



압축천연가스(CNG) 내압용기 결함에 따른 안전성 평가

장광수^a, 홍민성^{b*}

Safety Evaluations for Defects in CNG Pressure Vessels

Kwang Su Jang^a, Min Sung Hong^{b*}^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Ajou University,
206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea^b Department of Mechanical Engineering, Ajou University,
206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 September 2018
 Revised 18 September 2018
 Accepted 1 October 2018

Keywords:

Compressed natural gas (CNG)
 Finite element analysis
 Safety evaluation
 Pressure vessel

ABSTRACT

Based on four types of CNG cylinders, the features, causes of failure, risks, different pressure vessel inspection systems, and safety management techniques were analyzed and organized. Expected fatigue lifetime and burst pressure through external defect test were measured and finite element analysis was conducted for manufacturing process and inspection standard. External defect tests were conducted for three levels of artificial defects on the outer walls of cylinders, and all tests exceeded the pressure-proof test pressures. For the test with the most severe defects, the burst pressure was 431 bar, which was below the pressure test limit, and service life was shortened using finite element analysis. Thus, if internal pressure removal test is introduced to identify defects from the outside of cylinders through precision tests, and heat treatment defects that are the major cause of blowout accidents are found, the safety and security of CNG pressure vessels can be ensured.

1. 서론

우리나라 압축천연가스(CNG) 자동차는 대중교통을 담당하는 버스가 거의 대부분을 차지하고, 인구밀도가 높은 수도권에 집중되어 운행되고 있어 철저한 안전관리가 요구된다. 특히, CNG 자동차는 천연가스를 20.0 MPa(대기압력의 200배) 이상으로 압축하여 연료로 사용하는 방식으로 교통사고와 별도로 연료 누출에 의한 화재와 용기 폭발 등의 위험요인을 내포하고 있으며, 용기 파열 사고는 자동차에 타고 있는 사람은 물론 주변에 있는 행인과 다른 자동차에 타고 있는 사람 등에게까지 피해범위가 광범위하다고 할

수 있다.

2002년 월드컵 개최를 앞두고 대기환경 개선을 목적으로 CNG 자동차가 도입되었으나 내압용기안전에 대한 별도의 관리제도가 없어 2002년부터 2010년 까지 6건의 내압용기 파열사고가 발생하였다^[1].

최근 미세먼지 문제를 해결하기 위해 정부의 특별대책으로 CNG 버스 확대보급을 발표함에 따라 CNG 자동차는 지속적으로 확대보급 될 것으로 예상되며, 인구 밀집지역에서 운행되는 CNG 버스의 사고는 단 한번으로도 수많은 인명 및 재산상의 손실이 발생할 수 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2526

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: mshong@ajou.ac.kr (Min Sung Hong).

우리나라보다 앞서 용기에 대한 재검사를 실시한 국가들은 제도 도입 초기에는 탈거내압시험과 상세육안검사를 병행하여 실시하였으나 개선된 용기의 보급 확대로 현재는 이탈리아를 제외한 다른 국가들은 상세육안검사 한 가지 방법만을 사용하여 검사하고 있다.

본 연구의 목적은 2011년부터 시행된 내압용기 재검사 결과와 국내외 내압용기 파열사고 원인을 분석하고 내압용기 제조단계 검사기준과 재검사 기준의 외부 손상기준에 따른 인위적인 외부결함 시험과 유한요소해석을 통해 국내 내압용기 재검사 제도의 발전 방향을 제시하고, CNG 자동차의 안전성 향상에 도움이 되기 위함이다.

2. 이론적 배경

2.1 CNC 자동차 내압용기 개요

2.1.1 CNG 내압용기의 분류

CNG 용기의 종류는 Type 1, Type 2, Type 3, Type 4 네 가지 분류되며, 분류기준은 금속과 복합재의 사용여부 및 비율 등으로 구분한다^[1,2].

Type 1 용기는 Steel 또는 Al합금으로 제작되며 복합재가 사용되지 않는다. 따라서 무게가 무겁고 가격이 저렴하다. Type 2 용기는 Steel로 구성된 라이너의 몸통부분에 복합재를 감아서 만들어진 용기의 내압을 지지하는 비율은 금속용기가 75~90% 복합재가 25~10% 정도이며, Type 1 용기에 비해 무게가 가볍다. Type 3 용기는 Al합금으로 구성된 라이너의 전체에 복합재를 감싸서 만들어지며 용기의 내압을 지지하는 비율은 복합재가 75~90% 금속이 25~10%이다. Type 4 용기는 플라스틱으로 구성된 라이너의 전체에 복합재를 감싸서 만들어지며 용기의 내압은 복합재가 100% 지지한다^[1].

Type 1, 2 용기는 국내와 아시아권에서 주로 사용하며 차량의 하부에 설치되는 경우가 많다. 그래서 도로상의 이물질에 의한 오염 및 손상이 존재하며 지역별 도로 상태 및 날씨(강수량)에 영향을 많이 받는다. 또한 겨울철 제설약품에 의한 영향도 크다.

Type 3, 4 용기는 주로 유럽권에서 사용하며, 특히 프랑스와 독일에서 많이 사용한다. 프랑스와 독일에서는 버스에 Type 3, 4 용기만을 사용한다. 주로 차량 상부에 설치되어 도로상의 이물질에 의한 오염이 적지만, 자외선에 의해 열화 될 위험성이 높다. 무게가 가벼우나 가격이 비싸며, Steel에 비해 충격에 약하다. 하지만 연비 측면에서는 유리한데, 통상 차량 무게가 10% 줄어든다면 연비는 6% 증가하는 것으로 알려져 있다. 예를 들어 버스 공차 중량이 약 12,000 kg이고, 버스에 실린 Type 2 용기 전체의 무게를 약 600 kg이라고 할 때, 이를 Type 3, 4로 변경하면 약 300 kg의 무게감

소를 기대할 수 있고, 무게 감소에 따라 연비는 약 1.5% 상승할 것으로 기대된다^[3].

2.1.2 CNG 용기 고장원인 및 위험도 분석

2009년까지 전 세계에서 발생한 CNG 용기 사고사례에 대한 통계를 보면, 사고원인 중 용기결함이 37%로 가장 많은 비중을 차지했다. 그리고 응력부식균열이 16%, PRD (Pressure Relief Device)결함이 15%를 차지했다. 용기결함과 PRD결함은 제조불량으로, 52%를 차지한다. 그리고 충전, 화재, 외부손상 등의 사용자 부주의는 28%를 차지한다. 부식 및 피로에 의한 사고는 16%이다^[4].

2.1.3 CNG 내압용기의 결함 분석

용기의 결함 원인은 Type에 따라 다르다. 금속용기의 경우 부식과 응력부식균열 및 수소취성 그리고 피로 등에 의해 결함이 발생한다. 복합재 용기의 경우는 충격과 마모, 피로와 자외선 등이 용기결함의 원인이 된다. 용기의 결함원인을 검토한 결과 Type 2 용기는 모든 결함원인에 대하여 높은 영향을 받으므로 결함이 쉽게 발생 하며 관리하기 매우 어려운 용기임을 알 수 있었다^[4].

2.1.3.1 부식

금속이 그 주변 환경에서 화학적 혹은 전기화학적으로 반응하는 현상으로 전해질, 양극, 음극, 그리고 자유전자의 이동 경로가 있는 상황에서 발생한다. 부식이 발생하면 용기의 원래 설계 두께 보다 용기의 두께가 감소하며, 단면 감소 효과로 인해 과도한 응력이 발생하여 파손될 위험이 있다^[4].

2.1.3.2 응력 부식 균열

금속재료가 부식 환경 하에서 인장 강도를 받아서 발생하는 현상으로, 균열이 발생하면 용기의 원래 설계 두께 보다 용기의 두께가 감소하며, 단면감소 효과로 인하여 과한 응력이 발생하여 파손이 발생할 가능성이 있다^[4].

2.1.3.3 수소취성

강에 수소가 함유되면 연성을 잃고 취약하게 되는 성질을 보이며, 수소의 양이 많을수록 취성이 강해진다^[4].

2.1.3.4 충격

용기가 외부 물질에 의하여 충격을 받아 변형되는 현상으로, 버스 하부에 설치된 용기는 상부에 설치된 용기보다 빈번하게 충격 상황에 노출 된다. 연구 결과에 따르면, 국내 버스에 적용되는 철망

의 메쉬(mesh)는 현재의 1 cm × 1 cm의 망 위에 2~3 mm × 2~3 mm 메쉬 망을 2중 배치하는 구조를 가져야 한다^[4].

2.1.3.5 마모

2개의 물체 사이에 상대운동이 있을 경우, 미끄러짐이나 굴림에 의해 표면이 닳게 되는 현상으로, 차량 진동에 의해 용기 표면과 용기 브래킷 사이의 마모가 주로 발생한다. 그러므로 용기 표면과 브래킷 사이에 대한 상세외관검사를 하여야 하며, 스프링 브래킷을 적용할 경우 마모에 의한 결함 발생율이 현저히 낮아지는 것으로 조사되었다^[4].

2.1.3.6 자외선

태양광 자외선 복사에 의해 복합재의 열화가 발생하며, 변색, 백화, 강도저하 등의 현상이 발생한다. Type 2, 3, 4 용기의 복합재에 해당되는 사항이며, 버스의 상부에 장착되었을 때 중요한 검사 항목이 된다^[4].

2.1.3.7 피로

재료에 반복하중이 작용하면 재료 내부에 생기는 응력이 탄성한도를 넘지 않아도 피로에 의하여 재료는 차츰 약해지고, 마침내는 파괴되는 현상이다. CNG 용기는 충전 시 가압, 연료 소모 시 감압이 반복 발생하므로 피로가 발생한다. 플라스틱 재료는 피로 한도가 존재하지 않는다. 독일과 프랑스는 피로에 의하여 복합재의 파손을 유발할 수 있기 때문에 Type 3, 4용기에 대해서 내압검사를 실시하지 않는다^[4].

2.2 국내·외 CNG 자동차의 운영 현황 및 실태

2.2.1 국내·외 내압용기 관리 실태 및 검사제도

2.2.1.1 일반현황

자동차에 사용되는 압력용기에는 용접용기, 이음매 없는 용기, 복합용기 3가지 종류가 있다. 천연가스 차량용 CNG 용기는 2.1.1 절과 같이 4가지 종류의 용기가 사용되고 있으며 국내에서는 Type 1에 비해 가볍고 Type 3, 4에 비해 저렴한 Type 2 용기가 가장 널리 사용되고 있다.

2.2.1.2 CNG 용기장착 자동차 관리현황

CNG 용기의 제조는 용기 제조·수리 면허를 취득한 업체에서 생산하며 CNG 용기를 취급하는 업체의 경우 가스1종 면허도 소지해야 한다. CNG 용기 수리 업체는 차량 정비면허, 가스 시공 시설 면허를 소지해야 한다. 용기의 수리는 현행법상 용기 제조사에서 하도록 되어있다^[5].

용기 제조 단계에서의 정밀검사는 최초 설계·제조 및 설계 변경

단계에서 한국가스안전공사에서 실시하고 있으며 자동차용 내압용기 안전에 관한 규정 별표 1에 따라 시행한다.

CNG 용기의 육안검사 등은 최초 제조 시와 이후 매 36개월마다 재실시하도록 되어 있다. 그러나 자동차용 내압용기는 자동차관리법 시행규칙 제57조의14(내압용기 정기검사 및 수시검사)1항에 의거 승용자동차의 경우에는 4년, 그 밖의 자동차의 경우에는 3년을 재검사 주기로 하도록 되어 있다^[5].

2.2.1.3 CNG 용기 부속품의 관리 현황

ECE R110에는 CNG 용기 부속품에 대한 시험방법이 명시되어 있다. 이 시험방법은 최초 제작 시 형식인증을 위한 시험방법이다. CNG 용기 부속품은 대표적으로 CNG 탱크의 높은 압력을 엔진 구동에 적절한 압력으로 낮추어 주는 압력 레귤레이터, 압력 레귤레이터의 고장으로 출구 압력이 규정된 압력을 초과할 경우 가스를 외부로 방출하는 과압 방지밸브(PRV), 전기적 신호를 이용하여 CNG 연료 흐름을 차단하는 전자식 솔레노이드 밸브 및 CNG 연료 필터로 구성된다. 가장 먼저 과압시험을 실시하여 부속품이 설계된 내압에 맞도록 제작되었는지 확인하여야 한다. 이후 외부누설 시험을 모든 시료에 대해 실시하고, 내부누설시험도 지정된 모든 시료에 대해 실시하여야 한다. 온도 사이클, 내구, 진동 시험 후에도 지정된 시료에 대하여 외부누설시험과 내부누설시험을 실시하여 이상이 없는지 확인한다.

2.2.1.4 유럽의 CNG 내압 용기의 관리 실태 및 검사제도

독일, 프랑스, 이탈리아는 우리나라 보다 일찍 내압용기에 대한 재검사제도를 실시하였다. 상기 국가들은 시행초기에 탈거내압 시험을 실시하였으며 내압용기의 품질이 향상되고 검사기술과 안전관리 체계가 발달함에 따라 점차적으로 재검사 시행주기를 늘려나가고 있다. 또한 독일과 프랑스의 경우 내압용기의 Type 이 1에서 3, 4로 변경되면서 '03년 이후부터는 탈거 정밀검사를 실시하지 않고 상세외관검사로 대신하고 있으며, 이탈리아는 '07년부터 3년 주기로 실시하던 탈거 정밀검사를 4년 주기로 실시하고 있다.

2.2.2 CNG 내압용기의 안전 기준

압축천연가스는 1940년대 초반 이후부터 차량용 연료로 사용되어 왔으며, 초기의 고압압력 용기는 산업계 기준에 따라 제조되고, 시험이 수행되었다.

1970년대 후반까지 각 국가들에서는 산업용 가스용기 기준을 천연가스차량의 용기에 적용하였다. 그러나 시간이 지나게 됨에 따라 이러한 산업용 기준들은 안전 측면과 제품의 최적 용도를 위한 최선의 기준이 아니었음이 명백해졌다. 그 때 가볍고 고강도인 강

로 구성된 용기들에 대한 새로운 이탈리아 기준이 소개되었고, 이 새로운 기준이 매우 성공적이라 사실이 증명되었다. 이후로 이 기준에 따른 수십만 개의 천연가스차량용 용기들이 세계적으로 통용되게 되었다.

북미지역에서는 1980년대에 대규모의 차량이 천연가스차량으로 전환되기 시작하였다. 1982년에는 알루미늄 라이너와 유리 섬유 복합재로 제조된 주변부가 감싸진 용기들이 천연가스차량에 사용되기 시작되었다. 강으로 용기를 제조하는 제조사들이 1985년에 이러한 추세를 받아들여 가벼운 용기 설계를 하였으며, 유리 섬유로 강화된 용기를 생산하였다.

현재 전 세계적으로 환경을 보호하고자 하는 노력에 따라 친환경 자동차는 2011년에 약 1천 3백만 대를 넘어 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 천연가스 차량의 안전과 효율적인 내압 용기를 확보하기 위하여 적절한 안전 기준을 갖는 것이 중요하게 되었다. 국제 표준 제정 단체 및 각 국가에서는 천연가스 차량의 내압용기 검사, 유지 보수를 위한 규정 뿐 아니라 천연가스 차량의 내압용기를 위한 설계 및 검사 조건들에 대한 표준을 제정하였다.

천연가스용기는 가벼운 중량을 가져야 하며, 다른 압력 용기들에 적용되는 안전 기준을 유지하여야 한다. 천연가스 차량의 용기 설계 관련 기준은 ISO 11439, ECE R110, NGV2 200를 따른다.

3. 내압용기 재검사 결과 분석

3.1 CNG 자동차 내압용기 재검사 결과분석

3.1.1 차종별 불합격 현황 분석

2016년에는 승용 1,964대, 승합 8,792대, 화물 418대로 총 11,174대의 CNG 자동차가 내압용기 재검사를 받았으며, 1,179대의 자동차가 불합격을 받아 10.6%의 불합격률을 기록 하였다. 결과분석 시 자동차 대당 1개소 이상의 불합격 발생이 다수 있었으므로 불합격 대수 보다 불합격 개수가 더 많았다.

3.1.2 검사 항목별 결과 분석

불합격 자동차의 결함항목을 정리하면, 전체 불합격 1,891건 중 용기결함이 285건으로 15.1%를 차지하였고 가스누출은 741건으로 39.2%를 차지하였으며 내압용기 고정장치 등 기타장치 불합격이 865건으로 45.7%를 차지하였다. 용기 불합격은 부식이 가장 많았고 다음으로 균열/손상, 열해 순이며 가스누출은 부속 단품의 결함으로 누출하는 경우가 가장 많았고 다음은 연결부, 밸브 순으로 나타났다.

4. CNC 내압용기의 평가 및 분석

4.1 시험장치 및 유한요소해석

4.1.1 시험장치

CNG 용기 탈거 내압시험의 유용성을 검증하고, 적절한 시험 방법을 제시하기 위하여 아래 그림과 같은 파괴시험기 및 챔버를 이용하여 시험을 실시하였다. 용기를 가압하는 고압펌프는 공압으로 작동하며, 공압 레귤레이터와 밸브를 이용한 공기 유량 제어를 통해 물의 토출 유량이 결정된다. 가압 라인의 압력은 압력센서로 모니터링 되며, 데이터 레코더를 이용해 압력 값을 기록하였다. 반복가압시험을 할 때는 압력 값에 따라 공압 솔레노이드 밸브와 리턴 솔레노이드 밸브를 제어하여 가압과 감압이 반복되도록 하였다. CNG 내압용기 시험 장치는 Fig. 1에 나타내었다.

4.1.2 유한요소해석의 개요

유한요소해석은 실험 이전에 설계 값이 올바른지 여부를 판단하기 위하여 수행하기도 하지만, 실험을 통하여 파악이 어려운 경우에도 유용하게 사용될 수 있다. 해석에 사용된 구조해석용 프로그램은 Autodesk Simulation Mechanical 2012로써, Linear static analysis 모듈과 Nonlinear 해석 모듈인 Mechanical Event Simulation을 사용하였다.

해석의 첫 단계는 복합재를 제외하고 다양한 결합 모델에 대한 해석을 수행하였다. 이 해석의 결과 정성적인 경향은 파악할 수 있었으나, 정량적인 해석 결과에 많은 오차가 발생하였다.

정량적인 오차 문제를 해결하기 위하여 복합재를 트러스(truss) 요소를 이용하여 모델링을 하였다.

이때 복합재를 포함한 외부에 흠집이 존재할 모델의 해석을 통하여 응력 발생 부위와 금속라이너의 수명을 예측하였다. 이러한 해석 결과는 실제 실험 결과를 잘 모사하는 것으로 나타났다.

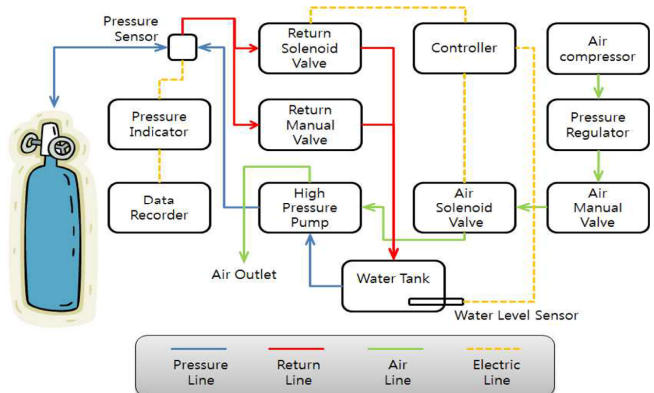


Fig. 1 Apparatus of CNG pressure vessel^[5]

4.1.2.1 유한요소해석 대상 모델

유한요소해석 대상 모델은 국내 N사 제품으로 CNG 028모델로써 용기 종류는 CNG Type 2이며, 중앙의 원통형 부는 두께가 약 4.8 mm로서 얇고, 플랜지 부분의 두께가 최대 7.5 mm로 두꺼워지는 형태를 가지고 있다.

본 해석 대상인 CNG Type 2의 용기는 금속라이너의 열처리 공정 후에 복합재를 감싸는 공정이 수행되고, 이 공정 이후에 약 40 MPa로 Auto-fretage를 수행하는 공정을 통하여 복합재에는 장력이 걸리며, 라이너에는 압축잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 응력들의 효과를 고려하려면, 용기의 부위별 잔류응력 상태 및 복합재의 장력을 파악하여야 한다. 그런데 실제로 이러한 응력상태를 파악하는 것은 거의 불가능한 일이며, 많은 실험 데이터를 요구한다. 따라서 본 해석에서는 이러한 초기 응력 상태가 없는 것으로 가정하여 모델링을 수행하였다.

4.1.2.2 재료의 특징

본 해석에 사용된 재료는 금속라이너 부분은 34CrMo4로써 DIN 17220 또는 AISI4135로 명명되는 Cr-Mo강이다. 본 해석에서는 열처리 이후의 재료의 기계적 성질을 입력하여야 하므로, MATWEB에서 제공하는 열처리(quenching/tempering)이후의 재료 특성을 입력하였다. 해석에 사용된 재료의 특성은 Table 1과 같다. 선형해석에서는 탄성계수와 포아슨비를 사용하였고, 비선형 해석에서는 kinematic hardening model을 사용하였다.

용기 제작 중에 Auto-fretage 공정을 통하여 40.0 MPa를 인가함으로써 소성변형을 발생시키므로, Kinematic hardening 원리에 의하여 소성변형에 따른 재료의 항복강도의 변화가 발생한다. 이를 고려할 경우 실제 항복강도 값은 기존의 항복강도보다 높은 값을 가질 것으로 예상된다. 그러나 그 값은 금속라이너를 감싸고 있는 복합재와 함께 고려되어야 하므로 본 해석에서는 작은 변화를 고려하지 않고 해석을 수행하였다.

본 해석에 사용된 복합재는 에폭시 수지(epoxy resin)에 유리 섬유를 첨가하여 강화한 것으로써, 최저 인장 강도가 1,034 MPa이다. 그런데 복합재의 경우, 변형률 속도와 온도에 따라 탄성 계수의

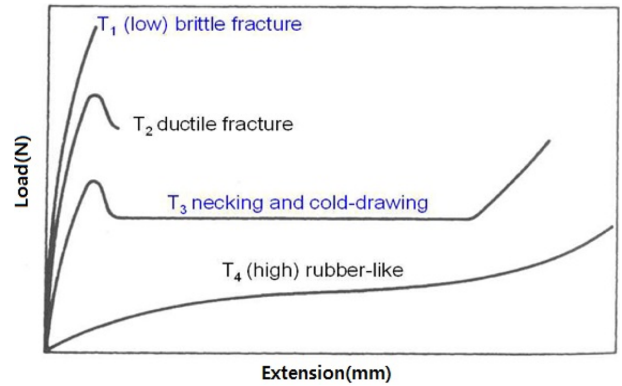


Fig. 2 Extension curve of composite material

값의 편차가 매우 심하므로 해석을 위하여 함께 모델링을 수행하는데 어려운 점이 있다. 따라서 본 논문에서는 금속라이너만 이용하여 해석을 한 경우와 복합재를 고려하여 해석한 것으로 구분을 하였으며, 이때 복합재를 직접 모델링 한 것이 아니라, 트러스 요소를 이용하여 모델링을 함으로써 복합재의 효과를 고려하였다. 온도에 따른 복합재의 인장 곡선을 Fig. 2에 나타내었다.

4.2 시험을 통한 내압용기 안전성 평가

4.2.1 반복가압시험 및 유한요소해석

4.2.1.1 시험방법

반복가압시험은 3급 판정을 받은 용기로 높은 압력으로 반복 가압 후 스트레스를 받은 용기의 파괴압력을 확인하고자 하였다. 압력의 범위는 최저압력 20 bar 이하, 최고압력 370 bar 이상으로 하였다. 최고압력은 Auto-fretage 압력인 410 bar보다 약 10% 낮은 압력으로 결정하였다. 압력 상승 시간은 약 600초, 370 bar에서 30 초를 유지하고 압력 하강 시간은 약 70초이다. 시험용기 사진과 시험 결과 사진을 Fig. 3과 4에 나타내었다.



Fig. 3 Photograph of test vessel (CNG type 2)



Fig. 4 Photograph of test result (after repeated pressure)

Table 1 Material characteristics of metal liner

Material Description	Bar austenitized at 1575 °F, water quenched, and tempered at 800 °F for 1 hour
Mass Density	7.82 e-009 N·s ² /mm ³
Modulus of Elasticity	206,842.72 N/mm ²
Poisson's Ratio	0.3
Yield Stress	1,172.11 N/mm ²
Strain Hardening Modulus	1,064.37 N/mm ²

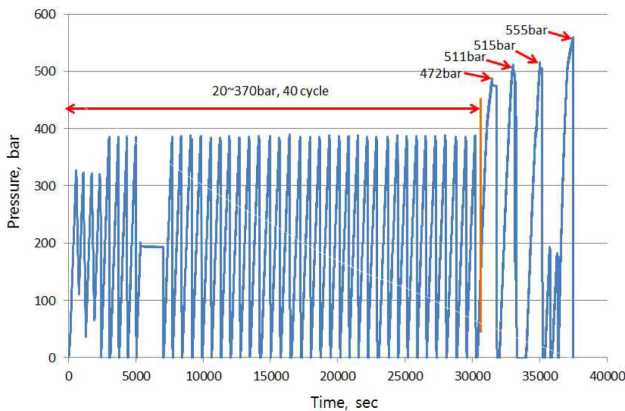


Fig. 5 Graph of repeated pressure test

반복가압 압력 310 bar를 초과한 370 bar의 압력으로 반복가압 시험을 실시한 결과 저부부식에 의한 3급 판정 용기임에도 몸통부위가 파손되었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 파손이 일어나기 전 용기에는 원주 방향의 균열이 다수 발견 되었다.

Fig. 5는 반복가압시험 그래프를 나타낸다. 최저 20 bar 이하에서 최고 370 bar 이상까지 40 사이클을 반복가압 하였다. 이후 압력을 점차로 높여 472 bar, 511 bar, 515 bar의 압력을 가하였지만 파괴는 일어나지 않았고, 최종적으로 555 bar에서 파괴가 발생하였다. 내압검사 결과는 합격이며 파괴압력도 530 bar를 초과하여 신품과 동등한 수준으로 나타났다. 그래프 상의 최고압력이 380 bar로 나타난 것은 펌프의 맥동 때문이며, 맥동이 없는 조건에서의 압력은 370 bar 이다.

4.2.1.2 예측 수명

이와 같은 압력을 반복할 경우 피로수명은 식 (1)로 예측할 수 있다.

$$n_2 = n_1 \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^b \quad (1)$$

만약 파괴압력 552 bar, 피로한도 310 bar에서 $n_1 = 40,000$ 회라고 했을 때 $b = 10.45$ 이다. 따라서 $n_2 = 6,296$ 회이므로 파열 시험기로 시험하는 경우 약 51일이 소요될 것으로 예상 된다. 그리고 6,296 회를 반복가압 할 수 있다는 것은 사용압력이 207 bar인 용기를 380 bar의 압력으로 하루 두 번 충전하면서 사용할 경우에도 약 8년 정도는 사용 수명이 남아 있음을 의미한다.

4.2.1.3 외부결합시험조건

외부결합시험은 용기 외벽에 인위적인 결함을 만들고 결함의 정도에 따라 결함부위의 파괴압력이 어떻게 달라지는지를 확인하기 위해 실시하였다. 외부결합은 용기 외부에서 드릴과 엔드밀을 사용하여 구멍을 가공하였으며, 복합재 부분을 관통한 후 금속라이너의

Table 2 Size of defect in external defect test

	Diameter (mm)	Vessel thickness (mm)
Test 1	1.5	3
Test 2	1.5	1
Test 3	9	0.5



Fig. 6 Photograph of external defect (test 1)

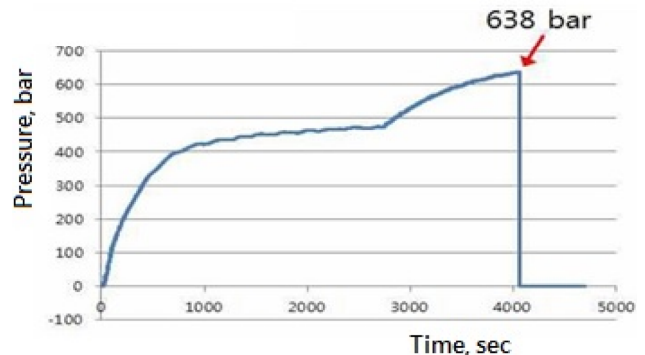


Fig. 7 Result of test 1

잔여두께는 Table 2에 나타난 값이 남도록 가공하였다. 1.5 mm 구멍은 드릴을 이용하여 가공한 것이며, 9 mm의 구멍은 엔드밀을 이용하여 가공하였다. 아래에 표기한 용기 잔여두께는 시험 전 계획한 두께이며, 실제 가공두께는 시험을 완료한 후 직접 측정하여 제시하였다.

4.2.1.4 외부결합시험 결과

시험 1의 결과 저부부식 및 외부결합이 있음에도 불구하고 결합부위가 아닌 몸통부위가 파손 되었다. 파괴압력은 638 bar로 나타났다. 내압검사 결과는 합격이며 파괴압력이 신품용기와 동등한 수준이다. Fig. 6과 Fig. 7에 외부결합 사진과 시험결과를 나타내었다.

시험 2의 결과 본 용기에는 저부부식과 외부결합(직경 1.5 Φ,



Fig. 8 Photograph of external defect (test 2)

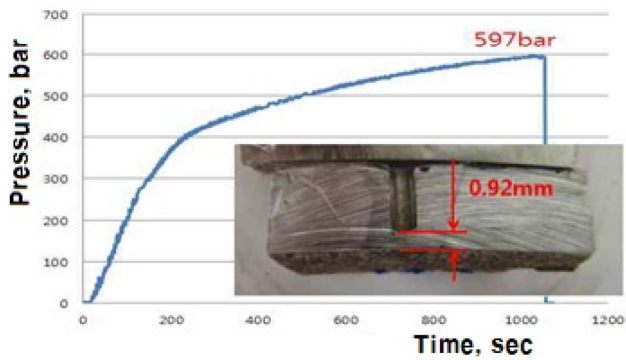


Fig. 9 Result of test 2

Table 3 Conditions of FEM analysis (test 2)

Event duration	30 s
Capture rate	10 /s
Analysis type	Fully manual
Output reaction forces	Calculated
Number of time steps	300
Initial time step size	0.1 s
Max. number of iterations	15
Convergence criteria	Displacement
Displacement tolerance	1E-4
Convergence tolerance	1E-6
Max. number of iterations	1000
Number of processors	1
Run static analysis	No
Type of solver	Nonlinear iterative solution method

용기 잔여두께 0.92 mm)이 존재함에도 불구하고 결함부위가 아닌 몸통부위가 파손되었다. 파괴압력은 597 bar로 합격이며, 파괴압력이 신품과 동등한 수준이다. Fig. 8과 Fig. 9에 외부결함 사진과 시험결과를 나타내었다. 시험 2의 유한요소해석의 요약은 Table

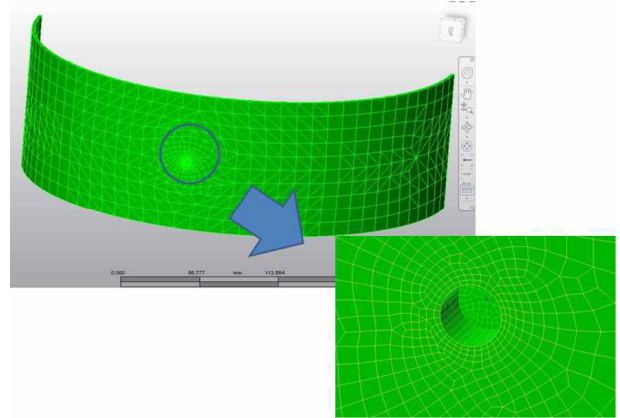


Fig. 10 Analytical Model

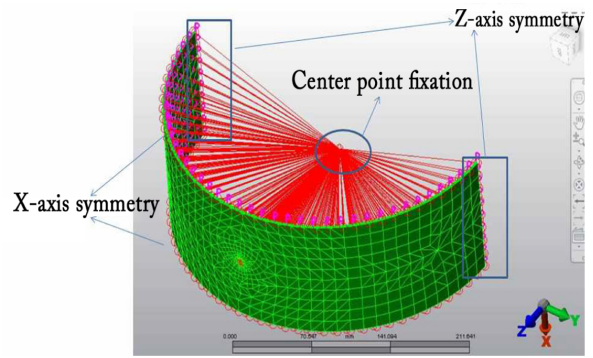


Fig. 11 Boundary conditions

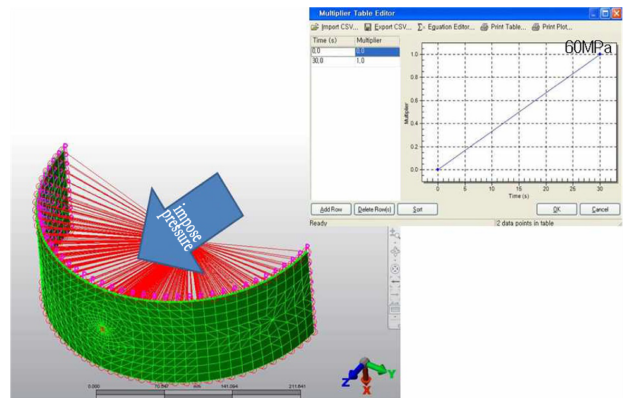


Fig. 12 Experimental condition

3에 기술하였다.

모델링은 Fig. 10과 같이 홈 주변부의 격자를 매우 작게 생성하였으며, 해석의 효율을 높이기 위하여, 대칭성을 이용한 half model을 사용하였다. 금속라이너는 Kinematic hardening model을 사용하였고, 트러스는 선형조건을 사용하였다. 해석모델은 Fig. 10에 나타내었다.

사용된 경계 조건은 Fig. 11과 같으며 평면 변형률 조건과 대칭성 조건을 부과하였다.

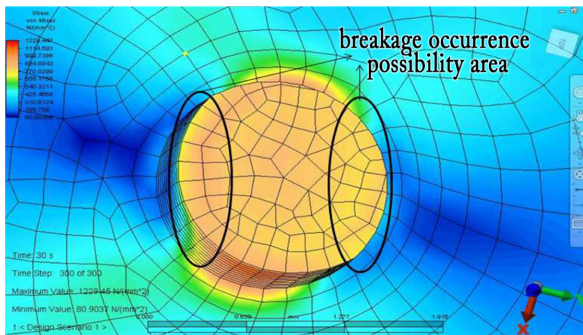


Fig. 13 Analytical result

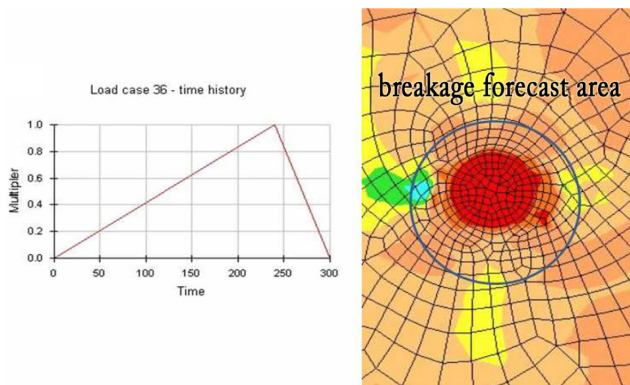


Fig. 14 Life expectation

해석에 사용된 초기 조건은 Fig. 12와 같으며, 0초에서 30초까지 선형적으로 증가시켜 30초에 600 bar (60 MPa)가 인가되도록 하였다.

해석 결과 600 bar에서 최대 Von-mises 응력 값은 약 1,230 MPa로써 최대인장강도(1,378.95 MPa)보다 약간 작은 것으로 나타난다. 특히 최대 응력 값이 가공부 벽면에서 나타나서 파손에 견디는 압력이 큰 것으로 판단된다. 해석결과와 예측수명을 Fig. 13과 Fig. 14에 각각 나타내었다.

용기를 4분 동안 300 bar를 인가하고 1분간 감압을 반복할 때
예상 피로 수명은 약 9,800회로, 하루 2회 충전 시 약 13년으로
예상된다.

시험 3의 결과 외부결합 부위에서 파손이 발생 하였다. 파괴압력은 431 bar였다. 내압검사 압력인 310 bar는 초과하였으나, 파괴 압력인 465 bar에는 미달하는 것으로 나타났다. Fig. 15와 Fig. 16에 외부결합 사진과 시험결과를 나타내었다.

유한요소해석 결과 500 bar에서 Von-mises 최대 응력 값은 약 1,230 MPa로서 최대 인장 응력과 유사한 것으로 나타났다. 이는 실험값 431 bar 보다는 약간 높게 나타났다. 시험 3과 같이 4분 동안 300 bar를 인가하고 1분간 감압을 하는 반복 시에 예상 피로 수명은 약 2,500회로 하루 2회 충전 시 3.4년의 수명이 예상된다.



Fig. 15 Photograph of external defect (test 3)

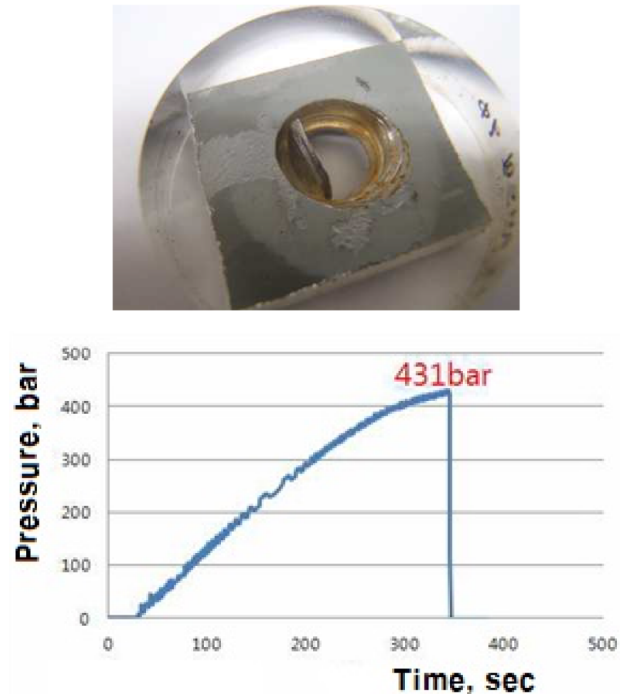


Fig. 16 Result of test 3

4.2.2 시험결과

시험 1의 용기는 저부부식과 외부결함(결함의 크기가 1.5 mm, 용기의 최소 두께 2.7 mm)이 있었음에도 불구하고 결함부가 아닌 몸통에서 파손 되었으며, 파열압력은 638 bar로 나타났다. 또한 내압검사 결과는 합격이며 파열압력은 신품과 동등한 수준이다. 시험 2의 용기도 파열시험은 597 bar로 합격이고, 파열압력도 신품과 동등한 수준이며 파열부위도 결함부와 다르게 파열되었다. 시험 3의 용기는 결함이 가장 가혹한 조건으로 내압시험압력은 초과하였으나, 파열시험압력에는 미치지 못하였고, 파열부위는 결함부위와 동일하게 나타났다. 외부결함 시험결과는 Table 4와 같다.

유한요소 해석 결과 외부결함이 일부 있더라도 사용수명까지 사용할 수 있는 것으로 해석 되었으나, 내압용기의 두께 0.5 mm에서는 사용 수명이 짧아지는 것을 알 수 있었다. 외부 결함에 따른 유한요소 해석 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Test results of external defects

	Test 1	Test 2	Test 3
Manufacturing standard pressure (465 bar)	Pass (638 bar)	Pass (597 bar)	Fail (431 bar)
Manufacturer design pressure (530 bar)	Pass (638 bar)	Pass (597 bar)	Fail (431 bar)
Pressure proof testing pressure (310 bar)	Pass (638 bar)	Pass (597 bar)	Pass (431 bar)

Table 5 FEM result

	Test 1	Test 2	Test 3
Max. Von-mises stress at 600 bar	-	1,230 MPa	1,230 MPa
Fatigue life	-	9,800 (13 yr)	2,500 (3.4 yr)
Breakage possibility area	-	Defect area	Defect area

4.3 내압용기 재검사 발전방향

외부결함시험과 유한요소해석에서 결함이 있는 용기 모두 파열 압력이 내압시험 이상 나와 현재의 상세정밀검사 도입의 타당성은 검증하였으나, 외국의 내압용기 파열사고 분석 결과 현재 상세정밀 검사로는 파열사고 83건 중 용기 제조불량으로 인한 31건은 발견할 수 없음을 알 수 있었다. 또한 국내에서 발생한 6건의 내압용기 파열사고 중 4건이 제조불량(열처리 불량)으로 내압용기재검사로 는 예방할 수 없다.

내압용기 파열사고로 이어지는 제조불량은 열처리 불량으로 내 압시험을 통한 내압용기의 영구증가량으로만 불합격 여부를 판단 할 수 있다. 이런 결론은 조합해 볼 때 내압용기재검사의 정확성을 향상시키기 위해서는 탈거 내압시험을 일부 도입하여 현재 3년 주기의 내압용기 상세정밀검사를, 3년째는 상세정밀검사, 6년째는 탈 거 내압시험, 9년째 다시 상세정밀검사를 하여 내압용기 표면의 결 함과 제조 시 열처리 결함을 모두 검사할 수 있는 검사 제도를 제시 한다. 6년째 시행하는 탈거 내압시험을 통해 내압용기의 내외부 결 함 조사와 도장 손상부위 도색 등 일부 수리를 할 수 있도록 하면 내압용기 사용수명 또는 차량 만료일까지 더욱 안전하게 사용 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 내압용기재검사 결과의 연도별 불합격 유형을 분석하 고, 국내·외 내압용기 파열사고 현황과 CNG 자동차의 검사제도 및 사용실태 등을 비교 분석하여 현 검사제도의 문제점을 파악, 개 선점 고찰과 함께 발전방향을 제시하고자 하였다. 또한 탈거 내압 시험 제도 도입을 위해 인위적인 외부결함 시험과 유한요소해석을 실시하였다.

내압용기 외부에 일정한 결함이 발생하더라도 일정 기간이상 사 용할 수 있으며, 외부 결함이 발생한 용기는 내압시험을 실시하여 도 그 안전성을 확인할 수 없다. 또한, 국내의 내압용기 파열사고의 원인은 대부분 열처리 결함으로 밝혀지고 있다. 상세정밀검사로 는 내압용기 제조 시 열처리 결함은 발견할 수 없다. 또한, 내압용기 제조단계에서는 열처리 결함을 발견하기 위해 내압시험을 실시하 여야 한다.

위와 같은 결론을 조합한 결과 내압용기 제조 후 3년째는 상세정 밀검사, 6년째는 내압용기 탈거 후 상세정밀검사와 내압시험을 모 두 실시, 9년째에 다시 상세정밀검사를 실시하여, 파열사고 예방과 함께 CNG 자동차의 안전을 확보하여야 한다.

References

- [1] Korea Transportation Safety Authority, 2012, Manual of CNG Pressure Vessel Inspecting Work, Korea Transportation Safety Authority, 31-37.
- [2] Korea Transportation Safety Authority, 2017, Manual of CNG Pressure Vessel Tuning, Korea Transportation Safety Authority, 17-27.
- [3] Chu, J. M., Kang, K. K., Gong, S. Y., Lee, J. M., 2011, A Study on the Supply Feasibility of High Safety Fuel Containers, Korea Environment Institute, 8-9.
- [4] Song, Y. S., 2011, A Study on Removal Precision Inspection of CNG Pressure Vessel, Korea Automotive Technology Institute, 41-60.
- [5] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2018, Regulation for Safety of CNG Pressure Vessel, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport No. 2018-176 1-5.