

경사단을 갖는 Steel 및 복합재료 원통셸의 자유진동 특성에 관한 연구

A Study on Free Vibration of Steel and Composite Cylindrical Shells with an Oblique Angle

이장원*·최영진**·이영신***

Lee, Jang-Won, Choi, Young-Jin and Lee and Young-Shin

Key Words : Free Vibration (자유 진동), Composite Material(복합재료), Cylindrical Shell(원통셸), Oblique Angle(경사단)
GFRP Composite(유리섬유강화 플라스틱복합재료)

ABSTRACT

The vibration characteristic is a primary design factor. The cylindrical shells are used as a primary components of complex structure. also, The cylindrical shells have oblique angle. In this study, The vibrational characteristics of steel and plain wave GFRP cylindrical shell with an oblique end are given by experimental and finite element method. To be find characteristic of the oblique end, the mass of the cylindrical shell is maintained. Natural frequency and mode shapes of isotropic and plain weave composite shells are obtained by modal test. The results are compared with those of the finite element method. The simply supported boundary conditions with bolts along the circumferential direction of the GFRP shell are well achieved. Also, The clamped boundary conditions is applied to the steel specimen. Those are shown to agree well with the analytical results and finite element analysis results.

1. 서론

진동의 저감 특성은 기계의 설계에 고려되는 중요한 설계인자가 되었다. 또한 구조물 설계시 동적 안정성을 확보하기 위하여 동특성에 대한 고찰이 필요하다. 즉, 공진에 의한 피해를 줄이기 위해서 진동해석이 요구된다. 원통셸에 대한 이론적 진동해석 및 실험에 대한 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 경사단을 갖는 연구도 수행되고 있다. 1973년 Leissa⁽¹⁾는 다양한 형상 및 경계조건을 갖는 원통 셸의 진동에 대한 연구 결과를 제시 하였고, Yamane⁽²⁾는 Donnell의 이론을 채용하여 단순 지지된 원통 셸의 진동특성을 연구하였는데, 넓은 범위의 반경/두께 비에 따른 원주방향 38차까지의 반과 수에 대한 고유진동수를 제시하였다. 원통셸의 강성 증가의 한 방법으로서 보강에 대한 연구가 수행되었고, 이영신 등은 복합재료 원통셸의 고유진동해석 및 좌굴해석에 대하여 다양한 연구를 수행하였다. Hu, J. and Redekop, D 등은 구조물의 기초 형

태인 셸(shell)의 진동특성을 파악하고, 끝단이 경사진 원통셸에 그 경사진 각도에 따른 진동특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

본 연구에서는 각도에 따른 steel과 GFRP의 특성을 파악하기 위하여 질량을 일정하게 한 상태에서 steel 원통셸의 경사단의 각도에 따른 고유진동수의 변화를 고찰하고, GFRP 복합재료 모델에 적용 하였다. 또한 질량을 변화시키면서 경사단과 질량에 따른 변화를 실험과 유한요소 해석을 통해 고찰하였다.

2. 진동실험

2.1 실험 시편 및 장치

실험을 통한 완전고정 steel과 단순지지 된 복합재료 원통셸의 진동해석을 위해 원통셸 시편을 제작하였고, Table 1에는 기하학적인 형상 데이터를 나타내었다. 시편은 스테인리스강 과 유리섬유강화(GFRP)[$0^{\circ}_3/\pm 45^{\circ}_3/90^{\circ}_3$]₅복합재료를 가지고 시험을 수행하였다. 본 실험에서 채용한 GFRP 복합재료 원통셸은 제작의 용이성을 고려하여 평직(plain weave)으로 제작하였다. 평직구조는 xy평

* 충남대학교 기계설계공학과 대학원
E-mail : jwlee@cnu@hanmail.net
Tel : (042) 825-6531, Fax : (042)822-7366

** 충남대학교 기계설계공학과 대학원

*** 충남대학교 기계설계공학과 교수

면에서 x 방향을 fill방향, y 방향을 warp 방향이라고 하는데, 이들 섬유방향과 warp방향에 대한 물성은 같다.

Table 1. Dimension of composite and steel shell
(unit mm)

material	dimension	steel and GFRP	
	composite shell(GFRP)	Length	360
Radius		70	
Thickness s		1.5	
steel shell	Length	400	
	Radius	60	
	Thickness s	1.6	

고유진동수 및 모드형상을 얻기 위한 진동실험은 모달 시험에서 사용되는 충격해머와 가속도계를 사용한 충격가진법을 이용하였다. 사용한 실험장비는 두 채널을 갖는 주파수분석기(FFT), 충격해머, 가속도계 그리고 응답의 증폭을 위한 증폭기 등이 있고, 가속도계를 시편에 부착하였다.

2.2 경계조건

진동실험에서 사용된 시편 고정용 장치로는 강체 구조물인 베드(bed)와 지그(jig)가 있다. 복합재료 원통셀의 단순지지 경계조건을 구현하기 위하여 사용한 방법은 셀의 끝단에서 원주방향 바깥표면을 따라서 지지 볼트를 이용하는 것이다. 여기서 단순지지조건을 구현하기 위해 볼트를 느슨히 조였다. 또한 steel의 완전고정 경계조건을 구현하기 위해서는 시편을 상하 제작하였다.

Fig.1은 시험시편과 경계조건을 구현한 모습이다. 단순경계 조건을 구현하기 위해 볼트를 적절한 강도를 조절하여 체결하였다.

2.3 실험방법

단순지지 원통셀의 진동실험은 FFT를 이용한 주파수 분석으로 수행되었고, 실험에 앞서 모드 형상을 결정하기 위하여 시편에 원주방향으로의 가진점을 표시하였다. 충격 가진 법에서는 충격해머에 의한 가진이 입력신호로 들어가고, 가속도계의 응답신호가 주파수 분석기에 입력되어 전달함수의 피크 응답이 일어나고, 위상각이 바뀌는 곳에서

고유 진동수가 결정된다. 이 실험에서는 원주방향 16점의 가진점을 이용하였다.

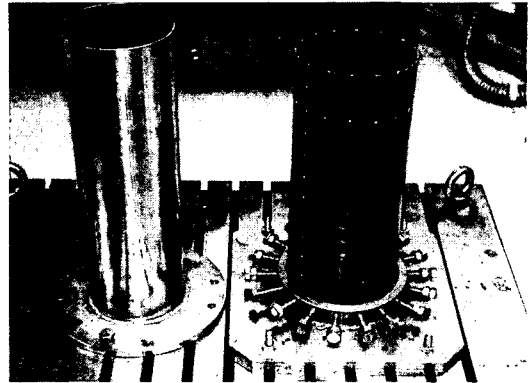


Fig.1 Photograph of the experimental setup and cylindrical shell specimen

3. 유한요소해석

실험과 고유진동수 및 모드 형상을 비교 검토하기 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 8.1을 이용한 해석을 수행 하였다. 유한 요소 모델링은 등방성 재료인 스테인리스강 스틸의 해석을 위해 4절점 탄성 셸요소(SHELL 63)와 복합재료 해석을 위하여 셸요소(SHELL 99)을 이용하여 해석을 수행하였다. mass를 일정하게하며 경사각의 변화에 따른 특성을 보기위한 해석과 질량과 각도를 동시에 변화시키며 한 해석을 실험과 비교 검토하였다.

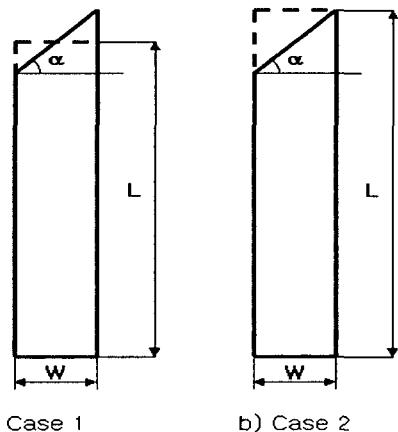


Fig.2 Geometry of cylindrical shell with an oblique end

case1의 경우는 L을 기준으로 해서 경사각을 변화시키면서 해석을 수행하였다. 이 경우 질량을 일정하게 유지시키면서 경사단에 따른 진동수의 변화를 알아보하고자한다. case2의 경우는 기준점 L로부터 경사단의 변화를 주며, 질량의 감소와 경사각의 변화에 따른 해석을 수행하였다. 원통셀 모델에 대한 유한요소모델의 생성은 절점수 2232개와 요소수 720개이다.

4. 결과 및 고찰

원통셀의 각도에 따른 고유진동수와 모드형상의 변화를 고찰해 보았고, 실험을 통해 검증하였다. Table2는 해석에 사용된 물성값을 제시하였다. 두 재료의 길이와 지름을 달리하였지만, 원통셀의 특성상 길이대 지름의비가 비슷한 비율을 가지므로 비교 고찰하였다.

Table 2. Material property of materials

Property	Unit	GFRP (Plain weave)	Steel
E_1	GPa	26.2	200
E_2	GPa	26.2	200
G_{12}	GPa	4.9	80.0
ρ	Kg/m^3	1880.0	7850
ν_{12}	-	0.12	0.29
E_1/E_2	-	1.0	1.0

4.1 등방성 원통셀

등방성 원통셀의 경우 실험에서 완전고정 경계조건을 구현하기 위해서 원통셀 하단부에 용접을하여 경계조건을 구현하였다. 실험값이 FEM 해석값보다 약간 낮게 나오는데, 이는 원통셀의 경계조건을 구현하기 위해 용접을 한 하단부가 마치 다른 모델을 해석하는 결과가 되었고, 지그와 베드 사이의 결합부분의 특성상 생기는 오차를 반영한다. 등방성 원통셀의 경우, 경사각이 증가 하면서, 고유진동수의 값이 감소하는 경향을 보였다. 또한 고차 모드로 갈수록 경사단에 따라서 차이가 증가함을 보인다.

4.2 평직 복합재료 원통셀

평직복합 원통셀(GFRP) $[0^\circ_3/\pm 45^\circ_3/90^\circ_3]_5$ 는 재

료 구조의 특성상 등방성으로 가정하고, 해석을 하였고, 이를 실험과 비교하였다. steel의 경우보다 고차 모드에서 오차가 증가하는 경향을 보였다. 또한, 실험값과의 오차도 증가했는데 이는 실험에서 단순지지 경계조건을 구현하기 어렵고 원주방향으로 죄고 있는 볼트의 수와 죄는 힘에 따라 큰 차이를 보인다. 그리고 Fig.4는 저차모드에서 각도와 질량에 대한 차이가 미소함을 보이며, 단순 지지시킨 복합재료의 경우 각도와 질량을 변화시킨 효과가 적다.

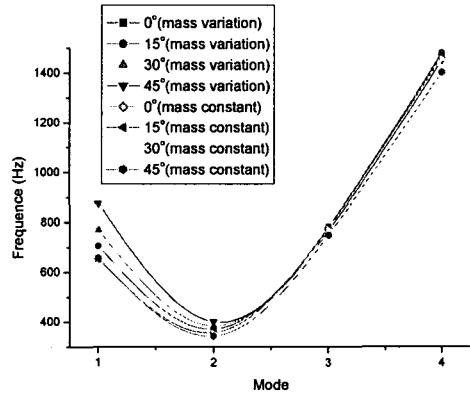


Fig.3 Analytical natural frequencies of steel cylindrical shell with mass variations.

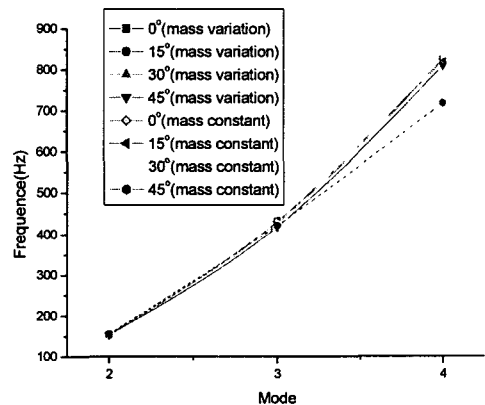


Fig.4 Analytical natural frequencies of GFRP cylindrical shell with mass variations.

Table3 Natural frequencies of steel and GFRP

angle material		0°		15°	30°	45°
		experiment	FEM	FEM	FEM	FEM
steel	1	577.96(1,1)	652.52(1,1)	652.98(1,1)	654.56(1,1)	657.81(1,1)
	2	335.55(1,2)	357.75(1,2)	356.64(1,2)	352.60(1,2)	342.43(1,2)
	3	704.37(1,3)	778.84(1,3)	776.78(1,3)	769.09(1,3)	749.07(1,3)
	4	1430(1,4)	1474.8(1,4)	1470.6(1,4)	1452.9(1,4)	1401.00(1,4)
GFRP	1					
	2	139.27(1,2)	154.56(1,2)	154.51(1,2)	154.26(1,2)	153.26(1,2)
	3	331.48(1,3)	432.15(1,3)	431.26(1,3)	427.85(1,3)	418.71(1,3)
	4	849.97(1,4)	824.82(1,4)	824.51(1,4)	821.92(1,4)	809.40(1,4)

(a) Case 1: constant mass

angle material		0°		15°	30°	45°
		experiment	FEM	FEM	FEM	FEM
steel	1	577.96(1,1)	652.52(1,1)	705.17(1,1)	768.65(1,2)	875.42(1,1)
	2	335.55(1,2)	357.75(1,2)	371.11(1,2)	384.08(1,2)	400.78(1,2)
	3	704.37(1,3)	778.84(1,3)	782.61(1,3)	779.53(1,3)	766.26(1,3)
	4	1430(1,4)	1474.8(1,4)	1479.4(1,4)	1461.0(1,4)	1448.9(1,4)
GFRP	1					
	2	139.27(1,2)	154.56(1,2)	154.89(1,2)	155.29(1,2)	155.80(1,2)
	3	331.48(1,3)	432.15(1,3)	431.76(1,3)	429.13(1,3)	421.81(1,3)
	4	849.97(1,4)	824.82(1,4)	825.80(1,4)	832.58(1,4)	718.94(1,4)

(b) Case 2: mass variation

Table3 을 보면 (a)의 경우 질량을 일정하게 유지시키면서 각도를 변화시킨 고유진동수의 결과이다. Fig.3 의 경우 steel 의 해석결과를 보이고 있는데, 질량을 일정하게 한 45°의 경우 고유진동수보다 질량을 감소시킨 15°경사의 원통 쉘의 경우 고유진동수가 더 올라감을 확인하였다. 고유진동수에 질량의 감소가 더 많은 영향을 주는 것을 확인하였다. 복합재료의 경우도 같은 경향을 확인하였지만, 차이가 미소하였다. 복합재료의 경우 고차모드에서 30°에서의 결과가 45°보다 높음을 확인하였다.

즉, case1의 경우와 case2의 경우의 차이가 복합재료의 경우보다 완전 고정된 steel의 경우 크게 나타났다.

Fig.5와 Fig.6은 case1의 경우 모드 형상(mode shape)을 나타내었다. GFRP복합재료의 경우는 1차 모드를 찾을 수 없었다. 여기서의 모드 형상은 원통쉘의 끝단에서의 상대적인 변위를 나타낸다.⁽⁸⁾ 고차모드에서는 경사단에 따라서 모드 형상의 변화가 차이가 많이 남을 확인했다. 이는 원통쉘의 특성인 국부적인 변형모드(localmode)를반영한다.

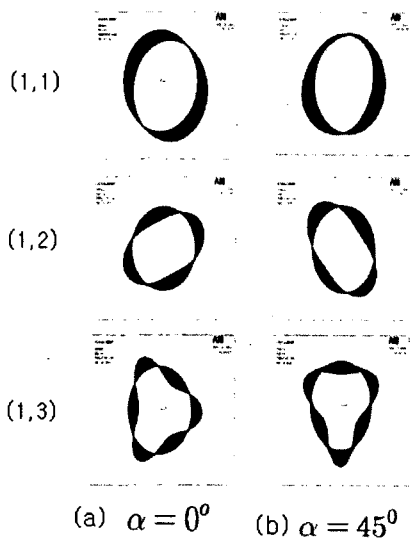


Fig.5 Mode shapes of steel cylindrical shell with constant mass

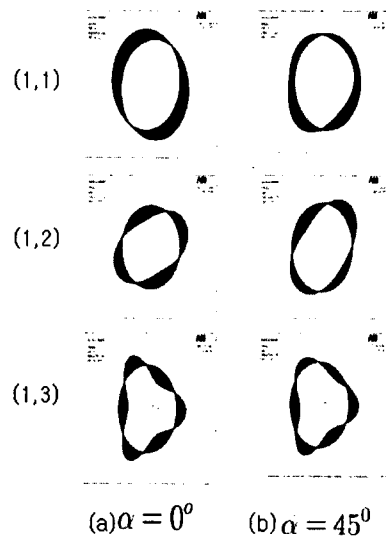


Fig.7 Mode shapes of steel cylindrical shell with mass variations

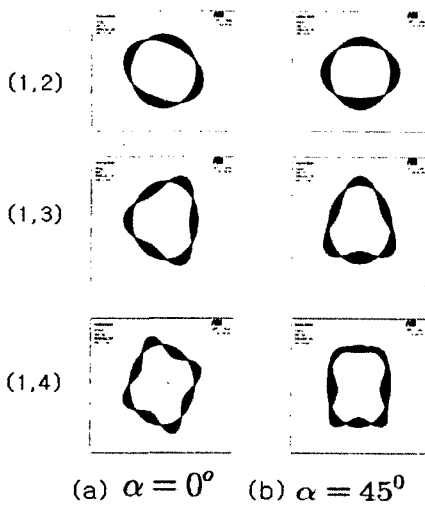


Fig.6 Mode shapes of GFRP cylindrical shell with constant mass

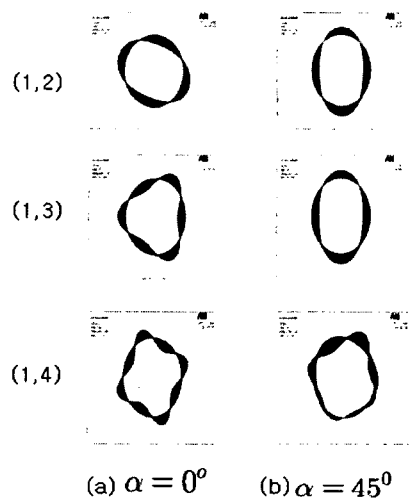


Fig.8 Mode shapes of GFRP cylindrical shell with mass variations

참 고 문 헌

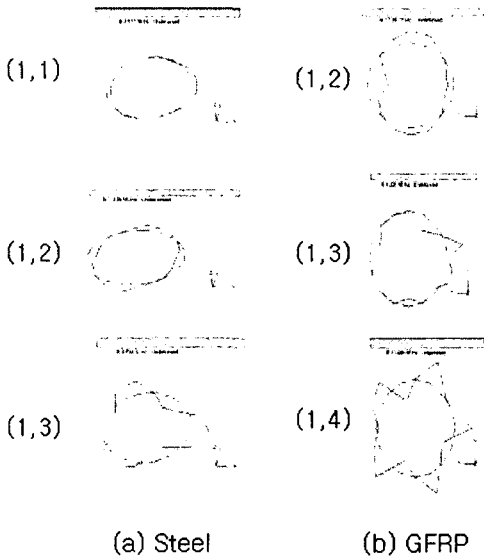


Fig.9 Experimental mode shapes of steel and GFRP cylindrical shell with flat end

5. 결론

일단 완전 고정 경계조건을 갖는 steel 과 GFRP복합 재료 원통셸의 경사단이 0~45° 로 변화에 따른 자유진동해석을 수행하였다. 경사단의 진동특성을 파악하기 위하여 질량을 일정하게 유지시킨 모델과 각도와 질량을 동시에 변화시킨 모델을 비교하여 고유진동특성을 연구하였다. 평평단을 갖는 원통셸에 대해 실험진동해석을 수행하여 진동특성을 비교하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 질량을 일정하게 하였을 때, 원통셸에 경사단이 증가할수록 고유진동수가 감소되는 결과를 확인하였다.
- (2) steel과 GFRP 복합재료의 실험과 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. 실험값과 유사한 경향임을 검증하였다.
- (3) 경사각이 커지면서 빔 모드에 의한 영향보다 원주방향 모드에 영향이 컸다.
- (4) 고차모드에서는 경사단에 따라서 모드 형상의 변화가 차이가 많이 남을 확인했다. 이는 원통셸의 특성인 국부모드의 변형에 의한 것이다.

(1) Leissa, A. W., 1973, "Vibration of Shells" NASA AP-128.

(2) Yamane, J. R., 1965, "Natural Frequency Curves of Simply Supported Cylindrical Shells", AIAA Journal, Vol. 3 No.1 , pp. 180~ 181.

(3) Swall, J.L. and Naumann, E.C., 1968, "An experimental and Analytical Vibration Study of Thin Shells with and without Longitudinal Stiffeners", NASA TN ,D-4705

(4) 이영신, 문흥기, 1986, "직교이방성 복합재료 원통셸의 자유진동 해석, 대한기계학회 논문집, 제8권, 제5호, pp. 408~415.

(5) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(6) 이영신, 최명환, 길기남, 송근영, 1998, "단순지지된 steel 및 복합재료 원통셸의 진동에 대한 진동특성에 대한 실험적 고찰, 한국소음진동공학회 1998, 춘계학술대회논문집 pp.334~339.

(7) 이영신, 김영환, 1996, "복합재료 원통셸의 고유진동수 및 좌굴하중에 대한 직교 보강 특성연구", 한국소음진동공학회지, 제 6권, 제 4호, pp.457~467.

(8) 이영신, 최명환, 신도섭, 1999, "단순지지된 Steel 및 GFRP 복합재료 원통셸의 자유진동 특성" 한국소음진동공학회지, 제 9권, 제2호, pp.273~284.

(9) 이영신, 양명석, 김현수, 2001 "단순지지 경계조건을 갖는 조합원통셸의 자유진동해석 ", 제11차 유도무기학술대회 논문집.

(10) Hu, J. and Redekop, D., 2003. "Prestressed Vibration Analysis of Cylindrical Shell with an Oblique End", Journal of Sound and vibration 277(2004) pp.429~435.