

〈논 문〉

## 진동시험 및 해석을 통한 하나로 캡슐 구조물의 구조건전성 평가

### Evaluation of Structural Integrity for HANARO Capsule Structure by Vibration Test and Analysis

이 영 신\* · 강 연 환\*\* · 최 명 환\*\*\* · 신 도 섭\*\*\*\*

Young-Shin Lee, Young-Wan Kang, Myoung-Hwan Shin and Do-Seob Choi,

(1999년 10월 8일 접수 : 2000년 1월 31일 심사완료)

**Key Words:** Instrumented Capsule(계장캡슐), Flow Induced Vibration(유체유발진동), Structural Integrity(구조건전성), Vortex Shedding(와류이탈), HANARO(하나로), Test Hole(조사공), Flow Tube(유동관)

#### ABSTRACT

The instrumented capsule is subjected 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 HANARO reactor is an issue of major concern. For this purpose the acceleration was measured by four accelerometers attached to the protection tube of the capsule mainbody and the displacement of test holes was calculated using commercial finite element program ANSYS to evaluate the structural interference with the neighboring flow tubes under the reactor operating condition. The calculated displacements of test holes in the reactor in-core were found to be lower than the values of allowable design criteria.

#### 1. 서 론

원자력 발전소에서 사용되는 재료의 개발이나 원자로에 적용하기에 앞서 이들 재료의 노내 조사거동을 확인하기 위하여 연구로를 이용한 조사시험(irradiation tests)에 캡슐이 주로 사용되고 있다. 한국원자력연구소에서 계장캡슐(97M-01K)은 연구로인 하나로(HANARO)의 이용시설중 하나이며, 노심내(in-core) 강제대류 영역에 설치되어 재료 조사시험에 이용된다<sup>(1)</sup>. 조사 시험편이 장입된 캡슐 본체는 하나로내 세 개의 조사공(test holes)에 삽입되고, 주변의 다른 유동관(flow tubes)에는 핵연료 다발이 삽입되게 된다. 조사 시험중 캡슐내부의 온도제어와 계측을 위한 라인들은

약 5m의 길이를 갖는 캡슐 보호관(protection tube)을 통하여 노외의 장비들과 연결된다. 또한 캡슐 본체(mainbody)와 보호관은 하나로에 설치된 상태에서 보호관의 상부를 잡아주는 로봇 팔 형태의 고정장치, 조사공과 본체의 접촉을 막아주는 상부 안내스프링 그리고 본체 하단부의 rod tip등에 의해 지지되고, Fig. 1에는 하나로와 캡슐 구조물이 설치되어 있는 개념도를 나타내었다. 이들 구조물은 전체 길이가 약 6m의 가늘고 긴 원통 형상이며, 중간을 지지해주는 장치가 없기 때문에 노심내를 끊임없이 순환하는 냉각재에 의해 불규칙 진동현상이 발생될 수 있다.

일반적으로 유체유발진동(flow-induced vibration)은 유체에 잠겨있거나 유체를 포함하고 있는 구조물의 응답에 관한 현상을 다루는 것으로서, Blevins<sup>(2)</sup>와 Chen<sup>(3)</sup>은 유체유동과 관련하여 구조물의 진동을 해석하기 위한 여러 해석적 방법을 제시하였다. 특히 원통 구조물에 있어서 진동은 횡방향, 축방향 그리고 직교류(cross flow)에 의한 와류이탈(vortex shedding)로 인하여 발생할 수 있으며, 축류의

\* 정회원, 충남대학교 기계설계공학과

\*\* 한국원자력연구소

\*\*\* 정회원, 충남대학교 기계설계공학과

\*\*\*\* 한국항공우주산업(주)

경우 불안정을 야기하는 유속이 상당히 커야 하고 진폭은 상당히 작다. 그러나 횡류의 경우 비교적 작은 유속에도 구조물은 불안정해질 수 있고, 와류이탈 주파수와와의 공진으로 인해 큰 진폭을 일으킬 수 있다. Fig. 1에서와 같이 캡슐 구조물은 하나로 노심에서 캡슐 본체부분에는 주변의 핵연료 냉각을 위해 약 7 m/sec의 축방향 유속이 작용하지만 본체 하단부와 상부는 각각 리셉터클(receptacle)과 상부 안내스프링에 의해서 지지되어 있기 때문에 큰 진동은 발생하지 않을 것을 예측된다. 그러나 직교류가 작용하는 침니 내부에서는 유류가 매우 복잡하여 정확한 유속을 알 수가 없고, 유체 출구(outlet)에서의 유량을 기초로하여 약 3.0 m/sec정도일 것으로 하나로 센터에서는 추천하고 있다<sup>(4)</sup>.

캡슐의 유체유발진동은 주로 직교류에 의한 것으로 생각되며, 캡슐 보호관의 중간에서 발생하는 진동은 캡슐본체의 상부에 설치된 안내 스프링을 통하여 조사공에 전달되고, 이 조사공의 상부에서 변위가 커지면 인접 유동관과의 간섭이 발생하게 된다. 하나로 내에서 유체에 의하여 발생하는 캡슐 구조물의 진동에 대한 육안 관찰이 가능한 곳은 캡슐 보호관의 중간부분까지이고, 노심에 설치된 캡슐 본체나 조사공에서의 변위는 실측과 육안관찰이 불가능하기 때문에 해석적 방법을 통하여 변위를 계산하여야 한다.

본 연구에서는 캡슐 구조물이 연구로의 정상 운전중에 유체에 의해서 발생하는 진동을 측정하기 위한 시험을 수행하였다<sup>(5)</sup>. 그러나 이러한 시험으로도 하나로 노심 부분에서

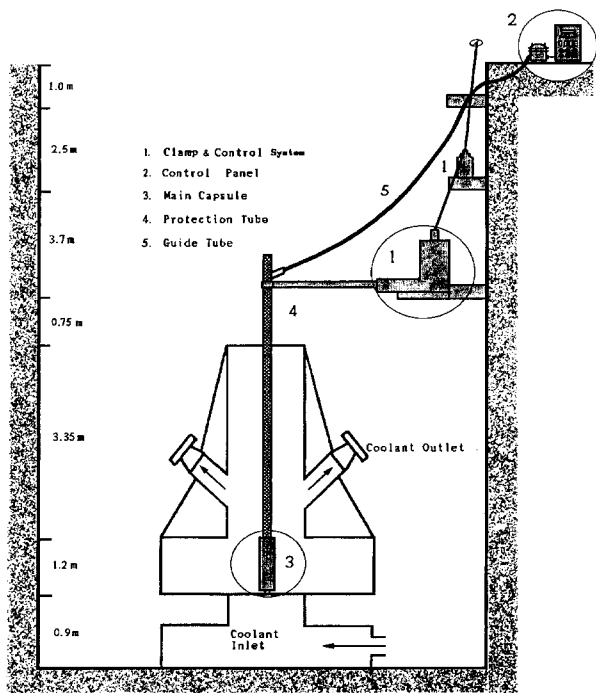


Fig. 1 HANARO and capsule structure

의 캡슐과 조사공의 변위를 측정할 수는 없었다. 따라서 진동시험을 통하여 얻은 캡슐 보호관에서의 변위값을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 측정된 가속도 신호를 측정점에서의 방향별 변위값으로 환산하여 구하고, 이들 변위값을 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS<sup>(6)</sup>의 변위 입력값으로 사용하여 해석을 수행하였다. 또한 해석결과를 토대로 하여 다른 주변 구조물과의 간섭사항을 평가하였고, 진동을 줄이기 위한 방안으로서 하나로 노심에 설치되어 있는 침니(chimney)의 상부에 캡슐 보호관을 잡아줄 수 있는 장치를 사용하였을 때 이 지지 구조물이 캡슐 구조물의 진동에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 하나로 캡슐 구조물

본 연구에서 고려한 모델은 침니를 이용한 지지장치의 사용 유무에 따라 크게 두 가지로 구분하였다. Fig. 2는 캡슐 고정장치(supporting system)만을 사용하는 경우로서 Model I로 나타내었고, Fig. 3은 진동을 줄이기 위하여 침니 내부의 설치 가능한 공간에 침니 브라켓(bracket)을 설치한 경우로서 Model II로 나타내었다. 침니 브라켓은 캡슐 고정장치로부터 약 1.47 m 아래 부분에 120° 간격의 두 보(beam) 구조물을 이용하여 침니 벽에 고정되었다. 이 침니 브라켓은 캡슐 mock-up과 Type-B 핵연료의 진동시험시 사용된 구조물과 동일 형태의 것이 사용되었다<sup>(4,7)</sup>. 캡슐 상부고정용 고정장치는 캡슐 하단부 rod tip으로부터 약 5.28 m 위치에 설치된 외팔보(cantilever) 형태의 구조물로서 한쪽 단은 강체 구조물에 고정되고, 다른 단은 캡슐 보호관 상부를 잡아주게 된다. 이 고정장치의 길이는 조사공에 따

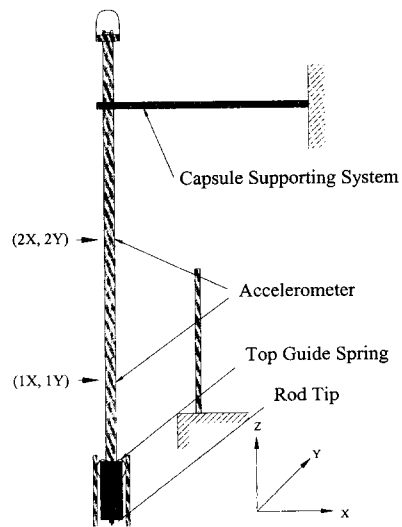


Fig. 2 Schematic model I in CT & IR2 hole

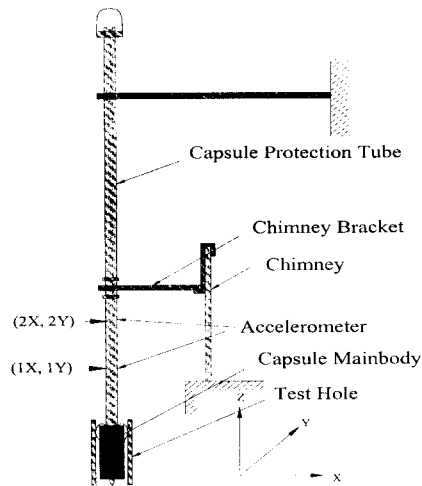


Fig. 3 Schematic Model II in CT hole

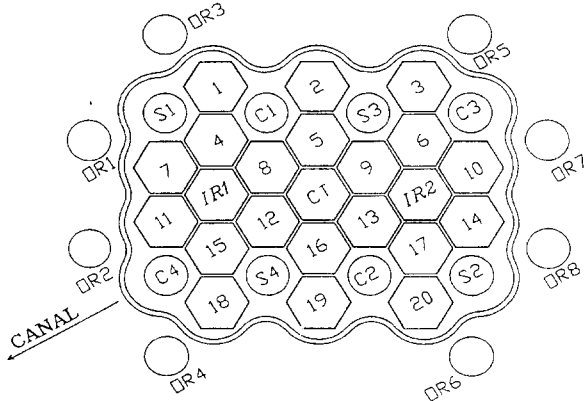


Fig. 4 In-core arrangement

라 다르며, IR1, CT 그리고 IR2 조사공에 대하여 각각 900 mm, 780 mm 그리고 650 mm이다

Fig. 4는 노심 유동관들의 배치 단면을 보여준다. 캡슐이 삽입되어 조사시험이 수행되는 부분은 IR1, CT, IR2 세개의 조사공으로 육각형의 핵연료 장전용 유동관들과 동일하다. 조사공의 최단직경은 74.4 mm이며, 최장직경은 80.4 mm 이고, 길이는 910 mm이다<sup>(8)</sup>. Fig. 5는 진동시험이 수행된 조사공에 대한 상세 단면을 보인 것으로서 CT 조사공과 가장 가까운 거리에 있는 유동관과의 거리는 1.2 mm 이고, IR2 조사공과 가장 근접한 유동관까지의 거리는 1.0 mm 이다. 따라서 조사공이 주변의 유동관과 부딪히지 않기 위해서는 설치상태에서 이들 사이 거리의 1/2인 0.6 mm 와 0.5 mm 이내를 허용변위로 할 수 있으며, 이들 값을 기준으로 하여 구조적 건전성을 평가하였다. 또한 캡슐이 조사공에 삽입되었을 때 이들 두 구조물은 7.2 mm의 간격을 갖게 되므로 캡슐은 유체유발 진동을 하면서 조사공의 상부와 접촉하지 않기 위해서는 7.2 mm 이내의 변위내에서 거동하여야 한다.

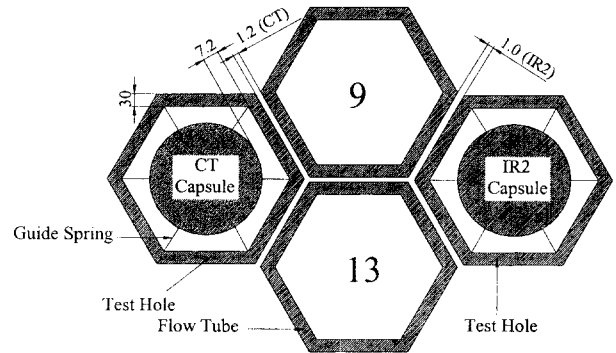


Fig. 5 Detailed section of in-core arrangement

상부 안내스프링은 캡슐본체 상부와 캡슐 보호관의 연결부에 설치된다. 이 스프링은 육각형의 유동관에 캡슐을 장·탈착할 때 안내역할을 하고, 캡슐이 조사공내에 장착된 후에는 조사공 상부에서 수평방향으로 스프링 역할을 하며, 약 15 N/mm의 스프링 강성을 갖는다<sup>(9)</sup>. 캡슐본체, 보호관 그리고 고정장치 등 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.

Table 1 Material properties of type 304 stainless steel and Zircaloy-4

Material	SUS304	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

### 3. 진 동 시 험

진동시험은 캡슐 보호관을 고정장치만으로 잡는 경우 (Model I)와 고정장치 및 침니 브라켓을 이용하여 잡는 경우 (Model II)의 두 모델에 대하여 수행되었다. 진동시험 시 가속도계는 비교적 큰 변위가 예상되는 캡슐 보호관의 길이방향 두 점을 선정하여 한 점에 2개씩 모두 4개를 사용하여 측정하였다. Fig. 2과 3에서 길이방향 두 측정점은 각각 (1X, 1Y), (2X, 2Y)이며, 한 점에 대하여 X는 캡슐 고정장치의 길이방향이고, Y는 직각방향으로 가속도계가 부착되었음을 나타낸다. 여기서 1X와 1Y는 캡슐하단 rod tip에서 약 2.76 m의 지점이고, 2X와 2Y는 약 4.16 m의 지

점이다. 또한 침니 상부에 침니 브라켓을 이용하는 경우의 Model II에 대하여 1X(1Y)점과 2X(2Y)점의 위치는 각각 2.31m와 3.21m이다.

진동시험에 사용된 가속도계는 수중용 가속도계로서 B & K 8319를 4개 사용하였고, hose band를 이용하여 보호관에 부착하였다. 시험은 하나로의 정상운전상태인 1차 냉각펌프 2대와 열교환기 2대가 작동하는 상태(Two Pump, Two Heat exchanger : TPTH)에서 최소 30분에서 최대 1시간 동안 수행하였다. 가속도계에서 측정된 신호는 테이프 레코더(tape recorder)에 저장하였고, 이들 신호는 모달해석 프로그램인 I-DEAS<sup>(10)</sup>를 이용하여 후처리하였다. 실시간에 대한 가속도 신호는 주파수 영역에 대한 변위성분으로 처리하여 가속도계 부착점에서의 방향성분별 변위이력(displacement history)을 얻었으며, 이들 신호에서 peak-to-peak 값을 취하여 각 측정점에서의 변위값을 얻었으며, Table 2에 나타내었다.

Fig. 6은 CT 조사공에 삽입된 Model I 캡슐의 1Y 방향에 대한 변위이력 선도를 나타내었다. 그림은 최대변위가 발생하는 시간영역에서의 200 sec 동안에 대한 변위값을 보이며 peak-to-peak 변위는 각각 6.05 mm, -7.44 mm이다. Fig. 7은 CT 조사공에서 Model I의 X 방향성분의 주파수 응답스펙트럼이고, 이때의 기본진동수(fundamental frequency)는 5.5Hz이다. Fig. 8은 CT 조사공에 침니 브라켓을 설치한 Model II의 X 방향성분의 주파수 응답스펙트럼이고, 이때의 기본진동수는 9.5 Hz이다. 이들 진동수 결과로부터 침니 브라켓을 이용하는 Model II의 경우, 캡슐 보호관의 강성증가로 인하여 진동수가 약 42% 증가함을 알 수 있다. 또한 이러한 결과는 Table 2에서 Model I과 II에 대한 측정 변위 결과로부터 확인할 수 있다. 즉 침니 브라켓을 사용함으로써 캡슐에서의 변위는 평균 40% 정도 줄일 수 있다.

Table 2 Peak-to-peak displacement transformed from acceleration signals

(unit: mm)

Accelerometer position and direction	Model I (CT)		Model I (IR2)		Model II (CT)	
	Peak-to-peak	Peak-to-peak	Peak-to-peak	Peak-to-peak	Peak-to-peak	Peak-to-peak
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

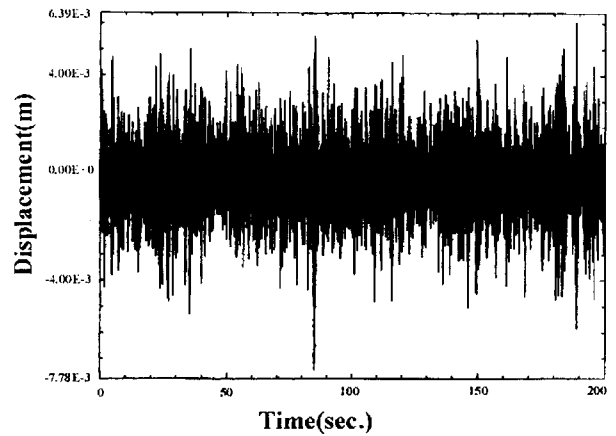


Fig. 6 Displacement time history of Model I in CT hole

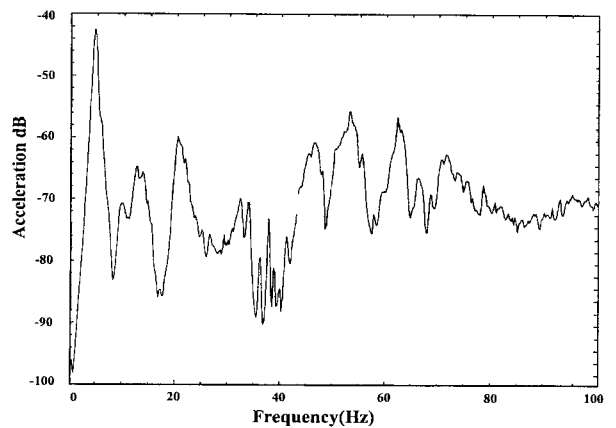


Fig. 7 Spectrum of Model I in CT hole

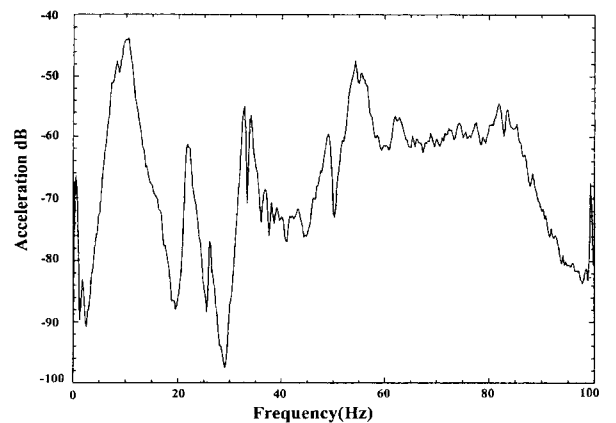


Fig. 8 Spectrum of Model II in CT hole

#### 4. 유한요소해석

##### 4.1 해석방법 및 모델링

진동시험에서 가속도계의 부착 위치는 노심에서 약간 떨

어져 있는 보호관의 중간 부분이며, 비교적 큰 변위가 예측되는 부위이다. 이들 결과로는 노심에 위치한 캡슐과 조사공의 변위를 예측할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 노심에 위치한 구조물의 변위를 얻기 위하여 캡슐, 조사공 그리고 지지 구조물 등을 유한요소 모델링하여 해석을 수행하였다.

해석은 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS<sup>(6)</sup>를 사용하였다. 모델을 생성하기 위하여 사용한 요소수는 3가지이고, 실제 형상을 고려하여 최대한 이들의 특성을 반영할 수 있는 요소를 사용하였다. 우선 캡슐하단의 rod tip, 캡슐본체, 캡슐 보호관, 캡슐 고정장치 및 침니 브라켓은 2절점, 3차원의 Beam4 요소를 사용하였고, 이 요소는 절점당 6자유도(Ux, Uy, Uz, Rotx, Roty, Rotz)를 갖고 있다. 상부 안내스프링은 2절점, 3차원의 Combin14 요소를 사용하였으며, 육각형의 조사공은 4절점, 3차원의 Shell63 요소를 사용하여 모델을 생성하였다. 모델 생성에서의 좌표계는 Fig. 2와 3에 나타난 것처럼 캡슐하단의 rod tip을 원점으로 하여, 캡슐 고정장치의 길이방향을 X축, X축과 수평방향으로 90° 직각인 축을 Y축 그리고 캡슐 보호관의 길이방향을 Z축으로 하였다.

노심에 위치한 조사공 및 캡슐 부위를 모델하는데 있어서 상부 안내스프링은 캡슐본체 상부에 부착되어 있고, 조사공과는 접촉하게 된다. 이때 캡슐이 진동하면서 최대변위가 발생하는 순간을 고려할 때 X방향으로 3개, Y방향으로 2개의 스프링만이 하중을 전달하고, 6개중 나머지 스프링은 조사공에 하중을 전달하지 못하게 된다. 따라서 Fig. 9의 A에서 보인 것처럼 해석모델에서는 X방향 변위하중 작용시 캡슐본체 상부와 접촉하는 3개의 스프링을 고려하였고, Y방향의 변위하중이 작용할 때는 6개의 스프링중 Y방향으로 스프링과 조사공이 접촉하는 형상을 고려하여 2개의 스프링으로 모델하였다. 또한 Fig. 9의 B와 C는 변위하중 작용점과 관련된 캡슐 보호관의 중요 절점번호를 나타내었다.

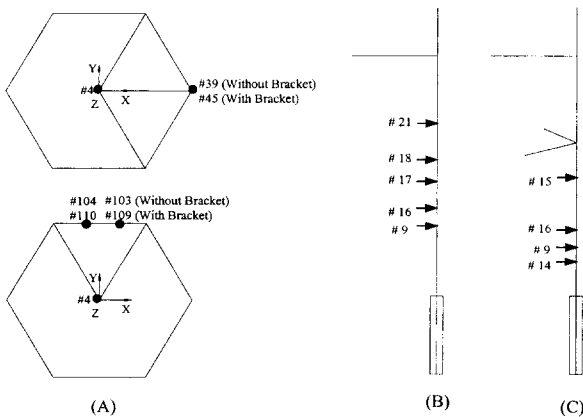


Fig. 9 Node numbers of test hole and capsule protection tube

## 4.2 하중 및 경계조건

유한요소 해석모델에 대하여 정적해석에서는 진동시험을 통하여 얻은 변위값을 하중으로 사용하였다. 캡슐 보호관에 부착된 가속도계로부터 얻은 가속도 신호를 변위값으로 환산한 결과는 Table 2에 제시되었다. 여기서 제시된 결과는 가속도 신호를 일정한 시간 동안에 측정된 값 중에서 peak-to-peak 값이다. 본 해석에서는 변위의 방향보다는 변위의 크기에 관심이 있고, 좀더 보수적인 해석을 위하여 측정된 변위값 중에서 절대치를 구하여 최대값을 변위하중으로 사용하였다.

연구로 내에서 조사공의 하단부, 캡슐 고정장치의 끝단 및 침니 고정장치의 끝단은 강체 구조물에 고정되어 있기 때문에 변위와 회전을 구속하는 고정 경계조건을 적용하였다. 또한 캡슐하단의 rod tip은 조사공 하부의 리셉터클에 장착된 후 X, Y, Z 방향의 변위는 없고, 회전이 자유로운 힌지 지지(hinged supports)로 고려하여 해석을 수행하였다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 동특성해석

캡슐 구조물은 하나로 수조내에 잠겨 조사시험되는 구조물로서 수중에서의 유체에 의한 동적효과는 추가적인 질량효과(added mass)로 고려할 수 있다<sup>(11)</sup>. 이러한 동특성의 변화는 고유진동의 변화로 나타나게 되므로 본 연구에서는 캡슐의 보호관, 본체 그리고 조사공의 표면적을 이용하여 추가질량을 계산하고, 이들을 유한요소 모델의 각 절점에 방향별로 부가하여 모달해석을 수행하였다. Fig. 10은 고정장치만을 사용한 Model I에 대한 실험과 유한요소 해석 결과인 처음 3차 모드까지의 고유진동수를 나타내었고, Fig.

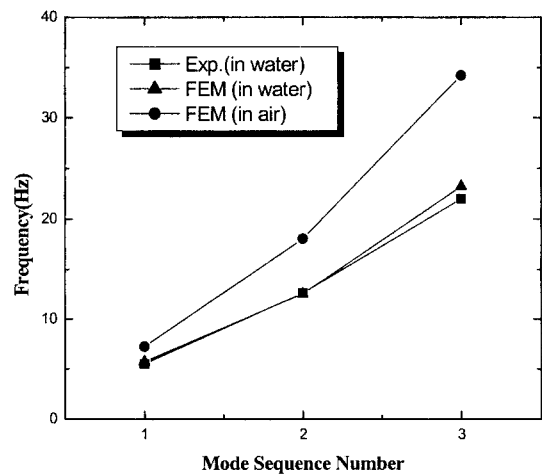


Fig. 10 Comparison of natural frequencies from experimental and FE analysis results

11에는 1,2차 진동수에 대한 모드형상을 나타내었다. 해석 결과 공기중에서 캡슐의 기본진동수는 7.22 Hz를 갖고, 수중에서는 추가질량의 효과로 인하여 5.72 Hz로 약 21%의 진동수 감소를 보였다. 또한 수중에서의 실험과 유한요소 해석결과는 3차 모드에서 5.3%의 오차를 보였으나 1,2차 모드에서는 거의 일치하는 결과를 보였으며, 이것은 유한요소 해석모델이 타당하게 생성되었음을 보이는 것이다.

Fig. 1에서 보인바와 같이 캡슐은 원형의 긴 부재로서 출구에서의 직교류로 인해 캡슐의 표면 주위에 와류가 발생하게 되고, 구조물에는 이 와류이탈(vortex shedding)의 주기를 갖는 동적인 가진력이 작용하게 되며, 와류이탈주파수( $f_s$ )는 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다<sup>(2,3)</sup>.

$$f_s = \frac{SU}{D} \quad (1)$$

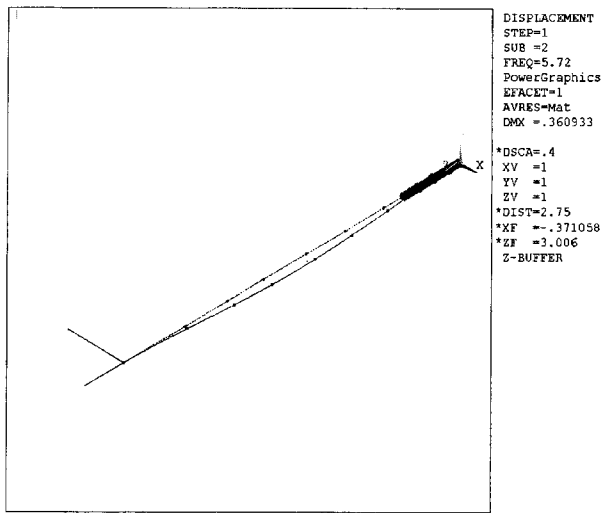
여기서 S는 Strouhal수로서 Reynolds수와 관계되고, 일반적으로 매끄러운 원형 파이프에 대하여 층류영역에서 0.2정도의 값을 갖는다<sup>(2,3)</sup>. 또한 D는 캡슐의 직경(34 mm)이고, U는 유체의 속도로서 하나로 센터에서는 0.3 m/sec를 넘지 않을 것으로 추정하고 있다. 캡슐 구조물의 고유진동수가 와류이탈주파수와 일치하게 되면 캡슐은 유동에 의하여 공진이 발생하고 큰 진폭을 갖는 진동이 발생하게 된다. 즉 실험으로 구한 고유진동수를  $f_w$ 라 하면, 이 진동수가  $f_s$ 와 같아질 때 공진이 발생하고, 이때 직교류 유동의 임계유속( $U_c$ )은 다음식으로 계산할 수 있다.

$$U_c = \frac{f_w D}{S} \quad (2)$$

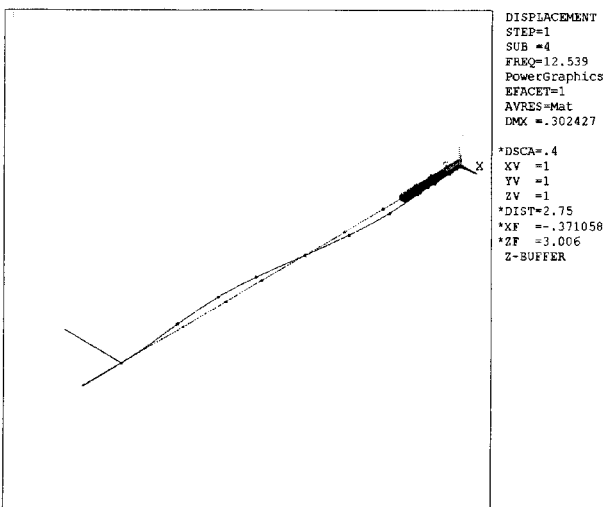
식 (2)에 실험으로부터 구한 캡슐의 기본진동수인  $f_w=5.5$  Hz를 이용하여 계산하면 임계유속,  $U_c=0.935$  m/sec로 계산된다. 따라서 하나로 침니 내부에서의 유속이 최대 0.3 m/sec임을 고려할 때 조사시험중 캡슐은 임계유속 이하의 범위에 있게 되어 유동에 의한 공진의 우려는 없는 것으로 평가된다.

### 5.2 캡슐 고정장치만을 사용할 경우(Model I)

CT 조사공에서 X, Y방향으로 각 점에 변위하중을 가해 해석한 경우의 결과를 Table 3에 나타내었고, Fig. 12는 가속도 측정점 1Y에 7.44 mm의 변위하중을 가한 경우의 변위형상을 나타내었다. 캡슐본체와 조사공 사이의 변위는 캡슐본체 상부(절점 #4)에서 Y방향으로 최대 2.46 mm를 보



(a) 1st mode



(b) 2nd mode

Fig. 11 Mode shapes of Model I capsule in water

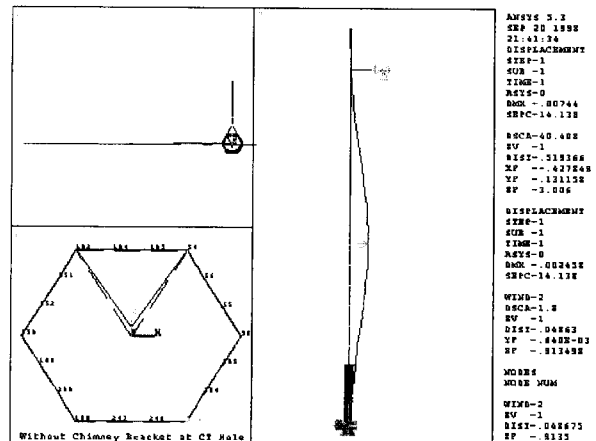


Fig. 12 Displacements of Model I in CT hole (1Y, #9,  $\delta = 7.44$  mm)

였고, 조사공 상부(절점 #103와 #104)에서 Y방향으로 최대 0.37 mm를 보였다. 이들 결과들은 캡슐 구조물이 전체적으로 고정장치의 길이방향(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.

캡슐 고정장치만으로 보호관을 지지한 Model I에 대한 해석결과는 CT 조사공에서 보다 IR 2 조사공에서 전체적으로 약간 큰 결과를 보였는데 이것은 IR 2 조사공에 사용되는 캡슐 보호관의 길이가 약간 길고, 해석의 입력으로 사용된 측정된 변위결과가 더 크기 때문이다. 또한 서로 간섭의 우려가 예상되는 부분에서의 결과들은 모두 허용범위내에 있으며, 최대변위가 발생하는 보호관의 중간부는 침니내에 위치하기 때문에 주변의 다른 구조물과의 간섭은 발생하지 않는다.

**Table 3** Displacement results of Model I in CT hole (unit: mm)

Accelerometer position and direction	ANSYS 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.	-	-	7.20	-	0.60	-	N/A

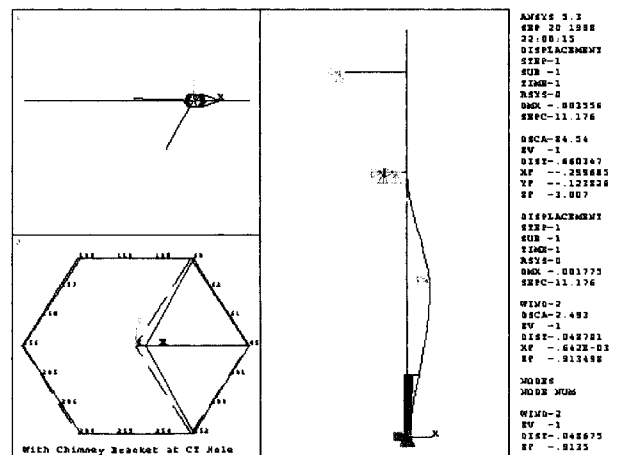
**Table 4** Displacement results of Model I in IR2 hole (unit: mm)

Accelerometer position and direction	ANSYS 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.	-	-	7.20	-	0.50	-	N/A

**5.3 캡슐 고정장치 및 침니 브라켓을 사용할 경우 (Model II)**

캡슐 고정장치만을 사용하는 경우(Model I), 변위의 결과로부터 캡슐은 조사 시험중 주변의 다른 구조물과의 간섭은 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 그러나 간헐적인 거동이라는 하지만 캡슐 보호관이 5.5~7.8 mm의 변위로 진동하기 때문에 가시적으로 비교적 큰 진동처럼 보인다. 따라서 이러한 진동을 좀더 줄이기 위하여 연구로 내에서의 침니 구조물을 이용해 캡슐 보호관의 중간을 잡아주는 방안이 검토되었다. Fig. 1에서 보인바와 같이 침니 내부에는 타 구조물을 설치하기가 어려우나, 침니 상부에는 추가적인 구조물의 설치가 가능하고, 본 연구에서는 가능한한 캡슐의 중간부분을 잡을 수 있도록 침니 브라켓을 설계, 제작하였고, 진동시험이 수행되었다.

Table 5에는 CT 조사공의 Model I에 침니 브라켓을 이용하여 중간부분을 지지한 경우의 해석결과를 나타내었다. 해석방법은 마찬가지로 실험을 통하여 얻은 두 점에서의 방향별 변위 결과를 해석의 입력으로 사용하였으며, Fig. 13은 1X에 3.45 mm의 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, 1X(1Y) 위치에서의 방향별 변위를 살펴보면 X방향의 변위가 Y방향보다 약간 큰 변위를 보였다. 캡슐본체와 조사공 사이의 변위는 캡슐본체 상부(절점 #4)에서 X방향으로 최대 1.77 mm를 보였고, 조사공과 주변 유동관 사이의 변위는 조사공 상부(절점 #45)에서 X방향으로 최대 0.27 mm로 주변 유동관과의 최소간격 1.0 mm의 1/2인 0.5 mm를 허용변위로 한다면 충분히 안전한 것으로 판단된다.



**Fig. 13** Displacements of Model II in CT hole (1X, #9,  $\delta = 3.45\text{mm}$ )

**Table 5** Displacement results of Model II in CT hole  
(unit : mm)

Accelerometer position and direction	ANSYS 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	0.76	#45	0.12	#16	1.87
2Y	1.65	#4	1.03	#109, #110	0.16	#16	2.56
Allowable disp.	-	-	7.20	-	0.60	-	N/A

캡슐 고정장치만을 사용하여 캡슐을 지지한 Model I의 경우는 CT, IR2 조사공에 관계없이 Y방향으로 변위가 크게 발생하였으나, 침니 상부에 브라켓을 설치하여 고정된 Model II의 경우는 X방향으로 최대변위가 발생하였다. 이것은 침니 브라켓이 Fig. 9의 (C)에서 보인 것처럼 보호관의 중간을 지지하기 때문에 각 방향에 대한 최대변위의 발생 방향을 바꿀 수 있고, 방향별 변위값을 크게 줄일 수 있음을 나타낸다. 또한 이러한 진동으로 인한 변위의 감소는 캡슐 구조물의 강성증가로 인한 것이다. 즉 침니 브라켓을 이용하여 캡슐 보호관의 중간을 잡아 줌으로서 굽힘모드가 지배적인 캡슐의 강성이 증가하여 진동수가 증가하고, 이것은 유동의 임계유속을 증가시켜 공진이 발생하는 것을 더 어렵게 하였기 때문이다.

## 6. 결 론

재료 조사시험을 위한 하나로 캡슐 구조물에 대한 진동 시험과 구조건전성을 평가하기 위한 구조해석이 수행되었으며, 이들 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 침니 브라켓을 사용하지 않는 하나로 캡슐 구조물 (Model I)은 유체속에서 5.5 Hz의 기본진동수를 갖으며, 유체에 의해서 공진이 발생할 수 있는 임계유속은 0.935 m/sec로서 운전중 최대 유속 0.3 m/sec를 고려할 때 공진은 발생하지 않는다.

(2) 보호관의 중간을 잡아주는 경우(Model II) 캡슐은 강성의 증가로 인하여 기본진동수가 9.5 Hz로 증가하고, 보

호관 중간부에서의 최대변위는 56%, 조사공 상부에서 변위는 약 40% 감소한다.

(3) IR 2 조사공에서 Model I 캡슐의 본체와 조사공 상부에서의 변위는 각각 2.60 mm와 0.39 mm로서 설치 상태에서의 허용변위(7.2 mm, 0.5 mm)를 만족하여 캡슐과 조사공, 조사공과 주변 유동관 사이의 간섭은 발생하지 않는다.

(4) 하나로 캡슐 구조물은 침니 브라켓의 사용 여부에 관계없이 유체유발진동에 의한 구조적 건전성을 확보하고 있으며, 구조물의 안전성을 보다 증대시키기 위해서는 중간을 잡아줄 수 있는 구조물을 설치하여 사용하는 것이 더 좋을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 강영환 외, 1994, "KMRR을 이용한 노내검증실험 평가기술개발", KAERI/RR-1398/93, 한국원자력연구소.
- (2) Blevins, R. B., 1977, "Flow-Induced Vibration", Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- (3) Chen, S. S., 1987, "Flow-Induced Vibration of Circular Cylindrical Structures", Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- (4) 강영환 외, 1995, "노내시험시설 설계건조(부록2)", KAERI/RR-1510/94, 한국원자력연구소.
- (5) HAN-IC-DD-PR-01, 1998, "97M-01K 캡슐 하나로 조사시험전 진동시험 절차서", 한국원자력연구소.
- (6) ANSYS Engineering Analysis System User's Manual for Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1992.
- (7) HANTAP-09-RT-002(Rev.1), 1997, "특수시험시설 절차서, 하나로 조사시험연료 진동시험절차서", 한국원자력연구소.
- (8) KAERI/TR-985/98, 1998, "재료조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서", 한국원자력연구소.
- (9) 강영환, 이영신, 최명환, 1996, "하나로 캡슐 지지용 와이어 스프링의 강성해석", 한국원자력학회 '96추계학술대회 논문집(II), pp. 494~499.
- (10) Lawry, M. H., 1996, I-DEAS Master Series Manual, SDRC Inc..
- (11) Blevins, R. B., 1979, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape", Van Nostrand Reinhold Co., New York.