

# 실내오염물질 방출량의 현장측정을 위한 플럭스 챔버의 설계 및 성능 검증 연구

정진희\*

한국건설기술연구원 건축연구본부, 박사후연구원

## A Study on a Flux Chamber Design and its Performance Verification for Field Measurement of Indoor Air Pollutants Emissions

Jeong Jinhee<sup>†</sup>

Postdoctoral Researcher, Department of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>†</sup>Corresponding author: jinheejeong@kict.re.kr

### Abstract

As concerns about indoor air quality increase, there has been a need to develop an accurate method of measuring surface emissions from actual living environments. In this study, a cost-effect and accurate flux chamber for measuring surface emissions was designed, and several tests, including airtightness, sample homogeneity, and recovery, were performed. The flux chamber was reinforced to maintain airtightness without leakage, and samples from the chamber were homogeneous (below 4% of the relative standard deviation) enough to represent the entire chamber. In the case of recovery, the concentration inside the chamber reached 100% of the injection concentration within 50 to 100 minutes. To increase the recovery of the experimental emissions relative to theoretical emissions, the rate at which the concentration changes over time should be used as early as possible when performing measurements. The sample inside the chamber, however, was not sufficiently mixed early during the measuring period; thus, research on how to overcome this methodological limitation is currently being conducted.

**Keywords:** 표면 방출량(Surface emission), 플럭스 챔버(Flux chamber), 실내공기질(Indoor air quality), 건축환경(Building environment), 현장측정(Field measurement), 성능 검증(Performance verification)

### 기호 및 약어 설명

$C_{ch}$  : 플럭스 챔버 내부농도(mol/mol)

$C_{CRM}$  : 표준가스 인증농도(mol/mol)

$dC_{ch}$  : 플럭스 챔버 내부농도 변화(mol/mol)

$V_{ch}$  : 플럭스 챔버의 체적( $m^3$ )

 OPEN ACCESS


Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.42, No.6, pp.137-146, December 2022  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.6.137>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 19 September 2022

Revised: 25 October 2022

Accepted: 13 December 2022

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$A_{ch}$  : 플럭스 챔버의 단면적( $m^2$ )

## 1. 서론

실내공기질은 실내에서 발생하는 오염물질과 더불어 외부 공기 중 존재하는 유해물질이 실내 공간으로 유입됨으로써 악화될 수 있으며, 국내 현행법 상 실내공기오염물질은 실내공기 시료를 채취하여 각각의 공정시험기준에 따라 농도를 분석하여 평가 및 관리하고 있다. 또한 실내공기질 공정시험기준(2021)<sup>1)</sup>에서는 실내 오염원의 하나인 건축자재로부터의 휘발성 유기화합물류 방출량 측정방법을 제시하고 있는데, 해당 방법은 대상 자재를 분취하여 시편을 마련하고 시험챔버에 거치한 뒤 항온항습( $20 \pm 2^\circ C$ ,  $50 \pm 5\%$ ) 조건에서 일정 기간이 경과한 후의 챔버 내부농도를 기반으로 방출량을 평가하는 방식이며, 이는 자재의 품질확인을 통한 실내공기질 관리의 측면에서 타당한 평가방식이다. 그러나 해당 평가방식은 측정의 객관성과 재현성을 확보하기 위해 실험환경을 통제하기 때문에 실제 거주조건에서 발생할 수 있는 다양한 상황을 의도적으로 배제하여 실제 환경에서의 오염물질 방출 양상과는 상이한 결과를 보일 수 있다<sup>2)</sup>. 따라서 건축자재가 실제 시공된 현장에서 방출하는 오염물질의 양과 실내공기환경에 미치는 영향의 정도는 실거주환경에서 평가할 필요가 있으며, 이를 위한 정확한 현장 측정 평가방법을 마련하는 일 역시 매우 유의미한 일이다. 즉, 오염물질이 자재의 자재 표면으로부터 실내 공기 중으로 방출 및 확산되는 평가과정은 기존의 방식과는 다른 접근방법을 필요로 한다.

표면 방출량을 측정하는 기법 중에서 플럭스 챔버(flux chamber)는 오염된 매질의 표면으로부터 방출되는 가스를 직접 측정하는 방법으로, 매질의 공극을 탈출하여 표면으로 발산되는 가스가 챔버 내부에 축적되도록 하여 얻는 측정값과 운용 조건을 이용하여 방출량을 산정할 수 있다. 플럭스 챔버는 생물기원의 황화합물 측정 목적으로 고안된 이래로 다양한 가스상 오염물질 측정에 적합하도록 개량되었으며, 휘발성유기화합물과 온실가스, 휘발성 Hg 등 다양한 가스상 오염물질의 채취와 측정에 널리 이용되고 있다<sup>3)</sup>. 플럭스 챔버법은 면 오염원의 실제 표면에 직접 적용 가능하여 토양, 매립지, 지하수 등과 같은 여러 환경 매질에서의 오염물질 방출량 실측에 다수 활용되어 왔으며<sup>4-9)</sup>, 공기-토양 매질 사이의 물질교환량 측정평가에도 이용된 사례가 있다<sup>10-12)</sup>. 이에 방출된 오염물질이 실내로 유입될 수 있는 가능성에 대한 고려 또한 수반되기도 하나<sup>13,14)</sup>, 실제 실내공기질에 영향을 미칠 수 있는 실내 오염원에 대한 실측 기법으로써의 적용 사례는 아직 부족한 실정이다.

플럭스 챔버법은 기밀한 매질의 표면에서 방출되는 가스의 농도 변화를 이용하여 플럭스를 계산하는 방법으로<sup>15)</sup>, 장치구성이 비교적 간단하고 운용이 편리하여 실용적이나, 챔버 내에서 가스가 희석될 수 있어 방출량과 과소평가될 우려가 있는데, 설계인자를 최적화함으로써 이와 같은 방법적 한계를 극복할 수 있다<sup>16)</sup>. 따라서 본 연구에서는 실내 공간의 내측 표면에 직접 적용 가능한 측정법으로써, 비용효율적이면서도 정확한 측정을 기대할 수 있는 플럭스 챔버 시스템을 제작 및 검증하였다. 이를 위하여 미국환경청<sup>17)</sup>의 가이드라인을 참조하여 플럭스 챔버를 자체 제작하였고, 다각적인 성능평가 시험을 통하여 실내공기오염물질의 실측에 적합한 방법적 최적화를 꾀하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 플럭스 챔버의 설계 및 제작

플럭스 챔버는 운용 방식에 따라 닫힌계(closed system)와 열린계(open system)로 사용 가능하고, 플럭스 산정방식은 시간 경과에 따른 농도변화율을 토대로 하는 기울기 방식(slope method)과 평형상태에 도달한 챔버 내부농도를 이용하는 평형농도 방식(steady-state method)을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 미국환경청(USEPA, 1986)의 가이드라인을 참고하여 소형의 플럭스 챔버를 스테인리스 스틸 재질의 원통형과 아크릴 재질의 반구형이 결합된 형태로, 단면적  $0.126 \text{ m}^2$ , 총 체적은 32 L이 되도록 설계 및 제작하였다. 그리고 표면에서 발산되는 기체가 챔버 내부에서 완전 혼합될 수 있도록 중앙에 교반팬을 설치하였고, 챔버의 총 체적을 초과하는 기체가 자연 배기되어 챔버 내부에 양압이 작용하지 않도록 배기구를 내었다. 또한, 필요한 경우 순환가스주입구로 사용 가능한 시료채취부 1개를 포함하여 총 3개의 시료채취부를 내어 플럭스 챔버를 밀폐식과 순환식으로 모두 운용할 수 있도록 하였으며, 내부 온도 변화를 관측할 수 있도록 전자식 온도 감지 센서를 장착하였다 (Fig. 1 참조).

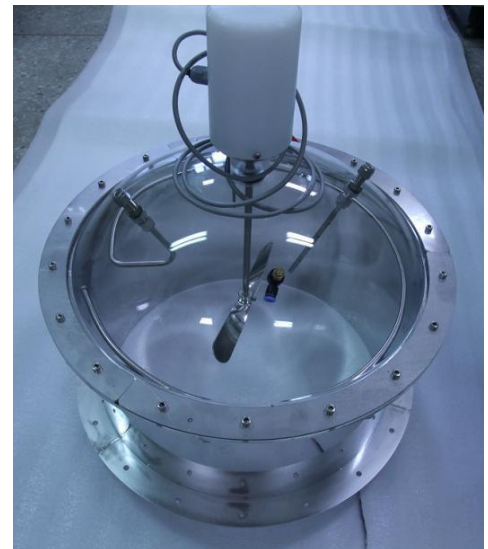
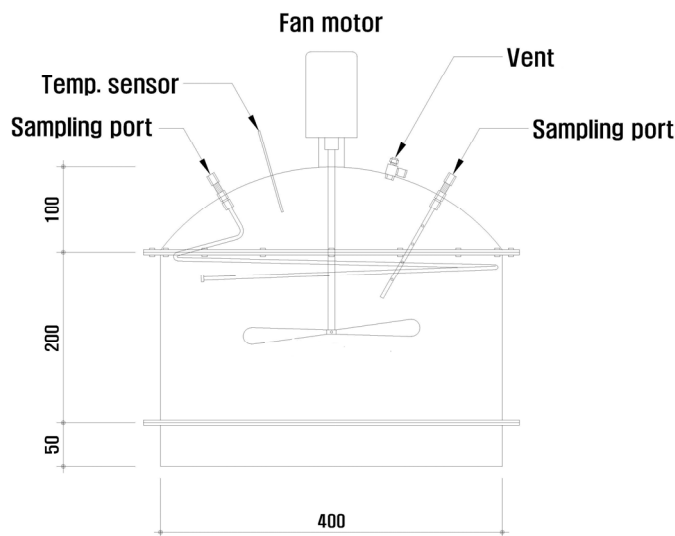


Fig. 1 A basic drawing (left) and practical design (right) of flux chamber for indoor air pollutants measurement

### 2.2 플럭스 챔버의 성능평가 실험

#### (1) 챔버 기밀성

플럭스 챔버 시스템은 기본적으로 표면으로부터 방출되는 가스를 챔버 내부에 축적시켜 농도를 측정하고 플럭스를 산정하는 기법이므로, 챔버의 기밀성이 확보되지 않으면 측정대상 물질의 농도와 플럭스 산정값이 과소 평가될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1차적으로 플럭스 챔버의 모든 개구부를 완전 밀폐한 상태에서 고순도

헬륨(99.99%)를 챔버에 일정량 주입하고 헬륨 감지기로 외부에서의 누출 여부를 확인하였다. 단, 실험실 헬륨 바탕농도가 0 ppm에 근사함을 사전에 확인하여 측정오차를 배제하였다. 그 다음으로 MFC (SLA5800 series, Brooks, USA)를 이용하여 챔버 내부에 고순도 질소(99.99%)를 5.00 L/min의 일정한 유량으로 주입하면서 가스주입구 이외의 개구부에서 버블유량계(BF-05, SIBATA, Japan)로 유출 유량을 측정하여 주입가스 유량과 비교하여 기밀성을 평가하였다. 평가 지표는 상대오차(realtive error, 이하 RE)로 하고, 아래의 식(1)과 같이 계산하였다.

$$\text{Realtive Error (RE\%)} = \frac{\text{Certified value} - \text{Measured value}}{\text{Certified value}} \times 100 \quad (1)$$

### (2) 시료 균질성

플렉스 챔버에서 채취하는 시료는 챔버 내부 가스에 대하여 대표성이 있어야 한다. 따라서 시료의 충분한 혼합을 위하여 측정대상물질의 표면 방출 기작에 영향을 미치지 않는다는 전제 하에 교반팬을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 표면 방출 상황을 모사하기 위하여 챔버와 동일한 단면적을 가진 상자에 glass beads ( $\phi$  2 mm)를 채워 매질을 대체하고, 하단부에 주입구를 내어 메탄 표준가스를 일정 유량으로 흘려주었다. 시료 채취는 3개의 개구부에서 동일한 규격의 gas-tight syringe (1000 series, Hamilton, USA)를 이용하여 동시에 동량을 채취하였고, 즉시 분석할 수 있도록 시료 채취 간격을 약 6분으로 조정하였다. 그리고 GC-FID로 분석한 반응값을 비교하여 상대표준편차(relative standard deviation, 이하 RSD)를 계산함으로써 시료 균질성을 평가하였다.

$$\text{Realtive Stadnard Deviation (RSD\%)} = \frac{\text{Arithmetic mean}}{\text{Standard deviation}} \times 100 \quad (2)$$

### (3) 회수율

본 연구에서는 두 가지의 회수율을 평가하였다. 첫째, 이미 농도를 알고 있는 표준가스를 주입하면서 챔버 내부농도가 도달하는 수준을 주입 농도와 비교하여 백분율로 표현하는 회수율(Recovery1, 식(3))이다. 이는 표면으로부터 방출되는 가스상 시료를 플렉스 챔버 내부에 어느 정도로 회수하여 축적할 수 있는지를 판단하는 지표로써, 시료 손실에 의한 오차를 배제하려면 챔버 내부 농도가 주입 농도의 100%를 회수할 수 있어야 한다. 둘째, 농도와 유속조건으로 계산한 이론적 방출량 대비 실제 측정된 농도로 산정하는 실험적 방출량의 비율을 나타내는 회수율(Recovery2, 식(6))이다. 이러한 개념은 플렉스 챔버의 방출량 계산방식 중에서 시간 경과에 따른 농도변화율을 이용하는 기율기 방식을 적용할 경우에 적용할 수 있으며, 이론적 방출량에 근접한 실험값을 획득하여야 플렉스의 과소평가를 방지할 수 있다.

$$\text{Recovery1 (\%)} = \frac{C_{ch}}{C_{CRM}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Experimental emission} = \frac{dC_{ch}}{dt} \times \frac{V_{ch}}{A_{ch}} \quad (4)$$

$$\text{Theoretical emission} = \frac{C_{in} \times v_{in}}{A_{ch}} \quad (5)$$

$$\text{Recovery2 (\%)} = \frac{\text{Experimental emission}}{\text{Theoretical emission}} \times 100 \quad (6)$$

### 2.3 분석의 정도관리

본 연구에서는 GC-FID (6890 series, Agilent, USA)에 Activated Alumina 80/100를 장착하여 메탄을 정량 분석하였다. 분석 조건은 오븐 온도를 3분간 40°C, 가스주입 온도는 100°C, 검출기 온도를 250°C로 유지하였고, 고순도 헬륨(99.99%)을 캐리어 가스로 사용하였으며, 상세한 분석조건은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 분석의 정도관리는 중량법으로 제조한 표준가스를 이용하여 기기의 직선성, 반복성, 재현성, 그리고 분석 정확도와 정밀도를 평가하였다.

기기 직선성은 저농도(2.11 µmol/mol)와 고농도(99.996 µmol/mol) 표준가스를 교차분석하여 얻은 결과값과 표준가스의 인증값을 비교하여 평가하였고, 한 점 교정법으로 확인한 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.999 이상이었다. 반복성은 동일한 표준가스를 연속적으로 5회 이상 반복 분석하였고, 재현성은 1일 이상의 간격을 두고 동일한 표준가스를 5회 이상 분석하여 얻은 결과값으로 평가하였는데, 각각의 RSD가 모두 1.0% 미만인 것으로 확인되었다. 분석 정확도와 정밀도는 99.996 µmol/mol 및 202.7 µmol/mol 표준가스를 3회 반복 분석하여 평가하였고, 분석값의 RSD가 각각 0.8%와 0.3%로 나타나 분석 신뢰도가 매우 우수하였다.

**Table 1** Analysis conditions of gas chromatography for methane

| Items          |          | Conditions   |
|----------------|----------|--|
| Instruments    |          | GC-FID 6890 Series (Agilent)                           |
| Column         |          | Activated Alumina 80/100, 6 ft × 2 mm, stainless steel |
| Temperature    | Oven     | 40°C (3 min)   |
|                | Injector | 100°C  |
|                | Detector | 250°C  |
| Total gas flow |          | 20.9 mL/min  |
| Carrier gas    |          | Helium gas (99.99%)                                    |
| Sample volume  |          | 0.2 mL   |

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 챔버 기밀성

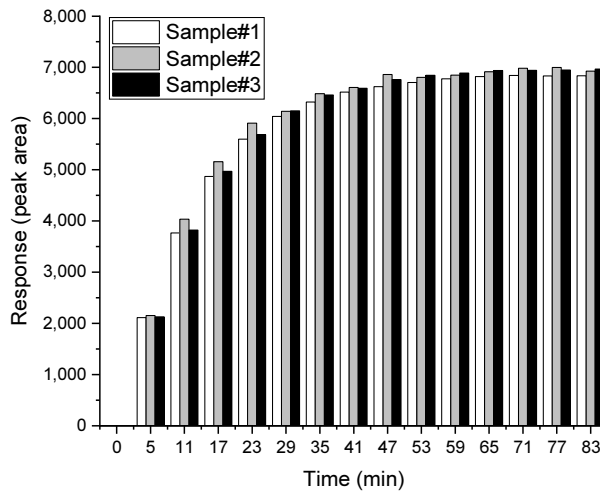
플럭스 챔버는 밀폐하였을 때 가스의 누출이 없어야만 정확한 측정이 가능하다. 헬륨 감지기를 이용한 1차 시험 결과, 챔버 개구부와 구조의 이음새에서는 헬륨이 감지되지 않았고, 챔버와 매질의 표면이 맞닿는 경계 부분에서 누출이 확인되어 챔버중량으로 압착 가능한 연질의 재료로 이를 보강하였다. 2차 시험은 질소가스를 챔버에 5.00 L/min의 일정 유량으로 주입하면서 서로 다른 유출부에서의 유량을 측정하였고, 결과의 재현성 확보를 위하여 총 3회의 반복실험을 수행하였다. 그 결과, 3개의 서로 다른 유출구에서 측정한 유량은  $5.00 \pm 0.01$  L/min의 범위였으며, 주입 유량과 유출구에서의 측정 유량의 RE가 0.1% 수준으로 나타나, 본 연구에서 제작한 플럭스 챔버의 기밀성이 우수함을 확인하였다(Table 2 참조).

**Table 2** The results of airtightness of flux chamber based on flow rate test

| Items           | Flow rate (L/min) |      |      | RE (%) |
|-----------------|-------------------|------|------|--------|
|                 | 1                 | 2    | 3    |        |
| Injected N2 gas | 5.00              | 5.00 | 5.00 | -      |
| Outlet#1        | 5.00              | 4.99 | 5.00 | 0.07   |
| Outlet#2        | 5.01              | 5.00 | 5.00 | 0.07   |
| Outlet#3        | 5.00              | 4.99 | 4.99 | 0.13   |

#### 3.2 시료 균질성

본 연구에서는 챔버 내부시료의 균질성을 평가하기 위하여 서로 다른 3개의 개구부에서 gas-tight syringe로 0.2 mL의 시료를 동시에 채취하였고, GC-FID를 이용하여 즉시 분석하였다. 약 6분 간격으로 동시 채취한 시료 분석 결과는 가스 크로마토그래피의 반응값인 peak area로 비교하였고, Fig. 2에 나타난 것과 같다. 일반적인



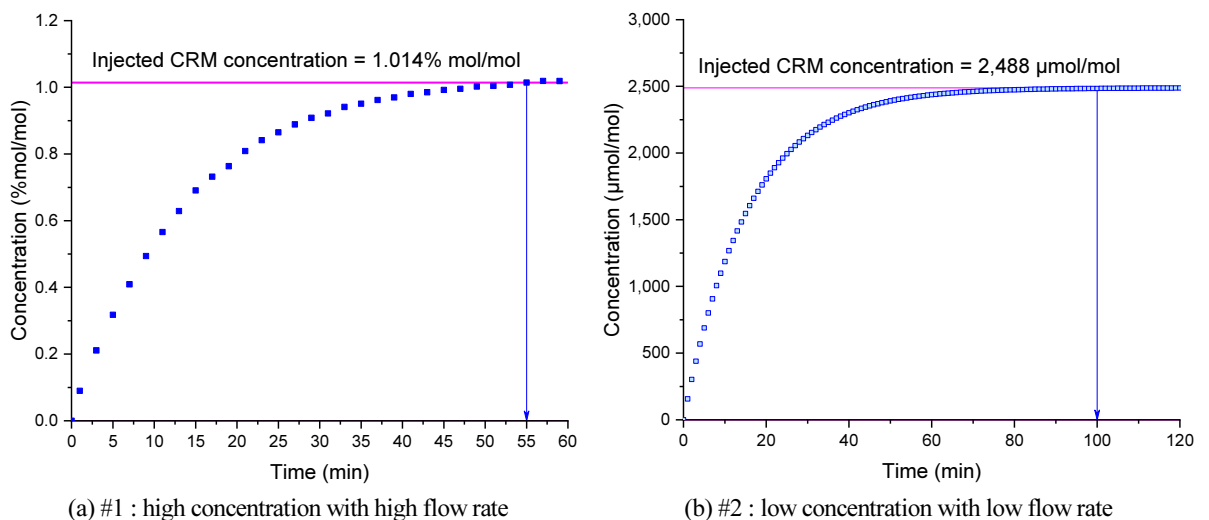
**Fig. 2** Comparisons of gas chromatography response values of 3 samples from the flux chamber

로 표준가스 주입 초기에는 챔버 내부 시료의 혼합이 충분하지 못하여 시료의 불균질성이 크게 나타날 수 있고, 서로 다른 부분에서 동시에 채취한 시료의 분석결과가 유사할수록 균질성이 높다고 평가할 수 있다. 본 연구 결과, 동시 채취한 시료 간 RSD가 0.9 ~ 3.7%로, 측정 초기의 불충분한 혼합 정도를 포함하여도 최대 4% 미만의 편차를 보여 챔버 내부에서 시료가 균질하게 분포함을 확인하였다. 이는 측정의 어느 시점에 시료를 채취하더라도 해당 결과가 챔버 내부 시료에 대한 대표성을 충분히 가짐을 의미하며, 해당 챔버의 시료 균질성은 측정 정확도에 부정적인 영향을 미치지 않을 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3 회수율

#### (1) 주입 농도 대비 챔버 내부 농도의 도달 수준

완전한 기밀성이 확보된 경우, 챔버 내부 농도는 이상적으로 주입 농도의 100%까지 도달가능하여야 한다. 챔버 하단에 연결한 상자를 통하여 1.014%mol/mol의 표준가스를 주입하면서 챔버 내부농도 변화를 관측한 결과, 표준가스 주입을 시작한 직후부터 챔버 내부 농도가 급격히 상승하였고, 내부 농도가 주입 농도의 100% 수준에 도달하기까지 약 55분이 소요되었다(Fig. 3(a)). 즉, 본 연구에서 제작한 플렉스 챔버는 3.1절의 챔버 기밀성 시험에서 확인한 바와 같이 우수한 기밀성을 가지기 때문에, 표면에서 방출되는 측정대상물질을 누출에 대한 우려없이 회수할 수 있다. 다양한 표면 방출 상황에서도 동일한 결과를 얻을 수 있는지 확인하기 위하여, 1차 실험보다 상대적으로 저농도 범위의 표준가스를 1/2 수준의 유량 조건으로 주입하면서 반복 실험을 수행하였다. 그 결과, 30분이 경과한 시점에 내부 농도가 주입 농도의 85% 수준에 도달하였으며, 100% 수준인 2,488  $\mu\text{mol/mol}$ 에 도달하기까지 약 100분이 소요되었다(Fig. 3(b)). 해당 실험에서 역시 도달 시간이 상이하였을 뿐, 주입 농도와 일치하는 회수율을 나타내어, 본 연구에서 자체 제작한 플렉스 챔버는 표면 방출가스를 누출 및 희석없이 측정가능할 것으로 기대할 수 있다.



**Fig. 3** The trends of methane concentration inside the flux chamber over time



(2) 이론적 방출량 대비 실험적 방출량의 비율

이론적 방출량은 표준가스 농도와 주입 유량 조건 및 챔버 체적으로 구할 수 있고, 실험적 방출량은 챔버 내부 농도를 변화를 관측하여 계산하였다. 단, 측정 초기의 불충분한 혼합으로 인하여 일부 초기 시점에서는 전체적인 경향을 벗어난 측정값이 기록될 수 있다. 따라서 농도변화율 산정 구간은 5 ~ 10분 간격으로 나누었으며, 결과값을 토대로 시간 범위별 회수율을 산정하였다(Table 3). 실험 결과, 유속 조건에 따라 가장 높은 회수율을 보이는 시간의 범위가 상이하었는데, 가장 낮은 유속조건(Case#1)을 제외한 나머지 조건에서는 5 ~ 10분 사이의 농도변화율을 이용하였을 때 이론적 방출량에 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 3** The results of recovery test using changing rate of methane concentration with time

|  | Items   | Case#1 | Case#2 | Case#3 | Case#4 |
|--|---|--------|--------|--------|--------|
| Conditions                                     | Flow rate (L/min)                             | 0.15   | 0.25   | 0.5    | 1.0    |
|  | Theoretical emission (mg/m <sup>2</sup> /min) | 0.17   | 0.28   | 0.57   | 1.14   |
| Experimental emission (mg/m <sup>2</sup> /min) | 0~5 min                                       | 0.13   | 0.20   | 0.35   | 1.03   |
|  | 5~10 min                                      | 0.11   | 0.27   | 0.48   | 1.02   |
|  | 5~15 min                                      | 0.11   | 0.21   | 0.40   | 0.93   |
| Recovery (%)                                   | 0~5 min                                       | 78.8   | 71.6   | 62.0   | 90.7   |
|  | 5~10 min                                      | 66.0   | 95.8   | 83.7   | 89.5   |
|  | 5~15 min                                      | 61.8   | 74.8   | 70.6   | 82.3   |

그러나 실제 표면에서는 본 실험의 조건보다 매우 낮은 유속으로 물질을 방출하는 것이 일반적이므로 농도변화율에 따른 기울기 방식으로 플럭스를 산정할 경우 사전 현장실험을 통하여 최적 조건을 파악할 필요가 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 챔버 내부농도는 초기에 급격히 상승하다가 증가세가 점차 둔화되고 평형상태에 수렴하는 경향을 보인다. 따라서 가능한 한 측정 초기의 농도변화율을 이용하여야만 이론적 방출량에 근사한 결과를 얻을 수 있는데, 실제 환경에서는 측정 직후의 농도가 매우 낮은 수준이며, 챔버 내부 시료 혼합이 불충분하므로 측정불확도가 커질 수 있어 현실적으로 측정 직후의 농도변화율을 사용하기 어렵다. 이러한 한계점은 농도변화율을 선형이 아닌 다중회귀식으로 구함으로써 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상되며, 챔버 내부농도 변화를 측정하는 간격을 보다 조밀하게 하기 위하여 실시간 측정장비를 이용할 필요가 있는데, 이에 대한 후속 연구가 진행되고 있다.

4. 결론

실내공간에는 다양한 오염물질 방출원이 존재하고, 여기서 방출되는 수많은 실내오염물질들이 건축물의 기밀성능이나 재질패턴 등에 의하여 내부에 축적될 가능성이 높다. 이에 주요 실내오염원 중 하나인 건축자재의 품질관리 뿐만 아니라, 실제 현장에 적용된 단일 혹은 복합자재에서 방출되어 표면으로부터 실내공간으로 확산



될 수 있는 오염물질을 실측할 수 있는 방법이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 실내공간의 내측 표면에 직접 적용 가능한 측정법으로써 비용효율적이면서도 정확한 측정을 기대할 수 있는 플렉스 챔버를 제작하였고, 기밀성, 시료 균질성, 회수율을 포함한 다각적인 성능평가 시험을 수행하였다. 1차 기밀성 평가는 누출이 예상되는 부분에서 헬륨을 감지하여 스크리닝하였고, 누출이 확인된 부분을 보강하여 기밀성을 개선하였으며, 질소가스를 이용한 2차 실험 결과, 챔버에 주입한 유량과 유출구에서의 측정 유량의 차이가 RE 0.1% 수준으로 우수한 기밀성을 가짐을 확인하였다. 시료 균질성은 동일한 시점에 서로 다른 유출구에서 채취한 시료의 분석값을 비교하였고, 시료 혼합이 불충분하여 균질성이 낮을 것으로 예상되는 측정 초기를 포함하여도 분석값의 RSD가 4% 미만의 정밀한 결과를 보여, 챔버로부터 채취한 시료가 전체 챔버 내부시료를 대표할 수 있는 균질성이 있음을 확인하였다. 회수율의 경우, 챔버 내부 농도는 실험 조건에 따라 50 ~ 100분 이내에 주입 농도의 100% 수준에 도달하였고, 이론적 방출량 대비 실험적 방출량의 회수율을 높이려면 측정 초기의 농도변화율을 이용하여야 함을 알 수 있었다. 플렉스 챔버의 농도변화율은 측정 초기에 큰 값을 보이고, 시간이 경과함에 따라 점차 변화율이 낮아지므로 밀폐식 플렉스 챔버를 기율기 방식으로 운용할 경우, 농도변화율 산정간격이 중요한 요소로 작용하였다. 다만 측정 초기는 챔버 내부시료의 혼합이 불충분하여 시료의 대표성이 떨어지는데, 이로 인한 측정평가 오차를 줄일 수 있는 후속 연구가 진행 중이다.

## 후기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 21DPSC-C163230-01).

## REFERENCES

1. Korea Ministry of Government Legislation(MOLEG), Environmental testing and inspection act, Article 6 (Enforcement date:2020.05.26.), 2021. <https://www.law.go.kr/LSW/eng/engLsSc.do?menuId=2&section=lawNm&query=test&x=0&y=0#liBgcolor7>. last accessed on the 25<sup>th</sup> August 2022
2. Lee, B. H., Kim, S. D., and Jeon, J. Y., Measurement and Uncertainty of Surface Radon Emission of Building Materials Using Closed Chamber, 2022 SAREK Summer Conference, June 2022, Pyeongchang, Republic of Korea.
3. Ma, J., McHugh, T., and Eklund, B., Flux Chamber Measurements Should Play a More Important Role in Contaminated Site Management, Environmental Science and Technology, Vol. 54, No. 19, pp. 11645-11647, 2020, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04078>.
4. Jeong, J. H., Kang, S. J., Lim, J. M., and Lee, J. H., Comparison and Optimization of Flux Chamber Methods of Methane Emissions from Landfill Surface Area, Journal of Korean Society of Environmental Engineering, Vol. 38, No. 10, pp. 535-542, 2016, <http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2016.38.10.535>.
5. Kim, D. S., Jang, Y. K., and Jeon, E. C., Surface Flux Measurements of Methane from Landfills by Closed Chamber Technique and its Validation, Journal of Korean Society of Atmospheric Environment, Vol. 16, No. 5, pp. 499-509, 2000, <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2020.22.2.79>.

6. Christensen, S., Ambus, P., Arah, J. R. M., Clayton, H., Galle, B., Griffith, D. W. T., Hargreaves, K. J., Klenzedtsson, L., Lind, A. M., Maag, M., Scott, A., Skiba, U., Smith, K. A., Welling, M., and Wienhold, F. G., Nitrous Oxide Emission from an Agricultural Field: Comparison between Measurements by Flux Chamber and Micrometeorological Techniques, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 24, pp. 4183-4190, 1996, [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00145-8](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00145-8).
7. Waite, D. T., Cabalo, E., Chau, D. and Sproull, J. F., A Comparison of Flux Chambers and Ambient Air Sampling to Measure  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane Volatilisation from Canola (*Brassica napus*) Fields, *Chemosphere*, Vo. 68, No. 6, pp. 1074-1081, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.01.085>.
8. Kim, D. S. and Na, U. S., Soil Emission Measurements of  $N_2O$ ,  $CH_4$  and  $CO_2$  from Intensively Managed Upland Cabbage Field, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, Vol. 27, No. 3, pp. 313-325, 2011, <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.3.313>.
9. Provoost, J., Reijnders, L., Swartjes, F., Bronders, J., Seuntjens, P., and Lijzen, J., Accuracy of Seven Vapour Intrusion Algorithms for VOC in Groundwater, *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-73, 2009, <https://doi.org/10.1007/s11368-008-0036-y>.
10. Duc, N. T., Silverstein, S., Lundmark, L., Reyier, H., Crill, P., and Bastviken, D., Automated Flux Chamber for Investigating Gas Flux at Water-air Interface, *Environmental Science and Technology*, Vol. 47, No. 2, pp. 968-975, 2013, <https://doi.org/10.1021/es303848x>.
11. Lin, C. J., Zhu, W., Li, X., Feng, X., Sommar, J., and Shang, L., Novel Dynamic Flux Chamber for Measuring Air-surface Exchange of H<sub>2</sub>O from Soils, *Environmental Science and Technology*, Vol. 46, No. 16, pp. 8910-8920, 2002, <https://doi.org/10.1021/es3012386>.
12. Poissant, L. and Casimir, A., Water-air and Soil-air Exchange Rate of Total Gaseous Mercury Measured at Background Sites, *Atmospheric Environment*, Vol. 32, No. 5, pp. 883-893, 1998, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00132-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00132-5).
13. Collignan, B., Diallo, T. M., Traverse, S., Chastanet, J., Abadie, M., Powaga, E., Hulot, C., Romani, Z., Allard, F., and Grasset, M., Methodology for the in Situ Characterisation of Soil Vapor Contaminants and Their Impact on the Indoor Air Quality of Buildings, *Building and Environment*, Vol. 177, 106900, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106900>.
14. Heggie, A. C. and Stavropoulos, B., Passive Diffusive Flux Chambers - a New Method to Quantify Vapour Intrusion into Indoor Air, *Environmental Science: Processes and Impacts*, Vol. 20, No. 3, pp. 523-530, 2018, <https://doi.org/10.1039/C7EM00569E>.
15. Eklund, B., Practical Guidance for Flux Chamber Measurements of Fugitive Volatile Organic Emission Rates, *Journal of Air and Waste Management Association*, Vol. 42, No. 12, pp. 1583-1591, 1992, <https://doi.org/10.1080/10473289.1992.10467102>.
16. Cooper, C. D., Reinhart, D., Rash, F., Seligman, D., and Keely, D., Landfill Gas Emissions, Report, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, US EPA, 1992.
17. United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA), Measurement of Gaseous Emission Rates from Land Surfaces Using an Emission Isolation Flux Chamber User's Guide, 1986.