

원자로 압력용기 재료의 하나로 계장캡슐(98M-02K) 조사시험

Irradiation of Reactor Pressure Vessel Materials Using HANARO Instrumented Capsule (98M-02K)

주기남*, 김봉구, 박승재, 신운택, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국형 PWR 원전의 원자로 압력용기(RPV) 재료를 하나로 계장캡슐 (98M-02K)를 이용하여 조사시켰다. 한국중공업에서 제작되어 영광 4,5호기 및 울진 4호기에 사용된 RPV base 및 용접재료로 round compact tension, charpy insert, PCVN(pre-cracked V-notch charpy insert), small tensile, SP(small punch), 그리고 MBE(magnetic Barkhausen effect) 시편을 포함한 여러 형태의 시편들이 제작되어 캡슐에 장입되었다. 시편들은 하나로 CT 시험공에 설치되어 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 조사온도로 $0.86 \sim 2.60 \times 10^{19}$ (n/cm^2)의 고속중성자 ($E > 0.82 \text{ MeV}$) 조사량까지 조사되었다. 조사된 시편들은 국산 RPV 재질의 조사성능 평가에 활용될 예정이며, 본 시험을 통해 얻어진 경험과 축적된 기술은 향후 원자력 재료들의 조사성능 연구에 활용될 예정이다.

Abstract

The RPV(Reactor Pressure Vessel) material used in Korean PWR nuclear reactors was irradiated in HANARO by using an instrumented capsule (98M-02K). Various types of specimens such as round compact tension, charpy insert, PCVN(pre-cracked V-notch charpy insert), small tensile, SP(small punch), and MBE(magnetic Barkhausen effect) specimens were inserted into the capsule. They were made of RPV base and weld metals that were fabricated by HANJUNG Co, and were used in Yonggwang Units 4,5 and Ulchin Unit 4 reactors. The specimens were irradiated in the CT test hole of HANARO at $290 \pm 10^\circ\text{C}$ up to the fast neutron fluence ($E > 0.82 \text{ MeV}$) of $0.86 \sim 2.60 \times 10^{19}$ (n/cm^2). The irradiated specimens will be tested to evaluate the nuclear irradiation performance of the Korean nuclear RPV materials. Previously obtained experience and established technology of HANARO standard instrumented capsule will be applied on subsequent nuclear material irradiation researches.

1. 서 론

연구로를 활용한 캡슐조사시험은 다양한 운전조건을 구현할 수 있으며 조사 시험 변수를 조절할 수 있고 중성자속이 높아 시험 기간을 크게 단축 할 수 있는 장점이 있다. 실제 주요 원자로 노심재료인 원자로압력용기(RPV) 재료의 경우 캡슐 시스템을 활용해 실제 원자로 사용온도인 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 조사온도를 구현할 수 있으며, 30MW의 하나로 출력 기준으로 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 가능케 하는 유용한 설비이다. 따라서, 한국원자력연구소에서는 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장캡슐 국산화 개발연구를 수행하여 왔다 [1,2,3].

현재 한국중공업(주)에서 국산화 제작되어 한국표준형 가압경수형원자로인 영광3호기 이후 국내의 전 경수형 원자로에 사용되고 있는 원자로압력용기의 경우 아직 수명말기까지의 조사손상 건전성이 충분히 입증되지 않은 상태이다. 따라서 개발된 조사시험용 표준형 계장캡슐을 활용하여 압력용기 재질의 조사손상 건전성을 입증하고자 본 연구를 수행하여 왔다. 이러한 필요에 따라 당 연구소에서는 1차적으로 조사시험용 계장캡슐의 설계·제작·검사에 필요한 기반기술을 자체적으로 개발하여, 최초의 조사시험용 계장캡슐인 97M-01K 캡슐을 설계·제작하여 조사시험한 바 있다 [4,5]. 이를 통하여 캡슐설계에 필수적인 하나로 조사시험공 핵적 기초특성 자료 및 캡슐 시험 환경변수에 따른 캡슐 특성자료를 확보할 수 있었다. 또한 확보된 경험과 기술을 바탕으로 하여 국내 산업체인 한국중공업(주)에서 제작되어 한국형 표준 원자로에 사용되고 있는 원자로압력용기재의 조사성능을 평가하기 위한 조사캡슐인 98M-02K 캡슐을 설계·제작하였다 [6].

캡슐내에는 한국중공업에서 제작되어 영광 4,5호기 및 울진 4호기에 사용된 RPV base 및 용접재료로 제작된 총 329개의 여러 종류의 시편이 포함되어 있다. 또한 캡슐내에는 시편온도 조절을 위한 He gas 층, micro-heater, thermocouple과 시편의 중성자 조사량 평가용인 fluence monitor 등이 설치되어 있다. 캡슐은 하나로 CT 시험공에 설치되어 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 조사온도로 $0.86 \sim 2.60 \times 10^{19} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ 의 고속중성자 ($E > 0.82 \text{ MeV}$) 조사량까지 조사 되었다. 조사된 시편들은 현재 조사후시험시설(IMEF)로 옮겨져 국산 RPV 재질의 조사성능 평가시험에 활용되어 국산 원자로압력용기의 건전성 확보 및 관련 산업체 기술의 고부가가치화에 기여할 예정이다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 경험과 축적된 기술을 활용하여 향후 원자력 재료들의 조사성능 연구가 활발히 추진될 예정이다.

2. 98M-02K 캡슐 설계·제작

국산 원자로 압력용기 재질의 조사성능 평가를 목적으로 하는 98M-02K 계장캡슐의 설계는 최초의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐인 97M-01K 캡슐에 근거하여 그림 1과 같이 수행되었다.

캡슐을 상세 설계하기 위해서 캡슐 이용자와의 협의를 통해 정한 캡슐 설계개념에 따라 캡슐의 기본설계를 수행한 후, 이에 따른 하나로 조사시험공에서의 gamma heating rate 분포를 계산하고, 계산된 값을 사용하여 시편의 최종배치 및

시편과 캡슐 각 부분간의 gap 설계 등 세부 설계를 수행하여야 한다. 원자로압력용기 재료의 조사시험만을 목적으로 하는 98M-02K 캡슐의 설계에 있어서 시편부 온도조절 능력 및 캡슐내 시편의 체적이용률 등을 향상시키기 위한 여러 설계개선이 이루어졌다.

먼저 캡슐내 장입된 시편부의 온도를 조사 목표온도인 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 로 유지하기 위하여 97M-01K 캡슐의 조사시험 자료를 기준으로 하여 시편 배치를 한 후, 이를 근거로 하여 MCNP 전산코드를 이용하여 계산한 캡슐 시편부위의 gamma heating rate 분포를 그림 2와 같이 계산하였다 [7]. 이를 기준으로 하여 gamma 값이 비교적 낮은 최상단 (1단)에는 최대 부피를 가지는 round형 compact 시편을 배치하였으며, 다음 단에는 시편을 중심부에 4개의 charpy 시편을 배치하여 사각 형태로 하였다. 그러나, 이러한 단순한 시편의 중심배치로는 보다 gamma 값이 높은 3,4,5단에서는 이용자가 요구한 조사온도를 맞출 수가 없어 캡슐 중심부에 빈 공간을 두고, 이를 중심으로 각 시편을 분산배치하는 설계로 결정하였다. 이러한 분산배치형의 캡슐 설계는 하나로 조사시험공의 핵적 특성 평가를 위한 무게장캡슐인 98M-01K 캡슐의 하나로 조사시험을 통해 그 구조 건전성이 입증된 바 있다 [8]. 이러한 시편 배치를 통해 98M-02K 캡슐은 97M-01K 캡슐에 비해 시편 체적율을 크게 향상시킬 수 있었다.

한편 축방향의 온도 편차를 줄이기 위한 설계 개선은 주로 열매체와 캡슐 외통간의 간격을 조절함으로써 수행하였는데, 그림 2의 gamma heating 분포와 시편 기본 배치도를 기본으로 하여 캡슐 열계산 전산코드인 GENGTC를 이용하여 try-and-error 보정 방식으로 수행되었다. 반면, 열매체와 시편간의 간격은 0.1mm로 일정하게 하였다. 또한 캡슐내 장착되는 micro-heater의 사양 조절을 통하여 단위 발열용량을 약 2배로 증가시킴으로써 각단간 온도 조절폭을 확대시켜 모든 시편의 조사온도 도달에 기여하고자 하였다.

이러한 설계 과정을 거쳐 최종적으로 하나로를 이용한 한국형 표준 원자로에 사용된 압력용기재의 조사성능 평가를 목적으로 한 계장캡슐인 98M-02K 캡슐이 그림 1과 같이 최종 설계되었다. 캡슐 기본 규격은 최초의 계장캡슐인 97M-01K 캡슐과 동일한 구조로, 5단의 $\phi 60\text{mm}$ 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 중성자 조사량 평가를 위한 Ni-Ti-Fe Fluence Monitor(F/M)가 각각 1, 3, 5단의 Al Holder에 장입되어 시편의 정확한 조사량 평가에 사용될 예정이다.

98M-02K Capsule에는 각 단 중심부에 표 1과 같이 실제 규격의 조사시편이 장입되어 있다. 1단에는 round compact tension 시편이, 2,3,4단에는 sharp insert 및 pre-cracked v-notch (PCVN) insert 시편이, 최하단인 5단에는 sharp insert, tensile, small punch, magnetic Barkhausen effect (MBE) 시편 등 총 329개의 시편이 장입되었다. 그림 3은 각단의 주요 시편을 촬영한 사진으로 v-notch를 포함하여 시편에 존재하는 모든 틈은 이에 맞게 동일한 재질로 제작된 spacer로 막아진다. 이들 시편은 모두 SA508 class 3의 RPV 재질로 국내 산업체인 한국중공업(주)에서 제작되어

한국형 표준 원자로인 영광 4,5호기 및 울진 4호기에 사용된 base 및 weld 재료이다.

캡슐 제작은 97M-01K 캡슐등의 제작을 통해 관련기술 및 하나로 품질규격 등을 확보하고 있는 대우정밀(주)에서 수행되었으며, 캡슐제작 기술시방서에 의거하여 제조 결함없이 설계대로 제작되었음이 확인되었다 [9]. 그림 4는 제작 완료되어 하나로 조사시험공 장입전의 98M-02K 캡슐의 전체사진이다.

3. 하나로 조사시험

98M-02K 캡슐은 노외에서 정해진 절차에 따라, 캡슐외관 및 치수검사, 본체 및 보호관부의 내압 및 He leak 시험, heater 및 열전대의 건전성 및 성능평가, 캡슐온도 조절장치와의 양립성 시험 등 여러 건전성 평가시험이 수행되었다. 시험결과 캡슐은 모든 조건을 만족함을 확인하였다.

캡슐은 하나로 CT 조사시험공에 설치되어 성능 및 조사시험이 수행되었는데, 원자로 출력 20MW 기준으로 약 2일간 조사되었다. 즉, 1차적으로 98M-02K 캡슐은 구조 변경(다공구조 도입) 및 캡슐내 장입시편량 증가에(97M-01K 캡슐대비) 따른 조사시험의 안전도 확보 및 캡슐 설계관련 기초자료를 확보하기 위하여 20MW 이하 저출력에서 약 9시간 30분간의 사전 성능시험을 수행하였다. 성능시험 단계에서 최적의 98M-02K 캡슐 조사조건을 도출하여 목표온도인 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 로 약 44시간 30분간(약 1.85일) 조사시험이 수행되었다. 따라서, 앞의 성능시험 부분을 20MW로 환산하면 98M-02K 캡슐은 대략 50시간동안 조사시험되었다.

조사시험기간 동안 캡슐내 위치한 각 시편의 조사온도는 각단의 열전대를 통해 기록되었는데 각 단의 조사시편의 온도는 성능시험 단계에서, 10MW 이하에서는 200°C 이내로, 20MW에서는 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 범위로 조절되었다. 최종 조사시험 단계에서의 시편의 조사온도는 표 2와 같이 정리되었으며, 각단의 평균값을 그림 5에 나타내었다. 조사시험동안의 1단을 제외한 각단의 시편온도는 실제 압력관의 원자로 사용온도인 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 범위로 유지할 수 있었으나, 비교적 부피가 제일 큰 1/2 RCT 시편이($\phi 33.75\text{mm}$) 위치한 1단의 조사온도는 최대 350°C 에 까지 이르렀다. 한편 각 단계에서의 시편 온도에 있어서 위와 아랫부분간에 다소간의 차이가 있었으며 시험기간동안 1, 2단의 경우 점차 온도가 증가하였으나, 3,4,5단의 경우 거의 변화가 없었다($2\sim 3^\circ\text{C}$ 이내). 이러한 온도증가는 그림 6에서 볼 수 있듯이 시간에 따른 원자로 제어봉의 상승으로 인한 gamma heating rate 값의 상승에 기인하는 것으로 추정되고 있다 [10].

캡슐내 시편이 성능 및 조사시험 동안 받은 고속중성자 ($E > 0.82\text{MeV}$) 조사량은 VENTURE 코드로 그림 1과 같이 이론적으로 계산되었는데 [10], 시편 위치에 따라 표 2와 같이 $0.86\sim 2.6 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 의 조사량을 가지는 것으로 계산되었다. 캡슐내 시편의 최대 조사량은 3단 하부 위치에서 얻어졌다. 이는 97M-01K 캡슐이 3단에서 최대치를 보인 점을 [5] 감안할 때, gamma heating rate의 최고치 이동과 마찬가지로 하나로 시편의 중성자 조사량은 제어봉 위치 변화에 따라 어느정도 변화함을 알 수 있었다. 한편 RPV 재질의 원자로내에서 수명말기까지 받는 고속중성자 조사량은 약 $7.26 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 에 이르는 것으로 알려져 있다.

4. 조사후 시험 일정

하나로 CT 시험공에 장입되어 조사된 캡슐은 원자로 작업수조에 보관되어 약 40일동안 방사능 냉각되어 캡슐 표면에서의 방사능 선량이 1,200 Rem/h 이하로 떨어져 후속작업이 가능한 것으로 추정되었다. 냉각된 캡슐은 일단 캡슐절단장치를 이용하여 적당한 크기로 수중에서 절단된 후 캡슐이송용 cask에 넣어져 조사후시험시설인 IMEF 핫셀로 이송되었다. 이후 캡슐은 핫셀내에서 정해진 절차에 따라 해체된후 분리된 조사시편은 별도로 보관되고 있다. 이들 시편들은 각기 정해진 조사후시험을 통하여 국산 RPV 재질의 조사성능 평가에 활용될 예정이다. 또한 캡슐내 포함된 F/M의 방사능 평가를 통하여 시편의 중성자 조사량을 실제 평가할 예정이다.

5. 결론

표준형 캡슐 조사시험을 통하여 축적된 자료 및 기술을 기본으로 하여 국내 한국형 PWR 원자로의 압력용기재로 사용된 재료의 중성자 조사특성 평가용 계장캡슐(98M-02K)을 설계·제작하여 하나로에서 조사시험하였다. 98M-02K 캡슐의 기본설계는 최초의 하나로 조사 캡슐인 97M-01K 캡슐을 기본으로 하여 다공구조형으로 설계되었다. 98M-02K 캡슐의 설계에서는 시편 조사온도의 반경 및 축방향의 정확한 조절, 캡슐내 시편의 체적 이용률 향상 등의 기술적인 사항이 보완되었다.

98M-02K 캡슐은 하나로 CT 조사시험공에서 조사온도 $290 \pm 10^\circ\text{C}$, 중성자 조사량 ($E > 0.82 \text{ MeV}$) $0.86\text{-}2.6 \times 10^{19} \text{ (n/cm}^2\text{)}$ 까지 성공적으로 조사된 후 조사후시험시설로 옮겨져 해체되었다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력중장기사업중 조사시험용캡슐개발및활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1510/94 (1995).
2. 강영환외, KAERI Report, KAERI/RR-1760/96 (1997).
3. K.N. Choo et als, Design of a new capsule controlling neutron flux and fluence and temperature of test specimens, J. Kor. Nucl. 29(2), 148 (1997).
4. 주기남외, 하나로 재료조사시험용 계장캡슐(97M-01K) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1226/99 (1999).
5. 강영환외, 계장캡슐(97M-01K) 개발을 위한 하나로 조사 시험 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1393/99 (1999).
6. 주기남외, 원자로 압력경계 재료 조사용 계장캡슐(98M-02K) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1392/99 (1999).
7. 서철교, 98M-02K 캡슐의 핵적 특성, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-98-74, 1998년 11월.
8. 김봉구외, 중성자속 측정용 무계장 캡슐 제작, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1249/99 (1999).
9. EMR Report (End of Manufacturing Report : 원자로 재료 조사시험용 계장캡슐

(98M-02K)), FA-KA-990103, 대우정밀(주), (1999년 1월).
 10. 이충성, 계장캡슐(98M-02K)의 중성자속 및 조사량, 하나로 내부통신문,
 HAN-RR-CR-99-055, 1999.8.12

Table 1. Specimens loaded in the 98M-02K capsule.

STAGE	SPECIMEN DIMENSION (mm)	NUMBER	SHAPE	MATEIALS
1	1/2 RCT (12.5xΦ33.75)	1x9 = 9	Round Bar 1	SA508 cl.3 RPV Made by HANJUNG (Co) Used in Yonggwang 4,5 Ulchin 4 Base / Weld
2	Charpy Insert (10x10x14)	4x8 = 32	Square Bar 4	
3	Charpy Insert PCVN Inset	4x8 = 32	Square Bar 4	
4	PCVN Insert (10x10x14)	4x8 = 32	Square Bar 4	
5	Sharpy Insert	8	Square Bar 4	
	Tensile (5x27.5x1)	64		
	SP (10x10x0.5)	80		
	MBE (2.5x10x1)	64		
	Sharpy Insert	8		

Table 2. 98M-02K 캡슐 조사시편 온도 및 고속중성자 (E>0.81MeV) 조사량.

단	시편류	열전대(T/C)	조사온도	비고	조사량 (x10 ¹⁹ n/cm ²)
1	CT	1	362	예) 종료시 조사온도값	1.2-2.0
		2	343		
		3	347		
		평균치	315 ~ 351	시간에 따라 점차 증가	
2	Sharpy(중심)	4	311		2.1-2.5
		5	302		
		평균치	294 ~ 306	시간에 따라 약간 증가	
3	Sharpy(다공)	6	291		2.5-2.6-2.4 (max.)
		7	276		
		8	303		
		평균치	288 ~ 290	일정값 유지	
4	Sharpy(다공)	9	304		2.4-1.9
		10	278		
		평균치	285 ~ 291	일정값 유지	
5	혼합 (다공)	11	286		1.9-0.86
		12	299		
		평균치	289 ~ 292	일정값 유지	

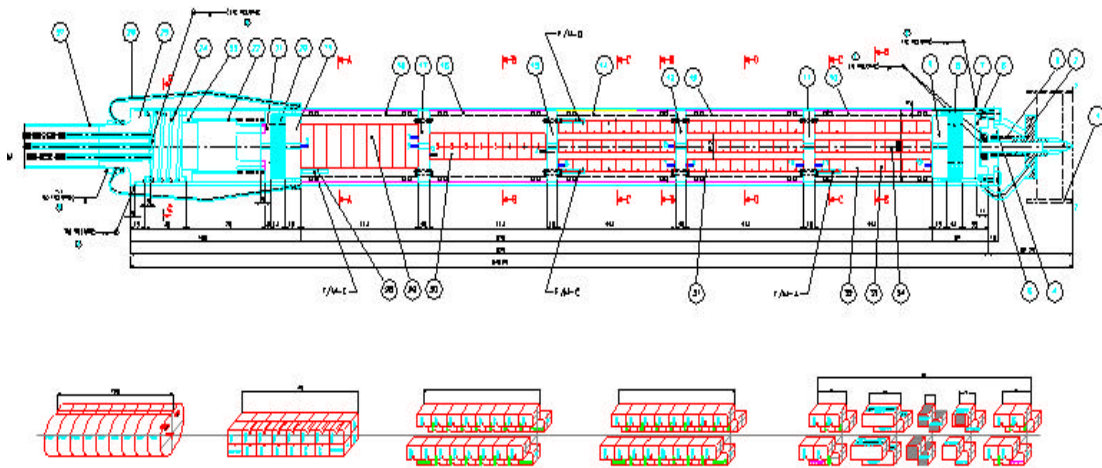


Fig. 1 Drawing of 98M-02K capsule for irradiation of RPV material in HANARO.

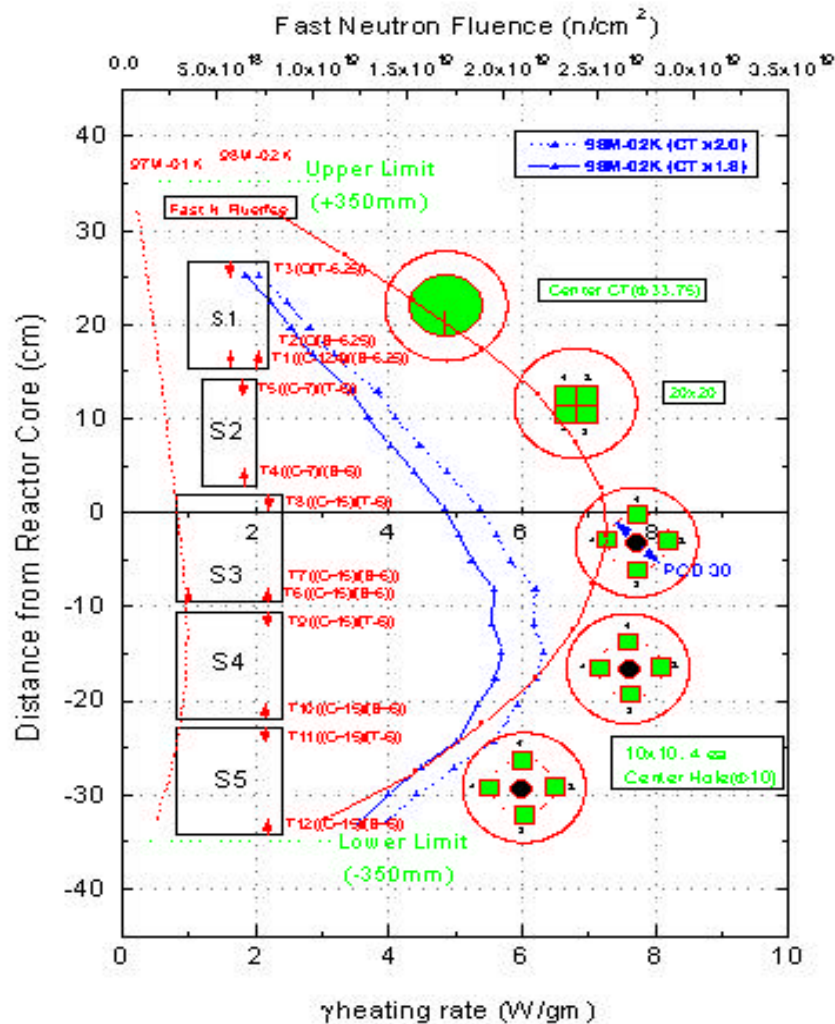


Fig. 2 Gamma heating rate and fast neutron fluence of 98M-02K capsule irradiated in the HANARO CT hole. (C=center, T=top, B=bottom)

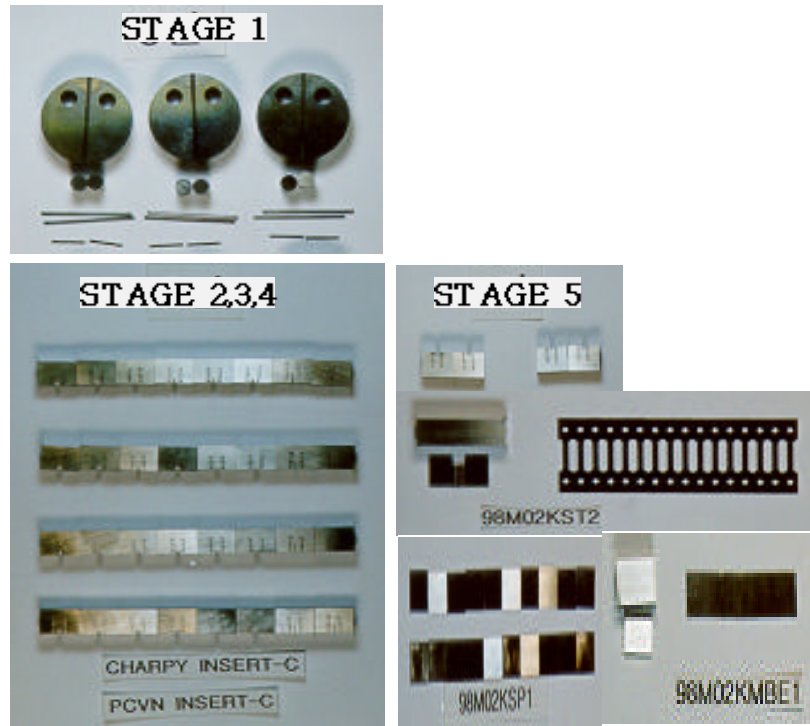


Fig. 3 Photographs of the specimen loaded in the 98M-02K capsule.



Fig. 4. Photograph of 98M-02K capsule before irradiation test.

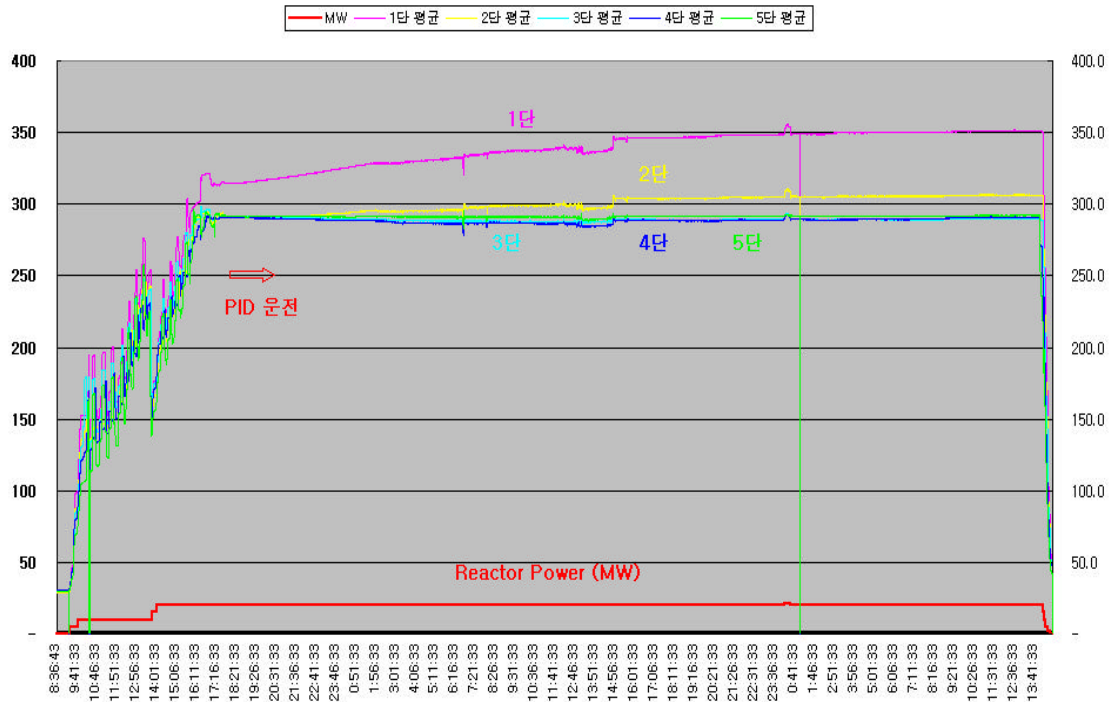


Fig. 5 Irradiation temperatures of specimens of 98M-02K Capsule irradiated in 20MW CT hole of HANARO.

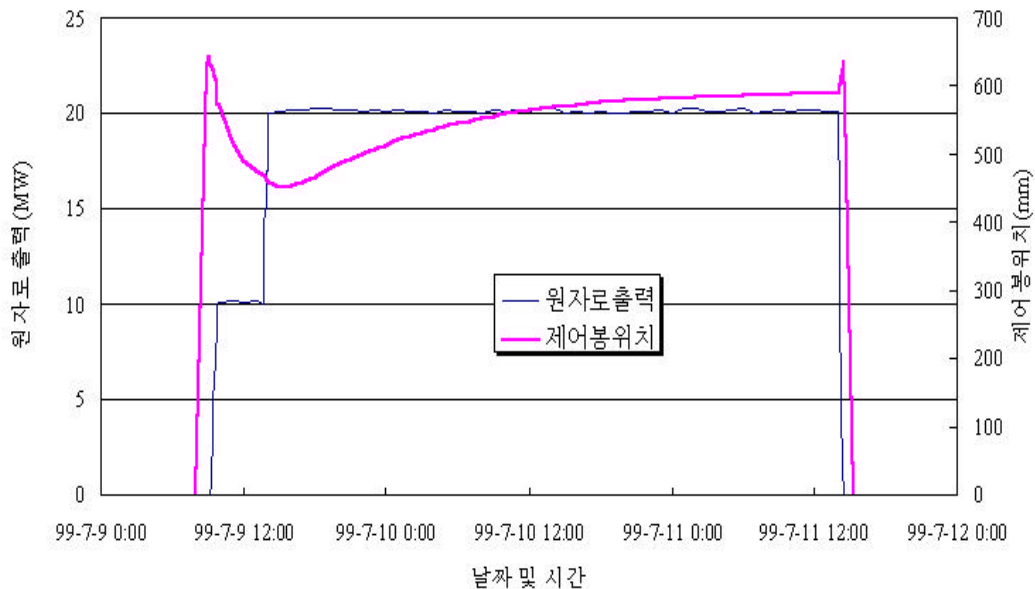


Fig. 6 Location of control rod during the irradiation test of 98M-02K capsule in HANARO CT hole.