KIGAS Vol. 16, No. 1, February, 2012
(Journal of the Korean Institute of Gas)

70 MPa용 Type 3 수소 복합용기의 상온수압반복 거동에 관한 연구

조성민 · 김창종 · †김영규
한국가스안전공사 가스안전연구원
(2012년 2월 1일 투고, 2012년 2월 27일 수정, 2월 28일 채택)

A Study on the Behavior of Ambient Hydraulic Cycling Test for 70 MPa Type3 Hydrogen Composite Cylinder

Sung-Min Cho · Chang-Jong Kim · †Young-Gyu Kim
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
(Received February 1, 2012; Revised February 24, 2012; Accepted February 24, 2012)

요 약

본 연구에서는 수압반복시험 장비를 이용하여 70 MPa용 Type 3의 수소복합용기에 대한 거동과 용기내부에 압력이 가해졌을 때 용기 거동을 유한요소법으로 해석하였다. 그 결과, 안전성과 경량성으로 주목받고 있는 Type3 수소용기는 실린더부에서 파열이 먼저 시작되었으며, 유한요소해석 결과에서도 동일한 양상을 확인하였다. 시험결과로 용기내부에 압력이 가해짐에 따라 실린더 몸통부가 부풀어 올라 돔너클과 실린더 몸통부가 가장 취약함을 알 수 있었다.

Abstract - The performance of the Type3 hydrogen composite cylinder whose pressure is 70 ㎫ using hydrostatic cycling test equipment was evaluted in this study. It also includes the finite element method analysis on the performance of the cylinder when the pressure is applied. As a result, cylinder body parts of the Type3 hydrogen composite cylinder, which draws attention with its safe status and the lightness, was ruptured first and the same result has been found out through the finite element method. The dome knuckle and the cylinder body were proved as the weakest parts since the cylinder body parts was expanded under the pressure.

Key words : Type 3 hydrogen composite cylinder, hydraulic cycling test, dome part, knuckle part

Ⅰ. 서 론

지구 온난화, 대기 오염 등의 환경 문제로의 관심이 높아짐에 따라, 온난화의 원인이 되는 이산화탄소를 배출하지 않으며, 유해한 배기가스를 배출하지 않는 수소연료전지자동차를 조기에 양산 개발하고자 노력하고 있다.

한국가스안전공사에 구축한 장비는 이러한 수소연료전지자동차용으로 사용되는 고압용기의 수압반복시험 및 밸브류로 구성된 고압수소저장시스템의 단품 및 시스템 평가를 통한 안전신뢰성 검증을 목적으로 하고 있다. 수소연료전지자동차는 차량이나 부품의 시험방법에 대한 통일된 기준/표준/시험법이 아직 완전하게 정비되어 있지 않고, 시장에서의 도입 제도, 기준 등이 만들어지고 있는 현실이다. 또한 연료로 수소를 사용한 경험이 빈약하기 때문에, 용기가 어떠한 경향과 거동을 나타내는지에 대해 불분명한 점도 적지 않다. 따라서 수소연료전지자동차용 고압수소저장시스템에 대한 내구성, 안전성 확보를 위하여 수소연료전지자동차에서 중요한 부품인 용기에 대한 반복피로시험을 수행하여야 한다. 특히 복합재 용기 분야에서 Type 3용기에 대한 높은 안전성과 내구성이 보고

†주저자:ygkim@kgs.or.kr

되고 있지만 실질적으로 얼마나 다른 용기에 비해 높은 성능을 가지고 있는지 국내에서는 검증되고 있지 않다. 따라서 구축된 수압반복 장비를 이용하여 Type 3 용기에 대한 수압반복시험을 실시하였으며, 이를 통하여 수소용기의 거동을 확인하고자 한다.

Ⅱ. 수소용기 국제 규격

초고압용기인 수소용기의 안전성 확인을 위한 국제규정은 개발 중에 있다. 또한, 국내의 경우 초고압 용기의 안전성을 확인하기 위한 시험설비가 극히 일부분이어서 국내업체에서 제품개발에 큰 어려움을 겪었다. 하지만 수소시대에 대한 관심과 역량이 커진 근래에 들어 수소용기의 안전기준이 유럽에서 UN ECE No.79 라는 규정으로 개발이 완료되었다.

그 이전에는 북미 CNG 산업규격인 ANSI/NGV2 2007 규정에 표기된 압력만 수소용기에 적합하게 만들어서 세부내용대로 용기를 시험하고 있었다. 이것을 우리는 Modified ANSI/NGV2 2007(HGV)라고 하며, 수소연료전지자동차용 용기 등에 적용하여 시험해왔다. 현재 국제적으로 통용되는 규격을 요약하여 Table 1에 제시하였다.

Table 1. International regulation for hydrogen cylinder

항목	ANSI/NGV2-2007 (북미 규정)	UN ECE R No.79 (유럽 규정)
상온 압력 반복 시험	명칭: Ambient Cycling Test	명칭: Ambient Temperature Pressure Cycle Test
	사용용기: 2	사용용기: 2
	시험방법: 사용압X1.25, 분당 10회 이하로 반복	시험방법: (a) 하위반복압력:2 MPa (b) 상위반복압력:사용압 X1.25 (c) 10회/분 이하
	합격기준: 설계수명x750(11,250회) 이상에서는누출은허용되나용기파열은없어야한다. 45,000회이상에서의파열은인정(NGV2000) 설계수명x2,250(33,750회) 이상에서파열은인정 (NGV2007)	합격기준: 1차 반복횟수인 4,000(15년 기준 기본충전횟수)X3이하에서는(12,000회) 파열이나 누수되지 않아야 하고 설계수명 12,000에서 36,000이하에서는 누출은 허용되나 용기파열은 없어야 한다.

Ⅲ. 시험장치 및 방법

고압용기에 대한 설계검증 시험 중의 하나로서 실제 수소가 충전이나 방출되는 상황을 모사하여 용기의 피로특성을 실제와 같은 환경으로 용기의 건전성을 검증하는 대표적인 시험 중의 하나이다. 실제 수소를 충전이나 방출하면 가스의 특성상 위험성과 제어의 어려움 및 누출되었을 때 정확한 위치파악의 어려움이 있다. 따라서 수압을 이용하여 용기의 피로가 누적되어 누출될 때까지를 확인하기 위한 시험이며, 또한 규정에서 요구되는 내구성을 만족하는 지 확인하기 위해 시험한다. 더불어 용기에 결함이 생겼을 때 시각 또는 영상으로 확인하기 위해 시험유체로 물을 사용한다.

수소용기를 시험할 수 있는 장비에 대한 상세사항은 Table 2에 제시하였다.

현재 수소용기는 35 MPa과 70 MPa로 충전하여 사용되고 있으므로, 각 용기의 작업성능과 용량에 맞게 수압반복시험을 위한 각각의 전용 장비를 구축하고 있다. 시험에 소요되는 시간을 줄이기 위해 분당 속도를 평균 6회 정도 사이클이 가능하도록 장비를 설계하였으며 요구되는 분당속도를 맞추기 위해 압력 35 MPa, 70 MPa로 구분하여 구축하였다.

Table 2. Specifications of high pressure pump

구 분	35 MPa 전용	70 MPa 전용
Flow Rate	84LPM	71LPM
MAX. Pump Pressure	55.5 MPa	111 MPa
Required Suction Pressure	0.3-0.4 MPa	0.3-0.4 MPa
Stroke Length/Stroke Per Minute	105mm/435	105mm/ 435
Fluid/ Max. Temp	Clean Water/ 60℃	Clean Water/ 60℃

Fig. 1. High pressure pump and chamber

Ⅳ. 결과 및 고찰

4.1. 라이너 파열시험 및 복합재 용기 상온수압반복시험

일반적으로 용기의 파열시험을 할 때 용기의 실린더 몸통부에서 파열이 발생하도록 용기제조업체들은 설계·제조하고 있다. 그 이유는 몸통에서 파열되어 어느 정도 힘을 흡수하여 외부 다른 물체에 충격을 적게 주기 위함이다. 탄소섬유를 와인딩하기 위한 틀과 가스의 외부 누출을 막는 역할을 하는 라이너는 자체의 파열시험을 통해 몸통에서 안정적으로 파열이 시작되고 있는지, 라이너의 내부 결함이 없는 확인하여야 한다. 아래의 Fig. 2는 국내에서 제작한 라이너의 파열시험 사진이며 몸통에서 파열이 시작됨을 확인하였다.

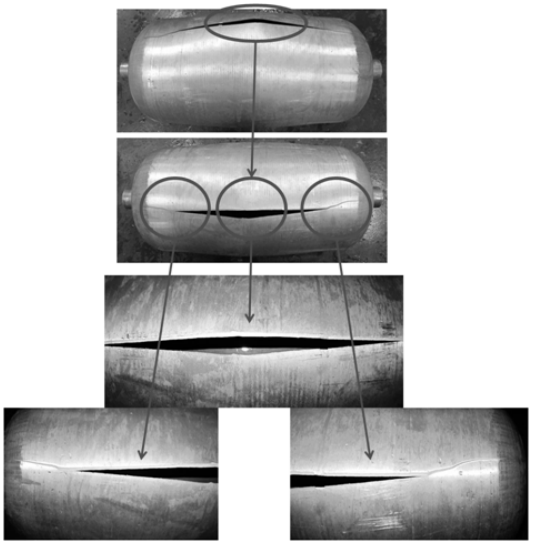

Fig. 2. Burst test result of Al liner

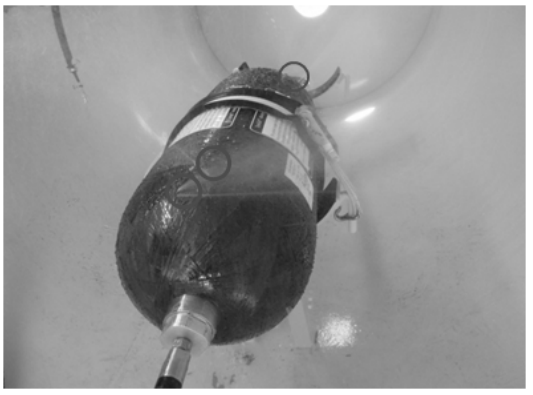

Fig. 3. Leakage of Type 3 cylinder

Fig. 3은 40리터 70 MPa 외산용기에 대한 수압반복시험을 수행한 사진이다. 복합재는 일반적으로 섬유의 여러가닥이 수지로 굳혀서 제작되는 형태로 라이너의 기밀성이 없다면 내부의 유체들은 가압즉시 작은 구멍을 통해서 외부로 누출 된다. 따라서 아래의 현상은 용기제작회사가 보증한 반복횟수 이상을 수행하여 내부 라이너의 피로에 의해 균열이 생겨 최종적으로 외부에 누출이 생기게 된다. 이를 보면 돔부위, 돔너클부위 그리고 몸통부위까지 다양하게 누수되는 것을 확인하였다. 따라서 실제 보이는 외부의 누수가 내부의 라이너에는 어떤 곳에서 발생되었는지 파악할 필요성 있다.

4.2. 누출 부위의 검증

수압반복 시험을 통해 누출이 발행한 용기의 정확한 결함 생성부위를 확인하기 위해 복합재료와 라이너를 절단하여 라이너 내부에서 침투탐상시험(Penetrant test)을 실시하였다. 그 결과 Fig. 4에서 제시한 것처럼 실린더 몸통부에 긴 결함이 발생한 것을 확인하였다. 여기서 주목할 점은 복합재 용기의 누출 부위는 돔 너클과 돔부위였으나 라이너의 누수부위는 실리더부(몸통부) 중앙이었다. 이것은 라이너에 결함이 발생한 후 유체는 복합재료 직상부로 바로 누출 되지 않고 누출이 용이한 쪽(복합재의 두께가 가장 얇거나 수지의 함침이 부족한 곳)으로 누출되었다고 볼 수 있다.

4.3. 유한요소해석

수압반복시험과 침투탐상시험을 통해 실제로 검증된 복합재 용기의 누출위치를 파악하였다. 이를 통해 실제 구조해석을 통해서는 압력이 가해졌을 때 어느 부위가 주로 움직여서 라이너의 피로를 유도하는지

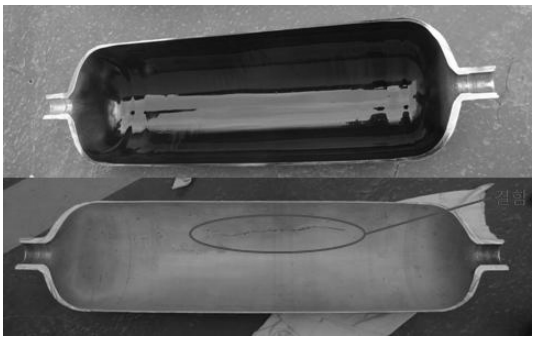

Fig. 4. Penetrant test result for inner liner of Type 3 cylinder

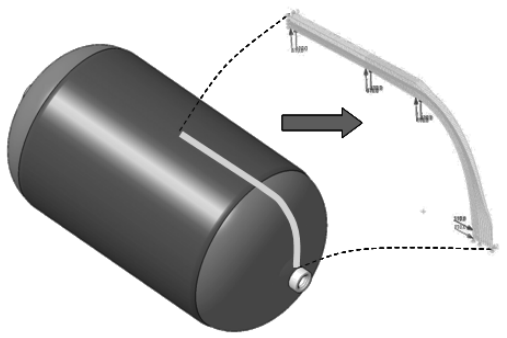

Fig. 5. FE analysis model

Table 3. Material properties of the Al liner

구 분	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	전단강도 (MPa)
라이너	290이상	320이상	14.0이상	-
수지	-	-	-	13.8이상

확인하고자 한다.

유한요소 모델링에서는 필라멘트 와인딩 구조의 이방성과 실린더/돔 부위의 국부 응력분포를 정확하게 예측하기 위해 3차원 적층고체요소를 사용하였다. 또한 주기적 대칭조건을 이용한 경계조건, 다점구속조건(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. 그리고 수소복합재 용기는 상하좌우가 대칭인 구조임으로 모델링의 편의성을 위해서 Fig. 5와 같이 일부부위의Full모델링을 수행하였다.

특히 돔부위는 헬리컬의 각도가 연속적으로 변하며 감기므로 기존의 고정된 각도로만 설계하는 기법으로는 모델링의 정확성이 저하된다.

따라서 Table 3의 내부라이너 물성치와 Table 4의 카본 섬유의 물성치를 통해서, 복합재 용기의 돔 부위에 대한 정확한 거동 예측 및 응력 분포 확인을 위해 연속적으로 변하는 헬리컬 각도까지 고려하여 해석할 수 있는 기법을 이용했다.

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

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 아래Fig.6과 같은 결과를 산출하였다.

Table 4. Material properties of the carbon fiber

Elastic Modulus	E1(GPa)	192
	E2(GPa)	3.9
Poisson's Ratio	V12	0.38
	V23	0.008
Shear Modulus	G12(GPa)	1.262
	G23(GPa)	1.262
Fiber Volume Fraction	Vf(%)	0.453

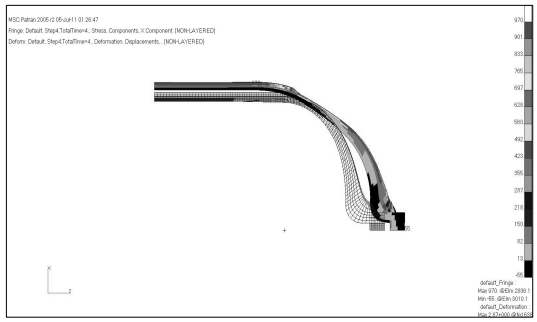

Fig. 6. Stresses and displacement at max. fill pressure

복합재 압력용기 구조해석 절차는 상용 소프트웨어인 MSC/PATRAN을 이용하여 라이너, 후프층 및 헬리컬 층을 각각 3D 모델링한 후, FEM 상용 소프트웨어인 ABAQUS로 응력해석과 변형에 대해 수행하였으며 대표적으로 최고 충전압력(87.5 MPa) 일때의 응력과 변형을 나타내었다. 이 해석에서는 초기 용기의 내피로 특성을 증대시키기 위해 제조사가 정한 자긴압력을 가하며 이때 라이너는 소성영역을 넘어 비선형 거동을 시작한다.

이를 통해 복합재 용기는 돔 너클을 기준으로 실린더 몸통부는 수직운동을 하고 돔부위와 보스부위는 수평운동을 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 압력이 가해질 때 실린더 몸통부에 돔부위보다 더 큰 응력이 걸려서 압력이 가해짐에 따라 실린더 몸통부가 더 크게 부풀어 올라 돔 너클과 실린더 몸통부가 피로에 취약

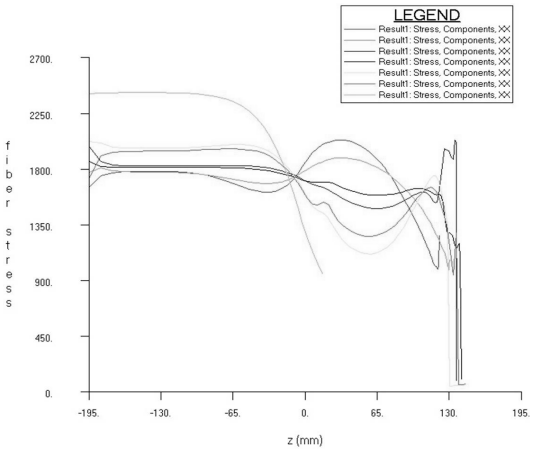

Fig. 7. Distribution of stress in each layer

하다는 것을 파악하였다. 이를 통해 일상적인 용기의 반복사용에 따라 최종적으로 몸통 중앙부위나 돔너클에서 크랙이 먼저 발생할 가능성이 대두되었고 실제 용기의 파괴부위도 일치함을 확인하였다.

실제 파열압 복합재 용기 모델링에서 몸통부위와 돔부위까지의 각 층별 응력값을 Fig. 7처럼 나타내었다. 위의 응력값과 같이 오른쪽 돔부위 각 층의 응력은 어떠한 층이라도 왼쪽의 몸통부위의 응력을 넘지 않음을 알 수 있다. 즉 Table 4의 섬유강도를 상회하는 인위적인 파열이 발생한다면 돔에서 파열이 먼저 발생하지 않고 몸통부위에서 먼저 파열이 발생하고 피로도 몸통쪽에 집중되어 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 70 MPa용 Type 3 수소용기에 대한 시험과 유한요소해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 라이너의 파열시험 시 실린더 몸통부에서 파열이 먼저 시작됨을 확인함으로서 응력이 돔부위보다 실린더 몸통부에 집중됨을 확인하였다.

2) 복합재 용기의 수압반복시험 시 피로에 의해 라이너에서 누출이 발생될 경우 복합재 표면에서는 누출이 여러 부위에서 발생된다. 하지만, 라이너 내부의 결함은 실린더 몸통부에서 발생된 것을 침투 탐상 시험을 실시하여 확인하였다.

3) 구조해석을 통한 용기의 응력은 몸통부위에 응력이 집중되어 있음을 확인하였다. 따라서 구조해석을 통한 용기의 변형은 돔 너클을 기준으로 실린더 몸통부는 수직운동을 하고 돔부위와 보스부위는 수평운동을 한다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 압력이 가해질 때 실린더 몸통부에 돔부위보다 더 큰 응력이 걸려서, 압력이 가해짐에 따라 실린더 몸통부가 더 크게 부풀어 올라 돔 너클과 실린더 몸통부가 피로에 취약하다 것을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] B.S. Kim et al, “Developing of Composite CNG pressure Vessels,” ICCM-11, Int’l Conf. Composite Materials, Gold Coast, Australia, 14-18, pp. 401-418 (1997)

[2] D. V. Rosata and C.S. Grove, “Filament Winding : Its Development, Manufacture, Application, and Design,” INTERSCIENCE PUBLISHERS (1984)

[3] 김영규, 김창종, 조성민, “고압용기 및 부품 종합시험 기반구축,” 한국가스학회, 2011 한국가스학회 춘계학술대회 논문집, pp. 3-13 (2011)