



## 35MPa 수소가스 자동차용 복합소재 압력용기의 응력특성에 관한 강도안전성 연구

†김청균 · 김도현

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터  
(2011년 12월 7일 접수, 12년 4월 5일 수정, 12년 4월 19일 채택)

## Strength Safety Study on the Stress Characteristics of a Composite Pressure Cylinder for 35MPa Hydrogen Gas Vehicle

†Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology  
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received December 7, 2011; Revised April 5, 2012; Accepted April 19, 2012)

### 요약

본 논문에서는 알루미늄 라이너와 탄소섬유/에폭시 및 유리섬유/에폭시로 구성된 복합소재 압력용기에 대한 응력 안전성 연구결과를 제시하고 있다. 9.2L의 저장용량을 갖는 수소가스 자동차용 복합소재 압력용기에는 35MPa의 충전압력으로 수소가스를 압축한 경우이다. FEM 해석결과는 미국의 수소가스 압력용기에 대한 DOT-CFFC와 한국의 KS B ISO 인증기준에 기반하여 평가하였다. FEM 해석결과에서 알루미늄 라이너에 걸리는 응력 247MPa는 알루미늄 항복강도(272MPa)의 95%에 해당하는 안전기준에 비해 충분히 낮다는 결과이다. 그리고 알루미늄의 표면에 감은 탄소섬유 복합소재는 후프방향과 헤리컬방향에서 발생한 최대탄소섬유응력이 29.43%와 28.87% 수준으로 각각 나타났기 때문에 최소파열압력에서의 최대섬유응력 대비 30% 이하를 유지해야 한다는 안전기준에 부합하므로 안전하다. 또한, 탄소섬유 복합소재에 대한 응력비는 후프방향과 헤리컬방향에 대해 3.4와 3.46으로 각각 예측되었기 때문에 최소안전기준인 2.4보다 높아 안전한 것으로 나타났다.

**Abstract** - This paper presents a stress safety of a composite pressure cylinder in which is composed of an aluminum liner and composite layers with carbon fiber/epoxy and glass fiber/epoxy resins. The composite pressure cylinder for a hydrogen gas vehicle contains 9.2 liter hydrogen gas, and hydrogen gases are compressed by a filling pressure of 35MPa. 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, 247MPa of an aluminum liner is sufficiently low compared with that of 272MPa, which is 95% level of a yield stress for aluminum. And, the carbon fiber composite layers in which are wound on the surface of an aluminum cylinder are safe because the maximum carbon fiber stresses from 29.43% to 28.87% in hoop and helical directions are below 30% for a given minimum required burst pressure level, respectively. The carbon fiber composite layers are also safe because the stress ratios from 3.40 to 3.46 in hoop and helical directions are above 2.4 for a minimum safety level, respectively.

**Key words** : hydrogen gas, composite, pressure cylinder, carbon fiber, glass fiber, aluminum liner

†주저자:ckkim\_hongik@nate.com

## I. 서론

탄소가스 배출의 주범으로 몰리고 있는 자동차용 엔진에서 탄화물질을 배제할 수 있는 유일한 대안은 수소가스를 연료로 사용한 수소연료자동차, 또는 배터리를 사용한 전기자동차를 도입하는 것이다.

전기자동차는 전기에너지를 공급하기 위해 새로운 발전소 건설은 대도시의 대기오염을 완화시킬 수는 있지만, 지구촌의 CO<sub>2</sub> 발생량을 줄이기는 어렵다. 수소는 물이나 다른 탄화수소 연료로부터 분리하면 되기 때문에 자원이 가장 풍부하다는 장점을 갖고 있다. 그러나 수소를 자동차 연료로 사용하기 위해서는 저장과 운반, 사용에 따른 안전성을 확보해야 한다.

수소연료는 안정된 액체로 보관할 수는 없고, 불안정한 가스로 저장하여 사용하기 때문에 휘발유나 경유에 비해 안전성이 크게 떨어진다. 따라서 수소연료는 무엇보다 안전성 확보가 중요하고, 더욱이 안정된 주행거리를 확보하기 위해 수소가스를 가능한 많이 압축하여 저장하는 것이 필수기술이다. 그렇지 않으면 수소가스가 완벽한 무공해 연료라 해도 기존의 연료에 대비 경제성과 안전성 측면에서 소비자의 외면을 받는다면 수소연료를 자동차에 사용하기는 어렵다.

수소가스를 안전하게 대용량으로 저장하기 위해서는 보통 알루미늄 라이너로 제작한 원통형상의 고압용기 외벽면에 탄소섬유 복합소재로 감아서 안전성을 확보하고[1], 최외곽면에는 외부의 스크래치로부터 보호할 수 있도록 유리섬유 복합소재로 감는다.

그동안 CNG를 20MPa의 높은 압력으로 충전하여 보다 많은 연료를 저장할 수 있는 복합소재 연료용기의 개발[2]로 경제성이 높은 500km의 주행거리를 확보하여 버스나 승용차 등에 적용한지 오래다.

수소가스는 충전압력을 35MPa로 높여 보다 많은 수소가스를 연료용기에 저장함으로써 주행거리를 연장할 수 있다. 특히, 압력용기의 저장용량을 9.2L로 낮게 설계하여 안전성을 높이고, 이들 압력용기를 병렬로 연결하여 사용한다면 한 개로 구성되는 대용량의 복합소재 압력용기를 대체하는 장점이 있다.

본 연구에서는 수소가스 저장용량이 9.2L이고, 충전압력이 35MPa인 복합소재 압력용기에 대한 안전성을 FEM으로 해석하고, 그 결과를 미국의 DOT-CFFC[3]와 한국의 KS 안전기준[4]으로 평가하여 그 유용성을 고찰하고자 한다.

## II. 유한요소 해석모델 및 사용소재

### 2.1. FEM 해석모델

본 연구에서 사용한 복합소재 압력용기의 저장용량은 9.2L이고, 충전압력은 35MPa의 소형압력용기이다. 수소가스 저장용 복합소재 연료용기의 안전성을 해석하기 위해 사용한 FEM 모델은 축을 기준으로 대칭형상을 가진 MARC[5]의 4절점 축대칭 솔리드 요소를 사용하였다. 수소가스 연료용기에서 돌부를 제외하고 원통형 용기의 안전성에 보다 큰 영향을 미치는 부분은 몸통의 평행부로 알려졌기 때문에 이 부분에 대한 안전성을 해석하기로 한다.

Fig. 1에서 보여준 것처럼 가스연료 압력용기의 몸통 평행부의 중심부분은 최소두께로 설계하고, 최내측으로부터 수소와 직접 접촉하는 알루미늄 라이너, 이 라이너의 외측벽을 감싼 2개의 복합소재 적층으로 구성되어 있다. 또한, FEM 안전성 해석에서 수소가스에 의해 형성된 35MPa의 내압은 수소연료 압력용기의 벽면에 대하여 수직방향으로 균일하게 작용한다고 가정한다.

### 2.2. 해석조건

FEM 해석모델은 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 복합소재 원통부의 알루미늄 라이너 두께, 복합소재 적층의 후프방향과 헤리컬방향으로 각각 나타낸 적층두께를 보여주고 있다. 복합소재는 탄소섬유/에폭시와 유리섬유/에폭시로 알루미늄 라이너에 작용하는 모든 가스압력을 담당하도록 감겨져 있다.

수소저장용기의 안전성을 높이기 위해서는 자진공정(autofrettage process)을 실시해야 한다. 알루미늄 라이너에 대한 자진공정을 실시한 후에 복합소재 용기를 안전하게 사용하기 위해서는 충전압력(filling pressure) 31MPa, 시험압력(test pressure) 51.7MPa,

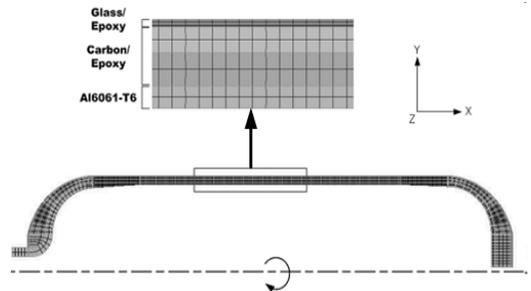


Fig. 1. FEM analysis model for 35MPa hydrogen gas cylinder and 9.2 liter storage capacity.

최소과열압력(minimum required burst pressure) 105.5MPa 등을 만족해야 한다.

**2.3. 소재의 물성치**

복합소재 소형압력용기에서 수소가스의 외부누출을 차단하기 위해 사용한 소재는 고강도 알루미늄 6061-T3이고, 이 소재에 대한 물리적 특성은 Table 1에서 제공한다.

또한, 9.2L의 저장용량을 갖는 원통용기의 외벽면을 감싸면서 압력용기의 안전성을 확보하기 위해 사용한 복합소재는 일본 Toray사에서 생산한 T700-12K 탄소섬유로 35MPa 정도의 가스고압에 견딜 수 있다. 본 연구에서 사용한 탄소섬유 소재에 대한 물리적 특성은 Table 2에서 제공한다.

수소연료 압력용기의 안전성을 담당하는 탄소섬유 복합소재는 용기몸통의 후프방향에 대한 안전성을 확보하기 위해 직각방향으로 감아준다. 또한, 원통형 용기의 좌우측에 형성된 돔부에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 일정한 경사도를 갖도록 헤리컬 방향으로 엮갈리도록 감는 것이 좋다.

**Table 1. Material properties of aluminum liner, 6061-T6.**

Properties	Values
Elastic modulus, GPa	69
Poisson's ratio	0.33
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	148
Elastic modulus in 2 direction, GPa	E2	3.82
Poisson's ratio 1-2	V12	0.38
Poisson's ratio 2-3	V23	0.30
Shear modulus 1-2, GPa	G12	1.46
Shear Modulus 2-3, GPa	G23	1.46

**III. 복합소재 압력용기의 평가기준**

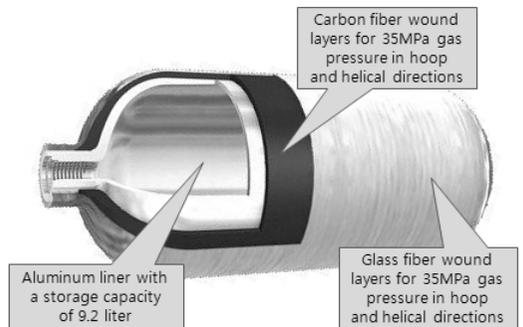
압력용기에 충전하는 내압을 0~65MPa까지 서서히 상승시켰을 때 알루미늄 라이너 및 복합소재에 걸리는 응력강도를 FEM으로 해석하여 자진공정에 필요한 최적의 자진압력을 선정하는 것이 중요하다.

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

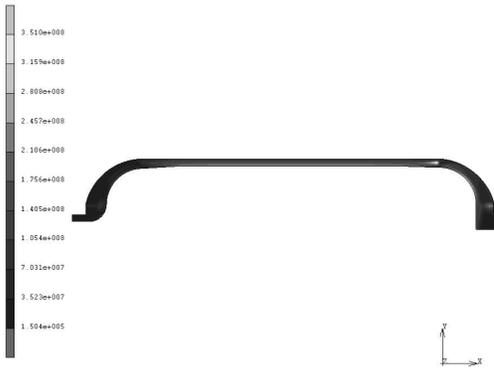
- 압력용기에 자진공정을 거친 후 0MPa이 되었을 때, 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 95%(272MPa)를 초과해서는 안 된다.
- 자진공정을 거친 후 충전압력을 작용할 때, 알루미늄 라이너의 벽면에 걸리는 인장응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 60%(172MPa)를 초과해서는 안 된다.
- 복합소재 용기에 공급한 충전압력에서 최대섬유응력은 최소과열압력에서의 최대섬유응력 대비 30%를 초과해서는 안 된다.
- 연료용기에 공급한 시험압력에서 예측된 응력비(=설계과열압력에서의 섬유응력/사용압력에서의 섬유응력)는 탄소섬유의 경우는 2.4, 유리섬유는 3.4 이상을 각각 유지해야 한다.

**IV. FEM 해석결과 및 고찰**

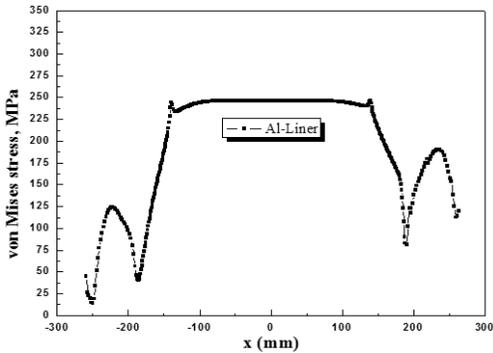
Fig. 2는 9.2L의 저장용량을 갖는 복합소재 연료용기를 보여주고, Fig. 3은 복합소재 압력용기의 내부용기를 구성하는 알루미늄 라이너에서 자진공정 압력을 제거한 후 수소가스 내압이 0MPa에 도달하



**Fig. 2. Composite fuel cylinder for a hydrogen gas.**



(a) Stress distribution



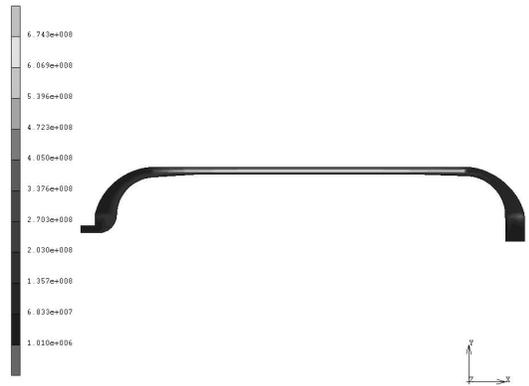
(b) von Mises stress along the surface of an aluminum liner

**Fig. 3.** Stress of an aluminum liner wound by a composite for a hydrogen gas vehicle with a storage capacity of 9.2 liter and a gas pressure of 0MPa.

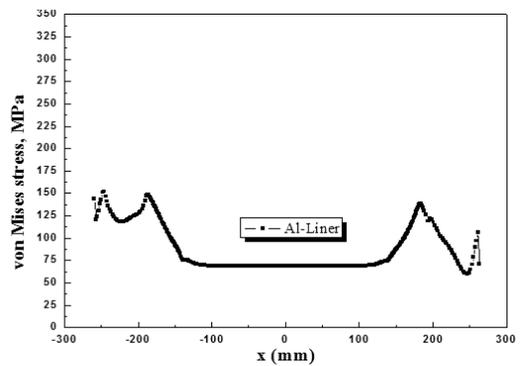
있을 때의 응력분포도를 해석한 결과이다. Fig. 3(a)에서는 Al 라이너에 걸리는 응력분포도를 보여주고, Fig. 3(b)에서는 Al 라이너의 전체길이를 따라서 예측된 응력으로 라이너 몸통의 평행부에서 247MPa의 von Mises

최대응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 알루미늄 라이너에 자기공정을 실시한 압력용기에 31MPa의 충전압력을 공급하였을 때 알루미늄 라이너에 걸리는 응력분포를 나타낸 결과이다. Fig. 4(a)에서는 알루미늄 라이너에 걸리는 응력분포도를 보여주고, Fig. 4(b)에서는 알루미늄 라이너의 전체길이를 따라서 예측된 응력으로 몸통의 평행부에서 69MPa의 von Mises 최대응력이 작용하고



(a) Stress distribution



(b) von Mises stress along the surface of an aluminum liner

**Fig. 4.** Stress of an aluminum liner wound by a composite for a hydrogen gas vehicle with a storage capacity of 9.2 liter and a filling pressure of 31MPa.

있음을 알 수 있다. 이 결과는 알루미늄 라이너 소재에 대한 안전성을 제시한 검증기준에 따르면 알루미늄 라이너에 자기공정을 실시한 후 충전압력 31MPa를 작용하였을 때 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 응력이 항복응력의 60%(172MPa)를 초과해서는 안 된다는 것을 만족하기 때문에 안전한 복합소재 압력용기라 할 수 있다.

Fig. 5는 복합소재의 응력분포 안전성을 해석한 결과이다. 복합소재는 Fig. 1에서 보여준 것처럼 알루미늄 라이너에 접하여 탄소섬유/에폭시 적층이 있고, 그 적층에 접하여 유리섬유/에폭시 적층을 형성한 구조를 갖는다. Fig. 5에서 복합소재의 응력분포는 자기공정을 실시한 후 충전압력 31MPa를 작용하였을 때

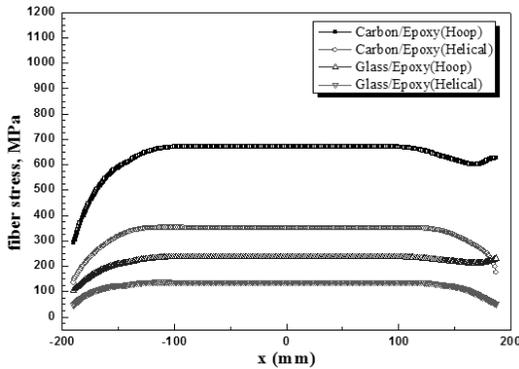


Fig. 5. Stress of a composite fiber for a hydrogen gas fuel cylinder with a storage capacity of 9.2 liter and a filling pressure of 31MPa.

- 탄소섬유/에폭시 소재에서 발생한 최대섬유응력은 최소파열압력에서의 최대섬유응력 대비 후프방향의 경우는 29.43%, 헬리컬방향의 경우는 28.87%로 각각 예측되었다.
- 유리섬유/에폭시 소재에서 발생한 최대섬유응력은 최소파열압력에서의 최대섬유응력 대비 후프방향의 경우는 29.36%, 헬리컬방향의 경우는 28.90%로 각각 예측되었다.

상기의 해석결과에 의하면, 압력용기에 공급한 충전압력 31MPa에서 예측된 최대섬유응력은 최소 파열압력에서의 최대섬유응력 대비 30%를 초과해서는 안 된다는 조건을 만족하기 때문에 안전하다 할 수 있다.

Fig. 6은 압력용기의 외벽면을 따라서 감은 복합소재에 대한 응력 안전성을 해석한 복합소재의 응력 분포는 자진공정을 실시한 후 시험압력 51.7MPa를 작용하였을 때

- 탄소섬유/에폭시 복합소재에서 발생한 응력비 (=설계파열압력에서의 섬유응력/사용압력에서의 섬유응력) 결과를 보면 후프방향의 경우는 3.40, 헬리컬방향의 경우는 3.46으로 각각 예측되었다.
- 유리섬유/에폭시 복합소재에서 발생한 응력비 결과를 보면 후프방향의 경우는 3.41, 헬리컬방향의 경우는 3.46으로 각각 예측되었다.

상기의 해석결과에 의하면, 압력용기에 공급한 시험압력 51.7MPa에서 예측된 응력비가 탄소섬유

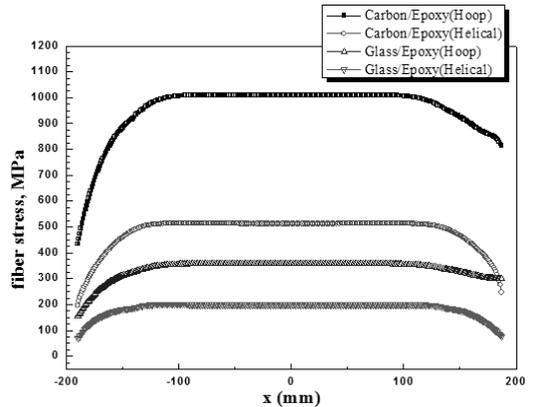


Fig. 6. Stress of a composite fiber for a hydrogen gas fuel cylinder with a storage capacity of 9.2 liter and a test pressure of 51.7MPa.

의 경우는 2.4, 유리섬유는 3.4 이상을 각각 유지해야 한다는 조건을 모두 만족하기 때문에 안전하다 할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 1에서 제시한 9.2L의 저장용량과 35MPa의 충전압력을 갖는 수소연료 용기의 안전성을 FEM으로 해석한 결과는 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 기준에 의거 평가할 때 Al 라이너와 복합소재의 안전성은 우수한 것으로 나타났다.

## V. 결론

9.2L의 저장용량과 35MPa의 충전압력을 갖는 탄소섬유 및 유리섬유로 감은 알루미늄 복합용기에 대한 응력 안전성을 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 안전기준으로 평가한 결과는 우수한 것으로 나타났다. 즉, 알루미늄 라이너의 안전성은 복합소재 압력용기에 작용하는 가스압력이 0MPa에 도달하였을 때 알루미늄 라이너에 걸리는 압축잔류응력은 247MPa로 미국의 DOT-CFFC에 안전기준을 만족하는 것으로 나타났다.

또한, 복합소재 연료용기에 공급한 충전압력에서 최대섬유응력은 최소파열압력에서의 최대섬유응력 대비 30%를 초과해서는 안 된다는 조건에서도 탄소섬유/에폭시를 후프방향으로 감은 경우에 최대 29.43%로 예측되었기 때문에 안전하다.

또한, 복합소재 연료용기에 공급한 시험압력에서 예측된 응력비는 탄소섬유의 경우는 2.4, 유리섬유

는 3.4 이상을 각각 유지해야 한다는 조건에서도 탄소섬유/에폭시의 경우는 최소 3.4, 유리섬유/에폭시의 경우 3.41로 모두 만족하는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] Fukunaga, H., and Chou, T. W., "Simplified Design Techniques for Laminated Cylindrical Pressure Vessels under Stiffness and Strength Constraints," *J. of Composite Materials*, Vol. 22, pp.1156~1169, (1998)
- [2] Yoon, Y. B., Cho, S. W., and Ha, S. K., "Optimal Design of Filament Wound Composite CNG Pressure Vessel," *J. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 1, pp.23~30, (2002)
- [3] US DOT-CFFC Basic Requirement, (2007)
- [4] KS B ISO 11119-2, (2008)
- [5] MARC, *MARC User's Manual Ver. 7.3*, MARC Analysis Research Corp., California, USA, (1999)