

## LNG 탱크 컨테이너의 내부압력 변화 분석 및 실제 홀딩타임 측정

†류영돈 · 이진한 · 조영도 · 오영삼\* · 차경호\*\*

한국가스안전공사, \*한국가스공사, \*\*연세대학교  
(2013년 8월 26일 접수, 2013년 10월 31일 수정, 2013년 10월 31일 채택)

### Internal Pressure Variation Analysis and Actual Holding Time Test on ISO LNG Tank Container

†Young-Don Ryou · Jin-Han Lee · Young-Do Jo,  
Young-Sam Oh\* · Kyong-Ho Cha\*\*

Korea Gas Safety Corporation, \*Korea Gas Corporation, \*\*Yonsei University  
(Received August 26, 2013; Revised October 31, 2013; Accepted October 31, 2013)

#### 요약

이 논문에서는 특례기준에 따라 국내에서 최초로 제작하고 검사한 LNG 탱크 컨테이너를 이용하여 육상 및 해상 운송 시연사업을 하고, 탱크 컨테이너를 운송할 때 탱크 컨테이너 내부에 충전된 LNG의 압력변화와 탱크 컨테이너의 실제 압력유지시간을 측정하였다. 탱크 컨테이너 내부의 압력은 충전 직후에는 급속하게 상승하고, 탱크 컨테이너를 이동할 때 급속히 하강하나, 일정시간이 경과한 후에는 기액평형상태 그래프의 온도-압력 변화와 일치함을 확인하였다. 또한, 탱크 컨테이너의 실제 압력유지시간은 특례기준에서 규정한 20일 이상을 만족함을 확인하였다.

**Abstract** - Internal pressure variation analysis and actual holding time test on ISO LNG tank containers which were made in Korea for the first time according to the special notification of ISO tank container manufacture have been conducted during the transport demonstration projects of the tank containers by tractor, train and ship. The internal pressure of the LNG tank container increased rapidly after LNG filling and dropped during moving the container. However, it was stabilized as time passed and followed the liquid-vapor equilibrium graph. In addition, actual holding time of the tank container was more than 20 days which was satisfied with the special notification of LNG tank container manufacture.

**Key words** : LNG Tank Container, Holding time, Pressure Variation, LNG Transport

#### 1. 서론

도시가스 배관망이 설치되지 않은 도서지역에서 발전용 연료로 경유를 사용함으로써 환경오염이 발생하고 있다. 또한, 연료비가 LNG에 비해 상대적으로 비싸서 발전 비용이 많이 소요되고 있다. 이에 따라 백령도 등 도서지역의 발전소에서는 발전 연료를

LNG로 대체하려고 하고 있다. 그러나 LNG를 도서 지역으로 운송하는 기준이 없으며, 기존의 운송 및 사용방법으로는 경제성이 없어 새로운 공급 및 사용 시스템이 필요하였다[1].

일본, 중국, 유럽 등에서는 LNG 연료 보급의 효율화를 위해서 도로, 철도 및 선박으로 운송이 가능한 복합운송용 탱크 컨테이너를 도입하여 사용하고 있다. 최근, 국내에서도 LNG를 서해5도에서 발전용으로 사용할 수 있도록 하기 위하여 '액화천연가스 ISO 탱크 컨테이너의 제조, 충전·운반 사용에 관한

†Corresponding author: rydon@kgs.or.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

특례기준」이 제정·고시되었다. 동 특례기준은 국제위험물 운송기준인 ADR(국제위험물도로운송규칙), RID(국제위험물철도운송규칙) 및 IMDG(국제해사위험물운송규칙) 등과 유사하게 규정되어 있으며, 국내의 저장탱크 제조 기준(KGS AC111) 및 탱크로리 제조 기준(KGS AC113)을 따르도록 규정하고 있다. 또한, 철도 운송 및 선박운송을 하는 경우에는 철도안전법과 선박안전법을 각각 따르도록 규정하고 있다[2].

LNG는 약 -162℃ 이하의 초저온 상태로 탱크 컨테이너에 저장되기 때문에 외부 열유입(침입)에 의하여 액체(LNG)가 증발되는데, 이 증발되는 가스를 Boil-off Gas(BOG)라고 한다.

ISO 탱크 컨테이너는 도로, 철도 및 선박에 적재되어 운송되는데, 운송 중에 기화된 LNG(BOG)가 대기중으로 방출되어서는 안된다. 따라서 동 특례기준에서는 탱크 컨테이너의 안전한 운송을 위하여 압력유지시간(Holding Time)을 최소 20일로 규정하고 있다. “압력유지시간(Holding Time)”이란 초기 충전상태에서의 압력이 외부의 열유입으로 인하여 안전밸브의 최저설정압력에 도달할 때까지 경과하는 시간을 말한다[2].

본 연구에서는 상기 특례기준에 따라 제작된 탱크 컨테이너의 육상 및 해상 운송 시연사업을 통하여 운송중인 탱크 컨테이너 내부의 압력변화를 측정·분석하였다. 또한 탱크 컨테이너의 실제 압력유지시간이 20일 이상이 되는지를 확인하였다.

## II. 탱크 컨테이너 압력유지시간

압력유지시간은 단열성능, 안전밸브 설정압력, 초기 충전상태, 추정 대기온도, LNG의 물리적 특성을 고려하여 결정하는데, 단열성능 등 다른 조건이 같다면 Table 1과 같이 최고허용사용압력(MAWP: Maximum Allowable Working Pressure)에 따라 달

**Table 1.** Example of tank container holding time according to MAWP[3]

MAWP (bar)	Length (mm)	Holding time(Days)	Evaporation rate(%/day)
6.9	6,058	44	0.25
10.3	6,058	54	0.25
12.4	6,058	59	0.25
15.9	6,058	65	0.25

라진다. 즉 MAWP가 클수록 압력유지시간은 길다.

미국의 경우 Reference Holding Time을 정하는 기준은 IMDG 및 49 CFR(US DOT)이며, 탱크 컨테이너의 MAWP에 따라 그 기간은 변하게 된다. 압력유지시간은 새로운 모델마다, 새로운 설계방식을 도입할 때마다 측정하게 되며, 질소를 이용하여 holding time을 측정한다. 미국의 LNG 탱크 컨테이너 제조사인 CVA사의 경우 압력유지시간은 MAWP에 따라 95일, 107일, 131일이었다[4].

49 CFR §178.338-9에서 규정하는 압력유지시간의 계산은 다음과 같다[5].

- 실제 압력유지시간(Actual holding time)은 기준압력유지시간(Reference holding time), 실제 충전 밀도, 실제 충전 압력, 압력 제한 장치의 최저 설정 압력으로 계산되어야 한다.
- 압력유지시간은 시험(Test)에 의해 결정되며, LNG 초기 충전시의 압력이 압력제한장치(안전밸브, 압력 제어 밸브등)의 설정압력까지 경과하는 시간을 측정한다.
- 시험(Test)을 할 때 사용하는 초저온 유체는 LNG 컨테이너의 최대 허용 밀도로, 설계 온도보다 높고, LNG의 충전 압력과 같거나 미만의 압력으로 충전되어야 한다.
- 시험 중 탱크 컨테이너의 압력과 대기 온도는 3시간 간격으로 기록되어야 하며, 컨테이너 압력이 안전밸브의 최저 설정압력에 도달할 때까지 기록되어야 한다.
- 한 개 이상의 탱크 컨테이너가 동일 설계기준으로 제조되는 경우 처음 제조되는 하나의 탱크 컨테이너에 대해서만 제조시에 압력유지시간 시험을 실시하고, 동일 설계기준으로 그 이후에 제조되는 탱크 컨테이너에 대하여는 첫 번째 운송시에 성능시험을 해야 한다.
- 비가연성 초저온 액체를 충전하는 탱크 컨테이너에 대하여는 압력유지시간 시험을 대신하여 다음의 식으로 압력유지시간을 정할 수 있다.
- LNG 컨테이너의 열전달률(heat transfer rate) 계산방법(49 CFR §178.338-9)

$$q = \frac{[n(\Delta h)(85 - t_1)]}{[ts - tf]}$$

여기서, q: LNG 충전시 열전달률(Btu/hr)  
 n : normal evaporation rate(NER) lb/hr 측정에 의해 결정  
 Δh: Test 유체의 증발 잠열(Btu/lb)  
 ts : Test 시간 동안의 외부 평균 온도(°F)  
 t1 : 최대 하중 압력하의 충전시 평형온도(°F)

tf : 대기압하의 유체의 평형 온도(°F)

- LNG 컨테이너의 RHT(rated holding time) 계산 방법(49 CFR §178.338-9)

$$RHT = \frac{[(U2 - U1)W]}{q}$$

여기서, RHT: Rated holding time

U1 and U2: LNG 충전시 압력 / 안전밸브의 최저 설정압력하의 liquid, vapour의 내부에너지(Btu/lb)

W : LNG 컨테이너의 liquid와 vapour의 총 중량 (lb)

q : 계산된 Heat transfer rate(Btu/hr)

탱크 컨테이너 내부에 열이 유입되면 컨테이너 내부의 온도가 상승하게 되고, Fig. 1의 기액평형곡선과 같이 압력이 상승하게 된다. 즉, 탱크 컨테이너 내부의 압력변화는 탱크 컨테이너 내부의 온도변화와 비례한다. 따라서, 적절한 압력유지시간을 유지하기 위해서는 탱크 컨테이너 내부로의 열유입을 차단하여야 한다. 혹자는 탱크 컨테이너 내부의 압력은 탱크 컨테이너를 이동시킬 때 낮아지기 때문에 설계시 계산한 압력유지시간보다 길어질 것이라고 주장하고 있다[6].

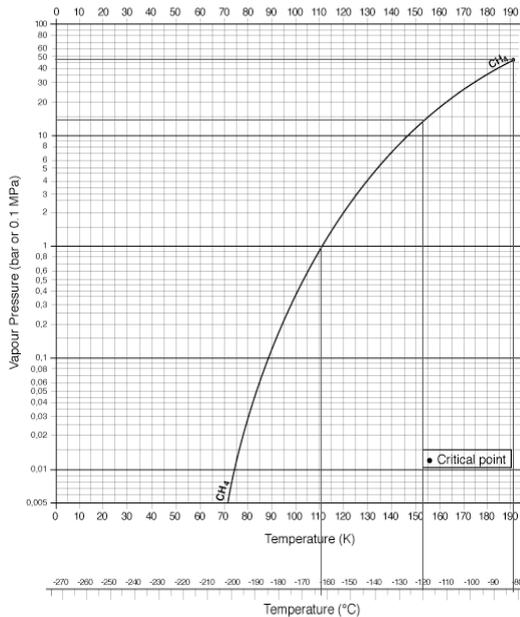


Fig. 1. Vapor-liquid equilibrium curve of CH4[7].

### III. 압력변화 분석 및 홀딩타임 측정

#### 3.1. 압력기록장치 부착

“액화천연가스 ISO 탱크 컨테이너의 제조, 충전·운반, 사용에 관한 특례기준” 제5조제7항에서 압력유지기간(Holding Time)은 최소 20일 이상이 되도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 특례기준에 따라 국내에서 제작한 탱크 컨테이너의 실제 압력유지기간을 확인하고, 이동 중인 LNG 컨테이너의 내부 압력 변화를 측정·기록하기 위하여 Fig. 2와 같이 탱크 컨테이너에 압력기록장치를 부착하고 탱크 컨테이너 내부의 압력을 10분마다 저장하도록 셋팅하였다(Fig. 3).

압력기록장치는 전기방폭 성능인증을 받은 설비로써 10분 간격으로 내부압력 및 외부 온도를 측정·저장할 때 건전지 교체 없이 100일 이상 사용이 가능한 설비이다. 측정되는 압력은 절대압력으로써 kPa로 표시된다.

#### 3.2. 육상 및 해상 운송 시연사업

탱크 컨테이너 운송 시연사업은 2차에 걸쳐 서로 다른 제품에 대해 진행하였다.

1차 시연사업은 탱크 컨테이너 충전 → 도로운송 → 철도운송 → 도로운송 → 선박운송 → 도로운송의 순으로 실시하였다. Fig. 4는 탱크 컨테이너 1차 시연사업 경로를 나타내고 있다.

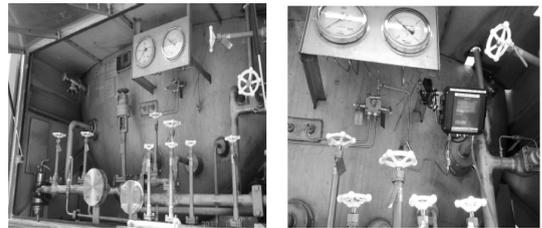


Fig. 2. Before and after installing pressure record equipment.



Fig. 3. Pressure recorder and its setting appearance.



Fig. 4. 1st transport demonstration path.



Fig. 5. LNG filling and road transport demonstration.



Fig. 7. Marine transport and disembarkation.



Fig. 6. Transshipment and rail transport.



Fig. 9. Transshipment to the storage site.



Fig. 8. 2nd transport demonstration path.

Fig. 5는 평택 출하기지에서 LNG를 충전하여 오봉역까지 도로로 운송하는 모습이다.

Fig. 6은 탱크 컨테이너를 트레일러에서 기차로 환적하여 운송하는 모습이다. 환적하는 장비는 화물 철도역에서 사용하는 컨테이너 전용의 상·하역 장비인 리치스테커이다.

탱크 컨테이너를 선박으로 운송하는 경우에는 탱크 컨테이너를 트레일러와 분리하지 않은 채 선박에 싣고 백령도까지 운송하였다. Fig. 7은 탱크 컨테이

너를 선박으로 운송하여 백령도 신항에서 하선하는 모습이다.

백령도 신항에서 하선한 탱크 컨테이너는 백령도 발전소까지 도로로 운송하였다.

2차 시연사업은 1차 시연사업과는 달리 철도 운송 시연을 거치지 않고, 탱크 컨테이너 충전 → 도로 운송 → 선박운송 → 도로운송의 순으로 실시하였다. Fig. 8은 탱크 컨테이너 2차 시연사업 경로를 나타내고 있다.

탱크 컨테이너는 Fig. 9와 같이 백령도 발전소에서 저장소로 환적한 후 압력유지기간의 적정성을 확인하기 위하여 1개월 동안 가스를 사용하지 않고 적재해 두었다.

### 3.3. 압력유지기간(홀딩타임) 적정성 검토

#### 3.3.1. 1차 시연사업 결과 분석

탱크 컨테이너 1차 운송 시연사업은 Fig. 4와 같이, 평택 LNG 출하기지에서 탱크 컨테이너에 LNG를 충전 한 후 도로운송, 철도 운송 및 해상 운송을 실시하였다. 충전과정에서부터 백령도 발전소에 도착할 때까지의 운송과정에서 LNG 탱크컨테이너 내부의 압력변화를 측정·기록하였다. 1차 압력측정 결과를 분석하면 다음과 같다.

① 탱크 컨테이너를 쿨링 다운(cooling down) 하고 LNG를 충전한 후 탱크 컨테이너 내부의 압력변화를 분석한 결과, 충전 직후의 가스압력이 빠른 속도로 상승하였다. 이는 BOG(Boil Off Gas)가 발생하지 않도록 하기 위해서는 24시간 이상 쿨링다운을 실시한 후에 LNG를 충전[8]해야 하는데, 2시간의 짧은 시간 동안 쿨링다운을 실시한 후에 LNG를 충전하였기 때문에 BOG가 급속도로 발생한 것으로 보인다.

◦ Fig. 10은 탱크 컨테이너에 LNG를 충전한 후 15시간 동안의 LNG 탱크 컨테이너 내부의 압력변화를 측정한 것이다. Fig. 10에서 하부의 적색 그래프는 외부 온도 변화를, 상부의 파란색 그래프는 탱크 컨테이너 내부의 절대압력 변화를 나타낸다. 외부온도의 변화는 거의 없으나, 충전 직후 탱크 컨테이너 내부의 압력은 급속도로 상승(압력 상승; 0.6bar → 1.7bar)하는 것을 볼 수 있다.

② 탱크 컨테이너를 이동(운송)할 때 상승하던 탱크 컨테이너 내부 압력이 급속히 하강함을 알 수 있다.

◦ Fig. 10에서 급상승하던 탱크 컨테이너 내부 압력이 6월 10일 21:50경 급속히 하강하였는데, 이 시간은 이동시 압력변화를 측정하기 위해서 주차장에서 차량을 이동 주차한 시간이며, 이동 주차 과정에서 탱크 컨테이너 내부의 차가운 액체(LNG)가 유동하면서 BOG를 재액화 한 것으로 판단된다.(탱크컨테이너 이동시 압력 하강 : 1.7bar → 0.65bar)

◦ Fig. 11에서 6월 11일 오전 9시 20분경 평택 탱

크로리 주차장에 주차된 탱크 컨테이너 트레일러를 오봉역으로 이송하기 위해 차량을 움직이기 시작할 때 1.7bar이던 탱크 컨테이너의 압력이 0.8bar로 하강하였는데, 그 이유는 앞의 경우와 같은 이유로 판단된다.

③ 6월 12일 10:40분경 평택 탱크로리 주차장에서 인천남항으로 이동, 인천남항에서 백령도 발전소까지 이동하는 중에는 압력의 급상승 또는 급하강이 발생하지 않았다. 충전후 4일차인 6월 13일에는 탱크 컨테이너가 이동중에도 압력의 변화는 거의 없었다. 이는 탱크 컨테이너 내부가 충분히 냉각되고, 탱크 컨테이너 내부로의 열유입이 크지 않은 것으로 판단된다.

- Fig. 11에서 압력 하강이 발생한 부분은 다음과 같이 탱크 컨테이너를 이동한 때 발생하였으며, BOG의 재액화에 의해 발생한 것으로 보인다.
  - 6.11. 09:20경 탱크 컨테이너 육상운송시작 압력 하강(1.7bar → 0.8)
  - 6.12 10:40경 탱크 컨테이너 해상운송시작 압력 하강(1.15bar → 0.98)
  - 6.12 19:10경 탱크 컨테이너 선박 적재
    - \*선박이 출발할 때 압력 조금 하강, 이후 완만한 상승(백령도 도착시 1.1bar)

◦ 6월 13일 8:30경 차량을 선박에서 하역하여 백령도 발전소로 이동하였으나, 처음과 달리 압력 변화는 거의 없었다.

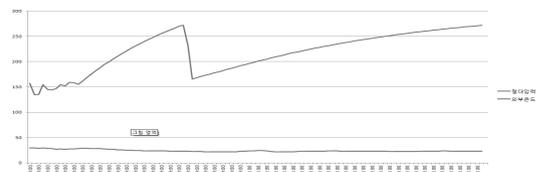


Fig. 10. Pressure variation during 15hrs after LNG filling(6.10~6.11).

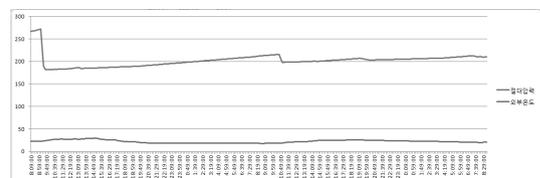


Fig. 11. Pressure variation during the tank container transport(6.11~6.13).

\* 6월 12일~13일 압력변화 : 1bar~1.1bar

1차 시연사업에서 탱크 컨테이너 내부의 압력변화를 기록·분석한 결과, 6월 10일 저녁 충전 직후의 탱크 컨테이너 내부의 압력(0.6bar)은 육상 및 해상 운송 사업이 시연되는 4일 동안 상승과 하강을 반복하였으며, 최종 압력은 처음과 비교하여 0.5bar 정도 상승(1.1bar)하였다. 그리고 압력 상승속도는 시간이 갈수록 완만해졌다.

### 3.3.2. 2차 시연사업 결과 분석

2차 시연사업은 Fig. 8과 같이 평택 출하기지에서 탱크 컨테이너에 LNG를 충전 후 도로운송으로 인천남항까지 운송, 인천남항에서 백령도 신항까지 선박 운송, 백령도 신항에서 백령도 발전소까지 도로로 운송한 후, 백령도 발전소에 위치한 LNG 저장시설에 탱크 컨테이너를 하역하였다.

운송 및 하역 과정에서의 탱크 컨테이너 내부의 압력변화를 확인하기 위하여 1차 시연사업에서 사용한 압력기록장치를 탱크 컨테이너에 부착하여 내부 압력을 측정·기록하였다. 또한, 탱크 컨테이너의 실제압력유지기간(Actual holding time)을 확인하기 위하여 백령도 발전소 부지에 LNG 탱크 컨테이너를 하역한 후 약 1개월간 탱크 컨테이너 내부의 압력변화를 측정하였다.

2차 시연사업과정에서의 탱크 컨테이너 내부의 압력 및 외부 온도 측정 결과를 분석하면 다음과 같다.

① Fig. 12에서 보는 바와 같이 탱크 컨테이너를 쿨링 다운(cooling down) 하고, LNG를 처음 충전한 이후의 가스 압력은 1차 때와는 달리 급하게 상승하지 않았다. 이는 쿨링다운 시간이 1차 때보다 2배 이상 길어(4시간 30분) BOG(Boil Off Gas) 발생이 적은 것으로 판단된다.

② LNG를 충전한 직후 상승하던 탱크 컨테이너의 내부 압력은 Fig. 12에서 보는 바와 같이 탱크 컨테이너의 이동과 함께 하강하였다. 이는 1차 때와 마찬가지로 탱크 컨테이너가 움직일 때 탱크 컨테이너 내부의 차가운 액체(LNG)가 유동하며 기화된 가스(BOG)를 재액화시킨 것으로 판단된다.

· Fig. 12에서 보는 바와 같이 탱크 컨테이너 내부의 압력은 6월 19일 08:00까지 지속적으로 상승하였고, 08:20경 이동을 시작하면서 압력은 급격히 하강(1.2bar → 0.8bar)하였다.

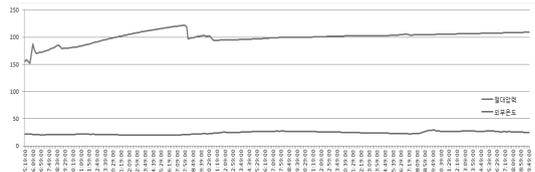


Fig. 12. Pressure variation for 3 days after LNG filling(6.18~6.20).

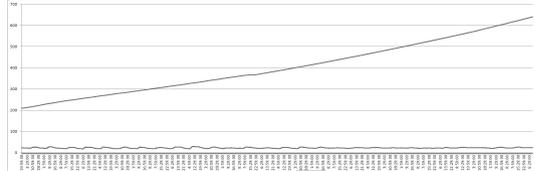


Fig. 13. Pressure variation for 1 month after stationed at LNG storage site(6.20~7.19).

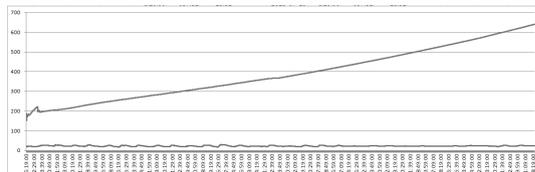


Fig. 14. Pressure variation from filling to stationing the LNG tank container (6.18~7.19).

③ 충전후 2일차인 6월 19일 오후부터는 탱크 컨테이너가 이동중에도 압력이 크게 오르거나 떨어지지 않았다. 이는 탱크 컨테이너가 완전히 쿨링다운되고, 탱크컨테이너에 열유입이 크지 않았던 것으로 판단된다.

④ 6월 20일부터 약 1개월간의 탱크 컨테이너 내부압력은 Fig. 13과 같이 급격한 변화 없이 지속적으로 상승하였다(압력변화 1bar → 5.4bar).

⑤ 탱크 컨테이너에 LNG를 충전하고 도로운송 및 해상운송을 거쳐 1개월 이상 저장소에 두었을 때 탱크 컨테이너 내부의 압력은 Fig. 14와 같이 일정한 속도로 증가하였으며, 1개월 이상 방출되지 않았다.

## IV. 결론

본 논문에서는 국내에서 최초로 제작하고 검사한 LNG 탱크 컨테이너를 이용하여 육상 및 해상 운송 시연사업을 하고, 탱크 컨테이너를 운송할 때 탱크

컨테이너 내부에 충전된 LNG의 압력변화와 탱크 컨테이너의 실제 압력유지기간을 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- ① 운송 중 탱크 컨테이너 내부의 압력 변화
  - LNG를 충전한 직후 탱크 컨테이너의 내부 압력은 시간이 흐름에 따라 상승하였다. 이는 탱크 컨테이너에 외부 열이 유입됨으로써 탱크 컨테이너 내부의 LNG가 기화하면서 압력이 상승하였음을 알 수 있다.
  - LNG를 충전한 직후에 급속히 상승하던 탱크 컨테이너의 내부 압력은 탱크 컨테이너를 운송하기 시작할 때 급속히 하강하였다. 이는 탱크 컨테이너를 이동할 때 탱크 컨테이너 하부의 차가운 액체(LNG)가 유동하면서 상부의 기화된 가스(BOG)를 재액화한 것으로 판단된다.
  - 그러나, 일정시간이 경과한 후에는 탱크 컨테이너 내부의 급속한 압력상승이나 급속한 압력하강은 발생하지 않았다. 이는 탱크컨테이너가 완전히 쿨링다운 되고 충전된 LNG가 안정화된 이후에는 BOG가 일정하게 발생함을 알 수 있으며, 탱크 컨테이너가 운송하는 과정에서도 탱크 컨테이너 내부의 압력이 낮아지지 않음을 알 수 있었다.
- ② 실제 홀딩타임 측정 결과
  - 탱크 컨테이너 내부의 압력은 Fig. 14에서 보는 바와 같이 완만하게 상승하였으며, 충전 후 1개월 이상 경과한 후에도 그 압력은 안전밸브의 최저설정압력에 도달하지 않았다. 즉, 국내에서 제작한 탱크 컨테이너의 압력유지기간은 특례기준에서 규정한 20일 이상을 만족함을 확인하였다.

결론적으로 탱크 컨테이너 내부의 압력은 충전 직후에는 급속하게 상승하고, 탱크 컨테이너를 이동할 때 급속히 강하하나, 일정시간이 경과한 후에는 급속한 상승이나 급속한 하강은 발생하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 탱크 컨테이너의 실제 압력유지기간은 탱크 컨테이너의 제조, 충전 및 사용에 관한 특례기준에서 규정한 20일 이상을 만족함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부에서 시행한 교통체계효율화 사업의 연구결과이며, 한국산업기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

## 참고문헌

- [1] Korea Gas Safety Corporation, "A study on the improvement of law and regulation for using multipurpose complex transport LNG tank container", (2013)
- [2] MOTIE, "Special notification regarding manufacturing, filling, transporting and using LNG ISO tank container", (2013)
- [3] Chart Ferox home page, [http://www.chart-ferox.com/getattachment/51f3c55a-d190-4437-9e33-c9fb7c3a2e48/inter\\_containers\\_300001.aspx](http://www.chart-ferox.com/getattachment/51f3c55a-d190-4437-9e33-c9fb7c3a2e48/inter_containers_300001.aspx)
- [4] Korea Gas Safety Corporation, Foreign trip report(U.S.), (2012)
- [5] 49 CFR §178.338-9
- [6] Korea Gas Safety Corporation, "7th tank container technical committee", (2012)
- [7] <http://www.google.co.kr/imgres>
- [8] Kiho Moon, etc, "Analysis of LNG Tank Cool-down system", Theories and Application of Chem. Eng., Vol. 8, No. 2, (2002)