

핵연료 조사시험용 캡슐 구조물의 좌굴 및 진동특성

Buckling and Vibration Characteristics of the Capsule for Nuclear Fuel Irradiation Test

최명환[†] · 강영환* · 김봉구* · 류정수* · 김영진*
M. H. Choi, Y. H. Kang, B. G. Kim, J. S. Ryu and Y. J. Kim

(2004년 3월 30일 접수 : 2004년 6월 28일 심사완료)

Key Words : Fuel Capsule(핵연료캡슐), Irradiation Test(조사시험), Vibration(진동), Buckling(좌굴), HANARO(하나로), Flow Induced Vibration(유체유발진동), Modal Testing(모달시험), Natural Frequency(고유진동수)

ABSTRACT

The vibration and buckling characteristics of the capsule for fuel irradiation test are studied. The natural frequencies of the capsule in air and under water are obtained by modal testing and finite element(FE) analysis using ANSYS program, and accelerations with flow are measured to estimate the compatibility with the operation requirement of the HANARO reactor. The experimental fundamental frequencies of the capsule in the x and z direction are 8.5 Hz and 8.75 Hz in air, and 7.5 Hz and 7.75 Hz under water, respectively. The maximum amplitude of accelerations under the normal operating condition is measured as 11.0 m/s^2 that is within the allowable vibrational limit(18.99 m/s^2) of the reactor structure. Also, the maximum displacement at 100 % flow is calculated as 0.13 mm which is not interference with other nearby structures. FE analysis results show that the natural frequencies are found to be similar to those of the modal testing when three supporting parts are considered as simply supported conditions. From the buckling analysis, when the loading tool is applied, the critical buckling load of the capsule is 233 N.

1. 서론

캡슐(capsule)은 국내 연구로인 하나로(high-flux advanced neutron application reactor; HANARO)를 이용한 재료 및 핵연료(fuel)의 조사시험(irradiation test)에 이용되는 장치이다. 하나로 노심(in-core)에는 조사시험을 위하여 CT, IR1 및 IR2의 육각형 조사공 3개와 노심 주변에 OR3~OR6의 원통형 조사공 4개가 확보되어 있다. 일반적으로 캡슐을

이용한 노내 조사시험에는 캡슐 내부의 여러 조건들을 제어하거나 계측할 수 있는 계장캡슐(instrumented capsule)과 제어, 계측이 불가능한 무계장캡슐이 이용되고 있다. 특히 계장캡슐은 원자로의 노심에 위치하는 시편 장착부의 분위기를 제어하거나 계측하기 위한 많은 계장라인들을 갖고 있으며, 이 선들은 캡슐과 연결된 긴 보호관(protection tube)을 통하여 노외의 제어계측 시스템에 연결된다. 현재까지 캡슐을 이용한 조사시험은 짧게는 1주에서 길게는 8주까지 수행되어 왔으며, 추후 이용자의 요구조건에 따라 2~3년의 장기간 조사시험을 수행할 예정이다. 따라서 이러한 계장캡슐 구조물에 대한 진동, 내진, 충격, 열응력 등의 기계적 특성평가와 열수력적 특성시험을 통한 하나로와의 양립성 평가 등이 수행되었고,^(1~3) 계

[†] 책임저자 : 정회원, 한국원자력연구소
E-mail : cmh2002@orgio.net
Tel : (042) 868-8531, Fax : (042) 863-6521
* 한국원자력연구소

장, 제어, 계측기술 등의 기술고도화를 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.⁽⁴⁾

최근 연구용 혹은 상업용으로 개발된 핵연료의 성능을 평가하기 위하여 핵연료 캡슐(fuel capsule)이 연구, 개발되고 있다. 개발된 캡슐이 하나로에서 조사 시험 되기 위해서는 하나의 정상 운전조건과 동일한 온도, 유량 조건하에서 압력강하 시험을 통해 캡슐의 설계요건을 검증하고, 하나로 노심과의 수력학적 양립성을 입증하여야 한다.⁽⁵⁾ 또한 조사시험중 캡슐 구조물은 하나로 내부 순환수에 의하여 유체유발 진동(flow induced vibration: FIV)이 발생하게 되며, 이러한 압력강하나 진동에 의한 구조건전성의 확보는 안전한 조사시험을 위해 필수적이다.

본 연구에서는 OR5 조사공에서의 핵연료 조사시험을 위해서 설계, 제작된 핵연료 캡슐에 대한 진동 및 좌굴특성에 대하여 기술하였다. 모달시험(modal testing) 및 해석을 통하여 핵연료 캡슐의 고유진동특성을 파악하고, 유체 유량에 따른 가속도를 측정하여 하나로에서 조사시험을 안전하게 수행할 수 있는가를 평가하는데 본 연구의 목적이 있다. 또한 진동해석을 위한 유한요소해석 모델을 개발하여 시험결과의 타당성을 비교/검증하고, 해석모델을 캡슐의 좌굴특성 파악에 적용하였다. 본 연구에서 진동시험은 하나의 1/2 노심구조를 갖는 조사설비 설계검증시험 시설의 OR공에 하나로의 장전상태와 동일한 조건으로 캡슐을 장전하고 수행하였다. 또한 진동 및 좌굴해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS⁽⁶⁾를 이용하였다.

2. 모델

Fig. 1은 핵연료 캡슐에 대한 기하학적 형상 및 주요부의 명칭을 나타내었다. 캡슐은 크게 세 부분으로 구성되는데, 하나로 조사공 하부 베이오넷(bayonet)에 체결되는 하단부의 rod tip, 핵연료 봉이 설치되는 본체(main body), 계장선들을 원자로 밖으로 끌어내는데 안내역할을 하는 보호관으로 구성된다. 핵연료 캡슐은 총 길이 4,934 mm의 실린더 형상이며, 스테인레스 강(STS316L) 재질의 본체는 외경 56 mm, 두께 2 mm, 길이 762.5 mm이고, 보호관은 외경 42.7 mm, 두께 2.8 mm, 길이 4113.8 mm로 STS304로 되어 있다. 또한 하나로 노심에 캡슐을 장전할 때

사용하는 장전용 툴(tool)은 외경 46 mm, 두께 5.5 mm, 길이 8.9 m의 알루미늄 재질로 되어 있으며, 좌굴해석시 고려되었다. 하나로내 장전 상태에서 캡슐은 세 부분이 지지되는데, 상부 스톱퍼(upper stopper) 부분을 OR clamp가 위에서 아래로 눌러주면 rod tip과 베이오넷의 스파이더(spider), OR5 조사공과 하부 스톱퍼(lower stopper)가 원주방향으로 접촉하여 지지되게 된다.

3. 유한요소해석

시험결과의 비교/검증 및 해석모델의 평가를 위하여 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용한 모달 및 좌굴해석을 수행하였다. 캡슐의 형상 모델링 및 요소 생성을 위하여 2절점 6자유도의 파이프요소(PIPE16)를 사용하였다. 캡슐본체와 보호관의 시편 및 계장라인은 약 3 kg의 질량으로 가정하여 질량요소(MASS21)로 처리하였다. 해석시 유체의 영향을 고려하기 위해 식 (1)에 캡슐의 외경 및 길이를 대입하여 동적유체질량을 계산하였다.⁽⁷⁾

$$M_A = \frac{\pi}{4} D_o^2 L \rho \quad (1)$$

계산된 본체와 보호관의 동적유체질량은 각각 1.87 kg와 5.91 kg이고, 수중 고유진동수 계산시 유한요소 모델의 각 절점에 추가질량(added mass)으로 부가하여 해석을 수행하였다.

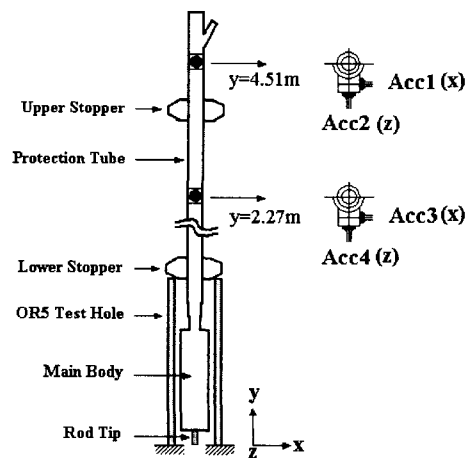


Fig. 1 Schematic view of the fuel capsule

Fig. 2는 핵연료 캡슐의 유한요소 해석모델로서 좌 표계는 Fig. 1과 동일하게 x 는 보호관의 가지방향, y 는 높이 방향으로 하였다. 생성한 모델의 절점수는 120개이고, 질량요소 25개를 포함하여 총 요소는 144개를 사용하였으며, 모달해석은 Householder 방법을 적용하였다. 해석에서 고려된 경계조건으로는 실제 세 지지점의 조건을 명확히 알 수가 없기 때문에 몇몇 조건에 따른 해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다. Table 1에는 고려한 세 점의 조건을 나타내었는데, rod tip 하단부는 모두 단순지지(simple support), 상·하부 스톱퍼의 조건을 단순지지와 고정(fixed)으로 고려한 네 경우에 대하여 나타내었다.

Fig. 1에서 보인바와 같이 캡슐은 직경에 비해 길이가 긴 형상을 갖기 때문에 축방향 하중에 의한 임계좌굴하중(critical buckling load)은 캡슐의 중요한 특성중 하나이다. 일반적으로 기둥(column)의 세장비(λ)는 길이(L)와 회전반경(r)의 비로 표현된다.⁽⁸⁾

$$\lambda = L/r \quad (2)$$

여기서 회전반경, $r = \sqrt{I/A}$ 은 단면2차 모멘트(I)와 단면적(A)의 관계식이다. 식 (2)를 이용하여 계산한 캡슐 보호관의 세장비는 274.7이고, 장전 튜를 고려한 경우에는 603으로 계산되었다. 따라서 핵연료 캡슐의 좌굴특성을 얻기 위하여 하나로에 설치된 상태와 캡슐 장전시 튜를 연결하였을 때의 좌굴해석을 수행하였다.

좌굴해석에서 고려한 경계조건 및 하중 작용부를 Table 2에 나타내었다. Rod tip과 하부 스톱퍼는 단순지지, 상부 스톱퍼는 자유상태로 하였다. 하중조건에 따라 세 경우를 고려하였는데, 첫째, Buck1은 튜

를 모델하여 튜의 상부에 단위하중 1.0 N을 가해준 경우, Buck2는 캡슐이 하나로에 장전된 상태로 보호관의 상부에 하중이 작용한 경우, Buck3는 OR clamp가 고정하는 상부 스톱퍼 위치에 하중을 가해준 경우이다. Table 3은 진동 및 좌굴해석에 사용한 캡슐 주요부의 기본적인 물성을 나타내었다.

4. 진동시험

본 연구에서 진동시험은 충격가진법을 이용한 모달 시험과 원자로의 정상 운전중 순환수의 유동에 의해서 발생하는 진동수준을 파악하기 위한 시험을 수행하였다. 시험은 연구로인 하나로의 1/2 노심구조를 갖고, 20개의 유동관과 48개의 갭홀(gap hole)이 장

Table 2 Boundary and force conditions for the buckling analysis of the fuel capsule

| Case | Rod tip, lower stopper | Upper stopper | Unit force (N) |
|-------|------------------------|---------------|----------------------------|
| Buck1 | S-S* | Free | Top of the tool |
| Buck2 | S-S | Free | Top of the protection tube |
| Buck3 | S-S | Free | Upper stopper |

* S-S : Simple support ($U_x = U_y = U_z = 0$)

Table 3 Material properties of the fuel capsule

| Properties | Zircaloy-4 | Stainless Steel | Aluminum |
|-----------------------------|------------|-----------------|----------|
| Elastic modulus(GPa) | 94.5 | 197 | 70 |
| Density(kg/m ³) | 6530 | 7850 | 2700 |
| Poisson's Ratio | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

Table 1 Boundary conditions for three supporting parts of the fuel capsule

| Case | B.C. | Rod tip | Lower stopper | Upper stopper |
|-------|------|---------|---------------|---------------|
| Case1 | | S-S* | S-S | Fixed |
| Case2 | | S-S | Fixed | S-S |
| Case3 | | S-S | Fixed | Fixed |
| Case4 | | S-S | S-S | S-S |

* S-S : Simple support ($U_x = U_y = U_z = 0$)

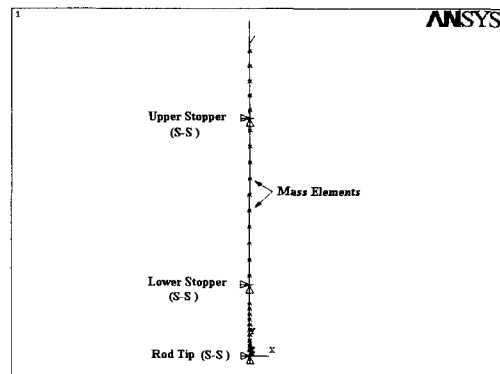


Fig. 2 FE model and boundary conditions of the fuel capsule for modal analysis

착되어 있는 조사설비 설계검증 시험시설의 OR공에서 수행하였다. 진동측정을 위하여 2축 수중 가속도계(B&K 5958)를 사용하였으며, Fig. 1과 같이 rod tip을 기준으로 y축 4.51 m되는 지점에 x방향(Acc1)과 z방향(Acc2), 2.27 m 지점에 x방향(Acc3)과 z방향(Acc4)으로 보호관의 2곳에 부착하였다.⁽⁹⁾

충격해머(B&K 8202)와 가속도계를 이용한 충격 가진법으로 공기중과 수중에서의 고유진동수를 측정하였다. 또한 유체유발진동의 측정을 위해 순환수의 유량을 설계유량⁽¹⁰⁾의 40~120 % 범위에서 10 %씩 변화시키며 시험을 수행하였다. 이때 설계유량은 209 kPa의 압력강하를 유발하는 유량이며, 압력강하 시험을 통하여 구하였다. 증폭기를 통한 가속도계에서의 신호는 데이터기록계(TEAC RD-200T)로 저장한 후 주파수분석기(B&K 3560D) 및 진동분석 프로그램(Pulse)을 이용하여 처리하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 진동특성

(1) 자유진동

Table 4는 모달시험과 유한요소해석을 통하여 얻

은 핵연료 캡슐의 공기중 고유진동수를 나타내었고, Fig. 3은 x방향에 대한 주파수응답곡선(frequency response function: FRF) 및 위상각(phase angle)을 나타내었다. 시험결과 핵연료 캡슐의 x, z방향 기본진동수(fundamental frequency)는 각각 8.5 Hz와 8.75 Hz이고, z방향의 진동수가 x방향에 비해 약간 큰 특성을 보였다. 해석을 통한 네 경우의 경계조건에 대하여 시험 결과와 잘 일치하는 경우는 Case4로서 OR5 조사공에 장착된 핵연료 캡슐의 모든 지지점은 단순지지로 고려하는 것이 타당함을 보이고 있다.

Table 4 Natural frequencies of the fuel capsule with boundary conditions in air

| Mode | Case | Natural frequency (Hz) | | | | |
|--------|------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | Test | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
| x-dir. | 1 | 8.5 | 14.90 | 9.13 | 14.91 | 8.66 |
| | 2 | 24.0 | 33.80 | 35.30 | 42.30 | 28.90 |
| | 3 | 70.0 | 85.48 | 84.43 | 111.1 | 73.31 |
| | 4 | 90.0 | 111.4 | 114.1 | 116.0 | 95.33 |
| z-dir. | 1 | 8.75 | 14.90 | 9.13 | 14.91 | 8.75 |
| | 2 | 24.5 | 33.80 | 35.30 | 42.30 | 28.96 |
| | 3 | 75.0 | 85.48 | 84.54 | 111.1 | 73.38 |
| | 4 | 96.0 | 111.4 | 114.3 | 116.0 | 95.51 |

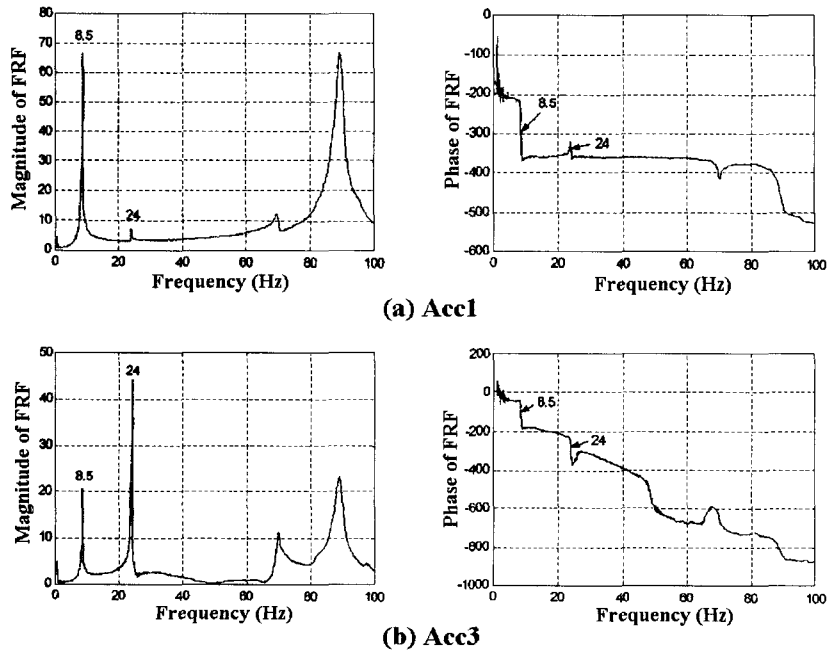


Fig. 3 FRF and phase angle of the fuel capsule in air in the x direction

Fig. 4는 Case4의 처음 4차까지 x 방향의 해석 모드형상을 나타내었으며, z 방향의 모드는 캡슐이 원주방향 대칭 형상을 갖기 때문에 x 방향과 동일하였다. 해석 결과에서 8.5 Hz에 해당하는 1차 모드는 캡슐의 보호관 상부의 모드가 지배적임을 알 수 있다. 2차 모드는 상,하부 스토퍼의 중간부 보호관의 1차 굽힘 모드를 보이고, 고차 모드에서는 보호관 상부의 2차 굽힘 및 중간부의 반파수(half wave)가 증가하는 전형적인 단순지지 보(beam)의 거동⁽⁷⁾을 보였다.

공기/수중의 모달시험 결과와 Case4 해석결과와의 비교를 Fig. 5에 나타내었다. 해석결과는 시험결과에

비해 약간 높은 진동수를 보였으며 이것은 실제 캡슐의 지지부가 이상적인 힌지조건 보다는 다소 낮은 강성으로 지지되기 때문인 것으로 판단된다. 시험을 통한 수중 핵연료 캡슐의 기본진동수는 7.5 Hz로서 공기중의 8.5 Hz에 비해 약 11.8%의 감소를 보였다. 이는 수중에서 구조물에 접해있는 유체가 캡슐과 같이 거동함으로 인해서 발생하는 동적유체질량의 영향이라 할 수 있다.

(2) 강제진동

조사시험중 하나로내 냉각수의 순환에 의한 핵연료 진동수준을 측정하였다. 수중 가속도계의 계측된 진

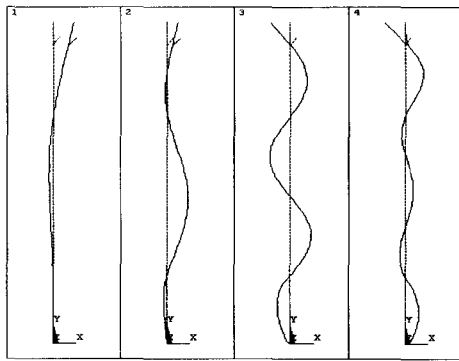


Fig. 4 X-dir. mode shapes of the fuel capsule (Case4)

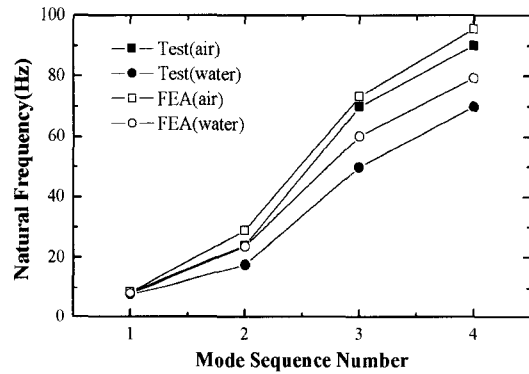
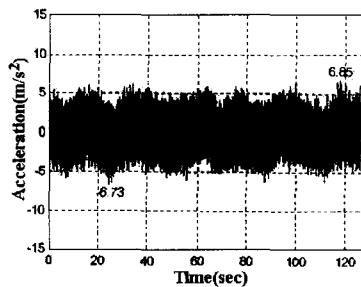
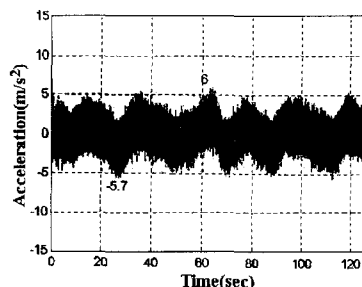


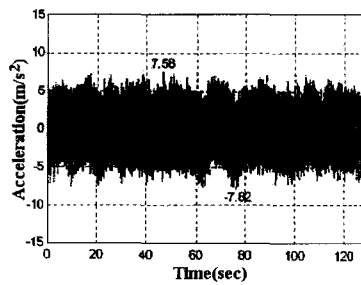
Fig. 5 Natural frequencies of the fuel capsule in air and under water (x-dir. modes)



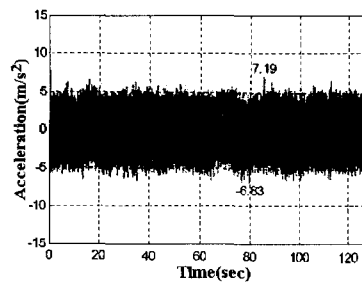
(a) Acc1



(b) Acc2



(c) Acc3



(d) Acc4

Fig. 6 Acceleration time history of the fuel capsule for the 100 % flow

캡슐의 구조건전성을 평가하기 위하여 정상 운전중 동신호를 이용하여 시간영역 및 주파수영역의 분석을 수행하였다. 시간영역 분석을 통하여 가속도 신호의 최대값 및 RMS(root mean square)값을 분석하였고, 주파수분석을 통하여 고유진동수를 얻었다.

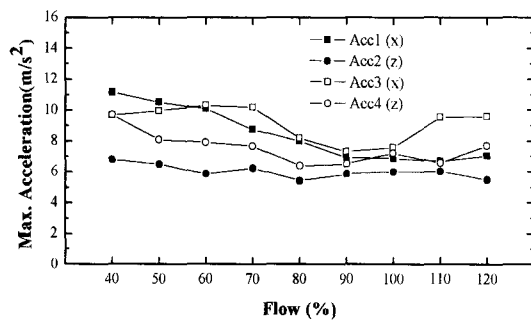
Fig. 6은 100% 유량조건에서의 2축 가속도계 2개에서의 시간에 따른 가속도 이력을 나타내었다. 약 2분간의 데이터에서 x방향인 (a) Acc1과 (c) Acc3의 최대 가속도는 각각 6.85와 7.82 m/s²으로 z방향인 (b)와 (d)의 가속도에 비해 약간 큰 값을 보였다. Fig. 7은 유량에 따른 가속도의 변화를 나타내었는데, 보호관의 중간 x방향인 Acc3 가속도계의 진동 진폭이 비교적 크게 발생하였고, z방향 보다는 x방향의 가속도가 크게 나타났다.

또한 전반적인 최대 가속도 진폭은 5~11 m/s², RMS값은 1.2~2.6 m/s²의 범위에 존재하였으며, 이들 값은 하나로 구조물의 진동 허용기준⁽¹¹⁾으로 설정된 가속도의 한계인 18.99 m/s² 이하에 존재한다. 따라서 핵연료 캡슐은 조사시험중 하나로 내에서 유체유발진동에 의한 구조건전성이 확보될 것으로 평가된다. Fig. 8은 유량에 따른 최대 변위로서 가속도 신호의 적분을 통하여 구한 값이다. 유량이 증가함에 따라 최대 변위는 증가하며, 100% 유량에서는 0.1~0.13 mm의 변위를 보였는데, 이는 하나로 침니 내부의 주변에 있는 타 구조물과의 간섭이 발생하지 않는 범위의 변위이다.

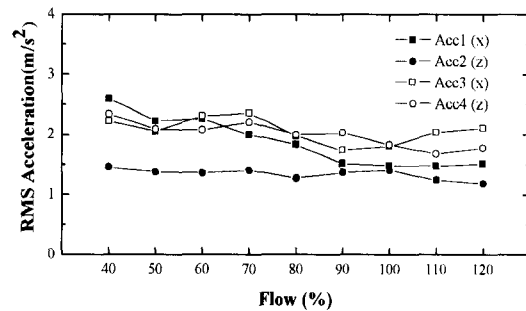
측정된 가속도 신호를 이용한 주파수영역 분석에서는 자기스펙트럼밀도(auto power spectrum density) 함수를 통하여 운전중 캡슐의 고유진동 특성을 얻었다. Fig. 9는 100% 유량에서 측정된 x방향(Acc1, Acc3)과 z방향(Acc2, Acc4) 진동신호의 자기스펙트럼밀도 함수를 나타내었다. 모달시험을 통하여 얻은 신호와 유사하게 저주파영역에서 기여도가 큰 2개의 피크가 발생하는데, 이는 캡슐의 고유진동수에 해당하는 것으로서 x방향은 8.5 Hz와 17.3 Hz, z방향은 8.25 Hz와 18 Hz를 보였다. 또한 모든 가속도계에서의 신호는 178.3 Hz에서 공통적으로 피크가 발생하였다. 이것은 시험시설에 사용된 펌프의 회전수(1750 rpm)에 해당하는 주파수(29.17 Hz)와 날개수(6 blade)의 곱인 BPF(blade passing frequency) 성분이 캡슐에 전달되어 나타난 것으로 판단된다.

5.2 좌굴특성

Table 5는 진동해석을 통하여 결정된 모델 및 경계조건(단순지지)을 이용하여 수행한 좌굴해석 결과로서, 장전시 틀을 고려한 경우(Buck1), 조사시험 중 캡슐의 장전상태에서 보호관의 상단부에 힘을 가하는 경우(Buck2)와 OR clamp부에 하중을 가하는 경우(Buck3)에 대한 좌굴하중을 나타내었다. 예측할 수 있는 바와 같이 틀을 고려할 때 임계좌굴(critical



(a) Peak



(b) RMS

Fig. 7 Acceleration of the fuel capsule with flow

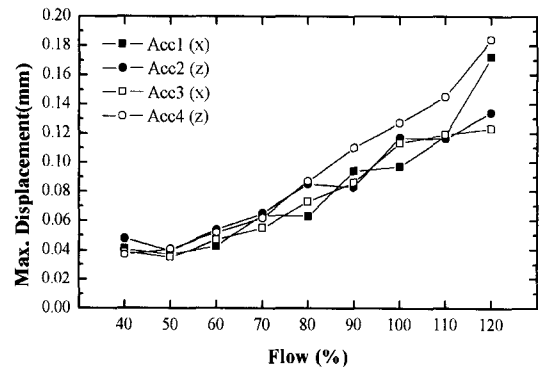


Fig. 8 Max. displacement of the fuel capsule with flow

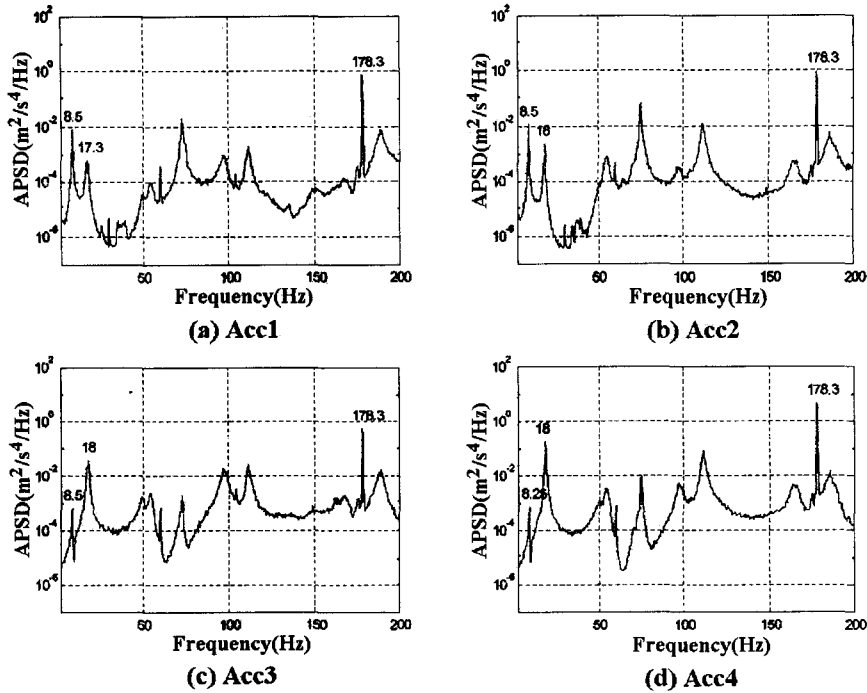


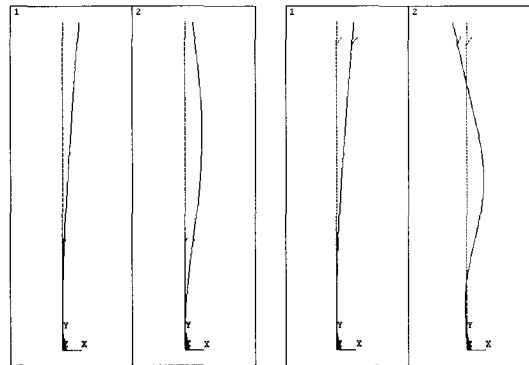
Fig. 9 Auto power spectrum density function of the fuel capsule at 100 % flow

Table 5 Buckling loads of the fuel capsule

| Mode | with tool | without tool | |
|------|-----------|--------------|-------|
| | Buck1 | Buck2 | Buck3 |
| 1 | 233 | 1856 | 4142 |
| 2 | 2384 | 17134 | 38508 |

buckling) 하중은 233 N으로 비교적 작은 하중을 보였다. 이는 캡슐 보호관에 비해 튜의 길이가 8.9 m로 길어 세장비가 크기 때문이며, Fig. 10(a)에 나타낸 바와 같이 임계좌굴모드는 튜의 모드가 지배적이다.

튜브를 배제한 Buck2의 경우에 캡슐의 임계좌굴하중은 1,856 N으로서 튜를 고려하는 경우에 비해 약 8배 높은 좌굴하중을 보였다. 특히 캡슐의 최종 고정을 위해서 사용하는 OR clamp부에 하중을 가하는 경우에는 4,142 N의 좌굴하중을 보였으며, 이것은 캡슐 고정시 약 4 kN까지 OR clamp로 눌러 주어도 캡슐은 좌굴이 발생하지 않음을 의미한다. Fig. 10(b)는 Buck3에 대한 1차와 2차 좌굴모드형상으로, 1차 모드는 보호관의 상부, 2차 모드는 상, 하부 스토퍼 사이의 보호관에서 좌굴이 발생하였다.



(a) Buck1 (b) Buck3
Fig. 10 Buckling mode shapes of the fuel capsule

6. 결론

(1) 핵연료 캡슐의 공기중 기본진동수는 x방향 8.5 Hz, z방향 8.75 Hz이고, 수중에서는 각각 7.5 Hz와 7.75 Hz로 동적유체질량에 의해 약 11.5%의 진동수 감소를 보였다.

(2) 유량증가에 따른 핵연료 캡슐의 최대 가속도

진폭은 5~11 m/s², RMS값은 1.2~2.6 m/s²의 범위에 존재하였고, 하나로 구조물의 진동 허용기준인 18.99 m/s²를 만족하였다. 또한 유량 증가에 따라 최대 변위는 증가하고, 100% 유량에서 0.1~0.13 mm의 변위를 보였으나, 하나로 침니 내부의 타 구조물과의 간섭은 없을 것으로 평가되었다.

(3) 가속도 신호의 주파수영역 분석을 통하여 운전중 캡슐의 기본진동수는 x방향 8.5 Hz, z방향 8.25 Hz로 모달시험 결과와 잘 일치하였다. 또한 178.3 Hz에서 시험시설에 사용된 펌프의 BPF 성분이 캡슐에 전달되어 나타났다.

(4) 유한요소해석 결과는 캡슐의 상, 하부 스톱퍼와 rod tip의 지지부를 단순지지로 고려하였을 때 (Case4) 모달시험 결과와 가장 잘 일치하였다.

(5) 장전 톨을 고려한 캡슐의 임계좌굴하중은 233 N으로 톨의 좌굴모드가 지배적이고, OR clamp부에 하중을 가할 경우 좌굴하중은 4,142 N으로서 캡슐 고정시 약 4 kN까지의 OR clamp 하중이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 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) 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.

(3) Kang, Y. H., Kim, Y. J., Kim, B. G., Lee, Y. S., Kim H. S. and Choi, Y. J., 2003, "Mechanical Characteristics of the HANARO Fuel Capsule," Trans. of the 17th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper #C04-3.

(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) ANSYS IP Inc., 2002, "ANSYS User's manual," Ver. 7.0, ANSYS IP Inc..

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

(8) Crandall, S. H., Dahl, N. C. and Lardner, T. J., 1978, "An Introduction to the Mechanics of Solids," 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc..

(9) 류정수, 윤두병, 우중섭, 오종명, 박승재, 조만순, 김봉구, 강영환, 2003, "핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 진동시험 보고서," KAERI/TR-2386/2003, 한국원자력연구소.

(10) 조만순, 2002, "핵연료 계장캡슐의 유량-차압 측정 실험," HAN-IC-CR-02-021, 한국원자력연구소.

(11) 정승호, 김태룡, 박진호, 박진석, 류정수, 1994, "KMRR 원자로구조물 및 일차냉각계통 배관의 진동시험," KAERI/RR-1417/94, 한국원자력연구소.