

실내환경의 환경성담배연기(ETS) 중 카드뮴에 관한 연구

하권철* · 박동욱* · 윤충식**

창원대학교 보건·생화학과, *한국방송대학교 환경보건학과, **대구가톨릭대학교 산업보건학과
(2003. 4. 30 접수, 2003. 7. 24 승인)

Cadmium Concentrations in Environmental Tobacco Smoke of Indoor Environments

Kwon Chul Ha*, Dong-Uk Park*, Chung Sik Yoon**

Kwon Chul Ha · Dong-Uk Park* · Chung Sik Yoon**

Department of Health Science & Biochemistry, Changwon National University, Gyongnam, 641-773, Korea

*Department of Environmental Health, Korea National Open University, Seoul, 110-791, Korea

**Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyongbuk, 712-702, Korea

(Received Apr. 30, 2003, Accepted Jul. 24, 2003)

요 약 : 실내 사무환경에 대해 흡연환경에 따라 흡연실, 흡연 허용 사무실, 비흡연사무실, 흡연실 인접 지역 등을 대상으로 ETS 중 발암물질인 카드뮴을 포함한 금속류, 니코틴, 3-EP, 호흡성먼지 등 지표물질의 농도분포와 이의 분포에 영향을 주는 흡연밀도, 흡연지수 등을 조사하여 그 상관성을 파악하였다. 공기교환횟수는 흡연실과 흡연허용사무실에서 각각 평균 11.1, 4.6 회/시간을 나타냈으며, 흡연밀도는 최고 $2.6 \text{ cig/m}^2 \cdot \text{hr}$ 에서부터 최저 $0.2 \text{ cig/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 나타났다. 금속류 중 카드뮴은 기하정규분포를 보였으며 흡연환경별 기하평균 농도가 흡연실에서 $0.045 \mu\text{g/m}^3$, 흡연실 인근 지역에서 $0.018 \mu\text{g/m}^3$, 흡연허용사무실에서 $0.021 \mu\text{g/m}^3$, 비흡연사무실에서는 $0.017 \mu\text{g/m}^3$ 의 분포를 보였으며 통계적으로는 유의한 차이를 나타냈다($p < 0.05$). 실내 흡연 환경에 따른 카드뮴의 농도 비를 조사한 결과 비흡연실 기준으로 흡연실에서 2.6배, 흡연허용사무실에서 1.2배의 농도 분포를 보였다. 카드뮴과 지표물질간 상관성을 조사한 결과 니코틴과의 상관계수가 0.53 ($p < 0.001$)으로 가장 높게 나타났으며 호흡성먼지와는 0.43, 3-EP와는 가장 낮은 0.41의 상관계수 값을 보였으며, 흡연 밀도와는 0.54 ($P < 0.001$), 흡연지수와는 0.63($p < 0.001$)의 상관계수 값을 보였다. 이러한 연구 결과를 토대로 ETS 중 중금속류에서는 카드뮴을 지표물질로 활용할 수 있다고 판단할 수 있다.

Abstract : The purpose of this study is to investigate cadmium concentrations among metals in ETS (Environmental Tobacco Smoke) of indoor environments and to evaluate the cadmium as a marker of ETS. The correlations of cadmium concentrations and nicotine, 3-EP, RSP, SD (Smoking Density), and SI (Smoking Index). Air samples of metals, nicotine, 3-EP, and RSP were taken in smoking room, smoking allowed office, corridor outside smoking room, and non-smoking office respectively. The

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)55-279-7663 Fax : +82+(0)55-279-7660

E-mail : kcha@sarim.changwon.ac.kr

SD, ACH, and SI were investigated during sampling. Airborne concentration of cadmium known as human carcinogen were qualified and quantified. The SD was 0.2 to 2.6 $\text{cig}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$, and the mean value of SD in smoking rooms was 1.2 $\text{cig}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ that is higher than other researches. The mean of ACH in smoking rooms was 11.1. The concentrations of cadmium showed log-normal distributions and the geometric mean concentrations of cadmium in smoking rooms, corridor outside smoking rooms, smoking allowed offices, and non-smoking offices were 0.045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.018 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.021 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 0.017 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively. The concentrations of cadmium in smoking room showed significant difference according to category of indoor office environments ($p < 0.05$) and showed compliance with occupational exposure limits. The correlation coefficients between cadmium and nicotine, 3-EP, and RSP were 0.53, 0.41, 0.43 respectively. The cadmium among metals showed the highest correlations ($r = 0.63$) with SI. It was recommended cadmium among metals is a good indicator for ETS.

Key words : Environmental Tobacco Smoke (ETS), Cadmium, Smoking Density (SD), Smoking Index (SI)

1. 서 론

환경성담배연기 (Environmental Tobacco Smoke, ETS)는 발암물질로 실내공기질 (Indoor Air Quality, IAQ)을 결정하는 중요한 오염원이며, 흡연자뿐만 아니라 비흡연자에게도 간접흡연을 야기하여 건강에 악영향을 미친다는 연구 결과가 보고되어 이에 대한 사회적인 관심이 증가하고 있다.¹

미국 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 1991년 ETS를 석면이나 벤젠과 같은 발암성 물질로 지정하였으며,¹ 미국 환경보호청 (Environmental Protection Agency, EPA)은 1992년 ETS를 Group A (Known human Carcinogen) 물질로 지정하였다.²

담배를 피울 때 발생하는 담배연기는 흡연자가 직접 들며 마시는 주류연과 담배를 피우는 사이에 앞부분에서 타면서 방출되는 부류연으로 구분할 수 있으며, ETS는 85~90%의 부류연과 10~15%의 호기된 주류연 (exhaled MS)으로 구성되어 있다.³ EPA에서는 “켈런, 담배, 파이프 담배, 시가의 끝 부분이 탈 때 방출되어지는 연기와 흡연자의 폐에서 배출되는 연기의 혼합물”로 ETS를 정의하고 있다.³ ETS는 4천 가지 이상의 화학물질이 포함되어 있으며 이중 상당수의 화학물질이 발암성이거나 독성 및 자극성을 지닌 물질로 밝혀졌다.⁴ 부류연과 주류연은 질적으로는 큰 차이가

없으면서도 흡연 시 온도와 수소이온농도, 희석정도, 산소농도 등에 따라 절대농도, 상 (phase) 분포, 구성입자의 크기에서 차이를 야기하게 되며, 주류연과 부류연의 농도도 다르게 나타나 유해물질 대부분의 경우 부류연에서의 농도가 주류연보다 높게 나타난다.⁴

ETS의 위험성을 평가하기 위해서는 ETS의 성분 분석과 함께 그 노출 정도가 정확하게 측정되어야 하지만 ETS는 여러 가지 복잡한 화학물질로 구성되어 있어 각각의 물질을 독립적으로 관리한다는 것은 매우 어려운 일이다. ETS를 전반적으로 측정 평가하기 위하여 지표 물질이 개발되어 ETS에 노출되는 정도를 평가하고 건강상의 영향에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다.⁵ 여러 연구자들에 의해 Nicotine, 3-Ethenylpyridine (3-EP), 호흡성먼지 (Respirable Suspended Particulate, RSP), 일산화탄소 (CO), 질소산화물 (NO_x), N-Nitrosamines, PAH, 흡연밀도 등이 좋은 지표물질로 추천되고 있으며, 최근에는 ETS에 더욱 특이적인 지표로서 UV-PM (Ultraviolet absorption Particulate Mass), FPM (Fluorescing Particulate Matter), Solanesol 등이 제시되고 있다.⁵

ETS에 존재하는 금속류는 30여 종이나 되며² 그 중 비소, 카드뮴, 크롬6가, 납, 니켈 등은 EPA, IARC (International Agency for Research on Cancer),⁶ 미국정부 산업위생전문가협회 (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)⁷ 등에 의해 인체에 대한 발암물질로 알려져 있다.

실내환경에 존재하는 ETS 중 미량으로 존재하는 발암물질의 농도 분포와 건강상의 영향에 대한 연구와 기존 지표물질과의 비교 분석 자료에 대한 연구는 아직 미흡하며 일부 연구 결과는 환경변화에 대한 고려 없이 일정한 조건하의 실험실에서 이루어지거나 환경 중 농도 분포만 조사되어 있어 그 활용이 제한적이다.⁸

Loh 등,⁹ Kalcher 등¹⁰은 ETS 중 발암물질인 카드뮴, 납을 대상으로 공기중 농도 분포와 폐암과의 연관성에 대한 연구를 진행하여 왔으며, 담배 1 개피당 카드뮴이 110 ng 이상이 배출되고 있다고 보고하였다. 국내에서 흡연과 관련하여 행해진 연구는 주로 일산화탄소, 휘발성 유기화합물, 산화질소, 타르, 니코틴 등 유해가스 성분에 대해서 보고하고 있는 반면 흡연 시 나오는 중금속 성분과 이들의 인체 내 생화학적 반응 등에 관한 보고는 아직까지 미흡한 실정에 있다.¹¹

이에 따라 ETS 중 카드뮴 등 중금속에 대해 흡연 환경에 따른 농도 분포를 조사하여 흡연환경별로 차이가 있는 지를 확인하고, 기존 지표물질인 니코틴, 3-EP, 호흡성먼지, 흡연밀도 등과의 상관성을 조사하여 카드뮴을 지표물질로 활용할 수 있는 지를 평가하였다. 또한 기존 지표물질과의 상관성 분석을 통해 발암물질인 카드뮴의 수준을 추정할 수 있고 더 나아가 이를 위험성 평가에 활용할 수 있을 것이다.

2. 대상 및 방법

2.1. 대상

2000년 4월부터 2001년 4월까지 평택, 구미, 창원의 실내 사무환경에 대해 흡연실 4 개소, 흡연실과 인접한 복도 4 개소, 흡연이 허용되는 사무실 3 개소, 비흡연사무실 5 개소를 대상으로 흡연을 통하여 발생하는 ETS의 수준을 파악하기 위하여 카드뮴을 포함한 금속류, 지표물질인 니코틴, 3-EP, RSP 등을 시료 채취하였다.

농도 결정 시 환경 요소로 제시된 것은 공간의 체적, 흡연밀도(Smoking Density, SD), 시간당공기교환횟수(Air Change per Hour, ACH), 그리고 이들 두 가지 요소를 동시에 고려하는 흡연지수(Smoking Index, SI) 등으로 환경요인 변화에 따른 금속 및 지표물질 등의 농도 분포를 파악하고 그 상관성을 분석하여 지표로서의 적합성을 규명하였다.

2.2. 연구 방법

2.2.1. 공기 중 중금속 채취 및 분석

ETS 중 중금속의 측정분석 방법은 NIOSH Method No. 7300을 응용하였다.¹² 고유량 시료채취기(High Volume Air Sampler, MSA Escort LC Pump, USA)를 약 2.5 l/min의 유량으로 맞추어 약 8 시간동안 MCE 막여과지(직경 37 mm, 0.8 μm Pore Size, Mixed Cellulose Ester Membrane Filter, Gelman Science, USA)를 이용하여 공기 중 시료를 채취하였다. 시료채취 전후에 시료채취기에 대한 유량을 보정하였다(Gilian Gilibrator-2, USA).

시료채취 후 여과지에 65%의 질산(GR reagent, Matsunoen Chemical Co., Japan) 5 ml를 가하고 초음파 오븐(Microwave Digestion System, MDS-2100, CEM Corp., USA)을 가동하여 여과지를 회화시킨 후 유도결합플라즈마-질량분석기(ICP-MSD; Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrum Detector, Varian Ultramass, Australia)를 이용하여 각각의 과정에서 중금속 종류에 따른 양을 측정하였다. 중금속의 회수율을 구하기 위해 3단계 농도 수준에서 각각 3개씩 여과지에 주입한 후 하루동안 보관한 뒤 현장시료와 같이 처리 분석하여 시료에 적용하였다. 중금속별 회수율은 카드뮴 99%, 크롬 102%, 납 97%였다. 초음파 오븐과 ICP-MSD의 가동 조건은 Table 1 및 2와 같다.¹³

Table 1. Instrumental Parameters of Microwave Digestion System

Parameter	Stage		
	1	2	3
Power (W)	50	70	100
Pressure (psi)	10	25	50
Ramp Time (Min)	5	15	20
Hold Time (Min)	3	10	15
Temp.	200	200	200
No. of Vessel	12		
Liquid Volume per Vessel	5 ml		

Table 2. ICP-MS Conditions for the Analysis of Airborne Metals

Variable	Conditions
Instrument	Varian Ultramass
Power	1200 W
Plasma Gas Flow Rate	15 l/min
Intermediate Gas Flow Rate	0.8 l/min
Nebulizer Gas Flow Rate	0.8 l/min*
Nebulizer	Cross Flow, Conical Nebulizer Glass Expansion, Australia
Spray Chamber	Raton™ Double Pass
Cones	Nickel
Resolution	0.7±0.1 amu
Isotopes	Cr 52, Cd 111, Pb 208
Dwell Time	100 ms
Sweeps	25 per reading
Mode	Normal Resolution
Diluent	2 % Hydrochloric acid
Internal Standard	100 µg Rh 103/l

* Nebulizer gas flow changes with optimization.

2.2.2. 공기 중 지표물질의 채취 및 분석

2.2.2.1. 니코틴과 3-EP

니코틴의 채취는 미국 NIOSH의 공정시험법 2551에 따라 XAD-4 흡착관 (80/40 mg, SKC Inc., USA)을 개인시료채취기에 연결하여 1 l/min의 유량으로 5시간 정도 지역시료로 채취하였다. 채취된 시료는 빛에 노출되지 않게 냉장 보관하였다.¹² 니코틴의 분석은 NIOSH 공정시험법 2551에 따라 질소인 검출기(Nitrogen-Phosphorus Specific Detector, NPD)가 장착된 가스크로마토그래피(Gas Chromatography, Hewlett Packard 5890A, USA)를 이용하였다(Table 3). 흡착관의 전후 층을 구별하여 각각 바이얼에 넣고 1 ml의 탈착액을 넣었다. 탈착 효율은 3단계 농도수준에서 각각 3개씩 XAD-4 흡착관에 주입시킨 후 하루동안 어두운 곳에 보관한 뒤 현장시료와 같이 처리하여 분석하여 시료에 적용하였다. 니코틴의 탈착용매로는 0.01% Triethylamine을 포함한 Ethyl Acetate를 이용하였으며 내부 표준 물질로써 Quinoline을 사용하였다. 3-EP는 Bertoni 등의 실험방법에 따라 니코틴과 동일한 방법으로 동일 흡착관에 채취하여 분석하였다.¹⁴

Table 3. The conditions of nicotine and 3-EP analysis

Variable	Conditions
GC	Hewlett Packard 5890A. USA
Detector	Nitrogen-Phosphorus Specific Detector
Injector	Capillary Split Mode
Column	25 m × 0.32 mm ID 0.25 µm Film Thickness HP 5, Hewlett Packard. USA
Carrier Gas	He
Flow Rate	1.5 ml/min
Split Ratio	5 : 1
Injector Volume	1 µl
Injector Temp.	200 °C
Detector Temp.	300 °C
Temp. Program	160 °C Iso-Thermal Mode

2.2.2.2. 공기 중 호흡성 먼지의 측정 및 분석

호흡성먼지의 정의는 NIOSH에서 정의하고 있는 ‘Aerosol Collected by Sampler with 4-µm Median Cut Point’를 따랐다.¹² 호흡성먼지의 채취는 미국 NIOSH의 공정시험법 0600에 따라 데시케이터에 하루이상 컨디셔닝 시킨 0.45 µm 공극의 PTFE (Polytetrafluorethylene) 여과지(SK C Inc., USA)를 2단 카세트에 넣어 조립한 뒤 10 mm-Nylon Cyclone에 장착하여 1.7 l/min의 유량으로 5시간 정도 지역시료로 채취하였다. 시료를 채취한 카세트를 데시케이터에 넣고 하루 이상 컨디셔닝 시킨 후 여과지의 무게를 재고 채취 후의 여과지 무게에서 채취전의 무게를 빼서 이를 통과시킨 공기의 양으로 나누어 농도를 계산하였다.

중금속과 지표물질을 분석할 때 매 5개의 시료마다 공시료를 하나씩 분석하였으며 금속류 중 카드뮴, 크롬, 납, 지표물질 중 니코틴, 호흡성먼지, 3-EP 등의 LOD (Limit of Detection) 값은 Table 4와 같다.

Table 4. LOD of Heavy Metals and Indicators for ETS

Heavy Metal	LOD(µg/m ³)
Cadmium	0.00036
Chromium	0.00018
Lead	0.00018
RSP	23.7
Nicotine	0.827
3-EP	0.476

2.2.3. 환경영향 인자 평가

2.2.3.1. ACH의 측정 및 계산

ACH는 일정시점에서 이산화탄소 농도를 측정하고 일정 시간 후에 다시 농도를 측정하여 경과된 시간동안 감소된 농도를 시간으로 나누어 구하는 이산화탄소 농도 감소법 (CO₂ Decay Method)으로 측정하였다. 이산화탄소 농도 감소법은 것이다. 미국 TSI사의 IAQ Calibration Kit으로 한 달에 1회 보정한 Q-Check CO₂ Meter (Model 8731, TSI, USA)를 사용하여 실내의 이산화탄소 농도를 1700 ppm 정도로 올린 다음에 이것이 일정한 농도로 떨어지는 시간을 측정하여 식 (1)을 이용하여 ACH를 계산하였다.¹⁵

$$ACH = \frac{\ln(C_{initial} - C_{out}) - \ln(C_{end} - C_{out})}{Time(hr)} \dots \text{식 (1)}$$

C_{initial} = Concentration at Start of Test
 C_{out} = Outdoor Concentration, 330 ppm
 C_{end} = Concentration at End of Test

2.2.3.2. SD의 측정 및 계산

ETS 지표물질들을 측정 분석하였을 때 측정된 농도의 어느 정도가 흡연률에 의하여 설명 가능한 지를 제시하기 위하여 흡연률의 간접적인 지표인 SD를 계산하여 측정 물질과의 상관성을 분석하였다. SD (cig/m²·hr)는 채취 시간당 흡연된 담배 수를 실내의 면적으로 나누어 계산하며 그 식은 (2)와 같다.¹⁶ 흡연한 담배의 수는 시료의 채취시간동안 흡연실에서 피워진 담배꽂초를 모아서 계수 하였다.

$$SD(cig/m^2 \cdot hr) = \frac{No. of Smoked Cigarettes(cig)}{Area(m^2) \times Sampling Time(hr)} \dots \text{식 (2)}$$

2.2.3.3. SI 계산

실내환경 중 ETS에 영향을 미치는 환기율과 흡연량을 동시에 고려하는 지수로 챔버실험에서 사용하는 SI가 있다. SI는 식 (3)에서 보는 바와 같이 담배연기 발생율과 환기량으로 구성되는데 연기발생율은 ETS가 발생되도록 태우는 담배의 수로 표시하였으며 환기율은 ACH로 계산하였다.

$$SI = \frac{G}{Q} \dots \text{식 (3)}$$

SI: Smoking Index
 G: Smoke Generation Rate(Smoking Density)
 Q: Dilution Flow Rate(Air Change per Hour)

2.2.4. 자료의 통계 분석

금속류와 지표물질, SD, SI간 상관성 검토, 시료채취 장소별 농도 차이를 규명하기 위해 ANOVA와 회귀분석을 실시하였다. ETS의 성분들은 대체적으로 대수정규분포를 하고 있기 때문에 대표값으로 기하평균(Geometric Mean, GM)과 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD) 등을 통계치로 제시하였다. 이 때 LOD 값은 공시료 기하표준편차의 3배로 계산하였으며, LOD 미만으로 나온 측정값들에 대해서는 검출한계의 1/2값으로 분류하여 통계처리에 이용하였다.

자료의 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 (Version 7.0, Microsoft Corp., USA)를 이용하여 분석하였다.

3. 결 과

3.1. ETS 중 중금속과 지표물질의 분포

3.1.1. 실내 사무 환경조건

실내사무환경을 흡연 환경에 따라 흡연실, 흡연실 인접 지역, 흡연허용사무실, 비흡연실 등으로 나누어 조사하였으며 시료채취 장소에 대한 특성과 흡연실 및 흡연허용사무실에 대한 SD와 ACH를 조사하여 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

조사대상 장소에서 HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning) 시스템이나 일반적인 배기 팬을 환기시설로 이용하고 있었다. 평택에 위치한 사무건물의 경우는 실내 환경에 대해 HVAC 시스템으로 중앙 제어하여 실내공기질을 유지하기 위하여 적절한 공기를 공급하고 있었으나 창원이나 구미의 경우는 송풍기를 이용한 회석환기를 사용하거나 일반적인 회석환기를 통해서 실내공기질을 조절하고 있었다.

ACH는 흡연실에서 11.1, 흡연허용사무실에서 4.6의 값을 보였으며 일반 회석환기를 사용하는 "C"에서 가장 낮은 2.9 ACH를 보였으며 좁은 공간에서 4개의

Table 5. Characteristics and Description of Sampling Site

Sampling Site		ACH(Air Change/Hour)	Area (m ²)	Smoking Density (Cig. No. /m ² · hr)	Smoking Index (SD/ACH)	Remarks
City	Condition					
Pyung Tek	A Smoking Room	7.2	13.9	0.64	0.09	HVAC System
	B Smoking Allowed Office	5.9	18.1	0.29	0.05	HVAC System
Chang Won	C Smoking Allowed Office	2.9	17.2	0.22	0.04	General Ventilation
	D Smoking Allowed Office	5.0	17.2	0.56	0.11	General Ventilation
	E Smoking Room	18.6	9.8	2.59	0.14	4 Fans, General Ventilation
Gumi	F Smoking Room	5.9	15.4	1.35	0.13	1 Fans, General Ventilation
	G Smoking Room	12.8	5.9	2.61	0.20	2 Fans, General Ventilation

송풍기로 환기를 하고 있는 "E"에서 가장 높은 18.6 ACH 값을 보였다.

3.1.2. 중금속

ETS 중 금속류에 대한 시료 채취 후 마그네슘, 크롬, 망간, 철, 니켈, 구리, 아연, 카드뮴, 납 등과 니코틴, 3-EP, 호흡성먼지 등에 대해 측정 분석한 결과를 Fig. 1에 흡연환경별로 분포도를 표시하였다. 카드뮴을 제외한 대부분의 금속 성분들이 흡연 환경조건에 따른 농도분포 차이를 보이지 않았으며 오히려 비흡연사무실에서 더 높은 농도 분포를 보였다. 니켈의 경우는 모든 실내 환경에서 검출한계 미만으로 나타났다.

실내환경의 ETS에 포함된 금속류 중 흡연과 관련하여 많이 연구되고 있는 물질이 카드뮴, 크롬, 납이다. 기존 연구 결과 흡연과 밀접한 상관성을 보여 지표물질로 추천되고 있는 카드뮴은 발암물질로 의심되고 있는 물질이다. 시료채취장소별로 나타난 카드뮴, 크롬, 납의 농도 분포를 Table 6에 나타내었다. 흡연 환경 조건에 따른 카드뮴의 기하평균 농도는 흡연실에서 0.045 µg/m³ (범위 0.03 ~ 0.18 µg/m³), 흡연실인접지역에서 0.018 µg/m³, 흡연허용사무실에서 0.021 µg/m³, 비흡연실에서 0.017 µg/m³로 분포하고 있어 흡연실에서 가장 높게 분포하고 있고 흡연실과 가까운 복도, 흡연허용사무실간에는 α=0.05 수준에서 통계적으로 유

의한 차를 보였으나 흡연허용사무실과 비흡연사무실, 흡연인접지역간 농도 분포의 차이에 대한 분산분석에서는 통계적으로 유의하지 않았다 (p>0.15).

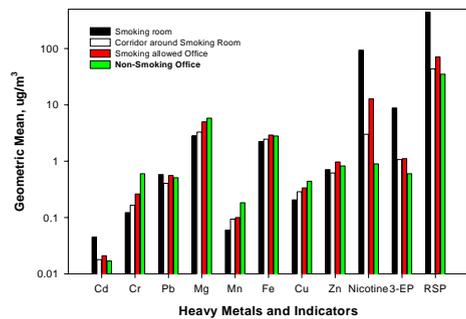


Fig. 1. Comparison of Geometric Mean of Heavy Metals and Indicators for ETS by Category of Indoor Office Environments.

크롬의 경우는 비흡연사무실에서 가장 높게 분포하였으며(p=0.039), 납의 경우는 흡연실이 가장 높게 나타났으나 비흡연사무실이나 흡연허용사무실에서도 상당량이 검출되어 흡연실과 명확한 차이를 보이지 않아 크롬과 같이 흡연 관련성이 낮다고 할 수 있다(p=0.359).

Table 6. Descriptive Statistics of Airborne Chromium, Cadmium, and Lead Concentrations for ETS by Category of Office Environments

Indicator	Indoor Environment	No. of Samples	Geometric Mean, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Range, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Geometric Standard Deviation
				min.	max.	
Cr	Smoking Room	7	0.121	0.06	0.31	1.73
	Corridor outside Smoking Room	4	0.168	0.09	0.58	2.39
	Smoking allowed Office	6	0.263	0.06	1.33	4.07
	Non-smoking Office	8	0.602	0.09	2.61	2.59
Cd	Smoking Room	7	0.045	0.03	0.18	2.14
	Corridor outside Smoking Room	4	0.018	0.01	0.04	1.67
	Smoking allowed Office	6	0.021	0.02	0.03	1.26
	Non-smoking Office	8	0.017	0.01	0.05	1.79
Pb	Smoking Room	7	0.581	0.32	1.15	1.57
	Corridor outside Smoking Room	4	0.409	0.17	0.99	2.06
	Smoking allowed Office	6	0.562	0.18	1.00	1.88
	Non-smoking Office	8	0.508	0.13	6.46	4.51

흡연환경 조건에 따라 카드뮴 농도를 누적확률분포로 표시하면 Fig. 2와 같이 나타난다. 흡연실 등에서 카드뮴의 농도는 W-test (Shapiro and Wilk test)를 통해 확인한 결과 대수정규분포를 하고 있었다 ($p < 0.05$).

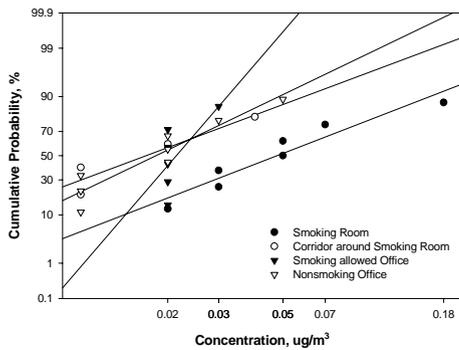


Fig. 2. Cumulative Probability Distributions of Cadmium Concentrations by Smoking Condition.

3.1.3. 지표물질

지표물질 세 가지 모두 흡연실에서 가장 높게 나타났으며 $\alpha=0.01$ 수준에서 흡연환경 별로 통계적으로

유의한 차이를 보였다 ($p < 0.01$). 그림 1에서 보는 것처럼 니코틴의 경우 호흡성먼지나 3-EP의 농도분포와는 달리 흡연허용사무실과 흡연실인접지역간 농도 차이가 명확하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

흡연실, 흡연허용사무실, 흡연실인접지역, 비흡연사무실별로 각 지표물질의 기하평균값을 확인한 결과 니코틴은 93.4, 12.8, 3.0, 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 호흡성먼지는 441.7, 43.4, 70.7, 35.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 3-EP는 8.8, 1.11, 1.07, 0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 보여 흡연 환경과 밀접한 연관성을 보여주고 있었다.

3.2. 카드뮴과 지표물질 및 환경인자간 상관관계

3.2.1. 카드뮴과 지표물질간 상관관계

지표물질과 금속류 중 카드뮴과의 상관성을 알아보기 위해서 발암물질인 카드뮴을 대상으로 기존의 연구결과 지표물질로 추천되고 있는 니코틴, 3-EP, 호흡성먼지와 상관성을 분석하기 위하여 시료채취별로 짝을 지어 회귀분석을 실시하여 상관계수(Correlation Coefficient, r) 값으로 그 결과를 표시하였다 (Fig. 3).

카드뮴과 상관성이 가장 높은 지표물질은 상관계수 값이 0.53인 니코틴으로 조사되었다. 그러나 카드뮴은 입자상 물질이고 니코틴은 가스 및 증기상 물질이기 때문에 상관성이 떨어질 것으로 예상되었으나 오히려

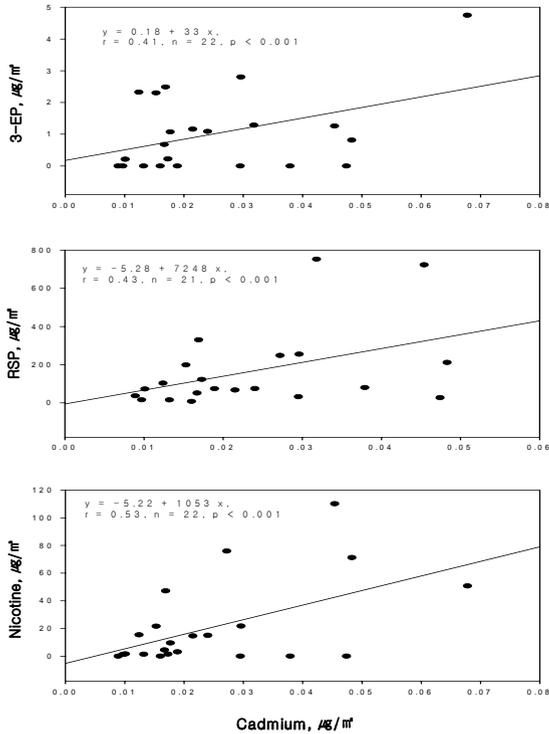


Fig. 3. Regression Plot between Cadmium Concentration and RSP, Nicotine, 3-EP Concentration.

입자상 물질인 호흡성먼지($r=0.43$)보다 높은 상관성을 보였다. 카드뮴과 3-EP와의 상관성 분석에서 0.41의 상관계수를 보여 지표물질 중 가장 낮은 상관관계를 나타냈다.

ETS 성분을 직접적으로 평가한다는 것은 불가능하므로 노출지표와 다른 구성분의 성분비(Ratio) 조사하여 노출량 추정에 사용한다면 ETS를 효과적으로 관리하는데 큰 도움이 될 것이다. Table 7은 니코틴과 호흡성먼지, 카드뮴을 비흡연사무환경을 기준으로 흡연환경이 달라짐에 따라 농도비가 어떻게 나타나는가를 보여준다. 니코틴의 경우는 비흡연사무실을 기준으로 흡연실 104배, 흡연허용사무환경 14.3배를 나타냈으며, 3-EP의 경우는 흡연실에서 14.4배, 흡연허용사무실 1.8배의 농도를 보였다. 호흡성먼지의 경우는 흡연실에서 12.6배, 흡연허용사무실에서 2.0배에 해당하는 농도 분포를 보였다. 카드뮴의 경우는 흡연실에서 2.6배, 흡연허용환경에서 1.2배에 해당하는 농도분포를 보였다. 흡연환경별 농도 변화가 가장 큰 물질은 니코틴이었다.

Table 7. The Ratios of Indicator Concentration in Non-smoking Office to Indicator Concentrations in Smoking Room and Smoking allowed Office

	Ratio		
	Nicotine	RSP	Cadmium
Non-smoking Office	1(0.9)*	1(35.1)	1(0.017)
Smoking Room	104(93.4)	13(441.7)	2.6(0.045)
Smoking allowed Office	14(12.8)	2.0(70.7)	1.2(0.021)

* Geometric Mean values($\mu\text{g}/\text{m}^3$) included in parentheses.

3.2.2. 카드뮴과 환경조건간 상관관계

ETS 구성 성분의 농도와 SD는 양의 상관성을 갖고 ACH는 음의 상관성을 갖는다. 즉 SD가 높을수록 ETS의 농도는 높아질 것이고 ACH가 작을수록 ETS의 농도는 높아질 것이다. SD의 경우 이들 지표물질과 직접 상관성 조사를 실시하였으며, 환기량과 SD를 동시에 고려하는 SI를 이용하여 상관성을 분석하였다.

ETS의 금속 성분과 흡연 환경 조건 중 SD와의 상관성을 분석한 결과 크롬 0.01, 납 -0.01, 마그네슘 -0.01의 낮은 상관계수 값을 보였으며 가장 높은 상관관계를 보인 물질은 카드뮴으로 0.54의 상관계수 값을 나타내었다($p<0.001$). SI와 카드뮴 농도 분포와의 상관계수 값은 0.63으로 SD보다 더 높은 상관성을 보였다.

4. 고 찰

흡연 환경별로 중금속의 농도 분포를 확인한 결과 카드뮴만이 흡연과 관련한 상관성을 보였다. 카드뮴의 농도분포는 ACGIH나 우리나라 노동부에서 제안하고 있는 산업보건 노출기준에 훨씬 미치지 못하였으며, ASHRAE (American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)에서 실내공기질 기준으로¹⁷ 제안하고 있는 미국 ACGIH의 TLVs (Threshold Limit Values) TWA (Time Weighted Average)의 1/10 수준인 $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 측정치와 비교해 보았을 때도 기준을 초과한 곳은 없었다(Table 6). 최고 높은 농도 분포를 보인 곳은 구미 지역 사업장의 면회실내 흡연실로 $0.183 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 수준을 나타내었으며, 또한 이곳에서 가장 높은 SD와 SI 값을 보였다. Wu 등이¹⁸ 조사한 카드뮴의 농도자료는 식당 $0.006 \sim 0.021 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 음악클럽 $0.011 \sim 0.038 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기차 $0.025 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 등으로 이와 비교해 보면 흡연실의 카드뮴 농도 $0.043 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 식당,

음악클럽, 기차 등에서의 농도보다 더 높은 수준이었으며 흡연허용사무실의 농도 $0.021 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 기차나 음악클럽의 농도와 비슷한 수준이었다.

카드뮴의 농도분포를 흡연환경별로 비를 조사한 결과 비흡연환경 대비 약 2.6배의 분포 차이를 보였다. Leaderer 등이¹⁹ 연구한 바에 따르면 흡연거주지역과 비흡연거주지역에서 농도분포가 약 3 배의 ETS 농도 분포 차이를 보인다고 보고하였다. 본 연구에서 이와 비슷한 결과를 얻었으나 니코틴 76배, 호흡성먼지 9.8 배의 농도분포 차이보다는 낮은 값이었다.

지표물질간 상관분석은 카드뮴이 니코틴과 가장 높은 상관계수 값인 0.53, 호흡성먼지와는 0.45, 3-EP와는 0.41의 값을 보였다. Turner 등,¹⁶ Leaderer 등,¹⁹ Coultas 등,²⁰이 조사한 바에 따르면 니코틴과 호흡성 먼지는 각각 0.54, 0.71, 0.73의 상관계수 값을 갖는다고 밝혔다. 카드뮴의 경우 니코틴과의 상관성이 Coultas 등의²⁰ 연구 결과와 비슷하였으며 일산화탄소나 이산화탄소보다는 높은 상관성이 관찰되었다. 본 연구 결과 카드뮴이 니코틴, 3-EP, 호흡성먼지 등 지표물질 보다는 흡연과의 상관성 정도는 높지 않았으나 금속류 중에서 가장 높은 상관성을 보였다. Wu 등이¹⁸ 조사한 바에 따르면 카드뮴의 경우 ETS의 좋은 지표물질이 된다고 제안하였다. 이에 대한 근거로 카드뮴이 흡연과 관련하여 흡연여부에 따라 농도 분포가 명확하게 차이가 나며, 담배에서 $1.28 \pm 0.17 \mu\text{g}$ 의 카드뮴이 존재하며 담배간 차이는 유의하지 않았으며, 담배에 존재하는 전체 카드뮴 양의 44 %가 ETS로 발생되며, ETS 중 카드뮴의 제거되는 속도가 느리며 발생원의 강도와 직선형의 상관성을 나타낸다는 것을 들고 있다.

환경요인으로 고려한 SD의 경우 ETS와 양의 상관성을 가져 SD가 증가할수록 지표물질의 농도는 증가하게 된다. 중금속 중 가장 높은 상관계수 값을 나타낸 것은 카드뮴으로 0.54의 상관계수 값을 보여 Turner 등이¹⁶ 연구한 호흡성먼지 (0.518)와 비슷한 수준이었으며 니코틴 (0.707)보다는 낮은 값이다. SD와 환기량을 고려한 SI와의 상관관계에서도 카드뮴의 경우 0.63의 비교적 높은 양의 상관성을 나타내어 Rando 등의²¹ 연구와 비교적 일치하고 있었다. SD가 높은 "E"와 "G"의 경우 충분한 환기량이 제공되고 있어 $0.027 \sim 0.045 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도분포를 보였으나 이들 지역보다 낮은 1.25의 SD를 보인 "F" 흡연실의 경우 $0.048 \sim 0.183$ 의 높은 카드뮴 농도분포를 보였다. 이를 통해 흡연실의 SD가 높

더라도 환기량으로 어느 정도 수준까지는 관리할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

발암물질인 카드뮴을 지표물질로 활용할 경우 흡연자와 비흡연자의 시간활동(Time-Activity) 조사 등을 통해서 ETS 자체나 다른 발암물질에 대한 노출량을 추정할 수 있을 것이며 궁극적으로는 암발생의 위험도 차이를 추정할 수 있을 것이다.

5. 결 론

2000년 4월부터 2001년 4월까지 평택, 구미, 창원시의 실내 사무환경에 대해 흡연환경에 따라 흡연실 4 개소, 흡연이 허용되는 사무실 3 개소, 비흡연사무실 5 개소, 흡연실 인접 지역 4개소를 대상으로 ETS 중 발암물질인 카드뮴을 포함한 금속류, 니코틴, 3-EP, 호흡성먼지 등 지표물질의 농도분포를 공정시험법에 따라 분석 평가하고, 실내 환경에서 ETS 농도 분포에 영향을 주는 요인인 SD, SI 등을 조사하여 상관성을 파악하였다. 연구결과는 다음과 같다.

ACH는 흡연실과 흡연허용사무실에서 각각 평균 11.1, 4.6의 값을 나타냈으며, SD는 최고 $2.6 \text{ cig}/\text{m}^3\cdot\text{hr}$ 에서부터 $0.2 \text{ cig}/\text{m}^3\cdot\text{hr}$ 까지 보였다. SI의 경우 평균 0.11의 값을 보였다.

금속류 중 카드뮴은 기하평균분포를 보였으며 흡연환경별 기하평균 농도가 흡연실에서 $0.045 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 흡연실 인접 지역에서 $0.018 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 흡연허용사무실에서 $0.021 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비흡연사무실에서는 $0.017 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 보였으며 통계적으로는 유의한 차이를 나타냈다 ($p < 0.05$). 실내 흡연 환경에 따른 카드뮴의 농도 비를 조사한 결과 비흡연실 기준으로 흡연실에서 2.6배, 흡연허용사무실에서 1.2배의 농도 분포를 보였다.

카드뮴과 지표물질 및 환경요인간 상관성을 조사한 결과 니코틴과의 상관계수가 0.53 ($p < 0.001$)으로 가장 높게 나타났으며 호흡성먼지와는 0.43, 3-EP와는 가장 낮은 0.41의 상관계수 값을 보였다. 흡연밀도와는 0.54 ($P < 0.001$), SI와는 0.63 ($p < 0.001$)의 상관계수 값을 보였다.

이러한 연구 결과를 토대로 ETS 중 중금속류에서는 카드뮴을 지표물질로 활용할 수 있다고 판단 할 수 있다.

참고 문헌

1. The National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH), Current Intelligence Bulletin 54: Environmental Tobacco Smoke in the Workplace - Lung Cancer and Other Health Effects. NIOSH Publication No. 91-108(1991).
2. US Environmental Protection Agency(EPA), Respiratory Health Effects of Passive Smoking: Lung Cancer and Other Disorders. Washington DC, US Environment Protection Agency, Office of Health and Environmental Assessment, EPA/600/ 6-90/006F(1992).
3. Environment Protection Agency(EPA), <http://www.epa.gov/iaq/ets.html>. ETS(1999).
4. J. L. Repace, A. H. Lowery, Indoor Air Pollution, Tobacco Smoke, and Public Health. Science 208:464(1980).
5. National Academy of Sciences, National Academy of Sciences Report: Environmental Tobacco Smoke, Measuring Exposure and Assessing Health Effect : GPO : Washington, DC(1986).
6. International Agency for Research on Cancer (IARC), IARC Monographs on Overall Evaluation of the Carcinogenicity to Humans : an updating of IARC Monographs(1997).
7. American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices(2003).
8. L. C. Holcomb, *Concentration and Exposure, Environ. Int.*, **19**:9-40(1993).
9. H. S. Loh, C. W. Wilson, *Lancet* **26**(1): 491(1972).
10. K. Kalcher, W. Kern, R. Pietsch, *Sci Total Environ.*, **128**(1):21-35(1993).
11. 박현미, 환경성담배연기(ETS)에 의해 발생하는 중금속에 관한 연구, 서울대 보건대학원 석사학위 논문(2000).
12. National Institute for Occupational Safety Health(NIOSH), Manual of Analytical methods, 4th ed, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease control and Prevention, NIOSH(1994).
13. G. Scherer, H. Barkemeyer, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **7**(1): 71-8(1983).
14. G. Bertoni, V. D. Palo, R. Tappa, M. G. Bertoni, V. D. Palo, *Chromatographia*, **43**: 296-300(1996).
15. J. T. Jankovic, R. Ihle, D. O. Vick, *American Industrial Hygiene Association Journal* **57**: 756-759(1996).
16. S. Turner, L. Cyr, A. J. Cross, *Env. International*, **18**:19-28(1992).
17. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), ASHRAE 62-1989: Standards for Acceptable IAQ, ASHRAE(1989).
18. D. Wu, S. Landsberger, S. M. Larson, *Environ. Sci. Technol.*, **29**:2311-2316(1995).
19. B. P. Leaderer, K. Hammond, *Environ. Sci. Technol.*, **25**:770-777(1991).
20. D. B. Coaltas, J. M. Samet, J. F. Mccarthy, *Am. Rev Respir. Dis.* **142**:602-606(1990).
21. R. J. Rando, P. K. Menon, H. G. Poovey, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **53**(11):699-704(1992).