

원통셸의 좌굴 거동 및 전단 변위에 따른 동적 특성 변화

이창훈* (충남대학교 기계공학과 대학원), 우호길 (충남대 기계공학과)
 구경희, 이재한 (한국 원자력 연구소)

Buckling Behavior and Variation of Dynamic Characteristics under Shear Displacement of Cylindrical Shell

C. H. Lee (Mech. Eng. Dept., CNU), H. K. Woo (Mech. Eng. Dept., CNU)
 G. H. Koo, J. H. Lee (KAERI)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the buckling and dynamic characteristics for the cylindrical shell under shear loading. To do this, a vibration modal tests and analyses and static buckling analyses were performed for the reduced scale model of nuclear reactor vessel. From the results of vibration modal analysis with the pre-shear displacement loads, it is known that the beam vibration mode is not affected by the shear displacement, however shell vibration modes are significantly affected by it. As the pre-shear displacement increases to the critical buckling displacement, the 1st shell vibration frequency in greatly reduces and approaches to zero value.

Key Words : Dynamic characteristics (동특성), Natural frequency (고유진동수), Shell mode (셸 모드), Eigen Buckling analysis (고유치 좌굴 해석), Shear displacement (전단 변위)

1. 서론

일반적으로 액체 금속로는 500℃ 이상의 고온과 5기압이하의 저압에서 운전되며 이러한 고온, 저압의 환경에서 발생할 수 있는 열응력을 최소화하기 위해 상대적으로 두께를 최소화한 박막 셸(shell) 구조 설계가 요구된다. 그러나 이 경우 셸의 두께가 얇아질수록 열응력에는 유리하나 지진 하중에 의한 좌굴(buckling)이 발생할 가능성이 매우 높다. 이러한 원자로의 설계와 개발 그리고 지진 하중에 대한 구조물의 거동에 대한 표현과 이해에 있어서 구조물의 동특성과 좌굴 강도 등의 역학적 특성을 정확히 규명하여야 한다. 원자로 용기에 작용하는 지진하중에 의한 수평 가속도는 노심 지지물이 장착되는 원자로 용기의 하단 부위에 수평 방향의 전단 하중으로 집중되므로 지진 하중에 대한 원자로 용기는 수평 전단 하중을 받고 있는 것으로 해석 할 수 있다. 액체 금속로의 전단 좌굴에 대한 연구는 이미 많은 연구자들에 수행된 바 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾

(dynamic shear load)으로 작용한다. 그러나 이러한 지진 하중에 대한 동적 좌굴 시험은 진동대(Shaking table)를 사용하여 수행할 수 있으나 시간과 비용 그리고 진동대 성능의 한계성 때문에 매우 어려운 문제점을 가지고 있다. 동적 좌굴 특성에 대한 연구는 G.Michel 등에 의해 수행된 바 있으나⁽¹⁾ 아직까지 많은 연구가 필요한 분야이다.

본 논문에서는 상사성을 고려한 3가지 형상의 원자로 용기의 축소 시험체에 대해 ANSYS의 유한 요소법을 이용한 진동 특성 해석을 수행하였다. 그리고 전단 하중에 의한 좌굴 특성과 진동 모드 특성간의 상호 상관 관계를 분석하기 위하여 전단 변위 하중 하에서의 진동 모드 해석을 수행 하였다. 그리고 정적 좌굴이 발생하는 임계 변위까지 전단 변위 하중을 적용시켜 각 시험체의 진동 모드 특성 변화를 검토하였다.

2. 진동 모드 시험 및 유한 요소 해석

2.1 진동 모드 시험

시험에 사용된 원통 셸은 상사성을 고려하여 제

실제 지진 하중은 원자로 용기에 동적 전단 하중

작된 원자로 용기의 축소 시험체이다. 원통 쉘의 경계조건은 일단 고정 타단 자유인 외팔형 경계 조건을 사용하였다. 원통 쉘의 경계 조건을 구현하기 위해 시험 모델의 상단을 진동대의 베드 위에 설치된 구조물에 보울트로 고정 시켰다. 원자로의 노심 지지물이 장착되는 하단 부위는 강체로 된 부가 질량을 부착하였다. 시험 모델은 비교적 단순하고 선형성이 뛰어나므로 충격 해머를 이용한 충격 가진을 사용하였다. 가진 시험을 통하여 동특성 매개 변수(고유 진동수, 진동 모우드 형상)를 추출하기 위해서는 각 측정점에 대한 주파수 응답함수(frequency response function)가 이용된다. 충격 가진에 의한 주파수 응답 함수의 측정 방법으로는 한 개의 가속도계를 선택된 지점에 부착시키고 충격지점을 옮겨가면서 구한 진동응답을 이용하는 방법을 택하였다. 시험 장치의 개략도는 Fig.1 과 같다.

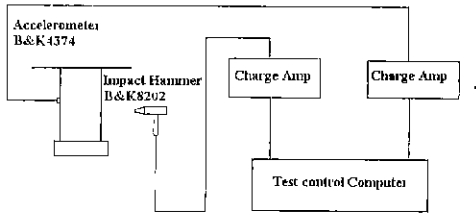


Fig.1 Block diagram for Experimental Modal Analysis

원통 쉘 구조물에 존재하는 여러 가지 모우드 형상들을 추출하기 위해서 다음과 같은 위치를 주파수 응답 함수의 측정점으로 사용하였다.

수평 모우드 (beam mode) : 하단부 강체의 원주상의 한 부분

수직 모우드 (Vertical mode) : 하단부 강체의 밀면 중앙 부분

쉘 모우드 (shell mode) : 원통 쉘의 중앙 부분

샘플링 시간 간격은 0.0002 초이며 주파수 응답 함수를 구하기 위해 필요한 데이터 개수는 2048개로 하였다. 원자로 용기 각 시험 시편의 규격은 Table 1 에 제시하였으며, 재료는 304SS, 재료 물성치로는 $E=194\text{Gpa}$, $\nu=0.27$, $\rho=7800\text{kg/m}^3$ 를 사용하였다.

Table 1 Dimension of Test models

	길이 (L)	직경 (D)	두께 (t)	세장비(L/R)
Model-1	50.0	104.0	0.5	0.96
Model-2	81.0	104.0	0.5	1.56
Model-3	160.0	104.0	0.5	3.08

(단위:mm)

2.2 진동 모우드 해석

본 논문에서는 범용 유한 요소 해석 코드인 ANSYS version 5.5를 사용하였다. 원통 쉘의 탄성 거동 해석 모델은 4절점 6자유도 요소인 SHELL63 요소를 사용하였다. 해석 모델의 경계조건은 시험 모델과 동일하게 쉘 상단의 각 절점의 자유도를 구속 시켰으며 부가 질량이 부착되어있는 하단 강체 부분은 계산의 효율성을 위해서 등가 강성 및 밀도를 적용하였다.

2.3 진동 시험 및 해석 결과

Fig.2, Fig.3, Fig.4는 각 시험 모델의 진동 해석 결과 대표적인 진동 모우드를 나타내고 있다. 세 가지 시험 모델에 대한 1차 모우드는 횡방향 굽힘 모우드 (Beam mode)로 나타났다. Table 2는 진동 시험과 해석으로 구한 고유진동수를 비교한 것이다. 각 시험 모델의 1차 고유진동수의 경우 실험값과 유한 요소 해가 4% 이내로 잘 일치하고 있다. 반면 주파수가 높은 영역에서는 Model-3의 경우를 제외하고 최대 21% 정도까지 차이를 보이고 있다.

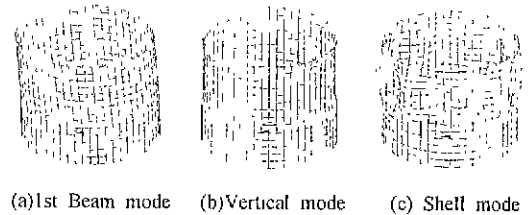


Fig.2 Mode shape of Model-1

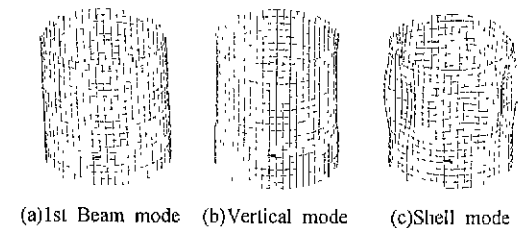


Fig.3 Mode shape of Model-2

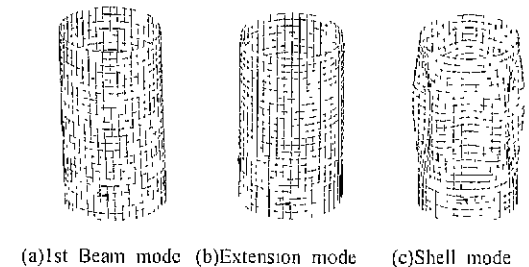


Fig.4 Mode shape of Model-3

Table 2 Natural frequency of cylindrical shell(Hz)

Model	Vibration mode shape	FEM Analysis	Result of Experiment
Model-1	Beam mode	655.5	654.3
	Vertical mode	1712.0	981.5
Model-2	Beam mode	465.3	473.6
	Vertical mode	1379.0	954.6
	Shell mode	3139.5	-
Model-3	Beam mode	257.9	268.6
	Vertical mode	933.1	903.3
	Shell mode	1637.0	1455.1

3. 좌굴 해석

유한 요소 수치 해석법을 이용하여 원통셸의 고유치 좌굴 해석을 수행하였다. 좌굴 해석에 사용된 해석 요소로는 4절점 SHELL63 요소를 사용하였다.

고유치 좌굴 해석 방법은 시스템의 고유치 문제로부터 이상적인 선형 탄성 구조물의 이론적 좌굴 강도를 예측하는 방법이다. 이 방법은 좌굴 모우드를 예측하는 경우는 비교적 정확하지만 탄성 거동만 고려되기 때문에 실제 좌굴 하중 보다 크게 평가된다 따라서, 이들 결과는 지진 좌굴 설계에 적용하기에는 보수성이 크게 저하됨으로 주의할 필요가 있다 Fig.5는 각 시험 모델에 대한 고유치 좌굴 모우드를 나타낸다 고유치 좌굴 모우드 해석 결과 세장비가 비교적 작은 Model-1 과 Model-2는 전단 좌굴의 영향이 크게 나타났으며 셸 전체에 주름이 생기는 좌굴 모우드이다. 세장비가 큰 Model-3의 경우 굽힘 좌굴과 전단 좌굴이 동시에 발생하는 복합 좌굴 모우드 형상을 나타낸다

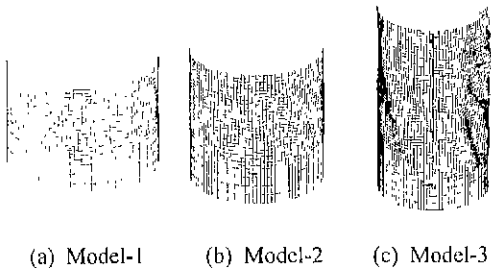


Fig.5 Eigenvalue Buckling mode of Test Models

4. 정적 전단 변위에 따른 동적 특성의 변화

본 논문에서는 원통셸의 전단 변형과 동적 거동과의 관계를 살펴보기 위하여 전단 변형이 가해진 상태에서의 동적 특성 변화를 살펴보았다. 먼저 동적 좌굴에서 좌굴이 일어날 때까지의 임계 변위가 정적 전단 좌굴에서의 것과 차이가 없음을 가정하였다. 해석 방법으로는 먼저 비선형을 무시한 고유치 좌굴 하중에 의한 정적 전단 변위를 임계 좌굴 변위라 놓고, 변위를 임계 좌굴 변위까지 점차적으로 증가시키면서 동적 특성을 관찰하였다. 이러한 해석을 통해 원통 셸의 변위에 따른 구조물의 동적 거동을 살펴볼 수 있다. Fig.7 는 각각의 모델의 대표적인 모우드들의 전단 변형에 따른 고유 진동수의 변화를 나타낸다.

해석 결과 모든 원통 셸에서 굽힘 모우드와 축방향 인장 압축 모우드의 고유 진동수는 전단 변형에 상관없이 일정하다는 것을 알 수 있다. 그러나 셸 모우드의 고유 진동수는 전단 변형이 증가됨에 따라 감소하는 결과가 나타났다 세장비가 비교적 짧은 시험체 Model-1과 Model-2의 경우 셸 모우드의 고유 진동수는 임계 좌굴 변위에 근접할수록 점점 감소하여 0 Hz에 접근하는 특성을 나타내며 좌굴 변위의 97%의 변위에서 셸 모우드의 고유 진동수가 첫 번째 굽힘 모우드의 고유진동수와 같게 나타났다. 셸 모우드의 형상들도 전단 변위가 증가됨에 따라 변화하였으며 임계 좌굴 변위에 접근하면 셸 진동 모우드 형상은 Fig.6과 같이 전단 좌굴 형상과 유사해진다. 그러나 복합 고유치 좌굴 모우드를 갖고 세장비가 큰 Model-3의 경우는 셸 모우드의 고유 진동수는 다른 모델에 비해 변화가 크게 나타났으며 변위가 증가 될수록 복합 진동 모우드의 형태로 나타났다. 임계 좌굴 변위의 62% 정도에서 1차 셸 모우드의 고유 진동수는 0 Hz 에 가까워졌으며 이는 셸 모우드에 의해 이미 구조물이 동적으로 불안정한 상태가 되었음을 의미한다. Model-3의 경우도 Fig.6과 같이 임계 좌굴 변위에서의 셸 모우드 형상은 고유치 좌굴 모우드 형상과 흡사하였다.

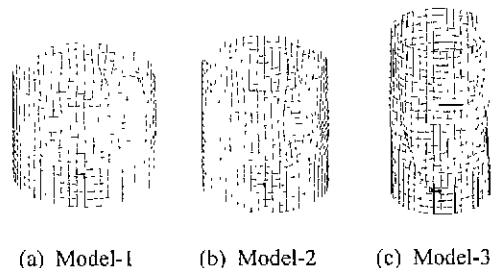
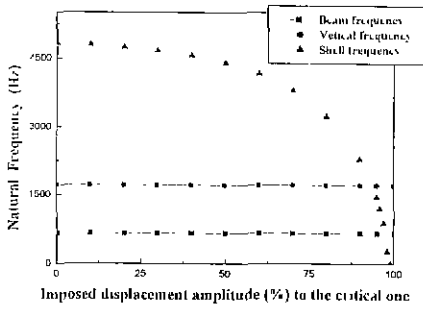
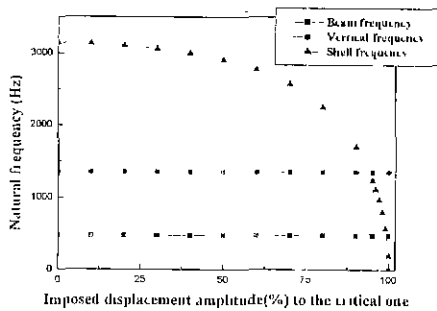


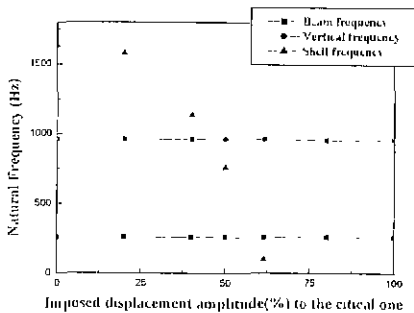
Fig.6 Shell mode as imposed displacement is close to the static critical one



(a) Test Model-1



(b) Test Model-2



(c) Test Model-3

Fig.7 Natural frequency evolution with displacement imposed amplitude

5. 결론

본 논문에서는 원자로의 좌굴 특성과 동적 특성 간의 상관 관계를 파악하기 위하여 원통 쉘 형상을 갖고 세장비가 다른 세 가지 원자로 축소 시험체에 대한 좌굴 해석 및 동특성 해석을 수행하였고 동특

성 시험을 통해 해석 결과를 검증하였다. 또한 원통 쉘의 변위에 따른 동적 특성을 관찰하여 좌굴이 일어날 때까지의 구조물의 동적 거동을 파악할 수 있는 하나의 해석 방법을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원자로 축소 시험체의 1차 진동 모우드는 빔 모우드이며 진동 시험 결과 1차 고유 진동수의 경우 해석결과와 잘 일치하였다.

(2) 원자로 축소 시험체의 고유치 좌굴 해석 결과 세장비가 작은 원통 쉘의 경우 순수 전단 좌굴 모우드를 나타냈으며 세장비가 큰 원통 쉘의 경우 복합 좌굴 모우드를 나타내었다.

(3) 순수 전단 좌굴 모우드를 갖는 원통쉘에 전단 변위 하중을 점차 증가 시키면 빔 진동 모우드의 고유 진동수는 변함이 없으며 쉘 진동 모우드의 고유 진동수는 크게 감소하여 임계 변위에 도달하면 0Hz에 접근한다.

(4) 복합 좌굴 모우드를 갖는 원통쉘에 전단 변위 하중을 점차 증가시키면 빔 진동 모우드의 고유 진동수는 변함이 없으나 쉘 진동 모우드의 고유 진동수는 임계 변위보다 훨씬 작은 변위에서 이미 급격히 줄어들어 0Hz에 접근한다

결론적으로 쉘 진동 모우드 형상은 전단 좌굴 형상을 갖는 원통쉘 구조물의 좌굴 하중에 크게 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1 Michel, G., Limam, A., Jullien, J. F., "Buckling of cylindrical shells under static and dynamic shear loading," Engineering Structures, vol.22, pp.535-543, 2000.
- 2 ANSYS User's manual for Revision 5.5, ANSYS Inc
- 3 구경희, 이재한, 유봉, "'KALIMER 원통형 쉘 구조물의 지진좌굴 해석 및 한계조건 검토," 한국 원자력 학회 '99 추계 학술 발표회 논문집
- 4 Gallely, G.D., Blachut, J., "Plastic buckling of short vertical cylindrical shells subjected to horizontal edge shear loads," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol 107, pp.101-106, 1985
- 5 신용철, 홍성인, 구경희, 유봉, "'액체금속로 KALIMER 원자로 용기 좌굴설계를 위한 축소 실험 모형의 좌굴 해석," 한국 원자력 학회 '2000 춘계 학술 대회 논문집