

70MPa 수소가스차량용 복합소재 압력용기의 응력특성에 관한 안전성 연구

김청균*, 김도현⁺

(논문접수일 2011. 08. 30, 수정일 2011. 11. 03, 심사완료일 2011. 12. 15)

A Safety Study on the Stress Characteristics of a Composite Pressure Cylinder for a Use of 70MPa Hydrogen Gas Vehicle

Chung Kyun Kim*, Do Hyun Kim⁺

Abstract

This paper presents a stress safety of a composite pressure cylinder for a hydrogen gas vehicle. The composite pressure cylinder in which is composed of an aluminum liner and carbon fiber wound layers contains 104 liter hydrogen gas, and is compressed by a filling pressure of 70 MPa. The FEM computed results are analyzed based on the US DOT-CFFC basic requirement for a hydrogen gas cylinder and KS B ISO specification. The FEM results indicate that the stress, 255.2 MPa of an aluminum liner is sufficiently low compared with that of 272 MPa, which is 95% level of a yield stress for aluminum. Also, the composite layers in which are wound on the surface of an aluminum cylinder are safe because the stress ratios from 3.46 to 3.57 in hoop and helical directions are above 2.4 for a minimum safety level. The proposed composite pressure cylinder wound by carbon fibers is useful for 70 MPa hydrogen gas vehicles.

Key Words : Hydrogen gas(수소가스), Composite(복합재), Pressure cylinder(압력용기), Carbon fiber(탄소섬유), Aluminum liner(알루미늄 라이너), Stress(응력)

1. 서론

수소가스(hydrogen gas)는 CO나 CO₂를 전혀 발생하지 않는 친환경의 무공해 연료로 기존의 탄화수소를 대체할 것으로 예상된다⁽¹⁾. 특히 대기오염의 주범으로 자동차가 지목되면서 자동차 연료원으로 사용하는 휘발유나 경유는 물론 액화석유가스(LPG), 압축천연가스(CNG) 등을 대체할 수 있는 차세대 에너지원으로 큰 관심의 대상이 되었다.

다만 수소연료는 가스상으로 저장하여 사용하기 때문에 기존의 연료 대비 경쟁력을 갖기 위해서는 안전성 확보는 물론이고, 수소가스를 가능한 많이 압축하여 저장용량을 높여 주행거리를 연장하는 것이 중요하다. 그렇지 않으면 아무리 무공해 연료라 해도 기존의 탄화수소 연료에 대비 경제성과 안전성에서 늘 문제가 되기 때문에 사업화의 어려움이 많다.

따라서 많은 양의 수소가스를 안전하게 저장하기 위해서는 초고압으로 충전할 수 있도록 알루미늄 라이너로 제작한 원통

* 홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터 (ckkim_hongik@naver.com)

주소: 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1

+ 홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터

형상의 고압용기의 외벽면에 탄소섬유 복합소재로 와인딩⁽²⁾하여 안전성을 확보하고, 탄소섬유와 같은 경량소재 사용으로 인한 연비향상, 최적화설계를 통한 경량화로 경제성을 확보할 수 있는 기술개발이 필요하다.

그동안은 CNG를 20MPa의 높은 압력으로 충전하여 보다 많은 가스연료를 저장할 수 있는 복합소재 압력용기의 개발^(3,4)로 경제적인 주행거리라 할 수 있는 500km를 달성함으로써 사업화가 추진되었다. 복합소재 연료용기는 강재(steel)로 제작한 원통형상의 평행부에 인장강도가 대단히 우수한 탄소섬유를 와인딩하여 안전성을 확보하였다. 그러나 2010년에 운행중이던 CNG 버스에서 연료용기가 폭발하는 안전사고가 발생하면서 충전압력을 10%나 낮춰 18MPa⁽⁵⁾로 충전하기 때문에 안전성은 더 향상되었지만 주행거리가 줄어들어 경제성이 떨어지는 문제점이 제기되었다.

무탄소 연료원을 자동차용으로 사용한다는 측면에서 관심을 갖게 된 수소가스는 충전압력이 70MPa로 대단히 높기 때문에 기존에 사용하던 20MPa의 충전압력을 갖는 CNG용 복합소재 압력용기로는 안전성을 보장할 수 없다. 따라서 70MPa의 충전압력에 안전한 복합소재 수소가스용 압력용기를 개발하여 안전성과 경제성을 함께 확보할 수 있는 연구가 필요하였다.

수소가스 연료를 안전하게 저장해야 하는 압력용기는 내부용기로 고강도의 알루미늄 라이너를 압출하여 사용하고, 이 용기의 안전성을 확보하기 위해서는 자진공정(autofrettage process)을 처리하여 안전성을 높이고, 또한 외벽면에는 후프방향과 헤리컬방향으로 탄소섬유를 적층이 형성되도록 와인딩하여 수소가스 충전에 따른 안전성을 확보하는 기술이 개발되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 수소가스 연료의 저장용량이 104L이고, 충전압력이 70MPa인 복합소재 고압용기에 대한 응력장도 안전성을 FEM으로 해석하고, 그 결과를 미국의 DOT-CFFC⁽⁶⁾와 한국의 KS 안전기준⁽⁷⁾으로 평가하여 그 유용성을 고찰하고자 한다.

2. FEM 해석 및 사용소재

2.1 FEM 해석모델

70MPa의 초고압용 수소가스 압력용기에 대한 안전성 해석을 위해 사용한 FEM 모델은 축을 기준으로 대칭형상을 가진 MARC⁽⁸⁾의 4절점 축대칭 솔리드 요소를 사용하였다. 가스용기에서 전면과 후면의 돔부를 제외하고, 원통형 용기의 안전성에 보다 큰 영향을 미치는 부분은 몸통의 평행부이므로 이 부분에 대한 안전성을 해석하고자 한다.

Fig. 1에서 보여준 것처럼 가스연료 압력용기의 몸통 평행부의 중심부분은 최소두께로 설계하고, 최내측으로부터 수소가스와 직접 접촉하는 알루미늄 라이너, 이 라이너의 외측벽을

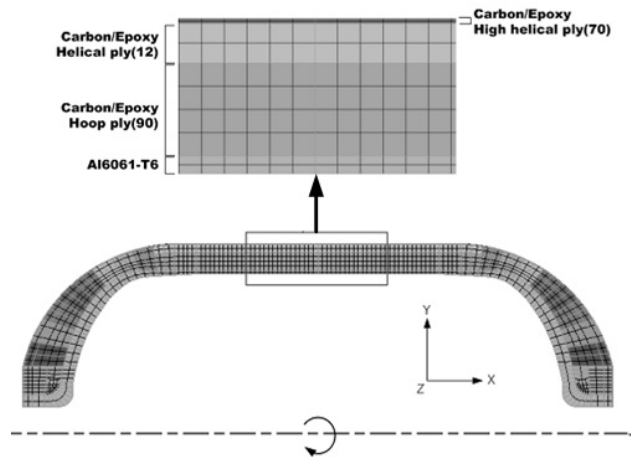


Fig. 1 FEM analysis model for 70MPa hydrogen gas cylinder and 104 liter storage capacity

감싸도록 와인딩한 3개의 복합소재 적층으로 구성되어 있다. 여기서 형성된 3개의 적층방향은 탄소섬유를 후프방향, 헤리컬방향, 하이헤리컬방향으로 구성된다.

또한, FEM 안전성 해석에서 수소가스에 의해 형성된 70MPa의 내압은 수소연료 압력용기의 벽면에 대하여 수직방향으로 균일하게 작용한다고 가정한다.

2.2 해석조건

FEM 해석모델에서는 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 복합소재 원통부의 알루미늄 라이너 두께, 탄소섬유로 와인딩한 복합소재 적층에서 후프방향, 헤리컬방향과 하이헤리컬방향으로 각각 나타낸 적층두께를 보여주고 있다.

수소연료 저장용기의 안전성을 획기적으로 높이기 위해서는 알루미늄 라이너에 대한 소성변형가공인 자진공정을 실시하여 안전성을 확보해야 한다. 알루미늄 라이너에 대한 자진공정을 처리한 후에 복합소재 압력용기를 안전하게 사용하기 위해서는 충전압력(filling pressure) 70MPa, 시험압력(test pressure) 105MPa, 최소파열압력(minimum required burst pressure) 210MPa 등을 충분히 만족해야 한다.

2.3 사용소재의 물성치

수소가스용 복합소재 고압용기에서 수소연료의 외부누출을 차단할 수 있도록 사용한 금속소재는 고강도 알루미늄 6061-T3이다. 본 연구에서 사용한 고강도 알루미늄 소재에 대한 물리적 특성은 Table 1에서 제공한다.

또한, 알루미늄 원통용기의 외벽면을 감싸면서 압력용기의 안전성을 확보하기 위해 사용한 복합소재는 일본 Toray사에서 생산한 T800-24K 탄소섬유로 70MPa 이상의 초고압에 견딜 수 있다. 본 연구에서 사용한 탄소섬유 소재에 대한 물리적 특

Table 1 Material properties of aluminum liner, 6061-T6

Properties	Values
Elastic modulus, GPa	69
Poisson's ratio	0.33
Plastic modulus, MPa	520
Yield strength(Min), MPa	286
Ultimate strength(Min), MPa	310

Table 2 Unidirectional material properties of carbon fiber

Properties	Symbol	Values
Elastic modulus in 1 direction, GPa	E1	189.4
Elastic modulus in 2 direction, GPa	E2	3.82
Poisson's ratio 1-2	V12	0.38
Poisson's ratio 2-3	V23	0.008
Shear modulus 1-2, GPa	G12	1.262
Shear Modulus 2-3, GPa	G23	1.262
Fiber volume fraction	vf	65%

성은 Table 2에서 제공한다.

수소연료 압력용기의 안전성을 담당하는 탄소섬유 복합소재는 용기몸통의 후프방향에 대한 안전성을 확보하기 위해 직각 방향으로 와인딩한다. 또한, 원통형 용기의 좌우측에 형성된 돔부에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 일정한 경사도를 갖도록 헤리컬방향과 하이헤리컬방향으로 엇갈리게 와인딩하는 것이 좋다.

3. 복합소재 연료용기의 안전성 평가기준

자동차용 복합소재 고압가스 압력용기에 충전하는 내압을 0~150MPa까지 서서히 상승시켰을 때 알루미늄 라이너 및 탄소섬유 복합소재에 걸리는 von Mises 응력을 FEM으로 해석하여 안전성을 검토하였다. 이때 예측된 von Mises 응력 데이터를 이용하여 복합소재 연료용기에 가장 안전하다고 예측되는 압력을 자진공정에 필요한 최적압력으로 선정하는 프로세스가 중요하다.

수소가스를 저장하는 복합소재 연료압력용기의 안전성은 국제적으로 공인된 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 기준에 의거 알루미늄 라이너 소재와 탄소섬유 복합소재에 대해 평가할 수 있다. 즉,

- (1) 복합소재 압력용기에 자진공정을 거친 후 0MPa이 되었을 때, 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 95%(272MPa)를 초과해서는 안 된다.
- (2) 복합소재 압력용기에 자진공정을 거친 후 충전압력을 작용할 때, 알루미늄 라이너의 벽면에 걸리는 인장응력은

알루미늄 소재의 항복응력 대비 60%(172MPa)를 초과해서는 안 된다.

- (3) 복합소재 연료용기에 공급한 충전압력에서 최대섬유응력은 최소파열압력에서의 최대섬유응력 대비 30%를 초과해서는 안 된다.
- (4) 탄소섬유로 제조한 복합소재 연료용기에 공급한 시험압력에서 예측된 응력비는 2.4 이상을 유지해야 한다.

4. 안전성 해석결과 및 고찰

Fig. 2에서 보여준 104L의 저장용량을 갖는 수소가스 저장용 복합소재 연료용기에 대해 응력강도 안전성을 해석한 결과는 Fig. 3에서 제시하고 있다. Fig. 3에서 보여준 응력분포도 해석결과는 복합소재 수소연료 압력용기에서 내부용기를 구성하는 알루미늄 라이너에 자진공정 압력을 적용하였을 때의 응력강도 안전성, 자진공정 압력을 제거한 후 수소가스 내압이 0MPa이 되었을 때의 응력강도 안전성, 충전압력을 작용하였을 때의 응력강도 안전성, 시험압력을 작용하였을 때의 응력강도 안전성을 각각 나타내고 있다.

자진공정을 거친 수소연료 복합소재 압력용기에 작용하는 가스압력이 0MPa에 도달하였을 때 알루미늄 라이너에 걸리는 응력은 Fig. 3(a)에서 보여주는 것처럼 255.2MPa로 예측되었다. 이 결과는 앞에서 언급한 안전성 검증기준의 첫 번째 조건을 만족하는 것이다. 즉, 알루미늄 라이너 소재에 대한 안전성 검증기준을 제시한 미국의 DOT-CFFC에 의거 자진공정을 실시한 후 0MPa이 되었을 때 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 응력은 항복응력의 95%(272MPa)를 초과해서는 안 된다는 것이다.

또한, 알루미늄 라이너에 자진공정을 거친 후 충전압력을 작용할 때 알루미늄 라이너의 벽면에 걸리는 응력강도 해석결과는 Fig. 3(b)에서 보여주고 있다. 가스압력용기의 충전압력이 70MPa에 도달하였을 때 알루미늄 라이너에 걸리는 응력은 135.5MPa로 앞에서 언급한 안전성 검증기준의 두 번째인 알루미늄 소재의 항복응력 대비 60%(172MPa)를 초과해서는 안 된다는 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

또한, 복합소재 압력용기의 외벽면을 따라서 와인딩한 탄소

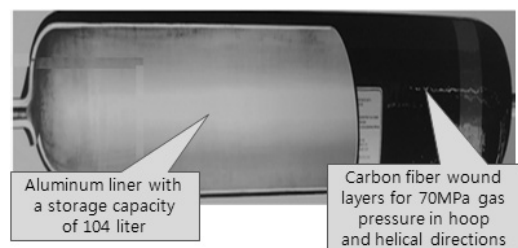
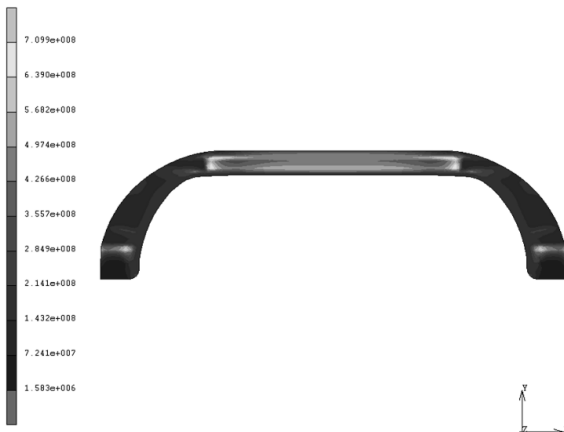


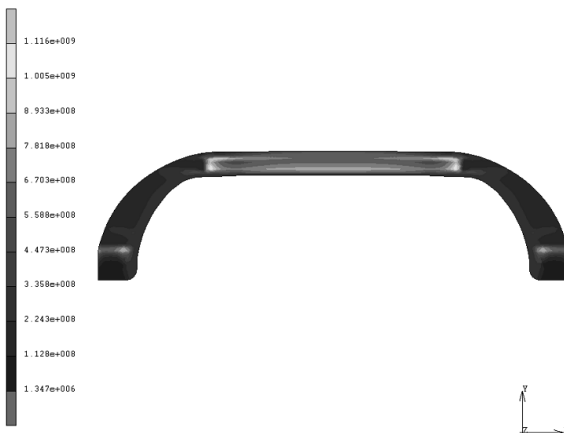
Fig. 2 Carbon fiber composite fuel cylinder for a hydrogen gas



(a) For zero pressure



(b) For filling pressure



(c) For test pressure

Fig. 3 Stress distribution for a given internal pressure

섬유 복합소재에 대한 응력강도 안전성 해석결과를 제시한 Fig. 3(b)에서는 압력용기의 충전압력이 70MPa에 도달하였을 때 복합소재에 대한 세 번째의 안전성 검증기준을 만족하는 데

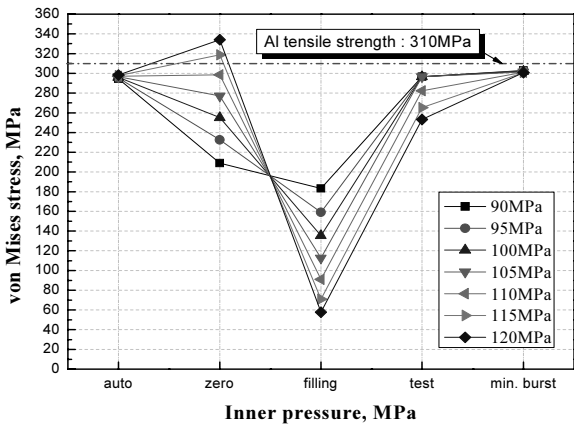
이터를 제공한다. 즉, 최대섬유응력은 최소과열압력에서 최대 섬유응력의 30%를 초과하면 안 된다는 안전조건으로 탄소섬유 복합소재에 작용하는 후프방향에서는 28%, 12° 경사지게 와인딩한 헤리컬방향에서는 28.9%, 70° 경사지게 와인딩한 하이헤리컬방향에서는 28.82%로 각각 예측되었고, 이 결과는 복합소재 연료탱크의 모든 방향에 대한 안전성 검증기준을 모두 만족하는 것이다.

또한, Fig. 3(c)에서는 탄소섬유 복합소재에 공급한 시험압력이 105MPa일 때 탄소섬유 복합소재에 대한 응력강도 해석결과로 네 번째의 안전성 검증기준을 만족하는 데이터를 제공한다. 즉, 탄소섬유로 제조한 복합소재 연료용기에 공급한 시험압력에서 예측된 응력비는 2.4 이상을 유지해야 한다는 안전조건으로 탄소섬유 복합소재에 작용하는 후프방향에서의 응력비는 3.11, 12° 경사지게 와인딩한 헤리컬방향에서의 응력비는 3.04, 70° 경사지게 와인딩한 하이헤리컬방향에서의 응력비는 3.05로 각각 예측되었고, 이 결과는 복합소재 연료탱크의 모든 방향에 대한 안전성 검증기준을 모두 만족하는 것이다.

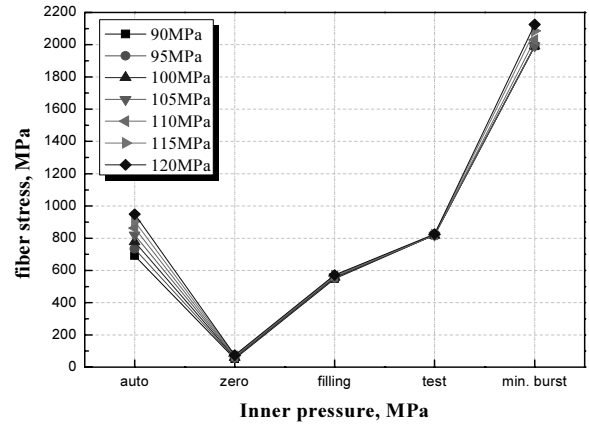
Fig. 4는 탄소섬유로 제작한 가스연료 압력용기의 응력강도 안전성을 FEM으로 해석한 결과이다. 즉, 복합소재 압력용기에서 가장 중요하게 다루는 원통형의 몸통 평행부에서 예측한 응력강도 안전성 해석결과를 제시한 것이다. Fig. 4에서 범례로 표현한 것은 가스연료용 압력용기의 안전성을 검증하기 위해 사용한 가스압력 데이터로 Fig. 1에서 제시한 가스용기에 대한 해석모델의 응력강도 안전성을 검증하는 해석결과로 사용할 수 있다. 충전압력(filling pressure) 70MPa, 시험압력(test pressure) 105MPa, 최소과열압력(minimum required burst pressure) 210MPa 등을 충분히 만족해야 한다.

Fig. 4(a)는 복합소재 압력용기에서 내부용기로 사용하는 알루미늄 라이너에 공급된 수소가스 압력을 90~120MPa까지 공급하였을 때 알루미늄 라이너의 원통형 몸체 평행부에 걸리는 von Mises 응력을 해석한 결과이다. 이때 가스압력을 115MPa 이상으로 높여서 공급하면 자진공정 처리 후의 압력인 0MPa 조건에서는 알루미늄 소재의 인장강도 310MPa를 넘어서기 때문에 위험하므로 제외하는 것이 바람직하고, 충전압력 구간에서는 복합소재 가스연료 압력용기에 공급한 모든 내압에 대하여 안전하다는 것은 복합소재 압력용기의 자진공정 안정화 작업이 대단히 중요함을 나타내는 결과이다.

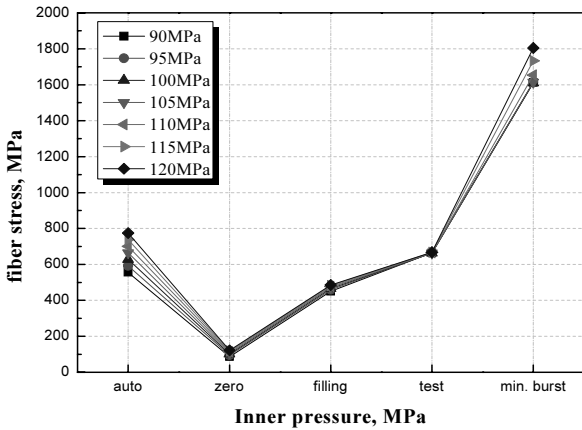
Fig. 4(b)~4(d)는 복합소재 압력용기에서 알루미늄 라이너의 외벽면을 따라서 후프방향, 헤리컬방향, 하이헤리컬방향으로 각각 와인딩한 탄소섬유 복합소재의 응력강도를 제시한 데이터이다. Fig. 4(b)는 후프방향으로 와인딩한 경우의 응력강도로도 일정한 각도로 경사지게 와인딩한 Fig. 4(c)나 4(d)에 비해 높은 응력을 나타내고 있다. 반면에 경사도가 70°로 가장 큰 경사도를 갖도록 와인딩한 Fig. 4(d)의 경우는 상대적으로



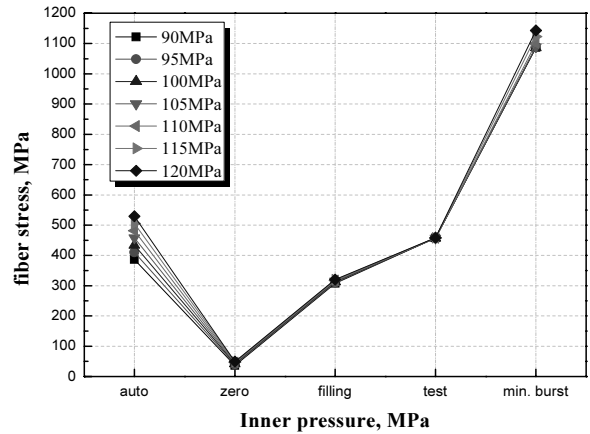
(a) von Mises stress for an aluminum liner



(b) von Mises stress for hoop layer of a composite



(c) von Mises stress for helical layer of a composite



(d) von Mises stress for high helical layer of a composite

Fig. 4 Stress safety at the cylindrical surface of a carbon fiber composite cylinder for a hydrogen gas

낮은 강도응력 해석결과를 제시하고 있다.

이것은 복합소재 압력용기에서 후프방향으로 와인딩한 탄소섬유는 가스내압에 대해 큰 하중을 담당하지만, 탄소섬유를 와인딩한 각도가 증가할수록 가스내압을 담당하는 능력은 떨어진다. 그렇지만, 복합소재 압력용기의 안전성을 충분히 확보하기 위해서는 후프방향의 와인딩에 의존하는 몸통 평행부와 헤리컬방향의 와인딩에 의존하는 돔부의 안전을 함께 고려해야 한다. 결국 하중담당 능력은 후프방향으로 와인딩한 복합소재가 높지만, 상대적으로 낮은 헤리컬방향의 와인딩 복합소재도 봉강소재 압력용기의 안전성에 중요한 역할을 한다는 것이다.

Fig. 4의 해석결과는 Fig. 1에서 제시한 알루미늄 라이너와 탄소섬유를 사용한 복합소재에 관하여 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS의 평가기준을 모두 만족한다. 즉, 수소연료 저장용기의 복합소재에 대한 검증기준은 사용압력에서 작용하는 최대섬유응력은 최소파열압력에서 최대섬유응력의 30%를 초과

하면 안 된다는 조건으로, 복합소재의 후프방향에서는 28%, 12°의 경사도를 갖는 헤리컬방향에서는 28.9%, 70°의 경사도를 갖는 하이헤리컬방향에서는 28.82%로 모든 방향에 대해 충분히 만족하고 있다.

따라서 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 안전기준으로 본 연구에서 제시한 복합소재 연료용기 해석모델의 안전성을 평가할 때 안전하다고 할 수 있다. FEM 해석결과처럼 탄소섬유 복합소재에 작용하는 응력이 모두 탄소섬유의 인장강도 이내에서 있을 때 평가결과는 타당성을 갖는다.

5. 결론

본 연구에서 제시한 104L의 저장용량과 70MPa의 충전압력을 갖는 탄소섬유로 와인딩한 알루미늄 복합용기 해석모델에 대한 응력강도 안전성을 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 안전기준으로 평가할 때 우수한 것으로 나타났다.

- (1) FEM 해석결과에 의하면, 알루미늄 라이너의 안전성은 복합소재 압력용기에 작용하는 가스압력이 0MPa에 도달하였을 때 알루미늄 라이너에 걸리는 응력은 255.2MPa로 미국의 DOT-CFFC에 의거 자진공정을 실시한 후 0MPa이 되었을 때 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 응력은 항복응력의 95%(272MPa)를 초과해서는 안 된다는 조건을 만족한다.
- (2) 한국의 KS B ISO 11119-2에서 규정한 복합소재 압력용기에 대한 응력강도 안전기준으로 제시한 응력비 2.4 이상의 조건으로 평가하면, 복합소재에 작용하는 후프방향의 응력비는 3.11, 12° 경사진 헬리컬방향의 응력비는 3.04, 70° 경사진 헬리컬방향의 응력비는 3.05로 모든 방향에서 만족하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) Wellnitz, J., 2008, "Hydrogen Storage Systems for Automotive Applications," *Int. J. Sustainable Design*, Vol. 1, No. 1, pp. 93~109.
- (2) Rosato, D. V., and Grove, C. S., 1995, *Filament Winding: its Development Manufacture, Application, and Design*, John Wiley & Sons, New York.
- (3) Yoon, Y. B., Cho, S. W., and Ha, S. K., 2002, "Optimal Design of Filament Wound Composite CNG Pressure Vessel," *J. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 1, pp. 23~30.
- (4) Kim, C., Kim, E. S., Kim, J. H., Choi, J. C., and Park, Y. S., 2002, "A Study on Filament Winding Process of a CNG Composite Pressure Vessel," *Proceeding of Spring KSPE Annual Conference*, pp. 656~660.
- (5) Lee, K. I., 2010, "On the Pressure Vessel Defect of Haengdangdong's CNG Bus Gas Explosion," *Korea Gas Newspaper*.
- (6) US DOT-CFFC, 2007, *Basic Requirement*.
- (7) KS B ISO 11119-2, 2008, *Gas Cylinders of Composite Construction*.
- (8) MARC, 1999, *MARC User's Manual Ver. 7.3*, MARC Analysis Research Corp., California.