한국산업위생학회지 제18권 제4호(2008년 12월)
J Korean Soc Occup Environ Hyg 2008;18(4):262-270

서울 · 경기 일부지역 다중이용시설실내공기 중 미세먼지와 미세먼지 중 내독소의 농도

전병학[1] · 황유경[1] · 김형아[1†] · 이세훈[1] · 안규동[2] · 허용[3]

[1]가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실 · [2]순천향대학교 의과대학 예방의학교실
[3]대구가톨릭대학교 자연대학 산업보건학과

Indoor Air Concentration of Particulate Matter and Endotoxin in Public Facilities

Byung-Hak Jeon[1] · Yu-Kyung Hwang[1] · Hyoung-Ah Kim[1‡] · Se-Hoon Lee[1] · Kyu-Dong Ahn2 · Yong Heo[3]

[1]The Catholic University of Korea, Dept. of Prev. Med, Seoul, Korea
[2]Soonchunhyang University, Dept. of Prev. Med, Chungnam, Korea
[3]Catholic University of Daegu, Dept. of Occupational Health, Kyongbuk, Korea

This study was conducted to measure concentrations of particulate matter (PM_{10}, $PM_{2.5}$) and endotoxin in thirty public facilities (7 elderly-care facilities, 4 hypermarkets, 4 university hospitals, 7 child-care facilities, 4 subway stations and 4 bus terminals) from September 2004 to February 2007 in Seoul and Gyeonggi-do province.

PM_{10} or $PM_{2.5}$ was measured with glass fiber filter and mini volume air sampler for 6 to 8 hours in indoor and outdoor of the facilities and expressed as μg/m^3. After weighing the filter, endotoxin was analyzed by Limulus Ameobocyte Lysate method (EU/m^3).

PM_{10} in indoor air was higher (GM and GSD was 78.00 and 1.92 μg/m^3, respectively) than the outdoor air (GM and GSD was 60.70 and 2.23 μg/m^3, respectively, I/O=1.28). All measurements was not exceeded the national maintenance standard. Elderly-care and child-care facilities showed relatively higher concentrations (83.27 μg/m^3 and 81.75μg/m^3; I/O=2.01 and 1.19, respectively) than hypermarkets or university hospitals. The highest $PM_{2.5}$ was seen in child-care facilities (62.15 μg/m^3, I/O=2.42). The I/O of the endotoxin in the PM10 and the $PM_{2.5}$ was exceeded 1.0 (1.37 and 1.57, respectively). Indoor PM_{10} was affected by user/day and humidity, and endotoxin in the PM10 was affected by temperature.

In conclusion, elderly- and child-care facilities are high priority facilities to be improved indoor air quality.

Key Words : Indoor air, Public facilities, Particulate matter, Endotoxin

Ⅰ. 서 론

정보화 시대에 이르러 인간의 활동반경이 밀폐된 공간으로 집중되면서 대부분의 사람들이 하루 24 시간 중 90 %이상을 가정, 일반사무실, 지하시설물, 상가, 음식점, 자동차, 지하철 등의 실내에서 생활하고 있다(EPA, 1987). 이러한 오염물

접수일 : 2008년 7월 29일, 채택일 : 2008년 10월 24일
‡ 교신저자 : 김형아 (서울시 서초구 반포동 505 가톨릭의대 예방의학교실,
Tel: 02-590-1241, Fax: 02-532-3820, E-mail: kimha@catholic.ac.kr)
본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01 - 2004 - 000 - 10427 - 1)지원으로 수행되었음.

질들은 거주자의 오감과 신체를 자극하게 되는데, 인간의 신체감각은 독성 감지보다는 쾌적성 감지가 더 쉽고 따라서 실내공기질 (Indoor Air Quality, IAQ)은 인간의 건강 · 쾌적성과 밀접한 관계를 가지며 개인의 공기 오염물질 노출에 주요한 요인이 될 수 있다 (Spengler & Sexton, 1983). 실내공기는 오염된 외부공기의 유입과 실내 오염원, 흡연, 실내 서식 미생물 등에 의하여 외부 공기에 비해 오염도가 점점 높아지고 있으며, 밀폐된 실내공간에서 실내오염원과 인간활동 등으로부터 발생하는 오염물질의 수준은 일반적으로 실외에 비해 2 5배 높으며, 때로는 100배 이상 될 수 있다 (EPA, 1987). 실내에 존재하는 오염원 또는 오염물질의 종류도 지속적으로 증가됨에 따라 재실자의 건강상 많은 영향을 초래 할 수 있기 때문에 대기환경과 더불어 중요하게 거론되고 있다(Kelly et al., 1999; Kim & Kim, 2005).

실내 오염물질 중 부유분진(suspended particulate matters)은 공기 중 부유하는 미세한 고체, 액체상 입자이며, 오랜 기간 대기 중에 체류한다. 보통 공기역학적 입경이 10 ㎛ 보다 큰 입자상 물질은 구강이나 코에서 대부분 걸러지지만, 이보다 작은 입자상 물질(미세먼지, 이하 PM_{10})은 기관지나 폐에 침투할 수 있고, 총부유분진에 비해 표면적이 상대적으로 크기 때문에 유해성 금속이나 가스 상 오염물질의 흡착이 용이하다.

환경부에서는 다중이용시설 및 신축공동주택의 실내공기질을 적정하게 관리하여 국민의 건강을 보호하고 환경 상 위해를 예방하기 위해『다중이용시설등의실내공기질관리법』을 2003년 5월에 제정, 2004년 5월부터 시행하고 있으며, 동법에는 일정규모 이상의 병원, 영유아보육시설, 노인복지시설, 산후조리원 등에 대해 PM_{10}은 100 ㎍/㎥, 지하역사 철도역사 등에 대해서는 150 ㎍/㎥으로 구분하여 유지기준을 다르게 설정하여 관리하고 있다 (환경부, 2004a). PM_{10}과 아울러 최근 $PM_{2.5}$의 위해성이 부각되면서 영국의 대기질 전문가회의에서는 대기 중 $PM_{2.5}$의 권고치를 24시간 평균 50 ㎍/㎥로 정하였고 (Battarbee et al., 1997), 1997년에 미국은 PM2.5의 24시간 평균 65 ㎍/㎥, 연평균 15 ㎍/㎥를 설정하여 미연방 대기질 기준 (National Ambient Ait Quality Standard, NAAQS)을 더욱 강화하였으나, 실내공기에 대한 규제기준은 없는 상태이다.

미국 산업안전보건연구원 (National Institute for Occupation Safety and Health, NIOSH)에서 1971~1988년 실내오염물질에 대한 500편 이상의 연구를 분석한 결과, 생물학적 오염원이 원인이 되는 비율을 5 %로 보고하였으나, 1990년대에 들어서 실내공기오염의 1차적 원인물질로 생물학적 요인이 차지하는 비율이 35~50 %정도 증가되었다 (Seitz, 1989). 건축디자인의 변화, 가정 및 실내 작업장에서 합성물질의 사용증가로 야기되는 빌딩증후군 (Sick Building Syndrome, SBS)의 (Wood, 1991) 주요원인으로 바이오에어로졸이 40 %의 역할을 하며, 이 중 부유세균은 humidifier fever, 천식 등과 관련성이 있어 실내공기질의 지표중의 하나로 보고되고 있다 (Dales et al., 1991). 이렇듯, 미세먼지와 함께 실내에 부유하는 생물학적 유해 인자 중 고체 상태인 바이오에어로졸(bioaerosol)은 공기 중 2 ㎛보다 큰 입경을 가진 분자 상 물질의 약 30 %를 차지하는 것으로 알려져 있으며, 일부 바이오에어로졸의 경우 내독소, 감염성 균, 알레르겐 등 자극성 물질을 포함하고, 특히 입경이 5~10 ㎛인 바이오에어로졸은 상기도에 침착하여 비염을 유발하며 5 ㎛이하의 바이오에어로졸은 폐포를 통하여 알레르기를 유발하는 것으로 알려져 있다. 그 중 그람음성 세균으로부터 유래되는 내독소의 만성적 노출이 폐를 비롯한 호흡기기관에 영향을 미침에도 불구하고 (Donham et al., 1989; Smid et al., 1992), 내독소 측정 · 평가를 위한 시료포집과 분석방법 등이 표준화되어 있지 않아 실험실에 따라서는 수십 배까지 결과가 달라질 수 있지만, 대부분 국가에서는 작업 및 일반 환경에서 내독소 노출기준을 설정하지 않은 상태이다. ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서는 절대적인 수치가 아닌 측정농도를 실외에서 측정한 배경농도(background)와의 상대적인 RLV(relative limit value)로 평가할 것을 제안하고 있다 (ACGIH, 1999).

본 연구는 일부 다중이용시설을 대상으로 각 시설에서 주요목적으로 사용되는 실내 공기 및 대조가 되는 실외 공기 중 PM_{10}, PM_{10}중 내독소, $PM_{2.5}$ 및 $PM_{2.5}$중 내독소 농도를 측정하고, 조사 · 분석된 자료를 토대로 향후 실내공기 중 PM_{10} 및 먼지 중 내독소에 대한 관리대책을 수립하는데 기초 자료로 제공하고자 한다.

Ⅱ. 연구대상 및 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2004년 9월부터 2007년 2월까지 서울, 경기 일부 지역의 다중이용시설(노인시설, 대규모점포, 대학병원, 어린이집, 지하역사, 버스터미널)중 ‘실내공기질공정시험방법’ (환경부, 2004b)의 규정에 근거하여 해당되는 시설을 임의로 선정하여, 방문 전 전화나 공문을 통해 조사 협조의 동의를 얻은 곳을 대상으로 하였다. 노인시설 7개소 (노인요양시설, 노인전문병원, 복지관 포함), 대규모점포 4개소, 대학병원 4개소, 어린이집 7개소 (유치원, 어린이집, 보육원 포함), 지하역사 4개소 및 버스터미널 4개소 등 총 30개소에서 PM10, $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 PM2.5중 내독소 농도를 측정 · 분석하였으며,

실내는 주요목적으로 사용되는 공간, 실외는 현관 또는 대조가 되는 장소로 하였고 '실내공기질공정시험방법'(환경부, 2004b)에 준하여 수행하였다.

2. 측정 및 분석방법

1) 일반적 특성 및 PM_{10}, $PM_{2.5}$

각 시설의 대표되는 실내 · 외 지점에서 공정시험방법에서 규정하고 있는 φ47 ㎜ 유리섬유필터와 mini volume air sampler (MinVol, U.S.A)를 사용하여 5ℓ/min의 유량으로 6-8시간 동안 공기를 포집하여 시료 채취 전 · 후의 무게 차이로 중량분석법으로 평가(μg/m³)하였다. 필터는 시료 채취 전 항온 · 항습 데시케이터 내에서 24시간 이상 보관하여 항량이 되도록 하였으며, 시료 채취 후에도 항온 · 항습 데시케이터 내에서 24시간 이상 보관하는 동일한 조건에서 항량이 되도록 하였다. 온도, 습도, 및 CO_2 농도는 온습도 측정기 (IAQ-CALC, U.S.A)를 사용하여 오전, 오후 두 차례 측정한 후 평균값으로 제시하였다.

2) PM_{10} 및 $PM_{2.5}$중 내독소

무게 측정이 끝난 여지는 내독소 농도 분석을 위해 -20℃ 냉동고에 보관하였다가 Limulus Ameobocyte Lysate (LAL)법을 이용한 분석키트 (Bio Whittaker, Inc)로 측정하였다; 폴리스틸렌 관에 여지를 넣고 pH 7.2의 Pyrogen-free LAL reagent water를 5 mℓ씩 넣고 흔들어 섞은 후, 350 rpm으로 원심분리시킨다. 그 후 관의 상층액 100 μℓ를 microplate에 넣고 37℃에서 30분간 배양시킨 후 Amebocyte 100 μℓ를 분주하여 2 3분간 흔든 후 LAL Reader를 이용해서 405 nm에서 흡광도를 측정하였다. PM_{10}과 $PM_{2.5}$중 각 내독소 농도는 EU/m³과 EU/dust μg 으로 나타내었다.

3. 통계처리

SPSS(Ver 12.0)를 이용하여 일반적 특성은 평균과 표준편차로, 기타 측정농도는 기하평균(Geometric Mean, GM), 기하표준편차(Geometric standard deviation, GSD)로 나타내었다. PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$중 내독소의 상관관계, 시설군간 실내농도의 차이, 일반적인 변수의 영향 등은 ANOVA, t-검정, 및 다중선형회귀를 이용하였다. PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 전체시료 (N=149) 중 측정 전 · 후 여지의 무게 차이가 없거나 검출이 되지 않았던 시료 (ND, not detected)는 통계처리에서 제외하였다.

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

1. 일반적 특성

시설의 종류에 따라 6개 시설군으로 구분한 대상시설의 일

Table 1. General characteristics of the study facilities (N=30)

Group	N	Age of facility (year)	User/day (person)	Temp (℃)	Humidity (%)	CO_2 (ppm)	Air velocity (m/s)
Elderly care facility	7	6.6±7.5	352.1±285.6	352.1±285.6	41.1±16.2	916.1±352.7	0.0±0.0
Hypermarket	4	3.5±0.5	5750.0±327.9	22.7±1.2	23.3±5.0	1114.6±67.8	0.0±0.0
University hospital	4	16.6±5.4	1750.0±482.2	22.5±0.8	24.6±6.6	1750.0±482.2	0.0±0.0
Child care facility	7	13.4±7.8	167.3±113.0	22.8±2.5	46.0±5.6	881.4±248.6	0.0±0.0
Subway station	4	24.0±4.2	82050.0±7138.1	16.6±1.1	22.5±4.2	1291.0±61.8	0.1±0.1
Bus terminal	4	13.5±8.6	7600.0±7480.3	7.0±0.9	47.4±19.4	1260.8±61.8	0.2±0.1
Mean±SD	30	12.4±9.1	13524.5±27368.1	19.8±5.8	35.6±14.5	1120.7±563.4	0.1±0.07

반적 특성은 표 1과 같다. 시설은 준공 후 평균 12.4±9.1년이 경과되었고, 평균 일일이용자수는 13524.5±27368.1명으로 어린이집과 노인시설의 하루 평균이용자는 167.3 352.1명으로 시설군의 특성에 따라 하루 이용자 수가 크게 다름을 알 수 있다. 지하역사의 경우 일일평균 이용객 82050.0±7138.1명으로 유동인구가 많았으며, 개통이후 25년 이상인 지하역사가 포함되었다. 측정일의 평균 실내온도는 19.8±5.8 ℃, 습도는 35.6±14.5 %, CO_2의 농도는 1120.7±563.4 ppm이었으며 기류는 평균 0.1±0.07 m/s로 실내공기질 측정조건을 만족하였다.

2. PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도

Table 2는 실내 및 실외의 PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{10}, 및 $PM_{2.5}$중 내독소 농도와 I/O 비를 나타낸 것이다. 실내 PM_{10} 농도는 78.00 μg/m³, 실외 농도는 60.70 μg/m³이었으며 (I/O=1.28) 실내농도가 실외농도 보다 높았다. 시설군별로는 지하역사의 경우 실내농도 106.04 μg/m³, 실외농도 54.98 μg/m³ (I/O=1.93)로 유지기준 (150 μg/m³)보다 낮았으나, 다른 시설군에 비해 높았고, 노인시설과 어린이집의 실내농도는 각각 83.27 μg/m³ (I/O=2.01), 81.75 μg/m³ (I/O=1.19)로 역시 유지기준 (100 μg/m³)을 초과하지는 않았지만, 노인시설의 경우 실내농도가 실외농도에 비해 2배 높았다. 대규모 점포 (53.63 μg/m³)와 터미널 (98.25 μg/m³)의 실내농도 역시 유지기준을 초과 하지 않았으며 I/O는 각각 0.75 및 1.00으로 실내농도가 낮거나 같았다. 실내공기 중 PM10은 시설군 간 유의한 차이가 없었다 (p=0.38).

$PM_{2.5}$의 경우, 실내농도는 38.95 μg/m³, 실외농도는 50.70 μg/m³로 실내농도가 실외농도 보다 낮았다. 지하역사의 실내농도가 65.69 μg/m³로 가장 높았고, 어린이집 62.15 μg/m³, 노인시설 39.75 μg/m³ 순이었다. 실내 · 외 농도비 (I/O)는 어린이집이 I/O=2.42로 $PM_{2.5}$의 실내농도가 실외에 비해 2배 이상 높았고, 노인시설 I/O=0.91, 지하역사 I/O=0.71 순이었으나 시설군 간 유의한 차이는 없었다 (p=0.12).

Fig 1은 각 시설군에서 측정된 실내공기 중 PM_{10} (a) 및 $PM_{2.5}$ (b)의 최대값, 최소값, 중앙값, 제1분위수, 제3사분위수를 사용하여 측정값의 분포특성을 나타낸 것으로 PM_{10}은 지하역사의 측정값의 범위가 가장 넓었고, 대학병원 경우 3.00~5.00 μg/m³ 사이에 분포하였으며, 노인시설을 제외한 시설군에서 중앙값 이하에 집중되는 경향이 있음을 알 수 있었다. $PM_{2.5}$는 어린이집에서 측정된 값의 범위가 넓었으며, 대학병원, 버스터미널, 대규모점포 등에서 중앙값 농도 이상에 집중되는 분포의 특성을 보였다.

현재 우리나라는 $PM_{2.5}$에 대한 실내 유지기준 또는 권고기준이 정해져 있지 않다. EPA에서는 대기 중 $PM_{2.5}$에 대한 기준을 24시간 35 μg/m³으로 설정하고 있으나, 역시 실내 기준은 설정되어 있지 않다. $PM_{2.5}$는 표면에 부착된 화학물질을 폐 깊숙이 운반하는 역할을 하며 (Tokiwa et al., 1998) 외기 중 10 μg/m³의 $PM_{2.5}$가 증가하면 심폐 질환으로 인한 사망률이 6 %, 폐암으로 인한 사망률이 8 % 증가하는 것이 증명되었다 (Pope et al., 2002). 본 연구에서 측정된 실외 $PM_{2.5}$는 일반대기 중 $PM_{2.5}$가 아닌 주요 사용목적 (실내) 이외의 공간으로, 엄밀하게는 외기(대기)가 아니며 또한 24시간 측정값이 아니기

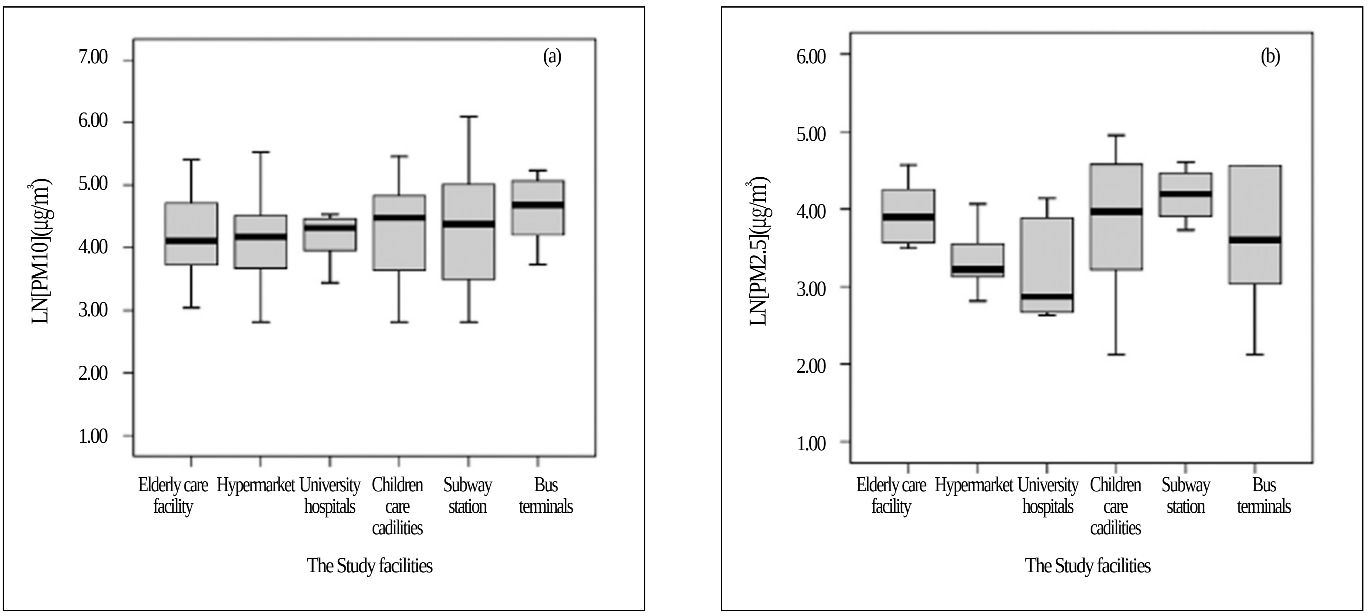


Fig 1. Distribution of PM_{10} (a) and $PM_{2.5}$ (b) in the facilities.

Table 2. Concentrations of PM_{10}, $PM_{2.5}$, endotoxin in PM_{10} and endotoxin in $PM_{2.5}$

		Indoor						Outdoor						I / O					
		PM_{10} (μg/m³)	Endo1 (EU/m³)	Endo2 (EU/μg)	$PM_{2.5}$ (μg/m³)	Endo3 (EU/m³)	Endo4 (EU/μg)	PM_{10} (μg/m³)	Endo1 (EU/m³)	Endo2 (EU/m³)	$PM_{2.5}$ (μg/m³)	Endo3 (EU/m³)	Endo4 (EU/m³)	PM_{10} (μg/m³)	Endo1 (EU/m³)	Endo2 (EU/m³)	$PM_{2.5}$ (μg/m³)	Endo3 (EU/m³)	Endo4 (EU/m³)
Elderly care facility (7)	GM	83.27	15.39	6.83	39.75	6.49	13.60	41.43	7.94	9.60	43.30	-	-						
	GSD	1.86	3.58	3.38	2.55	4.97	4.07	2.72	3.42	2.20	1.23	-	-	2.01	1.94	0.71	0.91		
	(N)	(11)	(11)	(11)	(13)	(13)	(13)	(11)	(11)	(11)	(2)	(-)	(-)						
Hyper market (4)	GM	53.63	18.01	3.29	28.06	6.60	4.26	71.76	16.49	4.43	-	-	-						
	GSD	1.35	2.43	2.43	1.48	2.50	2.40	2.55	2.72	3.17	-	-	-	0.75	1.07	0.74			
	(N)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(-)	(-)	(-)						
University hospital (4)	GM	68.14	15.99	6.98	24.02	9.82	3.86	59.83	10.41	7.03	-	-	-						
	GSD	1.39	3.10	1.63	1.95	5.80	2.64	1.55	1.95	1.88	-	-	-	1.14	1.54	0.99			
	(N)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(-)	(-)	(-)						
Child care facility (7)	GM	81.75	15.11	6.07	62.15	7.47	10.16	68.44	10.73	8.17	25.66	5.07	5.50						
	GSD	2.02	2.16	2.02	1.79	3.64	2.33	2.13	2.86	2.51	2.79	1.61	2.84	1.19	1.41	0.74	2.42	1.47	2.01
	(N)	(12)	(12)	(12)	(10)	(10)	(10)	(12)	(12)	(12)	(4)	(4)	(4)						
Subway station (4)	GM	106.04	15.46	4.25	65.69	3.26	21.47	54.98	6.56	10.35	92.44	5.29	19.11						
	GSD	3.92	1.81	2.62	1.41	2.42	2.14	2.08	9.82	4.95	2.71	4.23	13.68	1.93	2.36	0.41	0.71	0.62	1.12
	(N)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)						
Bus terminal (4)	GM	98.25	5.26	19.36	29.47	1.19	27.85	98.68	6.39	15.41	95.83	0.58	16.57						
	GSD	1.79	2.46	1.92	2.48	2.99	1.18	1.57	1.91	2.02	-	-	-	1.00	0.82	1.26	0.34	2.05	1.68
	(N)	(7)	(7)	(7)	(3)	(3)	(3)	(4)	(4)	(4)	(1)	(1)	(1)						
Total	GM	78.00	13.57	6.50	38.95	69.17	9.01	60.70	9.87	8.00	50.70	3.93	12.87						
	GSD	1.92	2.81	2.60	2.12	4.14	3.22	2.23	2.98	2.54	2.71	3.12	7.24	1.28	1.37	0.81	0.77	1.57	0.70
	(N)	(49)	(49)	(49)	(45)	(45)	(45)	(46)	(46)	(46)	(10)	(8)	(8)						

* GM: geometric mean; GSD: geometric standard deviation; I/O: Indoor/Outdoor ratio; Endo1, Endo2: Endotoxin in PM_{10},; Endo3, Endo4:Endotoxin in $PM_{2.5}$

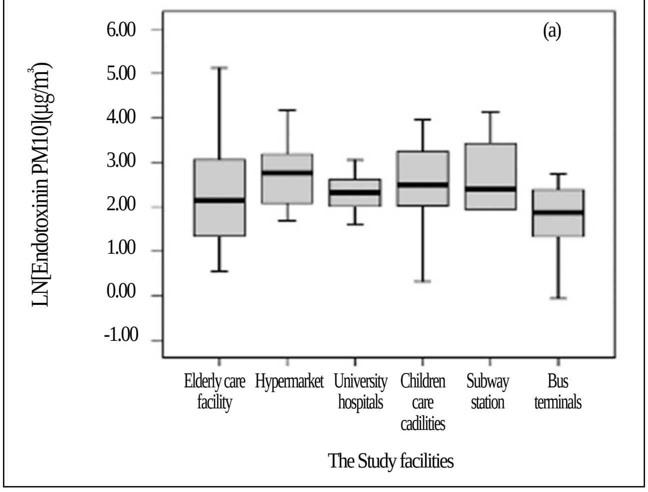
때문에 직접 비교할 수는 없으나 측정된 평균 실외 농도가 50.70 μg/m³으로 EPA 대기 중 기준보다 높음을 알 수 있었다. Abt 등 (2000)은 가정의 실내 입자상 물질 발생원 조사에서 조리, 청소, 사람들의 움직임이 가장 중요한 발생원으로 실내 농도에도 영향을 미쳤고 (I/O=2-33), 입자의 크기 분포도 변화시켰으며 조리 동안의 입자 크기는 0.02-0.5 ㎛ (물리적 직경), 청소시에는 0.7-10 ㎛ (공기역학적 직경), 그리고 사람의 움직임 때에는 3-4.3 ㎛으로 보고하였다.

PM10의 장기간 노출에 의한 건강영향에 관한 연구는 상당수 있으며 (Euler et al., 1987; Euler et al., 1988; Abbey et al., 1995), 단기간 노출에 대한 영향으로 호흡기계 증상과 질환의 발생률과 중증도, 폐 기능 검사에서의 질환 (Pope et al., 1991; Pope & Dockery., 1992), 병원 입원율 (Schwartz., 1994a; 1994b), 사망률 증가 (Dockery et al., 1992; Katsouyanni et al., 1995) 등이 연구되었다. Li (1994)는 TSP (총부유분진), PM_{10}, 및 $PM_{2.5}$의 관계를 비교한 결과 실내와 실외의 PM_{10} 농도의 20 % 및 40 %가 150 μg/m³을 초과하였으며 실내 TSP와 PM10 농도는 그에 상당하는 실외 농도와 상관이 있었고 (r=0.99) PM10과 $PM_{2.5}$ 사이에도 실내와 실외 상관이 각각 0.75 및 0.83, I/O는 0.60으로 보고한 바 있다. 본 연구에서는 TSP는 측정되지 않았으며 $PM_{2.5}$의 실내와 실외의 상관은 유의하지 않았다 (p=0.37).

실내 입자상 물질의 발생원은 재실자 (일상적인 활동을 통해서도 분진 발생), 토양, 물, 요리, 흡연, 연소기구, 건축재료, 가구, 일상 생활용품, 유지 · 보수 용품 등이다. 발생원에 따라서 뿐 만 아니라 같은 형태의 발생원일지라도 발생되는 입자상 물질의 변이는 상당히 크다. 1 ㎛이하의 입자상 물질은 주로 연소, 가스-대-입자 전환 (gas-to-particle conversion), 결정형 핵 형성과정, 또는 광화학 반응 과정으로부터 생성되며 그 보다 큰 입자들은 주로 절단, 연마, 파쇄, 물질의 마쇄 같은 기계적인 공정으로부터 생성된다. 어떤 물질은 1차 발생물질이며 어떤 것은 2차적으로 생성되기도 한다. 공기 중 입자상물질의 중요한 특성은 그 크기 분포이며 화학조성도 다르다 (Pluschke, 2004). 따라서 추후 입자상 물질의 화학적 조성 등의 특성에 따른 영향에 관한 연구가 필요할 것이다.

3. PM_{10} 및 $PM_{2.5}$중 내독소의 농도

Fig 2는 각 시설군에서 측정된 PM_{10}중 내독소 (a) 및 $PM_{2.5}$중 내독소 (b)의 최대값, 최소값, 중앙값, 제1분위수, 제3사분위수를 사용하여 나타낸 것으로 PM_{10}중 내독소는 노인시설에서 측정된 값이 가장 넓게 분포하였으며, 노인시설, 어린이집, 지하역사 등에서 중앙값 이상에 집중되는 경향을 나타냈고, $PM_{2.5}$중 내독소는 노인시설, 어린이집 등에서 중앙값 이상에 분포하는 것을 알 수 있었다. PM_{10}중 내독소의 실내농도는 13.57 EU/m³ (I/O=1.37)으로 실내농도가 실외보다 높았으며 대규모점포가 가장 높았고 (18.01 EU/m³) 터미널이 가장 낮았으며 (5.26 EU/m³) 시설군간 유의한 차이는 없었다 (p=0.24). 터미널을 제외하고 대부분의 시설군에서 실내농도가 실외에 비해 높았으며, 지하역사의 경우 실내 농도가 실외에 비해 약 2.4배 (I/O=2.36)로 가장 높았다. $PM_{2.5}$중 내독소의 평균 실내농도는 6.17 EU/m³로 역시 실내 농도가 실외 (3.93 EU/m³)보다 높았으며 (I/O=1.57) 시설군 간 유의한 차이는 없었다 (p=0.15, Table 2). PM_{10}과 PM_{10}중 내독소와의 상관과 $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5}$중 내독소와 상관은 각각 유의하였다 (r=0.49, p=0.001 및 r=0.41, p=0.01). 버스터미널에서 PM_{10}및 $PM_{2.5}$중 내독소의 농도 (EU/dust μg)는 19.36 EU/μg 및 27.85 EU/μg으로 다른 시설군에 비해 높았다. 문경환 등 (2005)은 알레르기 환자가 있는 가정의 먼지를 포집하여 내독소를 조사한 연구에



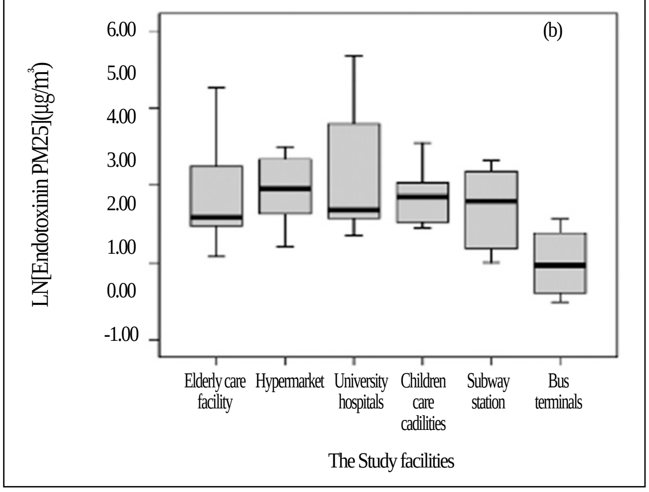


Fig 2. Distribution of endotoxin in PM_{10} (a) and endotoxin in $PM_{2.5}$ (b).

서 평균 3576~7455 EU/g 내독소가 검출되었다고 보고하였으며, Osman 등 (2007)은 만성폐질환 환자 가정의 실내공기를 측정한 결과 내독소 노출과 건강상태와의 관련은 없다고 하였으나, 평균 95.8 EU/dust mg 내독소가 검출되었다고 보고한 바 있다.

내독소는 그람음성 세균의 외벽세포의 lipopolysaccharide (LPS)-protein complex로 양친매성(amphiphilic)의 열에 안정한 물질이다. 일반 환경 중에는 그람음성 세균이 산재하며 특히 집먼지에도 존재한다. 이 때문에 공기 중 내독소에 의한 호흡기계 노출이 생길 수 있다. 근로자를 대상으로 한 내독소 노출과 가역적이고 (천식) 만성적인 기도 폐색, 폐기능 저하와의 관련성은 이미 확인 된 바 있으며 (Burrel & Ye, 1990; Gordon et al., 1992), 감자 가공 공장에서의 연구에서는 ~50 EU/m³의 농도에서 급성 기도폐색을 관찰하였다 (Zock et al., 1998). 또한 어린이와 성인에서 실내 환경 중 내독소와 천식 악화와의 사이의 원인 관계를 제안한 연구가 있으나 (Michel et al., 1996; Park et al., 2001) 내독소 시료포집법과 정량분석법에 관한 표준절차의 부족으로 노출기준 설정 시도는 아직 많지 않다 (White, 2002).

Table 3은 시설의 준공 후 경과년수, 일일이용자 수에 따른 PM_{10}, $PM_{2.5}$,, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$중 내독소 농도를 본 것이다. 시설의 나이는 5년 이하, 6-14년, 15년 이상으로 나누어 보았을 때 시설의 나이가 증가할수록 PM_{10}이 증가하는 경향이 있었으나 유의한 차이는 없었으며, $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 중 내독소 농도는 일정한 경향이 없었고, 역시 유의한 차이는 없었다. 일일이용자 수를 1000명 이하, 1001-10000명, 및 10001명 이상으로 나누어 보았을 때 모든 항목-PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 중 내독소-에서 일일이용자 수에 따른 차이나 일정한 경향은 없었고, 10001명 이상인 경우 107.15 μg/m³으로 유지기준 (지하역사, 지하도 상가, 여객터미널의 대합실 등의 유지기준 150 μg/m³ 적용)을 초과하지는 않았지만 다른 시설군에 비해 농도가 높았다.

실내공기 중 PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$중 내독소 농도에 영향을 미치는 변수를 알아보기 위해 시설의 준공 후 경과년수, 일일이용자수, 온도, 습도를 독립변수로 다중회귀분석을 한 결과 PM_{10}에는 일일용자수와 습도가, PM_{10}중 내독소 농도에는 온도가 영향을 미치는 변수로 각각 다음의 식으로 설명되었다;

· PM_{10} (μg/m³) = 7.47 (일일이용자수) + 0.016 (습도) + 3.420 (p=0.001)

· PM_{10}중 내독소 (EU/m³) = 0.059 (온도) + 1.063 (p=0.02)

실내공기질의 악화는 재실자의 작업능률 저하와 이에 따른 생산성의 감소, 무기력 증대, 각종 질병의 근본적인 원인이 될 수 있으므로 온?습도의 조절 등을 포함한 효율적인 실

Table 3. Concentrations of PM_{10}, endotoxin in PM_{10}, $PM_{2.5}$ and endotoxin in $PM_{2.5}$ according to age of facility and user/day

		PM_{10} (μg/m³)	Endotoxin in PM_{10} (EU/m³)	PM_{25} (μg/m³)	Endotoxin in PM_{25} (EU/m³)
		GM GSD (N)	GM GSD (N)	GM GSD (N)	GM GSD (N)
Age of facility (year)	≤5	71.15 2.00(14)	20.94 3.11(10)	41.33 2.09(12)	8.03 4.38(12)
	6-14	79.15 1.72(18)	10.78 2.95(20)	35.72 2.20(17)	4.20 3.53(16)
	15≤	82.37 2.12(17)	13.76 2.45(19)	41.15 2.16(14)	7.35 4.60(17)
User/day (person)	≤1000	82.44 1.99(24)	15.24 2.77(23)	49.59 2.21(20)	6.90 4.25(23)
	1001~10000	62.12 1.42(17)	13.12 3.14(19)	27.36 1.64(16)	7.30 4.00(17)
	10001≤	107.15 2.69(8)	10.14 2.21(7)	43.81 2.4(87)	2.08 3.20(5)

내공기질 관리가 중요하다 (Huang & Haghighat, 2002).

Ⅳ. 결 론

2004년 9월부터 2007년 2월까지 서울, 경기 일부지역의 다중이용시설 (노인시설, 대규모점포, 대학병원, 어린이집, 지하역사, 버스터미널 등 30시설)을 대상으로 실내공기질 관리 대책을 수립하는데 기초자료를 제공하고자 실내 · 외 공기 중의 PM_{10}, $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 및 $PM_{2.5}$중 내독소 농도를 조사한 결과는 다음과 같다;

시설의 준공 후 경과년수는 평균 12.4±9.1년, 일일이용자수는 13524.5±27368.1명, 온도는 19.8±5.8 ℃, 습도는 35.6±14.5 %, 기류는 0.1±0.07 m/s이었다.

실내 · 외 PM_{10}은 각각 78.00 μg/m^3 및 60.70 μg/m^3 (I/O=1.28)으로 실내농도가 실외 보다 높았다. 노인시설과 어린이집의 경우 실내농도는 각각 83.27 μg/m^3 (I/O=2.01)와 81.75 μg/m^3 (I/O=1.19)으로 노인시설 경우 실내 농도가 실외 농도에 비해 2배 높았으나 유지기준을 초과하지는 않았으며 시설군간 유의한 차이는 없었다 (p=0.38). PM2.5의 실내 · 외 농도는 각각 38.95 μg/m^3 및 50.70 μg/m^3 (I/O= 0.77)이었으며 실내 · 외 농도비는 어린이집이 가장 높았다 (I/O=2.42).

실내 PM_{10}중 내독소 농도는 13.57 EU/m^3 (I/O=1.37)으로 실내농도가 실외보다 높았으며 시설군간 유의한 차이는 없었고 (p=0.24), 실내 $PM_{2.5}$중 내독소 농도는 6.17 EU/m^{3}로 역시 실내농도가 실외 (3.93 EU/m^3) 보다 높았으며 (I/O=1.57) 시설군간 유의한 차이가 없었다 (p=0.15). PM_{10}과 PM_{10}중 내독소, $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5}$중 내독소와의 상관은 각각 유의하였다. 시설의 준공 후 경과년수에 따라 실내 PM_{10}농도는 증가하는 경향을 보였으나 유의한 차이가 없었고, $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$중 내독소의 경우는 시설의 준공 후 경과년수, 일일이용자수에 따른 일정한 경향이 없었다. 실내공기 중 PM_{10} 및 PM_{10}중 내독소 농도에 영향을 미치는 변수는 각각 일일 이용자수, 습도와 온도였다.

이상의 결과, 어린이집과 노인시설의 PM_{10} 또는 $PM_{2.5}$의 실내농도가 실외농도와 비슷하거나 높아 어린이 또는 노인이 주 이용자인 시설군의 온 · 습도 조절 등을 포함한 실내공기질 관리와 개선에 대한 관심과 노력이 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

문경환, 변상훈, 최달웅, 김영환, 이장희 등. 알레르기 환자 가정에서 생물학적 유해인자에 대한 노출평가 -세균, 진균, 집먼지 진드기 알레르겐, 내독소를 대상으로. 한국환경보건학회지 2005;31(2):120-126

환경부. 다중이용시설등의 실내공기질관리법. 환경부 2004a

환경부. 실내공기질 공정시험방법. 환경부 2004b

Abbey DE, Hwang BL, Burchette RJ et al. Estimated long-term ambient concentrations of PM10 and development of respiratory symptoms in a nonsmoking population. Arch Environ Health 1995;50:139-151

Abt E, Suh HH, Allen G, Koutrakis P. Characterization of indoor particle sources: A study conducted in the metropolitan Boston area. Environ Health Perspect 2000;108:35-44

ACGIH. Bioaerosols Assessment and Control. ACGIH 1999.

Battarbee JL, Rose NL, Long X. A continuous, high resolution record of urban airborne particulates suitable for retrospective microscopical analysis. Atmospheric Environment 1997;31(2):171-181

Burrel R, Ye S-H. Toxic risks from inhalation of bacterial endotoxin. Brit J Ind Med 1990;47:688-691

Dales RE, Zwanenburg H, Burnett R, Freanklin CA. Respiratory health effects of home dampness and molds among Canadian children. Am J Epidemol 1991;134(2):196-203

Dockery DW, Schwartz J, Spengler JD. Air pollution and dairy mortality: associations with particulates and acid aerosols. Environ Res 1992;59:362-363

Donham KJ, Haglind P, Peterson Y et al. Environmental and health studies of farm workers in Swedish swine confinement buildings. Br J Ind Med 1989;46:31-37

EPA. Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) Study. EPA 600/S6-87/002 U.S. 1987

Euler GL, Abbey DE, Hodgkin IF et al. Chronic obstructive pulmonary disease symptom effects of long-term cumulative exposure to ambient levels of total suspended particulates and nitrogen dioxide in California Seventh-Day Adventist residents. Arch Environ Health 1988;43:279-285

Euler GL, Abbey DE, Magie AR et al. Chronic obstructive pulmonary disease symptom effects of long-term cumulative exposure to ambient levels of total suspended particulates and sulfur dioxide in California Seventh-Day Adventist residents. Arch Environ Health 1987;42:213-222

Gordon T, Galdanes K, Brosseau L. Comparison of sampling media for endotoxin- contaminated aerosols. Appl Occup Environ Hyg 1992;7:472-477

Huang HY, Haghighat F. Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials. Building and Environment 2002;37:1349-1360

Katsouyanni K, Zmirou D, Spix C et al. Short-term effects of air pollution on health: a European approach using epidemiological time-series data. Europ Respir 1995; 8:1030-1038

Kelly TJ, Smith DL, Satola J. Emission rates of formaldehyde from materials and consumer products found in California homes. Environ Sci Tech 1999;33:81-88

Kim S-M, Kim H-J. Comparison of formaldehyde emission from building finishing materials at various temperature in under heating system; ONDOL. Indoor Air 2005; 15:317-325

Li C-S. Relationships of indoor/outdoor inhalable and respirable particles in domestic environments. Sci Total Environ 1994;151(3):205-211

Michel O, Kips J, Duchateau J et al. Severity of asthma is related to endotoxin in house dust. Am J Respir Crit Care Med 1996;154:1641-1646

Osman LM, Douglas JG et al. Indoor air quality in homes of patients with chronic obstructive
pulmonary disease. Am J Resp Crit Care Med 2007;176(5):465-471

Park JH, Gold DR, Spigelman DL, Burge HA, Milton DK. House dust endotoxin and wheeze in the first year of life. Am J Respir Crit Care Med 2001;163:322-328

Pluschke P Ed. Indoor Air Pollution. 4 · F The Handbook of Environmental Chemistry. Springer, 2004

Pope CA, Burnett RT, Thun MJ et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. J Am Med Assoc 2002; 287(9):1132-1141

Pope CA, Dockery DW. Acute health-effects of PM10 pollution on symptomatic and asymptomatic children. Am Rev Respir Dis 1992;145:1123-1128

Pope CA, Dockery DW, Spengler JD et al. Respiratory health and PM10 pollution-a daily tome-series analysis. Am Rev Respir Dis 1991;144:668-674

Schwartz J. Air pollution and hospital admissions for the elderly in Detroit, Michigan. Am J Respir Crit Care Med 1994a;150:648-655

Schwartz J. PM10, ozone and hospital admissions for the elderly in Minneapolis-St. Paul, Minnesota. Arch Environ Health 1994b;49:366-374

Seitz, TA . NIOSH Indoor Air Quality Investigations 1971-1988. In: The Practitioners Approach to Indoor Air Quality Investigations. Proc. Indoor Air Quality International Symposium. Weedes, D.M., Gammage, R.B., eds. American Industrial Hygiene Association, Akron, Ohio. 1989:163-171

Smid T, Heederik D, Houba R et al. Dust- and endotoxin-related respiratory effects in the animal feed industry. Am Rev Respir Dis 1992;146:1474-1479

Spengler JD, Sexton K. Indoor air pollution : a public health perspective. Science 1983;221(4605):9-17

Tokiwa H, Nakanishi Y, Sera N, Hara N, Inuzuka S. Analysis of environmental carcinogens associated with the incidence of lung cancer. Toxicol Lett 1998;99(1):33-41

White EM. Environmental endotoxin measurement methods: Standardization issues. Appl Occup Environ Hyg 2002;17(9):606-609

Wood JE. An Engineering approach to controlling indoor air quality. Environ Health Perspect 1991;95:15-21

Zock JP, Hollander A, Heederik D, Douwes J. Acute lung function changes and low endotoxin exposures in the potato processing industry. Am J Ind Med 1998;33:384-391