

복합재료 압력용기 Type-4 설계 프로그램 개발

이호용* · 조처룡**

Development of Design Program for Composite Pressure Vessel Type-4

Lee Ho Yong*, Joe Chee Ryong**

Abstract

A computer program for composite pressure vessel design is developed. In-puts are : material-property(young's modulus, shear modulus, tensile strength, poisson's ratio, density), operating pressure, burst pressure, liner thickness, boss diameter, boss weight and number of helical angles. Out-puts are; thickness of each layer, weight of the vessel, dimension of the vessel, inner volume, dome-shape and helical winding angle. Also filament winding angles can be selected various kinds of utilizing virtual boss diameter.

Key Words : Filament Winding(필라멘트 와인딩), Composite Pressure Vessel(복합재료 압력용기), HDPE(High Density Polyethylene), Helical Winding Angle(Helical 와인딩 각도), weighting Factor, Virtual Boss Diameter

기호설명

P_b : Burst Pressure
 V : Contained volume
 W : Vessel weight
 D : 실린더의 지름
 E_1 : Young's modulus(E_1)
 E_2 : Young's modulus(E_2)
 G_{12} : Shear modulus

1. 서론

유리섬유, 케블라 및 탄소섬유 등 고강도, 고탄성률을 지닌 섬유와 에폭시 등의 수지를 이용하여 만드는 필라멘트 와인딩 압력용기는 재래식 압력용기에 비하여 무게가 40 ~60% 정도이면서도 같

은 용적의 기체를 담을 수 있고 강한 내식을 지니고 있어 장시간 사용에 가능하다. 또한 파괴 양상에 있어서는 폭발형태의 급격한 파괴를 지닌 금속 압력용기에 비해 필라멘트 와인딩 압력용기는 내부 기체의 누출 형태의 파괴가 이루어지기 때문에 파괴 안전성의 특징을 가지고 있다. 또한 구조 효율면으로 볼 때 효율비(Performance Factor: $P_b V / W_v$)가 대개 두 배 정도가 높게 나타난다.[1]

필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 복합재 압력용기는 일반적으로 Hoop 방향 응력에 의해 파괴된다. 그러나 Hoop의 강도를 증가시키기 위하여 두께를 키우면 Longitudinal 방향으로도 강도가 불필요하게 증가된다. 이에 본 연구는 실린더형 압력용기의 외부를 섬유강화 복합재료로 보강시키고 내부의 라이너(Liner)도 플라스틱으로 이루어진 복합재료 압력용기 Type-4 최적 설계해석 프로그램을 개발하였다.

2. 복합재료 압력용기 설계 프로그램

2.1 기존 복합재료 압력용기의 설계 프로그램
기존의 유한요소해석을 통하여 복합재료 압력용기를

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

** 창원대학교 기계설계공학과

설계하는 경우에는 우선 각 층의 두께 및 용기의 형상을 입력하여야 해석이 가능하다. 보다 편리하게 복합재료 압력용기 설계하기 위하여 KIMM에서 개발된 프로그램으로 'KIMMPV'와 'DOME'이 있다.

프로그램 'DOME'은 실린더형 압력용기 양끝의 돔 부위 프로파일을 정하는 프로그램으로서 돔 부위의 복합재료에 Bending Stress는 없이 인장응력만 걸리도록 하는 것이다.

프로그램 'KIMMPV'는 실린더 부위와 돔 부위에 걸쳐 Helical 와인딩을 하고 실린더 부위는 Hoop 와인딩을 한다는 가정 하에 Helical 층과 Hoop 층에 있는 보강섬유에 균일한 장력이 걸리도록 하여 최적화 시키려면 어느 층을 얼마나 감아야 하는가를 설계하는 프로그램이다. 'KIMMPV'에서는 돔 부위보다는中间的 실린더 부위에 중점을 두어 설계하는데, 내부 라이너의 형상을 입력하고, 라이너 및 복합재료의 물성치를 입력하면 Helical 와인딩 각도, Helical 와인딩 두께, 그리고 Hoop 와인딩 두께가 나오도록 되어있다.

그러나 실제 압력용기를 개발할 때에는 우선, 용기의 용량, 사용 압력이 정해지며, 때로는 용기의 길이 제한, 혹은 외부 최대 직경의 제한 등을 수반하게 된다. 그리고 용기를 와인딩할 때 돔 부위의 Boss 주위에 보강섬유가 몰리면서 두께가 과도하게 두꺼워 지는 경우가 있다. 이를 해결하기 위해 와인딩하는 엔지니어들이 적절하게 돔 부위의 와인딩 패턴을 조절하곤 한다.

이에, 본 연구에서는 내부용적 및 사용압력 그리고 외형 치수의 일부를 입력하면 치수들이 계산되어 나오는 설계 프로그램을 개발하였다.

2.2 개발 복합재료 압력용기의 설계 프로그램

복합재료 압력용기 설계 프로그램은 복합재료의 보강섬유(Fiber)나 수지(Matrix)의 물성치와 파괴압력을 기본적으로 입력하고 라이너(Liner)의 외경, 압력용기의 외경, 내부 용적, 실린더 부의 길이, 압력용기의 전체 길이, Helical 와인딩 각도수를 선택하여 입력하면 사용자가 요구하는 압력용기가 최적으로 설계되어지도록 개발하였다.

특히 이 프로그램에서는 기존 설계 프로그램과는 달리 압력용기의 외경 또는 라이너의 외경과 내용물의 용적을 입력하면 압력용기의 길이를 알 수 있고 압력용기의 외경 또는 라이너의 외경과 압력용기의 실린더 길이 또는 전체 길이를 입력하면 압력용기의 내용물 용적을 알 수 있다. 그리고 압력용기의 라이너 무게, 사용된 복합재료의 무게 등 제작 시 사용된 각 재료의 무게를 알 수 있고 압력용기의 전체 무게도 알 수 있다.

또한 개발 대상 압력용기의 외경에 비하여 Boss의 직경이 작으면 Helical 와인딩 시에 Boss 부위에 보강섬유가 몰리게 되어 Boss 주위의 복합재료 층 두께가 커지는 결과가 나온다. 이런 문제점을 해결하기 위해

본 연구에서 개발된 프로그램에서는 Helical 와인딩 각도를 수개로 분산시켜서 Helical 와인딩 시 섬유가 Boss 부위에 너무 몰리지 않도록 설계하였다. 이를 위해서 마치 실제보다 더 큰 직경을 가진 Boss가 있다고 가정하고 와인딩을 한다. 이렇게 가정된 Boss의 직경 중 가장 큰 것을 Virtual Boss Diameter라고 정하였다. 이 Virtual Boss Diameter와 실제의 Boss Diameter 사이를 수개로 분할하여 서로 다른 Helical Winding을 하면 Boss부에 복합재료가 몰리지 않도록 할 수 있다.

개발 설계 프로그램은 Fig. 1과 Fig 2와 같이 프로그램 실행 시 설계 변수 입력창과 결과창으로 구성되어 있다.

Fig. 1 압력용기 설계 시 설계 변수 입력창

Fig. 2 압력용기 설계 시 계산 결과창

프로그램 실행 시 사용자가 설계 변수를 입력창에 입력을 한 후 "입력완료" 버튼을 누르고 "계산" 버튼을 누르면 계산되어 지도록 하였다. 계산 결과는 입력창에서 "결과" 버튼을 누른 후 생기는 계산 결과창에서 필요한 결과를 쉽게 알 수 있도록 하였다

3. 복합재료 압력용기의 설계

펠라멘트 와인딩 공법을 이용, 라이너(HDPE) 양 끝에 금속 Boss를 삽입하고 외부를 Carbon/Epoxy 로 Full wrapping한 의료용 복합재료 압력용기를 개발 프로그램을 이용하여 설계하였다.

이 프로그램을 이용 설계할 복합재료 압력용기의 재원은 Table 1과 같다. 주어진 압력용기의 재원을 살펴보면 라이너의 외경 및 내부 용적이 주어지고 압력용기의 외경을 모르므로 Fig. 3과 같은 Flow Chart를 사용하여 설계를 행하였다.

Table 1 복합재료 압력용기의 설계 재원

Liner 외경	89 mm
내부용적	2.5 l
Liner 두께	7 mm
Boss 직경	32 mm
Boss 무게	0.5kg
상용압력	20 MPa
파괴압력	60 MPa

4. 결과 및 고찰

4.1 재료의 물성치

복합재료 압력용기 설계 프로그램 실행 시 입력 할 자료에 필요한 각 재료의 탄성계수 및 인장강도 등을 알아보기 위하여 Carbon/Epoxy 재료의 시편을 0°, 90°(ASTM D3039-95a), 45°(ASTM D3518/D3518M-94)로 적층하여 각 각도별로 6개 씩 제작하였다.

변형률 측정을 위하여 사용된 스트레인게이지는 CAS사 제품 120Ω형(AE-23-TS80N-120-EL)이며, 시험 장치는 INSTRN 5567 모델을 사용하였다. 시험 조건은 ASTM D3039-96을 적용하였다. Table 2는 시험 후 재료의 물성치를 나타낸 것이다.

Table 1 Material Property

탄성계수(E_1 , GPa)	128.057	0° 인장시편
탄성계수(E_2 , GPa)	7.162	90° 인장시편
전단계수(G_{12} , GPa)	7.548	45° 인장시편
인장강도(MPa)	1984.216	90° 인장시편
Poissons Ratio	0.295	0° 인장시편

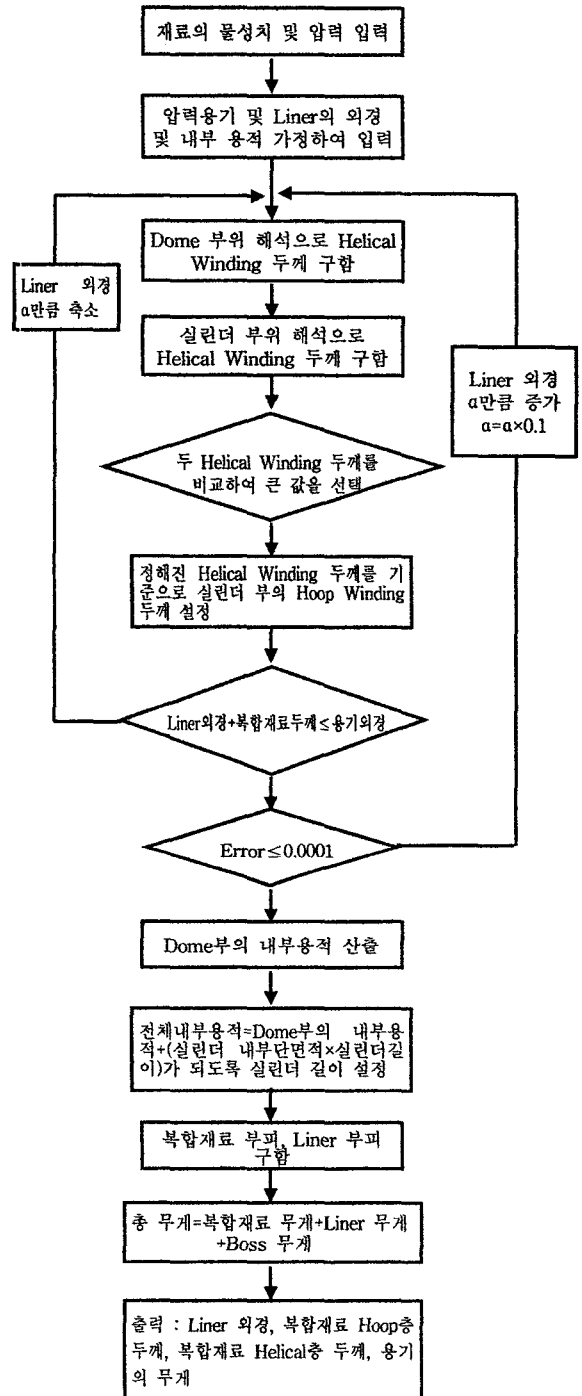


Fig. 3 Program Flow Chart

4.2 입력값과 결과

프로그램 실행 시 입력값은 복합재료 압력용기의 설계 재원과 물성치 시험에서 얻어진 값들로

이루어 졌고 Table 3과 같이 입력값들을 정하였다. Table 4는 계산 후 얻어진 결과값들을 나타낸 것이다.

Table 3 복합재료 압력용기 설계 프로그램 입력값

Burst Pressure(MPa)		60
Proof Pressure(MPa)		30
Operating Pressure(MPa)		20
Liner	Tensile Modulus(MPa)	1200
	Tensile Strength(MPa)	24.13
	Poisson's Ratio	0.4
	Density(g/cc)	0.955
	Thickness(mm)	7
Composite	Longitudinal Modulus(MPa)	128057
	Transverse Modulus(MPa)	7162
	Shear Modulus(MPa)	7548
	Tensile Strength(MPa)	1984.216
	Poisson's Ratio	0.295
	Densityg/cc	1.55
Boss	Diameter(mm)	32
	Weight(kg)	0.5
Liner Out Diameter(mm)		89
Inner Volume(ℓ)		2.5

Table 4 복합재료 압력용기 설계 프로그램 결과값

구분		Cylinder [※]	Dome ^{※※}
형상	Liner Total Length(mm)	593.5838	593.5838
	Liner Out Diameter(mm)	89	89
	Cylinder Length(mm)	537.2261	537.2261
	Vessel Out Diameter(mm)	92.06	92.84877
	Boss Diameter(mm)	32	32
무게	Liner Weight(kg)	1.126733	1.126733
	Composite Weight(kg)	0.379803	0.4947977
	Boss Weight(kg)	0.5	0.5
	Total Weight(kg)	2.506536	2.621531
Hoop Winding Thickness(mm)		1.154538	1.134
Helical Winding Thickness(mm)		0.375462	0.791385

※ Cylinder: 실린더 부위의 응력만을 고려한 해석 결과
 ※※ Dome : Dome 부위 해석이 필요하다고 판단될 때의 해석 결과

위 Table 4는 실린더 부위의 응력만을 고려했을 때와 Dome 부위의 응력도 해석한 결과를 비교한 것이다. 두 결과 중 압력용기의 총 무게는 무거워지지만 뒤의 해석 결과를 적용하여야 Dome 부위의 안전

설계가 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 압력용기 제작 시 필요한 몇 가지 재원으로만 가지고 사용자가 손쉽게 설계하도록 하였다. 즉, 파괴압력, 상용압력과 압력용기의 개략적인 치수 및 사용되어지는 재료의 물성치만 알면 손쉽게 설계되는 복합재료 압력용기 설계 프로그램을 개발하였다.

또한, 실린더부와 돔 부의 응력 및 와인딩 층의 두께를 각각 계산하여 압력용기의 안전성을 높였고 Helical 와인딩 각도 수를 정할 수 있어 불필요한 복합재료의 사용을 줄여 재료비의 감소 및 압력용기의 질량 감소도 나타내었다.

마지막으로 Helical 와인딩 각도가 여러 개일 경우 생성되는 Weighting Factor(Helical 와인딩 각도 별로 잡는 복합재료의 비율)를 이용하여 압력용기의 전체 형상을 부드럽게 설계하도록 하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 전의진, 홍창선, "섬유강화 복합재료의 개발과 응용(Ⅱ)(FRP 압력용기의 개발) - 최종보고서", BSN 105-588·C(1985)
- (2) 전의진, "FRP 압력용기의 국산화 개발(Ⅱ)-최종보고서", BSM 203-1626·C(1990)
- (3) 황병선, 김병하, 김병선, etc, "복합재료 산소 압력용기의 성형 및 내압 시험", 한국복합재료학회지, Vol. 14(3), pp.10-17(2001)
- (4) 엄문광, 김병선, 김병하, etc, "복합재 가압 탱크 개발연구-최종보고서", UCN 7200-2439.C(2001)
- (5) 윤영복, 조성원, 하성규, "복합재 CNG 압력용기 (Type Ⅱ)의 최적설계", 대한기계학회논문집, Vol. 26(1), pp.23-30(2002)
- (6) 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱, "최신복합재료", 교학사(1995)
- (7) 황태경, 홍창선, 김철곤, "복합재 압력용기의 확률 섬유 강도", 한국복합재료학회지, Vol.16(6), pp.1-9(2003)