



상거래용 천연가스 품질 측정 시스템의 정확도 관리 및 평가

윤은규 · †이강진

한국가스공사 가스연구원

(2023년 12월 1일 접수, 2024년 7월 24일 수정, 2024년 7월 29일 채택)

Accuracy Management and Evaluation of Natural Gas Quality Measurement System for Custody Transfer

Eun-Gyu Yun · †Kang-Jin Lee

Korea Gas Corporation(KOGAS) Research Institute, Incheon 21993, Korea

(Received December 1, 2023; Revised July 24, 2024; Accepted July 29, 2024)

요약

본 연구에서는 전국 천연가스 공급수급지점(한국가스공사 공급관리소)에서 천연가스 품질 측정에 사용 중인 온라인 가스분석기를 대상으로 측정 정확도를 평가하고, 2012년 '도시가스 열량거래제도' 시행 이후 천연가스 상거래에 사용되고 있는 발열량 측정 결과의 유효성을 확인하고자 하였다. 가스분석기의 측정 정확도는 기준 시험소와의 비교 숙련도 시험 방식으로 2013년부터 연 1회 정기 평가하고 있으며, 전체 시험 결과에 대한 통계분석을 통해 천연가스 거래용 가스분석기의 측정관리능력 및 결과의 신뢰성을 검증하였다. 평가 결과, 대부분의 시험에서 개별 성분 농도와 발열량 측정값이 ISO 13528 및 ISO/TR 14749에 따른 평가기준을 만족하며 기준시험과 통계적으로 일치하는 결과를 보여주었다. 결론적으로, 체계적인 성능 관리를 통해 가스분석기의 측정 정확도가 이론적으로 허용 가능한 범위 내에서 적절한 수준으로 유지되고 있으며, 상거래용 천연가스 품질 측정 시스템의 신뢰성이 확보되고 있음을 확인하였다.

Abstract - This study aims to evaluate the measurement accuracy of on-line natural gas analyzers operated to measure the quality of natural gas at gas supply points in Korea and verify the validity of the calorific value results used in gas trading after the implementation of the energy content-based national gas trading system in 2012. The measurement accuracy of the gas analyzers has been evaluated annually since 2013 through proficiency testing conducted by interlaboratory comparison. All test results were analyzed statistically to verify the measurement management capability and reliability of the measurement results of the gas analyzers for custody transfer. The evaluation results showed that in most tests, the concentration of individual components and calorific values satisfied the evaluation criteria according to ISO 13528 and ISO/TR 14749, demonstrating statistical agreement with the reference testing. It was confirmed that the measurement accuracy was appropriately maintained within the theoretically possible limits through systematic performance management, ensuring the reliability of calorific value measurements used in natural gas transactions.

Key words : natural gas quality, calorific value, on-line GC, natural gas analyzer, measurement accuracy, performance evaluation, custody transfer

†Corresponding author: kjlee@kogas.or.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

2012년 ‘도시가스 열량거래제도’ 시행으로 국내 천연가스 상거래 단위가 열량단위(MJ)로 일원화됨에 따라 한국가스공사(이하 KOGAS)는 전국 천연가스 공급수급지점(공급관리소)에 공정용 온라인 가스분석기(On-line GC, 이하 가스분석기)를 설치하고 지역 도시가스사 및 발전소에 공급하는 천연가스의 품질을 측정·관리하고 있다.

가스분석기는 배관에 흐르는 천연가스의 조성을 실시간 자동 분석하는 온라인 가스 크로마토그래프(Gas Chromatographs, GC) 장비로, 조성 데이터로부터 발열량, 웨버지수, 압축인자, 상대밀도 등 천연가스의 계량과 품질 관리를 위한 주요 물성값을 자동 산출하는 기능을 포함하고 있어 천연가스 거래 시장에서 매우 중요하게 활용된다. 특히 가스분석기로 순시 측정되는 천연가스의 발열량은 거래 열량 산출을 위한 핵심요소인 만큼 가스분석기의 측정 정확도 관리 는 천연가스 거래의 신뢰성 측면에서 필수적으로 요구되는 사항이다. 천연가스의 거래 에너지량(E , MJ)은 Fig. 1과 같이 공급되는 가스의 총 부피량(Q , m^3)과 단위 부피당 발열량(H , MJ/m^3)의 곱으로 결정된다. 이때 천연가스의 발열량은 ISO 6976[1]에 따라 식 (1)과 같이 계산된다.

$$H = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \times H_i^0}{Z_{mix}} \quad (1)$$

여기에서, H 는 실제 가스의 단위 부피당 발열량이며, x_i 는 개별 성분 가스의 농도(몰분율), H_i^0 는 순수 가스의 단위 부피당 발열량, 그리고 Z_{mix} 는 가스의 압축인자이다.

현재 KOGAS 배관망에서 천연가스 품질 측정을 위해 설치·운영 중인 가스분석기는 전국적으로 약 200여 대에 이른다. 이 중 미국 Emerson사의 가스분석기 모델이 전체의 절반가량을 차지하며 스위스 ABB사와 독일 RMG사 모델이 각각 20% 정도씩 운영되고 있다. 그 외 독일 Elster와 Siemens사의 모델도 일부 사용 중이다. Table 1은 KOGAS 공급관리소와 생산기지에서 사용되고 있는 제조사별 가스분석기 모델 내역이다.

가스분석기는 천연가스 도매 비용뿐 아니라 최종 소비자에게 부과되는 가스 요금 책정에 결정적인 기여를 하는 장비인 만큼 성능 정확도에 대한 적절한 유지·관리는 무엇보다 중요하다. KOGAS 각 사업소에서는 관련 기술 표준에 의거한 자체 정도관리를 통해

Table 1. List of on-line GC models operated in KOGAS gas network

Manufacturers	Model names
Emerson	Rosemount 370/500/700 series
ABB	NGC 8206
RMG	PGC 9000 series
Elster	EnCal 3000
Siemens	Sitrans CV

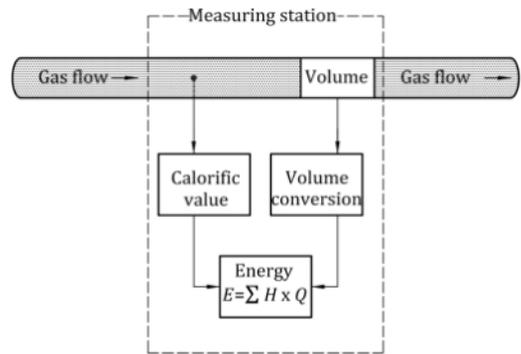


Fig. 1. Energy determination by on-line calorific value(H) measurement (ISO 15112[2]).

지속적인 성능 관리를 수행하고 있지만, 측정 결과에 대한 품질 보증 및 대내·외 신뢰성 확보를 위해 보다 객관적이고 종합적인 평가·감시 시스템이 추가적으로 요구된다. 이에 따라 KOGAS 가스연구원에서는 천연가스 항목에 대해 KOLAS 국제공인시험기관으로 전문 시험자격을 인정받고(KT548, 2012. 12.), 가스분석기 성능 정확도에 대한 제3자 검증 시험인 ‘가스분석기 정확도 시험’을 연 1회 정기 실시함으로써 공급 천연가스에 대한 품질 측정 능력을 지속적으로 유지·강화하는 데 기여하고 있다.

본 연구에서는 열량거래제 시행 이후 현재까지 실시된 가스분석기 정확도 시험의 누적 데이터 분석을 통해 KOGAS의 천연가스 품질 측정 관리 능력을 종합적으로 평가하고 천연가스 거래에 사용되는 발열량 측정 결과의 신뢰성을 확인하고자 하였다.

II. 연구방법

2.1. 시험대상 장비 및 평가항목

가스분석기 정확도 시험은 KOLAS 공인시험기관(KOGAS 가스연구원)을 기준 시험소로 하여 가스분

Table 2. Number of on-line GC accuracy testing

Year	2013	2014	2015	2016	2017
n	145	156	156	157	165
Year	2018	2019	2020	2021	2022
n	183	190	191	192	200

Total number of tests over 10 years: 1,735

석기의 측정 능력을 평가하는 비교 속련도 시험[3]이다. 동일 시험가스에 대하여 현장 가스분석기와 유효성이 확보된 기준시험 간의 결과 비교를 통해 상대 정확도를 평가하였다. 전국 공급관리소와 생산지에서 가스 품질 관리 및 상거래 용도로 운영되고 있는 가스분석기 전량을 대상으로 하며, 시험주기는 연 1회이다. 연간 시험 수량은 Table 2와 같이 2013년 145대에서 공급관리소 신설에 따라 2022년 200대까지 확대되었으며, 10년간 누적 시험 수량은 총 1,735건에 달한다[4].

평가 항목은 가스분석기의 조성 및 발열량 측정값이며, 특히 천연가스 거래에 직접적으로 사용되는 발열량에 대해서는 평가 기준 불만족 시 해당 가스분석기에 대한 즉각적인 시정 조치가 이루어질 수 있도록 엄격한 관리를 수행하였다. 최종 발열량 산출을 위한 각 개별 성분의 농도 측정값에 대해서도 기준시험과의 일치성을 확인하고 성능 정확도를 종합 점검함으로써 측정 품질 관리에 활용하였다.

2.2. 시료채취 및 시험방법

가스분석기는 ISO 10715[5]에 따라 배관에 흐르는 천연가스를 분석기로 직접 도입하는 직접 샘플링(Direct sampling) 방식으로 시료를 채취한다(Fig. 2 참조). 반면 기준시험에서는 배관 가스를 별도의 저장 용기에 채취하여 오프라인으로 분석하는 간접 샘플링(Indirect sampling) 방법을 사용하며, ISO 10715의 천연가스 샘플링법 중 진공 실린더법(Evacuated cylinder method)을 준용하였다(Fig. 3 참조). 시료 용기는 특수 내면 처리된 알루미늄 고압가스 실린더(6L 또는 10 L)를 10⁻⁷ kPa 수준까지 고진공 처리 후 사용하였다. 고압 유동 조건의 천연가스 배관 특성상 샘플링 시점의 차이에서 기인하는 시료의 불균질성을 최소화하기 위해 가스분석기에 시료가 주입되는 동시에 기준시험용 가스를 샘플링 하였다. 가스분석기의 직접 샘플링 방식에서 시료는 분석이 완료된 즉시 배출되기 때문에, 배관 가스가 계속 흐르는 상태에서 동일 시료에 대한 반복 측정은 어렵다. 가스분석기는 비교적 빠른 분석 시간(4분 내외)을 갖지만 흐름 배관 조건에

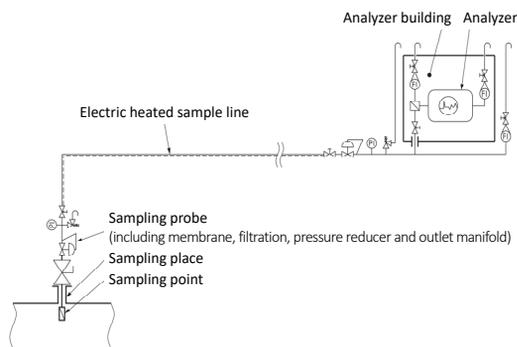


Fig. 2. Schematic diagram of On-line GC direct sampling system (ISO 10715).

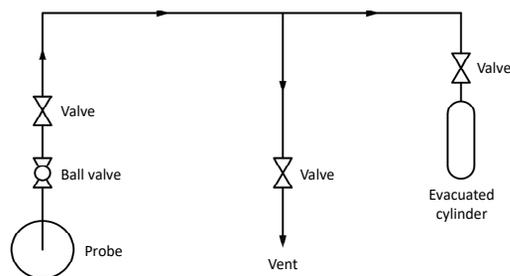


Fig. 3. Schematic diagram of evacuated cylinder method (ISO 10715).

서는 분석주기 동안 배관 가스의 변동 가능성이 충분히 존재하므로 기준시험 샘플링 시점의 단일 측정값을 대상으로 평가를 수행하였다.

기준시험에 사용된 장비는 ISO 6974-5[6] 및 GPA 2261[7]에 따라 천연가스 일반 조성 분석용으로 설계된 실험실용 가스 크로마토그래프(이하 Lab GC)이다. Agilent사의 7890A GC 모델로 열전도도 검출기(Thermal conductivity detector, TCD)를 사용하였으며, 6구(six port) 및 10구(ten port) 스위칭 밸브(Switching valves)를 통해 4개의 충전 분리관(Packed columns)을 복합 구성함으로써 다성분 동시 분석이 가능하도록 하였다. 시료의 주입은 가스 샘플링 밸브(Gas sampling valves, GSV)를 이용한 자동 주입 방식으로 1 mL 용량의 샘플 루프(loop)를 사용하였으며, MFC(Mass flow controller)를 통해 100 mL/min의 일정한 유량으로 시료가스를 주입하였다. 분석에 사용된 표준가스는 국가표준기관인 한국표준과학연구원에서 시료가스와 유사한 조성 범위로 정밀 제조(불확도 CH₄ 0.1 % 급)된 천연가스 인증표준물질(Certified Re-

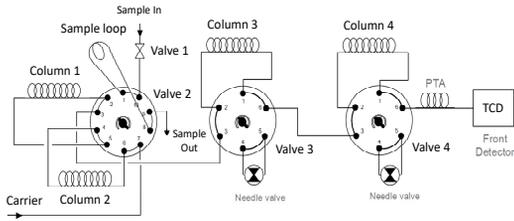


Fig. 4. Configuration of analytical equipment for laboratory GC according to ISO 6974-5 and GPA 2261: Multi-column system with switching valves.

Table 3. Analytical conditions of the Lab GC

Parts	Analytical Conditions
Method	ISO 6974-5, GPA 2261
Equipment	Agilent 7890A GC
Detector	TCD, 150 °C
Columns	Packed columns, inert steel Column 1: DC200/500, 2.0 m, 1/8" Column 2: DC200/500, 4.6 m, 1/8" Column 3: HayeSep P, 3.6 m, 1/8" Column 4: Molsieve 13X, 3.0 m, 1/8"
Valves	Valve 1: sample introduction on/off valve Valve 2: gas sampling and back-flush valve Valve 3: swithing the flow path for column 3 Valve 4: swithing the flow path for column 4 Valve box 100 °C
Carrier gas	99.999 cmol/mol He, 27 mL/min
Oven	90 °C isothermal, 25 min
Injection	GSV with 1 mL Sample loop Sample flow: 100 mL/min(MFC)

ference Materials, CRM)이다. Lab GC의 분석장치 구성은 Fig. 4와 같으며 상세 분석조건은 Table 3에 나타내었다.

진공 실린더에 채취한 시료가스는 위 분석조건으로 3회씩 반복 분석하여 식 (2)에 의해 개별 성분의 농도를 정량하였다.

$$x_i = A_i \times \frac{1}{RF} \quad (2)$$

여기에서 x_i 는 각 개별 성분의 농도(몰분율)이며, A_i 는 성분별 기기 감응값(피크 면적)의 평균이다. RF 는

동일한 분석조건에서 표준가스(CRM)를 분석하여 얻은 기기 감응계수(Response factor)로, 표준가스 성분별 농도와 감응값(피크 면적)에 대한 검정곡선의 기울기를 나타낸다. 이때 표준가스는 분석 기간 동안 발생할 수 있는 기기 변동성(Drift)을 보정하기 위해 시료 분석 직전과 직후에 각각 3회씩 반복 분석한 다음, 6회의 표준가스 감응값을 총 평균하여 감응계수를 구하였다. 시료가스의 최종 발열량은 분석된 전체 성분 농도를 정규화(Normalization)한 후 ISO 6976에 따라 별도 계산하였다(식 (1) 참조).

개별 성분 농도와 발열량에 대한 측정 불확도는 ISO GUM[8]의 절차를 준용하여 식 (3)과 식 (4)에 따라 산정하였다[9].

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u(x_i)^2} \quad (3)$$

$$U = k \times u_c(y) \quad (4)$$

여기에서 $u_c(y)$ 는 측정값의 표준불확도인 합성표준 불확도이며, 요인별 표준불확도 $u(x_i)$ 를 불확도 전파 법칙에 따라 모두 합성하여 구한다. U 는 확장불확도로 신뢰수준에 따른 측정값의 추정 범위를 나타내며, 합성표준불확도에 포함인자 k 를 곱하여 결정된다. 본 연구에서는 신뢰수준 약 95 %, $k = 2$ 에서 성분별 농도 및 발열량 측정값에 대한 확장불확도(U)를 산출하였다.

2.3. 측정 정확도 평가방법

(1) 발열량의 측정 정확도

현장 가스분석기가 기준시험과 동일한 발열량 결과를 나타내고 있는지 확인하기 위해 ISO 13528[10]의 비교 속도도 시험 통계기법 중 En 값(En value)과 백분율 차이(Percent difference, $D\%$)를 통한 상대 정확도 평가를 실시하였다.

En 값은 측정 시스템의 성능을 객관적으로 평가하는데 사용되는 중요한 지표로, 측정 불확도를 고려하여 정확도를 정량화한다. 이 값은 "Normalized Error", 즉 정규화된 오차(차이)를 의미하며, 식 (5)와 같이 측정값과 기준값 간의 차이를 각각의 불확도로 정규화함으로써 산출된다.

$$En = \frac{x - X}{\sqrt{U_x^2 + U_X^2}} \quad (5)$$

여기에서 x 는 가스분석기의 발열량 측정값, X 는 기준시험의 발열량 측정값(즉, 기준값)이며, U_x 와 U_X 는 각 측정값의 불확도(확장불확도)를 나타낸다. 이 식

에서 분자는 측정값과 기준값의 차이, 분모는 각각의 불확도를 합성한 전체 불확도를 의미하며, 불확도 범위 내에서 두 값의 차이를 평가한다. 본 연구에서 기준값의 불확도는 매 분석 시마다 산출하였으며, 가스분석기의 측정 불확도는 관련 선행 연구[11][12]를 통해 도출된 결과(상대 확장불확도 0.2 %)를 적용하였다. 일반적으로 En 평가에서 임계값은 1.0을 사용하여 $|En| \leq 1.0$ 일 때 만족, $|En| > 1.0$ 일 때 불만족으로 평가된다. 즉, En 절대값 1 이하일 경우 측정값과 기준값의 차이는 통계적으로 유의미하지 않으며, 측정 불확도를 고려할 때 기준값과 잘 일치한다고 판단할 수 있다. 따라서 En 기준 만족 시 가스분석기의 측정 정확도는 허용 범위 내에서 적절하게 유지되고 있다고 평가하였다.

백분율 차이($D\%$)는 기준값에 대한 측정값의 상대적인 편차를 백분율로 표현한 지표로, 식 (6)과 같이 계산된다.

$$D\% = 100(x - X)/X \quad (6)$$

여기에서 x 는 가스분석기의 발열량 측정값, X 는 기준시험의 발열량 측정값(즉, 기준값)을 나타낸다. En 값과 달리 측정 불확도가 고려되지 않고 통계적 해석이 제한적이지만, 측정값의 상대적인 편차를 직관적으로 이해하는 데 도움이 된다. 백분율 차이에 대한 평가는 가스분석기 운영 및 성능 관리 지침을 규정하는 ISO/TR 14749[13]를 준용하여 허용기준 $\pm 0.2\%$ 로 설정하였다. 평가 결과에서 En 값과 백분율 차이가 각각의 허용기준을 모두 만족하는 경우 해당 가스분석기의 측정 정확도가 적합한 것으로 최종 판정하였다.

(2) 개별 성분 농도의 측정 정확도

가스분석기의 개별 성분 농도 측정값에 대해서는 상관관계 분석과 측정 편차(bias) 분석을 통해 기준시험 결과와의 일치도를 확인하였다.

상관관계 분석은 두 측정법 간의 성분별 농도 분포 추세 및 상관성 파악을 목적으로 하며, 피어슨 상관계수(Pearson's correlation coefficient, r)를 통해 평가하였다. 피어슨 상관계수는 두 변수 간의 선형적 관련성을 파악하는 지표로 식 (7)과 같이 계산된다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

Table 4. Reproducibility criteria (ISO/TR 14749)

Component (cmol/mol)	Absolute difference (cmol/mol)
$x < 0.1$	0.02
$0.1 < x < 1.0$	0.07
$1.0 < x < 5.0$	0.10
$5.0 < x < 10.0$	0.12
over 10.0	0.15

이 식에서 분자는 두 변수(x, y)의 공분산, 분모는 각 변수의 표준편차의 곱으로, 공분산을 표준화하여 +1과 -1 사이의 값으로 계산된다. r 값은 +1에 가까울수록 두 측정법 간의 결과가 서로 밀접한 양의 상관관계를 갖는다고 해석된다. 두 값이 강한 상관성을 나타낼 경우 관측치 대부분이 선형 추세선(trend line, $y = ax + b$)에 근접하게 되는데, 만일 이 선이 원점을 지나 45도 대각선($y = x$)이라면 두 측정값은 상관성과 일치성을 모두 갖는다고 표현할 수 있다. 이 방법은 측정값 간의 상호 일치 관계를 시각적으로 판별하기에 용이하지만 일치도에 대한 정량적 평가가 어렵고 측정값 차이가 작은 경우에는 불일치 수준을 구분하기 쉽지 않을 수 있으므로 이를 보완하기 위해 측정 편차 분석을 추가적으로 수행하였다.

측정 편차 분석에서는 가스분석기와 기준시험 간의 성분별 측정값 차이 분포를 통해 일치성을 평가하고 기기 성능 및 측정 품질 관리를 위한 중요 정보를 도출하고자 하였다. 측정값 평균(참값의 추정치, $(x + X)/2$)에 대한 측정값 차이($d = x - X$)를 산점도 그래프로 나타내고 측정값 크기에 따른 불일치 정도 및 분포 양상을 확인하였으며, 전체적인 편향 특성을 바탕으로 특정 성분에서 일관되게 나타나는 과소·과대 측정 경향을 파악하였다[14]. 측정값 간의 일치도는 Table 4와 같이 ISO/TR 14749에 규정된 가스분석기 재현성 기준에 따라 평가하였다. 이 기준은 가스분석기 간의 측정 재현성 평가를 목적으로 하고 있어 샘플링 및 측정방법이 다른 두 결과의 직접 비교 기준으로는 다소 과도한 측면이 있으나, 천연가스 조성 분석방법의 상대 정확도 평가를 위한 좋은 참고 기준으로 활용이 가능하다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 발열량의 측정 정확도

2013년부터 2022년까지 수행된 전체 가스분석기

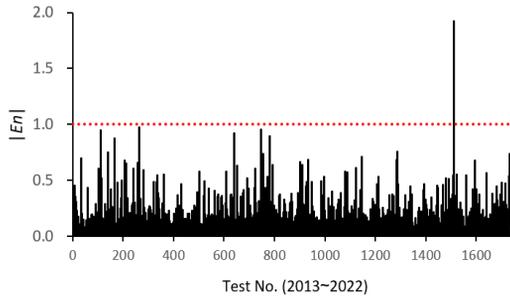


Fig. 5. En values for calorific values. The testing numbers(2013-2022) are plotted on the x-axis, absolute En values on the y-axis, with the red dotted line marking the $|En|$ acceptance limit.

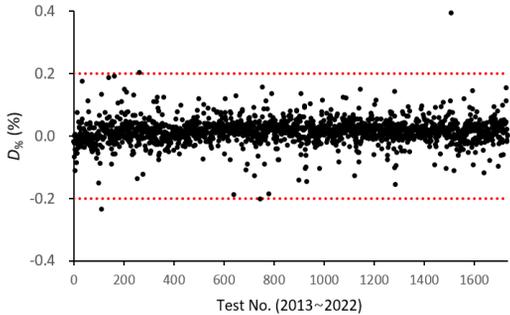


Fig. 6. Percent differences for calorific values. The testing numbers(2013-2022) are plotted on the x-axis, the percent differences($D_{\%}$) on the y-axis, with the red dotted line marking the $D_{\%}$ acceptance limit according to ISO/TR 14749.

정확도 시험의 발열량 평가 결과를 Fig. 5, Fig. 6 및 Table 5에 나타내었다. 10년간 실시한 1,735건의 시험 중 99.8%(1,731건)에서 En 값과 백분율 차이($D_{\%}$) 모두 평가 기준($En \leq \pm 1.0$, $D_{\%} \leq \pm 0.2\%$)을 만족하는 결과를 나타냈다. 특히 전체 시험의 97% 이상이 허용 기준의 절반 이하($En \leq \pm 0.5$, $D_{\%} \leq \pm 0.1\%$)에 해당하는 결과로 기준시험과 매우 높은 일치도를 보여주었다. 즉, 가스분석기 대다수가 지속적으로 높은 측정 정확도를 유지하고 신뢰성 있는 발열량 결과를 제공하고 있는 것으로 평가된다.

10년간의 전체 시험 기간 동안 가스분석기의 발열량 측정값이 허용기준을 불만족한 경우는 단 4건(En 1

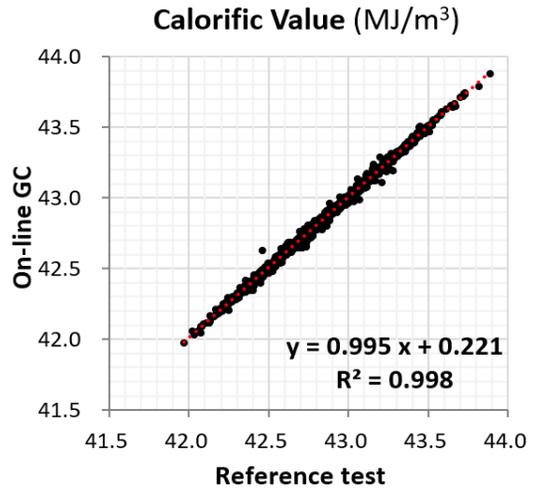


Fig. 7. Correlation with reference testing results for calorific value (2013-2022). X-axis: reference test results; Y-axis: on-line GC measurements. The red dashed line represents the linear regression trend line.

Table 5. Results of accuracy evaluation for calorific value measurements, $n = 1,735$

Classification	Number of cases	Pass rate, %
$En \leq \pm 1.0^{1)}$	1,734	99.9
$En \leq \pm 0.5$	1,705	98.3
$D_{\%} \leq \pm 0.2\%^{2)}$	1,731	99.8
$D_{\%} \leq \pm 0.1\%$	1,683	97.0

^{1) 2)} the acceptance limits

건, 백분율 차이 4건)에 불과하였다. 이 중 1건의 시험에서 En 값 1.93, 백분율 차이 0.39%로 2개 기준을 모두 크게 벗어난 불만족 결과를 보였으나, 해당 건은 장비 노후화로 교체 예정에 있던 가스분석기를 대상으로 한 시험이었으며 부적합 통보 후 신규 장비로 교체 조치가 이루어졌다. 그 외 백분율 차이 기준을 일부 초과한 나머지 3건의 경우에는 가스분석기 점검 결과 성능상의 특이사항이 발견되지 않았으며 재시험 결과에서 3건 모두 적합 상태로 확인되었다. 전체 시험 기간 동안 가스분석기 제조사 및 모델, 계절 등에 따라 나타나는 측정 특성의 차이는 확인되지 않았다.

추가적으로 발열량 측정 결과 간의 상관성을 확인

해 보기 위해 Fig. 7과 같이 기준시험과 가스분석기 측정값을 각각 X축과 Y축으로 하는 산점도 그래프 (Scatter plot)를 작성하였다.

두 측정값에 대한 산점도를 분석한 결과, 기울기 1, y-절편 0에 가까운 선형 추세선이 도출되었다. 관측치 대부분이 이 추세선과 매우 근접한 분포로 전체 측정 범위에서 높은 일치성을 보여주었다. 또한 상관계수 (r)가 0.999로 산출되어 두 측정값이 통계적으로 매우 강한 양의 상관관계를 나타내고 있음을 확인하였다.

3.2. 개별 성분 농도의 측정 정확도

개별 성분 농도에 대한 가스분석기와 기준시험 결과 간의 상관분석(Pearson correlation) 및 측정 편차 분석 결과는 Table 6과 같으며, Fig. 8과 Fig. 9에 각각의 그래프를 도시하였다.

먼저 두 측정값 간의 상관관계는 Fig. 8의 상관 그래프를 통해 분석하였다. 그래프의 X축과 Y축은 각각 기준시험 측정값(기준값)과 가스분석기 측정값을 나타내며, 모든 성분에서 상관계수(r) 0.9 ~ 1.0 범위의 높은 선형적 관련성을 보였다. 특히 천연가스 주성분인 C1 ~ C4 성분의 경우 상관계수가 0.998에서 0.999로 매우 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 상관관계의 통계적 유의성을 검증하는 유의확률(p-value)은 모든 성분에서 0에 가까운 값으로 산출되었다. 이는 두 측정값 간의 높은 상관성이 통계적으로 매우 신뢰할 만한 수준임을 의미한다. 또한, 두 값에 대한 산점도 추

세선이 기울기 1, y-절편 0의 일치도 기준선(y = x)과 거의 근접해 있어 가스분석기와 기준시험 간의 측정 농도 추세가 상호 일치하고 있는 것으로 평가된다.

측정 편차 분석에서는 Fig. 9와 같이 두 측정값의 평균을 X축, 측정값 차이를 Y축으로 한 산점도 그래프를 나타내고 ISO/TR 14749에 따른 상·하한 한계선을 표시하였으며, 이를 통해 측정값 간의 불일치 정도와 추세, 계통적 편향 특성 등을 분석하였다. 먼저 측정값 평균을 중심으로 차이 값들의 분포 양상을 살펴보면, 모든 성분에서 농도 크기에 따른 측정 차이의 뚜렷한 변동은 관찰되지 않았다. 이는 현재의 국내 천연가스 조성 수준에서는 성분별 농도의 크기가 불일치 정도에 미치는 영향이 크지 않으며 직선성이 확보되는 결과를 도출할 수 있음을 의미한다. 성분별 측정값의 차이가 ISO/TR 14749의 허용 범위를 벗어난 경우는 전체 1,735건 중 메탄 17건(1.0%), 에탄 25건(1.5%), 프로판 7건(0.4%), 질소 39건(2.3%)으로, 전체 98% 이상에서 기준 이내로 두 결과가 상호 일치하는 것으로 나타났다. 미소 성분인 부탄과 펜탄의 경우에는 측정 편차가 모든 시험에서 기준을 만족하고 있어 이론적으로 가능한 범위 내에서 측정 정확도가 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.

두 측정방식 간에 나타나는 구조적인 차이는 Y축에 대한 분포 특성을 통해 확인하였다. 이는 한 쪽에서 일관적으로 과소 또는 과대 측정되는 계통적 편향 (Systemic bias)을 파악하기 위함으로, 측정값 차이의

Table 6. Summary results of correlation and agreement between on-line GC and reference testing results for the concentration of components

Components	Conc. range(cmol/mol)			Correlation coefficient, <i>r</i>	Linear trendlines		Mean difference, \bar{d} (cmol/mol)	SD of the differences, s_d (cmol/mol)	limits* of difference. abs.($ d $) (cmol/mol)	Pass rate (%)
	min.	max.	mean		slope	y-intercept				
CH ₄	90.372	94.554	92.675	0.999	0.988	1.112	0.005	0.041	0.15	99.0
C ₂ H ₆	2.296	7.474	5.052	0.999	0.987	0.066	0.001	0.038	0.10, 0.12	98.6
C ₃ H ₈	0.542	3.570	1.475	0.999	0.995	0.007	0.000	0.017	0.07, 0.10	99.6
i-C ₄ H ₁₀	0.062	0.533	0.288	0.999	0.994	0.001	0.000	0.004	0.02, 0.07	100.0
n-C ₄ H ₁₀	0.073	0.570	0.324	0.998	1.005	0.001	0.003	0.005	0.02, 0.07	100.0
i-C ₅ H ₁₂	0.000	0.048	0.016	0.987	1.010	0.000	0.000	0.001	0.02	100.0
n-C ₅ H ₁₂	0.000	0.015	0.004	0.928	1.002	0.000	0.000	0.001	0.02	100.0
N ₂	0.000	0.437	0.165	0.966	0.956	-0.001	-0.008	0.017	0.02, 0.07	97.8

* limits according to ISO/TR 14749

상거래용 천연가스 품질 측정 시스템의 정확도 관리 및 평가

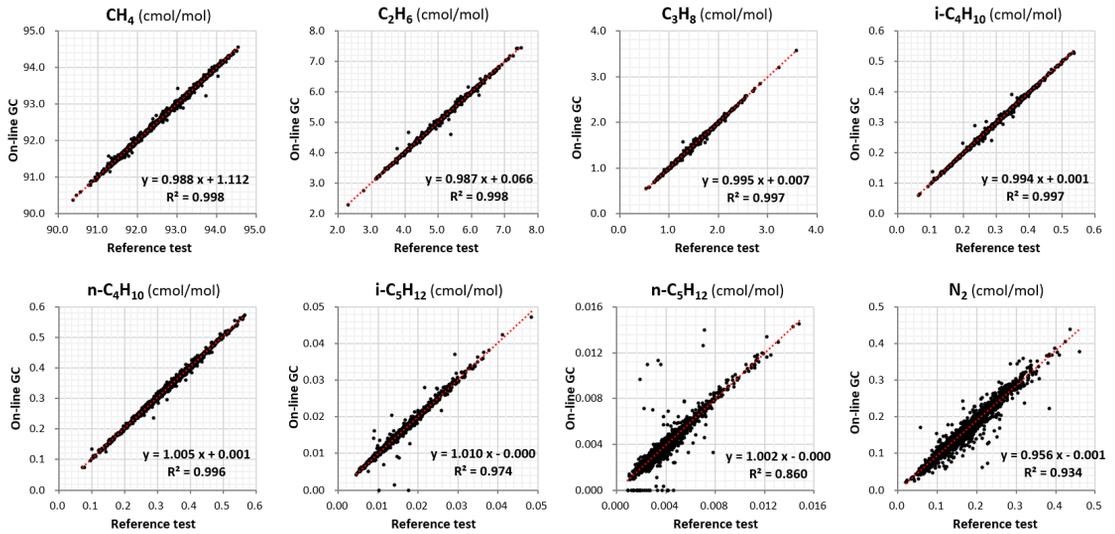


Fig. 8. Correlation analysis between on-line GC measurements and reference testing results for individual natural gas components(2013-2022; $n = 1,735$). Scatter plots display on-line GC results(y-axis) against reference testing results(x-axis), both in mole concentration. Red dashed lines represent linear regression fits. Pearson correlation coefficients(r) are provided for each component, quantifying the strength and direction of the linear relationships.

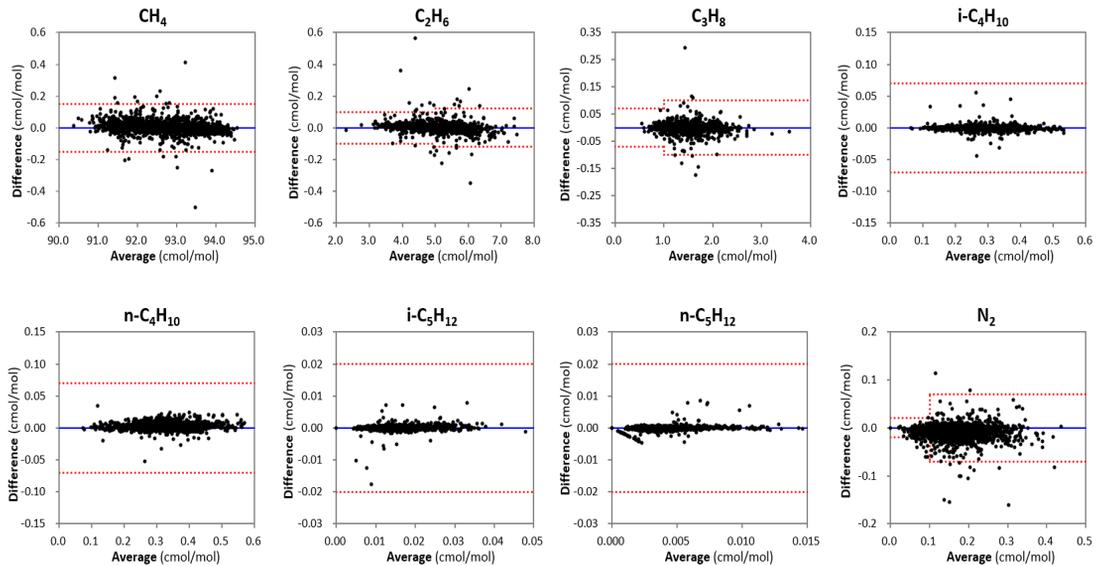


Fig. 9. Distribution of absolute differences between on-line GC measurements and reference testing results for individual natural gas components(2013-2022; $n = 1,735$). The x-axis represents the mean of paired measurements(mole concentration), and the y-axis shows their difference(mole concentration). Red dashed lines indicate the upper and lower limits according to ISO/TR 14749. Blue solid lines represent mean differences (\bar{d}), estimating measurement bias.

평균(Mean difference, \bar{d})을 정량적 지표로 활용하였다. 대부분의 성분에서 측정값의 차이, 즉 Y축 관측치가 0을 기준으로 대체로 고른 분포($\bar{d} \approx 0$)를 보여 뚜렷한 편향성을 드러내지는 않는 것으로 나타났다. 다만 질소 성분의 경우에는 농도 수준을 감안할 때 다른 성분에 비해 음의 방향으로 약간 치우쳐진 경향($\bar{d} = -0.008$)을 보이는데, 이는 현장 가스분석기에 비해 기준시험에서 질소 농도가 상대적으로 높게 측정되고 있음을 의미한다. 이러한 현상은 진공 실린더 샘플링 과정에서 발생하는 외부 공기의 영향으로 추론된다. 샘플링 작업 시에는 가스 배관에서 실린더까지 연결하는 전체 샘플링 장치를 고압의 배관가스로 압력 퍼지(Pressure purge)하는 사전 작업을 수행하지만, 장치 내부의 잔존 공기가 완전히 제거되지 않고 미량 남아 있다면 시험가스 중의 질소 농도를 증가시키는 요인이 된다. 반면 현장 가스분석기의 경우 직접 샘플링을 위한 고정식 샘플링 시스템 적용으로 공기 유입 가능성이 적고 지속적인 퍼지(Purge)가 이루어지기 때문에 기준시험에 비해 질소 농도가 상대적으로 낮게 측정되는 경향을 보인다. 질소 성분에서의 이러한 편향 특성이 두드러지는 수준은 아니지만, 기준시험을 위한 샘플링 작업 시 보다 세심한 주의가 필요하다.

IV. 결론

천연가스 상거래에 사용되는 가스분석기의 측정 성능 관리와 신뢰성 확보는 천연가스 거래의 정확성 및 공정성 제고를 위해 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 국내 천연가스 공급 및 거래에서 핵심적인 역할을 하는 온라인 가스분석기의 측정 정확도를 평가하고 그 결과를 분석함으로써 측정관리능력 및 측정 결과의 유효성을 확인하였다.

가스분석기의 측정 정확도는 KOLAS 공인시험기관(KOGAS 가스연구원)을 기준 시험소로 한 비교 숙련도 시험에 의해 연 1회 정기적으로 평가 및 관리되고 있다. 2013년부터 2022년까지 연간 145대에서 200대의 가스분석기가 평가되었으며, 10년 동안의 누적 시험 수량은 1,735건에 이른다. 평가 결과, 대부분의 시험에서 개별 성분 농도와 발열량 측정값이 평가 기준을 만족하며 기준 시험소와 통계적으로 일치하는 것으로 나타났다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 발열량의 측정 정확도 : 전체 1,735건 중 99.8% (1,731건)의 시험에서 ISO 13528 및 ISO/TR 14749에 따른 상대 정확도 평가 기준($En \leq \pm 1.0$, 백분율 차이 ($D\%$) $\leq \pm 0.2\%$)을 모두 만족하였다. 특히 97% 이상의 시험에서 En 값과 백분율 차이가 평가 기준의 절반

이내로 나타나 기준시험 결과와 높은 일치도를 보여 주었다.

(2) 개별 성분 농도의 측정 정확도 : 모든 성분에서 기준시험과 강한 양의 상관관계를 나타내며 측정법 간의 추세가 상호 일치함을 확인하였다. 기준시험과의 측정 편차 또한 전체 시험의 98% 이상에서 ISO/TR 14749의 성분별 허용기준에 부합하였다.

(3) 기타 측정 특성 : 성분별 측정 편차 분석에서 측정값 크기에 따른 불일치 양상의 변화는 관찰되지 않았으며, 대부분의 성분에서 뚜렷한 계통적 편향도 나타나지 않았다. 다만, 질소 성분의 경우 기준시험에서 가스분석기에 비해 약간 높은 값으로 측정되는 경향을 보였는데, 이는 기준시험 샘플링 시 발생하는 공기의 영향으로 파악된다. 정확도 검증 능력 향상을 위해 기준시험을 위한 샘플링 작업 시 보다 세심한 주의가 요구된다. 그 밖에 전체 시험 기간 동안 기기 제조사 및 모델 종류, 계절 등에 따른 측정 특성의 차이는 나타나지 않았으며 재현성 있는 결과를 도출하는 것으로 파악되었다.

상기 결과를 종합해 볼 때, 도시가스 열량거래제도 도입 이후 현재까지 대부분의 거래용 가스분석기의 정확도가 이론적으로 가능한 범위 내에서 적절한 수준으로 잘 유지되고 있으며 신뢰성 있는 측정 결과를 제공하고 있는 것으로 평가된다. 이는 장비의 성능뿐만 아니라 운영 및 관리 체계의 효율성도 함께 입증하는 결과로 중요한 의미를 지닌다. 가스분석기에 대한 이러한 지속적인 점검과 평가는 국내 거래용 천연가스 품질 측정 시스템의 유효성을 보증하고 측정관리능력을 유지·강화하는 데 중요한 역할을 한다. 이를 통해 천연가스 거래의 공정성을 높이고, 공급자와 소비자 간의 상호 신뢰를 공고히 하는데 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] ISO 6976, "Natural gas - Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition", (2016)
- [2] ISO 15112, "Natural gas - Energy determination", (2018)
- [3] ISO/IEC 17043, "Conformity assessment - General requirements for the competence of proficiency testing providers", (2023)
- [4] Lee, K. J., et al., "Annual Reports on the Accuracy Testing of On-line Natural Gas Analyzers and Gas Analysis", KOGAS Research Institute, (2013-2022)

- [5] ISO 10715, “Natural gas – Gas sampling”, (2022)
- [6] ISO 6974-5, “Natural gas – Determination of composition and associated uncertainty by gas chromatography – Part 5: Isothermal method for nitrogen, carbon dioxide, C1 to C5 hydrocarbons and C6+ hydrocarbons”, (2014)
- [7] GPA 2261, “Analysis for Natural Gas and Similar Gaseous Mixtures by Gas Chromatography”, (2020)
- [8] ISO/IEC Guide 98-3 “Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of the uncertainty in measurement (GUM:1995)”, (2008)
- [9] Woo, J. C., et al., “A Study on quality assurance and evaluation of uncertainty for the analysis of natural gas”, *Anal. Sci. & Tech.*, 19(6), 490-497, (2006)
- [10] ISO 13528, “Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison”, (2022)
- [11] Woo, J. C., et al., “A Study on the Improvement of Natural Gas Analysis System and Optimum Operation of Gas Chromatograph”, Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS), (2006)
- [12] Lee, K. J., et al., “Establishment of Management Guideline and System of Natural Gas Flow Measurement Facilities’ Uncertainty for International Standards”, KOGAS Research Institute, (2019)
- [13] ISO/TR 14749, “Natural gas – Online gas chromatograph for upstream area”, (2016)
- [14] Bland, J.M., Altman, D.G., “Measuring agreement in method comparison studies”, *Stat. Methods Med. Res.*, 8, 135-160, (1999)