

## 캡슐 하단부 구조변경에 따른 압력강하 및 진동특성

### Pressure Drop and Vibration Characteristics of the Capsule with the Modification of Bottom Structures

최명환† · 주기남\* · 조만순\* · 김봉구\*

M. H. Choi, K. N. Choo, M. S. Cho and B. G. Kim

(2005년 9월 27일 접수 ; 2005년 11월 14일 심사완료)

**Key Words** : Instrumented Capsule(계장캡슐), Bottom Structure(하단부 구조물), Vibration(진동), HANARO(하나로), Pressure Drop(압력강하), Displacement(변위), Modal Analysis(모달해석), Natural Frequency(고유진동수)

#### ABSTRACT

The bottom structure of an instrumented capsule is a part which is joined at the receptacle of the flow tube in the reactor in-core. A geometrical change of the bottom structure has an effect on the pressure drop and the vibration of the capsule. The out-pile test to evaluate the structural integrity of the material capsule called 04M-17U was performed by using a single channel and a half core test loop. From the pressure drop test, the optimized diameter of the cone shape's bottom structure which satisfies HANARO's flow requirement (19.6 kg/s) is 71 mm. The maximum displacement of the capsule measured at the half core test loop is lower than 1.0 mm. From the analysis results, it is found that the test hole will not be interfered with near the flow tubes because its displacement due to the cooling water is very small at 0.072 mm. The fundamental frequency of the capsule under water is 9.64 Hz. It is expected that the resonance between the capsule and the fluid flow due to the cooling water in HANARO's in-core will not occur. Also, the new bottom structure of a solid cone shape with 71 mm in diameter will be applicable to the material and special capsules in the future.

#### 1. 서 론

계장캡슐(instrumented capsule)은 국내 연구용 원자로인 하나로(HANARO)를 이용한 재료 및 핵연료(fuel), 크립시험과 같은 특수목적의 조사시험(irradiation test)을 수행하는데 이용되는 장치이다. 하나로 노심(in-core)에는 조사시험을 위하여 3개의 육각 조사공(test hole)과 노심 주변에 4개의 원형 조

사공이 확보되어 있다. 일반적으로 원자력 재료 시험편이 장입된 캡슐 본체(mainbody)는 원자로 노심 조사공에 장전되어 시험이 수행되며, 주변의 다른 유동관(flow tube)에는 핵연료 다발이 장전되게 된다. 캡슐 본체 내부의 온도제어나 계측을 위한 라인들은 캡슐 보호관(protection tube)과 안내관(guide tube)을 통하여 노외의 제어장치와 연결된다. 또한 조사시험 중 캡슐 하단부는 조사공 하부 리셉터클(receptacle)에 체결되며, 보호관의 중간부분은 침니 내부지지대(chimney bracket), 상부는 로봇암(robot arm)에 의해서 지지되며, 조사공과 캡슐 본체의 접촉을 막아주는 상부 안내스프링(top guide spring)에 의해서 지지되는 구조이다. 그러나 캡슐 구조물은 전체 길이가 약 6m인 가늘고 긴 원통 형상이어서 노심을 순환하

† 책임저자 : 정희원, 한국원자력연구소

E-mail : mhchoi@kaeri.re.kr

Tel : (042) 868-8531, Fax : (042) 863-6521

\* 한국원자력연구소

는 냉각수에 의해 불규칙한 진동이 발생할 수 있기 때문에 캡슐에 대한 진동특성을 규명하고, 구조적 안전성을 확보하는 것은 중요한 문제이다. 따라서 이러한 진동 및 구조적 안전성 측면에서의 재료 및 핵연료 캡슐에 대한 연구가 수행되었고<sup>(1~2)</sup>, 기계적 특성 평가와 열수력적 특성시험을 통한 하나로와의 양립성 평가, 계장, 제어, 계측기술 등의 기술고도화를 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다<sup>(3~4)</sup>.

재료 조사시험용 계장캡슐의 구조 중에서 원자로 노심의 조사공 하부 리셉터클에 체결되는 하단부 구조물(bottom structure)은 조사시험중 캡슐을 지지해주는 역할도 하지만, 형상과 외부 직경에 따라 조사공의 유량이 달라지게 된다. 또한 유량의 변화는 캡슐 전체 구조물의 진동에 영향을 줄 가능성이 있다. 따라서 하나로에서는 핵연료의 냉각에 필요한 유량 확보를 위하여 주변 조사공에 대한 유량을 19.6 kg/s 이하로 제한하고 있으며, 이를 준수하는 것은 하나로와의 양립성을 위하여 반드시 필요한 사항이다<sup>(5)</sup>.

이 연구에서는 최근 설계 개선된 하단부 구조물의 변경에 따른 캡슐 구조물의 압력강하 및 진동특성에 대하여 기술하였다. 04M-17U라 불리는 재료 조사시험용 계장캡슐<sup>(6)</sup>에 여러 형태의 하단부 구조물을 장착한 경우에 대한 시험 및 해석을 수행하였다. 압력강하 시험은 캡슐의 노외시험을 위하여 제작된 단일 채널시험루프(single channel test loop)를 이용하였으며, 모의 핵연료(dummy fuel)의 시험을 통하여 장치가 하나로와 동일한 유량을 보인다는 것을 확인하였고, 이를 비교의 기준으로 하였다. 또한 조사시험 중 캡슐의 구조 건전성을 평가하기 위한 진동변위를 하나로의 1/2 노심구조를 갖는 1/2 노심시험루프(half core test loop)에서 측정하였다. 진동변위의 비교를 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS<sup>(7)</sup>를 이용한 해석을 수행하였으며, 조사공 상부에서의 캡슐 및 조사공의 변위결과를 고찰하여 주변 타 구조물과의 간섭을 평가하였다. 또한 개발된 모델을 적용하여 캡슐의 고유진동수를 예측하였고, 이를 이용하여 하나로 침니 내부 유체의 유속으로 인한 캡슐의 공진 가능성을 평가하였다.

## 2. 캡슐 및 하단부 구조물

Fig.1은 재료 조사시험용 계장캡슐의 외형적인 형상을 나타낸 것으로서 크게 하단부 구조물, 본체, 보

호관, 안내관으로 구성되며, 전체 길이는 약 6m의 파이프 형상이다. 그 중에서 직경 60 mm, 두께 2 mm, 길이 870 mm의 캡슐 본체에는 시편을 포함하여 열매체, 온도측정용 열전대, 마이크로 히터, 중성자 측정용 fluence monitor 등을 포함하고 있다<sup>(6)</sup>. 또한 캡슐 본체의 아래 부분에 다울 핀(dowel pin)으로 체결되는 하단부 구조물은 조사시험중 원자로의 노심 하단부 리셉터클에 체결되어 캡슐을 지지해 주게 된다.

Fig.2는 캡슐 하단부 구조물의 형상을 나타낸 것으로서 캡슐의 개발 초기에는 핵연료 집합체의 하단부와 동일한 3개의 암(arm)을 갖는 형태였다. 그러나 핀 용접부의 취약함으로 인하여 손상이 발생하였고,

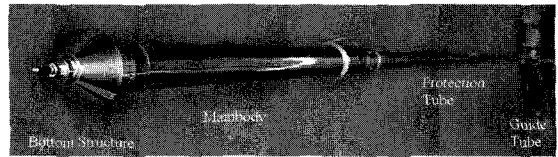
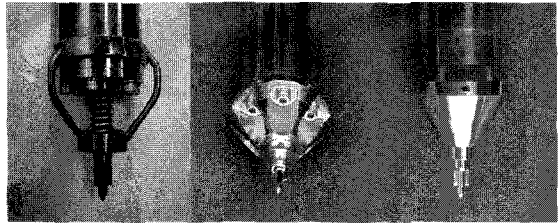


Fig. 1 Shape of the instrumented capsule



(a) Arm type (b) Bolt type (c) Dowel pin type  
Fig. 2 Shape of the bottom structures

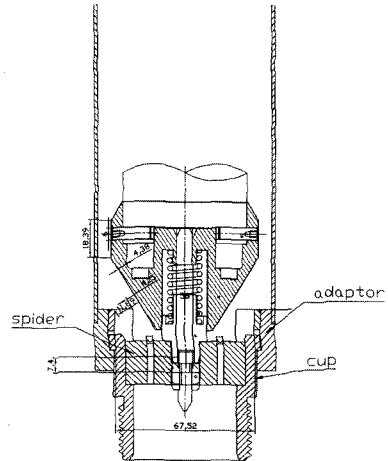


Fig. 3 Sectional view of the new bottom structure installed at CT test hole

이를 해결하기 위한 몇 차례의 설계개선이 있었으며, 설계 개선된 하단부 구조물을 캡슐에 장착한 후 여러 특성을 파악하기 위한 노외시험을 수행하였다<sup>(8)</sup>. 이전의 연구에서 언급된 캡슐 하단부의 구조는 손상 가능성이 있는 부위인 3개의 압과 상부 링을 없애고 원추(cone) 모양의 일체형 구조로서 캡슐 본체와 6개의 볼트를 이용하여 체결하였다. 또한 최근 체결 볼트의 풀림을 방지하고 구조적 안전성을 더 높이고자 04M-17U 캡슐에서는 다올 핀을 이용하여 측면에서 체결하는 구조로 설계 변경하였다<sup>(9)</sup>. Fig. 3은 캡슐 하단부 구조물이 육각 조사공에 장착되었을 때의 단면 형상을 나타내었다. 조사공 내에서의 압력강하는 구조물 외경에 따른 유로면적에 관계가 되며, 구조물의 형상은 유체 흐름의 패턴에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3. 시험

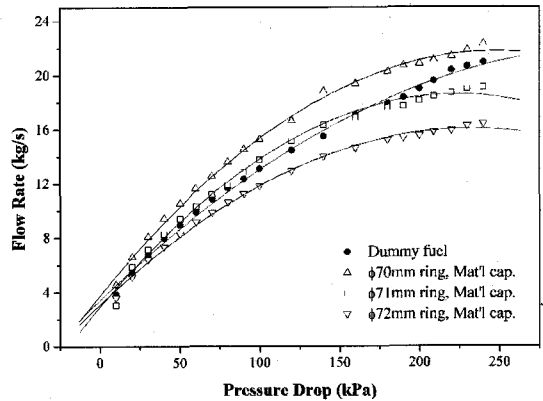
#### 3.1 압력강하

이 연구에서는 설계 변경된 하단부를 장착한 캡슐을 원자로에 장전하기 앞서 하나로서 요구하는 기준 유량의 만족 여부를 판단하여 하나로서의 양립성을 평가하기 위한 시험을 수행하였다. 하나로서의 육각 유동관에 설치되는 핵연료 집합체에 대한 설계요건은 온도 40°C에서 유량 19.6 kg/s일 때 압력강하가 209 kPa ± 5%의 범위에 있어야 한다는 것이다. 따라서 육각 조사공에 장전되는 캡슐에 대한 유동조건은 209 kPa의 압력강하에서 유량이 19.6 kg/s 이하여야 한다는 조건을 적용하였다. 압력강하 측정은 캡슐을 하나로서 장전하기 전에 노외에서 장·탈착, 압력강하, 내구성 및 진동시험 등을 수행하여 캡슐체원의 적합성 검토와 하나로서 요구되는 조건을 만족하는가를 검증하는데 사용되는 단일채널시험루프를 사용하였다<sup>(10)</sup>.

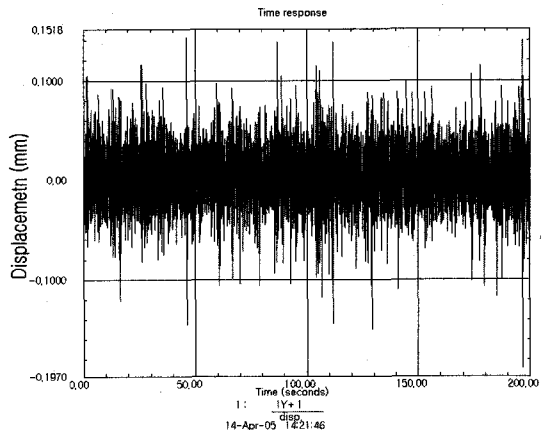
**Table 1** Comparison of the flow rate at the pressure drop of 209 kPa

Case	Bottom structure	O.D. (mm)	Flow rate (kg/s)	Remark
Dummy fuel	3-pin arm	-	19.60	Standard
Material capsule	Dowel pin	φ70	21.10	Unsatisfied
		φ71	18.44	Satisfied
		φ72	15.85	Satisfied

Table 1에는 모의 핵연료 다발, 다올 핀 방식으로 직경 70, 71, 72 mm의 하단부 구조물을 장착한 계장 캡슐의 209 kPa에서의 측정유량, Fig. 4에는 압력강하에 따른 유량의 변화를 나타내었다. 모의 핵연료에 대한 시험 결과는 19.6 kg/s의 하나로 기준유량과 동일한 유량을 보여 단일채널시험루프가 하나로서의 유동조건을 잘 구현하고 있음을 확인하였다. 하단부 구조물의 직경이 70 mm일 때 캡슐은 모의 핵연료 보다 더 많은 유량을 보여 부적합하였고, 72 mm의 링을 장착한 캡슐의 유량은 하나로서의 조건을 만족하기는 하였으나 15.85 kg/s로 캡슐의 냉각이 적을 것으로 판단되었다. 또한 외경이 71 mm인 경우에 18.44 kg/s의 적당한 유량을 보였고, 이는 하나로서와 잘 양립함을 확인 할 수 있었다. 따라서 추후 제작되는 계장캡슐에는 71 mm 직경의 solid cone 형상을 갖는 하단



**Fig. 4** Flow rate of the capsule with the pressure drop



**Fig. 5** X-dir. displacement of the capsule at Z = 2.25 m

부를 다올 핀으로 장착하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

### 3.2 진동변위 측정

압력강하 조건을 만족하는 직경 71 mm의 하단부 구조물을 장착한 04M-17U 캡슐의 진동 변위를 측정하여 해석데이터로 이용하고, 건전성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 진동변위의 측정은 하나로와 유동조건 및 지지조건이 거의 동일한 1/2노심시험루프를 이용하였다. 이 시험시설에서는 캡슐의 거동을 관측할 수 있는 장이 설치되어 있으며, 캡슐 하부에

서 2.25 m에 위치한 중간창(middle view glass)에서 두 방향의 변위를 측정하였고, 노심에 가까운 아래창(bottom view glass)의 1.42 m 지점에서 X 방향의 변위를 측정하였다.

변위측정에 사용한 장비로는 Polytec Laser Doppler Vibrometer, LDV controller, SONY data recorder, I-DEAS T-das software, HP VXI front end system, HP x2000 workstation 등을 이용하였다. 현장에서 측정된 신호는 테일 레코더에 약 5분간의 데이터를 기록하였고, 저장한 신호는 I-DEAS T-das<sup>(11)</sup> 프로그램을 이용하여 데이터를 획득하였다.

Table 2는 1999년 하나로에서 수행한 97M-01K 캡슐의 진동시험 결과<sup>(11)</sup>와 1/2 노심시험루프에서 측정한 04M-17U 캡슐의 진동변위를 나타내었다. 또한 Table 3에는 이전 캡슐 및 현재 캡슐에 대한 기하학적 형상, 지지조건 그리고 시험조건 등의 차이점에 대한 비교를 나타내었다.

04M-17U 캡슐의 측정된 Peak 변위는 0.862 mm로서 97M-01K 캡슐의 3.447 mm에 비해 상당히 작은 값을 보였다. 이것은 캡슐의 거동이 이전 캡슐에 비해 많이 안정화되었음을 의미하며, 가장 큰 원인은 약 5 m의 길이를 갖는 보호관의 직경이 34 mm에서 48.6 mm로 커지면서 강성이 증가하였기 때문이다. 또한 침니 내부지지대의 지지조건, 하단부 구조물의 형상, 시험시설 및 측정위치 등의 변수들로 인하여 변위의 차이가 발생한 것으로 보인다.

Fig. 5와 6은 각각 Z=2.25 m와 1.42 m 지점에서 측정한 200초간의 X방향 변위이력을 나타내었다. 시험시설 아래창에서의 측정값은 노심에 설치된 조사공 상부(약 0.9 m)에 근접한 위치에서의 측정 변위라는 점에 의미가 있으며, 정확히 일치하지는 않지만 캡슐 본체와 조사공 사이의 간섭을 예측하기 위한 데이터로 이용할 수 있다.

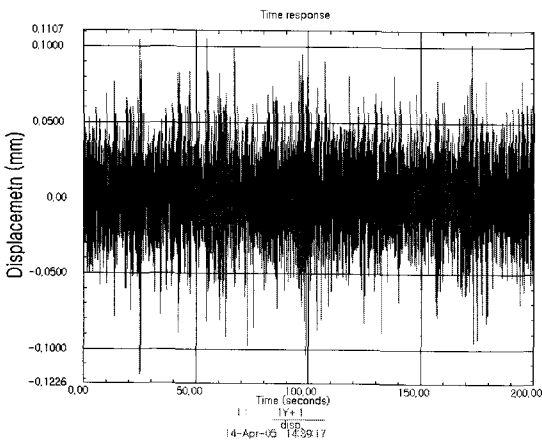


Fig. 6 X-dir. displacement of the capsule at Z=1.42 m

Table 2 Displacement of the capsule using a half core test loop

Capsule	Measuring point <sup>1)</sup> (m)	Dir.	Displacement (mm)			Remark
			Min. Peak	Max. Peak	RMS	
97M-01K	2.31	X <sup>2)</sup>	-3.447	2.484	-	Ref[1]
		Y <sup>2)</sup>	-2.755	3.132	-	
04M-17U	2.25	X	-0.189	0.143	0.026	Middle glass
		Y	-0.862	0.742	0.079	
04M-17U	1.42	X	-0.117	0.105	0.023	Bottom glass

1) Distance from the bottom of the capsule  
 2) X : Robot arm dir., Y : Perpendicular to the robot arm

Table 3 Comparison of the capsule between pervious and present model

Capsule	97M-01K <sup>(1)</sup>	04M-17U
Facility(year)	HANARO(1999)	Half core(2005)
Prot. tube(OD/t)	φ 34/2.8 mm	φ 48.6/2.8 mm
Chimney bracket	with or without	with
Bottom structure	3-pin arm	solid cone

### 4. 유한요소해석

조사 시험중 캡슐은 하나로 노심에서 냉각수에 의해 유체유발진동을 하게 되며, 하나로와 1/2노심시험 루프에서는 조사공과 캡슐, 조사공과 유동관 사이의 간섭을 평가하기 위한 변위의 측정이 불가능하였다. 따라서 이들 사이의 변위 예측을 통한 구조건전성을 평가하기 위하여 정적해석을 수행하였고, 캡슐의 고유진동특성을 파악하여 하나로 냉각유체와의 공진을 평가하기 위한 모달해석을 수행하였다.

#### 4.1 모델링

04M-17U 캡슐의 해석 모델은 기존의 연구에서 시험 및 해석결과의 비교를 통하여 검증된 모델<sup>(1)</sup>을 수정하여 생성하였다. 기존 캡슐과 현 캡슐의 차이는 Table 3에서 나타내었다. 해석 결과에 가장 크게 영향을 미치는 것은 보호관의 두께 변화와 지지조건의 변화를 생각할 수 있으며, 하단부 구조물의 형상은 해석모델에서 빔(Beam)이 단순지지된 것으로 보았기

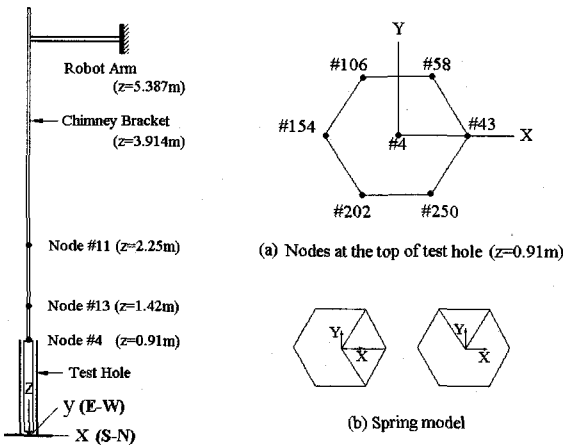


Fig. 7 Schematic view of the capsule model

때문에 영향을 미치지 않는다. 따라서 현 캡슐의 해석모델은 기하학적 형상 변화에 따른 단면 특성 및 수중에서의 동적유체질량을 재계산하여 모달해석시 모델에 반영하였다.

Fig. 7은 캡슐의 정적해석 및 모달해석을 위한 유한요소해석 모델의 개념도를 나타내었다. 해석모델에서 사용 좌표계는 캡슐 하단부를 원점으로 하여 로봇팔의 축방향을 X축, 횡방향을 Y축으로 하였으며, 캡슐의 축방향을 Z좌표로 하였다. 캡슐본체 상부에 부착되어 있는 상부 안내 스프링은 육각 조사공의 모서리와 접촉하게 되며, Fig. 7(b)에서 보인바와 같이 스프링-댐퍼(Combin14) 요소를 사용하여 X방향 변위 하중 작용시 3개, Y방향 하중 작용시 2개의 스프링으로 모델하였다. 유한요소 모델에 적용한 경계조건으로서 캡슐 하단부 rod tip은 단순지지, 로봇팔의 끝단과 조사공의 하단부는 고정 그리고 침니 내부지지대 부분은 X, Y방향 변위를 구속하는 단순지지로 보았다. 또한 하중조건으로는 Z=2.25 m (node #11)에서의 측정된 X, Y방향으로의 변위를 하중으로 가해 주었다.

#### 4.2 정적해석

Table 4에는 측정 진동변위를 하중조건으로 하여 해석한 조사공 상부에서의 변위를 나타내었다. 해석을 통하여 변위를 관찰한 부분은 최대변위(절점 #16), Z=1.42 m 위치(절점 #13), 조사공 상부위치에서 캡슐의 변위(절점 #4) 그리고 조사공 상부(X방향 절점 #43; Y방향 절점 #106)의 변위이다. 해석을 통한 최대변위는 변위 측정점 보다 약 20 cm 정도 낮은 위치(Z=2.04 m)에서 발생하였으나 측정점의 변위 보다 약간 큰 값을 보였다.

X 방향에 0.189 mm의 변위를 가해준 경우, 조사공 상부의 캡슐(절점 #4)에서는 0.107 mm, 조사공(절점 #43)의 변위는 0.016 mm로 계산되었다. Z=1.42

Table 4 Displacement(mm) of the capsule and the test hole

Dir.	ANSYS input(mm) (Node #11)	Max. (Node #16)	Capsule & test hole		Test hole & flow tube		Z=1.42 m (Node #13)	
			Node	Disp.	Node	Disp.	FEM	Test
X	Peak = 0.189	0.193	#4	0.107	#43	0.016	0.161	0.117
	RMS = 0.026	0.027	#4	0.015	#43	0.002	0.022	0.023
Y	Peak = 0.862	0.879	#4	0.486	#106	0.072	0.732	-
	RMS = 0.079	0.081	#4	0.045	#106	0.007	0.067	-
Allowable displacement			-	7.2	-	0.6	N/A	

m 위치에서의 RMS값 적용시 측정 및 해석 결과는 서로 잘 일치하여 유한요소해석 모델에서의 지지조건이나 강성이 실제 시험조건과 유사함을 확인할 수 있었다. 실제로 이 부분은 측정 가능한 조사공 상부에 가장 근접한 위치로서 약 50 cm의 위치 차이가 있기는 하지만 측정치를 근거로 할 때, 조사공 상부에서의 X방향 캡슐의 변위는 0.12 mm가 넘지 않을 것으로 평가된다. 또한 Y 방향 변위는 조사공 상부 캡슐 변위가 0.486 mm, 조사공 변위(절점 #106)가 0.072 mm로 계산되었고, Fig. 8은 X, Y방향 변위형상을 나타내었다.

이상의 측정 및 해석을 통한 노심 조사공 상부에서의 구조물들 간의 간섭을 평가하면, 우선 스프링 설치부에서 캡슐의 최대 발생변위는 Y방향 0.486 mm 이기 때문에 이들 사이의 허용거리인 7.2 mm 보다 충분히 작음을 알 수 있다. 또한 이 경우에 조사공은 0.072 mm의 변위가 발생하였으나, CT 조사공의 경우 이웃한 유동관과의 거리가 0.6 mm임을 고려한다면,

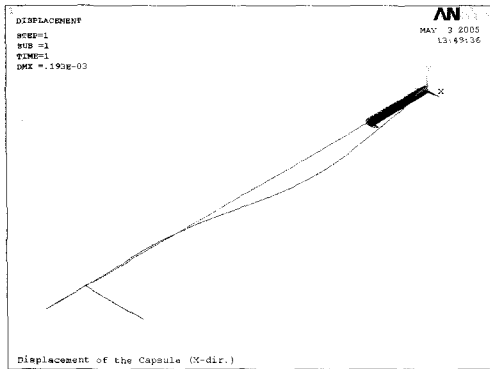
해석을 통해 예측된 조사공 상부의 변위는 매우 작음으로서 조사 시험중 조사공과 유동관 사이의 간섭은 발생하지 않고 구조적 건전성을 확보할 것으로 판단된다.

### 4.3 모달해석

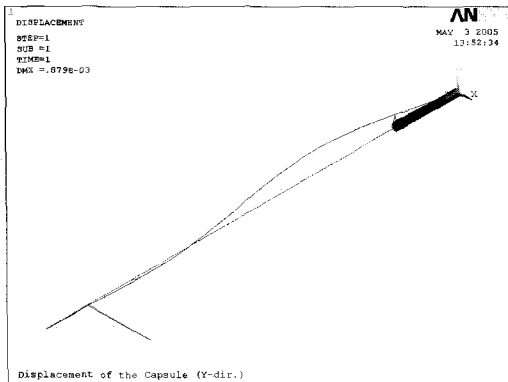
캡슐의 고유진동특성을 얻고, 하나로 냉각 유체에 의한 공진 가능성을 평가하기 위한 모달해석을 수행하였다. 해석모델은 정적해석을 위해 생성한 모델에 수중에서의 추가질량<sup>(12)</sup>을 고려하여 반영하였으며, 경계조건은 동일하게 적용하였다.

Table 5는 캡슐의 X, Y 두 방향에 대한 공기중과 수중에서의 고유진동수를 나타내었다. 04M-17U 캡슐의 공기중 기본진동수는 Y방향 12.68 Hz, X방향 12.94 Hz로 거의 동일한 특성을 보였다. 97M-01K 캡슐의 공기중 고유진동수가 7.22 Hz이었던 것과 비교한다면 약 43% 증가하였다. 이것은 Table 3에서 보인바와 같이 보호관의 직경이 커졌고, 침니 지지대 부분의 지지조건과 하단부 구조물의 변경 등이 종합적으로 작용한 것으로 판단된다. 또한 캡슐의 수중 고유진동수는 X방향에 대하여 9.81 Hz로 약 24%의 감소를 보였으며, Fig. 5의 변위신호에 대한 autospectrum 결과와도 잘 일치하였다. Fig. 9는 캡슐에 대한 수중에서의 4차까지의 모드형상을 나타낸 것으로 이들은 공기중에서의 모드형상과 동일하였다. 처음 두 모드는 각각 Y, X 방향의 1차 굽힘, 3차는 보호관 중간 부분의 2차 굽힘과 상부에서의 1차 굽힘 모드가 조합된 연성거동을 보였다. 또한 4차는 X방향 2차 굽힘모드가 지배적인 모드 특성을 보이고 있다.

캡슐은 원형의 긴 부재로서 원자로 냉각수의 출구에서 직교류로 인해 캡슐 표면 주위에 와류가 발생



(a) X direction



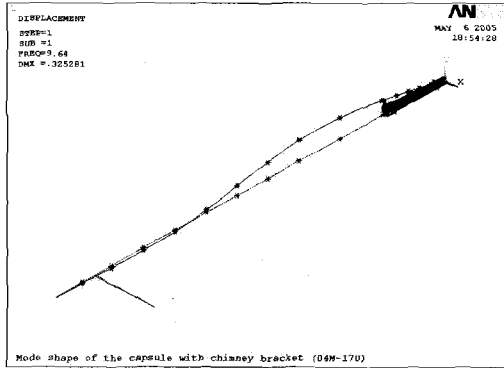
(b) Y direction

Fig. 8 Displacement shapes of the capsule

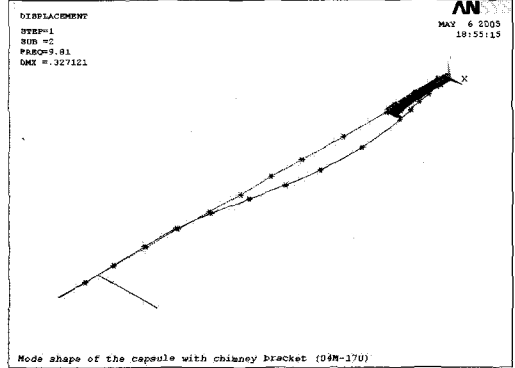
Table 5 Natural frequencies and modes of the capsule

Mode number	In air		Under water		
	Freq. (Hz)	Mode	Freq. (Hz)	Mode	Freq. (Hz)*
1	12.68	Y 1B	9.64	Y 1B	-
2	12.94	X 1B	9.81	X 1B	9.9
3	29.98	Y2B+T1B	23.38	Y2B+T1B	-
4	35.92	X 2B	24.35	X 2B	20.5

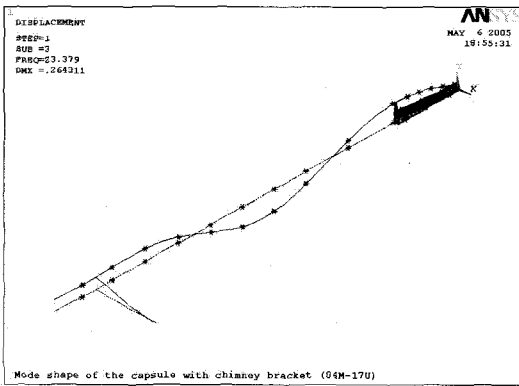
Note : 1) X, Y : Direction, B : Bending mode  
 2) T : Top part of the protection tube  
 3) \* : Frequency of the auto spectrum



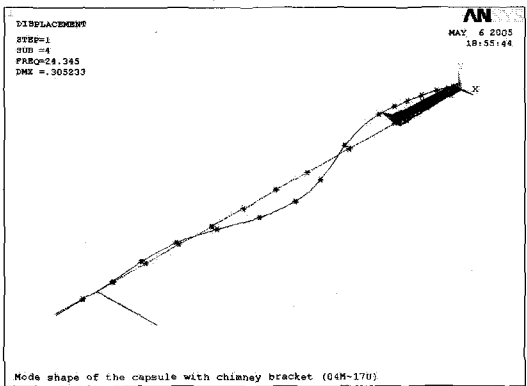
1st mode



2nd mode



3rd mode



4th mode

Fig. 9 Mode shapes of the capsule under water

하게 된다. 따라서 구조물에는 와류이탈(vortex shedding)의 주기를 갖는 동적인 가진력이 작용하게 되며, 와류이탈주파수( $f_s$ )는 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다<sup>(13)</sup>.

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

여기서  $S$ 는 Strouhal수로서 Reynolds수와 관계되고, 일반적으로 매끄러운 원형 파이프에 대하여 층류 영역에서 0.2 정도의 값을 갖는다. 또한  $D$ 는 캡슐의 직경(48.6 mm)이고,  $U$ 는 유체의 속도로서 하나로서는 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 실험이나 해석을 통하여 구한 고유진동수를  $f_w$ 라 하면, 이 진동수가  $f_s$ 와 같아질 때 공진이 발생하고, 이때 직교류 유동의 임계유속( $U_c$ )은 다음 식으로 계산할 수 있다.

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

식 (2)에 해석을 통해 얻은 캡슐의 기본진동수인  $f_w=9.64$  Hz를 이용하여 계산하면 임계유속,  $U_c=2.34$  m/sec로 계산된다. 따라서 하나로 칩니 내부에서의 유속이 최대 0.3 m/sec임을 고려할 때 조사시험 중 캡슐은 임계유속 이하의 범위에 있게 되어 유동에 의한 공진의 우려는 없는 것으로 평가된다.

## 5. 결론

계장캡슐의 하단부 구조물이 3편 압과 원추형의 볼트 체결 방식에서 solid cone형의 다물 핀 체결방식으로 설계변경되면서 캡슐의 압력강하 및 진동특성을 얻기 위한 연구가 수행되었으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Dummy fuel의 시험결과, 단일체널시험루프는

하나로와 동일한 유량(19.6 kg/s)을 구현하였고, 직경 71 mm의 신행 하단부 구조물을 장착한 계장캡슐 (04M-17U)의 유량은 18.44 kg/s로서 하나로 요구조건을 만족하였다.

(2) 1/2 노심시험루프에서 측정한 캡슐의 진동변위는 1.0 mm 보다 작았으며, 정적해석 결과, 조사공상부에서의 캡슐 최대변위는 Y방향 0.486 mm로 허용변위인 7.2 mm에 비해 아주 작았다. 또한 조사공상부의 변위는 0.072 mm로 CT 조사공의 이웃한 유동관과의 거리가 0.6 mm임을 고려한다면, 조사공과 유동관 사이의 간섭은 발생하지 않고 구조적 건전성을 확보하였다.

(3) 캡슐의 공기중 기본진동수는 12.68 Hz로서 97M-01K 캡슐의 보호관 직경 34 mm인 경우에 비해 보호관 강성 증가로 인하여 약 43 % 증가하였다.

(4) 캡슐의 수중 기본진동수는 9.64 Hz이고, 이를 이용하여 계산한 임계유속은 2.34 m/sec이다. 하나로 침니 내부에서의 최대 유속이 0.3 m/sec임을 고려하면 조사시험 중 캡슐은 임계유속 이하의 범위에 있게 되어 유동에 의한 공진의 우려는 없는 것으로 평가되었다.

(5) 향후 제작될 재료 및 특수캡슐의 하단부 구조물은 71 mm 직경의 solid cone형태로 제작하여 다울 핀 방식으로 체결하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 지원을 받아 2005년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

## 참 고 문 헌

(1) 이영신, 강영환, 최명환, 신도섭, 2000, "진동 시험 및 해석을 통한 하나로 캡슐 구조물의 구조건전성 평가," 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 2 호, pp. 261~268.

(2) 최명환, 강영환, 김봉구, 류정수, 김영진, 2004,

"핵연료 조사시험용 캡슐 구조물의 좌굴 및 진동특성," 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 8 호, pp. 741~748.

(3) Lee, Y. S., Choi, M. H. and Kang, Y. H., 2001, "Thermal and Mechanical Characteristics of an Instrumented Capsule for a Material Irradiation Test," Nuclear Engineering and Design, Vol. 205, No. 1-2, pp. 205~212.

(4) Kang, Y.H., et al., 2003, "Capsule Development and Utilization for Material Irradiation Tests," KAERI/RR-2360/03, KAERI.

(5) 류정수, 조영갑, 2000, "침니 내부지지대 및 계장형 핵연료 시험다발에 대한 진동시험 절차서," HAN-RS-OT-IT-00-002, Rev. 0, 하나로이용연구단, 한국원자력연구소.

(6) 대우정밀(주), 2005, "하나로 계장캡슐(04M-17U) 설계/제작: end of manufacturing report," 대우정밀(주).

(7) ANSYS IP Inc., 2005, "ANSYS User's manual," Ver. 9.0, ANSYS IP Inc.

(8) 최명환 외, "원추형 하단부 구조를 갖는 캡슐의 노외시험," KAERI/TR-2655/2004, 한국원자력연구소.

(9) 주기남, 2005, "Dowel pin 형 캡슐 하단부 설계변경," HAN-IC-CR-05-019, 내부통신문, 한국원자력연구소.

(10) 조만순 외, 2003, "캡슐 노외시험시설 활용 (2000~2003)," KAERI/TR-02406/2003, 한국원자력연구소.

(11) SDRC, 2004, "I-DEAS Master Series 10.0," Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.

(12) Blevins, R. D., 1979, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," Van Nostrand Reinhold Company, USA.

(13) Blevins, R. D., 1977, "Flow Induced Vibration," Van Nostrand Reinhold Company, USA.