

사업장 내 사무실의 PM_{2.5} 노출 평가

남미란 · 정종현¹ · 피영규^{1*}

대구한의대학교 산업보건연구소 · ¹대구한의대학교 보건학부

Exposure Assessment of PM_{2.5} in Manufacturing Industry Office Buildings

Mi Ran Nam · Jong-Hyon Jung¹ · Young Gyu Phee^{1*}

Institute for Industrial Health, Daegu Haany University · ¹Faculty of Health Science, Daegu Haany University

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted in order to evaluate PM_{2.5} concentrations at 20 offices connected to the manufacturing industry from the beginning of September to the end of November 2012.

Methods: A total of 20 samples were collected from 20 office buildings. Each PM_{2.5} sample was collected by a 37 mm PTFE filter attached to a Personal Environment Monitor.

Results: The geometric mean concentrations of PM_{2.5} in the offices was 23.47 µg/m³, and the mean PM_{2.5} concentrations measured in smoking offices were much higher than those of measured in non-smoking offices (24.83 µg/m³ and 21.55 µg/m³, respectively). PM_{2.5} was revealed to be higher in small offices (39.52 µg/m³) than in medium or large offices (22.69 µg/m³ and 11.04 µg/m³, respectively). The mean PM_{2.5} concentration of offices located on the 1st floor was higher than that of those on the 2nd floor, and those of offices located in the workplace were higher than those out of the workplace. The multiple regression model showed that concentration of PM_{2.5} was positively associated with the method of ventilation.

Conclusions: Smoking, ventilation method, location, and inflow of outdoor particulate matter are the most important factors for office PM_{2.5} concentrations.

Key words : concentration, office, PM_{2.5}

I. 서 론

현대인은 하루 중 80~85% 이상을 실내에서 생활하고 있으며, 밀폐된 실내환경에서 활동하는 시간이 늘어남에 따라 실내공기질은 중요한 사회적 건강 문제로 등장하고 있다(Lawrence et al., 2004). 실내공기질(Indoor Air Quality, IAQ)은 실외와는 다르게 실내 오염원과 실외오염물질의 유입에 의해 오염될 경우 정화가 어려울 뿐만 아니라 개방성이 적은 실내공간에서 오염된 실내공기의 노출을 통해 호흡기질환, 인체의 생화학적 부작용, 호흡기의 자극 등이 유발될 수 있다(Berglund et al., 1992; Jones, 1999). 또한, 주

택이나 학교, 공공건물, 병원, 지하시설물, 사무실 등 다양한 실내공간에서의 실내공기오염은 실내환경 뿐만 아니라 사회인구학적 특성, 업무관련 특성, 사회심리학적 특성 등 매우 복잡한 원인들에 의해서 야기될 수 있으며, 실내거주자들의 생명을 위협할 정도는 아니지만 장기적으로 건강에 악영향을 미치고 있다(Lee & Chang, 2000; Lee et al., 2004).

사무실의 실내환경은 단순히 업무능률 및 생산성 향상 뿐만 아니라 쾌적성 및 주거성 등의 삶의 질과도 밀접하게 연관되어 있다. 우리나라의 경우 2007년에 사무실의 공기질을 적절하게 관리하기 위한 지침을 제정하였다(MoEL, 2012). 사무실 내 먼지는 의

*Corresponding author: Young Gyu Phee, Tel: 053-819-1590, E-mail: yphee@dhu.ac.kr

Faculty of Health Science, Daegu Hanny University. 1 Hannydae-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 712-715

Received: December 6, 2013, Revised: December 19, 2013, Accepted: December 26, 2013

복에서 발생하는 섬유, 머리카락 및 피부각질 및 세포, 활동에 의한 먼지, 취급물질로 인한 먼지, 토양 입자 등으로 실내오염원과 실외오염원이 복합적인 작용에 의해 발생된다(Monn et al., 1997; Luoma et al., 2001). Monn et al.(2001)은 환기율, 대기오염도, 실내 거주자의 활동형태, 입자의 공기역학적 직경 등 다양한 변수들에 의해 실내 먼지의 오염도가 결정된다고 보고 한 바 있다.

공기 중 입자상물질은 크기분포와 화학적 구성성분에 따라 여러 가지로 구분되고 건강상의 영향은 화학적 구성성분과 입자의 크기에 따라 영향을 받으며 입자의 크기가 작을수록 폐포까지 침투될 가능성이 크다(Wallace, 1996). 미세먼지는 통상 PM₁₀(Particulate Matters)이라 칭하며 공기역학적으로 직경이 10 µm 이하는 PM₁₀, 2.5 µm 이하는 초미세먼지로 PM_{2.5}의 분진입자를 뜻한다. 특히, 크기가 작은 입자는 침강속도가 느리고 대기 중에 비교적 장시간 체류하며 사람이 호흡할 때 폐의 기관지 또는 폐포 부위에 침착되기 쉽다. 또한 PM₁₀은 호흡기계 질환에 큰 영향을 주고 PM_{2.5}는 심혈관계 질환 및 암, 조기사망을 초래할 수 있으며, 이는 입자의 크기가 작을수록 상대적으로 표면적이 증가하여 각종 중금속 및 대기 중 유해물질과의 흡착이 용이하기 때문에 PM_{2.5}의 독성이 PM₁₀보다 강하다는 것을 의미한다(Shendrikar & Steinmetz, 2003; Schwartz et al., 1999).

이렇듯 먼지로 인한 건강장해 예방을 위하여 환경부는 PM₁₀의 대기환경기준을 150 µg/m³으로 관리하고 있으며, 2015년부터 PM_{2.5}의 경우 연간기준 25 µg/m³, 24 시간 기준 50 µg/m³으로 규정하여 시행할 예정이다. 한편, 실내공간의 경우 환경부의 ‘다중이용시설등의 실내공기질관리법’에서 다중이용시설에 따라 PM₁₀에 대한 유지기준을 150~200 µg/m³ 이하로 규정하고 있으며 PM_{2.5}에 대한 기준은 아직 마련되어 있지 않다(MoE, 2013a). 그동안 다중이용시설의 종류에 대한 PM₁₀ 농도를 조사한 연구는 다양하게 진행되어져 왔으나(Kim et al., 2005; Seo et al., 2006; Jeon et al., 2008) PM_{2.5}에 대한 조사는 거의 수행된 바 없다. 또한, 학교 내의 미세먼지 관리를 위하여 우리나라 교육과학기술부에서는 학교보건법에 교사 안에서의 PM₁₀에 대한 유지기준을 100 µg/m³으로 설정하여 관리하고 있다(MoE, 2013b) 이러한 이유로 학교의 실내공기질 노출평가와 관련된 연구가 다양하게 이루어졌으나(Lim et al., 2008; Choi,

2008; Lee et al., 2010), 역시 모두 PM₁₀ 농도에 국한되어 있다. 한편, 고용노동부의 경우 역시 사무실의 PM_{2.5}에 대한 기준은 마련되어 있지 않고 PM₁₀은 관리기준으로 150 µg/m³로 규정하고 있으며 이와 관련하여 진행된 사무실의 실내공기질의 연구에서도 PM₁₀에 대한 노출평가 연구가 대부분이다(Lee et al., 2004; Roh et al., 2004; Jeong et al., 2007).

한편, 선진외국의 경우 PM_{2.5} 농도에 대한 연구가 학교(Gemenetzi et al., 2006; Branis et al., 2009; Yurtseven et al., 2012), 사무실(Mosqueron et al., 2002; Mohammadyan et al., 2010), 거주지(Cao et al., 2005; Yassin et al., 2012) 등을 대상으로 다양하게 진행되어 왔으나 우리나라의 경우 거의 수행된 바 없으며 특히, 사업장 내 사무실을 대상으로 한 PM_{2.5} 농도평가에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 사업장 내 사무실의 공기 중 PM_{2.5}의 농도를 평가하고 그 농도에 영향요인을 파악하여 사무실 근로자의 건강보호를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구는 2012년 9월부터 11월까지 경상도 지역의 제조업에 소재한 사무실 20개소를 임의 선정하고 현장조사를 통하여 공기 중 PM_{2.5}의 농도를 평가하였다.

2. 연구방법

1) 예비조사

사무실의 예비조사는 담당자와 사전 연락 후 사업장을 방문하여 현장조사를 실시하였고 근무환경, 시설, 환기 및 위생특성 등 PM_{2.5}의 농도에 영향을 줄 수 있는 요인들을 파악하였다. 또한, PM_{2.5}의 농도 측정에 필요한 노출평가 전략을 수립하였다.

2) PM_{2.5}의 측정 및 분석

(1) 시료의 측정

사무실 내 PM_{2.5}는 PEM(Personal Environmental Monitor, Cat. No. 761-203, SKC, USA)를 이용하여 채취하였다. 포집에 사용된 여과지는 PTFE Filter(37 mm,

pore size 2.0 μ m, SKC, USA)이며, 각각 여과지를 PEM에 장착한 후 입자 충돌판에 기름을 도포하고 자연건조시켰다. 그 후 2.0 ℓ /min으로 설정한 개인시료채취기(Personal air sampler, Gillian, USA)에 연결하여 근로자 1일 근무시간 동안 측정이 이루어지도록 하였다(MoEL, 2012). 개인시료채취기의 유량은 PM_{2.5}의 측정 전·후에 건식유량보정계(Defender 510, BIOS, USA)로 각 3회씩 측정하여 평균값을 활용하였다.

(2) 시료의 분석

측정 전·후 시료는 수분의 영향을 제거하기 위하여 데시게이터 내에서 24시간 이상 보관한 후 중량분석법을 이용하여 농도를 확인하였다. 시료의 분석은 10⁻⁵ g까지 칭량할 수 있는 전자저울(CP244S, Sartorius, Germany)을 이용하였으며, 시료 측정 전·후 중량차를 구하고 공시료의 무게를 보정한 후 농도값을 계산하였다.

3) 자료의 분석

모든 자료의 분석은 SPSS(Version 20.0K, USA) 프로그램을 이용하였다. 공기 중 PM_{2.5}의 농도는 Sapiro-Wilk의 정규성 검정결과 대수정규분포를 보여 기하평균과 기하표준편차로 제시하였고, 결과의 이해를 위하여 산술평균과 표준편차도 결과에 수록하였다.

사무실 형태, 사무실 위치, 흡연여부 등 두 군 간의 공기 중 PM_{2.5}의 농도 비교는 Mann-Whitney U test를 활용하였고, 건축자재 종류, 사무실 크기, 환기 방법 등의 세 군 이상간의 농도비교는 Kruskal-Wallis test를 수행하였다. 또한 공기 중 PM_{2.5}의 농도에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다.

III. 연구결과

1. 일반적 특성

1) 사무실의 일반적 특성

사무실 공간크기를 구분해보면 100 m² 미만이 45%(9개소)이었고 100~200 m² 미만 25%(5개소), 200 m² 이상이 30%(6개소)이었다(Table 1). 또한 사무실 건축연한은 10년 미만이 35%(7개소)로 가장 많았고, 10년 이상 20년 미만 35%(7개소), 20년 이상 30%(6개소)이었다(Table 1). 한편, 사무실이 작업

Table 1. General characteristics of subjects

Classification	Number of samples	Percentage(%)
Size of office space(m ²)		
m ² <100	9	45
100≤m ² <200	5	25
m ² ≥200	6	30
Building years		
<10	7	35
10≤years< 20	7	35
≥20	6	30
Office location		
In the workplace	4	20
Out of the workplace	16	80
Surrounding environment		
Industrial area	11	55
Non industrial area	9	45
Office floor		
1st floor	14	70
2nd floor	6	30

장 현관내에 위치한 경우가 20%(4개소), 밖에 위치한 경우가 80%(16개소)이었으며, 주변환경으로 공단 내에 위치한 사무실이 55%(11개소), 공단 외 지역이 45%(9개소)이었다. 1층에 위치한 사무실은 70%(14개소)이었고, 2층에 위치한 사무실이 30%(6개소)로 조사되었다.

2) 사무실의 환기, 흡연 및 위생 특성

사무실을 환기방법에 따라 구분해보면 창문을 통해 환기를 하는 사무실은 10%(2개소), 출입문을 이용한 환기는 55%(11개소), 환기를 하지 않는 사무실은 35%(7개소)이었다(Table 2).

한편, 사무실 내에서 흡연을 하는 사무실은 60%(12개소)이었고, 흡연을 하지 않는 사무실은 40%(8개소)이었으며, 사무실 전용의 유니폼을 착용하는 사무실은 20%(4개소), 착용하지 않는 사무실은 80%(16개소)로 나타났다. 사무실 내에서 전용의 실내화를 착용하는 사무실은 40%(8개소)이었고, 착용하지 않는 사무실은 60%(12개소)로 조사되었다.

3) 사무실의 실내환경 특성

사무실 내 일산화탄소의 평균농도는 0.7 ppm으로

Table 2. General characteristics of office by ventilation and sanitation

	Classification	Number of samples	Percentage(%)
Ventilating type	Window ventilation	2	10
	Door ventilation	11	55
	No ventilation	7	35
Smoking status	Smoking	12	60
	Non-smoking	8	40
Uniform	Yes	4	20
	No	16	80
Slipper	Yes	8	40
	No	12	60

Table 3. General characteristics of indoor environmental conditions

Classification	Mean	Standard Deviation	Min	Max
CO(ppm)	0.70	0.81	0.01	3.84
CO ₂ (ppm)	740.50	227.60	470.03	1215.02
Temperature(℃)	17.16	4.11	9.01	23.73
Relative Humidity(%)	56.70	11.67	24.62	73.44

산업안전보건법에 따른 사무실 공기관리 지침에서 제시하고 있는 관리기준인 10 ppm을 초과하는 사무실은 없었으며, 이산화탄소의 평균농도는 740.5 ppm으로 관리기준인 1,000 ppm을 초과하는 사무실은 15%(3개소)가 있었다. 또한, 실내 평균 온도와 습도는 각각 17.2℃ 및 56.7%로 조사되었다(Table 3).

2. 공기 중 PM_{2.5}의 농도 평가

1) 사무실 공간크기에 따른 공기 중 농도

Table 4는 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도를 사무실 체적별로 구분한 것으로 100 m³ 미만이 39.52 µg/

m³, 100~200 m³ 미만이 22.69 µg/m³, 200 m³ 이상이 11.04 µg/m³으로 사무실 체적이 작을수록 농도가 높게 나타났으며 이는 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05).

2) 사무실 건축연한에 따른 공기 중 농도

Table 5는 사무실을 건축연한에 따라 구분하였을 때 공기 중 PM_{2.5}에 대한 기하평균 농도를 나타낸 것으로 10년 미만이 23.35 µg/m³, 10년~20년 미만이 21.49 µg/m³, 20년 이상이 26.20 µg/m³으로 10년 미만과 20년 이상이 다소 높게 나타났으나 통계적 유의성은

Table 4. Airborne PM_{2.5} concentrations by office space

(Unit : µg/m³)

Classification	N*	GM**(GSD [†])	Mean±S.D. [‡]	Min	Max	p-value
m ³ <100	9	39.52(2.85)	55.79±38.20	4.55	124.94	0.026
100≤m ³ <200	5	22.69(1.85)	25.840±12.87	8.92	38.59	
m ³ ≥200	6	11.04(2.18)	14.067±10.35	4.44	31.01	

* N : Number of samples

**GM : Geometric Mean

[†] GSD : Geometric Standard Deviation

[‡] S.D. : Standard Deviation

Table 5. Airborne PM_{2.5} concentrations in office by building year

(Unit : µg/m³)

Classification	N	GM(GSD)	Mean±S.D.	Min	Max	p-value
10>years	7	23.35(2.96)	35.94±32.00	4.44	81.72	0.948
10≤years<20	7	21.49(3.24)	38.54±44.92	4.55	124.94	
years≥20	6	26.20(2.36)	32.38±16.87	4.93	55.86	

Table 6. Airborne PM_{2.5} concentrations by office location(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Classification	N	GM(GSD)	Mean \pm S.D.	Min	Max	p-value
In the workplace	4	33.93(1.84)	39.20 \pm 25.04	17.80	74.52	0.508
Out of the workplace	16	21.40(2.93)	34.93 \pm 34.50	4.44	124.94	

Table 7. Airborne PM_{2.5} concentrations by surrounding environment(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Classification	N	GM(GSD)	Mean \pm S.D.	Min	Max	p-value
Industrial area	11	27.26(2.43)	36.56 \pm 25.56	4.93	81.72	0.403
Non industrial area	9	19.54(3.18)	34.83 \pm 40.69	4.44	124.94	

없었다.

3) 사무실 위치에 따른 공기 중 농도

사무실 위치별 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도는 사업장 내 위치한 사무실이 33.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 사업장 외부에 위치한 사무실이 21.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사무실이 사업장 내 위치한 곳에서 농도가 높게 나타났으나 통계적 유의성은 없었다(Table 6).

4) 사무실 주변환경에 따른 공기 중 농도

사무실 주변의 환경에 따라 구분했을 때 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도는 공단지역 내에 위치한 사무실이 27.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 공단지역 외곽에 위치한 사무실이 19.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 공단지역 내에 위치한 사무실에서 농도가 높게 나타났으나 통계적 유의성은 없었다(Table 7).

5) 사무실 층수에 따른 공기 중 농도

Table 8은 사무실 위치를 층수별로 구분하였을 때

공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도를 나타낸 것으로 1층 사무실이 28.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2층 사무실이 14.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2층에 위치한 사무실보다 1층 사무실에서 농도가 높게 나타났으나 그 차이가 통계적으로 유의하지는 않았다.

6) 사무실 환기방법에 따른 공기 중 농도

Table 9는 사무실 내 환기방법에 따른 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도로 미환기 14.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 출입문 개방 24.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 창문환기 101.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 미환기 < 출입문개방 < 창문환기 순으로 농도가 높게 나타났으며 이는 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.01$).

7) 사무실 흡연여부에 따른 공기 중 농도

사무실 내 흡연여부를 구분하였을 때 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도는 흡연 사무실(24.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 흡연을 하지 않는 사무실(21.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 농도가

Table 8. Airborne PM_{2.5} concentrations by office floor(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Classification	N	GM(GSD)	Mean \pm S.D.	Min	Max	p-value
1st floor	14	28.53(2.50)	40.24 \pm 33.43	4.44	124.94	0.248
2nd floor	6	14.87(3.11)	25.40 \pm 29.47	4.55	81.72	

Table 9. Airborne PM_{2.5} concentrations in office by ventilation method(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Classification	N	GM(GSD)	Mean \pm S.D.	Min	Max	p-value
Not Ventilation	7	14.24(1.91)	16.91 \pm 10.92	4.93	38.59	0.001
Door ventilation	11	24.73(2.79)	35.52 \pm 25.57	4.44	78.05	
Window ventilation	2	101.02(1.35)	103.30 \pm 30.55	81.72	124.94	

Table 10. Airborne PM_{2.5} concentrations by smoking status

(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Classification	N	GM(GSD)	Mean \pm S.D.	Min	Max	p-value
Smoking	12	24.83(3.03)	40.08 \pm 37.14	4.44	124.94	0.758
Non-smoking	8	21.55(2.44)	29.35 \pm 24.13	4.55	81.72	

Table 11. Airborne PM_{2.5} concentrations by office sanitation

(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Classification		N	GM(GSD)	Mean \pm S.D.	Min	Max	p-value
Uniform	Yes	4	10.73(2.16)	13.65 \pm 11.76	4.93	31.01	0.089
	No	16	28.54(2.66)	41.32 \pm 33.60	4.444	124.94	
Slipper	Yes	8	13.37(2.66)	21.46 \pm 25.40	4.55	78.05	0.064
	No	12	34.14(2.38)	45.33 \pm 33.77	4.444	124.94	

높게 나타났으나 통계적 유의성은 없었다(Table 10).

8) 사무실 위생특성 따른 공기 중 농도

사무실 전용의 근무복을 착용하는 사무실의 공기

중 PM_{2.5}의 기하평균의 농도는 10.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미착용 사무실 28.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 근무복 미착용 사무실에서 농도가 높게 나타났고, 전용 실내화 착용여부에 따라 구분하였을 때 기하평균 농도는 착용 사무실이 13.37

Table 12. Factors affecting airborne PM_{2.5} concentration

Dependent variable	Independent variable	β	t-value	p-value	Model R-square
Airborne PM _{2.5} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temperature	0.199	1.481	0.158	0.638
	Relative humidity	-0.142	-0.925	0.369	
	CO ₂	-0.236	-1.672	0.114	
	Size of office space(m^2)				
	$\text{m}^2 < 100$	0.146	0.758	0.459	
	$100 \leq \text{m}^2 < 200$	0.089	0.590	0.564	
	$\text{m}^2 \geq 200$		Reference group		
	Office location				
	In the workplace	0.165	1.192	0.251	
	Out of the workplace		Reference group		
	Surrounding environment				
	Industrial Area	0.025	0.174	0.864	
	Non industrial area		Reference group		
	Office floor				
	1st floor	0.189	1.249	0.230	
	2nd floor		Reference group		
	Ventilation method				
	No ventilation	-0.138	-0.886	0.389	
	Window ventilation	0.636	4.519	0.001	
	Door ventilation		Reference group		
	Smoking status				
	Smoking	-0.023	-0.155	0.879	
	Non-Smoking		Reference group		
	Uniform				
	Yes	-0.140	-0.962	0.350	
	No		Reference group		
	Slipper				
	Yes	-0.114	-0.768	0.454	
	No		Reference group		

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미착용 사무실 $34.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 미착용 사무실에서 농도가 높게 나타났으나 통계적 유의성은 없었다(Table 11).

3. 공기중 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 영향을 미치는 요인

사무실 내 공기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 각 특성 변수인 온도, 습도, CO_2 , 사무실 크기, 위치, 주변특성, 층수, 환기방법, 흡연여부, 유니폼 및 실내화 착용여부의 각 변수를 독립변수로, $\text{PM}_{2.5}$ 를 종속변수로 설정하여 다중회귀 분석을 실시하였으며 명목형 변수의 경우 더미변수로 변환하여 분석하였다(Table 12). 그 결과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 영향을 미치는 주요인으로는 환기방법이었고, 출입문 환기방법에 비해 창문환기가 농도에 더 영향을 주는 것으로 나타났다($p < 0.01$).

IV. 고 찰

실내공기의 오염물질 농도는 실내 체적, 실내에서 발생하는 오염물질의 양, 반응 또는 침강 등을 통한 제거 정도, 실외공기와 희석, 실외공기의 오염농도에 따라 좌우되며(Maroni et al., 1995), 실내에 체류하는 사람들 개개인의 활동패턴 및 행동특성에 의해 강한 영향을 받기 때문에 어느 정도 오염물질에 노출되는지 정량하기는 쉽지 않다(Harrison, 1997). 과거에는 실내공기질을 정량적으로 측정할 수 있는 방법이 확립되지 않았지만, 주요 선진국에서는 실내공기 오염물질에 대한 측정방법을 개발함에 따라 우리나라도 환경부와 고용노동부가 시료채취 및 분석방법을 마련하였다. 고용노동부의 사무실 공기관리 지침에 의하면 미세먼지는 PM_{10} 샘플러를 장착한 고용량 시료채취기로 채취하며 분석은 중량분석을 권고하고 있으며 시료채취시간은 6시간 이상 연속측정하도록 하고 있지만 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 규정은 마련되어 있지 않다(MoEL, 2013a).

PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 는 대기오염물질의 대표적인 오염지표로 알려져 있으며 뿐만 아니라 실내공기에도 많은 영향을 주고 있다. 또한 입자 크기와 화학적 구성에 따라 물리적, 화학적 특성이 정해지고 입자의 크기가 작은 먼지일수록 인체에 미치는 독성이 강하다는 연구결과에 따라 최근 이에 관한 연구가 활발히 진행

되고 있다. 특히, 신체성장이 완전하지 않은 사람의 경우 이산화질소와 초미세먼지는 급성기관지염과 폐렴으로 병원 입원하는 횟수를 증가시키며, 먼지를 포함한 곰팡이, 진드기 등은 아토피와도 많은 연관이 있다(Barnett et al., 2005; Mendell & Health, 2005). 이러한 이유로 그동안 유치원, 초등학교, 중학교 및 고등학교를 대상으로 PM_{10} 에 대한 연구가 상당히 많이 이루어져 왔지만(Sohn et al., 2006; Roh et al., 2007; Lim et al., 2008; Son et al., 2008), $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 노출평가는 거의 없는 실정이다. 또한, 지하주차장(Park, 2010), 지하철 객차(Sohn et al., 2009) 등 다양한 실내공간에 대한 조사도 이루어졌지만 이 역시 PM_{10} 에 국한되었고 일부 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도에 대한 연구도 진행된 바 있지만 그 대상이 대기환경이었다(Jeon, 2010).

실내공간에서 발생하는 $\text{PM}_{2.5}$ 를 포함한 호흡성입자(Respirable particles)는 방향족탄화수소, 미량의 금속 등 여러 유기화합물과 무기화합물과 혼합되어 있다(Martonen et al., 1992). 특히 사무실이 사업장 내 존재하는 경우 사업장에서 발생하는 유기 또는 무기 화합물이 포함된 분진 등으로 인하여 사무실 내 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도에 영향을 줄 수 있다. 이에 본 연구는 사업장 내 사무실의 $\text{PM}_{2.5}$ 의 노출수준을 확인하고 그 농도에 영향을 미칠 수 있는 요인을 파악하고자 하였다.

그 결과 사무실 내 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도의 기하평균은 $23.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, Lee(2006)가 보고한 $79.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 수준으로 평가되었다. 이는 시료채취에 따른 채취매체나 채취시간 및 유량 등의 채취방법에 의하여 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 이 연구의 조사시점은 9월에서 11월초로 에어컨이나 온풍기의 가동이 없어 대부분 자연환기에 의존하고 있었다. 이는 조사시점의 계절적 영향에 따른 시설특성과 환기방법이 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다. $\text{PM}_{2.5}$ 에 관한 국내 연구는 거의 없는 실정으로 비교에 어려움이 있었다. 비록 연구대상은 다르지만 쿠웨이트의 거주 환경의 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 평균 $24.02 \sim 88.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구결과와 다소 유사한 수준을 보였다(Yassin et al., 2012). 한편, 사무실 공간 크기별 $\text{PM}_{2.5}$ 의 기하평균 농도는 100 m^2 미만이 $39.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $100 \sim 200 \text{ m}^2$ 미만이 $22.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 200 m^2 이상

이 11.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사무실 크기가 작을수록 농도가 높은 경향을 보였다. Mohammadyan et al.(2010)은 일반 사무실을 크기별로 구분했을 때 사무실의 PM_{2.5}의 평균 농도는 19.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 작은 크기의 사무실 농도 7.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 높게 나와 상반된 결과를 보였다. 이러한 차이는 본 연구는 사업장 내에 소재한 사무실로 그 공간이 작다는 것은 대부분 소규모 사업장에 위치하여 시설, 주변 작업환경 등이 다소 열악하여 공간이 작을수록 높게 나타난 것으로 판단된다.

사무실 건축연한에 따른 사무실 내 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도가 10년 미만은 23.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10년 이상 20년 미만은 21.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 20년 이상은 26.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 비록 입자 크기가 다른 사무실의 PM₁₀의 연구결과로 해석하면 Roh et al.(2004)은 1년 이하는 65.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1년에서 3년 사이는 48.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3년 이상은 65.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 역시 PM₁₀ 농도는 건축연한에 영향을 받지 않는 결과와 유사한 것으로 나타났다. 한편, 사무실 위치별 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도는 작업장 내 위치한 사무실이 33.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 작업장 밖에 위치한 사무실이 21.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 높게 나타났다. 실외의 입자들이 실내 PM_{2.5}의 농도에 영향을 준다는 Cao et al.(2005)의 연구결과를 감안하면 작업장에서 발생하는 분진 등의 입자가 사무실 PM_{2.5}의 농도에 다소 기여하고 있는 것으로 보인다. 또한, 사무실을 주변 환경별로 구분해보면 공단지역 내에 위치한 사무실의 PM_{2.5}의 농도(27.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 공단지역 외곽에 위치한 사무실의 농도(19.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 수준으로 조사되었다. 이는 입자의 크기는 다르지만 Jeong et al.(2007)이 수행한 공단지역 내 PM₁₀ 농도(130.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 상업지역 내 PM₁₀ 농도(87.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 다소 높다는 연구결과와 유사한 경향을 보였다. 이는 공단지역의 경우 주변에 사업장들이 밀집되어 그로 인한 유입과 주변의 교통량 등이 다소 사무실 PM_{2.5}의 농도에 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

사무실 위치를 층수별로 구분하였을 때 공기 중 PM_{2.5}의 기하평균 농도는 1층 사무실(28.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 2층 사무실(14.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 수준을 보였다. 이는 사무실의 위치를 지하 및 지상으로 구분한 Lee(2006)의 연구에서도 PM_{2.5}의 농도가 지상에 위치한 사무실이 더 높게 나타난 결과와 유사한 경향을

보였다. 이러한 결과는 1층 사무실의 경우 사업장에서 발생하는 분진 등이 유입될 확률이 높고 주변의 교통량에 따른 외부 비산먼지 등의 유입이 용이하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 사무실 내 환기방법별 PM_{2.5} 농도를 살펴보면 창문으로 환기하는 경우가 101.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 환기를 하지 않는 경우(14.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 출입문을 개방하여 환기하는 경우(24.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 상당히 높은 수준으로 나타났고 다중회귀분석결과 PM_{2.5}의 농도에 영향을 미치는 주요인으로 확인되었다. 일반적으로 실내오염물질의 농도 저감을 위해서 주기적인 환기가 요구되지만 사무실이 사업장 내에 위치한 경우 현장 또는 주변에서 발생하는 비산먼지가 창문으로 유입되어 PM_{2.5} 농도에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 보인다. 따라서 본 연구결과에서와 같이 사업장 내 사무실이 위치한 경우 전용의 근무복과 실내화를 착용하면 어느 정도 PM_{2.5}의 농도 저감 효과를 볼 수 있으며, 가급적 창문을 이용한 환기는 피하고 공기공급시스템 또는 공기청정기의 설치도 고려할 필요가 있다.

대부분 실내오염원의 주 원인으로 흡연을 들고 있으며 실내 흡연자가 있는 경우 PM_{2.5}의 농도가 25~45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가되는 것으로 알려져 있다(Wallace, 1996). 담배연기는 대부분 호흡성 입자이고(Cooper, 1980), 이러한 에어로졸은 폐에 침투되어 잔류하기에 충분한 작은 크기이며 보통 그 크기는 6~7 μm 또는 그 이하의 직경이 대부분이다(Martonen et al., 1992). 본 연구결과 흡연 사무실의 PM_{2.5}의 기하평균 농도는 24.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비흡연 사무실이 21.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어 큰 차이를 보이지는 않았다. 비록 연구의 대상은 다르지만 Mohammadyan et al.(2010)은 카페의 흡연구역이 비흡연구역에 비해 약 3배 이상의 PM_{2.5}의 농도 차이를 보고하였고 국내 Hwang et al.(1999)의 연구는 입자크기는 다르지만 흡연사무실의 PM₁₀ 농도(55.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 비흡연 사무실(7.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 역시 높은 결과를 보고하였다. 이는 사무실 내에서 흡연을 하는 경우 담배연기와 그 부산물 등이 PM_{2.5} 농도에 영향을 주는 것으로 판단되며, 쾌적한 실내환경을 위해서는 사무실 내 금연은 필수적인 것으로 생각된다.

이번 연구는 경상도 지역에 소재한 사무실 20개소로 한정되어 우리나라 사업장 내 사무실의 PM_{2.5}의

농도를 대표하기에는 다소 무리가 있다. 또한 시료의 채취기간이 짧았고 단기간 이루어짐에 따라 계절적인 영향이 고려되지 못했다는 제한점은 있다.

세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 24시간 $PM_{2.5}$ 농도의 기준을 $25 \mu g/m^3$ 로 권고하고 있으며(Branis et al., 2009), 유럽연합의 실내공기질기준(Air quality standards)은 1년 평균 농도를 역시 $25 \mu g/m^3$ 로 규정하고 있다(EC, 2013). 본 연구결과와 $PM_{2.5}$ 평균농도를 유럽연합의 실내공기질기준과 비교해보면 사무실이 1층에 있고 그 공간이 $100 m^3$ 이하, 건축년한 20년 이상, 사업장 또는 공단지역 내 사무실이 위치하고 창문으로 환기하며 전용의 근무복과 실내화 착용하지 않는 사무실은 모두 기준을 초과하고 있었다. 따라서 우리나라도 사무실 근로자의 건강 보호를 위하여 선진외국과 같이 $PM_{2.5}$ 에 대한 권고기준 등을 마련하는 것도 고려할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 2012년 9월부터 2012년 11월까지 경상도 지역에 소재한 사업장 내 사무실 20개소를 대상으로 공기 중 $PM_{2.5}$ 의 농도를 파악하고, 그 농도에 영향을 미치는 요인을 규명하고자 하였다. 그 결과 사무실 내 공기 중 $PM_{2.5}$ 의 기하평균 농도는 $23.47 \mu g/m^3$ 이었고 사무실을 공간으로 구분했을 때 크기가 작을수록 농도가 높게 나타났다. 또한, 사업장 내에 위치한 사무실의 $PM_{2.5}$ 의 농도가 사업장 밖에 위치한 사무실보다 높았고, 1층에 위치한 사무실의 농도가 2층 보다 높은 경향을 보였다. 한편, 환기의 경우 창문환기의 $PM_{2.5}$ 농도가 출입문을 이용하거나 환기를 하지 않는 경우에 비해 높게 나타났고, 사무실 내 흡연을 하는 경우 농도가 비흡연 사무실에 비해 높은 수준이었다.

따라서, 사무실 공간 크기가 작고 1층에 위치한 사무실인 경우 $PM_{2.5}$ 의 농도가 높게 나타나 이러한 사무실은 농도 저감을 위한 노력이 필요하다. 또한, 창문으로 환기하는 경우 작업장 또는 외부 비산먼지에 영향이 있는 것으로 보이며, 사무실이 사업장 내에 위치한 경우 $PM_{2.5}$ 의 농도가 높은 수준으로 나타나 공기정화기 설치 및 습식환경 유지가 요구된다. 한편, 사무실 전용의 작업복과 슬리퍼를 착용하는 곳의

농도가 낮았고 사무실 내에서 흡연을 하는 경우 비흡연 사무실 보다 $PM_{2.5}$ 의 농도가 높게 평가되어 쾌적한 실내환경을 위해서는 전용 근무복과 실내화 착용이 권장되고 사무실에서 금연은 필수적인 것으로 생각된다.

References

- Barnett, A.G., Williams, G.M, Schwartz J. Air pollution and child respiratory health: a case-crossover study in Australia and New Zealand. *Am J of Resp Crit Care Med* 2005;171:1271-1278
- Berglund B, Brunekreef B, Knoppel H, Lindvall T, Maroni M, Mølhave L, Skov P. Effects of indoor air pollution on human health. *Indoor Air* 1992;2(1):2-25
- Branis M, Jiri Safranek, Ade'la Hytychova. Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. *Building and Environ* 2009;44:1246-1246
- Cao JJ, Lee SC, Chow JC, Cheng Y, Ho KF, Fung K, Liu SX, Watson JG. Indoor/outdoor relationships for $PM_{2.5}$ and associated carbonaceous pollutants at residential homes in Hong Kong. *Indoor Air* 2005;15:197-204
- Choi SJ. The Effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of size-selective particulate in classrooms. *J Env Hlth Sci* 2008;34(2):137-147
- Choi TJ. The effect on outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of size-selective particulate in classrooms. *J of Environ Heal Sci* 2008;34(2):137-147
- Cooper JA, Environmental impact of residential wood combustion emissions and its implications. *J of Air Pollution Control Assoc* 1980;30:855-861
- European Commission. Air quality standards. Retrieved Dec. 10, 2013. Available from <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
- Gemenetis P, Moussas P, Arditoglou A, Samara C. Mass concentration and elemental composition of indoor $PM_{2.5}$ and PM_{10} in University rooms in Thessaloniki, northern Greece, *Atmos Environ* 2006;40:3195-3206
- Harrison PTC. Health impact of indoor air pollution. *Chemistry and industry* 1997;17:671-87
- Hwang SM, Shin JH, Jeong JU, Park SG, Baek SO. Comparison of Indoor Air Quality in Offices by

- Smoking Status. Proceedings of Korean Society for Atmospheric Environment, Gangreong, Gang-Won. 1999. p. 107
- Jeong JY, Lee BK, Phee YG. Assessment of Indoor Air Quality in Commercial Office Buildings. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2007;17(1):31-42
- Jeon BH, Hwang YK, Kim HA, Lee SH, Ahn KD, Heo Y. Indoor air concentration of particulate matter and endotoxin in public facilities. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2008;18(4):262-270
- Jeon BI. Characteristics of spacio-temporal variation for PM₁₀ and PM_{2.5} concentration in Busan. J of Environ Sci 2010;19(8):1013-1023
- Jones AP. Indoor air quality and health. Atmos Environ 1999;33(28):4635-4564
- Kim YS, Rho YM, Hong SC, Lee CM, Jun HY, Kim JC, Cho JH. A survey of indoor air quality in public facilities. Indoor Environ & Tech 2005;1(2):144-145
- Lawrence AJ, Masih A, Taneja A. Indoor/outdoor relationships of carbon monoxide and oxides of nitrogen in domestic homes with roadside, urban and rural locations in a central Indian region. Indoor Air 2004;15:76-82
- Lee CM, Kim YS, Roh YM, Kim JC, Jeon HJ, Lee SD. Health risk assessment of exposure to indoor air pollutants in office building. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2004;14(3):251-263
- Lee JD, Son BS, Kim YS. A study on indoor air quality in school. J of Korean Soc for Indoor Environ 2010;7(2):127-134
- Lee SC, Chang LY. Indoor air outdoor air quality investigation at school in Hong Kong. Chemosphere 2000;40:109-113
- Lee SD. A study on chemical composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in office buildings. Graduate school of health management. Seoul; Hanyang University Press; 2006. p. 30-32
- Lim YW, Lee CS, Kim HH, Yang JY, Lee GW, Sohn JR, Park JW, Shin DC. A study on the indoor air pollution in the classrooms of elementary schools in Korea. J of Korean Soc for Indoor Environ 2008; 37-49
- Luoma M, Batterman A. Characterization of particulate emissions from occupant activities in offices, Indoor air 2001;11:35-48
- Martonen TB, Katz I, Fults K, Hickey AJ. Use of analytically defined estimates of aerosol respirable fraction to predict lung deposition. Pharmaceutical Research 1992;9(12):1634-1639
- Maroni M, Seifert B, Lindvall T. Indoor air quality-a comprehensive reference book. Amesterdam: Elsevier.; 1997. p.125
- Mendell, MJ, Health GA. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. Indoor Air, 2005;15: 27-52
- Ministry of Education. School Health Act; 2013b. p.56
- Ministry of Employment and Labor. Guideline of air management in office(MoEL Public Notice No. 2012-71); 2012. p. 1-3
- Ministry of Environment. Act on indoor air quality management of multiplex use facility. 2013a. p. 32
- Mohammadyan M, Ashmore M, Shabankhani B. Indoor PM_{2.5} concentrations in the office, cafe, and home. Int J of Occup Hyg 2010;2:57-62
- Monn, C. Exposure assessment of air pollutants; a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/ personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone. Atmos Environ 2001; 35:1-32
- Monn C, Fuchs A, Hogger D, Junker M, Kogelschatz D, Roth N, Wanner H-U. Particulate matter less than 10 µm(PM₁₀) and fine particles less than 2.5 µm(PM_{2.5}); relationships between indoor, outdoor and personal concentrations. Sci of the Total Environ 1997; 208:15-21
- Mosqueron L, Momas I, Moullec YL. Personal exposure of Paris office workers to nitrogen dioxide and fine particles. Occup Environ Med 2002;59:550-555
- Park JH. The effect of ventilation and concentration of indoor air quality at indoor parking lots. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2010;20(4):241-247
- Roh YM, Lee CM, Kim SW, Kim CN, Kim HW, Cho KH, Choi HC, Kang SH, Kim JM. A study on the characteristics of indoor air quality in office and subjective symptoms of office workers. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2004;14(3):270-282
- Roh YM, Kim JC, Lee CM, Kim YS, Ha MN, Kwon HJ. A survey of distribution for indoor air pollutants in classrooms of some elementary schools. J of Korean Soc for Indoor Environ 2007;4(4):204-213
- Schwartz J, Norris G, Larson T, Sheppard L, Claiborne C, Koenig J. Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increase mortality. Environ Health Perspect 1999;107 :339-342
- Seo BR, Jeong MH, Jeon JM. Indoor air quality in various type of public facilities at honam province. Kor J Env Hlth, 2006;32(5):387-397
- Shendrikar AD, Steinmetz WK. Intergrating nephelometer

- measurements for the airborne fine particulate matter(PM_{2.5}) mass concentrations. Atmos Environ 2003;37:1383-1392
- Son BS, Song MR, Kim JD, Cho TJ, Yang W, Chung TW. The study on concentration of PM₁₀ and heavy metal in public schools at Chung-Nam area. J of Environ Sci 2008;17(9):1005-1013
- Sohn H, Ryu K, Im JK, Jang K, Lee K. PM₁₀ and CO₂ Concentrations in the Seoul Subway Carriage. J Env Hlth Sci 2009;35(6):454-460
- Sohn JR, Yoon SW, Kim YS, Roh YM, Lee CM, Son BS, Yang WH. A Survey on the indoor air quality of some school classrooms in Korea. J of Korean Soc for Indoor Environ 2006; 3(1): 54-63
- Wallace L. Indoor particles: a review. J Air & Waste Manage Assoc 1996;46:98-126
- Yassin MF, Bothaina EY, AlThaqeb, Eman AE, Al-Mutirid. Assessment of indoor PM_{2.5} in different residential environments. Atmos Environ 2012;56: 65-68
- Yurtseven E, Erdogan MS, Ulus T, Sahin UA, Onat B, Ergin E, Vehid S, Koksall S. An assessment of indoor PM_{2.5} concentrations at a medical faculty in Istanbul, Turkey. Environ Protection Engineering 2012;38(1) :115-127