복합재료 압력용기(Type 4)의 구조건전성 검토

Structural Integrity Evaluation of Composite Pressure Vessel(Type 4)

*#조승운[1], 김진태[1], 정배균[1]
*#S. U. Jo(Seungun.Jo@lignex1.com)[1], J. T. Kim[1] , B. G. Jung[1]
[1]LIG넥스원

Key words : Composite Pressure Vessel, Filament Winding, Finite Element Method

1. 서론

복합재료의 제조공정 중 필라멘트 와인딩 성형기법은 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 방법으로 이러한 성형기법으로 제작된 복합재료 압력용기는 기존의 금속재 압력용기에 비하여 무게가 가벼우면서 구조효율이 높다[1].

압력용기는 사용 재료와 복합재료 강화방법에 따라 네 가지로 구분하는데, Type 4는 내부 라이너를 비금속재료로 제작하여 용기주위를 복합재료 섬유로 보강한 용기이다. 복합재료가 가지는 특수성으로 인해 근래에는 Type 4 압력용기의 활용이 증가하고 있다. 수지를 함침시킨 탄소섬유나 유리섬유를 원주방향과 길이방향으로 감아서 만든 용기에서 라이너는 하중을 거의 부담하지 않고, 내부 물질이 새지 않도록 하는 역할만을 한다.

필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 복합재 압력용기는 일반적으로 원주(Hoop)방향 응력이 길이(Longitudinal)방향 응력에 비해 크기 때문에 대부분 원주방향 응력에 의해 파괴된다. 복합재료 압력용기의 안전성을 고려하여 두께를 키우면 길이방향으로의 불필요한 강도가 증가하게 된다[2].

본 연구에서는 비금속 내부 라이너와 필라멘트 와인딩 두께선정을 고려한 복합재료 압력용기 Type 4의 형상 개념설계를 통해 실 제작에 앞서 구조건전성을 평가 검토해 보고자 한다.

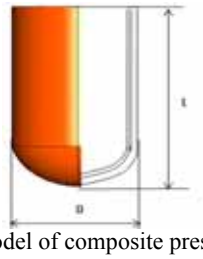


Fig. 1 Model of composite pressure vessel

2. 본론

2.1 복합재료 압력용기의 제원 및 특성

최대압력 10MPa의 내수압을 받는 Type 4 복합재료 압력용기는 플라스틱 소재의 이음매 없는 내부 라이너에 T700급 탄소섬유/에폭시(Epoxy) 수지를 헬리컬 및 와인딩 방향으로 번갈아 감아 제작된 2층 구조물이다. Fig. 1은 압력용기 형상을 나타낸 것으로, 실린더 부에서 내부 라이너 두께는 5mm로 임의 지정하고, 외부 복합재 층의 두께는 수식으로 결정하며 용기의 길이 L과 외경 D는 각각 1800mm, 1000mm이다. 돔형상의 경판 두께는 온반구형의 경우를 제외하고는 실린더 부 두께 이상이어야 한다. 본 연구에서는 두께 변수를 배제한 온반구형의 경판으로 압력용기 내의 모든 두께는 일정하다.

2.2. 재료의 물성치

내부라이너와 T700급 탄소섬유/에폭시 수지의 2층으로 이루어진 복합재료 압력용기 Type 4의 재료 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of pressure vessel

Material Property				Unit
Plastic Liner	Elastic modulus	E	1200	MPa
	Shear modulus	Es	24	MPa
	Poisson's ratio	ν	0.4	-
T700/ Epoxy	Longitudinal modulus	E_1	135.0	GPa
	Transverse modulus	E_2	7.5	GPa
	Shear modulus	G_{12}	3.5	MPa
	Poisson's ratio	ν	0.3	-
	Ultimate strength	σ_u	260	MPa
	Density	ρ	1500	Kg/m^3

2.3 복합재 두께 계산

두께가 반경에 비해 작은 압력용기가 내압을 받을 경우, 단위길이당 원통형 압력용기의 길이방향응력(Longitudinal Stress)σ_1과 원주방향응력(Hoop Stress)σ_2은,

$$\sigma_1 = pr/2t,\ \ \sigma_2 = pr/t \qquad (1)$$

여기서 p는 내압이고 t는 용기의 두께이다. 복합재료 압력용기의 모든 내압은 탄소섬유가 담당한다는 가정 하에 이방성 탄소섬유 수지층의 두께를 ASME 원주방향 두께 식(2)와 길이방향 두께 식(3)을 통해 산정할 수 있다[3-4].

$$t_{hoop} = \frac{pr}{SE - 0.6p} \qquad (2)$$

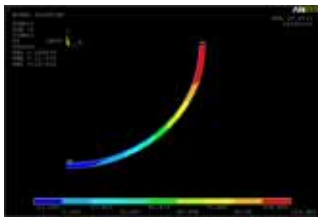
$$t_{longitudinal} = \frac{pr}{SE + 0.4p} \qquad (3)$$

여기서 p는 압력을 의미하고, r은 실린더의 반경, S는 복합재료 섬유방향 강도, E는 용접 효율계수를 의미한다.

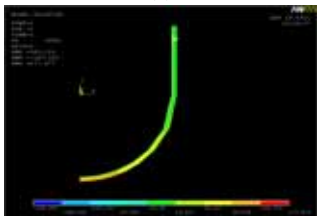
위 식에서 압력 p는 최대설계압력인 10MPa로 설정하였다. S는 탄소섬유 최대강도로써 260MPa로 가정하였다. 용접 효율 계수 E는 1.0으로 이상적이라 가정하였다. t_{hoop}와 $t_{longitudinal}$의 값을 비교하여 큰 수치인 20mm를 외부 복합재료 층의 두께로 선정하였고, 압력용기의 총 두께는 25mm이다.

2.4 압력용기 유한요소 해석

복합재료 압력용기의 해석을 위해 ANSYS 12.1을 이용하여 유한요소 해석을 실시하였다. 모델링에 사용된 요소는 라이너부분은 등방성, 탄소섬유 부분은 이방성 강성을 가지는 2차원 8 Node Plane 82 축대칭요소를 사용하였다. 용기 내부에 10MPa의 압력하중이 작용할 때 길이방향과 원주방향 응력 거동은 Fig. 2와 같이 나타난다. ASME 두께 산정식을 통해 결정되어진 두께를 설계요소로 적용하여 등방성과 이방성 강성을 가지는 2층 압력용기 구조물의 구조건전성을 평가할 수 있었다. 탄소섬유 최대강도가 260MPa로 산정되었을 때 길이방향과 원주방향응력은 각각 이론값으로 100MPa, 200MPa이며, 유한요소 해석결과에서는 118MPa, 177MPa의 이론값과 유사한 결과 값이 도출되었다. ASME 두께산정식이 이방성 재료의 해석에서도 안전율 1.3이상으로 유효함을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 2 Stresses in a composite pressure vessel at (a) the longitudinal stress and (b) the hoop stress

3. 결론

플라스틱 라이너와 복합재료 와인딩이 되어있는 압력용기 Type 4에서 ASME 두께 산정식을 통한 설계요소 반영으로 등방성과 이방성을 가진 구조물의 안전성을 평가할 수 있다. 복합재료 압력용기의 실 제작 전 몇 가지 설계변수를 통해 설계단계의 두께 선정과 구조적 거동 고찰을 통해 등방성 재료뿐 아니라, 이방성 재료에서도 ASME 두께 산정식이 유효함을 알 수 있었다.

본 연구에 대한 설계 신뢰성과 효율성을 높이기 위해서는 향후 실제 수압실험과 정확한 물성치 측정자료가 뒷받침 되어야할 것으로 사려된다.

참고문헌

1. 전의진, 홍창선, "섬유강화 복합재료의 개발과 응용(II)(FRP 압력용기의 개발)-최종보고서," BSN 105-588·C, 1985
2. 이호용, 조치룡, "복합재료 압력용기 Type-4 설계프로그램 개발,"한국 복합재료학회지, **5**, 1-6, 2004.
3. 김영훈, 김중엽, 이재욱, 송재영, "20피트 콘테이너형 압축천연가스탱크의 개념설계 및 구조효율성 평가," 대한조선학회논문집, **42**, 142-150, 2005.
4. Miller, Urey R. and P. Pastor, Thomas, "Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII, Division 1," ASME, 1992.