

연구보고서

국내 보급형 수동식 시료채취기 개발 연구(I)

박 정 근·박승현·조현민·장미연

요 약 문

연구기간

2019년 01월 ~ 2019년 11월

핵심 단어

시험챔버, 수동식 시료채취기, 유기화합물, 특허

연구과제명

국내 보급형 수동식 시료채취기 개발 연구(0)

1. 연구 배경 및 목적

수동식 시료채취 방법(Passive sampling methods)은 유기화합물 측정을 위해 국내·외에서 널리 이용되고 있고 측정방법의 신뢰성이 향상되면서 사용량이 증가되고 있으나 시료채취기의 가격이 비싸 유기화합물 측정 업무의 효율성 및 제한점에 대해 논란이 지속되어 왔다.

본 연구의 목적은 중장기적 측면에서 3년간 연구를 거쳐 가격이 저렴하면서 측정방법의 신뢰성이 높은 국내 보급형 수동식 시료채취기를 개발·보급하여 국내 유기화합물 측정 업무의 효율성을 높이고자 하였으며, 단기적(1차년)으로는 수동식 시료채취기 성능을 시험하기 위한 시험챔버를 새롭게 구축하고자 하였다.

2. 주요 연구내용

1) 전국 유기화합물 제조 및 취급 사업장 현황

2014년 전국 작업환경실태조사 결과에 의하면 조사대상 사업장 126,846개소 중 유기화합물 제조 사업장은 64개소, 유기화합물 취급 사업장은 26,627개소이었다.

2) 유기화합물 관련 업무상질병자 현황

최근 3년간(2015-2017년) 우리나라 산업재해에서 유기화합물과 관련된 업

무상질병 노동자는 2015년 21명, 2016년 11명, 2017년 36명이었으며, 업무상질병 노동자 중 사망자와 이환자 비율이 연도에 따라 다르나 3년간 전체 노동자 68명 중 질병사망자 비율은 47%로 나타났다.

3) 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템의 구축

시험챔버 시스템의 구축은 연구계획 수립, 시스템 구축계획 수립, 전문업체 선정 및 계약, 시스템 설계, 개별 장치 제작, 시스템 설치, 시스템 성능시험 과정으로 이루어졌다. 연구계획은 산업안전보건 연구업무 관련 내부 규정에서 수립하였고, 시스템 구축계획 수립, 전문업체의 선정 및 계약은 산업안전보건 연구업무 내규를 준용하면서 공공기관 계약 관련 규정에 따라 진행하였다. 시험챔버 시스템의 설계부터 시스템 성능시험 과정은 외부 전문업체에게 위탁하였다. 시스템의 주요 구성요소는 유기용제 발생장치, 항온습습기, 시험챔버, 배기장치, 그리고 제어프로그램이다. 시스템은 멀티가스 모니터를 통해 시험챔버를 통과하는 화학물질의 농도를 실시간으로 파악할 수 있다. 실시간 모니터링이 가능한 유기화합물은 7가지(벤젠, 부틸 아세테이트, 디클로로 메탄, 에틸 벤젠, 메틸에틸케톤, 메틸이소부틸케톤, 메타-크실렌)이며, 본 시험챔버를 이용하여 시료채취기의 성능을 평가하고자 할 경우 시험에 사용될 수 있는 유기화합물은 이들 7가지 중에서 선정하여야 한다. 본 연구는 1차년도 과제로서 수동식 시료채취기 평가용 시험챔버 시스템의 구축이 핵심 사항이었다. 설치업체는 시스템 구축 후 시스템 성능시험을 실시하였으며, 시스템 성능시험은 온·습도 시험, 풍속 균일도, 유기화합물 농도 균일도, 제어 프로그램 성능 시험이었다, 시험조건에 따른 시험결과는 적정 또는 정상인 것으로 나타났다.

4) 수동식 시료채취기 개발을 위한 기초 및 특허 자료 조사

국내·외에서 보편적으로 유통되어 사용되고 있는 수동식 시료채취기는 제조사, 모델마다 다르나 가격은 15,000 - 180,000원, 시료채취율 4 - 80

mL/min, 크기와 재질은 여러 가지 형태인 것으로 나타났다. 수동식 시료채취기의 특허 자료 총19개(국외 16개, 국내 3개)를 확보하였고, 일부 자료는 세부적으로 검토한 결과를 요약하여 제시하였다. 수동식 시료채취기 개발 및 보급을 위한 중장기적 가이드도 제시하였다. 2차년도 과제는 시료채취기의 시제품에 대해 시험챔버를 이용하여 실시하는 성능시험 진행이 필요하다. 성능시험은 유기화합물중 일부를 선정하여 탈착효율, 시료채취율 및 시료채취기 용량, 저장안정성, 검출한계, 신뢰정량한계, 분석정밀성 및 재현성 등 항목이 포함된다. 시험챔버 시스템에 대한 특허출원 신청이 진행된다. 3차년도 과제는 시험챔버를 이용한 성능시험 범위와 내용의 확대가 필요하다. 또한, 개발되는 수동식 시료채취기의 정밀도 및 정확도 평가와 함께 국내 안전보건 분야에서 수동식 시료채취기의 수요 정도, 시장 가격 등 실태를 조사하면서 수동식 시료채취기 개발의 비용-효과 분석, 생산인프라 구축의 타당성 평가 등이 필요하다.

3. 연구 활용방안

- 구축된 시험챔버는 신규 개발 단계에 있거나 개발된 수동식 시료채취기의 성능시험에 사용
- 기존 시료채취기 또는 관련 측정장비에 대해 온도·습도·기류 등 작업환경 조건별 성능평가에 활용
- 다수의 수동식 시료채취기 성능 비교, 정도관리 시료 조제, 작업환경측정분석 방법 연구 등에 활용

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 선임연구위원 박정근
 - ☎ : 052) 703. 0882
 - E-mail : jkpark@kosha.or.kr

차례

I. 서론	1
1. 연구의 배경 및 필요성	1
2. 선행 연구	2
3. 연구의 목적	11
II. 연구방법	12
1. 내용 및 범위	12
2. 연구방법	13
III. 연구결과	24
1. 전국 유기화합물 제조 및 취급 사업장 현황	24
2. 유기화합물 관련 업무상질병자 현황	26
3. 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템의 구축	29
4. 수동식 시료채취기 개발을 위한 기초 및 특허 조사	44
IV. 고찰 및 요약	64
1. 일반사항	64
2. 종합요약	66

참고문헌	68
영문초록	70
부 록	73
1. NIOSH 프로토콜 요약	74
2. 과업요청서: 수동식 시료채취기 시험챔버 사양서	79
3. 시험챔버 시스템 설계사양 조건 결정을 위한 전산유체역학 분석 자료(예)	86
4. 2015-2017년 업무상 질병 현황자료 분석 결과	94
5. 시험챔버 시스템 성능시험 결과	97
6. 시료채취기 시험챔버 시스템 사용자 매뉴얼	101

차례

〈표 II-1〉 국산 보급형 수동식 시료채취기의 개발 연도별 연구내용 및 범위	·12
〈표 III-1〉 유기화합물 제조 및 취급 사업장 수 현황	24
〈표 III-2〉 유기화합물 제조 및 취급 사업장 수 현황	25
〈표 III-3〉 2015-2017년 업무상질병의 원인물질별 연도별 질병자 분포	27
〈표 III-4〉 2015-2017년 업무상질병의 업종별 연도별 질병자 분포	27
〈표 III-5〉 2015-2017년 업무상질병의 직종별 연도별 질병자 분포	28
〈표 III-6〉 멀티가스모니터를 통해 모니터링 가능한 유기화합물 종류	42
〈표 III-7〉 수동식 시료채취기 관련 특허자료 조사 현황	50

그림 차례

〈그림 I-1〉 표준공기 조제시스템	3
〈그림 II-1〉 제1차년도 연구의 틀	14
〈그림 II-2〉 OSHA 수동식 시료채취기 시험챔버 실험장치	16
〈그림 II-3〉 유기용제 시료 제조용 실험장치 구조도	16
〈그림 II-4〉 실험실 실험장치 구조도	17
〈그림 II-5〉 표준공기 조제시스템	18
〈그림 II-6〉 프랑스 국립환경연구원 노출챔버	19
〈그림 II-7〉 정부의 R&D 특허기술동향 조사 사업 체계도	22
〈그림 III-1〉 2015-2017년 업무상 질병자의 연도별 사망자와 이환자의 비율 분포	26
〈그림 III-2〉 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템 계통도	31
〈그림 III-3〉 시험챔버	40
〈그림 III-4〉 멀티가스모니터	41
〈그림 III-5〉 3M OVM 3500	44
〈그림 III-6〉 SKC VOC 575-001	45
〈그림 III-7〉 Radiello RAD 130S	46
〈그림 III-8〉 Draeger ORSA 5	47
〈그림 III-9〉 Waterloo Membrane Sampler	48
〈그림 III-10〉 Pro-Tek Organic Vapor G-AA Air Monitoring Badge	49
〈그림 III-11〉 미국 특허 6,607,581 B2	53
〈그림 III-12〉 미국 특허 4,040,805	56
〈그림 III-13〉 미국 특허 7,889,980 B2	58

〈그림 III-14〉 미국 특허 4,680,165	60
〈그림 III-15〉 미국 특허 6,063,041	61
〈그림 III-16〉 미국 특허 9,757,774 B2	62

I. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

수동식 시료채취법(Passive or diffusive sampling method)은 확산(Diffusion) 또는 투과(Penetration) 원리가 작동되는 시료채취기를 사용하여 공기중 시료를 포집하는 측정방법이다. 흡착 튜브 또는 여과지 같은 매체를 통해 공기를 흡인하는 펌프를 사용하여 시료를 포집하는 능동식 시료채취법(Active sampling method)과 다르다. 수동식 시료채취기(Passive sampler)는 작업장에서 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds, VOC) 등 유해인자 측정에 사용되고 있는데 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)은 수동식 시료채취기를 사용하도록 하고 있으며(OSHA, 1996 및 2010), 고용노동부도 법적 작업환경측정에 사용할 수 있도록 하고 있다(노동부, 2000).

일반적으로 작업환경측정에 있어서 VOC에 대한 노출평가는 능동식 시료채취법을 주로 이용해 왔으나 수동식 시료채취법의 이용이 증가되면서 수동식 시료채취기의 활용을 통한 산업재해 예방에 관심이 점차 증가되고 있다. 한편, 최근 3년간(2015-2017년) 우리나라 산업재해에서 VOC와 관련된 업무상 질병 근로자는 총 68명(11-36명)으로 나타났는데 그 중 질병사망자가 47%를 차지하였으며, 연도에 따라 2015~2017년에 각각 차지하는 비율은 31%, 16%, 53%로 나타났다(고용노동부, 2016, 2017 및 2018).

그러나 수동식 시료채취방법의 신뢰성 및 정확성이 향상되면서 국내·외에서 점차 널리 사용되고 있으나 수동식 시료채취기(Passive or diffusive sampler)의 가격이 비싸 작업환경측정 또는 위험성평가 업무에 다량으로 또는 빈번하게 사용하기에 어려운 점이 있다. 수동식 시료채취기 세트의 구입 및 사용의 비용은 능동식 시료채취기(Active sampler) 및 펌프 세트의 구입, 유지 및 사용 비용까지 고려할 때 더 비싸다. 분석비용은 비슷한 측면이 있

다(OSHA, 1996).

국내에서도 수동식 시료채취기 개발에 관한 연구가 이루어졌으나 높은 습도 같은 특정조건에서 일부 물질의 포집효율 감소, 개인시료채취 방법으로 적용하기에 부적합한 재질, 법적 작업환경측정에 사용하기 어려움 등의 이유로 상용화 단계에까지 이르지 못했다(백남원 등 1996, 변상훈 등 1997, 이병규 2012).

따라서 우리나라 작업환경측정 제도 및 사업장 작업환경 조건에 적합하면서 저렴한 가격으로 널리 보급이 가능한 수동식 시료채취기 개발에 대한 연구가 필요하다.

2. 선행연구

1) 수동식 시료채취기 시험챔버 개발 또는 활용

이병규 등(2006)은 노동자가 노출되는 증기상 물질을 채취할 수 있는 시료채취기를 시험할 수 있는 설비로서 사업장의 작업환경과 유사한 시료채취기 시험챔버 또는 표준공기 조제시스템 개발에 관한 연구결과를 보고하였다. 시료채취기 시험챔버의 주요 구성요소는 공기압축기, 온·습도 및 공기유량 조절기, 시료주입기(Syringe pump), 혼합챔버(Mixing chamber), 시험챔버(Test chamber) I 및 II 이었다 (그림 I-1).

연구결과는 시험챔버의 규격, 형태, 재질, 챔버내 적정기류 확보방안, 인공증기 발생방법, 공기 및 습도 조절에 관한 사항을 포함하였다. 공기질 모니터링 방안은 Multi-gas monitor와 온·습도 및 기류측정기를 이용하여 시험챔버 내에서 실시간 모니터링을 실시했다고 하였다. 시료채취기 시험챔버에 대한 성능평가 결과, 시험챔버 내에서 증기농도는 증기발생 후 약 2~3시간 경과 후부터 평형에 도달하여 지속적으로 시험챔버의 모든 지점에서 일정한 농도가 유지되었다고 했다.



그림 I-1. 표준공기 조제시스템 사진

이병규(2012)는 VOC용 양면흡착형 수동식 시료채취기 개발에 관한 연구를 수행했는데 시료채취기 개발을 위한 시료 조제는 산업안전보건연구원이 개발하여 성능이 검증된 시료채취기 시험챔버를 이용하였다. 시험챔버는 공기압축기에서 만들어진 일반 공기가 온·습도 및 기류조절기를 거치면서 온도와 습도가 조절되고, 혼합챔버 안에 있는 유해물질 발생장치에서 주입되는 여러 화학물질이 증기화되면서 이 증기와 온·습도가 조절된 공기가 1차적으로 혼합되게 하였다. 혼합된 공기는 사각형 시험챔버내 기류제어판을 통과하면서 보다 균일하게 혼합이 이루어지고 회전식 기류발생장치가 설치된 지점에 이르러서는 모든 지점에서의 농도가 균일하게 된다. 온·습도가 조절되고 농도가 균일하게 조성된 지점에서 수동식 시료채취기 및 펌프-활성탄관 시료를 채취하여 조제할 수 있다고 하였다. 수동식 시료채취기의 성능을 평가하기 위해서는 시료채취기를 매달 수 있는 장

치와 기류발생 장치가 요구된다. 일반적으로 수동식 시료채취기의 면속도는 형태에 따라 다르나 Badge 형태의 수동식 시료채취기의 경우 최소한 0.05 - 0.1m/s로 유지해야 한다. 그 이유는 공기의 결핍현상으로 확산경로가 길어짐으로써 생기는 포집속도의 저하를 막을 수 있기 때문이다(Pristas, 1994, 재인용), 이를 위해 사각형 시험챔버 안에 기류발생장치(가지모양 회전체)를 별도로 장착하여 기류를 발생시킴으로써 수동식 시료채취기를 이용하여 시료를 조제할 수 있도록 하였다. 즉, 이 연구에서 가지모양의 회전체를 이용하여 이 회전체의 가지부분에 수동식 시료채취기를 매단 후 회전체의 회전속도에 변화를 줌으로써 적절한 기류를 발생시켰다. 수동식 시료채취기에 접하는 면속도 [점선속도(m/s) = 회전속도(RPM) x 1/60 x 회전지름(m) x 원주율(3.14)]는 채취 위치를 적절하게 선정하면서 기대하는 기류속도를 발생시켰다.

이 연구의 경우 챔버 내에서 네 가지 혼합물질 (벤젠, 톨루엔, 트리클로로에틸렌, 노말헥산)에 대한 일정한 농도환경의 구축은 시료의 혼합비율과 시료주입기의 주입속도 조절을 통해 이루어졌다. 챔버내 시험공기 농도에 대한 실시간 모니터링은 Multi-gas monitor(Annova, model 1312, Denmark)를 이용하여 농도평형이 이루어 졌는지 확인하고 농도평형 기간 동안 시험공기를 채취하여 평가하였다. 또한 시험공기 채취 시 챔버내 온·습도는 역시 실시간 모니터링 장비인 Portable aerosol spectrometer (Grimm, model 1.108, Germany)의 온·습도 센서를 이용하여 재확인하였다. 수동식 시료채취기의 성능평가 실험을 할 때 챔버내 온도는 약 25-29°C이었다. 챔버내 기준농도 설정은 펌프-활성탄관법을 이용하였다. 즉, 수동식 시료채취기로 측정할 때마다 펌프-활성탄관도 동시에 측정한 후 펌프-활성탄관법을 통해 산출된 측정값을 챔버내 기준농도로 간주하여 수동식 시료채취기를 평가하였다.

이나루 등(2000)은 저농도 유기용제 포집용 확산식 시료채취기 개발에 관한 연구 결과를 보고하였는데 세부 목적 중 실험용 확산식 시료채취기의 제작 및 실험실 성능 시험평가를 수행하기 위하여 공기 중 유기용제 농도시료 제조용 실험장치도 포함하였다. 실험장치의 주요 구성요소는 공기압축펌프, 유량조절기, 유량지시

계, 수욕조, 혼합조, 습도조절장치, 미량주사기 펌프, 알루미늄 가열판 등으로 구성되었다. 공기정화장치와 건조기가 부착된 공기압축펌프에서 공급되는 공기는 유량조절기와 유량지시계를 거쳐 약 20 L/min으로 공급되고, 시험공기는 수욕조를 거쳐 습도 $50 \pm 5\%$ 가 유지되도록 한 후 혼합조로 공급되었다. 혼합조의 습도는 습도계를 이용하여 측정하며, 이 신호를 받아 자동조절장치에 의하여 수욕조 온도가 조절됨으로써 일정한 습도가 유지되도록 하였다. 한편, 유기용제는 미량주사기 펌프에서 일정 유량으로 혼합조 내 알루미늄 가열판 위로 공급되는데 가열판 온도는 유기용제가 일정하게 증발되도록 조절하여 혼합조내 유기용제 농도가 일정하게 유지되도록 하였다. 혼합조는 3개를 연속적으로 연결하여 유기용제 증기가 공기와 균일하게 혼합되도록 설계되었다고 하였다.

전홍진과 이병규(2006)는 수동식 시료채취기의 정도관리 시료에 대한 적합성 평가에 관한 연구결과를 보고했는데 수동식 시료채취기 시료를 조제하기 위해 산업안전보건연구원이 개발한 표준증기 발생 챔버를 이용하였다. 이 연구는 챔버내에서 세 가지 혼합물질(벤젠, 톨루엔, o-크실렌)의 농도환경을 구축하였고, 수동식 시료채취기 시료를 대량(예, 세 가지 노출수준 시료의 경우 수준별 60개)으로 동시에 조제하였다. 챔버내 온도의 경우 20-25℃, 습도의 경우 20% 내·외에서 모든 시료가 조제되었는데, 시료채취기의 포집효율을 비교하기 보다는 동시에 60여개의 정도관리용 시료를 조제하는데 초점을 두었기 때문에 여러 온·습도 조건에서 실험을 실시하지는 않았다.

챔버의 핵심은 시험챔버 내에서 표준공기 중 유기용제 농도를 얼마나 균일하고 지속적으로 유지할 수 있는가 이며, 원하는 농도수준을 만들기 위해서는 각 대상물질의 혼합비율과 시료주입기의 주입속도 조절을 통한 주입량의 변화를 통해 이루어진다고 하였다. 대량 시료를 조제할 수 있는 챔버조건을 설정하기 위하여 온·습도 조절기에서 조절하는 회전속도의 변화와 가지모양의 회전체에 위치하는 수동식 시료채취기의 채취위치(회전반경)에 따른 포집양의 변이가 없는 조건을 찾기 위해 여러 조건에서 반복실험을 실시하였다고 했다.

2) 수동식 시료채취기 성능평가를 위한 프로토콜(Protocol)

■ OSHA 프로토콜 (Proposed protocol for the lab evaluation of diffusive samplers)

○ OSHA(1996)는 수동식 시료채취기의 실험실 평가를 위한 프로토콜을 제안하였는데 개념이나 용어는 여러 가지 프로토콜 (NIOSH 프로토콜, OSHA 분석법 평가가이드라인, CEN 프로토콜)을 준용하였다(부록 1 참조). NIOSH나 CEN 프로토콜의 시험 항목이나 범위는 매우 포괄적인데 비하여 OSHA 프로토콜의 경우 상당히 줄었다. 이 OSHA 프로토콜을 개발한 주요 취지는 시험에 소요되는 시간과 비용을 줄일 수 있는 근거를 바탕으로 새로운 형태의 프로토콜을 마련하고자 했다. NIOSH 프로토콜에 포함되어 있는 몇 가지 시험항목들[예, 요인실험 (Factor experiments) 및 역확산 실험(Reverse diffusion experiment)]은 OSHA 프로토콜에서 변경되거나 삭제되었다. NIOSH 프로토콜은 대략 184개 수동식 시료채취기를 이용하여 31가지 시험을 실시하는데 비해 OSHA 프로토콜은 81개 시료채취기를 이용하여 15가지 시험을 실시하도록 되어 있다.

○ 능동식 시료채취기 사용에 관한 측정분석법의 성능에 영향을 미치는 기초 사항은 수동식 시료채취기 사용에 관한 측정분석방법에도 영향을 미친다.

- 기초사항은 탈착효율(desorption efficiency), 검출한계(detection limits), 분석 정밀도(analytical precision) 및 저장 안정성(storage stability)을 포함한다.
- 능동식 및 수동식 시료채취기의 시험 평가에 있어서 가장 큰 차이는 능동식 시료채취기의 경우 단지 하나의 적절한 시료채취율이 선택되는 반면, 수동식 시료채취기의 경우 수동식 시료채취기 제품 각각에 채취된 각 분석대상 물질마다 시료채취율이 결정되어져야 하는 점이다. 만약 특정 monitor에 채취된 혼합물 시료채취율 관련 지식/정보를 안다면, 규정적 시료채취율(provisional sampling rate)는 분석대상 물질의 화학적 물리적 특성으로부터

계산이 가능하다. 물론 분석대상 물질의 특성과 수동식 시료채취기 내부 크기로부터 정확한 시료채취율(accurate sampling rate)은 계산할 수 없다.

- 여러 환경조건에 따른 시료채취율의 안정성은 수동식 시료채취기의 시료채취 성능에 대한 대부분 측면을 설명하는데 사용 가능하다. 시료채취율은 특정 조건하에서 실험적으로 결정되어야 한다. 이런 시료채취율은 시험공기 농도를 결정하기 위해 사용된 방법과 비교될 때 오류가 없다.

- 시험용 공기(Test atmosphere)는 준비가 필요하다.
- 시료채취가 이루어지는 동안 면속도(face velocity)는 0.4m/s이다.
- 시험용 공기 농도는 적어도 1개의 독립된 측정분석법으로 확인이 필요하다. 한 가지 확인방법은 real-time monitoring 기법(예, IR 모니터 또는 GC)이 있으며, 다른 확인방법은 수동식 시료채취법과 동시에 시료 채취하는 능동식 시료채취법이 있다. 이런 독립적 측정분석법은 반드시 오류가 없어야 하며, 최대 오류 허용(Maximum acceptable bias) 수준은 약 5%이다.

$$\text{NIOSH bias} = \frac{\text{시험결과 평균치(result average for test method)}}{\text{시험용 공기의 농도치(true con of test atmosphere)}} - 1$$

- 만약 계산된 농도치가 독립 측정분석 농도치와 다르면 적어도 하나의 또다른 독립 측정분석법의 농도치가 필요하다. 두 가지 독립 측정분석법 농도치는 일치되어야 한다. 이런 필요조건은 시험용 공기가 정량화 될 수 없을 때 필히 이루어져야 한다.

○ OSHA 프로토콜의 주요 시험 항목은 다음과 같다.

(1) 탈착효율(Desorption efficiency)

탈착효율은 OSHA 분석법 검증가이드(OSHA, 2010)에 제시된 방식으로 결정한다. OSHA(1996)에 따르면 탈착효율 시험용 시료는 활성탄 패드를 구입하여 4ml 유리 바이얼에 각각 넣고 셉텀캡을 씌운다. 패드는 시험 유해물질 용액으로 스파이크 시키고 상온에서 밤새 보관 후 다음날 탈착 및 분석한다.

(2) 시료채취율 및 시료채취기 용량(Sampling rate and capacity)

시료채취율(Sampling rate)은 챔버에서 시료채취 시간대(Time intervals) 마다 동일그룹시료(Replicate samples) 3개씩을 채취하여 결정한다. 즉, 총 30개 시료(공시료 제외)를 동시에 채취한다. 시간대는 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 및 12 시간이며, 챔버 안에서 수동식 시료채취기의 면속도는 0.4m/s로 유지한다. STEL 시료는 7.5 및 15분 시간대에서 결정한다. 시료공기의 농도는 25℃, 80% RH에서 2배수준 타겟농도이고, 채취된 시료의 질량(Mass)은 탈착효율로 보정한다(통상 뒷섹션에서 채취된 시료 유해화합물은 질량계산에 포함시키지 않음).

평균 채취 질량

$$\text{시료채취율 (mL/ min)} = \frac{\text{시료채취 질량}}{\text{시험챔버 농도치} \times \text{시료채취 시간}}$$

총시료채취율(Overall sampling rate)은 SRST(Shortest recommended sampling time)와 시료채취율이 갑자기 감소되는 시점 또는 MRST(Maximum recommended sampling time) 사이에서 실험을 통해 얻어진 개별 시료채취율의

평균값으로 산출한다. 이들 개별 시료채취율은 적어도 4개, 상대표준편차는 3% 이어야 한다. 시료채취율의 단위는 mL/min @760 mmHg 및 25°C, 시료채취기 용량(Sampler capacity)은 시료당 질량이다.

한편, 시료채취율 및 시료채취기 용량에 대한 시험이 이루어지는 동안 역확산(Reverse diffusion)이 확인되어야 하는데, 흔히 부적절한 포집매체를 사용하거나 시료의 체류가 불량한 조건일 경우 발생된다. 역확산은 2배수준 타겟농도, 습한 기류 조건에서 시험대상 시료에 2개 그룹의 수동식 시료채취기를 노출시키면서 일정한 시간이 지나면 그 중 1개 그룹을 제거하고, 나머지 1개 그룹을 시험대상 시료가 없는 조건으로 전체 시료채취시간 동안 계속 노출시킨다. 시료채취기 농도값이 2개 그룹 사이에 10% 이상 차이가 발생되면 역확산이 발생된 것이다.

(3) 저장안정성(Storage stability)

OSHA 분석법 검증가이드(OSHA, 2010)의 절차에 따라 저장안정성 시험을 실시한다. 시험챔버 농도는 1배수준 타겟농도, 80% RH, 25°C에서 MRST 동안 36개 시료를 동시에 채취한다. 시료채취 후 바로 분석된 시료는 총시료채취율이 1배수준 타겟농도에서 일정함을 증명하는데 사용된다.

OSHA 노출평가감독관(CSHOs)은 어떤 특정 규정(Standard)이 위반/초과 되는지 여부를 결정할 경우 측정분석오류(Sampling and analytical error, SAE)를 이용하여 측정 결과치를 OSHA 허용기준(Permissible exposure limits, PEL)과 비교한다. 능동식 시료채취기의 경우 SAEs는 sampling pump variation($\pm 5\%$) 및 QC division sample results를 이용하여 계산한다. 수동식 시료채취기의 경우 SAEs는 sampling rate variation($\pm 6.4\%$)을 이용하여 계산 가능하다.

(4) 검출한계(Detection limits), 신뢰정량한계(Reliable quantitation limit, RQL), 분석정밀성>Analytical precision) 및 재현성(Reproducibility)

OSHA 분석법 검증가이드(OSHA, 2010)에 따라 검출한계, 신뢰정량한계, 분석정

밀성 및 재현성을 시험한다. 검출한계는 시료 분석과정에서 시약공시료의 반응값과 유의하게 차이나는 반응값을 보이는 시료의 양 또는 농도를 말한다. 신뢰정량한계는 정밀하게 이루어지는 정량적 측정의 낮은 한계를 말한다. 정밀성 및 재현성은 시료의 측정과 분석이 이루어지는 전체 과정에서 분석정밀성 및 재현성을 말하며, 이들 항목을 시험한다.

3) 수동식 시료채취기 시험챔버의 규격 및 성능 조건

■ ISO 16107: 2007

ISO(2007)는 수동식 시료채취기의 성능평가용 챔버의 사양에 대해 필요사항을 규정하였으며, 주요 내용은 다음과 같다.

○ 노출챔버 규격

- 챔버용량: 기준 시료채취기(Reference samplers)를 포함하여 시험 횟수 마다 최소한 8개의 시료채취기를 부착할 수 있는 크기이어야 하며, 가장 낮은 유량으로 시료가 채취될 때 소모되는 평가대상 유기화합물의 양은 전체 총량의 5% 미만이어야 한다.
- 노출시간: 시험챔버 가동시간은 최대 12시간 까지 작동이 유지 되어야 한다.
- 시료물질 조제: 시험대상 유기화합물이 포함된 시료물질이 혼합챔버에서 가스형태 또는 증류화 및 희석되도록 장비를 설치하여야 하며, 시험대상 유기화합물의 양을 조절하여 적용농도로 설정이 가능하여야 한다.
- 기준농도 측정: 기준농도는 챔버 내 적어도 5개 위치에서 측정하면서 시료농도를 동시에 모니터링 하여야 한다.
- 챔버 재질: 시료물질에 노출되는 챔버의 재질은 내식성 및 내화성이어야 한다. 스테인레스 스틸이 선호되지만 Polypropylene이 적절한 재질이다.
- 환경조건 모니터링 장비: 챔버 안의 온·습도 및 기류를 모니터링할 수 있어 한다.

○ 환경조건 관리

- 기류: 개인시료 측정 조건에서 시료채취기가 사용될 경우 기류는 시료채취기 면속도로 최고 0.5m/s까지 도달할 수 있어야 한다.
- 상대습도: 20℃에서 25±5%, 50±5%, 80±5%를 설정할 수 있어야 한다.
- 온도: 온도는 10±3℃, 20±3℃, 30±3℃ 상태로 설정하고 유지할 수 있어야 한다. 만약 챔버가 스테인레스 스틸이라면 절연이 필요하다.
- 압력: 챔버 안의 압력은 가동 횟수 상관없이 1% 이내로 일정하여야 하며, 대기압의 95% - 105% 사이에서 고정되어야 한다.

○ 가동 변동성

챔버는 여러 가지 가능한 실험설계 중 하나를 통해 가동 횟수간 참상대표준편차 (Inter-run true relative standard deviation, Rr)에 대하여 평가되어야 한다. 예를 들면, 특정한 환경조건에서 4개 시료채취기를 이용하여 16회 가동 후 생성된 데이터를 분산분석(Analysis of variance)하여 제시할 수 있다.

3. 연구의 목적

○ 중기적으로는 3년 계획으로 연구를 거쳐 가격이 저렴하면서 신뢰성이 높은 국내 보급형 수동식 시료채취기를 개발하고, 단기적(1차년)으로는 선행연구를 검토하면서 개발되는 수동식 시료채취기의 성능을 시험할 수 있는 시험챔버 시스템을 구축하고자 하였다.

○ 궁극적으로 비용이 낮고 신뢰성이 검증된 국산 수동식 시료채취기를 개발·보급하여 산업현장에서 널리 활용할 수 있도록 함으로써 작업환경측정 사업의 효율성 제고와 노동자의 건강보호에 기여하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 내용 및 범위

이 연구과제는 국내 보급형 수동식 시료채취기를 개발하기 위해 2019년부터 시작하여 3년 계획으로 수행되는 중장기 과제 중 1차 년도 과제이다. 1차년도 과제의 연구내용 및 범위는 크게 두 가지인데, 첫째는 수동식 시료채취기 개발과 관련된 보고서, 논문, 특허자료 등에 대한 문헌조사이다. 문헌조사는 수동식 시료채취기 개발의 배경적인 정보로서 국내 전국적으로 소재하는 유기화합물 제조 및 취급 사업장 현황 조사를 포함하였고, 최근에 보고된 산업재해 통계자료 중 유기화합물에 의해 유발된 업무상질병 노동자 현황을 조사하였다. 둘째는 수동식 시료채취기의 성능시험 설비인 시험챔버 시스템 또는 증기발생챔버의 설계, 제작 및 시뮬레이션 실시이다(표 II-1).

표 II-1. 국산 보급형 수동식 시료채취기의 개발 연도별 연구내용 및 범위

2019년(1차년도)	- 최적의 설계조건 실험을 위한 시험챔버 시스템의 설계, 제작 및 시뮬레이션 - 선행연구에 대한 검토
2020년(2차년도)	- 대상 물질별 채취유량 실험(1) - 수동식 시료채취기 시제품 제작
2021년(3차년도)	- 대상 물질별 채취유량 실험(2) - 시료채취기 생산인프라 구축을 위한 실효성 평가

2. 연구방법

제1차년도 과제는 다음과 같이 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템 구축, 수동식 시료채취기 개발을 위한 기초 및 특허 정보 파악이 이루어질 것이며, 연구의 틀은 <그림 II-1>과 같다.

○ 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템 구축

- 실험실에 설치·작동될 시험챔버 시스템의 규격, 부대장비, 특허 등 관련 문헌조사
- 수동식 시료채취기 개발을 위한 시험챔버의 설계, 제작 및 시뮬레이션 실시

○ 수동식 시료채취기 개발을 위한 기초 및 특허 정보 파악

- 국내 작업환경측정에서 수동식 시료채취기의 사용 현황 등 조사
- 수동식 시료채취기의 국산화·상용화를 위한 요인 분석: 국산화·상용화 장애요인(기초기술, 특허 등) 조사
- 수동식 시료채취기 개발 및 보급을 위한 중장기적 가이드 제시



그림 II-1. 제1차년도 연구의 틀

1) 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템의 구축

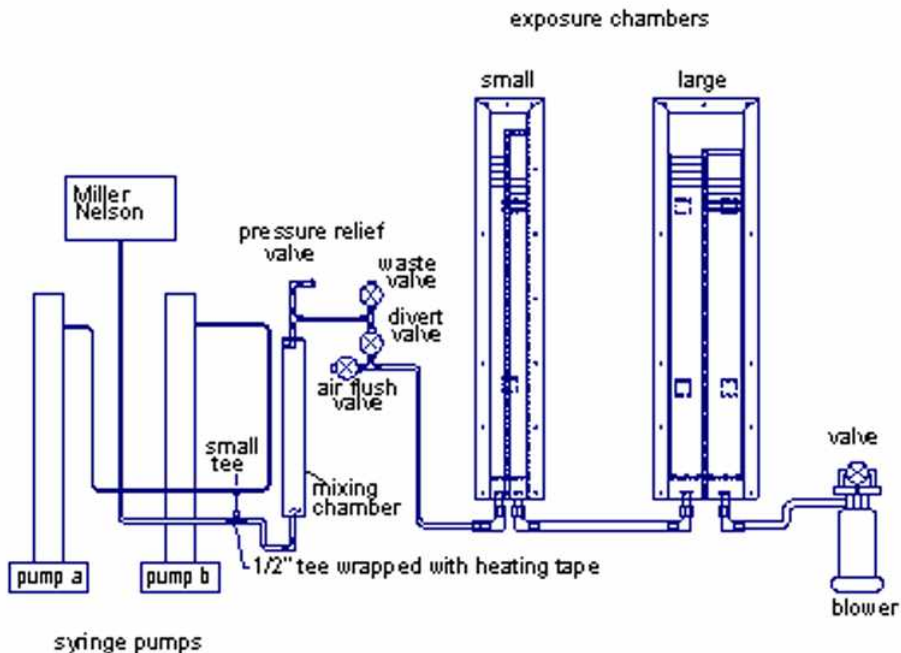
(1) 문헌조사

- 연구대상 시험챔버와 관련된 국내·외 시험챔버 모델의 사양, 이용 사례 조사

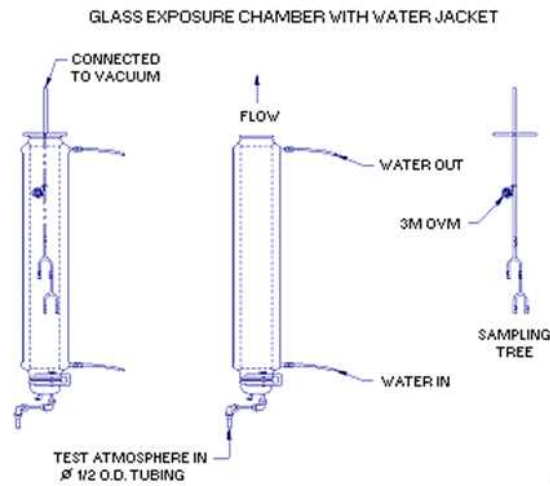
(2) 기존 시험챔버 비교분석

가) OSHA 수동식 시료채취기 시험챔버

OSHA(1996)는 수동식 시료채취기(Organic vapor monitors, Model 3520, 3M 및 Carbosieve S-III tubes, Orbo 91, Supelco)를 이용하여 수동식 시료채취기 성능시험용 프로토콜을 개발할 때 사용된 시험챔버를 이용하였다(그림 II-2).

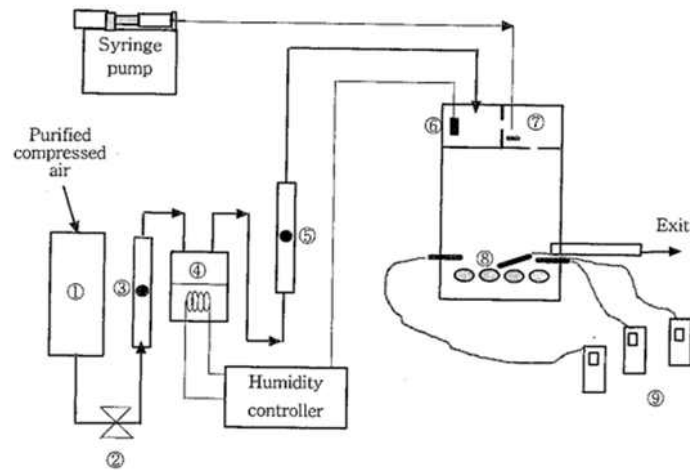


<a> Test atmosphere generation and sample collection apparatus



 Glass exposure chamber

그림 II-2. OSHA 수동식 시료채취기 시험챔버 실험장치



Schematic of the experimental apparatus and system ① Compressed air filter and regulator panel, ② Valve to adjust main air flow, ③ Rotameter, ④ Humidity generator, ⑤ Rotameter, ⑥ RH probe, ⑦ Flash evaporator, ⑧ Tested passive samplers and charcoal tubes, ⑨ Air sampling pumps.

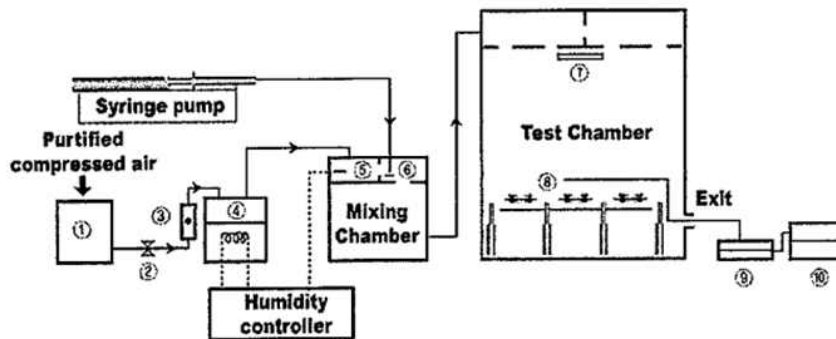
그림 II-3. 실험장치 구조도

나) 이나루 등(2001)

실험실에서 확산식 시료채취기의 성능시험을 위하여 알고 있는 공기 중 유기용제농도 시료를 제조하기 위하여 <그림 II-3>과 같은 실험장치를 이용하였다.

다) 이광용(2003)

실험실에서 확산식 시료채취기의 시료채취 효율 및 기류제어 막의 성능을 평가하기 위한 장치를 설치하였다 (그림 II-4). Mixing chamber(300 x 400 x 400 mm) 및 test chamber (600 x 600 x 700 mm)가 포함되었다.



Schematic of the experimental apparatus and system.

- ① Compressed air filter and regulator panel ② Air flow regulator ③ Air flow meter ④ Humidity generator ⑤ Humidity sensor ⑥ Flash evaporator ⑦ Device to circulate air and control of air velocity ⑧ Test passive sampler and charcoal tubes ⑨ Multigas monitor ⑩ Computer

그림 II-4. 실험장치 구조도

라) 이병규 등(2006)

노동자가 노출되는 증기상 유기화합물질(VOCs)용 수동식 시료채취기를 시험할 수 있는 시험챔버 또는 표준공기 조제시스템을 개발하였다 (그림 II-5).

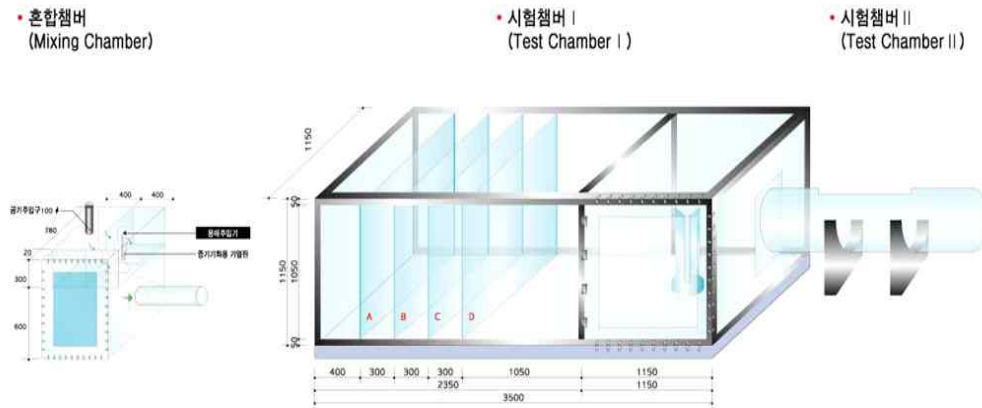


그림 II-5. 표준공기 조제시스템

마) 프랑스 국립환경연구원 노출챔버

Gonzalez-Flesca(2014)는 프랑스 국립환경연구원(INERIS)에서 확산형 시료채취기 성능평가를 위하여 새로운 실험실 시험챔버를 개발하였음을 보고하였다 (그림 II-6).

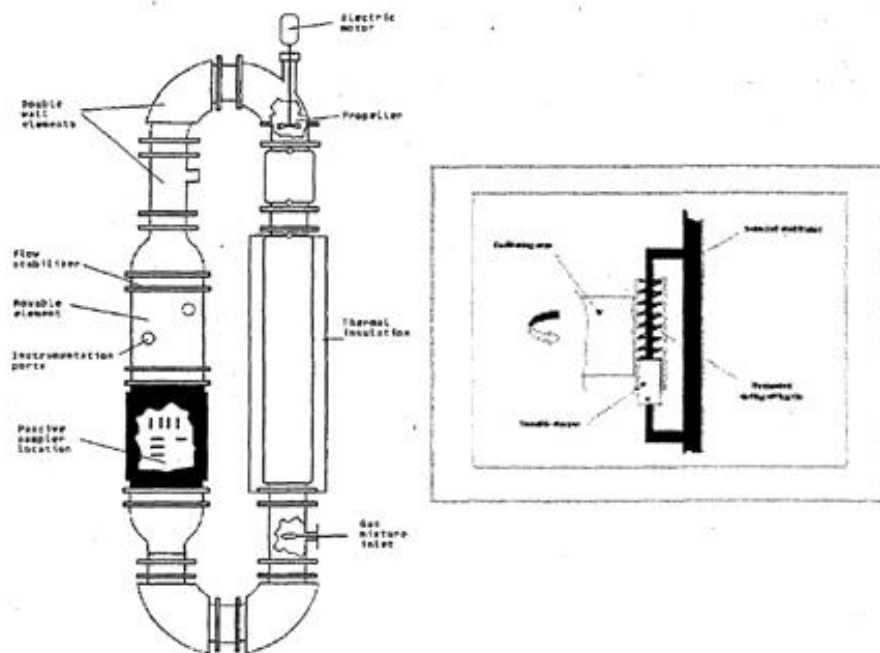


그림 II-6. 프랑스 국립환경연구원 노출챔버

(3) 시험챔버 시스템의 설계, 제작 및 설치

○ 설계 및 설치환경 조건 검토

문헌조사를 통해 설치 대상 시험챔버의 구성요소, 규격, 설치 장소의 공간(너비, 길이, 높이), 전기 및 수도 공급 조건, 배기 설비 등을 검토 확인 하였다. 시험챔버와 연계되어 작동되는 기계(예, 공기압축기 설치 위치, 멀티가스모터터 수리), 기구 및 설비(예, 배기 후드)도 점검하였다.

○ 설계조건, 규격, 성능 등 결정

시험챔버의 구성요소별 설계조건, 규격, 성능, 예산, 시험과정에서 필요한 사항 등을 파악하였고 전문가 및 전문업체 의견을 반영하여 시험챔버 사양서(안)을 작성하였다 (부록 2 참조).

○ 과업 제안요청서 작성

시험챔버의 사양서, 견적가, 입찰방법, 전문업체 선정 방법, 용역계약 등을 포함한 과업 제안요청서를 작성하였다.

○ 챔버구축 계획(안) 결정

2019년 자체연구과제 일환으로 계획된 시험챔버 설계, 제작 및 설치에 대해 연구원 및 공단 본부 부서별 검토를 거쳐 시험챔버 구축 계획을 최종 승인 받았다.

○ 위탁업체 선정 및 용역계약

계약 관련 정부의 법규 및 공단의 규정에 따라 입찰공고, 위탁업체 선정, 용역계약 등을 실시하였다.

○ 설계조건 검증 및 설치

위탁업체와 계약이 이루어지면 계약조건에 따라 시험챔버의 설계, 제작 및 설치 업무를 추진하되, 과업제안요청서와 과업기술제안서를 바탕으로 시험챔버 주요 구성요소별 세부 업무를 추진하였다. 특히 설계조건을 바탕으로 시험챔버 전체 시스템에 대해 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)적 분석을 통해 설계조건을 검증하면서 최적 모델을 결정하였다 (부록 3 참조).

○ 시험(시뮬레이션)

설치된 시험챔버를 과업제안요청서 및 과업기술제안서에 따라 시스템의 주요 구성요소 및 전체의 성능을 시험한다.

2) 수동식 시료채취기의 개발을 위한 기초 및 특허 조사

수동식 시료채취기 개발을 위한 기초 및 특허 정보는 다양하게 많으므로 이 연구의 목적을 효과적으로 달성하기 위한 정보를 중심으로 자료를 수집하면서 검토하였다.

(1) 수동식 시료채취기의 사용 현황

수동식 시료채취기의 사용은 점차 증가되고 있는 가운데 국내·외에서 유통되고 있는 제품 중 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 제품이나 새롭게 개발되어 주목되는 제품을 중심으로 조사하고자 하였다. 수동식 시료채취기의 종류, 가격, 사용 현황 등에 대해 자료를 수집하였다. 특히 시료채취기의 형태, 노출 표면적, 확산경로 길이 등 외관적 특성뿐만 아니라 흡착제의 종류 및 용량 등 내적 특성 자료도 파악하고자 했다.

(2) 국산화·상용화를 위한 특허자료 조사

시료채취기 형태, 흡착제 종류, 흡착물, 외부에 노출되는 표면적, 확산경로의 길

이, 시료채취시간 등에 대한 특허 자료를 조사하고자 했다. 조사는 수동식 시료 채취기 관련 연구를 수행했던 전문가들과 특허분야 변리사의 의견을 반영하였다. 정부의 R&D 특허기술동향 조사 사업(그림 II-7)을 활용하는 방안도 검토하였다(한국특허전략개발원, 2019).

국내·외 수동식 시료채취기의 특허 현황은 구글 프로그램 및 국내 특허정보검색서비스(Korea Intellectual Property Rights Information Service, KIPRIS)를 활용하였으며, ‘유기용제(Volatile organic compounds, VOC)’, ‘수동식 시료채취기(Passive sampler, passive sampling device)’, ‘개인시료채취기(Personal sampler)’ 등 키워드를 이용하여 검색하였다. 수집된 자료는 보관하면서 반복 검토 및 연구팀원간 토의를 통해 요약 정리하였다.

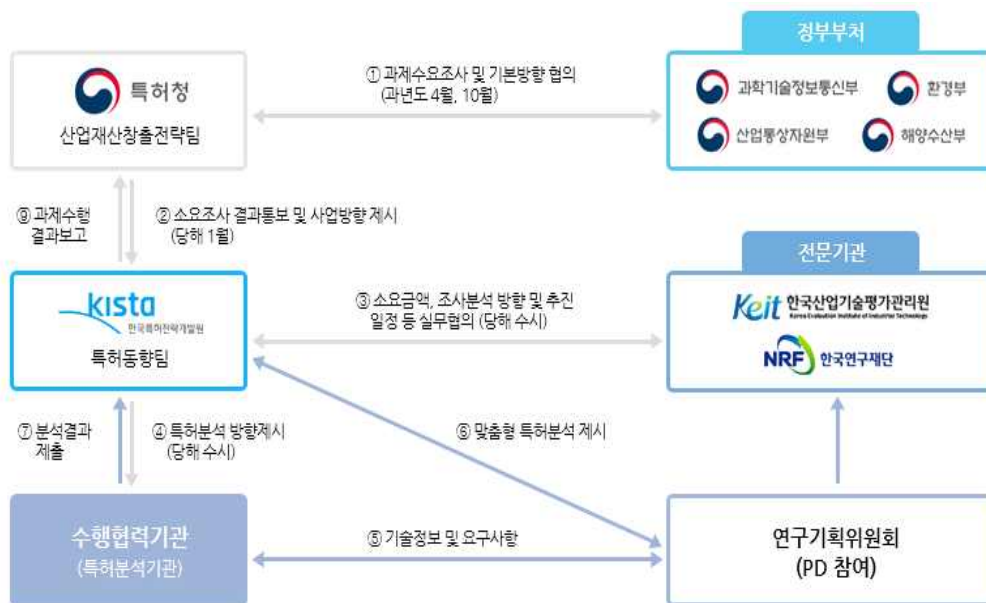


그림 II-7. 정부의 R&D 특허기술동향 조사 사업 체계도

(3) 수동식 시료채취기 개발 및 보급을 위한 중장기적 가이드 제시

본 연구는 3년 동안 추진될 예정이며, 연도별 연구 목표를 달성하기 위해 수행되는 과제이다. 1차년도 과제는 수동식 시료채취기를 개발할 경우 개발된 시제품 또는 완제품에 대해 성능을 시험하기 위한 시험챔버를 구축하는 것이 주된 목표이다. 1차년도 과제를 수행하면서 파악된 정보를 바탕으로 2차년도 및 3년도 수행될 연구의 내용과 방향을 고려하면서 중장기적 가이드를 제시하고자 하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. 전국 유기화합물 제조 및 취급 사업장 현황

산안법에 따라 관리되는 유기화합물로서 동법 안전보건규칙 별표12에 규정된 123종을 중심으로 제조 및 취급 현황을 조사하였다.

2014년 전국 작업환경실태조사 보고서(안전보건공단, 2014)에 의하면 조사대상 사업장 126,846개소 중 유기화합물 제조 사업장은 64개소, 유기화합물 취급 사업장은 26,627개소로 보고되었다(표 III-1). 5인 이상 제조업 및 비제조업의 경우 유기화합물 제조 사업장은 57개소, 유기화합물 취급 사업장은 24,542개소이었다. 5인 미만 제조업의 경우 유기화합물 제조 사업장은 7개소, 취급 사업장은 2,085개소이었다. 한편, 5인 이상 유기화합물 제조 사업장 57개소 및 취급 사업장 24,542개소에 대한 중분류 업종별 사업장 수 현황은 <표 III-2>와 같았다.

표 III-1. 유기화합물 제조 및 취급 사업장 수 현황[단위: 개소]

구분	조사대상	유기화합물	
		제조 사업장	취급 사업장
계	126,846	64	26,627
제조업 5인 이상	100,773	56	24,426
비제조업	10,000*	1	116
제조업 5인 미만	16,073	7	2,085

* 5인 미만 비제조업 사업장 1,032개소 포함

표 III-2. 유기화합물 제조 및 취급 사업장 수 현황* [단위: 개소]

업종	제조	취급
계	57	24,542**
제조업	56	24,426
식료품 제조업	-	384
음료 제조업	-	61
담배 제조업	-	4
섬유제품 제조업	1	577
의복, 의복액세서리 및 모피제품 제조업	-	343
가죽, 가방 및 신발 제조업	-	398
목재 및 나무제품 제조업	-	301
펄프, 종이 및 종이제품 제조업	-	1,048
인쇄 및 기록매체 복제업	1	1,557
코르크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	5	34
화학물질 및 화학제품 제조업	37	1,210
의료용 물질 및 의약품 제조업	2	238
고무제품 및 플라스틱제품 제조업	2	3,349
비금속 광물제품 제조업	-	420
1차 금속 제조업	1	572
금속가공제품 제조업	1	3,593
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	-	1,885
의료, 정밀 광학기기 및 시계 제조업	2	708
전기장비 제조업	-	1,278
기타 기계 및 장비 제조업	2	3,604
자동차 및 트레일러 제조업	1	1,307
기타 운송장비 제조업	-	487
가구 제조업	-	689
기타 제품 제조업	1	379
비제조업	1	116

* 5인 미만 제조업 사업장 제외

** 유기화합물 연간취급량은 89,881,029톤

2. 유기화합물 관련 업무상질병자 현황

최근 3년간(2015-2017년) 우리나라 산업재해에서 유기화합물과 관련된 업무상질병 노동자는 2015년 21명, 2016년 11명, 2017년 36명이었으며, 업무상질병 노동자 중 사망자와 이환자 비율이 연도에 따라 다르게 나타났는데 3년 전체 노동자 68명 중 질병사망자 비율은 47%로 나타났다(그림 III-1).

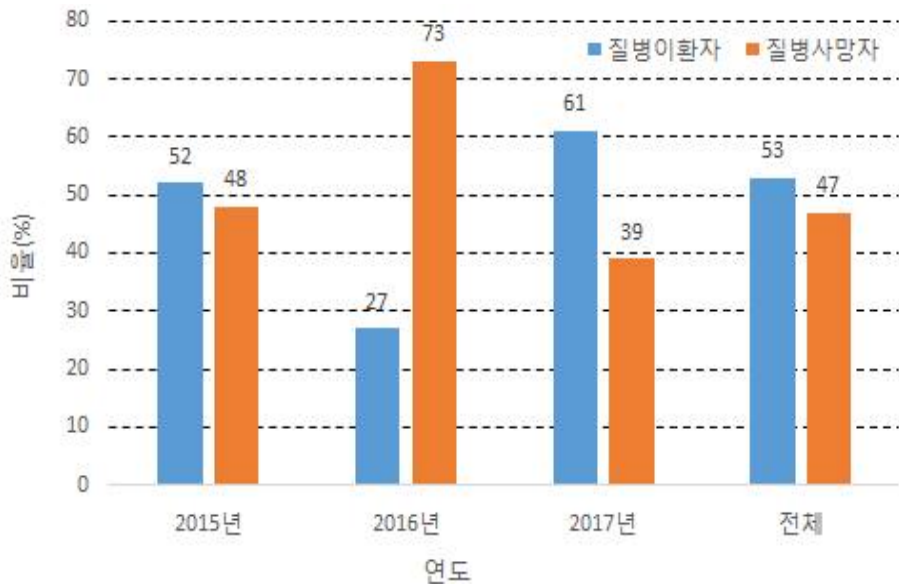


그림 III-1. 2015-2017년 업무상 질병자의 연도별 사망자와 이환자의 비율 분포

2015-2017년 업무상질병을 유발한 유기화합물 중 원인물질은 3년 전체적으로 볼 때 기타 유기화합물이 40%로 가장 높았고, 유기용제 23%, 벤젠 19%, 이황화탄소 18% 순이었다 (표 III-2). 업종별 업무상질병 노동자 분포는 3년 전체적으로 제조업이 71%로 가장 높게 차지하였고, 건설업 9%, 광업 및 기타의 사업 각각 7%,

농업 및 운수·창고 및 통신업 각각 3% 순이었다 (표 III-3). <표 III-4>에서 나타난 바와 같이 직종별 업무상질병 노동자 분포는 3년 전체적으로 볼 때 단순노무 종사자가 29%로 가장 높았고, 기능원 및 관련 기능 종사자와 장치·기계 조작 및 조립 종사자 각각 16%, 전문가 및 관련 종사자 7%, 관리자 4%, 사무종사자 및 서비스종사자 각각 2% 순이었다 (자세한 정보는 부록4 참조).

표 III-3. 2015-2017년 업무상질병의 원인물질별 연도별 질병자 분포

질병 원인물질/ 연도	2015년(%)	2016년(%)	2017년(%)	계(%)
벤젠	7(33)	-	6(17)	13(19)
이황화탄소	5(24)	4(36)	3(8)	12(18)
유기용제	3(14)	1(9)	12(33)	16(23)
기타	6(29)	6(55)	15(42)	27(40)
계	21(100)	11(100)	36(100)	68(100)

표 III-4. 2015-2017년 업무상질병의 업종별 연도별 질병자 분포

업종/ 연도	2015년(%)	2016년(%)	2017년(%)	계(%)
제조업	15(70)	11(100)	22(61)	48(71)
광 업	-	-	5(14)	5(7)
건설업	1(5)	-	5(14)	6(9)
농 업	2(10)	-	-	2(3)
운수·창고 및 통신업	1(5)	-	1(3)	2(3)
기타의 사업	2(10)	-	3(8)	5(7)
계	21(100)	11(100)	36(100)	68(100)

표 III-5. 2015-2017년 업무상질병의 직종별 연도별 질병자 분포

직종/ 연도	2015년(%)	2016년(%)	2017년(%)	계(%)
관리자	-	1(9)	2(6)	3(4)
기능원 및 관련 기능 종사자	4(19)	2(18)	5(14)	11(16)
단순노무 종사자	6(29)	1(9)	13(36)	20(29)
전문가 및 관련 종사자	3(13)	-	2(6)	5(7)
사무 종사자	1(5)	-	-	1(2)
서비스 종사자	-	-	1(3)	1(2)
장치·기계 조작 및 조립 종사자	1(5)	-	10(27)	11(16)
분류불능	6(29)	7(64)	3(8)	16(24)
계	21(100)	11(100)	36(100)	68(100)

3. 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템의 구축

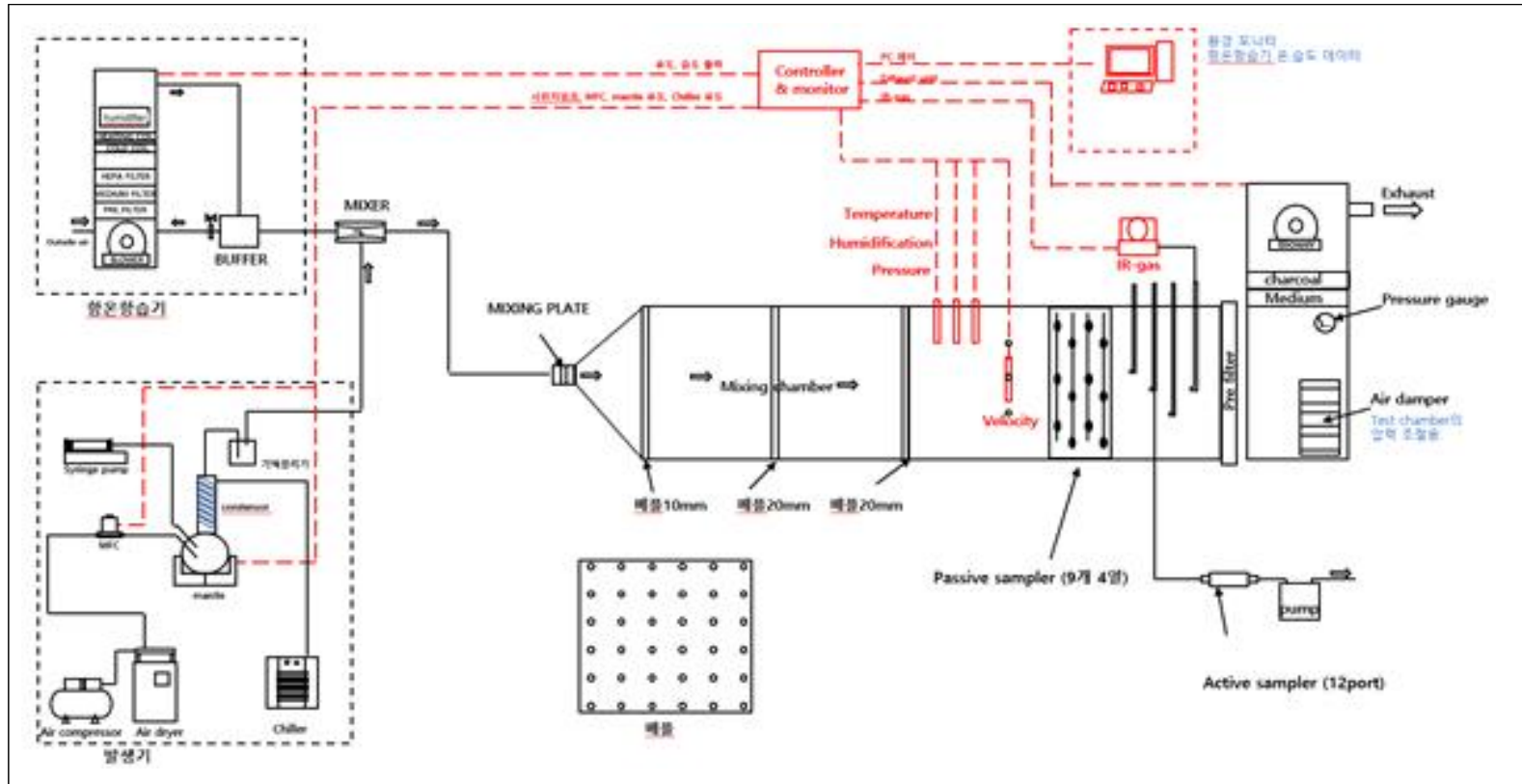
1) 시험챔버 시스템의 설계, 제작 및 설치

시험챔버 시스템의 구축은 연구계획 수립, 시스템 구축계획 수립, 전문업체 선정 및 계약, 시스템 설계, 개별 장치 제작, 시스템 설치, 시스템 성능시험 과정으로 이루어졌다. 시험챔버 시스템의 구축은 본 연구과제의 핵심 부분이다. 시험챔버 시스템의 설계부터 시스템 성능시험 과정은 외부 전문업체에게 위탁하였다.

시험챔버 시스템의 주요 구성요소는 유기용제 발생장치, 향온향습기, 시험챔버, 배기장치, 그리고 제어컨트롤러 또는 제어컨트롤 시스템이다. 구성 요소에 따라 다르나 각 요소의 세부적인 기계·기구·장치가 다양하다. 예를 들어, 유기용제 발생장치는 공기압축기(air compressor), 건조기(dryer), 시린지 셋트(syringe set), 열맨틀(heating mantle), 냉각기(chiller), 향온수조, 기수분리기, 버퍼(buffer), 혼합기(mixer)를 포함한다.

시험챔버 시스템 구성요소 중 일부는 기존 실험실 설비 또는 장치를 활용하였다. 배기장치와 연결되는 흡후드와 시험챔버 상단에 설치된 국소배기장치 후드는 기존 실험실 설비이다. 제어컨트롤러의 세부 장비라 할 수 있는 멀티가스모니터도 기존 장비이다. 멀티가스모니터는 시험챔버 시스템 구축의 위탁범위에 포함되지 않았으나 시스템 구축할 때 온라인화 시켜 제어컨트롤러가 시스템 챔버를 적절하게 모니터링할 수 있도록 설계하였다.

시험챔버 시스템의 개략도는 <그림 III-2>와 같다.



<a>

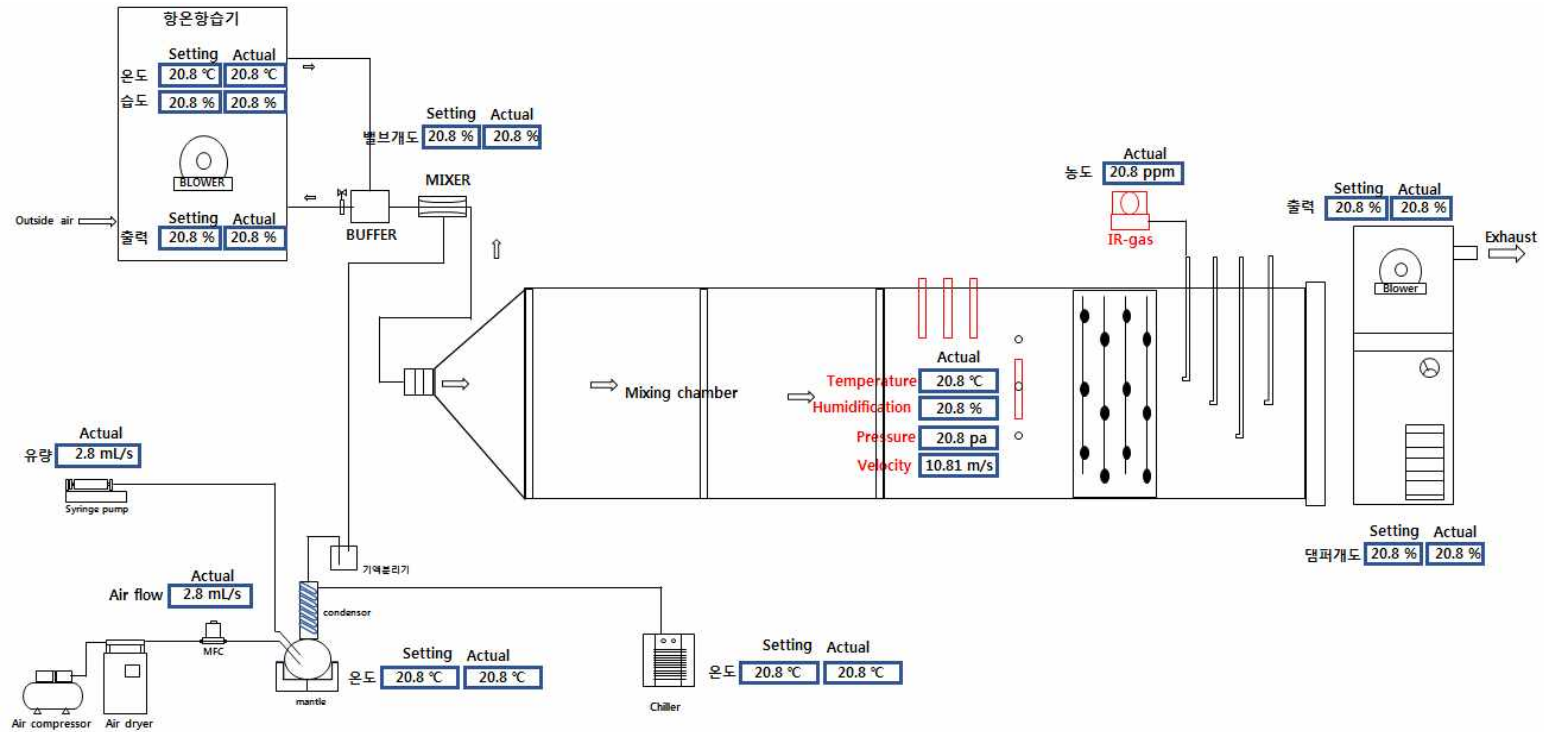


그림 III-2. 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템 계통도 (a: 전체 개략도, b: 요소별 설계 및 운전 조건)

2) 시험챔버 주요 구성요소별 기능 및 사양

(1) 유기용제 발생장치 1식

■ 주요 기능

유기용제를 가열증발시켜 가스화 시키고 냉각 콘덴서를 이용하여 사용자가 원하는 온도로 제어한다.

- 발생기의 플라스크에 연결된 시린지 펌프를 이용하여 플라스크에 정량화된 발생물질을 투입시킨다.
- 발생기에 연결된 air compressor와 air dryer를 통하여 만들어진 습기가 제거된 공기를 질량유량계(mass flow controller, MFC)를 이용하여 정량화된 공기를 발생기의 플라스크에 공급된다.
- 발생기의 플라스크에 공급된 발생물질은 맨틀을 이용하여 설정된 온도로 가열되어 액체가 기체화되며 이는 정량화된 공기와 혼합되어 플라스크에서 배출된다.
- 기체화된 물질은 chiller와 연결된 냉각콘덴서를 통하여 냉각되며, 기액 분리기를 통하여 액화된 기체를 남기고 순수 가스만 배출된다.

■ 설계사양

- 발생 방식 : 가열 증발식
- 용기 : 4구 플라스크, glass 2000 mL
- Mantle : Power - 500W, 2000 mL용
- Chiller : 5 liter
- 항온순환수조 : 6 liter, $-5^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$
- 기수 분리기 : 응축된 액체를 분리하여 순수 mist만 배출
- mixer는 항온항습 공기와 유기용제 발생장치로부터 들어온 가스의 혼합용기이며, 재질은 stainless steel이다. 버퍼의 항온항습 공기와 유기용제 증기가 혼합되어 시험챔버로 이동된다.

- 에어 컴프레셔 및 드라이어: 50L 알루미늄 에어탱크, 120 LPM 에어 컴프레셔, 저소음형, 자동 응축수 배출 에어컴프레셔임. 5HP 에어드라이어, 자동 응축수 배출 드라이어.

(2) 향온·향습기

■ 주요 기능

시료채취기 시험챔버에 향온, 향습 공기를 공급하기 위한 장치이다. 외부(실험실내)의 공기를 흡입하여 사용자가 설정한 온도, 습도 조건으로 형성한다. 향온, 향습된 공기는 버퍼에 공급되며, 버퍼의 일정한 압력을 유지한 후 남은 공기는 다시 향온 향습기에 공급된다. 세부 기능은 다음과 같다.

- Pre, Medium, HEPA Filter를 이용하여 공기를 정화시킨다.
- 전기 히터를 설치하여 공기를 가열한다.
- 냉매를 사용한 직접팽창 코일을 설치하여 공기를 냉각 및 제습한다.
- 가열증발식 가습기를 사용하여 습도를 조절한다.
- 배기구와 급기구가 연결되어 있는 버퍼를 통하여 배출되는 에어의 압력을 제어한다.
- 온도 및 습도는 제어컴퓨터로 제어한다.

■ 설계사양

- 외형사이즈 : 610 x 610 x 5200mm
- 필터
 - . Pre_filter - 300 x 300 x 25mm
 - . Medium_filter - 300 x 300 x 150mm, 85%
 - . HEPA filter - 300 x 300 x 150mm, 99.8%
- 재질 : stainless steel or steel (분체도장)
- heater coil : Electrical heating coil, 1.5 kW

- cooling coil : 직접팽창식, 1 HP
- 가습기 : 가열 증발식, 1kW
- 블로어 : type-ring blower, 정압 1300 mmH₂O, 풍량 2.9 m³/min, power 0.93 kW
- 제어 컨트롤러 : PLC, 프로그램, Touch controller

(3) 시험챔버 1식

■ 주요 기능

시험 프로토콜에 따라 일정한 온도, 습도, 기류 조건에서 혼합유기용제 농도 수준을 조성한 후 Passive samplers를 노출시켜 성능 시험을 실시하기 위한 설비이다 (그림 III-3).

- 유기용제 발생 장치로부터 공급되는 혼합유기용제 농도는 혼합기, 10mm 배플, 20mm 배플, 20mm 배플을 통하여 균일화 안정화된다. 시험챔버 안의 혼합유기용제는 온도계, 습도계, 풍속계를 이용하여 모니터링하게 된다.

- 혼합유기용제는 수동식 및 능동식 시료채취기를 통과한 이후에 위치한 측정 포트를 통하여 IR gas 측정시스템으로 실시간 모니터링된다.

테스트 챔버는 다음의 하위 구성요소를 포함한다. 배플(타공판) 3개는 탈착형으로 제작한다. 온습도계 2port, 압력계 1port, 풍속계 3port 확보한다. 혼합유기용제 증기의 농도를 측정하기 위해 수동식 시료채취기 측정위치 앞 부분에 6개의 port를 확보한다. 수동식 시료채취기 36개 이상 장착 가능하도록 한다. 수동식 시료채취기 교체를 위하여 4개의 개별 슬롯(슬롯당 수동식 시료채취기 9개씩 장·탈착 가능 구조)으로 제작한다. 능동식 시료채취기 12개 이상 장·탈착이 가능하도록 제작한다.

■ 설계사양

- 외형 사이즈 : 610 x 610 x 1500 mm
- 메인 공기 입구 - ϕ 100
- 타공판
 - a. 타공판 1 - hole ϕ 10, 간격 10 mm
 - b. 타공판 2 - hole ϕ 20, 간격 20 mm
 - c. 타공판 3 - hole ϕ 20, 간격 20 mm
- 재질 : Frame - STS304, 50 x 50mm 프레임, case-Polypropylene 6.0T
- 외부보온재 : 덕트보온재, 난연 고무발포 보온재
- 공기 토출구 필터 : Pre filter, size - 610 x 610mm
- sampling port for sampler: Passive sampler - 총36개, 9개 4개슬롯;
Active sampler -총 12개
- sampling port for IR gas
 - a. 6 port - 3 x 2 line
- port for sensor
 - a. 온습도계(temperature & humidity meter) - 2port
 - b. 압력계(differential pressure gauge) - 1port
 - c. 풍속계(velocity meter) - 3 port

(4) 배기장치 1식

■ 주요 기능

샘플러 노출 및 측정 후 남은 잔류 가스를 외부로 배기하기 위한 필터 및 블로어를 포함하는 장치이다.

- 남은 가스는 프리필터를 통과하여 배기장치로 들어오게 된다.
- 배기장치에서는 Pre, Medium, Charcoal filter를 거쳐 1차 처리된 후 실험실 내부에 설치된 국소배기장치 후드를 통해 건물 외부로 배출된다.

■ 설계사양

- 외형 사이즈 : 610 x 610 x 1200mm
- 필터: Medium Filter - 600 x 300mm; Charcoal filter
- 재질 : case - stainless steel 304
- 블로어 : Power - 1 kW

(5) 제어컨트롤러 1식

■ 주요 기능

시료채취기 시험챔버를 작동시키기 위한 컨트롤러 및 모니터 센서가 연결되어 있으며, 컨트롤러 및 모니터는 다음을 포함한다.

- 온도, 습도 모니터 및 제어
- 풍속 모니터 및 제어
- 가스 농도 모니터(IRgas) 및 제어
- 압력 모니터

제어컨트롤러의 기능은 구성요소에 따라 다음과 같다. 항온항습기의 온도, 습도 제어; 유기용제 발생장치의 MFC 유량, 맨틀 온도, 칠러 온도 제어; 시험챔버의 온도, 습도, 압력, 풍속, IRgas 농도 측정; 그리고 배기장치의 인버터 속도 제어

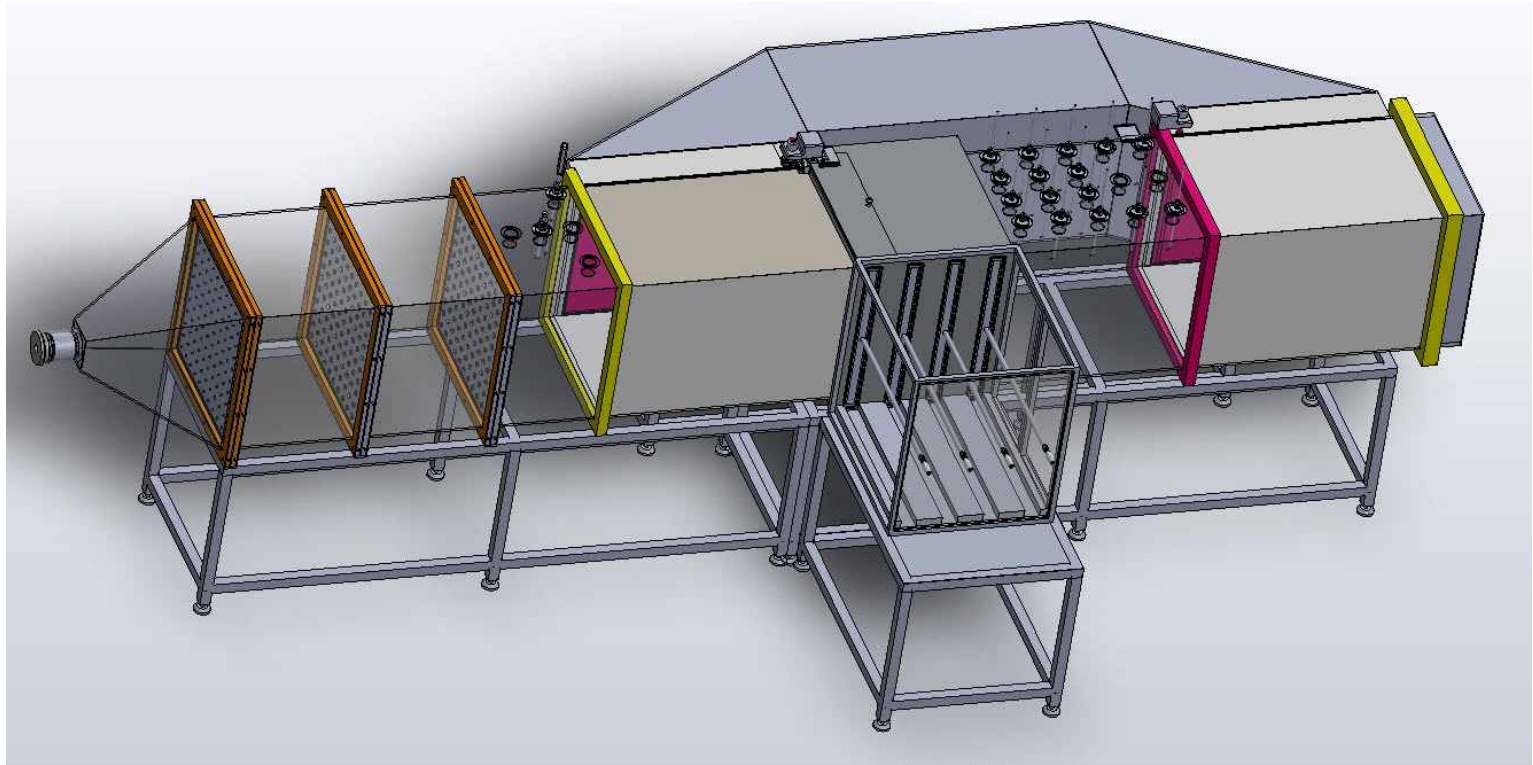
■ 설계사양

- 센서

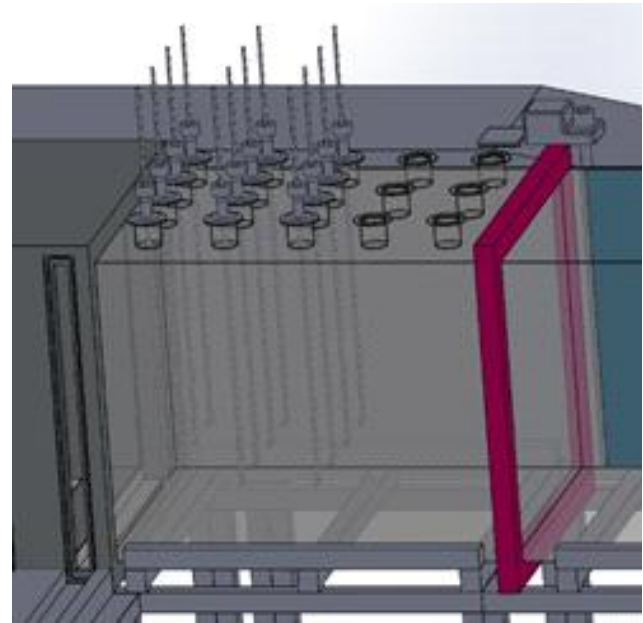
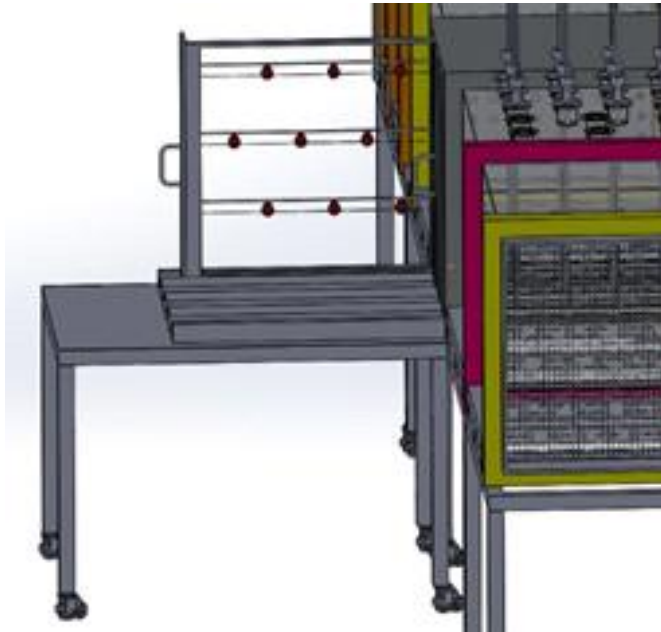
- a. 온습도 센서: 온도 $-20^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$; RH 0~100% 측정범위; Accuracy $\pm 1.5\%$,
- b. 풍속센서: Range 0 to 30 m/s, Accuracy $\pm 3\%$ (± 0.015 m/s), Resolution 0.01 m/s
- c. 차압센서: 0~1,000 pascal
- d. 컨트롤러: 온습도, 차압, 풍속 모니터링; 항온항습기, 발생기, 배기처리장치 제어; MFC 제어; 실시간 측정장비 연결가능

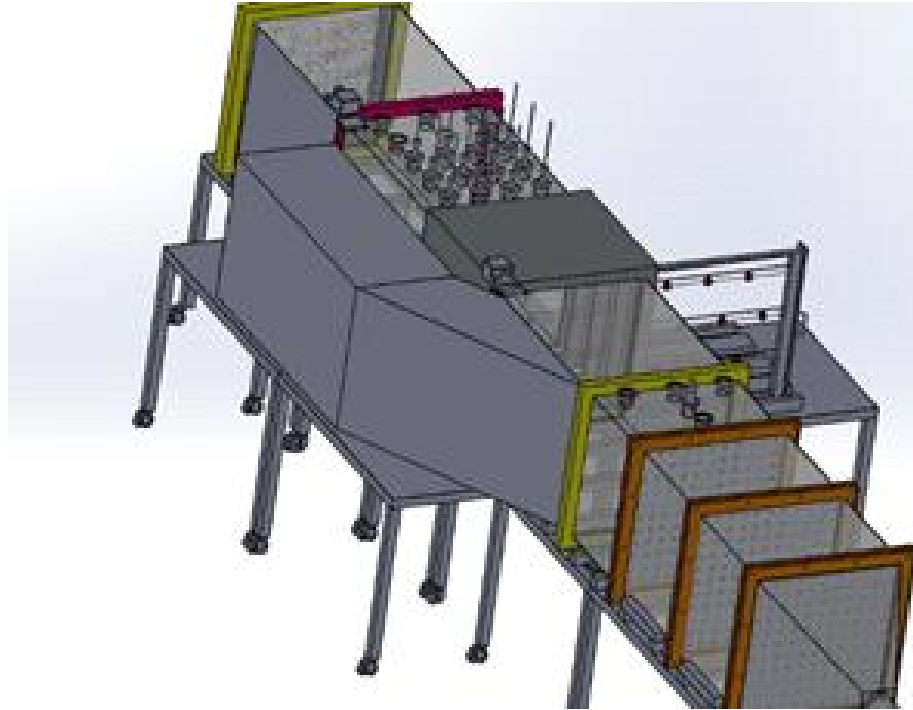
- 프로그램

- a. 온도, 습도, 압력, 풍속, 농도 모니터링
- b. 온도, 습도, 풍속, 농도 control
- c. 데이터 저장 및 report



<a>





<c>

그림 III-3. 시험챔버 (a: 전체 개략도, b: 수동식 및 능동식 시료채취기 장·탈착 작업대 및 멀티가스 모니터 포트, c: 바이패스 도면)

(6) 기타 멀티가스모니터 등 기계·기구·장비

멀티가스모니터는 시험챔버 시스템의 구성요소 중 제어프로그램 시스템의 일부 기계장치에 해당된다 (그림 III-4). 멀티가스모니터의 기능은 시험챔버 시스템이 정상적으로 작동될 때 시험챔버 안의 혼합유기용제 종류별 농도 수준을 실시간으로 모니터링하는 장비이다. 능동식 시료채취법을 이용하여 혼합유기용제 종류별 농도 수준을 산출하여 기준농도로 사용하는 방법과 구분된다.

멀티가스모니터는 시험챔버 시스템 구축 과정에서 외부 전문업체에 위탁하는 과업 범위에 포함되지 않았다. 그러나 시스템 설치 단계에 멀티가스모니터를 연결시켜 h/w 및 s/w 기능이 잘 이루어질 수 있도록 조치하였다.

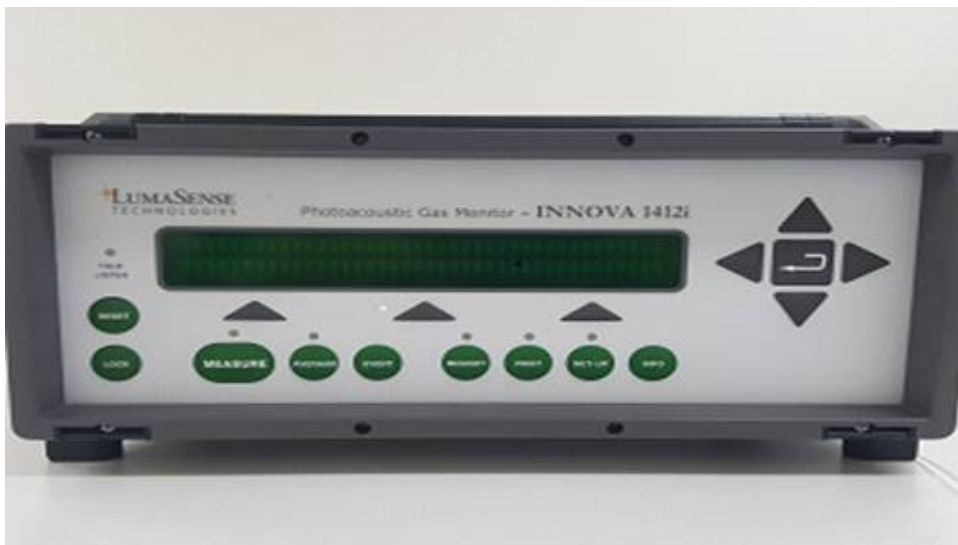


그림 III-4. 멀티가스모니터

본 시험챔버 시스템에 사용되는 멀티가스모니터는 7가지 유기화합물용 필터가 장착되어 있다 (표 III-6). 따라서 본 시험챔버 시스템을 이용하여 수동식 시료채취기의 성능을 시험하고자 할 경우 실험계획 단계에서 어떤 유기용제를 대상으로 시험을 실시할 지 미리 결정하되 멀티가스모니터로 실시간 모니터링이 가능한 유기용제를 선정하여야 한다.

표 III-6. 멀티가스모니터를 통해 모니터링 가능한 유기화합물 종류

유기화합물	CAS*	노출기준(ppm)	비고(폭발범위**, %)
벤젠	71-43-2	0.5	1.2 - 8
부틸 아세테이트	123-86-4	150	1.2 - 7.6
디클로로 메탄	75-09-2	50	12 - 25
에틸벤젠	100-41-4	100	1 - 6.7
메틸에틸케톤	78-93-3	200	1.8 - 11.5
메틸이소부틸케톤	108-10-1	50	1.4 - 7.5
메타-크실렌	108-38-3	100	1.1 - 7

* Chemical abstracts service

** 시험챔버 시스템의 전체 또는 일부 기계·장치의 안전성 검토 참고 정보

3) 시험챔버 시스템 성능시험 결과

시험챔버 시스템이 설치된 후 시스템의 성능시험을 실시하였다. 성능시험은 ISO 16107 국제표준을 중심으로 온·습도, 풍속, 유기화합물 농도에 대해 설계조건 범위내에서 간이적으로 이루어졌으며, 시스템 제어 프로그램의 성능 시험도 실시하였다 (자세한 사항은 부록5 참조).

(1) 온·습도 시험

온·습도 시험은 설계조건(온도: $10^{\circ}\text{C} \pm 3$, $20^{\circ}\text{C} \pm 3$, $30^{\circ}\text{C} \pm 3$; 습도: $25\% \pm 5$, $50\% \pm 5$, $80\% \pm 5$)에 따라 성능시험을 실시한 결과 적정한 것으로 나타났다.

(2) 풍속 시험

풍속 시험은 시험조건(0.2m/s , 0.1m/s , 0.05m/s)에 따라 성능시험을 실시한 결과 적정한 것으로 나타났다. 풍속의 균일도에 대해서도 실시하였으며, 측정위치 단면 9개 지점에서 측정한 결과가 설정조건($\pm 3\text{m/s}$) 이내이었으며, 평균 및 표준편차는 각각 $0.2\text{m/s} \pm 1.8$, $0.1\text{m/s} \pm 1.7$, $0.05\text{m/s} \pm 1.0$ 으로 나타났다.

(3) 농도 시험

농도 시험은 Methyl isobutyl ketone 표준시약을 이용하였으며, 설정농도는 노출 기준의 2X 수준(100 ppm)에서 성능시험을 실시한 결과 적정한 것으로 나타났다. 농도의 균일도에 대해서도 실시하였으며, 측정위치 단면 9개 지점에서 측정한 결과가 설정조건($\pm 10\%$) 이내이었으며, 평균 및 표준편차는 $101.6\text{ ppm} \pm 1.7$ 로 나타났다.

(4) 시스템 제어프로그램 시험

제어프로그램 시험은 시스템의 구성요소 중 향온향습기, 배기장치, 유기용제 발생장치, 버퍼 및 믹서의 일부 또는 전체 작동에 대해 제어 수준을 시험한 결과 정상인 것으로 나타났다.

4. 수동식 시료채취기 개발을 위한 기초 및 특허 조사

1) 수동식 시료채취기의 유통, 가격, 형태 등 특징

(1) 3M OVM 3500

현재 국내에서 가장 보편적으로 사용되어지고 있는 수동식 시료채취기는 3M사의 제품이며, 금액은 개당 약 15,000원 정도이다 (그림 III-5). 채취하고자 하는 화학물질의 종류에 따라 다른 채취기를 사용하며 가장 일반적으로 유기용제 채취에 사용되는 제품은 OVM 3500이다. 채취기는 약 지름 3 cm 정도의 다공성 확산형인 뱃지형으로 표면적이 넓고 확산통로가 짧으며, 수평기류에 의한 흡착률이 낮아지는 것을 방지하기 위한 다공성플라스틱 막을 가지고 있다. 흡착제는 활성탄 막으로 되어있으며, 시료채취율은 각 물질에 따라 다르지만 약 20~40 mL/min이다. 주로 CS₂를 탈착용매로 사용한다.



그림 III-5. 3M OVM 3500

(2) SKC VOC 575-001

국내에서 두 번째로 많이 사용되어지고 있는 제품은 SKC사의 제품이며 금액은 개당 약 34,000원이다 (그림 III-6). 채취하고자 하는 화학물질의 종류에 따라 다른 채취기를 사용하며 유기용제 채취에 사용되는 일반적인 제품은 VOC 575 제품이다. 채취기는 약 지름 2 cm 정도의 다공성 확산형인 뱃지형으로 실제 기류가 들어오는 부분은 약 지름 0.5 cm 정도이며, 시료채취율은 물질에 따라 변동은 있으나 약 10~20 mL/min이다. 3M제품과 다르게 흡착제가 입자상 활성탄이 들어있어 채취 후 흡착제를 다른 용기에 옮겨 CS₂를 탈착용매로 사용하여 분석한다.



그림 III-6. SKC VOC 575-001

(3) Radiello RAD 130S

Radiello사에서 취급하는 수동식 시료채취기 중 벤젠, 톨루엔, 크실렌을 포함한 휘발성유기용제 채취가 가능한 제품으로는 RAD 130S있으며 금액은 개당

160,000원이다 (그림 III-7). 이 채취기는 다공성 확산형인 방사형으로 표면적이 넓고 확산경로가 좁아 튜브형보다 높은 흡착율을 가진다. 시료채취율은 다른 제품과 같이 물질마다 다르나 약 40~80 ml/min정도이다. 채취기는 외부 오염을 막아줄 수 있는 몸체와 활성탄으로 채워진 스테인리스 스틸 카트리지로 구성되어 있으며, 시료 채취시에는 카트리지를 몸체 안으로 넣어 플라스틱 판에 고정시켜 사용하며 CS₂를 탈착용매로 사용하여 분석한다.



그림 III-7. Radiello RAD 130S

(4) Draeger ORSA 5

Draeger사에서 취급하는 수동식 시료채취기 중 휘발성유기용제 채취가 가능한 제품으로는 ORSA 5가 있으며 금액은 개당 180,000원이다 (그림 III-8). 채취기는 확산이 한방향으로 이루어지는 비다공성 투과형인 튜브형으로 외부 기류와 접촉되는 표면적이 적고 확산 경로가 긴편으로 बै지형보다 흡착율이 낮은편이다. 작은 원통형 튜브의 양쪽으로 기류가 이동하며 입자상 활성탄이 중앙부분

에 채워져있으며 시료채취율은 약 4~8 mL/min이다. 시료의 분석방법은 해당 사로 시료를 보내어 분석이 가능하다.

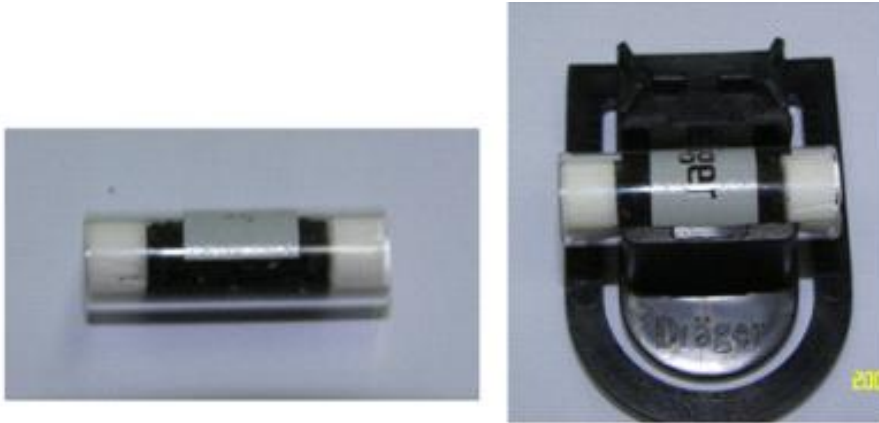


그림 III-8. Draeger ORSA 5

(5) Waterloo Membrane sampler

The Waterloo Membrane SamplerTM(WMSTM)은 캐나다의 공립 연구중심대학인 The University of Waterloo에서 고안된 유기화합물 측정이 가능한 수동식 시료채취기이다 (그림 III-9). 채취기는 비다공성 투과형인 튜브형으로 다른 튜브형에 비해서도 낮은 흡착율을 가지는 편이다. 유리 바이알에 앞면의 폴리디메틸실록산(Polydimethylsiloxane, PDMS) 여과막을 통해 한방향으로만 기류가 이동하며 입자상 활성탄이 채워져있다. 시료 채취시에는 바이알을 거꾸로 매달아 사용하며 시료채취율은 약 0.8~19 mL/min이다.



그림 III-9. Waterloo Membrane sampler

(6) Pro-Tek Organic Vapor G-AA Air Monitoring Badge

DuPont사의 수동식 시료채취기는 약 세로 10 mm 가로 7 mm의 직사각형 형태로 얇은 막 형태의 활성탄을 흡착제로 사용하고 있다 (그림 III-10). 채취기의 커버를 한쪽 혹은 양쪽을 선택적으로 제거하여 사용할 수 있으며 시료채취율은 각각 약 30~50 mL/min, 약 70~100 mL/min 이다. 시료의 전처리는 SKC 제품과 비슷하게 흡착제를 다른 용기에 옮겨 CS₂를 탈착용매로 사용하여 분석한다.

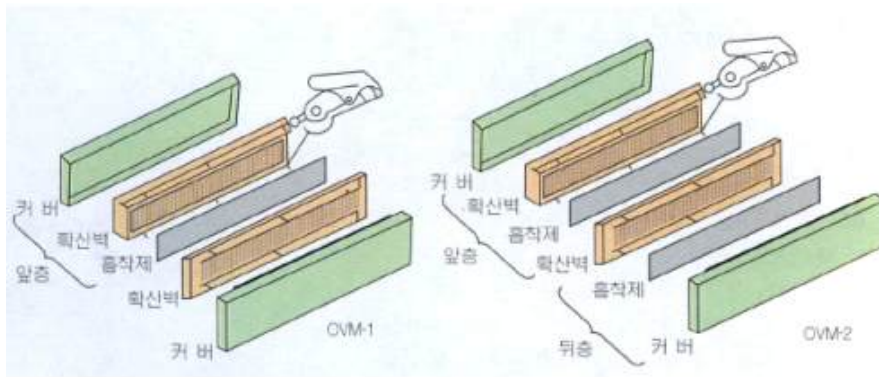


그림 III-10. Pro-Tek Organic Vapor G-AA Air Monitoring
Badge

2) 국산화·상용화를 위한 특허자료 조사 결과

작업장 공기 분야용 수동식 시료채취기를 대상으로 검색하여 확보한 특허자료는 총19개(국외 16개, 국내 3개) 이었다(표 III-7). 확보된 특허자료 중 일부를 검토하였으며, 검토내용을 요약한 예는 다음과 같다.

표 III-7. 수동식 시료채취기 관련 특허자료 조사 현황

연번	특허	품명	양수인
1	미국특허 6,607,581 B2	수동식 시료채취 뱃지	SKC, Inc(미국 펜실베이니아주 소재)
2	미국 특허 4,040,805	유기증기 개인노출 측정용 도시미터	Louisiana State Univ. 농업기계대학 감독위원회 (미국 Baton Rouge)
3	미국 특허 7,889,980 B2	수동식 시료채취 뱃지의 흡착제 이동	SKC, Inc.(미국 펜실베이니아주 소재)
4	미국 특허 4,680,165	증기/입자상 유기화합물 모니터링을 위한 도시메타	-
5	미국 특허 6,063,041	휘발성 물질 채취를 위한 기구	Firmenich SA(스위스 제네바)
6	미국 특허 9,757,774 B2	수동식 시료채취기	MyExposome, Inc.(미국 펜실베이니아주 소재)
7	미국 특허 2007/0163436 A1	수동식 시료채취 뱃지의 흡착제 이동	-
8	미국 특허 4,350,037	개인 가스 모니터	Perkin-Elmer Limited(영국)
9	미국 특허 2014/0069184 A1	수동식 시료채취장치와 시료채취 및 분석 방법	Tadeusz Gorecki(캐나다 워터루), Suresh Seethapathy(미국 아나폴리스), Geosyntec Consultants, Inc.(미국 보카레이턴)

연번	특허	품명	양수인	승인날짜
10	미국 특허 4,790,857	가스상 오염물질 도시메타	-	1986.11.20
11	미국 특허 4,040,805	유기증기 노출 평가를 위한 개인 모니터링 장치	Board of Supervisors Louisiana State University Agricultural and Mechanical college(미국 루이지애나)	1976.10.22
12	미국 특허 9,849,489 B2	수동식 시료채취 기구	MyExposome, Inc. (미국 필라델피아)	2016.10.26
13	유럽 특허 2 920 570 B1	수동식 시료채취 기구	-	2013.11.13
14	미국 특허 4,102,201	증기 채취 및 분석 기구	Minnesota Mining and Manufacturing Company	1977.9.26
15	미국 특허 6,050,150	확산 채취기	-	1997.9.5
16	미국 특허 5,482,677	열탈착형 수동 도시메타	Shell Oil Company(미국 텍사스)	1993.5.14
17	대한민국 등록실용 20-0398739	오염공기 측정용 시료채취 흡착관	-	2005.10.10
18	대한민국 등록실용 20-0407810	연결부를 갖는 오염공기 측정용 시료흡착관	-	2006.1.27
19	대한민국 공개특허 10-2014-0010697	수동대기채취기	국립대한법인 울산과학기술대학교 산학협력단	2014.1.27

■ 미국 특허 6,607,581 B2

- 품명 : 수동식 시료채취 뱃지
- 발명자 : D.L. Smith 및 P.M. Hall
- 양수인 : SKC, Inc.(미국 펜실베니아주 소재)
- 신청번호 : 09/834,694
- 승인날짜 : 2003.8.19

공기 중 다양한 유해물질에 대해 개인 노출을 평가하기 위한 수동식 시료채취기로서 사용자의 옷깃에 임시 고정될 수 있도록 클립이 있는 뱃지 형태로 고안되었다 (그림 III-11). 시료채취기의 활성탄을 열탈착 튜브로 옮겨 가스크로마토그래피를 이용하여 분석하는 방법이며, 1회의 탈착과정으로 전처리가 용이하다. 흡착재가 수동식 시료채취기에서 열탈착 튜브로 이동하는 것이 용이하도록 고안되었다. 사용이 편리하며, 기존의 장치들 보다 오류가 적다.

○ 특허항목

1. 일반적으로 열탈착 튜브를 통해 흡착재를 배출할 수 있는 개구부가 포함된 원뿔모양의 용기와 입자상 흡착재를 포함한 수동식 시료채취기이다.
2. 1항에 있어서, 해당 용기에 공기가 유입될 수 있는 구멍이 있는 판을 포함한 수동식 공기 시료채취기이다.
3. 1항에 있어서 사용자의 옷깃에 채취기를 고정시키는 방법을 포함한 수동식 시료채취기이다.
4. 2항에 있어서 해당 용기에 수분을 차단할 수 있는 막을 포함한 수동식 시료채취기이다.
5. 2항에 있어서 채취기 내부에 흡착재를 보관할 수 있는 칸막이를 포함한 수동식 시료채취기이다.

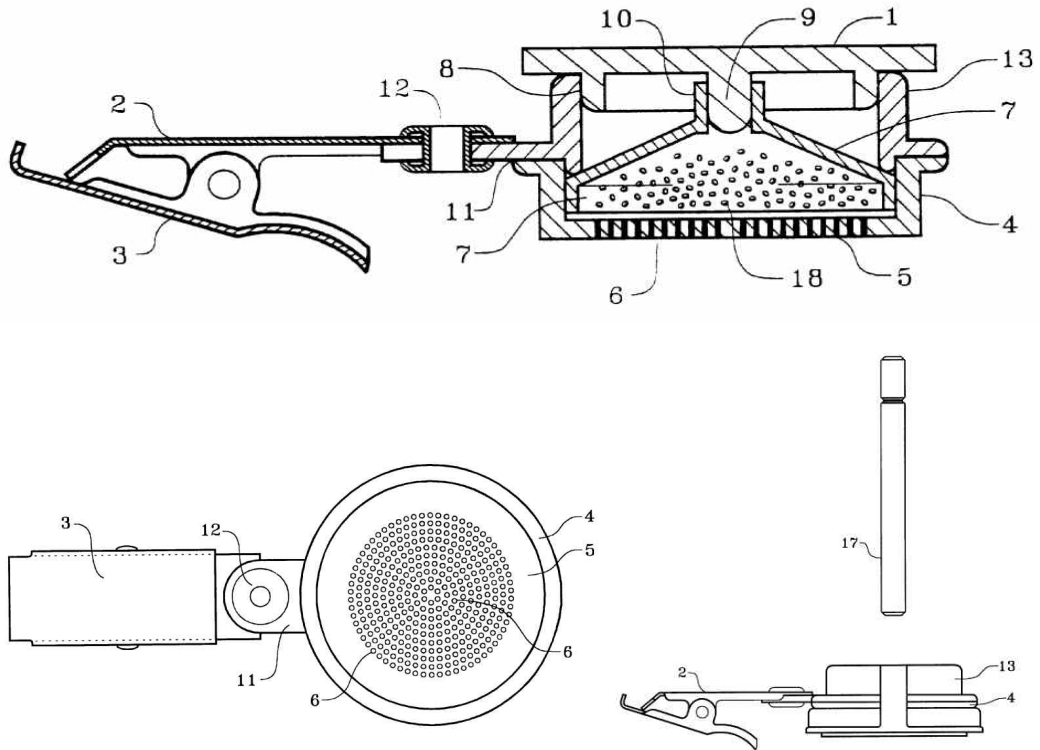


그림 III-11. 미국 특허 6,607,581 B2

6. 1항에 있어서 정전기를 제거하기 위해 적어도 하나의 전도성 표면을 포함하는 수동식 시료채취기이다.
7. 1항에 있어서 입자상 흡착재를 주입 및 배출하기 위한 튜브가 부착된 수동식 시료채취기이다.
8. 입자상 흡착재와 이를 담을 수 있는 용기가 포함된 수동식 시료채취기이다.

용기에는 분석을 위해 시료를 받는 튜브와 배출구를 접합하기 위한 형태의

흡착재 배출구, 마개 및 공기가 유입될 수 있는 구멍이 있는 판이 포함된다.

9. 8항에 있어서 사용자의 옷깃에 시료채취기를 부착하는 방법이 포함된 수동식 시료채취기이다.
10. 8항에 있어서 흡착재는 Carbonaceous 흡착재를 사용한 수동식 시료채취기이다.
11. 8항에 있어서 해당 용기의 패널에 공기 유입 시 수분을 제거하는 막을 포함하는 수동식 시료채취기이다.
12. 8항에 있어서 해당 용기는 원뿔형을 가지는 수동식 시료채취기이다.
13. 8항에 있어서 해당 용기는 원뿔꼴대기 모양과 유사한 형태를 가지는 수동식 시료채취기이다.
14. 8항에 있어서 해당 용기에서 배출된 입자상 흡착재와 이를 받는 튜브와 접합 가능한 수동식 시료채취기이다.
15. 공기 중 유해물질 시료를 얻는 방법은 수동식 시료채취기에 열탈착 튜브를 접합하여 시료채취기의 입자상 흡착재를 열탈착관에 부어준다.
16. 15항에 있어서 수동식 시료채취기의 입자상 흡착재의 부피는 열탈착 튜브의 내부 부피보다 크지 않아야 한다.
17. 15항에 있어서 흡착튜브에서 캐리어 가스로 흡착된 유해물질을 탈착하고 캐리어 가스를 이용하여 유해물질을 분석한다.
18. 15항에 있어서, 시료채취기는 개인이 착용한다.

■ 미국 특허 4,040,805

- 품명: 유기증기 개인노출 측정용 도시미터
- 발명자: L.H. Nelms 등
- 양수인: Louisiana State Univ. 농업기계대학 감독위원회 (미국 Baton Rouge)

- 신청번호: 735,010
- 승인날짜: 1977.8.9.

유기증기 중 염화비닐을 대상으로 하여 개인노출을 측정하기 위해 고안된 장치로 유해물질이 멤브레인을 통과해 스며들어 활성탄에 흡착된다. 측정이 완료되면 시료는 전처리 과정을 거쳐 가스크로마토그래피로 시료농도를 산출하는 원리이다. 사용이 쉽고 온·습도에 영향을 작게 받으며, 미국 OSHA의 개인측정 방법에 적합하다. 본 문서는 10개의 특허항목을 가지고 있으며 2개의 그림을 제시하였다 (그림 III-12).

그림 III-12a는 기기의 정면이고 그림 III-12b는 옆모습을 도식화 한 것이다. 몸체(11)는 흡착재(12)와 노출 증기에 반응하지 않는 단단한 재질로서 금속이나 플라스틱 재질이 적합하며, 무게가 가볍고 가공이 쉬운 알루미늄이 바람직하다. 흡착재(12)는 활성탄이나 숯이 적합하며, 약 250 - 350℃에서 24시간동안 건조시켜야 하며, 이에 적합한 활성탄은 Darco G-60(20-40 Mesh, Matheson Coleman and Bell)이다. 몸체부분에 흡착재를 채우기 위해 1 - 25mm의 공간(챔버)이 있으며, 보통 0.1 - 2g정도가 충전 된다. 이미 알려진 방해 작용은 없으며, 온·습도에 영향을 적게 받으며, 시료채취 시간은 활성탄 재충진 없이 1 - 24시간 동안 가능하다. 챔버와 막(13)의 너비는 20 - 48 mm의 범위에서 사용되며, 충전되는 흡착재의 양에 따라 달라질 수 있다. 막(13)을 덮고 있는 16(불임판)과 18(격자판)은 단단한 플라스틱 재질로 Poly-fluorinated ethylene polymer가 적합하다. 15(플러그)는 반응성이 없고 탄력 있는 재질로 플라스틱이나 플라스틱으로 코팅된 것을 사용하며, 충전된 흡착재가 흘러나오지 않도록 해준다.

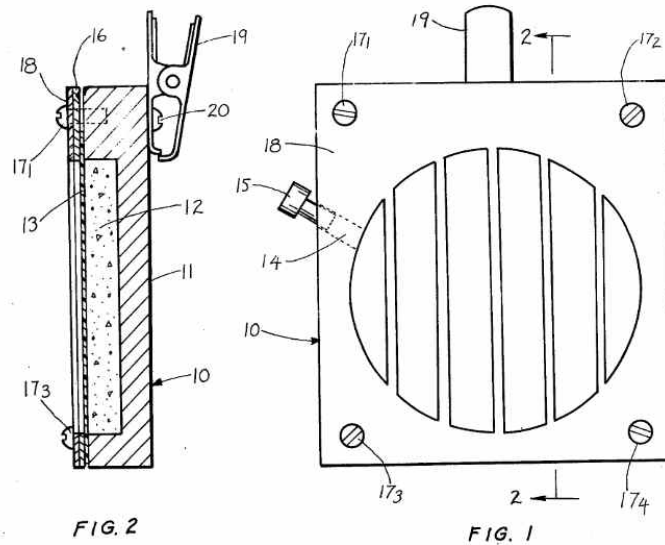


그림 III-12. 미국 특허 4,040,805

○ 특허 항목

1. 공기 중 유해물질에 대한 노출의 정량적 평가가 가능한 모니터링 장치로 흡착재와 유기증기에 반응하지 않는 단단한 재질로 되어있다. 입자상의 흡착재로 채워진 부분과 흡착재를 보호할 수 있는 막으로 구성된다. 막은 반응성, 통기성이 없으며, 약 0 - 40℃에서 투과성에 큰 변이가 없으며, 약 10ppb - 10ppm 범위의 농도가 완전히 투과 가능하다. 공기 중 유해 물질은 시료채취기 내부로 용해되어 막을 통과해 안쪽 흡착재에 흡착되며, 분석을 통해 시간가중평균 노출농도가 산출된다.
2. 1항에서 유해물질은 염화비닐(Vinly chloride)를 뜻한다.
3. 1항에서 흡착재는 활성탄이나 숯을 뜻한다.
4. 1항에서 막의 투과성 변이는 약 0 - 40℃의 범위에서 $\pm 20\%$ 이내이다.
5. 1항에서 막의 평균 두께는 0.5 - 10 mils (약 12.7 - 254 μ m)이다.

6. 5항에서 막 평균 두께의 범위는 1 - 3 mils (약 25.4 - 76.2um)이다.
7. 5항에서 막은 Dimethyl silicone으로 되어있다.
8. 1항에서 상부에는 흡착재를 보호하는 막 위에 커버 플레이트와 그리드 플레이트가 있다.
9. 1항의 모니터링 장치의 몸체는 막을 제거하지 않고 흡착재를 충전하거나 제거할 수 있는 캡이 있는 개구부가 포함되어있다.
10. 염화비닐이 혼합된 공기에서 착용자의 노출을 검출하고 정량하는데 유용한 장치로서 활성탄으로 채워진 얇은 상부와 활성탄을 보호할 수 있는 막이 씌워져 있다. 또한, 염화비닐이 내부로 용해되어 막 뒤쪽의 활성탄에 흡착되며, 이는 착용자가 노출되는 염화비닐의 농도와 시간에 정비례해서 흡착된다.

■ 미국 특허 7,889,980 B2

- 품명 : 수동식 시료채취 뱃지의 흡착제 이동
- 발명자 : Lloyd V.Guild
- 양수인 : SKC, Inc.(미국 펜실베이니아주 소재)
- 신청번호 : 11/613,761
- 승인날짜 : 2009.6.14

수동식 공기 채취기 혹은 뱃지는 입자상의 흡착제의 이동을 위한 바이알 연결 부분에 대한 것이다 (그림 III-13). 현재까지의 리뷰에 의하면, 오염물이 뱃지의 흡착제에 붙고 이것을 다시 탈착시켜 크로마토그래프 흡착제에 흡착시켰다가 분석을 위해 다시 탈착하는 상당히 많은 과정을 거쳐 분석을 진행하게 되어 있다. 따라서 분석시간이 길어지고 과도한 흡착/탈착 과정을 거치게 되며 각 과정에서 여러 오류가 발생할 수 있다. 따라서 이 발명에서는 앞선 Smith의 특허인 Pat.

No. 6,607,581보다 한단계 발전한 방법을 보여주는 방법이다. 본 연구에서는 단 한번의 탈착과정으로 분석을 진행 할 수 있다. 따라서 보다 간편하게 사용이 가능하며 오류도 줄일 수 있다. 또한 बै지와 흡착제의 재사용이 가능하다.

흡착제(21)가 담긴 바이알(20)을 बै지의 바이알 어댑터 부분(18)에 결합하여 흡착제를 बै지의 빈공간(7)에 넣은 후 마개(1)를 닫아 근로자의 호흡기 영역 근처인 옷깃 등에 부착하여 시료를 채취한 후 다시 흡착제를 바이알로 옮겨 담아 분석을 실시한다. 공기는 시료채취기의 바닥부분(5)을 통해 들어가며 공기 중 수분을 제거하고 정전기를 최소화하기 위해 멤브레인 필터(14)를 부착하였다.

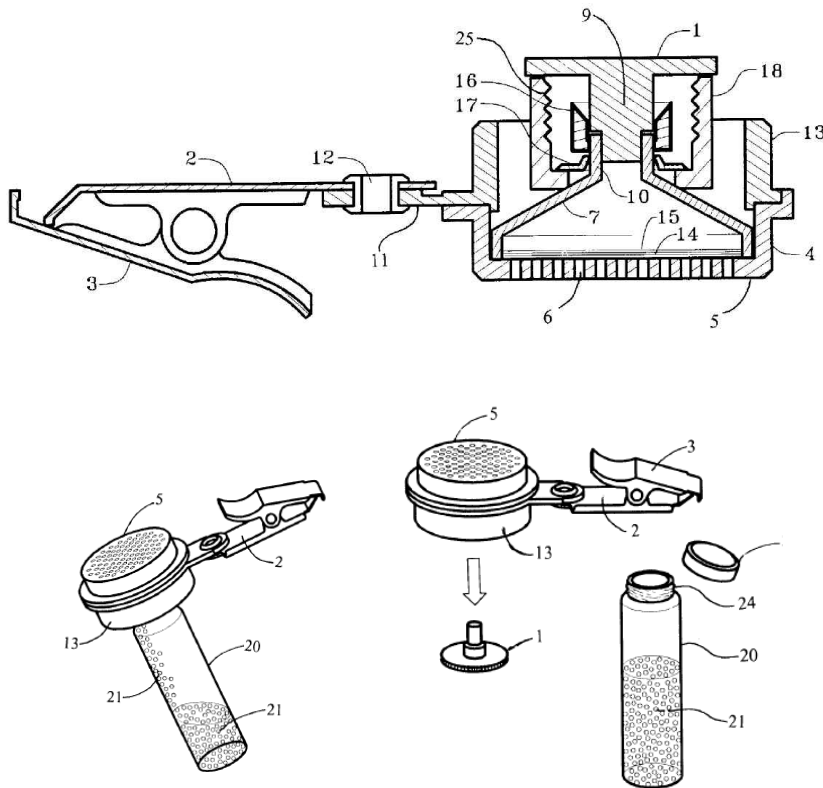


그림 III-13. 미국 특허 7,889,980 B2

■ 미국 특허 4,680,165

- 품명 : 증기/입자상 유기화합물 모니터링을 위한 도시메타
- 발명자 : Tuan Vo-Dinh
- 신청번호 : 359,791
- 승인날짜 : 1987.6.14

본 기구는 증기/입자상의 유기 화합물의 포집과 검출을 위한 도시메타이다 (그림 III-14). 특히 다핵방향성(polynuclear aromatic, PNA) 화합물과 같은 유기 화합물의 증기와 입자를 위한 수동식 도시메타로 화학처리된 다공성의 고체 표면에 채워되어 실온인광에서 샘플을 검출하는 것이 목적이며, 분자확산에 의해 매체에 포집된 물질의 추출이나 탈착의 과정을 거치지 않고 바로 모니터링 할 수 있도록 고안되었다. 특히 실온인광에서 lead acetate, thallium acetate, sodium iodide, sodium bromide, silver nitrate, cesium iodide 등과 같은 몇몇 중원자(heavy atom) 화합물에 의해 활성화되는 다핵방향성 화합물의 검출을 목적으로 한다. 샘플링은 화학처리된 표면(2)을 통해 이루어지며, 이 표면은 샘플의 흡착도를 높이고 흡착된 다핵방향성 분자의 형광방출을 향상시키기 위한 물질로 처리되어 있다. 확산에 의한 증기의 이동은 Fick's first law에 의해 계산되어진다.

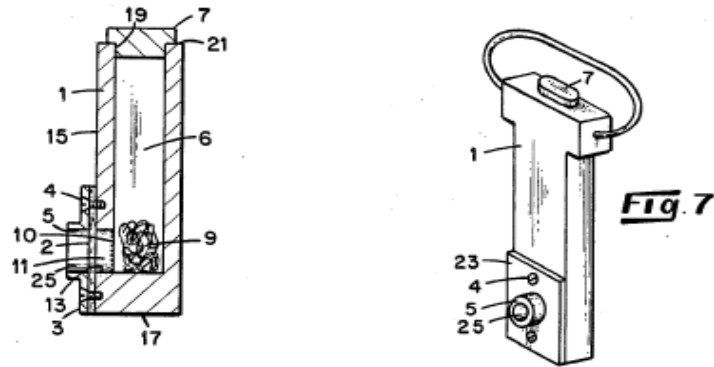


그림 III-14. 미국 특허 4,680,165

■ 미국 특허 6,063,041

- 품명 : 휘발성 물질 채취를 위한 기구
- 발명자 : Ivon Flament, Christine Vuilleumier, Laurence Aymard.
- 신청번호 : 09/117,396
- 승인날짜 : 2000.5.16

이 기기는 피부에 도포된 휘발성 물질을 정지된 상태의 표면에 포집하기 위한 장치로써, 보통 향수 산업에서 피부 또는 모발 혹은 다른 표면에서 휘발성 화합물의 확산을 측정하기 위한 장치이다(그림 III-15). 본 발명의 목적은 신뢰할 수 있고 재현성 있는 시료채취를 하면서 저렴하고 비전문가도 쉽게 사용 할 수 있는 장치를 제공함으로써 알려진 헤드스페이스 분석 기기의 단점을 보완하고자 함이다. 시료 채취는 스톱퍼(6)를 제거하고 하부 개구부(7)를 피부에 밀착시

킨다. 피부에서 휘발되는 물질은 그리드(3)를 통해 흡착제(5)에 도달하게 된다. 흡착제는 실리카겔, 카본블랙, 활성탄 등 휘발성 화합물의 성질에 알맞은 것으로 선택가능하다. 시료의 분석은 흡착 분말을 튜브에 옮겨 열탈착방법으로 분석한다.

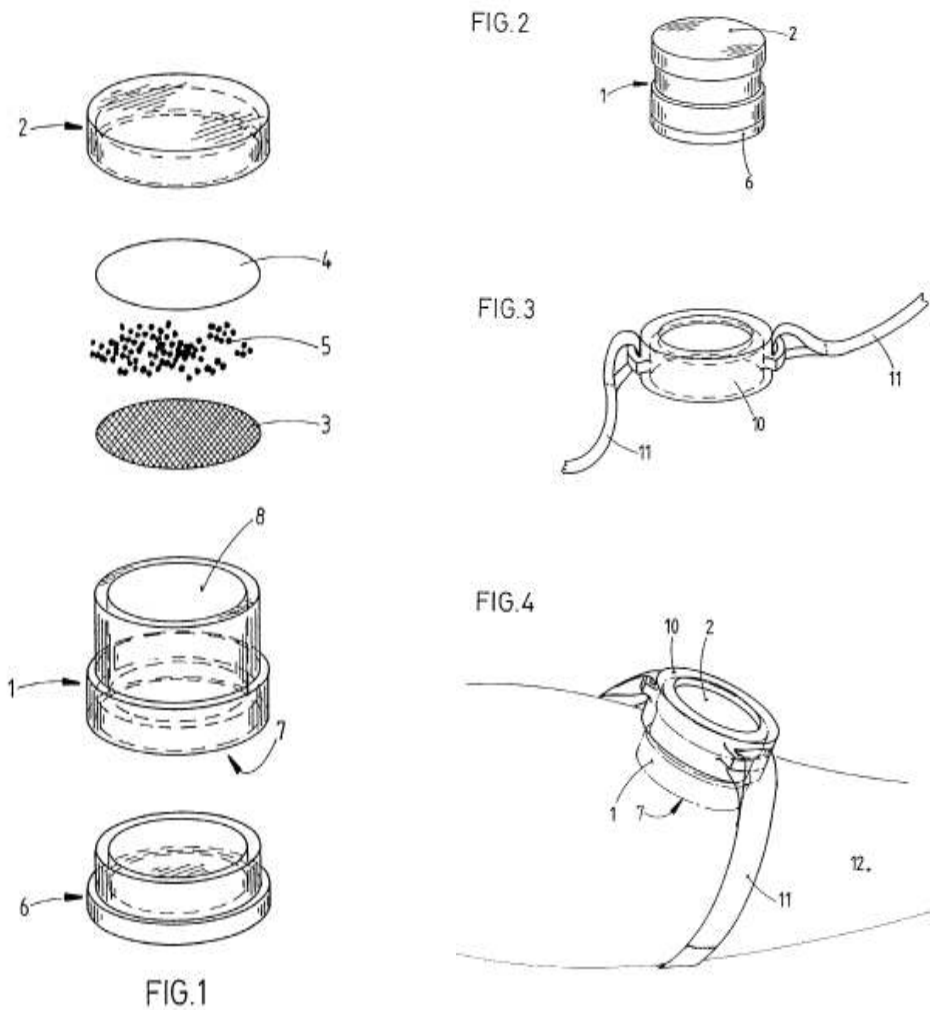


그림 III-15. 미국 특허 6,063,041

■ 미국 특허 9,757,774 B2

- 품명 : 수동식 시료채취기
- 발명자 : Steven O'Connell, Kim Anderson
- 양수인 : MyExposome, Inc.(미국 펜실베이니아주 소재)
- 신청번호 : 14/597,817
- 승인날짜 : 2017.9.12.

본 기기는 환경에서 노출가능한 다양한 화합물에 대한 농도를 모니터링할 수 있는 손목밴드 형태의 착용가능한 수동식 시료 채취기이다 (그림 III-16). 장치는 용매 및 열처리를 통해 정제 한 후 밀폐용기에 넣어 보관하며, 시료 측정시 개봉하여 장치를 착용하거나 특정 장소에 두어 시료를 채취한다. 본 장치의 분석은 유기용매나 산세척 등과 같은 용매추출 혹은 열탈착 등의 방법을 사용하여 전처리 하며 크로마토그래피 혹은 분광분석 등의 방법으로 분석이 가능하다.

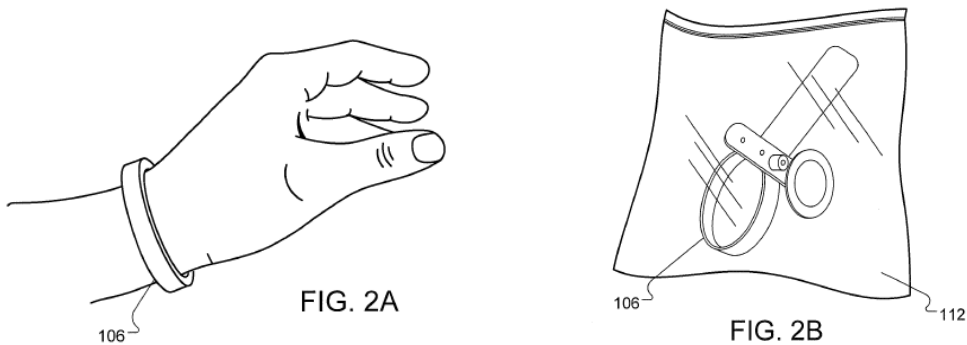


그림 III-16. 미국 특허 9,757,774 B2

3) 수동식 시료채취기 개발 및 보급을 위한 중장기적 가이드

2차년 과제는 1차년도 연구결과를 바탕으로 수동식 시료채취기의 시제품 개발이 이루어지고, 시제품에 대해 시험챔버 시스템을 이용하여 실시하는 성능시험 진행이 필요하다. 성능시험은 유기화합물중 일부를 선정하여 탈착효율, 시료채취율 및 시료채취기 용량, 저장안정성, 검출한계, 신뢰정량한계, 분석정밀성 및 재현성 등 항목이 포함된다. 시험챔버 시스템에 대한 특허출원 신청을 진행한다. 개발과정에서 수동식 시료채취기의 규격, 형태, 국산화의 장애요인 등 기초 정보에 대해 추가 조사가 병행될 필요 있다.

3차년 과제는 2차년까지 이루어진 연구결과를 바탕으로 시험챔버를 이용한 성능시험 범위와 내용의 확대가 필요하다. 또한, 개발되는 수동식 시료채취기의 신뢰성 및 정확성 평가와 함께 국내 안전보건 분야에서 수동식 시료채취기의 수요 정도, 시장 가격 등 실태를 조사하면서 수동식 시료채취기 개발의 비용-효과 분석, 생산인프라 구축의 타당성 평가 등이 필요하다.

IV. 고찰 및 요약

1. 일반사항

1) 전국 유기화합물 제조 및 취급 사업장 현황

2014년 전국 사업장 작업환경실태조사(안전보건공단, 2014)에 의하면 조사대상 사업장 126,846개소 중 5인 이상 제조업 및 비제조업의 경우 유기화합물 제조 사업장은 57개소, 유기화합물 취급 사업장은 24,542개소로 보고되었다. 5인 미만 제조업의 경우 유기화합물 제조 사업장은 7개소, 취급 사업장은 2,085개소이었다.

한편, 5인 미만 비제조업의 경우 유기화합물 제조 사업장 및 취급 사업장에 대한 정보가 제공되지 않았다. 그러나 2014년 전국 사업장 작업환경실태조사 자료 중 5인 미만 제조업에서 이들이 각각 차지하는 비율을 동일하게 적용 가능하다고 가정할 경우 5인 미만 비제조업에서 유기화합물 제조 사업장은 53개소, 취급 사업장은 15,526개소로 추정할 수 있다(한국산업안전보건공단, 2014, 박정근과 최준혁, 2017). 따라서 2014년 전국 사업장 작업환경실태조사 대상 사업장 126,846개소 중 유기화합물을 제조하거나 취급하는 사업장은 총 42,270개소(33.3%)이었다. 이런 식으로 2014년 작업환경실태조사 대상 전국 사업장의 모집단 1,979,897개소에 거칠게 적용할 경우 2014년 유기화합물을 제조·취급하는 전국 사업장은 총 659,306개소로 추정할 수 있다.

2) 유기화합물 관련 업무상 질병자 현황

최근 3년간(2015-2017년) 우리나라 산업재해 보고 자료에서 유기화합물과 관련된 업무상질병 노동자는 2015년 21명, 2016년 11명, 2017년 36명이었으며

(고용노동부, 2016 - 2018), 업무상질병 노동자 중 사망자와 이환자 비율이 연도에 따라 다르게 나타났는데 3년 전체 노동자 68명 중 질병사망자 비율은 47%로 나타났다. 그러나 이 질병사망자 수는 유기화합물과 관련되는 산재자 중 차지하는 비율이 작지 않은데 그렇다고 원인이나 사망에 관한 자세한 기록을 접할 수 없었기 때문에 구체적으로 분석하여 결과를 산출할 수 없었으므로 추가적인 연구가 필요하다.

3) 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템의 구축

시험챔버 시스템의 구축은 연구계획 수립, 시스템 구축계획 수립, 전문업체 선정 및 계약, 시스템 설계, 개별 장치 제작, 시스템 설치, 시스템 성능시험 과정으로 이루어졌다. 연구계획은 산업안전보건 연구업무 관련 내부 규정에 따라 수립하였고, 시스템 구축계획 수립, 전문업체의 선정 및 계약은 산업안전보건 연구업무 내규를 준용하면서 공공기관 계약 관련 규정에 따라 진행하였다. 시험챔버 시스템의 설계 단계부터 성능시험 단계는 외부 전문업체에게 위탁하여 진행하였다.

시험챔버 시스템의 주요 구성요소는 유기용제 발생장치, 항온항습기, 시험챔버, 배기장치, 그리고 제어프로그램이며, 각 요소에 따라 주요기능, 설계사양 또는 특징이 상세하게 제시되었다.

본 연구의 시험챔버 시스템과 연결된 멀티가스 모니터를 이용하여 실시간 모니터링이 가능한 유기화합물은 7가지(벤젠, 부틸 아세테이트, 디클로로 메탄, 에틸 벤젠, 메틸에틸케톤, 메틸이소부틸케톤, 메타-크실렌)이다. 그러므로 본 시험챔버를 이용하여 시료채취기의 성능을 평가하고자 할 경우 시험에 사용될 수 있는 유기화합물은 이들 7가지 중에서 선정하여야 한다.

본 연구는 1차년도 과제로서 수동식 시료채취기 평가용 시험챔버 시스템의 구축이 핵심 사항이었다. 설치업체는 시스템 구축 후 시스템 성능시험을 실시하였으며, 시스템 성능시험은 온·습도 시험, 풍속 균일도, 유기화합물 농도 균일도, 제어 프로그램 성능 시험이었다, 시험조건에 따른 시험결과는 적정 또는 정

상인 것으로 나타났다. 그러나 이 시스템 성능시험은 시스템 설치 후 시운전의 일환으로 이루어진 것이었으며, 시스템 설계조건에 일부에 대한 간이 성능시험이었다. 향후에 혼합 유기화합물, 다양한 농도, 풍속, 시간길이 등이 포함된 국제적인 기준(예, ISO 16107, OSHA 프로토콜)에 어느 정도 부합되는지 추가적인 연구가 필요하다.

4) 수동식 시료채취기 개발을 위한 기초 및 특허 자료 조사

국내·외에서 보편적으로 유통되어 사용되고 있는 수동식 시료채취기는 제조사, 모델마다 다르나 가격은 15,000 - 180,000원, 시료채취율 4 - 80 mL/min, 크기와 재질은 여러 가지 형태인 것으로 나타났다. 수동식 시료채취기의 특허 자료 총 19개(국외 16개, 국내 3개)를 확보하였고, 일부 자료는 세부적으로 검토한 결과를 요약하여 제시하였다.

수동식 시료채취기 개발 및 보급을 위한 중장기적 가이드도 제시하였다. 2차년 과제는 수동식 시료채취기의 시제품 개발이 이루어지고, 시제품에 대해 성능시험 진행이 필요하다. 시험챔버 시스템에 대한 특허출원 신청을 진행한다. 개발 과정에서 수동식 시료채취기의 규격, 형태, 국산화의 장애요인 등 기초 정보에 대해 추가 조사가 병행될 필요 있다. 3차년 과제는 시험챔버를 이용한 성능시험 범위와 내용의 확대가 필요하다. 아울러, 개발되는 수동식 시료채취기의 신뢰성 및 정확성 평가와 함께 국내 안전보건 분야에서 수동식 시료채취기의 수요 정도, 시장 가격 등 실태를 조사하면서 수동식 시료채취기 개발의 비용-효과 분석, 생산인프라 구축의 타당성 평가 등이 필요하다.

2. 종합 요약

본 연구과제는 중장기적 측면에서 3년 계획으로 연구를 거쳐 가격이 저렴하면서 신뢰성이 높은 국내 보급형 수동식 시료채취기를 개발하고자 하였으며, 단기적(1차년)으로는 개발되는 수동식 시료채취기의 성능을 시험할 수 있는 챔버

를 구축하고자 하였다. 궁극적으로는 비용이 낮고 신뢰성이 검증된 국산 수동식 시료채취기를 개발·보급하여 산업현장에서 널리 활용할 수 있도록 함으로써 산업보건 정책 또는 작업환경측정 사업의 효율성 제고와 노동자의 건강보호에 기여하고자 하였다.

제1차년도 연구과제의 목적을 달성하기 위하여 연구계획의 수립, 시험챔버 시스템 구축계획 수립, 전문업체 선정 및 계약, 시스템 설계, 개별 장치 제작, 시스템 설치, 시스템 성능시험 과정을 거쳐 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템을 구축하였다. 구축된 시스템의 성능시험 결과는 적정하거나 정상인 것으로 나타났다. 그러나 시스템의 성능시험은 시운전 과정에서 일부 설계조건을 대상으로 실시되었으므로 향후에 국제적인 기준에 어느 정도 부합되는지 추가적인 연구가 필요하다. 제2차년도 및 제3차년도 연구과제는 국내 보급형 수동식 시료채취기 개발에 중점을 둘 것이며, 개발되는 시료채취기 시제품을 대상으로 시험챔버 시스템을 이용하여 성능시험이 이루어질 것이다. 제2차년도 연구는 시험챔버 시스템에 대한 특허출원 신청도 진행된다. 한편, 시험챔버 시스템은 온도·습도·풍속 등 작업환경 조건에 대하여 다양한 연구에 활용될 수 있는데 특정 모델 수동식 시료채취기의 정밀도·정확도 시험, 다수 제품의 수동식 시료채취기 성능 비교 등 연구에 활용이 가능하다.

참고문헌

- 고용노동부, 2015년 산업재해 현황분석, 2016
- 고용노동부, 2016년 산업재해 현황분석, 2017
- 고용노동부, 2017년 산업재해 현황분석, 2018
- 박정근과 최준혁, 근골격계부담작업 유해요인조사의 실효성 강화방안 연구(II), 산업안전보건연구원, 2017-연구원-1072, 2017
- 변상훈, 박천재, 오세민 등, 활성탄섬유를 이용한 확산포집기의 공기 중 유기용제 포집효율에 관한 연구, 한국산업위생학회지 1996; 11(1):34-41
- 백남원, 공상휘, 박정임 등, 공기중 유기용제 농도 측정에 있어서 수동식 시료채취기의 성능평가 및 한국산 수동식 시료채취기의 개발에 관한 연구 제 2부: 한국산 수동식 시료채취기의 개발, 한국산업위생학회지 1996; 6(1):97-108
- 안전보건공단, 2014년 전국 사업장 작업환경실태조사 보고서, 2014-보건-1070, ISBN: 978-89-92591-72-0 94400, pp. 312-322, 2014
- 이광용, 확산식 시료채취기에서 기류제어막 공극 크기에 따른 시료채취율의 변화 특성에 관한 연구, 한성대학교 석사학위논문, 2003
- 이나루, 박두용, 김성진 등, 저농도 광역화 오염물질 포집용 확산식 채취기의 개발에 관한 연구, 산업안전보건연구원, 연구원2001-42-152, 2001
- 이병규, 휘발성유기화합물(VOCs)용 양면흡착형 수동식 시료채취기 개발, 용인대학교 대학원 박사학위 논문, 2012
- 이병규, 정지연, 이광용 등, 표준공기 조제시스템(증기인공환경 챔버) 개발, 산업위생학회 동계학술대회 발표초록집, 2006
- 전홍진, 이병규, 증기발생챔버로 조제된 수동식 시료채취기구의 정도관리시료 적합성 평가, 산업안전보건연구원, 연구원2006-237-960, 2006
- 한국특허전략개발원. 정부 R&D 특허기술동향 조사 사업 추진체계. [Accessed on 21 July 2019]. Available from <<https://www.kista.re.kr>>

- Donald Lee Smith, Peter M. Hall. Passive sampling badge. United States Patent US 6607581 B2. 2003. Aug. 19.
- Grosse, D. AND J. McKernan. Passive Samplers for Investigations of Air Quality: Method Description, Implementation, and Comparison to Alternative Sampling Methods. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-14/434, 2014.
- International Organization for Standardization (ISO). Workplace atmospheres - Protocol for evaluating the performance of diffusive samplers, ISO 16107, 2007
- Ivon Flament, Christine Vuilleumier. Device for sampling volatile products. United States Patent US 6063041. 2000. May. 16.
- Leonard H.Nelms, Kenneth D. Reiszner, Philip W. West. Personal monitoring device, or dosimeter, for measuring exposure of personnel to organic vapors. United States Patent US 4040805. 1977. Aug. 9.
- Lloyd V. Guild. Absorbent transfer for passive sampling badge. United States Patent US 7559980 B2. 2009. Jul. 14.
- MyExposome, Inc.. Passive sampling devices. United States Patent US 9757774 B2. 2017. Sep. 12.
- US Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Development of a protocol for laboratory testing of diffusive samplers, [Accessed on 5 April, 2019], Available from <http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/studies/3movm/3movm.html>, 1996.
- US Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Validation guidelines for air sampling methods utilizing chromatographic analysis, T-005, Version 3, [Accessed on 17 July, 2019], Available from <http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/chromguide/chromguide.html>, 2010.
- Tuan Vo-Dinh. Dosimeter for monitoring vapors and aerosols of organic compounds. United States Patent US 4680164. 1987. Jul. 14.

영문초록(Abstract)

Development of Passive Samplers Feasible to be Economically and Technically Used(I)

Park, Jung-Keun, Seung-Hyun Park, Hyun-Min Cho, Mee-Yeon Jang

*Occupational Health Research Bureau,
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA*

Objectives

This study were to establish a chamber system, on a short term base in the first year, which is able to test the performance of passive samplers to be developed for volatile organic compounds(VOCs) and, on a mid-and-long term base, to improve the effectiveness of sampling and analysis for VOCs by developing passive samplers which are low-cost and high precision through a three-year project.

Methods

This was the project initiated in the first year of 2019, out of three-year research projects to economically and technically develop passive samplers in the consecutively following years. There were two types of research actions as follows: 1) A literature survey was made to review a variety of reports, theses, patent records, etc.; 2) A chamber system, which will be used for testing the performance of passive samplers, was designed, assembled, constructed in the laboratory.

Results

1) Status of establishments to produce and handle VOCs nationwide: According to 'The National Survey on Working Environment Status in 2014,' out of 126,846 companies participated in the survey, the companies producing VOCs were 64 while those handling VOCs were 26,627.

2) Status of work-related disease or disorder workers exposed to VOCs: According to governmental reports on occupational injuries and illnesses for the years of 2015 to 2017, there were 21 workers with work-related disease or disorders caused by VOCs in 2015. Such workers were 11 in 2016 and 36 in 2017. Among a total of 68 workers stricken by the VOCs work-related disease and disorders during the three years, it was shown that the fatality proportion was 47%.

3) Design, assembly and set-up of the test chamber system at laboratory: The establishment of the test chamber system included a number of procedures or tasks such as planning one-year-research project, selection and contract of an engineering agent, design of the chamber system, manufacturing individual equipment or machine, settlement of the chamber system at laboratory, testing the performance of the chamber system, etc. The chamber system consists of several elements such as organic solvent generator, constant temperature and humidity system, test chamber, gas/vapor exhaust system, and online control system.

4) Survey of information on patents for passive samplers: The prices of passive samplers available globally vary, ranging of 15,000 to 180,000 KRW, with sampling rates of 4 to 80 mL/min, and their sizes and material nature are different. A mid-and-long-term research plan was described for developing and disseminating passive samplers after this project. For 2nd year project, a prototype of passive samplers will be developed and a series of performance

tests will be conducted. The performance test may include desorption efficiency, sampling rate, capacity of passive samplers, storage stability, detection limits, confidence quantification limit, analysis precision, repeatability, etc. For 3rd year project, it is necessary to expand the scope and contents of performance test. In addition, along with assessment of reliability and accuracy for passive samplers being developed, it is necessary to do cost-benefit analysis and validity assessment of production infrastructure while conducting a survey of demand and market prices for passive samplers in the safety and health fields.

Conclusions

In order to economically and technically develop passive samplers for VOCs, a variety of literature survey activities were made to examine and review relevant information including patent records, and a test chamber system was designed, assembled and constructed in the laboratory in the first year of 2019. The chamber system will be practically and effectively utilized for testing the performance of passive samplers in the following years.

부 록

1. NIOSH 프로토콜 요약
2. 과업요청서: 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템의 사양서(안)
3. 시험챔버 설계사양 조건 결정을 위한 전산유체역학 분석 자료(예)
4. 2015-2017년 업무상 질병 현황자료 분석 결과
5. 시험챔버 시스템 성능시험 결과
6. 시료채취기 시험챔버 시스템 사용자 매뉴얼

부록1. NIOSH 프로토콜 요약

■ 개요

OSHA 프로토콜의 개발은 NIOSH 프로토콜을 검토하면서 시험항목을 검증한 후 이루어졌으며, OSHA(1996)의 결론섹션 주요 내용은 다음과 같다.

- 검증 과정에서 사용된 3M OVM은 시험대상 혼합물질에 대해 효과적인 시료측정분석 결과치를 나타낸다.
- 정밀도는 능동식 시료채취기와 유사하게 나타난다.
- 수동식 시료채취는 능동식 시료채취와 유사한 제한점(예, limited capacity, 잠재적 저장 불안정성)을 가지고 있다.
- 모든 분석대상 물질의 농도 수준은 결정되어야 하므로 시료채취를 같은 기초적인 정보는 제공되어야 한다. 시료채취 대상 작업환경 공기 및 압력은 알아야 하고, 면속도 및 분석대상 물질의 수준은 측정결과에 영향을 미친다.
- 비용은 중요 이슈이다.
- 현장 평가에 관련하여 NIOSH 프로토콜은 현장 시료채취 연구가 이루어져야 함을 규정하고 있다. 현장 연구에서 수동식 시료채취기의 측정치는 기준 측정분석법(reference method)의 측정치와 비교가 필요하다. 현장의 작업환경 조건은 실험실 시험에서 고려되지 않는 효과가 있을 가능성이 있다.

■ NIOSH 및 OSHA 프로토콜 비교

- NIOSH 프로토콜:
 - 31종 시험을 위해 184개 monitors가 사용된다. 시험 범위가 특히 광범위 하며, 시간이 많이 소요되고 비용이 많이 지출된다.

- OSHA 프로토콜 개발을 위한 본 시험의 주요 취지는 NIOSH 프로토콜을 어떤 혼합유기용제에 적용시킴으로써 얻어진 경험을 통해 어떤 새로운 프로토콜을 개발할 수 있는지 여부를 결정하고자 했던 것이다. NIOSH 시험항목의 일부는 수정하거나 삭제할 수 있다고 판단하였다. 그런 측면에서 우선 삭제 대상은 factor effects 및 reverse diffusion 시험이었다.
- OSHA 프로토콜
 - 15종 시험을 위해 81개 monitors가 사용된다.
 - desorption efficiency 및 detection limit parameters는 spiked sampling media를 이용하여 결정하도록 규정되어 있다.
 - 시료채취기 성능평가 결과가 불일치한 것으로 파악될 경우 추가적인 성능평가를 하도록 규정하고 있다(NIOSH 프로토콜도 마찬가지임).
 - 수동식 시료채취용 OSHA method와 능동식 시료채취용 OSHA method 두 방법간 주요 차이는 시료채취기의 시료채취율 및 용량(capacity) 결정을 위한 시험항목의 유무이다.

■ NIOSH 프로토콜의 주요 시험 항목은 다음과 같음

1. Desorption efficiency

- 시험공기(Test atmosphere)의 농도 수준은 0.1, 0.5, 1, 2STD로 하여 각 수준별 4개의 시료채취기를 조제하여 시험을 실시한다. 공시료용 시료채취기는 각 수준별 2개 준비하고, 총 24개 시료채취기가 필요하다.

2. Sampling rate 및 capacity

- 시료채취 기간(time period)은 10가지이다: 1/8(7.5min), 1/4(15min),

1/2(30min), 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12h.

- 각 시료채취 기간별 수동식 시료채취기는 4개씩, 공시료는 전체적으로 2개이며, 총 40개의 수동식 시료채취기가 필요하다.
- 시험챔버 조건은 다음과 같다.
 - 시험공기는 2STD, 80%RH, 면속도 0.2m/s로 설정
 - 최대 12h 가동 가능
 - 최대 40개 수동식 시료채취기 장착 가능한 구조
 - 각 시료채취 기간별 해당 종료 시간 시점에 수동식 시료채취기 탈착 가능한 구조이어야 함
- 면속도 증가 효과에 대한 시험의 경우 시료채취 기간은 2h로 설정한다.

3. Reverse diffusion

- NIOSH 프로토콜의 경우 20 monitors를 0.5 MRST 동안 2STD, 80%RH 조건에 노출시킨 후, 10 monitors는 0.5MRST 이후에 제거한 후 분석하고, 나머지 10 monitors는 MRST 동안 80%RH에서 clean air에 노출시킨 후 분석 실시하여 각 농도를 비교한다.
- OSHA의 본 시험에서는 2h 동안 1STD, 68%RH에서 28 monitors를 면속도 0.2m/s 수준에서 노출시켜 14 monitors를 제거한 후, 추가적으로 2h 동안 1.1m/s로 clean air에서 노출시킨 후 분석 실시하여 각 농도를 비교한다.
- Pulse experiment 실시는 68.2%RH에서 0.3m/s로 실시하고, 1차 시험은 3개의 5-min-pulse 시험을 90min 넘게 실시하며, 2차 시험은 1개의 5-min-pulse 및 4개의 5-min-pulse를 함께 116min 넘게 실시한다.

4. Storage stability

- NIOSH 프로토콜의 경우 10개 저장안정시험용 시료채취기 3셋트를

0.5MRST에 대해 1STD, 80%RH로 준비한다. 제1 셋트는 조제 후 1일 안에 분석 실시하고, 제2 셋트는 25°C로 2주 보관 후 분석 실시 하며, 제3 셋트는 추가적으로 5°C에 2주 보관 후 분석 실시 한다. 저장안정성은 제1 세트 평균치와 제2 세트 평균치 사이 또는 제1세트 평균치와 제3 세트 평균치 사이의 분석결과치 차이가 10% 미만, 95%CI일 경우에 채택 (acceptable)으로 결정한다.

- OSHA의 본 시험에서는 36개 시료가 1STD, 66%RH, 2h동안 0.2m/s에서 동시에 채취된다. 3M 모니터의 경우 개별 모니터를 2 section으로 분리, install cup 및 closure cap, 2 section을 알루미늄 can에 넣고 플라스틱 cap으로 밀봉한다. 36 시료 중 6 시료는 시료채취 당일 즉시 분석하고, 15 시료는 실온(25°C) 저장하면서 3개씩 매3~4일마다 분석하고, 나머지 15 시료는 냉장(4°C) 저장하면서 3개씩 매3~4일마다 분석 실시한다. 저장 안정성 평가 기준(Day zero 시료의 분석치 기준)은 다음과 같다: 1) 2주 저장으로 인한 손실은 no more than 10%; 2) 2주 저장으로 인한 탈착율은 적어도 75%임.

5. Factor effects

- NIOSH 프로토콜은 6가지 factors가 있으며, 이들 factors는 monitor의 시료채취에 영향을 미칠 수 있다: Analyte concentration, Exposure time, Face velocity (linear velocity), Relative humidity, Interference, and Monitor orientation.
- 64가지 실험 실시가 필요하다: 각 factor 당 2가지 levels에서 해당 factor 조합에 대해 평가가 필요하다. 16가지 실험 및 48가지[다음 12가지 실험 조건에 대해 각각 4개 monitors 사용. 즉, 2가지 농도수준; 2가지 RH 조건; 2가지 linear velocity 조건; 2가지 monitor orientation 조건; 2가지 노출시간 조건(30분 및 120분); 2가지 간섭(interference) 조건] 실험 실시하

여 총 64가지 실험을 실시한다.

6. Temperature effects

- NIOSH 프로토콜은 10개의 monitors를 이용하여 0.5MRST 동안 0.5STD 및 10°C, 25°C, 40°C에서 시험을 실시한다.
- OSHA는 4개의 monitors를 이용하여 1STD, 0.1m/s, 80%RH 및 8°C, 25°C, 40°C에서 시험을 실시한다.

7. Accuracy & precision

- NIOSH 프로토콜의 경우 정확도 채택 기준은 0.5 ~ 2STD에 대하여 기준값의 $\pm 25\%$ 이내 및 95%CI 이다.
- OSHA는 0.5 ~ 2STD에 대해 각 시험조건별 4개의 monitors로 시료채취 실시하고, RSDs는 동질성(homogeneity) 확보를 위해 첫 시험대상 실시 이후 통합하여 Cochran 시험을 실시한다.

8. Shelf life

- NIOSH 프로토콜의 경우 monitor를 계속 관찰해야 한다. 시료채취기의 외부 형태 또는 공시료값에 있어서 어떤 변화가 있는지 여부도 파악 필요하다.
- OSHA 시험은 3M OVM 제품에서 어떤 변화도 관찰되지 않았으며, 소요 기간은 약 1년이었다.

부록2. 과업요청서: 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템의 사양서(안)

수동식 시료채취기 시험챔버 사양서

I 주요 사양

1. 주요 구성요소 및 조건

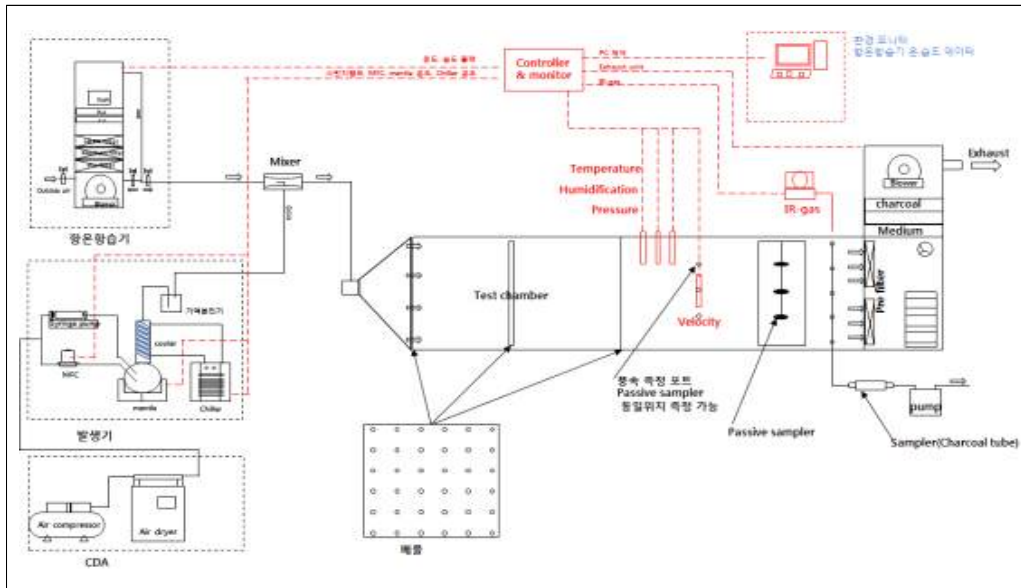
가. 구성요소 및 수량

- 1) 항온항습기 1대
- 2) 에어컴프레서 1대
- 3) 배기장치 1식
- 4) 유기용제 발생장치 1식
- 5) 제어컨트롤러 1식
- 6) 시험챔버 1식

나. 공통 조건

- 전체 챔버(시료채취기 시험챔버)의 가동시간은 12시간 이상이 유지 되어야 함
- 전체 챔버 재질은 내부식성 및 내화성이어야 하며, 챔버의 일부 또는 지지대는 스테인레스 스틸 및 알루미늄 프로파일로 사용 가능함

2. 시료채취기 시험챔버(전체챔버) 계통도



II 세부사양: 성능 및 규격

1. 항온항습기

- 1) 외형사이즈 : 610 x 610 x 1800mm 이내
- 2) 필터 : Pre, Medium, HEPA filter (300 x 300mm 이내)
- 3) 재질 : 외함 stainless steel
- 4) heater : Electrical heating coil
- 5) cooling coil : 직접 팽창식
- 6) 가습기 : 가열 증발식
- 7) 블로어 : Ring blower

- 8) Flow rate: 2.0 m³/min
- 9) 패널형 컨트롤러: PID(Proportional-integral-differential) 제어방식

2. 에어컴프레서

- 1) 에어탱크: 알루미늄 재질, 50L 이상
- 2) 에어 컴프레서: 120 LPM 이상
- 3) 자동 응축수 배출 에어 컴프레서: 저소음형
- 4) 에어 드라이어: 5 hp 이상
- 5) 자동 응축수 배출 드라이어 및 밸브

3. 배기장치

- 1) 외형 사이즈 : 610 x 610 x 1200mm 이내
- 2) 필터 : medium filter 610 x 305mm 이내 1 ea, HEPA filter 610x305mm 이내 1ea, charcoal filter 4ea
- 3) 재질 : 외함 stainless steel 304
- 4) 블로어 : 풍량 1,500 m³/h, 정압 250 mmAq 이상
- 5) 흡입압력 조절용 댐퍼: 400 x 400mm 이내

4. 유기용제발생장치

- 1) 발생 방식 : 가열 증발식. 증기농도 컨트롤범위는 $\pm 10\%$ 이내
- 2) 용기 : 3구 플라스크
- 3) Mantle 용량 : Power, 500W. 용량 2000ml. 200℃
- 4) 반응조용 냉각기 : 5 liter 이상
- 5) 항온순환수조 for 냉각기 : 순환량 5 liter 이상
- 6) 기액 분리기 : 응축된 액체를 분리하여 순수 mist만 배출
- 7) Syringe pump로 시험물질 정량투입
- 8) Dilution 유량 MFC(Mass flow controller) 제어

5. 제어컨트롤러

1) 온습도 센서

- 온도: $-20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$, 상대습도: $0 \sim 100\%$
- Accuracy : $\pm 1\%$ 이내

2) 풍속센서

- Range: $0 \sim 50 \text{ m/s}$
- Accuracy : $\pm 3\% (\pm 0.015 \text{ m/s})$ 이내
- Resolution : 0.01 m/s

3) 차압센서

- $0 \sim 1,000 \text{ pa}$

4) 컨트롤러

- 온·습도, 차압, 풍속 모니터링
- 향온향습기, 발생장치, 배기장치 제어
- MFC 제어
- 실시간 측정장비 연결 가능

5) 프로그램

- 모든 측정장비와 제어장비 제어 가능 할 수 있는 통합제어 가능해야 함

6. 시험챔버(Testchamber)

1) 기본조건

- 기준시료와 함께 최소한 8개 시료채취기로 채취할 수 있어야 함
- 최소한 5개 챔버 내부위치에서 동시 측정이 가능한 구조이어야 함
- 가장 낮은 유량으로 시료가 채취될 때 시료채취기에 의해 소모되는 평균대상 화합물의 양은 전체 급기량의 5%미만 이어야 함
- 기류·온·습도 모니터링이 가능해야 함
- 상대습도는 20°C 에서 $25 \pm 5\%$, $50 \pm 5\%$, $80 \pm 5\%$ 를 유지할 수 있어야 함
- 온도는 $10 \pm 3^{\circ}\text{C}$, $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, $30 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 상태로 유지할 수 있어야 함
- 챔버 내의 압력변화는 대기압의 95% ~ 105% 사이에서 고정되어야 함

- 하며, 변동범위는 1%이내이어야 함
- 챔버 내의 기류속도는 0.5m/s 이하가 되도록 해야 하며, 시료채취 중 수동식 시료채취기의 면속도는 0.05~0.1 m/s가 가능해야 함
 - 시료채취기 위치에 대한 유동해석을 해야 하며, 이에 대한 보고서를 첨부할 수 있어야 함
 - 시험을 위한 농도 조절 완료 후 설정농도를 크게 벗어나지 않도록 시료채취기를 장착할 수 있는 구조(샘플러 및 필터 거치대 포함)이어야 함
 - 챔버내 공기 체류시간을 고려한 열손실을 최소화 하기 위한 단열성 재질로 제작되어야 함
- 2) 외형 사이즈: 610 x 610 x 2300 mm(연결구조, 안정화챔버 포함) 이내
 - 3) 재질: frame STS 304 이상
 - 4) 외부보온재: Polypropylene, 이중 보온재
 - 5) 상부 공기주입구 - ϕ 100 mm 이내
 - 6) 측면 공기배출구: 타공판 1, 타공 hole 크기 ϕ 5mm, 간격 10mm (변경가능) 타공판 2, 타공 hole 크기 ϕ 5mm, 간격 5mm (변경가능)
 - 7) 공기 토출구 필터: Pre filter, size - 610 x 610 mm 이내
 - 8) Sampling port: passive sampler용 8~12개, Active sampler용 20~40개
 - 9) Sensor port: 온습도계용 1 ea, 풍속계용 6 ea, 차압계용 1 ea, IR-gas용 1 ea
 - 10) Mixer: 향온향습 공기와 유기용제 증기 혼합. 재질은 stainless steel

III 기타

1. 보증

전체챔버 제작 완료 후 1년 동안 무상 보증 수리를 진행함(소모품 제외).
장비 설계 후 수요처에서 설계 승인 후에 제작진행

2. 시험 및 확인작업

- 제작된 시료채취기 시험챔버가 정상적으로 동작하는지 확인
- 테스트 결과서 첨부

1) 아래의 테스트는 설치 완료 후에 검사함

- 외형 검사
- 수량 및 구성 검사

2) 성능 테스트

- 메인 컨트롤 패널의 조작 테스트
- 경고 장치의 동작 확인 테스트
- 샘플러 위치 구역별 풍속 확인 결과서
- 온습도 제어(온도, 습도 각 포인트) 성능 결과서

3. 교육

사용자 스스로 사용할 수 있도록 제공되는 매뉴얼에 따라 상세한 교육 수행

1) 시스템의 동작 교육

2) 시험물질 발생에 대한 교육

4. 특수 조건

- 전체챔버, 관련 기기 또는 장치(멀티가스모니터 시스템과 연계, 시료 채취기 현장 시험장비 제작 포함)의 제작, 시공, 연결 또는 설치 범위, 안전(예, 방폭구조 기계·기구 사용), 특허 문제 등은 협의 필요
- 전체챔버의 개발 및 제작 단계나 중간보고 단계에서 상세 설계조건, 제작 과정 또는 시뮬레이션 결과가 필요하여 요청될 경우 자료 제출
- 사양서 및 과업내역서의 일부 내용에 대해 추가·변경이 필요한 경우 협의 가능

- 공단의 보안규정 및 지침을 준수하여 시스템 개발을 수행하여야 하고, 과업 기간동안 취득한 모든 정보를 공단에 제공 또는 반납하여야 하며, 동 과업 수행 중 취득한 정보를 외부에 누설할 수 없음
- 전체 챔버 제작이 완료되면 사용자가 직접 시험 및 평가 후 검수 진행.

부록3. 시험챔버 시스템의 설계사양 결정을 위한 전산유체역학적 분석 자료(예)

. Case of Numerical Analysis in Sampler Test Chamber

Case	Mixing Plate 1	Mixing Plate 2 (10 mm)	Mixing Plate 3 (20 mm)	Mixing Plate 4 (20 mm)	Passive Sampler	Active Sampler	Pre-Filter	Mean Velocity in Chamber [m/s]
1	○	○						1.5
2	○		○					
3	○	○	○	○				
4	○	○	○	○	○	○	○	

Table 1. Case of numerical analysis in sampler test chamber

. Model Description for Sampler Test Chamber

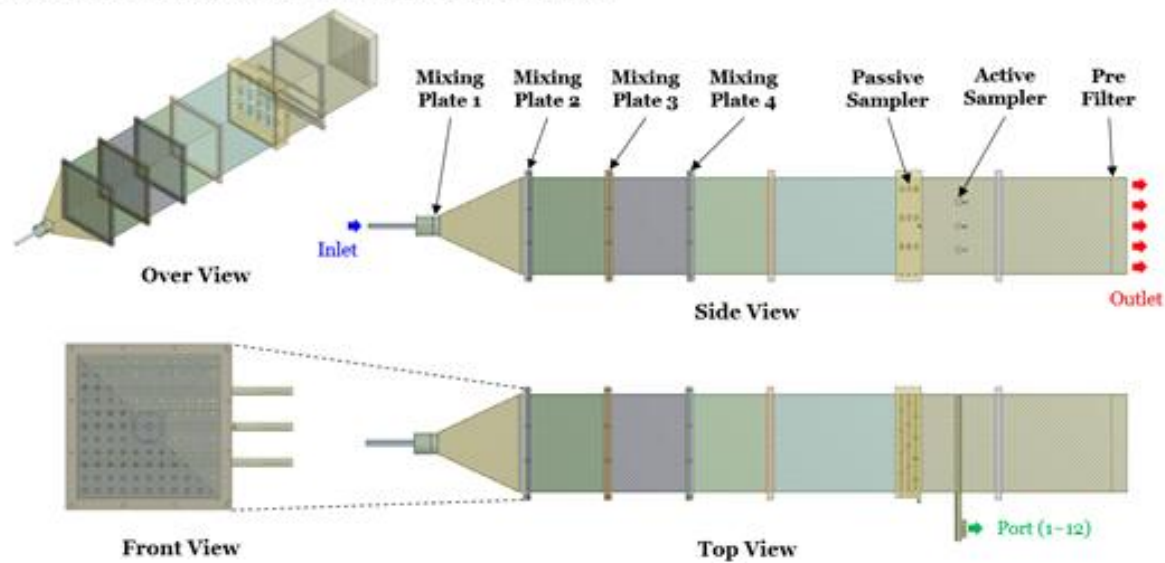
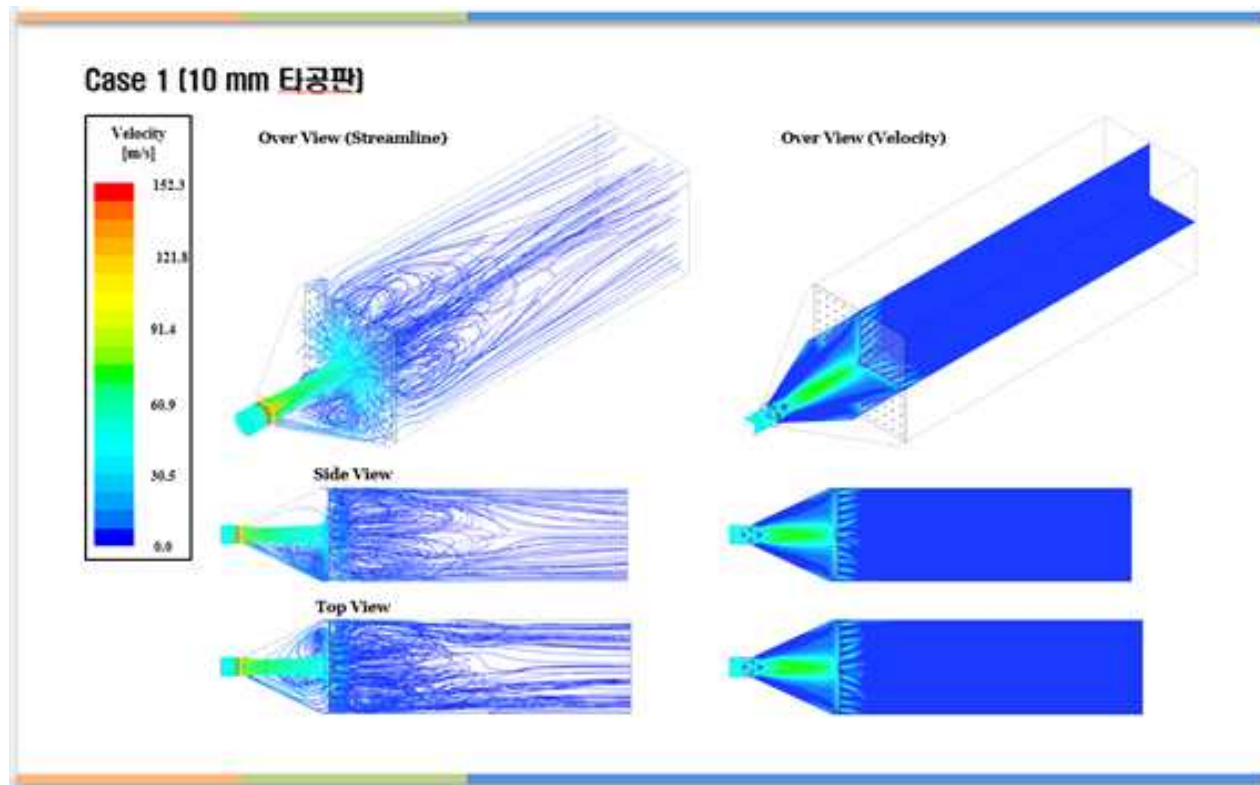
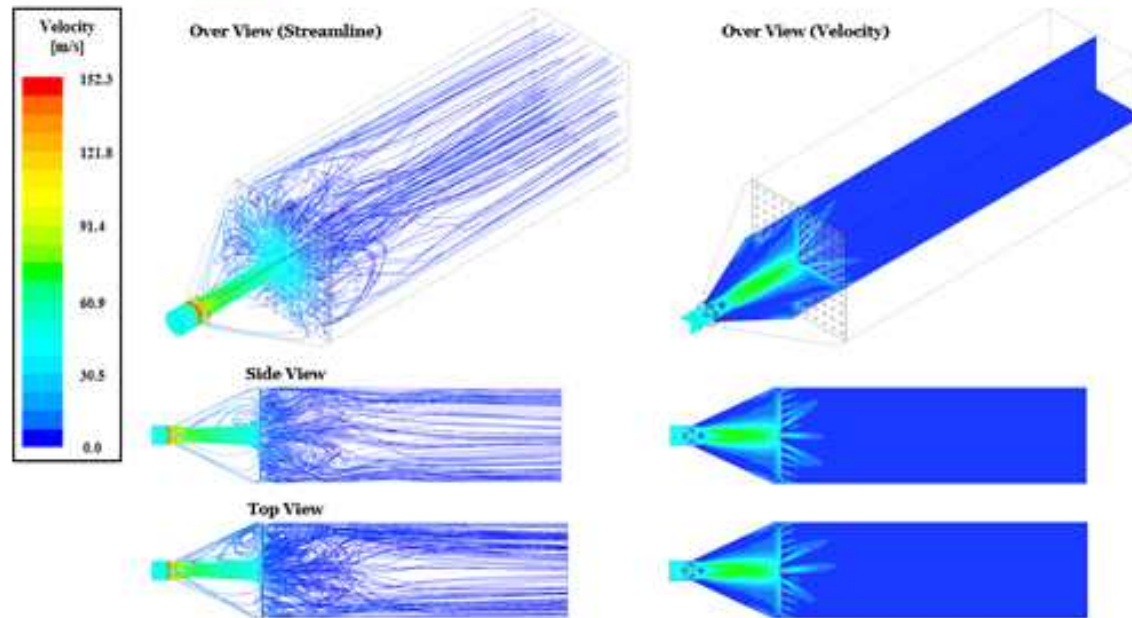
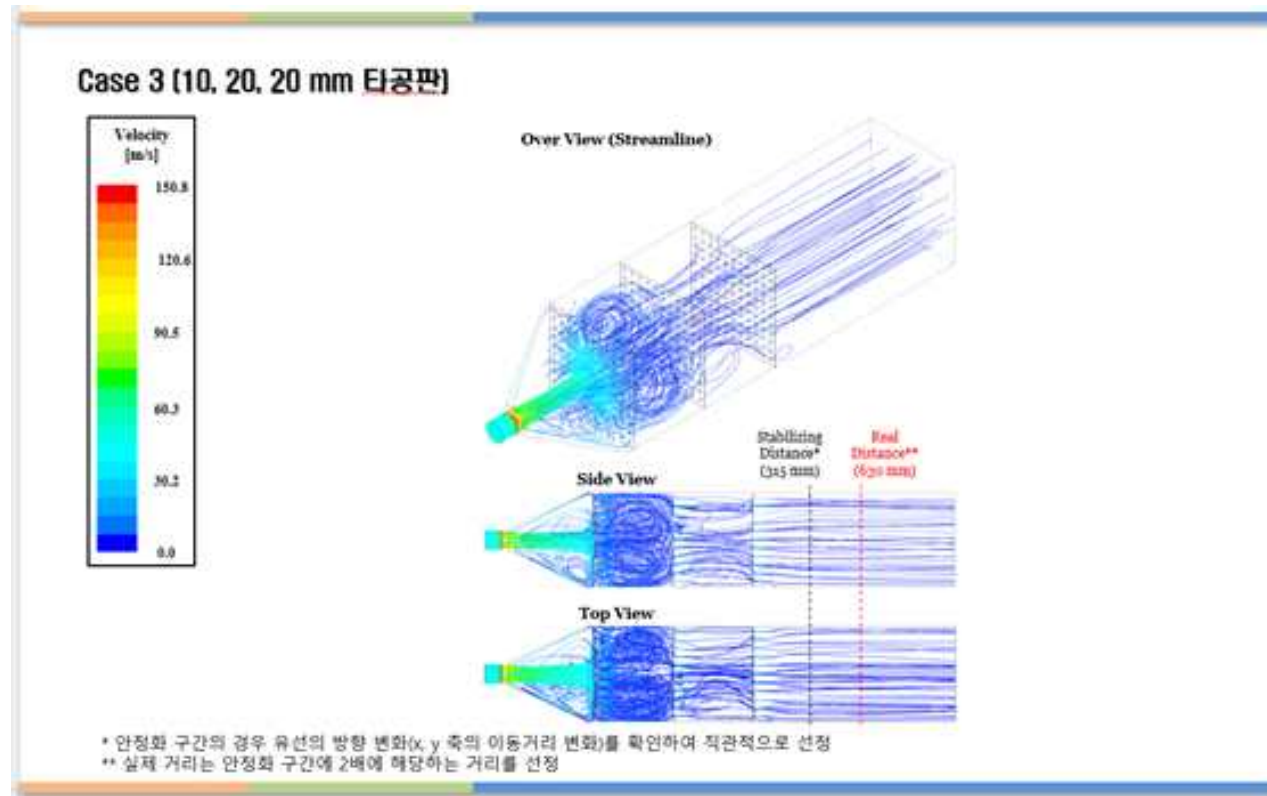


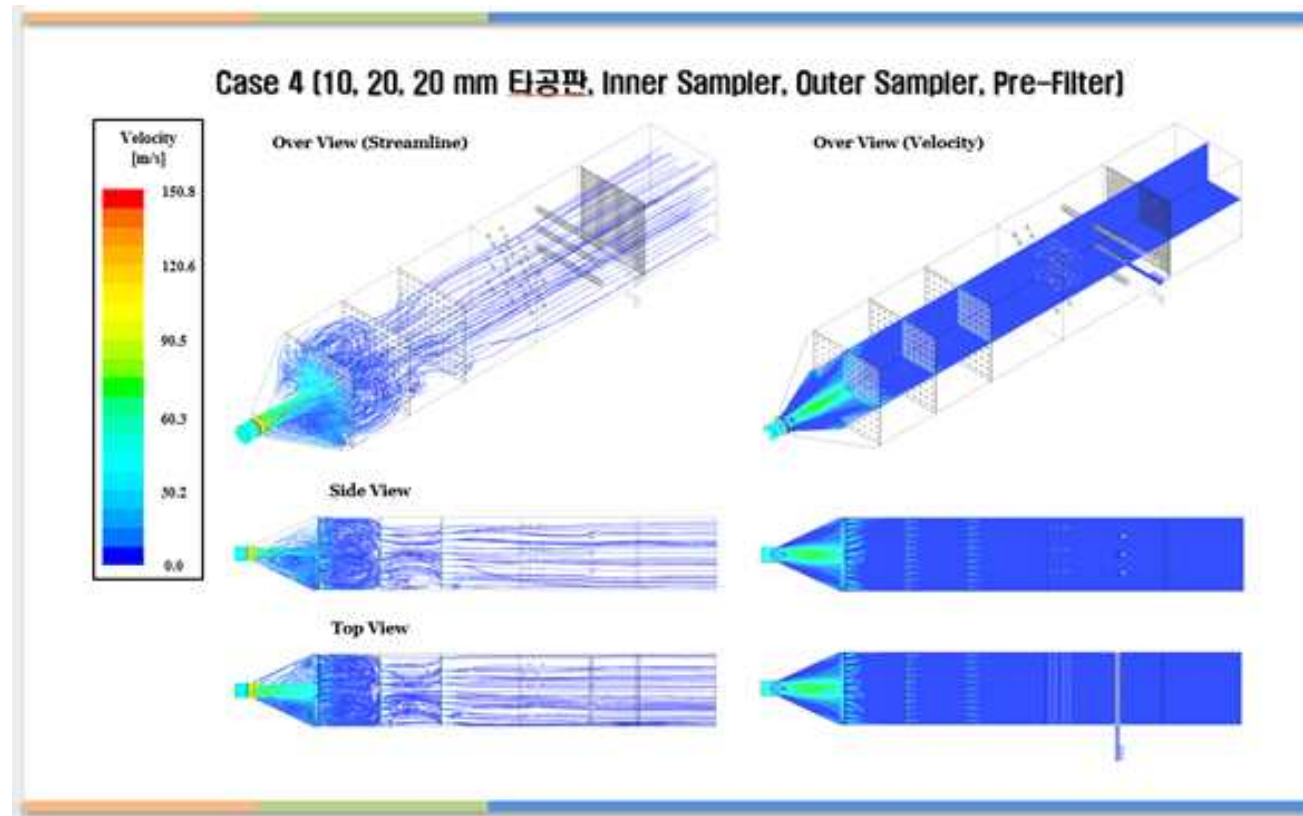
Figure 1. Description of sampler test chamber

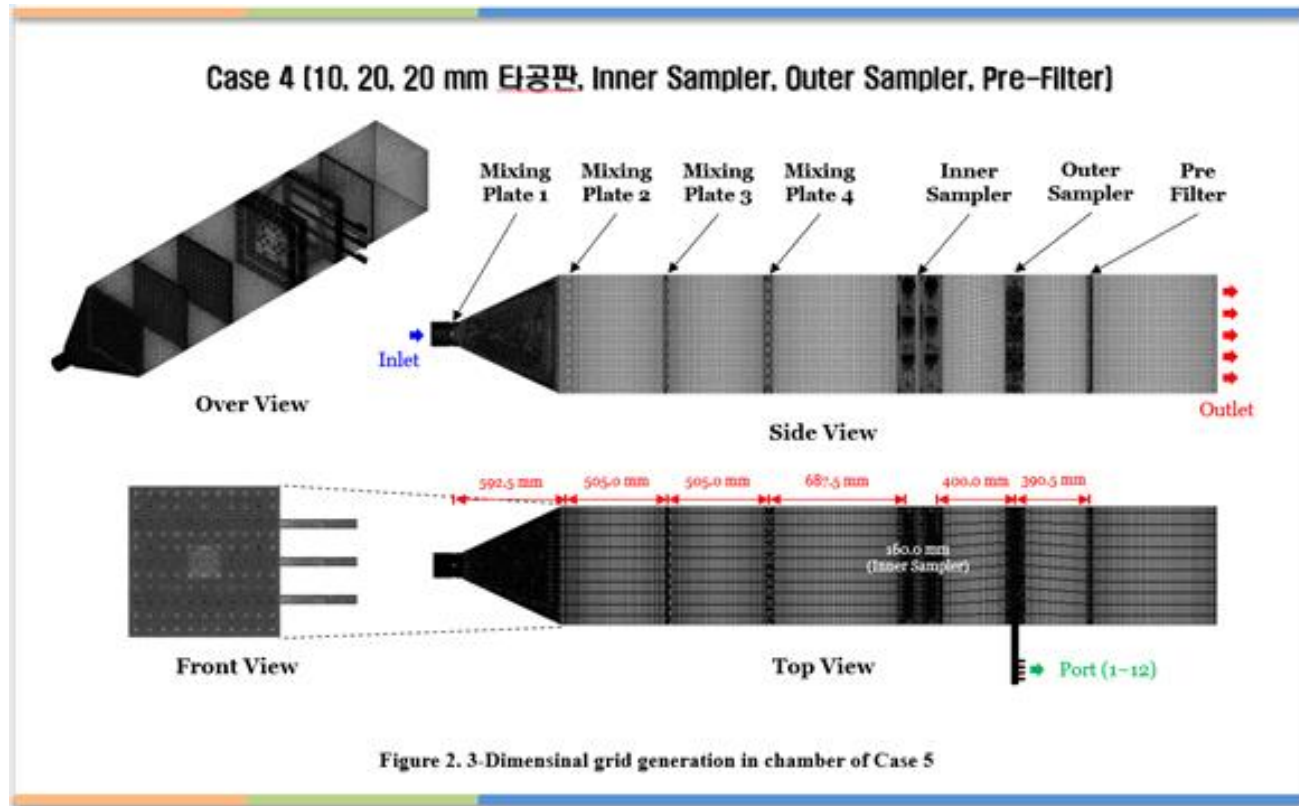


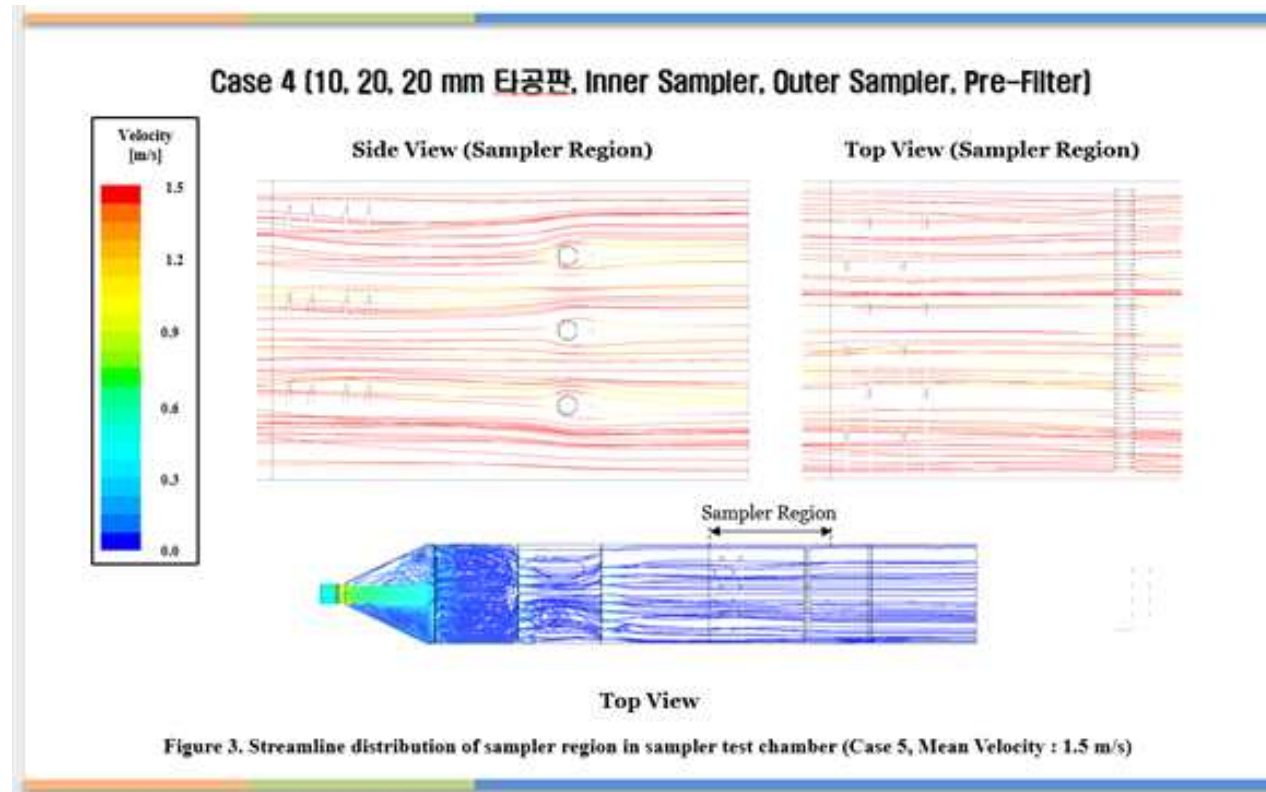
Case 2 (20 mm 타공판)











부록4. 2015-2017년 업무상 질병 현황자료 분석 결과

표 a. 2015-2017년 업무상질병의 성별 연도별 질병자 분포

성별/ 연도	2015년	2016년	2017년	계
남	19	10	33	62
여	2	1	3	6
계	21	11	36	68

표 b. 2015-2017년 업무상질병의 연령별 연도별 질병자 분포

연령/ 연도	2015년	2016년	2017년	계
20-29	-	-	2	2
30-39	2	1	7	10
40-49	6	5	8	19
50-59	12	3	10	25
60 이상	1	2	9	12
계	21	11	36	68

표 c. 2015-2017년 업무상질병의 근속기간별 연도별 질병자 분포

근속기간/ 연도	2015년	2016년	2017년	계
1년 미만	4	2	7	13
1 ~ 5 미만	2	1	6	9
5 ~ 10 미만	3	1	3	7
10 ~ 20 미만	5	4	9	18
20 이상	7	3	11	21
계	21	11	36	68

표 d. 2015-2017년 업무상질병의 사업장 규모별 연도별 질병자 분포

규모/ 연도	2015년	2016년	2017년	계
50인 미만	8	4	17	29
50 ~ 300 미만	3	-	4	7
300 ~ 500미만	-	-	1	1
500 ~ 1,000미만	-	-	5	5
1,000 이상	10	11	9	26
계	21	11	36	68

표 e. 2015-2017년 업무상질병의 지역별 연도별 질병자 분포

지역/ 연도	2015년	2016년	2017년	계
서울/인천/경기/강원	11	8	21	39
대전/충청	1	0	6	7
부산/대구/울산/경상	7	2	8	17
광주/전라	3	1	1	5
계	21	11	36	68

표 f. 2015-2017년 업무상질병의 발생형태별 연도별 질병자 분포

발생형태/ 연도	2015년	2016년	2017년	계
벤젠	8	1	6	15
이황화탄소	5	7	3	15
유기화합물 기타(유기용제)	1	1	13	15
유기화합물 기타(화학물질)	3	1	12	16
직업성 천식	4	1	2	7

표 g. 2015-2017년 업무상질병의 발생형태별 사망자 및 이환자 분포

발생형태/ 질병유형	질병사망자	질병이환자	계
벤젠	6	9	15
이황화탄소	15	-	15
유기화합물 기타(유기용제)	4	11	15
유기화합물 기타(화학물질)	5	11	16
직업성 천식	2	5	7
계	32	36	68

표 h. 2015-2017년 업무상질병의 발생형태별 원인물질별 질병자 분포

발생형태/ 질병 원인물질	벤젠	이황화탄소	유기용제	기타	계
벤젠	12	-	-	3	15
이황화탄소	-	12	-	3	15
유기화합물 기타(유기용제)	1	-	14	-	15
유기화합물 기타(화학물질)	-	-	-	16	16
직업성 천식	-	-	2	5	7
계	13	12	16	27	68

표 i. 2015-2017년 업무상질병의 발생형태별 성별 질병자 분포

발생형태/ 성별	남	여	계
벤젠	14	1	15
이황화탄소	14	1	15
유기화합물 기타(유기용제)	12	3	15
유기화합물 기타(화학물질)	15	1	16
직업성 천식	7	-	7
계	62	6	68

부록5. 시험챔버 시스템 성능시험 결과

본 시험챔버 시스템 성능시험 결과는 시스템 설치업체가 제출한 시운전 결과서를 정리 요약한 것임.

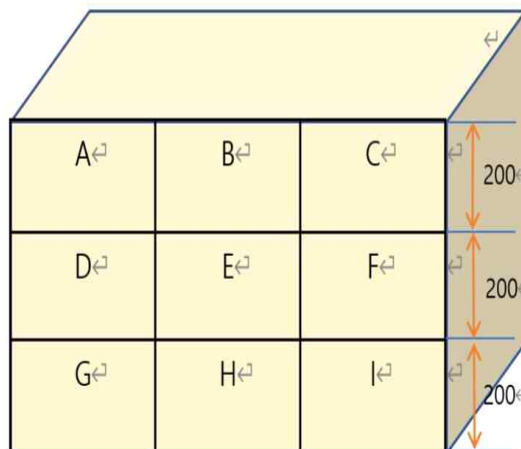
■ 온도, 습도 시험

온·습도 설정조건* 및 측정치						
구분	10℃±3		20℃±3		30℃±3	
25±5%	26.4%	12.8℃	26.9%	21.4℃	29.2%	28.3℃
50±5%	45.5%	12.8℃	52.3%	19.7℃	56.9%	28.0℃
80±5%	76.3%	13.0℃	78.1%	22.2℃	76.5%	28.6℃

* ISO 16107 국제표준 시험조건

■ 풍속 균일도 시험

1) 측정위치

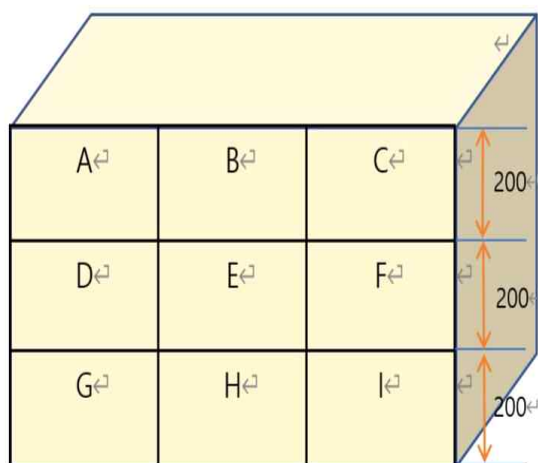


2) 풍속 측정

구분	설정 먼속도(m/s)		
	0.2	0.1	0.05
A	0.18	0.08	0.05
B	0.18	0.07	0.04
C	0.18	0.09	0.05
D	0.20	0.10	0.05
E	0.20	0.11	0.05
F	0.22	0.11	0.06
G	0.21	0.12	0.07
H	0.22	0.10	0.06
I	0.22	0.12	0.04
평균	0.2	0.1	0.05
표준편차	1.8	1.7	1.0

■ 농도 균일도 시험

1) 측정위치



2) 농도 측정

- 시험물질: Methyl isobutyl ketone
- 설정농도: 100 ppm

구분	농도	평균	표준편차
A	101.08	101.6	1.7
B	101.96		
C	103.14		
D	100.37		
E	102.96		
F	99.40		
G	99.45		
H	101.22		
I	104.58		

■ 제어 프로그램

시스템 요소	구분	설정조건	측정치
향온향습기	블라워모터	90%	90%
	온도	22℃	22℃
	습도	50%	50%
배기장치	블라워모터	70%	70%
유기용제	맨틀	80℃	79℃
발생장치	유량계(MFC)	13.8 L/min	13.8 L/min
버퍼 및 믹서	밸브	0%	0%

■ 시험챔버 시스템 성능시험 결과

구분	설정조건	결과
온도	$\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이내	적정
습도	$\pm 5\%$ 이내	적정
풍속	$\pm 3 \text{ m/s}$ 이내	적정
농도	$\pm 10\%$ 이내	적정
프로그램	정상제어	적정

부록6. 수동식 시료채취기 시험챔버 시스템 사용자 매뉴얼

User's Manual

[시험챔버 시스템 사용자 매뉴얼]

Contents

1. 시험챔버 시스템 설치 목적 및 특징 -----
2. 시험챔버 시스템 구성 및 시스템 diagram-----
3. 주요 구성품 -----
 - 가. 시료채취기 테스트 챔버
 - 나. 항온항습기
 - 다. Air handling system
 - 라. Exhaust filter unit
 - 마. lean air compressor system
 - 바. Gas generator
 - 사. Controller & computer
4. 시험챔버 시스템 운전 순서 -----
5. 유지보수(maintenance)-----
6. 고장발생 시 조치 (Trouble shooting)-----

1. 시험챔버 시스템 설치 목적 및 특징

목적

- 시료채취기 시험챔버는 작업장에서 노동자가 노출되거나 작업장 공기 중 존재하는 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)을 채취하기 위해 개발 중이거나 개발된 수동식 시료채취기의 성능을 시험하여 평가하기 위함이다.

특징

- 항온 항습화 된 혼합가스를 시험챔버에 공급해 주며, 일정한 면 속도 및 농도를 유지시켜 줍니다.
- 제어 컨트롤러를 통하여 온도, 습도, 압력, 농도 등을 모니터링 하고 컨트롤할 수 있습니다.

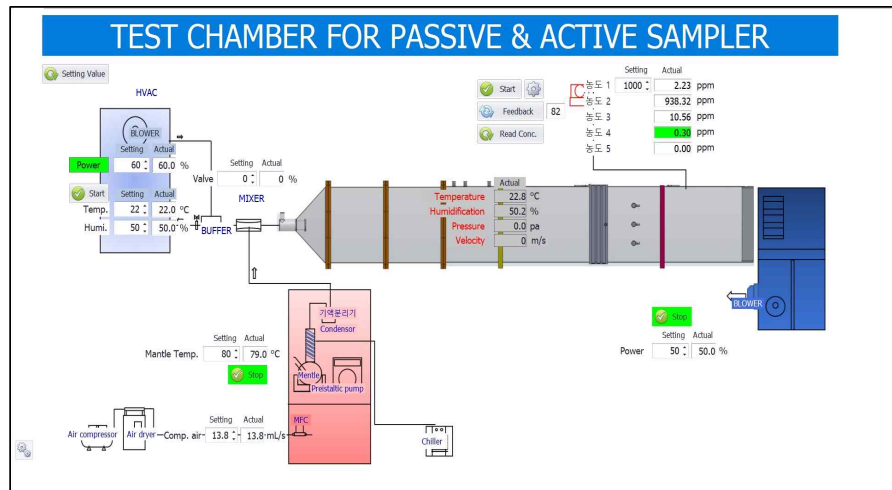
2. 시험챔버 시스템 구성 및 시스템 diagram

장비 구성

- 1) 시료 채취기 테스트 챔버
- 2) 항온, 항습기
- 3) Air handling system
- 4) Exhaust filter unit
- 5) Clean air compressor system
- 6) Organic vapor generator
- 7) Controller & computer

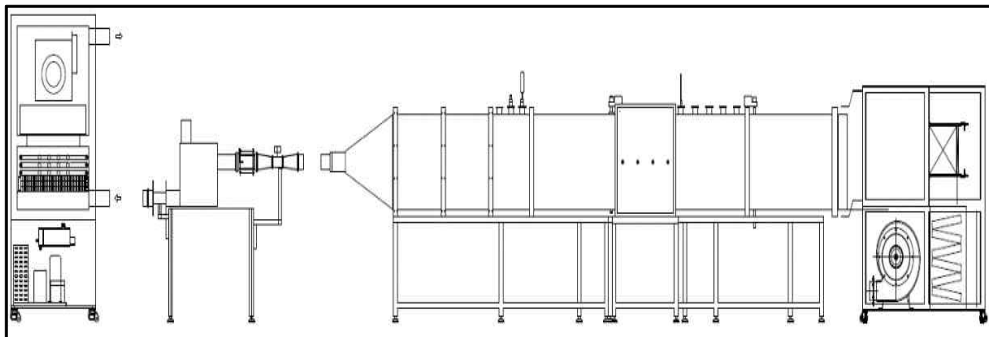
시스템 diagram

1) diagram



[그림 1] System diagram

2) system 구성



[그림 2] 시료채취기 시험챔버 구성도

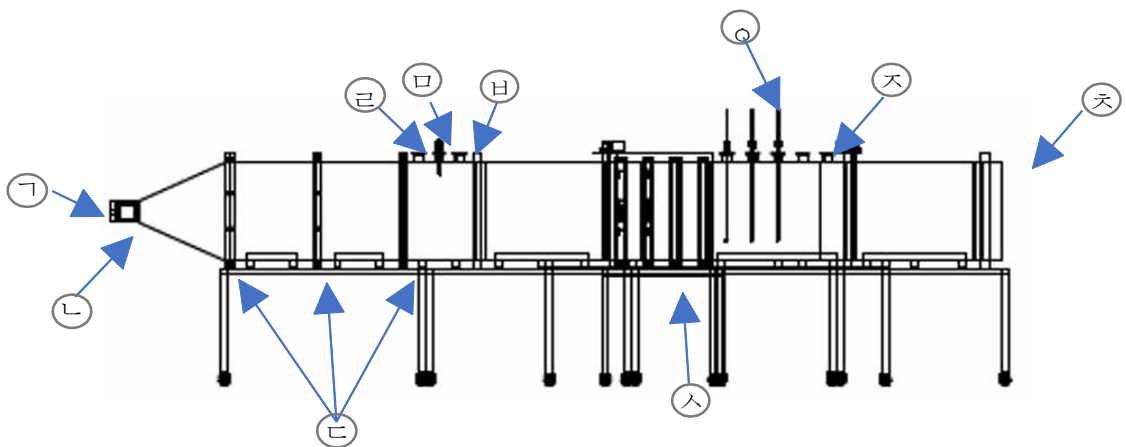
3. 주요 구성품

가. 시료채취기 테스트 챔버

1) 외형



[사진 1] 시료채취기 시험챔버 외형



[그림 3] 시료채취기 시험챔버 정면 뷰

가) Air In_let

- 향온향습된 공기와 유기가스가 혼합된 공기가 주입되는 입구 이다.

나) Mixing plate

- 공기와 유기용제에서 발생한 가스를 섞어 주며 관내에서 흐르던 공

기를 덕트로 흐를 때 확산이 골고루 되도록 해주는 기능을 한다.

다) 베플 1, 베플 2, 베플 3(타공판)

- 덕트내 먼풍속을 일정하게 하기 위한 베플(타공판)이다. 베플 1은 10mm 타공판 베플,2,3은 20mm 타공판을 사용하였다.

라) 온도 습도 센서 장착 port

마) 압력 측정 센서 장착 port

바) 풍속 측정 센서 장착 port

사) 패시브 샘플러 장착 슬라이드

아) Passive sampler 거치용 슬라이드 거치대는 총 4칸으로 구성 되었으며 한 개의 슬라이드당 9개 이상의 passive sampler를 장착 할 수 있다.

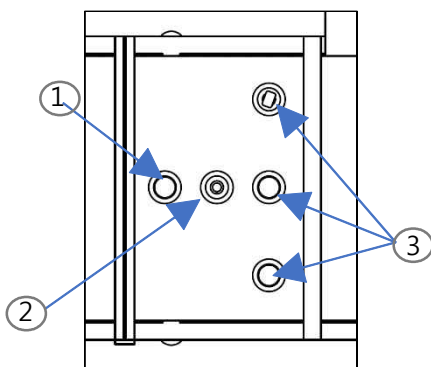
자) Active sampler용 sampling port 이다.

차) IRgas 측정 port

- 총 6개의 측정포트가 구성되어있으며 각각의 포트는 테스트 챔버의 측정높이를 조절 할 수 있도록 구성되어있다.

(1) Air out_let

ㄱ. 센서 장착 부

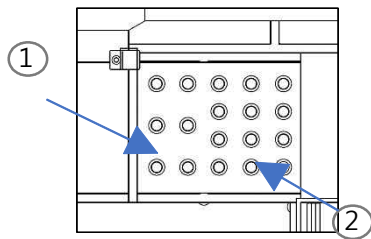


① 온도,습도 측정계

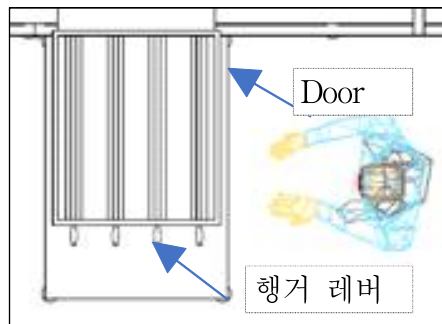
② 차압 측정계

③ 풍속 측정계

ㄴ. Active sampler and IRgas sampling port

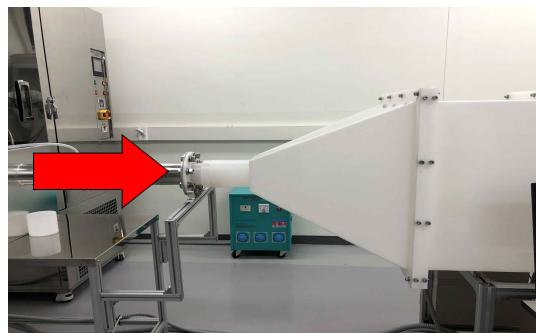


- ① Active sampler sampling port
- ② IRgas sampling port



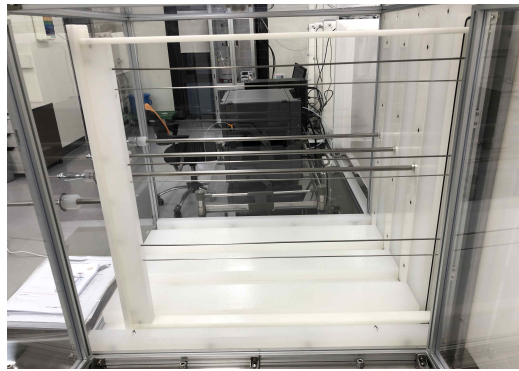
ㄷ. Passive sampler hanger

2) 동작순서



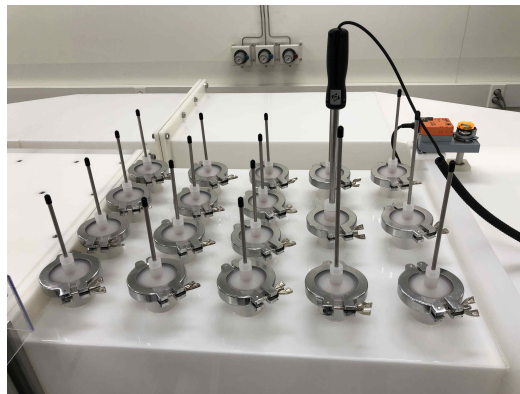
[사진] 챔버 air in_let

- 가) 향온 향습기와 연결된 air in_let을 통하여 air 가 주입된다.
- 나) Round duct 로 주입된 공기는 Mixing plate를 통하여 재 혼합되고 사각뿔 덕트(square pyramid duct)에 의하여 확산 flow가 형성 된다
- 다) 베플 1 (10mm 타공판), 베플 2 (10mm 타공판), 베플 3 (20 mm 타공판)을 통하는 동안 면풍속(Plane flow speed)는 균일하게 된다
- 라) 면풍속이 균일하게 만들어진 공기는 온도, 습도, 압력, 풍속을 측정하여 풍속 향온 향습기의 온도와 습도, 송풍량을 조절되게 한다.
- 마) 패시브 샘플러 장착 판 겉이에 장착된 샘플러는 이를 통과하게 되어 샘플러에 노출이 된다.



[그림] passive sampler 슬라이드 거치대

- 바) 패시브샘플러 후단에는 패시브 샘플러와 겹치지 않는 위치에서 액티브 샘플러를 위한 샘플링 포트가 위치하여 포트별로 샘플링 할 수 있다.



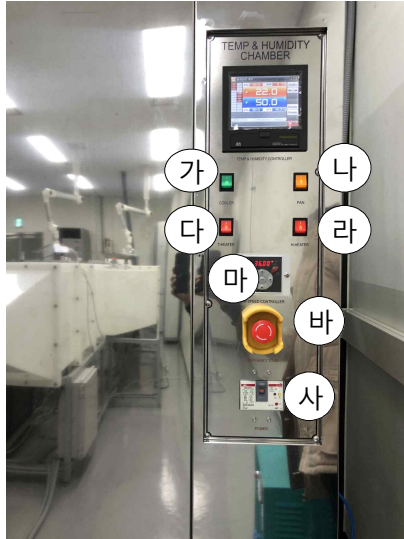
[그림] Active sampler sampling port

- 사) IR gas를 이용하여 실시간 농도측정을 위한 포트는 마지막에 위치하여 농도를 측정한다.
- 아) Air out_let부분에는 프리필터(Pre filter)를 장착하여 먼풍속을 일정하게 하는데 역할을 더한다.



[사진] 챔버 out_let 부분

나. 항온항습기



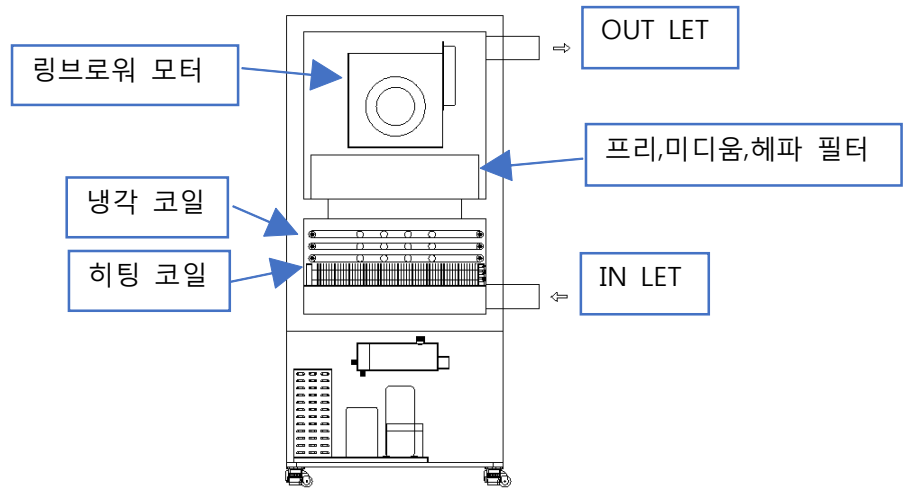
[사진] 항온항습기 정면 조작부 명칭

1) 외형

본 기기는 외부 공기를 정온, 정습을 발생하는 장치이다.

- 가) 냉각 코일 사용 여부 on/off 스위치 및 동작확인 표시등.
- 나) 팬 블로어 사용 여부 on/off 스위치 및 동작확인 표시등
- 다) 가열 히터 사용 여부 on/off 스위치 및 동작확인 표시등
- 라) 가습 히터 사용 여부 on/off 스위치 및 동작확인 표시등
- 마) 팬 블로어 controller
- 바) 비상 스위치 (Emergency stop switch)
- 사) 항온항습기 on/off 전원 스위치

나) 부분명칭



[그림 5] 향온향습기 내부 부속 배치도

다) 동작설명

#별첨 1 향온향습기 사용자 매뉴얼

다. Air handling system

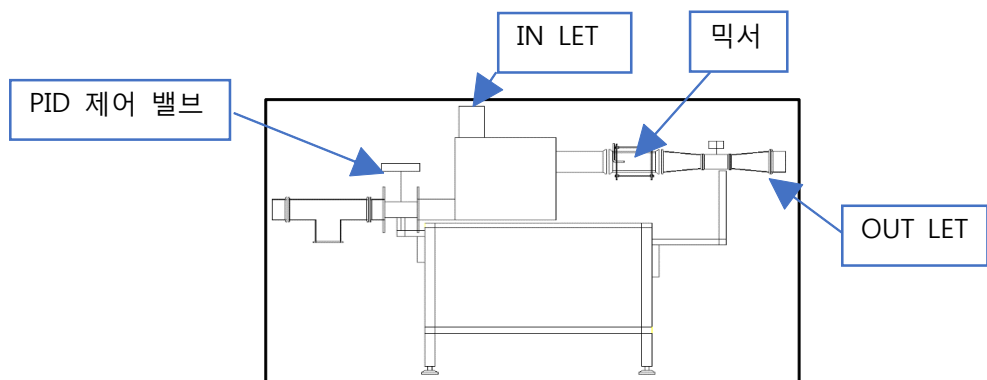
가) 외형사진

- 본 시스템은 저유량을 사용하는 시료채취기 챔버와 최저 유량을 사용하는 항온항습기의 유량gap 차이가 커서 이를 조절하고 유기용재발생기에서 발생한 gas를 항온항습공기와 혼합을 하기위한 기기 이다



[사진 3] Air handling system

나) 부분 명칭



[그림 6] Air handling system

다) 동작설명

- ㄱ. In_let 부분은 향온 향습기 Out_let 부분과 연결되어 향온 향습된 공기가 공급된다.
- ㄴ. Air handling system의 chamber에서 공기가 분배가 이루어 지며, 시료채취기 시험챔버에 필요한 air는 믹서를 통과하면서 “유기 용재발생기”에서 발생되어진 가스는 확산된다.
- ㄷ. PID valve 는 챔버로 들어가는 공기의 양을 조절하여 챔버에 흐르는 유속을 조절한다.

라. Exhaust filter unit

가) 외형사진

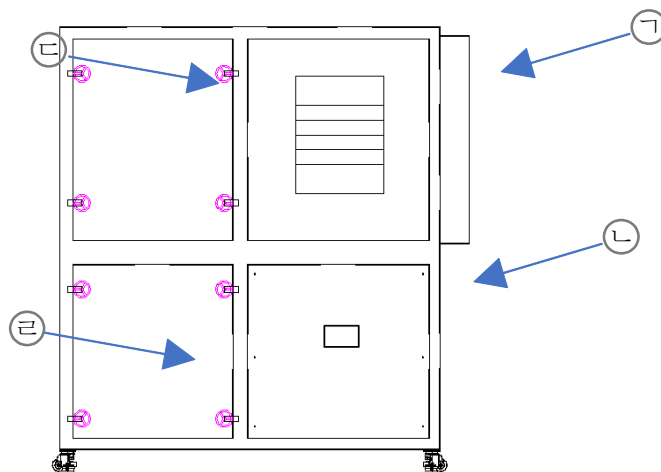
- 본 기기는 시료채취기 챔버에서 사용하고 버려지는 공기를 정화하여 외부로 배출하는 배기 유닛이다.



[사진 4] Exhaust filter unit

나) 부분 명칭

[그림 7] Exhaust filter unit



ㄱ. 덕트 댐퍼



[사진] 배기필터유닛 덕트 댐퍼

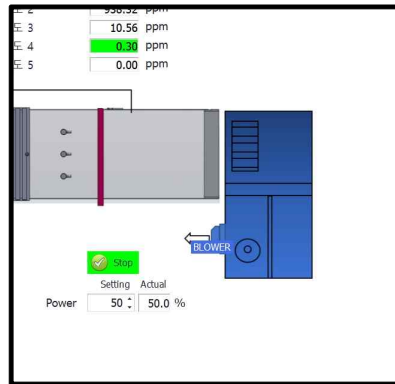
- ㄴ. 인버터 리모컨 : 블로어 출력 조절
- ㄷ. Medium filter 케이스
- ㄹ. 카본 필터 케이스



[사진] 카본 필터 장착 케이스

다) 동작순서

- ㄱ. 전원을 투입한다.
- ㄴ. 인버터 리모컨 가운데 버튼(ENT)을 누른후 “◀” “▶”버튼을 눌러 원하는 Hz(0~60Hz, 0~100%)로 설정한후 “ENT” 버튼을 누르면 동작한다.
- ㄷ. 덕트 댐퍼를 조절하여 원하는 압력으로 조절한다.



[그림] 제어컴퓨터 Exhaust filte unit on/off 버튼

마. Clean air compressor system

1) Air compressor [model name : asb-s200

- 본 기기는 공기를 압축하는 기기이다.



[사진 5] Air compressor

가) 동작 및 사용 설명서

① 기기의 후면의 전원 플러그를 콘센트에 연결 후 정면에 있는 전원스위치를

켄다.

- ② 일정시간(약 1분)이 지난후 정면에 있는 에어탱크 압력 게이지를 확인 하여 압력이 7 kg/cm²이상인지 확인한다.
- ③ 측면에 있는 레귤레이터의 손잡이를 위로 올려서 잠금장치를 해지한후 돌려서 원하는 에어 출력압력을 설정한다. 주로 4 kg/cm²의 압력을 사용한다.
- ④ 사용종료후 기기 후면 아래에 있는 응축수 배출 밸브를 약 2초간 열어둔뒤 닫아서 에어탱크 안에 있는 응축수를 배출 시킨다.
- ⑤ 정면에 있는 전원 스위치를 내려서 끈다.

2) Air drywer [model name : DHT-5N]

- 본 기기는 압축되는 공기에 섞여있는 수분을 제거하는 기기이다.



[사진 6] Air Drywer

가) 동작 및 사용 설명서

- ⑥ 기기의 후면의 전원 플러그를 콘센트에 연결 후 정면에 있는 전원 스위치 2개를 동시이 켜다.
- ⑦ 상단에 있는 밸브 in_let valve (from air compressor)와 Out_let valve(to clean air filter unit)를 열어둔다.
- ⑧ 에어 드라잉 과정에서 발생한 응축수는 자동으로 밖으로 배출 된다.

⑨ 사용 종료후 정면에 있는 전원 스위치를 내려서 끈다.

3) Clean air filter unit

- 본 기기는 압축되어있는 공기의 파티클 및 수분을 제거할 수 있는 기기이다.



[사진 7] Air Filter

가) 동작 및 사용 설명서

- (1) 상단에 있는 검은 색레버의 잠금 장치를 해지후 레버를 위로 당겨서 2중 잠금 장치를 해지 시킨다.
- (2) 레버를 돌려서 원하는 에어 압력으로 설정한다. (단 MFC, MPC 사용이 라면 2 kg/cm²)
- (3) 아래 2개 부분은 파티클 및 유분, 수분을 필터링 한 부분저장하는곳으로 투명 창을 확인하여 이물이 많이 쌓였는지 확인 하고, 많이 쌓여 있으면 아래 레버를 돌려 밖으로 배출 시킨다.

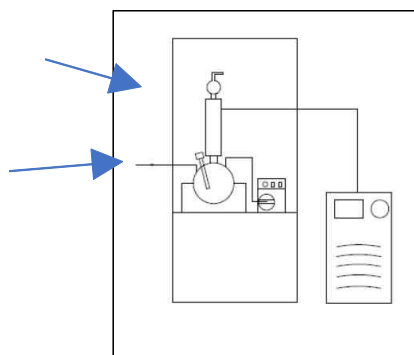
바. Gas generator

1) 외형



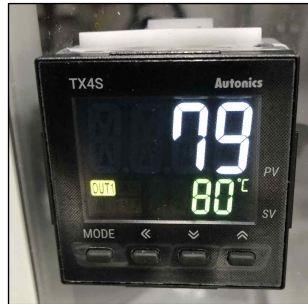
[사진 8] Organic vapor generator

2) 부분명칭 및 상세 설명



[그림 6] Air handling system

- 가) Heating mantle : 플라스크를 가열하는 역할을 한다
- 나) Flask : 유기용제 및 에어가 주입 되어 유기가스를 발생시킨다.
- 다) Condenser - cooling chiller와 연결되어 가스를 냉각 시킨다.
- 라) 기액분리기 : 유기가스의 수분을 모아주는 역할을 한다.
- 마) Out_let
- 바) Temperature controller



[사진] 온도 (mentle) 컨트롤러

- ㄱ. Chiller : 높아진 콘덴서의 온도를 낮춰주는 역할을 한다.



[사진] Chiller

ㄴ. Peristaltic pump : 정량의 유기용제를 주입하는 역할을 한다.



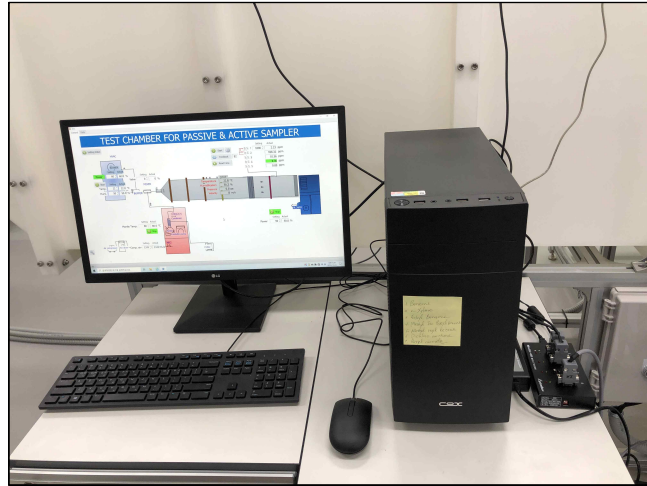
[사진] Peristaltic pump(정량펌프)

3) 동작순서

- 가) Heating mantle은 temperature controller에서 설정된 온도에 따라서 on/off되어져 설정 온도에 도달한다.
- 나) Peristaltic pump에 의해 정량화된 liquid는 flask에 공급된다.
- 다) Heating mantle에 의해서 가열된 플라스크는 안에 drop되는 liquid를 증발시킨다.
- 라) 가열 기화된 liquid는 condenser에의해 냉각되어 상온으로 냉각된다.
- 마) 냉각된 gas는 기액 분리기에 의해 액화된 기체를 분리하고 순수 gas만 out_let을 통하여 공급된다.

사. Controller & computer

1) 외형

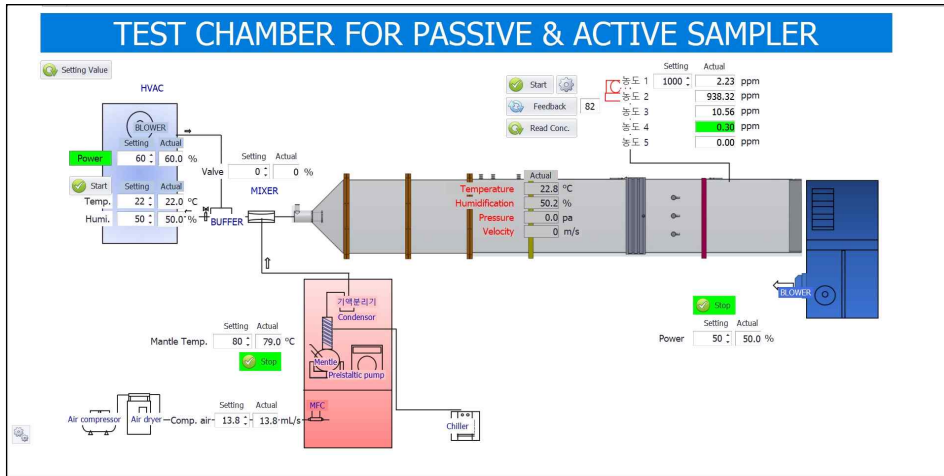


[그림 0] 컨트롤러 외형

2) 부분 명칭 및 상세 설명

- ㄱ. 전원 버튼
- ㄴ. PID 밸브 컨트롤러
- ㄷ. 센서 연결부
- ㄹ. 전원 연결부

3) 조작순서



[그림 7] 제어PC UI (User interface)

- 가) 컴퓨터의 전원을 키고 컨트롤러 프로그램 “ADS”를 실행한다
- 나) 항온항습기, 유기용제, 챔버, 배기 유닛 등의 현재 온도, 습도, 압력, 풍속 등을 확인 후 원하는 상태 값으로 조정한다.

4. 시험챔버 시스템 운전 순서

가. 전원을 ON 한다.

- a. Controller와 제어컴퓨터의 전원을 켜다.
- b. 향온향습기의 전원을 켜다.
- c. Exhaust filter unit의 전원을 켜다.
- d. Organic vapor generator의 전원을 켜다.
- e. IR gas의 전원을 켜다.
- f. 유기용재 발생기의 전원을 켜다.

나. 기기 Warming up

- a. IRgas 3분 이상 운전 실시한다.
- b. 향온향습기 온도, 습도 설정값 도달 확인한다.
- c. Exhaust filter unit 압력 확인 (o pascal)
- d. 유기용재 발생기 chiller 온도 설정값 도달 확인.
- e. 유속 설정값 도달 확인.

다. 0 calibration 확인

- a. IR gas 농도 “0”확인

라. Gas 발생기 동작 및 농도 확인

- a. 유기용재 발생기의 mantle target 온도 설정
- b. Mantle 온도 도달 확인 후 peristaltic pump target 속도 설정

- c. IR gas 측정 농도 도달 확인

마. 시료채취기 장착

- a. Passive sampler 장착한다.
- b. Active sampler 장착한 후 정량펌프 suction 유량설정 후 동작 시킨다.

바. Monitoring

사. 시료채취기 탈거

- a. Passive sampler를 탈거 한다.
- b. Active sampler의 펌프를 정지(자동정지, timer) 한다.
- c. Active sampler를 탈거 한다.

아. 기기 전원 OFF

- a. IRgas의 전원을 제외한 모든 전원은 OFF 한다.
- b. IRgas를 3시간 이상 N2 purge를 실시한다.

자. Test 종료

5. 유지 보수

가. 유기용제 발생기

a. 플라스크 및 콘덴서 등 세척

- 플라스크 및 콘덴서 등을 세척 할 경우 전원 OFF 상태에서 플라스크의 온도가 상온으로 떨어질 때까지 기다립니다.
- 상온상태에서 클립, 호스 등을 탈거하여 플라스크 등을 개별적으로 청소 해야 합니다.
- 세척 시에는 장갑과 보안경을 착용하여 시험물질이 손과 눈에 묻지 않도록 합니다.
- 세척 후 물기 등으로 완전히 건조된 후 조립합니다.

나. 항온 항습기

a. 필터 교체

- 전원 OFF 된 상태에서 측면 좌측 도어를 엽니다.
- 장비 내부에 필터 잠금 도어를 엽니다.
- 프리 필터, 미디움 필터, 헤파 필터를 꺼냅니다.
- 필터를 꺼낼 시 먼지가 설비 내부로 유입되지 않도록 주의합니다.
- 꺼낸 순서의 역순으로 새 필터를 조립합니다.

다. 배기 필터

a. 필터 교체

- 전원 OFF 된 상태에서 정면 우측 도어를 연다.
- 고정 핀을 탈거 한 후 필터를 꺼냅니다.
- 필터를 꺼낼 시 먼지가 설비 내부로 유입되지 않도록 주의합니다
- 꺼낸 순서의 역순으로 새 필터를 조립합니다.

6. 고장 발생 시 조치

1) 전원이 켜지지 않을 경우

- 전원코드가 외부 전원과 연결되어 있는지 확인합니다.
- 전원코드가 장비에 연결되어 있는지 확인합니다.
- 장비의 전원 스위치가 꺼져 있는지 확인합니다.
- 위의 모든 사항을 확인했음에도 불구하고 전원이 들어오지 않는다면 점검을 요청하시기 바랍니다.

2) 실제 온도가 설정 온도와 맞지 않을 경우

- 온도 보정이 필요하니 점검을 요청하시기 바랍니다.

3) 냉각, 가열 속도가 너무 느릴 경우

- 칠러 수조의 양이 적정 수준에 있는지 확인합니다.
- 위의 모든 사항을 확인했음에도 불구하고 정상 작동하지 않는다면 점검을 요청하시기 바랍니다.

4) 시스템에서 타는 냄새가 날 경우

- 전원코드를 분리하고, 즉시 외부전원을 차단합니다.

5) PC 컨트롤러가 장비를 제어하지 못할 경우

- PC와 네트워크 허브를 연결하는 케이블을 검사합니다.
- 장비와 네트워크 허브를 연결하는 케이블을 검사합니다.
- 네트워크 허브의 전원이 켜져 있는지 확인합니다.
- PC의 네트워크 설정을 확인합니다.
- 위의 모든 사항을 확인했음에도 불구하고 정상 작동하지 않는다면 점검을 요청하시기 바랍니다.

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 박정근 (선임연구위원, 직업환경연구실)

공동연구자 : 박승현 (실 장, 직업환경연구실)

조현민 (연 구 원, 직업환경연구실)

장미연 (연 구 원, 직업환경연구실)

〈〈연 구 기 간〉〉

2019. 1. 1 ~ 2019. 11. 30

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

산업안전보건연구원장

국산 보급형 수동식 시료채취기 개발 연구(I)

2019-연구원-1487

발 행 일 : 2019년 11월 30일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 고재철

연구책임자 : 직업환경연구실 선임연구위원 박정근

발 행 처 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전 화 : (052) 7030-888

F A X : (052) 7030-337

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