

재료 및 연료용 하나로 조사캡슐 조사후시험

Post-Irradiation Examinations of Nuclear Fuels and Materials Irradiated Capsule at HANARO in IMEF

주용선, 유병옥, 박대규, 정양홍, 오완호, 백승제, 전중환, 홍권표

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중장기 연구개발사업의 일환으로 판상핵연료 및 U-Mo 핵연료 등의 신형핵연료, DUPIC 핵연료 및 중성자 조사취화(irradiation embrittlement)에 덜 민감한 원자로 압력용기 등 구조물 재료의 신재료 개발에 대한 연구가 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용해 활발히 진행 중에 있다. 개발 중이거나 개발한 신재료 및 신형핵연료에 대한 중성자 조사후의 성능과 건전성을 규제기관으로부터 검증받기 위해 조사장치인 캡슐을 통해 조사후시험(PIEs)을 수행하고 있다. 이에 조사재 시험시설에서 수행하고 있는 하나로 조사캡슐 조사후시험과정 및 구축한 캡슐 해체 시스템을 간략히 기술하였다.

Abstact

The irradiated non-instrumented and instrumented capsules of new developed fuels such as DUPIC, plate shape and U-Mo and new materials less sensitive to neutron radiation embrittlement are applied for getting and confirming the post-irradiation performance data of fuels and materials through PIEs at the Irradiated Materials Examination Facility(IMEF) which was constructed by domestic technology for supporting of research and development of new nuclear fuels and materials. This paper describes the PIEs activities and dismantling system for capsules carried out in IMEF in detail.

1. 서론

개발 중이거나 개발한 신재료 및 신형핵연료는 관련 코드 및 원자력 규제기관인 한국원자력안전기술원(KINS)에서 요구하는 중성자 조사후의 성능과 건전성을 검증 받기 위한 조사후시험(PIEs)이 필수적이다. 따라서 이러한 조건을 만족시키기 위해 하나로 무계장 및 계장 조사캡슐을 이용하여 하나로에서 중성자에 일정기간 조사시킨 후 약 1~3 개월 정도 하나로 저장풀에서 냉각을 한다. 그렇지만 하나로에서 중성자에 조사한 핵연료나 재료는 핵반응이 일어나 강한 방사선을 방출하므로 일반 실험실에서는 취급 및 시험할 수도 없다. 그러므로 조사 핵연료 및 재료들에 대한 조사후시험은 반드시 방사선을 차폐할 수 있는 핫셀(hot cell)과 같은 특수한 시험시설에서나 취급할 수 있다. 국내에서 핫셀시설을 구비하고 조사후시험을 수행할 수 있는 시설은 조사후시험

시설(PIEF : Post-Irradiation Examination Facility)과 조사재시험시설(IMEF : Irradiated Materials Examination Facility)뿐으로 이들 모두는 한국원자력연구소에 위치하고 있으며, 하나로에서 조사한 핵연료 및 재료에 대한 대부분의 조사후시험은 조사재시험시설에서 수행하고 있다.

조사재시험시설은 핵연료 및 원자로 재료의 연구 개발과 건전성 평가를 위해 국내 기술에 의해 건설된 시설로서, 1994년부터 정상 가동하여 핫셀시험을 수행하고 있다. 시설의 규모는 지상 3층 지하 1층으로 연면적은 4,000 m²이고, 핫셀은 연료 시험용 핫셀(M1~M4), 재료 시험용 핫셀((M5a, M5b) 그리고 다용도용 핫셀(M6) 등 3개의 β -v용 핫셀 라인으로 그림 1과 같이 π 자형으로 구성되어 있다. 연료시험용 핫셀 라인에서는 조사장치인 캡슐과 연료다발의 해체 그리고 핵연료의 비파괴 및 파괴시험을 수행하고 있다. 연료의 비파괴시험으로는 외관 검사, X선 검사, 치수 측정, 감마 스캐닝, 와전류 검사 등이 수행되며 파괴시험으로는 블리스터링 시험(blistering test), 연료봉 절단, 조직 시험용 시료 제작 등을 수행하고 있다. 재료 시험용 핫셀 라인에서는 조사재료의 기계적 특성시험으로 충격시험, 인장시험, 피로 시험, 열처리시험 등을 수행하며, 그 외에 물성시험으로 열팽창을 측정시험도 수행하고 있다. 조직시험과 경도시험 그리고 밀도측정은 재료시험용 핫셀라인에 연결되어 설치되어 있는 납셀에서 수행하고 있고, 다용도용 핫셀 라인에서는 DUPIC 연구 과제가 진행 중에 있으며, 이 외에도 차폐형 미소성분 분석기(Electron Probe x-ray MicroAnalysis)와 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscopy)이 특수 실험실(Hot Lab.)에 설치되어 있어 조사된 핵연료와 재료의 미세조직관찰 및 성분 분석시험을 지원하고 있다. 각각의 셀에 대한 특성 및 기능은 표 1과 같다[1].

2. 시험 과정

핵연료 및 재료의 조사후시험은 크게 비파괴시험과 파괴시험으로 구분하여 수행하는데, 각각의 시험은 개발 및 연구부서에서 요구하는 조건에 따라 다를 수 있지만 중성자 조사후의 성능이나 건전성 평가에 요구되는 항목은 비슷하므로 특별한 경우를 제외하고는 다음과 같은 시험과정 및 내용으로 이루어진다.

가. 이송, 절단 및 해체

하나로에서 조사(irradiation)시킨 핵연료다발 또는 핵연료/재료 캡슐에서는 강력한 방사선이 방출되므로 이를 감쇠시키기 위해 하나로의 저장 수조(pool)에서 핵연료의 경우에는 핵분열생성물인 ¹³¹I의 감쇠를 위해 보통 3개월간을 그리고 재료의 경우에는 반감기가 짧은 핵종의 방사능 감쇠를 위해 1개월간을 냉각시킨 후 조사장치에 설치된 부속물을 절단하고 캡슐(연료 조사장치는 rig라고도 함) 본체만을 수송용기(cask)에 담아 조사재시험시설로 운반한다. 반입한 수송용기는 다시 수조에 넣어 핵연료다발 또는 캡슐을 담고 있는 바스켓을 인출한 후 풀과 핫셀사이에 설치되어 있는 버킷 엘리베이터를 사용하여 핫셀 내부로 반입하여 외관을 육안으로 검사한다. 그리고 핵연료다발과 캡슐을 그림 2와 같이 캡슐절단기[2] 또는 CNC Maching Center로 절단 및 해체하고, 시험연료봉과 삽입되어 있는 핵연료/재료 시편을 인출한다. 그러나 일부 시편용 홀더에 산화 등으로 인한 고착현상(jamming)이 발생한 시편은 그림 3과 같은 시편홀더 프레스 기기(specimen holder press machine)[3]를 사용하여 해체한다. 또한 재료시험용 캡슐에는 조사된 중성자의 양(fluecnce)을 계측하기 위한 중성자 모니터가 삽입되어 있으며, 이것들 역시 회수 및 분류하여 핫셀 외부에 설치한 그림 4와 같은 글로브박스(glove box)로 반출하여 2차 해체 및 시편을 분류한다. 그리고 구조물재료의 투과전자현미경(TEM)용 시편을 취급할 수 있는 에어 핀셋(air pincette)[4]도 그림 5와 같이 개발하였다. 특히 CNC Maching Center를 설계, 제작 및 핫셀내 설치함으로써 캡슐의 절단을 좀 더 정밀하게 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 구조물의 기계적·물리적 특성을 시험할 수 있는 시험시편도 제작할 수 있다.

나. 비파괴시험[5]

절단 및 해체를 통하여 인출한 시험연료봉 및 재료 시편에 대해서 우선 비파괴시험을 한다. 비파괴시험항목은 일반적으로 외관 검사, 사진 촬영, 치수 측정 및 감마스캐닝 등이 수행되고 있다.

외관 검사는 원자력재료(핵연료 및 재료)의 조사 거동(irradiation behaviors)을 거시적으로 관찰하기 위해 수행하며, 외관 상태를 육안이나 비디오 카메라로 관찰한 다음 필요하면 사진을 촬영한다.

치수 측정은 원자력재료의 길이와 단면 변화에 대해 일반적으로 측정하며, 핵연료봉인 경우에는 우선 연료봉을 상하로 운동하는 구동벤치에 고정시킨 다음 제조시 연료봉에 표시해 놓은 지점을 좌우에 설치된 두 개의 탐침(probe)을 위에서 아래로 이동시켜서 측정한다. 그리고 다시 탐침을 위에서 아래로 이동시키면서 두 탐침의 변화로부터 직경 변화 및 휨 정도를 측정하며, 하나로 핵연료봉의 경우에는 냉각핀이 원주방향으로 45도로 돌출되어 있어 총 4회 측정 후 평가한다. 재료의 경우에는 정반 및 다이알게이지를 활용하여 측정하고 있다.

감마스캐닝은 핵연료의 원자로내 조사 거동을 분석하고 평가할 수 있는 연소도의 측정과 연소도 분포에 관한 자료를 얻기 위해 수행하며, 모든 핵종에서 발산하는 감마선을 통합하여 측정하는 gross gamma scanning을 한 다음에 개별 핵종으로 ^{137}Cs 의 감마선 강도를 측정하고 있다. 하나로 핵연료의 경우 일반적으로 한 개의 지점에 대한 스펙트럼을 얻기 위해 약 500초 동안 시험을 수행한다.

다. 파괴시험

대부분의 비파괴시험은 장치의 자동화 작업으로 단 기간내에 비교적 많은 양의 시험자료를 생산할 수 있다. 그러나 파괴시험의 경우에는 대부분 수동 작업에 의존하여 시험자료를 획득하므로 시험에 많은 시간과 인력이 소요된다. 파괴시험으로는 금속조직시험, 경도시험, 밀도측정, 충격시험, 인장시험, 파괴인성시험, 3점 굽힘시험, 파단면 SEM관찰 및 성분분석시험을 수행하고 있다.

금속조직시험[6]은 원자력재료의 조사 거동을 분석 평가할 수 있는 많은 정보를 제공하는데, 하나로에서의 조사 온도 또는 실제 도달했던 온도는 각 재료별의 결정립 크기, 성장, 생성 및 성장에 관한 시험자료를 생산 및 해석을 통해 알 수 있다. 특히 하나로 핵연료에 대한 피복관의 표면산화량, 봉단마개 용접부위 건전성, 기포 분포 및 반응층(interfacial layer)의 두께도 본 시험을 통해 획득한다.

경도시험은 재료의 중성자 조사로 인한 취화정도를 확인하는 시험으로서 광학현미경에 부착된 모델명 MICRO-DUROMAT 4000E 미세경도기로 측정한다.

밀도시험은 핵연료의 연소 중에 연료의 고밀화에 의한 체적 감소와 핵분열생성물의 축적에 의한 체적증가에 따른 밀도변화를 측정하는 시험으로서 톨루엔을 침투액으로 사용하는 침투법(immersion method)을 적용하고 있다.

충격시험[7]은 원자로 압력용기의 조사취화량 및 ART(Adjusted Reference Temperature)를 예측하기 위한 시험으로서 일반적으로 재료시편의 흡수에너지, 횡팽창량, 파면을 측정 및 파면사진 촬영을 수행한다. 시험 가능한 온도범위는 $-150^{\circ}\text{C} \sim +300^{\circ}\text{C}$ 이며, 시험장비의 최대용량은 406 J이다.

인장시험[8]은 원자로 압력용기의 조사취화 정도를 확인하기 위한 시험으로서 재료시편의 항복강도, 최대인장강도, 연신율, 진응력 및 단면감소율 등을 측정하며, 시험 온도범위는 $-150^{\circ}\text{C} \sim +300^{\circ}\text{C}$ 이고, 장치의 외관형상은 그림 6과 같다.

파괴인성시험은 원자로 구조재료의 파괴인성을 측정하는 시험으로서 재료시편으로부터 하중-변위-전압강하 곡선에 대한 시험자료를 생산한 후 J-R선도를 획득하여 시편의 균열진전거동 특성 및 균열진전저항 특성치를 해석한다.

3점 굽힘시험은 하나로 핵연료의 경우 집합체의 운반 및 취급 시에 외부 충격에 의한 연료봉의 파손여부를 결정하는 외부 하중의 크기를 결정하기 위한 시험으로 ASTM E290-92 및 E885-90를 참조하여 개발한 시험절차서에 따라 시험을 수행한다. 재료의 경우에는 하중-변위 선도로부터 J-적분값 계산 및 ΔT_{DBTT} 값 등의 계산에 필요한 시험자료를 얻는다.

파단면 SEM관찰시험은 하나로 핵연료의 기공, 반응층의 형상 및 정성분석과 재료의 연성 및 취성 파괴형상 이미지를 획득하기 위해 수행한다. 특히 하나로 핵연료의 파단면 관찰을 그림 7와 같이 하기 위해 시편의 크기를 $\Phi 1.6 \times 1$ mm로 제작할 수 있는 장치(치구)를 개발하여 수행하고 있다.

성분분석시험은 하나로 핵연료의 반응층과 입계내 핵분열생성물의 성분을 분석하고, 원자로 압력용기 재질의 조사전후의 Ni, Cu, P, S 원소에 대한 wt%를 분석한다.

3. 결론 및 건의사항

하나로에서 중성자에 조사된 핵연료 및 재료의 조사후시험을 조사재시험시설에서 대부분 비파괴 및 파괴시험으로 구분하여 수행하였으며, 2개년(2001년 및 2002년) 동안 조사후시험이 완료 및 진행중인 내용은 다음과 같다.

- 국산 축소형 연료(KH96C-004), 손상핵연료(KFC-026), 핵연료 다발해체(KFH-011), 고출력 핵연료(KH99H-001), Hi-MET 핵연료
- 하나로 계장캡슐(99M-01K, 00M-02K, 00M-03K) 및 하나로 활성화과제 캡슐(00M-01U)

하나로에서 조사한 핵연료 및 재료용 캡슐의 조사후시험에 대한 시험과정이 완전하게 수립되었고, 또한 새로운 시험방법에 따른 시편의 형상이 결정되는 경우에도 이를 해체할 수 있는 능력도 충분히 구축되었다.

그리고 조사재시험시설의 효율적인 운영을 위해서는 우선적으로 이용자 그룹의 적극적인 협조가 필요하며, 조사재시험시설 홈페이지(<http://www.kaeri.re.kr/~imef>)를 통해 시설 이용 문의, 시험일정 및 시험내용도 충분히 검토할 수 있도록 해 주었으면 한다.

참고문헌

- [1] 노성기 외, “조사재시험시설 설계 건설”, KAERI/RR-669/87, KAERI(1987).
- [2] 주용선 외, “연구용원자로에서 조사된 캡슐 및 핵연료다발 해체장비 기술 개발”, KAERI/TR-1078/98, KAERI(1998).
- [3] 홍권표 외, “조사재시험시설운영”, KAERI/MR-353/2000, KAERI(2000).
- [4] 홍권표 외, “조사재시험시설운영”, KAERI/MR-368/2001, KAERI(2001).
- [5] 백상열 외, “조사재시험시설 감마스캐닝 시스템”, KAERI/TR-874-97, KAERI (1987).
- [6] 주용선 외, “조사재시험시설 금속조직시험”, KAERI/TR-944/98, KAERI(1998).
- [7] 주용선 외, “감시시험(충격) 하셀시험기술개발”, KAERI/TR-945/98, KAERI (1998).
- [8] 안상복 외, “원자로 감시시편 인장시험 기술개발”, KAERI/TR-1087/98, KAERI(1998).

표 1. Specification and functions of hotcell in IMEF.

Cell	Inside Dimension WxDxH (m)	Wall Thickness (m)	No. of windows	Functions	Major Cell Equipment
M1 Cell	7.0x3.0x6.0	Heavy Concrete 1.2	3	Visual inspection, Eddy current test, Dimensional measurement, Axial gamma scanning, X-ray radiography, HANARO fuel Blistering test	Profilometer, Eddy Current Tester, Gamma Scanning Equipment, X-ray Equipment, Blistering system
M2 Cell	7.0x3.0x6.0	Heavy Concrete 1.2	3	Dismantling of capsule and fuel bundle, Preparation of Mechanical test specimen	CNC Maching Center, Rod Cutter, Electric Discharge Machine
M3 Cell	4.7x3.0x6.0	Heavy Concrete 1.2	2	Preparation of metallography sample, Preparation of EPMA sample	Micro Cutter, Mounting Press, Grinder/Polisher, Periscope
M4 Cell	2.3x3.0x3.0	Heavy Concrete 1.2	1	Specimen storage, Specimen identification	Storage Rack
M5a Cell	7.1x2.0x4.0	Heavy Concrete 0.8	3	Charpy impact test, Heat treatment, Physical properties measurements	Impact Tester, Heating Furnace, Thermal Diffusivity Tester, Dilatometer
M5b Cell	4.8x2.0x4.0	Heavy Concrete 0.8	2	Tensile/compression test, Fatigue test	Dynamic Tensile Tester, Static Tensile Tester, High Scope
M6a Cell	11.7x2.0x4.0	Heavy Concrete 1.1	5	Pellet manufacturing	Pellet manufacturing
M6b Cell	11.7x2.0x4.0	Heavy Concrete 1.1	5	Rod and bundle manufacturing	Rod and bundle manufacturing units
M7 Cell	1.5x2.6x2.65	Lead 0.2	2	Metallography, Density Measurements	Microscope, Micro-hardness Tester, Balance
Hot Lab	-	cold room	-	Chemical composition analysis, Micro-structure Observation	EPMA, TEM

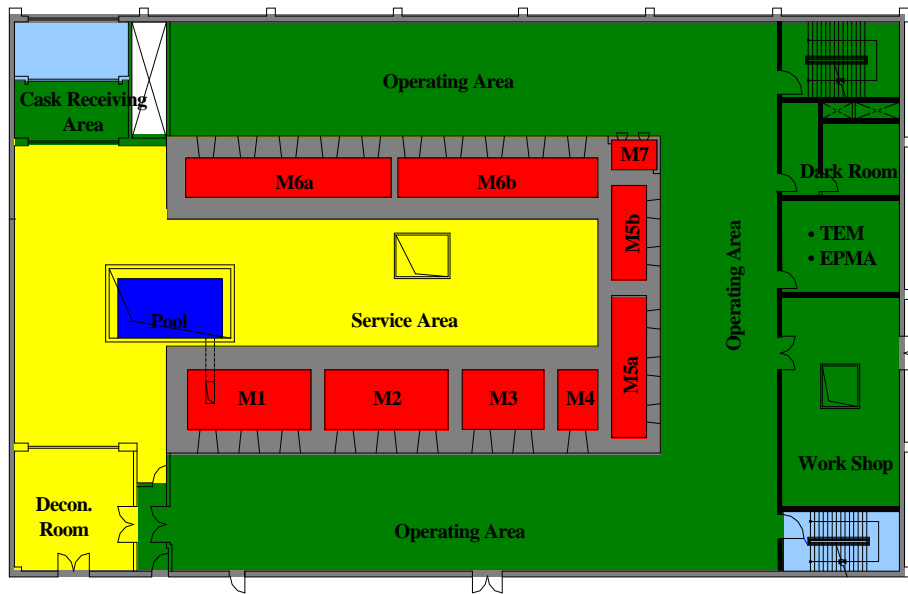


Fig. 1. 조사재시험시설 핫셀배치도(1층 평면도).

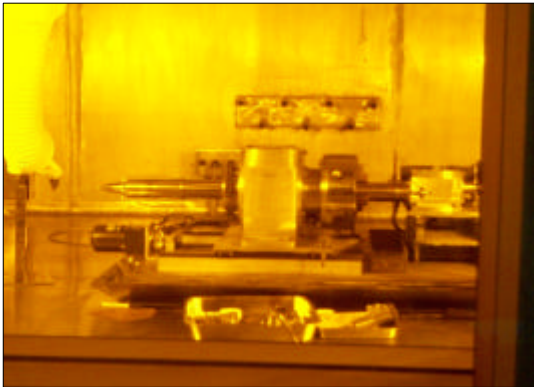


Fig. 2. 캡슐 절단 및 해체.



Fig. 3. 캡슐용 중성자모니터 해체 및 분류용 글로브박스.



Fig. 4. 고착한 시편해체용 시편홀더 프레스 기기.

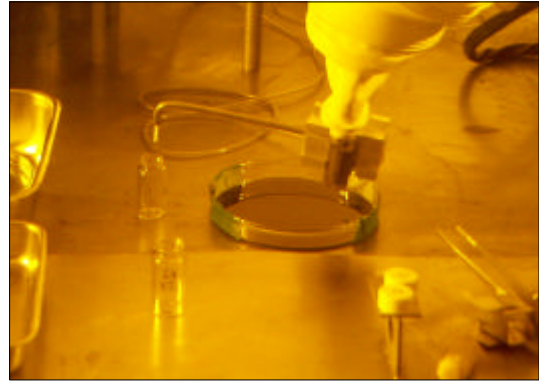


Fig. 5. 투과전자현미경용 시편 취금용 에어 핀셋.

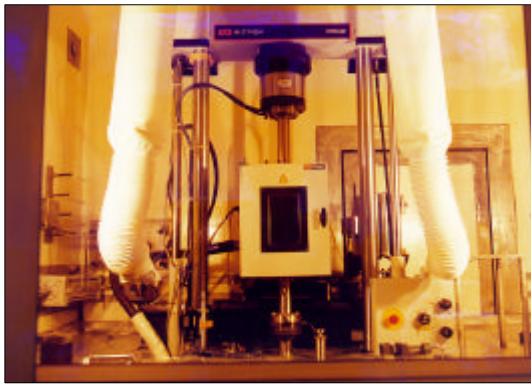


Fig. 6. 동적인장시험기(인장, 3점 굽힘 및 파괴인성).

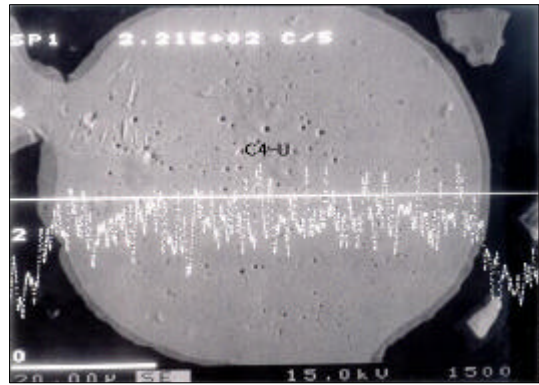


Fig. 7. 원심분말(129-0016-02) SEM사진 및 U-trace.