

다중이용시설의 실내공기질 실태조사 연구

다중 이용시설에 대하여 현장 측정을 실시하여 실내 공기질에 대한 현황을 정량적으로 파악하였다.

이윤규

한국건설기술연구원 건축연구부 (yglee@kict.re.kr)

서론

국내의 경우, 2004년 5월부터 시행예정인 다중이용 시설 등의 실내공기질관리법에 따라서, 학교 등의 일부 건축물을 제외하고 신축공동주택 및 대부분의 거주용 공간에 대한 실내공기질관리법이 제정되었다.

이러한, 건축물내에는 다양한 오염원(sources)과 휘발성유기화합물(VOCs), 포름알데히드(HCHO), 라돈(Radon), 석면(Asbestos), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃), 미세먼지(PM10), 부유세균 등 유해오염물질(contaminants)이 존재하고 있다. 또한, 실내공기오염은 각 오염원에서의 유해오염물질 방산정도(emission rate)가 실내의 환경조건, 적용 건축자재의 종류 및 공법, 환기설비의 특성 및 유형 등에 따라 큰 차이를 보이고 있으므로, 이에 대한 정확한 측정방법의 정립과 그에 따른 적절한 실태조사의 실시가 필요하다.

그럼에도 불구하고 국내의 경우, 최근까지 실내공간에서 발현할 가능성이 있는 상기 유해오염물질에 대하여 통일된 공정시험방법이 제시되어 있지 않았고, 기존의 측정 및 평가방법이 대부분 고도의 전문기술과 고가의 측정장비를 요구하고 있기 때문에 이에 대한 정량적 측정 및 평가가 현실적으로 매우 어려운 실정이었다.

그러나 환경부의 지속적인 관심과 노력의 일환으로 2004년 5월중으로 실내공기질 공정시험방법이 고시될 예정으로 있어 대다수 국민들이 거주하고 생

활하는 다양한 공간들에 대한 정량적인 실내공기질 평가가 가능하게 되었다.

이에 본 연구는 실내공기질 공정시험방법의 초안¹⁾을 대표적인 다중이용시설이라고 할 수 있는 병원, 지하역사, 터미널대합실 등에 대하여 시범적용하여 실태조사를 실시하였다. 측정은 휘발성유기화합물, 포름알데히드 등 10개의 주요 오염물질을 대상으로 하였다.

다중이용시설의 정의 및 분류

국내의 경우, 다중이용을 목적으로 하는 시설 또는 건축물에 대한 규정이 정부 각 부처의 업무특성에 따라 다소 차이를 보이고 있는데, 주요 관련법규에 명시된 다중이용시설에 대한 구체적인 사항을 살펴보면 표 1과 같다.

현장측정개요

“다중이용시설 등의 실내공기질관리법”의 시행령 및 시행규칙에 포함될 실내공기질공정시험법 초안에 따른 현장측정실험을 위하여 표 2와 같은 측정대상과 장비를 이용하여 시범적용 측정을 실시하였다. 현장측정대상 다중이용시설중 지하역사의 터미널대합실은 이용자가 많은 주말에 현장측정을 실시하였다.

먼저, 현장측정대상 3곳 중에 지하역사의 경우는

1) 일부 측정법의 경우, 최종적인 실내공기질 공정시험방법과는 다소 차이가 있을 수 있음.



<표 1> 다중이용시설의 정의

관련법	명칭	내용
건축법 시행령 제5조	다중이용건축물	가. 문화 및 집회시설(전시장 및 등·식물원을 제외한다), 판매 및 영업시설, 의료시설중 종합병원 또는 숙박시설 중 관광숙박시설의 용도에 쓰이는 바닥면적의 합계가 5천제곱미터 이상인 건축물 나. 16층이상인 건축물
건설산업기본법시행령 제36조	다중이 이용하는 건축물	1. 초·중등교육법, 고등교육법 또는 사립학교법에 의한 학교 2. 학원의 설립·운영에 관한 법률에 의한 학원 3. 식품위생법에 의한 식품접객업중 유흥주점 4. 공중위생관리법에 의한 숙박시설 5. 의료법에 의한 병원(종합병원·한방병원 및 요양병원을 포함한다) 6. 관광진흥법에 의한 관광숙박시설 또는 관광객 이용시설 중 전문휴양시설·종합휴양시설 및 관광공연장
소방법시행령 제4조	다중이용업	1. 식품위생법시행령 제7조제8호의 규정에 의한 식품접객업 중 다음 각목의 1에 해당하는 것 가. 휴게음식점영업 또는 일반음식점영업으로서 영업장으로 사용하는 바닥면적의 합계가 100제곱미터(영업장이 지하층에 설치된 경우에는 66제곱미터) 이상인 것(영업장이 1층 또는 지상과 직접 면하는 층에 설치된 것으로서 출입구가 건축물 외부로 직접 연결된 경우를 제외한다) 나. 단란주점영업 또는 유흥주점영업 2. 음반·비디오물 및 게임물에 관한 법률 제2조제5호의 규정에 의한 시청제공업(비디오물 감상실업에 한한다)·게임 제공업 또는 노래연습장업 3. 제1호 및 제2호의 규정에 의한 영업에 준하는 영업으로서 화재로 인한 인명피해가 발생할 우려가 있는 영업중 행정자치부장관이 그 영업의 허가·면허 또는 등록·신고업무를 관장하는 중앙행정기관의 장과 협의하여 행정자치 부령으로 정하는 영업
다중이용시설등의 실내공기질관리법 제3조	다중이용시설	1. 지하역사(출입통로·대합실·승강장 및 환승통로와 이에 딸린 시설을 포함한다) 2. 지하도상가(지상건물에 딸린 지하층의 시설을 제외한다) 3. 여객자동차운수사업법에 의한 여객자동차터미널의 대합실 4. 항공법에 의한 공항시설중 여객터미널 5. 향안법에 의한 향안시설중 대합실 6. 도서관 및 독서진흥법에 의한 도서관 7. 박물관 및 미술관진흥법에 의한 박물관 및 미술관 8. 의료법에 의한 의료기관 9. 실내주차장 10. 철도역사의 대합실 11. 그 밖에 대통령령으로 정하는 시설

지하 1층 개찰구와 지하 2층 승강장에서 이용자의 통행이 가장 빈번한 곳을 측정위치로 선정하였다. 종합병원의 경우는 일반적으로 외래 이용자 및 보호자가 대기하는 대기실과 환자가 생활하고 있는 실제 병실을 측정 대상으로 하였다. 터미널 대합실의 승

강장은 외기에 직접 면하는 경우가 많았기 때문에 실내의 대표소와 대기실에서 측정을 실시하였다.

측정시간은 일반인들의 이용빈도가 상대적으로 높다고 판단되는 오전 9시부터 오후 6시 사이로 한정하였다.

<표 2> 측정현장, 측정법 및 측정기자재

측정법	측정장소	종합병원		지하역사		터미널 대합실	
		3층 대기실	병실	개찰구	승강장	매표소	승차장
주시형 방법	휘발성 유기화합물	고체흡착열탈착 GC/MS 분석법 (Personal Air Sampler 를 이용한 TENAX -TA tube 포집)					
	포름알데히드	2,4-DNPH 유도체화 HPLC 분석법 (Personal Air Sampler를 이용한 DNPH cartridge 포집)					
현장측정방법	CO, CO ₂	비분산적외선 분석법 (YES-205)					
	NO ₂	화학발광법 (API-200A)					
	라 돈	연속모니터측정법 (RAD7 & RADON WL METER)					
	부유세균	총돌법 (Air sampler(Merck, MAS100) 측정장비)					
	미세먼지	소용량 공기포집법 (MINIVOL U.S.A SN3136)					
	석면	위상차현미경법 / 주사전자현미경법(SEM) SEM(AIS2003)					
	포름알데히드	2,4-DNPH유도체화 분석법 6(FP-30(광도측정방식)측정장비)					

현장 측정결과

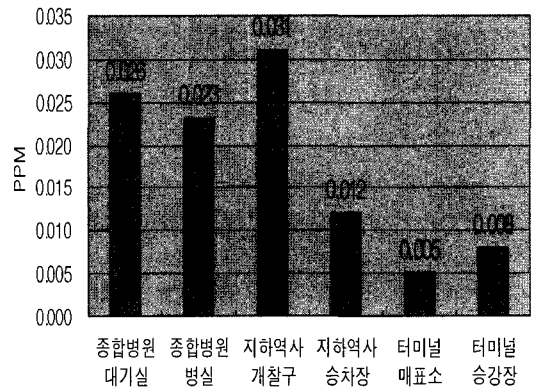
TVOC 와 포름알데히드

TENAX-TA tube 와 DNPH cartridge가 설치된 Personal Air Sampler로 공기시료를 포집하여 정밀 분석하는 방법을 적용하였다. 휘발성유기화합물과 포름알데히드는 현장측정시 현장의 온도와 습도의 변화에 따라 측정값이 영향을 받을 수 있으나, 고시 예정인 공정시험방법에서는 현장여건의 다양성과 불가피성을 반영하기 위하여 측정대상 시료물의 실제 사용목적과 방법에 따른 조건하에서 시험하도록 되어 있기 때문에 본 실험에서도 특별한 온습도 조절없이 현장조건 그대로 측정하였다.

그림 1은 포름알데히드의 현장측정결과를 나타낸 그림으로 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”의 실내공기 유지기준인 0.1ppm 이하의 양호한 측정값을 보여주고 있다. 그러나 측정현장 3곳 중에는 기준치는 만족하지만 종합병원의 수치가 상대적으로 높은 것으로 나타난 이유는 측정현장의 온, 습도 조건에 따른 것으로 사료된다. 표 3에서 보는 바와 같이 종합병원만 25℃ 이상이며 나머지 2곳은 모두 15℃ 이하의 낮은 온도조건을 보이고 있다. 다시 말하면 포름알데히드의 수치가 평균적으로 적게 나온 나머지 2곳의 농도는 다른 환경조건에 의한 영향보다 실내 온도조건에 의한 영향으로 인하여 포름알데히드의 검출

<표 3> 측정현장의 온도와 습도조건

측정대상	온도(℃)	습도(%)
종합병원 대기실	25.9	14.7
종합병원 병실	26.3	29.6
지하역사 개찰구	14.1	13.3
지하역사 승차장	12.8	14.6
터미널 매표소	14.6	35.5
터미널 대기실	14.4	37.9



[그림 1] HCHO 현장측정결과



량이 적어졌다고 판단된다.

지하역사 개찰구의 경우, 낮은 온도 조건임에도 불구하고 가장 높은 검출량을 보여줌으로 온도조건과 습도조건이 맞는 조건하에서 측정하였다면 상대적으로 다소 높은 값이 검출될 수도 있을 것으로 사료된다. 상대적으로 터미널의 경우, 건물의 구조상 외기와 접할 수 있는 여건이 많기 때문에 외기에 의한 자연환기의 영향으로 다른 2곳에 비해 상대적으로 적은 포름알데히드 검출량을 보인 것으로 판단된다.

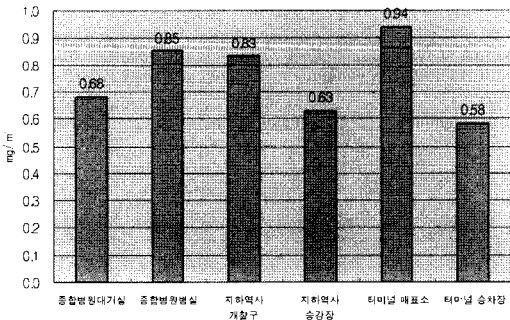
그림 2는 총 VOCs의 검출량을 그림으로 나타낸 것으로서 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”의 실내공기 유지기준인 의료기관 $400\mu\text{g}/\text{m}^3$, 지하역사, 터미널 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 값을 모두 초과하는 수치를 나타내고 있다. 온습도 조건이 차이가 나는 현장조건하에서 총 VOCs 검출값이 높게 나온 것은 현장측정 3곳 모두 실내공기 유지기준을 만족하지 못하고

있음을 나타내주고 있는 것이다. 고속터미널 승차장의 경우, 버스를 타는 곳이 외기와 접하고 있음에도 불구하고 높은 값을 보여주는 것은 상대적으로 실내공기환경의 질이 양호하지 않음을 반증하고 있다고 할 수 있다.

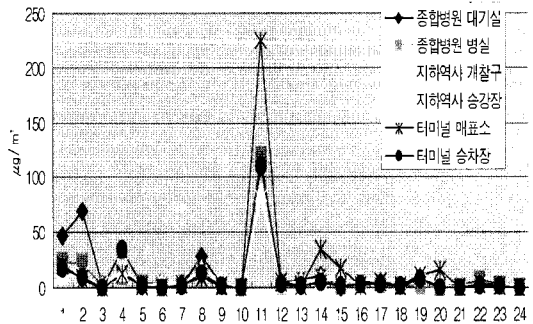
그림 3은 현장에서 측정된 VOCs를 표 4의 목록에 의거하여 각 현장의 방출량을 비교해본 것이다. 총 VOCs의 그림 2와 마찬가지로 터미널 매표소의 검출 농도가 높음을 볼 수 있는데, EPA-TO14A에서 규정하고 있는 표준가스를 이용하여 정량한 결과, 표 4의 검출대상 물질들 중에 톨루엔 등을 포함하여 약 11종의 휘발성유기화합물이 많이 나옴을 알 수 있다.

미세먼지

대기중에 부유하고 있는 입자상 물질중 미세먼지



[그림 2] 총 VOCs 현장측정결과



[그림 3] VOCs 현장측정결과

<표 4> 측정현장의 검출 VOCs 목록(표에서 unknown은 제외)

1	chloroform	13	chlorobenzene
2	1,2-dichloroethane	14	ethylbenzene
3	1,1,1-trichloroethan	15	m,p-xylene
4	benzene	16	styrene
5	carbon tetrachloride	17	o-xylene
6	1,2-dichloropropane	18	1,3,5-trimethylbenzen
7	tce	19	1,2,4-trimethylbenzen
8	cis-1,3-dichloroprop	20	m-dichlorobenzene
9	trans-1,3-dichloropr	21	p-dichlorobenzene
10	1,1,2-trichloroethan	22	o-dichlorobenzene
11	toluene	23	1,2,4-trichlorobenzene
12	pce	24	hexachlorol,3-butadiene

(PM10 : particulate matter less than 10 μ m)를 소용량 공기포집기(MINIVOL, U.S.A SN3136)를 이용하여 여과지상에 포집하는 방법으로 직경 10 μ m이하의 물질을 포집하여 질량농도를 측정하였다. 휴대용 미세 먼지 채취기의 유량은 5 l/min 로 설정하였으며 측정시간은 8시간동안 연속 측정하는 방법으로 측정하였다.

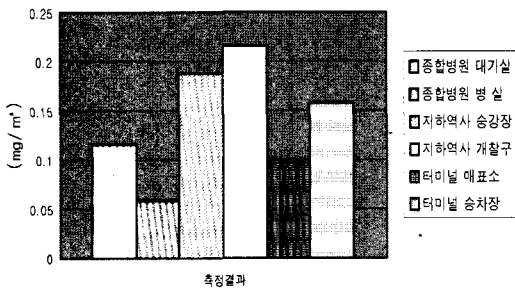
• 포집용 여과지

측정에서 사용한 여과지는 유리섬유제 여과지의 구멍크기(Pore Size)가 0.4 μ m 이하이며 직경이 47mm 인 유리섬유제 여과지를 사용하였다.

• 미세먼지 농도량 산출식

$$\frac{(\text{측정 후 무게} - \text{측정 전 무게}) \times 10^6}{\text{유량} (l / \text{min}) \times \text{기간}(\text{min})}$$

그림 4의 측정결과치를 살펴보면, 미세먼지의 경우 병원이 0.117mg/m³, 0.058mg/m³으로 가장 적은 값을 보이고 있으며 전철역의 승강장과 개찰구 (0.188mg/m³, 0.217mg/m³) 그리고 터미널(0.1mg/m³, 0.158mg/m³) 순의 결과를 보여준다. 병원의 대기실의 경우 이용자의 빈번한 왕래로 인하여 병실보다 높은 값을 보여주고 있다. 지하역사의 경우, 미세 먼지의 양이 가장 많은 것으로 나와 있는데 전동열차가 자주 왕래하는 특성상 그리고 이용자가 많은 시설의 특성상 많은 양의 먼지가 발생하는 것으로 볼 수 있는데 개찰구 보다는 승강장의 미세먼지양이 많은 것으로 나와 있다. 지하역사의 경우는 "다중이



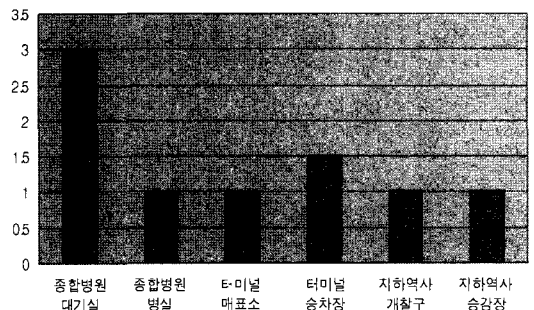
[그림 4] 미세먼지 측정결과

용시설 등의 실내공기질관리법"의 실내공기 유지기준인 150 μ g/m³을 초과하고 있으며 터미널의 경우는 승차장의 경우 유지기준을 초과하고 있음을 알 수 있다. 측정기간이 이용자가 가장 많은 토요일과 일요일이란 점을 감안하면 이용자가 적어지는 기간에는 먼지의 발생량이 감소할 것이란 예측도 할 수 있으나 유지기준을 초과하는 값을 보여줌으로 미세 먼지발생원에 대한 적절한 조치가 필요하다 하겠다.

• 이산화탄소와 일산화탄소

CO, CO₂ 는 주로 연료의 연소나 사람에 의해 주로 발생하며 실내공기오염도의 측정지표로 많이 활용되고 있다. 측정법은 비분산적외선법(NDIR)을 사용한 측정기기를 이용하여 측정하였다. "다중이용시설 등의 실내공기질관리법"의 실내공기 유지기준을 보면 CO₂의 경우 1000ppm 이하, CO의 경우 지하역사와 터미널, 의료기관의 경우 10ppm 이하, 실내주차장의 경우 25ppm 이하로 정하고 있다.

전체적인 측정결과 CO₂는 병원의 경우 실내유지기준인 1000ppm 전후의 값을 보여주고 있으며, 터미널과 지하역사의 경우보다 평균 높은 값을 보여주는데 이는 터미널의 경우, 건물의 특성상 외기에 많은 공간이 접해있으며 외기의 유입과 배기가 다양한 경로로 유입되어 오염원이 자연 배출되는 경우로 볼 수 있다. 지하철의 경우, 개찰구보다 승강장의 경우가 더 높은 평균값을 보여주는 이유도 같은 이유에서 라고 볼 수 있을 것이다. 터미널의 경우도 승차장이 매표소보다 높은 값을 보여주는 것은 승차장에서 대기하는 사람들의 영향으로 볼 수 있다. CO의 경



[그림 5] 일산화탄소 측정결과



우, 거의 모든 다중이용시설에서 매우 낮은 값을 보여주고 있으나, 병원의 경우와 터미널 승차장의 경우에서 상대적으로 높은 평균값을 보여주고 있는데 터미널 승차장의 경우 대기하는 고속버스의 배출 가스에 의한 영향이 있다고 볼 수 있겠다. 병원의 경우 오전시간대에 높다가 오후에 들어가면서 값이 적어지는 경향을 보였는데 에너지절약을 위한 고기밀 건물의 특성상, 병원에서 사용하는 장비에 의한 오염 발생문제와 병원이용자의 다소에 의한 영향으로 유추해 볼 수 있겠다(그림 5).

부유세균

총 부유세균의 경우 “다중이용시설 등의 실내공기질관련법”의 실내공기 유지기준에 의료기관과 보육시설, 노인복지시설, 학원의 경우만 800CFU/m³ 이하로 규정하고 있으며, 그 외의 시설의 경우엔 규정하지 않고 있으나 3곳의 다중이용시설의 측정 결과 일반적으로 사람의 왕래가 잦은 곳이나 지하철같이 밀폐공간에서의 부유세균의 측정은 측정결과를 살펴볼 때 어느 정도의 규제가 필요한 것으로 사료되고 있다. 병원의 경우가 가장 적은 값을 보여주고는 있으나 지하역사와 터미널의 경우 병원보다 높은 값을 보여줌으로 “다중이용시설 등의 실내공기질관련법”에 언급 안된 다중이용시설의 부유세균의 오염도가 적지 않음을 보여주고 있다. 사용된 측정장비는 air sampler (Merck, MAS100)와 삼각대와 배지가 있

으며 배지는 CASO agar(casein-peptone soymeal-peptone agar, Tryptic Soy agar)를 고압증기 멸균하여 일회용 표준 페트리디시 (87mm)에 미리 분주, 건조한 상태로 준비(Agar plate)하여 사용한다. 그 외에 준비기구로는 살균용 70% 알코올 분무기, tissue 등이 있다.

측정결과(표 5), 공공장소에서는 사람의 이동이 많은 시간대에서 세균 검출률이 높게 나타났다. 특히 많은 사람이 이동하는 지하역사의 경우 다른 공공장소에 비해 약 2~3배가 많은 세균이 검출되었다.

250L, 500L, 1000L의 포집량으로 시험을 한 결과, 소요시간과 결과의 식별 용이성을 감안하면 500L 정도의 포집량으로 시험 후 m³으로 환산하는 것이 가장 적합한 것으로 사료된다. 시간대는 인원이 붐비는 시간과 인원유동이 없는 정체된 시간에서 모두 측정해 주는 것이 좋을 것으로 생각된다.

시험자에 의한 오염을 최소화 하여야 하며, 건조 등의 직접적인 영향을 받는 곳에서는 공기의 흐름이 불규칙하여 시험 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 공기의 흐름을 대표할 수 있는 곳에 장비를 설치하는 것이 바람직하다 할 수 있겠다.

이산화질소

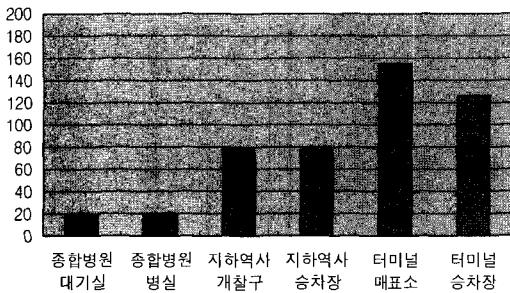
이산화질소의 경우 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”의 실내공기 권고기준에 의하면 실내주차장이 0.3ppm 이하 그 외 다중이용시설이 0.05ppm

<표 5> 부유세균 현장측정 결과

포집량	종합병원 대기실			종합병원 병실			지하역사 개찰구		
	250L	500L	1000L	250L	500L	1000L	250L	500L	1000L
9:00AM	51	143	219	64	124	209	148	243	334
1:00 PM	6	10	21	75	127	229	233	322	389
5:00 PM	16	29	58	47	91	152	181	271	365

포집량	지하역사 승강장			터미널 매표소			터미널 승차장		
	250L	500L	1000L	250L	500L	1000L	250L	500L	1000L
9:00AM	91	168	256	45	80	148	84	143	212
1:00 PM	162	241	340	73	142	234	126	226	322
5:00 PM	109	199	302	122	195	298	117	197	287

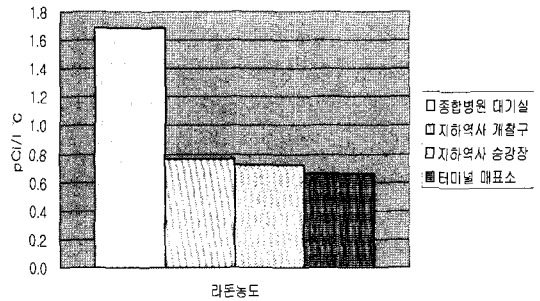
이하로 나와 있으나, 현장측정결과(그림 6) 병원을 제외한 터미널과 지하역사이 권고 기준을 넘어가는 값을 보여주고 있으며, 지하철의 경우보다는 버스의 진출입이 잦은 터미널의 경우 0.1ppm에서 0.15ppm의 높은 수치의 값을 보여주고 있다. 다시 말하면 내연기관 및 화석연료의 연소가스에 의한 오염도가 지하철의 경우와 터미널의 경우에서 높은 것으로 볼 수 있으며 터미널의 경우 많은 고속버스의 진출입으로 그에 따르는 주정차시 나오는 배기가스 등의 영향이 클 것으로 사료된다.



[그림 6] 이산화질소 측정결과

라돈

라돈의 경우 의료기관인 병원에서 가장 많이 나왔으나 그 이외의 다중이용시설에서는 적은 양이 나온 것으로 측정된다. EPA 기준인 4pCi/l와 비교해 볼 때 양호한 결과라고 할 수 있다. 라돈의 검출과 농도측정은 alpha-track detector, charcoal canister, grab sampling, continuous sampling, continuous working level monitor, radon progeny integrating sampling unit 등의 측정법이 있다. alpha-track detector는 필터 안에 라돈의 입자를 유입시켜 단위



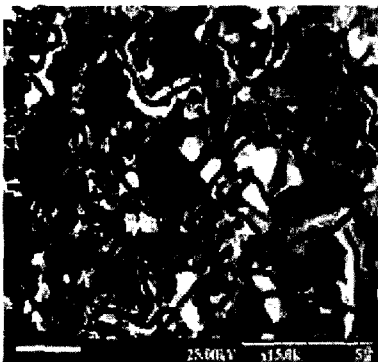
[그림 7] 라돈 측정결과

[표 6] 측정된 석면결과(SEM 결과)

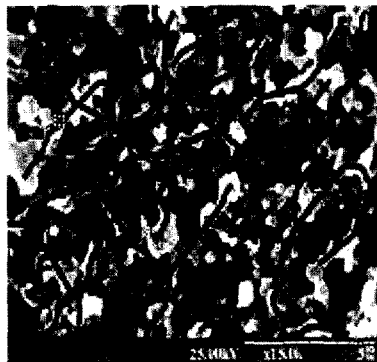
Location	석면개수	측정면적 (μm ²)
지하역사 승강장	18	145.94
터미널 승차장	14	142.52
종합병원 대기실	14	142.79

[표 7] 측정된 석면결과(위상차 현미경결과)

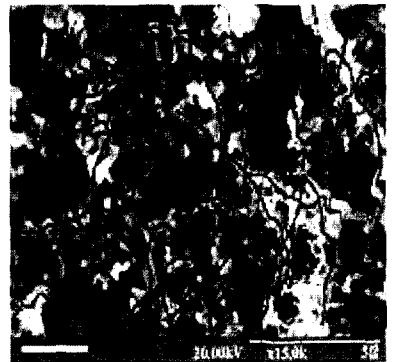
Location	공기체취량(L)	공기중 석면농도 (개/cc)
지하역사 개찰구	1200	0.017
터미널 매표소	1200	0.01
종합병원 병실	1200	0.003



(a) 지하역사 승강장



(b) 터미널 승차장



(c) 종합병원 대기실

[그림 8] 석면의 SEM 판독사진



면적당 라돈의 개수를 측정하여 농도계산을 하는 것으로 단기간측정에는 불가능하고 약 3개월 이상의 긴 시간을 요구한다. Continuous Working Level Monitor는 0.1 liter/min의 저유량으로 대기공기를 흡입하여 필터 안에 감지되는 알파 입자를 카운트함으로써 농도계산을 한다. 이 방법은 단기간 측정에도 가능하다.

석면

석면의 경우 위상차 현미경법 및 SEM의 판독결과, 모두 지하역사의 경우에서 높은 값을 보여주는 것으로

나타났다. "다중이용시설 등의 실내공기질관련법"의 실내공기 권고기준에 의하면 0.01개/cc이하의 값을 가지면 되는 것으로 되어있으나 지하역사의 경우 그보다 높은 0.017개/cc의 값을 보여주고 있으며 위상차 현미경법의 석면판독시 석면섬유 판독의 정확도가 그리 높지 않음을 고려할 때, 그 오염의 정도는 더 심할 것으로 사료된다. SEM 판독의 경우에서도 지하철역이 20-30%의 높은 석면 검출율을 보여주고 있다. 현재 SEM은 초기보급단계로 좀더 많이 보급되어 사용빈도가 높아질수록 신뢰도가 높은 측정결과 값을 보여줄 수 있을 것으로 사료된다. ④