

# 차량용 200bar 급 Type 3 복합재 압력용기의 개발 및 설계인증시험

정상수\* · 박지상\* · 김태욱\* · 정재한\*\*

## Development of high-pressure Type 3 composite cylinder for compressed hydrogen storage of fuel cell vehicle

Sang-Su Chung, Ji-Sang Park, Tae-wook Kim, Jae-Han Chung

### Abstract

The objective of study on composite cylinder for alternative fuel vehicle is to develop safe, efficient, and commercially viable, on-board fuel storage system for the fuel cell vehicle or natural gas vehicle that use highly compressed gaseous fuel such as hydrogen or natural gas. This study presents the whole procedure of development and certification of a type 3 composite cylinder of 207bar service pressure and 70 liter water capacity, which includes design/analysis, processing of filament winding, and validation through various testing and evaluation. Design methods of liner configuration and winding patterns are presented. Three dimensional, nonlinear finite element analysis techniques are used to predict burst pressure and failure mode. Design and analysis techniques are verified through burst and cycling tests. The full qualification test methods and results for validation and certification are presented.

**Key Words:** Type 3 composite cylinder, Filament winding, Finite element analysis,

### 1. 서 론

수소 또는 천연가스와 같은 차량용 고압가스 연료는 상대적으로 낮은 에너지 밀도로 인하여 기존 가솔린 자동차에 준하는 주행거리를 갖기 위해서는 높은 압력의 고압기체 저장기술이 요구된다<sup>(1)</sup>. 이 저장 기술은 기존의 저장 기술 중 중량효율 면에서 가장 월등하고, 시스템의 구성이 단순하다. 따라서 자동차 등 수송기기용의 탑재 시스템으로 가장 주목을 받고 현재 활발히 연구되고 있는 기술 중 실용화 가능성이 가장 높은

기술이다. 또한 천연가스 엔진은 가장 오염이 없는 엔진들 중의 하나이다<sup>(2)</sup>. 이미 해외에서는 압축천연가스차량용 저장용기로 200~250bar 급의 복합재 압력용기가 상용화되어 널리 사용되고 있으며, 연료전지 자동차용으로는 350bar급 복합용기도 실증단계를 거쳐 상용화에 이르고 있다. 국내에서도 복합용기 설계/해석/제작 기술에 대한 기초적인 연구가 수행되어왔고, 최근에는 실용화 목표에 맞추어 본격적인 개발에 중점을 두고 있는 중이며 국내인증도 획득한 상태라 상용화에 한발 다가선 실정이다.

본 연구는 350bar급 이상의 연료전지차량용 복합재 압력용기의 개발의 선행 단계로 중소형 차량에 탑재 가능한 크기의 200bar급 Type3 복합용기의 개발과 설계인증시험을 통해 정립된 설계/해석/제작의 핵심요소 기술에 대한 타당성을 검

\* 한국기계연구원

\*\* (주)이노컴

증하고 시연하는데 목적을 갖는다.

## 2. 설계/해석 및 제작

### 2.1 3차원 비선형 유한요소 해석

복합재 압력용기의 설계에 있어서 유한요소법을 이용한 구조해석은 필수적이다. 복합재 압력용기에 대한 유한요소해석에는 섬유 방향과 두께가 연속적으로 변화하는 필라멘트 와인딩 복합재 구조물의 3차원 모델링기법, 기하학적 비선형 해석기법, 재료 비선형성을 고려한 탄소성 해석 기법등을 포함하는 까다로운 구조해석 기법이 요구된다. 본 연구에서는 필라멘트 와인딩 구조의 이방성과 실린더-돔 부위의 국부 응력분포를 정확히 예측하기 위해 3차원 적층고체요소를 사용하였다. 또한 주기적 대칭조건을 이용한 경계조건, 다점구속 조건(multi point constraint)을 사용하였다. 그리고 라이너의 소성거동 및 실린더-돔 접속부위의 비선형 거동을 예측하기 위한 기하학적 비선형 및 재료 비선형 해석기법을 도입하여 해석을 수행하였다<sup>(2)</sup>.

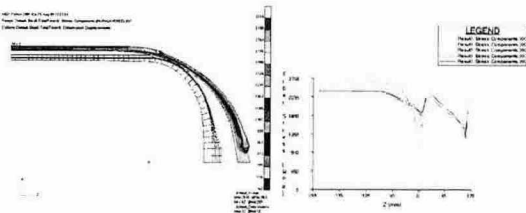


Fig. 1 Stress distribution on CFRP layer at design burst pressure for CNG cylinder.

그림 1은 파열 압에서의 응력분포와 변형 형상, 그리고 축방향으로 각 단층의 응력변화를 나타낸 것이다. 이는 후프 층과 헬리컬 층의 응력비가 최소화되어 있으며, 구조 및 중량의 최적함을 보여주고 있다. 또한 여전히 상대적으로 실린더 몸통부의 후프 층의 발생응력이 최대로 파손부위 및 파손모드를 바람직한 방향으로 유도하고 있음을 알 수 있었다.

### 2.2 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 최소화하여 작업을 용이하게 하기 위해 후프 층 및 헬리컬 층의 와인딩 순서 및 차레를 설계하였다. 그림 2는 와인딩 작업을 하기 위해 생성된 와인딩 패턴을 나타낸 것이다.

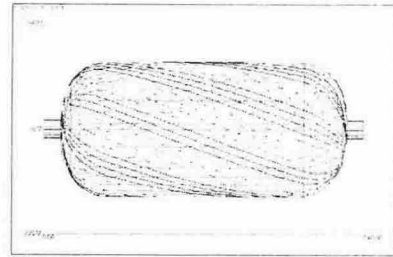


Fig. 2 Processing design for filament winding.

### 2.3 필라멘트 와인딩 작업공정

알루미늄 6061-T6로 제작된 라이너에 탄소섬유 간의 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<sup>(3)</sup>. 와인딩 완료된 용기는 사용된 수지에 맞는 최적 사이클로 경화 시켜 최종 시제품을 완성한다. 그림 3은 4축 필라멘트 와인딩 장비에 거치되어 와인딩 중인 복합재 압력용기와 제작 완성된 시제품을 나타낸 것이다.

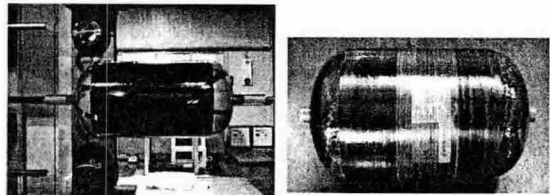


Fig. 3 Filament winding.

## 3. 설계인증시험

필라멘트 와인딩 공정을 거쳐 국내규격에 따른 인증작업을 실시하였다. 요구되는 시험 항목은 총 10 항목이고 모든 시험을 아래 기술된 방법으로 수행하였다<sup>(4)</sup>.

• 파열시험 (Hydrostatic Burst Test)

파열시험은 용기 종류에 따라 규정된 최소 파열압까지 가압 후 60초간 유지한 후 동일한 가압 속도로 파열될 때까지 승압하는 방법으로 실시하였다. 파열시험을 통한 실제 파열압력은 평균 666bar로 요구되는 최소파열압력인 512bar 이상에서 파열되었으며, 설계해석 값과도 6% 이내의 오차를 보임과 동시에 파열부위도 실린더 몸통부로 설계 신뢰성을 인정받았다. Table. 1은 파열 시험결과와 해석값을 비교한 것이다.

Table. 1 Comparison burst test result with FEM

구분	파열압 (MPa)	오차 (%)	파열모드
FEM	646	-	실린더 몸통
파열시료1	682	5.6	실린더 몸통
파열시료2	671	3.7	실린더 몸통
파열시료3	645	0.2	실린더 몸통

• 상온압력반복시험 (Ambient Temp. Test)

상온압력반복시험은 최고충전압력 이상의 압력을 매분 10분 이하로 1만회 이상 반복가압 후, 내압시험압력 이상의 압력을 매분 10분 이하의 비율로 30회 가압할 때 용기의 변형 또는 누출이 없어야 한다. 본 시험은 용기의 반복가압으로 인한 내피로성 측정시험이며, 용기의 변형 또는 누출은 없이 시험을 통과하였다.

• 환경압력반복시험 (Environment Cycling Test)

본시험은 내환경성에 대한 성능을 평가하는 시험으로 용기를 압력 0Pa, 온도 60도 이상, 상대습도 95% 이상인 상태로 48시간 방치한 후, 그 상태로 매분 10회 이하 비율로 5000회 이상 반복가압하였다. 그리고 압력 0Pa, 상온에서 용기상태를 안정화 시킨 후, 용기를 영하 50도 이하의 온도로 안정시키고 그 상태에서 10회 이하의 비율로 5000회 이상 반복 가압하였다. 완료 후, 압력을 0Pa, 온도 상온으로 안정화 시킨 후 내압시

험압력 이상의 압력을 매분 10분 이하의 비율로 30회 이상 가압한다. 시험 결과 용기의 변형 및 누출은 없이 통과하였다.

• 온도압력반복시험 (Temp. Cycling Test)

용기를 상온압력반복시험을 수행 후, 온도 93도의 열매중에 10분 이상 침적시킨 후, 온도 영하 50도 이하의 냉매로 이동하여 침적시키고 이를 20회 반복 수행하였다. 본 시험은 극한 온도 환경에서의 용기의 신뢰성을 평가하는 시험으로서 실제 시험 중에 용기의 변형 및 누출 없이 시험을 통과하였다.

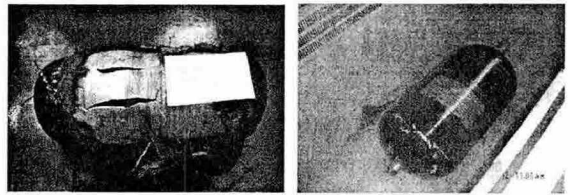


Fig. 4 Burst and Environment Cycling Test.

• 최소두께확인시험 (Min. Thickness Test)

설계해석으로 얻은 복합재의 순수 두께를 제외한 외부 층을 연삭하여 도면의 수치와 일치되는 용기로 가공한 후 상온압력반복시험을 수행하였다. 시험 중 용기에 변형 또는 누출이 없이 시험을 통과하였다.

• 화염노출시험 (Bonfire Test)

화염시험은 용기를 가스로 최고충전압으로 충전시킨 후, 수평 및 수직으로 위치시키고 화염속에 노출시킨 후 안전밸브에서 20분 이내 완전히 토출되는지 여부를 판단한다. 실제 수평 및 수직 시험은 각각 점화 후 45초, 42초에 안전밸브로 내부 가스가 토출이 시작되어 용기는 파열되지 않고 시험을 통과하였다.

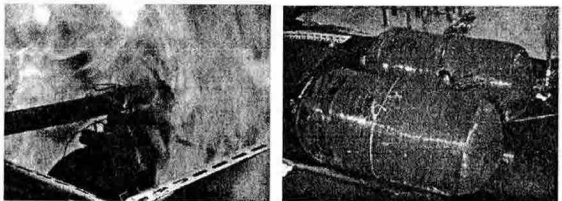


Fig. 5 Bonfire Test.

- 진자식 충격시험 (Impact Pendulum ITest)  
진자의 충격에너지가 30N.m 이상으로 진자를 용기 표면 여러장소에 가한 후, 상온압력반복시험을 수행한 결과 용기의 누출 또는 파손 없이 시험을 통과하였다.

- 낙하시험 (Drop Test)  
용기를 수평으로 바닥면으로부터 3m에 위치시키고, 이를 평활하고 수평한 콘크리트 바닥에 낙하시킨 후 상온압력반복시험을 수행한 결과 용기의 누출 및 파손 없이 통과하였다.

- 보호도장내산시험 (Coating Acid Resistance Test)  
보호도장 내산시험은 차량운행시 외부물질에 대한 내산성을 시험하기 위함이며, 중량비 30%의 황산용액에 100시간 노출시킨 후, 파열시험을 수행하여 최소파열압 이상을 나타내어야 하며, 파열부의 기점이 몸통부인 것으로 보아 적합성을 확인하였다.

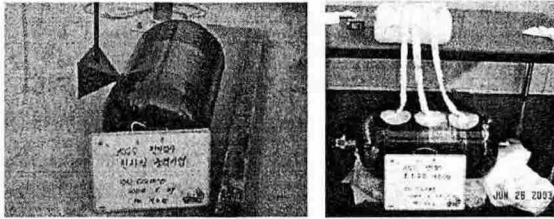


Fig. 6 Pendulum Impact Test and Coating Acid Resistance Test.

- 보호도장염수분부시험(Coating Salt Spray Test)  
시험편을 채취하여 염수는 240시간 동안 연속적으로 분무하여 시험편 도막의 팽창, 벗겨짐, 부식 등 및 사용상 지장이 있는 결함이 나타나 적합성을 확인 하였다

#### 4. 결론

본 연구에서는 사용압 207bar, 내용적 70L급의 차량용 복합용기의 개발과 설계인증시험을 완료하였으며, 국내 최초로 차량용 type 3 복합용기의 인증획득에 성공하였다. 요약해보면 다음과 같다. 먼저 차량용 복합용기의 설계/해석부터 제작, 시험평가에 이르는 전 개발 과정의 핵심요소

기술을 검증 및 시연하여 그 유효성과 타당성을 입증하였고, 차량용 복합용기 개발 관련 실질적인 경험과 엔지니어링 데이터를 확보할 수 있었다. 또한 개발된 복합용기에 대한 파열강도, 내구성, 내충격성, 내환경성, 기능성 관련 10개 항목의 설계인증시험을 성공적으로 완료하여, 개발된 복합용기의 안전성과 실효성을 입증하였다.

이상의 과정을 통해 국내 최초 인증 획득 및 양산화에 성공하였으며, 차후 개발 준비 중인 350bar급 수소용 복합용기의 성공적 개발을 위한 확고한 기반을 마련하였다.

#### 후 기

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

#### 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) 황경정, 박지상, 김태욱, 정재한: “소형 복합재료 고압력 용기에 대한 비선형적 구조거동에 관한 연구”, 복합재료 추계학술대회 논문집, 2002, pp 10~14
- (4) 이대길, 정광섭, 최진호: “복합재료역학 및 제조기술”, (주) 교학사, pp.348
- (5) 한국가스안전공사: “고압가스안전관리기준 통합고시(제12-19-8조(제조))”, 가스법관련고시집, 2003, pp. 284-33