

'11 춘계학술대회 우수 논문

수중운동체 적용을 위한 샌드위치 복합재 원통의 좌굴 해석 및 시험

김지선*, 이경찬*, 권진회**, 최진호***, 조종래****, 조상래*****, 조윤식*****

Buckling Analysis and Test of Composite Sandwich Cylinder for Underwater Application

Ji-Seon Kim*, Gyeong-Chan Lee*, Jin-Hwe Kweon**, Jin-Ho Choi***, Jong-Rae Cho****, Sang-Rae Cho*****, and Yoon-Sik Cho*****

ABSTRACT

In this paper, as a basic research to apply the composite sandwich to underwater vehicle, the manufacturing, analysis and test methods, and weight saving effect of a composite sandwich cylinder under external pressure were studied. A two-step manufacturing method to prevent the wrinkling of the sandwich cylinder face was proposed and the three cylinders were made and tested. Finite element results based on the shell and solid model using MSC.Nastran were compared with test results. The comparison showed that the linear finite element analysis using the shell and solid elements can predict the buckling pressure of the sandwich cylinder with approximately 3% difference. The parametric study of the filament wound cylinders revealed that the composite sandwich can reduce the weight of the cylinder more than 30% compared with the filament wound cylinder supporting the same pressure.

초 록

본 연구에서는, 복합재 샌드위치를 수중운동체용 구조물에 적용하기 위한 기초연구로서, 샌드위치 복합재 원통의 제작, 좌굴 해석 및 시험 방법, 중량저감 효과를 분석하였다. 우선 면재에 주름이 생기지 않도록 하는 2단계 샌드위치 제작 방법을 소개하고, 이를 사용하여 원통을 제작하여 수압시험을 수행하였다. 동시에 MSC Nastran의 쉘요소와 고체요소를 사용한 유한요소해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다. 시험과 해석의 결과 비교로부터 선형 유한요소해석으로도 샌드위치 원통의 좌굴압력을 3% 내외의 오차로 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 필라멘트 와인딩 원통에 대한 인자연구를 통해 샌드위치를 사용할 경우 동일한 지지압력에서 필라멘트 와인딩 원통보다 최소 30% 이상 무게가 줄어드는 것을 확인하였다.

Key Words : 복합재료(composite materials), 샌드위치(sandwich), 좌굴(buckling), 무게저감(weight reduction), 외부 수압(external pressure)

2011년 춘계학술대회 우수논문(무심사)

* 경상대학교 항공우주특성화대학원 항공우주공학전공

**+ 경상대학교 항공우주시스템공학과 · 항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:jwkwon@gnu.kr)

*** 경상대학교 기계공학부 · 항공기부품기술연구소

**** 한국해양대학교 기계정보공학부

***** 울산대학교 조선해양공학부

국방과학연구소

1. 서론

무게가 중요한 설계변수가 되는 조선 해양 분야에, 항공 우주 분야에서 축적된 복합재 설계, 제작 기술을 적용하기 위한 노력이 진행되고 있다. 수중운동체와 같은 중량 민감 구조물에 비강도, 비강성이 뛰어난 복합재료를 적용하면 구조물 자체 중량을 줄여 예비 부력을 확보할 수 있다. 또한 복합재의 우수한 소음 흡수 특성을 이용하여 수중 음파로 인한 피탐지 위험을 줄일 수 있고 염수환경 하에서 내부식성을 높일 수 있다[1].

일반적으로 수중운동체는 물속에서의 기동성을 확보하고 면적당 부피 효율성을 키우기 위해 원통 형태의 구조를 가진다. 이러한 형태의 구조물이 외압을 받게 될 경우, 재료의 강도보다 훨씬 낮은 응력에서 좌굴이 발생할 수 있기 때문에 좌굴이 중요한 설계변수가 된다. 따라서 외부 수압을 받는 원통 형태 구조물의 좌굴은 오랫동안 연구자들의 주요 관심사가 되어 왔다[2-7].

구조물에서 무게 증가 대비 좌굴 특성을 크게 향상시킬 수 있는 방법으로 샌드위치 구조의 적용을 고려할 수 있다. 샌드위치는 강성이 큰 면재(face) 사이에 경량의 코어(core)를 삽입한 구조로서, 비강도, 비강성뿐만 아니라 굽힘 강성을 크게 할 수 있다[8]. 또한 샌드위치는 코어의 재료적, 형상적 특성으로 인해 내부 소음을 흡수하는 효과[9-11]까지 있어 음향 피탐지 특성을 중시하는 수중운동체에 적용할 경우 소음 저감 효과를 거둘 수 있다[12, 13]. 샌드위치의 이러한 특성으로 인해 샌드위치에 대한 연구는 오래전부터 지속적으로 이루어져 왔다.

Kardomateas 등[14]은 샌드위치 구조로 이루어진 기둥(column)의 좌굴 특성을 면재와 코어의 종류 및 경계조건에 따라 해석적으로 연구하였다. Szyk 등[15]은 축방향 압축력을 받는 샌드위치 원통형 판넬(panel)의 좌굴에 대한 비선형 대수방정식을 도출하였다. Kardomateas[16]는 넓은 샌드위치 판넬의 전역좌굴에 대한 탄성해를 제시하고, 다른 전역좌굴식의 결과와 비교한 바 있다. Veedu와 Carlsson[17]은 폼 코어(foam core) 샌드위치 기둥의 면재와 코어의 분리에 따른 좌굴 거동을 선형 해석과 비선형 해석을 통하여 연구하고, 시험 결과와 비교하였다. Muc과 Zuchara[18]는 샌드위치 판넬의 전역좌굴하중과 고유진동수에 대해서 Hamilton과 Lagrange의 변분 원리를 이용한 이차원 비선형 지배방정식을 도출하고 다른 이론들과 비교하였다.

그러나 기존의 연구들은 대부분 샌드위치 평판의 특성 연구에 집중되어 있고, 외압을 받는 원통 형태의 복합재 샌드위치 구조물에 대한 연구는 거의 발견되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 샌드위치를 외부 수압을 받는 원통 형태의 복합재 구조물에 적용하는 방법을 제시하고, 실제 시험을 제작하여 수압 시험을 수행하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 시험 결과와 좌굴해석 결과를 비교하여 샌드위치 원통의 유한

요소해석 방법을 분석하였다. 동시에 필라멘트 와인딩(filament winding) 복합재 원통에 대한 좌굴해석을 수행하여 샌드위치 복합재 원통의 무게 저감 효과에 대해서도 연구하였다.

2. 샌드위치 원통의 제작

일반적으로 샌드위치 복합재는 진공백(vacuum bag) 성형을 이용하여 일체성형(cocuring) 방법으로 제작된다. 그러나 원통의 경우 성형 과정에서 가해지는 압력으로 인해 면재 주름이 생기기 쉽기 때문에 이를 방지하기 위한 공정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 외부 몰드(mold)와 진공백 공정을 이용한 2단계 동시접착(co-bonding) 방법으로 샌드위치 복합재 원통을 제작하였다. 동시접착 방법 중 일차 성형에서는 프리프레그(prepreg)의 성형 사이클(cycle)에 따라 외부 몰드를 이용하여 바깥쪽 면재를 먼저 성형하여 표면 결함을 최소화하였다. 바깥쪽 면재를 먼저 제작한 후 코어와 안쪽 면재를 제작하는 이차 성형에서는 상대적으로 낮은 압력을 가하여 코어의 찌그러짐이 발생하지 않도록 하였다. 각 단계의 성형 개략도와 사이클을 Fig. 1에 나타내었다.

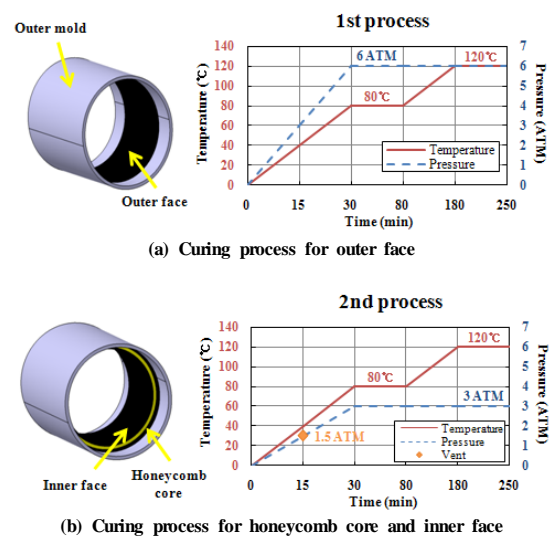


Fig. 1 Curing cycles.

면재 제작에 사용된 프리프레그는 SK chemical사의 탄소/에폭시 일방향 프리프레그(prepreg)인 USN125이고, 코어는 M.C. Gill사의 노멕스 허니콤(Nomex honeycomb)이다. 시험용 원통은 총 3개를 제작하였다. 실험실에서의 시험 제작 용이성을 고려하여 면재의 적층각은 0°와 90°로 설정하였다. 노멕스 허니콤 코어를 복합재 원통에 적용하기 위하여 코어를 30 mm 폭으로 절단하고, 원통의 원주방향으로 돌아가며 접착하였다. 면재와 코어의 접착에는 Cytec사의 필름(film) 접착제, FM73M을, 코어와

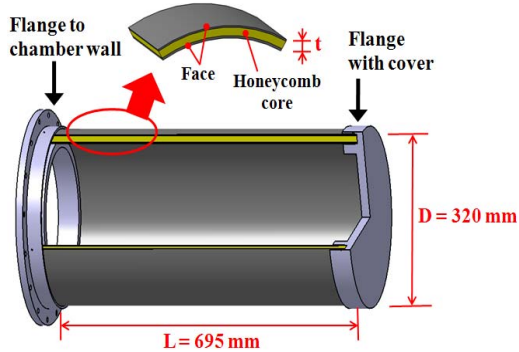


Fig. 2 Schematic of sandwich composite cylinder.

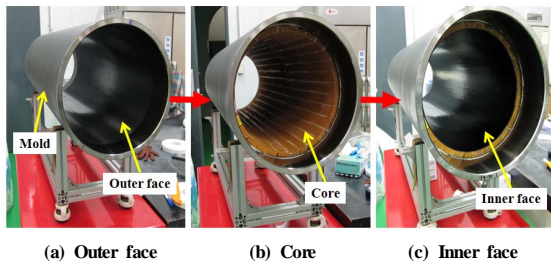


Fig. 3 Manufacturing steps for sandwich composite cylinder.

Table 1 Geometry and stacking sequence of cylinders

Specimen ID	Face stacking sequence	Outer radius (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)
SWN-0/90-1			694	16.32
SWN-0/90-2	[0/90] _{4s}	160	695	16.36
SWN-0/90-3			694	16.34

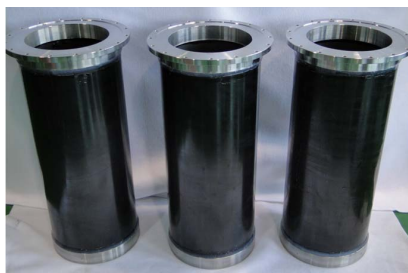


Fig. 4 Specimens with flanges.

코어의 접착에는 PTM&W Industries사의 페이스트(paste) 접착제, ES6292를 사용하였다. 시편에 대한 자세한 정보와 원통 제작과정을 Fig. 2와 3, Table 1에 나타내었다.

수압 시험이 진행되는 동안 원통의 좌단은 수압시험장치에 고정되고, 우단은 물속에 노출된다. 따라서 시편의 좌단에는 시편을 시험장치에 고정시켜줄 플랜지가 필요하고, 우단

에는 물의 유입을 막아줄 수 있는 플랜지가 필요하다. 본 연구에서는 강(SM 45C)을 사용하여 시편과 이중 겹침으로 결합되는 플랜지를 제작하였다. 시편과 플랜지와의 접착에는 Araldite AW106과 Hardener HV 953U를 1:0.8의 비율로 혼합한 접착제를 사용하여 상온에서 24시간 이상 경화시켰다. 플랜지를 결합한 시편의 모습을 Fig. 4에 나타내었다.

3. 수압 시험

수압 시험은 울산대학교에서 보유하고 있는 수압시험기(Fig. 5 참조)를 사용하여 수행하였다. 호스를 통해 물이 기기로 유입되고, 수압은 최대 40 MPa까지 가할 수 있는 자동 펌프를 이용하여 조절된다. 챔버는 최대 150기압(수심 1,500 m에 해당)까지 견딜 수 있으며, 물의 유입에 따른 내부의 압력과 변형 정보는 컴퓨터 인터페이스 시스템을 이용하여 수집한다. 또한 용기의 한쪽 끝이 열린 형태로 제작되어 수압 증가에 따른 원통 내부의 모습을 육안으로 확인할 수 있다. 원통 내부에는 원주방향으로 90도마다 총 8개의 변형률게이지를 설치하여, 길이방향과 원주방향의 변형률을 측정하였다.

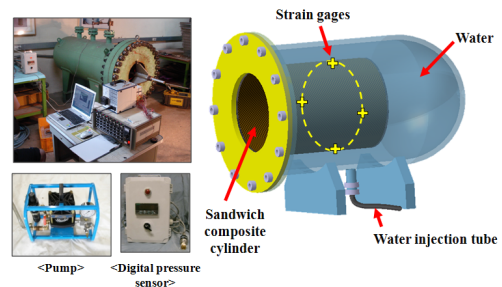


Fig. 5 Test equipments.

4. 유한요소해석

4.1 샌드위치 복합재 원통

좌굴해석에는 상용 유한요소 프로그램인 MSC NASTRAN을 사용하였다. 상대적으로 두께가 얇은 면재에는 총 5160개의 CQUAD4 요소[19]를 사용하였고, 두께가 두꺼운 코어에는 2580개의 CHEXA 요소[19]를 사용하였다. 실제 시험에서 적용된 경계조건을 반영하기 위하여 시험기기에 부착되는 좌단은 고정지지, 플랜지로 보강되는 우단은 종축방향 변위를 허용하는 고정지지로 가정하였다. 또한 원통의 우단 중앙에 절점(node)을 생성하여 우단 끝 절점들과 RBE2 요소[19]로 묶어주었다. 해석에 사용된 하중조건은 고심도 수중운동체가 정수압을 받는 조건과 동일하게 적용하였으며, 해석에 사용된 물성치를 Table 2에, 유한요소모델과 하중과 경계조건을 Fig. 6에 나타내었다.

Table 2 Properties of materials

		USN125	Honeycomb core
Elastic modulus	E ₁	162 GPa	10 MPa
	E ₂	9.6 GPa	10 MPa
	E ₃	- GPa	283 MPa
Shear modulus	G ₁₂	6.1 GPa	10 MPa
	G ₁₃	6.1 GPa	31 MPa
	G ₂₃	3.5 GPa	59 MPa
Poisson's ratio	ν ₁₂	0.30	0.30
	ν ₃₁	-	0.02
	ν ₂₃	-	0.02

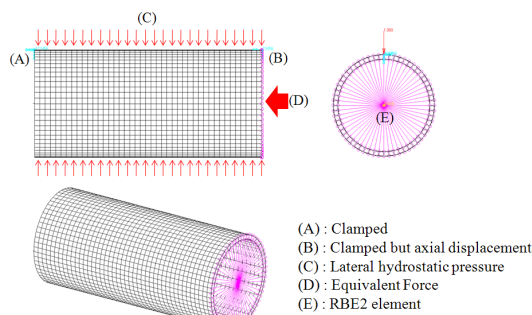


Fig. 6 Boundary and loading conditions for sandwich cylinder.

4.2 필라멘트 와인딩 복합재 원통

샌드위치 복합재 원통의 무게 저감 효과를 확인하기 위하여 필라멘트 와인딩 복합재 원통과 비교하였다. 유한요소모델에는 총 3024개의 CQUAD4 요소가 사용되었고, 하중 및 경계조건은 샌드위치 복합재 원통과 동일하게 적용되었다. 해석에 사용된 유한요소모델을 Fig. 7에 나타내었으며, 해석에 필요한 물성치는 참고문헌[5]을 참고하였다.

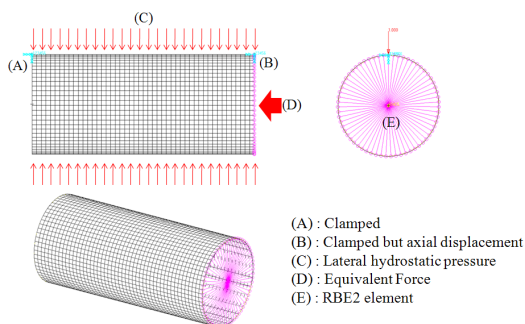


Fig. 7 Finite elements model for filament winding cylinder.

5. 결과 및 분석

5.1 샌드위치 복합재 원통의 좌굴

샌드위치 원통이 외부압력을 받으면, 원주방향과 길이방향으로 압축응력을 받게 된다. 그러다가 외부압력이 임계치에 도달하면 지지하중의 감소를 동반한 급격한 면외 대변형이 발생하게 되는데 이때를 좌굴로 규정한다[4,5]. 이러한 불안정 좌굴 시험에서 외부압력의 크기를 제어하는 하중제어방식을 사용할 경우 좌굴이 발생함과 동시에 구조물의 파손이 발생하게 된다. 그러므로 일반적으로는 변위제어로 시험을 해야 하지만, 본 연구에서와 같이 수압을 가할 경우 변위제어로 하중을 가하는 것이 불가능하다. 따라서 본 시험에서는 좌굴과 함께 구조물의 파손이 발생할 수밖에 없는 상황이므로, 원통에서 파손을 동반한 대변형이 발생하는 순간의 외부 압력을 좌굴압력으로 정의하였다. 좌굴압력은 첫 번째 시편에 4.85 MPa, 두 번째와 세 번째 시편에서 모두 5.06 MPa로 나타났다. 수압 증가에 따른 변형률 그래프를 Fig. 8에 제시하였다.

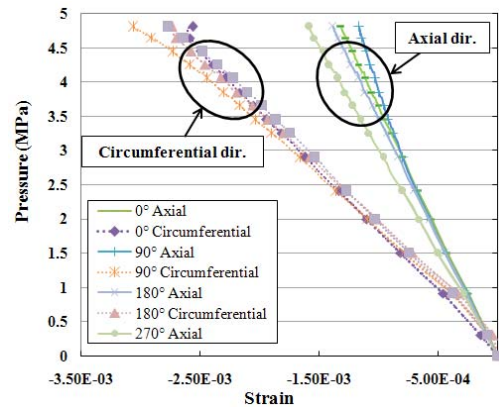


Fig. 8 Strain responses during the hydrostatic pressure test.

일반적으로 원주방향 변형률이 길이방향 변형률보다 약 2배 정도 크게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 두께가 얇은 원통형 압력 용기에서 길이방향 응력보다 원주방향 응력이 2배 더 크게 나타나는 것을 감안하면 자연스런 결과로 볼 수 있다.

세 시편의 최종파손 형상은 Fig. 9에 제시하였다. SWN-0/90-1의 경우, 원통의 중앙부를 중심으로 길이방향으로 긴 파손이 발생함과 동시에 원통의 좌단에서 약 7 cm 떨어진 지점에서 원주방향으로 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다.

SWN-0/90-2의 경우 또한, 원통의 중앙부에서 길이방향으로 긴 파손이 발생하였다. 하지만, SWN-0/90-1에서와 달리 면재가 갈라지고, 코어가 안으로 밀려든 모습을 확인할 수 있다. SWN-0/90-3의 파손 형상도 SWN-0/90-2 시편과 유사하게 나타났다. 길이방향으로 긴 파손이 발생하고, 내부 면재가 갈라지면서 코어가 안으로 밀려들어갔다. 하지만 원통이 길이방향 압력을 견디지 못하고 안으로 눌리면서 우측 플랜지와의 결합부에서도 파손이 발생하였다.

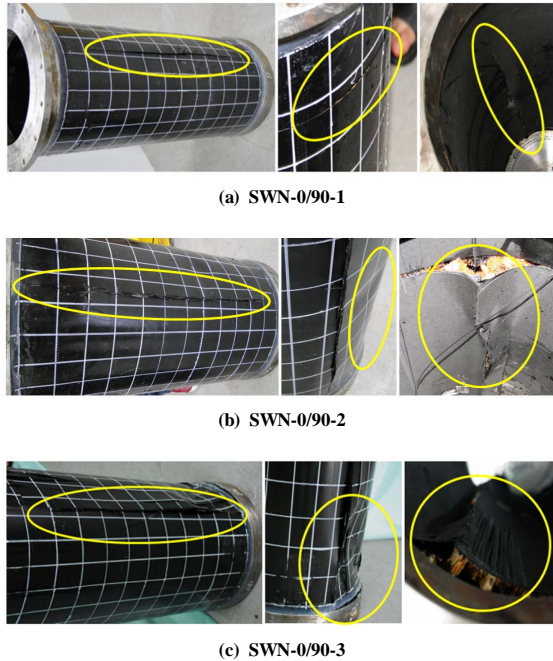


Fig. 9 Final failure modes.

MSC NASTRAN을 이용하여 좌굴해석을 수행한 결과, 샌드위치 복합재 원통의 좌굴하중은 5.15 MPa로 나타났으며, 좌굴모드는 원주방향으로 3개의 웨이브(wave), 종축방향으로 1개의 웨이브를 보였다. 시험에서는 좌굴과 파손이 순간적으로 발생하고, 파손 발생과 함께 시험장치의 물이 원통의 내부로 쏟아져 들어오므로 좌굴모드를 촬영하여 비교하는 것은 어려웠다. 유한요소해석에 의한 좌굴모드를 Fig. 10에, 시험 및 유한요소해석의 좌굴압력 결과값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Buckling pressures by test and analysis

Specimen ID	Test (MPa)	Analysis (MPa)	Error (%)
SWN-0/90-1	4.85		5.83
SWN-0/90-2	5.06	5.15	1.75
SWN-0/90-3	5.06		1.75
Average	4.99	5.15	3.11

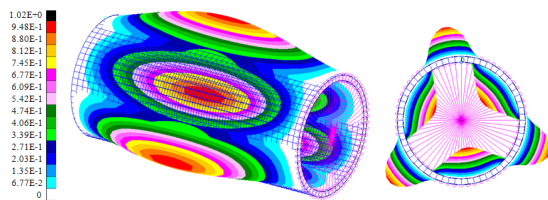


Fig. 10 buckling mode shape.

5.2 샌드위치 복합재 원통의 무게 저감 효과

본 연구에서 사용한 샌드위치 복합재 원통의 좌굴해석 결과값은 5.15 MPa이다. 따라서 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 목표 압력을 5.15 MPa로 설정하고, 샌드위치 복합재 원통과 동일한 하중형태 및 경계조건에서의 무게를 계산해보았다.

필라멘트 와인딩 복합재 원통은 기하학적 조건과 적층순서, 즉 헬리컬 와인딩(helical winding) 층의 각도와 후프(hoop) 와인딩 층의 비율 등에 따라 구조물의 특성이 달라진다[5]. 따라서 여러 인자들을 고려하여 최적의 조합을 적용할 경우 가장 효율적인 구조설계가 될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 샌드위치 면재 역시 실험실에서의 제작 편의성을 고려하여 단순 직각적층방식(cross-ply)을 사용하였음을 고려하여, 필라멘트 와인딩 원통의 해석에서도 최적화 작업은 수행하지 않고, 인자연구를 통해 주요 인자의 효과만을 고려하였다.

먼저 후프 와인딩 층의 비율을 20%로 고정하고 헬리컬 와인딩 층의 각도를 0°, 30°, 60°로 변화시켜보았다. 그 중에서 가장 뛰어난 효율을 보인 각도를 기준으로 후프 와인딩 층의 비율을 0%, 10%, 30%로 바꿔보았다. 각 조건에 따른 원통의 두께와 무게, 그리고 파손 종류를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Analysis results of filament wound composite cylinder

Manufact. method	Helical wind. angle (deg)	Ratio of hoop wind. (%)	Thickness (mm)	Weight (kg)	Failure mode
Sandwich	-	-	16.34	5.17	Buckling
Filament winding	0	20	9.7	10.55	Buckling
	±30	20	7.75	8.48	Buckling
	±60	20	7.15	7.84	Static
	±60	0	6.95	7.63	Buckling
	±60	10	6.85	7.52	Static
	±60	30	7.75	8.48	Static

본 연구에서 후프 층 비율을 20%로 설정하였을 때, 가장 높은 압력을 지지하는 헬리컬 와인딩 층의 각도는 60°이다. 하지만 좌굴이 발생했던 0°와 30°와는 다르게 좌굴보다 먼저 정적파손이 발생했다. 그 밖에도 헬리컬 와인딩 층의 각도가 60°일 때, 후프 층 비율이 0%인 경우를 제외한 모든 경우에 좌굴보다 정적파손이 먼저 발생했다. 좌굴과 정적파손을 동시에 고려하였을 때, 가장 높은 지지압력을 보인 필라멘트 와인딩 복합재 원통은 헬리컬 와인딩 각도가 60°, 후프 와인딩 층의 비율이 10%일 때이고, 이 때 원통의 무게는 7.52 kg이다. 5.17 kg인 샌드위치 복합재 원통과 비교해보았을 때, 샌드위치 복합재 원통은 필라멘트 와인딩 원통 대비 약 31%의 무게를 저감할 수 있다. 현재의 샌드위치 원통은 최적화를 하지 않은 특정한 적층순서를 가진 경우이고, 필라멘트 와인딩 원통은 인자연구를 통해 지지압력이 높은 경우를 가정한 것임에도 불구하고 샌드위치를 사용할 경우 30% 이상의 무게저감 효과를 거둘

수 있음을 확인하였다. 따라서 샌드위치의 면재를 최적화할 경우 무게 저감효과는 더 커질 것으로 기대할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 샌드위치 구조를 원통 형태의 복합재 구조물에 적용하기 위한 기초연구로서, 샌드위치 복합재 원통을 제작하여 수압시험을 수행하였다. 샌드위치 원통은 본 연구에서 제안한 2단계 성형방법으로 제작하였고, 유한요소해석 결과와 비교하였다. 제작된 샌드위치 원통은 동일한 외부압력을 지지하는 필라멘트 와인딩 원통에 비해 최소 30% 이상 무게를 줄일 수 있었다. 또한 샌드위치 원통의 좌굴압력은 2차원 셸요소(면재)와 3차원 고체요소(심재)를 사용한 선형 유한요소해석을 통해 약 3% 내외의 오차로 예측할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 샌드위치 구조물이 외부압력을 받는 원통 형태의 구조물에서 중량을 저감할 수 있는 대안이 될 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지정 수중운동체 특화연구센터와 2010년도 정부(교육과학기술부) 재원 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2010-0029689)으로 수행된 연구이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) C. T. F. Ross, "A Conceptual Design of an Underwater Vehicle," *Ocean Engineering*, Vol. 33, 2006, pp. 2087-2104.
- 2) H. L. T. Nguyen, I. Elishakoff and V. T. Nguyen, "Buckling under the External Pressure of Cylindrical Shells with Variable Thickness," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 24, 2009, pp. 4163-4168.
- 3) G. Gusic, A. Combescure, and J. F. Jullien, "The Influence of Circumferential Thickness Variations on the Buckling of Cylindrical Shells under External Pressure," *Computers & Structures*, Vol. 74, No. 4, 2000, pp. 461-477.
- 4) S. H. Hur, H. J. Son, J. H. Kweon, and J. H. Choi, "Postbuckling of Composite Cylinders under External Hydrostatic Pressure," *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1-3, 2008, pp. 114-124.
- 5) C. J. Moon, I. H. Kim, B. H. Choi, J. H. Kweon, and J. H. Choi, "Buckling of Filament Wound Composite Cylinders Subjected to Hydrostatic Pressure for Underwater Vehicle Applications," *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, 2010, pp. 2241-2251.
- 6) M. Yazdani, H. Rahimi, A. A. Khatibi, and S. Hamzeh, "An Experimental Investigation into the Buckling of GFRP Stiffened Shells under Axial Loading," *Scientific Research and Essay*, Vol. 4, No. 9, 2009, pp. 914-920.
- 7) M. Buragohain and R. Velmurugan, "Study of Filament Wound Grid-stiffened Composite Cylindrical Structures," *Composite Structures*, Vol. 93, No. 2, 2011, pp. 1031-1038.
- 8) J. R. Vinson, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Technomic Pub. Co., Lancaster, PA, 1999.
- 9) W. C. Huang and C. F. Ng, "Sound Insulation Improvement using Honeycomb Sandwich Panels," *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 1-3, 1998, pp. 163-177.
- 10) J. J. Sargianis and J. Suhr, "Noise Mitigation and Wave Number Characterization in Sandwich Structures," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129, No. 4, 2011, pp. 2416-2416.
- 11) R. Zhou and M. J. Crocker, "Sound Transmission Loss of Foam-Filled Honeycomb Sandwich Panels using Statistical Energy Analysis and Theoretical and Measured Dynamic Properties," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 6, 2010, pp. 673-686.
- 12) 우리의 해군 (2011년 7월 [2011년 3월 29일 검색]). "잠수함의 스텔스 기술" [온라인게시물], available from world wide web @ <http://www.roknavy.com/joyypark/a2-6.htm>
- 13) 이현곤, 김상현, "잠수함 국외 기술 동향", 대한조선학회지, 제44권 제3호, 2007, pp. 3-6.
- 14) G. A. Kardomateas, G. J. Simitses, L. Shen, and R. Li, "Buckling of Sandwich Wide Columns," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 37, No. 7, 2002, pp. 1239-1247.
- 15) W. Szyk, Z. Laszczyk, and K. Magnucki, "Elastic Buckling of an Axially Compressed Sandwich Cylindrical Panel with Three Edges Simply Supported and One Edge Free," *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, No. 8, 2006, pp. 910-918.
- 16) G. A. Kardomateas, "An Elasticity Solution for the Global Buckling of Sandwich Beams/Wide Panels With Orthotropic Phases," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 77, No. 2, 2010, pp. 15-21.
- 17) V. P. Veedu and L. A. Carlsson, "Finite-Element Buckling Analysis of Sandwich Columns Containing a Face/core Debond," *Composite Structures*, Vol. 69, No. 2 2005, pp. 143-148.
- 18) A. Muc and P. Zuchara, "Buckling and Failure Analysis of FRP Faced Sandwich Plates," *Composite Structures*, Vol. 48, No. 1-3, 2000, pp. 145-150.
- 19) MSC NASTRAN User's Guide.