

하나로 공동이용 활성화사업 재료조사캡슐(01M-05U) 조사후시험

Post-Irradiation Examinations of 01M-05U Irradiated Instrumented Capsule for Materials

주용선, 김도식, 유병욱, 정양홍, 오완호, 백승제, 박대규, 백상열, 김희문, 홍권표

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 공동이용 활성화사업의 일환으로 중성자 조사취화(irradiation embrittlement)에 덜 민감한 핵연료피복관과 원자로 압력용기 등 구조물 재료의 신재료 개발에 대한 연구가 대학을 중심으로 연구용 원자로인 하나로(HANARO) 및 조사장치인 캡슐을 이용해 활발히 진행 중에 있는데, 이들의 중성자 조사후 성능과 건전성을 규제기관으로부터 검증받기 위해서 연구용 원자로인 하나로(HANARO)에서 조사한 계장캡슐(01M-05U)을 2003년 3월 10일 고차폐능 핫셀시설을 지닌 조사재시험시설로 이송하여 캡슐절단 및 해체, 중성자 모니터의 핫셀 외부로의 반출 등의 조사후시험(PIEs)을 약 3 개월에 걸쳐 수행하였다. 캡슐에서 인출한 중성자모니터의 최대 방사선량율은 하단에서 둘째단인 2 단(캡슐을 수직으로 세웠을 때)의 시편홀더에 삽입한 모니터에서 21.6 $\mu\text{Sv/h}$ 이었고, 이는 기존의 계장캡슐의 측정위치와 큰 차이가 없음을 확인하였다.

Abstract

As a part of HANARO cooperation project, the HANARO and irradiation capsule are used for verifying new developed fuel claddings and developing new materials less sensitive to neutron irradiation embrittlement after irradiation by university researchers. The irradiated 01M-05U instrumented capsules, sponsored by HANARO cooperation project, are applied for getting and confirming the post-irradiation performance data through PIEs at the Irradiated Materials Examination Facility(IMEF) during 3 months. The maximum exposure of neutron monitor is measured 21.6 $\mu\text{Sv/h}$ at second specimen holder from bottom and that result is corresponded the location of the former instrumented capsule irradiated at HANARO.

1. 서 론

본 캡슐은 원자로 로심에서 도달할 것으로 예상하는 중성자량(약 $1.9 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$, $E > 1.0 \text{ MeV}$)를 조사시켰으며, 개량한 핵연료피복관 및 원자력재료의 연구 및 개발을 위한 소형 인장시편, 경도시편, TEM시편 등이 포함되어 있다. 각각의 시편들은 다시 총 5개의 구간으로 구분되어 있는 시편홀더의 단면에 0° , 90° , 180° , 270° 간격으로 가공된 홈의 축방향으로 삽입되었고,

또한 중성자모니터도 각각의 시편홀더에 90°간격으로 2 개씩 삽입되었다. 캡슐 외통의 절단에는 산화알루미늄 계열의 휠을 사용하였고, 캡슐을 장착한 물림척 회전속도, 휠축의 회전속도 및 이송량은 각각 2.5 rpm, 200 rpm 및 0.15 mm/min이었으며, 캡슐의 상단과 하단부를 절단하는데 소요된 시간은 약 1 시간이었다. 그리고 캡슐에서 인출한 중성자모니터의 방사선량율은 하단에서 둘째 단인 2 단(캡슐을 수직으로 세웠을 때)의 시편홀더에 삽입한 모니터로써 최대 21.6 $\mu\text{Sv/h}$ 이었고, 이는 핵연료다발의 감마스캐닝의 결과와도 유사함을 알 수 있었다.

본 계장캡슐에 삽입되어 있는 시편 및 중성자모니터들은 높은 방사능을 지니고 있어 이들에 대한 캡슐 절단, 해체, 시편분류, 중성자모니터 해체 등의 조사후시험(PIEs)을 고차폐능 핫셀시설^[1,2]인 조사재시험시설(IMEF)에서 수행하였다.

2. 본 론

가. 캡슐의 시설 및 핫셀 반입

조사재시험시설의 인수구역까지 자중이 약 10 톤인 하나로 핵연료 운반용 캐스크를 사용하여 트럭으로 운반하고, 최대 취급하중이 30 톤인 고정용 호이스트(fixed hoist)를 사용하여 트럭에 실린 캐스크를 운반용 카트(transfer cart)로 하역한 후, 구동모터를 작동시켜 서비스구역(service area)으로 이송 및 반입하였다. 그리고 운반용 캐스크의 상부에 부착되어 있는 충격흡수체를 제거한 후 캐스크 뚜껑의 체결용볼트를 풀고, 캐스크 운반용 치구(pedestal)로 캐스크를 들어 올려 풀로 반입하고, 원격으로 치구를 사용하여 캐스크의 뚜껑을 연 후, 특수공구를 사용하여 캡슐을 담고 있는 바스켓(basket)을 꺼내 버킷 엘리베이터(bucket elevator)의 바스켓에 옮기고, M1 핫셀로 반입하였다. 핫셀로 반입한 캡슐은 인셀크레인(in-cell crane) 및 원격조종기(master-slave manipulator)를 사용하여 바스켓에서 꺼낸 후 작업대(working table)위에 올려놓았다. 일련의 작업 절차 및 내용을 그림 1에 나타내었다.

나. 외관검사

캡슐을 M1 핫셀에 설치한 다목적용 벤치(multi-purpose bench)에 수직으로 거치한 후 벤치를 상하 이송 및 회전시켜 캡슐의 표면, 하단부의 로드 팁(rod tip)과 하부안내핀(bottom guide), 하부안내핀 스프링(bottom guide spring), 그리고 상부의 절단면을 육안 및 쌍안경으로 관찰하였다. 캡슐 표면에는 원자로 내에서 발생할 수 있는 긁힌 자국 등을 전혀 확인할 수 없었고, 하단부의 로드 팁, 특히 하부안내핀의 절단 혹은 휨 등의 외부로부터의 충격으로 인한 결함을 확인할 수 없었다. 그러나 상부의 절단면에는 절단 후의 틈새를 육안으로 뚜렷하게 확인할 수 있었으나, 원자로 및 조사재시험시설의 풀물 등이 스며들었는지 여부는 확인할 수 없었다.

나. 캡슐의 절단

해체셀(dismantling cell)인 M2 핫셀에서 캡슐의 절단 및 해체를 수행하였다. 캡슐 외통의 단면 형태 및 재질은 원형 파이프 및 스테인레스 강이며, 캡슐의 상부 및 하단부에 표시되어 있는 절단 지점을 캡슐절단기^[3]를 사용하여 절단하였다. 사용한 절단휠의 재질은 산화알루미늄 계열이고, 캡슐을 장착한 물림척은 2.5 rpm으로 회전시켰으며, 휠축의 회전속도 및 이송량은 200 rpm 및 0.15 mm/min이었고, 캡슐의 상단과 하단부를 건식으로 절단하는데 약 1 시간 소요되었다.

다. 해체 및 시편분류

캡슐 외통의 하단 및 상하단을 절단 후 외통내부에 열전대(thermo-couple)와 히터선(heater line)으로 단단하게 결합되어 삽입한 시편홀더와 단열재를 분리하기 위해 캡슐절단기에 다시 장착한 후 열전대 및 히터선을 캡슐 상부로부터 절단하였다. 열전대 및 히터용 선을 홀더 및 단열재에 고착시키는 코킹작업이 불완전하여 구성품의 강성(stiffness)이 작아져서 해체하는데 기존의 계장캡슐보다 작업성이 약간 저하되었다. 왜냐하면 캡슐 외통에서 분리된 내장물을 그림 2와 같이 캡

절단기의 물림척에 물린 후 홀더 및 단열재에 각각 코킹되어 있는 열전대 및 히터용 선을 휠로 절단하기 위해서 물림척을 회전시켰을 때 편심되게 회전함으로 인해 절단휠에 커다란 하중이 가해졌기 때문이다. 절단 후 홀더 및 단열재를 원격조작기로 취급하여 캡슐내의 위치별로 표시된 배스에 담았는데, 해체된 각각의 홀더 및 단열재에는 캡슐내에서의 위치를 확인할 수 있는 어떠한 표시도 각인된 것을 확인할 수 없었다. 그래서 이들의 캡슐내의 위치를 정확하게 유지하기 위해서 캡슐 상부로부터 꺼내어지는 순서대로 제작도면과의 일치여부를 확인하는 절차를 수행하였고, 이러한 절차가 완료된 시편들은 혼합되지 않도록 각 단별의 트레이(tray)에 담아 분류하였다. 일련의 작업과정을 그림 2에 나타내었다.

라. 중성자 모니터 절단, 해체 및 시편분류

본 캡슐에는 2 종류의 중성자 모니터가 삽입되어 있었다. 이는 캡슐의 중성자 조사량을 평가하기 위한 것으로서, 제원이 각각 $\Phi 2.5 \times 15$ mm 및 $\Phi 3.8 \times 17.7$ mm이다. 그런데 이들의 모니터 캡슐은 핫셀의 원격조작기를 갖고 취급하기 곤란함은 물론 절단 및 해체가 거의 불가능하다. 따라서 이를 M5a 핫셀 지붕 상단에 설치한 글로브박스(glove box)로 인출한 후 글로브박스내에서 작업자가 직접 중성자모니터를 잡고 절단 및 해체 작업을 수행하였다. 캡슐용 중성자 모니터 중에서 제원이 $\Phi 2.5 \times 15$ mm인 것은 한쪽 끝단을 니퍼(nipper)로 절단한 후, 변형된 끝단을 다시 롱노우즈(long nose)로 원형에 근사하도록 복원시키고, 그리고 흔들어 원통내부에 삽입한 제원이 $\Phi 0.7 \times 13$ mm인 중성자 모니터를 해체하였다. 해체한 중성자 모니터는 캡슐 위치에 대한 정보를 정확하게 유지하기 위해서 별도로 준비한 바이알(vial)에 담아 분류하였다. 반면에 제원이 $\Phi 3.8 \times 17.7$ mm인 것은 한쪽 끝단을 니퍼(nipper)로 절단한 후, 변형된 끝단을 다시 롱노우즈(long nose)로 원형에 근사하도록 복원 또는 원통을 찢어 원통에 삽입한 알루미늄 막대기 2 개 꺼내고 나서 샤피어(sapphire) 중성자 모니터를 2 개 또는 3 개씩 해체 및 분류하였다. 이것 역시 캡슐 위치에 대한 정보를 정확하게 유지하기 위해서 별도로 준비한 바이알(vial)에 담아 분류하였다. 작업자가 중성자 모니터 1 개를 해체하는데 약 15분 소요되었으며, 작업과정은 그림 2에 나타내었다. 각각의 중성자 모니터별 방사선량 및 운반용 용기의 표면에서의 방사선량을 측정하였고, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

마. TEM시편용 블록 해체 및 시편분류^[4]

TEM시편시편을 담고 있는 블록 9 개(선문대 : 2 개, 연구소 : 3 개, 인하대 : 2 개, 충북대 : 2 개)를 M5a 핫셀에서 그림 3의 프레스 머신 및 송곳을 사용하여 해체한 후 각각의 캡슐로부터 그림 4와 같은 에어핀셋(사용압력 : 0.15 ~ 0.20 MPa)을 활용하여 $\Phi 3 \times 100$ μ m 크기의 시편 총 118개를 인출 및 분류하여 28개의 투명한 바이알(vial)에 넣어 분류 및 저장하였다. 그리고 28개의 바이알 중에서 1개(용기번호 ⑧, TEM 및 EPMA시편 각 3개)를 임의로 선택한 후 핫셀내부에 설치되어 있는 핫셀감마모니터로 방사선량을 측정하였는데 최대값이 700 μ Sv/h이었다.

3. 결론 및 건의사항

캡슐의 조사후시험 중 각종 시편들에 대한 시험을 제외한 캡슐의 외관검사, 절단 및 해체, 그리고 중성자 모니터의 핫셀외부의 반출 등이 성공적으로 수행하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

- 1) 캡슐 외통의 절단에는 산화알루미늄 계열의 휠을 사용하였고, 캡슐을 장착한 물림척 회전속도, 휠축의 회전속도 및 이송량은 각각 2.5 rpm, 200 rpm 및 0.15 mm/min이었으며, 캡슐의 상단과 하단부를 절단하는데 소요된 시간은 약 1 시간이었다.
- 2) 캡슐에서 인출한 중성자모니터의 방사선량은 하단에서 둘째단인 2 단(캡슐을 수직으로 세웠을 때)의 시편홀더에 삽입한 모니터로서 최대 26.3 μ Sv/h 이었고, 이는 핵연료다발의 감마스캐닝의 결과와도 유사함을 알 수 있었다.
- 3) 특히 기존의 캡슐보다 시편홀더, 각종 시편 및 중성자모니터 조립이 매우 양호하게 이루어져

많은 시간과 인력을 투입하지 않고 쉽게 수행되었다.

- 4) 미세조직관찰용 TEM시편에 대한 해체 및 분류작업을 핫셀 내부에서 0.15 ~ 0.20 MPa의 압력을 사용하는 에어핀셋(air pincette)으로 처리하였다.

그러나 캡슐의 중성자조사 평가에 사용할 중성자모니터의 크기 및 내용물은 핫셀 작업의 특성에 알맞게 개선되어야 할 것으로 판단되며, 이러한 내용은 차기 계장캡슐의 설계 및 제작에 반영하여 효율적이고도 경제적인 조사후시험을 수행하는데 많은 도움이 될 것이다.

4. 참고문헌

1. 박대규 외, “핫셀설계기술”, KAERI/AR-468/97, 한국원자력연구소(1997).
2. 노성기 외, “조사재시험시설건설”, KAERI/RR-880/89, 과학기술처(1989).
3. 주용선 외, “연구로원자로에서 조사된 캡슐 및 핵연료다발 해체장비 기술개발”, KAERI/TR-1078/99, 한국원자력연구소(1999).
4. 홍권표 외, “조사재시험시설운영”, KAERI/MR-368/2001, 한국원자력연구소(2001)

표 1. 캡슐용 중성자 모니터 방사선량을 측정결과

시편홀더 번호	시편고유번호	수량 (개)	방사선량을 (μ Sv/h)	비고 (Vial 번호)
10	44-1A	1	1.3	S1
	44-1B	1	21.3	T1
12	44-2A	1	1.2	S2
	44-2B	1	26.3	T2
14	44-3A	1	1.92	S3
	44-3B	1	21.6	T3
16	44-4A	1	2.26	S4
	44-4B	1	19.3	T4
18	44-5A	1	2.26	S5
	44-5B	1	16.9	T5

* S : Sapphire, T : Ti/Fe/Ni



캐스크 반입



캐스크 작업



캐스크 풀 반입



캡슐 핫셀반입(1)



캡슐 핫셀반입(2)



캡슐 바스켓 인출

그림 1. 조사시험용 계장캡슐(00M-02K)의 시설 및 핫셀내 반입 작업.

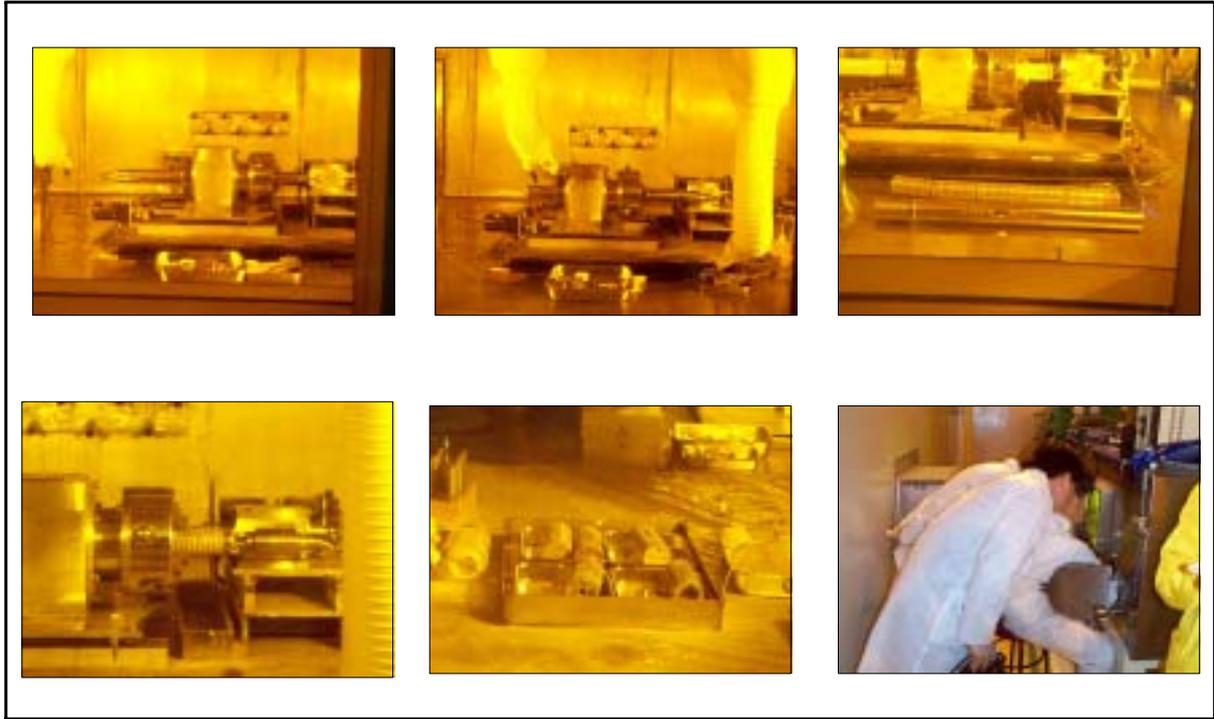


그림 2. 조사용 계장캡슐(01M-05U) 절단 및 시편분류 작업사진(중성자모니터 분류 포함).



그림 3. 고착한 시편해체용 시편홀더 프레스 기기.



그림 4. 투과전자현미경용 시편 취급용 에어 핀셋.