

천연가스 주배관망 수소 혼입 대응을 위한 가스 품질 측정 체계 구축 연구

윤은규 · 이강진[†]

한국가스공사 가스연구원

A Study on Establishment of Gas Quality Measurement System for Responding to Hydrogen Blending in Natural Gas Transmission Pipeline Network

EUN-GYU YUN, KANG-JIN LEE[†]

Korea Gas Corporation Research Institute, 950 Incheonsinhang-daero, Yeonsu-gu, Incheon 21993, Korea

[†]Corresponding author :
kjlee@kogas.or.kr

Received 4 July, 2025
Revised 4 August, 2025
Accepted 6 August, 2025

Abstract >> This study investigates the limitations of existing gas quality measurement systems under hydrogen blending in natural gas transmission pipelines. Experimental analysis with 2-20% hydrogen-enriched gases revealed significant measurement errors in current analyzers, due to low hydrogen sensitivity and poor H₂-N₂ separation. Among three improvement strategies, full replacement with analyzers suitable for hydrogen blending was found most effective in terms of cost, accuracy, and stability. The study also reviews recent developments and certification cases of commercial analyzers, and proposes follow-up tasks including performance validation, uncertainty evaluation, system optimization to ensure reliable gas quality measurement under hydrogen blending.

Key words : Hydrogen blending(수소 혼입), Natural gas(천연가스), Gas quality measurement (가스 품질 측정), On-line analyzer(온라인 분석기), Gas chromatograph(가스 크로마토그래프), Custody transfer(가스 상거래)

1. 서론

전 세계적으로 탄소중립과 수소경제 활성화를 위한 정책적, 기술적 노력이 본격화되면서 기존 천연가스 배관망을 활용한 수소 혼입이 대규모 수소 운송 및 공급을 위한 현실적 방안으로 주목받고 있다. 수소 혼입은 수소 전용 배관망 건설에 소요되는 막대한 비용과 시간을 절감할 수 있으며 기존에 구축된

광범위한 가스 네트워크를 통해 수소의 광역 수송 및 안정적 공급이 가능하다는 이점을 지닌다. 실제로 유럽, 미국, 호주 등 주요 국가에서 가스 인프라를 활용한 수소 혼입 실증 프로젝트가 활발히 진행되고 있으며 대부분의 프로젝트에서 안전성, 인프라 호환성, 시장 수용성 등을 고려해 수소 혼입 목표를 최대 20%로 설정하고 실증을 확대하고 있다¹⁻⁵⁾. 국내에서도 ‘제1차 수소경제 이행 기본 계획’을 통해 천연가

스 배관망을 활용한 수소 운송 및 공급 전략을 제시하고 최대 20% 수소 혼입을 목표로 한 단계별 실증 계획을 수립하였다. 이에 따라 현재 고압 주배관망은 한국가스공사, 중저압 도시가스 배관망은 한국가스안전공사 주도로 수소 혼입의 안전성 및 호환성 검증이 추진되고 있다⁶⁻⁸⁾.

기존 천연가스 배관망에 수소 혼입을 실제 적용하기 위해서는 혼입에 따른 조성 변화에 대응 가능한 품질 측정 체계로의 전환이 필수적이다. 가스 품질의 정확한 측정은 가스 상거래의 공정성과 안정적인 공급망 운영에 직접적인 영향을 미치며 특히 조성, 발열량, 웨버지수, 밀도와 같은 품질 인자는 수요처 설비의 효율, 안전성뿐 아니라 거래 에너지량 및 가스 요금과도 밀접하게 연관된다⁹⁾. 따라서 본 연구에서는 수소 혼입이 기존 가스 품질 측정 시스템에 미치는 영향을 분석하고 신뢰성 있는 측정 체계 구축을 위한 기술적 개선 방안을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 기술 현황

2.1 국내 천연가스 공급 인프라 현황

국내 천연가스 공급 인프라는 2025년 기준 전국 총 5,206 km에 달하는 주배관망과 433개 공급 관리소를 통해 연간 약 34,500천 톤의 천연가스를 공급하는 광범위한 가스 네트워크를 구축하고 있다¹⁰⁾. 한국가스공사의 5개 liquefied natural gas (LNG) 인수기지(인천, 평택, 삼척, 통영, 제주)에서 최대 6.87 MPa의 고압 천연가스가 주배관망을 통해 각 지역으로 수송되며 공급 관리소에서 중저압으로 감압되어 지역 도시가스사와 발전소로 공급된다. 이러한 광범위한 가스 공급망을 활용할 경우 효율적이고 안정적인 대규모 장거리 수소 수송 및 공급이 가능하다.

천연가스 공급 시스템에서 정확한 가스 계량과 품질 측정은 가스 상거래의 근간이 되는 중요한 기술이다. Fig. 1과 같이 한국가스공사의 전국 정압 관리소(governor station, GS)에는 유량계, 온도 및 압력 전송기, 가스 분석기로 구성된 계량 설비(metering sys-

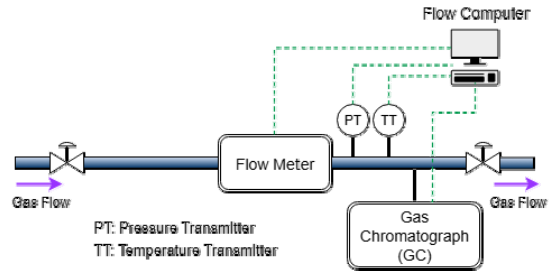


Fig. 1. Schematic diagram of natural gas metering system

tem)가 설치되어 있으며 이를 통해 수요처로 공급되는 가스의 양과 품질이 실시간 측정되어 거래 에너지량과 요금 산정에 활용되고 있다. 이 중 가스 품질 측정을 담당하는 가스 분석기는 현재 약 200대가 상거래용으로 운영 중이며 가스 조성에 대한 정밀 분석을 통해 발열량, 상대밀도, 압축계수 등 계량 및 품질 관리를 위한 주요 물성값을 산출한다.

가스 분석기의 측정 데이터는 거래 에너지량을 결정하는 핵심 요소이므로 경미한 측정 오차라도 누적될 경우 상당한 경제적 파급 효과를 초래할 수 있다. 이에 따라 전체 가스 분석기는 엄격한 정확도 기준에 따라 관리되며 국제 표준에 기반한 정기적인 성능 검증이 이루어지고 있다. 특히 천연가스 열량 거래제 시행 이후 체계적인 품질 관리 시스템을 통해 높은 수준의 측정 신뢰성이 지속적으로 유지되고 있다⁹⁾.

그러나 수소가 천연가스 배관망에 혼입될 경우 가스 품질 측정 체계를 현행 조건대로 유지하는 데에는 기술적 한계가 존재한다. 기존 가스 분석기는 천연가스 조성 분석에 최적화되어 있어 수소 성분의 정량 분석이 어렵고 수소 혼입에 따른 가스 물성 변화를 정확히 반영하지 못할 우려가 있다. 따라서 수소 혼입 환경에서도 현재 수준의 측정 정확도를 유지하는 것은 상거래 신뢰성 확보와 안정적인 수소 혼입 및 공급을 위한 선결 과제라 할 수 있다.

2.2 가스 분석기 측정 원리 및 기술적 한계

기존 천연가스용 가스 분석기는 가스 배관에 온라인으로 설치되는 공정용 가스 크로마토그래프(gas

Table 1. The thermal conductivity (k) of gases (25°C, 1 atm)

Gas components	k (W/m·K)	Gas components	k (W/m·K)
He	0.1513	CO ₂	0.0168
H ₂	0.1805	CH ₄	0.0340
Air	0.0262	C ₂ H ₆	0.0212
Ar	0.0177	C ₃ H ₈	0.0184
N ₂	0.0259	C ₄ H ₁₀	0.0167
O ₂	0.0263	C ₅ H ₁₂	0.0144

Table 2. Compositions of hydrogen-enriched synthetic test gas mixtures (unit: mol%)

Components	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
H ₂	2.0	5.0	10.0	14.9	19.7
CH ₄	90.5	87.7	83.1	78.5	74.2
C ₂ H ₆	4.89	4.75	4.50	4.30	3.97
C ₃ H ₈	1.76	1.70	1.62	1.54	1.44
i-C ₄ H ₁₀	0.29	0.29	0.27	0.26	0.24
n-C ₄ H ₁₀	0.29	0.29	0.27	0.26	0.24
i-C ₅ H ₁₂	0.020	0.019	0.018	0.017	0.019
n-C ₅ H ₁₂	0.020	0.019	0.018	0.017	0.015
n-C ₆ H ₁₄	0.099	0.099	0.090	0.089	0.080
N ₂	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13
CO ₂	0.020	0.019	0.018	0.017	0.016

Note. Relative expanded uncertainty of all components is 2% ($k=2$, confidence level approximately 95%).

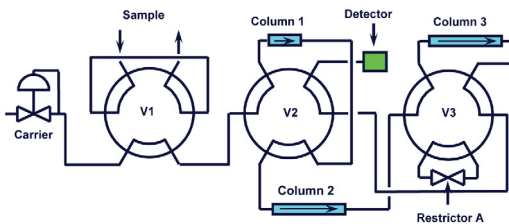


Fig. 2. Scheme of the switching valve system for natural gas analysis. Column 1 retains C₆₊ components ready for backflushing. Column 2 separates C₃ to C₅ hydrocarbons and column 3 separates N₂, C₁, CO₂, C₂

chromatograph, GC)로 열전도도 검출기(thermal conductivity detector, TCD)를 기반으로 헬륨(He)을 운반가스로 사용한다. TCD는 운반 가스와 분석 물질 간의 열전도도 차이에 감응하는 원리로 작동하는 검출기이다. Table 1과 같이 헬륨은 천연가스 성분(메탄, 에탄, 프로판 등)과 높은 열전도도 차이로 천연가스 분석에 적합하다¹¹⁾. 반면 수소의 경우 헬륨과 유사한 열전도도 특성으로 인해 TCD 감도가 현저히 저하되며 이는 수소를 포함한 천연가스 분석에서 중요한 문제점으로 작용한다.

또한 현행 가스 분석기는 ISO 6974-5 규격에 따라 3개(또는 모델에 따라 4개)의 컬럼(column, 분리관)을 스위칭 밸브 시스템으로 복합 구성하여 설계되며 전체 천연가스 성분(C₁-C₆₊, N₂, CO₂)을 5분 이내에 효율적으로 분석할 수 있도록 최적화되어 있다(Fig. 2)¹²⁾. 이러한 천연가스 전용 설계로 인하여 수소와 같은 이질적인 성분이 포함될 경우 해당 성분의 분석이 어려울 뿐만 아니라 기존 성분의 정밀한 측정에도 간섭 요인으로 작용할 수 있다.

3. 수소 혼입에 따른 가스 품질 측정 영향

3.1 시험 장비 및 가스

수소 혼입에 따른 가스 분석기 품질 측정 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 실제 수소 혼입 조건에서 기존 가스 분석기의 성능 특성을 실험적으로 검토하였다. 시험 대상 분석기는 현재 천연가스 상거래용으로 널리 사용되는 Rosemount™ 770XA GC 모델(Emerson, St. Louis, MO, USA)이며 시험 가스는 Table 2와 같이 일반 천연가스 조성 2-20 mol% 범위의 수소를 혼합하여 제조한 표준 가스 5종을 사용하였다.

3.2 수소 성분의 감응 특성

수소 혼입 시험 가스에 대한 가스 분석기 측정 특성 평가 결과 수소 성분은 질소 피크 직전에 매우 낮은 감도로 검출되었으며 비선형적인 반응 특성을 나타냈다. 특히 주목할 문제는 수소와 질소 간의 낮은 분리능(resolution)이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 두 성분 피크가 완전히 분리되지 않고 상당 부분 중

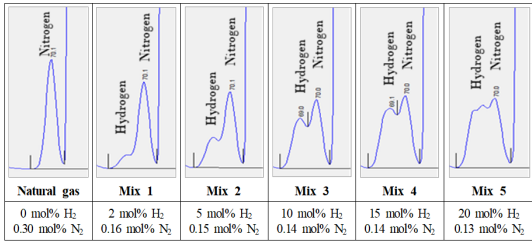


Fig. 3. Changes in hydrogen and nitrogen peaks in response to hydrogen blending in natural gas (hydrogen and nitrogen peak variations as a function of hydrogen content in the natural gas)

침되어 비정상적인 피크 형태를 보이고 있다. 이러한 분리 특성으로 인하여 수소의 정량화가 어려울 뿐 아니라 질소 성분의 정상적인 분석까지 방해하는 것으로 확인되었다.

3.3 측정 성능 변화 및 오차 분석

수소-질소 분리능 문제로 수소가 질소 피크에 일부 또는 전량 포함되면서 수소 혼합 시 질소 성분이 실제보다 과대 측정되는 것으로 나타났다. 특히 수소 20 mol% 혼합 조건(mix 5)에서는 질소 농도가 제조 농도 대비 약 260%까지 높게 측정되었다(Table 3).

Table 3. Measurement errors of raw component concentrations in test gas mixtures (unit: %)

Components	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
H ₂	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CH ₄	-0.1	0.2	0.9	1.7	2.4
C ₂ H ₆	0.0	1.0	0.3	-0.3	0.4
C ₃ H ₈	-1.4	0.3	-1.5	-0.2	-0.1
i-C ₄ H ₁₀	-0.6	-0.5	-1.0	-0.7	-1.0
n-C ₄ H ₁₀	0.5	0.1	0.6	0.6	0.8
i-C ₅ H ₁₂	0.0	-0.2	-1.5	-0.6	-2.4
n-C ₅ H ₁₂	-1.0	-2.7	-1.0	-1.4	1.7
n-C ₆ H ₁₄	-1.6	-0.9	-1.0	0.0	0.6
N ₂	63.6	101.1	45.1	56.1	258.8
CO ₂	-2.8	-5.7	-3.1	-1.8	-2.3
Sum	-2.0	-4.6	-9.2	-13.5	-17.6

Note. This table presents the measurement errors (as a percentage difference) of raw component concentrations in test gases compared to the reference (manufacturing) concentrations.

수소의 직접적인 분석 간섭은 질소 성분에만 국한되었으며 메탄, 에탄, 프로판 등 다른 천연가스 성분에서는 유의한 간섭이 관찰되지 않았다. 그러나 천연가스용 가스 분석기는 가스 물성(발열량, 상대밀도 등) 산출을 위해 분석 성분의 농도 총합을 100 mol%로 조정하는 정규화(normalization) 처리 후 최종 농도를 산출하므로 수소 및 질소의 분석 오차는 결국 다른 성분의 결과값에도 간접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 Table 4와 같이 수소 혼합률이 증가할수록 다른 성분의 농도 또한 비례적으로 증가하는 경향을 나타냈으며 수소 20 mol% 혼합 시 질소는 338.1%, 메탄과 에탄은 각각 24.2% 및 21.9%의 측정 오차를 보였다.

이러한 성분 농도 오차는 궁극적으로 발열량, 상대밀도, 압축계수 등 주요 물성값 산출에도 영향을 미쳤다. Table 5 및 Fig. 4와 같이 수소 함량이 증가할수록 발열량과 상대밀도의 측정 오차는 비례적으로 증가하고 압축계수는 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 수소 20 mol% 혼합 조건에서 발열량 및 상대밀도의 측정 오차는 각각 15.6%, 21.4%였으며 압축계수는 -0.12%의 오차를 보였다.

Table 4. Measurement errors of normalized component concentrations in test gas mixtures (unit: %)

Components	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
H ₂	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CH ₄	1.9	5.1	11.1	17.5	24.2
C ₂ H ₆	2.0	6.0	10.4	15.3	21.9
C ₃ H ₈	0.5	5.1	8.4	15.4	21.2
i-C ₄ H ₁₀	1.5	4.4	9.0	14.9	20.2
n-C ₄ H ₁₀	2.5	4.9	10.7	16.2	22.3
i-C ₅ H ₁₂	2.4	5.1	8.8	15.1	18.8
n-C ₅ H ₁₂	1.3	2.3	9.3	14.2	23.6
n-C ₆ H ₁₄	0.0	3.4	8.5	15.0	21.6
N ₂	68.0	111.8	60.7	81.6	338.1
CO ₂	-0.8	-1.2	6.5	13.5	18.5
Sum	-1.8	-4.5	-9.0	-13.3	-17.4

Note. This table presents the measurement errors (as a percentage difference) of normalized component concentrations in test gases, where the total concentration is adjusted to 100%.

Table 5. GC measurement accuracy for H₂/NG mixtures: comparison of reference values and analytical results

Test gas	H ₂ content (mol%)	N ₂ error (%)	Comp. sum error (%)	Calorific value (MJ/m ³)		CV error (%)	Relative density		RD error (%)	Compression factor		CF error (%)
				Ref.	GC		Ref.	GC		Ref.	GC	
Mix 1	2.0	68.0	-1.8	42.49	43.06	1.3	0.5987	0.6100	1.9	0.9972	0.9970	-0.02
Mix 2	5.0	111.8	-4.5	41.61	43.09	3.6	0.5828	0.6109	4.8	0.9974	0.9970	-0.04
Mix 3	10.0	60.7	-9.0	40.08	43.07	7.5	0.5555	0.6097	9.7	0.9977	0.9970	-0.07
Mix 4	14.9	81.6	-13.3	38.60	43.08	11.6	0.5294	0.6101	15.2	0.9980	0.9970	-0.10
Mix 5	19.7	338.1	-17.4	37.08	42.88	15.6	0.5023	0.6100	21.4	0.9983	0.9971	-0.12

Note. Error values represent the percentage deviation of GC analytical results from the corresponding reference values.

- Ref = reference values calculated from the known composition of each test gas mixture.
- GC = gas chromatography measured values obtained through analytical testing.
- CV = calorific value; RD = relative density; CF = compression factor.
- Comp. sum error = compositional sum error indicating the deviation from 100% total composition.
- Positive error values indicate GC overestimation; negative values indicate GC underestimation.

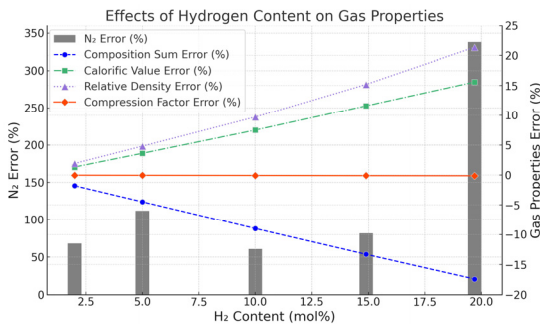


Fig. 4. Measurement errors in gas properties and nitrogen content by hydrogen blending ratio. N₂ error (left axis) denotes the percentage difference between the GC result and the certified test gas concentration. Property errors (right axis) indicate deviations from reference values calculated via ISO 6976 based on certified gas compositions

이론적으로 수소 혼입 농도가 증가하면 발열량과 상대밀도는 감소하고 압축계수는 증가하게 된다. 그러나 기존 가스 분석기에서는 수소가 정량화되지 않은 채 나머지 성분들을 대상으로 정규화 처리되므로 Fig. 5에 나타난 바와 같이 시험 가스 5종의 물성값은 혼입 농도 변화와 무관하게 거의 일정하게 측정되었다. 이는 현행 분석 체계가 수소 혼입에 따른 가스 물성 변화를 전혀 반영하지 못한다는 것을 의미한다.

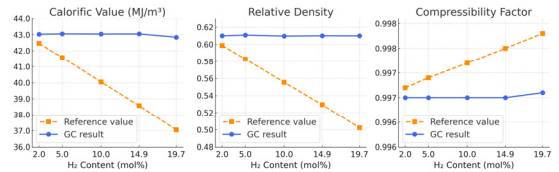


Fig. 5. Comparison of reference and GC-measured gas properties by hydrogen content

4. 수소 혼입 대응을 위한 품질 측정 시스템 개편 방안

4.1 분석 시스템 개선 방안 비교

3장에서 확인한 바와 같이 기존 천연가스용 가스 분석기는 수소 혼입 환경에서 심각한 수준의 측정 오차를 보인다. 따라서 주배관망 수소 혼입이 본격적으로 추진될 경우 혼입 영향권 내의 모든 가스 분석기는 현행 운영 조건으로 사용할 수 없으며 시스템 전면 개편이 불가피하다.

수소 혼입 가스의 정확한 품질 측정을 위해서는 다음과 같은 기술적 개선 사항이 기본적으로 요구된다.

첫째, 수소 감응도 향상을 위해 아르곤(Ar) 또는 질소(N₂)를 운반 가스로 사용하는 독립된 수소 분석 채널 구성이 필요하다. 별도의 검출기(TCD), 컬럼, 밸브 시스템에 의한 병렬 크로마토그래피 구성으로

수소의 정량 분석이 추가적으로 가능하다. 둘째, 수소-질소 간의 간섭 제거 및 분리 성능 확보를 위하여 고분리능 컬럼의 적용과 함께 밸브 스위칭 타이밍 등 분석 조건의 정밀한 조정이 필요하다.

이러한 기술적 요소를 바탕으로 수소 혼입 천연가스 분석을 위한 세 가지 시스템 개편 방안을 검토하였다.

4.1.1 1안: 가스 분석기 전면 교체

수소와 천연가스 성분을 동시 분석할 수 있는 상거래용 프로세스 가스 분석기로 전면 교체하는 방안이다. 일부 상용화 모델은 수소 20 mol% 혼입 가스에 대한 품질 분석 기능을 제공하고 있으며 기존 설비와의 호환성 또한 우수하다. 초기 투자비용은 상대적으로 높지만 분석 성능과 운영 안정성 면에서 가장 우수하며 유지 관리의 용이성 또한 확보되어 있어 최적의 개선 방안으로 평가되었다.

4.1.2 2안: 기존 가스 분석기 개조

기존 분석기의 분석 모듈(컬럼, 검출기 등)을 교체 또는 추가 구성함으로써 성분 간섭 영향을 최소화하고 수소 분석 기능을 확보하는 방안이다. 현장 업그레이드가 가능한 경우 비교적 단기간 내 조치가 가능하지만 분석 모듈의 단가가 높고 기기 상태에 따라 개조 비용이 완제품 교체 수준에 이를 수 있다. 또

한 작업 난이도가 높고 제조사 공장 반출 시 장기간 측정 공백이 불가피하며 성능 보장이 불확실하다는 점에서 현실적 제약이 크다. 따라서 기술적 조건이 충족되는 일부 사례에 한해 제한적으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

4.1.3 3안: 수소 전용 분석기 병행 설치

기존 분석기를 일부 보완하고 수소 전용 분석기를 별도로 설치하는 방안이다. 최소한의 설비 수정을 통해 기존 장비를 활용할 수 있으나 이중 시스템 운영으로 인한 공간 제약, 비용 부담, 유지 관리의 복잡성 등이 주요 한계로 지적된다. 또한 분석기 간 프로그램 연동이 필요하며 시스템 유효성이 검증되지 않아 정확도 확보에도 어려움이 있으므로 일반적인 적용에는 적합하지 않다. 다만 수소 농도 실시간 모니터링이 요구되는 설비에는 고려하여 볼 수 있다.

이러한 세 가지 방안의 주요 특징과 장단점은 Table 6에 정리하였다.

4.2 최적 개선 방안 도출

세 가지 방안에 대해 기술적 타당성과 경제성을 종합적으로 비교한 결과 1안의 신규 분석기 교체 방안이 비용 효율성, 측정 성능 보장, 장기적인 운영 안정성 측면에서 가장 효과적인 개선 전략으로 도출되

Table 6. Comparison of system upgrade strategies for gas quality measurement under hydrogen blending conditions

Category	Option 1: Full replacement of gas analyzer	Option 2: Retrofit of existing gas analyzer	Option 3: Parallel installation of hydrogen-specific analyzer
System configuration	Replace with a new analyzer capable of simultaneous NG and H ₂ analysis	Upgrade analytical channels or components of existing analyzer	Add a hydrogen-specific analyzer with partial system modification
Operating equipment	Single system (1 unit)	Single system (1 unit)	Dual system (2 units)
Carrier Gases	He + Ar (or N ₂)	He + Ar (or N ₂)	He + Ar (or N ₂)
Advantages	- Verified performance - Rapid commissioning - Easy operation and maintenance	- Reuses existing system - Faster than replacement - Partial upgrades possible	- Minimal changes to existing system - Fast H ₂ monitoring (1 minute) - NG system operable alone
Disadvantages	- High initial investment cost - Equipment removal needed - Long lead time before installation	- Requires performance verification - Inconsistent measurement quality - Increases maintenance complexity - Possible monitoring gap	- Complex system setup - Requires more space/equipment - Lower efficiency and cost-effectiveness

었다. 이 방안은 다음과 같은 주요 강점을 지닌다. 첫째, 상용화된 제품으로 실증 프로젝트를 통해 현장 적용성이 입증된 바 있다. 둘째, 기존 천연가스 분석 시스템과 유사한 운용 방식이 적용되어 운영 전환이 용이하다. 셋째, 정식 출시 제품으로 제조사의 지속적인 기술 지원 및 부품 공급이 보장되며 표준화된 유지 보수 체계를 적용할 수 있다. 마지막으로 향후 수소 혼입률 확대나 추가 성분 분석 등 측정 요구 조건 변화에 대응할 수 있는 확장성을 갖추고 있어 장기적 운용 측면에서 활용성이 높다. 따라서 국내 천연가스 주배관망의 수소 혼입 대응을 위해서는 1안의 신규 분석기 교체를 우선적으로 추진하는 것이 가장 합리적이다.

5. 기술 개발 동향 및 현장 적용성 평가

5.1 수소 혼입 대응 가스 분석기 개발 동향

전 세계적으로 천연가스 네트워크에 수소를 혼입 및 공급하려는 기술적 시도가 확대됨에 따라 이에 대응하기 위한 가스 분석기의 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이미 주요 가스 분석기 제조사에서는 기존 천연가스 전용 분석기의 기술적 한계를 보완한 수소 대응 모델을 상용화하고 있다. 본 연구에서는 국내 천연가스 주배관망에서 운용 중이거나 운용 실적이 있는 주요 공정용 가스 분석기 제조사 5곳 (Emerson, ABB, RMG, Elster, Valmet)을 대상으로 직접 인터뷰 및 기술 문헌 조사를 수행하고 수소 혼입 대응 기술 개발 현황과 상용 장비의 주요 사양을 종합적으로 검토하였다.

조사 결과 대부분의 제조사에서 수소 혼입 천연가스의 실시간 조성 분석과 물성 산출이 가능한 온라인 GC 기반 분석기를 출시하고 있는 것으로 나타났다. Table 7은 제조사별 분석기 모델과 주요 기술 사양이며 Fig. 6에 각 모델의 수소 분석 범위를 비교하였다.

본 연구에서 조사한 바에 따르면 이들 분석기는 크게 두 가지 유형으로 분류된다. 첫 번째는 기존 천

Table 7. Comparison of process GCs for H₂NG applications

Manufacturer	Model	Type	H ₂ range (mol%)	Carrier gas	Cycle (min)
Emerson	700XA 770XA	GC-TCD	0-20 (50)	He, Ar/N ₂	5-6
Emerson	470XA	GC-TCD	0-10	He, Ar	15
ABB	PGC 1000 (single)	GC-TCD	0-10 (20)	He	6
ABB	PGC 1000 (dual)	GC-TCD	0-100	He, N ₂	6
ABB	PGC 5000	GC-TCD	0-100	He, Ar	4
RMG	PGC 9304	GC-TCD	0-20	He, Ar	3-4
RMG	RGC 704	GC-TCD	0-20	He, Ar	1
Elster	EnCal 3000	GC-TCD	0-20	He, Ar	5
Valmet (Siemens)	Maxum II	GC-TCD	0-100	He, Ar/N ₂	3

Note. Table reorganized based on technical brochures and direct communications with manufacturers (2024). Parenthetical values indicate upgraded or extended configuration options. Actual specifications may vary depending on specific application requirements.

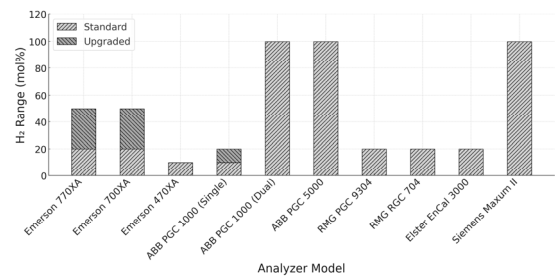


Fig. 6. Hydrogen measurement ranges of process gas analyzers for H₂NG by manufacturer and model

연가스 상거래용 분석기를 기반으로 수소 분석 기능을 확장한 모델로 770XA, 700XA, 470XA (이상 Emerson), PGC1000 (ABB, Zurich, Switzerland), PGC9304 (RMG Messtechnik GmbH, Butzbach, Germany) 및 RGC704 (RMG Messtechnik GmbH), EnCal 3000 (Elster GmbH, Mainz-Kastel, Germany)이 이에 해당한다¹³⁻¹⁷. 천연가스 주요 조성과 함께 수소 최대 10 mol% 또는 최대 20

mol%까지 동시 분석 가능한 기본 사양을 제공하며 일부 모델은 수소 50 mol% 또는 100 mol%까지 측정 범위를 확장한 업그레이드 구성도 제공되어 다양한 수소 혼입 시나리오에 대응이 가능하다. 두 번째 유형은 범용 공정 분석 플랫폼을 기반으로 수소를 포함한 다양한 조성의 혼합가스를 분석할 수 있도록 설계된 모델로 PGC 5000 (ABB)과 Maxum II (Valmet, Espoo, Finland)가 대표적이다^{18,19)}. 천연가스와 함께 수소 0-100 mol% 범위의 광범위한 분석 설계가 가능하며 분석 목적에 따라 성분별 모듈 및 검출기를 다양하게 구성할 수 있는 높은 확장성을 특징으로 한다. 다만 일반 가스 상거래용 모델에 비해 설치 공간, 운용비용, 유지 관리 측면에서 제약이 따르므로 적용 목적과 현장 여건에 따른 사전 검토가 요구된다.

5.2 국내외 적용 사례 및 인증 현황

이들 가스 분석기가 가스 배관망에서 실제 활용된 사례는 대부분 수소 혼입 실증 프로젝트를 통해 확인된다. 대표적으로 영국 HyDeploy 프로젝트에서 700XA 및 770XA가 최대 20 mol% 수소가 혼입된 천연가스의 품질 모니터링 및 혼입 비율 제어에 활용되었다. 프랑스 GRHYD 프로젝트에서는 770XA 모델이 6 mol% 수소 혼입에 대한 안전성 검증에 적용되었으며 이탈리아 Asset Readiness Project에서도 동일 모델이 2.5-10.0 mol%의 수소 혼입을 위한 파일럿 설비에 활용된 바 있다. 이외에도 헝가리 FGSZ 프로젝트, 호주 ATCO Clean Energy Innovation Hub 등 여러 수소 혼입 실증 프로젝트에서 Emerson사 가스 분석기 활용 사례가 다수 확인되었다¹³⁾. 국내에서는 PGC1000 모델이 한국가스공사 평택 LNG기지 내 수소 혼입 시험 설비에 설치되어 최대 20 mol% 수소의 고압 배관망 혼입 실증에 활용 중이다.

이들 상용 분석기들은 측정 성능에 대한 공인 기관 인증과 함께 상거래용 사용 승인을 통해 법정 계량 목적의 품질 측정에 대비하고 있는 것으로 조사되었다. 770XA 모델은 수소 최대 30 mol% 혼입 조건에서 국제 법정 계량기 기술 기준(OIML R140)에

다른 계량 적합성 인증을 획득하였다¹³⁾. PGC1000 모델은 네덜란드 국가 계량 인증 기관인 Netherlands Measurement Institute (NMI)로부터 OIML R140 및 유럽 법정 계량기 적합성 인증제도(Measuring Instruments Directive, MID) 기준에 따라 최대 10 mol% 수소가 혼합된 천연가스에 대한 조성 및 발열량 측정을 위한 시스템 적합성을 인증받았다²⁰⁾. 최대 20 mol% 수소 분석이 가능한 PGC 9304 및 RGC 704 모델(RMG)은 ATEX, EMC 등 방폭 및 전자파 적합성을 충족하여 EU 적합성 선언(EU declaration of conformity)을 통해 산업용 사용 적합성을 확보하였고 특히 RGC 704의 경우에는 독일의 국가 측정 기관인 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)로부터 형식 승인(type examination certificate)을 받아 상거래용 가스 분석기로 사용 승인까지 획득한 상태이다^{21,22)}. 또한 EnCal 3000은 ATEX, IECEx, FM, KC, EMC 등 다양한 국가 및 국제 기준에 따른 안전 및 기능 적합성 인증을 획득하였고 독일 PTB로부터 계량 인증서(metrological certificate)를 발급받아 측정 성능을 공식적으로 검증받았다¹⁷⁾.

이러한 인증은 해당 장비들이 수소 혼입 조건에서도 상거래 적용을 위한 기술적 요건을 충족함을 공식적으로 입증한 사례로 평가되며 향후 수소 혼입 천연가스의 법정 계량 및 품질 측정 체계 구축을 위한 신뢰 기반으로 활용될 수 있다.

이와 같이 수소 혼입 조건에서 가스 품질 측정에 대한 산업계 수요가 증가함에 따라 분석기의 기술 사양뿐만 아니라 실증 적용성과 인증 확보 여부 또한 중요한 고려 요소로 부각되고 있다. 따라서 향후 분석기 도입 및 적용 시에는 상용화 수준, 실증 이력, 인증 현황을 종합적으로 검토하여 현장 여건에 적합한 장비를 선택할 필요가 있다.

5.3 현장 적용을 위한 기술적 고려사항

조사된 분석기들은 대부분 기존 천연가스 상거래용 장비의 검증된 기술을 기반으로 하고 있어 기본적인 측정 성능과 운영 안정성은 확보되어 있을 것

으로 판단된다. 그러나 수소 혼입 조건에서의 장기 운영 안정성, 정밀도 및 정확도 유지, 다양한 혼입 농도 대응성 등에 대해서는 추가적인 실증 검증이 요구된다.

현재 제조사에서 공개한 기술 자료는 대부분 기본 사양 및 성능 개요 수준에 국한되어 있으며 수소 혼입 환경에서의 주요 성능 지표에 대한 정량적 데이터는 확인이 어려운 실정이다. 특히 수소 농도 변화에 따른 분석 간섭 영향, 운반 가스 이중 구성에 따른 시스템 안정성, 측정 불확도 변화 등의 요소에 대해서도 체계적인 평가가 필요하다. 또한 동일 모델이라도 분석 가스의 조성 특성이나 운영 조건에 따라 컬럼 구성, 운반가스 종류, 밸브 시퀀스 등 세부 설계 사양이 달라질 수 있으며 수소 분석 범위 확대 시 일부 천연가스 성분의 분리 및 정량 성능에 제약이 발생할 가능성도 존재한다.

가스 상거래용 분석기로 활용하기 위해서는 기존 천연가스 전용 분석기와 동등한 수준의 측정 정확도가 요구되므로 수소 혼입 조건에서도 일관된 분석 성능을 확보할 수 있는지에 대한 사전 검증이 필수적이다. 따라서 실제 도입 시에는 예상 가스 조성 범위, 목표 성능 정확도, 응답 시간 등을 고려한 기술 검토와 함께 수소 혼입률별 성능 평가, 장기 안정성 시험, 기존 시스템과의 측정 정확도 비교 등을 포함한 체계적인 실증 시험이 반드시 선행되어야 한다.

6. 향후 연구 계획

천연가스 주배관 수소 혼입에 대응하기 위한 가스 품질 측정 체계의 신뢰성 확보와 상거래 적용을 위하여 다음과 같은 후속 연구를 수행하고자 한다.

6.1 가스 분석기 성능 검증 및 분석 특성 평가

현재 수소 혼입 가스 분석과 관련된 문헌 및 제조사 제공 정보는 크로마토그래피 컬럼, 검출기 등 주요 분석 장치의 상세 설계 사양과 정량적 분석 특성에 대한 기술 자료가 매우 제한적이다. 특히 수소가

혼입된 천연가스를 대상으로 한 정밀한 성능 평가 자료가 부재하여 분석기의 측정 불확도를 정량적으로 파악하기 어려운 실정이다. 이에 따라 ISO 10723 및 ISO/TR 14749 등의 가스 분석기 성능 평가 지침에 근거하여 분리능(resolution), 감도(sensitivity), 검출 한계(limit of detection), 반복성(repeatability), 재현성(reproducibility), 직선성(linearity) 등 주요 성능 지표를 실험적으로 도출하고 기존 천연가스 분석 성능과의 정량적 비교 평가를 수행할 계획이다.

6.2 수소 혼입 농도별 정확도 및 불확도 평가

천연가스 배관망 내 수소의 혼입 농도는 공급 조건에 따라 달라지며 경우에 따라 광범위한 농도 범위를 형성할 수 있다. 이러한 운영 특성을 고려하여 수소 혼입률 0-20% 범위 내 다양한 농도 구간에서 가스 분석기의 측정 정확도와 불확도를 체계적으로 평가할 계획이다. 특히 저농도 구간(0-5 mol%)에서의 검출 안정성과 고농도 구간(15-20 mol%)에서의 성분 간섭 영향을 중점적으로 분석하여 수소 농도 변화에 따른 측정 견고성(robustness)을 확보하고자 한다. 또한 수소 농도 변동에 따른 가스 물성(발열량, 상대밀도, 압축계수, 웨버지수 등)의 불확도를 정량화하고 농도 구간별 최적 교정 주기 및 방법을 도출할 예정이다. 이를 통해 수소 공급 조건 변화에도 일관된 측정 신뢰도를 유지할 수 있는 가스 품질 관리 체계를 확립하고자 한다.

6.3 측정 시스템 최적 구성 및 운영 조건 도출

가스 배관 샘플링 시스템(프로브, 필터, 감압 장치, 이송 배관 등) 및 시료 주입 장치(밸브, 루프, 레귤레이터 등)를 포함한 전체 시스템 구성 요소에 대한 수소 적합성 및 내구성을 평가할 예정이다. 이를 바탕으로 분석기의 설치 환경 조건, 교정 방법 및 주기, 분석 절차 등 수소 혼입 가스 측정에 최적화된 운영 기술을 정립할 계획이다.

6.4 측정 결과의 소급성 확보

수소 혼입 가스 측정 시스템의 신뢰성 확보를 위하여 국가 표준 기관인 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)과의 협력을 통해 가스 분석기 교정용 인증 표준 물질(certified reference material, CRM) 확보 방안을 마련하고 측정 결과의 소급성(traceability)을 확보하고자 한다.

6.5 현장 적용성 검증 및 기술 표준화

실제 배관 환경에서의 검증 시험을 통해 수소 혼입 가스 품질 측정 시스템의 현장 적용성을 검토할 계획이다. 이를 바탕으로 수소 혼입 가스 품질 측정을 위한 표준 운영 절차(standard operating procedure)와 기술 지침을 마련하고 향후 국내 천연가스 배관망 수소 혼입 정책 추진 시 계량 기술 표준으로 활용될 수 있도록 할 예정이다.

이러한 종합적 연구를 통해 기존 천연가스 상거래용 품질 측정 시스템과 동등 이상의 정확도와 신뢰성을 확보함으로써 수소 혼입 환경에서도 가스 품질 측정의 공정성과 투명성이 보장되는 계량 체계를 구축하고자 한다.

7. 결론

본 연구에서는 천연가스 주배관망 내 수소 혼입 시 기존 가스 품질 측정 체계의 기술적 한계와 그에 따른 측정 오류를 정량적으로 분석하고 신뢰성 있는 품질 측정 체계 구축을 위한 개편 방안을 도출하였다. 수소 혼입률 2-20% 조건에서 기존 가스 분석기의 성능을 평가한 결과 수소 성분의 낮은 감응도와 수소-질소 간의 낮은 분리능으로 인하여 수소의 정량화가 불가능하며 질소를 포함한 주요 성분들의 분석 정확도 또한 크게 저하되는 것으로 나타났다. 이로 인하여 발열량, 상대밀도 등 가스 물성값의 측정 오차가 수소 혼입률에 비례하여 증가하였으며 수소

20 mol% 혼입 조건에서 발열량과 상대밀도는 각각 15.6%, 21.4%의 오차를 보였다.

이러한 문제는 단순한 컬럼 교체나 분석 조건 조정만으로는 해결이 어렵기 때문에 상거래 신뢰성을 유지하기 위해서는 측정 시스템의 전면적인 개편이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 가스 분석기 전면 교체, 기존 분석기 개조, 수소 전용 분석기 병행 설치의 세 가지 방안을 비교 분석하였으며 기술적 실현 가능성, 경제성, 운영 효율성 등을 종합적으로 고려한 결과 수소와 천연가스를 동시에 분석할 수 있는 신규 가스 분석기로의 전면 교체 방안이 최적의 개선안으로 도출되었다.

현재 주요 가스 분석기 제조사에서는 수소 혼입 분석이 가능한 상용 모델을 개발 및 공급하고 있으며 일부 모델은 공인 기관 인증을 획득하고 실증 프로젝트에 적용된 사례도 확인된다. 그러나 정확도, 정밀도 등 핵심 성능 지표에 대한 구체적 데이터는 여전히 제한적이므로 향후 후보 모델에 대한 실증 평가를 통해 성능 신뢰성을 확보하고 실제 운영 환경에 적합한 품질 측정 체계를 정립해 나갈 필요가 있다.

본 연구는 국내 천연가스 인프라 기반의 수소 혼입 실증 및 상거래 적용을 위한 기술 기반을 마련하였다는 점에서 의의가 있으며 향후 수소경제로의 전환 과정에서 신뢰성 있는 가스 품질 측정 체계 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국가스공사 가스연구원의 연구과제의 일환으로 수행되었음(과제번호: RD2023-0091, RD2024-0371).

References

1. International Energy Agency (IEA), "Global hydrogen review 2023", IEA, 2023. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.
2. US Department of Energy (DOE), "HyBlend: opportunities

- for hydrogen blending in natural gas pipelines”, DOE, 2022. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hybrid-end-opportunities-hydrogen-blending-natural-gas-pipelines>.
3. Hydrogen Council, “Hydrogen insights 2021: a perspective on hydrogen investment, deployment and cost competitiveness”, Hydrogen Council, 2021. Retrieved from <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>.
 4. K. Kanellopoulos, S. Busch, M. De Felice, S. Giaccaria, and A. Costescu, “Blending hydrogen from electrolysis into the European gas grid”, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi: <https://dx.doi.org/10.2760/908387>.
 5. Electric Power Research Institute (EPRI), “Safety considerations of blending hydrogen in existing natural gas networks”, EPRI, 2019. Retrieved from <https://www.epri.com/research/products/000000003002017253>.
 6. Ministry of Trade, Industry and Energy, “The first basic plan for the implementation of hydrogen economy”, H2KOREA, 2021. Retrieved from <https://h2hub.or.kr/main/yard/video.do?mode=view&articleNo=913&article.offset=0&articleLimit=10>.
 7. J. S. Moon, “Development of hydrogen mixing safety verification technology in natural gas piping network”, In: 2023 Annual Conference of the Korean Institute of Gas, 2023 May 25-26; Jeju, Korea, pp. 53-54. Retrieved from https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11500749&nodeId=NODE11500749&mobileYN=N&mediaTypeCode=185005&isPDFSizeAllowed=true&locale=ko&foreignIpYn=N&articleTitle=%EC%B2%9C%EC%97%B0%EA%B0%80%EC%8A%A4+%EB%B0%B0%EA%B4%80%EB%A7%9D+%EC%88%98%EC%86%8C%ED%98%BC%EC%9E%85+%EC%95%88%EC%A0%84%EC%84%B1+%EA%B2%80%EC%A6%9D+%EA%B8%B0%EC%88%A0%EA%B0%9C%EB%B0%9C+%EB%8F%99%ED%96%A5&articleTitleEn=Development+of+Hydrogen+mixing+Safety+Verification+Technology+in+natural+gas+Piping+Network&voisId=VOIS00729417&voisName=2023%EB%85%84%EB%8F%84+%ED%95%9C%EA%B5%AD%EA%B0%80%EC%8A%A4%ED%95%99%ED%9A%8C+%EB%B4%84+%ED%95%99%EC%88%A0%EB%8C%80%ED%9A%8C+%EB%85%BC%EB%AC%B8%EC%A7%91+%5B%EC%B4%88%EB%A1%9D%EC%A7%91%5D&voisCnt=185&searchResultKey=%2FIMfWK6MWZi5N74t6Fqz8Usg%2FhK71coY4sdKfWvUeQgB3DFW8eF64zPlioVGHf1&language=ko_KR&hasTopBanner=true.
 8. J. E. Kim, K. Y. Park, D. Lim, T. H. Kim, and C. H. Yu, “An analysis of overseas cases of hydrogen mixed in urban gas piping network”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 5, 2024, pp. 583-590, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.583>.
 9. E. G. Yun and K. J. Lee, “Accuracy management and evaluation of natural gas quality measurement system for custody transfer”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 28, No. 3, 2024, pp. 60-69, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2024.28.3.60>.
 10. Korea Gas Corporation (KOGAS), “Natural gas supply system”, KOGAS, 2025. Retrieved from <https://www.kogas.or.kr/site/koGas/1060103010000>.
 11. J. R. Rumble, “CRC handbook of chemistry and physics”, 10 3rd ed, CRC Press, USA, 2022, pp. 6-211.
 12. International Organization for Standardization (ISO), “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 (ISO 6974-5:2014)”, ISO, 2014. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/57080.html>.
 13. D. J. Pettigrew, “Hydrogen in natural gas - analytical considerations”, Emerson Gas Analysis, 2023. Retrieved from https://www.tuvsud.com/en-gb/-/media/regions/uk/pdf-files/event-documents/gfmw-2024/technical-papers/4-hydrogen-3-douglas-pettigrew_emerson.pdf.
 14. ABB, “PGC1000: H₂ in natural gas”, ABB, 2020. Retrieved from <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=AN%2FPCGH2&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
 15. RMG, “Process gas chromatograph PGC 9300”, RMG Messtechnik GmbH, 2021. Retrieved from <https://www.rmg.com/en/products/gas-analysis-equipment/process-gas-chromatograph-pgc-9300>.
 16. RMG, “Process gas chromatograph RGC 7”, RMG Messtechnik GmbH, 2023. Retrieved from <https://www.rmg.com/en/products/gas-analysis-equipment/process-gas-chromatograph-rgc-7>.
 17. Honeywell International, “EnCal 3000 H₂: accurate hydrogen measurement”, Honeywell International, 2019. Retrieved from <https://docuthek.kromschroeder.com/download.php?lang=de&doc=64999>.
 18. ABB, “PGC5000: process gas chromatograph”, ABB, 2017. Retrieved from <https://library.e.abb.com/public/66b54627573345bd8cd36180f9877d68/SI%20PGC5000-EN%20GEN%201%20Rev%20C.pdf>.
 19. Siemens AG, “MAXUM edition II - efficiency meets unsurpassed performance”, Siemens AG, 2023. Retrieved from <https://www.siemens.com/in/en/products/automation/process-analytics/process-gas-chromatograph.html>.
 20. Netherlands Measurement Institute (NMI), “Certification of gas chromatograph NGC 8206 or PGC1000 for the measurement of calorific value and composition of natural gases”, NMI, 2021.
 21. RMG Messtechnik GmbH, “EU declaration of conformity:

process gas chromatograph type PGC 9301, PGC 9302, PGC 9303, PGC 9304 and GC 9310”; RMG Messtechnik GmbH, 2022. Retrieved from https://static.rmg.com/31541/EU-DoC_PGC-9301_PGC-9302_PGC-9303_PGC-9304_GC-9310_2022-03-18_signed.pdf.

22. RMG Messtechnik GmbH, “EU declaration of conformity: process gas chromatograph RGC 704 (including PTB type examination certificate)”; RMG Messtechnik GmbH, 2023. Retrieved from <https://static.rmg.com/31541/EU-DoC-RGC-704-2023-07-11-signed.pdf>.