



# 흡입독성시험 증기 발생장치의 개선 연구

OSHRI

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원





연구보고서

# 흡입독성시험 증기 발생장치의 개선 연구

김용순·라대식·김태현

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원





# 요약문

- 연구기간 2021년 01월 ~ 2021년 11월
- 핵심단어 흡입독성시험, 증기발생장치, 이동식발생장치, 기화방식
- 연구과제명 흡입독성시험 증기발생장치의 개선 연구

## 1. 연구배경

산업화학물질의 흡입독성시험은 노동자들에게 화학물질이 노출되는 경로 중 가장 중요한 경로인 호흡기를 통해 체내로 유입된 화학물질의 독성영향을 확인하는 시험방법이다. 흡입독성시험은 실험을 위해 제작된 흡입챔버 내에서 실험동물에 시험물질을 노출 시켜 그 농도에 따라 독성 영향의 빈도, 정도(크기) 등을 평가하는 것으로, 이를 위해서는 흡입챔버 내에서 시험물질을 목표하는 농도로 일정하게 노출 및 분석이 가능하게 하는 것이 매우 중요하다. 산업안전보건연구원 흡입독성연구센터 내 증기발생장치는 이동에 제한이 있는 고정식 장치로, 발생장치와 노출챔버 간의 일정한 거리가 있어 시험물질 발생 농도의 한계가 있는 단점이 있다. 이러한 이유로 기존 증기발생장치의 단점을 개선하여 향후 진행하게 될 흡입독성시험을 원활하게 수행하기 위하여 증기발생장치의 개선 개발이 필요하다.

## 2. 주요 연구내용

### ○ 기존 발생장치의 문제점 및 개선가능 항목 검토

발생장치와 노출챔버 간의 일정한 거리가 있어 발생가능 농도의 한계가 있

는 점과 시험물질이 발생기에서 챔버로 이동하는 동안 주변 환경의 온도에 민감한 현상이 나타나고 있는 점 등의 단점을 개선하기 위해 거리, 온도, 응축, 관직경, 버블링, 증기압에 관해 검토를 하였고, 그 중 개선이 가능할 것으로 판단되는 거리, 버블링을 중점으로 연구를 진행하였다.

### ○ 증기발생장치 제작

발생장치 제작을 위한 초안을 설계하여 문제점 등을 검토한 후 가스 세척병(gas washing bottle)에서 얻은 아이디어를 활용하여, 발생조를 만들고, 항온수조의 부력에 의한 움직임을 방지하기 위하여 별도의 고정장치를 제작 및 부착하여 움직임을 없도록 하였고, 이동이 가능하도록 작은 사이즈로 제작하여 발생기와 챔버 사이의 거리를 줄일 수 있도록 제작 하였다. 또한, 가스세척병을 응용한 모델에서 병의 용량에 관한 한계가 있어 기존 발생조를 활용하여 이동식으로 가능한 모델을 만들었다.

## 3. 연구 활용방안

- 산업안전보건연구원 「안전보건연구개발」 “흡입독성시험 및 평가” 사업의 시험물질 노출에 직접적으로 활용
- 흡입독성시험 관련 시설·설비의 지속적인 개선 및 유지·보수를 통한 흡입독성 연구의 신뢰성 및 과학적 유효성 확보

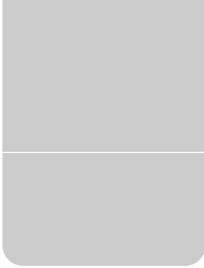
## 4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업화학연구실 연구위원 김용순
  - ☎ 042) 869. 8512
  - E-mail : somays@kosha.or.kr



# 목 차

<b>I. 서 론</b> .....	<b>1</b>
1. 흡입독성시험 .....	3
2. 증기발생 방법(장치종류)의 종류와 장단점 .....	4
3. 흡입독성연구센터 증기발생장치 .....	6
<b>II. 증기발생장치 개선</b> .....	<b>11</b>
1. 증기발생장치 현황 및 문제점 .....	13
2. 개선가능 항목 검토 .....	14
3. 증기발생장치 제작 .....	16
4. 증기발생장치 성능시험 .....	19



# 목 차

<b>Ⅲ. 결과 및 고찰</b> .....	<b>41</b>
1. 증기발생장치 개선가능 항목 검토 및 제작 .....	43
2. 증기발생장치 비교 .....	44
3. 증기발생장치 추가 개선 사항 .....	47
4. 연구의 한계 및 문제점 .....	48
5. 제언 .....	48
<b>참고문헌</b> .....	<b>51</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>53</b>

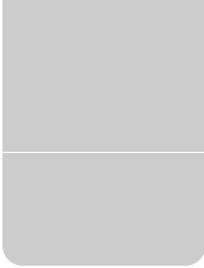
# 표 목차

〈표 Ⅰ-1〉 다양한 방법에 따라 생성된 가스의 정확도 .....	6
〈표 Ⅱ-1〉 계절별 발생 농도 및 유량 차이 .....	14
〈표 Ⅱ-2〉 개선가능 항목 .....	15
〈표 Ⅱ-3〉 기존 발생장치의 유량별 평균농도 .....	20
〈표 Ⅱ-4〉 기존 발생장치의 T95 .....	23
〈표 Ⅱ-5〉 발생장치(Ⅰ)의 유량별 평균농도 .....	27
〈표 Ⅱ-6〉 발생장치(Ⅰ)의 T95 .....	30
〈표 Ⅱ-7〉 발생장치(Ⅱ)의 유량별 평균농도 .....	34
〈표 Ⅱ-8〉 발생장치(Ⅱ)의 T95 .....	38
〈표 Ⅲ-1〉 발생장치의 유량별 최고농도 .....	44
〈표 Ⅲ-2〉 발생장치의 유량별 T95 .....	46

# 그림목차

[그림 Ⅰ-1] 증기발생장치 안전 캐비닛	7
[그림 Ⅰ-2] 발생부(반응조)	8
[그림 Ⅰ-3] 냉각부 (냉각기, trap)	8
[그림 Ⅰ-4] 증기발생장치를 이용한 흡입노출 시스템 모식도	9
[그림 Ⅱ-1] 흡입독성연구센터 발암성시험 흡입노출 시스템 모식도	13
[그림 Ⅱ-2] 흡입독성연구센터 아(급)만성시험 흡입노출 시스템 모식도	14
[그림 Ⅱ-3] 발생장치 설계(안)	16
[그림 Ⅱ-4] PYREX® Gas washing bottle with side inlet and coarse fritted disc	17
[그림 Ⅱ-5] 제작된 발생장치(Ⅰ)	18
[그림 Ⅱ-6] 제작된 발생장치(Ⅱ)	19
[그림 Ⅱ-7] 기존 발생장치의 노출 변화(1 lpm)	20
[그림 Ⅱ-8] 기존 발생장치의 노출 변화(5 lpm)	21
[그림 Ⅱ-9] 기존 발생장치의 노출 변화(10 lpm)	21
[그림 Ⅱ-10] 기존 발생장치의 노출 변화(20 lpm)	22
[그림 Ⅱ-11] 기존 발생장치의 노출 변화(30 lpm)	22
[그림 Ⅱ-12] 기존 발생장치의 T95(1 lpm)	24
[그림 Ⅱ-13] 기존 발생장치의 T95(5 lpm)	24
[그림 Ⅱ-14] 기존 발생장치의 T95(10 lpm)	25
[그림 Ⅱ-15] 기존 발생장치의 T95(20 lpm)	25
[그림 Ⅱ-16] 기존 발생장치의 T95(30 lpm)	26

[그림 II-17] 발생장치(Ⅰ)의 설치 및 시험물질 노출	27
[그림 II-18] 발생장치(Ⅰ)의 노출 변화(1 lpm)	28
[그림 II-19] 발생장치(Ⅰ)의 노출 변화(5 lpm)	28
[그림 II-20] 발생장치(Ⅰ)의 노출 변화(10 lpm)	29
[그림 II-21] 발생장치(Ⅰ)의 노출 변화(20 lpm)	29
[그림 II-22] 발생장치(Ⅰ)의 노출 변화(30 lpm)	30
[그림 II-23] 발생장치(Ⅰ)의 T95(1 lpm)	31
[그림 II-24] 발생장치(Ⅰ)의 T95(5 lpm)	31
[그림 II-25] 발생장치(Ⅰ)의 T95(10 lpm)	32
[그림 II-26] 발생장치(Ⅰ)의 T95(20 lpm)	32
[그림 II-27] 발생장치(Ⅰ)의 T95(30 lpm)	33
[그림 II-28] 발생장치(Ⅱ)의 설치 및 시험물질 노출	34
[그림 II-29] 발생장치(Ⅱ)의 노출 변화(1 lpm)	35
[그림 II-30] 발생장치(Ⅱ)의 노출 변화(5 lpm)	35
[그림 II-31] 발생장치(Ⅱ)의 노출 변화(10 lpm)	36
[그림 II-32] 발생장치(Ⅱ)의 노출 변화(20 lpm)	36
[그림 II-33] 발생장치(Ⅱ)의 노출 변화(30 lpm)	37
[그림 II-34] 발생장치(Ⅱ)의 T95(1 lpm)	38
[그림 II-35] 발생장치(Ⅱ)의 T95(5 lpm)	39
[그림 II-36] 발생장치(Ⅱ)의 T95(10 lpm)	39
[그림 II-37] 발생장치(Ⅱ)의 T95(20 lpm)	40



## 그림목차

[그림 Ⅱ-38] 발생장치(Ⅱ)의 T95(30 lpm) .....	40
[그림 Ⅲ-1] 기존 발생장치의 유량별 최고농도 .....	44
[그림 Ⅲ-2] 발생장치(Ⅰ)의 유량별 최고농도 .....	45
[그림 Ⅲ-3] 발생장치(Ⅱ)의 유량별 최고농도 .....	45
[그림 Ⅲ-4] 발생장치의 유량별 T95 .....	47

# I. 서론





# I. 서론

## 1. 흡입독성시험

산업화학물질의 흡입독성시험은 노동자들에게 화학물질이 노출되는 경로 중 가장 중요한 경로인 호흡기를 통해 체내로 유입된 화학물질의 독성영향을 확인하는 시험방법으로 그 중요성은 모두가 인식하고 있다. 또한, 최근 살생물제, 미세먼지 등 사회적 이슈로 인해 흡입독성시험에 대한 관심과 그 필요성이 증가하고 있다. 흡입독성시험은 실험을 위해 제작된 흡입챔버 내에서 실험동물에 시험물질을 노출 시켜 그 농도에 따라 독성 영향의 빈도, 정도(크기) 등을 평가하는 것이다. 일반적으로 반복흡입독성시험에서는 실험동물의 임상 증상, 체중변화, 사료 및 물 섭취량 변화, 장기중량 변화, 부검 육안소견, 혈액 및 혈액생화학검사, 기관지폐포세척액(Bronchoalveolar lavage fluid, BALF) 검사, 조직병리학적 검사 등 다양한 관찰항목을 통해 독성 영향을 평가한다. 하지만, 이러한 평가를 위해서는 흡입챔버 내에서 시험물질을 목표하는 농도로 일정하게 노출 및 분석이 가능하게 하는 것이 매우 중요하다. 또한, 전체 호흡기에 대한 노출을 최대화하고 노출 농도의 시간적, 공간적 안정성을 확보하기 위한 정교한 기술적 조치가 반드시 필요하다(OECD GD39, 2018).

국립환경과학원 고시 「화학물질의 시험방법에 관한 규정」 및 OECD TG 412 및 413 에서 흡입독성시험 대상 시험물질은 흡입 가능한 물질로 가스, 휘발성 물질, 나노물질을 포함한 입자상 물질(에어로졸)로 크게 이야기하고 있다(국립환경과학원 2020, OECD TG 412 2018, OECD TG 413 2018). 그 중 작업장에서 노출될 수 있는 여러 가지 물질 중 용제(solvent)는 할로카본, 방향족 탄화수소, 알코올, 에테르, 에스테르, 아세테이트, 아마이드, 아민, 알데하이드, 케톤 등 그 종류가 다양하며 특히 직업적 노출에 의해 독성 영향을 일으킬 수 있는 요인이 될 수 있다(기성환 등 2018). 이러한 화학물질

은 일반적으로 증기(vapor)의 형태로 흡입독성시험을 수행할 수 있으며, 이에 따라 증기 농도를 일정하게 유지하는 증기 발생장치가 반드시 필요 하며, 발암성시험을 포함한 만성노출 연구에서는 증기 농도가 장기간 동안 안정적으로 노출될 수 있어 한다(Hori 등 1986).

## 2. 증기발생 방법(장치종류)의 종류와 장단점

시험물질을 발생시키기 위해 다양한 증기발생 방법이 개발되었다. 크게 정적(static) 방법과 동적(dynamic) 방법의 두 범주로 나눌 수 있다. 정적 방법은 간단하고 복잡한 장치가 필요하지 않지만, 농도(특히 고농도)의 신뢰성, 제한된 시험물질의 양에 대해서 1회만 생성 되며, 누출 및 압력에 따라 농도가 변화 되는 등 제한점이 많다. 이에 반해 연속적인 희석 가스와 일정 속도로 발생하는 증기와의 혼합을 기반으로 하는 동적 방법은 상대적으로 복잡하고 비싸지만, 평형 상태에서 흡착 및 응축의 영향이 무시될 정도로 생성되고, 연속적으로 시험이 가능하며, 온도, 상대습도 및 유량에 대한 시험물질의 발생 조절이 가능하다는 장점이 있다(Li 등 2012). 이런 이유로 대부분의 흡입독성 시험을 위한 증기발생장치는 동적 방법을 많이 활용하고 있다. 증기발생 방법은 연구자에 따라 그 종류를 언급하는 방식이 조금씩 차이가 난다. Hori 등(Hori 등 1986)은 증기발생 방법을 확산관 방식(diffusion tube method), 버블링에 의한 포화방법(saturation method by bubbling), 역류 휘발법(counter-current volatilization), 주사기 펌프 방식(syringe pump method), 스프레이 건 방식(spray gun method), 소결구법(sintered sphere method)과 같은 방식을 언급 하고 있으며, Li 등(Li 등 2012)은 주입방식(injection methods), 투과방식(permeation methods), 확산방식(diffusion methods), 기화방식(evaporation methods)으로 구분하였다. Li 등(Li 등 2012)이 언급한 증기발생 방법에 관한 주요 내용은 다음과 같다. 먼저 주입방식은 희석 가스에 액체를 주입하여 시험물질을 만드는 방법으로

일반적인 주사기, 모터 구동을 통한 주사기 및 펌프형 주사기와 같은 다양한 주입 장치가 적용되고 있다. 장점은 희석 가스를 다른 유량으로 적용하여 다양한 농도를 얻을 수 있다는 점이다. 희석 가스에 주입된 액체를 휘발시키기 위해 혼합 챔버의 분무기 및 히터가 자주 적용된다. 그러나 주입 후 혼합 챔버의 농도가 크게 변할 수 있으므로 변동의 균형을 맞추기 위해 확장된 혼합 챔버가 필요하다. 한편, 주입방식은 주사기의 제한된 부피와 재충진(refill)이 필요하다는 단점이 있다. 투과방식은 픽의 확산 법칙(Fick's law)을 기반으로 하며, 액체에서 생성된 증기가 막을 통해 확산되는 것을 이용한다. 다양한 장치 중에서 투과관을 가장 많이 활용하며, 투과관은 고분자 물질로 만들어진 관에 액체를 밀봉하여 사용한다. 온도, 튜브 길이 및 재질, 튜브 벽 두께와 같은 변수가 투과율에 영향을 미치며, 이는 운반 가스에서 관련 물질의 농도에 추가로 영향을 미친다. 특히 온도는 투과방식에서 가장 중요한 매개변수이다. 따라서 투과방식은 가스 농도의 정확성을 보장하기 위해 정밀한 온도 제어가 필요하다. 투과방식은 응축성 가스, 액체, 승화 고체 및 많은 반휘발성 화합물을 포함하여 많은 부분에서 사용할 수 있다. 그러나 이러한 방법의 단점은 투과 평형에 도달하는 데 초기 시간이 오래 걸리고 상대적으로 높은 비용이 들며 차단 가능성이 없는 배출원으로부터 지속적인 배출이 있다는 점이다. 확산방식은 용기에서 모세관을 통하거나 모세관에서 직접 액체 증기의 확산과 희석 가스 혼합에 의하여 발생된다. 일정한 농도를 얻기 위해서는 확산조건, 즉 온도, 압력, 농도구배, 모세관의 길이와 직경, 희석가스의 유속을 유지하여야 한다. 투과방식과 유사하게 온도는 중요한 영향을 미친다. 장점과 단점은 투과법과 유사하며, 적용 범위가 넓고 많은 화합물에 적합하다. 그러나 순수한 성분으로 채워진 여러 용기가 적용되지 않는 한 하나의 확산 용기에서 다성분 혼합물을 준비하는 것은 불가능하다. 또한 안정적인 가스 생성을 위한 확산 평형을 얻기 위해서는 오랜 시간이 필요하다. 기화방식은 가장 간단한 원리로 구동이 된다. 희석 가스는 액체를 통해 버블링하거나 액체 표면을 통과하는 데 사용된다. 발생된 증기는 희석 가스로 농도를 낮추고 더 낮은 수준에서 안정화

하기 위해 열 교환기를 사용하여 재냉각할 수 있다. 기화방식은 투과 및 확산 방법에 비해 저렴하고 시험물질 발생에 대한 안정화 기간이 짧다. <표 I-1>은 네가지 방법에 따라 생성된 시험물질의 정확도를 보여준다(Li 등 2012).

**<표 I-1> 다양한 방법에 따라 생성된 가스의 정확도**

방법	주요내용
주입방식 (Injection)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주입 장치의 정확도에 크게 좌우</li> <li>- 다성분 테스트 가스는 순수 성분만큼 정확하지 않음</li> </ul>
투과방식 (Permeation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 온도, 압력 및 가스 흐름과 같은 열역학 및 물리적 상태 변수의 영향을 받는 투과율이 불확실성의 주요 원인</li> <li>- 투과 방법은 매우 낮은 농도(ppb 수준)를 생성하는 데 사용할 수 있으며 교정 자체의 불확실성도 전체 정확도에 영향을 줌</li> </ul>
확산방식 (Diffusion)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 확산 속도가 가장 중요한 불확실성임</li> <li>- 확산 속도의 변화는 화합물 자체, 확산 장치의 설계 및 열역학적 상태 변수와 관련이 있음</li> <li>- 불확실성은 투과 방법과 유사함</li> </ul>
기화방식 (Evaporation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 희석 시스템과 온도 변화로 현저한 편차 발생</li> <li>- 화합물의 증기압도 중요한 요인 중 하나</li> <li>- 증기압이 낮은 화합물의 경우 오류를 최소화할 수 있음</li> </ul>

### 3. 흡입독성연구센터 증기발생장치

산업안전보건연구원 흡입독성연구센터 내 흡입독성 발생장치는 기화방식(버블링 가열 기화방식)을 적용한 증기발생장치다. 안전 캐비닛, 발생부, 냉각부 및 제어부로 크게 구성되어 있다. 안전 캐비닛은 외부 누기를 방지하고, 시스템 내부에서 배관을 통해 외부로 공기가 배출되어 작업자가 안전하게 시험을 수행할 수 있다 [그림 I-1]. 발생부는 일정한 유량의 공기를 통해 유기용제를

가스 상태로 발생시킨다. 반응조 내부에는 버블링을, 반응조 외부에는 역삼투 증류수를 이용한 가온(heating) 방식으로 시험물질을 보다 더 효율적으로 발생시킬 수 있도록 되어 있다[그림 I-2]. 냉각부는 발생된 가스 상태의 유기용제를 상온으로 온도를 감소시켜 배출하기 위한 장치로 역삼투 증류수를 이용하여 감온(cooling)을 시키는 구조로 되어있다[그림 I-3]. 냉각부의 출구부에는 트랩(trap)을 설치하여 응축된 시험물질을 제거해 주는 역할을 한다. 발생부의 반응조 및 냉각부의 대부분 체결 부는 Polytetrafluoroethylene (PTFE)을 사용하였다. 발생부 및 냉각부는 가온 및 감온을 위한 히터와 냉각기(chiller)가 각각 연결되어 있다. 제어부는 유기용제 가스의 발생을 위한 유량을 일정하게 조절 및 유지시켜주기 위한 유량계(mass flow controller, MFC)와 각종 센서류, 안전을 위한 relief valve, 컴퓨터 등 제어를 위한 장치들이 구성되어 있다[그림 I-4].



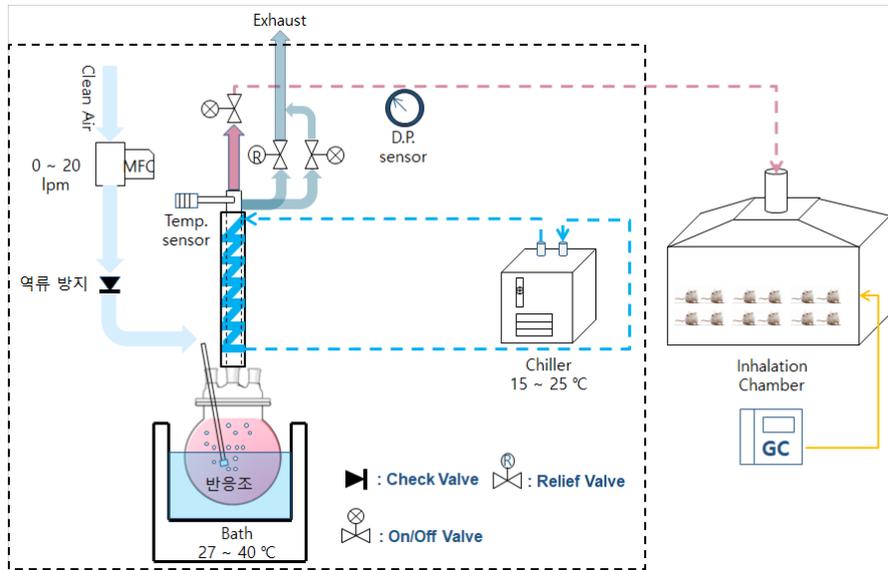
[그림 I-1] 증기발생장치 안전 캐비닛



[그림 I-2] 발생부(반응조)



[그림 I-3] 냉각부 (냉각기, trap)



[그림 I-4] 증기발생장치를 이용한 흡입노출 시스템 모식도



## Ⅱ. 증기발생장치 개선

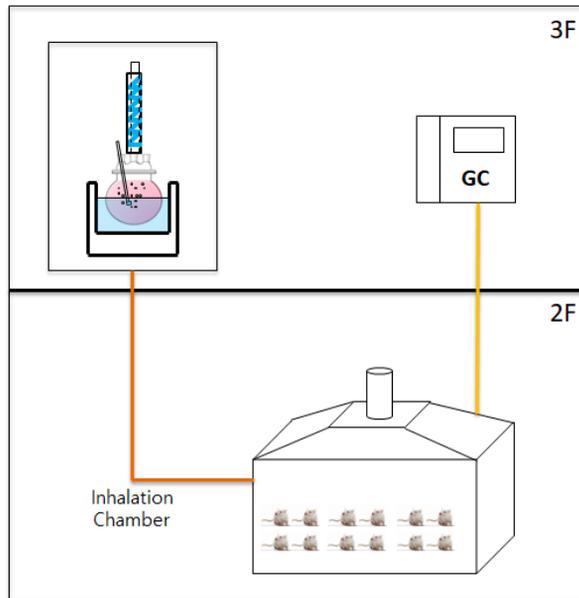




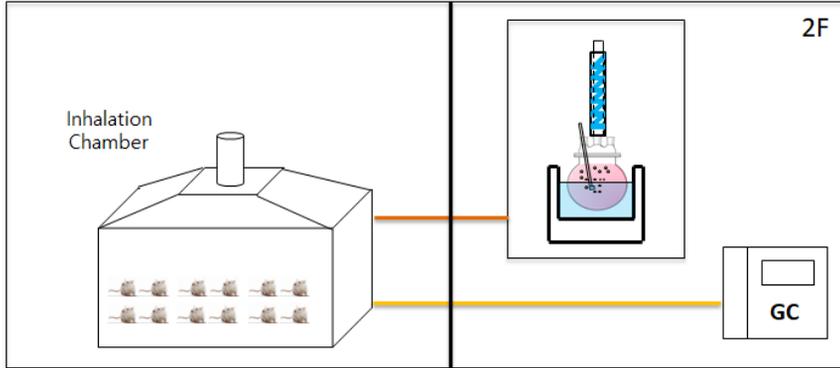
## II. 증기발생장치 개선

### 1. 증기발생장치 현황 및 문제점

흡입독성연구센터에 설치되어 있는 증기발생장치는 이동에 제한이 있는 고정식으로, 발생장치와 노출챔버간의 일정한 거리가 있어 발생가능 농도의 한계가 있는 단점이 있다[그림 II-1, II-2]. 이러한 예로, 반응조에서 히터 및 버블을 이용하여 일정수준의 농도로 발생을 시키더라도 챔버까지의 거리로 인해 챔버로 가는 동안 응축 등에 의해 히터 및 버블의 역할이 무의미해지는 현상이 발생하고 있다. 또한, 실험실 내부의 온도환경은 유지되고 있지만, 시험물질이 발생기에서 챔버로 이동하는 동안 계절에 따른 온도 영향으로 여름철은 상대적으로 발생이 잘되지만 겨울철은 그 반대의 현상이 나타나고 있다<표 II-1>.



[그림 II-1] 흡입독성연구센터 발암성시험 흡입노출 시스템 모식도



[그림 II-2] 흡입독성연구센터 아(급)만성시험 흡입노출 시스템 모식도

<표 II-1> 계절별 발생 농도 및 유량 차이

항목		1월 첫째 주		8월 첫째 주		비교(%)
		평균	편차	평균	편차	
농도	물질 A	391.49	7.61	402.47	8.32	2.80
	물질 B	207.09	15.08	213.88	13.05	3.28
	물질 C	234.35	8.12	245.29	15.36	4.67
유량	물질 A	23.50	0.19	22.27	0.58	-5.27
	물질 B	58.33	8.82	32.90	1.97	-43.60
	물질 C	299.99	0.02	299.31	1.83	-0.23

## 2. 개선가능 항목 검토

흡입독성연구센터에서 활용하고 있는 증기발생장치는 앞서 이야기한 바와 같이 기화방식을 적용하고 있다. 개선을 위해 다른 방식 즉, 주입방식, 투과방식, 확산방식을 함께 검토한다면 더 많은 아이디어를 얻을 수 있겠으나, 제한

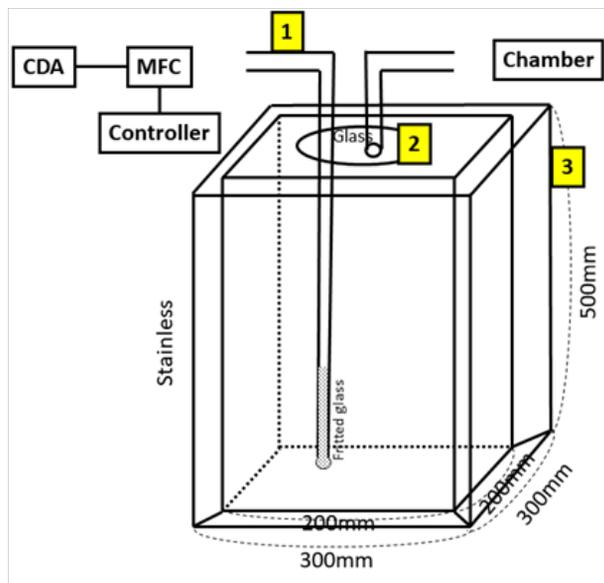
된 시간과 경제성을 고려하여 기존의 기화방식과 현재 보유하고 있는 흡입독성시스템에 한정하여 개선가능 항목을 확인하였다. 기화방식은 희석 시스템과 온도변화, 시험물질의 증기압이 가장 큰 변수로 알려져 있기 때문에 이에 관련된 내용을 중심으로 확인하였다. 검토된 주요항목은 다음 <표II-2>과 같다. 현재 보유하고 있는 시스템에서 많은 변화를 주지 않고 발생장치만의 개선을 통해 기존 시험물질의 발생농도를 유의미하게 증가시킬 수 있는 항목은 제한적이었다. 특히, 기화방식의 본질적인 특성 때문에 거리, 온도, 응축, 관직경, 버블링, 증기압 등을 개선 가능한 항목으로 검토하였으나, 실제 이번 연구에서 적용할 수 있는 항목은 거리와 버블링으로 압축되었다.

**<표 II-2> 개선가능 항목**

항목	내용 및 현황	개선방안
거리	- 발생장치와 챔버 사이 거리 - 발생장치는 고정식	- 이동식으로 발생장치와 챔버 사이 거리를 줄임. 단, 분석장비의 경우 이동이 불가능하여 챔버와 분석장비 사이 거리는 변경 없음
온도	- 반응조 외부를 가온하여 시험 물질을 보다 더 효율적으로 발생 - 반응조 외부에 히터와 연결된 가온된 물과 접촉	- 반응조 외부를 직접 가온된 물과 접촉
응축	- 발생된 가스 상태의 유기용제를 상온으로 온도를 감소시켜 배출 - 냉각기(chiller)를 적용	- 별도의 냉각기(chiller)는 적용하지 않음
관직경	- 각 부분의 연결되는 관의 직경에 따라 노출 농도에 영향	- 이번 연구에서는 적용하지 않음
버블링	- 반응조 내부에는 버블링을 통해 시험물질을 보다 더 효율적으로 발생 - 반응조 내부에 버블링 장치 장착	- 반응조 바닥 전체가 버블링 가능한 방식으로 변경
증기압	- 시험물질의 증기압	- 기존 흡입독성시험을 수행한 이력이 있는 시험물질 활용 - 이번 연구에서는 적용하지 않음

### 3. 증기발생장치 제작

발생장치 제작을 위해 구상한 아이디어 중 하나는 스테인레스 재질로 제작하여 내구성을 향상시키고, 유량을 300 lpm(liter per minute)으로 높여 높은 유량을 통해 고농도 노출이 가능할 수 있도록 고안하였다. 또한, 칠리를 제외하고 항온펌프를 부착해 온도의 영향으로 보다 더 효율적인 발생이 가능할 수 있도록 구상 하였다. 하지만, 청정공기(clean and dry air, CDA)가 발생조로 공급될 때(그림 II-3의 1) 공급되는 공기 압력에 따른 공급 및 발생 유리배관의 직경, 버블러와 발생조 본체의 연결 부분(그림 II-3의 2)의 연결 방법, 항온순환펌프의 장착 부위(그림 II-3의 3)에 장착 가능성, 발생조의 시험물질 잔량 확인 가능성 등을 고려하였을 때 제작, 성능확인 및 보완개선 등의 단계에서 많은 시간과 예산이 소요되는 등의 문제점이 발생할 가능성이 높아 제작 검토 단계에서 보류하였다.



[그림 II-3] 발생장치 설계(안)

추가로 구상한 제작안은 [그림 II-4]와 같이 아래 바닥 전체가 버블링이 가능하여 시험물질의 표면적을 넓혀 시험물질을 보다 효율적으로 발생가능하도록 하고, 항온수조를 이용하여 발생조 주위를 가온하는 방식으로 구상하였다. 발생조 내 시험물질의 잔량을 확인할 수 있고, 여러개의 발생조를 연결하거나 분리하여 상황에 맞게 활용할 수 있는 장점이 있지만, 항온수조 내 물의 부력에 의해 발생조가 불안정하게 움직일 수 있는 단점이 있다.

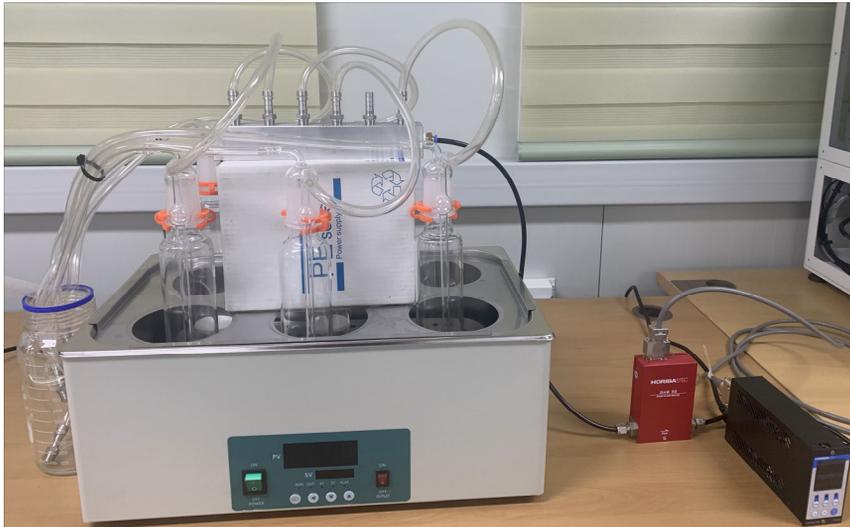


**[그림 II-4] PYREX® Gas washing bottle with side inlet and coarse fritted disc**

이를 바탕으로 가스 세척병(gas washing bottle)에서 얻은 아이디어를 활용하여, 발생조를 제작하고, 항온수조의 부력에 의한 움직임을 방지하기 위하여 별도의 고정장치를 제작 및 부착하여 움직임을 없도록 하였다. 또한, 이동이 가능하도록 제작하여 발생기와 챔버 사이의 거리를 줄일 수 있도록 하였다. 응축장치는 별도로 부착하지 않고, 대기 중의 온도로 응축된 물질이 분리

되는 방식으로 제작하였다. 제작완료 된 증기 발생장치(증기발생장치(I))는 먼저 시험물질 대신 증류수를 이용하여 버블링, 유량계 등의 작동여부를 확인 하였다[그림 II-5].

증기발생장치(I)를 이용하여 장치의 성능시험을 진행하였으나, 제작된 가스 세척병의 용량(개당 0.35 리터, 6개 부착으로 총 2.1 리터)이 작아 기존 발생장치의 용량(5 리터)에 미치지 못하여, 원하는 결과를 얻지 못하였다. 이에 따라 기존 발생장치의 주요 부품을 활용 및 변형한 증기발생장치(II)를 제작하여 성능시험을 진행하였다[그림 II-6].



[그림 II-5] 제작된 발생장치(I)



[그림 II-6] 제작된 발생장치(II)

#### 4. 증기발생장치 성능시험

흡입독성시험을 진행한 경험이 있는 시험물질인 anisole(CAS No. 100-66-3)을 이용하여 유량별로 시험물질 발생 농도와 흡입챔버 내 목표농도의 95%에 도달하는 시간인 T95 를 확인하였다. 유량은 흡입독성시험에서 일반적으로 많이 사용하였던 1, 5, 10, 20, 30 lpm 으로 고정하여 시험을 수행하였다.

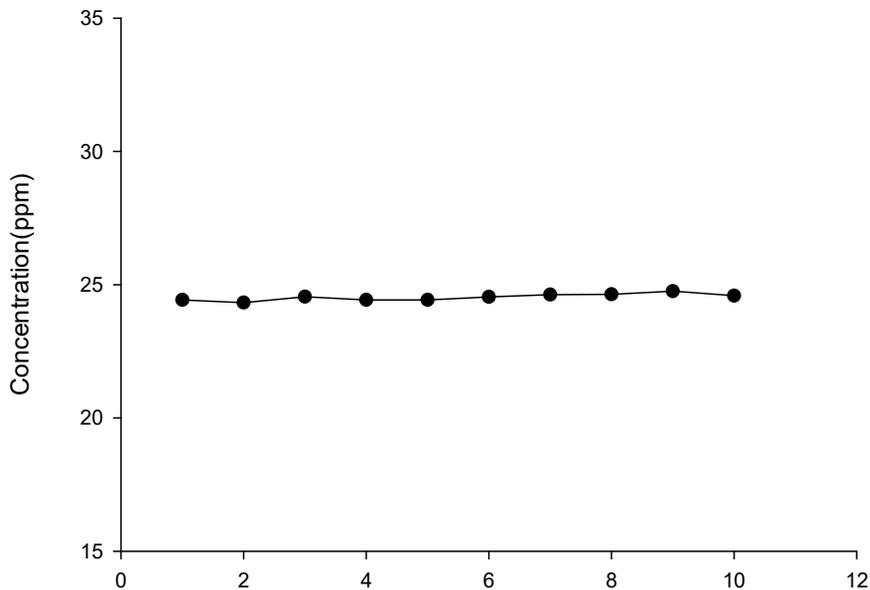
##### 1) 기존 증기발생장치

먼저, 기존 증기발생장치의 유량별(1, 5, 10, 20, 30 lpm) 농도 변화를 확인하였다. 평균 농도변화는 일정한 수준의 농도로 노출이 되는 지점에서 10 포인

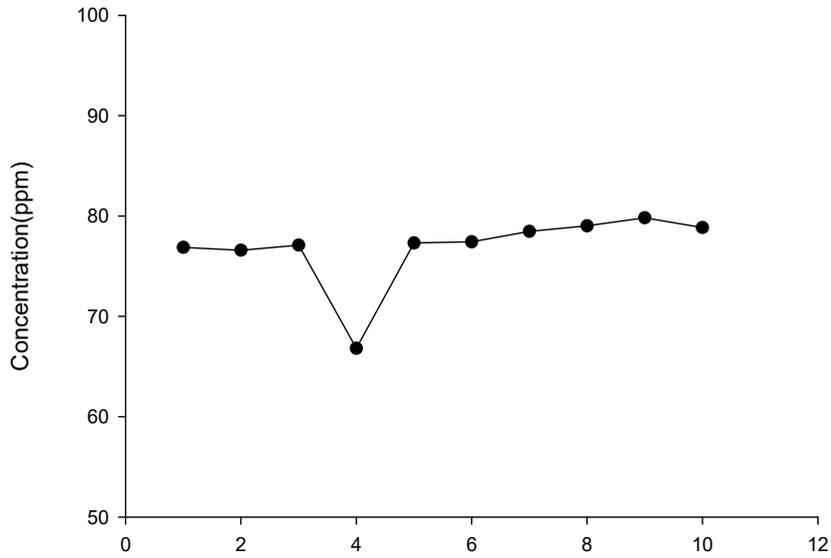
트(약 1시간) 앞서서부터 측정한 값으로 계산하였다. 기존 증기발생장치의 유량별 발생된 시험물질의 평균농도는 1, 5, 10, 20, 30 lpm 각각 24.533 ppm, 76.829 ppm, 145.805 ppm, 297.701 ppm, 465.435 ppm 으로 확인되었다<표Ⅱ-3>.

〈표 Ⅱ-3〉 기존 발생장치의 유량별 평균농도

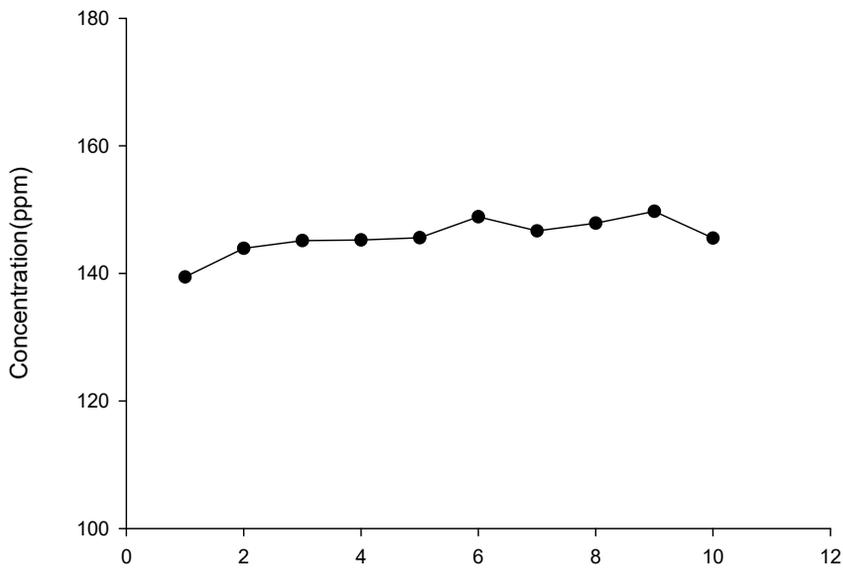
No.	Flow rate(lpm)	Concentration(ppm)
1	1	24.533 ± 0.1287
2	5	76.829 ± 3.6761
3	10	145.805 ± 2.8825
4	20	297.701 ± 8.5487
5	30	465.435 ± 5.0779



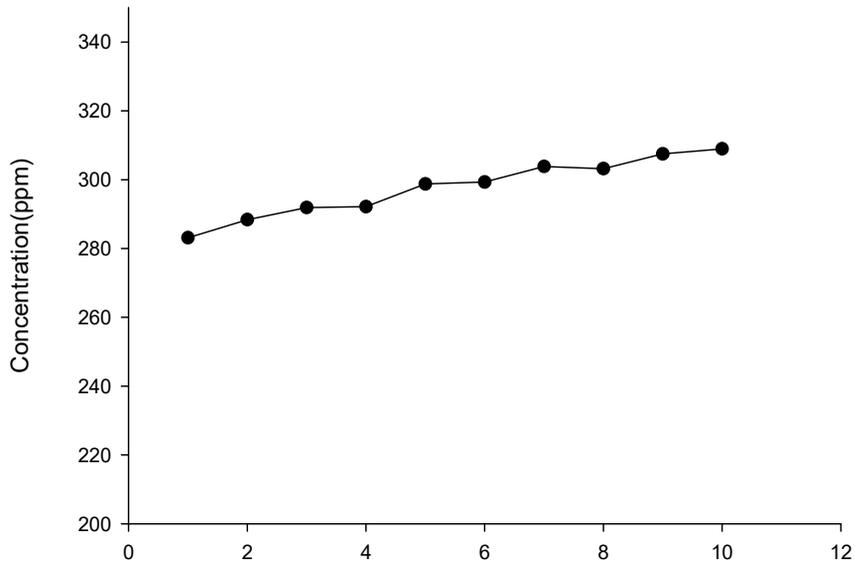
[그림 Ⅱ-7] 기존 발생장치의 노출 변화(1 lpm)



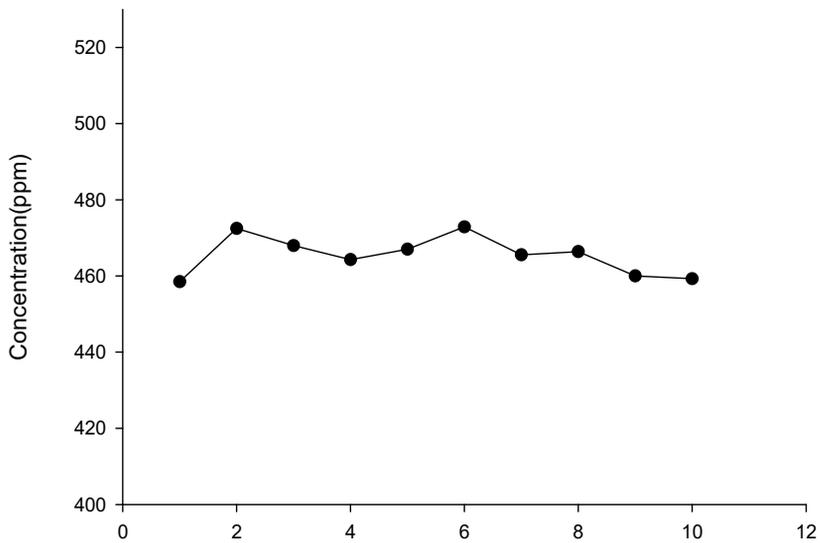
[그림 II-8] 기존 발생장치의 노출 변화(5 lpm)



[그림 II-9] 기존 발생장치의 노출 변화(10 lpm)



[그림 II-10] 기존 발생장치의 노출 변화(20 lpm)



[그림 II-11] 기존 발생장치의 노출 변화(30 lpm)

유량별 시험물질의 발생 노출변화를 확인한 결과, 대부분 평균값의  $\pm 10\%$ 의 범위 내에서 안정적으로 발생이 되는 것을 확인하였다[그림 II-7, II-9, II-10, II-11]. 하지만, 5 lpm 노출의 경우에는 일시적으로 10% 범위를 벗어나는 일탈이 발생하였다[그림 II-8].

한편, 유량별로 흡입챔버 내 목표농도의 95%에 도달하는 시간인 T95 확인 결과, 1, 5, 10, 20, 30 lpm 각각 7.3분, 12.4분, 13.4분, 13.8분, 13.6분으로 확인되었다<표II-4>[그림 II-12, II-13, II-14, II-15, II-16]. T95는 아래의 OECD 가이드라인에서 제시한 공식으로 산출하였다(OECD GD39, 2018).

$$C_t = C_0 \times (1 - e^{-\frac{F}{V} \times t})$$

$C_t$  = concentration at the time  $t$

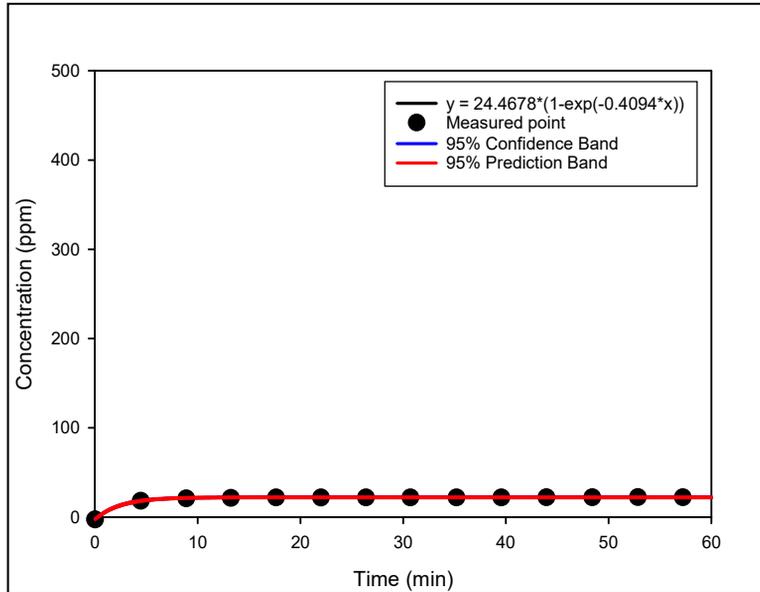
$C_0$  = equilibrium chamber concentration

$F$  = total flow through the chamber

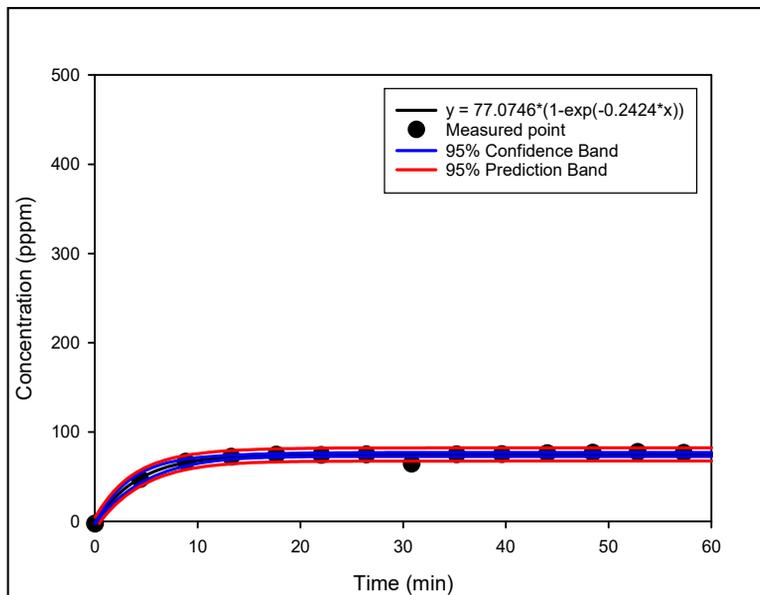
$V$  = chamber volume

〈표 II-4〉 기존 발생장치의 T95

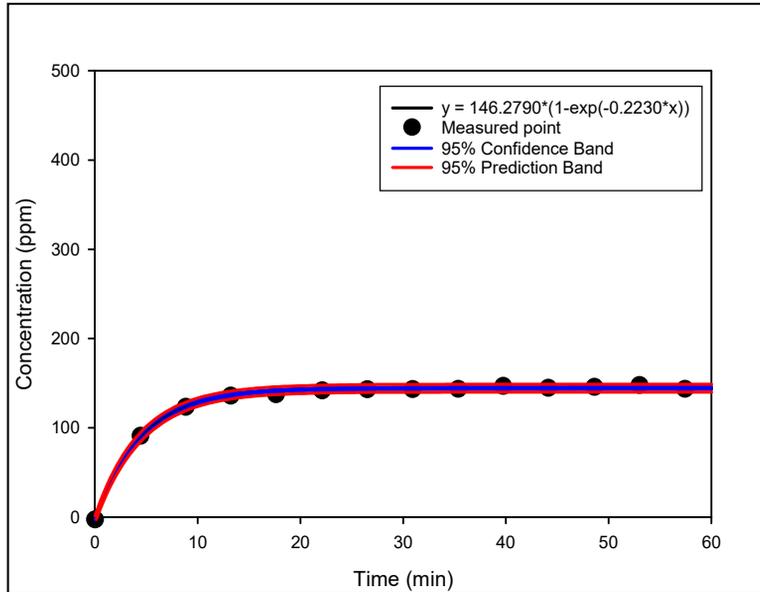
No.	Flow rate(lpm)	T95(min)
1	1	7.3
2	5	12.4
3	10	13.4
4	20	13.8
5	30	13.6



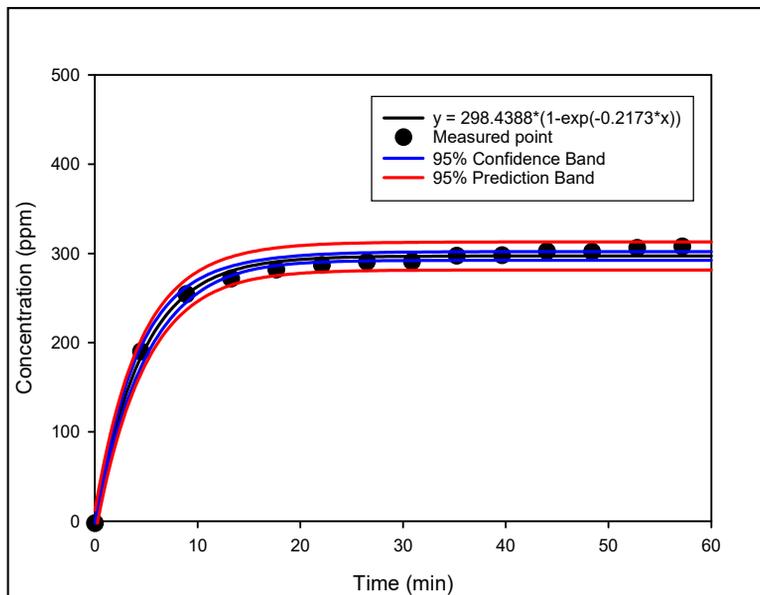
[그림 II-12] 기존 발생장치의 T95(1 lpm)



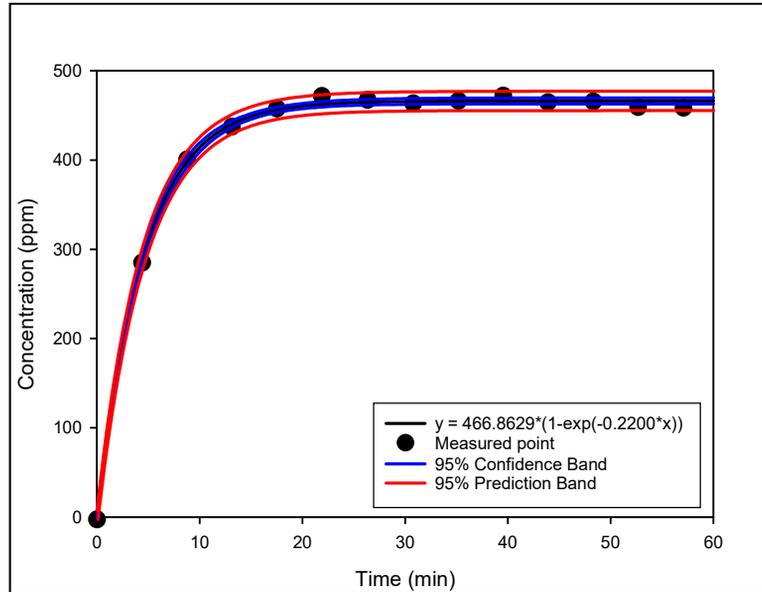
[그림 II-13] 기존 발생장치의 T95(5 lpm)



[그림 II-14] 기존 발생장치의 T95(10 lpm)



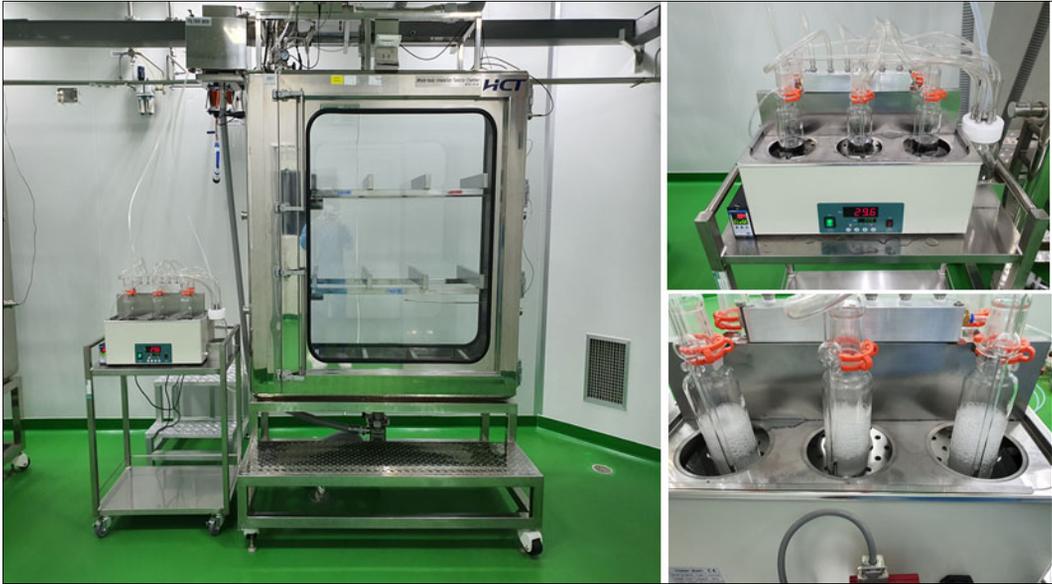
[그림 II-15] 기존 발생장치의 T95(20 lpm)



[그림 II-16] 기존 발생장치의 T95(30 lpm)

## 2) 발생장치(I)

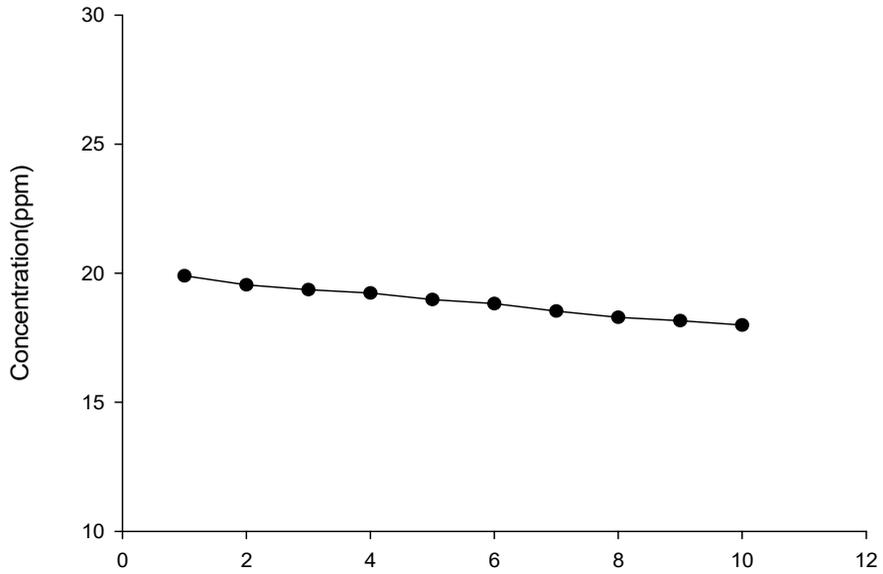
제작된 발생장치(I)도 기존 발생장치와 동일한 유량으로(1, 5, 10, 20, 30 lpm) 농도 변화를 확인하였다. 기존 발생장치와는 달리 흡입챔버 옆에 발생장치를 설치하여 실험을 수행하였다[그림 II-17]. 유량별 발생된 시험물질의 평균농도는 1, 5, 10, 20, 30 lpm 각각 18.833 ppm, 54.128 ppm, 99.862 ppm, 202.626 ppm, 303.640 ppm 으로 확인되었다<표II-5>.



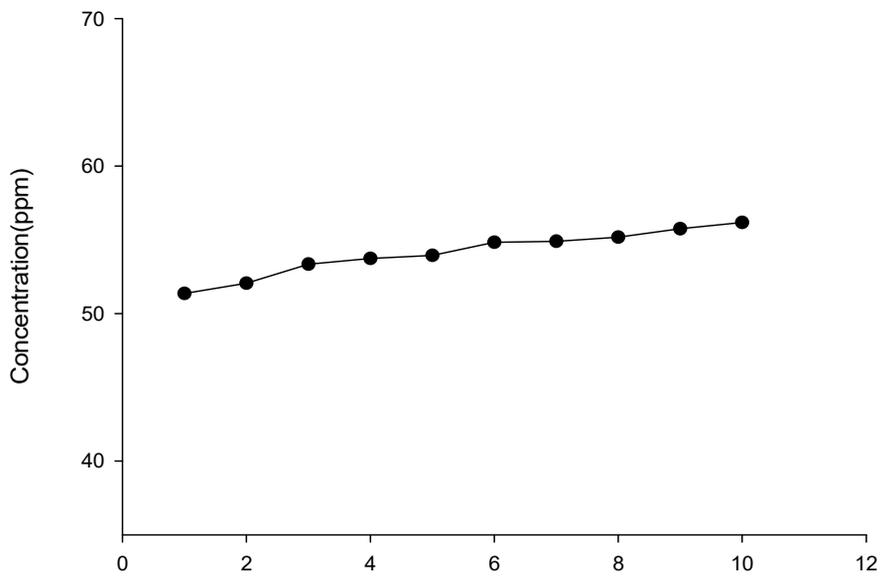
[그림 II-17] 발생장치(I)의 설치 및 시험물질 노출

〈표 II-5〉 발생장치(I)의 유량별 평균농도

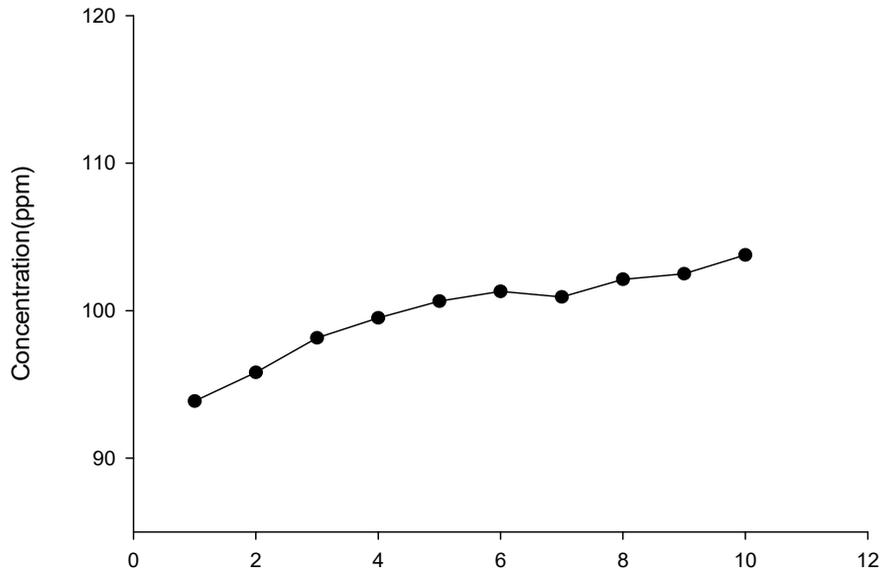
No.	Flow rate(lpm)	Concentration(ppm)
1	1	18.883 ± 0.6355
2	5	54.128 ± 1.5552
3	10	99.862 ± 3.0998
4	20	202.626 ± 3.6050
5	30	303.640 ± 5.7843



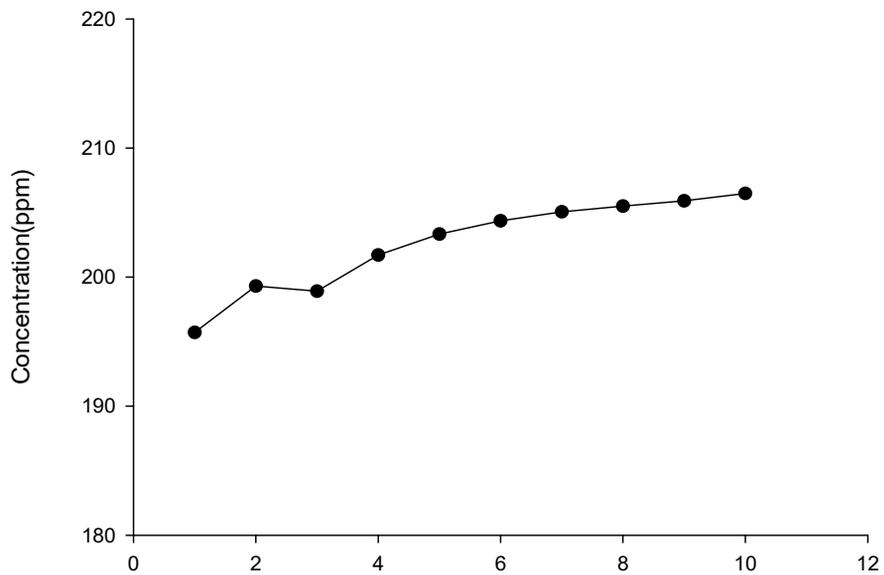
[그림 II-18] 발생장치(I)의 노출 변화(1 lpm)



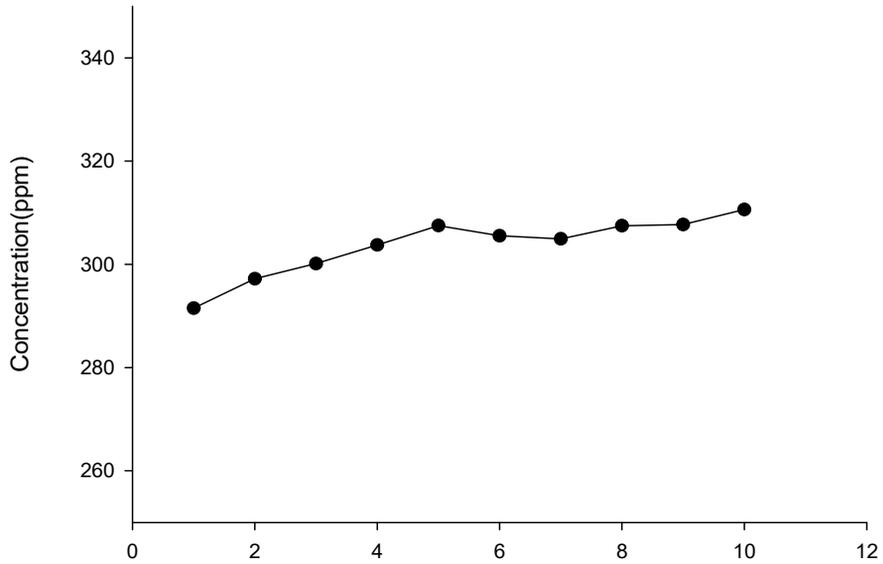
[그림 II-19] 발생장치(I)의 노출 변화(5 lpm)



[그림 II-20] 발생장치(I)의 노출 변화(10 lpm)



[그림 II-21] 발생장치(I)의 노출 변화(20 lpm)



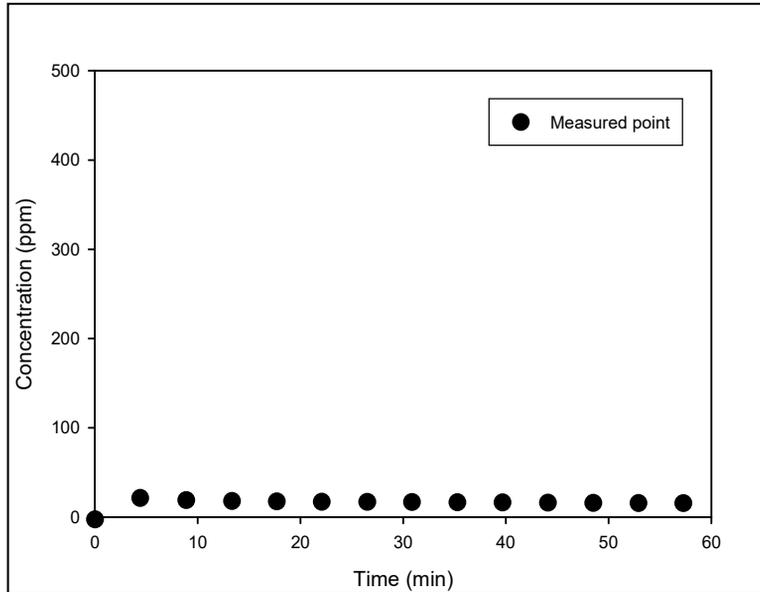
[그림 II-22] 발생장치(I)의 노출 변화(30 lpm)

유량별 시험물질의 발생 노출변화를 확인한 결과, 대부분 평균값의  $\pm 10\%$ 의 범위 내에서 안정적으로 발생이 되는 것을 확인하였다[그림 II-18, II-19, II-20, II-21, II-22].

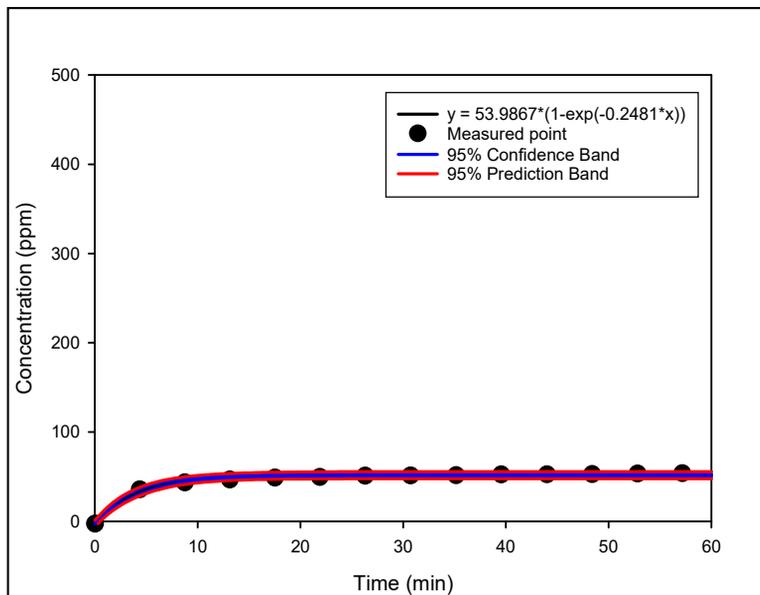
유량별로 흡입챔버 내 목표농도의 95%에 도달하는 시간인 T95 확인 결과, 1, 5, 10, 20, 30 lpm 각각 0.1분, 12.1분, 16.6분, 15.1분, 17.3분으로 확인되었다<표II-6>[그림 II-23, II-24, II-25, II-26, II-27].

<표 II-6> 발생장치(I)의 T95

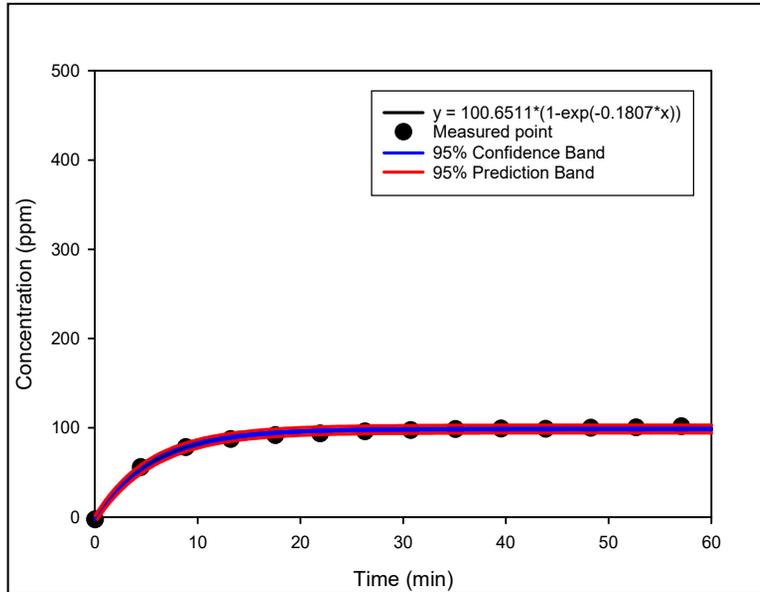
No.	Flow rate(lpm)	T95(min)
1	1	0.1
2	5	12.1
3	10	16.6
4	20	15.1
5	30	17.3



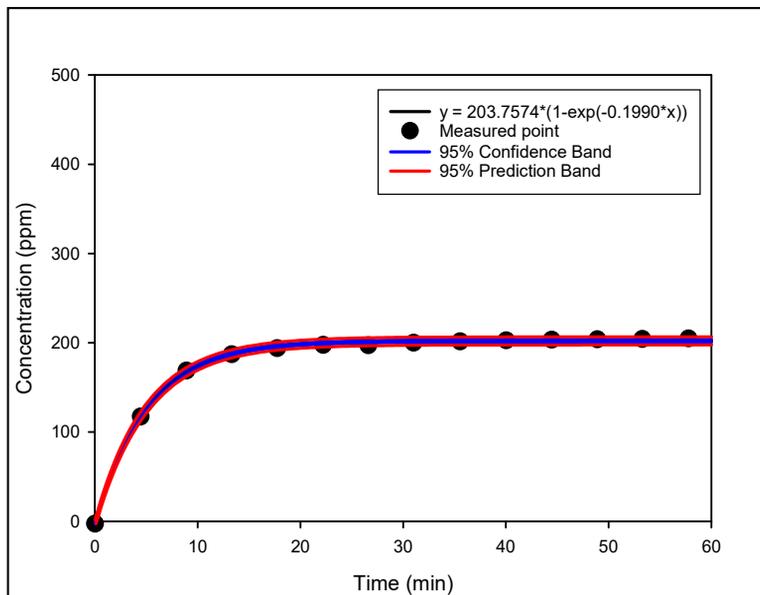
[그림 II-23] 발생장치(I)의 T95(1 lpm)



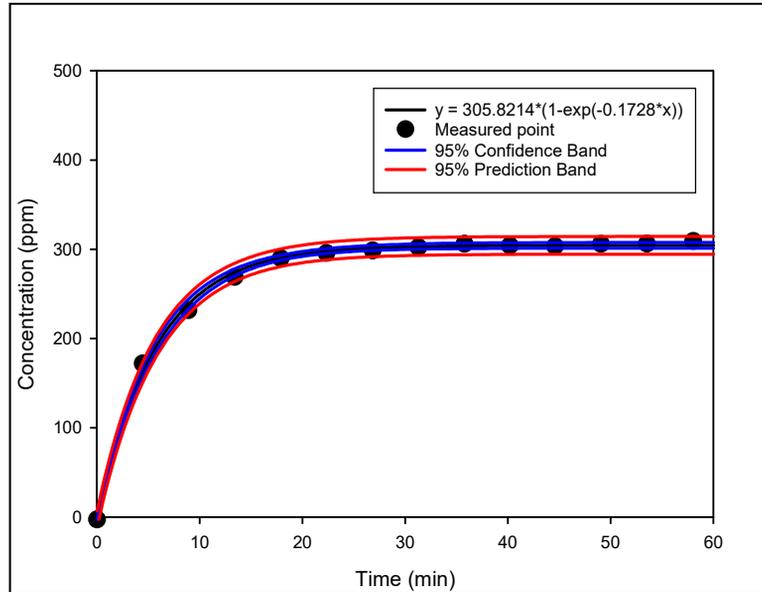
[그림 II-24] 발생장치(I)의 T95(5 lpm)



[그림 II-25] 발생장치(I)의 T95(10 lpm)



[그림 II-26] 발생장치(I)의 T95(20 lpm)



[그림 II-27] 발생장치(I)의 T95(30 lpm)

### 3) 증기발생장치(II)

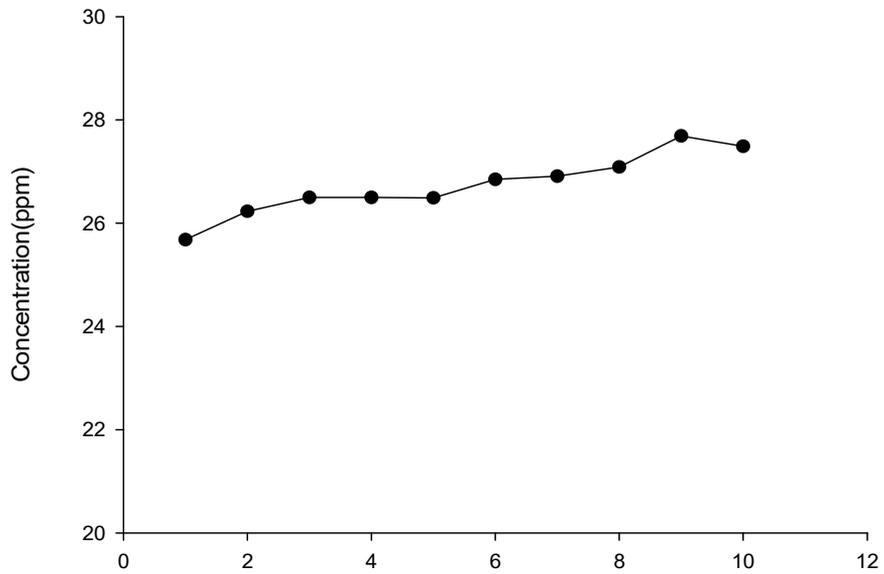
제작된 발생장치(II) 역시 기존 발생장치와 동일한 유량으로(1, 5, 10, 20, 30 lpm) 농도 변화를 확인하였다. 증기발생장치(I)과 동일하게 흡입챔버 옆에 발생장치를 설치하여 실험을 수행하였다[그림 II-28]. 유량별 발생된 시험물질의 평균농도는 1, 5, 10, 20, 30 lpm 각각 26.742 ppm, 97.247 ppm, 185.097 ppm, 243.349 ppm, 345.864 ppm 으로 확인되었다<표II-7>.



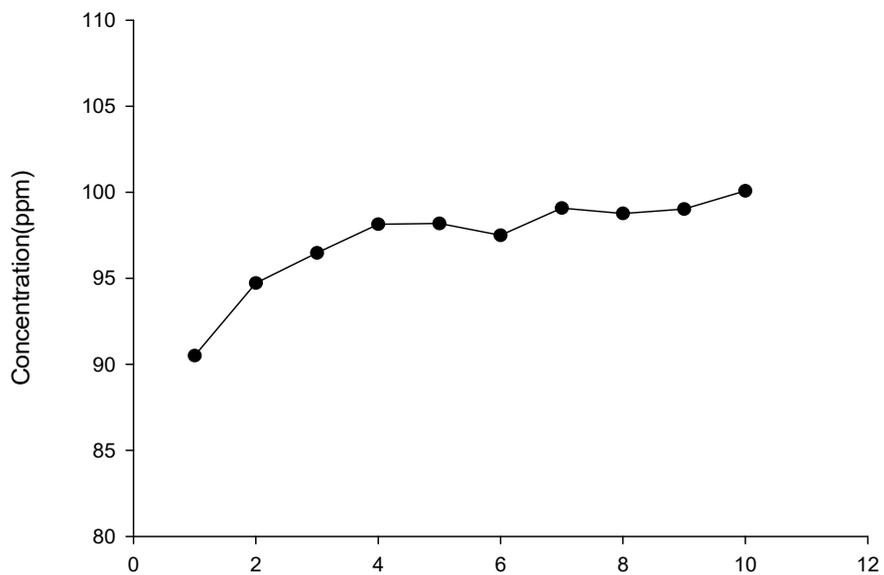
[그림 II-28] 발생장치(II)의 설치 및 시험물질 노출

〈표 II-7〉 발생장치(II)의 유량별 평균농도

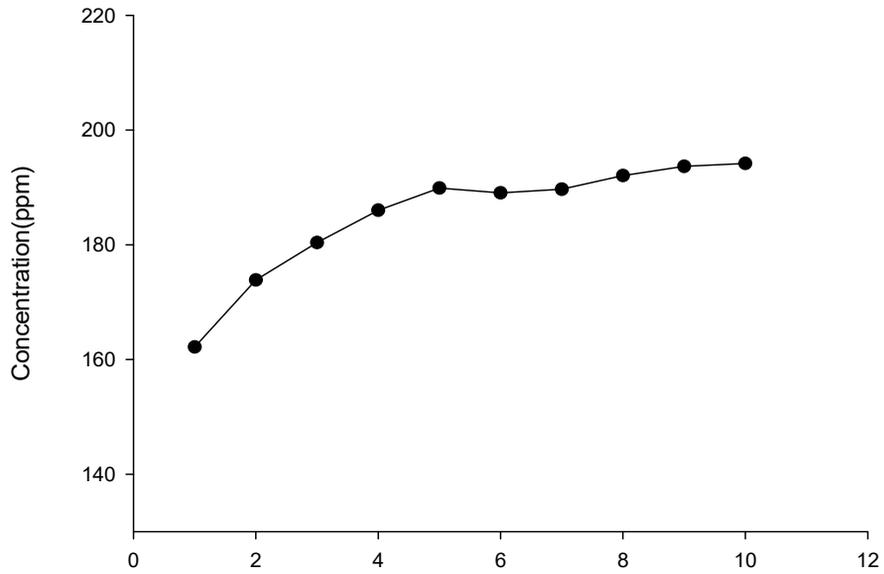
No.	Flow rate(lpm)	Concentration(ppm)
1	1	26.742 ± 0.5965
2	5	97.247 ± 2.8103
3	10	185.097 ± 10.2103
4	20	243.349 ± 2.3435
5	30	345.864 ± 3.7604



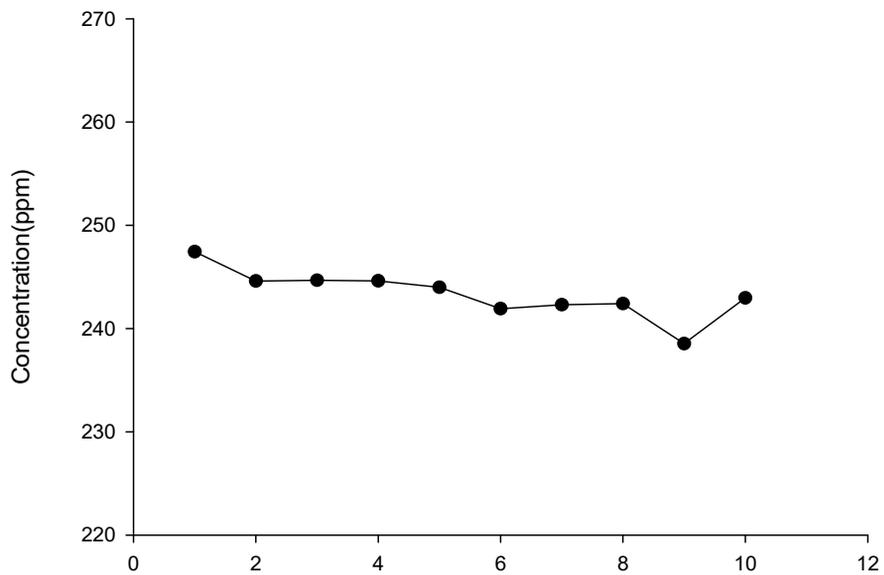
[그림 II-29] 발생장치(II)의 노출 변화(1 lpm)



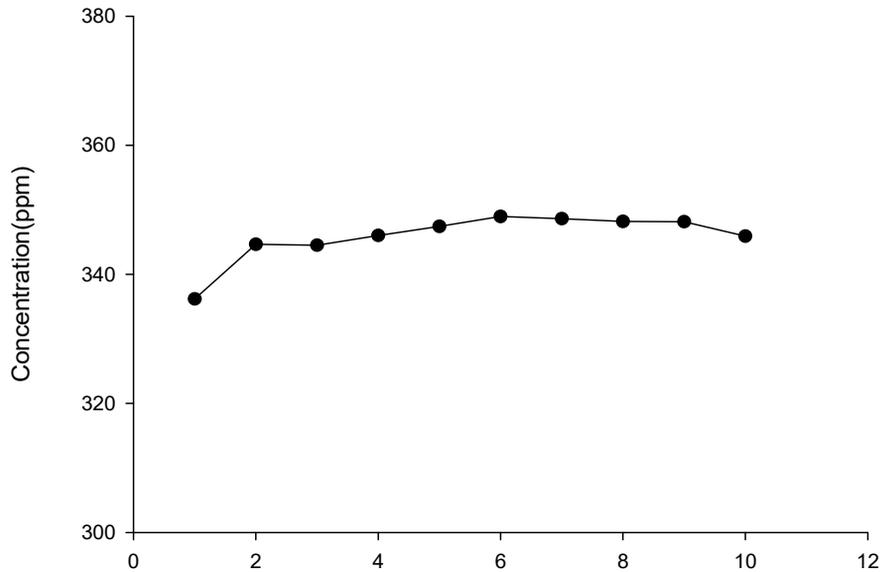
[그림 II-30] 발생장치(II)의 노출 변화(5 lpm)



[그림 II-31] 발생장치(II)의 노출 변화(10 lpm)



[그림 II-32] 발생장치(II)의 노출 변화(20 lpm)



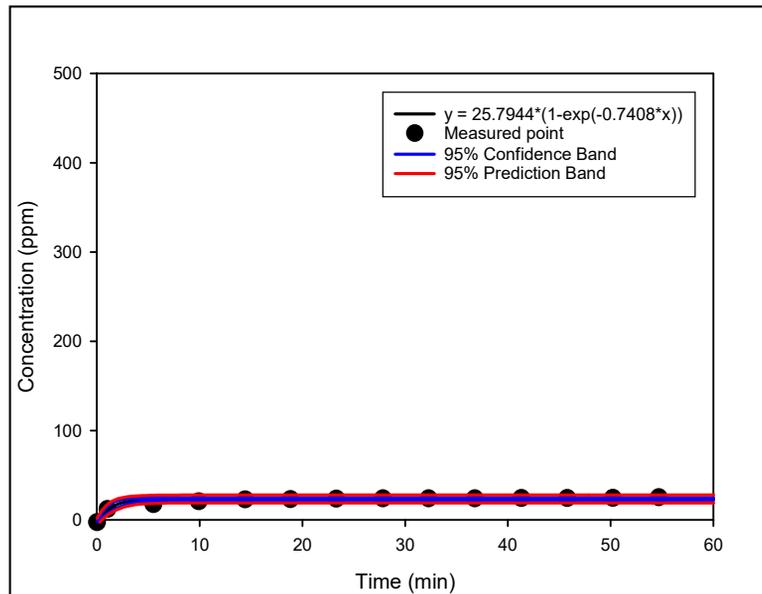
[그림 II-33] 발생장치(II)의 노출 변화(30 lpm)

유량별 시험물질의 발생 노출변화를 확인한 결과, 대부분 평균값의  $\pm 10\%$ 의 범위 내에서 안정적으로 발생이 되는 것을 확인하였다[그림 II-29, II-30, II-31, II-32, II-33]. 하지만, 10 lpm 노출의 경우에는 초기에 일시적으로 10% 범위를 벗어나는 일탈이 발생하였다[그림 II-31].

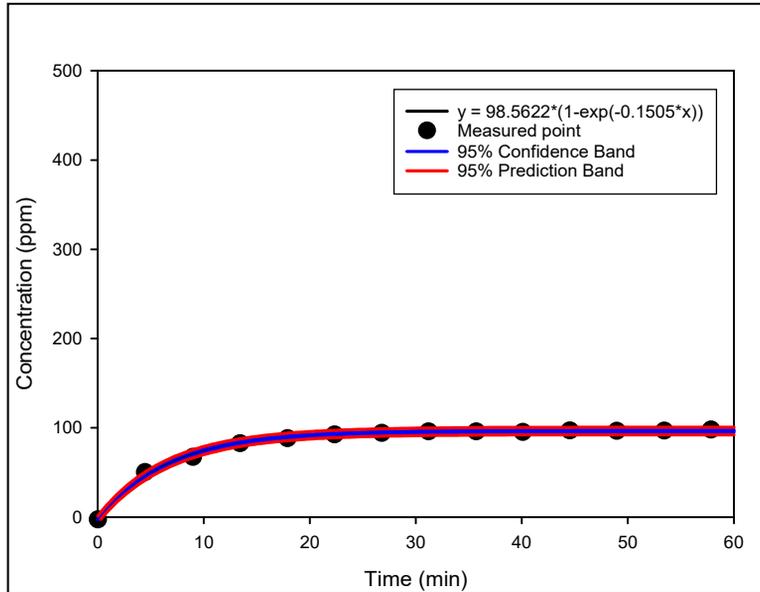
유량별로 흡입챔버 내 목표농도의 95%에 도달하는 시간인 T95 확인 결과, 1, 5, 10, 20, 30 lpm 각각 4.0분, 19.9분, 23.2분, 8.9분, 18.9분으로 확인되었다<표II-8>[그림 II-34, II-35, II-36, II-37, II-38].

〈표 II-8〉 발생장치(II)의 T95

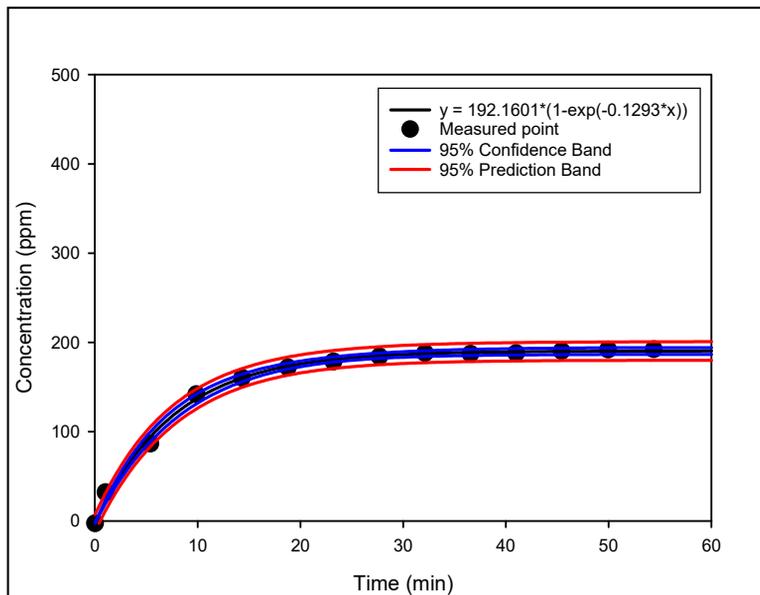
No.	Flow rate(lpm)	T95(min)
1	1	4.0
2	5	19.9
3	10	23.2
4	20	8.9
5	30	18.9



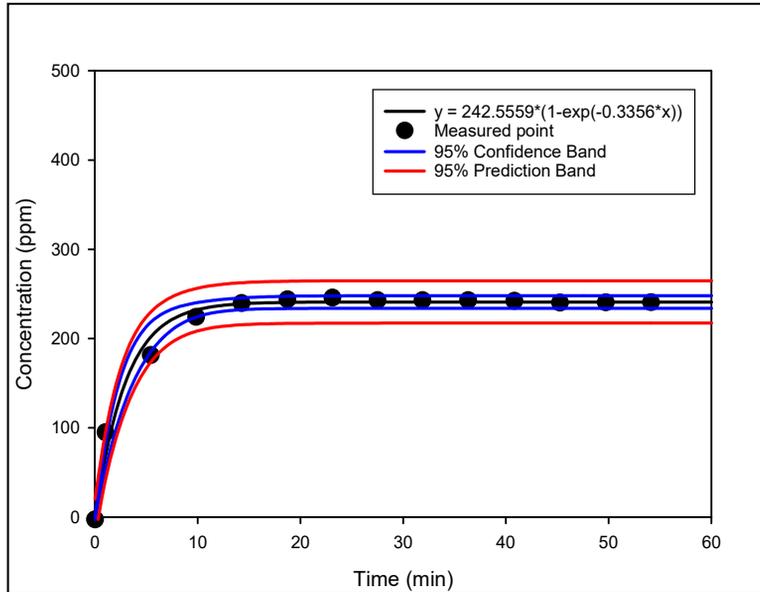
[그림 II-34] 발생장치(II)의 T95(1 lpm)



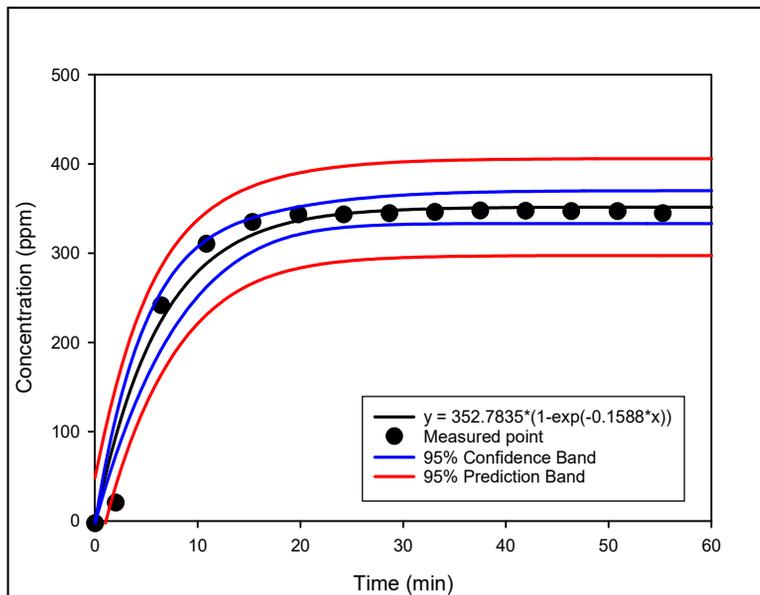
[그림 II-35] 발생장치(II)의 T95(5 lpm)



[그림 II-36] 발생장치(II)의 T95(10 lpm)



[그림 II-37] 발생장치(II)의 T95(20 lpm)



[그림 II-38] 발생장치(II)의 T95(30 lpm)

### Ⅲ. 결과 및 고찰





### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. 증기발생장치 개선가능 항목 검토 및 제작

증기 발생장치의 개선을 위해 기존 고정식 증기발생장치의 노출 제한점을 파악하였다. 흡입독성연구센터에서 사용 중인 증기발생장치는 가온 기화방식으로 가장 간단한 원리로 구동되며, 다른 방식에 비해 소요비용이 저렴하고 시험물질 발생에 대한 안정화 기간이 짧은 장점이 있다. 이런 이유로 적은 비용 및 인력으로 개선하고자 하는 증기발생장치의 발생 방식도 기화방식을 선택하였다. 관련 문헌 및 그동안의 경험을 바탕으로 챔버와 발생기 사이의 거리, 관직경, 응축, 칠러 및 히터의 필요성, 유량 등을 검토하였다. 또한, 발생장치는 주문제작의 초자를 많이 사용하기 때문에 파손 시 비용 및 제품 제작기간이 오래 걸리는 등 높은 유지보수 비용과 시간이 소요되는 것을 감안하여 소모성 부품을 단순화 시킬 수 있는 방안을 검토하였다. 검토 결과, 상대적으로 유지·보수가 가능하도록 증기발생장치의 구조를 단순화 하였고, 챔버와 발생기간 거리를 좁히기 위해 이동이 가능한 발생장치를 개선하여 시험 모델을 제작하였다.

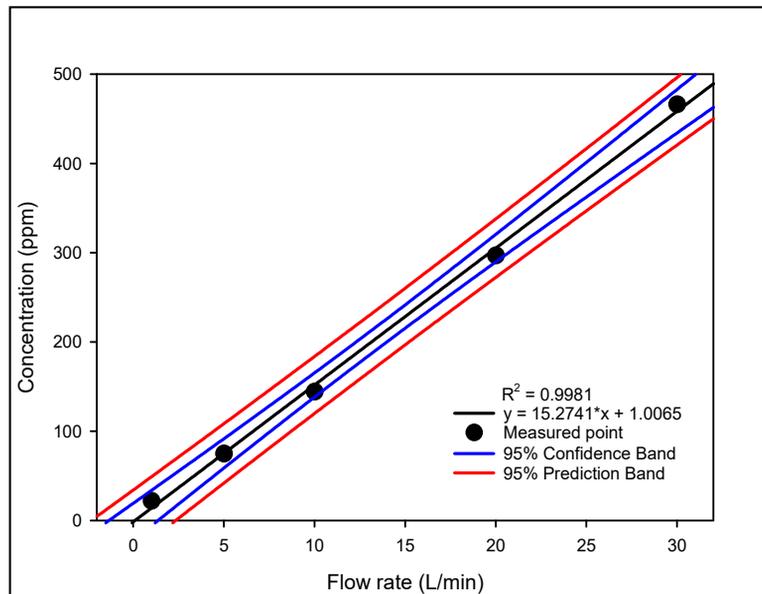
제작된 발생장치(I)는 세척병을 활용하여 탈부착이 편하고, 충분한 세척병이 있을 경우 파손이 되어도 바로 교체가 가능하고, 이동이 가능하도록 시험 모델을 제작하였으나, 제작된 시험모델의 세척병의 개별 부피가 작아 실제 기존 발생장치와 비교는 어려웠다. 제작된 발생장치(II)는 기존 발생장치의 동일한 부피의 발생장치를 이용하여 최대한 단순화하여 시험모델로 만들었다.

## 2. 증기발생장치 비교

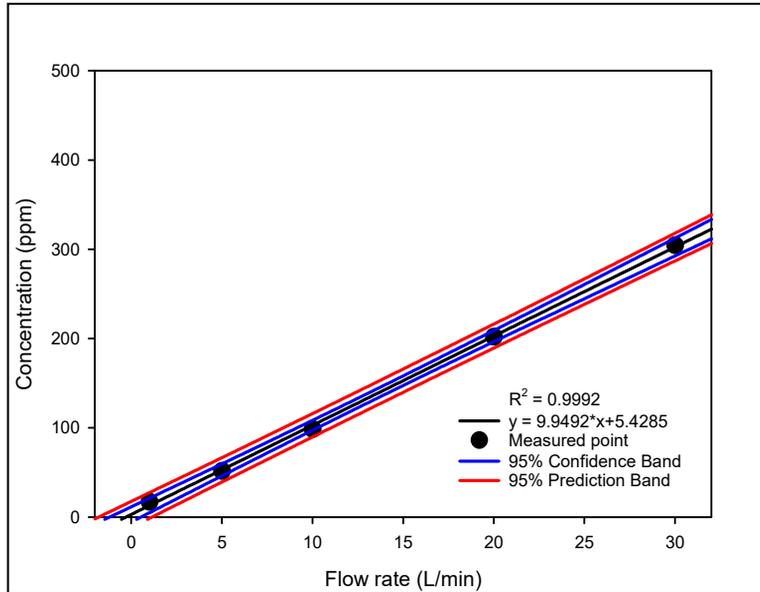
기존 발생장치, 제작된 발생장치(I) 및 발생장치(II)의 성능을 비교 하였다. 흡입독성시험에서 일반적으로 많이 사용하는 1, 5, 10, 20, 30 lpm 의 유량을 고정하여 T95 와 각 유량별 통계적 최고농도를 확인하였다.

〈표 III-1〉 발생장치의 유량별 최고농도

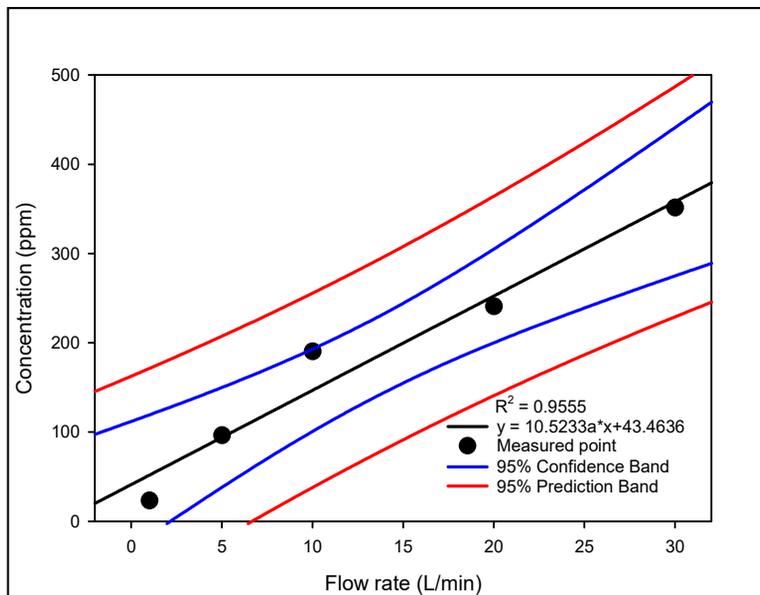
No.	Flow rate (lpm)	기존 발생장치 (ppm)	발생장치(I) (ppm)	발생장치(II) (ppm)
1	1	24.4678	19.5715	25.7944
2	5	77.0746	53.9867	98.5622
3	10	146.279	100.6511	192.1601
4	20	298.4388	203.7574	242.5559
5	30	466.8629	305.8214	352.7835



[그림 III-1] 기존 발생장치의 유량별 최고농도



[그림 III-2] 발생장치(I)의 유량별 최고농도



[그림 III-3] 발생장치(II)의 유량별 최고농도

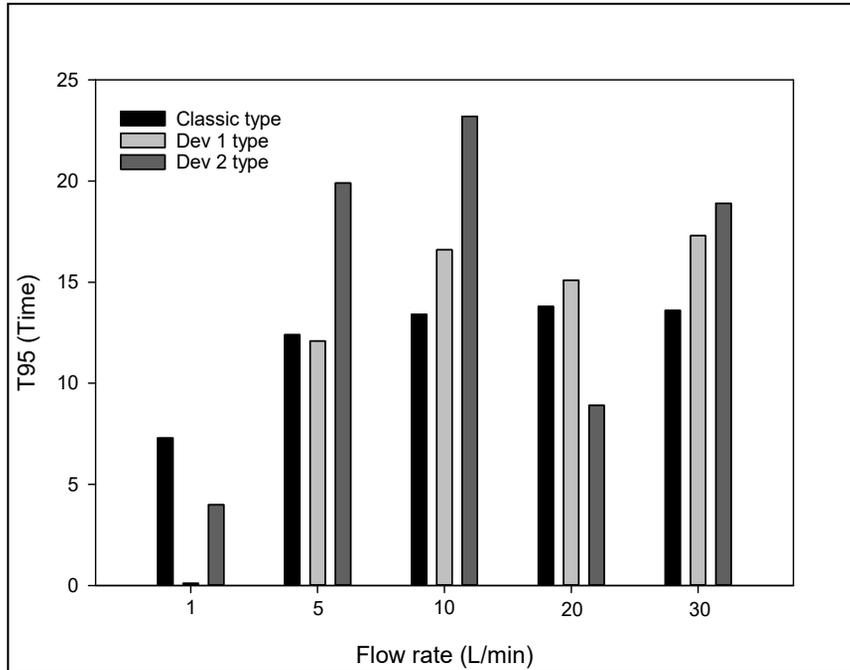
1, 5 및 10 lpm 의 유량에서는 발생장치(II)가 가장 높은 농도를 발생 시켰고, 20 및 30 lpm 의 유량에서는 기존 발생장치가 가장 높은 농도를 발생 시켰다<표Ⅲ-1>[그림 Ⅲ-1, Ⅲ-2, Ⅲ-3]. 발생장치(I)에서는 모든 유량에서 가장 낮은 농도를 발생 시켰으나 이는 약 2.4배의 발생조 부피가 가장 큰 원인으로 사료된다. 하지만, 발생장치와 챔버와의 거리가 짧아졌음에도 불구하고 20 및 30 lpm 의 유량에서 발생장치(II)의 농도가 기존 발생장치의 농도보다 낮은 이유는 명확히 확인되지 않았다. 다만 챔버와의 발생장치 사이의 체결과 같은 연결의 문제로 추정된다.

한편, 기존 발생장치, 제작된 발생장치(I) 및 발생장치(II)의 T95를 비교 하였을 때 1 및 5 lpm 에서는 발생장치(I)의 T95가 가장 짧았고, 10 및 30 lpm 에서는 기존 발생장치의 T95가 가장 짧았으며, 20 lpm 에서는 발생장치(II)의 T95가 가장 짧았다<표Ⅲ-2>[그림 Ⅲ-4]. 발생장치(I)의 경우 항온 수조와 버블링의 영향이 짧은 T95를 보여준 것으로 추정된다.

제작된 발생장치(I) 및 발생장치(II)는 기존 발생장치에 비해 상대적으로 높은 농도의 발생이 가능할 수 있는 결과를 보여주었다. 직접적인 결과로는 낮은 유량에서만 높은 농도를 발생시킬 수 있을 것으로 판단되지만, 발생장치(I)의 발생조의 크기를 고려한다면 향후 적절한 보완을 거치면 상대적으로 높은 농도의 발생이 가능할 것으로 사료된다.

〈표 Ⅲ-2〉 발생장치의 유량별 T95

No.	Flow rate (lpm)	기존 발생장치 (min)	발생장치(I) (min)	발생장치(II) (min)
1	1	7.3	0.1	4.0
2	5	12.4	12.1	19.9
3	10	13.4	16.6	23.2
4	20	13.8	15.1	8.9
5	30	13.6	17.3	18.9



[그림 III-4] 발생장치의 유량별 T95

### 3. 증기발생장치 추가 개선 사항

제작된 두 개의 시험모델을 대상으로 추가 개선사항을 검토하였다. 두 종류의 발생장치 모두 초자폭발 등의 사고로부터 안전을 확보하기 위하여 안전밸브(relief valve)의 설치가 필요하다. 또한 시험물질의 유출로부터 작업자를 보호할 수 있는 적절한 환기시설이 필요하다. 발생장치(I)의 경우 초자의 내구성을 강화할 수 있는 방법의 추가 검토가 필요하며, 발생조의 크기를 크게 하거나, 작은 크기의 발생조를 연결하여 적절한 수준의 발생장치에 관해서도 추가적으로 고려할 필요가 있다. 발생장치(II)의 경우 부피가 큰 발생조를 안전하게 고정할 수 있는 방법이 필요하다. 한편, Hori 등(Hori 등 1992)은 챔버 상부에 팬(fan)을 설치하여 농도 유지의 효율성을 높였다고 하였는데, 이 방법도 검토해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 연구의 한계 및 문제점

기화방식은 저렴한 비용과 시험물질 발생 시 안정화 기간이 짧은 장점이 있지만, 근본적으로 희석 시스템과 온도 변화로 현저한 노출 농도 편차가 발생할 수 있고, 시험물질의 증기압이 노출 농도의 중요한 편차를 일으키는 요인이 될 수 있는 단점이 있다. 이런 이유로 무조건적으로 노출 농도를 높일 수 없다. 이를 보완하기 위해서는 증기발생 장치의 방식을 시험물질에 따라 다양화 시킬 필요가 있다. 향후 미스트(mist) 발생장치를 활용하여 챔버로 가는 관의 길이 조정과 트랩(trap) 설치 등을 통해 입자형태 물질의 낙하 원리를 이용하여 증기를 발생시키는 방법 등 시험물질에 따라 다양한 방법의 연구 및 개발이 필요하다고 판단된다. 한편, 발생장치의 개선이나 사용 중인 발생 시스템에서 개선에 필요한 아이디어는 연구자(사용자)들이 제시할 수 있으나, 관련 내용의 제작기술은 연구자들에게는 제한적인 부분이기 때문에 다양한 변화를 만들어 낼 수 없다. 또한, 발생장치의 특성상 대부분의 부품이 기성품이 아닌 제작품이기 때문에 제작을 위한 의뢰가 필요하고, 이에 따라 소요 시간이 매우 길다. 이와 같은 이유로 여러 변수(관경, 챔버 간 거리, 분석장비 위치 등)에 해당되는 실험을 위해서는 시간 및 인력 등의 소요가 매우 크기 때문에 제한된 변수를 대상의 연구가 진행 될 수밖에 없다. 이런 이유로 장기적인 관점으로 발생시스템에 대한 연구의 수행이 필요하다.

## 5. 제언

흡입독성시험은 산업화학물질의 호흡기노출로 인한 노동자들의 건강 유해성·위험성의 확인 및 평가를 위해 매우 중요한 시험 및 연구 분야이다. 하지만 시험을 수행하기 위해서는 노출 및 분석, 관찰 및 측정, 동물윤리 등 이에 맞는 많은 조건들을 충족시켜야 한다. 이를 위해 관련연구 및 사업의 지속적인 수행이 필요하다. 특히 발생 및 분석은 흡입독성시험에서 가장 기본적으로

충족되어야 하는 조건이다. 그 중 발생장치는 발생방법, 수조온도, 공기유량, 계절에 따른 기온변화, 농도측정방법, 관경의 길이, 관경의 굵기 등 다양한 변수를 고려한 연구가 요구되며, 구성 부품의 제작기술과 충분한 제작 소요시간 또한 요구된다. 이런 이유로 증기발생장치의 개선 및 개발은 장기적인 관점의 연구가 수행되어야 하며, 이를 통해 “흡입독성시험 및 평가” 사업의 원활한 수행과 관련된 다른 기관에 기술 이전 등을 통해 관련 산업 및 유해성·위험성의 확인 및 평가에 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.



## 참고문헌

국립환경과학원 고시 「화학물질의 시험방법에 관한 규정」 국립환경과학원  
고시 제2020-46호(2020.11.03.) 제5항 건강영향 시험분야

기성환, 김민선, 김성연 등. 핵심독성학 3판. 2018. pp. 395-407.

Hori H, Tanaka I, Ohnishi A et al., A New Generator for Producing  
Propylene Oxide Vapor in Inhalation Toxicity Studies. 1986,  
J UOEH 8(2): 169-176.

Hori H, Hyakudo T, Tanaka I. A New Methyl Bromide Gas  
Generation for Inhalation Toxicity Studies. 1992, JUOEH  
14(3): 197-203.

Li Y, Taffner T, Bischoff M et al., Test Gas Generation from  
Pure Liquids: An Application-Oriented Overview of Methods  
in a Nutshell. International Journal of Chemical Engineering  
2012, Article ID 417029.

Muse WT, Thomson SA, Matson KL et al., Generation, Sampling  
and Analysis for Low-Level GB (SARIN) Vapor for Inhalation  
Studies. U.S.Army ECBC, AMSSB-RRT-TT, APG, MD, July  
2003.

OECD Guidance document on inhalation toxicity studies, Series on Testing and Assessment No. 39 (Second Edition), 6 July 2018.

OECD Guidelines on the Testing of Chemicals Section 4 Health Effects Test No. 412, 28-day (subacute) Inhalation Toxicity Study, 25 June 2018.

OECD Guidelines on the Testing of Chemicals Section 4 Health Effects Test No. 413, 90-day (subchronic) Inhalation Toxicity Study, 25 June 2018.

# Abstract

**Title :** The improvement study of vapor generator in inhalation toxicity study

**Objective :** It is very important to enable constant exposure and analysis using vapor generator in the inhalation toxicity study. It is necessary to improve and develop the vapor generator in order to improve the disadvantages of the existing vapor generator including fixed constant distance, and to make good process for perform the inhalation toxicity study to be conducted in the future.

**Methods :** After designing the draft for the production of the generator and examining the problems, the idea obtained from the gas washing bottle is used to make the generator, and to prevent movement due to the buoyancy of the water bath, a separate fixed device is attached to prevent movement. T95 and the highest possible concentration for each flow rate (1, 5, 10, 20, 30 liter per minute) of existing model and the improved model were confirmed.

**Conclusion :** As a result of confirming the possible concentration, it was confirmed that a sufficiently high concentration could be generated if the generation tank of the improvement model was supplemented.

**Key words :** Inhalation toxicity study, vapor generator, portable vapor generator, vaporization method

## 연구진

연구기관 : **산업안전보건연구원**

연구책임자 : 김용순 (연구위원, 흡입시험연구부)

연구원 : 라대식 (연구원, 흡입시험연구부)

연구원 : 김태현 (연구원, 흡입시험연구부)

## 연구기간

2021. 01. 02. ~ 2021. 11. 30.

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

**산업안전보건연구원장**

**흡입독성시험 증기 발생장치의 개선 연구**  
**(2021-산업안전보건연구원-799)**

**발행일** : 2021년 11월 30일

**발행인** : 산업안전보건연구원 원장 김은아

**연구책임자** : 산업안전보건연구원 연구위원 김용순

**발행처** : 안전보건공단 산업안전보건연구원

**주소** : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

**전화** : 042-869-8512

**팩스** : 042-869-8693

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

**I S B N** : 979-11-92138-32-9