KIGAS Vol. 13, No. 6, December, 2009
(Journal of the Korean Institute of Gas)

초고압가스 차량용 연료탱크의 강도안전성에 관한 유한요소해석

†김청균 · 김도현
홍익대학교 트리보 · 메카 · 에너지기술 연구센터
(2009년 11월 4일 접수, 2009년 12월 31일 수정, 2009년 12월 31일 채택)

Finite Element Analysis on the Strength Safety of a Fuel Tank for Highly Compressed Gas Vehicle

†Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim
Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 4. November. 2009, Revised 31. December. 2009, Accepted 31. December. 2009)

요 약

본 연구에서는 Al6061-T6 소재의 알루미늄 라이너와 탄소섬유-에폭시 및 유리섬유-에폭시 복합소재를 적층으로 감아서 제조한 복합소재 연료탱크에 대한 강도안전성을 유한요소법(FEM)으로 해석하였다. 복합소재 연료탱크는 내구성 향상을 위해 자긴공정(autofrettage process)으로 제조한 다음에 압축천연가스를 공급하였다. 자긴공정을 거친 가스탱크의 응력안전에 대한 FEM 해석결과는 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 설계안전 평가기준과 비교 · 평가하였다. FEM 계산결과에 의하면, 자긴공정을 거친 연료탱크의 응력강도는 돔 지역에서 약간 불안정한 것으로 나타났고, 몸체의 평행부에서는 비교적 균일한 안정성을 보여주고 있다. 자긴공정을 거친 복합소재 연료탱크의 평행부에서 관찰된 강도안전성 데이터는 평가기준 데이터로 제공된다. 9.2리터의 복합소재 연료탱크의 응력강도 안전성에 대한 계산결과에 따르면, 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 평가기준치를 모두 만족하는 것으로 나타났기 때문에 안전한 설계라 할 수 있다.

Abstract - In this study, the strength safety of a composite fuel tank which is fabricated by an aluminum liner of Al6061-T6 materials and composite layers of carbon/epoxy-glass/epoxy composites has been analyzed by using a finite element analysis technique. In order to enhance the durability of the composite fuel tank, an autofrettage process was used and compressed natural gas was supplied to the prestressed fuel tank. The FEM computed results on the stress safety of autofrettaged gas tanks were compared with a criterion of design safety of US DOT-CFFC and Korean Standard. The FEM computed results indicated that the stress safety of autofrettaged fuels tanks shows instability at the dome zone and uniform stability at the parallel body, which provide an evaluation data for a strength safety of autofrettaged composite fuel tanks. The computed results show that the stress safety of 9.2 liter composite fuel tanks satisfied the safety criteria of four evaluation items, which are provided by US DOT-CFFC and KS and indicated a safe design.

Key words : compressed natural gas, fiber-reinforced composite material, filament winding, fem

Ⅰ. 서 론

고압가스 차량용 연료탱크에서 LPG의 경우는 실린더 형상의 강재용기로 간단하게 제작하지만, 압축천연가스(Compressed Natural Gas)를 저장하기 위한 압력용기는 강재로 제작하기도 하지만, 높은 가스압력과 자중량을 고려하여 복합소재(composite material)로 제조하는 경우가 늘어나고 있다.

†주저자:ckkim_hongik@nate.com

섬유강화(fiber-reinforced) 복합소재는 기존의 어떠한 금속재료보다 강도와 강성도가 높아 고강도를 요구하는 천연가스 압력탱크, 항공기, 우주선 제품 등에서 널리 사용하고 있다. 섬유강화 복합소재는 비중이 낮지만 강도는 상대적으로 대단히 높기 때문에 높은 강도비와 강성비를 갖는 우수한 소재이다. 따라서 고강도의 경량부품을 제작해야 하는 제품에 많이 적용되고는 있으나 대단히 고가이기 때문에 기존의 금속소재를 대체할 정도의 소재로 자리를 잡기에는 어려움이 있다.

본 연구에서 초고압가스용 연료탱크 설계에 활용하려는 섬유강화 복합재료는 우수한 피로강도 특성을 갖기 때문에 경량화, 고강도의 파괴 안전성을 요구하는 우주항공, 자동차의 압력용기에서 다양하게 적용되고 있다[1,2]. 압력용기로 많이 사용하는 금속재료는 등방성 소재이지만, 복합재료는 이방성 재료이기 때문에 섬유방향으로 가장 높은 강성과 강도를 나타낸다. 또한 복합재료는 파괴가 발생할 때까지 항복이 일어나지 않는 특성을 가지고 있으므로 설계할 당시에 이러한 강도특성을 고려해야 한다. 복합재료는 대부분 섬유(fiber)와 매트릭스(matrix)로 구성되어 있고, 제조하려는 제품에 따라 성형하는 제조공법이 달라지는 특성이 있다. 복합소재로 축대칭이나 회전체 형상의 구조물을 제조하는 경우는 유리섬유나 탄소섬유 등을 이용한 필라멘트 와인딩(filament winding) 공법을 사용한다[3-5]. 이러한 와인딩 공법은 많은 수의 섬유가 실패(spool)로부터 풀려서 액체의 수지(resin), 촉매(catalyst) 등이 섞여 있는 수지통(resin bath)을 통과한 후 캐리지(carriage)에서 넓게 펼쳐진 후 맨드릴에 감기게 되는 제조법이다. 이 제조공법에서 수지의 함유량은 섬유의 장력과 수지를 닦아내는 정도에 관련되며, 이 제조법의 장점은 원통형이나 곡률을 가진 탱크 구조물을 일체성형으로 쉽게 제작할 수 있고, 하중을 전달하는 방향으로 섬유를 집중적으로 보강하여 복합재료가 가지고 강도안전 특성을 최대한 활용함으로써 높은 강도안전 작동조건을 확보할 수 있다.

Fig. 1. FEM analysis model of aluminum-carbon/epoxy-glass/epoxy composite tank.

본 연구에서는 압축천연가스와 같은 초고압가스를 안전하게 저장하기 위해 연료 저장탱크의 안쪽에는 압출 인장성이 우수한 알루미늄 라이너를 성형하여 제작하고, 이 라이너의 외측에 탄소섬유, 유리섬유로 이루어진 복합소재로 촘촘하게 연달아 감아 제조한 연료탱크에 대해 FEM 강도해석을 진행하였다. 고압가스 차량용 저장탱크를 사용압력을 공급한 상태에서 해석한 FEM 강도해석 결과는 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS규격에 따라 강도안전성 평가기준에 따라 평가하였다[6].

II. 유한요소해석

2.1. 해석대상

본 연구에서 고려한 유한요소 해석모델은 9.2리터의 저장용량을 갖는 초고압가스 차량용 복합소재 연료탱크로 Fig. 1에서 저장탱크의 단면모델을 보여주고 있다. 여기서 복합소재 저장탱크는 내부에 박판의 알루미늄 소재(Al 6061-T6)로 라이너를 제작하고, 이 알루미늄 라이너의 외측부에는 4개의 복층으로 구성된 복합소재 코드(code)를 겹겹이 적층하여 저장탱크의 강도안전성을 확보하도록 하였다. 즉, 복합소재를 원주 방향(hoop)과 헤리컬 방향(helical)으로 감아서 연료탱크의 강도안전성을 확보한다. 복합소재는 탄소섬유와 유리섬유에 에폭시를 레진으로 사용하여 안전하게 접합하였다.

Fig. 1에서 보여준 CNG와 같은 초고압가스 차량용 복합소재 저장탱크의 강도 안전성을 해석하기 위해 필요한 알루미늄 소재에 대한 물리적 특성치를 Table 1에서 간략하게 제시하고 있다.

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

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

Table 2. Pressure loadings.

Strength Safety Items	Criteria
Filling pressure, MPa	31
Test pressure, MPa	51
Minimum required burst pressure, MPa	105

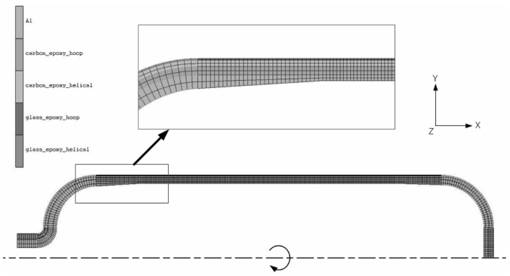

Fig. 2. FE analysis model.

2.2. 해석모델 및 작업압력

Fig. 2는 알루미늄 복합소재 저장탱크의 강도안전성을 고찰하기 위한 제시된 FEM 해석모델을 보여주고 있다. 초고압가스용 복합소재 저장탱크에 대한 해석모델은 4절점 축대칭 솔리드 요소(solid element)를 사용하였고, 알루미늄 라이너 저장탱크의 내면에 작용하는 가스압력에 의해 복합소재 저장탱크에 걸리는 응력특성을 해석하기 위해 축대칭 솔리드 요소는 비교적 정확한 시뮬레이션 해석결과를 제공하는 것으로 알려져 있다.

Table 2에서는 복합소재 저장탱크의 내부에 작용하는 가스압력의 크기를 자긴공정(autofrettage process)을 거친 탱크에 공급하는 충진압력, 시험압력, 저장탱크의 최소파열압력 등을 제시하고 있다. 저장탱크에 대한 강도안전성 시험평가는 자긴공정의 내압을 0MPa에서 시작하여 알루미늄 복합소재의 강도특성에 적합할 정도의 최대압력까지 끌어올리는 공정을 시뮬레이션하는 것이다. 이 공정에서 알루미늄 소재는 항복강도를 넘어서 소성영역에 진입함으로써 가공경화 현상에 의해 알루미늄 저장탱크는 높은 강도안전성을 확보하게 된다. 그 이후에 공급된 천연가스의 최고압력으로부터 다시 0MPa로 끌어내리고, 충전압력과 시험압력, 최소파열압력으로 변화시키면서 저장탱크의 응력특성을 관찰하여 안전성을 확보하게 된다.

복합소재로 제조된 저장탱크에 대한 자긴작업은 알루미늄 라이너가 있는 복합소재 용기를 제조할 때 제조공정 중에 가해지는 압력으로, 라이너에 항복강도를 초과하는 압력을 가하여 영구적인 소성변형을 일으켜서 강도 내구성을 높이는 제작공정을 말한다. 이 결과로 내부압력이 0MPa일 때에도 알루미늄 라이너는 자긴공정을 통해 형성된 압축응력을, 섬유소재는 인장응력을 갖게 된다.

2.3. 강도안전성 평가기준

Fig. 1에서 보여준 초고압가스 차량용 복합소재 저장탱크에 대한 강도안전성 평가는 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS에 기준하여 알루미늄 라이너 소재와 복합소재 2개 부분으로 나뉘어 평가를 진행하였다. 즉,

(1) 복합소재에 대한 자긴공정(autofrettage process)을 거친 후 0MPa이 되었을 때, 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 등가응력은 알루미늄 소재의 항복응력 95% 수준을 초과해서는 안 된다.
(2) 복합소재에 대한 자긴공정을 거친 후 충전압력을 작용할 때, Al 라이너의 벽면에 걸리는 인장응력은 알루미늄의 항복응력 60% 수준을 초과해서는 안 된다.
(3) 충전압력에서 최대섬유응력은 최소파열압력에서의 최대섬유응력의 30% 수준을 초과해서는 안 된다.
(4) 시험압력에서 유리섬유에 대한 최소응력비는 3.4를 달성하거나 또는 그 이상으로 초과해야 안전하다.

III. 강도안전성 해석결과

Figs. 3과 4는 초고압가스 차량용 복합소재 저장탱크의 알루미늄 라이너 및 복합소재에 내압으로 작용하는 충진압력 31MPa 및 시험압력 51MPa을 공급하였을 때, 알루미늄 라이너에 걸리는 응력분포 특성을 보여주고 있다. FEM으로 계산한 해석결과를 보면, 알루미늄 라이너 소재의 최고응력은 라이너 몸체의 중간부근에서 높은 응력이 균일하게 발생하는 것으로 나타났다. 물론 압력탱크의 노브(knob) 부근에서 국부적으로 큰 응력이 걸리는 것은 소재의 라운드 처리부분의 오차라고 생각하면 된다. 여기서 제시된 응력분포는 알루미늄 소재의 기계적 강도범위 이내에 있으므로 안전한 것으로 판단된다.

Figs. 5와 6은 초고압가스 차량용 복합소재 저장탱크의 알루미늄 라이너 및 복합소재에 내압으로 작용하는 시험압력 51MPa을 공급하였을 때, 알루미늄 라이너의 축방향을 따라서 작용하는 응력특성을 해석한 결과이다. 저장탱크에 공급된 시험압력이 51MPa일 때 알루미늄 라이너에 작용하는 응력은

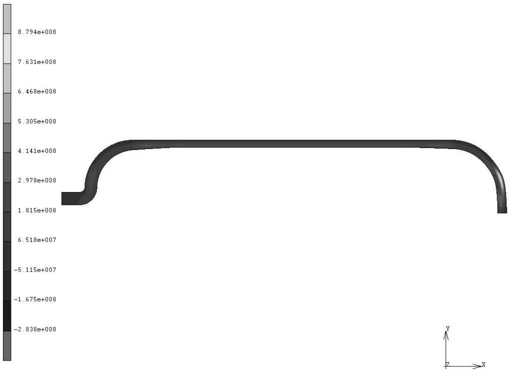

Fig. 3. von Mises stress distribution of aluminum liner at the filling pressure of 31MPa.

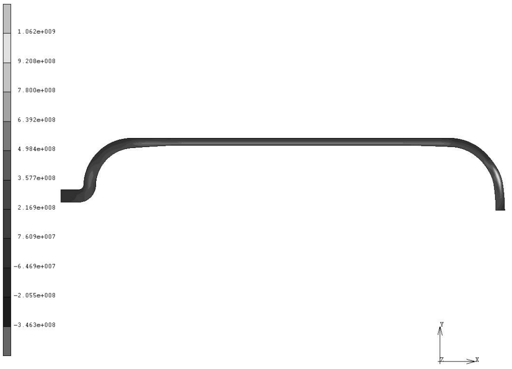

Fig. 4. von Mises stress distribution of aluminum liner at the test pressure of 51MPa.

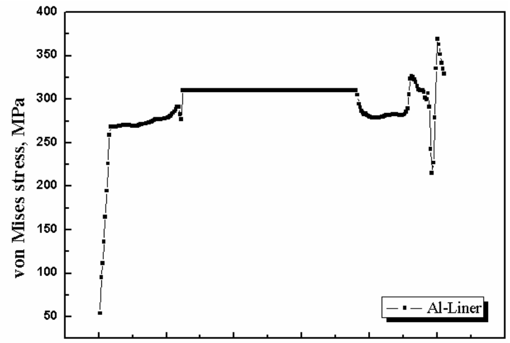

Fig. 5. von Mises stress of aluminum liner at the test pressure of 51MPa.

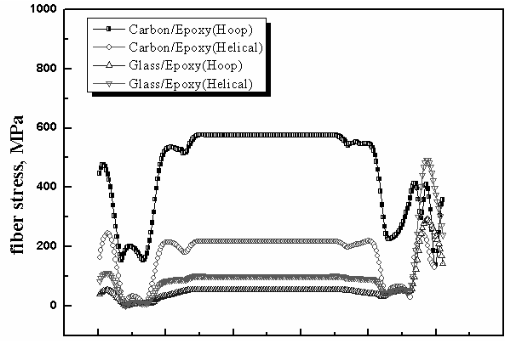

Fig. 6. Fiber stress of composite material at the test pressure of 51MPa.

비교적 높으면서 균일한 von Mises 응력이 작용하는 것으로 나타났고, 가스를 충전하고 방출하는 돔(dome) 부분에서 높아진 응력조건은 FEM 해석에서 사용한 축대칭 해석모델의 구속조건에 의해 형성된 것으로 판단되므로 본 해석의 관찰영역에서는 배제하였다. 따라서 탱크해석에서 의미를 갖는 저장탱크의 알루미늄 라이너 중심부근에서 계산된 응력값을 강도안전성 평가기준 데이터로 사용하였다.

복합소재 저장탱크의 안전성을 평가하기 위한 평가항목과 평가기준은 각국에서 기준으로 제시하고 있다. 따라서 초고압가스 복합소재 저장탱크를 사용하기 위해서는 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 규격에서 제시한 평가기준치를 모두 만족해야 한다. 본 연구에서 제시한 Fig. 1의 탱크모델에 대한 강도해석 결과에 의하면, DOT-CFFC와 KS에서 제시한 평가 기준치를 만족하는 것으로 나타났기 때문에 설계측면에서 본 탱크의 강도안전성을 확보하고 있다. 그러나 복합소재를 제조하는 과정에 제조결함이 발생하거나 탱크를 버스 등에 장착하여 사용하는 과정에 외부충격을 강하게 받으면 초고압가스용 저장탱크의 안전성을 담보할 수 없기 때문에 반드시 실험적으로 강도안전성을 체크하고, 복합소재를 제조하는 프로세스를 엄격하게 관리하는 것이 초고압가스용 저장탱크의 안전성을 담보하는 지름길이다.

Fig. 5에서 제시한 알루미늄 라이너에 대한 FEM 응력강도 해석결과에 의하면, 복합소재에 대한 자긴공정을 거친 후에 0MPa이 되었을 때 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 von Mises 등가응력은 270MPa로 알루미늄 소재의 항복응력의 94.4%에 해당한다. 이것은 복합소재 저장탱크의 강도안전성 평가기준으로 제시된 95% 이하이기 때문에 안전한 것으로 판단할 수 있다. 또한, 복합소재의 자긴공정을 거쳐 강성도를 크게 높인 후에 충전압력을 가한 상태에서 알루미늄 라이

너의 벽면에서 발생하는 인장응력은 137MPa로 알루미늄 소재의 항복강도 60% 이하를 만족해야 하는 강도안전 평가 기준치에 미달하므로 안전한 것으로 판단된다. 따라서 알루미늄 소재로 제조된 Fig. 1과 같은 초고압가스 차량용 복합소재 저장탱크에 내압이 작용할 경우에 대한 가스저장 탱크의 안전기준 두 가지 조건을 모두 만족하고 있다.

Fig. 6은 알루미늄 복합소재의 박막적층에 대한 FEM 강도해석 예측결과를 제시한 데이터이다. 여기서 예측된 응력강도는 저장탱크에 충전압력을 공급한 상태에서 복합소재에 걸리는 최대섬유응력이 최소파열압력의 30% 이내에 존재해야 복합소재 강도상 안전하다는 것이다. Fig. 6의 FEM 해석결과에 의하면, 후프 방향의 탄소섬유/에폭시 소재응력은 29.8MPa, 헤리컬 방향의 탄소섬유/에폭시 소재응력은 27.5MPa로 모두 30% 이하이기 때문에 안전한 것으로 생각된다. 또한 후프 방향의 유리섬유/에폭시 소재응력은 26.8MPa, 헤리컬 방향의 유리섬유/에폭시 소재응력은 27.1MPa로 모두 30% 이하이기 때문에 모두 안전한 것으로 나타났다.

복합소재에 대한 또 다른 안전기준은 최소응력비에 대한 것으로 탄소섬유는 2.4, 유리섬유는 3.4 이상으로 설계되어야 안전하다. 이 경우 KS 평가기준을 만족하기 위해 해석한 Fig. 6의 해석결과에 의하면 후프 방향의 탄소섬유/에폭시 최소응력비는 2.4, 헤리컬 방향의 탄소섬유/에폭시 응력비는 2.4로 탄소섬유의 최소응력비 조건 이상으로 예측되어 모두 안전한 것으로 나타났다. 또한, 후프 방향의 유리섬유/에폭시 최소응력비는 3.4, 헤리컬 방향의 유리섬유/에폭시 최소응력비는 3.5로 모두 초과하는 것으로 나타났으며, 전체적으로 볼 때 안전기준을 모두 만족하는 것으로 판단된다.

다만, 실제의 초고압가스 차량용 복합소재 저장탱크 제조를 위해서는 만약을 위해 안전성 평가기준을 보다 강화시킬 필요성은 제기되지만, 결국은 제조비용과 안전성 측면의 타협점을 찾는 것이 보다 중요한 설계 포인트라 생각된다.

요약하면, 본 연구에서 제시한 Fig. 1의 복합소재 저장탱크 해석모델은 복합소재 안전성 평가기준을 만족하는 것으로 해석되었지만, 이론적 수치해석의 신뢰성이 아무리 우수해도 실제의 가스 저장탱크는 폭발사고가 발생할 경우 대단히 위험하기 때문에 본 연구와 같은 FEM 해석결과를 바탕으로 설계하되, 반드시 실험적 실증연구를 거쳐 강도안전성을 확보하는 것이 중요하다.

Ⅳ. 결 론

Al6061-T6 소재의 알루미늄 라이너와 에폭시를 레진으로 사용하고, 탄소섬유와 유리섬유로 이루어진 복합소재를 감아 성형한 복합소재 연료탱크에 대해 FEM 강도안전성 연구를 수행하였다. 자긴공정을 거친 후에 여러 가지의 가스압력을 공급한 상태에 대한 강도해석을 수행하고, 그 결과를 DOT-CFFC와 한국 KS규격에 따라 평가하였다.

FEM 응력특성 해석결과에 의하면, 저장탱크에서 발생한 응력은 특히 돔에서 측정위치에 따라 변하지만 저장탱크의 몸통부에서 발생한 응력은 비교적 균일한 것으로 나타났다.

또한 복합소재 저장탱크의 강도안전성 평가기준에 따라서 FEM 강도해석 데이터와 비교하면 모두 평가기준을 만족하는 것으로 나타났기 때문에 본 연구에서 제시한 9.2리터의 초고압가스용 복합소재 연료탱크의 안전성을 확보된 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 박재성, 강현규 외 4인, “필라멘트 와인딩된 복합재 탱크의 거동해석과 변형률 측정”, 한국항공우주학회지, 29(7), pp.49-55, (2001)

[2] 공철원, 윤종훈, 이용무, “알루미늄 라이너를 이용한 KSR-Ⅲ 복합재 탱크 개발”, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.318-321, (2002)

[3] 이대길, 정광섭, 최진호, “복합재료 역학 및 제조기술”, 시그마프레스, (1998)

[4] 주상건, 권진희 외 3인, “필라멘트 와인딩 압력용기의 비선형 유한요소해석”, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.151-156, (1992)

[5] 황태경, 박재범 외 2인, “필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 구조 수명 평가”, 한국복합재료학회지, 21(6), pp.23-30, (2008)

[6] KS B ISO 11119-2, (2008)