

개량형 노심보호연산기계통 개발
Development of Advanced Reactor Core Protection
Calculator System

개량형 노심보호연산기계통 열수력모델 검증
Thermal-Hydraulic Model Verification for Advanced
Reactor Core Protection Calculator System

KAERI
2010. 8

연구수행기관
한국원자력연구원

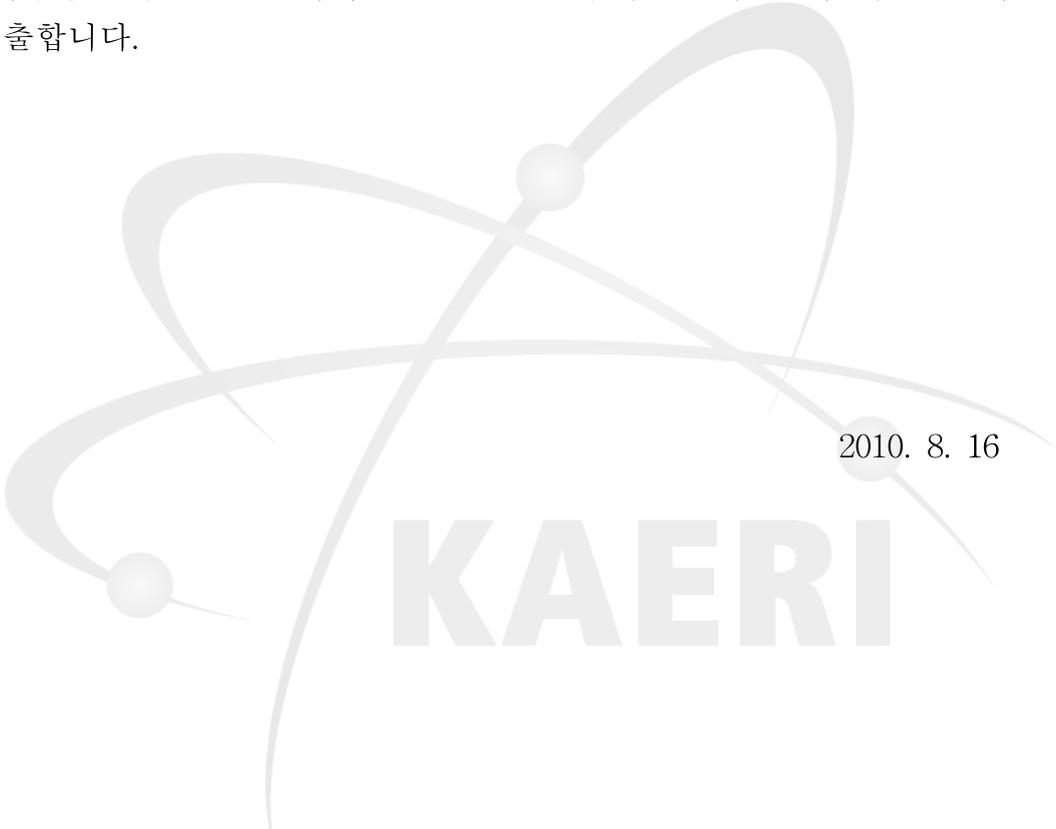
두산중공업(주)

제 출 문

두산중공업(주)사장 귀하

본 보고서를 2007-2010년도 “개량형 노심보호연산기계통 개발” 과제의 위탁과제인 “개량형 노심보호연산기계통(RCOPS) 열수력모델 검증”의 최종(2단계) 보고서로 제출합니다.

2010. 8. 16



KAERI

과 제 명 : RCOPS 열수력모델 검증
과제책임자 : 인 왕 기
참 여 자 : 전 태 현
오 동 석
신 창 환
황 대 현
서 경 원
양 용 식

요 약 문

I. 제 목

개량형 노심보호연산기계통(RCOPS) 열수력모델 검증

II. 연구의 목적 및 중요성

본 연구과제는 개량형 노심보호연산기계통(RCOPS)의 열수력모델(DNBR 모듈)을 검증하기 위해 수행되었다. RCOPS DNBR 모듈은 최적 DNBR 신속계산 모델(CETOP-D)을 기반으로 개발되었으므로 DNBR 모듈의 기능설계(Functional Design) 및 Database에 대한 검증이 필요하다. RCOPS의 국산화 성공 및 국내 신규원전 공급을 위한 필수 선행요건인 RCOPS 기능설계 개선에 관한 특정기술주제보고서(Topical Report)에 대한 한국원자력안전기술원(KINS) 승인을 획득하기 위해서는 RCOPS DNBR 모듈의 검증이 필수적이다.

III. 연구의 내용 및 범위

RCOPS 열수력모델의 DNBR 계산 방법론은 최적 DNBR 신속계산 코드인 CETOP-D와 동일하므로 RCOPS DNBR 모듈의 검증을 위해 CETOP-D 코드와 RCOPS DNBR 계산 모듈(STATIC)의 알고리즘을 비교하였다. 아울러 다양한 노심운전조건을 모의한 검증시험 자료를 이용하여 CETOP-D와 RCOPS STATIC 모듈의 DNBR 계산결과를 비교함으로써 RCOPS STATIC 모듈의 기능설계 및 Database를 검증하였다. RCOPS 기능설계(알고리즘) 개선의 인허가를 획득하기 위해 노심보호연산기계통 기능설계 개선에 관한 TR를 한국원자력안전기술원(KINS)에 제출하고 심사의견을 반영하여 TR를 개정하였다. RCOPS 실시간 소프트웨어의 검증을 위한 모듈시험(Module Test)과 단위시험(Unit Test)를 수행하였다. RCOPS DNBR 계산 노드 수 변경(20개에서 40개)에 따른 DNBR 모듈의 모듈시험을 추가로 수행하였다. 울진 4호기 10주기 노심설계 자료를 이용하여 RCOPS DNBR 모듈의 불확실도를 평가하고 DNBR Margin을 예측하였다.

IV. 연구결과 및 활용계획

본 연구과제의 주요 연구결과는 RCOPS DNBR 모듈의 기능설계 검증, RCOPS용 노심보호연산기계통(CPCS)의 기능설계 개선에 관한 TR, 모듈시험/단위시험 및 RCOPS 노심열적여유도 평가이다. 다양한 원자로 노심 운전조건에서의 RCOPS DNBR과 CETOP-D DNBR을 비교함으로써 RCOPS DNBR 모듈의 기능설계를 검증하였다. RCOPS를 위한 CPCS 기능설계 개선에 관한 TR은 KINS의 승인을 획득하였다. RCOPS DNBR 모듈에 대한 간이 모듈시험도 통과 판정조건을 만족하였다. 예비 단위시험도 수행하여 RCOPS On-line 소프트웨어 및 Off-line 모의 프로그램의 오류를 일부 수정하였다. RCOPS의 DNBR 평균오차와 표준편차는 각각 CPCS에 비해 0.4%-1%와 0.2% 작고 DNBR 전체 불확실도 인자(BERR1)는 약 0.8% 감소하는 것으로 예측되었다. 울진 4호기 10주기 노심의 대표적인 운전조건에서 RCOPS 최소 DNBR이 CPCS에 비해 0.3%-1.0% 높은 것으로 평가되었다.

RCOPS는 기능설계 개선 및 계통설계에 관한 특정기술주제보고서의 KINS의 승인을 계기로 신울진 1,2호기 적용이 확정되었다. RCOPS의 국산화가 성공적으로 이루어짐에 따라 국내외 원전의 CPCS 교체사업에도 참여할 수 있을 것으로 보인다. DNBR 모듈을 포함하여 RCOPS의 개선 알고리즘은 하드웨어 플랫폼의 의존도가 없으므로 국내 및 미국 원전에서 운용중인 CPCS와 Common Q CPCS의 알고리즘 개선에도 활용이 가능하다.

KAERI

SUMMARY

I . Project Title

Thermal-Hydraulic Model Verification for Advanced Reactor Core Protection Calculator System

II. Objective and Importance of the Project

The objective of this project is to verify the thermal-hydraulic model for advanced reactor core protection system, RCOPS. Since the DNBR module in RCOPS was developed based on the best-estimate faster-running DNBR program(CETOP-D), it is necessary to verify the functional design and database of the DNBR module. The thermal-hydraulic model verification is important in order to get approval of KINS on Topical Report(TR) about the functional design improvements in RCOPS. The TR approval is a prerequisite for the successful localization of the RCOPS and its application to domestic nuclear power plants.

III. Scope and Contents of Project

This project compared the RCOPS DNBR module(STATIC) against the CETOP-D code because the RCOPS DNBR algorithm is the same as the CETOP-D. The RCOPS STATIC module and its database was verified by comparing the STATIC DNBR with the CETOP-D DNBR which was calculated at various core operating conditions. In order to get an approval of KINS on TR, the TR on the improved functional designs in the core protection calculator system was submitted and revised by incorporating the reviewers comments. Module test and Unit test were performed to verify and validate the RCOPS on-line software. Additional Module test was performed to test the DNBR module due to the functional design change of the number of axial node for the DNBR calculation, i.e., 20 node to 40 node. The RCOPS DNBR margin was predicted by estimating the overall DNBR uncertainty for UCN 4 cycle 10.

IV. Result and Proposal for Applications

The results of this research project are the functional design verification of the RCOPS DNBR module, Topical Report on the CPCS functional design improvements for the RCOPS, Module Test and Unit Test, and thermal margin assessment of the RCOPS. The functional design of the RCOPS DNBR module was verified by comparing the RCOPS DNBR with the CETOP-D DNBR at various core operating conditions. The RCOPS TR on the CPCS algorithm improvements was approved by KINS. The simplified module test of the RCOPS DNBR module was passed by satisfying the acceptance criteria. The errors in both the on-line software and off-line Fortran simulator were corrected through the preliminary Unit Test. The mean error and standard deviation of the RCOPS DNBR were predicted to be lower than the CPCS ones by 0.4%-1% and 0.2%, respectively. The overall DNBR uncertainty factor(BERR1) was also predicted to be 0.8% lower than the CPCS one. The minimum DNBR(MDNBR) of the RCOPS appeared to be 0.3%-1.0% higher than the CPCS MDNBR at a typical core operating condition.

The RCOPS was decided to be implemented in new UCN unit 1&2 with the KINS approval of the TRs on the algorithm improvement and system design. It is anticipated to participate in a domestic and international project replacing CPCS with the localized RCOPS. Since the algorithm improvements for the RCOPS such as the DNBR module are not dependent on the hardware platform, they are applicable to improve the algorithm of the legacy and Common Q CPCS operating in nuclear power plants of Korea and USA.

목 차

요약문	i
SUMMARY	iii
목차	v
표 목차	vi
그림 목차	vi
약어(Abbreviations)	viii
1. 과제개요	1
2. 연구개발의 필요성	1
3. 국내외 기술개발 현황	2
4. 연구개발 목표 및 달성도	4
5. 연구개발결과 활용방안	14
6. 연구성과	14
부록 A: 1차년도(2007.8.1-2008.7.31) 연구개발 내용 및 결과	16
부록 B: 2차년도(2008.8.1-2009.7.31) 연구개발 내용 및 결과	29
부록 A: 3차년도(2009.8.1-2010.7.31) 연구개발 내용 및 결과	38

표 목차

표 1 개정 STATIC 모듈시험 결과 예시(세부모듈 6)	7
표 2 COPP(RCOPS) IST 예비시험 결과(2010.7.15)	10
표 3 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1) : DNBR Initial Values	10
표 4 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1) : LPD Initial Values	10
표 5 RCOPS와 CPCS MDNBR(울진 4호기 10주기)	12
표 B1 노심보호연산기 DNBR 모듈(STATIC)의 DNBR 예측오차	34
표 B2 개정 STATIC 모듈시험 결과 예시(세부모듈 6)	34
표 C1 COPP(RCOPS) IST 예비시험 결과(2010.7.15)	45
표 C2 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1): DNBR 초기값 및 원자로정지 시간	45
표 C3 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1): LPD 초기값 및 원자로정지 시간	45
표 C4 RCOPS LISP 시험자료	46
표 C5 MSCU 방법론에 포함된 불확실도 변수	86
표 C6 원자로(OPR1000) 노심 운전조건	91
표 C7 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 통계	91
표 C8 RCOPS와 CPCS DNB-OPM 오차 통계	103
표 C9 RCOPS와 CPCS DNB-OPM 불확실도 인자(BERR1)	103
표 C10 RCOPS와 CPCS MDNBR(울진 4호기 10주기)	117

그림 목차

그림 1 RCOPS DNBR 모듈 기능설계 및 Database 간이 검증시험 결과	5
그림 2 RCOPS DNBR 모듈(개정) 기능설계 검증	7
그림 3 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LBOC)	12
그림 4 RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LBOC)	13
그림 A1 RCOPS DNBR 모듈 기능설계 및 Database 간이 검증시험 결과	26
그림 A2 축방향 노드 개수에 따른 최소 DNBR 민감도 분석 결과	26
그림 A3 RCOPS DNBR 모듈(STATIC)의 기능설계 흐름도	27
그림 A4 RCOPS DNBR 모듈의 블록 5 흐름도	27
그림 A5 STATIC 모듈과 개정 STATIC 모듈 최소 DNBR 비교	28
그림 B1 개정 STATIC 모듈의 DNBR 예측오차 분포	35
그림 B2 노심 축방향 출력분포	35

그림 B3	축방향 노드 수(NDX)에 따른 노심 최소 DNBR(MDNBR) 비교	36
그림 B4	RCOPS DNBR 모듈 기능설계 검증	36
그림 B5	RCOPS와 CPCS MDNBR 오차(균일 축방향 출력분포)	37
그림 B6	정상운전시 CETOP-D MDNBR의 보수성(OPR1000)	37
그림 C1	RCOPS STATIC 모듈시험 입력자료 1(DNBR 계산노드 수=40)	39
그림 C2	RCOPS STATIC 모듈시험 입력자료 2(DNBR 계산노드 수=40)	40
그림 C3	RCOPS COPP 입력범위 시험 개략도	47
그림 C4	COPP IST 예비시험 결과(TAPE11)	48
그림 C5	COPP IST 시험결과(TAPE11) 변수 및 양식	49
그림 C6	RCOPS LISP 입력자료 및 예비시험 결과(Case 17)	50
그림 C7	DNBR 전체 불확실도 해석을 위한 MSCU 방법론	87
그림 C8	CPCS(RCOPS)의 DNBR 불확실도 해석 절차	88
그림 C9	OPR1000(울진 4호기 10주기) 주요 연소도에서의 노심 축방향 출력분포	92
그림 C10	RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LBOC)	92
그림 C11	RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LMOC)	93
그림 C12	RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LEOC)	93
그림 C13	RCOPS와 CPCS의 MDNBR 비교(울진 4호기 10주기 LBOC)	94
그림 C14	RCOPS와 CPCS의 MDNBR 비교(울진 4호기 10주기 LMOC)	94
그림 C15	RCOPS와 CPCS의 MDNBR 비교(울진 4호기 10주기 LEOC)	95
그림 C16	RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 확률분포(울진 4호기 10주기 LBOC)	96
그림 C17	RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 확률분포(울진 4호기 10주기 LMOC)	97
그림 C18	RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 확률분포(울진 4호기 10주기 LEOC)	98
그림 C19	CETOP-D와 RCOPS의 축방향 출력분포 상대오차	99
그림 C20	DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(SBOC)	104
그림 C21	DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(LBOC)	105
그림 C22	DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(LMOC)	106
그림 C23	DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(LEOC)	107
그림 C24	CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(SBOC)	108
그림 C25	CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LBOC)	109
그림 C26	CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LMOC)	110
그림 C27	CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LEOC)	111
그림 C28	RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(SBOC)	112
그림 C29	RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LBOC)	113
그림 C30	RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LMOC)	114
그림 C31	RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LEOC)	115

약어(Abbreviations)

ASI	: Axial Shape Index
CEAP	: Control Element Assembly Processor
COPP	: Core Protection Processor
CPCS	: Core Protection Calculator System
DB	: Database
DNB	: Departure from Nucleate Boiling
DNB-OPM	: DNB Overpower Margin
DNBR	: Departure from Nucleate Boiling Ratio
DSVT	: Dynamic Software Verification Test
FDR	: Functional Design Requirements
IST	: Input Sweep Test
LBOC	: Long Beginning of Cycle
LEOC	: Long End of Cycle
LISP	: Live Input Single Parameter
LMOC	: Long Middle of Cycle
LPD	: Local Power Density
MDNBR	: Minimum DNBR
MSCU	: Modified SCU
RCOPS	: Reactor Core Protection System
SBOC	: Short Beginning of Cycle
SCTF	: Single Channel Test Facility
SCU	: Statistical Combination of Uncertainties

평가용 최종보고서(위탁과제용)

1. 과제개요

사 업 명	전력산업연구개발사업	기 술 분 야	원자력발전기술	
단위과제명	개량형 노심보호연산기계통 개발			
위탁과제명	개량형 노심보호연산기계통(RCOPS) 열수력모델 검증			
위탁 연구기관	한국원자력연구원	위탁연구책임자	인왕기	
총 연구기간 (단계, 년차)	2007. 8. 1 - 2010. 7. 31		연 참여인력	
	2단계 1-3년차			
1단계 연도별 신청연구비 (백만원)	2007	2008	2009	계
	108	115	115	338
특기사항	없음			

2. 연구개발의 필요성

국내 표준원전(영광 3-6호기, 울진 3-6호기) 및 미국 원전 7개 호기에 운용중인 노심보호연산기계통(CPCS)은 컴퓨터를 이용한 디지털 실시간 노심보호계통으로 원자로 관련 사고(제어봉 인출/낙하, 냉각수 펌프 고장 등) 발생시 원자로를 정지키는 원자로보호계통이다. CPCS는 원자로 노심 운전조건을 계측하여 원자로 운전제한인자(핵비등이탈률(DNBR), 선출력밀도(LPD))를 실시간으로 예측하므로 이전의 아나로그 방식의 원자로보호계통에 비해 원자로의 안전성뿐만 아니라 원자로 운전여유도를 증가시켜 원전의 이용률 향상에 핵심적인 역할을 한다. 그러나 CPCS는 계측기 신호를 이용하여 다소 복잡한 연산기능을 수행하는 안전등급 계통이므로 계통구조와 연산 알고리즘이 복잡하고 높은 신뢰성이 요구된다.

하드웨어적으로는 제어봉위치 검출기의 다중화 및 제어봉연산기와 노심보호연산기의 성능개량과 계통구조의 최적화가 필요하다. 근래에 웨스팅하우스는 CPCS의 하드웨어 플랫폼(Platform) 및 계통구성을 개량한 Common Q CPCS를 국내 신고리 1-2/신월성 1-2 호기 및 신고리 3-4호기에 신규로 공급할 예정이다. 국내에서는 CPCS의 독자 설계기술은 확보하였으나 CPCS와 같은 원전 안전계통의 국산화 개발 및 원전적용 경험은 거의 없는 상태이다. 이는 원전 안전계통 부품의 성능검증과 품질인증 절차가 복잡하고 많은 개발비용이 소요되기 때문인 것으로 사료된다. 근래에 원자력연구개발사업의 일환으로 KNICS 사업단

에서는 원전 안전계통의 국산화 연구개발을 수행하고 있으나 현재 성능과 품질인증이 완료되지 않은 상태이다.

한편, CPCS 알고리즘은 1970년대의 하드웨어 성능을 바탕으로 개발된 것이므로 비교적 단순하고 보수적인 실시간 계산방법을 채택하고 있다. 따라서 향후 노심보호연산기계통(특히 CPU 모듈)의 성능개량을 바탕으로 알고리즘의 개선이 필요하다. 더욱이 지난 20년간의 국내외 CPCS 운전경험에서 도출된 알고리즘의 개선이 필수적이다. 특히 CPC 핵심 알고리즘인 DNBR 계산모듈의 개선은 원자로 노심 열적여유도(Thermal Margin)를 증가시킬 뿐만 아니라 아나로그 원전의 노심보호계통과 차별화된 고급기술로 국내기술의 국제경쟁력 향상에 도움이 될 것으로 판단된다. 제어붕위치신호의 불량(부품고장 또는 잡음신호)으로 인한 원자로의 불시정지 사례를 개선하기 위한 신호검증 알고리즘의 개선도 중요한 기술과제이다. 또한 원자로출력급감발계통(RPCS)의 작동후 CPC 출력의 급격한 증가로 인한 원자로 정지 및 CPC 보조정지 인자의 허용운전범위 이탈로 인한 원자로 정지 등을 방지하기 위한 알고리즘의 개선도 중요한 CPC 개선항목에 속한다.

최근 원자력연구개발사업의 일환으로 개량형 노심보호연산기계통(RCOPS)의 국산화 개발 연구가 시작되었다. RCOPS는 CPCS와 Common Q CPCS 대비 동등이상의 성능을 가진 하드웨어와 알고리즘 개발을 목표로 추진되었다. RCOPS는 CPCS와 Common Q CPCS 대비 계통구조를 개량하여 최적화하였으며 상기와 같은 알고리즘도 개선하였다. 현재 RCOPS 개발은 1단계 연구개발이 완료되었으며 향후 국내원전 적용을 위한 검증시험과 인허가 업무가 필요한 상태이다.

3. 국내외 기술개발 현황

최근 미국의 웨스팅하우스는 CPCS를 개량한 Common Q CPCS를 개발하여 미국의 Palo Verde 발전소와 국내의 신고리/신월성 1,2호기에 적용하기 위해 인허가 심사를 받고 있다. Common Q CPCS의 주요내용은 제어봉연산기(CEAC)를 8개 채널로 늘리고 하드웨어를 Concurrent 3205 모델에서 Advant AC 160으로 변경한 것이다. 8개 채널의 CEAC을 사용함으로써 CEAC 단일고장에 의한 원자로정지 가능성을 줄였지만 제어붕위치신호 채널격리장치의 개수가 4배로 증가하는 문제점을 줄이기 위해 별도로 8개의 제어붕위치신호 프로세서(CEA Position Processor, CPP)를 추가하였다. 그러나 개발기간과 인허가 부담을 줄이기 위해 노심보호연산기의 기능향상을 위한 CPCS 알고리즘의 개선은 이루어지지 않았다.

원전계측제어시스템개발사업의 일환으로 수행된 노심보호연산기 개발 타당성검토 및 전략수립 과제(2002. 7 - 2003. 6)에서는 국내외 가동원전에 운용중인 CPCS의 교체와 신규 원전의 적용을 위한 새로운 디지털 노심보호계통의 국산화 타당성과 가능성을 검토하고 개발방안과 실용화 전략을 수립하였다. 노심보호계통의 단일고장으로 인한 불시 원자로정지의 방지와 원자력발전소의 이용률 향상을 위해 실시간 디지털 노심보호계통의 하드웨어와 알고리즘의 개선이 필수적이다. 국내원전 8개 호기에 운용중인 CPCS의 주요부품은 단종되고 부품의 노후화와 예비부품의 부족으로 향후 하드웨어의 전면적인 교체가 필요한 실정이다. 그러나 현재 국내는 물론 세계적으로도 CPCS를 대체 공급할 수 있는 능력을 갖고 있지 못한 실정이다.

세계적으로 디지털설비의 성능이 크게 증대되어 원전 설비에 최신기술 적용 및 개량화 요구가 증대하고 있다. 즉, 원전 운영자는 기존설비의 노후화로 유지보수성 저하 및 원천기술 부재에 따른 설비 운영경험 반영 제한성 등으로 인하여 국산화 기술자립의 필요성을 절실하게 인식하고 있는 상황이다. 최근 미국의 웨스팅하우스는 기존의 CPCS 하드웨어를 개량한 Common Q CPCS를 개발하여 미국의 Palo Verde 2호기와 국내 신고리/신월성 1, 2호기에 공급하고 있다. 현재 국내는 물론 세계적으로도 CPCS를 대체 공급할 수 있는 능력을 갖고 있지 못한 실정이기 때문에 외국회사에 의한 CPCS 독점공급은 해외 기술 의존도를 심화시킬 뿐만 아니라 구매 및 유지보수 비용이 크게 증가하는 문제점을 안고 있다. 국내 표준원전 8개호기에 공급된 CPCS는 Concurrent사 CPU를 사용하고 있으나 현재 생산이 중단되어 향후 설비 유지보수에 어려움이 예상된다. 특히 영광 3, 4호기의 경우 10여년 이상 운전에서 따른 설비의 노후화로 인해 가까운 장래에 CPCS의 전면 교체가 예상되며 국내 다른 표준원전의 경우에도 순차적으로 전면교체가 이어질 것으로 전망된다. 즉 수백억대의 예산이 투입되는 전면적인 개조공사가 예상되나 현재로는 웨스팅하우스와 같은 외국업체에 의존할 수밖에 없다.

외국회사에 의한 CPCS 독점공급은 핵심원천기술의 외국 의존도를 심화시킬 뿐만 아니라 설비 개선의 곤란, 설비의 구매 및 유지보수 비용의 증가 등 다양한 문제점을 안고 있다. 따라서 실시간 디지털 노심보호계통의 국내개발은 해외기술의 수입대체 또는 견제를 통해 기기공급 비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 부품의 안정적 공급과 원활한 유지보수를 기대할 수 있다. 또한 원자로안전계통의 핵심계통인 CPCS 하드웨어 및 알고리즘을 국내개발은 원자로안전계통의 독자개발 기술력과 원전 산업의 국제경쟁력을 높이는 것은 물론 원전 기술혁신의 중대한 성과가 될 것이다. 그러나 원자력 연구개발사업에의 투자를 위한 불확실성이 상존하고 있으며 타 산업 분야 대비 수요가 크지 않은 점 등을 고려할 때 정부의 지원없이 관련 기업의 자발적 투자를 유발시킬 동기가 미약한 것이 현실이다. 이에 국내 소비전력의 40% 이상을 담당하고 있는 원자력 사업에 꼭 필요한 핵심원천기술의 적기 확보에 정부가 적극적으로 지원함으로써 원자력발전의 경쟁력 제고에 크게 기여할 수 있을

것이다.

4. 연구개발 목표 및 달성도

가. 최종 목표

- RCOPS 열수력모델 검증
- RCOPS 열수력모델 인허가

나. 당해 단계목표 및 달성도

세부연구목표	주요 연구개발 실적 ¹⁾	가중치 (%) ²⁾	연구목표 달성도 ³⁾ (%)	비고 ⁴⁾
특정기술주제보고서 (TR) 작성	RCOPS 기능설계개선 TR(Rev.00 & Rev.01)	20		TR 제출
열수력모델의 모듈 검증	RCOPS DNBR 모듈의 기능설계 요건서(FDR, ICPC-TR-08001) 및 DB(ICPC-TR-08002)	10	100	RCOPS FDR 및 DB
TR 인허가	기능설계개선 TR(Rev.02) 승인	15	100	TR 개정본
열수력모델의 정적기능 검증	DNBR 모듈시험 완료(20개) FDR(Rev.01) 및 DB(Rev.02) 개정	10 5		모듈시험자료 FDR 및 DB 개정본
RCOPS 단위시험	RCOPS 모듈시험(2개) 및 단위시험	30	100	시험자료
노심 열적여유도 평가	DNBR 모듈 불확실도 및 RCOPS 전체 불확실도 해석	10		RCOPS DNBR 여유도
총계 ⁵⁾		100	100	

- 주1) 연구개발실적은 연구목표 대비 구체적이고, 정량적으로 작성
 2) 전체연구목표 대비 세부연구목표의 중요도를 표기
 3) 목표달성도는 실적/목표의 백분율로 표기
 4) 목표달성도에 대한 근거 및 사유를 간략히 작성
 5) 총괄적으로 종합하여 단계목표달성도를 기재

다. 세부연구목표별 주요연구내용 및 결과

1) 1차년도(2007.8.1 - 2008.7.31) 연구개발 내용 및 결과(부록 A)

RCOPS 기능설계 개선의 인허가 획득을 위해 "노심보호연산기계통 기능설계 개선"에 관한 특정기술주제보고서(TR)를 제출하고 TR 설명회를 개최하였다. KINS 심사의견을 반영

하여 TR 개정본(Rev.01, 2008. 2)을 KINS에 제출하여 2008년 6월 15일 인허가 1차 심사질의에 대한 답변을 완료하였다.

RCOPS 열수력모델의 기능설계와 Database 검증시험(그림 1)을 완료하고 RCOPS 개정 DNBR 모듈의 모듈시험을 위한 입출력 시험자료도 생산하였다. RCOPS 실시간 소프트웨어의 V/V(Verification/Validation)를 위해 20개의 모듈시험 자료를 생산하여 RCOPS 소프트웨어 V/V 팀(KOPEC)에 제공하였다.

1차년도 주요 연구결과는 다음과 같다.

- RCOPS 기능설계개선 특정기술주제보고서(Rev.00, 2007.11 & Rev.01, 2008.2)
- RCOPS 소프트웨어 DNBR 모듈시험 입출력 자료(20개)
- DNBR 계산 노드 수의 영향 평가 논문(1편)

Wang-Kee In, Tae-Hyun Chun, Seung-Yeob Baeg, "Effects of Axial Nodal Sections in a Faster-Running DNBR Program," Trans. KNS Spring Meeting, Gyeongju, Korea, May 29-30, 2008.

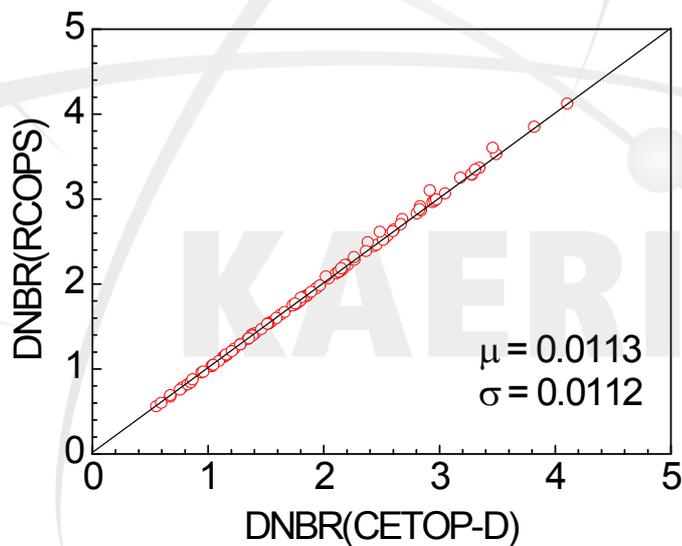


그림 1 RCOPS DNBR 모듈 기능설계 및 Database 간이 검증시험 결과

2) 2차년도(2008.8.1 - 2009.7.31) 연구개발 내용 및 결과(부록 B)

RCOPS 기능설계 관련 TR에 대한 KINS의 심사의견을 반영하여 TR 개정본(Rev.02, 2008. 11)을 제출하여 KINS 승인을 획득하였다(원자력안전과-2812, 2008. 11. 4). DNBR 모듈(STATIC) 관련 TR 개정내용은 DNBR 계산에 필요한 축방향 노드 수의 민감도 분석결과이다.

RCOPS 실시간 소프트웨어의 검증을 위해서는 모듈시험과 단위시험이 필요하다. 모듈시험과 단위시험을 수행하기 위해 필요한 개정 STATIC 모듈의 모의 FORTRAN 코드를 개발하였다. 개정된 STATIC 모듈시험을 위해 20개의 시험자료를 수정 생산하였다. 20개의 모듈시험 자료를 이용하여 개정 STATIC 모듈시험을 KOPEC과 공동으로 수행하였다. 모듈시험 결과 STATIC 모듈 기능설계와 실시간 소프트웨어의 차이가 일부 발견되어 수정되었으며 STATIC 모듈시험은 최종적으로 통과된 것으로 판정되었다 (표 1).

RCOPS의 초기 플랫폼으로 선정된 PLC HFC-6000의 제한요건(모듈별 입력/출력 변수 개수, 배열변수의 크기, 메모리 등)으로 인해 DNBR 모듈의 단순화가 요구되어 DNBR 계산노드 수를 20으로 고정하여 기능설계를 수행하였다. 그러나 RCOPS의 플랫폼이 POSAFE-Q로 변경되어 상기 PLC 제한요건이 완화되었다. 또한 DNBR 계산노드 수에 따른 RCOPS DNBR 정확도의 변화를 분석한 결과 노드 수가 40개인 경우 대비 20개인 경우 DNBR 여유도가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 RCOPS DNBR 계산 노드 수를 증가시키기 위해 RCOPS 기능설계를 수정하였으며 RCOPS 소프트웨어의 모듈시험 자료를 추가 생산하였다. 개정된 STATIC 모듈의 기능설계와 Database를 검증하기 위해 다양한 RCOPS 운전조건을 모의한 시험자료를 이용하였다. 그림 2는 RCOPS DNBR 계산 축방향 노드 수(NDX)가 20개와 40개인 경우 MDNBR 비교 결과를 나타낸다. RCOPS의 DNBR 노드 수가 20인 경우 MDNBR의 평균오차와 표준편차가 모두 1.1%인 반면에 노드 수가 40인 경우 0.4%로 MDNBR 오차가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

2차년도 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 노심보호연산기계통 기능설계 개선 TR(Rev.02)의 KINS 승인 획득(2008. 11)
- RCOPS 기능설계요건서 및 Database 문서(개정본)
KAERI/KNF, Functional Design Requirements for an Improved Core Protection Calculator System, ICPC-TR-08001, Rev.01, June, 2009.
KAERI/KNF, Improved Core Protection Calculator System Database Document, ICPC-TR-08002, Rev.02, June, 2009.
- DNBR 계산노드 수 민감도 분석 및 DNBR 여유도 평가 (논문 3편 및 기술보고서 1편)
 - [1] Wang-Kee In, Chang-Hwan Shin, Tae-Hyun Chun, Jong-Sik Bae, "Optimal Number of Axial Nodes in a Faster-Running DNBR Program for an On-Line Application," NTHAS6, Okinawa, Japan, November 24-27, 2008.
 - [2] Wang-Kee In, Tae-Hyun Chun, Jong-Sik Bae, "Thermal Margin Budget of a Simplified Core Thermal-Hydraulic Code for OPR1000," KNS Spring Meeting, Jeju, Korea, May 18-22, 2009.
 - [3] Wang-Kee In, Tae-Hyun Chun, Seung-Yeob Baeg, "Examination of a Simplified Thermal-Hydraulic Program for a PWR Core Protection System," ICONE17, Brussels, Belgium, July 12-16, 2009.
 - [4] 인왕기 외 5인, "개량형 원자로 노심보호계통 핵비등이탈률 모듈의 축방향 노드 수 영향분석 및 기능설계 검증," KAERI/TR-3799/2009, July 2009.

표 1 개정 STATIC 모듈시험 결과 예시(세부모듈 6)

시험번호	변수명	예상값	실제값	오차(%)	판정결과
1	FDNB	2.24370	2.24754	0.01	통과
	FDNBF	2.37020	2.37043	0.00	
	FDNBX	-0.06350	-0.06391	0.00	
2	FDNB	1.40631	1.40632	0.00	통과
	FDNBF	2.17061	2.17061	0.00	
	FDNBX	-0.07605	-0.07605	0.00	
3	FDNB	2.73141	2.73140	0.00	통과
	FDNBF	2.21833	2.21832	0.00	
	FDNBX	-0.21036	-0.21036	0.00	
4	FDNB	1.20920	1.20914	0.00	통과
	FDNBF	1.65897	1.65894	0.00	
	FDNBX	0.13805	0.13805	0.00	
5	FDNB	2.49227	2.49227	0.00	통과
	FDNBF	2.61163	2.61161	0.00	
	FDNBX	-0.11117	-0.11118	0.00	

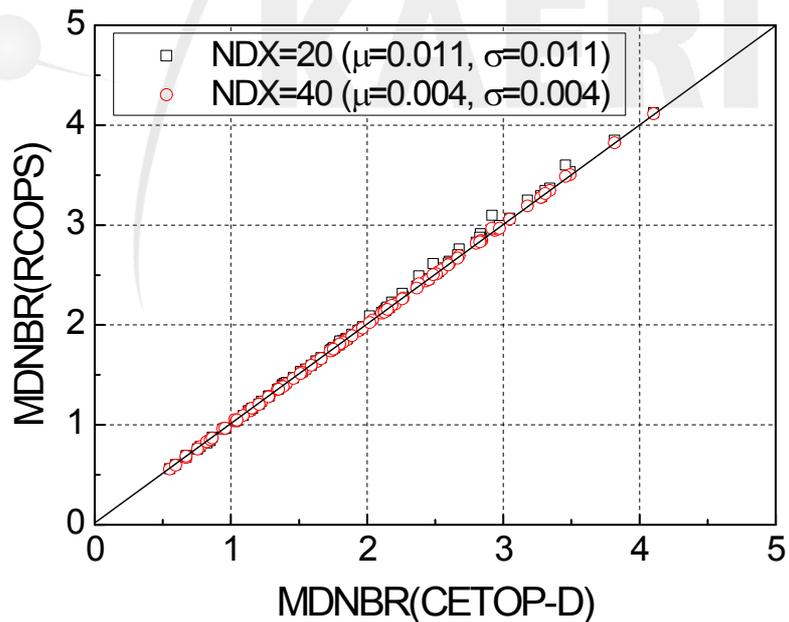


그림 2 RCOPS DNBR 모듈(개정) 기능설계 검증

3) 3차년도(2009.8.1 - 2010.7.31) 연구개발 내용 및 결과(부록 C)

RCOPS 모듈시험(추가) 및 단위시험

RCOPS DNBR 계산 노드 수 변경(20개에서 40개)에 따른 DNBR 모듈(STATIC)의 모듈시험을 추가로 수행하기 위해 2개의 시험자료를 생산하였다. 추가 시험자료를 이용하여 KOPEC에서 모듈시험을 수행한 결과 통과 판정조건(0.1% 이하)을 만족한 것으로 나타났다.

단위시험은 통합된 시스템 환경에서 수행되며 이 시험의 목적은 RCOPS 계통이 주어진 기능 및 성능요건을 만족하도록 수행되는지를 확인하는 것이다. 단위시험의 시험자료는 설비의 기능요건 및 소프트웨어 요건에 따라 정적인 또는 동적인 경우에 대하여 모두 생산하여 수행한다. 이러한 시험자료는 설비의 정상범위 및 비정상범위를 포함하며 비정상범위에 대한 시험에서는 수행결과가 정해진 요건대로 적절히 반응하는지를 시험한다. 단위시험은 입력범위 시험(Input Sweep Test, IST), 동적 소프트웨어 검증시험(Dynamic Software Verification Test, DSVT) 및 실시간 입력 단일변수 시험(Live Input Single Parameter Test, LISP)으로 나누어 수행한다.

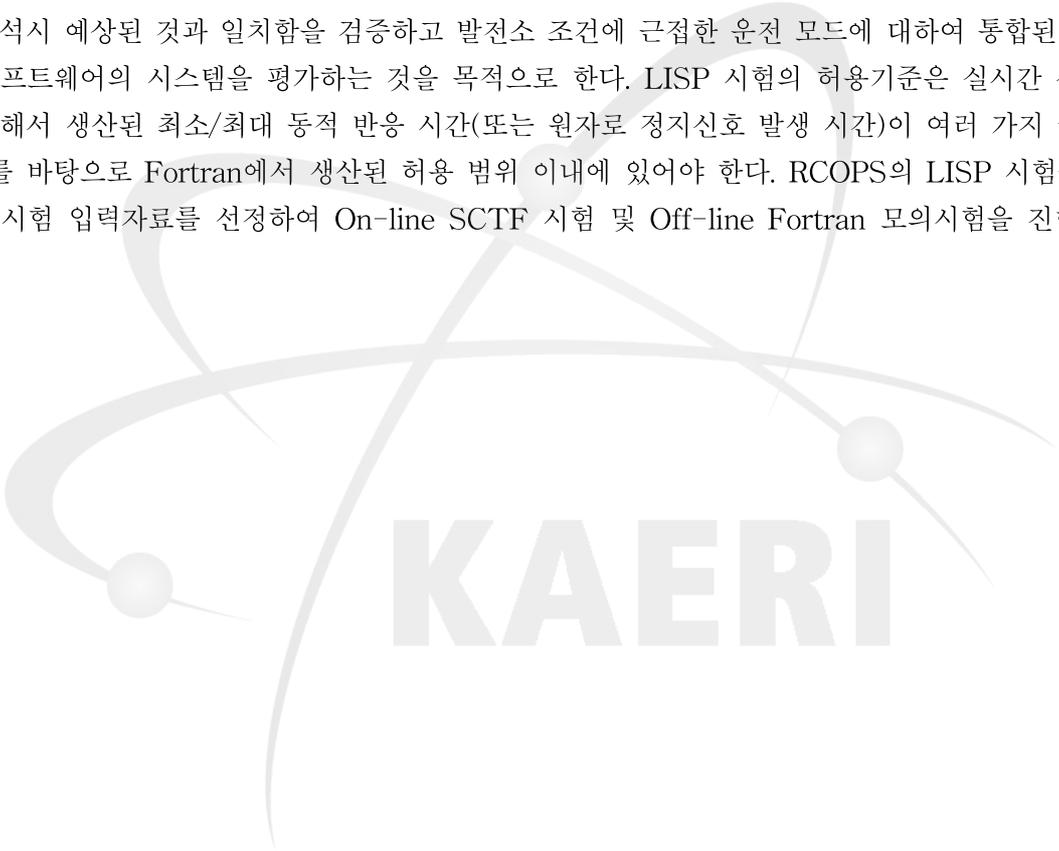
RCOPS 입력범위 시험(IST)은 주요 연산 프로세서 모듈인 CEAP와 COPP에 대해 수행하였다. CEAP와 COPP에 대한 IST는 RCOPS 운전영역을 포함하는 운전조건의 조합으로 각각 1200개와 2000개의 시험자료를 사용한다. 기존의 CPC IST용 전산코드인 CPCSWTs를 수정하여 COPP에 대한 IST 전산코드를 개발하였다. CPCSWTs 코드의 서브루틴 CPCD는 CPCS DNBR 모듈이므로 RCOPS DNBR 모듈로 대체하였고 서브루틴 SWEEPIN의 DB(BERR1)의 주소를 변경하였다. CPCSWTs 코드의 상세 수정내용은 부록 C에 기술하였다.

표 2는 COPP에 대한 IST 예비시험 결과(2010년 7월 15일 기준)를 요약한 것이다. 2000개의 시험결과중 MDNBR(변수 X) 값이 0.5 이상 10.0 이하인 경우와 선출력밀도(LPDDC)는 노심 평균 선출력밀도의 1000% 미만인 경우만 분석한 결과이다. MDNBR과 LPDDC의 오차는 On-line RCOPS 모의 시험장치(SCTF)의 시험결과와 Off-line RCOPS 모의 전산코드(RCOPS Fortran Simulator)의 예측결과의 차이를 의미한다. MDNBR 오차 분석을 위한 시험자료는 1198 개이며 1159개(약 97%)가 0.5(DNBR unit) 미만의 차이를 보이고 있다. 약 3%의 시험결과는 매우 큰 MDNBR 차이를 보이고 있고 CPC IST의 MDNBR 최대 허용오차가 0.0093인 것을 고려할 때 시험결과가 만족스럽지 못하므로 원인규명이 필요하다. 한편, LPDDC의 경우 분석대상 시험자료 1295 개중 1274개(약 98%)가 25% 이내의 차이를 보이고 있으며 오차가 100%를 초과하는 경우도 17개이다. CPC IST의 LPDDC 최대 허용오차가 2.2% 이므로 On-line 소프트웨어 및 Off-line Fortran Simulator에 대한 추가 검증이 필요하다.

표 3과 4는 6개의 RCOPS DSVT 예비시험(2010. 7. 1) 결과중 Off-line Fortran 프로그램

과 On-line SCTF 의 DNBR과 LPD 초기값을 비교한 것이다. DNBR 초기값의 최소와 최대 차이는 각각 -0.1623 과 0.3038 로 신고리 1,2호기의 결과(-0.0030 , $+0.00023$)에 비해 매우 크고 최대 허용오차 0.0093 보다도 크다. LPD 초기값의 최소와 최대 차이(상대오차)도 각각 -0.03358% 와 3.72864% 로 신고리 1,2호기의 결과(-0.0026% , $+0.0118\%$)에 비해 매우 큰 것을 알 수 있다. LPD 초기값의 최대 차이가 $8.8\% \text{avg}(\text{Case 5})$ 로 최대 허용오차 $2.2\% \text{avg}$ 보다 크다. 따라서 이미 언급한 바와 같이 On-line 소프트웨어 및 Off-line Fortran Simulator에 대한 추가검증이 필요한 것을 의미한다.

실시간 입력 단일변수 시험(Live Input Single Parameter Test, LISP)은 외부에서 생성되어 RCOPS의 COPP/CEAP 입력 하드웨어를 통해 읽어 들인 COPP/CEAP 입력에 대한 응용소프트웨어와 실행소프트웨어의 실시간 조사를 뜻한다. 통합된 RCOPS 소프트웨어와 하드웨어의 동적 반응이 설계 분석시 예상된 것과 일치함을 검증하고 발전소 조건에 근접한 운전 모드에 대하여 통합된 하드웨어와 소프트웨어의 시스템을 평가하는 것을 목적으로 한다. LISP 시험의 허용기준은 실시간 신호 변화에 의해서 생산된 최소/최대 동적 반응 시간(또는 원자로 정지신호 발생 시간)이 여러 가지 공정 불확실도를 바탕으로 Fortran에서 생산된 허용 범위 이내에 있어야 한다. RCOPS의 LISP 시험을 위해 5개의 시험 입력자료를 선정하여 On-line SCTF 시험 및 Off-line Fortran 모의시험을 진행하고 있다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font. Above the text is a stylized graphic consisting of several curved lines and two circular nodes, resembling an orbital path or a network structure.

KAERI

표 2 COPP(RCOPS) IST 예비시험 결과(2010.7.15)

MDNBR 오차 (DNBR unit)	자료 수 (1198 개)	LPDDC 차이 (% avg)	자료 수 (1295 개)
-6	1	-25	507
-5	2	25	767
-4	2	75	4
-3	7	125	4
-2	11	225	4
-1	10	325	4
-0.5	3	425	2
+0.0	1159	525	3
+0.5	3		

표 3 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1) : DNBR Initial Values

DSVT Case No.	Off-line (Fortran)	On-line (SCTF)	차이 (DNBR unit)	차이 (%)
1	1.6833	1.5210	-0.1623	-9.64178
5	1.6327	1.3921	-0.2406	-14.73633
11	3.7297	4.0335	0.3038	8.14543
15	6.1346	5.9810	-0.1536	-2.50383
24	1.7553	1.7012	-0.0541	-3.08209
27-2	1.6623	1.5133	-0.149	-8.96348

표 4 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1) : LPD Initial Values

DSVT Case No.	Off-line (Fortran)	On-line (SCTF)	차이 (% avg)	차이 (%)
1	235.5269	243.8638	8.3369	3.53968
5	235.7052	244.4938	8.7886	3.72864
11	133.4635	133.4333	-0.0302	-0.02263
15	87.8497	87.8202	-0.0295	-0.03358
24	242.1221	242.0768	-0.0453	-0.01871
27-2	219.2561	223.4020	4.1459	1.89089

RCOPS 열적여유도 평가

RCOPS의 DNBR 불확실도 및 열적여유도(DNBR 여유도)를 평가하기 위해 RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석용 RCOPSIM 코드를 개발하고 RCOPS DNBR 모듈의 Database도 생산하였다. 분석대상 노심은 개량형 핵연료(PLUS 7)가 균일하게 장전된 울진 4호기 10주기이다. RCOPS DNBR 불확실도는 DNBR 모듈의 불확실도 및 DNBR 전체 불확실도로 나누어 분석하였다. DNBR 모듈의 불확실도 해석은 기준 CETOP-D MDNBR 대비 RCOPS 및 CPCS MDNBR의 오차를 평가한 것이다. DNBR 전체 불확실도 해석은 MSCU(Modified Statistical Combination of Uncertainties) 방법론을 이용하여 RCOPS와 CPCS의 DNB-OPM 전체 불확실도 인자(BERR1)를 예측한 것이다. RCOPS 및 CPCS에 대한 BERR1 값을 이용하여 대표적인 노심 운전조건에서 예측된 MDNBR도 비교하였다.

RCOPS의 DNBR 모듈은 CPCS의 DNBR 모듈(CETOP2)을 CETOP-D 코드로 대체한 것이므로 RCOPS DNBR 모듈에 대한 불확실도는 RCOPS MDNBR과 CETOP-D MDNBR의 오차(그림 3)를 통계적으로 분석하여 평가하였다. RCOPS는 CPCS에 비해 MDNBR 평균오차는 0.4%-1% 감소하였고 표준편차는 약 0.2% 작은 것으로 예측되었다.

RCOPSIM 코드 및 울진 4호기 10주기 노심설계 자료를 이용하여 RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석을 수행하였다. CPCS와의 비교를 위해 CPCS DNBR 전체 불확실도 해석도 수행하였다. 그림 4는 RCOPS DNB-OPM(OverPower Margin) 오차의 확률분포 및 통계량을 예시한 것이다. RCOPS와 CPCS의 DNBR 전체 불확실도 인자(BERR1)는 각각 1.0597과 1.0683으로 RCOPS가 약 0.8% 감소하는 것으로 예측되었다.

울진 4호기 10주기 노심의 대표적인 운전조건에서 주요 연소도에 따른 RCOPS MDNBR을 CPCS MDNBR과 비교하였다. RCOPS MDNBR이 CPCS MDNBR에 비해 0.3%-1.0% 높은 것으로 평가되었다(표 5). RCOPS는 신울진 1,2호기에 적용될 예정이므로 RCOPS 열적여유도의 최종평가는 향후 신울진 최종 노심설계 자료를 이용하여 수행되어야 한다.

3차년도 주요 연구결과는 다음과 같다.

- RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석코드(RCOPSIM v1m0) 개발
- RCOPS DNBR 모듈 Database (PLUS 7 연료 장전 노심)
- RCOPS 단위시험 전산코드 개발
- RCOPS 열적여유도 평가 기술보고서 (1편)
인왕기 외 5인, “개량형 원자로 노심보호시스템의 열적여유도 평가,”
KAERI/TR-4104/2010, July 2010.
- RCOPS 알고리즘 개선 관련 논문 (KNF 공동)

Tae-Young Yoon, Dae-Jin Lee, Wang-Kee In, Jong-Sik Bae, "Advanced Core Protection Calculator Algorithm for Shin-Ulchin 1&2," ICAPP2010, San Diego, CA, USA, June 13-17, 2010.

표 5 RCOPS와 CPCS MDNBR(울진 4호기 10주기)

계통구분	SBOC	LBOC	LMOC	LEOC
CPCS	2.3651	2.3703	2.5367	2.5165
RCOPS	2.3748	2.3801	2.5452	2.5429
MDNBR 변화량	+0.4%	+0.4%	+0.3%	+1.0%

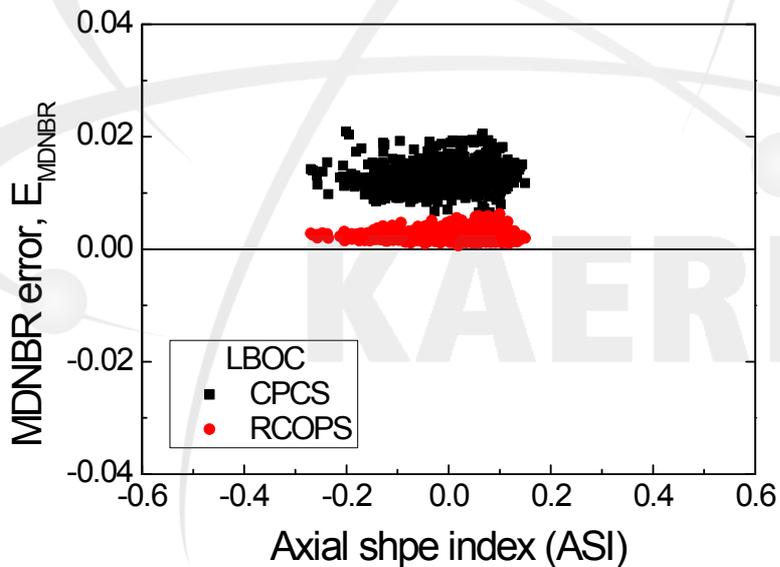
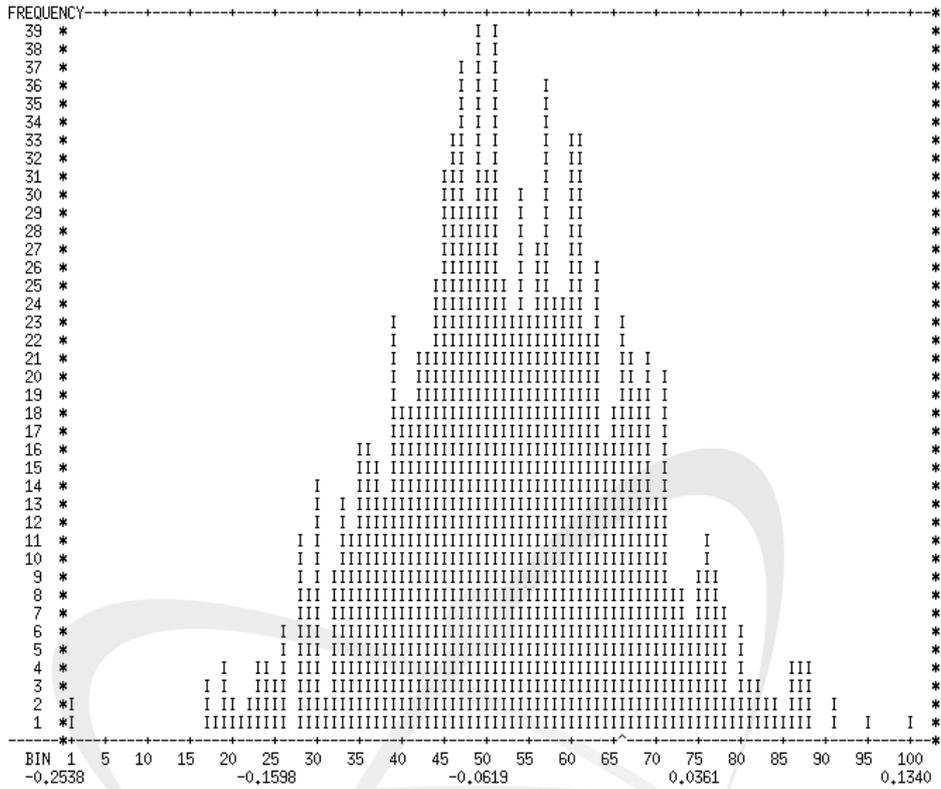


그림 3 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LBOC)



ERROR VALUES
 MINIMUM VALUE = -0.2538 MAXIMUM VALUE = 0.1359 MEAN VALUE = -0.0503

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I), I=1, 1095)

NUMBER OF DATA POINTS = 1095
 MEAN = -.5026436597E-01
 STANDARD DEVIATION = 0.5487009138E-01
 MEDIAN = -.5227267742E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0.1191649470E-02
 STANDARD KURTOSIS = 3.107585192
 D PRIME STATISTIC = 10201.51953

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDEV (WHERE K = 1.723) = -.1448055357
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(43) IS -.1462832689

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDEV (WHERE K = 1.723) = 0.4427680373E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(1053) IS 0.4558801651E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES DPRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD M15.15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .0050 IS 10126.75000
 THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .9950 IS 10295.88574
 THE DPRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 1095 = 10201.51953
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF .28462

BASED UPON INPUT DPRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: NORMAL

그림 4 RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LBOC)

5. 연구개발결과 활용방안

RCOPS 개발과제는 신울진 1,2호기 및 국내 후속 원전의 디지털 노심보호계통(CPCS)을 대체 공급하기 위해 수행되었다. 이를 위해 RCOPS 개발 관련 특정기술주제보고서(Topical Report)를 작성하여 인허가 기관에 제출하여 승인을 받았으며 상용화에 필요한 예비 모듈시험 및 단위시험을 수행하였다. 한편, RCOPS 노심의 열적여유도 평가를 위한 DNB 불확실도 해석용 전산코드를 개발하였다.

RCOPS는 상용원전의 디지털 노심보호계통인 CPCS의 설비 및 알고리즘을 개량한 것으로 기존의 CPCS 대비 동등이상의 성능을 보유하고 있다. CPCS 계통의 단점을 보완하고 원자로 불시정지 가능성을 낮추기 위한 계통구조 최적화와 알고리즘 개선도 이루어졌으므로 RCOPS가 CPCS에 비해 기술적 우위를 갖고 있다. 특히, RCOPS 설비의 공급비용이 CPCS에 비해 현저히 낮을 것으로 예상되므로 RCOPS의 상용화 경쟁력이 우수한 것으로 판단된다. RCOPS의 경우 안정적인 부품공급과 신속한 현장 기술지원이 가능하므로 유지보수 비용을 줄일 수 있고 RCOPS 관련 기술이전도 원활하게 이루어질 수 있는 이점이 있다.

RCOPS는 신울진 1,2호기 적용이 확정되었으며 RCOPS의 상용화가 성공적으로 이루어지면 미국내 원전(7개 호기)의 CPCS 교체시에도 참여할 수 있을 것으로 보인다. 물론 CPCS에 대한 원천 기술소유권을 보유하고 있는 웨스팅하우스와 공동으로 원전의 해외수출에도 활용할 수 있다. 한편, DNBR 모듈을 포함하여 본 과제에서 개선된 노심보호계통의 알고리즘 등은 하드웨어 플랫폼의 의존도가 없으므로 국내외 원전에서 운용중인 CPCS와 Common Q CPCS의 알고리즘 개선에도 활용이 가능하다.

6. 연구성과

가. 총괄표

구 분	1차년도 (‘07.8.1~’08.7.31)		2차년도 (‘08.8.1~’09.7.31)		3차년도 (‘09.8.1~’10.7.31)		합계(단위:건수)	
	국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외
논문게재								
논문발표	1		1	2	1		2	3
특허출원								
특허등록								
프로그램등록								
기술이전								

나. 세부목록

1) 논문게재 및 발표

구분	연번	논문제목	학술지(회의)	연도/권/호	주관단체	연구(발표)자	
국내	게재	1					
		2					
		3					
		4					
		5					
	발표	1	Effects of Axial Nodal Sections in a Faster-Running DNBR Program	춘계 원자력학술발표회	2008	KNS	인왕기, 전태현, 백승엽
		2	Thermal Margin Budget of a Simplified Core Thermal-Hydraulic Code for OPR1000	춘계 원자력학술발표회	2009	KNS	인왕기, 전태현, 배종식
		3					
		4					
		5					
국외	게재	1					
		2					
		3					
		4					
		5					
	발표	1	Optimal Number of Axial Nodes in a Faster-Running DNBR Program for an On-Line Application	한일원자력열수력학술대회 (NTHAS6)	2008	JNS	인왕기, 신창환, 전태현, 배종식
		2	Examination of a Simplified Thermal-Hydraulic Program for a PWR Core Protection System	국제원자력학술대회(ICON E17)	2009	ASME	인왕기, 전태현, 백승엽
		3	Advanced Core Protection Calculator Algorithm for Shin-Ulchin 1&2	국제원자로학술대회(ICAP P2010)	2010	ANS	윤태영, 이대진, 인왕기, 배종식
		4					
		5					

2) 지적재산권 출원·등록: 없음

3) 기술이전 실적: 없음

부록 A: 1차년도(2007.8.1 - 2008.7.31) 연구개발 내용 및 결과

A1. RCOPS 열수력모델 기능설계 및 Database 검증

RCOPS 열수력모델은 개선된 방법론을 이용하여 DNBR 계산을 수행하므로 변경된 기능설계 및 Database에 대한 검증이 필요하다. RCOPS 열수력모델의 DNBR 계산 방법론은 최적 DNBR 신속계산 코드인 CETOP-D와 동일하므로 CETOP-D 코드와 RCOPS DNBR 계산모듈(STATIC)의 알고리즘을 비교하였다. 아울러 96개의 검증시험 자료를 이용하여 CETOP-D와 RCOPS STATIC 모듈의 DNBR 계산결과를 비교하여 RCOPS STATIC 모듈의 기능설계 및 Database를 검증하였다. **그림 A1**은 RCOPS STATIC 모듈의 간이 검증시험 결과를 보여주는 것으로 DNBR 계산 노드 수의 차이에 따른 영향을 고려하면 검증시험 결과는 성공적인 것으로 판단된다. 참고로 RCOPS STATIC 모듈과 CETOP-D의 DNBR 계산 노드 개수는 각각 20과 40이며 노드 개수에 따른 최소 DNBR (MDNBR) 민감도 분석결과는 **그림 A2**와 같다.

A2. 열수력모듈(STATIC) 구조 분석 및 검증시험 절차 수립

DNBR 실시간 계산을 위한 STATIC 모듈은 8개의 블록과 1개의 보조블록(서브루틴)으로 **그림 A3**에 도시한 바와 같이 구성하였으며 각 블록의 입력 및 출력 변수를 정의하였다. RCOPS STATIC 모듈의 입력 및 출력 변수는 CPC와 동일하게 정의하여 다른 알고리즘 모듈과의 연계성에는 변화가 없도록 하였다. RCOPS STATIC 모듈에 대한 검증시험은 기능설계 및 Database에 대한 간이 검증시험과 모듈시험을 우선적으로 수행하고 단위시험(정적시험 및 동적시험) 및 불확실도 평가를 수행할 계획이다. 또한 RCOPS의 국내원전 적용시에는 DNBR 제한 사고 분석도 수행할 예정이다.

STATIC 알고리즘 모듈의 목적은 노심 최소 DNBR, 고온수로 건도(Quality) 및 고온관 최고온도의 정적(Static) 계산을 위한 것이다. 부가적으로는 노심 열출력 및 DNBR 값을 갱신하기 위해 필요한 정적인 공정변수들을 계산한다. STATIC 모듈의 주요기능 및 블록별 입력변수와 출력변수는 다음과 같다.

블록 1(Block 1): 모듈 입력자료 정의

이 블록의 목적은 BEST 모듈의 DNBR 계산에 필요한 다른 알고리즘 모듈들로부터의 입력 변수들을 정의하는 것이다. RCOPS 다른 알고리즘 모듈로부터의 입력변수는 다음과 같으며 CPC DNBR 모듈(STATIC)과 동일하다.

COOL(노심유량 계산 모듈) 입력변수:

MC = calibrated, normalized core coolant mass flow rate

HEAD(노심출력 계산 및 DNBR 갱신 모듈) 입력변수:

P	=	corrected primary coolant system pressure, psia
Tcmax	=	maximum compensated cold leg temperature, °F
φCALC	=	maximum compensated core average heat flux, % of rated power
PF	=	CEA deviation penalty factor for DNBR
Thavg	=	average hot leg temperature, °F
Tc1,Tc2	=	scaled cold leg temperatures, °F
Th1,Th2	=	scaled hot leg temperatures, °F
Hin	=	inlet core coolant specific enthalpy, Btu/lbm
HF	=	saturated liquid specific enthalpy, Btu/lbm
HFG	=	latent heat of vaporization, Btu/lbm

HEAT(노심출력분포 합성 모듈) 입력변수:

PDAVG	=	average of the hot pin power distribution
PDi	=	relative power in axial node i of the pseudo hot pin (i=1 to 20)

블록 2(Block 2): 고온봉 출력분포 및 운전영역별 노심운전인자 계산

이 블록에서는 최근의 운전조건을 이용한 정적 DNBR 계산을 위해 고온봉의 출력분포($\phi_c(i)$), 반경방향출력 첨두치(P1ST) 및 축방향 출력편차(Axial shape index)를 계산한다.

$$\phi_c(i) = TR \cdot PF \cdot PDi \quad i=1 \text{ to } 20 \quad (2.1)$$

$$P1ST = PDAVG \cdot TR \quad (2.2)$$

$$AHP = \frac{\sum_{i=1}^{10} \phi_c(i) - \sum_{i=11}^{20} \phi_c(i)}{\sum_{i=1}^{20} \phi_c(i)} \quad (2.3)$$

여기서,

TR	=	azimuthal tilt allowance
φc(i)	=	hot pin heat flux at axial node i, i=1 to 20
P1ST	=	integrated one pin radial peak
AHP	=	hot pin axial shape index

아울러 실시간으로 측정된 운전조건을 이용하여 운전영역을 설정하고 운전영역별 고온다발 유

량 조정인자(FSPLIT) 및 알고리즘 불확실도 인자(PFRGN)를 결정한다. 또한 노심 평균 열유속(QAVG)과 핵연료와 피복관에서 발생하는 열유속(QHOT)도 계산한다.

$$QAVG=(0.01*\phi CALC)*(FLUX0/0.0036)*BERR1*PFRGN \quad (2.4)$$

$$QHOT = QFPC*QAVG \quad (2.5)$$

여기서,

FLUX0 = core average heat flux at rated power, Mbtu/hr-ft², constant

PFRGN = region-dependent algorithm allowance(E1 또는 E2, constant)

BERR1 = DNBR overall uncertainty factor, constant

QFPC = Fraction of power generated in the fuel rod plus cladding
DNBR calculation, constant

QAVG = core average heat flux, Btu/sec ft²

QHOT = heat flux generated in the fuel plus the cladding, Btu/sec ft²

블록 2의 입력 및 출력 변수는 다음과 같다.

입력변수(From Block 1):

P = corrected primary coolant system pressure

PF = CEA deviation penalty factor for DNBR

PDAVG = average of the hot pin power distribution

PDi = relative power in axial node i of the pseudo hot pin (i=1 to 20)

TCMAX = maximum compensated cold leg temperature

ϕ CALC = maximum compensated core average heat flux, % of rated power

출력변수:

$\phi c(i)$ = hot pin heat flux at axial node i, i=1 to 20

QAVG = core average heat flux with penalty, Btu/sec ft²

QHOT = heat flux generated in the fuel plus the cladding, Btu/sec ft²

TIN = core inlet temperature, °F

PREF = system pressure, psia

P1ST = integrated one pin radial peak

FSPLIT = hot assembly flow split factor

블록 3(Block 3): 21-노드 고온봉 출력분포 합성

블록 3에서는 블록 2에서 계산된 20개 노드의 고온봉 출력분포를 사용하여 21개 노드 점에서의 고온봉 출력분포를 합성한다. 즉, Newton 및 Bessel의 보간법을 이용하여 21개 노드 점에

서의 고온봉 출력분포를 계산하고 합이 20이 되도록 조정한다. 이렇게 얻어진 21개 노드 점 출력분포와 핵연료와 피복관에서 발생하는 열유속(QHOT)을 이용하여 DNBR 계산에 필요한 21개 노드 점 고온봉 출력분포(ZFLUX)를 계산한다. 또한 DNBR 계산시간의 단축을 위해 최소 DNBR을 찾기 시작하기 위한 축방향 노드(JSTAR)도 결정한다.

$$\text{PHIC21}(1) = ((\phi_c(1) \quad \phi_c(2)) * \text{FZCOF}(1) + \text{FZCOF}(2) * \phi_c(3) + \text{FZCOF}(3) * \phi_c(4)) * \text{FZCOF}(4) \quad (2.6)$$

$$\text{PHIC21}(2) = (\text{FZCOF}(5) * \phi_c(1) + \text{FZCOF}(6) * \phi_c(2) + \text{FZCOF}(7) * \phi_c(3) + \phi_c(4)) * \text{FZCOF}(4) \quad (2.7)$$

$$\text{PHIC21}(20) = (\text{FZCOF}(5) * \phi_c(20) + \text{FZCOF}(6) * \phi_c(19) + \text{FZCOF}(7) * \phi_c(18) + \phi_c(17)) * \text{FZCOF}(4) \quad (2.8)$$

$$\text{PHIC21}(21) = ((\phi_c(20) \quad \phi_c(19)) * \text{FZCOF}(1) + \text{FZCOF}(2) * \phi_c(18) + \text{FZCOF}(3) * \phi_c(17)) * \text{FZCOF}(4) \quad (2.9)$$

$$\text{PHIC21}(i+2) = (\text{FZCOF}(8) * \phi_c(i+2) + \text{FZCOF}(9) * \phi_c(i+1) + \phi_c(i+3) \quad \phi_c(i)) * \text{FZCOF}(4), \quad i=3, 17 \quad (2.10)$$

$$\text{ZFLUX}(j) = \text{QHOT} * \text{PHIC21}(j), \quad j=1, 21 \quad (2.11)$$

여기서,

FZCOF(1-9) = Constants for Newton's difference formulas and Bessel's formula for interpolating to halves, constant

PHIC21(i) = 21-point relative hot pin heat flux distribution, i=1 to 21

ZFLUX(i) = 21-point hot pin power distribution, i=1 to 21, Btu/sec-ft²

블록 3의 입력 및 출력 변수는 다음과 같다.

입력변수(From Block 2):

$\phi_c(i)$ = hot pin heat flux at axial node i, i=1 to 20

QHOT = heat flux generated in the fuel plus the cladding, Btu/sec-ft²

출력변수:

DX = axial node length

NDXP1 = number of axial nodes (=21)

JSTAR = node number to start searching minimum DNBR

ZFLUX(i) = 21 point hot pin power distribution, i=1 to 21, Btu/sec-ft²

블록 4(Block 4): 노심 초기조건 설정

이 블록에서는 유량 및 엔탈피 계산을 위한 노심 입구에서의 초기조건을 설정하고 엔탈피 전

달계수의 초기 값(CH2)도 계산한다. 아울러 추후 DNBR 계산에 필요한 수로 형상 변수 및 중간변수의 값도 계산한다.

$$\text{CH2} = (\text{RADIAL}(2)*\text{D}(2)/\text{A}(2) - \text{RADIAL}(3)*\text{D}(3)/\text{A}(3))/(\text{RAA2}*\text{DD2P}/\text{A2P} - \text{RADIAL}(3)*\text{D}(3)/\text{A}(3)) \quad (2.12)$$

$$\text{DHYD}(i) = 4.*\text{A}(i)/\text{PERIM}(i), \quad i=1, 4 \quad (2.13)$$

$$\text{F}(i) = \text{GINFS}*\text{A}(i) \quad (2.14)$$

$$\text{H}(i) = \text{CHPT} \quad (2.15)$$

여기서,

- A(i) = flow area for channel i, i=1 to 4, ft²
- GINFS = hot assembly inlet mass velocity, lbm/s ft²
- PERIM(i) = wetted perimeter for channel i, i=1 to 4, ft
- CHPT = initial value of enthalpy as a function of temperature
- D(1 4) = effective rod diameter for channels 1 to 4, ft
- RAA2 = effective normalized radial peaking factor for the artificial channel 2'

블록 4의 입력 및 출력 변수는 다음과 같다.

입력변수:

- MC = calibrated, normalized core coolant mass flow rate (from Block 1)
- PREF = system pressure, psia (from Block 2)
- TIN = core inlet temperature (from Block 2)
- FSPLIT = hot assembly flow split factor (from Block 2)

출력변수:

- A32 = ratio of the flow area for channels 3 and 4 with respect to channel 2
- A42 = ratio of the flow area for channel 4 with respect to channel 2
- CHH(1) = enthalpy transport coefficient at the core inlet(first node)
- CH2,CH(2)= initial value of average enthalpy transport coefficient
- HECO(j) = product of conductivity and Prandtl number to the 0.4 power, i.e., $k*Pr^{0.4}$, j=1 to 5
- DHYD(i) = hydraulic diameter of channel i, i=1 to 4
- F(i) = inlet flow rate in channel i, i=1 to 4, lbm/s
- H(i) = inlet enthalpy in channel i, i=1 to 4
- H2P(1) = enthalpy in boundary channel between channels 2 and 3 at node 1

H22(1) = enthalpy in boundary channel between channels 2 and 3
at node 1

블록 5(Block 5): 최소 DNBR(MDNBR) 계산

블록 5에서는 'Prediction-Correction' 수치해법을 이용하여 전달계수 모델에 기초한 질량, 에너지 및 운동량 보존 방정식의 해를 구한다. 지배 방정식의 풀이를 통해 얻어진 고온 수로에서의 질량유량과 엔탈피를 이용하여 임계열유속(Critical heat flux)을 계산하고 노심 최소 DNBR(MDNBR) 및 최대 건도를 결정한다. 지배 방정식의 풀이를 위해 다양한 보조계산이 필요하므로 여러 개의 서브루틴으로 구성된 보조블록(유량 및 엔탈피 보조계산)이 더불어 이용된다. 그림 A4는 블록 5의 계산 흐름도를 보여주는 것으로 노심입구(J=1)에서부터 노심출구(J=21)까지 지배방정식의 해를 구한다.

블록 5에서 각 수로의 질량 및 엔탈피 계산을 위해 다양한 보조계산을 수행하는 보조블록은 모두 8개의 서브루틴(SAT, PROP, MODMN, CIJMIX, DIFFER, TRANS, DIVERT, CHF)으로 구성되어 있다. SAT은 측정된 노심압력에서 포화상태 물성치를 계산하며 PROP은 과냉상태 및 2상 유동의 물성치를 계산하는 서브루틴이다. 서브루틴 MODMN은 2상유동 마찰계수의 증배수(Multiplier)를 계산하기 위한 것으로 국소비등 조건에서는 Sher-Green 상관식을 완전비등 상태에서는 수정 Martinelli-Nelson 상관식을 각각 사용한다. CIJMIX는 난류혼합 및 교차류 저항 인자를 계산하기 위한 서브루틴이다. 교차류 저항 인자(CIJ)는 전단항력과 유로면적 변화에 따른 압력손실을 고려한 Hestroni 상관식을 이용하여 계산하고 난류혼합 인자(WP)는 핵연료 지지격자에 의해 발생한 난류에디를 고려하기 위한 것으로 상관식을 이용하여 계산한다. 서브루틴 DIFFER는 압력, 유량 및 엔탈피의 노심 축방향 변화율을 계산한다. 서브루틴 TRANS는 버퍼수로의 엔탈피를 이용하여 엔탈피 전달계수를 계산하며 서브루틴 DIVERT는 횡방향 운동량 보존식으로부터 교차류를 계산한다. 마지막으로 서브루틴 CHF는 CHF 상관식을 이용하여 임계열유속(CHF)과 고온 봉 출력에 대한 CHF 비율을 계산한다. 아울러 비균일 축방향 노심 출력분포의 CHF 보정인자도 계산한다.

블록 5의 입력 및 출력 변수는 다음과 같다.

입력변수:

- A32 = ratio of the flow area for channels 3 and 4
with respect to channel 2 (from Block 4)
- A42 = ratio of the flow area for channel 4 with
respect to channel 2 (from Block 4)
- NDXP1 = number of axial nodes (from Block 3)
- QAVG = core average heat flux, Btu/sec ft²(from Block 2)
- PREF = system pressure, psia, (from Block 2)
- $\phi_c(i)$ = hot pin heat flux at axial node i, i=1 to 20 (from Block 2)

JSTAR = node number to start searching minimum DNBR,
(from Block 3)

DX = axial node length (from Block 3)

ZFLUX(i) = 21 point hot pin power distribution, i=1 to 21,
Btu/sec ft² (from Block 3)

F(i) = inlet flow rate in channel i, i=1 to 4, lbm/s (from Block 4)

H(i) = inlet enthalpy in channel i, i=1 to 4, (from Block 4)

CH2,
CH(2) = initial value of average enthalpy transport coefficient for use in
subroutine DIFFER (from Block 4)

HECO(j) = product of conductivity and Prandtl number
to the 0.4 power, i.e., $k*Pr^{0.4}$ for use in
subroutine PROP, j=1 to 5 (from Block 4)

DHYD(i) = hydraulic diameter of channel i, i=1 to 4 (from Block 4)

H2P(1) = enthalpy in boundary channel between channels 2 and 3
at node 1 for use in subroutine TRANS (from Block 4)

H22(1) = enthalpy in boundary channel between channels 2 and 3
at node 1 for use in subroutine TRANS (from Block 4)

P1ST = integrated one pin radial peak (from Block 2)

HFG = latent heat (from Block 1)

HF = enthalpy of saturated liquid (from Block 1)

출력 변수:

FDNB = minimum DNBR

FDNBF = flow rate at location of min. DNBR

FDNBFS = correction factor for a non uniform heat flux distribution
at location of min. DNBR

FDNBQLOC = local heat flux at location of min. DNBR

FDNBX = quality at the location of min. DNBR

TF = saturation temperature

블록 6(Block 6): MDNBR 위치에서의 노심 주요인자 결정

블록 6에서는 노심 최소 DNBR 발생 노드에서의 건도(XST), 비균일 축방향 출력분포 보정인자(FKST), 고온수로의 질량유속(GPRFST), 엔탈피 증가(DhST) 및 열유속(QLOCST) 등을 정의한다. 또한 RCOPS 다른 알고리즘 모듈(HEAD)에서 DNBR을 갱신하기 위한 중간변수들(XY, XXY, LNX)도 계산하고 추가적인 DNBR 불확실도를 고려한 최종 정적 DNBR(DNBRST)의 값도 확정한다.

$$XST = FDNBX \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \text{GPRFST} &= \text{FDNBF} & (2.17) \\ \text{DhST} &= \text{XST} * \text{HFG} + \text{HF} - \text{Hin} & (2.18) \\ \text{FKST} &= \text{FDNBFS} & (2.19) \\ \text{QLOCST} &= \text{FDNBQLOC} & (2.20) \\ \text{CHF1C} &= \text{CCHF5} + \text{CCHF6} * \text{PRST} & (2.21) \\ \text{CHF1D} &= \text{CCHF7} * \text{PRST} & (2.22) \\ \text{CHF1E} &= \text{CCHF8} & (2.23) \\ \text{XY} &= \text{GPRFST}(\text{CHF1C}) & (2.24) \\ \text{XXY} &= \text{GPRFST}(\text{CHF1D} + \text{CHF1E} * \text{GPRFST}) & (2.25) \\ \text{LNx} &= \ln(\text{GPRFST}) & (2.26) \\ \text{DNBRST} &= \text{EDNB1} * (\text{FDNB} + \text{EDNB2}) & (2.27) \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \text{CCHF5} \quad 8 &= \text{Coefficients for CHF correlation, constant} \\ \text{EDNB1} &= \text{DNBR adjustment factor, constant} \\ \text{EDNB2} &= \text{DNBR adjustment offset, constant} \end{aligned}$$

블록 6의 입력 및 출력 변수는 다음과 같다.

입력변수:

$$\begin{aligned} \text{FDNB} &= \text{minimum DNB ratio (from Block 5)} \\ \text{FDNBF} &= \text{flow rate at location of min. DNBR (from Block 5)} \\ \text{FDNBFS} &= \text{correction factor for a non uniform heat flux distribution} \\ &\quad \text{at location of min. DNBR (from Block 5)} \\ \text{FDNBQLOC} &= \text{local heat flux at location of min. DNBR (from Block 5)} \\ \text{FDNBX} &= \text{quality at location of min. DNBR (from Block 5)} \\ \text{HFG} &= \text{latent heat (from Block 1)} \\ \text{HF} &= \text{enthalpy of saturated liquid (from Block 1)} \\ \text{Hin} &= \text{inlet core coolant specific enthalpy, Btu/lbm, (from Block 1)} \\ \text{MC} &= \text{calibrated, normalized core coolant mass flow rate} \\ &\quad \text{(from Block 1)} \\ \phi\text{CALC} &= \text{maximum compensated core average heat flux,} \\ &\quad \text{\% of rated power (from Block 1)} \\ \text{PF} &= \text{CEA deviation penalty factor for DNBR (from Block 1)} \\ \text{PREF} &= \text{system pressure, psia, (from Block 2)} \end{aligned}$$

출력변수:

$$\begin{aligned} \text{DNBRST} &= \text{minimum static DNBR} \\ \text{XST} &= \text{quality at the node of minimum DNBR} \end{aligned}$$

GPRFST	= hot channel mass flux at node of min. DNBR, Mlbm/hr-ft ²
DhST	= hot channel enthalpy rise to node of min. DNBR
FKST	= f-correction factor at min. DNBR
QLOCST	= hot channel heat flux at node of min. DNBR, Btu/sec-ft ²
XY, XXY, LNX	= intermediate variables for DNBR update
MCST	= BEST core coolant mass flow rate
PFST	= CEA deviation penalty factor for DNBR
φCALCST	= BEST compensated core average power, % of rated power
PRST	= primary coolant system pressure

블록 7(Block 7): 엔탈피-온도 비율 계산

블록 7은 고온관 및 저온관에서의 엔탈피와 온도의 비율(CPIN1, CPIN2, CPOUT1, CPOUT2)을 계산한다. 이 변수들은 추후 RCOPS의 다른 알고리즘 모듈(HEAD)로 전송되어 노심 열출력을 계산하는데 이용된다. 또한 온도 측정오차를 고려한 고온관 최고온도(Thmax)를 계산하기도 한다.

블록 7의 입력 및 출력 변수는 다음과 같다.

입력변수:

Thavg	= average hot leg temperature, °F (from Block 1)
Tc1, Tc2	= scaled cold leg temperatures, °F (from Block 1)
Th1, Th2	= scaled hot leg temperatures, °F (from Block 1)
TF	= saturation temperature (from Block 5)
PRST	= primary coolant system pressure (from Block 6)

출력변수:

CPIN1	= enthalpy temperature ratio of water in pump legs 1 and 2, Btu/lbm-°F
CPIN2	= enthalpy temperature ratio of water in pump legs 3 and 4, Btu/lbm-°F
CPOUT1	= enthalpy temperature ratio of water feeding steam generator 1, Btu/lbm-°F
CPOUT2	= enthalpy temperature ratio of water feeding steam generator 2, Btu/lbm-°F
Thmax	= maximum hot leg temperature including uncertainties, °F
TSAT	= saturation temperature of water, °F

블록 8(Block 8): 주요 계산결과 출력

RCOPS의 다른 알고리즘 모듈에서 사용하기 위해 DNBR 모듈에서 계산된 변수들을 STATIC 모듈의 버퍼로 출력한다. STATIC 모듈의 버퍼로 출력되는 변수는 기존의 CPCS와 동일하다.

A3. DNBR 모듈시험

RCOPS STATIC 모듈의 기능설계 및 실시간 소프트웨어의 V/V (Verification/Validation)를 위해 20개의 모듈시험 입출력 자료를 생산하였다. 모듈시험 자료는 STATIC 모듈내 각 서브모듈(블록)별로 각각의 입력변수와 출력변수의 값을 포함하고 있으며 서브모듈내 주요 알고리즘을 시험할 수 있도록 설계하였다. 상기 STATIC 모듈시험 입출력 자료는 RCOPS 소프트웨어 V/V 팀에 제공되었다. RCOPS 소프트웨어 V/V 팀은 동일한 서브모듈 입력자료를 이용하여 독립적인 계산을 수행하고 각 서브모듈별 출력변수의 값을 제공된 예상 값과 비교하여 모듈시험 결과를 판정한다.

A4. 특정기술주제보고서(Topical Report) 제출 및 질의답변

RCOPS에 적용하기 위한 기능설계(알고리즘) 개선의 인허가를 획득하기 위해 노심보호연산기계통 기능설계 개선에 관한 특정기술주제보고서(Topical Report)를 2008년 2월에 원자력안전기술원(KINS)에 제출하였으며 TR 설명회도 개최하였다. 본 TR은 신고리 1, 2호기에 적용예정인 Common Q CPCS 알고리즘 대비 개선된 CPCS 알고리즘을 기술하였다. 주요 알고리즘 개선내용은 핵비등이탈률(DNBR) 계산방법 개선, 보조정지 인자에 대한 예비정지경보 추가, 출력급감발계통 작동시 가변과출력정지 방지 및 제어봉 위치신호 처리방법 개선이다. DNBR 계산방법 개선은 TR의 2.2절에 개선 배경, 알고리즘 개정 및 알고리즘 검증 및 평가의 내용으로 기술되었다.

상기 TR중 DNBR 모듈 개선에 대해 6개의 KINS 1차 질의가 발행되어 답변서를 제출하였다. DNBR 알고리즘 검증 관련 주요 질의내용은 개정 STATIC 모듈 DNBR 결과가 CETOP-D 결과보다 비보수적인 경우의 처리 방법을 설명하는 것과 96개 시험조건에 대하여 개정 STATIC과 기존 CPC DNBR의 비교결과를 제출하는 것이다. 먼저 개정 STATIC 모듈 DNBR의 보수성을 확인하기 위해서는 DNBR 불확실도 해석을 수행한다. 즉, DNBR 신속계산 참조코드인 CETOP-D DNBR 대비 개정 STATIC 모듈의 DNBR 오차를 통계적으로 분석하여 DNBR 불확실도 인자(BERR1)를 결정한다. BERR1은 개정 STATIC 모듈의 DNBR 계산에 사용되는 노심출력 페널티로 개정 STATIC 모듈이 실시간으로 계산한 DNBR의 보수성을 보증한다. 한편, 96개의 시험조건에서 계산된 CPC STATIC 모듈과 개정 STATIC 모듈의 최소 DNBR (MDNBR) 비교결과는 아래의 **그림 A5**와 같다. CETOP-D MDNBR 대비 상대오차의 평균은 -1.3%(STATIC)와 +1.1%(개정 STATIC)이며 표준편차는 1.4%(STATIC)와 1.1%(개정 STATIC)로 나타났다.

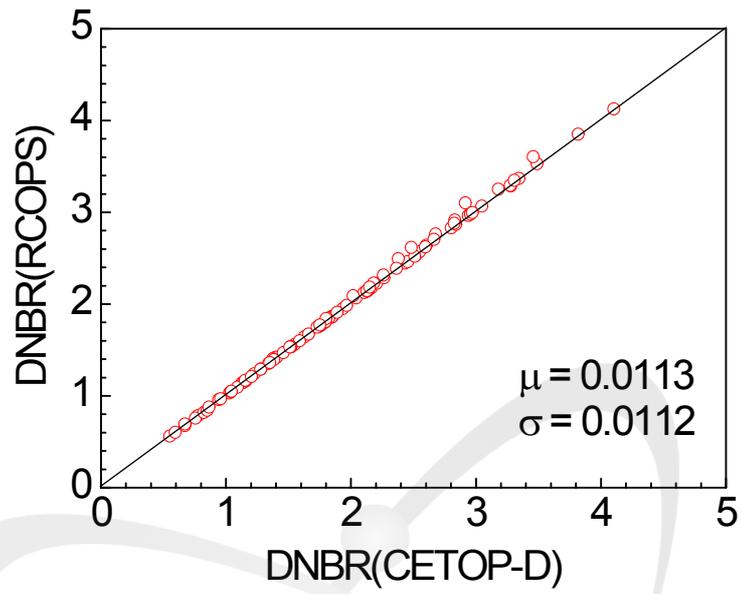


그림 A1 RCOPS DNBR 모듈 기능설계 및 Database 간 검증시험 결과

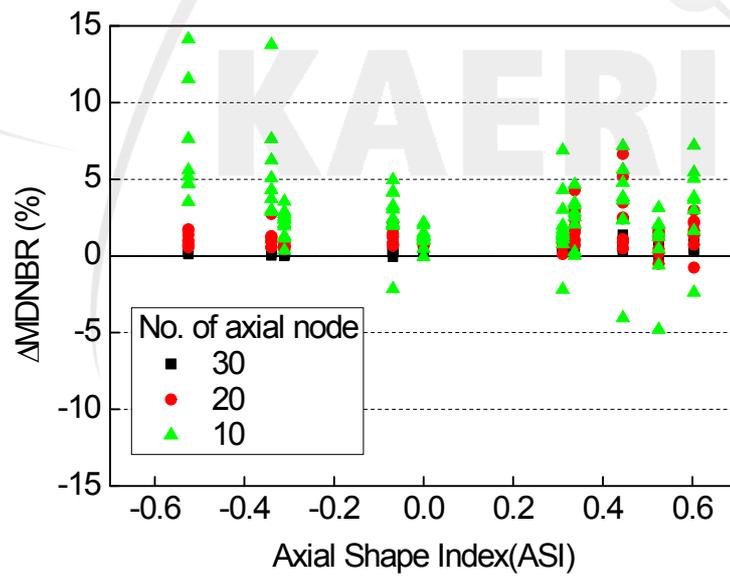


그림 A2 축방향 노드 개수에 따른 최소 DNBR 민감도 분석 결과

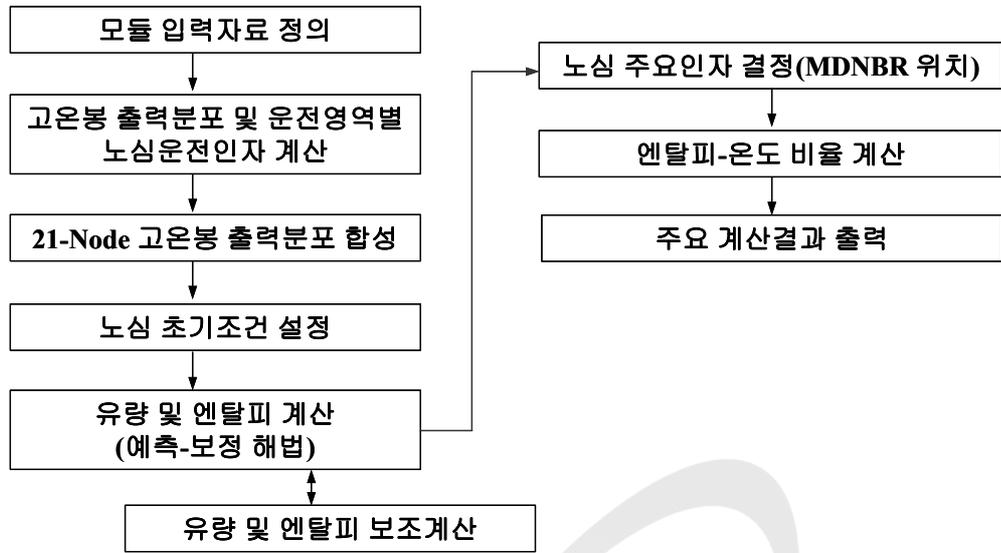


그림 A3 RCOPS DNBR 모듈(STATIC)의 기능설계 흐름도

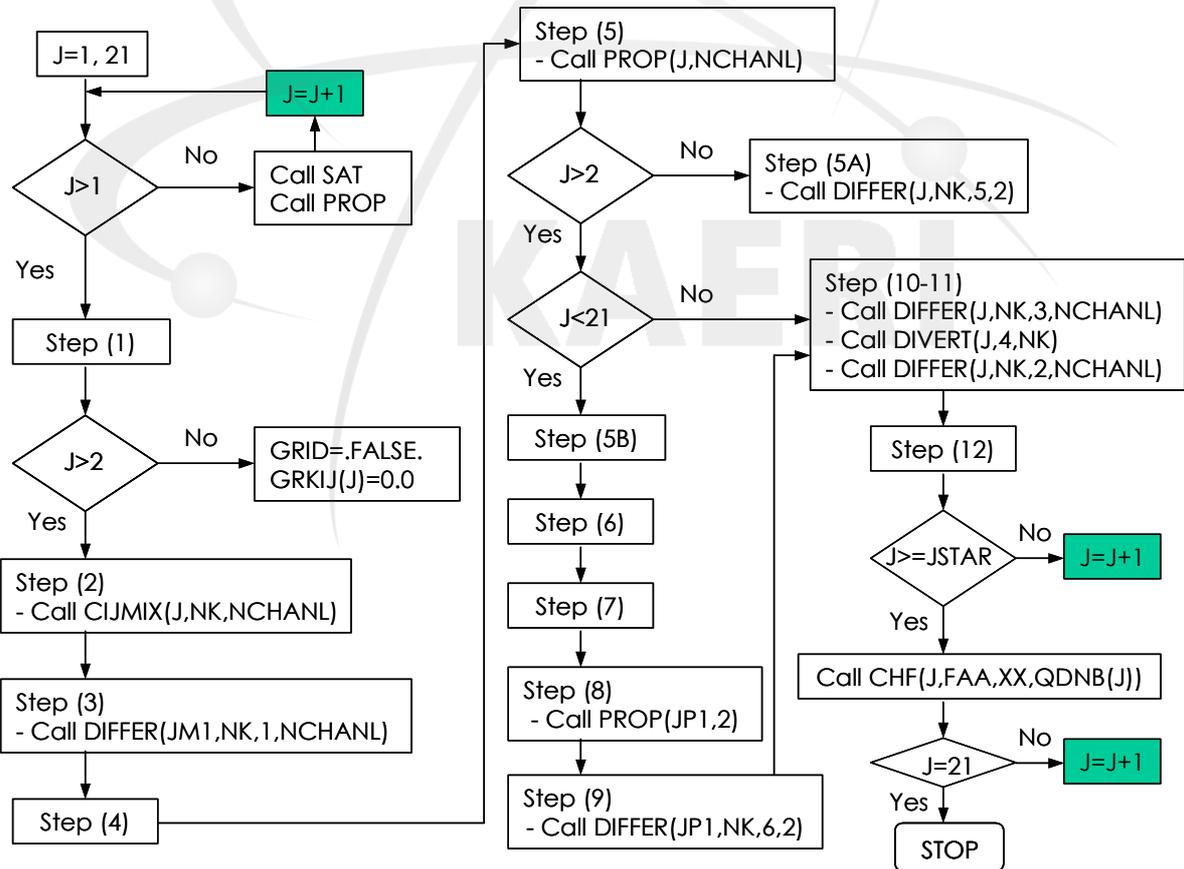


그림 A4 RCOPS DNBR 모듈의 블록 5 흐름도

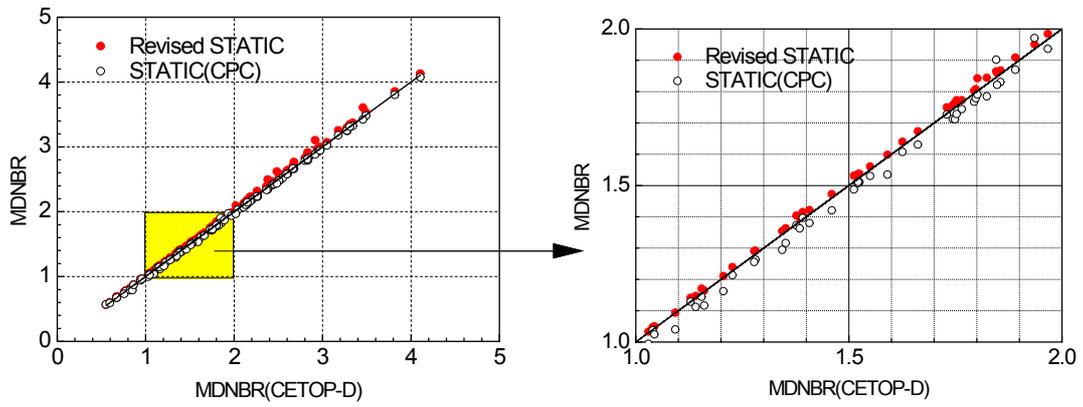


그림 A5 STATIC 모듈과 개정 STATIC 모듈 최소 DNBR 비교



부록 B: 2차년도(2008.8.1 - 2009.7.31) 연구개발 내용 및 결과

B1. 특정기술주제보고서(Topical Report) 개정 및 인허가

RCOPS용 노심보호연산기(CPC) 기능설계 개선에 관한 특정기술주제보고서(TR)에 대한 한국원자력안전기술원(KINS)의 심사의견을 반영하여 TR을 개정하고 KINS 승인을 획득하였다(2008. 11). 노심보호연산기계통 기능설계의 주요 개선사항인 DNBR 모듈(STATIC) 관련 TR 개정내용은 DNBR 계산에 필요한 축방향 노드 수의 민감도 분석결과이다. 즉, 기능설계개선 TR의 2.2.3절(알고리즘 검증 및 평가)에 축방향 계산노드 수에 따른 최소 DNBR 변화를 분석한 결과 향후 CETOP-D 코드의 실시간 적용을 위해서는 20개 이상의 노드를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다는 내용을 추가 기술하였다.

한편, DNBR 모듈 개선 관련 기술현안에 대한 추가 KINS 설명회(2008. 9. 30)를 개최하고 KINS의 재질의서에 대한 답변서를 제출하였다. DNBR 모듈 관련 KINS가 제기한 주요현안은 두 가지이다. 첫 째는 개정 STATIC 모듈의 DNBR 예측오차 상한치가 표 B1과 같이 높게 계산된 이유와 엔탈피 전달계수 튜닝이 오히려 더 오차를 줄일 수 있는지 여부이고 두 번째 현안은 축방향 노드 수가 10인 경우 음의 ASI(Axial shape index)에서 현저하게 비보수적인 결과(그림 B1)가 나타나는 이유이다. 첫 번째 현안에 대한 답변을 요약하면 다음과 같다. CPC 기존 STATIC 모듈의 경우 DNBR 튜닝절차에 의해 DNBR 오차의 상한치를 최소화시키지만 개정 STATIC 모듈은 DNBR 튜닝을 수행하지 않은 경우이다. 개정 STATIC 모듈의 축방향 노드 수가 기존 DNBR 계산코드(CETOP-D)의 노드 수 보다 적은 경우 DNBR 오차가 증가하므로 일정 개수 이하에서는 CPC STATIC과 같이 튜닝절차가 바람직하다. 따라서 STATIC 모듈의 DNBR 예측오차를 줄이기 위해서는 축방향 노드 수의 증가가 필요하다. 두 번째 현안에 대한 답변은 개정 STATIC 모듈의 경우 전달계수(Transport coefficients) 모델과 예측-보정(Prediction-Correction) 수치해법을 이용하므로 최소 DNBR(MDNBR) 발생 가능구간의 출력분포의 변화가 큰 경우(그림 B2) 축방향 노드 크기의 영향이 클 것으로 판단된다. 축방향 노드 수에 대한 MDNBR 민감도 분석결과 노드 수는 최소 20개 이상이 필요하며 원적적용 설계시 노드 수를 40개로 변경하는 것이 바람직하다는 것이다. 또한 개정 DNBR 모듈의 불확실도 해석절차를 설명하고 축방향 노드 수에 따른 개정 DNBR 모듈의 불확실도 예비 해석결과를 제시하였다.

B2. 모듈시험 및 단위시험

개량형 노심보호계통(RCOPS) 실시간 소프트웨어의 검증을 위해서는 모듈시험과 단위시험이 필요하다. 모듈시험과 단위시험을 수행하기 위해 필요한 개정 STATIC 모듈의 모의 FORTRAN 코드를 개발하였다. 개정 STATIC 모듈시험을 위해 20개의 시험자료를 생산하였다. 모듈시험 자료는 STATIC 모듈 내부 기능모듈별 시험용 입력변수의 값과 출력변수의 예상값을 포함하고 있다. 즉 개정 STATIC 모듈은 8개의 세부 기능모듈(블록)로 구성되어 있으므로 8개 기능모듈에 대한 각각의 입력변수와 출력변수의 값을 생산하였다.

20개의 모듈시험 자료를 이용하여 개정 STATIC 모듈시험을 (주)한국전력기술(KOPEC)에서 수행하였다. 모듈시험 결과 STATIC 모듈 기능설계와 실시간 소프트웨어의 차이가 일부 발견되어 수정되었으며 STATIC 모듈시험은 최종적으로 통과된 것으로 판정되었다. 표 B2는 개정 STATIC 모듈중 DNBR 계산의 핵심 세부모듈인 모듈 6의 모듈시험 결과를 보여주는 것으로 I/O 시뮬레이터를 사용하지 않은 경우이다. 표에서 예상값은 STATIC 모듈 모의 FORTRAN 코드의 계산 값이며 실제값은 소프트웨어의 실행결과를 의미한다.

RCOPS 단위시험에 필요한 입력자료를 생산하기 위해 개정 STATIC 모듈의 모의 FORTRAN 코드를 (주)한전원자력연료(KNF)에 제공하였으며 KNF와 공동으로 단위시험 자료를 선정하였다. 한편 선행호기(울진 5,6호기 및 신고리 1,2호기)의 CPC 단위시험 결과와 CPC 불확실도를 분석하였다. 단위시험중 CPC(또는 RCOPS COPP) Input Sweep Test는 컴퓨터의 프로세싱 불확실도를 결정하기 위한 것으로 이는 향후 CPC(또는 RCOPS)의 DNBR/LPD(선출력밀도) 불확실도의 입력자료가 된다. OPR1000 원자로의 CPC 불확실도 해석에 사용되는 CPC 컴퓨터 프로세싱 불확실도는 0.0093 DNBR unit과 2.2% LPD 트립 설정치이다. 따라서 RCOPS 프로세서(COPP) Input Sweep Test의 시험오차는 이들 값 이내이어야 하며 만일 이보다 크면 RCOPS 프로세싱 불확실도를 증가시켜야 한다.

B3. DNBR 모듈 기능설계 및 Database 개정

RCOPS의 초기 플랫폼으로 선정된 PLC HFC-6000의 제한요건(모듈별 입력/출력 변수 개수, 배열변수의 크기, 메모리 등)으로 인해 DNBR 모듈의 단순화가 요구되어 DNBR 계산 노드 수를 20으로 고정하여 기능설계를 수행하였다. 그러나 RCOPS의 플랫폼이 POSAFE-Q로 변경되어 상기 PLC 제한요건이 완화되었다. 또한 DNBR 계산노드 수에 따른 RCOPS DNBR 정확도의 변화를 분석한 결과 노드 수가 40개인 경우 대비 20개인 경우 DNBR 여유도가 약 2% 감소하는 것으로 나타났다(그림 B3). 이것은 DNBR 모듈의 개선을 통한 기존 CPC 대비 RCOPS DNBR 여유도의 예상 증가량(약 2%)이 상쇄되는 것을 의미한다. 따라서 RCOPS DNBR 계산 노드 수를 증가시키기 위해 RCOPS 기능설계를 수정하였으며 RCOPS 소프트웨어의 모듈시험 자료를 추가 생산하였다.

RCOPS DNBR 계산 노드 수 증가를 위해 DNBR 모듈(STATIC)의 서브모듈 3과 6를 개정하였다. STATIC 서브모듈 3의 주요 개정내용은 보간법을 이용하여 DNBR 계산에 필요한 축방향 노드 수(NDX)에서의 노심 축방향 출력분포를 합성하는 것이다. 즉 STATIC 모듈의 노심 출력분포 입력은 20개 노드의 출력분포이므로 이를 이용하여 DNBR 계산에 필요한 NDX(=40)개 노드의 고온봉 출력분포를 생성하고 아울러 NDX 노드의 축방향 위치 정보도 계산한다. STATIC 서브모듈 6에서는 모듈 3에서 생성된 NDX 노드의 고온봉 출력분포를 이용하여 DNBR 계산에 필요한 4개 수로의 선출력분포를 계산한다. 이와 같은 STATIC 모듈의 기능설계 개정에 따라 STATIC 모듈의 Database도 수정하였다. 즉 STATIC 서브모듈 3에 STATIC 모듈로 입력되는 노심 축방향 출력분포의 노드 개수를 Database 상수(NDXFZ=20)로 추가하였다. 반면에 STATIC 서브모듈 6의 Database 상수인

고온봉 출력분포의 위치정보는 모듈 3에서 계산되므로 삭제되었다.

RCOPS DNBR 모듈중 서브모듈 3(블록 3)의 알고리즘 변경내용은 다음과 같다.

$$DX = ZFUEL/NDX \quad (4.4-26)$$

$$NDXP1 = NDX+1 \quad (4.4-27)$$

$$NDXPZ = NDXFZ+1 \quad (4.4-27a)$$

where,

NDX = number of axial nodal sections for the DNBR calculation, constant

NDXFZ = number of axial nodes of the pseudo hot-pin power distribution, constant

Construct NDX-node and NDXP1-point power distributions PHICM(NDX) and PHICN(NDXP1) by interpolation. The interpolation is skipped if NDX is equal to 20.

If NDX is equal to 20,

Then, for $i=1, 2, \dots, NDX$

$$PHICM(i) = \phi c(i) \quad (4.4-27b)$$

Increment index i to NDX

and for $i=1, 2, \dots, NDXP1$

$$PHICN(i) = PHIC21(i) \quad (4.4-27c)$$

Increment index i to NDXP1

and go to the Beginnings of "j-loop-3B".

Otherwise, set equally spaced axial power locations:

For $i=1, 2, \dots, NDXPZ$,

$$XXL(i) = (i-1)/(NDXPZ-1) \quad (4.4-27d)$$

Increment index i to NDXPZ

$$DDX = 1/NDX \quad (4.4-27e)$$

$$N1 = NDXP1 \quad (4.4-27f)$$

$$AA = 0.0 \quad (4.4-27g)$$

For $j=1, 2, \dots, N1$ (Beginnings of "j-loop-3D")

For $i=1, 2, \dots, NDXPZ-2$ (Beginnings of "i-loop-3E")

If AA is less than or equal to $XXL(i+1)$, go to eq.(4.4-27h)

Increment index i

End of "i-loop-3E"

$$FZZ = 0.5 * (PHIC21(i)+PHIC21(i+1)) \quad (4.4-27h)$$

If $XXL(i+1)-XXL(i)$ is greater than 0.0001,

Then, $FZZ = PHIC21(i+1)-((PHIC21(i+1)-PHIC21(i))$

$$*(XXL(i+1)-AA))/(XXL(i+1)-XXL(i)) \quad (4.4-27i)$$

$$\text{If } N1 \text{ is equal to } NDX+1, \text{ PHICN}(j) = \text{FZZ} \quad (4.4-27j)$$

$$\text{If } N1 \text{ is equal to } NDX, \text{ PHICM}(j) = \text{FZZ} \quad (4.4-27k)$$

$$\text{AA} = \text{AA} + \text{DDX} \quad (4.4-27l)$$

Increment index j

End of “j-loop-3D”

If N1 is equal to NDX,

Then, go to the Beginnings of “j-loop-3B”.

Otherwise, N1 = NDX (4.4-27m)

$$\text{AA} = 0.5 * \text{DDX} \quad (4.4-27n)$$

Increment index j

And go back to the Beginnings of “j-loop-3D”.

Compute NDXP1-point hot-pin power distribution, ZFLUX using the relative hot-pin heat flux distribution, PHICN and heat flux generated in the fuel, QHOT:

For j=1,2,...,NDXP1 (Beginnings of “j-loop-3B”)

$$\text{ZFLUX}(j) = \text{QHOT} * \text{PHICN}(j) \quad (4.4-28)$$

$$\text{X}(j) = (j-1) * \text{DX} \quad (4.4-28a)$$

Increment index j

RCOPS DNBR 모듈중 서브모듈 6(블록 6)의 알고리즘 변경내용은 다음과 같다.

For j=1,2,...,NDXP1 (Beginnings of “j-loop-6A”)

$$\text{JP1} = j+1 \quad (4.4-63)$$

Calculate linear heat distributions of four channels:

For i=2,...,NCHANL (Beginnings of “i-loop-6B”)

$$\text{QPRIM}(i) = \text{QAVG} * \text{PHICM}(\text{JM1}) / \text{P1PB} * \text{RADIAL}(i) * 3.14159 * \text{D}(i) \quad (4.4-75)$$

Increment index i

End of “i-loop-6B”

$$\text{QPRIM}(1) = \text{QAVG} * (\text{PHICM}(\text{JM1}) / \text{P1ST}) * 3.14159 * \text{D}(1) * \text{RADIM1} \quad (4.4-76)$$

$$\text{QPRI2P} = \text{QAVG} * \text{PHICM}(\text{JM1}) / \text{P1PB} * \text{RAA2} * 3.14159 * \text{DD2P} \quad (4.4-77)$$

$$\text{QPRI22} = \text{QAVG} * \text{PHICM}(\text{JM1}) / \text{P1PB} * \text{RAA22} * 3.14159 * \text{DD22} \quad (4.4-78)$$

개정된 STATIC 모듈의 기능설계와 Database를 검증하기 위해 다양한 RCOPS 운전조건을 모의한 시험자료를 이용하였다. RCOPS STATIC 모듈을 모의한 FORTRAN 전산코드를 수정 개발하여 주어진 시험조건에서 RCOPS MDNBR을 계산하였다. 동일한 시험자료를 이용하여 참조 DNBR 계산 전산코드인 CETOP-D에 의한 MDNBR과 RCOPS MDNBR을 비교하였다. **그림 B4**는 RCOPS DNBR 계산 축방향 노드 수(NDX)가 20개와 40개인 경우 MDNBR 비교 결과를 나타낸다. 참고로 본 검증시험 계산에 사용한 CETOP-D의 DNBR 노드 수는 40개이다. 일반적으로 CETOP-D를 이용한 참조 DNBR 계산에서는 40개의 노드가 사용되고 있다. RCOPS의 DNBR 노드 수가 20인 경우 MDNBR의 평균오차와 표준편차

가 모두 1.1%인 반면에 노드 수가 40인 경우 0.4%로 MDNBR 오차가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

RCOPS DNBR 모듈과 CETOP-D의 DNBR 계산방법이 동일하므로 DNBR 노드 수가 같은 경우 각각의 MDNBR 값은 서로 일치해야 한다. 그러나 RCOPS DNBR 노드 수가 40인 경우 MDNBR 오차가 0%가 아닌 것은 RCOPS의 경우 시험용 노심 출력분포로부터 보간법에 의해 생성된 출력분포를 사용하기 때문이다. 즉 CETOP-D는 시험용 출력분포(41-42개 노드)를 그대로 사용하지만 RCOPS의 경우 시험출력분포를 실시간 출력분포 합성법과 동일한 20개 노드의 출력분포로 만들고 이를 다시 40개 노드의 출력분포로 재구성하여 MDNBR 계산에 사용하기 때문이다. 이러한 노심 출력분포의 미세한 차이로 인해 DNBR 노드 수가 40인 경우 RCOPS와 CETOP-D의 MDNBR 오차가 발생한 것으로 보인다. RCOPS DNBR 모듈의 추가 검증을 위해 노심 축방향 출력분포가 균일한 경우 CETOP-D 대비 RCOPS와 CPCS의 MDNBR을 비교하였다. 이것은 노심 축방향 출력분포 합성법의 영향을 제거하고 DNBR 모듈만의 오차를 평가하기 위한 것이다. **그림 B5**는 노심 축방향 출력분포가 균일한 경우 CETOP-D MDNBR 대비 RCOPS와 CPCS MDNBR의 오차를 나타낸 것이다. CPCS MDNBR은 4%-8% 정도의 오차를 보이고 있는 반면에 RCOPS MDNBR의 오차는 0%이다. 따라서 RCOPS DNBR 모듈의 기능설계와 Database의 개정이 성공적으로 이루어졌음을 알 수 있다.

B4. 노심 열적여유도(DNBR 여유도) 향상 방안 도출 및 평가

CETOP-D 코드를 기반으로 하는 DNBR 계산방법의 RCOPS 적용에 따라 노심 열적여유도를 추가적으로 향상시킬 수 있는 방안을 도출하고 DNBR 여유도 증가량을 예측하였다. CETOP-D 코드는 신속하고 보수적인 DNBR 계산을 위해 조정인자(Tuning factor)를 이용한다. 즉 고온 핵연료집합체 입구 유량인자(FSPLIT)의 값을 조정하여 광범위한 노심 운전 조건에서 항상 보수적인 MDNBR 계산이 이루어지도록 한다. 이로 인해 정상운전 조건에서는 CETOP-D의 MDNBR이 과도한 보수성을 나타낸다. **그림 B6**는 국내 표준원전인 OPR1000 노심의 경우 정상운전시 CETOP-D MDNBR이 기준 DNBR 계산코드(TORC)의 MDNBR에 비해 10% 이상 작은 것을 보여주고 있다. 반면에 원자로 정상운전시 최적화된 CETOP-D 코드의 조정인자(FSPLIT)를 사용하면 과도한 보수성을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 따라서 CETOP-D 코드와 동일한 DNBR 계산 방법론을 적용하는 RCOPS DNBR 모듈의 경우 Database 상수인 FSPLIT 값을 최적화하면 정상운전시 DNBR 여유도를 현저히 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 B1 노심보호연산기 DNBR 모듈(STATIC)의 DNBR 예측오차

시험자료	DNBR 모듈	평균오차(%)	표준편차(%)	상한치(%)
CETOP-D 검증 용 96개 운전조 건	기존 STATIC (DNBR 튜닝)	-1.3	1.4	1.0
	개정 STATIC (20개 노드)	1.1	1.1	2.9
CPC 불확실도 해석용 운전조 건(811 cases)	기존 STATIC (DNBR 튜닝)	-0.4	1.8	2.6
	개정 STATIC (20개 노드)	0.9	0.7	2.1

표 B2 개정 STATIC 모듈시험 결과 예시(세부모듈 6)

시험번호	변수명	예상값	실제값	오차(%)	판정결과
1	FDNB	2.24370	2.24754	0.01	통과
	FDNBF	2.37020	2.37043	0.00	
	FDNBX	-0.06350	-0.06391	0.00	
2	FDNB	1.40631	1.40632	0.00	통과
	FDNBF	2.17061	2.17061	0.00	
	FDNBX	-0.07605	-0.07605	0.00	
3	FDNB	2.73141	2.73140	0.00	통과
	FDNBF	2.21833	2.21832	0.00	
	FDNBX	-0.21036	-0.21036	0.00	
4	FDNB	1.20920	1.20914	0.00	통과
	FDNBF	1.65897	1.65894	0.00	
	FDNBX	0.13805	0.13805	0.00	
5	FDNB	2.49227	2.49227	0.00	통과
	FDNBF	2.61163	2.61161	0.00	
	FDNBX	-0.11117	-0.11118	0.00	

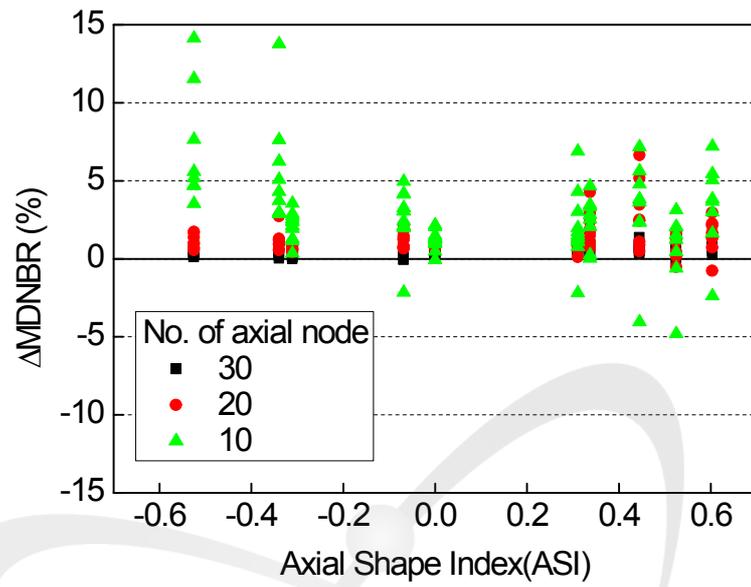


그림 B1 개정 STATIC 모듈의 DNBR 예측오차 분포

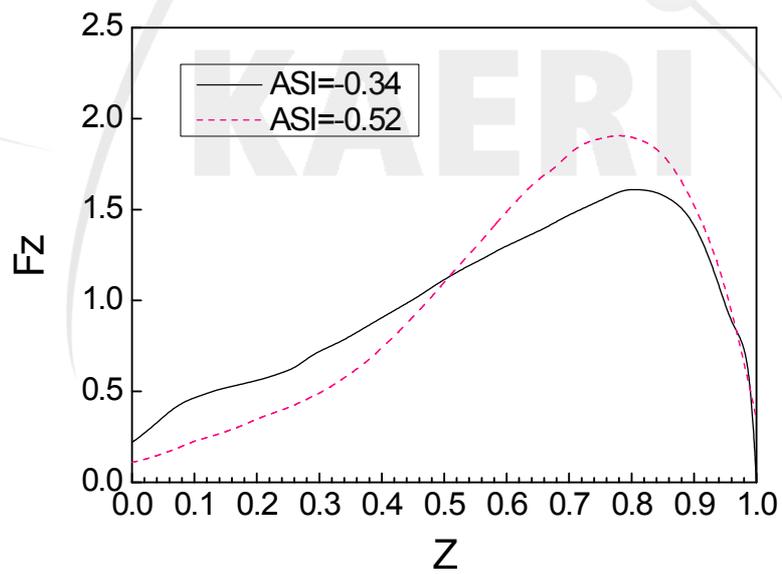


그림 B2 노심 축방향 출력분포

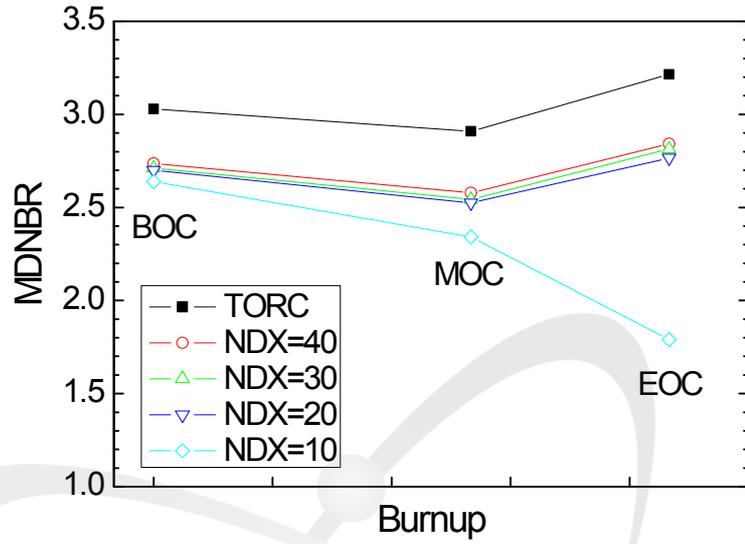


그림 B3 축방향 노드 수(NDX)에 따른 노심 최소 DNBR(MDNBR) 비교

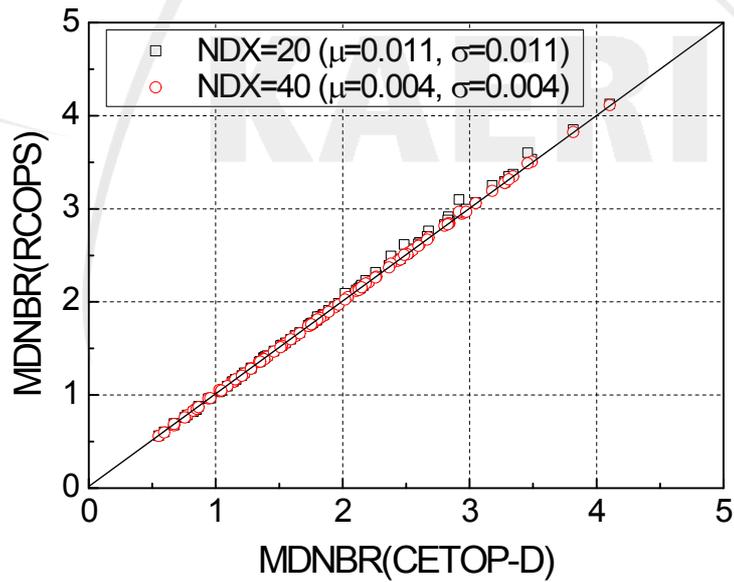


그림 B4 RCOPS DNBR 모듈 기능설계 검증

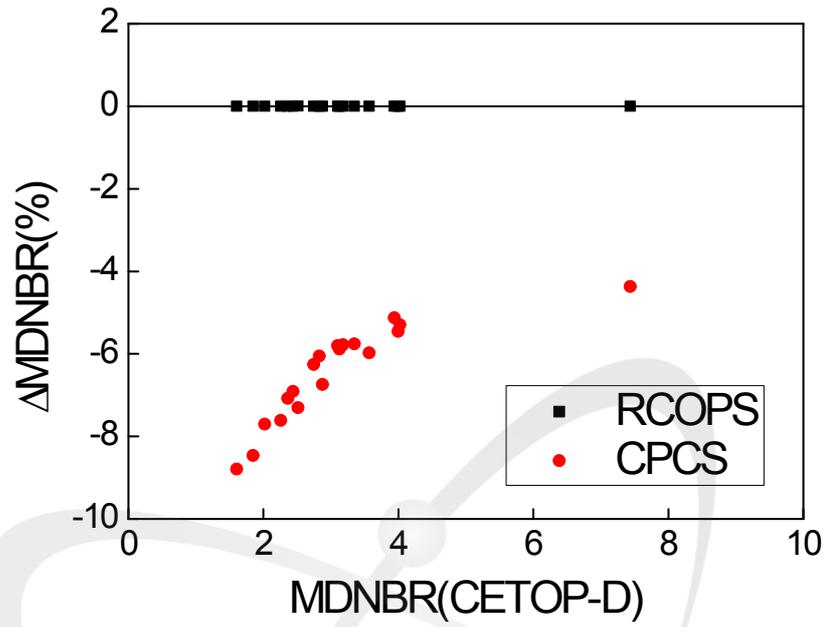


그림 B5 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차(균일 축방향 출력분포)

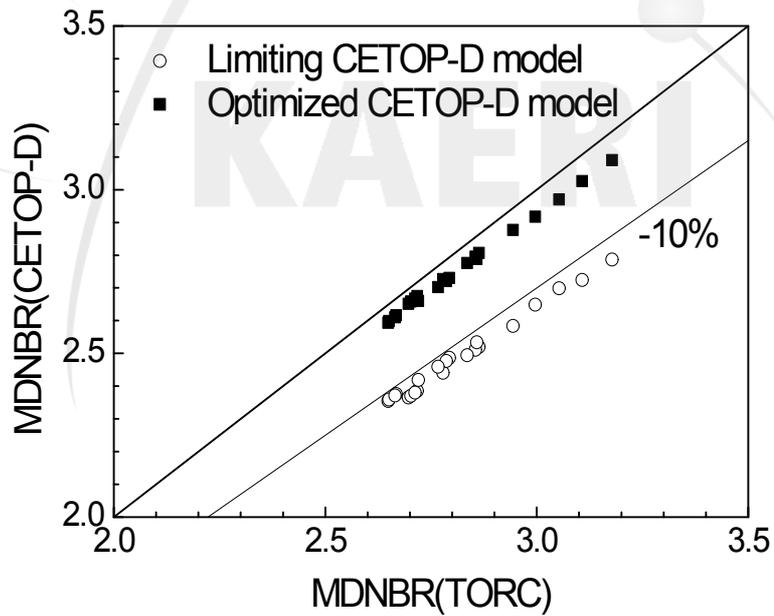


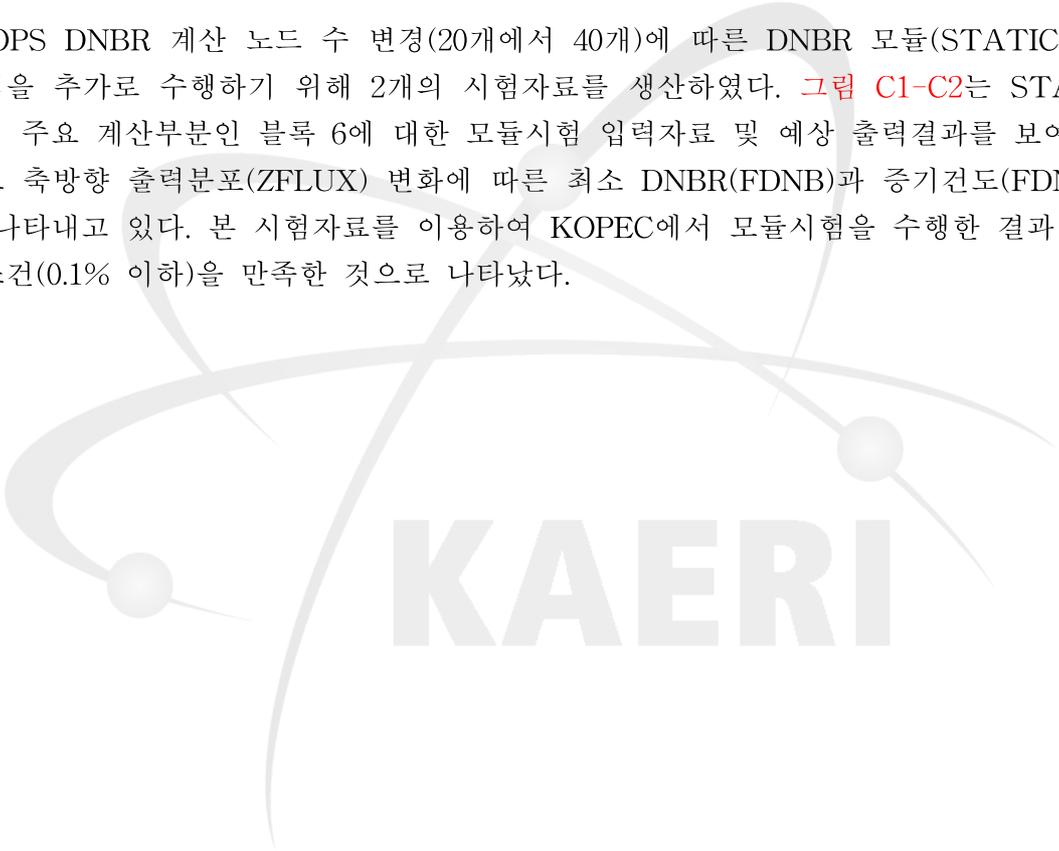
그림 B6 정상운전시 CETOP-D MDNBR의 보수성(OPR1000)

부록 C: 3차년도(2009.8.1 - 2010.7.31) 연구개발 내용 및 결과

C1. STATIC 모듈시험(DNBR 노드 수 변경에 따른 추가시험)

RCOPS 알고리즘 검증을 위한 시험은 구현단계에서 모듈시험 (Module Test)과 단위시험(Unit Test)이 수행되며, 소프트웨어 확인 및 검증업무의 일환으로 이루어진다. 모듈 시험은 여러 개의 Function Block(모듈)으로 구현된 알고리즘에 대해 미리 정의된 입력값을 인가하여 수행결과를 얻은 후 예상 출력값과 비교하는 방식으로 수행한다. 개별 모듈에 대하여 충분한 수의 시험자료를 인가하여 모듈의 모든 계산 흐름을 확인하는 Black Box 시험을 수행한다. 정적인 시험자료를 사용하므로 실행되지 않은 모듈 사이의 계산 흐름은 단위시험(Unit Test)을 통하여 수행된다.

RCOPS DNBR 계산 노드 수 변경(20개에서 40개)에 따른 DNBR 모듈(STATIC)의 모듈 시험을 추가로 수행하기 위해 2개의 시험자료를 생산하였다. 그림 C1-C2는 STATIC 모듈의 주요 계산부분인 블록 6에 대한 모듈시험 입력자료 및 예상 출력결과를 보여주는 것으로 축방향 출력분포(ZFLUX) 변화에 따른 최소 DNBR(FDNB)과 증기건도(FDNBX) 값을 나타내고 있다. 본 시험자료를 이용하여 KOPEC에서 모듈시험을 수행한 결과 통과 판정조건(0.1% 이하)을 만족한 것으로 나타났다.



KAERI

Case S06-02				1	189	R	HPERIM1	23.6017
			hold	1	190	R	HPERIM2	5.9004
			2000	1	191	R	HPERIM3	0.27954
			run	1	192	R	HPERIM4	0.08525
			150	1	193	R	KIJ	1.4
			pulse	1	194	R	ABETA	0.0035
			ao	1	195	R	COMIX	92.843
			di	1	196	R	CU1	1
			do	1	197	R	CU2	3.3
			hsl-s	1	198	R	CU3	1
1	1	R	HF	1	199	R	CAA1	0.234
1	2	R	HFG	1	200	R	CAA2	0
1	3	R	QAVG	1	201	R	CAA3	0
1	4	R	PREF	1	202	R	CBB1	6.46
1	5	R	JSTAR	1	203	R	CBB2	0
1	6	R	DX	1	204	R	CBB3	0
				1	205	R	CCC1	-0.2
				1	206	R	CCC2	0
				1	207	R	CCC3	0
				1	208	R	CNPC1	1
1	7	R	ZFLUX1	1	209	R	CNPC2	0.33
1	8	R	ZFLUX2	1	210	R	CNPC3	1.5
1	9	R	ZFLUX3	1	211	R	SKECDK	1
1	10	R	ZFLUX4	1	212	R	CCEO	0.664966
1	11	R	ZFLUX5	1	213	R	CCHF3	405.32
1	12	R	ZFLUX6	1	214	R	CCHF4	-0.09929
1	13	R	ZFLUX7	1	215	L	NCHANL	4
1	14	R	ZFLUX8	1	216	R	RADIAL1	1
1	15	R	ZFLUX9	1	217	R	RADIAL2	1
1	16	R	ZFLUX10	1	218	R	RADIAL3	1.03823
1	17	R	ZFLUX11	1	219	R	RADIAL4	1.043705
1	18	R	ZFLUX12	1	220	R	D1	7.5127
1	19	R	ZFLUX13	1	221	R	D2	1.8782
1	20	R	ZFLUX14	1	222	R	D3	0.08898
1	21	R	ZFLUX15	1	223	R	D4	0.02714
1	22	R	ZFLUX16	1	224	R	RAA2	1.03412
1	23	R	ZFLUX17	1	225	R	DD2P	0.213437
1	24	R	ZFLUX18	1	226	R	A1	0.25065
1	25	R	ZFLUX19	1	227	R	A2	0.06266
1	26	R	ZFLUX20	1	228	R	A3	0.002925
1	27	R	ZFLUX21	1	229	R	A4	0.001216
1	28	R	ZFLUX22	1	230	R	A2P	0.007342
1	29	R	ZFLUX23	1	231	R	ZFUEL	12.475
1	30	R	ZFLUX24	1	232	R	QFPC	0.975
1	31	R	ZFLUX25	1	233	R	PERIM1	24.8846
1	32	R	ZFLUX26	1	234	R	PERIM2	6.2211
1	33	R	ZFLUX27	1	235	R	PERIM3	0.33209
1	34	R	ZFLUX28	1	236	R	PERIM4	0.12311
1	35	R	ZFLUX29	1	237	R	CCHF5	-0.67757
1	36	R	ZFLUX30	1	238	R	CCHF6	6.8235E-04
1	37	R	ZFLUX31	1	239	R	CCHF7	3.1240E-04
1	38	R	ZFLUX32	1	240	R	CCHF8	-0.083245
1	39	R	ZFLUX33	2			*hsl-r*	*hsl-r*
1	40	R	ZFLUX34	2	1	R	FDNB	1.393440
1	41	R	ZFLUX35	2	2	R	FDNBF	2.170205
1	42	R	ZFLUX36	2	3	R	FDNBFS	1.080133
1	43	R	ZFLUX37	2	4	R	FDNBQLOC	120.185512
1	44	R	ZFLUX38	2	5	R	FDNBX	-0.059671
1	45	R	ZFLUX39	2	6	R	TF	652.723744
1	46	R	ZFLUX40	2	7	L	i1SWVST6	0
1	47	R	ZFLUX41	2	8	L	i1SWVST62	0
				2	9	B	bSWVST6T	0

그림 C2 RCOPS STATIC 모듈시험 입력자료 2(DNBR 계산노드 수=40)

C2. RCOPS 단위시험

Common Q CPCS 대비 개선된 RCOPS 알고리즘에 대하여 RCOPS 검증시험을 수행하여야 한다. CPCS 알고리즘 검증시험은 신고리 1&2호기 Common Q CPCS의 검증시험 방법 및 절차에 따라 수행된다. 이 절차에 따르면 RCOPS 검증시험은 FORTRAN으로 구현된 Off-line 알고리즘 코드의 시험결과와 Single Channel Test Facility (SCTF)에서의 On-line 알고리즘 시험결과를 비교하여 예상 출력값과 실제 출력값이 오차범위 이내임을 확인하는 것이다.

단위시험의 목적은 노심보호계통이 주어진 기능 및 성능요건을 만족하도록 수행되는지를 확인하기 위해 통합된 RCOPS 시스템 환경에서 수행된다. 단위시험의 시험자료는 설비의 기능요건 및 소프트웨어 요건에 따라 정적인 또는 동적인 경우에 대하여 모두 생산하여 수행한다. 이러한 시험자료는 설비의 정상범위 및 비정상범위를 포함하며 비정상범위에 대한 시험에서는 수행결과가 정해진 요건대로 적절히 반응하는지를 시험한다. 단위시험은 입력범위 시험(Input Sweep Test, IST), 동적 소프트웨어 검증시험(Dynamic Software Verification Test, DSVT) 및 실시간 입력 단일변수 시험(Live Input Single Parameter Test, LISP)으로 나누어 수행한다.

입력범위 시험(IST)의 목적은 RCOPS 알고리즘이 허용된 운전영역 내에서 수 많은 입력변수들의 조합이 정상상태로 초기화되는지를 확인하는 것이다. RCOPS의 중앙 연산프로세서인 COPP에 대하여 약 2000개와 제어봉집합체 프로세서인 CEAP에 대하여 약 1200개의 시험자료를 사용한다. 이들 시험자료는 RCOPS 입력변수들의 상한치와 하한치 및 가변상수 변화 범위 등에 대하여 RCOPS 운전영역을 충분히 포함한다. IST의 통과 허용기준은 다음과 같다.

- On-line (SCTF) 및 Off-line (FORTRAN) 2개의 다른 검증시험 도구에서 생산된 DNBR과 LPD 값의 차이로부터 결정된 공정 불확실도 값은 안전해석에 사용된 값 이하이어야 한다
- RCOPS 하드웨어에 통합된 소프트웨어가 모든 검증시험 자료에 대하여 정상상태로 초기화되어야 한다
- 소프트웨어 오류가 발견되지 않아야 한다

그림 C3은 COPP IST 개략도를 나타낸 것으로 시험자료의 생산, 검증, SCTF 시험, IST Fortran 모의 및 통계분석의 절차에 따라 진행된다. COPP IST를 수행하기 위해 필요한 4종의 전산코드(CPCONV, SWPVER, CPCSWTS, LUNCH) 중 RCOPS DNBR 모듈을 사용하는 CPCSWTS 코드를 수정하였다. CPCSWTS 코드의 주요 서브루틴인 CPCD와 SWEEPIN을 각각 수정하였다. 서브루틴 CPCD에서는 주요 DNBR 모듈 변수인 TSAT을 출력하기 위해 출력 배열변수(sweep(65))와 일치시키고 노심유량(GIN) 계산식의 오류를 정정하였다. 서브루틴 SWEEPIN에서는 DNBR 전체 불확실도 가변상수인 BERR1의 Database 주소를 변경하였다. RCOPS의 COPP IST를 위한 CPCSWTS 코드의 서브루틴 CPCD와 SWEEPIN의 상세 변경내용은 다음과 같다.

서브루틴 CPCD 수정내용:

```

SUBROUTINE CPCD
C
C*****
C
C          RCOPS STATIC MODULE (CETOP-D)
C
C          AUGUST 2009
C          Consistent with RCOPS_CPCDndx_2008m01_MDL6dp.f
C          in Rev06/STATICndx
C
C          W. K. IN(KAERI)
C*****
C
COMMON/GENER/IGEN,ITAPE,ITAPEIN,NIN,NOUT
! COMMON/SWEPT/SWEEP(66),ISWEEP(39)
! COMMON/SWEPT/SWEEP(66),ISWEEP(63)
COMMON/SWEPT/SWEEP(90),ISWEEP(7)
!
c wki 2010.7.14
equivalence (sweep(65),TSAT)
c
----- (중략) -----
C   STATIC DNBR PROGRAM..MODULE 5
C
C   CALCULATE INITAL VALUES FOR FLOW AND ENTHALPY.
C

cwki2008.05.6
GIN = MCST * GINREF/0.0036
c   GIN = MCST * GINREF/0.0036 * VIN/0.02177
GINFS=GIN*FSPLIT

서브루틴 SWEEPIN 수정내용:
SUBROUTINE SWEEPIN
* SWEEPIN ACQUIRES INPUT DATA AND SETS UP INITIAL CONDITIONS
* FOR EACH TEST CASE OF THE CPC INPUT SWEEP.
* CALLED FROM CPCSWTS

cwki 2010.7.15   DBASE(2037) = BERR1
dbase(1914) = berr1

```

그림 C4는 COPP(RCOPS) IST 모의 CPCSWTS 코드의 출력(TAPE11)을 도시한 것이다. TAPE11은 2000개의 COPP IST 시험자료 파일로 Case ID와 SCTF 시험결과 및 Off-line 모의 시험결과를 포함하고 있다. 그림 C5는 TAPE11의 변수정의 및 양식(Format)을 보여주는 것으로 9개의 Record로 구성되어 있으며 2번과 9번의 Record가 각 Case 별로 반복된다. SCTF와 Fortran 예측결과의 주요 비교대상 인자는 최소 DNBR(X)과 선출력밀도(LPDDC)이다.

표 C1은 COPP에 대한 IST 예비시험 결과(2010년 7월 15일 기준)를 요약한 것이다. 2000

개의 시험결과중 MDNBR(변수 X) 값이 0.5 이상 10.0 이하인 경우와 선출력밀도(LPDDC)는 노심 평균 선출력밀도의 1000% 미만인 경우만 분석한 결과이다. MDNBR과 LPDDC의 오차는 On-line RCOPS 모의 시험장치(SCTF)의 시험결과와 Off-line RCOPS 모의 전산코드(RCOPS Fortran Simulator)의 예측결과의 차이를 의미한다. MDNBR 오차 분석을 위한 시험자료는 1198 개이며 1159개(약 97%)가 0.5(DNBR unit) 미만의 차이를 보이고 있다. 약 3%의 시험결과는 매우 큰 MDNBR 차이를 보이고 있고 CPC IST의 MDNBR 최대 허용오차가 0.0093인 것을 고려할 때 시험결과가 만족스럽지 못하므로 원인규명이 필요하다. 한편, LPDDC의 경우 분석대상 시험자료 1295 개중 1274개(약 98%)가 25% 이내의 차이를 보이고 있으며 오차가 100%를 초과하는 경우도 17개이다. CPC IST의 LPDDC 최대 허용오차가 2.2% 이므로 On-line 소프트웨어 및 Off-line Fortran Simulator에 대한 추가 검증이 필요하다.

동적 소프트웨어 검증시험(Dynamic Software Verification Test, DSVT)의 목적은 설계기준 사고에 대한 RCOPS 소프트웨어의 동적 시험 결과가 설계 해석에 의한 예측 범위 이내에 있는지를 확인하는 것이다. 검증시험 자료는 보통 49개의 시험자료를 생산하며, 이들 시험자료는 설계기준사고에 대한 RCOPS 소프트웨어의 동적 기능을 충분히 확인할 수 있어야 한다. CPC의 DSVT 시험자료는 통상적으로 49개로 구성되어 있으나 본 과제에서는 RCOPS DSVT를 위해서 대표적인 시험자료 약 10개를 생산하였다. DSVT의 통과 허용기준은 다음과 같다.

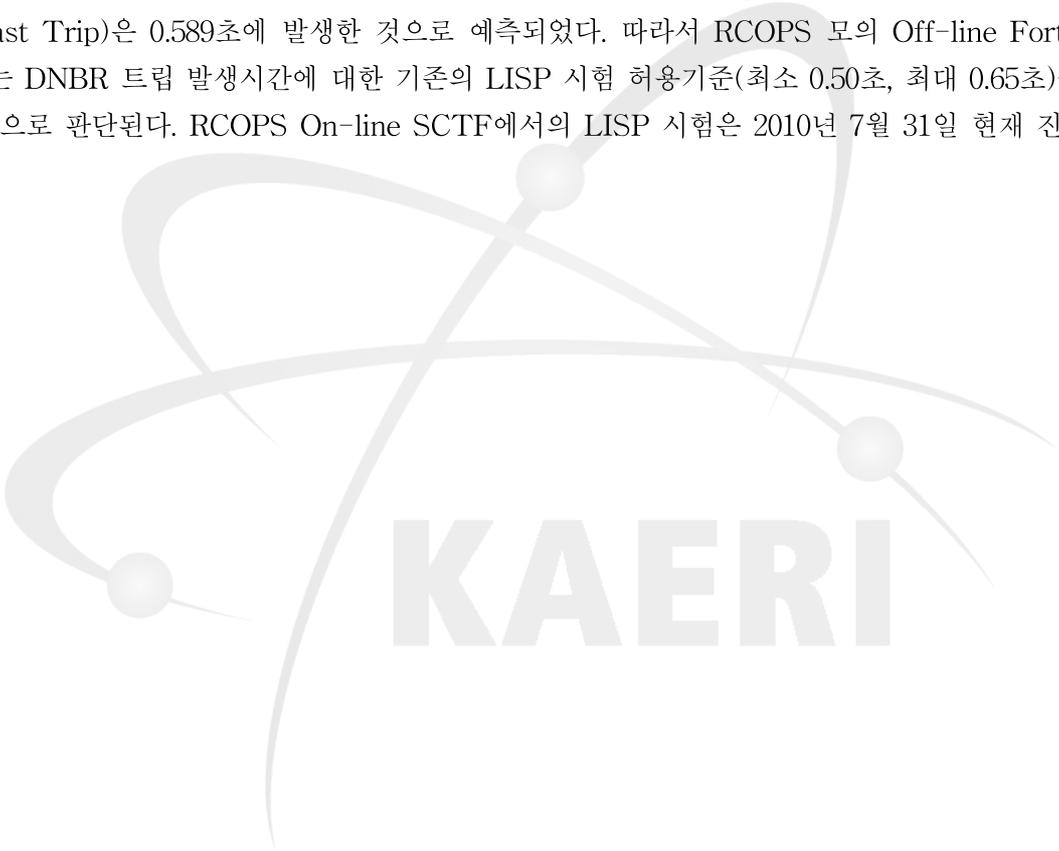
- On-line SCTF 및 Off-line Fortran에서 생산된 초기 DNBR과 LPD 값이 IST에서 결정된 공정 불확실도 허용 범위 내에 있어야 한다
- On-line SCTF 및 Off-line Fortran에서 생산된 동적 반응 시간(또는 원자로정지신호 발생 시간)이 허용 범위 이내에 있어야 한다
- 소프트웨어 오류가 발견되지 않아야 한다

표 C2와 C3는 2010년 7월 1일 기준으로 RCOPS DSVT 예비시험 결과중 Off-line Fortran 프로그램과 On-line SCTF 의 DNBR과 LPD 초기값 및 원자로 정지시간을 비교한 것이다. DNBR 초기값의 최소와 최대 차이는 각각 -0.1623과 0.3038로 신고리 1,2호기의 결과(-0.0030, +0.00023)에 비해 매우 크다. LPD 초기값의 최소와 최대 차이도 각각 -0.03358%와 3.72864%로 신고리 1,2호기의 결과(-0.0026%, +0.0118%)에 비해 매우 큰 것을 알 수 있다. DNBR 및 LPD에 의한 원자로 정지시간도 On-line SCTF와 Off-line Fortran의 시험결과가 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 On-line 소프트웨어 및 Off-line Fortran Simulator에 대한 추가검증이 필요한 것을 확인할 수 있다.

실시간 입력 단일변수 시험(Live Input Single Parameter Test, LISP)은 외부에서 생성되어 RCOPS의 COPP/CEAP 입력 하드웨어를 통해 읽어 들인 COPP/CEAP 입력에 대한 응용소프트웨어와 실행소프트웨어의 실시간 조사를 뜻한다. 통합된 RCOPS 소프트웨어와 하드웨어의 동적 반응이 설계 분석시 예상된 것과 일치함을 검증하고 발전소 조건에 근접한 운전 모드에 대하여 통합된 하드웨어와 소프트웨어의 시스템을 평가하는 것을 목적으로 한다. 발전소 정상 운전 중 주요 운전 변수인 원자로 냉각재 펌프속도, 저온관 및 고온관 온도, 가압기 압력, 노외계측기 신호 및 제어봉(CEA) 위치에

대하여 각각 1개의 운전 변수를 특정한 범위까지 변화시켜 동적 반응을 확인하기 위한 시험자료를 생산한다. 표 C4는 5개의 LISP 시험자료를 보여주는 것으로 DSVT 시험자료중 단일 입력신호를 변화시키는 경우를 선정한 것이다. LISP 시험의 허용기준은 실시간 신호 변화에 의해서 생산된 최소/최대 동적 반응 시간(또는 원자로 정지신호 발생 시간)이 여러 가지 공정 불확실도를 바탕으로 Fortran에서 생산된 허용 범위 이내에 있어야 한다.

그림 C6는 LISP의 첫 번째 시험 입력자료 및 예비 시험결과(Fortran 출력)를 보여주는 것으로 원자로 냉각재 펌프속도가 1초만에 100%에서 90%로 감소하는 경우이다. DNBR 트립 설정치(DNBRLM)는 최대값(1.28050)이고 LPD 트립 설정치(LPDLM)는 최소값(388.88)으로 각각 설정되었다. RCOPS 주요 알고리즘 모듈(FLOW, UPDATE, POWER, STATIC)의 실행주기는 가장 짧게 주어졌다. 냉각재 펌프속도의 감소에 따른 DNBR에 의한 첫 번째 트립(First Trip)이 0.522초에 발생하고 마지막 트립(Last Trip)은 0.589초에 발생한 것으로 예측되었다. 따라서 RCOPS 모의 Off-line Fortran 예측 결과는 DNBR 트립 발생시간에 대한 기존의 LISP 시험 허용기준(최소 0.50초, 최대 0.65초)을 만족하는 것으로 판단된다. RCOPS On-line SCTF에서의 LISP 시험은 2010년 7월 31일 현재 진행중이다.



KAERI

표 C1 COPP(RCOPS) IST 예비시험 결과(2010.7.15)

MDNBR 오차 (DNBR unit)	자료 수 (1198 개)	LPDDC 차이 (% avg)	자료 수 (1295 개)
-6	1	-25	507
-5	2	25	767
-4	2	75	4
-3	7	125	4
-2	11	225	4
-1	10	325	4
-0.5	3	425	2
+0.0	1159	525	3
+0.5	3		

표 C2 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1): DNBR 초기값 및 원자로정지 시간

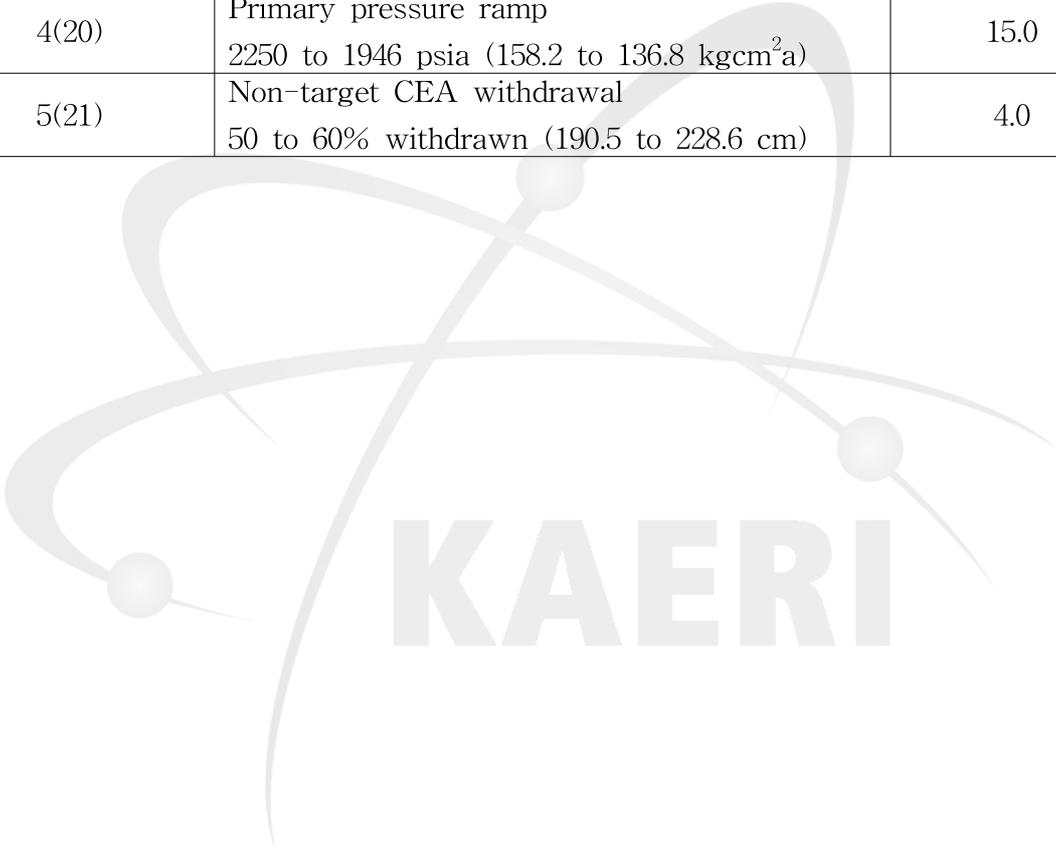
Case No.	DNBR Initial Values (DNBR Units)		DNBR Trip Times (Seconds)	
	Off-line (Fortran)	On-line (SCTF)	Off-line (Fortran)	On-line (SCTF)
1	1.6833	1.5210	0.854	0.8
5	1.6327	1.3921	NT	0.15(JTRP=80)
11	3.7297	4.0335	5.307	0.15
15	6.1346	5.9810	NT	0.15
24	1.7553	1.7012	NT 5.707(AUX)	0.15
27-2	1.6623	1.5133	0.757	0.15

표 C3 RCOPS DSVT 예비시험 결과(2010.7.1): LPD 초기값 및 원자로정지 시간

Case No.	LPD Initial Values (LPDDC)		LPD Trip Times (Seconds)	
	Off-line (Fortran)	On-line (SCTF)	Off-line (Fortran)	On-line (SCTF)
1	235.5269	243.8638	0.857	0.8
5	235.7052	244.4938	NT	0.15(JTRP=80)
11	133.4635	133.4333	5.807 5.307(AUX)	0.15
15	87.8497	87.8202	NT 32.707(AUX)	0.15
24	242.1221	242.0768	NT 5.707(AUX)	0.15
27-2	291.2561	223.4020	0.907	0.15

표 C4 RCOPS LISP 시험자료

Case No. (DSVT case no.)	Description	Transient time (sec)
1(17)	Reactor coolant pump speed ramp 100% to 90% rated speed (1190 to 1071 rpm)	1.0
2(18)	Ex-core detector ramp 100% to 125% power	15.0
3(19)	Cold leg temperature ramp 553.5 to 543.5 °F (289.7 to 282.2 °C)	15.0
4(20)	Primary pressure ramp 2250 to 1946 psia (158.2 to 136.8 kgcm ² a)	15.0
5(21)	Non-target CEA withdrawal 50 to 60% withdrawn (190.5 to 228.6 cm)	4.0



KAERI

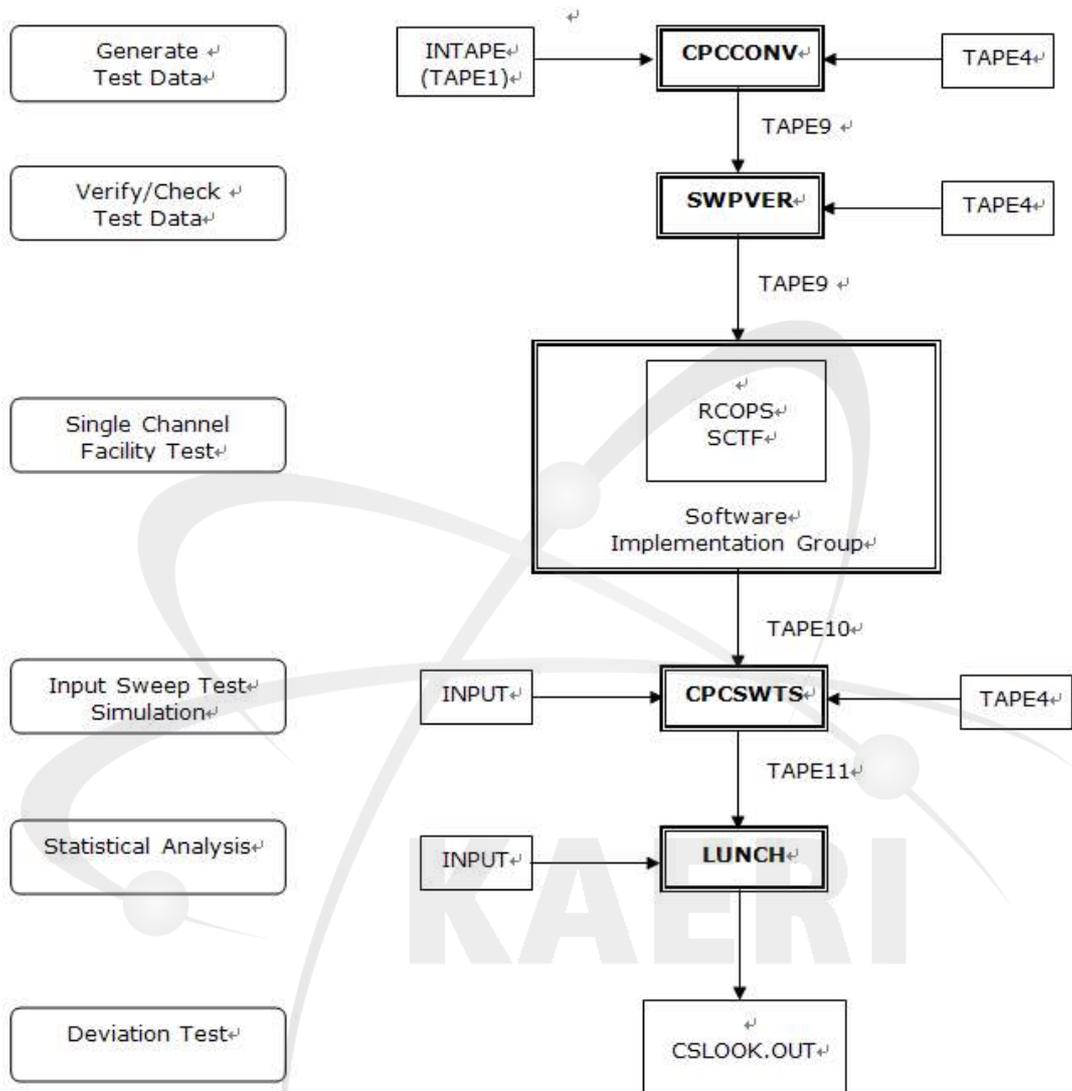


그림 C3 RCOPS COPP 입력범위 시험 개략도

CPC INPUT SWEEP TEST FOR ROOPS										07/15/2010 14:01:22		
1	1.0000	5879.5566	1.1253	107.4859	114.3071	2.0470	114.3186	0.0706	630.6961	1.6381		
524	7999	524.7999	600.8624	600.8624	1929.1101	0.2508	0.3093	0.2912	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1		31174	31174	31174	31174	0	0	1				
1	1.0000	29.6255	1.0200	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	567.6452	1.0600		
0	0.693	5881.4858	0.0148	107.4725	114.2979	2.0478	114.3094	0.0708	630.6723	1.6380		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	78.3043		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
0	0.3068	732.5643	-0.0920	140.3635	144.6607	4.1217	144.6752	0.0711	660.1601	1.9146		
540	6344	540.6344	622.0590	622.0590	2368.4708	0.2609	0.5727	0.3561	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2		25970	25970	25970	25970	0	0	1				
1	1.0000	29.6255	1.0200	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	567.6452	1.0600		
0	0.3055	737.5305	-0.0974	140.3565	144.6633	4.1496	144.6778	0.0677	660.1595	1.9160		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	71.4846		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
0	0.1293	4745.6216	0.1422	79.3352	82.3830	2.2025	82.3912	0.2530	647.2871	1.5623		
557	7233	557.7233	621.1539	621.1539	2166.8903	0.1980	0.2963	0.2689	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3		36094	36094	36094	36094	0	0	1				
1	1.0000	29.6255	1.0200	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	567.6452	1.0600		
0	0.1239	4667.6113	0.0690	79.3095	82.3697	2.1666	82.3779	0.2078	647.2803	1.6034		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	73.3713		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
0	0.0795	5678.5117	0.0271	97.0429	103.4444	2.1607	103.4547	0.0751	627.8221	1.6775		
519	3957	519.3957	593.1735	593.1735	1890.0798	0.2154	0.2694	0.2616	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4		33217	33217	33217	33217	0	0	1				
1	1.0000	29.6255	1.0200	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	567.6452	1.0600		
0	0.0797	5679.5539	0.0270	97.0437	103.4404	2.1612	103.4507	0.0752	627.7997	1.6775		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	72.4598		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
0	0.2568	3658.8911	0.3858	23.4232	63.0320	2.1278	63.0353	0.0623	641.1868	1.5803		
500	2677	500.2677	524.7025	524.7025	2076.9334	0.1201	0.1611	0.1284	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5		43063	43063	43063	43063	0	0	1				
1	1.0000	29.6255	1.0200	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	567.6452	1.0600		
0	0.2568	3659.8588	0.3858	23.4233	63.0320	2.1283	63.0383	0.0621	641.1774	1.5803		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	99.2966		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000		
1	1.5592	222.4926	0.1658	37.4935	45.8901	3.3158	45.8901	-0.1392	627.5916	2.0800		
575	3120	575.3120	594.9636	594.9636	1886.9329	0.1302	0.1340	0.1293	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1996		25214	25214	25214	25214	0	0	4				
1	1.0000	124.6983	1.0383	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	564.4174	1.0600		
1	1.5577	222.6152	0.1657	37.4677	45.8903	3.3177	45.8903	-0.1396	627.5663	2.0803		
100	100.0000	100.0000	100.0000	73.0000	35.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	0.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	73.0000		
13	0.0000	35.0005	35.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	73.0000	13.0000	73.0000		
1	1.3860	252.3608	0.1744	39.3705	48.9665	3.5960	48.9665	-0.5094	629.5204	2.1209		
575	4477	575.4477	596.0746	596.0746	1913.0639	0.1645	0.1642	0.0849	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1997		25214	25214	25214	25214	0	0	4				
1	1.0000	122.9700	1.0380	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	564.4174	1.0600		
1	1.3384	251.9787	0.1569	39.3603	48.9681	3.5905	48.9681	-0.4674	629.4963	2.1818		
100	100.0000	100.0000	100.0000	73.0000	11.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	0.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	73.0000		
13	0.0000	11.0000	11.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	73.0000	13.0000	73.0000		
1	1.4584	260.2200	0.1945	40.6751	51.9812	3.5540	51.9812	0.4186	631.4036	2.1301		
575	5441	575.5441	596.8731	596.8731	1938.8675	0.0807	0.1742	0.1729	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1998		25214	25214	25214	25214	0	0	4				
1	1.0000	69.2261	1.0381	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	564.4174	1.0600		
1	1.4383	259.9357	0.1846	40.7166	51.9885	3.5498	51.9885	0.4102	631.3839	2.1445		
100	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000	70.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	0.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000		
0	0.0000	70.0005	70.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000	0.0000	50.0000		
3	1712	143.2826	0.2507	20.3427	25.9552	3.1548	25.9552	-0.0802	632.3250	2.1110		
574	0660	574.0660	584.9047	584.9047	1951.5498	0.0683	0.0710	0.0710	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1999		25214	25214	25214	25214	0	0	4				
1	1.0000	50.9279	1.0456	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	564.4174	1.0600		
3	1733	143.1608	0.2507	20.3304	25.9509	3.1525	25.9509	-0.0799	632.3051	2.1111		
100	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000	35.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	0.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000		
0	0.0000	35.0005	35.0005	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000	0.0000	50.0000		
0	0.6702	332.8911	0.0473	56.3012	73.5403	3.3828	73.5403	-0.1253	635.6836	2.1382		
576	6791	576.6791	605.8083	605.8083	1998.3257	0.2017	0.2023	0.1933	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2000		25214	25214	25214	25214	0	0	4				
1	1.0000	41.5403	1.0286	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	564.4174	1.0600		
0	0.6697	333.1025	0.0472	56.2844	73.5366	3.3851	73.5366	-0.1256	635.6649	2.1385		
100	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000	11.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	0.0000		
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000		
0	0.0000	11.0000	11.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	50.0000	0.0000	50.0000		

그림 C4 COPP IST 예비시험 결과(TAPE11)

Record	Description	Units	Variable (Program Name)	Format
1	Title	-	Title includes date and time of run	8A10
2	Single channel results X, LPDDC, DXMIN, BDTD, PHICAL, PKMX, PMAX, QASI, TSAT, P1	EU	SWEEP(I), I=1,10	10F10.4
3	TC1, TC2, TH1, TH2 PR, D1, D2, D3, PFLPD1, PFDNBR1, PFLPD2, PFDNBR2	EU	ISWEEP(I), I=11,22	12F10.4
4	Case ID WRAW(I), I=1,4	-	ISWEEP(I), I=1,7, IFLAG	I5, 7I10
5	FC1, PCALIB, TR, KCAL, TPC, EOL, CEANOP, PFMLT, TCREF, BERR1	EU	SWEEP(I), I=48, 56 SWEEP(47)	10F10.4
6	Simulation results X, LPDDC, DXMIN, BDTD, PHICAL, PKMX, PMAX, QASI, TSAT, P1	EU	SWEEP(I), I=57, 66	10F10.4
7	CEA(I), I=1,8	%	SWEEP(I), I=67, 76	10F10.4
8	CEA(I), I=9,16	%	SWEEP(I), I=77, 86	10F10.4
9	CEA(I), I=17,24	%	SWEEP(I), I=87, 90	4F10.4
10 -	Repeat Records 2 through 9 for each case			

그림 C5 COPP IST 시험결과(TAPE11) 변수 및 양식

LISP TEST CASES FOR RCOPS

HIGHEST DNBR, LOWEST LPD, SHORTEST EXECUTIONS

```

LPDLM      1  1  1  388.880
DNBRLM     1  1  2  1.28050
FLOW       1  1 2602 0.0020
UPDATE     1  1 2604 0.0120
POWER      1  1 2606 0.0220
STATIC     1  1 2608 0.3450
/EOB
CASE 17. PUMP RAMP 1.00 TO 0.90 FLOW IN 1.0 SEC. (MOST CONSERVATIVE)
TEND       2  2  1.0
RN1.2      3  4  .02600      .03100
RN3-6      5  8  .22840      .00008156  0.0      .000021
NTOS       9  9  20.
NTYPE      10 10 2.
TINC       11 11 0.08
PTA-PTD    15 18 500.      500.      500.      500.
ALF        19 19 1.0
WINT       50 50 0.0
NW         51 51 2.
WTTAB      52 53 0.0      1.0
W1TAB      77 78 .99996      .89996
W2TAB      102 103 .99996      .89996
W3TAB      127 128 .99996      .89996
W4TAB      152 153 .99996      .89996
NTC        177 177 1.0
TTAB       178 178 0.0
TC1TAB     203 203 553.676
TC2TAB     228 228 553.667
TH1TAB     253 253 612.212
TH2TAB     278 278 612.230
PRTAB      303 303 2251.058
NDT        328 328 1.0
DTTAB      329 329 0.0
D1TAB.1    354 354 .29167
D2TAB.1    379 379 .35530
D3TAB.1    404 404 .32533
KCALFLG    429 429 1.0
CEAINT     502 502 1.0
CPTA-CPTB  705 706 300.      300.
NOARRAYS   995 999 1.0      0.0      0.0      1.0      1.0
END- 17    1  1  1  0.
/EOB
/EOB
/STOP

```

FINAL TRIP STATUS AND TRIP TIMES FOR THIS CASE

TRIP STATUS	KW/FT *TRIPPED*	DNBR *TRIPPED*	PUMP *TRIPPED*	AUX TRIP **RESET**	THSAT **RESET**	KW/FT PRETRIP ***SET***	DNBR PRETRIP ***SET***	CWP ***SET***
LAST TRIP OR PRETRIP TIME (SECONDS)	0.544	0.531	0.531	NO TRIP	NO TRIP	0.544	0.531	0.531

THE LAST TRIP OCCURRED AT 0.544 SECONDS.

THE LAST PRETRIP OCCURRED AT 0.544 SECONDS.

	MINIMUM	MAXIMUM
COMPENSATED POWER	113.1462	113.1613
CALIB. FLUX POWER	105.5997	105.9850
DNBR	1.4792	1.8145
LPD	13.6856	273.7842

	LPD	DNBR	PUMP	AUX	THSAT
FIRST TRIP TIME (SEC)	0.536	0.522	0.522	0.000	0.000
FINAL TRIP TIME (SEC)	0.602	0.589	0.589	0.000	0.000
FINAL RESET TIME (SEC)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

그림 C6 RCOPS LISP 입력자료 및 예비시험 결과(Case 17)

C3. RCOPS 노심 열적여유도 평가

RCOPS 노심의 열적여유도(DNBR Margin)를 평가하기 위해서는 RCOPS 전체 DNBR 불확실도 해석이 필수적이다. 이것은 RCOPS 열적여유도는 가용 DNBR 과출력여유도(Available Overpower Margin, AOPM)에서 RCOPS DNB-OPM 불확실도 인자(BERR1) 및 기타 RCOPS 출력 측정 불확실도(BERR0, BERR2)를 고려해서 계산하기 때문이다. 따라서 우선 RCOPS DNB-OPM의 불확실도를 계산하기 위해서는 노심설계코드, 참조 신속 DNB-OPM 계산코드 및 RCOPS(CPCS)/SCU Simulator가 필요하다. 노심설계코드와 참조 신속 DNB-OPM 계산코드는 기존의 CPCS 불확실도 해석에 사용중인 ROCS 코드와 CETOP-D 코드를 활용하였다. RCOPS/SCU Simulator인 RCOPSIM 코드는 CPCS/SCU Simulator(CPCSIM)의 DNBR 계산모듈을 개선된 RCOPS DNBR 모듈로 수정하여 개발하였다.

본 연구에서는 RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석을 위해 RCOPSIM 코드와 RCOPS DNBR 모듈 Database를 사용하였다. 울진 4호기 10주기에 대한 RCOPS와 CPCS의 DNBR 불확실도 해석을 수행하였다. DNBR 불확실도는 DNBR 계산모델의 불확실도 및 DNBR 전체 불확실도로 나누어 분석하였다. DNBR 계산모델의 불확실도 해석은 기준 CETOP-D DNBR 대비 RCOPS 및 CPCS DNBR의 오차를 분석하여 DNBR 계산모델만의 불확실도를 평가하기 위한 것이다. 한편, DNBR 전체 불확실도는 MSCU 방법론을 이용하여 모든 불확실도 요소들을 결합하여 RCOPS와 CPCS의 DNB-OPM 전체 불확실도 인자(BERR1)를 결정하는 것이다. RCOPS 및 CPCS에 대한 BERR1 값을 사용하여 대표적인 노심 운전조건에서 계산된 MDNBR을 비교함으로써 RCOPS와 CPCS 노심의 열적여유도를 평가하였다.

RCOPS DNBR 모듈은 CPCS DNBR 모듈(CETOP2)을 CETOP-D 코드로 대체한 것이므로 RCOPS DNBR에 대한 불확실도 해석은 CPCS와 동일한 방법으로 수행된다. 즉, CPCS DNBR 전체 불확실도 해석(Overall Uncertainty Analysis, OUA)은 실제 노심조건에 대해서 전 주기를 통해 95%의 확률과 95%의 신뢰도 수준으로 CPCS DNBR의 보수성을 보증하기 위한 것이다. DNBR 전체 불확실도 해석에 필요한 입력들은 ROCS(3차원 노심핵설계 코드) 모델, CETOP-D 모델, 노심 운전범위, 계측기 불확실도, RCOPS 불확실도 해석코드 등이다. MSCU(Modified Statistical Combination of Uncertainties) 방법론을 이용하여 RCOPS DNBR 전체 불확실도 인자를 결정한다.

RCOPS DNBR 전체 불확실도 인자는 DNBR 모듈의 모델 불확실도, 노심출력분포 합성 불확실도, 계측기 측정신호의 불확실도와 DNBR Limit 불확실도 등과 같은 모든 불확실도 요소들을 통계적으로 결합하여 결정한다. MSCU 방법론에 포함되는 불확실도 인자는 표 C5와 같이 계통변수(System Parameter)의 불확실도와 상태변수(State Parameter)의 불확실도로 나눌 수 있다. 또한 그림 C7은 DNBR 전체 불확실도 해석을 위한 MSCU 방법론의 개요를 보여준다.

RCOPS와 CPCS의 DNBR 전체 불확실도 해석은 **그림 C8**의 불확실도 해석절차에 따라 수행된다. 주요 연소도 구간에 대하여 원자로 노심 모사 전산 코드인 ROCS로부터 계산된 약 1200개의 출력분포를 각각 이용한다. ROCS 코드로 계산된 3차원 출력침투계수(Fq)와 참조 신속 DNBR 설계코드인 CETOP-D로 계산된 DNB-OPM(DNB Overpower Margin)과 RCOPS(CPCS) 불확실도 해석코드로 계산한 DNB-OPM을 비교하여 그 오차를 통계적인 방법으로 분석한다. RCOPS 불확실도 해석의 주요 결과는 DNBR 전체 불확실도 인자(BERR1)이며 주요 연소도에 대한 해석 결과 중 가장 큰 값을 보수적으로 결정하여 전 주기 동안 사용한다.

DNBR 불확실도 해석코드

RCOPS 노심의 열적여유도(DNBR Margin)를 평가하기 위해서는 RCOPS DNB-OPM 불확실도 인자(BERR1)를 계산해야 한다. 따라서 우선 RCOPS DNB-OPM의 불확실도를 계산하기 위해서는 노심설계코드, 참조 DNB-OPM 계산코드와 RCOPS/SCU Simulator가 필요하다. 노심설계코드와 참조 DNB-OPM 계산 전산코드는 기존의 CPCS 불확실도 해석에 사용중인 ROCS 코드와 CETOP-D 코드를 활용한다. RCOPS/SCU Simulator인 RCOPSIM 코드는 CPCS/SCU Simulator(CPCSIM)의 DNBR 계산모듈을 개선된 RCOPS DNBR 모듈로 수정하여 개발하였다.

CPCS 전체 불확실도 해석코드(CPCSIM)는 주 프로그램과 다수의 부 프로그램(서브루틴)으로 구성되어 있다. RCOPS 전체 불확실도 해석코드(RCOPSIM v1m0)는 CPCSIM 코드의 주 프로그램(cpsim.f)과 7개의 부 프로그램(cetop2.f, coos.f, histry.f, opm.f, cpcd.f, update.f, updrv.f)을 수정하여 개발되었다. 각각의 프로그램 수정 내용은 아래와 같으며 부 프로그램인 cpcd.f는 DNBR 계산을 수행하는 핵심 모듈로 전체내용이 변경되었다.

주 프로그램인 cpsim.f의 변경내용은 다음과 같은 RCOPSIM 코드의 버전 정보 및 권리사항(Copyright)이다.

```

PROGRAM CPCSIM_RCOPS
C
C
C          CPCSIM  CPC/CETOP-2/SCU SIMULATOR
C          VERSION 4 MOD 08
C          10/21/97
C
C          S. GRILL
C
C (C) COPYRIGHT 1990 - 1997, ABB - COMBUSTION ENGINEERING,INC.
C          ALL RIGHTS RESERVED
C
C          MODIFIED CPCSIM FOR RCOPS OUA
C          VERSION 1 MOD 00
C          5/31/2010
C          WANG-KEE IN
C
***** (중략) *****

```

```

C WKI 2010.5.25
  VERMOD='RCOPSIM V1M0'
  VERDAT='05/25/10'
C
  VERMD1='VERSION ' // VERMOD(10:10) // ' MOD ' // VERMOD(12:12)
C
***** (중략) *****
  WRITE(NOUT,60) VERMD1,VERDAT,VERDAT(7:8),JSN,CURDAT,CURTIM,NETNOD
  1 ,INFIL1(1:ILEN1),OUTFL1(1:ILEN2)
60  FORMAT(////////38X,'*****'
1     /,38X,'*                               *'
2     /,38X,'*           CPCSIM_RCOPS        *'
3     /,38X,'*       CPC/CETOP2/SCU SIMULATOR *'
4     /,38X,'*           ',A16,'            *'
5     /,38X,'*           ',A8,'            *'
6     /,38X,'*                               *'
7     /,38X,'*       (C) COPYRIGHT 1986 - 19',A2,' *'
8     /,38X,'* ABB - COMBUSTION ENGINEERING, INC. *'
9     /,38X,'*       ALL RIGHTS RESERVED      *'
A     /,38X,'*                               *'
B     /,38X,'*           S. GRILL            *'
C     /,38X,'*                               *'
D     /,38X,'*       (C) COPYRIGHT 2010      *'
E     /,38X,'*           KAERI              *'
F     /,38X,'*       ALL RIGHTS RESERVED    *'
G     /,38X,'*                               *'
H     /,38X,'*           WANG-KEE IN        *'
I     /,38X,'*                               *'
J     /,38X,'*****'
K  /,28X,'JOB IDENTIFIER: ',A8,3X,'DATE/TIME: ',A8,3X,A8
L  /,43X,'JOB RUNNING ON NODE: ',A8,; /,5X,'INPUT DATA FILE = ',A
M  /,5X,'OUTPUT FILE      = ',A)

```

6개 부 프로그램(cetop2.f, coos.f, opm.f, update, updrv.f)의 수정내용은 RCOPS DNBR 모듈의 Database 변경에 따른 다음과 같은 Common 변수 BICNST의 주소 변경이다.

```

SUBROUTINE CETOP2 (PRESS,TIN,G,POWER,P1ST,PF,AXPD,DNBR,QUAL)
***** (중략) *****
C wki 2010.5.25 Modification for RCOPS DNBR Module DB
COMMON /BICNST/ DUM1(313),THOTL,THOTH,DUM2(174),TR,DUM3(79),AHF1
1 ,AHF2,AHF3,AHF4,AHFG1,AHFG2,AHFG3,AHFG4,AEN11,AEN12,AEN13,AEN14
2 ,AEN21,AEN22,AEN23,AEN24,AEN31,AEN32,AEN33,AEN34,AEN41,AEN42
3 ,AEN43,AEN44,DUM4(1306),QAVG,DUM5(145),GAVG,DUM6(4454)

```

```

SUBROUTINE COOS
***** (중략) *****
C
C wki 2010.5.25 Modification for RCOPS DNBR Module DB
COMMON /BICNST/ SPACE1(1899),QAVG,SPACE2(4600)

```

```

SUBROUTINE OPM
***** (중략) *****
C wki 2010.5.25 Modification for RCOPS DNBR Module DB
COMMON /BICNST/ SPACE1(600),AA,SPACE2(1298),QAVG,SPACE3(223)

```

1 ,EDNB1,EDNB2,SPACE4(4375)

SUBROUTINE UPDATE

***** (중략) *****

C wki 2010.5.25 Modification for RCOPS DNBR Module DB

COMMON /BICNST/ DUM1(569),AHF1,AHF2,AHF3,AHF4,AHFG1,AHFG2

1 ,AHFG3,AHFG4,AEN11,AEN12,AEN13,AEN14,AEN21,AEN22

2 ,AEN23,AEN24,AEN31,AEN32,AEN33,AEN34,AEN41,AEN42,AEN43,AEN44

3 ,CCE0,CCE3,CCE4,CCE5,CCE6,CCE7,CCE8,AA,BB,DUM2,QLCOF1,QLCOF2

4 ,DNBCV1,DNBCV2,DUM3(1438),GAVG,DUM4(4454)

SUBROUTINE UPDDRV

***** (중략) *****

C

COMMON /BICNST/ DUM(489),TR,DUM1(110),AA,BB,DUM2(1443)

1 ,GAVG,DUM3(4454)

부 프로그램인 histry.f의 수정내용은 RCOPS DNBR 모듈의 Database 변경에 따른 다음과 같은 DB 변수(GAVG, EDNB1, EDNB2)의 주소 변경이다.

SUBROUTINE HISTRY

***** (중략) *****

C

C 13. GAVG (DESIGN CORE CETOP2, 2046 2046

C AVG. MASS FLUX) UPDATE

C

C 15. EDNB1,EDNB2,AA,BB OPM,UPDDRV, 2124,2125 2124,2125

RCOPSIM 코드의 핵심 서브 서브루틴인 CPCD는 CETOP-D 코드를 기반으로 개발한 DNBR 계산 모듈이며 주요 소스 코드(cpcd.f)는 다음과 같다.

SUBROUTINE CPCD
INCLUDE 'INOUT.BLK'

C

C*****

C

C RCOPS STATIC MODULE (CETOP-D) *

C

C MAY 2010 *

C Consistent with RCOPS_CPCDndx_MDL6dp_Rev08.f *

C in Rev08 *

C

C W. K. IN(KAERI) *

C

C*****

C

COMMON /CLOCK1/TIME
COMMON/TITLE/TITLE(8), PAGE, LINE
COMMON /AOUT2/AOUT(20)
COMMON/BOU2/BOU(60)
COMMON /COU2/COU(80)

```
COMMON /DOUT1/DOUT(60)
COMMON/CPEDIT/DUMMY(45),IDCNT,DDTIME,IDOUT(10),DUMMY1(3)
DIMENSION XEDIT(60),IDOUT(2,10)
```

----- (중략) -----

```
COMMON /CTPINP/FZ(50),P1ST,PFST,PRST,MCST,TCMAX,PHICST
C2009.8.9 1HIN,HFIN,HFGIN
```

```
COMMON /BICNST/ ADUM1(489),TR,ADUM2(1261),SPAC1(148),
```

```
C-----
C MODULE 2 CONSTANTS BEGIN IN THE DATA BASE ARRAY AT LOCATION 1900
C
. QAVG,QFPC,P1B2,P1B3,ASIB2,ASIB3,TB2,TB3,PPB2,PPB3,
. E1,E2,FSPLT1,FSPLT2,BERR1,RADIAL(4),SPAC02(21),
```

```
C-----
C MODULE 3 CONSTANTS BEGIN IN THE DATA BASE ARRAY AT LOCATION 1940
C
. BDUM1(2),ZFUEL,FZCOF(9),SPAC03(48),
```

```
C-----
C MODULE 4 CONSTANTS BEGIN IN THE DATA BASE ARRAY AT LOCATION 1970
C WKI.2007.01.10 DELETED
```

```
C-----
C MODULE 5 CONSTANTS BEGIN IN THE DATA BASE ARRAY AT LOCATION 2000
C
```

----- (중략) -----

```
C-----
C MODULE 8 CONSTANTS BEGIN IN THE DATA BASE ARRAY AT LOCATION 2120
C
. CCHF5,CCHF6,CCHF7,CCHF8,EDNB1,EDNB2, SPAC08(4),
```

```
C-----
C MODULE 9 CONSTANTS BEGIN IN THE DATA BASE ARRAY AT LOCATION 2130
C
. THLIM, TINLIM, HTR00, HTR01, HTR10, HTR11, HTR20, HTR21, HTR30,
. HTR31, THERR, SPAC09(9),TDI(5),ADUM3(4346)
```

```
C-----
C
DIMENSION INTA(6500)
EQUIVALENCE (ADUM1(1),INTA(1))
EQUIVALENCE (INTA(1940),NDX), (INTA(1941),NDXFZ),
1 (INTA(2000),NCHANL), (INTA(2062),NGRID)
```

```
REAL MCST,LNX
```

```
C
DIMENSION PDST(50),FZST(50),PHIC(50),PHIC21(50)
DIMENSION QUALN(50),GPR4(50),QPRIM4(50),CHH(50)
CWKI2009.3.21
DIMENSION XXL(50),PHICM(50),PHICN(50),X(50)
```

```
DIMENSION DDOUT(14),DSEDIT(50)
```

```
C
INIT = 1
```

```
C-----
C
```

```

C   STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 1
C
C   PICK UP VALUES CALCULATED BY HIGHER PRIORITY PROGRAMS.
C
C   INPUTS:
C       AOUT   = FLOW PROGRAM OUTPUT BUFFER
C       BOUT   = UPDATE PROGRAM OUTPUT BUFFER
C       COUT   = POWER PROGRAM OUTPUT BUFFER
C
C   OUTPUTS:
C       MCST   = NORMALIZED CORE COOLANT MASS FLOW RATE
C       TH     = AVERAGE HOT-LEG TEMPERATURE
C       TC1    = COLD-LEG (1) TEMPERATURE
C       TC2    = COLD-LEG (2) TEMPERATURE
C       TH1    = HOT-LEG (1) TEMPERATURE
C       TH2    = HOT-LEG (2) TEMPERATURE
C       TCMAX  = MAXIMUM COLD-LEG TEMPERATURE
C       PRST   = PRIMARY COOLANT SYSTEM PRESSURE
C       PHICST = MAXIMUM COMPENSATED CORE AVERAGE HEAT FLUX
C       PFST   = CEA DEVIATION PENALTY FACTOR FOR DNBR
C       HIN    = CORE INLET ENTHALPY
C       HF     = SATURATED LIQUID ENTHALPY
C       HFG    = LATENT HEAT OF VAPORIZATION
C       PDST   = 20 ELEMENT ARRAY OF HOT PIN POWER DISTRIBUTION
C       PDAVG  = AVERAGE OF HOT PIN POWER DISTRIBUTION

```

CODE

```

100 CONTINUE
    MCST   = AOUT( 6)
    TH     = BOUT(12)
    TC1    = BOUT(13)
    TC2    = BOUT(14)
    TH1    = BOUT(15)
    TH2    = BOUT(16)
    TCMAX  = BOUT(19)
    PRST   = BOUT(20)
    PHICST = BOUT(21)
    PFST   = BOUT(22)
    HIN    = BOUT(23)
    HF     = BOUT(24)
    HFG    = BOUT(25)

```

```

C
    DO 110  I = 1, 20
    PDST(I) = COUT(I+26)
110 CONTINUE
    PDAVG   = COUT(50)

```

```

C
C   END OF MODULE 1
C
    GO TO (200,5000) INIT

```

```

C-----
C
C   STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 2
C
C   CALCULATE POWER DISTRIBUTION DATA FOR DNBR CALCULATION.
C
C   INPUTS:
C       TCMAX  = MAXIMUM COLD-LEG TEMPERATURE
C       PRST   = PRIMARY COOLANT SYSTEM PRESSURE

```

```

C      PHICST  = MAXIMUM COMPENSATED CORE AVERAGE HEAT FLUX
C      PFST    = CEA DEVIATION PENALTY FACTOR FOR DNBR
C      PDAVG   = AVERAGE OF HOT PIN POWER DISTRIBUTION
C      PDST(20) = 20 ELEMENT ARRAY OF HOT PIN POWER DISTRIBUTION
C
C      OUTPUTS:
C      PHIC(20) = 20 ELEMENT ARRAY OF HOT-PIN HEAT FLUX WITH PENALTY
C      QCORE    = CORE AVERAGE HEAT FLUX WITH PENALTY
C      QHOT     = HEAT FLUX IN THE FUEL + CLADDING
C      TIN      = CORE INLET TEMPERATURE
C      PREF     = REACTOR COOLANT SYSTEM PRESSURE
C      P1ST     = INTEGRATED RADIAL PEAKING FACTOR
C      FSPLIT   = FLOW STARVATION FACTOR TO HOT ASSEMBLY
C
CODE
200 CONTINUE

      GP1      = TR*PFST
      DO 210   I = 1, 20
      PHIC(I)  = GP1*PDST(I)
210 CONTINUE
      P1ST     = PDAVG * TR
      SASI1    = 0.
      SASI2    = 0.
      DO 220   I = 1, 10
      SASI1    = SASI1 + PHIC(I)
      SASI2    = SASI2 + PHIC(I+10)
220 CONTINUE
      QASI     = (SASI1-SASI2)/(SASI1+SASI2)
C
C      CALCULATE INLET COOLANT MASS FLUX AND REGION-DEPENDENT PARAMETERS.
C
      TIN = TCMAX
      PREF = PRST
C
      IF(P1ST .LT. P1B2 .OR. P1ST .GE. P1B3) GO TO 230
      IF(QASI .LT. ASIB2 .OR. QASI .GE. ASIB3) GO TO 230
      IF(TCMAX .LT. TB2 .OR. TCMAX .GE. TB3) GO TO 230
      IF(PRST .LT. PPB2 .OR. PRST .GE. PPB3) GO TO 230
      FSPLIT   = FSPLT1
      PFRGN    = E1
      GO TO 240
230 FSPLIT   = FSPLT2
      PFRGN    = E2
240 CONTINUE
      QCORE = (0.01 * PHICST) * QAVG * BERR1 * PFRGN
      QHOT = QFPC * QCORE
C
C      END OF MODULE 2
C
C-----
C
C      STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 3
C
C      CALCULATE 21-POINT AND 40-NODE POWER DISTRIBUTION DATA.
C
C      INPUTS:
C      PHIC    = 20 ELEMENT ARRAY OF HOT PIN POWER DISTRIBUTION WITH PENALTY
C      QHOT    = HEAT FLUX IN THE FUEL PLUS THE CLADDING

```

```

C
C   OUTPUTS:
C     ZFLUX  = NDXP1 ELEMENT ARRAY OF HOT-PIN POWER DISTRIBUTION
C     JSTAR  = NODE NUMBER TO START SEARCHING MIN. DNBR
C     DX     = AXIAL NODE LENGTH
C     NDXP1  = NUMBER OF AXIAL NODE POINTS FOR THE DNBR CALCULATION
C     X      = LOCATIONS OF THE HOT-PIN POWER DISTRIBUTION FOR THE DNBR
CALC.
C     PHICM  = NDX-NODE RELATIVE HOT-PIN HEAT FLUX DISTRIBUTION
C
CODE
  300 CONTINUE
C

```

----- (중략) -----

```

      DO 310 K = 3, 19
      PHIC21(K) = (-PHIC(K-2)+FZCOF(9)*PHIC(K-1)+FZCOF(8)*PHIC(K)
      .
      - PHIC(K+1))*FZCOF(4)
310 CONTINUE

      DO 305 K = 1,21
305 IF (PHIC21(K) .LT. 0.01) PHIC21(K) = 0.01
      S20 = 0.
      DO 320 K = 1, 20
      S20 = S20 + PHIC(K)
320 CONTINUE
      S21 = PHIC21(1) + 4.0*PHIC21(20) + PHIC21(21)
      DO 330 K = 2,18,2
      S21 = S21 + 4.0*PHIC21(K) + 2.0*PHIC21(K+1)
330 CONTINUE
      S21 = S21 / 3.0
      DO 340 K = 1, 21
      PHIC21(K) = PHIC21(K) * S20 / S21
340 CONTINUE
C
      DX = ZFUEL/FLOAT(NDX)
      NDXP1 = NDX + 1
      NDXPZ = NDXFZ + 1
C
CWKI2009.3.25
C
C --- COMPUTE NDX-NODE AND NDXP1-POINT POWER DISTRIBUTIONS BY INTERPOLATION
C     BUT, SKIP THE INTERPOLATION FOR NDX=20
C
C     PHICN(NDXP1) = NDXP1-POINT POWER DISTRIBUTION
C     PHICM(NDX) = NDX-NODE POWER DISTRIBUTION
C
      IF(NDX.EQ.20) THEN
      DO 345 I=1,NDX
345 PHICM(I)=PHIC(I)
      DO 347 I=1,NDXP1
347 PHICN(I)=PHIC21(I)
      GO TO 355
      ENDIF
C
C --- SET EQUALLY SPACED AXIAL POWER LOCATIONS
C .....
DO 350 I = 1, NDXPZ

```

```

350 XXL(I) = FLOAT(I-1)/FLOAT(NDXPZ-1)
C
      DDX = 1./FLOAT(NDX)
N1=NDXP1
AA=0.0
356 DO 353 J=1,N1
      DO 351 I=1,NDXPZ-2
          IF(AA.LE.XXL(I+1)) GO TO 352
351 CONTINUE
352 CONTINUE

C      FIRST EXPRESSION IS EXCEPTION -- BOTH XXL VALUES SAME

      FZZ = .5 * ( PHIC21(I)+PHIC21(I+1) )

C      NORMALLY, IF IS TRUE -- USE USUAL INTERPOLATION/EXTRAPOLATION

      IF(XXL(I+1)-XXL(I).GT.0.0001) FZZ=PHIC21(I+1)-
1((PHIC21(I+1)-PHIC21(I))*(XXL(I+1)-AA))/(XXL(I+1)-XXL(I))
      IF(N1.EQ.NDX+1) PHICN(J)=FZZ
      IF(N1.EQ.NDX) PHICM(J)=FZZ
353 AA=AA+DDX
      IF(N1.EQ.NDX) GO TO 355
      N1=NDX
      AA=DDX/2.
      GO TO 356
355 CONTINUE

C
C --- CALCULATE NDXP1-POINT HOT-PIN POWER DISIBUTION: ZFLUX(J)
C
      DO 381 J=1,NDXP1
          ZFLUX(J) = QHOT*PHICN(J)
381 X(J) = FLOAT(J-1)*DX
C
C --- DETERMINE THE AXIAL NODE (JSTAR) TO START SEARCH FOR CHF
C
      DO 382 J=2,NDXP1
          IF(ZFLUX(J).LE.ZFLUX(J-1)) GO TO 385
382 CONTINUE
      JSTAR=NDXP1
385 JSTAR=J
C
C      END OF MODULE 3
C
C-----
C
C      STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 4 (DELETED)
C
C      CALCULATE CHF CORRELATION(CE-1/KCE-1) PARAMETERS.
C
C-----
C
C
C      STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 5
C
C      CALCULATE INITAL VALUES FOR FLOW AND ENTHALPY.
C
C      INPUTS:
C          MCST      = CORE AVERAGE FLOW RATE

```

```

C      TIN      = CORE INLET TEMPERATURE
C      PREF     = REACTOR COOLANT SYSTEM PRESSURE
C      FSPLIT   = FLOW STARVATION FACTOR TO HOT ASSEMBLY
C
C      OUTPUTS:
C      A32      = RATIO OF THE FLOW AREA FOR CH. 3&4 W.R.T CH.2
C      A42      = RATIO OF THE FLOW AREA FOR CH. 4 W.R.T CH.2
C      CHH(1)   = ENTHALPY TRANSPORT COEFF.
C      CH2,CH(2) = INITIAL AVG. ENTHALPY TRANSPORT COEFFICIENT
C      HECO     = PRODUCT OF CONDUCTIVITY AND PRANDTL NUMBER
C      DHYD(I)  = HYDRAULIC DIAMETER OF CHANNEL I
C      F(I)     = INLET FLOW RATE OF CHANNEL I
C      H(I)     = INLET ENTHALPY OF CHANNEL I
C      H2P(1)   = INLET ENTHALPY OF CHANNEL 2P
C      H22(1)   = INLET ENTHALPY OF CHANNEL 22
C
CODE
C
C --- Calculate the initial enthalpy transport coefficient: CH22
      CH2=0.0
----- (중략) -----
      IF(CH2.EQ.0.) CH(2)=CH22
C --- Calculate the intermediate array (HECO) to calculate Product of conductivity
C and Prandtl number to the 0.4 power ( $k*Pr^{0.4}$ )
      COE=0.0
      IF(PREF.LE.PDI(1))IL=1
      IF(PREF.GE.PDI(5)) IL=5
      IF(PREF.GE.PDI(5).OR.PREF.LE.PDI(1)) GO TO 520
      DO 500 I=1,4
      IF(PREF.GT.PDI(I).AND.PREF.LE.PDI(I+1)) IL=I
500 CONTINUE
      COE=(PREF-PDI(IL))/(PDI(IL+1)-PDI(IL))
----- (중략) -----
C --- Calculate initial conditions
      A32=(AFLOW(3)+AFLOW(4))/AFLOW(2)
      A42=AFLOW(4)/AFLOW(2)
C
      IF(TIN.GT.580.0) GO TO 550
----- (중략) -----
      GO TO 560
----- (중략) -----
cwki2007.01.29
c      GIN = MCST * GINREF/0.0036 * VIN/VINREF
cwki 2010.5.23 change GINREF/0.0036 to GAVG
c      GIN = MCST * GINREF/0.0036
      GIN = MCST * GAVG

      GINFS=GIN*FSPLIT
      DO 570 I=1,NCHANL
      DHYD(I)=4.*AFLOW(I)/PERIM(I)
      F(I) =GINFS*AFLOW(I)

```

```

570 H(I) =CHPT
      F(1)=GIN*AFLOW(1)
      H2P(1)=CHPT
      H22(1)=CHPT
      IF(CH2.EQ.0.0)CH(2)=CZ
      CHH(1)=CH(2)

```

```

C
C END of MODULE 5

```

```

C-----

```

```

C
C   STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 6

```

```

C
C   COMPUTE CORE/HOT-ASSEMBLY & BUFFER/HOT-CHANNEL FLUID PROFILES.

```

```

C
C   INPUTS:

```

```

C       A32      = RATIO OF THE FLOW AREA FOR CH. 3&4 W.R.T CH.2
C       A42      = RATIO OF THE FLOW AREA FOR CH. 4 W.R.T CH.2
C       NDXP1    = NUMBER OF AXIAL NODES(NDX+1)
C       QCORE    = CORE AVERAGE HEAT FLUX WITH PENALTY
C       PEF      = REACTOR COOLANT SYSTEM PRESSURE
C       PHICM    = NDX-NODE ARRAY OF HOT PIN POWER DISTRIBUTION WITH PENALTY
C       JSTAR    = NODE NUMBER TO START SEARCHING MIN. DNBR
C       DX       = AXIAL NODE LENGTH
C       X(NDXP1) = LOCATIONS OF THE AXIAL POWER FACTORS
C       ZFLUX    = NDXP1 ELEMENT ARRAY OF HOT-PIN POWER DISTRIBUTION
C       F(I)     = INLET FLOW RATE OF CHANNEL I
C       H(I)     = INLET ENTHALPY OF CHANNEL I
C       CH2,CH(2) = INITIAL AVG. ENTHALPY TRANSPORT COEFFICIENT
C       HECO     = PRODUCT OF CONDUCTIVITY AND PRANDTL NUMBER
C       DHYD(I)  = HYDRAULIC DIAMETER OF CHANNEL I
C       H2P(1)   = INLET ENTHALPY OF CHANNEL 2P
C       H22(1)   = INLET ENTHALPY OF CHANNEL 22
C       P1ST     = INTEGRATED RADIAL PEAKING FACTOR

```

```

C
C   OUTPUTS:

```

```

C       FDNB     = MIN. DNBR
C       FDNBF    = FLOW RATE AT LOCATION OF MIN. DNBR
C       FDNBQLOC = LOCAL HEAT FLUX AT LOCATION OF MIN. DNBR
C       FDNBX    = QUALITY AT LOCATION OF MIN. DNBR
C       HFG      = LATENT HEAT
C       HF       = SAT. LIQUID ENTHALPY
C       TF       = SATURATION TEMPERATURE

```

```

C
C   CODE

```

```

C

```

```

----- (중략) -----

```

```

      NK=NCHANL-1

```

```

C

```

```

C *****

```

```

C   BEGINNINGS OF "J-LOOP" HERE (J=1, 2, ... NDXP1)

```

```

C *****

```

```

      DO 600 J=1,NDXP1
        JP1=J+1
        JM1=J-1
        JML=(JM1-1)*NCHANL
        L=JM1*NCHANL

```

```

JPL=J*NCHANL
M=JM1*NK
JPM=J*NK
IF(J.GT.1) GOTO 610
C
C --- CALL 'SAT' TO CALCULATE SATURATION PROPERTIES
C
CALL SAT(PREF,VF,VFG,TF,VISS)
C
TDI(5)=TF
VG=VF+VFG
C
C --- CALL 'PROP' TO CALCULATE SUBCOOLED AND TWO-PHASE PROPERTIES AT J=1
C : RHO, VFRIC, VISC, FSP, FMULT(PHII)
C
CALL PROP(1,NCHANL)
GO TO 600
C
C STEP (1) CALCULATE THE CHANNEL FLOWS AT NODE J (J.GE.2): F(1-4)
C
610 F(1+L)=F(1+JML)-DX*WL(J)
----- (중략) -----
IF(J.GT.2) GRID=GRIDSS
IF(J.GT.2) GO TO 601
GRID=.FALSE.
GRKIJ(J)=0.0
DO 620 I=1,NGRID
ZG=GRIDXL(I)*ZFUEL
IF(ZG.GT.X(JM1).AND.ZG.LE.X(J)) GRID=.TRUE.
IF(ZG.GT.X(JM1).AND.ZG.LE.X(J)) GRKIJ(J)=GRIDKIJ(I)
620 CONTINUE
C
C --- CALCULATE LINEAR HEAT DISTRIBUTIONS OF FOUR CHANNELS
C
----- (중략) -----
C
C STEP (2) CALCULATE MIXING AND CROSSFLOW RESISTANCE PARAMETERS
C BASED ON THE FLOWS AT J-1: CIJ(1-3), WP(1-3)
C
601 CALL CIJMIX(J,NK,NCHANL)
C
C --- CALCULATE THE FLOWS AND TURBULENT MIXING AT NODE J
C FOR THE BUFFER CHANNELS(2P, 22): F22, F2P
C
----- (중략) -----
C
C STEP (3) CALCULATE ENTHALPY GRADIENTS FOR EACH CHANNEL: DHDX(1-4)
C
CALL DIFFER(JM1,NK,1,NCHANL)
C
C STEP (4) CALCULATE ENTHALPY FOR EACH CHANNEL: H(1-4) AT J
C

```

```
H(1+L)=H(1+JML)+DX*DHDX(1)
H(2+L)=H(2+JML)+DX*DHDX(2)
H(3+L)=H(3+JML)+DX*DHDX(3)
H(4+L)=H(4+JML)+DX*DHDX(4)
CHH(J)=CH(2)
```

```
C
C STEP (5) CALCULATE SUBOOLED AND TWO-PHASE PROPERTIES AT NODE J
C       : RHO, VFRIC, VISC, FSP, FMULT(PHII)
C
C       CALL PROP(J,NCHANL)
```

```
IF(J.GT.2) GO TO 603
```

```
C
C STEP (5A) CALCULATE PRESSURE GRADIENTS DPDX(1-2)
C           AND UPDTAE FLOWS AT J=2 FOR CHANNELS 1 & 2
C
C       CALL DIFFER(J,NK,5,2)
```

----- (중략) -----

```
603 CONTINUE
```

```
C
C STEP (5B) STOP FOR J=NDXP1 (EXIT NODE)
C
C       IF(J.GE.NDXP1) GO TO 605
```

```
C
C --- CHECK LOCATION OF SPACER GRID: GRID=.TRUE. OR .FALSE.
C
C       GRIDSV=GRID
C       GRID=.FALSE.
```

----- (중략) -----

```
C
C STEP (6) PREDICT THE FLOWS FOR CHANNELS 1 & 2 AT J+1
C
C       CWKI2009.3.21
C       XLL4=PHICM(J)/PHICM(JM1)
```

----- (중략) -----

```
C
C STEP (7) PREDICT THE ENTHALPIES FOR CHANNELS 1 & 2 AT J+1
C
C       DO 660 I=1,4
C       QPRIM(I)=QPRIM(I)*XLL4
C       IF(I.GT.2) GO TO 660
```

----- (중략) -----

```
660 CONTINUE
```

```
C
C STEP (8) CALCULATE SUBOOLED AND TWO-PHASE PROPERTIES AT NODE J+1
C       : RHO, VFRIC, VISC, FSP, FMULT(PHII)
C
```

```

CALL PROP(JP1,2)
C
C STEP (9) OBTAIN PREDICTED CROSSFLOWS BETWEEN CHANNELS AT NODE J+1
C     BY SOLVING AXIAL AND TRANSVERSEMOMENTUM EQUATIONS: W12(J+1)=WL(JP1)
C
C CALL 'DIFFER' TO CALCULATE PRESSURE GRADIENTS FOR CHANNELS 1 & 2: DPD(1-2)
C SUBROUTINE 'DIVERT' IS CALLED UPON BY 'DIFFER' TO CALCULATE THE CROSSFLOW
C
CALL DIFFER(JP1,NK,6,2)

W(2+JPM)=WL(JP1)*A32
W(3+JPM)=WL(JP1)*A42
GRID=GRIDSV

605 CONTINUE
C
C STEP (10-11) CALCULATE CROSSFLOWS AT J
C
C --- CALL 'DIFFER' TO CALCULATE PRESSURE GRADIENTS
C --- CALL 'DIVERT' TO CALCULATE DIVERSION CROSSFLOW
C --- CALL 'DIFFER' TO CALCULATE FLOW GRADIENTS
C
CALL DIFFER(J,NK,    3,NCHANL)
CALL DIVERT (J,4,NK)
CALL DIFFER( J,NK,    2,NCHANL)
C
C STEP (12) CORRECT THE CHANNEL FLOWS AND ENTHALPIES AT NODE J
C
F(1+L)=F(1+JML)+DX*DFDX(1)
F(2+L)=F(2+JML)+DX*DFDX(2)
F(3+L)=F(3+JML)+DX*DFDX(3)
F(4+L)=F(4+JML)+DX*DFDX(4)
C
699 CONTINUE
IF(J.LT.JSTAR) GO TO 600

XX=(H(4+L)-HF)/HFG
C
C WKI 2008.5.28 MAKE THE QUALITY LIMIT(0.995) AS A DATABASE CONSTANT, XLIM
C LIMIT THE QUALITY TO 0.995
C
IF( XX .GT. XLIM ) XX = XLIM

----- (중략) -----

C
C --- SEARCH FOR CHF IN CHANNEL 4
C
C --- CALL 'CHF' TO CALCULATE CRITICAL HEAT FLUX RATIO
C
CALL CHF(J,FAA,X,XX,FSJ,CHFRJ)

CHFMIN=AMIN1(CHFRJ,CHFMIN)

----- (중략) -----

```

```

600 CONTINUE
C
C   DETERMINE MIN. DNBR AND AVERAGE ENTHALPY TRANSPORT COEFFICIENT.
C
      FDNB=CHFMIN
      FDNBX=CQUAL
      FDNBQLOC=ZFLUX(JL)
C
C --- CALCULATE AVERAGE VALUE OF ENTHALPY TRANSPORT COEFFICIENT
C
      ATR=0.0
      DO 700 J=1,NDXP1
700  ATR=ATR+1./CHH(J)
      ATR=NDXP1/ATR
C
C   END OF MODULE 6
C
C-----
C
C   STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 7 (****MERGED IN MODULE 6****)
C-----
C
C   STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 8
C
C   CALCULATE PARAMETERS AT MIN. DNBR.
C
C   INPUTS:
C     FDNB      = MIN. DNBR
C     FDNBF     = FLOW RATE AT LOCATION OF MIN. DNBR
C     FDNBQLOC  = LOCAL HEAT FLUX AT LOCATION OF MIN. DNBR
C     FDNBX     = QUALITY AT LOCATION OF MIN. DNBR
C     HFG       = LATENT HEAT
C     HF        = SAT. LIQUID ENTHALPY
C     HIN       = CORE INLET ENTHALPY
C     PREF      = PRIMARY COOLANT SYSTEM PRESSURE
C     MC(MCST)  = CORE COOLANT MASS FLOW RATE
C     PHICST    = CORE AVERAGE HEAT FLUX(% OF RATED POWER)
C     PF(PFST)  = CEA DEVIATION PF
C
C   OUTPUTS:
C     DNBRST    = MINIMUM STATIC DNBR
C     XDST      = QUALITY AT THE NODE OF MINIMUM DNBR
C     GPRFST    = HOT CHANNEL MASS FLUX AT NODE OF MIN. DNBR
C     DHST      = HOT CHANNEL ENTHALPY RISE TO NODE OF MIN. DNBR
C     FKST      = F-CORRECTION FACTOR AT MIN. DNBR
C     QLOCST    = HOT CHANNEL HEAT FLUX AT NODE OF MIN. DNBR
C     XY        = INTERMEDIATE VARIABLE FOR DNBR UPDATE
C     XXY       = INTERMEDIATE VARIABLE FOR DNBR UPDATE
C     LNX       = INTERMEDIATE VARIABLE FOR DNBR UPDATE
C     PRST      = PRIMARY COOLANT SYSTEM PRESSURE
C     MCST      = CORE COOLANT MASS FLOW RATE
C     PHICALCST = CORE AVERAGE HEAT FLUX(% OF RATED POWER)
C     PFST      = CEA DEVIATION PF
C
C
C
CWKI.2007.01.10
      XDST=FDNBX
      GPRFST=FDNBF

```

```

DHST=XDST * HFG + HF - HIN
FKST      = FDNBFS
QLOCST    = FDNBQLOC
PRST=PRF
MCST=MCST

```

C

```

IF (GPRFST.GT.1.D-10) GO TO 805
GPRFST      = 1.D-10
FKST        = 0.0
805 IF (GPRFST .LE. 100.) GO TO 807
GPRFST      = 100.
FKST        = 0.0

```

807 CONTINUE

----- (중략) -----

C

```

DNBRST      = EDNB1 * (FDNB + EDNB2)
DNBRST      = AMAX1(DNBRST,0.0)
DNBRST      = AMIN1(DNBRST,10.0)

```

C

END OF MODULE 8

C

C

C

C

STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 9

C

C

CALCULATE AVERAGE CORE ENTHALPY RISE FOR STATIC DELTA-T
POWER CALCULATION.

C

INPUTS:

C

TC1 = COLD LEG 1 TEMPERATURE

C

TC2 = COLD LEG 2 TEMPERATURE

C

TH1 = HOT-LEG 1 TEMPERATURE

C

TH2 = HOT-LEG 2 TEMPERATURE

C

TH = AVERAGE HOT-LEG TEMPERATURE

C

PRST = PRIMARY COOLANT SYSTEM PRESSURE

C

TF = SATURATED LIQUID TEMPERATURE

C

OUTPUTS:

C

CPIN1 = H/T FOR COLD-LEG 1

C

CPIN2 = H/T FOR COLD-LEG 2

C

CPOUT1 = H/T FOR HOT-LEG 1

C

CPOUT2 = H/T FOR HOT-LEG 2

C

THMAX = MAXIMUM CORE OUTLET TEMPERATURE WITH UNCERTAINTY

C

TSAT = SATURATED LIQUID TEMPERATURE

C

CODE

900 CONTINUE

IF(TH .GT. THLIM) GO TO 903

IF(AMAX1(TC1,TC2) .GE. TINLIM) GO TO 903

TIN1 = TINLIM

TIN2 = TINLIM

GO TO 905

903 TIN1 = TC1

TIN2 = TC2

905 HTR0 = HTR00 + HTR01 * PRST

```

HTR1   = HTR10 + HTR11 * PRST
HTR2   = HTR20 + HTR21 * PRST
HTR3   = HTR30 + HTR31 * PRST

```

----- (중략) -----

```

TSAT   = TF
IF(INIT .EQ. 2) TSAT=439.2708+PRST*(.1253656-.135545D-4*PRST)
THMAX  = AMAX1(TH1,TH2) + THERR

```

```

C
C   END OF MODULE 9
C

```

```

C
C   STATIC DNBR PROGRAM...MODULE 10
C

```

```

C   DUMP RESULTS TO OUTPUT BUFFER.
C

```

```

C   INPUTS:

```

```

C       PRST   = PRIMARY COOLANT SYSTEM PRESSURE
C       P1ST   = INTEGRAL RADIAL PEAKING FACTOR
C       DNBRST = MINIMUM "STATIC" DNBR
C       MCST   = NORMALIZED CORE COOLANT MASS FLOW RATE
C       XDST   = QUALITY AT NODE OF MINIMUM DNBR
C       PHICST = COMPENSATED CORE AVERAGE POWER
C       CPIN1  = COLD-LEG (1) SPECIFIC HEAT
C       CPIN2  = COLD-LEG (2) SPECIFIC HEAT
C       CPOUT1 = HOT-LEG (1) SPECIFIC HEAT
C       CPOUT2 = HOT-LEG (2) SPECIFIC HEAT
C       TSAT   = SATURATION TEMPERATURE
C       THMAX  = MAXIMUM HOT LEG TEMPERATURE WITH UNCERTAINTY
C       QLOCST = HOT CHANNEL HEAT FLUX AT NODE OF MINIMUM DNBR
C       FKST   = F-CORRECTION FACTOR AT MINIMUM DNBR
C       GPRFST = HOT CHANNEL MASS FLUX AT NODE OF MINIMUM DNBR
C       DHST   = HOT CHANNEL ENTHALPY RISE TO NODE OF MINIMUM DNBR
C       PFST   = CEA DEVIATION PENALTY FACTOR FOR DNBR
C       XY     = INTERMEDIATE VARIABLE FOR DNBR UPDATE
C       XXY    = INTERMEDIATE VARIABLE FOR DNBR UPDATE
C       LNX    = INTERMEDIATE VARIABLE FOR DNBR UPDATE

```

```

C   OUTPUTS:

```

```

C       DOUT   = STATIC DNBR PROGRAM OUTPUT BUFFER
C

```

```

C   CODE

```

```

DOUT( 1) = MCST
DOUT( 3) = PRST
DOUT( 4) = P1ST
DOUT( 5) = PHICST
DOUT( 6) = XDST
DOUT( 7) = CPIN1
DOUT( 8) = CPIN2
DOUT( 9) = CPOUT1
DOUT(10) = CPOUT2
DOUT(11) = TSAT
DOUT(12) = THMAX
DOUT(13) = QLOCST
DOUT(14) = FKST
DOUT(15) = GPRFST

```

----- (중략) -----

```
C
C   END OF MODULE 10
C
C-----
C
C   RETURN
```

----- (중략) -----

```
END

SUBROUTINE TRANS(J,DHDX)
C
C
COMMON/MPC/H(4,50),HF,PREF,NDXP1
COMMON/TRANSP/CH22,QPRI2P,QPRI22,F22,F2P,WP2P,WP22,H2P(50),
1H22(50),CH2,WP2
CWKI2006.12
COMMON/MD/BDUM1(156),DX,BDUM2(19)
CWKI2009.3.22
COMMON /BICNST/SPACE(1941),ZFUEL,ADUM1(4558)
DIMENSION INTA(6500)
EQUIVALENCE (SPACE(1),INTA(1))
EQUIVALENCE (INTA(1940),NDX)

DIMENSION DHDX(4)
SAVE
```

----- (중략) -----

```
C
C THIS IS THE TRANSPORT COEFFICIENT
C
C   RMULT = 1.0
C   IF( CH22 .LT. 0.0 ) RMULT = -1.0
C
C NARROW THE LIMITS FOR THE TRANSPORT COEFFICIENT (1/3/89)
C
C   IF( ABS(CH22) .LT. 0.1 ) CH22 = 0.1 * RMULT
C   IF( ABS(CH22) .GT. 10. ) CH22 = 10. * RMULT
C   RETURN
C   END
```

```
SUBROUTINE CHF(J,FAA,X,XX,FSJ,CHFRJ)
C
c   IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C
cwki20100124 commnted out      SAVE
COMMON/MCH/HFG,ZFLUX(50)

COMMON/MPC/H(4,50),HF,PREF,NDXP1
COMMON /BICNST/SPAC(2115),ADUM1(4),CCHF5,CCHF6,CCHF7,CCHF8
1,ADUM2(96),SKECDK,CCE0,CCHF3,CCHF4,ADUM3(4277)
DIMENSION AX(50),AXCC(50),X(50)
SAVE
```

```
CCE4=CCHF3+CCHF4*PREF
CCE5=CCHF5+CCHF6*PREF
```

```
DX=X(2)-X(1)
```

```
----- (중략) -----
```

```
IF(J.EQ.1) GO TO 90
C=1.8*(1.-XX)**4.31/FAA**0.478
AXC=EXP(DX*C)
AXCC(1)=-1.0
AX(1)=1.0
SUM=0.0
DO 25 JJ=2,J
JJM1=JJ-1
```

```
----- (중략) -----
```

```
AX(JJ)=AX(JJM1)*AXC
AXCC(JJ)=AX(JJ)*(C* X(JJ)-1.0)
25 SUM=SUM+ZCE1*(AX(JJ)-AX(JJM1))+ZCE2*(AXCC(JJ)-AXCC(JJM1))/C
```

```
CHFRJ=CHF1/SUM*(AX(J)-1.0)*SKECDK
```

```
CWKI
```

```
C --- CORRECTION FACTOR FOR NON-UNIFORM HEATING: FS
```

```
C
```

```
FSJ=CHF1/(CHFRJ*ZFLUX(J))
```

```
RETURN
```

```
90 CHFRJ=CHF1/SUM*(AX(NDXP1-1)-1.0)*SKECDK*ZFLUX(NDXP1-1)/ZFLUX(NDXP1)
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
SUBROUTINE MODMN(ALPHA,PHI,IA,GF,T,X)
```

```
C
```

```
c
```

```
C
```

```
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
```

```
COMMON/PROMOD/ DTF,DTJL
```

```
COMMON/MDDP/QPRIM(4),F(4,50),HG,VG,VF,TF,DHYD(4),VISS,
```

```
1RHO(4,50),V(4),VFRIC(4,50),FSP(4,50),U(4,50),VP(4,50),
```

```
2FMULT(4,50),KMN1,KMN2
```

```
COMMON/MPC/H(4,50),HF,P,NDXP1
```

```
SAVE
```

```
*** CALCULATE M-N VOID AND FRICTION MULTIPLIER
```

```
* INPUT-
```

```
* OUTPUT-
```

```
IF(IA.EQ.0) GO TO 10
```

```
* VOID FRACTION
```

```
IF(KMN1.GT.1)GO TO 8
```

```
----- (중략) -----
```

```
8 IF(P.GT.1850.)GO TO 3
```

```
IF(X.LT.0.01) GO TO 3
```

```
IF(X.GT.0.1)GO TO 6
```

```
ALPHA=A1L+A2L*X+A3L*X**2+A4L*X**3
```

RETURN
3 VGDVL=1.
GO TO 7

C

6 ALPHA=A1H+A2H*X+A3H*X**2+A4H*X**3
RETURN
7 ALPHA=1./(1+(1-X)*VF*VGDVL/(X*VG))
RETURN
10 IF(KMN2.GT.1) GO TO 11

----- (중략) -----

11 PHISQ=0.
IF(X.LT.0.) GO TO 80
IF(P-2000.)12,12,22
12 IF(X-.02)14,14,16
14 FMN=1.
GO TO 24
16 IF(X-.2)18,18,20
18 FMN=X**B1/B2
GO TO 24
20 FMN=X**B3/B4
GO TO 24
22 FMN=(-.0103166*X+.005333*X**2)*(P-3206.)+1.
GO TO 32
24 IF(P-1850.) 26,32,32
26 IF(GF-0.7)28,28,30
28 PHISQ=FMN*(1.36+0.0005*P+0.1*GF-0.000714*P*GF)
GO TO 60
30 PHISQ=FMN*(1.26-0.0004*P+0.119/GF+0.00028*P/GF)
GO TO 60

----- (중략) -----

GO TO 42
33 IF(X-0.02)34,34,36
34 FMNP=1.
GO TO 42
36 IF(X-0.2)38,38,40
38 FMNP=X**.4800/.1425
GO TO 42
40 FMNP=X**.6099/115.26D-03
42 IF(X-0.4) 50,50,44
44 IF(GF-.7)46,46,48
46 FAM=7.0*(1.0+0.93*(.7-GF))*FMNP/4.75
GO TO 58
48 FAM = (1.+ 3.521 / (GF) ** 1.4) * FMNP / 4.75
GO TO 58
50 IF(GF-.7) 52,52,54
52 FAM=(1.+(7.*X**.75)/(7**(1.0+X)))*(1.0+0.93*(0.7-GF))
GO TO 58
54 FAM=1.+7.*X**.75/GF**(1.+X)
58 PHISQ=FAM*FMN/FMNP
60 IF(PHISQ-1.)62,80,80
62 PHISQ=1.
80 IF(P.GT.1850.) GO TO 95
IF(DTF.GE.DTJL) GO TO 82
PHI=1.
GO TO 101

```

82 TSTAR=DTJL+T-DTF
   PHX=(T-TSTAR)/(TF-TSTAR)
   IF(PHISQ.EQ.0.0.AND.PHX.GT.1.0) PHX=1.0
87 PHI=1.0+(0.042**B1/B2-1.0)*PHX
   GO TO 100
95 IF(DTF.GT.DTJL) GO TO 96
   TSTAR=DTF
   GO TO 97
96 TSTAR=DTJL
97 C1=1.05*(1.-0.0025*TSTAR)
   IF(C1.GT.1.0) C1=1.0
   IF(DTF.GT.0.0) GO TO 94
   PHI=1.
   GO TO 100
94 PHI=1.-(TSTAR/DTF)

```

----- (중략) -----

```

RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SAT(P,VF,VFG,TSAT,VISS)

```

C

```

   DIMENSION DHF(4),DHFG(4),DVF(4),DVFG(4),DP(4)
   SAVE
   DATA DVF/0.02565,0.02517,0.02472,0.02428/
   DATA DVFG/0.16266,0.17761,0.19390,0.21178/
   DATA DP/2000.,1900.,1800.,1700./

```

----- (중략) -----

```

   IL=3
   IF(P.LE.2000.) GO TO 1

```

----- (중략) -----

```

RETURN
1 IF(P.GT.1900.) IL=1
  IF(P.GT.1800..AND.P.LE.1900.) IL=2
  IF(P.GT.1700..AND.P.LE.1800.) IL=3
  IL1=IL+1
  XR=(P-DP(IL1))/(DP(IL)-DP(IL1))

```

----- (중략) -----

```

RETURN
END

```

```

SUBROUTINE CIJMIX(J,NK,NCHANL)

```

C

```

COMMON/MCH/HFG,ZFLUX(50)
COMMON/MPC/H(4,50),HF,PREF,NDXP1

```

*** CALCULATE MIXING AND CROSSFLOW RESISTANCE PARAMETERS

* INPUT-J,NK,NCHANL,W,RHO,GAP,A,PERIM

* OUTPUT-CIJ,WP

```

CWKI.2007.01.10 COMMON/MDDP/QPRIM(4),AA,BB,CC,F(4,50),HG,VG,VF,TF,DHYD(4),

```

----- (중략) -----

```

COMMON/MD/CH(3),WP(3),W(3,50),DX,DPDX(4),
1DFDX(4),DHDX(4),SL,DPK(4),CIJ(3)
C
COMMON /BICNST/SPAC(2030),AFLOW(4),PERIM(4),SPAC1(53),GAP(3),
.          SPAC2(75),KIJ,ABETA,GC,COMIX,SPAC3(6),ADUM1(4321)
C
REAL KIJ
SAVE
C
JM1=J-1
DO 1 K=1,NK
KP1=K+1
IF(K.GT.1.AND.J.GT.3) GO TO 2
I=KP1
IF(W(K,J).GE.0.) I=K
AXFLO=F(I,JM1)
RSTAR=RHO(I,JM1)
WMIN=ABS(W(K,J))
IF(WMIN.LT..001) WMIN=.001
XL=0.0

----- (중략) -----

2 IF(K.EQ.1) GO TO 1
c wki2010.5.23 change GAVG to GAVGK
GAVGK=(F(K,JM1)/AFLOW(K)+F(KP1,JM1)/AFLOW(KP1))/2.
DAVG=2.*(AFLOW(K)/PERIM(K)+AFLOW(KP1)/PERIM(KP1))

----- (중략) -----

1 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE DIFFER(J,NK,IPART,NCHANL)
COMMON/MDDP/QPRIM(4),F(4,50),HG,VG,VF,TF,DHYD(4),
1VISS,RHO(4,50),V(4),VFRIC(4,50),FSP(4,50),U(4,50),VP(4,50),
2FMULT(4,50),KMN1,KMN2
COMMON/MD/CH(3),WP(3),W(3,50),DX,DPDX(4),
1DFDX(4),DHDX(4),SL,DPK(4),CIJ(3)
COMMON/MPC/H(4,50),HF,PREF,NDXP1
COMMON/G1/GRKIJ(50)
COMMON/TRANSP/CH22,QPRI2P,QPRI22,F22,F2P,WP2P,WP22,H2P(50),
1H22(50),CH2,WP2

COMMON/G2/RE(4)
COMMON/LOG/GRID
C
COMMON /BICNST/SPAC(2030),AFLOW(4),SPAC1(137),GC,COMIX,ADUM0(6),
.          CU(3),CAA(3),CBB(3),CCC(3),ADUM1(4309)
C
*** CALCULATE PRESSURE, FLOW, ENTHALPY GRADIENTS
* INPUT=J,IPART,JK,NCHANL,WP,W,QPRIM,FSP,FMULT,VFRIC,DHDY,VP,VPA
* V,DX,A
* OUTPUT=DPDX,DFDX,DHDX
* VARIABLES=COGRID,HWI,HWL,WV,JM1,JP1,SAVE,CH,CU,WKK,NCHA
* COMMON=GRID
C

```

```

LOGICAL GRID
SAVE
Cwki 2006.7 Commented out "COGRID"
c   DATA COGRID/0.45/
      JM1=J-1
      IF(IPART.EQ.1) GO TO 100
      IF(IPART.EQ.2) GO TO 200
      IF(IPART.GE.3) GO TO 300
100 S1=0.5
      S2=0.5
      S3=0.5
      JP1=J+1

----- (중략) -----

      H1=H(1,J)-H(2,J)
      H2=(H(2,J)-H(3,J))/CH(2)
      H3=H(3,J)-H(4,J)
      DHDX(1)=(H1*W(1,J) )*(0.5-S1)-H1*WP(1)+QPRIM(1))/(F(1,JP1)

----- (중략) -----

      IF(CH2.NE.0.) RETURN
      CALL TRANS(JP1,DHDX)
      CH(2)=CH22
      H2=(H(2,J)-H(3,J))/CH(2)
      DHDX(3)=(H2*W(2,J)*(0.5+S2)+H2*WP(2)+H3*W(3,J)*(0.5-S3)-H3*
1WP(3)+QPRIM(3))/(F(3,JP1)+F(3,J))*2.0
      DHDX(4)=(H3*W(3,J)*(0.5+S3)+H3*WP(3)+QPRIM(4))/(F(4,JP1)
1+F(4,J))*2.0
      RETURN
C
200 DFDX(1)=-W(1,J)
      DFDX(2)=W(1,J)
      DFDX(3)=W(2,J)-W(3,J)
      DFDX(4)=W(3,J)
      RETURN
C
300 DPDX(1)=0.0
      DPDX(2)=0.0
      IF(IPART.GE.5) GO TO 301
      DPDX(3)=(U(3,J)-U(4,J))*WP(3)-(U(2,J)-U(3,J))/CU(2)*WP(2)
      DPDX(4)=- (U(3,J)-U(4,J))*WP(3)
301 DO 390 I=1,NCHANL

----- (중략) -----

      IF(.NOT.GRID) GO TO 310
      N1=GRKIJ(J)
      IF(N1.NE.0)GRCOE=CAA(N1)+CBB(N1)*RE(I)**CCC(N1)
      IF(N1.EQ.0) GRCOE=0.45
      SAVE=SAVE+0.5*GRCOE/DX/RHO(I,J)
310 DPK(I)=SAVE/AFLOW(I)/AFLOW(I)
      FLOWSQ=F(I,JM1)**2
390 DPDX(I)=-DPK(I)*FLOWSQ/GC-RHO(I,J)-DPDX(I)/AFLOW(I)/GC
      IF(IPART.GE.5) CALL DIVERT(J,IPART, 1)
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE DIVERT(J, IPART,NK)
COMMON/DD/WL(50)
COMMON/MDDP/QPRIM(4),F(200),HG,VG,VF,TF,DHYD(4),VISS,
1RHO(200),V(4),VFRIC(200),FSP(200),U(200),VP(200),
2FMULT(200),KMN1,KMN2
COMMON/MD/CH(3),WP(3),W(150),DX,DPDX(4),
1DFDX(4), DHDX(4),SL,DPK(4),CIJ(3)

```

```

COMMON/MPC/H(200),HF,PREF,NDXP1

```

C

```

COMMON /BICNST/SPAC(2030),AFLOW(4),SPAC1(137),GC,COMIX,SPAC2(6),
CU(3),SPAC3(17),CNPC(3),ADUM1(4298)

```

C

```

DIMENSION AAA(3),B(3),USAVE(3),USTAR(3)
SAVE

```

*** CALCULATE DIVERSION CROSSFLOW

* INPUT - SL,DX,GC,IPART,U,DPK,F,A, DPDX,CIJ,J

* OUTPUT- W

```

JM1=J-1
DXGC=DX*GC
L=JM1*4
JML=(JM1-1)*4
M=JM1*3
JMM=(JM1-1)*3
DO 1 K=1,NK,2
USAVE(K)=(U(K+JML)+U(K+1+JML))*0.5
USTAR(K)=(U(K+L)+U(K+1+L))*0.5

```

1 CONTINUE

IF(IPART.GE.5) GO TO 2

----- (중략) -----

2 DO 5 K=1,NK

```

SL=0.5
IF(K.EQ.1) SL=1.E+20
SLDX=SL*DX
SP=0.0
IF(IPART.LT.5.AND.K.EQ.1.AND.J.LT.NDXP1)SP=WL(J+1)*CIJ(K)
IJ=K+1

```

----- (중략) -----

5 CONTINUE

IF(IPART.GE.5) WL(J)=B(1)/AAA(1)

IF(IPART.GE.5)W(1+M)=WL(J)

IF(IPART.GE.5) RETURN

* SOLVE THE MATRIX EQUATION AAA(3,3)*W(3)=B(3)

SX=SLDX/GC*(-1.0)

----- (중략) -----

```

W(1+M)=B(1)/AAA(1)
B(2)=B(2)-A21*W(1+M)-B(3)*A23/AAA(3)
W(2+M)=B(2)/(AAA(2)-A32*A23/AAA(3))
W(3+M)=(B(3)-A32*W(2+M))/AAA(3)
RETURN
END

```

SUBROUTINE PROP(J,NCHANL)

```
COMMON/PROMOD/ DTF,DTJL
COMMON/MDDP/QPRIM(4),F(4,50),HG,VG,VF,TF,DHYD(4),VISS,
1RHO(4,50),V(4),VFRIC(4,50),FSP(4,50),U(4,50),VP(4,50),
2FMULT(4,50),KMN1,KMN2
```

```
COMMON/MCH/HFG,ZFLUX(50)
```

```
C COMMON/MPC/RNDXP1,H(4,50),HF,PREF
COMMON/MPC/H(4,50),HF,PREF,NDXP1
```

```
COMMON/MPPO/ HECO(5)
```

```
COMMON/G2/RE(4)
```

```
C COMMON /BICNST/SPAC(1900),QFPC,SPAC1(129),AFLOW(4),SPAC2(115),
. TDI(5),HPERIM(4),SPAC01(11),ADUM1(4331)
```

```
C DIMENSION VISC(4),ALPHA(4),QUAL(4),T(4)
SAVE
* INPUT-QPRIM,QFPC,VGDVL,AA,BB,CC,NDXP1,F
* INPUT-J,NCHANL,H,HF,PREF,HG,IERROR,VG,VF,TF,DHYD,VISS,KMN1,KMN2,A
* OUTPUT-RHO,V,VISC,VFRIC,IERROR,JBOIL,PHIL,FSP,U,VP,FMULT
```

```
C
200 DO 399 M=1,NCHANL
IF(NCHANL.EQ.4.AND.J.GT.2.AND.M.LE.2) GO TO 399
ALPHA(M)=0.0
HAVG=H(M,J)
GF=F(M,J)/AFLOW(M)*0.0036
IF(HAVG.GT.HF) GO TO 300
```

```
C COMPUTE SUBCOOLED PROPERTIES
```

```
C
```

```
----- (중략) -----
```

```
C VP(M,J)=V(M)
QUAL(M)=(HAVG-HF)/HFG
VFRIC(M,J)=V(M)
RHO(M,J)=1./V(M)
U(M,J)=F(M,J)/AFLOW(M)*VP(M,J)
IF(J.EQ.1) GO TO 399
GO TO 350
```

```
C COMPUTE TWO-PHASE PROPERTIES
```

```
300 QUAL(M)=(HAVG-HF)/HFG
KMN1=KMN1+1
CALL MODMN(ALPHA(M),PHIL,GF,T(M),QUAL(M))
```

```
----- (중략) -----
```

```
VFRIC(M,J)=VF
T(M)=TF
VISC(M)=VISS
RHO(M,J)=1/V(M)
U(M,J)=F(M,J)/AFLOW(M)*VP(M,J)
HEIN=HECO(5)
```

```
350 RE(M)=F(M,J)/AFLOW(M)*DHYD(M)/VISC(M)*3600.
```

```
CWKI.2007.01.10
```

```
C FSP(M,J)=AA*RE(M)**BB+CC
FSP(M,J)=0.184*RE(M)**(-0.2)
```

```
IF(HAVG.GT.HF) GO TO 341
DO 340 I=1,4
340 IF(T(M).GE.TDI(I).AND.T(M).LT.TDI(I+1)) IL=I
```

----- (중략) -----

```
341 HE=0.023/DHYD(M)/3600.*RE(M)**0.8*HEIN
DTF=QPRIM(M)*QFPC/HE/HPERIM(M)
DTJL=(QPRIM(M)*QFPC/HPERIM(M)*.0036 )**0.25*60./
1EXP(PREF/900.)+TF-T(M)
```

C

```
KMN2=KMN2+1
CALL MODMN(ALPHA(M),PHII,0,GF,T(M),QUAL(M))
FMULT(M,J)=PHII
399 CONTINUE
RETURN
END
```



RCOPSIM 코드는 HP-Unix 시스템 기반의 라이브러리를 사용하므로 Unix 시스템의 Fortran 컴파일러를 사용하여 실행파일을 생성하였다. Unix 시스템에서 RCOPSIM 코드의 실행파일(rcopsimv1m0_Rev08_kaeri.exe)을 만들기 위한 makefile은 다음과 같다.

```

FFLAGS          = +U77 -K +ppu -g
DEST            = .
EXTHDRS        =
HDRS           =
INSTALL        = /usr/sbin/install
LD             = f90
FC             = f90
LDLFLAGS       = +U77 +ppu -g

LIBS           = /user3/jykim/wkin/cpcsimv4m8/lib/pilib1.2mod5.f90.ppu.a \
                /user3/jykim/wkin/cpcsimv4m8/lib/cemodel15.0mod11.f90.ppu.a \
                /user3/jykim/wkin/cpcsimv4m8/lib/userlib1.0mod10.f90.ppu.a

MAKEFILE       = Makefile

OBJS           = analyze.o \
                apr2579.o \
                bercal.o \
                cardin.o \
                ccdl.o \
                cetop2_rcops.o \
                cfstin.o \
                chpack.o \
                cinpt1.o \
                cinput.o \
                coos_rcops.o \
                cpcc.o \
                cpcon.o \
                rcopsimv1m0_Rev08_cpcc.o \
                cpout.o \
                pcsim_rcops.o \
                dptest.o \
                ed.o \
                eject.o \
                errctp.o \
                factor.o \
                fdtest.o \
                fibeta.o \
                filopn.o \
                flrt17.o \
                histry_rcops.o \
                incbeta.o \
                inout.o \
                irate.o \
                limlin.o \
                mdnor.o \
                mdtm.o \
                mdtmf.o \
                messge.o \
                moment.o \
                noise.o \
                nonp.o \
                okrset.o \
                opm_rcops.o \
                plot.o \
                ranf.o \
                ranset.o \
                rdcord.o \
                readinp.o \
                roc221.o \

```

```

rocedt.o \
rocfil.o \
stat.o \
steam.o \
summary.o \
svcinpt.o \
tails.o \
tolimit.o \
update_rcops.o \
upddrv_rcops.o \
urand.o

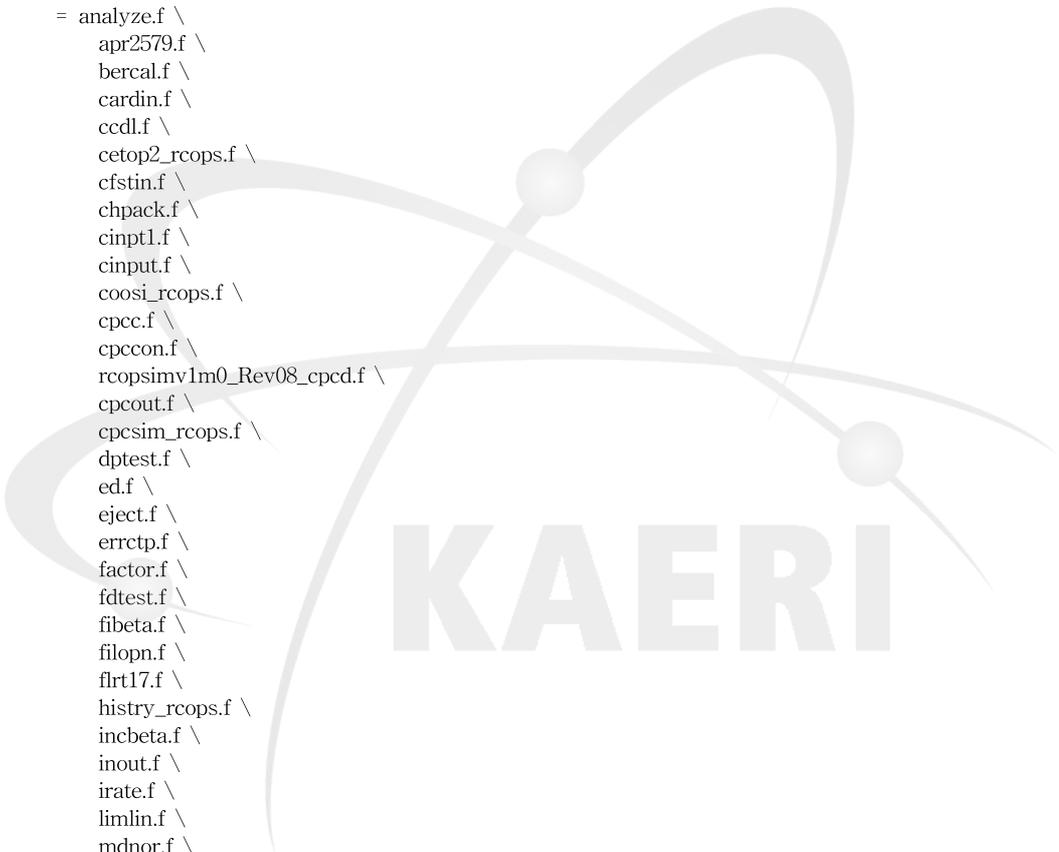
PRINT          = pr

PROGRAM        = rcopsimv1m0_Rev08_kaeri.exe

SHELL          = /usr/bin/sh

SRCS           = analyze.f \
apr2579.f \
bercal.f \
cardin.f \
ccd.f \
cetop2_rcops.f \
cfstin.f \
chpack.f \
cinpt1.f \
cinput.f \
coosi_rcops.f \
cpcc.f \
cpcon.f \
rcopsimv1m0_Rev08_cpdc.f \
cpcout.f \
cpcsim_rcops.f \
dptest.f \
ed.f \
eject.f \
errctp.f \
factor.f \
fdtest.f \
fibeta.f \
filopn.f \
flrt17.f \
histry_rcops.f \
incbeta.f \
inout.f \
irate.f \
limlin.f \
mdnor.f \
mdtn.f \
mdtnf.f \
messge.f \
moment.f \
noise.f \
nonp.f \
okrset.f \
opm_rcops.f \
plot.f \
ranf.f \
ranset.f \
rdcord.f \
readinp.f \
roc221.f \
rocedt.f \
rocfil.f \
stat.f \
steam.f \

```



```

summary.f \
svcinpt.f \
tails.f \
tolimit.f \
update_rcops.f \
upddrv_rcops.f \
urand.f

SYSHDRS      =

all:          $(PROGRAM)

$(PROGRAM):  $(OBJS) $(LIBS)
              @echo "Linking $(PROGRAM) ..."
              @$$(LD) $$(LDFLAGS) $(OBJS) $(LIBS) -o $(PROGRAM)
              @echo "done"

clean::      @rm -f $(OBJS) core

clobber::    @rm -f $(OBJS) $(PROGRAM) core tags

depend::     @mkmf -f $(MAKEFILE) ROOT=$(ROOT)

echo::       @echo $(HDRS) $(SRCS)

index::      @ctags -wx $(HDRS) $(SRCS)

install:     $(PROGRAM)
              @echo Installing $(PROGRAM) in $(DEST)
              @-strip $(PROGRAM)
              @if [ $(DEST) != . ]; then \
              (rm -f $(DEST)/$(PROGRAM); $(INSTALL) -f $(DEST) $(PROGRAM)); fi

print::      @$$(PRINT) $(HDRS) $(SRCS)

tags:        $(HDRS) $(SRCS); @ctags $(HDRS) $(SRCS)

update:      $(DEST)/$(PROGRAM)

$(DEST)/$(PROGRAM): $(SRCS) $(LIBS) $(HDRS) $(EXTHDRS)
                  @$$(MAKE) -f $(MAKEFILE) ROOT=$(ROOT) DEST=$(DEST) install

###
analyze.o: NRMTST1.BLK
apr2579.o: GLOBAL1.BLK APR25IN.BLK INOUT.BLK
bercal.o: GLOBAL1.BLK BERCAL1.BLK MESSG2.BLK INOUT.BLK FILE1.BLK CDAT1.BLK \
          CDAT2.BLK
cardin.o: CARDIN1.BLK GLOBAL1.BLK CPCNSE.BLK FLTP10.BLK CEFAST1.BLK \
          MESSG2.BLK BERCAL1.BLK ROCDAT.BLK ROCNME.BLK MDD.BLK CLOCK1.BLK \
          COOS1.BLK CPCCDAT.BLK FLRT17.BLK CARDIN2.BLK INOUT.BLK FILE1.BLK
cetop2_rcops.o: AOUT2.BLK BOUT2.BLK DOUT1.BLK GLOBAL1.BLK
cfstin.o: GLOBAL1.BLK FLTP10.BLK BOUT2.BLK SVCCEA.BLK CEFAST1.BLK CDAT1.BLK \
          CPCNSE.BLK CPCOUTL.BLK MESSG2.BLK INOUT.BLK
cinpt1.o: GLOBAL1.BLK MESSG2.BLK CDAT1.BLK CARDIN2.BLK INOUT.BLK CDAT2.BLK
cinput.o: GLOBAL1.BLK MESSG2.BLK INOUT.BLK FILE1.BLK CDAT1.BLK CDAT2.BLK
coos_rcops.o: GLOBAL1.BLK MDD.BLK COOS1.BLK PARAM1.BLK ERROR1.BLK INOUT.BLK \
             MESSG2.BLK
cpcc.o: CPCCDAT.BLK INOUT.BLK
cpcon.o: GLOBAL1.BLK MESSG2.BLK CDAT1.BLK CDAT2.BLK SVCCEA.BLK COUT1.BLK \
          AOUT2.BLK BOUT2.BLK DOUT2.BLK CPCNSE.BLK INOUT.BLK CARDIN1.BLK \
          CPCCDAT.BLK
rcopsimv1m0_Rev08_cpcc.o: INOUT.BLK
cpccout.o: GLOBAL1.BLK FLTP10.BLK CEFAST1.BLK BOUT2.BLK COUT1.BLK CPCCDAT.BLK \
           CPCOUTL.BLK DNBINP.BLK BERCAL1.BLK MESSG2.BLK INOUT.BLK
cpccsim_rcops.o: MESSG1.BLK MESSG2.BLK CEFAST1.BLK CPCNSE.BLK GLOBAL1.BLK FLTP10.BLK \
                CPCCDAT.BLK CPCOUTL.BLK DNBINP.BLK MDD.BLK AOUT2.BLK BOUT2.BLK \
                CARDIN1.BLK CDAT1.BLK CDAT2.BLK ROCDAT.BLK ROCNME.BLK TITLE.BLK \
                BERCAL1.BLK CPCD1.BLK PARAM1.BLK ERRORS.BLK INOUT.BLK FILE1.BLK \

```

COUT1.BLK DOUT1.BLK
 dptest.o: GLOBAL1.BLK NORMTST.BLK NRMTST1.BLK MOMENTS.BLK FDBLK.BLK \
 MESSG2.BLK
 ed.o: FDBLK.BLK
 eject.o: TITLE.BLK
 errctp.o: GLOBAL1.BLK INOUT.BLK
 factor.o: GLOBAL1.BLK APR25IN.BLK
 fdtest.o: GLOBAL1.BLK FDBLK.BLK MOMENTS.BLK
 fibeta.o: BETA1.BLK
 filopn.o: GLOBAL1.BLK INOUT.BLK FILE1.BLK FLRT17.BLK FLTP10.BLK
 flrt17.o: FLRT17.BLK INOUT.BLK MESSG2.BLK FLTP10.BLK GLOBAL1.BLK
 incbeta.o: GLOBAL1.BLK BETA1.BLK MESSG2.BLK
 inout.o: INOUT.BLK
 irate.o: GLOBAL1.BLK MDD.BLK INOUT.BLK
 limlin.o: GLOBAL1.BLK COOS1.BLK PARAM1.BLK INOUT.BLK ERROR1.BLK MESSG2.BLK
 mdtm.o: INOUT.BLK
 messge.o: MESSG1.BLK MESSG2.BLK
 moment.o: MOMENTS.BLK
 noise.o: GLOBAL1.BLK INOUT.BLK
 opm_rcops.o: GLOBAL1.BLK MDD.BLK AOUT2.BLK BOUT2.BLK DOUT1.BLK CPCNSE.BLK \
 CPCOUTL.BLK FLTP10.BLK INOUT.BLK CPCD1.BLK BERCAL1.BLK
 plot.o: INOUT.BLK
 ranf.o: GLOBAL1.BLK
 ranset.o: GLOBAL1.BLK
 rdcord.o: INOUT.BLK ROCNME.BLK ROCCRD.BLK ROC221.BLK ROCASC.BLK
 readinp.o: CARDIN1.BLK MESSG2.BLK GLOBAL1.BLK CPCNSE.BLK FLTP10.BLK \
 CPCOUTL.BLK SVCCEA.BLK CDAT1.BLK BOUT2.BLK CEFAS1.BLK ROCDAT.BLK \
 BERCAL1.BLK INOUT.BLK FILE1.BLK
 roc221.o: INOUT.BLK ROCNME.BLK ROC221.BLK ROCASC.BLK ROCCRD.BLK
 rocedt.o: INOUT.BLK ROCNME.BLK ROCEDT.BLK ROC221.BLK ROCASC.BLK
 rocfil.o: GLOBAL1.BLK INOUT.BLK FLTP10.BLK CDAT1.BLK ROCDAT.BLK ROCNME.BLK \
 CPCOUTL.BLK MESSG2.BLK CARDIN1.BLK ROC221.BLK ROCCRD.BLK ROCEDT.BLK \
 ROCASC.BLK
 stat.o: GLOBAL1.BLK PARAM1.BLK INOUT.BLK ERRORS.BLK MESSG2.BLK
 summary.o: GLOBAL1.BLK MOMENTS.BLK TOLERNC.BLK NORMTST.BLK NRMTST1.BLK \
 MESSG2.BLK INOUT.BLK
 sveinpt.o: GLOBAL1.BLK SVCCEA.BLK MESSG2.BLK INOUT.BLK
 tails.o: GLOBAL1.BLK INOUT.BLK TOLERNC.BLK
 tolimit.o: MOMENTS.BLK TOLERNC.BLK
 update_rcops.o: GLOBAL1.BLK INOUT.BLK CPCNSE.BLK DOUT1.BLK MDD.BLK
 upddrv_rcops.o: GLOBAL1.BLK INOUT.BLK CPCNSE.BLK CPCOUTL.BLK FLTP10.BLK CPCD1.BLK \
 DOUT1.BLK BERCAL1.BLK MESSG2.BLK

DNBR 모듈 Database

RCOPS DNB-OPM 불확실도 해석을 위한 노심설계 자료는 예비적으로 울진 4호기 10주기 자료를 활용하였다. 울진 4호기 10주기는 KNF가 개발한 개량핵연료(PLUS 7)가 균일하게 장전된 노심이다. 본 과제에서 개발한 RCOPS/SCU Simulator(RCOPSIM)와 울진 4호기 10주기 CPCS 전체 불확실도 해석용 노심설계 자료를 이용하여 RCOPS DNB-OPM 불확실도 해석을 수행하였다. RCOPSIM 코드를 실행하기 위해서는 RCOPS DNBR 모듈의 Database가 필요하다.

울진 4호기 10주기에 대한 CETOP-D Model을 이용하여 RCOPS DNB-OPM 불확실도 해석을 위한 RCOPS DNBR 모듈(STATIC)의 Database를 다음과 같이 생산하였다.

CONSTANTS FOR RCOPS STATIC SUBPROGRAM (UCN 4 Cy-10 CETOP-D DB)

```
-----  
MODULE 2  
-----  
CONSTANTS FOR POWER DISTRIBUTION UPGRADE  
RELOAD DATA BLOCK  
CORE AVERAGE HEAT FLUX : BTU/FT**2/SEC  
QAVG 1 1 1900 52.2919  
RELOAD DATA BLOCK  
FRACTION OF POWER GENERATED IN THE FUEL : DIMENSIONLESS  
QFPC 1 1 1901 0.975  
RELOAD DATA BLOCK  
NARROW BAND INTEGRATED ONE PIN RADIAL : DIMENSIONLESS  
BREAK POINTS  
P1B2,3 1 2 1902 1.28 4.28  
RELOAD DATA BLOCK  
NARROW BAND ASI BREAK POINTS : DIMENSIONLESS  
ASIB2,3 1 2 1904 -0.3 0.3  
RELOAD DATA BLOCK  
NARROW BAND MAXIMUM COLD LEG TEMPERATURE : DEGREE F  
BREAK POINTS  
TB2,3 1 2 1906 550.0 572.0  
RELOAD DATA BLOCK  
NARROW BAND RCS PRESSURE BREAK POINTS : PSIA  
PPB2,3 1 2 1908 2000.0 2325.0  
REGION-DEPENDENT ALGORITHM UNCERTAINTY : DIMENSIONLESS  
ALLOWANCES(was E2=1.02 by wki)  
E1,E2 1 2 1910 1.0 1.0  
RELOAD DATA BLOCK  
ASI DEPENDENT FLOW SPLITS : DIMENSIONLESS  
FSPLT1-2 1 2 1912 0.70 0.70  
DNBR UNCERTAINTY FACTOR : DIMENSIONLESS  
(ADDRESSABLE CONSTANT)  
BERR1 1 1 1914 1.0  
RELOAD DATA BLOCK
```

EFFECTIVE NORMALIZED RADIAL PEAKING FACTOR : DIMENSIONLESS
 RADIAL(4) 1 4 1915 1.0 1.0 1.058737 1.069305

MODULE 3

CONSTANTS FOR POWER DISTRIBUTION

RELOAD DATA BLOCK
 I NUMBER OF NODAL SECTIONS : DIMENSIONLESS
 NDX 1 1 1940 40.

RELOAD DATA BLOCK
 I NUMBER OF AXIAL POWER FACTORS : DIMENSIONLESS
 NDXFZ 1 1 1941 20.

RELOAD DATA BLOCK
 ACTIVE FUEL LENGTH : FT
 ZFUEL 1 1 1942 12.475

RELOAD DATA BLOCK
 INTERPOLATION COEFFICIENTS : DIMENSIONLESS
 FZCOF(1-4) 1 4 1943 35.0 21.0 -5.0 0.0625
 FZCOF(5-8) 1 4 1947 5.0 15.0 -5.0 9.0
 FZCOF(9) 1 1 1951 9.0

MODULE 5

CONSTANTS FOR FLOW AND ENTHALPY INITIALIZATION

RELOAD DATA BLOCK
 I NUMBER OF CHANNELS : DIMENSIONLESS
 NCHANL 1 1 2000 4.

RELOAD DATA BLOCK
 RCS PRESSURE BREAK POINTS : PSIA
 PDI(1-4) 1 4 2001 1800. 2100.0 2200.0 2300.
 PDI(5) 1 1 2005 2500.

RELOAD DATA BLOCK
 CONSTANTS TO CALCULATE THE ARRAY HECO : DIMENSIONLESS
 HECL(1-4) 1 4 2006 0.34468 0.32361 0.30664 0.29504
 HECL(5-8) 1 4 2010 0.30025 0.34557 0.32457 0.30156
 HECL(9-12) 1 4 2014 0.29981 0.30095 0.34588 0.32489
 HECL(-16) 1 4 2018 0.30745 0.29815 0.30246 0.34610
 HECL(-20) 1 4 2022 0.32519 0.30769 0.29680 0.30495
 HECL(-24) 1 4 2026 0.34674 0.32584 0.30833 0.29515
 HECL(25) 1 1 2030 0.31927

RELOAD DATA BLOCK
 FLOW AREA FOR CHANNEL 1-4 : FT²
 AFLOW(4) 1 4 2031 .25843 .06461 .003018 .001244

RELOAD DATA BLOCK
 WETTED PERIMETER FOR CHANNEL 1-4 : FT
 PERIM(4) 1 4 2035 24.3903 6.0976 .32624 .12133

RELOAD DATA BLOCK
 EFFECTIVE ROD DIAMETER FOR CHANNEL 1-4 : FT
 DHEAT(4) 1 4 2039 7.3553 1.8388 0.08712 0.02657

RELOAD DATA BLOCK
 EFFECTIVE NORMALIZED RADIAL PEAK FOR CH. 2P : DIMENSIONLESS
 RAA2 1 1 2043 1.031100

RELOAD DATA BLOCK
 EFFECTIVE ROD DIAMETER FOR CH. 2P : FT
 DD2P 1 1 2044 0.208967

RELOAD DATA BLOCK
 FLOW AREA FOR CH. 2P : FT2
 A2P 1 1 2045 0.007563

RELOAD DATA BLOCK
 CORE AVERAGE INLET MASS VELOCITY : LBM/FT**2/SEC
 GAVG 1 1 2046 708.3889

MODULE 6

CONSTANTS FOR PREDICTION-CORRECTION OF FLOW AND ENTHALPY

RELOAD DATA BLOCK
 RATIO OF MAX. ROD RADIAL PEAK OF CH.2 : DIMENSIONLESS
 P1PB 1 1 2060 1.0724

RELOAD DATA BLOCK
 FLOW AREA FOR CH. 22 : FT2
 A22 1 1 2061 .010124

RELOAD DATA BLOCK
 NUMBER OF SPACER GRIDS : DIMENSIONLESS
 I
 NGRID 1 1 2062 10.

RELOAD DATA BLOCK
 OPTION TO INPUT DIFFERENT SPACER GRID TYPES : DIMENSIONLESS
 GRIDKIJ(4)1 4 2063 1. 2. 2. 2.
 GRIDKIJ(4)1 4 2067 2. 2. 2. 2.
 GRIDKIJ(4)1 4 2071 2. 2. 0. 0.

RELOAD DATA BLOCK
 RELATIVE GRID LOCATION : DIMENSIONLESS
 GRIDXL(4) 1 4 2075 .0217 .1174 .2224 .3274
 GRIDXL(4) 1 4 2079 .4324 .5374 .6424 .7474
 GRIDXL(4) 1 4 2083 .8524 .9574 .0000 .0000

RELOAD DATA BLOCK
 EFFECTIVE RADIAL PEAKING FACTOR FOR CH. 1 : DIMENSIONLESS
 RADIM1 1 1 2087 1.0

RELOAD DATA BLOCK
 EFFECTIVE NORMALIZED RADIAL PEAKING FACTOR : DIMENSIONLESS
 FOR CH. 2"
 RAA22 1 1 2088 1.016637

RELOAD DATA BLOCK
 EFFECTIVE ROD DIAMETER FOR CH. 2" : FT
 DD22 1 1 2089 0.305283

RELOAD DATA BLOCK
 GAP BETWEEN CH. 2' AND 2" : FT
 GAP2P 1 1 2090 0.19651

RELOAD DATA BLOCK
 GAP BETWEEN CH. 2" AND 3 : FT
 GAP22 1 1 2091 0.27651

RELOAD DATA BLOCK
 GAP BETWEEN CH. I AND I+1 : FT
 GAP(1-3) 1 3 2092 .09150 .10851 .04251

XLIM 1 1 2095 0.995

MODULE 8

CONSTANTS FOR PARAMETERS AT MIN. DNBR.

RELOAD DATA BLOCK
CONSTANTS FOR CHF CORRELATION(KCE-1) : DIMENSIONLESS
CCHF5-8 1 4 2120 -0.14044 3.6533E-4 1.6483E-4 -0.0092941

RELOAD DATA BLOCK
DNBR ADJUSTMENT FACTORS : DIMENSIONLESS
EDNB1-2 1 2 2124 1.0 0.0

MODULE 9

CONSTANTS FOR CALCULATING AVERAGE CORE ENTHALPY RISE

LOWER RANGE LIMIT ON HOT LEG TEMPERATURE : DEGREE F
THLIM 1 1 2130 482.0

LOWER LIMIT ON COLD LEG TEMPERATURE FOR THERMAL : DEG F
PWR CALCULATED HOT LEG IS .LT. THLIM
TINLIM 1 1 2131 472.0

PRESSURE DEPENDENT COEFFICIENTS USED TO : X=BTU/LBM
DETERMINE ENTHALPY-TEMPERATURE RATIOS Y=DEG F
Z=PSIA
X/Y,X/Y/Z,X/Y**2,X/Y**2/Z,X/Y**3,X/Y**3/Z,
X/Y**4,X/Y**4/Z
HTR00-01 2 2 2132 1.40389 -8.95646E-04
HTR10-11 2 2 2134 -2.24636E-03 4.94459E-06
HTR20-21 2 2 2136 2.93975E-06 -8.93325E-09
HTR30-31 2 2 2138 -3.32787E-10 5.25863E-12

RELOAD DATA BLOCK
HOT LEG TEMPERATURE UNCERTAINTY (ADDITIVE) : DEGREE F
THERR 1 1 2140 13.0

SUBROUTINE

PROP

TEMPERATURE BREAK POINTS : DEGREE F
TDI(1-4) 1 4 2150 460.0 520.0 580.0 640.0
TDI(5) 1 1 2154 700.0

RELOAD DATA BLOCK
HEATED PERIMETER FOR CH. I : FT
HPERIM(4) 1 4 2155 23.1075 5.7769 .27368 .08346

SUBROUTINE

CIJMIX

RELOAD DATA BLOCK
HETSRONI CROSSFLOW RESISTANCE : DIMENSIONLESS
KIJ 1 1 2170 1.4

RELOAD DATA BLOCK
TURBULENT MIXING COEFFICIENT : DIMENSIONLESS
ABETA 1 1 2171 0.0101

GRAVITATIONAL CONVERSION CONSTANT : FT/SEC**2
GC 1 1 2172 32.2

RELOAD DATA BLOCK
TURBULENT MIXING COEFFICIENT : FT^-1
COMIX 1 1 2173 87.432

SUBROUTINE

DIFFER

RELOAD DATA BLOCK
VELOCITY TRANSPORT COEFFICIENTS : DIMENSIONLESS
CU(1-3) 1 3 2180 1.0 3.3 1.0

RELOAD DATA BLOCK
GRID LOSS COEFFICIENTS : DIMENSIONLESS
CAA(1-3) 1 3 2183 .329 .506 0.0
CBB(1-3) 1 3 2186 4.34 6.030 0.0
CCC(1-3) 1 3 2189 -0.20 -0.20 0.0

SUBROUTINE

DIVERT

RELOAD DATA BLOCK
PRESSURE TRANSPORT COEFFICIENTS : DIMENSIONLESS
CNPC(1-3) 1 3 2200 1.0 0.33 1.5

SUBROUTINE

CHF

RELOAD DATA BLOCK
FUEL ROD HEAT FLUX ENGINEERING FACTOR : DIMENSIONLESS
SKECDK 1 1 2220 1.0

CONSTANTS FOR CE-1 CORRELATION PARAMETERS

RELOAD DATA BLOCK
CONSTANTS FOR CHF CORRELATION(KCE-1) : DIMENSIONLESS
CCE0,CCHF 1 3 2221 0.564845 613.58 -0.14560

표 C5 MSCU 방법론에 포함된 불확실도 변수

	MSCU 불확실도
<p>계통 변수 (System Parameter)</p>	<p>Core Inlet Flow Distribution Engineering Factor on Enthalpy Rise Systematic Fuel Rod Pitch Systematic Fuel Clad Diameter Engineering Factor on Heat Flux CE-1 CHF Correlation (including croee validation uncertainty) TORC Code uncertainty Fuel Rod Bow Penalty HID-1 Grid Penalty</p>
<p>상태 변수 (State parameter)</p>	<p>Measured State Parameter Uncertainties Algorithm Uncertainty Startup Measurement Uncertainties Radial Peaking Factor Measurement Uncertainty Computer Processing Uncertainties Simulator Model Uncertainties Rod Bow Penalty on Fxy</p>

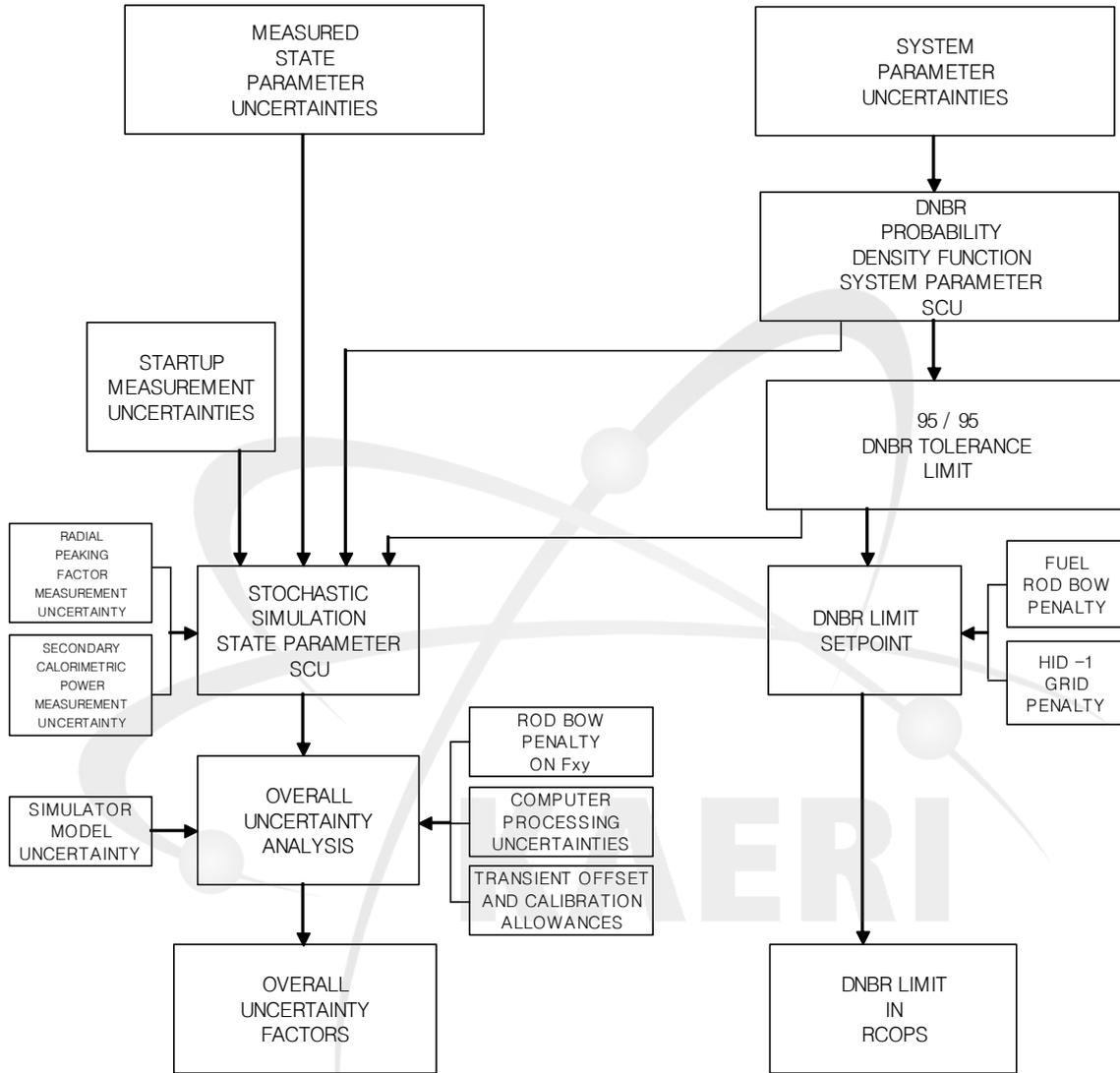


그림 C7 DNBR 전체 불확실도 해석을 위한 MSCU 방법론

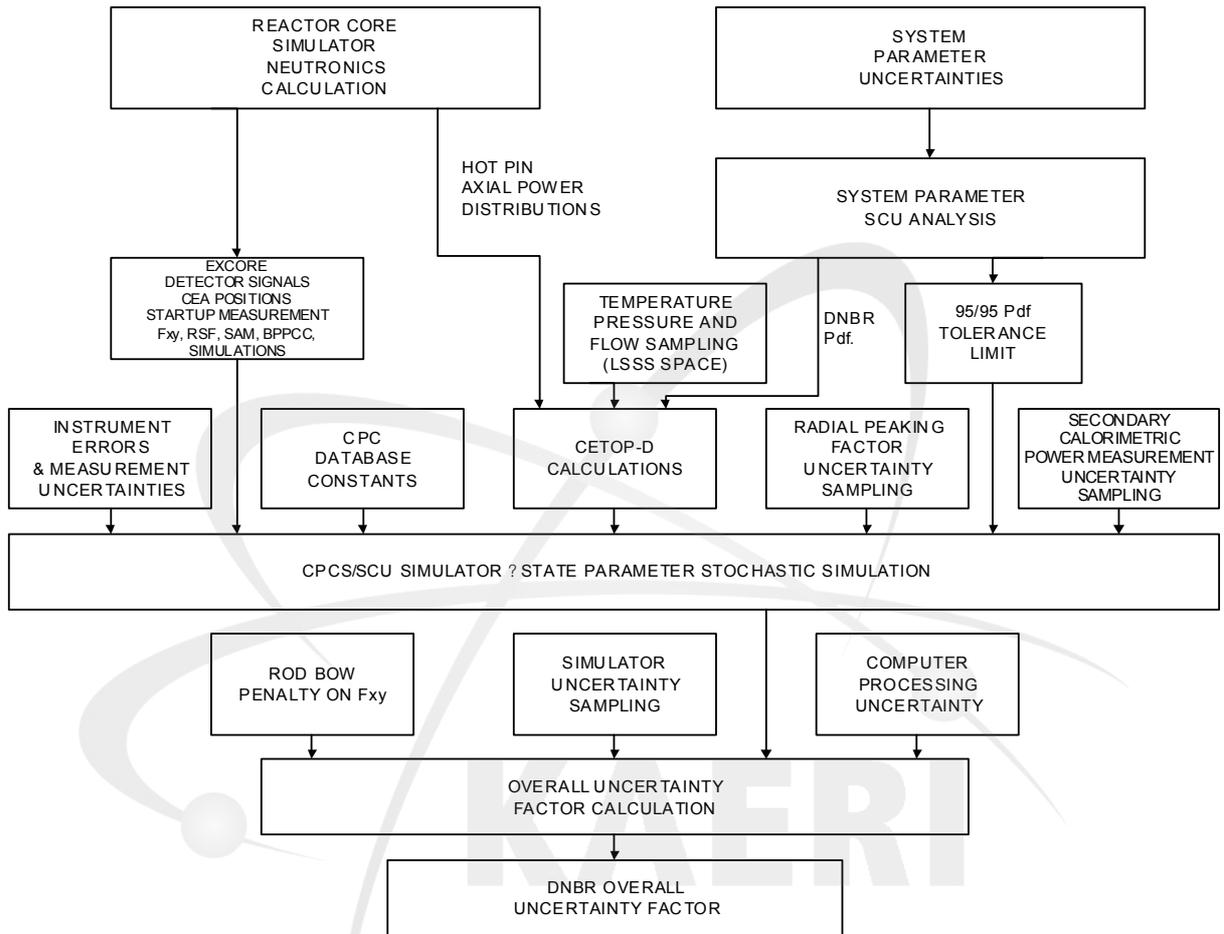


그림 C8 CPCS(RCOPS)의 DNBR 불확실도 해석 절차

DNBR 모듈 불확실도

RCOPS DNBR 모듈은 CPCS DNBR 모듈(CETOP2)을 CETOP-D 코드로 대체한 것이므로 RCOPS DNBR 모듈에 대한 불확실도는 RCOPS MDNBR과 CETOP-D MDNBR의 오차를 계산하여 분석하였다. RCOPS와 CPCS DNBR 모듈의 불확실도를 비교하기 위하여 CPCS MDNBR과 CETOP-D MDNBR의 오차도 계산하였다. 즉, RCOPS/CPCS MDNBR 오차는 다음과 같이 정의하였다.

$$E_{MDNBR} = \frac{MDNBR(CETOP-D) - MDNBR(RCOPS/CPCS)}{MDNBR(CETOP-D)} \quad (C1)$$

RCOPS와 CPCS MDNBR의 오차를 계산하기 위해 다양한 원자로 노심 운전조건을 모의하였다. 표 C6는 본 계산에 사용한 국내 표준원자로인 OPR1000(PLUS 7 핵연료 장진노심)의 광범위한 노심 운전조건을 나타낸다. 그림 C9는 울진 4호기 10주기 노심의 주요 연소도인 주기초(LBOC), 주기중반(LMOC) 및 주기말(LEOC)에서의 대표적인 축방향 출력분포를 보여준다. LBOC 출력분포는 노심 중심부에서 출력이 높은 분포를 보이고 있으며 LMOC와 LEOC는 노심 중심부 출력이 낮고 노심 상하부 근처에서 출력이 높아지는 특징을 나타낸다.

그림 C10-C12는 상기 노심 운전조건에서 계산한 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차를 비교한 것이다. RCOPS와 CPCS 모두 MDNBR 오차가 양의 값을 나타내고 있는데 이는 MDNBR이 참조코드인 CETOP-D MDNBR 보다 높게 계산된 것을 의미한다. 그림 C13-C15는 CETOP-D MDNBR 대비 RCOPS와 CPCS MDNBR를 비교한 것으로 RCOPS와 CPCS MDNBR이 다소 높은 것을 확인 할 수 있다. 특히 CPCS가 RCOPS에 비해 다소 높은 MDNBR 값을 보이고 있으며 MDNBR 오차의 변화도 큰 것을 알 수 있다.

그림 C16-C18은 울진 4호기 10주기 주요 연소도(LBOC, LMOC, LEOC)에서의 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차의 확률분포를 비교한 것이다. 모든 연소도에서 RCOPS의 MDNBR 오차가 현저히 작은 것을 알 수 있다. CPCS MDNBR의 평균오차는 약 1.3%-1.5%인 반면에 RCOPS의 경우에는 약 0.2%-1%로 감소하였다. CPCS MDNBR의 최소오차(Min)와 최대오차(Max)는 0.0065/0.0209(LBOC), -0.0062/0.0289(LMOC)과 -0.0113/0.0311(LEOC) 이다. 한편, RCOPS MDNBR의 최소오차(Min)와 최대오차(Max)는 0.0006/0.0063(LBOC), 0.0012/0.014(LMOC)와 -0.0045/0.0204이다. CPCS와 RCOPS 모두 LEOC에서 MDNBR 오차가 큰 것을 알 수 있다.

RCOPS MDNBR 오차의 원인은 시험계산에 사용한 노심 축방향 출력분포가 CETOP-D의 출력분포와 다소 다르기 때문이다. 이것은 CETOP-D의 경우 시험출력분포를 그대로 사용하지만 RCOPS의 경우 실시간 출력분포합성법과 동일한 방법으로 합성된 축방향 출력분포를 사용하기 때문이다. 그림 C19는 대표적인 시험출력분포(CETOP-D 출력분포)와 RCOPS 출력분포의 상대오차를 나타낸 것으로 노심의 상하부(10%)에서 큰 차이를 보이고 있다. 노심 축방향 전체노드와 상하부 10%를 제외한 노드에서의 출력분포 RMS(Root-Mean-Square) 오차는 각각 약 12% 와

0.7%이다.

표 C7은 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차의 통계량(평균오차, 표준편차, Skewness, Kurtosis)을 요약한 것이다. 여기서 Skewness와 Kurtosis는 각각 오차 확률분포의 대칭성과 편평도를 나타내는 통계인자이다. Skewness 값이 0.0인 경우 완전대칭 확률분포를 의미하며 이상적인 정규확률분포(Normal Probability Distribution)의 Kurtosis 값은 3.0이다. LBOC에서 RCOPS MDNBR 오차의 Skewness와 Kurtosis 값이 다소 큰데 이는 오차 확률분포가 비대칭이며 뾰족한 모양을 나타내고 있음을 의미한다. LEOC에서의 RCOPS MDNBR 오차의 Skewness와 Kurtosis는 각각 0.06과 3.3으로 이상적인 정규확률분포에 가장 가까운 오차분포를 의미하며 그림 12에서 확인이 가능하다. RCOPS MDNBR 오차의 평균과 표준편차가 CPCS에 비해 현저히 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히 LBOC와 LMOC에서의 RCOPS MDNBR 오차가 CPCS에 비해 크게 감소한 것을 알 수 있다. RCOPS의 DNBR 모듈은 CPCS에 비해 MDNBR 평균오차는 0.4%-1% 감소하였고 표준편차는 약 0.2% 작은 것으로 나타났다.

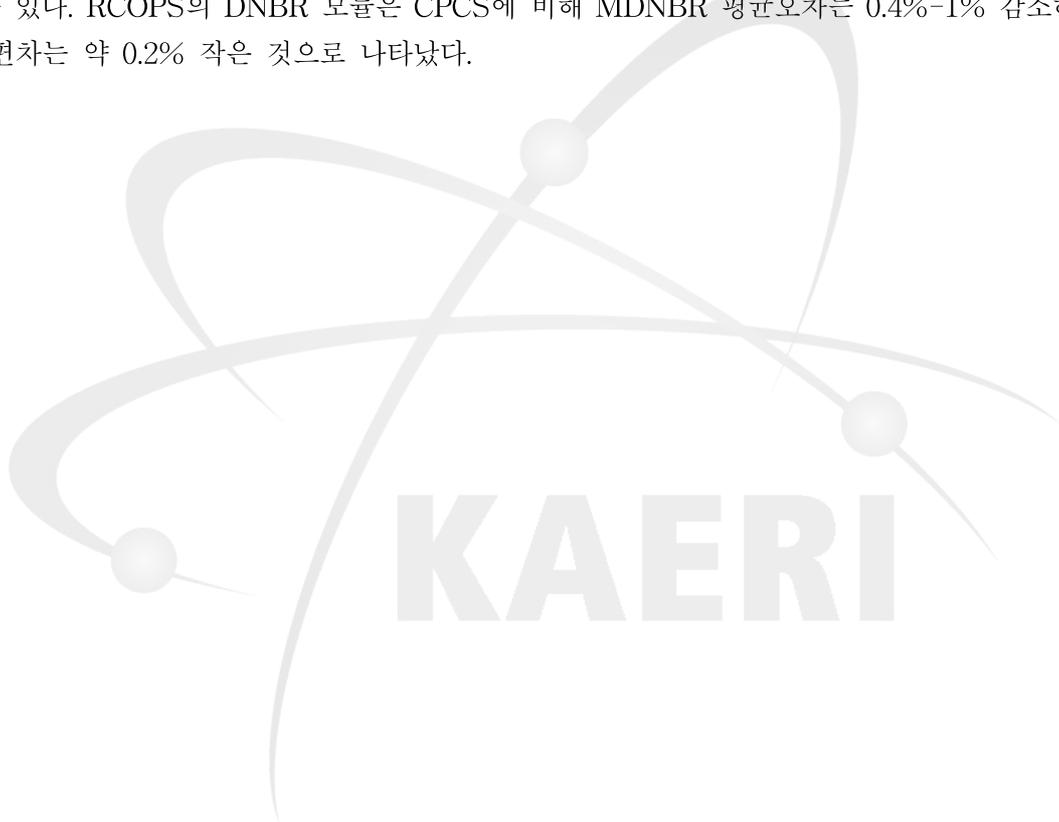


표 C6 원자로(OPR1000) 노심 운전조건

노심운전 인자	값
노심출력(%)	53 - 197
노심입구 온도(°F)	500 - 595
노심 압력(psia)	1785 - 2415
노심 유량(%)	85 - 115
반경방향 출력침투(Fr)	1.40 - 1.61
축방향 출력분포(Axial Shape Index)	-0.6 - +0.6

표 C7 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 통계

연소도 (표본개수)	계통구분	평균오차	표준편차	Skewness	Kurtosis
LBOC (1173)	CPCS	0.0127	0.0020	0.6565	4.54
	RCOPS	0.0023	0.0008	1.6734	7.01
LMOC (1173)	CPCS	0.0152	0.0046	-0.3046	3.58
	RCOPS	0.0071	0.0022	0.1978	2.69
LEOC (1167)	CPCS	0.0144	0.0051	-0.3893	4.69
	RCOPS	0.0105	0.0030	0.0609	3.30

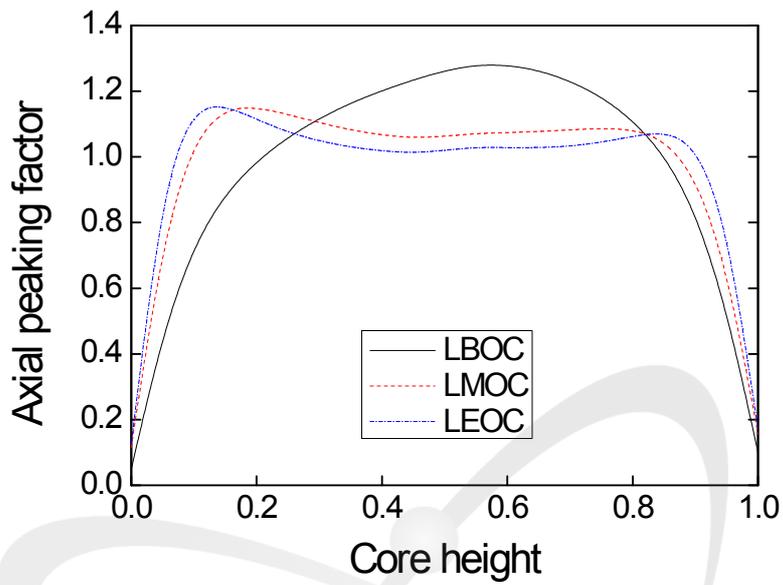


그림 C9 OPR1000(울진 4호기 10주기) 주요 연소도에서의 노심 축방향 출력분포

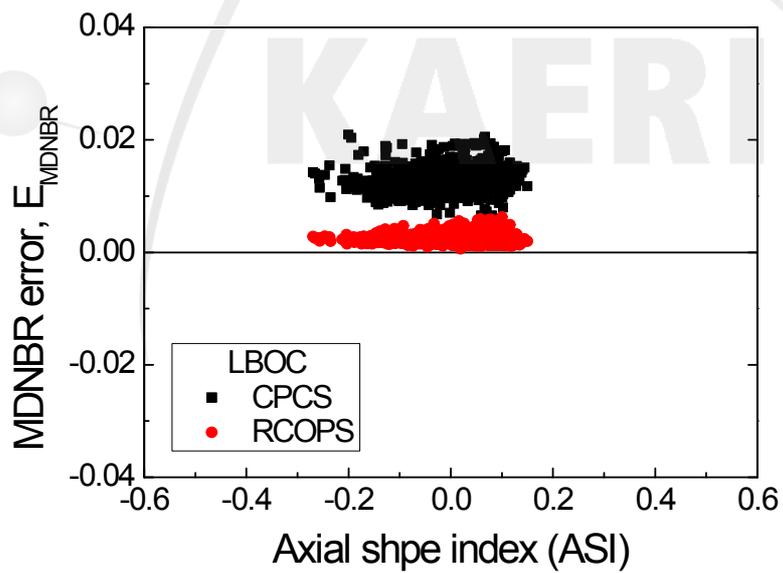


그림 C10 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LBOC)

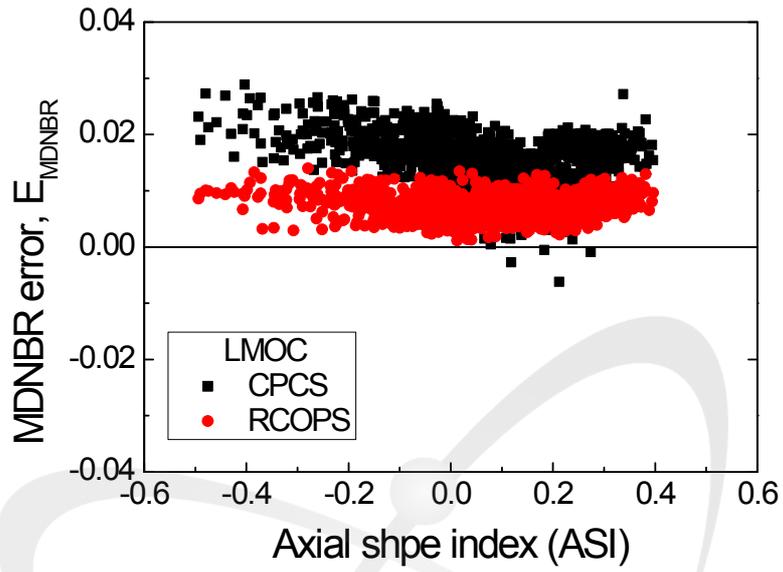


그림 C11 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LMOC)

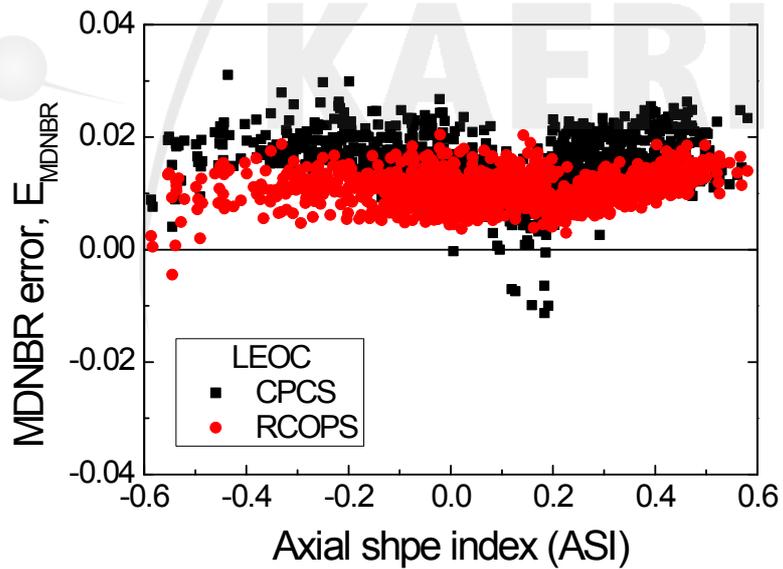


그림 C12 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 오차(울진 4호기 10주기 LEOC)

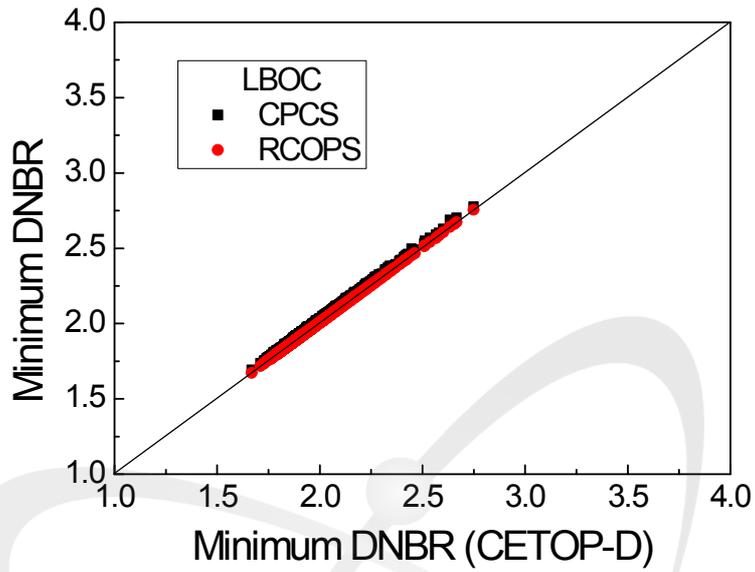


그림 C13 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 비교(울진 4호기 10주기 LBOC)

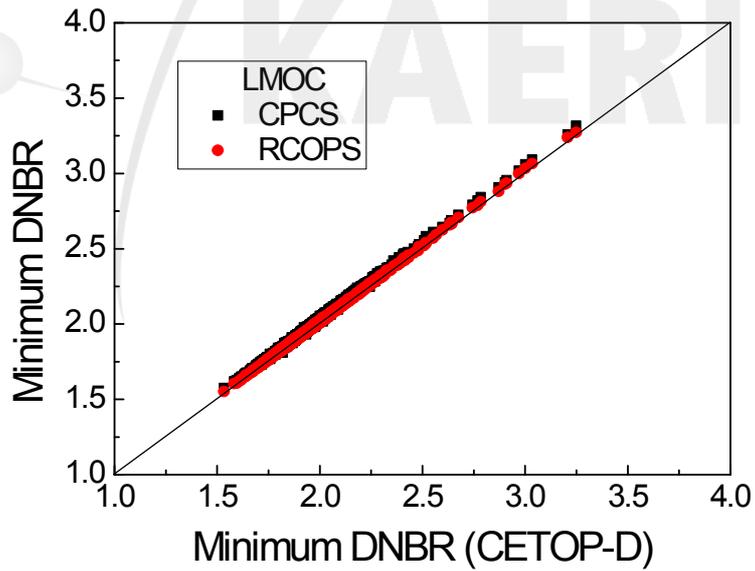


그림 C14 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 비교(울진 4호기 10주기 LMOC)

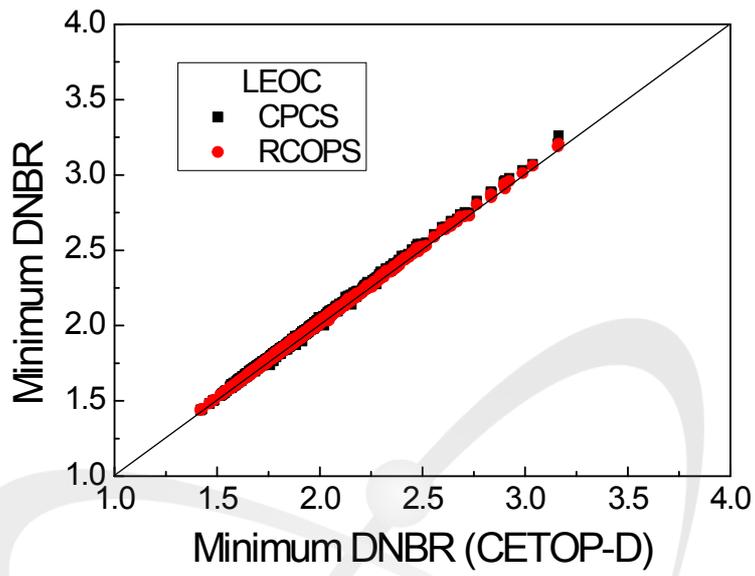


그림 C15 RCOPS와 CPCS의 MDNBR 비교(울진 4호기 10주기 LEOC)

KAERI

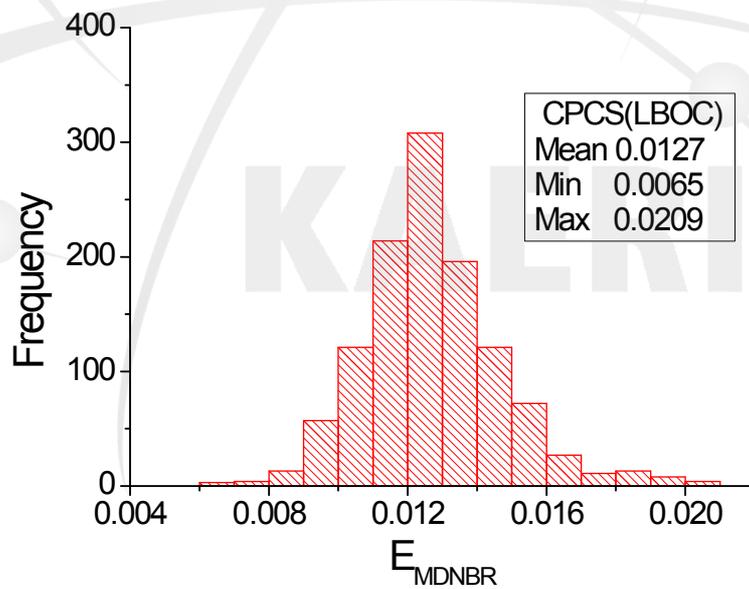
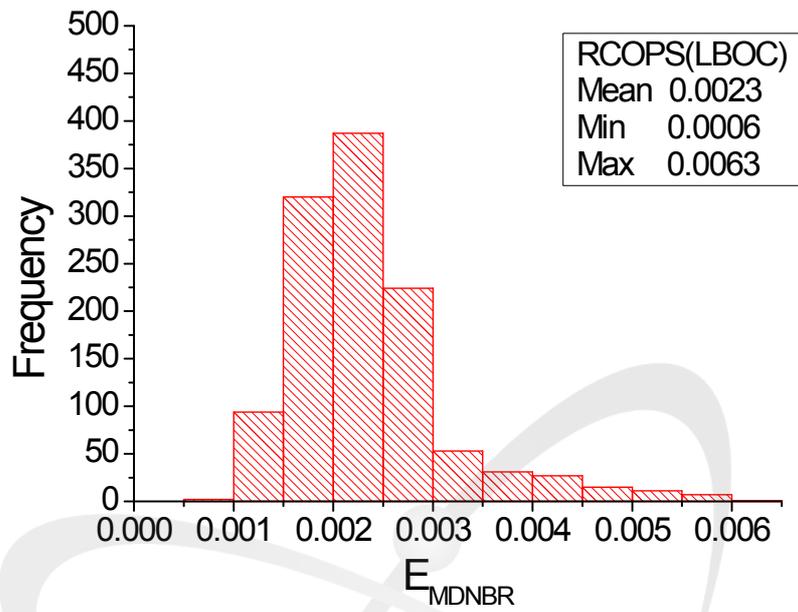


그림 C16 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 확률분포(올진 4호기 10주기 LBOC)

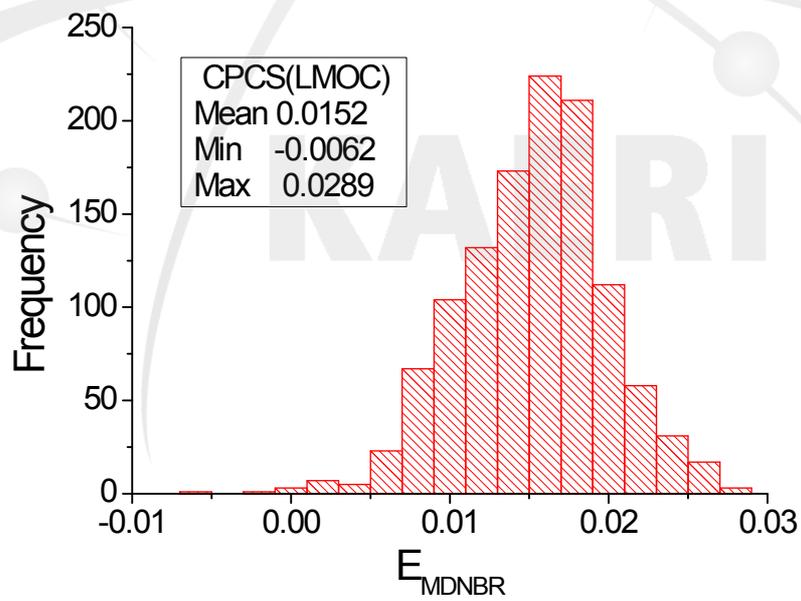
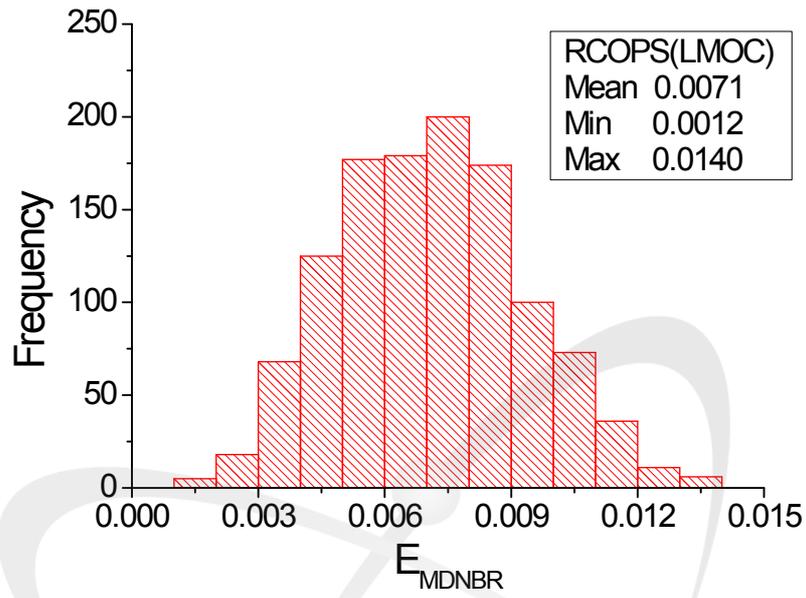


그림 C17 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 확률분포(울진 4호기 10주기 LMOC)

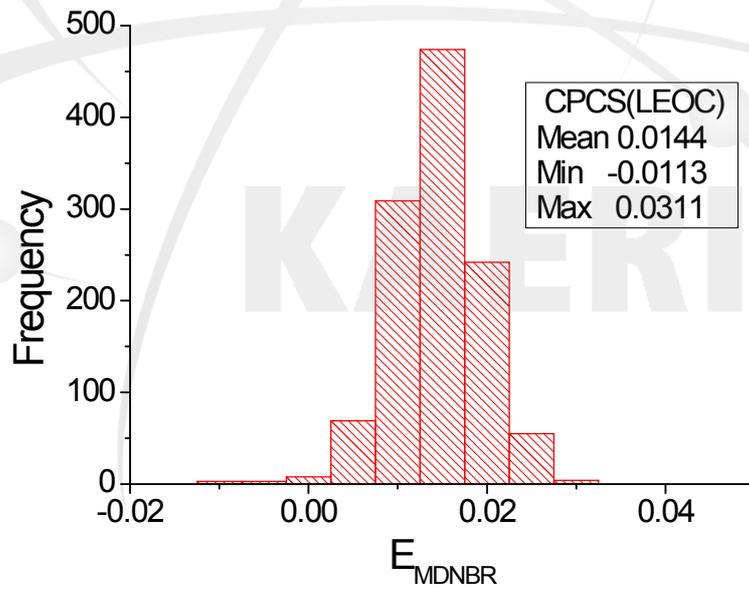
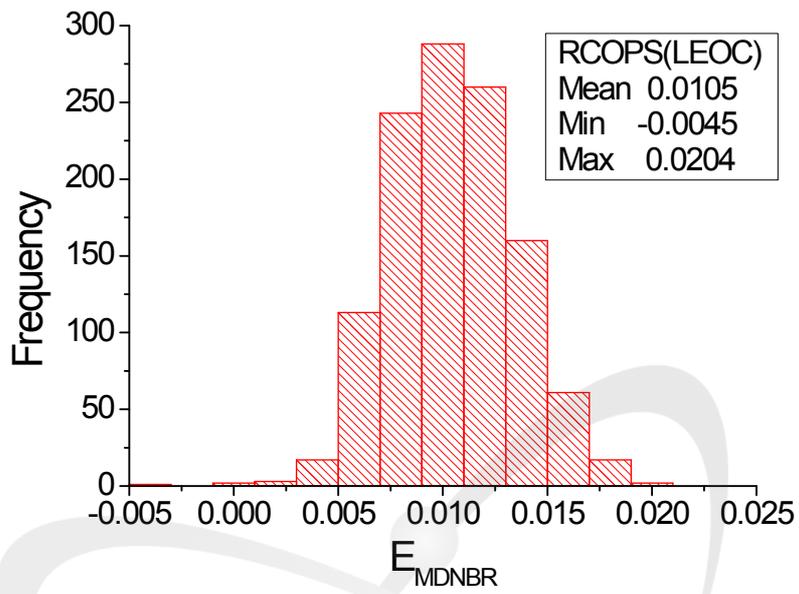


그림 C18 RCOPS와 CPCS MDNBR 오차 확률분포(울진 4호기 10주기 LEOC)

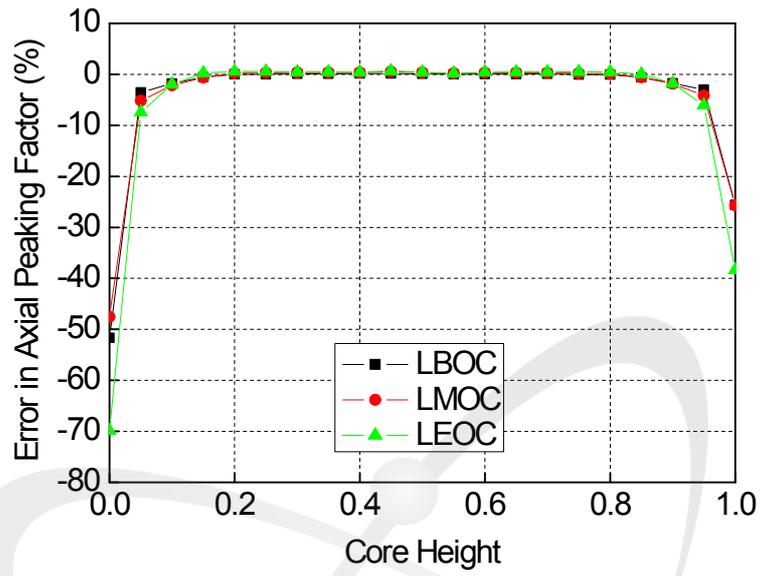


그림 C19 CETOP-D와 RCOPS의 축방향 출력분포 상대오차

KAERI

DNBR 전체 불확실도

RCOPS/SCU Simulator(RCOPSIM) 및 울진 4호기 10주기(PLUS 7 연료 장전노심) 노심설계 자료를 이용하여 RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석을 수행하였다. RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석은 MSCU 방법론을 적용하여 CPCS DNBR 전체 불확실도 해석절차와 동일하게 수행되었다. 즉 RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석을 위해서 CPCS/SCU Simulator인 CPCSIM 코드를 RCOPS/SCU Simulator인 RCOPSIM 코드로 대체하였다. CPCS와 RCOPS DNBR 전체 불확실도 해석에 필요한 주요 입력자료는 노심 핵적계산 결과(고온봉 출력분포, 노외 계측기 신호, 제어봉 위치 등), 기준 DNBR 계산코드인 CETOP-D의 DNB-OPM, CPCS(RCOPS) Database 및 계측기 오차 등이다. DNBR 전체 불확실도 해석을 위한 주요 노심운전 인자의 범위는 표 C6와 같으며 CPCS(또는 RCOPS)의 운전영역을 포함하고 있다. 그림 C20-C23은 본 DNBR 전체 불확실도 해석에 사용한 울진 4호기 10주기 주요 연소도(SBOC, LBOC, LMOC, LEOC)에서의 주요 노심 운전인자(ASI, 입구온도, 유량, 압력)의 분포를 도시한 것이다. CPCS와 RCOPS의 허용 운전범위를 충분히 포함하는 광범위한 운전조건이 사용되었음을 확인할 수 있다.

광범위한 노심 운전범위에서 무작위로 선택한 각각의 운전조건과 다양한 노심 출력분포를 이용하여 CETOP-D 코드로 계산한 기준 DNB-OPM과 CPCSIM 또는 RCOPSIM으로 계산한 DNB-OPM을 비교하여 CPCS와 RCOPS 각각의 DNBR 전체 불확실도 인자(BERR1)를 결정한다. 즉, BERR1을 결정하기 위한 CPCS 또는 RCOPS DNB-OPM의 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$E_i = \left[\frac{DNB-OPM(CPCS/RCOPS) - DNB-OPM(CETOP-D)}{DNB-OPM(CETOP-D)} \right]_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (C2)$$

여기서 N은 DNB-OPM 오차의 통계분석을 위한 표본 개수를 의미하며 약 1200개의 표본 운전조건을 모의한다.

CPCS와 RCOPS DNB-OPM 불확실도의 주요 인자는 DNBR 모듈의 모델 불확실도, 노심 출력분포의 측정 불확실도 및 계측기 오차이다. 각각의 DNB-OPM 불확실도 인자들을 통계적으로 결합하여 DNB-OPM 오차의 확률분포를 구한다. DNB-OPM 오차의 확률분포를 분석하여 95% 확률과 95% 신뢰수준의 한방향 상한치(One-sided Upper Tolerance Limit)를 결정하여 BERR1 값을 계산한다.

DNB-OPM의 오차 확률분포가 정규분포(Normal Distribution)인 경우 95/95 한방향 상한치(UTL95/95)는 다음과 같이 계산된다.

$$UTL_{95/95} = \mu + K_{95/95}\sigma \quad (C3)$$

DNB-OPM의 오차 확률분포가 비정규분포인 경우에는 Non-parametric 기법을 이용하여 95/95 한방향 상한치를 결정한다. 즉 오차 크기를 오름차순으로 정렬하여 최대 오차 위치로부터 자료 개수를 세어 95/95 상한치의 위치를 찾는다. 즉, 순위통계(Order Statistics)와 이항(Binomial) 확률분포를 이용하여 한방향 상한치를 결정할 수 있는 위치인자를 계산한다.

DNB-OPM의 오차 확률분포에 대한 정규분포 여부는 D' 시험[6]을 이용하여 판정하였다. 즉 D' 시험은 통계량 D' 값이 주어진 신뢰수준에서 지나치게 작거나 큰 경우 시험대상 오차 확률분포가 비정규분포인 것을 의미한다. 정규분포 시험 통계인자 D' 은 아래와 같이 정의된다.

$$D' = \frac{T}{S} \quad (C4)$$

여기서 S와 T는 오름차순으로 정렬된 DNB-OPM 오차(E_i)에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$S^2 = \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \quad (C5)$$

$$T = \sum_{i=1}^N \{i - (n+1)/2\} E_i \quad (C6)$$

그림 C24-C27은 울진 4호기 10주기에 대한 CPCS DNB-OPM 오차의 확률분포 및 통계량을 나타낸 것이다. 연소도 SBOC(표본개수 N=1090)에서의 CPCS DNB-OPM 오차의 최소와 최대 값은 각각 -0.2009 및 0.1377이며 평균 값은 -0.0339를 보이고 있다. 오차 확률분포에 대한 D' 시험(DPRIME Test) 결과 정규분포로 판정되었음을 알 수 있다. 연소도 LBOC(표본개수 N=1094)에서의 CPCS DNB-OPM 오차의 평균 및 최소값/최대값은 각각 -0.0438 및 -0.2079/0.1475 이다. D' 시험결과 DNB-OPM 오차분포는 정규분포로 판정되었다. 연소도 LMOC(표본개수 N=948)에서의 CPCS DNB-OPM 오차의 평균 및 최소값/최대값은 각각 -0.0777 및 -0.2380/0.1527 이다. DNB-OPM 오차분포는 D' 시험을 통과하였으나 정규분포의 판정기준을 만족하지 못해서 오차분포의 상한치는 정규분포와 비정규분포에 대한 값들중 보수적인 것으로 결정한다. 연소도 LEOC(표본개수 N=836)의 경우 CPCS DNB-OPM 오차의 평균 및 최소값/최대값은 각각 -0.0759 및 -0.2495/0.2192 이다. DNB-OPM 오차분포는 D' 시험을 통과하였으나 정규분포의 판정기준을 만족하지 못해서 비정규분포로 결정되었다.

그림 C28-C31은 울진 4호기 10주기에 대한 RCOPS DNB-OPM 오차의 확률분포 및 통계량을 나타낸 것이다. 연소도 SBOC(표본개수 N=1090)에서의 RCOPS DNB-OPM 오차의 최소와 최대 값은 각각 -0.2076 및 0.1257이며 평균 값은 -0.0418이다. 오차 확률분포에 대한 D' 시험결과 정규분포로 판정되었음을 알 수 있다. 연소도 LBOC(표본개수 N=1095)에서의 RCOPS DNB-OPM 오차의 평균 및 최소값/최대값은 각각 -0.0503 및 -0.2558/0.1359 이다. D' 시험결과 DNB-OPM 오차분포는 정규분포로 판정되었다. 연소도 LMOC(표본개수 N=948)에서의 RCOPS DNB-OPM

오차의 평균 및 최소값/최대값은 각각 -0.0798 및 $-0.2600/0.1430$ 이다. D' 시험결과 DNB-OPM 오차분포는 정규분포로 판정되었다. 연소도 LEOC(표본개수 $N=832$)의 경우 RCOPS DNB-OPM 오차의 평균 및 최소값/최대값은 각각 -0.0794 및 $-0.2927/0.1898$ 이다. DNB-OPM 오차분포는 D' 시험을 통과하였으나 정규분포의 판정기준을 만족하지 못해서 오차분포의 상한치는 정규분포와 비정규분포에 대한 값들중 보수적인 것으로 결정한다.

표 C8은 RCOPS와 CPCS DNB-OPM 오차 통계량을 비교한 것으로 RCOPS는 CPCS에 비해 평균오차가 약 0.3%-0.8% 낮은 것을 알 수 있다. RCOPS와 CPCS DNB-OPM 오차의 표준편차는 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데 이것은 합성된 노심 축방향 출력분포의 오차가 포함되었기 때문인 것으로 판단된다. 표 C9는 RCOPS와 CPCS DNB-OPM의 전체 불확실도 인자(BERR1)을 비교한 것이다. 연소도 LEOC에서는 BERR1 값의 차이가 없지만 최대 BERR1 값은 SBOC에서 각각 1.0597(RCOPS)과 1.0683(CPCS)로 RCOPS가 약 0.8% 낮아지는 것으로 예측되었다.

상기 RCOPS 및 CPCS DNB-OPM 불확실도 해석결과는 RCOPS DNB-OPM 불확실도 해석용 전산코드의 검증 및 RCOPS 노심 열적여유도 평가를 위한 예비결과이다. 최종 DNB-OPM 불확실도 해석결과 및 노심 열적여유도 평가는 향후 RCOPS가 적용될 신울진 1,2호기 노심설계 자료를 바탕으로 수행되어야 한다.

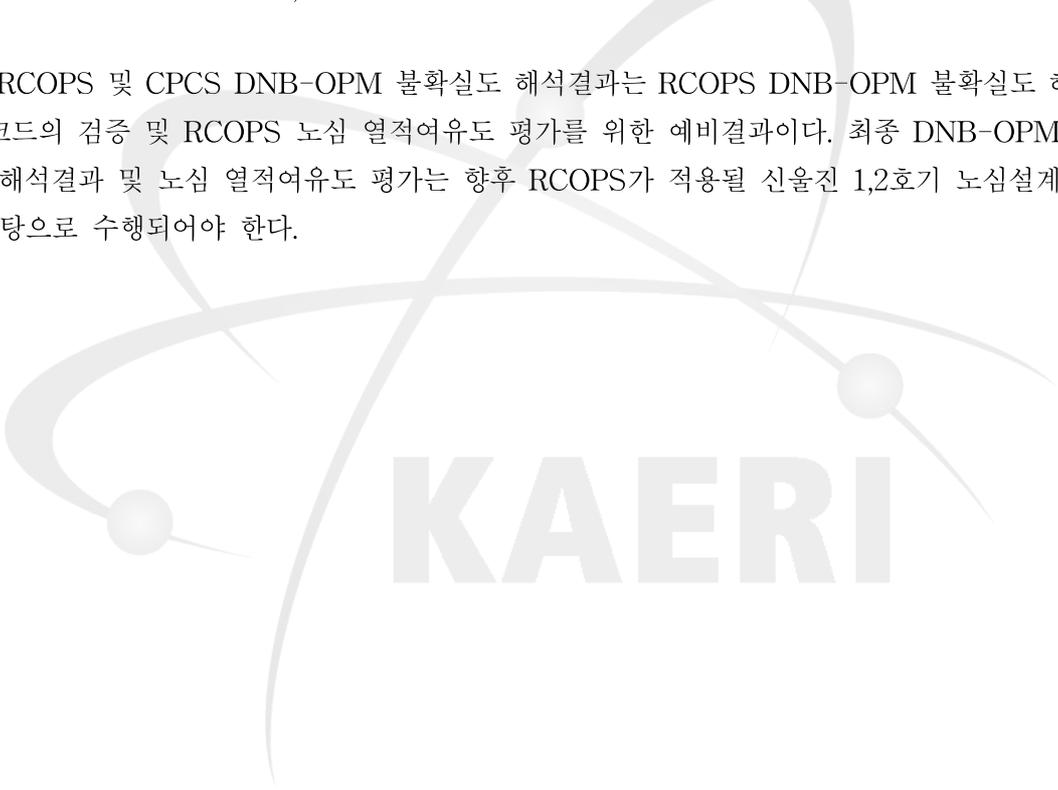
The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three orbiting spheres and a central nucleus, rendered in a light gray color. Below the graphic, the word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font, also in light gray.

표 C8 RCOPS와 CPCS DNB-OPM 오차 통계

연소도 (표본개수)	계통구분	평균오차	표준편차	Skewness	Kurtosis
SBOC (1090)	CPCS	-0.0339	0.0563	0.1434	2.96
	RCOPS	-0.0418	0.0559	0.1396	2.97
LBOC (1094)	CPCS	-0.0438	0.0566	0.1246	3.04
	RCOPS	-0.0503	0.0549	0.1192	3.11
LMOC (948)	CPCS	-0.0777	0.0534	0.3041	3.25
	RCOPS	-0.0798	0.0565	0.2086	3.11
LEOC (836)	CPCS	-0.0759	0.0606	0.4235	3.82
	RCOPS	-0.0794	0.0607	0.2094	3.32

표 C9 RCOPS와 CPCS DNB-OPM 불확실도 인자(BERR1)

계통구분	SBOC	LBOC	LMOC	LEOC
CPCS	1.0683	1.0588	1.0248	1.0380
RCOPS	1.0597	1.0496	1.0231	1.0380

KAERI

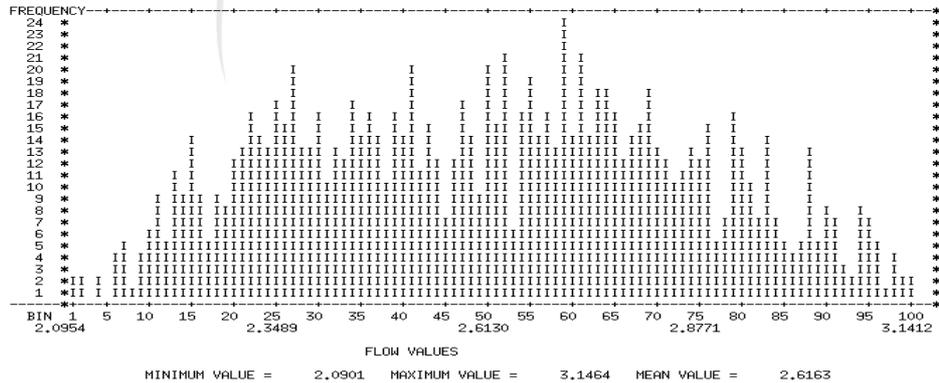
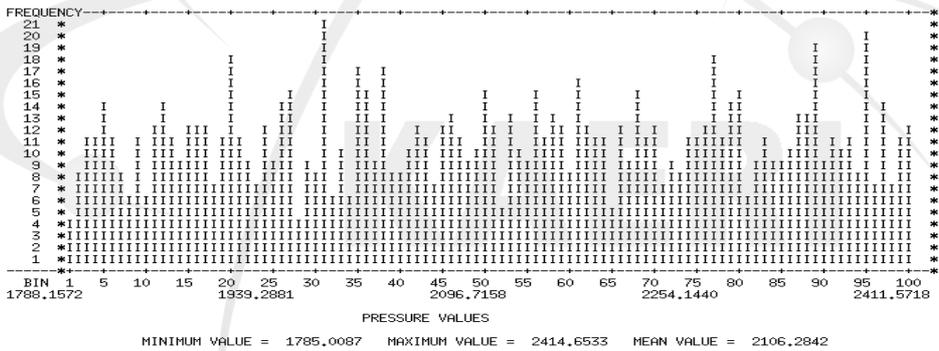
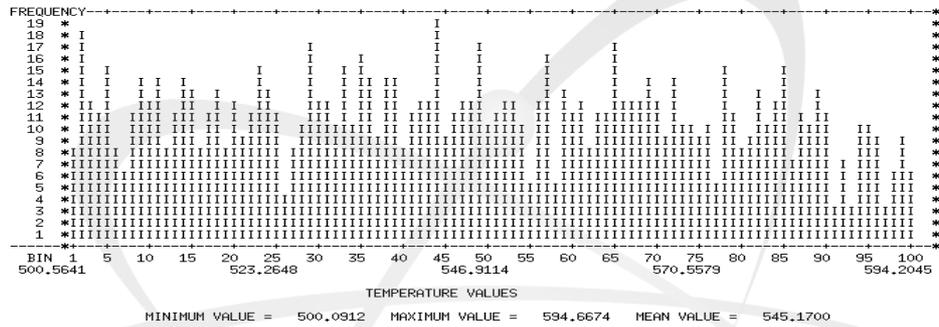
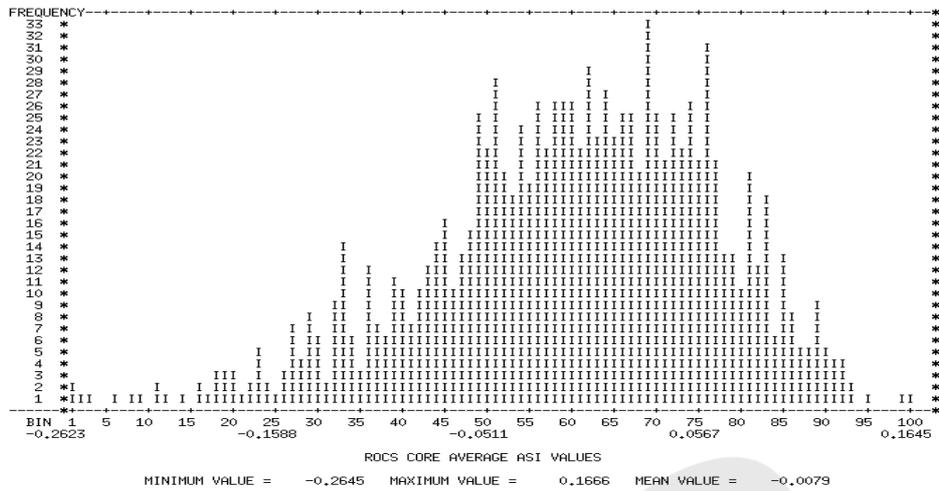


그림 C20 DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(SBOC)

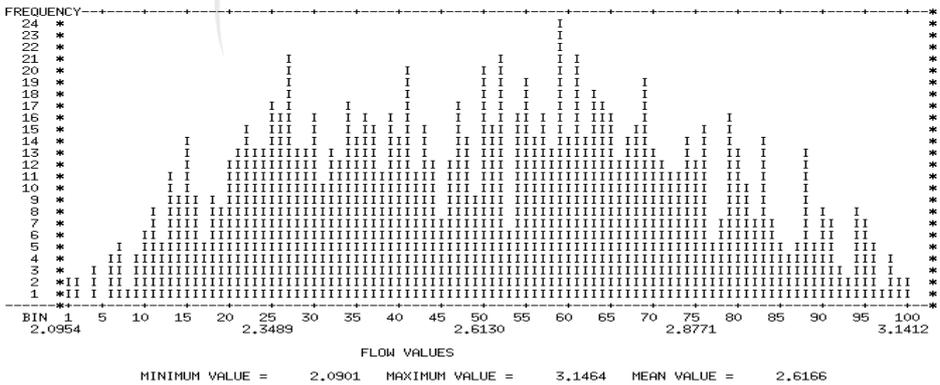
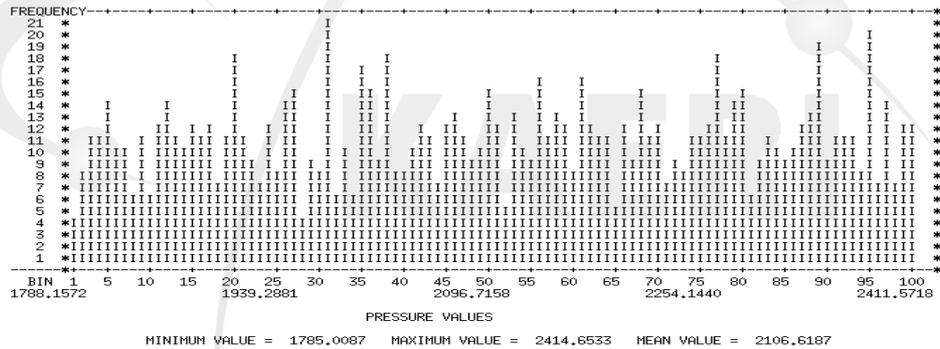
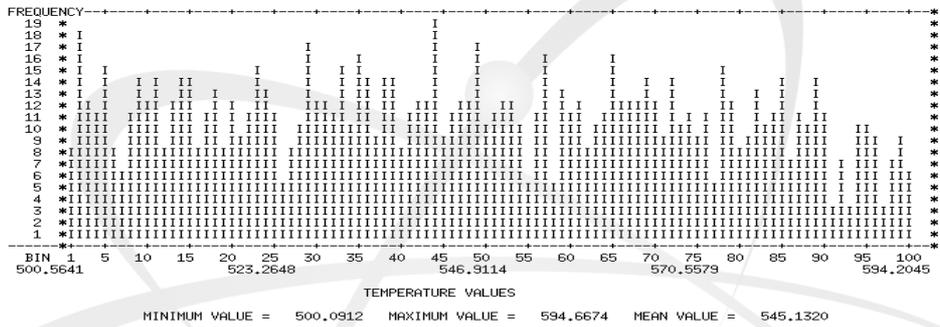
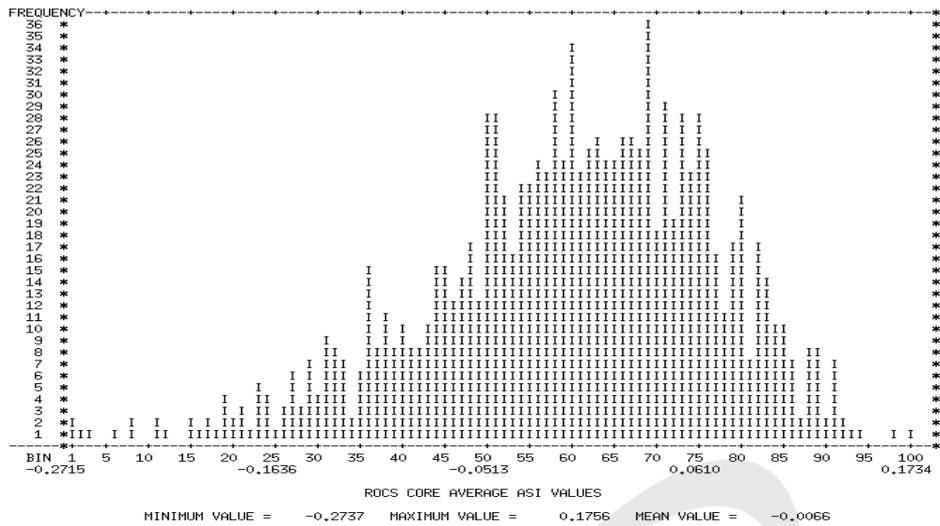


그림 C21 DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(LBOC)

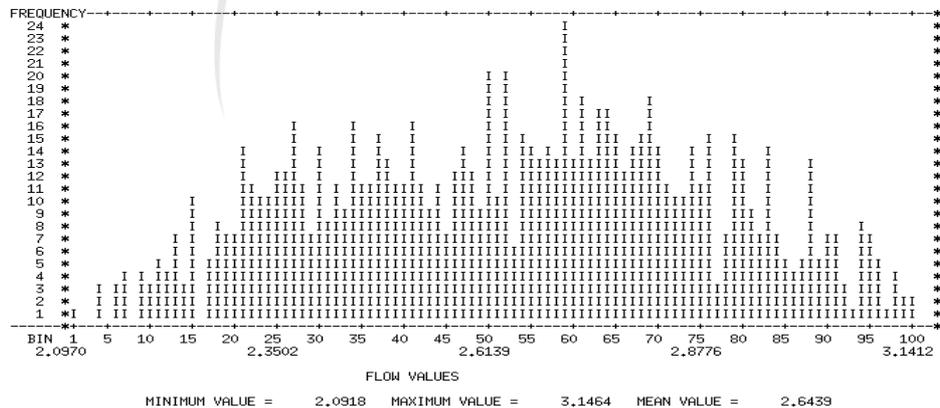
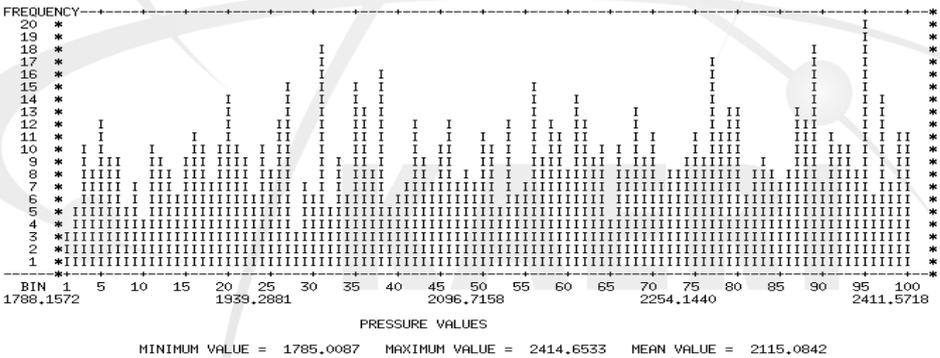
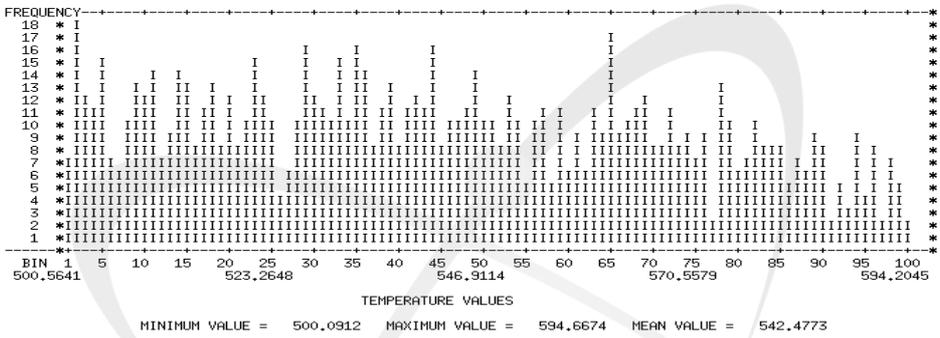
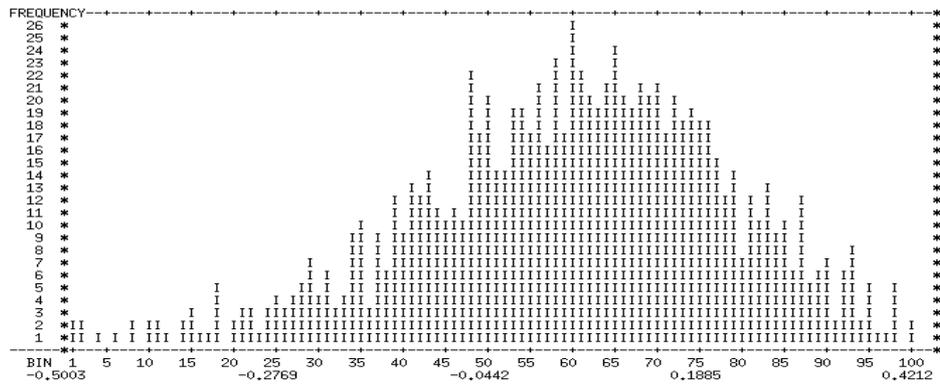


그림 C22 DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(LMOC)

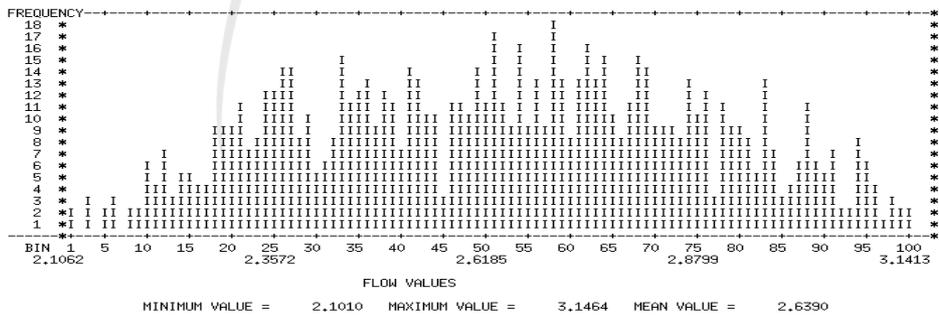
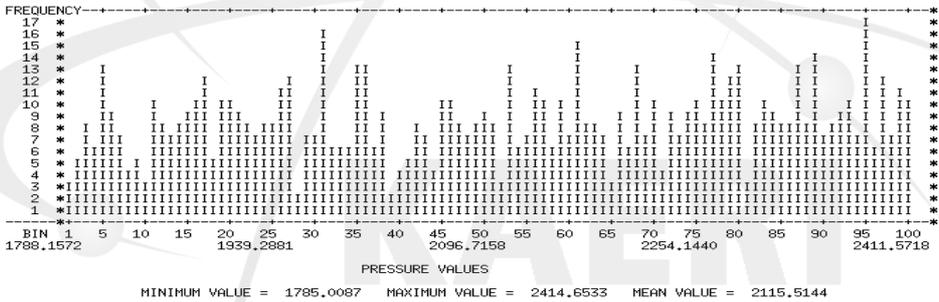
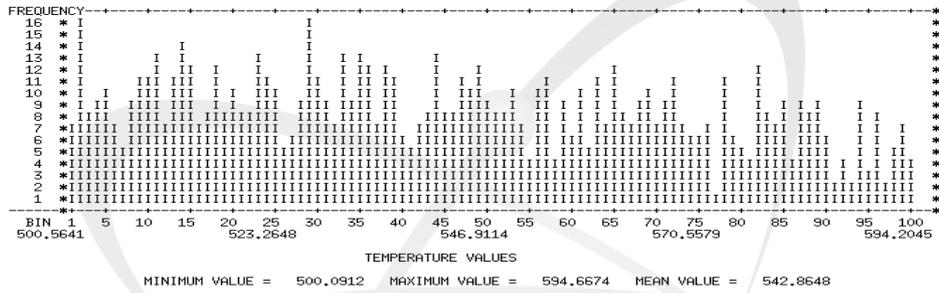
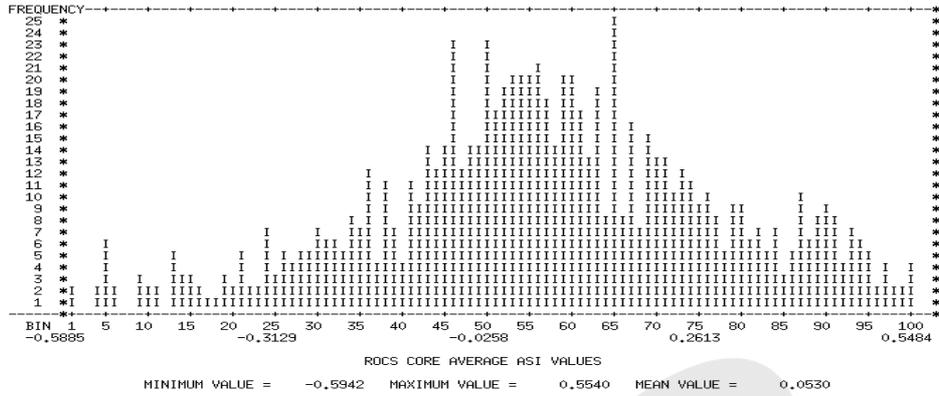
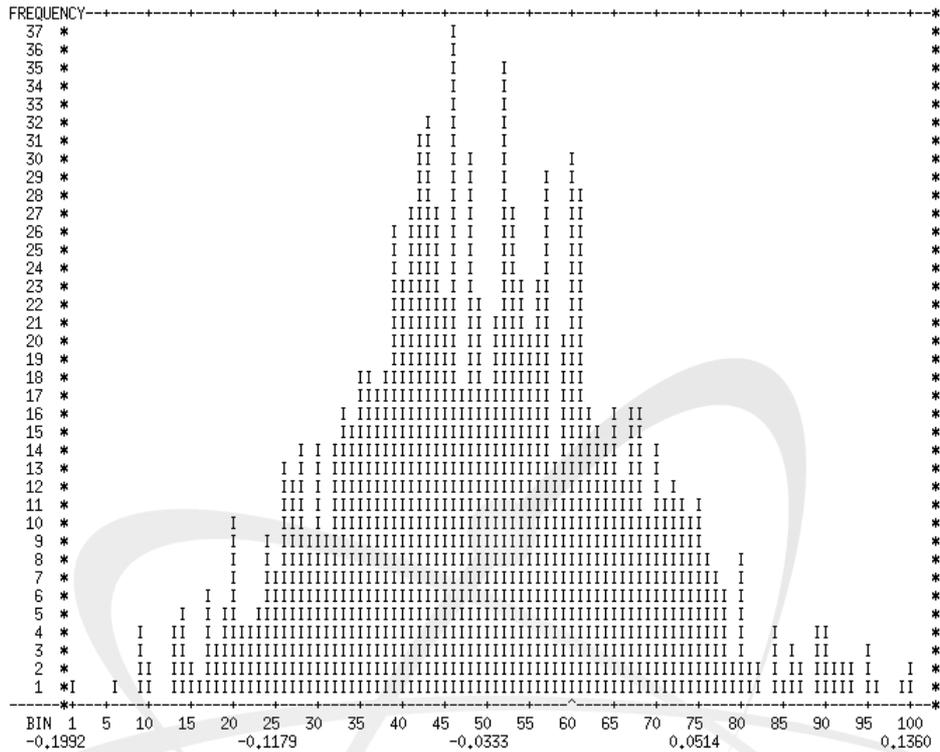


그림 C23 DNBR 전체 불확실도 해석용 노심 운전인자 분포(LEOC)



MINIMUM VALUE = -0.2009 MAXIMUM VALUE = 0.1377 MEAN VALUE = -0.0339

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I), I=1, 1090)

NUMBER OF DATA POINTS = 1090
 MEAN = -.3389346600E-01
 STANDARD DEVIATION = 0.5628869310E-01
 MEDIAN = -.3642448783E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0.1434100866
 STANDARD KURTOSIS = 2.964877129
 D PRIME STATISTIC = 10145.90039

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDDEV (WHERE K = 1.724) = -.1309351772
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(43) IS -.1334860325

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDDEV (WHERE K = 1.724) = 0.6314824522E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(1048) IS 0.6701791286E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES DPRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

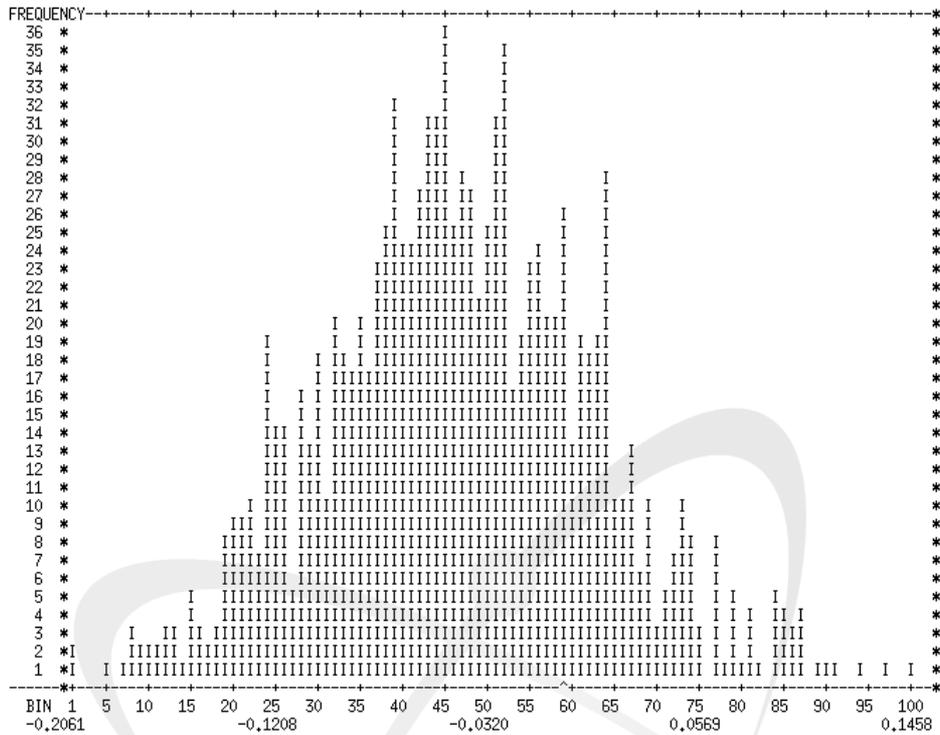
***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD M15.15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .0050 IS 10057.22852
 THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .9950 IS 10225.59277
 THE DPRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 1090 = 10145.90039
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF .44210

BASED UPON INPUT DPRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: NORMAL

그림 C24 CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(SBOC)



ERROR VALUES
 MINIMUM VALUE = -0,2079 MAXIMUM VALUE = 0,1475 MEAN VALUE = -0,0438

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I), I=1, 1094)

NUMBER OF DATA POINTS = 1094
 MEAN = -0,4381610081E-01
 STANDARD DEVIATION = 0,5656432360E-01
 MEDIAN = -0,4608067870E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0,1245642900
 STANDARD KURTOSIS = 3,035912752
 D PRIME STATISTIC = 10187,15332

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDEVEV (WHERE K = 1,724) = -0,1413329989
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(43) IS -0,1401312947

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDEVEV (WHERE K = 1,724) = 0,5370080099E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(1052) IS 0,5813550949E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES DPRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

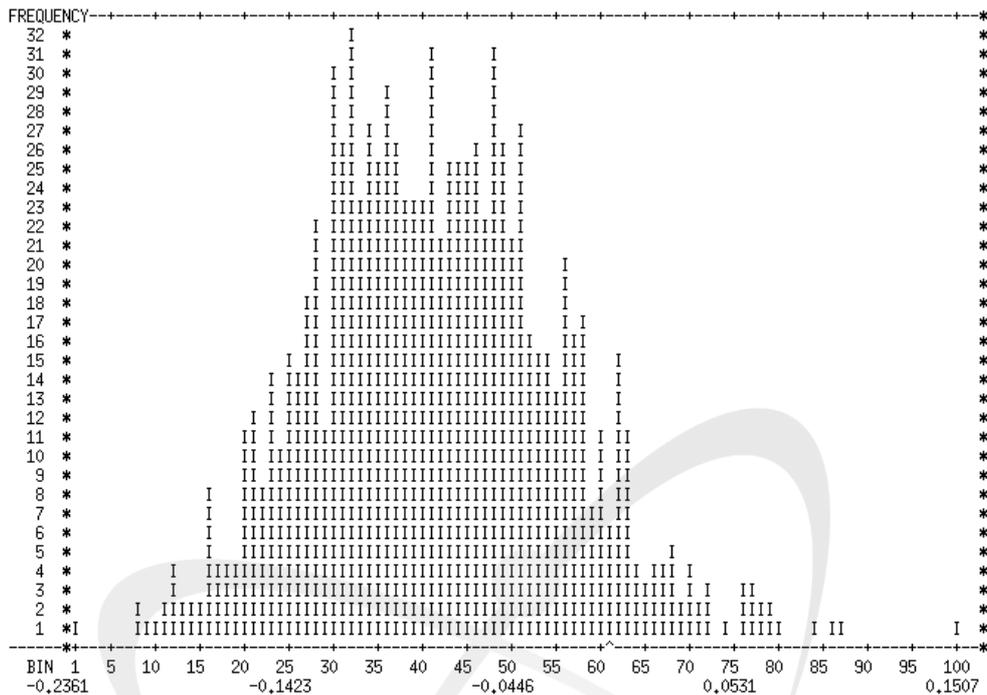
***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD M15.15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .0050 IS 10112,83301
 THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .9950 IS 10281,81445
 THE DPRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 1094 = 10187,15332
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF .28083

BASED UPON INPUT DPRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: NORMAL

그림 C25 CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LBOC)



ERROR VALUES
 MINIMUM VALUE = -0,2380 MAXIMUM VALUE = 0,1527 MEAN VALUE = -0,0777

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I),I=1, 948)

NUMBER OF DATA POINTS = 948
 MEAN = -.7765502483E-01
 STANDARD DEVIATION = 0,5338343233E-01
 MEDIAN = -.7973131537E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0,3041389585
 STANDARD KURTOSIS = 3,253437757
 D PRIME STATISTIC = 8204,376953

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDEVE (WHERE K = 1,730) = -.1700083613
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(37) IS -.1646141410

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDEVE (WHERE K = 1,730) = 0,1469831914E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(912) IS 0,1962244511E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES DPRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

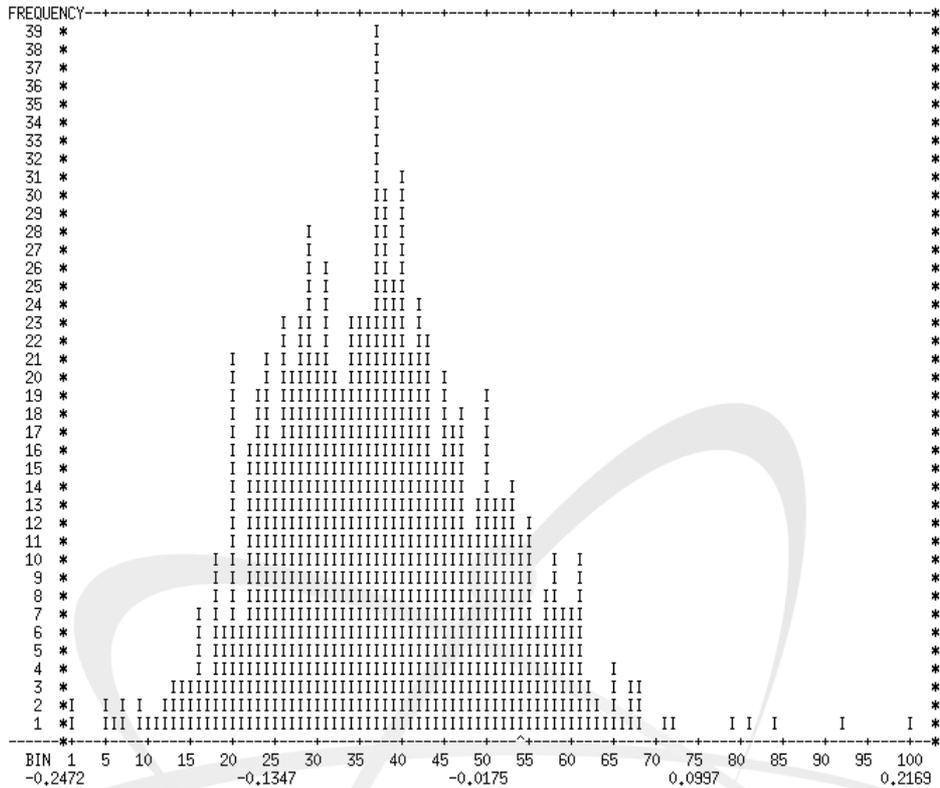
***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD M15.15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .0050 IS 8151,214355
 THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .9950 IS 8297,642578
 THE DPRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 948 = 8204,376953
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF .16618

BASED UPON INPUT DPRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: INDETERMINATE

그림 C26 CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LMOC)



MINIMUM VALUE = -0.2495 MAXIMUM VALUE = 0.2192 MEAN VALUE = -0.0759

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I),I=1, 836)

NUMBER OF DATA POINTS = 836
 MEAN = -.7592974603E-01
 STANDARD DEVIATION = 0.6060614809E-01
 MEDIAN = -.7819506526E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0.4234851301
 STANDARD KURTOSIS = 3.824090481
 D PRIME STATISTIC = 6746.046387

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDDEV (WHERE K = 1.735) = -.1810814142
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(32) IS -.1723284721

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDDEV (WHERE K = 1.735) = 0.2922192961E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(805) IS 0.3336441517E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES DPRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

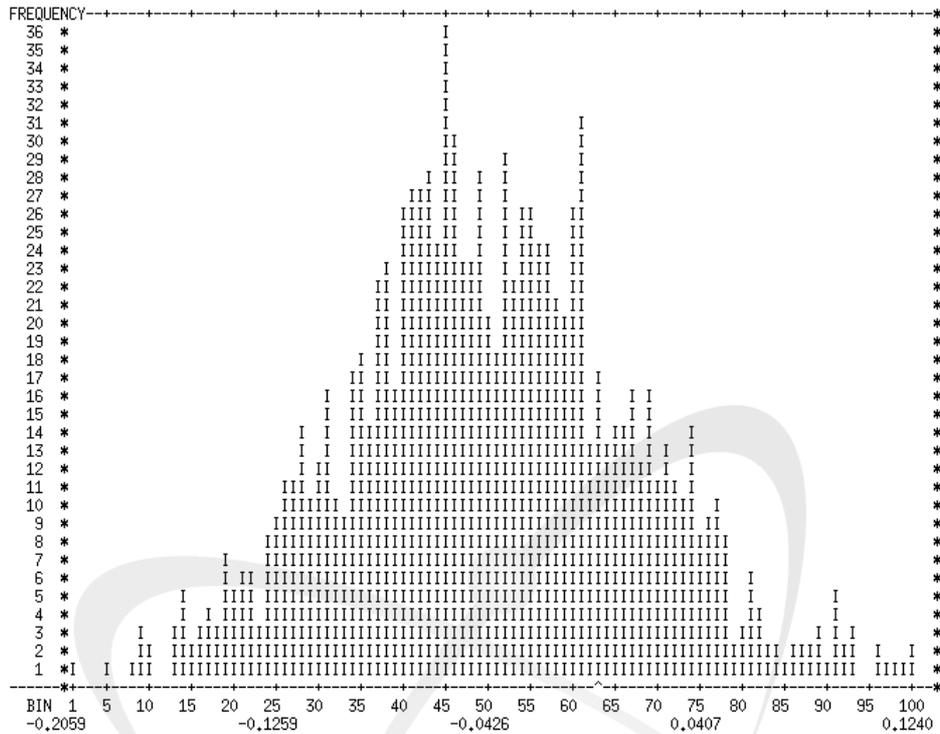
***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD N15.15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .0050 IS 6745.252441
 THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = .9950 IS 6874.378906
 THE DPRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 836 = 6746.046387
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF .00538

BASED UPON INPUT DPRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: NOT NORMAL

그림 C27 CPCS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LEOC)



ERROR VALUES
 MINIMUM VALUE = -0,2076 MAXIMUM VALUE = 0,1257 MEAN VALUE = -0,0418

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I), I=1, 1090)

NUMBER OF DATA POINTS = 1090
 MEAN = -.4179532453E-01
 STANDARD DEVIATION = 0,5585026368E-01
 MEDIAN = -.4455760121E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0,1396001130
 STANDARD KURTOSIS = 2,967980623
 D PRIME STATISTIC = 10144,11035

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDDEV (WHERE K = 1,724) = -.1380811781
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(43) IS -.1395806670

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDDEV (WHERE K = 1,724) = 0,5449053273E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(1048) IS 0,5841982365E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES DPRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

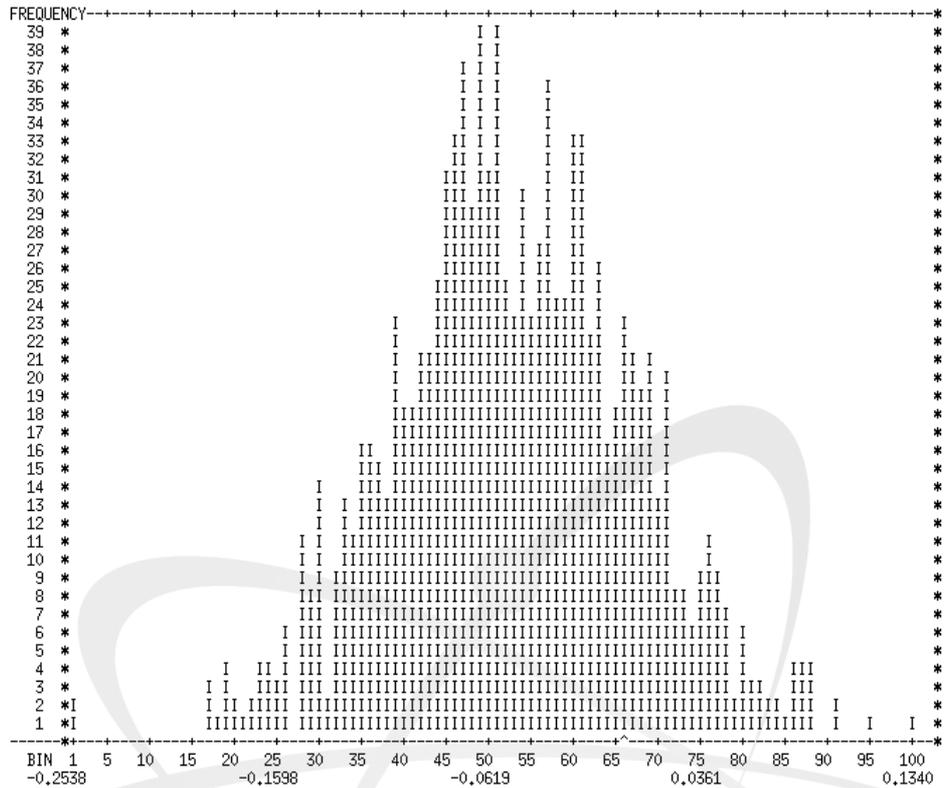
***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD N15,15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = ,0050 IS 10057,22852
 THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = ,9950 IS 10225,59277
 THE DPRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 1090 = 10144,11035
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF ,42082

BASED UPON INPUT DPRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: NORMAL

그림 C28 RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(SBOC)



ERROR VALUES
 MINIMUM VALUE = -0,2558 MAXIMUM VALUE = 0,1359 MEAN VALUE = -0,0503

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I), I=1, 1095)

NUMBER OF DATA POINTS = 1095
 MEAN = -.5026436597E-01
 STANDARD DEVIATION = 0,5487009138E-01
 MEDIAN = -.5227267742E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0,1191649470E-02
 STANDARD KURTOSIS = 3,107585192
 D PRIME STATISTIC = 10201,51953

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDDEV (WHERE K = 1,723) = -.1448055357
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(43) IS -.1462832689

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDDEV (WHERE K = 1,723) = 0,4427680373E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(1053) IS 0,4558801651E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES DPRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

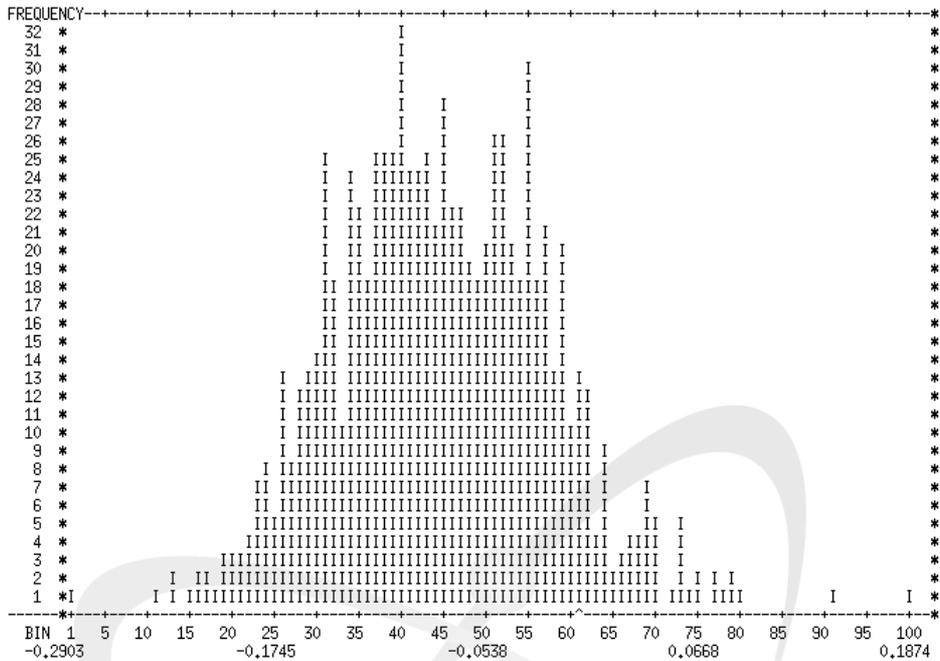
***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD M15,15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = ,0050 IS 10126,75000
 THE DPRIME STATISTIC FOR PROB = ,9950 IS 10295,88574
 THE DPRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 1095 = 10201,51953
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF ,28462

BASED UPON INPUT DPRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: NORMAL

그림 C29 RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LBOC)



ERROR VALUES
 MINIMUM VALUE = -0.2927 MAXIMUM VALUE = 0.1898 MEAN VALUE = -0.0794

SUMMARY OF STATISTICS FOR (X(I), I=1, 832)

NUMBER OF DATA POINTS = 832
 MEAN = -.7940346003E-01
 STANDARD DEVIATION = 0.6071220711E-01
 MEDIAN = -.8176577091E-01
 STANDARD SKEWNESS = 0.2094094753
 STANDARD KURTOSIS = 3.319668293
 D PRIME STATISTIC = 6750.557617

ONE-SIDED 95/95 LOWER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR - K*STDEVE (WHERE K = 1.735) = -.1847391427
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(32) IS -.1794072986

ONE-SIDED 95/95 UPPER TOLERANCE LIMITS FOR X
 NORMAL LIMIT = XBAR + K*STDEVE (WHERE K = 1.735) = 0.2593223006E-01
 NONPARAMETRIC LIMIT = X(801) IS 0.3354310989E-01

RESULTS OF THE D PRIME NORMALITY TEST:
 SAMPLE SATISFIES D PRIME TEST AT PUBLISHED PROBABILITY LEVELS

***** THIS DOES NOT IMPLY NORMALITY *****

(SEE ANSI STD M15.15-1974, OR APPENDIX B OF VV-FE-0200)

THE D PRIME STATISTIC FOR PROB = .0050 IS 6696.703125
 THE D PRIME STATISTIC FOR PROB = .9950 IS 6825.211426
 THE D PRIME STATISTIC FOR THIS SAMPLE OF SIZE 832 = 6750.557617
 AND CORRESPONDS TO A PROBABILITY OF .23611

BASED UPON INPUT D PRIME STATISTIC RANGES SAMPLE IS JUDGED TO BE: INDETERMINATE

그림 C31 RCOPS DNB-OPM 오차 확률분포 및 통계량(LEOC)

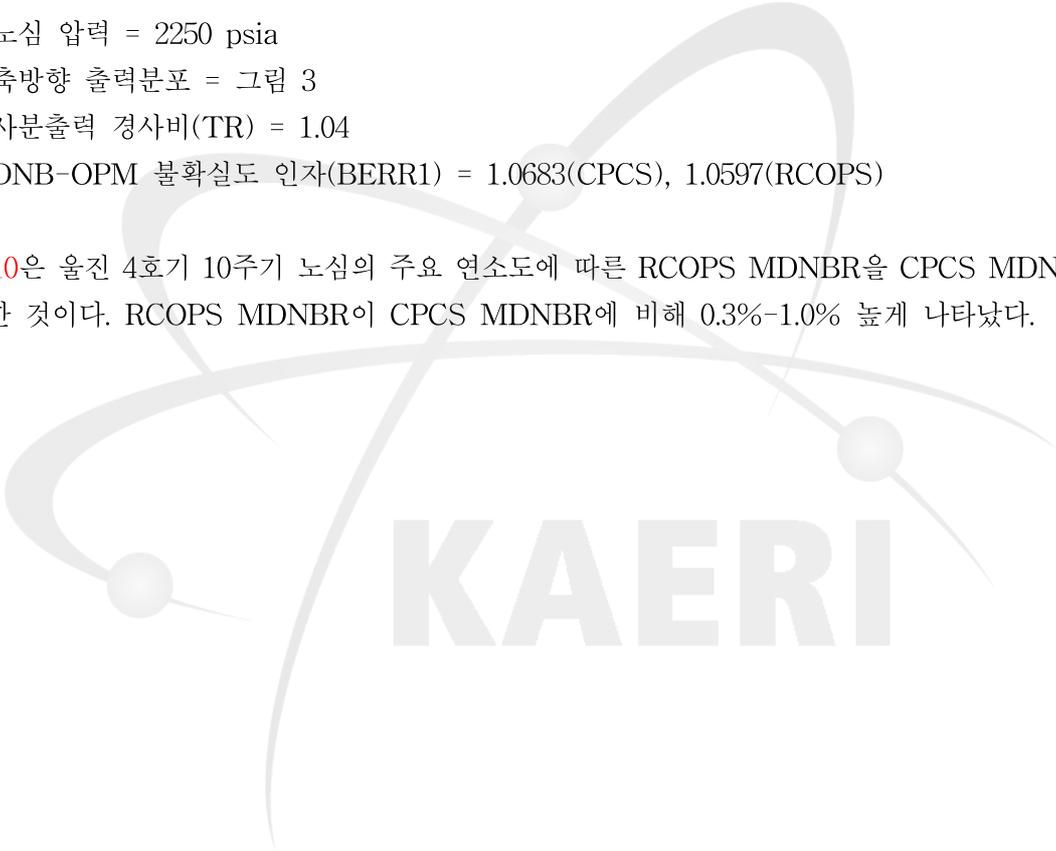
열적여유도 평가

RCOPS 노심의 열적여유도(DNBR 여유도)를 평가하기 위해 울진 4호기 10주기 노심의 대표적인 운전조건에서 최소 DNBR(MDNBR)을 계산하였다. RCOPS와 CPCS의 DNBR 여유도를 비교하기 위해 CPCS의 MDNBR도 계산하였다.

RCOPS 및 CPCS 열적여유도 평가에 사용한 운전조건은 다음과 같다.

- 노심출력 = 100% (0.188251 MBtu/ft²-hr)
- 노심유량 = 105% (2.6777 Mlbm//ft²-hr)
- 고온봉 침투출력 (Fr) = 1.50
- 노심 입구온도 = 564.5 oF
- 노심 압력 = 2250 psia
- 축방향 출력분포 = 그림 3
- 사분출력 경사비(TR) = 1.04
- DNB-OPM 불확실도 인자(BERR1) = 1.0683(CPCS), 1.0597(RCOPS)

표 C10은 울진 4호기 10주기 노심의 주요 연소도에 따른 RCOPS MDNBR을 CPCS MDNBR과 비교한 것이다. RCOPS MDNBR이 CPCS MDNBR에 비해 0.3%-1.0% 높게 나타났다.



KAERI

표 C10 RCOPS와 CPCS MDNBR(울진 4호기 10주기)

계통구분	SBOC	LBOC	LMOC	LEOC
CPCS	2.3651	2.3703	2.5367	2.5165
RCOPS	2.3748	2.3801	2.5452	2.5429
MDNBR 변화량	+0.4%	+0.4%	+0.3%	+1.0%



서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식							
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/CR-364/2009							
제목 / 부제		개량형 노심보호연산기계통(RCOPS) 열수력모델 검증					
연구책임자 및 부서명		인왕기(선진핵연료기술개발부)					
연구자 및 부서명		전태현, 오동석, 신창환, 양용식(선진핵연료기술개발부) 황대현, 서경원(SMART기술검증)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010		
페이지	117 p.	도표	있음(o), 없음()	크기	21x29 Cm.		
참고사항							
공개여부	공개(o), 비공개()		보고서종류		수탁보고서		
비밀여부	대외비(), __ 급비밀						
연구위탁기관	(주)두산중공업		계약번호				
초록 (15-20줄내외)		<p>본 연구과제는 개량형 노심보호연산기계통(RCOPS)의 열수력모델(DNBR 모듈)을 검증하기 위해 수행되었다. RCOPS 열수력모델의 DNBR 계산 방법론은 최적 DNBR 신속계산 코드인 CETOP-D와 동일하므로 RCOPS DNBR 모듈의 검증을 위해 CETOP-D 코드와 RCOPS DNBR 계산모듈(STATIC)의 알고리즘을 비교하였다. 다양한 노심운전조건을 모의한 검증시험 자료를 이용하여 CETOP-D와 RCOPS STATIC 모듈의 DNBR 계산결과를 비교함으로써 RCOPS STATIC 모듈의 기능설계 및 Database를 검증하였다. RCOPS 기능설계(알고리즘) 개선의 인허가를 획득하기 위해 노심보호연산기계통 기능설계 개선에 관한 특정기술주제보고서(TR)를 제출하였다. RCOPS 실시간 소프트웨어의 검증을 위한 모듈시험(Module Test)과 단위시험(Unit Test)을 수행하였다. 울진 4호기 10주기 노심설계 자료를 이용하여 RCOPS DNBR 모듈의 불확실도를 평가하고 DNBR 여유도를 예측하였다. RCOPS를 위한 CPCS 기능설계 개선에 관한 TR은 KINS의 승인을 획득하였다. RCOPS DNBR 모듈에 대한 간이 모듈시험도 통과 판정조건을 만족하였다. 노심의 대표적인 운전조건에서 RCOPS 최소 DNBR이 CPCS에 비해 0.3%-1.0% 높은 것으로 평가되었다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		개량형 노심보호연산기계통, DNBR 모듈, 열수력모델, 모듈시험, 단위시험, DNBR 여유도, 특정기술주제보고서					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/CR-364/2009			
Title / Subtitle	On-Line Core Thermal-Hydraulic Model Improvement		
Project Manager and Department	Wang Kee In (Innovative Fuel Development)		
Researcher and Department	Tae-Hyun Chun, Dong-Seok Oh, Chang-Hwan Shin, Yong-Sik Yang (Innovative Fuel Development)		
	Dae-Hyun Hwang, Kyung-Won Seo (SMART PM)		
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI
			Publication Date
			2010
Page	117 p.	Ill. & Tab.	Yes(o), No ()
			Size
			21x29 Cm.
Note			
Open	Open(o), Closed()		Report Type CR
Classified	Restricted(), ___Class Document		
Sponsoring Org.	Doosan Heavy Industry Inc.	Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)			
<p>The objective of this project is to verify the thermal-hydraulic model for advanced reactor core protection system, RCOPS. This project compared the RCOPS DNBR module(STATIC) against the CETOP-D code because the RCOPS DNBR algorithm is the same as the CETOP-D. The RCOPS STATIC module and its database was verified by comparing the STATIC DNBR with the CETOP-D DNBR which was calculated at various core operating conditions. In order to get an approval of KINS on Topical Report, the TR on the improved functional designs in the core protection calculator system was submitted to KINS. Module test and Unit test were performed to verify and validate the RCOPS on-line software. The RCOPS DNBR margin was predicted by estimating the overall DNBR uncertainty for UCN 4 cycle 10. The RCOPS TR on the CPCS algorithm improvements was approved by KINS. The simplified module test of the RCOPS DNBR module was passed by satisfying the acceptance criteria. The minimum DNBR(MDNBR) of the RCOPS appeared to be 0.3%-1.0% higher than the CPCS MDNBR at a typical core operating condition.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)	RCOPS, DNBR Module, Thermal-Hydraulic Model, Module Test, Unit Test, DNBR Margin, Topical Report(TR)		