

한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 재료의
하나로 계장캡슐(99M-01K · 02H) 조사시험

Irradiation of Reactor Pressure Vessel Materials Manufactured by
HANJUNG Co. Using the HANARO Instrumented Capsule (99M-01K · 02H)

주기남, 강영환, 김봉구, 손재민, 오중명, 신윤택

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국중공업(주)에서 제작되어 국내 영광 4,5호기 및 울진4호기의 원자로압력용기(RPV)로 사용중인 국산 SA508 cl.3 재료의 조사특성을 평가하고자 하나로 계장캡슐을(99M-01K, 99M-02H) 이용하여 조사시험하였다. 두 캡슐내에는 RPV base 및 용접재질의 round compact tension, charpy insert, PCVN(pre-cracked V-notch charpy insert), small tensile, SP(small punch), 그리고 MBE(magnetic Barkhausen effect) 시편 등이 각각 134 및 131개씩 장입되었다. 캡슐은 22MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에서 조사온도 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 조건으로 3일간씩, $1.4 \sim 3.0 \times 10^{19}$ (n/cm^2)의 고속중성자 ($E > 1.0$ MeV) 조사량까지 조사되었다. 조사된 시편들은 한국중공업(주) 제작 국산 RPV 재료의 조사성능 평가에 활용될 예정이며, 본 시험을 통해 얻어진 결과들은 국산 RPV 재료의 고부가가치화 및 국내 원전들의 건전성 평가에 크게 기여할 전망이다.

Abstract

The RPV(Reactor Pressure Vessel) material used in Yonggwang Units 4-5 and Ulchin Unit 4 Korean PWR nuclear reactors that was fabricated by HANJUNG Co, was irradiated at HANARO using instrumented capsules (99M-01K, 99M-02H). 134 and 131 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 capsules. The specimens were irradiated in the IR2 test hole of HANARO of 22MW reactor output power at $290 \pm 10^\circ\text{C}$ in the range of $1.4 \sim 3.0 \times 10^{19}$ (n/cm^2) of fast neutron fluence ($E > 1.0$ MeV). The irradiated specimens will be tested to evaluate the nuclear irradiation performance of the Korean nuclear RPV materials. The obtained results will be effectively used for quality evaluation of Korean RPV materials and on integrity

evaluation of domestic nuclear reactors.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 주요 원자력 재료의 중성자 조사효과 평가를 위한 표준형 계장캡슐 국산화 개발연구를 수행하여 왔다 [1-6]. 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 캡슐조사시험의 경우, 실제 원자로 사용온도인 $290\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 조사온도에서 30MW의 하나로 출력 기준으로 약 6일간의 조사시험만으로 재료가 실제 원자로에서 40년 설계수명 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.

현재 한국중공업(주)에서 국산화 제작되어 한국표준형 가압경수형원자로인 영광3호기 이후 국내의 모든 경수형 원자로에 사용되고 있는 원자로압력용기의 경우 아직 수명말기까지의 중성자 조사손상 건전성이 충분히 입증되지 않은 상태이다. 따라서 한국중공업(주)의 국산 PRV 재질의 조사특성 평가의뢰에 의해 현재 개발되어 있는 조사시험용 표준형 계장캡슐 기술을 활용하여 압력용기 재질의 조사손상 건전성을 입증하고자 하나로 계장캡슐을 (99M-01K, 99M-02H) 설계·제작하였다.

캡슐의 주요설계는 최근 하나로 조사시험을 성공리에 수행한 다공구조의 98M-02K 캡슐을 기본으로 하여 [7], 그동안의 캡슐조사시험을 통해 도출된 여러 설계개선점들이 반영되었다 [8-12]. 캡슐은 조사시편을 중심으로 다단독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조이며, 12개의 열전대 및 Ni-Ti-Fe 중성자 모니터가 장착되어 조사시편의 온도변화 및 조사량 측정에 각기 사용되었다.

캡슐내 조사시편은 영광 4,5호기 및 울진 4호기 원자로의 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) 시편 등으로 99M-01K 캡슐에는 총 134개의 시편이, 99M-02H 캡슐에는 131개의 시편이 장입되었다. 캡슐은 20MW 출력의 하나로 CT 조사시험공에서 조사온도 $290\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 조건에서, RPV 재료의 40년 설계수명 동안에 받을 중성자 조사량에 해당하는 $7.26\times 10^{19}\text{ (n/cm}^2)$ ($E>1.0\text{ MeV}$) 까지 조사하고자 설계·제작되었다.

두 캡슐의 조사시험은 캡슐 고정장치의 문제로 인하여, 설계 조건과 유사할 것으로 추정된 [11] 22MW 출력의 IR2 조사시험공에서 약 3일간 (66MWD) 조사시험되었다. 99M-01K 캡슐내의 시편들은 조사시험중 micro-heater의 비정상 거동에 따른 264°C 의 낮은 조사온도를 보인 4단의 시편을 제외하고는 $288\sim 300^{\circ}\text{C}$ 의 조사온도에서 $1.43\sim 2.96\times 10^{19}\text{ (n/cm}^2)$ ($E>1.0\text{ MeV}$)의 고속중성자 조사량까지 조사되었으며, 99M-02H 캡슐내의 시편들은 $280\sim 303^{\circ}\text{C}$ 의 조사온도에서, $1.37\sim 2.86\times 10^{19}\text{ (n/cm}^2)$ ($E>1.0\text{ MeV}$)의 고속중성자 조사량까지 조사되었다.

조사된 시편들은 현재 조사후시험시설(IMEF)로 옮겨져 국산 RPV 재질 시편의 조사성능 평가시험에 활용되어 국산 원자로 압력용기의 건전성 확보 및 관련 원자력 산업체 기술의 고부가가치화에 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 경험과 축적된 기술들은 향후 원자력 재료들의 다양한 조사성능 연구에 활발히 이용될

것이다.

2. 99M-01K & 02H 캡슐 설계 · 제작

한국중공업(주)에서 제작되어 현재 울진 및 영광의 원자력발전소에 설치되어 있는 원자로 압력용기 재질의 조사성능 평가를 목적으로 하는 99M-01K (M은 Material, K는 KAERI의 표기) 및 99M-02H(H는 HANJUNG의 표기) 계장캡슐의 설계는 최근 하나로 조사시험을 통하여 그 구조건전성이 검증받은 다공구조의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐인 98M-02K 캡슐에 근거하여 설계 · 제작되었다 [7,9,12]. 그림 1은 99M-01K 캡슐의 설계도이고, 그림 2는 99M-01K 및 99M-02H 캡슐과 동일한 형태의 하나로 표준형 계장캡슐의 제작된 모습이다. 99M-02H 캡슐의 경우 1단에 R-CT 시편대신 4개의 Charpy 시편을 2단과 같은 형태로 배치하고 2~5단에는 99M-01K 캡슐과 동일하게 시편들을 배치하였다.

99M-01K 및 99M-02H 캡슐의 기본구조는 동일한 원자로압력용기 재료의 조사시험을 목적으로 제작되었던 98M-02K 캡슐의 설계를 기본으로 하였다. 캡슐은 크게 본체부, 보호관부, 안내관부로 나뉘어지는데, 캡슐 본체는 $\Phi 60\text{mm}$ 의 STS 316 재질의 튜브 내부에 5단의 Al 열매체로 나뉘어지고, 각 열매체 내에는 조사시편을 포함하여 여러 계장품이 설치되어 있다.

한편 99M-01K 및 99M-02H 캡슐의 설계에서는 다음과 같은 부분의 개선이 이루어졌다 [12]. 계장캡슐의 내진특성을 향상시키기 위해 본체상부 상부 Guide Spring 및 보호관부를 변경하였으며, 조립작업의 편리성 및 안전성을 위해 보호관의 길이를 증가시켰으며, 안내관 직경을 확대시켰다. 또한 원자로에서의 작업 효율화를 위하여 Junction Unit 대신 Junction Box 장치를 도입하였다. 또한 캡슐 하단부 Guide Arm 부위의 절단현상을 방지하기 위한 설계변경을 수행하였다 [12].

캡슐내 조사시편은 영광 4,5호기 및 울진 4호기 원자로의 base 및 용접재료로 round compact tension, charpy, PCVN(pre-cracked V-notch charpy), SP(small punch), 그리고 MBE(magnetic Barkhausen effect) 시편 등이 캡슐에 장입되었다. 99M-01K 및 99M-02H 캡슐에는 98M-02K 캡슐과는 달리 1/3 길이의 insert charpy 시편 대신 정상 규격의 charpy 시편이 장입되었으며, 98M-02K 캡슐에서의 온도조절 어려움으로 인해서 99M-01K 캡슐 1단에는 1/2" RCT(round compact tension) 시편 대신 시편직경이 작은 0.4T-RCT 시편이 장입되었다. 99M-01K 및 99M-02H 캡슐에는 각각 134개 및 131개의 시편이 장입되었는데, 표 1은 99M-01K 캡슐내에 포함된 시편의 내역이다. Gamma heating 값이 비교적 낮은 최상단 (99M-01K 캡슐의 1단)에는 최대 부피를 가지는 round형 compact 시편을 배치하였으며, 다음 단에는 캡슐 중심부에 4개의 charpy 시편을 배치하여 사각 형태로 하였다. Gamma 값이 높은 3,4,5단에서는 캡슐 중심부에 빈 공간을 두고, 이를 중심으로 시편을 분산배치하는 다공형태로 설계하였다.

위의 시편 배치를 기준으로 하여 MCNP 전산코드를 이용하여 캡슐 시편부위의 gamma heating rate와 중성자 조사량 분포를 계산하였다 [11]. 그림 3은 99M-01K 캡슐내 시편 배치에 따른 gamma 분포를 98M-02K 캡슐과 비교하여 나타낸 그림으로, 이때 캡슐은 20MW 출력의 하나로 CT 시험공에서 조사시험되는 것으로 가정하였다. 본 설계에서의 gamma 값 계산은 기존의 방식과는 일부 다른 prompt

& delayed gamma 값을 구하는 방식으로 계산하였으며, 4월말로 예상되는 조사시험시 예측되는 원자로 제어봉의 위치는 400mm로 간주하였다. 또한 핵연료의 연소효과와 캡슐 안전성을 감안하여 위의 계산값보다 20% 추가된 값을 최종 설계 gamma 값으로 가정하였다. 99M-02H 캡슐의 경우 최상단에 RCT 시편대신 charpy 시편 4개가 중심부에 장입되나, 99M-01K 캡슐과 동일한 gamma heating 값을 가지는 것으로 가정하여 최종적인 99M-01K 및 99M-02H 캡슐에 대한 최종 설계 gamma heating curve를 결정하였다.

캡슐내 시편의 최종 조사온도는 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 를 목표로 하는데, 원자로 출력으로 일정 온도까지 올라가면 캡슐내 He 압력 및 heater 출력 등을 조절하여 순차적으로 최종 목표온도에 도달하게 한다. 98M-02K 캡슐에서는 원자로 출력만으로만 도달하게 되는 1차 목표온도를 기준으로 하여 1atm He 조건에서 열매체와 캡슐 외통간의 간격 설계를 수행하였으나, 실제 캡슐은 25psi He의 진공 상태에서 조사시험되었으며 이에 따라 각단에서 시편간 위·아래 위치에 따라 온도 편차가 발생한 것으로 추정되었다 [9]. 따라서, 99M-01K 및 99M-02H 캡슐에서는 비교적 고진공 상태인 $0.4\text{K}_{\text{He}=1\text{atm}}$ 조건에서 gap 설계를 수행하여 각단 시편 상하간의 온도 편차를 줄이고자 하였다. 한편 98M-02K 캡슐의 조사시험을 분석결과 $0.4\text{K}_{\text{He}=1\text{atm}}$ 은 약 35psi 진공에서 얻어지는 것으로 추정되고 있다 [9]. 99M-01K 및 99M-02H 캡슐 각단의 설계온도 목표치를 $0.4\text{K}_{\text{He}=1\text{atm}}$ 진공조건으로 결정함으로써, 비교적 안정적인 50-100torr의 진공에서 조사시험이 목표시험 온도인 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 에 균일하게 도달할 수 있도록 하였다.

캡슐내 시편의 조사온도를 계산하는데 이용한 GENGTC code의 경우, 캡슐 내부 구조를 모두 symmetric geometry로 변형해야 하므로 99M-01K 캡슐의 RCT 시편을 제외한 non-symmetric geometry를 가지는 모든시편들에 대해서 GENGTC 적용을 위해서 symmetric 형태로의 변경을 해야하고 이에 따른 각 부분의 밀도 보정작업을 수행하여야 한다. 2단의 경우 98M-02K 캡슐과 유사하게 동일 길이법으로 설계하였으며, 3,4,5단의 경우 반경방향으로의 열전도를 감안하여 시편이 동일 두께의 ring 형태로 존재하는 것으로 모델링한후 열계산을 수행하였다 [12].

시편 온도 계산에는 GENGTC code를 이용하여 99M-01K 및 99M-02H 캡슐의 각단에서의 부품간 간격 조정작업을 하였는데, 이때 시편과 열매체간의 간격은 모두 0.1mm로 하였다. 열매체와 외통간의 간격은 99M-01K 캡슐의 경우 0.06~0.23mm로, 99-02H 캡슐에서는 0.06~0.28mm로 결정되었는데, 캡슐의 최상위단(1단) 위에서부터 중심부로 갈수록 열매체와 외통간의 간격이 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다.

한편 캡슐내 시편부에는 12개의 열전대가 설치되어 있어 조사시험 동안의 조사시편의 온도 변화가 캡슐 조절장치에 기록되며, 중성자 조사량 평가를 위한 Ni-Ti-Fe 및 Sapphire Fluence Monitor(F/M)가 각 단의 Al Holder에 장입되어 있어 조사후 해체되어 시편의 정확한 조사량 평가에 사용되게 되었다.

이러한 캡슐의 상세설계 방침에 따라 캡슐은 하나로 설계 기준에 준하여 최종설계된 후 그동안의 하나로 캡슐 제작등을 통하여 캡슐 제작경험을 충분히 확보하고 있는 대우정밀(주)에서 제작되었다.

3. 하나로 조사시험

99M-01K 및 02H 캡슐은 하나로 조사시험전 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 두 캡슐은 모든 조건을 만족함을 확인하였다.

캡슐의 조사시험은 사전에 설계된 바와 같이 20MW 출력의 하나로 CT 조사시험공에 설치하여 조사시험하고자 하였으나, 원자로 설치과정에서 캡슐 고정장치의 비정상 거동으로 인하여 설계 조건과 유사할 것으로 추정된 [13] 22MW 출력의 IR2 조사시험공에서 각기 약 3일간씩 (66MWD) 일주일 간격으로 조사시험되었다. 1차 조사된 99M-02H 캡슐내의 시편들은 그림 4에서와 같이 280~303°C의 비교적 균일한 조사온도에서, $1.37\sim 2.86\times 10^{19}$ (n/cm²) (E>1.0 MeV)의 고속중성자 조사량까지 조사되었다. 한편 2차로 조사된 99M-01K 캡슐에서는 조사시험중 micro-heater의 비정상 거동에 따라 4단 시편은 264°C의 비교적 낮은 조사온도를 보였으나, 그 외의 시편들은 288~300°C의 조사온도에서 $1.43\sim 2.96\times 10^{19}$ (n/cm²) (E>1.0 MeV)의 고속중성자 조사량까지 정상적으로 조사되었다.

캡슐의 조사시험 초기에는 캡슐 조사시험에 대한 안전도 확인 및 설계관련 기초자료를 확보하기 위하여 22MW까지 원자로 출력을 단계적으로 올리면서 각 단계에서 He 진공 및 heater 출력 효과를 확인하는 캡슐 성능시험을 수행하였다. 성능시험 단계에서 시편의 목표 조사온도인 290±10°C에 맞는 최적의 He 진공도 및 heater 출력 등의 조사조건을 도출하여 이 조건으로 원자로 출력이 66MW-day에 이를때까지 조사시험하였다.

조사시험기간 동안 시편의 조사온도는 시편내에 설치된 열전대를 통해 기록되었는데 성능시험 단계에서 도출된 최적의 He 진공도 조건에서 각 단의 조사시편 온도는 상하단간에 비교적 균일한 분포를 보였다 (표 2 참조). 하나로 시험에서 최적의 He 진공도 조건은 캡슐내 He 진공 조절만으로 최대 시편온도가 목표온도 290°C에 도달하는 조건으로 하고 있다. 표 2에서 볼 수 있듯이 98M-02K 캡슐에 비해 99M-01K 및 99M-02H 캡슐들에서 최적 진공도 값이 차이 나는 것은 조사조건의 차이 및 캡슐 설계상의 이유 등 복잡한 원인들에 기인된다. 한편 99M-01K 및 99M-02H 캡슐들은 98M-02K 캡슐에 비해 각단간의 온도 차이가 훨씬 감소하여 균일한 온도분포를 보이고 있는데, 이는 He 1기압 조건으로 설계한 98M-02K 캡슐과는 달리 두 캡슐의 최종설계를 실제 조사시험시 예상되는 He 진공도를 감안하여 수행하였기 때문으로 추정된다.

그림 4는 99M-02H 캡슐의 조사시험 전 과정동안 in-situ로 측정된 시편의 조사온도를 각단의 평균값으로 나타낸 것이다. 조사시험동안 각단의 모든 시편온도는 실제 압력관의 원자로 사용온도인 290±10°C의 범위로 유지할 수 있었다. 한편 시험 초기에 290°C로 일정하였던 각단의 시편온도들은 점차 차이를 보이다가 약 1일후에는 일정한 상태로 유지되었다. 조사기간동안의 이러한 시편온도 변화는 그림 5에서와 같이 원자로의 제어봉 위치 변화에 따른 gamma 값의 변화에 기인된 것으로 추정되는데, 동일한 원자로 출력에서도 제어봉 위치는 초기 약 1일동안은 매우 급격하게 평형위치를 향해 상승하는 것을 알 수 있다. 제어봉의 상승은 하부 시편에서는 gamma 값이 감소하는 경향을 가져와 시편온도가 떨어지게 되고 이를 heater 출력을 상승시켜 일정한 값으로 유지하였다. 반면, 상부의 시편에서는 반대로 gamma 값이 상승하여 시편온도가 상승하였으므로 캡슐내부의 He 압력을 높여 시편을 일정온도로 유지하였다.

그림 6은 99M-02H 캡슐내 시편이 성능 및 조사시험 동안 받은 고속중성자

($E > 0.82 \text{ MeV}$) 조사량 및 열중성자 ($E < 0.625 \text{ eV}$) 조사량을 VENTURE 코드로 계산한 그림이다 [14]. 시편은 캡슐내 위치에 따라 $1.5 \sim 3.2 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 의 고속중성자 조사량을 가지는 것으로 계산되었으며, 캡슐내 시편의 최대 조사량은 3단 하부 위치에서 얻어졌다. 이는 $E > 1.0 \text{ MeV}$ 의 $E < 0.625 \text{ eV}$ 고속중성자 조사량 $1.4 \sim 2.9 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 에 해당한다.

4. 조사후 시험 일정

22MW 출력의 하나로 IR2 시험공에 장입되어 조사된 캡슐은 원자로 작업수조에 보관되어 약 한달동안 냉각되었으며, 캡슐 표면에서의 방사능 선량이 안전치 이하로 떨어져 후속작업이 가능하도록 하였다. 먼저 1차 조사된 99M-02H 캡슐을 원자로 작업수조내에서 캡슐절단장치를 이용하여 정해진 크기로 수중에서 절단한 후 캡슐이송용 cask에 넣어 조사후시험시설인 IMEF 핫셀로 이송하였다. 이송된 캡슐은 핫셀내에서 정해진 절차에 따라 해체되었고 분리된 조사시편은 현재 물성평가를 위한 조사후 시험이 수행되고 있다. 이들 시편들은 각기 정해진 조사후시험을 통하여 국산 RPV 재질의 조사성능 평가에 활용될 예정이다. 한편 99M-02H 캡슐은 절단후 해체 과정에서 캡슐내에 냉각수가 유입됨으로써 핫셀내 시편분리 작업에 상당한 어려움이 야기되었으므로, 현재 2차 조사시험된 99M-01K 캡슐의 처리방안에 대한 개선점 도출을 위해 관련부서간 기술협의를 진행중이다. 캡슐내 포함되었던 Fe-Ni-Ti F/M는 별도로 분리되어 방사능 평가를 통한 시편의 실제 중성자 조사량 평가 작업에 사용되고 있다.

5. 결 론

표준형 계장캡슐 조사시험 기술을 사용하여 한국중공업(주)에서 제작되어 국내 한국표준형 원자로에 사용중인 국산 압력용기 (RPV) 재료의 중성자 조사특성을 평가하고자 99M-01K 및 99M-02H 캡슐을 설계·제작하여 하나로에서 조사시험하였다. 두 캡슐의 기본설계는 최근 하나로 조사시험을 완료한 98M-02K 캡슐을 기본으로 하여 상부 1,2단은 시편 중심배치형으로, 3,4,5단은 다공구조형으로 설계하였다. 캡슐내에는 RPV base 및 용접재질의 다양한 형태의 시편들이 각각 134 및 131개씩 장입되었다. 캡슐은 22MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에서 조사온도 $290 \pm 10^\circ \text{C}$ 의 조건으로 $1.4 \sim 3.0 \times 10^{19} \text{ (n/cm}^2)$ 의 고속중성자 ($E > 1.0 \text{ MeV}$) 조사량까지 성공적으로 조사된 후 조사후시험시설로 옮겨져 해체되었다. 현재 조사된 시편들을 사용하여 국산 RPV 재질의 조사성능 평가시험이 수행중에 있다.

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. Y.H. Kang et als, Structural analysis for the HANARO irradiation capsule through vibration test, Pro. of 6th ASRR symposium, Mito, Japan, march 1999.
5. 강영환외, ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석, '99추계원자력학회, Seoul, Korea, October 1999.
6. 주기남외, 한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 재료의 하나로 조사시험용 계장캡슐 설계·제작, 2000춘계원자력학회, Kori, Korea, May 2000.
7. 주기남외, 원자로 압력경계 재료 조사용 계장캡슐 (98M-02K) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1392/99 (1999).
8. 강영환외, 계장캡슐(97M-01K) 개발을 위한 하나로 조사 시험 보고서, KADER 기술보고서, KAERI/TR-1393/99 (1999).
9. 계장캡슐(98M-02K) 하나로 조사 시험 보고서, KAERI 기술보고서, 작성중 (2000).
10. 주기남외, 원자로 압력용기 재료의 하나로 계장캡슐(98M-02K) 조사시험, '99추계원자력학회, Seoul, Korea, October 1999.
11. 이병철, 재료조사시험용 캡슐 99M-01K 분석 (I), (II), 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-00-006/007, 2000년 1월.
12. 주기남외, 한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기 소재의 조사용 계장캡슐 (99M-01K·02H) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1646/2000 (2000).
13. 서철교, 이병철, 재료조사시험용 캡슐 99M-01K 분석 (III), 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-92X-0-047, 2000년 5월.
14. 이충성, 계장캡슐 조사량 재평가, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-00-069, 2000년 7월.

Table 1. Specimens loaded in 99M-02H capsule.

단	시편 규격	개수	시편부 모양	재료 ¹
1 단	PCVN (10x10x55) ²	4x2 = 8	Square Bar 1개 (20x20x114 mm)	Y5
2 단	Charpy (10x10x55)	4x2 = 8	Square Bar 1개 (20x20x114 mm)	U4W
3 단	Charpy (10x10x55)	4x1 = 4	Square Bar 4개 (10x10x114mm)	U4W
	PCVN (10x10x55)	3x1 = 3		U4W
	SP (10x10x0.5)	1x80=80		(Y4,Y5,U4,U4W)x20
	MBE (10x2.5x1)	1x16=16		(Y4,Y5,U4,U4W)x4
4 단	PCVN (10x10x55)	4x2 = 8	Square Bar 4개 (10x10x114mm)	U4W
5 단	Charpy (10x10x55)	3x1 = 3	Square Bar 4개 (10x10x114mm)	Y5
	PCVN (10x10x55)	1x1 = 1		U4W

1 : Y=Yonggwang, U=Ulchin, W=Weld, 2 : all dimension in mm

Table 2. The specimen temperature of 98M-02K and 99M-01K · 02H capsules at optimum He pressure without heater power.

캡슐 조사조건 (Rx Power, He Pressure)	측정온도(°C)				
	1단	2단	3단	4단	5단
98M-02K (20MW CT, 25 torr)	291	275	275	267	260
99M-01K (22MW IR2, 40 torr)	289	291	279	290	281
99M-02H (22MW IR2, 57 torr)	289	291	287	288	291

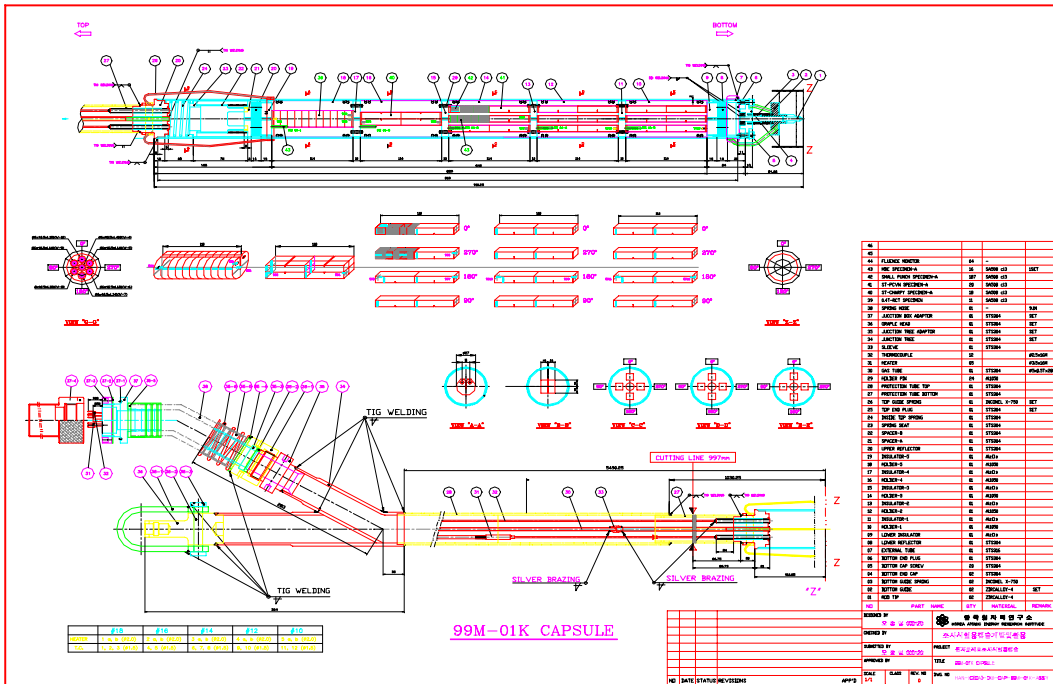


그림 1 99M-02H 캡슐 설계도 (한국중공업(주) 제작 국산 RPV 재료시험용)



그림 2 하나로 표준형 계장캡슐

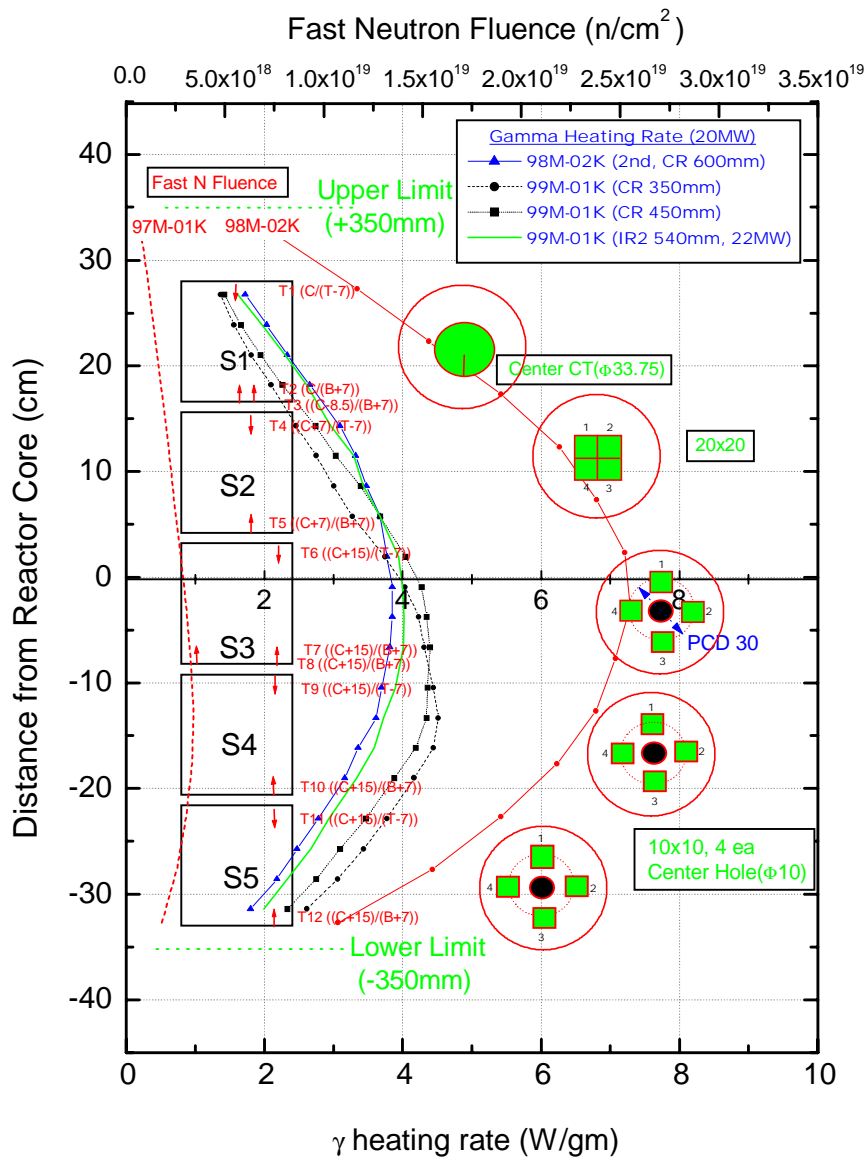


그림 3 99M-01K 및 99M-02H 캡슐의 gamma heating rate 분포 (C=center, T=top, B=bottom)

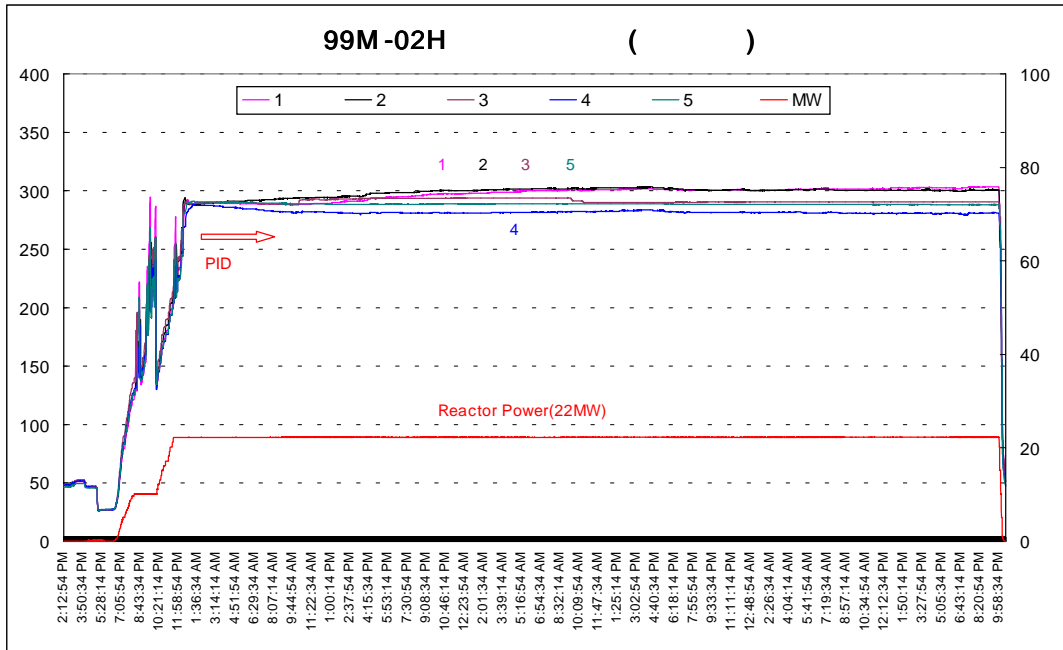


그림 4 99M-02H 캡슐내 시편의 조사온도 변화 (22MW IR2, 66MWd)

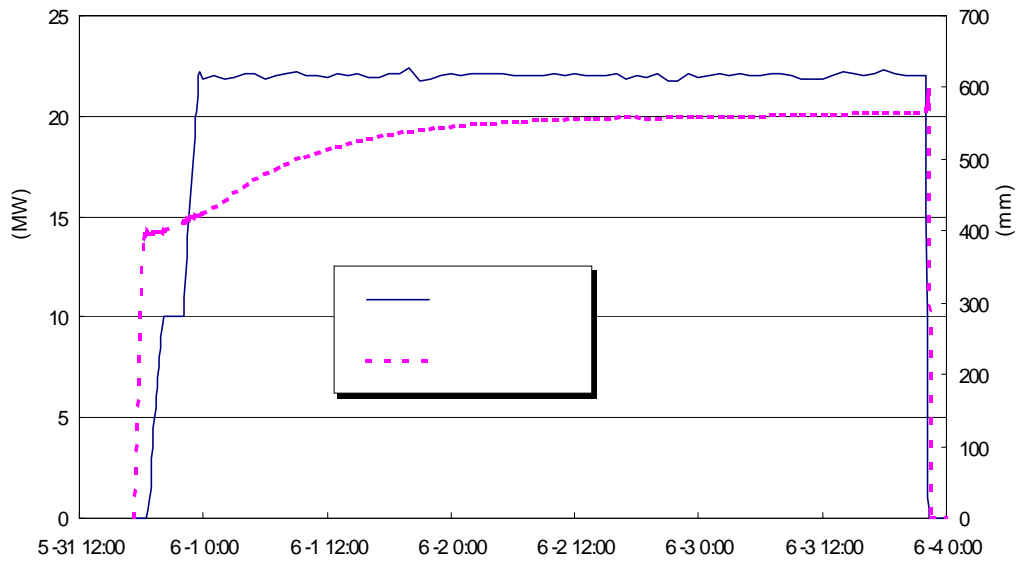


그림 5. 99M-02H 캡슐 운전이력 (하나로 7-7-2주기)

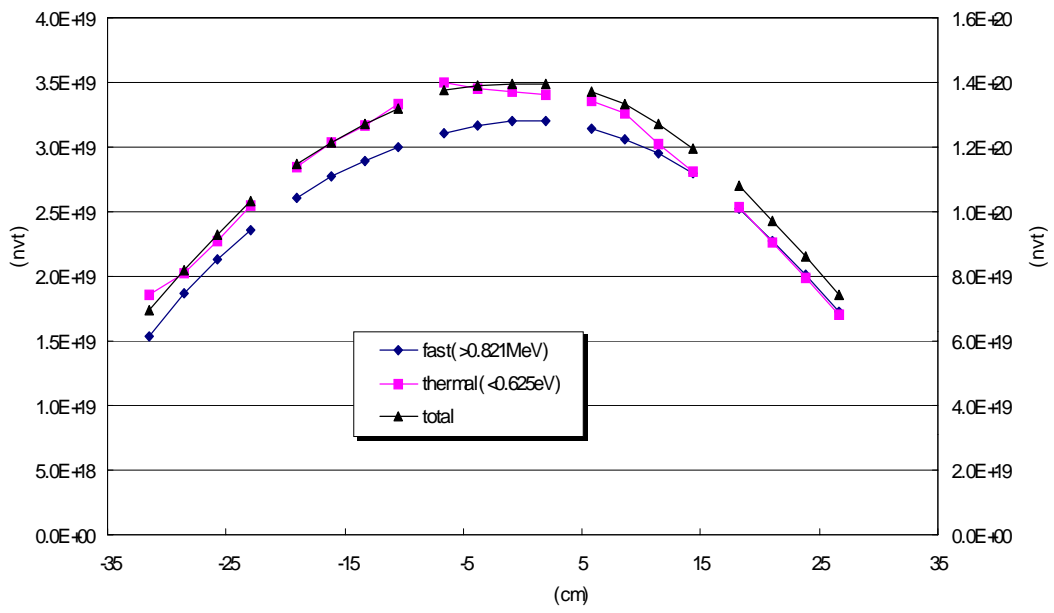


그림 6 99M-02H 캡슐내 시편의 위치에 따른 평균 조사량