



수소연료 저장탱크용 알루미늄 라이너의 강도안전성에 관한 연구

†김청균 · 김도현

홍익대학교 트리보 · 메카 · 에너지기술 연구센터
(2012년 4월 15일 투고, 2012년 6월 19일 수정, 2012년 6월 19일 채택)

A Study on the Strength Safety of an Aluminium Liner for a Hydrogen Fuel Storage Tank

†Chung Kyun Kim · Do Hyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received April 15, 2012; Revised June 19, 2012; Accepted June 19, 2012)

요약

본 연구에서는 70MPa의 충전압력을 갖는 110L 수소연료 저장탱크에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. 6061-T6 알루미늄 라이너의 외벽면에는 Toray의 T800-24K와 T700-12K, 그리고 Mitsubishi Ray의 MR60H-24P 탄소섬유를 사용하여 와인딩한 복합소재 연료탱크의 강도안전성을 미국의 DOT-CFFC와 KS의 안전규격으로 고찰하였다. 70MPa용 수소가스탱크의 응력강도에 대한 FEM 해석결과에 의하면, 거의 유사한 소재특성을 갖는 Toray의 T800-24K와 Mitsubishi Ray의 MR60H-24P는 70MPa의 수소연료 저장탱크를 제조하는데 사용해도 안전한 것으로 나타났다. 반면에, Toray의 T700-12K는 70MPa의 충전압력을 갖는 복합소재 저장탱크를 제조하기에는 강도안전성을 보장할 수 없으므로 60MPa 이하의 수소연료 복합소재탱크 제조를 권장한다.

Abstract - In this study, the strength safety for 110 liter hydrogen fuel storage tank with 70MPa filling pressure has been analyzed using a FEM technique. The strength safety of a composite fuel tank in which is fabricated by an aluminum liner of 6061-T6 and carbon fiber wound composite layers of T800-24K and T700-12K of Toray, and MR60H-24P of Mitsubishi Ray has been investigated based on the criterion of a strength safety of US DOT-CFFC and Korean Standard. The FEM computed results on the strength safety of 70MPa hydrogen gas tank showed that the hydrogen fuel storage tank in which is fabricated by T800-24K and T700-12K of Toray, and MR60H-24P of Mitsubishi Ray is safe because those two carbon fibers have very similar material properties. But, the composite storage tank with a filling pressure of 70MPa in which is fabricated by T700-12K of Toray may not guaranty the strength safety, and thus this study recommends a composite hydrogen fuel tank under 60MPa.

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

1. 서론

차세대 자동차용 친환경 연료로 개발된 수소(H₂)는 연소과정에서 발생하는 저위발열량은 57,750kcal

로 탄소연료의 97,200kcal에 비해 40%나 떨어지는 발열량[1]을 갖는다. 수소연료는 지구온난화의 주범으로 알려진 이산화탄소 배출이 전혀 없기 때문에 가장 유망한 연료로 부각되어 상용화 연구를 적극 추진하고 있다.

수소를 자동차용 연료로 사용하기 위해서는 수소

†주저자:ckkim_hongik@nate.com

가스를 안전하게 저장할 수 있는 고압용기가 필요하고, 수소는 발열량이 낮기 때문에 한번 충전으로 어느 정도의 주행거리를 확보할 수 있는지가 중요한 관심사항이다. 따라서 수소가스를 저장하는 탱크는 더 많은 수소가스를 저장할 수 있도록 용량을 크게 설계하는 것이 중요하다. 즉, 수소연료를 사용한 차량은 주행거리 안정성을 확보하고 있어야 하고, 수소연료 충전소까지 안전하게 도착할 수 있을 정도의 저장용량을 갖추어야 한다.

결국 수소연료는 탄소연료에 비해 발열량이 40%나 낮고, 가스상태로 저장해야 하므로 액체연료에 비해 초고압으로 충전하는 것이 경제성이지만, 위험성은 더 높아진다. 수소가 무공해 연료로 각광을 받는다 해도 자동차 연료로 사용하기 위해서는 기존의 휘발유나 경유와 같은 액체연료와, LPG 및 CNG와 같은 가스연료와 경쟁해야 한다.

수소연료 저장탱크의 장착으로 인한 안전성과 경제성을 확보하기 위해서는 고강도 알루미늄 라이너로 제작한 원통형상의 고압용기 외벽면에는 탄소섬유 복합소재로 와인딩[2,3]하여 강도안전성을 확보하고, 탄소섬유와 같은 고강도 경량소재 사용으로 연비향상을 꾀하고, 최적설계를 통한 경량화로 경제성을 확보하는 것이 중요하다.

또한, 자동차의 긴 주행거리와 경제성을 확보하기 위해서는 수소가스의 충전압력을 70MPa 이상으로 높이고, 저장용량을 100L 이상으로 높여서 한 번의 충전으로 500km 정도를 주행할 수 있는 수소연료 저장탱크를 개발하는 것이 수소연료 자동차의 핵심기술이다.

자동차용으로 개발된 수소연료 저장탱크에는 알루미늄 라이너와 탄소섬유를 와인딩한 복합소재 연료탱크가 있으나, 아직은 알루미늄이나 탄소섬유 가격이 고가이기 때문에 경제성 측면에서 수소연료 자동차의 운행이 아직은 어렵다. 하지만, 국제적으로 탄소발생량을 감축하려는 노력은 자동차 산업에도 영향을 미쳐 친환경 자동차 개발에 박차를 가하고 있다. 최근에 가장 큰 관심을 갖고 있는 수소가스 자동차와 전기 자동차가 차세대 자동차로 각축을 벌이지만, 이것들로 성능과 가격 측면에서 상용화하기에는 아직도 멀었다.

따라서 본 연구에서는 수소가스 저장탱크의 용량이 110L이고, 충전압력이 70MPa인 복합소재 수소가스 연료탱크에 작용하는 고압가스 연료탱크에 대한 강도안전성을 FEM으로 해석하고, 그 결과를 미국의 DOT-CFFC[4]와 한국의 KS 안전기준[5]으로 평가하여 그 유용성을 고찰하고자 한다.

II. FEM 해석모델 및 하중조건

2.1. FEM 해석모델

Fig. 1에서 보여준 FEM 해석모델에서는 초고압으로 충전된 수소연료가 외부로 누출되지 않도록 수소연료 저장탱크의 최내측 구조물로 변형거동 안전성이 우수한 알루미늄 라이너를 원통형상으로 성형하고, 그 외곽표면에는 저장탱크에 작용하는 초고압의 가스압력에도 강도안전성을 충분히 확보할 수 있도록 탄소섬유로 와인딩한 복합소재 용기로 제조하였다.

수소가스 저장탱크의 강도안전성을 해석하기 위해 사용한 FEM 해석모델은 중심축을 기준으로 대칭형상을 가진 MARC[6]의 4절점 축대칭 솔리드 요소를 사용하였다. Fig. 1에서 보여준 해석모델에 가해지는 가스내압조건은 대칭을 형성하고 있으므로 전체 복합소재 연료탱크의 1/4만을 고려한 축소모델로 강도안전성을 해석하였다.

FEM 강도안전성 해석에서 연료탱크에 저장된 수소가스는 균일하게 작용한다고 가정하여 반경방향에 대한 전단응력의 변형은 없는 것으로 간주할 수 있으므로 Fig. 1의 해석모델은 원주방향을 따라서 인장 또는 압축 거동만을 나타낸다.

2.2. 하중조건

수소연료 저장탱크의 알루미늄 라이너에 공급된 수소가스 충전내압은 70MPa로 알루미늄 소재만으로는 감당하기가 어렵기 때문에 외측표면에 탄소섬유를 후프방향과 헤리컬방향으로 서로 엇갈리게 와인딩하고, 연료탱크의 경량화와 강도안전성을 충분히 확보할 수 있도록 자기작업을 한다.

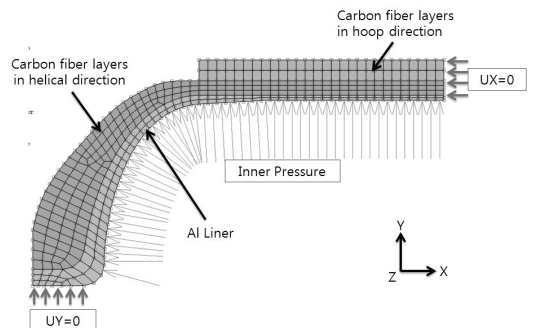


Fig. 1. FEM analysis model for 70MPa hydrogen gas cylinder and 110 liter storage capacity

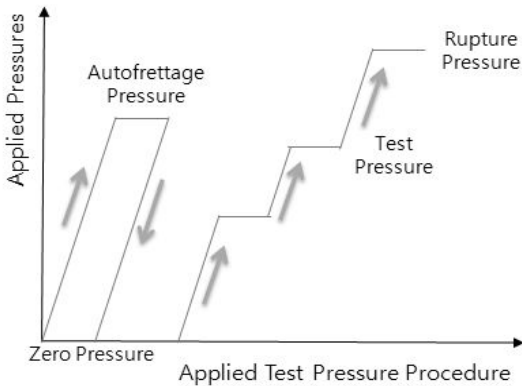


Fig. 2. Supplied pressures for testing a composite gas cylinder from autofrettage pressure to burst pressure

알루미늄 라이너에 대한 자진작업을 한 후에는 복합소재 수소연료 저장탱크를 안전하게 사용할 수 있는가를 확인하기 위해 충전압력(filling pressure) 70MPa, 시험압력(test pressure) 105MPa, 최소과열압력(minimum required burst pressure) 164.5MPa의 시험평가를 거쳐 안전성이 확인되면 사용한다.

복합소재 수소연료 저장탱크의 강도안전성을 확보하기 위해 자진작업을 거쳐 시험압력과 최소과열압력에 이르는 시험평가 프로세스를 Fig. 2에서 제시하고 있다.

III. 사용소재 물성치

110L의 저장용량을 갖는 복합소재 연료탱크가 70MPa의 수소가스를 안전하게 저장하고, 가스누출을 완벽하게 차단할 수 있도록 고강도 알루미늄인 6061-T3을 사용한다. Table 1은 라이너로 사용한 Al 6061-T6 소재의 기계적 특성을 제시하고 있다.

또한, 수소연료 저장탱크의 복합소재로 사용한 탄소섬유는 일본의 Toray사에서 생산한 T800-24K와 T700-12K, 그리고 Mitsubishi사에서 생산한 MR60H-24P의 세 가지가 있고, 이들 소재를 사용하여 Fig. 1에서 제시한 FEM 해석모델의 강도안전성을 상대적으로 비교하였다.

일본의 두 업체에서 제공한 탄소섬유의 물성치는 Table 2와 같지만, 이들 데이터의 정확도는 실험환경과 실험방식에 따라 약간씩 달라진다. Table 2에서 제시한 데이터만을 기준으로 판단하면 강도에서는 Toray 제품이 우수하고, 강성에서는 Mitsubishi 제품이 우수함을 알 수 있다. 그렇지만, 이들 물성치

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
Ultimate strength(Min), MPa	310

Table 2. Unidirectional material properties of carbon fiber

Properties	Toray (T800-24K)	Toray (T700-12K)	Mitsubishi Rayon (MR60H-24P)
Tensile Strength, MPa	5,880	4,900	5,680
Density, g/cm ³	1.8	1.8	1.81
Strain, %	2	2.1	1.9
Filament Dia, μm	5	7	5

는 알루미늄 라이너의 외측벽면에 어떤 각도로 와인딩하고, 어느 정도의 두께를 선정하느냐에 따라 강도가 달라지기 때문에 물성치만으로 복합소재 수소탱크의 강도안전성을 논하기는 어렵다.

IV. 알루미늄 라이너의 강도안전성 평가기준

자동차용 복합소재 수소연료 압력용기의 강도안전성은 국제적으로 공인된 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 기준에 의해 알루미늄 라이너를 평가할 수 있다. 즉,

① 복합소재 압력용기에 자진공정을 거친 후 0MPa이 되었을 때, 알루미늄 라이너의 벽면에서 발생한 응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 95%(272MPa)를 초과해서는 안 된다.

② 복합소재 압력용기에 자진공정을 거친 후 충전압력을 작용할 때, 알루미늄 라이너의 벽면에 걸리는 인장응력은 알루미늄 소재의 항복응력 대비 60%(172MPa)를 초과해서는 안 된다.

V. 강도안전성 해석결과 및 고찰

5.1. 탄소섬유소재에 따른 안전성 해석

본 연구에서 사용한 수소연료 저장탱크의 저장용량은 110L이고, 충전압력은 70MPa로 알루미늄 라이너에 걸리는 강도안전성을 Toray의 T800-24K와 Mitsubishi Rayon의 MR60H-24P, Taray의 T700-12K를 갖고 상대적으로 비교·고찰하였다.

Fig. 3은 Fig. 1에서 보여준 FEM 해석모델의 강도안전성을 편리하게 평가할 수 있도록 알루미늄 라이너에서 평행한 중심지역을 표시한 A에서 축 중심의 플랜지부 B에 이르기까지 라이너의 외경벽면을 따라 응력값을 측정할 수 있는 모델을 표시하고 있다.

Fig. 4는 탄소섬유소재 T800-24K를 사용하여 알루미늄 라이너를 와인딩한 복합소재 연료탱크에 120MPa의 자기압력을 작용하였을 때 알루미늄 라이너에 걸리는 응력분포도를 보여준 FEM 해석결과이다. Fig. 4에서 보여준 것처럼, 후프방향으로 와인딩한 탄소섬유 적층부근의 응력은 균일하게 나타나지만, 저장탱크의 평행부에서 돔부로 연결되는 부근에 걸린 응력은 급격하게 증가함을 알 수 있다. 그러다가 돔부를 지나 플랜지에 의해 연결되는 B부근에 작용하는 응력이 급격하게 떨어져 강도안전성을 충분히 확보하는 응력저동 특성을 보여주고 있다.

Fig. 5는 탄소섬유소재 MR60H-24P를 사용하여 알루미늄 라이너를 와인딩한 복합소재 연료탱크에 Fig. 4와 동일한 작동조건을 적용한 상태에서 알루미늄 라이너에 걸리는 응력분포도를 보여준 결과이다. Fig. 5에서 제시한 응력분포 해석결과는 Fig. 4의 경우와 거의 같은 응력분포도와 강도안전성을 그대로 확보하고 있다.

Fig. 5(b)에서 예측한 von Mises 응력 해석결과에 의하면, 수소연료 저장탱크의 평행부에서는 237MPa

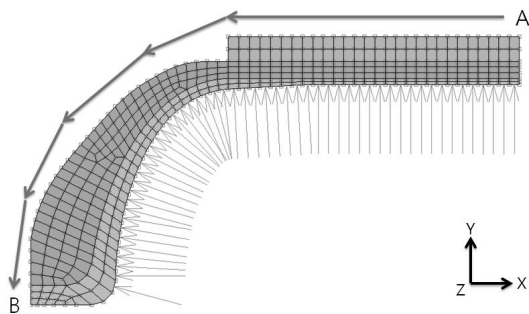
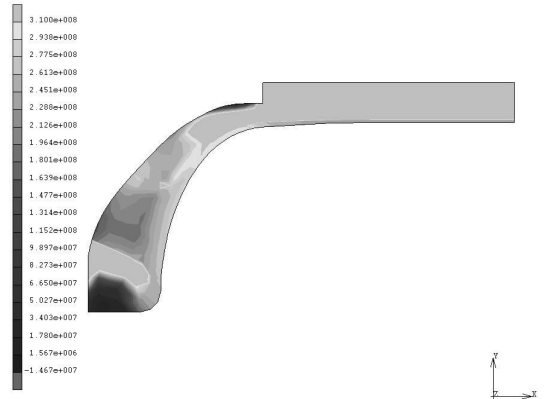


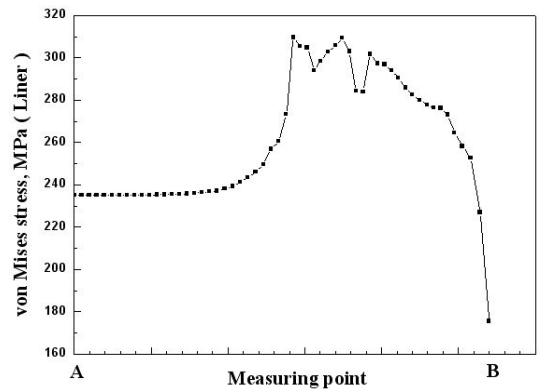
Fig. 3. Measuring points of the stress along Al liner surface from A to B.

로 항복강도의 95%인 272MPa 이내에 있으므로 충분히 안전하다. 또한, 탄소섬유 T800-24K를 사용하여 해석한 Fig. 4(b)의 235MPa와 큰 차이가 없으므로 나타났다. 또한, 수소연료 저장탱크의 평행부가 끝나는 지역에서 관찰된 von Mises 응력의 최대값은 311MPa로 T800-24K의 310MPa과 거의 같은 강도안전성을 유지하고 있다. 이것은 탄소섬유로 사용한 Toray T800-24K와 Mitsubishi Rayon MR60H-24P의 소재특성이 거의 같은 물리적 특성을 갖기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 수소연료 저장탱크를 와인딩한 탄소섬유소재는 T800-24K 또는 MR60H-24P 어느 것을 사용해도 70MPa의 충전압력을 갖는 수소탱크를 제조해도 안전한 것으로 나타났다.

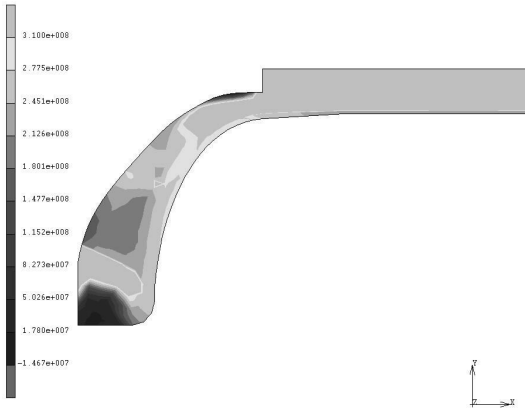


(a) Stress distribution

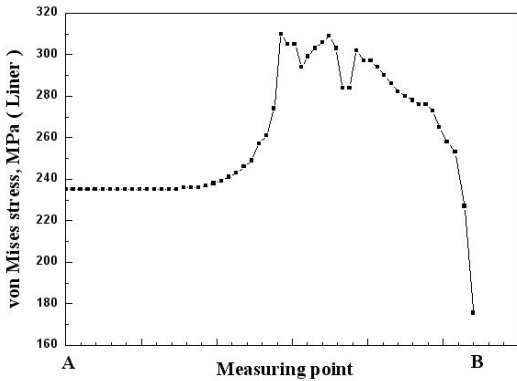


(b) Stress along the surface from A to B

Fig. 4. von Mises stress along the surface of an aluminum liner from A to B with a carbon fiber of T800-24K.



(a) Stress distribution

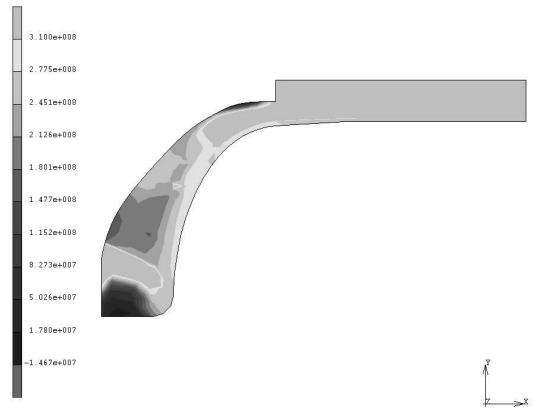


(b) Stress along the surface from A to B

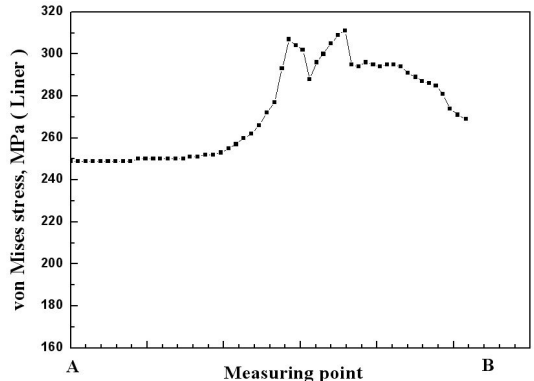
Fig. 5. von Mises stress along the surface of an aluminum liner from A to B with a carbon fiber of MR60H-24P.

Fig. 6은 탄소섬유소재 T700-12K를 사용하여 알루미늄 라이너를 와인딩하여 제조한 복합소재 연료탱크에 120MPa의 자긴압력을 작용할 때 Al 라이너에 걸리는 응력분포도를 보여준 FEM 해석결과이다. Fig. 6(a)에서 보여준 것처럼, 후프방향으로 와인딩한 탄소섬유 적층부근에서는 균일한 응력을 나타내지만, 저장탱크의 평행부가 끝나는 지역에서 관찰한 von Mises 응력의 최대값은 312MPa로 T800-24K의 310MPa에 비해 높게 나타났다. 이 결과는 소재특성을 감안할 때 70MPa의 복합소재 저장탱크에 사용하기에는 상대적으로 불안정하다 할 수 있다.

Fig. 6의 강도안전성 해석결과에 의하면, 수소연료 저장탱크의 평행부에서 나타난 von Mises 응력은 250MPa로 항복강도의 95%인 272MPa보다 충분히 낮아 안전하지만, 탄소섬유소재 T800-24K를 사



(a) Stress distribution



(b) Stress along the surface from A to B

Fig. 6. von Mises stress along the surface of an aluminum liner from A to B with a carbon fiber of T700-12K.

용한 경우의 235MPa보다는 6.5%나 더 높아 강도안전성 측면에서 약간 불안정한 것으로 나타났다. 또한, 저장탱크의 평행부가 끝나는 지역에서 관찰한 von Mises 응력의 최대값은 312MPa로 T800-24K의 310MPa에 비해 높게 나타났다. 이 결과는 소재특성을 감안할 때 70MPa의 복합소재 저장탱크에 사용하기에는 상대적으로 불안정하다 할 수 있다.

5.2. 수소가스 내압변동에 따른 안전성 해석

알루미늄 라이너의 강도안전성을 확보하기 위해 사용한 복합소재에 따라 달라지는 응력을 비교한 데이터를 Fig. 7에서 제시하고 있다. 강도안전성을 해석한 Fig. 7의 FEM 결과에 의하면, 탄소섬유소재 T800-12K와 MR60H-24K는 70MPa의 수소가스 내압이 작용할 때 280MPa의 von Mises 응력이 걸리지만,

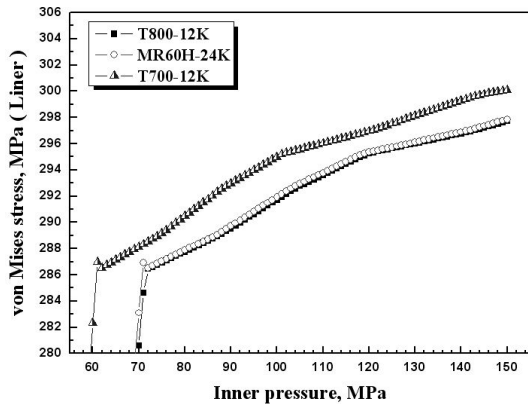


Fig. 7. von Mises stress of an aluminum liner for carbon fibers with T800-12K, MR60H-24K, and T700-12K.

T700-12K는 60MPa의 내압이 작용해야 280MPa의 von Mises 응력이 걸리는 것으로 나타났다. 이것은 탄소섬유 T800-12K와 MR60H-24K의 von Mises 응력은 T700-12K에 비해 16.7%나 더 높은 강도안전성을 갖는다. 이들 3가지 탄소섬유소재의 응력거동 패턴이 거의 같은 것으로 보아 탄소섬유 제품의 내구성은 모두 안정된 것으로 판단된다.

또한, 탄소섬유 T800-12K의 응력이 MR60H-24K 보다는 3~6MPa 낮게 예측되어 강도안전성 측면에서 약간 앞서지만, 이들 두 소재를 사용하여 저장탱크를 제조해도 안전성에는 문제가 없고, 70MPa의 수소연료 저장탱크 제조에 사용해도 안전할 것으로 사료된다. 반면에 T700-12K를 사용하여 수소연료 저장탱크를 제조할 경우는 60MPa 정도를 넘지 않는 범위에서 설계하는 것이 안전함을 알 수 있다.

VI. 결론

충전압력 70MPa과 저장용량 110L을 갖는 수소연료 자동차용 복합소재 저장탱크에서 알루미늄 라이너의 강도안전성을 FEM으로 해석하였다. 복합소재 연료탱크에서 Al 라이너의 강도안전성을 확보하기 위해서는 미국의 DOT-CFFC와 한국의 KS 규격에서 언급한 “자진작업을 처리한 알루미늄 라이너의 항복강도를 95% 이하로 유지”해야 한다는 조건을 만족하는 탄소섬유 T800-12K, MR60H-24K, T700-12K의 3가지를 사용하여 상대적으로 평가하였다.

FEM 해석결과에 의하면 유사한 물리적 특성을 보유한 Toray의 탄소섬유 T800-12K와 Mitsubishi Rayon의 MR60H-24P는 70MPa의 충전압력을 갖는 복합소재 저장탱크를 제조해도 거의 같은 강도안전성을 확보하고 있어 문제가 없는 것으로 예측되었다. 그러나, Toray의 탄소섬유소재 T700-12K를 사용하여 70MPa의 저장탱크를 제조하기에는 불안정하므로 60MPa 이하의 수소가스 저장탱크를 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 김청균, “자동차엔진공학”, 복두출판사, pp.118 (2004)
- [2] 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)
- [3] 황태경, 박재범 외 2인, “필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 구조 수명 평가”, 한국복합재료학회지, Vol. 21, No. 6, pp.23~30 (2008)
- [4] US DOT-CFFC Basic Requirements (2007)
- [5] KS B ISO 11119-2 (2008)
- [6] MARC, MARC User's Manual Ver. 7.3, MARC Analysis Research Corp., California, USA (1999)