

연료전지 차량용 TYPE3 복합재 고압용기 개발

정 재한¹⁾, 조 성민²⁾, 김 태욱³⁾, 박 지상⁴⁾, 정 상수⁵⁾

Development of Hydrogen Type3 composite cylinder for Fuel Cell vehicle

Jaehan Chung, Sungmin Cho, Tae-Wook Kim, Jisang Park, Choonki Yun

Key words : Composite cylinder(복합재 실린더), Type3(타입3), Filament Winding (저장탱크), Fuel cell vehicle(연료전지차량)

Abstract : The objective of this study is to demonstrate and commercialize for on-board fuel storage system for the hydrogen fuel cell vehicles. Type3 composite cylinder is consisting of the full wrapped composites on a seamless aluminum liner. Especially, the seamless aluminum liner has been commercialized with development of fabrication through this study. The key technologies, including design, analysis and the optimized filament winding process for 350bar composite cylinder, were established and verified with design qualification test in accordance with international standard. And the facilities for fabrication and design qualification test have been constructed.

1. 서 론

카본, 케블라, 유리섬유 등의 보강섬유와 에폭시 등의 수지를 사용하여 만든 복합재료는 우수한 비강도, 비강성도, 그리고 내피로 특성 등으로 경량화와 고강성, 고강도가, 요구되는 고급 구조물에 광범위하게 사용되고 있다.¹⁾

특히 필라멘트 와인딩 성형기법으로 제작되는 복합재료 압력용기는 재래식 금속재 압력용기에 비해 40~60% 정도의 중량으로 설계/제작이 가능하고, 뛰어난 내식성과 내피로 특성을 가진다. 또한 파손 시 금속재 압력용기가 폭발형태의 급격한 파괴가 발생하는 반면, 복합재료 압력용기의 경우, 급격한 파괴 이전에 내부 유체가 먼저 누출되어 버림(Leakage before burst)으로 구조적으로 안전성이 우수한 특성을 갖는다.²⁾

필라멘트 와인딩 복합재 압력용기는 그 구조적 특성상 이음매 없는 라이너(seamless liner)의 제조적 어려움과 설계, 해석 그리고 최적의 필라멘트 와인딩 과정의 어려움이 있는데 특히 라이너 제조 과정 시, 돔 부위의 곡률과 와인딩 각도가 연속적으로 변화하기 때문에 유한요소해석을 위한 모델링에 많은 시간과 노력이 소요된다. 또한 최적의 필라멘트 와인딩의 형태를 찾기 위한 부단한 노력이 필요한 현실이다.

본 연구는 350 bar, 74L급 수소저장용 복합재 압력용기의 국내 개발 및 생산을 위해, 이음매 없

는 라이너 개발, 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 설계, 해석 및 필라멘트 와인딩 성형기술, 시험평가 기술을 연구하고 이를 바탕으로 상용화하고자 한다.

2. 수소 저장용기의 설계 및 해석

국산 라이너 시제품이 개발될 때까지 수입라이너를 이용한 복합재 설계 타당성 평가를 수행하고 있다.

탄소섬유는 고성능 타입을 직접 사용한 모델과 이와 동일한 성능을 구현하기 위해 범용 탄소

- 1) (주) 이노컴
E-mail : jhchung@inocom21.com
Tel : (053)616-1360 Fax : (053)616-1363
- 2) (주) 이노컴
E-mail : cho225@inocom21.com
Tel : (053)616-1360 Fax : (053)616-1363
- 3) (주) 이노컴
E-mail : twkim@inocom21.com
Tel : (053)616-1360 Fax : (053)616-1363
- 4) 한국기계연구원
E-mail : jspark@kims.re.kr
Tel : (055)280-3316 Fax : (055)280-3498
- 5) 한국기계연구원
E-mail : css4592@kims.re.kr
Tel : (055)280-3316 Fax : (055)280-3498

섬유를 보강하여 제작된 모델로 나누어 설계 및 제작을 수행하였다.

이를 통해 연료전지 차량용 350 bar, 74L급 Type 3 복합재 압력용기의 설계/해석/제조/시험 평가의 핵심요소기술을 개발하였다.

알루미늄 라이너를 비롯한 수지와 섬유의 기계적 특성을 확보하기 위해 만능시험기와 Extensometer를 이용하여 기계적 특성시험을 하였다. 알루미늄은 AL6061, 수지는 Epoxy, 보강섬유는 탄소섬유이다. 각 원재료 물성들의 기계적 특성은 요구되어지는 ANSI/NGV2-2000의 규격에 따라 아래의 Table 1에 나타내었다.^{3),4)}

Table 1 원소재의 기계적 특성

원재료	물성값	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	전단강도 (MPa)	비고
라이너		311	358	14.5	-	Pass
카본섬유		-	4136	-	-	Pass
수지		-	-	-	41.26	Pass

2.1 라이너 설계

라이너는 필라멘트 와인딩 시 최적의 성능을 발휘하기 위해 등장력 돔 이론을 이용하여 돔 좌표를 생성하였으며, 확관공정(Ironing), 최종제품 치수, 피로특성 및 자진처리압을 고려하여 벽두께를 산출하였다.⁵⁾

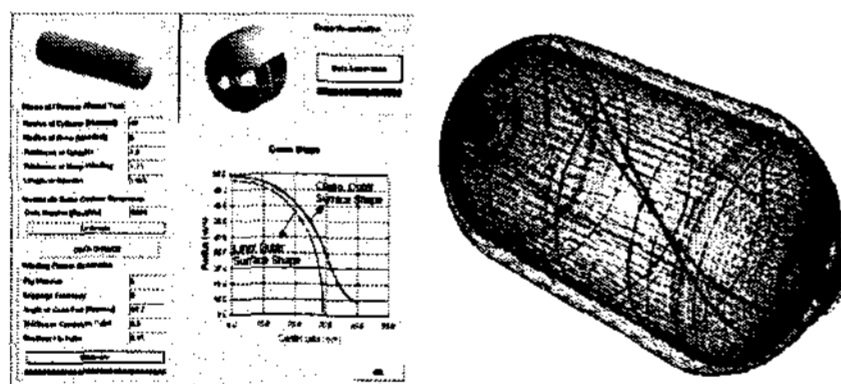
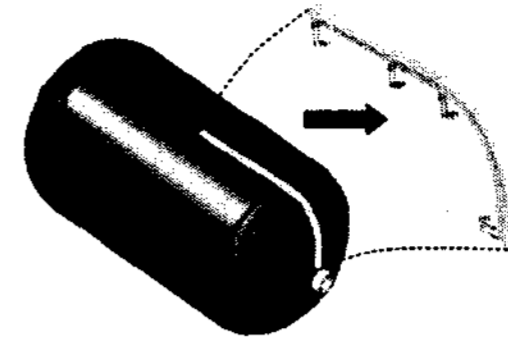


Fig.1 필라멘트 와인딩을 고려한 돔 contour 생성

2.2 복합재 압력용기의 유한요소 모델링

두꺼운 복합재의 거동을 예측하기 위하여 재료 및 기학적 비선형성을 고려하여 설계기법을 구축하였다. 특히 돔부위는 헬리컬의 각도가 연속적으로 변하며 감기므로 기존의 고정된 각도로만 설계하는 기법으로는 모델링의 정확성이 저하된다.



<Full Modeling 기법>

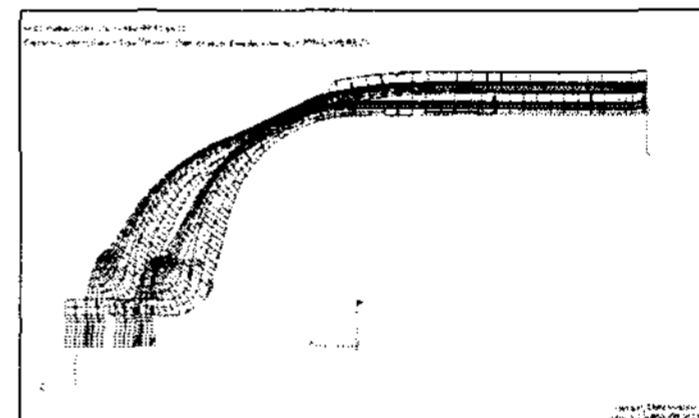
Fig.2 유한요소 모델링 단계

따라서 돔 부위의 정확한 거동 예측 및 응력 분포 확인을 위해 연속적으로 변하는 헬리컬 각도까지 고려하여 해석할 수 있는 기법을 개발했다.

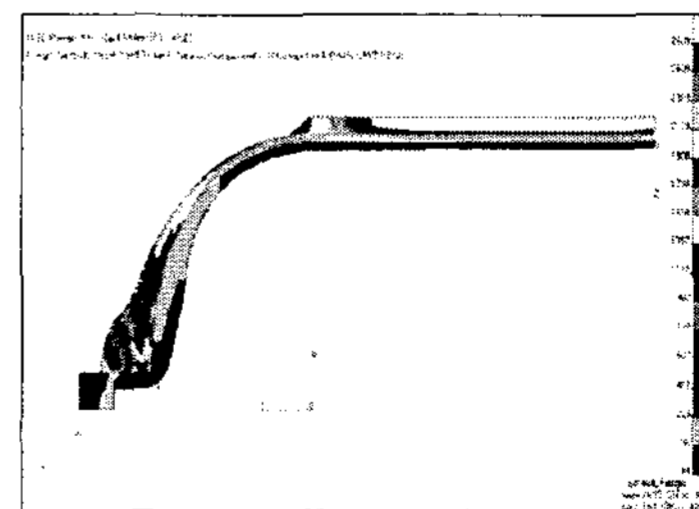
이를 이용한 와인딩 패턴설계로 반복 충전시 발생하는 돔 부위 경계점(knuckle부)에서의 굽힘 변형 등의 과도한 변형 발생을 최소한으로 억제하여 피로특성을 증대시켰다.

구조해석은 유한요소의 3D 적층고체요소(3D Layered Solid Element)를 활용하였으며, 각 하중 단계별로 각각 수행하였다.

위의 여러 해석, 설계요소를 적용하여 탄소섬유 소재, 라이너 형상 등의 설계변수가 용기의 구조 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 다양한 상세 구조해석을 수행하였으며, 설계변수의 변화에 따른 용기의 구조적 거동 고찰을 통해 아래 Fig.3와 같은 결과를 산출하였다.⁵⁾



(a) 각 하중별 응력분포 산출



(b) 각 하중별 변형변위 산출

Fig.3 각 하중별 응력과 변형 모델링

3. 이음매 없는(Seamless) 알루미늄 라이너 제조 및 건전성 평가

알루미늄 라이너 성능을 결정하는 벽두께 구현을 위한 주요 공정으로서 아래 Fig.4 와 같이 확관 Tool 설계기법 구축하였다.

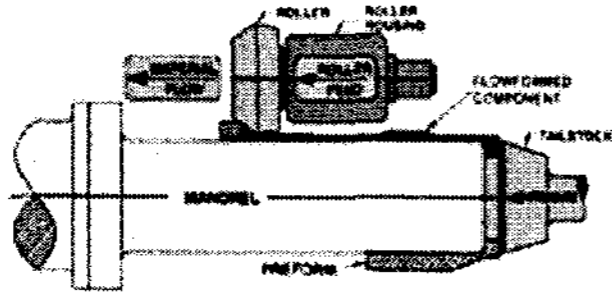
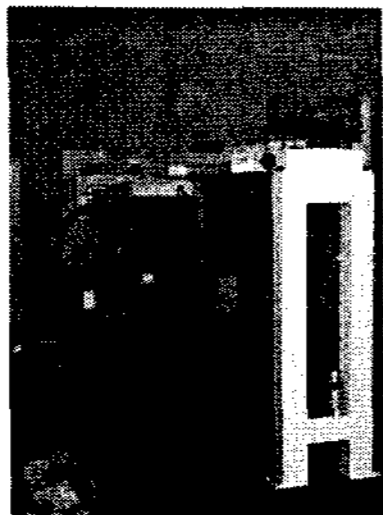


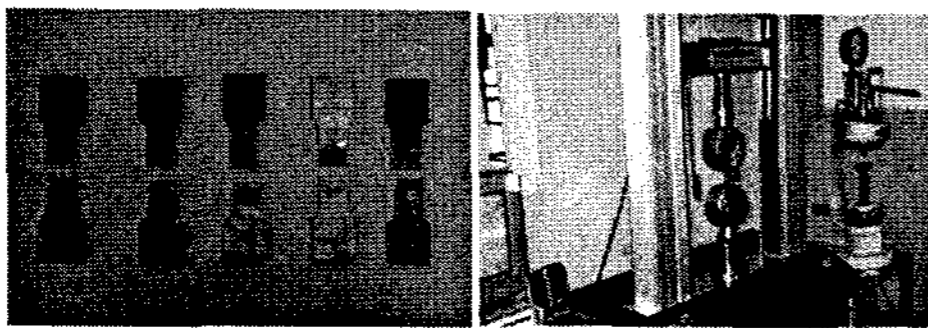
Fig. 4 환관 공정 개략도

또한, 전용 Spinning 기계 구축으로 양쪽 Boss 및 Dome를 성형하였고 T6 열처리에 의한 라이너를 제조하였다.



Picture. 1 전용 Spinning 기계

위와 같이 제조되어진 라이너의 건전성 평가 요소로서 치수, 벽두께 및 Dome contour의 정확한 구현과 기계적 물성값을 평가하여 설계, 해석 시 적용하였다.⁷⁾



Picture. 2 Seamless Tube의 기계적 물성평가

4. 복합재 압력용기의 시제작 및 성능 평가

유한요소해석법을 통한 구조설계 결과를 이용하여 시제품에 대한 무게 및 전체 크기를 CATIA 3D 모델로 예측하였으며, 공정해석으로 획득한 최적 와인딩 패턴을 예측하고 구현하였다.

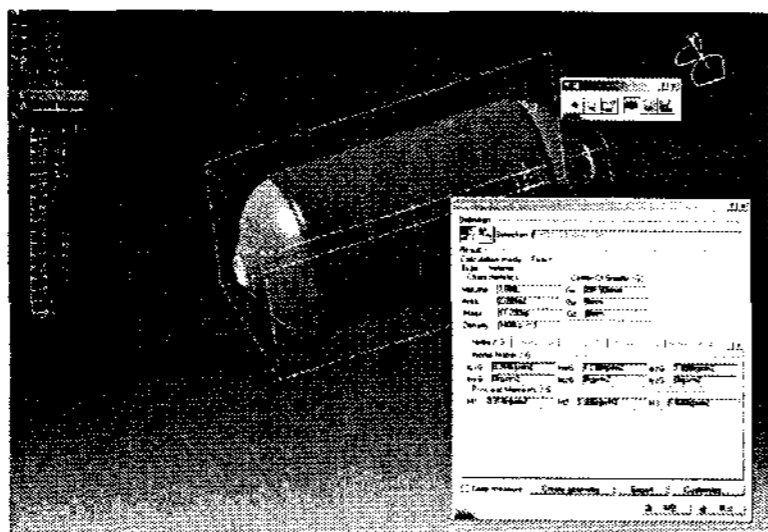
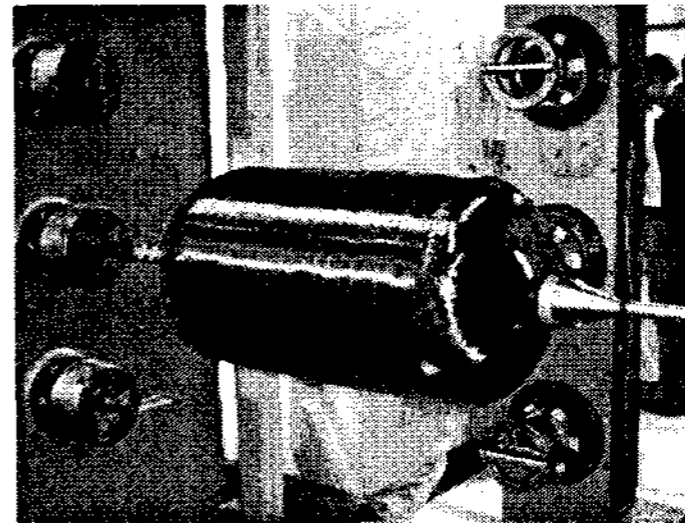


Fig.5 3D CATIA 모델링

공정해석을 통해 획득한 최적 와인딩 패턴 및 필라멘트 와인딩 장비를 사용하여 시제품을 제작하였다. 또한, 제작된 시제품은 두꺼운 복합재료의 원활한 경화를 위해 수지의 최적경화 사이클을 개발하여 응력 분포 및 거동을 예측하였다.

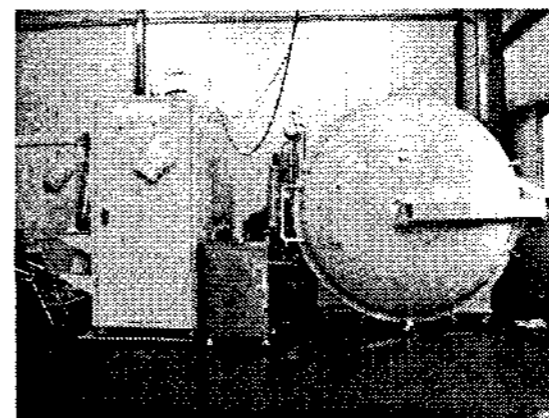


Picture. 3 시제작 제품

Table 2 시제품 특성

Water Capacity	74 L
Outside Diameter	399 mm
Total Weight	36 kg
Overall Length	900 mm
External Volume	85.9 L
H2 Capacity	1.7 kg
Weight Efficiency	4.5 wt%
Volumetric Efficiency	20 kg/m ³

위와 같이 제작된 시제품을 위해 성능평가는 개정된(Modified) NGV2-2000의 규정에 따라 반복 파열 테스트를 완료하였다.^{8),9)}



Picture. 4 파열, 반복 시험장비



(a) 반복 전 시제품 (b) 반복완료 후 시제품



(c) 파열 후 시제품

Picture. 5 시제작 반복, 파열 테스트

5. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 등장력 돔이론을 이용해 설계하였으며 3차원 비선형 FEM을 통해 각 부위의 응력분포 및 거동을 예측하였다. 따라서 복합재 압력용기가 수소 자동차에 적용될 수 있는 최적의 구조설계를 하였다.

둘째, 이음매 없는(Seamless) 알루미늄 라이너를 제조하기 위해 확관, 스피닝(Spinning) 기술을 개발하여 이론 설계값과 최대한 부합되도록 하였다.

셋째, 필라멘트 와인딩 공법으로 복합재 압력용기를 성형하였으며 특히, 설계해석으로 획득된 와인딩 패턴의 공정해석을 통해 실제 필라멘트 와인딩에 적용되도록 최적화 시켰다. 이와 더불어 두꺼운 복합재료를 위한 최적경화 사이클을 개발하여 적용함으로써 수지에 대한 건전한 복합재 압력용기를 제작할 수 있었다.

넷째, 제작된 시제품의 성능 타당성 검사(Design Qualification Test)를 위해 전용 파열, 반복 시험기법을 개발하였고 이러한 개발 장비를 이용하여 시제품에 대한 성능 평가를 하였다. 이를 통해 국제 규격에 만족함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업의 일환(과제번호 2006-N-HY12-P-03)으로 수행되었습니다.

References

- [1] 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱 공저, 1995, "최신 복합재료", pp. 1, (주)교학사
- [2] 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱 공저, 1995, "최신 복합재료", pp. 6
- [3] ASTM E8-01, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, pp.14
- [4] Modified NGV-2000, 2006, Batch Test, pp. 20, ANSI
- [5] 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱 공저, 1995, "최신 복합재료", pp. 134
- [6] Modified NGV-2000, 2006, Service Condition, pp. 6, ANSI
- [7] ISO/DIS 15869-1, 2004, Batch tests, pp. 9, ISO
- [8] Modified NGV-2000, 2006, Design Qualification Tests, pp. 25, ANSI
- [9] Modified NGV-2000, 2006, Material Qualification Tests and Requirements, pp. 10, ANSI