한국환경보건학회지, 제33권 제1호(2007)
Kor. J. Env. Hlth., Vol. 33, No. 1, pp 49~56(2007)

다양한 실내환경 중 휘발성유기화합물 오염의 패턴 분류

김윤신 · 노영만 · 이철민† · 김기연 · 김종철 · 전형진
한양대학교 환경 및 산업의학연구소

Pattern Classification of Volatile Organic Compounds in Various Indoor Environment

Yoon-Shin Kim · Young-Man Roh · Cheol-Min Lee† · Ki-Youn Kim · Jong-Cheol Kim · Hyung-Jin Jun

Institute of Environmental & Industrial Medicine(IEIM), Hanyang University

(Received September 4, 2006/Accepted November 15, 2006)

ABSTRACT

The purpose of this study was to survey the distribution patterns of volatile organic compounds(VOCs) and formaldehyde in the various indoor environments using cluster analysis. We investigated VOCs and formaldehyde in subway stations, underground shopping areas, medical centers, maternity recuperation centers, public childcare centers, large stores, funeral houses, and indoor parking lots from June, 2005 to May, 2006. Concentration of TVOCs in maternity recuperations was 2,605.7 $\mu g/m^3$ that was higher than the guideline and other facilities. TVOCs in public childcare centers was 1,951.6 $\mu g/m^3$ also it exceeded the guideline. Moreover, concentration of TVOCs in every facility exceeded the guideline of Department of Environment, Korea. In case of formaldehyde, mean concentration, 336.5 $\mu g/m^3$, in only public childcare centers exceeded the 120 $\mu g/m^3$ of the guideline. Finally, by applying cluster analysis, three pattterns of the indoor air pollutions were distinguished. In the results of analysis, concentrations of TVOCs and formaldehyde of cluster 3 were higher than cluster 1 and 2 that were 2,561.4 $\mu g/m^3$ and 184.9 $\mu g/m^3$, respectively.

Keywords: VOCs, formaldehyde, cluster analysis, receptor method, public facility

I. 서 론

실내공기질(Indoor Air Quality: IAQ)에 대한 문제의 발생 배경을 보면, 1970년대 이전 거주지역 및 비산업 지역의 실내공기질에 관한 문제는 점차적으로 증가하였으나, 그 관심수준은 매우 미약한 실정이다.[1] 그러나 1970년대 이후 각종 산업분야에서 에너지 절감효율을 높이기 위한 노력의 일환으로 열효율 증대를 위한 건물의 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여, 이들 건물의 실내공기질이 악화되면서 실내공기질의 관리 및 건강위해성에 대한 관심이 발생되었다.[2] 특히, 실내공기질에 영향을 미치는 건강상의 악영향 물질은 휘발성유기화합물, 폼알데하이드, 중금속 등의 다양한 화학물질로 알려 있다.[3]

†Corresponding author : Institute of Environmental & Industrial Medicine(IEIM), Hanyang University
Tel: 82-2-2220-1510, Fax: 82-2-2292-2510
E-mail : spica@hanyang.ac.kr

실내공기오염은 주택, 학교, 사무실, 공공건물, 병원, 지하시설물, 교통수단 등 다양한 실내공간의 공기가 오염된 상태를 말하며 매우 복합적인 원인들에 의해서 야기될 수 있는데 그 영향은 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아닐지라도 장기적으로 볼 때 건강에 나쁜 영향을 미치고 있음에 틀림없다.[4] 이러한 실내공기오염의 문제는 인간 활동에 의해 발생되는 각종 오염물질들이 실내에 방출되어 실내환경을 오염시키는 현상에 의한 문제라 할 수 있다.[5] 실내공기 중에는 물리적, 화학적 및 생물학적으로 다양한 오염물질이 존재할 가능성이 있으며, 이러한 오염물질들은 외부공기의 유입, 담배연기, 난방기, 오븐, 취사도구, 시멘트, 세정제, 건축자재, 페인트등과 같은 복합적인 배출원에 기인하므로 그 배출량 역시 오염물질에 따라 상당한 편차를 나타내는 것으로 알려져 있다.[6]

선진국의 실내공기질에 관한 연구는 실태조사 연구로부터 실내공기질 예측 모델링에 관한 연구까지 많은 발전을 하여 왔으며, 최근 거주자를 대상으로 한 건강위

해성평가에 관한 많은 연구가 수행되어지고 있으나,[7] 국내 실내공기질에 관한 연구는 2003년과 2004년 환경부의 '다중이용시설등의 실내공기질 관리법'의 제정과 시행 이후 이 법을 토대로 실내공기질 관리 주요시설의 확장 및 다양한 관리기법을 도입하기 위해 다양한 실내공간의 실내공기질에 관한 조사연구가 활발히 수행되어지고 있다. 또한 관리대상오염물질의 확대를 위해 현 법규제오염물질 이외의 건강상 위해가 높은 것으로 알려져 있는 휘발성유기화합물의 다양한 실내환경에서의 농도수준을 파악하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 아직 실내공기오염에 대한 이들 휘발성유기화합물에 대한 합리적인 대책과 관리방안 등을 마련하기 위한 관련 연구의 수행은 매우 미흡한 수준에 있다.

실내공기오염에 대한 합리적인 대책과 관리방안 등을 마련하기 위해서는 실내공기 오염에 대한 연구가 선행되어야 하며, 이러한 연구는 수용방법론(receptor methods)을 이용하여 수행할 수 있다.[8] 수용방법론 중에서 오염원에 대한 정보가 부족할 때 인자분석, 다중회귀분석, 군집분석 등의 다변량 분석법이 보편적으로 많이 사용되고 있다.[9-11] 이러한 응용통계 방법론들은 오염원에 대한 정보가 부족할 때 자료 집단에서 유사한 성질을 갖는 특정 군집을 분류하고, 분류 작업이 올바르게 수행되었는지의 여부를 정량적으로 규명하는 방법으로서, 국내에서는 김과 김(1990)[12]이 실내환경에서 여러 오염물질의 농도를 새로운 각도에서 분석하고 오염의 패턴을 분석하기 위하여 이용한 바 있다.

본 연구에서는 다양한 실내환경에서의 공기 중 휘발성유기화합물의 농도를 조사한 후 군집분석법(cluster analysis)을 이용하여 휘발성유기화합물을 농도패턴이 유사한 특정군집 즉, 다중이용시설들을 분류하고, 도출된 군집의 특징과 다양한 환경중의 실내공기중의 휘발성유기화합물의 오염 패턴을 파악하였다. 김과 김(1990) 및 남 등(2002)에 의해 지하시설물 및 다양한 실내공간 내의 PM_{10} 관리차원에서 본 연구의 방법론을 응용한 바 있으나 본 연구는 추후 실내공기질관리법의 휘발성유기화합물의 선정, 기준의 설정 및 규제대상시설의 분류시 기초자료를 제공하기위해 다양한 실내환경에서의 휘발성유기화합물의 형태를 파악하기 위해 수행되었다.

II. 연구방법

1. 연구대상 및 방법

본 연구는 2005년 6월부터 2006년 5월까지 1년간 서울, 대구 및 아산에 위치한 환경부의 '다중이용시설등의 실내공기질 관리법'에서 제시하는 17개 다중이용시설 중 지하철역사(3), 지하도상가(8), 의료시설(6), 보육시설(8), 도서관(3), 대규모점포(8), 장례식장(3), 찜질방(5), 산후조리원(3) 및 실내주차장(9)을 대상으로 유해공기오염물질로 알려진 휘발성유기화합물 및 폼알데하이드의 농도분포를 조사하였다. 또한 이들 조사대상 다중이용시설의 선정에 있어 다중이용시설별 실내공기중의 유해공기오염물질의 오염패턴을 정확히 분석하기 위해 거주자 중 흡연자가 없는 시설을 연구대상시설로 선정하였다.

휘발성유기화합물의 포집은 Tenax-TA(60/80 mesh, Supelco, USA)가 200 mg 이상 충전된 스테인레스 흡착관(1/4 inch×9 cm, Perkinelmer, UK)을 이용하여 포집하였다. 또한 포집전 열탈착기(TC20, Markes, USA)를 이용하여 300℃에서 3시간 이상 열탈착 전처리를 실시하였다. 휘발성유기화합물 포집에 사용한 펌프는 포집 전 · 후의 유량변동이 적은 Personal Air Sampler (Gilian, USA)를 사용하여 0.2 *l*/min으로 30분간 포집하였다. 또한 포집 전 · 후 유량은 Digital Flowmeter (Alltech, USA)를 이용하여 총 흡인유량을 산출하였다. 이때 거의 모든 포집에서 포집 전 · 후의 유량변화가 5% 이내인 것으로 조사되었다. 포집이 끝난 시료에 대해서는 흡착튜브의 양끝을 Storage Cap으로 막고 4℃의 냉장고에서 분석 전까지 보관하였고 포집 후 일주일내 분석하였다. 휘발성유기화합물의 분석은 Turbomatrix ATD(Perkinelmer, UK) 열탈착기와 가스크로마토그래피(GC-MSD, HP-6890, Agilent 5973 inert, USA)를 이용하여 수행되었다.

폼알데하이드의 포집은 카르보닐화합물과 2,4-DNPH와의 반응에 의해 생성되는 DNPH 유도체를 분석하는 방법으로 시료 포집시 알데히드 뿐만 아니라 케톤과도 반응하여 안정한 유도체를 형성하는 2,4-DNPH 유도체화 방법을 사용하였다. 포집에 사용한 펌프는 포집 전·후의 유량변화가 비교적 적은 personal air sampler (Gilian, USA)를 이용하여 0.5 *l*/min의 유속으로 시료를 흡인하였으며, 포집시간은 30 min으로 하였다. 포집매체는 4 cm의 폴리프로필렌 튜브에 고순도로 정제된 2,4-DNPH가 코팅되어 있는 2,4-DNPH cartridge (Supelco, USA)를 이용하며, 알데히드 측정시 오존은 2,4-DNPH 유도체를 감소시키거나 2,4-DNPH가 오존과 반응하여 인위적인 불순물을 형성하는 등 방해물질로 존재하기 때문에 측정시 이러한 오존의 영향을 제거하기 위하여 2,4-DNPH cartridge 전단부에 KI가 채워져 있는 오존 스크루버(Supelco, USA)를 설치하였다. 또한 태양광선은 artifact를 형성하는 등 방해작용을 일으킬 수 있으므로 측정 시 알루미늄 호일을 이용하여 태양

광선에 노출되는 것을 방지하였다. 측정이 끝난 시료는 내부가 알루미늄으로 코팅되어 있는 container에 개별 포장하여 용매추출 전까지 4°C 이하에서 냉장 보관하고 시료의 추출 및 분석에 사용된 모든 실험기자재는 추출용매인 HPLC-grade acetonitrile(J.T. Baker, USA)로 세척하고 60°C 건조기에서 30분 이상 건조시키고, 고순도 N_2(99.999%)로 purging하였다. 시료의 추출은 용매추출장치인 vacuum elution rack(Supelco, USA)에 2,4-DNPH cartridge를 고정시키고 지용성 필터(47 mm, ø0.45 μm, PTFE)에 3회 이상 여과한 acetonitrile 5 ml를 이용하여 매우 느린 속도(1 ml/min)로 추출하여, HPLC(Younglin Korea)로 분석하였다.

2. 자료 분석 방법

본 연구는 다양한 실내환경에 대해 군집분석을 이용하여 유사한 실내환경들간에 군집을 형성하였다. 본 연구에서 사용된 군집분석은 다양한 군집분석 방법 중 비교적 algorithm이 간단하고 계산이 간편하며, 보편적으로 가장 많이 사용되는 응집위계분석법을 적용하였으며, 비유사도의 기준을 결정하기 위해 Euclidian 거리를 이용하여 군집분석을 수행하였다. 그리고 분류된 그룹이나 case 사이의 거리를 표시하는 군집화방법으로서 Ward's method를 이용하였다.

또한 군집분석을 수행하기 전에 본 연구에서는 원자료(raw data)에 대한 자료변환을 수행하였다. 변수의 변량분포가 대칭형을 나타내지 않고 어느 한쪽으로 치우쳐 있을 경우 통계분석의 결과가 과장되거나 오류가 발생할 가능성이 있기 때문에 본 연구에서는 먼저 원자료에 대한 빈도분석을 실시하여 자료의 변수별 변량분포를 살펴보았으며, 그 결과 원자료가 한쪽으로 치우쳐 있어 군집분석에 앞서 자료변환을 실시하여 자료들의 분포를 정규분포화 해야 할 필요성이 제기되어 원자료에 대한 로그(logarithmic) 변환을 수행하였다. 또한 z-score를 이용하여 자료의 표준화를 통해 변수들이 평균 0, 분산 1의 동일한 가중치를 갖도록 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 다양한 실내환경의 휘발성유기화합물 농도분포 현황

다양한 실내환경에서 조사된 휘발성유기화합물의 평균농도는 Table 1과 같다. 현 환경부의 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'에서는 다양한 다중이용시설

Table 1. Average concentration of volatile organic compounds in the various indoor environments

(Unit : μg/m³)

Pollutant	Sauna (n=5)	Library (n=3)	subway station (n=3)	Maternity recuperation center (n=2)	Public childcare center (n=8)	Medical center (n=6)	Large store (n=8)	Under-ground shopping area (n=8)	Funeral house (n=3)	Indoor parking lot (n=9)
Formaldehyde	105.0	34.8	33.0	28.9	336.5	24.1	98.1	35.8	8.6	49.5
TVOCs	1621.8	1268.2	1073.6	2604.7	1951.6	931.1	1954.4	2267.1	1542.5	1412.1
Methylchloroform	0.2	0.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
Benzene	48.6	4.7	5.2	7.8	7.5	5.1	6.8	10.8	7.8	16.6
Carbontetrachloride	0.3	0.3	0.4	0.8	0.8	0.3	0.4	0.6	0.5	0.4
Trichloroethylene	4.6	1.8	2.9	21.3	3.0	2.0	2.8	4.2	2.4	3.5
Toluene	89.2	32.4	65.4	151.3	90.6	61.5	83.0	158.0	122.6	91.1
Tetrachloroethylene	2.2	1.8	2.6	2.3	2.2	2.1	2.0	2.6	2.0	2.3
Ethylbenzene	6.3	6.3	13.1	9.0	23.9	12.1	4.8	10.6	6.7	11.4
m,p-Xylene	10.8	6.3	15.1	7.6	37.5	21.7	4.2	10.1	6.3	13.7
Styrene	5.8	2.1	2.6	5.3	6.6	3.4	4.5	11.2	5.6	4.4
1,1,2,2-Tetrachloroethane	3.3	4.7	3.0	3.0	2.9	2.8	2.7	4.3	2.4	2.7
o-Xylene	6.9	8.0	8.8	8.4	27.1	14.9	5.5	12.8	6.5	12.4
1-Ethyl-4-methylbenzene	3.9	3.6	4.0	10.2	7.7	2.9	3.2	5.7	3.3	6.7
1,3,5-Trimethylbenzene	3.2	6.1	4.1	9.1	5.5	2.8	3.6	8.4	5.7	6.8
1,2,4-Trimethylbenzene	6.5	12.7	9.5	25.3	11.9	5.2	6.5	19.1	11.5	29.4
1,3-Dichlorobenzene	3.3	3.3	3.5	3.9	2.8	6.6	3.9	4.6	3.2	3.9
1,4-Dichlorobenzene	3.4	3.4	3.6	4.1	2.9	8.3	4.0	4.8	3.3	4.2
1,2-Dichlorobenzene	2.6	2.2	2.8	3.1	2.9	2.6	3.6	3.4	2.4	4.1

내 실내공기중의 폼알데하이드와 총휘발성유기화합물에 대해 규제하고 있으나 개별 휘발성유기화합물들에 대해 규제는 이루어지고 있지 않다. 이에 본 연구에서 조사된 다양한 다중이용시설별 실내공기중의 폼알데하이드 및 총휘발성유기화합물의 평균농도와 관리법의 규제기준과 비교시 폼알데하이드의 경우 보육시설만이 기준치를 초과하는 것으로 조사되었다. 또한 총휘발성유기화합물의 경우 모든 조사대상 다중이용시설에서의 평균농도가 기준치를 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

보육시설의 실내공기중의 폼알데하이드의 평균농도는 336.5 μg/m^{3}으로 현 관리법에서 제시하고 다중이용시설의 실내공기 중 폼알데하이드의 기준치인 120 μg/m^{3}을 약 2.8배 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

총휘발성유기화합물의 경우 현 관리법에서는 다중이용시설별로 거주자의 오염물질에 대한 민감성 및 거주특성 등을 고려하여 500 μg/m^3, 400 μg/m^3 및 1,000 μg/m^{3}으로 구분하여 규제하고 있다. 본 연구에서 다양한 실내환경의 다중이용시설에서 조사된 총휘발성유기화합물의 평균농도와 관리법에서 기준치와 비교시 산후조리원의 경우 평균농도가 2,605.7 μg/m^{3}로 현 관리법의 산후조리원에 대한 기준치인 400 μg/m^{3}을 약 6.5배 초과하는 가장 높은 초과율을 나타냈으며, 보육시설 역시 평균농도가 1,951.6 μg/m^{3}로 기준치인 400 μg/m^{3}을 약 4.9배 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

개별 휘발성유기화합물의 Toluene의 경우 본 연구에서 조사된 모든 다중이용시설에서 다른 개별 휘발성유기화합물들에 비해 가장 높은 평균농도를 나타냈다. Toluene 다음으로 높은 평균농도를 나타낸 개별휘발성유기화합물로는 사우나 및 대규모점포의 경우 Benzene (각, 48.6 μg/m^3, 6.8 μg/m^3)이 지하철역사, 보육시설 및 의료시설은 m,p-Xylene(각, 15.1 μg/m^3, 37.5 μg/m^3, 21.7 μg/m^3)이 도서관, 산후조리원, 지하상가, 장례식장 및 실내주차장은 1,2,4-Trimethylbenzene(각, 12.7 μg/m^3, 25.3 μg/m^3, 19.1 μg/m^3, 11.5 μg/m^3, 29.4 μg/m^3)인 것으로 조사되었다.

2. 군집 분류

다양한 실내환경의 다중이용시설들에서 조사된 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도자료를 바탕으로 유사한 실내환경 특성을 지닌 다중이용시설별로 군집을 형성하기 위해 Fig. 1의 수상도를 이용하여, 비교적 낮은 비유사도 준위에서 군집을 분류한 결과 3개의 군집으로 가분류를 시행할 수 있었다. 가분류된 3개의 군집에서 군집 1은 18개 다중이용시설(의료시설C, 의료시설D, 의료시설E, 의료시설F, 도서관A, 도서관B, 대규모

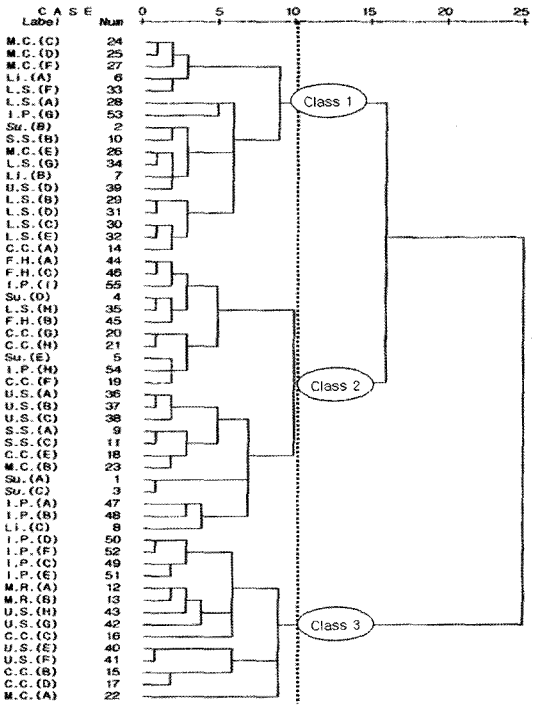

Fig. 1. A dendrogram using the euclidean distance after logarithmic transformation.: M.C.-Medical center, Li.-Library, L.S.-Large store, I.P.-Indoor parking lot, S.S.-Subway station, F.H.-funeral house, C.C.-Childcare center, Su.-Sauna, M.R.-Maternity recuperation centers.

Table 2. Classified public facilities after cluster analysis

Class	n	Public facilities
1	18	Large store - (7), Medical center - (4), Library - (2), Indoor parking lot-(1), Sauna - (1), Subway station - (1), Childcare center - (1), Underground shopping area - (1)
2	23	Sauna - (4), Indoor parking lot - (4), Childcare center - (4), Funeral house - (3), Underground shopping area - (3), Subway station - (2), Library - (1), Medical center - (1), Large store - (1)
3	14	Indoor parking lot - (4), Underground shopping area - (4), Childcare centers - (3), Maternity recuperation centers - (2), Medical center - (1)

점포A, 대규모점포B, 대규모점포C, 대규모점포D, 대규모점포E, 대규모점포F, 대규모점포G, 실내주차장G, 찜질방B, 지하철역사B, 보육시설A, 지하상가D), 군집 2는 23개 다중이용시설(지하상가A, 지하상가B, 지하상가C, 찜질방A, 찜질방C, 찜질방D, 찜질방E, 장례식장A, 장례식장B, 장례식장C, 도서관C, 실내주차장A, 실내

주차장B, 실내주차장H, 실내주차장 I, 보육시설E, 보육시설F, 보육시설G, 보육시설H, 지하역사A, 지하역사C, 의료시설B, 대규모점포H), 군집 3은 14개 다중이용시설(실내주차장C, 실내주차장D, 실내주차장E, 실내주차장F, 산후조리원A, 산후조리원B, 지하상가E, 지하상가F, 지하상가G, 지하상가H, 보육시설B, 보육시설C, 보육시설D, 의료시설A)로 분류되었으며 어느 군집에도 포함되지 않는 이상치는 분류되지 않았다.

3. 군집별 휘발성유기화합물의 오염 패턴

분류된 군집별 다중이용시설들의 유사한 실내환경을 살펴보면 군집 1의 경우 대규모점포와 의료시설이 11개 시설로 군집 1 전체 시설의 60% 이상을 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 이들 시설은 다른 시설에 비해 시설 내부의 공간체적이 크다는 특징을 찾을 수 있다. 군집 2는 사우나, 실내주차장, 보육시설, 장례식장 및 지하상가가 18개 시설로 군집 2 전체 시설의 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 이들 시설 대부분은 연소활동 및 다양한 휘발성유기화합물을 방출하는 발생원이 존재하고 있다는 특징을 찾을 수 있다. 군집 3은 지하주차장 및 지하상가가 8개 시설로 군집 3 전체 시설의 57% 이상을 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 이들 시설들은 실내 휘발성유기화합물의 발생원이 다수 존재하고 있으며, 또한 환기의 상태가 불량한 시설이라는 특징을 찾을 수 있다.

Table 3. The Concentrations of volatile organic compounds in each class after cluster analysis

Pollutants	Class	Concentration (μg/m³)			p-value
		n	Mean	SD	
HCHO	1[a]	23	62.1	95.4	p<0.05
	2[a]	18	63.8	65.3	
	3[b]	14	184.9	266.2	
TVOCs	1[a]	23	1476.3	610.8	p<0.01
	2[a]	18	1268.8	1141.9	
	3[b]	14	2561.4	1188.1	
Methylchloroform	1[a]	23	0.2	0.2	p<0.01
	2[b]	18	0.1	0.1	
	3[a]	14	0.2	0.1	
Benzene	1	23	17.7	28.0	p>0.05
	2	18	5.9	4.3	
	3	14	12.8	5.6	
Carbontetrachloride	1[a]	23	0.4	0.1	p<0.01
	2[a]	18	0.3	0.1	
	3[b]	14	0.8	0.8	
Trichloroethylene	1[a]	23	3.2	1.7	p<0.01
	2[a]	18	2.5	0.9	
	3[b]	14	6.5	6.5	
Toluene	1[a]	23	95.4	30.3	p<0.01
	2[b]	18	57.1	32.6	
	3[c]	14	145.1	60.0	
Tetrachloroethylene	1[a]	23	2.2	0.5	p<0.01
	2[a]	18	2.0	0.2	
	3[b]	14	2.5	0.5	
Ethylbenzene	1[a]	23	10.3	6.5	p<0.01
	2[a]	18	2.9	1.3	
	3[b]	14	23.4	22.1	
m,p-Xylene	1[a]	23	14.8	12.1	p<0.01
	2[a]	18	2.9	1.5	
	3[b]	14	30.5	37.1	
Styrene	1[a]	23	4.5	1.9	p<0.01
	2[a]	18	3.0	1.3	
	3[b]	14	10.8	10.7	
1,1,2,2-Tetrachloroethane	1	23	3.2	1.4	p>0.05
	2	18	2.8	0.5	
	3	14	3.5	1.3	
o-Xylene	1[a]	23	11.9	8.6	p<0.01
	2[a]	18	4.0	1.2	
	3[b]	14	24.2	24.9	
1-Ethyl-4-methylbenzene	1[a]	23	4.1	1.6	p<0.01
	2[a]	18	3.0	0.9	
	3[b]	14	9.7	5.8	
1,3,5-Trimethylbenzene	1[a]	23	5.3	3.3	p<0.01
	2[b]	18	3.2	0.7	
	3[c]	14	8.6	4.2	
1,2,4-Trimethylbenzene	1[a]	23	12.2	11.1	p<0.01
	2[a]	18	5.6	1.5	
	3[b]	14	28.4	25.6	
1,3-Dichlorobenzene	1	23	3.4	0.7	p>0.05
	2	18	3.6	0.4	
	3	14	5.5	5.1	
1,4-Dichlorobenzene	1[a]	23	3.5	0.8	p<0.05
	2[a]	18	3.8	0.5	
	3[b]	14	6.4	7.7	
1,2-Dichlorobenzene	1[a]	23	2.7	0.3	p<0.01
	2[a,b]	18	3.3	1.5	
	3[b]	14	3.7	0.9	

[a, b, c] Duncan Indicate

군집 별 휘발성유기화합물의 농도를 비교한 결과 군집 3에 속하는 시설이 군집 1과 군집 2에 속하는 시설에 비해 조사 대상 휘발성유기화합물 중 Carbontetrachloride를 제외한 모든 물질의 농도가 가장 높은 것으로 조사되었다. 반면, 군집 2의 경우 TVOCs, Benzene, Carbontetrachloride, Trichloroethylene, Ethylbenzene, m,p-Xylene, Styrene, 1,1,2,2-Tetrachloroethane, o-Xylene, 1-Ethyl-4methylbenzene, 1,3,5-Trimethylbenzne, 1,2,4-Trimethylbenzene의 농도가 가장 낮은 것으로 조사되었으며, 군집 1의 경우 폼알데하이드, Toluene, Tetrachloroethylene, 1,3-Dichlorobenzene, 1,4-Dichlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene의 농도가 가장 낮은 것으로 조사되었다. 그러나 군집별 다양한 실내환경에서의 휘발성유기화합물의 농도분포의 차이를 검증한 결과 군집 1과 군집 2에 속하는 다중이용시설들의 다양한 실내환경에 분포되어 있는 휘발성유기화합물의 농도간에는 Methylchloroform, Toluene, 1.3.5-Trimethylbenzene을 제외한 나머지 연구대상 휘발성유기화합물의 농도가 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 조사되었다.

IV. 고 찰

실내환경은 건물의 용도, 거주자의 행동 특성, 건축자재 및 생활용품, 건물의 위치 등 다양한 환경에 의해 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다. 환경부에서는 17개 다중이용시설에 대해 거주자들에게 유해한 영향을 줄 수 있을 것으로 사료되는 공기오염물질에 대해 건물의 용도 특성에 따라 크게 3가지로 분류하여 규제하고 있다. 또한 규제오염물질 종류의 확대 및 관리대상 시설의 확대를 위해 다양한 연구가 수행 중에 있으며 현 규제대상오염물질에 대한 규제기준의 타당성 검토를 통해 기준의 강화 및 완화를 추진 중에 있다.

이에 본 연구에서는 실내공기질의 경우 건물의 용도뿐만 아니라 여러 다른 환경적 요인에 의해 큰 영향을 받고 있음을 제시하기 위하여 휘발성유기화합물의 농도 패턴에 따른 다양한 실내환경을 분류하고 이의 특징을 제시함으로써 향후 실내공기질 관리법의 확대 개정에 있어 보다 체계적이며, 융통성 있는 관리안의 수립에 있어 기초자료를 제공하고자 하는 목적으로 수행되었다.

다양한 실내환경에서 조사된 총휘발성유기화합물의 농도 대부분은 현 실내공기질 관리법에서 정하고 있는 기준을 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 휘발성유기화합물의 경우 새집증후군 및 복합화학민감증을 유발하는 대표적 오염물질로 알려져 있으며, 또한 거주자들의 건강상 큰 악영향을 줄 수 있는 물질로 알려져 있으나 본 조사결과에 의하면 대부분의 다양한 실내환경의 실내공기 중에 높은 농도로 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. 반면 폼알데하이드의 경우 역시 새집증후군을 유발하며 건강상에 악영향을 미치는 물질로 알려져 있으나 본 연구에서는 보육시설을 제외한 다른 실내환경에서는 기준을 초과하고 있지 않고 있는 것으로 조사되었다. 그러나 보육시설의 경우 환경오염물질에 대한 면역이 약한 유아들이 장시간 거주하는 공간으로 이에 대한 정밀조사 및 관리방안 확립 등 적절한 조치가 시급히 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

본 연구에서는 아직 국내 실내공기질 관리법에서 신축공동주택을 제외한 다른 17개 다중이용시설에 대해서는 개별 휘발성유기화합물에 대해 규제가 이루어지고 있지 않으나 이들 오염물질이 거주자들에게 건강상에 악영향이 큰 물질임을 고려하여 이들 오염물질의 특성에 따른 다양한 실내환경의 분포 특성을 분류하여 제시하였다. 본 연구에서 사용된 분류법으로는 군집분석을 활용하였는데 군집분석은 자연과학 분야에서 널리 사용되어지고 있는 응용 통계분석법으로서, 자료집단 내에서 유사한 성질을 갖는 특정 그룹을 분류하는데 이용되고 있다. 군집분석은 군집의 개수, 내용, 구조 등이 완전히 알려지지 않은 상태에서 개체 사이의 거리 또는 비유사도에 근거하여 군집의 특성과 관계를 분석하는 것을 주요 목적으로 하는 통계분석법으로 기본 원리는 두 개체 사이의 거리를 기준으로 공간에서 비유사도를 측정함으로서 동일한 pattern을 가진 개체를 분류하는 것이며, 거리 또는 비유사도가 작은 두 개체는 동일한 군집에 소속된다는 것이다.[13] 일반적으로 군집분석은 크게 위계 군집분석법(hierarchical cluster analysis)과 비위계 군집분석법(non-hierarchical cluster analysis)으로 구분한다. 비위계 분석법은 군집의 수를 이미 알고 있거나 추정할 수 있을 때 개체들을 정해진 특정 군집으로 최적 분배하는 방법이다. 반면, 위계 분석법은 한 군집이 다른 군집에 포함되지만, 군집간 중복이 허용되지 않고 군집의 수가 미지일 때, 계보 형식의 수상도를 이용하는 분석법이다. 위계 분석법은 비위계분석법에 비해 algorithm이 간단하고 계산시간이 상대적으로 짧으며, 전체 군집들간의 구조적인 관계를 수상도라는 2차원 상의 공간에 간단히 표현할 수 있다는 장점이 있다.[14]

본 연구에서는 지하철역사, 지하도상가, 의료시설, 보육시설, 도서관, 대규모점포, 장례식장 및 실내주차장을 대상으로 군집분석을 수행한 결과 전체 3개의 군집으

로 분류되었다. 이중 군집 3에 속한 다중이용시설들의 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도가 다른 두 군집에 속한 다중이용시설들의 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도에 비해 높은 것으로 조사되었으며, 군집 1과 군집 2의 경우 대부분의 조사대상물의 농도차가 통계적으로 유의하지 않는 것으로 조사되어 두 군집에 속한 다중이용시설들의 실내환경에는 큰 차이가 없는 것으로 여겨진다.

가장 높은 농도를 보인 군집 3에 속하는 다중이용시설의 특징으로는 실내주차장과 지하상가가 군집 3에 속한 다중이용시설 중 57%를 차지하고 있었다. 이들 시설은 자동차 및 상가내 각종 진열대에서 진열되어 있는 생활용품 등 휘발성유기화합물의 발생원이 다수 존재하는 특성을 가지고 있으며, 또한 지상구간에 위치한 건물에 비해 환기 등의 원활히 이루어지지 않아 실내 휘발성유기화합물의 농도가 다른 실내환경에 비해 높게 나타난 것으로 여겨진다. 뿐만 아니라 군집 3에 속해 있는 다중이용시설들의 공통적인 조건은 조사 당시 공조상태가 불량한 상태로 원활한 환기가 이루어지고 있지 않은 것으로 조사되어 이의 영향으로 높은 농도를 보인 것으로 사료된다. 산후조리원의 경우 신생아 및 산모들이 거주하는 공간으로 실내공기 오염물질에 대해 아주 민감한 거주자들이 이용하는 시설로 본 조사연구에서 최고 높은 농도를 보인 군집 3의 집합에만 포함되어 있는 것으로 조사되어 이 시설에 대한 집중적 관심과 대책 마련이 시급한 것으로 사료된다.

본 연구에서 조사된 휘발성유기화합물 중 세 군집간에 유의한 농도 차이를 보이지 않은 휘발성유기화합물로는 Benzene, 1,1,2,2-Tetrachloroethane, 1,3-Dichlorobenzene으로 조사되어 이들 물질의 경우 건물의 용도에 따라 농도변화가 큰 차이가 있지 않은 것으로 조사되었다. 또한 대부분이 조사대상 휘발성유기화합물의 농도차 역시 군집 3만을 제외하고 군집 1과 군집 2간에 유의한 차이를 나타내지 않았다. 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때 다양한 실내환경의 다중이용시설들내의 휘발성유기화합물의 농도는 건물의 용도에 따라 큰 차이를 보이는 것보다는 각 시설내의 다른 환경적 요인 즉, 실내공기질 개선을 위한 노력 등이 실내공기중의 휘발성유기화합물의 농도에 크게 기여하고 있는 것으로 사료된다.

또한, 실내공기 중의 일부 화학물질은 주거형태 및 생활환경에 따라 발생 특성이 다를 수 있기 때문에,[15] 다중이용시설의 실내공기질 관리를 위해서는 우선적으로 휘발성유기화합물 등 각 오염물질에 대한 발생원의 파악이 중요하다.[16]

본 연구에서 획득된 결과를 통해 현 실내공기질 관리법 상 다중이용시설들의 실내공기질에 관한 관리가 건물의 용도에 따라 분류하고 관리하고 있는 우리나라 실내환경정책 방향에 있어 향후 시설의 규모, 공조현황 및 기타 실내공기질에 영향을 미치는 다른 물리적 조건들에 대한 조사의 확대가 요구되고 또한 이러한 조사를 통해 획득된 자료를 바탕으로 다른 복합적인 요소들을 고려한 보다 효율적인 실내환경보건법의 강화 및 실내환경보건 정책의 수립 및 시행이 요구되어진다.

V. 결 론

본 연구는 다중이용시설에서 실내공기질 관리법의 휘발성유기화합물 선정, 기준의 설정 및 규제대상시설의 분류시 기초자료를 제공하고 다양한 실내환경에서의 휘발성유기화합물의 형태를 파악하기 위하여 2005년 6월부터 2006년 5월까지 서울, 대구, 아산에 위치한 환경부의 '다중이용시설등의 실내공기질 관리법'에서 제시하는 다중이용시설 중 일부 지하철역사, 지하도상가, 의료시설, 보육시설, 도서관, 대규모점포, 장례식장 및 실내주차장을 대상으로 휘발성유기화합물과 폼알데히드를 조사하였다.

본 연구의 결과를 요약하여 제시하면 다음과 같다.

첫째, 산후조리원의 경우 총휘발성유기화합물의 농도가 2,605.7 $\mu g/m^3$로 환경부의 기준치인 400 $\mu g/m^3$를 약 6.5배 초과하였으며 보육시설에서의 평균농도는 1,951.6 $\mu g/m^3$로 기준치보다 약 4.9배 높게 조사되었다. 또한 모든 대상시설에서 총휘발성유기화합물의 기준치를 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

둘째, 폼알데하이드의 경우 보육시설에서만 환경부 기준치를 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 보육시설의 실내공기 중의 평균농도는 336.5 $\mu g/m^3$으로 기준치인 120 $\mu g/m^3$을 약 2.8배 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

셋째, 지하철역사, 지하도상가, 의료시설, 보육시설, 도서관, 대규모점포, 장례식장 및 실내주차장을 대상으로 군집분석을 수행한 결과 3개의 군집으로 분류되었다. 이중 군집 3에 속한 다중이용시설의 실내공기 중 총휘발성유기화합물과 폼알데히드의 농도가 2,561.4 $\mu g/m^3$, 184.9 $\mu g/m^3$로 군집 1과 군집 2보다 높게 조사되었으며 환경부의 기준치를 모두 초과하고 있다.

본 연구는 환경부의 '다중이용시설등의 실내공기질 관리법'에서 제시하는 일부 다중이용시설을 대상으로

군집을 분류하여 각 시설별 실내유해공기오염물질의 패턴을 분류하였으나 시설의 규모, 공조현황 및 모든 시설을 반영하지 못하였다. 향후 연구에서는 이러한 연구 제한점에 대한 확대가 요구되며 이러한 조사를 통하여 획득된 자료를 바탕으로 보다 효율적인 실내환경보건 및 국민의 복지향상을 위한 관리방안의 시행이 요구되어진다.

감사의 글

본 연구는 2004년 환경부 차세대핵심환경기술개발사업(과제번호: 013-041-035)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Stolwijk, J. A. : Risk assessment of acute health and comfort effects of indoor air pollution. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **641**, 56-62, 1992.
2. National Academy of Sciences(NAS) : Human exposure assessment for airborne pollutants, Washington DC, 1993.
3. 심상효, 김윤신 : 신축공동주택의 실내공기질 특성 및 평가 -휘발성유기화합물 및 포름알데히드 중심으로-. 한국환경보건학회지, **32**(4), 275-281, 2006.
4. Lee, S. C. and Chang, M. : Indoor and outdoor air quality investigation at school in Hong Kong. *Chemosphere*, **40**, 109-112, 2000.
5. James E. Woods : An engineering approach to controlling indoor air quality. *Environmental Health Perspectives*, **95**, 15-21, 1991.
6. Tichenor, B. A., Sparks, L. A., White, J. B. and Jackson, M. D. : Evaluating sources of indoor air pollution, *Journal Air & Waste Manage Association*, **40**, 487-492, 1990.
7. Dimitoroulopoulou, C., Ashmore, M. R., Byrne, M. A. and Kinnersley, R. P. : Modeling of indoor exposure to nitrogen dioxide in the UK. *Atmospheric Environment*, **35**, 269-279, 2005.
8. 남보현, 황인조, 김동술 : 분산주성분 분석을 이용한 실내환경 중 PM-10 오염의 패턴분류. 한국대기환경학회지, **18**(1), 25-37, 2002.
9. 황인조, 김태오, 김동술 : PMF 방법론을 이용한 수원지역 PM-10의 오염원 확인. 한국대기환경학회지, **17**(2), 133-145, 2001.
10. 유상준, 김동술 : 군집분석과 분산 주성분분석법을 이용한 대기분진시료의 분류. 한국대기보전학회지, **13**(1), 51-63, 1997.
11. Hopke, P. K. : Receptor Modeling in Environmental Chemistry, Wiley Interscience, New York, 1985.
12. 김동술, 김형석 : Pattern Recognition을 이용한 지하상가에서의 대기오염물질의 농도 분석에 관한 연구. 한국대기보전학회지, **6**(1), 1-10, 1990.
13. Hopke, P. K. : Receptor Modeling for Air Quality Management, Elsevier Science Publishing Company Inc., New York, 1991.
14. Massart, D. L. and Kaufman, L. : The Interpretation of Analytical Chemical Data by the Use of Cluster Analysis, John Wiley & Sons, New York, 1983.
15. 문경환, 변상훈, 최달웅, 이은일, 오은하, 김영환 : 실내 공기 중 일부 알데하이드류에 대한 위해도 평가. 한국환경보건학회지, **32**(1), 19-26, 2006.
16. 서병량, 정만호, 전준민 : 호남지역의 다중이용시설별 실내공기질 실태 조사. 한국환경보건학회지, **32**(5), 387-397, 2006.