



다구찌법을 이용한 복합소재 수소연료탱크의 최적설계에 관한 연구

*김청균 · 김도현

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2011년 8월 13일 접수, 2011년 12월 24일 수정, 2011년 12월 27일 게재)

On the Optimized Design of a Composite Hydrogen Fuel Tank using Taguchi Method

†Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim

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

(Received August 13, 2011; Revised December 24, 2011; Accepted December 27, 2011)

요 약

본 연구에서는 70MPa의 충전압력을 갖는 130L 수소연료 저장탱크에 대한 최적설계를 유한요소법과 다구찌 설계법으로 고찰하였다. 6061-T6의 알루미늄 라이너의 외벽면에 T800-24K의 탄소섬유로 감아서 제조한 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 미국 DOT-CFFC와 KS의 설계안전 규격을 기준으로 해석하였다. 70MPa용 수소가스 탱크의 응력강도에 대한 FEM 해석결과에 의하면, US DOT-CFFC와 KS 규격에서 제시한 응력비 2.4의 기준값과 비교할 때 안전한 것으로 나타났다. 따라서, 다구찌 설계법에 기반한 최적설계 데이터는 설계모델 5번으로 선정할 수 있고, 여기서 제시할 수 있는 알루미늄 라이너의 두께는 6.4mm, 탄소섬유 적층에서 후프방향의 두께는 31mm, 헬리컬방향의 두께는 10.2mm이다.

Abstract - In this study, the optimized design for 130 liter storage fuel tank with 70MPa filling pressure has been investigated using a FEM technique and Taguchi design method. The strength safety of a composite fuel tank in which is fabricated by an aluminum liner of 6061-T6 material and carbon fiber wound composite layers of T800-24K has been analyzed based on the criterion of design safety of US DOT-CFFC and Korean Standard. The FEM computed results on the stress safety of 70MPa hydrogen gas tank were compared with a criterion of a stress ratio, 2.4 of US DOT-CFFC and Korean Standard, and indicated the safety. Thus, the optimized design elements based on the Taguchi's method were recommended as an aluminum liner thickness of 6.4mm, a carbon fiber laminate thickness in hoop direction of 31mm and a carbon fiber laminate thickness in helical direction of 10.2mm, which is represented by a design model of No. 5.

Key words : optimized design, hydrogen gas tank, composite material, Taguchi method, cylindrical bombe, aluminum liner

1. 서 론

가스를 연료로 사용하는 자동차에 연료의 안전한 충전과 저장, 방출을 위해서는 안전성을 특별히 보장할 수 있는 연료탱크, 즉 원통형상의 압력용기에

액상 또는 기상의 연료를 상온에서 고압으로 충전할 수 있는 강재의 원통용기 또는 복합소재 고압가스 압력용기를 사용한다.

가스연료를 저장하는 용기의 종류와 저장용량은 연료의 종류와 자동차의 주행거리, 충전압력 등을 감안하여 결정한다. 예를 들면, LPG 차량은 상온에서 액상을 유지하기 때문에 0.9~1MPa의 충전압력을 유

†주저자:ckkim_hongik@nate.com

지하므로 저가의 강재로도 안전성을 충분히 확보할 수 있고, CNG 차량은 상온에서 가스상을 유지하기 때문에 20.1MPa의 높은 압력으로 충전해야 적정의 주행거리를 확보할 수 있어 강재원통에 후프방향의 탄소섬유를 적층으로 감은 복합소재 연료탱크[1,2]를 많이 사용한다.

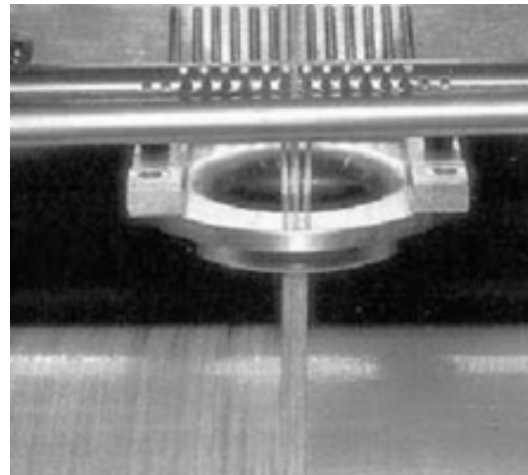
반면에 수소연료 차량은 상온에서 항상 가스상을 유지하고, 수소가스의 반응열은 탄소보다 크게 낮기 때문에 70MPa의 초고압으로 수소를 충전해야 가솔린엔진과 유사한 정도의 주행거리를 확보할 수 있다. 따라서 수소연료 차량에 사용하는 연료탱크는 고강도의 알루미늄 라이너 외벽면에 탄소섬유를 후프방향과 헬리컬방향으로 감은 복합소재 연료탱크를 사용해야 안전하다. 최근에는 연비와 주행거리를 확보하기 위해 수소연료 자동차용 복합소재 연료탱크의 압력은 높이고, 중량은 낮추려는 기술개발 경향 때문에 고가의 탄소섬유를 사용한 안전성 확보에 관심을 갖고 있다. 수소연료 자동차의 경제성과 주행거리를 감안할 때 가스연료탱크의 충전압력은 70MPa 이상, 저장용량은 130L 정도로 높여서 설계하는 것이 바람직하다.

따라서 가스연료 저장탱크의 설계 포인트는 압력 용기의 강도안전성을 높게 설계하면서 안전성을 충분히 확보하고, 가벼우면서 저렴하고, 또한 설치공간은 작게 차지하는 것이 바람직하지만, 이들 조건을 모두 만족할 수 있는 방안은 없다. 그렇지만 국내 외적으로 볼 때 친환경적 자동차만이 살아남을 것은 분명하고, 대기오염에 대한 규제치는 나날이 높아질 것이므로 탄화수소로 운행되는 자동차의 축소는 불가피하다. 최근 큰 관심을 끌고 있는 전기자동차는 전력생산에 필요한 에너지의 대부분을 탄화수소에 의존하여 생산한다는 것을 고려하면 수소연료 자동차에 대한 관심을 더 많이 갖는 것이 현실적이다. 따라서 대기환경을 보호하고, 자동차 산업발전의 지속성을 유지하기 위해서는 수소연료 자동차의 신속한 보급이 필요하다. 이러한 수소연료 자동차를 보급하기 위해서는 무엇보다도 안전하고 저렴한 고용량의 수소연료 저장탱크를 생산하는 것이 중요하다.

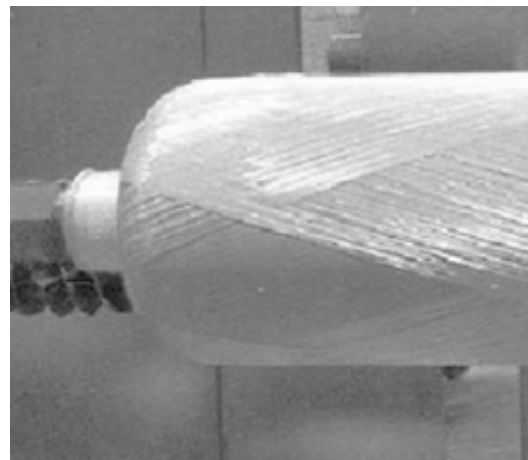
본 연구에서는 수소연료 자동차의 충전압력을 70MPa로 높게 유지하면서 저장용량을 130L로 키워 수소연료 차량의 주행거리를 500km 이상 확보할 수 있도록 원통형상의 알루미늄 라이너에 탄소섬유로 감은 복합소재 연료탱크의 최적설계를 다구찌 설계법과 FEM 해석법으로 수행하고자 한다.

II. 수소연료 탱크용 복합소재의 특성

본 연구에서 고려한 복합소재는 탄성강도, 강성도, 열응력, 단열특성 등이 대단히 우수한 탄소섬유(T800-24K)를 레진으로 접합한 물질로 가스연료탱크에 작용하는 70MPa의 가스압력을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 복합소재는 가볍고 하중지력이 대단히 우수하지만, 고가이기 때문에 항공기의 동체, 선박의 특수배관, 로켓트 추진체, CNG 연료탱크, 수소연료 연료탱크 등에 제한적으



(a) Hoop winding



(b) Helical winding

Fig. 1. Carbon fiber winding in hoop and helical directions.

로 사용하고 있다[3].

자동차용 수소연료 저장탱크에서 강도안전성을 충분히 확보할 수 있도록 Fig. 1에서 보여준 것처럼 알루미늄 라이너의 외벽면에는 후프방향과 헤리컬 방향을 따라서 탄소섬유 필라멘트가 잘 접착하도록 감아서 사용하는 가스탱크용 복합소재는 탄소섬유를 고분자 레진으로 접합하기 때문에 높은 감쇠성으로 인해 외부에서 전달되는 진동에너지를 흡수하고, 열팽창계수가 낮아 연료탱크 내외부의 온도변화가 커도 비교적 안전해야 한다. 또한, 이방성 물질인 복합소재는 섬유방향으로 가장 큰 강성과 강도를 유지하기 때문에 필라멘트의 와인딩 각도를 설계하기가 어렵고, 하중에 의해 파괴가 발생할 때까지 항복이 일어나지 않다가 갑자기 끊어지는 현상으로 진전되기 때문에 이에 적합한 설계를 해야 한다.

III. 가스연료탱크의 설계기준 및 해석조건

3.1. 설계기준

본 연구에서 설계한 수소가스 복합소재 연료탱크의 저장용량은 130L로 크고, 충전압력은 70MPa로 높다. 복합소재 연료탱크의 내부용기는 Table 1에서 제시한 고강도의 알루미늄 소재(6061-T6)로 압출 성형하여 강도안전성을 확보한다. 또한, Table 2는 FEM 강도해석과 다구찌의 최적설계에 필요한 탄소섬유 복합소재, T800-24K에 대한 물성치를 제시하고 있다.

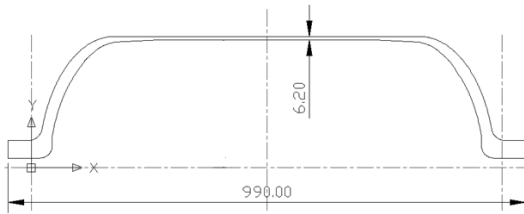


Fig. 2. Aluminum liner design model for 70MPa composite tank.

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
Tensile strength(Min), MPa	310

알루미늄 소재를 압출하여 제작한 내부용기 라이너의 외측면에는 탄소섬유 복합소재를 후프방향과 헤리컬방향으로 적층이 형성되도록 겹겹이 감아서 수소연료탱크의 강도안전성을 확보하였다. 본 연구에서 사용한 130L 저장용량의 알루미늄 압력용기에 대한 개략적인 설계치수는 Fig. 2에서 제시하고 있다.

3.2. 해석조건

본 연구에서 사용한 대표적인 FEM 해석모델은 Fig. 3에서 제시한 것처럼 복합소재 원통부의 알루미늄 라이너 두께, 복합소재 적층의 후프방향과 헤리컬방향으로 나타낸 적층두께를 각각 보여주고 있다. 복합소재 연료탱크의 최적설계를 위해 검증해야 하는 강도안전성에 연계된 FEM 해석을 위해서는 MARC[4]의 4절점 축대칭 솔리드 요소를 사용하여

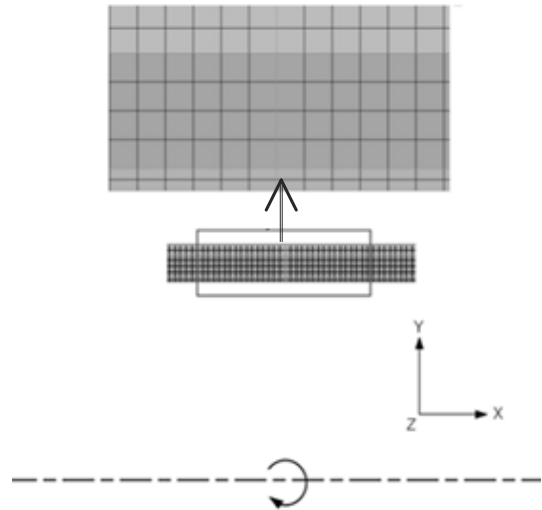


Fig. 3. FE analysis model.

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%

다. 여기서 알루미늄 라이너의 소성변형 강도안전성을 획기적으로 높이기 위해서는 자긴작업(autofrettage process)을 실시해야 한다. 알루미늄 라이너에 대한 자긴작업을 처리한 후에 충전압력(filling pressure), 시험압력(test pressure), 최소과열압력(minimum required burst pressure)을 모두 고려하여 수소가스의 내압을 설정하고, 가스연료탱크의 FEM 강도안전성을 만족하는 최적설계를 다구찌법으로 수행하였다.

IV. 다구찌 설계법을 이용한 최적설계

4.1. 다구찌 설계법

최적설계법의 하나인 다구찌 설계법은 1) 제품의 기능성을 저해하는 요소들의 영향을 최소화 하고, 2) 제품의 공정에서 요구하는 기능성을 최소한의 비용으로 달성하는 방법을, 3) 직교배열에 의해 설계 요소를 실험적으로 선정하는 최적화 기술이다. 따라서 품질의 특성값이 목표값을 벗어나면서 발생하는 품질저하, 즉 손실의 정도를 나타내는 손실함수로 SN비(신호 대비 노이즈 비율)로 품질의 양부를 결

Table 3. Design factors and levels for Taguchi's design method.

Factor Level	Al liner thickness, mm	Hoop layer thickness, mm	Helical layer thickness, mm	E
1	6.2	34	12.2	-
2	6	31	10.2	-
3	6.4	37	14.2	-

Table 4. Orthogonal array table of $L_9(3^4)$.

No.	Al liner thickness, mm	Hoop layer thickness, mm	Helical layer thickness, mm
1	6.2	34	12.2
2	6	34	10.2
3	6.4	34	14.2
4	6	31	12.2
5	6.4	31	10.2
6	6.2	31	14.2
7	6.4	37	12.2
8	6.2	37	10.2
9	6	37	14.2

정하는 설계법이다. 여기서는 SN비가 작으면 작을 수록 우수한 설계라 할 수 있는 망소특성과 크면 클 수록 좋은 설계라 할 수 있는 망대특성의 두 가지로 나타낼 수 있다. 망소특성의 대표적인 설계인자는 마모나 응력이고, 망대특성의 사례로는 수명이나 강도안전성 등이 있다.

다구찌법을 이용하여 최적설계를 수행하려는 수소연료 저장탱크에서 고려할 수 있는 설계인자는 Table 3에서 제시한 것처럼 알루미늄 라이너의 두께, 복합소재 적층에서 후프층의 두께와 헤리컬층의 두께이고, 각각의 설계인자에 대해 수준(level)을 달리하는 3개의 변동폭으로 제시될 수 있다. Table 3에서 제시한 설계인자의 최적 설계치는 가능한 응력비를 높게 유지하면서, 알루미늄 라이너의 강도를 안전하게 확보할 수 있어야 하며, 특히 복합소재의 적층두께는 얇게 설정하는 것이 바람직한 최적설계이다.

즉, 복합소재 연료탱크의 위험성을 고려하여 강도 안전성은 높게 유지하되, 탄소섬유의 가격이 대단히 고가인 점을 감안하여 탄소섬유의 무게는 가볍게 설계하는 것이 가장 합리적인 최적설계가 될 것이다.

다구찌 설계법에서 복합소재 가스연료탱크의 설계인자 모두를 고려하기는 어려우므로 Table 4처럼 대표적인 4인자 3수준의 직교배열 테이블을 사용하여 총 81개의 최적설계 모델을 9개로 축소하여 각각의 설계인자에 대한 최대응력과 복합소재 적층의 두께에 미치는 영향을 후프방향과 헤리컬방향에 대해 고찰하였다.

4.2. 해석결과 및 고찰

수소연료 저장탱크에서 수소가스와 직접 접촉하는 알루미늄 라이너는 자긴작업을 처리한 후 무부하 상태에서 발생하는 축방향의 잔류응력은 항복강도의 95%인 272MPa 이하를 유지해야 안전하다. 그렇다고 알루미늄 라이너의 항복강도 95%보다 너무 낮게 설계기준을 설정하면 안전하기는 하지만, 만약 연료탱크에 가해지는 충전압력이 높아질 경우 라이너에는 높은 인장응력이 발생하기 때문에 오히려 강도안전성이 불안정해지는 결과를 초래한다. 따라서 다구찌 설계법으로 설정한 알루미늄 라이너에 대한 잔류응력을 제시한 Fig. 4의 해석결과를 기반으로 평가하면, 설계모델 3번은 항복강도 95%에 위치하여 가장 우수한 잔류응력 조건을 제시하지만, 실제에서는 알루미늄 소재의 기계적 특성을 항상 균일하게 제조할 수 없다는 현실을 감안하면 위험한 설계조건이 될 수 있다. 그러나, 설계모델 1번, 5번, 9번은 이러한 걱정을 안 해도 되는 적절한 설계모델이라 할 수 있다.

또한, 복합소재 고압용기의 강도안전성을 규정한

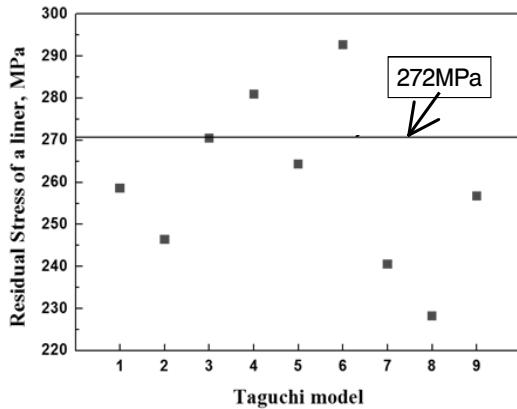


Fig. 4. Residual stress of an aluminum liner for 130 liter hydrogen gas storage tank.

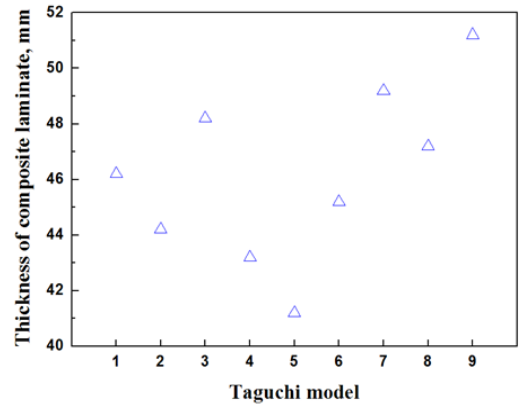


Fig. 6. Thickness of a composite laminate of a hydrogen gas storage tank.

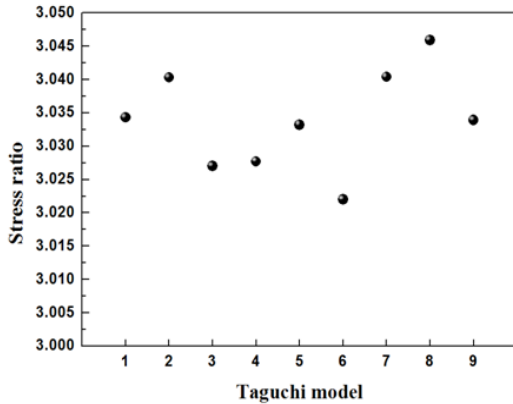


Fig. 5. Stress ratio of a carbon fiber composite for 130 liter hydrogen gas storage tank.

미국 DOT-CFFC[5] 및 KS[6] 기준에 의하면, 탄소섬유 복합소재에 걸리는 응력비는 시험압력에서 2.4를 초과해야 안전한 것으로 판단한다. 130L의 저장용량을 갖는 복합소재 연료탱크에서 탄소섬유 응력비 데이터를 제공한 Fig. 5의 해석결과에 의하면, Table 4의 모든 설계모델에 대해 2.4를 충분히 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 탄소섬유(T800-24K)를 알루미늄 라이너의 외벽면에 후프방향과 헤리컬방향으로 적층이 형성되도록 감을 경우 복합소재의 강도안전성은 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 복합소재의 적층두께에 대한 최적설계 데이터를 제공한 것으로 복합소재의 두께가 얇을수록 우수한 설계조건이라 할 수 있다. 따라서 복합소재의

적층두께가 가장 작은 설계모델 5번을 추천할 수 있고, 그다음으로 4번과 2번 모델을 고려할 수 있다. 그렇지만, 설계모델 4번은 Fig. 4의 해석결과에서 보여준 것처럼 알루미늄 라이너에 대한 강도안전성 측면에서 볼 때 예측된 잔류응력이 항복강도의 95%를 넘어서기 때문에 위험하여 선정하기가 어렵다. 또한, 설계모델 2번은 잔류응력이 상대적으로 낮아 연료탱크의 저장용량을 높이는데 하나의 문제점으로 지적될 수 있다.

Figs. 4~6의 해석결과를 기반으로 복합소재 연료탱크에 대한 최적설계 모델을 5번으로 선정하면, 알루미늄 라이너의 강도안전성 95% 이하, 복합소재의 응력비 2.4를 초과하는 기준 모두를 만족하기 때문에 최적의 설계조건이라 할 수 있다. 여기에 탄소섬유의 적층두께를 얇게 설정해야 소재가격이 저렴해지고, 복합소재 연료탱크의 경량화에도 기여할 수 있다.

따라서 본 연구에서 선정할 수 있는 최상의 설계 모델은 5번이고, 차선의 최적설계 해석모델로 1번과 9번으로 결정하는 것이 바람직하다. 즉, 130L의 저장용량과 70MPa의 충전압력을 갖는 복합소재 수소연료 저장탱크에서 알루미늄 라이너의 두께는 6.4mm, 후프방향의 탄소섬유 적층두께는 31mm, 헤리컬방향의 탄소섬유 적층두께는 10.2mm로 결정하는 것이 강도안전성과 저장용량, 경량화, 가격 등의 측면에서 유리하다할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서 고려한 130L의 저장용량과 70MPa의 충전압력을 갖는 수소연료 복합소재 저장탱크에 대

한 최적설계를 유한요소법과 다구찌법으로 해석하였다. 복합소재 연료탱크의 강도안전성은 KS와 미국 DOT-CFFC 규격에서 제시한 자기작업을 처리한 알루미늄 라이너의 항복강도를 95% 이하로 유지하고, 또한 응력비는 2.4를 초과해야 한다는 안전기준을 만족하는 고압가스 연료탱크에 대한 최적설계조건을 맞도록 도출하였다.

70MPa의 충전압력을 감당하는 자동차용 수소가스 복합소재 연료탱크에 대해 다구찌 설계법을 적용한 FEM 해석결과에 의하면, 응력비와 강도안전성 모두를 만족하는 최적의 설계조건은 내부탱크를 구성하는 알루미늄 라이너의 두께가 6.4mm이고, 탄소섬유로 감은 후프방향의 적층두께는 31mm, 헤리컬 방향의 적층두께는 10.2mm로 선정하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

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] 황태경, 박재범 외 2인, "필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 구조 수명 평가", 한국복합재료학회지, Vol. 21, No. 6, pp.23~30 (2008)
- [3] 이대길, 정광섭, 최진호, "복합재료 역학 및 제조 기술," 시그마프레스 (1998)
- [4] MARC, MARC User's Manual Ver. 7.3, MARC Analysis Research Corp., California, USA (1999)
- [5] US DOT-CFFC Basic Requirements (2007)
- [6] KS B ISO 11119-2 (2008)