

## 중성자속 측정용 무계장캡슐 개발

### Development of Non-Instrumented Capsule for Neutron Flux Measurement in HANARO

김봉구, 주기남, 신운택, 오종명, 강영환

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

하나로 조사공의 축방향 중성자속 분포 및 조사시편의 온도를 측정, 평가하고, 원자로 재료(RPV SA508 cl. 3)의 조사를 위한 무계장캡슐(98M-01K)을 성공적으로 설계, 제작하여 하나로 CT 조사공에서 조사하였다. 하나로 조사공의 중성자속 측정을 위해 fluence monitor(F/M)와 시편의 조사온도 평가를 위해 thermal monitor(T/M)도 개발하였다. 무계장캡슐 내부는 5 단으로 구성되어 있다. 각 단의 열매체에 F/M, T/M 및 원자로 재료의 조사시편을 설치하였다. 본 논문에서는 무계장캡슐(98M-01K) 개발과 관련한 F/M 및 T/M 개발, 캡슐 설계개선, 캡슐조립과 관련된 기술 내용들을 기술하였다.

#### Abstract

The non-instrumented capsule(98M-01K) for measuring and evaluating the axial neutron flux distribution of a test hole in HANARO and the temperature of specimens, and for irradiating the reactor material(RPV: pressure vessel material, SA508 cl. 3) was successfully designed, fabricated and irradiated in the CT test hole at HANARO. Fluence monitor(F/M) and thermal monitor(T/M) were developed to measure and evaluate the neutron fluence of a test hole in HANARO and the irradiation temperatures of the specimens, respectively. There are 5 stages having the specimens in the capsule main-body. F/M, T/M and specimens were inserted in thermal media of each stage. The several technical points, related to structural design change, monitor design and manufacturing, capsule assembling, obtaining in developing the non-instrumented capsule(98M-01K) was described in this paper.

#### 1. 서론

연구로를 이용한 조사시험에 이용되는 시설 중 캡슐은 여러 조사조건을 충족시킬 수 있는 이유로 해서 가장 유용하게 사용되는 장비이다. 이러한 필요에 따라 한국원자력연구소에서는 하나로를 이용한 조사시험용 무계장 및 계장캡슐을 국내 기술력으로 설계·제작에 필요한 기술을 자체적으로 개발하여 조사시험을 수행해 오고 있다.[1-8]. 하나로에는 7개의

수직공이 있으며, 이 중 노심 내부에 있는 3개의 조사공(CT, IR1, IR2)은 캡슐을 이용한 재료조사시험에 활용되고 있다. 그리고, reflector에 있는 OR 조사공도 재료 및 핵연료 조사시험에 활용될 것이다.

캡슐을 이용한 재료 조사시험을 수행할 때 조사조건, 즉 중성자속 분포, 조사온도 등을 정확하게 측정하여 평가하는 것은 매우 중요하다. 이는 조사시험 결과 평가에 대한 신뢰성을 갖게 할 수 있기 때문이다. 따라서, 조사시험 초기에는 조사시험과 관련된 자료(중성자속 분포, 조사온도 등)를 확보하는 것이 중요하다. 이에 따라 무게장캡슐을 이용한 재료조사 및 하나로 조사공의 축방향 중성자속 분포를 측정하기로 하였다. 이와 아울러 원자로 재료의 조사시험을 함께 수행하기로 하였다. 무게장캡슐 내부는 5단으로 구성되어 열매체 내부에 조사시편을 위치시켰다. 조사시험시 조사공의 중성자속 분포 측정을 위해 fluence monitor(F/M)를 개발하였으며, 캡슐 내부의 각단 열매체 외부에 F/M을 180° 방향으로 2 set를 위치시켜 조사공의 축방향 중성자속 분포를 측정하였다. 그리고, 조사시험시 각 단에 있는 시편이 도달하는 온도를 평가하기 위하여 thermal monitor(T/M)를 설계/제작하였으며, 각 단의 조사시편 주위에 축방향으로 3set를 위치시켰다.

본 논문에서는 무게장캡슐(98M-01K) 개발과 관련한 monitor 설계/개발, 구조설계변경, 캡슐조립에 있어서 기술적인 보완점들을 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 무게장캡슐 제작 요구사항

하나로 조사공의 중성자속 분포 측정용 무게장캡슐의 기본적인 구조 설계개념은 이미 설계/제작되어 조사시험이 완료된 표준형 계장캡슐(97M-01K)[4-6]을 기본으로 하였다. 단, 계장캡슐 구조에서 계장 line, 계장 line 보호판과 flexible tube가 제외되었다. 그리고, 무게장캡슐 전체 길이는 하나로 핵연료 수송용기를 이용한 이송을 고려하여 1030mm이하로 하였다. 무게장캡슐에는 5단의 열매체 내에 조사시편이 있으며, 중성자속 및 온도 monitor가 각 단에 설치되었다. 재료 조사 및 중성자속 분포 측정용 무게장캡슐의 설계·제작·검사에 관한 요구사항은 참고문헌[9]에 상세히 기술되어 있다.

하나로에서 조사시험 시설로 이용되는 캡슐 설계시 반영되어야 할 주요 요구사항으로는 기능적 요구사항(functional requirements), 성능 요구사항(performance requirements), 특별 요구사항(specific requirements), 외통 요구사항(external tube requirements), 시편 요구사항(specimen requirements), Monitor 요구사항(monitor requirements), 열매체 요구사항(thermal media requirements) 등이 있다. 무게장캡슐 개발과 관련하여 주요 요구사항은 다음과 같다.

#### 가. Monitor 요구사항(Monitor requirements)

무계장캡슐은 계장캡슐과는 달리 조사중 조사온도 및 분위기를 조정할 수 없기 때문에 조사시편의 조사온도 확인 및 중성자 조사량 확인을 위해 T/M과 F/M을 캡슐 내부의 적절한 위치에 설치한다.

##### (1) Fluence monitor(F/M)

F/M은 하나로 조사공의 축방향 중성자속 분포와 조사시편이 받는 총 fluence를 측정하는 것이다. F/M의 조사조건은 하나로 출력 20 MW에서 5-10 시간 조사하여 2 일 이내에 해체되어 후속실험이 수행되어야 한다. 이를 위해서는 F/M은 조사에 따른 방사선량이 가능한 작게 되도록 설계되어야 한다. 그리고, 신뢰성 있는 자료 확보를 위해 F/M은 캡슐내부의 각단 열매체의 2 곳에 설치한다. 이를 위해 열매체 표면에 F/M을 설치하기 위한 홈을 가공한다. F/M 재료는 Ti, Fe, Ni, Nb, Lu, Mo, Cu, Co,

Ag, In, Ta 등을 사용한다. F/M을 설치하기 위한 알루미늄 관의 직경은  $\varphi 0.75\text{mm}$ , 길이는 F/M이 설치되는 위치에 따라 83~110mm로 한다.

(2) Thermal monitor(T/M)

T/M은 캡슐내 조사시편이 도달하는 온도를 thermal indicator(T/I)의 용점(melting point)에 따른 형상변화를 관찰하여 평가하는 것이다. 즉, 용점이 다른 합금들을 온도를 측정하고자 하는 부위에 설치한다. 용점이 약 190~310℃인 합금을 T/I로 사용한다. T/M에 T/I를 설치하기 위해 T/M에 직경이  $\varphi 1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 인 hole을 가공하며, T/M은 조사시편과 동일한 재질을 사용한다.

나. 열매체 요구사항(Thermal media requirements)

(1) T/M 설치 홈 가공

열매체내 T/M 장전부의 가공치수와 가공공차는 T/M과 열매체의 간격을 가능한 한 적게 하기 위해 각 열매체에 장전하는 T/M을 설계에 따라 결정한다. 열매체내 T/M 장전부의 가공치수 공차는 T/M 제작후 실측치수의 +0.1~+0.25mm로 한다.

(2) F/M 설치 홈 가공

열매체 표면에 폭 1mm, 깊이 1.2mm의 홈을 가공한다. 길이는 F/M 길이에 따라 가공한다. 가공부위의 가공치수 공차는 폭은 0.0~+0.1mm, 깊이는 -0.1~+0.1mm, 길이는 0.5~+1.0mm로 한다.

2.2. 무게장캡슐 구조 설계/제작

하나로 조사공의 중성자속 분포 측정용 무게장캡슐의 구조 설계는 계장을 위한 heater, 열전대, 분위기 조정을 위한 가스관 및 보호관을 제외하고는 기본적으로 표준형 계장캡슐과 유사하다. 그러나, 조사공의 중성자속 분포 측정을 위한 F/M 및 조사시편 온도 측정을 위한 T/M이 개발되었고, 하나로 핵연료 이송용 용기사용, 캡슐 내부의 He 가스 주입과 하나로 조사공에서 표준형 계장캡슐의 성능시험을 위해 발견된 캡슐 고정문제에 대한 검토를 수행하여 캡슐 고정부분에 대한 설계를 일부 변경하였다.

가. 캡슐 하단부 설계개선

표준형 계장캡슐의 고정문제에 대한 검토에 의해 캡슐 하단부 guide arm 부위를 45° bending시키는 방안이 제시되었다[10,11]. 중성자 측정용 무게장캡슐 설계시 이와 같은 사항들을 고려하여 캡슐 하단부의 guide arm에 대한 설계를 개선하였다. 개선 내용으로는 guide arm 끝부분의 가공을 하지 않기로 하였으며, guide arm의 길이를 기존 것보다 길게 하여 bending이 용이하게 하였다. 이외의 치수는 캡슐의 기술적 사항을 고려하여 기존의 치수와 동일하게 하였다.

Guide spring의 하중 특성은 핵연료 및 캡슐의 하나로 장입 및 유지시 그 안전성과 직결되는 매우 중요한 특성중의 하나이다. 따라서, 중성자 측정용 무게장캡슐에 대한 guide spring 특성치 결정은 하나로 핵연료의 무게와 spring 특성치와 표준형 계장캡슐의 spring 특성치[12]를 참조하였다. 중성자 측정용 무게장캡슐 설계도[13]에서 무게장캡슐의 총무게는 약 10 kg으로 평가되었다. 이에 따라 무게장캡슐용 spring은 하나로 36 핵연료봉 집합체의 guide spring을 기준으로 설계되어 제작되었다. 중성자 측정용 무게장캡슐의 제작 완료 후, 무게장캡슐의 무게는 10.9 kg으로 측정되어 무게장캡슐용 spring 설계는 적합한 것으로 판단되었다.

나. Fluence Monitor(F/M) 설계/제작

하나로에서 캡슐을 이용하여 시편 조사시험을 수행함에 있어서 조사량측정 및 평가는 조사시편의 조사후시험 결과분석에 매우 중요하다. 뿐만 아니라 조사공의 특성 및 운전이력에 따른 조사이력 등도 평가할 수 있다. 연구로에 장입된 캡슐에 대한 핵적 및 열적

조건들을 평가하기 위해서는 전산코드를 이용한 계산법과 실제 캡슐 내에 F/M을 장입하여 조사시험을 수행한 후 직접 activity를 측정하여 평가하는 방법이 있다.

무계장캡슐, monitor 및 spectral set의 예상 방사선량을 평가하여 F/M에 활용할 재료들이 채택되었다. 이러한 재료들이 직경 0.75mm인 알루미늄 관에 위치하도록 하였다. 알루미늄 관 외부는 구분을 위해 압착하였으며, 압착되는 부분의 길이를 달리하였다. 이는 F/M이 캡슐 내부 각 단계 있는 열매체에 설치될 때 두 번째 압착마디가 긴 쪽이 캡슐 상부를 향하도록 하기 위함이다. 그리고, F/M을 각 단계에 설치하기 위해 F/M set의 길이를 달리하여 각 단계에 설치하기 위한 구분을 하였다. F/M 설계에 따라 제작된 F/M은 Fig. 1과 같다. 이와 같이 제작된 F/M은 각 단계의 열매체 외부에 홈을 가공하여 2개씩 설치하였다.

#### 다. Thermal Monitor(T/M) 설계/제작

Thermal indicator(T/I)가 삽입된 T/M을 설계/제작하여 무계장캡슐 내에 설치하면 조사시험중 시편의 온도를 간접적으로 할 수 있다. T/M을 이용하여 조사시편의 온도 평가는 하나로에서 조사시험이 이미 무계장캡슐을 이용하여 수행되었다[1]. 무계장캡슐 조사후 시험 결과[3]에 의하면, 무계장캡슐 내에 설치되었던 T/M로서 조사시편의 온도 평가에는 어려움이 있었다. 이를 고려하여 중성자속 측정용 무계장캡슐에 이용된 T/M를 아래와 같이 실험을 수행하여 설계, 제작하였다.

T/M을 설계, 제작하기 전에 Netzsch의 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 200을 사용하여 표준시료에 대한 용융온도를 측정되었다. 이 결과, 온도 가열속도, 분위기 등에 차이는 있지만, 표준시료의 측정온도는 측정 오차범위( $\pm 3\%$ ) 내에 있어 측정장비에 대한 신뢰도를 확인하였다. 그리고, 14 종류의 T/I에 대한 용융온도를 측정하여 조사시편의 예상온도 영역인 230 ~ 320 $^{\circ}\text{C}$ 에서 7 종류의 T/I를 선정하였다. 선정된 T/I에 대한 실험결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 또한, T/I의 온도에 따라 변화는 형상을 관찰하기 위해 T/I가 기계적으로 설치된 T/M를 예비 제작하여 DSC200을 이용하여 모양변화를 관찰하였다. T/I의 용융점까지의 가열전과 가열온도에서 5 시간 가열 후에는 형상이 변했음을 확인하였다. 이에 따라 하나로 출력 20 MW에서 5 시간 이상 조사된 T/M의 T/I 형상 변화를 관찰하였다. T/M의 재원은 길이 15mm, 폭 5mm, 두께 0.5mm이고, 여기에 T/I 설치를 위해  $\phi 1\text{mm}$ 인 7개의 구멍이 있도록 설계하였다. T/M 재질은 조사시편과 동일한 RPV(Y5 A2) SA508 cl. 3이다. 그리고, T/M의 위치와 T/I를 알 수 있도록 각 T/M과 각 구멍에 번호를 표시하였다. Fig. 2에는 T/I 실험결과와 T/M 설계에 따라 제작된 전형적인 T/M을 보여준다. 이와 같이 제작된 T/M은 조사시편과 함께 무계장캡슐의 각 단계 3 set씩 조립되었다.

### 2.3. 조사시편 설계/제작

무계장캡슐 내에 설치되어 조사되는 시편의 재질은 RPV(Y5 A2) SA508 cl3이며, 조사후시험 목적에 따라 다양하게 설계되었다. 이들 시편 종류로는 1/2T-CT specimen-A, Charpy specimen-A(V-notch), PCVN specimen-A(U-notch), small tensile-A, ABI specimen, MBE specimen, S.P. test specimen 등이 있으며, 시편의 총 수량은 258개이다. 그리고, 시편 고정을 위한 spacers가 있으며, 작은 시편의 조립을 위한 4종의 assembly가 있다. 각 단별로 설치된 시편에 대한 특성은 Table 2와 같다.

### 2.4. 캡슐 부품제작 및 조립

#### 가. He 가스 주입구 제작

초기의 무계장캡슐[1]은 캡슐 하단부에 He 가스 주입구가 있었으나, 중성자속 분포 측정용 무계장캡슐은 캡슐 상단에 주입구를 설치하기로 하고, 특수 top end plug를 예비

설계하였다. 부품 제작 전에 예비설계에 따라 He 가스 주입을 위한 예비 부품을 가공하였으며, 밀폐시험을 수행하여 이에 대한 가능성을 확인하였다. 즉, He 가스를 주입하고 진공을 뽑은 후 압력 변화를 관찰하였다. 약 10분이 경과한 후에도 진공도는 계속 유지되어 He 가스 주입구를 TIG 용접을 충분한 시간으로 판단되었다. 이에 따라 top end plug와 He 가스 주입 plug의 설계가 확정되었으며, top end plug가 제작되었다.

#### 나. 캡슐 부품제작 및 조립절차

하나로 CT 조사공에 장입되어 조사되는 무계장캡슐은 내부에는 열매체, 열매체에는 조사시편, 조사중 시편 온도 평가를 위한 T/M 및 조사시험시 중성자속 분포 측정을 위해 F/M 등이 있다. 그리고, 무계장캡슐은 하나로 노심에 장입되기 때문에 품질의 신뢰도와 안정성이 보장되도록 제작되었다. 앞서 기술된 설계도와 시방서에 따라 부품들이 가공되었으며, 치수검사가 수행되었다. 가공된 무계장캡슐 부품들은 Fig. 3과 같다. 그리고, 캡슐 조립은 캡슐 하단부가 먼저 용접, 캡슐 내부의 각단의 열매체, 시편, T/M 및 F/M 조립, 캡슐 상단부가 조립되어 캡슐 외통과 top end plug부분의 TIG 용접으로 진행되었다. 그리고, 최종적으로 무계장캡슐 열적 설계에 따라 외통 내부의 분위기는 0.4기압의 He 가스로 충진한 후 plug 부분을 TIG 용접하였다. Fig. 4는 최종 조립된 무계장캡슐이다.

#### 2.5. 검사

본 무계장캡슐의 검사는 부품검사, 조립중 검사 및 최종조립검사로 나누어 수행되었다. 치수검사는 조립 전에 가공품에 대한 형상과 치수를 제작도면과 비교하여 검사하였다. 그리고, 공정상 필요한 시험 및 검사는 캡슐 검사절차에 따라 수행하였다. 무계장캡슐의 조립이 완료된 후에는 용접부에 대한 비파괴 검사(NDT)가 수행되었다. 또한, 제작 완료된 무계장캡슐의 He 가스 누출여부 및 용접부의 기밀성을 확인하기 위하여 He leak 시험을 수행하였다. He leak 시험결과에 따르면 무계장캡슐 용접부위의 기밀성은 우수한 것으로 판단되었다. 또한, 캡슐 내부 각 단의 시편, F/M 및 T/M, 알루미늄 insulator 등의 조립상태를 명확히 확인하기 위하여 중성자를 이용한 neutron radiography를 실시하였다. 이 결과, 무계장캡슐 내부의 열매체, 시편, T/M, F/M 등의 조립상태가 양호함을 확인하였다.

#### 3. 결론

- 1) 기존 캡슐의 설계를 개선하여 중성자속 측정용 무계장캡슐(98M-01K)을 개발하였으며, 이를 하나로 CT 조사공에서 조사하여 후속 시험을 수행 중에 있다.
- 2) 하나로 조사공의 축방향 중성자속 분포측정을 위해 fluence monitor(F/M)를 개발하였다.
- 3) 캡슐 내 조사시편이 도달한 온도를 평가하기 위하여 thermal indicator(T/I)를 이용한 thermal monitor(T/M)를 개발하였다.

#### Acknowledgement

본 연구는 1998년도 과학기술부의 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. 김용성 외, 무계장캡슐의 설계 및 제작, KAERI/TR-509/95, 한국원자력연구소, 1995.

2. 강영환 외, 계장캡슐 활용기술개발, KAERI/RR-1760/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1997.
3. 강영환 외, 무계장캡슐을 이용한 원전재료의 하나로 조사 및 조사후 시험, KAERI/TR-1164/98, 한국원자력연구소, 1998.
4. 주기남 외, 하나로 계장캡슐을 이용한 원자로 재료의 중성자 조사시험, '98 추계학술 발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998, 10.
5. 주기남 외, 재료조사시험용 계장캡슐(97M-01K) 설계,제작 보고서, KAERI/TR-1226/99, 한국원자력연구소, 1999.
6. K.N. Choo, et al., Irradiation of Reactor Materials Using an Instrumented Capsule in HANARO, The 6th Asian Symposium on Research Reactor, March 29 to 31, 1999, Mito, Japan.
7. 강영환 외, 재료 조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서, KAERI/TR-985/98, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1998.
8. Y.H. Kang, et al., Structural Analysis for the HANARO Irradiation Capsule through Vibration Test, The 6th Asian Symposium on Research Reactor, March 29 to 31, 1999, Mito, Japan.
9. 김봉구, 중성자속 분포 측정용 무계장캡슐 기술시방서, HAN-IC(CA)-DD-SP-98-004, 1999, 9.
10. 주기남, HAN-IC-CR-98-002, 1998, 8.
11. 주기남, HAN-IC-memo8-7, 1998, 9.
12. 주기남, Guide spring 상수 및 캡슐하단부 결정, IC-OA7-C05, 1997, 4.
13. 중성자속 분포 측정용 무계장캡슐 설계도, HAN-IC(CA)-DW-CAP-98M-01K, 1998, 11.

Table 1. Test results for thermal monitors.

No.	Material	Measured value(°C)		Heating temp(°C)	Remark
		ave. onset	ave. peak		
1	Sn-Sb	239,1	243,6	250	+6,4°C
2	Pb-In	238,1	262,1	270	+7,9°C
3	Pb/In/Sb	254,4	272,1	280	+7,9°C
4	Pb/In	260,3	275,8	285	+9,2°C
5	Sn/Ag	260,3	275,8	285	+9,2°C
6	Pb/In/Ag	313,3	315,9	320	+4,1°C
7	Pb/Sb	312,3	317,7	325	+7,3°C

Table 2. Characteristics of specimens in the non-instrumented capsule.

Stage	Specimen & dimension	Q'y	Shape	Remark
1	PCVN(U-notch), 10×10×55 mm	8	square bar	SA508 cl. 3
2	Charpy(V-notch), 10×10×55 mm	8	square bar	SA508 cl. 3
3	PCVN(U-notch), 10×10×55 mm ABI, 27,5×10×2,5 mm	8	square bar	SA508 cl. 3
		8		
4	Charpy(V-notch), 10×10×55 mm ABI, 27,5×10×2,5 mm MBE, 10×2,5×1,0 mm	8	square bar	SA508 cl. 3
		4		
		80		
5	1/2T-CT, 31,75×30,48×12,7 mm Small tensile, 27,5×5×0,5 mm S.P., 10×10×0,5 mm	6	square bar	SA508 cl. 3
		56		
		72		

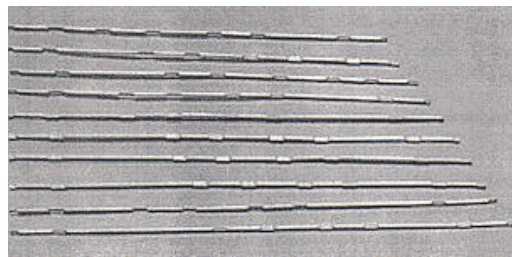


Fig. 1. Photograph of fluence monitors



Fig. 2. Photograph of a thermal monitor



Fig. 3. Photograph on parts of 98M-01K before assembling



Fig. 4. Photograph of 98M-01K after assembling