

기술자료

주유소 유증기 회수설비의 운영 실태 분석 및 관리 효율화 방안 Strategies for Efficient Management and Operational Status of Vapor Recovery Systems at Gas Stations

황규철^{1),2)}, 이해연¹⁾, 송민영³⁾, 김나래⁴⁾, 김동호⁵⁾, 노수진⁶⁾, 윤영욱⁷⁾,
김정호⁸⁾, 김종범^{1),*}

¹⁾충남연구원 서해안기후환경연구소,

²⁾국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공, ³⁾서울연구원 지속가능연구실,

⁴⁾금강유역환경청 측정분석과, ⁵⁾강원대학교 미세먼지통합관리학과,

⁶⁾대림대학교 보건안전학과, ⁷⁾APM엔지니어링, ⁸⁾열린공간

접수일 2026년 5월 12일

수정일 2026년 6월 15일

채택일 2026년 7월 6일

Received 12 May 2026

Revised 15 June 2026

Accepted 6 July 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-630-3924

E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Kyuchool Hwang^{1),2)}, Hye Yeon Lee¹⁾, Min Young Song³⁾, Na Rae Kim⁴⁾,
Dongho Kim⁵⁾, Sujin Noh⁶⁾, Younguk Yoon⁷⁾, Jeongho Kim⁸⁾, Jong Bum Kim^{1),*}

¹⁾Seohae Research Institute, Chungnam Institute, Hongseong, Republic of Korea

²⁾Major of Environmental Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

³⁾Urban Environment & Climate Change Research Division, The Seoul Institute, Seoul, Republic of Korea

⁴⁾Geum River Basin Environment Office, Daejeon, Republic of Korea

⁵⁾Department of Integrated Particulate Matter Management, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea

⁶⁾Department of Health & Safety, Daelim University, Anyang, Republic of Korea

⁷⁾APM Engineering Co., Ltd., Bucheon, Republic of Korea

⁸⁾Open Space Co., Seoul, Republic of Korea

Abstract This study investigated the operational status and exposure characteristics of vapor recovery systems (VRS) at gas stations in Korea and proposed strategies for improving management efficiency. Literature reviews and field measurements were conducted to evaluate the current management system and actual exposure conditions around gas stations. The results showed that VRS have contributed significantly to reducing volatile organic compounds (VOCs) emissions and improving economic benefits nationwide. Previous studies reported removal efficiencies of approximately 82~94% for total hydrocarbons (THC) and BTEX compounds near fuel dispensers. However, field observations in this study identified repeated short-term high-concentration exposure events despite the operation of VRS. A total of 90 spike events were detected during the observation period, and peak THC concentrations reached up to 54.0 ppm, approximately 37 times higher than the baseline concentration. The findings suggest that the current management approach, which primarily relies on recovery efficiency, may not adequately reflect actual exposure conditions at gas stations. In addition, the uniform application of a 90% recovery efficiency in emission inventories may lead to uncertainties because of equipment aging, leakage, and operational variability. Therefore, future management strategies should incorporate exposure-based assessment methods, periodic field evaluations, and consideration of Stage III vapor recovery technologies for improving both environmental and occupational health protection.

Key words: Gas station, VOCs, THC, Stage III, Vapor recovery system (VRS)

1. 서 론

휘발성유기화합물 (volatile organic compounds, VOCs)은 도장공정, 유기용제 사용, 건축자재, 접착제, 자동차 배기가스 등의 인위적 배출원 (anthropogenic VOCs)과 수목이나 해양에서 배출되는 자연적 배출원 (biogenic VOCs) 등 다양한 배출원을 통해 발생한다 (Lee *et al.*, 2024). VOCs는 인체 노출 시 신경계 장애를 일으키거나 호흡기 질환을 유발하며, 벤젠, 1,3-부타디엔 등은 발암물질로 알려져 있다 (Jindamanee *et al.*, 2025; Zhou *et al.*, 2023). 또한 최근에는 대기 중 질소산화물 (nitrogen oxides, NOx)과 반응하여 오존 (ozone, O₃) 및 광화학스모그 (photochemical smog)를 생성하는 것으로 알려지면서 대기오염 및 기후변화 측면에서 매우 중요한 물질로 관리되고 있다 (Lee *et al.*, 2022; Shao *et al.*, 2020).

기후에너지환경부(기후부)에서는 과학적이고 체계적인 대기환경 개선을 위해 2019년과 2020년 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(미세먼지법)」과 「대기 관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(대기권역법)」을 신설하였고, 해당 법에 따라 5년 단위의 미세먼지 저감 및 대기환경개선을 위해 계획을 수립하여 추진해오고 있다 (MCEE, 2020, 2019a). 관리 대상물질은 초미세먼지 (particulate matter less than 2.5 μm , PM_{2.5})와 미세먼지 (particulate matter less than 10 μm , PM₁₀)를 포함한, NOx, 황산화물 (sulfur oxides, SOx), VOCs 등 5개 항목이다 (MCEE, 2024). 1차 계획인 2020년부터 2024년까지 이행평가 결과 대부분의 오염물질은 기존 계획 대비 100% 이상의 목표치를 나타낸 반면, VOCs는 목표 미달성 지역이 다수 확인되어 이에 대한 신규사업 발굴과 추진이 필요한 것으로 나타났다 (CN, 2025). 1차 계획에서 VOCs에 대한 저감 사업으로는 노후 석탄화력발전소 조기 폐쇄와 가동중지 및 상한제약, 사업장 배출허용기준 강화, 노후 경유차 조기폐차, 노후 건설기계 및 농기계 엔진교체, 도로 VOCs 함량 제한 및 수성도로 전환, 주유소 유증기 회수설비 설치 등의 사업을 추진하였다 (MCEE, 2019b).

그중 도로 함량 제한과 주유소 유증기 회수설비 설치는 생활부문 주요 사업으로 진행되었으며, 대기권역법에 따라 권역 내 모든 주유소는 의무적으로 설치·운영하도록 하였다 (CNI, 2025).

주유소 유증기 회수설비는 주유소에서 유류의 운반, 저장 및 주유 시 발생하는 유증기를 포집·회수하는 설비를 설치하여 비산배출되는 VOCs 저감을 목적으로 설치되었으며, 설치 위치에 따라 Stage I (저장시설)과 Stage II (주유시설)로 구분된다 (Sa *et al.*, 2013). 유증기 회수시설은 설치 시 유증기 회수가 적절하게 이루어지는지 압력감쇄와 누설 및 유증기 회수율에 대한 설치검사를 진행하며, 이후 시설의 적정 운영·관리를 위해 연 단위로 정기검사를 진행하고 있다 (MCEE, 2018). 국가미세먼지정보센터에 발간하는 <국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람 VII>에 따르면 유증기 회수설비가 설치되어 있는 주유소에서 배출되는 VOCs 양은 주유소의 휘발유 판매량과 유증기 회수시설 유형별 VOCs 배출계수를 사용하여 산정되며, 여기서 유증기 회수설비가 설치되어 있는 경우 회수율은 90%로 일괄 적용하고 있다 (NAIR, 2025). 환경공단에서 유증기 회수설비의 효과 분석 결과 총 탄화수소 (total hydrocarbon, THC)와 벤젠에 대한 저감 효율은 각각 82.1%와 93.3%로 나타났다 (KECO, 2020a). 설비의 효율은 설치 이후 유지·관리에 따라 달라질 수 있지만, 일반적으로 시간이 지남에 따라 효율이 감소하는 경향이 있어 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

현재 유증기 회수율 검사는 전문 검사원이 어댑터를 이용해 노즐을 완전 밀폐한 이상적 조건에서 연 1회 측정되므로, 일반 이용객에 의한 불완전 밀폐, 설비 노후화 등 실제 운영 조건의 변동성을 반영하지 못한다. 또한 유증기 회수율은 VOCs 저감 성과를 나타내는 지표일 뿐, 주유소 종사자와 이용객이 주유 행위 중 순간적으로 노출되는 고농도 피크를 직접 반영하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 회수율이 아닌 실제 노출 농도에 초점을 맞춘 현장 측정을 수행하였다. 먼저 주유소 유증기 회수설비의 관리 동향과 국내외 주유소

유증기 노출 수준을 조사하였고, 주유소를 대상으로 현장 평가를 진행하여, 향후 주유소 유증기 회수설비 운영 방안을 제안하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 자료 조사

주유소 유증기 회수설비에 대한 운영 현황 파악을 위해 기후부와 환경공단의 자료를 활용하였다. 또한 검사 방법 등의 자료는 기후부의 고시를 활용하였으며, 배출량 산정방식은 국가미세먼지정보센터의 편람을 활용하였다. 그 밖에 주유소의 유증기 노출 수준 파악을 위해서는 구글과 DBpia 등의 검색포털을 활용하여 “주유소, 유증기 회수설비, 노출, 농도, VOCs” 등의 주요어로 검색하여 나온 결과를 분석하였다. 또한 현장 조사에 대한 기상 조건 검토를 위해 관측지인 충남 홍성군에 위치한 종관기상관측(automated synoptic observing system, ASOS) 자료를 활용하였다.

2.2 현장 측정

주유소의 VOCs 노출 현황 파악을 위해 주유소 1개소를 대상으로 측정을 진행하였다. 측정위치는 충남

홍성군에 위치한 내포신도시 내 주유소로 휘발유와 경유를 주유할 수 있는 노즐이 양방향으로 설치된 기기 2개가 운영되고 있었다. 측정 대상인 주유소를 중심으로 서쪽으로는 주거단지가 있고, 동쪽으로는 논, 밭과 함께 축사가 다수 위치해 있다. 북쪽으로는 약 1.5 km 거리에 LNG 발전소가 위치해 있지만, 본 연구의 주제인 VOCs의 농도에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 측정기간은 2025년 12월 1일부터 5일까지 5일간 진행되었고, 측정시간은 주유소 운영시간을 고려하여 오전 9시부터 오후 6시까지 진행하였다. 그림 1은 측정지점과 측정모습을 나타낸 것이다.

2.3 측정장비

주유소의 VOCs 노출특성 파악을 위해 2개의 측정장비를 활용하였다. VOCs의 경우 기존 공정시험법에서 활용되는 고체흡착관 분석법은 정확한 농도값을 확인할 수 있지만 실시간으로 변화하는 농도에 대한 시간 분포를 확인할 수 없다는 단점이 있다(Park *et al.*, 2022). 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 PTR-ToF-MS나 SIFT-MS와 같은 실시간 첨단장비를 활용한 연구가 진행되고 있다(Park *et al.*, 2025; Kim *et al.*, 2021). 하지만 이러한 첨단장비는 매우 고가이며, 전문 인력의 운영이 필요하다. 이에 VOCs에 대한 현장 점검 시



Fig. 1. Location of the surveyed gas station (left) and the view of measurement (right).

Table 1. Comparison of specifications of measurement device used in this study.

	TVA 2020	Air Pro
Manufacturer (Nation)	Thermo (U.S.A)	Kunak (Spain)
Detection method	FID	PID
Measurement period	Up to 10 hours for continuous measurement	Available for continuous measurement
Parameters	THC	PM _{2.5} , PM ₁₀ , CO ₂ , NO, O ₃ , VOCs, NH ₃ , etc. (Varies by sensor configuration)
Measurement range (resolution)	1.0~10,000 ppm (± 1.0 ppm)	0~3,000 ppb (± 1.0 ppb, for VOCs)
Detection limit	0.5 ppm	1.0 ppb
Sampling interval	2~30 sec	10~12 sec
Flow rate	1 lpm (pump)	Passive
Power supply	Battery (Up to 10 hours)	Solar panel (Self-powered)
Operating temperature	-10 to 45°C	-40 to 60°C
Weight	4.3 kg	3.5 kg

측정 분석이 어려운 VOCs 대신 THC로 진행되고 있으며, 대부분의 배출시설에 대한 배출허용기준 역시 THC로 설정되어 있다. 이에 본 연구에서는 VOCs의 노출특성 파악을 위해 TVA 2020 (Thermo, U.S.A)의 장비를 사용하였다. TVA 2020은 불꽃이온화 검출기 (Flame ionization detector; FID) 방법을 사용하여 총 탄화수소(THC)를 측정하였다. 또한 간이센서 방식의 Kunak Air Pro (Kunak, Spain)를 활용하여 VOCs에 대한 변화특성을 같이 검토하였다. 간이센서는 기존 공정시험 측정장비 대비 감도가 낮고, 정확성이 떨어진다는 단점이 있지만 상대적으로 저렴한 가격으로 다양한 장소에서 활용할 수 있다는 장점으로 지역 공간 분포 모니터링 등에 다수 활용되고 있다(Hwang *et al.*, 2023a; Noh *et al.*, 2021). 두 장비에 대한 상세 사양은 표 1에 나타났다.

측정 신뢰도 확보를 위해 다음과 같은 QA/QC 절차를 수행하였다. TVA 2020은 현장 측정 전 제조사 권고 절차에 따라 영점(zero) 및 범위(span) 교정을 실시하였으며, 측정기간 중 매일 측정 전 영점 확인을 수행하였다. Kunak Air Pro는 공인기관에 의한 공식 교정이 이루어지지 않은 간이측정기로, 절대농도의 정확도에는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 TVA 2020과 동일한 위치에 나란히 설치하여 동시 측정을 수행하였으며, 두 장비의 시간별 농도 변동 경향(시계열 패턴)이 전반적으로 유사하게 나타났다. 본 연구에서 Kunak

Air Pro의 VOCs 자료는 절대농도의 정량적 비교보다는 TVA 2020의 THC 농도 변화와의 시간적 변동 확인 및 보조 지표로 활용하였다.

2.4 자료 분석

수집된 데이터를 바탕으로 주유소 주변 지역의 THC 및 VOCs 농도특성을 분석하였다. Kunak Air Pro는 전 원 공급 문제로 12월 4일부터 5일까지의 데이터가 누락되어, 유효 데이터가 확보된 12월 1일부터 3일까지의 자료를 분석에 활용하였으며, TVA 2020 자료는 5일간의 자료를 모두 활용하였다. 주유소 주변의 순간적인 노출특성을 규명하기 위해 본 연구에서는 기저 농도(baseline) 대비 피크(peak) 농도를 분석하였다. 자료의 기저 수준은 이동 최솟값 필터(moving minimum filter)와 가우시안 평활화(Gaussian smoothing) 기법을 활용하여 정의하였으며, 특정 임계값(threshold)을 초과하는 고농도 지점을 식별하였다. 이동 최솟값 필터는 윈도우 크기 120분(1분 간격 데이터 기준 120포인트)을 적용하였고, 가우시안 평활화는 동일한 120포인트를 적용하였다. 스파이크 판별 임계값은 기저농도 + 2σ (약 95% 신뢰구간) 기준으로 설정하였으며, 임계값 초과 및 국소 최댓값 조건을 동시에 만족하는 시점을 스파이크 이벤트로 정의하였다. 모든 데이터 통계 및 분석은 MATLAB (R2022b version, Mathworks)을 통해 분석되었다.

3. 연구 결과

3.1 주유소 유증기 회수설비 관리 현황

3.1.1 유증기 회수설비 설치 현황

주유소에서 배출되는 유증기로 인한 인체 위해성과 오존 전구물질 관리를 목적으로 유증기 회수설비가 설치·운영되고 있으며, 2020년 제정된 대기관리권역법에 따라 수도권에만 한정되었던 의무 지역이 전국 4개 권역의 시도 주유소로 확대되었다(MCEE, 2020). 2021년 연간 판매량 2,000 m³ 이상인 주유소를 우선적으로 설치가 의무화되었고, 2023년까지 연간 판매량 1,000 m³ 이상의 주유소까지 확대·적용되었다. 2024년에는 대부분의 대상 사업장에 관련 시설 설치가 완료되었다(KECO, 2020a).

Stage I의 경우 저장시설에 대해 휘발유 운반차량의 유류를 저장시설로 공급하는 과정에서 배출되는 유증기를 회수밸브를 통해 운반차량으로 회수하며, Stage II는 주유시설에서 휘발유 차량 주유 시 자동차 연료탱크로부터 배출된 유증기를 주유기에 부착된 회수설비를 통해 저장시설로 회수하고 있다(Kim, 2014). 2025년 12월 기준 전국의 유증기 회수시설 설치 주유소는 총 6,635개소이며(표 2), 지역별로는 경기도가 1,936개소로 가장 많이 설치되어 있으며, 그 뒤를 이어

충청남도 613개소, 경상남도 487개소, 경상북도 478개소 등으로 나타났다(KECO, 2025).

3.1.2 유증기 회수설비 설치 효과

주유소 유증기 회수설비가 전국으로 확대 도입된 이후의 종합적인 효과 분석 자료는 현재까지 미비한 실정이다. 다만, 2020년 환경공단에서 발간한 <유증기 회수설비 설치사업 업무편람>에 2008년부터 2019년까지 시행된 사업의 운영 성과를 바탕으로 유증기 회수설비 도입에 따른 정량적 효과를 보고하였다(KECO, 2020a). 유증기 회수설비 설치 주유소는 2008년 243개소에서 2019년 3,868개소로 12년간 약 15.9배 증가하였으며, 휘발유 판매량은 612,000천 리터에서 6,881,440천 리터로 약 11.2배 증가하였다. 12년간 발

Table 2. Status of gasoline vapor recovery system installation by region (KECO, 2025).

Region	No.	Ratio (%)	Region	No.	Ratio (%)
Gyeonggi	1,936	29.2	Incheon	303	4.6
Chungnam	613	9.2	Jeonnam	299	4.5
Gyeongnam	487	7.3	Jeonbuk	281	4.2
Gyeongbuk	478	7.2	Gwangju	224	3.4
Seoul	436	6.6	Daejeon	212	3.2
Chungbuk	392	5.9	Ulsan	207	3.1
Busan	383	5.8	Sejong	55	0.8
Daegu	329	5.0	Total	6,635	100.0

Table 3. Annual performance of vapor recovery and economic benefits (KECO, 2020a).

	No. of gas station	Oil sales (1,000 L)	VOCs emissions (tons)	VOCs recovery (tons)	Economic benefit (Million KRW)
2008	243	612,000	679	611	1,402
2009	977	1,964,000	2,180	1,962	4,256
2010	1,996	3,647,000	4,048	3,643	8,444
2011	2,631	4,563,000	5,065	4,558	11,917
2012	2,855	4,989,000	5,538	4,984	13,411
2013	2,992	5,179,000	5,749	5,174	13,492
2014	3,037	5,156,826	5,724	5,152	12,755
2015	3,068	5,132,764	5,697	5,128	10,494
2016	3,114	5,323,931	5,863	5,277	10,029
2017	3,156	5,316,433	5,901	5,311	10,732
2018	3,229	5,367,890	5,958	5,363	11,491
2019	3,868	6,881,440	7,638	6,875	13,716
Total		54,133,284	60,040	54,038	122,139

Table 4. Comparison of VOC emissions before and after the installation of vapor recovery systems (unit: %) (KECO, 2020a).

	THC	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
Fuel dispenser	82.1	93.3	92.2	87.0	94.4
Roadside	53.0	59.5	61.6	49.6	59.6
Office		38.4	50.0	20.7	23.1

생한 누적 VOCs 배출량 60,040톤 중, 약 54,038톤이 회수된 것으로 산정되었으며 (90% 회수율 적용), 이를 통한 경제적 편익은 총 122,139백만 원으로 산정되었다(표 3).

유증기 회수설비 설치에 따른 저감 효과 분석을 위해 2012년부터 2017년까지의 자료를 검토하였고, 설치 전후 주유기, 도로변, 사무실에서 THC 및 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌에 대한 저감 효과를 분석하였다(표 4). THC의 경우 주유기에서는 82.1%, 도로변에서는 53.0%의 저감 효과를 보였다. 벤젠은 주유기 93.3%, 도로변 59.5%, 사무실 38.4%로 나타났고, 톨루엔 역시 주유기 92.2%, 도로변 61.6%, 사무실 50.0%로 벤젠과 유사한 저감 효과를 보였다. 주유기 주변에서의 저감 효율은 82.1~94.4%로, 국가 배출량 산정 시 적용되는 회수설비 조건인 90%와 대체로 부합하는 수준이 나타났다.

3.1.3 유증기 회수율 관리

유증기 회수설비는 주유 과정에서 발생한 유증기를 회수밸브나 노즐을 통해 주유차량이나 주유탱크로 회수시키는 역할을 한다. 저장시설(Stage I)의 경우 유류가 운반되어 오는 경우 간헐적으로 발생하며, 즉시 운반차량으로 회수하여 가기 때문에 노출에 대한 영향은 미비한 편이다(Kim *et al.*, 2013). 하지만 주유시설(Stage II)은 하루 중 주유차량의 이용에 따라 빈번하게 발생하기 때문에 노출 관리가 중요하다. 이에 유증기 회수설비는 설치 당시 설치검사를 진행하여 압력감쇄 및 누설, 회수율을 확인한다. 이후 회수율은 연 1회, 압력감쇄와 누설은 2년에 1회 검사를 진행하도록 하고 있다(KECO, 2020b). 회수율은 기체 흡입 어댑터를 주유 노즐의 유증기 흡수공에 밀폐 부착 후 주유 시 부착된 어댑터와 연결된 호스를 통해 흡입되는 공기

량을 측정하여 산정한다. 식 (1)은 회수율 계산식이다.

$$A/L = \frac{G_1 - G_0}{Q_1 - Q_0} \quad (1)$$

여기서 A/L = 회수율(%)

G_0 = 유증기 유량 계측기 초기 눈금

G_1 = 일정 체적(약 17~19 L)에 도달했을 때 유증기 유량 계측기 눈금

Q_0 = 주유 계측기 초기 눈금

Q_1 = 일정 체적(약 17~19 L)에 도달했을 때 주유 계측기 눈금

회수설비의 정확한 저감 효율을 산정하기 위해서는 개별 기기 및 대상물질에 대한 농도 관측이 필요하다. 하지만 주유소 현장에서는 주유기에서의 누출 외에 자동차의 이동 과정에서 배출된 오염물질과 도로변 등 주변으로부터 비산영향이 작용할 수 있어 기기의 누출에 대한 정확한 파악이 어렵다. 이러한 이유로 회수율을 기반으로 운영 효과를 산정하고 있지만 회수율 판정 과정에서 가정되는 90%의 경우 노출에 부착된 고무패킹이 차량 유입구와 주유구가 완전 밀착된다는 전제 조건이 부합되어야 하며, 만약 밀폐가 되지 않는다면 주변 공기가 유입되고 반대로 유증기는 외부로 노출될 가능성이 있다. 또한, 설비의 노후화나 사용자의 부적절한 노즐 조작 등에 의해 실제 효율은 설계치보다 감소할 수 있어, 향후 시설 관리나 효과 분석 시 이에 대한 고려가 필요하다.

3.2 주유소 현장 조사

3.2.1 기상 개황

본 연구 기간인 2025년 12월 1일부터 12월 5일까지의 기상 자료 분석을 위해 관측지에 인접한 홍성 종관

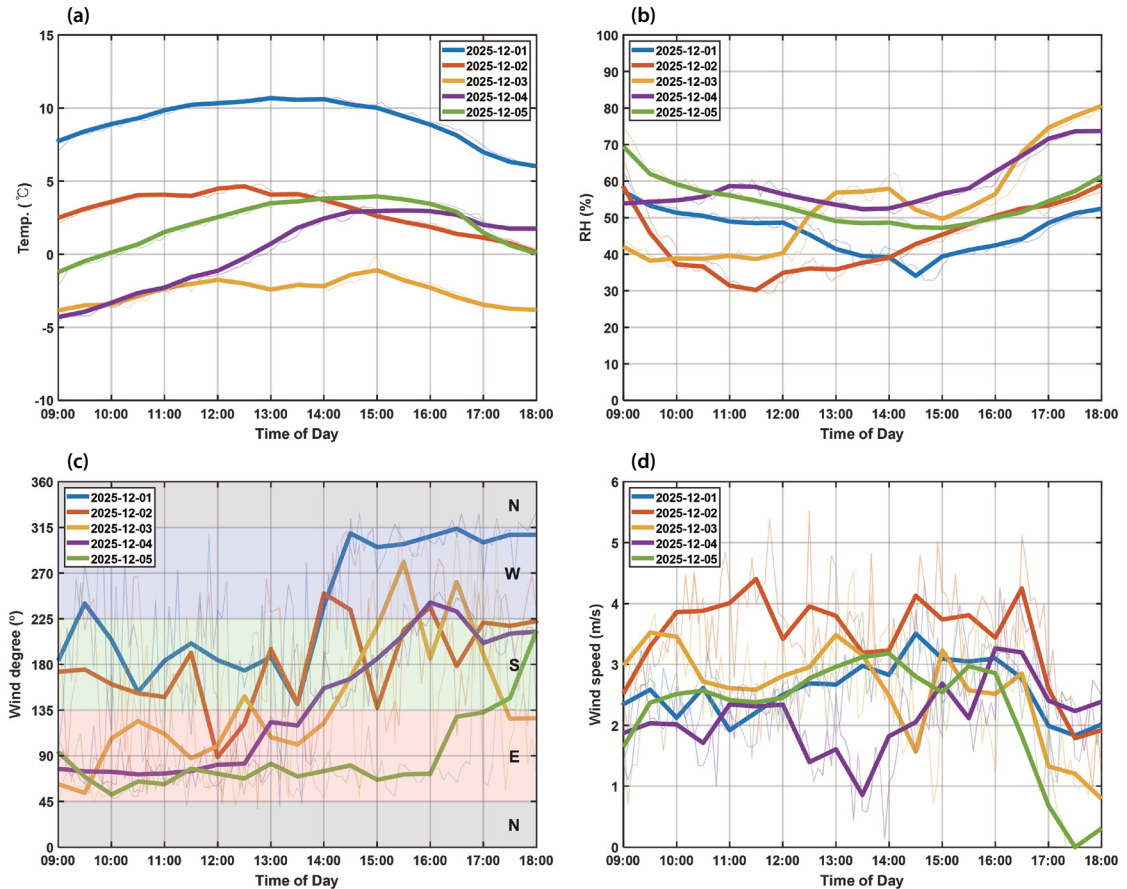


Fig. 2. Time-series variations of meteorological parameters during the observation period.

기상관측소 자료를 활용하였다. 주요 기상 요소를 분석한 결과, 현장 조사 초기에는 비교적 온화한 기온 분포를 보였으나 조사 후반으로 갈수록 기온이 하락하여 전형적인 초겨울 형태의 기온 분포가 나타났다(그림 2). 12월 1일 평균 기온은 약 9.1°C로 상대적으로 온화하였으나, 12월 3일 기온이 급감하여 평균 기온 약 -2.6°C로 나타났다. 상대습도는 관측기간 동안 약 40~60%로 유지되었다. 평균 풍속은 2.1~3.4 m/s로 나타났다으며, 주풍향은 북동풍과 북서풍으로 나타났다.

3.2.2 주유소 주변 THC 및 VOCs 농도 변동

측정기간 동안 주유소 주변에서 관측된 THC와 VOCs의 시간별 농도 변화를 분석한 결과, 두 물질 모

두 일정한 주기성을 보이며 특정 시간대에 농도가 증가하는 경향을 나타냈다(그림 3). 그림 3의 좌측 y축은 THC 농도(ppm), 우측 y축은 VOCs 농도(ppb)를 나타낸다. 본 연구에서는 차량 출입 관리대장, 카드 결제 내역, 유조차 하역 기록 등 주유소의 세부 운영 자료에 대한 접근이 제한되어, 스파이크 이벤트를 개별 배출원(주유, 유조차 하역, 기상 조건 등)별로 정량적으로 분리하지는 못하였다. 다만 측정지점은 주유소 부지 내에 위치하며, 인근에 VOCs 및 THC를 다량 배출하는 산업시설이나 교통밀집지역이 존재하지 않는 입지적 특성을 보인다(그림 1). 이러한 점을 고려하여, 본 연구에서 관측된 고농도 스파이크는 주유소 내 운영 활동(주유 행위, 유증기 발생·회수, 차량 출입 등)에

기인한 것으로 해석하였다.

측정 시작 직후인 오전 9시에 THC는 4.0 ± 0.7 ppm, VOCs는 33.6 ± 21.9 ppb를 기록하였다. THC의 경우 이른 오전 시간대에 비교적 높은 농도를 유지하다가 10시 이후 점진적으로 감소하는 양상을 보였는데, 이는 대기 혼합고의 상승에 따른 확산 효과와 전일 야간에 정체되었던 오염물질의 영향이 복합적으로 작용한

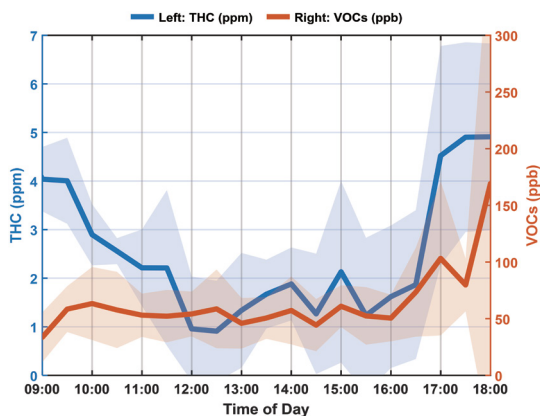


Fig. 3. Time-series variations of THC (blue) and VOCs (red) concentrations during the observation period.

것으로 판단된다. 정오를 기점으로 THC 농도는 약 1.0 ppm까지 낮아지며 최저치를 기록하였다. 16시까지 THC는 1~2 ppm 내외, VOCs는 40~60 ppb 범위에서 비교적 안정적인 수준을 유지하였다. 15시경 THC의 표준편차가 1.9 ppm으로 일시적으로 상승하는 현상이 관찰되었는데, 이는 해당 시간대 주유 차량 유입량의 일시적 증가와 하역 작업 등 이벤트성 배출원의 간헐적 영향에 의한 것으로 분석된다. 16시 이후부터 두 물질의 농도는 급격하게 상승하는 양상을 나타냈다. 17시에 THC 농도는 4.5 ± 2.3 ppm으로 오전 최고농도보다 높게 나타났으며, 18시에는 4.9 ± 1.9 ppm으로 일 최고농도가 나타났다. VOCs 역시 18시에 169.3 ± 227.5 ppb로 급증하며 일 최고농도가 나타났다. 특히 18시경 관측된 VOCs의 높은 표준편차 (± 227.5 ppb)는 퇴근 시간대 차량 집중 유입에 따른 유증기 배출량 증가와 함께 기온 하강에 따른 지표 역전층 형성으로 인해 오염물질이 지표 인근에 정체될 수 있는 가능성을 나타낸다. 결과적으로 주유소 주변의 유증기 관련 물질 농도는 차량 활동도가 높은 퇴근 시간대에 기상 요인과 맞물려 가장 높은 노출 수준을 보였다.

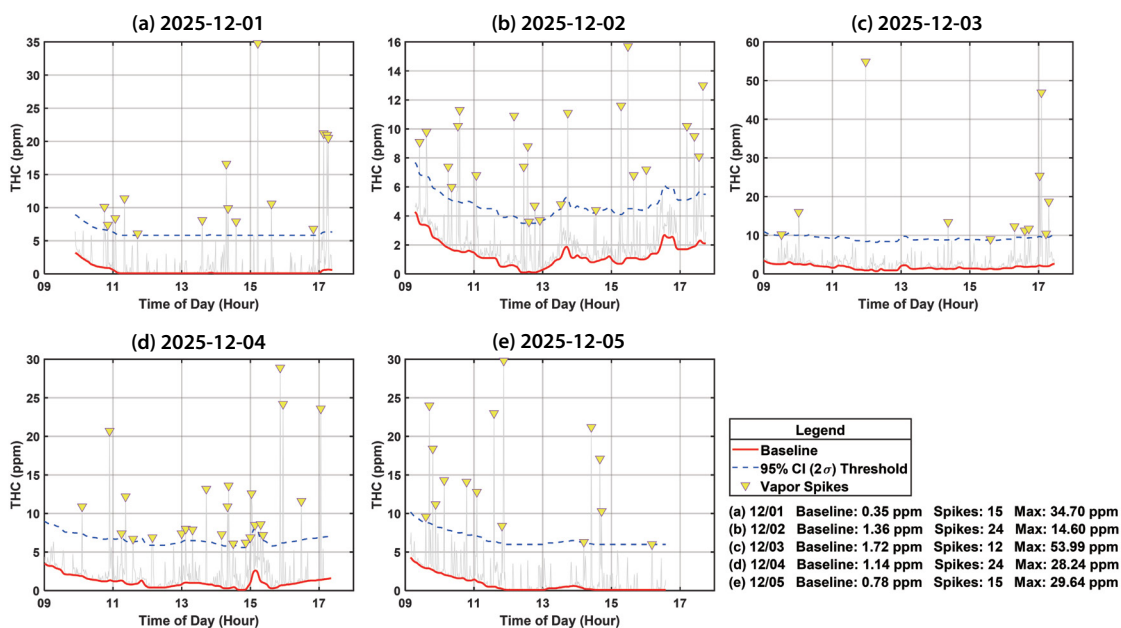


Fig. 4. Baseline and peak identification of THC concentrations using a moving minimum filter and Gaussian smoothing.

TVA 2020을 통해 수집된 THC 원본 데이터(1분)를 기준으로 이동 최솟값 필터와 가우시안 평활화 기법으로 분석한 결과, 주유소 주변의 배경농도와 단기적인 고농도 배출 이벤트인 스파이크(Spike) 현상이 명확히 구분되었다(그림 4).

측정기간 동안 스파이크 이벤트는 총 90회 발생하였으며, 기저농도 대비 가장 높은 스파이크 농도가 나타난 날은 12월 1일로 확인되었다. 당일 평균 기저농도는 0.4 ppm으로 매우 낮은 배경 수준을 유지했으나, 식별된 스파이크의 평균농도(Avg. Spike Height)는 13.1 ppm으로 기저농도의 약 37배에 달하는 THC가 주유 활동 시 반복적으로 배출되었음을 의미한다. 기저농도가 상승했던 다른 측정일에도 스파이크의 농도는 기저농도 수준 대비 매우 높은 수준이 나타났다. 12월 5일의 경우 기저농도(0.8 ppm) 대비 평균 스파이크 높이가 약 18배 높게 형성되었으며, 12월 3일에는 기저 수준이 높았음에도 불구하고 평균 10배 이상의 추가적인 농도 증가가 관측되었다.

3.3 주유소 VOCs 노출 수준

앞서 주유소의 THC 노출 수준 파악을 위해 현장 조사를 수행하였다. 현장 조사 결과 배경농도 대비 순간적으로 높은 농도를 보였으며, 이는 기존 배경농도 대비 최대 약 37배까지 높은 수준으로 확인되었다. 하지만 이러한 노출농도가 주유소 유증기의 영향인지 도로변 또는 주유하러 들어온 자동차 배기가스의 영향인지는 확인할 수 없다. 이에 선행 연구를 기반으로 주유소의 VOCs 노출 수준을 검토하였다.

국내에서는 Jang *et al.* (2015)이 주유소 유증기 회수설비 운영에 따른 VOCs와 악취 저감 효과를 분석하였다. 대상지역은 당시 유증기 회수설비 의무설치지역이었던 수도권(서울, 경기, 인천)의 5개 주유소를 대상으로 하였고, 측정 전 사전검사를 통해 유증기 회수설비의 회수율이 적정 범위(88~120%) 이내인 곳을 선정하였다. 연구 결과 주유기 주변의 복합악취는 약 92.6%가 저감되었고, BTEX에 대해서는 벤젠 93.6%, 톨루엔 92.8%, 에틸벤젠 91.6%, 자일렌 92.2%로 기존

의 기준 저감률(90%)을 상회하는 것으로 나타났다. 다만 인근 사무실과 부지 경계에서는 각각 32%와 45% 수준으로 떨어지는 것으로 나타났지만 이에 대한 영향은 유증기 외 주변 흡연과 자동차 배기가스 등 외부 영향이 관여했을 것으로 보고하였다.

Hakkola and Saarinen (2000)은 이보다 앞서 핀란드 헬싱키에서 유증기 회수설비 설치에 따라 Stage I과 II의 탄화수소(C3~C11) 노출 수준을 평가하였다. 연구 결과 Stage I의 경우 유증기 회수설비 운영에 의해 기존 대비 노출 수준이 20~25% 수준으로 나타났고, Stage II의 경우 고객이 가솔린 증기에 노출되는 정도를 상당히 제어해주며, 주변 환경으로의 배출도 감소시키는 것으로 보고하였다. Lee *et al.* (2015) 역시 주유소 유증기 회수설비 사용에 따른 BTEX의 개인노출 특성을 검토하였는데 물질별로 벤젠 1.8 ± 6.9 ppb, 톨루엔 7.7 ± 13.7 ppb, 에틸벤젠 0.2 ± 0.8 ppb, 자일렌 1.6 ± 8.4 ppb로, 농도별 편차가 매우 크게 나타났다. 여기서 Stage II의 설비가 VOCs 배출억제와 더불어 주유소 종사자의 노출저감 효과도 높은 것으로 보고하였다. 하지만 향후 주유소 종사자의 건강보호를 위해 관련 사업장에 대한 작업환경 노출평가 필요성을 언급하였다.

선행 연구에서 가솔린 유증기 노출에 따른 장기적인 부정적인 건강 피해 사례는 확인되지 않았지만 일부 민감한 사람은 급성 자극 증상을 보인다고 보고하였다(Fiedler *et al.*, 1994).

Muto *et al.* (2025)은 2000년부터 2021년까지 발표된 주유소 벤젠 노출 관련 논문을 분석하여 그 결과를 보고하였다. 총 22개국에서 실시한 73개 연구를 대상으로 하였고, 논문 중 확인된 3,944건의 벤젠 농도 중 제시된 검증 방법에 따라 선별된 1,396건의 자료를 활용하였다. 전체 데이터에 대한 평균농도는 7 ppb 수준으로 확인되었고, 이는 미국정부산업위생전문가협회(American conference of governmental industrial hygienists, ACGIH)에서 제공하고 있는 8시간 기준의 시간가중평균농도(time-weighted average, TWA)인 0.5 ppm보다 낮은 것으로 나타났다(Work Safe BC, 2025).

Table 5. Estimated THC concentrations derived from benzene exposure levels by country.

Region	Country	Benzene (ppb)	Estimated THC (ppm)
Asia	Iran	319.8	32.0
	Thailand	59.2	5.9
	India	32.6	3.3
	Republic of Korea	34.5	3.5
	China	14.7	1.5
	Vietnam	75.2	7.5
Middle East	Saudi Arabia	10,702.2	1,070.2
	Egypt	3,695.9	369.6
Europe	Greece	339.8	34.0
	Italy	56.3	5.6
	Serbia	12.9	1.3
	Spain	34.5	3.5
South America	Brazil	147.8	14.8
North America	Mexico	6.6	0.7
This study			2.5 ± 1.2

측정값을 국가별로 보면 사우디아라비아가 10.7 ppm으로 가장 높은 수준으로 나타났고, 이집트 3.7 ppm, 그리스 0.34 ppm, 이란 0.32 ppm, 한국 0.03 ppm으로 확인되었다. 선행 연구에서 벤젠은 THC의 0.5~1.5%를 차지하는 것으로 보고하였으며, 이를 기반으로 본 연구에서 측정된 THC와 비교를 위해 환산된 농도를 표 5에 나타냈다(Saarinen *et al.*, 2000; Vainiotalo *et al.*, 1999). 환산은 앞서 선행 연구에서 제시한 비율(0.5~1.5%)의 중간값인 1.0%와 상온 조건(25°C, 1기압)으로 가정하여 산정하였다.

3. 4 유증기 회수설비 관리 효율화를 위한 제언

주유소의 유증기 누출을 막기 위해 설치된 유증기 회수설비는 생활부문 VOCs 저감 정책으로 지속적으로 추진되어 왔으며, 특히 2020년 제정된 대기관리권 역법에 따라 전국으로 확대됨에 따라 높은 VOCs 저감과 더불어 경제적 이익을 주는 것으로 보고되고 있다. 하지만 문헌 조사 및 현장 측정 결과 시설 점검에 대한 한계와 빈번하게 발생하는 근로자 및 이용자에 대한 고농도 노출, 배출량 산정 과정에서 과소 산정이 발생

할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 본 연구 결과를 기반으로 다음과 같은 개선 방안을 제안한다.

3. 4. 1 주유소에 대한 작업환경 관리 차원의

노출 관리

주유소 현장에서 유증기 회수설비에 대한 효과 분석은 많은 어려움이 따른다. 이에 본 연구에서는 주유소에서 회수설비에 대한 성능보다는 주유 시 순간적으로 노출되는 농도에 관점을 맞춰 현장 조사를 진행하였다. 현장 조사 결과 THC 기준 주유소의 배경농도는 0.4~1.7 ppm 수준이었으나 이와 대조적으로 피크 농도는 일 최소 12회에서 24회까지 확인되었다. 피크 시 평균 농도는 7.1~18.1 ppm으로 나타났으며, 최대 54.0 ppm까지 치솟아 배경농도 대비 약 37배 높게 나타났다. 이는 주유소 현장 근무자와 이용객이 배경농도 대비 수십 배가 넘는 고농도 유증기에 하루 수십 차례 반복적으로 노출되고 있음을 의미한다. 산업보건 분야에서는 작업장을 대상으로 TWA와 더불어 15분 단위의 단시간노출기준(short term exposure limit, STEL)도 중요 지표로 관리하고 있다(Ashford and Caldart, 2025). 주유를 위해 차량이 입고되고 출차될 때까지 약 5분 정도 소요된다고 볼 때, 고농도 피크에 대한 반복적인 단기 노출 가능성이 확인되었다. 이러한 관점에서 주유소 주변 대기질에 대한 관리는 단순한 회수율 차원을 넘어 작업환경 관리 관점에서 고농도 피크에 대한 관리나 제어를 위한 기술적 대책과 정책적 방안이 마련될 필요가 있다. 기술적으로는 주유기 상부에 국소 배기장치를 설치하거나 실시간 농도 감시 및 경보 체계를 도입하는 방안을 검토할 수 있으며, 제도적으로는 산업안전보건법에 작업환경측정 대상에 주유소를 포함하여 STEL 기반의 정기적 노출평가를 실시하는 방안을 고려할 수 있다. 다만 이러한 설비 도입은 영세 주유소에 비용 부담으로 작용할 수 있어, 단계적 적용이나 지원 사업과의 연계가 함께 검토될 필요가 있다.

3. 4. 2 배출량 산정 시 누출 및 시설 노화에 대한 고려

CAPSS는 국가 정책수립과 추진 효과 분석에 대한 중요 지표로 활용되고 있다(Choi *et al.*, 2025; Hwang

et al., 2023b). 현재 주유소에 유증기 회수설비가 설치된 경우 저감 효율을 90%로 일괄 적용하고 있다 (NAIR, 2025). 환경공단에서 실시한 효과 분석에서 90%에 유사한 효율(82.1~94.4%)을 보였다. 하지만 이는 전문가에 의한 정확한 활용에 의한 결과로 일반인이 사용하는 경우 회수 노즐의 밀폐를 확인하기는 어렵고, 시설(펌프)의 노후화에 따른 효율 저하도 감안해야 한다. 또한 일부 연구에서는 온도와 압력차에 의한 응결이 시설 효율을 저하시키는 원인으로 제기하였다(Liu et al., 2000). 2012년 정기검사 결과 대상 사업장의 18.5%가 부적합 판정을 받았으며, 최근에는 응결에 의한 단점을 보완하기 위한 연구나 유증기 회수설비의 개선을 위해 형식인증을 일부 개편하기도 하였다(Liang et al., 2024; Kim et al., 2013). 이러한 점을 종합적으로 고려하면, 현재 배출량 산정에 일률적으로 적용되는 90%의 저감 효율은 전문 검사원에 의한 최적 조건하의 측정값을 근거로 한 수치임을 인식할 필요가 있다. 본 연구는 단일 주유소에서 단기 관측의 한계로 인해 90% 기준에 대한 직접적 수정 근거를 제시하기에는 충분하지 않으나, 향후 다수 지점에 대한 현장 실증 연구를 통해 설비 연식별·계절별 실제 저감 효율 범위를 파악하고, 이를 배출계수 산정에 반영하는 방안을 검토할 필요가 있다.

3.4.3 유증기 회수설비의 경제성 증대를 위한

Stage III로의 전환

기존의 유증기 회수설비는 누출된 유증기를 주유차량이나 보관탱크로 회수만 할 뿐 유증기를 재가공하여 활용하지는 못하고 있다. 하지만 최근 유럽과 중국, 그리고 국내 일부 업체에서 회수된 유증기를 감압(Depressurization)하여 재사용할 수 있는 방안(Stage III)을 제시하고 있다(Ecomagic, 2026; Hongyang, 2026). 증기화된 유체는 쉽게 누출되어 주변 환경 및 근로자에게 악영향을 미칠 수 있으나 이를 감압하게 되면 다시 액체 상태로 전환되어 재사용이 가능하다(EMglobal, 2021). 유럽 등에서는 기존의 Stage I, II에서 Stage III로의 전환이 추진되고 있다. 아직은 상용화나 적용사례가 많지 않아 경제성은 떨어질 수 있지만,

회수된 유증기를 감압을 통해 액체로 보관 시 누출에 대한 염려가 적어질 수 있고, 유증기의 재사용이 가능하다는 측면에서 Stage III로의 전환도 향후 검토가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 주유소 유증기 회수설비의 운영 현황과 관리 실태를 조사하고, 실제 주유소 현장에서의 THC 및 VOCs 노출특성을 분석하여 향후 관리 효율화 방안을 제안하였다. 국내 유증기 회수설비는 대기관리권역법 시행 이후 전국적으로 확대 설치되었으며, 기존 연구 결과에서 THC 및 BTEX 물질에 대해 약 82~94% 수준의 저감 효율을 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 유증기 회수설비의 확대 운영은 VOCs 배출량 저감과 경제적 편익 측면에서 긍정적인 효과를 보이는 것으로 나타났다.

그러나 본 연구의 현장 측정 결과, 유증기 회수설비가 설치된 주유소에서도 단기적인 고농도 THC 노출이 반복적으로 발생하는 것으로 확인되었다. 측정기간 동안 총 90회의 고농도 사례가 관측되었으며, 배경농도 대비 약 37배 높은 수준을 나타냈다. 현재 유증기 회수설비의 관리 체계는 회수율 중심으로 운영되고 있으나, 실제 현장에서는 노즐 밀폐 상태, 설비 노후화, 운전 조건 등에 따라 회수 효율이 달라질 수 있다. 또한 국가 배출량 산정 과정에서 회수 효율을 일률적으로 90% 적용하는 방식은 실제 배출특성을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다.

따라서 향후 주유소 유증기 회수설비 관리는 단순한 회수율 평가를 넘어 실제 노출특성을 고려한 관리 체계로 전환될 필요가 있다. 이를 위해 현장 기반 노출 평가 확대, 시설 노후화에 따른 회수 효율 현실화, 작업환경 관리 차원의 단기 고농도 노출 관리, 그리고 회수 유증기의 재활용이 가능한 Stage III 기술 도입 검토 등이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구는 단일 주유소를 대상으로 수행되었다는 한계가 있으며, 차량 배출가스와 유증기 영향을 완전히 분리하지 못하였다. 다

만 정책 적용을 위해서는 공정시험법과 간이측정장비 간 비교 기준의 부재, 주유소 운영정보 접근의 제약, 다수의 영세 사업장에 대한 모니터링 비용 부담, 차량 배기가스와 유증기 기여분의 분리 문제 등이 해결되어야 할 과제로 남아 있다. 향후 연구에는 다양한 지역과 계절을 포함한 장기 관측, BTEX 등 개별 VOCs 성분 분석, 그리고 측정 표준화 방안 마련이 포함될 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 충청남도의 재원으로 충남연구원 정책지원과제 “생활 VOCs 배출원(주유소)의 배출관리 기호 현황 조사(25DE0014)”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ashford, N.A., Caldart, C.C. (2025) Environmental Protection Laws, 37-50, International Encyclopedia of Public Health 3rd Edition.
- Choi, S., Lee, D., Choi, Y., Choi, K., Shin, E., Kim, H., Cha, M., Song, H., Yoo, C. (2025) Analysis of national air pollutant emissions in 2020 and re-estimation results for emissions from past years (2016-2019), *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 19(4). <https://doi.org/10.1007/s44273-025-00051-6>
- Chungcheongnam-do (CN) (2025) The 2nd Chungcheongnam-do Air Quality Management Implementation plan.
- ChungNam Institute (CNI) (2025) A Survey on the Basic Status of Emission Management for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Gas Stations. <https://www.cni.re.kr/main/contents/report/view.do?docId=1025DE0014&no=23&kind=1&projectType=7&sort=DATE%2FDESC&period=1> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Ecomagic (2026) Vapor recovery methods must change. <https://www.ecomagic.co.kr/page/technologies.php> (accessed on Apr. 19, 2026).
- EMglobal (2021) Stage-3 VRU for Retail Fuel Station Networks. <https://emglobal.biz/?redirect=no> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Fiedler, N., Mohr, S.N., Kelly-McNeil, K., Kipen, H.M. (1994) Response of Sensitive Groups to MTBE, Inhalation Toxicology, 6, 539-552. <https://doi.org/10.3109/08958379409003039>
- Hakkola, M.A., Saarinen, L.H. (2000) Customer Exposure to Gasoline Vapors During Refueling at Service Stations, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(9), 677-680. <https://doi.org/10.1080/10473220050110086>
- Hongyang (2026) Gasoline Vapor Recovery by Condensation and adsorption. <https://www.chinahongyang.com/vapor-recovery-system/stage-iii-for-filling-station/> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Hwang, K., Park, S., Lee, G., Kim, J.B. (2023a) Indoor Air Quality Analysis in Naepo New Town using IoT Sensor, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 24-41, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.24>
- Hwang, K., Park, S., Lee, G., Noh, S., Kim, J., Lee, J.Y., Park, J.-S., Kim, J.B. (2023b) Policy Recommendation for Region Air Quality Management and Change of Air Pollutants Emission in ChungNam base on Modified CAPSS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(4), 492-524, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.4.492>
- Jang, T.H., Kim, T.-O., Song, K.-B., Kim, H.-S., Jeong, J.-Y., Chung, S.-H. (2015) Reduction of Malodor and VOCs Emission through Vapor Recovery System in Gas Station, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 14(4), 263-269, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2015.14.4.263>
- Jindamanee, K., Keawboonchu, J., Pinthong, N., Meeyai, A., Inchai, P., Thepanondh, S. (2025) Environmental impacts and emission profiles of volatile organic compounds from petroleum refineries, *Scientific Reports*, 15, 15509. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99932-7>
- Kim, C.H., Kim, J., Noh, S., Lee, S., Yoon, S.H., Lee, S.S., Park, J.-S., Kim, J.B. (2021) A Study on Temporal-Spatial Characteristics of Volatile Organic Compounds Distributed near Petrochemical Industrial Complex using PTR-ToF-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 812-828, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.812>
- Kim, J.H. (2014) A Study on the Effective Management Strategies for Reducing Volatile Organic Compounds (VOCs) Emissions in Gas Station. Ph.D. Dissertation, Kwangwoon University, Seoul, Korea, (in Korean with English abstract). <https://www.riss.kr/search/detail/Detail>

- View.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=b2a9b8916a8ca363ffe0bdc3ef48d419&outLink=K (accessed on Apr. 19, 2026).
- Kim, J.H., Sohn, Y.-L., Kim, H.-S., Jang, T.-H., Yoo, K.S. (2013) A Study on Present Conditions and Improvement Alternatives of Vapor Recovery Unit of Stage II at Gas Stations, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 6, 115-140, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2013.06.21.2.115>
- Korea Environment Corporation (KECO) (2020a) Technical Manual for the Installation of Stage II Vapor Recovery Systems. https://www.mcee.go.kr/m/mob/policy_data/read.do?sessionId=EvVFRmrlglpB-pqBJ-1KDvj4bPc4B3xpOtMsXH.mehome1?menuId=36&condition.code=A30102&seq=7536 (accessed on Apr. 19, 2026).
- Korea Environment Corporation (KECO) (2020b) Operation and Maintenance (O&M) Guideline for Vapor Recovery Units. https://www.keco.or.kr/web/lay1/bbs/S1T197C1136/A/101/view.do?article_seq=25110 (accessed on Apr. 19, 2026).
- Korea Environment Corporation (KECO) (2025) Current Status of Vapor Recovery System (VRS) Installation in Gas Stations by Region. <https://www.data.go.kr/data/15148322/fileData.do> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Lee, D., Kim, D., Lee, D., Song, M.Y., Kim, J.B., Choi, W., Hong, C.S., Kim, K. (2022) A Study on Distribution of Volatile Organic Compounds Concentration over Paju National Publishing Complex, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4) 599-609, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.599>
- Lee, H., Won, J.-U., Kim, C.-N., Roh, J. (2015) Occupational Exposure Aspects of Gasoline Vapor According to the Use of a Gasoline Vapor Recovery System, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 25(2), 156-165, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.2.15>
- Lee, J., Lee, M., Chang, L., Shin, S.-A., Kim, K., Choi, Y., Lim, H., Choi, S.-D., Lee, G. (2024) Assessment of VOCs emission inventory in Seoul through spatiotemporal observations using passive and online PAMS measurements, *Atmospheric Environment*, 338(1), 120857. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120857>
- Liang, J., Sun, L., Cheng, C., Wang, K., Zhu, T., Li, T. (2024) Advancing gasoline vapor recovery in oil depots: Integrating cooling and adsorption technologies, *Energy*, 313(30), 133823. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133823>
- Liu, Y., Ritter, J.A., Kaul, B.K. (2000) Simulation of gasoline vapor recovery by pressure swing adsorption, *Separation and Purification Technology*, 20(1), 111-127. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00066-6](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00066-6)
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (2018) Regulations on the Inspection Methods for Vapor Recovery Systems at Gas Stations. <https://law.go.kr/admRulLsInfo.do?admRulSeq=2100000136129> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (2019a) Special Act on The Reduction and Management for Fine Dust. https://www.law.go.kr/DRF/lawService.do?OC=dl_lawinfosearch&target=law&MST=283033&type=HTML&mobileYn=&efYd=20260127 (accessed on Apr. 19, 2026)
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (2019b) 1st Comprehensive Plan for Fine Dust Management. <https://air.go.kr/synap/data/air/article/2025/4/675.view.xhtml?> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (2020) Special Act on The Improvement of Air Quality in Air Control Zones. https://www.law.go.kr/DRF/lawService.do?OC=dl_lawinfosearch&target=law&MST=276713&type=HTML&mobileYn=&efYd=20251001 (accessed on Apr. 19, 2026).
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (2024) 2nd Comprehensive Plan for Fine Dust Management. https://me.go.kr/m/mob/policy_data/read.do?sessionId=UtNerbajNed1_PgG2joNy5Pmu8R8Xgitqs5STV6H.mehome1?menuId=35&condition.code=A3&seq=8369 (accessed on Apr. 19, 2026).
- Muto, E.Y., Figueiredo, E.D.S., Silva, H.D.P.D., Trivelato, G.D.C. (2025) Benzene Exposure in Gas Stations across the World: A Systematic Review, *ACS Chemical Health & Safety*, 32, 534-547. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.5c00041>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2025) National Air Pollutant Emission Inventory Calculation Methods Manual (VII). <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=8&articleId=491&boardId=8&menuId=49¤tPageNo=1> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Noh, S., Yoon, S.H., Hwang, E.Y., Lee, S.Y., Lee, S.S., Kim, J.B. (2021) Proposal for improvement and management status of indoor air quality in School, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 20(2), 166-177, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2021.20.2.166>
- Park, S., Kim, J., Lee, G., Noh, S., Chea, J.S., Kim, M.Y., Jeon, J.-M., Lee, S.S., Kim, J.B. (2022) Characteristics of Spatial Distribution VOCs around Petrochemical Complex Using Passive Sampler, *Journal of Korean Society for Atmo-*

- spheric Environment, 38(5), 764-775, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.764>
- Park, S.-M., Oh, B.-H., Kim, C.H., Shin, S.-H., Kim, P., Lee, K., Park, J., Hwang, K., Kim, J.B., Park, Y., Kim, J. (2025) Real-Time Observation and Comparison of Atmospheric Formaldehyde Using PTR-ToF-MS and Mid-infrared Spectroscopy Based on Optical Absorption, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 28(1), 37-49, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.28.1.37>
- Sa, J.-H., Jeon, E.-C., Lee, J.-W., Kim, S.J., Han, J.-H. (2013) Removal of VOCs from Gasoline Reservoir at Gas Station using Cooled Condensing Unit, *Journal of Korean Society of Environmental Administration*, 19(1), 45-51, (in Korean with English abstract).
- Saarinen, L., Hakkola, M., Kangas, J. (2000) Comparison of tanker drivers' occupational exposures before and after the installation of a vapour recovery system, *Journal of Environmental Monitoring*, 2(6), 662-665. <https://doi.org/10.1039/b005599i>
- Shao, P., Xu, X., Zhang, X., Xu, J., Wang, Y., Ma, Z. (2020) Impact of volatile organic compounds and photochemical activities on particulate matters during a high ozone episode at urban, suburb and regional background stations in Beijing, *Atmospheric Environment*, 236(1), 117629. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117629>
- Vainiotalo, S., Peltonen, Y., Ruonakangas, A., Pfaffli, P. (1999) Customer exposure to MTBE, TAME, C6 alkyl methyl ethers, and benzene during gasoline refueling, *Environmental Health Perspectives*, 107(2), 133-140, <https://doi.org/10.1289/ehp.99107133>
- Work Safe BC (2025) Table of exposure limits for chemical and biological substances. <https://www.worksafebc.com/en/resources/health-safety/ohsr-searchable/table-exposure-limits-chemical-biological-substances?lang=en> (accessed on Apr. 19, 2026).
- Zhou, X., Zhou, X., Wang, C., Zhou, H. (2023) Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review, *Chemosphere*, 313, 137489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137489>

Authors Information & Contributions

- 황규철 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원, 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공 박사과정, kchwang@cni.re.kr) Writing - original draft, Visualization, Methodology
- 이혜연 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원, yeonii530@cni.re.kr) Data curation, Formal analysis
- 송민영 (서울연구원 지속가능연구실 연구위원, mysong@si.re.kr) Resources
- 김나래 (금강유역환경청 측정분석과 환경연구사, knarae10@korea.kr) Investigation
- 김동호 (강원대학교 미세먼지특성화대학원 박사과정, kdh7144@naver.com) Investigation
- 노수진 (대림대학교 안전보건학과 교수, sjnoh@daelim.ac.kr) Investigation
- 윤영욱 (APM엔지니어링 부장, younguk.yoon@apm.co.kr) Resources
- 김정호 (열린공간 소장, jeonghoflux@naver.com) Validation
- 김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구위원, kjb0810@cni.re.kr) Writing - review & editing, Conceptualization