



차량용 LNG연료용기의 단열성능에 관한 연구

†한정옥 · 이용원

가스공사 연구개발원

(2007년 11월 30일 접수, 2008년 3월 17일 채택)

Study on Adiabatic Performance of LNG Storage Tank for Vehicles

†JeongOk Han · YoungWon Lee

R&D Division of Korea Gas Corporation

(Received November 30, 2007, Accepted March 17, 2008)

요 약

압축천연가스 자동차는 최근 대기환경 개선을 위해 대도시 시내버스에 적용되고 있으며 대기 오염물질을 저감시키는데 효과적인 것으로 입증되고 있다. 압축천연가스의 단점인 낮은 연료저장밀도를 높이기 위해 액화천연가스를 연료로 하는 차량기술이 시도되고 있다. 본 논문에서는 자동차에 액화 천연가스를 적용하기 위한 LNG 저장 용기의 단열특성을 실험적으로 측정하여 기준과의 적합성을 판단하였으며 측정방법에 대한 비교검토를 통해 측정결과의 신뢰성을 제고하였다. 시험용기의 단열성능계수는 $40 \text{ J/h} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$ 으로 기준범위 이내의 성능을 확인하였으며 두 가지 측정방법들은 상호 일치하는 결과를 보여주었다. 또한 용기의 벤트밸브 동작특성을 조사하여 증발가스의 방출량 특성을 파악하였다.

Abstract – Natural gas vehicles are being applied to city buses for improving air quality in metropolitan and have proved the effective way to reduce the pollutant emissions. Liquefied Natural Gas(LNG) has also attempted a vehicle fuel in order to raise the fuel storage density that is a disadvantage of Compressed Natural Gas(CNG). This paper described insulation characteristic of a LNG storage tank. From the results, adiabatic coefficient of a tested tank was around $40 \text{ J/h} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$ and it was the lower level than gas safety regulation limit. Two experimental methods were adopted to justify the evaluation results and they were revealed that the results were very similar to each other. Also, through testing relief valve operation characteristic it was investigated venting amount of boiled off gas.

Key words: LNG, Storage Tank, Adiabatic Performance, Vehicle

I. 서 론

천연가스 자동차는 연료 공급형태에 따라 CNG (compressed natural gas)와 LNG (liquefied natural gas)로 구분할 수 있으며 아직 국내외적으로 CNG가 대부분을 차지하고 있다. 이는 초저온상태의 LNG가 고압의 CNG에 비해 연료저장 및 유지 특성이 어렵고 또한 LNG를 공급할 수 있는 인프라가 부족하기 때문으로 판단된다. 천연가스는 대기환경 오염 물질인 PM, NO_x, SO_x 및 CO 등이 타 연료에 비해 낮게 배출되기 때문에 저공해차량 연료로 주목을 받아왔다. 그러나 연료를

충전할 수 있는 충전소가 충분하지 않아 차량보급의 걸림돌이 되고 있다.

현재의 인프라와 기술을 고려할 때 시내버스와 운행거리가 짧은 트럭 및 청소차의 경우에는 CNG를, 장거리 시외버스와 화물차 그리고 대형 물류차량의 경우에는 LNG를 적용하는 것이 바람직하다. LNG 차량은 CNG에 비해 연료밀도가 높기 때문에 동일저장 체적에서 약 3배의 연료를 더 저장할 수 있는 장점이 있다. 따라서 LNG의 경우 주행거리 증가로 대형차량에 적용이 가능할 수 있다.

LNG차량은 액화상태의 초저온(-130°C 내외)의 연료를 저장해야하기 때문에 단열 용기가 필요하며 안정적인 운행을 위해 단열성능을 확보하는 것이 중요하다.

†주저자: johan@kogas.or.kr

현재 외국에서 수입에 의존하고 있는 차량용 LNG용기는 선진국에서는 상용화되어 있으나 아직 국내는 시범 운행 수준이다. LNG는 초저온 상태의 액상연료로서 저장특성이 취약하며 시간에 따라 지속적인 증발이 일어나게 된다. 따라서 LNG를 사용할 경우 증발가스가 벤트설정압력 이상이 되지 않도록 적절한 적용방안이 필요하다.

본 연구에서는 LNG 연료용기의 성능평가를 통해 LNG 연료 공급계통의 신뢰성을 확인하고 LNG차량 보급을 위한 요소기술을 확보하고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 단일 실험을 위한 실험장치로 정적상태와 동적상태에서 시험이 가능하도록 하였으며 시험용기는 Taylor-Wharton사 제품을 대상으로 하였다. 시험용기의 규격은 다음과 같다.

- 용량: 450 l, 수용적 기준
- 모델: LNG-119V(진공단열 구조)
- 크기: 0.66 m(외경)×1.67 m(유효길이)
- 재질: SUS 304

2.2. 실험방법

LNG 연료용기 단열성능 측정을 위하여 비가연성인 액체질소(LN2)를 사용하였다. LN2는 액화온도가 대기압에서 -195°C 의 초저온 상태이기 때문에 단열성능시험에 주로 사용된다. LNG 용기의 단열성능을 검사는 고압가스안전관리법[2]에서도 단열성능평가에 LN2를 사용하도록 규정하고 있다. LNG의 증발잠열이 LN2의 2.9배 수준이므로 LN2의 결과로부터 LNG의 압력상승률을 예측할 수 있다.

측정방법은 용기의 배출구를 대기로 개방하는 대기

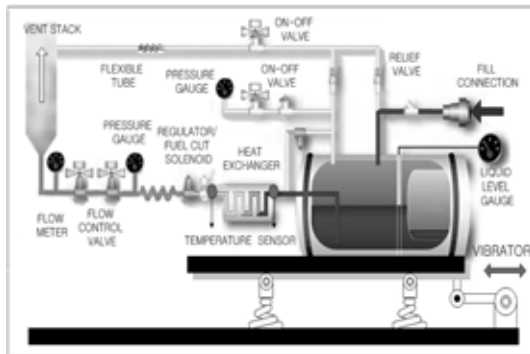


Fig. 1. Schematic diagram of testing apparatus.

방출 실험 방법과 용기압력을 상승시켜 벤트밸브를 통해 벤트되는 가스량을 측정하는 벤트유량 측정방법을 사용하였다. 벤트유량 측정방법은 대기방출실험과 같이 벤트량을 측정하는 것은 동일하나 벤트 되기까지 도달 시간과 벤트특성을 파악할 수 있는 장점이 있다.

한편 용기의 단열성능은 차량이 장기간 주차 또는 비운행시 증발가스(BOG) 발생으로 문제가 될 수 있기 때문에 중요한 성능이며 동적상태에서는 연료사용으로 문제가 되지 않는다.

2.2.1. 대기방출 방법

대기방출 실험에서는 일정시간 간격으로 방출된 질소가스를 유량계로 측정하였으며 용기와 저장유체의 열적 평형상태가 유지되는 상태에서 실험이 진행되도록 하였다. 방출가스의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 열교환기를 유량계 전단에 설치하였다.

평형상태 유지 여부는 시간당 배출되는 기화된 질소 가스의 유량 변화로부터 판단하였으나 실제로 열적 평형상태가 유지되어도 대기압의 변화에 따라 미소하게 배출 유량이 변화된다. 초저온 용기의 단열성능은 대부분 정적상태에서 측정하여 기준에 부합되는지 여부를 판단하게 되나 본 연구에서는 실제 LNG차량에 장착시 연료공급능력 및 단열능력을 측정하기 위하여 정적상태와 동적상태에서 측정하였고 외기온도도 15°C , 35°C 로 변화시키며 단열성능을 측정하였다.

실험조건은 아래와 같다.

- N2 벤트압력: 0.1 MPa(포화온도: -195°C)
- 증발잠열[4]: 200.3 kJ/kg(@0.1MPa, -195°C)
- 대기온도: 15°C , 35°C (2조건)
- N2 비체적: $0.855 \text{ m}^3/\text{kg}$ (@ 15°C)

단열성능계수를 증발량으로부터 계산하기 위해 용기 표면적과 온도차는 실험조건을 적용하였다. 직경 0.66 m, 유효길이 1.67 m에 대한 용기 표면적은 원통형상으로 보아 표면적을 4.1 m^2 으로 적용하였다. 또한 온도차는 실험조건에서 LN2 포화온도(-195°C)와 대기온도(15°C)와의 차이인 210°C 를 적용하였다.

2.2.2. 벤트유량 측정 방법

대기방출에 사용한 동일 LNG 충전용기에 대해 밸브를 닫고 LN2를 충전한 후 내부압력이 상승 되는 조건에서 압력을 측정하고 벤트 설정압력까지 도달후 벤트밸브를 통해 벤트 되는 BOG(Boil Off Gas) 배출량을 측정하였다. BOG발생은 외부에서의 열전달에 의한 LN2의 내부 증발로 압력이 상승되고 벤트압력 이상이

되었을 때 외부로 방출된다. BOG 는 용기의 1차 벤트 밸브를 통해 배출되며 이를 유량계로 누적 측정하여 결과를 분석하였다.

실험조건은 다음과 같다.

- N2 벤트압력: 1.80MPa(포화온도: -160°C)
- 증발잠열: 124.4kJ/kg(@1.80 MPa, -160°C)
- 대기온도: 15°C
- N2 비체적: 0.855 m³/kg(@15°C)

2.2.3. 용기 내부압력 측정실험

압력측정을 위해 용기 내부압력을 모니터링 할 수 있도록 압력 전송기를 릴리프 밸브 전단에 설치하였다. 벤트유량 측정과 용기내부 압력 변화를 통해 단열성능과 방출 가스 특성을 조사하였다.

용기의 진공성능을 간접적으로 평가하기 위한 실험으로 용기 제작사에서 제시된 기준을 검토하였다. 시험용기에 LNG를 충전시킨 후 LN2의 포화압력 까지 벤트 시킨다. 최소 1시간 이상 정지상태에서 탱크압력을 측정하여 확인하는 방법이다.

확인과정은 다음과 같다.

- 가. LNG를 만 충전하고 포화압력까지 벤트시킨다.
- 나. 최소 1시간 이상 방치한 상태에서 압력상승을 기록한다.
- 다. 24시간 이상 경과한 뒤 압력을 기록하여 압력 상승률을 계산한다.

$$\text{압력상승률} = \frac{\text{압력변화}}{\text{경과시간}}$$

압력상승률이 0.0164 MPa/h(=2.4 psi/h)를 초과할 경우 진공성능을 확인하여야 하며 이러한 경우에는 단열성능에 문제가 발생하였다고 판단할 수 있다[3].

앞서 수행한 LN2 실험 결과로부터 압력상승률을 검토하였다. LNG와 LN2는 증발잠열이 서로 다르기 때문에 이를 고려하여 압력상승률을 검토하였다. 증발잠열은 LNG가 LN2의 2.9배 수준이므로 압력상승률은 LNG의 경우 2.9배만큼 둔화될 것으로 예상된다.

III. 실험결과

3.1. 단열성능 측정실험

Fig. 2에 정적상태와 동적상태에서 증발량 변화를 나타냈다. 동적상태는 증발량의 증가를 가져오는 것으로 나타났다.

측정결과는 Table 1과 같다. 실험결과 고압가스 안전관리법에 차량용 LNG용기 제조 기준인 125 J/h · °C · m² 이하[2]로 나타났다. LNG 연료용기의 단열성능은

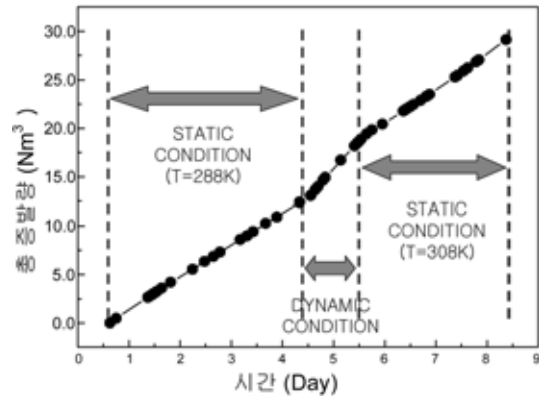


Fig. 2. Evaporation characteristic of a LNG tank.

Table 1. Results of evaporation performance of a tested LNG tank.

실험조건	증발량 (l/h)	h (J/h · °C · m ²)	BOG 증발률 (%/day)
STATIC(T=15°C)	144	39.1	1.3
STATIC(T=35°C)	162	40.2	1.5
DYNAMIC(T=35°C)	223	60.7	2.1

외기온도가 15°C에서 33°C로 변화함에 따라 증발율이 약 13%증가되었으나 정적상태에서 동적상태로 변화함에 따른 증발율의 변화는 약 38%로 그 영향력이 크게 나타났다. BOG 증발률은 약 1%-2%/day 수준인 것으로 나타났다.

3.2. 벤트유량 측정 실험

이래 Fig. 3은 LN2의 BOG 발생 결과를 나타낸 것이다. 초기 과정에서는 비선형성이 나타나지만 이후 과

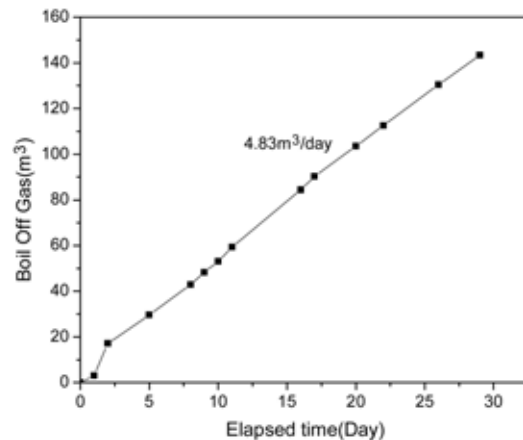


Fig. 3. Vented gas history of boiled off LN2.

정에서는 매우 선형적인 특성을 나타냄을 알 수 있다.
여기서 LNG용기로 전달된 열량을 LN2 증발량으로부터 계산하고 이를 앞에서 측정된 결과와 비교하였다.

LN2 증발열량: Q1
 $Q1 = \text{증발잠열} \times (\text{LN2 증발량} / \text{비체적})$
 $= 124.4(\text{kJ/kg}) \times 4.83(\text{m}^3/\text{day}) / (24\text{h}/\text{day}) / 0.855(\text{m}^3/\text{kg})$
 $= 29.3 \text{ kJ/h}$

단열 성능계수를 증발열량으로부터 계산하며 온도차는 LN2 포화온도(-160°C)와 대기온도(15°C)와의 차이인 175°C를 적용하였다.

이로부터 용기에 전달되는 단열 성능계수(h)는 다음과 같다.

$h = \text{증발열량} / (\text{용기 표면적} \times \text{용기 내외부 온도차})$
 $= 29.3 / (4.1(\text{m}^2) \times 175(\text{°C})) / 1000$
 $= 40.8 \text{ (J/h} \cdot \text{°C} \cdot \text{m}^2)$

여기서 계산된 결과는 앞에 계산된 LN2 증발량 실험 결과(h = 39.1 J/h · °C · m²)와 4%의 차이가 나타났다. 이러한 차이는 상호 결과의 신뢰성을 보여줄 수 있는 수준이라 판단된다.

Table 2. Comparison of adiabatic performance on LNG tank.

적용방법	단열성능 계수 (J/h · °C · m²)	비고
대기방출 방법	39.1	기준
벤트유량측정방법	40.8	4%

3.3. 용기 내부압력 측정실험

Fig. 4는 LN2의 증발에 따른 압력상승을 분단위로 기록한 것으로 시간 기울기를 구하면 다음과 같다.

압력 상승률 = $1.0692\text{E-}3 \times 0.1\text{MPa}/\text{분} \times 60$
 $= 0.0064 \text{ MPa/h}$

이를 LNG의 경우로 환산하면 2.9배만큼 감소할 것

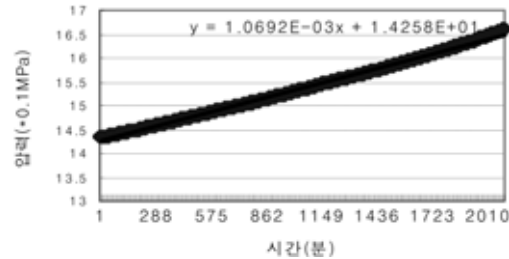


Fig. 4. Pressure build up history of LN2 gas.

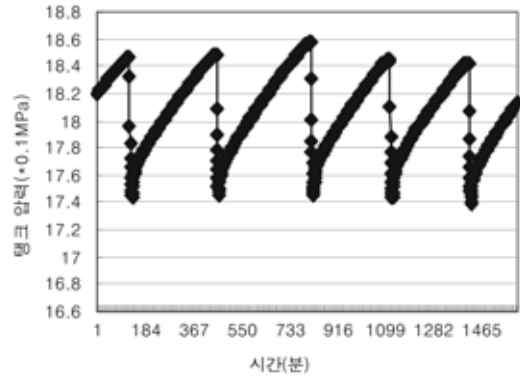


Fig. 5. Pressure variation caused by vent valve operation.

으로 예상되며 이는 제작사의 기준치인 0.0164 MPa/h 이내의 양호한 상태라 판단된다.

3.4. LNG 용기의 릴리프 밸브 특성

LNG 용기의 밸브를 모두 잠근 상태에서 외부로부터의 열 침입에 따라 압력이 상승하게 되고 일정압력 이상에서 1차 릴리프 밸브가 작동하여 내부 기체를 방출하게 된다. 이러한 특성을 관찰하기 위해 1분 간격으로 용기 내부 압력을 기록하여 압력변화 추이와 방출되는 가스량을 누적 측정하였다.

Fig. 5는 압력변화 특성으로 릴리프 밸브 동작 시작점은 최대압력이 18.5기압 부근에서 작동하며 17.5기압 부근에서 닫히는 특성을 보여주고 있다. 그러나 이러한 특성은 일정치 않으며 릴리프 밸브의 상태에 따라 다소 변하는 결과를 보여주고 있다. 장기간의 실험을 통하여 확인한 결과 벤트 간격은 일정치 않은 것으로 나타났다.

이러한 이유는 정확히 알 수 없으나 동일한 릴리프 밸브에서 발생된 점으로 보아 벤트밸브 자체의 특성이라 여겨진다. 즉, 열림과 닫힘 시작점이 어느 정도의 편차 범위 내에 움직이고 있다고 판단된다. 이와 같이 측정된 벤트압력 변화 특성과 벤트량을 계산하였으며 1회 평균 벤트 가스량은 50% 잔량조건에서 약 2.5~3 m³ 인 것으로 나타났다. 방출시간은 약 10분 내외로 관찰되었다. 이는 용기에서 방출된 가스의 확산거동에 중요한 자료로 활용될 수 있다.

IV. 결과 및 고찰

차량용 LNG 저장용기의 단열특성실험을 통하여 단열 성능을 파악하고 향후 LNG 차량 도입시 필요한 기준과의 적합성 여부를 판단하였다.

차량용 LNG연료용기의 단열성능에 관한 연구

- 시험한 차량용 LNG 저장 용기는 고압가스안전관리법에서 제시한 기준이하의 단열성능을 보임을 확인하였다.

- 단열성능계수 측정을 위해 적용한 대기방출 시험방법과 벤트유량 측정방법은 상호 잘 일치하였다.

- LNG저장용기의 벤트밸브는 균일한 동작특성은 아니지만 압력상승에 따라 동작하는 주기적인 특성을 나타냈다.

후 기

본 연구는 환경부 무저공해 자동차 사업단의 지원으

로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] “EURO-4 수준 운행차용 대형 천연가스 차량기술 개발”, 환경부 보고서 23-34, (2007)
- [2] “액화천연가스 자동차 연료용 초저온용기 제조 및 검사기준”, 고압가스안전관리법 통합고시, KGS-C025
- [3] “LNG Vehicle Fuel Tank Installation and Operation Manual”, Taylor Wharton, Manual P/N 7950-8359
- [4] “EES 물성계산 프로그램”, (2007)