

경남지역 지하생활공간 중 미량 유해물질인 포름알데히드의 농도 분포 특성

하권철[†]

창원대학교 보건·생화학과

Characteristics of Formaldehyde Concentrations in the Underground Spaces in Gyeongnam Province

Kwon Chul Ha[†]

Department of Health Science & Biochemistry, Changwon National University

(Received Sep. 14, 2004/Accepted Nov. 21, 2004)

ABSTRACT

The purpose of this research is to characterize formaldehyde as trace toxic air pollutant in the underground spaces in Gyeongnam province. Air samples of formaldehyde were taken in the three underground spaces for ten months from April 2003 to January 2004. The IAQ(Indoor Air Quality) of underground spaces were controled using central ventilation(supply/exhaust) system. The levels of GM of airborne formaldehyde concentrations in three sampling spaces were well below applicable standards, Korean Ministry of Environment, 0.1 ppm. However, some sample of airborne formaldehyde concentrations in underground spaces "B" and "C" were in excess of standard, due to the commercial products in shop, structural material, and the climate having high humidity and temperature. There are statistical differences in levels of formaldehyde by sampling spaces ($p=0.086$).

Keywords : formaldehyde, indoor air quality, underground spaces, HPLC-UVD, 2,4-dinitrophenylhydrazine(2,4-DNPH)

I. 서 론

현대에 들어 실내에서 보내는 시간이 많아져 쾌적한 실내공기질을 확보하기 위한 노력들이 계속되고 있다. 실내공기와 관련하여 IAQ(Indoor Air Quality), TBS(Tight Building Syndrome), SBS(Sick Building Syndrome), IEQ(Indoor Environmental Quality), BRD (Building-Related Disease) 등의 용어가 등장하였다. 최근 지하생활공간을 포함한 실내 환경질에 대한 개념은 여러 오염물질로부터 건강상의 영향은 물론 불쾌감이 없어야 한다는 쪽으로 가고 있으며 이를 위해 실내 공기질을 규정하고 확보하기 위한 다양한 연구와 노력들이 필요하다.¹⁻³⁾

실내공기질에 영향을 미치는 건강상의 악영향 물질로

포름알데히드(Formaldehyde), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC), 석면, 라돈, 납 등의 다양한 화학물질이 제시되고 있다. 이 중 포름알데히드는 새집증후군 등 실내공기질에 영향을 미치는 매우 중요한 유해인자로 부각되고 있다.^{4,5)}

포름알데히드는 무색의 친수성 가스로서 물과 반응하여 포르말린을 쉽게 만들게 되는데, 이러한 포르말린은 합성수지, 플라스틱, 염료, 고무, 접착제, 목제품, 비료, 농약, 수용성 페인트, 방직업 등 매우 다양한 분야에 사용되는 중요한 물질이다. 포름알데히드의 인체에 미치는 영향으로는 비암 발생과 자극(눈, 코 등 상기도)을 일으키며 메스꺼움, 기침, 가슴 답답함, 피부 붉힘 등을 나타내는 것으로 알려져 있다. 미국 EPA (Environment Protection Agency)에서는 포름알데히드를 Group B(probable human carcinogen, 인체에게서 포름알데히드 노출과 암 발생간에 인과관계가 있다는 제한된 자료들이 제시되고 있음)으로 설정하고 있다.⁴⁾ 또한 미국정부산업위생전문가협회(American

[†]Corresponding author : Department of Health Science & Biochemistry, Changwon National University
Tel: 82-55-279-7663, Fax: 82-55-279-7660
E-mail : kcha@changwon.ac.kr

Conference of Governmental Industrial Hygiene Association, ACGIH)에서는 포름알데히드를 인체에게서 암을 일으키는 물질인 A2그룹(발암성 의심 물질, suspected human carcinogen)으로 분류하고 있으며, 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 발암성물질(Ca)로 분류하고 있다.^{6,7)} 포름알데히드의 지하생활공간에서의 공기 중 기준은 24시간 평균 0.1ppm이하로 설정되어 있다. 우리나라 노동부와 미국 ACGIH에서는 8시간 시간가중평균노출기준(TLV-TWA)으로 1 ppm, 단시간노출기준(TLV-STEL) 2 ppm으로 규정하고 있다.

여러 연구들을 통하여 포름알데히드는 일반적으로 실내외에서 0.06 ppm(parts per million) 정도의 낮은 수준으로 존재한다고 알려졌다.^{4,8)} 낮은 농도이지만 지하상가의 경우는 관리자나 상점주인 등 거주자 외에도 상가를 방문하는 통행인이나 손님들이 노출이 가능하고 노출시간이 장시간 지속된다면 그 문제점은 심각하다고 할 수 있다. 특히 환경보건 분야에서 난제라고 할 수 있는 저 농도의 미량유해물질에 장기간 노출되었을 때 나타나는 다양한 건강상의 영향을 파악하고 대책을 마련하기 위해서는 이들 물질에 대한 위험성평가의 한 단계로서 노출정도 등 농도 분포에 대한 특성을 파악할 필요가 있다.^{9,10)}

이에 따라 본 연구에서는 환경부에서 법적으로 관리하고 있는 경남지역 지하생활공간인 지하상가에 대해서 건강에 악영향을 미치는 미량의 유해물질인 포름알데히드에 대한 공기 중 농도 분포를 파악하고, 쾌적한 공기질을 확보하기 위한 대책에서 중요한 발생원을 분석하여 실내공기질 관리에 도움을 주고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상

본 연구에서는 환경부에서 법적으로 관리하고 있는 경남지역 지하생활공간인 지하상가 3곳(마산 2곳, 진주 1곳)에 대해서 2003년 4월부터 2004년 1월까지 약 10개월 동안 공기 중 포름알데히드에 대한 시료 채취 및 평가에 관한 연구가 이루어졌다.

2. 연구 방법

지하생활환경 중 미량유해물질인 포름알데히드의 공기 중 농도 분포를 파악하기 위하여 우리나라 환경부와 미국 EPA의 공정시험법인 EPA TO-11 방법에 따라 2,4-DNPH 유도체화방법을 이용하여 측정 및 평가

Table 1. HPLC analytical conditions for formaldehyde-2,4-DNPH derivative

Parameter	Analytical condition
Column	Nova-pak C18 3.9×150 mm
Mobile phase	45:55(acetonitrile : water)
Flow rate	1.3 ml/min
Injection volume	20 μ l
Detector	UV-VIS
Wavelength	360 nm

하였다.¹¹⁾ DNPH-Coated Silica gel Cartridge(SKC Inc.) 흡착관을 시료채취기(Gilian, USA)에 연결하여 1 l/min의 유량으로 3시간 정도 지역시료로 채취하였다. 시료채취기는 측정전후에 유량보정계(Gilian, USA)를 이용하여 유량을 보정하였다. 채취된 시료는 빛에 노출되지 않게 냉장 보관하였다. 채취된 흡착관 시료의 경우 앞 층과 뒷층을 분리하여 각각 4 ml의 바이엘에 넣은 후 2 ml의 탈착용매를 넣고 30분 정도 교반 시키면서 탈착시켰다. 탈착용매로는 acetonitrile(EMScience, HPLC grade)을 사용하였다. 분석에 사용한 HPLC(waters 2690, Alliance, USA)의 2,4-DNPH와 포름알데히드 유도체를 분석하기 위한 분석조건은 다음 Table 1과 같다.

본 연구의 포름알데히드 분석법에 대한 검출한계(Limit of Detection, LOD) 및 정량한계(Limit of Quantitation, LOQ)는 NIOSH에서 제시한 방법에 따라 산출하였다.¹²⁾ 분석방법의 LOD는 0.008 μ g/m³이었으며 LOQ는 0.026 μ g/m³이었다.

미량의 유해물질은 대수정규분포(Log-Normal Distribution)를 하고 있기 때문에 대표 값으로 기하평균(Geometric Mean, GM)과 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD) 등 유용하리라 생각되는 통계치를 제시하였다. 사용한 통계 기법은 ANOVA와 t-test이며 시료채취장소간 농도 차이를 규명하기 위해 사용하였다. 자료 처리는 Sigma Plot 4.0 for Windows (Version 4.0, Jandel Corp., USA) 및 Sigma Stat. for Windows (Version 4.0, Jandel Corp., USA), Excel 2000 (Microsoft Corp., USA)을 이용하여 분석하였다.^{13,14)}

III. 결과 및 고찰

1. 지하생활공간의 특징 및 실내공기질 관리

본 연구의 대상인 지하상가 3곳(마산 2곳, 진주 1곳)에 대한 실내환경 결정의 중요한 요소인 면적, 총연장거리(폭), 거주자, 이용객 등 거의 모든 면에서 다르게

Table 2. Characteristics of sampling space underground spaces in gyungnam province

Sampling space	A	B	C
Area, m ²	16,746	3,143	7,665
Length/width, m	517/23~33	170/20	330/11
Occupants(manager)	350(17)	120(3)	400(7)
Customer per day	30,000	3000	20,000
No. of shop	407	85	212
No. of exit	18	6	14
Ventilation System	Central	Central	Central
Fans(Horse Power)	40HP × 4, 30HP × 2	25HP × 2, 10HP × 2	50HP × 3
Supply air(m ³ /h)	339,880	114,920	162,000
Exhaust air(m ³ /h)	298,800	87,500	135,000
Open year	1999	1980	1988

나타났다(Table 2). 환기시설의 경우 급기량과 배기량을 조절하면서 신선한 공기를 제공하거나 오염된 공기를 제거하고 있었으며, 공급되는 공기를 더 많이 함으로써 양압을 유지하여 외기에서 들어오는 공기의 양을 최소화하였다. 외기가 들어올 수 있는 통로라고 할 수 있는 출입구도 6~18개로 나타났으며, 난방은 모두 중앙관리 식으로 관리하고 있었다. 규모면에서 보면 “A”가 가장 커서 이동하는 사람들의 수나 거주자, 가게 수에서도 가장 높게 나타났다. 다음으로는 “C”가 중간이었으며 “B”가 가장 작은 규모로 나타났다. 실내에서 발생하는 오염물질의 발생원이 될 수 있는 벽체의 표면마감재에 있어서는 “A”와 “B”는 천정을 칠패판으로 마감하였으나 “C”의 경우는 아직까지 파티클보드를 사용하고 있었으며, 건물도 가장 오래된 1980년에 건축되어 노후화 되었으며 천정의 재질과 이음새가 파손되어 시급히 개선이 필요하였다.

지하생활공간에 대한 환기량에 있어서는 단위면적 · 시간당 20~31 m³로 ASHRAE 62-1999에서 건물용도별 환기량 기준에서 지하상가에 대해 제안하고 있는 1 m² 당 7 m³/시간을 만족시키고 있었다.¹⁵⁾

2. 시료 채취 장소별 포름알데히드의 농도 분포

시료채취 장소별 포름알데히드의 농도 분포는 W-test(Shapiro and Wilk test) 결과 대수정규분포(Lognormal Distribution)를 하고 있었다.¹³⁾ 일반적으로 실내외에서 포름알데히드는 0.06 ppm 정도의 낮은 수준으로 존재한다고 알려졌다. 본 연구 결과에서도 측정치의 대표치인 기하평균(GM) 값이 이 정도의 수준이었으나 농도분포의 범위에서는 건강상의 영향을 미칠 수 있는 0.1 ppm을 초과하는 시료도 있었다. 지하상가

Table 3. GM, GSD, and range of radon concentrations by sampling space (Standard : 0.1 ppm)

Sampling Space	No. of Sample	Formaldehyde Concentration, ppm		
		GM	GSD	Range
A	22	0.056	1.693	0.016~0.094
B	14	0.057	1.472	0.026~0.107
C	14	0.077	1.608	0.034~0.125

의 규모가 가장 컸던 “A”에서는 0.016~0.094 ppm이었으며 기하평균값은 0.056 ppm, 중간 규모인 “B”에서는 0.026~0.107 ppm의 농도분포를 보였으며 기하평균값은 0.057 ppm, 가장 적은 규모인 “C”에서는 농도분포가 0.034~0.125 ppm이었으며 기하평균값은 0.077 ppm이었다(Table 3). 평균적으로는 “C” 지역에서 대체적으로 높은 농도분포를 보였으며 각 시료채취 장소별 포름알데히드 농도분포의 통계적 차이는 $\alpha=0.1$ 에서 유의한 차이를 보였다($p=0.086$).

각 지하생활공간별로 농도분포에 차이가 있는 것은 지하상가에서 판매하고 있는 가죽 등의 의류제품이나 화장품 등이 포름알데히드의 발생원이 다르기 때문에 농도가 높아졌을 가능성이 있다. 실제로 “A”보다는 “B”와 “C”에서 포름알데히드의 발생원이 될 수 있는 의류매장 등이 더 많이 입점해 있었다. 또한 시료채취를 하던 시기가 포름알데히드 채취 및 분석의 정확도에 영향을 미칠 수 있는 습도가 높은 여름철에 이루어져서 전체적으로 농도 분포가 높아졌을 가능성을 고려해 볼 수 있다. 이의 차이를 규명하기 위한 더 폭 넓은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

“A”에서 포집 분석한 포름알데히드의 농도분포는 법적 기준인 0.1ppm을 초과한 것이 없어서 기준에 적합하였으나 “B”의 경우는 총 14개의 시료 중 2개, “C”의 경우는 총 14개의 시료 중 4개의 시료에서 법적 기준인 0.1 ppm을 초과하는 것으로 밝혀졌다.

2001년 가을철에 수도권 지역을 대상으로 하여 측정 분석한 포름알데히드의 농도는 기준인 0.1 ppm 이하로 나타났으나, 측정 대상이었던 유치원, 어린이집, 노인복지회관, 병원, 아파트, 도서관, 미술관, 박물관, 공항, 고속버스터미널, 지하철, 지하상가 중 가장 높은 농도분포인 72.4 ppb(Part per Billion)로 나타난 곳 지하상가로 조사되었다.⁴⁾ 1989년에 실시된 지하공간의 공기오염 및 공기 중 미량유해물질에 관한 조사 연구에서 지하환경시설에서 평균농도가 124.2 ppb로 기준치를 초과하고 있었으나 본 연구와는 다른 측정방법인 Standard chromotropic acid 방법을 사용하였기 때문으로 판단된다.¹⁶⁾

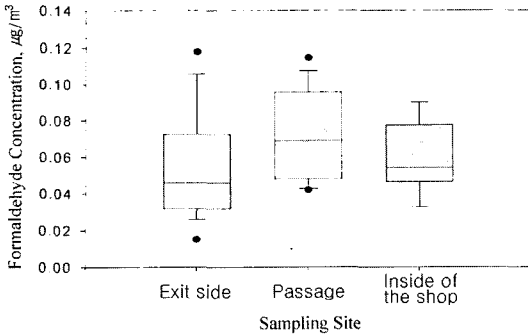


Fig. 1. The distribution of formaldehyde concentrations by sampling site in sampling space.

3. 포름알데히드 농도분포에 영향을 미치는 인자

실내환경에서 포름알데히드를 효과적으로 제거하기 위해서는 우선적으로 농도분포에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 분석하는 것이다. 여러 연구를 통하여 실내환경에서 포름알데히드 농도 분포에 영향을 미치는 오염원은 건축 시 사용한 건축자재, 데커레이션 시 성분, 가구나 실내 가구의 칠, 난방연료의 연소과정, 흡연, 생활용품, 접착제, 의약품 등에서 배출되었을 것으로 판단된다.^{4,14)} 특히 지하생활공간 중 지하상가에서는 각 점포에서 취급하고 있는 의류, 건축자재 중 합판, 가죽제품, 화학약품 등에서 발생되었을 것으로 판단되며 각 발생원에서 발생하는 양을 조사하여 효과적으로 관리하여야 할 것이다.

Fig. 1은 지하생활환경 중에서 시료채취 장소를 외기의 영향을 받는 부분과 이용객이 많이 다니는 통로, 그리고 외기의 영향이 없는 내부로 나누어 살펴본 결과이다. 평균농도 분포는 통로가 가장 높았으나, 농도 분포의 범위는 외기의 영향을 받는 출구 쪽이 넓게 범위로 분포하고 있었다.

기존의 연구결과와 비교 시 계절적으로 다른 계절에 비해 여름철에 더 높은 분포를 한다고 알려져 있는데 시료 채취 시 습도에 의한 영향을 받기 때문으로 밝혀졌다. 측정지점에 대한 실내외(Indoor/Outdoor) 비가 다른 연구자의 결과에 따르면 1.1에서 31.6의 값을 보였으나 본 연구에서는 비록 포름알데히드의 발생원이 상가 내부에 있지만 Table 2에서 보았듯이 환기시설의 확충으로 양압을 유지하고 있어 실내외의 비가 1.4 정도로 나타났다.⁴⁾ 이를 통해 실외에서 포름알데히드가 유입 되었다기보다는 지하생활공간에서 발생한 것으로 생각할 수 있으며 추후 명확한 발생원을 규명할 필요가 있다.

미국에서는 1996년부터 108개의 미량유해물질 중 33

개에 대해서 지속적으로 모니터링을 하면서 그 추이를 분석하여 문제의 본질을 이해하고 환경 정책에 활용하고 있어⁴⁾ 우리나라에서도 지역별 추이 등을 분석하여 위험성평가의 자료로 활용할 수 있도록 준비하여야 할 것이다.

IV. 요약 및 결론

경남지역 3곳의 지하생활공간에 대한 실내공기질을 결정하는 미량 유해물질 중 포름알데히드의 공기 중 시료를 2003년 4월에서 3004년 1월 사이에 측정 분석하여 그 농도 분포와 농도 분포에 영향을 미치는 인자들을 조사, 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 지하생활공간에서는 실내공기질을 관리하기 위하여 급배기가 이루어지는 중앙관리환기시설을 가동하고 있었다. 환기량은 ASHRAE의 건물 용도별 기준을 만족하고 있었다.

2. 시료채취장소별로 포름알데히드의 농도분포는 대수정규분포를 하고 있었으며 그 대표치라고 할 수 있는 기하평균값은 법적 기준을 초과하지 않고 있었다. 지하생활공간별 공기 중 포름알데히드 농도분포는 $\alpha = 0.1$ 수준에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($p=0.086$).

3. 지하생활환경 중 포름알데히드의 농도는 총 50개의 시료 중 6개의 시료가 노출기준인 0.1 ppm을 초과하고 있었다. 시료채취장소인 “A”에서의 포름알데히드 농도는 법적 기준을 만족하고 있었으나 “B”와 “C”에서 각각 2개와 4개의 시료가 기준을 초과하고 있었다.

4. 지하생활공간에서 실내공기질에 영향을 미칠 수 있는 다양한 원인에 기인한 것으로 판단되며, 주요 발생원은 상가에서 판매하고 있는 가죽제품의 의류, 화장품 등의 다양한 발생원이 존재하였다. 또한 주로 측정하였던 시기가 여름철이었던 만큼 시료 채취 시 습도에 의한 영향으로 포름알데히드의 농도가 차이가 있었던 것으로 판단된다.

참고문헌

1. McCarthy, J. F., Bearg, D. W. and Spengler, J. D. : Assessment of indoor air quality. indoor air pollution: A Health Perspective, 82-108, 1998.
2. Harrje, D. T. : Building dynamics and indoor air quality. indoor air pollution: A Health Perspective, 68-81. J.M. Samet and J.D. Spengler, Eds. The Johns Hopkins University Press, London, 1991.
3. Spengler, J. D. : Sources and concentrations of indoor air pollution. indoor air pollution: A Health Perspec-

- tive, 33-67. J.M. Samet and J.D. Spengler, Eds. The Johns Hopkins University Press, London, 1991.
4. 환경부 : 실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방법 연구: 연구보고서, 2002.
 5. Seifert, B. : Organic indoor pollutants: sources, species, and concentrations. chemical, microbiological, health and comfort aspects of indoor air quality-state of the art in SBS, 25-36. H. Knoppel and P. Wolkoff, Eds. ECSC, EEC, Brussels and Luxembourg. Printed in the Netherlands, 1992.
 6. American Conference of Governmental Industrial Hygienists : 2004 TLVs and BEIs: threshold limit values for chemical substances and physical agents, Cincinnati, OH: ACGIH, 2004.
 7. National Institute for Occupational Safety and Health : NIOSH pocket guide to chemical hazards, DHHS (NIOSH) Pub. No. 97-140, Cincinnati, OH: NIOSH, 1997.
 8. US Environment Protection Agency : <http://www.epa.gov/iaq/formalde.html>, 2004.
 9. Hines, A. L. : Indoor air quality and control, New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993.
 10. Ryan, P. B. and Lambert, W. E. : Personal exposure to indoor air pollution. indoor air pollution: A Health Perspective, 109-127, 1994.
 11. US Environmental Protection Agency : Compendium of methods for the determination of toxic organic compounds in ambient air, TO11, NC: EPA, 1988.
 12. National Institute of Occupational Safety and Health : A NIOSH technical report: guidelines for air sampling and analytical method development and evaluation, NIOSH Pub. No. 95-117, Cincinnati, OH: NIOSH, 1995.
 13. Mulhausen, J. R. and Damiano, J. : A strategy for assessing and managing occupational exposures, AIHA Press, 1998.
 14. Wolkoff, P. : The dynamics of the indoor environment and some strategical aspects of indoor measurements. chemical, microbiological, health and comfort aspects of indoor air quality-state of the art in SBS, 15-24. H. Knoppel and P. Wolkoff, Eds. ECSC, EEC, Brussels and Luxembourg. Printed in the Netherlands, 1992.
 15. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) : ASHRAE 62-1989: Standards for Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE, 1989.
 16. 백남원 외 12명 : 지하공간의 공기오염 및 공기 중 미량유해물질에 관한 조사 연구, 한국환경과학연구협의회, 1989.