

## 진동시험을 통한 하나로 조사캡슐의 구조해석

### Structural Analysis for the HANARO Irradiation Capsule through Vibration Test

강영환, 최창웅  
한국원자력연구소  
이영신, 최명환, 신도섭  
충남대학교

#### 요 약

하나로 조사 시설중의 하나인 계장캡슐은 가늘고 긴 구조로 이루어져 있고, 하나로 노심내 강제대류 영역에 설치될 때, 유체에 의한 진동으로 다른 인접 구조물에 간섭을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 이를 평가하기 위한 진동시험이 수행된 바 있으며, 본 연구에서는 진동시험을 통하여 얻어진 가속도 신호를 변위(displacement)값으로 환산한 결과를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램을 이용하였고, 변환된 변위값을 입력으로 사용하였으며, 타 구조물과의 간섭이 예상되는 중요 부위에 대한 변위를 예측함으로써 계장캡슐 구조물의 구조건전성을 평가하였다.

#### Abstract

Instrumented capsules are one of the irradiation facilities in the HANARO core. The capsule is a cylindrical shape, and it has the outside diameter of 60 mm and length of 877 mm. This structure is subject to flow-induced vibration (FIV) due to the flow of the primary coolant and then the structural integrity of the capsule during irradiation in the reactor is issue of major concern. However, the complexity of coolant flow in the forced convection area of the reactor, it is very difficult to obtain directly the flow-induced loads acting on the capsule structure. For this purpose the acceleration was measured by four accelerometers attached to the protection tube of the capsule. Based on the measured data, the displacement at the top part of the capsule mainbody and the displacement between flow tubes were calculated using commercial finite element program ANSYS to evaluate the structural interference to the neighboring flow tubes under the reactor operating condition. The calculated displacement at the region of the flow tube are lower than the values in allowable design criteria.

## 1. 서 론

계장캡슐(97M-01K)은 하나로 노심내 강제대류 영역에 설치되어 재료조사 시험을 위한 시설이다. Fig. 1은 캡슐구조물의 하나로내 설치 개념도를 나타낸 것이다. 설치된 상태에서 계장캡슐 구조물은 고정장치, 상부 안내스프링, Rod Tip에 의해 지지되고 있어 진동을 줄일 수 있으나, 가늘고 긴 구조물이므로 노심내를 끊임없이 순환하는 냉각재에 의해 불규칙 진동현상이 발생할 수 있다. 이때 발생한 진동은 캡슐본체가 장입되어 있는 조사공(test hole)에 전달되고, 인접 유동관(flow tube)과의 간섭이 우려된다. 따라서 진동에 의한 간섭현상을 평가하기 위한 진동시험이 수행되었다[1]. 진동시험은 계장캡슐 보호관을 고정팔만으로 잡는 경우와 고정팔 및 침니에 고정장치를 이용하여 잡는 두 경우의 모델에 대하여 수행되었다. 진동측정에서 가속도계는 비교적 큰 변위가 예상되는 캡슐 보호관의 두 점을 선정하여 한 점에 2개씩 모두 4개를 사용하여 측정되었다. 진동시험에 수행된 조사공은 CT와 IR2이고, 측정된 가속도 신호들은 데이터 기록장치에 저장한 후 후처리에 이용되었다. 한편, 간섭현상이 예상되는 부위의 변위는 실측과 육안관찰이 불가능하여, 이 부분의 변위를 실험적으로 측정하거나 예측하는 것은 많은 어려움이 있기 때문에 진동시험 결과에 근거한 해석을 통하여 예측하였다.

본 연구에서는 캡슐 보호관의 두 점에 부착된 가속도계를 이용하여 측정된 가속도 신호를 측정점에서의 방향별 변위값으로 환산하여 구하고, 이들 변위값을 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS[2]의 입력값으로 사용하여 해석하였다. 또한 해석결과를 토대로 하여 다른 구조물과의 간섭사항을 평가하였고, 침니 상부에 캡슐 보호관을 잡아줄 수 있는 장치를 구성하여 잡아주었을 때의 캡슐구조물의 진동에 미치는 영향 등을 평가하였다.

## 2. 구조물 설명

본 연구에서 고려한 모델은 침니 고정장치의 사용유무에 따라 크게 두 가지로 구분하였다. Fig. 1은 캡슐 고정장치만을 사용하는 경우로서 Model I으로 나타내었고, Fig. 2는 캡슐 고정장치와 침니 고정장치를 사용할 때의 모델로서 Model II로 나타내었다. 계장캡슐 상부 고정용 고정장치는 외팔보(cantilever) 형태로 한쪽 단은 기지판(base plate) 위에 고정되고, 다른 단은 캡슐 보호관(protection tube) 상부를 잡아주게 된다. 고정장치와 조사공 사이의 거리는 약 900mm(IR1), 780mm(CT), 650mm(IR2)이다. 내부 조사공은 IR1, CT, IR2 조사공으로 육각형의 핵연료 장전용 유동관들과 동일하다. 조사공의 최단직경은 74.4mm이며, 최장직경은 80.4mm이고, 길이는 910mm이다[3]. 상부 안내스프링은 캡슐본체 상부와 캡슐 보호관의 연결부에 설치된다. 이 스프링은 육각형의 유동관에 계장캡슐을 장·탈착할 때 안내역할을 하고, 캡슐이 조사공내에 장착된 후에는 조사공 상부에서 수평방향으로 스프링 역할을 하며, 이 스프링의 강성은 약 15 N/mm이다[4]. 침니 고정장치는 Mock-up 캡슐을 이용한 진동시험[5]과 Type-B 핵연료 진동시험[6]에 사용되었던 것을 이용하였다. 이것은 보호관에 결합되는 고정팔 고정부위와 침니를 연결하는 고정팔 이동부위로

구성되어 있고, 고정팔이 노심 방향으로 흘러내리는 것을 방지하는 장치로 Stopper가 있다.

캡슐본체 및 보호관 그리고 고정장치 등의 대부분의 구조물은 SUS304 재질로 제작되었으며, 캡슐하단의 Rod Tip, 조사공 및 상부 안내스프링은 Zircaloy-4 재질로 이루어져 있다. 이들 재료의 기계적 물성은 Table 1에 나타내었고, 유한요소 해석에 이용되었다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 해석방법 및 모델링

캡슐 보호관에 부착된 가속도계로부터 얻은 가속도 신호는 변위값으로 환산되었고[7], Table 2에 변위값으로 환산한 각 측정점에서의 방향별 최소·최대치를 나타내었다. 여기서 1X와 1Y는 캡슐하단 Rod Tip에서 약 2.76m의 지점이고, 2X와 2Y는 약 4.16m의 지점으로서 가속도계의 부착 위치와 방향을 나타내며 Fig. 1에 나타내었다. 또한 침니 상부에 고정장치를 이용하는 경우의 Model II에 대하여 1X점과 2X점의 위치는 각각 2.31과 3.21m이다. 이때 측정된 가속도 신호는 일정한 시간동안에 측정된 값이기 때문에 양과 음으로 진동하는 현상을 보인다. 본 해석에서는 변위의 방향보다는 변위의 크기에 관심이 있으므로 환산된 변위값의 절대치를 구하여 이들 중 최대값을 하중의 입력값으로 사용하였다. 해석에서 적용한 좌표계는 Fig. 1과 2에 나타난 것처럼 캡슐하단의 Rod Tip을 원점으로 하였고, 캡슐 고정장치의 길이방향을 X축, X축과 수평방향으로 90° 직각인 축을 Y축 그리고 캡슐 보호관의 길이방향을 Z축으로 하였다.

상부 안내스프링은 캡슐본체 상부에 부착되어 있고, 조사공과는 분리되어 있다. 따라서 X방향의 하중이 작용할 때는 캡슐본체 상부에 설치된 6개의 스프링중 X방향으로 3개는 조사공과 접촉하고, 3개는 접촉하지 않는다. 따라서 해석의 모델에서는 X방향 변위하중 작용시 캡슐본체 상부와 접촉하는 3개의 스프링을 고려하였고, Y방향의 변위하중이 작용할 때는 6개의 스프링중 Y방향으로 스프링과 조사공이 접촉하는 형상을 고려하여 2개의 스프링으로 모델하여 해석하였다. 해석에서 고려된 조사공 상부와 캡슐 보호관의 절점번호를 Fig. 3에 나타내었다.

유한요소 모델을 생성하기 위하여 사용한 요소수는 3가지로서 실제 형상을 고려하여 최대한 이들의 특성을 반영할 수 있는 요소를 사용하였다. 사용한 요소는 캡슐하단의 Rod Tip, 캡슐본체, 캡슐 보호관, 캡슐 고정장치 및 침니 고정장치는 2절점, 3차원의 Beam4요소를 사용하였고, 이 요소는 절점당 6자유도( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $Rot_x$ ,  $Rot_y$ ,  $Rot_z$ )를 갖고 있다. 상부 안내스프링은 2절점, 3차원의 Combin14 요소를 사용하였고, 육각형의 조사공은 4절점, 3차원의 Shell63요소를 사용하여 모델을 생성하였다.

#### 3.2 경계조건

해석에서의 경계조건은 캡슐하단의 Rod Tip, 조사공 하단, 캡슐 고정장치의 끝단 및 침니 고정장치의 끝단에 부여하였다. 캡슐하단의 Rod Tip은 조사공 하부의 receptacle에 장착된 후 X, Y, Z

방향의 변위는 없고, 회전이 자유로운 힌지 지지(hinged supports)로 고려하였고, 조사공 하단, 캡슐 고정장치의 끝단 및 침니 고정장치의 끝단은 X, Y, Z 방향의 변위와 회전이 구속된 완전고정의 경계조건을 적용하여 해석하였다.

## 4. 구조해석 결과 및 고찰

### 4.1 캡슐 고정장치만을 사용할 경우의 구조해석 (Model I)

CT 조사공에서 X, Y 한 방향으로 각 점에 변위를 가해 해석한 경우의 결과를 Table 3에 나타내었고, Fig. 4는 가속도 측정점 1Y에 7.44mm의 최대변위를 가한 경우의 변위형상을 나타내었다. 캡슐본체와 조사공 사이의 변위는 캡슐본체 상부(절점 #4)에서 Y방향으로 최대 2.46mm를 보였고, 조사공과 주변 유동관 사이의 변위는 조사공 상부(절점 #103와 #104)에서 Y방향으로 최대 0.37mm를 보였다. 이들 결과들은 캡슐 구조물이 전체적으로 고정팔이 설치된 방향(X방향)으로의 강성이 Y방향보다 약간 크기 때문에 나타난 것으로 보인다. 또한 하중 작용점의 영향으로서 조사공의 상부에 가까운 1X, 1Y에 하중을 가하는 경우의 변위가 2X, 2Y에 하중을 가하는 경우보다는 더 큰 변위를 보였다.

Table 4는 Model I 을 IR2 조사공에 삽입하여 시험한 결과를 기초로한 경우의 해석결과를 나타내었다. CT 조사공에서와 비슷하게 캡슐본체와 조사공 사이의 변위는 캡슐본체 상부(절점 #4)에서 Y방향으로 최대 2.60mm를 보였고, 조사공 상부에서의 최대변위는 Y방향으로 0.39mm를 보였으며, 전체 구조물의 최대변위는 7.82mm로서 하중 작용점인 캡슐 보호관의 중간부분(절점 #9)에서 발생하였다.

캡슐 고정장치만으로 보호관을 지지한 Model I 에 대한 해석결과는 CT 조사공에서 보다 IR2 공에서 전체적으로 약간 큰 결과를 보였는데 이것은 해석의 입력으로 사용된 측정된 변위결과가 IR2에서 더 크기 때문이다. 또한 서로 간섭의 우려가 예상되는 부분에서의 결과들은 모두 허용범위 내에 있으며, 최대변위가 발생하는 보호관의 중간부는 침니 내에 위치하기 때문에 주변의 다른 구조물과의 간섭은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

### 4.2 캡슐 고정장치 및 침니 고정장치를 사용할 경우의 구조해석 (Model II)

Table 5에는 CT 조사공의 Model I 에 침니 고정장치를 이용하여 중간부분을 지지하는 경우의 해석결과를 나타내었다. 해석방법은 마찬가지로 실험을 통하여 얻은 두 점에서의 방향별 변위결과를 해석의 입력으로 사용하였으며, Fig. 5는 1X에 3.45mm의 변위하중을 가한 경우의 조사공 상부의 변위와 캡슐 보호관의 X방향 변위형상을 나타내었다. 전체적으로 각 부위에 대한 변위값은 1X, 1Y 지점에 변위하중을 가하는 경우에 더 크게 나타났으며, X방향의 변위가 Y방향 보다는 약간 큰 값을 보였다. 캡슐본체와 조사공 사이의 변위는 캡슐본체 상부(절점 #4)에서 X방향으로 최대 1.77mm를 보였고, 조사공과 주변 유동관 사이의 변위는 조사공 상부(절점 #45)에서 X방향으로 최대 0.27mm를 보였다.

캡슐 고정장치만을 사용하여 캡슐을 지지한 Model I의 경우는 CT, IR2 조사공에 관계없이 Y 방향으로 변위가 크게 발생하였으나, 침니 상부에 고정장치를 이용하여 고정한 Model II의 경우는 X방향으로 최대변위가 발생하였다. 이것은 침니 고정장치가 Fig. 3(c)에서 보인 것처럼 침니 고정장치를 사용하면 긴 구조물의 중간을 지지하는 영향 때문에 각 방향에 대한 최대변위의 발생 방향을 바꿀 수 있고, 각 방향별 변위값을 크게 줄일 수 있다.

## 5. 결론

하나로 진동시험 결과를 토대로 계장캡슐구조물의 구조건전성을 평가하기 위한 구조해석이 수행되었으며, 이들 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) IR2 조사공에서 Model I은 캡슐본체 상부(절점 #4)의 최대변위는 2.60mm로 허용변위 7.2mm내에 있으며, 조사공 상부에서의 최대변위는 0.39mm로 허용변위 0.5mm내에 있어 주변의 유동관과의 충돌은 발생하지 않는다.

(2) CT 조사공에서 Model II는 캡슐본체 상부에서 X 방향으로 1.77mm의 최대변위를 보였고, 조사공 상부에서는 최대변위가 0.27mm로 허용변위 0.6mm이내에 있다.

(3) CT 조사공에서 침니 고정장치를 이용하면 Model I의 경우보다 조사공의 상부에서 최대 변위량을 약 40% 정도 줄일 수 있다.

(4) 하나로 노심에 설치될 계장캡슐 구조물은 침니 고정장치의 사용 여부에 관계없이 허용기준을 만족하여 다른 구조물과의 간섭을 일으키지 않는다. 그러나 계장캡슐의 구조적 안전성을 보다 증대시키기 위해서는 침니 고정장치를 설치하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## Acknowledgement

본 연구는 1998년도 과학기술부의 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] HAN-IC-DD-PR-01, "97M-01K 캡슐 하나로 조사시험전 진동시험 절차서", 1998.
- [2] ANSYS Engineering Analysis System User's Manual for Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1992.
- [3] KAERI/TR-985/98, "재료조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서", 한국원자력연구소, 1998.
- [4] 강영환외 2인, "하나로 캡슐지지용 와이어 스프링의 강성해석", 한국원자력학회 '96추계학술대회 논문집(II), pp. 494~499.
- [5] KAERI/RR-1510/94, "노내시험시설 설계건조(부록2)", 1995.
- [6] HANTAP-09-RT-002(Rev.1), "하나로 조사시험연료 진동시험절차서", 1997.
- [7] HAN-IC-OT-98-002 "진동시험중 측정된 가속도값의 변위값으로 변환", 1998.

Table 1 Material Properties of Type 304 Stainless Steel and Zircaloy-4

Material	Type 304 Stainless Steel	Zircaloy-4
Modulus of Elasticity (GPa)	193	94.3
Mass Density (kg/m <sup>3</sup> )	7913	6500
Poisson's Ratio	0.27	0.35
Ultimate Strength (MPa)	515	415
Yield Strength (MPa)	205	240
Allowable Stress (MPa)*	123	144

\* Allowable stress (ASME Code Sec.III, NF-3322.1) :  $F_t = 0.60S_y$

Table 2 Minimum and Maximum Displacement Transformed from Acceleration Signals

(unit : mm)

Accelerometer Position and Direction	Model I (CT)		Model I (IR2)		Model II (CT)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1X	-5.271	6.082	-6.194	7.157	-3.447	2.484
1Y	-7.439	6.050	-7.050	7.822	-2.755	3.132
2X	-3.828	4.168	-4.283	4.168	-1.054	1.196
2Y	-4.651	5.245	-4.534	4.834	-1.550	1.652

Table 3 Displacement Results of Model I in CT Hole

(unit : mm)

Accelerometer Position and Direction	Analysis Input	Between Capsule and Test hole		Between Test Hole and Flow Tube		Maximum	
		Node No.	Disp.	Node No.	Disp.	Node No.	Disp.
1X	6.08	#4	2.05	#39	0.31	#9	6.08
1Y	7.44	#4	2.46	#103,#104	0.37	#9	7.44
2X	4.17	#4	1.34	#39	0.20	#18	5.54
2Y	5.25	#4	1.54	#103,#104	0.23	#18	6.59
Allowable Disp.		-	7.2	-	0.6	-	N/A

Table 4 Displacement Results of Model I in IR2 Hole

(unit : mm)

Accelerometer Position and Direction	Analysis Input	Between Capsule and Test hole		Between Test Hole and Flow Tube		Maximum	
		Node No.	Disp.	Node No.	Disp.	Node No.	Disp.
1X	7.16	#4	2.41	#39	0.36	#9	7.16
1Y	7.82	#4	2.60	#103, #104	0.39	#9	7.82
2X	4.28	#4	1.37	#39	0.21	#18	5.70
2Y	4.83	#4	1.47	#103, #104	0.22	#18	6.20
Allowable Disp.		-	7.2	-	0.5	-	N/A

Table 5 Displacement Results of Model II in CT Hole

(unit : mm)

Accelerometer Position and Direction	Analysis Input	Between Capsule and Test hole		Between Test Hole and Flow Tube		Maximum	
		Node No.	Disp.	Node No.	Disp.	Node No.	Disp.
1X	3.45	#4	1.77	#45	0.27	#14	3.52
1Y	3.13	#4	1.61	#109, #110	0.24	#14	3.22
2X	1.20	#4	1.76	#45	0.12	#16	1.87
2Y	1.65	#4	1.03	#109, #110	0.16	#16	2.56
Allowable Disp.		-	7.2	-	0.6	-	N/A

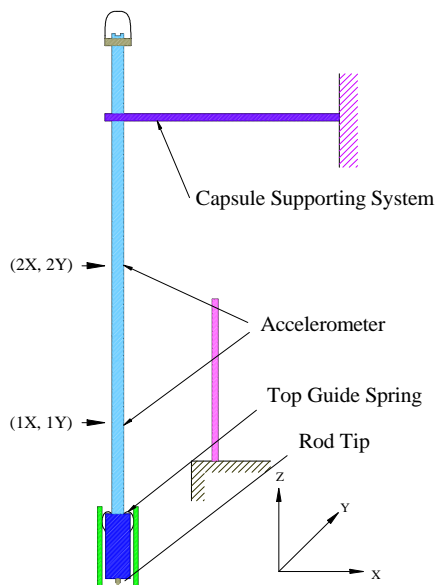


Fig. 1 Schematic Model I in CT & IR2 Hole

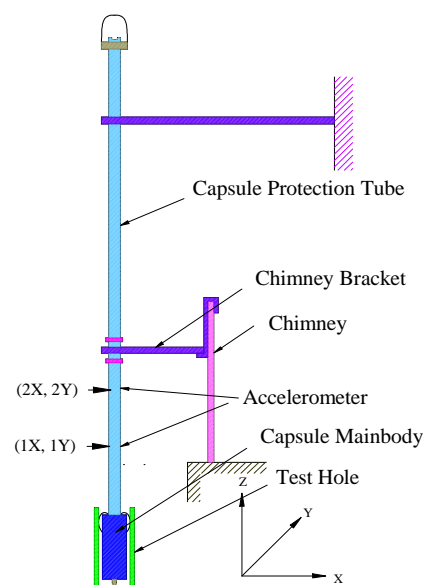


Fig. 2 Schematic Model II in CT Hole

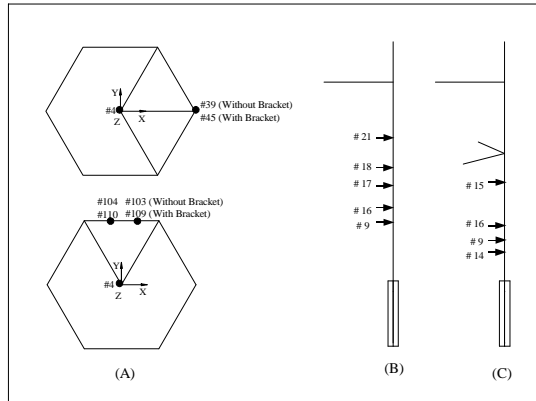


Fig. 3 Node Numbers of Test Hole and Capsule Protection Tube

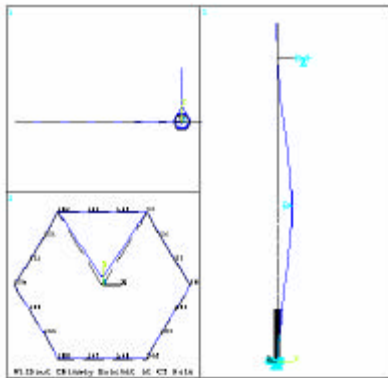


Fig. 4 Displacements of Model I in CT Hole (1Y, #9,  $\delta = 7.44\text{mm}$ )

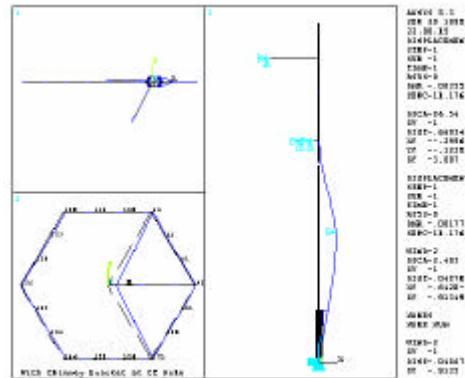


Fig. 5 Displacements of Model II in CT Hole (1X, #9,  $\delta = 3.45\text{mm}$ )