KAERI/TR–2429/2003

ISAAC 노심 열전달/ 파단유량/ 비상노심주입/ 격납건물살수/국부공기냉각기 모델 평가

An Evaluation of Core Heat Transfer/Break Flow/ Emergency Core Cooling System/Containment Dousing Spray /Local Air Cooler Models in ISAAC Code

2003년 3월

한 국 원 자 력 연 구 소
Korea Atomic Energy Research Institute

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2002년도 “중수로원전 중대사고 해석코드 개선 및 사고관리 지침서 개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2003 년 3 월

보고서명: ISAAC 노심 열전달/ 파단유량/ 비상노심주입/ 격납건물살수/ 국부공기냉각기 모델 평가
(An Evaluation of Core Heat Transfer/Break Flow/Emergency Core Cooling System/Containment Dousing Spray /Local Air Cooler Models in ISAAC Code)

주 저 자 : 김시달
공 저 자 : 김동하
박수용

요 약 문

1995년부터 1년에 걸쳐 2단계 PSA를 수행하기 위해 개발된 ISAAC 전산코드는 CANDU 고유의 중대사고 현상에 대한 기본적인 모델 위주로 개발되었고, 본 코드를 이용한 사고 시나리오 해석경험도 PSA 수행목적으로 제한되었다. 따라서 기본 모델에 대한 이해를 높이고 사고해석 경험을 축적하기 위해 노심 열전달 모델, 파단유량 모델, 비상노심 주입모델 및 격납건물 살수/국부공기냉각기 모델의 평가를 수행하였다. 연구전략으로 개별 모델에 대한 내용 분석과 모델 평가를 동시에 수행했으며, 모델평가는 불확실 변수 또는 사용자 옵션에 대한 민감도 계산결과를 이용하였다.

노심 열전달 모델에 대한 AECL 실험 및 코드 해석 분석 결과, 수평 압력관 내부의 37개의 연료봉에 대한 ISAAC의 단일 연료봉 모델의 타당성이 검토되었고, 파단 유량 모델 검토 결과 코드 내에 불확실 변수로 모델 되어 있는 방출계수 값은 0.75가 적당한 값임이 밝혀졌다. 다음으로 파단 크기/위치에 따른 비상노심 주입 모델 검토결과 ISAAC 모델이 FSAR에 비해 유사함을 확인하였다. 마지막으로 격납건물 살수/국부공기냉각기 모델 분석 결과, 사고초기의 격납건물 첨두 압력이 FSAR과 비교해 3% 이내로 근접했으며 격납건물살수계통은, 특히 대형 LOCA의 경우, 사고 초기에 대부분 주입되고 종결되므로 주입되는 동안 압력을 유지시켜 준다. 그러나 장기간의 관점에서 보면 공기냉각기가 미작동 되는 경우 격납건물살수계통은 1.2시간에 종결되지만 격납건물 파손을 13시간 정도 지연시키는 효과가 있다. ISAAC에서의 공기냉각기를 통한 냉각 해석 모델은 일관성 있게 냉각량을 예측함을 확인 하였다. 다만, 현재의 ISAAC에서는 격납건물의 두 장소에만 공기 냉각기를 설치할 수 있도록 되어있는데 더 많은 장소에 설치할 수 있도록 모델 보완의 필요성이 확인되었다.

SUMMARY

As an ISAAC computer code, which was developed for a Level-2 PSA during 1995, has mainly fundamental models for CANDU-specific severe accident progression and also the accident-analyzing experiences are limited to Level-2 PSA purposes, the Core Heat Transfer model, Break Flow model, Emergency Core Cooling System model and Containment Dousing Spray /Local Air Cooler model are evaluated to enhance understanding for basic models and to accumulate accident-analyzing experiences. Sensitivity studies using model parameters and sensitivity coefficients are performed.

According to the results from AECL experiments and code analyses for core heat transfer model, it was found that one representative fuel rod for the actual 37 fuel rods did not cause serious temperature discrepancies during the severe accident progression. The results from emergency core cooling system model, shows a good comparison with the FSAR. As the results of the evaluation, it was found that local air coolers could control containment pressure whether dousing spray is operating or not, and their operation does not cause containment failure. Regarding the dousing system, it could control containment pressure as long as it is operating and its operating time depends on containment conditions. For a large LOCA sequence without local air coolers, spray works only for 1.2 hours and delays containment failure by 13 hours compared to the no spray case. According to the test results, the ISAAC models for local air coolers show a consistent trend for steam removal. As ISAAC could model local air coolers only at two locations at present, future work is planning to generalize the locations for local air coolers.

목 차

표 목 차

그 림 목 차

.

제 1 장 서론

1990년대 중반에 월성2/3/4호기의 2단계 PSA 수행목적으로 1년동안 한국원자력연구소 (KAERI)와 FAI (Fauske & Associates, Inc.)가 공동으로 개발한 ISAAC 전산코드는 CANDU 고유의 중대사고 현상을 모의하기 위하여 기본모델 위주로 작성되었다. 또한 본 코드를 이용한 사고 시나리오 해석경험도 2단계 PSA 수행목적으로 제한되어 충분하지 못하며 사용자를 위한 사용설명서 등도 아직 초보적인 상태이다. 따라서 기본 열수력 및 핵분열생성물 모델에 대한 연구를 우선적으로 수행하여 코드를 이해하고 다양한 사고해석 경험을 축적할 필요가 있다. 이를 위해 본 보고서에서는 ISAAC의 여러 모델 중 기본 열수력 주요 모델인 노심 열전달 모델, 파단유량 모델, 비상노심 주입모델 및 격납건물 살수/국부공기냉각기 모델을 평가하였다. 여기에서 취급한 모델 이외의 핵분열생성물과 직.간접으로 연관된 계통의 노드화 (Nodalization) 모델, 붕괴열 (Decay Heat) 모델 및 휘발성 핵분열생성물의 방출 (Volatile Fission Product Release) 모델은 다른 기술보고서 [1-1]에서 다루어졌다.

코드검증 차원에서 살펴보면, ISAAC 전산코드는 경수로와는 달리 CANDU 원전에서의 중대사고 진행 및 현상에 대한 의견수렴이나 실험자료가 아직까지 매우 부족하며 핵연료관 파손과 같은 일부 분야에 대해서만 캐나다의 원자력공사 (AECL)에서 제한적으로 실험을 수행하고 있는데 그 대부분도 COG (CANDU Owner's Group) 소유자료로 외부에서는 관련 실험이나 해석 내용을 파악하기 어려운 실정이다. 이로 인해 ISAAC은 개발 이후 충분한 검증 및 이를 통한 활용기회를 갖지 못하였다. 따라서 본 보고서에서는 개별 모델에 대한 내용 분석과 모델 평가를 동시에 수행했으며, 모델평가는 불확실 변수 또는 사용자 옵션에 대한 민감도 계산결과를 이용하는 연구전략을 사용하였다.

본 보고서는 제 2 장에서 노심 열전달 모델 분석 결과를, 제 3장에서는 파단유량 모델 분석 결과를, 제 4장에서는 비상노심주입 모델 분석 결과를 그리고 제 5장에서는 격납건물살수/국부공기냉각기 모델 분석 결과를 기술하였다.

제 2 장 노심 열전달 모델 분석

2.1 연구배경

월성 발전소는 칼랜드리아 탱크의 감속재 내부에 연료관이 수평으로 놓여있고, 또한 압력관 내부에도 연료봉들이 수평으로 놓여있다는 큰 특징을 갖는다. 380개의 수평 연료관은 실린더 형태의 칼랜드리아 탱크의 내부에 22개의 행과 열의 형태로 원을 이루면서 수평으로 놓여있고, 제일 바깥의 칼랜드리아관 (calandria tube), CO2 가스층, 압력관 (pressure tube), 그리고 수평 연료봉으로 구성되어 있다. 압력관 내부에는 지르칼로이 판 (end plate)에 의해 양단이 고정된 12개의 bundle (꾸러미) 형태의 수평 연료봉이 들어 있고, 꾸러미 단위로 연료 교체가 이루어진다. 각 연료봉 꾸러미는 4개의 링 형태로 구성된 37개의 수평 연료봉으로 구성되어 있으며, 각 연료봉은 경수로에서처럼 지르칼로이 피복재로 보호되어 있다. 따라서, 칼랜드리아 탱크의 감속재나 압력관 내부의 냉각재 수위가 감소하면 수평 연료관이나 수평 연료봉 일부 혹은 전체가 대기에 노출되는 월성 고유 현상이 일어난다..

경수로의 일반적으로 노심 입력을 마련할 때 축 방향으로 10개에서 15개 정도로 나누어 계산한다. 이는 중대사고 해석용 코드에서는 중대사고시 냉각수가 고갈됨에 따라, 수직으로 놓여있는 연료봉의 상단부터 그리고 가운데 위치한 연료봉부터 노출되어 먼저 가열되고 재배치되므로, 연료봉 (또는 assembly)을 축 방향으로 세분할수록 가열되거나 재배치되는 현상을 자세하게 모의할 수 있기 때문이다. 한편 연료봉 (또는 assembly)을 감싸고 있는 shroud로의 열전달 효과를 모의하기 위해 반경 방향으로도 구분하여 보통 5개 정도로 나누어 모의한다.

월성 발전소 고유의 노심을 모의하기 위해, 경수로에서 축 방향과 반경방향으로 연료봉을 군집화한 단위 노드가 몇 개 (혹은 수십 개)의 실제 연료봉의 임의의 위치에서의 특성을 모의하듯이, 월성 대상의 안전해석코드인 ISAAC에서도 비슷한 연료관 (또는 연료봉) 군집화 모델링 개념이 도입되었다. 즉, 380개의 수평 연료관을 최대 74개의 대표 수평 연료관으로 정의하여 칼랜드리아 내부에서의 수평 노심의 거동을 예측하고 있다. 각 대표 연료관은 서로 다른 높이와 출력을 가짐으로써 칼랜드리아 내부의 감속재 수위 효과와 가열 정도를 고려하도록 하였다. 또한 수평 연료관 내부의 12개의 꾸러미 (bundle)는 각각 또는 2개씩 묶어 출력을 지정하도록 함으로써 수평연료관 내부의 축 방향의 온도를 모의할 수 있도록 하였다.

이제 관심의 대상은 연료관 안의 37개의 연료봉을 어떻게 모의하느냐 하는 방법이다. 실제 수평으로 놓여있는 37개의 연료봉은 제일 가운데 1개 (링 1), 그 주위의 6개 (링 2), 그 외곽의 12개 (링 3), 그리고 제일 바깥쪽의 18개 (링 4)로 구성되어 있다. 37개의 연료봉을 각각 (또는 높이에 따라 군집화하여 19개로) 모의할 수 도 있고, 아니면 링으로 구분하여 대표 연료봉으로 정의하여 모의할 수도 있고, 또는 37개의 연료봉을 대표 연료봉 하나로 정의하여 모의하는 방법도 있다.

첫 번째 방법에 의한 연료봉 모의는 CATHENA 코드에서 사용하는 모델링으로, 연료관 내부의 연료봉 온도 거동만을 해석하는 경우에는 유용하나, 다른 일차계통이나 격납건물 전반에서의 열수력 모델에 비하여 모델 정도가 너무 깊어 모델 균형이 맞지 않으며, 또한 이 방법을 전체의 연료관에 적용하게 되면 경우 해석해야 할 연료봉의 수가 너무 많아 현실적으로 발전소를 모의하는데는 한계가 있다.

두 번째 방법은 현재 CHAN 코드에서 사용하고 있는 방법으로, 연료봉이 37개의 경우 4개의 링으로, 28개인 경우 3개의 링으로 모의한다. 이러한 방법은 압력관 내부의 연료봉들의 온도 분포를 적절한 수의 연료봉을 정의하여 예측할 수 있는 장점이 있는 반면, 그 적용 범위는 여전히 한계가 있다. 즉 압력관 내부에 냉각수가 있는 경우 냉각수 수위가 감소하면 (예로, 제일 외각의 링 (링 4)은 상부에 위치한 일부 연료봉은 대기에 노출되지만, 하부에 위치한 연료봉들은 여전히 냉각수에 잠겨있게 됨), 같은 링으로 모사하더라도 급격한 온도 분포를 갖게된다. 따라서 임의의 링의 대표 온도를 얻기 위해서는 각 연료봉의 온도를 평균해야 하는데, 이렇게 온도 분포가 차이가 나면 여러 링으로 모델하는 의미가 퇴색한다. 실제로, CHAN을 이용한 실험 해석에서는 이미 사고가 많이 진행되어 압력관 내부에 순수하게 수증기로 채워져 있는 경우를 대상으로 분석하며, 그 때의 연료봉의 온도 분포를 실험과 비교한다.

현재 ISAAC에서는 제일 마지막 방법, 즉 압력관 내부의 37개의 개별 연료봉을 대표연료봉 하나로 모의하는 방법을 채택하고 있다. 이 방법은 수평연료관 내부에서의 열전달을 모의하기 위한 가장 간단한 방법으로, 이의 장점은 코드 전체의 전반적인 열수력 모델과의 균형을 유지하면서 중대사고 관점에서 필요한 정보를 빨리 얻을 수 있는 데 있다. 또한, 단일 연료봉이지만 외부 조건 (냉각수 혹은 대기와의 접촉)에 따라 연료봉 내부에서의 온도분포를 구하여 압력관 내부의 수위 변화에 따른 열전달 효과를 고려할 수 있도록 하였다. 다만, 37개의 연료봉을 대표 연료봉 하나로 취급하기 때문에 37개 연료봉 사이의 온도 분포가 큰 경우 이에 대한 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 다음 장에서는 37개의 연료봉을 하나의 대표 연료봉으로 모의하는 ISAAC에서의 기본 가정이 중대사고 진행 관점에서 그 영향이 얼마나 있는지를 평가하였다. 이를 위해, 기존 논문이나 보고서를 통하여 상세 모델로 얻은 결과를 검토하여

연료봉들의 온도 분포를 파악하고, ISAAC 결과를 비교함으로 위에서 언급한 현안들에 대한 검토 결과를 정리하였다.

2.2 ISAAC의 단일 대표연료봉 모델의 타당성

ISAAC에서 가정하는, 37개의 연료봉에 대한 단일 대표연료봉 접근 방법의 타당성을 평가하기 위하여, 먼저 AECL에서 수행한 실험 및 코드 해석 결과를 검토하여 이로부터 압력관 내부에 위치한 연료봉 사이의 온도 분포를 분석하였다.

2.2.1. AECL 논문 요약

현재 CANDU 원전에서의 중대사고에 관련된 실험은 AECL만이 수행하고 있고, 그 대부분도 COG 소유로 되어있어 외부에서는 관련 실험이나 해석 내용을 접근할 수 없는 상황이다. 이 보고서에서 검토하고자 하는 압력관 내부에서의 연료봉 온도 분포 관련 내용도 AECL의 논문이나 보고서에 의존하여 수행할 수밖에 없는 한계를 가지고 있다. 기존 논문을 검토한 결과, CANDU 원전의 중대사고 환경에서 수평연료관 내부의 수평연료봉의 온도분포를 규명하기 위해 AECL이 COG 후원으로 실험 및 해석을 수행하였고, 논문으로 발표된 일부 결과를 얻을 수 있어 여기에 정리하였다.

중대사고 환경에서의 연료봉 거동에 대한 보다 나은 이해와 해석 코드 검증용 자료를 생산하기 위해, 단계별로 실험 및 해석이 수행되었다. 한편으로는 모의하는 연료봉의 개수를 7개부터 시작하여 28개, 그리고 37개로 늘이고, 또 다른 한편에서는 중대사고 환경에서 실험이 수행되는 동안 연료봉이 압력관 내부의 처음 위치에 그대로 놓여있는 상황과 가열된 연료봉들이 압력관 하부로 재배치 된 이후의 조건에서 실험을 수행한 4편의 논문을 검토하였다.

첫 번째 논문인 참고문헌 2-1에서는 모의 연료봉 7개에 대한 out-of-pile 고온 열화학 (high-temperature thermal-chemical) 실험 중 네 번째 실험에 대하여 CHAN-II (Mod 6), CHAN-II-WL, 그리고 CATHENA를 사용하여 실험과 결과를 비교하였다. 특히, 이 논문은 실험 결과를 모른 채로 실험을 모사하고 결과를 비교하는 내용으로, 이러한 비교 테스트를 통하여 이 세 가지 코드가 실험을 모사할 수 있는 능력이 있음을 확인하고 있다.

CHAN-II 코드는 압력관 내부가 과열 수증기 (superheated steam)로 차 있는 경우 연료채널의 과도 거동을 예측하기 위한 속성 코드로, 열적, 화학적 모델을 포함하고 있고, 기하학적 모양과 물질 성질에 대한 수정을 통하여 비상 노심 급수가 안 되는 LOCA 사고 해석에 사용되었다. CHAN-II (Mod 6)는 CHAN-II 코드를 수정하여 연료봉의 수에 따라 최대 4개의 연료 링까지, 중심 핀이 있는 경우와 없는 경우, 그리고 단상 증기 유량에서 사용할 수 있도록 하였고, CHAN-II-WL 역시 CHAN-II를 수정하여 복사 열전달 모델을 개선 (온도에 따른 emissivity 계산)하고 압력관 외부의 냉각 재킷 (cooling jacket)을 모의하도록 하였다. 마지막으로, CATHENA는 CANDU 원전에서의 LOCA 사고를 모의하기 위해 AECL에서 개발된 코드로, 파이프로 연결되어있는 구조에서 이상 유동을 2 fluid 모델을 이용하여 모의하며, 사용되는 고체 물질이 용융 온도까지 상승하는 경우까지 모의할 수 있는 모델을 가지고 있어, 열 복사, 압력관 변형, 지르칼로이/증기 산화반응, 그리고 비응축 기체까지 모사가 가능하다. CHAN과 CATHENA 코드는 압력관 내부에 위치한 복잡한 연료봉 형상을 모의하기 위하여 서로 다른 기하학적 가정을 사용한다. 그림 2-1에서 보듯이, CATHENA는 각각의 연료봉과 연료봉 사이에 생기는 유로 채널을 일일이 모의하는 반면, CHAN 코드는 링 구조를 가진 형상을 가정하며, 이 경우 2개의 연료 링, 2개의 유량 채널, 압력관, 그리고 칼랜드리아관으로 구분하여 모의한다.

실험관과 해석 코드 결과의 온도 분포를 비교하기 위하여 실험관 중앙 연료봉, 외곽의 연료봉들, 유량관 (flow tube), 냉각수, 그리고 수증기의 온도를 비교하였다. 축 높이 1425 mm에서 코드 결과들이 약 60-100°C 정도 실험보다 낮게 예측하고 있지만, 1575 mm에서서는 훨씬 실험과 일치하고 있다 (전체 연료봉 길이는 1800 mm임). 외곽으로 갈수록 온도 차이는 줄어들어 약 50°C 차이를 보인다. CHAN-II-Mod6에서는 내부 링과 외곽 링의 온도차이가 몇도 되지 않는다. CATHENA에서는 연료봉의 재배치를 고려하기 위한 비동심원축 형상을 모의할 수 있어 (CHAN은 동심원축 가정), 압력관의 위 부분과 아래 부분에서 약 60-100°C 정도의 온도 차이가 나타나며, 이는 연료봉 재배치로 인한 변형 (deformation)때문으로 해석된다. CHAN은 동심원축 가정으로 인해 동일한 온도분포를 보인다.

증기 온도도 비교하였는데, CATHENA는 실험 결과를 잘 모의하는 반면, CHAN 코드는 약 300°C 까지 높게 예측하고 있다. 이러한 이유로는, CHAN 코드가 실험관 끝단에서의 열 손실을 고려하지 못하기 때문으로 이해되고 있다. 냉각수 온도도 CATHENA가 잘 모사하고 있고, CHAN의 경우 높게 예측하는데 이는 냉각 재킷 표면에서의 열 손실을 모사하지 않기 때문이다. Urbanic-Heidrick 상관식을 이용하여 지르칼로이와 수증기 사이의 반응에 의한 수소 생성량을 모의하였는데, CATHENA는 약 22% 과도하게 예측하였고, CHAN 코드는 약 6% 내외로 모의하였다.

두 번째 논문인 참고문헌 2-2에서는 CHAN Thermal-Chemical Experiment를 수행하기 전에 실험 입력을 최적화하기 위하여 CATHENA와 CHAN-II-WL 코드를 이용하여 실험을 모의하였으며, 이 때의 주요 변수로 압력관 내부로의 증기 유량, 미가열 연료봉 도입, 그리고 감속재 온도를 선정하여 그 효과를 평가하였다. 증기 유량은 5, 7, 9, 10, 그리고 15 g/sec를 사용하였고, 8 g/sec에서 최대 온도를 예측하였다. 그 이유로는 이보다 적은 유량에서는 수증기 고갈로 지르칼로이 산화 반응이 제약을 받고, 이보다

유량이 많은 경우에는 수증기 흐름에 의한 냉각 효과가 크기 때문이었다. 28개의 연료봉 가운데 4개의 연료 가열기 (연료봉) 중 하나를 꺼 놓은 경우는 다 켜 놓은 경우와 큰 차이가 없었고 (물론 가열기로부터의 총 열량은 같도록 하였음), 감속재 온도도 25°C와 75°C의 두 경우를 비교하였는데 핵비등 (nucleate boiling)을 유지하는 한에는 연료봉 온도 분포에 영향이 없음을 확인하였다. 이 실험 결과를 CHAN과 CATHENA로 모의하였는데 두 결과는 서로 달랐으며, 차이의 원인은 CHAN은 링 개념을 이용하여 연료봉을 모의하는 반면 CATHENA는 연료봉 각각을 모의하기 때문으로 결론짓고 있다. 다만 두 코드 모두 현상을 모의하는데는 적합한 것으로 평가하고 있다.

세 번째 논문인 참고문헌 2-3에서는 중대사고 환경에서의 현상 이해 및 해석 코드 검증용 데이터 생산을 위해 위의 예비 계산을 수행한 후 28개의 연료봉이 있는 경우에 대하여 고온 Thermal-Chemical 실험인 CS28-1을 수행, 분석하였다. 10g/sec의 증기 유량 조건에서 연료봉 온도가 1680°C에 도달하여 지르칼로이 산화반응으로 인한 온도 상승을 확인하였다. 실험결과를 모의하기 위하여 해석 코드로는 CHAN-II-WL Mod28a를 사용하였고 2개의 지르칼로이 산화모델 (Urbanic-Heidrick Model (UH)과 Leistikow with Prater-Courtrigut correlation (LE))을 이용하였다. 실험과 코드 해석 모두 증기 고갈 현상을 확인하였고, LE 상관식이 UH보다 온도 상승 시점 및 상승량이 빠르고 크게 나타났으며, 최대 수소 생성량을 비교한 결과 UH 모델이 실험을 더 근사하게 모의한다고 확인되었다. 다만, 코드 해석 결과 얻어진 압력관의 온도가 실험보다 과도하게 높게 예측되어 원인 규명 중에 있으며, 원인 중 하나는 코드에서 반영되지 않은 CO2 가스층에 의한 냉각 효과로 판단하고 있다.

마지막 논문인 참고문헌 2-4는 압력관 내부의 연료봉의 형상 변형의 효과를 보여주는 실험에 대하여, 37개의 연료봉이 있는 압력관에서의 온도 분포를

CATHENA Mod3.5a로 분석하였다. 특히 중대사고 환경에서의 연료봉의 거동 모사에 초점을 맞추어, 연료봉들이 압력관 하부로 촘촘하게 재배치된 형상에서의 열화학적 특성 거동을 코드로 분석하였다. 냉각수 상실사고로 인한 과열 수증기 환경에서, 연료봉 각각과 압력관, 그리고 칼랜드리아 튜브에서의 열전도 현상과, CATHENA 모델을 이용한 정상상태와 재배치 상태에서의 복사열 가시변수 (view factor) 계산, 그리고 변형으로 연료봉이 서로 닿게 되는 경우의 metal-to-metal contact 열전달을 고려하였다. 또한, 압력관의 부분적인 처짐으로 인한 연료봉의 위치 재배치 효과나, 산화 반응시 수증기 고갈 효과 등도 CATHENA의 모델을 이용하였다. 해석 결과 연료봉이 재배치되면 심각한 수증기 고갈로 연료봉에서의 산화반응에 의한 열 생성이 급격하게 감소함을 확인할 수 있었고, 이로 인해 재배치된 연료봉에서의 온도는 재배치가 되지 않은 경우의 급격한 온도 상승에 비하여 상당히 작게 예측되었다.

2.2.2. AECL 실험 및 코드 해석 결과 비교

위에서 언급한 네 편의 논문 내용을 근거하여, 압력관 내부의 연료봉 사이의 온도 분포를 검토하였다. 그림 2-2부터 2-4는 7개의 연료봉을 사용한 모의 실험에서의 실험 측정치와, 개별 연료봉을 모의하는 CATHENA, 그리고 고링으로 연료봉을 대표하는 CHAN 코드의 계산 결과를 내부 및 외부 연료봉의 여러 위치에서 비교하고 있다 [2-1]. 각 그림에서의 실험과 코드와의 온도 차이는 가열되는 동안 (stage 4) 내부 연료봉에서 약 200°C, 외곽의 연료봉에서는 약 100°C의 차이를 보이며, 관심이 되고있는 내 외부 연료봉 사이의 온도 차이는 그림 2-2와 2-4를 비교해보면 최대 약 200°C 정도임을 보여주고 있다.

28개의 연료봉에 대하여 수행된 고온 열화학 실험인 CS 28-1에서의 압력관 내 연료봉의 온도분포는 그림 2-5에 제시되어 있다 [2-3]. 출력이 40kW보다

적은 600 초 이전에는 위치별로 최대 약 60°C 정도의 차이를 보이며, 급격히 가열되는 그 이후부터는 온도 증가율이 서로 달라 제일 안쪽에 위치한 TC 34 (중앙 링), 두 번째 링의 TC 32, 그리고 중앙 링의 가열되지 않은 연료봉의 TC 33이 높은 온도 분포를 갖는다. 산화 반응이 발생하기 이전인 850초 부근에서 최외곽 연료봉 표면의 TC 29를 제외하고는 연료봉 사이의 온도차이는 약 180°C정도이다.

일반적으로 압력관 내부가 과열의 수증기로 가득 차게 되면 연료봉의 온도는 이미 냉각재 상실로 상승한 상태이며 따라서 그림 2-6과 같이 연료봉들이 원래 자리를 이탈하여 처지는 현상 (sagging)이 발생하게 된다 [2-4]. 이러한 형상에서의 연료봉 온도 거동은 지금까지의 분석 대상이었던 건전한 형상과 다르게 예측된다. 그림 2-7은 정상 형상을 유지하고 있는 연료채널에서의 CATHENA 해석 결과로, 제일 위 그림에서 보면, 중앙 연료다발인 bundle 7의 경우 시간에 따라 중앙 연료봉 1번의 피복재와 최외곽의 연료봉 21의 피복재에서의 온도차이가 계속 증가함을 보여준다. 그러나, 그림 2-6과 같이 연료 채널 내부에서의 연료봉 재배치를 고려하여 해석하게 되면 (100초에 재배치된다고 가정) 그림 2-8의 실선 온도처럼 내부에 위치한 연료봉의 온도가 시간이 지날수록 더 이상 증가하지 않으며, 심지어 외부로의 열 손실로 감소하는 경향을 보인다. 이러한 이유는, 형상 재배치로 중앙에 위치한 연료봉 사이의 유로 면적이 감소하여 수증기의 공급과 산화 반응이 제한되기 때문이다. 참고로 일점 쇄선의 온도 거동은 연료 다발 사이의 지르칼로이 막판 (end plate)에서의 유량 혼합을 완전 혼합 (complete mixing)으로 가정한 결과로, 재배치 상황에서의 최대 산화 반응으로 인한 온도 상승을 보여주며, 온도가 발산하는 굵은 점선은 초기 형상을 계속 유지하는 경우에서의 온도 거동을 보여준다.

2.2.3. AECL 실험 및 코드 해석 결과 검토

위에서 검토한 압력관 내부의 연료봉 사이의 온도 분포로부터 ISAAC에서 가정하는 단일 대표 연료봉 모델의 적용성 여부를 다음처럼 정리하였다:

1) 압력관 내부에 냉각수가 남아있는 동안에는 CHAN에서처럼 37개의 연료봉을 4개의 링으로 구분하여 모의해도 수위에 따른 온도 분포 효과를 평가할 수 없다. 즉, 동일한 링에 소속된 연료봉도 상부에 있으면 대기에 노출되어 가열되고, 하부에 위치한 연료봉은 냉각수 온도를 유지하게 되기 때문이다. AECL에서 수행한 실험에서 보듯이, 중대사고 환경을 모의하기 위하여 이미 압력관 내부의 냉각수는 모두 고갈되어 과열의 수증기가 차있는 경우를 모의하였고, 이 경우를 CHAN으로 해석하였다.

2) 수증기 환경인 압력관 내부에서 연료봉들이 처음 위치에 있다고 가정하였을 때, 지르칼로이 산화이전까지는 안쪽의 연료봉과 외곽에 위치한 연료봉 사이의 온도 차이가 최대 200°C 정도로 나타남을 확인하였다.

3) 압력관 내부가 수증기 환경인 경우는 이미 연료봉이 가열되어 있는 상황으로, 압력관 내부의 연료봉의 형상은 초기의 형상에서 그림 2-6처럼 재배치되어 있을 가능성이 매우 높다. 이 경우 실험에서 나타났듯이 내부의 연료봉에서의 증기 고갈 현상이 심하여 더 이상의 온도 증가가 일어나지 않아, 내부와 외곽의 연료봉 사이의 온도 차이가 시간에 따라 일률적으로 벌어지지 않음을 보여준다.

4) ISAAC 결과에서 보면 압력관 내부의 냉각수가 고갈되고 나면 연료봉의 온도는 바로 상승하여 지르칼로이 산화반응을 일으킴을 알 수 있다. 일단 압력관 내부의 연료봉의 온도가 상승하게되어 재배치되고 나면, 그 이후의 연료봉의 형상에 대해서는 불확실성이 높아 연료봉에 대한 자세한 모델링은 큰 의미를 갖지 못한다.

따라서, 중대사고에서의 노심 열전달 현상을 모의하는 ISAAC 코드에서 압력관 내부의 37개의 연료봉을 대표 연료봉으로 정의하여 모델링하는 접근 방법은, 압력관 내부의 연료봉들을 여러 개의 링으로 구분하여 모델하는

것에 비하여, 사고 초기 연료봉들의 재배치 이전 동안 압력관 내부에서의 연료봉들의 온도 분포를 간과하지만, 그 영향은 중대사고 관점에서 크지 않음을 확인하였다.

2.3 ISAAC의 노심 열전달 모델 특성

ISAAC에서는 연료봉, 피복재, 압력관, 칼랜드리아관, 압력관 내부의 냉각재 및 칼랜드리아관 외부의 감속재에서의 에너지 보존 방정식을 세워 열전달 현상을 모의한다. 즉, 각 구성 요소에서 열원과 열침원을 정의하고, 열전달 계수를 도입하여 미분 방정식을 작성한다. 이때 전도, 대류, 복사 효과를 고려하며, 기하학적 형상이 바뀌거나 냉각재의 상태가 바뀌는 경우까지 고려하여 열전달 계수를 계산한다. 예로, 압력관과 칼랜드리아관 사이의 열전달은 복사열, CO2 가스층에서의 열전도, 그리고 압력관이 부풀어 칼랜드리아관과 접촉하였을 때의 접촉으로 인한 열전달까지 고려하도록 상관식을 도입하여 계산한다. 특히 수평연료관의 건전성과 관련되어 관심이 되고있는 칼랜드리아관과 감속재와의 열전달은, 감속재가 있는 경우는 풀 비등, 핵 비등, 그리고 막 비등에 의한 대류 현상을 고려하고 있으며, 칼랜드리아관이 대기에 노출되어 있는 경우는 칼랜드리아 탱크 상부 대기의 온도 차이에 의한 자연 순환에 의한 대류를 고려하도록 모의하였다.

ISAAC에서 모의하고 있는 노심의 형상은 그림 2-9에 잘 정리되어 있다. 그림에서 보듯이 칼랜드리아 탱크 내부에 수평으로 놓여있는 수평연료관은 칼랜드리아관 외벽의 감속재 수위와 연계된 열전달 현상과, 압력관 내부의 열수력 조건에서 칼랜드리아관, CO2 가스 층, 압력관, 그리고 대표연료봉에서의 열전달 현상을 다루고 있다. 그림에는 나타나있지 않지만 축 방향으로도 12개의 연료다발 (fuel bundle)을 정의하여 온도 분포를 예측하고 있다.

대형 파단사고와 발전소 정전사고에서의 ISAAC에서 예측하는 노심 내 온도 분포를 그림 2-10부터 그림 2-15에 정리하였다. 그림 2-10은 LOCA 사고에서 수평연료관 내부의 온도 분포를 보여주고 있는데, 위에서부터 연료봉, 피복재, 압력관, 그리고 칼랜드리아관의 순서이다. 발전소 트립이후 온도가 감소하다가 냉각재 상실로 압력관이 고갈되면서 온도는 거의 1500도까지 상승하고, 1시간 30분 경에는 산화반응으로 인한 급격한 발열 현상으로 연료봉 온도가 용융온도까지 도달한다. 피복재 온도는 연료봉 온도와 유사하게 변하고, 압력관 온도는 약간 낮은 온도로 좇아가다가 산화반응이 시작되면서 바로 연료봉 온도로 접근한다. 칼랜드리아 탱크의 감속재와 닿아있는 칼랜드리아관은 감속재 온도를 유지하다가 역시 산화반응 이후 연료봉 온도에 도달함을 보여준다. 그림 2-11은 칼랜드리아 탱크 안에 높이별로 위치해있는 수평연료관의 연료봉 온도를 보여준다. 높이별로 연료봉 출력이 다르긴 하지만 건전성이 손상되는 순서는 연료관 외부의 감속재의 수위에 밀접하게 연관되어 있으며, 따라서 높은 위치에 있는 연료봉부터 손상된다 (모두 6개의 수평 연료관 중 #1, #2, #3은 broken loop에, #4, #5, #6은 unbroken loop에 연결되어 있고, 서로 사이사이에 얽히도록 위치하여 높이 순서는 #1, #4, #2, #5, #3, 그리고 #6이다). 그림 2-12는 제일 상단에 위치한 수평연료관 (#1)의 축 방향에 위치한 연료봉들의 온도 분포를 보여준다. ISAAC에서는 축 방향으로 12개의 연료 다발 (fuel bundle)에 대한 출력을 지정하여주고, 출력이 높은 중앙부터 가열되어 손상되며 출력이 낮은 가장자리로 전파됨을 알 수 있다.

그림 2-13부터 2-15까지는 발전소 정전사고에서의 온도 분포를 보여주고 있다. 월성 원전에서는 초기 사고가 LOCA가 아니더라도 냉각재가 고갈되고 감속재 수위가 낮아지면 압력관이 손상되어 압력관 파단사고로 진행된다. 따라서, 사고 진행의 전체적인 경향은 LOCA와 유사하고, 다만 사고 진행 시간에서 약간의 차이를 보인다.

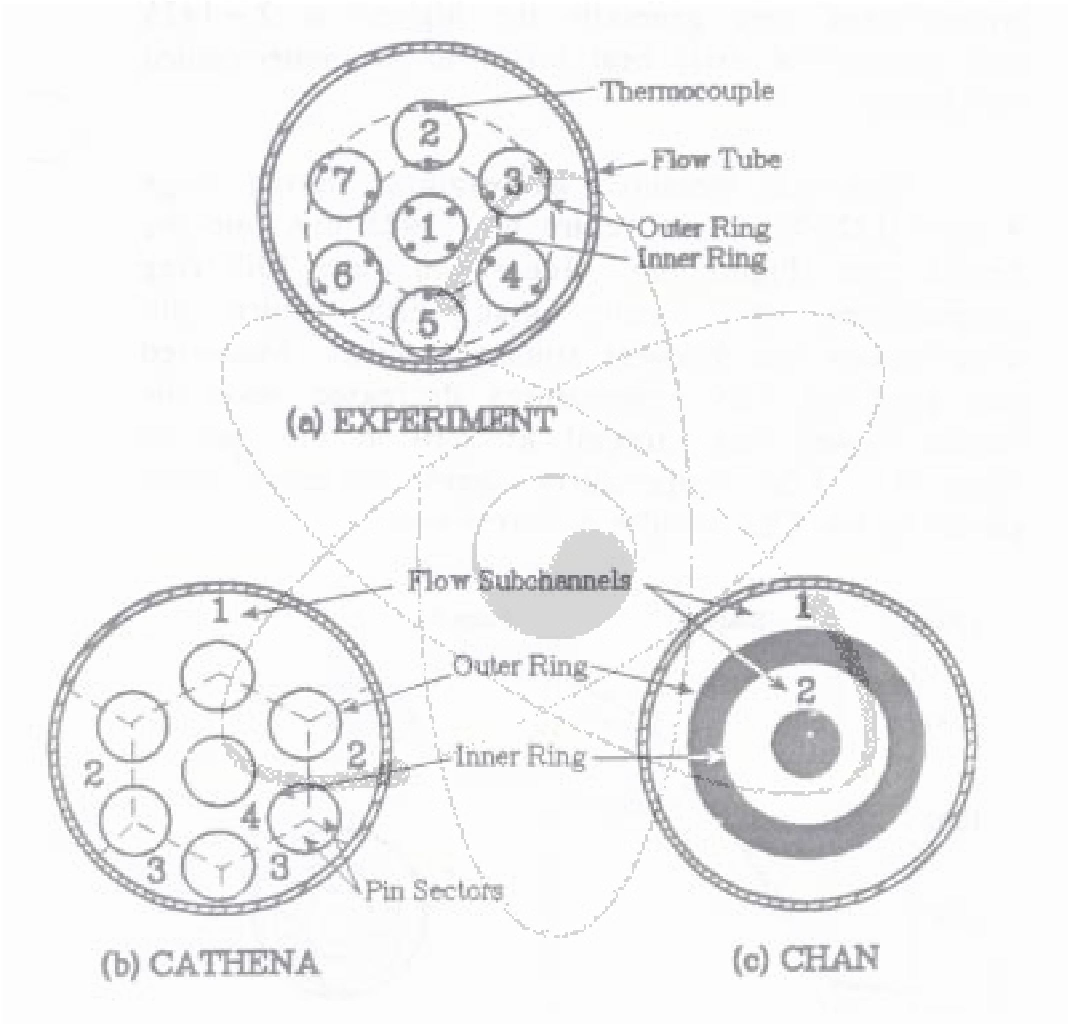


그림 **2-1** 실제 실험에 사용된 연료관 형상 및 코드 별 모델 방법**[2-1]**

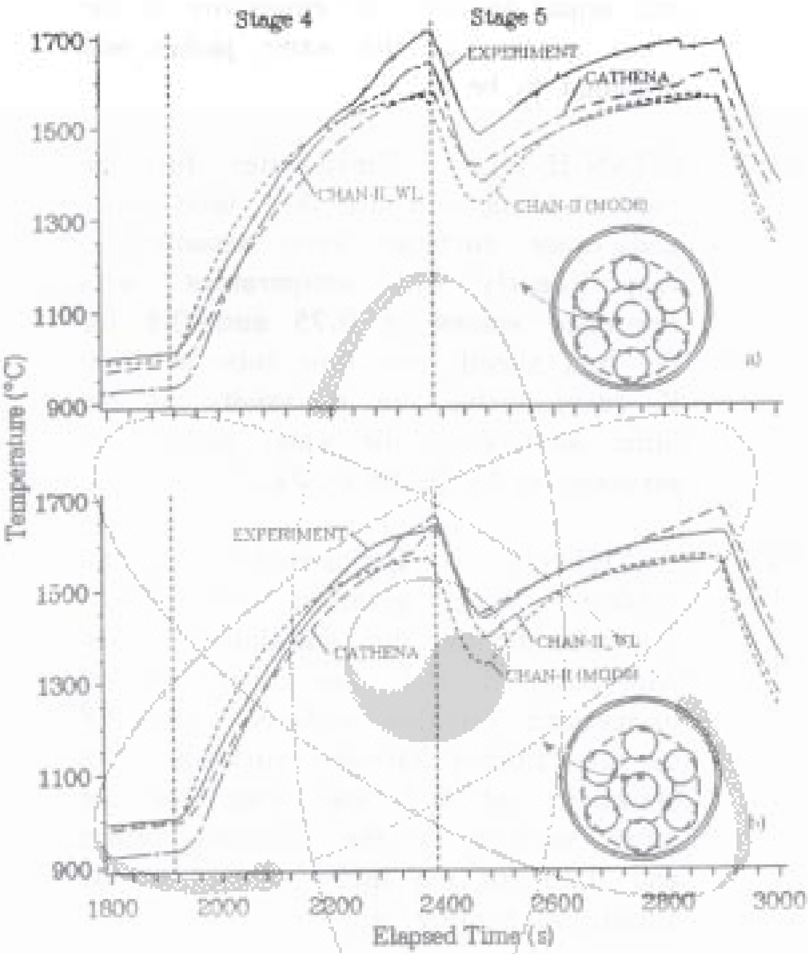


그림 2-2 실험, CHAN, 그리고 CATHENA에서의 내부 연료봉 표면에서의 온도 거동[2-1]

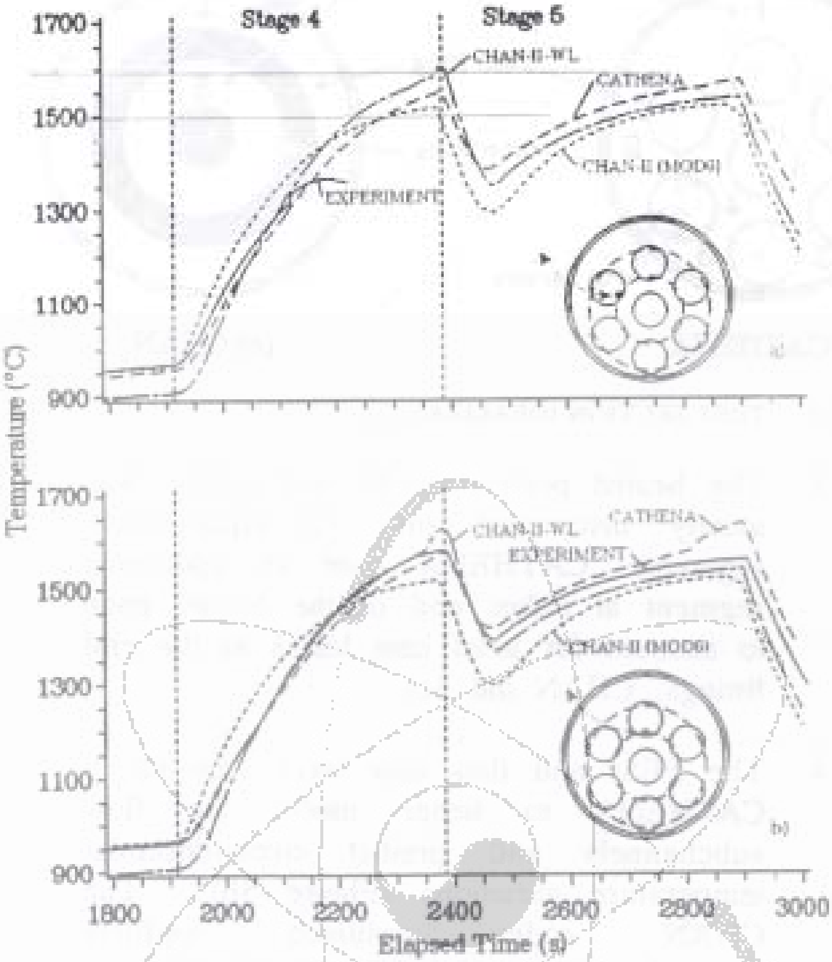


그림 2-3 실험**, CHAN,** 그리고 **CATHENA**에서의 외부 연료봉 안쪽에서의 온도 거동**[2-1]**

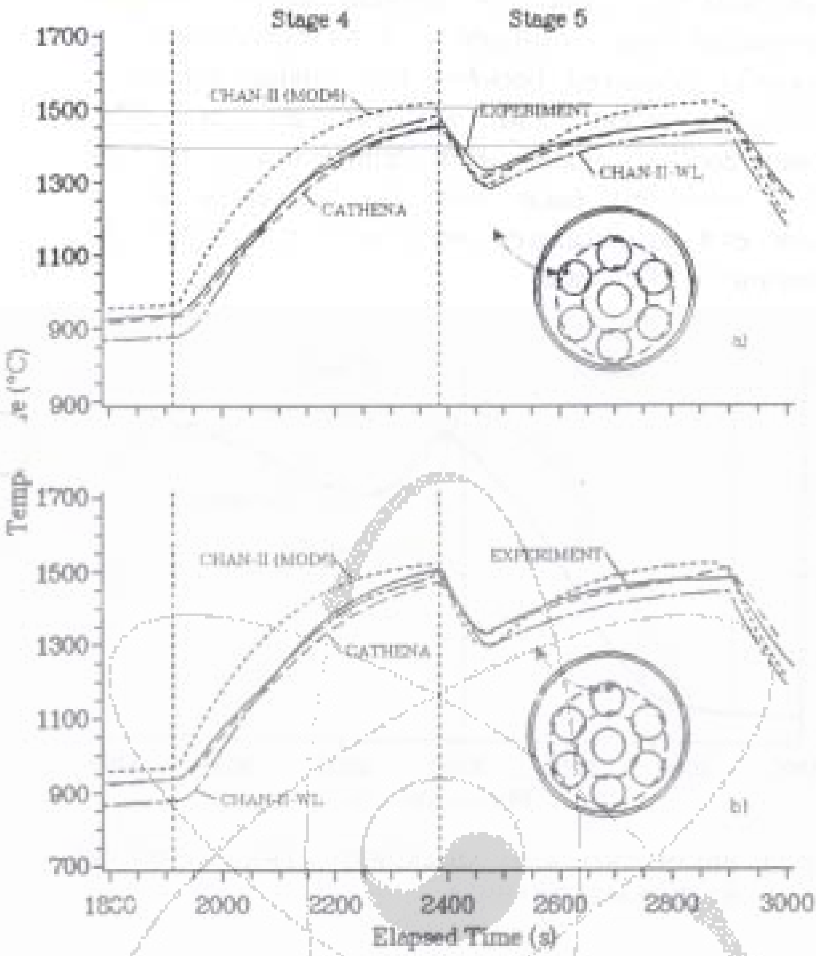


그림 **2-4** 실험**, CHAN,** 그리고 **CATHENA**에서의 외부 연료봉 바깥쪽에서의 온도 거동**[2-1]**

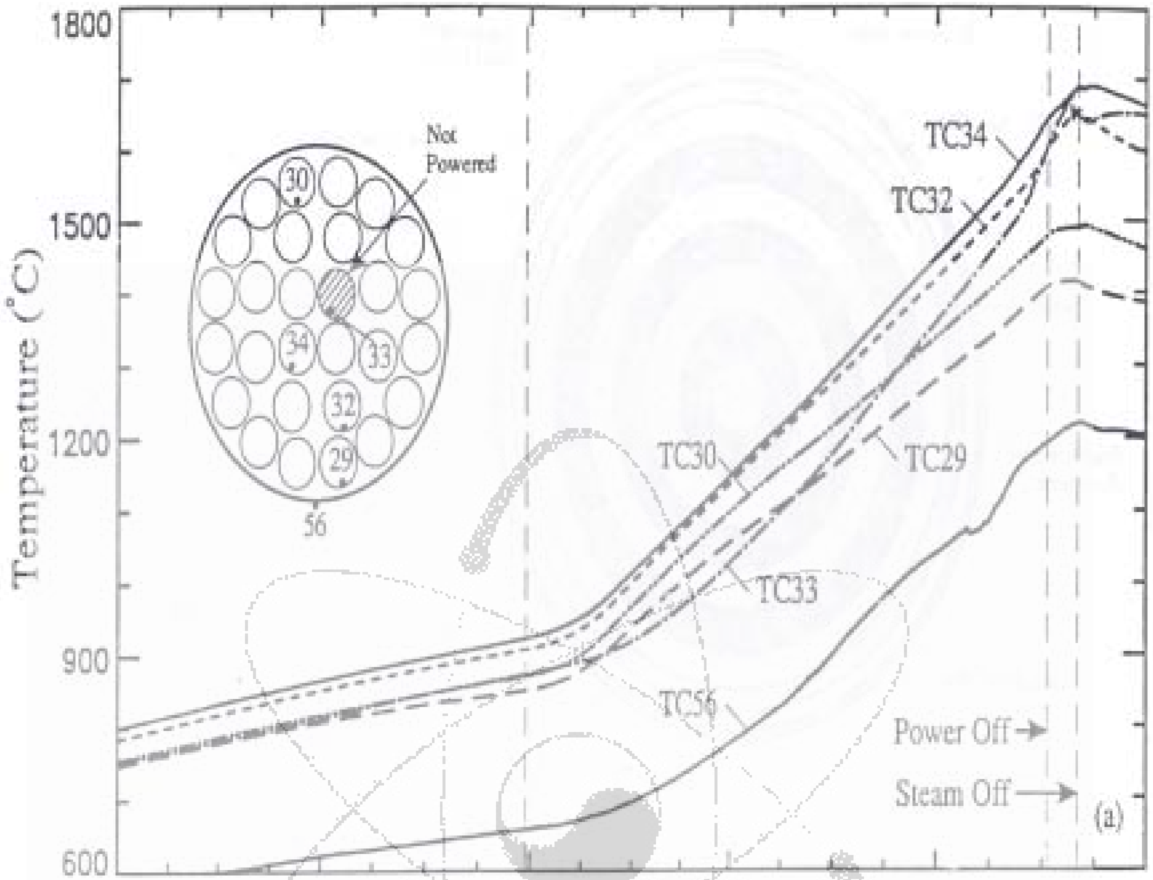


그림 **2-5** 실험에서 계측된 연료봉에서의 온도분포 **[2-3]**

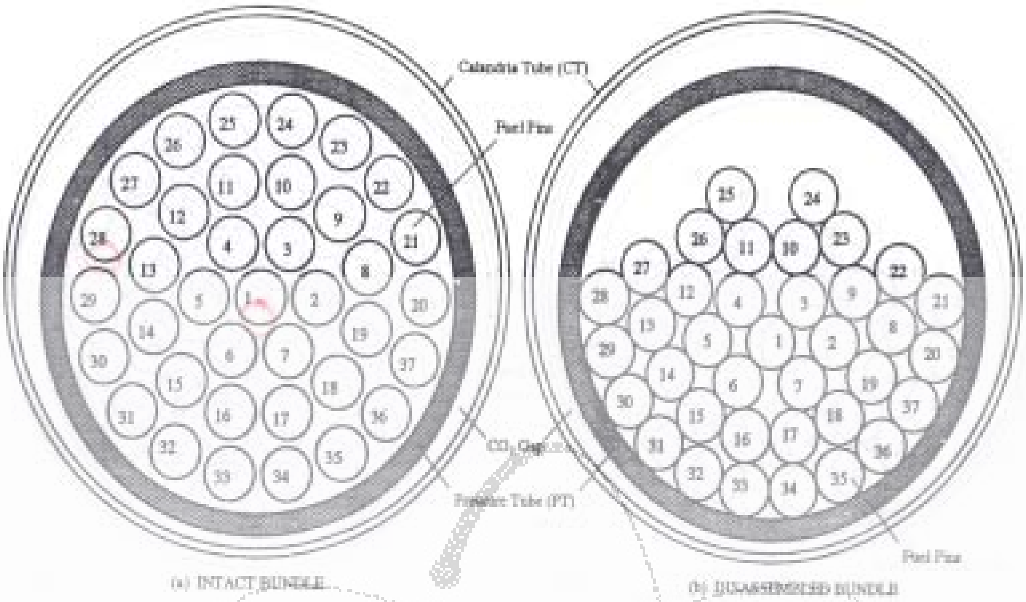


그림 **2-6** 가열 환경에서 압력관 내부에서의 연료봉의 가능한 형상

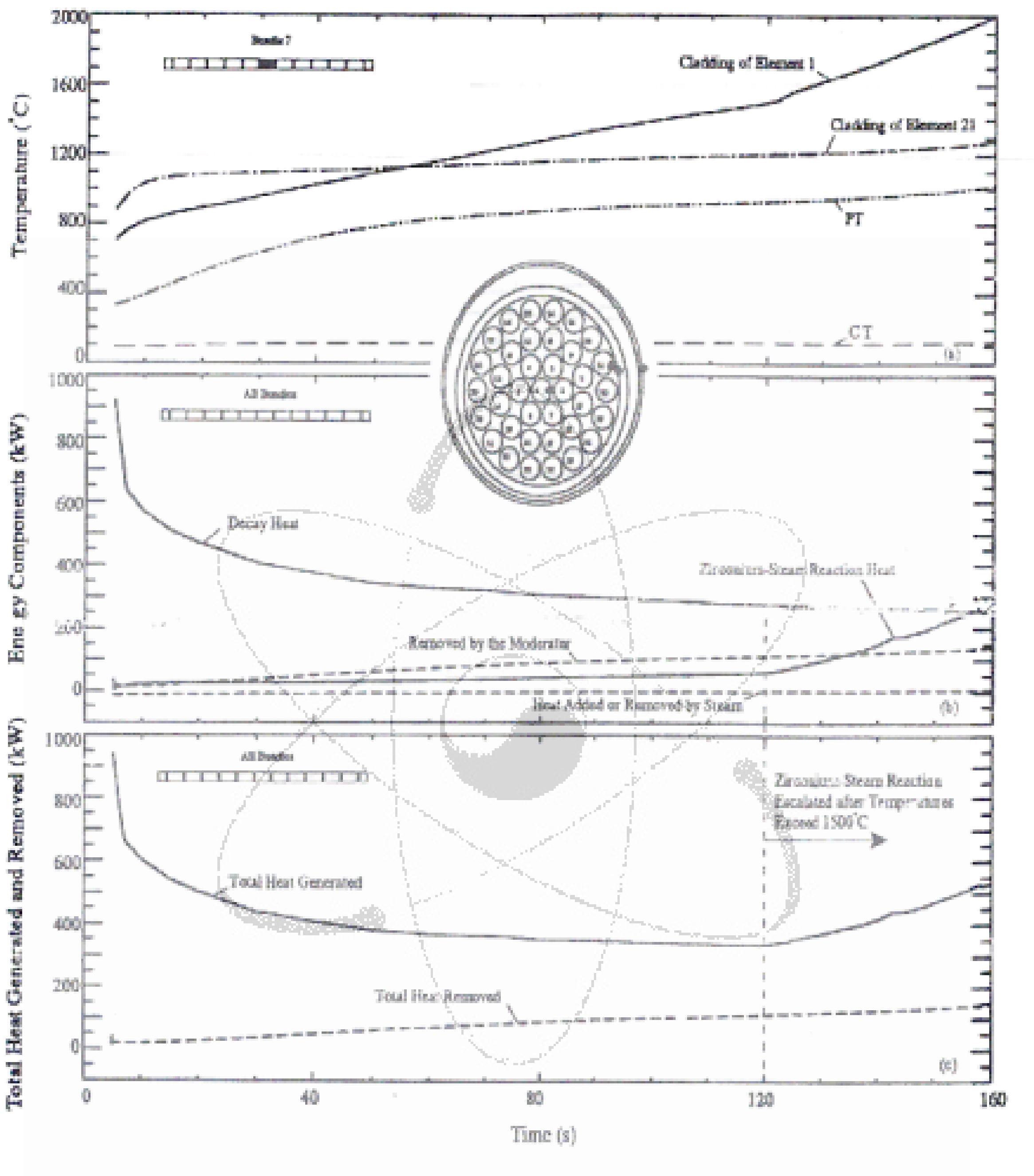


그림 **2-7** 연료봉이 제 위치에 있을 경우 **CATHENA**로 예측한 연료봉 거동**[2-4]**

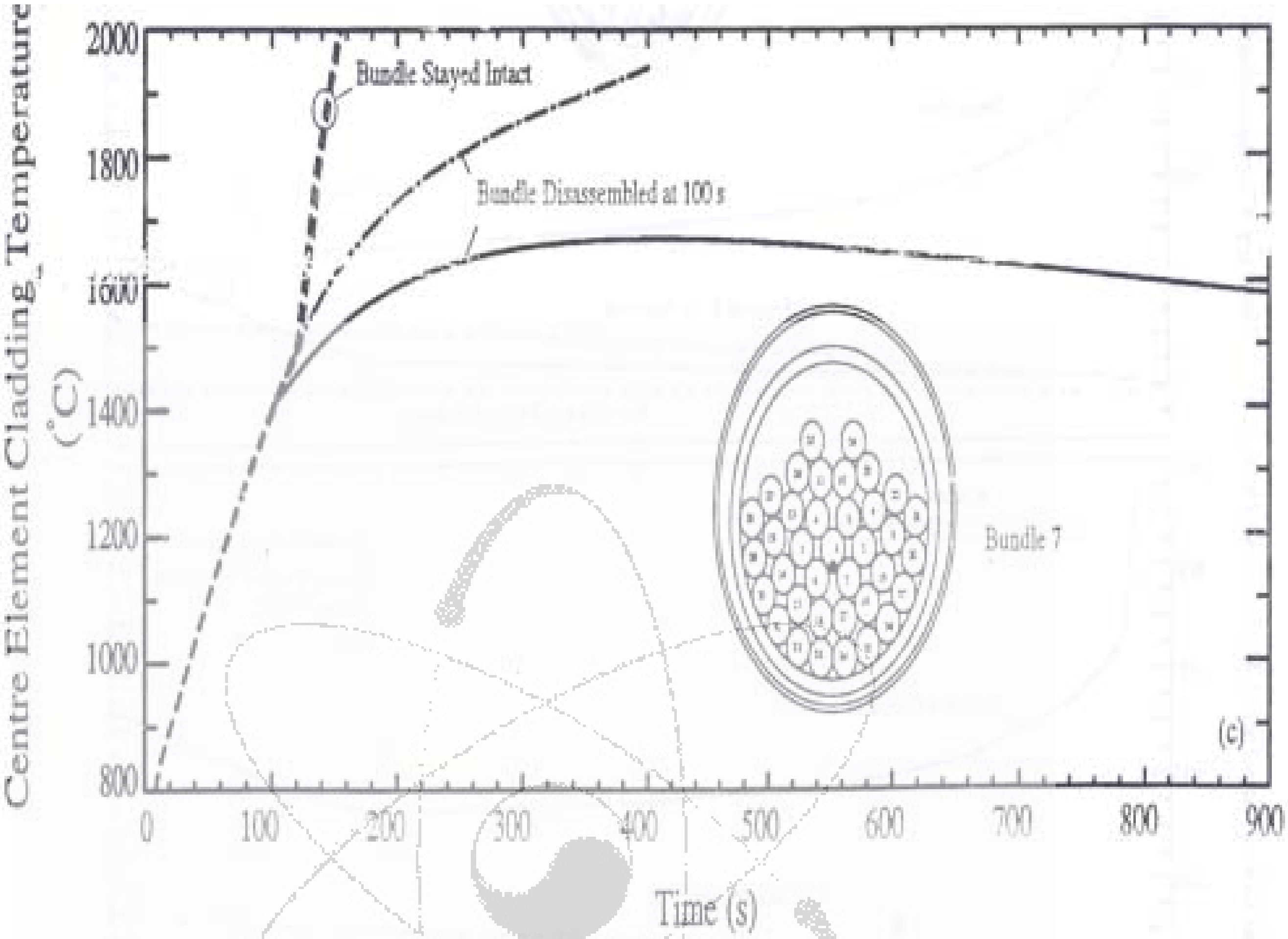
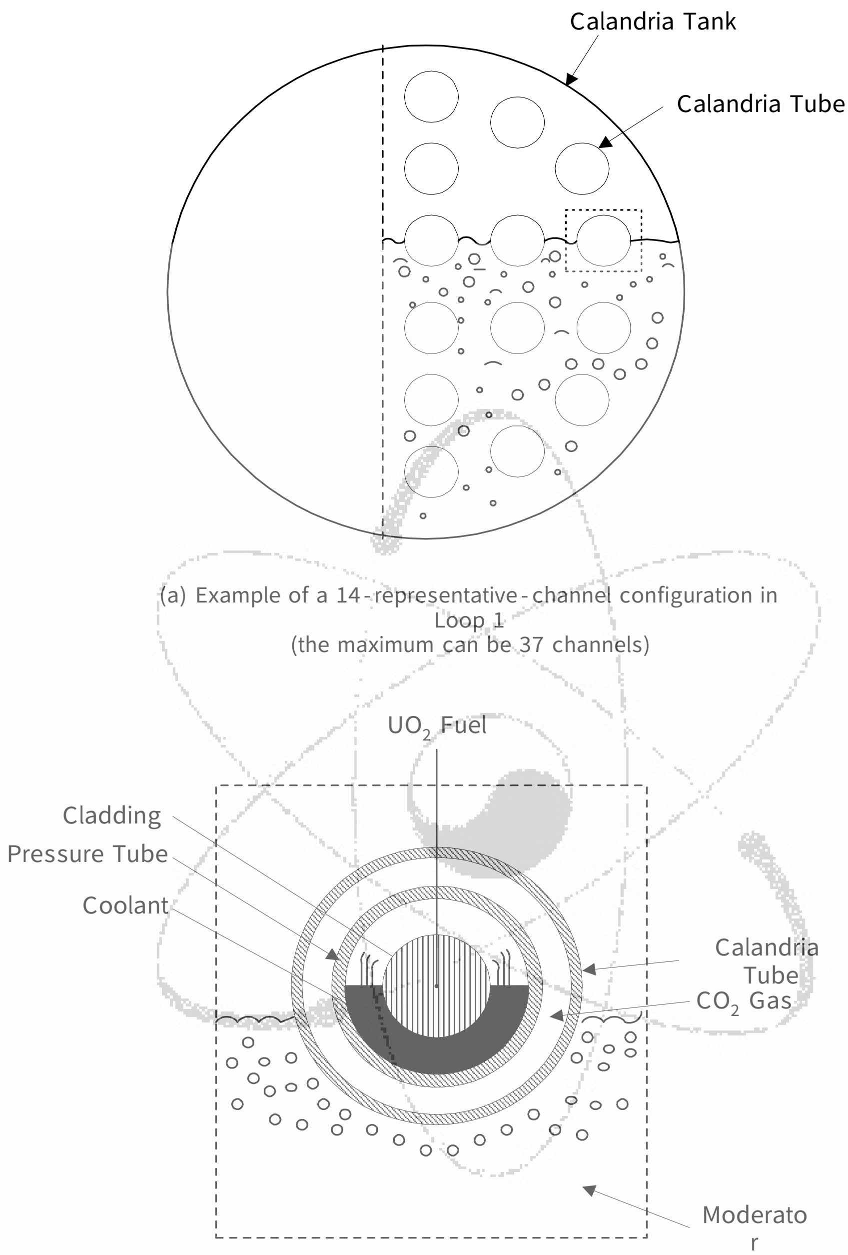


그림 **2-8** 연료봉이 재배치되었을 경우 **CATHENA**로 예측한 연료봉 거동**[2-4]**



(a) Example of a 14-representative-channel configuration in Loop 1
(the maximum can be 37 channels)

(b) Radial configuration of a representative channel

그림 2-9 ISAAC에서의 노심 형상 모델링

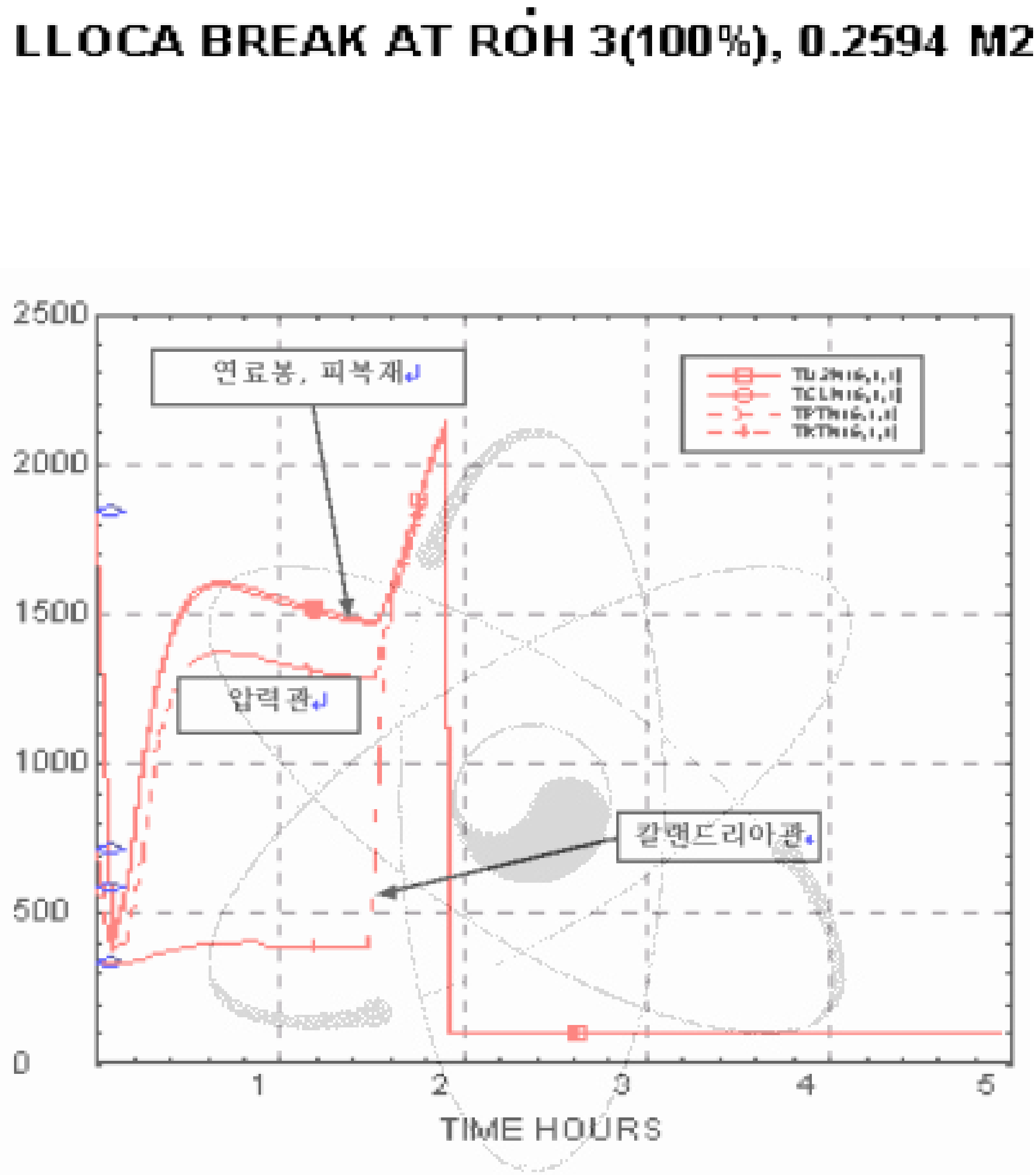


그림 2-10 대형 파단사고에서의 ISAAC을 이용한 칼랜드리아관, 압력관, 피복재, 그리고 연료봉 온도 분포

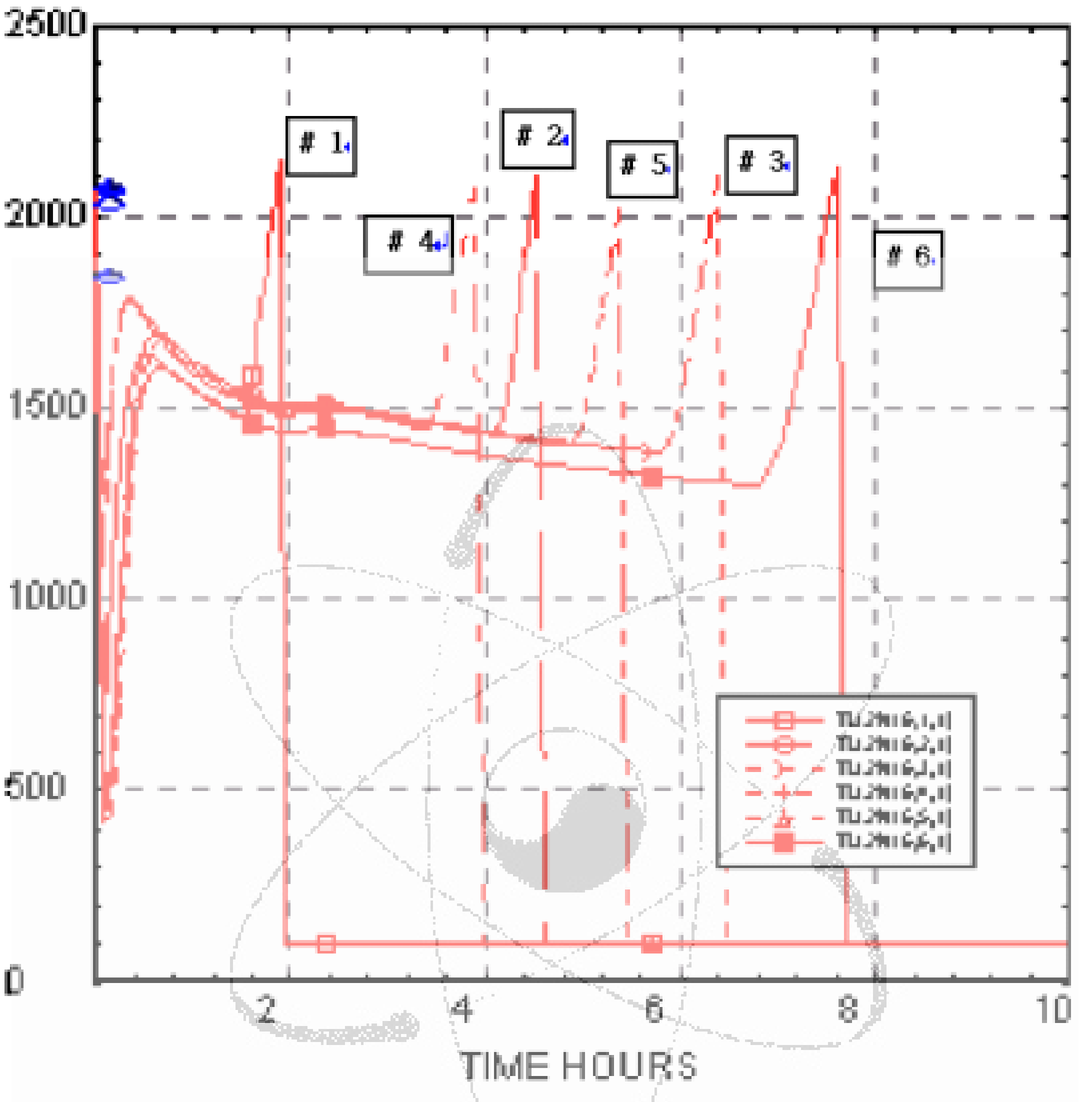


그림 2-11 대형 파단사고에서의 수평연료관 높이별 연료봉 온도 분포

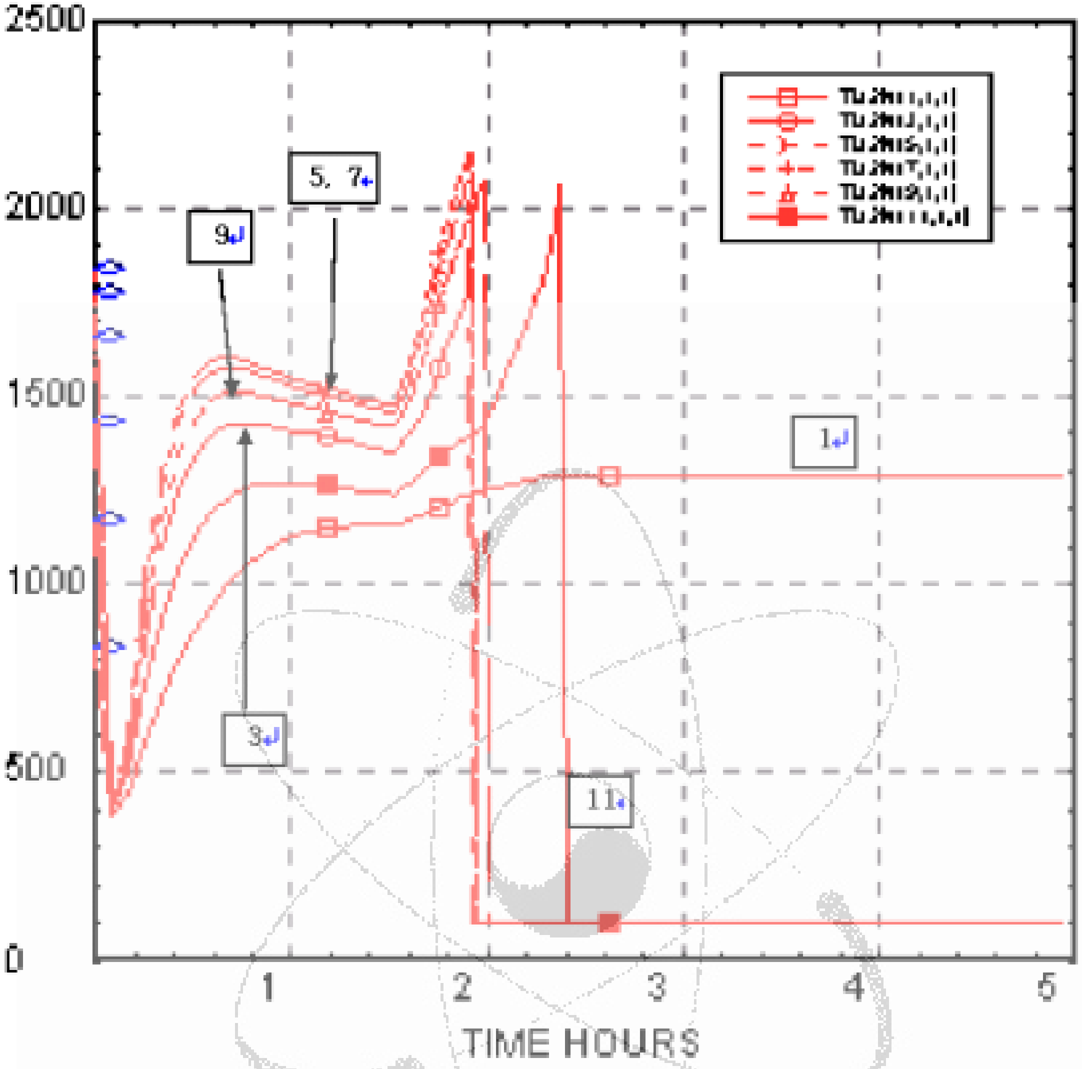


그림 2-12 대형 파단사고에서의 수평연료관 축 방향별 온도 분포

LOAH(0.05) REFERENCE

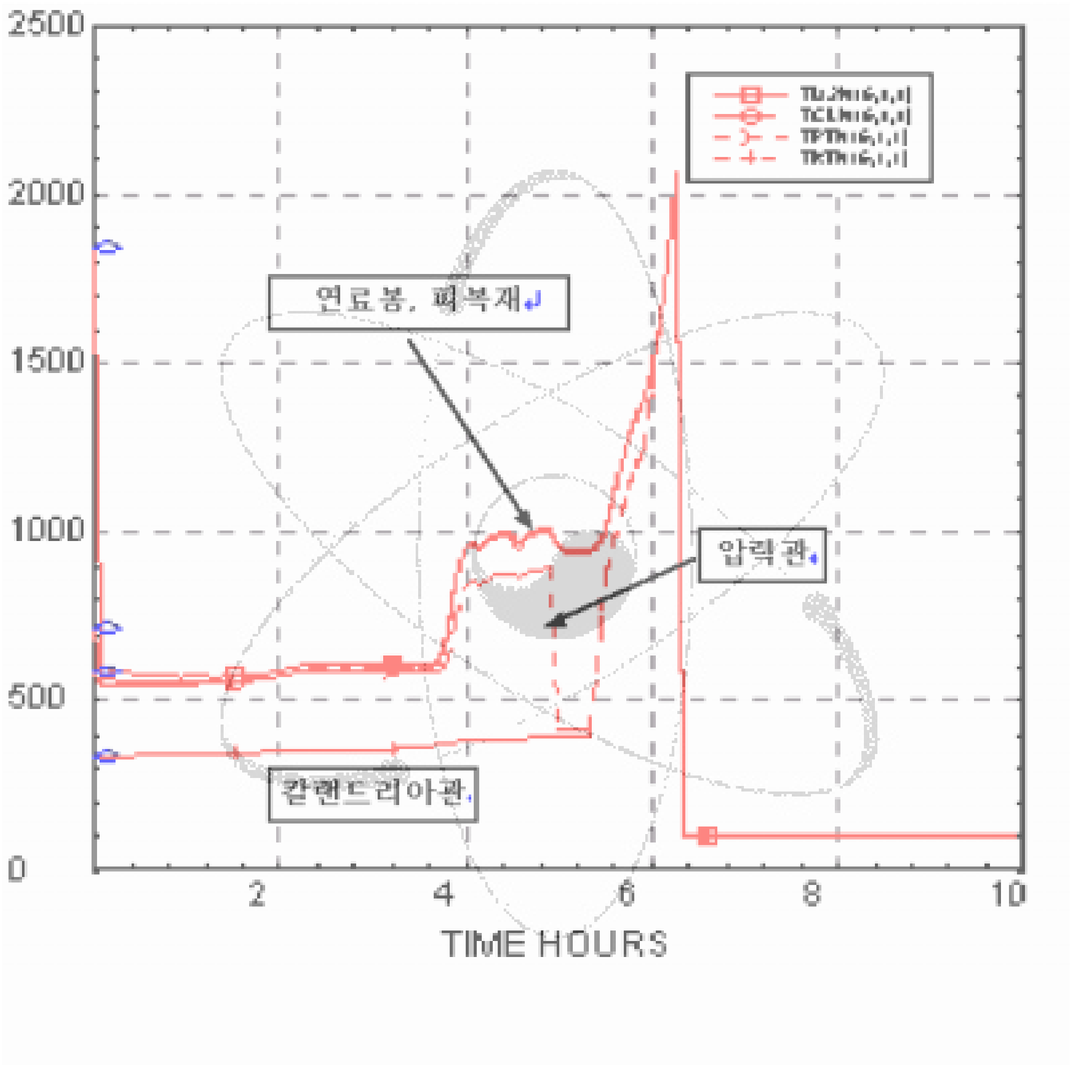


그림 **2-13** 발전소 정전사고에서의 칼랜드리아관, 압력관, 피복재, 그리고 연료봉 온도 분포

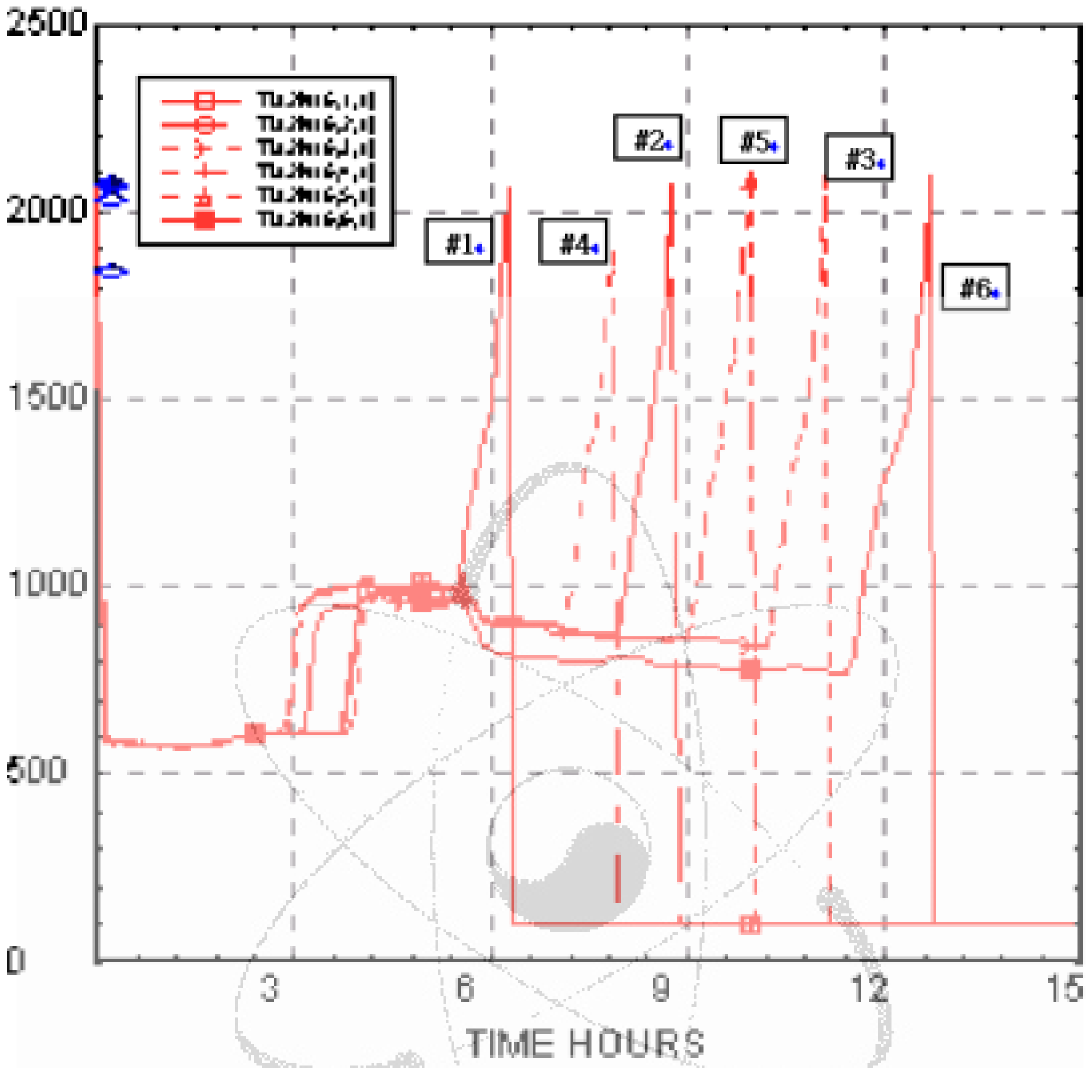


그림 2-14 발전소 정전사고에서의 수평연료관 높이별 연료봉 온도분포

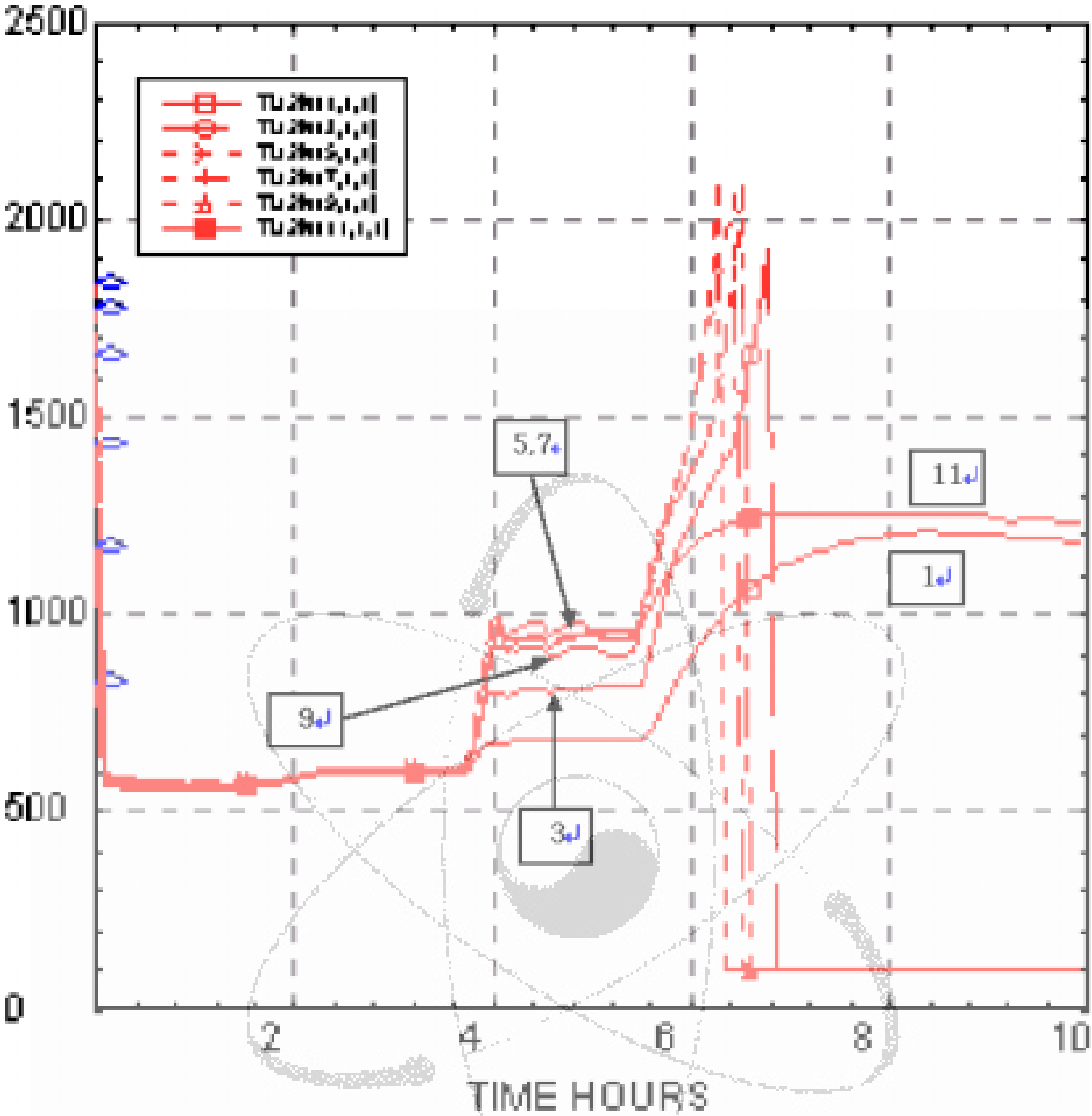


그림 2-15 발전소 정전사고에서의 수평연료관 높이별 연료봉 온도분포

제 3 장 파단유량 모델 분석

ISAAC의 파단유량 모델에서는 Henry-Fauske의 이상 임계유동 모델[3-1]을 이용하여 두 격자 사이의 개구부를 통한 과 냉각수, 그리고 가스와 증기가 혼합된 이상 유체, 또는 물의 유출량을 계산한다. 이 모델에 관련된 ISAAC 코드의 관련 서브루틴과 내용은 표 3-1에 나타냈다.

이상 혼합물의 밀도 ρ 는 식(3-1)에 의해 계산된다.

$$\rho \equiv \frac{\alpha}{\nu_g} + \frac{1-\alpha}{\nu_\lambda} \tag{3-1}$$

여기서, α 는 혼합물의 void fraction 이고 ν_g 는 가스의 비체적이고 ν_λ 은 증기의 비체적을 나타낸다. 이상 혼합물의 건도 x는 다음식에 의해 구해진다.

$$\chi = \frac{\alpha}{\nu_g \rho} \tag{3-2}$$

유동은 unchoked flow 때는 실제 압력비인 P_2/P_1 이나 choked flow 때는 임계 압력비인 η_{crit} 의 압력비 r 의 함수로서 계산된다.

$$r = \max(\eta_{crit}, P_2 / P_1) \tag{3-3}$$

여기서, P_1 과 P_2 는 상, 하향 격자의 압력을 나타내며 그리고 η_{crit} 는 포화 압력비 $Psat/P_1$ 와 이상 혼합물용 임계 유동에 대한 임계 압력비 η 의 최소값을 쓴다.

$$\eta_{crit} = \min(\eta, P_{sat} / P_1) \tag{3-4}$$

Henry-Fauske의 모델에 단순화된 것은 η을 계산할 때 사용된다.

$$\eta = \begin{cases} 0.83 - \dfrac{0.15}{0.22}\chi & \chi \le 0.2 \\ 0.69 - \dfrac{\left[0.69 - \left(\dfrac{2}{1+\gamma}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}\right]}{0.8}(\chi - 0.20) & \chi > 0.2 \end{cases} \qquad (3\text{-}5)$$

여기서, r은 증기의 비열의 비를 나타낸다.

water flow 용 ,α < 0.001, 인 질량 유동율 w는 식(3-6)에 의해 구해진다.

$$w = Af_{CD}\left[\frac{2P_1(1-r)}{v_\lambda}\right]^{1/2} \qquad (3\text{-}6)$$

여기서, A는 개구부의 면적을 나타내며 f_{CD}는 개구부의 방출 계수를 나타낸다.

이상 유동용,α ≤0.001, 인 질량 유동율 w는 식(3-7)에 의해 구해진다.

$$w = Af_{CD}\left\{\frac{2P_1\rho\left[\dfrac{1-\alpha}{\alpha}\right](1-r) + \dfrac{\gamma}{\gamma-1}\left(1-r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)}{\alpha\left[\dfrac{1-\alpha}{\alpha} + \dfrac{1}{r^{1/\gamma}}\right]^2}\right\}^{1/2} \qquad (3\text{-}7)$$

개구부를 통한 가스-증기 혼합물과 물의 질량 유동율, W_g 와 W_l은 다음식에 의해 계산된다.

$$w_g = w\chi \tag{3-8}$$

$$w_w = w(1-\chi)$$

냉각재 상실사고[3-2]를 모의하여 파단유량을 검토하였으며 파단크기/위치 및 방출계수를 변화시켜 가면서 FSAR의 관련 값들과 비교하였다. 표 3-1은 파단 크기/위치 및 방출계수에 따른 초기 파단 방출 유량을 나타내는 것으로 ISAAC 값과 FSAR [3-3] 값이 차이가 있으나 파단부를 통한 방출 총량은 유사하며, 중대사고 현상자체가 가지는 불확실성을 고려하면 이 모델을 이용하는데 있어서 큰 무리가 없는 것으로 판단하였다. 그림 3-1부터 그림 3-6은 ISAAC과 FSAR로 계산된 100% 원자로 출구 모관 파단시 파단 방출유량, 35% 원자로 입구 모관 파단시 파단 방출유량, 그리고 55% 펌프 흡입구 파단시 파단 방출유량을 나타낸다.

표 3-1 파단유량 모델에 관련된 ISAAC 코드의 관련 서브루틴과 내용

Break Flow Model

Code Structure

FLOBRK

CALL WFLOW

FLOBRK : 일차 열전달 계통 안의 개구부를 통한 파단 유량을 계산하며 WFLOW를 부른다.

WFLOW : Henry-Fauske의 이상 임계유동 모델을 이용하여 두 격자 사이의 개구부를 통한 과 냉각수, 그리고 가스와 증기가 혼합된 이상 유체, 또는 물의 유출량을 계산한다. 모두 아래와 같은 12개의 변수로 구성되어있다.

FCD : 개구부 방출 계수

PSATD : 상위 격자 안의 물의 포화 압력

VWDON : 상위 격자 안의 물의 비체적

VF : 상위 격자 안의 void fraction

VGDON : 상위 격자 안의 가스-증기 혼합물의 비체적

GAMMAD:상위 격자 안의 가스-증기 혼합물의 일정한 체적시 비열과 일정한 압력시 비열의 비

P1 : 격자 1의 압력

P2 : 격자 2의 압력

A : 개구부의 면적

WW12 : 물의 질량 유동율

WG12 : 가스-증기 혼합물의 질량 유동율

Q : 이상 혼합물의 질

위의 변수중 WW12, WG12 그리고 Q는 출력으로 사용되고 나머지 변수들은 입력으로 사용된다.

표 3-2 파단 크기/위치 및 방출계수에 따른 초기 파단 방출 유량

	f_{CD}	ROH 7 (100 %)	RIH 8 (35 %)	RIH 8 (100 %)	PS 4 (55 %)	PS 4 (100 %)
ISAAC 계산유량 (kg/s)	0.6	6975	2005	5727	4459	8108
	0.75 *	8718	2506	7159	5574	10135
	0.9	10462	3007	8590	6689	12162
FSAR 계산유량 (kg/s)		8210	5470	10800	7170	9000

f_{CD} (FCDBRK) : Discharge Coefficient for Henry-Fauske two phase critical flow model (0.75 : Default 값)

ROH : 원자로출구모관, RIH : 원자로입구모관, PS : 펌프 흡입관

ROH 100 % : (0.2594m^2)

RIH 100 % : (0.213m^2), RIH 35 % (0.07455m^2)

PS 100 % :(0.30165m^2), PS 55 % :(0.1659m^2)

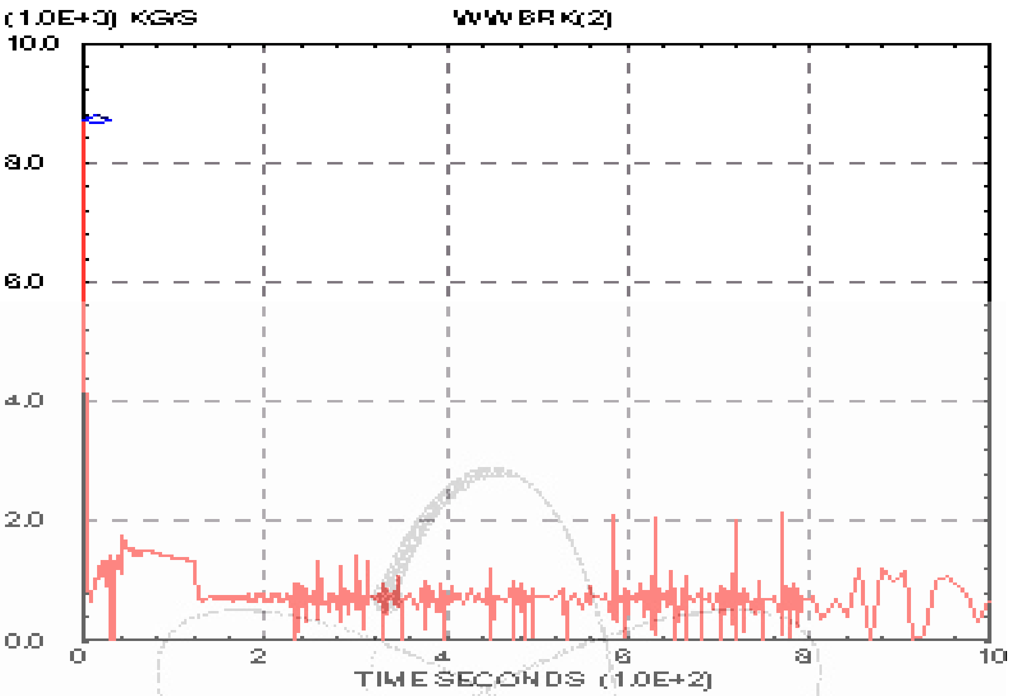


그림 3-1 100% 원자로출구모관 파단시 파단방출 유량 (방출계수:0.75 ISAAC)

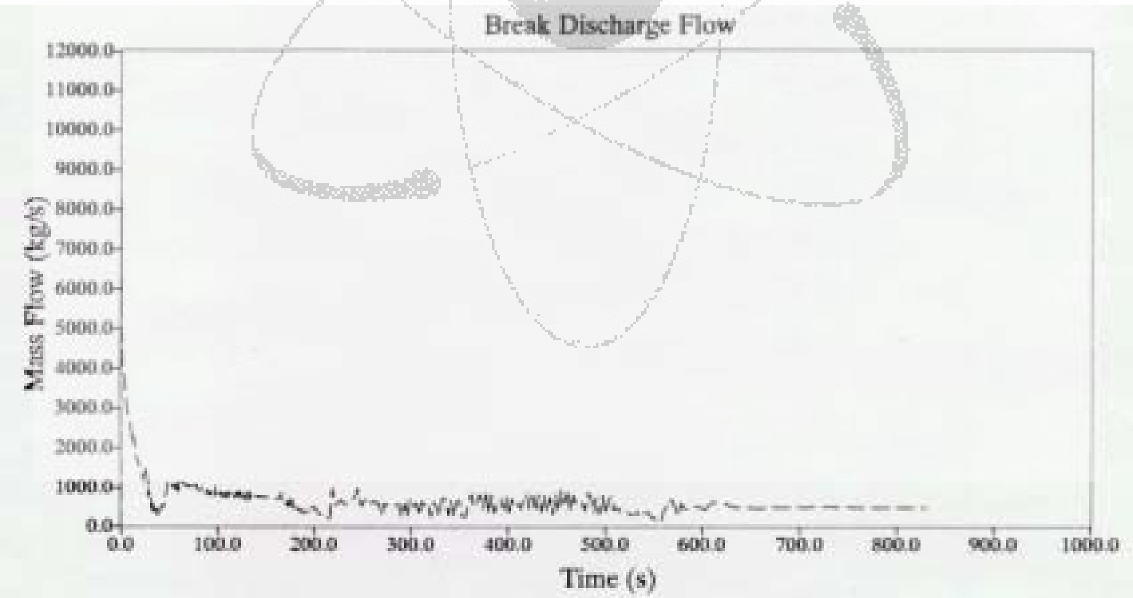


그림 3-2 100% 원자로출구모관 파단시 파단방출 유량 (FSAR)

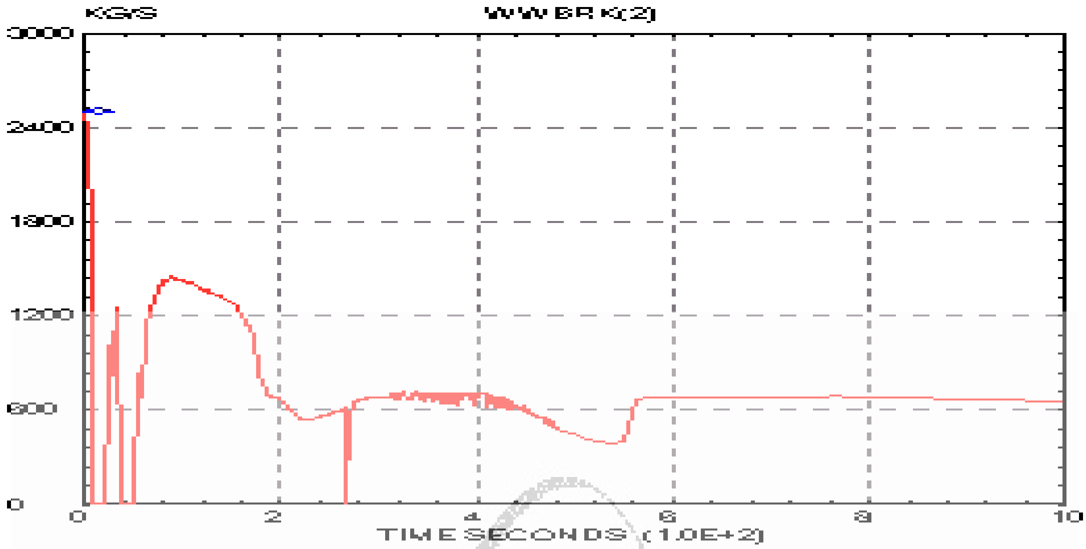


그림 3-3 35% 원자로입구모관 파단시 파단방출 유량 (방출계수:0.75 ISAAC)

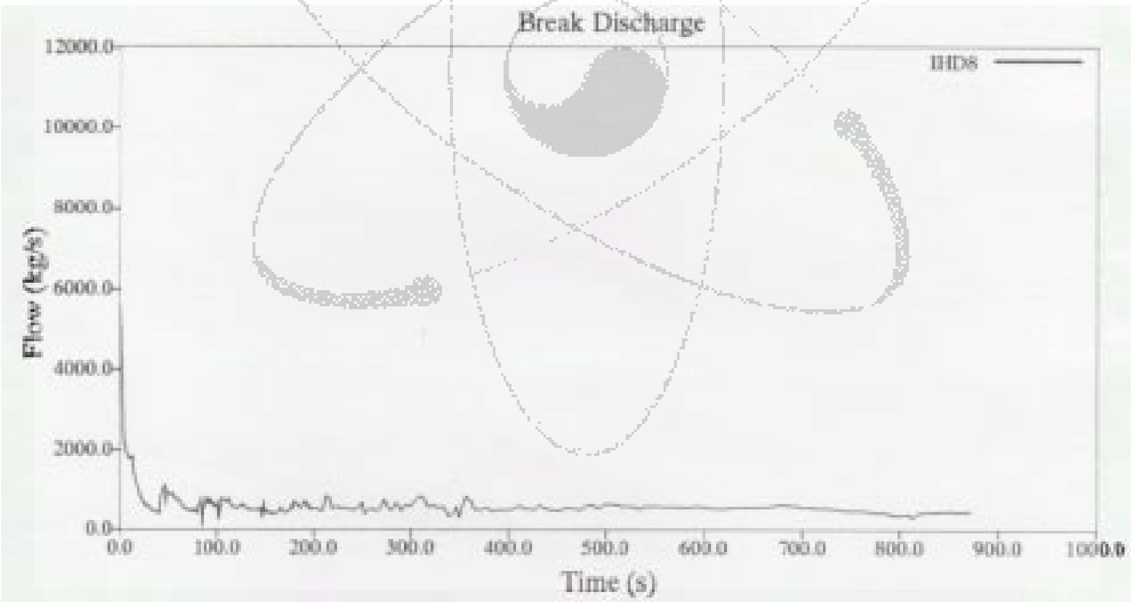


그림 3-4 35% 원자로입구모관 파단시 파단방출 유량 (FSAR)

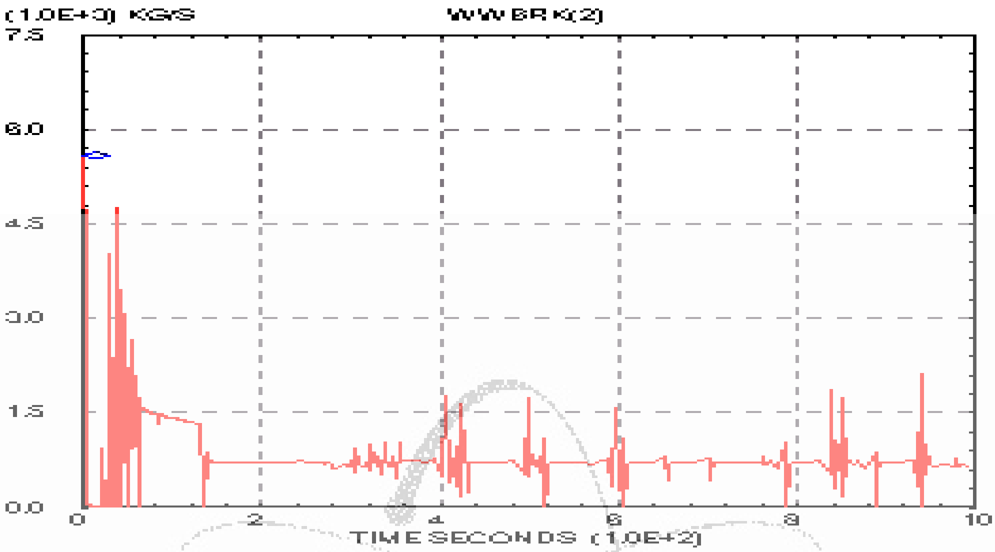


그림 3-5 55% 펌프흡입관 파단시 파단방출 유량 (방출계수:0.75 ISAAC)

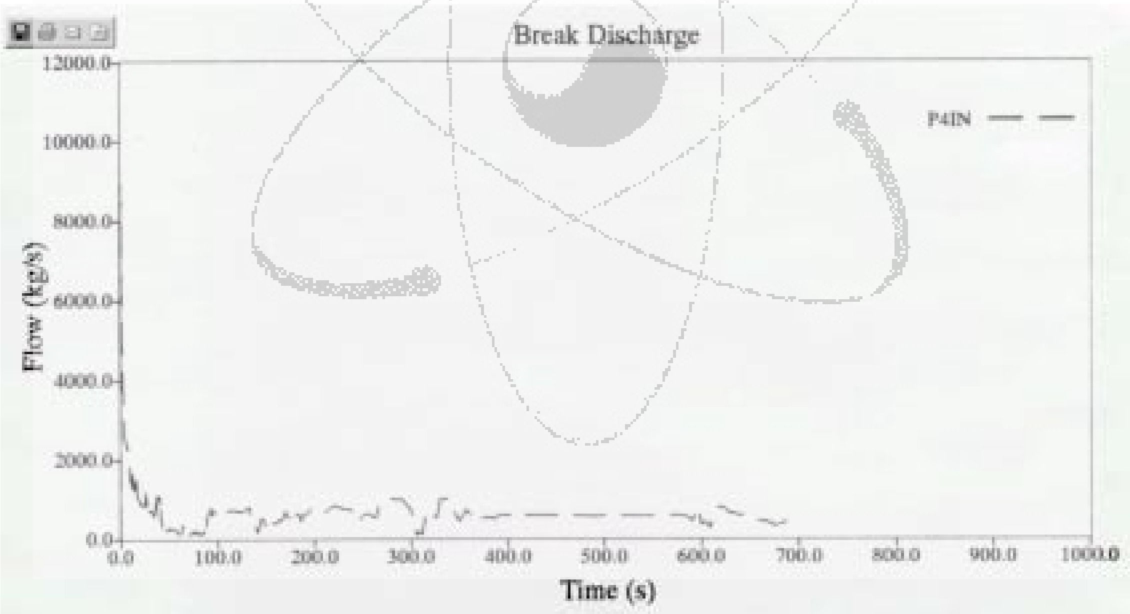


그림 3-6 55% 펌프흡입관 파단시 파단방출 유량 (FSAR)

제 4 장 비상노심주입 모델 분석

모델 분석을 위해서 이 코드의 관련 서브루틴의 코딩내용과 참조 코드인 MAAP코드의 사용자 설명서 등을 참조하였다. 이 모델에 관련된 ISAAC 코드의 관련 서브루틴과 내용은 표 4-1에 나타냈다.

월성발전소에서의 비상 노심 냉각 계통은 가동 압력에 따라 가압경수로처럼 3단계로 나눌 수 있다. 고압 운전 모드는 약 4.4 MPa(a)로 가압되어 있는 ECC 탱크로부터 1차 계통으로 냉각수를 공급하며, 중압 운전 모드는 격납건물 상부의 다우징 탱크에 저장되어 있는 냉각수를 펌프를 이용하여 1차 계통으로 제공한다. 마지막으로, 저압운전 모드는 격납건물 바닥에 모인 냉각수를 역시 펌프를 이용, 냉각기를 거쳐 1차 계통으로 공급한다.

비상 급수 계통으로부터 공급되는 유량은 비상 급수원의 압력과 1차 계통간의 압력 차이에 따라 결정된다. PWR의 경우에는 비상 급수가 각 냉각관 (cold leg)으로 공급되며, 1차 계통이 노심을 중심으로 서로 연결되어 있어 각 냉각관의 압력이 유사하고, 따라서 냉각관 별로 주입되는 유량은 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나, 월성발전소의 경우 1차 계통은 2개의 독립된 폐쇄 회로로 구성되어 있고, 각 폐쇄 회로는 정상 운전 중에는 가압기를 통해 서로 연결되어 있다. 만일, 어느 한 폐쇄 회로에서 냉각재 상실 사고 (LOCA)가 발생하게 되면 가압기와 연결된 양 폐쇄회로의 고립 밸브를 닫아, 건전한 폐쇄 회로의 냉각수를 보호하도록 설계되어 있다. 따라서 LOCA시 고립 밸브가 닫히고 나면, 두 개의 폐쇄 회로는 서로 독립적인 압력 거동을 보이므로, 건전한 회로와 손상된 회로로 공급되는 유량은 다를 수밖에 없다.

기존의 비교적 간단한 비상노심 냉각유량 모델은 급수원과 냉각관 사이의 압력차이에 따라 유량의 공급 여부와 그 양을 계산할 수 있지만, 월성발전소에서처럼 하나의 급수관을 이용하여 공급된 유량이 양 폐쇄 회로의 압력 조건에 따라 분배되거나 혹은 어느 한쪽 회로로 공급되는 모델은 고려되어 있지 않다. 이 보고서의 목적은 이러한 월성발전소의 특성을 고려한 비상 급수 유량을 예측할 수 있는 모듈을 개발하는 것이다. 고압 및 중/저압 계통의 특성에 따른 급수관 내의 압력 감소 관계식을 이용하여 각각의 경우의 유량을 예측할 수 있는 방법이 설명되어 있다. 이 모델은 월성발전소의 전반적인 중대사고를 해석할 수 있는 ISAAC 전산 코드 [4-1]의 모듈로 연계되어 비상 급수량 계산에 활용되고 있다 [4-2].

이 모델에 사용된 압력 / 유량 관계식은 참고문헌 [4-3]에 나타나있다.

냉각재 상실사고를 모의하여 비상노심 냉각수 주입양 및 주입시간을 검토하였으며 파단크기/위치를 변화시켜 가면서 (방출계수는 0.75로 고정) FSAR의 관련 값들과 비교하였다 (Dousing Spray는 FSAR과 비교하기 위해 작동하지 않는 것으로 가정). 표 4-1은 파단 크기/위치에 따른 비상노심냉각수 주입시간을 나타낸 것으로 중압주입부터 저압주입까지 ISAAC 에서는 273 - 286초 정도 차이가 나며 FSAR 에서는 371 - 385초 정도 차이가 남을 알 수 있었고 ISAAC 코드가 FSAR의 결과와 비교해 중압주입의 경우 111 - 145초 빠르며 저압주입의 경우 220 - 240초 빠르게 나타났다.

그림 4-1부터 그림 4-6은 ISAAC과 FSAR로 계산된 100% 원자로 출구 모관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량, 35% 원자로 입구 모관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량, 그리고 55% 펌프 흡입구 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량을 나타낸다. 그림 4-7은 35%,55%, 그리고 100% ROH 파단에 따른 비상노심냉각수의 주입량

(ISAAC 결과)을 나타내는 것이다. 실제 주입량은 그림에서 ISAAC 계산 결과 나타난 숫자에 4를 곱한 것이다.

표 4-1 비상노심주입 모델에 관련된 ISAAC 코드의 관련 서브루틴과 내용

Wolsong plant용 engineered safeguard features에 관련된 subroutine은 ENGSAF와 AUXESF이다.

ENGSAF : ECCS, shutdown cooling system, degasser condenser tank overflow rate (tank가 물로 넘칠 때), dousing spray 같은 안전계통의 flow rate를 계산한다. 이 routine은 DIFFUN에 의해 불려짐

AUXESF : containment spray system, local fan coolers and chillers, degasser condenser tank heater, shield cooling system 이 routine은 AUXREG에 의해 불려짐

ECCS Model

Code Structure
DiFFUN
CALL ENGSAF in this subroutine PFLOSP ,HTEXCH is called.

PFLOSP 두 루프 사이의 ECC flow split를 계산
HTEXCH :Degasser condenser tank와 Dousing system 안에 있는 열교환기의 shell과 tube model

ESFEVT : dousing tank spray, fan coolers and chillers, DCT heaters, shield cooling exchanger 같은 engineered safeguard features의 상태 특성을 나타낸다.

PSEVT : ECCS 작동 로직 모델

표 4-2 파단 크기/위치에 따른 비상노심 냉각수 주입시간

파단 위치 & 크기 / ECCS (초)	ROH 7 (100%)	ROH 7 (55%)	ROH 7 (35%)	RIH 8 (100%)	RIH 8 (35%)	PS 4 (100%)	PS 4 (55%)
HPI (ISAAC, FSAR)	**8.7 (21.1)**	**24.5**	**43.0**	**9.1**	**46.8 (37.8)**	**4.6**	**12.8 (33.0)**
MPI (ISAAC, FSAR)	**123.4 (234.7)**	**142.3**	**170.0**	**126.0**	**172.2 (292.8)**	**122.1**	**130.2 (275.2)**
LPI (ISAAC, FSAR)	**395.9 (617)**	**414.9**	**450.8**	**407.4**	**458.0 (678.1)**	**394.4**	**405.5 (645.6)**

방출계수 : 0.75

ROH : 원자로출구모관, RIH : 원자로입구모관, PS : 펌프 흡입관

ROH 100 % : (0.2594m^2), ROH 55 % (0.14267m^2), ROH 35 % (0.09079m^2)

RIH 100 % : (0.213m^2), RIH 35 % (0.07455m^2)

PS 100 % :(0.30165m^2), PS 55 % :(0.1659m^2)

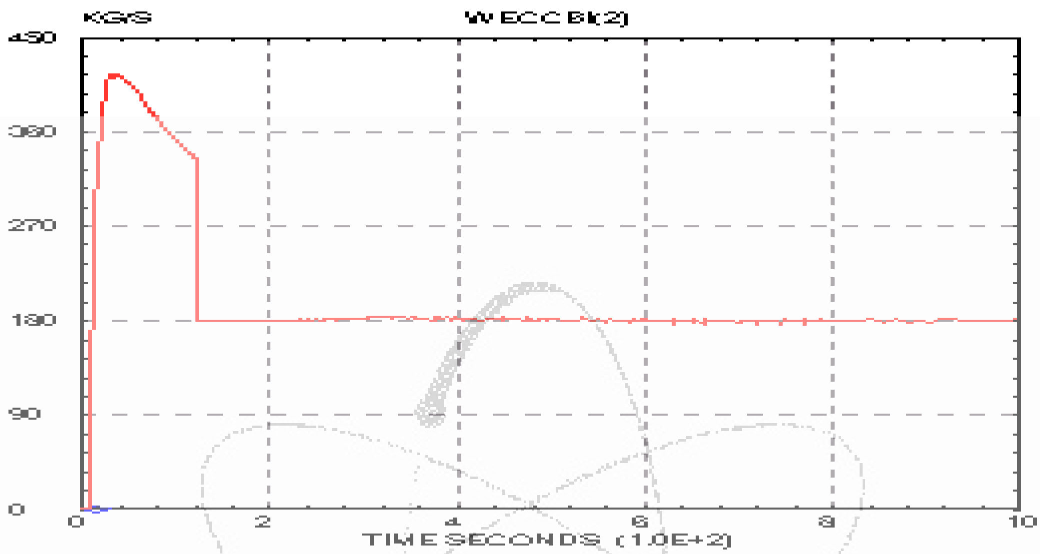


그림 4-1 100% 원자로출구모관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량 (ISAAC)

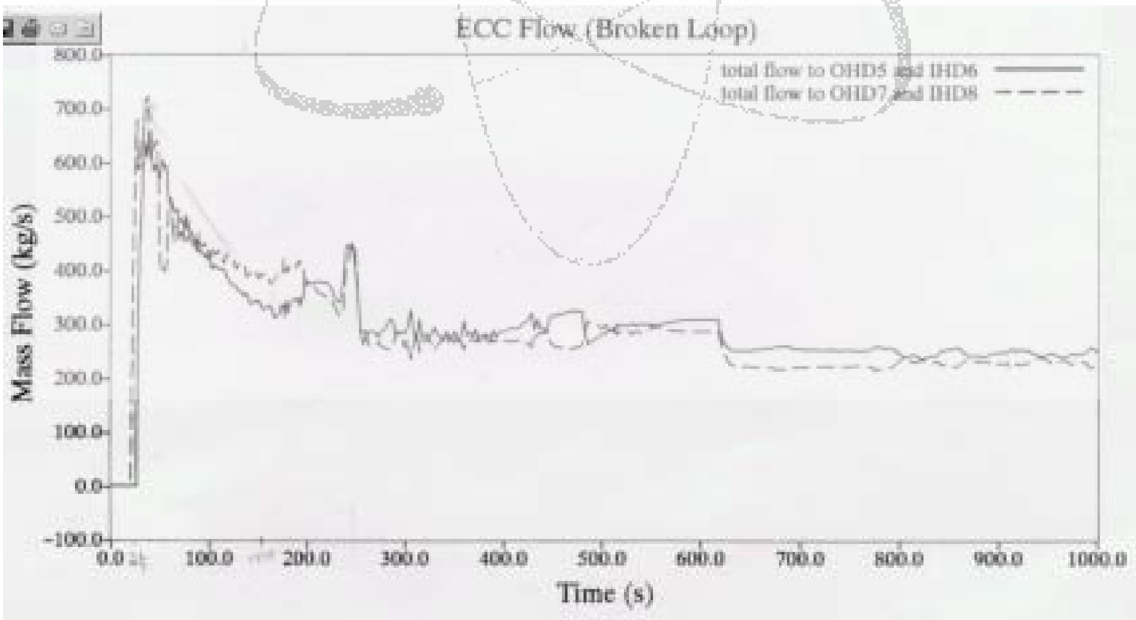


그림 4-2 100% 원자로출구모관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량 (FSAR)

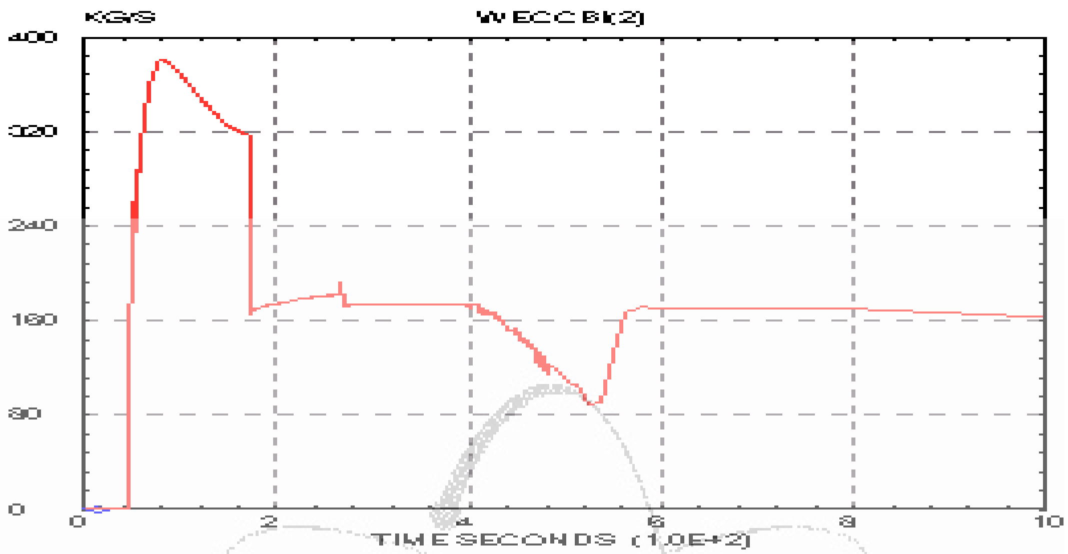


그림 4-3 35% 원자로입구모관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량 (ISAAC)

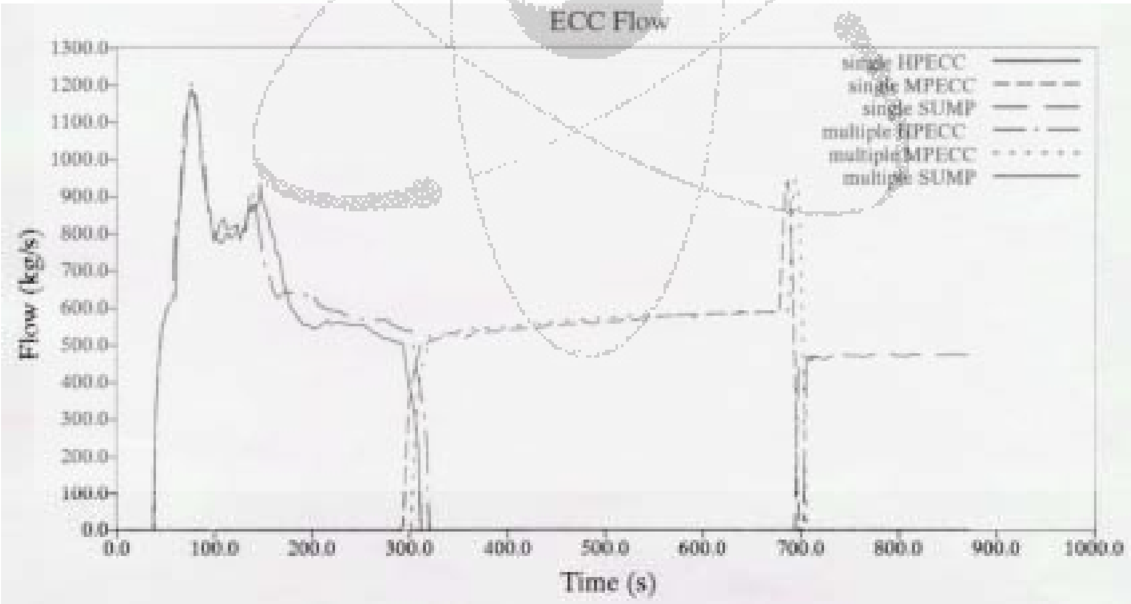


그림 4-4 35% 원자로입구모관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량 (FSAR)

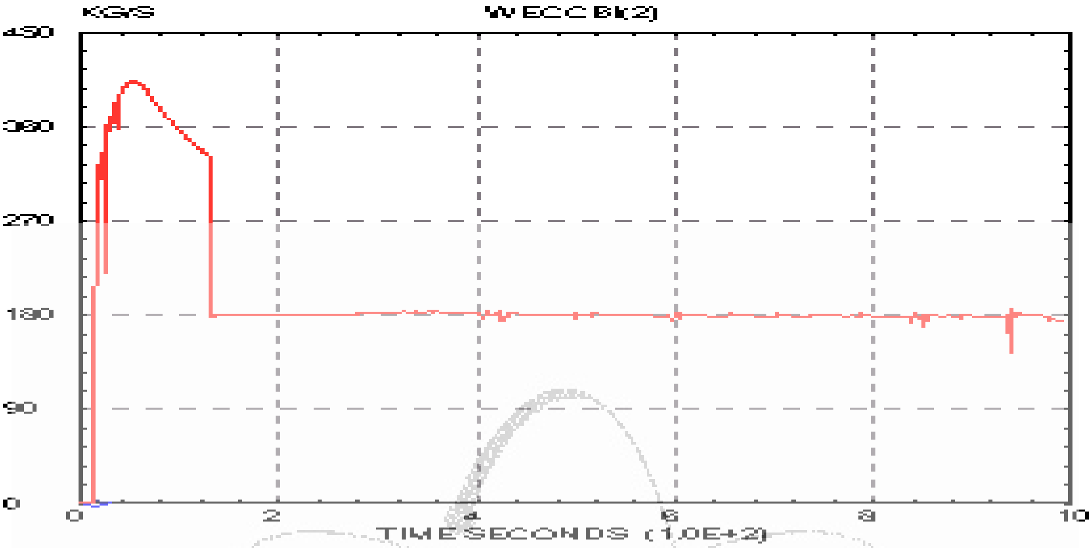


그림 4-5　55% 펌프흡입관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량 (ISAAC)

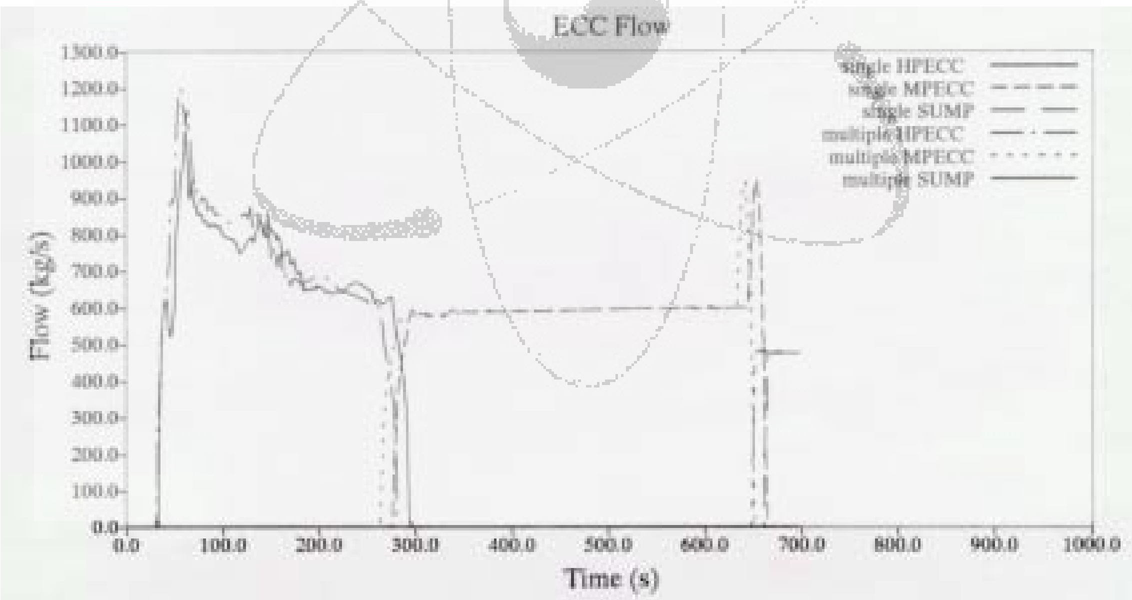


그림 4-6　55% 펌프흡입관 파단시 파단 회로로의 비상노심냉각수 유량 (FSAR)

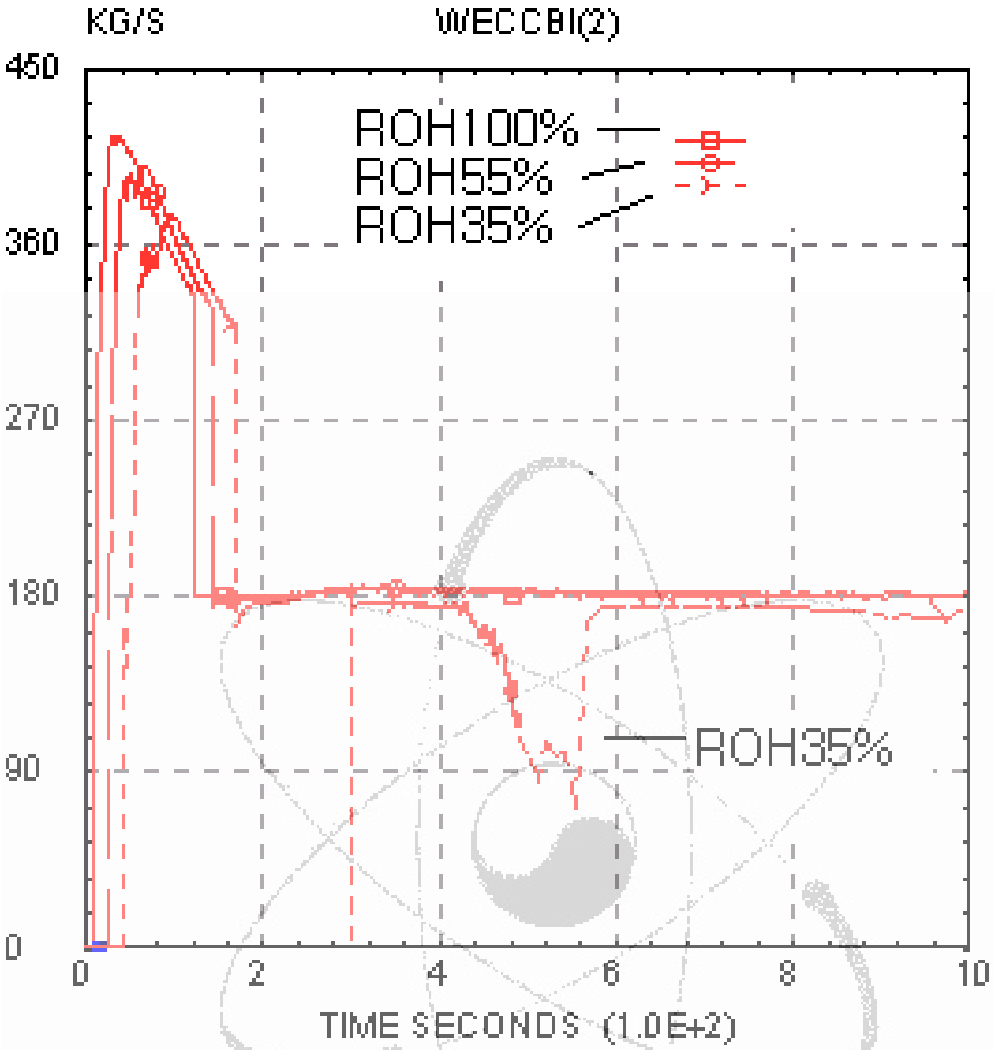


그림 4-7 **ROH 파단 크기에 따른 비상노심냉각수 유량 (ISAAC)**

제 5 장 격납건물살수/국부공기냉각기 모델 분석

모델 분석을 위해서 이 코드의 관련 서브루틴의 코딩내용과 참조코드인 MAAP코드의 사용자 설명서 등을 참조하였다. 이 모델에 관련된 ISAAC 코드의 관련 서브루틴과 내용은 표 5-1에 나타냈다.

격납건물 engineered safeguard 는 독립적인 activation logic을 갖고 있으나 같은 경계 물 소스를 갖고있는 두개의 fan cooler 또는 fan system을 갖고있다. 하나는 fan cooler, 다른 하나는 chiller다. 비록 이러한 두 계통의 이름이 다르지만 activation logic과 energy/steam 제거 term을 얻기 위해 사용된 subroutine은 같다.

계통을 activate 하기위해, 아래 조건은 만족해야 한다.

1. AC of DC power is available
2. 계통은 강제적으로 끄지 않는다.
3. 계통은 수동으로 작동 되거나 압력이 설정치에 도달한다.

일단조건이 만족되면, 신호는 계통을 작동하도록 보내진다.신호가 받아진 후 계통은 실제적으로 작동 되기 전 사용자에 의해 정해진 delta-time에 의해 지연된다. Secondary water 이용도는 응축 증기에 의해 gas energy를 재거 하는데 필수적이다. 만약 물 소스가 이용 가능 하면, subroutine FANCLR이 불려지며, 그렇지 않으면 subroutine FAN이 불려진다.

Fan cooler나 chiller에 사용되는 event code와 variable은 아래와 같다.

Fan cooler나 chiller에 사용되는 event code와 variable

조건	Fan Cooler	Chiller
	PWR	PWR
Power	205	205
Not Forced Off	221	225
Manually On	218	210
Set Point	PFANO	PCHRO
Water Availability	203	203
Signal Received	79	78
System On	77	76
Delay Time	TDFAN	TDCHR

냉각재 상실사고[3-2]를 모의하여 격납건물 살수계통과 국부 공기냉각기 영향을 검토하였다.

격납건물 살수계통 영향평가 결과 격납건물 살수계통은 국부 공기냉각기가 작동 중일 때는 격납건물이 파손되지 않고 영향이 미미하여 (그림 5-1) 여기서는 국부 공기냉각기가 작동하지 않을 경우 격납건물 살수계통의 영향에 대해서만 평가하였다. 격납건물 압력변화는 그림 5-1에 나타나 있다. 국부 공기냉각기가 작동되지 않고 격납건물 살수계통이 작동하는 경우, 약 37.8 시간 경과 후에 격납건물이 파손되었다 (파손압력: 519 kPa). 격납건물 살수계통이 동작하지 않는 경우에는 격납건물이 약 24.8 시간에 파손된다.

즉, 격납건물 살수계통이 가용한 경우 대기의 온도를 초기에 낮춤으로 격납건물 파손시점을 약 13시간 정도 지연시키는 효과가 있음을 보여준다.

대형 냉각재 상실사고 때의 격납건물 첨두압력을 비교하기 위하여 월성 2,3,4호기 FSAR 결과와 비교하였다 (표5-2). FSAR의 일차계통의 열수력 분석은 CATHENA MOD3.5 전산코드를, 격납건물 압력반응 분석은 격납건물 열수력코드인 PRESCON2-VER 0.610을 사용하였다. FSAR에서의 초기 조건은 100% 원자로 출구모관 파단사고로 파단면적은 0.2594 m2 이고 첨두 방출유량은 0.1초에 8,210 kg/s이며, 원자로 트립은 0.87초에 발생하였다. 살수계통이 완전 상실된 경우 사고 시작 후 33초에 첨두압력은 209kPa (109 kPa(g))이고 국부 공기냉각기가 완전 상실된 경우 격납건물 첨두압력은 약 26초 부근에서 184kPa (84 kPa(g)) 이다.

ISAAC 계산에서 가정한 파단위치와 면적은 FSAR와 같이 출구 모관에 0.2594 m^2이고, 파단면적을 통해 FM_107으로 냉각재가 방출되도록 하였다. 살수계통이 완전히 상실된 경우 그림 5-2에서 보듯이 첨두압력은 사고 시작 42초 후에 213kPa (113kPa(g))이고, 500 초에는 142 kPa (42 kPa(g))이다. FSAR(209kPa)과 비교하여 보면, 첨두 값은 절대압력으로 약 2% 높게 예상되었고, 발생 시간은 9초 지연되었음을 알 수 있다.

국부 공기냉각기가 완전 상실된 경우 ISAAC의 계산 결과에 따르면, 그림 5-3처럼 첨두압력은 사고 시작 후 약 20초 지나서 178kPa (78 kPa(g))로 나타난다. FSAR(184kPa)와 비교하면, 첨두값은 약 3% 낮으며, 발생시간도 상당히 근접함을 알 수 있다. 이상에서 보듯이 대형 파단 사고시 격납건물 초기 압력이 FSAR와 상당히 근사함을 알 수 있다.

표 5-1 격납건물살수/국부공기냉각기 모델에 관련된 ISAAC 코드의 관련 서브루틴과 내용

Wolsong plant용 engineered safeguard features에 관련된 subroutine은 ENGSAF와 AUXESF 이다.

ENGSAF : ECCS, shutdown cooling system, degasser condenser tank overflow rate (tank 가 물로 넘칠 때), dousing spray 같은 안전계통의 flow rate를 계산한다. 이 routine은 DIFFUN에 의해 불려짐

AUXESF : containment spray system, local fan coolers and chillers, degasser condenser tank heater, shield cooling system 이 routine은 AUXREG에 의해 불려짐

Code Structure
DiFFUN
CALL ENGSAF in this subroutine HTEXCH is called.
CALL AUXREG in this subroutine AUXESF is called.
in AUXESF, SPRAY, HTEXCH,FANCLR are called.

HTEXCH :Degasser condenser tank와 Dousing system 안에 있는 열교환기의 shell과 tube model

ESFEVT : dousing tank spray, fan coolers and chillers, DCT heaters, shield cooling exchanger 같은 engineered safeguard features의 상태 특성을 나타낸다.

SPRAY :spray droplets에 열과 질량 전달 다룸
FANCLR :격납건물 fan cooler와 chiller안의 열 제거와 증기 응축률 계산

표 5-2 대형 냉각재 상실 사고시 격납건물 첨두압력 비교

	Case 1	Case 2
FSAR	209 kPa	184 kPa
ISAAC	213 kPa	178 kPa

Case 1: 살수계통 off, 국부공기냉각기 on

Case 2: 살수계통 on, 국부공기냉각기 off

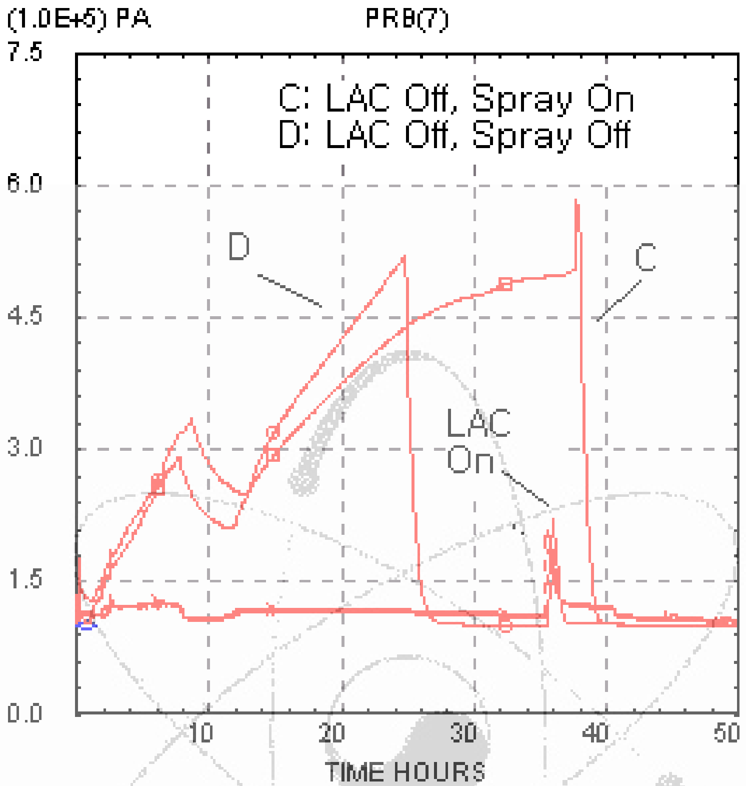


그림 5-1 격납건물 살수유무에 따른 격납건물 압력 거동 비교

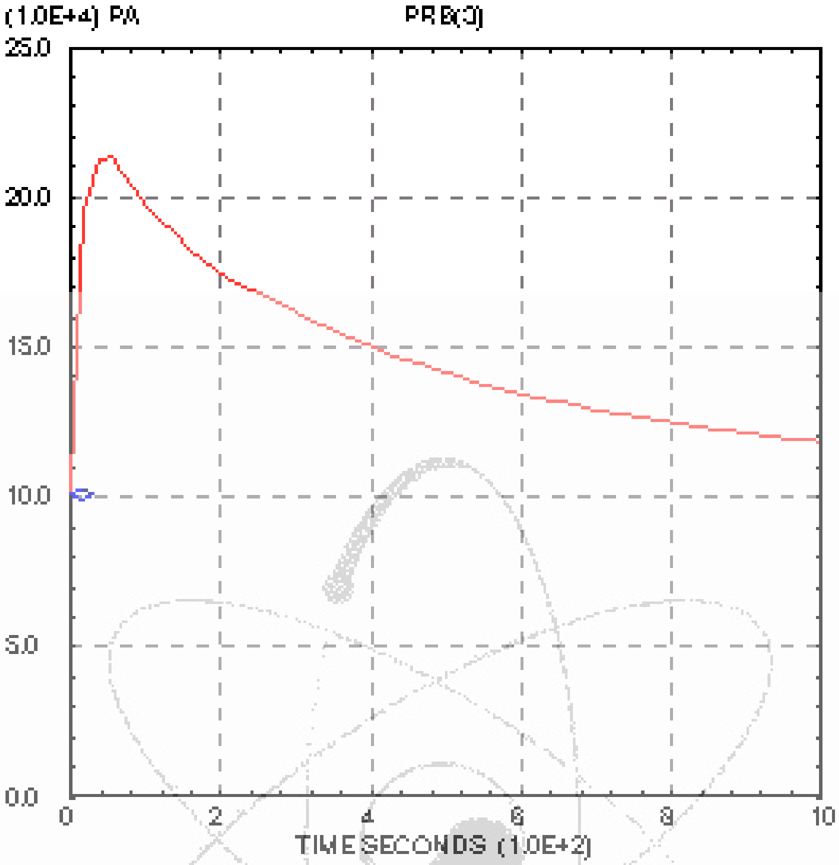


그림 **5-2** 살수계통이 완전 상실된 경우 연료교체실에서의 압력**(Pa)**

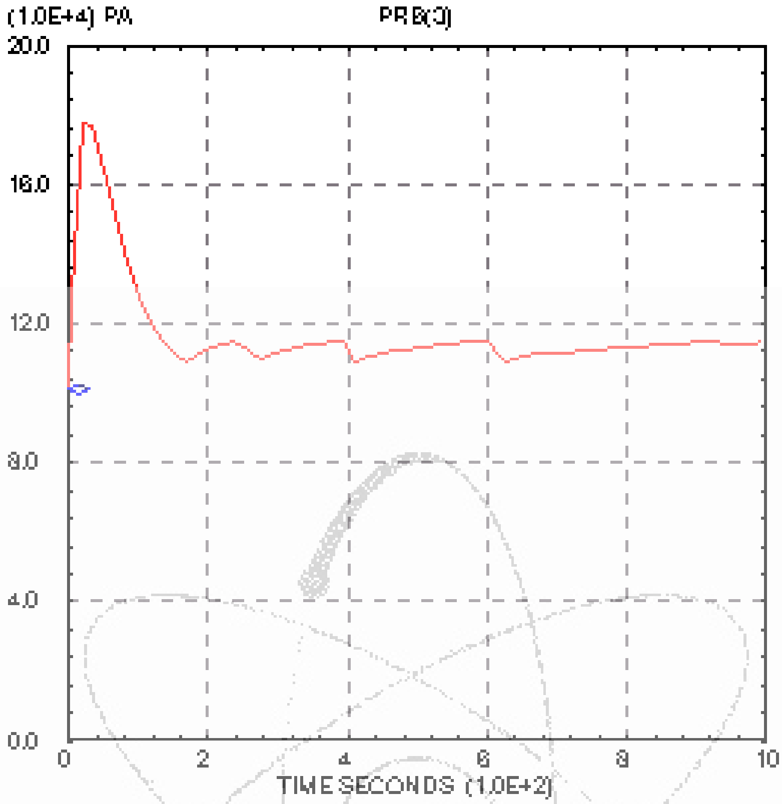


그림 **5-3** 국부 공기냉각기가 완전 상실된 경우 연료교체실에서의 압력**(Pa)**

제 6 장 참고문헌

1-1. 송용만(2003), ISAAC 노드화/붕괴열/휘발성 핵분열생성물 방출 모델 평가, KAERI/TR-2417/2003.

2-1. A BLIND SIMULATION STUDY OF AN OUT-OF-PILE HIGH-TEMPERATURE FUEL CHANNEL EXPERIMENT (Sanderson D.B. et al., presented at the 16th Annual Nuclear Simulation Symposium, Saint John, NB, 1991)

2-2. PRE-TEST SIMULATION OF A 28-ELEMENT HIGH-TEMPERATURE THERMAL-CHEMICAL EXPERIMENT USING THE COMPUTER CODES CATHENA AND CHAN-II-WL (Lei, Q.M., et al., presented at the 13th Annual CNS Conference, Saint John, NB, 1992)

2-3. POST-TEST ANALYSIS OF THE 28-ELEMENT HIGH-TEMPERATURE THERMAL-CHEMICAL EXPERIMENT CS28-1 (Lei, Q.M., et al., AECL, presented at the 4th International Conference on Simulation Methods in Nuclear Engineering, Monteral, June 2-4, 1993)

2-4. MODELING DISASSEMBLED FUEL BINDLES USING CATHENA MOD-3.5a UNDER LOCA/LOECC CONDITIONS (Lei, Q.M., et al., AECL, presented at the CNA/CNS Annual Conference, Saskatoon, Saskatchewan, June 4-7, 1995)

3-1. R.E. Henry and H.K.Fauske, "The Two-Phase Critical Flow of One Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes"Journal of Heat Transfer, pp. 179, May, 1971.

3-2. 김시달(2002), 월성발전소의 대형 냉각재 상실사고에서의 국부공기냉각기와 격납건물 살수의 영향, KAERI/TR-2350/2002.

3-3. KEPCO, "Wolsong NPP 2/3/4 FSAR", Volume VIII Chapter 15, March 1995

4-1. "가압 중수로형 원자력 발전소의 2단계 PSA를 위한 전산코드 개발," KAERI/RR-1573/95, 한국원자력연구소, 1995.12

4-2. "가압 중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가," 최종보고서, TR.93NJ10.97.67-2, 전력 연구원, 1997.8

4-3. 김동하, "월성발전소에서의 비상노심냉각계통 유량 계산," 98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998.

서 지 정 보 양 식			
수행기관보고서번호	위탁연구기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2429/2003			

제 목 / 부 제	ISAAC 노심 열전달/ 파단유량/ 비상노심주입/ 격납건물살수/국부공기냉각기 모델 평가
주 저 자	김시달 (한국원자력연구소, 열수력안전연구부)
공 저 자	김동하, 박수용 (한국원자력연구소, 열수력안전연구부)

발행지	대 전	발행 기관	한국원자력연구소	발행일	2003년 3월
면 수	62p	도 표	유 (O), 무 ( )	크 기	A4
참고사항	2002 중장기과제				
비밀여부	공개 (O), 대외비 ( ), -----비밀			보고서종류	기술보고서
위탁연구기관				계약번호	

초 록

1995년부터 1년에 걸쳐 2단계 PSA를 수행하기 위해 개발된 ISAAC 전산코드는 CANDU 고유의 중대사고 현상에 대한 기본적인 모델 위주로 개발되었고, 본 코드를 이용한 사고 시나리오 해석경험도 PSA 수행목적으로 제한되었다. 따라서 기본 모델에 대한 이해를 높이고 사고해석 경험을 축적하기 위해 노심 열전달 모델, 파단유량 모델, 비상노심 주입모델 및 격납건물 살수/국부공기냉각기 모델의 평가를 수행하였다. 연구전략으로 개별모델에 대한 내용 분석과 모델 평가를 동시에 수행했으며, 모델평가는 불확실변수 또는 사용자 옵션에 대한 민감도 계산결과를 이용하였다.
노심 열전달 모델에 대한 AECL 실험 및 코드 해석 분석 결과, 수평 압력관내부의 37개의 연료봉에 대한 ISAAC의 단일 연료봉 모델의 타당성이 검토되었고, 파단 유량 모델 검토 결과 코드 내에 불확실 변수로 모델 되어있는 방출계수 값은 0.75가 적당한 값임이 밝혀졌다. 다음으로 파단크기/위치에 따른 비상노심 주입 모델 검토결과 ISAAC 모델이 FSAR에 비해 유사함을 확인하였다. 마지막으로 격납건물 살수/국부공기냉각기 모델 분석결과, 사고초기의 격납건물 첨두 압력이 FSAR과 비교해 3% 이내로 근접했으며 격납건물살수계통은, 특히 대형 LOCA의 경우, 사고 초기에 대부분 주입되고 종결되므로 주입되는 동안 압력을 유지시켜 준다. 그러나 장기간의 관점에서 보면 공기냉각기가 미작동 되는 경우 격납건물살수계통은 1.2시간에 종결되지만 격납건물 파손을 13시간 정도 지연시키는 효과가 있다. ISAAC에서의 공기냉각기를 통한 냉각 해석 모델은 일관성 있게 냉각량을 예측함을 확인 하였다. 다만, 현재의 ISAAC에서는 격납건물의 두 장소에만 공기 냉각기를 설치할 수 있도록 되어있는데 더 많은 장소에 설치할 수 있도록 모델 보완의 필요성이 확인되었다.

주제명 키워드	ISAAC, 노심 열전달 모델, 파단유량 모델, 비상노심 주입모델 및 격납건물 살수/국부공기냉각기 모델

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Organization Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2429/2003			

Title/Subtitle	An Evaluation of Core Heat Transfer/Break Flow/Emergency Core Cooling System/Containment Dousing Spray /Local Air Cooler Models in ISAAC Code
Main Author	See-Darl Kim (KAERI, Thermal-hydraulic Safety Research)
Author	Dong-Ha Kim, Soo-Yong Park (KAERI, Thermal-hydraulic Safety Research)

Pub. Place	Taejon	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	March 2003
Page	62p	Fig. & Tab.	Yes (O), No ( )	Size	A4
Note	2002 Mid-Long Term Project				

Classified	Open (O), Outside ( ), ----- Class	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.		Contract No.	

Abstract

As an ISAAC computer code, which was developed for a Level-2 PSA during 1995, has mainly fundamental models for CANDU-specific severe accident progression and also the accident-analyzing experiences are limited to Level-2 PSA purposes, the Core Heat Transfer model, Break Flow model, Emergency Core Cooling System model and Containment Dousing Spray /Local Air Cooler model are evaluated to enhance understanding for basic models and to accumulate accident-analyzing experiences. Sensitivity studies using model parameters and sensitivity coefficients are performed. According to the results from AECL experiments and code analyses for core heat transfer model, it was found that one representative fuel rod for the actual 37 fuel rods did not cause serious temperature discrepancies during the severe accident progression. The results from emergency core cooling system model, shows a good comparison with the FSAR. As the results of the evaluation, it was found that local air coolers could control containment pressure whether dousing spray is operating or not, and their operation does not cause containment failure. Regarding the dousing system, it could control containment pressure as long as it is operating and its operating time depends on containment conditions. For a large LOCA sequence without local air coolers, spray works only for 1.2 hours and delays containment failure by 13 hours compared to the no spray case. According to the test results, the ISAAC models for local air coolers show a consistent trend for steam removal. As ISAAC could model local air coolers only at two locations at present, future work is planning to generalize the locations for local air coolers.

Subject Keywords	ISAAC, Core Heat Transfer model, Break Flow model, Emergency Core Cooling System model, Containment Dousing Spray /Local Air Cooler model