

유전 알고리즘을 이용한 어린이 시설의 실내 공기질 분석

박서연 · 우창규*

한국기술교육대학교 기계공학부

(투고 2024년 2월 23일, 수정 2024년 3월 13일, 게재확정 2024년 3월 19일)

Indoor air quality analysis based on genetic algorithm for childhood facilities

Seo Yeon Park, Chang Gyu Woo*

School of Mechanical Engineering, KOREATECH

(Received February 23 2024; Revised March 13 2024; Accepted March 19 2024)

Abstract

Children are vulnerable to bad indoor air quality, and many researches on indoor air quality have been done with various methodologies. Herein, we used the genetic algorithm, one of the optimization methods, for the analysis based on better estimation values that are not easy to measure. A children playroom and a Taekwondo gym were chosen for the different degree of physical activity. After estimation of the number of occupants, the generation degree of CO₂ and PM_{2.5} were determined from the data of the indoor air quality monitors. Relative errors were below 1% for all cases. Due to many air-treating electronics, the PM_{2.5} in the children playroom was well-managed compared to that in the Taekwondo gym. The PM_{2.5}-generating activities were calculated and that of the Taekwondo gym was higher than that of the children playroom. The PM_{2.5} generating values were on the positive relationship with CO₂ generating values. This means that we can obtain meaningful information from limited measurement data. For the numerous children facilities, indoor air quality can be easily analyzed and this might contribute to enhancing the children health.

Keywords: indoor air quality, genetic algorithm, occupants, childhood facility

* Corresponding author.

Tel : +82-41-560-1123, Fax : +82-41-560-1253

E-mail : woo@koreatech.ac.kr

1. 서론

미세먼지를 포함하여 다양한 실내공기오염물질은 인간의 건강에 유해하다. 공기오염물질은 기관지, 폐, 피부, 눈 및 심혈관 질환을 일으키고, 암까지도 유발할 수 있다(Kampa and Castanas, 2008). 특히 어린이들은 실내 공간에서 활발하게 활동을 하며 호흡량이 많고, 어른에 비해 신체의 발달이 완전하지 않아 공기오염물질에 더욱 취약하다(Cooper et al., 2020). 공기오염물질의 농도는 실내 오염원, 실외 농도, 재실자의 수 및 활동 등 다양한 요인에 따라 변화한다. 이러한 요인들에 의한 실내 농도는 기존의 연구에서 다음의 방정식으로 제시되어 있다(Diapouli, Chaloulakou and Koutrakis, 2013).

$$\frac{dC_{i,n,i}}{dt_i} = S_i - L_i \times C_{i,n,i} \quad (1)$$

여기서, C_{in} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 실내오염물질의 농도, S ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)는 오염물질의 생성량, L (/hr)은 오염물질의 소멸항, 그리고 i 는 i 번째 시간 스텝을 의미한다. 위의 방정식을 시간 t_i 와 t_{i-1} (hr) 사이의 적분을 수행하여 PM 및 CO_2 에 대해 각각 정리하면 다음과 같다.

$$L_1 = \frac{Q_V}{V} \eta_V + \lambda + k + \frac{Q_F}{V} \eta_F \quad (2)$$

$$L_2 = \frac{Q_V}{V} + \lambda \quad (3)$$

$$C_{PM,in}(t_i) = C_{PM,in}(t_{i-1})e^{-L_1 t} + \frac{\left[P\lambda + (1 - \eta_V) \frac{Q_V(t)}{V} \right] C_{PM,out}(t) + S_{PM}}{L_1} (1 - e^{-L_1 t}) \quad (4)$$

$$C_{CO_2,in}(t_i) = C_{CO_2,in}(t_{i-1})e^{-L_2 t} + \frac{\left[\lambda + \frac{Q_V(t)}{V} \right] C_{CO_2,out}(t) + S_{CO_2}}{L_2} (1 - e^{-L_2 t}) \quad (5)$$

여기서, C_{out} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 실외오염물질의 농도, t 는 시간, P 는 침기량, λ (/hr)는 공기환율, k (/hr)는 침착률, Q_V (m^3/hr)는 환기 유량, Q_F (m^3/hr)는 공기청정기 유량, V (m^3)는 실내 공간의 부피, S_{PM} ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)은 미세먼지 생성량, L_1 (/hr)은 미세먼지 소멸항, η_V (%)는 기계환기 효율, η_F (%)는 공기청정기 효율, S_{CO_2} (ppm/hr)은 CO_2 생성량, L_2 (/hr)는 CO_2 소멸항을 나타낸다.

기존의 연구는 주로 실내공기질 측정 장치를 사용하여 온도, 습도, CO_2 농도 및 미세먼지 농도를 측정하고 이를 예측하고 있다. 하지만 실내공기질에 큰 영향을 미치는 요인인 재실자 수나 미세먼지 생성률은 측정되고 있지 않아(Argunhan and Avci, 2018; Diapouli, Chaloulakou and Koutrakis, 2013; Elbayoumi, Ramli and Yusof, 2015; Guak et al., 2021; Kim et al., 2019; Singh, Sokhi and Kukkonen, 2020; Tang et al., 2018; Um et al., 2022)에 인간활동에 의한 영향을 정량적으로 비교하는데 어려움이 있었다.

대부분의 경우에서 사람의 활동은 CO_2 와 미세먼지의 주 생성원(S_{PM} , S_{CO_2})으로 작용한다. 본 연구에서는 재실자 한 명당 생성되는 양을 생성항으로 정의하였으며, S_{CO_2} 와 S_{PM} 은 다음과 같다.

$$S_{CO_2} = n \times A_{CO_2} \quad (6)$$

$$S_{PM} = n \times A_{PM} + B_{PM} \quad (7)$$

n 은 재실자 수, A_{CO_2} 는 재실자 당 CO_2 발생량, A_{PM} 은 재실자 당 미세먼지 발생량, 그리고 B_{PM} 은 비재실자 기반 미세먼지 발생량을 의미한다. n 값은 CO_2 측정 데이터에서 계산될 수 있다(Macarulla et al., 2017). 얻어진 n 값을 통해 A_{PM} 을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 시간 평균의 발생량을 얻을 수 있다는 가설을 바탕으로 실내 인원 수와 재실자 당 미세먼지 발생량을 결정하기 위해 유전 알고리즘을 사용했다. 재실자의 활동에 의한 미세먼지 발생량은 제한된 측정 데이터를 통해 추정할 수 있다.

2. 실험방법

2.1 측정장소

본 연구를 위해 두 곳의 측정장소를 선정했다. 한 곳은 상대적으로 더 어린 아이들이 이용하는 키즈카페이며, 다른 한 곳은 신체 활동이 더 활발한 어린이들이 이용하는 태권도장이다. 그림 1은 측정장소의 실제 사진이며, 그림 2에는 측정장소의 도면을 나타내었다. 표 1과 표 2는 측정장소의 정보와 운영되는 시간표와 재실자 정보를 나타내고 있다.

키즈카페에는 2개의 공기청정기, 2개의 서큘레이터, 그리고 2개의 에어컨이 설치되어 있었다. 에어컨 중 한

대는 스탠딩 타입으로 입구 근처에 위치하였고, 한 대는 천장형이었다. 또한, 입구에는 기계환기를 위한 디퓨저도 설치되어 있었다. 태권도장에는 모서리에 스탠딩 타입의 에어컨이 설치되어 있었고, 다른 에어컨이나 공기청정기와 같은 장치는 없었다. 키즈카페 내에는 주방이 있어 사람 외의 미세먼지 발생원으로 작용하였다. 태권도장의 비 재실자 기반 미세먼지 발생원은 벽면에 위치한 소독 및 탈취 자동 분무기(세스코 에어제닉)였다. 키즈카페나 태권도장 시설에 어린이가 머무는 동안 최소 한 명의 성인이 함께 재실하였다. 성인 재실자는 추정된 결과에 영향을 미칠 수는 있으나, 상대적으로 활동이 거의 없었기 때문에 CO₂와 미세먼지의 발생에

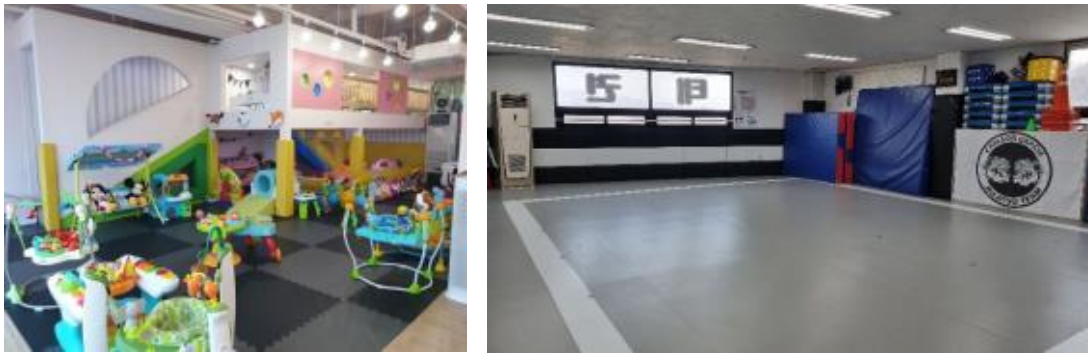


Figure 1 Photos of measurement sites. The children playroom (left) and Taekwondo gym (right).

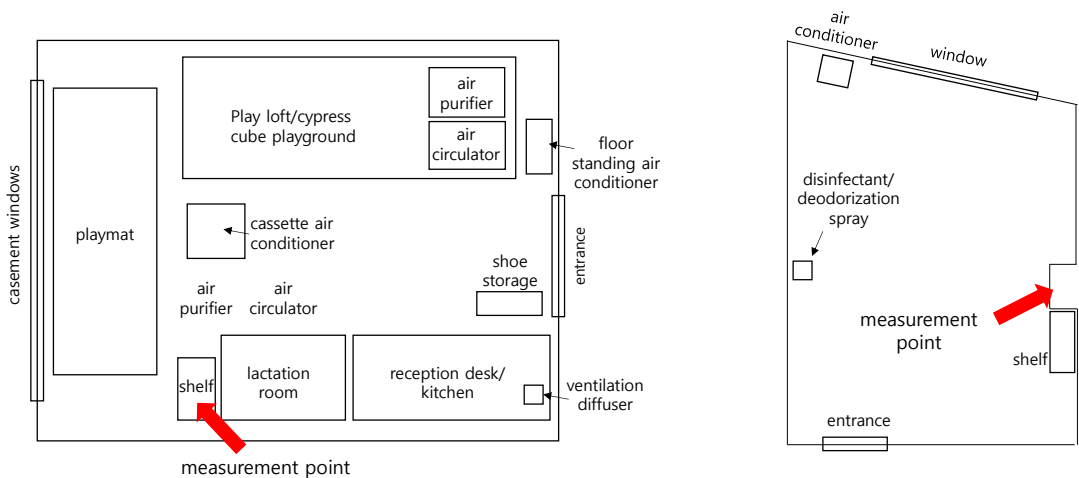


Figure 2 Floor plans of measurement site and measuring points in children playroom (left) and Taekwondo gym (right).

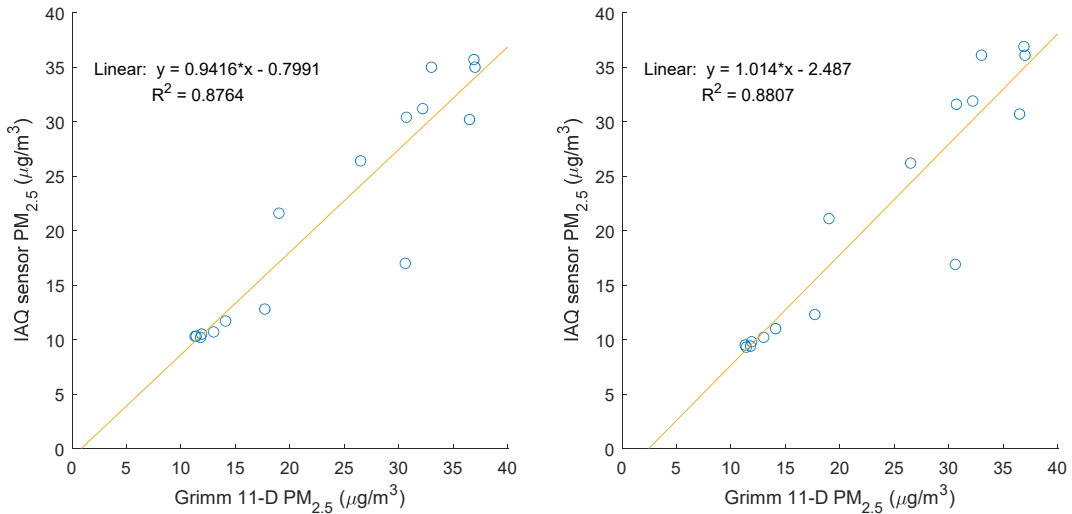


Figure 3 Data comparison between indoor air quality monitors and PM measurement equipment. (a) IAQ sensor data for the children playroom and (b) IAQ sensor data for Taekwondo gym.

있어 그 영향은 극히 제한적일 것이다.

대상 공간의 공기질 데이터는 실내공기질 (Indoor air quality, IAQ) 모니터링 장치 (Awair Omni, Awair Inc., United States)로 측정되었다. 모니터링 장치는 선반 위에 놓여 있었으며, 데이터는 10분 간격으로 측정되었다. 장치를 설치하기 전, 그림 3과 같이 PM (Particulate Matter) 기준 측정 장비(11-D,

Grimm, Germany)를 사용하여 비교 측정을 하였다. 사용한 실내공기질 모니터링 장치는 미세먼지의 PM_{2.5}만 측정하고 있어 PM 측정 장비 11-D의 PM_{2.5} IAQ 데이터와 비교하였고, 그림 3에서와 같이 0.88의 R²의 높은 정확도를 확인할 수 있었다. 시간별 실외 PM_{2.5} 농도 데이터는 표 1에 표기된 것과 같이 측정장소의 인근에 위치한 정부 시설에서 베타선 감쇠법(Beta-ray

Table 1 Measurement site descriptions.

	Children playroom	Taekwondo gym
Location	Downtown of Cheonan	Outskirts of Cheonan
Size ($W \times L \times H$) (m)	8 × 12 × 3.8	7.5 × 9.7 × 2.5
Floor	6th	6th
Year of build	2017	2005
Measuring period	August 2021 - October 2021	December 2021 - July 2022
Average occupants	7	10 - 15
Average age	0 - 5	4 - 7 / 8 - 15
Straight distance from governmental measurement site (km)	3.0	8.6
Indoor air quality-related electronics	two air-circulators(BKF-2070CBL, Bokuk), one large air purifiers(AX80M7580WFD, Samsung, 79.9 m ²), one small air purifier(AX47R9880WFD, Samsung, 47 m ²), one air-conditioner(AP13J7394EA, Samsung), one cassette air-conditioner on the ceiling(not identified)	one automatic deodorization spray(Airgenic, Cesco), one air-conditioner(SK-07006-4004, Tempia)

attenuation method)으로 측정된 값을 사용하였다. 실의 농도 측정값은 1시간 간격의 데이터로 가장 가까운 시간대 6개의 데이터에 대한 이동 평균값을 사용하였다.

2.2 비선형회귀 방법(Non-linear regression method)

각 시간 스텝에서 계산된 CO₂ 및 PM_{2.5} 농도와 측

였다.

계산된 데이터는 다시 다음 시간 스텝을 계산하는 데 사용되어 시간 순차적으로 계산되었다. 재실자 수와 환기 유량은 측정된 CO₂ 데이터를 기준으로 결정되었다. 인원수 추정과정에서 CO₂ 농도를 사용하는데, 여기에서 일인당 발생시킬 수 있는 CO₂ 농도의 범위를 두고 재실자 수를 추정하므로, 이 범위가 매우 중요해진다. 본 계산과정에서는 시간당 100~1000 ppm값의 범위

Table 2 Occupant schedule in the measurement sites.

site	schedule	Number of occupants	Status
Children playroom	10:30 - 11:00 (30 minutes)	1 - 2	Preparation
	11:00 - 13:00 (2 hours)	2 - 7	Open for visitors
	13:00 - 13:30 (30 minutes)	1 - 2	Cleaning and organizing toys
	13:30 - 15:30 (2 hours)	2 - 7	Open for visitors
	15:30 - 16:00 (30 minutes)	1 - 2	Cleaning and organizing toys
	16:00 - 18:00 (2 hours)	2 - 7	Open for visitors
Taekwondo gym	16:30 - 17:20 (1 hours)	~15 (4 - 7 years old)	Taekwondo training
	17:30 - 18:20 (1 hours)	~10 (8 - 15 years old)	Taekwondo training

정 데이터 사이의 오차를 최소화하기 위해 유전 알고리즘이 사용되었다 (그림 4). 유전 알고리즘은 자연세계의 진화과정에 기초한 계산모델이다. 유전 알고리즘의 장점은 크고 복잡한 함수의 최적화에 빠른 수렴으로 강점을 보이지만, 계산량이 많고, local minima에 빠질 수 있는 약점이 있다. 하지만 본 연구의 파라미터 수는 그렇게 많지 않아 대부분의 계산시간이 그렇게 오래 걸리지 않고, local minima가 그리 흔히 발생하지는 않는다. 본 연구는 MATLAB R2022a의 ga 함수를 사용하였는데, 오차함수를 정의하고 이를 최소화하는 변수를 추정하였다. 재실자의 수는 정수이므로 ga 함수 내 정수 제한 조건을 적용하였다. 사용된 유전알고리즘에 사용된 기본적 옵션값들은 모두 MATLAB ga 함수에 내장된 기본값을 사용하였다. 적합도의 경우 rank를 기반으로 평가하였고, 교배 조건은 intermediate recombination, 변이 조건은 경우 가우시안 조건을 사용하였다. 생식의 경우 종료판정조건은 총 변수 개수의 100을 곱한 수인 400을 CO₂, PM_{2.5} 모두 사용하

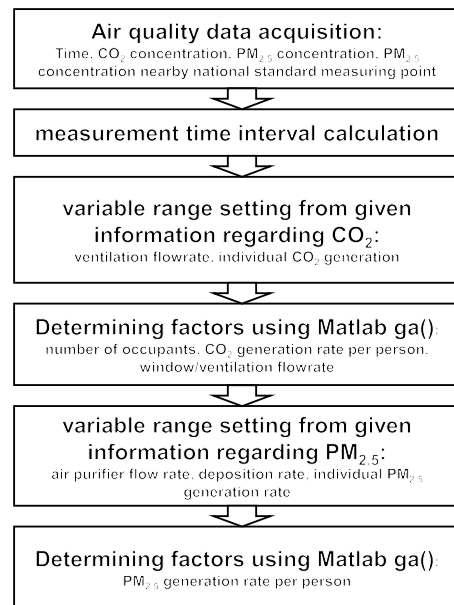


Figure 4 Data regression flow chart

를 갖도록 설정하였고, 기존 문헌들(Persily and Jonge, 2017)에서 판단하였을 때 이 범위는 적절한 것으로 판단된다.

추정된 데이터를 바탕으로 단위 시간당 재실자 1명이 발생시키는 PM_{2.5}의 양을 추정하였다.

실외 CO₂ 농도는 대기의 평균 CO₂ 농도인 410 ppm (Park et al., 2020)보다 약간 낮은 값인 400 ppm으로 설정하였다. 이는 CO₂ 측정 센서가 가끔씩 410 ppm 이하의 값을 표시하는데 이를 식에 그대로 반영하면 환기율이 현실과는 다른 매우 높은 값으로 계산되기 때문이다. 키즈카페의 기계환기 장치와 공기청정기의 효율은 각각 0.6, 0.97로 설정되었다. 공기청정기의 유량은 0-500 m³/hr로 제한되었다. 미세먼지의 침착률은 0.2-3 /hr로 범위를 지정하였다.

환기 유량의 경우, 키즈카페는 창문을 통한 환기 유량은 0-1000 m³/hr, 기계환기 유량은 0-1000 m³/hr, 태권도장은 창문을 통한 환기 유량만 0-2000 m³/hr로 제한하였다. 시설이 운영되는 시간 외에는 최대 재실 인원이 0명이 되도록 제한하여 오류를 최소화하였으며, 키즈카페는 10:30-18:30, 태권도장은 12:00-18:30에만 운영되었으며 최소 재실인원은 0명, 최대 재실인원은 각각 7명, 15명으로 계산하였다 (표 2). 이를 제한하지 않아도 추정값은 계산되나 계산되는 변수 값 특히 직접 측정이 되지 않는 침기량 등의 편차를 줄일 수 있다. 정확한 비교를 위해 재실자들의 출입정보와 비교하는 것이 적절하나 자료획득에 어려움이 있었다.

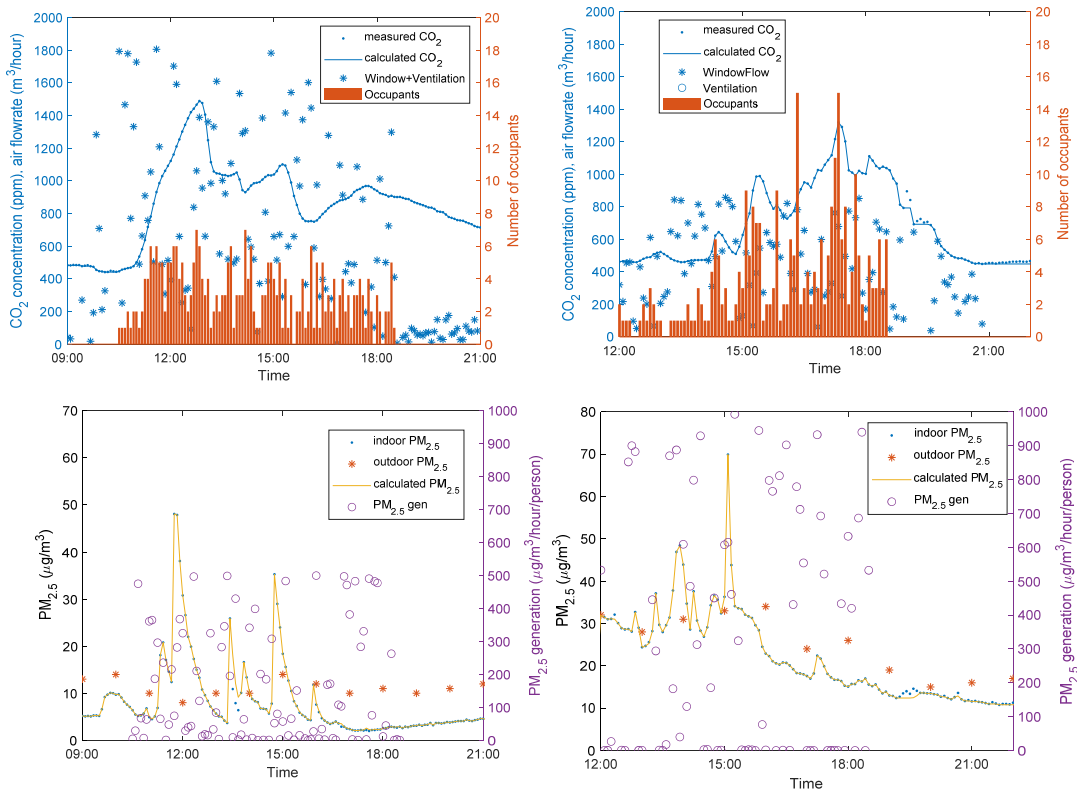


Figure 5 Comparison between measured and calculated data using regression methods. CO₂ data of (a) children playroom of September 11th, 2021 (b) Taekwondo gym of May 13th, 2022 and corresponding PM_{2.5} data of (c) children playroom and (d) Taekwondo gym based on CO₂ data.

3. 측정 및 분석결과

그림 5는 유전 알고리즘으로 계산된 키즈카페와 태권도장의 회귀 결과를 나타내고 있다. 계산된 CO₂와 PM_{2.5}의 농도는 모든 시간 스텝에서 측정 데이터와 1% 미만의 오차를 보였다. 키즈카페의 경우, 3차례의 구분된 시간대로 운영됨에 따라 실내 CO₂와 PM_{2.5} 농도도 사람이 재실하는 동안 3번의 뚜렷한 정점을 보인다. 재실자의 수가 많을 때, 키즈카페보다 태권도장에서 실내와 실외의 PM_{2.5} 농도 차이가 상대적으로 적었다. 이는 태권도장이 키즈카페에 비해 환기율이 높

은 영향으로 판단된다. 앞서 제한한 변수들의 조건 하에서, 재실자의 수는 실제 운영되는 정보와 유사하게 계산되고 있다.

실내외의 PM_{2.5} 비율(I/O ratio)은 그림 6에 나타나고 있다. I/O ratio는 키즈카페는 최대 5, 태권도장은 최대 1.4까지 상승했다. 키즈카페의 경우, PM_{2.5}의 농도가 크게 상승하더라도 곧바로 저감되어 농도가 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 이는 공기청정기, 에어컨, 서큘레이터 등 내부에 많은 입자상 오염물질 저감 기기가 있기 때문으로 판단된다.

그림 7에서처럼 계산된 데이터를 통해 각 측정 시간

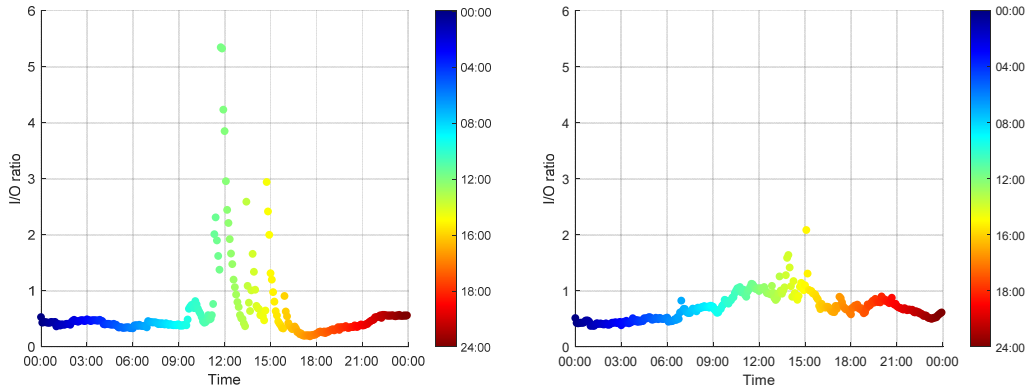


Figure 6 Indoor/Outdoor PM_{2.5}ratio change during measurement in (a) the children playroom (b) the Taekwondo gym at the same day.

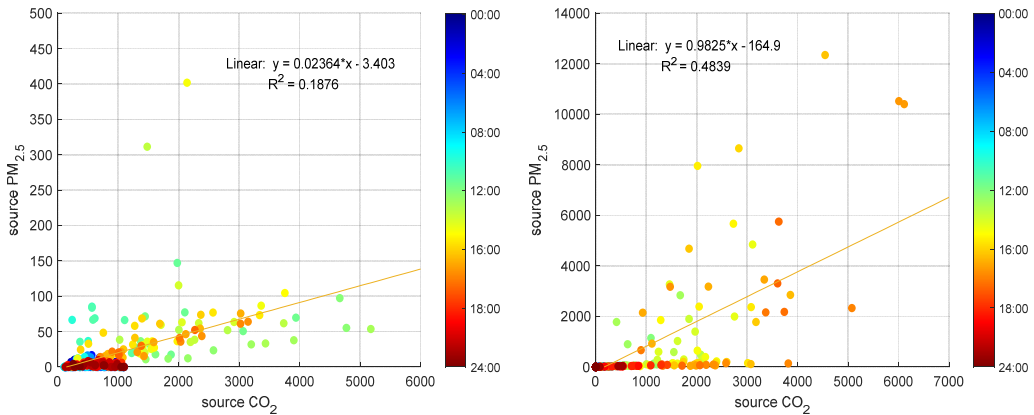


Figure 7 S_{PM} vs S_{CO₂} of (a) the children playroom and (b) the Taekwondo gym with quadratic regression at the same day.

스텝에서의 SPM과 SCO2 값을 얻을 수 있었다. 이 생
 성향에는 실내에 재실한 어린이와 성인의 영향이 모두
 포함되어 있다. 그러나 성인의 활동 정도는 매우 낮아
 미세먼지 발생량이 극히 적으며, 성인의 영향은 무시할
 수 있다. SPM과 SCO2는 양의 상관관계를 보이고 있

보여진 결과는 아니지만, 태권도장이 키즈카페보다 상
 대적으로 ACO2 대비 APM 값이 높은 경향을 확인할
 수 있었다. 이는 태권도장 재실자의 신체 활동이 키즈
 카페에서의 활동보다 더 많은 미세먼지를 배출하고 있
 다고 판단되며, 태권도장에서 더 활발한 활동에서

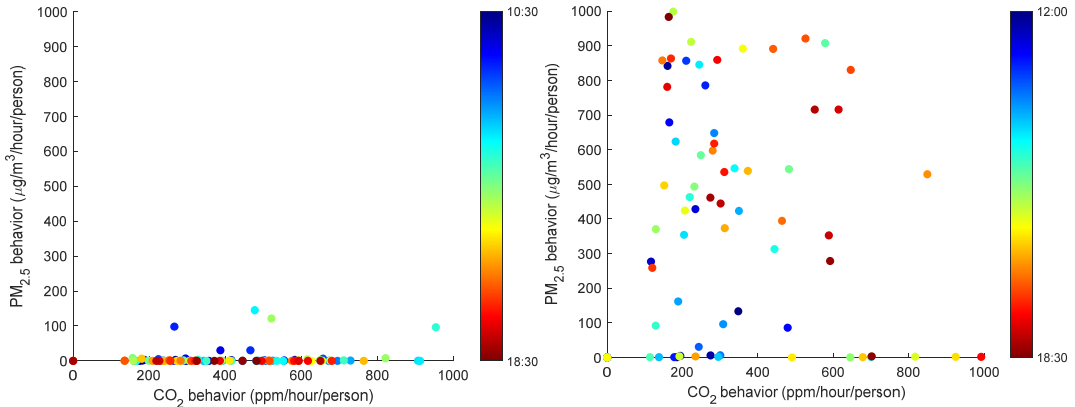


Figure 8 Contaminant-inducing human activity values of CO₂ and PM_{2.5}(A_{CO2}, A_{PM}) in the children playroom and the Taekwondo gym at the same day.

다. 이는 CO2를 많이 배출하는 행동이 높은 PM2.5를
 발생시킬 가능성이 있으며, CO2와 PM2.5 발생 메커
 니즘 사이 밀접한 연관이 있음을 보여준다.

어린이가 활동하는 시간 동안 활동으로 유발되는 재

키즈카페에서보다 미세먼지의 발생량이 높음을 판단할
 수 있다.

그림 9은 태권도장에 비해 키즈카페에서 A_{PM}의 값이
 작으며, I/O ratio가 높은 결과를 보이고 있다. 실내

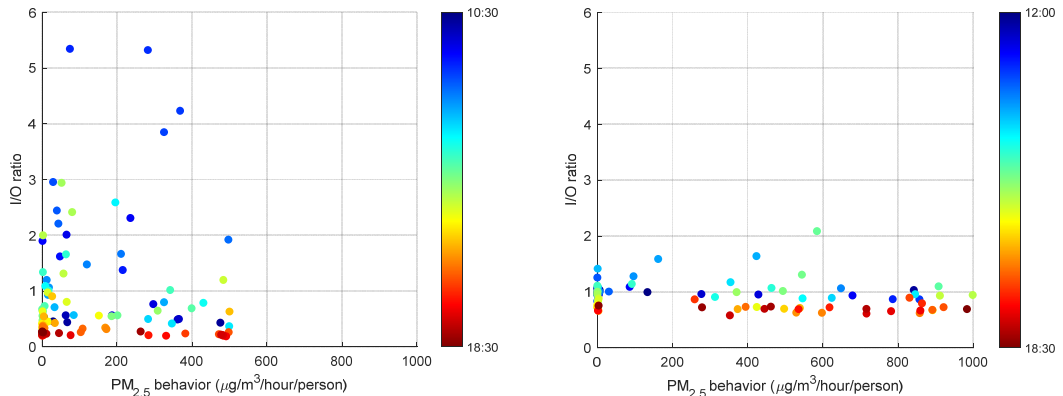


Figure 9 I/O ratio vs APM in the children playroom and Taekwondo gym at the same day.

실자 1명당 오염물질의 발생량(A_{CO2}, A_{PM})은 그림
 8과 같다. 운영되는 일정 정보를 기반으로 해당 시간
 대의 데이터가 선택되었다. 모든 데이터에서 동일하게

공간의 상태나 종류에 따라 미세먼지의 발생량이 적더
 라도 쉽게 실내 농도가 높아질 수 있음을 알 수 있다.
 또한 높은 PM_{2.5}의 발생량에도 I/O ratio가 적은 태권

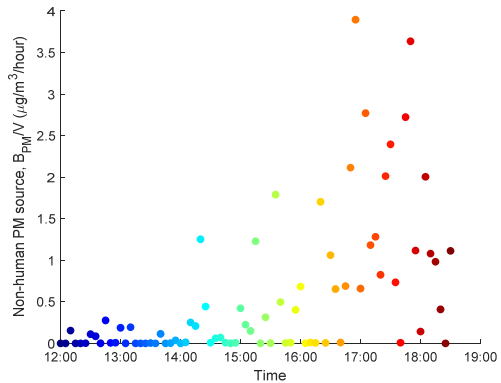
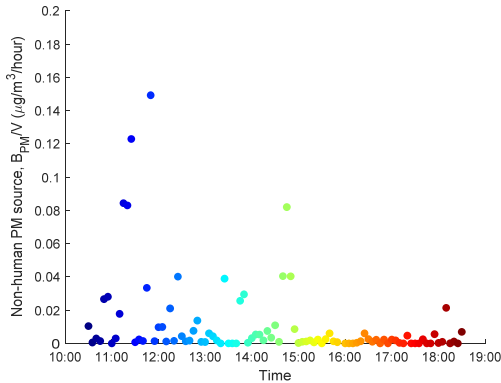


Figure 10 B_{PM}/V and with respect to occupant time in the (a) children playroom and (b) Taekwondo gym at the same day.

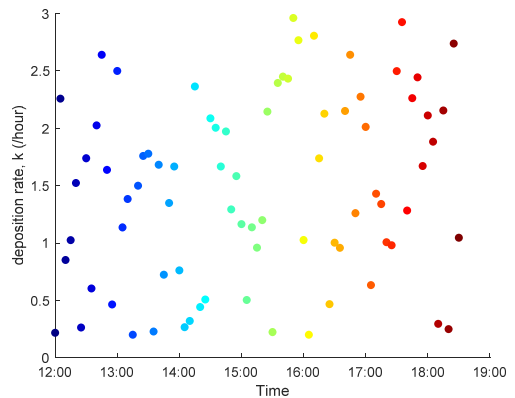
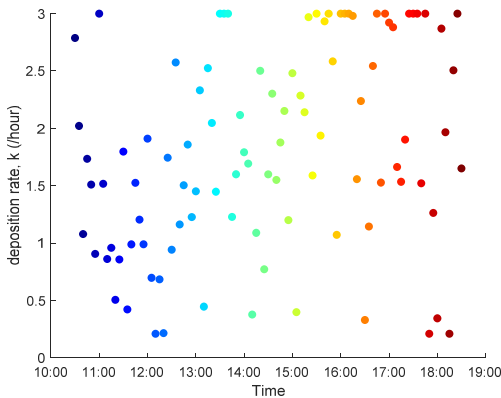


Figure 11 Deposition rate k with respect to occupant time in the (a) children playroom and (b) Taekwondo gym at the same day

도장의 결과는 어느 경로를 통해서든 더 활발하게 환기가 되고 있음을 의미할 수 있다.

실내 공간의 단위 부피당 시간에 따른 비재실자 기반의 미세먼지 발생량을 결과는 그림 10에 나타나 있다. 키즈카페에 비해 태권도장에서의 비재실자로 인한 $PM_{2.5}$ 의 발생량이 훨씬 많음을 알 수 있다. 태권도장 내 살균 및 탈취 자동 분무기에서 발생한 입자로 인한 결과일 수 있으나, 이는 비교 연구를 통해 확인할 필요가 있다. 그림 11은 사람이 재실하는 동안의 침착률을 나타낸다. 침착률의 경우, 시간에 따라 랜덤하게 분포하고 있으며, 시간이나 시설의 종류에 따른 뚜렷한 경향이 없음을 의미한다.

4. 결론

유전 알고리즘을 이용한 회귀분석을 통해 키즈카페와 태권도장 두 곳 어린이 시설의 실내공기질과 영향 요인을 분석하였다. 각 시간 스텝별 재실자의 활동에 따른 $PM_{2.5}$ 의 발생량을 계산할 수 있었다. 키즈카페보다 태권도장에서의 활동에 의한 $PM_{2.5}$ 의 발생량이 더 높은 결과를 보였으며, 이를 통해 활동의 정도와 그에 따른 $PM_{2.5}$ 의 발생량을 통계적으로 분석할 수 있다. 추정된 발생량의 결과를 통해 실내 공간의 제한된 정보만으로도 실내공기질을 예측할 수 있는 가능성을 볼 수 있다.

유전알고리즘의 local minima에 빠질 수 있는 한계를 극복하기 위해서 추정 변수의 범위를 적절하게 조정하는 것이 중요한데, 변수의 범위를 제한하는 방법은 추가적인 정보의 획득(기밀도 측정, 창문, 환기장치, 공기 청정기 등의 운전정보, 재실자 출입 정보, 주변 공기질 정보 등)이 필요하며, 이러한 정보들은 적절한 분석을 통해 품질을 개선할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국기계연구원의 기관연구사업의 지원을 받아 수행되었으며, 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신사업(RIS)(2021RIS-004)과 산업통상자원부의 바이오산업기술개발사업 (20018463) 지원을 받아 수행된 결과입니다.

References

- Argunhan, Z. and Avci, A. S. (2018). Statistical evaluation of indoor air quality parameters in classrooms of a university. *Advances in Meteorology*, 2018. doi: 10.1155/2018/4391579
- Cooper, N., Green, D., Guo, Y., and Vardoulakis, S. (2020). School children's exposure to indoor fine particulate matter. *Environmental Research Letters*, 15(11), 115003. doi: 10.1088/1748-9326/abbaf
- Diapouli, E., Chaloulakou, A., and Koutrakis, P. (2013). Estimating the concentration of indoor particles of outdoor origin: A review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(10), 1113-1129. doi: 10.1080/10962247.2013.791649
- Elbayoumi, M., Ramli, N. A., and Yusof, N. F. F. M. (2015). Development and comparison of regression models and feedforward back-propagation neural network models to predict seasonal indoor PM_{2.5-10} and PM_{2.5} concentrations in naturally ventilated schools. *Atmospheric Pollution Research*, 6(6), 1013-1023. doi: 10.1016/j.apr.2015.09.001
- Guak, S., Kim, K., Yang, W., Won, S., Lee, H., and Lee, K. (2021). Prediction models using outdoor environmental data for real-time PM₁₀ concentrations in daycare centers, kindergartens, and elementary schools. *Building and Environment*, 187, 107371. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107371
- Kampa, M., and Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367. doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.012
- Kim, J., Hong, T., Lee, M., and Jeong, K. (2019). Analyzing the real-time indoor environmental quality factors considering the influence of the building occupants' behaviors and the ventilation. *Building and Environment*, 156, 99-109. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.04.003
- Macarulla, M., Casals, M., Carnevali, M., Forcada, N., and Gangolells, M. (2017). Modelling indoor air carbon dioxide concentration using grey-box models. *Building and Environment*, 117, 146-153. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.02.022
- Persily, A., and Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27, 868-879. doi: 10.1111/ina.12383
- Singh, V., Sokhi, R. S., and Kukkonen, J. (2020). An approach to predict population exposure to ambient air PM_{2.5} concentrations and its dependence on population activity for the

- megacity London. *Environmental pollution*, 257, 113623. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113623
- Tang, C. H., Garshick, E., Grady, S., Coull, B., Schwartz, J., and Koutrakis, P. (2018). Development of a modeling approach to estimate indoor-to-outdoor sulfur ratios and predict indoor PM_{2.5} and black carbon concentrations for Eastern Massachusetts households. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 28(2), 125-130. doi: 10.1038/jes.2017.11
- Um, C. Y., Zhang, N., Kang, K., Na, H., Choi, H., and Kim, T. (2022). Occupant behavior and indoor particulate concentrations in daycare centers. *Science of The Total Environment*, 824, 153206. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153206