

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신형 핵연료 및 원자로 구조물재료 개발용
하나로 무게장/계장 캡슐 조사후시험 현황

The Status of Post Irradiation Examinations
of HANARO Non-instrumented and Instrumented Capsules for
Advanced Nuclear Fuels and Structural Steels in IMEF

주용선, 송웅섭, 오완호, 백승제, 유병옥, 김도식, 안상복, 박대규, 김기하, 홍권표
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력연구개발사업 및 하나로 활성화 사업의 결과로 개발한 신형 핵연료 및 구조물재료의 중성자조사에 대한 각종 성능 및 특성을 확인하기 위해서는 조사후시험(Post Irradiation Examinations : PIEs)을 반드시 이행해야 한다. 이를 위해 조사재시험시설에서는 1998년부터 2004년 3월까지 무게장캡슐 FL-350-Z-9001을 포함하여 총 13개의 핵연료 및 재료용 무게장/계장 캡슐의 조사후시험을 수행하였다. 핵연료 성능시험용 캡슐은 조사 rig 절단 및 해체, 연료봉 제원측정, 감마스캐닝, 조직 및 경도시험, 밀도측정, 그리고 SEM/EPMA 등을 시험하였고, 재료 성능시험용 캡슐은 핵연료 피복관, 중수로용 압력관, 경수로용 원자로압력용기(RPV)의 국산 SA508 cl.3 재료의 중성자 조사후 특성을 평가하는 파괴시험-충격시험, 소형인장시험(small tensile test), PCVN(pre-cracked V-notch)시험, 경도시험, 금속조직시험, SEM/EPMA시험, 그리고 TEM시험- 등을 수행하였다.

요 약

Post-irradiation examinations(PIEs) ought to be performed to evaluate the neutron irradiation effects and performance of advanced nuclear fuels and structural steels, which were researched and developed by nuclear mid- and long-term atomic energy R&D program. Since 1998 total thirteen(13)

non-instrumented or instrumented HANARO capsules for nuclear fuels and structural steels have been carried out in IMEF. The PIEs for nuclear fuel capsules are such as irradiation rig dismantling, dimension measurement, gamma-scanning test, Metallurgy, hardness test, density measurement, and SEM/EPMA. For structural steel capsules, destructive tests have been tested such as impact test, small tensile test, PCVN, hardness, metallurgy, SEM/EPMA, and TEM.

1. 서 론

원자력연구개발사업 및 하나로활성화과제의 일환으로 판상핵연료, U-Mo 핵연료 및 DUPIC 핵연료 등의 신형 핵연료와 중성자 조사취화(irradiation embrittlement)에 덜 민감한 원자로 압력용기 등 구조물 재료의 신재료 개발에 대한 연구가 하나로(HANARO)를 이용해 지속적으로 진행하고 있다. 개발 중이거나 개발한 신형핵연료 및 신재료는 관련 코드 및 원자력 규제기관인 한국원자력안전기술원(KINS)에서 요구하는 중성자 조사후의 성능과 건전성을 검증하기 위해 하나로 조사캡슐(irradiation capsule)을 활용해 조사후시험을 수행하고 있는데, 하나로에서 중성자에 조사한 핵연료나 재료는 핵반응이 일어나 강한 방사선을 방출하므로 일반 실험실에서는 취급 및 시험할 수도 없으므로^[1,2,3], 반드시 고방사선을 차폐할 수 있는 특수시설인 핫셀(hot cell) 시험시설에서 수행해야 한다. 국내에서 핫셀시설을 구비하고 조사후시험을 수행할 수 있는 시설은 조사후시험시설(PIEF)와 조사재시험시설(IMEF)로서 1998년부터 2004년 3월까지 하나로에서 중성자 조사한 핵연료 및 재료용 무게장/계장 캡슐 13개를 대부분 조사재시험시설에서 수행하였다.

2. 본 론

핵연료 캡슐은 조사 rig 절단 및 해체, 연료봉 제원측정, 감마스캐닝, 조직 및 경도시험, 밀도측정, 그리고 SEM/EPMA 등을 시험하였고, 재료 캡슐은 핵연료 피복관, 중수로용 압력관, 경수로용 원자로압력용기(RPV)의 국산 SA508 cl.3 재료의 중성자 조사후 특성을 평가하는 파괴시험-충격시험, 소형인장시험(small tensile test), PCVN(pre-cracked V-notch)시험, 경도시험, 금속조직시험, SEM/EPMA시험, 그리고 TEM시험- 등을 수행하였으며, 1998년부터 2004년 3월까지 무게장캡슐 FL-350-Z-9001을 포함하여 총 13개의 핵연료 및 재료용 무게장/계장 캡슐을 시험하였다. 각각의 캡슐에 대한 세부 현황 및 내용은 다음과 같다.

1) 재료용 무게장캡슐(FL-350-Z-9001)

하나로에서 최초로 조사한 무게장캡슐로서 캡슐내부에는 열매체, 스페이서 블록, 중성자모니터, 온도모니터 및 여러 종류의 시편들이 내장되어 있다. 캡슐내에

내장되어 있는 각종 시편들을 해체하기 위해서 M2 핫셀에 설치한 캡슐절단기를 사용하여 캡슐 하부만을 절단한 후 해체하였다. 운전 조건은 척 회전수, 휠 회전수, 휠 이송속도를 각각 3 rpm, 200 rpm 및 0.15 mm/min이었다. 해체한 열매체(specimen holder)에서 중성자모니터, 온도모니터 및 시편들을 재분류하기 위해 M5a 핫셀로 이송하여 작업하였다. 해체 및 분류한 중성자모니터는 핫셀 밖으로 꺼내 운반용 캐스크에 담아 타시설로 이송하였고, 온도모니터의 용융합금의 용융유무 확인시험 및 11개의 충격시편에 대한 충격시험-온도별 최대흡수에너지 측정, 횡팽창량 측정-을 수행하였다.

2) 재료용 계장캡슐(97M-01K)

조사시험용 캡슐개발 및 활용과제에서 중장기사업을 지원하기 위해 제작하여 하나로에서 조사시킨 계장캡슐로서 1998년 11월 12일 조사재시험시설로 이송하여 캡슐 상부 및 하부를 캡슐절단기로 절단 및 해체하였다. 열매체의 구멍에 고착되어 있는 $\Phi 3 \times 25 \text{ mm}^3$ 및 $\Phi 3 \times 40 \text{ mm}^3$ 인 중성자모니터를 해체하기 위해 제염실에 설치한 글로브박스에서 TEM용 시편 취급용 핀셋을 사용하여 중성자모니터를 해체하였다. 해체한 중성자모니터 수량은 총 8개이고, 방사선량율은 $280 \mu\text{Sv/h}$ 이었다. 열매체에 삽입한 시험시편의 종류는 S.P시편, 인장시편, 충격시편, MBE시편 및 TEM시편이었다.

3) 재료용 무게장캡슐(98M-01K)

20 MW 하나로 CT 시험공에서 2일간 조사시킨 무게장캡슐로서 1999년 1월 28일 하나로 저장폴에서 조사재시험시설로 이송하여 절단 및 해체하였고, 작업 조건은 97M-01K와 동일하였다. 본 캡슐의 특징은 열매체의 홈에 온도모니터와 시편을 함께 삽입하는 방법을 도입하고, 중성자모니터의 길이를 40 mm에서 104 mm로 약 2배 길게 하고, 열매체의 길이를 110 mm에서 55 mm로 짧게 하는 대신에 수량을 5개에서 10개로 2배 증가시켰다. 열매체에 고착한 PCVN 시편을 해체하는데 많은 시간과 인력을 투입하였다. 온도모니터 및 단열재의 방사선량율을 측정하였는데, 각각 1.1 mSv/h 및 0.2 mSv/h 이었다. 온도모니터 수량은 총 15개이었으며, 각각의 온도모니터별로 용융온도가 각각 235°C , 264°C , 270°C , 280°C , 285°C , 300°C , 320°C 인 서로 다른 7개의 용융금속(eutectic alloy)에 대해 하이스코프(Hi-scope)로 용융유무 확인시험을 수행하였다.

4) 재료용 계장캡슐(98M-02K)

20 MW 하나로 CT 시험공에서 4일간 조사시킨 계장캡슐로서 1999년 9월 6일 하나로 저장폴에서 조사재시험시설로 이송하여 절단 및 해체하였고, 작업 조건은 98M-01K와 동일하였다. 해체한 열매체내의 시편의 산화 방지를 위해 플라스틱 용기 내에 알코올을 담아 열매체를 보관하였다. 중성자 모니터의 수량은 총 3개로서 각각의 방사선량율은 각각 1.4 mSv/h , 3.9 mSv/h , 0.53 mSv/h 이었다. 본 캡슐은 하나로에서 조사시험시 하단부의 가이드가 이탈되어 있었고, 이를 규명하기 위해 하단부의 부품을 폐기물로 처리하지 않고, M4 핫셀에 보관한후 하이스코프를 활용하

여 외관검사를 수행하였다.

5) 재료용 계장캡슐(99M-02H)

2000년 7월 10일 하나로 저장폴에서 조사재시험시설로 이송한 후 동년 7월 11일에 절단 및 해체하였고, 작업 조건은 98M-01K와 동일하였으나, 절단 중에 캡슐 내부로부터 약 100 cc의 물이 흘러나왔다. 중성자 모니터의 수량은 샤파이어 및 반응물질이 각각 5개로서 총 10개이며, 각각의 방사선량율은 B.G 및 최대 0.98 mSv/h이었다. 특히 본 캡슐의 열매체에 고착된 시편들을 해체하기 위해 시편해체장치(specimen press machine)을 M5a 핫셀 내부에 설계/제작/설치하였고, 중성자모니터 해체 및 작업자의 피폭을 최소화하기 위해 글로브박스(glove box)도 제작하여 M5a 핫셀 천정에 설치하여 작업하였다.

6) 재료용 계장캡슐(99M-01K)

원자로 압력용기의 재료 개발을 위해 하나로(HANARO)의 IR2 시험공(출력 22 MW)에서 4일간 중성자에 조사한 캡슐로서 2001년 2월 6일 반입하여 절단 및 해체하였고, 작업 조건은 99M-02H와 동일하였으나, 캡슐 내부에서 약 10 cc의 물이 흘러나왔다. 열매체의 양단에 시편의 이탈 방지 및 열전달을 고려하여 두께가 2 mm 인 판재를 설치해서 열매체내부의 시편 모두를 시편해체장치를 이용해 해체하였다. 그러나 열매체 4단 및 5단은 양단의 판재가 고착되어 이를 M2 핫셀에서 밀링기기로 절삭 후 M5a 핫셀로 이송하여 시편해체장치로 해체하였다. 중성자 모니터의 수량은 샤파이어 및 반응물질이 각각 5개로서 총 10개이며, 각각의 방사선량율은 3.5 μ Sv/h 및 최대 0.14 mSv/h이었다. 수행한 시험내용은 외관검사, 캡슐절단 및 해체, 시편분류, 중성자모니터 해체 및 핫셀 외부 반출, 충격시험, RCT 및 PCVN 시편시험을 수행하였다.

7) 재료용 계장캡슐(00M-01U)

하나로 활성화 사업을 지원하기 위해 최초로 제작한 계장캡슐로서 2001년 2월 13일에 시설로 반입하였다. 이용자 그룹은 한국원자력연구소, 한양대, 인하대, 충남대, 과학기술원 및 전문대이며, 수행한 시험은 충격시험, 조사성장용시편 길이측정, 인장시험, 소형인장시험, PCVN시험, 경도시험, TEM시험, SEM시험 및 EPMA시험이다. 본 캡슐시험을 통해 TEM시편 취급장치인 에어핀셋을 개발하여 시편 인출 및 분류에 활용하였다.

8) 재료용 계장캡슐(00M-02K)

원자로 압력경계 분야의 원자로압력용기재 개발을 위해 하나로(HANARO)의 IR2 시험공(출력 24 MW)에서 3일간 중성자에 조사한 캡슐로서 2001년 6월 4일 반입하였고, 절단 작업중 캡슐 내부에서 약 20 cc의 물이 흘러나왔다. 중성자모니터는 충격시편에 5개, 그리고 샤파이어 및 반응물질(직경 0.5 mm)이 각각 5개로서 총 15개이며, 각각의 방사선량율은 10.5 μ Sv/h 및 최대 93 μ Sv/h이었다. 외관검사, 캡슐절단 및 해체, 시편분류, 중성자모니터 해체 및 핫셀외부 반출, PCVN시험, 충격시험을 수행하였다.

9) 재료용 계장캡슐(00M-03K)

조사시험용 캡슐개발 및 활용과제에서 원자로 압력용기의 재료 개발을 위해 하나로(HANARO)에서 조사한 캡슐로서 2001년 11월 1일 반입하였고, 외관검사, 캡슐 절단 및 해체를 수행하였다. 소형인장시험에 대한 인장시험은 2003년도에 수행하였고, TEM시험(수량 80개) 및 중수로압력관 개발용 시험시험 등은 M4 핫셀에 보관 중에 있다.

10) 재료용 계장캡슐(01M-05U)

핵연료용 피복관 재료의 중성자 조사 성능을 확인하기 위해 하나로(HANARO)의 CT 시험공(출력 24 MW)에서 20일간 중성자에 조사한 계장캡슐로서 2003년 3월 1일 반입하였고, 작업 조건은 00M-03K와 동일하였고, 캡슐 내부로부터 물이 전혀 흘러나오지 않았다. 중성자모니터는 사파이어 및 반응물질(직경 0.5 mm)이 각각 5개로서 총 10개이며, 각각의 방사선량율은 2.26 $\mu\text{Sv/h}$ 및 최대 26.3 $\mu\text{Sv/h}$ 이었다. 이용자 그룹은 한국원자력연구소, 선문대, 한양대, 인하대 및 충북대이며, 수행한 시험은 외관검사, 캡슐절단 및 해체, 시험분류, 중성자모니터 해체 및 핫셀외부 반출, 조사성장용시험 길이측정, semi-length 인장시험, 경도시험 및 TEM시험이다.

11) 재료용 계장캡슐(02M-05U)

핵연료용 피복관 재료의 중성자 조사 성능을 확인하기 위해 하나로(HANARO)의 CT 시험공(출력 24 MW)에서 29일간 중성자에 조사한 계장캡슐로서 2003년 8월 12일 반입하였고, 캡슐 하단부 가이드 암(guide arm)이 절단되어 있었다. 작업 조건은 01M-05U와 동일하였고, 캡슐 내부로부터 물이 전혀 흘러나오지 않았다. 중성자모니터는 반응물질만을 넣은 캡슐로 총 5개이며, 최대 방사선량율은 182 $\mu\text{Sv/h}$ 이었다. 이용자 그룹은 한국원자력연구소 및 한국기술교육대학이다. 수행한 시험은 외관검사, 캡슐절단 및 해체, 시험분류, 중성자모니터 해체 및 핫셀외부 반출, 충격 시험, 소형인장시험이고, TEM 및 소형편치시험용 시험은 M4 핫셀로 보관중이다.

12) 연료용 무계장캡슐(02F-11K)

2003년 3월 14일부터 동년 6월 01일까지 24MW 출력으로 하나로 OF5공에서 53.84 FPD로 조사한 계장용 핵연료캡슐로서 핵연료봉 집합체에는 핵연료봉 3개가 조립되었고, 평가 최종 연소도는 5.132 GWD/MTU 이며, 동년 8월 12일 하나로 작업수조 내에서 절단 후 조사재시험시설로 운반하여 캡슐 절단 및 해체, 외관검사 및 전계수 감마선 측정시험을 수행하였다. 그러나 조직시험 및 성분분석 시험 등은 의뢰자의 예산 문제로 추후에 수행토록 조정하였다.

13) 크립시험용 계장캡슐(01S-01K)

2002년 10월 11일부터 11월 15일까지 28일간 24MW 출력에서 하나로 OF5공에서 조사공인 IP-15공에서 조사한 계장용 크립캡슐로서 노내 크립시험용이다. 2003년 11월 6일 조사재시험시설로 이송 후 11월 10일부터 약 1주일동안 절단 및 해체하여 폐기물로 처리하였다.

3. 결 론

조사재시험시설에서는 1998년부터 2004년 4월 현재까지 총 13개의 핵연료 및 재료용 무게장/계장 캡슐을 다음과 같이 수행하였다.

- 가. 년도별로 1998년 2개, 1999년 2개, 2000년 2개, 2001년 3개, 2003년 4개씩 각 시험하였다(그림 1. 참조).
- 나. 캡슐 분류별로 무게장캡슐 3개, 계장캡슐 10개를 시험하였다.
- 다. 캡슐 종류별로 재료시험용 캡슐 12개 및 연료시험용 캡슐을 1개 시험하였다(그림 1. 참조).
- 라. 조사후시험은 캡슐 절단 및 해체, 중성자모니터 해체 및 핫셀외부 반출, 충격 시험, 인장시험, 경도시험, 광학현미경시험, SEM/EPMA시험 및 TEM시험을 지원하였다(그림 2. 참조).
- 마. 캡슐 시험을 지원하기 위해 캡슐절단기, 시편해체장치, 글로브박스 및 에어핀셋 등의 치구를 설계, 제작 및 설치하였다(그림 2. 참조).

3. 참고문헌

1. 박대규 외, “핫셀설계기술”, KAERI/AR-468/97, 한국원자력연구소, 1997.
2. 노성기 외, “조사재시험시설건설”, KAERI/RR-880/89, 과학기술처, 1989.
3. 주용선 외, “하나로 공동이용 활성화사업 재료조사캡슐(01M-05U) 조사후시험”, 추계학술대회, 한국원자력학회, 2003.

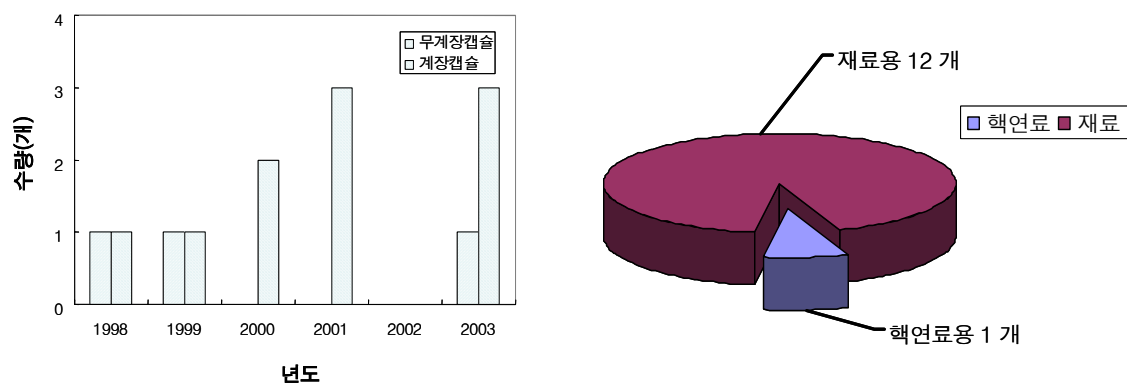


그림 1. 하나로 조사캡슐 년도별 및 종류별 캡슐시험 현황.

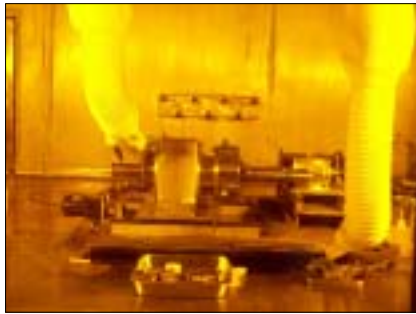


사진 1. 캡슐 절단(1) 및 캡슐절단기 외관 형상



사진 2. 캡슐 절단(2)



사진 3. 시편홀더 내 시편해체 및 분류



사진 4. 중성자모니터 해체용 글로브박스



사진 5. 시편홀더 고착용 시편 해체 장치



사진 6. TEM시편 취급용 에어핀셋

그림 2. 조사시험용 계장캡슐 절단, 해체 및 관련 개발 장비 현황.