

## 상온 수압반복시험 시 Type 3 복합재용기 내 공기층의 온도변화

조성민\*, 김광석\*, 김창종\*, 유근준\*, 이연재\*, 조윤성\*, 류성기\*\*,#

\*한국가스안전공사 가스안전연구원, \*\*경상대학교 기계항공학부(ReCAPT)

### Temperature Variations of Air Pocket in Type-3 Composite Vessel during Ambient Hydraulic Cycling Test

Sung-min Cho\*, Kwang Seok Kim\*, Chang Jong Kim\*, Geun-jun Lyu\*, Yeon-jae Lee\*, Yun Seong Jo\*, and Sung-Ki Lyu\*\*,#

\*Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation,

\*\*School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT, Gyeongsang National Univ.

(Received 19 August 2015; received in revised form 24 August 2015; accepted 5 September 2015)

#### ABSTRACT

This research aims to increase the reliability and reproducibility of the ambient cycling test by properly making corrections to the test procedure. The vessel (106 L) is initially filled with 70 L of water and horizontally placed on a balance. The pressure range inside the vessel varies from 2.5 to 25.9 MPa at the frequency of 6 cycles per minute. After reviewing the results, there was a temperature difference of approximately 10 °C between the air pocket and the water, and the upper part of the liner faced a repeated temperature change of 40 °C. It is possible for the aluminum liner of the composite vessel to be damaged by such a sharp change in temperature. Additionally, as a result, no pass having anything to do with the purpose of the test would occur. Therefore, it is suggested that the air pocket be completely removed.

**Key Words** : Ambient Hydraulic Cycling Test(상온수압반복시험), Type3 Composite Vessel(타입3복합재용기), Internal Temperature Variations(내부온도변화)

#### 1. 서 론

수소 또는 압축천연가스(CNG)를 연료로 사용하는 자동차가 무배출 차량으로의 중요한 역할로 인하여 세계 주요 자동차 제조사들로부터 주목을 받고 있다. 이러한 움직임에 따라 높은 압력으로 압축된 연료를 위한 저장소의 무게와 부피를 감소시키기 위해 많은 노력을 하고 있다. 현재까지는, 복합소재로 만든 용기가 연료저장소로서 가장 뛰어난 성능을

발휘하는 것으로 알려져 있다. 이러한 용기는 그 구조와 구성 재질에 따라 아래와 같이 4가지 형태로 구분된다.

Type I 용기는 오직 금속재질로만 만들어 용기로 가장 중량이 많이 나간다. 주로 이음매 없는 철제 튜브(seamless steel tube)를 이용하여 제조한다. Type II 용기는 상기 Type I 용기의 옆면을 유리섬유로 감아서 만든다. 유리섬유로부터 추가된 지지력으로 인해 Type I 용기가 저장할 수 있는 압력보다 높은 압력으로 압축된 가스를 저장 할 수 있다. Type III 용기는 얇은 알루미늄 라이너를 에폭시 수지를 묻힌 탄소섬

# Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

유를 감아 경화시켜 만든다. 이것은 Type I 또는 II 용기보다 훨씬 가볍지만, 더 높은 압력의 가스를 수용할 수 있다.

Type IV 용기는 얇은 플라스틱 재질의 라이너에 에폭시 수지를 묻힌 탄소섬유를 감아 경화시켜 만든다. 유일한 금속부분은 보스라 불리기도 하는 밸브연결부 뿐이다.<sup>[1]</sup>

Type III 및 IV 용기는 현재 천연가스 또는 수소를 각각 20.7 MPa, 70 MPa의 압력으로 저장하는데 사용하고 있다. 대부분의 선진국은 이러한 용기를 시판하기 전에 ANSI/NGV2-2007 또는 ISO11439 등 여러 가지 기준과 규정에서 요구하는 일련의 시험을 의무적으로 통과하도록 법으로 정하였다. 사실, 이 기준과 규정들은 안전한 사용을 위한 최소한의 요구사항이며, 계속하여 수정해 나아가고 있다. 이러한 개선의 노력에 보탬이 되고자 본 연구를 수행하였다.<sup>[2]</sup>

위에 기술된 규정들에서 요구한 시험의 종류를 표1에 요약하였고, 이들 중 상온수압반복시험에 대하여 중요한 제안을 하고자 한다. 상온수압반복시험의 목적은 용기가 예상 수명에 도달할 때까지 반복되는 연료의 충전(가압)과 방출(이완)에 의해 손상되지 않고 원래의 기능을 구현하는지를 알아보는 시험이다. CNG 용기는 충전 횟수 한계가 11,250회이다. 이는 2일에 한번 완충하여 용기의 기대 수명인 15년까지 사용했을 경우 총 충전 횟수를 근거로 계산한 것이다.

시험 규정에 따르면, 용기를 물, 글리콜 또는 기체 연료 대체물질 등을 사용하여 분당 6회 미만의 속도로 사용압력의 1.25배(CNG용기의 경우 25.9 MPa)까지 가압한다. 상온수압반복시험의 절차에는 시험용기에 물을 채우는 전처리 과정이 있다. 이 전처리 과정에서 시험용기 내에 남아있는 공기의 양은 개별 시험자의 습관에 크게 좌우될 수 있음에도 그 표준절차가 명시되어있지 않았다. 그러나 이러한 공기층의 존재가 시험결과에 미치는 영향에 대한 논의가 현재 활발히 진행 중이다.

논의의 쟁점은 공기를 고속으로 압축, 팽창시키면 용기 라이너에 열적 피로를 유발하고, 이는 결국 원래 시험의 목적과 상관없는 원인에 의한 불합격 판정을 야기할 수 있다는 것이다.

**Table 1 List of the tests specified in the standards/regulation for commercial type III composite vessel**

ANSI/NGV2-2007	ISO11439
Ambient Hydraulic Cycling Test	Ambient Cycling Test
Environment Test	Environment Test
Composite Flaw Tol. Test	Composite Flaw Tol. Test
Accelerated Stress Rupture	Drop Test
Permeation Test	Leak before Break
Bonfire Test	Extreme Temp. Cycling Test
Leak Test	Permeation Test

본 연구는 이러한 열적 피로의 가능성 실험을 통해 평가하기 위해 Type III 복합용기 내부 공기층의 온도 변화 범위에 집중하였다. 추후 Type IV 용기에 대한 유사한 시험이 수행되어야 하며, 그 결과를 관련 규정을 개선하는데 이용할 수 있을 것이다.<sup>[3-10]</sup>

## 2. 이론 및 방법

### 2.1 Type III 복합용기의 전처리 과정

Fig. 1(a)에 나타난 공칭 용량이 106 L인 Type III 복합용기(Model-V106C22K-1N, INOCOM, Korea)를 사용하였다. 이 제품은 국내에서 CNG를 연료로 사용하는 자동차의 연료탱크로 판매되고 있으며, 사용압력은 20.7 MPa이고 4 mm 두께의 Al6061-T6 이음매 없는 라이너와 12 mm 두께의 복합재로 구성되어 있다. 빈 용기를 수평으로 눕혀 고정시킨 후, 한쪽 보스를 통해 내부에 온도계 다발(다음 절에서 상세하게 설명되어 있음)을 장착하고 다른 한쪽 보스에는 물 공급 호스를 연결하였다. 이때 용기의 무게는 39 kg이었다. 전자저울 지시계를 영점으로 설정한 후, 용기에 23°C의 수돗물을 상압에서 가득 채웠을 때 용기의 무게가 106 kg이었다. 이로부터 실제 용량이 공칭용량 106 L와 동일함을 알 수 있었다. 이 경우 용기 내 공기층을 완전히 제거하기 위해 용기를 진공펌프에 연결한 상태에서 5분간 손으로 흔들어주었다. 이 상태에서 물 공급 호스 연결부를 부분적으로 개방하여 내부 물이 빠져나오고 공기가 유입되도록 하였다. 전자저울은 최종적으로 70 kg을 지시하였고, 물 공급 호스를 제조사의

사용설명서에 따라 단단히 조였다.

## 2.2 온도계 다발

용기 내 물과 공기의 온도를 측정하기 위해 6개의 K타입 열전대(thermocouple, KTSS-116, OMEGA Engineering Inc., CT)를 Fig. 1(b)와 같이 스테인리스 지그의 각 압(arm) 끝 부분에 고정시켰다. 지그 압은 몸통으로 접힐 수 있도록 제작되어 좁은 용기 보스를 통해 용기 내부로 들어갈 수 있다. 용기 내부로 들어간 다음에는 스프링의 작용에 의해 다시 펼쳐질 수 있다. 지그는 완전히 펼쳐졌을 때 각 압의 끝 부분이 알루미늄 라이너의 안쪽 표면으로부터 20 mm 떨어진 곳에 위치하도록 설계하였다.

각 열전대는 시험도중 인가되는 고압에 의해 손상되지 않도록 1 mm 두께의 스테인리스로 둘러싸여 보호되고 있다. 스테인리스 막은 열전대의 평균 응답 시간을 증가시킨다. 하지만 이 값은 3초 미만으로 반복 가압 주기보다 짧아 측정의 정확도에

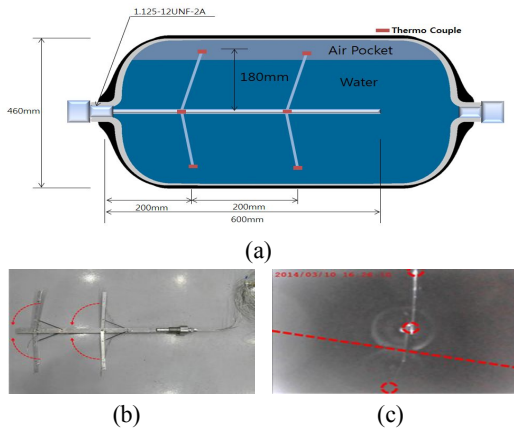


Fig. 1 (a) The cross sectional view (Catia® image) and the dimensions inside the type III composite vessel used in the test, equipped with the thermocouple jig; (b) the thermocouple jig with 4 arms which are folded up (see the red round arrows) for the insertion; and (c) the endoscopic image inside the vessel showing the jig nearly perpendicular to the water surface (the red dashed line), the thermocouples are located at the red circles

큰 영향을 미치지 않을 것으로 기대된다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 상부에 위치한 두 열전대는 공기층의 온도를 측정하고 하부의 두 열전대와 중간에 있는 물의 온도를 측정한다. 이는 가압 전 물의 용량인 70 L가 용기의 공칭 용량인 106 L의 반 보다 크기 때문이다. Fig. 1(c)는 내시경을 이용하여 지그가 용기 내부에서 수직으로 세워져있는 지를 확인한 것을 나타낸다.

## 2.3 고압 물 펌프

Fig. 2에 나타난 바와 같이 용기 가압을 위한 고압용 물 펌프(KD28-435, Pressure Jet, India)를 사용하였다. 이 장치는 최대 55.5 MPa의 압력에서 분당 84 L의 속도로 용기에 공급하면서 실시간으로 용기의 압력을 측정할 수 있다. 가압속도는 600 RPM 플랜저 펌프에 의해 조절된다. 물 공급 펌프와 물 공급 호스 사이에는 냉각기(chiller)가 설치되어 있다. 이는 압축에 의해 데워진 물을 회수하여 냉각시키는 중요한 역할을 한다. ANSI/NGV2-2007 등과 같은 규정에 따르면, 사용압력의 1.25배에 해당하는 압력(즉, 이 시험의 경우 25.9 MPa)을 용기에 인가해야 한다. 고압이 인가될 때 물이 새는 것을 방지하기 위해 특수한 나사산(1.125 12UNF)을 지그 및 호스연결용 보스에 각각 만들었다. 이 나사산과 O-ring을 사용하면 최대 55 MPa의 압력까지 견딜 수 있도록 연결부위를 완벽하게 밀봉할 수 있다.

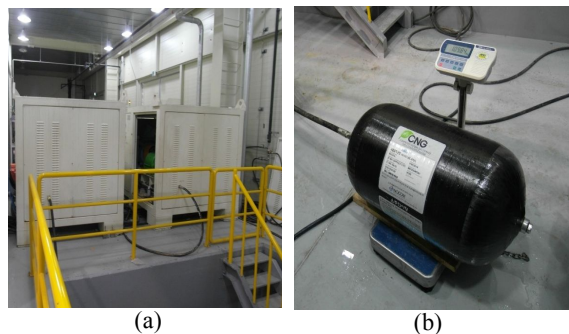


Fig. 2 Photos of (a) the high pressure water pump and (b) the Type III composite vessel for CNG storage installed and operated in the AHC test site in Korea Gas Safety Corporation

## 2.4 상온수압반복시험의 절차

안전상의 이유로 Type III 복합용기의 상온수압 반복시험은 한국가스안전공사에 만들어진 4×4×5 m의 피트 안에서 수행된다. 물 공급 펌프는 피트와 1.5 m 이격된 지상에 설치되어 있다. 펌프와 용기는 3/4 인치 고압호스(SB-HWS344, SELBLAST, UK)를 이용하여 연결하였다. 매 100 ms마다 열전대로부터의 신호가 전선을 통해 데이터 저장기로 전송되어 저장된다. 용기의 무게는 전자저울의 계기판을 고화질 디지털 카메라를 이용하여 원거리에서 읽고 기록함으로써 저장된다. 물 공급 펌프는 LabView를 이용해 미리 프로그램 된 절차에 따라 컴퓨터에 의해 자동 조절된다. 최대 인가 압력은 25.9 MPa(사용압력의 1.25배)이고 최저 인가 압력은 2.5 MPa(최대 인가 압력의 10 % 미만)이며, 분당 5~6회 반복 가압한다. 시간에 따른 인가 압력의 변화형태는 사인함수가 아니라, 오히려 톱니형태에 가깝다. 제어실은 시험장소로부터 15 m 이격되고 벽에 의해 잘 구분된 장소에 설치하였다. 시험장소는 폐쇄회로에 의해 녹화되었으며 장치의 작동은 원격으로 조작하면서 관찰하였다.

## 3. 결과 및 토의

본 연구에서는 초기 1,000회에 해당하는 데이터만 수집하여 분석하였다. 이는 전주기 시험(11,250회)의 10% 이하에 해당된다. 그럼에도 불구하고 데이터를 관찰한 결과 200~300회 반복한 이후부터는 온도변화가 주기적 정상상태에 도달한 것을 알 수 있었고, 이 후의 데이터는 이미 취득한 데이터의 단순한 반복임을 의미하기 때문에 10 %의 데이터만으로도 본 연구의 목적을 설명하는데 충분하다고 할 수 있다. 반복 가압과 팽창의 결과로 용기 내부 물의 질량은 97 kg에서 110 kg까지 변화하였다. 이는 용기가 최대 인가 압력에서 공칭 용량보다 단지 4 kg의 물만을 더 수용할 수 있음을 나타낸다. 물의 비압축성을 가정하면 용기가 가압에 의해 약간 부풀어 오른다고 할 수 있다. 초기 물의 부피를 70 L로 정한 것은 물 공급호스가 연결된 보스가 항상 물 표면에 잠겨있도록 하기 위함이다.

이렇게 함으로써 팽창 시 보스를 통한 공기의 손실을 막을 수 있어 시험 결과의 재연성을 높일 수 있기 때문이다. Fig. 3은 시간의 흐름에 따른 압력의 변화곡선을 나타냈다. 압력 변화가 주기적 정상상태에 도달하는 데는 약 4.5분이 소요되었다. 이 시간 동안은 파장이 불규칙하며 주기적 정상상태의 파장과 비교하여 더 긴 것으로 나타났다. 또한, 두드러진 undershoot도 나타난다. undershoot의 발생은 초기에 액추에이터 밸브와 펌프 사이에 설치된 호스의 저압현상에 기인한 것으로 분석된다. 구체적으로 설명하면, 압축된 물은 용기로부터 방출되어 냉각기 탱크로 흘러 들어간다. 이 호스 내부의 압력은 초기에는 0 MPa이고 시험이 진행됨에 따라 2.5 MPa까지 증가한다. 액추에이터 밸브와 펌프를 잇는 호스에는 냉각기로 향하는 호스는 서로 개방되어 있으므로, 이 두 호스에는 동일한 압력이 인가되어야 한다. 용기 내 물이 방출하여 압력계 지지값이 2.5 MPa에 도달하면 냉각기 탱크에 설치된 체크밸브가 닫히고 액추에이터에 흐르게 되어 용기 압력이 내려가게 된다. 밸브가 열린다. 이때 용기 내부 압력

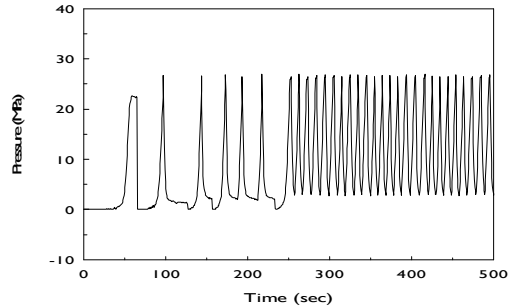


Fig. 3 Pressure variation as time elapsed during the

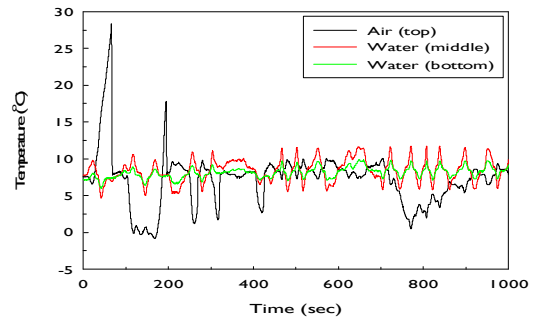


Fig. 4 Temperature profiles of the air pocket and the water as time elapsed during the test

이 펌프의 압력보다 높기 때문에 물이 순간적으로 역방향으로 유동하게 된다. Fig. 4에는 반복 횟수가 증가함에 따른 온도변화가 주어졌다. 총괄적으로 이야기해서 물의 온도는 점진적으로 단조 증가하는 반면 공기층의 온도는 압력변화와 같은 속도로 상승과 하강을 반복하는 것을 볼 수 있다. 빠른 열적 평형에 의해 공기층과 물의 초기 온도는 8°C로 동일하였다. 시험 도중 물의 온도가 매우 좁은 범위(즉, 6~11°C)에서 변할 때 공기층의 최대 온도는 28°C에 달했고 최저온도는 -2°C까지 내려갔다.

중간 부위에서의 온도변화폭은 하부에서의 폭보다 약간 컸다. 이는 공기층과 중간층의 물 사이에서 열 교환이 일어났고, 물의 출입으로 인해 난류가 형성되지 않아 물이 서로 섞이지 않음을 의미한다. 난류가 발생하지 않는다는 것은 초기에 형성된 공기층이 시작된 이후에 제거되지 않는다는 것을 의미한다.

등온과정에서 이상기체 상태방정식을 적용하면 공기층의 부피가 260 mL임을 추정할 수 있다. 이는 물의 표면이 천장으로부터 26 mm떨어져 있음을 의미한다. 표면파동을 고려하면, 용기에 최대 인가 압력이 인가되었을 때 상부 열전대의 일부 또는 전부가 물 아래에 잠겨있을 것으로 예상된다. 이는 공기층의 온도가 240초 이후 10°C를 초과하지 않는 이유를 설명해준다. 식 (1)에 의하면 이상기체로서의 공기가 287 K의 온도일 때 2.5 MPa에서 25.9 MPa까지 단열 압축되면 최종 온도는 554 K(281 °C)까지 상승한다.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \dots\dots\dots(1)$$

여기서,  $T$ 와  $P$ 는 기체의 온도와 압력이고,  $\gamma$ 는 단열 인수(adiabatic index, 공기의 경우 7/5로 알려짐)이며, 아래첨자 1과 2는 각각 압축 전과 후를 상징한다. 단열팽창에 의한 온도 강하를 계산하기 위해서 동일한 방정식 식 (1)이 사용된다. 계산 결과는 149 K(-124°C)인데, 이 값은 실제 측정온도 -2°C보다 훨씬 낮은 온도이다. 따라서 물과 금속 라이너에서 팽창하는 공기층으로 열전달이 매우 빠른 속도로 일어난다고 말할 수 있다. 열전달 속도를 정량적으로 계산하기 위해 열전달 속도에 대한 팽창속도의 비를 의미하는 다음의 무

차원 그룹을 도입하였다.

$$\frac{\rho d(C_p/h)}{\Gamma} \dots\dots\dots(2)$$

여기서,  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $h$ 는 상온에서 공기의 각각 밀도(=1.6 kg/m<sup>3</sup>), 열용량(=1.000 J/kgK), 평균 대류 열전달 계수(=100 W/m<sup>2</sup>K)이다. 그리고  $d$ 는 특성 길이로 본 연구에서는 공기층의 초기 두께의 반절에 해당하는 길이(0.16 m)이다. 마지막으로  $\Gamma$ 는 반복 가압 주기(10 s)이다. 이들 값을 식 (2)에 대입하면 0.25를 얻는데, 이는 열전달 속도가 압축-팽창 주기보다 4배 빠름을 의미한다. 본 연구로부터 공기층과 시험유체 사이에 약 10°C 가량의 온도 차이가 발생하고, 공기층과 접촉한 라이너 상부가 최대 40°C의 주기적인 온도 변화에 장기간 노출됨을 발견하였다. 주목할 점은 본 실험에서 압축-팽창은 1,000회까지만 반복하였는데, 결과에 나타난 경향대로라면 반복 횟수가 실제 시험 규정대로 11,250회 이었다면 온도 차이가 훨씬 클 것이다. 또한 이로 인해 용기에 열 손상이 발생할 가능성이 매우 높을 것으로 예상된다. 따라서 상온수압반복시험의 전처리 단계에서 공기층을 다음의 방법들을 이용하여 완전히 제거할 것을 강력히 제안한다. 진공펌프를 연결한 상태에서 용기를 충분한 시간동안 흔들어준다. 그리고 용기를 수직으로 단단히 고정된 상태에서 시험을 진행한다.

실제로 후자의 방법은 많은 시험기관에서 플라스틱 라이너를 포함하여 고온에 훨씬 취약한 Type IV 용기를 시험할 때 사용하고 있다. 하지만 본 연구에서 사용한 전자의 방법은 후자의 방법보다 시험이 용이할 뿐만 아니라 용기의 무게를 측정할 수 있는 등 훨씬 많은 데이터를 취득 가능하다.

#### 4. 결론

본 연구의 목적은 복합용기에 대한 상온수압반복시험의 절차를 적절히 수정함으로써 시험의 신뢰도와 재현성을 높이기 위함이다. 현재, NGV2-2007와 ISO11439를 비롯한 고압용기를 인증하는 어떠한 기준도 상온수압반복시험의 전처리과정의

세부과정까지 명시하지 않는다. 예를 들어, 용기에 유체를 채우는 과정에서 용기 내 공기층이 남아있지 않도록 하기 위해 특별한 관심을 기울일 필요가 있다. 이러한 공기층이 용기 재료의 강도를 약화시키는 등의 부작용을 보여주기 위해, 반쯤 물이 채워진 106 L 용량의 CNG용 Type 3 복합용기 내부 곳곳의 온도를 측정 및 기록하면서 상온수압반복시험을 수행하였다. 용기에 초기 70 L의 물을 채웠고, 전자저울에 수평으로 올려놓았다. 물 공급 펌프로 용기를 주기적으로 가압-방출하면서 용기 내부의 하부(물), 중간부(물) 및 상부(공기층)의 온도변화를 초고속 데이터 수집 장비를 이용하여 측정하고 기록하였다. 용기내부의 압력변화 범위는 2.5 MPa에서 25.9 MPa까지이며 반복 속도는 분당 6회로 설정하였다. 그 결과, 공기층과 시험유체 사이에 약 10°C 가량의 온도 차이가 발생하고, 공기층과 접촉한 라이너 상부가 최대 40°C의 주기적인 온도변화에 장기간 노출됨을 발견하였다. 이러한 결과를 바탕으로 복합용기에 열 손상 발생 가능성이 있다고 결론 내렸다. 열 손상은 상온수압반복시험의 목적과는 무관한 불합격을 야기시킬 수 있으므로 반드시 피해야 한다. 이를 위해, 전처리 과정에서 용기를 진공펌프로 연결하고 충분히 흔들어 공기층을 제거하거나, 용기를 수직으로 세운상태에서 시험을 진행하는 등의 방법을 제안하였다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 일반연구자 기본지원사업(NRF-2013 R1A1A2058580) 및 산업통상부의 산업기술혁신사업 중 한국가스안전공사에 의해 지원된 “수소스테이션용 87 MPa급 Type 3 수소저장용기 개발” 연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Akansu, S. O., Dulger, Z., Kahraman, N., and Vezirolu, T. N., “Internal Combustion Engines Fueled by Natural Gas-Hydrogen Mixtures,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 29, No. 14, pp. 1527-1539, 2004.
2. Park, D. W., “A Study on the Safety of Compressed Hydrogen Gas Container by Thermodynamics Characteristics,” A Thesis of a Master, Kyung-Hee University, Republic of Korea, 2009.
3. Lee, S., Kim, Y., Kim, S. and Yoon, K., “Temperature Change of a Type IV Cylinder during Hydrogen Fueling Process,” *Proc. of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety*, 2009.
4. Kim, C. J, Cho, S. M, Kim, E. J. and Yoon, K. B., “The Study on the Internal Temperature Change of Type 3 and Type 4 Composite Cylinder during Filling” *Proc. of International Conference on Hydrogen Safety*, 2013.
5. Kim, E. S., Kim, J. H., Park, Y. S., Kim, C. and Choi, J. C., “Development of an Automated Design System of CNG Composite Vessel using Steel Liner Manufactured by DDI Process,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 20, No. 1, pp. 205-213, 2003.
6. Kim, H. J., “A Study on Improving Fatigue Life for Composite Cylinder with Seamless Integrated Liner,” *Journal of the Korean Institute for Gas*, Vol. 17, No. 6, pp. 46-51, 2013.
7. Hong, J. H., “Safety Evaluation of a TYPE III Hydrogen Pressure Vessel Considering the Temperature Variation Generated by the Charge,” A Thesis of a Master, Chung-Ang University, Republic of Korea, 2014.
8. Bae, J. H., Lee, H. W., Kim, M. S., and Kim, C., “Optimal Design for CNG Composite Vessel Using Coupled Model with Liner and Composite Layer,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 29, No. 9, pp. 1012-1019, 2012.
9. Rhee, H. W., "Experimental Evaluation of Fatigue Threshold for SA-508 Reactor Vessel Steel", *J. of the KSMPE*, Vol. 11, No. 4, pp. 160-167, 2012.
10. Lee, S. H., Heo, S. M., Cho, H. M., Son, H. and Jeong, S. M., "Energy Dissipation by Particle Sloshing in a Rolling Cylindrical Vessel", *J. of the KSMPE*, Vol. 9, No. 3, pp. 62-68, 2010.