



차량용 복합소재 수소연료탱크의 강도안전성에 관한 연구

†김청균 · 김도현

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2011년 7월 3일 접수, 2011년 10월 28일 수정, 2011년 10월 28일 게재)

A Study on the Strength Safety of a Composite Hydrogen Fuel Tank for a Vehicle

†Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim

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

(Received July 3, 2011; Revised October 28, 2011; Accepted October 28, 2011)

요 약

본 연구에서는 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 기준에 근거하여 수소가스 복합소재 연료탱크에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. 알루미늄 라이너 소재인 6061-T6와 탄소섬유 복합소재인 T800-24K로 적층이 형성 되도록 감은 수소가스 복합소재 연료탱크는 130L의 저장용량을 갖으며, 70MPa의 충전압력으로 수소가스가 채워진다. FEM 해석결과에 의하면, 내부탱크를 형성하는 알루미늄 라이너에 작용하는 von Mises 응력 255.2MPa은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 95%인 272MPa보다 낮기 때문에 안전하다. 또한, 복합소재 연료탱크에서 후프방향의 탄소섬유 응력비는 3.11이고, 헬리컬방향의 응력비는 3.04인 것으로 나타났다. 이들 응력비 데이터는 탄소섬유 복합소재 연료탱크에서 안전기준으로 권고한 2.4에 비해 높기 때문에 양방향 모두에서 안전하다. 따라서 70MPa의 충전압력을 갖는 130L 저장용량의 복합소재 연료탱크에 대한 강도안전성은 유용한 것으로 판단된다.

Abstract - This paper presents the strength safety of a hydrogen gas composite fuel tank, which is analyzed using a FEM based on the criterion of US DOT-CFFC and Korean Standard. A hydrogen gas composite tank in which is fabricated by an aluminum liner of 6061-T6 material and carbon fiber wound composite layers of T800-24K is charged with a filling pressure of 70MPa and a gas storage capacity of 130 liter. The FEM results indicated that von Mises stress, 255.2MPa of an aluminum liner inner tank is low compared with that of 95% yield strength, 272MPa. And a carbon fiber stress ratio of a composite fuel tank is 3.11 in hoop direction and 3.04 in helical direction. These data indicate that a carbon fiber gas tank is safe in comparison to that of a recommended criterion of 2.4 stress ratio. Thus, the proposed composite tank with 130 liter capacity and 70MPa filling pressure is usable in strength safety.

Key words : strength safety, hydrogen gas tank, composite material, stress ratio, aluminum liner

1. 서 론

가스차량은 액체연료를 사용하는 가솔린이나 디젤차량에 비해 연료의 저장과 공급 측면에서 안전성

이 떨어지고, 연료탱크의 저장용량과 연결된 주행거리는 상대적으로 짧기 때문에 경쟁력이 떨어진다. 그렇지만, LPG나 CNG 연료를 사용하는 차량은 친환경적 저공해성이 우수하고, 수소연료를 사용하는 차량은 무공해성을 강조하기 때문에 연료를 태워서 동력원을 획득하는 엔진에서 평가하면 가장 현실적인 차량이라 할 수 있다[1].

†주저자:ckkim_hongik@nate.com

수소연료 차량은 가스를 압축하여 저장하기 때문에 저장성과 안전성, 경량성을 높이기 위해 복합소재 연료탱크를 사용한다. 복합소재를 구성하는 탄소섬유의 가격이 고가이므로 가격 경쟁력은 떨어지지만, 친환경성과 경량화에 의한 연비향상이라는 측면에서 가장 현실적인 대안으로 부각되고 있다. 복합소재 연료탱크는 수소가스 차량의 주행거리를 증가시키고, 강도안전성을 확보하면서 중량을 낮추기 위해 충전압력을 높여 가스연료를 보다 많이 압축·저장할 수 있어야 한다.

수소가스의 충전압력을 높이기 위해서는 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 담보할 수 있어야 하는데, 강재용기로는 강도와 중량 측면에서 한계점에 도달하였다. 따라서 강재용기의 외측면에 후프방향으로 복합소재를 감아서 사용하기도 하고, 최근에는 알루미늄 라이너의 외측면에 후프방향과 헤리컬방향으로 탄소섬유를 적층으로 감아서 사용하는 기술을 개발하였다[2,3].

버스나 승용차에서 복합소재 가스연료 저장탱크를 사용하는 경우는 20.1MPa급의 CNG 연료탱크가 있고, 아직은 널리 보급되지 않았지만 70MPa급의 수소연료 복합소재 연료탱크가 상용화되어 있다. 그렇지만, CNG 연료탱크의 사고발생[4]으로 인한 위험성이 높아져 새로운 복합소재 연료탱크에 대한 관심이 많아졌다.

가스차량에서 큰 비중을 차지하는 연료탱크의 제조원가를 낮추기 위해 저가소재를 사용하기를 원하지만 강도안전과 경량화 측면에서 채택하기 어렵다. 보통은 강재를 사용하여 제조원가를 낮추고 강도를 어느 정도 낮추기 위해 최적설계와 제조기술로 보완을 하지만, 중량증가로 인한 연비손실과 저장용량 증가로 인한 제약을 감안해야 한다. 대안으로 고가의 탄소섬유 복합소재를 사용하면 가벼우면서 안전성과 연비효율, 저장용량을 높인 복합소재 연료탱크를 제안할 수 있지만 가격이 크게 상승하는 문제점이 있다. 따라서 차량용 고압가스 압력용기의 제조에는 경제성과 안전성, 경량화, 연비 등의 항목을 복합적으로 평가하는 것이 중요하다.

본 연구에서 관심을 갖고 있는 수소가스 연료탱크는 70MPa의 초고압으로 충전하여 장거리를 운행할 수 있도록 저장용량을 확보하는 것이 중요하기 때문에 가벼우면서 강도안전성을 확보할 수 있도록 고가의 탄소섬유로 제조한 원통형상의 복합소재 압력탱크로 제조하는 것이 대안이다.

따라서 복합소재 압력용기는 대량생산에 의한 원가절감과 탄소섬유의 가격하락을 기다리는 것밖에 다른 대안이 없다. 본 연구에서는 70MPa의 초고압을 견딜 수 있도록 인장강도가 대단히 우수한 고가

의 탄소섬유 T800-24K를 사용하였다. 결국은 70MPa의 충전압력을 갖는 수소가스용 복합소재 연료탱크의 개발에 관심을 갖게 되었다. 더욱이 복합소재 연료탱크의 경제성을 확보하기 위해서는 130L의 대용량 저장탱크가 관심의 대상이고, 이 탱크에 대해 강도안전성을 유한요소법으로 해석하고자 한다.

II. 유한요소해석

II.1 해석대상 및 물성치

수소연료 저장탱크의 강도안전성을 해석하기 위한 유한요소해석 모델은 Fig. 1에서 보여준 130L의 대용량 원통용기이다. 실린더 형상의 몸통 평행부에는 탄소섬유 필라멘트로 감은 후프방향의 직각 적층부와 좌우측의 반원형상 돌부에는 탄소섬유로 감은 헤리컬방향의 경사 적층부로 구성되어 있다.

Fig. 1은 복합소재 연료탱크에서 내부에는 알루미늄 소재(6061-T6)로 실린더 형상의 얇은 라이너를 압출하여 성형하고, 그 외벽면에는 탄소섬유와 레진을 사용하여 후프방향과 헤리컬방향의 적층으로 번갈아 감아서 강도안전성을 확보한 것이다.

또한, Fig. 1에서 보여준 수소연료 차량용 복합소재 연료탱크의 FEM 강도해석에 필요한 알루미늄 소재 및 탄소섬유에 대한 물리적 특성치를 Table 1과 2에서 각각 제시하고 있다.

II.2 해석모델 및 작업압력

Fig. 2는 알루미늄 라이너를 갖는 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 고찰하기 위해 제시한 FEM 해석모델을 보여준다. 수소연료용 복합소재 연료탱크에 대한 해석모델은 MARC[5]의 4절점 축대칭 솔

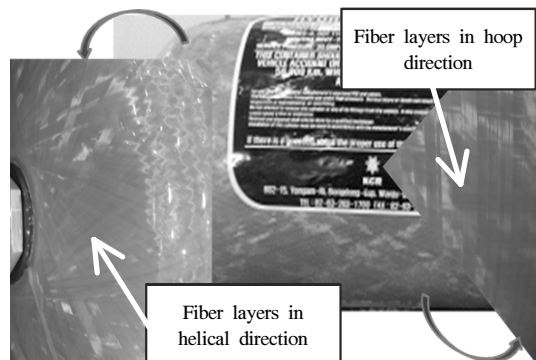


Fig. 1. Carbon fiber wound composite fuel tank for a hydrogen gas vehicle with an aluminum liner.

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

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

Table 2. Unidirectional material properties of a carbon fiber, T800-24K.

Properties	Symbol	Values
Elastic modulus in 1 direction, GPa	E_1	189.4
Elastic modulus in 2 direction, GPa	E_2	3.82
Poisson's ratio 1-2	ν_{12}	0.38
Poisson's ratio 2-3	ν_{23}	0.008
Shear modulus 1-2, GPa	G_{12}	1.262
Shear Modulus 2-3, GPa	G_{23}	1.262
Fiber volume fraction	ν_f	65%

리드 요소(solid element)를 사용하였고, 알루미늄 라이너 저장탱크의 내경부에 작용하는 가스압력에 의해 복합소재 연료탱크에 걸리는 응력특성을 해석하기 위해 축대칭 솔리드 요소는 비교적 정확한 시뮬레이션 해석결과를 제공하는 것으로 알려져 있다.

Table 3에서는 복합소재 연료탱크의 내부에 작용하는 수소가스 압력, 즉 자긴작업(autofrettage process)을 처리한 후에 연료탱크에 연료를 공급하는 충전압력, 시험압력, 최소파열압력으로 강도안전성을 고찰하는데 필요한 데이터를 제시하고 있다. 복합소재 연료탱크에 대한 강도안전성 시험평가는 자긴작업의 내압을 무부하인 0MPa에서 시작하여 알루미늄 복합소재의 강도특성에 적합한 최대압력까지 끌어올릴 수 있는 공정작업을 시뮬레이션하는 것이다. 이 작업에서 알루미늄 소재는 항복강도를 넘어 소성영역에 진입할 수 있도록 가공하기 때문에 경화현상에 의해 알루미늄 저장탱크는 높은 강도안전성을 확보하게 된다. 그 이후에는 공급된 천연가스의 최고압력을 다시 0MPa로 끌어내리고, 충전압력과 시험압력, 최소파열압력으로 상승시켜가면서 복합소재 저장탱크의 응력특성을 고찰하여 강도안전성을 확보한다.

복합소재로 제조된 연료탱크에 대한 자긴작업은

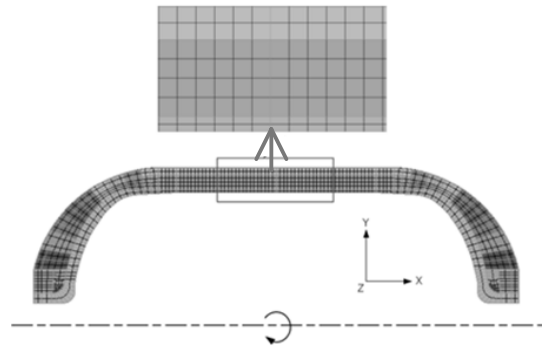


Fig. 2. FE analysis model.

Table 3. Gas pressure loadings

Strength Safety Items	Criteria
Filling pressure, MPa	70
Test pressure, MPa	105
Minimum required burst pressure, MPa	210

알루미늄 라이너가 있는 복합소재 고압용기를 제조할 때 제조과정 중에 가해지는 압력으로, 라이너에 항복강도를 초과하는 압력을 공급하여 영구적인 소성변형을 일으켜서 강도안전 내구성을 높이는 제작공정을 말한다. 이 결과로 내부압력이 0MPa일 때에도 알루미늄 라이너는 자긴작업을 통해 형성된 압축응력을, 섬유소재는 인장응력을 별도로 갖게 된다.

III.3 강도안전성 평가기준

Fig. 1의 수소연료 차량용 복합소재 연료탱크에 대한 강도안전성은 국제적으로 공인된 미국의 DOT-CFFC[6]와 한국의 KS 기준[7]에 의거 알루미늄 라이너 소재와 탄소섬유 복합소재에 대한 평가를 수행할 수 있다. 즉,

- 복합소재 연료탱크에 대해 자긴작업을 처리한 후 0MPa에 도달하였을 때, 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 압축응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 95%를 초과해서는 안 된다.
- 복합소재 연료탱크에 대해 자긴작업을 처리한 후 충전압력을 작용하였을 때, 알루미늄 라이너의 벽면에 걸리는 인장응력은 알루미늄 항복응력 대비 60%를 초과해서는 안 된다.
- 복합소재 연료탱크에 시험압력의 2/3 수준을 적용할 때 탄소섬유에 작용하는 최소 응력비는 2.4를 달성하거나 또는 초과해야 안전하다.

III. 해석결과 및 고찰

탄소섬유 복합소재를 사용한 수소연료 저장탱크의 강도안전성을 해석하기 위해 사용한 FEM 모델은 Fig. 2에서 보여주고 있다. 복합소재 연료탱크의 알루미늄 라이너 용기에 작용하는 안전성 평가압력에는 자진압력(autofrettage pressure), 무부하압력(zero pressure), 충전압력(filling pressure), 시험압력(test pressure), 최소파열압력(minimum required burst pressure) 등이 고려되었다. 이들 압력을 알루미늄 라이너의 내압으로 작용하였을 때 발생한 von Mises 응력에 대한 FEM 해석결과를 Fig. 3에서 보여주고 있다. 여기서 수소가스를 공급하였을 때 형성되는 자진압력, 시험압력, 최소파열압력에 대한 알루미늄 라이너의

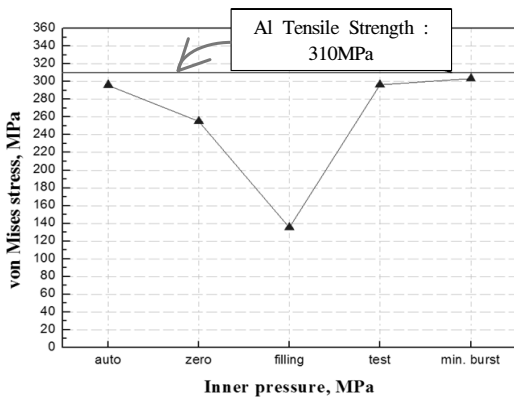


Fig. 3. Von Mises stress of an aluminum liner for 130 liter hydrogen gas storage tank.

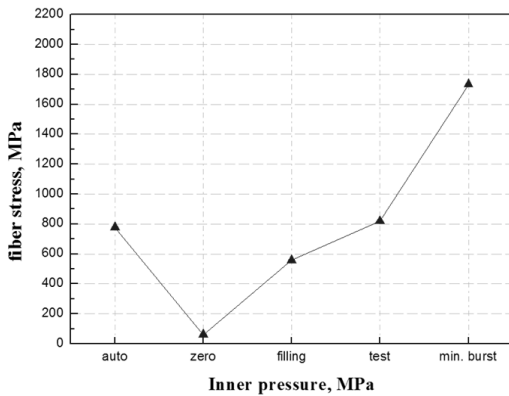


Fig. 4. Carbon fiber composite stress in hoop direction for 130 liter hydrogen gas storage tank.

von Mises 응력은 알루미늄 소재의 인장강도인 310MPa 이하로 모두 안전한 것으로 나타났다.

또한, 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 강도안전성 기준을 만족하는지 여부를 평가한 Fig. 3의 해석결과에 의하면 모두 안전한 것으로 나타났다. 첫 번째로 자진작업을 처리한 복합소재 연료탱크의 내압이 0MPa에 도달하였을 때 알루미늄 라이너의 von Mises 응력은 255.2MPa로 알루미늄 소재의 항복응력인 95%, 즉 272MPa를 넘지 않았기 때문에 안전하다. 두 번째로 복합소재 연료탱크에 작용하는 충전압력이 70MPa일 때 알루미늄 라이너의 von Mises 응력은 135.5MPa로 알루미늄 소재의 항복응력인 60%, 즉 172MPa를 넘지 않았기 때문에 또한 안전하다.

Figs. 4와 5는 복합소재 연료탱크에서 탄소섬유에 대한 강도안전성을 자진압력, 무부하압력, 충전압력, 시험압력, 최소파열압력의 항으로 표시한 FEM 강도안전 해석결과이다. Fig. 4에서는 후프방향으로 감은 탄소섬유에 작용하는 인장응력 해석결과를 제시하고 있다. 즉, 무부하 상태인 0MPa에서는 가장 낮은 50MPa, 충전압력 70MPa에서는 560MPa로 각각 예측되었고, 복합소재 알루미늄 라이너에 작용하는 수소가스내압이 증가할수록 높은 인장응력을 나타내고 있다.

또한, Fig. 5는 헬리컬방향으로 감은 탄소섬유에 작용하는 인장강도 해석결과로 무부하인 0MPa에서는 가장 낮은 105MPa, 충전압력 70MPa에서는 460MPa로 각각 계산되었다. 탄소섬유 복합소재에 대한 강도안전성 해석결과에 의하면, 충전압력 70MPa에서 최소파열압력 210MPa에 이르는 내압구간에서는 후프방향으로 감은 탄소섬유에 작용하는 인장응력이 헬리컬방향으로 감은 탄소섬유에 작용

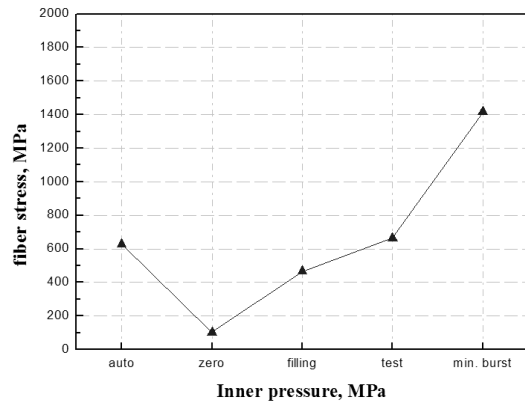


Fig. 5. Carbon fiber composite stress in helical direction for 130 liter hydrogen gas storage tank.

하는 인장응력에 비해 높게 나타났다. 이것은 후프 방향으로 감은 탄소섬유의 하중비중이 높고, 헤리컬 방향으로 감은 탄소섬유의 하중비중은 상대적으로 낮다는 것을 의미한다.

또한, 복합소재 연료탱크에서 탄소섬유에 대한 강도안전성 평가기준에 의하면, 시험압력의 2/3 수준에서 탄소섬유의 최소 응력비는 2.4를 초과해야 안전하다. 이 기준을 적용할 때, Fig. 4의 해석결과를 기반으로 예측한 후프방향의 최소 응력비는 3.11로 2.4를 충분히 초과하므로 안전하다. Fig. 5의 해석결과를 기반으로 예측한 헤리컬방향의 최소 응력비는 3.04로 평가기준 2.4를 만족하고 있다. 따라서 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 담당하는 후프방향과 헤리컬방향의 탄소섬유 소재는 안정되게 와인딩된 것으로 판단된다.

V. 결론

130L의 저장용량과 70MPa의 충전압력을 갖는 수소가스용 복합소재 연료탱크에 대한 강도안전성을 유한요소법으로 해석하였다. 탄소섬유 복합소재로 감은 연료탱크의 안전성은 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 기준에 근거하여 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 자진작업을 처리한 복합소재 연료탱크의 내압이 0MPa일 때 알루미늄 라이너의 von Mises 등가압축응력은 255.2MPa로 알루미늄 라이너의 항복응력 95%를 넘지 않으므로 안전하다.

2) 복합소재 연료탱크에 작용하는 충전압력이 70MPa일 때 알루미늄 라이너의 von Mises 응력은 135.5MPa로 알루미늄 라이너의 항복응력 60%를 넘지 않으므로 안전하다.

3) 탄소섬유에 대한 후프방향의 최소 응력비는 3.11로 강도안전성 평가기준의 최소 응력비 2.4를 초과하므로 안전하고, 헤리컬방향의 최소 응력비는 3.04로 평가기준 2.4를 넘으므로 탄소섬유로 와인딩은 복합소재 연료탱크는 안전한 것으로 판단된다.

4) 복합소재 연료탱크에 작용하는 모든 내압에 대하여 알루미늄 라이너에 작용하는 인장강도는 라이너 소재의 인장강도 310MPa 이하를 유지하므로 안전하다.

참고문헌

- [1] 김청균, 자동차엔진공학, 복두출판사 (2004)
- [2] 공철원, 윤중훈, 이용무, “알루미늄 라이너를 이용한 KSR-III 복합재 탱크 개발”, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.318-321 (2002)
- [3] 황태경, 박재범 외 2인, “필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 구조 수명 평가”, 한국복합재료학회지, Vol. 21, No. 6, pp.23-30 (2008)
- [4] 이경인, “행당동 CNG 버스사고 ‘용기결함’에 무게”, 한국가스신문 (2010년 8월 10일)
- [5] MARC, MARC User's Manual Ver. 7.3, MARC Analysis Research Corp., California, USA (1999)
- [6] US DOT-CFFC Basic Requirements (2007)
- [7] KS B ISO 11119-2 (2008)