

수소연료전지 차량용 350bar Type3 복합재 압력용기 실증기술 개발

Development of high-pressure composite cylinder for compressed hydrogen storage of fuel cell vehicle: type 3 composite cylinder

박지상, 김태욱, 정상수, 정재한*
한국기계연구원, *(주)이노컴

[초록]

본 연구는 기 개발 완료된 천연가스차량용 200bar급 Type 3 복합재 압력용기를 개발로 축척된 핵심요소기술과 실질적인 경험을 바탕으로 수소연료전지 차량에 탑재할 350bar급 Type 3 복합재 압력용기에 대한 설계/해석과 시험평가의 핵심적인 사항을 고찰하였다. 설계/해석에는 350bar급 Type 3 복합재 압력용기에 대한 3차원 비선형 유한요소 모델링 및 해석기법이 제시되었고, 설계된 라이너형상과 와인딩 패턴을 이용하여 필라멘트 와인딩 공법으로 1차시제품을 제작하였다. 제작된 시제품에 대하여 파열시험 및 반복피로시험을 수행하여 설계/해석 기법의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

전 세계 자동차 제조업계에서는 수소를 이용한 연료전지 자동차의 실용화사업이 세계적인 추세이다. 수소 또는 천연가스와 같은 차량용 고압가스 연료는 상대적으로 낮은 에너지 밀도로 인하여 기존 가솔린 자동차에 준하는 주행거리를 갖기 위해서는 높은 압력의 고압기체 저장기술이 요구된다^[1]. 이 저장 기술은 기존의 저장 기술 중 중량효율 면에서 가장 월등하고, 시스템의 구성이 단순하다. 또한 구성 엔진은 가장 오염이 없는 엔진들 중의 하나이다^[2]. 따라서 현 단계에서는 가장 실용화 가능성이 높은 기술이며, 연료전지자동차 실용화를 위한 핵심 기술로 인식되고 있다.

이미 해외에서는 압축천연가스차량용 저장용기로 200 ~ 250bar 급의 복합재 압력용기가 상용화되어 널리 사용되고 있다. 국내에서도 복합용기 설계/해석/제작 기술에 대한 기초적인 연구가 수행되어왔고, 실용화 목표에 맞추어 본격적인 개발에 중점을 두고 있는 중이며 최근에는 200bar급 CNG차량용 복합용기에 대한 국내인증을 획득한 상태라 상용화에 한발 다가선 실정이다.

본 연구는 350bar급 수소연료전지차량용 복합재 압력용기의 실증기술 개발을 목표로 350bar급 type 3 복합재 압력용기에 대한 설계/해석기법 제시 및 시제품제작, 시험평가를 통해 핵심요소기술의 타당성을 검증 및 시연하는데 목적은 둔다.

2. 설계 및 해석

복합재 압력용기의 형상 설계는 돔 부분에서 과도한 응력집중이 발생하지 않도록 등장력 돔 이론^[3]에 기초하여 설계하였다. 또한 구조적으로 취약한 너클부와 보스부를 강화하기 위해 변동 와인딩 패턴을 고안하여 적용하였다. 이러한 설계에 대해 3차원 비선형 유한요소법^[4]을 적용하여 각 압력 단계에서의 응력 수준을 확인하고 이를 최적화 시키는 방법으로 설계/해석을 수행하였다.

그림 1은 유한요소 모델링과 해석 결과의 대표적인 예를 나타낸 것인데, 필라멘트 와인딩의 복잡한 재료 이방성과 기하학적 형상을 완전하게 묘사할 수 있는 적층 3차원 요소와 직교이방성 3차원 요소를 함께 사용하였으며, 주기적 대칭구조를 활용하여 용기의 일부만을 모델링하여 전체의 거동을 확인할 수 있는 방법을 구현하였다.

그림 2는 복합재 층의 섬유방향 응력분포를 나타낸 것인데, 중량 목표를 맞추기 위한 노력으로 실린더 부와 돔 부의 응력 수준을 비슷한 수준까지 맞추었음을 알 수 있다. 수소용 350bar급 복합용기의 설계에서는 높은 반복시험압력에서 내구한도를 맞추는데 초점을 두어야 하기 때문에 기존의 200bar급 차량용 복합용기나 300bar급 소형 복합용기와는 다른 응력분포를 갖게 된다.

표 1은 이러한 설계/해석 과정을 거쳐 최종 확정된 설계 사양이다.

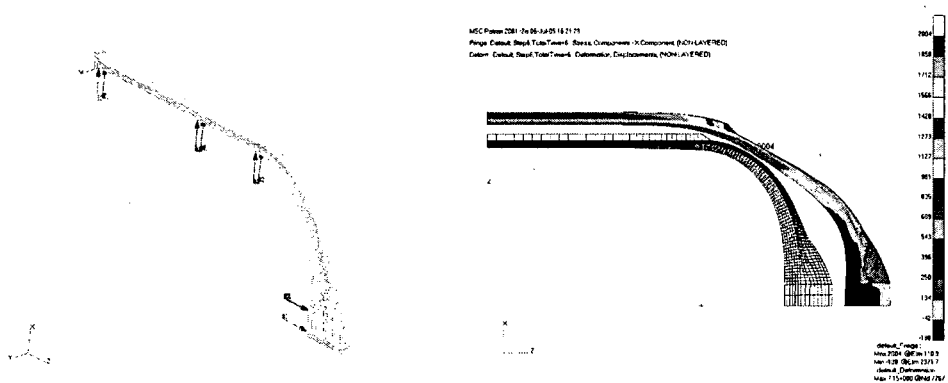


그림 1. 유한요소 모델링과 설계과열압에서의 변형형상 및 응력분포

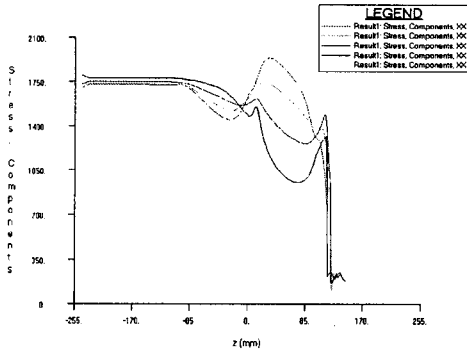


그림 2. 설계 과열압에서 복합재 층의 섬유방향 응력분포

Water Capacity	4314 cu. in (70.7 L)
Outside Diameter	15.98 in (406 mm)
Total Weight	59.5 lb (33.3kg)
Overall Length	73.4 in (840.9 mm)
External Volume	5242 cu. in (85.9 L)
H ₂ Capacity	3.68 lb (1.67 kg)
Weight Efficiency	5.0 wt%
Volumetric Efficiency	19.4 kg/m ³
Service pressure	5000 psi (35.0 MPa)
Autofrettage pressure	8250 psi (57.8 MPa)
Test pressure	7500 psi (52.5 MPa)
Minimum required burst pressure	11750 psi (82.3 MPa)
Design burst pressure	15225 psi (105 MPa)

표 1. 350bar급 수소용기 설계 사양

3. 시제품 제작 및 시험평가

3-1. 필라멘트 와인딩 공정설계

설계해석에서 주어진 와인딩 패턴 및 두께에 따라 최적 와인딩 공정설계를 수행하였다. 본 공정에서는 필라멘트 와인딩시 compaction 효과를 극대화하고, 각도가 다른 층간의 link를 최소화 하여 작업을 용이하게 하기 위해 후프 층 및 헬리컬 층의 와인딩 순서 및 차레를 설계하였다. 그림 3은 와인딩 작업을 하기 위해 생성된 와인딩 패턴 및 전용코드를 나타낸 것이다.

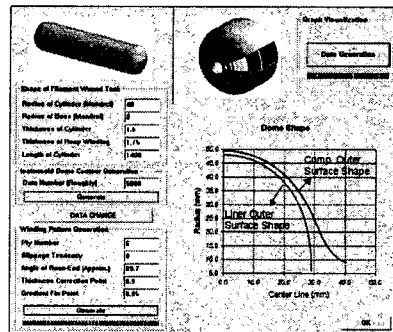
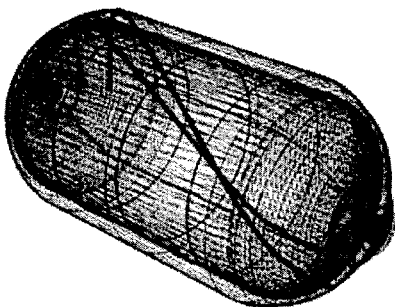


그림 3. 라이너형상 및 와인딩 패턴 생성 전용코드

3-2. 필라멘트 와인딩 작업공정

알루미늄 6061-T6로 제작된 라이너에 탄소섬유간의 Galvanic 부식을 방지하기

위해 에폭시로 라이너 표면을 코팅한 후 와인딩 공정설계와 프로그램 된 절차에 따라 필라멘트 와인딩을 실시하였다. 작업 시 섬유장력 및 주위온도, 수지의 점도 및 물성이 필라멘트 와인딩 작업에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 품질 관리가 중요하다. 와인딩 완료된 용기는 사용된 수지에 맞는 최적 사이클로 경화시켜 최종 시제품을 완성한다. 그림 4는 4축 필라멘트 와인딩 장비에 거치되어 와인딩 중인 복합재 압력용기와 제작 완성된 시제품을 나타낸 것이다.

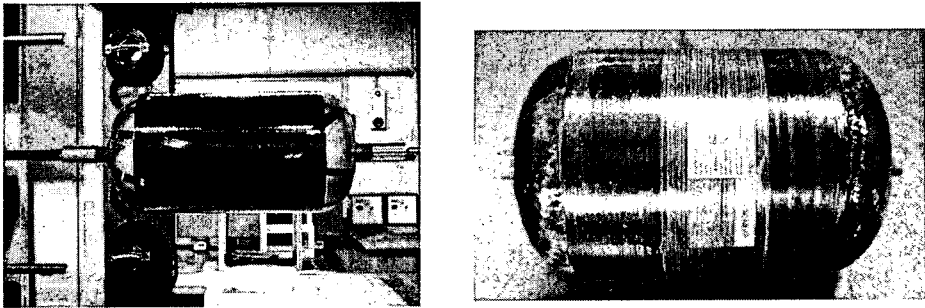


그림 4. 필라멘트 와인딩 중인 압력용기 및 완성된 시제품

3-3. 시제품 시험평가

완성된 1차 시제품에 대해 파열 시험 및 상온압력반복시험을 수행하여 설계/해석 기법의 타당성 검토를 수행하였다. 먼저 파열시험은 최소요구파열압(사용압 x2.35)까지 가압하여 5초간 유지 후, 용기가 파열될 때까지 가압한다. 적합성 판단여부는 시험용기의 파열압력이 최소요구파열압력(사용압x2.35)을 초과해야 하고 실제 시험 파열압은 119.6Mpa로 요구조건을 만족하였다.

상온압력반복시험은 요구되는 충전횟수(최소 5,000회)의 3배 동안 사용압력의 1.25배 압력으로 반복 가압한다. 적합성 판단여부는 시험용기의 충전횟수의 3배에 이를 때까지 누출되지 않아야 하고 실제 시험시 반복가압 횟수 15,000까지 누출 및 파열이 없었으므로 요구조건을 만족하였다. 그림 5는 파열시험 후의 용기 및 상온압력반복시험 중의 상태를 나타낸 것이다.

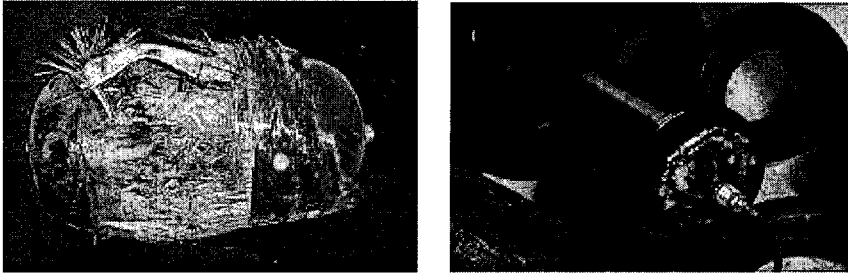


그림 5. 파열시험 후의 용기 및 상온압력반복시험 중의 용기

4. 결론

본 연구에서는 사용압 350bar, 내용적 70L급의 FCV 차량용 Type 3 복합재 압력용기의 실증기술개발을 완료하였고 그 내용을 요약해보면 다음과 같다. 먼저 FCV 차량용 복합용기의 설계/해석부터 제작, 시험평가에 이르는 전 개발 과정의 핵심요소기술을 검증 및 시연하여 그 유효성과 타당성을 입증하였다. 또한 FCV 차량용 복합용기 개발 관련 실질적인 경험과 엔지니어링 데이터를 확보할 수 있었다.

차후 설계인증시험을 통해 안전성과 실효성을 입증할 계획이며 최종적으로 국내외 인증을 획득하여 실용화개발에 확고한 기반을 마련할 예정이다.

5. 후기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21C프론티어연구개발사업(수소에너지사업단)의 “연료전지 자동차용 및 정치형 고압 수소기체 저장복합재 압력용기의 실증기술개발”의 일환으로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

- (1) DOE: "Section III Hydrogen storage", FY 2002 Progress report, 2002
- (2) B. S. Kim et al, "Developing of Composite CNG pressure Vessels," ICCM-11, Int'l Conf. on Composite Materials, Gold Coast, Australia, July 14-18, 1997, pp. 401-418
- (3) 박재성: "필라멘트 와인딩된 압력탱크의 점진적 파손해석 및 설계", 한국과학기술원, 2002, pp18~22
- (4) 황경정, 박지상, 김태욱, 정재한: "소형 복합재료 고압력 용기에 대한 비선형적

- 구조거동에 관한 연구”, 복합재료 추계학술대회 논문집, 2002, pp 10~14
- (5) S.T Peter, W.D Humphrey, R.F.Foral: “Filament winding composite structure fabrication”, 2nd edition, SAMPE, USA, pp 5-43~5-53
- (6) 이대길. 정광섭. 최진호: “복합재료역학 및 제조기술”, (주) 교학사, pp.348
- (7) 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱: “최신 복합재료”, (주) 교학사, pp.87~124