

## LNG 밀도계를 이용한 저장 탱크 내 LNG 발열량 실시간 측정방법에 관한 연구

하영철<sup>†</sup> · 이성민

한국가스공사 연구개발원 유체계량연구실  
429-790 경기도 안산시 상록구 일동 638-1  
(2010년 4월 15일 접수, 2010년 11월 30일 채택)

## A Study on the Method for Measuring the live Calorific Value of LNG in storage tank using LNG Densitometer

Youngcheol Ha<sup>†</sup> and Seongmin Lee

Fluid Measurement Research Lab, R&D Division, KOGAS, Il-dong, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi 429-790, Korea  
(Received 15 April 2010; accepted 30 November 2010)

### 요 약

가스호환성에 문제가 있는 저열량의 LNG가 도입되기 시작한 것은 2005년 동절기부터이다. 이러한 LNG의 도입량은 매년 증가하고 있으며 향후에는 극저열량(발열량  $\leq 9,500$  kcal/Nm<sup>3</sup>)의 CBM(Coal Bed Methane), Shale LNG도 대량 도입될 예정이다. 따라서 호환 가능한 발열량의 가스를 인수기지에서 송출하기 위해서는 저장 탱크별 LNG 발열량을 실시간으로 모니터링할 수 있는 방법이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 이러한 방법의 일환으로 저장 탱크 내 설치된 밀도계를 이용하여 LNG 발열량을 실시간으로 측정할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다. 이를 위해 액상 LNG와 발열량 간의 정밀·정확한 상관식을 도출하고 이 방법의 불확도를 계산하였으며 또 인수기지 내 발열량 측정 시스템을 시험 구축하였다. 본 방법의 유효성을 확인하기 위해 현장 LNG 분석데이터와 비교하였으며 그 결과 0.17~0.47% 정도의 편차를 확인하였다.

**Abstract** – The low caloric LNG, which didn't meet the gas interchangeability of Korea, has been imported from 2005 winter season. Amount of this LNG imports has been increased from year to year. In the near future, very low caloric LNG (calorific value  $\leq 9,500$  kcal/Nm<sup>3</sup>) such as CBM, Shale LNG will be imported large amounts. For this reason, we need a method for monitoring live calorific values(CV) of LNG in each storage tank to supply gasified LNG with interchangeable CV at LNG receiving terminal. This study was conducted to develop the method for measuring the live CVs of LNG in each storage tank using LNG densitometer. For this purpose, the accurate correlation between CV and density of LNG was derived and the uncertainty of this method was evaluated and also the measuring system for CVs was constructed at LNG receiving terminal. To verify this method, the results of measurement using this method were compared with the field data of LNG analysis and the results showed that the deviations were 0.17~0.47%.

Key words: LNG, Densitometer, Correlation, Density, Calorific Value, Natural Gas

### 1. 서 론

2004년까지만 하더라도 도입 LNG의 발열량 범위는 10,450~10,750 kcal/Nm<sup>3</sup> 내외로서 발열량이 충분히 높고 일정하여 특별한 발열량 관리 없이도 가정/산업/수송/발전용 가스기기에 적합한(가스 호환성이 있는) 가스를 공급할 수 있었다. 인수기지 송출가스의 발열량을 관리하기 시작한 것은 저열량 LNG가 도입되기 시작한 2005년 동절기부터이며 저장 탱크를 고·중·저열량으로 지정하고 발열량 그룹별로 LNG를 분리 저장하는 방법을 사용하여 공급가스의 발열량을 조절하였다. 그러나 이러한 발열량 관리 방법도 저열량 LNG의 도입이

증가함에 따라 탱크 저장효율 감소로 인해 적용이 어렵게 되었고 향후에는 극저열량의 CBM, Shale LNG가 대량 도입될 예정이어서 기존과는 다른 공급가스의 발열량 조절 방법이 필요하게 되었다. 인수기지 송출 가스의 발열량을 관리하는 가장 쉬운 방법은 LPG를 투입하여 저열량 LNG의 발열량을 높이는 것이나 이는 공급가스의 단가 상승 문제가 있고 또 LPG 투입 시스템의 응답 속도 문제로 일정 시간 동안은 저열량 가스가 증열되지 않고 그대로 송출될 개연성이 존재한다. 이러한 문제를 풀 수 있는 가장 근본적인 대책은 인수기지 탱크(기지별 약 16~18개) 별로 발열량을 알 수 있는 방법을 찾는 것이다.

국외에서 사용하는 탱크별 LNG 발열량을 모니터링 방법으로는 1) 주기적으로 저장탱크내 LNG를 샘플링 분석하여 조성과 발열량을

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: fractals@kogas.or.kr

확인하는 방법, 2) LNG 저장시 해당 LNG의 조성(또는 발열량)과 물량을 탱크별로 할당하여 관리하는 방법, 3) LNG를 산지별로 분리하여 저장하는 방법 등이다. 1), 2)의 방법은 프랑스 등 유럽국가에서 사용하는 방법으로 인수기지 탱크수가 3~4개 정도로 매우 적고 탱크 용량도 50,000 m<sup>3</sup> 정도로 상당히 작으며 LNG 하역이 간헐적인 경우에 사용 가능한 방법으로 보통 1)과 2)의 방법이 병용된다. 3)의 방법은 저장 탱크수가 충분한 일본에서 사용하는 방법이며, 우리나라와 같이 연중 LNG 수요분포가 급격한 동고하저형인 경우 일본에 비해 1.5배 이상의 탱크 수가 필요하기 때문에 이 방법을 적용하기는 어렵다.

과거 탱크 수가 적었을 때는 인수기지 내 LNG 재고량 산정을 위해 월 1회 탱크별로 LNG 조성을 분석한 바 있으나 탱크 1기 당 샘플링 및 분석시간이 3~4시간 소요되기 때문에 탱크 수가 기지별로 18여기에 달하는 경우 모든 탱크의 LNG를 분석하는데는 3~4일이 소요되고 특히 동절기에는 하루 2항차가 하역되기 때문에 이 방법으로 각 탱크의 발열량을 알기는 매우 어렵다.

다행히 우리나라의 경우 LNG 도입 역사가 짧아 저장탱크가 거의 모두 신형이고 이에 따라 과량의 증발가스 발생 즉, 롤오버(Roll-over)[1]의 원인이 되는 LNG 층형성 감시를 위한 LTD(Level, Temperature, Density meter, 간단히 Densitometer라고도 함) 등의 최신설비가 갖춰져 있어서 각 탱크별 LNG 밀도를 알 수 있는 기기를 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 LNG 밀도계(LTD)를 이용하여 발열량을 실시간으로 알 수 있는 방법을 도출하고자 하였다. 이를 위해 LNG 밀도와 발열량 간의 정교한 상관관계를 도출하고 불확도를 평가하였으며, 인수기지에 발열량 모니터링 시스템을 시험 구축하여 본 방법을 실험효성을 확인하였다.

## 2. 이 론

### 2-1. LNG 밀도와 발열량 상관식

불활성가스가 없는 기상 LNG(이하 구분이 필요한 경우 LNG(g)로 표기)의 경우 발열량은 상대밀도(비중)만의 함수로 표현될 수 있다[2]. 액상의 LNG(이하 구분이 필요한 경우 LNG(l)로 표기)에 대해서도 이와 같은 관계가 성립한다면, 각 탱크 내 LNG 발열량은 LTD로 측정된 밀도로부터 추정하는 것이 가능하게 된다.

먼저 LTD로 측정된 LNG(l) 밀도로 발열량을 추정하는 것이 가능하려면 LNG(l) 내 불활성가스 즉, 이산화탄소와 질소의 농도는 매우 낮은 수준 이하여야 한다. 그런데 LNG 액화 공정에서 결빙현상을

피하기 위해 이산화탄소는 50 ppmv 이하로 제한되며 질소는 액화점이 -196 °C(표준대기압 기준)로서 LNG 액화온도(-165 °C 내외)보다 낮아 액화 전 원료 가스의 질소 농도가 크게 높더라도 LNG에는 1% 이상 포함되지 않는다. 더욱이 하역시까지 항해 중 상당 양의 질소가 BOG(Boil off gas, 증발가스) 형태로 증발하기 때문에 실제 하역시의 질소 농도는 선적시의 절반 수준이 된다. 일례로 메탄 99.5 mol%와 질소 0.5 mol%로 구성된 LNG(l)의 경우 BOG 내 메탄과 질소의 몰 농도 비는 89:11[3] 정도이어서 매우 빠른 시간 내에 질소 농도가 줄어드는 것을 알 수 있다. 실제로 인수기지로 하역되는 LNG의 질소 농도를 보면 대부분 0.2 mol% 이내이고 극히 일부 산지의 LNG만 0.5 mol%가 되는 것을 확인할 수 있다(300 항차 중 1항차). 그런데 이러한 LNG도 5 개 내외의 탱크에 분산 저장되고 또한 다른 LNG와 혼합 저장되는 것을 감안하면 실제 저장 탱크 내 질소 농도는 0.3 mol%를 초과할 개연성은 거의 없다.

Table 1은 LNG(g) 발열량과 LNG(l) 밀도의 상관식을 만들기 위해 LNG 발열량 전 범위에 해당하는 LNG 조성 7가지를 선정하고 각 조성별로 LNG(l) 밀도와 LNG(g) 발열량을 계산한 결과이다. LNG(l) 밀도는 상거래 표준인 ISO 6578[4]을 이용하여 계산하였고, 발열량은 ISO 6976[5]을 이용하여 계산한 값으로 계산 불확도는 0.1%이다.

식 (1)은 Table 1의 데이터를 이용하여 LNG(g) 발열량을 LNG(l) 밀도와 질소농도로 회귀분석한 것이다. 여기서  $T_R$ 은 LNG(l) 밀도의 기준온도를 나타내며, 식 (1)을 이용하여 발열량을 산정하기 위해서는  $T_R$  기준의 밀도가 적용되어야 함을 의미한다( $LD(T_R)$ 로 환산방법은 2.2절의 식 (2),(3) 참조). 본 상관식에서는 LNG(l) 밀도의 기준온도는 -160 °C로 하였고, (단위부피당) 발열량의 기준온도는, 부피에 대해서는 0 °C, 발열량(=연소)에 대해서는 15 °C를 적용하여 우리나라 발열량 기준조건에 맞추었다.

Table 2는 식 (1)의 회귀 오차와 질소 농도 설정값에 따른 발열량과 예측 오차를 나타낸 것이다. 회귀오차는 최대 0.06%로서 LNG(g)의 발열량-상대밀도 상관식[2]의 오차 0.05%와 거의 유사한 수준으로 매우 긴밀한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 개별 탱크 내 LNG의 질소 농도는 LTD로 측정되지 않으므로 발열량 추정오차가 가장 낮은 값으로 선정하는 것이 필요한데, 전술한 바와 같이 저장 탱크 내 최대 질소함량은 0.3 mol% 내외임으로 적정 질소 농도를 0.15%로 선정하면 질소를 측정하지 않는데 따른 오차를 최소로 줄일 수 있는 것을 알 수 있고 이에 따른 발열량 추정 오차는 약 0.23% 내외임을 Table 2로부터 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 질소 농

Table 1. Regression data for correlating between calorific value and density of LNG

Components	Compositions						
	LNG A	LNG B	LNG C	LNG D	LNG E	LNG F	LNG G
CH <sub>4</sub>	99.79	97.175	93.49	90.512	89.98	88.227	87.060
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.07	2.400	5.08	6.054	6.04	7.125	8.400
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.01	0.255	1.16	2.384	2.54	2.848	3.480
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	—	0.031	0.08	0.489	0.54	0.762	0.420
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	—	0.072	0.11	0.516	0.58	0.757	0.540
i-C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	—	0.051	0.01	0.017	0.02	0.036	0.020
n-C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	—	—	0.01	0.006	—	0.006	0.010
N <sub>2</sub>	0.13	0.016	0.06	0.022	0.30	0.239	0.070
Density (kg/m <sup>3</sup> )	421.098	430.192	442.909	457.282	459.525	466.483	468.404
Heating Value (kcal/Nm <sup>3</sup> )	9517.44	9767.90	10096.37	10520.70	10539.20	10759.26	10835.25

**Table 2. The error of eq. (1) for regression and with fixed N<sub>2</sub>**

LNG	Regression error of eq. (1) (%)	Error(%) of eq. (1) with fixed N <sub>2</sub>		
		N <sub>2</sub> =0.0 (mol %)	N <sub>2</sub> =0.15 (mol %)	N <sub>2</sub> =0.30 (mol %)
A	-0.00	0.18	-0.03	-0.24
B	-0.02	0.01	-0.20	-0.41
C	0.06	0.14	-0.06	-0.26
D	-0.06	-0.03	-0.22	-0.41
E	0.04	0.42	0.23	0.04
F	-0.01	0.29	0.10	-0.09
G	0.03	0.12	-0.06	-0.25

도를 0.15 mol%로 하였다.

$$H_V = 8464.34 - 20.1413 \cdot LD(T_R) + 0.0538661 \cdot LD^2(T_R) - 134.488 \cdot N_2 \quad (1)$$

## 2.2 단위 온도 당 LNG(l) 밀도계수

저장탱크 내 LNG는 항상 끓는점에 있다. 표준 대기압에서 LNG의 끓는점은 대체로 -160 내외이지만 대기압이 다소 변동하고 탱크 압력도 대기압보다 다소 높게 운영되므로 실제 LNG의 끓는점은 -160 ~ -157 °C 범위에 분포한다. 따라서 LTD로 측정된 LNG 밀도로 발열량을 계산하려면 식 (1)에서 요구하는 -160 °C(=T<sub>R</sub>) 기준의 밀도로 변환해야 한다. Table 3은 Table 1의 LNG 조성을 이용하여 -160 ~ -157 °C 범위에서 단위 온도 당 LNG 밀도변화(밀도계수)를 계산한 것이다. LNG 밀도계수를 보면  $-3.6 \times 10^{-3} \sim -0.30 \times 10^{-3}$  정도로 비교적 일정하여 평균값인  $-3.3 \times 10^{-3}$ 을 밀도계수로 사용할 수도 있겠으나 본 연구에서는 오차를 줄이기 위해 식 (2)와 같이 상관식으로 표현하였고 이에 따른 오차는 0.01% 수준이다. 따라서 온도 T<sub>m</sub>에서 LTD로 측정된 밀도 LD(T<sub>m</sub>)를 발열량 계산에 필요한 LD(T<sub>R</sub>)로 변환은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\alpha_T = \frac{1}{LD} \frac{\partial LD}{\partial T} = 13.9 \times 10^{-6} \cdot LD(T) - 9.44 \times 10^{-3} \quad (2)$$

**Table 3. LNG(l) density coefficient : temperature range between -160 °C and -157 °C**

Kind of LNG	LNG(l) density at -160 °C	LNG(l) density at -157 °C	$\alpha_T$ (°C <sup>-1</sup> )
A	421.098	416.567	-0.003626
B	430.192	425.751	-0.003477
C	442.909	438.566	-0.003301
D	457.282	453.053	-0.003111
E	459.525	455.291	-0.003100
F	466.483	462.323	-0.002999
G	468.404	464.274	-0.002965

**Table 4. The uncertainty of measurement in calibration of LTD's calorific value**

Uncertainty components related to calibrate H <sub>V(LTD)</sub>	Relative sensitivity coefficient ①	Coverage factor, ②	Probability distribution	Uncertainty (%), ③	Contribution to the standard uncertainty of Err ①×③/②
Uncertainty of PRM composition for calibration GC	0.16	2	normal	0.1	0.008
Uncertainty of GC analysis for LNG samples	0.16	2	normal	1.0	0.080
Uncertainty of density eq. of ISO 6578	1.25	2	normal	0.1	0.063
Regression error of eq.(1)	1	1.732	square	0.06	0.035
Accuracy of LTD including precision	1.25	2	normal	0.1	0.063
Standard uncertainty for Err	-	1	normal	-	0.125
Expanded uncertainty for Err	-	2	normal	-	0.25

$$LD(T_R) = LD(T_m) \times [1 + \alpha_T \cdot (T_R - T_m)] \quad (3)$$

## 2-3. LTD를 이용한 발열량 측정불확도

본 방법의 발열량 측정 불확도(모르는 오차)를 확인하기 위해 불확도 평가를 하였다. 불확도 평가 방법은 ISO GUM[5]을 따랐고 각 불확도 성분의 확장불확도는 KOGAS 저열량 가스 보고서[6]를 인용하였다. LTD를 이용한 LNG(g) 발열량 측정 불확도를 알기 위해서는 먼저 LTD 발열량의 교정 불확도를 아는 것이 필요하다. 식(4)는 탱크 내 LNG 조성을 가스분석기(GC)로 분석하여 해당 LTD의 발열량 오차를 교정하는 기본 모델을 나타내며, 식 (5)는 LNG(l) 밀도에 대한 발열량의 상대감도계수 즉, LNG(l) 밀도 1%가 유발하는 발열량의 퍼센트 오차를 나타낸다. Table 4는 LTD 발열량 교정시 이와 관련된 불확도 요인과 불확도 크기를 산정하고 전체 교정 불확도를 계산한 것이다. 이 불확도 계산의 정확도를 결정하는 핵심인자는 각 불확도 요인별 상대감도계수(Relative sensitivity coefficient)인데 본 계산에서는 기본적으로 식 (4)와 (5)를 이용하였지만 여기에는 다소 복잡한 발열량 계산식이 연계되어 있어서 최종 결과만을 나타내었다. 불확도 계산결과를 보면 LTD 발열량의 교정불확도가 0.25%임을 알 수 있으며 이는 LTD 발열량 오차를 제거하더라도 남게 되는 모르는 오차를 의미한다. 한 가지 간과해서는 안 되는 것이 이 불확도가 LTD를 이용한 LNG 발열량의 측정불확도를 의미하는 것이 아니라는 점이다. 이는 2.1절에서 언급한 바와 같이 실제 측정에서는 질소 농도를 모르기 때문에 질소농도 추정에 따른 불확도 요인이 추가되어야 실제 측정불확도가 되기 때문이다. 따라서 불확도 전파법칙[7]에 따라 질소 농도 추정 불확도 0.23%(확률분포는 사각 분포로 가정)를 상기 결과와 합성하면 LTD 발열량 측정 불확도가 0.36%가 되는 것을 알 수 있다.

$$\text{Err} = H_{V(\text{ISO 6976})} - H_{V(\text{LTD})} \quad (4)$$

$$\frac{\partial H_V}{\partial LD(T_R)} \frac{LD(T_R)}{H_V} \simeq 1.25 \quad (5)$$

## 3. LNG 발열량 측정 시스템 구축

LNG(l) 밀도계를 이용한 발열량 측정의 유효성을 확인하기 LNG 인수기지에 Fig. 1과 같이 발열량 측정시스템을 시험 구축하였다. LNG 탱크에 장착된 각 LTD(Whessoe 1146 Level, Temperature, Densitometer)는 DCS(Distributed Control System)를 통해 발열량 모니터링 컴퓨터와 연결하였다. 각 LTD의 밀도, 온도 신호는 RS-485(Binary Modbus) 통신으로 DCS와 연결되고 DCS에 수집된 신호는, 해당 신호의 메모리를 공유 방식으로 발열량 모니터링 컴퓨터와 연

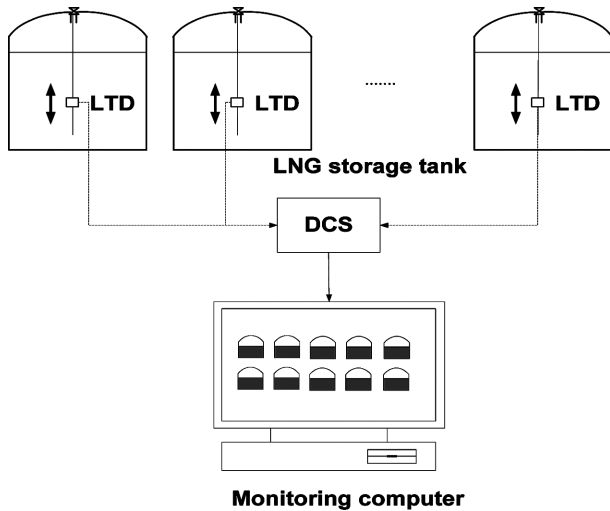


Fig. 1. Schematic of the measuring system for the live calorific values of LNG in each storage tank.

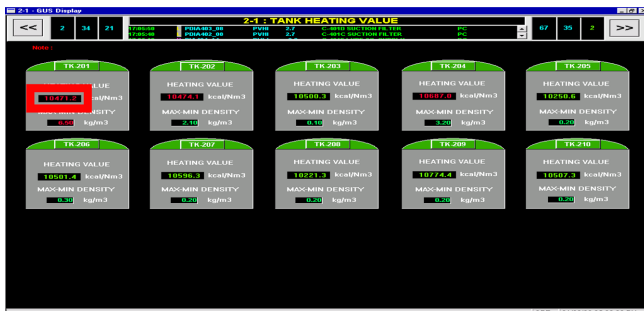


Fig. 2. Display of the live calorific values of LNG in each storage tank.

결된다. 발열량 계산 및 모니터링 화면은 DCS 운용 프로그램을 이용하여 작성하였으며 Fig. 2와 같이 탱크 아이콘과 실제 탱크 번호를 그래픽으로 출력하여 각 탱크별 발열량을 쉽게 알 수 있도록 하였다. 모니터링 화면에는 각 탱크의 번호, 발열량, LNG 최하부와 최상부의 밀도차가 표시되도록 하였다. 밀도 차이를 표시한 이유는 저장된 LNG에 층이 있는지 여부를 확인하기 위함이며 이 값이  $1 \text{ kg/m}^3$  (경험값) 이상일 때는 발열량값이 빨간색으로 표시되도록 하여 층이 없을 때의 초록색과 구분할 수 있도록 하였다. 빨간색으로 표시된 발열량은 탱크 내 전체 LNG의 발열량을 대표하지 못하며 따라서 적정 혼합 방법 또는 우선 송출방식을 이용하여 층을 소멸시켜야 함을 나타낸다.

#### 4. 현장시험 결과

##### 4-1. LTD로 측정된 국부 밀도값(발열량값)의 대표성

Fig. 2의 발열량 모니터링 화면에 실시간으로 표시되는 발열량은 탱크 최하부, 특정 위치의 밀도로 계산된 값이다. 그런데 LNG 저장 탱크의 높이 및 직경은 각각 27~49 m, 64~72 m 정도로 매우 크므로 하루 2회 스캔 (탱크 최하부에서 상부까지 밀도값 스캔) 시간을 제외하고는 탱크 최하부에 있는 LTD로 측정된 LNG 밀도값이 탱크 내 전체 LNG 밀도를 대표할 수 있는지 확인이 필요하다. 이를 위해 발열량 모니터링 화면에 표시되는 상·하부 밀도 차이를 3 개월간 감시하고 16개 탱크의 LTD 스캔 값을 지속적으로 조사하였고 대표적인 3개 탱크의 스캔 결과를 Table 5에 나타내었다. Tank A, B는 저장된 LNG 내 층이 없는 경우이고 C는 층이 있는 경우이다. 층이 없는 Tank A, B의 스캔 결과를 보면 LTD가 대기 상태로 있는 탱크 최하부부터 저장 LNG 최상부까지 온도 및 밀도 변화가 거의 없는 것을 알 수 있으며 다만, 최상부로 가면서 LNG 온도가  $0.1\sim0.2$  낮아지고 밀도는  $0.1\sim0.3 \text{ kg/m}^3$  정도 높아지는 것이 관찰된다. 이는 LNG 상부 표면에서 증발가스로 인해 냉각된 LNG가 LTD 스캔 경로와 평행하게 아래쪽 방향으로 대류하면서 나타나는 현상으로 추정된다[2]. 이로부터 탱크 내 LNG는, 상·하부 최대 밀도차가  $0.3 \text{ kg/m}^3$ 에 불과할 정도로 충분히 대류하여 혼합되고 있으므로 국부적으로 측정된 LNG 밀도값이 전체 LNG 밀도를 대표할 수 있는 것을 알 수 있다. C 탱크의 경우에는 LNG 상·하부 밀도차이가  $10.7 \text{ kg/m}^3$  정도 차이가 나는데 이는 이중 LNG간에 층이 형성된 경우로서 LTD가 대기 상태로 있는 탱크 최하부 지점의 밀도가 전체 밀도를 대표하지 못함을 알 수 있다. 이 경우 탱크의 안전을 위해서나 발열량 모니터링을 정확히 하기 위해 적절한 층소멸 방법을 써야 한다.

##### 4-2. 발열량 측정 정확도

LTD를 이용한 발열량 측정 정확도를 확인하기 위해 LNG 인수기지 내 2개 탱크에 대하여 LNG를 샘플링하고 동시에 LTD로 측정된 밀도, 온도 그리고 발열량 측정시스템 상의 발열량 값을 기록하였다. Table 6에는 샘플 LNG 조성과 해당 탱크 내 LTD로 측정된 밀도 및 온도값을 나타내었고 Table 7에는 샘플 LNG 조성을 이용하여 계산한 밀도, 발열량 그리고  $-160^\circ\text{C}$ 로 환산된 LTD 밀도 및 이를 이용하여 식 (1)로 계산한 발열량을 나타내었다. Table 7의 결과를 보면 Test ①의 경우 LNG의 조성으로 계산한 발열량값(ISO 6976 이용)과 LTD로 측정된 값이  $0.47\%$  정도 차이가 나고 Test ②의 경우에는  $0.16\%$  정도 차이가 나는 것을 관찰할 수 있다. 가스분석에 의한 계산 발열량값과 LTD 발열량값이 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있

Table 5. LTD scan data: density and temperature of LNG with level

Tank A			Tank B			Tank C		
Level (m)	Temp. ( $^\circ\text{C}$ )	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Level (m)	Temp. ( $^\circ\text{C}$ )	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Level (m)	Temp. ( $^\circ\text{C}$ )	Density ( $\text{kg/m}^3$ )
0.380	-157.9	456.6	0.380	-158.0	455.6	0.370	-157.1	449.0
1.000	-157.9	456.6	1.000	-158.0	455.6	1.000	-157.3	449.0
2.000	-157.9	456.6	2.000	-158.0	455.6	2.000	-157.3	448.8
3.000	-157.9	456.6	3.000	-158.0	455.6	3.000	-157.4	440.1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
24.000	-158.0	456.7	27.000	-158.1	455.4	18.000	-158.6	438.3
25.000	-158.0	456.7	28.000	-158.1	455.4	19.000	-158.6	438.3
25.640	-158.1	456.7	28.340	-158.1	455.3	19.740	-158.6	438.3

**Table 6. Raw data of LNG measured to verify the accuracy of this study**

Components	Composition (mol%)	
	Test ①	Test ②
CH <sub>4</sub>	90.700	91.235
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.810	5.530
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.243	2.015
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.490	0.550
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.577	0.495
i-C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	0.023	0.025
n-C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	0.010	0.005
N <sub>2</sub>	0.147	0.145
LTD LD(T <sub>m</sub> ) (kg/m <sup>3</sup> )	456.8	453.8
T <sub>m</sub> (°C)	-158.7	-158.8

**Table 7. Comparison of the density and calorific values between this study and LNG sampling/analysis method**

Item		Test	Test
LD(T <sub>R</sub> ) (kg/m <sup>3</sup> )	ISO 6578	456.83	454.77
	This study	458.62	455.48
	Dev.(kg/m <sup>3</sup> )	1.79	0.71
Calorific value, H <sub>v</sub> (kcal/Nm <sup>3</sup> )	ISO 6976	10487.05	10428.71
	This study	10536.74	10445.38
	Dev.(%)	0.47	0.16

는데 다만 Test ①의 경우 차이가 다소 크게 보인다. 2.2절에서 살펴본 바와 같이 LTD 발열량 불확도는 0.36%이며, 여기에 LNG 분석 불확도에 의한 발열량 불확도 0.1%를 감안한다 하더라도 EN[8] 판정법에 의한 허용 편차는 0.37%(=√0.1<sup>2</sup>+0.36<sup>2</sup>) 이내 이어야 한다. 더욱이 샘플 LNG 내 질소함량이 거의 0.15 mol%이어서 질소 농도에 의한 불확도 요인이 사라지기 때문에(2.1절 참조) 실제적으로는 0.27% 이내의 차이가 나야 한다. 이렇게 다소 큰 발열량 차이의 원인이 가스 샘플링 오류에 의한 것인지 또는 실제 LTD의 오차 때문인지는 확실하지 않으나 개연성이 높은 것은 가스 샘플링 오류이다. Test ①, ② 모두 LNG(I) 샘플(가스상)을 3개로 하였는데, 분석결과를 보면 발열량으로 환산한 반복성이 ±1% 수준이다. 이는 가스상의 LNG를 샘플링 및 분석했을 때의 발열량 반복성 ±0.05%(공정용 GC Danalyzer 570 기준)에 비해 20배나 큰 값이다. 원인으로는 LNG(I) 샘플러의 기화기 용량이 충분하지 못한 문제와 샘플링 기술 문제가 복합된 것으로 보이며, 이를 해결하기 위해 방안으로 샘플 실리더 수를 크게 늘리는 것과, 정밀·정확한 LNG(I) 분석시스템이 쓰이는 LNG 하역시 빈 탱크에 LNG를 저장 하는 방안이 검토되고 있다.

2010년 현재 3개 LNG 인수기지에 본 발열량 측정시스템이 구축되어 있으며 2011년 상반기까지 발열량 측정 불확도를 0.36% 수준으로 향상시킬 계획이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 LNG(I) 밀도계를 이용하여 LNG 인수기지 저장탱크 내 LNG 발열량을 실시간으로 알 수 있는 방법을 도출하고자 하였다. 이를 위해 LNG(I) 밀도와 발열량 간의 정교한 상관식을 도출하고 불확도를 평가를 통하여 본 방법의 오차 범위를 확인하였으며 인수기지에 발열량 측정시스템을 시험 구축하고 실제 탱크 내 LNG

를 샘플링하여 구한 발열량과 LTD 발열량을 비교하여 본 방법의 유효성을 시험하였다. 다음은 본 연구 결과를 요약한 것이다.

(1) LNG(I) 밀도 및 질소농도와 발열량 간의 상관식을 도출하였다. 상관식의 회귀 오차는 0.06% 정도로 매우 작아 LNG(I) 밀도로부터 발열량을 매우 정확하게 도출할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) LTD로 발열량 측정시 질소 농도 미측정으로 인한 상관식의 최대 오차는 0.46%이나 질소농도를 0.15 mol%로 할 경우 0.23%로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 임의 온도에서 측정된 LNG(I) 밀도를 -160 °C 기준으로 환산하는데 필요한 단위 온도 당 밀도계수를 도출하였으며 오차는 0.01% 수준이다.

(4) 불확도 분석결과 LTD를 이용한 LNG 발열량 측정방법의 최소 불확도는 0.36%임을 알 수 있었다.

(5) 인수기지에 시험 구축된 발열량 측정시스템의 유효성을 확인하기 위해, 2개 탱크에 대하여 LNG를 샘플링하고 가스분석을 하였다. 그 결과, 분석에 의한 발열량과 LTD 발열량 간의 차이가 각각 0.17%, 0.47% 정도로 나타나 발열량 측정시스템이 유효한 것으로 확인되었다.

## 사용기호

- H<sub>V</sub> : Volumetric real gas superior calorific value[kcal/m<sup>3</sup>]  
(conversion factor of kcal to kJ is 4.1868) Reference condition for volume is 0 °C, 1.01325 bar and reference temperature for combustion is 15 °C
- LD(T<sub>R</sub>) : Liquid phase density of LNG at reference temperature T<sub>R</sub> [°C]
- LD(T<sub>m</sub>) : Liquid phase density of LNG at temperature T<sub>m</sub>[°C]
- T<sub>R</sub> : Reference temperature for liquid phase density of LNG. Here -160 °C
- T<sub>m</sub> : A temperature of LNG in storage tank at which liquid phase density of LNG is measured[°C]
- T : A temperature between -157 and -160 °C
- N<sub>2</sub> : Mole concentration of nitrogen in LNG[mol%]

## 참고문헌

- Lewis, J. P. and Outtrim, P. A., "RolloverUpdate of Current Technology," Report No. GRI-95/0486, Gas Research Institute, USA (1995).
- Ha, Y. C., "Correlations Between the Important Physical Properties of Natural Gas," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONG-HAK)*, **47**(5), 599-607 (2009).
- Ha, Y. C., "Program for Predicting the Phase Envelope of Natural gas(ngPE 1.0)," Korea Software Registration No. 2009-01-121-004618(2009).
- ISO 6578, *Refrigerated hydrocarbon liquids Static measurement Calculation procedure*, International Organization for Standardization, Geneva(1991).
- ISO 6976, *Natural Gas Calculation of Calorific Values, Density, Relative Density and Wobbe Index from Composition*, International Organization for Standardization, Geneva(1995).

6. KOGAS, "A Countermeasure Study for the Impacts on Kogas's production/Transmission-Supplying System and Gas Consumer Caused by Low Caloric Natural Gas(LNG/PNG)," Project No. 05-PA-GF-010-31, Korea Gas Corporation(2008).
7. ISO GUM, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization, Geneva(1995).
8. EA-4/02, *Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration*, European co-operation for Accreditation(1999).