한국환경보건학회지, 제43권 제4호(2017)
J Environ Health Sci. 2017; 43(4): 267-272
pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
https://doi.org/10.5668/JEHS.2017.43.4.267

원 저 Original articles

어린이집에서 이산화탄소와 미세먼지의 장기간 시간적인 변이를 활용한 실내환경수준 평가

김윤지*·이세원*·반현경*·차상민**·김근배***·이기영*†
*서울대학교 보건대학원 환경보건학과
**Kweather
***국립환경과학원

Temporal Variation of Indoor Air Quality in Daycare Centers

Yoonjee Kim*, Sewon Lee*, Hyunkyung Ban*, Sangmin Cha, Geunbae Kim***, and Kiyoung Lee*†**
**Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea*
***Kweather, Seoul, Korea*
****National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea*

ABSTRACT

Objectives: The purposes of the study were to analyze the temporal variation of carbon dioxide (CO_2) and particulate matter (PM) in daycare centers and evaluate the appropriateness of the official test method of one-time measurement.

Methods: Indoor air quality in 46 daycare centers in the Seoul Metropolitan Area was measured as specified in the official test method of Indoor Air Quality Management law. In addition, indoor air quality in the 46 daycare centers was measured over 37 days using a real-time monitor (AirGuard K).

Results: The daily means of CO_2 and PM in the 46 daycare centers were 1042.74 ± 134.45 ppm and 67.60 ± 18.25 μg/m^3, respectively. Indoor air quality in the daycare centers showed significant temporal fluctuation. Measurements for single days were significantly different from the 37-day average exposure. Relative error of short term exposure decreased with an increase in the number of sampling days. The noncompliance rate for CO_2 using the official testing method was 2.17%, and none exceeded the PM_{10} standard of 100 μg/m^3. With monitoring over 37 days, the daily noncompliance rate for CO_2 was 50.4% and the daily noncompliance rate for PM was 13.8%.

Conclusions: When the official test method evaluates the indoor air at daycare centers one day per year, the results may not represent actual indoor air quality over a longer period of time. Real-time monitoring devices could be an alternative for managing indoor air quality.

Keywords: Indoor, time variation, real-time data, daycare, particulate matter, carbon dioxide

I. 서 론

어린이집의 실내 환경은 어린이의 건강에 중요한 영향을 미친다. 어린이들은 취약계층 중 한 집단으로 공기 중 오염물질 등의 환경 오염원의 노출에 해로운 영향을 받을 수 있다.[1] 어린이들은 성인보다 활동적이기 때문에 호흡량이 많고 입으로 숨을 쉬는 경우가 많다. 구강 호흡을 하게 되면 코

†**Corresponding author:** 1 Gwanak-ro Gwanak-gu, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul 115-470, Korea, Tel: +82-2-880-2735, Fax: +82-2-762-2888, Email: cleanair@snu.ac.kr
Received: 19 June 2017, Revised: 18 August 2017, Accepted: 19 August 2017

를 통해 오염원이 여과되지 않아 어른들보다 더 많은 오염원을 흡입 할 수 있다.[2-4] 또한, 어린이들은 실내에서 하루 중 65~95%의 시간을 보내기 때문에, 실내 활동 공간에서의 오염물질 노출이 많이 될 것이다.[1]

현재 우리나라에서는 어린이집의 실내공기질을 관리하기 위해 실내공기질 관리법이 제정되어 있다. 이 법은 다중이용시설, 신축되는 공동주택 및 대중교통 차량의 실내공기질을 알맞게 유지하여 국민의 건강을 보호하고 환경상의 위해를 예방함을 목적으로 한다. 대상이 되는 실내환경 중 어린이집은 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설과 같은 집단에 포함이 되고 어린이집의 크기는 연면적 430 제곱 미터 이상인 곳으로 제한되고 있다. 평가항목으로는 미세먼지(PM_{10}), 이산화탄소(CO_2), 폼알데하이드, 총부유세균, 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO_2), 총휘발성유기화합물(Total Volatile Organic Compounds), 라돈, 석면, 오존, 곰팡이, 초미세먼지($PM_{2.5}$) 등 총 12개 항목이 있다. 관리 항목 중 PM_{10}, 이산화탄소, 폼알데하이드, 총부유세균, 일산화탄소는 실내공기질 유지기준이 있어 이를 위반시 개선 명령 및 과태료를 부과하고 있고 이산화질소, 라돈, 총휘발성유기화합물, 석면, 오존, 곰팡이, 미세먼지($PM_{2.5}$)에 대해서는 실내공기질 권고 기준이 있다.[5]

어린이집과 같은 다중이용시설의 정확한 실내공기질의 평가를 위해서 실내공기질관리법이 제정되어 있다. 실내공기질 관리법에서 관리되고 있는 항목 중 이산화탄소와 미세먼지는 대표적인 오염물질로서 이들의 시료 채취는 오전 8시부터 오후 8시 사이인 주간시간대에 해당 시설이 실제 운영하고 있는 조건과 동일한 환경상태(온도, 습도 등)에서 실시한다. 미세먼지의 경우 시료채취 시간은 6시간 이상으로 총 1회 채취하며 7시~9시 또는 18시~20시를 필히 포함하도록 한다. 이산화탄소의 경우는 1시간 이상 채취하며 총 1회 채취하도록 되어 있다. 어린이집의 미세먼지와 이산화탄소의 농도는 일년에 한번 실내공기질관리법에 의거해 측정되고 그 결과를 토대로 실내공기질 관리법에 의해 관리 받고 있다.

일년에 1번 측정을 하여 실내 환경의 질을 평가하는 것은 오염물질의 농도의 시간적인 변이를 고려하면 그 적합성에 한계가 있을 수 있다. 실내환경에서 일부 오염물질의 농도는 일정한 수준을 유지하는 것이 아니라 시간에 따른 변이를 가지고 있다고 보고되고 있다. 폴란드에서 실험을 통해 지속적으로 이산화탄소 농도를 관찰한 결과 농도의 변화에 하루를 주기로 패턴이 있었다.[6] 세르비아의 초등학교에서는 난방을 하는 기간 동안 이산화탄소와 미세먼지의 농도가 난방을 하지 않는 기간에 비해 높았다.[7] 대만의 가정집과 헝가리의 회사 내에서 실내 오염물질의 농도를 측정하였을 때 계절에 따른 변화가 있는 것으로 조사되었다.[8,9] 하지만 어린이들이 아침에 등원한 후 대부분의 낮 시간을 보내는 어린이집에서의 실내 환경의 시간적인 변이에 대한 연구는 제한적이다. 1회 측정으로 평가하는 실내공기질관리법은 실내 오염물질의 시간적 변이를 고려하지 않은 방법으로 실내공기질관리법의 결과가 장기간 어린이집의 실내공기질을 대표할 수 있는 지에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이 연구의 목적은 어린이집의 실내환경을 장기간 측정한 자료를 통해 이산화탄소와 미세먼지의 기간별 변이를 활용하여 일회 측정으로 관리하는 방법이 적절한지를 평가하기 위함이다. 수도권에 위치한 46곳의 어린이집에서 실내공기질관리법으로 이산화탄소와 미세먼지를 평가하고 비슷한 시기의 2달간 연속 측정된 자료와 비교하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 수도권 내 어린이집 46개소를 섭외하여 연속측정장치인 에어가드K (AirGuard K–S, KWeather)를 설치하여 각 어린이집의 실내공기질을 측정하였다. 본 연구에서 사용한 에어가드K-S 모델은 온도, 습도, 미세먼지, 이산화탄소, 휘발성유기화합물, 소음 등 총 6가지 항목을 측정 할 수 있는 기기이다. 에어가드K의 온도 측정은 반도체(Band Gap)를 이용하였고 측정 범위는 -40~125±1.0°C 이다. 습도의 경우는 정전용량(Capacitive Polymer)를 이용해 0~100±4.0%의 범위 안에서 상대습도를 측정하였다. 이산화탄소는 비분산적외선(NDIR) 검출 방식을 이용해 0~10,000±20 ppm 범위에서 측정하였고 미세먼지는 0~500±10 $\mu g/m^3$ 의 범위에서 적외선 광산란 방식을 이용해 측정하였다. 에어가드K-S는 세로 190.83 mm와 가로 81.07 mm이며 무게는 450 g이다. 에어

가드K의 실시간 데이터는 스마트폰 앱 '에어가드K'를 통해 에어가드K 스테이션과 공유기를 와이파이로 연결 후 지정된 서버로 실시간으로 전송된다.

에어가드K의 설치는 2016년 10월 초에 모두 완료되었고 약 두 달간 실시간으로 실내공기질 데이터를 수집하였다. 어린이집 안에서도 어린이들이 활동을 많이 하는 곳인 놀이방에 기기를 설치하였고 주로 어린이들의 손이 닿지 않는 벽면에 설치하였다. 본 연구는 2016년 10월 11일부터 11월 30일까지의 데이터를 사용하였다. 에어가드K의 미세먼지 측정에 대한 정확도를 평가하기 위해 MicroPEM (RTI, USA)와 동일한 날에 같은 시간대에 같은 장소에 기기를 두고 측정을 3일 이상, 3번 반복 실시하여 농도 보정 계수를 구하였다. 에어가드K의 미세먼지 농도는 광산란식 방법을 이용해 측정된 농도로 이는 입자의 크기와 굴절률의 함수로 결정되기 때문에 오차가 생길 수 있다. 수집된 에어가드K의 미세먼지 농도 값에 보정계수 1.5를 적용하여 변환하였다.[10]

섭외한 46곳의 어린이집을 대상으로 2016년 10월 11일에서 11월 7일에 걸쳐 실내공기질관리법[5]에 명시되어 있는 대로 실내공기질을 측정하였다. 실내공기질관리법의 측정은 해당 어린이집이 운영되고 있는 평일 9시부터 18시 사이에 이루어졌고 에어가드K가 데이터를 수집하고 있는 기간 중에 이루어졌다.

어린이집에서의 실내오염원 노출을 정확히 평가하기 위하여 총 51일의 측정 기간 중 어린이집의 운영 시간인 평일 37일의 데이터를 09시부터 18시까지 따로 분류하였다. 정리된 데이터는 측정 일별로 분류하여 일평균을 구하였고 어린이집별로 분류하여 어린이집별 평균 또한 구하였다. 일평균과 어린이집별 평균을 이용하여 실내공기질 유지 기준을 충족하였는지 여부를 판단하였다. 또한, 임의의 *n*날과 37일간의 이산화탄소와 미세먼지의 측정 데이터를 비교하기 위해서 부트스트랩 분석을 수행했다. *n*날의 데이터는 37일간의 실시간 데이터에서 1,000회씩 *n*번을 무작위로 복원 추출한 결과를 사용하였다. 통계 분석은 R studio (R Studio, Boston, MA, USA)를 이용하였고 그래프는 SigmaPlot 10.0 (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA)을 이용하여 그렸다.

III. 결과 및 고찰

실내 오염원의 농도 추이를 보기 위해 어린이집 46곳에서의 이산화탄소와 미세먼지의 농도의 일일평균을 구했다. 37일의 측정 기간 동안 어린이집 46곳에서 이산화탄소와 미세먼지의 일일 평균값은 Fig. 1에 나타내었다. 이산화탄소와 미세먼지 농도의 일평균값의 평균은 각각 1042.7±134.4 ppm과 67.6±18.2 μg/m^3 이었다. 측정 기간인 37일동안 일평균 범위는 이산화탄소의 경우는 771.5 – 1265.6 ppm이었고 미세먼지의 경우는 34.5 – 111.4 μg/m^3 이었다. 이산화탄소의 일평균 농도가 1000 ppm을 넘는 날은 37일 중 56.8%이었고 미세먼지의 경우 일평균 농도가 100 μg/m^{3}을 넘는 날은 37일 중 8.1%, 75 μg/m^{3}을 넘는 날은 32.4%이었다. Fig. 1에 볼 수 있듯이, 37일 동안의 일일 변이는 미세먼지가 이산화탄소보다 더 컸다.

어린이집에서 측정한 37일의 실시간 데이터의 평균을 어린이들이 실제로 실내 오염원에 노출된 '참값'이라는 가정을 하고 37일의 평균과 처음 *n*일의 누적 평균을 사용하여 단기 노출량과 실제 노출량의 차이를 비교하였고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 처음 *n*일의 단기 노출량과 37일 데이터의 평균과의 차이가 매우 큰 것을 확인 할 수 있었다. 이산화탄소의 경우 첫 날과 37일의 평균의 차이가 109.3 ppm으로 9.90%의 차이를 보였고 미세먼지의 경우는 첫날과 37일의 평균 차이가 10.8 μg/m^{3}으로 16.30%의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 샘플링 기간이 늘어날수록 37일 데이터의 평균과의 차이가 작아지는 경향을 보였다. 처음 5일의 평균은 37일의 평균과의 차이가 5% 미만으로 작아졌다.

표본 데이터에서 무작위로 데이터를 반복적으로 뽑는 부트스트랩 방법을 사용하여 임의의 날의 인구평균 노출량과 37일의 측정기간동안의 인구 평균 노출량을 비교하였다. 37일의 평균을 임의의 날의 평균과 비교해보았을 때 랜덤으로 추출된 날들의 평균이 편향되지 않는다는 것을 확인 할 수 있었다. (Fig. 3) 샘플링 기간이 길어질수록 상대 오차가 작아지는 것을 볼 수 있었지만 샘플링 기간이 10일이 되어도 여전히 큰 오차가 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이산화탄소의 상대 오차의 평균과 표준편차는 1일째에는 -0.0083±0.47이었다가 10일째에 0.0018±0.16이

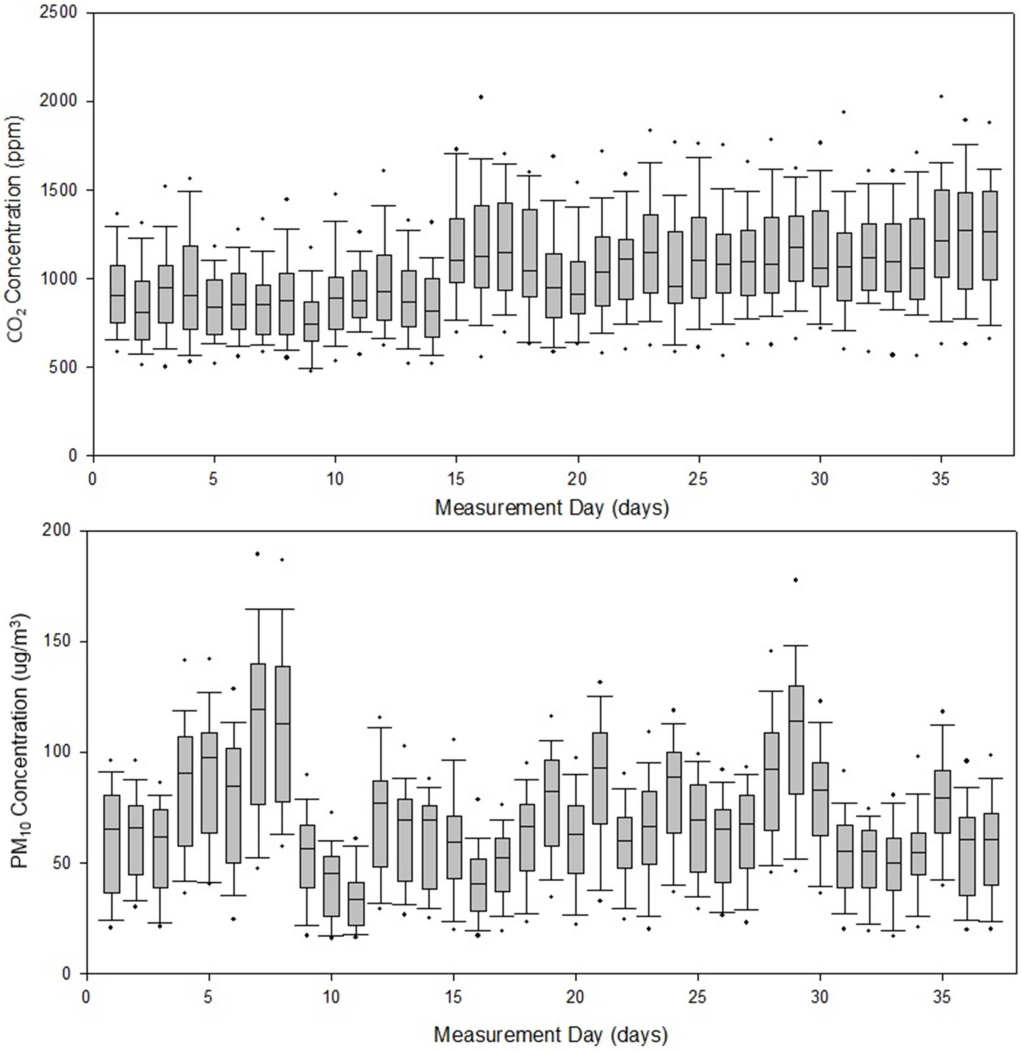

Fig. 1. Daily variation of CO_2 and PM for 37 measurement days from real-time data. Boxes show the 25th, 50th, and 75th percentiles and whiskers indicate the 5th and 95th percentiles. Dots indicate the most extreme values within 1.5 times the interquartile range from each box edge.

되었고 미세먼지의 경우는 1일째에는 -0.0045±0.55에서 10일째에 -0.0086±0.19이 되었다.

일회성의 측정으로 끝나는 실내공기질관리법의 데이터를 37일간의 실시간 데이터와 비교해 보았다. 실내공기질관리법으로 측정한 이산화탄소 농도의 어린이집별 평균과 표준편차는 699.48±150.54 ppm이였고 미세먼지 농도의 어린이집별 평균과 표준편차는 47.33±20.10 μg/m^3 이였다. 온도는 21.77±1.76°C 이었고 습도는 50.77±10.17% 이었다. 실내공기질관리법 결과에 의하면 46개의 어린이집중에서 실내공기질 유지 기준인 이산화탄소 농도 1000 ppm을 초과하는 어린이집은 1곳만 있었고 1500 ppm을 넘는 곳은 없었다. 미세먼지(PM_{10})의 평균 농도가 100 μg/m^{3}을 넘는 곳은 단 한 곳도 없었으나 75 μg/m^3 를 넘는 곳은 4 곳, 50 μg/m^3 을 넘는 경우는 22곳이 있었다.

실내공기질관리법을 이용한 1회의 측정 결과로 보면 46개의 어린이집이 매우 양호한 실내공기질을 가

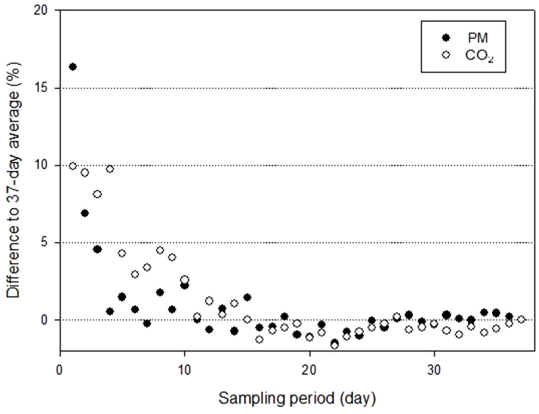

Fig. 2. Association between sampling period and difference of the exposure amount during limited period and 37-days.

지고 있는 것으로 보였으나 장기간 측정된 에어가드K의 데이터를 살펴보았을 때는 결과가 다르게 나왔다. 46개소 어린이집에서 이산화탄소와 미세먼지를 측정한 일 수는 34.7±5.1일 이었다. 46개소 어린이집 중 운영시간 동안의 이산화탄소 평균 농도가 1000 ppm을 초과하는 확률은 50.4±9.2%이었고 1500 ppm을 초과하는 확률은 19.4±7.2%으로 실내공기질관리법의 결과와는 큰 차이를 보였다. 미세먼지의 경우 일일 평균이 100 μg/m^3 을 초과하는 확률은 측정일수의 13.8 ±19.8%이었고 75 μg/m^{3}을 초과하는 확률은 36.0 ±25.6% 이었고, 50 μg/m^3 을 초과하는 확률은 70.5 ±16.7%이있었다. (Table 1)

실시간 데이터로 확인한 결과, 어린이집의 이산화탄소 농도는 실내공기질관리법으로 측정해서 나온 결과보다 더 많은 어린이집들이 기준을 넘는 것으로 나왔다. 이렇게 나온 데는 여러가지 원인이 있을 수 있지만 우선 측정 시간의 차이가 제일 큰 원인이라고 할 수 있다. 실내공기질관리법에 의하면 이산화탄소 농도는 어린이집의 운영시간 중 1시간 이상 측정하는 것으로 나와있다. 앞서 나온 결과에서 알 수 있듯이, 실내 오염원의 농도는 시간에 따른 변이가 있다. 에어가드K가 어린이집 운영 시간인 9시부터 18시까지의 이산화탄소 농도를 모두 기록하여 총 9시간 동안의 농도를 평균을 낸 것에 비하여 실내공기질관리법은 최소 1시간의 측정이기에 시간에 따른 변이가 고려되지 않은 결과라고 할 수 있다.

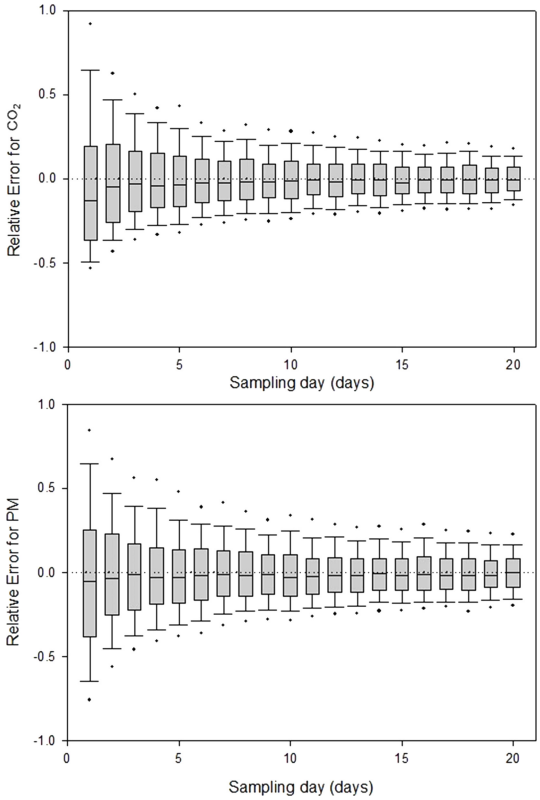

Fig. 3. Relative Error estimates for mean CO_2 and PM by number of days sampled, compared to the mean value of 37-days measurements calculated from the real-time data. Boxes show the 25th, 50th, and 75th percentiles and whiskers indicate the 5th and 95th percentiles. Dots indicate the most extreme values within 1.5 times the interquartile range from each box edge.

Table 1. Percentage of daycare center (n=46) exceeding given criteria

	CO_2		PM*		
	>1000 ppm	>1500 ppm	>50 μg/m^3	>75 μg/m^3	> 100 μg/m^3
One day	2.2%	0%	47.8%	8.7%	0%
37 days	50.4±9.2%	19.4±7.2%	70.5±16.7%	36.0±25.6%	13.8±19.8%

IV. 결 론

본 연구는 수도권 내 어린이집 46곳에서 실내공기질의 수준을 측정하였다. 37일의 측정 기간 동안 어린이집의 실내공기질은 시간에 따른 변이를 보였다. 실내공기질관리법으로 측정한 경우 이산화탄소의 기준 초과율은 2.17% 인 반면 장기간 연속 측정한 이산화탄소의 일일 평균 농도의 실내공기질 기준인 1000 ppm을 초과하는 확률은 50.4% 였다. 미세먼지는 실내공기질관리법으로 측정한 경우 실내공기질 기준인 100 μg/m^3 을 초과하는 곳이 단 한 곳도 없었고 장기간 동안 연속 측정했을 때 초과 확률은 13.8%로 실내공기질관리법의 결과와 차이가 있었다. 1년에 한번 측정하는 실내공기질관리법으로 장기간의 실제 실내공기질을 대변하는 것은 적합성에 한계가 있다. 실시간 측정 기기로 연속 측정하여 실내공기질을 관리하는 것이 다른 방법 일 수 있다.

References

1. Annesi-Maesano I, Baiz N, Banerjee S, Rudnai P, Rive S, Sinphonie Group. Indoor air quality and sources in schools and related health effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2013; 16(8): 491-550.
2. Burtscher H, Schüepp K. The occurrence of ultrafine particles in the specific environment of children. *Paediatric Respiratory Reviews.* 2012; 13: 89-94.
3. Bateson TF, Schwartz J. Children's response to air pollutants. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A.* 2007; 71(3): 238-243.
4. Ferng SF, Li-Wen L. Indoor air quality assessment of daycare facilities with carbon dioxide, temperature, and humidity as indicators. *Journal of Environmental Health.* 2002; 65(4): 14.
5. Ministry of Environment, Indoor Air Quality Control In Public Use Facilities, etc. Act No.12216
6. Szczurek A, Maciejewska M, Połoczański R, Teuerle M, Wyłomańska A. Dynamics of carbon dioxide concentration in indoor air. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.* 2015; 29(8): 2193-2199.
7. Lazović I, Jovašević-Stojanović M, Živković M, Tasić V, Stevanović Ž. PM and CO_2 variability and relationship in the different school environments. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly.* 2015; 21(1-2): 179-187.
8. Hung IF, Yu CC, Tung CJ, Yang YC, Chou KD. Indoor radon concentrations in Taiwanese homes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A.* 1994; 29(9): 1859-1870.
9. Szigeti T, Dunster C, Cattaneo A, Spinazzè A, Mandin C, Le Ponner E, et al. Spatial and temporal variation of particulate matter characteristics within office buildings—The OFFICAIR study. *Science of The Total Environment.* 2017; 587: 59-67.
10. National Institute of Environmental Research. (2016). *Environmental health monitoring service in built environments of susceptible population*. Seoul: Korean Society of Environmental Health.