

## 광이온화검출기(PID) 기반 직독식 장비와 기존 활성탄관 분석법의 비교

박해동\* · 김동현

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

## Comparison between Photoionization Detector (PID)-based Direct-reading Instruments and Conventional Charcoal Tube Analysis

Hae Dong Park\* · Dong Hyeon Kim

*Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA*

### ABSTRACT

**Objectives:** This study aimed to analyze the measurement characteristics of photoionization detector (PID)-based direct-reading instruments for toluene and identify the effects of various environmental variables on the accuracy of the instruments.

**Methods:** Toluene was selected as the target substance due to its high measurement frequency and the elevated rate of its exposure index in workplace environment assessments. The response time ( $t_{63}$ ) of isobutylene and toluene was measured and compared according to the OSHA method. Toluene concentrations were prepared at five levels (0.1, 0.5, 1, 2 TWA, and STEL) using Tedlar bags. PID measurements (with a correction factor of 0.5 applied) were compared with charcoal tube sampling and analysis (GC/FID) under varying conditions of temperature (5°C, 20°C, and 35°C) and relative humidity (20%, 50%, and 80%). Multiple linear regression analysis was performed with the response ratio as the dependent variable to determine the impact of temperature, humidity, concentration, and elapsed days.

**Results:** The average response time ( $t_{63}$ ) for toluene was 6.21 seconds, which was significantly slower than that for isobutylene (3.88 seconds) ( $p < 0.001$ ). A very high correlation of over 0.97 was observed between the PID measurements and the charcoal tube analysis results. However, the average response ratio was 0.75, indicating a tendency to underestimate the actual concentration by approximately 25%. The response ratio by concentration level was lowest at 0.64 for 0.1 TWA and highest at 0.84 for 0.5-1 TWA. The multiple linear regression analysis identified temperature and number of elapsed days as the primary factors affecting the response ratio, with elapsed days showing a greater influence than temperature.

**Conclusions:** While PID-based direct-reading instruments require supplementation for quantitative absolute value measurement, they offer excellent utility for immediate identification of concentration changes and high-concentration risk detection. Systematic maintenance is essential to maintain the reliability of the equipment, including daily calibration before use and regular cleaning to address sensor aging and contamination.

**Key words:** Toluene, photoionization detector (PID), direct-reading instrument, response ratio, exposure assessment

\*Corresponding author: Hae Dong Park, Tel: 052-703-0861, E-mail: [workenv@kosha.or.kr](mailto:workenv@kosha.or.kr)  
400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44429

Received: March 4, 2026 Revised: March 17, 2026, Accepted: March 18, 2026

 Hae Dong Park <https://orcid.org/0000-0002-3497-0369>

 Dong Hyeon Kim <https://orcid.org/0009-0003-2754-6695>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서 론

산업 현장에서 근로자의 건강을 보호하고, 직업병을 예방하기 위해서 유해 화학물질에 대한 정확한 노출 평가는 필수적이다. 전통적인 노출 평가 방식은 시료를 채취한 후 실험실로 운반하여 분석하는 과정을 거치는데, 이는 결과 도출까지 수일에서 수주가 소요되는 상당한 시간 지연(lag time)을 발생시킨다. 이러한 시간적 지연은 노출 제어 조치의 적정성을 신속하게 확인하거나, 작업 공정 중 발생하는 급격한 노출 변화에 즉각적으로 대응하는 것을 어렵게 만든다. 특히 n-헥산이나 메탄올 등에 의한 급성 중독 사고가 발생하는 상황에서, 장시간 평균 노출(TWA) 관리에 치중한 기존 분석법의 한계를 보완하기 위해 실시간 모니터링의 필요성이 강조되고 있다(Sleeth et al., 2016; Yeo & Choi, 2016; Soo JC et al., 2018; Takaya et al., 2022; Kim et al., 2023; Ha & Lee, 2024).

최근 광이온화검출기(PID) 등을 기반으로 한 직독식 장비(direct-reading instruments, DRI)의 기술적 발전은 이러한 문제의 대안으로 부상하고 있다. 직독식 장비는 실시간 또는 실시간에 가까운 농도 정보를 제공하여 작업 현장의 최고 노출 수준(peak exposure level)을 즉각적으로 포착할 수 있게 하며, 이는 위험 상황 발생 시 근로자에게 즉각적인 알람을 제공하여 환기나 보호구 착용 등의 신속한 조치를 유도하는 데 탁월한 효용성을 가진다(Han & Kim, 2018; Park et al., 2019 ; Takaya et al., 2022; Kim et al., 2023).

그러나 이러한 장점에도 불구하고 직독식 장비의 현장 적용에는 몇 가지 기술적 단점이 존재한다. 우선, 정량적 정확도 측면에서 기존 공정시험법에 비해 신뢰도가 낮게 평가되기도 하며, 센서 자체가 외부 환경 요인에 민감하게 반응하여 측정값의 변동이 발생할 수 있다. PID의 경우 비특이적(non-specific)인 특성으로 인해 복합 화학 물질이 공존하는 환경에서 개별 물질을 명확히 구분하여 정량화하는 데 한계가 있다. 또한, 배터리 수명이나 무선 통신의 안정성 등 하드웨어적인 제약 사항도 현장 적용의 걸림돌로 작용하고 있다(Park et al., 2019; Lee et al., 2022; Takaya et al., 2022; Kim et al., 2023).

이러한 단점들을 극복하고 직독식 장비의 신뢰성을 확보하기 위해서는 체계적인 보정 및 관리 전략이 수립되어야 한다. 사용 전 매일 실시하는 '0점 조정' 및 스패น(span) 교정을 포함하여, 센서 램프의 정기적인 세척과

주기적인 성능 검증을 통한 유지관리가 필수적이다. 또한, 전력 소모를 최소화하고 통신 범위의 제한점을 해소할 수 있는 최신 ICT 기술의 도입이 검토되어야 하며, 측정 데이터의 신뢰성을 담보하기 위해 전문가에 의한 데이터 해석과 기존 분석법과의 주기적인 교차 검증이 병행되어야 한다(Han and Kim, 2018; Kim et al., 2023).

현재 국내에서는 직독식 장비에 대한 수요가 점차 증가하고 있으나, 이를 실제 노출 평가 및 사업장 자율 관리에 활용하기 위한 표준화된 가이드라인은 아직 미비한 실정이다(Park et al., 2019; Kim et al., 2023). 이에 본 연구는 국내 사업장에서 측정 빈도가 높은 유기화합물을 대상으로 PID 직독식 장비의 측정 특성을 분석하고, 다양한 환경 변수가 장비의 정확도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 통해 향후 국내 실정에 적합한 직독식 장비 활용 표준화 방안과 근로자 보호를 위한 효율적인 실시간 노출 관리 전략 마련의 기초 자료를 제공하고자 한다.

## II. 연구대상 및 방법

### 1. 대상 물질 및 직독식 장비

본 연구는 국내 산업현장에서의 노출 빈도와 광이온화검출기(PID)의 반응 특성을 종합적으로 고려하여 대상 물질을 선정하였다. 고용노동부에 보고된 2022년부터 2024년까지의 국내 작업환경측정 결과 데이터에서 유해인자별 측정 건수를 추출하였으며, 금속 및 분진류를 제외한 유기화합물은 총 6,871,981건 이었다(허가 대상물질, 측정비대상, 혼합유기화합물 제외). 3년간 유기화합물의 측정 빈도를 합산하여 빈도 순위를 부여하였다. 선정된 상위 30개 물질 중 PID 센서의 반응 지표인 결정계수가 확보되지 않거나 반응하지 않는 물질을 제외한 13종을 후보로 선정하였다. 최종적으로 단일물질 측정 건수가 많고, 노출지수(측정값/TWA)가 10%를 초과하는 빈도가 높은 톨루엔(toluene)을 연구 대상 물질로 결정하였다. 톨루엔의 노출기준은 TWA 50 ppm, STEL 150 ppm이며, PID 보정계수(CF)는 10.6 eV 램프 기준 0.5이다(Table 1).

직독식 장비는 PID 기반의 장비(PGM 6248, MultiRAE Pro, RAE systems, Honeywell, USA)를 사용하였다. 본 장비는 250 cc/min의 유량으로 공기를 흡입하며, 10.6 eV 램프를 장착하고, 10 ppb의 분해능을 가진 ppb 단위 측정이 가능한 모델이다. 연구 시작 시점에

**Table 1.** Annual average measurements, PID factors, and exposure limits by substance

Rank	Compound	N*	CF <sup>†</sup> at 10.6eV	K-OELs <sup>‡</sup> (ppm)	
				TWA <sup>§</sup>	STEL <sup>  </sup>
1	Toluene	88,424	0.5	50	150
2	Isopropyl alcohol	83,405	6	200	400
3	Acetone	80,888	1.1	500	750
4	Xylene(o,m,p)	73,727	0.44	100	150
5	Methanol	63,255	NR <sup>¶</sup>	200	250
6	Ethylbenzene	52,660	0.52	100	125
7	Methylethylketone	47,744	0.9	200	300
8	Butylacetate	44,658	2.6	200	-
9	Ethylacetate	42,755	3.49	400	-
10	Methylisobutylketone	39,443	0.8	50	75
11	2-Butoxyethanol	37,961	1.2	20	-
12	Formaldehyde	31,961	NR	0.3	-
13	n-Butanol	28,923	4.7	20	-
14	n-Hexane	27,290	4.3	50	-
15	Cyclohexanone	22,750	0.9	25	50
16	n-Heptane	22,003	2.8	400	500
17	Styrene	21,698	0.4	20	40
18	Isobutyl alcohol	20,978	3.8	50	-
19	Ethylene glycol	20,105	16	-	C100
20	Methyl acetate	17,371	6.6	200	250
21	Ethanolamine	17,352	1.6	3	6
22	Cyclohexane	16,280	1.4	200	-
23	Dichloromethane	15,824	NR	50	-
24	Phenol	13,652	1	5	-
25	Dimethylformamide	12,475	0.7	10	-
26	Tetrahydrofuran	12,360	1.7	50	100
27	Acetonitrile	12,265	-	20	-
28	Benzene	11,487	0.53	0.5	2.5
29	Trichloromethane	9,041	-	10	-
30	Methylene bis(phenyl isocyanate)	8,752	VS <sup>**</sup>	0.005	-

\*N: number of measured samples per year(average for 3 years), <sup>†</sup>CF: correction factors by RAE systems, <sup>‡</sup>K-OELs: Korea occupational exposure limits, <sup>§</sup>TWA: time weighted average, <sup>||</sup>STEL : short term exposure limit, <sup>¶</sup>NR: no response, <sup>\*\*</sup>VS: very slow ppb level response

‘0’점 교정과 Span 교정을 실시하고, 이후에는 ‘0’점 교정만 실시한 후 실험하였다.

**2. 물질별 반응시간 실험**

직독식 장비의 물질별 반응시간 실험은 OSHA의 방법에 따랐으며(OSHA, 2024), 주요 절차는 다음과 같았다.

먼저, 이소부틸렌 표준가스(Isobutylene 100ppm, Oxygen in Nitrogen 20.9%, 34 L, CALGAZ, USA)를 10 L 용량의 테들러 백에 넣고, 직독식 장비를 연결하였다. 테들러 백 내의 표준가스를 직독식 장비로 흡입시켜서 1초 간격으로 데이터를 저장하면서 관찰하였다. 약 1분간 노출하여 측정값이 정체된 시점에 깨끗한 공기를 도입하

였다. 이를 6회 반복 측정하여 데이터를 획득하였다.

농도가 증가하는 동안의 반응시간( $t_{63(\text{rise})}$ )을 구하기 위하여, 농도 증가 구간 중에서 시험농도의 50%와 측정값 간의 차이를 구하여 절대값이 가장 작은 순으로 연속된 5개의 측정값을 선정하였다. 선정된 값을 이용하여 변환값을 산출하고( $\ln(\text{시험농도}-\text{측정값})$ ), 이를 이용하여 기울기를 구하였다.  $t_{63(\text{rise})}$ 는 기울기의 역수를 취하여 구하였다. 농도가 감소하는 동안의 반응시간( $t_{63(\text{decay})}$ )은 농도 감소 구간 중 시험농도의 50%에 가장 가까운 5개의 측정값을 선정하였으며, 다른 절차는  $t_{63(\text{rise})}$ 와 같다.  $t_{63(\text{rise})}$ 와  $t_{63(\text{decay})}$ 를 평균하여 최종 반응시간( $t_{63}$ )을 계산하였다.

톨루엔에 대한 반응시간을 구하기 위하여, 테들러 백에 톨루엔 시약 원액을 일정량 주입하여 넣어 제조한 가스를 이용하였다. 톨루엔 시험농도는 활성탄관에 채취 분석한 값(30.7~43.0 ppm)을 기준으로 하였으며, 다른 실험 절차는 위와 동일하였다.

### 3. 농도수준 및 환경 요인의 영향 평가

각 시험별로 3개의 테들러 백을 준비하였다. GC 분석에 사용되는 고순도 에어(Air, 산소농도 21% 내외, (주)덕양)를 테들러 백에 약 5리터 넣었다. 이때, 공기의 주입 유량은  $2.5 \pm 0.1$  LPM 이었고, 2분간 주입하였다. 톨루엔의 농도를 0.1, 0.5, 1, 2TWA 및 STEL 수준으로 제조하기 위하여, 공기가 주입된 테들러 백에 톨루엔 시약을 계산된 일정량으로 취하여 주입하였다. 실험 온도는 5°C, 20°C, 35°C로 하였으며, 항온기(MIR-204, Incubator, Sanyo Electric Co., LTD., Japan)의 온도를 설정한 후, 테들러 백과 직독식 장비 및 시료채취용펌프 등을 내부에 두고 실험하였다. 습도(상대습도)를 20%, 50%, 80%에서 실험하기 위하여, 각 온도별 상대습도 설정에 필요한 수분의 양을 계산한 후, 탈이온수를 마이크로실린지로 주입하였다. 제조된 테들러 백은 50°C로 설정된 오븐(MIR-204, Incubator, Sanyo Electric Co., LTD., Japan)에서 30분 이상 두면서 주입된 톨루엔과 탈이온수가 기화되도록 하였다. 육안으로 액체방울의 존재 및 기화여부를 확인한 후, 설정된 실험용 항온기로 테들러 백을 옮겨서 30분간 온도를 순화시켰다. 테들러 백에 각각 활성탄관을 연결하고, 시료채취펌프(Model 220-1000TC, Pocket Pump TOUCH, SKC, USA)를 이용하여 0.2 LPM 으로 10분간 채취하였다. 활성탄관 채취 후, 직독식 장비를 테들러 백에 연결하여 3분간 모니터링하고, 테들러 백 간의 측정은

약 3분의 시간차를 두어 직독식 장비의 지시값이 떨어지도록 한 후 다음 테들러 백을 모니터링하였다.

활성탄관에 채취된 시료는 이황화탄소( $\text{CS}_2$ ) 1 mL로 30분간 탈착하였다. 분석은 GC/FID(Agilent 8890, USA)를 사용하였으며, DB-5 컬럼(30 m × 0.320 mm × 0.25 μm)과 질소( $\text{N}_2$ ) 운반가스를 사용하였다. 오븐 온도는 150°C에서 3분간 유지하였으며, 톨루엔의 머무름 시간은 2.55분이었다.

직독식 장비는 1초 단위로 데이터를 저장하였으며, 측정시간동안의 저장된 값 중에서 가장 높은 값을 포함한 연속된 15개의 값을 평균하여 측정값으로 하고, PID 센서의 보정계수인 0.5를 적용하여 최종 측정값으로 하였다. 실험조건별 PID 장비의 평가값을 비교하기 위하여, PID 장비의 최종 측정값을 활성탄관 채취분석법으로 평가된 값으로 나누어서 반응비를 계산하였다.

### 4. 통계 분석 방법

수집된 데이터는 IBM SPSS(Ver. 29.0)를 사용하여 분석하였다. 각 그룹의 데이터가 등분산성을 만족하지 않는 경우가 많아 비모수 검정인 Kruskal-Wallis test를 실시하였으며, 대응별 비교 시 Bonferroni 수정을 통해 유의수준 0.05에서 통계적 유의성을 평가하였다. 직독식 장비의 측정값과 활성탄관 분석값 간의 상관성은 Pearson 상관분석으로 확인하였다. 반응비를 종속 변수로 하여 온도, 습도, 농도수준 및 실험경과일자의 영향을 파악하기 위한 다중선형회귀분석을 수행하였다.

## III. 연구결과

### 1. 물질별 반응시간( $t_{63}$ ) 분석

OSHA 방법에 따른 반응시간 실험 결과, 이소부틸렌의 반응시간은 평균 3.88초였으나, 톨루엔의 반응시간은 6.21초로 평가되어 통계적으로 유의한 차이가 있었다( $p < 0.001$ ). 이소부틸렌의 경우 표준가스를 도입하여 측정값이 상승하는 동안의 반응시간은 3.53초였으며, 클린 에어 도입으로 측정값이 하강하는 동안의 반응시간은 4.24초로 평가되었다. 반면, 톨루엔의 경우 측정값이 상승하는 동안의 반응시간은 6.92초였으며, 측정값이 하강하는 동안의 반응시간은 5.51초로 평가되었다(Table 2). 이는 물질의 화학적 성질에 따라 PID 센서의 응답 특성이 달라짐을 시사하며, 현장 평가 시 대상 물질별 반응시간에 따른 안정화 시간을 충분히 고려해야 한다.

**Table 2.** DRI's response time by substance (unit: sec) (by OSHA method)

Compound	t <sub>63</sub>	t <sub>63(rise)</sub>	t <sub>63(decay)</sub>
Isobutylene	3.88 ±0.53	3.53 ±0.68	4.24 ±0.77
Toluene	6.21 ±0.54	6.92 ±0.54	5.51 ±0.84

2. 시험용 제조 가스의 농도 수준

테들러 백을 이용하여 제조된 톨루엔 시험용 공기의 농도를 활성탄관 채취분석법(GC/FID)으로 검증한 결과, 이론적 계산 농도와 실제 분석값 사이에는 일정 수준의 차이가 존재하였다. 0.1 TWA 수준의 시료는 평균 2.61 ppm, 0.5 TWA는 17.00 ppm, 1 TWA는 33.83 ppm, 2 TWA는 52.71 ppm, 그리고 STEL 수준은 90.54 ppm으로 각각 분석되었다. 이론 농도 대비 실제 분석값은 약 57~74% 수준이었으며, 농도별 변이계수는 6.6~22.9% 수준이었다(Table 3). 이는 제조 과정에서 주입 공기 유량의 오차 등에 기인한 것으로

판단된다. 각 실험 조건별로 3개의 테들러 백 공기를 제조하였는데, 이때의 변이계수를 분석한 결과, 0.1 TWA와 0.5 TWA의 저농도 구간에서는 변이계수의 평균이 각각 8.48%와 5.01%로 다소 높게 나타났으나, 1 TWA 이상의 고농도 구간에서는 변이계수의 평균이 약 2% 수준의 낮은 변이를 보였다(data not shown).

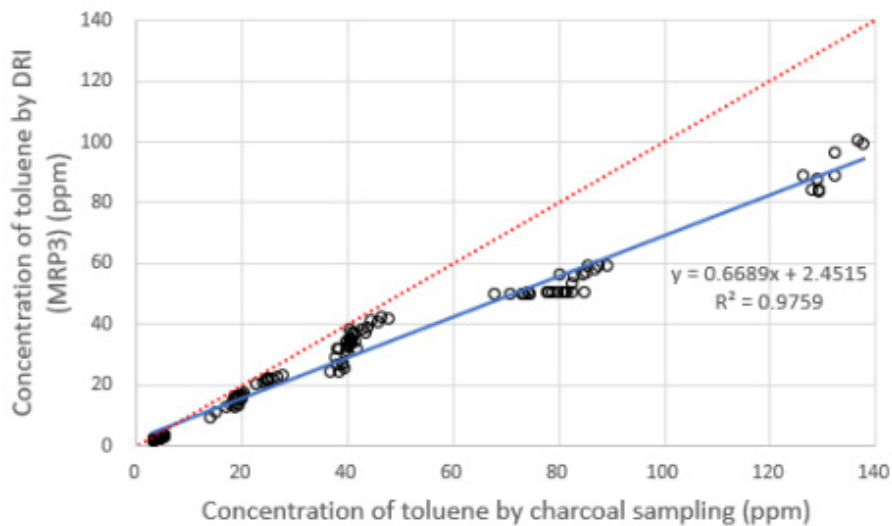
3. 기존 분석법과 직독식 장비 측정값의 상관성 및 반응비

PID 직독식 장비의 측정값(보정계수 0.5 적용)을 활성탄관 분석값과 비교한 결과, 두 방법 사이에는 0.97 이상의 매우 높은 상관관계가 확인되었다(Figure 1). 그러나 정량적 일치도를 나타내는 반응비(PID 최종 측정값/활성탄관 분석값)를 분석했을 때, 반응비의 평균은 0.75로 평가되었다. 즉, 본 실험에서 직독식 장비는 제조사에서 제공하는 보정계수를 적용했을 때, 기존 분석법에 비해 톨루엔 농도를 25% 과소평가되는 것으로 나타났다.

**Table 3.** Concentration levels in produced Tedlar bags

Level	Conc.* (ppm)	N <sup>†</sup>	AM <sup>‡</sup> (ppm)	SD <sup>§</sup> (ppm)	CV <sup>  </sup> (%)
0.1 TWA <sup>¶</sup>	4.6	30	2.61	0.50	19.2
0.5 TWA	23.1	27	17.00	3.90	22.9
1 TWA	46.3	33	33.83	4.95	14.6
2 TWA	92.6	27	52.71	3.46	6.6
STEL <sup>**</sup>	148.1	9	90.54	6.66	7.4

\*Conc.: nominal concentration of toluene, <sup>†</sup>N: number of samples, <sup>‡</sup>AM: arithmetic mean, <sup>§</sup>SD: standard deviation, <sup>||</sup>CV: coefficient of variation, <sup>¶</sup>TWA: time weighted average, <sup>\*\*</sup>STEL : short term exposure limit



**Figure 1.** Correlation between direct-reading measurements and charcoal tube analytical methods

#### 4. 농도 수준 및 환경 요인에 따른 반응비 변동 특성

농도 수준에 따른 반응비의 차이는 통계적으로 유의미하였다( $p < 0.001$ ). 0.1 TWA 수준에서 반응비 중위수가 0.64로 가장 낮았으며, 0.5~1 TWA 수준에서는 0.84로 가장 높게 평가되었다. 2 TWA 수준과 STEL 수준에서 반응비는 각각 0.67과 0.68로 평가되었다 (Table 4).

온도 변화에 따른 영향 평가에서는 전체 그룹 간 유의한 차이가 관찰되었으며( $p = 0.042$ ), 20°C 조건에서 톨루엔 반응비의 중위수가 0.73으로 5°C 및 35°C의 반응비 0.69에 비해서 높게 나타났으나, 2개 온도별 대응 비교에서 통계적인 유의한 차이는 없었다( $p > 0.05$ ) (Table 5).

습도가 20%에서 80%로 증가함에 따라 반응비 중위수가 0.73에서 0.68로 감소하는 경향성이 관찰되었으나, 본 실험 조건 내에서 통계적인 유의성은 확보되지 않았다( $p = 0.750$ ) (Table 6).

#### 5. 다중선형회귀분석을 통한 반응비 영향 요인 규명

반응비에 영향을 미치는 독립변수(농도, 온도, 습도, 실험경과일자)를 활용하여 다중선형회귀분석을 실시한 결과, 최종적으로 도출된 회귀방정식은 다음과 같았다.

$$RR = 0.898 - 0.014D - 0.003T - 0.015C + 0.000H$$

RR: 반응비(response ratio), D: 실험경과일자(elapsed date), T: 온도(temperature), C: 농도수준(concentration), H: 상대습도(humidity)

도출된 회귀 모형은 통계적으로 유의하였으며( $p < 0.001$ ), 설명력은 23.8%( $R^2 = 0.238$ )로 나타났다. 분석 결과, 실험경과일자( $p < 0.001$ )와 온도( $p < 0.001$ )가 반응비에 영향을 미치는 주요 인자로 파악되었다. 특히 표준화 계수를 비교했을 때 실험경과일자(-0.415)의 영향력이 온도(-0.359)보다 크게 나타났다.

**Table 4.** Comparison of response ratios by concentration levels

Level	N*	Med <sup>†</sup>	AM <sup>‡</sup>	SD <sup>§</sup>	CV <sup>  </sup> (%)	Min <sup>¶</sup>	Max <sup>**</sup>
0.1 TWA <sup>++</sup>	30	0.64	0.63	0.04	7.09	0.53	0.71
0.5 TWA	27	0.84	0.82	0.06	7.76	0.69	0.91
1 TWA	33	0.84	0.83	0.08	10.05	0.64	0.96
2 TWA	27	0.67	0.66	0.03	4.78	0.6	0.74
STEL <sup>††</sup>	9	0.68	0.69	0.03	5.05	0.65	0.74

\*N: number of samples, <sup>†</sup>Med: median, <sup>‡</sup>AM: arithmetic mean, <sup>§</sup>SD: standard deviation, <sup>||</sup>CV: coefficient of variation, <sup>¶</sup>Min: minimum, <sup>\*\*</sup>Max: maximum, <sup>++</sup>TWA: time weighted average, <sup>††</sup>STEL: short term exposure limit

**Table 5.** Comparison of response ratios by temperature

Temp* (°C)	N <sup>†</sup>	Med <sup>‡</sup>	AM <sup>§</sup>	SD <sup>  </sup>	CV <sup>¶</sup> (%)	Min <sup>**</sup>	Max <sup>++</sup>
5	39	0.69	0.76	0.13	17.31	0.56	0.96
20	51	0.73	0.75	0.09	12.66	0.60	0.90
35	36	0.69	0.69	0.06	9.40	0.53	0.80

\*Temp: temperature, <sup>†</sup>N: number of samples, <sup>‡</sup>Med: median, <sup>§</sup>AM: arithmetic mean, <sup>||</sup>SD: standard deviation, <sup>¶</sup>CV: coefficient of variation, <sup>\*\*</sup>Min: minimum, <sup>++</sup>Max: maximum

**Table 6.** Comparison of response ratios by relative humidity

RH* (%)	N <sup>†</sup>	Med <sup>‡</sup>	AM <sup>§</sup>	SD <sup>  </sup>	CV <sup>¶</sup> (%)	Min <sup>**</sup>	Max <sup>++</sup>
20	39	0.73	0.74	0.10	14.15	0.56	0.96
50	39	0.69	0.72	0.11	14.74	0.53	0.91
80	39	0.68	0.72	0.10	13.36	0.60	0.91

\*RH: relative humidity, <sup>†</sup>N: number of samples, <sup>‡</sup>Med: median, <sup>§</sup>AM: arithmetic mean, <sup>||</sup>SD: standard deviation, <sup>¶</sup>CV: coefficient of variation, <sup>\*\*</sup>Min: minimum, <sup>++</sup>Max: maximum

## IV. 고 찰

본 연구는 산업현장에서 유기화합물 노출을 실시간으로 감시할 수 있는 광이온화검출기(PID) 기반 직독식 장비의 신뢰성을 평가하고, 이를 실제 노출평가에 도입하기 위한 기술적 근거를 마련하고자 수행되었다.

본 연구에 사용된 직독식 장비의 제조사에서는 반응시간( $t_{90}$ )을 15초 이내라고 제시하고 있었다. 톨루엔에 대한 PID 장비의 반응시간( $t_{63}$ )은 평균 6.21초로, 교정가스인 이소부틸렌(3.88초)보다 유의하게 느리게 측정되어, 물질별 반응시간이 달라질 수 있음을 확인하였다. 반응시간 평가기준( $t_{90}$  또는  $t_{63}$ )이 다르므로 직접적인 비교는 어려웠으나, 다른 연구에서는 제조사에서 제시한 반응시간( $t_{90}$ )이 3초 였으나, 실제 실험에서는 4~39초로 평가되어 차이가 있었다(Choi et al., 2012). 물질별 응답 특성의 차이는 단시간 노출(STEL)이나 천장값(ceiling) 평가 시 매우 중요한 고려사항이며, 장비 지시값이 실제 농도 변화를 반영하여 안정화되기 위해서는 충분한 모니터링 시간이 필요하다. 반응시간이 길거나 로깅이 느린 경우에는 피크 노출을 평균화하거나 반영하지 못할 수도 있다. 이러한 점을 고려하여 평가 전략을 수립하여야 하고, 데이터 해석에서 유의하여야 할 것으로 생각된다.

테들러 백과 시약 원액을 이용한 가스 제조방법은 여러 분야에서 활용되고 있고, 적절한 세척과정을 거치고 적절한 분석기한(일반적으로 24~48시간) 내에 사용하면 신뢰할 수 있는 표준가스를 제조할 수 있다(US EPA, 1996; Mochalski et al., 2013; Herrington, 2020). 본 실험에서 테들러 백에 제조된 가스의 농도는 3반복으로 제조된 각 세트별 변이계수는 평균 8.48% 였고, 제조된 공기의 농도는 계산된 이론적인 농도의 57~74% 수준이었다. 이는 제조시 공기 유입량이 정밀하게 통제되지 못하였기 때문에 판단된다. 유량보정계를 이용하여 공기 유입량을 일시적으로 체크하였고, 고압가스의 압력에 따라서 공기 유량이 달라졌기 때문에 오차가 발생하였다. 또한, 타이머를 이용하여 수동으로 밸브를 조작하는 과정에서도 오차가 발생했을 것으로 생각된다. 이로 인해 본 실험에서는 활성탄관 채취 분석을 통하여 제조가스의 농도를 확인한 후 적용하였다. 공기를 정량적으로 주입할 수 있는 시스템이 적용된다면 추가적인 활성탄관 채취분석에 의한 농도 확인이 필요하지 않을 것으로 생각된다.

실험실 내 챔버 평가에서 PID 직독식 장비의 측정값과 활성탄관 분석값 간의 상관계수는 0.97 이상으로 매우 높게 나타났다. 이는 PID 기술이 작업환경 내 톨루엔 농도의 실시간 변화 추이를 추적할 수 있음을 의미한다. 이를 통하여 일시적인 고농도 노출(peak exposure) 상황을 포착하는 데 있어 기존 분석법의 한계를 보완할 수 있는 강력한 도구가 될 수 있다. 이러한 결과는 PID가 휘발성 유기화합물(VOCs)에 대해 우수한 선형성을 보인다는 선행 연구의 결과와도 일치한다(Coy et al., 2000; Poirrot et al., 2004). 그러나 정량적 일치도를 나타내는 반응비(response ratio)는 평균 0.75 수준으로 나타나, 제조사가 제시한 보정계수를 적용하더라도 실제 농도를 약 25% 과소평가하는 경향이 확인되었다. 이러한 과소평가 경향은 건설업 도장 작업장에서 PID가 실제 노출을 낮게 평가했다고 보고한 연구 결과와도 일맥 상통한다(Coy et al., 2000; Kim et al., 2023).

농도 수준에 따른 분석 결과, 0.1 TWA 수준에서 반응비 중위수가 0.64로 가장 낮아 저농도에서 과소평가가 더 심화되는 것으로 나타났다. 이는 저농도(5 ppm)에서 PID의 정확도가 낮았으나 농도가 높아질수록(25~100 ppm) 개선되었다는 연구 결과와 유사한 경향을 보인다(Choi et al., 2012). 다중선형회귀분석 결과, 반응비에 유의미한 영향을 미치는 외부 요인은 온도와 실험경과일자로 확인되었다. 특히 35°C의 고온 환경에서 반응비가 낮아졌는데, 이는 온도 상승 시 가스 밀도가 감소하여 단위 부피당 샘플링되는 분자 수가 줄어들기 때문으로 풀이되며 고온 작업장에서의 추가 보정 필요성을 시사한다(Khoshakhlagh et al., 2021). 습도의 경우 본 연구에서는 통계적 유의성이 낮았으나 습도가 높아질수록 반응비가 감소하는 음의 경향성이 관찰되었다. 이는 고습 환경(90% RH)에서 수증기 분자에 의한 '소광효과(Quenching effect)'로 인해 센서 감도가 감소한다는 선행 연구들의 결과와 유사하다(Barsky et al., 1985; LeBouf & Coffey, 2015).

연구의 회귀분석에서 가장 큰 영향력을 보인 요인은 실험경과일자였다. 이는 시간이 경과함에 따라 PID 램프의 노화나 창(window)의 오염물질 축적으로 인해 센서 감도가 점진적으로 저하됨을 의미한다(Kim et al., 2023). 고농도 평가 후 램프 주변에 잔여물이 쌓여 감도가 저하될 수 있다는 보고는 이러한 결과를 뒷받침한다(LeBouf & Coffey, 2015). 따라서 장비의 신뢰성을 유지하기 위해서는 사용 전 '0점 조정'과 '스팬 교정'이

필요하며, 오염이 심한 환경에서는 센서와 램프에 대한 정기적인 세척이 반드시 수반되어야 한다(Choi et al., 2012).

본 연구는 톨루엔 단일 물질을 대상으로 실험실 챔버 내에서 수행되었다는 한계가 있다. 실제 작업 현장은 기류의 방향이 불규칙하고 다양한 간섭 물질이 공존하여 실험실보다 더 복잡한 변수가 작용한다 (Kim et al., 2023). 또한 연구진이 보유한 장비 1대를 사용하여 평가하였는데, 동일한 모델의 장비 간에도 편차가 발생할 수 있으므로 장비 개별 특성에 대한 고려가 필요하다(Coffey et al., 2009; Choi et al., 2012). 향후 연구에서는 현장 노출 빈도가 높은 다른 유기화합물들로 대상을 확대하고, 복합 유기용제 노출 시나리오에서의 활용 방안을 검토할 필요가 있다. 또한, 활성탄 시료 분석값을 기준으로 도출된 현장보정계수를 적용하여 PID의 정확도를 향상시키는 방안에 대한 연구가 필요하다(Kim et al., 2024).

## V. 결 론

기존 측정분석방법과 비교에서 PID 기반 직독식 장비는 약 25% 과소평가되어, 정량적 절대값 측정에는 보완이 필요하였다. 그러나, 두 값 간의 높은 상관관계로 인하여, 농도 변화의 즉각적인 확인과 농도 위험 감지에는 활용 가능할 것으로 판단된다. 즉, 직독식 장비는 유기화합물 노출 수준을 시계열적으로 파악할 수 있게하고, 위험 상황에 신속히 대응할 수 있도록 하는 효과적인 도구가 될 수 있을 것이다. 본 연구에서 확인된 환경 요인별 영향과 반응 특성은 향후 국내 직독식 장비 활용 가이드라인 수립 및 노출 평가 전략 마련의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## References

Brown KK, Shaw PB, Mead KR, Kovein RJ, Voorhees RT et al. Development of the chemical exposure monitor with indoor positioning (CEMWIP) for workplace VOC surveys. *J Occup Environ Hyg.* 2016;13(6):401-412 (doi: 10.1080/15459624.2015.1125488)

Choi DM, Choi YE, Yoon CS, Lee KW, Lee YK, Lee IM, Park JI. Laboratory evaluation of the accuracy, precision, and inter-instrumental variance of a portable photoionization detector. *J Korean Soc Occup Environ*

*Hyg.* 2012;22(3):200-208

Coffey CC, Pearce TA, Lawrence RB, Hudnall JB, Slaven JE et al. Measurement capability of field portable organic vapor monitoring instruments under different experimental conditions. *J Occup Environ Hyg.* 2009;6(1):1-8 (doi: 10.1080/15459620802514728)

Coy JD, Bigelow PL, Buchan RM, Tessari JD, Parnell JO. Field evaluation of a portable photoionization detector for assessing exposure to solvent mixtures. *AIHAJ.* 2000;61(2):268-274 (doi: 10.1080/15298660008984536)

Ha KC, Lee HS. Characteristics of formaldehyde exposure during cooking work among school meal service workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2024; 34(4):350-358 (doi: 10.15269/JKSOEH.2024.34.4.350)

Han DH, Kim DH. Exposure to ozone and TVOCs during shipyard welding and the adequacy of RPE. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2018;28(2):200-210 (doi: 10.15269/JKSOEH.2018.28.2.200)

Herrington JS. Storage stability of 66 volatile organic compounds (VOCs) in silicon-lined air canisters for 30 days. Restek Application Note. 2020

Jeong JY, Park SW, Lee JE, Lee GY. Diisocyanate exposure assessment for polyurethane foam manufacturing workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2012; 22(3):209-216

Khoshakhlagh AH, Golbabaee F, Beygzadeh M, Carrasco-Marin F, Shahtaheri SJ. Evaluation of direct reading photoionization detector performance under various operational parameters. *Environ Health Eng Manag J.* 2021;8(2):123-128 (doi: 10.34172/EHEM.2021.15)

Kim SH, Park HD, Hwang E. Review paper for characterization of photoionization detector-direct reading monitors. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2023;33(2):93-102 (doi: 10.15269/JKSOEH.2023.33.2.93)

Kim SH, Yi GY, Kim SJ, Park HD. Preliminary study on effect of the field correlation factor for increasing of the accuracy in a direct reading instruments on photoionization detector for total volatile organic compounds. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2024;34(1):67-76 (doi: 10.15269/JKSOEH.2024.34.1.67)

Kim W, Ryoo JJ, Jung JD, Park GH, Kim GY, Kang JJ, Jung KH, Ham SH. The results of the application of a real-time chemical exposure monitoring system in a workplace. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2023; 33(2):215-229 (doi: 10.15269/JKSOEH.2023.33.2.215)

LeBouf RF, Coffey CC. Effect of interferents on the

- performance of direct-reading organic vapor monitors. *J Air Waste Manag Assoc.* 2015;65(3): 261-269 (doi: 10.1080/10962247.2014.986308)
- Lee GH, Kim JH, Park SC, Song MY, Kim KC, Lee DS, Choi WS, Kim JB. Characteristics of spatial and temporal distribution of VOCs around painting facilities and roadside located near Cheonan downtown area. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2022;38(5):687-701 (doi: 10.5572/KOSAE.2022.38.5.687)
- Mochalski P, King J, Unterkofler K, Amann A. Stability of selected volatile breath constituents in Tedlar, Kynar and Flexfilm sampling bags. *Analyst.* 2013;138(5): 1405-1418
- Occupational safety and Health Administration(OSHA). OSHA Method Guideline 2, Direct-Reading Methods. 2024
- Park YH, Lee HK, Seo MK, Kim J. A study on the application of real-time environment monitoring system in underground mines using Zigbee technology. *Tunnel Undergr Space.* 2019;29(2):108-121 (doi: 10.7474/TUS.2019.29.2.108)
- Poirot P, Subra I, Gérardin F, Baudin V, Grossmann S et al. Determination of short-term exposure with a direct reading photoionization detector. *Ann Occup Hyg.* 2004;48(1):75-84 (doi: 10.1093/annhyg/meg079)
- Rua Z, Tang H, Liu D, Zhu H, Pan J et al. Determination of volatile organic compounds in workplace by portable gas-chromatography. *Wei Sheng Yan Jiu.* 2016; 45(2):268-272
- Sleeth DK, Pahler LF, Larson RR. A comparison of direct-reading instruments for the measurement of hexavalent chromium during stainless steel welding. *J Chem Health Saf.* 2016;23(3):36-42 (doi: 10.1016/j.jchas.2015.10.014)
- Soo JC, Lee EG, LeBouf RF, Kashon ML, Chisholm W et al. Evaluation of a portable gas chromatograph with photoionization detector under variations of VOC concentration, temperature, and relative humidity. *J Occup Environ Hyg.* 2018;15(4):351-360 (doi: 10.1080/15459624.2018.1426860)
- Takaya K, Hagiwara M, Matoba S, Takaya M, Shibata N. A real-time gas monitoring system based on ion mobility spectrometry for workplace environmental measurements. *Ind Health.* 2022;60:40-46 (doi: 10.2486/indhealth.2021-0037)
- U.S. Environmental Protection Agency. Method 0040: Sampling of principal organic hazardous constituents from combustion sources using Tedlar® bags. 1996
- Yeo JH, Choi KM. Comparative analysis between direct-reading meter of PID and GC-FID using the active type air sampler for VOCs measurement. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2016;26(3):301-306 (doi: 10.15269/JKSOEH.2016.26.3.301)

<저자정보>

박해동(연구위원), 김동현(연구위원)