



## FEV 자동차용 복합소재 연료탱크의 강도안전성에 미치는 기여율에 관한 해석적 연구

†김청균 · 김도현\*

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

## The Effects of Affecting Ratios on the Strength Safety of a Composite Fuel Tank for FEV Vehicles

†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 논문에서는 FEV 차량용 복합소재 연료탱크의 탄소섬유 적층두께에 따라 달라지는 강도안전성에 미치는 기여율의 영향을 해석하고자 한다. 기여율에 의한 영향을 FEM 모델링으로 고찰하기 위해, 복합소재 연료탱크의 알루미늄 라이너와 탄소섬유 적층에 작용하는 von Mises 등가응력을 후프방향과 헤리컬방향에 대하여 각각 계산하였다. FEM 해석결과에 따르면, 알루미늄 라이너에 작용하는 등가응력 기여율은 후프방향으로는 77.5%, 70° 경사진 헤리컬방향으로는 18.11%, 12° 경사진 헤리컬방향으로는 4.39%로 각각 작용하는 것으로 나타났다. 12° 경사진 탄소섬유 적층 두께비가 후프방향 적층 두께비의 42% 정도로 높게 유지됨에도 불구하고 알루미늄 라이너 소재에서 보여준 기여율 경향은 탄소섬유 적층의 강도안전성에 대해서도 유사한 것으로 나타났다. 결과적으로, 탄소섬유 연료탱크의 강도안전성은 탄소섬유 적층의 두께보다 와인딩 각도에 의해 더 많은 영향을 받는다는 계산결과를 보여주고 있다.

**Abstract** - The purpose of this paper is to analyze affecting ratios of strength safety in carbon fiber layer thickness of a composite fuel tank for FEV vehicles. To investigate affecting ratios by FEM modeling, the equivalent von Mises stress has been computed on the aluminum liner and carbon fiber layers of composite fuel tanks in hoop and helical directions respectively. According to the FEM results, the affecting ratios of an aluminum liner on the equivalent stress are 77.5% in hoop direction, 18.11% in 70° winded helical direction and 4.39% in 12° winded helical direction. These trends on the strength safety of carbon fiber layers have been shown as those of an aluminum liner even though the layer thickness ratio of 12° inclined carbon fiber is very high of 42% compared with that of hoop layer thickness. Thus, the computed results show that the strength safety of a carbon fiber fuel tank is more influenced by the winding angle rather than the fiber thickness of carbon fiber layers.

**Key words** : composite fuel tank, affecting ratio, hoop layer, helical layer, hydrogen gas, liner

†주저자:ckkim\_hongik@naver.com

## I. 서론

수소연료를 사용하는 FEV 차량의 연료탱크는 35~70MPa 정도의 고압에 충분히 견디면서 가볍게 제작되어야 효율성이 높다. 고압가스용 연료탱크로 개발된 강제기반 압력용기는 제조공정이 간단하므로 제작비가 저렴하지만 가스압력이나 경량화 측면에서 한계점을 갖기 때문에 보통은 35MPa 이하에서 사용한다. 반면에 알루미늄이나 플라스틱 소재를 라이너로 사용한 복합소재 압력용기는 제조공정이 복잡하고 고가의 탄소섬유를 사용하므로 제작비는 높아지지만 35~70MPa의 가스압력에도 충분히 견디며, 특히 용기를 가볍게 제조할 수 있으므로 수소연료 자동차용 압력용기로 널리 사용하고 있다.

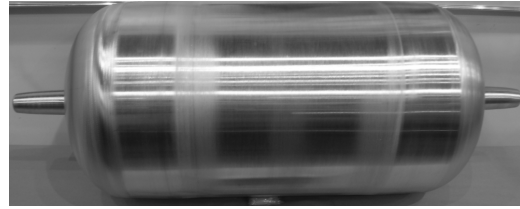
복합소재 압력용기의 핵심소재는 1940년대에 개발된 유리섬유 복합재료를 시작으로 현재의 탄소섬유 복합소재에 이르기까지 다양하게 개발되어 비행기, 우주선, 무기체계, 자동차 구조물 등에 적용하고 있다[1,2]. 탄소섬유 복합소재는 압력용기 구조물의 경량화를 통한 에너지 절감과 강도안전성 향상에 큰 기여를 하면서 탄소섬유 소재를 사용한 신제품 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

완전연소가 용이한 가스연료를 사용하여 차량의 탄소가스 배출량을 줄이거나, 또는 탄소를 없애고 수소연료만을 사용할 수 있도록 하기 위해서는 반드시 안전하고 가벼운 연료탱크를 사용해야 한다. LPG 연료와 같이 0.2~0.3MPa의 저압에서 사용하는 용기는 강재를 사용하고, CNG 연료와 같이 20MPa 정도의 고압에서 사용하는 용기는 강재에 원주방향으로 유리섬유 소재를 감아서 사용한다. 반면에 70MPa 정도의 고압에서 사용하는 용기는 알루미늄 라이너에 원주방향과 축방향 하중을 동시에 감당할 수 있도록 탄소섬유 소재를 감은 복합용기를 사용한다.

수소연료를 안전하게 저장하기 위해 연료탱크를 복합소재로 제작하고자 할 때는 용기에 걸리는 모든 하중을 충분히 견딜 수 있도록 탄소섬유 소재를 원주방향, 축방향, 사선방향 등 몇 개의 층을 겹치도록 감아서 강도안전성을 확보하는 것이 중요하다. 이것을 위해 본 연구에서는 연료탱크를 구성하는 복합소재의 각 층이 연료탱크의 강도안전성에 미치는 영향을 평가하기 위해 복합소재 적층의 두께변동에 따른 기여도를 분석하였다.

## II. 고압가스 연료탱크의 적층형상

FEV 자동차에서 수소연료를 안전하게 저장할 수 있도록 선정된 복합소재 연료탱크는 주행거리를 고



(a) Aluminium liner



(b) Pressure container wrapped with a carbon fiber in hoop and helical directions

Fig. 1. High pressure fuel tank for a hydrogen gas vehicle.

려하여 104L의 내용적에 70MPa의 압력을 견딜 수 있는 구조를 갖도록 설계하였다. 수소가스와 접촉하는 연료탱크의 내부에는 A16061-T6 재질의 라이너를 성형하고, 이 라이너의 외부에는 Toray T800C-24K 탄소섬유를 감아서 용기의 강도 및 밀봉 안전성을 확보하였다. 알루미늄 라이너의 외벽에는 탄소섬유 소재를 직각으로 감은 후프층, 12°로 경사지게 감은 1차 헤리컬층, 70°로 경사지게 감은 2차 헤리컬층 등 총 3개의 층이 겹쳐지도록 적층하여 제조하였다.

Fig. 1(a)는 알루미늄 소재를 성형하여 제조한 라이너이고, Fig. 1(b)는 알루미늄 라이너의 외면을 따라서 탄소섬유 소재를 원주방향과 헤리컬방향으로 적층이 되도록 감은 수소연료용 고압가스 연료탱크를 보여주고 있다.

## III. 복합소재 적층의 기여율 분석

### 3.1. 기여율

본 연구에서 복합탱크의 강도안전성에 영향을 주는 기여율[3,4]은 각각의 인자가 측정값의 변화량에

대해 어느 정도의 영향을 미치는가를 하나의 지표로 나타낸 것을 말한다. 즉, 각 인자의 변화량을 전체의 변화량에 대한 백분율로 나타낸 것을 의미한다. 만약에 기여율에 관련된 각 인자의 변화량에 대해 측정값의 변화량 비율이 증가한다면, 이 인자가 기여율 전체에 미치는 영향은 높아지기 때문에 설계에서 중요하게 다루어야 유용한 설계가 된다.

### 3.2. 복합소재 적층의 기여율

#### 3.2.1. 복합소재 적층의 구성

수소연료 저장탱크 용기의 강도안전성을 확보하기 위해 제조한 복합소재 연료탱크의 알루미늄 외면에는 3개의 복합소재 적층으로 구성된다. 즉, 알루미늄 라이너와 접촉하면서 감싸는 층은 후프층으로 원주방향을 따라서 가장 두껍게 형성하고, 그 다음으로 12°로 경사지게 감싸는 1차 헤리컬층은 후프층 대비 약 42%의 두께비를 갖도록 적층을 만든다. 또한, 70°로 경사지게 감싸는 2차 헤리컬층은 후프층 대비 약 5.3%의 두께비를 유지하도록 적층을 쌓아서 강도안전성을 확보한다.

여기서 후프층은 축방향을 기준으로 90°가 유지 되도록 감기 때문에 제작공정에서 큰 어려움은 없으나 1차 헤리컬층은 약 12°, 2차 헤리컬층은 약 70°가 되도록 경사지게 알루미늄 라이너 외벽면을 감기 때문에 제작하기가 까다롭다.

#### 3.2.2. 기여율 분석에 필요한 측정값 선정

복합소재 연료탱크의 강도안전성에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 분석하기 위해서는 기여율의 분석 기준이 될 수 있는 고압가스 용기의 측정값을 결정

해야 한다. 기여율에 영향을 미치는 요소를 분석하기 위해서는 연료탱크를 구성하고 있는 복합소재 탱크내부의 알루미늄 라이너와 외부의 복합소재 적층의 두께를 고려해야 한다.

Fig. 1에서 제시한 복합소재 연료탱크의 강도안전성에 영향을 미치는 기여율을 분석하기 위해서는 내부의 알루미늄 라이너에 대한 von Mises 응력과 외부의 복합소재 적층에 대한 섬유방향의 응력을 각각 측정한다. 이들 2가지의 측정값을 기여율 계산의 전체에 해당하는 값으로 결정하였다. 기여율 분석에서 가장 기본적인 측정값을 도출하기 위해 Fig. 2에서 제시한 104L의 저장용량을 갖는 FEM 해석모델[5]을 사용하였다.

강도안전성에 미치는 영향을 보다 정확하게 반영하기 위해서는 기여율 분석에서 제어할 수 있는 인자를 제외하고 제어 불가능한 인자의 영향을 최대한 줄이는 것이 중요하다. Fig. 1에서 제시한 고압가스 연료탱크는 두께가 일정한 실린더와 두께가 크게 변하는 돔 부분으로 나눌 수 있다. 특히 연료탱크의 돔 부분은 강도안전성을 확보하기 위해 실린더의 평행부에서 돔 부분으로 이동할수록 두께를 두껍게 설계한다.

연료탱크의 돔 부분은 두께가 일정하지 않기 때문에 돔 부분의 두께 변화가 제어불가능 요소로 기여율 계산에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 돔 부분을 제외한 실린더의 두께는 일정하므로 각 층의 두께가 일정한 실린더 부분만을 기여율 해석에서 고려하였다.

본 연구에서는 복합소재의 각 층이 연료탱크의 측정값에 미치는 기여율을 분석하기 위해 복합소재의 적층 두께를 하나의 인자로 선정하였다. 각 층의 두께에 일정한 변동량을 주고, 두께의 변화에 대한 응력 측정값을 FEM으로 해석하였다. 여기서 알루미늄 라이너의 두께를 인자로 선정하지 않았는데, 이것은 알루미늄 라이너에 가해진 자진작업 압력이 연료탱크에 미치는 영향을 없애기 위함이다.

#### 3.2.3. 해석조건

고압가스 연료탱크의 안전성을 인증하는 관련 규정에 따르면, 연료탱크의 강도안전성을 평가할 때 사용압력, 시험압력, 최소파열압력에 대한 조건들 모두를 적용해야 한다. 그러나, 여기서 제시한 압력의 크기는 기여율을 분석할 때 압력의 변화가 기여율에 영향을 미치지 않기 때문에 모두를 고려할 필요는 없다. 따라서 FEM 강도안전성 해석을 간편하게 진행하기 위해 알루미늄 라이너에 대한 자진작업을 한 후에 사용압력만을 적용하였고, 이 때 라이너나 복합소재의 각 층에서 발생하는 응력값을 측정하였다.

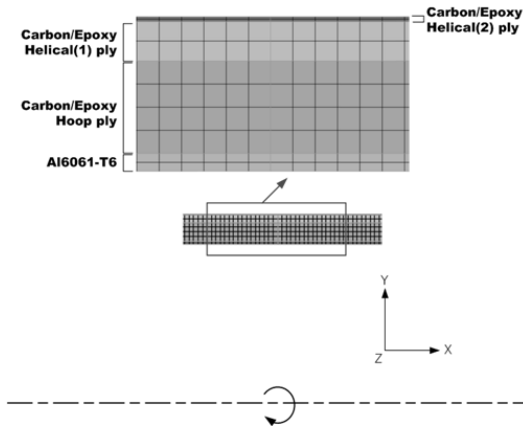


Fig. 2. Finite element models for affecting ratio analysis.

#### IV. 기여율 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 복합소재 연료탱크의 내용적이 104L이고, 사용압력이 700bar인 압력용기의 강도안전성을 담당하는 탄소섬유 소재의 적층 두께에 대한 기여율을 FEM으로 응력강도를 해석하였다.

Fig. 3은 복합소재 압력탱크의 반경방향과 원주방향으로 분포하는 von Mises 응력분포를 보여준 해석 결과로 용기의 두께에 비해 축방향 길이가 길기 때문에 응력분포 패턴은 균일한 것처럼 보여준다.

Table 1은 FEM으로 해석한 von Mises 응력값을 내측의 알루미늄 라이너와 외측의 탄소섬유 소재를 구성하고 있는 후프층, 1차 헤리컬층, 2차 헤리컬층 각각에 대하여 측정된 결과로 각각의 적층에 대한 기여율로 환산하여 나타낸 결과이다. 즉, 알루미늄 라

이너에 대한 자진작업을 한 후 사용압력이 작용할 때 알루미늄 라이너와 복합소재의 각 층에서 발생하는 von Mises 응력에 대해 기여율을 계산한 것이다.

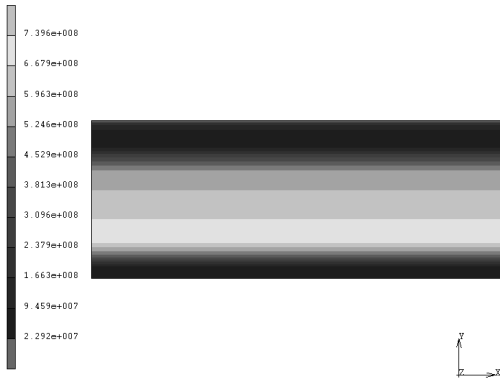
Table 1에서 알루미늄 라이너에 미치는 각 층의 기여율을 보면, 후프층은 약 77.5%의 높은 기여율을 나타내고 있다. 고압가스 연료탱크의 실린더 부분에서는 용기내부의 가스에 의한 압력이 작용할 때 반경방향으로 응력이 크게 증가하기 때문에 반경방향으로 작용하는 강도안전성을 확보하기 위해 후프층을 두껍게 설계하는데, Table 1에서 이러한 기여율의 차이를 확인할 수 있다. 즉, 알루미늄 라이너의 von Mises 응력에 미치는 후프층의 두께 변동량 영향이 다른 복합소재 층보다 크다는 것을 알 수 있다.

또한, 탄소섬유 소재를 경사지게 감은 각도가 12°인 1차 헤리컬층은 적층방향이 반경방향으로 많이 치우쳐있어 실린더 부분의 라이너에 걸리는 응력에 거의 영향을 못 준다는 사실을 기여율 4.39%로 잘 나타내고 있다. 반면에 2차 헤리컬층의 두께는 후프층에 대비 5.3% 수준으로 얇게 감았지만, 와인딩 각도가 70°로 크기 때문에 알루미늄 라이너 응력에 미치는 기여율은 18.11%로 높게 나타났다.

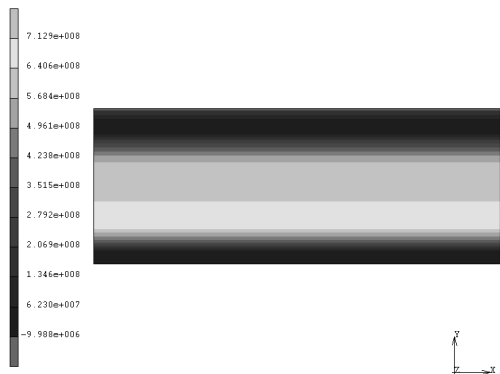
Table 1에서 제시한 또 다른 해석결과는 각 복합소재 두께의 변동량이 복합소재 적층의 응력에 미치는 영향을 기여율 통해 분석한 것이다. 복합소재의 각 층은 후프층의 두께 변동량에 대해 약 74%~82%의 영향을 받고 있어 실린더 부분에서는 후프층이 다른 층에 비해 가장 큰 중요도를 갖고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 또한, 70°로 감은 2차 헤리컬층은 탄소섬유의 두께 변동량에 대해 15%~21%의 높은 기여율을 갖는 것으로 나타내고 있다. 반면에 12°로 감은 1차 헤리컬층은 탄소섬유의 두께 변동량에 대해 3%~10%의 기여율을 갖는 것으로 가장 낮은 기여도를 나타내고 있다.

결과적으로 알루미늄 라이너와 섬유소재의 응력에 미치는 영향은 복합소재를 감는 방향에 따라 큰 영향을 받는 것으로 강도안전성에 대한 기여율 해석을 통해 알 수 있다.

복합소재 연료탱크를 구성하는 탄소섬유의 두께는 후프층에서 가장 두껍게 적층하고, 그 다음으로 1차 헤리컬층의 두께를 후프층 대비 약 42%이 되도록 적층하지만, 2차 헤리컬층은 후프층 대비 약 5.3%로 가장 얇게 적층하여 제조한다. Table 1에서 제시한 해석결과는 알루미늄 라이너나 복합소재에 걸리는 응력은 적층의 두께보다는 탄소섬유를 감는 헤리컬 각도에 의해 더 많은 영향을 받는다는 것을 의미한다. 따라서 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 확보하기 위해서는 탄소섬유의 적층 두께를 크게 하는



(a) Stress distribution in radial direction



(b) Circumferential direction

Fig. 3. Typical von Mises stress distribution of a composite fuel tank based on the finite element analysis.

**Table 1.** Affecting ratios of composite layers of a gas fuel tank

Total stress		Layer thickness	Hoop dir.	12° inclined helical dir.	70° inclined helical dir.
		Aluminum liner		77.5	4.39
Carbon fiber	Hoop dir.		82.38	2.68	14.94
	12° inclined helical layer dir.		73.99	4.53	21.48
	70° inclined helical layer dir.		74.48	9.57	15.95

것보다 헬리컬 방향으로 감는 적층의 각도설계를 더 중요하게 다루어야 한다.

### V. 결론

FEV 자동차용 연료탱크로 사용하는 탄소섬유 복합소재 압력용기의 강도안전성에 미치는 기여율 영향을 FEM으로 해석하였다. 기여율에 영향을 미치는 요소로 복합소재의 적층두께에 대해 일정한 변화량을 주고 FEM 해석을 통해 알루미늄 라이너와 탄소섬유의 각 부분에 걸리는 등가응력을 측정하여 연료탱크에 대해 평가하였다.

FEM 해석결과에 의하면, 알루미늄 라이너의 등가응력에 미치는 기여율은 후프층에서 77.5%로 가장 높고, 탄소섬유의 와인딩 각도가 70°인 경우의 기여율은 18.11%로 그 다음이고, 12°의 와인딩 각도를 갖는 경우는 4.39%로 가장 낮게 나타났다. 탄소섬유 소재의 강도안전성에 작용하는 기여율 경향은 라이

너와 유사한 경향을 보여주었다.

이러한 결과는 복합소재 연료탱크에서 강도안전성에 큰 영향을 미치는 요소가 복합소재의 적층두께보다는 복합소재를 감는 경사각도라는 것으로, 탄소섬유 소재를 와인딩하는 각도설계에 보다 많은 비중을 두는 것이 중요함을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] 이대길, 정광섭, “복합재료 역학 및 제조 기술”, 시그마프레스 (1998)
- [2] P.K. Mallick, “Fiber-reinforced composites”, CRC press (2008)
- [3] 류연선, 임오강, 박경진 공역, “최적설계입문”, 인터비전 (2001)
- [4] 박성현, “현대실험계획법”, 민영사 (2003)
- [5] “MARC user’s manual,” Version K6.1, MARC Analysis Research Co. (1996)