

'95 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 재료 조사시험용 계장캡슐의 열적 및 역학적 특성

( Thermal and Mechanical Characteristics of Instrumented Capsule  
for Material Irradiation Test )

강영환, 박종만, 주기남, 박진석  
한국원자력연구소

이영신, 최명환  
충남대학교

### 요 약

다목적연구로 HANARO를 이용한 압력용기 재료 조사시험에 이용될 계장캡슐 (Instrumented Capsule)의 열적, 역학적 특성분석이 수행되었다. 캡슐에 장입될 조사시험의 온도평가는 GENGTC와 HEATING 7.2f를 이용 계산하였다. 또한 이들 온도분포로 인하여 발생하는 캡슐외통과 End Plug에서의 응력해석은 전산코드 ANSYS를 이용 수행하고, 냉각수압에 의한 캡슐본체의 좌굴응력을 계산함으로써 강도평가를 하였다.

### 1. 서 론

원자력 핵심부품재의 노내 사용중 중성자 조사로 인한 여러 기계적 물성의 저하현상인 재질취화는 발전소 수명단축의 주요 원인중의 하나이다. 따라서 이들 부품재의 노내 거동평가 및 예측, 새로운 원자력 재료개발이나 설계변경시에도 실제 원자로에 적용하기에 앞서 이들 재료의 노내 조사거동을 확인하기 위하여 연구로를 이용한 조사시험에 캡슐이 가장 활발히 이용되고 있다.

조사시험은 조사용 캡슐내에 장입되어 시험하게 되는데, 캡슐은 원자로 노심에 장전되기 때문에 핵적, 열적, 규격적인 제한을 받는다. 조사중 시험은  $\gamma$ 발열에 의해 자기 발열을 하기 때문에, 시험의 온도는 노심내의 위치에 따른  $\gamma$ 선 강도에 따라 달라진다.  $\gamma$ 선 강도는 대개 노심의 출력분포에 따르기 때문에, 그 강도는 일정하지 않게 분포한다. 그러므로 캡슐내에 장전될 시험의 온도는 노심의 출력분포에 따라 축방향의 중앙은 높고, 상·하단은 낮게 분포된다.[1]

본 연구에서는 하나로(Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor : HANARO) 노내에 설치되어 재료 조사시험에 사용될 계장캡슐에 대한 온도계산과 응력해석등이 수행되었다. 캡슐 본체에서의 온도는 전산코드 GENGTC와 HEATING 7.2f[2]를 이용하여 계산하였다. 캡슐본체 외통에서의 온도구배로 인한 기계적 응력과 외통과 End Plug에서의 열응력 해석은 전산코드 ANSYS[3]를 이용 수행하여, 재료의 허용응력과 비교함으로써 강도평가를 하였다.

## 2. 캡슐개요

조사시험에 이용되는 캡슐은 무계장과 계장캡슐로 나누나, 시편의 조사조건 제어를 할 수 있는 캡슐이 계장캡슐이다. 그러므로 일정한 온도영역에서 재료의 조사시험을 수행키 위해 시편의 온도를 정확히 제어할 수 있는 다단독립 히터(heater) 제어형 캡슐을 선택하였다. 다단독립 히터 제어형 캡슐은 하나로 설계조건에 양립하여야 하며, 원하는 시편의 종류, 수량 및 크기를 수용할 수 있도록 설계하고자 하였다. 일차로 Charpy 시험편과 원형의 충격시험편을 혼재시키고자 하며, 필요에 따라 Charpy 시험편 대신에 판상의 인장 시험편을 넣을 수 있도록 설계하였다. 시편의 조사온도는 290~330 °C 하에서 중성자 조사량에 따른 조사전·후의 특성을 파악토록 설계하였다. 캡슐에 대한 형상은 Fig.1에 나타내었으며, 주요한 부품들은 외통, 보호관, End Plug, 절연체, 반사체, 시편, 열매체, 스프링, 히터 등으로 되어 있다. 캡슐본체의 재질은 SA-240 Type304 스테인레스강이고, 조사시료는 캡슐 중앙을 중심으로 내부 다섯영역에 대칭이 되도록 Fig.1과 같이 배치하였다.

## 3. 온도 계산

온도 및 응력계산에 사용한 캡슐본체의 크기 및 기계적 물성들[4]은 Table 1에 나타내었다. 캡슐본체의 응력해석을 수행하기에 앞서 온도계산이 이루어 졌다. 온도는 일본 JAERI 캡슐 설계분야 전문가들이 현재 캡슐설계시 사용하고 있는 전산코드 GENGTC와 유한차분법(FDM)을 이용한 열전달 전산 프로그램인 HEATING 7.2f를 사용하여 계산하였다. 특히 후자의 경우는 원통형 구조를 갖는 사용후 핵연료 수송용기의 열해석에 널리 사용되고 있으므로, 본 캡슐의 열계산에 적합하다고 생각된다. Fig.2는 HEATING 7.2f 2D 해석모델로 축단면의 1/2 모델이며, 크게 다섯 영역의 시편 구간과 외통 그리고 단열 부분등으로 모델되었다.

전산코드 GENGTC에 대한 신뢰성은 일본 JAERI 전문가가 계산한 결과와 비교함으로써 확인하였고, 직경 60mm, 두께 2mm의 본 캡슐모델에 대한 온도계산 결과를 Table 2에 나타내었다. 캡슐 반경방향으로의 온도분포는 2D 해석의 경우 시편중앙에서 약 283.75 °C 로 가장 크게 계산되었고, 외통에서의 최대온도는 중앙 내벽에서 108.34 °C로 가장 크게 나타났다. Fig.3에는 시편이 있는 다섯 영역 중앙의 온도분포를 나타낸 것으로, 반경방향 해롭깍 부분에서의 온도차이를 뚜렷하게 알 수 있다.

## 4. 응력 해석

캡슐에 발생하는 응력에는 압력에 의해 발생하는 일차막응력( $P_m$ )과 이차응력으로 분류되는 열응력( $P_e$ )이 있다. 또한 열응력에는 캡슐외통 두께방향 온도차이로 인한 열응력과 End Plug에서의 반경방향 온도구배로 인한 열응력으로 분류할 수 있다.

### 4.1 내압에 의한 응력계산

캡슐 본체 내부와 외부에서의 압력차로 인한 응력은 ASME Sec.III, Appendix A[5]에서 규정하는 식을 적용하여 계산하였다. ASME Code 규정의 응력식은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_h = p \frac{1+Z^2}{Y^2-1} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = p \frac{1}{Y^2 - 1} \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_r = p \frac{1 - Z^2}{Y^2 - 1} \quad (3)$$

여기서 1, 2, 3은 각각 원주방향, 축방향 그리고 반경방향의 주응력을 나타내고 있으며,  $Y = \frac{D_o}{D_i}$ ,  $Z = \frac{D_o}{(D_i + D_o)/2}$ 로서 캡슐 내경( $D_i$ )과 외경( $D_o$ ) 크기의 관계식이다.

압력에 의해서 작용하는 캡슐의 최대 응력강도는 주응력의 차이로 나타낼 수 있으며, 다음과 같다.

$$S = |\sigma_1 - \sigma_3| \quad (4)$$

윗식에서 캡슐외통 내·외부의 압력차로 인한 막응력( $P_m$ )은 4.36 MPa 이다.

#### 4.2 좌굴응력 계산

조사공 내부 캡슐외통의 표면에 흐르는 냉각유체로 인한 냉각수압( $P$ )은 약 0.4 MPa이다.[6] 이 냉각수압에 의해 발생하는 캡슐외통의 좌굴응력은 다음식으로 구할 수 있다.[7]

$$P_{cr} = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)R_o^3} \quad (5)$$

여기서  $P_{cr}$  은 임계좌굴응력이며,  $R_o$ 는 캡슐 외반경이다. 식(5)로 부터 임계좌굴응력은 15.52 MPa이다.

#### 4.3 열응력 해석

##### 4.3.1 캡슐외통에서의 두께방향 온도차에 의한 열응력

캡슐 외통에서의 두께방향 온도차로 인한 열응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{c, \max} = \frac{1}{2} \Delta T \alpha \frac{E}{(1-\nu)} \quad (6)$$

여기서  $\sigma_{c, \max}$ 는 캡슐 원주방향의 최대 열응력이며,  $\Delta T$ 는  $|T_i - T_o|$ 로 캡슐외통의 내벽과 외벽온도의 차이를 나타낸다. 캡슐 길이방향 각 영역에 따라 온도가 다르게 분포되는데, 최대온도 차이는 캡슐 중간 영역에서  $\Delta T = 52.58 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 가장 크며, 이때 식(6)을 이용하여 계산된 최대 열응력은 122.45 MPa 이다.

##### 4.3.2 캡슐 End Plug 에서의 반경방향 온도차에 의한 열응력

캡슐 하부 End Plug에서의 반경방향 온도차에 의해서 발생하는 열응력의 계산을 위해서 상용 유한요소 전산프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 캡슐의 형상이 대칭이므로 축대칭 구조물의 2차원 해석에 주로 사용되는 축대칭 요소를 사용하였으며, 106개의 절점과 75개의 요소를 생성하였다. 경계조건으로는 캡슐하부 고정부에 대하여 길이 방향으로의 변위를 고정하였다. 열하중에 의해 발생한 캡슐외통 End Plug에서의 최대 열응력은 외통과 End Plug의 연결부에서 106 MPa이다.

캡슐외통에서의 주요 결과로 냉각수압에 의한 캡슐외통의 임계좌굴응력은 15.52 MPa로 허용좌굴응력을 만족하였으며, 캡슐에 작용하는 전체응력은 막응력과 열응력의 중첩에 의해서 결정할 수 있다. 캡슐외통에 작용하는 일차막응력( $P_m$ )은 4.36 MPa로 허용응력강도인 137.2 MPa를 만족하였다. 또한 외통에서의 막응력과 열응력과의 조합된 응력결과는 126.81 MPa이고, End Plug에서의 조합응력은 110.36 MPa로 허용응력값을 만족하였다. Table 3 에는 캡슐에 대한 강도평가 기준과 평가 결과를 나타내었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 재료 조사시험용 계장캡슐 본체의 온도계산 및 열응력 해석을 수행하여 캡슐의 강도를 평가하였다. 이들의 수행결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

### (1) 온도계산

캡슐본체에서의 온도계산결과(2D) 최대온도는 캡슐 중앙에서 약 283.75 °C 이며, 캡슐 외통 내벽과 외벽에서의 최대 온도차이는 52.58 °C로 계산되었다. 또한 1D 와 2D 코드를 이용한 결과들은 10% 이하의 차이로 잘 일치하였다.

### (2) 캡슐본체의 응력해석

냉각수압에 의한 캡슐본체의 임계좌굴응력은 15.52 MPa로 허용좌굴응력을 만족하였다.

캡슐본체에 작용하는 응력으로 압력차에 의한 막응력은 4.36 MPa로 비교적 낮게 계산되었다. 온도구배에 의한 캡슐외통에서의 조합응력은 126.81 MPa이며, End Plug에서의 조합응력은 110.36 MPa 로 해석되었다.

이들 응력값들은 열하중이 작용할때의 허용응력강도 411.9 MPa 보다 작고, ASME Code의 허용응력기준을 만족하였다.

## 참고문헌

1. 강영환외, KAERI/RR-1398/93, "KMRR을 이용한 노내검증실험 평가기술 개발"
2. K.W. Childs, "HEATING 7.2f User's Manual", ORNL, 1993
3. "ANSYS Engineering Analysis System User's Manual for Revision 5.0", Swanson Analysis System, Inc., 1992
4. ASME Bolier and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Appendix I, 1989
5. ASME Bolier and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Appendix A, 1989
6. TS-37-31200-003, Rev.4, Tech. Spec., "Stress Analysis of the Reactor Assembly", KAERI, 1992
7. ASME Bolier and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Subsection NB, 1989

Table 1. Material Properties and Dimension of Instrumented Capsule.

Internal Pressure ( MPa )	Diameter ( mm )	Thickness ( mm )	Young's Modulus ( GPa )	Density ( kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's Ratio	Thermal Expansion Coeff. ( 1/°C )
내압(p) : 0.3	내경(D <sub>i</sub> ) : 56 외경(D <sub>o</sub> ) : 60	2.0	193	7913	0.27	17.07 × 10 <sup>-6</sup>

Table 2. Temperature Data Calculated Using GENGTC and HEATING 7.2f.

( Unit : °C )

Code	Region	Center Temp.	Surface Temp.	Remark**
GENGTC ( 1D )	I *	281.60	51.05	-
	II	278.54	55.03	-
	III	296.45	56.81	-
	IV	280.08	55.21	-
	V	275.99	50.69	-
HEATING 7.2f ( 2D )	I	273.48	50.18	2.88
	II	260.80	54.09	6.37
	III	283.75	55.76	4.28
	IV	263.00	54.25	6.10
	V	266.97	49.86	2.54

\* : Top Part of the Capsule Main Body

\*\* : Center Temperature Difference,  $( T_G - T_H ) / T_G \times 100$

Table 3. Stress Results of Capsule under Thermal Loading.

( Unit : MPa )

Position	Stress Item	Calculated Stress	Design Stress Intensity	Allowable Stress Intensity	Safety Factor*	Code Requirement
External Tube	P <sub>m</sub>	4.36	137.2	137.2	31.47	P <sub>m</sub> < S <sub>m</sub> **
	P <sub>cr</sub>	15.52	-	1.2	12.93	P <sub>cr</sub> > 3P***
	P <sub>m</sub> + P <sub>e</sub>	126.81	137.2	411.9	3.15	P <sub>m</sub> +P <sub>e</sub> < 3S <sub>m</sub>
End Plug	P <sub>m</sub> + P <sub>e</sub>	110.36	137.2	411.9	3.73	P <sub>m</sub> +P <sub>e</sub> < 3S <sub>m</sub>

\* : Safety Factor = Allowable Stress Intensity / Stress Value

\*\* : Design Stress Intensity ( S<sub>m</sub> )

\*\*\* : Coolant Pressure ( P )

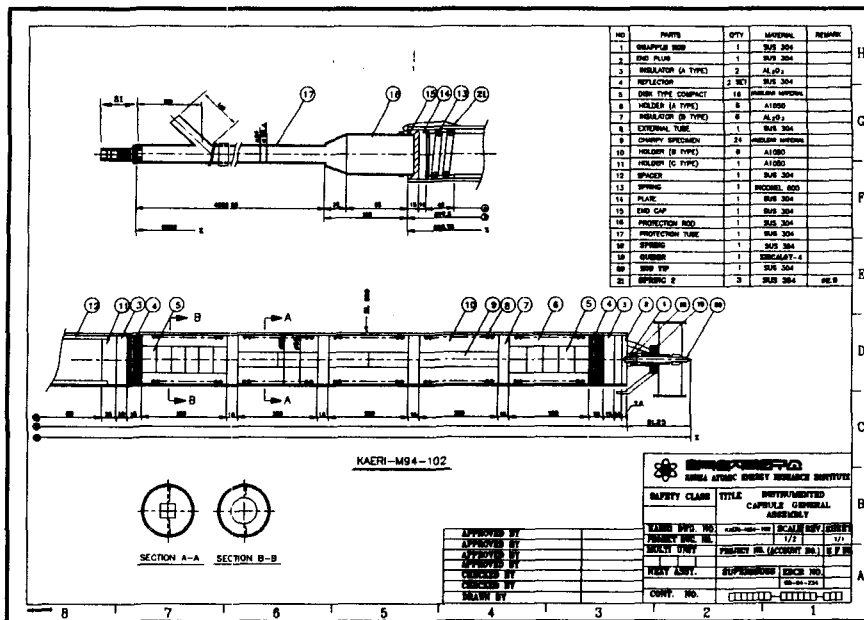


Fig.1. Drawing of Instrumented Capsule General Assembly.

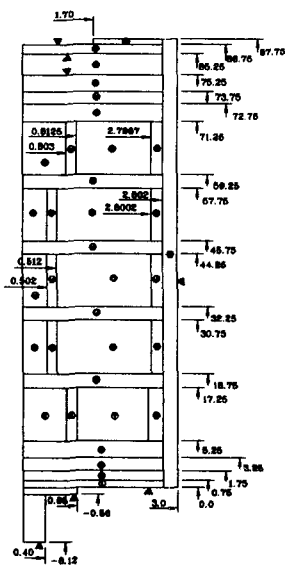


Fig.2. Analysis Model for Temperature Calculation in HEATING 7.2f.

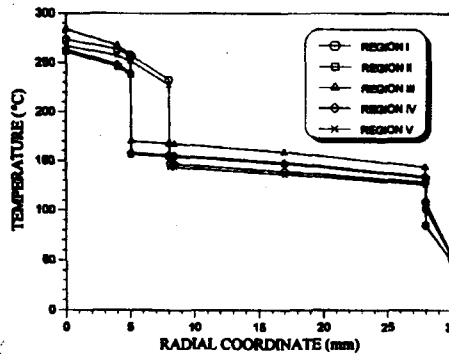


Fig.3. Calculated Temperature Profile in the Region(I ~ V).