

실험 및 해석을 통한 노심지지 원통셸의 자유진동해석

김 월 태*, 정 명 조*, 송 선 호*, 이 영 신**

Free Vibration Analysis of a Core Support Barrel by Experimental and Analysis Methods

W.T Kim, M.J. Jhung, S.H. Song, Y.S. Lee

ABSTRACT

Free vibration analysis of a Core Support Barrel shell structure is studied through experimental and finite element analysis methods. The structure is considered to be a thick shell with the ratio of thickness to radius 3/10. Finite element model is established by solid model with brick elements. Modal analyses are performed with respect to the various ratios of thickness to radius with clamped-free and free-free boundary conditions. Experimental test is done to find out how well the results are agreed with those of analysis.

The comparison of the results from experiment and analysis shows a good agreement between them in general.

1. 서론

원자력 발전소 노심지지 구조물은 원자로 냉각재 유체유동에 의한 하중으로부터 핵연료 집합체와 제어봉 집합체를 보호하고 지지, 구속하는 등의 기능을 수행한다.

노심지지 구조물을 포함한 원자로 일차 냉각재 계통의 모든 기기에 대한 진동해석은 발전소 수명 기간 동안의 정상운전, 과도운전 및 사고운전시 해당 기기가 건전성을 유지할 수 있는지를 확인하는 중요한 수단이다. 미국 원자력규제기관인 USNRC에서는 원자로 내부구조물의 진동 평가 지침으로

Regulatory Guide 1.20을 제정하여 원자로 내부구조물의 진동평가기 사용하고 있으며^(1,2), 국내에서도 이 지침이 원용되고 있다. 노심지지 구조물 원통의 형상을 가진 원통셸에 대한 진동해석에 관한 연구는 실제 원자력 발전소의 노심지지 구조물의 구조 건전성을 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

본 논문에서는 두께와 반경비가 약 3/10이고, 하나의 노즐 구멍이 있으며, 축대칭인 원통셸의 하단부에 안쪽으로 플랜지가 부착된 경우에 대한 자유진동 해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 상용 컴퓨터 프로그램의 하나인 ANSYS를 사용하였다. 유한요소 해석결과는 진동실험을 통한 결과와 비교하였으며, 비교결과 유한요소 해석결과의 타당성을 확인하였다.

* 한국원자력안전기술원 안전심사부 기계설비실

** 충남대학교 기계설계과

방향으로 길이가 0, 1/2 L, 4/5 L, L이 되는 4곳을 택하였고, 반경방향 모우드는 원주를 45도 간격으로 8등분한 곳을 측정함으로써 확인하였다. 실험

4. 유한요소해석

ANSYS를 이용하여 모우드해석을 수행하였다. 유한요소 모델은 Fig. 4와 같다.

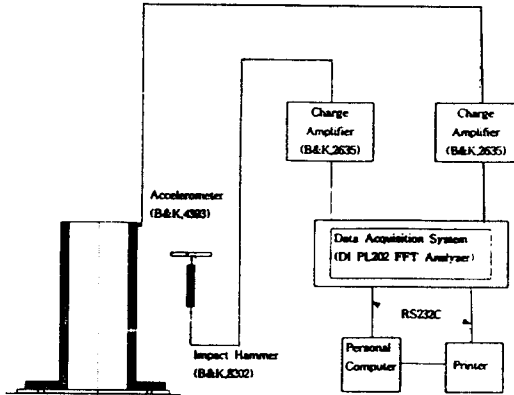


Fig. 2 Experimental test system

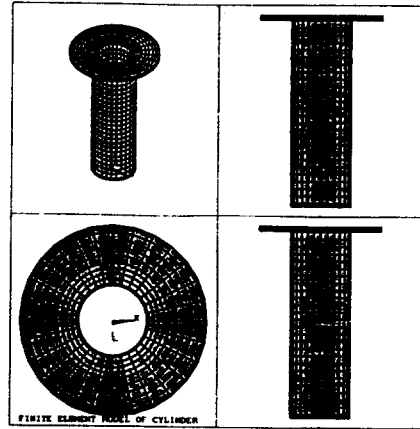


Fig. 4 Finite element model of ANSYS

은 측정점 및 가진점을 동일점으로 놓고 수행하였다. 가진 및 신호처리 평균횟수는 3회, 샘플링 포인트는 4096으로 설정하였다. 해석결과에서 셸의 고유진동수는 20차 모우드에서도 8 Hz 이하의 진동수 분포를 보여주었으므로 진동수 측정범위는 25 Hz로 설정하였다. Fig. 3에서 전형적인 주파수 응답함수 측정데이터를 볼 수 있다.

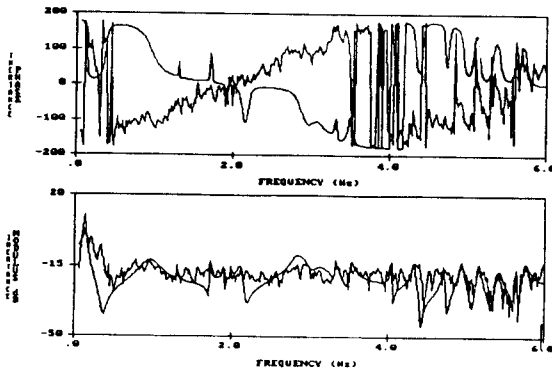


Fig. 3 Typical frequency response function

연구대상 원통셸이 thick shell로 간주되므로 SOLID 45 요소를 사용하였다. 셸의 모델은 우선 key point를 선정한 후, area를 생성시키고, 중심축을 잡아 회전시켰다. 전체 절점수는 3690개이고, 요소 수는 2352개이며, 전체 유한요소 모델의 주자유도는 U_x, U_z 자유도를 전체 모델에 대해 균등하게 40개의 절점에 적용한 후 계산 결과를 40차 모우드까지 추출하도록 하였다. 모우드 추출법은 reduced (Householder) method를 사용하였다.

해석은 두께 대 반경비를 변화시켜 가면서 모우드 및 진동수의 변화경향을 고찰하였다. 또한 구멍의 영향 및 자유단의 셸 안쪽으로 플렌지가 보강될 경우에 대한 영향을 고찰하였다.

5. 결과 및 고찰

Free-free 경계조건에서의 모우드 해석결과는 Table 1에, fixed-free 해석결과는 Table 2에 실었다. 표에서 알 수 있는바와 같이, free-free 조건에서는 일차 및 이차 빔모우드 외에는 뚜렷한 모

우드의 구분 없이 빔 및 셸 혼합모우드가 존재하고 있어 모우드형상의 구분을 뚜렷이 확인할 수 없었다. 반면, fixed-free 조건에서는 비록 약간의 혼합모우드가 존재하기는 하나 4차 빔모우드까지 확인이 가능하였으며, 30 및 40 모우드를 볼 수 있었다.

Table 1 Frequency of modes with free-free condition

Mode No.	Frequency		Comment
	w/o Hole	w/ Hole	
1	1.26	1.26	1st beam
2	1.73	1.73	torsion
3	1.74	1.74	2 θ (bottom)
4	1.74	1.74	2nd beam
5	1.87	1.87	2 θ
6	1.91	1.91	2 θ
7	2.10	2.08	2 θ
8	2.29	2.32	2 θ
9	2.78	2.72	2 θ , 3rd beam
10	3.13	3.21	2 θ , 3rd beam
11	3.69	3.65	2 θ
12	4.15	4.14	2 θ , 4th beam
13	4.52	4.45	2 θ 4th beam
14	4.82	4.95	
15	5.25	5.24	
16	5.93	5.90	
17	6.63	6.54	
18	6.84	6.70	
19	6.91	6.96	
20	7.15	7.09	

구멍의 영향을 확인한 결과, 셸의 두께보다 작은 직경을 갖는 구멍의 영향은 소수 셋째자리 이하에서만 영향을 미치는 정도로 무시할 수 있음을 보였다. 또한 자유단에 셸의 안쪽으로 플랜지가 보강된 영향을 살펴본 결과, 동일 모우드에서 전반적으로 약간 증가된 경향을 보이고 있으나, 대략 소수점 둘째 자리에서만 영향을 미치는 정도였다.

Fig. 5는 빔 모우드에 대한 진동수 분포를 보여 준다. 그림에서 알 수 있듯이 빔 모우드 차수가 높아질수록 특정 두께 대 반경비에서 진동수의 증가 혹은 감소경향이 뚜렷한 임계특성을 나타냄을 알 수 있다. 3차 빔 모우드에서는 두께 대 반경비가 0.2까지 커질수록, 4차 빔 모우드에서는 0.27까지 커질수록 두께 대 반경비가 커짐에 따라 진동

수가 증가하였으나, 그 이후의 비에서는 오히려 진동수가 감소경향을 나타내고 있음을 뚜렷이 알 수 있다. 3차 및 4차 axial 빔 모우드를 살펴보면, 임계점을 기준으로 두께 대 반경비가 작은 구역에서

Table 2 Frequency of modes with fixed-free condition

Mode No.	Frequency			Comments
	w/o Hole	w/ Hole	w/o Hole & w/o Bot. Fig	
1	0.081	0.081	0.081	1st beam
2	0.081	0.081	0.081	1st beam
3	1.01	1.00	1.01	torsion
4	1.29	1.29	1.30	2nd beam
5	1.29	1.29	1.30	2nd beam
6	1.77	1.77	1.76	2 θ (bottom)
7	1.89	1.89	1.88	2 θ (bottom)
8	2.04	2.04	2.01	2 θ (mid, bot o.phase)
9	2.16	2.16	2.15	2 θ (mid, bot o.phase)
10	2.86	2.86	2.86	2 θ (included loc. beam)
11	2.94	2.94	2.97	2 θ (included loc. beam)
12	3.13	3.13	3.14	3rd beam
13	3.16	3.16	3.19	3rd beam
14	3.39	3.40	3.40	2 θ (top)
15	3.56	3.56	3.57	torsion
16	4.49	4.48	4.55	2 θ
17	4.81	4.81	4.85	2 θ
18	5.32	5.31	5.35	4th beam
19	5.67	5.68	5.74	4th beam
20	6.46	6.46	6.47	3 θ
21	6.66	6.66	6.69	3 θ
22	6.71	6.70	6.72	2 θ
23	6.98	6.98	7.15	2 θ
24	7.23	7.22	7.21	4 θ
25	7.24	7.24	7.31	4 θ

는 거의 동일한 진동수를 보이나, 비가 큰 구역에서는 두께 대 반경비가 커지면서 진동수도 점차 커지는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편 셸 모우드에 대한 진동수의 변화 경향은 Fig. 6에서 두께 대 반경비가 커짐에 따라 계속 커짐을 알 수 있다.

구조물의 고유진동수가 전반적으로 낮은 관계로 저차 모우드의 고유진동수가 뚜렷이 측정되지 않았다. 그 이유는 셸이 두껍기 때문이며, 측정상의 오차 및 셸 구조물의 복잡성, 즉 구멍존재, 자유단에서의 셸 안쪽으로 플랜지 부착 등의 원인으로 판단된다.

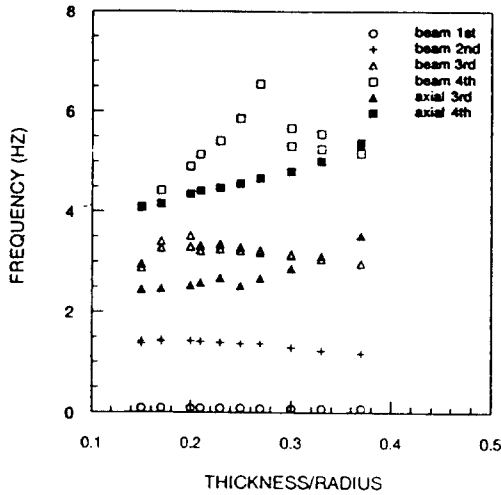


Fig. 5 Beam mode frequency

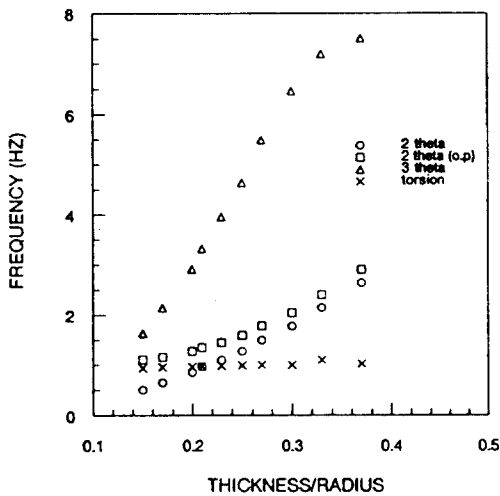


Fig. 6 Shell mode frequency

실험 데이터로부터 30차 모드까지의 collate 결과가 Fig. 7에 제시된다. 이 그림은 11개 측정/가진점의 실험데이터간에 동일 고유진동수로 분류할 수 있는 진동수를 갖고 있는지의 여부를 보여준다. Tolerance를 20 %로 설정한 결과이다. 5차 모드를 제외하고 1차에서 13차 모드까지 대부분의 저차 모드에서 좋은 collate 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Table 3은 실험결과로부터 구한 모드별 진동수 및 감쇠값이다.

이 결과를 Table 2의 해석으로부터 구한 값과 비교하면, 1차 모드를 제외하고는 저차의 주요 모드에서 비교적 근사한 고유진동수값을 보이고 있다. 그러나 두 결과가 모드 차수에서는 일치

Table 3 Experimental frequency of modes

Mode No.	Frequency (Hz)	% Damping
1	0.1	0.84
2	1.2	7.05
3	1.5	5.40
4	1.9	3.24
5	1.9	.40
6	2.2	4.13
7	2.9	2.12
8	3.2	2.25
9	3.6	2.08
10	3.6	3.01
11	4.4	2.39
12	4.4	2.86
13	4.4	1.46
14	4.5	2.90
15	4.6	2.79
16	5.7	1.83
17	6.2	1.94
18	6.5	1.01
19	6.7	1.00
20	7.6	1.00
21	8.8	1.00
22	9.4	1.00
23	10.4	1.00
24	10.7	1.00

되는 경향을 찾을 수 없었다. 예로, 해석에서 12번째 모드가 3.1 Hz로 나타났으나, 실험에서는 8번

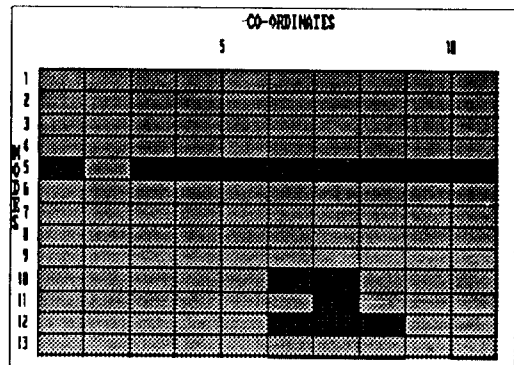


Fig. 7 Collate of frequency response functions

제 모우드가 3.2 Hz로 측정되었다.

Fig. 8은 ICATS에서 제공되는 MESHGEN 프로그램을 이용하여 생성한 메쉬 및 애니메이션 결과 중 한 예를 보여준다. 4번 결점에서의 데이터를 2차 빔 모드 형상에 대하여 출력한 결과이고, Fig. 9는 해석결과로부터의 2차 빔 모우드 형상을 보여주고 있다.

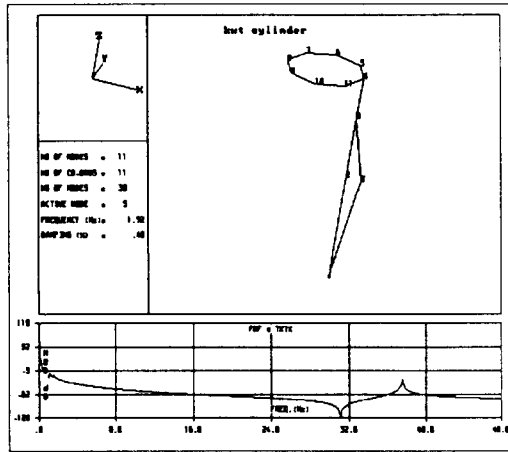


Fig. 8 A mode shape from experimental test

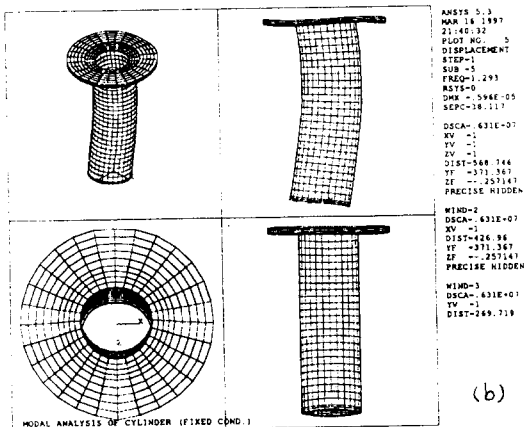


Fig. 9 Second beam mode shape from ANSYS

6. 결론

이상으로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 셸 두께 정도의 직경을 가지는 구멍의 영향은 무시할 만하다. 또한 자유단에 셸의 안쪽으로 균일한 보강 플랜지로 인한 영향도 거의 무시할 만하다.

둘째, 특정한 두께 대 반경비를 기준으로 고유진동수는 증가 경향에서 감소 경향으로 반전된다. 또한 빔 axial 모우드는 그러한 특정 비까지는 상당히 완만한 증가 경향을 보이다가 그이상의 비에서는 증가폭이 커진다.

셋째, 실험으로부터 보여지는 고유진동수는 해석으로부터 구한 고유진동수와 비교적 잘 일치하였다. 그러나, 모우드 형상은 일치하지 않는 경우가 많았다.

※ 참고문헌

- (1) USNRC Regulatory Guide 1.20, 1976, "Comprehensive Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and Initial Startup Testing", The United States Nuclear Regulatory Commission
- (2) 김용범, 박운원, 이정배, 1995, "유체유동에 의해 진동하중을 받는 원자로 내부구조물의 건전성 평가", 대한기계학회 '95년도 동력학 및 제어부문 학술대회논문집, pp.122-127
- (3) D. J. Ewins, 1994, *Modal Testing : Theory and Practice*, John Wiley & Sons INC., New York
- (4) "PL202 Real Time FFT Analyzer/DSO Operating Manual", Revision 1.2, 1993, Diagnostic Instruments
- (5) "ICATS(Imperial College Analysis, Testing and Software) Reference Manual", 1995, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Mechanical Engineering Department