

KAERI/TR-3244/2006

핵연료 조사시험용 계장캡슐(05F-01K)
조사시험 계획서 (개정 1)

Irradiation Test Plan of Instrumented Capsule(05F-01K)
for Nuclear Fuel Irradiation in HANARO (Revision1)

KAERI
2006. 9.

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “연구로이용기술개발” 대과제의 “조사시험용 캡슐 개발 및 활용” 세부과제에서 설계·제작한 “핵연료 조사시험용 계장캡슐(05F-01K)의 조사시험 계획서(개정1)”에 관한 내용을 기술보고서로 작성·제출합니다.

2006. 9.

작 성 자 : 손 재 민
박 승 재
신 윤 택
오 종 명
이 동 수
강 영 환
조 만 순
주 기 남
최 명 환
김 수 성
서 철 교
김 현 일
김 관 현
김 봉 구
김 학 노

요 약

핵연료 개발을 위해서 조사시험 중 핵연료 특성변화(핵연료 온도, 핵연료봉 내압변화, 핵연료 소결체 길이변화 등)를 측정하는 것은 매우 중요하다. 이에 따라, 핵연료 조사시험 중 핵연료 특성(온도, 압력, 변형 등)을 측정할 수 있는 핵연료 조사시험용 계장캡슐과 계장기술 개발을 수행하였다. 이에 따라 “연구로이용기술개발” 대과제의 “조사시험용 캡슐 개발 및 활용” 세부과제에서는 2003년도에 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-11K)에 대한 설계검증시험을 하나로 OR5 조사공에서 2003년 3월 14일부터 2003년 6월 1일 까지(53.84 EFPD) 성공적으로 수행하였다. 설계검증 조사시험 후 IMEF hot cell에서 계장캡슐을 해체하여 구조적 건전성을 확인하였으며, 측정된 핵연료 중심온도와 핵연료 연소도에 대한 평가를 수행하였다. 그리고 2004년도에는 설계 검증된 핵연료 계장캡슐을 이용하여 핵연료의 중심온도, 핵연료봉 내압변화, 핵연료 소결체 길이변화 등을 측정할 수 있는 시험핵연료봉과 03F-05K 핵연료 조사시험용 계장캡슐을 품질보증 절차에 따라 설계·제작하고, 조사시험을 하나로 OR5 조사공에서 2004년 4월 27일부터 2004년 10월 1일까지(59.5 EFPD) 수행하면서 핵연료 조사특성을 성공적으로 측정하였다. 03F-05K 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 조사시험 중 측정된 핵연료의 최대 중심온도는 1,316 °C이었으며, 선출력은 521 W/cm 이하로 조사되었고, 조사시험 후 핵연료 연소도는 3,461 MWD/MTU으로 평가되었다. 03F-05K 핵연료 계장캡슐은 IMEF에서 육안검사와 핵연료봉의 감마스캐닝 등의 조사후시험을 통하여 특성자료를 분석하였다.

핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험의 효율을 증대하기 위하여 이중계장용 핵연료봉을 개발하고 이를 조사시험하기 위한 05F-01K 핵연료 계장캡슐을 설계·제작하고, 하나로 OR5 조사공에서 조사시험을 준비 중에 있다.

SUMMARY

An instrumented capsule was developed to be able to measure fuel characteristics, such as fuel temperature, internal pressure of fuel rod, fuel pellet elongation, and neutron flux, etc., during the irradiation test of nuclear fuel in HANARO. The instrumented capsule for measuring and monitoring fuel centerline temperature and neutron flux was designed and manufactured. And then, to verify the design of the instrumented capsule in the test hole, it was successfully irradiated in the test hole of HANARO from March 14, 2003 to June 1, 2003 (53.84 full power days at 24 MW). In the year of 2004, 3 test fuel rods and the 03F-05K instrumented fuel capsule were designed and fabricated to measure fuel centerline temperature, internal pressure of fuel rod, and fuel axial deformation during irradiation test. Now, this capsule was successfully irradiated in the test hole OR5 of HANARO reactor from April 27, 2004 to October 1, 2004 (59.5 full power days at 24-30 MW). The capsule and fuel rods have been dismantled and fuel rods have been examined at the hot cell of IMEF.

The dual instrumented fuel rods, which allow for two characteristics to be measured simultaneously in one fuel rod, have been designed and manufactured to enhance the efficiency of the irradiation test using the instrumented fuel capsule. The instrumented fuel capsule(05F-01K) was designed and manufactured for a design verification test of the dual instrumented fuel rods. The irradiation test of the 05F-01K instrumented fuel capsule will be carried out at the OR5 vertical experimental hole of HANARO.

목 차

요 약	ii
SUMMARY	iii
표 목 차	v
그 림 목 차	vi
제 1 장 서론	1
제 2 장 핵연료 조사시험 현황	3
제 3 장 핵연료용 계장캡슐 설계검증 조사시험 결과	5
3.1 02F-11K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 결과	6
3.2 03F-05K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 결과	8
제 4 장 핵연료용 계장캡슐(05F-01K) 조사시험 계획	12
4.1 조사시험 목적	12
4.2 조사시험 일정	13
4.3 조사시험 조건	14
4.4 실험 요구 조건	14
4.5 기존 실험과의 유사성	16
4.6 조사시험 전 검사	18
4.7 조사시험 후 시험	18
제 5 장 핵연료용 계장캡슐(05F-01K) 설계 및 제작	19
5.1 핵연료용 계장캡슐 설계	19
5.2 이중계장용 핵연료봉 집합체 설계	21
5.3 이중계장용 핵연료봉 설계 및 제작	23
5.4 조사시험을 위한 핵적 특성 평가	25
5.5 핵연료용 계장캡슐 제조 및 품질보증	30
제 6 장 결 론	33
참고문헌	34

표 목 차

표 3.1 핵연료 계장캡슐(02F-11K & 03F-05K) 조사시험 개요	5
표 3.2 핵연료 계장캡슐(02F-11K & 03F-05K)에 적용된 계장 종류	5
표 3.3 02F-11K 핵연료 계장캡슐 조사시험 하나로 운전 주기 및 출력	8
표 3.4 02F-11K 핵연료 계장캡슐 핵연료봉별 측정 최대 핵연료 중심온도	8
표 3.5 02F-11K 핵연료 계장캡슐 SPND별 최대 측정값	8
표 3.6 03F-05K 핵연료 계장캡슐 조사시험 하나로 운전 주기 및 출력	10
표 3.7 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 최대 핵연료 중심온도	10
표 3.8 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 최대 SPND 측정값	10
표 3.9 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 핵연료 소결체 길이 변화 LVDT 측정값	11
표 3.10 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 핵연료봉 내압 변화 LVDT 측정값	11
표 5.1 03F-05K 핵연료용 계장캡슐의 부품 및 주요제원	20
표 5.2 핵연료와 피복관 사양	24
표 5.3 Xe 포화 상태의 운전 노심에 대한 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 선출력 (W/cm) [1차]	26
표 5.4 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 반응도 효과	28
표 5.5 Xe 포화 상태의 운전 노심에 대한 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 선출력 (W/cm) [2차]	29

그림 목 차

그림 3.1 하나로 OR5 조사공에서 조사시험 중인 핵연료 계장캡슐	6
그림 3.2 DAS(Data Acquisition System) 화면	7
그림 3.3 02F-11K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 측정 자료	7
그림 3.4 05F-03K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 측정 자료	9
그림 4.1 제3연구동의 조사시험 원격제어장치	13
그림 4.2 하나로 제어실의 조사시험 원격제어장치	13
그림 4.3 핵연료봉과 SPND의 장착 위치	16
그림 4.4 하나로 핵연료 기준 핵연료봉의 축 방향 위치	17
그림 5.1 05F-01K 핵연료 계장캡슐 설계도면	19
그림 5.2 05F-01K 조사시험용 핵연료봉 집합체 설계도	22
그림 5.3 이중계장용 핵연료봉 (6종류)	24
그림 5.4 핵연료봉 내압변화+핵연료 표면온도 이중계장용 핵연료봉	30
그림 5.5 핵연료봉 소결체 길이변화+핵연료 중심온도 이중계장용 핵연료봉 ..	31
그림 5.6 핵연료 중심온도+핵연료 표면온도 이중계장용 핵연료봉	31
그림 5.7 모의 핵연료봉 (조립 전, 후)	31
그림 5.8 핵연료 조사시험용 계장캡슐 부품 및 가조립 사진	31
그림 5.9 05F-01K 핵연료 계장캡슐 조립	32

제 1 장 서 론

국내에서는 핵연료 개발과 관련한 핵연료 조사시험으로는 TRIGA 원자로를 이용한 CANDU 핵연료 조사, 중수로 핵연료국산화를 위해 캐나다 AECL의 NRU를 이용한 조사시험[10], 한·불 공동연구를 통한 프랑스 CEA의 OSIRIS를 이용한 경수로용 핵연료의 조사시험[11] 등이 있었다. 그리고 핵연료 조사시험과 관련한 연구가 일부 수행되었으나[12-14], 국내에서는 하나로가 가동되기 전까지 연구로를 이용한 핵연료의 조사시험은 계속되지 않았다.

하나로 가동과 함께 핵연료 개발을 위한 조사시험 계획이 수립되었으며, 이에 따라 핵연료 조사시험을 위한 핵연료 조사시험용 무계장캡슐(이하 “핵연료 무계장캡슐”이라함)을 개발하여 활용하고 있으며, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(이하 “핵연료 계장캡슐”이라함)과 계장기술을 개발하여 왔다. 현재까지 핵연료 무계장캡슐을 이용하여 DUPIC 핵연료 개발을 위한 조사시험을 수행하였으며, 이 외에도 연구로용 핵연료, HIMET 핵연료 및 신형핵연료 등의 조사시험이 수행되었다.

핵연료 개발을 위해서 조사시험 중 핵연료 특성변화(핵연료 온도, 핵연료봉 내압 변화, 핵연료 소결체 길이변화 등)를 측정하는 것은 매우 중요하다. 그러나 핵연료 무계장캡슐을 이용한 핵연료 조사시험 중에는 핵연료 특성 변화를 측정할 수 없다. 이에 따라, 핵연료 조사시험 중 핵연료 특성을 측정할 수 있는 핵연료 계장캡슐과 계장기술 개발이 진행되어 왔다. 그 결과 조사시험 중 핵연료 중심온도를 측정할 수 있도록 핵연료봉과 핵연료 계장캡슐을 설계·제작하였다[15]. 그리고 핵연료 계장캡슐에 대해 하나로 조사공 내에서의 안전성을 확인하고, 핵연료 계장캡슐을 이용한 노외시험(압력강하, 진동 및 내구성시험)으로 기계적 및 수력적 안정성도 확인하여[16], 2003년도에 하나로 OR5 조사공에서 02F-11K 핵연료 계장캡슐의 설계검증 조사시험을 53.84 EFPD(Effective Full Power Days) 동안 성공적으로 완료하였다[17].

02F-11K 핵연료 계장캡슐은 핵연료 중심온도와 중성자속(neutron flux) 측정을 위한 계장기술만이 적용되었다. 03F-05K 핵연료 계장캡슐에는 02F-11K 핵연료 계장캡슐에 적용되었던 핵연료 중심온도와 중성자속은 물론이고, 핵연료봉 내부압력의 변화, 핵연료 소결체 길이 변화 측정을 위한 계장 기술이 적용되었다. 03F-05K 핵연료 계장캡슐의 조사시험은 하나로 OR5공에서 2004년 4월 20일부터 2005년 10월 1일까지 59.5 EFPD 동안 성공적으로 수행되었다[43].

02F-11K와 03F-05K 핵연료 계장캡슐의 설계·제작과 조사시험의 경험을 바탕으로 핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험의 효율을 향상하기 위하여 한 개의 핵연료봉에서 두개의 핵연료 특성을 측정하기 위한 이중계장용 핵연료봉을 설계·제작하였다[55]. 그리고 이중계장용 핵연료봉을 조사시험하기 위한 05F-01K 핵연료 계장캡슐을 설계·제작하였으며 조사시험을 수행하기 위한 계획을 수립하기 위하여 본 보고서를 작성하였다.

본 보고서의 제 2 장에서는 하나로를 이용한 핵연료 조사시험 현황, 제 3 장에서는 2003년과 2004년도에 각각 수행한 02F-11K와 03F-05K 핵연료용 계장캡슐의 설계검증시험 결과, 제 4 장에서는 05F-01K 핵연료용 계장캡슐의 조사시험 계획, 제 5 장에서는 05F-01K 핵연료용 계장캡슐의 설계·제작 및 핵연료 성능 예비평가에 대해 각각 기술하였으며, 제 6 장에서는 결론을 기술하였다.

본 보고서가 개정1로 새롭게 작성된 주요 사유는 다음과 같으며 이와 관련된 내용을 수정하고 보완하였다.

- 1개의 핵연료봉을 모의 핵연료봉으로 대체

05F-01K 핵연료 계장캡슐에 장착하여 조사시험을 수행할 예정이던 3개의 이중계장용 핵연료봉의 제작 과정에서 핵연료 중심온도와 표면온도 측정용 핵연료봉에서 Helium leak가 발생하여 이를 폐기하고 모의 핵연료봉으로 대체하였다.

- 조사시험 일정 변경

Helium leak의 원인을 규명하고 모의 핵연료봉을 제작하기 위하여 당초의 조사시험 일정이 연기되었다.

[당초] 하나로 운전 41주기 (2006. 02. 09. ~ 03. 04.), 23.2 EFPD

하나로 운전 42주기 (2006. 03. 16. ~ 04. 08.), 23.2 EFPD

[변경] 하나로 운전 46주기 (2007. 01. 03. ~ 01. 26.), 23.2 EFPD

하나로 운전 47주기 (2007. 02. 07. ~ 03. 07.), 23.2 EFPD

- 핵적 특성 재평가

3개의 이중계장용 핵연료봉 중에서 1개가 모의 핵연료봉으로 대체된 것과 2006년 11월에 IR1 조사공에 FTL(Fuel Test Loop)이 설치되기 때문에 핵적 특성을 재평가하게 되었다. IR1에 설치될 FTL은 시험 핵연료를 갖지 않으며 FTL의 시운전을 위해 Al_2O_3 로 된 모의 핵연료가 FTL의 IPS(In-Pile Section)에 장전되는 것이다.

제 2 장 핵연료 조사시험 현황

국내에서 핵연료 조사시험과 관련해서는 TRIGA 원자로를 이용한 조사시험과 프랑스 CEA의 OSIRIS를 이용한 국제공동연구로 수행한 조사시험이 있었다. 그리고 하나로 가동과 함께 하나로를 이용한 원자로재료 조사시험용 무게장 및 계장캡슐을 개발하고, 이를 이용한 원자로재료의 조사시험을 수행하고 있다. 또한, 학계, 산업계 및 연구계에서 요구하는 연구목적에 적합하도록 재료용 계장캡슐 내부의 시편배치를 다양화하여 조사시험을 지원하고 있다.

하나로에서 캡슐을 이용한 원자력재료의 조사시험이 가능하도록 재료용 캡슐 기술의 개발연구를 1994년 9월부터 중장기 과제로 수행하였다[1]. 그 결과로 재료용 무게장캡슐의 설계·제작 및 조사시험을 성공리에 수행되었으며[2-4], 재료용 계장캡슐을 설계·제작하여, 1998년 5월에 설계검증을 위한 조사시험을 성공리에 수행하였으며 이들은 현재까지 재료 조사시험에 계속적으로 활용되고 있다 [5-9,23].

한편, 국내의 핵연료 개발과 관련한 핵연료 조사시험으로는 TRIGA 원자로를 이용한 CANDU 핵연료 조사, 중수로 핵연료국산화를 위해 캐나다 AECL의 NRU를 이용한 조사시험[10], 한·불 공동연구를 통한 프랑스 CEA의 OSIRIS를 이용한 경수로용 핵연료의 조사시험[11] 등이 있었다. 그리고 핵연료 조사시험과 관련한 연구가 일부 수행되었으나[12-14], 국내에서 연구로를 이용한 핵연료의 조사시험은 계속되지 않았다. 그리고 핵연료 조사시험봉에 대해서 조사시험 중 특성을 측정하기 위한 계장기술과 상용로 또는 하나로에서 조사된 핵연료를 하나로에서 재조사하기 위한 계장기술에 대한 기술 검토가 있었다[24]. 1995년 하나로가 가동되고, 1998년 핵연료 조사시험을 위한 무게장캡슐을 개발하여 핵연료 조사시험에 활용하고 있으며, 그리고, 핵연료 계장캡슐과 계장기술을 개발하여 왔다. 이에 따라 02F-11K와 03F-05K 핵연료 계장캡슐에 대한 설계검증시험을 성공적으로 수행하였다[15-17,36,37,43].

현재까지 하나로를 이용한 핵연료의 조사시험 현황을 살펴보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 경수로용 신형핵연료 개발
 - 고연소도 핵연료 소결체 개발 조사시험 : 2002.3 - 2007(진행 중)
- 핵비확산성 건식공정 산화물 핵연료(DUPIC) 핵연료 개발

- 모의 소결체 연소 시험: 1999.8.4 - 1999.10.4
- DUPIC 소결체 연소시험: 2000.5.10 - 2000.7.10
- DUPIC 소결체 연소시험(SPND 설치): 2001.6.2 - 2002.2.3
- DUPIC, SIMFUEL, UO_2 소결체의 연소시험: 2002.7.14 - 2002.10.4
- DUPIC, 소결체의 연소시험: 2004.2.2 - 2004.5
- SMART(HiMET: High performance Metallic) 핵연료 조사 시험
 - 1차 시험: 2001.7.4 - 2001.10.7
 - 2차 시험: 2003.1.10 - 2004.2.20
 - 3차 시험: 2003.3.1 - (543 EFPD 예정)
- 연구로용 개량 핵연료 개발 조사시험
 - 제 1차 U_3Si 봉상 핵연료다발 연소시험: 1997.12.17 - 1999.6.6
 - 제 1차 RERTR U_3Si_2 mini-plate 연소시험: 1999.7.15 - 2000.3.28
 - 제 2차 U_3Si 봉상 핵연료다발 고출력 연소시험: 1999.6.17 - 2000.7.25
 - 제 1차 U-Mo 봉상 핵연료다발 연소시험: 2001.6.26 - 2001.8.24
 - 제 2차 U-Mo분산 봉상 핵연료다발 연소시험: 2003.1.10 - 2004.1.20
- 하나로공동이용활성화 사업(핵분열기체확산계수측정)
 - 2000년부터 2005년 12월말까지 32회 조사
(조사공 : HTS/IP4, 조사시간 : 20-30분, 핵물질 : 약 300mg)
- 02F-11K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험
 - 설계검증시험 : 2003년 3월 14일부터 2003년 6월 1일까지
(약 53.84 EFPD, 24 MW)
- 03F-05K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험
 - 설계검증시험 : 2004년 4월 27일부터 2004년 10월 1일까지
(약 59.5 EFPD, 24-30 MW)

제 3 장 핵연료용 계장캡슐 설계검증 조사시험 결과

현재까지 핵연료용 계장캡슐의 조사시험은 하나로 OR5 조사공에서 02F-11K와 03F-05K 핵연료 계장캡슐을 이용하여 2회 수행되었다. 표 3.1에서 보는 바와 같이 02F-11K 핵연료 계장캡슐은 각각 2003년 3월 14일부터 6월 1일까지 하나로 출력 24 MW에서 53.84 EFPD 동안, 03F-05K 핵연료 계장캡슐은 2004년 4월 27일부터 10월 1일까지 하나로 출력 24~30 MW에서 59.5 EFPD 동안 조사시험이 수행되었다.

표 3.1 핵연료 계장캡슐(02F-11K & 03F-05K) 조사시험 개요

구 분	02F-11K	03F-05K
HANARO Power (MW)	24	24 ~ 30
Experimental Vertical Hole	OR5	OR5
Irradiation Test Period	2003.3.14 ~ 6.1	2004.4.27 ~ 10.1
HANARO Operation Cycle	24-1, 24-2 25-1, 25-2	31-2, 32-1, 32-2, 32-3, 33-1
Maximum Linear Power (kW/m)	53.2	50.1
Average Linear Power (kW/m)	49.2	46.3
Average Burn-up (MWD/MTU)	5,930	5,556
Effective Full Power Days	53.84	59.5
Measured Center Temperature (°C)	1,375	1,316

적용된 계장기술을 요약하면 다음 표 3.2와 같이 02F-11K 핵연료 계장캡슐에서는 핵연료 중심온도와 중성자속을 측정하였으며, 03F-05K 핵연료 계장캡슐에서는 핵연료 중심온도, 핵연료봉 내압변화, 핵연료 소결체 길이변화, 그리고 중성자속을 측정하였다.

표 3.2 핵연료 계장캡슐(02F-11K & 03F-05K)에 적용된 계장 유형

계장 종류	02F-11K	03F-05K	Sensors
핵연료 중심온도	3 sets	1 set	C-Type Thermocouple
핵연료봉 내압 변화	-	1 set	압력계 + LVDT
핵연료 소결체 길이 변화	-	1 set	변형계 + LVDT
중성자속	3 sets	1 set	SPND

3.1 02F-11K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 결과

02F-11K 핵연료용 계장캡슐의 설계검증 조사시험은 2003년 3월 14일부터 2003년 6월 1일까지 성공적으로 수행되었다. 그림 3.1은 02F-11K 핵연료 계장캡슐의 설계검증을 위해 하나로 노심 OR5 조사공에서 조사되고 있는 사진이다.

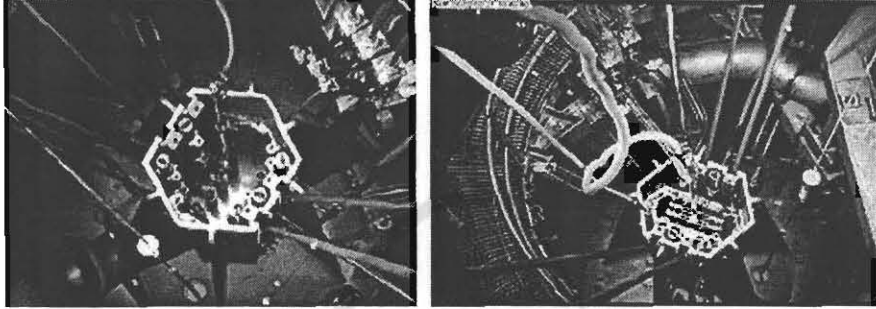


그림 3.1 하나로 OR5 조사공에서 조사시험 중인 핵연료 계장캡슐

설계검증시험 중 하나로 출력, 제어봉위치, 열전대에 의해 측정되는 핵연료 중심온도, SPND(Self-Powered Neutron Detector) 신호는 그림 3.2와 같이 DAS(Data Acquisition System)을 통하여 관측되었다. 그리고 DAS를 통하여 수집된 조사시험 자료는 그림 3.3과 같다. 핵연료 계장캡슐 조립 시 보호관 가지를 기준으로 중심온도는 60°, 180°, 300°, SPND는 0°, 120°, 240°에 위치하도록 하였다. 하나로 노심 OR5 조사공에 장전할 때에는 캡슐의 보호관 가지가 1시 방향(북쪽방향을 12시 기준으로 함)이 되도록 하였다. 이에 따라 12시(0° 기준)를 기준으로 열전대는 3시, 7시, 11시, SPND는 1시, 5시, 9시 방향에 위치하도록 OR5 조사공에 장전하였다. 설계검증 조사시험 동안 하나로 출력, 핵연료 중심온도, SPND 신호 등을 요약하면 다음 표 3.3, 표 3.4, 표 3.5와 같다.

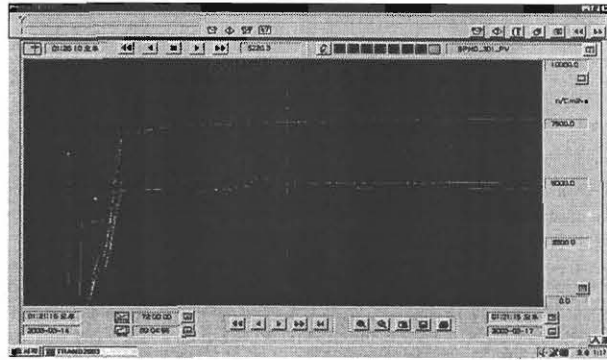
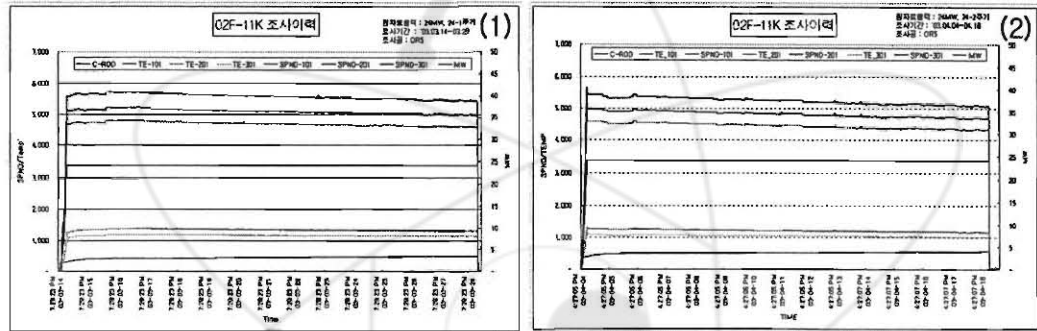
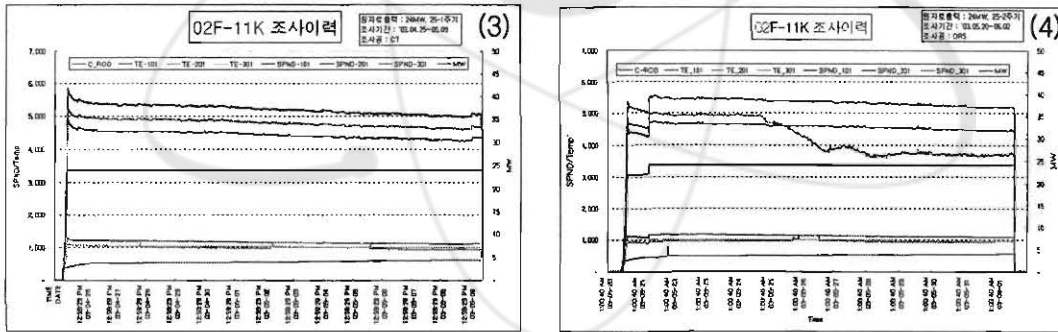


그림 3.2 DAS 화면



(1) 24-1 주기

(2) 24-2 주기



(3) 25-1 주기

(4) 25-2 주기

그림 3.3 O2F-11K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 측정 자료

표 3.3 02F-11K 핵연료 계장캡슐 조사시험 하나로 운전 주기 및 출력

하나로 운전주기	일자	기간	하나로 출력
24-1	2003. 3. 14 - 2003. 3. 28	14 일	24 MW
24-2	2003. 4. 4 - 2003. 4. 18	14 일	24 MW
25-1	2003. 4. 25 - 2003. 5. 9	14 일	24 MW
25-2	2003. 5. 20 - 2003. 6. 1	12 일	22-24 MW

표 3.4 02F-11K 핵연료 계장캡슐 핵연료봉별 측정 최대 핵연료 중심온도

핵연료봉	최대 핵연료 중심 온도(℃)
T/C #1	24-1주기에서 최대온도 1,375 ℃
T/C #2	24-1주기에서 최대온도 1,369 ℃
T/C #3	24-1주기에서 최대온도 1,177 ℃

표 3.5 02F-11K 핵연료 계장캡슐 SPND별 최대 측정값

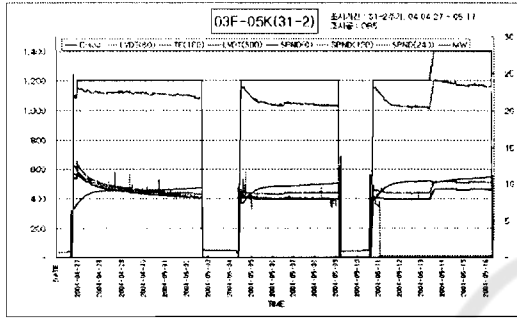
핵연료봉	SPND 최대 측정값(mV)
SPND #1	25-1주기에서 최대치 ~4,892 mV
SPND #2	25-1주기에서 최대치 ~5,833 mV
SPND #3	25-1주기에서 최대치 ~5,284 mV

3.2 03F-05K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 결과

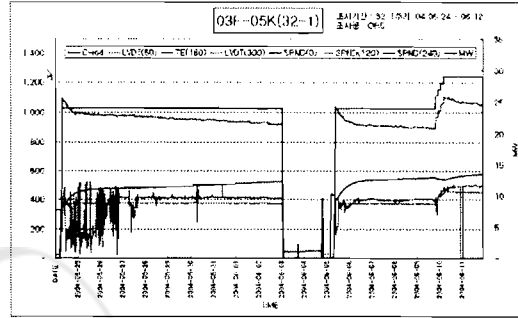
03F-05K 핵연료용 계장캡슐의 설계검증 조사시험은 2004년 4월 27일부터 2004년 10월 1일까지 성공적으로 수행되었다.

설계검증 조사시험 중 하나로 출력, 제어봉 위치, 핵연료 중심온도, 핵연료봉 내압 변화, 핵연료 소결체 길이 변화, 그리고 SPND 신호는 DAS(Data Acquisition System)을 통하여 관측되었다. DAS를 통하여 수집된 조사시험 자료는 그림 3.4와 같다. 핵연료 계장캡슐 조립 시 보호관 가치를 기준으로 핵연료 소결체 길이 변화는 60°, 핵연료 중심온도는 180°, 핵연료봉 내압 변화는 300°, SPND는 0°, 120°, 240°에 위치하도록 하였다. 하나로 노심 OR5 조사공에 장전할 때에는 캡슐의 보호관 가치가 10시30분 방향(북쪽방향을 12시 기준으로 함)이 되도록 하였다. 이에 따라 12시(0° 기준)를 기준으로 변형계는 12시30분, 열전대는 4시30분, 압력계는 8시30분, SPND는 10시30분, 2시30분, 6시30분 방향에 위치하

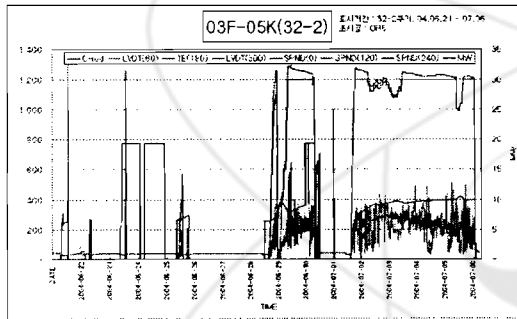
도록 OR5 조사공에 장전하였다. 설계검증 조사시험 동안 하나로 출력, 핵연료 중심온도, SPND, 변형계와 LVDT, 그리고 압력계와 LVDT 신호를 요약하면 다음 표3.6, 표 3.7, 표 3.8, 표 3.9, 표 3.10과 같다.



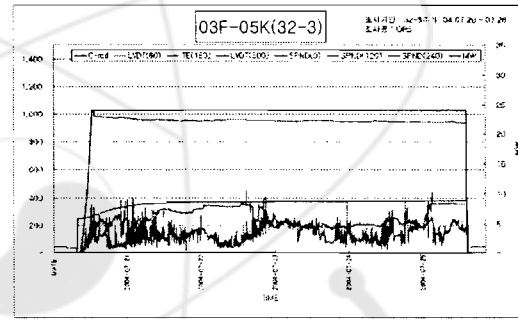
(1) 31-2 주기



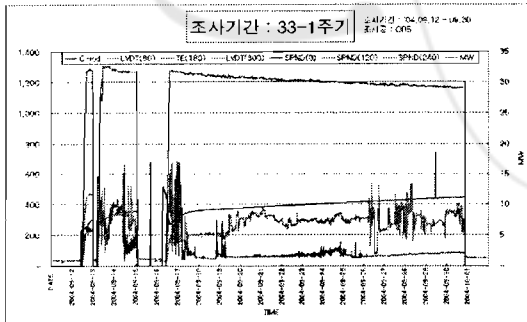
(2) 32-1 주기



(3) 32-2 주기



(4) 32-3 주기



(5) 33-1 주기

그림 3.4 05F-03K 핵연료 계장캡슐 설계검증 조사시험 측정 자료

표 3.6 03F-05K 핵연료 계장캡슐 조사시험 하나로 운전 주기 및 출력

하나로 운전주기	일자	기간	하나로 출력
31-2	2004.4.27 - 2004.5.17	21일	24-28 MW
32-1	2004.5.24 - 2004.6.12	20일	24-29 MW
32-2	2004.6.21 - 2004.7.6	16일	30 MW
32-3	2004.7.20 - 2004.7.26	7일	24 MW
33-1	2004.9.12 - 2004.10.1	20일	30 MW

표 3.7 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 최대 핵연료 중심온도

하나로 운전주기	최대 핵연료 중심 온도(℃) [출력(MW), 제어봉위치(mm)]
31-2	1,246.16870 [24, 323]
32-1	1,108.88745 [29, 541]
32-2	1,316.31873 [29, 261]
32-3	1,034.20935 [24, 273]
33-1	1,307.26245 [30, 301]

표 3.8 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 최대 SPND 측정값

하나로 운전주기	최대 SPND 측정값 (mV) [출력(MW), 제어봉위치(mm)]		
	SPND 141 (0)	SPND 142 (120)	SPND 143 (240)
31-2	612.1875 [24, 323]	636.250 [24, 323]	699.6875 [24, 323]
32-1	458.7500 [29, 540]	458.7500 [29, 540]	521.8750 [24, 467]
32-2	520.0000 [27, 262]	509.6875 [30, 399]	644.6875 [30, 320]
32-3	446.2500 [24, 370]	451.5625 [24, 370]	408.7500 [24, 371]
33-1	535.6250 [30, 428]	534.0625 [30, 428]	682.1875 [30, 319]

표 3.9 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 핵연료 소결체 길이 변화 LVDT 측정값

하나로 운전주기	변형 LVDT(60) 측정값 (mV) [출력(MW), 제어봉위치(mm)]	
	최대값 (초기값)	최소값
31-2	-1.54969	-1.60375 [28, 545]
32-1	-1.59125	-1.61594 [29, 577]
32-2	-1.59844	-1.61406 [30, 400]
32-3	-1.59812	-1.61063 [24, 379]
33-1	-1.56560	-1.17906 [30, 304]

표 3.10 03F-05K 핵연료 계장캡슐 하나로 운전 주기별 핵연료봉 내압 변화 LVDT 측정값

하나로 운전주기	압력 LVDT(300) 측정값 (mV) [출력(MW), 제어봉위치(mm)]	
	최대값	최소값 (초기값)
31-2	-1.97563 [24, 323]	-2.18812
32-1	-1.97156 [29, 540]	-2.17344
32-2	-1.93844 [29, 261]	-2.13406
32-3	-1.99469 [24, 272]	-2.13031
33-1	-1.94531 [30, 297]	-2.13562

제 4 장 핵연료용 계장캡슐(05F-01K) 조사시험 계획

4.1 조사시험 목적

05F-01K 핵연료 계장캡슐의 조사시험 목적은 핵연료 조사시험의 성능 향상을 위하여 개발된 이중계장용 핵연료봉을 하나로에서 조사시험하기 위함이다. 02F-11K와 03F-05K 핵연료 계장캡슐에 장착된 3개의 핵연료봉은 조사시험 중 각각 한 개의 특성만을 측정하도록 되어있었으나 이중계장용 핵연료봉은 한 개의 핵연료봉에서 두개의 특성을 측정할 수 있도록 설계된 것이다. 이 이중계장용 핵연료봉은 캡슐을 이용한 조사시험의 효율을 배가하기 위함이고 다음과 같이 6 가지 형태로 설계되었다[55].

- Fuel Rod ① : 핵연료 중심온도와 핵연료봉 내압 변화 측정
- Fuel Rod ② : 핵연료 표면온도와 핵연료봉 내압 변화 측정
- Fuel Rod ③ : 핵연료 중심온도와 핵연료 소결체 길이 변화 측정
- Fuel Rod ④ : 핵연료 표면온도와 핵연료 소결체 길이 변화 측정
- Fuel Rod ⑤ : 핵연료 표면온도와 핵연료 중심온도 측정
- Fuel Rod ⑥ : 핵연료 하단부 중심온도와 핵연료 상단부 중심온도 측정

금번에 조사시험을 수행하는 05F-01K 핵연료 계장캡슐에는 이 6개중 핵연료 표면온도와 핵연료봉 내압변화(Fuel Rod ②), 핵연료 중심온도와 핵연료 길이 변화(Fuel Rod ③), 핵연료 표면온도와 핵연료 중심온도(Fuel Rod ⑤)를 측정하기 위한 3개의 핵연료봉을 장전하여 조사시험을 수행할 예정이었다. 그러나 핵연료 중심온도와 표면온도를 측정하기 위한 이중계장용 핵연료봉(Fuel Rod ⑤)은 제작 후에 Helium leak가 발생하여 모의 핵연료봉을 제작하여 대신 장착하였다.

6개의 이중계장용 핵연료봉 중 3개만을 선정한 이유는 핵연료 계장캡슐에는 3개의 핵연료봉만을 장착할 수 있기 때문이다. 나머지 핵연료 중심온도와 핵연료봉 내압변화(Fuel Rod ①), 핵연료 표면온도와 핵연료 길이 변화(Fuel Rod ④), 상부와 하부의 핵연료 중심온도(Fuel Rod ⑥) 측정을 위한 3개의 핵연료봉은 06F-01K 핵연료 계장캡슐에 장착하여 조사시험을 수행할 예정이며, 현재 제작 중이다.

05F-01K 핵연료 계장캡슐은 하나로 OR5 조사공에서 약 46.4 EFPD 동안 조사시험을 수행할 계획이다. 조사시험 기간 중에는 1분 간격으로 핵연료 중심온도, 핵연료 표면온도, 핵연료봉 내압 변화, 핵연료 소결체 길이 변화, 그리고 SPND 3개의 신호를 수집할 예정이다. 또한 하나로 제어실과 제3연구동 235호실

에 설치된 원격감시시스템(그림 4.1과 그림 4.2)을 통하여 조사시험 상황을 감시할 계획이다.



그림 4.1 제3연구동의
조사시험 원격제어장치

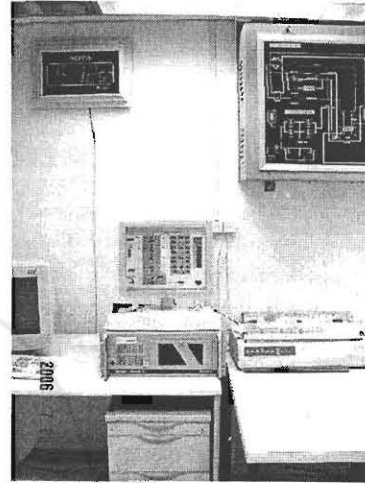


그림 4.2 하나로 제어실의
조사시험 원격제어장치

4.2 조사시험 일정

이중계장용 핵연료봉을 위한 05F-01K 핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험을 위하여 다음과 같은 일정으로 수행하였으며, 혹은 계획 중에 있다.

- 이중계장용 핵연료봉 설계 : 2004. 9. ~ 2005. 2.
- 05F-01K 핵연료 계장캡슐 핵적 검토 및 선출력 평가(1차)
: 2005. 6. ~ 2005. 7.
- 05F-01K 핵연료용 계장캡슐 설계 : 2005. 2. ~ 2005. 7.
- 05F-01K 핵연료용 계장캡슐 부품 제작 : 2005. 7 ~ 2005. 9.
- 이중계장용 계측 sensor 수급 : 2005. 6 ~ 2005. 12.
- 핵연료 가공 : 2005. 9.
- 이중계장용 핵연료봉 용접 자격화 시험 : 2005. 10. ~ 2005. 11.
- 이중계장용 핵연료봉 조립 및 용접 : 2006. 1. 13. ~ 7. 14.
- 05F-01K 핵연료 계장캡슐 핵적 검토 및 선출력 평가(2차)
: 2006. 8. ~ 2006. 9.
- 모의 핵연료봉 조립 : 2006. 9. 14.
- 이중계장용 핵연료봉의 Hold-Down Spring 누락 조립에 따른 snap ring

- 과 temporary spring 구조건전성 노외시험 : 2006. 9. 19. ~ 9. 24.
- Hold-Down Spring 누락 조립에 따른 snap ring과 temporary spring 장착 : 2006. 9. 25.
- 05F-01K 핵연료 계장캡슐 조립 : 2006. 9. 27 ~ 9. 28.
- 05F-01K 핵연료 계장캡슐 하나로안전심의위원회 심의(예정) : 2006. 10. 27.
- 05F-01K 핵연료 계장캡슐 노외시험 : 하나로 반입 직전
- 05F-01K 핵연료 계장캡슐 하나로 반입 : 연구로 운전관리실과 협의 후 결정
- 05F-01K 핵연료 조사시험(예정)
 - 하나로 운전 46주기 (2007. 01. 03. ~ 01. 26.), 23.2 EFPD
 - 하나로 운전 47주기 (2007. 02. 07. ~ 03. 07.), 23.2 EFPD

4.3 조사시험 조건

핵연료용 계장캡슐의 조사시험은 하나로 정상가동조건의 OR5 조사공에서 수행할 예정이며, 상세한 조건은 다음과 같다.

- 하나로 열출력 : 30 MW 기준
- 조사공 : 하나로 OR5
(이전의 02F-11K와 03F-05K 핵연료 계장캡슐과 동일함)
- 시험 핵연료봉 선출력[46][57]
 - 05F-01K 핵연료 계장캡슐 최대 한계 선출력 : 610.78 W/cm(제어봉 위치 300mm)[57]
 - * 안전성 분석 시 산출된 최대 선출력 638.45 W/cm 보다 낮으므로 안전한 것으로 평가되었다.[8][9]
- 시험 기간 : 46.4 EFPD
 - 하나로 운전 46주기 (2007. 01. 03. ~ 01. 26.), 23.2 EFPD
 - 하나로 운전 47주기 (2007. 02. 07. ~ 03. 07.), 23.2 EFPD

4.4 실험 요구 조건

- 실험 조사 환경(반응률, 변형 등)
 - 캡슐 외통(STS316L)에 대한 조사특성(기계적 및 부식특성)을 검토한 결과 조사에 의하여 재질의 열화현상이 발생하지 않고, 좌굴 안전성, 장·탈착 시 또는 조사시험 시 발생할 수 있는 충격하중에 대한 구조 안전

성을 수행한 결과 변형은 없다.

- 냉각수 유량 조건
 - 200 kPa의 압력강하를 유발하는 유량은 약 9.2 kg/s
 - * 하나로 제한조건인 12.7 kg/s 이하를 만족함.
- 실험기기 및 시료 온도 등
 - 핵연료 중심온도 : 약 1,350 °C 이하
 - * 이전 02F-11K와 03F-05K 핵연료 계장캡슐의 조사시험 시 최대온도로 1,316 °C가 측정되었다.
 - 핵연료 온도의 안전성 분석 결과는 다음 표와 같으며, 제어봉 인출 사고 시 최대 2,378 °C이고 이는 핵연료의 용융온도인 2,849 °C보다 낮음.

구분	핵연료 표면 최고 온도	핵연료 중심 최고 온도
정상 운전	105 °C	2,169 °C
RIA(제어봉 인출 사고)	110 °C	2,378 °C
펌프축 고착 사고	136 °C	2,170 °C

- 캡슐의 내부 압력
 - 핵연료 계장캡슐은 open type 이므로 냉각수가 캡슐 내부로 흐르므로 내부 압력 없음.
- 이중계장용 핵연료봉 내부 압력
 - 초기상태에 1.2 bar(abs)의 Helium으로 충전되어 있음
 - 저 연소도 조사시험이므로 조사시험 중 핵연료봉의 내부 압력은 최대 15 bar를 넘지 않는 것으로 평가됨.
- 예상 반응도 값
 - 노심에 고정되는 본 핵연료 캡슐에 해당하는 반응도 효과의 제한치는 +12.5 mk 이하여야 하며, 아래에 나타낸 최대 반응도 효과는 아래 표와 같이 1.6 mk로 제한치를 만족시킨다. 모든 경우에 대한 제어봉 위치는 1/2 삽입 위치임.

노심 조건	임계도값	반응도 차이(mk)
캡슐 장전	0.99276	-
캡슐 파손	0.99316	0.4
완전 인출	0.99436	1.6
모의 핵연료 장전	0.99416	1.4

- 실험자료 측정 요건
 - 조사시험 기간 중에는 1분 간격으로 핵연료 중심온도, 핵연료 표면온도, 핵연료봉 내압 변화, 핵연료 소결체 길이 변화, 그리고 SPND의 신호를

수집할 예정임.

- 비정상 운전 요건
 - 핵연료봉의 파단으로 인하여 핵분열 생성물이 방출되어 하나로의 RMS에 검출될 경우 시험 중단함.

4.5 기존 실험과의 유사성

- 기존 실험 경험

핵연료 계장캡슐은 다음과 같이 2회에 걸쳐 조사시험을 수행하였다.

구 분	02F-11K	03F-05K
HANARO Power (MW)	24	24 ~ 30
Experimental Vertical Hole	OR5	OR5
Maximum Linear Power (kW/m)	53.2	50.1
Average Linear Power (kW/m)	49.2	46.3
Average Burn-up (MWD/MTU)	5,930	5,556
Effective Full Power Days	53.84	59.5
Max. Center Temperature (℃)	1,375	1,316
Irradiation Test Period	2003. 3. 14 ~ 6. 1	2004. 4. 27 ~ 10. 1

- 유사성
 - 외통과 내부 부품들은 이전에 조사시험이 성공적으로 완료된 두개의 핵연료 계장캡슐(02F-11K & 03F-05K)과 동일하다.
 - 각 핵연료봉에 장전된 핵연료의 종류는 이전에 조사시험이 성공적으로 완료된 두개의 핵연료 계장캡슐(02F-11K & 03F-05K)의 경우와 동일하다.
 - 핵연료봉과 SPND의 장착 위치는 그림 4.3과 같이 60°와 300°에는 이중 계장용 핵연료봉이, 180°에는 모의 핵연료봉이, 그리고 0°, 120°, 240°에는 Rhodium type SPND가 장착되었음. OR5 조사공에 핵연료 계장캡슐의 장착 시에는 안내관의 가지 방향이 약 10시 30분(북쪽을 12시로 기준함)이 되도록 고정할 계획이다.
 - 하나로 제어실과 제3연구동 235호실에 각각 원격감시시스템을 가동하고 제어실에서는 하나로 운전원이 제3연구동에 235호실에서는 조사시험용 캡슐 개발 및 활용 과제원들이 지속적으로 감시업무를 수행할 것이다. (그림 4.1 & 그림 4.2)

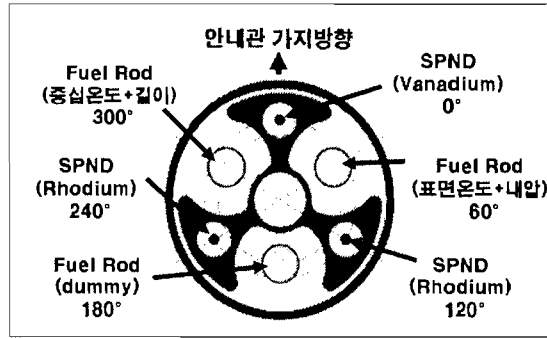


그림 4.3 핵연료봉과 SPND의 장착 위치

• 차이점

- 이전 조사시험의 경우에는 핵연료 계장캡슐에 장착된 핵연료봉이 단일 계장용 이었으나 금번의 05F-01K 핵연료 계장캡슐에는 이중계장용 핵연료봉이 장착됨. 이중계장용 핵연료봉은 양단에 계장 sensor가 장착되었다.
- 이전 조사시험의 경우에는 3개의 핵연료봉이 장착되었으나 금번의 05F-01K 핵연료 계장캡슐에는 2개의 핵연료봉이 장착됨. 따라서 핵연료 소결체 개수가 총 15개(3봉 x 5개)에서 10개(2봉 x 5개)로 줄어들었다.
- Helium leak가 발생한 이중계장용 핵연료봉은 모의 핵연료봉을 대신 장착하였다.
- 05F-01K 핵연료 계장캡슐에 장착된 핵연료 소결체의 축 방향 중심이 그림 4.4와 같이 하나로 핵연료 중심을 기준으로 -22.5 cm에 위치하도록 조정하였다. (이전의 02F-11K는 -12.5 cm, 03F-05K는 -25.0에 위치하였다.) [9]

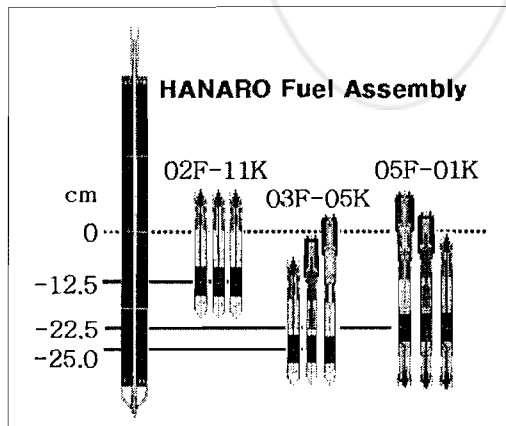


그림 4.4 하나로 핵연료 기준 핵연료봉의 축 방향 위치

4.6 조사시험 전 검사

05F-01K 핵연료용 계장캡슐의 조사시험 전에 시험 핵연료봉 제작, 핵연료용 계장캡슐 최종 조립 및 노외성능 확인을 위해 다음과 같은 시험 및 검사들을 수행하였다.

- 핵연료봉 용접공정 자격화

시험 핵연료봉 봉단 및 계장품 용접 공정에 대해 시험계획에 따라 수립된 용접공정 자격화 검사(인장시험, 조직검사, Helium leak test)를 실시하였다.

- 육안 및 치수검사

시험용 핵연료봉을 제작하기 전에 UO_2 소결체 및 핵연료봉 부품의 외관 상태와 결함유무를 육안으로 확인하고, 치수검사 수행하였다.

- 캡슐 노외시험

05F-01K 핵연료 계장캡슐은 엔지니어링동에 위치한 1/2노심시험루프에서 노외성능 시험을 수행할 예정이다. 노외시험을 통하여 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 공기 중 무게와 수중무게를 측정하고, OR5의 장전시험을 위하여 OR Clamp를 이용하여 캡슐을 고정하고, 하나로의 유량 조건에 맞추어 pump를 가동하고 약 30분간 캡슐을 유관으로 관찰할 것이다. 이때, 노외 시험 조건은 다음과 같다.

- 시험로 입구온도 : 14.7℃
- 노심유량 유입 압력 : 245.0 KPa
- 노심유량 : 390 kg/sec
- 우회유량 : 30.1 kg/sec
- 시험로 수위 : 95%

노외시험은 하나로 원자로홀로 반입 직전에 수행할 예정이다.

4.7 조사시험 후 시험

하나로에서 03F-05K 핵연료용 계장캡슐의 조사시험후 시험 핵연료 성능평가를 위해 IMEF hot cell에서 계장캡슐 본체를 해체하여 시험 핵연료봉의 구조적 건전성을 확인할 예정이며, 수행할 주요시험 항목은 다음과 같다.

- 계장캡슐 및 핵연료봉 집합체의 외관검사 및 해체
- 핵연료봉 감마스캐닝
- UO_2 소결체의 미세구조 등

제 5 장 핵연료용 계장캡슐(05F-01K) 설계 및 제작

5.1 핵연료용 계장캡슐 설계

핵연료 조사시험 중 핵연료 특성(핵연료 중심온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 변형 등)을 효율적으로 측정하기 위한 이중계장용 핵연료봉을 조사시험하기 위한 05F-01K 핵연료용 계장캡슐을 제 4 장에서 기술한 바와 같은 조사시험 계획에 따라 설계·제작하였다[56].

05F-01K 핵연료용 계장캡슐의 설계구조는 그림 5.1과 같으며, 2004년도에 조사시험이 수행된 03F-05K 핵연료 계장캡슐과 비교하여 볼 때 핵연료봉 장착을 위한 부분을 제외한 나머지는 동일하다[15, 36]. 05F-01K 핵연료용 계장캡슐은 하단 고정부(bottom guide assembly, rod tip과 bottom end plate로 구성), 외통, 보호관 및 안내관의 크게 4부분으로 구성되어 있다. 그리고 계장캡슐을 조사공 내에 안정적으로 지지·고정하기 위하여 보호관 부에 OR clamp로 고정되는 상부 스토퍼와 OR 조사공의 반사체 상부에 고정되는 하부 스토퍼가 있다. 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 주요 부품 및 제원은 표 5.1과 같다.

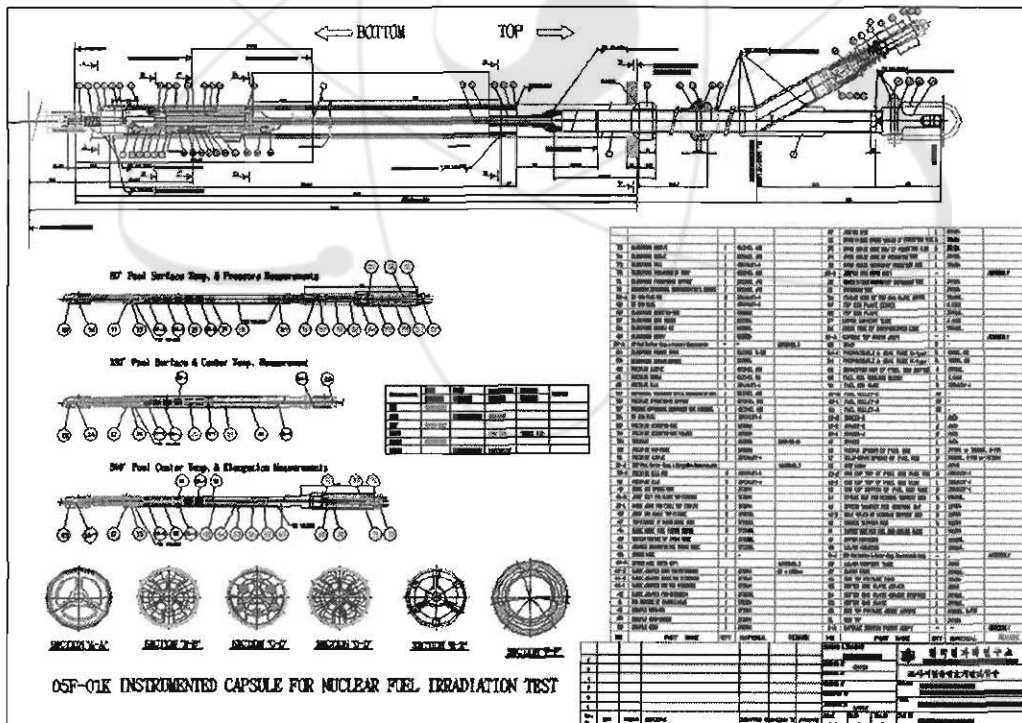


그림 5.1 05F-01K 핵연료 계장캡슐 설계도면

표 5.1 05F-01K 핵연료용 계장캡슐의 부품 및 주요제원

번호	부품명	수량	재료	주요제원
01	Rod Tip	1	STS304	길이 105.30 mm
02	Rod Tip Fixture Guide Spring	1	STS304 (or Inconel X-750)	wire 직경 2.2 mm
03	Bottom End Plate	1	STS 316L	외경 56.0 mm
04	Bottom End Plate Cover Stopper	1	STS 316L	
05	Bottom End Plate Cover	1	Al 6061	외경 59.3 mm
06	Rod Tip Fixture Ring	1	Zircaloy-4	외경 17.0 mm
07	Outer Tube	1	STS 316L	외경 56.0 mm, 내경 52.0 mm
08	Lower Support Tube	1	Al 6061	외경 51.6 mm, 내경 46.6 mm
09	Lower Housing	1	STS 316L	외경 51.6 mm
10	Upper Housing	1	STS 316L	외경 51.6 mm
11	Support Tube for Fuel Rod Cooling Block	1	STS 304	길이 216 mm
12	Housing Support Rod	3	STS 304	길이 233 mm
13	Spring Washer for Housing Nut	3	STS 304	
14	Fixture Nut for Housing Support Rod	3	STS 316L	
15	End Cap Bottom for Fuel Rod Tube	3	Zircaloy-4	길이 25.0 mm 외경 9.50 mm
16	LVDT Holder	1	Al 6061	
17	Hold-down Spring of Fuel Rod	3	Inconel X-750 or STS 304	wire 직경 1.60mm
18	Plenum Spring of Fuel Rod	3	STS 304 or Inconel X-750	wire 직경 1.90mm free length 55mm
19	Spacer	12	Al ₂ O ₃	
20	Fuel Pellet	15	UO ₂ pellet	PWR 핵연료(17×17)
21	Fuel Rod Tube	3	Zircaloy-4	길이 132.15(3) mm 외경 9.50 mm 내경 8.35 mm
22	Fuel Rod Cooling Block	1	Al 6061	길이 189.0 mm 외경 51.6 mm
23	Top Connector Nut of Fuel Rod	3	STS 3016L	길이 21.0 mm 외경 10.0 mm

(계 속)

번호	부품명	수량	재료	주요제원
24	Thermocouple(K-type) & Seal Tube	2	Inconel 600	
24-1	Thermocouple(C-type) & Seal Tube	2	Inconel 600	
25	SPND	3	-	
26	Guide Tube of Instrumented Line	1	STS 316L	길이 311.98 mm
27	Upper Support Tube	1	Al 6061	외경 51.6 mm, 길이 431.48 mm
28	Top End Plate	1	STS 316L	외경 56.0 mm, 길이 117.0 mm
29	Top End Plate Cover		Al 6061	외경 57.1 mm, 길이 20.0 mm
30	Fixture Ring of Top End Plate Cover	1	STS 316L	
31	Protection Tube	11	STS 304	외경 42.7 mm, 길이 2637.8 mm
32	Lower Fixture Stopper of Protection Tube	1	STS 304	외경 70.0 mm
33	Upper Fixture Stopper of Protection Tube	1	STS 304	외경 70.0 mm
34	Upper Fixture Guide of Protection Tube	1	STS 304	외경 47.7 mm, 길이 68.2 mm
35	Upper Fixture Guide Bolt of Protection Tube	1	STS 304	
36	Upper Fixture Spring Washer of Protection Tube	1	STS 304	
37	Junction Tree	1	STS 304	
38	Grapple Head	1	STS 304	
39	Grapple Head Hanger	1	STS 304	
40	Grapple Head Pin	1	STS 304	
41	Pin Fixture of Grapple Head	1	STS 304	
42	Adaptor for Cable Extension	1	STS 304	
43A	Cable Guide Spring Hose Ass'y	1	STS 304	
51A	Fuel & LVDT Ass'y(pressure)	1	Inconel 600	
65A	Fuel & LVDT Ass'y(elongation)	1	Inconel 600	

5.2 이중계장용 핵연료봉 집합체 설계

이중계장용 핵연료봉 집합체에 그림 5.2와 같이 조사시험 중 핵연료 표면온도와 핵연료봉 내압 변화 측정, 핵연료 중심온도와 핵연료 소결제 길이 변화 측정, 그리고 핵연료 표면온도와 핵연료 중심온도 측정을 위한 3가지 종류이다. 온도측

정을 위해서는 열전대, 핵연료봉 내압측정을 위해서는 압력계 및 LVDT, 핵연료 길이측정을 위해서는 변형계 및 LVDT가 각각 사용되었으며, 중성자속 측정용 SPND(Self-Powered Neutron Detector)가 3개 설치되었다. 그리고 계장캡슐 내에서의 이중계장용 시험 핵연료봉과 SPND의 위치를 식별하기 위해 적정한 위치에 제품 식별부호를 각인하였다. 이중계장용 핵연료봉과 SPND는 알루미늄 재질의 cooling block과 함께 조립된다.

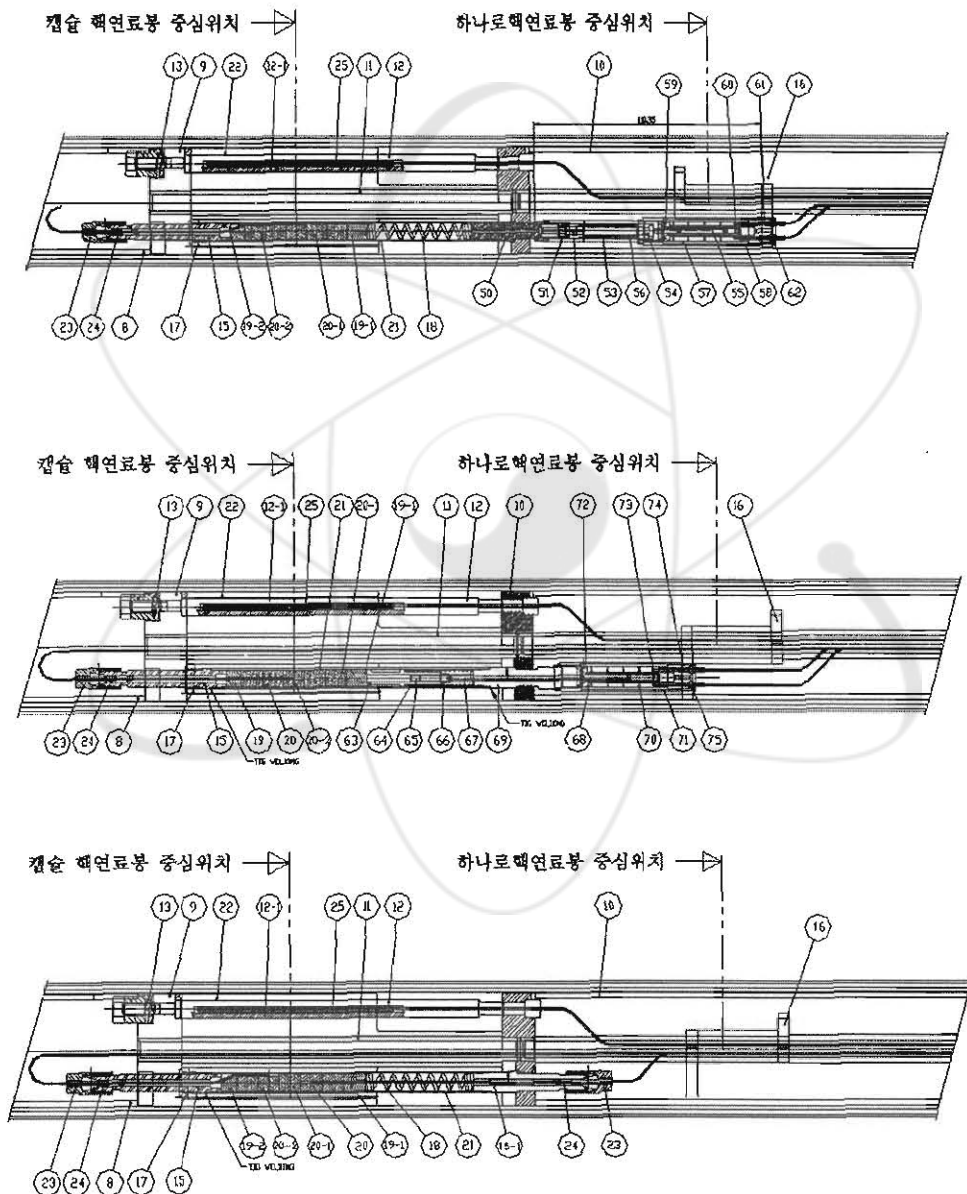


그림 5.2 05F-01K 조사시험용 핵연료봉 집합체 설계도

5.3 이중계장용 핵연료봉 설계 및 제작

조사시험 중 한 개의 핵연료봉에서 두개의 핵연료 특성 측정을 위한 이중계장용 핵연료봉은 다음과 같이 6종류로 설계되었으며, 그 개념도는 그림 5.3과 같다[55].

- Fuel Rod ① : 핵연료 표면온도와 핵연료봉 내압 변화 측정
- Fuel Rod ② : 핵연료 중심온도와 핵연료봉 내압 변화 측정
- Fuel Rod ③ : 핵연료 표면온도와 핵연료 소결체 길이 변화 측정
- Fuel Rod ④ : 핵연료 중심온도와 핵연료 소결체 길이 변화 측정
- Fuel Rod ⑤ : 핵연료 표면온도와 핵연료 중심온도 측정
- Fuel Rod ⑥ : 핵연료 하단부 중심온도와 핵연료 상단부 중심온도 측정

이 6개의 이중계장용 핵연료봉 중에 ② 핵연료 표면온도 + 핵연료봉 내압 변화, ③ 핵연료 중심온도 + 핵연료 소결체 길이 변화 ⑤ 핵연료 표면온도 + 핵연료 중심온도용 3개의 시험 핵연료봉을 제작하였다. 시험 핵연료봉의 주요 제원은 다음과 같다.

- 각 이중계장용 핵연료봉 구성품
: UO_2 소결체 5개, 알루미나 spacer, plenum spring 등
- 계장품
 - 핵연료 중심온도 측정용 C-type 열전대 2개
 - 핵연료 표면온도 측정용 K-type 열전대 2개
 - 핵연료봉 내압변화 측정용 압력계와 LVDT 1 set
 - 핵연료 소결체 길이변화 측정용 변형계와 LVDT 1 set
- 이중계장용 핵연료봉 재질 : Zircaloy-4
- 피복관 외경 및 두께 : $\varnothing 9.50$ mm, 0.57 mm

그러나 핵연료 표면온도와 핵연료 소결체 길이 변화 측정(Fuel Rod ③) 이중계장용 핵연료봉에서 Helium leak가 발생하여 폐기하고 대신 모의 핵연료봉을 제작하여 05F-01K 핵연료 계장캡슐에 장착하였다. 모의 핵연료봉은 이중계장용 핵연료봉과 모든 사양이 동일하며, 단지 핵연료 대신 알루미나(Al_2O_3)를 장입하였다. 제작 후 Helium leak test를 수행하여 Helium leak가 없음을 확인하였다.

이중계장용 시험 핵연료봉에 사용된 핵연료는 핵연료 설계검증 시에 사용된 02F-11K와 03F-05K 핵연료 계장캡슐에 사용된 핵연료와 동일한 핵연료를 사용

하였으며, 사양은 다음 표 5-2와 같다.

표 5.2 핵연료와 피복관 사양

구 분		사 양
핵연료	Type	PWR 17 x 17형 (KNFC 제조)
	External diameter	8.18 mm
	Length	10.27 mm
	Thermocouple Hole	1.48 mm(ø)
	Depth of Dish	0.13 mm
	Curvature of Dish	12.83 mm
	U-235 Enrichment	2.42 w/o
	Density	10.498 g/cm ³ (95.8%TD)
피복관	Grain Size	9.35 μm
	Material	Zircaloy-4
	External Diameter	9.50 mm
	Thickness	0.57 mm
	Length	132.15 mm
	Gap (소결체와 피복관 사이)	167 μm
	Filler Pressure	1.2 bar (Helium)

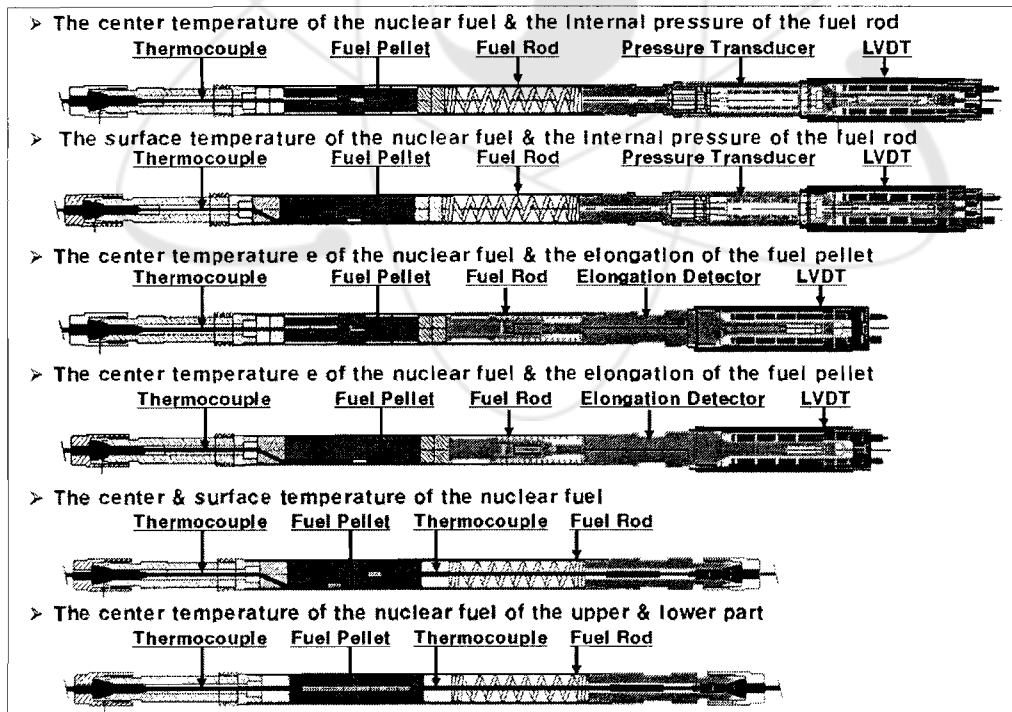


그림 5.3 이중계장용 핵연료봉 (6종류)

5.4 조사시험을 위한 핵적 특성 평가

가. 1차 평가 (2005.07.26.)

이번에 조사시험 될 05F-01K 핵연료 계장캡슐에 장착되는 핵연료봉에는 농축도가 2.42 w/o 소결체가 각각 5개씩 장입되었다. 이와 동일한 시험 핵연료봉은 핵연료용 계장캡슐(02F-11K와 03F-05K)에 설치되어 하나로 노심 OR5에 장전되어 2003년 3월과 2004년 4월에 53.84 EFPD(24 MW)와 59.5 EFPD(24~30 MW) 동안 각각 설계검증시험을 위한 조사시험이 성공적으로 수행되었다.

핵연료봉의 축 방향 중심위치는 그림 4.4와 같이 02F-11K 핵연료 계장캡슐의 경우 하나로 핵연료 중심위치를 기준으로 -12.5 cm이었으며, 03F-05K 핵연료 계장캡슐의 경우 -25.0 cm이었고, 금번에 조사시험 될 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 경우에는 03F-05K 핵연료 계장캡슐 보다 높은 선출력(linear power)을 얻기 위하여 -22.5 cm로 설정하였다.

이 핵연료봉 위치에서 선출력을 평가하여 적절한 조사 시험이 이루어질 수 있는지 확인하고자 선출력 평가를 수행하였다. 선출력 평가는 MCNP를 사용하였는데 보다 정확한 계산을 위하여 하나로에 대한 연소 노심 모델을 이용하였다. 원자로가 Xe 평형 상태에 있을 때 핵연료 캡슐의 선출력이 높으므로 보수적인 선출력 평가를 위하여 Xe 평형 상태의 MCNP 연소 노심 모델을 이용하였다. 핵연료 캡슐의 핵연료 위치는 -22.5 cm로 아래쪽에 위치하고 있으므로 제어봉 높이가 낮을 때 높은 선출력이 발생한다. 운전 가능한 제어봉 위치 중에서 5 cm 단위의 낮은 제어봉 위치인 250, 300, 350 mm에서 선출력을 계산하였다. 조사시험 때의 평균적인 제어봉 위치에 가까운 450 mm에 대해서도 선출력을 평가하였다. 시험 핵연료봉의 선출력은 축 방향 출력분포의 변화가 심하므로 1 cm 단위로 선출력을 계산하여 표 5.3에 나타내었다.

안전성 평가를 위한 한계 선출력은 계산 오차와 노심 장전 모형의 영향을 고려하여 도출하였다. 계산 오차는 MCNP 계산 fsd(fractional standard deviation)의 2배를 적용하였고, 실제 장전될 노심 모형은 현 시점에서는 알 수 없으므로 노심 장전 모형의 영향으로 10 %를 설정하였다. 안전성 평가를 위한 최대 한계 선출력은 제어봉 높이 300 mm에서 545.17 Watt/cm로 나타났다. 최초 조사시험 전에 수행된 핵연료 계장캡슐에 대한 안전성 평가를 수행한 결과는 최대 선출력 638.45 Watt/cm에서 안전한 것으로 나타났다[31,45,46]. 따라서 05F-01K 핵연료

계장캡슐의 최대 한계 선출력은 안정성 평가가 이루어진 선출력 보다 훨씬 낮으므로 따로 안전성 평가를 할 필요가 없어졌다.

표 5.3 Xe 포화 상태의 운전 노심에 대한 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 선출력 (W/cm) [1차]

[fsd: fractional standard deviation, 한계 선출력 = 최대 * (1 + 2 * fsd) * 1.10]

제어봉 위치 (mm)	핵연료 위치 (cm)	선출력 (Watt/cm)					한계 선출력
		봉 1	봉 2	봉 3	평균	최대(fsd)	
250	-25.0	415.03	382.49	404.27	401.26	453.19 (0.0354)	533.80
	-24.0	414.68	366.37	390.77			
	-23.0	397.14	363.91	387.80			
	-22.0	427.17	372.94	404.32			
	-21.0	453.19	424.33	414.52			
300	-25.0	430.86	377.86	395.73	409.18	464.49 (0.0335)	545.17
	-24.0	406.15	376.03	403.37			
	-23.0	416.14	370.40	389.05			
	-22.0	432.69	405.21	412.55			
	-21.0	464.49	402.35	454.76			
350	-25.0	418.69	367.90	386.42	394.68	460.59 (0.0328)	539.88
	-24.0	387.09	378.72	394.67			
	-23.0	402.35	384.72	372.77			
	-22.0	401.88	371.27	361.27			
	-21.0	460.59	412.07	419.81			
450	-25.0	373.05	339.08	339.62	363.53	430.26 (0.0341)	505.56
	-24.0	356.37	342.13	347.65			
	-23.0	371.25	355.17	345.06			
	-22.0	392.93	335.59	336.31			
	-21.0	430.26	393.62	394.91			

나. 2차 평가 (2006.09.22.)

(1) 개요

1차 평가가 수행되었으나 05F-01K 핵연료 계장캡슐은 3개의 시험 핵연료봉에서 2개의 시험 핵연료봉과 1개의 모의 핵연료봉으로 설계가 바뀐 것과 2006년 11월에 IR1 조사공에 FTL(Fuel Test Loop)이 설치되기 때문에 핵적 특성을 재평가하게 되었다. IR1에 설치될 FTL은 시험 핵연료를 갖지 않으며 FTL의 시운전을 위해 Al₂O₃로 된 모의 핵연료가 FTL의 IPS(In-Pile Section)에 장전되는 것이다.

(2) 평가 방법

핵적 특성 평가는 핵연료 캡슐이 장전되는 초기의 선출력과 반응도 효과에 대한 것으로 한정하였다. 평가는 MCNP를 이용한 계산으로 수행하였으며 예상되는 노심 환경을 반영하도록 모델링하고 핵연료 캡슐에 대한 선출력 평가를 위하여 핵연료 캡슐에 대한 모델링을 수행하였다. 계산에 적용된 노심 조건은 아래의 '(가)'항에 나타내었으며, 핵연료 캡슐에 대한 조건은 아래의 '(나)'항에 나타내었다.

(가) 노심 조건

- 하나로 출력: 30 MW
- 노심 평균 연소도: 29.31 %U-235
- R01~20, CAR1~4, SOR1~4: 각 연소도 분포를 갖는 핵연료집합체
- OR3,4,6: 모의 핵연료집합체
- IR1: FTL의 시운전용 IPS
- OR5: 05F-01K
- 예상 제어봉 위치: 250~550 mm
- Xe 평형

(나) 핵연료 캡슐의 주요 특성

- 시험 핵연료봉의 개수: 2
- 시험 핵연료 소결체의 축 방향 중심 위치: -22.5 cm
- 시험 핵연료의 농축도: 2.42 w/o
- 모의 핵연료의 재질: Al₂O₃
- 피복관 재질: Zircaloy-4
- 캡슐 외통 재질: SUS 316L

캡슐이 실제 장전되는 방향을 고려하여 캡슐에 대한 MCNP 모델을 만들었다. 캡슐 안내관의 가지방향의 연장선에 SPND가 위치하므로 노심 모델에서 SPND는 Y축 방향에서 시계방향으로 15° 회전한 것에 해당한다. 이에 따라 Al₂O₃로 된 캡슐의 모의 핵연료가 노심 쪽에 가까이 있다.

(3) 결과

가. 반응도 효과

캡슐의 조사 시험을 위한 반응도 효과는 각 노심 조건에 해당하는 임계도를 계산하여 평가하였다. 노심에 고정되는 본 핵연료 캡슐에 해당하는 반

응도 효과의 제한치는 +12.5 mk 이하여야 하며, 아래에 나타낸 최대 반응도 효과는 표 5.4와 같이 1.6 mk로 제한치를 만족시킨다. 모든 경우에 대한 제어봉 위치는 1/2 삽입 위치이다.

표 5.4 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 반응도 효과

노심 조건	임계도값	반응도 차이(mk)
캡슐 장전	0.99276	-
캡슐 파손	0.99316	0.4
완전 인출	0.99436	1.6
모의 핵연료 장전	0.99416	1.4

(나) 선출력

시험 핵연료의 선출력은 제어봉 위치에 따라 크게 변화한다. 핵연료 봉의 축 방향 중심 위치는 -22.5 cm로 아래쪽에 위치하고 있으므로 제어봉 높이가 낮을 때 높은 선출력이 발생한다. 운전 가능한 제어봉 위치를 5 cm 단위로 구분하여 선출력을 계산하였다. 시험 핵연료봉의 선출력은 축 방향 출력분포의 변화가 심하므로 1 cm 단위로 선출력을 계산하여 표 5.5에 나타내었다. 안전성 평가를 위한 한계 선출력은 계산 오차와 노심 장전 모형의 영향을 고려하여 도출하였다. 계산 오차는 MCNP 계산 fsd(fractional standard deviation)의 2배를 적용하였고, 실제 장전될 노심 모형은 현 시점에서는 알 수 없으므로 노심 장전 모형의 영향으로 10%를 설정하였다. 안전성 평가를 위한 최대 한계 선출력은 제어봉 높이 300 mm에서 610.78 Watt/cm로 나타났다. 같은 구조의 핵연료 계장캡슐에 대한 안전성 평가결과에 의하면 638.45 Watt/cm에서 안전한 것으로 나타났다[47]. FTL 시운전용 IPS의 설치와 캡슐의 설계 변경에 의하여 최대 한계 선출력이 12% 증가하였지만 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 최대 한계 선출력은 안전성 평가가 이루어진 선출력 보다 훨씬 낮으므로 따로 안전성 평가를 할 필요가 없어졌다[57].

표 5.5 Xe 포화 상태의 운전 노심에 대한 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 선출력 (W/cm) [2차]

[fsd: fractional standard deviation, 한계 선출력 = 최대 * (1 + 2 * fsd) * 1.10]

제어봉 위치 (mm)	핵연료 위치 (cm)	선출력 (Watt/cm)					한계 선출력
		봉 1	봉 2	봉 3 (모의)	평균	최대(fsd)	
250	-25.0	405.51	433.71	-	430.32	490.56 (0.0347)	577.06
	-24.0	369.86	438.71	-			
	-23.0	381.06	438.70	-			
	-22.0	429.25	451.04	-			
	-21.0	464.83	490.56	-			
300	-25.0	426.35	416.85	-	445.41	522.15 (0.0317)	610.78
	-24.0	401.95	404.88	-			
	-23.0	417.53	430.27	-			
	-22.0	484.21	461.84	-			
	-21.0	488.06	522.15	-			
350	-25.0	418.48	430.87	-	433.62	490.12 (0.0341)	575.90
	-24.0	408.96	397.73	-			
	-23.0	405.33	421.59	-			
	-22.0	439.59	460.42	-			
	-21.0	490.12	463.09	-			
400	-25.0	389.20	417.71	-	416.13	468.47 (0.0370)	553.45
	-24.0	388.06	407.07	-			
	-23.0	390.43	426.02	-			
	-22.0	423.12	411.00	-			
	-21.0	440.23	468.47	-			
450	-25.0	402.12	384.51	-	403.45	469.32 (0.0337)	551.05
	-24.0	393.20	383.04	-			
	-23.0	381.42	383.17	-			
	-22.0	419.11	408.48	-			
	-21.0	410.13	469.32	-			
500	-25.0	380.47	359.96	-	378.60	440.39 (0.0358)	519.12
	-24.0	360.09	368.26	-			
	-23.0	358.79	360.32	-			
	-22.0	352.32	387.73	-			
	-21.0	417.65	440.39	-			
550	-25.0	323.77	341.76	-	351.39	398.30 (0.0358)	469.50
	-24.0	319.57	342.19	-			
	-23.0	333.56	345.51	-			
	-22.0	360.32	372.79	-			
	-21.0	376.10	398.30	-			

5.5 핵연료용 계장캡슐 제조 및 품질보증

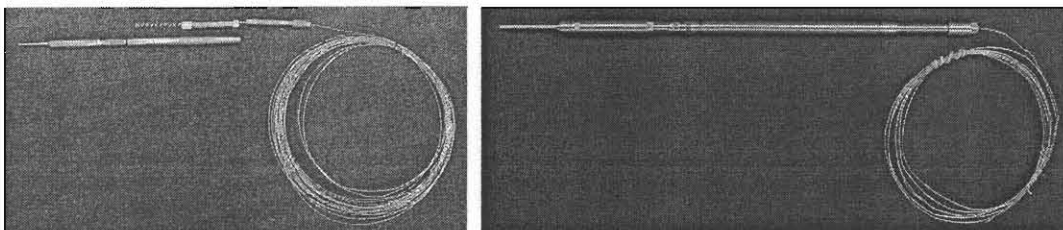
핵연료용 계장캡슐, 시험핵연료봉의 설계 및 제조와 관련한 품질보증 기준은 다음과 같은 문서에 규정되어 있다.

- 핵연료 조사시험용 계장캡슐 설계도 : HAN-IC-DW-05F-01K-05-001
- 핵연료 조사시험용 계장캡슐 제작기술시방서 : HAN-IC-DD-SP-05-003
- 핵연료 조사시험용 계장캡슐 구매시방서 : HAN-IC-DD-SP-05-004
- 조사시험용 핵연료봉 용접 사양서 : HAN-IC-WP-01-2
- 조사시험용 핵연료봉 용접 자격화 기록서 : HAN-IC-WP-01-3
- 조사시험용 핵연료봉 용접부위 조직 검사 : HAN-IC-CR-05-036
- 조사시험용 핵연료봉 용접부위 인장 시험 : HAN-IC-CR-05-036
- 조사시험용 핵연료봉 치수검사 : HAN-IC-CR-05-036
- 조사시험용 핵연료봉 He 누출검사 : HAN-IC-CR-05-036
- 핵연료 조사시험용 계장캡슐 조립절차서 : HAN-IC-CT-WP-06-001

위와 같은 품질보증 문서에 규정된 시험항목에 대한 검사를 실시하여 각 시험항목에 대한 품질기준을 만족하는 시험 핵연료봉 및 캡슐을 제작하였으며, 핵연료용 계장캡슐 및 시험 핵연료봉 제조는 다음과 같은 제조보고서에 기술되어 있다. 그리고 조립과 조립 후 검사는 관련문서의 품질관리지침에 따라 실시하였다.

- 핵연료 조사시험용 계장캡슐 설계/제작보고서 : 작성 중
- 핵연료 조사시험용 계장캡슐(05F-01K) 제작 EMR : FA-KA-051010

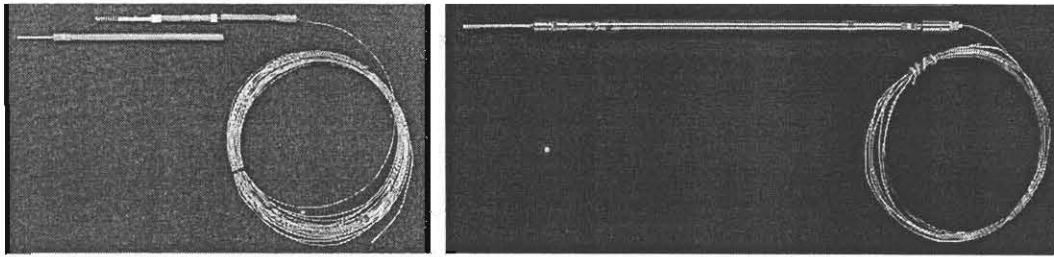
품질기준에 따라 제조된 이중계장용 핵연료봉은 그림 5.4-5.6과 같으며, 모의 핵연료봉은 그림 5.7, 그리고 05F-01K 핵연료용 계장캡슐은 그림 5.8과 그림 5.9와 같다.



(조립 전)

(조립 후)

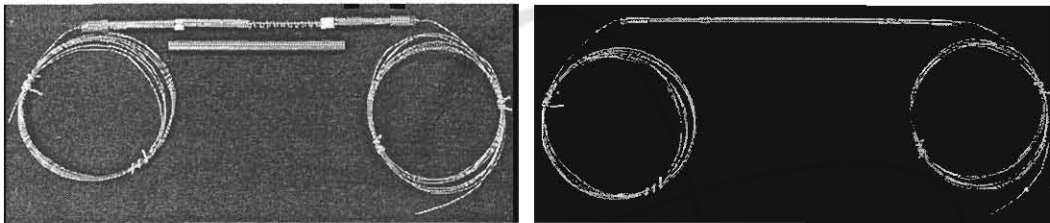
그림 5.4 핵연료봉 내압변화+핵연료 표면온도 이중계장용 핵연료봉



(조립 전)

(조립 후)

그림 5.5 핵연료봉 소결체 길이변화+핵연료 중심온도 이중계장용 핵연료봉



(조립 전)

(조립 후)

그림 5.6 핵연료 중심온도+핵연료 표면온도 이중계장용 핵연료봉

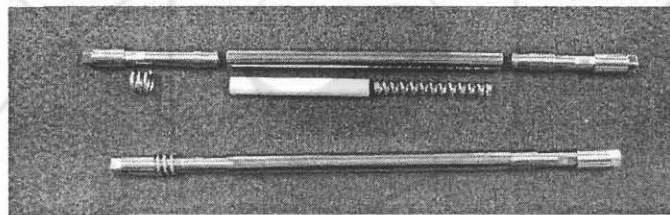


그림 5.7 모의 핵연료봉 (조립 전, 후)

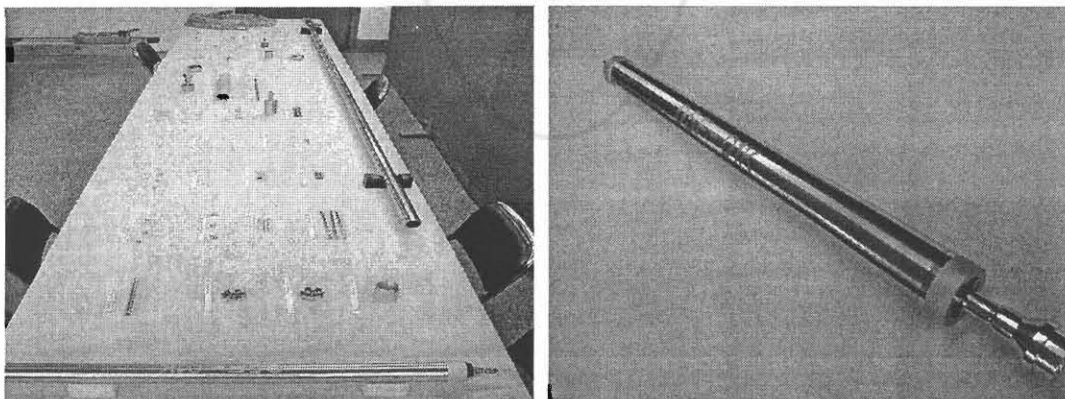


그림 5.8 05F-01K 핵연료 계장캡슐 부품 및 가조립

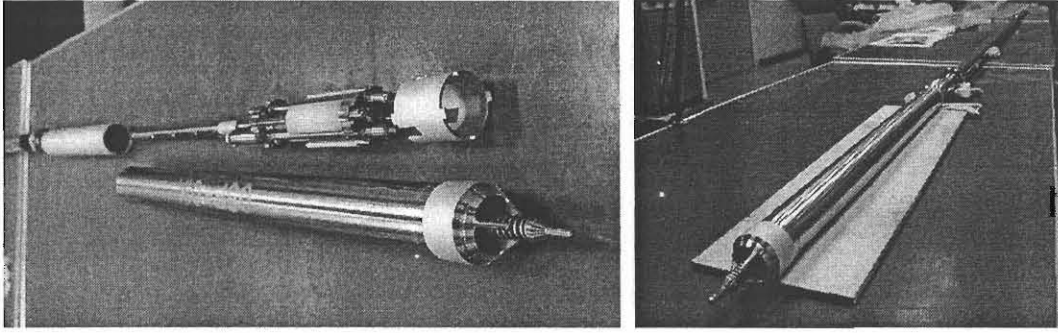
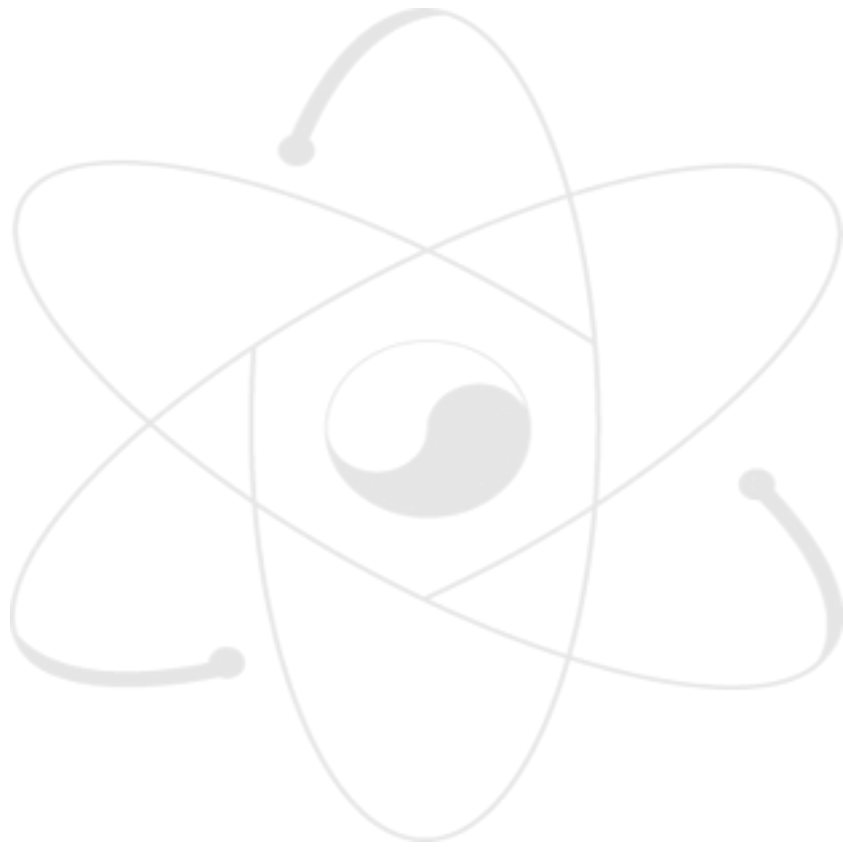


그림 5.9 O5F-01K 핵연료 계장캡슐 조립



제 6 장 결 론

핵연료 개발을 위해서 요구되는 조사시험 중 핵연료 특성변화(핵연료 온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 길이 변형 등)를 측정하는 것은 매우 중요하다. 이에 따라, 핵연료 조사시험 중 핵연료 특성(온도, 압력, 변형 등)을 할 수 있는 핵연료용 계장캡슐과 계장기술 개발을 수행하고 있다. 이에 따라 2003년도에는 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-11K)에 대한 설계검증시험을 성공적으로 수행하였고 2004년도에는 핵연료용 계장캡슐을 이용하여 핵연료의 중심온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 변형 및 중성자속을 측정할 수 있는 03F-05K 핵연료용 계장캡슐을 품질기준에 만족되도록 설계·제작하여 조사시험을 성공적으로 수행하였다.

2006년도에는 핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험의 효율을 향상하기 위하여 한 개의 핵연료봉에서 두개의 핵연료 특성을 측정하기 위한 이중계장용 핵연료봉을 개발하고 이를 조사시험하기 위한 05F-01K 핵연료용 계장캡슐을 품질기준에 맞도록 설계·제작 하였으며, 하나로 노심 OR5 조사공에서 조사시험을 수행할 예정이다. 05F-01K 핵연료 계장캡슐의 조사시험 중 핵연료 중심온도, 핵연료 표면온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 길이 변형, 그리고 중성자속을 측정하고, 조사시험 후에는 시험핵연료의 조사후시험을 수행하여 측정 자료와 조사후시험 결과를 비교·분석하여 핵연료 특성자료를 평가할 예정이다.

조사시험 기술은 향후에는 이용자들의 요구를 고려한 장기간 조사시험 및 고온 상태에서의 조사시험 등을 수행하여 국내의 핵연료 개발은 물론 핵연료 개발을 위한 국제공동연구에도 기여하고 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 핵연료 특성 측정을 위한 계장기술과 특성자료 평가 기술은 3-pin FTL(Fuel Test Loop)을 이용한 핵연료 조사시험에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 강영환 외, 계장캡슐 활용기술개발, KAERI/RR-1760/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1997.
- [2] 김용성 외, 무계장캡슐의 설계 및 제작, KAERI/TR-509/95, 한국원자력연구소, 1995.
- [3] 강영환 외, 무계장캡슐을 이용한 원전재료의 하나로 조사 및 조사후시험, KAERI/TR-1164/98, 한국원자력연구소, 1998.
- [4] 김봉구외, 중성자속 측정용 무계장캡슐 제작, KAERI/TR-1249/99, 한국원자력연구소, 1999.
- [5] 강영환 외, 재료 조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서, KAERI/TR-985/98, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1998.
- [6] 주기남 외, 하나로 재료조사시험용 계장캡슐(97M-01K) 설계·제작 보고서, KAERI/TR-1226/99, 한국원자력연구소, 1999.
- [7] 주기남 외, 하나로 계장캡슐을 이용한 원자로 재료의 중성자 조사시험, '98 추계학술 발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998. 10.
- [8] K.N. Choo, et al., Irradiation of Reactor Materials Using an Instrumented Capsule in HANARO, The 6th Asian Symposium on Research Reactor, March 29 to 31, 1999, Mito, Japan.
- [9] Y.H. Kang, et al., Structural Analysis for the HANARO Irradiation Capsule through Vibration Test, The 6th Asian Symposium on Research Reactor, March 29 to 31, 1999, Mito, Japan.
- [10] T.J. Cater, et al., The irradiation and post-irradiation examination of two Korean fuel bundles made by KAERI, Exp-BDL-43106, AECL, 1984
- [11] 강영환, KAERI/CEA-IRDI/FRAGEMA 간의 국제공동연구 참가 보고서, KAERI/TR-84/86
- [12] 강영환 외, KMRR 이용 조사시험 방안 연구, KAERI/RR-771/88
- [13] 강영환 외, KMRR 이용 조사시험 방안 연구, KAERI/RR-858/89
- [14] 강영환 외, KMRR 이용 조사시험 방안 연구, KAERI/RR-964/90
- [15] 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-06K/02F-11K) 설계/제작, KAERI/TR-2408/2003, 한국원자력연구소, 2003.2.
- [16] 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-06K/02F-11K) 설계검증 시험

- 계획 및 안전성 분석, KAERI/TR-2415/2003, 한국원자력연구소, 2003.3.
- [17] 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-06K/02F-11K) 설계검증 조사 시험, KAERI/TR-2658/2004, 한국원자력연구소, 2004.1.
- [18] 주기남 외, 한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 소재의 조사용 계장 캡슐(99M-01K-02H) 설계·제작 보고서, KAERI/TR-1646/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- [19] 주기남 외, 원자로 압력용기 재료 하나로 조사시험용 계장캡슐 (00M-02K) 설계·제작 보고서, KAERI/TR-1945/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [20] 주기남 외, 노심 및 중수로 압력관 재료 하나로 조사시험용 계장캡슐 (00M-03K) 설계·제작 보고서, KAERI/TR-1985/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [21] 주기남 외, 2001년도 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐 (01M-05U) 설계·제작 보고서, KAERI/TR-2342/2002, 한국원자력연구소, 2002.
- [22] 주기남 외, 2002년도 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐 (01M-05U) 설계·제작·시험 보고서, KAERI/TR-2558/2003, 한국원자력연구소, 2003.
- [23] 주기남 외, 원자로 압력용기 조사파괴특성 평가용 계장캡슐 (02M-02K) 설계·제작·시험 보고서, KAERI/TR-2596/2003, 한국원자력연구소, 2003.
- [24] 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장기술 현황분석, KAERI/AR-513/98, 한국 원자력연구소, 1998.
- [25] 서철교, 02F-06K의 SPND에서의 열중성자속과 핵연료 소결체의 미세 출력 분포, 내부통신문 HAN-RR-CR-900-03-009, 2003. 5. 31.
- [26] 이충성, 계장 핵연료 캡슐의 조사시험에 대한 HANAFMS 계산결과, 내부통신문 HAN-RR-CR-900-03-028 (2003. 6.3)
- [27] 김봉구, 오중명, 설계변경요청서, HANA-IC-DCR-03-001, 2003. 9. 24.
- [28] 오중명, 김봉구, 03F-05K 핵연료 조사시험용 계장캡슐 설계도, HAN-IC-DW-03F-05K, 2003.10.24.
- [29] 오중명, 김봉구, 핵연료 조사시험용 계장캡슐 제작기술시방서, HAN-IC-DD-SP-03-005, 2003.10.10.
- [30] 오중명, 김봉구, 핵연료 조사시험용 계장캡슐 구매시방서, HAN-IC-DD-SP-03-006, 2003.10.10.
- [31] 김봉구, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(03F-05K)에 대한 핵적검토 의뢰,

- HAN-IC-CR-03-026, 2003.11.05.
- [32] 서철교, 핵연료 계장캡슐(03F-05K)의 선출력 평가, HAN-RR-CR-900-04-002, 2004.01.03.
- [33] 김봉구, 오종명, 설계변경요청서, HANA-IC-DCR-03-002, 2004.02.23.
- [34] 오종명, 김봉구, 핵연료 계장캡슐의 하부 guide spring 제작 및 평가, HAN-IC-CR-04-003, 2004.02.23.
- [35] 김수성, PQT 용접결과 보고, HAN-IC-CR-04-007, 2004. 3. 12
- [36] 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(03F-05K) 설계/제작, KAERI/TR-2773/2004, 한국원자력연구소, 2004. 6.
- [37] 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(03F-05K) 조사시험 계획서, KAERI/TR-2774/2004, 한국원자력연구소, 2004. 6.
- [38] 손재민, 핵연료 조사시험용 계장캡슐 조립 절차서, HAN-IC-CT-WP-04-003(개정번호1), 한국원자력연구소, 2004.8.16
- [39] 손재민, 핵연료 조사시험용 계장캡슐 조사시험 절차서, HAN-IC-CT-WP-04-003(개정번호1), 한국원자력연구소, 2004.8.16
- [40] 손재민, 03F-05K 핵연료 조사시험용 계장캡슐 선출력 계산 요청, HAN-IC-CR-04-033, 2004. 11. 12
- [41] 서철교, 핵연료 계장캡슐(03F-05K)의 노심 계산 결과, HAN-RR-CR-900-05-001, 2001. 1. 5
- [42] 손재민, 03F-05K 핵연료 계장캡슐 절단 및 IMEF 운송, HAN-IC-CR-05-004, 2005. 1. 26
- [43] 손재민, 03F-05K 핵연료 계장캡슐 조사시험, HAN-IC-CR-05-005, 2005. 1. 27.
- [44] 손재민, 03F-05K 핵연료 계장캡슐 조사시험, KAERI/TR-3035/2005, 한국원자력연구소, 2005. 7.
- [45] 손재민, 05F-01K 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 핵적 & 안전성 검토 의뢰, 내부통신문, HAN-IC-CR-05-025, 2005. 7.12.
- [46] 서철교, 핵연료 계장캡슐(05F-01K)의 선출력 평가, HAN-RR-CR-900-05-029, 2005.7.26
- [47] 박철, “경수로 신형 소결체 계장형 캡슐 노내 조사시험시 온도 거동,” 내부통신문, HAN-RR-CR-03-007, 2003.2.12
- [48] 김수성, Dual rod 용접시험 결과 보고, HAN-IC-CR-05-036, 2005. 11. 28.
- [49] 손재민 외, “핵연료 조사시험용 계장캡슐(05F-01K) 조사시험 계획서 (개정 0), KAERI/TR-3119/2006, 한국원자력연구소, 2006.01.

- [50] 손재민, “05F-01K 핵연료 계장캡슐의 이중계장용 핵연료봉 He Leak 경위 및 분석” 내부통신문, HAN-IC-CR-06-015, 2006.07.14.
- [51] 손재민, “05F-01K 핵연료 계장캡슐의 이중계장용 핵연료봉 조립시 Hold-Down Spring 누락 경위 및 조치” 내부통신문, HAN-IC-CR-06-16, 2006.07.14.
- [52] 서철교, 05F-01K & 06F-01K의 실험신청서에 대한 검토 의견, HAN-RR-CR-900-06-029, 2006.8.17.
- [53] 손재민, “05F-01K 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 핵적 & 안전성 검토 의뢰(2)” 내부통신문, HAN-IC-CR-06-018, 2006.8.24.
- [54] 손재민, “핵연료 조사시험용 계장캡슐(이중계장용) 조립 절차서, HAN-IC-CT-WP-06-001, 한국원자력연구소, 2006.9.19.
- [55] J.M.Sohn, “Design of the Dual Instrumented Fuel Rods to Measure the Nuclear Fuel Characteristics during Irradiation Test at HANARO”, Korea Nuclear Society, 2005.5.
- [56] J.M.Sohn, “Design of the Instrumented Fuel Capsule(05F-01K) for the Dual Instrumented Fuel Rods Irradiation Test at HANARO”, Korea Nuclear Society, 2005.10.
- [57] 서철교, 핵연료 계장캡슐(05F-01K)의 조사시험을 위한 핵적 특성 평가, HAN-RR-CR-900-06-037, 2006.9.22

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/TR-3244/2006					
제 목 / 부 제		핵연료 조사시험용 계장캡슐(05F-01K) 조사시험 계획서 (개정 0)			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		손재민 (하나로이용기술개발부)			
연구자 및 부서명		오종명, 신윤택, 박승재, 조만순, 주기남, 최명환, 이동수 강영환, 김봉구, 김학노 (하나로이용기술개발부), 서철교, 김현일(하나로운영부), 김관현(품질보증실)			
출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2004
페이지	42 p.	도 표	있음(○), 없음()	크 기	27 Cm.
참고사항					
공개여부	공개(○), 비공개()		보고서종류	기술보고서	
비밀여부	대외비(), _ 급비밀				
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)					
<p>핵연료 개발을 위해서 조사시험 중 핵연료 특성변화(핵연료 온도, 핵연료봉 내압변화, 핵연료 소결체 길이변화 등)를 측정하는 것은 매우 중요하다. 이에 따라, 핵연료 조사시험 중 핵연료 특성(온도, 압력, 변형 등)을 측정할 수 있는 핵연료 조사시험용 계장캡슐과 계장기술 개발을 수행하였다. 이에 따라 “연구로이용기술개발” 대과제의 “조사시험용 캡슐 개발 및 활용” 세부과제에서는 2003년도에 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-11K)에 대한 설계검증시험을 하나로 OR5 조사공에서 2003년 3월 14일부터 2003년 6월 1일 까지(53.84 EFPD) 성공적으로 수행하였다. 설계검증 조사시험 후 IMEF hot cell에서 계장캡슐을 해체하여 구조적 건전성을 확인하였으며, 측정된 핵연료 중심온도와 핵연료 연소도에 대한 평가를 수행하였다. 그리고 2004년도에는 설계 검증된 핵연료 계장캡슐을 이용하여 핵연료의 중심온도, 핵연료봉 내압변화, 핵연료 소결체 길이 변화 등을 측정할 수 있는 시험핵연료봉과 03F-05K 핵연료 조사시험용 계장캡슐을 품질보증 절차에 따라 설계·제작하고, 조사시험을 하나로 OR5 조사공에서 2004년 4월 27일부터 2004년 10월 1일까지(59.5 EFPD) 수행하면서 핵연료 조사특성을 성공적으로 측정하였다. 03F-05K 핵연료 계장캡슐의 조사시험 중 측정된 핵연료의 최대 중심온도는 1,316 °C이었으며, 선출력은 521 W/cm 이하로 조사되었고, 조사시험 후 핵연료 연소도는 3,461 MWD/MTU으로 평가되었다. 03F-05K 핵연료 계장캡슐은 IMEF에서 육안검사와 핵연료봉의 감마스캐닝 등의 조사후시험을 통하여 특성자료를 분석하였다.</p> <p>핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험의 효율을 증대하기 위하여 개발된 이중 계장용 핵연료봉을 조사시험하기 위한 05F-01K 핵연료 계장캡슐을 설계, 제작하고, 하나로 OR5 조사공에서 조사시험을 준비 중에 있다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		핵연료 조사시험용 계장캡슐, 05F-01K, 핵연료, 조사시험, 이중계장용 핵연료봉, 하나로, 핵연료 특성측정			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-3244/2006							
Title / Subtitle		Irradiation Test Plan of Instrumented Capsule(05F-01K) for Nuclear Fuel Irradiation in HANARO (Revision 0)					
Project Manager and Department (or Main Author)		Jae Min Sohn (HANARO Utilization Technology Development Division)					
Researcher and Department		B.G.KIM, J.M.Sohn, M.H.Choi, Y.T.Shin, S.J.Park, Y.H.Kang, M.S.Cho, K.N.Choo, H.R.Kim(HANARO Utilization Technology Development Division), J.M.Oh(Advanced Fuel Development Division), C.G.Seo, H.I.Kim(HANARO Operation Division), K.H.Kim(HP)					
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI		Publication Date	2004	
Page	42 p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No ()		Size	27 Cm.	
Note							
Open	Open(○), Closed()			Report Type		Technical Report	
Classified	Restricted(), ___Class Document						
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)							
<p>An instrumented capsule was developed to be able to measure fuel characteristics, such as fuel temperature, internal pressure of fuel rod, fuel pellet elongation, and neutron flux, etc., during the irradiation test of nuclear fuel in HANARO. The instrumented capsule for measuring and monitoring fuel centerline temperature and neutron flux was designed and manufactured. And then, to verify the design of the instrumented capsule in the test hole, it was successfully irradiated in the test hole of HANARO from March 14, 2003 to June 1, 2003 (53.84 full power days at 24 MW). In the year of 2004, 3 test fuel rods and the 03F-05K instrumented fuel capsule were designed and fabricated to measure fuel centerline temperature, internal pressure of fuel rod, and fuel axial deformation during irradiation test. Now, this capsule was successfully irradiated in the test hole OR5 of HANARO reactor from April 27, 2004 to October 1, 2004 (59.5 full power days at 24-30 MW). The capsule and fuel rods have been dismantled and fuel rods have been examined at the hot cell of IMEF.</p> <p>The instrumented fuel capsule(05F-01K) was designed and manufactured for a design verification test of the dual instrumented fuel rods. The irradiation test of the 05F-01K instrumented fuel capsule will be carried out at the OR5 vertical experimental hole of HANARO.</p>							
Subject Keywords (About 10 words)		Instrumented capsule for nuclear fuel irradiation test, 05F-01K, Nuclear Fuel, Irradiation Test, HANARO, Duel Instrumented Nuclear fuel rod,, Measurement of fuel characteristics during irradiation test					