

대학건물 실내 에어로졸입자의 입경별 질량농도 특성

서정민¹ · 왕 빈¹ · 장성호¹ · 박정호^{2,*} · 최금찬³

¹부산대학교 바이오환경에너지학과, ²경남과학기술대학교 환경공학과

³동아대학교 환경공학과

Characteristics of Size-segregated Mass Concentrations of Indoor Aerosol Particles in University Buildings

Jeong-Min Suh¹ · Wang Bin¹ · Seong-Ho Jang¹ · Jeong-Ho Park^{2,*} · Kum-Chan Choi³

¹Department of Bio-Environmental Energy, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea,

²Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea,

³Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

ABSTRACT

Objective: Based on the fact that fine particles are more likely to produce negative influences on the health of occupants as well as the quality of indoor air compared to coarse particles, it is critical to determine concentrations of aerosol particles with different sizes. Thus, this study focused on the size distribution and concentrations of aerosol particles in university buildings.

Method: Aerosol particles in indoor air were collected from four areas: corridors in buildings(In-CO), lecture rooms(In-RO), laboratories(In-LR), and a cafeteria(In-RE). Samples were also collected from outside for comparison between the concentrations of indoor and outdoor particles. For the collection of the samples, an eight stage non-viable cascade impactor was used.

Result: The average concentration of PM₁₀ in the samples collected from indoor areas was 34.65-91.08 µg/m³, and the average for PM_{2.5} was 22.65-60.40 µg/m³. The concentrations of the aerosol particles in the corridors, lecture rooms, and laboratories were relatively higher than the concentrations collected from other areas. Furthermore, in terms of mass median aerodynamic diameter(MMAD), the corridors and lecture rooms had higher numbers due to their characteristics, showing 2.36 µm and 2.11 µm, respectively. Laboratories running an electrolysis experiment showed 1.58 µm, and the cafeteria with regular maintenance and ventilation had 1.96 µm.

Conclusion: The results showed that the PM₁₀ concentrations of all samples did not exceed indoor air quality standards. However, the PM_{2.5} concentration was over the standard and, in particular, the concentration of fine particles collected from the laboratories was relatively higher, which could be an issue for the occupants. Therefore, it is important to improve the quality of the indoor air in university buildings.

Key words: cascade impactor, indoor aerosol particle, MMAD, university building

I. 서 론

최근, 환경보건학적 측면에서 실내공기질의 중요성이 크게 대두되고 있으며, 현대인들은 하루 중 대부분의

시간을 실내에서 생활함과 동시에 주요 공기오염물질의 농도가 실외보다 실내가 높다는 연구결과들이 발표되고 있다(Montgomery & Kalman, 1989; Lee & Chang, 2000; Lee & Kim, 2004). 특히 사무실, 학교 등과 같은

*Corresponding author: Jeong Ho Park, Tel: 055-751-3345, E-mail: jhpark@gnitech.ac.kr

Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, 33 Dongji-ro, Jinju 660-758

Received: September 15, 2014, Revised: November 15, 2014, Accepted: December 16, 2014

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

실내공간에서는 독성, 알레르기성, 발암성의 무기 및 유기물질들이 혼합된 에어로졸입자(Aerosol particles)가 주요한 오염물질이며, 에어로졸입자는 실내외 공기 중 고체 또는 액적상태의 부유물질로 입경 수 nm에서 100 μm 까지 넓은 범위로 연속적으로 분포하고 있다.

대기 에어로졸입자의 입경별에 따른 발생기원은 크게 입경 1 μm 이하의 미세입자(Fine particles)영역의 경우 각종 연소과정이나 가스상→입자상으로 전환된 2차 입자들도 구성되어 있으며, 약 1 μm 이상의 조대입자(Coarse particles) 영역은 토양, 해염, 꽃가루 등 자연적 발생원에서 주로 기원되고 있다(Willeke & Whitby, 1975; Sienfeld & Pandis, 1998). 또한, 실내 에어로졸입자는 실외에서 유입된 입자, 실내에서 발생한 입자 그리고 실내외에서 발생한 가스상물질에서 입자상으로 전환된 2차입자들로 구성되어 있다(Meng et al., 2005; Uhde & Salthammer, 2007).

한편, 에어로졸입자에 관한 많은 독성학 연구에서 미세입자가 조대입자보다 더 강한 독성학적 악영향을 미친다고 보고되고 있으며(Donaldson et al., 1998), 특히 실내공기 중 PM_{10} 의 농도가 증가할 때 마다 사망률이 증가한다는 보고가 있다(Carlton et al., 1999; Kim et al., 2008). 따라서 실내외 공기 중 PM_{10} 또는 $\text{PM}_{2.5}$ 등 입경별 농도에 대한 연구는 실내오염에 의한 인체영향을 평가하는데 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 이에 환경부는 실내외 $\text{PM}_{2.5}$ 의 물리화학적 특성을 분석한 결과 실외보다는 실내의 미세먼지 농도가 높고 중금속을 포함한 미량원소의 기여농도 또한 실내가 다소 높다고 보고하고 있다(MoE, 2008).

최근 국내에서는 전국단위의 대기 중 고농도 미세먼지 문제와 이로 인한 실내환경에 대한 관심 집중되고 있으나, 대부분의 연구들이 PM_{10} 또는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 측면에서 진행되고 있으며, 입경별 농도 분포 특성을 연구한 사례는 부족한 실정이다. 한편, 국외 실내 에어로졸입자의 입경별 농도 특성 연구를 살펴보면, Kavouras & Stephanou(2002)은 다중이용시설의 경우 1 μm 이하의 미세입자영역에서, Qian et al.(2012)은 학교 교실의 경우 1 μm 이상의 조대입자 영역의 농도가 상대적으로 높은 입경분포 특성을 보고하고 있다.

따라서 에어로졸입자의 인체영향, 발생원 규명 등의 측면에서는 입경별 시료채취를 통한 보다 상세한 실내 거동특성을 파악할 수 있는 데이터가 매우 중요하다고 판단된다. 특히, 대학건물의 경우 학생들과

연구종사자들이 장시간 이용하고 있어 항상 쾌적하고 건강한 실내환경의 유지는 매우 중요한 요소이며, 밀폐된 실내공간에서 오염물질들이 축적될 경우 쾌적한 실내 활동이 저해될 뿐 아니라 재실자의 건강을 위협하고 작업능률에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러나 현재 환경부의 “다중이용시설등의실내공기질관리법”이나 교육부의 “학교보건법”등에서는 일부 도서관을 제외한 대학 건물은 법적으로 실내환경관리 적용대상에 포함되어 있지 않다.

본 연구에서는 다양한 실내공간에서 에어로졸입자의 입경별 농도 특성을 파악하기 위한 기초연구로서 대학건물의 다양한 실내공간을 우선 연구대상으로 선정하고 에어로졸입자의 분급포집 장치인 다단 임팩터(Cascade impactor)를 사용하여 실내공기 중 입경별 농도 특성을 파악하였다. 본 연구결과는 대학건물을 포함한 다양한 실내공간에서 에어로졸입자의 입경별 특성 및 농도저감과 관리를 위한 유효한 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 임팩터의 포집효율

본 연구에서는 실내 에어로졸입자의 입경별 농도 특성을 파악하기 위하여 8단 임팩터(8 Stage non-viable cascade impactor, TE-20-800, Tisch Environmental Inc., USA)와 직경 81 mm 유리섬유 필터(TE-20-301, Tisch Scientific Inc., USA)를 사용하였다. 본 임팩터는 입구로부터 유입된 에어로졸입자를 0~7단의 충돌 분리판 및 backup 필터로 분급 포집되며, 각 분리단의 공기역학적 분급입경은 각각 0단(> 9 μm), 1단(5.8~9 μm), 2단(4.7~5.8 μm), 3단(3.3~4.7 μm), 4단(2.1~3.3 μm), 5단(1.1~2.1 μm), 6단(0.65~1.1 μm), 7단(0.43~0.65 μm) 및 filter backup(< 0.43 μm) 이다. 한편, 본 연구에서는 임팩터 분리단의 특성상 분리입경 2.1 μm 를 기준으로 0~4단까지를 조대입자 영역 그리고 5단 이하를 미세입자 영역이라 정의하였다.

한편, 임팩터의 포집특성은 각 분리단의 포집효율(Collection efficiency, E_i) 및 응답함수(Response function, K_i)로 표시될 수 있으며, 본 임팩터의 포집효율은 Vaughan(1989)의 제안식 등을 통해 직접 계산한 결과 Figure 1과 같다(Bau & Witschger, 2013; Roberts & Mitchell, 2013).

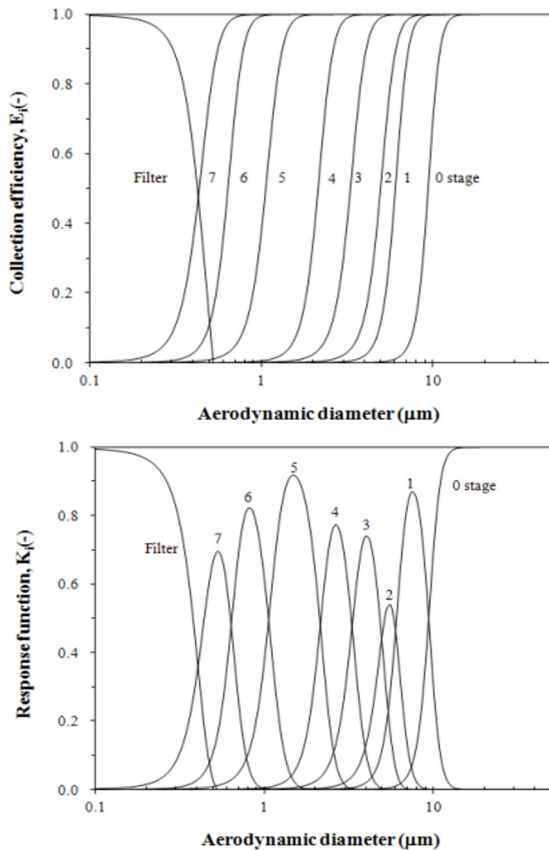


Figure 1. Calculated collection efficiency and response function of 8 stage non-viable cascade impactor

2. 시료의 채취

본 연구에서는 대학건물의 실내공기 중 에어로졸 입자의 입경별 농도 특성을 평가하기 위하여 2014년 3월 중 경상남도 밀양시에 위치한 대학건물을 연구대상으로 하였다. 시료채취 지점은 Table 1에 나타낸 바와 같이 복도(In-CO), 강의실(In-RO), 실험실(In-LR), 식당(In-RE) 등 실내공간 총 4개 지점 그리고 실내/실외의 농도 특성을 비교하기 위하여 캠퍼스 중앙광장(Out-CS)의 실외 1개 지점을 선정하였다. 복도의 경우 면적 408.4 m²이고 연구실과 강의실 사이의 통

로로 창문은 없으며, 일반적으로 하루에 한번 밀대결제로 청소가 이루어지고 있다. 강의실의 경우 면적 90.6 m²이고 12개의 창문이 있어 자연환기가 용이하며, 하루에 4시간이상 수업이 진행되고 있다. 실험실의 경우 질삭유의 전기분해실험이 진행 중이며, 실험을 위해 소수의 연구자들만 이용하고 있다. 하루에 수백명이 이용하는 식당의 경우 상시적으로 창문을 통한 자연환기와 하루에 3번 청소가 주기적으로 이루어지고 있다.

한편, 시료채취 방법은 임팩터를 사용하여 바닥으로부터 1.5 m 높이에서 흡인유량 28.3 L/min으로 24시간 기준으로 연속 채취하였으며, 시료채취 횟수는 실내 식당 및 실외 중앙광장 지점은 각 2회 그리고 복도, 강의실, 실험실 등 지점에서는 각 4회씩 실시하였다.

또한, 포집전후의 필터무게를 칭량하기 위해 시료채취 전후 24시간 이상 데시게이트에서 항온, 항습한 후 무게 0.01 mg까지 칭량가능한 전자저울(AT201, METTLER, USA)을 이용하여 측정 전후의 필터 중량을 칭량하고 질량 농도를 산정하였다.

III. 연구결과

1. 입경범위별 질량농도

본 연구기간 중 복도, 강의실, 실험실, 식당 등 4개 실내지점과 실외 중앙광장에서 채취된 에어로졸입자의 입경범위별 평균농도 및 표준편차 그리고 TSP 농도를 Table 2에 나타냈다. 여기서 임팩터의 전체 입경범위별 농도를 총먼지(Total Suspended Particles, TSP)라 하였다.

본 연구기간 중 TSP 평균농도는 실내지점인 복도 103.80 μg/m³, 강의실 96.13 μg/m³, 실험실 85.03 μg/m³, 식당 35.84 μg/m³의 순으로, 실외 중앙광장은 64.90 μg/m³로 나타났다. 또한, 실내/실외 농도비 즉, I/O(Indoor/Outdoor)비는 복도 1.6배, 강의실 1.5배, 실험실 1.3배, 식당 0.6배로 식당을 제외한 모든 지점에

Table 1. General description of sampling sites

Sampling site	Floor	Area(m ²)	Number of Window	Frequency of cleaning
Floor corridor(In-CO)	3F	408.4	-	one time/day
Lecture room(In-RO)	3F	90.6	12	one time/day
Laboratory(In-LR)	3F	153.7	8	Intermittent
Cafeteria(In-RE)	1F	276.5	11	three times/day

서 실내농도가 실외보다 높게 나타났다.

에어로졸입자는 다양한 발생원의 영향이나 외기 환기 및 청소 여부 등에 따라 입경범위별 농도 특성에 큰 영향을 줄 수 있는데, 전반적으로 지점별 큰 차이를 보였다. 특히 각 지점의 입경범위별 최대농도는 복도의 경우 1단($PM_{5.8-9.0}$) 영역에서 $22.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 나타났다. 또한, 강의실은 7단($PM_{0.43-0.65}$) 영역에서 $15.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 2단($PM_{4.7-5.8}$) 영역에서 $14.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 높게 나타났으며, 실험실은 6단($PM_{0.65-1.1}$) 영역에서 $23.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 나타났다. 또한, 식당의 경우 실험실과 마찬가지로 입경범위별 6단($PM_{0.65-1.1}$) 영역에서 상대적으로 높게 나타났으나 농도는 $7.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 실험실의 약 1/3 농도 수준으로 낮게 나타났다.

한편, 실외 지점의 입경범위별 농도 특성과 비교하여 복도와 강의실의 경우 1~6단의 조대입자 영역에서 상대적으로 높게 나타났으며, 특히 1단($PM_{5.8-9.0}$) 영역에서는 약 5배 이상 높았다. 실험실의 경우에는 5단($PM_{1.1-2.1}$)과 6단($PM_{0.65-1.1}$)의 영역에서 약 3배 이상 농도가 높았으며, 그 외 입경범위에서는 실외 지점의 입경별 농도와 큰 차이가 없었다. 반면, 식당은 모든 입경범위에서 실외 농도보다 낮았으며, 특히 4단($PM_{2.1-3.3}$), 7단($PM_{0.43-0.65}$), F단($PM_{0.43}$)에서 약 1/2배 이하의 낮은 농도가 나타났다.

2. 질량 대수정규분포

에어로졸입자의 입경분포는 에어로졸입자의 자연적, 인위적 발생원의 영향 특성을 평가하기 위한 중

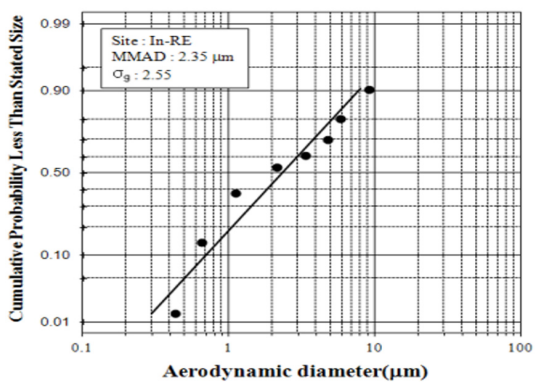
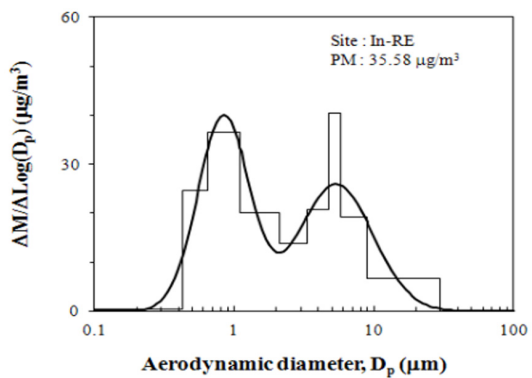
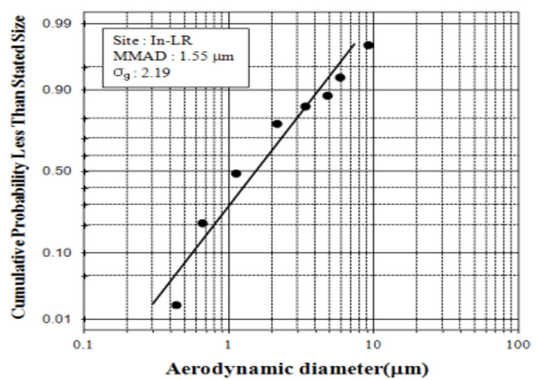
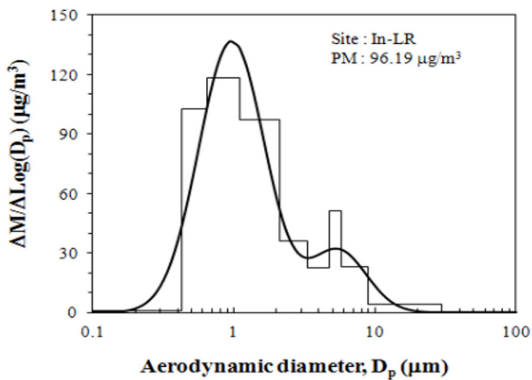
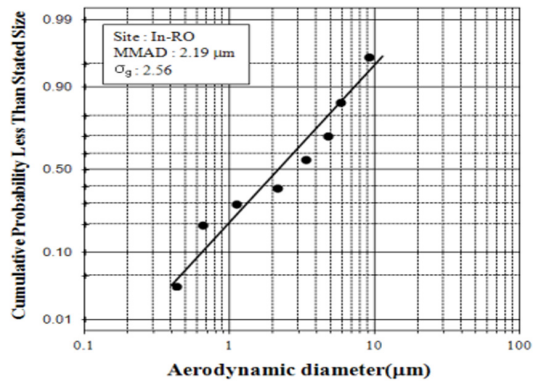
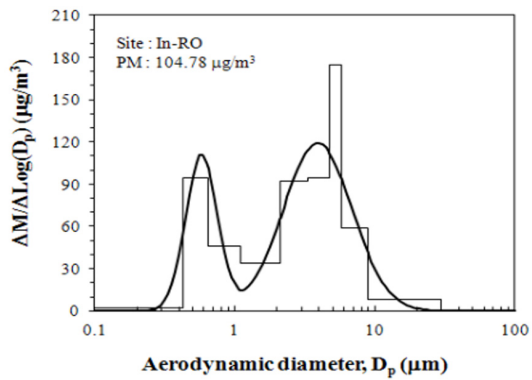
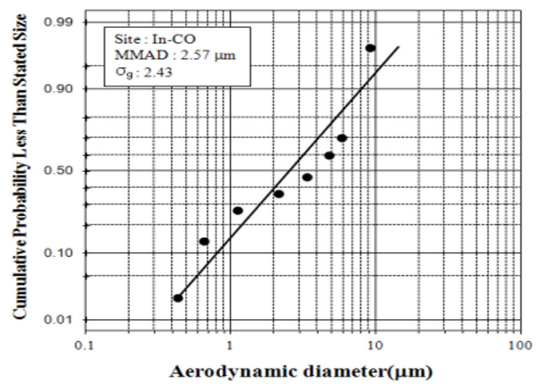
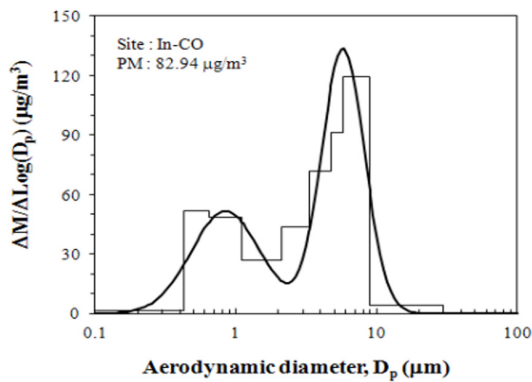
요한 인자이다. 또한, 임팩터에 의해 포집된 에어로졸입자의 입경농도 분포는 통상 미세입자 측에 쏠리는 비대칭 분포를 보이나, 넓은 범위의 입경폭을 대수(Logarithm)로 변환시켜 대수정규분포(Log-normal distribution)로 나타내면 데이터 해석이 용이한 것으로 알려져 있다(Park & Choi, 1997).

Figure 2에는 복도 등 4개 실내 지점과 실외지점에서 채취된 에어로졸입자의 대표적 질량농도 분포의 특성을 나타냈다. 일반적으로 대기 에어로졸입자의 입경분포는 인위적, 자연적 등 다양한 발생원의 동시 영향으로 인해 입경 약 $1\sim 2 \mu\text{m}$ 전후로 미세입자 및 조대입자 영역의 양측에 피크를 나타내는 이산형(Bimodal)분포를 보이는데(Whitby, 1978), 본 연구에서도 실외 중앙광장의 경우 전형적인 이산형 분포 특성이 나타났다.

실내 지점 또한 대부분 이산형 분포의 형태를 보이고 있었으나, 지점별로 미세입자 및 조대입자 영역에서 나타난 최대농도 피크 등 입경분포의 형태가 실외 지점과 다소 상이하였다. 특히, 복도 지점의 입경분포 농도 특성은 조대입자가 미세입자 영역보다 더 큰 농도 피크 특성과 더불어 조대입자 영역은 입경 약 $5 \mu\text{m}$ 그리고 미세입자 영역은 약 $0.9 \mu\text{m}$ 부근에서 각각 높은 농도 피크가 나타났다. 강의실 지점은 조대입자 영역에서 복도와 비슷한 입경농도 특성을 보이고 있었으나 미세입자의 영역에서는 실외지점과 비슷한 약 $0.6 \mu\text{m}$ 부근에서 높은 피크가 나타났다. 절삭유의 전기분해 실험이 진행중인 실험실의 경우

Table 2. Average concentrations of size-segregated particulate matter at sampling sites

Sites	Stages of cascade impactor($\mu\text{g}/\text{m}^3$)									TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	0 (PM _{>9.0})	1 (PM _{5.8-9.0})	2 (PM _{4.7-5.8})	3 (PM _{3.3-4.7})	4 (PM _{2.1-3.3})	5 (PM _{1.1-2.1})	6 (PM _{0.65-1.1})	7 (PM _{0.43-0.65})	F (PM _{0.43})	
Indoor air										
In-CO	3.01	22.82	10.12	11.47	12.21	12.94	15.89	12.70	2.64	103.80
	±1.38	±7.36	±4.67	±2.75	±2.47	±4.75	±3.91	±3.40	±1.03	±17.02
In-RO	3.56	10.98	14.48	12.82	13.93	9.57	11.23	15.58	3.99	96.13
	±0.65	±1.42	±5.12	±2.56	±5.25	±0.72	±0.68	±1.91	±0.23	±10.29
In-LR	2.21	4.11	5.77	4.17	7.48	20.37	23.01	15.52	2.39	85.03
	±0.60	±1.12	±1.93	±1.22	±0.91	±4.86	±4.93	±4.02	±0.68	±11.92
In-RE	1.84	1.98	3.39	5.03	3.80	5.40	7.12	5.89	0.86	35.84
	±2.26	±2.41	±0.35	±2.60	±1.56	±0.35	±1.74	±2.08	±0.52	±0.36
Outdoor air										
Out-CS	4.29	2.82	5.40	8.83	7.73	5.03	8.10	19.51	3.19	64.90
	±0.17	±0.17	±1.04	±0.69	±0.17	±0.52	±0.69	±2.60	±0.69	±5.03



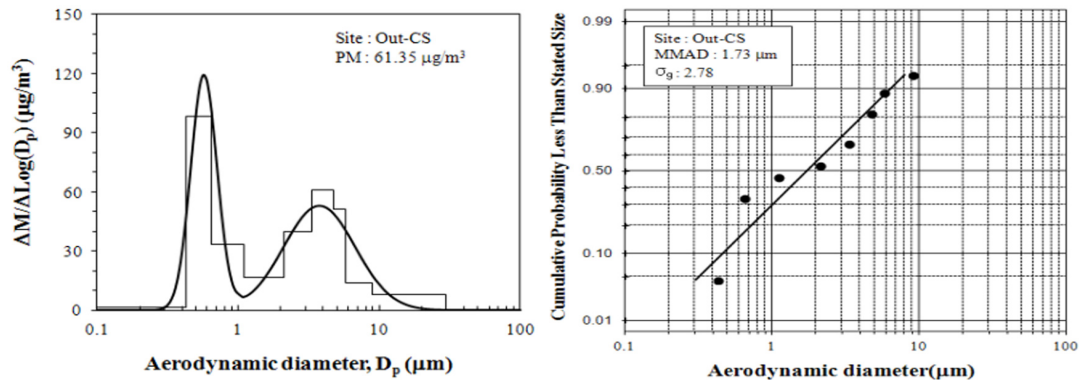


Figure 2. Mass size distributions of aerosol particle and the spreadsheet-generated log-probit paper with regression line from cascade impactor data reduction at sampling sites

입경 약 1 μm 의 미세입자 영역에서 최대농도 피크가 나타났다. 반면, 하루에 3회 정도 주기적인 청소가 이루어지고 있는 식당의 경우 실외 지점이나 다른 실내 지점에 비해 조대입자 및 미세입자의 모든 영역에서 낮은 농도 피크가 나타났다.

한편, 공기역학적 질량중양경(Mass Median Aerodynamic Diameter, MMAD)과 기하표준편차(Geometric standard deviation, σ_g)는 입경분포 특성을 표시하는 중요한 인자로서 일반적으로 대수확률(Log-probability) 그래프 용지에서 각 분리단의 50% 절단입경($d_{50\%}$)에 해당하는 농도 누적 퍼센트와의 교차점들을 수작업으로 최적 직선(Best-fit line)을 긋고 직선식으로 부터 구할 수 있다(Hinds, 1982). 그러나 수작업으로 직선식을 긋는 방식은 다소의 오차가 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 Figure 2에 나타난 바와 같이 엑셀 프로그램(MS Excel)상에서 대수확률 그래프용지를 작성하고 각 분리단의 농도 누적 퍼센트를 통해 선형회귀선의 y 절편 및 기울기를 구하는 최소자승회귀분석(Least-squares linear regression)으로 직선방정식을 긋는 Probit method를 이용하여 각각의 MMAD와 σ_g 를 나타냈다(O'Shaughnessy & Raabe, 2003).

MMAD와 σ_g 값은 각 지점별 에어로졸입자 발생원의 영향특성을 나타내는 중요한 인자이며, 실내 지점별 MMAD는 복도 2.57 μm , 강의실 2.19 μm , 식당 2.35 μm 으로 실외 중앙광장 1.73 μm 에 비해 높았고, 반면 실험실은 1.55 μm 로 실외 지점보다 낮았다.

또한, σ_g 는 복도 2.43, 강의실 2.56, 실험실 2.19, 식당 2.55으로 나타나, 모든 실내지점이 실외 지점 2.78에 비해 다소 낮게 나타났다.

3. 각 지점별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}

한편, 실내외 에어로졸입자에 관한 연구들의 대부분은 PM₁₀ 또는 PM_{2.5} 측면에서 많이 보고되고 있으나, 본 실험에 사용된 입매터는 각 분리단의 50% 절단경이 9 μm (0단)와 2.1 μm (4단)이기 때문에 다른 연구결과들과 직접적인 농도 비교가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 앞서 Probit method로써 긋는 직선방정식으로 부터 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도를 추정하였다. 그 결과 Table 3에는 각 지점별 전체 입경별 농도 특성에서 평균 질량농도, MMAD 및 σ_g 그리고 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 추정 농도값을 나타냈다.

평균 MMAD는 복도 2.36 μm , 강의실 2.11 μm , 실험실 1.58 μm , 식당 1.96 μm 그리고 실외 중앙광장은 1.67 μm 로 나타났으며, 평균 σ_g 는 복도 2.45, 강의실 2.61, 실험실 2.32, 식당 2.31 그리고 실외 중앙광장은 2.82로 나타났다.

실내지점별 PM₁₀ 농도는 복도 86.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강의실 91.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 실험실 83.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 식당 34.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 실외 농도와 비교하면 복도, 강의실, 실험실은 약 1.4~1.5배 정도 높았으며, 식당은 약 0.6배로 낮았다. 또한, PM_{2.5} 농도는 복도 54.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강의실 54.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 실험실 60.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 식당 22.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 실외 농도와 비교하면 복도, 강의실, 실험실은 약 1.3~1.4배 높았으며, 식당은 약 0.5배로 낮았다.

IV. 고 찰

본 연구대상 대학건물 내 실내 에어로졸입자의 입경별 농도 특성은 지점별 시료채취 기간과 횟수는

Table 3. TSP concentration, MMAD, og, PM₁₀ and PM_{2.5} concentration at sampling sites.

Sites	TSP($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MMAD(μm)	og [*]	PM _{2.5} & PM ₁₀ concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
				PM _{2.5}	PM ₁₀
Indoor air					
In-CO	103.80±17.02	2.36±0.18	2.45±0.15	54.94±10.91	86.12±24.34
In-RO	96.13±10.29	2.11±0.15	2.61±0.04	54.65± 3.68	91.08± 9.34
In-LR	85.03±11.92	1.58±0.05	2.32±0.12	60.40± 9.79	83.83±12.08
In-RE	35.84±0.36	1.96±0.54	2.31±0.34	22.65± 5.54	34.65± 1.76
Outdoor air					
Out-CS	64.90±5.03	1.67±0.08	2.82±0.06	42.24± 4.16	62.15± 4.87

다소 상이하지만 지점별 TSP 평균농도의 경우 복도, 강의실, 실험실, 식당의 농도 순으로 나타났다. I/O 농도비는 복도, 강의실, 실험실의 경우 실내농도가 1.3~1.6배로 높았으나 식당은 0.6배로 낮았다. 이는 복도, 강의실, 실험실 지점의 경우 지점별 다양한 실내 에어로졸입자의 발생원 영향과 더불어 환기나 청소 등 실내 발생원의 저감효과가 적은 결과로 판단된다. 반면, 식당은 상대적으로 낮은 농도 특성으로 나타났으며, 이는 하루에 3회의 정기적인 청소와 자연환기 등을 통한 실내 에어로졸입자의 제거 영향이 큰 것으로 판단된다.

입경범위별 농도 특성은 복도의 경우 최대 농도가 PM_{5.8-9.0}의 조대입자 영역에서 나타났는데, 이는 직접적인 외기환기가 어려운 상태에서 재실자들의 활동량이 많아 바닥에 퇴적된 거대입자의 재비산이 용이한 특성상 조대입자 영역 농도에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

강의실의 경우에는 실외 중앙광장과 유사한 PM_{0.43-0.65}의 미세입자 영역과 더불어 PM_{4.7-5.8}의 조대입자 영역에서도 높게 나타났다. 이는 복도와 마찬가지로 재실자의 활동량으로 인한 바닥면지의 실내 발생원의 영향과 더불어 창문을 통해 직접적인 실외 공기의 유입이 용이한 점을 고려한다면 실외 입자의 영향이 동시에 실내 입경분포 특성에 영향을 미친것으로 판단된다.

입경범위 PM_{0.65-1.1}의 미세입자 영역에서 최대농도를 나타낸 실험실의 경우 질삭유의 전기분해 실험과정에서 발생한 미세입자의 발생영향이 큰 것으로 판단된다. 실외지점에 비해 모든 입경범위에서 낮은 농도 특성을 나타낸 식당의 경우 앞서 설명한 대로 정기적인 청소와 환기로 인해 바닥에 퇴적된 조대입자

영역뿐만 아니라 미세입자 영역의 농도도 크게 제거되어 나타난 결과라 판단된다. 한편, Nam(2013)에 의하면 실내 에어로졸입자 농도는 바닥청소에 의해 크게 줄어들며, 특히 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도는 빗자루와 대걸레로 청소하는 것이 진공청소기나 대걸레만으로 청소하는 것보다 저감효과 큰 것으로 보고하고 있다.

각 지점별 대표적 질량농도 분포의 특성에서 복도 및 강의실의 경우 입경 1 μm 이상의 조대입자 영역에서 높은 농도 특성을 나타냈다. 이는 앞서 설명한 바대로 재실자의 활동에 따라 바닥에 퇴적된 조대입자가 재비산 되기 쉬운 특성과 더불어 특히 강의실의 경우 실외지점과 비슷한 약 0.6 μm 부근에서도 피크가 나타나 복도보다 창문을 통해 직접적인 실외 공기의 유입이 용이한 영향 특성이 동시에 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, Qian et al.(2012)은 대학 강의실에서 입경분포 측정결과 재실자의 활동으로 인해 대부분 입경 1 μm 이상의 조대입자 영역의 발생영향이 큰 것으로 보고하고 있다. 또한, 실험실의 경우 입경 약 1 μm 의 미세입자 영역에서 최대 피크가 나타났으며, 식당의 경우 실외 지점이나 다른 실내 지점에 비해 조대입자 및 미세입자 영역의 피크농도가 모두 낮게 나타났다. 결국, 실내 지점의 입경분포 특성은 다양한 실내 발생원의 영향과 외기의 유입여부 그리고 청소상태에 따른 영향에 의해 크게 변함을 알 수 있다.

지점별 평균 MMAD를 살펴보면, 실외 지점보다 복도, 강의실, 식당의 경우 높게 나타났으며 실험실의 경우에는 낮게 나타났다. 이러한 결과는 복도, 강의실의 경우 바닥 비산면지의 재비산으로 인한 조대입자 영역의 농도가 반대로 실험실은 실험과정에서 발생하는 미세입자 영역의 농도가 전체 에어로졸입

자의 입경별 농도에 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 반면, 식당의 경우 청소 등으로 인해 조대입자 영역 뿐만 아니라 미세입자 영역의 제거효과도 상대적으로 더 높아서 나타난 결과로 보인다. 또한, 평균 og 는 실내 지점들이 실외 지점에 비해 다소 낮았는데, 이는 실외 지점에서는 다양한 에어로졸입자 발생원이 넓게 영향을 미치는 반면, 실내 지점의 경우 실외 영향 특성과 더불어 지점별 특정 에어로졸입자 발생원의 영향이 상대적으로 더 집중된 결과로 판단된다.

한편, 임팩터의 입경별 농도에서 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도를 추정한 결과, 실내지점별 PM_{10} 농도는 환경부의 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”의 실내공기질 유지농도기준인 PM_{10} $150 \mu g/m^3$ 과 비교하여 보면 전반적으로 기준치를 초과하지 않았다(MoE, 2014). 그러나 국내 다중이용 40개 시설에서 측정된 평균 PM_{10} 농도 $18.0 \sim 71.2 \mu g/m^3$ 과 비교하면, 복도, 강의실, 실험실의 경우 비교적 높은 농도 특성을 보였다(Won et al., 2012). 또한, $PM_{2.5}$ 농도는 현재 실내기준은 없지만, 2015년부터 적용되는 대기 중 24시간 환경기준($50 \mu g/m^3$)과 비교하여 보면, 복도, 강의실, 실험실은 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타난 반면, 식당은 양호한 농도 수준을 보이고 있었다. 한편, Kim et al.(2008)의 대학도서관에서 측정한 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도 보고에서는 각각 $37.7 \mu g/m^3$ 및 $25.3 \mu g/m^3$ 으로 전반적으로 대기환경기준 이하의 양호한 농도 특성을 보이고 있으며, 이는 도서관의 경우 학생들의 이용도가 높지만 주기적인 청소와 환기설비 가동 및 공기정화기를 통한 자체 정화 등 실내공기질 관리로 인한 결과로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 대학건물 내 실내 에어로졸입자의 입경별 농도 특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 연구기간 중 대학건물 내 PM_{10} 농도는 전반적으로 실내공기질 유지농도기준을 초과하지 않았으나, 기존 보고된 국내 다중이용시설의 평균농도보다 높았다. 또한, $PM_{2.5}$ 농도는 향후 적용될 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타나 미세먼지의 인체 유해성에 견주어 볼 때 대학의 미세먼지 실내공기질 관리개선택이 요구되는 것으로 판단된다.

실내 지점별 입경분포는 복도 및 강의실의 경우

미세영역보다 조대입자 영역에서 더 높은 농도 피크가 나타나 재실자의 활동도가 많고 바닥먼지의 재비산으로 인해 전체 에어로졸입자 농도에 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 실험실의 경우 미세입자 영역에서 더 높은 농도로 나타나 재실자수는 적지만 환기 부족과 전기분해 실험과정으로 미세입자의 발생영향이 큰 것으로 보였다. 또한, 평균 MMAD에서도 복도 $2.36 \mu m$, 강의실 $2.11 \mu m$, 실험실 $1.58 \mu m$ 등으로 나타나 복도, 강의실의 경우 조대입자 영역 그리고 실험실의 경우 미세입자 영역의 농도가 전체 질량 농도에 더 큰 영향을 준 것으로 나타났다. 결국 실내 에어로졸입자의 농도 및 입경별 특성은 각 지점별 발생원의 특성과 환기여부 그리고 청소상태 등에 따른 영향이 큰 것으로 판단된다.

한편, 향후 실내 에어로졸입자의 발생원 규명, 유해성 여부를 보다 상세히 판단하기 위해서는 화학적 성분의 분석결과 등 보다 면밀한 에어로졸입자의 특성 파악할 필요가 있다. 또한, 대부분의 대학에서는 본 연구대상과 마찬가지로 환기설비 없거나 자연환기나 정기적인 청소 등 체계적인 실내환경 관리가 미흡할 것으로 판단되며, 현재 환경부의 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”이나 교육부의 “학교보건법”등에서도 일부 도서관을 제외한 대학 건물은 실내환경관리 적용대상에 포함되어 있지 않다. 따라서 대학생 및 교직원의 건강피해를 예방하고 쾌적한 대학건물의 실내환경을 유지하기 위해서는 환기설비의 설치나 주기적인 청소 등 종합적인 미세먼지 실내공기질 관리개선택이 시급히 요구된다.

References

- Bau S, Witschger O. A modular tool for analyzing cascade impactors data to improve exposure assessment to airborne nanomaterials. *J Phys Conf. Ser.* 2013;429:1-10
- Carlton AG, Turpin JB, Johnson W, Buckley BT, Simcik M et al. Methods for characterization of personal aerosol exposures. *Aerosol Sci Technol* 1999;31(66):66-80
- Donaldson K, Li XY, MacNee W. Ultrafine(nanometer) particle mediated lung injury. *J Aerosol Sci* 1998;29(5/6):553-560
- Hinds WC. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley and Sons Inc.; 1982. p. 120-150

- Kavouras IG, Stephanou EG. Gas/particle partitioning and size distribution of primary and secondary carbonaceous aerosols in public buildings. *Indoor air* 2002;12:17-32
- Kim JH, Lee TJ, Kim DS. Investigation of indoor air quality and the characteristics of particulate matter distribution in a university library. *J Korean Soc Indoor Environ* 2008;5(1):24-36
- Lee CM, Kim YS. Analysis of research trend for indoor air pollutants and health risk assessment in public facilities. *J Korean Soc Indoor Environ* 2004;1(1):39-60
- Lee SC, Chang M. Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere* 2000;41:109-113
- Meng QY, Turpin BJ, Korn L, Weisel CP, Morandi M et al. Influence of ambient(outdoor) sources on residential indoor and personal PM_{2.5} concentrations: analyses of RIOPA data. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* 2005; 15:17-28
- Ministry of Environment(MoE). Risk assessment and management technology - A risk analysis of indoor/outdoor airborne fine particles : Based on environmental epidemiological research. Report, 091-041-032; 2008. p.10
- Ministry of Environment(MoE). Indoor air quality guideline Act; 2014.
- Montgomery DD, Kalman DA. Indoor/outdoor air quality: Reference concentrations in complaint free residences. *Appl. Ind. Hyg.* 1989;4:17 - 20
- Nam MR. Exposure assessment of PM₁₀ and PM_{2.5} in office buildings. Master's Thesis, Daegu Haany University, Daegu, Korea; 2013. p.20
- O'Shaughnessy PT, Raabe OG. A comparison of cascade impactor data reduction methods. *Aerosol Sci Technol* 2003;37:187-200
- Park JH, Choi KC. Characterization of chemical composition and size distribution of atmospheric aerosols by low-pressure impactor. *J KOSAE* 1997;13(6):475-486
- Qian J, Hospodsky D, Yamamoto N, Nazaroff WW, Peccia J. Size-resolved emission rates of airborne bacteria and fungi in an occupied classroom. *Indoor Air* 2012;22: 339-351
- Roberts DL, Mitchell JP. The effect of nonideal cascade impactor stage collection efficiency curves on the interpretation of the size of inhaler-generated aerosols. *AAPS PharmSciTech* 2013;14(2):497-510
- Sienfeld JH, Pandis SN. Atmospheric chemistry and physics. John Wiley and Sons Inc.; 1998. p. 408-447
- Uhde E, Salthammer T. Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality - A review of recent advances in indoor chemistry. *Atmos Environ* 2007;41:3111 - 3128
- Vaughan NP. The Andersen impactor: Calibration, wall losses and numerical simulation. *J Aerosol Sci* 1989; 20(1):67-90
- Whitby KT. The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmos. Environ.* 1978;12:135-159
- Willeke K, Whitby KT. Atmospheric Aerosols: Size Distribution Interpretation. *J Air Poll Cont Assoc* 1975;25:529-534
- Won SR, Lim JY, Shim IK, Kim EJ, Choi AR et al. Characterization of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration distribution at public facilities in Korea. *J Korean Soc Indoor Environ* 2012;9(3):229-238