



수소연료탱크용 복합소재 압력용기에 관한 강도안전성 평가연구

김청균 · 김도현

홍익대학교 트리보메카 · *에너지기술 연구센터
(2010년 11월 30일 접수, 2011년 2월 22일 수정, 2011년 2월 22일 채택)

Strength Safety Evaluation of Composite Pressure Container for Hydrogen Fuel Tanks

† Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim*

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology, Hongik University

**Department of Automotive Engineering, Daelim University College*

(Received November 30, 2010; Revised February 22, 2011; Accepted February 22, 2011)

요 약

본 논문은 104L의 저장용량과 70MPa의 사용압력을 갖는 수소연료탱크용 복합소재 압력용기에 관한 강도안전성을 해석한 평가연구이다. 탄소섬유 복합용기의 내측은 6061-T6의 알루미늄 라이너를 사용하고, 외경측은 원주방향을 따라서 탄소섬유 후프층을 형성하고, 또한 12° 적층과 70° 적층을 헬리컬방향으로 경사지게 감아서 제작하였다. 복합소재 연료탱크의 강도안전성에 대한 FEM 해석결과는 US DOT-CFFC와 KS B ISO 11119-2 규정에 따라 평가되었다. FEM 해석결과에 의하면, 104L의 복합용기로 제시된 설계모델을 US DOT-CFFC와 KS B ISO 11119-2 기준으로 평가할 때 모두 안전하다할 수 있다. 그렇지만, 탄소섬유 연료탱크에 대한 계산결과는 한국의 평가기준을 사용하기보다는 미국의 안전기준을 적용하는 것이 더 안전하다는 해석결과를 알 수 있다. 따라서 70MPa의 수소연료 압력용기의 강도안전성을 충분히 확보하기 위해서는 미국의 DOT-CFFC 안전기준에 의거 평가하고 설계하는 것이 바람직하다.

Abstract - This paper presents a strength safety evaluation of composite pressure container for hydrogen fuel tanks with a storage capacity of 104 liter and 70MPa pressure. The carbon fiber composite container is manufactured by an aluminum liner of Al6061-T6 and composite multi-layers of hoop winding layer in circumferential direction, 12° inclined winding layer and 70° winding layer in helical direction respectively. The FEM results on the strength safety of composite fuel tanks were evaluated with a criterion of design safety of US DOT-CFFC and KS B ISO 11119-2 codes. The FEM computed results indicate that the proposed design model of 104 liter composite container is safe based on two strength safety codes. But, the computed results of carbon fiber fuel tanks based on US DOT-CFFC code is safer compared with that of KS B ISO 11119-2. Thus the hydrogen gas pressure container of 70MPa may be evaluated and designed by US DOT-CFFC code for more strength safety.

Key words : strength safety, composite fuel tank, carbon fiber, liner, hydrogen gas, FEM

†주저자:ckkim_hongik@naver.com

I. 서론

가스연료를 사용한 자동차에는 액화석유가스(LPG)를 사용한 LPG 자동차가 처음 개발되었고, 이어서 천연가스(NG)를 압축한 CNG 자동차, 액화천연가스(LNG)를 사용한 LNG 자동차 등이 있다. 이들 가스 자동차는 기존의 가솔린이나 경유 자동차에서 발생하는 배출가스 오염문제를 해결하기 위해 도입되었지만, 이들 가스연료도 모두 탄화수소 계열이므로 CO₂나 CO를 불가피하게 발생하기 때문에 지구온난화와 대기오염 문제를 근본적으로 해결할 수는 없다.

따라서 고갈되고 있는 석유자원, 환경오염 문제 등을 완벽하게 해결하기 위해 개발하고자 하는 수소연료전지 차량은 탄소가 없는 수소만을 사용하기 때문에 차세대 자동차로 많은 관심을 갖고 있다. 그렇지만, 수소는 CH₄나 H₂O처럼 다른 원소에 붙어서 존재하다가 외부에서 에너지를 공급함으로써 생산할 수 있지만, 저장이 어려워 항상 특별한 용기에 고압으로 보관한다. 즉, 수소는 대단히 불안정하기 때문에 수소연료를 대량으로 사용할 수 있도록 하기 위해서는 강도안전성이 대단히 높은 특별한 용기에 고압으로 압축하여 저장하는 것이 경제적이다.

수소의 연소에너지는 탄소보다 25% 이상 낮기 때문에 자동차에서 동일한 출력을 확보하기 위해서는 그만큼 연료를 더 태워야 하므로 가능한 연료탱크를 크게 하고, 특히 수소가스를 초고압으로 압축하여 저장하는 기술이 중요하다. 수소가스는 보다 많이 저장하는 것이 경제적이므로 수소연료 자동차의 주행거리를 높이기 위해서는 연료탱크의 강도안전성이 중요한 관사가 되었다.

따라서 수소연료 자동차에서 더 많은 수소가스를 저장하고, 연비를 높이면서 안전하게 사용할 수 있도록 하기 위해서는 고강도의 경량탱크를 저렴하게 개발하는 것이 급선무이다. 수소연료 저장탱크에 강재를 사용하기에는 강도와 강성도가 낮기 때문에 인장강도가 대단히 우수한 탄소섬유 복합재료로 강도안전성을 담당하도록 하고, 가벼운 알루미늄 소재로는 수소가스의 밀봉안전성을 감당하도록 역할을 분담한 복합소재 압력용기를 개발하는 것이 중요하다.

소수연료 자동차용 연료탱크를 제조하기 위한 복합소재 성형방법으로 다양한 기술이 개발되었지만, 제작비용과 시간, 대량생산 등의 측면에서 탄소섬유를 알루미늄 라이너의 외면에 적층으로 감아서 제작하는 필라멘트 와인딩(filament winding) 공법[1,2]이 가장 적절한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 알루미늄 라이너의 외면에 탄소섬유를 적층으로 감아서 제작한 수소연료 자동차용 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 유한요소법[3]으로 해석하고, 이 해석결과를 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS B ISO 11119-2 설계규정에 따라 강도안전성을 서로 비교하면서 고찰하고자 한다.

II. 강도안전성 해석모델

복합소재 연료탱크의 내용적이 104L이고 사용압력이 70MPa인 내측의 라이너에 Al6061-T6 소재를 사용하여 수소가스의 누출을 방지하였다. 또한, 알루미늄 라이너의 외측을 적층으로 감싸서 안전성을 확보하기 위해 사용한 탄소섬유 소재는 Toray T800C-24K이다.

알루미늄 라이너의 저장내압을 높이기 위한 자기작업(auto-fretting process) 소성가공을 통해 복합소재 압력용기의 내구성을 높였다. 또한, 탄소섬유 압력용기의 사용압력에 대한 강도안전성을 확보하기 위해 알루미늄 라이너의 평행부에 대해서는 반경방향으로 후프층을 적층으로 감고, 축방향에 대해서는 12°의 경사도를 갖는 와인딩과 70°의 경사도를 갖는 와인딩 적층 두 가지로 제작하였다.

III. 복합용기의 강도안전성 기준

복합소재 연료탱크의 강도안전성을 담보하기 위한 기준으로 본 연구에서는 미국의 DOT-CFFC Basic Requirements (2007)[4]와 한국의 KS B ISO 11119-2 (2008)[5] 두 가지를 사용하였다. 여기서 압력용기에 대한 강도안전성은 내측의 알루미늄 라이너와 외측의 복합소재 적층부분에 대한 안전성 기준은 가스압력에 대하여 평가하도록 규정되어 있다.

또한, 복합소재 고압용기에 대한 강도안전성은 안전설계에 필요한 사용압력이나 시험압력을 기준으로 파열시험을 평가하는 방법이 있다.

3.1. 안전성평가 압력기준

(1) DOT-CFFC

미국의 DOT-CFFC 기준에 따르면, 복합소재 연료탱크에 사용압력이 주어졌을 때 시험압력은 설계를 위한 사용압력의 5/3배, 최소파열압력은 사용압력의 3.4배로 각각 계산한다. 따라서 본 연구에서 탄소섬유로 제작된 연료탱크의 사용압력을 70MPa으로 제시하였기 때문에 시험압력은 116.7MPa이고, 최소파열압력은 238MPa이 된다.

(2) KS B ISO 11119-2

한국의 KS B ISO 11119-2 기준에 따르면, 안전설계를 위해 시험압력이 주어졌을 때 사용압력은 시험압력의 2/3을 초과하지 않도록 하며, 과열압력은 시험압력의 2배 이상이 되어야 한다고 규정하고 있다. 따라서 복합소재 연료탱크의 사용압력이 70MPa일 때 시험압력은 105MPa이고, 최소과열압력은 210MPa이 된다.

3.2. 연료탱크의 안전성 평가기준

수소연료 자동차에 장착한 연료탱크 압력용기에 고압가스를 반복적으로 충전하고 방출하는 과정에 용기에 작용하는 높은 응력에 안전해야 한다. 본 연구에서 압력용기의 안전성을 검토하기 위해 고려한 2개의 안전기준을 보면, 시험압력과 최소과열압력을 약간 다르게 규정하고 있다는 사실을 알 수 있다. 즉,

(1) DOT-CFFC 규정

① 자긴작업을 실시한 후 0MPa이 되었을 때 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 등가응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 95%를 초과해서는 안 된다.

② 자긴작업을 실시한 후 사용압력이 작용할 때 라이너의 벽면에 작용하는 인장응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 60%를 초과해서는 안 된다.

③ 사용압력에서의 최대섬유응력은 최소과열압력에서 최대섬유응력의 30%를 초과해서는 안 된다.

(2) KS B ISO 11119-2 규정

① 탄소섬유의 경우 응력비가 2.4를 달성하거나 초과해야 한다. 여기서, 응력비는 최소과열압력에서의 섬유응력을 사용압력에서의 섬유응력으로 나눈 값이다.

탄소섬유로 적층하여 제작한 복합소재 연료탱크에

대한 강도안전성 평가 압력기준을 살펴보면 차이점을 발견할 수 있다. 즉, 알루미늄 라이너에 대한 검증기준은 미국의 DOT-CFFC 규정에서만 제시된 것에 비해 복합소재에 대한 검증기준은 2개의 규정에 모두에서 제시되어 있다. 또한, DOT-CFFC의 ③번 규정을 백분율 대신 분자를 크게 하는 식으로 변환하게 되면 한국의 KS B ISO 11119-2의 ①번 규정과 같은 계산식이 된다. 따라서, DOT-CFFC 기준조건이 KS B ISO 11119-2의 조건보다 더 가혹한 안전설계 제한치를 갖게 된다.

한국의 KS B ISO 11119-2에서는 알루미늄 라이너에 대한 안전기준을 특별히 언급하지 않고 있다. 결과적으로 2개의 규정에 제시된 검증기준을 함께 적용하면 알루미늄 라이너와 복합소재에 대해 강도안전성을 종합적으로 평가할 수 있으므로 본 연구에서는 이들 2가지 규정 모두를 고려하고, 이에 대한 강도안전성 비교평가를 수행하고자 한다.

IV. 해석결과 및 고찰

104L의 내용적을 갖는 복합소재 압력용기에 대한 강도안전성을 FEM에 의거 강도해석을 수행한 후에 미국과 한국에서 각각 규정한 압력기준에 따라 평가하였다. 이때에 복합소재 연료탱크의 라이너 용기에 적용한 소성가공 자긴작업 압력은 100MPa이다.

4.1. DOT-CFFC에 기준한 해석결과

DOT-CFFC 규정에 기준하여 내용적 104L을 갖는 연료탱크 복합용기에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석한 결과를 Table 1에서 제시하고 있다.

즉, 알루미늄 라이너에 대한 강도안전성 검증기준을 제시한 DOT-CFFC에 따르면, 자긴작업 후 0MPa이 되었을 때 라이너의 벽면에서 발생한 등가응력은 알루미늄 항복응력의 95% (272MPa)를 초과해서는 안

Table 1. FEM computed results of composite fuel tanks based on FEM strength safety analysis of DOT-CFFC code

Aluminum liner	Recommended stress	FEM computed results		
Equivalent stress criterion	272MPa	255.2MPa	O	
Tensile stress criterion	172MPa	135.5MPa	O	
Carbon fiber layer	≤ 30% of maximum fiber stress by DOT-CFFC code	≥ 2.4 stress ratio by KS B ISO 11119-2 code		
Hoop dir.	28.00%	O	3.57	O
12° winding in helical dir.	28.90%	O	3.46	O
70° winding in helical dir.	28.82%	O	3.47	O

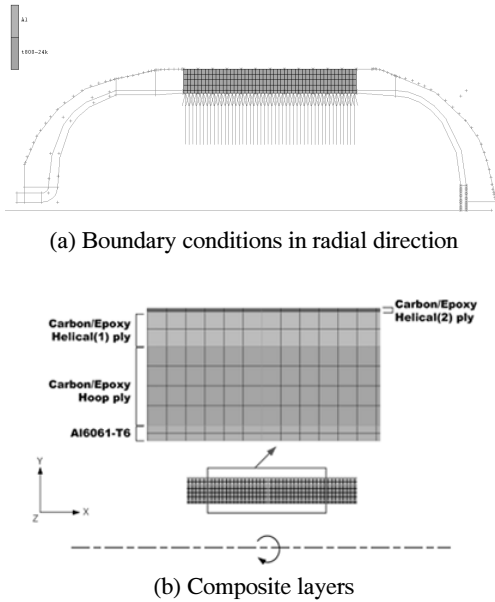


Fig. 1. Finite element models of typical composite fuel tank.

된다는 것이다. Fig. 1과 같은 FEM 해석모델에서 알루미늄 라이너에 걸리는 등가응력은 255.2MPa이므로 첫 번째 검증기준을 만족한다.

또한, 자진작업을 거친 후 사용압력이 작용할 때 라이너의 벽면에서 발생한 인장응력은 알루미늄의 항복응력의 60% (172MPa)를 초과하면 안 된다는 조건으로, 알루미늄 라이너에 걸리는 인장응력은 135.5MPa이므로 두 번째 검증기준을 만족한다.

또한, 연료탱크의 복합소재에 대한 검증기준으로 제시한 것을 보면, 사용압력에서 작용하는 최대섬유응력은 최소과열압력에서 최대섬유응력의 30%를 초과하면 안 된다는 조건으로 복합소재에 작용하는 후프방향에서는 28%, 12° 경사지게 감은 헤리컬방향에서는 28.9%, 70° 경사지게 감은 헤리컬방향에서는 28.82%로 모든 방향에 대한 검증기준 조건을 모두 만족하고 있다.

따라서 Fig. 1에서 제시한 탄소섬유 알루미늄 복합용기에 대한 강도안전성을 DOT-CFFC 안전기준으로 평가할 때 안전하다할 수 있다. 여기서 수행한 강도안전성 FEM 해석에서 탄소섬유 복합소재에 작용하는 응력은 모두 탄소섬유의 인장강도 이내에서 작용해야 평가의 타당성을 갖는다.

또한, 우리나라의 KS B ISO 11119-2에서 규정한 복합소재 압력용기의 강도안전성 검사기준에서 제시

한 응력비를 2.4 이상의 조건으로 평가하면, 복합소재에 작용하는 후프방향의 응력비는 3.57, 12° 경사진 헤리컬방향의 응력비는 3.46, 70° 경사진 헤리컬방향의 응력비는 3.47로 모든 방향에서 검증기준을 충분히 만족하고 있다.

따라서 미국의 DOT-CFFC 평가기준으로 알루미늄 라이너와 탄소섬유 복합소재에 대한 강도안전성을 평가하고, 이 결과를 바탕으로 복합소재 연료탱크를 설계한다면 안전하다할 수 있다.

4.2. KS B ISO 11119-2에 기준한 해석결과

KS B ISO 11119-2 규정에 기준하여 내용적 104L을 갖는 연료탱크 복합용기에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석한 결과를 Table 2에서 제시하고 있다.

복합소재 연료탱크 압력용기에 대한 KS B ISO 11119-2 규정은 알루미늄 라이너 용기를 감싸고 탄소섬유가 있는 적층에 대한 강도안전성으로 응력비가 2.4 이상을 유지해야 한다는 것을 규정하지만, 알루미늄 라이너에 대한 별도의 규정이 없어 미국의 DOT-CFFC를 사용하고 있다. 즉, 알루미늄 라이너에 대한 강도안전성 검증기준을 제시한 DOT-CFFC에 의거 라이너의 벽면에서 발생한 등가응력이 알루미늄 항복응력의 95% (272MPa)를 초과해서는 안 된다는 것이다. Fig. 1에서 제시한 FEM 해석모델에 대한 등가응력은 255.2MPa이므로 안전하다할 수 있다.

KS B ISO 11119-2 규정에서 복합소재 연료탱크의 안전성 검증기준인 응력비 2.4 이상의 안전조건에 대한 FEM 강도안전성 해석결과에 의하면, 복합소재에 작용하는 후프방향의 응력비는 3.11, 12° 경사진 헤리컬방향의 응력비는 3.04, 70° 경사진 헤리컬방향의 응력비는 3.05로 모든 방향에 대해 안전한 결과치를 제시하고 있다.

그러나, 미국의 DOT-CFFC에서 복합소재에 대해 강도안전성 검사기준으로 제시한 사용압력에서 작용하는 최대섬유응력은 최소과열압력에서 최대섬유응력의 30%를 초과하면 안 된다는 기준으로 평가하면, 후프방향에서는 32.15%, 12° 경사진 헤리컬방향에서는 32.87%, 70° 경사진 헤리컬방향에서는 32.81%로 각각 계산되었다. 따라서 DOT-CFFC에 기반한 강도안전성 해석결과는 탄소섬유를 감은 모든 방향에서 30%를 초과하므로 복합소재 연료탱크의 안전성을 보장할 수 없다는 것이다.

결국, 탄소섬유 복합소재의 강도를 KS 기준으로 설계할 때는 안전해도 강도안전성 검증기준인 응력비 2.4를 충분히 초과하지 않으면 미국의 안전기준에서 제시한 최대섬유응력의 30%를 초과해야 한다는 안전기준을 만족하지 못할 수도 있으므로 안전성을

Table 2. FEM computed results of composite fuel tanks based on FEM strength safety analysis of KS B ISO 11119-2 code.

Carbon fiber layer	≥ 2.4 stress ratio by KS B ISO 11119-2 code		≤ 30% of maximum fiber stress by DOT-CFFC code	
Hoop dir.	3.11	O	32.15%	X
12° winding in helical dir.	3.04	O	32.87%	X
70° winding in helical dir.	3.05	O	32.81%	X

항상 담보하기는 어려울 것으로 예상된다.

따라서 소수연료 자동차에 사용하는 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 충분히 확보하기 위해서는 최소한 KS B ISO 11119-2에서 규정하는 응력비 기준 이상을 확보하되, 국제적으로 안전성을 공인받기 위해서는 미국의 DOT-CFFC 검사기준에 기반한 안전설계를 실시하는 것이 바람직하다.

V. 결 론

본 연구에서는 104L의 내용적을 갖는 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 유한요소법으로 해석하였고, 해석결과의 타당성을 검토하기 위해 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS B ISO 11119-2의 규정을 함께 적용하였다.

알루미늄 라이너에 대한 강도안전성은 DOT-CFFC 규정을 사용한 해석결과에 의하면, 항복응력 대비 95%와 60%를 초과해야 한다는 안전기준을 255.2MPa와 135.5MPa로 각각 만족하였다. 또 다른 안전기준으로 검토한 복합소재의 강도안전성은 최대섬유응력의 30%를 미달해야 하는 안전기준을 28%~28.9%로 모든 탄소섬유 적층에 대하여 만족하였다.

또한, KS B ISO 11119-2 규정에 따른 탄소섬유의 응력비는 2.4를 초과해야 한다는 강도안전성 해석결과에 의하면, 탄소섬유를 감는 모든 방향에 대하여 3.04~3.11로 모두 만족하는 결과를 얻었으나, 이 조건을 미국의 DOT-CFFC 규정에서 언급한 최대섬유응력의 30%에 미달해야 한다는 안전기준을 적용

하면 32.15~32.87%로 모두 충족하지 못하는 해석결과를 제시하였다.

따라서 본 연구에서 제시한 내용적 104L의 복합소재 연료탱크 압력용기는 미국의 DOT-CFFC 규정으로 설계하면 한국의 KS B ISO 11119-2 규정을 모두 만족하지만, 반대로 적용하여 설계할 경우는 미국기준을 충족하지 못하므로 외국에서 사용하기는 곤란할 것이라는 사실이다.

결국 탄소섬유를 사용한 70MPa의 초고압 연료탱크 압력용기의 강도안전성을 충분히 확보하기 위해서는 국제적으로 공인된 미국의 DOT-CFFC 규정을 기반으로 설계하는 것이 바람직하다. 그러나, DOT-CFFC 규정에 따라 탄소섬유 복합용기를 제작하면, KS B ISO 11119-2보다는 가혹한 안전기준을 적용한 경우이므로 불필요하게 과도한 안전설계에 따른 원가상승과 중량화가 수반되므로 압력용기의 내용적과 사용압력, 시험압력을 잘 선정해야 한다.

참고문헌

- [1] 이대길, 정광섭, “복합재료 역학 및 제조 기술”, 시그마프레스 (1998)
- [2] P.K. Mallick, “Fiber-reinforced composites”, CRC press (2008)
- [3] “MARC user’s manual,” Version K6.1, MARC Analysis Research Co. (1996)
- [4] DOT-CFFC Basic Requirements (2007)
- [5] KS B ISO 11119-2 (2008)