

하나로 계장캡슐을 이용한 원자로 재료의 중성자조사시험

Irradiation Tests of Reactor Materials Using a HANARO Instrumented Capsule

주기남, 맹완영, 김봉구, 채희택, 안국훈, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

최초의 하나로 재료조사시험용 표준형 계장캡슐(97M-01K Capsule)이 설계·제작되어 하나로 CT 및 IR2 조사시험공에서 조사시험되었다. 캡슐의 조사시험 목적은 하나로 조사시험공의 핵적 특성을 측정하며, 또한 향후 원자로 재료시험용 캡슐의 설계에 필요한 자료들을 얻기 위해서이다. 캡슐에는 조사시편을 중심으로 하여 각기 독립적으로 작동되는 전기 히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 12개의 열전대 및 4 세트의 Fe-Ni 및 Al-Co 중성자 모니터가 들어 있어 조사시험 동안의 캡슐 각 부위의 온도변화 및 조사후 중성자 조사량 측정에 각기 사용된다. 조사시편의 온도에 미치는 캡슐 설계변수들의 영향을 보기 위하여, 20MW까지의 원자로 출력, 캡슐내 He 압력, 그리고 전기히터의 용량에 따른 캡슐 각 부위와 조사시편의 온도 변화를 측정하였으며, 전산코드를 이용하여 계산된 이론치와 비교 분석하였다. 또한, 본 연구에서는 개발된 캡슐의 성능을 향상시키기 위한 캡슐 설계상의 기술적인 보완점들에 대해서도 논의하였다.

Abstract

The first instrumented capsule (97M-01K) was designed, fabricated and successfully irradiated in the CT and IR2 test holes of HANARO. The purposes of the capsule were to evaluate the nuclear characteristics of the test holes and to obtain design data for nuclear reactor material capsule. There are 5 stages having specimens and independent electric heaters in the capsule mainbody. 12 thermocouples and 4 sets of Fe-Ni and Al-Co Neutron Fluence Monitors were also inserted in the capsule to measure the temperatures of the capsule parts and thermal/fast neutron fluences, respectively. The effects of reactor power up to 20MW, He pressure in the capsule, and heater power on the temperatures of the specimens were investigated and compared to the theoretical values obtained using computer programs. In this paper, several technical points in designing HANARO material capsules were also discussed to improve performance and capability of the developed capsule.

1. 서론

한국원자력연구소 소재 다목적 연구로인 하나로를 이용하여 주요 원자력 재료들의 중성자 조사효과 평가를 위한 계장캡슐 국산화 개발연구가 수행되어 왔다 [1,2]. 하나로를 이용한 주요 재료 조사시험 시설의 하나인 캡슐 (Capsule) 조사시험에서는 원자로 압력용기 재료의 경우, 하나로 출력 30MW에서 약 6일간의 조사시험만으로 재료가 실제 원자로에서 수명 말기까지 받을 중성자 조사량인 $7.26 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 에 도달하게 되므로 단기간에 관련 재료 및 구조물의 조사성능 예측 및 평가를 가능하다. 또한, 캡슐 설비는 사용자의 다양한 조사조건 요구에 적용될 수 있는 점으로 인해 가장 유용한 조사 시스템으로 평가되고 있다 [3].

이러한 필요에 따라 당 연구소에서는 하나로를 이용한 재료 조사시험용 계장 캡슐을 순수 국내 기술력으로 개발하기 위하여 조사시험용 계장캡슐의 설계·제작·검사에 필요한 기술을 자체적으로 개발하였으며, 캡슐 mock-up을 설계·제작하여 노외 기술적인 평가작업을 완료하였다 [1,2]. 본 연구를 통하여 하나로 조사시험공의 핵적특성 측정 및 원자로 압력용기 재료의 조사특성 연구를 위한 최초의 조사시험용 계장캡슐(97M-01K)을 제작하였다. 그리고 제작 캡슐에 대해 하나로내 장입시의 진동특성 관련 건전성 평가 및 조사성능 평가를 전산 코드를 이용하여 이론적으로 수행하여 조사시험에 대한 관련기관의 인허가를 획득한 후 [4], 하나로에 설치하여 냉각수 흐름속에서의 내진 건전성 평가를 마친 후, 조사성능 시험을 수행하였다.

캡슐의 조사성능시험은 하나로 중심의 CT 및 IR2 시험공에서 수행되었으며, 추후 실제 이용자 요구 캡슐의 설계에 필요한 기초 자료들을 얻기 위하여, 원자로의 단계별 출력 증가 (20MW까지), 캡슐내 He 압력, 그리고 전기히터의 용량 등에 따른 캡슐 각 부위의 온도 변화를 측정하였으며, 이 결과와 전산코드를 이용하여 계산한 이론치를 비교 분석하였다. 또한, 조사시험에서 도출된 캡슐 설계상의 보완점인 시편 조사온도에서의 이론치와 측정치 간의 차이, 캡슐 반경 및 축 방향으로의 시편 온도의 편차, 캡슐내 시편의 체적 이용률 향상 등에 대해서도 논의하였다.

본 연구를 통해 개발된 조사시험용 캡슐은 1차적으로 국산 원자로 압력용기재의 조사시험에 사용될 예정이며, 향후 원자로 핵심재의 노내거동 예측을 통한 원자로 건전성 평가 및 수명예측, 신소재 및 핵연료의 개발 등 여러 목적으로 사용될 예정이다.

2. 조사시험용 캡슐 및 시편

하나로를 이용한 최초의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐인 97M-01K Capsule의 개략도는 그림 1과 같다. $\phi 60\text{mm}$ 의 STS 316 재질의 캡슐본체 내부는 5단으로 나뉘어지고, 각 단 중심에 있는 조사시편의 온도는 하나로 출력조건에서 캡슐내 He 진공도의 조절로 1차 조절되며, 각 단별 독립적으로 작동하는 전기히터로 최종 조절되며, 내부에 장입된 열전대를 통하여 조사시험과 동시에 캡슐 조절장치에 기록된다. 캡슐내에는 고속중성자 및 열중성자 조사량 평가를 위한 Fe/Ni, Al/Co Fluence Monitor(F/M)가 각각 1, 3, 5단의 Al Holder에 장입되어 시편의 정확한 조사량 평가에 사용될 예정이다.

97M-01K Capsule에는 각 단 중심부에 조사시편이 장입되어 있는데, 1, 3, 5단에는 조사 시험공의 핵적 특성 평가용 stainless steel 304 round bar 시편이 장입되었으며, 2, 4단에는 한국중공업(주)에서 제작되어 현재 국내 원자로에 설치되어 사용되고 있는 국산 압력용기 재질인 SA508-3 재료의 Sharpy, Tensile,

(Small) Punch, MBA, TEM, Round Bar 등의 시편들이 장입되었다 [5,6].

캡슐은 대우정밀(주)에서 제작되었으며, 캡슐제작 기술시방서에 의거하여 제조 결함없이 설계대로 제작되었음이 확인되었다 [7].

3. 하나로 조사시험

97M-01K 캡슐을 하나로 노심인 CT 및 IR2 시험공에 설치하여 조사시험을 수행하였다. 이를 위하여 먼저 재료 조사시험용 캡슐을 하나로 시험공에 장입하여 조사시험을 수행하는 과정에 대한 캡슐 건전성을 입증하여 관련 규제기관의 인허가를 취득하였다 [4]. 또한, 계장캡슐을 이용하여 하나로에서 조사시험을 수행하기 위해서 필요한 관련장치들인 캡슐고정장치, 캡슐조정장치, 캡슐연결장치인 Junction Unit 등을 이용하였다. 캡슐을 먼저 조사 시험공 하단부에 고정된후 노심 침니 상부에 침니고정틀을 이용하여 보호관을 1차 고정시킨 후, 보호관 상부를 Robot Arm 장치를 이용하여 2차 고정시켰다. 1차적으로, 캡슐이 조사시험 동안 캡슐 주위의 냉각수 흐름에 따라 가지는 진동 특성을 평가하기 위하여, 원자로 영 출력에서의 진동평가 시험을 수행하여 관련 요건을 만족함을 입증하였다 [8].

조사시험은 캡슐 및 관련 장치들의 정상 작동상태를 확인한 후 향후 캡슐 이용자들의 요구에 따른 조사시험용 캡슐설계에 필수적인 자료들을 얻기 위하여 원자로 출력, He 진공도, 그리고 히터 출력 등의 변수에 따른 조사시험을 그림 2와 같이 수행하였다. 원자로 출력은 5MW 간격으로 20MW까지 단계적으로 증가시켰으며, 캡슐내 He 압력은 1기압~0.01기압 범위에서 조절하였고, 전기히터는 0~117 KW/cm 범위에서 조절하며 캡슐 각 부위의 온도 변화를 측정하였다.

4. 조사시험 결과분석

그림 2는 원자로 출력, 캡슐내 He 진공도, 히터 출력 등 조사시험 조건의 변화와 이에 따른 캡슐 각부위의 온도변화 및 냉각수 온도 변화를 열계산 코드 이론치를 사용하여 종합하여 나타낸 그림으로 캡슐 각 부위의 조사온도는 원자로 출력이 증가할수록, 캡슐내의 He 압력이 낮아질수록, 전기히터의 출력이 커질수록 증가하는 경향을 실제 조사시험에서 확인할 수 있었으며, 전체 조사시험 캡슐 설비는 정상적으로 작동하였다. 이들 실험변수에 따른 캡슐 각부의 온도는 다음과 같이 실측치와 비교하여 분석되었다.

그림 3은 하나로 출력 20MW시의 CT 시험공에서, 캡슐내 He 압력이 1.0 및 0.4 기압일 때의 캡슐 중심부인 3단에서 측정된 반경방향으로의 온도분포를, 열계산 전산코드인 GENGTC를 이용하여 계산한 이론치와 비교하여 나타낸 그림이다. 두 값 모두 시편 중심에서 반경 방향으로 온도가 감소하는 전체적인 경향은 일치하나, 측정치와 이론치 간에는 어느 정도 차이를 보이고 있다. 이러한 경향은 다른 단에서도 동일하게 나타나고 있다.

캡슐내에 장착된 전기히터 효과에 있어서는 전반적으로 계산치와 유사한 경향을 보여 출력이 증가함에 따라 시편온도가 증가하였다. He 압력이 일정한 조건에서 히터가 최대출력(117W/cm)으로 가동될 때, 약 12~33℃ 정도 시편온도가 상승하였는데, 일반적으로 시편의 온도가 높을수록, He 압력이 낮을수록 그 증가폭이 감소하는 경향을 보이고 있다. 캡슐내 He 압력의 효과에 있어서, He 압력이 낮아질수록 시편 온도가 올라가는 경향은 이론과 일치한다. 그러나 일반적으로 주요 사용 범위로 추정되는 1~0.4 기압에서의 온도변화는 이론치인 80~90℃에 비해 훨씬 작은 온도 변화를 보이고

있다. 이러한 실측치와 이론치간의 차이에 대해 추정되는 원인으로는 열계산코드의 한계 및 model 입력자료 등의 부정확성, gamma heating rate나 캡슐 표면에서의 열전도도의 부정확성, 제작상의 부품간 gap 공차 및 열전대 설치 위치상의 오류 등 여러 각도로 추정되고 있으며, 현재 원인 파악을 위해서 추가적인 결과분석 및 보완시험을 계속하고 있다.

한편 IR2 시험공에서의 조사시험 결과는 모든 시험변수 조건에서 CT 시험공과 거의 유사한 경향을 보였으나, 시편의 조사온도는 전반적으로 CT 시험공에서보다 약 15~35°C 낮은 값을 보였다.

97M-01K 캡슐이 CT 시험공에서 조사시험된 후, 각 단에 대한 중성자 조사량을 이론적으로 계산하였다. 0.821MeV 이상의 고속중성자량은 노심 중심에서 약 13cm 하부 위치에서(캡슐 4단에 해당) 최대값인 $3.4 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 을 보이며, 캡슐 최상단부인 1단 끝의 경우 약 $9.2 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 의 최소값을 보이고 있다 [9]. IR2 시험공에서의 조사량도 유사한 정도일 것으로 추정되므로 실제 원자로 압력용기 재료가 실제 원자로에서 수명말기까지 받을 중성자 조사량인 $7.26 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 에는 원자로 출력에 따라 약간의 차이는 있으나 약 1주일의 조사시험 기간안에 도달할 수 있음을 보여준다. 한편 냉각수와 접촉하는 부위인 STS 계열 재료들은 1.0MeV의 고속중성자 조사 환경에서 약 $1 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 의 사용제한치 내에서는 조사안전성을 유지하는 것으로 알려져 있다 [10]. 따라서, 97M-01K 캡슐의 경우, 하나로 중심의 CT, IR2 시험공에 장입되어 각각 $2.10 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 와 $1.95 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 의 고속중성자속(>0.82 MeV)에 놓이게 되므로, 약 550일 정도까지의 조사시험 기간동안 재료 건전성을 유지할 것으로 판단된다. 향후 더욱 정확한 시편의 조사량 분석 작업이 캡슐의 IMEF 시설에서의 해체후 시편내 F/M 분석을 통해 수행될 예정이다.

5. 향후 조사시험 계획

하나로 CT 및 IR2 시험공에서 조사시험된 97M-01K 캡슐은 현재 하나로 작업수조내에 임시보관중이며, 향후 캡슐절단장치를 사용하여 절단한 후, 캡슐운반을 위한 이송용 Cask에 넣어 IMEF 시설로 이송하여 해체할 것이다. IMEF 시설내에서 조사 시편의 시험 및 F/M의 중성자 평가 등의 작업도 수행할 예정이다.

한편, 97M-01K 캡슐의 하나로 조사시험을 통해 축적된 database를 보완하기 위하여 다음과 같은 캡슐이 설계·제작되어 조사시험될 예정이다. 먼저 하나로 원자로 출력 및 조사시험공의 특성 파악을 위한 무게장캡슐을 설계·제작중이다. 또한, 캡슐 각단의 길이 및 반경 방향의 온도특성을 파악, 히터용량, 시편 및 열매체간의 gap 설계변수 영향, 그리고 캡슐내 시편 체적 이용율 향상 등의 목적으로 한 계장캡슐 등을 계획하여 현재 설계·제작중이다.

6. 결 론

1. 하나로 조사시험공 특성과악 및 원자로 압력용기재의 조사시험을 목적으로 한 최초의 하나로내 재료 조사시험용 계장캡슐인 97M-01K 캡슐을 설계·제작하여, 원자로 출력 20MW까지 CT 및 IR2 조사시험공에서 성공적으로 조사시험을 수행하였다.
2. 조사시험을 통하여 캡슐설계에 주요자료로 사용될 조사시험공의 핵적특성 및 조사시편의 온도에 영향을 미치는 원자로 출력, 캡슐내 Helium 진공도, 전기히터 출력 등의 효과를 체계적으로 분석할 수 있었다. 조사시험 변수 효과로 원자로 출력은 20MW까지 상승함에 따라 시편온도는 약 167~190°C 상승하였으며, 이때

캡슐내 He 진공도를 1~0.05기압 범위로 조절함에 따라 시편온도는 약 65℃ 변화하였으며, 히터 출력을 0~117W/cm 범위로 조절하여 약 12~33℃의 조사시편 온도 상승을 얻을 수 있었다.

- 본 조사시험을 통하여 조사시편 온도의 이론치와 측정치 간의 차이, 캡슐 반경 및 축 방향으로의 시편 온도의 차이, 조사시편 온도조절성능 향상, 캡슐내 시편의 체적 이용률 향상 등 향후 하나로를 이용한 원자로 재료의 조사시험용 캡슐설계에 있어 보완되어야 할 기술적 사항들을 도출하였다.

Acknowledgement

본 연구는 1998년도 과학기술부의 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1510/94 (1995).
- 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1760/96 (1997).
- JMTR Irradiation Handbook, JAERI, 1994.
- 강영환외, 재료 조사시험용 캡슐 및 관련설비의 안전성 분석보고서, KAERI/TR-985/98, (1998).
- 주기남외, 하나로 표준형 계장캡슐 설계도, IC-DW-CAP-97-001(1) (1997).
- EMR Report (End of Manufacturing Report : HANARO 표준형 계장 캡슐 (97M-01K)), FA-KA-970826, 대우정밀(주), (1997년 6월).
- Unpublished documents on the JMTR design criteria.
- 주기남외, 하나로 조사시험용 계장캡슐 제작 및 조사성능 예측, 한국원자력학회 '97 추계학술대회 논문집, 409-414 (1997년).
- 이영신, 하나로 진동시험에 따른 구조건전성 해석, 충남대학교, 1998년, 5월.
- 이충성, 계장캡슐의 중성자조사량, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-98-034, 1998년6월.

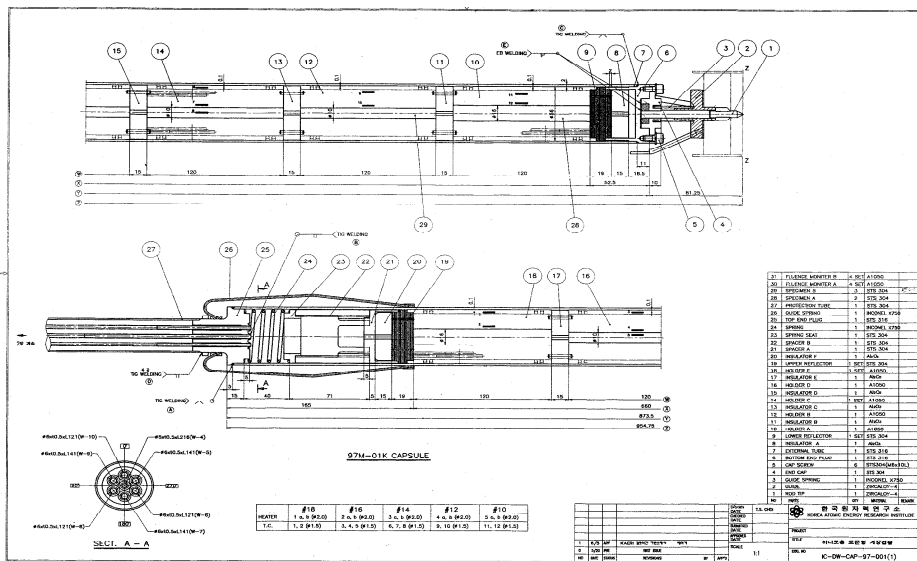


Fig.1 Drawing of HANARO instrumented capsule (97M-01K)

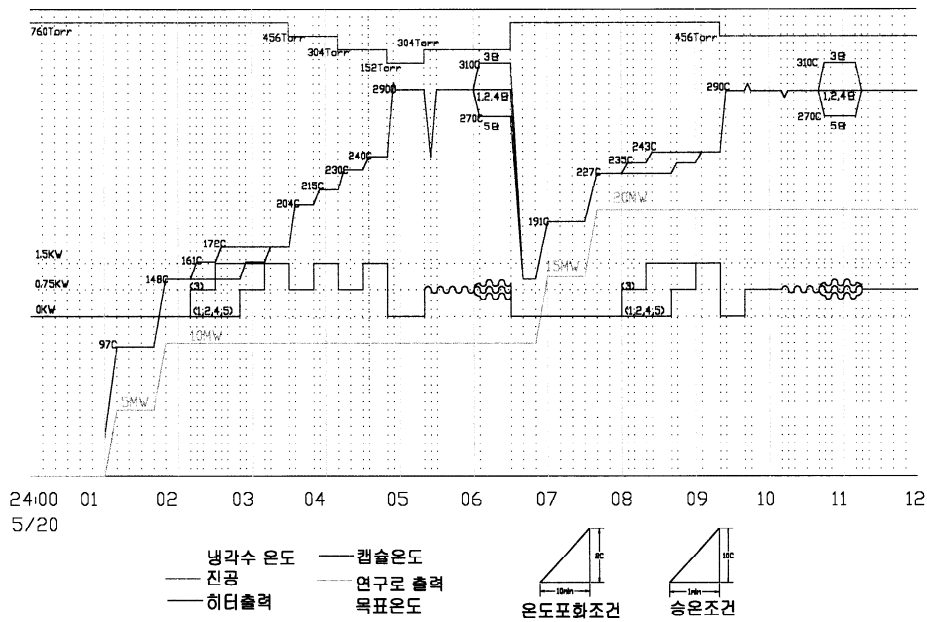


Fig.2 Details of Irradiation Test of 97M-01K Capsule in HANARO CT Hole.

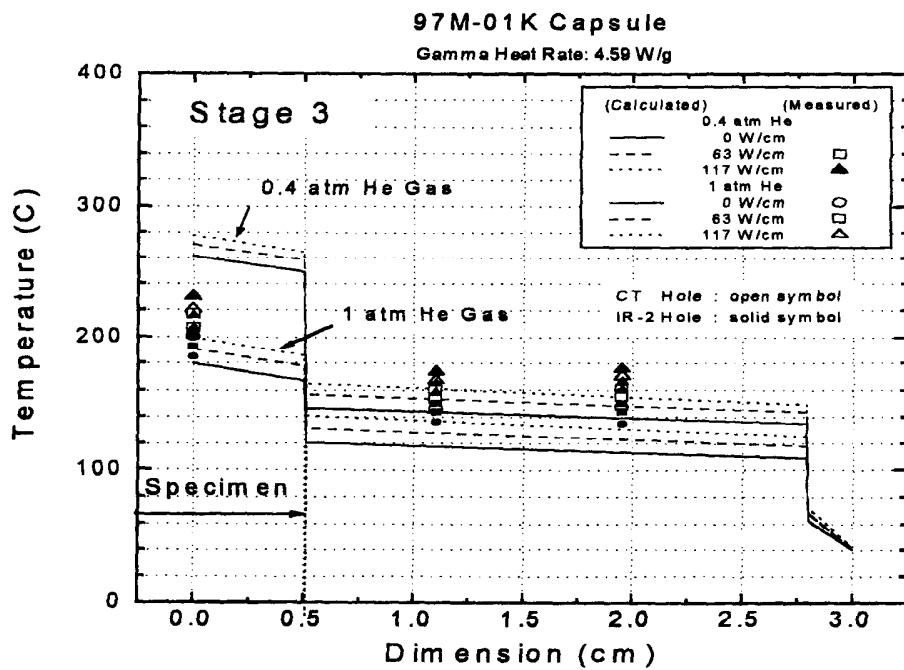


Fig. 3 Measured and calculated temperatures in radial direction of 97M-01K capsule inserted in CT hole of 20MW HANARO.