



직독식장비의 활용을 통한 작업환경관리방안(Ⅰ)

(PID 센서를 이용한 유기화합물 평가를 중심으로)

OSHRI

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



연구보고서

직독식장비의 활용을 통한 작업환경관리방안(Ⅰ)

(PID 센서를 이용한 유기화합물 평가를
중심으로)

김성호·박해동·황은송

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요 약 문

- 연구 기간 2022년 1월 ~ 2022년 11월
- 핵심 단어 직독식장비, PID, 유기화합물, 작업환경관리
- 연구과제명 직독식장비의 활용을 통한 작업환경관리방안(Ⅰ)
(PID 센서를 이용한 유기화합물 평가를 중심으로)

1. 연구배경

- 사업장에서 취급하는 화학물질의 종류 및 사용량이 증가함에 따라 현행 작업환경측정제도로 작업장관리 및 근로자 건강보호를 위한 개선된 작업환경측정 제도 도입을 검토하고 있는 시점에서,
- 직독식 시료채취 방법은 펌프식 시료채취 방법 보다 사용이 간편하고, 작업환경측정·평가에 소요되는 시간이 줄고, 급성중독 물질 등 근로자 노출 시에 즉각적인 건강영향을 일으킬 수 있는 화학물질을 취급하는 사업장에 적용이 고려되고 있음
- 본 연구는 직독식장비 중 PID 방식 장비를 활용하여 사업장에서 자율예방 목적으로 해당 장비를 활용할 수 있는 방안을 모색하고자 하였음

2. 주요 연구내용

1) PID 직독식장비 활용 방안

PID 직독식장비는 당장 법적 장비로 활용하기에는 제한점*이 있었으며, 직독식장비의 장점을 활용하여 실시간 데이터의 피크 노출(peak exposure) 관

리를 통한 자율예방 목적의 유해물질 모니터링 방법으로는 활용될 수 있을 것으로 전망함

* 한계점: 극한 환경(온도·습도) 영향, 고농도 평가 시 간섭 영향, 센서 오염, 정확도 수준 저하, 화학물질 간의 상호영향(cross-sensitivity)

○ 피크노출 관리: ACGIH 3/5 규칙, 단시간 노출기준(STEL), 최고노출기준(C), 노출상한치(EL), 즉시건강위험농도(IDLH), 탄화수소용매 혼합물 평가 등

○ PID 직독식장비는 사용이 간편하고 현장 적용성이 좋으나, 화학물질 간의 상호영향 등 데이터 해석에는 전문 기술이 필요함. 이에 따라 본 연구에서는 전문인력을 구분(Tier 1~4)하고 관련 역할*을 소개함

* 역할: 직독식장비의 기능 이해, 적절한 사용의 설명, 장비 표시/알람의 대응 및 인지, 고장수리, 장비 관리, 장비 선택, 데이터 해석

○ PID 직독식장비는 작업환경측정의 예비조사 또는 공정의 오염원을 확인하는데 활용되며, PID 센서의 개발로 인한 정확도가 향상된다면 향후 근로자 노출평가 도구로 활용 될 수 있을 것으로 판단됨

2) 챔버연구

혼합물(아세톤, 이소프로필 알콜, 톨루엔, m-자일렌)의 농도수준(14, 162, 323, 862 ppm)별 PID 직독식장비의 농도와 활성탄 시료채취 분석 농도(기준 농도)를 비교하여 정확도 기준(95% 신뢰구간에서 정확도 25% 이내)을 비교하였음

○ 챔버 실험 11회 중 단 1회만(9%)이 NIOSH에서 제시하는 정확도 기준에 만족하였으며, 대부분 PID 직독식장비의 농도가 기준 농도에 비해 과소평가되었음

- 보정계수로 PID 직독식장비의 농도를 보정한 결과, 제조사보정계수를 적용한 경우, 모든 실험에서 정확도 기준을 만족하지 못하였고, 필드보정계수를 적용한 경우, 모두 정확도 기준을 만족하였음
- 제한점: 본 챔버연구는 환경적 요인(온·습도)을 고려하지 않았기 때문에 필드보정계수의 적용 여부는 추가 연구가 필요함

3) PID 직독식장비의 특성

- 시중에서 유통되고 있는 15종의 PID 직독식장비 중 개인 평가용*은 2종(13%)으로 조사되었고, 13종은 휴대용*으로 예비조사 또는 오염원을 확인하는 용도로 활용되고 있었음

* 무게 기준: 개인 평가용은 500 g 이하, 휴대용은 12 kg 이하

- PID 직독식장비의 측정방식은 펌프식이 확산식 보다 많았으며, PID 센서 외에 전기화학식 등 다양한 센서를 동시에 부착하는 멀티타입 측정 기기가 많았음
- 모든 PID 직독식장비는 배터리 충전 방식, 알람모드 제공, 실시간 농도 수준 표시, 설정된 노출기준값과 비교 할 수 있는 시스템을 갖추고 있었고, 일부 장비에서는 방폭 인증 등 필요한 인증을 취득하고 있었음

4) 향후 PID 직독식장비의 활용

- 국내 사업장에서 사용하고 있는 혼합물은 다양하며, 공정 또한 다양해서, 이러한 사업장을 모니터링하기 위해서는 PID 직독식장비에 대한 현장 연구, 환경요인을 고려한 챔버연구가 필요함. 또한 직독식장비를 사용하는 사용자에게 대한 교육 프로토콜의 개발 및 대내·외적인 협력 인프라 구성이

필요함. 따라서 상기와 같은 역할을 할 수 있는 허브(HUB) 센터(가칭 직독식측정연구센터)가 신설될 필요가 있음

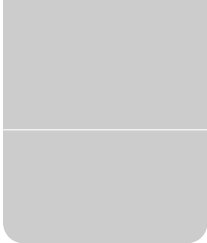
- PID 직독식장비와 사물인터넷(IoT)을 접목하여 효과적인 사업장의 화학 물질 모니터링 사업을 할 수 있으며, 센서 기술의 발달로 인한 웨어러블 장비 등 모듈형 스마트 센서를 활용한 모니터링 시스템 개발이 필요함

3. 연구 활용방안

- PID 직독식장비에 대한 기초자료로 활용될 수 있음
- PID 직독식장비를 활용하여 작업환경관리를 하고자 하는 사업장에 활용될 수 있음

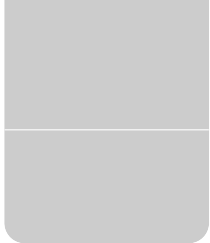
4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 차장 김성호
 - ☎ 052) 703 0892
 - E-mail sungho.kim@kosha.or.kr



목 차

I. 서 론	1
1. 연구 배경	2
2. 연구 목적	4
II. 연구내용 및 방법	5
1. 연구내용	7
2. 연구방법	8
III. 연구결과	23
1. 관련자료분석	25
2. 챔버실험 결과	54
3. 작업환경관리에 PID 직독식장비 도입 방안	83



목 차

IV. 고찰	97
V. 결론	109
참고문헌	113
부록	121

표 목차

〈표 II-1〉 PID 직독식장비 실험챔버 구성요소	11
〈표 II-2〉 개별 화학물질에 대한 특성 비교표	13
〈표 II-3〉 개별 화학물질의 농도계산 산출표	14
〈표 II-4〉 실험챔버 조건에 따른 혼합물질의 농도수준	15
〈표 II-5〉 파과 농도를 고려한 적정 공기량 및 채취 유량 산정	15
〈표 II-6〉 농도수준별 이론 채취량	16
〈표 II-7〉 혼합물질의 검량선 농도범위 결정	16
〈표 II-8〉 검량선 범위를 고려한 탈착시료 농도 범위	17
〈표 II-9〉 혼합물질 평가를 위한 사용된 시료채취기구	17
〈표 III-1〉 이온화방식 검출기 종류	25
〈표 III-2〉 직독식장비의 물리적 특성 및 평가항목	31
〈표 III-3〉 직독식장비의 성능특성, 실험방법 및 기준	34
〈표 III-4〉 PID 직독식장비의 크기·무게 비교	36
〈표 III-5〉 PID 직독식장비의 특성 비교	37
〈표 III-6〉 연도별 직독식장비 관련 국내문헌 목록	38
〈표 III-7〉 연도별 직독식장비 관련 국외문헌 목차	42
〈표 III-8〉 2종의 직독식장비에 대한 보정계수 비교	44
〈표 III-9〉 제조사별 직독식장비의 종류 및 센서 유형	46
〈표 III-10〉 직독식장비 종류 및 실험조건	48
〈표 III-11〉 PID 직독식장비의 농도와 활성탄 농도 비교	54
〈표 III-12〉 MM No.1 장비를 활용한 실험챔버 배경농도 비교	55

표 목차

〈표 III-13〉 활성탄 매체의 배경농도 분석 결과	56
〈표 III-14〉 시간별 주요 실험내용 및 실험조건 (레벨 A)	57
〈표 III-15〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 A)	59
〈표 III-16〉 PID 장비 간의 상관분석 결과(레벨 A)	59
〈표 III-17〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨 A)	61
〈표 III-18〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 A)	61
〈표 III-19〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 A)	61
〈표 III-20〉 레벨 A에 대한 정확도(A) 비교	62
〈표 III-21〉 시간별 주요 실험내용 및 실험조건(레벨 B, C)	63
〈표 III-22〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 B)	65
〈표 III-23〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 C)	65
〈표 III-24〉 PID 장비 간의 상관분석 결과(레벨 B,C)	66
〈표 III-25〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨 B)	67
〈표 III-26〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 B)	67
〈표 III-27〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 B)	68
〈표 III-28〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨 C)	69
〈표 III-29〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 C)	69
〈표 III-30〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 C)	70
〈표 III-31〉 레벨 B에 대한 정확도(A) 비교	71
〈표 III-32〉 레벨 C에 대한 정확도(A) 비교	71
〈표 III-33〉 시간별 주요 실험내용 및 실험조건(레벨 D)	72

〈표 III-34〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 D)	74
〈표 III-35〉 PID 장비 간의 상관분석 결과(레벨 D)	74
〈표 III-36〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨 D)	76
〈표 III-37〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 D)	76
〈표 III-38〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 D)	76
〈표 III-39〉 레벨 D에 대한 정확도(A) 비교	77
〈표 III-40〉 제조사 혼합보정계수(MMCFs)	78
〈표 III-41〉 MMCFs을 적용한 직독식장비의 정확도(A) 변화 비교	78
〈표 III-42〉 제조혼합비율과 분석결과에 따른 실제혼합비율 비교	79
〈표 III-43〉 RMCfS를 적용한 직독식장비의 정확도(A) 변화 비교	79
〈표 III-44〉 필드보정계수(SMCFs)	80
〈표 III-45〉 SMCFs을 적용한 직독식장비의 정확도(A) 변화 비교	80
〈표 III-46〉 사용자에 따른 역할 및 세부항목 (BoK 내용 번역)	86
〈표 III-47〉 유해등급에 따른 측정주기 및 노출기준 비교	91
〈표 III-48〉 GGVA의 그룹별 농도값 (ACGIH 2014 참조)	94
〈표 IV-1〉 챔버 내의 혼합물질의 이론 농도와 기준값과의 비교	105
〈표 부록-1〉 AA 모델 직독식장비 특성표	121
〈표 부록-2〉 AB 모델 직독식장비 특성표	122
〈표 부록-3〉 AC 모델 직독식장비 특성표	123
〈표 부록-4〉 AD 모델 직독식장비 특성표	124
〈표 부록-5〉 BA 모델 직독식장비 특성표	125

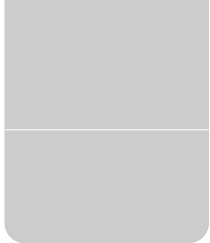


표 목차

〈표 부록-6〉 BB 모델 직독식장비 특성표	126
〈표 부록-7〉 CA 모델 직독식장비 특성표	126
〈표 부록-8〉 CB 모델 직독식장비 특성표	127
〈표 부록-9〉 DA 모델 직독식장비 특성표	127
〈표 부록-10〉 DB 모델 직독식장비 특성표	128
〈표 부록-11〉 EA 모델 직독식장비 특성표	128
〈표 부록-12〉 FA 모델 직독식장비 특성표	129
〈표 부록-13〉 FB 모델 직독식장비 특성표	129
〈표 부록-14〉 GA 모델 직독식장비 특성표	130
〈표 부록-15〉 GB 모델 직독식장비 특성표	130

그림목차

[그림 II-1] PID 직독식장비 실험챔버 모식도	10
[그림 II-2] 혼합물질 평가를 위한 실험챔버 사진	18
[그림 II-3] 정밀도(SrT)와 편향(B)에 대한 정확도 산정표	20
[그림 III-1] PID 센서의 작동원리 모식도	26
[그림 III-2] 실험챔버 농도 안정화 실험	55
[그림 III-3] MM No.1 장비의 일간 배경농도 비교	56
[그림 III-4] 시간에 따른 MM No.1 장비의 농도 변화(레벨 A)	58
[그림 III-5] 시간에 따른 PID 직독식장비 농도 변화(레벨A)	60
[그림 III-6] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 A)	62
[그림 III-7] 시간에 따른 MM No.1 장비의 농도 변화(레벨 B, C)	64
[그림 III-8] 시간에 따른 PID 직독식장비 농도 변화(레벨B, C)	66
[그림 III-9] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 B)	68
[그림 III-10] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 C)	70
[그림 III-11] 시간에 따른 MM No.1 장비의 농도 변화(레벨 D)	73
[그림 III-12] 시간에 따른 PID 직독식장비 농도 변화(레벨 D)	75
[그림 III-13] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 D)	77
[그림 III-14] 보정계수를 적용한 후 직독식장비의 농도값 비교	81
[그림 III-15] 각 레벨별 농도 비교(PID, MM, 활성탄 매체)	82
[그림 III-16] SMCFs 적용 후 직독식장비(PID, MM)의 농도 변화	82
[그림 III-17] PID 직독식장비 적용 및 전략 수립 절차	91

I. 서론

.....

I. 서론

1. 연구배경

1981년 12월 31일 법률 제03532호에 따라 산업안전보건법이 제정되고, 1983년 고용노동부 제1호 고시로 작업환경측정 제도가 실시된 이후 40년 동안 고용노동부는 근로자의 건강 보호 및 쾌적한 작업환경 조성을 위하여 사업주로 하여금 작업환경측정을 하도록 하고 있다(산업안전보건법 제125조). 최근 작업환경측정 결과의 신뢰성 및 한정된 작업환경측정 대상 유해인자 등에 대한 기존 작업환경측정 제도의 한계점을 개선하기 위해서 2020년도부터 3년간 산업안전보건연구원에서 포괄적 작업환경평가 제도 도입에 대한 연구를 진행해 오고 있다(이윤근 등, 2020~2022). 이처럼 작업환경평가 제도가 재검토 되는 시점에서 직독식장비를 활용하여 작업환경측정 및 관리 방안에 대한 패러다임 전환이 필요하다는 의견이 있었다(하권철 등, 2020). 직독식센서 기술을 활용하여 측정할 수 있는 물질은 114종으로 조사 되었고, 직독식장비의 실시간 데이터 기술을 활용하여 작업장 관리방안을 마련할 필요성이 대두되었다. 미래전문기술원에서는 전자산업에 적용할 수 있는 화학물질감지 스마트 센서 셋트를 개발하는 연구를 시작으로 직독식장비를 활용한 작업장의 모니터링 방법을 구체화하고 있다(함승현 등, 2020).

직독식장비의 개발 역사를 보면, 초기에는 예비조사의 목적으로만 장비를 활용하였기 때문에 박스형 형태였고, 무거웠지만, 모니터링 목적으로 사용되면서 장비의 크기와 무게가 작아졌고(Dena Siel et al, 2019), 향후 노출평가 또는 법 준수 목적으로 활용할 목표로 하고 있었다. 지금까지 직독식장비의 장점 및 한계점을 확인하기 위한 연구가 지속적으로 진행되어 왔고, 이를 활용하기 위한 방안도 모색하고 있었다.

2. 연구목적

최근 센서 기술의 발달과 이를 활용한 직독식장비의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 또한 직독식장비로 측정할 수 있는 농도의 정확도가 크게 향상되고 있으며, 이에 따라 측정값의 신뢰도가 향상되고 있는 추세이다. 미국은 1970년도부터 직독식측정 관련 법(Public Law 91-596)이 제정된 이래로 직독식장비에 대한 작업장 평가 방법 개발, 실험연구, 현장 적용 연구 등 관련 연구를 지속적으로 수행해 오고 있다. 최근 PID 직독식장비를 사용하여 작업장 노출평가의 도구로 활용되기 위한 기틀 마련 연구가 국내·외적으로 이루어지고 있으며, 최근 일산화탄소의 측정에 대한 KOSHA GUIDE가 개발되는 등 작업장 모니터링 관리 또는 오염원 관리 방법 외에 노출평가 목적으로 직독식장비를 활용하고 있었다.

본 연구의 목적은 문헌고찰과 챔버실험을 통해서 PID 직독식장비의 특성 및 한계점을 파악하고, PID 직독식장비를 작업환경을 관리하기 위한 방법으로 활용할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 또한 챔버실험을 통해서 PID 직독식장비의 정확도를 향상시킬 수 있는 방법을 확인하고자 하였다.

Ⅱ. 연구내용 및 방법



II. 연구내용 및 방법

1. 연구 내용

가스 및 증기상 물질을 측정하는 직독식장비의 평가 방법을 이해하고, PID 직독식장비의 특성을 파악하기 위해서 문헌을 고찰하였다. 챔버 시험을 통해서 PID 직독식장비의 특성을 확인하고, 최종적으로 작업환경관리 방안을 제시하고자 하였다. 따라서 본 연구 내용은 다섯 가지로 분류할 수 있다.

- 1) 직독식장비의 평가 방법
- 2) PID 직독식장비의 특성
- 3) PID 직독식장비 관련 문헌 조사
- 4) 챔버 연구를 통한 혼합물에 대한 PID 직독식장비의 정확도 실험
- 5) PID 직독식장비를 활용한 작업환경관리 방안

2. 연구방법

1) 관련 자료 분석

(1) 증기 및 가스류 측정을 위한 직독식장비의 평가 요소에 대하여 2012년도 미국 NIOSH 기술보고서(Components for Evaluation of Direct-Reading Monitors for Gases and Vapors)를 분석하였다.

(2) 시중에 유통되고 있는 직독식장비 중 PID 직독식장비를 제조사 7개소의 홈페이지 또는 개별 문의를 통해서 자료를 수집하고 정리하였다.

○ RAE Systems : <http://www.instrumart.com>

○ Dräger : <http://www.draeger.com>

○ GrayWolf : <http://www.graywolfsensing.com>

○ Rkl : <http://www.rkinstruments.com>

○ MSA : <http://www.us.msasafety.com>

○ Thermo fisher : <http://www.thermofisher.com>

○ Photovac : <http://inficon.com>

(3) PID 직독식장비 연구 문헌 고찰

국내·외 PID 직독식장비 관련 연구 및 보고서를 검토하여, PID 직독식장비의 특성 및 한계점을 파악하고, 실현 가능한 작업환경관리 방안과 향후 방안을 제시하였다.

가) 국내문헌

- 학술연구정보서비스: riss.kr
- 산업안전보건연구원: oshri.kosha.or.kr

나) 국외문헌

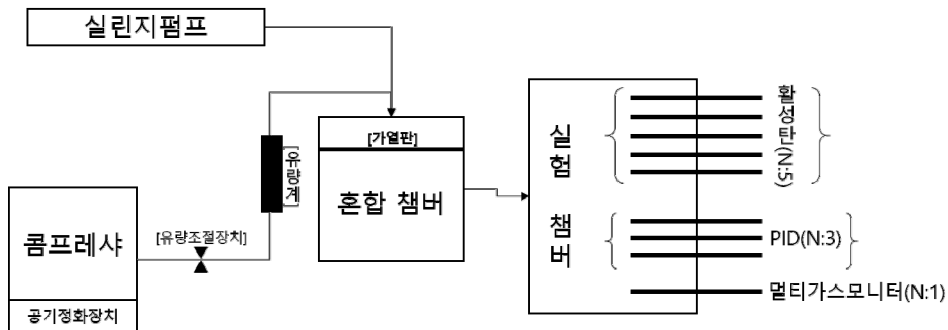
- PubMed: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov
- Google 학술 검색: scholar.google.co.kr

2) 챔버실험

혼합물질에 대한 PID 직독식장비의 정확도 수준을 파악하기 위해서 챔버실험을 실시하였다. 실험 방법은 NIOSH 연구 보고서(2012)에서 제안한 방법을 활용하였으며, 본 연구에서는 동일 제조사의 PID 직독식장비 3종과 활성탄 매체 농도를 비교하는 연구를 실시하였다. 작업환경측정 자료를 기준으로 화학물질 4종을 선정하였으며, 그 농도범위는 노출기준의 0.2~2배 수준으로 하였으며, 4가지 농도수준으로 평가하였다. 여러 문헌에서 PID 센서 시험에서 환경요인(온·습도 조건)을 고려하고 있지만 본 연구에서는 환경요인을 고려하지 않았으며, 시험 중 챔버의 평균 온·습도는 각각 26℃, 67%로 조사되었다.

(1) 챔버 구성

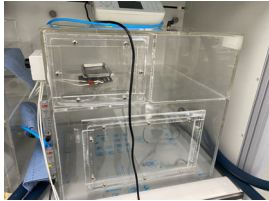
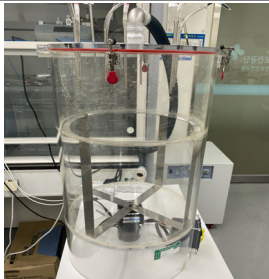
실험 챔버는 혼합 챔버와 실험 챔버로 구분하였으며, 챔버 내에 기류와 농도를 일정하게 만들기 위해서 공기압축기(air compressor)를 사용하여 실험실 실내 공기(질소 가스를 퍼지(purge)하는 방식을 사용하지 않음)를 동일한 유속으로 유입시켰다(표 II-1). 공기압축기를 통해 생성된 압축 공기는 유량조절장치에서 유량을 조절(0~25 L/min)하여 혼합 챔버로 공기를 이동시켰다(그림 II-1).



[그림 II-1] PID 직독식장비 실험챔버 모식도

혼합 유기용제는 실린지 펌프에서 혼합 챔버 상부의 가열판으로 이송되고, 가열판의 전압조절장치를 사용하여 온도를 150℃로 균일하게 맞춘 후, 4가지 농도 수준을 각각 실험하였다. 그리고 실험챔버 내부에 멀티가스측정기를 설치하여 상시 실험 챔버의 농도 변화를 모니터링 하였다. 4가지 농도 수준별 반복 실험은 각각 2회 실시하였고, 실험 전 배경농도를 활성탄 매체를 사용하여 측정하였다. 실험이 끝나면 깨끗한 공기만을 주입하여 챔버 내부의 공기를 정화하였다.

〈표 II-1〉 PID 직독식장비 실험챔버 구성요소

챔버 구성	사진	특성
혼합챔버		혼합 유기용제를 발생시켜, 공기압축기를 통해 주입된 공기량에 따라 혼합 챔버로 혼합 유기용제가 이동하게 됨
가열판 (온도: 150℃)		펌프 실린지를 통해서 주입된 혼합 유기용제는 가열판에 떨어지게 되고, 가열판의 온도는 150℃로 일정하게 유지됨
유량계		공기압축기에서 주입되는 공기의 양을 유량계를 사용하여 일정한 양으로 유입되는지를 확인 할 수 있으며, 유량은 20, 25 L/min으로 설정하였음
공기압축기		실내에 있는 공기를 압축하여 챔버 내로 공기를 유입시키는 장치
실린지 펌프		혼합 유기용제를 일정한 속도(mL/min)로 주입하는 장치이며, 본 연구에서는 0.002~0.11 mL/min의 범위로 사용함
혼합 챔버		발생된 혼합 유기용제는 혼합 챔버에서 일정한 농도 범위를 유지하며, 측정기기를 연결하여 혼합 챔버에서 각각의 농도를 측정함

(2) 화학물질의 선정

화학물질의 선정은 작업환경측정 통계자료를 바탕으로 선정하였다. 국내에서 가장 많이 측정·분석하는 물질인 톨루엔, 이소프로필 알콜(IPA), 아세톤, 자일렌이었으며, 이 물질은 주로 도장, 인쇄 공정에서 많이 사용하는 화학물질이었다(노동부, 2021).

화학물질은 극성 2종(아세톤, 이소프로필 알콜), 비극성 2종(톨루엔, m-자일렌)으로 구성했고, 분자량 및 끓는점(℃)은 아세톤<이소프로필 알콜<톨루엔< m-자일렌 순이었다. 증기압력은 아세톤이 245.3 hPa (20℃) 가장 높았고, m-자일렌이 가장 낮았다(13.78 hPa, 29.4℃). 그 밖에 화학물질의 특성은 <표 II-2>에 나타냈다.

〈표 II-2〉 개별 화학물질에 대한 특성 비교표

화학물질 특성	아세톤	이소프로필 알코올	톨루엔	m-자일렌
분류	케톤류	알콜류	방향족 탄화수소	방향족 탄화수소
극성	극성	극성	비극성	비극성
영문	acetone	2-propanol or IPA	toluene	m-Xylene
화합식	C ₃ H ₆ O	C ₃ H ₈ O	C ₇ H ₈	C ₈ H ₁₀
분자량, g/mol	58.1	60.1	92.1	106.2
어는점, °C	-94.6	-	-	-
녹는점, °C	-	-89	-93	-48
끓는점, °C	56.5	82.6	111	138
밀도, g/cm ³ (25°C)	0.791	0.785	0.865	0.868
색	무색	무색	자료없음	무색
냄새	약한 아로마성의 자극적인 냄새	알콜 냄새	벤젠 같은 냄새	자료없음
증기 압력, hPa (20°C)	245.3	43	30.9 (21.1°C)	13.78 (29.4°C)
수용해도, g/L (25°C)	전반적으로 용해됨	용해됨	0.58 (부분적으로 용해됨)	146 (부분적으로 용해됨)
증기밀도	-	2.07	3.18	-
분해 온도	상압에서 분해되지 않은 상태로 증류 가능	상압에서 분해되지 않은 상태로 증류 가능	-	-
CAS 번호	67-64-1	67-63-0	108-88-3	108-38-3

(3) 화학물질의 혼합비율, 농도 및 노출기준

혼합물질의 혼합 비율은 1:1:1:1로 설정하였으며, 함량과 비중을 활용하여 농도를 계산하였다. 그리고 아세톤, IPA, 톨루엔, m-자일렌의 노출기준은 각각, 500 ppm, 200 ppm, 50 ppm, 100 ppm이었다<표 II-3>.

〈표 II-3〉 개별 화학물질의 농도계산 산출표

화학물질 특성	아세톤	IPA (아세트프로판올)	톨루엔	m-자일렌
비율	1	1	1	1
분자량(g/mole)	58.08	60.1	92.14	106.17
함량(%)	99.9	99.5	99.9	99.0
비중(g/mL)	0.791	0.785	0.865	0.868
계산농도(mg/mL)*	0.790	0.781	0.864	0.859
노출기준(ppm)	500	200	50	100

* 계산농도 (mg/mL) = 비중 (g/mL) X 함량 (%)

(4) 혼합물질의 수준별 이론 농도

혼합물질의 농도범위는 노출기준의 0.2~2배 수준을 고려하여 14 ppm, 162 ppm, 323 ppm, 862 ppm으로 설정하였으며, 혼합물질 주입 실린지의 속도(mL/min)와 공기압축기의 공기 유량(L/min)을 조절하여 농도 수준을 맞추었다<표 II-4>.

〈표 II-4〉 실험챔버 조건에 따른 혼합물질의 농도수준

농도 수준 (이론치 ppm*)	레벨 A (14)	레벨 B (162)	레벨 C (323)	레벨 D (862)
실리지 유량 (mL/min)	0.001	0.015	0.030	0.080
공기 유량 (L/min)	20	25	25	25
가열판 온도 (°C)	150	150	150	150

* 반올림하여 표기 함

(5) 공기량 산출 (톨루엔 기준)

NIOSH 1501 분석법을 참고하여 톨루엔 기준으로 공기량을 산출하였고, 파과 농도를 고려하여 펌프의 유량을 결정하였으며, 모든 실험의 채취시간은 30분으로 동일하게 설정하였다(표 II-5).

〈표 II-5〉 파과 농도를 고려한 적정 공기량 및 채취 유량 산정

농도 (ppm)	14	162	323	862
농도 (mg/m ³)	50.9	609.0	1218.4	1364.6
적정 공기량(L)*	6.0	6.0	3.0	1.2
채취 유량(30분)	0.20**	0.20	0.10	0.04***

* 적정 공기량: 1~8 L (파과농도: 4.51 mg)

** 최대 채취 유량은 0.20으로 함

*** 파과 될 것을 고려하여 최소 유량으로 실험 함

(6) 검량선 용액제조

검량선 농도 범위를 결정하기 위해서 채취된 이론 농도를 수식을 활용하여 계산하였고, 그 농도 범위는 0.090 mg ~ 1.040 mg 사이로 계산되었다(표 II-6).

〈표 II-6〉 농도수준별 이론 채취량

단위: mg

화학물질	아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌
레벨 A	0.095	0.094	0.104	0.103
레벨 B	0.948	0.937	1.037	1.031
레벨 C	0.948	0.937	1.037	1.031
레벨 D	0.948	0.937	1.037	1.031

검량선은 아세톤, IPA, 톨루엔, m-자일렌의 혼합비를 1:1:1:1로 하여 STOCK 1 용액을 제조하였고, STOCK 1과 CS₂의 비율을 1:6으로 STOCK 2 용액은 제조한 다음 검량선(STANDARD)은 6개 수준으로 제조하였다(표 II-7).

〈표 II-7〉 혼합물질의 검량선 농도범위 결정

단위: mg

화학물질	아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌
STANDARD 1	0.028	0.028	0.031	0.031
STANDARD 2	0.056	0.056	0.062	0.061
STANDARD 3	0.140	0.139	0.154	0.153
STANDARD 4	0.279	0.276	0.306	0.304
STANDARD 5	0.553	0.547	0.605	0.602
STANDARD 6	1.344	1.328	1.470	1.461

(7) 탈착시료 용액제조

탈착시료는 3개의 농도범위로 3개씩 만들었고, 각 농도범위는 검량선 농도 범위 내에서 저, 중, 고 농도수준으로 제조 하였다(표 II-8).

〈표 II-8〉 검량선 범위를 고려한 탈착시료 농도 범위

단위: mg

화학물질		아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌
탈착	N				
DE 1	3	0.085	0.084	0.093	0.092
DE 2	3	0.395	0.391	0.432	0.430
DE 3	3	0.988	0.976	1.080	1.074

(8) 측정기기의 구성

혼합물질을 평가하기 위해 사용된 시료채취기구는 〈표 II-9〉과 같다.

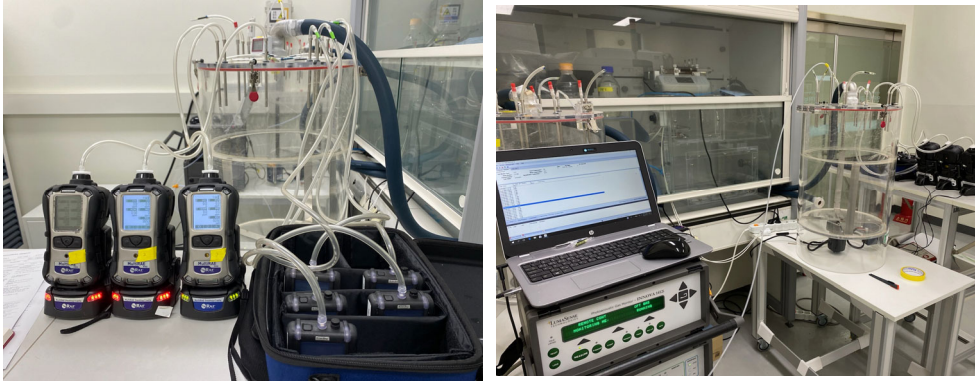
〈표 II-9〉 혼합물질 평가를 위해 사용된 시료채취기구

시료채취기구	사진	특성
멀티모니터 측정기기		- 챔버 내의 혼합물의 농도를 모니터링하고, 챔버 내의 농도의 안정화를 확인하는 장비 - Interval: 35초
PID 직독식장비 (3종)		- MultiRAE PRO(RAE SYSTEM) - UV 램프: 10.6 eV - 교정가스: 100 ppm 이소부틸렌 - Interval: 1분
저유량 펌프 (5종)		- 활성탄관(SKC 226-01) - 유량: 0.04~0.2 L/min - 분석법: NIOSH 1501

(9) 측정방법

PID 직독식장비는 측정 전, 이소부틸렌(isobutylene) 100 ppm의 표준가스로 보정하고, 영점보정 후 측정을 실시하였다. 배경농도는 활성탄 매체를

활용하여 매일 수준별 농도 평가 전에 실시하였으며, 멀티가스모니터(MM)장비를 활용하여 챔버 내의 농도를 상시 모니터링 하였다[그림 II-2].



[그림 II-2] 혼합물질 평가를 위한 실험챔버 사진

(10) 활성탄관 시료채취 및 분석

PID 직독식장비의 농도값과 비교하기 위해서 활성탄관(SKC 226-01) 매체 2개를 PID 직독식장비 측정시 동일한 위치에서 동시에 시료를 채취하였다. 활성탄관 매체는 저유량 펌프에 연결하여 0.1 L/min의 유량으로 시료를 채취하였고 사용한 측정 및 분석법은 NIOSH 1501이었다. 시료채취 전, 후에 유량 보정계를 사용하여 유량을 보정하였고, 검교정 된 유량보정기기를 사용하였다.

채취된 시료는 1 mL 2% 부탄올-이황화탄소(CS_2 , Aldrich 34-227-0)를 탈착용매로 사용하였고, 가스크로마토그래피 분석기기에 불꽃이온화검출기(FID, flame ionization detector)를 부착된 기기로 분석하였다.

(11) 정확도(Accuracy, A) 계산

정확도 검증을 위해서는 아래의 수식으로 계산하였으며, NIOSH 보고서에 따라 정확도가 25% 이내를 만족 조건으로 하였다.

가) Precision (S_r) 산출

먼저 Precision (S_r), 측정값에 대한 분포도를 나타내는 것으로 측정값의 편차와 평균으로 구할 수 있다.

$$S_r = \sigma / \mu$$

여기서, S_r 은 정밀도, σ 는 기준값의 표준편차, μ 는 측정값의 평균을 의미한다.

나) Bias (B) 산출

Bias (B), 측정값과 기준값 사이의 편향을 의미한다.

$$B = \mu / C_T - 1$$

여기서 B는 편향, μ 는 측정값의 평균, C_T 는 기준값의 평균을 의미한다.

다) 정밀도(S_{rT}) 산출

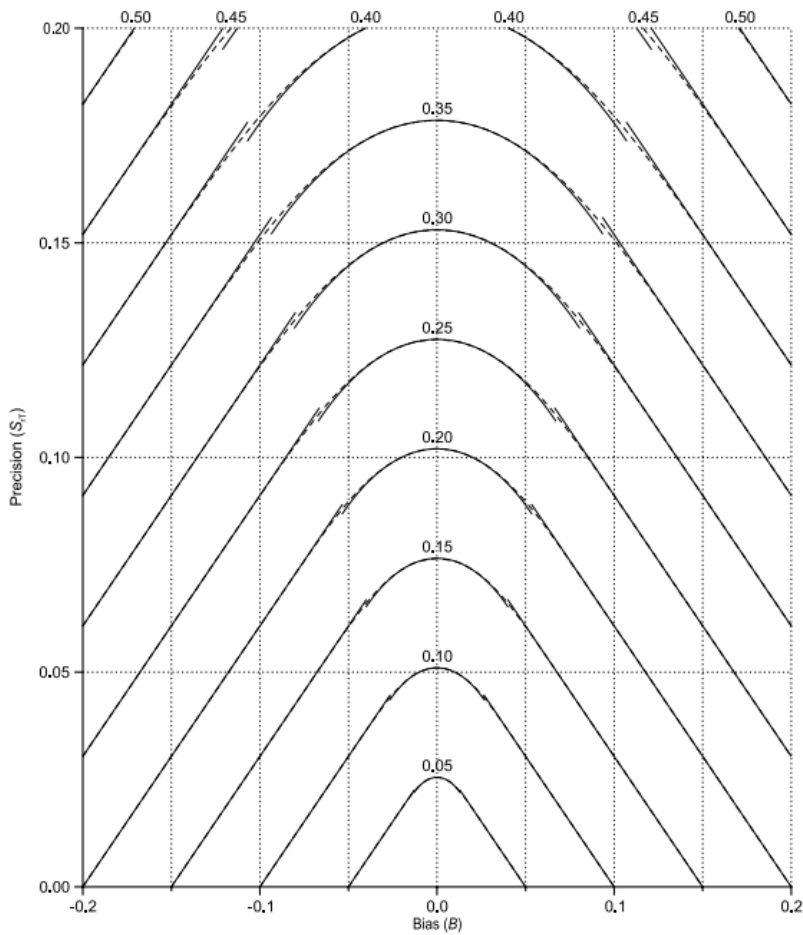
정밀도를 다른 방법으로 구할 수 있는데, 이 때 정밀도를 Precision (S_{rT})라고 하며, 측정값의 표준편차를 기준값의 평균으로 나눠 준 값을 의미한다.

$$S_{rT} = \sigma / C_T \text{ 또는 } S_{rT} = S_r \times (1 + B)$$

라) 정확도(A) 산출

그리고 최종적으로 정확도 Accuracy(A)에 대한 식은 아래와 같다.

$$A(B, S_{rT}) = \begin{cases} 1.96 \times \sqrt{B^2 + S_{rT}^2} & \text{if } |B| < \frac{S_{rT}}{1.645} \\ |B| + 1.645 \times S_{rT} & \text{otherwise} \end{cases}$$



[그림 II-3] 정밀도(S_{rT})와 편향(B)에 대한 정확도 산정표 (NIOSH, 2012 인용)

(12) 보정계수 계산

가) 제조사보정계수 (Manufacture Mixture Correction Factors, MMCFs)

$$CF_{mix} = \frac{1}{\frac{f_a}{CF_a} + \frac{f_b}{CF_b} + \frac{f_c}{CF_c} \dots + \frac{f_n}{CF_n}}$$

여기서, f는 각 물질의 구성 비율, CF는 각 물질의 보정계수(CF)를 의미한다.

나) 필드보정계수 (Standard Mixture Correction Factors, SMCFs)

$$\text{고유보정계수}(SMCFs) = \frac{\text{직독식장비 농도}}{\text{활성탄 농도}}$$

3) 통계 프로그램

농도수준별 기술통계, 직독식장비 간의 상관분석, 분산분석(사후검정) 등 SPSS 통계 프로그램(ver 18.0)을 사용하였고, 보고서에 삽입되는 실시간 그래프, Box plot, 선형 그래프 등은 시그마플랏 프로그램(ver 14.0)을 활용하였다. 정확도 계산 등 일부 간단한 수식의 계산 및 단순 그래프는 엑셀 프로그램(ver 2016)을 활용하였고, 함축적인 의미를 전달하기 위해서 파워포인트 프로그램(ver 2016)을 활용하여 그림을 편집하여 사용하였다.

Ⅲ. 연구결과



Ⅲ. 연구결과

1. 관련자료분석

1) PID(photoionization detector) 직독식장비

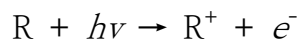
(1) PID의 정의

PID는 photoionization detector의 약자이며, 이온화 검출기(ionization detectors)는 크게 4가지로 분류할 수 있다. 각 검출기는 해당 물질을 이온화시키기 위해서 필요한 에너지원(불꽃, 램프, 또는 방사능)을 사용한다<표 Ⅲ-1>.

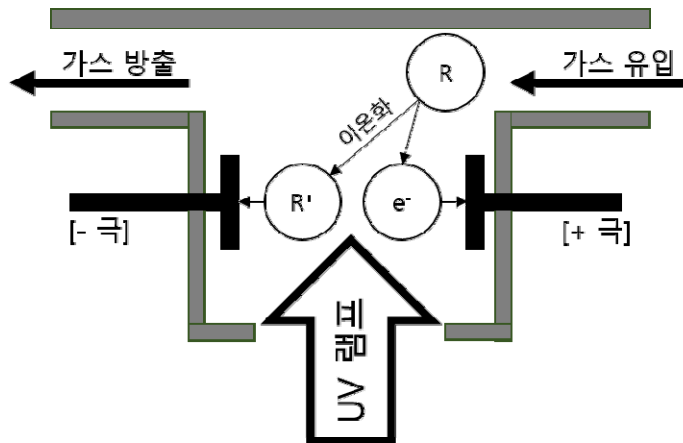
〈표 Ⅲ-1〉 이온화방식 검출기 종류

구분	영문
불꽃 이온화 검출기	flame ionization detector, FID
광이온화 검출기	photoionization detector, PID
전자 포획 검출기	electron capture detector, ECD
이온 이동성 분광법	ion mobility spectrometry, IMS

광이온화(Photoionization) 방식은 불꽃 없이 이온화되는 기술이며, 해당 가스·증기가 이온화챔버 내로 들어오면 입사광(incident light)보다 적은 에너지에도 이온화 될 수 있는 물질은 안정된 자외선(ultraviolet, UV)에 의해 이온화된다. 분자는 전자를 잃을 수 있는 충분한 에너지의 광자(photo)를 흡수할 때 이온화가 이루어진다[그림 Ⅲ-1].



여기서, R은 대상 물질, $h\nu$ 는 광자, R^+ 는 이온화된 물질을 말한다.



[그림 III-1] PID 센서의 작동원리 모식도

광이온화 검출기(photoionization detector, PID)는 이온에 반응하고, 화학적 반응으로 이온화되는 것이 아니라 광자의 흡수에 의해 이온이 생성되므로 비파괴적(nondestructive) 기술이라 할 수 있다. PID는 높은 전압을 이용하여 대상 분자(R)는 이온화 되어 R^+ 가 되어 전자(e^-)를 내어 놓는다. 이 후 e^- 는 양극으로 이동하고, R^+ 는 음극으로 이동하게 되는데, 이 때 이온화된 분자의 양만큼 전극에서 전기적 신호를 생성하게 된다. 일반적으로 광자를 발생시키는 에너지원은 램프이며, 10 electron volt (eV), 10.6 eV 및 11.7 eV가 상용화되고 있다. PIDs는 탄소 2개 이상으로 구성된 대부분의 유기화합물을 측정할 수 있다. 자외선(UV)의 광자의 에너지가 높을수록 더 많은 가스를 측정할 수 있다. 따라서 11.7 eV (아르곤) 램프로 포름알데히드 및 10.6 eV (크립톤) 램프에서 측정할 수 없는 할로젠화합물을 측정할 수 있다. 대부분 PID로 유기화합물을 측정하지만, 황화수소, 암모니아 및 아르신과 같은 무기화합물도 측정이 가능하다. 공기의 구성 물질, 메탄, 에탄은 측정할 수 없다. 측정 물질의 농도에 따라 수분의 간섭이 있을 수 있다는 점도 고려해야 한다.

방향족탄화수소가 존재할 경우, PID에서 이온화가 증대된다. PID는 물질

의 농도에 따라 대체로 선형을 이룬다. PID 장비는 전통적으로 지역 시료측정 또는 감시의 목적으로 사용되나 최근 개인 시료측정으로도 활용되고 있다.

(2) 직독식장비의 기본 사항

가) 직독식장비의 개요

미국은 1970년대에 산업안전보건법(Occupational Safety and Health Act, Public Law 91-596)에 따라 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서 작업환경측정 및 분석방법에 대한 부분을 수행하도록 하고 있었다. 1974년도부터 미국 OSHA (Occupational Safety and Health Administration)와 NIOSH가 공동으로 공기 중 유해물질에 대한 측정 및 분석법의 개발 및 평가에 대하여 공동으로 연구를 수행하였다. 그 후 새로운 측정기술이 개발될 경우 NIOSH에서 관련 연구를 수행하고 있었다.

나) 용어의 정의

어느 나라와 마찬가지로 용어를 통일화하는 것이 중요하다. 미국에서는 직독식장비의 용어에 대해서 monitor, meter, detector, indicator, sensor, analyzer, 및 alarm 등으로 다양하게 사용하고 있었지만, 미국 NIOSH에는 장비를 monitor로 정의하였고, 직독식장비를 direct-reading monitors, DRMs로 표기하기로 2012년도부터 표기하고 있었다.

현재 우리나라는 e-나라 표준인증 사이트의 표준용어 사전에는 direct reading instrument로 영문 표기되어 있고, 국문으로는 직독 계기 또는 직독 측정기 등 다양한 용어로 사용되고 있었다. 한편 우리 산업보건 분야에서는 직독식장비로 널리 사용되고 있었다.

(3) 직독식장비(DRMs)의 요구사항

측정매체에 대한 정확도 등 결과값에 대한 신뢰성 확보는 매우 중요한 부분이다. 직독식장비를 평가하기 위해서는 아래의 요구사항을 만족해야 한다.

가) 정확도(accuracy)

공기 중에서 측정한 농도 수준은 정규분포 한다고 본다. 이 때 측정값이 기준농도(참값)에 근접할수록 정확도는 높다고 할 수 있다. 직독식장비에 대한 정확도를 평가할 때, 95% 신뢰구간의 최대 측정 오차를 적용하는데, 2012년 NIOSH 보고서에서는 측정값이 95% 신뢰구간에서 25% 이내(허용 가능한 농도 범위는 25% 이하)의 기준을 만족할 때 직독식장비에 대한 정확도 기준을 만족한다고 보고 있었다.

나) 정밀도(precision)

정밀도는 동일한 반복 측정값에 대한 변화 수준을 나타내며, 측정 모집단의 평균에 대한 상대적인 변동성을 의미한다.

$$S_r = a/u, S_{r,T} = a/C_T$$

여기서 S_r 은 상대표준편차, a 는 표준편차, μ 는 측정값의 평균이며, $S_{r,T}$ 는 실제 농도에 대한 농도의 측정표준편차, C_T 는 실제 농도를 의미한다.

다) 편향(bias, B)

편향은 장비의 측정값 분포의 평균(u)과 실제 농도(C_T)의 비율로 표시된다. 정확도 허용가능 범위를 만족하고, 편향의 크기가 10% 이하로 보고 있었다.

$$B = (u/C_T) - 1$$

라) 검출(측정)한계 (limit of detection and limit of measurement)

직독식장비에 표시(측정)될 수 있는 가장 낮은 농도를 검출(측정)한계로 정의하고 있다.

마) 측정범위(measurement range)

측정범위는 직독식장비로 정확도 범위를 만족할 수 있는 실험 물질의 농도 범위를 의미한다.

바) 평가범위(evaluation range)

평가범위는 노출기준의 0.2~2.0배 사이로 직독식장비를 평가하기 위하여 실험하는 농도 범위를 의미한다.

사) 간섭(interferences)

간섭은 다른 화학물질 또는 환경적 요인(온도, 습도 등)에 따라 직독식장비에서 측정된 농도에 영향을 줄 수 있는 요인을 말한다.

- 해당 물질에 대한 대표성 있는 채취를 방해하는 물질
- 장비 특성상 정확하게 측정할 수 없는 물질
- 해당 물질의 대표성 있는 채취를 방해하는 환경요인
- 장비 시스템 상 정확하게 측정할 수 없도록 방해하는 환경요인

아) 시료채취율(sampling rate or uptake rate)

시료채취 속도 또는 체적비율로 직독식장비에 유입되는 공기를 의미하며, 장비의 내부 표시장치에 시료채취 유량이 표시되어야 한다.

자) 노출기준(exposure limit)

근로자가 작업 시간동안 건강영향이 발생하지 않는 권장 농도 수준으로 국가마다 차이가 있다. 미국 NIOSH에는 REL(recommended exposure limit), OHSA에서는 PEL(permissible exposure limit), ACGIH에서는 TLV(threshold limit value), 한국에서는 노출기준이 물질마다 설정되어 있다.

- 시간가중평균기준(time-weighted average, TWA): 1일 작업시간동안 6시간 이상 연속 측정하거나 작업시간을 등간격으로 나누어 6시간 이상 연속 분리하여 측정
- 단시간 노출기준(short-term exposure limit, STEL): 1회에 15분간 측정하되 유해인자 노출특성을 고려하여 측정횟수를 정하여 측정
- IDLH(immediately dangerous to life and health): 공기 중의 유해인자의 노출로 인해서 사망 또는 즉각적인 또는 영구적인 건강에 악영향을 미치는 농도 수준

차) 직선성(linearity)

직독식장비의 측정된 화학물질의 농도 대비 기기 반응값의 검량곡선이 수

학적으로 선행이 되어야 한다.

카) 반응속도(response time)

측정 예상 농도에 도달하는데 걸리는 시간(어떤 경우에는 63.4%, 그 밖에는 90% 이상 도달하는 것을 의미)을 말한다.

타) 민감도(sensitivity)

아주 작은 농도 수준에도 직독식장비에서 감지할 수 있는 능력을 말한다.

파) 검출기(detector)

검출기(화학적, 전기적, 기계적 또는 물리적 검출기)는 가스·증기를 정량 또는 정성 분석할 수 있는 장치이다. 직독식장비의 구성은 시료채취, 분리, 검출, 데이터 처리 및 표시로 이루어진다.

하) 검출기 수명(detector life)

검출기 수명은 일반적으로 허용 가능한 범위 내에서 작동될 수 있는 시간을 의미한다. 따라서 그 범위를 지나게 되면 감지기의 성능이 저하된다. 검출기의 수명은 그 유형(반도체, 광열, 광학 및 광섬유 기반 등)의 특성에 따라 차이가 있기 때문에 제조업체는 사용자에게 이러한 정보를 제공해야 한다.

가) 장비의 불확도(monitor's uncertainty)

장비의 불확도는 시료채취 및 분석 절차의 결과에 대한 오류에서 발생하며, 수학적인 계산으로 개별 오류를 확인할 수 있다.

(4) 직독식장비의 평가요소

직독식장비의 평가 시 사용되어지는 장비의 물리적, 운영, 및 성능 특성의 요구사항 및 실험 부분으로 나뉘어 기술하였다.

가) 물리적 특성

물리적 특성은 직독식장비의 크기, 모양, 무게 및 검출 방법 등의 내용이 포함되어야 하며, 작동, 유지 및 교육의 내용도 포함되어야 한다. 그리고 제조

사는 문서를 통해서 사용자가 해당 장비를 적절하게 사용할 수 있도록 안내하도록 하고 있다<표 III-2>.

〈표 III-2〉 직독식장비의 물리적 특성 및 평가항목

특성 분류	평가항목
문서	장비의 작동, 관리 및 작동 이론
취급	취급 방법(보호구 착용 등)
오염제거의 편리성	오염원 제거 시 노출가능성에 대한 예측
운영적 관리	켜·끄기, 영점(zeroing), 내부 검교정 확인, 가스 선택, 결과값 표시
알람	청각/진동, 시각 알람, 배터리 부족 표시기
화면 표시	연속값, 화면의 충분한 크기와 밝기
유지관리	교환 가능한 전원장치, 검출기

나) 문서(documentation)

각각의 측정기기 제조사는 작동, 유지, 측정기기의 동작에 대한 원리에 대하여 문서화해야 한다. 이는 제본 또는 전자문서로 되어 있고, 사용자가 쉽게 직독식장비의 작동 방법에 대해 숙지할 수 있어야 한다. 수치는 ppm 또는 해당 물질의 농도 단위로 표시하고, 표준 온도와 압력 상태에서의 수치에 대한 상관관계를 나타내야 한다. 사용자가 기술적으로 작동이 불가할 경우에는 관련 기술자 부분에 대한 내용을 문서화해야 한다. 뿐만 아니라 직독식장비의 유지 관리 절차, 방법 등을 사용자에게 제시해야 한다.

다) 설명정보(descriptive information)

매뉴얼에는 측정기기의 작동원리, 장비의 기본적인 설명, 잠재되어 있는 간섭 현상 등 사용에 필요한 사항에 대한 설명정보를 제공해야 한다. 그리고 기술적인 부분이나 직독식장비를 법적 장비로 활용할 때에는 기술자와 반드시 협의해야 한다.

라) 물리적 정보(physical information)

매뉴얼에는 수리의 목적으로 회로도 등이 포함되어 하며, 수리 방법, 문제 진단 방법 및 적절한 서비스를 받는 방법을 포함해야 한다. 그리고 수리에 필요한 부품을 목록화해야 하며, 제조사가 노후화된 부품에 대한 정책(신 부품 교체 시기 등)을 가지고 있다면 매뉴얼에 포함시켜야 한다. 또한 제조사의 규정, 기술적인 지원, 소요시간, 비용 및 방법 등에 대해서 설명되어야 한다.

마) 휴대성(portability)

측정기기의 휴대성은 4단계로 분류할 수 있었다.

- 개인용: 무게는 500 g 보다 가벼워야 하고, 특히 개인적으로 착용 가능
- 휴대용: 한 사람이 쉽게 이동할 수 있고, 12 kg 보다 가벼워야 함
- 운반 가능용(transportable): 두 사람 또는 카트를 이용해서 한사람이 운반 할 수 있어야 하고 무게의 범위는 13 ~25 kg 함
- 지역용: 25 kg 이상의 무게이며, 고정하여 측정기기를 사용함

위의 내용은 단지 권고 무게이며, 더 정확한 무게를 측정하기 위해서는 NLE(NIOSH lift equation)으로 계산할 것을 권장하고 있었다.

바) 디자인

직독식 센서는 교체가 가능하도록 디자인되어야 한다. 예를 들어 전기화학식 직독식장비의 전기화학식 셀은 교환이 가능해야 한다. 이 같은 측정기기는 전형적으로 확산식이며, 개인 노출평가에 사용된다. 또한 이동식 가스크로마토그래프 분석기기의 경우에도 검출기를 교환할 수 있도록 디자인되어야 한다.

사) 안전

제조사는 사용자가 직독식장비를 안전하게 사용할 수 있도록 구체적인 경고표시, 절차 등을 제공해야 한다. 예를 들어 사용자가 폭발성, 가연성 물질을 측정할 경우, 관련 안전 인증을 획득한 제품을 사용해야 한다. 그리고 이러한 제품의 회로는 불꽃이나 열에 안전하다는 것을 증명해야 한다.

(5) 직독식장비의 성능실험절차 및 적합기준

직독식장비에 대한 성능평가 항목으로는 반응시간, 검교정, 직선성 등이 있으며, 관련 성능실험절차 및 적합기준은 〈표 III-3〉에 제시하고 있었다.

〈표 III-3〉 직독식장비의 성능특성, 실험방법 및 기준(계속)

성능평가 특성	실험절차 및 방법	적합기준
반응시간	4가지의 농도수준으로 실험(20%, 40%, 60%, 80% 그리고 100%) * 다수의 장비로 반복 실험하고, 실험 사이에 챔버 내에 청정공기 주입	각 농도수준의 90%에 도달하는 시간을 기록 * 각 농도수준의 10%까지 낮아지는 시간을 기록 ※ 제조사 스펙 확인
검교정	검교정(영점 포함) 청정공기 4시간 주입 후, 30분 동안 측정(각 농도수준)하고, 측정 후에는 청정공기 주입, 2회 실시	결과에 대한 예상 농도 범위는 90~110%임
직선성	검량선을 만든 후, 다른 농도수준을 실험	결과에 대한 예상 농도 범위는 90~110%임
편이(drift)	청정공기 및 예상 농도값에 대한 장비의 반응값 실험 * 3일 이상 실험	결과가 예상농도 범위 $\pm 10\%$ 이내
범위	노출기준의 0.1배, 0.5배, 1.0배, 2.0배 수준으로 실험 * 각 농도수준 당 최소 4회 실험	결과가 각각의 예상농도 범위 $\pm 10\%$ 이내
환경적 영향	온도, 상대습도, 극한수준에 대한 실험(노출기준의 0.1배, 0.5배, 1.0배, 2.0배 수준)	결과에 대한 예상 농도 범위는 90~110%임(온도, 상대습도 범위는 제조사에서 제안하는 수준으로 함)
정밀도	노출기준의 0.1배, 0.5배, 1.0배, 2.0배 수준으로 실험	수식을 활용하여 계산함
편향	정밀도에서 계산된 값을 사용하여 편이를 계산함	예상 편향값의 10%를 초과해서는 안 됨
정확도	정밀도와 편이를 사용하여 계산함	정확도는 95% 신뢰구간에서 ≤ 25 수준

〈표 III-3〉 직독식장비의 성능특성, 실험방법 및 기준

성능평가 특성	실험절차 및 방법	적합 기준
검출한계	가장 낮은 농도를 10번 반복 실험	측정값의 범위가 10% 이내여야 함
환경적 방해요인	측정 당시에 환경적인 방해요인이 있는지에 대해서 확인한다. * 극한수준에 대한 실험일 경우에는 방해요인: 입자, 스모그, 안개(fog), 분진(dust), 가스, 연료 증기, house chlorine bleach, engine exhaust	환경적 방해요인으로 결과값이 10%를 초과할 경우에는 실험 실패
전자기 방해요인	전자기 방해요인으로부터 최대한 가까이에서 실험 * 장비의 표시값이 예상 농도값과 비교	전자기 방해요인으로 결과값이 10%를 초과해서는 안 됨
낙하 및 진동	ANSI/ISA.(2010)* 표준에 따라 실험	패스 테스트
장거리 측정	측정 선의 유무에 따른 측정 결과값의 차이 실험	결과값의 차이가 10% 이내여야 함
검출기 수명	얼마나 오랫동안 검출기의 수명이 지속되는지 확인	제조사의 자료와 비교
step change response and recovery	ANSI/ISA.(2010)*에 따른 시험방법	패스 테스트
전원 공급	ANSI/ISA.(2010)*에 따른 시험방법	패스 테스트
지속 안정성	예상농도에 대한 장비의 반응에 대한 편이가 있느냐를 결정	장시간 동안의 측정된 반복된 값
측정기기 불확도	불확도 제공	불확도 제공
품질보증 요구사항	ISO 17025.(2005) 표준에 따름	-
신뢰성	장비값과 표준화된 농도값을 비교 * 시간에 따른 그래프(일간, 그룹간 및 그룹내의 변이)	변이 요소 예측
현장 평가	독립된 방법으로 현장 평가 연구를 통한 장비의 값 비교	편이와 정밀도를 결정함

* ANSI/ISA-92.00.01-2010: Performance Requirements for Toxic Gas Detectors

(6) 평가 및 문서 보고서

마지막 단계로 직독식장비를 평가하고 관련 내용을 보고서 형태로 문서화한다. 가능하다면, 지속적으로 관련 실험을 수행하는 것이 좋고, 보고서의 내용을 명확하고 간결하게 기술하고 각각의 평가단계에서 직독식장비의 성능을 제시해야 하고, 반드시 보고서에는 아래의 내용을 포함시켜야 한다.

- 서론: 평가한 측정기기의 설명
- 실험: 실험 절차 및 수행절차 설명
- 결과: 실험적 결과를 설명
- 논의 및 결론: 실험결과를 논의하고, 그 결과를 바탕으로 결론을 도출

2) PID 직독식장비 조사

PID 직독식장비 제조사 7개소를 조사하여 국·내외에서 현재 유통되고 있는 해당 장비를 제조사별로 정리하였다. 본 연구에서 조사한 장비 이외에도 시중에 유통되고 있는 PID 장비가 더 있다.

(1) PID 직독식장비의 크기·무게 비교

시중에 판매되고 있는 PID 직독식장비의 크기·무게는 대부분 휴대용이며, 일부 개인 시료채취를 목적으로 판매되는 제품도 있었다<표 III-4>. NIOSH 2012년 보고서의 직독식장비의 휴대성 기준을 적용한 결과, 500 g 보다 가벼운 장비는 2종, 나머지는 모두 휴대용(12 kg 이하)로 조사되었다. 조사한 장비 중에서 가장 무거운 장비는 5.8 kg인 F/B 장비로 조사되었다.

〈표 III-4〉 PID 직독식장비의 크기·무게 비교

제조사/모델	크기(mm)	무게(g)	사용목적
A/A	118x60x30	235	개인용*
A/B	193x96.5x66	880	휴대용
A/C	255x76x64	738	휴대용
A/D	255x76x64	738	휴대용
B/A	179x77x42	550	휴대용
B/B	132x281x56	880	휴대용
C/A	50(직경) x 300	700	휴대용
C/B	83x295x55: 프로브 93x80x93: 본체	460: 프로브 180: 본체	휴대용
D/A	200x68x52	400	개인용*
D/B	240 x 130 x 150	1,700	휴대용
E/A	169.9 x 89.7 x 51.4	450	휴대용
F/A	292 x 229 x 102	4,173	휴대용
F/B	343 x 262 x 81	5,800	휴대용
G/A	228.6 x 76.2 x 107.9	860	휴대용
G/B	254 x 76 x 50	800	휴대용

* 개인용: NIOSH(2012)에서 제안하는 무게 기준 500 g 이하

(2) PID 직독식장비의 운영 특성 비교

대부분의 장비의 온도 하한 조건은 -10 또는 -20 ℃로 설정하고 있으나, 0 ℃ 설정하고 있는 2종의 장비가 있었으며, 온도 상한 조건은 대부분 50 ℃로 조사되었다. 시중에 판매되고 있는 PID 직독식장비의 크기·무게는 대부분 휴대용이며, 습도 조건은 대부분 하한 조건은 0%, 상한 조건은 95% 또는 100%로 제시하고 있었다. 측정방식은 대부분 펌프식이었으며, PID 센서와 다른 방식의 센서를 함께 사용할 수 있는 직독식장비도 6종으로 조사되었다(표 III-5).

(3) 그 밖의 PID 직독식장비의 특성

PID 직독식장비는 개인용 또는 휴대용으로 사용하고 있기 때문에 모든 장비가 배터리 충전 방식으로 택하고 있었다. 그리고 대부분의 장비에서 알람모드를 제공하고 있었으며, 실시간 표시값으로 TWA, STEL 등을 설정할 수 있

기 때문에 작업 공정에서 발생하는 이상 현상에 대해서도 작업자가 인지할 수 있는 시스템을 갖추고 있었다. 또한 일부 장비는 위험성 물질을 취급하는 사업장에서 사용할 수 있도록 방폭 인증을 받고 있었다. 세부 내용은 부록에서 정리하였다.

〈표 III-5〉 PID 직독식장비의 특성 비교

제조사/모델	온도조건(℃)	습도조건(%)	측정방식	센서
A/A	-20~55	0~95	펌프식	9.8, 10.6 eV
A/B	-20~55	0~95	펌프식	PID+기타 [*]
A/C	-20~50	0~95	펌프식	9.8, 10.6 eV
A/D	-20~50	0~95	펌프식	10.6 eV
B/A	-20~50	10~90	확산식	PID+기타 ^{**}
B/B	-10~35	10~95	펌프식	PID+GC
C/A	-10~70	0~100	-	10.6 eV
C/B	-10~50	0~100	-	PID+기타 ^{***}
D/A	-20~50	0~95	펌프식	10.6, 11.7 eV
D/B	-20~50	0~95	펌프식	PID 센서
E/A	-20~50	15~90	펌프식	PID 센서
F/A	-10~45	15~95	-	FID, PID
F/B	-	-	-	FID, PID
G/A	0~50	0~95	펌프식	10.6, 11.7 eV
G/B	0~40	0~100	펌프식	10.6 eV

* EC, LEL, NDIR, CO2 센서 가능 , ** IR, EC 센서 가능, *** 최대 8개 센서 동시 탑재 가능

3) PID 직독식장비 관련 국내·외 연구문헌 검토

(1) 국내문헌 고찰 결과

국내문헌을 조사하기 위해서 학술연구정보서비스(riss.kr) 사이트에서 직독식으로 검색한 결과 82건의 국내문헌이 검색되었고, 이 중 PID 직독식장비에 관한 문헌은 3건이었으며, 사물인터넷 기술을 활용한 스마트센서 개발 연구에 관련 된 문헌이 1건으로 총 4건으로 조사되었습니다.

산업안전보건연구원, 미래전문기술원에서 직독식장비에 관한 연구 보고서는 3건으로 조사되었다<표 III-6>.

〈표 III-6〉 연도별 직독식장비 관련 국내문헌 목록

연번	제목	저자	년도
1	가스와 증기의 측정을 위한 직독식 장비	이광묵	1992
2	직독식 측정기 PID와 능동식 시료채취기에 의한 GC-FID 정량분석법의 VOCs 농도 비교 연구	여진희, 최광민	2016
3	전자산업 화학물질감지 스마트 센서세트 개발·적용	함승헌 등	2020
4	작업장 화학물질 감지를 위한 모듈형 스마트 센서세트 개발 연구	한문일 등	2021
5	직독식장치와 센서 기술을 이용한 작업환경 모니터링 현황과 전망	하현철 등	2021
6	사물인터넷 기술을 이용한 가스상 물질 측정용 스마트센서 개발과 향후과제	김욱 등	2022
7	직독식 측정기를 활용한 네일 관리 시 방출되는 휘발성 유기화합물 (VOCs)분석*	정송이, 김정원	2022

가) 이광목, 1992

해당 연구도 가스 검지관에 관한 문헌으로 작업장에서 발생하는 물질의 발생원을 찾거나, 새는 곳을 확인하거나, 대략적인 농도를 확인할 수 있는 장비로 전문적인 지식 없이도 사용할 수 있음을 언급하고 있다. 검지관의 경우, 온도, 기압 및 습도의 영향이 많고, 낮은 농도에서 오차가 많이 발생하고, 재현성의 문제도 있으므로 정확한 결과값을 얻을 수 없으며, 일부 물질간의 상호 영향(cross-sensitivity)도 있다고 언급하고 있다.

나) 여진희 & 최광민, 2016

직독식장비(PID 센서)와 활성탄관을 측정매체로 채취한 휘발성유기화합물(TVOC)에 대하여 농도를 비교한 연구이다. 최근 반도체 공장 등 화학물질을 많이 취급하는 사업장에서 직독식장비를 활용한 작업환경관리 방안을 국내에서 모색하고 있다. 화학물질의 사용이 다양하기 때문에 개별물질을 펌프를 활용하여 작업환경을 측정하여 관리하기에는 경제적인 부분뿐만 아니라 시간과 노력이 많이 필요하다. 하지만 직독식장비(PID 센서)를 활용하면 다양한 화학물질을 한 번에 측정할 수 있는 장점과 결과값을 실시간으로 확인할 수 있는 큰 장점을 가지고 있기 때문에 이에 대한 연구가 국내·외적으로 활발하게 이루어지고 있다.

여진희 & 최광민.(2016)의 챔버 연구에서 사용한 PID 직독식장비는 RAE3000(RAE System, USA)을 사용하였으며, 비교하기 위해서 활성탄관으로 화학물질을 채취하였다. 실험 대상 화학물질은 아세톤과 에탄올이며, 자석교반기를 사용하여 노출기준의 0.2배, 0.1배, 0.02배, 0.01배 수준의 농도수준으로 발생시켰으며, 챔버 내의 평균 온도는 24~26 ℃, 습도는 40~46%였고, 측정시간은 15분, 60분, 360분으로 하였다.

단일 물질(아세톤, 에탄올)에 대한 직독식장비와 기존 방식과의 농도는 양의 상관관계를 보였다(아세톤: $r=0.984$, 에탄올: $r=0.919$). 측정시간(15분)에 따른 두 방식과의 농도 변화 차이는 유사한 결과를 나타내고 있다.

해당 연구를 종합해 보면, 단일 물질(아세톤, 에탄올)에 대해서 두 측정방식

의 결과 농도의 변화가 유사하여, 직독식장비의 활용에 큰 문제가 없어 보였다. 직독식장비의 경우에는 해당 유해물질의 노출경향 파악, 화학물질 누출 사고 등 즉각적인 대응 목적으로 사용하기에 적합하다. 그리고 저자는 작업환경측정 보다는 화학물질 실시간 감시 체계에 PID 센서를 도구로 활용할 것을 말하고 있다.

다) 함승헌 등, 2020

전자산업에서 사용되는 4종의 물질인 TVOC, 염산, 시안화수소, 불화수소를 선정하였고, 알람기준을 선정하여 지역 및 개인 시료 채취하는 사업장에 센서 세트를 설치하여 모니터링 할 수 있도록 하는 연구였다.

라) 한문일 등, 2020

PID 센서가 부착된 모듈형 스마트 센서 세트를 개발하여 모듈형 센서 세트의 플랫폼을 연동시켜 사업장의 농도를 실시간으로 모니터링 하도록 구현하는 연구였다.

마) 하현철 등, 2021

노출기준이 설정되어 있는 물질 중에서 직독식 센서로 측정할 수 있는 물질은 114종이었으며, 검지관은 127종이었다. 직독식장비의 장점인 피크노출을 활용할 방안을 검토하는 등 측정방법에 대한 다양한 알고리즘을 연구할 필요가 있었다. 직독식장비의 신뢰도를 확보하기 위해서 센서성능평가센터를 건립할 것을 제안하였다.

바) 김욱 등, 2022

우리나라 사업장의 직업병이 발생함에 따라 산업안전보건법이 제정되고 1983년에 작업환경측정이 시행된 이후로 관련 제도의 문제점이 최근 대두되고 있다. 이와 동시에 2022년도에 중대재해처벌법이 제정되어 급성중독 물질의 관리도 중요해지고 있다. 이에 따라 화학물질 상시 모니터링 시스템 적용이 중요해 지는 시점에서 본 연구는 중요하다. 본 연구에서는 사물인터넷의 통신방법(블루투스, LTE, Wi-Fi 등)을 활용하여 장거리에서 근로자의 노출

데이터를 전송 받아서 관리 받을 수 있다. 본 연구의 가스상 물질은 총휘발성 유기화합물, 염소, 불화수소, 시안화수소를 대상으로 연구를 진행하였고, 휘발성유기화합물을 측정할 수 있는 PID 직독식장비를 개발하여 사물인터넷 기술과 접목하여 중소규모 사업장의 스마트센서를 활용한 관리 시스템 체계가 마련될 것으로 전망하였다.

사) 정송이 & 김정원, 2022

연구에 사용한 검지관은 가스텍(GASTEC GV-100)이며, 측정한 물질은 포름알데하이드, 톨루엔, 아세톤 3종으로 챔버 실험을 하였다. 검지관도 직독식 장비 중 하나로 비색법의 방식으로 변색층에 따라 그 농도를 예측하는 방법으로 주로 예비조사의 목적으로 사용된다. 해당 연구를 이러한 직독식장비를 활용하여 네일 작업장에서 방출될 수 있는 화학물질을 예측하였고, 이에 따른 작업장 관리가 필요함을 강조하고 있었다.

(2) 국외문헌 고찰 결과

국외문헌은 PubMed 사이트와 Google 학술 검색 사이트에서 검색하였으며, PubMed 사이트 중심으로 direct, reading, monitor 이 세 단어를 선택적으로 조합한 결과 951건의 국외문헌이 검색되었고, 이 중 직독식장비가 포함된 문헌 중 PID 직독식장비에 관한 19건의 문헌을 검토하였으며, 해당 연구의 내용을 아래와 같이 정리하였다<표 III-7>.

〈표 III-7〉 연도별 직독식장비 관련 국외문헌 목차(계속)

연번	국외문헌 제목	저자	년도
1	Response of Portable VOC Analyzers to Chemical Mixtures	D.A. · DuBose et al	1981
2	An evaluation of some portable, direct-reading 10.2 eV and 11.8 eV photoionization detectors, and a flame ionization gas chromatograph for organic vapors in high humidity atmospheres	Barsly et al	1985
3	Simultaneous multi-instrumental monitoring of vapors in sewer headspaces by several direct-reading instruments	Barsky et al	1986
4	Testing of Commercially Available Detectors Against Chemical Warfare Agents Summary Report	Longworth, T.L et al	1999
5	Field evaluation of a portable photoionization detector for assessing exposure to solvent mixtures	Coy JD et al	2000
6	Determination of short-term exposure with a direct-reading photoionization detector	Precédés et al	2004
7	Technical Note TN-106	RAE	2005
8	Measurement Capability of Field Portable Organic Vapor Monitoring Instruments Under Different Experimental Conditions	Coffey et al	2009

〈표 III-7〉 연도별 직독식장비 관련 국외문헌 목차

연번	국외문헌 제목	저자	년도
9	On-the-fly calibration of direct reading photoionization detectors	Drummond I	2010
10	Direct-reading methods for workplace air monitoring	Christopher C. Coffey, Terri A	2010
11	Effect of calibration and environment condition on the performance of direct-reading organic vapor monitors	Coffey et al	2012
12	Evaluation of photoionization detector performance in photocatalytic stuies for removing volatile orgainc compounds	Rismanchian M et al	2012
13	Effect of calibration environment on the performance of direct-reading organic vapor monitors	LeBouf et al	2013
14	The PID handbook	RAE	2013
15	Effect of Interferents on the performance of direct-reading organic vapor monitors	Ryan F. LeBouf, Christopher C. Coffey	2015
16	Evaluation of a portable gas chromatograph with photoionization detector under variations of VOC concentration, temperature, and relative humidity	Soo JC et al	2018
17	A practical guide for use of real time detection systems for worker protection and compliance with occupational exposure limits	Dina Siegel et al	2019
18	Evaluation of direct reading photoionization detector performance under various operational parameters	Amir HK et al	2021
19	Technical Note TN-114(Sensor specifications and cross-sensitivities)	RAE	2022

가) D.A. · DuBose et al, 1981

1980년대부터 직독식장비에 대한 혼합물질에 대한 평가가 있었다. 단일물질에 대한 평가는 가능하나, 혼합물질에 대한 평가는 기기별 기기반응값의 차이를 보였다.

2종류의 직독식장비(Century Systems OVA-108, Bacharach TLV Sniffer)를 사용하여 다양한 혼합물*을 평가하여 개별 보정계수를 구하고자 하였다.

* 실험 혼합물 집단(10종): 아세트산+클로로포름, 아세트산+시클로헥산, 아세트산+아세톤, 아세톤+클로로포름, 아세톤+메틸에틸케톤, 벤젠+메틸에틸케톤, 벤젠+메탄올, 클로로포름+시클로헥산, 메탄올+메틸에틸케톤, 벤젠+메탄올+메틸에틸케톤

결과로는 직독식장비 마다, 혼합물 집단에 따라 기기반응값의 차이가 있었기 때문에 적용해야 하는 보정계수가 달랐고, 측정값은 예상 농도의 30% 이내 수준이었다고 보고하고 있었다. 1980년대 직독식장비는 박스형으로 지금의 휴대용 직독식장비 보다 무거운 경향을 보였다<표 III-8>.

〈표 III-8〉 2종의 직독식장비에 대한 보정계수 비교

물질	보정계수		물질	보정계수	
	OVA	TLV		OVA	TLV
아세트산	1.64	15.60	시클로헥산	0.47	0.70
아세톤	0.80	1.22	메탄올	4.39	2.01
벤젠	0.29	1.07	메틸에틸케톤	0.64	1.12
클로로포름	9.28	-			

나) Barsky, J.B et al, 1985

PID 직독식장비의 센서는 램프의 에너지량에 따라 반응값이 달라지는데, 해당 연구는 높은 습도조건에서 PID 센서 2종(10.2 eV, 11.8 eV)과 FID 장비의 반응값을 비교하고자 하였다. 실험 물질은 단일 물질 8종(헥산, 1,1-디클로로에탄, 클로로포름, 트리클로로에틸렌, 퍼클로로에틸렌, 벤젠, 톨루엔 및 클로로벤젠)이며, 직독식장비는 3종으로 OVA(모델: 128, FID), H-Nu(모델: PI-101, 10.2 eV 램프 PID), AID(모델: 580, 11.8 eV 램프 PID)으로 평가하였다. AID 장비의 11.8 eV 램프는 습도에 민감하였기 때문에 대부분의 실

험에서 제외하였고, 2종의 직독식장비를 비교하였다.

FID 장비는 습도가 높은 환경에서 100 ppm까지는 직선성을 보였으나, PID 장비는 높은 습도조건에서 농도가 높아질수록 농도값 대비 반응값이 줄어드는 경향을 보였다. H-Nu 장비도 습도에 영향을 많이 받는 것으로 조사되었고, 특히, 측정 후 램프에 검댕, 끈적이는 잔여물이 쌓여 있었기 때문에 반응값이 고농도에서 떨어졌을 것으로 보고 있었다. 따라서 직독식장비의 램프 관리는 중요한 부분이라고 설명하였으며, PID 센서는 높은 습도 환경, 고농도 평가 시 정량적인 평가가 어렵기 때문에 밀폐공간의 작업환경을 측정하는 것은 부적합하다고 판단하였다. 8종의 단일 물질의 보정계수를 구하여 제조사에서 제시하는 보정계수와 비교한 결과, 대부분 차이를 보였고, 벤젠의 경우에만 제조사 보정계수와 동일한 결과를 보였다.

다) Barsky et al, 1986

하수 맨홀에서 발생하는 다양한 증기상의 화학물질을 직독식장비를 활용하여 평가한 연구인데, 사용한 직독식장비로는 OVA(FID), H-Nu(PID), Hydrogen Sulfide Ecolyzer 3종이었다. 활성탄, Tenax 튜브로 직독식장비와 함께 농도를 평가하였으나, 보고서에서는 관련 내용을 제시하진 않았다. 작업장의 상황을 자세히 기술하였는데, 측정 당시의 환경조건(온도, 습도), 측정 시간, 하수 유량, 날씨 등을 기록하였다. 방향족(aromatics)을 제외한 화학물질 종류(할로젠화 지방족, 지방족/알켄, 지방족, 알켄/방향족)에서 FID 장비가 PID 장비보다 높은 측정값을 보였으며, 두 장비의 시간가중 비율(PID/FID)은 0.1~0.2로 나타났다. 그리고 모든 화학물질류는 90% 습도 환경에서 반응값의 감소하는 경향을 보였다.

라) Longworth, T.L et al, 1999

미국에서 1996년도에 테러와 관련 된 법(Law 104-201)이 개정되면서 직독식장비를 활용하여 화학전(chemical warfare, CW)에 대한 위기대응 시 활용할 수 있는 방안을 찾고자 연구를 수행하였다. 연구에 사용된 장비목록은 <표 III-9>와 같았다.

〈표 III-9〉 제조사별 직독식장비의 종류 및 센서 유형

장비명	제조사	센서 유형
MiniRAE Plus	RAE Systems, Inc	PID (10.6 eV)
Passport II OVM	Mine Safety Appliance Co.	PID (11.7 eV)
TVA 1000B TVA	HNU Systems, Inc	PID (11.7 eV)
TVA 1000B TVA	Foxboro Company	PID (10.6 eV)
TVA 1000B TVA	Foxboro Company	FID
Phosphoric Acid Ester Tubes	Drager Corp.	Colorimetric tubes
Thioether Tubes	Drager Corp.	Colorimetric tubes

실험에 사용된 물질은 3종으로 화학전에 사용되는 물질인 타분(G계열 신경작용제의 일종), 사린(유기인화합물로 신경가스의 일종), 마스터드(H계열의 수포작용제로 피부 접촉시 화상)에 대하여 평가를 진행하였다.

PID 장비는 화학전 3종 물질에 대해서 신뢰할 만한 수준의 결과값을 도출하지 못하였고, PID 램프에 화학물질의 먼지, 티끌, 습기 및 잔류물 으로 오염될 수 있기 때문에 주기적인 세척이 필요해 보였다.

PID와 FID 직독식장비는 화학작용제의 검출 및 경고에 대해서 신뢰할 수 없었다. 화학작용제의 증기와 그 밖에 부산물에 대하여 전반적으로 검출 능력이 저하되었다. G계열 0.1 mg/m^3 , H계열 2 mg/m^3 낮은 농도수준에 대해서 PID 직독식장비로 측정이 불가능했다. 따라서 군사적 목적으로 PID 직독식장비의 활용은 어려울 것으로 보았다.

마) Coy JD et al, 2010

PID 직독식장비를 활용한 혼합유기용제(solvent mixtures) 평가를 실제 건설업의 페이팅 작업 26개소에 대한 개인노출평가 연구이며, 호흡영역 반경 30 cm에서 개인 노출평가를 한 연구였다. 연구에 활용된 직독식장비는 RAE사의 장비로 10.6 eV 센서를 부착하였다. 평가한 혼합유기용제의 종류는 탄화수소계 화합물로 아세톤, 에탄올, 메탄올, 톨루엔, 자일렌 등 19종을 대상

으로 평가하였다.

해당 연구를 ACGIH에서 제안하는 혼합물질에 대한 노출평가 지표를 사용하여 평가에 사용하였다. 그리고 PID 직독식장비의 농도값과 활성탄 매체의 농도값을 비교하여 상관관계를 분석하였고, 혼합유기용제에 대한 PID 직독식장비의 활용의 유무를 평가하였다.

$$\text{혼합물의 노출기준 (TLV)} = \frac{1}{\frac{f_a}{TLV_a} + \frac{f_b}{TLV_b} + \frac{f_c}{TLV_c} + \dots + \frac{f_n}{TLV_n}}$$

여기서, f는 각 물질의 구성비율, TLV는 각 물질의 노출기준을 말한다.

혼합유기용제 평가를 목적으로 PID 직독식장비는 좋은 측정도구이며, PID 장비의 농도값이 다소 과소평가되는 경향은 있으나 활성탄 매체의 농도값과의 통계적으로 유의한 상관관계를 보이고 있었다. Diaz et al, 1994년 연구에 따르면, 탄화수소계열 물질을 PID 직독식장비로 측정하여 보정계수를 적용한 후 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다고 보고하였다. 따라서 저자는 증기상용제류(solvent vapors)를 사용하는 근로자에 대한 노출평가를 실시할 경우에는 비교적 저렴한 PID 직독식장비를 활용할 수 있을 것으로 보았다.

바) Procédés et al, 2010

PID 직독식장비를 활용하여 단시간 노출평가를 실시하는 방안에 대한 연구였다. 사용된 직독식장비는 Photovac사의 2020 PE Photovac이며, PID 센서는 10.6 eV 램프가 장착하여 평가에 사용하였다. 직독식장비의 장점은 실시간으로 농도 수준을 확인할 수 있기 때문에 전통적인 방법에서 제한점이 있는 단시간 노출평가를 적용할 수 있다. 단시간 노출기준으로 STEL, C값이 있지만, 모든 화학물질이 두 노출기준 지표를 가지고 있지 않기 때문에 저자는 단시간 노출평가 지표를 노출상한치(Excursion Limit, EL) 개념을 처음으로 적용하여 평가하였다. 실험 화학물질 그룹은 5종으로 석유 스피릿(petroleum spirit), 톨루엔, 메틸에틸케톤, 에틸벤젠, 톨루엔:메틸에틸케톤:에틸벤젠(1:1:1)이었다.

$$\frac{C_1}{3T_1} + \frac{C_2}{3T_2} + \dots + \frac{C_n}{3T_n}$$

여기서, C는 각 물질의 측정값, 3T는 각 물질의 노출기준의 3배를 말한다.

연구 결과 모든 실험군에서 PID직독식장비 측정값이 활성탄 매체 농도값과 통계적으로 유의한 상관관계를 보였으며, 특히 혼합물 실험군에서는 상관계수(r^2)가 1로 매우 정확한 농도값을 보였다. 단일 물질 3종의 경우에는 제조사 보정계수값으로 보정한 후 비교하였는데, 모두 상관계수(r^2)가 0.99로 나타났다.

단시간 노출평가 방안으로 ACGIH 노출상한치(EL) 값을 제1하였고, 노출기준의 3배 수준 또는 경우에 따라 노출기준의 1.5배 수준을 설정하여 단시간 노출평가 할 것을 제안하고 있었다.

사) Coffey et al, 2009

제조사가 다른 직독식장비를 다양한 실험조건에서 실험하였으며, 실험에 사용된 물질은 2가지 농도수준(5, 100 ppm)의 헥산으로 하였다. 관련된 직독식장비 및 실험조건은 <표 III-10>를 참조하였다.

<표 III-10> 직독식장비 종류 및 실험조건

직독식장비의 종류	센서 종류	개수	실험조건
ppbRAE	PID	4	· 온도: 4, 21, 38℃ · 상대습도: 30, 60, 90% · 물질: 헥산 · 농도: 5, 100 ppm
IAQRAE	PID	4	
MultiRAE	PID	4	
TVA	PID	2	
	FID	2	
SapphiRe	IR	2	

제조사별 동일한 직독식장비 사이의 농도값의 편차를 연구한 결과, ppbRAE 직독식장비(PID)가 가장 우수하였으며, 개별 장비로는 SapphiRe

직독식장비(IR)의 성능이 좋았다. 연구 결과 직독식장비는 온도, 습도 및 농도 수준에 따라 영향을 받으며, ppbRAE 장비는 21℃가 가장 적합 온도 범위였으며, 높은 농도(100 ppm) 보다는 낮은 농도(5 ppm)에서 농도값의 정확도가 좋았다. 모든 PID 직독식장비 중 정확도 기준인 25% 이내인 장비는 42% 밖에 없었다. 따라서 환경적인 요인에 영향을 많이 받기 때문에 법 준수 의무를 판단하기 위한 장비로 활용되기에는 한계가 있는 것으로 판단하였다.

아) Drummond, I, 2010

PID 직독식장비는 가스 및 증기상 유기용제를 측정할 수 있는 장점이 있지만, 검출기에 따라 개별 물질에 따른 기기 반응 값의 차이가 크고, 습도가 높은 환경은 그렇지 않은 환경에 비해 UV 램프의 반응 수준이 떨어진다고 보고하고 있었다. 그렇기 때문에 PID 직독식장비로 측정한 값에 대한 신뢰도가 낮았고, PID 직독식장비는 측정 전에 검교정을 하도록 제조사에서 권장하고 있었다. 사실 검교정용 가스는 건조한 상태이기 때문에 작업장의 환경하고는 차이가 있어서 이 또한 결과의 정확도를 저하시키는 요인으로 판단하였다.

따라서 본 연구는 이러한 검교정의 문제를 해소하기 위해서 해결책을 제안하고 있는데, 그 방법은 실제 작업장에서 검교정을 실시하고, 활성탄 시료의 결과값으로 보정하는 방법을 제시하고 있었다.

$$RF = \frac{\text{활성탄 시료 TWA}}{\text{직독식장비 TWA}}$$

여기서 RF는 반응계수(response factor, RF)이며, RF 값을 계산한 후, PID 직독식장비의 농도값에 RF 값으로 보정하였다.

본 연구는 현장연구로 트럭에서 가솔린을 내리는 작업 시 PID 직독식장비인 MiniRAE(10.6 eV 램프)를 활용하여 작업환경을 평가하였는데, 활성탄 매체의 평균 벤젠의 농도는 6.0 ppm, PID 직독식장비의 평균 벤젠의 농도는

30 ppm으로 PID 장비의 농도값이 활성탄 매체의 농도값보다 높게 나타났다(RF: 0.2). 따라서 동일한 작업 조건에서 반응계수값을 PID 직독식장비의 농도값에 적용하여 평가할 것을 제시하였다.

자) Christopher C. Coffey, Terri A, 2010

직독식장비는 작업장 노출평가를 할 수 있는 도구이며, 증기 및 가스상 에어로졸을 측정할 수 있다. 해당 자료를 통해서 장비 선택시 고려해야 하는 요인과 최근 개발된 직독식장비를 소개하고 있었다. 가스와 증기류를 측정하는 방식으로 비색법 등 다양한 방식이 있으며, 이온화 방식에는 3가지가 있는데 불꽃 이온화 방식(FID), 광이온화 방식(PID), 전기포획 방식(ECD)로 구분하고 있었다.

이 중 PID 방식은 다양한 UV 램프를 통해서 선택적인 측정이 가능하다고 소개하고 있었다. PID 직독식장비로 분석할 수 있는 화합물은 방향족 탄화수소, 유기황, 또는 헤테로 원자를 함유한 화합물이었다. 왜냐하면, 이러한 물질은 UV 램프에 도달할 때 이온화 전위를 갖고 있기 때문에 PID로 측정이 가능하다. PID 장비는 연속적인 농도값을 제공할 수 있으며, 사용과 검교정이 간단하고, 반응속도가 빨라서 민감도가 좋은 장비이지만, 높은 에너지 램프를 사용할 때는 수분과 산소의 잠재되어 있는 방해 작용이 존재할 수 있기 때문에 사용 시에는 이 부분에 대한 고려가 필요하기 때문에 몇 가지 해결해야 하는 과제가 있었다.

- 직독식장비를 활용하여 8시간 노출기준을 적용하기 위한 측정을 할 수 있는지?
- 단시간 농도의 결과를 얻을 수 있기 때문에 더 많은 단위작업장을 짧은 간격으로 모니터링 할 수 있는지?
- 직독식장비의 많은 데이터 자료를 어떻게 설명할 것인지?
- 측정값의 정확도를 높이기 위해서 본 측정 전에 현장 보정(field calibration) 반드시 해야 하는가?

그럼에도 불구하고 직독식장비는 가스 및 증기류를 측정 전략을 개발한다

면 좋은 도구가 될 수 있다.

차) Coffey et al, 2012

해당 연구는 챔버연구이며, 단일물질인 시클로헥사논에 대해서 다양한 환경에서 직독식장비 각 3종의 농도값을 비교하였다. 직독식장비의 종류로는 3종의 SAP, 3종의 TVA(FID, PID 방식)이었으며, 활성탄 매체의 농도값과 비교하였으며, 실험조건은 4가지의 농도수준, 3가지의 온도조건, 4가지의 습도 조건에서 실험하였다.

연구 결과는 직독식장비인 SAP ($r^2 = 0.97$) 및 TVA (FID방식) ($r^2 = 0.92$)의 결과값이 활성탄 매체 결과값과 높은 상관관계를 보였으며, TVA (PID방식) ($r^2 = 0.94$)의 결과값은 90% 습도 조건만 제외하고는 높은 상관관계를 보였다. 해당 연구 역시 PID 직독식장비의 한계점을 높은 습도 조건으로 보고 있으며, 이러한 환경에서 PID 직독식장비 사용 시 주의할 것을 언급하였다.

카) Rismanchian M et al, 2012

PID 직독식장비를 평가하기 위해서 단일 물질인 자일렌 3종의 혼합물의 4가지 농도수준을 평가하였으며, 환경 요인으로 습도를 3가지(0%, 20%, 80%) 범위로 조절하면서 환경 요인에 따른 PID 농도값의 변화를 확인하였다.

연구 결과 습도 변화에 대한 기준값(활성탄 농도)과 좋은 상관관계로 나타났다. 자일렌 물질에 대한 PID 농도값은 기준값 보다 낮은 경향을 보이고 있었다. 제조사에서 제시한 자일렌의 보정계수는 0.39~0.44로 나타났지만, 해당 연구에서는 1.21~1.42로 계산되었다. 그렇기 때문에 PID 측정의 경우 보정계수를 적용할 것을 권고하고 있었다.

타) LeBouf et al, 2013

LeBouf et al.(2013) 연구에 따르면, 연구에서 사용한 직독식장비의 종류는 SAP (IR 방식), TVA (FID, PID 방식)이며, 시클로헥산의 농도범위는 30, 150, 300, 475 ppm였다. 챔버의 크기는 22 m³이며, 환경조건은 같은 조건 실험(파트 1) 2분류(5℃, 30%와 38℃, 90%)와 다른 조건실험(파트2)로 나뉘

서 시험하여 직독식장비의 농도값과 비교하기 위해서 2개의 활성탄 매체로 해당 물질을 채취한 농도값을 사용하였다.

직독식장비는 높은 온도와 습도의 환경에서 농도값과의 차이를 보였다. 그럼에도 불구하고, 5℃, 30% 환경과 극한환경(38℃)에서는 각각 PID 직독식장비가 가장 선호도가 높았고, 38℃, 90% 환경에서는 PID 직독식장비가 두 번째로 선호도가 높았고, 극한환경(5℃)에서도 PID 직독식장비가 두 번째로 높았다. 그리고 장비 검교정 시에 측정할 단위 작업장의 장소의 환경을 고려해야 한다.

파) LeBouf & Coffey, 2015

직독식장비의 장점으로 소개하는 부분은 측정과 결과에 대한 보고의 시간이 단축되는 점, 측정 농도에 대한 빠른 대응이 가능한 점, 실시간 농도값 및 최고값 표시, 작업의 형태를 개선하기 위한 근로자의 실시간 노출정보 제공, 작업환경관리 및 필요한 호흡보호구 선택에 대한 조언이 가능하게 된다. 직독식장비로 다양한 화학물질에 대한 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면, 습도가 높은 환경(극한환경)에서는 측정값의 오차가 발생할 수 있고, PID 센서의 경우에 쉽게 오염될 수 있다는 단점도 있다.

LeBouf & Coffey.(2015) 연구에 평가된 직독식장비는 MIRAN SapphIRe Portable Toxic Vapor Analyzers (SAP) (IR 센서) (series 205B, model 100), Century Portable Toxic Vapor Analyzers (PID 센서와 FID 방식) (TVA, model TVA-1000B)이었다. 그리고 챔버의 부피는 22 m³이며, 극한 환경(온도: 21℃, 상대습도: 90%) 조건에서 직독식장비 간의 비교하였으며, 활성탄관으로 채취한 농도값과 비교하였다. 화학물질은 시클로헥산(cyclohexane)과 간섭이 있을 수 있는 증기류(헥산, 메틸에틸케톤, 트리클로로에틸렌 및 톨루엔)이었다. 연구 결과 농도 수준과 PID 직독식장비의 결과 값에는 높은 상관 관계(직선성)를 보였다.

높은 상대습도 환경(극한환경)에서는 PID 센서 직독식장비는 신뢰성이 낮다고 보고하고 있다. SAP 직독식장비의 경우에는 시클로헥산을 흡수하는 파

장에서 외부 간섭에 의한 영향이 있었고, 그렇기 때문에 관련 전문 지식이 있는 사용자에 의해서 사용할 것을 권장하고 있다. 그리고 탄화수소계의 화학물질을 측정할 경우에는 FID 방식의 직독식장비가 가장 신뢰성이 높았다.

하) Soo JC et al, 2019

직독식장비는 PID 직독식장비와 GC(gas chromatograph)가 결합된 GC-PID 직독식장비이며, 챔버(Nor-Lake Enviroliner; Nor-Lake Scientific, Hudson, WI) 실험에 평가된 화학물질은 7종(아세톤, 에틸벤젠, 메틸이소부틸케톤, 톨루엔, m, p, o-자일렌)이며, 4종의 농도수준, 3종의 온도조건(25, 30, 35℃), 3종의 습도조건(25, 50, 75%)에서 실험하였다.

가) Amir Hossein Khoshakhlagh et al, 2021

PID 직독식장비의 장점은 측정과 동시에 결과값을 확인할 수 있어서 빠른 대응이 가능하고, 작업 중 농도의 변화를 기록할 수 있지만, 수분과 온도에 영향을 많이 받는다는 단점이 있었다. 그렇지만 PID 직독식장비의 측정값과 실제값에는 상당한 연관성을 보이고 있었다. 연구에 사용했던 장비는 MultiRAE Lite(모델명: PGM-6208, RAE Systems, USA)이며, 10.6 eV 램프를 장착하였다. 톨루엔 4가지 농도수준(20, 100, 200, 400 ppm)으로 3종의 온도조건(21, 30, 40℃), 3종의 습도조건(30, 50, 80%)를 평가하였다. 본 연구는 챔버 연구로 혼합 챔버의 유량은 600 mL/min이었고, 활성탄 매체를 사용하여 100 mL/min의 유량으로 30분간 채취하여 그 농도값을 비교하였다. 아래 표의 결과를 보면, PID 직독식장비의 결과값이 활성탄 매체의 값보다 대체적으로 높은 경향을 보이고 있으나 높은 직선성을 보이고 있었다($r^2=0.93$). 그리고 온도가 증가할수록 80% 상대습도에서 PID 결과값의 재현성이 낮아지는 경향을 보였다.

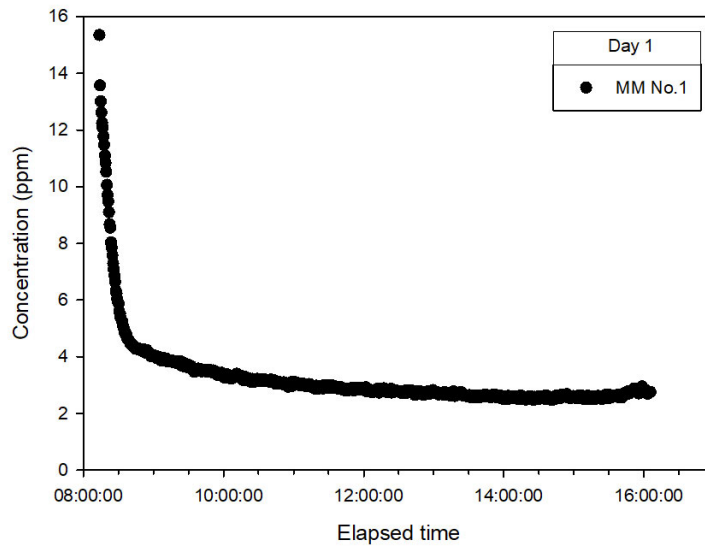
〈표 III-11〉 PID 직독식장비의 농도와 활성탄 농도 비교

측정방법	평균 ± 표준편차			
	20 ppm	100 ppm	200 ppm	400 ppm
활성탄 매체	21.5 ± 1.6	93.6 ± 6.3	203.5 ± 5.8	406.7 ± 4.1
PID	26.3 ± 8.1	98.6 ± 6.3	207.9 ± 8.7	413.4 ± 6.2

2. 챔버실험 결과

1) 배경농도 실험

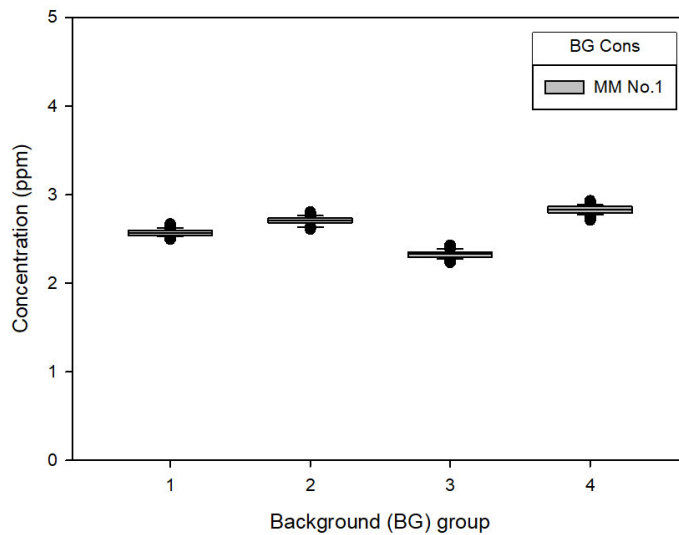
챔버 내의 배경농도를 멀티모니터 측정기기(이하 “MM No.1”로 기술함)로 챔버 내의 농도변화를 확인하였다[그림 III-2]. MM No.1의 결과, 농도값이 2 ppm 수준까지 떨어졌으나, 0 ppm 수준까지 떨어지지 않았다. 해당 장비는 공기 중에 있는 탄화수소(hydrocarbon) 계열의 물질을 모두 측정할 수 있는 장비였기 때문에 대기 중에 일부 간섭 물질에 의해서 일정 농도로 나타날 수 있다고 하여 실험을 계속 진행 하였다〈표 III-12〉, [그림 III-3]. 동시에 활성탄 매체를 활용하여 배경농도를 측정한 결과, 모든 시료의 농도값은 불검출(N.D.)로 나타났다〈표 III-13〉.



[그림 III-2] 실험챔버 농도 안정화 실험

〈표 III-12〉 MM No.1 장비를 활용한 실험챔버 배경농도 비교

일정	N	평균	표준편차	최대값	최소값
Day 1	53	2.57	0.03	2.50	2.67
Day 2	51	2.70	0.04	2.61	2.80
Day 3	126	2.33	0.04	2.24	2.43
Day 4	71	2.82	0.04	2.72	2.93
평균	—	2.55	0.21	2.24	2.93



[그림 Ⅲ-3] MM No.1 장비의 일간 배경농도 비교
1: Day1, 2: Day2, 3: Day3, 4: Day4.

〈표 Ⅲ-13〉 활성탄 매체의 배경농도 분석 결과

분류	개수(N)	농도* (ppm)
배경농도	5	N.D.**
레벨 A	2	
레벨 B, C	2	
레벨 D	2	

* 물질: 아세톤, IPA, 톨루엔, m-자일렌

** 불검출을 의미함

2) 레벨 A 실험 결과

(1) 개요

레벨 A 실험에 대한 시간 경과에 따른 주요 실험 내용 및 특이사항을 표로

정리하였다<표 III-14>. 먼저, 공기압축기를 가동하여 실험챔버 내에 깨끗한 공기가 주입되도록 하였고, MM No.1로 챔버 내의 농도를 모니터링하였고, 농도 수준은 2.5 ppm 수준으로 더 내려가지 않았고[그림 III-4], 활성탄 시료 분석 결과, 모든 시료에서 불검출(N.D.)로 나타났다<표 III-13>.

〈표 III-14〉 시간별 주요 실험내용 및 실험조건 (레벨 A)

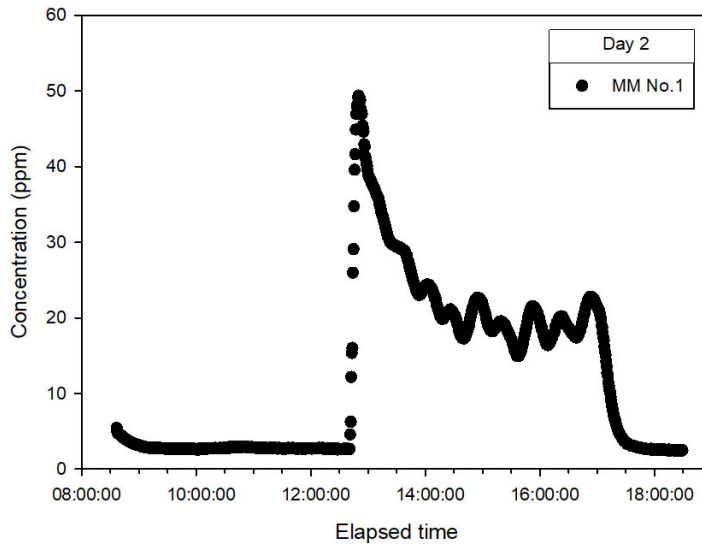
시간	주요 내용	특이사항
11:00~	챔버 안정화	공기압축기 ON
11:57~12:26	배경농도측정	
12:40~	혼합용제(레벨A) 주입*	실린지 펌프 ON
15:40~16:11	레벨 A-1	
16:18~16:50	레벨 A-2	
17:03~18:13	챔버 크리닝	실린지 펌프 OFF
18:13~	실험 종료	공기압축기 OFF

* 주입 조건: <표 II-4> 참조

- 실린지 펌프 유량: 0.001 mL/min
- 공기압축기 유량: 20 L/min
- 가열판 온도 조건: 150℃

(2) MM No.1 모니터링 결과

[그림 III-4]에 따르면, 챔버 내 혼합용제의 농도가 급격히 증가하다가 떨어지는 경향을 보였다. 그 이유는 혼합용제를 미량 주입하는 어려움이 있었기 때문에 실린지 펌프의 유량을 높인 후, MM No.1 모니터링 결과를 확인 한 후에 실린지 펌프 유량을 0.001 mL/min로 조절하였기 때문이다. 14:00 이 후부터 챔버 내의 농도 평형이 이루어진 것을 MM No.1로 확인한 후 PID 직독식장비(이하 “PID No.1, No.2, No.3”로 기술함) 평가를 실시하였다.



[그림 Ⅲ-4] 시간에 따른 MM No.1 장비의 농도 변화(레벨 A)

(3) 활성탄 매체 시료채취 결과(레벨 A)

레벨 A의 이론치 농도는 14 ppm이며, 활성탄 매체 2회 반복 측정하여 PID 직독식장비의 농도값과 비교하였다. 활성탄 매체의 혼합물질 농도의 합은 각각 10.2 ppm, 10.7 ppm으로 나타났다. 레벨 A에 대한 활성탄 시료의 농도수준은 이론치 농도에 비해 낮았다. 그리고 제조 시, 혼합용제의 혼합비율 1:1:1:1이었으나, 분석 결과에 대한 물질의 비율은 아세톤, IPA, 톨루엔, m-자일렌 물질이 각각 35%, 43%, 12%, 10%로 대체적으로 분자량이 클수록 농도 수준은 낮은 경향을 보였다<표 Ⅲ-15>.

〈표 III-15〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 A)

단위: ppm

레벨	개수	아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌	TVOC
	분자량	58.08	60.10	92.14	106.17	-
A-1	5	3.6±0.1	4.4±0.04	1.2±0.02	1.0±0.02	10.2±0.1
A-2	2*	3.8±0.01	4.6±0.02	1.3±0.02	1.1±0.02	10.7±0.02
레벨 A		3.6±0.1	4.5±0.1	1.3±0.03	1.0±0.04	10.4±0.3
물질 비율		0.35	0.43	0.12	0.10	1

* 챔버 측정 중, 유연성 튜브 탈락으로 결과값에서 제외

(4) PID 직독식장비 결과

가) 상관분석

PID 직독식장비 간의 상관관계는 Pearson의 상관관계로 분석한 결과, PID 직독식장비 간의 상관계수는 0.968(p-value<0.01)로 높은 상관관계를 보였다(표 III-16).

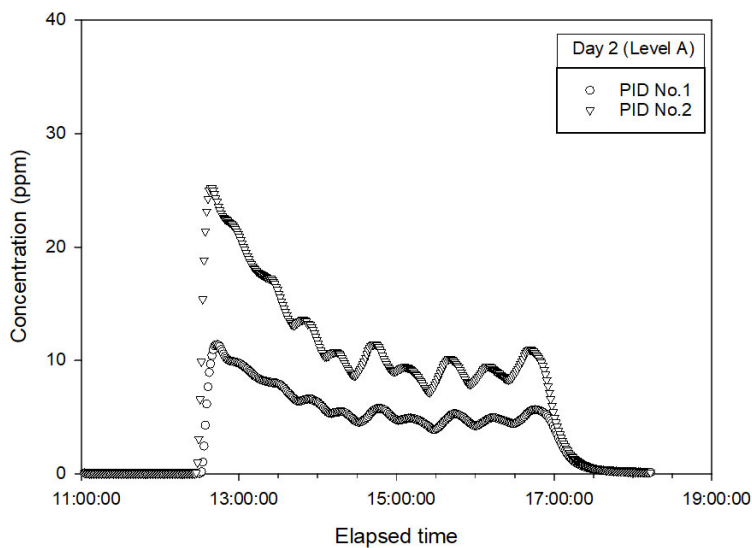
〈표 III-16〉 PID 장비 간의 상관분석 결과(레벨 A)

PID 직독식장비		No.1	No.2
No.1	Pearson 상관계수		0.969*
	유의확률(양쪽)	1	0.000
	N		432
No.2	Pearson 상관계수	0.969*	
	유의확률(양쪽)	0.000	1
	N	432	

* p-value <0.01

나) 시간에 따른 농도 변화

[그림 III-5]는 2종 PID 직독식장비 간의 농도 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 두 장비간의 상관관계는 높았으나, 농도 수준은 PID No.2가 PID No.1보다 높은 경향을 보였다. 동일한 제조사의 동일한 모델이지만, 두 장비의 농도에는 큰 차이를 보이고 있었다.



[그림 III-5] 시간에 따른 PID 직독식장비 농도 변화(레벨A)

직독식장비와 활성탄매체에 대한 기술통계(평균, 표준편차, 최소값, 최대값)를 비교해 보았다<표 III-17>. 활성탄 매체의 농도를 기준으로 하고, 직독식장비의 농도를 비교한 결과, PID No.2가 기준에 가장 가까웠고, 통계적인 유의한 차이가 없었다<표 III-18>. PID No.1은 기준에 비해 과소평가되었고, MM No.1은 기준에 비해 과대평가 되었다[그림 III-6].

〈표 III-17〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨A)

측정매체	개수(N)	평균	표준편차	최소값	최대값	평가수준*
PID No.1	65	5.7	0.68	4.5	6.8	0.55
PID No.2	65	11.1	1.56	8.6	13.6	1.07
MM No.1	103	18.7	1.53	15.8	21.5	1.80
활성탄 매체 (기준값)	7	10.4	0.26	10.1	10.7	-

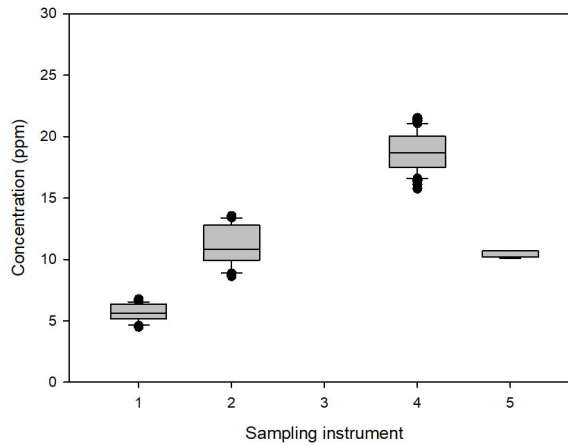
* 수식: 평가수준 = $\frac{\text{측정매체 평균}}{\text{활성탄매체 평균}}$

〈표 III-18〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 A)

통계지표	제공항	df	F	유의확률(P)
집단-간	7178.490	3	1327.306	0.000
집단-내	425.454	236		
합계	7603.945	239		

〈표 III-19〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 A)

측정매체	N	유의수준=0.05에 대한 부집단		
		1	2	3
PID No.1	65	5.65		
PID No.2	65		11.06	
활성탄 매체	7		10.37	
MM No.1	103			18.73
유의확률(P)	-	1.000	0.091	1.000



[그림 III-6] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 A). 1: PID No.1, 2: PID No.2, 3: PID No.3, 4: MM No.1, 5: 활성탄 매체

(5) 측정값의 정확도 결과(레벨 A)

측정값을 활용하여 레벨 A 농도 수준에 대한 정확도(A)를 계산한 결과, PID No.2 장비의 정확도는 11%로 정확도 기준인 25% 이내를 만족하였고, 편향(B)도 7%로 10% 이내에 들었다. 하지만, 다른 장비의 정확도는 PID No.1, MM No.1은 각각 89%, 114%로 정확도 기준을 만족하지 못하였다 <표 III-20>.

<표 III-20> 레벨 A에 대한 정확도(A) 비교

기술통계	PID No.1	PID No.2	MM No.1	활성탄 매체
N	65	65	120	7
평균	5.65	11.06	21.78	10.37(C_T)
표준편차	0.68	1.56	2.72	0.26
정밀도(S_r)	0.046	0.023	0.012	0.025(S_{rT})
편향(B)	-0.45	0.07	1.10	
정확도(A)	0.89	0.11	1.14	

3) 레벨 B, C 실험 결과

(1) 개요

레벨 B, C 실험에 대한 시간 경과에 따른 주요 실험 내용 및 특이사항을 표로 정리하였고<표 III-21>, 실험 순서에 따라 레벨 B, C에 대한 PID 직독 식장비 평가 실험을 실시하였다.

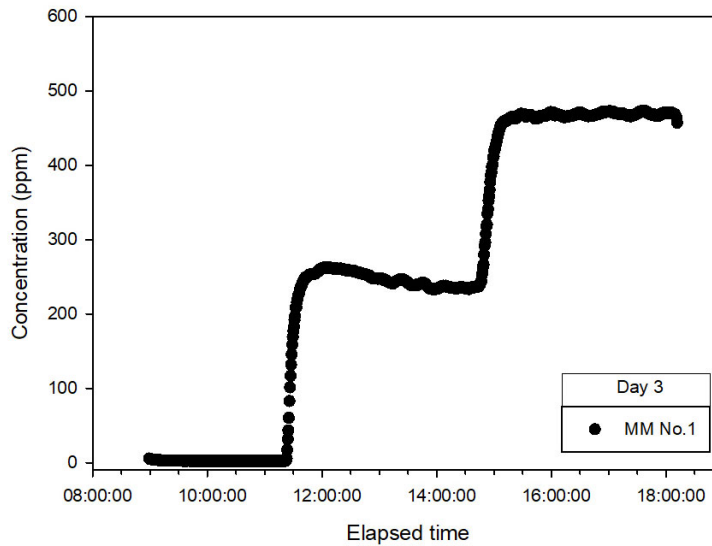
〈표 III-21〉 시간별 주요 실험내용 및 실험조건(레벨 B, C)

시간	수요 내용	특이사항
09:00~	챔버 안정화	공기압축기 ON
09:53~11:07	배경농도측정	
11:20~	혼합용제(레벨B) 주입*	실린지 펌프 ON
13:16~13:49	레벨 B-1	
13:54~14:28	레벨 B-2	
14:47~	혼합용제(레벨C) 주입*	
16:56~17:27	레벨 C-1	
17:30~17:57	레벨 C-2	
18:00~	실험 종료	실린지 펌프, 공기압축기 OFF

* 주입 조건: <표 II-4> 참조

(2) MM No.1 모니터링 결과

레벨 B, C의 농도수준을 만족하기 위해서 혼합용제의 실린지 펌프의 유량을 0.015 mL/min(레벨 C: 0.030 mL/min), 공기압축기 유량을 25 L/min, 가열 판 온도 조건을 150℃로 조절하여, 원하는 농도 수준을 구현하였고, MM No.1 장비로 농도의 평형상태에 도달한 것을 확인 후 평가를 실시하였다[그림 III-7].



[그림 Ⅲ-7] 시간에 따른 MM No.1 장비의 농도 변화(레벨 B, C)

(3) 활성탄 매체 시료채취 결과(레벨 B, C)

레벨 B의 이론치 농도는 162 ppm이며, 활성탄 매체 2회 반복 측정하여 PID 직독식장비의 농도값과 비교하였다. 활성탄 매체의 혼합물질 농도의 합은 각각 156.4 ppm, 134.3 ppm으로 나타났다. 레벨 A에 대한 활성탄 시료의 농도수준은 이론치 농도에 비해 낮았다. 그리고 제조 시, 혼합용제의 혼합비율 1:1:1:1이었으나, 분석 결과에 대한 물질의 비율은 아세톤, IPA, 톨루엔, m-자일렌 물질이 각각 31%, 31%, 21%, 18%로 대체적으로 분자량이 클수록 농도 수준은 낮은 경향을 보였다<표 Ⅲ-22>.

〈표 III-22〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 B)

단위: ppm

레벨	개수	아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌	TVOC
	분자량	58.08	60.10	92.14	106.17	-
B-1	5	48.4±2.8	48.1±2.3	32.7±0.7	27.1±0.5	156.4±6.0
B-2	5	47.3±2.3	47.4±1.8	32.3±0.9	27.4±0.8	134.3±4.9
레벨 B		47.8±2.5	47.8±2.0	32.5±0.8	27.3±0.6	155.3±5.3
물질 비율		0.31	0.31	0.21	0.18	1

〈표 III-23〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 C)

단위: ppm

레벨	개수	아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌	TVOC
	분자량	58.08	60.10	92.14	106.17	-
C-1	5	91.4±3.1	91.4±2.9	60.5±2.1	48.3±1.6	291.7±9.0
C-2	5	98.5±1.5	95.6±.12	63.5±1.4	52.4±1.4	309.9±4.2
레벨 C		98.5±1.5	93.5±3.0	62.0±2.3	50.4±1.4	300.8±11.7
물질 비율		0.31	0.31	0.21	0.18	1

(4) PID 직독식장비 결과

가) 상관분석

PID 직독식장비 간의 상관관계는 Pearson의 상관관계로 분석한 결과, PID 직독식장비 간의 상관계수는 0.998(p-value<0.01)로 높은 상관관계를 보였다(표 III-24).

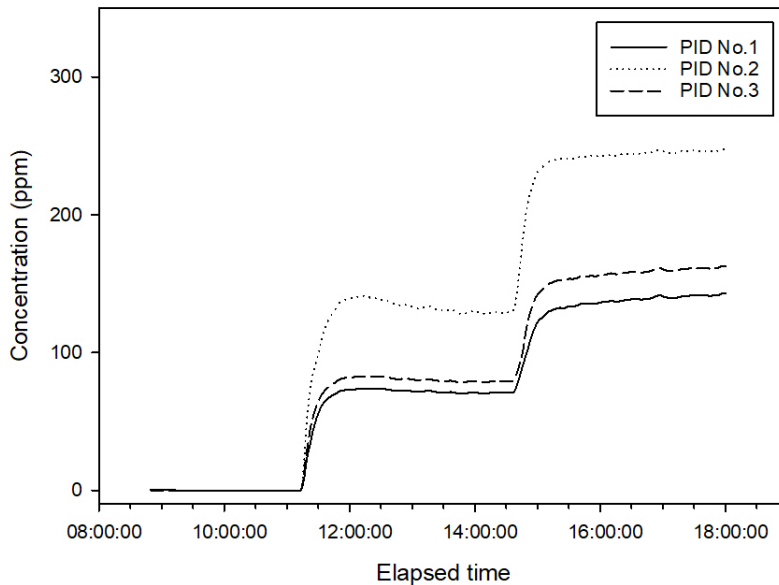
〈표 Ⅲ-24〉 PID 장비 간의 상관분석 결과(레벨 B,C)

PID 직독식장비		No.1	No.2	No.3
No.1	Pearson 상관계수		0.998 [*]	1.000 [*]
	유의확률(양쪽)	1	0.000	0.000
	N		554	554
No.2	Pearson 상관계수	0.998 [*]		0.998 [*]
	유의확률(양쪽)	0.000	1	0.000
	N	554		554
No.3	Pearson 상관계수	1.000 [*]	0.998 [*]	
	유의확률(양쪽)	0.000	0.000	1
	N	554	554	

* p-value < 0.01

나) 시간에 따른 농도 변화

[그림 Ⅲ-8]는 레벨 B, C에 대한 PID 직독식장비(3종) 간의 농도 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다.



[그림 Ⅲ-8] 시간에 따른 PID 직독식장비 농도 변화(레벨B, C)

그 결과, 기준 농도와 PID 값 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보였다(표 III-26, 27), <표 III-29,30>. 기준에 비해 PID 3종의 농도 수준은 과소평가되었고, MM No.1의 농도 수준은 레벨 A와 유사하게 과대평가되는 경향을 보였다[그림 III-9,10]. 직독식장비와 활성탄매체에 대한 기술통계(평균, 표준편차, 최소값, 최대값)를 비교한 결과, PID 3종 중 2종(PID No.1, No3)은 비슷한 농도 수준을 보이고 있었지만, PID No.2는 이 2종 보다 상대적으로 높은 농도값을 보이고 있었다(표 III-25), <표 III-28>.

〈표 III-25〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨 B)

기술통계	개수(N)	평균	표준편차	최소값	최대값	평가수준*
PID No.1	69	70.88	0346	70.09	72.21	0.46
PID No.2	69	129.79	1.39	127.72	133.62	0.84
PID No.3	69	79.05	0.49	78.22	80.43	0.51
MM No.1	117	238.62	4.00	232.99	246.79	1.54
활성탄 매체	10	155.10	5.21	149.00	162.00	1.00

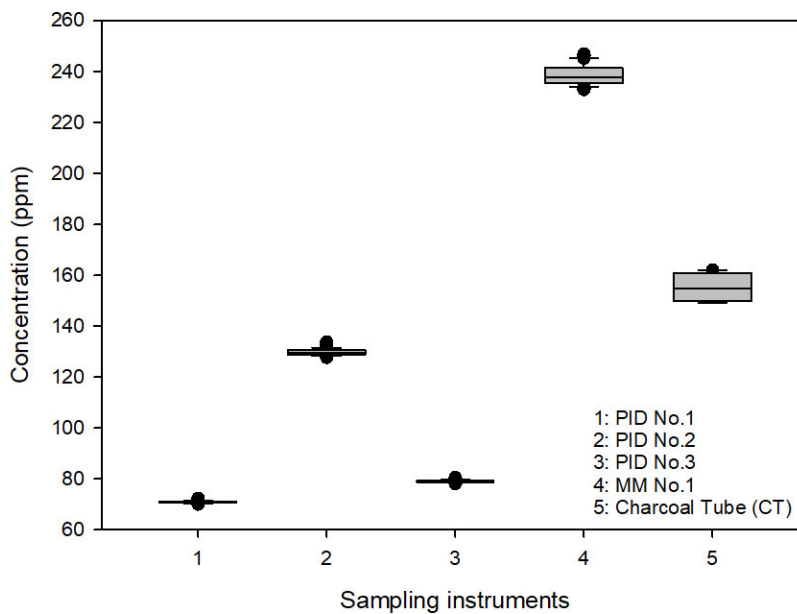
* 수식: 평가수준 = $\frac{\text{측정매체 평균}}{\text{활성탄매체 평균}}$

〈표 III-26〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 B)

통계지표	제곱항	df	F	유의확률(P)
집단-간	1721284.788	4	62507.274	0.000
집단-내	2264.947	329		
합계	1723549.735	333		

〈표 Ⅲ-27〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 B)

측정매체	N	유의수준=0.05에 대한 부집단				
		1	2	3	4	5
PID No.1	69	70.88				
PID No.3	69		79.05			
PID No.2	69			129.79		
활성탄 매체	117				155.10	
MM No.1	10					238.62
유의확률(P)	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



[그림 Ⅲ-9] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 B). 1: PID No.1, 2: PID No.2, 3: PID No.3, 4: MM No.1, 5: 활성탄 매체

〈표 III-28〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨 C)

측정 매체	개수(N)	평균	표준편차	최소값	최대값	평가수준*
PID No.1	60	140.98	0.79	139.60	143.05	0.47
PID No.2	60	246.13	0.67	244.32	247.54	0.82
PID No.3	60	160.84	0.85	159.30	162.93	0.53
MM No.1	105	469.55	2.16	465.81	473.51	1.56
활성탄 매체	10	300.80	11.79	285.00	315.00	1.00

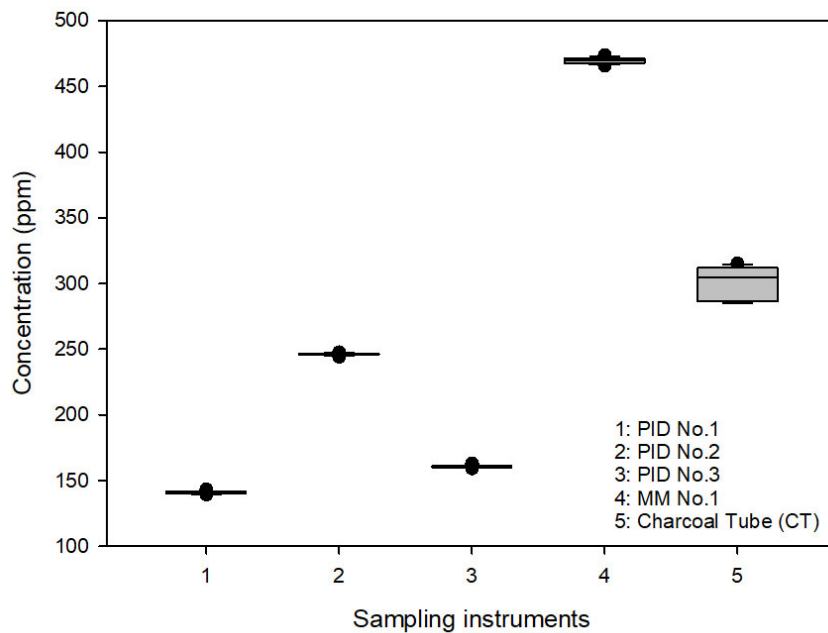
* 수식: 평가수준 = $\frac{\text{측정매체 평균}}{\text{활성탄매체 평균}}$

〈표 III-29〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 C)

통계지표	제곱항	df	F	유의확률(P)
집단-간	5834420.910	4	229215.135	0.000
집단-내	1845.408	290		
합계	5836266.319	294		

〈표 Ⅲ-30〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 C)

측정 매체	N	유의수준=0.05에 대한 부집단				
		1	2	3	4	5
PID No.1	60	140.98				
PID No.3	60		160.84			
PID No.2	60			246.13		
활성탄 매체	105				300.80	
MM No.1	10					469.55
유의확률(P)	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



[그림 Ⅲ-10] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 C)

1: PID No.1, 2: PID No.2, 3: PID No.3, 4: MM No.1, 5: 활성탄 매체

(5) 측정값의 정확도 결과(레벨 B, C)

측정값을 활용하여 레벨 B 농도 수준에 대한 정확도(A)를 계산한 결과, 모든 직독식장비의 정확도는 25% 이내의 기준을 만족하지 못하였다<표 III-31, 32>. PID No.2의 레벨 B, C 농도 수준에 대한 정확도는 각각 33%, 36%로 가장 높았다.

〈표 III-31〉 레벨 B에 대한 정확도(A) 비교

기술통계	PID No.1	PID No.2	PID No.3	MM No.1	활성탄 매체
N	69	69	69	124	10
평균	70.89	129.79	79.05	238.43	155.33(C_T)
표준편차	0.46	1.40	0.49	3.98	5.28
정밀도(S_r)	0.075	0.041	0.067	0.022	0.034(S_{rT})
편향(B)	-0.54	-0.16	-0.49	0.53	-
정확도(A)	1.07	0.33	0.96	0.59	-

〈표 III-32〉 레벨 C에 대한 정확도(A) 비교

기술통계	PID No.1	PID No.2	PID No.3	MM No.1	활성탄 매체
N	60	60	60	105	10
평균	1401.0	246.1	160.8	469.6	300.8(C_T)
표준편차	0.79	0.67	0.85	2.16	11.79
정밀도(S_r)	0.083	0.047	0.072	0.025	0.039(S_{rT})
편향(B)	-0.53	-0.18	-0.47	0.56	-
정확도(A)	1.04	0.36	0.92	0.62	-

4) 레벨 D 실험 결과

(1) 개요

레벨 D 실험에 대한 시간 경과에 따른 주요 실험 내용 및 특이사항을 표로 정리하였고<표 III-33>, 실험 순서에 따라 레벨 D에 대한 PID 직독식장비 평가 실험을 실시하였다.

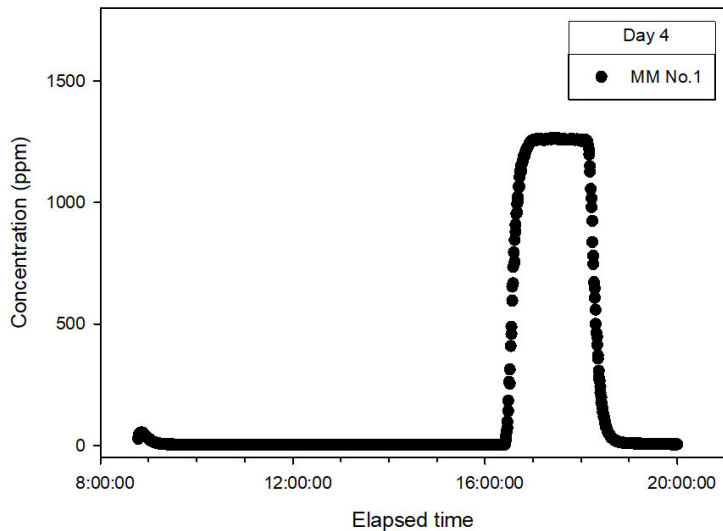
<표 III-33> 시간별 주요 실험내용 및 실험조건(레벨 D)

기간	수요 내용	특이사항
08:47~	챔버 안정화	공기압축기 ON
15:10~15:51	배경농도측정	
16:24~	혼합용제(레벨D) 주입*	실린지 펌프 ON
16:58~17:26	레벨 D-1	
17:28~17:56	레벨 D-2	
18:00~다음날('22.8.26.)	실험 종료	챔버 크리닝

* 주입 조건: <표 II-4> 참조

(2) MM No.1 모니터링 결과

레벨 D의 농도수준을 만족하기 위하여 <표 II-4> 주입 조건에 따라 실린지 펌프와 공기압축기 유량을 조절하였고, 레벨 D 농도의 안정화가 되는 지점을 MM No.1로 모니터링 하였다[그림 III-11].



[그림 III-11] 시간에 따른 MM No.1 장비의 농도 변화(레벨 D)

(3) 활성탄 매체 시료채취 결과(레벨 D)

레벨 D의 이론치 농도는 862 ppm이며, 활성탄 매체 2회 반복 측정하여 PID 직독식장비의 농도값과 비교하였다. 활성탄 매체의 혼합물질 농도의 합은 각각 758.7 ppm, 791.2 ppm으로 나타났다. 레벨 D에 대한 활성탄 시료의 농도수준은 이론치 농도에 비해 낮았다. 그리고 제조 시, 혼합용제의 혼합비율 1:1:1:1이었으나, 분석 결과에 대한 물질의 비율은 아세톤, IPA, 톨루엔, m-자일렌 물질이 각각 33%, 32%, 20%, 15%로 대체적으로 분자량이 클수록 농도 수준은 낮은 경향을 보였다<표 III-34>.

〈표 III-34〉 활성탄 매체 농도 결과(레벨 D)

단위: ppm

레벨	개수	아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌	TVOC
	분자량	58.08	60.10	92.14	106.17	-
D-1	5	255.0±8.7	249.3±6.0	151.0±3.5	103.3±3.1	758.7±17.9
D-2	5	257.0±5.3	250.1±3.7	161.0±3.6	123.1±2.3	791.2±13.3
레벨 D		256.0±6.9	249.7±4.7	156.0±6.2	113.2±10.7	774.9±22.7
물질 비율		0.33	0.32	0.20	0.15	1

(4) PID 직독식장비 결과

가) 상관분석

PID 직독식장비 간의 상관관계는 Pearson의 상관관계로 분석한 결과, PID 직독식장비 간의 상관계수는 0.999 이상(p -value<0.01)로 높은 상관관계를 보였다(표 III-35).

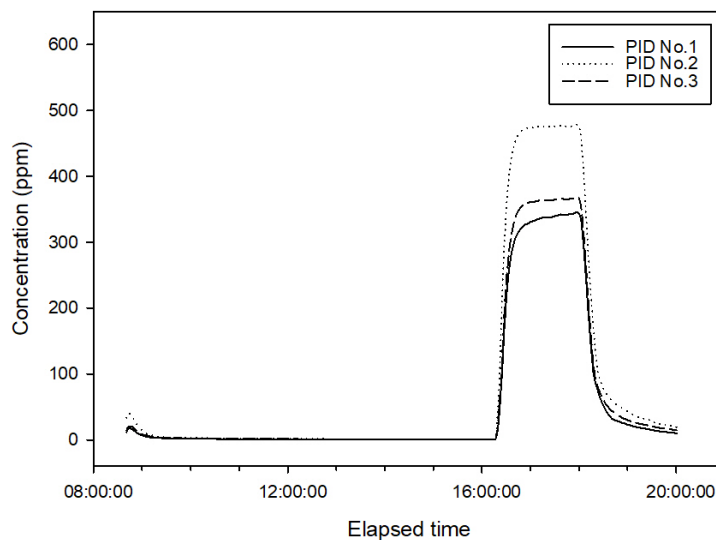
〈표 III-35〉 PID 장비 간의 상관분석 결과(레벨 D)

PID 직독식장비		No.1	No.2	No.3
No.1	Pearson 상관계수		0.999*	1.000*
	유의확률(양쪽)	1	0.000	0.000
	N		681	681
No.2	Pearson 상관계수	0.999*		0.999*
	유의확률(양쪽)	0.000	1	0.000
	N	681		681
No.3	Pearson 상관계수	1.000*	0.999*	
	유의확률(양쪽)	0.000	0.000	1
	N	681	681	

* p -value < 0.01

나) 시간에 따른 농도 변화

[그림 III-12]는 레벨 D에 대한 PID 직독식장비(3종) 간의 농도 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그 결과, 기준 농도와 PID 값 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보였다(표 III-37, 38). 기준에 비해 PID 3종의 농도 수준은 과소평가 되었고, MM No.1의 농도 수준은 레벨 A~C와 유사하게 과대평가 되는 경향을 보였다[그림 III-13]. 직독식장비와 활성탄매체에 대한 기술통계(평균, 표준편차, 최소값, 최대값)를 비교한 결과, PID 3종 중 2종(PID No.1, No3)은 비슷한 농도 수준을 보이고 있었지만, PID No.2는 이 2종 보다 상대적으로 높은 농도값을 보이고 있었다(표 III-36).



[그림 III-12] 시간에 따른 PID 직독식장비 농도 변화(레벨 D)

〈표 III-36〉 측정 매체에 따른 기술통계 비교(레벨 D)

	개수(N)	평균	표준편차	최소값	최대값	평가수준*
PID No.1	58	338.79	4.00	329.79	345.54	0.44
PID No.2	58	475.98	0.98	474.20	478.95	0.61
PID No.3	58	364.52	1.71	360.68	368.36	0.47
MM No.1	100	1260.34	2.81	1249.77	1266.34	1.63
활성탄 매체	10	774.90	22.69	735.00	811.00	-

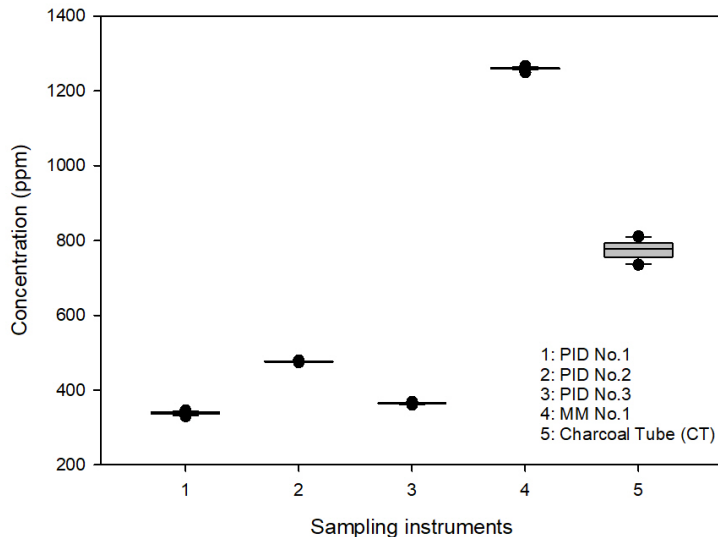
* 수식: 평가수준 = $\frac{\text{측정 매체 평균}}{\text{활성탄매체 평균}}$

〈표 III-37〉 일원배치 분산분석 결과(레벨 D)

	제곱항	df	F	유의확률(P)
집단-간	4820043.31	4	514794.444	0.000
집단-내	6560.479	279		
합계	48426603.79	283		

〈표 III-38〉 사후검정을 통한 PID 장비 간의 농도 비교(레벨 D)

측정 집단군	N	유의수준=0.05에 대한 부집단				
		1	2	3	4	5
PID No.1	69	338.79				
PID No.3	69		364.52			
PID No.2	69			475.98		
활성탄 매체	117				774.90	
MM No.1	10					1260.34
유의확률(P)	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



[그림 III-13] 측정매체 간의 Box plot 농도 비교(레벨 D)

(5) 측정값의 정확도 결과(레벨 D)

측정값을 활용하여 레벨 D 농도 수준에 대한 정확도(A)를 계산한 결과, 모든 직독식장비의 정확도는 25% 이내의 기준을 만족하는 PID 직독식장비는 없었다<표 III-39>.

<표 III-39> 레벨 D에 대한 정확도(A) 비교

	PID No.1	PID No.2	PID No.3	MM No.1	활성탄 매체
N	58	58	58	102	10
평균	338.8	476.0	364.5	1260.1	155.33(C _T)
표준편차	4.01	0.98	1.72	3.33	22.65
정밀도(S _r)	0.067	0.048	0.062	0.018	0.029(S _{rT})
편향(B)	-0.56	-0.39	-0.53	0.63	-
정확도(A)	1.10	0.76	1.04	0.67	-

4) 보정계수(Correction Factor, CF) 계산 결과

(1) 제조사보정계수(Manufacture Mixture Correction Factors, MMCFs)

제조사 보정계수 계산식에 따르면, 각 물질의 혼합 비율을 개별 물질의 보정계수로 나눠서 제조사 보정계수를 구할 수 있었다<표 III-40>.

〈표 III-40〉 제조사 혼합보정계수(MMCFs)

화학물질의 종류	아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌
비율	1	1	1	1
개별물질의 CF	1.10	6.00	0.50	0.44
MMCFs	0.75*			

* 계산식: $MMCFs = \frac{1}{\frac{0.25}{1.10} + \frac{0.25}{6.00} + \frac{0.25}{0.50} + \frac{0.25}{0.44}} = 0.75$

MMCFs를 적용하여 정확도(A)를 레벨별로 비교해 보았는데, 모든 PID 직독식장비에서 MMCFs 값을 적용하였더니 오히려 정확도(A)는 나빠지는 결과를 보였다<표 III-41>.

〈표 III-41〉 MMCFs를 적용한 직독식장비의 정확도(A) 변화 비교

정확도(A)		PID No.1	PID No.2	PID No.3	MM No.1
A	전	0.89	0.11	-**	1.14
	후	1.21	0.49	-**	-*
B	전	1.07	0.33	0.96	0.59
	후	1.29	0.73	1.21	-
C	전	1.04	0.36	0.92	0.62
	후	1.36	0.92	1.28	-
D	전	1.10	0.76	1.04	0.67
	후	1.42	1.20	1.38	-

* PID 직독식장비에만 해당됨, ** 측정값 없음

2) 실제 혼합보정계수(Real Mixture Correction Factors, RMCFs)

실제로 각 레벨별 농도를 분석한 결과, 이론 혼합비율로 분석값이 일치하지 않았다. 그 이유는 혼합물질의 분자량, 물리적인 특성에 따라 달라지기 때문이었다<표 III-42>.

〈표 III-42〉 제조혼합비율과 분석결과에 따른 실제혼합비율 비교

화학물질의 종류		아세톤	IPA	톨루엔	m-자일렌	RMCFs ^{***}
보정계수(CF)		1.10	6.00	0.50	0.44	-
제조 혼합비율		0.25	0.25	0.25	0.25	0.75 [*]
실제 혼합 비율	레벨 A	0.35	0.43	0.12	0.10	1.17
	레벨 B	0.31	0.31	0.21	0.18	0.87
	레벨 C	0.32	0.31	0.21	0.17	0.88
	레벨 D	0.33	0.32	0.20	0.15	0.92

* 제조사 혼합보정계수(MMCFs) 값, ** 실제혼합비율에 계산된 보정계수값

RMCFs를 적용하여 정확도(A)를 레벨별로 비교해 보았는데, PID No.1 장비의 레벨 A의 제외하고는 RMCFs 값을 적용하였더니 오히려 정확도(A)는 나빠지는 결과를 보였다<표 III-43>.

〈표 III-43〉 RMCFs를 적용한 직독식장비의 정확도(A) 변화 비교

정확도(A)		PID No.1	PID No.2	PID No.3	MM No.1
A	전	0.89	0.11	-	1.14
	후	0.71[*]	0.29	-	- ^{**}
B	전	1.07	0.33	0.96	0.59
	후	1.18	0.54	1.09	-
C	전	1.04	0.36	0.92	0.62
	후	1.26	0.73	1.16	-
D	전	1.10	0.76	1.04	0.67
	후	1.30	1.03	1.25	-

* 볼드체: RMCFs 적용 후 정확도가 개선된 경우, ** PID 직독식장비에만 해당됨

(2) 필드보정계수 (Standard Mixture Correction Factors, SMCFs)

필드보정계수는 사업장에서 측정한 활성탄 매체 농도값을 활용하는 방식으로 각 레벨별 필드보정계수를 구하여 평균을 구한 후, 평균 SMCFs를 각각의 직독식장비에 적용해 보았다<표 III-44>.

〈표 III-44〉 필드보정계수(SMCFs)

SMCFs*	PID No.1	PID No.2	PID No.3	MM No.1
레벨 A	0.55	1.07	—**	2.10
레벨 B	0.46	0.84	0.51	1.53
레벨 C	0.47	0.82	0.53	1.56
레벨 D	0.44	0.61	0.47	1.63
평균 SMCFs	0.48	0.83	0.50	1.71

* $SMCFs = \frac{\text{직독식장비}}{\text{활성탄매체}}$, ** 측정값 없음

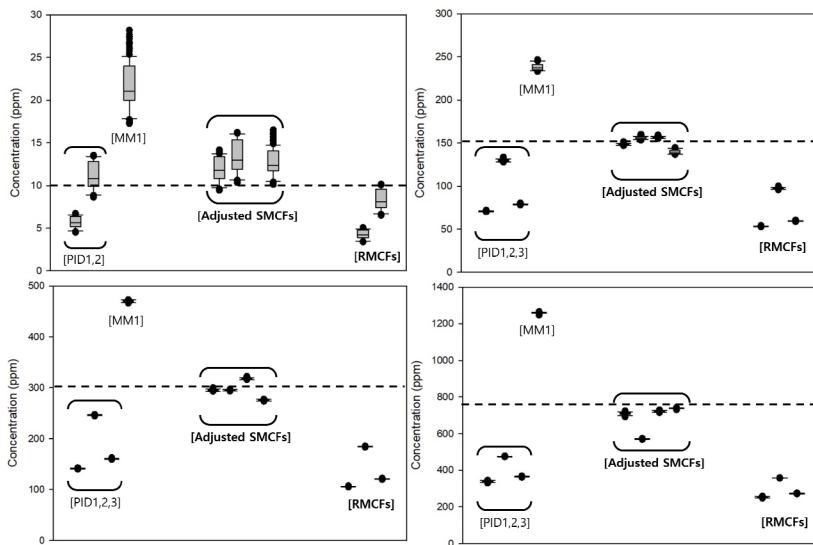
SMCFs 적용 시, 모든 PID 측정값의 정확도가 향상되었다. PID No.1, 3 장비의 경우, 모든 레벨의 SMCFs 값이 0.5 수준으로 비슷한 보정계수 값을 나타냈다. 하지만 PID No.2 장비의 경우, 레벨 D로 갈수록 SMCFs 값이 낮아지는 경향을 보이고 있으나, 모든 경우에서 정확도가 향상되는 결과를 보였다<표 III-45>.

〈표 III-45〉 SMCFs를 적용한 직독식장비의 정확도(A) 변화 비교*

정확도(A)		PID No.1	PID No.2	PID No.3	MM No.1
A	전	0.89	0.11	—	1.14
	후	0.12	0.25	—	0.27
B	전	1.07	0.33	0.96	0.59
	후	0.11	0.07	0.07	0.21
C	전	1.04	0.36	0.92	0.62
	후	0.29	0.30	0.17	0.45
D	전	1.10	0.76	1.04	0.67
	후	0.17	0.52	0.14	0.43

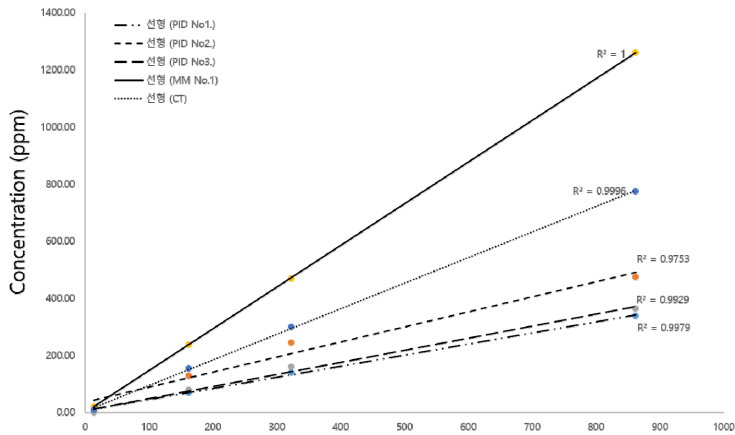
* **볼드체**: 정확도가 향상된 경우 또는 정확도 기준(25% 이내)을 만족하는 경우

평균 SMCFs를 적용했더니, 모든 장비의 정확도가 개선되는 결과를 보였다 [그림 III-14]. 특히 PID No.1, No.3 장비의 정확도가 대부분 25% 이내인 정확도 기준을 만족하는 것으로 나타났다. PID No.2 장비의 경우, 농도값이 증가할수록 과소평가되는 경향을 보였다.



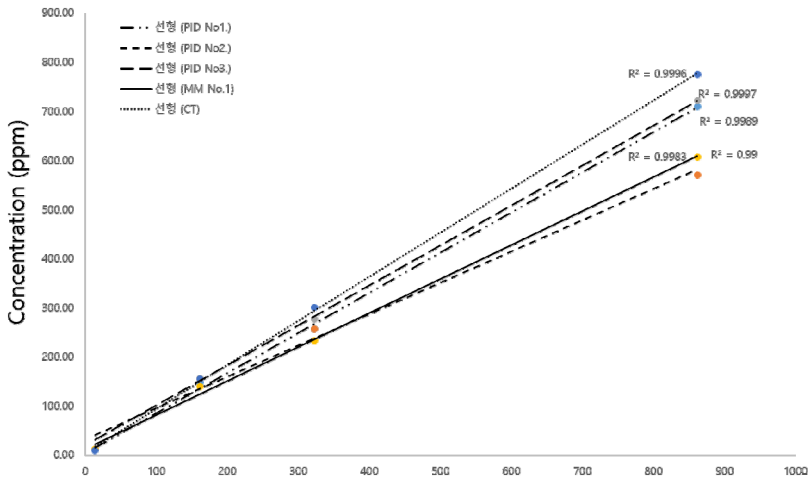
[그림 III-14] 보정계수를 적용한 후 직독식장비의 농도값 비교

[그림 III-15]는 모든 직독식장비의 측정 농도는 선형성을 보였다. 가장 선형이 좋은 장비는 MM No.1으로 R^2 값이 1에 가까웠다. 활성탄 매체의 농도값을 기준으로 MM No.1의 농도값은 과대평가되고 있었고, PID 직독식장비 3종 모두 과소평가되고 있었다. PID No.1과 No.3 장비의 경우에는 기기 반응값이 비슷한 경향을 보이며, 평균 SMCFs값도 유사하였지만 PID No.2의 경우에는 레벨 A, B에서는 활성탄 매체의 농도값과 유사한 값을 보이고 있으나, 레벨 C,D(고농도)로 갈수록 그 반응값이 줄어드는 경향을 보이고 있었고, 고농도 수준일수록 SMCFs값은 낮아지는 경향을 보였다<표 III-45>.



[그림 III-15] 각 레벨별 농도 비교(PID, MM, 활성탄 매체)

[그림 III-16]은 평균 SMCFs로 보정한 값을 적용한 농도 수준이다. 그림에서 알 수 있듯이, 기준값과 직독식장비와의 편차가 줄어 든 것을 확인할 수 있었다. PID No.2는 고농도로 갈수록 기준값의 편차가 커지는 경향을 보였다.



[그림 III-16] SMCFs 적용 후 직독식장비(PID, MM)의 농도 변화

3. 작업환경관리에 PID 직독식장비 도입 방안

1) 사업장 PID 직독식장비 전문인력 구축 및 역할

(1) 전문인력 그룹별 역할 소개

PID 직독식장비는 작동이 간단하기 때문에 사용이 간편하여 편리하고, 가격도 저렴해서 사업장에서 활용이 매우 용이하다. 그리고 농도 표시, 알람 기능 등 육안으로 그 농도 수준을 확인할 수 있기 때문에 쉽게 적용할 수 있다. 하지만, 정확한 평가를 위해서는 고려해야 할 사항이 많기 때문에 PID 직독식장비를 전문 인력이 필요하다. AIHA(American Industrial Hygiene Association)에서 2015년도에 가스·증기상 물질을 측정하는 직독식장비 현장 적용이라는 BoK(Body of Knowledge)를 제시하였고, 2019도와 2020년도에 한 번 더 개정되었다. 이 BoK에 제시하고 있는 직독식장비 사용자 조직을 4가지(일반 사용자, 중급 사용자, 고급 사용자, 초고급 사용자) 및 역할은 7가지로 구분하고 있으며, 아래와 같다.

- 직독식장비의 기능 이해
- 적절한 사용의 설명
- 장비 표시, 알람의 대응 및 인지
- 고장수리
- 장비 관리
- 장비 선택
- 데이터 해석

가) 일반 사용자(Tier 1 - Basic User)

일반 사용자는 말 그대로 현장에서 모니터링하고 직독식장비를 사용하여 정보를 수집하는 자를 말한다. 이들은 사용 전에 알람, 데이터, 에러 메시지 등

기본 장비의 세팅을 담당하며, 세부 항목 및 역할에 대해서는 <표 III-46>에 설명하였다. 이 그룹에서는 장비 관리, 선택 및 데이터 해석은 하지 않는다.

- 직독식장비의 기능 이해: a~d
- 적절한 사용의 설명: a~e
- 장비 표시, 알람의 대응 및 인지: a~e
- 고장수리: a~c
- 장비 관리: 관계없음
- 장비 선택: 관계없음
- 데이터 해석: 관계없음

나) 중간 사용자(Tier 2 - Intermediate User)

작업장의 공정을 이해하고 적절한 직독식장비를 선정할 수 있는 자를 중간 사용자로 하고, 일반 사용자를 활용하여 작업장의 측정 계획을 실행하며, 일반 사용자를 위해 직독식장비를 준비하거나 관리해 준다. 중간 사용자의 역할 및 세부항목은 <표 III-48>에 정리하였다<표 III-46>. 이 그룹에서는 장비 선택 및 데이터 해석을 하지 않는다.

- 직독식장비의 기능 이해: a~f
- 적절한 사용의 설명: a~h
- 장비 표시, 알람의 대응 및 인지: a~e
- 고장수리: a~f
- 장비 관리: a~f
- 장비 선택: 관계없음
- 데이터 해석: 관계없음

다) 고급 사용자(Tier 3 - Specialist User)

고급 사용자는 직독식장비의 사용해야 할 상황 및 장비의 검교정의 이해 등 직독식장비를 적절하게 사용할 수 있는 사람을 말한다. 이러한 바탕으로 측정 계획을 수립, 평가 및 데이터 해석을 할 수 있다. 특히 특정화되어 있지 않은 환경에 대해서 평가가 가능하다. 그리고, 측정 장비의 작동 원리를 알고 있고, 중간/일반 사용자에 의해 사용되어진 장비가 적절한지에 대한 여부를 보장해 준다<표 III-46>. 이 그룹부터 데이터 해석을 할 수 있어야 한다.

- 직독식장비의 기능 이해: a~f
- 적절한 사용의 설명: a~j
- 장비 표시, 알람의 대응 및 인지: a~f
- 고장수리: a~f
- 장비 관리: a~f
- 장비 선택: a~i
- 데이터 해석: a~c

라) 최고급 사용자(Tier 4 - Advanced User)

최고급사용자는 사용 목적 및 장비 성능에 맞게 사용할 수 있으며, 직독식 장비의 성능과 질을 평가할 수 있다. 그들은 기술적인 작동원리를 이해하고, 새로운 방법으로 일반적이지 않은 환경을 평가 할 수 있다. 조사, 혼합유기 문제, 예측불가능한 상황 뿐만 아니라 위기대응 전략, 장비 선택, 측정방법의 선택, 및 측정법의 개발까지 가능한 사람을 말한다<표 III-46>.

- 직독식장비의 기능 이해: a~f
- 적절한 사용의 설명: a~k
- 장비 표시, 알람의 대응 및 인지: a~f
- 고장수리: a~f

- 장비 관리: a~f
- 장비 선택: a~l
- 데이터 해석: a~c

〈표 III-46〉 사용자에 따른 역할 및 세부항목 (BoK 내용 번역) (계속)

일반 사용자에게 요구되는 능력 및 준수사항	
지식, 기술 및 능력	주요역량
1. 직독식장비의 기능 이해	
	a. 장비 켜고 끄는 방법
	b. 장비 사용 준비의 이해 (검교정, 적정 센서 사용 등)
	c. 장비 사용을 위한 준비 (사전 점검, 배터리 체크 등)
	d. 장비의 반응시간 이해 및 측정을 위한 지속시간
	e. 기능적 테스트 수행 방법 및 시기 이해
	f. 검교정, 영점 조정 방법 및 시기 이해
2. 적절한 사용의 설명	
	a. 장비의 수행하는 공정에 대한 이해
	b. 장비의 화학물질 검출 유무에 대한 이해
	c. 장비 운영에 적합한 환경에 대한 이해
	d. 잠재된 장비의 간섭현상에 대한 구분
	e. 측정 장소에 대한 이해
	f. 장비의 상호영향, 센서 오염, 적합한 사용의 구분
	g. 장비구성, 알람설정, 데이터 수집의 이해
	h. 데이터 처리
	i. 예측 가능한 환경에 대한 측정 계획 수립
	j. 평가에 대한 장비의 필요성 및 한계점 이해
	k. 예측/예측불가 상황에 대한 측정 전략 수립
3. 장비 표시, 알람의 대응 및 인지	
	a. 장비 운영 시, 표시되는 정보 구분
	b. 장비의 정상 수준과 안전수준을 구분
	c. 발생하는 알람 내용 및 원인을 인지
	d. 알람에 따른 적절한 대응 방법 이해
	e. 알람에 대한 모든 상황 인지
	f. 보정계수의 적용 결정

〈표 III-46〉 사용자에 따른 역할 및 세부항목 (BoK 내용 번역)

일반 사용자에게 요구되는 능력 및 준수사항	
지식, 기술 및 능력	주요역량
4. 고장수리	
	a. 장비고장 시점 인식
	b. 장비고장에 대한 처리방법 인지
	c. 장비고장 수리점 인지
	d. 장비 정확도 발생 시점 이해
	e. 검교정, 영점 조정의 필요 시기 이해
	f. 제조사 점검 시기의 이해
5. 장비 관리	
	a. 검교정 로그/기록에 요구된 정보 이해
	b. 장비의 적절한 충전 시기 이해
	c. 적절한 장비 세척 수행
	d. 적절한 장비 보관 수행
	e. 장비 부품, 소모품, 점검 주기에 대한 인지
	f. 센서 교체, 필터 교체 등 사용자 서비스 수행
6. 장비 선택	
	a. 사용 환경에 따른 장비 선택 방법 인지
	b. 장비 선택에 따른 위험특성의 이해
	c. 장비의 제한점의 이해, 이에 따른 다른 장비선택 방법
	d. 사용 환경에 따른 적절한 장비 사용 인식
	e. 장비에 대한 AIHA의 FACT SHEET 활용
	f. 예상되는 오염요소에 대한 적절한 측정 장비 사용
	g. 예측 불가한 상황에서 발생될 수 있는 위험요소 인식
	h. 적절한 장비 구입에 대한 정당한 사유 설명
	i. 미지 환경 측정 목적으로 여러 장비 활용 가능
	j. 새로운, 미지 환경 등 장비에 대한 사용 인식
	k. 비정상 상태에 대한 위험요소 인식
	l. 장비의 측정범위, 원리, 기술에 대해 이해
7. 데이터 해석	
	a. 사전 대응에 대한 장비 데이터 해석
	b. 장비 측정값에 대한 계산
	c. 측정값에 대한 데이터 비교

(2) PID 직독식장비의 구입

PID 직독식장비는 광이온화 방식의 검출기로 이온 반응(화학적 반응으로 이온화되는 것이 아님)으로 광자의 흡수에 의해 이온이 생성되는 비파괴적 기술이기 때문에 개별 물질의 농도를 제시할 수 없고, 총휘발성유기화합물(total volatile organic compounds, TVOC)의 농도를 제시한다. PID 센서의 구성은 램프 eV 종류, 분해능, 농도 범위, 직선범위, 민감도, 회복시간 등인데, 사업장의 농도 수준을 고려하여 적합한 PID 직독식장비를 구입하여야 한다. 여기서 가장 중요한 부분은 램프 eV 종류인데, 시중에서 판매되는 대부분은 10.6 eV이며, 9.8 eV, 11.7 eV 등이 있으며, 이에 따라 측정할 수 있는 물질의 종류가 달라지며, 제조사에 따라 보정 계수가 달라질 수 있다. 예를 들어 사업장에 초산과 암모니아를 측정하기 위해서 PID 직독식장비를 구입했는데, 램프 eV가 9.8 eV였다면, 해당 물질은 측정할 수 없게 된다. 따라서 사업장의 직독식장비 일반 사용자 등 관련 담당자는 PID 직독식장비를 구입할 때, 제조사와 확인한 후 구입해야 한다.

(3) 전문교육 필요

직독식장비에 대한 제조사 교육이 우선되어야 한다. 대부분의 PID 직독식장비를 판매하는 회사에서 교육을 제공하고 있으며, 기본 작동 교육, 관리 및 운영 교육 및 점검 등 관련 교육을 제공해 주고 있다.

(4) PID 직독식장비의 제한점(limitation)

미국에서는 1970년도에 PID 직독식장비 관련하여 법을 제정(Public Law 91-596)한 이후 50년이 되었고, 이 기간 중에 PID 직독식장비에 대한 다양한 노력들이 있었고, 이에 관련 된 한계점을 제시하고 있었다.

가) 극한 환경(온도·습도)에 영향

PID 직독식장비의 가장 큰 문제는 수분에 취약하다는 것인데, 대부분의 문헌에서 높은 습도 환경에서 PID 장비의 농도값이 기준 대비 과소평가되는 경향을 보이고 있었다(Barsly et al, 1985., Drummond I, 2010., Coffey & Terri, 2010., LeBouf et al, 2013, LeBouf & Coffey, 2015., Amir HJ et al, 2021).

나) 고농도 평가에 영향

PID 직독식장비의 장점 중 하나는 농도값에 대한 직선성을 가지고 있다는 것이다. 대체적으로 문헌에서 보면 PID 센서에서 권장하는 측정 범위에서 직선성을 유지하고 있었지만, 고농도로 갈수록 직선이 꺾이는 경향을 보이고 있었다(Barsly et al, 1985., RAE, 2013).

다) PID 센서의 오염

PID 측정 후 램프 주변에 먼지, 티끌 등에 의해 오염되었고(Longworth et al, 1999), 고농도 평가 후 램프 주변에 검댕, 끈적이는 잔여물이 쌓여 있는 경우도 있었다(LeBouf & Coffey, 2015). 최근에는 장비 제조사에서 램프 세척을 위한 키트를 판매 및 교육하고 있었다.

마) PID 직독식장비의 정확도 수준

혼합물의 화학물질 종류의 차이, 화학적 특성, 구성 비율, 작업 공정의 차이 등에 따라 정확도에 영향을 주는 요인으로 보고 있었다(D.A. DuBose et al, 1981). 직독식장비 제조사마다 측정값의 차이가 있었으며, 정확도 기준(25% 이내)을 만족하는 비율이 낮았다(42%)(Coffey et al, 2009). 또한 PID 직독식장비의 측정값이 과소평가되는 경향을 보였고, (Coy JD et al, 2000), PID 직독식장비의 정확도를 높이기 위한 보정계수 적용이 필요 하였다(Barsly et al, 1985., Précédés et al, 2004., Drummond I, 2010).

바) 화학물질 간의 상호영향(cross-sensitivity)

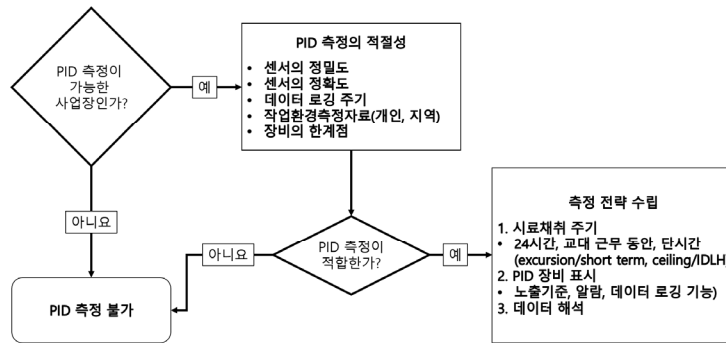
제조사에서는 화학물질 간의 상호영향에 대해서 관련 문헌을 제공하고 있다(Dina Siegel et al, 2019., RAE, 2022).

2) PID 직독식장비의 활용 여부 결정

PID 직독식장비의 경우, 여러 문헌에서 한계점을 제시하고 있는데, 일부 물질간의 상호 영향(cross-sensitivity)가 존재하고, 특정 환경 조건(온·습도가 높은 환경)에서 PID 센서의 반응 능력의 차이를 보이고 있었다. 그리고 고농도 평가 시에도 과소평가되는 한계점이 있었다. 그럼에도 불구하고 PID 직독식장비를 작업환경관리에 활용하는 가장 큰 이유는 실시간으로 작업장의 농도값을 확인할 수 있기 때문이다. 전통적인 방식은 그 결과값이 정확한 반면 시료채취 후 평가까지 많은 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 하지만 PID 직독식장비를 활용한다면 실시간 작업장 농도를 모니터링 할 수 있고, 피크 농도 지점을 활용하여 화학물질 누출 시점을 즉각적으로 찾아 사업장의 작업환경을 개선하는데 좋은 도구로 활용될 수 있다. 따라서 PID 직독식장비의 한계점을 이해하고 활용 할 수 있는지의 여부를 판단해야 한다.

(1) PID 직독식장비 적합여부 및 측정전략 수립절차

먼저 PID 직독식장비로 측정이 가능한 물질인지, 물질간의 상호 영향은 없는지, 작업장 환경을 판단하여 PID 직독식장비 측정이 가능한지에 대한 여부를 확인하여 가능하다면 센서의 정확도, 정밀도, 데이터 로깅 주기, 작업환경 측정 데이터(개인, 지역시료), 그리고 제조사의 장비에 대한 한계점을 조사한다. 그 다음 PID 직독식장비로 측정이 가능하다고 판단되면 측정 전략을 수립한다[그림 III-17]. 시료채취 전략에는 데이터 로깅 주기, 노출기준 평가 등 직독식장비 데이터의 해석에 대한 내용을 기반으로 측정 전략을 수립한다.



[그림 III-17] PID 직독식장비 적용 및 전략 수립 절차(Siegel et al, 2019 참조)

(2) PID 직독식장비 측정법에 적용되는 노출기준

PID 직독식장비로 측정된 농도는 노출기준과 비교할 수 있다. 노출기준의 적용은 노출 기간과 화학물질의 독성을 고려하여 유해 등급에 따른 PID 직독식장비의 측정 주기 해석 및 노출기준을 다르게 적용한 항목은 Siegel et al, 2019의 연구를 참고하였다<표 III-47>.

<표 III-47> 유해등급에 따른 측정주기 및 노출기준 비교(Siegel et al, 2019 참조)

노출기간: 유해등급	측정주기	노출기준	예
초/분: 즉각적/급성영향	직독식장비 측정	Ceiling [*] STEL ^{**}	황화수소, 염화수소
분/시간: 급성영향	15분 측정 또는 8시간 측정	STEL ^{***} TWA ^{****}	용제류(자극, 마취)
일/주: 아급성/만성영향	일간/주간/달간 측정	TWA ^{****} L-OEL ^{****}	납
년: 만성영향	년간 평균 노출	L-OEL	염화비닐

* 단시간 노출기준(Short Term Exposure Limit, STEL)

** 최고노출기준(Ceiling, C)

*** 시간가중평균기준(Time Weighted Average, TWA)

**** L-OEL: long-term average-occupational exposure limit, LTA-OEL

가) ACGIH 규칙 3/5

급성영향을 일으킬 수 있는 화학물질에 대해서 ACGIH에서는 피크 노출로부터 단시간 노출평가를 할 수 있도록 하고 있으며, 일명 규칙 3/5로 정의하고 있었다. 8시간 TWA를 초과하지 않으면서, 15분의 측정된 농도값이 TWA의 3배를 초과하지 않고, 1시간 동안 이러한 농도가 4회 이상 발생하지 않아야 한다(규칙 3). 그리고 15분 측정 농도가 TWA의 5배를 초과해서는 안 된다(규칙 5).

- 규칙 3: PID 직독식장비의 15분 동안의 연속적 평균농도값을 구한다. 연속된 15분 평균 농도값이 작업시간동안 TWA의 3배 초과된 값이 4회를 초과한다면, 즉각적으로 작업을 멈추고, 개선 대책을 실행해야 한다.
- 규칙 5: 피크 노출 농도가 TWA의 5배가 초과 된 경우, 즉각적으로 작업을 멈추고, 개선 대책을 실행해야 한다.
- TWA: PID 직독식장비로 측정된 8시간 간격의 평균농도를 구하여, 8시간 TWA 기준값과 비교하여, 초과 시, 즉각적으로 작업을 멈추고, 개선 대책을 실행해야 한다.

나) 단시간 노출기준(STEL)

15분간의 시간가중평균노출값으로서 노출농도가 시간가중평균노출기준(TWA)을 초과하고 단시간노출기준(STEL) 이하인 경우에는 1회 노출 지속시간이 15분 미만이어야 하고, 이러한 상태가 1일 4회 이하로 발생하여야 하며, 각 노출의 간격은 60분 이상이어야 한다.

다) 최고노출기준(Ceiling, C)

최고노출 수준을 평가할 수 있는 최소한의 시간동안 측정하는 것을 의미한다.

라) Excursion Limits

ACGIH 문헌에서는 TWA는 설정되어 있지만, STEL이 설정되어 있지 않는 물질을 평가할 때 사용하는 용어로 노출상한치라고도 한다. TWA의 3배의 농도 수준이 30분 이하여야 하고, TWA의 5배 이상의 농도 수준은 잠

시라도 노출되어서는 안 된다는 의미를 가지고 있다.

마) Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH)

즉각적으로 생명 또는 건강영향에 위험을 일으킬 수 있는 농도이며, 30분간 노출될 경우, 회복 불능 상태에 이르거나 사망에 이르게 하는 농도를 의미한다.

바) 시간가중평균기준(TWA)

1일 8시간 작업을 기준으로 하여 유해인자의 측정치에 발생시간을 곱하여 8시간으로 나눈 값을 의미한다.

사) 혼합물의 노출기준 평가

화학물질이 2종 이상 혼재하는 경우에 혼재하는 물질 간에 유해성이 인체의 서로 다른 부위에 작용한다는 증거가 없는 한 유해 작용은 가중되므로 노출기준을 아래의 식에 따라 산출하되, 산출되는 수치가 1을 초과하지 아니하는 것으로 한다.

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n}$$

여기서, C는 화학물질 각각의 측정치를 의미하며, T는 화학물질 각각의 노출기준을 의미한다.

아) TWA의 3배 노출기준 평가

$$\frac{C_1}{3T_1} + \frac{C_2}{3T_2} + \dots + \frac{C_n}{3T_n}$$

여기서, C는 화학물질 각각의 측정치를 의미하며, 3T는 화학물질 각각의 노출기준의 3배를 의미한다.

자) 탄화수소용매(hydrocarbon solvents)의 노출기준 평가

탄화수소용매(hydrocarbon solvents)의 경우에는 그 구성성분이 다양하다. 이 경우에는 다음의 식을 활용하여 용매류에 대한 노출기준을 평가할 수 있다.

$$GGV_{mixture} = \frac{1}{\frac{F_a}{GGV_a} + \dots + \frac{F_n}{GGV_n}}$$

여기서, $GGV_{mixture}$ 는 혼합물에 대한 8시간 노출기준값, GGV_a 는 <표Ⅲ-48>에 해당하는 값, F_a 는 탄화수소용매 내에 포함되어 있는 해당 물질의 비율을 의미한다. $GGV_{mixture}$ 을 수식으로 값을 구하여, 구한 값이 8시간 TWA를 초과하는 지를 판단한다.

〈표 Ⅲ-48〉 GGVa의 그룹별 농도값 (ACGIH 2014 참조)

탄화수소용매	A*	B*	C*
C5-C6 Alkanes	1500	1800	Pentane, all isomers (1770) Hexane isomers (1760)
C7-C8 Alkanes	1500	1200	Heptane, all isomers (1640) Octane, all isomers (1401)
C5-C6 Cycloalkanes	1500	1800	Cyclopentane (1720) Cyclohexane (350)
C7-C8 Cycloalkanes	1500	800	Methyl cyclohexane (1610)
C7-C8 Aromatics	200	500	Toluene (75) Xylene, all isomers (434) Ethyl benzene (87)
C9-C15 Alkanes	1200	1200	Nonane (1050)
C9-C15 Cycloalkanes	1200	800	
C9-C15 Aromatics	100	500	Trimethyl benzene, isomers (123) Naphthalene (52) Cumene (246)

* A: Mckee et al, B: UK-HSE 40/2000, C: ACGIH Unique TLV (mg/m3)

(3) 보정계수 적용

보정계수 적용은 PID 직독식장비의 정확도를 높일 수 있는 방법이지만, 작업장의 다양한 변수(PID 장비 제조사, PID 센서, 혼합물질의 종류, 혼합비율, 공정의 특성, 작업장의 환경 등)들이 존재하는 상황에서 하나의 보정계수를

제시하는 것은 현재 국내 실정에서 한계가 있어 보인다. 본 연구에서는 챔버 실험을 통해서 필드보정계수(SMCFs)를 구하였고, 상당 부분 정확도가 향상되는 것을 확인하였다. 하지만, 다양한 작업장 환경에서 적용이 될지는 향후 추가 연구가 필요해 보인다.

3) 사물인터넷 등과 접목

공단 미래전문기술원에서는 지속적으로 전자산업 평가를 위한 툴을 개발해 오고 있다. 그 중 사물인터넷(IoT) 기술을 접목하여 사업장의 상시 모니터링 시스템을 구축하기 위한 연구를 진행하였다(Ham et al, 2020). 그리고 모듈형 스마트 센서 세트 개발연구를 통해서 실시간으로 관리자가 현장의 상황을 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하였다(Han et al, 2021).

4) 직독식측정연구센터의 필요성 및 역할

전통적으로 직독식장비는 산업현장에서 근로자의 건강을 예방하기 위한 목적으로 사용되었지, 노출평가나 법 준수의 목적으로 사용되지 않았다. 그렇기 때문에 현재 시장에 유통되고 있는 장비는 대부분 이러한 수준을 알려주는데 초점을 맞춰왔다. 다른 목적으로는 직독식장비의 실시간 농도 데이터를 활용하여 작업장을 개선하는 목적으로도 사용되었다. 예비조사(screening)에 직독식장비를 활용할 경우에 초기 비용은 높으나, 측정 및 분석 비용 등 기타 부대비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 직독식장비의 가장 큰 장점은 피크 노출(peak exposure)을 실시간으로 알 수 있기 때문에 위기대응(emergency response) 목적으로도 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

초기에 목적(예비조사, 위기대응)은 달성하였으나, 작업장의 노출평가 및 법 준수를 위한 목적으로 사용하기 위해서는 센서성능평가센터의 신설이 필요해 보인다(Ha et al, 2020). PID 센서 또는 장비 제조사에서 실험을 통해서 제품에 대한 성능을 소비자에게 제시하고 있고, 개별 물질에 대한 보정계

수값을 제시하고 있으나, 대부분 사업장에서는 혼합물질을 사용하고 있고, 사업장의 특성에 따라 PID 직독식장비의 보정계수값이 달라질 수 있다는 특이점이 있다. 앞으로 직독식장비를 노출평가 또는 법 준수 장비로 활용하기 위해서는 센서성능평가센터를 활용하여 다양한 작업환경에 대한 실험실 연구와 현장 적용 연구를 바탕으로 PID 직독식장비를 활용한 작업장별 또는 공정별 노출평가 방법을 제시할 수 있을 것이다.

IV. 고 찰

.....

IV. 고찰

1. PID 직독식장비의 한계점

PID 직독식장비는 실시간 농도를 수분 또는 수초 단위로 확인할 수 있기 때문에 급성중독 물질 누출에 즉각적인 대응이 가능하다. 그리고 사용이 편리하고, 가격도 저렴하여 사업장에서 활용하기에도 용이하다. 하지만, 제조사에서는 단일물질에 대해서만 보정계수 값을 제시하고 있으며, 혼합물질에 대해서는 수식을 제공할 뿐 보정계수 값을 제공하지 않고 있다(RAE, 2005). 본 연구에서는 국내·외 문헌을 검토한 결과, 혼합 물질의 종류, 비율 등 다양한 요인으로 인해서 PID 직독식장비 결과값에 차이를 보였고, PID 직독식장비를 법적 장비로 활용하기에는 외부 환경 등 고려해야 하는 요인들이 많이 있었다. 그 요인으로서는 극한 환경(온도·습도)(Barsly et al, 1985., Drummond I, 2010., Coffey & Terri, 2010., LeBouf et al, 2013, LeBouf & Coffey, 2015., Amir HJ et al, 2021), 고농도 평가(Barsly et al, 1985., RAE, 2013), PID 센서의 오염(Longworth et al, 1999., LeBouf & Coffey, 2015), PID 직독식장비의 정확도 수준(D.A. DuBose et al, 1981., Coffey et al, 2009., Coy JD et al, 2000., Barsly et al, 1985., Précédés et al, 2004., Drummond I, 2010), 화학물질 간의 상호영향(Dina Siegel et al, 2019., RAE, 2022)이 있었다. 지금까지 직독식장비 센서 기술이 발전해온 것처럼 향후 이러한 직독식장비 센서의 한계점을 극복한 센서가 개발 된다면, 법적 장비로 활용될 가능성이 커질 것으로 판단된다.

2. PID 직독식장비의 활용 방안

PID 직독식장비는 증기·가스상 물질을 실시간으로 측정하여 사업장에서 즉각적인 대응을 할 수 있는 도구이다. PID 센서는 총휘발성유기화합물(TVOC) 평가 할 수 있기 때문에 혼합물질에 대한 평가가 가능하지만, 개별 물질에 대한 농도는 알 수 없고, 다만 제조사에서 제시하는 보정계수를 활용하여 개별 농도값을 계산식으로 대략 유추할 수는 있지만 정확하다고 보기는 어렵다. 최근에는 PID 센서와 FID 검출기를 결합하여 개별 물질 평가를 할 수 있는 직독식장비가 소개되고 있고, 휴대용으로 개인이 착용하여 사업장의 환경을 모니터링 할 수 있는 장비도 소개되고 있다.

직독식장비의 활용에 대한 인식체계가 전환되고 있었는데, 전통적인 직독식장비의 활용은 단지 예비조사의 목적(Siegel et al, 2019)으로 사용되었지만, 소음측정 및 일부 직독식장비는 법적 장비로 활용되고 있었다. 작업환경 측정 및 정도관리 등에 관한 고시(제2020-44호) 제25조(검지관방식의 측정)에서 검지관을 예비조사 목적, 검지관방식 외에 다른 측정방법이 없을 때, 발생하는 가스상 물질이 단일물질인 경우에 검지관을 사용할 수 있도록 하고 있다. 검지관 방식은 사용이 간편하고, 반응시간이 빨라서 맨홀, 밀폐 작업장 등에서 활용될 수 있는 장점이 있지만, 민감도와 특이도가 낮고, 해석이 주관적이며, 무엇보다 단일물질 측정에만 활용될 수 있다는 단점이 있었다. 하지만, PID 직독식장비의 경우, 혼합물에 대한 평가가 가능하고, 실시간 누적 데이터를 활용한 빅데이터 활용 등 검지관의 단점을 보완할 수 있을 것으로 본다. 또한, PID 직독식장비는 작업환경측정에 대한 예비조사, 화학물질 누출 확인 등의 목적으로 활용되고 있었으며, 최근에 산업안전보건공단 미래전문기술원에서는 사물인터넷을 활용하여 사업장 상시 모니터링 구축을 위한 연구를 진행하고 있었다(Ham et al, 2020).

미국 환경보호청(EPA)의 독성물질규제법(TSCA)에 의해 등록된 화학물질은 86,405종(2020년)으로 조사되었다(EPA, 2020). 2016년도 환경부 통계에 따

르면 2014년도에 비해 2016년도의 유통량이 12.4% 증가하였다고 보고되어 있고, 그 수도 16,874종으로 계속해서 증가 추세에 있었다. 이처럼 다양한 화학물질의 사용이 증가되는 시점에서 산업안전보건법의 작업환경측정 대상 유해인자의 개념 확장이 필요한 실정이다. 이런 관점에서 볼 때, 직독식장비의 활용은 필요한 시점으로 보이며, 해당 장비의 제한점을 수용하고, 적용할 수 있는 방안의 모색이 필요해 보인다.

본 연구와 문헌을 검토한 결과, PID 직독식장비에는 농도 수준에 대한 일관성 있는 농도값을 제시할 수 있었고, 일반적인 작업장 대기환경 수준에서는 PID 직독식장비의 활용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만, 현시점에서 해당 장비를 법적인 작업환경측정평가 방법으로 활용할 수는 없었다. 그 이유는 혼합물질 평가에서 낮은 정확도 수준인데, 이를 보완하기 위해서는 보정계수를 적용해야 하지만, PID 센서는 환경에 영향을 많이 받으므로 일률적인 보정계수를 구하기는 쉽지 않다. 본 연구는 챔버실험 연구로 혼합물질 4종에 대한 PID 직독식장비 평가에 현장 보정계수를 적용 시 정확도가 향상되는 결과를 확인하였지만, 실제 사업장에서 적용이 가능할지는 추가 연구가 필요해 보인다.

산업안전보건법상 작업환경측정기관의 장비기준(시행령 제95조)으로 작업환경측정 대상 유해인자 중 유기화합물 114종(시행규칙 제186조 제1항)을 분석할 수 있는 장비로 가스크로마토그래피(GC)로 규정하고 있으며, 김성호 등 (2021) 논문에 따르면, 국내 179개 기관 중 99% 이상이 불꽃이온화 검출기(FID)를 보유하고 있는 것으로 조사되었다. 대부분의 유기화합물을 FID로 분석할 수 있으나, 이황화탄소(CS_2) 경우, 불꽃광도검출기(FPD, flame photometric detector)로 분석을 해야만 한다. 반면에 PID 직독식장비는 300여종 이상의 화학물질을 측정할 수 있으며, 이황화탄소(CS_2) 또한 측정할 수 있다. 따라서 FID로 측정이 불가능한 물질에 대해서 PID 직독식장비를 활용할 수 있는 방안을 검토해야 할 필요성이 있다.

3. PID 직독식장비의 피크 노출(peak exposure) 활용

PID 센서의 장점인 물질에 대한 빠른 반응속도 및 측정값과 농도 간의 높은 상관관계를 활용 할 수 있는 피크 노출(peak exposure)을 작업환경측정 모니터링 방법으로 제시한 바 있다.

1) 피크 노출(peak exposure, 규칙 3/5): 모든 물질

(1) 규칙 3

PID 직독식장비로 15분 동안의 연속 측정하여 평균농도값을 계산하여, 해당 물질의 TWA의 3배 초과된 값이 4회를 초과할 경우에 즉시 작업을 중단하게 한다.

(2) 규칙 5

PID 직독식장비로 15분 동안의 연속 측정하여 평균농도값을 계산하여, 해당 물질의 TWA의 5배 초과 시, 즉시 작업을 중단하고 개선 대책을 마련해야 한다.

(3) TWA

PID 직독식장비로 8시간 동안의 연속 측정하여 평균농도값을 계산하여, 해당 물질의 TWA 기준을 초과 시, 즉시 작업을 중단하고, 개선 대책을 마련해야 한다.

2) STEL/C 존재하는 단일 물질

PID 직독식장비로 15분 동안의 연속 측정하여 평균농도값을 계산하여, 해당 물질의 STEL 초과 여부를 판단한다. 8시간 근무 시간 중 1회 STEL 초과

시, 작업은 즉시 중단되어야 한다. 만약, PID 평균농도값이 STEL과 TWA 사이에 있을 경우, 1회 노출 지속시간이 15분 미만이어야 하고, 이러한 상태가 1일 4회 이하로 발생하여야 하며, 각 노출의 간격은 60분 이상이라면, 작업을 계속 할 수 있다(고용노동부 고시 제2020-48호, 2020).

3) STEL/C 없는 단일 물질(노출상한치(excursion limit, EL) 적용)

PID 직독식장비로 30분 동안의 연속 측정하여 평균농도값을 계산하여, 해당 물질이 TWA 3배 초과 시, 작업을 즉시 중단하도록 하고, TWA 5배 초과 시에는 작업을 즉시 중단 할 뿐만 아니라, 노출 저감 대책을 함께 수립해야 한다.

4) 그 밖에 적용 방안

PID 직독식장비로 30분 동안의 연속 측정하여 평균농도값을 계산하여 누적 평균값을 구한다. 이 값은 사업장의 환경에 따라 달라질 수 있으며, 이 농도값을 사업장의 고유의 기준값으로 정한 후, 사업장의 특성에 따라 초과 배수 또는 통계기법 활용(예: 95% 신뢰구간에서 상위 25%)하여 초과 여부를 결정한다. 이를 초과할 경우, 작업을 중단하거나 개선 대책을 마련하도록 한다(하권철, 2020 보고서의 내용을 일부 활용).

다음으로는 허용 증가율을 적용하는 방법인데, PID 직독식장비로 30분 동안의 연속 측정하여 평균농도값을 계산한 후, 다음 30분 동안의 평균농도값이 직전 농도값과의 증가율을 계산하여 허용 증가율을 적용하는 방법으로 이를 초과할 경우, 작업을 중단하거나 개선 대책을 마련하도록 한다(하권철, 2020 보고서의 내용을 일부 활용).

4. 직독식측정연구센터의 필요성 및 역할

직독식장비를 활용한 작업환경측정 방법 및 센서 종류는 근로자의 건강 및 안전을 보호하기 위해서 향후 여러 분야(제조업, 건설업, 석유화학 등)에서 활용될 것으로 전망한다. 특히 안전이 확보되어 있지 않는 사업장에서 알람을 통해 작업을 하는 근로자에게 즉시 위험을 알리므로 사고를 예방할 수 있다. 이처럼 사업장의 농도를 모니터링 하여 즉각적인 대응 방안 수립이 가능한 방법으로 기존의 시간 소모가 많은 작업환경측정방법을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

미국 NIOSH에서는 2008년도에 직독식장비 및 센서 기술에 관한 워크숍을 하였고, 2014년도에는 관련 센터(NIOSH Center for Direct Reading and Sensor Technologies, NCDRST)를 건립하였다. 센터에서 수행하는 업무로는 직독식장비의 성능 특성 및 센서의 검증, 관련 지침을 개발, 직독식장비 교육 방법 개발 및 업무 수행을 위한 내·외적인 협력관계를 유지하는 것입니다. 하권철 등 2020년 연구에서도 “센서성능평가센터” 건립을 제안한 바 있었고, 센서에 대한 현장·실험실 평가를 제안하였다. 본 연구에서는 “직독식측정연구센터”로 센서의 성능을 평가하는 것이 아니라, 시중에서 유통되고 있는 직독식장비의 성능을 평가하고, 다양한 요인(온·습도조건, 혼합물의 종류·비율 등)에 따른 적용 가능한 작업환경평가 방법의 마련을 주로 하고, 직독식장비 사용자 교육, 내·외부 협력관계 유지 등의 역할도 함께 수행할 것은 제안하였다.

환경부에서는 환경 분야 시험·검사 등에 관한 법률(약칭: 환경시험검사법) 제9조의 3에 따라 간이측정기(형식승인이나 예비형식승인의 대상이 되지 아니하는 측정기기 중 센서형 측정기기 등)에 대한 성능인증을 받도록 하고 있었고, 미세먼지 간이측정기는 별도의 법령(미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법)에 따라 성능인증을 받도록 하고 있었다. 또한 간이측정기 성능인증 검사기관을 도입하여, 대기, 실내공기질, 수질, 먹는물, 소음 5개 분야의 간이측

정기에 대한 성능을 인증하는 업무를 하고 있었지만, 아직 환경부에서도 PID 센서에 대한 인증 제도는 미비한 실정이다. 향후 PID 센서에 대한 성능인증 제도가 필요해 보이며, 환경부의 성능인증 검사기관과 협업하여 직독식측정 연구센터를 운영할 필요가 있다고 본다.

5. 챔버 실험: 혼합물질의 이론값과 실제값

챔버 실험을 위해 제조한 혼합물질(아세톤, IPA, 톨루엔, m-자일렌)의 이론 농도를 구하기 위해서 혼합물질 주입 유량과 공기 유량을 계산하였다. 그 결과, 두 농도간의 상관 관계(R^2)는 0.9996으로 높은 상관성을 보였다(표 IV-1), 직독식장비인 MM No.1 장비와 활성탄 매체를 활용하여 챔버 내의 혼합물질이 균질하게 분포되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

〈표 IV-1〉 챔버 내의 혼합물질의 이론 농도와 기준값과의 비교

단위: ppm

레벨	A	B	C	D
이론 농도	14	162	323	862
기준값*	10.4	155.3	300.8	774.9
비교 비율**	0.74	0.96	0.93	0.90

* 활성탄 매체 평균

** 비교 비율 = $\frac{\text{활성탄 매체 평균}}{\text{이론 농도}}$

낮은 농도에서 비교 비율의 차이가 나는 이유는 혼합물질을 주입하는 실리지 유량을 0.001 mL/min으로 극미량 주입하였기 때문에 이에 따른 오차가

발생했을 것으로 보이며, 공기 유량을 측정하는 기기가 로타미터(2차 표준)를 사용하여 정교한 공기 유량을 측정하기가 어려웠다고 사료된다.

챔버의 혼합물질의 모니터링 목적으로 사용된 MM No.1 장비는 공기 중에 존재하는 탄화수소(hydrocarbon) 계열 등을 측정 할 수 있는 장비이며, 본 연구에서는 대기 중의 공기를 공기압축기를 통해서 챔버 내로 유입시켰다. 따라서 공기 중에 존재하는 탄화수소(hydrocarbon) 계열의 물질이 측정되었기 때문에 농도 값이 0 ppm으로 떨어지지 않았다.

활성탄 매체를 사용하여 배경농도를 측정한 결과, MM No.1 장비의 농도가 2.43~2.93 ppm으로 표시 되더라도 활성탄 매체의 농도는 혼합물질 4종 모두 불검출로 나타났기 때문에 챔버 배경농도는 문제가 없다고 판단하였다.

6. 챔버 실험: 혼합물질 비율의 차이

챔버 실험 대상 화학물질은 4종(아세톤, 이소프로필 알콜, 톨루엔, m-자일렌)으로 혼합 비율을 1:1:1:1로 하여 혼합물을 제조하였으며, 혼합물은 케톤류 1종, 알콜류 1종, 방향족 탄화수소 2종으로 분류할 수 있다. 이에 따라 개별 화학물질에 따른 물리·화학적 특성이 다름에 따라 끓는점, 증기 압력, 분해 온도 등의 차이로 혼합물의 비율과 분석된 혼합물의 비율의 차이를 보였다 <표 III-42>. NIOSH(2012) 보고서에서는 방향족탄화수소가 혼합물에 존재할 경우 PID의 이온화가 증대된다는 내용이 있었다.

제조사에서 제공하는 혼합물에 대한 보정계수 산출식으로 측정값을 보정한 결과, 정확도는 개선되지 않는 결과를 보였으며, 실측값에 대한 혼합 비율을 적용했을 경우도 마찬가지였다. 반면, 필드 보정계수를 각 수준별 농도값에 적용했을 경우, 정확도가 개선되는 결과를 보였다. 따라서, 본 연구에서는 혼합물질에 대해서 PID 직독식장비로 평가할 때, 제조사 보정계수 보다는 필드 보정계수가 정확도를 높일 수 있는 방법으로 제시할 수 있었다.

7. 미래전문기술원와의 차별점

우리 연구원에서 수행된 본 연구 과제는 화학물질로부터 근로자의 노출을 저감시키기 위한 작업환경 관리 방안으로 PID 직독식장비를 활용할 수 있는지를 찾아보고자 하였다. 또한 PID 직독식장비의 성능 평가 방법, PID 직독식장비의 개발 방향, 해당 장비의 제한점 및 적용 시 필요한 절차 등 PID 직독식장비를 활용하기 위해서 필요한 제반 사항에 대해서 관련 내용들을 제시하고자 하였다. 반면, 미래전문기술원에서 수행한 연구는 전자산업에 대한 화학물질 감시 체계를 구축하기 위한 스마트 센서 세트 개발(2020년), 모듈형 스마트 센서 세트를 사물인터넷에 적용하기 위한 방안 연구(2021년) 등 실제 사업장에 적용할 수 있는 모니터링 체계를 구축하는 실제적인 연구로 볼 수 있다. 예를 들어 본 연구에서 제안하고 있는 작업자에 대한 노출평가 방법으로 피크 노출(peak exposure) 기준을 모듈형 스마트 센서 세트에 적용하여 작업장의 화학물질을 모니터링 하는 방법을 개선할 수 있다. 따라서 우리 연구원에서 수행한 연구를 기반으로 미래전문기술원에서 수행하는 실제적인 연구에 시너지 효과를 낼 수 있을 것으로 본다.

V. 결 론



V. 결론

PID 직독식장비는 사용이 간편하고, 농도 수준을 즉각적으로 파악하여 관리 방안을 마련하기에 용이한 도구였지만, 극한 온·습도 환경, 고농도 평가, 센서의 오염, 작업의 특성(혼합물 종류, 비율, 공정 등)에 따른 정확도 저하, 화학물질 간의 상호영향(cross-sensitivity) 등 PID 직독식장비를 법적 장비로 활용하여 작업환경관리에 적용하는 것은 아직 제한점이 있었다. 그리고 PID 직독식장비를 활용하기 위해서는 장비의 이해, 적절한 사용, 농도 표시/알람의 의미, 수리, 관리, 적절한 장비의 선택, 데이터 해석 등 충분한 지식을 갖춘 사람에 의해서 취급해야 하므로 전문 인력의 양성이 필요해 보인다.

PID 장비를 법적 장비로 활용하기에는 제한점이 있지만, 작업환경 모니터링 관리 또는 오염원 관리를 위한 도구로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이 때 피크 노출(peak exposure) 기준을 적용할 수 있는데, 작업장에서 사용하는 화학물질 등 작업장 환경에 따라 적합한 기준을 선정해야 하며, 측정 전략 수립절차에 따라 PID 장비 적용 여부를 판단해야 한다. 혼합물질 평가에 있어서 PID 직독식장비의 한계점인 정확도를 극복하는 것이 중요한 부분인데, 본 연구의 챔버 연구를 통해서는 필드보정계수를 활용할 경우에 정확도 수준이 향상되는 결과를 보였다. 하지만, 본 연구는 환경 요인(온·습도)을 통제하지 않았기 때문에 향후 추가 연구가 필요해 보인다.

PID 방식의 직독식장비를 작업장의 작업환경관리에 활용하기 위해서는 전문 인력이 필요하다는 점과 PID 직독식장비를 활용하기 위해서는 실험 연구를 통한 측정방법 개발이 필요해 보인다. 본 연구에서는 근로자의 건강과 안전을 지키기 위하여 직독식장비의 활용이 지속적으로 요구되고 있는 시점에서 직독식측정연구센터의 신설하여 직독식장비를 활용한 작업환경 모니터링 방법 개발, 교육 프로토콜 개발하여 인력을 양성하고, 대내·외 협력관계 유지시킬 수 있을 것을 본다.

참고문헌

- 고용노동부. 산업안전보건법. 고용노동부. 2021.
- 고용노동부. 2020년도 작업환경측정 실시 결과. 고용노동부. 2021.
- 고용노동부. 작업환경측정 및 정도관리 등에 관한 고시(고용노동부 고시 제 2020-44호). 고용노동부. 2020.
- 고용노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부 고시 제2020-48호). 고용노동부. 2020.
- 김성호 등. 작업환경측정시료의 분석수탁기관과 자율정도관리 참여와의 연관성. 한국산업보건학회지. 2021: 31(2) 111-118
- 김욱 등. 사물인터넷 기술을 이용한 가스상 물질 측정용 스마트센서 개발과 향후과제. 한국산업보건학회지. 2022: 32(1) 78-88.
- 여진희, 최광민. 직독식 측정기 PID와 능동식 시료채취기에 의한 GC-FID 정량 분석법의 VOCs 농도 비교 연구. 한국산업보건학회지. 2016:26(3):301-306.
- 이광묵. 가스와 증기의 측정을 위한 직독식 장비. 대한산업보건협회. 1992:56:20-23.
- 이광용 등. 확산식 시료채취기에서 기류제어 막 공극 크기에 따른 시료채취율의 변화특성에 관한 연구. 한국산업위생학회지. 2005: 14(2): 125-133
- 이윤근 등. 포괄적 작업환경 평가 시범사업 연구(II). 안전보건공단 산업안전 보건연구원. 2021.
- 정송이, 김정원. 직독식 측정기를 활용한 네일 관리 시 방출되는 휘발성 유기

- 화합물(VOCs)분석. 한국인체미용예술학회지. 2022: 23(1): 47-58.
- 하권철 등. 직독식장치와 센서 기술을 이용한 작업환경 모니터링 현황과 전망. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2020.
- 한문일 등. 작업장 화학물질 감지를 위한 모듈형 스마트 센서세트 개발 연구. 안전보건공단 미래전문기술원. 2021.
- 함승현 등. 전자산업 화학물질감지 스마트 센서세트 개발·적용. 안전보건공단 미래전문기술원. 2020.
- ACGIH. TLVs and BELs. ACGIH. 2021.
- AIHA. Reporting specifications for electronic real time gas and vapor detection equipment (Fact Sheet). AIHA. 2022
- AIHA. Technical framework, guidance on use of direct-reading instruments. AIHA. 2019.
- Amir Hossein Khoshakhlagh et al. Evaluation of direct reading photoionization detector performance under various operational parameters. HEMJ. 2021:8(2):123-128.
- ANSI/ISA. Performance requirements for toxic gas detectors. ANSI/ISA-92.00.01-2010.
- Christopher Coffey et al. Effect of calibration and environmental condition on the performance of direct-reading organic vapor monitors. J Occup Environ Hyg. 2012:9(11):670-680.
- Christopher Coffey, Terri A. Pearce. Direct-reading methods for workplace air monitoring. J Chem Health Saf. 2010.

- Christopher Coffey et al. Measurement Capability of Field Portable Organic Vapor Monitoring Instruments Under Different Experimental Conditions. J Occup Environ Hyg. 2008;6:1-8.
- D.A. DuBose et al. Response of portable VOC analyzers to chemical mixtures. EPA. 1981.
- Detectors Against Chemical Warfare Agents: Summary Report. ANSI. 1999.
- Département Ingénierie des Procédés et al. Determination of Short-term Exposure with a Direct Reading Photoionization Detector. Ann Occup Hyg. 2004;48(1):75-84.
- Dina Siegel et al. A practical guide for use of real time detection systems for worker protection and compliance with occupational exposure limits. WHITE PAPER. 2019.
- EPA. Toxic substances control act(TSCA). EPA. 2022.
- Ian Drummond. On-the-Fly Calibration of Direct Reading Photoionization Detectors. J Am Ind Hyg Assoc. 1997;58:820-822.
- James D. Coy et al. Field Evaluation of a Portable Photoionization Detector for Assessing Exposure to Solvent Mixtures. J Am Ind Hyg Assoc. 2000;61:268-274.
- Jhy-charm Soo et al. Evaluation of a portable gas chromatograph with photoionization detector under variations of VOC concentration, temperature, and relative humidity. J Occup Environ Hyg. 2019;15(4):351-360.

- Joseph B. Barsky et al. Simultaneous multi-instrumental monitoring of vapors in sewer headspaces by several direct-reading instruments. Environ Res. 1986;39:307-320.
- Joseph B. Barsky et al. An Evaluation of the Response of Some Portable, Direct-Reading 10.2 eV and 11.8 eV Photoionization Detectors, and a Flame Ionization Gas Chromatograph for Organic Vapors in High Humidity Atmospheres. J Am Ind Hyg Assoc. 1985;46(1):9-14.
- Masoud Rismanchian et al. Evaluation of photoionization detector performance in photocatalytic studies for removing volatile organic compounds. Int J Env Health Eng. 2012;1(5):1-7.
- NIOSH. Components for evaluation of direct-reading monitors for gases and vapors. NIOSH, 2012.
- NIOSH. Hydrocarbons, aromatic (NMAM 1501, fourth edition). NIOSH. 2003;3:4-7.
- P.Poirot et al. Determination of Short-term Exposure with a DirectReading Photoionization Detector. Ann Occup Hyg. 2004;1:75-84.
- RAE. Technical Note TN-114(Sensor specifications and cross-sensitivities). RAE. 2022.
- RAE. The PID handbook. RAE. 2013.
- RAE. Technical Note TN-106(A guideline for PID instrument response). RAE. 2005.

- Ryan F. LeBouf, Christopher C. Coffey. Effect of interferences on the performance of direct-reading organic vapor monitors. J Air Waste Manag Assoc. 2015;65(3):261-269.
- Ryan F. LeBouf et al. Effect of calibration environment on the performance of direct-reading organic vapor monitors. J Air Waste Manag Assoc. 2013;63(5):528-533.
- Song YK et al. Press release for chemical substance distribution survey in 2016. Ministry of environment. 2018.

Abstract

Strategies for Working Environment Management by Direct Reading Photoionization Monitor

Objectives: With increasing sorts and usage of chemicals in the workplace, it is time to prepare work environment management plans to protect workers' health. With the development of direct-reading monitors (DRMs), it has been possible to monitor hazardous chemicals continuously. Thus, it seems necessary for workplace to prepare immediate response to exposure to chemicals such as acute chemicals and chemicals of unknown toxicity. The purpose of this study was to find a way to monitor hazardous chemicals using PID DRMs for prevention purposes in the workplace.

Methods: Basic data and research related to PID DRMs were reviewed and characteristics of commercially available equipment were identified. Concentrations of toluene, isopropyl alcohol, acetone, and m-xylene mixture in the chamber were set to be 14 ppm, 162 ppm, 323 ppm, and 862 ppm, respectively. PID concentration and charcoal concentration (reference value) were compared for evaluating the accuracy. We tried to suggest a method to improve the level of accuracy by adjusting PID concentration with a correction factor. A limitation of this chamber study was that environmental factors were not controlled (room temperature: 26°C, humidity: 67%).

Results: According to the literature, PID DRMs have limitations for use as legal equipment due to effects of temperature and humidity, high concenin accuracy, chemical interaction, and so on. Although PID DRMs are easy to use, they require specialized personnel who understand DRMs, their proper usage, monitor indications and alarms, troubleshooting, management, selection, and data interpretation.

According to the chamber study, only 1 (9%) out of 11 met the accuracy criteria. Most result values were underestimated compared to reference values. As a result of applying the correction factor of the manufacturer to the PID concentration, the accuracy was not satisfied. However, when the field correction factor was applied, it was 100% satisfied.

Conclusion: PID DRMs seem to be suitable as monitoring equipment using peak exposure, although they require specialized personal. For the evaluation of mixture with PID DRMs, it seems appropriate to use a correction factor. For that, field study and chamber studies under various environmental conditions are needed.

Keywords: PID, DRMs, chamber, mixture, accuracy

부록

직독식장비 제조사 중 PID 방식의 장비를 유통하는 7개소를 조사하여 제조사별로 정리하였는데, 본 연구에서 조사한 장비 이외에도 시중에 유통되는 해당 장비는 더 있을 수 있다는 점은 참고 바랍니다. 또한 장비에 대한 광고 등의 목적으로 활용될 수 있기 때문에 제조사와 모델은 알파벳으로 처리하였음을 양해 바랍니다.

1) A 제조사, A 모델

〈표 부록-1〉 AA 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	118x60x30 mm
무게	235 g
센서	10.6 eV (9.8 eV 가능)
반응시간(T90)	15초 이내
배터리	충전식 Li-ion 배터리
운전시간	12시간 이상, 충전시간: 4시간 이내
표시	실시간 농도, STEL, TWA, 피크값 등
측정	내부 팬(internal fan)
알람모드	소리(30 cm에서 95dB), 진동, 시각(붉은색 LEDs), man down alarm 탑재
데이터 로깅	3개월 연속 로깅 간격(1~3,600초 가능)
운영 온도	-20~55℃
습도	0~95%
인증	EMC directive: 2004/108/EC/ R&TTE directive: 1999/5/EC.ATEX directive: 94/9/EC

2) A 제조사, B 모델

〈표 부록-2〉 AB 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	193x96.5x66 mm
무게	880 g
센서	PID 센서 (EC, LEL, NDIR, CO ₂ 센서 부착 가능)
반응시간(T90)	-*
배터리	충전식 Li-ion 배터리
운전시간	12시간 이상, 충전시간: 6시간 이내
표시	실시간 농도, STEL, TWA, 피크값 등
측정	내장 펌프(built-in pump), 250 cc/min, low-flow 시에 자동 꺼짐 기능 탑재
알람모드	소리(30 cm에서 95dB), 진동, 시각(붉은색 LEDs), man down alarm 탑재
데이터 로깅	6개월 연속(1분 간격, 5개 센서 탑재 시)
운영 온도	-20~55℃
습도	0~95%
인증	IP-65 인증, MIL-STD-810G and 461F compliant LEL CSA C22.2 No. 152; ISA-12.13.01

* 반응시간(T90)은 센서 제조사 특성표에 나타나 있음

3) A 제조사, C 모델

〈표 부록-3〉 AC 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	255x76x64 mm
무게	738 g
센서	10.6 eV (9.8 eV 가능)
반응시간(T90)	- *
배터리	충전식 Li-ion 배터리
운전시간	16시간 이상
표시	실시간 농도, STEL, TWA, 피크값 등
측정	내장 펌프, 500 cc/min, low-flow 시에 자동 꺼짐 기능 탑재
알람모드	소리(30 cm에서 95dB), 진동(x), 시각(붉은색 LEDs), man down alarm 탑재
데이터 로깅	6개월 연속(1분 간격)
운영 온도	-20~50℃
습도	0~95%
인증	IP-65, IP-67 인증, UL, cUL (미국, 캐나다), ATEX Ex II 2GEx ia IIC/IIB T4 (유럽)

* 반응시간(T90)은 센서 제조사 특성표에 나타나 있음

4) A 제조사, D 모델

〈표 부록-4〉 AD 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	255x76x64 mm
무게	738 g
센서	10.6 eV
반응시간(T90)	- *
배터리	Alkaline battery adapter
운전시간	12시간 이상
표시	실시간 농도 등
측정	내장 펌프, 400 cc/min, low-flow 시에 자동 꺼짐 기능 탑재
알람모드	소리(30 cm에서 95dB), 진동(x), 시각(붉은색 LEDs), man down alarm 탑재
데이터 로깅	-
운영 온도	-20~50℃
습도	0~95%
인증	highly resistant to EMI/RFI, EMC directive: 89/336/EEC, 방폭인증 없음

* 반응시간(T90)은 센서 제조사 특성표에 나타나 있음

5) B 제조사, A 모델

〈표 부록-5〉 BA 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	179x77x42 mm
무게	550 g
센서	PID 센서 (IR, EC 센서 탑재 가능)
배터리	충전식 Li-ion 배터리
운전시간	평균 42시간(PID 센서 단독)
표시	실시간 농도 등
측정	확산 방식 (내부 펌프, 선택 가능)
알람모드	소리(30 cm에서 100dB), 진동, 시각(붉은색 LEDs)
데이터 로깅	약 400시간
운영 온도	-20~50℃
습도	10~90%
인증	IP-68 인증, 방폭 인증(ATEX 및 IECEX, EAC, cCSAus 등)

6) B 제조사, B 모델

〈표 부록-6〉 BB 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	132x281x56 mm
무게	880 g
센서	PID+GC 검출기 탑재
운전시간)	8시간
표시	실시간 농도 등
운영 온도	-10~35℃
습도	10~95%
인증	IP-54 인증, 방폭 인증 (ATEX 및 IECEx, EAC, cCSAus, CE 마크)

7) C 제조사, A 모델

〈표 부록-7〉 CA 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기(프로브)	50(직경) x 300 mm
무게	700 g
센서	10.6 eV 램프 (측정 범위: 0.02~20 ppm)
운영 온도	-10~70℃
습도	0~100% (정확도: $\pm 2\%$ < 80%, $\pm 3\%$ > 80%)

8) C 제조사, B 모델

〈표 부록-8〉 CB 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	프로브(83x295x55 mm) 본체(93x80x93 mm)
무게	프로브(460 g) 본체(180 g)
센서	PID 센서 및 25개 이상 (최대 동시 8개 가능)
배터리	충전식 Li-ion 배터리
운전시간	12시간 이상, 충전시간: 3시간
운영 온도	-10~50℃
습도	0~100%

9) D 제조사, A 모델

〈표 부록-9〉 DA 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	200x68x52 mm
무게	400 g
센서	10.6 eV (선택적 10.0 eV, 11.7 eV 램프)
배터리	Alkaline battery adapter
운전시간	12시간 이상
표시	실시간 농도 등
측정	내장 펌프, 400 cc/min, low-flow 시에 자동 꺼짐 기능 탑재
알람모드	소리(30 cm에서 95dB), 진동(x), 시각(붉은색 LEDs) man down alarm 탑재
운영 온도	-20~50℃
습도	0~95%
인증	IP-65 인증, highly resistant to EMI/RFI, EMC directive: 89/336/EEC, 방폭 인증 없음

10) D 제조사, B 모델

〈표 부록-10〉 DB 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	240 x 130 x 150 mm
무게	1700 g
센서	PID 센서
반응시간(T90)	30초 (90% 농도수준)
운전시간	18시간 이상
측정	펌프 타입 (유량: 0.9 L/min)
운영 온도	-20~50℃
습도	0~95%
알람모드	TWA, STEL 알람 설정 가능(30 cm: 95dB, LED 동시)
인증	IP-64

11) E 제조사, A 모델

〈표 부록-11〉 EA 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	169.9 x 89.7 x 51.4 mm
무게	450 g
센서	PID 센서
배터리	충전식* 니켈 이온 배터리 * 충전시간: 6시간 이내
운전시간	8시간 이상
표시	실시간 농도
측정	내장 펌프
알람모드	LED 불빛, 청력* 및 진동 * 30 cm에서 95 dB 소음 수준
운영 온도	-20~50℃
습도	15~90%
인증	IP 65

12) F 제조사, A 모델

〈표 부록-12〉 FA 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	292 x 229 x 102 mm
무게	4,173 g
센서	FID 방식 (옵션: PID 방식 가능)
반응시간(T90)	3.5초(90% 농도* 수준 도달)
배터리	최소 10시간 (완충까지 10시간 이내)
운영 온도	-10~45℃
습도	15~95%
측정	1 L/min [정확도: $\pm 20\%$ 또는 ± 0.5 ppm(0.5~500 ppm)]

13) F 제조사, B 모델

〈표 부록-13〉 FB 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	343 x 262 x 81 mm
무게	5,800 g
센서	PID 또는 FID 방식 선택 가능 0.5~500 ppm (이소브틸렌)
반응시간(T90)	3.5초
배터리	충전식 니켈 카드뮴 배터리
운전시간	8시간
표시	실시간 농도
측정	1 L/min [정확도: $\pm 25\%$ 또는 ± 2.5 ppm(0.5~500 ppm)]

14) G 제조사, A 모델

〈표 부록-14〉 GA 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	228.6 x 76.2 x 107.9 mm
무게	860 g
센서	PID 방식 (10.6 eV, 10.0 eV, 11.7 eV 가능)
반응시간(T90)	3초 이내 (90% 농도수준 도달)
측정	300 mL/min
알람모드	85 dB 소리로 알람
운영 온도	0~50℃
습도	0~95%

15) G 제조사, B 모델

〈표 부록-15〉 GB 모델 직독식장비 특성표

구성	세부내용
크기	254 x 76 x 50 mm
무게	800 g
센서	PID 방식 (10.6 eV 램프)
반응시간(T90)	3초 이내 (90% 농도수준 도달)
측정	300 mL/min
알람모드	95 dB 소리로 알람
운영 온도	0~40℃
습도	0~100%

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 김성호 (연구위원, 직업환경연구실)

연구원 : 박해동 (연구위원, 직업환경연구실)

연구원 : 황은송 (연구위원, 직업환경연구실)

연구기간

2022. 01. 01. ~ 2022. 11. 30.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

**직독식장비의 활용을 통한 작업환경관리방안(Ⅰ)
(PID 센서를 이용한 유기화합물 평가를 중심으로)
(2022-산업안전보건연구원-782)**

발 행 일 : 2022년 11월 30일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 직업환경연구실 연구위원 김성호

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전 화 : 052-703-0892

팩 스 : 052-703-0347

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-92782-31-7