

다점 단순지지된 연속원통셸의 진동특성에 대한 실험적 고찰

이영신^{*}, 한창환^{**}, 김근택^{**}, 김현수^{***}

An Experimental Study on the Vibraton Characteristics of a Continuous Circular Cylindrical Shell with the Multi-simple Support

Y. S. Lee, C. H. Han, K. T. Kim, H. S. Kim

ABSTRACT

This paper presents the vibration characteristics of a continuous circular cylindrical shell multi-simply supported at arbitrary axial positions for searching design parameters. In this modal test the impulse test method is applied to the excitation of experimental model. Natural frequencies are obtained from the peak points of frequency response function(FRF) through frequency analyzer and vibration behaviors are investigated. FE analysis is performed with ANSYS 5.5 to improve the reliability of experimental results. Their results are compared with experimental results. The effect of dynamic characteristics is analyzed for the number of support point on the shell.

1. 서론

연속원통셸(continuous circular cylindrical shell) 구조물은 항공기, 우주비행체, 미사일 또는 잠수함 등 고성능 구조물뿐만 아니라 공장 또는 산업설비에 사용되는 대형 송유관, 가스관, 핵연료봉 또는 배관 등으로 많이 사용되고 있다.

따라서 본 연구를 통해 다점 단순지지된 연속원통셸 구조물에 대한 동특성을 실험적으로 고찰하고자 한다. 본 진동실험에서 연속원통셸을 각 스펠(span)의 지지점(support point)에서 길이 방향으로

연속적으로 결합된 원통셸의 결합구조물로 정의한다. 실험 전에 ANSYS 5.5 상용 프로그램을 이용하여 실험모델과 동일한 형상과 물성치를 갖는 FE 모델을 생성하여 각각의 지지점 수에 따른 모달 파라미터를 추출하고, 진동실험은 실험모델을 가진하고 입력에 대한 응답을 측정하여 동특성을 규명하는 충격가진법으로 수행되고 주파수응답함수(FRF)로부터 고유진동수 및 모드형상을 고찰하고 지지점의 수에 대한 동특성을 조사했다. 모달 파라미터는 동적거동(응답)을 예측하는데 매우 중요하므로 해의 신뢰성을 높이기 위해 FEM 해석을 병행하여 수행하였다. 실험을 위해 재질이 스테인레스 강인 모델을 제작하였다. 지그(jig)는 기존의 시험베드(test bed)에 장착할 수 있고 다점 단순지지구현이 가능하게 제작되었다.

* 정희원, 충남대학교 기계설계공학과

** 정희원, 한국항공우주연구소 소형기연구그룹

*** 충남대학교 기계설계공학과 대학원

2. 진동실험

2.1 실험모델

Fig. 1은 다점 단순지지된 연속원통셀의 형상 및 좌표계를 보여주고 있다. 실험모델은 전체길이(L)가 1.0m, 두께(h)가 0.001m, 반경(a)이 0.05m이며, 스패길이(span length)는 L1(스팬 1), L2(스팬 2), L3(스팬 3), L4(스팬 4)가 0.25m이다. 재료는 스테인레스 강(stainless steel)이다.

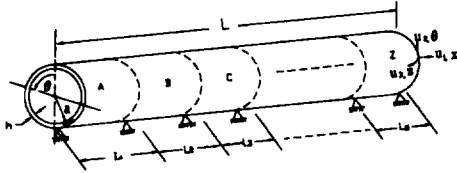


Fig.1 Geometry and coordinate system

재료 물성치는 탄성계수(E)가 193 GPa, 전단 탄성계수(G)는 74 GPa, 포아송비(ν)는 0.27, 밀도(ρ)는 7860 kg/m^3 이다.

2.2 실험장치 및 모델장착

실험장치는 실험대상을 가진하는 해머(impact hammer), 응답을 측정하는 가속도계, 신호 증폭기(signal amplifier), 8 채널 자료획득 시스템(BOBCAT DAQ 5.32) 및 PC용(노트북) 주파수분석기(FFT, STAR SYSTEM)로 구성되었다.



Fig. 2 Installation of experimental model (case I) on the test bed with jigs

Fig. 2는 지그를 이용해 실험모델을 시험베드 및 지그에 장착한 모습이다. 강체시험베드(Test bed)는 충분한 질량(800kgf)과 방진댐퍼를 가지고 있다. 모델장착시 단순지지가 잘 구현되도록 원주방향으로 18개의 볼트로 모델을 지지했다. 모델이 변형되지 않도록 주의해서 볼트를 죄었다. 이와 같은 단순지지 방법은 이영신 등⁽⁴⁾에 의해 지지점에 대한 신뢰성이 입증되었다.

Table 1 Case of experimental modal test for the number of support and span

Case	Span	Support	Span length(m)
I	1	2	1.0
II	2	3	0.5-0.5
III	3	4	33.3-33.3-33.3
IV	4	5	0.25-0.25-0.25-0.25
V	4	5	0.20-0.40-0.20-0.20
VI	4	5	0.15-0.55-0.15-0.15

Table. 1은 실험 Case를 제시하고 있다. Case IV는 4개의 동일스팬(equal span)을 갖는 다점 단순지지된 연속원통셀의 동특성을 고찰하는 실험이다. Case I, II, III은 지지점의 수에 따른 연속원통셀의 동특성 조사실험이고, Case V, VI은 스패길이의 변화(unequal span)에 따른 동특성 조사실험이다. 여기서 0.20-0.40-0.20-0.20은 $L1=0.20\text{m}$, $L2=0.40\text{m}$, $L3=0.20\text{m}$, $L4=0.20\text{m}$ 인 연속원통셀을 의미한다.

2.3 실험수행

실험수행 전에 우선 실험모델에 가진점(driving point)을 길이방향과 원주방향으로 표시하였다. 실험장치를 set-up하고 가진회수는 5회로 결정하여 이들 값을 평균값으로 택하였다. 가진시 과부하(overload) 및 중복가진(double impact)을 제거할 수 있도록 시스템을 설정하였다. 응답을 가속도계

로 측정하고 주파수분석기(frequency analyzer)에 의해 구해진 주파수응답함수의 피크점(peak point)에서 위상각, 전달함수의 실수부(real part) 또는 허수부(imaginary part)의 값과 상호 비교하여 고유진동수(natural frequency) 및 진동모드(vibration mode)를 결정하였다. 실험결과는 Table 2에 제시되었다.

3. 유한요소 해석

유한요소해석(FEA)이 진동실험 결과에 대한 신뢰성의 확보차원에서 수행되었다. 해석 Tool로는 ANSYS 5.5 상용프로그램이 사용되었다. FE 모델링은 Fig. 3에서 보여 주는 바와 같으며 4 절점 Shell 63 등방성 탄성셀 요소를 적용하였다. 요소의 수는 길이방향으로 51개 원주방향으로 16개이며, 총 메쉬(mesh)의 수는 816개, 절점(node) 수는 831개이다. 또한 실험과 동일한 경계조건을 갖도록 FE 모델링을 하는데 역점을 두었다. 고유진동수 및 모드형상의 결과를 Table 2에 제시하였다.

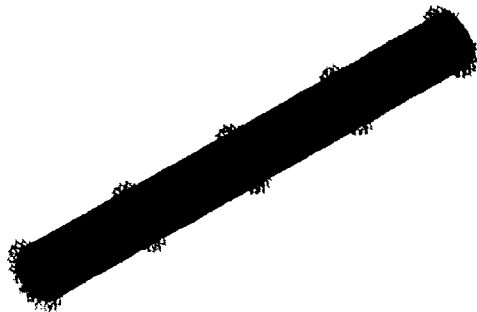


Fig. 3 FE Model of a 4-span continuous circular cylindrical shell

4. 결과 및 고찰

진동실험 및 유한요소 해석(FEA)을 통하여 구한 고유진동수 및 모드형상을 Table. 2에 제시하였다. (,)는 모드(m, n)를 의미하며 구조물의 진동

모드(vibration mode)를 나타낸다. m은 길이방향의 반파수(axial half-wave number)이며, n은 원주방향의 파수(circumferential wave number)이다. 고유진동수를 오름차순으로 정리하였으며, 1차는 각 Case 별 기본진동수(fundamental frequency)에 해당된다. 고유진동수는 1차에서 5차까지, 모드수는 길이방향으로 2차, 원주방향으로 4차까지 조사되었다. 본 진동실험에서 진동 측정 주파수 대역폭(frequency bandwidth)이 2,000Hz으로 설정되어 진동수 및 모드 조사에 제한이 되었으며, 제시된 모드수 이상은 확인할 수가 없었다. Table 2에서 보는 바와 같이 FEA 결과와 실험결과가 비교적 잘 일치되고 있다.

Table 2 Comparison of natural frequencies and mode shapes for FEA results and experimental results, cases I ~ IV.

Mode	Case I		Case II		Case III		Case IV	
	FEA	EXP	FEA	EXP	FEA	EXP	FEA	EXP
1st	265 (1,1)	235 (1,1)	426 (1,2)	455 (1,2)	778 (1,2)	820 (1,2)	983 (1,3)	1020 (1,3)
2nd	270 (1,2)	290 (1,2)	566 (1,2)	565 (1,2)	826 (1,3)	865 (1,3)	1190 (1,3)	1090 (1,3)
3rd	426 (2,2)	450 (2,2)	753 (1,3)	785 (1,3)	926 (1,2)	995 (1,2)	1280 (1,2)	1240 (1,2)
4th	724 (1,3)	755 (1,3)	969 (1,1)	-	1240 (1,2)	1220 (1,2)	1361 (1,3)	1350 (1,3)
5th	745 (2,3)	790 (2,3)	982 (2,3)	1020 (2,3)	1428 (1,4)	1490 (1,4)	1492 (1,4)	1530 (1,4)

- FEA : finite element analysis results(Hz)
- EXP : Experimental results(Hz)

모드는 구조물의 거동을 가시적으로 확인할 수 있으며 고유특성이 된다. 모드는 작용하중에 독립적이며, 구조물의 형상과 경계조건에 의존적이다.

또한 실험 Case 별로 동특성을 분석해 보면 지지점의 수가 많을수록 기본 고유진동수도 증가하고 있다. 이러한 현상은 지지점의 구속이 구조물의

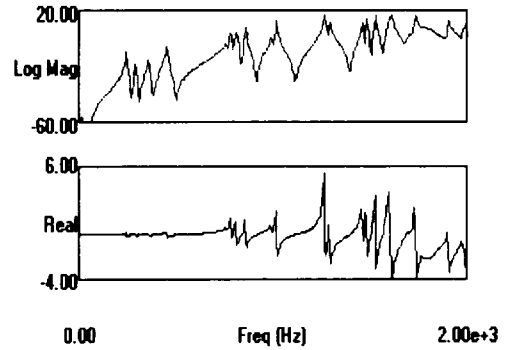
강성에 영향을 주어 나타난다고 볼 수 있다. 모드형상의 경우 1차모드에서 Case I은 모드(1, 1), Case II 및 Case III은 모드(1, 2) 그리고 Case IV는 모드(1, 3)로 나타났으며, 지지점이 증가할수록 스패의 길이가 작아져 원주방향의 거동이 나타난다. 즉, 스패의 길이가 길어질수록 원주방향보다는 길이방향의 거동이 지배적이고, 스패의 길이가 짧아질수록 원주방향의 거동이 지배적이다.

FEM 모델 해석을 통해 오류차순으로 50차까지의 고유진동수에 대한 모드를 확인한 결과 Case I은 $m=1\sim 8$, Case II는 $m=1\sim 3$, Case III은 $m=1\sim 3$ 그리고 Case IV는 $m=1\sim 2$ 로 나타나 이를 입증할 수가 있었다.

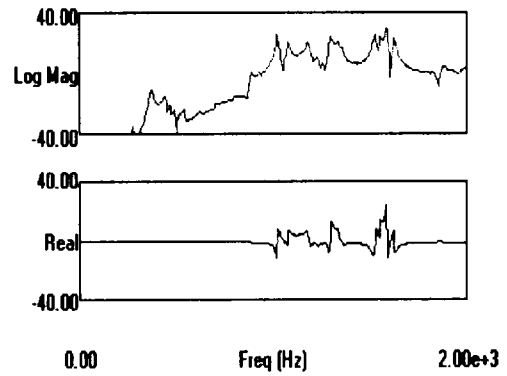
실험결과 주파수응답함수(FRF)는 경계조건이 복잡할수록 전달함수의 피크점(공진점)이 잘 분리되지 않는데, 이러한 현상은 경계조건의 구현 또는 볼트 지지상태에 의한 영향일 수도 있어 차후 분석이 필요하다.

Fig. 4는 시험을 통해서 얻은 주파수응답함수를 나타내고 있다. 여기서 (a)는 스패의 수가 1이고 양단 단순지지인 Case I의 주파수응답곡선이다. (b)는 4개의 스패를 갖는 Case IV의 주파수응답곡선이다. (b)의 경우 공진점과 반공진점이 (a)에 비하여 분명치 않다. 따라서 실수부(real part)와 비교해 분석하고 저차에서 나타난 피크점은 고유진동수에서 제외시켰다. peak 커브 피팅 방법을 적용하여 모달 파라미터를 추출하고, 각 고유진동수에 대한 모드형상을 보기 위해 geometry를 형성하였다. 모드형상은 Fig. 6과 7에 제시되었다.

Fig. 5는 Case IV의 기여도함수(coherence function)를 보여주고 있으며, 실험에서 노이즈 등의 크기와 관련한 중요한 의미를 가진다. 이것은 상호스펙트럼(cross spectrum)의 제곱을 자기스펙트럼(auto spectrum)의 곱으로 나눈 값으로 정의된다. 기여도함수에서 보는 바와 같이 시스템이 비교적 안정적이라고 볼 수 있다. Case V, Case VI는 스패의 길이의 변화가 구조물의 동특성에 미치는 영향을 고찰하고자 해석했다.



(a) FRF of Case I



(a) FRF of Case IV

Fig. 4 Frequency response Function(FRF) of case I, IV (experimental modal test)

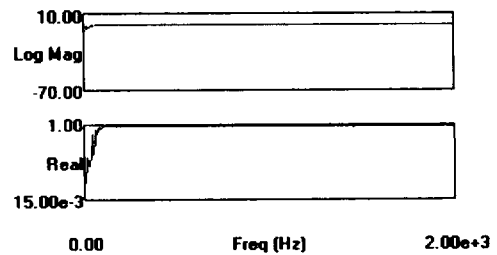


Fig. 5 Coherence of Case IV

본 실험에서는 기본진동수와 모드형상의 추출에 중점을 두었다. Table 3은 지지점의 수가 동일하고 스패의 길이가 다른 경우에 대해 FEM 및 실험결과를 제시하고 있다. 진동실험 결과 기본진동수는 Case IV가 1,020 Hz, Case V는 855 Hz 그리고 Case VI은 515 Hz로서 Case VI이 Case IV, V보다 기본진동수가 현저하게 감소함을 알 수 있다. 따라서 스패의 길이가 동특성에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of natural frequencies and modes of FEA and experimental results for Case IV, V, VI

Case	Case IV		Case V		Case VI	
	FEA	EXP	FEA	EXP	FEA	EXP
Frequency (Hz)	983	1020	806	855	531	515
Mode shape (m,n)	(1,3)		(1,2)		(1,2)	

여기서 스패의 길이가 가장 짧은 스패(0.15m)을 갖진 Case VI의 진동수가 가장 낮은 것은 상대적으로 가장 긴 스패(0.55m)을 가지고 있어 긴 스패가 길이방향으로 지배적인 거동을 하기 때문이다. 스패의 길이에 따라 원주방향의 모드 및 길이방향의 모드의 특성도 달라진다.

Fig. 6은 Case IV의 다점 단순지지된 연속원통셀의 길이방향의 모드형상을 일부만 보여주고 있다. 실험을 통해서 직접 구한 m=1차 모드를 제시하였다. 동일스패인 경우 모든 스패에서 동일한 모드형상이 나타나나 스패의 길이가 동일하지 않은 연속원통셀은 스패마다 m의 값이 다르게 나타날 수 있다.

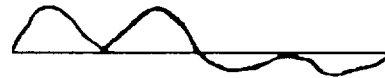
(a)는 진폭비가 일정한 모드형상을 보이고 있으나 (b)는 지지에 의해 스패의 진폭비가 다르게 나타나고 있다. 모드형상이 자연스럽게 나타나지 않은 부분에 대해서는 경계조건이 구현 또는 가진점의 수 등의 영향이 있는 것으로 판단된다.



(a) m=1, f=1020 Hz



(b) n=1, f=1080 Hz



(c) m=1, f=1,180 Hz

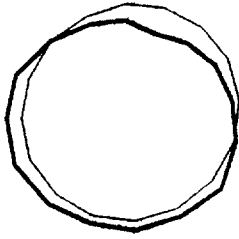


(d) m=1, f=1,230 Hz

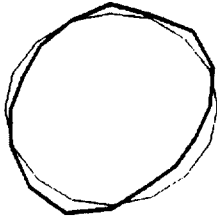


(e) m=1, f=340 Hz

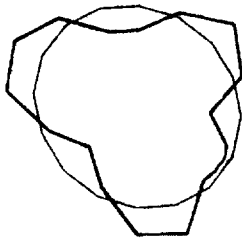
Fig. 6 Mode shapes(m) of Case IV (experimental results)



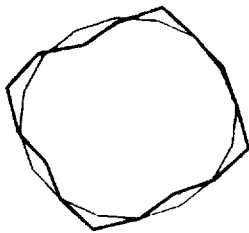
(a) $n=1$, $f=235\text{Hz}$, Case I



(b) $n=2$, $f=290\text{Hz}$, Case I



(c) $m=3$, $f=1020\text{Hz}$, Case IV



(d) $m=4$, $f=1530\text{Hz}$, Case IV

Fig. 7 Mode shapes(m) of Case I, IV
(Experimental results)

Fig. 7은 원주방향의 모드형상(n)을 보여준다. 모드형상은 FEA 결과와 유사하게 나타났으며 실험을 통해서 구한 일부 모드만 제시하였다. (a) 및 (b)는 Case I의 1차 및 2차모드형상이며, (c) 및 (d)는 Case IV의 3차 및 4차모드이다. 원주방향의 모드는 원통셀의 모드와 유사하다.

5. 결론

다점 단순지지된 연속원통셀의 동특성(모달 파라미터)을 진동실험 및 FEM을 통해 해석하였다. 충격가진법을 사용한 실험을 통해 주파수응답함수를 구하고 피크점에서 고유진동수 및 모드형상을 도출하였다.

본 연구의 해석결과는 다음과 같다. (1) 연속원통셀의 경우 지지점의 수에 따라 고유진동수가 증감한다. 이것은 구조물의 구속효과에 의한 강성의 영향으로 해석된다. (2) 또한 동특성은 스패의 길이에 따라 변화한다. 즉, 스패가 길면 길이방향의 거동이, 스패가 짧아지면 원주방향의 거동이 지배적이다. (3) FEA와 실험결과는 비교적 잘 일치한다. (4) 모드형상에서 보는 바와 같이 지지점이 분리되고 변위가 발생하는 형상이 나타나고 있다. 따라서 이러한 형상은 추가실험을 통해 분석하고자 한다.

참고문헌

- (1) 이영신, 최명환, 1999, "내부판 구조물이 결합된 강 및 평직복합재료 원통셀의 구조진동특성연구," 한국소음진동학회 Vol. 9, No. 1, pp.149~162.
- (2) 한창환, 이영신, 1999, "외부에 사각판이 결합된 원통셀의 자유진동해석," 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp. 402~407.
- (3) 이영신, 김영완, 1996, "복합재료 원통셀의 고유진동수 및 좌굴하중에 대한 직교보강 특성연구," 한국소음진동공학회, Vol. 6, No. 4, pp. 457~467.

- (4) 이영신, 최명환, 신도섭, 1999, "단순지지된 Steel 및 GFRP 복합재료 원통셸의 자유진동 특성", 한국소음진동공학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 273~284.
- (5) 김영완, 이영신, 1999, "사각개구부를 갖는 링 보강원통셸의 진동해석," 대한기계학회논문집, Vol. 23, No. 11, pp. 2040~2049.
- (6) 이영신, 김영완, 1998, "회전운동을 고려한 Cutout이 있는 복합재료 원통셸의 진동해석 및 최적설계," Vol. 8, No. 3, pp. 467~476.
- (7) 이영신, 최명환, 신도섭, 1999, "단순지지된 Steel 및 GFRP 복합재료 원통셸의 자유진동특성," Vol. 9, No. 2, pp. 273~284.
- (8) Lee, Y. S. and Kim, Y. W., 1998, "Vibration Analysis of the Rotating Composite Cylindrical Shell with Orthogonal Stiffness," Composite and Structure, Vol. 69, No. 2, pp. 271~281.
- (9) Lee, Y. S. and Kim, Y. W., 1999, "Nonlinear Free Vibration Analysis of the Rotating Hybrid Cylindrical Shells," Composite and Structure, Vol. 70, No. 2, pp. 161~168,
- (10) Lee, Y. S. and Kim, Y. W., 1999, "The effect of Boundary Conditions on the Natural Frequencies for the Rotating Composite Cylindrical Shells with Orthogonal Stiffness," Advances in Engineering Software, Vol. 30, No. 9~11, pp. 649~655.