

원자로압력용기, 노심, 중수로압력관 재료의
하나로 조사시험용 계장캡슐(00M-02K, 00M-03K) 설계·제작

Design and Fabrication of HANARO Instrumented Capsule for
Irradiation Test of Reactor Vessel, Core, Pressure Tube Materials

주기남*, 김봉구, 손재민, 신윤택, 박승재, 오종명, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀에서 연구수행중인 경수로 원자로압력용기, 노심 재료 및 중수로 압력관 재료의 조사특성을 평가하고자 하나로 계장캡슐(00M-02K 및 00M-03K)을 설계·제작하였다. 캡슐의 주요설계는 시편을 열매체내 중심 혹은 4공에 분산배치하는 표준형 캡슐 구조를 기본으로 하였다. 00M-02K 캡슐은 원자로 압력용기재인 SA508 재질의 시편들을 $290\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 조사하기 위하여 설계되었으며, 00M-03K 캡슐은 재료특성치가 서로 다른 노심재료인 stainless steel과 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 각각 $350\pm 20^{\circ}\text{C}$, $300\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 조사시험하기 위하여 설계되었다. 캡슐은 독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe/Al₂O₃ 중성자 모니터를 설치하였다. 00M-02K 캡슐에는 원자로 압력용기 재료로 제작된 small punch, small tensile, MBE(magnetic Backhausen effect), ABI(automated ball indentation), 1/3 PCVN(pre-cracked V-notch), Charpy, 그리고 PCVN 시편 등이 장입되었다. 00M-03K 캡슐 상부에는 노심재료로 제작된 tensile 및 TEM 시편이, 하부에는 압력관재료로 제작된 CB(cantilever beam), 성장(growth), TEM, tensile, CT(compact tension) 시편이 캡슐에 장입되었다. 두 캡슐은 하나로 IR2 조사시험공에서 중성자 조사량이 각각 최대 $3.0\times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)$, $1.0\times 10^{20}(\text{n}/\text{cm}^2)$ ($E>1.0\text{MeV}$)까지 조사될 예정이다.

Abstract

For the irradiation of the RPV(Reactor Pressure Vessel), reactor core, and CANDU pressure tube materials, HANARO instrumented capsules(00M-02K and 00M-03K) were designed and fabricated. The capsules were designed to have standard 1-hole or 4-hole specimen structures in the thermal media. 00M-02K capsule was designed to irradiate RPV materials at $290\pm 10^{\circ}\text{C}$ and 00M-03K capsule

was designed to irradiate reactor core and CANDU pressure tube materials at $350 \pm 20^\circ\text{C}$ and at $300 \pm 10^\circ\text{C}$, respectively. There are 5 stages having specimens and independent electric heaters in the capsule mainbody. 14 thermocouples and 4 sets of Ni-Ti-Fe/ Al_2O_3 neutron fluence monitors were also inserted in the capsule to measure the temperatures of the specimens and thermal/fast neutron fluences, respectively. Various types of specimens such as small punch, small tensile, MBE(magnetic Backhausen effect), ABI(automated ball indentation), 1/3 PCVN(pre-cracked V-notch), Charpy, and PCVN specimens were inserted into the 00M-02K capsule and tensile, TEM, CB(cantilever beam), growth, and CT(compact tension) were inserted into the 00M-03K capsule. The specimens will be irradiated in the IR2 test hole of HANARO at $290 \pm 10^\circ\text{C}$ up to the fast neutron fluence ($E > 1.0$ MeV) of 3.0×10^{19} and 1.0×10^{20} (n/cm^2), respectively.

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 $7.26 \times 10^{19} \text{n}/\text{cm}^2$ 에 도달하게 되므로 단기간에 관련 재료 및 구조물의 조사성능 예측 및 평가를 가능케 하는 유용한 설비이다.

현재 관련 기술이 우선적으로 국산화 개발된 하나로 조사시험용 표준형 계장캡슐은 원자력 재료들에 대한 산·학·연의 하나로 중성자 조사시험 연구에 활발히 활용되고 있다. 본 연구에서는 연구소의 원자력재료기술개발팀에서 연구수행중인 경수로 원자로압력용기, 노심재료 및 중수로 압력관 재료의 조사특성을 평가하기 위한 하나로 계장캡슐(00M-02K 및 00M-03K)을 설계·제작하였다.

가압경수형원자로인 영광3호기 이후 국내의 전 경수형 원자로에 사용되고 있는 원자로압력용기의 경우 아직 수명말기까지의 조사손상 건전성이 충분히 입증되지 않은 상태이다. 따라서 한국중공업(주)의 국산 PRV 재의 조사특성 평가의뢰에 의해 현재 개발되어 있는 조사시험용 표준형 계장캡슐을 활용하여 압력용기 재질의 조사손상 건전성을 입증하고자 하나로 계장캡슐(00M-02K)을 설계·제작하였다. 00M-02K 캡슐은 원자로 압력용기재인 SA508 재질의 시편들을 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 온도에서 조사하기 위하여 설계되었으며, 영광 3,4,5호기 및 울진 4호기에 사용된 원자로 압력용기 재료 및 용접재료로 제작된 small punch, small tensile, MBE(magnetic Backhausen effect), ABI(automated ball indentation), 1/3 PCVN(pre-cracked V-notch), Charpy, 그리고 PCVN 시편 등 총 488개의 시편이 장입되었다.

00M-03K 캡슐은 재료특성치가 서로 다른 노심재료인 stainless steel과 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 각기 다른 온도인 $350 \pm 20^\circ\text{C}$, $300 \pm 10^\circ\text{C}$ 의 온도로 조사시험하기 위하여 설계되었다. 00M-03K 캡슐 상부에는 노심재료인 stainless steel

304, 316, 321 등의 재료와 Cr-Mo로 제작된 tensile 및 TEM 시편이 총 170개가 장입되었으며, 하부에는 중수로 압력관재료인 Zr-2.5Nb 재질로 제작된 CB(cantilever beam), 성장(growth), TEM, tensile, CT(compact tension) 시편 등 총 81개의 시편들이 캡슐에 장입되었다.

캡슐의 주요설계는 그동안 하나로 조사시험을 수행한바 있는 시편을 열매체 중심에 배치하는 구조(00M-03K 4,5단)와 4공으로 분산배치하는 구조를 적용하였으며, 그동안의 캡슐 조사시험을 통해 도출된 여러 설계개선점들이 설계에 반영되었다 [7,8]. 캡슐은 조사시편을 중심으로 다단독립제어 전기히터가 장착된 5단의 구조로 되어 있으며, 조사시험 중 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하기 위하여 14개의 열전대 및 5개의 Ni-Ti-Fe/Al₂O₃ 중성자 모니터를 설치하였다.

두 캡슐은 하나로 IR2 조사시험공에 설치될 예정으로 00M-02K 캡슐은 290±10℃의 조사온도에서, 00M-03K 캡슐내의 노심재료는 350±20℃, 중수로 압력관 재료는 300±10℃의 조사온도로 조사될 것이다. 두 캡슐은 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에서 각각 3일 및 11일 동안 조사되어 중성자 조사량이 각각 최대 3.0×10¹⁹(n/cm²), 1.0×10²⁰(n/cm²) (E>1.0MeV)에 도달하도록 시험할 예정이다.

본 조사시험을 통해 얻어질 결과들은 소내 연구중인 원자력재료의 조사성능 평가시험에 활용되어 국내 원자력발전소 주요 소재 및 기기의 건전성 확보 및 관련 원자력 산업체 기술의 고부가가치화에 크게 기여할 것이다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 경험과 축적된 기술을 활용하여 향후 여러 원자력 재료들의 다양한 조사성능 연구가 활발히 추진될 것으로 기대된다.

2. 00M-02K 및 00M-03K 캡슐 설계 · 제작

한국중공업(주)에서 제작되어 현재 울진 및 영광의 원자력발전소에 설치되어 있는 원자로 압력용기 재질의 조사성능 평가를 목적으로 하는 00M-02K (M은 Material, K는 KAERI의 표기) 계장캡슐의 설계는 최근 하나로 조사시험을 통하여 그 구조건전성이 검증받은 시편의 중심 및 4공 배치 구조의 재료조사시험용 표준형 계장 캡슐인 99M-01K 및 99M-02H 캡슐에 근거하여 [7] 그림 1과 같이 수행되었다. 재료특성치가 서로 다른 노심재료인 stainless steel과 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 동시에 조사시험 하기 위한 00M-03K 캡슐에서 노심재료의 경우 00M-02K 캡슐과 동일하게 4공 구조로 시편이 배치되었으며, 21.25x18.4mm의 규격을 가지는 CT 시편을 포함하는 중수로 압력관 재료의 시편들은 하부 4,5단의 중심에 시편이 배치되는 구조로 설계되었다 (그림 2 참조).

캡슐을 설계하기 위해서는 먼저 캡슐 이용자와의 협의를 통해 정한 캡슐 설계개념에 따라 캡슐의 주요구조, 장입시편, 조사조건 등을 결정하는 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.

두 캡슐의 시편을 제외한 부위의 구조는 원자로압력용기 재료의 조사시험을 목적으로 제작되었던 99M-02H 캡슐의 설계를 기본으로 하였다. 캡슐은 크게 본체부, 보호관부, 안내관부로 나뉘어지는데, 캡슐 본체는 Ø60mm의 STS 316 재질의 튜브 내부에 5단의 Al 열매체로 나뉘어지고, 각 열매체 내에는 조사시편을

포함하여 여러 계장품이 설치되어 있다. 조사시편의 온도는 하나로 출력조건에서 캡슐내 He 진공도의 조절로 1차 조절되며, 각 단별 독립적으로 작동하는 전기히터로 최종 조절되어 진다.

00M-02K 캡슐내 조사시편은 영광 3,4,5호기 및 울진 4호기 원자로의 base 및 용접재료인 SA508 class 3 steel로 표 1에서와 같이 표준 charpy 및 PCVN(pre-cracked V-notch charpy), 1/3 길이의 insert PCVN 시편, 그리고 소형시편들인 SP(small punch), ST(small tensile), MBE(magnetic Barkhausen effect), ABI(automated ball indentation) 시편 등이 case에 넣어져 장입되었다. 또한 00M-03K 캡슐의 경우, 표 2에서와 같이 상부 1,2단과 중심 3단의 #1,3 hole(0, 180° 위치)에는 노심재료 시편을, 중심 3단의 #2,4 hole(90, 360° 위치)과 하단 4,5단에는 중수로 압력관 재료의 시편들이 장입되었다. 노심재료 시편으로는 Cr-Mo, STS 316, 304, 321 재질의 판상 인장시편과 Cr-Mo 재질의 TEM 시편들이 장입되었으며, TEM 시편들은 중심 3단의 #3 hole에 case와 함께 장입되었다. 한편 중수로 압력관 재료 시편으로는 상용의 Zr-2.5Nb 압력관으로 제작된 CB(cantilever beam), 성장(growth), TEM, tensile, CT(compact tension) 시편 등이 동일 재질의 spacer와 함께 case 내에 설치되어 장입되었다. 이와 같이 00M-02K 및 00M-03K 캡슐에는 표 1, 2와 같이 각각 488개 및 251개의 시편들이 장입되었다.

00M-02K 캡슐의 경우 각단에서 시편은 캡슐 중심부에 위치하는 10x10mm 크기의 사각바 형태로 분산배치되었으며, 필요에 따라 시편부 양쪽에는 STS 304 재질의 시편 마개 목적의 spacer를 설치하였다. 한편 00M-03K 캡슐에서 모든 노심재료의 인장시편의 경우 IMEF 시설에서의 조사후 시험을 수행하기 위한 최소 시편 폭인 15mm를 가지므로 직사각형의 형태(15x10mm)의 사각바 형태로 적층되었으며 빈공간에는 유사재료인 STS 304 재질로 채워 넣어 모든 시험공에서 15x10x114 형태로 존재하게 하였다. 한편 중수로 압력관 시편의 경우 다양한 규격의 시편들을 동일재질의 case 안에 spacer와 함께 효율적으로 배치하였다. 00M-03K 캡슐의 4,5단의 경우 비교적 큰 규격을 가지는 CT 시편(21.25x18.4mm)을 포함시키고자 20x20x114mm 규격의 case 내에 시편들을 spacer와 함께 배치한 후 캡슐 중심부에 배치하였다.

캡슐 설계를 위해서는 위의 시편 배치를 기준으로 하여 MCNP 전산코드를 이용하여 캡슐 시편부위의 gamma heating rate와 중성자 조사량 분포를 계산하여야 한다. 그러나 본 설계에서의 gamma 값은 향후 00M-02K 및 00M-03K 두 캡슐의 예상 조사일정 등을 감안하여 동일한 24MW 원자로 출력에서 얻어진 00M-01U 캡슐의 [6] gamma 값(제어봉 370mm 위치)을 사용하였다. 비록 시편 재질의 차이로 인해 유발되는 gamma 값의 변화는 [9] 향후 조사시의 핵연료 연소도, 제어봉 위치 변화 등에 따른 gamma 값의 변화를 감안하면 오차범위에 있을 것으로 추정되어 00M-02K 및 00M-03K 캡슐 모두에 동일한 gamma 값을 기준으로 설계하였다.

00M-02K 캡슐내 시편의 최종 조사온도는 $290 \pm 10^\circ\text{C}$ 를 목표로 하고 있다. 그러나 시편의 조사온도는 원자로 출력으로 일정 온도까지 올라가면 캡슐내 He 압력 및 heater 출력 등을 조절하여 순차적으로 최종 목표온도에 도달하게 한다. 00M-02K 캡슐에서는 고진공 상태인 $0.4\text{K}_{\text{He}=1\text{atm}}$ 조건에서 시편이 목표온도에 도달하도록 gap 설계를 수행하였다. 00M-03K 캡슐의 경우 상부의 노심재료의 경우 $350 \pm 20^\circ\text{C}$ 를

목표로, 하부의 중수로압력관 재료의 경우 $300 \pm 10^\circ\text{C}$ 를 목표로 하므로, 특히 3단의 경우 위치에 따라 상이한 조사온도를 가지도록 열매체 내외부 gap을 설계하였다.

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. 시편형태 변경방법에는 1) 열전달에 중요한 경계부의 길이가 동일하다는 가정하에 수행하는 방법과 2) 부품 각부의 면적을 동일하게 하여 변경하는 방법이 있다. 본 설계에서는 4공 구조의 단에서는 반경방향으로의 열전도를 감안하여 시편이 동일 두께의 ring 형태로 존재하는 것으로 모델링한후 열계산을 수행하였으며, 00M-03K 캡슐의 4,5단의 경우 1)의 방법인 동일 길이법으로 설계하였다.

캡슐내 시편의 조사온도를 결정하는데 있어 가장 중요한 단계는 캡슐내 부품간의 간격을 설계하는 것이다. 이는 앞에서 계산된 gamma heating 값을 사용하여 부품간의 간격을 조절해가면서 시편의 조사 온도를 각 단별로 목표온도로 일정하게 유지되게 조정하는 과정이다. 시편 온도 계산에는 GENGTC, Heating 2f, ANSYS code등의 전산 프로그램들이 이용되는데, 본 캡슐에서는 ANSYS 및 GENGTC code를 이용하여 계산한후 그동안의 자료와의 연관성 차원에서 GENGTC 결과를 바탕으로 하여 최종 설계하였다. 그림 3은 00M-02K 및 00M-03K 캡슐의 각 단에 대한 모델링 치수이다. 이를 사용하여 두 캡슐의 각단에서의 부품간 간격 조정작업을 하였는데, 이때 시편과 열매체간의 간격은 00M-03K 캡슐의 3단 #1,3 hole을 제외하고는 모두 0.1mm로 하였다. 00M-03K 캡슐의 3단 #1,3 hole에 장입된 STS 노심재료의 경우 290°C 조사온도의 Zr-2.5Nb 시편과 상이한 350°C 의 조사온도를 조성하기 위하여 특별히 gap을 0.12mm로 설계하였다. 그림 4는 00M-02K 캡슐 최상위단(1단)에 대한 간격결정 단계를 보여주고 있는데, 일반적으로 캡슐의 최상위단(1단) 위에서부터 중심부로 갈수록 열매체와 외통간의 간격이 감소하다가 다시 증가하는 경향을 가진다.

한편 두 캡슐 모두 시편부에는 14개의 열전대가 설치되어 있어 조사시험 동안의 조사시편의 온도 변화는 캡슐 조절장치에 기록된다. 또한 캡슐내에는 중성자 조사량 평가를 위한 Ni-Ti-Fe 및 Al_2O_3 fluence monitor(F/M)가 각 단의 Al Holder에 장입되었다. 또한 00M-02K 캡슐 시편내부에는 조사량 평가방법의 비교검증을 위하여 외국의 표준 dosimeter가 설치되었다.

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. 그림 5는 캡슐 조립전 부품, 부품 조립후 외통 삽입전 모습, 그리고 최종 제작된 캡슐 사진을 보여주고 있다.

3. 향후 조사시험 계획

00M-02K 및 00M-03K 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 평가가

우선적으로 수행될 것이다. 캡슐이 이들 노외 시험조건을 모두 만족하는 경우, 24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에 장입되어 설계된 조사온도에서 조사시험될 예정이다.

24MW 출력의 하나로 IR2 조사시험공에 He 1기압으로 유지된 캡슐이 장입되는 경우, 캡슐내 조사시료 온도는 각단에서의 gamma heating 값에 따라 기본적으로 100~200℃로 상승한다. 이에 캡슐 내부 He gas 압력을 1기압에서 0.4K_{He,1atm} 기압으로(약 35 torr 해당) 낮출 경우 각단에서의 부품간의 간격 차이에 의해 조사시료는 각각 목표온도로 상승하게 된다. 최종적으로 각단별 설치된 micro-heater를 이용하여 각 단별 온도의 미세조절을 하게 되는데 약 20~80℃ 까지 시편온도를 상승시킬 수 있다. 이러한 변수조절에 따라 캡슐에 장입된 원자로 압력용기 재료 시편의 조사온도는 최종적으로 290±10℃로 조절되게 된다.

00M-02K 캡슐은 원자로 압력용기의 40년 설계수명동안의 중성자 조사량인 7.26×10¹⁹ (n/cm²) (E>1.0 MeV)을 기준으로 하여 1-9.0×10¹⁹ (n/cm²) 범위로 조사되도록 약 3일정도 조사될 것이고, 00M-03K 캡슐은 1.0×10²⁰ (n/cm²) (E>1.0 MeV) 이상의 조사량을 갖도록(24MW 11일 이상) 조사시험될 예정이다. 조사시험된 캡슐은 하나로 작업수조 내에서 일정기간 보관되어 냉각기간을 거친 후 캡슐절단장치로 절단되어 캡슐운반용 Cask에 넣어져 IMEF 시설로 이송되어 해체된다. IMEF hot cell 내에서 각종 시편의 기계적 시험 및 F/M의 중성자 평가 등의 작업이 수행되어 조사 시편의 조사성능 평가 작업이 수행될 예정이다. 또한 일부 F/M은 외국의 평가기관으로 보내져 비교 분석될 예정이다.

4. 결 론

국내 영광 3,4,5호기, 울진 4호기 원자로의 압력용기재로 사용된 원자로 압력용기 재료의 중성자 조사특성 평가용 계장캡슐(00M-02K) 및 노심재료인 STS 재료와 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금을 동시에 조사시험하기 위한 계장캡슐(00M-03K)을 설계·제작하였다. 캡슐의 기본설계는 시편의 중심배치 및 4공 배치구조의 표준형 캡슐 구조를 기준으로 하였다. 00M-02K 캡슐은 원자로 압력용기재인 SA508 시편들을 290±10℃ 단일온도에서 조사되도록 설계되었으며, 00M-03K 캡슐은 서로 다른 재질인 stainless steel 계열의 노심재료와 Zr-2.5Nb 합금의 중수로 압력관 재료를 각기 다른 350±20℃, 300±10℃의 조사온도로 시험하도록 설계되었다. 캡슐내에는 조사시편의 온도 및 조사량을 측정하한 열전대 및 Ni-Ti-Fe/Al₂O₃ 중성자 모니터가 설치되었다. 두 캡슐은 하나로 IR2 조사시험공에서 중성자 조사량이 각각 최대 3.0×10¹⁹(n/cm²), 1.0×10²⁰(n/cm²) (E>1.0MeV)까지 조사될 예정으로, 조사후 시편의 물성평가등을 통해 관련 재료의 건전성 확보 및 조사특성 평가에 크게 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력증장기사업중 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, KAERI Report, KAERI/RR-2038/99 (2000).
6. 주기남외, 하나로 공동이용 활성화를 위한 대학 연구지원용 하나로 계장캡슐 (00M-01U)의 조사시험, '01춘계원자력학회, Cheju, Korea, May 2001.
5. 강영환외, ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석, '99추계원자력학회, Seoul, Korea, October 1999.
6. 주기남외, 원자로 압력경계 재료 조사용 계장캡슐 (98M-02K) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1392/99 (1999).
7. 주기남외, 한국중공업(주) 제작 국산 원자로 압력용기소재의 조사용 계장캡슐 (99M-01K·02H) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1646/2000 (2000).
8. 주기남외, 하나로공동이용활성화를 위한 대학연구지원용 계장캡슐 (00M-01U) 설계·제작 보고서, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1857/2001 (2001).
9. 서철교, 계장 캡슐(00M-01U)의 조사시험에 대한 핵적 특성 평가, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-920-00-089, 2000년 12월.

Table 1. Specimens loaded in 00M-02K capsule.

단	시편내역	비고
1단	표준 PCVN 8개	(4공 × 2열)
2단	표준 Charpy 8개	
3단	소형시편 Case 22개 -SP : 10x10x12 14개 -ST : 10x10x30 4개 -MBE: 10x10x14 2개 -ABI : 10x10x28 2개 표준 PCVN 1개	최대 flux 지점
4단	1/3PCVN 포장(10x10x55) 4개 표준 Charpy 4개	1/3PCVN 27개를 호일포장
5단	표준 PCVN 8개	
합 계	488개	

Table 2. Specimens loaded in 00M-03K capsule.

구 분	단	시편 및 규격	개수	시편부 모양	재료 및 비고
노심 재료	1	Tensile (76x15x1) ¹ (G ² :25.4x3.7)	4x10=40	Square Bar 4개 (15x10x76 mm)	Cr-Mo, STS316(LN ³), STS321
	2	Tensile (76x15x1) (G:25.4x3.7)	4x10=40	Square Bar 4개 (15x10x76 mm)	STS316(LN), STS321, STS304(NG ⁴), STS316(LN)
		Tensile (76x15x1)	1x10=10	Square Bar 1개 (15x10x76 mm)	STS304(YG ⁵)
		CB ⁶ (38x3.2x4.33)	1x6 = 6	Square Bar 1개 (10x10x114mm)	Zr-2.5Nb (시편/Case)
		Growth(Length) (76.83x3.86x0.81)	1x4 = 4		
중수로 압력관	3	Tensile (76x15x1)	1x10=10	Square Bar 1개 (15x10x76 mm)	STS304(UC ⁷)
		TEM (∅3x0.1)	4x4(X) =70	Square Bar 4개 (5x7.5x24 mm)	Cr-Mo(X는 3~5개 시편)
		Growth(Circumf.) (38.23x6.35x2.59)	1x9 = 9	Square Bar 1개 (10x10x114mm)	Zr-2.5Nb (시편/Case)
		Growth(Length) (76.83x3.86x0.81)	1x4 = 4		
	4	TEM (∅3x0.1)	1x15=15	Square Bar 1개 (20x20x114mm)	Zr-2.5Nb (시편/Case)
		Tensile(Circumf.) (40.04x15x2 (G:12.7x4))	1x2 = 2		
		Tensile(Length) (44.7x12.7x4.33 (G:12.7x4.32))	1x4 = 4		
		CT ⁸ (21.25x18.4x4.33)	1x12=12		
	5	Tensile(Circumf.) (40.04x15x2 (G:12.7x4))	1x12=12	Square Bar 1개 (20x20x114mm)	Zr-2.5Nb (시편/Case)
		Tensile(Length) (44.7x12.7x4.33 (G:12.7x4.32))	1x4 = 4		
		CT (21.25x18.4x4.33)	1x9 = 9		
합 계		251개		노심(170) + 중수로압력관(81)	

- 1 : all dimension in mm, 2 : Gauge 부분의 길이 및 폭
 3 : LN=low Nitrogen, 4 : NG=nuclear grade
 5 : YG=Yonggwang archive, 6 : CB=cantilever beam
 7 : UC=Ulchin archive, 7 : CT=compact tension

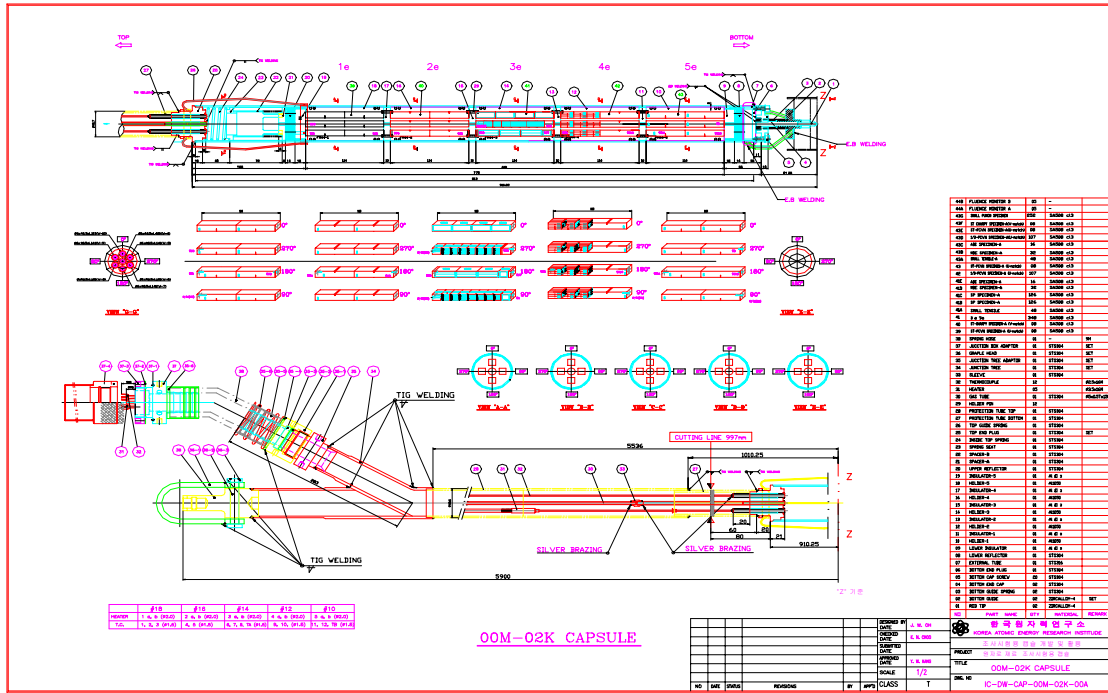


Fig. 1 Drawing of 00M-02K capsule for irradiation of RPV material in HANARO.

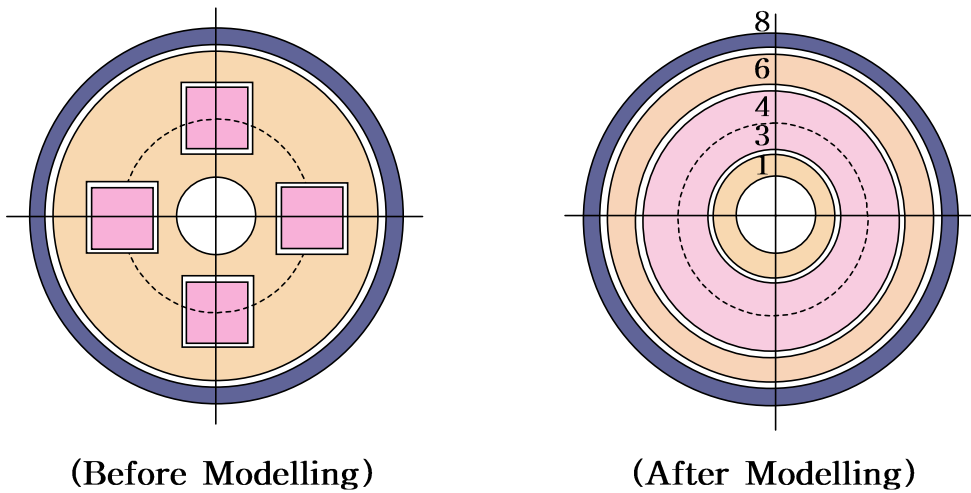


Fig. 2 Calculation model for 4 hole structure of 00M-02K & 00M-03K capsules.

□

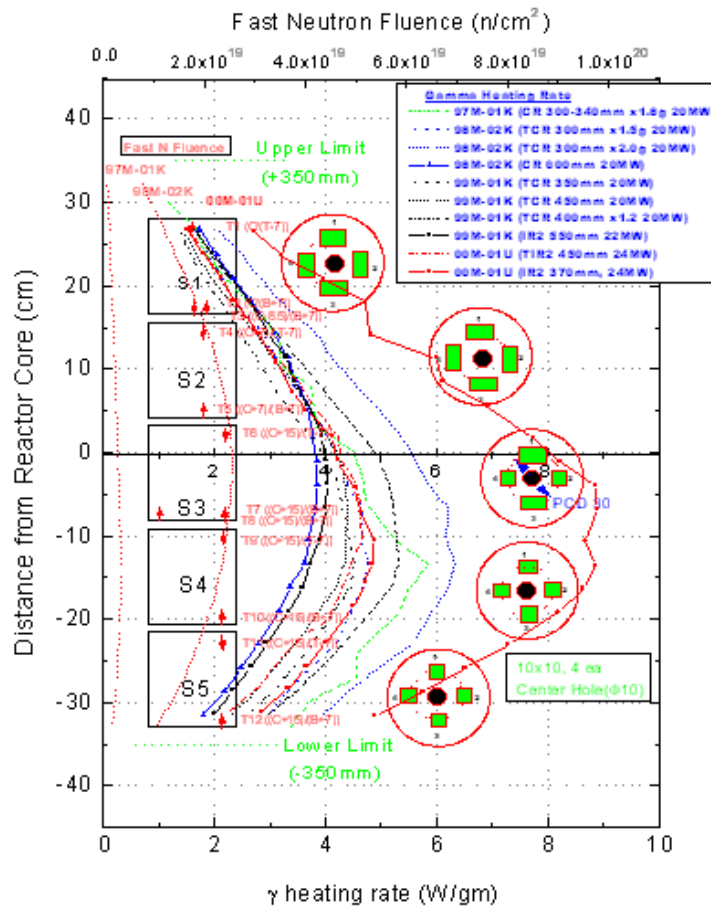


Fig. 3 00M-02K/00M-03K 캡슐내 조사시편 배치 및 발열량 (원자로 출력 24MW).

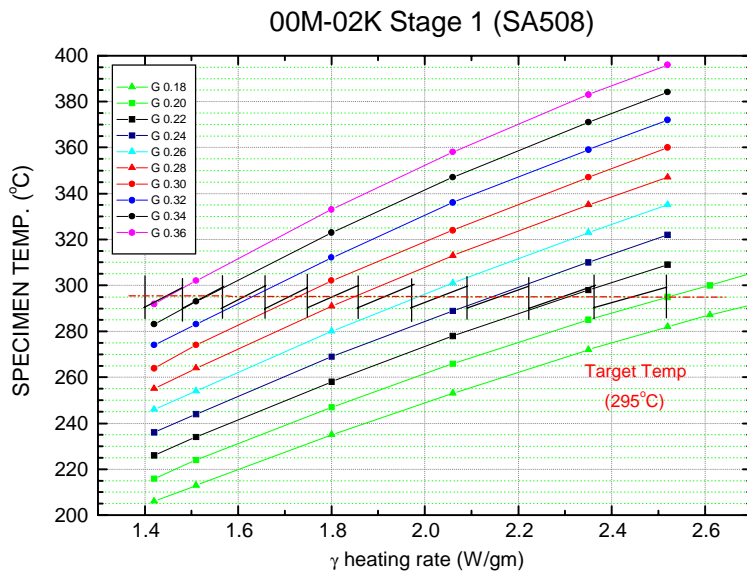


Fig. 4 Gap determination at Stage 1 of 00M-02K capsule (SA508 RPV steel).



Fig. 5 00M-02K 및 00M-03K 캡슐 부품, 외통 장입전 조립모습, 최종 제작 모습.