

논문

교정가스 종류에 따른 총탄화수소(THC) 측정기 농도 변화 특성 Characteristics of THC Concentration Change According to the Calibration Gases of Total Hydrocarbon Meter

이유경, 강경구, 길지훈, 김기홍, 강대일, 공부주*

국립환경과학원 대기공학연구과

Yookyung Lee, Kyounggu Kang, Jihoon Keel, Keehong Kim,
Daeil Kang, Buju Gong*

Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research,
Incheon, Republic of Korea

접수일 2026년 2월 26일
수정일 2026년 3월 18일
채택일 2026년 3월 18일

Received 26 February 2026
Revised 18 March 2026
Accepted 18 March 2026

*Corresponding author
Tel : +82-(0)32-560-7333
E-mail : bjkgong@korea.kr

Abstract In this study, we measured the THC concentration for VOCs according to the type of calibration gas in the laboratory and field by dividing the THC measuring instruments that were type-approved in Korea into cases where the calibration gas was calibrated with methane and cases where it was calibrated with propane. When methane was used as the calibration gas, the measured THC concentrations ranged from approximately 45~85% of the standard gas concentration. In contrast, when propane was applied, the measured concentrations ranged from approximately 96~107%, indicating that demonstrated higher measurement accuracy with propane calibration. In addition, field measurements conducted at emission facilities using THC analyzers calibrated with propane showed concentrations ranging from 94~115% of the reference values, indicating relatively small differences among instruments. Considering that THC emission management in Korea mainly focuses on VOCs with carbon numbers ranging from 2 to 4, the use of propane rather than methane as the calibration gas is expected to improve the accuracy of THC measurements. However, changing the calibration gas may increase measured THC concentrations at some facilities and potentially lead to exceedance of emission limits. Therefore, further review is required regarding the introduction of measurement methods targeting non-methane hydrocarbons (NMHC) and the adjustment of emission limits based on actual THC concentration levels.

Key words: Total hydrocarbon (THC), Performance evaluation, Standard gas, Methane, Propane

1. 서론

대기오염물질의 정확한 측정은 대기환경 관리와 배출규제의 신뢰성을 확보하기 위한 중요한 요소이다. 특히 시료 채취와 분석 과정에서는 다양한 오차 요인이 발생할 수 있으므로 이를 최소화하기 위한 계측기술의 개선과 체계적인 정도관리(quality assurance, QA)가 필요하다.

총탄화수소(Total Hydrocarbon, THC)는 탄소와 수소로 구성된 유기화합물의 총량을 의미하며, 대기 중에서 광화학반응을 통해 오존 및 2차 생성물질 형

에 영향을 미치는 물질군으로 알려져 있다. 이러한 특성으로 인해 대기오염 배출 관리 및 규제 분야에서 중요한 관리 지표로 활용되고 있다.

대기배출원에서 배출되는 탄화수소 성분은 매우 다양하며, 여러 인위적 발생원에서 배출되는 탄화수소를 하나의 지표로 통합하여 평가하기 위해 THC 농도 측정이 활용되고 있다. 일반적으로 휘발성유기화합물(VOCs)은 가스크로마토그래피(GC) 분석을 통해 정밀 분석이 가능하지만, 현장 조건에서는 분석 장비와 운영상의 제약으로 인해 적용이 제한될 수 있다. 반면 탄화수소 농도를 측정하는 장비는 비교적 간단한 구

조로 구성되어 있어 배출시설 현장에서 신속한 농도 측정이 가능하다는 장점이 있다.

국내에서는 유해성대기감시물질이 배출되면서 개별물질 농도로 관리가 어려운 일부 배출시설에 대해 THC 농도를 기준으로 배출허용기준을 적용하고 있다. 이러한 총량 규제 방식은 다양한 휘발성유기화합물을 통합적으로 관리할 수 있다는 장점이 있으나, 개별 물질의 배출 특성을 직접적으로 반영하기 어렵다는 한계도 존재한다.

현재 대기오염공정시험기준에서는 굴뚝 배출가스 중 탄화수소 농도를 불꽃이온화검출기(FID) 또는 비분산적외선분석기(NDIR)를 이용하여 측정하도록 규정하고 있으며, 측정 결과는 탄소 농도(ppmv)로 표시한다. 또한, 대기배출원의 농도 측정에는 형식승인을 받은 장비 사용이 권장되고 있다.

그러나 일부 현장에서는 THC 측정 장비 간 결과 차이가 발생할 수 있다는 의견이 제기되고 있으며, 특히 교정가스 종류에 따라 THC 측정 농도 정확도가 달라질 가능성이 제기되고 있다(Kim, 2010). 예를 들어 메테인(CH_4)을 THC 측정기 교정가스로 사용할 경우 탄소수가 높은 휘발성유기화합물의 농도가 상대적으로 낮게 평가될 수 있다는 보고가 있다. 반면 미국 환경보호청(US EPA)은 프로페인(C_3H_8)을 교정가스로 사용하도록 권고하고 있어 교정가스 종류에 따른 측정 특성 차이를 검토할 필요가 있다(US EPA, 2017b).

따라서 본 연구에서는 국내 대기배출원 분야에서 형식승인을 받은 THC 측정 장비를 대상으로 교정가스 종류에 따른 VOCs 물질의 THC 측정 농도 특성을 비교하였다. 또한 교정가스 조건에 따른 측정 정확도와 오차 발생 경향을 분석하여 대기배출원의 THC 농도 측정의 신뢰성을 향상시키기 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 연구 방법

국내외의 THC 측정법의 원리는 불꽃이온화분석

기(FID)의 기술을 응용하는 데 기초하는데(Dubose and Harris, 1981) 이는 탄화수소를 연소시킬 때 발생하는 이온에 의한 미세전류 차이를 측정하여 대기 중의 THC의 농도로 제시하는 방식에 해당한다(NIER, 2026).

THC 측정 방법은 대표적으로 EPA Method 25A와 Method 25B가 있으며, 각각 불꽃이온화검출기(FID)와 비분산적외선분석기(NDIR)를 이용하여 기체상 유기화합물 농도를 측정하는 방법이다. Method 25A는 FID 측정 방법으로 알칸, 알켄 및 방향족 화합물을 주요 측정 대상으로 하는 연속측정법이며, Method 25B는 주성분이 알칸 계열인 경우에 적용되는 NDIR 기반 측정 방법이다.

EPA Method 25A는 포름알데하이드나 염소화합물에 대한 반응성이 낮고, 산소를 포함한 VOCs 및 수용성 화합물에 대한 감도가 낮다는 특성이 있다. 또한 다양한 유기화합물을 통합적으로 측정할 수 있으나 개별 VOCs 물질의 정량 분석에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다(US EPA, 2017b).

한편, EPA Method 21은 공정 설비에서 발생하는 VOCs 누출 여부를 확인하고 누출 위치를 파악하기 위한 용도로 사용되는 방법으로, 배출구 농도 측정보다는 누출 감지 및 관리 목적에 활용되므로 교정가스는 일반적으로 누출 정의 농도와 거의 동일한 알려진 농도의 기준 화합물로 교정하고 있다(US EPA, 2017a).

Method 25A를 적용한 배출구 농도 측정에서는 샘플링 시스템을 약 110°C 로 가열하여 응축을 방지하며, FID 검출기 블록은 120°C 이상으로 유지하도록 규정하고 있다. 또한 측정 장비의 교정가스는 일반적으로 공기 또는 질소 중의 프로페인(C_3H_8)을 사용하도록 권고하고 있으며, 필요에 따라 다른 유기화합물을 교정가스로 사용할 수 있다(US EPA, 2017b).

국내의 경우 대기배출원에서 배출되는 휘발성유기화합물 관리 목적으로 THC 농도 기준이 적용되고 있으며, 주로 탄소수 3~6개 범위의 VOCs 물질을 대상으로 관리가 이루어지고 있다. THC 농도는 측정 장비에서 얻어진 농도값에 교정가스의 탄소수를 반영하여

탄소 농도로 환산하는 방식으로 산정된다.

대기오염공정시험기준에서는 굴뚝 배출가스의 탄화수소 농도를 FID 또는 NDIR 분석기를 이용하여 측정하도록 규정하고 있으며, THC 측정기의 형식승인 대상 장비는 FID 방법으로 측정되는 항목으로 한정되어 있다.

본 연구에서는 국내에서 형식승인을 받은 탄화수소 측정 장비를 대상으로 표준가스 종류에 따른 농도 검량 특성을 평가하였다. 특히 일반적으로 사용되는 메테인(CH_4)과 프로페인(C_3H_8)을 교정가스로 적용하여 다양한 VOCs 물질에 대한 농도 응답 특성의 차이를 비교하였다. 이를 통해 교정가스 선택에 따른 농도 측정 정확도 차이를 분석하고자 하였다.

대기오염공정시험기준에서 제시하는 THC 농도 계산식은 다음과 같으며, 측정값은 교정가스를 기준으로 한 농도(ppmv)로 표시한다. 이를 탄소 농도(ppmC)로 환산할 경우에는 해당 교정가스의 탄소수를 고려하여 계산한다(NIER, 2025).

$$C_c = K \times C_{\text{측정}}$$

C_c = 총탄화수소(THC) 농도(ppm(탄소))

$C_{\text{측정}}$ = 측정된 THC 농도(ppm(프로페인 또는 다른 교정가스))

K = 탄소 등가 교정계수(교정가스에 대한 적절한 반응계수로 메테인=1, 에테인=2, 프로페인=3, 뷰테인=4임)

본 연구에서 사용한 THC 장비는 A, B, C, D, E 등 5종으로 E 모델은 메테인(CH_4)으로만, B 모델은 메테

인(CH_4) 및 프로페인(C_3H_8)으로만 교정 가능하고, 다른 장비는 메테인=1, 에테인=2, 프로페인=3, 뷰테인=4 등 탄소수가 다른 가스 종류를 선택하여 장비를 교정할 수 있다.

우리나라 형식승인 대상 환경측정기기 구조·성능 세부기준을 살펴보면 THC 측정기의 형식승인 및 정도관리 대상은 ‘불꽃이온화법(FID) 또는 이와 동등 이상의 성능을 갖는 방법이어야 한다’라고 규정하고 있어 EPA Method 25A THC 측정 장비만 해당되며 측정 범위는 THC로 0~1,000 ppm 농도 범위로 규정하고 있다(NIER, 2026).

대기오염공정시험기준의 THC 측정법의 개정방향은 제조사별 불꽃이온화분석기(FID) 측정값의 비교 검토 및 현장 측정을 통하여 실험 결과 THC 농도 측정값이 크게 차이가 나면, 문헌에 나와 있는 탄화수소 종류별(CH_4 , C_3H_8 등) 반응계수(response factor) 차이 및 EPA Method를 근거로 휴대용 FID의 THC 측정기의 교정가스를 변경하여 개정하고자 한다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 THC 측정기를 대상으로 성능 실험을 실험실에서의 6차에 걸쳐 실시하였고, 현장 실험을 2회 수행하였다.

1차 성능 실험은 실험실 내부에서 교정가스 메테인(CH_4) 240.0 ppm으로 교정한 후 THC 측정기 5종류(A, B, C, D, E)의 반복성 및 직선성 시험을 실시하였다. 측정 대상 물질은 제로가스와 톨루엔(C_7H_8) 30.4 ppm(THC 212.8 ppm), 50.5 ppm(THC 353.5 ppm) 3종으로 시험가스를 5분씩 5회 반복시험하였으며, 검사 방법은 환경측정기 성능 시험방법 TM 0201.1 방법으로 THC 농도를 측정하였다(NIER, 2026).



Fig. 1. THC meters applied to this research.

2차 실험은 THC 측정기 4종류(A, B, C, D)를 사용하였고, 교정가스는 프로페인(C_3H_8) 264.1 ppm, D 장비는 메테인(CH_4) 224.0 ppm 가스를 사용하여 THC 측정기를 교정하였다. 분석 대상 물질은 제로가스와 톨루엔(C_7H_8) 30.4 ppm (THC 212.8 ppm), 50.5 ppm (THC 353.5 ppm) 2종 시험가스를 5분씩 5회 반복시험하여 THC 농도를 측정하였다.

3차 실험은 THC 측정기 2종류(A, B)를 사용하였고, 교정가스는 프로페인(C_3H_8) 264.1 ppm 가스를 사용하여 교정한 후, 분석 대상 물질은 제로가스와 메테인(CH_4) 224.0 ppm 시험가스를 각각 5분씩 5회 반복시험하여 THC 농도를 측정하였다.

4차 실험은 THC 측정기 3종류(A, B, C) 5대를 대상으로 메테인(CH_4) 241.3 ppm으로 교정한 후 분석 대상을 에테인(C_2H_6), 프로페인(C_3H_8), n-부테인($n-C_4H_{10}$), 1,3-부타디엔(1,3- C_4H_6), 톨루엔(C_7H_8) 5종을 대상으로 농도 구간별(저농도, 중농도, 고농도)로 시험용 가스를 조제하여, 각각 5분씩 5회 THC 농도를 측정하였다.

5차 실험은 THC 측정기 3종류(A, B, C) 5대를 프로페인(C_3H_8) 264.1 ppm으로 교정한 후 시험가스 메테인(CH_4), 에테인(C_2H_6), n-부테인($n-C_4H_{10}$), 1,3-부타디엔(1,3- C_4H_6), 톨루엔(C_7H_8) 5종을 대상으로 농도별(저농도, 중농도, 고농도)로 시험용 가스를 조제하

여, 각각 5분씩 5회 THC 농도를 측정하였다.

6차 실험은 THC 측정기 2종류(A, C) 3대를 대상으로 에테인(C_2H_6) 가스 241.0 ppm, n-부테인($n-C_4H_{10}$) 가스 235.9 ppm을 사용하여 교정한 후 시험가스 1,3-부타디엔(1,3- C_4H_6), 톨루엔(C_7H_8) 가스 2종을 대상으로 농도별(저농도, 중농도, 고농도)로 시험용 가스를 조제하여 각각 5분씩 5회 THC 농도를 측정하였다.

사업장의 THC 현장 측정 실험은 THC 측정기 3종류(A, B, C)를 대상으로 프로페인(C_3H_8)으로 교정 후 인천 지역 내의 인쇄업 1개 업소, 기계제조업 1개 업소에서 2회 현장 실험을 실시하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 THC 측정기 실험실 시험

THC 측정기의 성능 시험을 교정가스 종류별(CH_4 , C_3H_8), 측정 대상 가스 종류별 농도 구간을 나누어 THC 측정기 장비별로 실험실에서 5차로 나누어 실시하였다. 1차 실험은 실험실 내부에서 THC 측정기 5종류(A, B, C, D, E)를 메테인(CH_4) 가스 240.0 ppm으로 교정한 후 제로가스와 톨루엔(C_7H_8) 가스를 5회 반복 시험한 THC 측정기별 반복성 및 직선성 시험 결과는 표 1과 같으며 THC 측정 기기별로 THC 농도 및

Table 1. Linearity and repeatability of THC concentration of toluene gas with methane as a calibration gas. (unit: ppm)

No.	A			B			C			D			E		
	Zero	Mid	Span	Zero	Mid	Span	Zero	Mid	Span	Zero	Mid	Span	Zero	Mid	Span
	0	212.8	353.5	0	212.8	353.5	0	212.8	353.5	0	212.8	353.5	0	212.8	353.5
1	0.9	92.9	158	4.9	201	325.7	0.1	167.2	269.5	0.0	110	179.0	0.2	157.2	270.6
2	1.9	93.0	161	5.8	201	325.1	0.2	167.6	268.4	2.0	109	180.0	3.4	159.5	268.6
3	1.7	92.6	161	4.5	201	324.2	0.4	167.3	269.9	1.6	109	180.0	5.2	157.4	268.9
4	1.1	92.4	162	3.9	201	324.9	0.4	167.3	268.4	0.3	110	179.0	4.4	158.5	268.6
5	0.7	90.8	161	3.4	201	324.5	0.5	167.1	267.5	0.0	109	179.0	3.7	162.4	270.3
Average	1.3	92.3	160.6	4.5	200.9	324.9	0.3	167.3	268.7	0.8	109.4	179.4	3.4	159.0	269.4
S.D.	0.46	0.80	1.36	0.82	0.29	0.52	0.15	0.17	0.86	0.85	0.49	0.49	1.71	1.88	0.87
Accuracy (%)	-	43.4	45.4	-	94.4	91.9	-	78.6	76.0	-	51.4	50.7	-	74.7	76.2

※ Calibration gas: CH_4 240.0 ppm, Test gas: C_7H_8 zero 0 ppm, mid THC 212.8 ppm, span THC 353.5 ppm.

Table 2. Linearity and repeatability of THC concentration of toluene gas with propane as a calibration gas. (unit: ppm)

No.	A			B			C		E	
	Zero	Mid	Span	Zero	Mid	Span	Zero	Span	Zero	Span
	0	212.8	353.5	0	212.8	353.5	0	353.5	0	353.5
1	0.12	190.3	372.0	-0.10	195.1	345.4	4.72	393.6	4.58	280.7
2	0.12	191.4	375.0	-0.07	193.1	343.6	4.66	393.9	4.59	281.4
3	0.12	195.7	378.6	-0.05	201.7	343.0	4.52	395.1	4.57	280.6
4	0.10	198.7	382.2	-0.17	206.4	344.5	4.48	395.8	4.52	282.1
5	0.10	197.8	380.4	-0.16	206.0	343.3	4.46	393.8	4.51	283.5
Average	0.1	194.8	377.6	-0.1	200.5	344.0	4.6	394.4	4.6	281.6
S.D.	0.01	1.83	1.23	0.05	1.13	0.29	0.10	0.28	0.03	1.07
Accuracy (%)	-	91.5	106.9	-	94.3	97.3	-	111.6	-	79.7

※ Calibration gas: C₃H₈ 264.1 ppm (E equipment is calibrated with CH₄ 240 ppm)
 Test gas: C₇H₈ zero 0 ppm, mid THC 212.8 ppm, span THC 353.5 ppm.

표준편차를 확인하였다. 제로가스와 톨루엔 표준가스(C₇H₈) 30.4 ppm (THC 212.8 ppm), 50.5 ppm (THC 353.5 ppm)에 대하여 THC 측정 농도는 A, D 장비는 표준가스 농도의 (43.4~51.4)%, B 장비는 (91.9~94.4)%, C, E 장비는 (74.7~78.6)% 수준의 농도를 나타내었다.

2차 실험은 실험실 내부에서 THC 측정기 3종류(A, B, C)를 대상으로 교정가스는 프로페인(C₃H₈) 264.1 ppm으로 교정하고, 1종류(E) 장비는 프로페인(C₃H₈)으로 교정이 안되어 메테인(CH₄) 가스 240.0 ppm으로 교정한 후 제로가스와 실험 대상 톨루엔(C₇H₈) 가스 212.8 ppm, 353.5 ppm을 5회 반복시험한 THC 측정기별 반복성 및 직선성 시험 결과는 표 2와 같다. 측정기 종류별 THC 농도는 표준가스 농도 대비 A 장비는 (91.6~106.9)%, B 장비는 (94.3~97.3)%, C 장비는 111.6%, E 장비는 79.7% 수준의 THC 측정 농도를 나타내었다.

3차 실험은 실험실 내부에서 THC 측정기 2종류(A, B)를 대상으로 프로페인(C₃H₈) 가스 264.1 ppm으로 교정한 후 메테인(CH₄) 224.0 ppm 시험가스를 대상으로 THC 측정기별 반복성 시험 결과는 표 3과 같으며 A 장비의 THC 농도는 평균 466 ppm 수준으로 표준가스 농도 대비 219.1%, B 장비의 THC 농도는 평균 252.4 ppm 수준으로 표준가스 농도의 118.6% 수준의

Table 3. Repeatability of THC concentration of methane gas with propane as a calibration gas. (unit : ppm)

No.	A	B
1	466.2	249.9
2	465.9	252.9
3	465.9	252.6
4	466.2	253.5
5	465.6	252.9
Average	466.0	252.4
S.D.	0.07	0.42
Accuracy (%)	219.1	118.6

※ Calibration gas: C₃H₈ 264.1 ppm, Test gas: CH₄ THC 224.0 ppm.

농도를 보여주었다.

THC 측정기의 교정가스 메테인(CH₄), 프로페인(C₃H₈) 종류에 따른 1차, 2차 실험의 THC 측정 농도의 상관성 실험 결과를 그림 2 및 그림 3에 나타내었다. 시험가스로는 제로가스와 톨루엔(C₇H₈) 가스 30.4 ppm (THC 212.8 ppm) 및 50.5 ppm (THC 353.5 ppm)을 사용하였다. THC 측정기를 메테인(CH₄)으로 교정 후 톨루엔(C₇H₈) 가스의 THC 농도는 표준가스 농도 대비 (43.4~94.4)% 수준으로 나타났고, 프로페인(C₃H₈)으로 교정 후 톨루엔(C₇H₈) 가스의 THC 측정기 농도는 표준가스 농도의 (91.6~111.6)% 수준으로 나타났으며 THC 측정기 종류별 THC 농도 차이도 크지 않은

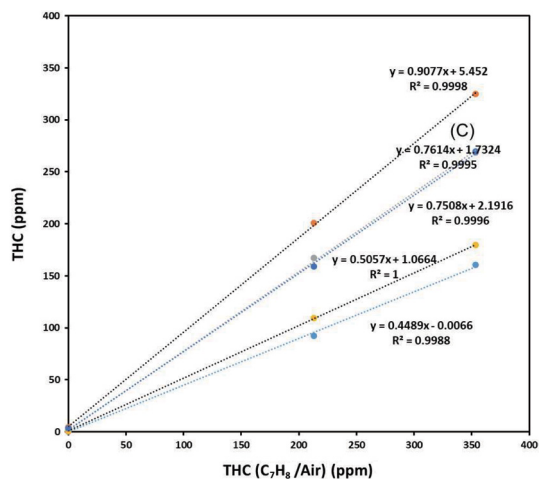


Fig. 2. Correlation of THC concentration of toluene gas with methane as a calibration gas.

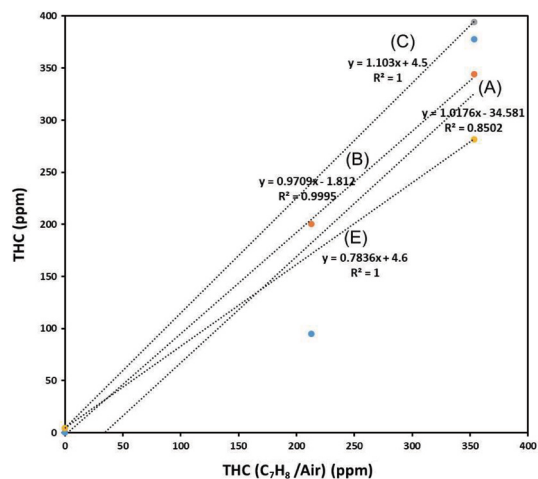


Fig. 3. Correlation of THC concentration of toluene gas with propane as a calibration gas.

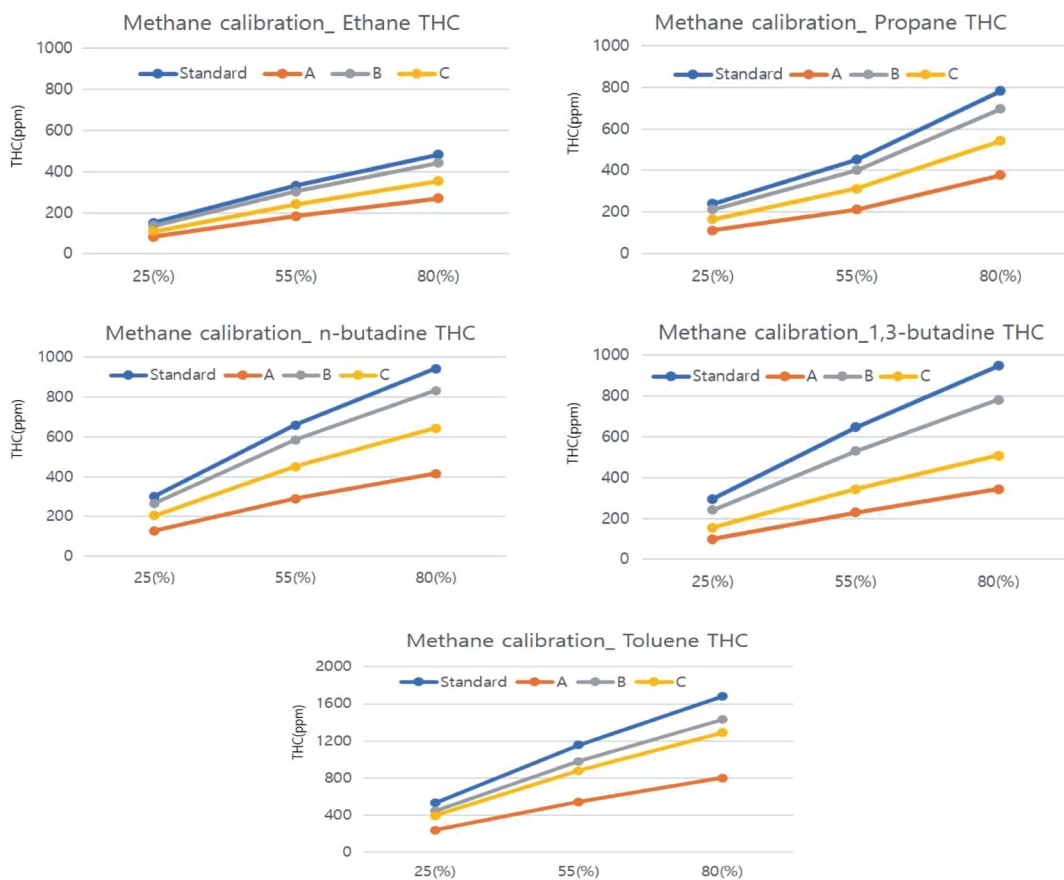


Fig. 4. Comparison of THC concentration when calibration gas of THC meter is methane.

Table 4. Accuracy of THC meter when calibration gas of THC meter is methane.

Gas	Standard		THC conc. (ppm)			Accuracy of THC conc. (%)		
	THC ppm	%	A	B	C	A	B	C
C ₂ H ₆	0.0	0	0.0	0.0	0.0	—	—	—
	151.2	25	82.0	137.5	109.0	54.2	91.0	72.1
	331.6	55	183.5	303.0	242.0	55.3	91.4	73.0
	482.0	80	269.5	441.5	353.0	55.9	91.6	73.2
C ₃ H ₈	0.0	0	0.0	1.5	0.0	—	—	—
	240.1	25	112.5	212.5	164.0	46.9	88.5	68.3
	453.0	55	213.0	400.5	312.0	47.0	88.4	68.9
	783.0	80	376.5	695.5	543.0	48.1	88.8	69.3
n-C ₄ H ₁₀	0.0	0	0.0	0.0	0.0	—	—	—
	300.6	25	128.0	265.5	204.0	42.6	88.3	67.9
	660.0	55	289.0	585.0	451.0	43.8	88.6	68.3
	943.6	80	416.0	833.5	643.0	44.1	88.3	68.1
1,3-C ₄ H ₆	0.0	0	0.0	2.0	0.0	—	—	—
	296.0	25	100.0	242.0	155.0	33.8	81.8	52.4
	646.8	55	228.5	530.0	344.0	35.3	81.9	53.2
	946.8	80	343.5	780.5	508.0	36.3	82.4	53.7
C ₇ H ₈	0.0	0	1.0	-0.5	1.0	—	—	—
	528.4	25	234.5	443.0	394.0	44.4	83.8	74.6
	1154.3	55	538.5	979.0	878.0	46.7	84.8	76.1
	1680.7	80	800.5	1429.0	1290.0	47.6	85.0	76.8
Average	—	—	—	—	—	45.4	86.9	68.2

것으로 나타났다.

4차 실험은 실험실 내부에서 THC 측정기 3종류(A, B, C) 5대(A 2대, B 2대, C 1대)를 대상으로 메테인(CH₄) 가스 241.3 ppm으로 THC 측정기를 교정한 후 제로가스와 시험가스 에테인(C₂H₆), 프로페인(C₃H₈), n-뷰테인(n-C₄H₁₀), 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆), 톨루엔(C₇H₈) 가스상 물질을 대상으로 제로가스 및 가스 종류별 표준가스 농도의 0%, 25%, 55%, 80% 농도 수준의 시험가스를 만들어서 각각 5분씩 5회 측정된 평균 지시값을 표 4 및 그림 4에 나타내었다. 시험대상 가스 종류별 THC 측정기의 측정 농도는 표준가스 농도 대비 에테인(C₂H₆)에 대해서는 (54.2~91.6)%, 프로페인(C₃H₈)에 대해서는 (46.9~88.8)%, n-뷰테인(n-C₄H₁₀)에 대해서는 (42.6~88.6)%, 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆)에 대해서는 (33.8~82.4)%, 톨루엔(C₇H₈)에 대해서는

(44.4~85)%를 나타내어 THC 측정기를 메테인(CH₄)으로 교정한 후 나온 오염물질별 THC 측정기 농도는 평균적으로 표준가스 농도의 (45.4~86.9)% 농도 수준을 나타내었다.

5차 실험은 실험실 내부에서 THC 측정기 3종류(A, B, C) 5대(A 장비 2대, B 장비 2대, C 장비 1대)를 대상으로 프로페인(C₃H₈) 가스 264.1 ppm으로 교정한 후 제로가스와 시험가스 메테인(CH₄), 에테인(C₂H₆), n-뷰테인(n-C₄H₁₀), 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆), 톨루엔(C₇H₈) 5종을 대상으로 제로가스 및 가스 종류별 표준가스 농도의 0%, 25%, 55%, 80% 농도 수준의 시험가스를 만들어서 각 5분씩 5회 측정된 평균 지시값을 표 5 및 그림 5에 나타내었다. 시험 대상 가스 종류별 THC 측정기의 THC 측정 농도는 표준가스 농도 대비 메테인(CH₄)에 대해서는 (112.9~209.9)%, 에테인(C₂H₆)

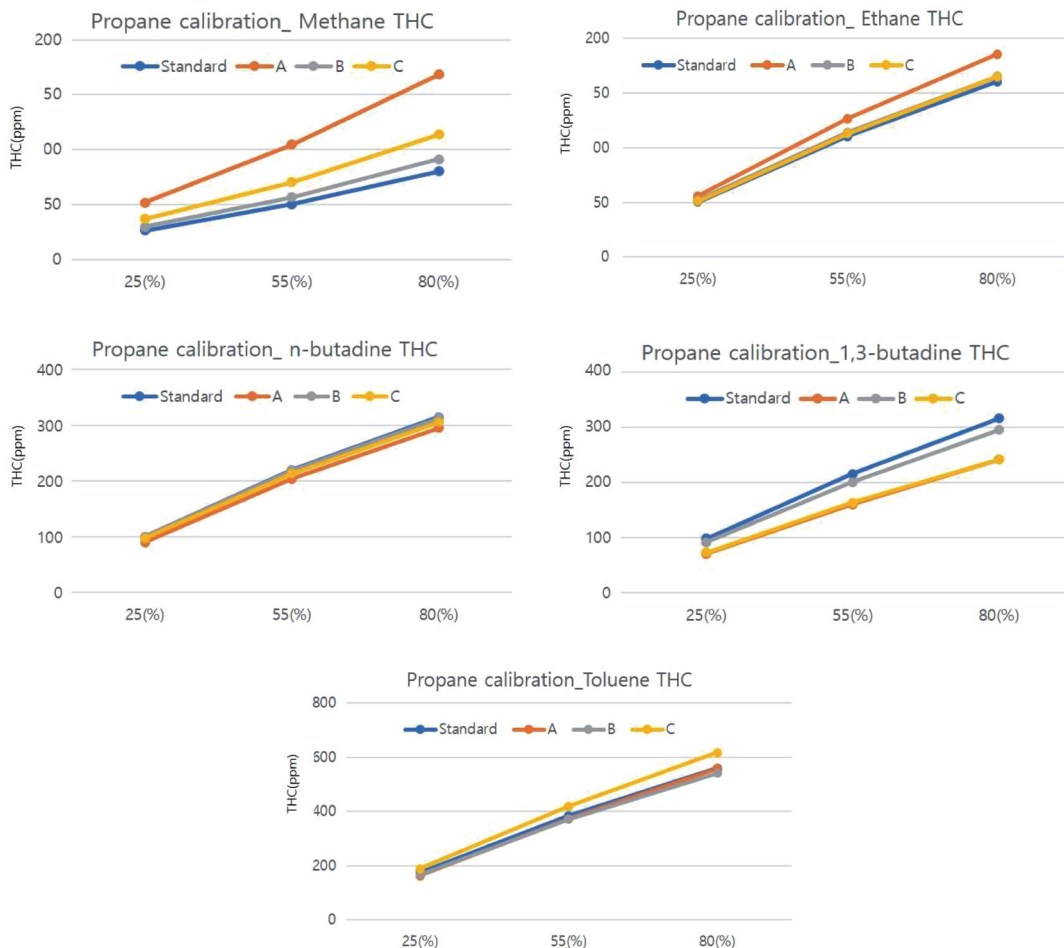


Fig. 5. Comparison of THC concentration when calibration gas of THC meter is propane.

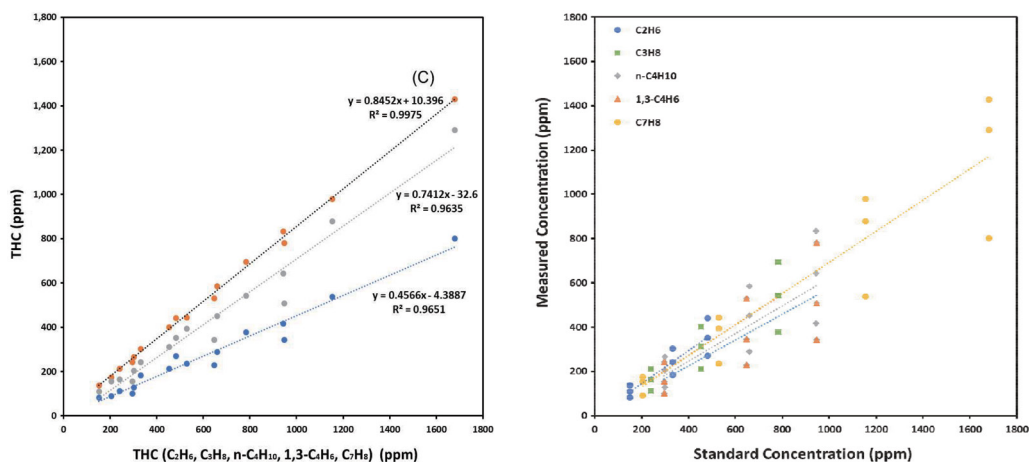
에 대해서는 (101.2~115.5)%, n-뷰테인 ($n\text{-C}_4\text{H}_{10}$)에 대해서는 (89.8~99.8)%, 1,3-부타디엔 ($1,3\text{-C}_4\text{H}_6$)에 대해서는 (71.5~93.5)%, 톨루엔 (C_7H_8)에 대해서는 (93.1~110.3)%의 농도 수준을 나타내어 THC 측정기를 프로페인 (C_3H_8)으로 교정한 후 나온 오염물질별 THC 측정기의 THC 농도는 평균적으로 표준가스 농도의 (101.1~116.3)% 농도 수준을 나타내었다.

4차 및 5차 실험의 오염물질별, 측정기별 THC 측정기의 반복성 및 직선성 시험 결과를 그림 6 및 그림 7에 나타내었다. THC 측정기를 메테인(CH_4)으로 교정 후 실험 대상 가스(C_2H_6 , C_3H_8 , $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$, $1,3\text{-C}_4\text{H}_6$,

C_7H_8)에 대한 THC 농도 상관성(R^2)은 그림 6과 같이 (0.97~0.99) 수준으로 높게 나타났으나 직선성은 (0.45~0.85)를 나타내어 메테인(CH_4)으로 교정 시 THC 측정기 농도는 표준가스 농도 대비 THC 측정기 농도가 상당히 낮게 나타났고, 실험 대상 가스상 물질 중에는 1,3-부타디엔 ($1,3\text{-C}_4\text{H}_6$) 물질이, THC 측정기 중에는 A 장비가 표준가스 농도 대비 THC 농도값이 비교적 낮게 나타나므로 THC 측정기를 메테인(CH_4)으로 교정 시 모든 항목에서 THC 측정값이 과소 측정되었으며, 그 차이는 탄소(C) 수가 높아질수록 더 커졌다.

Table 5. Accuracy of THC concentration when calibration gas of THC meter is propane.

Standard		THC (ppm)			Accuracy of THC conc. (%)		
Gas	THC (ppm)	A	B	C	A	B	C
CH ₄	0.0	0.0	0.5	0.0	—	—	—
	26.2	51.5	30.0	37.0	196.6	114.5	141.2
	50.0	105.0	56.5	70.0	209.9	112.9	139.9
	80.4	168.0	91.5	114.0	208.9	113.8	141.7
C ₂ H ₆	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—
	50.4	56.0	52.0	51.0	111.1	103.2	101.2
	110.5	126.5	114.0	113.0	114.4	103.1	102.2
	160.7	185.5	165.5	165.0	115.5	103.0	102.7
n-C ₄ H ₁₀	0.0	0.0	0.5	0.0	—	—	—
	100.2	90.0	100.0	97.0	89.8	99.8	96.8
	220.0	203.5	219.5	213.0	92.5	99.8	96.8
	314.5	295.0	312.5	305.0	93.8	99.4	97.0
1,3-C ₄ H ₆	0.0	0.0	1.0	0.0	—	—	—
	98.7	70.5	91.5	73.0	71.5	92.7	74.0
	215.6	160.0	200.0	163.0	74.2	92.8	75.6
	315.6	241.5	295.0	241.0	76.5	93.5	76.4
C ₇ H ₈	0.0	1.0	0.0	1.0	—	—	—
	176.1	164.0	168.5	188.0	93.1	95.7	106.7
	384.8	373.0	371.0	420.0	96.9	96.4	109.2
	560.2	558.5	541.5	618.0	99.7	96.7	110.3
Average					116.3	101.1	104.8

**Fig. 6.** Correlation of THC concentration when calibration gas of THC meter is methane.

THC 측정기를 프로페인(C₃H₈)으로 교정 후 실험 대상 가스(CH₄, C₂H₆, n-C₄H₁₀, 1,3-C₄H₆, C₇H₈) 물질

에 대한 THC 측정기의 농도 상관성(R²)은 그림 7과 같이 (0.93~0.99) 수준으로 나타났고 직선성은 (0.88~

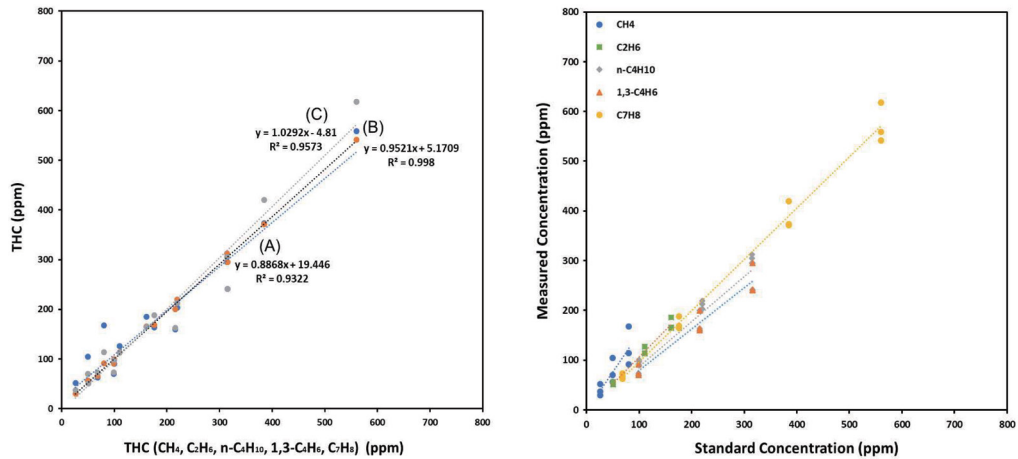


Fig. 7. Correlation of THC concentration when calibration gas of THC meter is propane.

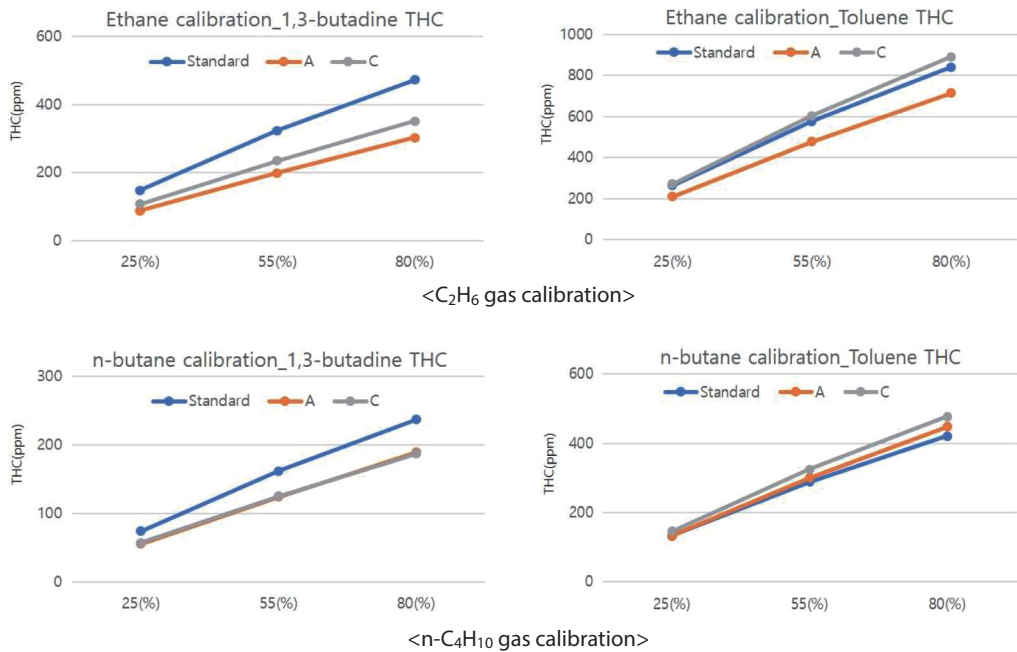


Fig. 8. Comparison of THC concentration when calibration gases of THC meter are ethane and n-butane.

1.02) 수준으로 1에 근접하는 것으로 나타나서 THC 측정기의 교정을 메테인(CH₄)보다 프로페인(C₃H₈)으로 교정한 경우가 기준값과 측정값의 THC 측정기의 농도 차이가 더 적게 나타났으며, 표준물질 대비 실험 대상 물질의 THC 측정기 농도는 메테인(CH₄) 물

질은 농도가 높게, 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆) 물질은 농도가 낮게 나타났으며, THC 측정기 중에는 A 장비의 THC 측정값이 메테인(CH₄) 물질에 대하여 표준가스 농도 대비하여 THC 농도가 높게 나타났다.

6차 실험은 실험실 내부에서 THC 측정기의 교정이

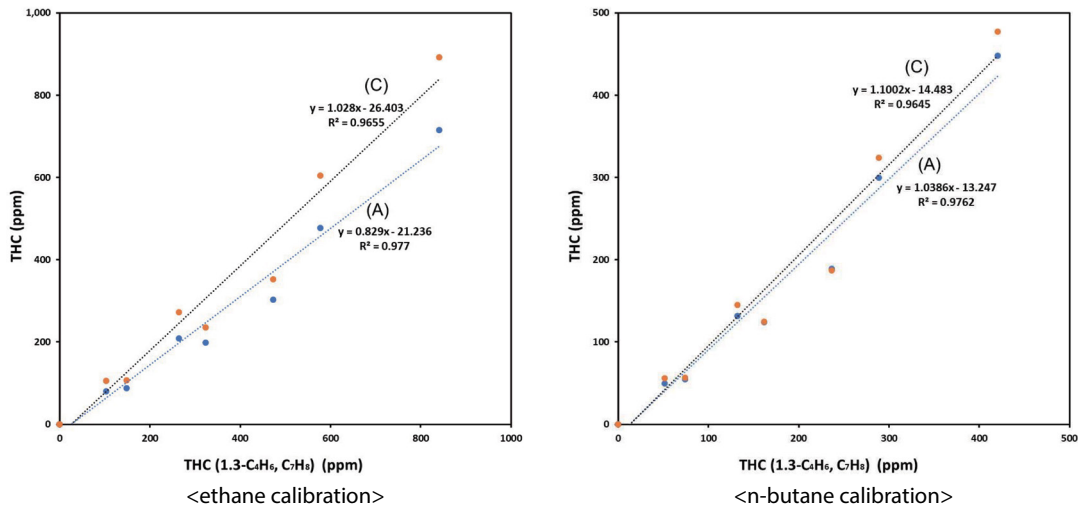


Fig. 9. Correlation of THC concentration when calibration gases of THC meter are ethane and n-butane.

Table 6. Accuracy of THC concentration when calibration gas of THC meter is ethane.

Standard		THC conc. (ppm)		Accuracy of THC conc. (%)	
Gas	THC conc. (ppm)	A	C	A	C
1,3-C ₄ H ₆	0.0	0.0	0.0	—	—
	148.0	88.0	107.0	59.5	72.3
	323.4	199.0	235.0	61.5	72.7
	473.4	303.0	352.0	64.0	74.4
C ₇ H ₈	0.0	0.0	0.0	—	—
	264.2	208.5	272.0	78.9	102.9
	577.2	477.5	604.0	82.7	104.7
	840.4	715.5	892.0	85.1	106.1
Average				72.0	88.9

스를 메테인(CH₄), 프로페인(C₃H₈) 외에 타 가스 종류에 따른 THC 측정기 농도 데이터의 검증을 위하여 교정가스를 에테인(C₂H₆) 241.0 ppm, n-부테인(n-C₄H₁₀) 235.9 ppm을 사용하여 THC 측정기를 교정한 후 실험실 내부에서 THC 측정기 2종류(A, C) 3대(A 장비 2대, C 장비 1대)를 대상으로 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆), 톨루엔(C₇H₈) 가스 2종을 대상으로 제로가스 및 가스종류별 표준가스 농도의 0%, 25%, 55%, 80% 농도 수준의 시험가스를 만들어서 각각 5분씩 5회 측정한 평

Table 7. Accuracy of THC concentration when calibration gas of THC meter is n-butane.

Standard		THC conc. (ppm)		Accuracy of THC conc. (%)	
Gas	THC conc. (ppm)	A	C	A	C
1,3-C ₄ H ₆	0.0	0	0	—	—
	74.0	55.0	57.0	74.3	77.0
	161.7	124.0	125.0	76.7	77.3
	236.7	189.0	187.0	79.8	79.0
C ₇ H ₈	0.0	0	0	—	—
	132.1	132.0	145.0	99.9	109.8
	288.6	300.0	324.0	104.0	112.3
	420.2	448.0	477.0	106.6	113.5
Average				90.2	94.8

균 지시값 및 정확도를 표 6과 7 및 그림 8과 9에 나타내었다.

THC 측정기를 에테인(C₂H₆) 가스로 교정한 경우 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆) 및 톨루엔(C₇H₈) 농도에 대한 THC 측정기의 농도 정확도는 평균 (61.7~104.6)% 수준을 나타내었고 물질별로는 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆) 보다는 톨루엔(C₇H₈) 물질의 THC 측정기 농도의 정확도가 더 높게 나타났다. THC 측정기를 n-부테인(n-C₄H₁₀) 가스로 교정한 경우 1,3-부타디엔(1,3-C₄H₆)

Table 8. Accuracy of THC concentration in printing industry when calibration gas of THC meter is propane. (unit: ppm)

Time	A	B	C
10:40 AM	657.9	763.1	746.0
10:45 AM	655.6	768.6	744.0
10:50 AM	659.2	764.8	721.2
10:55 AM	660.0	745.4	753.0
11:00 AM	692.8	800.8	879.6
11:05 AM	838.1	964.2	1,021.2
11:10 AM	911.5	1,064.2	1,096.8
11:15 AM	926.2	1,177.0	1,144.2
11:20 AM	915.7	1,190.0	1,080.6
11:25 AM	893.9	1,126.0	1,105.2
11:30 AM	900.8	1,176.1	1,092.6
Average	802.5	848.9	865.4
Accuracy (%)	94.5	-	101.9

및 톨루엔(C_7H_8)에 대한 THC 측정기의 정확도는 평균 (76.9~111.9)% 수준을 나타내었고 물질별로는 1,3-부타디엔(1,3- C_4H_6)보다는 톨루엔(C_7H_8) 물질에 대하여 THC 측정기의 농도 정확도가 높게 나타났다.

THC 측정기는 여러 가지 복합 VOCs 물질을 THC 농도로 환산하는 측정기이므로 THC 측정기의 측정 농도는 단일 대기오염물질 농도보다 불확실성이 높으며, THC의 관리 대상 물질이 대기오염물질 중 탄화수소(2~4)개의 고리를 갖는 물질이 황화메틸(C_2H_6S), 아크롤레인(CH_2CHCHO), 아세트산비닐($CH_3CO_2CH=CH_2$), 디메틸포름아미드($HCON(CH_3)_2$) 등을 주 대상으로 하므로 THC 측정기를 메테인(CH_4)으로 교정하기보다는 프로페인(C_3H_8)으로 교정 후 사용하는 것이 우리나라 대기배출시설 THC 농도 배출허용기준 관리에 더 합리적인 방법으로 판단된다.

3.2 THC 측정기 현장 시험 평가 결과

THC 측정기 3종을 대상으로 교정가스를 프로페인(C_3H_8)으로 교정을 실시한 후 THC 농도가 비교적 높은 인쇄업과 THC 농도가 비교적 낮은 기계제조업을 대상으로 현장에서 THC 농도를 측정한 시험 결과를 표 8과 9에 나타내었다.

THC 측정기 3종의 현장 측정 시험 결과는 인쇄업

Table 9. Accuracy of THC concentration in machinery manufacturing industry when calibration gas of THC meter is propane. (unit: ppm)

Time	A	B	C
10:50 AM	19.4	13.3	27.7
10:55 AM	30.5	29.1	36.4
11:00 AM	32.9	28.1	40.1
11:05 AM	33.8	29.7	43.1
11:10 AM	37.3	32.8	46.2
11:15 AM	37.1	35.6	26.6
~	~	~	~
12:35 PM	3.9	2.0	1.2
12:40 PM	4.8	3.0	2.4
12:45 PM	10.9	26.9	10.3
12:50 PM	26.8	26.3	16.4
12:55 PM	26.6	25.9	38.8
13:00 PM	23.0	25.1	38.6
13:05 PM	24.8	24.7	36.1
13:10 PM	28.0	27.6	34.3
13:15 PM	33.9	34.7	32.9
13:20 PM	33.8	35.6	33.7
13:25 PM	35.1	37.2	38.0
Average	27.3	27.3	31.2
Accuracy (%)	100.2	-	114.5

을 대상으로 한 경우 THC 농도는 표 8과 같이 800 ppm 이상으로 높게 나타났고, B 장비 농도를 기준으로 THC 측정기의 농도 정확도는 (94.5~101.9)% 수준으로 나타났다. 기계제조업을 대상으로 한 THC 측정 농도는 표 9와 같이 (27~31) ppm 수준으로 나타났고 THC 측정기 농도 정확도는 B 장비 농도 기준으로 (100.2~114.5)% 수준으로 검출되어 THC 측정기를 프로페인(C_3H_8)으로 교정 후 현장에서 측정한 THC 농도는 THC 측정기 종류별로 농도 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 형식승인을 받은 THC 측정기를 대상으로 교정가스 종류에 따른 THC 측정 농도 특성을 평가하였다. 실험실 및 현장 실험을 통해 메테인(CH_4)과 프로페인(C_3H_8)을 각각 THC 측정기의

교정가스로 적용하여 다양한 VOCs 물질에 대한 THC 농도 응답 특성을 비교 분석하였다.

실험 결과, THC 측정 농도는 메테인(CH_4)을 교정가스로 사용한 경우 표준가스 농도의 약 (45~85)% 수준으로 나타났고, 프로페인(C_3H_8)을 교정가스로 적용한 경우에는 약 (96~107)% 범위로 나타나서 THC 측정기를 프로페인(C_3H_8)을 교정가스로 사용한 경우가 상대적으로 높은 측정 정확도를 보였다. 이는 교정가스의 탄소수 차이에 따른 검출기 응답 특성의 영향으로 판단된다.

또한, 프로페인(C_3H_8)으로 교정된 THC 측정 장비를 이용하여 배출사업장 현장에서 THC 농도를 측정한 결과, 농도 분포가 (94~115)% 수준으로 나타나 THC 측정 장비 간 농도 차이가 비교적 크지 않은 것으로 확인되었다.

국내 THC 배출 관리는 주로 탄소수 (2~4) 범위의 VOCs 물질을 대상으로 농도 관리가 이루어지고 있다. 이러한 특성을 고려할 때 THC 측정에 있어서 적정 교정가스를 메테인(CH_4)보다 프로페인(C_3H_8)으로 적용하는 방식이 THC 측정 농도 정확도를 향상시키는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

다만, 교정가스를 메테인(CH_4)에서 프로페인(C_3H_8)으로 변경할 경우 일부 배출시설에서는 THC 측정 농도가 증가하여 배출허용기준을 초과할 가능성도 존재할 수 있다. 따라서 향후 대기배출원 관리에서는 메테인(CH_4)을 제외한 비메테인탄화수소(non-methane hydrocarbons, NMHC)를 대상으로 하는 측정 방법의 도입 가능성을 검토하고, 국내 배출시설의 실제 THC 농도 수준을 고려한 배출허용기준 조정에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-SP2024-089).

References

- Dubose, D.A., Harris, J.C. (1981) Flame ionization detector response characteristics for hydrocarbons, *Journal of Chromatographic Science*, 19(9), 392-396. <https://doi.org/10.1093/chromsci/19.9.392>
- Kim, G.-H. (2010) The analytical bias of total hydrocarbon (THC) measurements in relation to the selection of standard gas compound, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(4), 449-452. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2010.26.4.449>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2025) Air Pollution Standard Test Methods. NIER Announcement No. 2025-57. <https://www.nier.go.kr/common/kor/board/comBbsList.do?menuNo=13001&bbsNo=31>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2026) Notification on type approval and accuracy inspection of environmental measuring instruments, environmental measuring instrument performance test method. NIER Announcement No. 2025-51. <https://www.nier.go.kr/common/kor/board/comBbsList.do?menuNo=13001&bbsNo=31>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017a) Method 21: Determination of Volatile Organic Compound Leaks. <https://www.epa.gov/emc/method-21>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017b) Method 25A: Determination of Total Gaseous Organic Concentration Using a Flame Ionization Analyzer. <https://www.epa.gov/emc/method-25a>

Authors Information

- 이유경(국립환경과학원 대기공학연구과 연구원)
(leeyk412@korea.kr)
- 강경구(국립환경과학원 대기공학연구과 연구원)
(kkg0223@korea.kr)
- 길지훈(국립환경과학원 대기공학연구과 연구사)
(episode23@korea.kr)
- 김기홍(국립환경과학원 대기공학연구과 연구사)
(khkim47@korea.kr)
- 강대일(국립환경과학원 대기공학연구과 과장)
(nierkang@korea.kr)
- 공부주(국립환경과학원 대기공학연구과 연구관)
(bjkong@korea.kr)