



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

영·유아의 활동에 의한 보육실  
미세먼지 발생 평가

Estimation of Particle Generation by Infant's  
Activities in a Child-care Room

2016 년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

박 성 준

영·유아의 활동에 의한 보육실  
미세먼지 발생 평가

Estimation of Particle Generation by Infant's  
Activities in a Child-care Room

지도교수 김 광 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2016년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

박 성 준

박성준의 공학석사 학위논문을 인준함

2016년 2월

위원장	인
부위원장	인
위원	인

## 국문 초록

미세먼지는 황사, 도시의 고밀화 등으로 인해 최근 관심이 높아지는 오염물질로써, 미세먼지에 장시간 노출될 경우 호흡기와 심혈관계 질환이 발생 수 있으며 심하면 사망에 까지 다다를 수 있다. 미세먼지는 발생원이 실내와 실외에 모두 존재하기 때문에, 이와 같은 미세먼지의 발생 특성이 고려된 관리 방안이 수립되어야 한다.

본 연구의 대상공간인 보육시설의 경우 면역력이 매우 약한 영·유아가 장시간 생활하는 공간이기 때문에 실내 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안 도입이 필수적이다. 그러나 대부분의 보육시설의 경우 예산이 부족 등으로 인해 관리방안 적용에 한계가 있으므로 미세먼지 저감을 위해 보육시설에 적합한 가장 효율적인 관리방안에 대한 평가 이루어져야 한다.

관리 방안의 농도 저감 효과 평가를 위해 시뮬레이션 또는 농도 예측 모델이 활용되는데, 실내 미세먼지 농도 예측 시 다양한 인자들의 값이 요구되며, 재실 상태에서의 농도 저감 효과를 평가해야하므로 먼저 재실자로 인한 실내 미세먼지 발생률이 반드시 평가가 선행되어야 한다. 특히 보육시설의 경우 실내 주요 발생원이 영·유아의 활동이기 때문에 이로 인한 미세먼지 발생률의 수치에 대한 데이터가 반드시 요구된다.

본 연구에서는 첫 번째로 영·유아에 활동에 의한 미세먼지의 발생이 입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였고, 두 번째로 보육실 미세먼지 발생 특성 분석 및 보육실내 미세먼지 발생률을 입경별 개수 농도로 정량화 하여, 미세먼지 농도 예측에 활용 가능한 보육실 미세먼지 발생률 데이터를 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 먼저, 보육실의 실내 환경 특성 파악 및 미세먼지 농도 변화 특성 파

악을 위해 실제 보육이 이루어지고 있는 만3세반 보육실을 대상으로 실내 환경 관찰 및 기록과 실내·외 미세먼지의 입경별 개수 농도를 측정하였다. 관찰 내용을 분석한 결과 보육실 주요 미세먼지 발생원은 영·유아의 활동으로 판단되었다. 또한 재실과 비재실로 나누어 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계, 재실 유무에 따른 I/O ratio, 그리고 실내 발생원과 실내 농도의 양의 상관관계를 분석 결과, 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지는 실내 발생원의 유무에 상관없이 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인하였고 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 재실여부 즉, 영·유아의 활동 여부가 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 입경의 미세먼지의 농도에 영향을 크게 미친다는 것을 확인하였다.

(2) 활동 내용, 재실 인원수, 실내표면에 침착된 미세먼지의 양과 미세먼지 발생의 상관관계 분석 내용을 바탕으로 활동 내용에 따라 영·유아 1인당 미세먼지 발생률을 입경별로 개수 농도로 산출하였으며, 산출 결과의 중앙값은 미세먼지의 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 10 $\mu$ m 별로 교육 시 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동 시 8856/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리 시 29686/h, 32486/h, 12311/h이다. 발생률 산출 결과를 이용한 예측 농도를 측정 농도와 비교하여 결과 값의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 결과는 보육실 미세먼지 농도 예측 시 실내 미세먼지 발생률 데이터로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

**주요어** : 보육시설, 실내공기질, 미세먼지, 실내 미세먼지 발생

**학 번** : 2014-20510

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구의 범위 및 방법 .....	4
제 2 장 미세먼지 발생 평가를 위한 예비적 고찰 .....	8
2.1 미세먼지의 특성 .....	8
2.1.1 미세먼지의 구성과 입경 .....	8
2.1.2 미세먼지의 인체 위해도 .....	11
2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자 고찰 .....	15
2.2.1 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘 .....	15
2.2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자 .....	17
2.3 미세먼지 발생 평가관련 기존연구 고찰 .....	26
2.4 소결 .....	32
제 3 장 영·유아 활동에 의한 미세먼지 발생이 입경별 농도에 미치는 영향 분석 .....	34
3.1 개요 .....	34
3.2 보육실의 실내·외 미세먼지 입경별 농도 측정 .....	34
3.2.1 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요 .....	34
3.2.2 영·유아의 일과 활동 관찰 .....	37
3.2.3 실내·외 미세먼지 입경별 농도 측정 .....	37
3.3 재실조건이 실내 미세먼지 입경별 농도에 미치는 영향 분석 .....	39
3.3.1 분석 방법 .....	39
3.3.2 일과 활동에 따른 미세먼지 입경별 농도 특성 .....	40
3.3.3 재실 및 비재실시 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계 .....	40
3.3.4 재실 및 비재실시 I/O Ratio 비교 .....	45

3.3.5	실내 미세먼지 농도와 실내 CO <sub>2</sub> 농도의 상관관계	46
3.4	소결	49
제 4 장	보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수 산출	51
4.1	개요	51
4.2	보육실의 침기율 산출	51
4.3	침착률 및 침투 계수 산출	56
4.3.1	침착률 및 침투 계수 산출 방법 고찰	56
4.3.2	침착률 및 침투 계수 산출 결과	58
4.4	소결	66
제 5 장	보육실 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률	67
5.1	개요	67
5.2	보육실 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계 분석	67
5.2.1	영·유아의 활동 내용 및 재실 인원수	68
5.2.2	실내표면에 침착된 미세먼지의 양	72
5.3	영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출	74
5.3.1	미세먼지 발생률 산출 모델	74
5.3.2	영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 및 고찰	77
5.4	소결	87
제 6 장	결론	89
	참고 문헌	93
	ABSTRACT	98

## 표 목차

<표 3.1> 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요 .....	36
<표 3.2> 측정 개요 .....	38
<표 4.1> Effective Air Leakage Area 산출 결과 .....	52
<표 4.2> 침기율 산출 결과 .....	55
<표 4.3> 미세먼지의 입경별 침착률(k) 및 침투 계수(P) 산출 결과 .....	62
<표 4.4> Friction Velocity 산출 결과 .....	65
<표 5.1> 비교 대상 Case 선정 .....	73
<표 5.2> 미세먼지 발생률 산출 결과 (3 $\mu$ m) .....	79
<표 5.3> 미세먼지 발생률 산출 결과 (5 $\mu$ m) .....	80
<표 5.4> 미세먼지 발생률 산출 결과 (10 $\mu$ m) .....	81
<표 5.5> 1인당 미세먼지 발생률 산출 결과 .....	82



## 그림 목차

[그림 1.1] 연구 흐름도 .....	7
[그림 2.1] 실내 환경에 존재하는 미세먼지의 다양한 입자 크기와 범위 .....	10
[그림 2.2] 미세먼지의 입경별 분류 .....	11
[그림 2.3] 코, 기관지, 폐에 대한 미세먼지의 입경별 상대적인 침착률 .....	13
[그림 2.4] 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘 .....	15
[그림 2.5] 침기율의 로그 분포 .....	18
[그림 2.6] 지역에 따른 미세먼지의 입경별 점유율 .....	19
[그림 2.7] 건물 외피를 통한 미세먼지의 침투 과정 .....	20
[그림 2.8] 다수의 연구자들의 입경별 침투 계수 산출 결과 .....	21
[그림 2.9] 실내 미세먼지의 입경별 발생원 .....	24
[그림 2.10] 미세먼지의 입경별 침착률 .....	25
[그림 3.1] 측정 대상 보육시설의 주변 환경 및 평면도 .....	35
[그림 3.2] 측정기간 동안의 I/O Ratio .....	42
[그림 3.3] 비재실 시 실내와 실외 미세먼지 개수 농도의 상관관계 .....	43
[그림 3.4] 재실 시 실내와 실외 미세먼지 개수 농도의 상관관계 .....	44
[그림 3.5] 비재실과 재실 시 I/O Ratio .....	45
[그림 3.6] 실내 미세먼지 개수 농도와 실내 CO <sub>2</sub> 농도의 상관관계 .....	48
[그림 4.1] 대상 보육실의 Blower door test .....	53
[그림 4.2] 침착률 및 침투 계수 산출 구간 (11/27) .....	59
[그림 4.3] 침착률 및 침투 계수 산출 구간 (11/30) .....	60
[그림 4.4] 침착률 및 침투 계수 산출 구간 (12/1) .....	61
[그림 4.5] 실내 측정 농도와 산출한 침기율, 침착률, 침투 계수를 이용한 예측 농도의 비교 .....	63
[그림 5.1] 활동 내용에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도 .....	70
[그림 5.2] 재실 인원수에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도 .....	71

[그림 5.3] 바닥 청소 여부에 따른 실내 미세먼지 농도 .....	73
[그림 5.4] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도 비교(11/20) .....	84
[그림 5.5] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도 비교(12/1) .....	85
[그림 5.6] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도의 상관관계 .....	86

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

건물의 기밀성능이 향상되어 환기량이 감소하고, 재실자의 실내거주 시간이 증가함에 따라 실내공기질에 대한 관심도 또한 높아지고 있다. 실내공기질의 악화는 재실자의 작업 효율을 저하시키고 건강에 악영향을 미치므로 실내공기질을 쾌적하게 유지 및 관리할 필요가 있다. 대부분의 실내 공기 오염물질의 발생원은 실내에 존재하기 때문에 환기를 통해 공기 중 오염물질을 외부로 배출하여 농도를 효과적으로 저감할 수 있다. 그러나 발생원이 실내와 실외에 모두 존재하는 오염물질의 경우 환기를 하면 오히려 오염물질이 실내로 유입될 수 있고, 밀폐 시 실내 발생으로 인해 실내 오염물질 농도가 증가할 수 있다. 따라서 이러한 오염물질의 경우 실내에서 발생하는 오염물질을 배출 또는 제거하거나 외기를 실내로 유입할 때 외기에 포함된 오염물질을 제거하는 등 오염물질의 특성을 고려한 관리방안을 도입할 필요가 있다.

최근 공기 오염물질 중 하나인 미세먼지가 이슈화되고 있다. 미세먼지는 입경 0.005~500 $\mu\text{m}$ 의 공기 중에 부유하는 작은 입자를 의미하는데<sup>1)</sup>, 중금속 등 인체에 유해한 성분으로 구성되어 있어 인체가 미세먼지에 장시간 노출될 경우 호흡기 및 심혈관 질환이 발생할 수 있고 심하면 사망에까지 다다를 수 있다.<sup>2)3)</sup> 또한 최근 연구에서 미세먼지의 입경별 개수 농도가 질량 농도 보다 인체의 위해성 평가에 더 적합하다는 연구결과를

---

1) 차동원 (2007). 실내공기오염. 기문당, 81.

2) US EPA (1996). Air quality criteria for particulate matter. 1, Washington, DC.

3) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association, 287(9), 1132-1141.

통해 입경별 개수 농도에 대한 측정에 대한 필요성이 대두되고 있다.<sup>4)5)</sup>

대기 중 미세먼지 농도 저감을 위한 다양한 정책이 실행되어 왔으나 한국의 지리적 특성상 중국발 황사의 영향을 피할 수 없고, 공업화 및 도시 고밀화로 인한 교통량 증가 등으로 인해 미세먼지 오염은 더욱 심각해지고 있다. 또한 미세먼지는 흡연, 조리, 연소, 재실자의 활동 등으로 인해 실내에서 발생하거나 실외에서 발생한 미세먼지가 실내로 유입되어 실내 농도를 형성하며 입경에 따라 거동특성이 다르기 때문에<sup>6)</sup> 앞서 언급한 바와 같이 관리방안 수립을 위해 미세먼지의 입경별 발생 특성에 대한 분석이 반드시 필요하다.

보육시설의 경우 면역체계가 불완전하고<sup>7)</sup>, 체중 당 호흡량이 성인의 약 2.5배로<sup>8)</sup> 성인보다 공기 오염물질 노출에 더 취약한 영유아가 생활하는 공간이다. 영·유아는 하루 약 8시간을 보육시설에서 생활하기 때문에<sup>9)</sup> 장시간 오염물질에 노출될 수 있고, 이는 발달 단계인 영·유아의 건강에 매우 치명적일 수 있으므로 영·유아의 주요 활동 공간인 보육실 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안 도입은 필수이다. 그러나 보육시설의 예산 부족 등으로 관리방안 선택에 제약이 있다는 점을 고려할 때 효과적인 관리방안 선택을 위해 보육실을 대상으로 실내 미세먼지 농도 특성

---

4) Penttinen, P., Timonen, K. L., Tiittanen, P., Mirme, A., Ruuskanen, J., Pekkanen, J. (2001). Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *European Respiratory Journal*, 17(3), 428-435.

5) Stephenson, D., Seshadri, G., Veranth, J. M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHA Journal*, 64(4), 516-521.

6) Thatcher, T. L., Layton, D. W. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13), 1487-1497.

7) Salvi, S. (2007). Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, 8, 275-280.

8) Graham, L. M. (2004). All I need is the air that I breath: Outdoor air quality and asthma. *Paediatric Respiratory Reviews*, 5, 59-64.

9) 이경미, 이기숙 (2009). 유아의 성과 연령에 따른 유아교육기관에서의 하루일과. *교육과학연구*, 40(3), 171-193.

에 대한 분석이 이루어져야 한다.

관리방안 도입에 따른 실내 미세먼지 농도 저감 효과를 분석하기 위해 특정 관리방안을 도입 후 미세먼지 농도 측정을 통해 그 효과를 검증할 수 있으나, 안전과 예산의 문제로 실제 영·유아 생활하고 있는 보육실을 대상으로 관리방안의 저감 효과를 검증하는데 한계가 있다. 따라서 시뮬레이션 또는 예측 모델 등을 통해 실내 미세먼지 농도를 예측하여 관리방안의 효과를 검증할 필요가 있다.

다수의 연구자들이 실내 미세먼지 농도를 예측하거나 이를 바탕으로 관리방안의 저감 효과를 분석하였으나, 대부분 오피스나 일반 주거 건물과 같이 성인 위주의 공간 및 성인의 활동에 의한 미세먼지 발생을 대상으로 하였다. 그러나 보육실을 대상으로 농도를 예측 및 관리방안의 효과 검증을 위해 반드시 보육실의 미세먼지 발생 특성이 고려된 실내 미세먼지 발생률 데이터가 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 첫 번째로 영·유아의 활동에 의한 미세먼지의 발생이 입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였고, 두 번째로 보육실 미세먼지 발생 특성 분석 및 보육실내 미세먼지 발생률을 입경별 개수 농도로 정량화 하여, 보육실 미세먼지 관리 및 보육실 미세먼지 농도 예측에 활용 가능한 자료를 제공하고자 한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 목적을 달성하기 위해 먼저 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 실내 미세먼지 농도 영향인자를 도출하고 영향인자들의 특성을 고찰하였다. 또한 실내 미세먼지 발생 평가에 관련된 기존연구를 통해 미세먼지 발생률 산출 이론 및 분석 방법에 대해 고찰하였다.

보육실 환경 특성에 따라 실내 미세먼지 발생 특성 또한 달라질 수 있기 때문에 미세먼지 발생 평가에 앞서 보육실 미세먼지 발생 특성을 파악하였다. 또한 일과 활동이 이루어지고 있는 보육실을 대상으로 실내·외 미세먼지 입경별 농도를 측정하여 분석에 필요한 데이터를 확보하였다. 이를 바탕으로 보육실 미세먼지 발생 특성에 영향을 받는 입경이 무엇인지 파악하였으며, 보육실 미세먼지 발생 평가에 활용하였다.

미세먼지 발생 평가를 위한 발생률 산출을 위해 대상 보육실의 침기율, 침착률 및 침투 계수가 산출되어야 한다. 침기율, 침착률 및 침투 계수는 실내 미세먼지 농도 형성에 영향을 미치는 영향인자로 실내 발생률 산출을 위해 반드시 필요한 계수이며, 측정 데이터를 및 기존 연구들의 산출 방법을 고찰하여 해당 인자들을 산출하였다.

마지막으로 위에서 측정 및 산출한 결과와 발생률에 영향을 미치는 영향인자들과의 상관관계 분석 결과를 바탕으로 보육실 미세먼지 발생률을 산출하였다. 또한 산출 결과를 이용하여 예측한 실내 농도와 측정한 실내 농도를 비교하여 산출 결과의 타당성을 검증하였다.

본 연구의 범위 및 방법을 연구 진행 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

### **(1) 미세먼지 발생 평가를 위한 예비적 고찰**

미세먼지의 기본적 구성과 입경별 특성 그리고 인체에 대한 위해성을 고찰함으로써, 미세먼지의 저감의 및 입경별 분석의 필요성에 대해 확인하였다. 실내 미세먼지 발생 평가를 위해 먼저 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 실내 미세먼지 농도 영향인자를 확인하고, 기존연구를 통해 영향인자의 개념 및 특성에 대해 고찰하였다. 또한 미세먼지 발생 평가에 관련된 기존연구를 통해 발생률 산출 방법 및 이론을 고찰하였다.

### **(2) 영·유아 활동에 의한 미세먼지 발생이 입경별 농도에 미치는 영향 분석**

보육실의 환경 특성을 파악하여 미세먼지 발생 특성을 분석하기 위해 실제 보육이 이루어지는 보육실을 대상으로 실내·외 미세먼지 입경별 농도를 측정하였다. 보육실 미세먼지 발생 특성이 입경별 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 재실과 비재실로 나누어 실내외 농도의 상관관계, I/O ratio 비교, 재실 시 실내 미세먼지 농도와 CO<sub>2</sub> 농도와의 상관관계를 분석하였다.

### **(3) 보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수 산출**

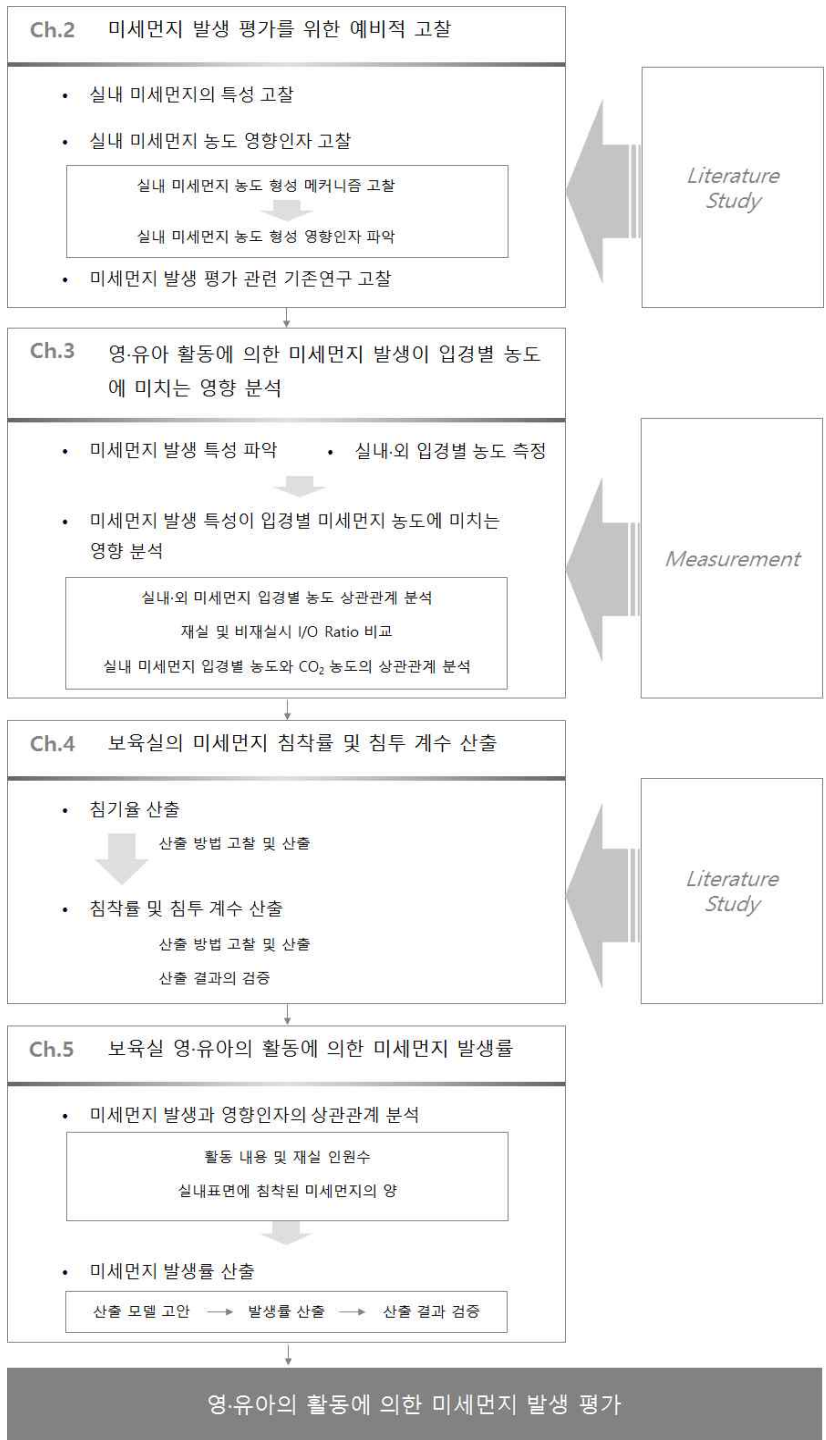
실내 미세먼지 발생 평가를 위해, 미세먼지 농도 형성 영향인자인 침기율, 침착률 및 침투 계수에 대한 평가가 선행되어야 하며 이를 위해 기존연구의 침착률 및 침투 계수 산출 방법을 이용하여 해당 인자들의 값을 산출하였다. 산출 값의 타당성 검증을 위해 측정 실내 농도와 산출 값을 이용하여 예측한 실내 농도를 비교하였다.

#### (4) 보육실 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률

영·유아의 활동 내용, 재실 인원수, 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양에 따라 실내 미세먼지 발생률 역시 달라지므로 이러한 영향인자와 발생률과의 상관관계를 분석하였고 발생률 산출 결과에 참고하였다. 미세먼지 발생률 산출을 위해 먼저 발생률 산출 모델을 고안하였다. 산출 모델은 Mass Balance Equation의 해를 이용하였으며, 이를 이용하여 활동 내용에 따른 영·유아 1명당 미세먼지 발생률을 산출하였다. 산출 결과의 타당성 검증을 위해 산출 결과를 이용한 예측 농도와 측정된 농도 상관관계를 분석하였다.

본 연구의 진행을 연구 흐름도로 나타내면 다음 [그림 1.1]과 같다.





## 제 2 장 미세먼지 발생 평가를 위한 예비적 고찰

본 장에서는 미세먼지 발생률 평가를 위한 예비적 고찰로서 본 연구의 대상 오염물질인 미세먼지의 개념 및 특성, 그리고 건강에 대한 위해성을 살펴보고자 한다. 미세먼지 발생 평가를 위해 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 농도 형성에 영향을 미치는 인자를 파악하고 해당 인자들의 특성을 기존연구를 통해 고찰하고자 한다. 또한 기존연구의 실내 미세먼지 발생률 산출 이론 및 조건을 고찰하여 본 연구에서의 활용성에 대해 검토하고자 한다.

### 2.2 미세먼지의 특성

#### 2.2.1 미세먼지의 구성과 입경

미세먼지는 공기 중에 존재하는  $0.005\sim 500\mu\text{m}^{10)}$  크기의 액체 또는 고체상 물질을 뜻한다. 이때 입경이 크거나 밀도가 높은 미세먼지는 무게가 무거워 공기 중에 부유하는 시간이 짧고, 입경이 작거나 밀도가 낮은 미세먼지는 좀처럼 가라앉지 않고 공기 중에 장시간 부유하게 된다. 이처럼 부유하고 있는 공기 중의 미세먼지를 에어로졸 또는 분진이라고도 하며, 모두 미세먼지를 총칭한다.<sup>11)</sup>

미세먼지는 다양한 발생원이 존재하고 발생원에 따라 그 구성이 다르다. 모래먼지, 흙과 같이 자연적으로 발생하는 미세먼지의 경우 무기질 성분을 많이 함유하고 있는 반면 화석연료의 연소나 자동차 등의 배출가

---

10) 차동원, op. cit., 81

11) 박영욱 (2002). 실내 생활공간에서의 미세먼지 오염 특성 및 제어기술, 한국생활환경학회지, 9(2), 122-128.

스 등과 같이 인위적으로 발생한 미세먼지의 경우 연료, 황화합물, 무기질, 유기탄소, 그리고 중금속 등을 포함하고 있다. 또한 미세먼지는 불완전연소로 인한 대기 중 1차 가스상 오염물질의 화학적 반응, 고온 응축과정을 통해 발생되기도 하며 황화합물, 질산화물, 유기탄소 등을 포함하고 있다.<sup>12)</sup>

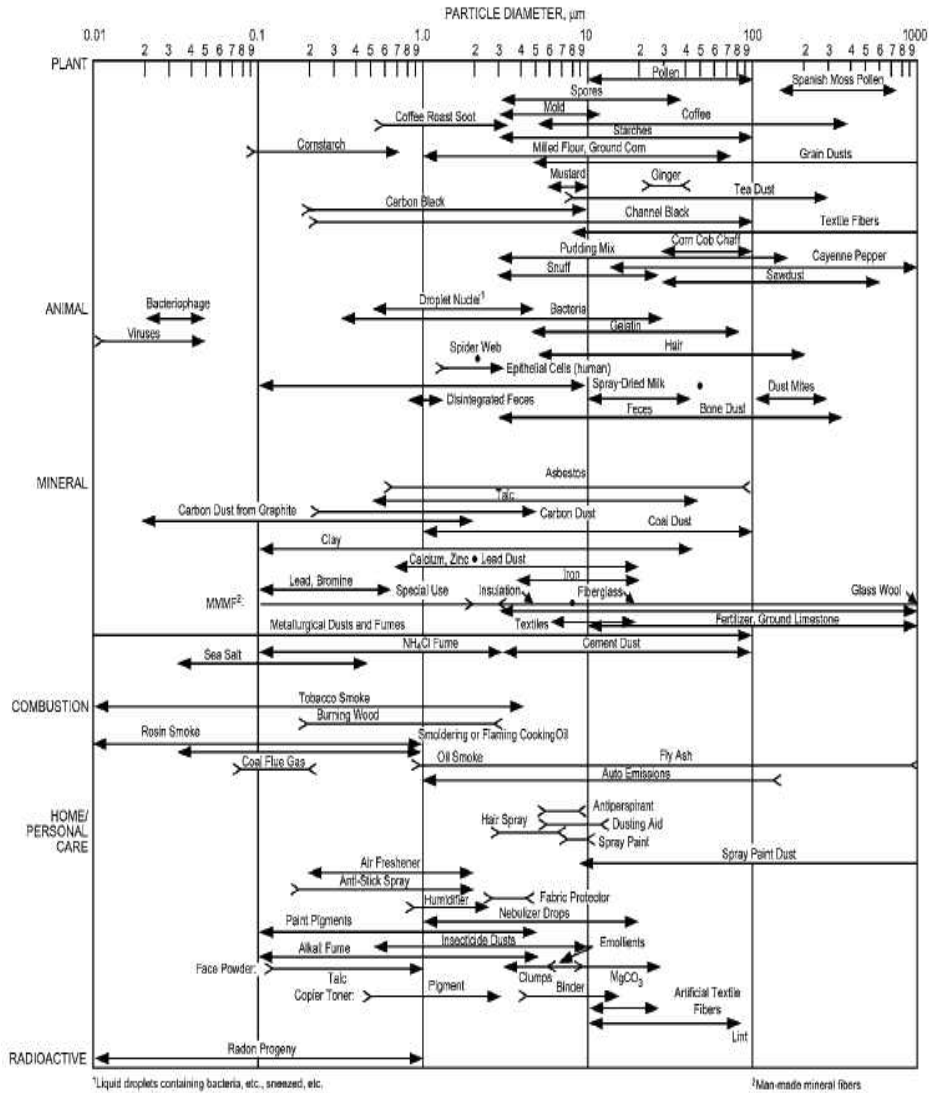
이렇게 다양한 발생원에 의해 생성되는 미세먼지는 다양한 입경으로 구성되어 있고 [그림 2.1]은 실내 환경에 존재하는 미세먼지의 다양한 입자 크기와 범위를 나타낸다. 학술적으로 입경 2.5 $\mu\text{m}$  이상의 미세먼지를 Coarse Particle, 입경 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 Fine Particle<sup>13)</sup>, 입경 0.1 $\mu\text{m}$  이하를 Ultra Fine Particle이라 분류하며 이를 도식화하면 [그림 2.2]와 같다. 통상적으로 미세먼지를 입경 10 $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 PM10, 입경 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 PM2.5라 칭한다. 그러나 기존의 PM10과 PM2.5으로 미세먼지에 대한 분석을 진행할 경우 미세먼지의 입경별 특성을 반영하는데 한계가 있다. 입경의 크기가 입자들의 성질과 이동, 제어기술에 영향을 미치기 때문에 입경에 따라 그 특성이 달라지므로<sup>14)</sup>, 미세먼지를 분석함에 있어 반드시 입경의 크기를 고려해야 한다.

---

12) 강공인, 김신도, 이정실, 최경순, 실내공기질관리학, 문운당, 66-67.

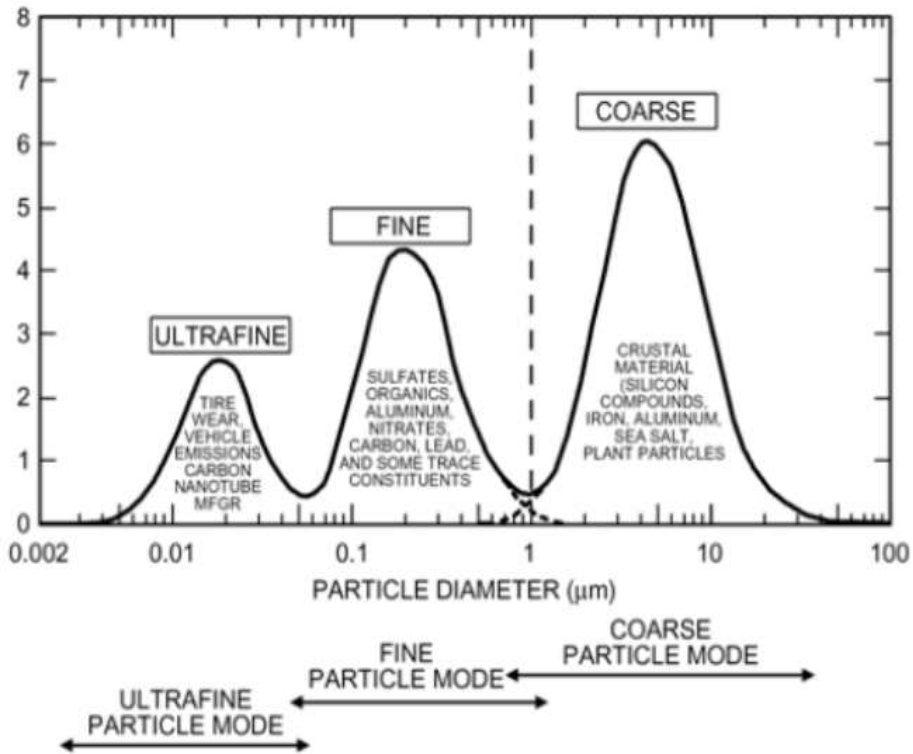
13) Whitby K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols, Atmospheric Environment, 12, 135-150.

14) Zhang, Y., 실내공기질, 동화기술, 14.



[그림 2.1] 실내 환경에 존재하는 미세먼지의 다양한 입자 크기와 범위<sup>15)</sup>

15) ASHRAE HANDBOOK (2013). fundamentals. 11.4.



[그림 2.2] 미세먼지의 입경별 분류<sup>16)</sup>

### 2.1.2 미세먼지의 인체 위해도

공기 중에 부유하고 있는 미세먼지는 호흡 등을 통해 인체로 유입되게 되는데, 앞서 서술한 바와 같이 미세먼지는 인체에 유해한 성분으로 구성되어 있으므로 인체로 유입될 경우 천식과 같은 알레르기 반응부터 장시간 노출로 인해 호흡기 및 심혈관 질환이 발생할 수 있고, 심하면 사망에 까지 다다를 수 있다.<sup>17)18)</sup> 중국과 같이 대기 중 미세먼지 농도가 매우 높은 나라의 경우 미세먼지로 인한 사망자가 매년 속출하고 있으

16) ASHRAE HANDBOOK (2013). op. cit., 11.3.

17) US. EPA, op. cit.

18) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D., op. cit., 1132-1141.

며, 전 세계적으로 미세먼지의 위해성에 대한 내용이 언급되고 있다. 특히 한국의 경우 계절풍의 영향으로 중국의 황사 및 미세먼지로 인한 피해가 예상되며, 이에 따라 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안 도입이 시급하다.

미세먼지의 위해성은 미세먼지의 입경과 밀접한 연관이 있다. 앞서 서술한 바와 같이 미세먼지는 발생원에 따라 다양한 성분으로 구성되는데, 대체로 인위적인 발생에 의한 미세먼지의 입경이 작고 중금속 등 인체에 유해한 성분의 비율이 높다. 이는 입경이 작아짐에 따라 표면적이 입경의 제곱에 비례하여 증가하여 중금속 등 인체에 유해한 성분이 입자의 표면으로 노출되기 쉬워져 유해성분의 농도가 비례적으로 증가하기 때문이다.<sup>19)</sup>

또한, 입경의 크기가 작을수록 폐포와 같이 체내 깊숙한 곳으로 침투 및 침착되므로 인체에 대한 위해도가 높아진다.<sup>20)21)</sup> 입경 10 $\mu$ m 이상의 미세먼지는 대부분 코와 입 등에서 걸러지는 반면에, 입경 10 $\mu$ m이하의 경우 코와 입을 거쳐 체내로 유입되고, 그 중에서도 입경 1 $\mu$ m 이하의 미세먼지는 인체 깊숙이 축적되는 비율이 높다.<sup>22)</sup> 다음 [그림2.3]는 코, 기관지, 폐에 대한 상대적인 미세먼지의 입경별 침착률을 나타내고 있다.

---

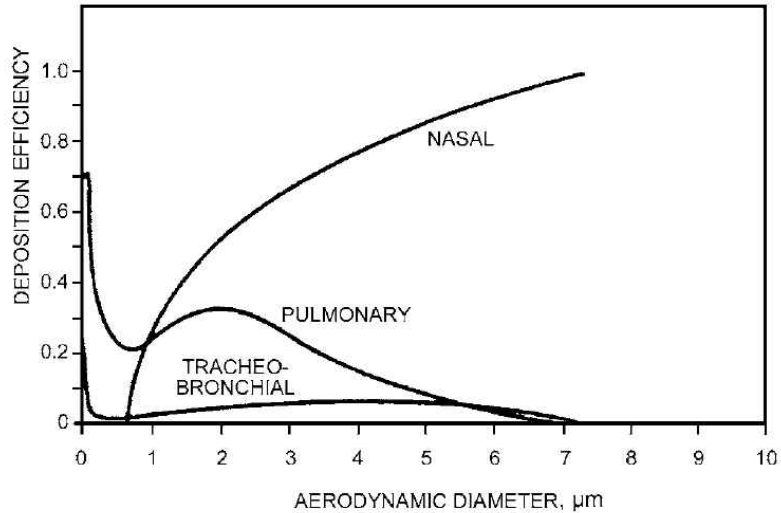
19) 차동원, op. cit., 79

20) Berico, M., Luciani, A., Formignani, M. (1997). Atmospheric aerosol in an urban area-measurements of TSP and PM10 standards and pulmonary deposition assessments. *Atmospheric Environment*, 31(21), 3659-3665.

21) Long, C. M., Suh, H. H., Kobzik, L., Catalano, P. J., Ning, Y. Y., Koutrakis, P. (2001). A pilot investigation of the relative toxicity of indoor and outdoor fine particles: In vitro effects of endotoxin and other particulate properties. *Environmental Health Perspectives*, 109(10), 1019-1026.

22) 김신도 (2003). 미세먼지 규제와 영향. *공기청정기술*, 19-28.

23) ASHRAE HANDBOOK (2013). op. cit., 11.3.



[그림 2.3] 코, 기관지, 폐에 대한 미세먼지의 입경별 상대적인 침착률<sup>23)</sup>

또한, 미세먼지의 질량 농도 보다 개수 농도가 인체 위해도와 더 직접적인 관련이 있다는 연구결과<sup>24)</sup>를 통해, 기존의 미세먼지의 질량 농도로 인체 위해를 평가하던 방식이 아닌 미세먼지의 입경별 개수 농도를 이용한 인체 위해도 평가에 대한 필요성이 언급되고 있다.

최근에는 대표적인 민감한 집단인 영·유아와 어린이를 대상의 연구결과가 발표되고 있는데, 미세먼지에 노출된 어린이에게서 호흡기계 질환으로 인한 사망률이 증가하였으며, 미세먼지 농도가 증가할 경우 영아의 사망률 또한 증가하는 것을 보고하였다.<sup>25)</sup> 또한 캘리포니아 지역의 약 1800명의 학생을 대상으로 8년간 미세먼지 노출과 폐 기능의 관계를 조

24) Stephenson, D. Seshadri, G. Veranth, J.M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. AIHA Journal, 64(4), 516-521.

25) Ha EH, Lee JT, Kim H, Hong YC, Lee BE, Park HS, Chrisiani DC (2003). Infant susceptibility of mortality to air pollution in Seoul, South Korea. Pediatrics, 111, 284-290.

사한 결과, 미세먼지에 많이 노출된 집단은 그렇지 않은 집단보다 폐 기능이 악화될 가능성이 약 5배 높은 것으로 나타났다.<sup>26)</sup> 아동기 및 청소년기의 미세먼지 노출은 성인기에도 영향을 미칠 수 있고, 특히 영·유아는 신체기관이 발달하는 단계이기 때문에, 이 시기에 오염물질에 노출될 경우 건강에 매우 치명적일 수 있다.

---

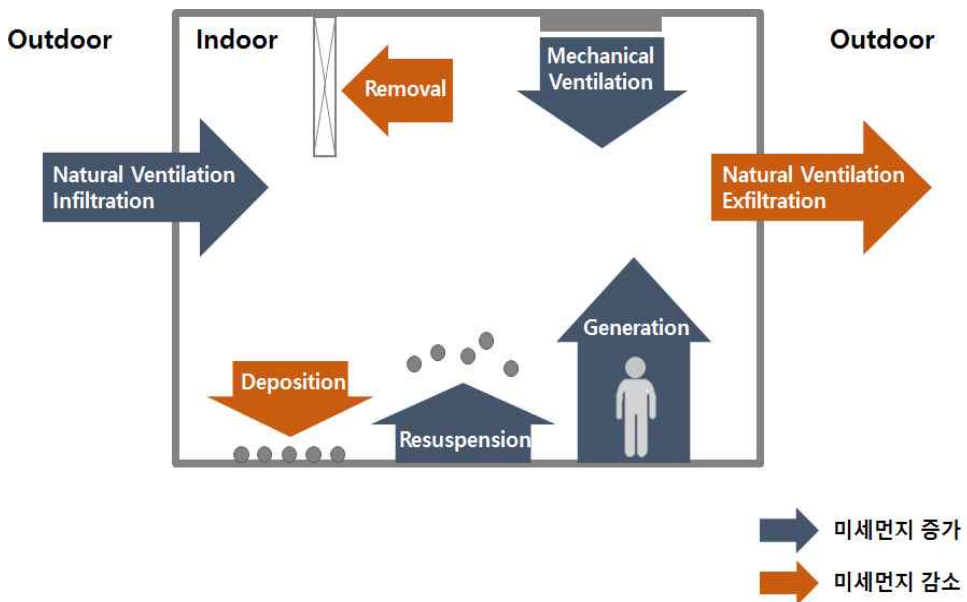
26) Guaderman WJ, Avol E, Gililand F, Vora H, Thomas D, Berhane K, McConnell R, Kuenzli N, Lurmann F, Pappaport E, Margolis H, Bates D, Peters J (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *N Engl J Med*, 351, 1057-1067.



## 2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자 고찰

### 2.2.1 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘

실내 미세먼지는 크게 실내에서 발생된 미세먼지와 실외에서 발생되어 실내로 유입된 미세먼지로 구성되는데, 환기 또는 침기로 인해 외부로 배출되거나 Removal Device를 통해 제거되기도 한다. 이처럼 미세먼지는 발생, 유입, 배출, 제거 등의 과정을 거쳐 실내농도를 형성하게 되는데 [그림 2.4]는 단일 실에서 미세먼지가 실내 농도를 형성하는 메커니즘을 나타낸다.



[그림 2.4] 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘

자연환기나, 침기 그리고 기계 환기를 통해 외기에 포함된 미세먼지가 실내로 유입되게 된다. 또한 기류변화 또는 진동과 같은 충격으로 인해 실내 표면에 침착되어 있던 미세먼지가 재부유하고, 재실자의 실내 활동

(흡연, 조리 등)으로 인해 실내에서 미세먼지가 발생한다.

실내 미세먼지는 자연 환기와 누기를 통해 실외로 배출되거나, 실내 Removal Device에 의해 제거되어 그 농도가 감소한다. 또한 부유하던 미세먼지가 실내 표면에 침착되는 현상을 통해 실내 미세먼지 농도가 감소하게 된다.

이처럼 실내 미세먼지는 실외에서 실내로의 유입 및 실내 발생으로 인해 농도가 증가하거나 배출, 제거, 침착으로 인해 농도가 감소하게 되며 자연 환기, 기계 환기, 침기에 의한 환기율 또는 침기율을 Air Exchange Rate, 미세먼지의 재부유와 실내 발생을 합쳐 실내 발생(Generation)이라 하면, 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 질량 보존에 근거한 Mass Balance Equation인 식(2.1)로 표현할 수 있다. 이때, 실내를 완전 혼합 상태로 가정하고, 미세먼지의 응축, 증발, 응고와 같은 작용은 매우 미미하므로 이에 대한 내용은 무시한다.

$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_o + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.1)$$

여기서,

$i$	: Particle size	( $\mu\text{m}$ )
$C_i$	: Indoor particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$C_o$	: Outdoor particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$a$	: Air exchange rate	(1/h)
$P$	: Penetration coefficients	(Dimensionless)
$G$	: Particle generation rate	( $\mu\text{g}/\text{h}$ or $\#/\text{h}$ )

## 2.2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자

앞서 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 침기율(Air exchange rate), 실외 미세먼지 농도(Outdoor particle concentration), 침투 계수(Penetration Coefficient), 발생률(Generation rate), 그리고 침착률(Deposition rate)이 실내 미세먼지 농도 영향인자임을 확인하였으며, 본 절에서는 영향인자들의 특성에 대해서 살펴보았다.

### (1) 침기율 (Air Exchange Rate)

침기란 의도치 않은 외기가 실내로 유입되는 현상을 의미하는데, 단위 시간당 외기가 실내로 유입되는 정도를 침기율이라 한다. 이러한 침기율은 실내와 실외의 온도차, 풍속과 풍향, 건물의 외피 형상, 건물의 기밀 성능, 재실자, 기계설비시스템 등 다양한 요소의 영향을 받는다. 따라서 건물마다 기밀성능 및 실내 환경이 달라 침기율이 다르며, 같은 건물이라도 외부 또는 내부의 환경에 따라 건물의 층에 따라 침기율이 달라질 수 있다.

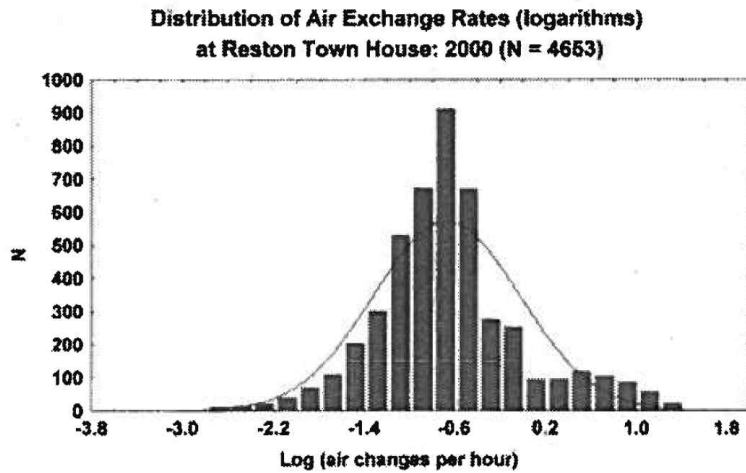
Wallace<sup>27)</sup>는 4000세대 이상의 주거건물을 대상으로 1년간 침기율을 측정하였는데, 그 결과 각 건물, 계절 그리고 건물의 층에 따라 침기율이 다르게 나타났다. 또한, 침기율 데이터 분석 결과 침기율이 정규분포를 이루고 있음을 [그림 2.5]을 통해 확인할 수 있는데, 이는 다양한 요소에 의해 침기율이 변동하지만, 건물마다 빈도수가 높은 침기율이 존재함을 의미한다.

이처럼 침기율은 외부환경, 건물특성에 따라 그 값이 상이하게 나타날

---

27) Wallace, L. A., Emmerich, S. J., Howard-reed, C. (2002). Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, 296-306.

수 있고, 침기율의 변동에 따라 실외 미세먼지가 실내로 유입되는 정도 및 실내 미세먼지가 실외로 배출되는 정도가 다르므로 미세먼지 분석에 있어 반드시 고려해야 하는 영향인자이다.



[그림 2.5] 침기율의 로그 분포<sup>27)</sup>

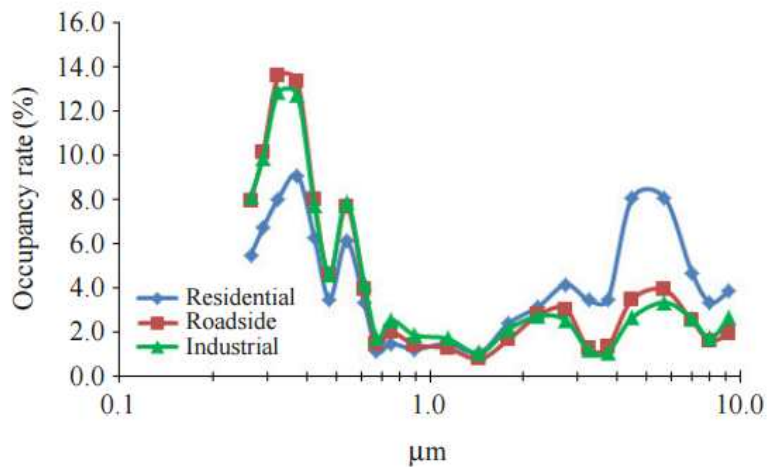
## (2) 실외 미세먼지 농도 (Outdoor Particle Concentration)

대기 중 미세먼지는 자연환기, 기계환기, 침기 등에 의해 건물 내로 유입되게 되는데, 이때 실외 미세먼지 농도가 높을수록 실내로 유입되는 미세먼지의 농도가 높으므로 실외 미세먼지 농도는 실내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다.

실외 미세먼지 농도는 주변 환경 등에 의해 그 농도가 다를 수 있는데 [그림 2.6]은 인근지역의 환경에 따른 미세먼지 개수 농도의 입경별 점유율을 한국의 경우 겨울에는 계절풍의 영향으로, 봄에는 황사의 영향으로 인해 계절별로 대기 중 미세먼지 농도가 다르다.<sup>28)</sup>

28) 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호 (2005). 서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. 한국환경보건학회지, 31(4), 301-308.

실외 미세먼지는 다양한 입경으로 구성되어 있는데 앞서 서술한 바와 같이 미세먼지의 입경에 따라 성질과 이동, 성분, 제어기술에 영향을 미치므로 미세먼지의 입경별 분포와 특성 파악은 미세먼지 해석에 있어 매우 중요한 과정이다.



[그림 2.6] 지역에 따른 미세먼지의 입경별 점유율<sup>29)</sup>

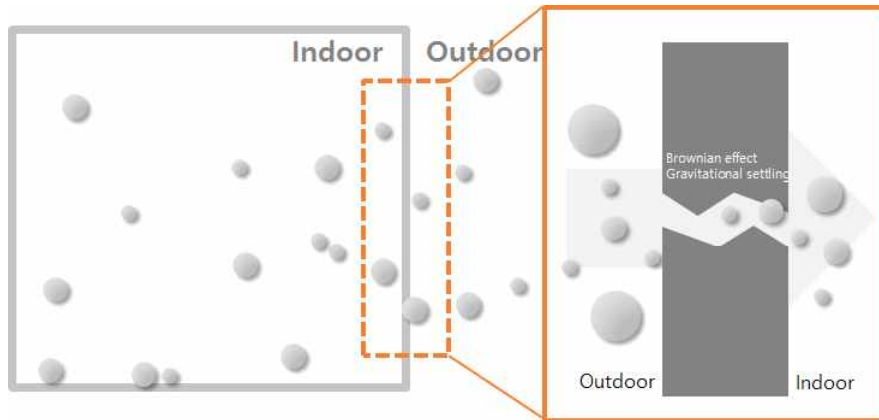
### (3) 침투 계수 (Penetration Coefficient)

침투 계수란 침기로 인해 실외 미세먼지가 실내로 유입 시 건물의 외피, 창의 틈 등에 의해 제거된 후 실내로 유입되는 비율을 의미한다. 침투 계수는 창, 개구부, 벽체, 건물의 틈새의, 실내와 실외의 압력차 등에 영향을 받는 건물의 특성과 관련된 인자이다. 단순히 건물의 외피 등에 의한 필터링 효과를 나타내는 계수이므로 건물마다 침투 계수가 다르게 나타난다.

침투 계수는 또한 미세먼지의 입경에 따라 다른데, 입경마다 중력의

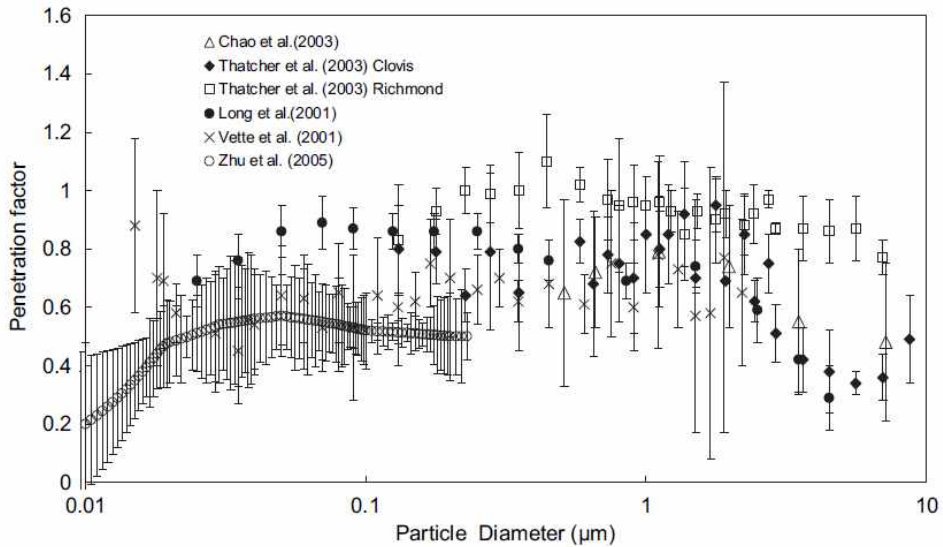
29) 이용기, 이기중, 이재성, 신은상 (2012). 미세먼지 입경농도 분포의 지역별 특성. 한국 대기환경학회지, 28(6), 666-674.

효과와 브라운 운동의 효과가 다르고, 입경이 크기에 따라 건물의 틈새 등에서 걸러지는 정도가 다르기 때문이다. [그림 2.7]은 미세먼지가 건물 틈새로 유입되어 걸러지는 과정을 나타낸다.



[그림 2.7] 건물 외피를 통한 미세먼지의 침투 과정

[그림 2.8]은 기존 연구의 입경별 침투 계수를 산출한 결과를 나타낸 그래프이다. 연구자 마다 측정대상의 건물 특성이 다르기 때문에 침투 계수가 상이하게 산출되었고 실제 건물을 대상으로 측정한 후 침투 계수를 산출한 결과이기 때문에 침투 계수가 하나의 값으로 산출되지 않고 편차가 나타났지만, 입경의 크기가 작을수록 침투 계수는 커지며, 반대로 입경의 크기가 클수록 침투 계수가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 입경이 크기가 작은 미세먼지는 건물 외피의 틈새 등을 통과하기 비교적 수월하여 건물 침투 계수가 커지며 입경의 크기가 커질수록 중력의 영향이 커지고 건물 외피의 틈에서 걸러지는 정도가 증가하기 때문이다. 이처럼 기존의 연구 결과를 바탕으로 실외 미세먼지가 실내로 침투할 때 대체로 Coarse Particle 보다 Fine Particle이 침투하는 정도가 더 높다는 것을 확인할 수 있다.



[그림 2.8] 다수의 연구자들의 입경별 침투 계수 산출 결과<sup>30)</sup>

#### (4) 미세먼지의 실내 발생 (Particle Generation)

본 연구에서는 실내 미세먼지 발생원에 의한 미세먼지의 생성과, 기류 변화 진동 등으로 인해 실내 표면에 침착되어 있던 미세먼지의 재부유를 합쳐 실내 발생(Generation)이라하였다. 본 장에서는 먼저 실내 미세먼지 발생의 이해를 돕고자 먼저, 실내 발생원과 재부유를 분리하여 살펴보았다.

실내에서도 실외와 마찬가지로 연소로 인해 미세먼지 발생하는데, 실내 흡연, 조리, 난방장치 등이 주요 발생원이다. 또한 청소는 실내 표면의 미세먼지를 제거하지만 제거 과정에서 진공청소기 내부에 포집된 먼

30) C. Chen, B. Zhao (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. Atmospheric Environment, 45, 275-288.

31) De-Ling Liu & William W. Nazaroff (2003) Particle Penetration Through Building Cracks, Aerosol Science and Technology, 37(7), 565-573.

지가 다시 밖으로 배출되어 실내 부유 미세먼지의 농도를 증가시킬 수 있기 때문에 실내 미세먼지 발생원으로 작용할 수 있다.

재부유란 실내에서 발생되거나 실외에서 유입된 미세먼지가 실내 표면에 침착되어 있다가 미세먼지에 작용하는 Mechanical Force, Aerodynamic Force, Electrostatic Force와 중력, 부착력의 평형이 깨지면서 공기 중으로 다시 부유하는 현상이다. 간단하게 미세먼지의 침착의 반대 과정이라 할 수 있다. 재실자의 보행이나 활동 또는 청소 등 실내 기류를 변화시키거나 실내 표면에 진동 및 충격을 일으키는 행위들이 대표적인 미세먼지 재부유의 원인이다. 또한 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양이 많을수록 재부유로 인해 발생하는 실내 미세먼지가 증가하게 된다.

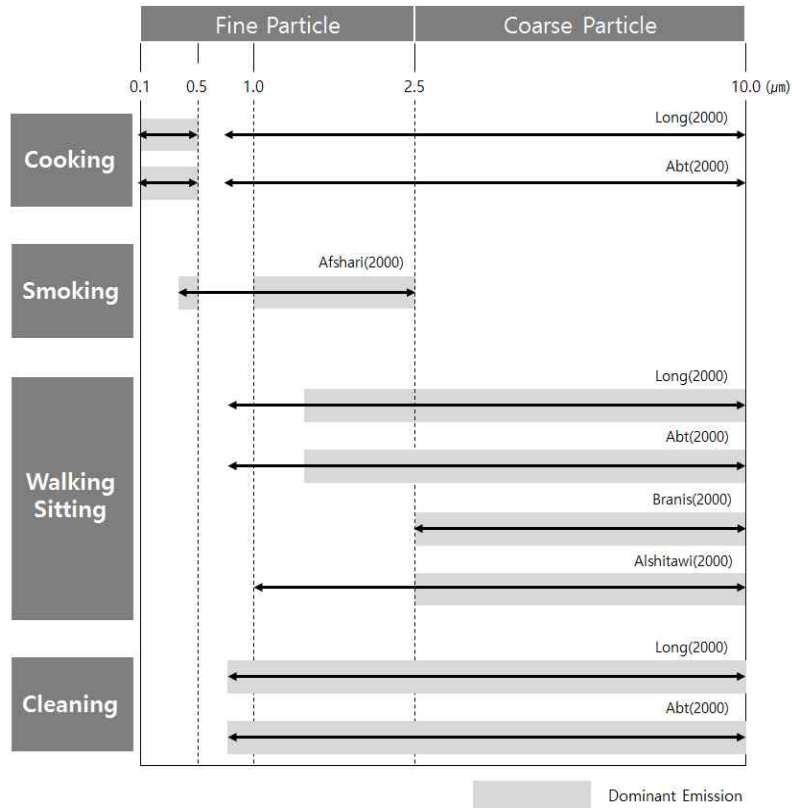
미세먼지의 실내 발생과 재부유 모두 결과적으로 실내 공기 중 미세먼지 농도를 증가시키는 요인이며, 조리나 청소는 미세먼지를 발생하기도 하지만 동시에 실내 기류변화를 일으켜 미세먼지의 재부유에도 영향을 미치는 등 발생과 재부유는 밀접한 관계가 있다. 몇몇 기존연구에서 재실자의 활동에 의한 미세먼지 발생은 재부유로 표현하는 등 둘의 개념을 분리해서 사용하기도 하지만, 실내 발생으로 인해 실내 미세먼지 농도가 증가하였을 때, 둘을 명확히 구분하는데 한계가 있어 기존의 많은 연구에서 두 개념을 분리하지 않고 해석하였다.

실내 미세먼지의 발생원에 따라 발생하는 미세먼지의 입경 특성이 다르며, 다수의 연구자들이 미세먼지의 입경별 실내 발생원 분석을 위한 연구를 수행한 바 있다. 그 결과 Fine Particle 영역에 해당하는 미세먼지는 주로 조리과 같이 연소를 동반하는 발생원에 의해 주로 발생되었다. 조리는 입경  $10\mu\text{m}$  이하 미세먼지를 발생시키는데, 특히 입경  $0.5\mu\text{m}$  이하 미세먼지의 발생량이 많은 것으로 확인되었다. 또한, 청소나 재실자의



움직임 등은 주로 Coarse Particle을 발생시키는 발생원으로 확인되었다. [그림 2.9]는 실내 발생원에 따른 미세먼지 입경별 발생에 대한 기존 연구의 결과이다.

- 
- 32) Abt, E., Suh, H., Allen, G., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor sources: A study conducted in the metropolitan Boston area. *Environmental Health Perspectives*, 108(1), 35-44.
  - 33) Afshari, A., Matson, U., Ekberg, L. E. (2005). Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: A study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*, 15(2), 141-150.
  - 34) Alshitawi, M., Awbi, H. (2011) Measurement and prediction of the effect of students' activities on airborne particulate concentration in a classroom. *HVAC&R Research*, 17(4), 446-464.
  - 35) Branis, M., Rezacova, P., Domasova, M. (2005) The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 in a classroom. *Environmental Research*, 99(2), 143-149.
  - 36) Long, C. M., Suh, H. H., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(7), 1236-1250.



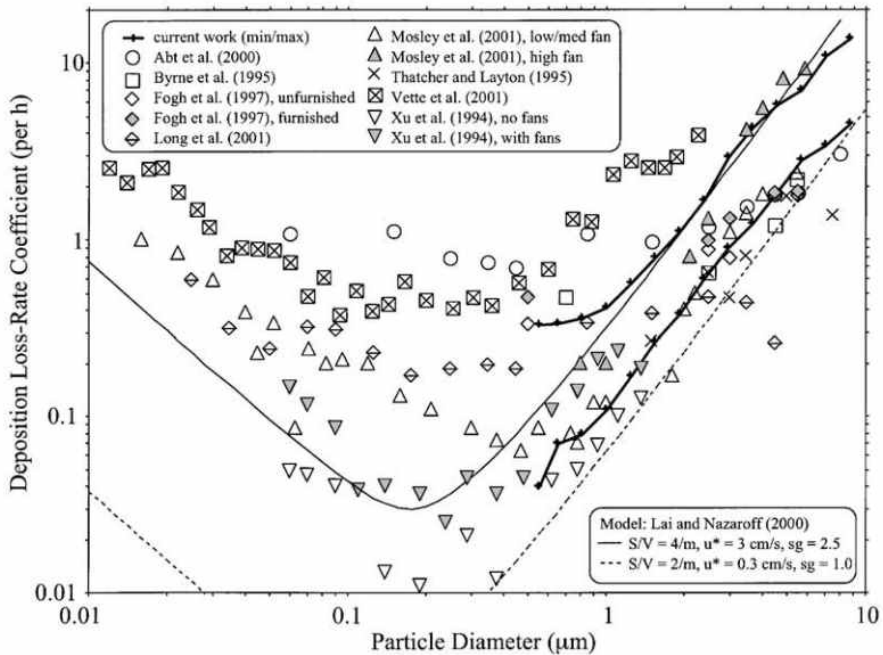
[그림 2.9] 실내 미세먼지의 입경별 발생원<sup>32)-36)</sup>

#### (5) 침착률 (Particle Deposition Rate)

공기 중의 미세먼지는 관성충돌, 중력, 브라운 운동 등으로 인해 실내 표면에 침착되는데, 단위시간당 실내 미세먼지가 침착되는 정도를 침착률이라 한다. 미세먼지가 실내 표면에 침착하면 부유하고 있는 미세먼지의 농도가 감소하므로 침착률은 실내에서 미세먼지 농도 감소에 영향을 미치는 인자이다.

침착률은 실내 표면의 거칠기와 실내 기류 및 진동에 영향을 받기 때문에 침착률 또한 실내 환경에 따라 그 값에 차이가 발생할 수 있다. 또한 침착률은 미세먼지의 입경에 영향을 받는다. 미세먼지의 입경에 따

라 물리적 특성이 다른데, 입경이 작을수록 중력의 영향보다 확산의 영향이 커 침착되는 정도가 작고, 입경이 클수록 중력의 영향을 많이 받아 상대적으로 실내 표면에 침착되는 정도가 크다. 기존 연구를 통해 이와 같은 결과를 확인할 수 있는데, [그림 2.10]을 통해 입경에 따른 침착률이 V 형태를 보인다는 것을 알 수 있다. 입경  $0.1\mu\text{m}$ 이하의 Ultra Fine Particle의 경우 브라운 운동이나 난류 확산의 영향 등으로 인해 실내 표면에 부착되는 정도가 커 침착률이 증가한다.



[그림 2.10] 미세먼지의 입경별 침착률<sup>37)</sup>

37) Thatcher, T.L., Lai, A.C.K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R.G. and Nazaroff, W.W. (2002). Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. Atmospheric Environ, 36, 1811-1819.

## 2.3 미세먼지 발생 평가관련 기존연구 고찰

실내 미세먼지는 발생 평가 방법은 Steady-state Model 또는 Mass Balance Equation을 이용하여 실내 발생률을 정량적으로 산출하는 방법, 그리고 측정을 통해 해당 Activity로 인한 미세먼지 발생을 정성적으로 평가 하는 방법이 있다. 본 연구는 실내 미세먼지 발생률을 정량적으로 산출하여 평가하고자 하므로 본 장에선 이에 관련된 기존 연구를 고찰하였다.

### (1) Steady-state Model

Dockery(1981)<sup>38)</sup>은 실내 미세먼지의 실내 발생과 실외 유입의 영향을 분석하기 위해 Mass Balance Equation인 식(2.1)를 이용하여 Steady-state Model의 개념을 정립하였고 그 과정은 아래와 같다.

$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_o + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.1)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{(a+k)} \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{aP}{(a+k)} C(t) + \frac{G(t)}{V(a+k)} - C_i(t) \quad (2.2)$$

양변을 적분 후, Sampling time, T로 나누면 식(2.3)과 같다.

---

38) Dockery, D. W., Spengler, H. D. (1981). Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. Atmospheric Environment, 15, 335-343.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{1}{(a+k)} \frac{1}{T} \int_0^T dC_i(t) &= \frac{aP}{(a+k)} \frac{1}{T} \int_0^T C_o(t) dt \\ &+ \frac{1}{V(a+k)} \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T C_i(t) dt \end{aligned} \quad (2.3)$$

이때,

$$\overline{C_o(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T C_o(t) dt$$

$$\overline{C_i(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T C_i(t) dt$$

$$\overline{G(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt$$

이라 하면, 식(2.4)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{1}{(a+k)} \frac{C_i(T) - C_i(0)}{T} &= \\ \frac{aP}{(a+K)} \overline{C_o(T)} + \frac{1}{V(a+k)} \overline{G(T)} - \overline{C_i(T)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dockery의 연구에선 24시간 동안 측정데이터를 활용하였기 때문에 위의 식(2.4)에서 측정 시간, T가 24시간이므로 좌변을 0으로 취급하여 식(2.5)의 Steady-state Model을 도출하였다. 이때 실내 공기유입량과 공기 배출량은 동일하고, 응고, 응축, 증발 등으로 인한 미세먼지 농도 변화는 무시하며, 측정 시간 동안 침기율, 침투 계수, 침착률이 일정하다고 가정

하였다.

$$\overline{C_i(T)} = \frac{aP}{(a+k)} \overline{C_o(T)} + \frac{1}{V(a+k)} \overline{G(T)} \quad (2.5)$$

Koutrakis(1992)<sup>39)</sup> 또한 위의 연구와 동일한 가정 후 식(2.6)을 통해 State-state Model을 도출하였다. 그 과정은 아래와 같다.

$$Q_{os} + Q_{is} = F_{out} + F_d \quad (2.6)$$

이때,

$$Q_{os} = VaPC_{out}$$

$$F_{out} = VaC_{in}$$

$$F_d = VkC_{in}$$

이라 하면 식(2.7)과 같이 정리된다.

$$VaPC_o + Q_{is} = VaC_i + VkC_i \quad (2.7)$$

$$\Rightarrow C_i = \frac{aP}{(a+k)} C_o + \frac{1}{V(a+k)} Q_{is} \quad (2.8)$$

---

39) Koutrakis, P., Briggs, S. L. K. (1992). Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga counties, New York, *Enviro. Sci. Technol.*, 26, 521-527.

여기서,

$Q_{os}$  : The flux of particles originating from outdoors

$Q_{is}$  : The flux of particles originating from indoors

$F_{out}$  : Transport of aerosols from the indoor to the outdoor environment

$F_d$  : Removal of particles on indoor surfaces by brownian diffusion of sedimentation

Steady-state Model은 식(2.9)과 같이 정리할 수 있으며  $aP/(a+k)$ 가 실외 미세먼지가 실내로 유입되어 부유하고 있는 비율을 의미하는 Infiltration Factor로 표현되고,  $G/V(a+k)$ 는 실내에서 발생되어 부유하고 있는 미세먼지의 농도로 표현된다. 식(2.9)의 우변의 좌측항은 실외의 실내로의 유입을, 우측항은 실내 발생을 의미한다.

$$C_i = F_{inf}C_o + C_{ig} \quad (2.9)$$

여기서,

$F_{inf}$  : Infiltration factor (Dimensionless)

$C_{ig}$  : Particles generated indoors ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  or  $\#/\text{m}^3$ )

분석 기간 동안 측정된 실내 농도( $C_i$ )와 실외 농도( $C_o$ )를 선형 회귀 분석하여 기울기 값으로  $F_{inf}$ 를, 절편 값으로  $C_{ig}$ 를 구할 수 있으며, 측정 시간 동안의 침기율, 침착률, 및 실내 부피를  $G/V(a+k)$ 에 대입하여 실내 발생률을 산출할 수 있다.

Steady-state Model의 해석을 위해선 측정 시간이 길어야 하며, 측정 시간 동안의 침기율, 침착률 등을 평균값으로 취급한다. 그러나 실제 건물에선 매시간 해당 인자들의 값이 변동하며, 다양한 Activity에 의해 미

세먼지가 발생되므로, 한 가지 Activity에 의해 발생하는 미세먼지 발생률의 정확한 해석에는 한계가 있다. 따라서 위의 평가 방법은 계절 또는 년 단위의 대량의 측정 데이터를 바탕으로 대상 건물의 실내 미세먼지 농도에 대한 실내 발생과 실외 유입을 평균적으로 평가하는데 적합한 방법으로 판단된다.

## (2) Mass Balance Equation Approach

Mass Balance Equation인 식(2.1)을 활용하여 실내 미세먼지 발생률을 산출 모델인 식(2.10)를 도출할 수 있다.<sup>40)41)</sup> 이때, 해당 Activity에 의해 미세먼지 발생되고 그로 인한 실내 농도의 최대치를  $C_{peak}$ , 해당 Activity 전의 실내 농도를  $C_{ini}$ , 두 농도 사이의 시간 간격을 T라 한다.

본 모델을 통해 분석하고자 하는 해당 Activity의 미세먼지 발생률을 산출할 수 있으며, 다른 실내 미세먼지 발생원이 없는 상태에서 해당 Activity를 연구자가 직접 수행하여 농도를 측정할 수 있거나, 관찰 및 측정을 통해 해당 Activity로 인한 농도 증가 및 그 시점이 명확히 구분 가능할 때 본 모델의 산출 방법을 사용할 수 있다. 그러나 미세먼지 발생률을 분석하고자 하는 Activity가 다양하며, 다양한 Activity가 연속적으로 발생할 경우, 전 시간대의 Activity로 인한 실내 미세먼지 농도 증가로 인해 해당 방법에서 요구되는  $C_{peak}$ 와  $C_{ini}$ 을 구분하는데 한계가 있어, 본 방법 이용하기 부적절할 것이라 판단된다.

---

40) He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Cilbert, D. (2004). Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. Atmospheric Environment, 38, 3405-3415.

41) Ferro, A. R., Kopperud, R. J., Hildemann, L. M. (2004). Source Strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. Environmental Science Technology, 38, 1759-1764.



$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_o + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.1)$$

$$\bar{G} = V \times \left[ \frac{C_{peak} - C_{ini}}{T} + (\bar{a} + \bar{k}) \bar{C}_i - \bar{a}P\bar{C}_o \right] \quad (2.10)$$

여기서,

$\bar{G}$	: Particle generation rate	( $\mu\text{g}/\text{h}$ or $\#/\text{h}$ )
$C_{peak}$	: Peak indoor particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$C_{ini}$	: Initial particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$\bar{C}_i$	: Average indoor particle concentration during T	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$\bar{C}_o$	: Average outdoor particle concentration during T	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$\bar{a}$	: Average air exchange rate during T	(1/h)
$\bar{k}$	: Average deposition rate during T	(1/h)

## 2.4 소결

본 장에서는 미세먼지의 기본적인 특성과 위해성을 고찰함으로써 실내 미세먼지 농도 영향인자의 영향도 평가에 대한 필요성을 재고하였으며, 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 통하여 실내 미세먼지 농도 영향인자를 파악하고 그 특성에 대해 고찰하였다. 또한 기존의 실내 미세먼지 발생 평가에 대한 기존 연구를 조사함으로써 평가 방법 및 이론에 대해 검토하였다.

(1) 미세먼지는 공기 중 부유하고 있는 액체 또는 고체상의 작은 입자이며, 중금속 등 인체에 해로운 성분을 포함하고 있다. 미세먼지는 다양한 입경으로 구성되어 있고 입경에 따라 물리적 특성이 다르며 이에 따라 실내 거동 및 제어 특성이 달라진다. 따라서 기존의 PM2.5 또는 PM10의 분류는 미세먼지의 입경별 특성을 반영하는데 한계가 있기 때문에 미세먼지의 입경별 분석이 요구된다.

(2) 실내 미세먼지는 환기나 건물의 틈새 등을 통해 실외에서 실내로 유입되며, 실내에서 발생되기도 한다. 이러한 실내 미세먼지 농도 형성 과정에 다양한 영향인자들이 관여하며, 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 환기량 또는 침기량, 실외 미세먼지 농도, 침투 계수, 침착률, 그리고 실내 발생이 그 영향인자임을 파악하였다. 기존연구 고찰을 통해 침투 계수, 침착률이 미세먼지의 입경에 따라 달라지며, 실내 발생 또한 발생원에 따라 발생 입경이 다르다는 것을 확인하였다.

(3) 또한 기존 연구에서 미세먼지 발생의 정량적 평가를 위해 사용된

Steady-state Model과 Mass Balance Equation 활용한 모델을 고찰하였다. 그러나 기존의 평가 방법은 실내 미세먼지에 대한 실외와 실내 발생의 영향 파악이 용이하나 전체 측정 기간 동안의 평균적인 발생률을 추정할 수 있는 방법이거나  $C_{peak}$ 와  $C_{ini}$ 이 명확히 구분될 때 사용 가능한 방법 이므로, 매 시간 활동 강도 및 활동 내용이 변화하는 영·유아를 대상으로 발생률을 평가함에 한계가 있음을 확인하였다.

## 제 3 장 영·유아 활동에 의한 미세먼지 발생이 입경별 농도에 미치는 영향 분석

### 3.1 개요

앞서 2장의 실내 미세먼지 농도 영향인자의 특성 고찰을 통해, 실내 환경 특성이 실내 미세먼지 발생 특성에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 따라서 본 장은 영유아의 활동에 의한 미세먼지 발생 평가를 위한 전단계로, 보육실 일과 활동 관찰 및 기록을 통해 보육실의 실내 환경 특성을 파악한 후, 이를 토대로 실제 운영이 이루어지는 보육실의 실내·외 미세먼지 개수 농도의 특성을 분석하여, 실내 영·유아의 활동에 의해 발생하는 미세먼지 입경이 무엇인지 파악하고자 한다.

### 3.2 보육실의 실내·외 미세먼지 입경별 농도 측정<sup>42)</sup>

#### 3.2.1 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요

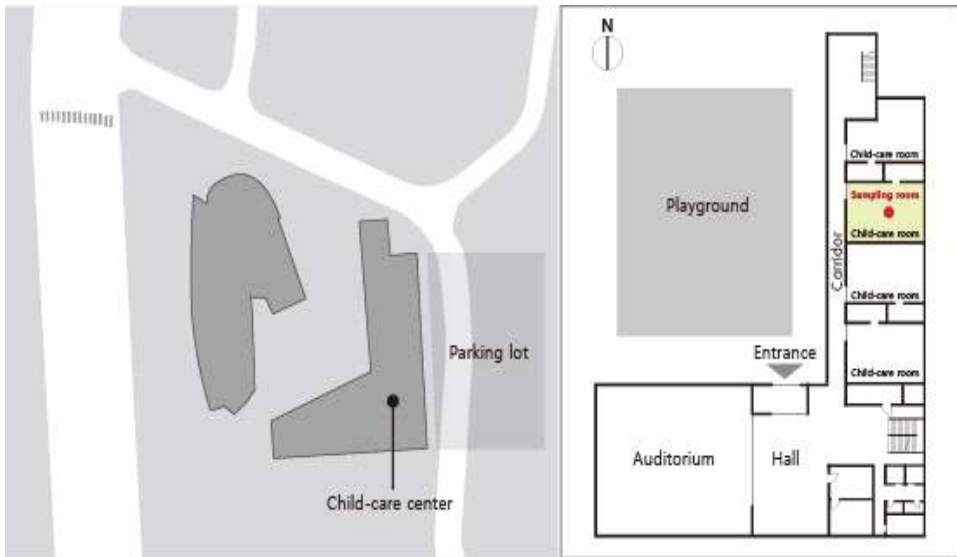
측정이 이루어진 보육시설은 서울시 관악구에 위치한 지하 1층 지상4층 규모의 건물로, 왕복 2차선 도로와 주차장이 주변에 인접하여 있다. 해당 보육시설은 층 당 4개, 총 16개의 보육실과 각층 별로 Activity 실 및 도서관 그리고 강당이 위치하였고 주방 및 식당은 지하 1층에 위치하였다.

측정은 1층에 위치한 만 3세반의 보육실에서 진행하였다. 보육실 내부는 pull-in 방식의 시스템 창호가 동측에, 복도로 연결되는 출입문은 서

---

42) 박성준, 김지혜, 조구상, 여명석, 김광우 (2015). 보육시설 실내 미세먼지의 입경별 실내·외 발생원 분석 대한건축학회 논문집, 31(12), 215-222.

측에 위치하며, 남·북 방향으로 인접 보육실이 위치하고 있다. 대상건물의 위치 및 평면도, 측정이 진행된 보육실의 정보는 [그림 3.1], <표 3.1>과 같다.



[그림 3.1] 측정 대상 보육시설의 주변 환경 및 평면도

<표 3.1> 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요

보육시설 개요	
위치	서울시 관악구
규모	B1 ~ 4F
용도	보육실, 식당 및 주방(B1), Activity 실, 교무실
연면적	4,215㎡
건축면적	1,383㎡
보육실 개요	
위치	1F, 건물의 동측
면적	48.01㎡
부피	165.63㎥
채실자 수	15 (영·유아) + 1 (보육교사)
마감재	벽면 : 페인트, 바닥 : Vinyl flooring

### 3.2.2 영·유아의 일과 활동 관찰

보육시설의 일과 활동은 크게 자유활동, 낮잠, 식사, 교육활동 및 기타 활동으로 구분할 수 있고, 자유활동, 낮잠, 식사는 매일 공통적으로 진행되며 교육활동 및 기타활동은 일주일을 주기로 요일별 변화가 있다. 해당 보육시설의 경우 규모가 커 다양한 Activity 실들이 별도로 마련되어 있어 특별활동 및 기타활동은 보육실이 아닌 이러한 Activity 실에서 진행되었으며 식사 또한 지하의 식당에서 이루어졌다.

측정이 진행된 보육실의 경우 별도의 기계 환기장치 없이 pull-in 방식의 시스템 창호를 이용하여 일과 활동 중 불규칙하게 자연환기가 이루어졌으며, 기록한 환기 스케줄을 <그림 3.2>에 나타내었다. 보육실에서 진행되는 일과 활동 중 낮잠을 제외한 대부분의 일과 활동에서 영·유아의 지속적인 움직임이 발생하고, 이는 보육실 내 미세먼지의 발생 특성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 측정 기간 동안 재실유무, 재실인원, 일과 활동의 내용을 관찰 및 기록하였으며, 보육시설 실내 미세먼지 농도변화 분석에 참고하였다.

### 3.2.3 실내외 미세먼지 입경별 개수 농도 측정

일주일을 주기로 반복되는 보육시설의 일과 활동 특성을 반영하여 환절기와 겨울철에 각각 5일 이상, 실제 운영 데이터 확보를 위해 측정자의 의도적인 제어 없이 일과 활동이 이루어지고 있는 보육실을 대상으로 측정을 진행하였다.

환절기 해당 보육실의 일과 활동 시간 동안 자연환기가 불규칙하게 이루어져 침기량 산출에 한계가 있고, 자연환기 시 실외 미세먼지가 실내로 유입되는 정도가 커져 실내 미세먼지에 대한 실외의 영향이 커진다는 점을 고려하여, 환절기에 측정한 데이터를 3장의 실내 미세먼지에 대한

실외 및 실내 발생 영향의 정석적 분석에 활용하였고, 자연환기를 거의 실시하지 않는 겨울철의 데이터를 4장과 5장의 실내 미세먼지 발생률 산출에 활용하였다.

일과 활동에 따른 미세먼지의 입경별 측정을 위해 Optical Particle Counter(AEROTRAK, TSI 9306-v2)를 이용하였다. Optical Particle Counter는 미세먼지가 기기내부의 빛 산란 장치로 유입되었을 때, 광 검출기(photo detector)로 유입된 미세먼지에 의해 산란된 빛의 세기를 측정하고, 이를 통해 유입된 미세먼지 입경의 크기와 입자의 개수를 추정하는 기기이다. 본 연구에서는 미세먼지의 입경별 분석을 위해 보육실과 실외에서 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m, 총 6개의 입경의 개수농도를 측정하였다. 미세먼지와 함께, 실내·외 온·습도, CO<sub>2</sub> 농도도 함께 측정하였으며, 아이들의 활동을 방해하지 않는 공간의 0.9m 높이(만 3세 영·유아의 호흡선)에서 측정하였다. 진행된 측정에 대한 개요는 <표 3.2>과 같다.

<표 3.2> 측정 개요

측정 내용		개요
위치		보육실(바닥으로부터 0.9m 높이)실과 실외
측정기기	미세먼지	Optical particle counter (AEROTRAK, TSI 9306-v2)
	CO <sub>2</sub> , 온도, 상대습도	Data logger (MCH-383SD)
측정 간격		환절기 - 10분 겨울철 - 2분



### 3.3 재실조건이 실내 미세먼지 입경별 농도에 미치는 영향 분석<sup>43)</sup>

#### 3.3.1 분석 방법

보육시설 실내 미세먼지의 입경별로 주요 영향인자가 실내 발생인자 또는 실외 침투인지를 파악하기 위해 아래의 3단계 순서로 분석하였다.

첫 번째로, 실외 미세먼지가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해 측정된 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계를 선형 회귀 분석 방법을 이용하였다. 이때 선형 회귀 분석의  $R^2$ 값이 1에 가까울수록 실내 미세먼지와 실외 미세먼지 농도의 상관관계가 높고, 이는 실내 미세먼지가 실외 발생원의 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. 또한, 실내·외 발생원이 입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 보육시설 내 주요 실내 발생원인 영·유아의 활동이 이루어지는 재실 시와 실내 발생원이 없고 실외 발생원의 영향만 있는 비재실 시로 구분하여 분석하였다.

두 번째로, 실내 발생원이라 예상되는 영·유아의 활동에 따른 실내 미세먼지 농도 변화를 더 자세히 비교하기 위해 마찬가지로 재실 시와 비재실 시로 구분하여 입경별 미세먼지 농도의 I/O ratio를 분석하였다.

마지막으로, 영·유아의 활동이 실내 발생원임을 명확히 파악하기 위해 실내 발생원의 강도를 나타낼 수 있는 지표를 선정한 후, 실내 발생원 강도 지표와 실내 미세먼지 농도의 양의 상관관계를 선형 회귀 분석을 이용하여 분석하였다.

---

43) Ibid

### 3.3.2 일과 활동에 따른 미세먼지 입경별 농도 특성

대상 보육시설의 전체 측정기간에 걸친 미세먼지 농도 변화를 실내 농도와 실외 농도의 비율인 I/O ratio로 표현하였고, [그림 3.2]와 같다.

분석 결과, 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 I/O ratio와 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 I/O ratio의 변화양상이 뚜렷하게 구분되었다. 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 경우 전체 일과 활동에 걸쳐 I/O ratio가 1에 가까웠지만, 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 경우 재실 시 I/O ratio가 증가하며, 침구 준비 및 정리와 같은 특정 활동 시에 특히 I/O ratio가 크게 증가하였다.

### 3.3.3 재실 및 비재실시 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계

실내 발생원 유무(비재실, 재실)에 따른 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계를 분석하였다.

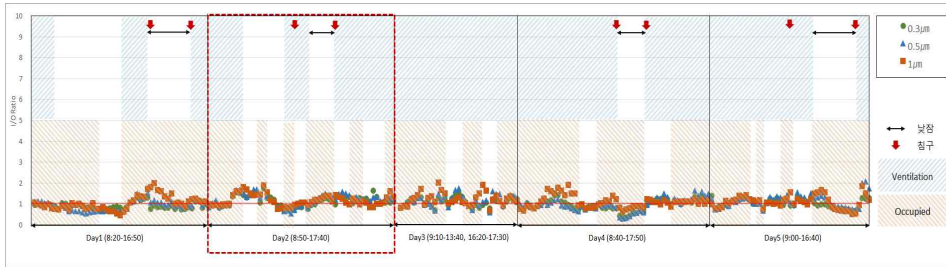
실내 발생원이 없는 비재실 조건에서의 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계는 [그림 3.2]와 같다. 10 $\mu$ m를 제외한 모든 입경에서 선형 회귀 분석의 R<sup>2</sup>값이 입경별로 각각 0.68 (0.3 $\mu$ m), 0.81 (0.5 $\mu$ m), 0.80 (1.0 $\mu$ m), 0.74 (3.0 $\mu$ m), 0.74 (5.0 $\mu$ m)이고, 기울기가 1에 가까운 것을 확인할 수 있다. 이는 비재실 시에 대부분의 입경에서 실내 미세먼지 농도가 실외 농도와 높은 상관관계가 있음을 의미한다.

재실 시의 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계는 [그림 3.3]과 같다. 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m의 경우 선형 회귀 분석의 기울기가 각각 0.72, 0.85이고 R<sup>2</sup>값이 각각 0.56, 0.70 이므로 실내 미세먼지 농도가 실외 미세먼지 농도와 상관관계가 있다는 걸 확인할 수 있다. 입경 1 $\mu$ m의 경우에도 선형 회귀 분석의 기울기가 0.63이고 R<sup>2</sup>값이 0.39으로 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m의 작은 미세먼지에 비해서는 상관관계가 약하지만, 3 $\mu$ m (R<sup>2</sup>=0.05), 5 $\mu$ m (R<sup>2</sup>=0.03), 10 $\mu$ m (R<sup>2</sup>=0.02)의 큰 입경의 미세먼지와 비교하였을 때 상관관

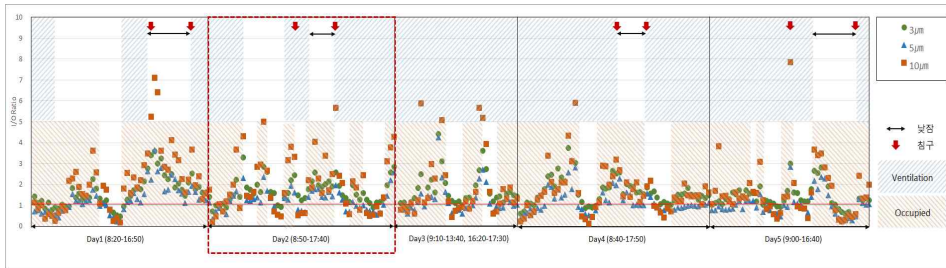
계가 있다고 판단할 수 있으며, 아울러 실외 농도가 증가함에 따라 실내 농도도 함께 증가하는 경향을 그래프를 통해 확인할 수 있다.

따라서 입경  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ 의 작은 미세먼지는 입경  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 에 비해 상대적으로 실내 미세먼지 농도에 대한 실외 미세먼지 농도의 영향도가 큰 것으로 판단된다. 그러나  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  입경의 경우 그래프 위의 점이 점선을 중심으로 고르게 분포되어 있지 않고(그림 3.3, d), e), f)),  $R^2$ 값 역시 0.05이하의 작은 값으로 실내 농도와 실외 농도의 상관관계를 확인할 수 없으며, 실외 농도 변화량 대비 실내 농도 변화량이 큰 것을 확인할 수 있다.

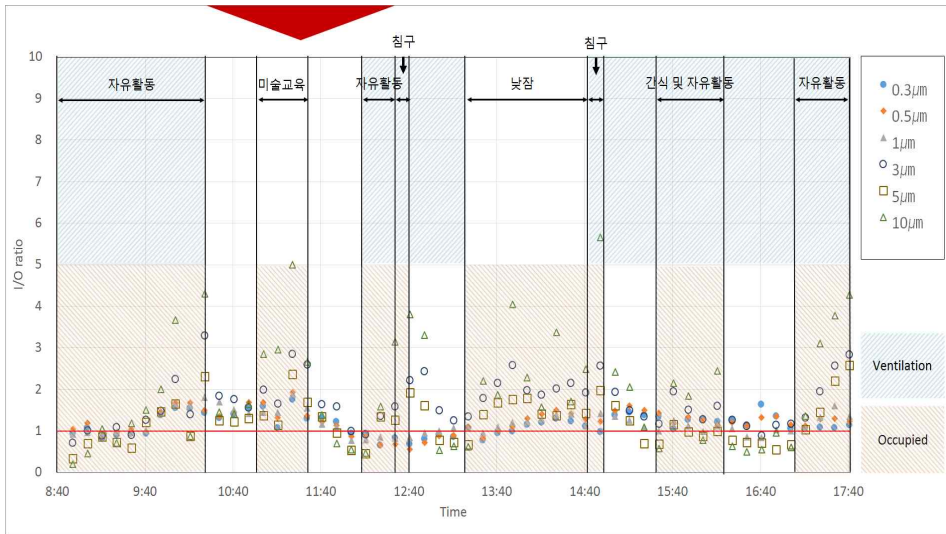
[그림 3.2]와 [그림 3.3]을 통해  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$  입경의 경우 비재실 조건, 재실 조건 모두 실내 농도가 실외 농도의 영향을 받는 것을 확인하였고,  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$  입경의 경우 비재실 시에는 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인할 수 있는 반면,  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  입경 모두 재실 시에는 실외 농도의 영향이 거의 없다는 것을 확인할 수 있다.



a) 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m

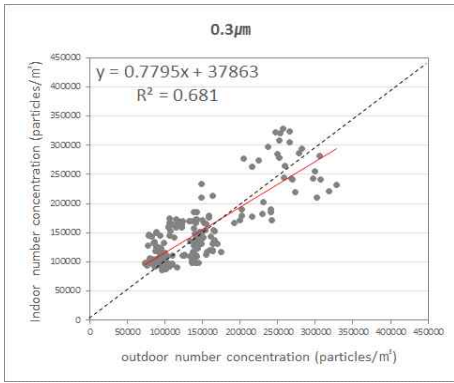


b) 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m

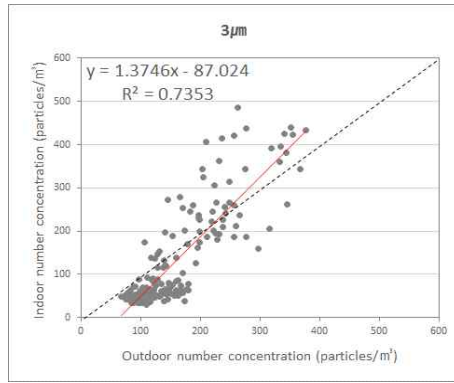


c) 두 번째 측정 날의 일과 활동에 따른 I/O Ratio

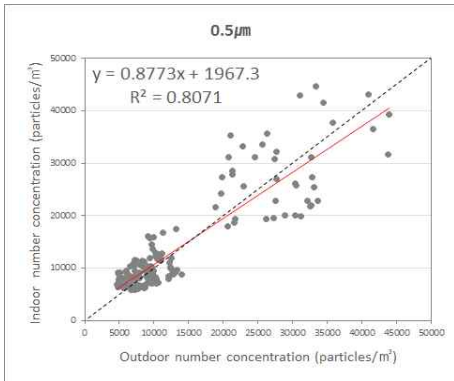
[그림 3.2] 측정기간 동안의 I/O Ratio



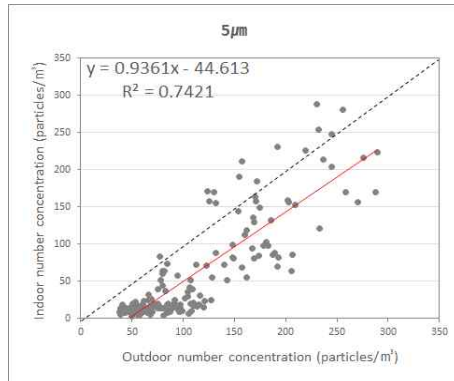
a) 입경 0.3 $\mu$ m



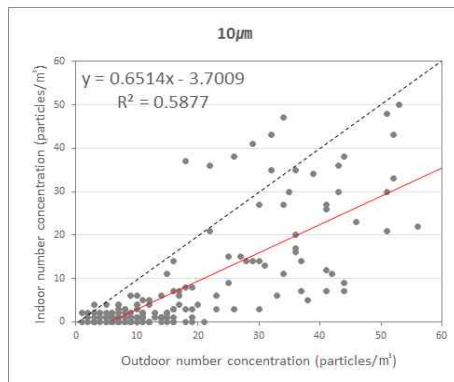
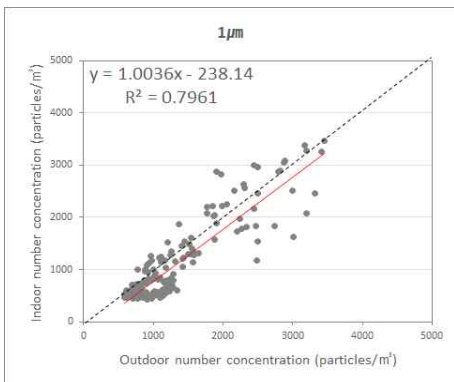
d) 입경 3 $\mu$ m

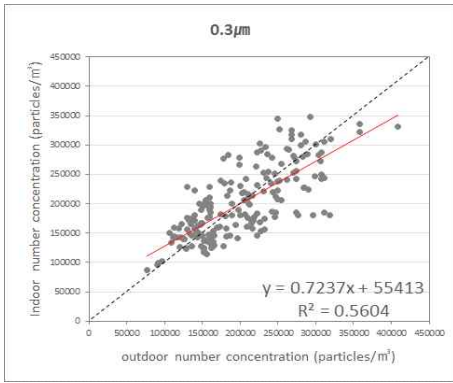


b) 입경 0.5 $\mu$ m

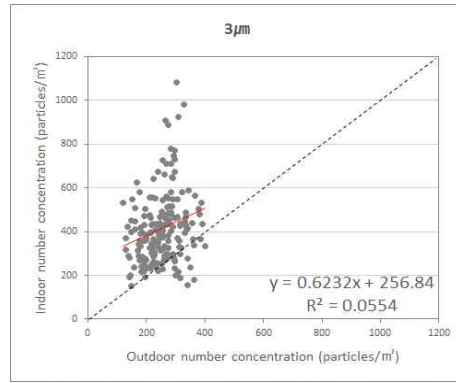


e) 입경 5 $\mu$ m

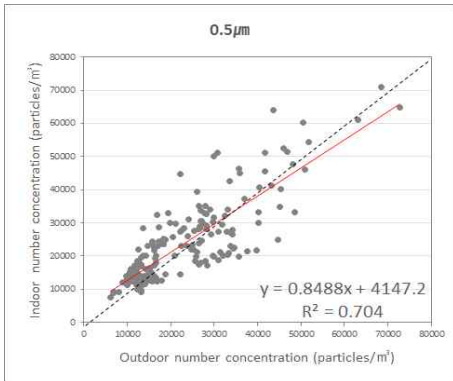




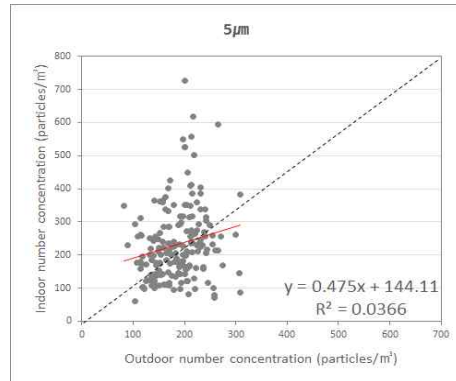
a) 입경 0.3µm



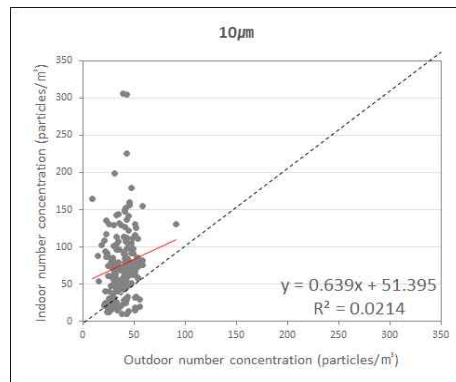
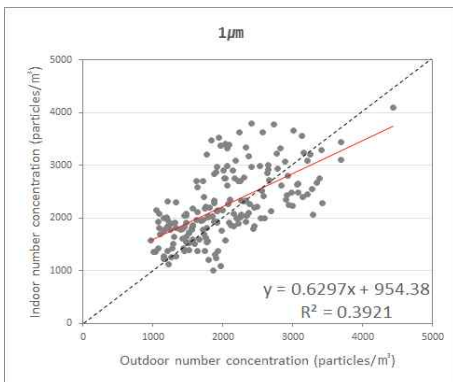
d) 입경 3µm



b) 입경 0.5µm



e) 입경 5µm

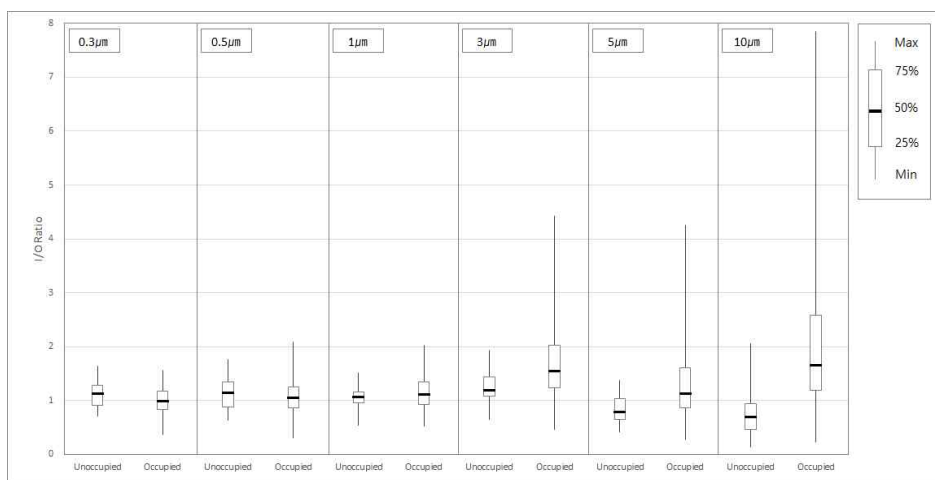


### 3.3.4 재실 및 비재실시 I/O Ratio 비교

영·유아의 재실이 실내 입경별 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 미세먼지의 입경별로 비재실 조건에서의 I/O ratio(Unoccupied)와 재실 조건에서의 I/O ratio(Occupied)를 비교하였다(그림 3.4).

입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 재실 시와 비재실 시의 I/O ratio가 모두 1에 가깝게 나타났고, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 와 비교하였을 때 I/O ratio의 편차 역시 매우 작으므로 재실 유무에 따른 I/O ratio의 변화가 작다는 걸 확인할 수 있다.

반면, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우, 재실유무에 따라 I/O ratio의 편차가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 입경 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지는 비재실 시 I/O ratio의 중앙값이 1보다 작아 실내 미세먼지 농도가 실외 미세먼지 농도보다 대체로 작은 것을 확인할 수 있다. 그러나 재실 시 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 I/O ratio가 증가하며, Maximum I/O ratio와 Minimum I/O ratio의 차이가 3 $\mu\text{m}$ 의 경우 10배, 5 $\mu\text{m}$ 의 경우 16배, 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 34배로, 그 편차가 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다.



### 3.3.5 실내 미세먼지 농도와 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 상관관계

큰 입경의 실내 미세먼지 농도가 재실 시에 증가하는 원인을 규명하기 위하여 실내 발생원 강도에 따른 실내 미세먼지 농도를 분석하였다.

Alshitawi(2011)<sup>44</sup>의 연구에서는 재실 학생 수를 발생원의 강도를 나타내는 지표로 선정하여 실내 발생원 강도와 실내 미세먼지 농도의 상관관계를 분석하였다. 하지만 대상 보육실의 일과 활동을 관찰 및 기록한 결과 영·유아의 등원 시간, 재실인원이 불규칙하고, 짧은 시간 내에서도 재실인원의 변동이 발생하여 재실인원수를 발생원의 강도를 나타내는 지표로 활용함에 한계가 있다. 또한, 환기가 불규칙하게 이루어져 발생원 강도와 환기가 동시에 고려된 지표의 선정이 요구되었다.

본 연구에서는 인체에서 발생되고 환기에 의해 희석되어 결정되는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 실내 발생원의 강도와 환기가 같이 고려된 지표로 선정하였다.

낮잠 시간의 경우 영·유아의 활동이 없어 미세먼지의 발생이 없으나, 호흡에 의한 CO<sub>2</sub> 발생은 지속되므로 앞서 가정한 CO<sub>2</sub>의 지표성을 상실하므로 분석데이터에서 제외했다.

실내 미세먼지 농도와 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 상관관계는 [그림 3.5]와 같다. 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 그래프 위의 점이 분산되어 있고 R<sup>2</sup>값이 0.1 이하로 매우 작게 나타났다(그림 3.5, a), b), c)). 이는 실내 미세먼지 농도와 실내 발생원의 상관관계가 없다는 것을 의미하기 때문에, 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 실내 발생원의 영향이 거의 없다는 것을 확인할 수 있다.

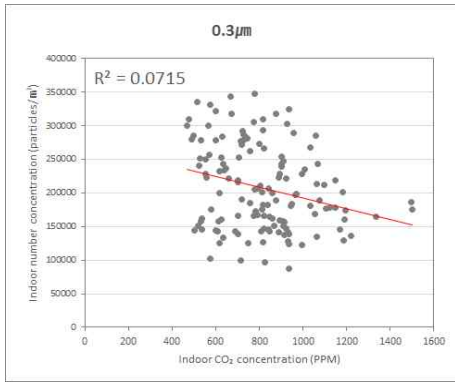
반면, 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지의 경우, 그래프 위의 점이 양의 증가 방향으로 고르게 분포되어 있으며 R<sup>2</sup>값 또한 입경별로 각각 0.51

---

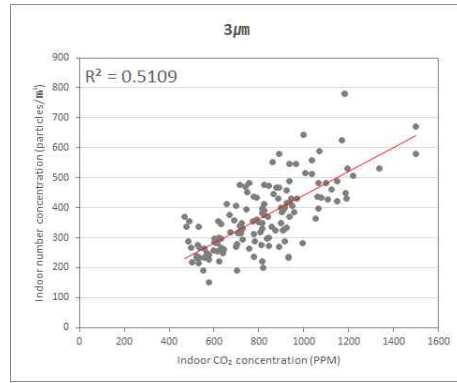
44) Alshitawi, M. S., Awbi, H. B. op. cit., 446-464.



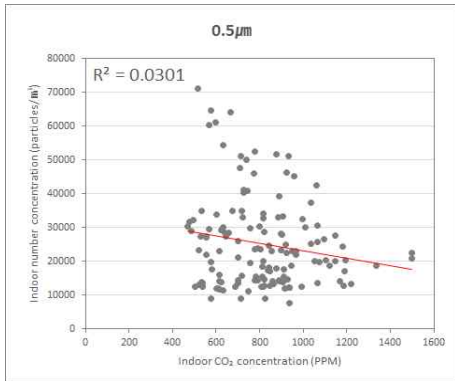
(3 $\mu\text{m}$ ), 0.58 (5 $\mu\text{m}$ ), 0.67 (10 $\mu\text{m}$ )이므로 큰 입경의 실내 미세먼지 농도와 실내 CO<sub>2</sub> 농도(실내 발생원의 강도)가 양의 상관관계를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.



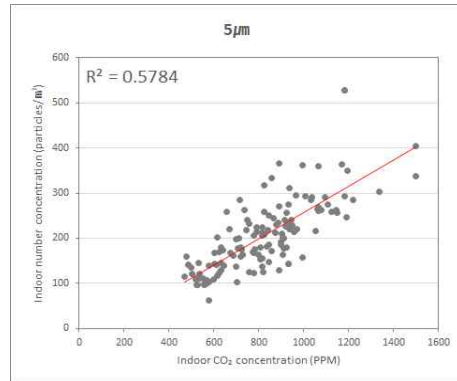
a) 입경 0.3 $\mu\text{m}$



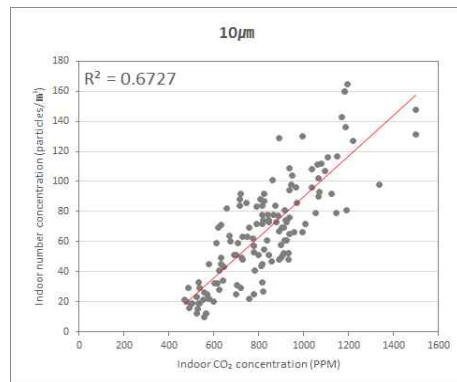
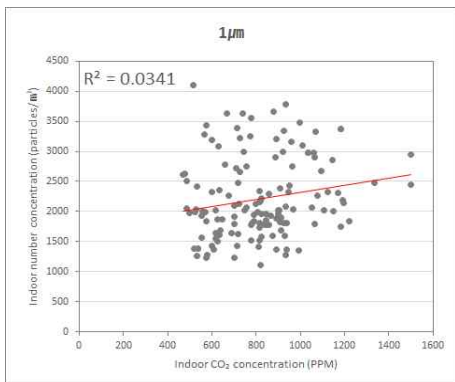
d) 입경 3 $\mu\text{m}$



b) 입경 0.5 $\mu\text{m}$



e) 입경 5 $\mu\text{m}$



### 3.4 소결

본 장에서는 실제 운영되는 보육실을 대상으로 실내·외 미세먼지 농도를 측정하였고, 자연환기를 실시하여 실외의 영향 파악이 가능한 환절기 데이터를 대상으로 보육실 미세먼지에 대한 실외와 영·유아에 의한 실내 발생의 영향을 입경별로 정성적으로 분석하였다. 겨울철 데이터와 본 장의 분석결과는 보육실 미세먼지 발생 평가를 위해 4장과 5장에 활용하였다.

(1) 보육실내 미세먼지의 농도 변화 특성을 분석한 결과, 측정 기간 동안 활동 및 재실 유무에 관계없이 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 I/O ratio는 일정하였으나, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 재실 시 I/O ratio가 증가하며, 특히 침구 준비 및 정리 시 I/O ratio가 급격히 증가함을 확인하였다.

(2) 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계 분석 결과 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지는 실내 발생원의 유무에 상관없이 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인하였다. 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 비재실 시와 재실 시의 결과가 다르게 나타났는데, 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ 의 입경은 비재실 시에는 실내와 실외 농도의 상관관계가 확인되었으나 실내 발생원이 있는 재실 시에 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인할 수 없었고, 10 $\mu\text{m}$ 의 입경은 재실조건과 상관없이 실내와 실외 농도 간에 상관관계가 확인되지 않았다. 이를 통해 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$  입경의 미세먼지는 실외의 영향이 큰 것을 파악하였다.

(3) 재실 유무에 따른 I/O ratio 비교 분석 결과 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 재실 유무에 관계없이 I/O ratio가 비교적 1에 가깝게 나타났지만, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 실내 발생원이 존재하는 재실 시 I/O ratio의 편차가 매우 크게 나타났다. 따라서 재실 여부, 즉 영·유아의 활동 여부가 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$  입경의 미세먼지의 농도에 영향을 크게 미친다는 것을 확인하였다.

(4) 실내 발생원과 실내 농도의 양의 상관관계 파악을 위해 실내 발생원의 강도를 나타낼 수 있는 지표로 CO<sub>2</sub> 농도를 선정하였고, 실내 농도와의 상관관계 분석하였다. 그 결과 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지 농도는 발생원 강도와 양의 상관관계가 있으므로 영·유아의 활동이 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$  미세먼지의 주요 실내 발생 인자임을 파악하였다.

# 제 4 장 보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수 산출

## 4.1 개요

앞서 2장에서 고찰한 바와 같이 침기율, 침착률 및 침투 계수는 실내 미세먼지 농도 형성에 영향을 미치는 주요 인자이며, 실내 미세먼지 발생률을 분석하기 위해 측정 기간 동안의 대상실의 침기율, 침착률 및 침투 계수 값이 요구된다. 따라서 본 장에서는 측정 기간 동안 해당 보육실의 침기율, 침착률, 및 침투 계수를 산출하고자 한다.

## 4.2 보육실의 침기율 산출

측정 기간 동안 해당 보육실의 침기율 산출을 위해 해당 보육실의 기밀 성능 측정 결과와 CO<sub>2</sub> 농도의 감소 구간 데이터를 이용하는 KS표준 옥내 환기량 측정방법<sup>45)</sup>을 참고하였다.

측정 대상 보육실의 기밀 성능 측정을 통해 식(4.1)<sup>46)</sup>의 Effective air leakage area( $A_L$ )를 산출하였으며, 그 결과는 <표 4.1>과 같다.

$$A_L = 10000Q_r \frac{\sqrt{\rho/2\Delta p_r}}{C_D} \quad (4.1)$$

45) KS 표준, KS F 2603 옥내 환기량 측정방법.

46) ASHRAE HANDBOOK (2013). op. cit., 16.15.

여기서,

- $Q_r$  : Airflow rate at  $\Delta p_r$  (m<sup>3</sup>/s)  
 $\rho$  : Air density (1.2kg/m<sup>3</sup> at sea level) (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\Delta p_r$  : Reference pressure difference (Pa)  
 $C_D$  : Discharge coefficient (Dimensionless)  
 ( $C_D=1$  at 4Pa,  $C_D=0.6$  at 10Pa)

<표 4.1> Effective Air Leakage Area 산출 결과

개구부 밀폐 여부	$\Delta p_r$	$Q_r$	$A_L$
O	10.2	0.44	1795
X	10	0.39	1600
개구부의 Effective Air Leakage Area (cm <sup>2</sup> ) ( $A_{L, seal} - A_{L, seal off}$ )			195



[그림 4.1] 대상 보육실의 Blow door test

보육실 CO<sub>2</sub> 농도 감소 구간을 이용한 침기율 산출에는 KS F 2603 옥내 환기량 측정 방법에서 제공하는 식(4.2)을 참고하였다. 본 방법에서는 실내 이산화탄소 농도의 완전 혼합을 가정하고 있기 때문에, 보육실내 6곳에서 CO<sub>2</sub> 농도를 측정 후 산술평균값을 완전 혼합 상태의 농도로 간주하였다.

$$a = \frac{2.303}{t} \log \frac{C_1 - C_o}{C_t - C_o} \quad (4.2)$$

여기서,

- $t$  : 제 1회 때 측정 시간부터 그 측정까지 경과 시간 (h)
- $C_1$  : 제 1회 때의 측정시간에 있어서의 실내 CO<sub>2</sub> 농도 (ppm)
- $C_t$  : t 시간 후에 있어서의 실내 CO<sub>2</sub> 농도 (ppm)
- $C_o$  : 급기 중의 CO<sub>2</sub> 농도 (ppm)

기밀 성능 측정 결과와 가스 추적법인 CO<sub>2</sub> 농도 감쇠 구간을 통해 산출한 해당 보육실의 침기율 산출 결과는 <표 4.2>와 같다. 보육실 실내의 미세먼지 측정 시간 간격에 맞춰 2분 간격으로 침기율을 산출하였다.



<표 4.2> 침기울 산출 결과

Case	침기울
11/19 (8:30-16:32)	
11/20 (8:30-18:30)	
11/23 (8:30-18:30)	
11/27 (8:30-18:30)	
11/30 (8:30-18:30)	
12/1 (8:30-18:30)	

## 4.3 침착률 및 침투 계수 산출

### 4.3.1 침착률 및 침투 계수 산출 방법 고찰

침착률과 침투 계수를 산출하는 표준 방법이 정립되지 않았으므로, 본 연구에서는 기존 연구자들이 제시한 산출 방법 중에서 Tung(1999)<sup>47)</sup>와 Chao(2003)<sup>48)</sup>가 제안한 방법을 참고하였다.

Mass Balance Equation인 이용하여, 실내 발생원이 없는 조건에서 식(2.2)를 식(4.3)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_{out} + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.2)$$

$$C_i = \frac{aP}{a+k} C_o + (C_{ini} - \frac{aP}{a+k} C_o) \exp(-(a+k)t) \quad (4.3)$$

여기서,

$C_{ini}$  : Initial indoor particle concentration (#/m<sup>3</sup>)

이때, 시간이 경과함에 따라 실내 미세먼지 농도는 일정한 평형 값에 다다르고, 그 일정 값을  $C_{ss}$ 라고 하면, 식(4.3)를 식(4.4)와 같이 정리할 수 있다.

---

47) Tung, T. C. W., Chao, C. Y. H., Burnett, J. (1999). A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell. Atmospheric Environment, 33, 881-893.

48) Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Cheng, E. C. K. (2003). Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences. Atmospheric Environment, 37, 4233-4231.

$$C_i = C_{ss} + (C_{ini} - C_{ss})\exp(-(a+k)t) \quad (4.4)$$

여기서,

$$C_{ss} : \text{Equilibrium particle concentration} \quad (\#/m^3)$$

위의 식(4.4)으로부터 침착률과 침투 계수를 식(4.5)와 식(4.6)으로 추정할 수 있으며, 측정 시간  $t$  동안 침기율( $a$ ), 침투 계수( $P$ ), 침착률( $k$ ), 실외 미세먼지 농도( $C_o$ )는 일정하다 가정한다.

$$k = -\left(\frac{1}{t}\right)\ln\left(\frac{C_i - C_{ss}}{C_{ini} - C_{ss}}\right) - a \quad (4.5)$$

$$P = \left(1 + \frac{a}{k}\right)\frac{C_{ss}}{C_o} \quad (4.6)$$

### 4.3.2 침착률 및 침투 계수 산출 결과

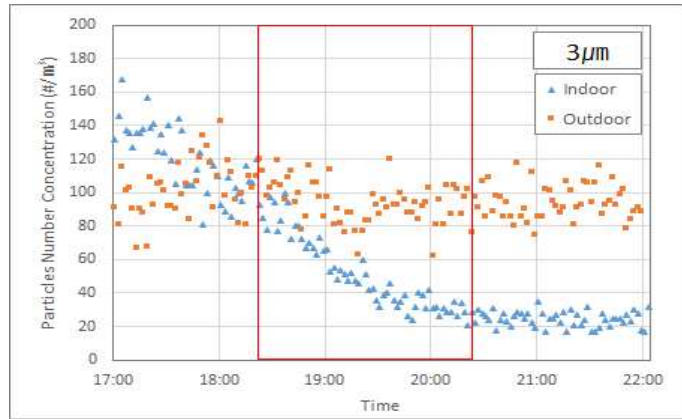
앞서 서술한 침착률 및 침투 계수 산출 방법은 측정 시간  $t$  동안 침기율( $a$ ), 실외 미세먼지 농도( $C_o$ )가 일정하다고 가정하였으므로, 비교적 실내 환경 변화가 없는 하원 후인 비재실 구간을 이용하였다. 앞서 3장의 결과를 참고하여 입경 실내 발생의 영향을 받는 입경  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 의 미세먼지를 대상으로 하였으며, 침착률 및 침투 계수 산출 구간은 [그림 4.2-4]과 같으며, 결과는 <표 4.3>와 같다.

침착률 및 침투 계수의 산출 결과를 통해 미세먼지의 침착률 및 침투 계수는 입자의 크기와 관련이 있다는 것을 확인할 수 있다. 미세먼지 입경의 크기가 증가할수록 중력의 영향이 커져 침착률이 커지며, 건물 외피 등의 틈새에 의해 걸러지는 효과가 커져 침투 계수는 작아진다. 즉, 입자의 크기가 클수록 침착으로 인해 제거되는 정도가 크며, 실외에서 실내로 유입되는 정도가 작다는 것을 의미한다.

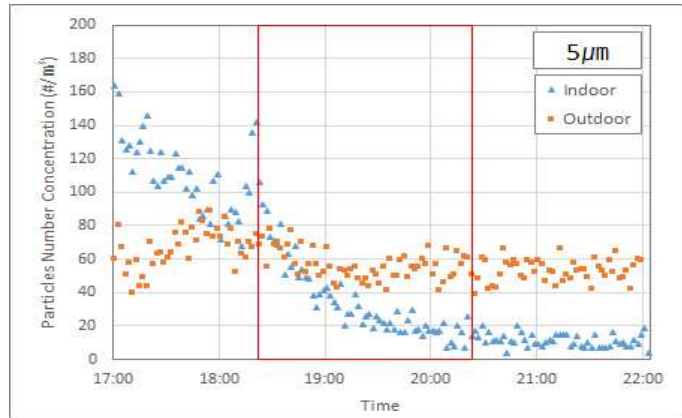
본 연구에서는 산출한 침착률과 침투 계수의 평균값을 해당 보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수로 활용하였으며, 산출 결과의 검증을 위해 측정한 농도와 산출한 침착률과 침투 계수 및 침기율을 실내 발생원이 없는 조건의 식(4.7)에 대입하여 산출한 예측 데이터와 비교하였다. 비교 결과인 [그림4.5]를 통해 예측 농도와 측정한 농도가 유사함을 확인할 수 있고, 산출 결과의 타당성을 확인하였다.

$$C_i^m = \frac{aP}{a+k} C_o^m + (C_i^{m-1} - \frac{aP}{a+k} C_o^m) \exp(-(a+k)t) \quad (4.7)$$

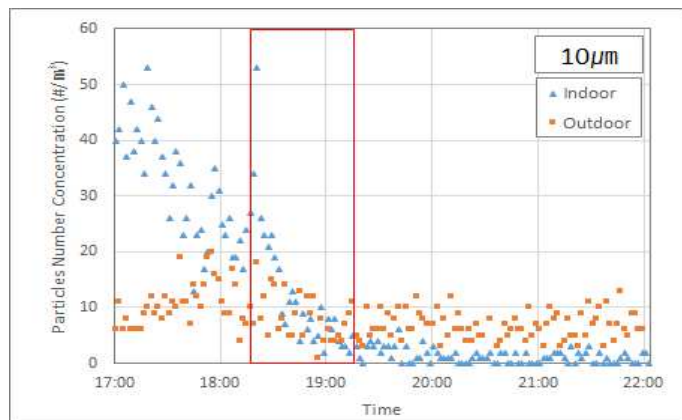
여기서,

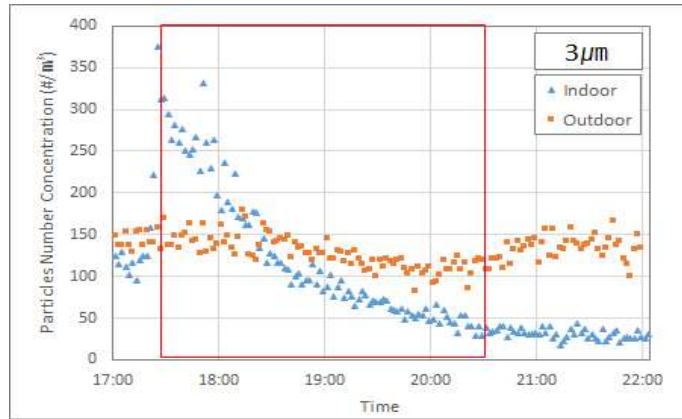


(a) 입경 3µm

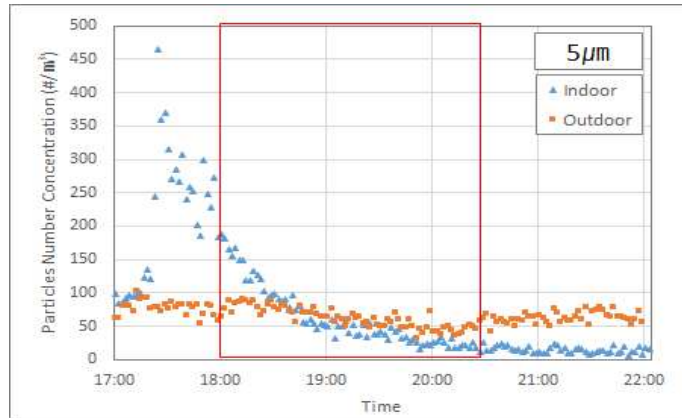


(b) 입경 5µm

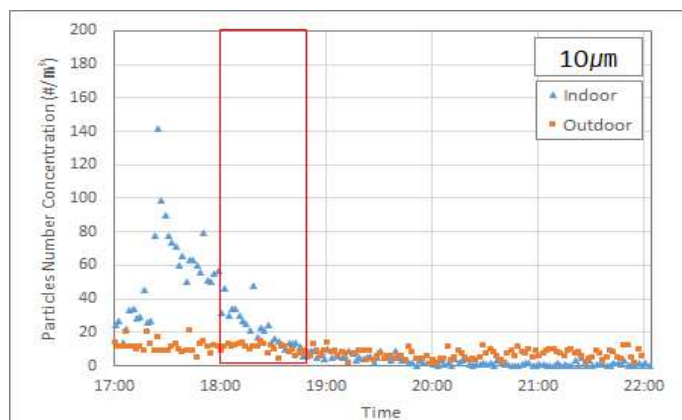


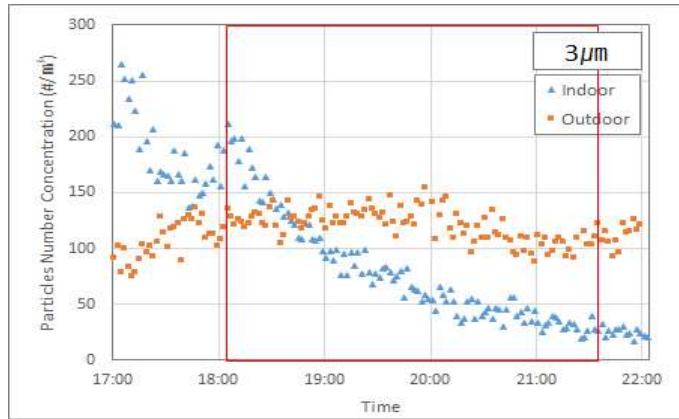


(a) 입경 3µm

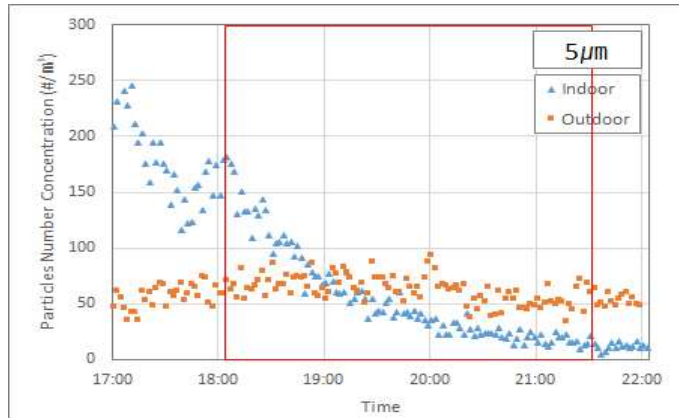


(b) 입경 5µm

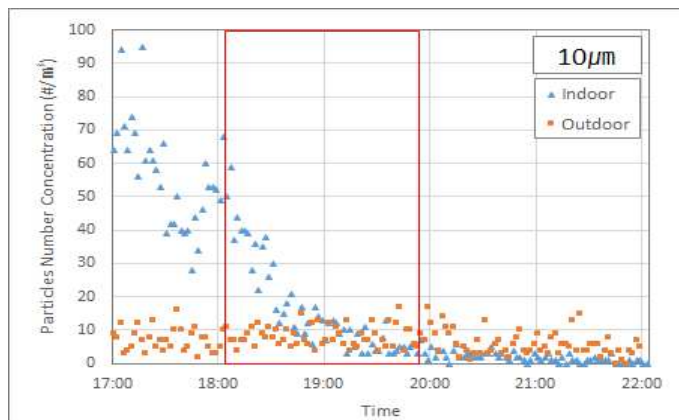




(a) 입경 3µm



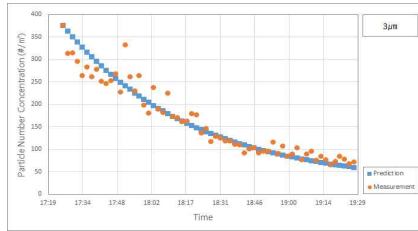
(b) 입경 5µm



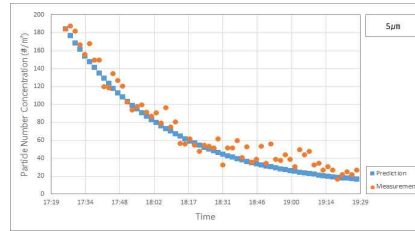
〈표 4.3〉 미세먼지의 입경별 침착률(k) 및 침투 계수(P) 산출 결과

Case	3 $\mu$ m		5 $\mu$ m		10 $\mu$ m	
	k	P	k	P	k	P
11/27	0.80	0.38	0.90	0.26	1.93	0.14
11/30	0.61	0.41	0.98	0.30	2.6	0.22
12/1	0.43	0.34	0.83	0.25	1.4	0.21
Average	0.61	0.38	0.90	0.27	1.99	0.19

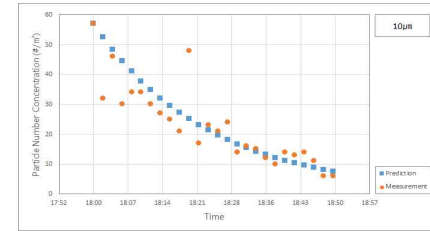




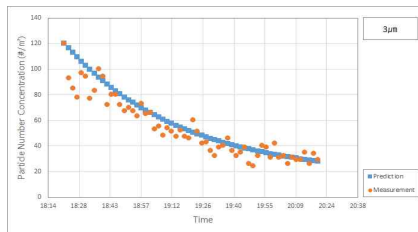
(a) 입경 3µm (11/27)



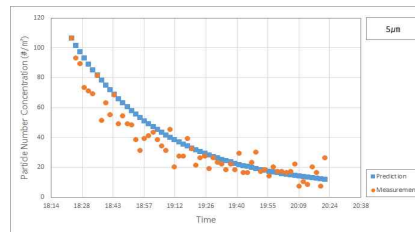
(b) 입경 5µm (11/27)



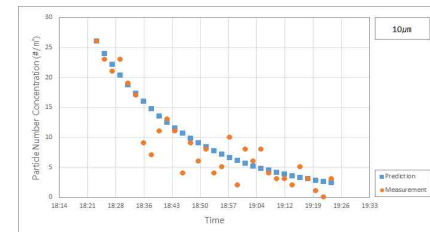
(c) 입경 10µm (11/27)



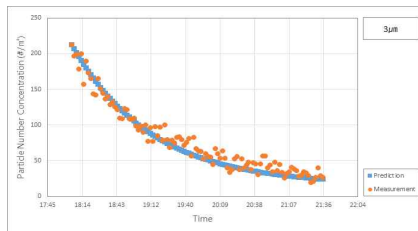
(d) 입경 3µm (11/30)



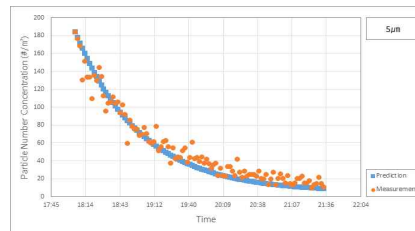
(e) 입경 5µm (11/30)



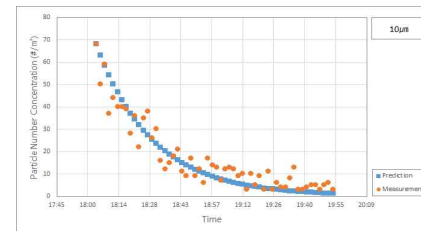
(f) 입경 10µm (11/30)



(g) 입경 3µm (12/1)



(h) 입경 5µm (12/1)



(i) 입경 10µm (12/1)

[그림 4.5] 실내 측정 농도와 산출한 침기율, 침착률 및 침투 계수를 이용한 예측 농도의 비교

앞서 2장에서 고찰한 바와 같이 침착률은 실내 표면에서의 침착 속도에 영향을 받기 때문에, 보육실의 경우 재실 시 영·유아의 활동 등으로 인해 실내 기류가 발생하며 이에 따라 미세먼지의 침착률이 변동할 수 있다. 앞서 산출한 침착률은 비재실 상태에서의 결과이기 때문에, 실내 환경에 변화가 생기는 재실 시에 활용하기 위해 활용 타당성에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 침착률의 활용 타당성 검토를 위해 Lai(2000)<sup>49)</sup>의 연구를 참고하였다. Lai(2000)는 미세먼지의 입경과 Friction velocity에 따라 침착 속도가 달라지며, Friction velocity가 각각 0.3cm/s, 1cm/s, 3cm/s 일 때 입경 1 $\mu$ m 미만의 미세먼지는 침착 속도가 다르고, 입경 1 $\mu$ m 이상의 미세먼지는 침착 속도가 같다는 결과를 도출하였다. Lai(2000)가 제안한 Friction velocity 산출 식은 아래 식(4.8)과 식(4.9)와 같다.

$$u^* = \left( \nu \frac{dU}{dy} \Big|_{y=0} \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

$$\frac{dU}{dy} \Big|_{y=0} = \left( \frac{0.074}{\rho_a \nu} \right) \left( \frac{\rho_a U_\infty^2}{2} \right) \left( \frac{U_\infty L}{\nu} \right)^{-1/5} \quad (4.9)$$

---

49) Lai, A. C. K., Nazaroff, W. W. (2000). Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 31(4), 463-476.

여기서,

- $u^*$  : Friction velocity (cm/s)
- $U_\infty$  : Representative freestream air velocity measurement (cm/s)
- $\rho_a$  : Air density (kg/m<sup>3</sup>)
- $\nu$  : Kinematic viscosity of air (0.15cm<sup>2</sup>/s at 20°C) (cm<sup>2</sup>/s)
- $L$  : Characteristic Length (cm)

해당 보육실의 재실 상태에서 측정한 실내 기류 데이터와 식(4.8)과 식(4.9)을 이용하여 Friction velocity를 산출하였고, 그 결과는 <표 4.4>와 같다. 측정 기간 동안의 최대 Friction velocity는 1.31cm/s이며, 이는 Lai의 연구 결과에서 입경 1 $\mu$ m 이상 미세먼지의 침착 속도가 동일한 범위에 속한다. 따라서 비재실 상태에서 산출한 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 미세먼지의 침착률을 재실 상태에서도 활용하는 것이 타당함을 확인하였다.

<표 4.4> Friction Velocity 산출 결과

Measured velocity (cm/s)		$L$ (cm)	Friction Velocity (cm/s)
Minimum	1	861	0.08
Maximum	22		1.31

## 4.4 소결

본 장은 보육시설 실내 미세먼지 발생률 산출을 위한 전 단계로 실내 미세먼지 해석에 필요한 침기율, 침착률, 침투 계수를 산출 하였다. 본 장의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 실내 미세먼지 해석을 위해 침기율 데이터가 반드시 요구되며, 본 연구에서는 측정 대상 보육실의 기밀 성능 측정 결과와 KS F 2603 옥내 환기량 측정방법을 참고하여 침기율을 산출하였다.

(2) 침착률 및 침투 계수 산출을 위해 Tung(1999)와 Chao(2003)가 제안한 방법을 참고하였으며, 영·유아가 모두 하원한 후 실내 환경 변화가 적은 비재실 구간과 실외 농도가 비교적 일정한 구간을 이용하여 침착률 및 침투 계수를 산출하였다. 그 결과 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 침착률은 각각 0.61, 0.90, 1.99이며, 침투 계수는 각각 0.38, 0.27, 0.19로 산출되었다. 침착률 및 침투 계수 산출 결과를 통해 입경의 크기가 클수록 실내 표면 등에 침착되는 정도가 크며, 실외에서 실내로 공기가 유입될 때 개구부 및 건물의 틈새 등에 의해 걸러지는 정도 역시 크다는 것을 확인하였다. 이를 통해 미세먼지의 입경의 크기가 클수록 실내 미세먼지에 대한 실외 미세먼지의 영향이 작다는 3장의 분석 내용을 수치적으로 확인하였다.

## 제 5 장 보육실 영·유아의 활동에 의한 입경별 미세먼지 발생률

### 5.1 개요

앞서 3장에서 보육시설 실내 미세먼지에 대한 실외 및 실내 발생의 영향을 입경별로 분석하였고, 그 결과 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지가 실내 발생의 영향이 큰 것을 파악하여 발생률 추정 대상 입경으로 선정하였다. 또한 4장에서는 본 장의 목적인 실내 미세먼지 발생률 분석을 위해 해당 보육실의 침기량, 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 미세먼지의 침착률 및 침투 계수를 산출하였다. 이를 토대로 본 장에서는 실내 미세먼지 발생률 산출을 통해 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생을 정량화 하여 평가하고자 한다.

### 5.2 보육실내 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계 분석

실내 미세먼지의 발생은 발생원에 의한 발생, 적재되어 있던 미세먼지의 재부유가 그 원인이며, 재실자의 활동 내용과 재실 인원수 등이 미세먼지 발생에 영향을 미친다는 것을 2장에서 고찰하였다.

3.2.2절에서 살펴본 바와 같이, 해당 보육실내 기타 미세먼지 발생원이 없기 때문에 영·유아의 활동이 지배적인 실내 발생원으로 작용할 것으로 판단된다. 또한, 영·유아의 일과 활동 내용, 재실 인원수 및 실내표면에 침착되어 있던 미세먼지의 양이 실내 미세먼지 발생에 영향을 미치는 영향인자로 판단되어, 실내 미세먼지 발생률 산출에 앞서 영향인자들과의 상관관계를 분석하였다.

### 5.2.1 영·유아의 활동 내용 및 재실 인원수

보육시설의 하루 일과는 다양한 일과 활동으로 구성되어 있는데 활동 내용에 따라 영·유아의 활동 강도가 다르며, 이에 따라 미세먼지 발생률이 달라질 수 있다. 영·유아의 일과 활동 관찰 내용과 보육실내 미세먼지 농도 특성 분석 결과를 토대로 일과 활동을 영·유아의 활동 내용에 따라 비교적 강도가 높은 자유 활동과 강도가 낮은 교육, 그리고 미세먼지 발생량이 많은 침구준비 및 정리로 구분하였다. 또한, 재실 인원수의 증감에 따라 전체 실내 미세먼지 발생률이 달라질 수 있기 때문에, 일과 활동 관찰 기록을 토대로 시간별 재실 인원수를 구분하였다.

실내 미세먼지는 실내에서 발생한 미세먼지와 실외에서 실내로 유입된 미세먼지에 의해 구성되므로, 실내 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계를 분석하기 위해 실외의 영향을 제외한 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 산출하였다. 실외에서 실내로 유입된 미세먼지 농도를 식(4.7)를 통해 계산하였으며, 실내 유입분과 측정된 실내 농도와의 차를 통해 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 산출하였으며, 그 과정은 식 (5.1)과 같다. 이때 침기율, 침착률 및 침투 계수는 앞서 4장의 결과를 이용하였으며, 실외 농도는 측정 당시의 실제 실외 농도를 이용하였다.

$$C_i^m = \frac{aP}{a+k} C_o^m + (C_i^{m-1} - \frac{aP}{a+k} C_o^m) \exp(-(a+k)t) \quad (4.7)$$

$$C_{ig} = C_{i,m} - C_i^m \quad (5.1)$$

여기서,

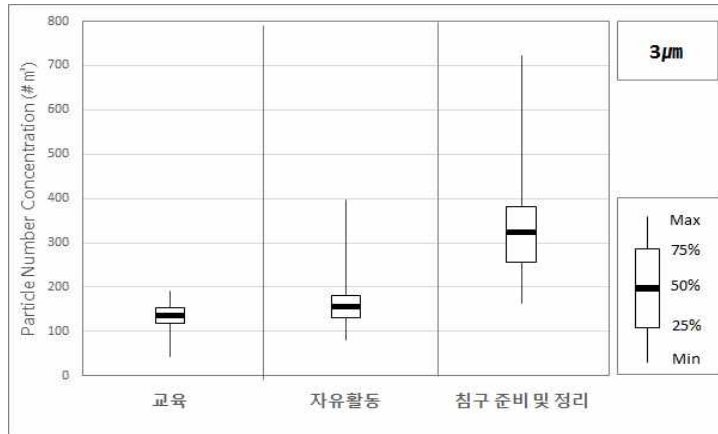
$C_{ig}$  : Indoor generated particle number concentration (#/m<sup>3</sup>)

$C_{i,m}$  : Measured indoor particle number concentration (#/m<sup>3</sup>)

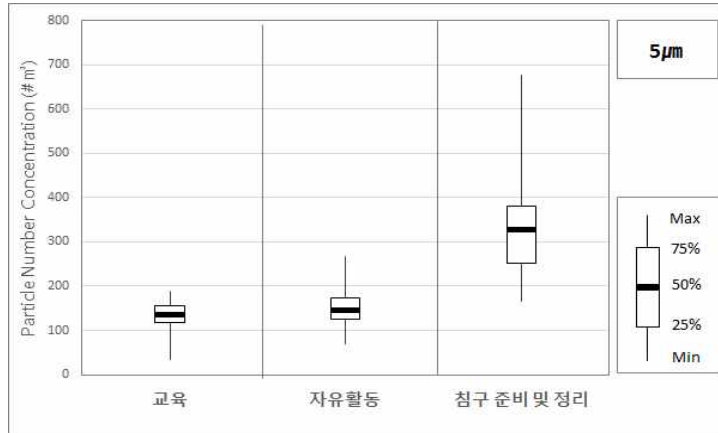
활동 내용에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도의 입경별 산출 결과는 [그림 5.1]과 같다. 침구 준비 및 정리 시 가장 높게 농도가 형성되었으며, 비교적 활동 강도가 높은 자유 활동이 교육보다 실내 농도가 높게 형성되는 것을 확인하였다.

실내 미세먼지 발생과 재실 인원수의 상관관계를 분석하기 위해 영·유아가 등원하여 재실 인원수가 증가하는 오전 시간대의 데이터를 이용하여 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 재실 인원수 별로 산출하였다. 산출 결과는 [그림 5.2]와 같으며, 재실 인원수가 증가할수록 농도가 높아짐을 확인할 수 있다.

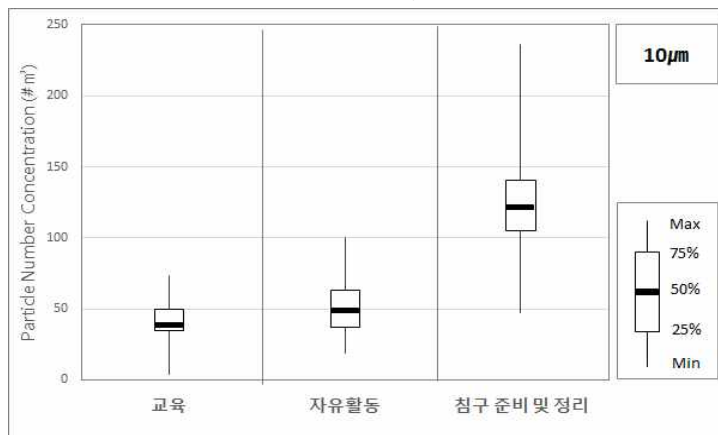
실내 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계 분석 결과, 활동 내용과 재실 인원수는 실내 미세먼지 발생률에 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.



(a) 입경 3µm



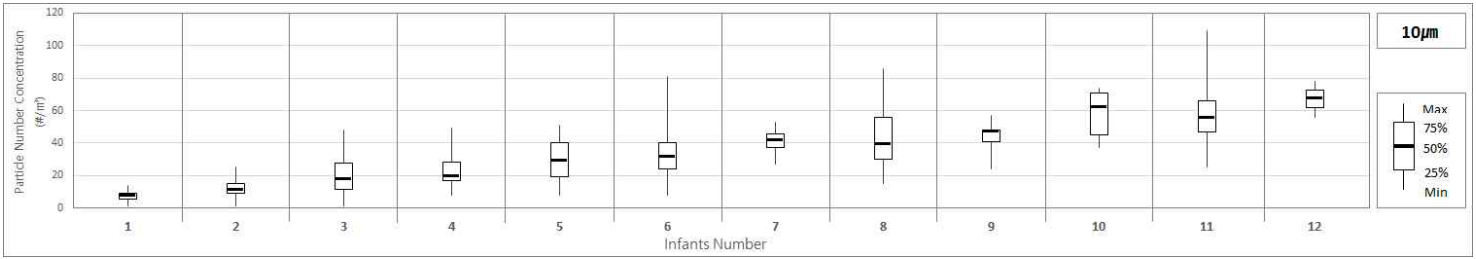
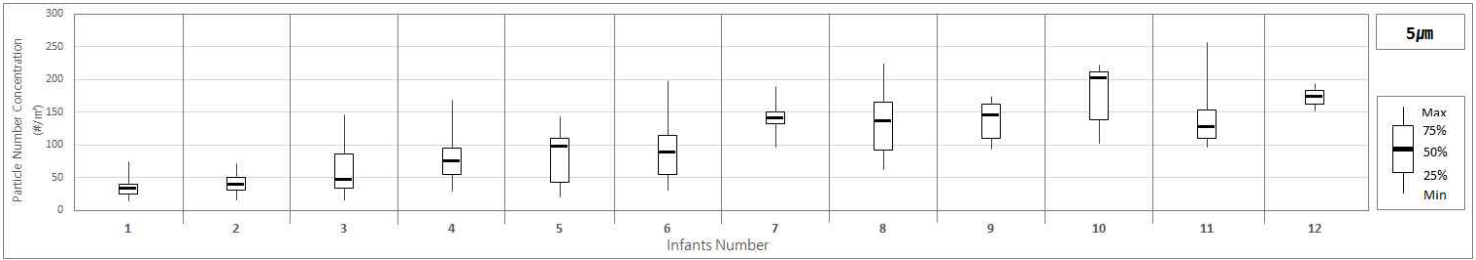
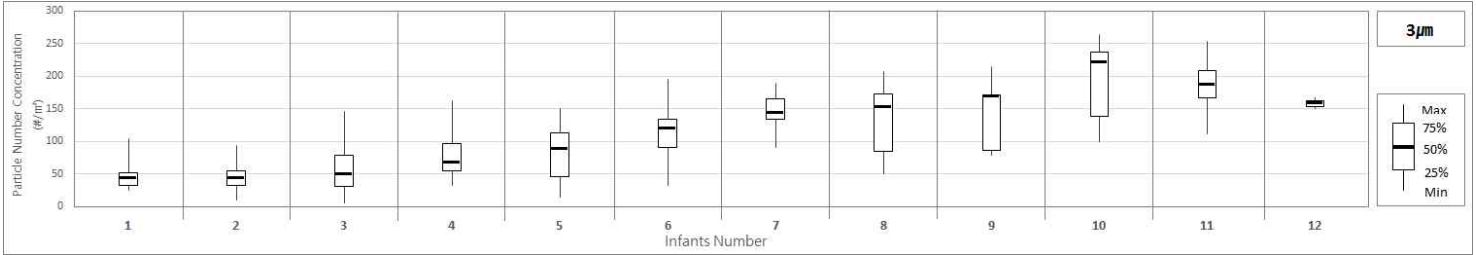
(b) 입경 5µm



(c) 입경 10µm

[그림 5.1] 활동 내용에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도





[그림 5.2] 재실 인원수에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도

### 5.2.2 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양

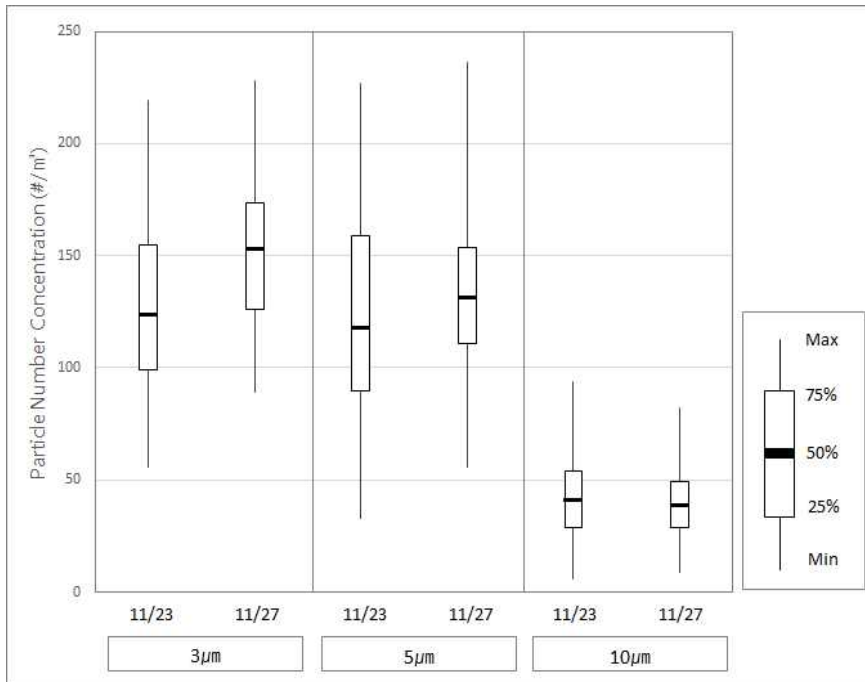
본 연구에서는 실내 표면 등에 침착되어 있다 기류 변화 등에 의해 실내로 재부유하는 과정을 모두 실내 발생으로 간주하였으므로, 보육실내 바닥, 가구 등의 표면에 침착되어 있는 미세먼지, 즉 실내표면에 침착된 미세먼지의 양 또한 실내 미세먼지에 발생을 미치는 영향인자로 판단하였다.

영·유아의 활동이 이루어지는 일과 활동 시간에는 미세먼지의 침착과 재부유가 연속적으로 발생하므로, 일과 활동 중 실내표면에 침착된 미세먼지의 양에 대한 상관관계 분석에 한계가 있다. 따라서 상관관계 분석을 위해 영·유아가 등원하기 전 시간대에 보육실내 청소를 실시하여 실내 표면의 미세먼지 영향을 최소화하고자 하였고, 청소를 실시한 날과 청소를 실시하지 않은 날의 오전 시간대의 실내 미세먼지 농도를 비교하였다. 실외 미세먼지의 농도, 습도, 재실 인원 역시 실내 미세먼지 농도에 영향을 미치므로 위의 조건이 비슷한 Case를 대상으로 비교하였다.

<표 5.1>과 [그림 5.3]은 실내표면에 침착된 미세먼지 양의 영향을 분석하기 위한 Case 선정 및 비교 결과이다. 비교 결과 바닥 청소 여부에 관계없이 실내 미세먼지 농도의 편차는 비슷함을 확인할 수 있다. 따라서 보육실 바닥에 침착된 미세먼지가 실내 발생에 미치는 영향이 적다는 것을 확인하였지만, 바닥 이외에도 영·유아의 의류, 장난감 등 다양한 요소에 실내 미세먼지가 침착는 등 다양한 요소에 영향을 받으므로 실내 미세먼지 적재량의 영향 대한 정확한 평가에는 한계가 있다. 따라서 실내 미세먼지 발생률 산출 시 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양에 대한 영향은 고려하지 않았다.

<표 5.1> 비교 대상 Case 선정

Case	실내상대습도 (%)	바닥청소여부
11/23 (9:40-11:30)	42.3~45.4	X
11/27 (9:40-11:30)	40~40.7	O



[그림 5.3] 바닥 청소 여부에 따른 실내 미세먼지 농도

### 5.3 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출

본 장에서는 실내 미세먼지 발생률 산출 모델을 제시하고, 이용하여 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률을 산출하였다. 또한 산출 결과의 검증에 위해 실제 실내 미세먼지 측정 농도 데이터와 발생률 산출 결과를 이용하여 예측한 실내 농도 데이터를 비교하였다.

#### 5.3.1 미세먼지 발생률 산출 모델

앞서 2장에서 살펴본 바와 같이, 기존 연구에서 사용한 식(2.10)을 이용하여 실내 미세먼지 발생률 산출할 수 있다.

$$\bar{G} = V \times \left[ \frac{C_{peak} - C_{ini}}{\Delta t} + (\overline{a+k}) \bar{C}_i - \bar{a} P \bar{C}_o \right] \quad (2.10)$$

그러나 기존 방법을 이용하여 미세먼지 발생률을 산출할 경우, 분석하고자 하는 특정 활동이 이루어지는 시점을 기준으로 하여 그로인해 실내 농도가 최고점에 다다른  $C_{peak}$  값이 요구된다. 또한  $C_{peak}$ 에 다다를 때까지의 시간 간격 동안의 실내 농도, 실외 농도, 침기량, 침착률의 평균값을 이용하기 때문에,  $C_{peak}$ 까지 도달하는데 소요된 시간이 늘어날수록 결과의 오차가 커진다. 보육시설의 경우 등원시간이 영·유아 마다 일정하지 않다는 점, 활동이 꾸준히 일어나지만 활동 강도나 패턴이 일정하지 않다는 점, 그리고 교육, 간식, 자유 활동과 같은 일과 활동이 연속적으로 일어난다는 점 등을 고려할 때, 기존의 발생률 산출에 필요한  $C_{peak}$  선정에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 보육실내 실내 환경 특성을 반영하여 실내 미세먼지 발생률을 산출할 수 있는 모델을 고안하였으며, 모델 도출 과정은 아래와 같다.

실내 미세먼지 발생률 산출 모델은 Mass balance equation인 식(2.2)을 통해 도출하였으며, Mass balance equation는 1차 미분방정식의 형태이므로 해인 실내 농도( $C_i$ )를 구하면 식(5.2)와 같다.

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = a(t)PC_o(t) + \frac{G(t)}{V} - a(t)C_i(t) - kC_i(t) \quad (2.2)$$

$$C_i(t) = e^{-\int (a(t)+k)dt} \times \left[ \int e^{\int (a(t)+k)dt} \times \left( a(t)PC_o(t) + \frac{G(t)}{V} \right) dt + C \right] \quad (5.2)$$

여기서,

$C$  : Integral constant

본 연구에서 사용한 측정기기는 실시간 농도 변화를 측정할 수 있는 센서방식이 아닌 측정 시간 동안 공기를 포집 후 측정된 미세먼지 개수를 포집 유량으로 나눠 개수 농도 결과를 나타내는 방식이므로 측정 시간 동안의 실내 환경 변화를 반영하는데 한계가 있다. 따라서 침기율( $a$ ), 실내 미세먼지 발생률( $G$ ), 실내 및 실외 농도( $C_i, C_o$ )를 식(5.3-6)와 같이 측정 시간  $t$  동안의 평균값으로 표현하면 측정 시간  $t$  동안  $\bar{a}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{C}_i$ ,  $\bar{C}_o$ 가 일정하다 간주할 수 있으며, 식(5.2)를 식(5.7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\bar{a} = \frac{1}{t} \int_0^t a(t) dt \quad (5.3)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{t} \int_0^t G(t) dt \quad (5.4)$$

$$\bar{C}_i = \frac{1}{t} \int_0^t C_i(t) dt \quad (5.5)$$

$$\bar{C}_o = \frac{1}{t} \int_0^t C_o(t) dt \quad (5.6)$$

$$\bar{C}_i = \left( \frac{\bar{a} P \bar{C}_o}{\bar{a} + k} + \frac{\bar{G}}{V(\bar{a} + k)} \right) (1 - e^{-(\bar{a} + k)t}) + \bar{C}_{ini} e^{-(\bar{a} + k)t} \quad (5.7)$$

현재 측정 시간에서의 실내 농도를  $\bar{C}_i^m$ , 전 시간에서의 실내 농도를  $\bar{C}_i^{m-1}$ 이라 하면, 식(5.7)을 식(5.8)와 같이 정리할 수 있으며, 식(5.8)은 실내 발생원이 있는 조건에서 실내 미세먼지 농도를 예측할 수 있는 수식이다. 식(5.8)에서 실내 미세먼지 발생률을 좌변으로, 나머지 변수를 우변으로 이항시키면 식(5.9)이 도출 된다.

$$\bar{C}_i^m = \left( \frac{\bar{a} P \bar{C}_o^m}{\bar{a} + k} + \frac{\bar{G}^m}{V(\bar{a} + k)} \right) (1 - e^{-(\bar{a} + k)t}) + \bar{C}_i^{m-1} e^{-(\bar{a} + k)t} \quad (5.8)$$

$$(5.9)$$

### 5.3.2 영유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 및 고찰

본 연구에서는 앞서 도출한 미세먼지 발생률 산출 모델인 식(5.9)를 이용하여 발생률을 산출하였는데, 결과의 오류를 최소화하기 위해 측정 간격을 2분으로 하였다. 또한 오전 등원 시간의 경우 영유아의 활동 이루어지지만 영·유아의 등원으로 인해 재실 인원수가 일정하지 않고 출입문의 개폐가 불규칙하며, 학부모의 출입 등의 영향 등 실내 환경 변화가 크므로 판단하여 분석에서 제외하였고, 침기율 및 실외 농도의 변화가 큰 구간 역시 분석에서 제외하였다. 동일한 활동이여도 영·유아 마다 활동 강도와 활동의 지속 시간이 다르기 때문에 실내 미세먼지 농도의 증가 구간과 감소 구간이 불규칙적으로 발생한다. 감소 구간에서 발생률을 산출할 경우 발생률이 음의 값을 나타내므로 음의 값으로 산출된 발생률은 분석에서 제외하였다.

미세먼지 발생의 영향인자인 활동 내용을 구분하였고, 영·유아 각각의 활동을 고려한 미세먼지 발생률 산출에는 한계가 있으므로, 영·유아 전체 발생률을 재실 인원수로 나누어 1인당 평균 발생률을 산출하였다. 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 결과는 <표 5.2-4>와 같다. 같은 활동 내에서도 영유아의 활동의 강도가 일정하지 않으므로 산출한 발생률의 25%, 50%, 75% 값을 표기하였다. 미세먼지의 발생률은 모든 측정 날짜와 모든 입경에서 침구 준비 및 정리, 자유 활동, 교육 순으로 나타났다. 침구 준비 및 정리에 의해 발생하는 실내 미세먼지는 자유 활동 대비 입경 3 $\mu\text{m}$ 의 경우 4.6배, 입경 5 $\mu\text{m}$ 의 경우 5.3배 입경 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 6.4배로 미세먼지 발생률이 매우 크게 나타났다. 침구 준비 및 정리를 침구에서 방출 및 재부유되는 미세먼지로 인해 발생량이 크게 나타난 것으로 판단되며, 높은 발생률이 앞서 3.3.2절의 침구 준비 및 정리 시 I/O ratio가 높아지는 원인임을 확인하였다. 교육 활동 시 미세먼지 발생

률이 모든 입경에서 가장 낮게 나타났는데, 제자리에서 울동을 하거나 그림을 그리는 등 자유 활동에 비해 상대적으로 활동 강도로 인해 발생률이 작은 것으로 판단된다.

본 연구는 만3세반의 보육실을 대상으로 분석하였기 때문에 활동 강도 및 특성이 다른 연령대 영·유아의 미세먼지 발생률과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 또한 과도하게 높은 채실밀도 또는 카펫과 같이 미세먼지의 재부유가 많이 일어날 수 있는 가구의 유무도 미세먼지 발생률에 영향을 미칠 수 있으므로, 이러한 보육실의 미세먼지 발생률 역시 본 연구의 대상 보육실의 미세먼지 발생률과 차이가 발생할 수 있다. 따라서 연령대와 실내 환경이 상이한 보육실을 대상으로는 본 연구의 산출 결과를 활용하기에 부적합할 것이라 판단된다.



<표 5.2> 미세먼지 발생률 산출 결과 (3 $\mu$ m)

(단위: #/h)

활동 내용		11/19	11/20	11/23	11/27	11/30	12/1
교육	인원수	11	11	10	13	9	9
	25%	16169	13153	4713	3760	9133	7402
	50%	25537	17792	13162	17698	12141	12337
	75%	30669	45542	38788	56308	55117	17271
자유 활동	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	50402	65501	34698	38026	69933	40650
	50%	91740	111329	60773	94723	96134	95513
	75%	147616	207887	115760	136567	126835	150050
침구 정리 및 준비	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	X	258794	135917	210111	63522	337246
	50%		394526	149702	426661	212064	436967
	75%		535089	164083	708175	413466	809716

<표 5.3> 미세먼지 발생률 산출 결과 (5 $\mu$ m)

(단위:#/h)

활동 내용		11/19	11/20	11/23	11/27	11/30	12/1
교육	인원수	11	11	10	13	9	9
	25%	36852	17935	11049	14111	5973	5545
	50%	43405	35222	36841	25490	36558	29018
	75%	49958	51295	51142	35515	64677	70873
자유 활동	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	49183	39732	52150	38026	50890	55671
	50%	108549	78045	94478	94723	95517	97684
	75%	155637	143643	140978	136567	171738	156718
침구 정리 및 준비	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	X	166794	193697	252833	110912	229573
	50%		194389	209997	501417	293518	492300
	75%		453681	226297	532394	442956	838220

<표 5.4> 미세먼지 발생률 산출 결과 (10 $\mu$ m)

(단위:#/h)

활동 내용		11/19	11/20	11/23	11/27	11/30	12/1
교육	인원수	11	11	10	13	9	9
	25%	21951	6559	8649	6671	1642	5102
	50%	35483	17272	19732	11118	1679	14575
	75%	46416	21652	39400	28899	15146	14656
자유 활동	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	41066	24761	16802	27133	27738	20870
	50%	80438	54611	46410	37642	55125	48355
	75%	116271	76547	80604	59297	90188	77959
침구 정리 및 준비	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	X	62143	155440	209086	49237	77251
	50%		112891	159451	239979	117567	149921
	75%		146945	163462	430112	175781	285366

〈표 5.5〉 1인당 미세먼지 발생률 산출 결과 (단위:#/h·person)

활동 내용		3 $\mu$ m	5 $\mu$ m	10 $\mu$ m
교육	25%	449	634	231
	50%	1617	2275	1446
	75%	4063	5169	3172
자유 활동	25%	4736	3834	2307
	50%	8556	8479	4518
	75%	14416	14091	8023
침구 정리 및 준비	25%	14628	16199	6963
	50%	29686	32486	12311
	75%	49932	46245	17604

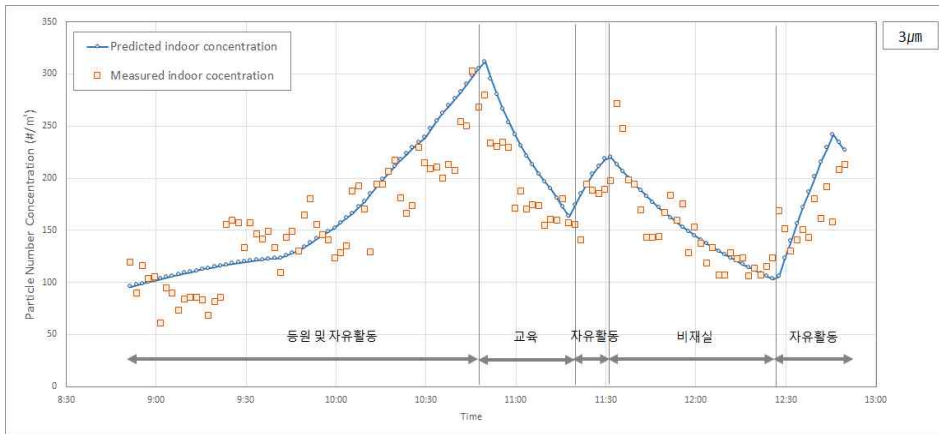
〈표 5.5〉는 전체 측정 기간 동안의 영·유아 1인당 발생률을 입경별로, 활동 내용별로 산출한 결과이다. 미세먼지 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 발생률의 중앙값은 교육의 경우 각각 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동의 경우 8556/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리의 경우 29686/h, 32486/h, 12311/h로 나타났다. 세 입경 모두 교육 시 발생률이 가장 낮으며, 침구 정리 및 준비 시 발생률이 높음을 확인할 수 있다.

실내 미세먼지 발생률 산출 결과의 검증을 위해 산출 결과를 이용하여 예측한 실내 농도와 측정된 실내 농도를 비교하였다. 입경별 발생률 산

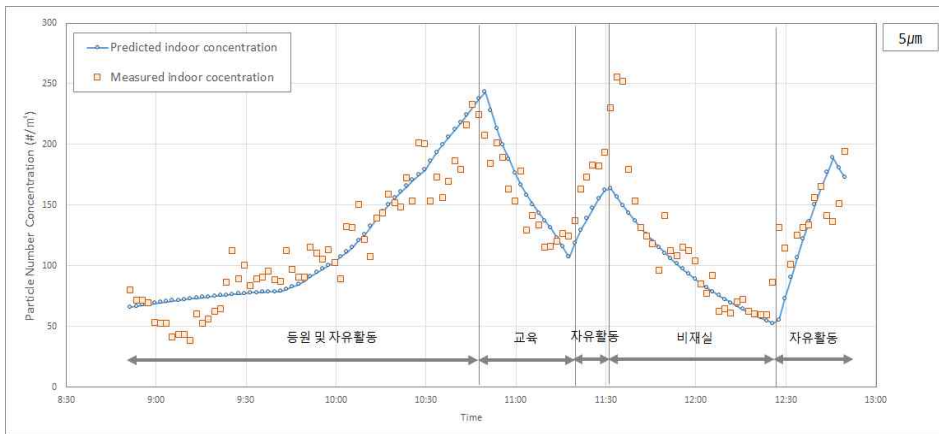
출 결과, 침기율, 침착률, 침투 계수, 측정된 실외 농도 및 관찰 기록을 식(5.8)에 대입하여 실내 미세먼지 농도를 예측하였으며, 실내 미세먼지 발생률은 산출 결과의 중앙값을, 예측에 사용된 초기 농도는 측정된 실내 미세먼지 농도를 이용하였다.

[그림 5.4]와 [그림 5.5]은 각각 11월 20일과 12월 1일의 예측한 실내 미세먼지 농도와 측정된 실내 미세먼지 농도이다. [그림 5.5]의 급격한 농도 증가 구간을 제외하면, 예측 농도와 측정 농도 값이 비슷하고 농도의 증가 또는 감소 패턴이 유사함을 확인할 수 있다. 그러나 영·유아의 활동 강도는 활동이 지속되는 시간 동안 일정하지 않으며, 재실하고 있는 모든 영·유아가 동일한 강도로 동일한 활동을 하지 않기 때문에 예측 농도와 실제 농도의 차이가 발생할 수 있다. 또한, 활동 중에 화장실을 가거나 하는 등의 갑작스러운 재실 인원수의 변동이 발생하며, 갑작스럽게 활동 강도가 매우 높아져 미세먼지 발생률이 매우 높아질 수 있기 때문에 측정 농도가 예측 농도보다 낮거나 높을 수 있다.

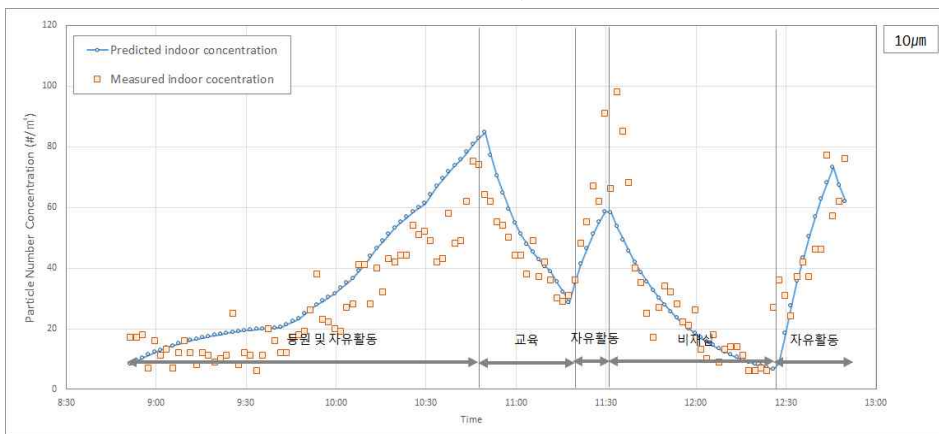
전체 기간 동안 예측한 농도와 측정된 농도와의 상관관계 분석을 위해 선형 회귀 분석을 이용하였다. 비재실 구간 및 재실 인원 파악에 한계가 있는 하원 시간대의 구간은 분석에서 제외하였다. [그림 5.6]은 세 가지 입경에서 예측 농도와 측정된 농도의 선형 회귀 분석 결과이다. 이때, 기울기와  $R^2$  값이 1에 가까울수록 두 농도의 상관관계가 매우 높고 예측 농도가 실제 농도와 매우 유사함을 의미한다. 상관관계 분석 결과 입경  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 의 기울기가 각각 0.93, 0.88, 0.89,  $R^2$  값이 각각 0.82, 0.82, 0.75로 예측 농도와 측정된 농도와의 상관관계를 확인할 수 있다. 즉, 본 연구에서 산출한 실내 미세먼지 발생률을 이용한 보육실내 미세먼지 농도 예측 결과가 타당함을 의미한다.



(a) 입경 3µm

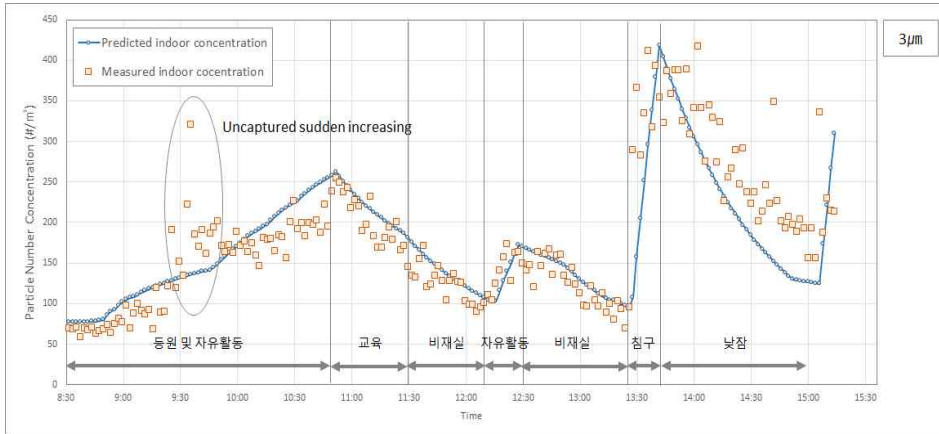


(b) 입경 5µm

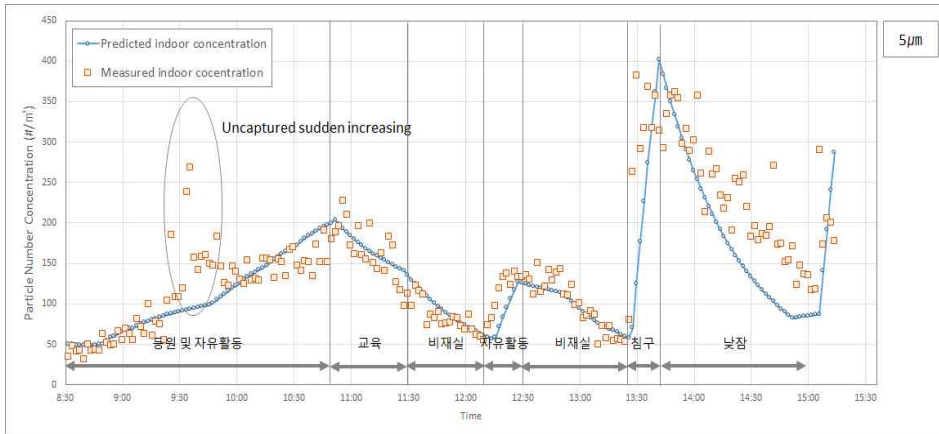


(c) 입경 10µm

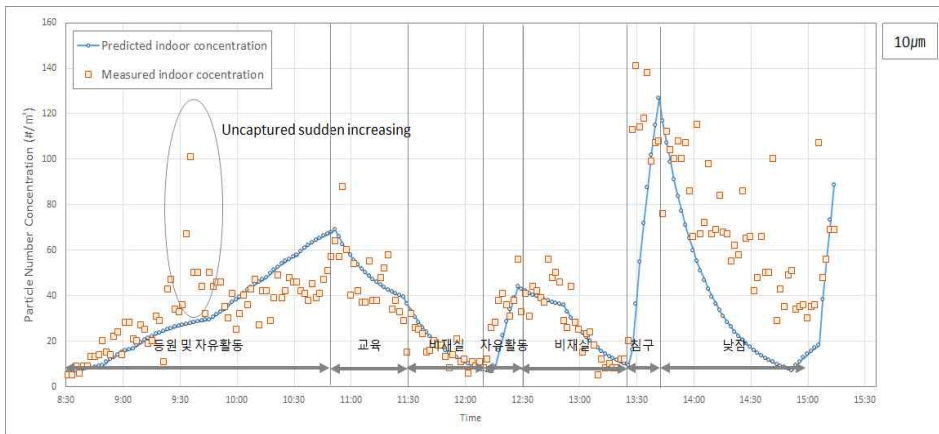
[그림 5.4] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도 비교 (11/20)



(a) 입경 3µm

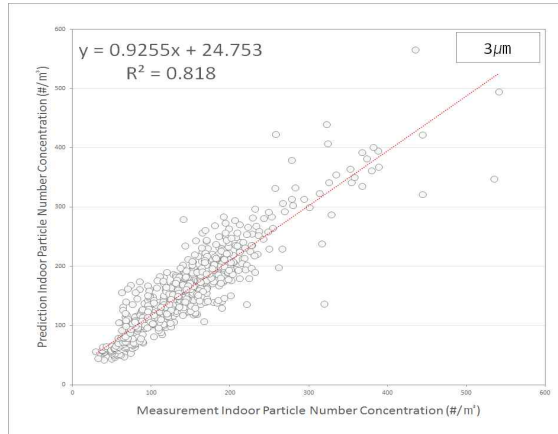


(b) 입경 5µm

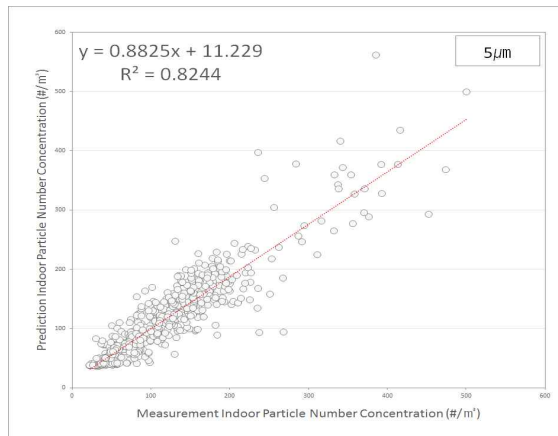


(c) 입경 10µm

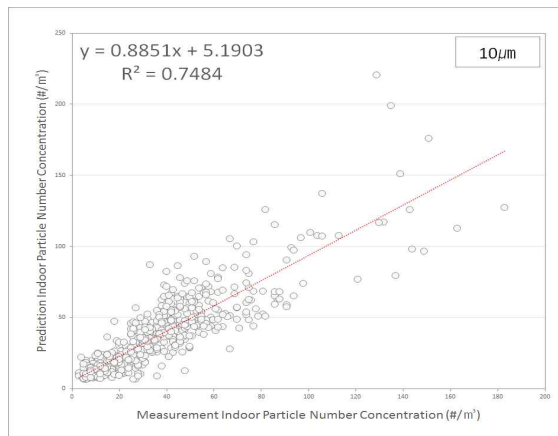
[그림 5.5] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도 비교 (12/1)



(a) 입경 3µm



(b) 입경 5µm



(c) 입경 10µm

[그림 5.6] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도의 상관관계



## 5.4 소결

본 장에서는 실내 미세먼지 발생률 산출을 통해 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생을 정량화 하여 평가하였다. 미세먼지 발생률 산출에 앞서 보육실 미세먼지 발생에 영향을 미치는 영향인자를 도출하고 해당 인자와의 상관관계를 분석하여 실내 미세먼지 발생률 분석에 참고하였다. 또한 실내 발생률 산출 모델을 도출하고, 해당 모델을 통해 보육실 내 미세먼지 발생률을 산출하였으며, 산출 결과를 이용한 예측 농도와 측정된 실내 농도를 비교하여 결과의 타당성을 검증하였다. 본 장의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 보육실 영·유아의 일과 활동 관찰 및 분석을 토대로, 미세먼지 발생에 영향을 미치는 인자로서 활동 내용, 재실 인원수, 그리고 실내표면에 침착되어 있던 미세먼지 양이 있음을 파악하였다. 해당 인자들이 실내 미세먼지 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 실외 미세먼지 농도의 영향을 제외한 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 산출하였으며 활동 내용, 재실 인원수에 따른 농도를 비교하였다. 활동 강도가 비교적 큰 자유 활동 시 상대적으로 정적인 교육 활동 보다 미세먼지 농도가 높았으며, 침구에서 재부유한 미세먼지로 인해 침구 준비 및 정리 시 그 농도가 매우 높게 나타났다. 재실 인원수가 늘어날수록 실내 미세먼지 발생에 영향을 미치는 발생원이 증가한다고 볼 수 있고, 재실 인원수가 증가함에 따라 실내 농도가 증가함을 확인하였다. 따라서 활동 내용과 재실 인원수는 보육실 미세먼지 발생에 영향을 미치는 인자이므로 발생률 산출에 분석 내용을 참고하였다. 실내표면에 침착된 미세먼지의 양의 경우, 청소를 통해 바닥에 침착된 먼지를 제거한 후 제거하지 않은 날과

실내 농도를 비교하였으나 농도 차이를 확인하지 못하였고, 다른 요소들의 영향을 분석하는데 한계가 있으므로 해당 인자는 분석에 제외하였다.

(2) 기존 연구에서 활용한 미세먼지 발생률 산출 모델은 보육실의 특성상 활용에 한계가 있으므로, 활동 강도와 지속시간이 불규칙한 영·유아의 활동 특성을 고려할 수 있는 미세먼지 발생률 산출 모델을 도출하여 분석에 활용하였다. 앞서 미세먼지 발생 영향인자 분석 내용을 바탕으로 활동 내용에 따라 영·유아 1인당 미세먼지 발생률을 입경별로 개수 농도로 산출하였으며, 산출 결과의 중앙값은 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 10 $\mu$ m 순으로 교육 시 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동 시 8856/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리 시 29686/h, 32486/h, 12311/h의 미세먼지가 발생하였다. 이를 통해 미세먼지의 발생률이 가장 높은 활동은 침구 준비 및 정리이며, 활동량이 적은 교육 시 발생률이 가장 낮음을 수치적으로 확인하였다.

(3) 영유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 결과의 검증을 위해 3장, 4장 및 5장에서 산출한 결과를 이용하여 예측한 실내 미세먼지 농도와 측정된 농도를 비교하였다. 영·유아의 활동 강도가 일정하지 않고, 측정기기 주변에서 강도가 큰 활동이 발생하는 등의 예상치 못한 실내 농도 증가로 예측 농도와 차이가 발생하였으나, 선형 회귀 분석을 통해 두 농도의 상관관계를 분석한 결과 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 기울기가 각각 0.93, 0.88, 0.89, R<sup>2</sup> 값이 각각 0.82, 0.82, 0.75로 예측 농도와 측정된 농도와의 상관관계를 확인하였고, 발생률 산출 결과가 타당함을 검증하였다.

## 제 6 장 결 론

미세먼지는 황사, 도시의 고밀화 등으로 인해 최근 관심이 높아지는 오염물질로써 호흡기와 심혈관계 질환을 유발시키는 인체에 매우 위해한 물질이다. 또한 발생원이 실내와 실외에 모두 존재하는 단순히 환기로 실내 농도를 저감할 수 없으며, 실내 발생과 실외에서 유입되는 미세먼지를 모두 고려한 관리방안이 수립되어야 한다.

본 연구의 대상공간인 보육시설의 경우 면역력이 매우 약한 영·유아가 장시간 생활하는 공간이다. 따라서 보육시설을 대상으로 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안이 필수적으로 도입되어야 한다. 그러나 보육시설을 대상으로 실내 미세먼지 농도 특성에 대한 연구가 부족하고 대부분의 보육시설의 경우 예산이 부족 등으로 인해 관리방안 적용에 한계가 있으므로 관리방안 대안들의 농도 저감 효과 분석을 통해 가장 효율적인 관리방안이 무엇인지 평가되어야 한다. 그러나 안전 등의 문제로 실제 보육시설을 대상으로 관리방안의 효과 검증에 한계가 있기 때문에, 시뮬레이션이나 예측 모델을 활용하여 관리방안의 농도 저감 효과가 평가되어야 한다.

실내 미세먼지 농도 예측 시 다양한 인자들의 값이 요구되는데, 재실 상태에서의 농도 저감 효과가 평가되어야 하므로 재실자로 인한 실내 미세먼지 발생률이 반드시 필요하며, 농도 예측을 위해 이에 대한 평가가 선행되어야 한다. 특히 보육시설의 경우 실내 주요 발생원이 영·유아의 활동이기 때문에 이로 인한 미세먼지 발생률에 대한 평가가 반드시 이루어져야 한다.

본 연구에서는 첫 번째로 영·유아에 활동에 의한 미세먼지의 발생이

입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였고, 두 번째로 보육실 미세먼지 발생 특성 분석 및 보육실내 미세먼지 발생률을 입경별 개수 농도로 정량화 하여, 미세먼지 농도 예측에 활용 가능한 보육실 미세먼지 발생률 데이터를 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 먼저, 보육실의 실내 환경 특성 파악 및 미세먼지 농도 변화 특성 파악을 위해 실제 보육이 이루어지고 있는 만3세반 보육실을 대상으로 실내 환경 관측 및 기록과 실내외 미세먼지의 입경별 개수 농도를 측정하였다. 관측 내용을 분석한 결과 보육실 주요 미세먼지 발생원은 영·유아의 활동으로 판단되었다. 또한 재실과 비재실로 나누어 실내외 미세먼지 농도의 상관관계, 재실 유무에 따른 I/O ratio, 그리고 실내 발생원과 실내 농도의 양의 상관관계를 분석 결과, 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지는 실내 발생원의 유무에 상관없이 실내외 농도의 상관관계를 확인하였고 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 재실여부 즉, 영·유아의 활동 여부가 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 입경의 미세먼지의 농도에 영향을 크게 미친다는 것을 확인하였다. 이를 통해 입경 입경이 작은 Fine Particle은 실외의 영향이 크고, 보육실의 영·유아 활동에 의해 발생하는 미세먼지는 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 Coarse Particle임을 파악하였다. 위의 결과를 통해 보육실 Fine Particle 농도 저감을 위해선 실외에서 유입되는 공기에, Coarse Particle 농도 저감을 위해선 실내 공기에 관리방안이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 보육실 미세먼지 발생률 평가를 위해 이에 필요한 인자인 침착률 및 침투 계수 산출을 위해 Tung(1999)와 Chao(2003)가 제안한 방법을 이

용하였으며, 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 침착률은 각각 0.61, 0.90, 1.99이며, 침투 계수는 각각 0.38, 0.27, 0.19로 산출되었다. 이를 통해 미세먼지의 입경의 크기가 클수록 실내 표면 등에 침착되는 정도가 크며, 실외에서 실내로 공기가 유입될 때 개구부 등에 의해 걸러지는 효과가 크기 때문에 실외 보단 실내의 영향이 크며. 입경이 작을수록 공기 중에 부유하는 시간이 길어지고 실내로 침투되는 정도가 더 크다는 것을 확인하였다. 이는 Fine Particle의 경우 실외의 영향이 크고 Coarse Particle의 경우 실내의 영향이 크다는 3장의 결과를 설명하며, 미세먼지 관리 방안 수립 시 입경에 따라 효과적인 관리 방안이 다를 수 있음을 의미한다.

(3) 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생 평가에 앞서 활동 강도에 따라 활동 내용을 자유 활동, 교육, 침구 준비 및 정리로 나누었으며, 평가에 활용하였다. 기존 연구에서 활용한 미세먼지 발생률 산출 모델은 보육실의 특성상 활용에 한계가 있으므로, 활동 강도와 지속시간이 불규칙한 영·유아의 활동 특성을 고려할 수 있는 미세먼지 발생률 산출 모델을 고안하여 분석에 활용하였다. 앞서 미세먼지 발생 영향인자 분석 내용을 바탕으로 활동 내용에 따라 영·유아 1인당 미세먼지 발생률을 입경별로 개수 농도로 산출하였다. 산출 결과의 중앙값은 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 10 $\mu$ m 순으로 교육 시 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동 시 8856/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리 시 29686/h, 32486/h, 12311/h이다. 본 연구는 만3세반의 보육실을 대상으로 분석하였기 때문에 활동 강도 및 특성이 다른 연령대 영·유아의 미세먼지 발생률과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 또한 과도하게 높은 재실밀도 또는 카펫과 같이 미세먼지의 재부유가 많이 일어날 수 있는 가구의 유무도 미세먼지 발생률에 영향을 미칠 수 있으므로, 이러한 보육실의 미세먼지 발생률 역시 본 연구의 대상 보

육실의 미세먼지 발생률과 차이가 발생할 수 있다. 따라서 연령대와 실내 환경이 상이한 보육실을 대상으로는 본 연구의 산출 결과를 활용하기에 부적합할 것이라 판단된다. 산출 결과를 통해 미세먼지의 발생률이 가장 높은 활동은 침구 준비 및 정리이며, 활동량이 적은 교육 시 발생률이 가장 낮음을 수치적으로 확인하였다. 재실 인원수가 증가하고 영·유아의 활동 지속되는 오전 등원 시간이나 자유 활동 시에는 시간이 경과함에 따라 실내 미세먼지 농도가 증가할 수 있으므로, 환기 등을 통해 실내 미세먼지 농도를 저감해야 한다. 또한 침구 준비 및 정리의 경우 미세먼지 발생률이 매우 높으며 바로 뒤에 낮잠 활동이 이어져 미세먼지가 침착되는 도중 호흡으로 인해 영·유아의 체내로 유입될 수 있으므로 장시간 환기 등을 통해 반드시 실내 미세먼지 농도를 저감할 필요가 있다.

본 연구의 결과는 보육실 미세먼지 농도 관리 방안 수립 및 보육실 미세먼지 농도 예측을 위한 자료로 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 차동원 (2007). 실내공기오염. 기문당.
- 2) 이경미, 이기숙 (2009). 유아의 성과 연령에 따른 유아교육기관에서의 하루일과. 교육과학연구, 40(3), 171-193.
- 3) 박영옥 (2002). 실내 생활공간에서의 미세먼지 오염 특성 및 제어기술, 한국생활환경학회지, 9(2), 122-128.
- 4) 강공언, 김신도, 이정실, 최경순, 실내공기질관리학, 문운당.
- 5) Zhang, Y., 실내공기질, 동화기술.
- 6) 김신도 (2003). 미세먼지 규제와 영향. 공기청정기술, 19-28.
- 7) 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호 (2005). 서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. 한국환경보건학회지, 31(4), 301-308.
- 8) 이용기, 이기중, 이재성, 신은상 (2012). 미세먼지 입경농도 분포의 지역별 특성. 한국대기환경학회지, 28(6), 666-674.
- 9) 박성준, 김지혜, 조구상, 여명석, 김광우 (2015). 보육시설 실내 미세먼지의 입경별 실내-외 발생원 분석 대한건축학회 논문집, 31(12), 215-222.
- 10) KS 표준, KS F 2603 옥내 환기량 측정방법.
- 11) US EPA (1996). Air quality criteria for particulate matter. 1, Washington, DC.
- 12) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association, 287(9), 1132-1141.

- 13) Penttinen, P., Timonen, K. L., Tiittanen, P., Mirme, A., Ruuskanen, J., Pekkanen, J. (2001). Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *European Respiratory Journal*, 17(3), 428-435.
- 14) Stephenson, D., Seshadri, G., Veranth, J. M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHA Journal*, 64(4), 516-521.
- 15) Thatcher, T. L., Layton, D. W. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13), 1487-1497.
- 16) Salvi, S. (2007). Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, 8, 275-280.
- 17) Graham, L. M. (2004). All I need is the air that I breath: Outdoor air quality and asthma. *Paediatric Respiratory Reviews*, 5, 59-64.
- 18) Whitby K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols, *Atmospheric Environment*, 12, 135-150.
- 19) ASHRAE HANDBOOK (2013). fundamentals.
- 20) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D., op. cit., 1132-1141.
- 21) Berico, M., Luciani, A., Formignani, M. (1997). Atmospheric aerosol in an urban area-measurements of TSP and PM10 standards and pulmonary deposition assessments. *Atmospheric Environment*, 31(21), 3659-3665.
- 22) Long, C. M., Suh, H. H., Kobzik, L., Catalano, P. J., Ning, Y. Y., Koutrakis, P. (2001). A pilot investigation of the relative toxicity of



- indoor and outdoor fine particles: In vitro effects of endotoxin and other particulate properties. *Environmental Health Perspectives*, 109(10), 1019-1026.
- 23) Stephenson, D. Seshadri, G. Veranth, J.M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHA Journal*, 64(4), 516-521.
- 24) Ha EH, Lee JT, Kim H, Hong YC, Lee BE, Park HS, Chrisiani DC (2003). Infant susceptibility of mortality to air pollution in Seoul, South Korea. *Pediatrics*, 111, 284-290.
- 25) Guaderman WJ, Avol E, Gililand F, Vora H, Thomas D, Berhane K, McConnell R, Kuenzli N, Lurmann F, Pappaport E, Margolis H, Bates D, Peters J (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *N Engl J Med*, 351, 1057-1067.
- 26) Wallace, L. A., Emmerich, S. J., Howard-reed, C. (2002). Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, 296-306.
- 27) Chen, C., Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45, 275-288.
- 28) Liu, De-Ling & William W. Nazaroff (2003) Particle Penetration Through Building Cracks, *Aerosol Science and Technology*, 37(7), 565-573.
- 29) Abt, E., Suh, H., Allen, G., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor sources: A study conducted in the metropolitan Boston area.

- Environmental Health Perspectives, 108(1), 35-44.
- 30) Afshari, A., Matson, U., Ekberg, L. E. (2005). Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: A study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*, 15(2), 141-150.
  - 31) Alshitawi, M., Awbi, H. (2011) Measurement and prediction of the effect of students' activities on airborne particulate concentration in a classroom. *HVAC&R Research*, 17(4), 446-464.
  - 32) Branis, M., Rezacova, P., Domasova, M. (2005) The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 in a classroom. *Environmental Research*, 99(2), 143-149.
  - 33) Long, C. M., Suh, H. H., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(7), 1236-1250.
  - 34) Thatcher, T.L., Lai, A.C.K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R.G. and Nazaroff, W.W. (2002). Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmospheric Environ*, 36, 1811-1819.
  - 35) Dockery, D. W., Spengler, H. D. (1981). Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. *Atmospheric Environment*, 15, 335-343.
  - 36) Koutrakis, P., Briggs, S. L. K. (1992). Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga counties, New York, *Enviro. Sci. Technol.*, 26, 521-527.
  - 37) He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert, D. (2004). Contribution

- from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment*, 38, 3405–3415.
- 38) Ferro, A. R., Kopperud, R. J., Hildemann, L. M. (2004). Source Strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. *Environmental Science Technology*, 38, 1759–1764.
- 39) Tung, T. C. W., Chao, C. Y. H., Burnett, J. (1999). A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell. *Atmospheric Environment*, 33, 881–893.
- 40) Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Cheng, E. C. K. (2003). Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences. *Atmospheric Environment*, 37, 4233–4231.
- 41) Lai, A. C. K., Nazaroff, W. W. (2000). Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 31(4), 463–476.

# ABSTRACT

## Evaluation of the Impact of Size-resolved Indoor Particle Concentration Factors in a Child-care Center.

By Park, Seong Jun

Department of Architecture and Architecture Engineering

Master' Course in the Graduate School of

Advised by Professor Kim, Kwang Woo

2016. 2

The particle is one of the major air pollutants, and many studies have reported that particles may cause the cardiovascular and respiratory diseases. Particles are generated indoors and originate from outdoor. Indoor particles have different sources, chemical composition, and biological effects according to particle size. Therefore, To establish indoor particle control strategies, particle generation characteristics must be considered.

Infants and children who seem to be most vulnerable to the air pollutants spend most times in a Child-care room. Therefore, It is necessary to investigate particle generation characteristics in child-care room to control indoor particles in a Child-care center. But, Many Child care-centers have tight budgets to apply particle control strategies and due to safety problem, it is hard to test particle control strategies in child-care room.

Simulation or indoor particle model are used for estimation of particle reduction effect of particle control strategies and indoor particle generation data must be needed for input data.

The aim of this study is to identify the effects of infant's activities on size-resolved indoor particle generation and estimate the particle generation characteristics and generation rate in child-care room.

The results of this study are summarized as follows:

(1) Indoor and outdoor particle number concentrations were measured simultaneously for five days by using Optical Particle Counter while every indoor activity is documented. The results show that fine particles( $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ ) have a strong relationship with outdoor particle concentration, on the other hand, coarse particles( $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ) have a strong relationship with indoor source. In other words the major source of indoor fine particles from outdoor and coarse particles from indoor. Thus, Infant's activities are major source of coarse particle in child-care room.

(2) Particle generation rates are estimated according to activities and per person. As the results, the median value of particle generation rates (#/h) are 1617/h ( $3\mu\text{m}$ ), 2275/h ( $5\mu\text{m}$ ), 1446/h ( $10\mu\text{m}$ ) in education, 8856/h ( $3\mu\text{m}$ ), 8479/h ( $5\mu\text{m}$ ), 4518/h ( $10\mu\text{m}$ ) in play, and 29686/h ( $3\mu\text{m}$ ), 32486/h ( $5\mu\text{m}$ ), 12311/h ( $10\mu\text{m}$ ) in making a bed. This results can be applied for prediction of indoor particle concentration in child-care room.

Keywords : Child-care Room, Indoor Air Quality, Particle, Particle Generation

Student Number : 2014-20510



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

영·유아의 활동에 의한 보육실  
미세먼지 발생 평가

Estimation of Particle Generation by Infant's  
Activities in a Child-care Room

2016 년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

박 성 준



영·유아의 활동에 의한 보육실  
미세먼지 발생 평가

Estimation of Particle Generation by Infant's  
Activities in a Child-care Room

지도교수 김 광 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2016년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

박 성 준

박성준의 공학석사 학위논문을 인준함

2016년 2월

위원장	인
부위원장	인
위원	인

## 국문 초록

미세먼지는 황사, 도시의 고밀화 등으로 인해 최근 관심이 높아지는 오염물질로써, 미세먼지에 장시간 노출될 경우 호흡기와 심혈관계 질환이 발생 수 있으며 심하면 사망에 까지 다다를 수 있다. 미세먼지는 발생원이 실내와 실외에 모두 존재하기 때문에, 이와 같은 미세먼지의 발생 특성이 고려된 관리 방안이 수립되어야 한다.

본 연구의 대상공간인 보육시설의 경우 면역력이 매우 약한 영·유아가 장시간 생활하는 공간이기 때문에 실내 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안 도입이 필수적이다. 그러나 대부분의 보육시설의 경우 예산이 부족 등으로 인해 관리방안 적용에 한계가 있으므로 미세먼지 저감을 위해 보육시설에 적합한 가장 효율적인 관리방안에 대한 평가 이루어져야 한다.

관리 방안의 농도 저감 효과 평가를 위해 시뮬레이션 또는 농도 예측 모델이 활용되는데, 실내 미세먼지 농도 예측 시 다양한 인자들의 값이 요구되며, 재실 상태에서의 농도 저감 효과를 평가해야하므로 먼저 재실자로 인한 실내 미세먼지 발생률이 반드시 평가가 선행되어야 한다. 특히 보육시설의 경우 실내 주요 발생원이 영·유아의 활동이기 때문에 이로 인한 미세먼지 발생률의 수치에 대한 데이터가 반드시 요구된다.

본 연구에서는 첫 번째로 영·유아에 활동에 의한 미세먼지의 발생이 입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였고, 두 번째로 보육실 미세먼지 발생 특성 분석 및 보육실내 미세먼지 발생률을 입경별 개수 농도로 정량화 하여, 미세먼지 농도 예측에 활용 가능한 보육실 미세먼지 발생률 데이터를 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 먼저, 보육실의 실내 환경 특성 파악 및 미세먼지 농도 변화 특성 파

악을 위해 실제 보육이 이루어지고 있는 만3세반 보육실을 대상으로 실내 환경 관찰 및 기록과 실내·외 미세먼지의 입경별 개수 농도를 측정하였다. 관찰 내용을 분석한 결과 보육실 주요 미세먼지 발생원은 영·유아의 활동으로 판단되었다. 또한 재실과 비재실로 나누어 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계, 재실 유무에 따른 I/O ratio, 그리고 실내 발생원과 실내 농도의 양의 상관관계를 분석 결과, 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지는 실내 발생원의 유무에 상관없이 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인하였고 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 재실여부 즉, 영·유아의 활동 여부가 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 입경의 미세먼지의 농도에 영향을 크게 미친다는 것을 확인하였다.

(2) 활동 내용, 재실 인원수, 실내표면에 침착된 미세먼지의 양과 미세먼지 발생의 상관관계 분석 내용을 바탕으로 활동 내용에 따라 영·유아 1인당 미세먼지 발생률을 입경별로 개수 농도로 산출하였으며, 산출 결과의 중앙값은 미세먼지의 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 10 $\mu$ m 별로 교육 시 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동 시 8856/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리 시 29686/h, 32486/h, 12311/h이다. 발생률 산출 결과를 이용한 예측 농도를 측정 농도와 비교하여 결과 값의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 결과는 보육실 미세먼지 농도 예측 시 실내 미세먼지 발생률 데이터로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

**주요어** : 보육시설, 실내공기질, 미세먼지, 실내 미세먼지 발생

**학 번** : 2014-20510

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구의 범위 및 방법 .....	4
제 2 장 미세먼지 발생 평가를 위한 예비적 고찰 .....	8
2.1 미세먼지의 특성 .....	8
2.1.1 미세먼지의 구성과 입경 .....	8
2.1.2 미세먼지의 인체 위해도 .....	11
2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자 고찰 .....	15
2.2.1 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘 .....	15
2.2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자 .....	17
2.3 미세먼지 발생 평가관련 기존연구 고찰 .....	26
2.4 소결 .....	32
제 3 장 영·유아 활동에 의한 미세먼지 발생이 입경별 농도에 미치는 영향 분석 .....	34
3.1 개요 .....	34
3.2 보육실의 실내·외 미세먼지 입경별 농도 측정 .....	34
3.2.1 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요 .....	34
3.2.2 영·유아의 일과 활동 관찰 .....	37
3.2.3 실내·외 미세먼지 입경별 농도 측정 .....	37
3.3 재실조건이 실내 미세먼지 입경별 농도에 미치는 영향 분석 .....	39
3.3.1 분석 방법 .....	39
3.3.2 일과 활동에 따른 미세먼지 입경별 농도 특성 .....	40
3.3.3 재실 및 비재실시 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계 .....	40
3.3.4 재실 및 비재실시 I/O Ratio 비교 .....	45

3.3.5	실내 미세먼지 농도와 실내 CO <sub>2</sub> 농도의 상관관계	46
3.4	소결	49
제 4 장	보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수 산출	51
4.1	개요	51
4.2	보육실의 침기율 산출	51
4.3	침착률 및 침투 계수 산출	56
4.3.1	침착률 및 침투 계수 산출 방법 고찰	56
4.3.2	침착률 및 침투 계수 산출 결과	58
4.4	소결	66
제 5 장	보육실 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률	67
5.1	개요	67
5.2	보육실 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계 분석	67
5.2.1	영·유아의 활동 내용 및 재실 인원수	68
5.2.2	실내표면에 침착된 미세먼지의 양	72
5.3	영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출	74
5.3.1	미세먼지 발생률 산출 모델	74
5.3.2	영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 및 고찰	77
5.4	소결	87
제 6 장	결론	89
	참고 문헌	93
	ABSTRACT	98

## 표 목차

<표 3.1> 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요 .....	36
<표 3.2> 측정 개요 .....	38
<표 4.1> Effective Air Leakage Area 산출 결과 .....	52
<표 4.2> 침기율 산출 결과 .....	55
<표 4.3> 미세먼지의 입경별 침착률(k) 및 침투 계수(P) 산출 결과 .....	62
<표 4.4> Friction Velocity 산출 결과 .....	65
<표 5.1> 비교 대상 Case 선정 .....	73
<표 5.2> 미세먼지 발생률 산출 결과 (3 $\mu$ m) .....	79
<표 5.3> 미세먼지 발생률 산출 결과 (5 $\mu$ m) .....	80
<표 5.4> 미세먼지 발생률 산출 결과 (10 $\mu$ m) .....	81
<표 5.5> 1인당 미세먼지 발생률 산출 결과 .....	82

## 그림 목차

[그림 1.1] 연구 흐름도 .....	7
[그림 2.1] 실내 환경에 존재하는 미세먼지의 다양한 입자 크기와 범위 .....	10
[그림 2.2] 미세먼지의 입경별 분류 .....	11
[그림 2.3] 코, 기관지, 폐에 대한 미세먼지의 입경별 상대적인 침착률 .....	13
[그림 2.4] 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘 .....	15
[그림 2.5] 침기율의 로그 분포 .....	18
[그림 2.6] 지역에 따른 미세먼지의 입경별 점유율 .....	19
[그림 2.7] 건물 외피를 통한 미세먼지의 침투 과정 .....	20
[그림 2.8] 다수의 연구자들의 입경별 침투 계수 산출 결과 .....	21
[그림 2.9] 실내 미세먼지의 입경별 발생원 .....	24
[그림 2.10] 미세먼지의 입경별 침착률 .....	25
[그림 3.1] 측정 대상 보육시설의 주변 환경 및 평면도 .....	35
[그림 3.2] 측정기간 동안의 I/O Ratio .....	42
[그림 3.3] 비재실 시 실내와 실외 미세먼지 개수 농도의 상관관계 .....	43
[그림 3.4] 재실 시 실내와 실외 미세먼지 개수 농도의 상관관계 .....	44
[그림 3.5] 비재실과 재실 시 I/O Ratio .....	45
[그림 3.6] 실내 미세먼지 개수 농도와 실내 CO <sub>2</sub> 농도의 상관관계 .....	48
[그림 4.1] 대상 보육실의 Blower door test .....	53
[그림 4.2] 침착률 및 침투 계수 산출 구간 (11/27) .....	59
[그림 4.3] 침착률 및 침투 계수 산출 구간 (11/30) .....	60
[그림 4.4] 침착률 및 침투 계수 산출 구간 (12/1) .....	61
[그림 4.5] 실내 측정 농도와 산출한 침기율, 침착률, 침투 계수를 이용한 예측 농도의 비교 .....	63
[그림 5.1] 활동 내용에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도 .....	70
[그림 5.2] 재실 인원수에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도 .....	71

[그림 5.3] 바닥 청소 여부에 따른 실내 미세먼지 농도 .....	73
[그림 5.4] 예측 및 측정한 실내 미세먼지 농도 비교(11/20) .....	84
[그림 5.5] 예측 및 측정한 실내 미세먼지 농도 비교(12/1) .....	85
[그림 5.6] 예측 및 측정한 실내 미세먼지 농도의 상관관계 .....	86



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

건물의 기밀성능이 향상되어 환기량이 감소하고, 재실자의 실내거주 시간이 증가함에 따라 실내공기질에 대한 관심도 또한 높아지고 있다. 실내공기질의 악화는 재실자의 작업 효율을 저하시키고 건강에 악영향을 미치므로 실내공기질을 쾌적하게 유지 및 관리할 필요가 있다. 대부분의 실내 공기 오염물질의 발생원은 실내에 존재하기 때문에 환기를 통해 공기 중 오염물질을 외부로 배출하여 농도를 효과적으로 저감할 수 있다. 그러나 발생원이 실내와 실외에 모두 존재하는 오염물질의 경우 환기를 하면 오히려 오염물질이 실내로 유입될 수 있고, 밀폐 시 실내 발생으로 인해 실내 오염물질 농도가 증가할 수 있다. 따라서 이러한 오염물질의 경우 실내에서 발생하는 오염물질을 배출 또는 제거하거나 외기를 실내로 유입할 때 외기에 포함된 오염물질을 제거하는 등 오염물질의 특성을 고려한 관리방안을 도입할 필요가 있다.

최근 공기 오염물질 중 하나인 미세먼지가 이슈화되고 있다. 미세먼지는 입경 0.005~500 $\mu\text{m}$ 의 공기 중에 부유하는 작은 입자를 의미하는데<sup>1)</sup>, 중금속 등 인체에 유해한 성분으로 구성되어 있어 인체가 미세먼지에 장시간 노출될 경우 호흡기 및 심혈관 질환이 발생할 수 있고 심하면 사망에까지 다다를 수 있다.<sup>2)3)</sup> 또한 최근 연구에서 미세먼지의 입경별 개수 농도가 질량 농도 보다 인체의 위해성 평가에 더 적합하다는 연구결과를

---

1) 차동원 (2007). 실내공기오염. 기문당, 81.

2) US EPA (1996). Air quality criteria for particulate matter. 1, Washington, DC.

3) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association, 287(9), 1132-1141.

통해 입경별 개수 농도에 대한 측정에 대한 필요성이 대두되고 있다.<sup>4)5)</sup>

대기 중 미세먼지 농도 저감을 위한 다양한 정책이 실행되어 왔으나 한국의 지리적 특성상 중국발 황사의 영향을 피할 수 없고, 공업화 및 도시 고밀화로 인한 교통량 증가 등으로 인해 미세먼지 오염은 더욱 심각해지고 있다. 또한 미세먼지는 흡연, 조리, 연소, 재실자의 활동 등으로 인해 실내에서 발생하거나 실외에서 발생한 미세먼지가 실내로 유입되어 실내 농도를 형성하며 입경에 따라 거동특성이 다르기 때문에<sup>6)</sup> 앞서 언급한 바와 같이 관리방안 수립을 위해 미세먼지의 입경별 발생 특성에 대한 분석이 반드시 필요하다.

보육시설의 경우 면역체계가 불완전하고<sup>7)</sup>, 체중 당 호흡량이 성인의 약 2.5배로<sup>8)</sup> 성인보다 공기 오염물질 노출에 더 취약한 영유아가 생활하는 공간이다. 영·유아는 하루 약 8시간을 보육시설에서 생활하기 때문에<sup>9)</sup> 장시간 오염물질에 노출될 수 있고, 이는 발달 단계인 영·유아의 건강에 매우 치명적일 수 있으므로 영·유아의 주요 활동 공간인 보육실 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안 도입은 필수이다. 그러나 보육시설의 예산 부족 등으로 관리방안 선택에 제약이 있다는 점을 고려할 때 효과적인 관리방안 선택을 위해 보육실을 대상으로 실내 미세먼지 농도 특성

---

4) Penttinen, P., Timonen, K. L., Tiittanen, P., Mirme, A., Ruuskanen, J., Pekkanen, J. (2001). Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *European Respiratory Journal*, 17(3), 428-435.

5) Stephenson, D., Seshadri, G., Veranth, J. M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHA Journal*, 64(4), 516-521.

6) Thatcher, T. L., Layton, D. W. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13), 1487-1497.

7) Salvi, S. (2007). Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, 8, 275-280.

8) Graham, L. M. (2004). All I need is the air that I breath: Outdoor air quality and asthma. *Paediatric Respiratory Reviews*, 5, 59-64.

9) 이경미, 이기숙 (2009). 유아의 성과 연령에 따른 유아교육기관에서의 하루일과. *교육과학연구*, 40(3), 171-193.

에 대한 분석이 이루어져야 한다.

관리방안 도입에 따른 실내 미세먼지 농도 저감 효과를 분석하기 위해 특정 관리방안을 도입 후 미세먼지 농도 측정을 통해 그 효과를 검증할 수 있으나, 안전과 예산의 문제로 실제 영·유아 생활하고 있는 보육실을 대상으로 관리방안의 저감 효과를 검증하는데 한계가 있다. 따라서 시뮬레이션 또는 예측 모델 등을 통해 실내 미세먼지 농도를 예측하여 관리방안의 효과를 검증할 필요가 있다.

다수의 연구자들이 실내 미세먼지 농도를 예측하거나 이를 바탕으로 관리방안의 저감 효과를 분석하였으나, 대부분 오피스나 일반 주거 건물과 같이 성인 위주의 공간 및 성인의 활동에 의한 미세먼지 발생을 대상으로 하였다. 그러나 보육실을 대상으로 농도를 예측 및 관리방안의 효과 검증을 위해 반드시 보육실의 미세먼지 발생 특성이 고려된 실내 미세먼지 발생률 데이터가 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 첫 번째로 영·유아의 활동에 의한 미세먼지의 발생이 입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였고, 두 번째로 보육실 미세먼지 발생 특성 분석 및 보육실내 미세먼지 발생률을 입경별 개수 농도로 정량화 하여, 보육실 미세먼지 관리 및 보육실 미세먼지 농도 예측에 활용 가능한 자료를 제공하고자 한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 목적을 달성하기 위해 먼저 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 실내 미세먼지 농도 영향인자를 도출하고 영향인자들의 특성을 고찰하였다. 또한 실내 미세먼지 발생 평가에 관련된 기존연구를 통해 미세먼지 발생률 산출 이론 및 분석 방법에 대해 고찰하였다.

보육실 환경 특성에 따라 실내 미세먼지 발생 특성 또한 달라질 수 있기 때문에 미세먼지 발생 평가에 앞서 보육실 미세먼지 발생 특성을 파악하였다. 또한 일과 활동이 이루어지고 있는 보육실을 대상으로 실내·외 미세먼지 입경별 농도를 측정하여 분석에 필요한 데이터를 확보하였다. 이를 바탕으로 보육실 미세먼지 발생 특성에 영향을 받는 입경이 무엇인지 파악하였으며, 보육실 미세먼지 발생 평가에 활용하였다.

미세먼지 발생 평가를 위한 발생률 산출을 위해 대상 보육실의 침기율, 침착률 및 침투 계수가 산출되어야 한다. 침기율, 침착률 및 침투 계수는 실내 미세먼지 농도 형성에 영향을 미치는 영향인자로 실내 발생률 산출을 위해 반드시 필요한 계수이며, 측정 데이터를 및 기존 연구들의 산출 방법을 고찰하여 해당 인자들을 산출하였다.

마지막으로 위에서 측정 및 산출한 결과와 발생률에 영향을 미치는 영향인자들과의 상관관계 분석 결과를 바탕으로 보육실 미세먼지 발생률을 산출하였다. 또한 산출 결과를 이용하여 예측한 실내 농도와 측정한 실내 농도를 비교하여 산출 결과의 타당성을 검증하였다.

본 연구의 범위 및 방법을 연구 진행 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

### **(1) 미세먼지 발생 평가를 위한 예비적 고찰**

미세먼지의 기본적 구성과 입경별 특성 그리고 인체에 대한 위해성을 고찰함으로써, 미세먼지의 저감의 및 입경별 분석의 필요성에 대해 확인하였다. 실내 미세먼지 발생 평가를 위해 먼저 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 실내 미세먼지 농도 영향인자를 확인하고, 기존연구를 통해 영향인자의 개념 및 특성에 대해 고찰하였다. 또한 미세먼지 발생 평가에 관련된 기존연구를 통해 발생률 산출 방법 및 이론을 고찰하였다.

### **(2) 영·유아 활동에 의한 미세먼지 발생이 입경별 농도에 미치는 영향 분석**

보육실의 환경 특성을 파악하여 미세먼지 발생 특성을 분석하기 위해 실제 보육이 이루어지는 보육실을 대상으로 실내·외 미세먼지 입경별 농도를 측정하였다. 보육실 미세먼지 발생 특성이 입경별 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 재실과 비재실로 나누어 실내외 농도의 상관관계, I/O ratio 비교, 재실 시 실내 미세먼지 농도와 CO<sub>2</sub> 농도와의 상관관계를 분석하였다.

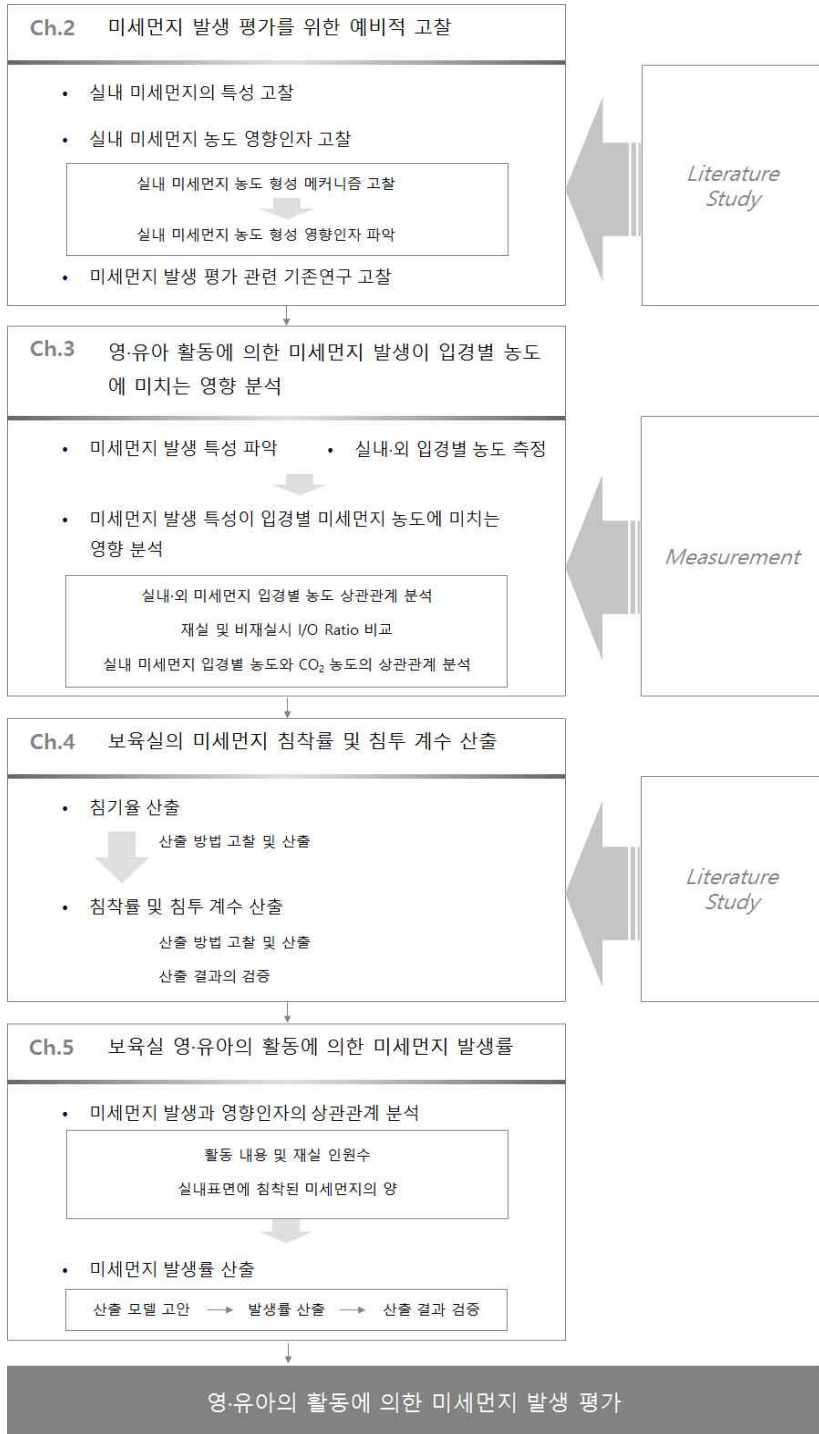
### **(3) 보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수 산출**

실내 미세먼지 발생 평가를 위해, 미세먼지 농도 형성 영향인자인 침기율, 침착률 및 침투 계수에 대한 평가가 선행되어야 하며 이를 위해 기존연구의 침착률 및 침투 계수 산출 방법을 이용하여 해당 인자들의 값을 산출하였다. 산출 값의 타당성 검증을 위해 측정 실내 농도와 산출 값을 이용하여 예측한 실내 농도를 비교하였다.

#### (4) 보육실 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률

영·유아의 활동 내용, 재실 인원수, 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양에 따라 실내 미세먼지 발생률 역시 달라지므로 이러한 영향인자와 발생률과의 상관관계를 분석하였고 발생률 산출 결과에 참고하였다. 미세먼지 발생률 산출을 위해 먼저 발생률 산출 모델을 고안하였다. 산출 모델은 Mass Balance Equation의 해를 이용하였으며, 이를 이용하여 활동 내용에 따른 영·유아 1명당 미세먼지 발생률을 산출하였다. 산출 결과의 타당성 검증을 위해 산출 결과를 이용한 예측 농도와 측정된 농도 상관관계를 분석하였다.

본 연구의 진행을 연구 흐름도로 나타내면 다음 [그림 1.1]과 같다.



## 제 2 장 미세먼지 발생 평가를 위한 예비적 고찰

본 장에서는 미세먼지 발생률 평가를 위한 예비적 고찰로서 본 연구의 대상 오염물질인 미세먼지의 개념 및 특성, 그리고 건강에 대한 위해성을 살펴보고자 한다. 미세먼지 발생 평가를 위해 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 농도 형성에 영향을 미치는 인자를 파악하고 해당 인자들의 특성을 기존연구를 통해 고찰하고자 한다. 또한 기존연구의 실내 미세먼지 발생률 산출 이론 및 조건을 고찰하여 본 연구에서의 활용성에 대해 검토하고자 한다.

### 2.2 미세먼지의 특성

#### 2.1.1 미세먼지의 구성과 입경

미세먼지는 공기 중에 존재하는  $0.005\sim 500\mu\text{m}^{10)}$  크기의 액체 또는 고체 상 물질을 뜻한다. 이때 입경이 크거나 밀도가 높은 미세먼지는 무게가 무거워 공기 중에 부유하는 시간이 짧고, 입경이 작거나 밀도가 낮은 미세먼지는 좀처럼 가라앉지 않고 공기 중에 장시간 부유하게 된다. 이처럼 부유하고 있는 공기 중의 미세먼지를 에어로졸 또는 분진이라고도 하며, 모두 미세먼지를 총칭한다.<sup>11)</sup>

미세먼지는 다양한 발생원이 존재하고 발생원에 따라 그 구성이 다르다. 모래먼지, 흙과 같이 자연적으로 발생하는 미세먼지의 경우 무기질 성분을 많이 함유하고 있는 반면 화석연료의 연소나 자동차 등의 배출가

---

10) 차동원, op. cit., 81

11) 박영욱 (2002). 실내 생활공간에서의 미세먼지 오염 특성 및 제어기술, 한국생활환경 학회지, 9(2), 122-128.



스 등과 같이 인위적으로 발생한 미세먼지의 경우 연료, 황화합물, 무기질, 유기탄소, 그리고 중금속 등을 포함하고 있다. 또한 미세먼지는 불완전연소로 인한 대기 중 1차 가스상 오염물질의 화학적 반응, 고온 응축과정을 통해 발생되기도 하며 황화합물, 질산화물, 유기탄소 등을 포함하고 있다.<sup>12)</sup>

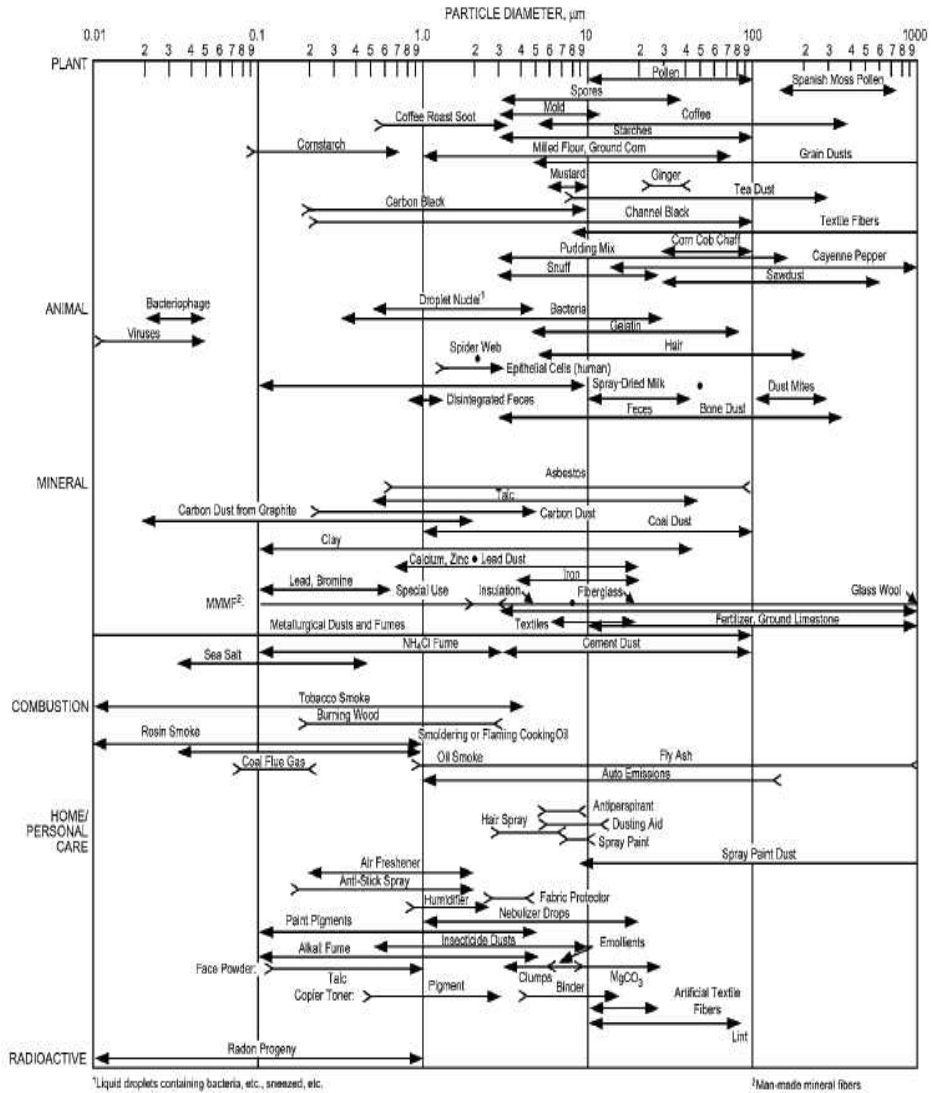
이렇게 다양한 발생원에 의해 생성되는 미세먼지는 다양한 입경으로 구성되어 있고 [그림 2.1]은 실내 환경에 존재하는 미세먼지의 다양한 입자 크기와 범위를 나타낸다. 학술적으로 입경 2.5 $\mu\text{m}$  이상의 미세먼지를 Coarse Particle, 입경 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 Fine Particle<sup>13)</sup>, 입경 0.1 $\mu\text{m}$  이하를 Ultra Fine Particle이라 분류하며 이를 도식화하면 [그림 2.2]와 같다. 통상적으로 미세먼지를 입경 10 $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 PM10, 입경 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 PM2.5라 칭한다. 그러나 기존의 PM10과 PM2.5으로 미세먼지에 대한 분석을 진행할 경우 미세먼지의 입경별 특성을 반영하는데 한계가 있다. 입경의 크기가 입자들의 성질과 이동, 제어기술에 영향을 미치기 때문에 입경에 따라 그 특성이 달라지므로<sup>14)</sup>, 미세먼지를 분석함에 있어 반드시 입경의 크기를 고려해야 한다.

---

12) 강공인, 김신도, 이정실, 최경순, 실내공기질관리학, 문운당, 66-67.

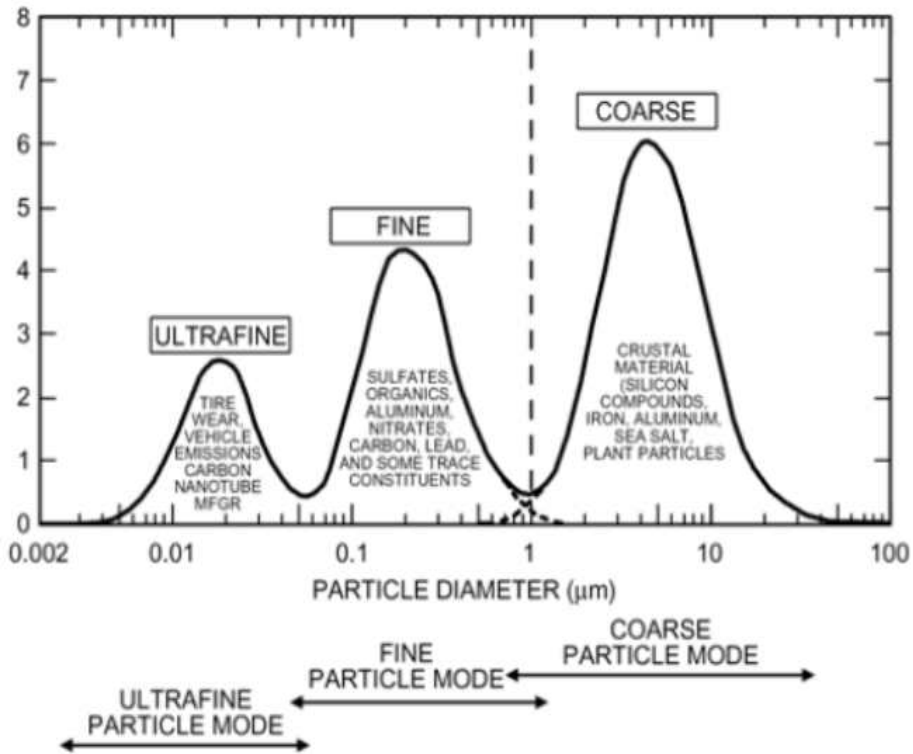
13) Whitby K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols, Atmospheric Environment, 12, 135-150.

14) Zhang, Y., 실내공기질, 동화기술, 14.



[그림 2.1] 실내 환경에 존재하는 미세먼지의 다양한 입자 크기와 범위<sup>15)</sup>

15) ASHRAE HANDBOOK (2013). fundamentals. 11.4.



[그림 2.2] 미세먼지의 입경별 분류<sup>16)</sup>

### 2.1.2 미세먼지의 인체 위해도

공기 중에 부유하고 있는 미세먼지는 호흡 등을 통해 인체로 유입되게 되는데, 앞서 서술한 바와 같이 미세먼지는 인체에 유해한 성분으로 구성되어 있으므로 인체로 유입될 경우 천식과 같은 알레르기 반응부터 장시간 노출로 인해 호흡기 및 심혈관 질환이 발생할 수 있고, 심하면 사망에 까지 다다를 수 있다.<sup>17)18)</sup> 중국과 같이 대기 중 미세먼지 농도가 매우 높은 나라의 경우 미세먼지로 인한 사망자가 매년 속출하고 있으

16) ASHRAE HANDBOOK (2013). op. cit., 11.3.

17) US. EPA, op. cit.

18) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D., op. cit., 1132-1141.

며, 전 세계적으로 미세먼지의 위해성에 대한 내용이 언급되고 있다. 특히 한국의 경우 계절풍의 영향으로 중국의 황사 및 미세먼지로 인한 피해가 예상되며, 이에 따라 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안 도입이 시급하다.

미세먼지의 위해성은 미세먼지의 입경과 밀접한 연관이 있다. 앞서 서술한 바와 같이 미세먼지는 발생원에 따라 다양한 성분으로 구성되는데, 대체로 인위적인 발생에 의한 미세먼지의 입경이 작고 중금속 등 인체에 유해한 성분의 비율이 높다. 이는 입경이 작아짐에 따라 표면적이 입경의 제곱에 비례하여 증가하여 중금속 등 인체에 유해한 성분이 입자의 표면으로 노출되기 쉬워져 유해성분의 농도가 비례적으로 증가하기 때문이다.<sup>19)</sup>

또한, 입경의 크기가 작을수록 폐포와 같이 체내 깊숙한 곳으로 침투 및 침착되므로 인체에 대한 위해도가 높아진다.<sup>20)21)</sup> 입경 10 $\mu$ m 이상의 미세먼지는 대부분 코와 입 등에서 걸러지는 반면에, 입경 10 $\mu$ m이하의 경우 코와 입을 거쳐 체내로 유입되고, 그 중에서도 입경 1 $\mu$ m 이하의 미세먼지는 인체 깊숙이 축적되는 비율이 높다.<sup>22)</sup> 다음 [그림2.3]는 코, 기관지, 폐에 대한 상대적인 미세먼지의 입경별 침착률을 나타내고 있다.

---

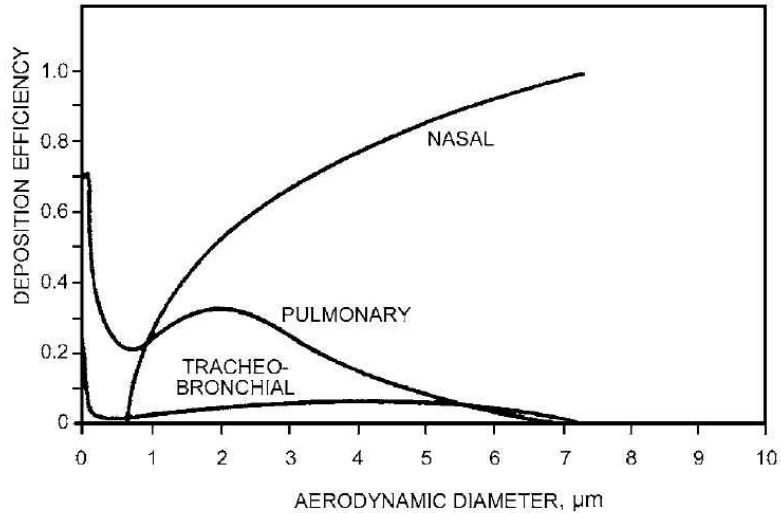
19) 차동원, op. cit., 79

20) Berico, M., Luciani, A., Formignani, M. (1997). Atmospheric aerosol in an urban area-measurements of TSP and PM10 standards and pulmonary deposition assessments. *Atmospheric Environment*, 31(21), 3659-3665.

21) Long, C. M., Suh, H. H., Kobzik, L., Catalano, P. J., Ning, Y. Y., Koutrakis, P. (2001). A pilot investigation of the relative toxicity of indoor and outdoor fine particles: In vitro effects of endotoxin and other particulate properties. *Environmental Health Perspectives*, 109(10), 1019-1026.

22) 김신도 (2003). 미세먼지 규제와 영향. *공기청정기술*, 19-28.

23) ASHRAE HANDBOOK (2013). op. cit., 11.3.



[그림 2.3] 코, 기관지, 폐에 대한 미세먼지의 입경별 상대적인 침착률<sup>23)</sup>

또한, 미세먼지의 질량 농도 보다 개수 농도가 인체 위해도와 더 직접적인 관련이 있다는 연구결과<sup>24)</sup>를 통해, 기존의 미세먼지의 질량 농도로 인체 위해도를 평가하던 방식이 아닌 미세먼지의 입경별 개수 농도를 이용한 인체 위해도 평가에 대한 필요성이 언급되고 있다.

최근에는 대표적인 민감한 집단인 영·유아와 어린이를 대상의 연구결과가 발표되고 있는데, 미세먼지에 노출된 어린이에게서 호흡기계 질환으로 인한 사망률이 증가하였으며, 미세먼지 농도가 증가할 경우 영아의 사망률 또한 증가하는 것을 보고하였다.<sup>25)</sup> 또한 캘리포니아 지역의 약 1800명의 학생을 대상으로 8년간 미세먼지 노출과 폐 기능의 관계를 조

24) Stephenson, D. Seshadri, G. Veranth, J.M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. AIHA Journal, 64(4), 516-521.

25) Ha EH, Lee JT, Kim H, Hong YC, Lee BE, Park HS, Chrisiani DC (2003). Infant susceptibility of mortality to air pollution in Seoul, South Korea. Pediatrics, 111, 284-290.

사한 결과, 미세먼지에 많이 노출된 집단은 그렇지 않은 집단보다 폐 기능이 악화될 가능성이 약 5배 높은 것으로 나타났다.<sup>26)</sup> 아동기 및 청소년기의 미세먼지 노출은 성인기에도 영향을 미칠 수 있고, 특히 영·유아는 신체기관이 발달하는 단계이기 때문에, 이 시기에 오염물질에 노출될 경우 건강에 매우 치명적일 수 있다.

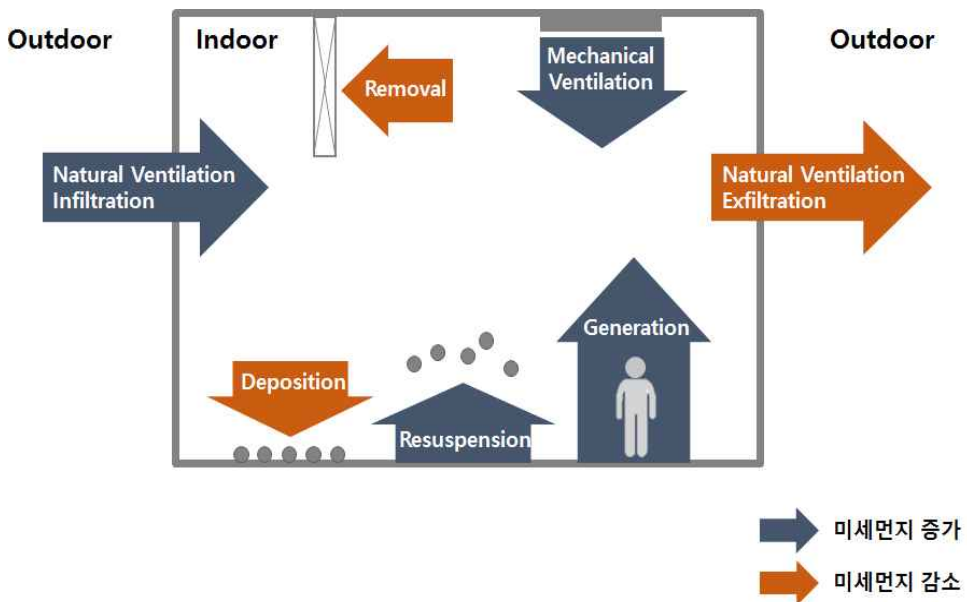
---

26) Guaderman WJ, Avol E, Gililand F, Vora H, Thomas D, Berhane K, McConnell R, Kuenzli N, Lurmann F, Pappaport E, Margolis H, Bates D, Peters J (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *N Engl J Med*, 351, 1057-1067.

## 2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자 고찰

### 2.2.1 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘

실내 미세먼지는 크게 실내에서 발생된 미세먼지와 실외에서 발생되어 실내로 유입된 미세먼지로 구성되는데, 환기 또는 침기로 인해 외부로 배출되거나 Removal Device를 통해 제거되기도 한다. 이처럼 미세먼지는 발생, 유입, 배출, 제거 등의 과정을 거쳐 실내농도를 형성하게 되는데 [그림 2.4]는 단일 실에서 미세먼지가 실내 농도를 형성하는 메커니즘을 나타낸다.



[그림 2.4] 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘

자연환기나, 침기 그리고 기계 환기를 통해 외기에 포함된 미세먼지가 실내로 유입되게 된다. 또한 기류변화 또는 진동과 같은 충격으로 인해 실내 표면에 침착되어 있던 미세먼지가 재부유하고, 재실자의 실내 활동

(흡연, 조리 등)으로 인해 실내에서 미세먼지가 발생한다.

실내 미세먼지는 자연 환기와 누기를 통해 실외로 배출되거나, 실내 Removal Device에 의해 제거되어 그 농도가 감소한다. 또한 부유하던 미세먼지가 실내 표면에 침착되는 현상을 통해 실내 미세먼지 농도가 감소하게 된다.

이처럼 실내 미세먼지는 실외에서 실내로의 유입 및 실내 발생으로 인해 농도가 증가하거나 배출, 제거, 침착으로 인해 농도가 감소하게 되며 자연 환기, 기계 환기, 침기에 의한 환기율 또는 침기율을 Air Exchange Rate, 미세먼지의 재부유와 실내 발생을 합쳐 실내 발생(Generation)이라 하면, 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 질량 보존에 근거한 Mass Balance Equation인 식(2.1)로 표현할 수 있다. 이때, 실내를 완전 혼합 상태로 가정하고, 미세먼지의 응축, 증발, 응고와 같은 작용은 매우 미미하므로 이에 대한 내용은 무시한다.

$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_o + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.1)$$

여기서,

$i$	: Particle size	( $\mu\text{m}$ )
$C_i$	: Indoor particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$C_o$	: Outdoor particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$a$	: Air exchange rate	(1/h)
$P$	: Penetration coefficients	(Dimensionless)
$G$	: Particle generation rate	( $\mu\text{g}/\text{h}$ or $\#/\text{h}$ )



## 2.2.2 실내 미세먼지 농도 영향인자

앞서 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 침기율(Air exchange rate), 실외 미세먼지 농도(Outdoor particle concentration), 침투 계수(Penetration Coefficient), 발생률(Generation rate), 그리고 침착률(Deposition rate)이 실내 미세먼지 농도 영향인자임을 확인하였으며, 본 절에서는 영향인자들의 특성에 대해서 살펴보았다.

### (1) 침기율 (Air Exchange Rate)

침기란 의도치 않은 외기가 실내로 유입되는 현상을 의미하는데, 단위 시간당 외기가 실내로 유입되는 정도를 침기율이라 한다. 이러한 침기율은 실내와 실외의 온도차, 풍속과 풍향, 건물의 외피 형상, 건물의 기밀 성능, 재실자, 기계설비시스템 등 다양한 요소의 영향을 받는다. 따라서 건물마다 기밀성능 및 실내 환경이 달라 침기율이 다르며, 같은 건물이라도 외부 또는 내부의 환경에 따라 건물의 층에 따라 침기율이 달라질 수 있다.

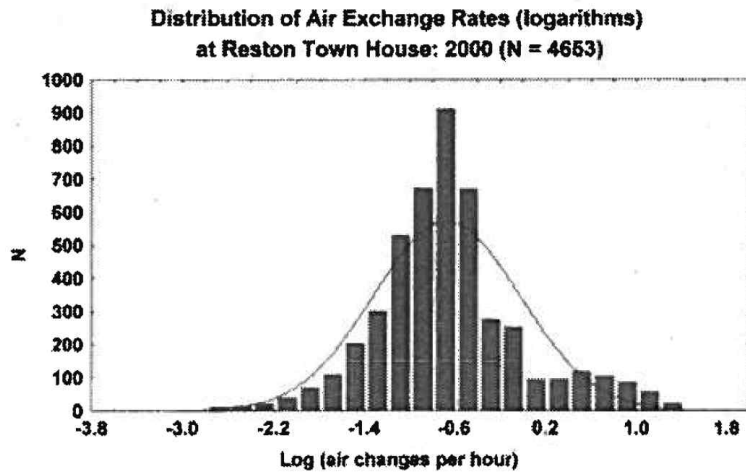
Wallace<sup>27)</sup>는 4000세대 이상의 주거건물을 대상으로 1년간 침기율을 측정하였는데, 그 결과 각 건물, 계절 그리고 건물의 층에 따라 침기율이 다르게 나타났다. 또한, 침기율 데이터 분석 결과 침기율이 정규분포를 이루고 있음을 [그림 2.5]을 통해 확인할 수 있는데, 이는 다양한 요소에 의해 침기율이 변동하지만, 건물마다 빈도수가 높은 침기율이 존재함을 의미한다.

이처럼 침기율은 외부환경, 건물특성에 따라 그 값이 상이하게 나타날

---

27) Wallace, L. A., Emmerich, S. J., Howard-reed, C. (2002). Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, 296-306.

수 있고, 침기율의 변동에 따라 실외 미세먼지가 실내로 유입되는 정도 및 실내 미세먼지가 실외로 배출되는 정도가 다르므로 미세먼지 분석에 있어 반드시 고려해야 하는 영향인자이다.



[그림 2.5] 침기율의 로그 분포<sup>27)</sup>

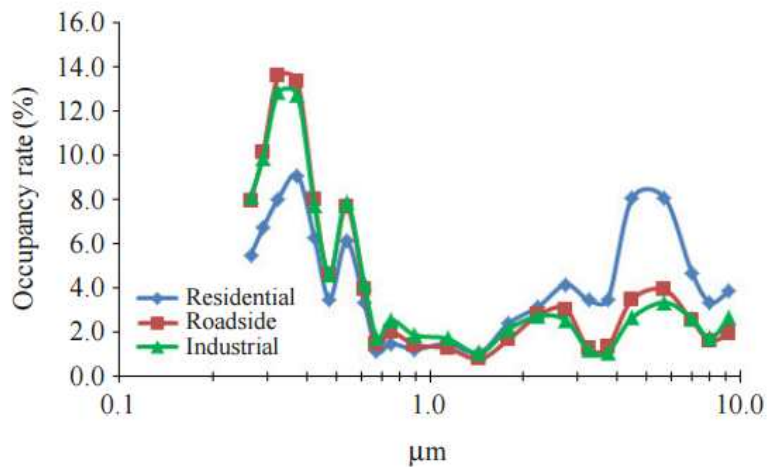
## (2) 실외 미세먼지 농도 (Outdoor Particle Concentration)

대기 중 미세먼지는 자연환기, 기계환기, 침기 등에 의해 건물 내로 유입되게 되는데, 이때 실외 미세먼지 농도가 높을수록 실내로 유입되는 미세먼지의 농도가 높으므로 실외 미세먼지 농도는 실내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다.

실외 미세먼지 농도는 주변 환경 등에 의해 그 농도가 다를 수 있는데 [그림 2.6]은 인근지역의 환경에 따른 미세먼지 개수 농도의 입경별 점유율을 한국의 경우 겨울에는 계절풍의 영향으로, 봄에는 황사의 영향으로 인해 계절별로 대기 중 미세먼지 농도가 다르다.<sup>28)</sup>

28) 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호 (2005). 서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. 한국환경보건학회지, 31(4), 301-308.

실외 미세먼지는 다양한 입경으로 구성되어 있는데 앞서 서술한 바와 같이 미세먼지의 입경에 따라 성질과 이동, 성분, 제어기술에 영향을 미치므로 미세먼지의 입경별 분포와 특성 파악은 미세먼지 해석에 있어 매우 중요한 과정이다.



[그림 2.6] 지역에 따른 미세먼지의 입경별 점유율<sup>29)</sup>

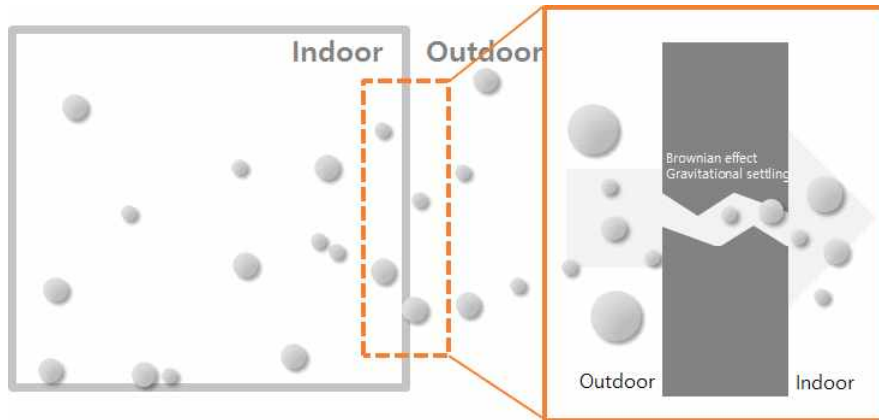
### (3) 침투 계수 (Penetration Coefficient)

침투 계수란 침기로 인해 실외 미세먼지가 실내로 유입 시 건물의 외피, 창의 틈 등에 의해 제거된 후 실내로 유입되는 비율을 의미한다. 침투 계수는 창, 개구부, 벽체, 건물의 틈새의, 실내와 실외의 압력차 등에 영향을 받는 건물의 특성과 관련된 인자이다. 단순히 건물의 외피 등에 의한 필터링 효과를 나타내는 계수이므로 건물마다 침투 계수가 다르게 나타난다.

침투 계수는 또한 미세먼지의 입경에 따라 다른데, 입경마다 중력의

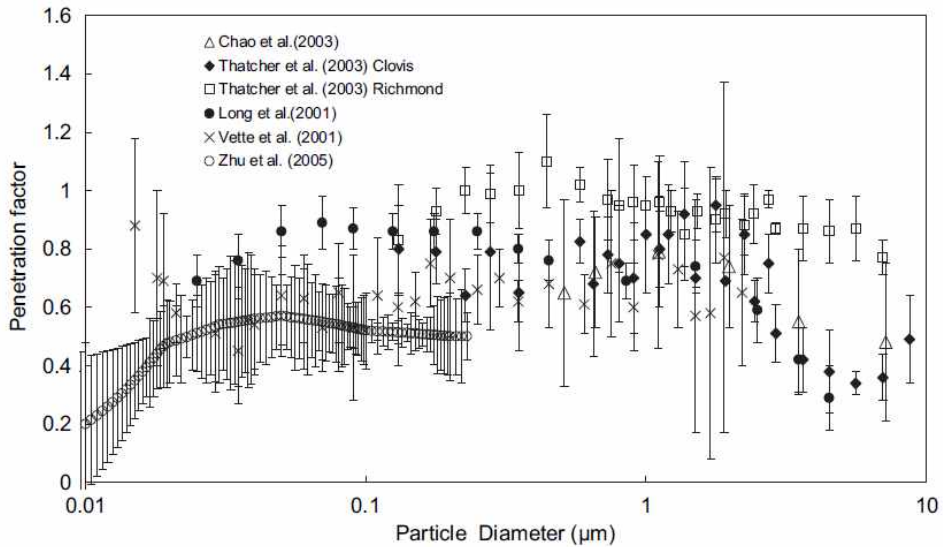
29) 이용기, 이기중, 이재성, 신은상 (2012). 미세먼지 입경농도 분포의 지역별 특성. 한국 대기환경학회지, 28(6), 666-674.

효과와 브라운 운동의 효과가 다르고, 입경이 크기에 따라 건물의 틈새 등에서 걸러지는 정도가 다르기 때문이다. [그림 2.7]은 미세먼지가 건물 틈새로 유입되어 걸러지는 과정을 나타낸다.



[그림 2.7] 건물 외피를 통한 미세먼지의 침투 과정

[그림 2.8]은 기존 연구의 입경별 침투 계수를 산출한 결과를 나타낸 그래프이다. 연구자 마다 측정대상의 건물 특성이 다르기 때문에 침투 계수가 상이하게 산출되었고 실제 건물을 대상으로 측정한 후 침투 계수를 산출한 결과이기 때문에 침투 계수가 하나의 값으로 산출되지 않고 편차가 나타났지만, 입경의 크기가 작을수록 침투 계수는 커지며, 반대로 입경의 크기가 클수록 침투 계수가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 입경이 크기가 작은 미세먼지는 건물 외피의 틈새 등을 통과하기 비교적 수월하여 건물 침투 계수가 커지며 입경의 크기가 커질수록 중력의 영향이 커지고 건물 외피의 틈에서 걸러지는 정도가 증가하기 때문이다. 이처럼 기존의 연구 결과를 바탕으로 실외 미세먼지가 실내로 침투할 때 대체로 Coarse Particle 보다 Fine Particle이 침투하는 정도가 더 높다는 것을 확인할 수 있다.



[그림 2.8] 다수의 연구자들의 입경별 침투 계수 산출 결과<sup>30)</sup>

#### (4) 미세먼지의 실내 발생 (Particle Generation)

본 연구에서는 실내 미세먼지 발생원에 의한 미세먼지의 생성과, 기류 변화 진동 등으로 인해 실내 표면에 침착되어 있던 미세먼지의 재부유를 합쳐 실내 발생(Generation)이라하였다. 본 장에서는 먼저 실내 미세먼지 발생의 이해를 돕고자 먼저, 실내 발생원과 재부유를 분리하여 살펴보았다.

실내에서도 실외와 마찬가지로 연소로 인해 미세먼지 발생하는데, 실내 흡연, 조리, 난방장치 등이 주요 발생원이다. 또한 청소는 실내 표면의 미세먼지를 제거하지만 제거 과정에서 진공청소기 내부에 포집된 먼

30) C. Chen, B. Zhao (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. Atmospheric Environment, 45, 275-288.

31) De-Ling Liu & William W. Nazaroff (2003) Particle Penetration Through Building Cracks, Aerosol Science and Technology, 37(7), 565-573.

지가 다시 밖으로 배출되어 실내 부유 미세먼지의 농도를 증가시킬 수 있기 때문에 실내 미세먼지 발생원으로 작용할 수 있다.

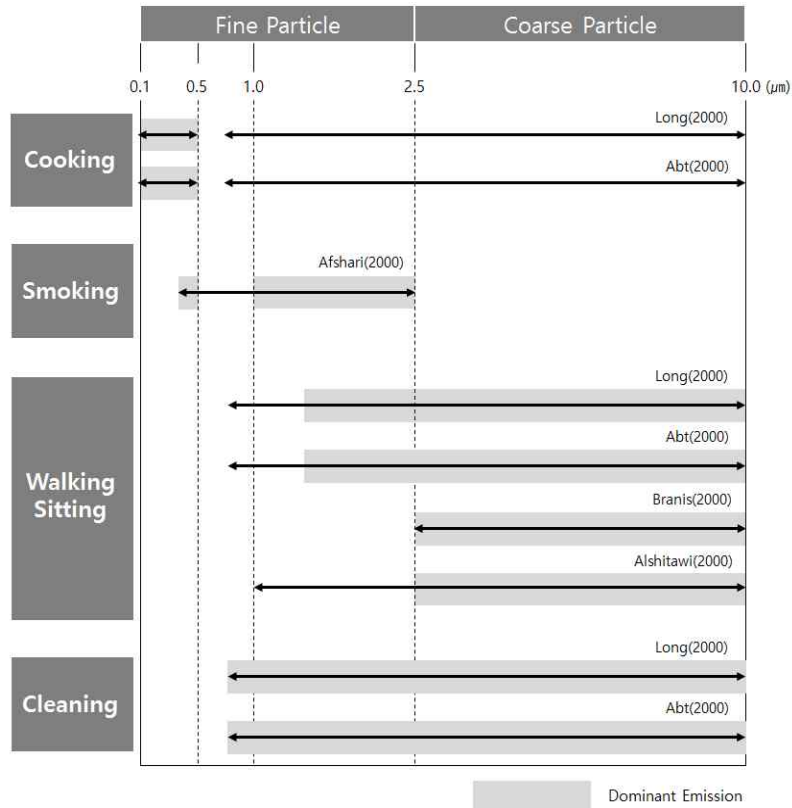
재부유란 실내에서 발생되거나 실외에서 유입된 미세먼지가 실내 표면에 침착되어 있다가 미세먼지에 작용하는 Mechanical Force, Aerodynamic Force, Electrostatic Force와 중력, 부착력의 평형이 깨지면서 공기 중으로 다시 부유하는 현상이다. 간단하게 미세먼지의 침착의 반대 과정이라 할 수 있다. 재실자의 보행이나 활동 또는 청소 등 실내 기류를 변화시키거나 실내 표면에 진동 및 충격을 일으키는 행위들이 대표적인 미세먼지 재부유의 원인이다. 또한 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양이 많을수록 재부유로 인해 발생하는 실내 미세먼지가 증가하게 된다.

미세먼지의 실내 발생과 재부유 모두 결과적으로 실내 공기 중 미세먼지 농도를 증가시키는 요인이며, 조리나 청소는 미세먼지를 발생하기도 하지만 동시에 실내 기류변화를 일으켜 미세먼지의 재부유에도 영향을 미치는 등 발생과 재부유는 밀접한 관계가 있다. 몇몇 기존연구에서 재실자의 활동에 의한 미세먼지 발생은 재부유로 표현하는 등 둘의 개념을 분리해서 사용하기도 하지만, 실내 발생으로 인해 실내 미세먼지 농도가 증가하였을 때, 둘을 명확히 구분하는데 한계가 있어 기존의 많은 연구에서 두 개념을 분리하지 않고 해석하였다.

실내 미세먼지의 발생원에 따라 발생하는 미세먼지의 입경 특성이 다르며, 다수의 연구자들이 미세먼지의 입경별 실내 발생원 분석을 위한 연구를 수행한 바 있다. 그 결과 Fine Particle 영역에 해당하는 미세먼지는 주로 조리과 같이 연소를 동반하는 발생원에 의해 주로 발생되었다. 조리는 입경  $10\mu\text{m}$  이하 미세먼지를 발생시키는데, 특히 입경  $0.5\mu\text{m}$  이하 미세먼지의 발생량이 많은 것으로 확인되었다. 또한, 청소나 재실자의

움직임 등은 주로 Coarse Particle을 발생시키는 발생원으로 확인되었다. [그림 2.9]는 실내 발생원에 따른 미세먼지 입경별 발생에 대한 기존 연구의 결과이다.

- 
- 32) Abt, E., Suh, H., Allen, G., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor sources: A study conducted in the metropolitan Boston area. *Environmental Health Perspectives*, 108(1), 35-44.
  - 33) Afshari, A., Matson, U., Ekberg, L. E. (2005). Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: A study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*, 15(2), 141-150.
  - 34) Alshitawi, M., Awbi, H. (2011) Measurement and prediction of the effect of students' activities on airborne particulate concentration in a classroom. *HVAC&R Research*, 17(4), 446-464.
  - 35) Branis, M., Rezacova, P., Domasova, M. (2005) The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 in a classroom. *Environmental Research*, 99(2), 143-149.
  - 36) Long, C. M., Suh, H. H., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(7), 1236-1250.



[그림 2.9] 실내 미세먼지의 입경별 발생원<sup>32)-36)</sup>

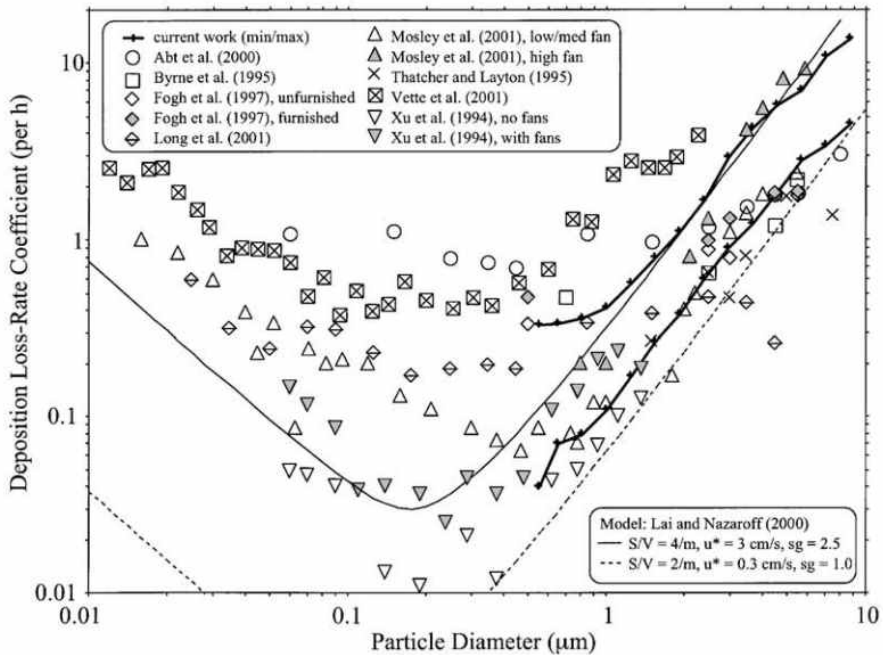
### (5) 침착률 (Particle Deposition Rate)

공기 중의 미세먼지는 관성충돌, 중력, 브라운 운동 등으로 인해 실내 표면에 침착되는데, 단위시간당 실내 미세먼지가 침착되는 정도를 침착률이라 한다. 미세먼지가 실내 표면에 침착하면 부유하고 있는 미세먼지의 농도가 감소하므로 침착률은 실내에서 미세먼지 농도 감소에 영향을 미치는 인자이다.

침착률은 실내 표면의 거칠기와 실내 기류 및 진동에 영향을 받기 때문에 침착률 또한 실내 환경에 따라 그 값에 차이가 발생할 수 있다. 또한 침착률은 미세먼지의 입경에 영향을 받는다. 미세먼지의 입경에 따



라 물리적 특성이 다른데, 입경이 작을수록 중력의 영향보다 확산의 영향이 커 침착되는 정도가 작고, 입경이 클수록 중력의 영향을 많이 받아 상대적으로 실내 표면에 침착되는 정도가 크다. 기존 연구를 통해 이와 같은 결과를 확인할 수 있는데, [그림 2.10]을 통해 입경에 따른 침착률이 V 형태를 보인다는 것을 알 수 있다. 입경 0.1 $\mu\text{m}$ 이하의 Ultra Fine Particle의 경우 브라운 운동이나 난류 확산의 영향 등으로 인해 실내 표면에 부착되는 정도가 커 침착률이 증가한다.



[그림 2.10] 미세먼지의 입경별 침착률<sup>37)</sup>

37) Thatcher, T.L., Lai, A.C.K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R.G. and Nazaroff, W.W. (2002). Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. Atmospheric Environ, 36, 1811-1819.

## 2.3 미세먼지 발생 평가관련 기존연구 고찰

실내 미세먼지는 발생 평가 방법은 Steady-state Model 또는 Mass Balance Equation을 이용하여 실내 발생률을 정량적으로 산출하는 방법, 그리고 측정을 통해 해당 Activity로 인한 미세먼지 발생을 정성적으로 평가 하는 방법이 있다. 본 연구는 실내 미세먼지 발생률을 정량적으로 산출하여 평가하고자 하므로 본 장에선 이에 관련된 기존 연구를 고찰하였다.

### (1) Steady-state Model

Dockery(1981)<sup>38)</sup>은 실내 미세먼지의 실내 발생과 실외 유입의 영향을 분석하기 위해 Mass Balance Equation인 식(2.1)를 이용하여 Steady-state Model의 개념을 정립하였고 그 과정은 아래와 같다.

$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_o + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.1)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{(a+k)} \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{aP}{(a+k)} C(t) + \frac{G(t)}{V(a+k)} - C_i(t) \quad (2.2)$$

양변을 적분 후, Sampling time, T로 나누면 식(2.3)과 같다.

---

38) Dockery, D. W., Spengler, H. D. (1981). Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. Atmospheric Environment, 15, 335-343.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{1}{(a+k)} \frac{1}{T} \int_0^T dC_i(t) &= \frac{aP}{(a+k)} \frac{1}{T} \int_0^T C_o(t) dt \\ &+ \frac{1}{V(a+k)} \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt - \frac{1}{T} \int_0^T C_i(t) dt \end{aligned} \quad (2.3)$$

이때,

$$\overline{C_o(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T C_o(t) dt$$

$$\overline{C_i(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T C_i(t) dt$$

$$\overline{G(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt$$

이라 하면, 식(2.4)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{1}{(a+k)} \frac{C_i(T) - C_i(0)}{T} &= \\ \frac{aP}{(a+K)} \overline{C_o(T)} + \frac{1}{V(a+k)} \overline{G(T)} - \overline{C_i(T)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dockery의 연구에선 24시간 동안 측정데이터를 활용하였기 때문에 위의 식(2.4)에서 측정 시간, T가 24시간이므로 좌변을 0으로 취급하여 식(2.5)의 Steady-state Model을 도출하였다. 이때 실내 공기유입량과 공기 배출량은 동일하고, 응고, 응축, 증발 등으로 인한 미세먼지 농도 변화는 무시하며, 측정 시간 동안 침기율, 침투 계수, 침착률이 일정하다고 가정

하였다.

$$\overline{C_i(T)} = \frac{aP}{(a+k)} \overline{C_o(T)} + \frac{1}{V(a+k)} \overline{G(T)} \quad (2.5)$$

Koutrakis(1992)<sup>39)</sup> 또한 위의 연구와 동일한 가정 후 식(2.6)을 통해 State-state Model을 도출하였다. 그 과정은 아래와 같다.

$$Q_{os} + Q_{is} = F_{out} + F_d \quad (2.6)$$

이때,

$$Q_{os} = VaPC_{out}$$

$$F_{out} = VaC_{in}$$

$$F_d = VkC_{in}$$

이라 하면 식(2.7)과 같이 정리된다.

$$VaPC_o + Q_{is} = VaC_i + VkC_i \quad (2.7)$$

$$\Rightarrow C_i = \frac{aP}{(a+k)} C_o + \frac{1}{V(a+k)} Q_{is} \quad (2.8)$$

---

39) Koutrakis, P., Briggs, S. L. K. (1992). Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga counties, New York, *Enviro. Sci. Technol.*, 26, 521-527.

여기서,

$Q_{os}$  : The flux of particles originating from outdoors

$Q_{is}$  : The flux of particles originating from indoors

$F_{out}$  : Transport of aerosols from the indoor to the outdoor environment

$F_d$  : Removal of particles on indoor surfaces by brownian diffusion of sedimentation

Steady-state Model은 식(2.9)과 같이 정리할 수 있으며  $aP/(a+k)$ 가 실외 미세먼지가 실내로 유입되어 부유하고 있는 비율을 의미하는 Infiltration Factor로 표현되고,  $G/V(a+k)$ 는 실내에서 발생되어 부유하고 있는 미세먼지의 농도로 표현된다. 식(2.9)의 우변의 좌측항은 실외의 실내로의 유입을, 우측항은 실내 발생을 의미한다.

$$C_i = F_{inf}C_o + C_{ig} \quad (2.9)$$

여기서,

$F_{inf}$  : Infiltration factor (Dimensionless)

$C_{ig}$  : Particles generated indoors ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  or  $\#/\text{m}^3$ )

분석 기간 동안 측정된 실내 농도( $C_i$ )와 실외 농도( $C_o$ )를 선형 회귀 분석하여 기울기 값으로  $F_{inf}$ 를, 절편 값으로  $C_{ig}$ 를 구할 수 있으며, 측정 시간 동안의 침기율, 침착률, 및 실내 부피를  $G/V(a+k)$ 에 대입하여 실내 발생률을 산출할 수 있다.

Steady-state Model의 해석을 위해선 측정 시간이 길어야 하며, 측정 시간 동안의 침기율, 침착률 등을 평균값으로 취급한다. 그러나 실제 건물에선 매시간 해당 인자들의 값이 변동하며, 다양한 Activity에 의해 미

세먼지가 발생되므로, 한 가지 Activity에 의해 발생하는 미세먼지 발생률의 정확한 해석에는 한계가 있다. 따라서 위의 평가 방법은 계절 또는 년 단위의 대량의 측정 데이터를 바탕으로 대상 건물의 실내 미세먼지 농도에 대한 실내 발생과 실외 유입을 평균적으로 평가하는데 적합한 방법으로 판단된다.

## (2) Mass Balance Equation Approach

Mass Balance Equation인 식(2.1)을 활용하여 실내 미세먼지 발생률을 산출 모델인 식(2.10)를 도출할 수 있다.<sup>40)41)</sup> 이때, 해당 Activity에 의해 미세먼지 발생되고 그로 인한 실내 농도의 최대치를  $C_{peak}$ , 해당 Activity 전의 실내 농도를  $C_{ini}$ , 두 농도 사이의 시간 간격을 T라 한다.

본 모델을 통해 분석하고자 하는 해당 Activity의 미세먼지 발생률을 산출할 수 있으며, 다른 실내 미세먼지 발생원이 없는 상태에서 해당 Activity를 연구자가 직접 수행하여 농도를 측정할 수 있거나, 관찰 및 측정을 통해 해당 Activity로 인한 농도 증가 및 그 시점이 명확히 구분 가능할 때 본 모델의 산출 방법을 사용할 수 있다. 그러나 미세먼지 발생률을 분석하고자 하는 Activity가 다양하며, 다양한 Activity가 연속적으로 발생할 경우, 전 시간대의 Activity로 인한 실내 미세먼지 농도 증가로 인해 해당 방법에서 요구되는  $C_{peak}$ 와  $C_{ini}$ 을 구분하는데 한계가 있어, 본 방법 이용하기 부적절할 것이라 판단된다.

---

40) He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Cilbert, D. (2004). Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. Atmospheric Environment, 38, 3405-3415.

41) Ferro, A. R., Kopperud, R. J., Hildemann, L. M. (2004). Source Strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. Environmental Science Technology, 38, 1759-1764.

$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_o + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.1)$$

$$\bar{G} = V \times \left[ \frac{C_{peak} - C_{ini}}{T} + (\bar{a} + \bar{k}) \bar{C}_i - \bar{a}P\bar{C}_o \right] \quad (2.10)$$

여기서,

$\bar{G}$	: Particle generation rate	( $\mu\text{g}/\text{h}$ or $\#/\text{h}$ )
$C_{peak}$	: Peak indoor particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$C_{ini}$	: Initial particle concentration	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$\bar{C}_i$	: Average indoor particle concentration during T	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$\bar{C}_o$	: Average outdoor particle concentration during T	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ or $\#/\text{m}^3$ )
$\bar{a}$	: Average air exchange rate during T	(1/h)
$\bar{k}$	: Average deposition rate during T	(1/h)

## 2.4 소결

본 장에서는 미세먼지의 기본적인 특성과 위해성을 고찰함으로써 실내 미세먼지 농도 영향인자의 영향도 평가에 대한 필요성을 재고하였으며, 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 통하여 실내 미세먼지 농도 영향인자를 파악하고 그 특성에 대해 고찰하였다. 또한 기존의 실내 미세먼지 발생 평가에 대한 기존 연구를 조사함으로써 평가 방법 및 이론에 대해 검토하였다.

(1) 미세먼지는 공기 중 부유하고 있는 액체 또는 고체상의 작은 입자이며, 중금속 등 인체에 해로운 성분을 포함하고 있다. 미세먼지는 다양한 입경으로 구성되어 있고 입경에 따라 물리적 특성이 다르며 이에 따라 실내 거동 및 제어 특성이 달라진다. 따라서 기존의 PM2.5 또는 PM10의 분류는 미세먼지의 입경별 특성을 반영하는데 한계가 있기 때문에 미세먼지의 입경별 분석이 요구된다.

(2) 실내 미세먼지는 환기나 건물의 틈새 등을 통해 실외에서 실내로 유입되며, 실내에서 발생되기도 한다. 이러한 실내 미세먼지 농도 형성 과정에 다양한 영향인자들이 관여하며, 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘을 고찰하여 환기량 또는 침기량, 실외 미세먼지 농도, 침투 계수, 침착률, 그리고 실내 발생이 그 영향인자임을 파악하였다. 기존연구 고찰을 통해 침투 계수, 침착률이 미세먼지의 입경에 따라 달라지며, 실내 발생 또한 발생원에 따라 발생 입경이 다르다는 것을 확인하였다.

(3) 또한 기존 연구에서 미세먼지 발생의 정량적 평가를 위해 사용된



Steady-state Model과 Mass Balance Equation 활용한 모델을 고찰하였다. 그러나 기존의 평가 방법은 실내 미세먼지에 대한 실외와 실내 발생의 영향 파악이 용이하나 전체 측정 기간 동안의 평균적인 발생률을 추정할 수 있는 방법이거나  $C_{peak}$ 와  $C_{ini}$ 이 명확히 구분될 때 사용 가능한 방법 이므로, 매 시간 활동 강도 및 활동 내용이 변화하는 영·유아를 대상으로 발생률을 평가함에 한계가 있음을 확인하였다.

## 제 3 장 영·유아 활동에 의한 미세먼지 발생이 입경별 농도에 미치는 영향 분석

### 3.1 개요

앞서 2장의 실내 미세먼지 농도 영향인자의 특성 고찰을 통해, 실내 환경 특성이 실내 미세먼지 발생 특성에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 따라서 본 장은 영유아의 활동에 의한 미세먼지 발생 평가를 위한 전단계로, 보육실 일과 활동 관찰 및 기록을 통해 보육실의 실내 환경 특성을 파악한 후, 이를 토대로 실제 운영이 이루어지는 보육실의 실내·외 미세먼지 개수 농도의 특성을 분석하여, 실내 영·유아의 활동에 의해 발생하는 미세먼지 입경이 무엇인지 파악하고자 한다.

### 3.2 보육실의 실내·외 미세먼지 입경별 농도 측정<sup>42)</sup>

#### 3.2.1 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요

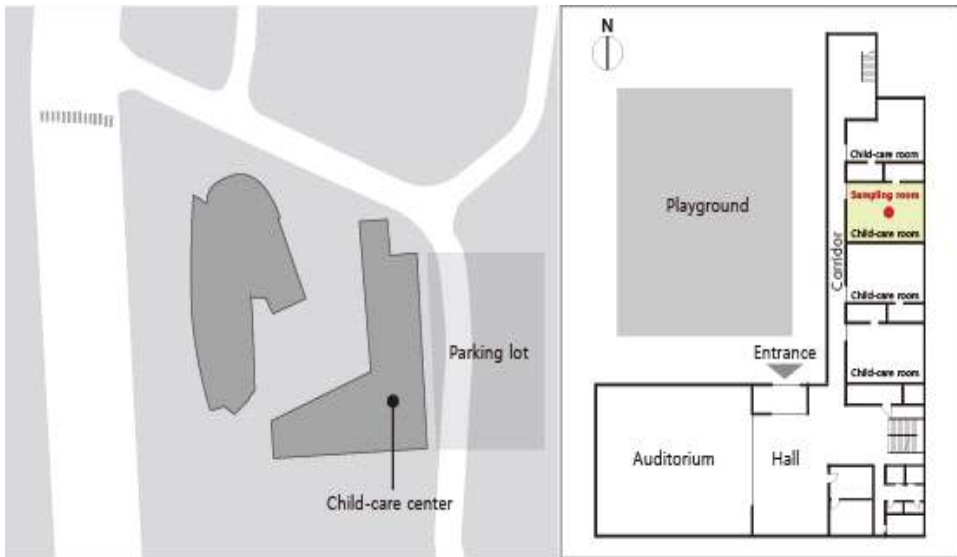
측정이 이루어진 보육시설은 서울시 관악구에 위치한 지하 1층 지상4층 규모의 건물로, 왕복 2차선 도로와 주차장이 주변에 인접하여 있다. 해당 보육시설은 층 당 4개, 총 16개의 보육실과 각층 별로 Activity 실 및 도서관 그리고 강당이 위치하였고 주방 및 식당은 지하 1층에 위치하였다.

측정은 1층에 위치한 만 3세반의 보육실에서 진행하였다. 보육실 내부는 pull-in 방식의 시스템 창호가 동측에, 복도로 연결되는 출입문은 서

---

42) 박성준, 김지혜, 조구상, 여명석, 김광우 (2015). 보육시설 실내 미세먼지의 입경별 실내·외 발생원 분석 대한건축학회 논문집, 31(12), 215-222.

측에 위치하며, 남·북 방향으로 인접 보육실이 위치하고 있다. 대상건물의 위치 및 평면도, 측정이 진행된 보육실의 정보는 [그림 3.1], <표 3.1>과 같다.



[그림 3.1] 측정 대상 보육시설의 주변 환경 및 평면도

<표 3.1> 측정 대상 보육시설 및 보육실 개요

보육시설 개요	
위치	서울시 관악구
규모	B1 ~ 4F
용도	보육실, 식당 및 주방(B1), Activity 실, 교무실
연면적	4,215㎡
건축면적	1,383㎡
보육실 개요	
위치	1F, 건물의 동측
면적	48.01㎡
부피	165.63㎥
채실자 수	15 (영·유아) + 1 (보육교사)
마감재	벽면 : 페인트, 바닥 : Vinyl flooring

### 3.2.2 영·유아의 일과 활동 관찰

보육시설의 일과 활동은 크게 자유활동, 낮잠, 식사, 교육활동 및 기타 활동으로 구분할 수 있고, 자유활동, 낮잠, 식사는 매일 공통적으로 진행되며 교육활동 및 기타활동은 일주일을 주기로 요일별 변화가 있다. 해당 보육시설의 경우 규모가 커 다양한 Activity 실들이 별도로 마련되어 있어 특별활동 및 기타활동은 보육실이 아닌 이러한 Activity 실에서 진행되었으며 식사 또한 지하의 식당에서 이루어졌다.

측정이 진행된 보육실의 경우 별도의 기계 환기장치 없이 pull-in 방식의 시스템 창호를 이용하여 일과 활동 중 불규칙하게 자연환기가 이루어졌으며, 기록한 환기 스케줄을 <그림 3.2>에 나타내었다. 보육실에서 진행되는 일과 활동 중 낮잠을 제외한 대부분의 일과 활동에서 영·유아의 지속적인 움직임이 발생하고, 이는 보육실 내 미세먼지의 발생 특성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 측정 기간 동안 재실유무, 재실인원, 일과 활동의 내용을 관찰 및 기록하였으며, 보육시설 실내 미세먼지 농도변화 분석에 참고하였다.

### 3.2.3 실내외 미세먼지 입경별 개수 농도 측정

일주일을 주기로 반복되는 보육시설의 일과 활동 특성을 반영하여 환절기와 겨울철에 각각 5일 이상, 실제 운영 데이터 확보를 위해 측정자의 의도적인 제어 없이 일과 활동이 이루어지고 있는 보육실을 대상으로 측정을 진행하였다.

환절기 해당 보육실의 일과 활동 시간 동안 자연환기가 불규칙하게 이루어져 침기량 산출에 한계가 있고, 자연환기 시 실외 미세먼지가 실내로 유입되는 정도가 커져 실내 미세먼지에 대한 실외의 영향이 커진다는 점을 고려하여, 환절기에 측정한 데이터를 3장의 실내 미세먼지에 대한

실외 및 실내 발생 영향의 정석적 분석에 활용하였고, 자연환기를 거의 실시하지 않는 겨울철의 데이터를 4장과 5장의 실내 미세먼지 발생률 산출에 활용하였다.

일과 활동에 따른 미세먼지의 입경별 측정을 위해 Optical Particle Counter(AEROTRAK, TSI 9306-v2)를 이용하였다. Optical Particle Counter는 미세먼지가 기기내부의 빛 산란 장치로 유입되었을 때, 광 검출기(photo detector)로 유입된 미세먼지에 의해 산란된 빛의 세기를 측정하고, 이를 통해 유입된 미세먼지 입경의 크기와 입자의 개수를 추정하는 기기이다. 본 연구에서는 미세먼지의 입경별 분석을 위해 보육실과 실외에서 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m, 총 6개의 입경의 개수농도를 측정하였다. 미세먼지와 함께, 실내·외 온·습도, CO<sub>2</sub> 농도도 함께 측정하였으며, 아이들의 활동을 방해하지 않는 공간의 0.9m 높이(만 3세 영·유아의 호흡선)에서 측정하였다. 진행된 측정에 대한 개요는 <표 3.2>과 같다.

<표 3.2> 측정 개요

측정 내용		개요
위치		보육실(바닥으로부터 0.9m 높이)실과 실외
측정기기	미세먼지	Optical particle counter (AEROTRAK, TSI 9306-v2)
	CO <sub>2</sub> , 온도, 상대습도	Data logger (MCH-383SD)
측정 간격		환절기 - 10분 겨울철 - 2분

### 3.3 재실조건이 실내 미세먼지 입경별 농도에 미치는 영향 분석<sup>43)</sup>

#### 3.3.1 분석 방법

보육시설 실내 미세먼지의 입경별로 주요 영향인자가 실내 발생인자 또는 실외 침투인지를 파악하기 위해 아래의 3단계 순서로 분석하였다.

첫 번째로, 실외 미세먼지가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해 측정된 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계를 선형 회귀 분석 방법을 이용하였다. 이때 선형 회귀 분석의  $R^2$ 값이 1에 가까울수록 실내 미세먼지와 실외 미세먼지 농도의 상관관계가 높고, 이는 실내 미세먼지가 실외 발생원의 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. 또한, 실내·외 발생원이 입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 보육시설 내 주요 실내 발생원인 영·유아의 활동이 이루어지는 재실 시와 실내 발생원이 없고 실외 발생원의 영향만 있는 비재실 시로 구분하여 분석하였다.

두 번째로, 실내 발생원이라 예상되는 영·유아의 활동에 따른 실내 미세먼지 농도 변화를 더 자세히 비교하기 위해 마찬가지로 재실 시와 비재실 시로 구분하여 입경별 미세먼지 농도의 I/O ratio를 분석하였다.

마지막으로, 영·유아의 활동이 실내 발생원임을 명확히 파악하기 위해 실내 발생원의 강도를 나타낼 수 있는 지표를 선정한 후, 실내 발생원 강도 지표와 실내 미세먼지 농도의 양의 상관관계를 선형 회귀 분석을 이용하여 분석하였다.

---

43) Ibid

### 3.3.2 일과 활동에 따른 미세먼지 입경별 농도 특성

대상 보육시설의 전체 측정기간에 걸친 미세먼지 농도 변화를 실내 농도와 실외 농도의 비율인 I/O ratio로 표현하였고, [그림 3.2]와 같다.

분석 결과, 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 I/O ratio와 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 I/O ratio의 변화양상이 뚜렷하게 구분되었다. 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 경우 전체 일과 활동에 걸쳐 I/O ratio가 1에 가까웠지만, 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 재실 시 I/O ratio가 증가하며, 침구 준비 및 정리와 같은 특정 활동 시에 특히 I/O ratio가 크게 증가하였다.

### 3.3.3 재실 및 비재실시 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계

실내 발생원 유무(비재실, 재실)에 따른 실내·외 미세먼지 농도의 상관관계를 분석하였다.

실내 발생원이 없는 비재실 조건에서의 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계는 [그림 3.2]와 같다. 10 $\mu\text{m}$ 를 제외한 모든 입경에서 선형 회귀 분석의  $R^2$ 값이 입경별로 각각 0.68 (0.3 $\mu\text{m}$ ), 0.81 (0.5 $\mu\text{m}$ ), 0.80 (1.0 $\mu\text{m}$ ), 0.74 (3.0 $\mu\text{m}$ ), 0.74 (5.0 $\mu\text{m}$ )이고, 기울기가 1에 가까운 것을 확인할 수 있다. 이는 비재실 시에 대부분의 입경에서 실내 미세먼지 농도가 실외 농도와 높은 상관관계가 있음을 의미한다.

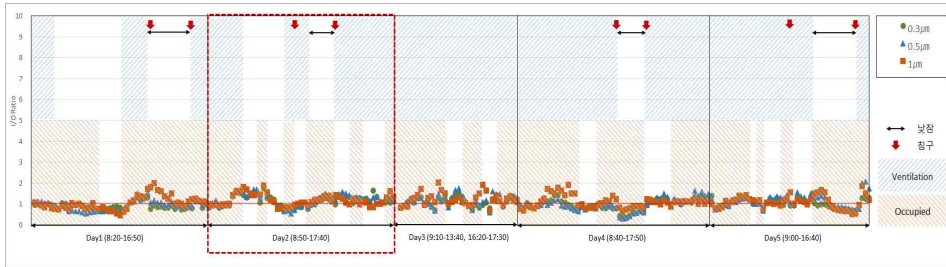
재실 시의 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계는 [그림 3.3]과 같다. 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ 의 경우 선형 회귀 분석의 기울기가 각각 0.72, 0.85이고  $R^2$ 값이 각각 0.56, 0.70 이므로 실내 미세먼지 농도가 실외 미세먼지 농도와 상관관계가 있다는 걸 확인할 수 있다. 입경 1 $\mu\text{m}$ 의 경우에도 선형 회귀 분석의 기울기가 0.63이고  $R^2$ 값이 0.39으로 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ 의 작은 미세먼지에 비해서는 상관관계가 약하지만, 3 $\mu\text{m}$  ( $R^2=0.05$ ), 5 $\mu\text{m}$  ( $R^2=0.03$ ), 10 $\mu\text{m}$  ( $R^2=0.02$ )의 큰 입경의 미세먼지와 비교하였을 때 상관관



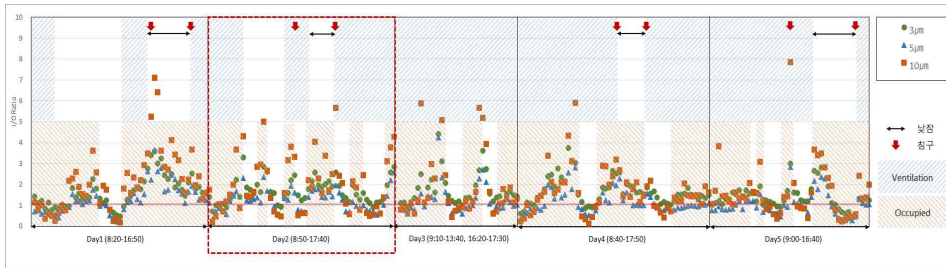
계가 있다고 판단할 수 있으며, 아울러 실외 농도가 증가함에 따라 실내 농도도 함께 증가하는 경향을 그래프를 통해 확인할 수 있다.

따라서 입경  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ 의 작은 미세먼지는 입경  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 에 비해 상대적으로 실내 미세먼지 농도에 대한 실외 미세먼지 농도의 영향도가 큰 것으로 판단된다. 그러나  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  입경의 경우 그래프 위의 점이 점선을 중심으로 고르게 분포되어 있지 않고(그림 3.3, d), e), f)),  $R^2$ 값 역시 0.05이하의 작은 값으로 실내 농도와 실외 농도의 상관관계를 확인할 수 없으며, 실외 농도 변화량 대비 실내 농도 변화량이 큰 것을 확인할 수 있다.

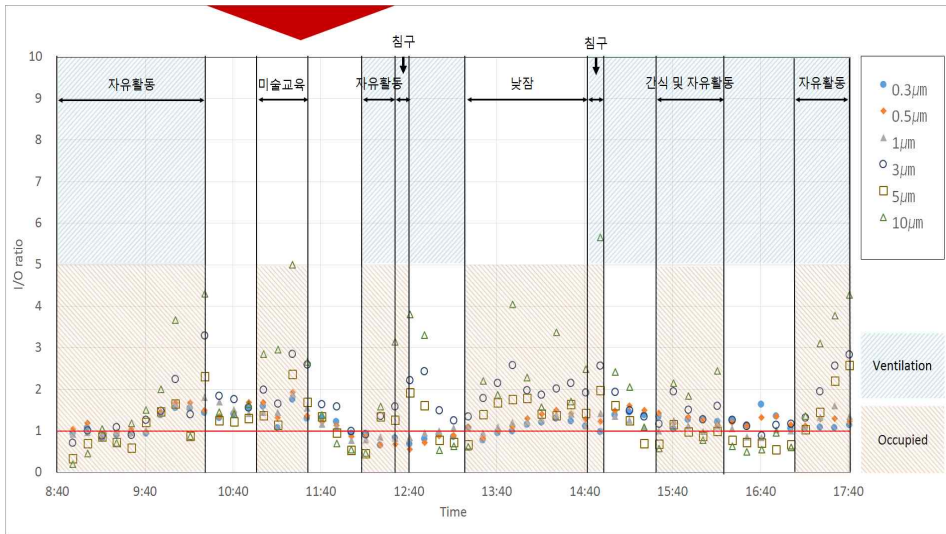
[그림 3.2]와 [그림 3.3]을 통해  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$  입경의 경우 비재실 조건, 재실 조건 모두 실내 농도가 실외 농도의 영향을 받는 것을 확인하였고,  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$  입경의 경우 비재실 시에는 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인할 수 있는 반면,  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  입경 모두 재실 시에는 실외 농도의 영향이 거의 없다는 것을 확인할 수 있다.



a) 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m

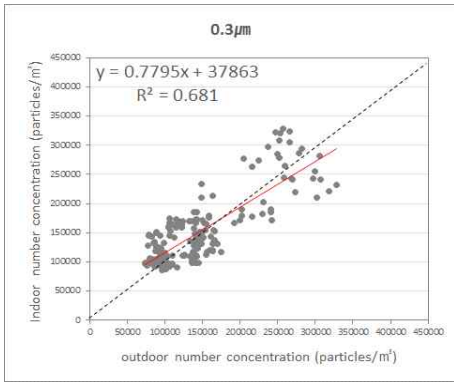


b) 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m

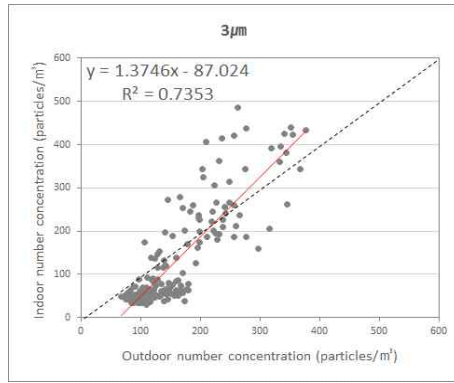


c) 두 번째 측정 날의 일과 활동에 따른 I/O Ratio

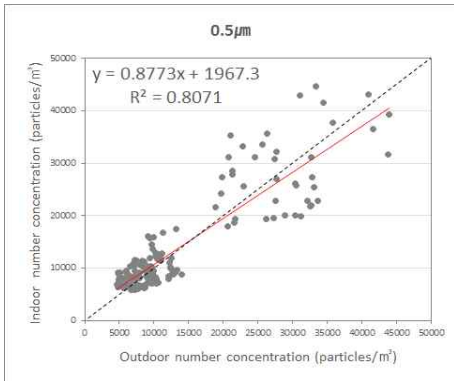
[그림 3.2] 측정기간 동안의 I/O Ratio



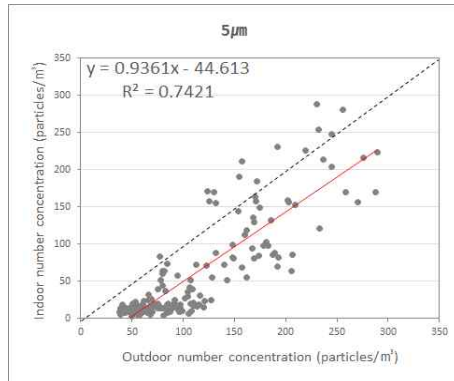
a) 입경 0.3 $\mu$ m



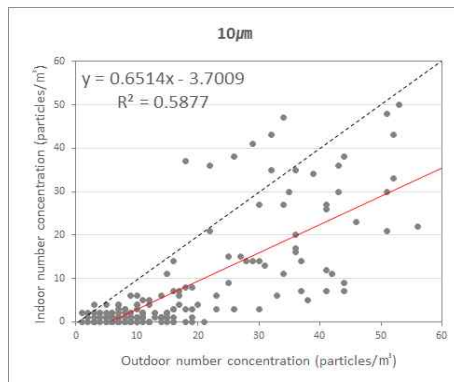
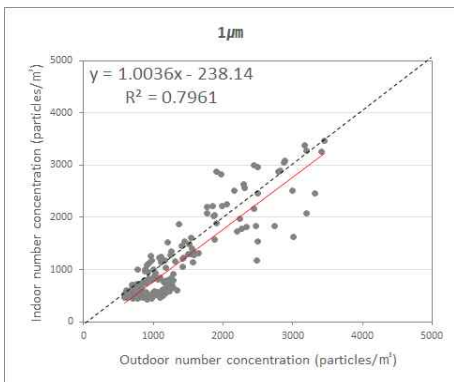
d) 입경 3 $\mu$ m

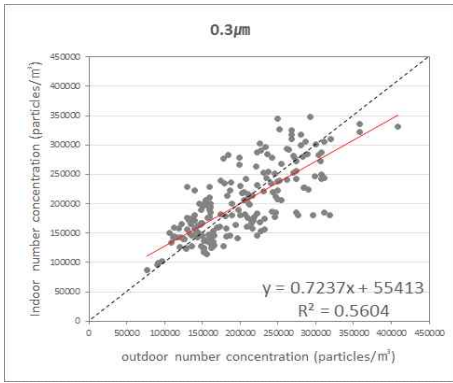


b) 입경 0.5 $\mu$ m

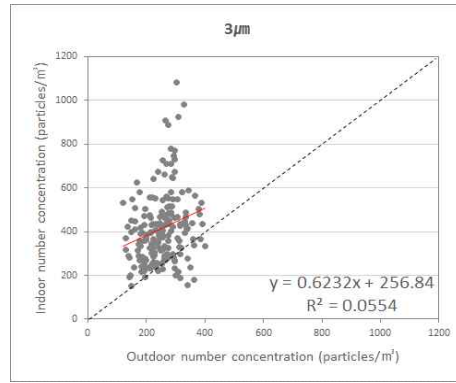


e) 입경 5 $\mu$ m

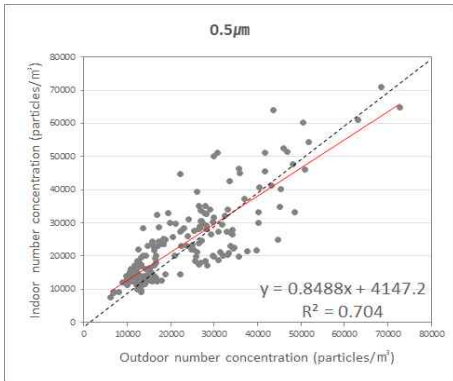




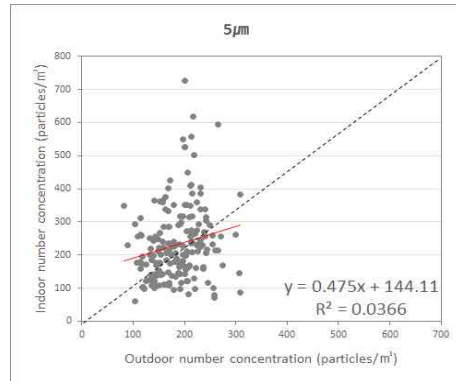
a) 입경 0.3µm



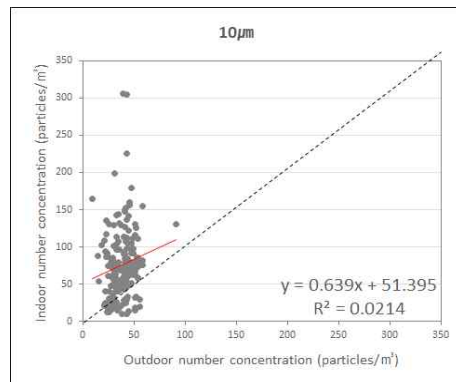
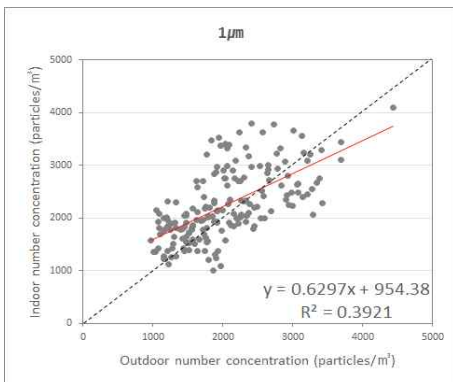
d) 입경 3µm



b) 입경 0.5µm



e) 입경 5µm

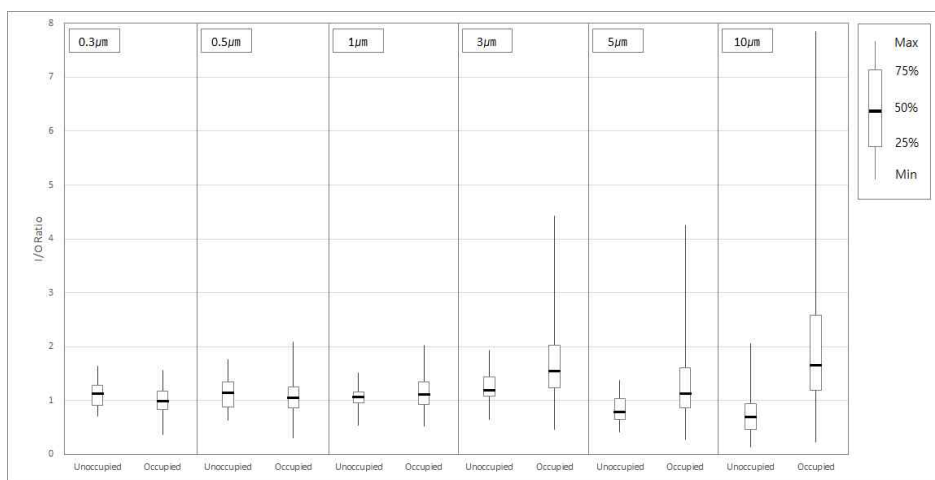


### 3.3.4 재실 및 비재실시 I/O Ratio 비교

영·유아의 재실이 실내 입경별 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 미세먼지의 입경별로 비재실 조건에서의 I/O ratio(Unoccupied)와 재실 조건에서의 I/O ratio(Occupied)를 비교하였다(그림 3.4).

입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 재실 시와 비재실 시의 I/O ratio가 모두 1에 가깝게 나타났고, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 와 비교하였을 때 I/O ratio의 편차 역시 매우 작으므로 재실 유무에 따른 I/O ratio의 변화가 작다는 걸 확인할 수 있다.

반면, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우, 재실유무에 따라 I/O ratio의 편차가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 입경 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지는 비재실 시 I/O ratio의 중앙값이 1보다 작아 실내 미세먼지 농도가 실외 미세먼지 농도보다 대체로 작은 것을 확인할 수 있다. 그러나 재실 시 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 I/O ratio가 증가하며, Maximum I/O ratio와 Minimum I/O ratio의 차이가 3 $\mu\text{m}$ 의 경우 10배, 5 $\mu\text{m}$ 의 경우 16배, 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 34배로, 그 편차가 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다.



### 3.3.5 실내 미세먼지 농도와 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 상관관계

큰 입경의 실내 미세먼지 농도가 재실 시에 증가하는 원인을 규명하기 위하여 실내 발생원 강도에 따른 실내 미세먼지 농도를 분석하였다.

Alshitawi(2011)<sup>44</sup>의 연구에서는 재실 학생 수를 발생원의 강도를 나타내는 지표로 선정하여 실내 발생원 강도와 실내 미세먼지 농도의 상관관계를 분석하였다. 하지만 대상 보육실의 일과 활동을 관찰 및 기록한 결과 영·유아의 등원 시간, 재실인원이 불규칙하고, 짧은 시간 내에서도 재실인원의 변동이 발생하여 재실인원수를 발생원의 강도를 나타내는 지표로 활용함에 한계가 있다. 또한, 환기가 불규칙하게 이루어져 발생원 강도와 환기가 동시에 고려된 지표의 선정이 요구되었다.

본 연구에서는 인체에서 발생되고 환기에 의해 희석되어 결정되는 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 실내 발생원의 강도와 환기가 같이 고려된 지표로 선정하였다.

낮잠 시간의 경우 영·유아의 활동이 없어 미세먼지의 발생이 없으나, 호흡에 의한 CO<sub>2</sub> 발생은 지속되므로 앞서 가정한 CO<sub>2</sub>의 지표성을 상실하므로 분석데이터에서 제외했다.

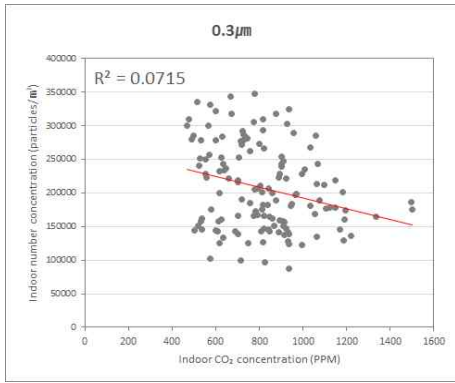
실내 미세먼지 농도와 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 상관관계는 [그림 3.5]와 같다. 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 그래프 위의 점이 분산되어 있고 R<sup>2</sup>값이 0.1 이하로 매우 작게 나타났다(그림 3.5, a), b), c)). 이는 실내 미세먼지 농도와 실내 발생원의 상관관계가 없다는 것을 의미하기 때문에, 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 실내 발생원의 영향이 거의 없다는 것을 확인할 수 있다.

반면, 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지의 경우, 그래프 위의 점이 양의 증가 방향으로 고르게 분포되어 있으며 R<sup>2</sup>값 또한 입경별로 각각 0.51

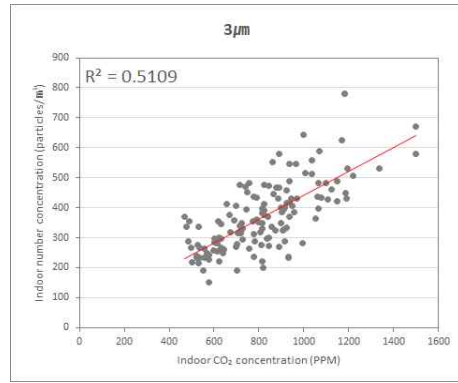
---

44) Alshitawi, M. S., Awbi, H. B. op. cit., 446-464.

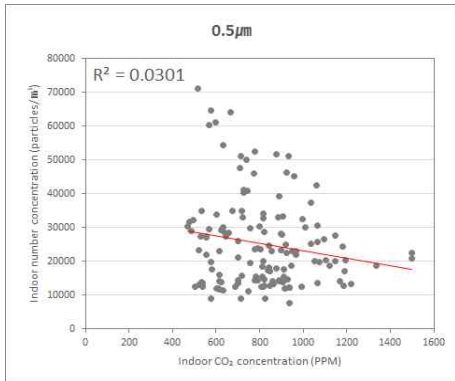
(3 $\mu\text{m}$ ), 0.58 (5 $\mu\text{m}$ ), 0.67 (10 $\mu\text{m}$ )이므로 큰 입경의 실내 미세먼지 농도와 실내 CO<sub>2</sub> 농도(실내 발생원의 강도)가 양의 상관관계를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.



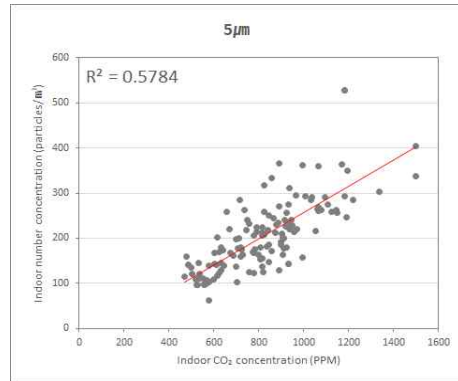
a) 입경 0.3µm



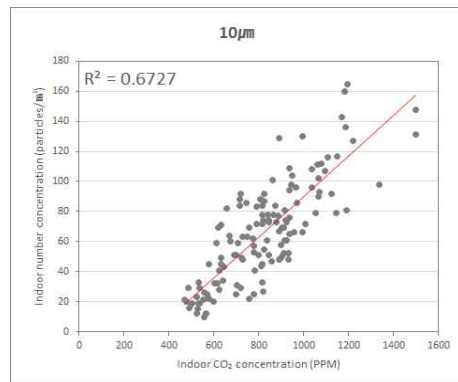
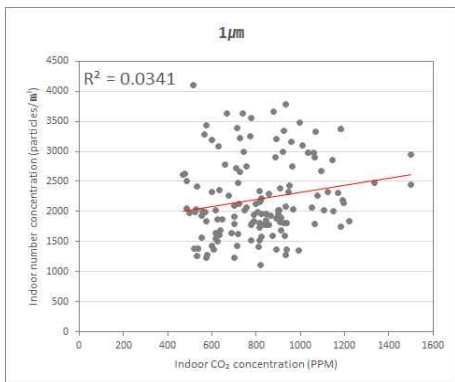
d) 입경 3µm



b) 입경 0.5µm



e) 입경 5µm





### 3.4 소결

본 장에서는 실제 운영되는 보육실을 대상으로 실내·외 미세먼지 농도를 측정하였고, 자연환기를 실시하여 실외의 영향 파악이 가능한 환절기 데이터를 대상으로 보육실 미세먼지에 대한 실외와 영·유아에 의한 실내 발생의 영향을 입경별로 정성적으로 분석하였다. 겨울철 데이터와 본 장의 분석결과는 보육실 미세먼지 발생 평가를 위해 4장과 5장에 활용하였다.

(1) 보육실내 미세먼지의 농도 변화 특성을 분석한 결과, 측정 기간 동안 활동 및 재실 유무에 관계없이 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 I/O ratio는 일정하였으나, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 재실 시 I/O ratio가 증가하며, 특히 침구 준비 및 정리 시 I/O ratio가 급격히 증가함을 확인하였다.

(2) 실내와 실외 미세먼지 농도의 상관관계 분석 결과 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지는 실내 발생원의 유무에 상관없이 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인하였다. 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 비재실 시와 재실 시의 결과가 다르게 나타났는데, 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ 의 입경은 비재실 시에는 실내와 실외 농도의 상관관계가 확인되었으나 실내 발생원이 있는 재실 시에 실내와 실외 농도의 상관관계를 확인할 수 없었고, 10 $\mu\text{m}$ 의 입경은 재실조건과 상관없이 실내와 실외 농도 간에 상관관계가 확인되지 않았다. 이를 통해 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$  입경의 미세먼지는 실외의 영향이 큰 것을 파악하였다.

(3) 재실 유무에 따른 I/O ratio 비교 분석 결과 입경 0.3 $\mu\text{m}$ , 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 재실 유무에 관계없이 I/O ratio가 비교적 1에 가깝게 나타났지만, 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지의 경우 실내 발생원이 존재하는 재실 시 I/O ratio의 편차가 매우 크게 나타났다. 따라서 재실 여부, 즉 영·유아의 활동 여부가 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$  입경의 미세먼지의 농도에 영향을 크게 미친다는 것을 확인하였다.

(4) 실내 발생원과 실내 농도의 양의 상관관계 파악을 위해 실내 발생원의 강도를 나타낼 수 있는 지표로 CO<sub>2</sub> 농도를 선정하였고, 실내 농도와의 상관관계 분석하였다. 그 결과 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ 의 미세먼지 농도는 발생원 강도와 양의 상관관계가 있으므로 영·유아의 활동이 입경 3 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$  미세먼지의 주요 실내 발생 인자임을 파악하였다.

# 제 4 장 보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수 산출

## 4.1 개요

앞서 2장에서 고찰한 바와 같이 침기율, 침착률 및 침투 계수는 실내 미세먼지 농도 형성에 영향을 미치는 주요 인자이며, 실내 미세먼지 발생률을 분석하기 위해 측정 기간 동안의 대상실의 침기율, 침착률 및 침투 계수 값이 요구된다. 따라서 본 장에서는 측정 기간 동안 해당 보육실의 침기율, 침착률, 및 침투 계수를 산출하고자 한다.

## 4.2 보육실의 침기율 산출

측정 기간 동안 해당 보육실의 침기율 산출을 위해 해당 보육실의 기밀 성능 측정 결과와 CO<sub>2</sub> 농도의 감소 구간 데이터를 이용하는 KS표준 옥내 환기량 측정방법<sup>45)</sup>을 참고하였다.

측정 대상 보육실의 기밀 성능 측정을 통해 식(4.1)<sup>46)</sup>의 Effective air leakage area( $A_L$ )를 산출하였으며, 그 결과는 <표 4.1>과 같다.

$$A_L = 10000Q_r \frac{\sqrt{\rho/2\Delta p_r}}{C_D} \quad (4.1)$$

45) KS 표준, KS F 2603 옥내 환기량 측정방법.

46) ASHRAE HANDBOOK (2013). op. cit., 16.15.

여기서,

- $Q_r$  : Airflow rate at  $\Delta p_r$  (m<sup>3</sup>/s)  
 $\rho$  : Air density (1.2kg/m<sup>3</sup> at sea level) (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\Delta p_r$  : Reference pressure difference (Pa)  
 $C_D$  : Discharge coefficient (Dimensionless)  
 ( $C_D=1$  at 4Pa,  $C_D=0.6$  at 10Pa)

<표 4.1> Effective Air Leakage Area 산출 결과

개구부 밀폐 여부	$\Delta p_r$	$Q_r$	$A_L$
O	10.2	0.44	1795
X	10	0.39	1600
개구부의 Effective Air Leakage Area (cm <sup>2</sup> ) ( $A_{L, seal} - A_{L, seal off}$ )			195



[그림 4.1] 대상 보육실의 Blow door test

보육실 CO<sub>2</sub> 농도 감소 구간을 이용한 침기율 산출에는 KS F 2603 옥내 환기량 측정 방법에서 제공하는 식(4.2)을 참고하였다. 본 방법에서는 실내 이산화탄소 농도의 완전 혼합을 가정하고 있기 때문에, 보육실내 6곳에서 CO<sub>2</sub> 농도를 측정 후 산술평균값을 완전 혼합 상태의 농도로 간주하였다.

$$a = \frac{2.303}{t} \log \frac{C_1 - C_o}{C_t - C_o} \quad (4.2)$$

여기서,

- $t$  : 제 1회 때 측정 시간부터 그 측정까지 경과 시간 (h)
- $C_1$  : 제 1회 때의 측정시간에 있어서의 실내 CO<sub>2</sub> 농도 (ppm)
- $C_t$  : t 시간 후에 있어서의 실내 CO<sub>2</sub> 농도 (ppm)
- $C_o$  : 급기 중의 CO<sub>2</sub> 농도 (ppm)

기밀 성능 측정 결과와 가스 추적법인 CO<sub>2</sub> 농도 감쇠 구간을 통해 산출한 해당 보육실의 침기율 산출 결과는 <표 4.2>와 같다. 보육실 실내의 미세먼지 측정 시간 간격에 맞춰 2분 간격으로 침기율을 산출하였다.

<표 4.2> 침기울 산출 결과

Case	침기울
11/19 (8:30-16:32)	
11/20 (8:30-18:30)	
11/23 (8:30-18:30)	
11/27 (8:30-18:30)	
11/30 (8:30-18:30)	
12/1 (8:30-18:30)	

## 4.3 침착률 및 침투 계수 산출

### 4.3.1 침착률 및 침투 계수 산출 방법 고찰

침착률과 침투 계수를 산출하는 표준 방법이 정립되지 않았으므로, 본 연구에서는 기존 연구자들이 제시한 산출 방법 중에서 Tung(1999)<sup>47)</sup>와 Chao(2003)<sup>48)</sup>가 제안한 방법을 참고하였다.

Mass Balance Equation인 이용하여, 실내 발생원이 없는 조건에서 식(2.2)를 식(4.3)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = aPC_{out} + \frac{G}{V} - aC_i - kC_i \quad (2.2)$$

$$C_i = \frac{aP}{a+k} C_o + (C_{ini} - \frac{aP}{a+k} C_o) \exp(-(a+k)t) \quad (4.3)$$

여기서,

$C_{ini}$  : Initial indoor particle concentration (#/m<sup>3</sup>)

이때, 시간이 경과함에 따라 실내 미세먼지 농도는 일정한 평형 값에 다다르고, 그 일정 값을  $C_{ss}$ 라고 하면, 식(4.3)를 식(4.4)와 같이 정리할 수 있다.

---

47) Tung, T. C. W., Chao, C. Y. H., Burnett, J. (1999). A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell. Atmospheric Environment, 33, 881-893.

48) Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Cheng, E. C. K. (2003). Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences. Atmospheric Environment, 37, 4233-4231.



$$C_i = C_{ss} + (C_{ini} - C_{ss})\exp(-(a+k)t) \quad (4.4)$$

여기서,

$$C_{ss} : \text{Equilibrium particle concentration} \quad (\#/m^3)$$

위의 식(4.4)으로부터 침착률과 침투 계수를 식(4.5)와 식(4.6)으로 추정할 수 있으며, 측정 시간  $t$  동안 침기율( $a$ ), 침투 계수( $P$ ), 침착률( $k$ ), 실외 미세먼지 농도( $C_o$ )는 일정하다 가정한다.

$$k = -\left(\frac{1}{t}\right)\ln\left(\frac{C_i - C_{ss}}{C_{ini} - C_{ss}}\right) - a \quad (4.5)$$

$$P = \left(1 + \frac{a}{k}\right)\frac{C_{ss}}{C_o} \quad (4.6)$$

### 4.3.2 침착률 및 침투 계수 산출 결과

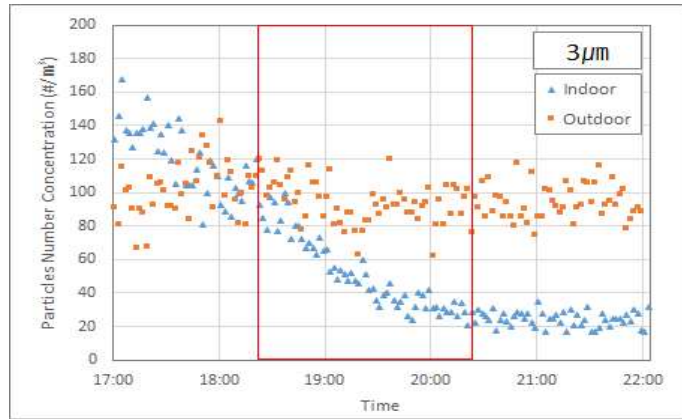
앞서 서술한 침착률 및 침투 계수 산출 방법은 측정 시간  $t$  동안 침기율( $a$ ), 실외 미세먼지 농도( $C_o$ )가 일정하다고 가정하였으므로, 비교적 실내 환경 변화가 없는 하원 후인 비재실 구간을 이용하였다. 앞서 3장의 결과를 참고하여 입경 실내 발생의 영향을 받는 입경  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 의 미세먼지를 대상으로 하였으며, 침착률 및 침투 계수 산출 구간은 [그림 4.2-4]과 같으며, 결과는 <표 4.3>와 같다.

침착률 및 침투 계수의 산출 결과를 통해 미세먼지의 침착률 및 침투 계수는 입자의 크기와 관련이 있다는 것을 확인할 수 있다. 미세먼지 입경의 크기가 증가할수록 중력의 영향이 커져 침착률이 커지며, 건물 외피 등의 틈새에 의해 걸러지는 효과가 커져 침투 계수는 작아진다. 즉, 입자의 크기가 클수록 침착으로 인해 제거되는 정도가 크며, 실외에서 실내로 유입되는 정도가 작다는 것을 의미한다.

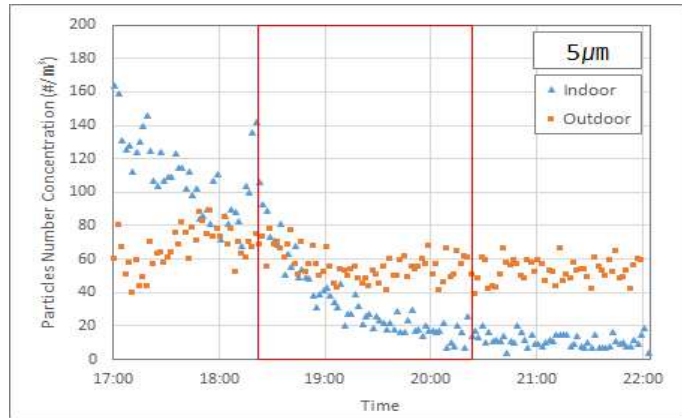
본 연구에서는 산출한 침착률과 침투 계수의 평균값을 해당 보육실의 미세먼지 침착률 및 침투 계수로 활용하였으며, 산출 결과의 검증을 위해 측정한 농도와 산출한 침착률과 침투 계수 및 침기율을 실내 발생원이 없는 조건의 식(4.7)에 대입하여 산출한 예측 데이터와 비교하였다. 비교 결과인 [그림4.5]를 통해 예측 농도와 측정한 농도가 유사함을 확인할 수 있고, 산출 결과의 타당성을 확인하였다.

$$C_i^m = \frac{aP}{a+k} C_o^m + (C_i^{m-1} - \frac{aP}{a+k} C_o^m) \exp(-(a+k)t) \quad (4.7)$$

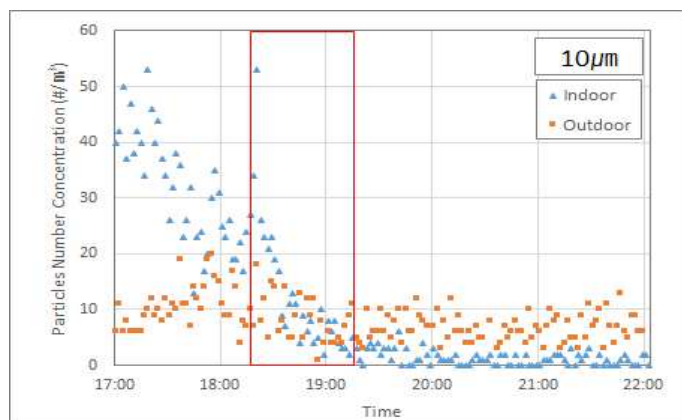
여기서,

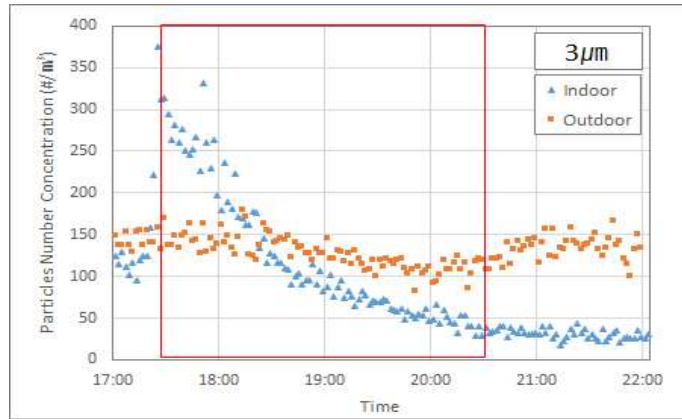


(a) 입경 3µm

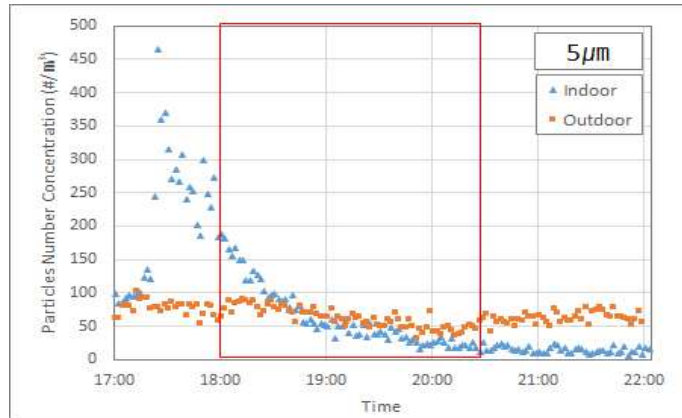


(b) 입경 5µm

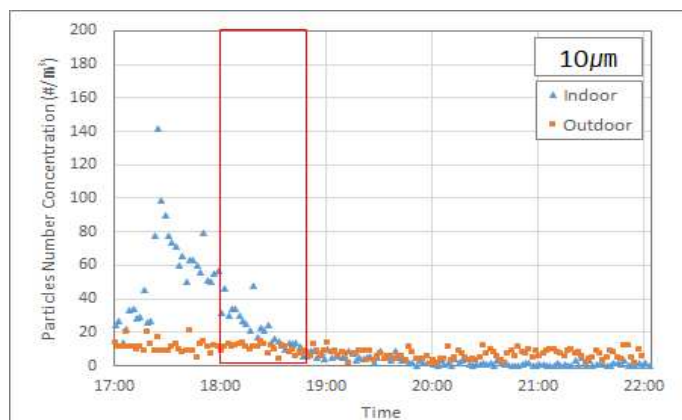


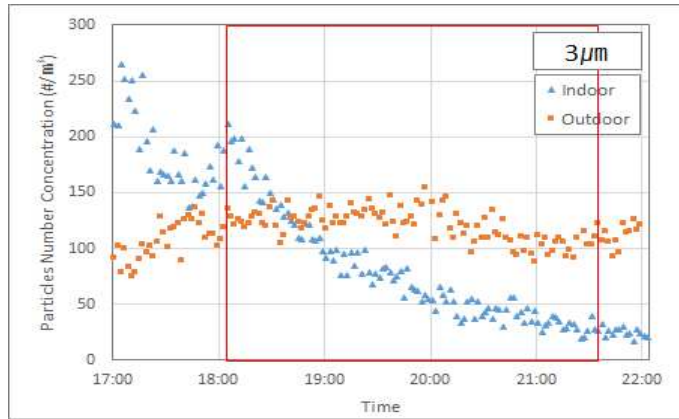


(a) 입경 3µm

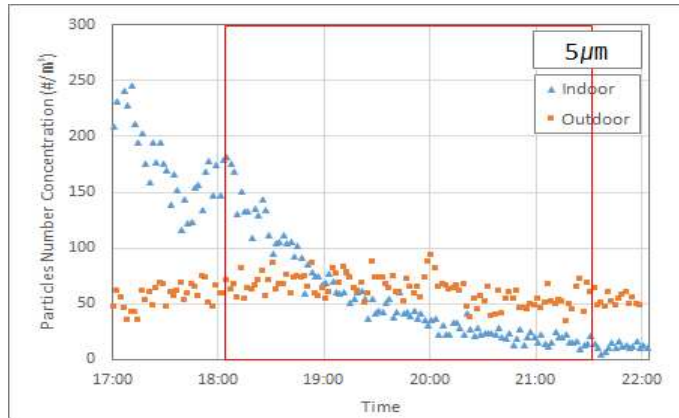


(b) 입경 5µm

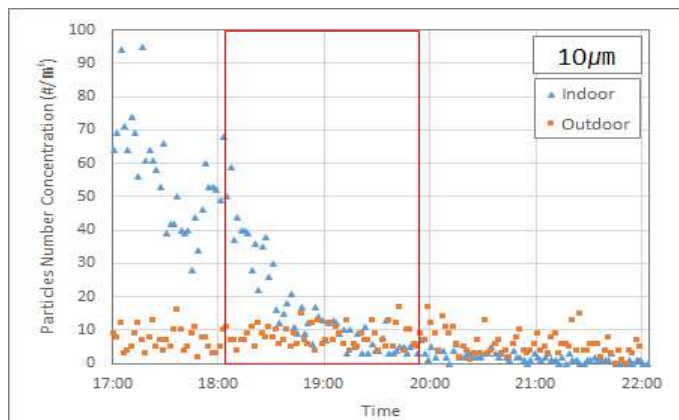




(a) 입경 3µm

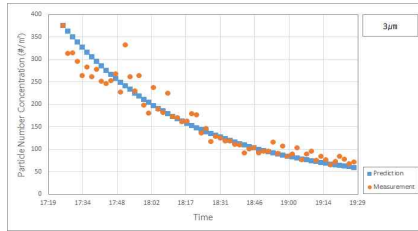


(b) 입경 5µm

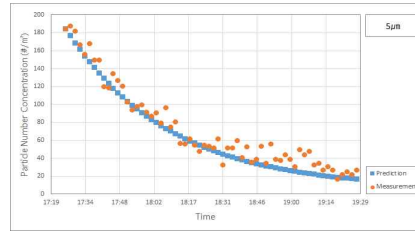


〈표 4.3〉 미세먼지의 입경별 침착률(k) 및 침투 계수(P) 산출 결과

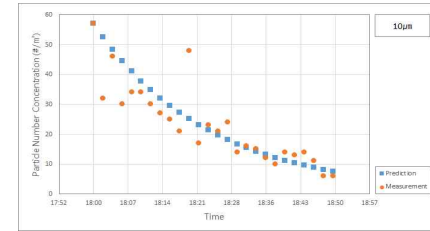
Case	3 $\mu$ m		5 $\mu$ m		10 $\mu$ m	
	k	P	k	P	k	P
11/27	0.80	0.38	0.90	0.26	1.93	0.14
11/30	0.61	0.41	0.98	0.30	2.6	0.22
12/1	0.43	0.34	0.83	0.25	1.4	0.21
Average	0.61	0.38	0.90	0.27	1.99	0.19



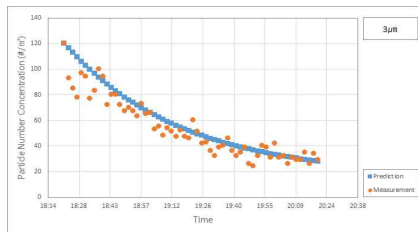
(a) 입경 3µm (11/27)



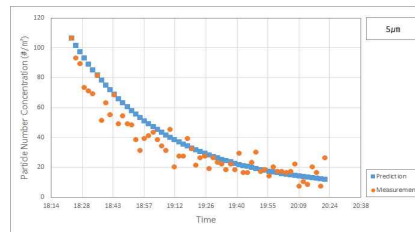
(b) 입경 5µm (11/27)



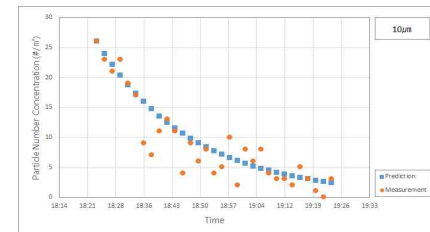
(c) 입경 10µm (11/27)



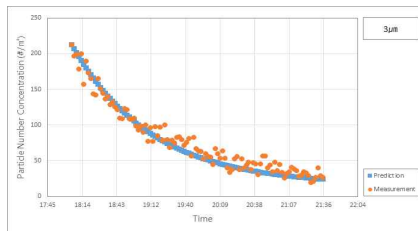
(d) 입경 3µm (11/30)



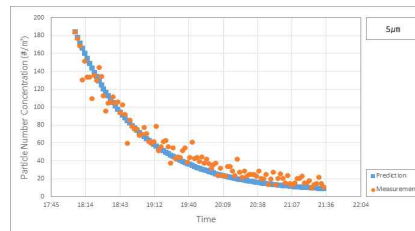
(e) 입경 5µm (11/30)



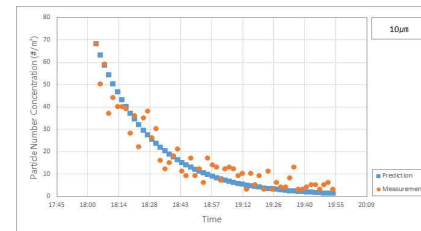
(f) 입경 10µm (11/30)



(g) 입경 3µm (12/1)



(h) 입경 5µm (12/1)



(i) 입경 10µm (12/1)

[그림 4.5] 실내 측정 농도와 산출한 침기율, 침착률 및 침투 계수를 이용한 예측 농도의 비교

앞서 2장에서 고찰한 바와 같이 침착률은 실내 표면에서의 침착 속도에 영향을 받기 때문에, 보육실의 경우 재실 시 영·유아의 활동 등으로 인해 실내 기류가 발생하며 이에 따라 미세먼지의 침착률이 변동할 수 있다. 앞서 산출한 침착률은 비재실 상태에서의 결과이기 때문에, 실내 환경에 변화가 생기는 재실 시에 활용하기 위해 활용 타당성에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 침착률의 활용 타당성 검토를 위해 Lai(2000)<sup>49)</sup>의 연구를 참고하였다. Lai(2000)는 미세먼지의 입경과 Friction velocity에 따라 침착 속도가 달라지며, Friction velocity가 각각 0.3cm/s, 1cm/s, 3cm/s 일 때 입경 1 $\mu$ m 미만의 미세먼지는 침착 속도가 다르고, 입경 1 $\mu$ m 이상의 미세먼지는 침착 속도가 같다는 결과를 도출하였다. Lai(2000)가 제안한 Friction velocity 산출 식은 아래 식(4.8)과 식(4.9)와 같다.

$$u^* = \left( \nu \frac{dU}{dy} \Big|_{y=0} \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

$$\frac{dU}{dy} \Big|_{y=0} = \left( \frac{0.074}{\rho_a \nu} \right) \left( \frac{\rho_a U_\infty^2}{2} \right) \left( \frac{U_\infty L}{\nu} \right)^{-1/5} \quad (4.9)$$

---

49) Lai, A. C. K., Nazaroff, W. W. (2000). Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 31(4), 463-476.



여기서,

- $u^*$  : Friction velocity (cm/s)
- $U_\infty$  : Representative freestream air velocity measurement (cm/s)
- $\rho_a$  : Air density (kg/m<sup>3</sup>)
- $\nu$  : Kinematic viscosity of air (0.15cm<sup>2</sup>/s at 20°C) (cm<sup>2</sup>/s)
- $L$  : Characteristic Length (cm)

해당 보육실의 재실 상태에서 측정한 실내 기류 데이터와 식(4.8)과 식(4.9)을 이용하여 Friction velocity를 산출하였고, 그 결과는 <표 4.4>와 같다. 측정 기간 동안의 최대 Friction velocity는 1.31cm/s이며, 이는 Lai의 연구 결과에서 입경 1 $\mu$ m 이상 미세먼지의 침착 속도가 동일한 범위에 속한다. 따라서 비재실 상태에서 산출한 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 미세먼지의 침착률을 재실 상태에서도 활용하는 것이 타당함을 확인하였다.

<표 4.4> Friction Velocity 산출 결과

Measured velocity (cm/s)		$L$ (cm)	Friction Velocity (cm/s)
Minimum	1	861	0.08
Maximum	22		1.31

## 4.4 소결

본 장은 보육시설 실내 미세먼지 발생률 산출을 위한 전 단계로 실내 미세먼지 해석에 필요한 침기율, 침착률, 침투 계수를 산출 하였다. 본 장의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 실내 미세먼지 해석을 위해 침기율 데이터가 반드시 요구되며, 본 연구에서는 측정 대상 보육실의 기밀 성능 측정 결과와 KS F 2603 옥내 환기량 측정방법을 참고하여 침기율을 산출하였다.

(2) 침착률 및 침투 계수 산출을 위해 Tung(1999)와 Chao(2003)가 제안한 방법을 참고하였으며, 영·유아가 모두 하원한 후 실내 환경 변화가 적은 비재실 구간과 실외 농도가 비교적 일정한 구간을 이용하여 침착률 및 침투 계수를 산출하였다. 그 결과 입경  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 의 침착률은 각각 0.61, 0.90, 1.99이며, 침투 계수는 각각 0.38, 0.27, 0.19로 산출되었다. 침착률 및 침투 계수 산출 결과를 통해 입경의 크기가 클수록 실내 표면 등에 침착되는 정도가 크며, 실외에서 실내로 공기가 유입될 때 개구부 및 건물의 틈새 등에 의해 걸러지는 정도 역시 크다는 것을 확인하였다. 이를 통해 미세먼지의 입경의 크기가 클수록 실내 미세먼지에 대한 실외 미세먼지의 영향이 작다는 3장의 분석 내용을 수치적으로 확인하였다.

## 제 5 장 보육실 영·유아의 활동에 의한 입경별 미세먼지 발생률

### 5.1 개요

앞서 3장에서 보육시설 실내 미세먼지에 대한 실외 및 실내 발생의 영향을 입경별로 분석하였고, 그 결과 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지가 실내 발생의 영향이 큰 것을 파악하여 발생률 추정 대상 입경으로 선정하였다. 또한 4장에서는 본 장의 목적인 실내 미세먼지 발생률 분석을 위해 해당 보육실의 침기량, 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 미세먼지의 침착률 및 침투 계수를 산출하였다. 이를 토대로 본 장에서는 실내 미세먼지 발생률 산출을 통해 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생을 정량화 하여 평가하고자 한다.

### 5.2 보육실내 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계 분석

실내 미세먼지의 발생은 발생원에 의한 발생, 적재되어 있던 미세먼지의 재부유가 그 원인이며, 재실자의 활동 내용과 재실 인원수 등이 미세먼지 발생에 영향을 미친다는 것을 2장에서 고찰하였다.

3.2.2절에서 살펴본 바와 같이, 해당 보육실내 기타 미세먼지 발생원이 없기 때문에 영·유아의 활동이 지배적인 실내 발생원으로 작용할 것으로 판단된다. 또한, 영·유아의 일과 활동 내용, 재실 인원수 및 실내표면에 침착되어 있던 미세먼지의 양이 실내 미세먼지 발생에 영향을 미치는 영향인자로 판단되어, 실내 미세먼지 발생률 산출에 앞서 영향인자들과의 상관관계를 분석하였다.

### 5.2.1 영·유아의 활동 내용 및 재실 인원수

보육시설의 하루 일과는 다양한 일과 활동으로 구성되어 있는데 활동 내용에 따라 영·유아의 활동 강도가 다르며, 이에 따라 미세먼지 발생률이 달라질 수 있다. 영·유아의 일과 활동 관찰 내용과 보육실내 미세먼지 농도 특성 분석 결과를 토대로 일과 활동을 영·유아의 활동 내용에 따라 비교적 강도가 높은 자유 활동과 강도가 낮은 교육, 그리고 미세먼지 발생량이 많은 침구준비 및 정리로 구분하였다. 또한, 재실 인원수의 증감에 따라 전체 실내 미세먼지 발생률이 달라질 수 있기 때문에, 일과 활동 관찰 기록을 토대로 시간별 재실 인원수를 구분하였다.

실내 미세먼지는 실내에서 발생한 미세먼지와 실외에서 실내로 유입된 미세먼지에 의해 구성되므로, 실내 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계를 분석하기 위해 실외의 영향을 제외한 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 산출하였다. 실외에서 실내로 유입된 미세먼지 농도를 식(4.7)를 통해 계산하였으며, 실내 유입분과 측정된 실내 농도와의 차를 통해 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 산출하였으며, 그 과정은 식 (5.1)과 같다. 이때 침기율, 침착률 및 침투 계수는 앞서 4장의 결과를 이용하였으며, 실외 농도는 측정 당시의 실제 실외 농도를 이용하였다.

$$C_i^m = \frac{aP}{a+k} C_o^m + (C_i^{m-1} - \frac{aP}{a+k} C_o^m) \exp(-(a+k)t) \quad (4.7)$$

$$C_{ig} = C_{i,m} - C_i^m \quad (5.1)$$

여기서,

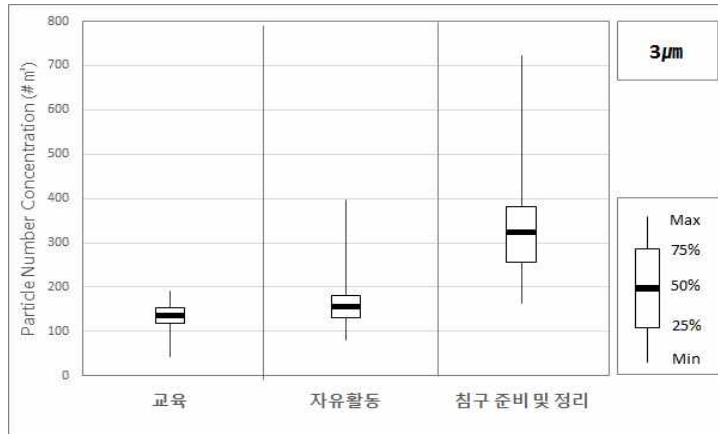
$C_{ig}$  : Indoor generated particle number concentration (#/m<sup>3</sup>)

$C_{i,m}$  : Measured indoor particle number concentration (#/m<sup>3</sup>)

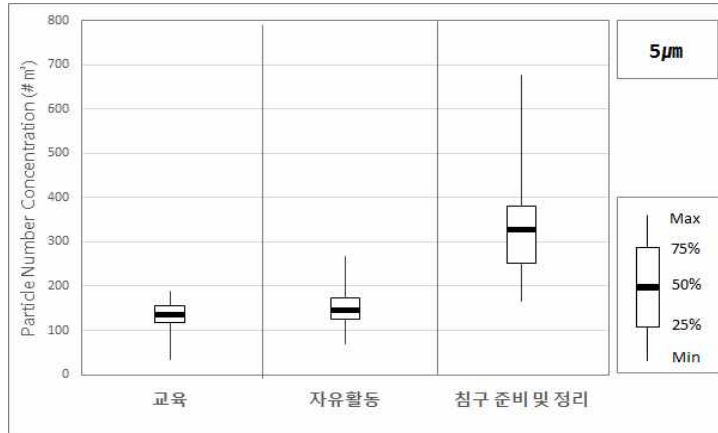
활동 내용에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도의 입경별 산출 결과는 [그림 5.1]과 같다. 침구 준비 및 정리 시 가장 높게 농도가 형성되었으며, 비교적 활동 강도가 높은 자유 활동이 교육보다 실내 농도가 높게 형성되는 것을 확인하였다.

실내 미세먼지 발생과 재실 인원수의 상관관계를 분석하기 위해 영·유아가 등원하여 재실 인원수가 증가하는 오전 시간대의 데이터를 이용하여 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 재실 인원수 별로 산출하였다. 산출 결과는 [그림 5.2]와 같으며, 재실 인원수가 증가할수록 농도가 높아짐을 확인할 수 있다.

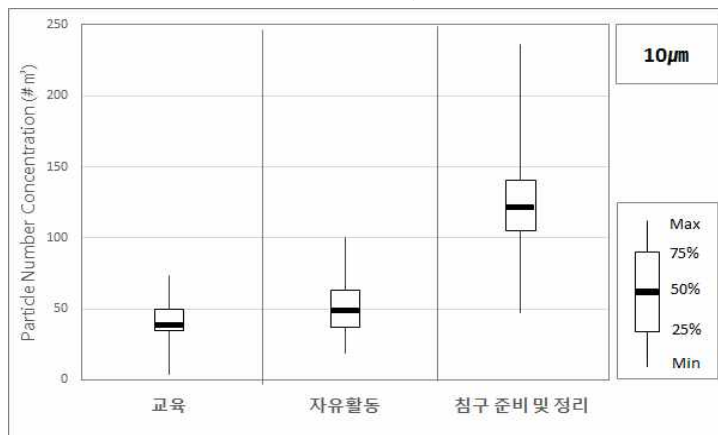
실내 미세먼지 발생과 영향인자의 상관관계 분석 결과, 활동 내용과 재실 인원수는 실내 미세먼지 발생률에 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.



(a) 입경 3µm

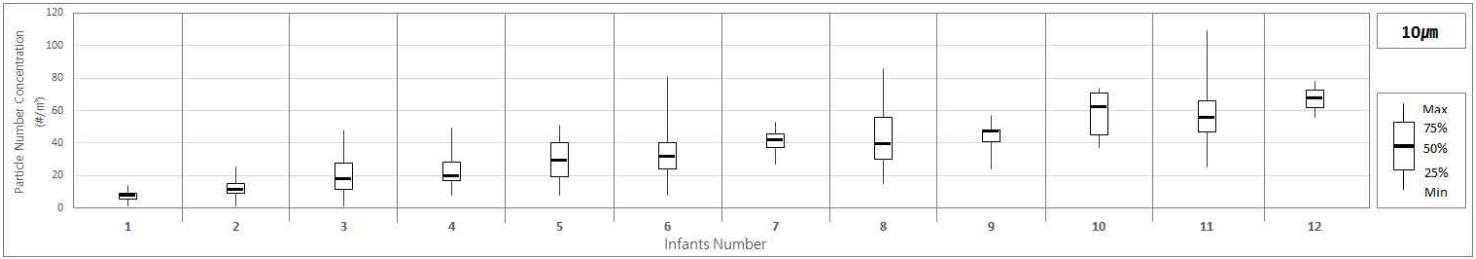
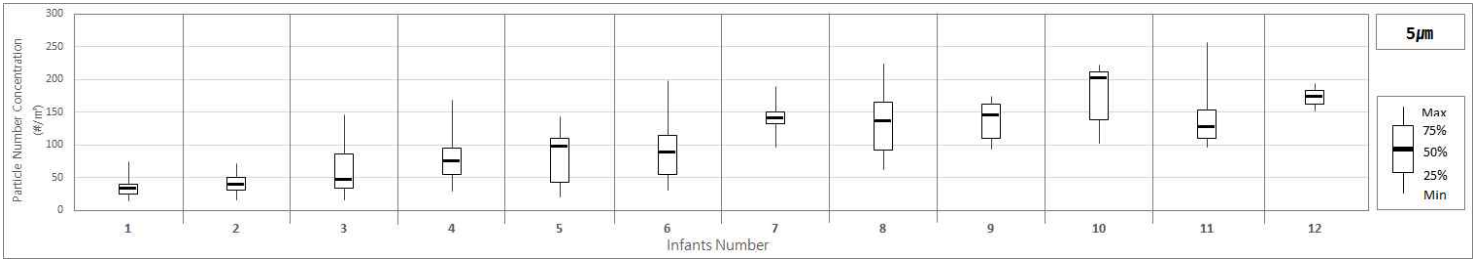
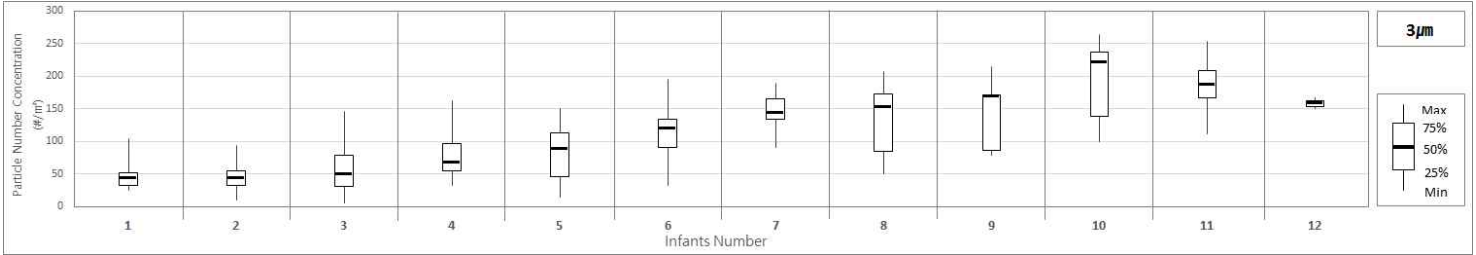


(b) 입경 5µm



(c) 입경 10µm

[그림 5.1] 활동 내용에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도



[그림 5.2] 재실 인원수에 따른 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도

### 5.2.2 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양

본 연구에서는 실내 표면 등에 침착되어 있다 기류 변화 등에 의해 실내로 재부유하는 과정을 모두 실내 발생으로 간주하였으므로, 보육실내 바닥, 가구 등의 표면에 침착되어 있는 미세먼지, 즉 실내표면에 침착된 미세먼지의 양 또한 실내 미세먼지에 발생을 미치는 영향인자로 판단하였다.

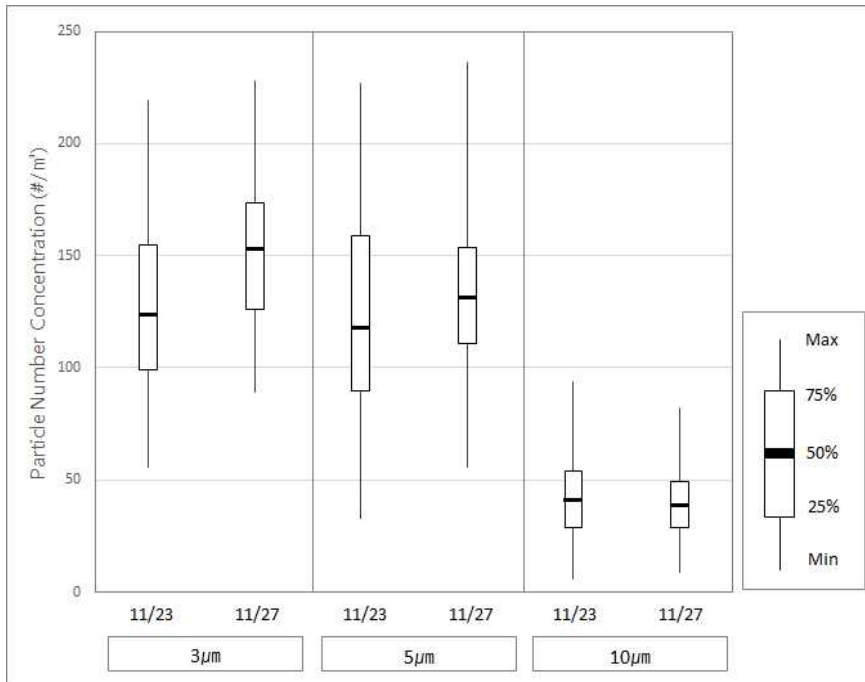
영·유아의 활동이 이루어지는 일과 활동 시간에는 미세먼지의 침착과 재부유가 연속적으로 발생하므로, 일과 활동 중 실내표면에 침착된 미세먼지의 양에 대한 상관관계 분석에 한계가 있다. 따라서 상관관계 분석을 위해 영·유아가 등원하기 전 시간대에 보육실내 청소를 실시하여 실내 표면의 미세먼지 영향을 최소화하고자 하였고, 청소를 실시한 날과 청소를 실시하지 않은 날의 오전 시간대의 실내 미세먼지 농도를 비교하였다. 실외 미세먼지의 농도, 습도, 재실 인원 역시 실내 미세먼지 농도에 영향을 미치므로 위의 조건이 비슷한 Case를 대상으로 비교하였다.

<표 5.1>과 [그림 5.3]은 실내표면에 침착된 미세먼지 양의 영향을 분석하기 위한 Case 선정 및 비교 결과이다. 비교 결과 바닥 청소 여부에 관계없이 실내 미세먼지 농도의 편차는 비슷함을 확인할 수 있다. 따라서 보육실 바닥에 침착된 미세먼지가 실내 발생에 미치는 영향이 적다는 것을 확인하였지만, 바닥 이외에도 영·유아의 의류, 장난감 등 다양한 요소에 실내 미세먼지가 침착는 등 다양한 요소에 영향을 받으므로 실내 미세먼지 적재량의 영향 대한 정확한 평가에는 한계가 있다. 따라서 실내 미세먼지 발생률 산출 시 실내 표면에 침착된 미세먼지의 양에 대한 영향은 고려하지 않았다.



<표 5.1> 비교 대상 Case 선정

Case	실내상대습도 (%)	바닥청소여부
11/23 (9:40-11:30)	42.3~45.4	X
11/27 (9:40-11:30)	40~40.7	O



[그림 5.3] 바닥 청소 여부에 따른 실내 미세먼지 농도

### 5.3 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출

본 장에서는 실내 미세먼지 발생률 산출 모델을 제시하고, 이용하여 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률을 산출하였다. 또한 산출 결과의 검증에 위해 실제 실내 미세먼지 측정 농도 데이터와 발생률 산출 결과를 이용하여 예측한 실내 농도 데이터를 비교하였다.

#### 5.3.1 미세먼지 발생률 산출 모델

앞서 2장에서 살펴본 바와 같이, 기존 연구에서 사용한 식(2.10)을 이용하여 실내 미세먼지 발생률 산출할 수 있다.

$$\bar{G} = V \times \left[ \frac{C_{peak} - C_{ini}}{\Delta t} + (\overline{a+k}) \bar{C}_i - \bar{a} P \bar{C}_o \right] \quad (2.10)$$

그러나 기존 방법을 이용하여 미세먼지 발생률을 산출할 경우, 분석하고자 하는 특정 활동이 이루어지는 시점을 기준으로 하여 그로인해 실내 농도가 최고점에 다다른  $C_{peak}$  값이 요구된다. 또한  $C_{peak}$ 에 다다를 때까지의 시간 간격 동안의 실내 농도, 실외 농도, 침기량, 침착률의 평균값을 이용하기 때문에,  $C_{peak}$ 까지 도달하는데 소요된 시간이 늘어날수록 결과의 오차가 커진다. 보육시설의 경우 등원시간이 영·유아 마다 일정하지 않다는 점, 활동이 꾸준히 일어나지만 활동 강도나 패턴이 일정하지 않다는 점, 그리고 교육, 간식, 자유 활동과 같은 일과 활동이 연속적으로 일어난다는 점 등을 고려할 때, 기존의 발생률 산출에 필요한  $C_{peak}$  선정에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 보육실내 실내 환경 특성을 반영하여 실내 미세먼지 발생률을 산출할 수 있는 모델을 고안하였으며, 모델 도출 과정은 아래와 같다.

실내 미세먼지 발생률 산출 모델은 Mass balance equation인 식(2.2)을 통해 도출하였으며, Mass balance equation은 1차 미분방정식의 형태이므로 해인 실내 농도( $C_i$ )를 구하면 식(5.2)와 같다.

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = a(t)PC_o(t) + \frac{G(t)}{V} - a(t)C_i(t) - kC_i(t) \quad (2.2)$$

$$C_i(t) = e^{-\int (a(t)+k)dt} \times \left[ \int e^{\int (a(t)+k)dt} \times \left( a(t)PC_o(t) + \frac{G(t)}{V} \right) dt + C \right] \quad (5.2)$$

여기서,

$C$  : Integral constant

본 연구에서 사용한 측정기기는 실시간 농도 변화를 측정할 수 있는 센서방식이 아닌 측정 시간 동안 공기를 포집 후 측정된 미세먼지 개수를 포집 유량으로 나눠 개수 농도 결과를 나타내는 방식이므로 측정 시간 동안의 실내 환경 변화를 반영하는데 한계가 있다. 따라서 침기율( $a$ ), 실내 미세먼지 발생률( $G$ ), 실내 및 실외 농도( $C_i, C_o$ )를 식(5.3-6)와 같이 측정 시간  $t$  동안의 평균값으로 표현하면 측정 시간  $t$  동안  $\bar{a}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{C}_i$ ,  $\bar{C}_o$ 가 일정하다 간주할 수 있으며, 식(5.2)를 식(5.7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\bar{a} = \frac{1}{t} \int_0^t a(t) dt \quad (5.3)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{t} \int_0^t G(t) dt \quad (5.4)$$

$$\bar{C}_i = \frac{1}{t} \int_0^t C_i(t) dt \quad (5.5)$$

$$\bar{C}_o = \frac{1}{t} \int_0^t C_o(t) dt \quad (5.6)$$

$$\bar{C}_i = \left( \frac{\bar{a}P\bar{C}_o}{\bar{a}+k} + \frac{\bar{G}}{V(\bar{a}+k)} \right) (1 - e^{-(\bar{a}+k)t}) + \bar{C}_{ini} e^{-(\bar{a}+k)t} \quad (5.7)$$

현재 측정 시간에서의 실내 농도를  $\bar{C}_i^m$ , 전 시간에서의 실내 농도를  $\bar{C}_i^{m-1}$ 이라 하면, 식(5.7)을 식(5.8)와 같이 정리할 수 있으며, 식(5.8)은 실내 발생원이 있는 조건에서 실내 미세먼지 농도를 예측할 수 있는 수식이다. 식(5.8)에서 실내 미세먼지 발생률을 좌변으로, 나머지 변수를 우변으로 이항시키면 식(5.9)이 도출 된다.

$$\bar{C}_i^m = \left( \frac{\bar{a}P\bar{C}_o^m}{\bar{a}+k} + \frac{\bar{G}^m}{V(\bar{a}+k)} \right) (1 - e^{-(\bar{a}+k)t}) + \bar{C}_i^{m-1} e^{-(\bar{a}+k)t} \quad (5.8)$$

$$(5.9)$$

### 5.3.2 영유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 및 고찰

본 연구에서는 앞서 도출한 미세먼지 발생률 산출 모델인 식(5.9)를 이용하여 발생률을 산출하였는데, 결과의 오류를 최소화하기 위해 측정 간격을 2분으로 하였다. 또한 오전 등원 시간의 경우 영유아의 활동 이루어지지만 영·유아의 등원으로 인해 재실 인원수가 일정하지 않고 출입문의 개폐가 불규칙하며, 학부모의 출입 등의 영향 등 실내 환경 변화가 크므로 판단하여 분석에서 제외하였고, 침기율 및 실외 농도의 변화가 큰 구간 역시 분석에서 제외하였다. 동일한 활동이여도 영·유아 마다 활동 강도와 활동의 지속 시간이 다르기 때문에 실내 미세먼지 농도의 증가 구간과 감소 구간이 불규칙적으로 발생한다. 감소 구간에서 발생률을 산출할 경우 발생률이 음의 값을 나타내므로 음의 값으로 산출된 발생률은 분석에서 제외하였다.

미세먼지 발생의 영향인자인 활동 내용을 구분하였고, 영·유아 각각의 활동을 고려한 미세먼지 발생률 산출에는 한계가 있으므로, 영·유아 전체 발생률을 재실 인원수로 나누어 1인당 평균 발생률을 산출하였다. 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 결과는 <표 5.2-4>와 같다. 같은 활동 내에서도 영유아의 활동의 강도가 일정하지 않으므로 산출한 발생률의 25%, 50%, 75% 값을 표기하였다. 미세먼지의 발생률은 모든 측정 날짜와 모든 입경에서 침구 준비 및 정리, 자유 활동, 교육 순으로 나타났다. 침구 준비 및 정리에 의해 발생하는 실내 미세먼지는 자유 활동 대비 입경 3 $\mu\text{m}$ 의 경우 4.6배, 입경 5 $\mu\text{m}$ 의 경우 5.3배 입경 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 6.4배로 미세먼지 발생률이 매우 크게 나타났다. 침구 준비 및 정리를 침구에서 방출 및 재부유되는 미세먼지로 인해 발생량이 크게 나타난 것으로 판단되며, 높은 발생률이 앞서 3.3.2절의 침구 준비 및 정리 시 I/O ratio가 높아지는 원인임을 확인하였다. 교육 활동 시 미세먼지 발생

률이 모든 입경에서 가장 낮게 나타났는데, 제자리에서 울동을 하거나 그림을 그리는 등 자유 활동에 비해 상대적으로 활동 강도로 인해 발생률이 작은 것으로 판단된다.

본 연구는 만3세반의 보육실을 대상으로 분석하였기 때문에 활동 강도 및 특성이 다른 연령대 영·유아의 미세먼지 발생률과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 또한 과도하게 높은 채실밀도 또는 카펫과 같이 미세먼지의 재부유가 많이 일어날 수 있는 가구의 유무도 미세먼지 발생률에 영향을 미칠 수 있으므로, 이러한 보육실의 미세먼지 발생률 역시 본 연구의 대상 보육실의 미세먼지 발생률과 차이가 발생할 수 있다. 따라서 연령대와 실내 환경이 상이한 보육실을 대상으로는 본 연구의 산출 결과를 활용하기에 부적합할 것이라 판단된다.

<표 5.2> 미세먼지 발생률 산출 결과 (3 $\mu$ m)

(단위: #/h)

활동 내용		11/19	11/20	11/23	11/27	11/30	12/1
교육	인원수	11	11	10	13	9	9
	25%	16169	13153	4713	3760	9133	7402
	50%	25537	17792	13162	17698	12141	12337
	75%	30669	45542	38788	56308	55117	17271
자유 활동	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	50402	65501	34698	38026	69933	40650
	50%	91740	111329	60773	94723	96134	95513
	75%	147616	207887	115760	136567	126835	150050
침구 정리 및 준비	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	X	258794	135917	210111	63522	337246
	50%		394526	149702	426661	212064	436967
	75%		535089	164083	708175	413466	809716

<표 5.3> 미세먼지 발생률 산출 결과 (5 $\mu$ m)

(단위:#/h)

활동 내용		11/19	11/20	11/23	11/27	11/30	12/1
교육	인원수	11	11	10	13	9	9
	25%	36852	17935	11049	14111	5973	5545
	50%	43405	35222	36841	25490	36558	29018
	75%	49958	51295	51142	35515	64677	70873
자유 활동	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	49183	39732	52150	38026	50890	55671
	50%	108549	78045	94478	94723	95517	97684
	75%	155637	143643	140978	136567	171738	156718
침구 정리 및 준비	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	X	166794	193697	252833	110912	229573
	50%		194389	209997	501417	293518	492300
	75%		453681	226297	532394	442956	838220



<표 5.4> 미세먼지 발생률 산출 결과 (10 $\mu$ m)

(단위:#/h)

활동 내용		11/19	11/20	11/23	11/27	11/30	12/1
교육	인원수	11	11	10	13	9	9
	25%	21951	6559	8649	6671	1642	5102
	50%	35483	17272	19732	11118	1679	14575
	75%	46416	21652	39400	28899	15146	14656
자유 활동	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	41066	24761	16802	27133	27738	20870
	50%	80438	54611	46410	37642	55125	48355
	75%	116271	76547	80604	59297	90188	77959
침구 정리 및 준비	인원수	11	12	10	13	9	9
	25%	X	62143	155440	209086	49237	77251
	50%		112891	159451	239979	117567	149921
	75%		146945	163462	430112	175781	285366

〈표 5.5〉 1인당 미세먼지 발생률 산출 결과 (단위:#/h·person)

활동 내용		3 $\mu$ m	5 $\mu$ m	10 $\mu$ m
교육	25%	449	634	231
	50%	1617	2275	1446
	75%	4063	5169	3172
자유 활동	25%	4736	3834	2307
	50%	8556	8479	4518
	75%	14416	14091	8023
침구 정리 및 준비	25%	14628	16199	6963
	50%	29686	32486	12311
	75%	49932	46245	17604

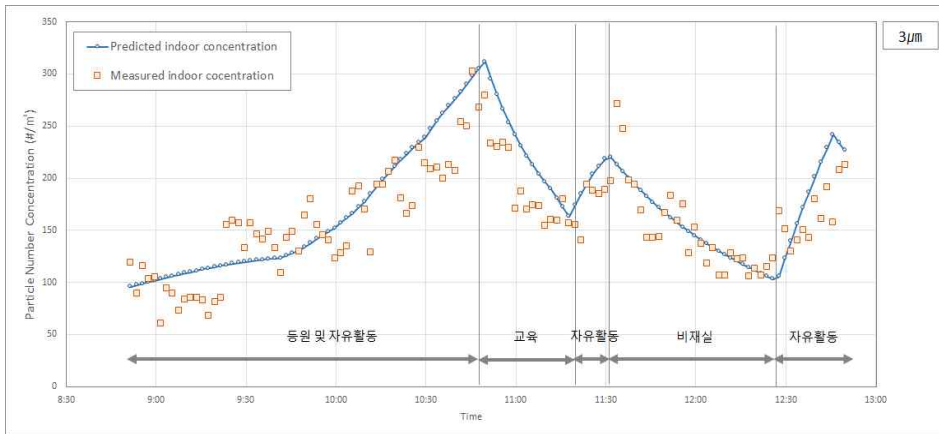
〈표 5.5〉는 전체 측정 기간 동안의 영·유아 1인당 발생률을 입경별로, 활동 내용별로 산출한 결과이다. 미세먼지 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 발생률의 중앙값은 교육의 경우 각각 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동의 경우 8556/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리의 경우 29686/h, 32486/h, 12311/h로 나타났다. 세 입경 모두 교육 시 발생률이 가장 낮으며, 침구 정리 및 준비 시 발생률이 높음을 확인할 수 있다.

실내 미세먼지 발생률 산출 결과의 검증을 위해 산출 결과를 이용하여 예측한 실내 농도와 측정된 실내 농도를 비교하였다. 입경별 발생률 산

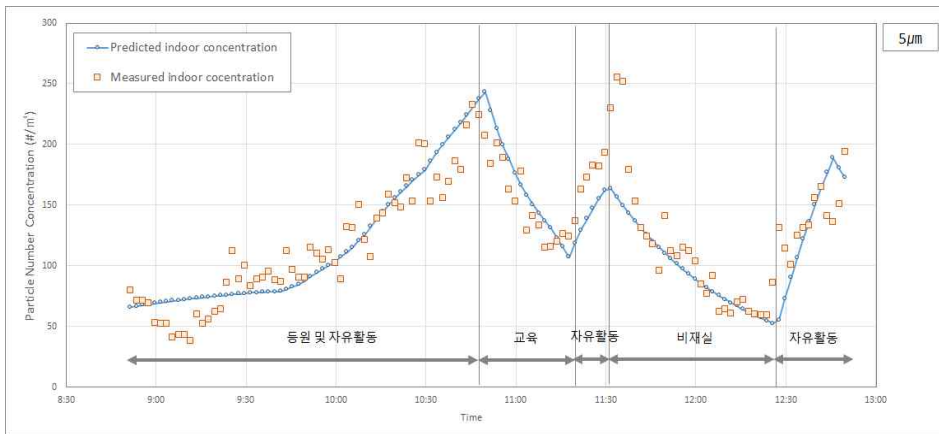
출 결과, 침기율, 침착률, 침투 계수, 측정된 실외 농도 및 관찰 기록을 식(5.8)에 대입하여 실내 미세먼지 농도를 예측하였으며, 실내 미세먼지 발생률은 산출 결과의 중앙값을, 예측에 사용된 초기 농도는 측정된 실내 미세먼지 농도를 이용하였다.

[그림 5.4]와 [그림 5.5]은 각각 11월 20일과 12월 1일의 예측한 실내 미세먼지 농도와 측정된 실내 미세먼지 농도이다. [그림 5.5]의 급격한 농도 증가 구간을 제외하면, 예측 농도와 측정 농도 값이 비슷하고 농도의 증가 또는 감소 패턴이 유사함을 확인할 수 있다. 그러나 영·유아의 활동 강도는 활동이 지속되는 시간 동안 일정하지 않으며, 재실하고 있는 모든 영·유아가 동일한 강도로 동일한 활동을 하지 않기 때문에 예측 농도와 실제 농도의 차이가 발생할 수 있다. 또한, 활동 중에 화장실을 가거나 하는 등의 갑작스러운 재실 인원수의 변동이 발생하며, 갑작스럽게 활동 강도가 매우 높아져 미세먼지 발생률이 매우 높아질 수 있기 때문에 측정 농도가 예측 농도보다 낮거나 높을 수 있다.

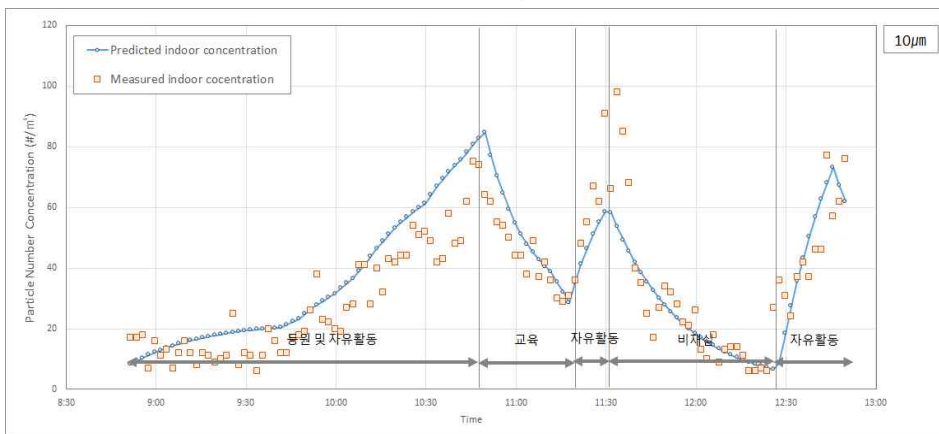
전체 기간 동안 예측한 농도와 측정된 농도와의 상관관계 분석을 위해 선형 회귀 분석을 이용하였다. 비재실 구간 및 재실 인원 파악에 한계가 있는 하원 시간대의 구간은 분석에서 제외하였다. [그림 5.6]은 세 가지 입경에서 예측 농도와 측정된 농도의 선형 회귀 분석 결과이다. 이때, 기울기와  $R^2$  값이 1에 가까울수록 두 농도의 상관관계가 매우 높고 예측 농도가 실제 농도와 매우 유사함을 의미한다. 상관관계 분석 결과 입경  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 의 기울기가 각각 0.93, 0.88, 0.89,  $R^2$  값이 각각 0.82, 0.82, 0.75로 예측 농도와 측정된 농도와의 상관관계를 확인할 수 있다. 즉, 본 연구에서 산출한 실내 미세먼지 발생률을 이용한 보육실내 미세먼지 농도 예측 결과가 타당함을 의미한다.



(a) 입경 3µm

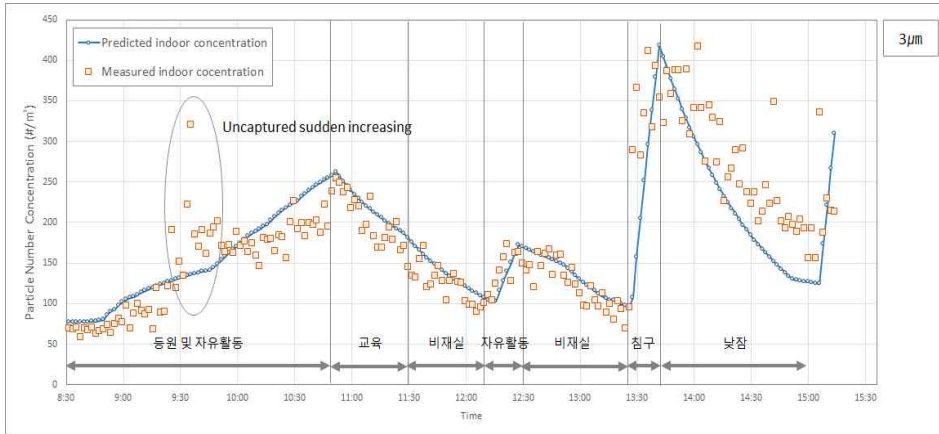


(b) 입경 5µm

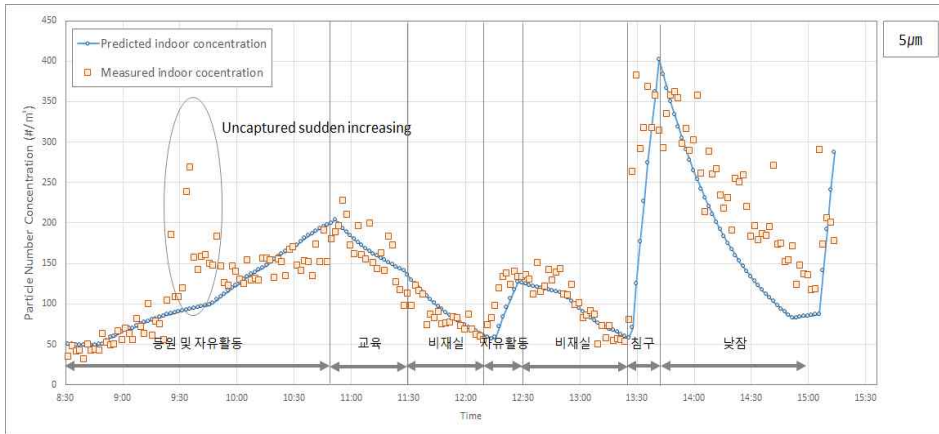


(c) 입경 10µm

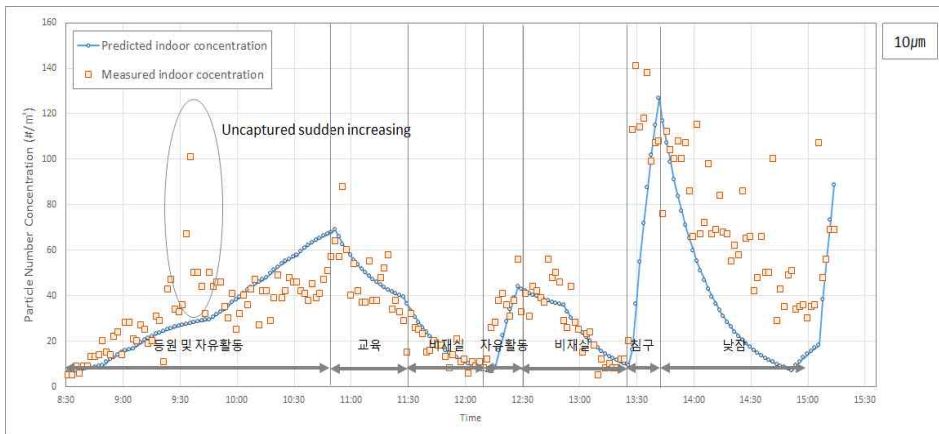
[그림 5.4] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도 비교 (11/20)



(a) 입경 3 $\mu$ m

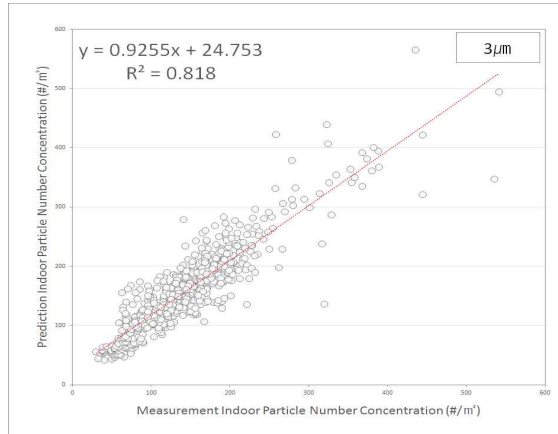


(b) 입경 5 $\mu$ m

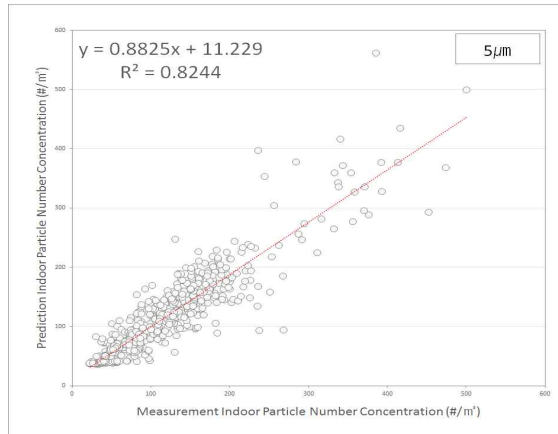


(c) 입경 10 $\mu$ m

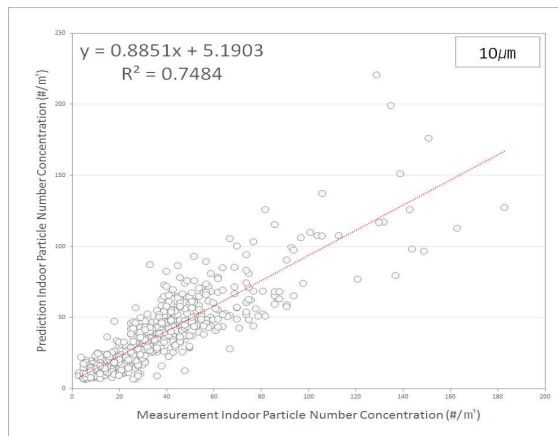
[그림 5.5] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도 비교 (12/1)



(a) 입경 3µm



(b) 입경 5µm



(c) 입경 10µm

[그림 5.6] 예측 및 측정된 실내 미세먼지 농도의 상관관계

## 5.4 소결

본 장에서는 실내 미세먼지 발생률 산출을 통해 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생을 정량화 하여 평가하였다. 미세먼지 발생률 산출에 앞서 보육실 미세먼지 발생에 영향을 미치는 영향인자를 도출하고 해당 인자와의 상관관계를 분석하여 실내 미세먼지 발생률 분석에 참고하였다. 또한 실내 발생률 산출 모델을 도출하고, 해당 모델을 통해 보육실 내 미세먼지 발생률을 산출하였으며, 산출 결과를 이용한 예측 농도와 측정된 실내 농도를 비교하여 결과의 타당성을 검증하였다. 본 장의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 보육실 영·유아의 일과 활동 관찰 및 분석을 토대로, 미세먼지 발생에 영향을 미치는 인자로서 활동 내용, 재실 인원수, 그리고 실내표면에 침착되어 있던 미세먼지 양이 있음을 파악하였다. 해당 인자들이 실내 미세먼지 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 실외 미세먼지 농도의 영향을 제외한 실내 발생에 의해 형성된 실내 농도를 산출하였으며 활동 내용, 재실 인원수에 따른 농도를 비교하였다. 활동 강도가 비교적 큰 자유 활동 시 상대적으로 정적인 교육 활동 보다 미세먼지 농도가 높았으며, 침구에서 재부유한 미세먼지로 인해 침구 준비 및 정리 시 그 농도가 매우 높게 나타났다. 재실 인원수가 늘어날수록 실내 미세먼지 발생에 영향을 미치는 발생원이 증가한다고 볼 수 있고, 재실 인원수가 증가함에 따라 실내 농도가 증가함을 확인하였다. 따라서 활동 내용과 재실 인원수는 보육실 미세먼지 발생에 영향을 미치는 인자이므로 발생률 산출에 분석 내용을 참고하였다. 실내표면에 침착된 미세먼지의 양의 경우, 청소를 통해 바닥에 침착된 먼지를 제거한 후 제거하지 않은 날과

실내 농도를 비교하였으나 농도 차이를 확인하지 못하였고, 다른 요소들의 영향을 분석하는데 한계가 있으므로 해당 인자는 분석에 제외하였다.

(2) 기존 연구에서 활용한 미세먼지 발생률 산출 모델은 보육실의 특성상 활용에 한계가 있으므로, 활동 강도와 지속시간이 불규칙한 영·유아의 활동 특성을 고려할 수 있는 미세먼지 발생률 산출 모델을 도출하여 분석에 활용하였다. 앞서 미세먼지 발생 영향인자 분석 내용을 바탕으로 활동 내용에 따라 영·유아 1인당 미세먼지 발생률을 입경별로 개수 농도로 산출하였으며, 산출 결과의 중앙값은 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 10 $\mu$ m 순으로 교육 시 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동 시 8856/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리 시 29686/h, 32486/h, 12311/h의 미세먼지가 발생하였다. 이를 통해 미세먼지의 발생률이 가장 높은 활동은 침구 준비 및 정리이며, 활동량이 적은 교육 시 발생률이 가장 낮음을 수치적으로 확인하였다.

(3) 영유아의 활동에 의한 미세먼지 발생률 산출 결과의 검증을 위해 3장, 4장 및 5장에서 산출한 결과를 이용하여 예측한 실내 미세먼지 농도와 측정된 농도를 비교하였다. 영·유아의 활동 강도가 일정하지 않고, 측정기기 주변에서 강도가 큰 활동이 발생하는 등의 예상치 못한 실내 농도 증가로 예측 농도와 차이가 발생하였으나, 선형 회귀 분석을 통해 두 농도의 상관관계를 분석한 결과 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 기울기가 각각 0.93, 0.88, 0.89, R<sup>2</sup> 값이 각각 0.82, 0.82, 0.75로 예측 농도와 측정된 농도와의 상관관계를 확인하였고, 발생률 산출 결과가 타당함을 검증하였다.



## 제 6 장 결 론

미세먼지는 황사, 도시의 고밀화 등으로 인해 최근 관심이 높아지는 오염물질로써 호흡기와 심혈관계 질환을 유발시키는 인체에 매우 위해한 물질이다. 또한 발생원이 실내와 실외에 모두 존재하는 단순히 환기로 실내 농도를 저감할 수 없으며, 실내 발생과 실외에서 유입되는 미세먼지를 모두 고려한 관리방안이 수립되어야 한다.

본 연구의 대상공간인 보육시설의 경우 면역력이 매우 약한 영·유아가 장시간 생활하는 공간이다. 따라서 보육시설을 대상으로 미세먼지 농도 저감을 위한 관리방안이 필수적으로 도입되어야 한다. 그러나 보육시설을 대상으로 실내 미세먼지 농도 특성에 대한 연구가 부족하고 대부분의 보육시설의 경우 예산이 부족 등으로 인해 관리방안 적용에 한계가 있으므로 관리방안 대안들의 농도 저감 효과 분석을 통해 가장 효율적인 관리방안이 무엇인지 평가되어야 한다. 그러나 안전 등의 문제로 실제 보육시설을 대상으로 관리방안의 효과 검증에 한계가 있기 때문에, 시뮬레이션이나 예측 모델을 활용하여 관리방안의 농도 저감 효과가 평가되어야 한다.

실내 미세먼지 농도 예측 시 다양한 인자들의 값이 요구되는데, 재실 상태에서의 농도 저감 효과가 평가되어야 하므로 재실자로 인한 실내 미세먼지 발생률이 반드시 필요하며, 농도 예측을 위해 이에 대한 평가가 선행되어야 한다. 특히 보육시설의 경우 실내 주요 발생원이 영·유아의 활동이기 때문에 이로 인한 미세먼지 발생률에 대한 평가가 반드시 이루어져야 한다.

본 연구에서는 첫 번째로 영·유아에 활동에 의한 미세먼지의 발생이

입경별 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였고, 두 번째로 보육실 미세먼지 발생 특성 분석 및 보육실내 미세먼지 발생률을 입경별 개수 농도로 정량화 하여, 미세먼지 농도 예측에 활용 가능한 보육실 미세먼지 발생률 데이터를 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 먼저, 보육실의 실내 환경 특성 파악 및 미세먼지 농도 변화 특성 파악을 위해 실제 보육이 이루어지고 있는 만3세반 보육실을 대상으로 실내 환경 관측 및 기록과 실내외 미세먼지의 입경별 개수 농도를 측정하였다. 관측 내용을 분석한 결과 보육실 주요 미세먼지 발생원은 영·유아의 활동으로 판단되었다. 또한 재실과 비재실로 나누어 실내외 미세먼지 농도의 상관관계, 재실 유무에 따른 I/O ratio, 그리고 실내 발생원과 실내 농도의 양의 상관관계를 분석 결과, 입경 0.3 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m의 미세먼지는 실내 발생원의 유무에 상관없이 실내외 농도의 상관관계를 확인하였고 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 미세먼지의 경우 재실여부 즉, 영·유아의 활동 여부가 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m 입경의 미세먼지의 농도에 영향을 크게 미친다는 것을 확인하였다. 이를 통해 입경 입경이 작은 Fine Particle은 실외의 영향이 크고, 보육실의 영·유아 활동에 의해 발생하는 미세먼지는 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 Coarse Particle임을 파악하였다. 위의 결과를 통해 보육실 Fine Particle 농도 저감을 위해선 실외에서 유입되는 공기에, Coarse Particle 농도 저감을 위해선 실내 공기에 관리방안이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 보육실 미세먼지 발생률 평가를 위해 이에 필요한 인자인 침착률 및 침투 계수 산출을 위해 Tung(1999)와 Chao(2003)가 제안한 방법을 이

용하였으며, 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 10 $\mu$ m의 침착률은 각각 0.61, 0.90, 1.99이며, 침투 계수는 각각 0.38, 0.27, 0.19로 산출되었다. 이를 통해 미세먼지의 입경의 크기가 클수록 실내 표면 등에 침착되는 정도가 크며, 실외에서 실내로 공기가 유입될 때 개구부 등에 의해 걸러지는 효과가 크기 때문에 실외 보단 실내의 영향이 크며. 입경이 작을수록 공기 중에 부유하는 시간이 길어지고 실내로 침투되는 정도가 더 크다는 것을 확인하였다. 이는 Fine Particle의 경우 실외의 영향이 크고 Coarse Particle의 경우 실내의 영향이 크다는 3장의 결과를 설명하며, 미세먼지 관리 방안 수립 시 입경에 따라 효과적인 관리 방안이 다를 수 있음을 의미한다.

(3) 영·유아의 활동에 의한 미세먼지 발생 평가에 앞서 활동 강도에 따라 활동 내용을 자유 활동, 교육, 침구 준비 및 정리로 나누었으며, 평가에 활용하였다. 기존 연구에서 활용한 미세먼지 발생률 산출 모델은 보육실의 특성상 활용에 한계가 있으므로, 활동 강도와 지속시간이 불규칙한 영·유아의 활동 특성을 고려할 수 있는 미세먼지 발생률 산출 모델을 고안하여 분석에 활용하였다. 앞서 미세먼지 발생 영향인자 분석 내용을 바탕으로 활동 내용에 따라 영·유아 1인당 미세먼지 발생률을 입경별로 개수 농도로 산출하였다. 산출 결과의 중앙값은 입경 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 10 $\mu$ m 순으로 교육 시 1617/h, 2275/h, 1446/h, 자유 활동 시 8856/h, 8479/h, 4518/h, 침구 준비 및 정리 시 29686/h, 32486/h, 12311/h이다. 본 연구는 만3세반의 보육실을 대상으로 분석하였기 때문에 활동 강도 및 특성이 다른 연령대 영·유아의 미세먼지 발생률과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 또한 과도하게 높은 재실밀도 또는 카펫과 같이 미세먼지의 재부유가 많이 일어날 수 있는 가구의 유무도 미세먼지 발생률에 영향을 미칠 수 있으므로, 이러한 보육실의 미세먼지 발생률 역시 본 연구의 대상 보

육실의 미세먼지 발생률과 차이가 발생할 수 있다. 따라서 연령대와 실내 환경이 상이한 보육실을 대상으로는 본 연구의 산출 결과를 활용하기에 부적합할 것이라 판단된다. 산출 결과를 통해 미세먼지의 발생률이 가장 높은 활동은 침구 준비 및 정리이며, 활동량이 적은 교육 시 발생률이 가장 낮음을 수치적으로 확인하였다. 재실 인원수가 증가하고 영·유아의 활동 지속되는 오전 등원 시간이나 자유 활동 시에는 시간이 경과함에 따라 실내 미세먼지 농도가 증가할 수 있으므로, 환기 등을 통해 실내 미세먼지 농도를 저감해야 한다. 또한 침구 준비 및 정리의 경우 미세먼지 발생률이 매우 높으며 바로 뒤에 낮잠 활동이 이어져 미세먼지가 침착되는 도중 호흡으로 인해 영·유아의 체내로 유입될 수 있으므로 장시간 환기 등을 통해 반드시 실내 미세먼지 농도를 저감할 필요가 있다.

본 연구의 결과는 보육실 미세먼지 농도 관리 방안 수립 및 보육실 미세먼지 농도 예측을 위한 자료로 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 차동원 (2007). 실내공기오염. 기문당.
- 2) 이경미, 이기숙 (2009). 유아의 성과 연령에 따른 유아교육기관에서의 하루일과. 교육과학연구, 40(3), 171-193.
- 3) 박영옥 (2002). 실내 생활공간에서의 미세먼지 오염 특성 및 제어기술, 한국생활환경학회지, 9(2), 122-128.
- 4) 강공언, 김신도, 이정실, 최경순, 실내공기질관리학, 문운당.
- 5) Zhang, Y., 실내공기질, 동화기술.
- 6) 김신도 (2003). 미세먼지 규제와 영향. 공기청정기술, 19-28.
- 7) 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호 (2005). 서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. 한국환경보건학회지, 31(4), 301-308.
- 8) 이용기, 이기중, 이재성, 신은상 (2012). 미세먼지 입경농도 분포의 지역별 특성. 한국대기환경학회지, 28(6), 666-674.
- 9) 박성준, 김지혜, 조구상, 여명석, 김광우 (2015). 보육시설 실내 미세먼지의 입경별 실내-외 발생원 분석 대한건축학회 논문집, 31(12), 215-222.
- 10) KS 표준, KS F 2603 옥내 환기량 측정방법.
- 11) US EPA (1996). Air quality criteria for particulate matter. 1, Washington, DC.
- 12) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association, 287(9), 1132-1141.

- 13) Penttinen, P., Timonen, K. L., Tiittanen, P., Mirme, A., Ruuskanen, J., Pekkanen, J. (2001). Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *European Respiratory Journal*, 17(3), 428-435.
- 14) Stephenson, D., Seshadri, G., Veranth, J. M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHA Journal*, 64(4), 516-521.
- 15) Thatcher, T. L., Layton, D. W. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13), 1487-1497.
- 16) Salvi, S. (2007). Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, 8, 275-280.
- 17) Graham, L. M. (2004). All I need is the air that I breath: Outdoor air quality and asthma. *Paediatric Respiratory Reviews*, 5, 59-64.
- 18) Whitby K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols, *Atmospheric Environment*, 12, 135-150.
- 19) ASHRAE HANDBOOK (2013). fundamentals.
- 20) Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D., op. cit., 1132-1141.
- 21) Berico, M., Luciani, A., Formignani, M. (1997). Atmospheric aerosol in an urban area-measurements of TSP and PM10 standards and pulmonary deposition assessments. *Atmospheric Environment*, 31(21), 3659-3665.
- 22) Long, C. M., Suh, H. H., Kobzik, L., Catalano, P. J., Ning, Y. Y., Koutrakis, P. (2001). A pilot investigation of the relative toxicity of

- indoor and outdoor fine particles: In vitro effects of endotoxin and other particulate properties. *Environmental Health Perspectives*, 109(10), 1019-1026.
- 23) Stephenson, D. Seshadri, G. Veranth, J.M. (2003). Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHA Journal*, 64(4), 516-521.
- 24) Ha EH, Lee JT, Kim H, Hong YC, Lee BE, Park HS, Chrisiani DC (2003). Infant susceptibility of mortality to air pollution in Seoul, South Korea. *Pediatrics*, 111, 284-290.
- 25) Guaderman WJ, Avol E, Gililand F, Vora H, Thomas D, Berhane K, McConnell R, Kuenzli N, Lurmann F, Pappaport E, Margolis H, Bates D, Peters J (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *N Engl J Med*, 351, 1057-1067.
- 26) Wallace, L. A., Emmerich, S. J., Howard-reed, C. (2002). Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, 296-306.
- 27) Chen, C., Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45, 275-288.
- 28) Liu, De-Ling & William W. Nazaroff (2003) Particle Penetration Through Building Cracks, *Aerosol Science and Technology*, 37(7), 565-573.
- 29) Abt, E., Suh, H., Allen, G., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor sources: A study conducted in the metropolitan Boston area.

- Environmental Health Perspectives, 108(1), 35-44.
- 30) Afshari, A., Matson, U., Ekberg, L. E. (2005). Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: A study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*, 15(2), 141-150.
  - 31) Alshitawi, M., Awbi, H. (2011) Measurement and prediction of the effect of students' activities on airborne particulate concentration in a classroom. *HVAC&R Research*, 17(4), 446-464.
  - 32) Branis, M., Rezacova, P., Domasova, M. (2005) The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 in a classroom. *Environmental Research*, 99(2), 143-149.
  - 33) Long, C. M., Suh, H. H., Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(7), 1236-1250.
  - 34) Thatcher, T.L., Lai, A.C.K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R.G. and Nazaroff, W.W. (2002). Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmospheric Environ*, 36, 1811-1819.
  - 35) Dockery, D. W., Spengler, H. D. (1981). Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. *Atmospheric Environment*, 15, 335-343.
  - 36) Koutrakis, P., Briggs, S. L. K. (1992). Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga counties, New York, *Enviro. Sci. Technol.*, 26, 521-527.
  - 37) He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert, D. (2004). Contribution



- from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment*, 38, 3405–3415.
- 38) Ferro, A. R., Kopperud, R. J., Hildemann, L. M. (2004). Source Strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. *Environmental Science Technology*, 38, 1759–1764.
- 39) Tung, T. C. W., Chao, C. Y. H., Burnett, J. (1999). A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell. *Atmospheric Environment*, 33, 881–893.
- 40) Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Cheng, E. C. K. (2003). Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences. *Atmospheric Environment*, 37, 4233–4231.
- 41) Lai, A. C. K., Nazaroff, W. W. (2000). Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 31(4), 463–476.

# ABSTRACT

## Evaluation of the Impact of Size-resolved Indoor Particle Concentration Factors in a Child-care Center.

By Park, Seong Jun

Department of Architecture and Architecture Engineering

Master' Course in the Graduate School of

Advised by Professor Kim, Kwang Woo

2016. 2

The particle is one of the major air pollutants, and many studies have reported that particles may cause the cardiovascular and respiratory diseases. Particles are generated indoors and originate from outdoor. Indoor particles have different sources, chemical composition, and biological effects according to particle size. Therefore, To establish indoor particle control strategies, particle generation characteristics must be considered.

Infants and children who seem to be most vulnerable to the air pollutants spend most times in a Child-care room. Therefore, It is necessary to investigate particle generation characteristics in child-care room to control indoor particles in a Child-care center. But, Many Child care-centers have tight budgets to apply particle control strategies and due to safety problem, it is hard to test particle control strategies in child-care room.

Simulation or indoor particle model are used for estimation of particle reduction effect of particle control strategies and indoor particle generation data must be needed for input data.

The aim of this study is to identify the effects of infant's activities on size-resolved indoor particle generation and estimate the particle generation characteristics and generation rate in child-care room.

The results of this study are summarized as follows:

(1) Indoor and outdoor particle number concentrations were measured simultaneously for five days by using Optical Particle Counter while every indoor activity is documented. The results show that fine particles( $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ ) have a strong relationship with outdoor particle concentration, on the other hand, coarse particles( $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ) have a strong relationship with indoor source. In other words the major source of indoor fine particles from outdoor and coarse particles from indoor. Thus, Infant's activities are major source of coarse particle in child-care room.

(2) Particle generation rates are estimated according to activities and per person. As the results, the median value of particle generation rates (#/h) are 1617/h ( $3\mu\text{m}$ ), 2275/h ( $5\mu\text{m}$ ), 1446/h ( $10\mu\text{m}$ ) in education, 8856/h ( $3\mu\text{m}$ ), 8479/h ( $5\mu\text{m}$ ), 4518/h ( $10\mu\text{m}$ ) in play, and 29686/h ( $3\mu\text{m}$ ), 32486/h ( $5\mu\text{m}$ ), 12311/h ( $10\mu\text{m}$ ) in making a bed. This results can be applied for prediction of indoor particle concentration in child-care room.

Keywords : Child-care Room, Indoor Air Quality, Particle, Particle Generation

Student Number : 2014-20510