

비중계와 SGERG 방정식을 이용한 천연가스 열량 산정에 관한 연구

하영철 · 이강진

한국가스공사 연구개발원

A Study on the Evaluation of Heating Value of Natural Gas Using SGERG Equation and a Specific Gravity Meter

Youngcheol Ha and Kangjin Lee

R&D Center, Korea Gas Corporation

요 약

천연가스 도입 다변화 정책이 시행된 이후 공급 천연가스의 조성이 산지별로 적지 않게 차이나고 있으며 이에 따라 부피와 열량으로 이원화된 기존 천연가스 상거래 단위 체계를 열량 단위로 일원화하는 방안이 검토되고 있다. 열량을 상거래 단위로 하기 위해서는 고가의 가스분석기가 필요하지만 공급량이 극히 적은 상당수 공급설비에까지 이를 적용하기는 어려우며 이로 인해 보다 경제적인 방안이 모색되고 있다. 이러한 방안의 하나로 본 연구에서는 SGERG식과 비중계를 이용한 열량산정 방법을 분석해 보았다. 이를 위해 압축계수식인 SGERG식을 열량식으로 변형하고 불확도 분석을 하였다. 또한 열량계산에 필요한 비중, 이산화탄소 함량, 질소 함량의 측정 또는 예측의 타당성도 검토했고 실제 현장 데이터를 통해 본 방법의 적정성도 확인하였다. 그 결과 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 가스분석기와 유사한 불확도로 열량 산정을 할 수 있음을 확인하였다.

Abstract — Gas analyser is widely used for the determination of the heating value of natural gas (NG) at large metering stations for billing purpose. However, it is very expensive and unrealistic to small metering stations. In this study, the method using SGERG (StandardTM Groupe European de Recherches Gazieres) equation and a specific gravity meter (SGERG + SG meter) as one of means of an economical heating value evaluation is analyzed. SGERG equation, original compressibility factor equation, is modified into heating value equation and analyzed its uncertainty. In addition, the validity of measurement or estimation of specific gravity, mole fractions of N₂ and CO₂ in need of heating value calculation is analyzed and the applicability of this method is validated by comparing these results with field data. It is confirmed that the calculated heating value uncertainty in case of using the stated above method is almost the same as that of gas analyser.

1. 서 론

한국가스공사의 천연가스 상거래 단위는 열량과(기준 조건의)부피로 이원화되어 있다. 열량 단위는 발전회사로 판매할 때 쓰이며 그 외 도시가스사나 산업체에는 모두 부피 단위로 거래하고 있다.

공급가스의 조성이 일정하면 상거래 단위는 전혀 문제되지 않는다. 일정한 가스 조성으로 인해 부피와 열량이 서로 환원되고 이로 인해 한 단위에서의 천연가스 요금 결정은 곧바로 다른 단위로 직결되기 때문이다. 그렇지만 조성이 변동할 경우는 부피 거래에 모순이 생긴

다. 이는 열량과 부피의 반비례 관계에서 비롯되는 것으로 높은 열량의 가스를 공급할 수록 더 작은 부피량이 거래되기 때문이다.

90년대 중반까지만 하더라도 도입 천연가스의 조성은 비교적 일정해서 이원화된 상거래 단위 체계는 문제되지 않았다. 그러나 90년 중반 이후부터는 천연가스 도입 다변화가 이루어지면서 산지별로 조성 차가 적지 않게 나고 있으며 이에 따라 상거래 단위를 열량으로 일원화하는 방안이 검토되고 있다.

열량을 상거래 단위로 하기 위해서는 열량을 산정할 수 있는 가스분석기가 필요하다. 그러나 공급량이 극히 작은

상당수의 가스공급소 계량설비에까지 고가의 가스분석기를 설치하는 것은 비용과 효율 문제가 발생하며 따라서 이러한 공급소의 경우에는 다른 방안이 검토되어야 한다.

본 연구에서는 바로 이러한 문제 해결을 위한 경제적 방안으로 SGERG^{[1][2]} 방정식과 비중계 가스분석기의 1/5 가격-이용 방법을 모색해 보았다. 이를 위해 압축계수 계산식인 SGERG 방정식을 열량계산식으로 변형했고 이에 대한 불확도 분석을 하였다. 또한 열량계산에 필요한 비중, 이산화탄소 함량, 질소 함량의 측정 또는 예측의 타당성도 검토했고 실제 현장의 데이터를 통해 본 방법의 적정성도 확인하였다.

2. 이 론

2-1. SGERG 방정식의 열량계산 방법

SGERG 방정식은 천연가스 압축계수를 계산하기 위한 식이지만 내부에는 열량계산 루틴이 포함되어 있어서 이를 분리하면 비중, 이산화탄소, 질소의 몰분율로 열량을 계산할 수 있다. 식(1)~(15)는 SGERG 방정식 중 열량계산과 관련된 식만 정리한 것이며 이로부터 열량을 계산하는 방법을 설명하면 다음과 같다.

절차 ①: 먼저 기준압축계수 Z_b 의 초기값을 정한다. Z_b 의 초기값은 1 정도로 하면 된다.

절차 ②: 주어진 비중, 이산화탄소, 질소의 몰분율, 기준 온도 및 압력을 이용하여 식(1)에서 식(13)까지 계산한다. 여기서 제2차 비리얼계수 $B_{i,j}$ 와 B_i 의 관련자료는 Tables 1, 2를 이용한다.

절차 ③: Z_b^{NEW} 와 Z_b 를 비교해서 수렴 조건 ϵ (ex. $\epsilon = 0.00001$) 보다 작은 지 확인한다. 만일 이보다 크면 $Z_b = Z_b^{NEW}$ 로 하고 수렴 조건에 만족될 때까지 절차 ②를 반복 수행한다.

절차 ④: 식(14), (15)를 이용하여 기준 조건의 열량을 구한다.

$$X_{CH} = 1 - X_{N_2} - X_{CO_2} \quad (1)$$

$$B_{air}(T_b) = -0.12527 + 5.91 \times 10^{-4} T_b - 6.62 \times 10^{-7} T_b^2 \quad (2)$$

$$\rho_{b(dir)}(T_b, P_b) = \frac{M_{r(air)}}{RT_b + B_{air}(T_b)} \quad (3)$$

Table 1. Interaction virial coefficient terms for nitrogen and carbon dioxide.

Fluid for B_{i-j}	b_0 (m ³ /kmol)	b_1 (m ³ /kmol-K)	b_2 (m ³ /kmol-K ²)
N ₂ -N ₂	-0.144600	0.740910×10 ⁻³	-0.911950×10 ⁻⁶
CO ₂ -CO ₂	-0.868340	0.403760×10 ⁻²	-0.516570×10 ⁻⁵
CO ₂ -N ₂	-0.339693	0.161176×10 ⁻²	-0.204429×10 ⁻⁵

$$M_r = \frac{G_r Z_b R T_b \rho_{b(air)}}{P_b} \quad (4)$$

$$M_{CH} = \frac{M_r - X_{CO_2} M_{rCO_2} - X_{N_2} M_{rN_2}}{X_{CH}} \quad (5)$$

$$H_{CH} = \frac{M_{CH} - G_1}{G_2} \quad (6)$$

$$B_i = b_0 + b_1 T_b + b_2 T_b^2 \quad (i = 0, 1, 2) \quad (7)$$

$$B_{CH-CH} = B_0 + B_1 H_{CH} + B_2 H_{CH}^2 \quad (8)$$

$$B_{i-j} = b_0 + b_1 T_b + b_2 T_b^2 \quad (9)$$

$$B_{CO_2-CH} = -0.865 \times (B_{CO_2-CO_2} B_{CH-CH})^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$B_{N_2-CH} = (0.72 + 1.875 \times 10^{-5} (320 - T_b)^2) \frac{(B_{N_2-N_2} + B_{CH-CH})}{2} \quad (11)$$

$$B_{mix} = B_{CO_2-CO_2} X_{CO_2}^2 + B_{N_2-N_2} X_{N_2}^2 + B_{CH-CH} X_{CH}^2 + 2B_{CO_2-N_2} X_{CO_2} X_{N_2} + 2B_{CO_2-CH} X_{CO_2} X_{CH} + 2B_{N_2-CH} X_{N_2} X_{CH} \quad (12)$$

$$Z_b^{NEW} = 1 + \frac{B_{mix} P_b}{RT_b} \quad (13)$$

$$H_N = \frac{H_{CH} X_{CH}}{1 + 0.0001027(T_b - 298.15)} \quad (14)$$

$$H_V = H_N \frac{P_b}{Z_b R T_b} \quad (15)$$

2-2. SGERG 방정식의 열량계산 불확도

SGERG식을 열량계산식으로 사용하기 위해서는 이 식으로 계산된 열량의 불확도(=오차) 순수 열량 계산식

Table 2. Virial coefficient terms for the equivalent hydrocarbon.

	i	b_{i0}	b_{i1}	b_{i2}
B_0 (m ³ /kmol)	0	-0.425468	0.286500×10 ⁻²	-0.462073×10 ⁻⁵
B_1 (m ³ /MJ)	1	0.877118×10 ⁻³	-0.556281×10 ⁻⁵	0.881510×10 ⁻⁸
B_2 (m ³ kmol/MJ ²)	2	-0.824747×10 ⁻⁶	0.431436×10 ⁻⁸	-0.608319×10 ⁻¹¹

단의 불확도를 알아야한다. 그런데 SGERG의 규격서인 ISO 12213-3¹¹⁾과 AGA 8¹²⁾에는 압축계수 불확도만 ±0.1% 라고만 명기되어 있고 열량 불확도는 따로 언급하고 있지 않다. 따라서 이들 규격서로부터 열량 불확도를 인용하기는 어렵고 대신 압축계수 불확도와 열량에 대한 압축계수의 상대민감도¹³⁾로부터 추론해야 한다.

열량에 대한 압축계수의 상대민감도는 식(16)으로 표현되며 열량값 1% 변화가 일으키는 압축계수의 % 변화를 의미한다. 그런데 이는 열량값 1% 불확도가 일으키는 압축계수의 % 불확도로도 해석 가능하므로 상대민감도와 압축계수의 불확도를 안다면 식(18)과 같은 방법으로 열량의 불확도를 대략적으로 추론하는 게 가능하다.

$$\theta_{H_v}(\%) = \frac{\partial Z}{\partial H_v} \frac{H_v}{Z} \quad (16)$$

여기서, 압축계수 Z는

$$Z = 1 + B_{\text{mix}} \left(\frac{P}{RT} \right) + C_{\text{mix}} \left(\frac{P}{RT} \right)^2 \quad (17)$$

$$U_{H_v}(\%) = \frac{U_Z(\%)}{\theta_{H_v}} \quad (18)$$

Fig. 1은 압축계수 불확도가 ±0.1%인 온도 263 K~338 K와 압력 0 MPa~10 MPa 영역에서 상대 민감도를 계산한 결과이다. 비중은 도입 천연가스의 평균인 0.624를 사용하였고 이산화탄소와 질소함량은 무시하였다. 그림을 살펴보면 온도, 압력에 따라 상대민감도가 다양하게 나타나는 것을 관찰할 수 있으며 온도가 높고 압력이 낮을 수록 민감도가 작고 반대의 경우에는 큰 것을 알 수 있다. 주목해야 할 부분은 온도 263 K와 압력 10 MPa 근방의 민감도인데 여기서의 민감도가 -1.8 근방으로 가

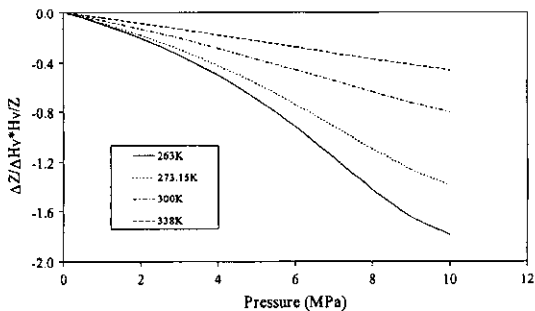


Fig. 1. The percentage change in compressibility brought about +1% change in heating value for temperature from 263 K to 338 K for pressure up to 10 MPa. (mole percent of nitrogen = 0%, mole percent of hydrocarbon = 0%, specific gravity = 0.624, heating value at 25°C = 984.54 MJ/kmol).

장 크기 때문이다. 그런데 이 온도, 압력은 분명히 압축계수 불확도 ±0.1% 영역이므로 상대민감도 -1.8을 그대로 반영하여 열량의 불확도를 산출하면 ±0.056%가 되며, 이러한 경계역을 피하더라도 최소한 압축계수 불확도 정도는 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 SGERG 방정식을 이용하여 계산한 열량값의 불확도는 대략 압축계수 불확도 ±0.1% 정도는 된다고 판단할 수 있다.

2-3. 비중, 이산화탄소 및 질소 함량 산정

열량을 정확히 산정하기 위해서는 비중, 이산화탄소 및 질소의 함량을 어느 정도로 정확히 산정해야 하는 지 알아야 한다. 만일 이들 인자의 불확도가 열량 불확도를 거의 유발하지 않는다면 불필요하게 정확히 산정할 필요가 없고, 역으로 큰 불확도를 유발한다면 대단히 정확하게 산정해야 하기 때문이다. 상대민감도를 계산해보면 이들 인자의 불확도와 열량 불확도의 상관관계를 알 수 있는데, 상대민감도가 << 1이면 대략적인 값을, 1 근방이면 정밀 측정이 필요함을 나타낸다.

$$\theta_{G_r}(\%) = \frac{\partial H_v}{\partial G_r} \frac{G_r}{H_v} \quad (19)$$

$$\theta_{x_{CO_2}}(\%) = \frac{\partial H_v}{\partial X_{CO_2}} \frac{X_{CO_2}}{H_v} \quad (20)$$

$$\theta_{x_{N_2}}(\%) = \frac{\partial H_v}{\partial X_{N_2}} \frac{X_{N_2}}{H_v} \quad (21)$$

식(19)~(21)은 비중, 이산화탄소, 질소에 대한 열량의 상대민감도를 나타내며 이를 계산해 보면 비중 0.55~0.80 영역에서 $\theta_{G_r} = 0.87\%$, $\theta_{x_{N_2}} = -1.7 \sim -1.2\%$, $\theta_{x_{CO_2}} = -2.5 \sim -1.8\%$ 이고 도입 천연가스의 평균 비중 0.624에서는 $\theta_{G_r} = 0.87\%$, $\theta_{x_{N_2}} = -1.4\%$, $\theta_{x_{CO_2}} = -2.2\%$ 정도 된다. 이로부터 열량계산에 사용되는 이러한 가스 특성은 대단히 정확하게 산정해야 함을 알 수 있다.

그렇지만 이산화탄소와 질소의 경우 공급가스 내 이

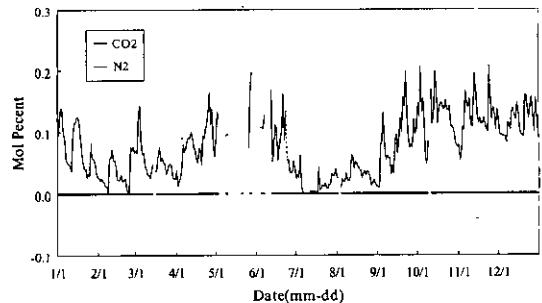


Fig. 2. N₂ and CO₂ mole percent in supplying NG measured at jungdong metering station during 1999.

들 함량이 극히 작으면 고정값을 사용해도 크게 문제되지 않는다. Fig. 2는 99년도에 중동공급소에서 측정한 이들 성분의 함량을 나타내는데 이산화탄소는 0.00%, 질소는 0.0~0.2% 정도만 포함되어 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 다른 공급소의 경우도 마찬가지며^[4] 따라서 이들의 적정 고정값을 적용한다면 열량 불확도는 크게 증가하지 않게 된다. 만일 이산화탄소와 질소의 연중 평균값^[4]인 0.00%, 0.08%를 열량제산에 적용한다면 예상되는 열량의 불확도 증가분은 -0.11~+0.17%에 불과하다(0.0~0.2%의 질소 함량 변화와 상대민감도를 고려하여 계산한 값).

천연가스 수급계약이 최소 10년 이상임을 감안할 때 당분간 천연가스 내 질소와 이산화탄소의 함량이 현재와 같은 수준으로 유지될 것으로 보이며 따라서 이들 성분을 측정하지 않아도 열량산정의 불확도는 크게 증가하지 않을 것으로 판단된다.

비중의 경우는 현재 천연가스 산지별로 변동폭이 작지 않는데 이는 가스분석기보다 대단히 저렴한 비중계로 측정 가능하다. 제작사 사양으로는 오차가 ±0.1%이지만 현장 적용 결과 대체로 ±0.2%^[5] 내외로 유지할 수 있는 것으로 확인되었다.

2-4. SGERG로 계산한 열량값 비교

SGERG로 계산한 열량과 가스분석기의 열량 편차를 알아보기 위해 평택인수기지 고압송출라인의 가스분석 결과 3개를 샘플링하였다. 샘플 가스의 조성은 Table 3에 나타내었으며 각 조성은 산지가 모두 다른 것이다.

Table 4에는 SGERG로 계산한 열량과 가스분석기의 열량이 비교되어 있다. 여기서 가스분석기 열량이란 가스분석기에 내장된 가스 물성계산 코드 GPA 2172^[6]로 계산한 값을 나타내며 여기에는 분석된 가스 조성이 모두 사용된다. 시험 결과를 살펴보면 가스 A, B, C 모

Table 5. Uncertainties of each component related to heating value predictions.

	Equation (%)	Reproducibility (%)	N ₂ , CO ₂ (%)
Gas Analyser	±0.10	±0.20	
SGERG + SG-Meter	±0.10	±0.17	-0.11~+0.17

두에 대해 SGERG로 계산한 열량값이 가스분석기의 값보다 작은 경향을 나타내며 그 크기는 대체로 -0.05% 미만임을 관찰할 수 있다. 그렇지만 이 편차의 크기는 GPA 2172의 계산 불확도 내에 들어오기 때문에 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

3. 현장 자료 분석 결과

SGERG식과 비중계(이하 SGERG + 비중계)를 가스분석기 대신 사용하기 위해서는 이 방법의 불확도가 가스분석기의 불확도와 유사한 수준이어야 한다. 이들 방법의 각 불확도 성분 및 크기는 Table 5에 나타내었으며 불확도의 크기는 상대민감도가 고려된 값이다. 여기서 재현 불확도는, 가스분석기의 경우 긴 분석 주기에 의한 불확도 증가분이 고려된 값이고, SGERG + 비중계의 경우는 현장시험 결과^[6]로부터 도출한 것이다. 또한 질소와 이산화탄소 함량에 따른 불확도는 이들 값을 각각 0.08%, 0.00%으로 고정했을 때 발생할 수 있는 불확도를 나타낸다. 표를 살펴보면 가스분석기와 SGERG + 비중계의 열량 불확도 차이는 계산식과 재현성에 의해서 거의 나타나지 않고 대부분 질소와 이산화탄소의 함량에 의해서 결정되며 그 크기는 ±0.2% 정도에 불과함을 알 수 있다.

이러한 이론적 편차가 실제로 현장 조건에서 유지되는지 확인하기 위해 현장 데이터를 수집·분석하였다. 대

Table 3. Compositions of test gases sampled at high pressure supplying pipeline of Pyong-Taek LNG terminal.

Test gas	CH ₄ (mol%)	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	^t Specific gravity
Gas A	90.0160	5.6320	2.9420	0.6510	0.6620	0.0070	0.0000	0.0900	0.0000	0.630900
Gas B	90.067	6.1380	2.5920	0.5670	0.5590	0.0130	0.0010	0.063	0.0000	0.627242
Gas C	89.212	8.2619	1.8857	0.2852	0.3242	0.0122	0.0018	0.0108	0.0003	0.622945

^tSpecific Gravity is not a component of NG, but is calculated by gas analyser from gas compositions.

Table 4. Comparison of heating value predictions between SGERG and GPA 2172 for test gases.

Test gas	Heating value from gas analyser (A) (kcal/m ³)	Heating value from SGERG (B) (kcal/m ³)	Deviation (%) (B/A-1)×100
Gas A	10631.594	10629.283	-0.022
Gas B	10582.601	10579.637	-0.028
Gas C	10529.626	10524.550	-0.048

상 공급소는 중동공급소로서 발전소 공급 계량설비에 가스분석기(HP 5890)와 비중계(Solatron NT 3096)가 설치되어 있다. Fig. 3-(a), (b)는 공급 가스의 비중과 가스 조성을 실측하여 계산한 열량값을 비교해 놓은 것인데, SGERG + 비중계 열량은, 실측한 비중과 질소 및 이산화탄소의 함량을 0.08%, 0.00%로 하여 계산한 값이며 가스분석기 열량은 이 기기에서 계산된 열량을 나타낸다. 그리고 가스분석기 열량이 1시간 동안 일정한 것은 분석 주기가 1시간이기 때문이다. 시험시간 동안 이산화탄소의 함량은 0.00%로 일정했고 질소 함량은 Fig. 3-(a)의 경우 0.00~0.02%, Fig. 3-(b)는 0.08~0.10% 정도 되었다.

그림을 살펴보면 두 방법의 열량 차이가 이론과 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 3-(a)에서 대체로 -0.1% 정도의 편차가 나타나는 것은 SGERG 식에 쓰인 질소 함량이 실제 함량보다 각각 0.06~0.08% 많은 데서 비롯된 것으로 보인다. 약간의 편차 등락 폭은 두 기기의 재현 불확도 범위 안에 충분히 들어오기 때문에 문제되지 않는다. Fig 3-(b)는 실제 질소 함량과 고정값의 차이가 0.02% 이내 일 때의 열량을 비교한 것인데 ±0.05% 이내로 두 열량값이 일치하고 있다.

따라서 이 두 현장 결과로부터 가스분석기 열량과 SGERG + 비중계의 열량 차이는 질소 함량에 따른 불확도 증가분(±0.2% 이내) 외에는 없는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 경제적인 열량산정 방법의 하나인 SGERG 방정식과 비중계를 사용하는 방법의 타당성 분석을 하였다. 이를 위해 SGERG식을 열량식으로 변경하고 이 식의 불확도를 확인했으며, 또한 열량산정에 필요한 비중, 이산화탄소, 질소의 산정 방법도 검토하였다. 또한 현장 데이터를 통해 이 방법의 타당성도 검토하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. SGERG 식의 열량계산 불확도는 대략 ±0.1% 이내인 것으로 분석되었다.
2. 열량계산에 필요한 질소와 이산화탄소의 함량은 실측값 대신 고정값을 사용할 수 있는 것으로 분석되었다. 현재 공급되는 천연가스 내 이들 함량이 상당히 적어서 적정 고정값만 사용하면 예상되는 불확도 증가분은 -0.11~+0.17% 정도에 불과하기 때문이다.
3. 실제 현장 자료를 분석한 결과 SGERG + 비중계와 가스분석기 열량 차이를 질소와 이산화탄소의 함량에 의한 불확도인 ±0.2%(-0.11~+0.17%) 이내로 유지할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 방법을 사용하면 고가의 가스분석기를 사용하지 않고도 가스분석기와 유사한 불확도의 열량값을 산정할 수 있다고 결론 지을 수 있다.

사용기호

- $B_{i,j}$: 성분 i 와 성분 j 의 상호작용 비리얼 계수, $i = N_2, CO_2$; $j = N_2, CO_2$ (CH를 제외한 N_2, CO_2 에 한함)
- B_{mix} : 혼합가스의 2차 비리얼계수 [$m^3/kmol$](계산방법은 AGA 8 참조)
- C_{mix} : 혼합가스의 3차 비리얼계수 [$m^6/kmol^2$](계산방법은 AGA 8 참조)
- G_1 : -2.709328
- G_2 : 0.021062199
- G_i : 비중(혼합가스 기준밀도 ÷ 공기 기준밀도)
- H_{CH} : 등가탄화수소의 고위발열량[MJ/kmol], $H_{CH} = H_{CH} [25^\circ C, V(T, P)]$
- H_N : 25 deg · C의 몰당 발열량[MJ/kmol]
- H_V : 온도 T에서 천연가스의 단위 체적당 고위 발열량 [kJ/m^3]
- M_i : 천연가스의 몰질량 [$kg/kmol$]
- M_n : 성분 i 의 몰질량, $i = N_2, CO_2, CH$ [$kg/kmol$]
- $M_{r(air)}$: 공기의 몰질량(=28.96256 $kg/kmol$)
- P : 절대압력[kPa]
- R : 일반가스상수[8.31451 $kJ/kmol-K$]

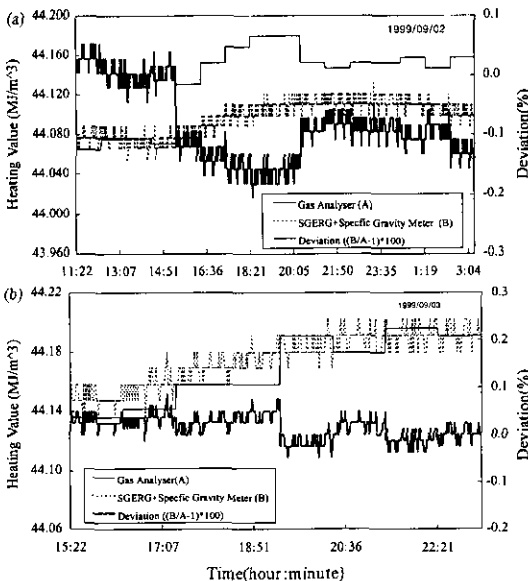


Fig. 3. (a) Comparison of heating value predictions between SGERG + SG meter and gas analyser (99/9/2, Jungdong Metering Station), (b) Comparison of heating value predictions between SGERG + SG meter and gas analyser (99/9/3, Jungdong Metering Station).

T : 절대온도[Kelvin]
 U_{th} : 열량의 불확도
 U_z : 압축계수의 불확도
 X_i : 성분 i 의 몰분율, $i = N_2, CO_2, CH$
 Z_b : 기준 조건에서 천연가스의 압축계수
 $\rho_{b(air)}$: 기준 조건에서 공기의 질량밀도, $[kg/m^3]$
 θ : 상대민감도

아래첨자

air : 공기
 b : 기준 조건
 CH : 등가 탄화수소(질소, 이산화탄소 등을 제외한 천연가스내 탄화수소)
 CO_2 : 이산화탄소
 mix : 혼합가스
 N_2 : 질소

ISO 12213-3 (1997).

2. "Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases", AGA Report No. 8 (1994).
3. "Measurement of Fluid Flow-Evaluation of Uncertainties", ISO/TR 5168 (1998).
4. "일일공급량일보", 한국가스공사 (1999).
5. 이강진, 허재영, 하영철, 안승희, 이승준: "기준밀도계와 가스분석기에 의한 계산밀도와의 정확도 비교연구", 한국가스공사 보고서, 98-KA-FM-수시-303-00 (1999).
6. 이강진, 장승룡, 이철구: "기준밀도계 운영방안에 관한 연구", 한국가스공사 보고서, 97-KA-FM-수시-182-00 (1997).
7. "Calculation of Gross Heating Value, Relative Density and Compressibility Factor for Natural Gas Mixtures from Compositional Analysis", GPA Standard 2172 (1998).

참고문헌

1. "Natural Gas-Calculation of Compression Factor",