

# 환경담배연기로 인한 실내공기 중 PM2.5 및 미량성분 오염 특성 Indoor Air Quality Pollution of PM2.5 and Associated Trace Elements Affected by Environmental Tobacco Smoke

임종명\* · 이진홍<sup>†</sup>

Jong-Myoung Lim\* · Jin-Hong Lee<sup>†</sup>

\*한국원자력연구원 환경방사능평가팀 · 충남대학교 환경공학과

*\*Environmental Radioactivity Assessment Team, Korea Atomic Energy Research Institute*

*Department of Environmental Engineering, Chungnam National University*

(2013년 9월 2일 접수, 2014년 4월 22일 수정, 2014년 4월 28일 채택)

**Abstract :** Environmental tobacco smoke (ETS) samples were collected separately in mainstream and side-stream smoke using a self-designed smoking machine, and a total 40 of PM2.5 was collected with low volume air sampler at indoor environments with and without ETS in Daejeon, Korea. About 20 trace elements including toxic metals like As, Cr, Mn, Se, V, and Zn were determined in PM2.5 and ETS samples by instrumental neutron activation analysis (INAA). It is found that the emission factors of K, Cl, Na, and Al were much higher than those of toxic elements for both mainstream and side-stream smoke. The average concentration of PM2.5 was enriched by 1.5 times at smoking area ( $58.7 \pm 18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) than at smoking free area ( $38.6 \pm 12.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The concentration ratio of each element between smoking and smoking free area were ranged from 1.1 to 6.0 except Cu (1.0); especially, Ce (6.0), La (5.2), K (2.3), and Co (2.0) showed higher ratio, which suggests that the ETS is one of the possible increasing factors of PM2.5 and elemental concentration at indoor environment.

**Key Words :** *Environmental Tobacco Smoke (ETS), Indoor Air Quality, PM2.5, Trace Elements, Instrumental Neutron Activation Analysis*

**요약 :** 본 연구는 흡연기작을 모사한 시료채취장비를 이용하여 환경담배연기를 주류연기와 비주류연기로 구분하여 채취하고, 환경담배연기 중의 미량원소성분을 중성자방사화분석을 이용하여 분석하였다. 또한, 실내공기 중 PM2.5를 집중적으로 채취하고 인체 영향이 큰 As, Cr, Mn, Se, V, Zn를 비롯한 약 20종의 미량원소를 분석하여 그 화학적 특성을 파악하며 환경담배연기가 실내공기질에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 담배개피 당 미량원소 발생량은 Cl, K, Na 등을 제외한 대부분의 원소에서 비주류연기에서 더 높게 나타났고, K, Cl, Na, Al의 발생량은 개피 당 1  $\mu\text{g}$  이상으로 가장 많았고, Br, Fe, Zn도 높은 배출량을 보여 외부오염원과 독립적으로 실내 환경에서의 Br, Cl, Fe, K, Zn의 농도 증가에 환경담배연기가 기여하는 것으로 판단된다. PM2.5의 농도는 흡연 사무실은  $58.7 \pm 18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 반면, 비흡연 사무실은  $38.6 \pm 12.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보여 ETS에 의해 흡연 사무실에서 1.5배 정도 높게 나타났고, 미량원소의 농도비는 Cu (1.0)를 제외한 모든 원소에서 농도비의 평균값이 1.1~6.0으로 흡연 사무실의 원소 농도가 비흡연 사무실의 원소 농도보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 환경담배연기가 실내 공기 중 PM2.5와 미량원소의 농도 증가의 한 원인인 것을 보여주고 있다.

**주제어 :** 환경담배연기, 실내공기질, 미세분진, 미량원소, 중성자방사화분석

## 1. 서론

실내의 환경 중 호흡성 입자상 물질은 다양한 오염원에서 배출된 독성 미량원소들(As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Se, Zn)과 동반 작용하여 인간의 호흡기 계통에 미치는 영향이 매우 크다. 특히, PM2.5 (aerodynamic equivalent diameter, AED, less than 2.5  $\mu\text{m}$ )는 호흡기 계에 깊숙이 침투하여 폐포에 쉽게 흡착될 수 있어 인체에 미치는 영향이 더욱 크다.<sup>1,2)</sup> 한편, 실내공기질(indoor air quality, IAQ)의 오염은 일차적으로 외부공기의 영향을 받게 되며 담배연기, 조리, 스토브, 시멘트, 건축자재, 벽면의 입자상 물질 등과 같은 실내오염원으로부터 발생되고 있다.<sup>3-7)</sup> 환경담배연기(environmental tobacco smoke, ETS)는 인체에 미치는 위해성을 바탕으로 미국 연방환경청(EPA)이 1992년 인체발암물질(human carcinogen)로

분류하였다.<sup>8)</sup> 환경담배연기는 쉐련, 담배, 파이프담배, 시가의 끝부분이 탈 때 발생하는 비주류연기(side-stream smoke, SS)와 흡연자의 폐를 거쳐 발생하는 주류연기(mainstream smoke, MS)의 혼합물로 정의할 수 있으며 비주류연기는 환경담배연기의 대부분을 구성하고 있다.<sup>9-12)</sup>

환경담배연기는 실내공기의 입자상 물질 중 조대입자보다 미세입자 영역의 질량과 수 농도를 상대적으로 증가시킨다.<sup>13,14)</sup> 따라서, 환경담배연기는 가장 유의한 실내공기 오염원 중의 하나로 평가되고 있으며<sup>7,15-18)</sup> 자발적 흡연자는 물론 비흡연자에게 직접흡연 못지않게 해로울 수 있는 간접흡연을 유발한다는 점에서 가장 논란이 많은 문제 중 하나이다.<sup>19)</sup> 환경담배연기에 함유된 유해물질은 주로 구강 및 기도점막에 작용하여 호흡기 장애를 일으키며 심장혈관 질환, 소화성 궤양, 폐암 등을 일으키며 무기 가스, 금속, 입자상

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: jinlee@cnu.ac.kr Tel: 042-823-7546 Fax: 042-822-5610

물질, 방사능 물질, 휘발성 유기화합물, 유기질소화합물, 케톤 및 다환 방향족 탄화수소 등이 있다.<sup>20)</sup> 이중 국내에서 흡연과 관련하여 수행된 연구는 주로 일산화탄소, 휘발성 유기화합물, 산화질소, 타르, 니코틴 등의 유해가스 성분 등이며<sup>21-23)</sup> 환경담배연기에 함유된 인체 발암물질인 As, Cd, Cr, Ni 등의 중금속의 분포와 이들의 인체 내 생화학적 반응 등에 관련된 연구는 아직까지 대단히 미흡한 실정이다. 환경담배연기 중 비주류연기는 저온에서의 불완전 연소로 인해 유해성분의 배출량이 오히려 주류연기보다 더 심각한 것으로 보고되고 있으며,<sup>24,25)</sup> 4천종 이상의 화학물질이 포함되어 있고 이중 40~50 종은 발암성 물질로 알려져 있기 때문에 입자상물질을 포함한 환경담배연기의 성분분석은 매우 중요하다.<sup>17,26)</sup>

본 연구는 흡연기작을 모사한 시료채취장비를 이용하여 환경담배연기를 주류연기와 비주류연기로 구분하여 채취하고 환경담배연기 중의 미량원소성분을 중성자방사화분석을 이용하여 분석하였다. 또한, 실내공기 중 PM 2.5를 집중적으로 채취하고 인체 영향이 큰 As, Cr, Mn, Se, V, Zn를 비롯한 21종의 미량원소를 분석하여 그 화학적 특성을 파악하고 환경담배연기가 실내공기질에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 환경담배연기의 샘플링

환경담배연기를 채취하기 위하여 일반적인 흡연 상황을 재현할 수 있는 채취 장치를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 이 장비를 이용하여 환경담배연기를 주류연기와 비주류연기로 분리하여 각각 채취하였다. 채취 장치는 흡연자의 흡연 활동을 대신하는 smoking machine 역할의 진공펌프, 주류연기와 비주류연기의 누출을 방지하기 위한 필터 홀더, 연소 공간, 비주류연기의 채취를 위한 플라스크의 상단과 저유량 공기 펌프(handy sampler)로 구성 된다.<sup>10)</sup> 연소 공간은 공기 유입을 위해 하단부에 구멍이 있는 플라스틱 재질의 진공박스를 이용하였다. 이러한 일련의 흡연 장치를 활용하여 일반적인 흡연 상황을 재현하기 위해 퍼프부피(puff volume)

35 mL, 1 puff 당 흡입 시간은 2초이며 10초의 간격을 두어 흡입하였다. 또한 분석에 필요한 충분한 양의 시료를 확보하기 위해 하나의 필터에 여러 개비의 담배를 사용하였으며, 통계적 유의성을 확보하기 위해 각각 10개의 주류연기와 비주류연기 시료를 채취하였다. 여지는 기계적 강도가 강하여 환경담배연기 시료의 채취와 분석에 적합한 teflon filter supported PTFE (2.0 µm pore size, 47 mm diameter, Pall Corporation)를 사용하였다.

### 2.2. 실내공기 중 PM2.5 샘플링

환경담배연기가 실내공기 중 PM2.5에 미치는 영향을 파악하고자 흡연 사무실과 그 대조군으로써 인접하여 위치한 동일 면적의 비흡연 사무실을 대상으로 각각 1개 지점을 선정하였다. 두 시료채취 지점은 모두 충남대학교 공과대학 3호관 5층에 위치하고 있고 약 10 m의 거리 간격이 있다. 두 사무실 모두 오전 8시부터 밤 12시 정도까지 2~3명이 상주하고 있고 유동인수는 측정되지 않았지만, 특별히 많지 않았으며 두 사무실의 환경은 크게 다르지 않았다. 두 사무실의 냉, 난방 환경은 비슷한데 모두 1대의 에어컨, 그리고 중앙난방과 전기 히터를 사용하고 있었다. 환기는 특별한 사유가 없는 한 약 2시간 간격으로 창문을 개방하여 실시하였고 습도 조절기는 사용되지 않았다. PM2.5는 annular denuder air sampler (URG, 3000C model)를 이용하여 2005년 10월과 2006년 2월에 2차(10시료/차, 24시간/시료)에 걸쳐 각 지점별로 총 20개의 시료를 집중적으로 채취하였다. Air sampler의 유량은 약 16.7 L/min으로 하여 시료 당 공기량이 약 24,000 L를 유지하도록 하였다. PM2.5는 기계적 강도가 강하고 미량원소에 대해 화학적으로 매우 작은 바탕 농도를 갖고 있어 미량원소의 분석에 효율적인 pore 형태의 polycarbonate membrane filter (0.4 µm pore size, 47mm diameter, Whatman)를 사용하여 채취하였다. 채취한 PM2.5 시료는 항온(25°C), 항습 상태(50%)의 저장고에서 1일간 보관한 후, 전기적 하전을 중화시키기 위해 <sup>210</sup>Po 선원을 넣어 둔 저울(Mettler Co., readability: 1 µg)에서 칭량하고, 시료분석 전까지 데시케이터에 보관하였다.

두 비교공간에서 측정된 PM2.5 농도의 차이에 대한 통계적 유의성 검정은 평균에 대하여 paired t-test, 중앙값에 대하

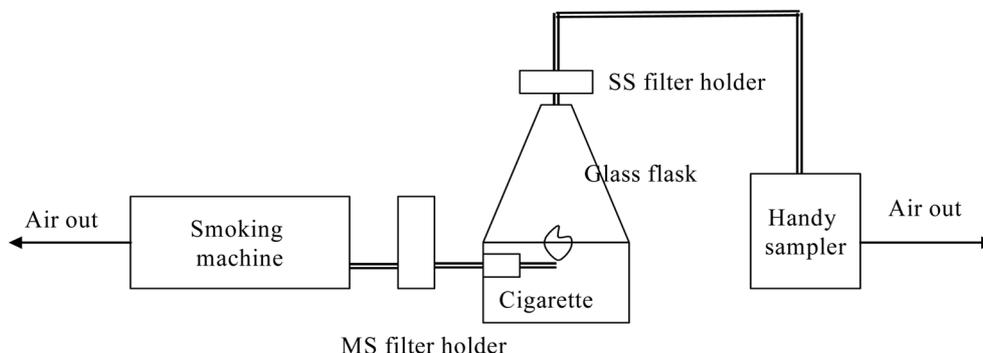


Fig. 1. Sampling equipment for mainstream and side-stream smoke of ETS.

여는 Mann-Whitney test, 분포형식에 대해서는 Kolmogorov-Smirnov test를 사용하였다.

### 2.3. 미량원소 분석

금속원소를 포함한 미량원소의 분석기술 중 중성자방사화분석은 일반 금속시험법에서 수반되는 전처리 과정(용해, 농축, 희석)이 필요하지 않는 비파괴분석법으로 다양한 환경 시료의 주성분과 As, Co, Cr, Mn, Fe, Sc, Se, V, Zn, halogen 및 rare earths와 같은 미량 및 희토류 성분 분석에 적용성이 매우 우수한 분석법으로 평가되고 있다.<sup>27)</sup> 중성자방사화분석의 장점과 특징은 높은 감도, 다원소 및 비파괴분석능력과 대기입자에 대해 실질적인 매질효과가 없다는 점이다. 특히, 고체 시료의 원소 분석시 가장 큰 오차요인이 되는 화학적 전처리 과정을 거치지 않아 원소농도의 정확도를 크게 향상시키므로 대기입자의 원소분석에 대한 효용성이 매우 뛰어나다.<sup>28-30)</sup> 중성자방사화분석은 시료의 준비와 조사, 냉각, 계측의 과정에 따라 이루어지며 분석시료의 방사화를 위하여 한국원자력연구소의 연구용원자로(HANARO)의 중성자 조사시설인 기송관(PTS,  $\Phi_{th} = 2.95 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ) 조사장치를 이용하였다. 모든 시료는 조사시간 동안의 중성자속 차이 등에 영향을 받지 않게 동일한 기하학적 조건에서 조사하여 분석오차를 최소화시켰으며, 정확한 중성자속과 변동을 측정하기 위하여 Al-Au activation wire (Al 99.99%, Reactor Exp.)를 사용하였다. 방사능 계측에 사용한 고순도 게르마늄 반도체 검출기(EG&G ORTEC)는 25% relative efficiency, <sup>60</sup>Co의 1,332 keV에서 1.85 keV FWHM, peak to Compton ratio가 45 : 1이며 감마선의 측정 및 분석, 에너지와 검출효율 검정을 위해 Gamma Vision (EG & G ORTEC) 프로그램을 사용하였다. 통계적 오차를 줄이기 위해 계측시간을 알맞게 조절하였으며, 불감시간은 5% 이하로 유지하였다.

본 연구의 분석결과의 정도관리를 위해 NIST (NIST, the National Institute of Standards and Technology, USA) SRM (Standard Reference Material) 2783 (air particulate on filter media)을 시료와 동일한 분석조건에 따라 분석하였다. 측정치의 참값에 대한 접근도를 나타내는 정확도, 즉 상대오차 (relative error)는 인증표준물질의 인증값에 대한 측정치의 상대차이[(experimental value-certified value)/certified value, %]로써 결정되고, 측정값들의 상대표준편차(RSD, standard deviation/mean of experimental value, %)는 분석값들의 정밀도를 나타내는데, 두 가지 모두 분석방법과 과정의 유효성 척도로 사용된다. 본 연구의 분석 정확도와 정밀도는 Table 1에 정리되어 있다. 정도관리 결과, Al, As, Fe, K, Na, Sb, V의 분석값이 상대오차 5% 이하, 그리고 Ba, Co, Cr, Cu, Mg, Mn, Ti, Zn는 10% 이하로 나타나 매우 정확한 분석값을 보였다. 또한, 정밀도를 나타내는 상대표준편차는 Mg (13.4%)을 제외하면 모두 10% 미만으로 역시 매우 정밀한 분석값을 보였음을 알 수 있다.

Table 1. Analytical results of NIST SRM 2783 (air particulate on filter media) by INAA

Element	Certified value (ng/filter)	This work (ng/filter)	Relative error (%)	RSD (%)
	Mean±Unc. (2s) <sup>a)</sup>	Mean±SD (1s)		
Al	23210±530	22179±348	-4.4	1.6
As	11.8±1.2	11.2±0.21	-4.7	1.9
Ba	335±50	352±14.4	5.1	4.1
Co	7.7±1.2	7.2±0.7	-7.1	9.2
Cr	135±25	124±12	-7.9	9.6
Cu	404±42	383±32	-5.1	8.4
Fe	26500±1600	25492±938	-3.8	3.7
K	5280±520	5217±117	-1.2	2.2
Mg	8620±520	9452±1271	9.7	13.4
Mn	320±12	342±13.0	7.0	3.8
Na	1860±100	1839±34.7	-1.1	1.9
Sb	71.8±2.6	73±3.8	2.4	5.2
Sc	3.54±0.28	3.82±0.31	7.9	8.1
Ti	1490±240	1401±89.3	-6.0	6.4
V	48.5±6.0	49.3±1.3	1.6	2.7
Zn	1790±130	1921±173	7.3	9.0

<sup>a)</sup> Expanded uncertainty with the coverage factor of two (approximately 95% confidence)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 환경담배연기 중 미량원소 발생량

환경담배연기를 주류연기와 비주류연기로 나누어 중성자방사화분석을 이용하여 분석한 21종의 원소성분(Al, As, Ba, Br, Ce, Co, Cl, Cr, Cu, Fe, I, K, La, Mg, Mn, Na, Sb, Se, Ti, V, Zn)의 단위 배출계수(emission factor,  $\mu\text{g}$  or  $\text{ng}/\text{cig.}$ )를 크기순으로 정리하면 Table 2와 같다. 주류연기와 비주류연기에서 모두 Al, Cl, K, Mg, Na의 배출량이 약 1  $\mu\text{g}/\text{cig.}$  이상으로 가장 많고, Br, Fe, Zn도 상대적으로 높은 수준의 배출량을 보였다. 따라서 실내 환경에서의 Br, Cl, Fe, K, Zn 등의 농도 증가는 환경담배연기의 영향에 따른 것으로 판단된다. 이러한 결과는 환경담배연기 중 비주류연기에서 Cl, K, Na의 배출계수가 1  $\mu\text{g}/\text{cig.}$  이상임을 보인 Lansberger<sup>31)</sup>의 연구 결과와 일치한다. 또한, Chao<sup>32)</sup>의 연구, Olson<sup>6)</sup>의 연구는 S, Ca와 함께 실내에서 K가 높은 농도수준을 나타내는 것으로 보고하였고, 이는 환경담배연기로 인한 것임을 지적하고 있다. 일반적으로 바이오매스(biomass)의 연소로 인해 Cl, K의 대기 중 농도가 크게 높아지는 데<sup>33,34)</sup> 이는 본 연구의 결과와 같이 바이오매스의 연소 시 Cl, K의 배출량이 상대적으로 높은 수준을 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Table 2에는 비주류연기와 주류연기에 존재하는 미량원소의 농도비(Ratio = SS/MS)를 나타내었다. 환경담배연기 중금속 및 유해화학물의 배출량은 일반적으로 재배 토양 및 처리 공정에 따라 달라질 수 있다. 또한 주류

**Table 2.** Statistical summary of mainstream and side-stream smoke emission factor per one cigarette

Unit	Mainstream Smoke (MS)		Side-stream Smoke (SS)		Total emission		Ratio <sup>a)</sup>
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
Al	1.90	0.43	2.22	0.46	4.12	0.82	1.16
Cl	43.9	21.7	17.6	6.6	61.5	18.85	0.40
K	83.6	49.8	30.9	13.8	114	58.55	0.37
Mg	0.95	0.90	2.42	2.80	3.37	3.58	2.56
Na	2.69	0.88	2.11	0.70	4.80	1.30	0.79
Fe	0.77	0.25	0.69	0.20	1.46	0.39	0.90
As	3.91	1.09	4.10	2.24	8.01	2.74	1.05
Ba	47.3	24.1	68.7	39.1	116	53.5	1.45
Br	297	170	188	42.0	485	156	0.63
Ce	5.62	4.17	7.97	4.40	13.6	7.97	1.42
Co	1.12	0.49	7.90	9.82	9.02	10.1	7.04
Cr	18.1	9.40	28.0	18.8	46.2	17.4	1.55
Cu	39.3	24.5	20.8	21.1	60.1	26.8	0.53
I	21.6	19.5	34.7	24.4	56.3	40.5	1.61
La	3.73	2.46	6.21	3.88	9.94	5.96	1.67
Mn	10.1	2.97	35.2	61.8	45.2	64.0	3.49
Sb	3.52	0.20	7.75	0.61	11.3	0.83	2.20
Se	3.99	2.52	7.81	5.35	11.8	4.26	1.96
Ti	201	97.3	122	92.0	323	78.0	0.61
V	0.72	0.44	0.84	0.52	1.56	0.63	1.16
Zn	218	63.5	223	93.0	440	101	1.02

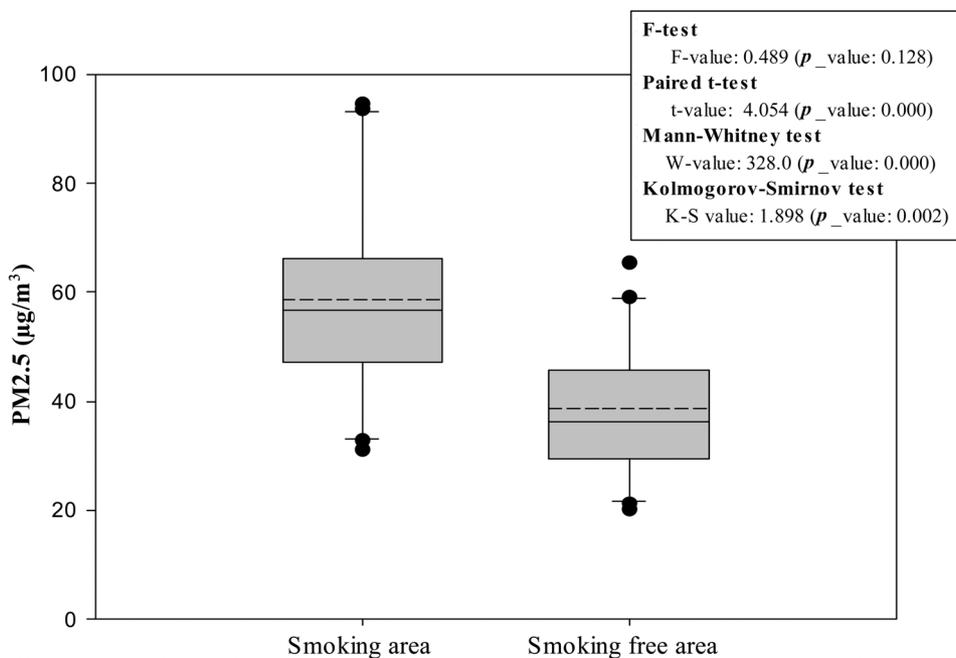
<sup>a)</sup> Concentration ratio of each element between SS and MS (SS/MS)

연기와 비주류연기에서의 상대농도 분포는 발생기작 중 온도에 따라 크게 달라진다. 비주류연의 경우 약 600℃의 연

소 온도를 나타내지만 주류연의 경우 약 900~1,000℃의 연소온도가 유지된다. 따라서 저온에서의 불완전연소에 따라 비주류연기에서 더 쉽게 응축되어 유해물질의 발생량은 상대적으로 많아지게 된다. 주류연기와 비주류연기의 배출량을 비교한 결과, 비주류연기에서 주류연기보다 Co는 약 7배, Mn은 약 3.5배로 상당히 높은 결과를 나타내었다. 또한 Ba, Ce, Cr, I, La, Mg, Sb, Se가 비주류연기에서 주류연기보다 높은 농도를 보였고, 반대로 Br, Cl, Cu, K, Na, Ti는 주류연기에서 더 높은 농도를 보였다. Br, Cl 등의 할로젠 원소와 K, Na, Ti 등의 경원소의 경우 고온에서 쉽게 완전 연소되어 주류연기로 많은 부분이 포함되었기 때문에 주류연기에서 상대적으로 높은 배출량을 보이는 것으로 판단된다.

### 3.2. 실내공기 중 PM2.5와 미량원소 농도 분포

흡연 사무실과 비흡연 사무실의 실내공기 중 PM2.5 및 21종의 원소성분 농도 비교와 통계량 자료를 Fig. 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 본 연구에서 분석된 실내공기 중 PM2.5의 농도는 흡연이 허용된 사무실은 58.7±18.1 µg/m<sup>3</sup> (31.1~94.6 µg/m<sup>3</sup>)인 반면, 비흡연 사무실은 38.6±12.7 µg/m<sup>3</sup> (20.3~65.4 µg/m<sup>3</sup>)로 WHO의 연평균 가이드라인<sup>19)</sup>인 10 µg/m<sup>3</sup>보다 크게 높은 수준을 보였다. 또한, 일평균 가이드라인인 25 µg/m<sup>3</sup>을 초과하는 빈도는 흡연 사무실이 100%, 비흡연 사무실도 90%였다. 만약 두 대조군의 실내 공기질의 외부 영향이 동일하다면, 실내공기 중 PM2.5의 농도가 환경담배연기에 의해 약 1.5배 정도 더 증가한 것으로 판단된다. 이는 실내 주거공간에서 흡연 활동이 있는 경우의 PM2.5 농도가 흡연이 배제된 공간에서의 농도보다 약 1.3~1.5배 높게 나타난 이전의 연구결과들과 유사하다.<sup>35)</sup> 두 비교공간에서 측



**Fig. 2.** Comparison of indoor PM2.5 concentrations between smoking and smoking free area.

**Table 3.** Statistical summary of PM2.5 and the associated elemental concentrations in smoking and smoking free area. The unit of PM2.5 is  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , while all the rest are in  $\text{ng}/\text{m}^3$

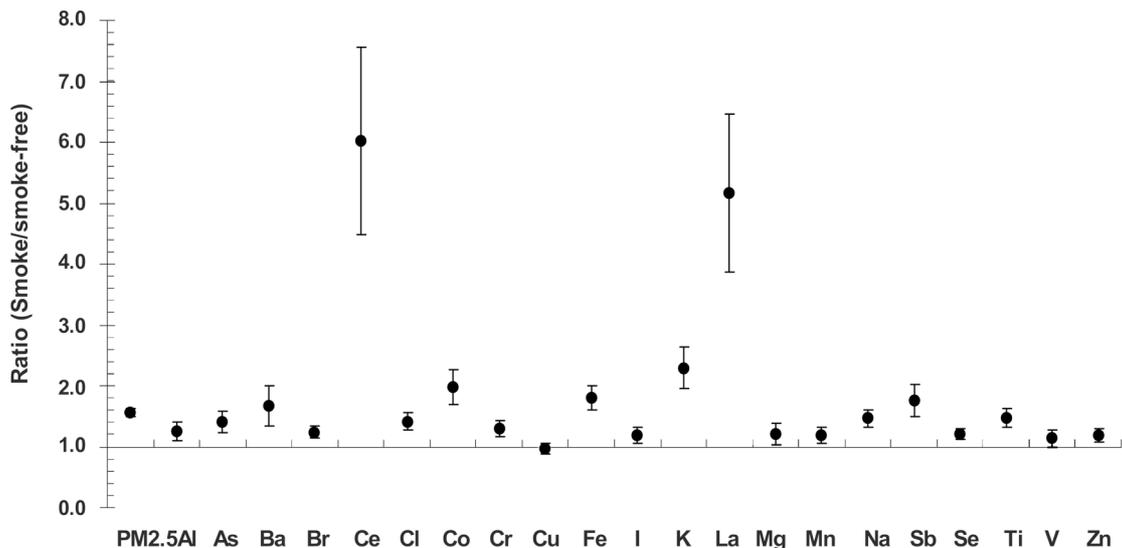
	Smoking area					Smoking free area					p value
	Mean	SD	Min	Max	N	Mean	SD	Min	Max	N	
Al	311	209	14	646	20	275	192	60	595	19	0.91
As	5.04	2.44	1.58	10.1	20	4.01	2.38	1.36	10.7	20	0.84
Ba	31.8	46.4	4.26	218	20	21.7	30.9	4.24	149	20	0.78
Br	19.8	11.0	7.8	43.2	20	17.0	10.2	5.9	41.6	20	0.69
Ce	5.02	3.14	0.52	9.81	20	1.45	0.92	0.26	3.98	20	0.00
Cl	193	87.5	95.1	458	20	145	59.1	78.1	292	20	0.05
Co	0.38	0.26	0.10	1.23	19	0.27	0.17	0.10	0.64	12	0.29
Cr	19.3	5.7	12.1	30.3	20	16.0	3.8	10.5	25.4	20	0.29
Cu	12.6	10.3	2.1	43.3	20	13.8	13.3	2.2	59.4	19	0.29
Fe	406	172	172	864	20	273	157	101	658	20	0.18
I	5.72	2.54	2.43	9.95	20	5.88	3.52	1.21	13.0	20	0.58
K	481	244	155	1006	20	254	151	55.6	576	17	0.01
La	2.97	1.99	0.35	7.15	20	0.85	0.48	0.20	2.32	20	0.00
Mg	162	273	5.73	1284	20	189	246	17.2	956	20	0.65
Mn	19.1	8.32	8.51	41.4	20	17.6	7.36	6.01	32.7	20	0.66
Na	380	239	47.4	887	20	308	237	49.8	774	20	0.69
Sb	6.33	5.76	0.72	23.6	20	4.49	3.95	0.26	13.3	20	0.92
Se	3.61	1.45	1.22	7.65	20	3.29	1.66	1.16	8.05	20	0.51
Ti	24.4	19.2	1.40	86.5	20	18.1	14.1	1.85	65.8	19	0.63
V	1.60	0.85	0.22	3.72	20	1.62	0.88	0.14	4.11	19	0.29
Zn	93.2	54.3	40.6	261	20	83.1	47.9	33.8	234	20	0.79
PM2.5	58.7	18.1	31.1	94.6	20	38.6	12.7	20.3	65.4	20	0.00

정된 PM2.5 농도의 차이에 대한 통계적 유의성 검정 결과, 흡연의 유무에 따른 PM2.5의 농도분포는  $p < 0.01$ 로 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있었다.

원소성분별로 살펴보면, 흡연사무실에서는 K, Fe, Na, Al,

Cl, Mg, Zn의 농도가 높게 나타났고, 독성금속인 As의 산술 평균은  $5.04 \pm 2.44 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Cr은  $19.3 \pm 5.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Mn은  $19.1 \pm 8.32 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Se는  $3.61 \pm 1.45 \text{ ng}/\text{m}^3$ , V은  $1.60 \pm 0.85 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Zn은  $158 \pm 92.2 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 비흡연 사무실에서도 K, Fe, Na, Al, Cl, Mg, Zn의 농도가 높게 나타났는데, As의 산술평균은  $4.01 \pm 2.38 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Cr은  $16.0 \pm 3.75 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Mn은  $17.6 \pm 7.36 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Se는  $3.29 \pm 1.66 \text{ ng}/\text{m}^3$ , V은  $1.62 \pm 0.88 \text{ ng}/\text{m}^3$ , Zn은  $83.1 \pm 47.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ 였다. 또한, 흡연 사무실과 비흡연 사무실의 실내공기 중 원소 농도에 대한 분포를 비교하기 위하여 일원배치분산분석을 수행한 결과, 두 공간에서 Ce, Cl, K, La의 농도차이가 통계적으로 유의한 수준( $p < 0.05$ )으로 나타났는데, 이러한 원소들은 환경담배연기로 인해 실내에서 상대적으로 높은 농도를 나타내는 것으로 판단된다. 환경담배연기 중 원소 배출량이 상대적으로 높은 수준으로 나타난 Al, Mg, Na, Br, Fe, Zn의 경우 자연적/인위적으로 복합적인 오염원의 영향을 받아 높은 농도 범위에서 분포하며 또한 농도 변화의 폭이 크기 때문에 평균 농도의 차이가 통계적으로 유의하지 않은 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 반면에 대기 중에서 일반적으로 극미량의 농도 수준으로 보이는 Ce와 La는 환경담배연기의 배출량은 상대적으로 작은 수준이지만 흡연에 따른 농도의 차이가 극명하게 나타났다.

흡연 사무실과 비흡연 사무실의 PM2.5 내 원소농도 크기를 비교하기 위해 두 그룹의 농도비(Ratio = smoking area/smoking free area)의 평균과 표준오차를 Fig. 3에 나타내었다. 미량원소의 농도비는 Cu (1.0)을 제외한 모든 원소에서 농도비의 평균값이 1.1~6.0으로 흡연 사무실의 원소농도가 비흡연 사무실의 원소농도보다 높게 나타나 실내공기 중 미량원소의 농도 증가의 원인 중 하나가 환경담배연기인 것으로 판단된다. 환경담배연기로 인해 가장 큰 영향을 받은 원소는 희토류 원소인 Ce (6.0)과 La (5.2)였고 K (2.3), Co (2.0), Sb (1.8), Fe (1.8), Ba (1.7)의 농도도 흡연 사무실에서



**Fig. 3.** Ratio of elemental concentration for smoking and smoking free area.

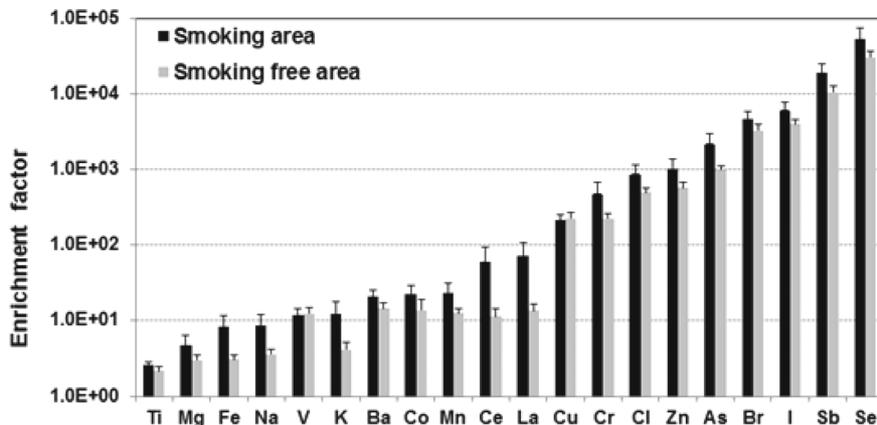


Fig. 4. Results of enrichment factor analysis of elemental concentration for smoking and smoking free area.

상당량 부유되는 것으로 나타났다. 한편, Böhländt 등<sup>18)</sup>의 연구는 실내에서 환경담배연기로 인한 Ce와 La의 농도가 각각 24와 29배 증가한 결과를 보고하며 희토류 원소 중 Ce와 La가 환경담배연기의 지표원소(marker element)임을 지적하였다.

원소의 분포특성을 비교한 과거의 연구들을 보면, 주로 부화계수(enrichment factor, EF)를 사용하여 실외공기뿐 아니라 실내공기 중 원소의 인위적 오염의 정도를 비교한 것을 볼 수 있다.<sup>17,36)</sup> 부화계수는 Al, Fe, Si와 같이 지각 구성 대표 원소를 이용하여 대상 물질들 간의 상대적인 농도비 ( $EF = \{X/Al\}_{sample} / \{X/Al\}_{crust}$ )를 계산하여 인위적인 오염정도를 평가한다. 여기서 X는 비교의 중심이 되는 관심대상 원소성분의 농도를 의미한다. Fig. 4는 비교결과를 보여주는 데, 대략 EF 값이 수십 또는 수백을 초과할 때, 부화의 정도가 심각하다고 판단한다.<sup>37)</sup> 부화계수 값이 100을 초과하는 경우를 모아 보면, Cu, Cr, Cl, Zn, As, Br, I, Sb, Se의 9개 성분에 국한되는데, 이러한 원소들은 실외대기 중에서 자동차 배기가스, 화석연료 연소 등의 인위적인 오염원에 의해 영향 받는 것으로 알려져 있다. 또한 해당 원소들 모두 흡연이 이루어진 사무실에서 상대적으로 더 높은 EF 값을 보이고 있는 것으로 나타났다. 한편, 두 공간에서의 EF 값을 비교하면, Ce, Fe, La, K가 상대적으로 흡연이 이루어진 사무실에서 크게 나타났다. 이러한 결과는 흡연이 이루어지는 실내공간에서 미량원소의 농도 증가의 원인 중 하나가 환경담배연기임을 시사하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 환경담배연기와 실내공기 중 PM2.5를 집중적으로 채취하고 인체 영향이 큰 As, Cr, Mn, Se, V, Zn를 비롯한 약 20종의 미량원소의 화학적 특성을 파악하여 환경담배연기가 실내공기질에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 담배 개피 당 미량원소의 발생량은 K과 Cl이 각각 114

μg, 61.5 μg으로 가장 높게 나타났으며 Br, Cl, K, Na 등을 제외한 대부분의 원소에서 비주류연기에서 주류연기에서 보다 더 높은 수준을 나타내었다. PM2.5의 농도는 흡연 사무실에서는 58.7±18.1 μg/m<sup>3</sup>인 반면, 비흡연 사무실은 38.6±12.7 μg/m<sup>3</sup>로 1.5배 정도 높게 나타나 환경담배연기로 인한 실내공기질의 영향이 매우 큰 것으로 평가되었다. 환경담배연기로 인한 금속원소들의 농도는 Cu를 제외한 모든 원소에서 흡연이 이루어진 사무실에서 최대 6배 이상 높게 나타났다. 환경담배연기로 인해 가장 큰 영향을 받은 원소는 실내외 공기 중 극미량의 농도분포를 나타내는 희토류 원소인 Ce (6.0)와 La (5.2)이었으며 독성금속인 As, Cr, Mn, Se, V, Zn이 흡연이 이루어진 사무실에서 약 1.1~1.5배 높은 농도를 나타내었다. 이러한 결과는 환경담배연기가 실내공기 중 PM2.5와 미량원소의 농도 증가의 주요한 오염원인 것을 보여주고 있다.

#### 사사

이 논문은 미래창조과학부와 한국연구재단의 원자력연구기반확충사업으로 연구 지원한(M2051100007505B020007510)의 결과물입니다. 그리고 본 연구는 대전녹색환경지원센터의 2011년도 연구개발사업의 부분 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

KSEE

#### Reference

1. Natusch, D. F. S., Wallace, J. R. and Evans, Jr. C. A., "Toxic trace elements: preferential concentration in respirable particles," *Science*, **183**, 202~204(1974).
2. Dockery, D. W. and Pope, III C. A., "Acute respiratory effects of particulate air pollution," *Annu. Rev. Publ. Health*, **15**, 107~132(1994).

3. Nam, B. H., Hwang, I. J. and Kim, D. S., "Pattern Classification of PM-10 in the Indoor Environment Using Disjoint Principal Component Analysis," *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **18**, 25~37(2002).
4. Larson, T., Gould, T., Simpson, C., Liu, L.-J. S., Claiborn, C. and Lewtas, J., "Source apportionment of indoor, outdoor, and personal PM2.5 in Seattle, Washington, using positive matrix factorization," *J. Air Waste Manage.*, **54**, 1175~1187(2004).
5. Geller, M. D., Chang, M., Sioutas, C., Ostro, B. D. and Lipssett, M. J. "Indoor/outdoor relationship and chemical composition of fine and coarse particles in the southern California deserts," *Atmos. Environ.*, **36**, 1099~1110(2002).
6. Olson, D. A., Turlington, J., Duvall, R. M., McDow, S. R., Stevens, C. D. and Williams, R., "Indoor and outdoor concentrations of organic and inorganic molecular markers: Source apportionment of PM2.5 using low-volume samples," *Atmos. Environ.*, **42**, 1742~1751(2008).
7. Lim, J. M., Jeong, J. H., Lee, J. H., Moon, J. H., Chung, Y. S. and Kim, K. H. "The analysis of PM2.5 and associated elements and their indoor/outdoor pollution status in an urban area," *Indoor Air*, **21**, 145~155(2011).
8. U. S. EPA, "Respiratory Health Effects of Passive Smoking: Lung Cancer and Other Disorders," EPA/600/6-90/006F(1992).
9. Adams, J. D., O'Mara-Adams, K. J. and Hoffmann, D., "Toxic and carcinogenic agents in diluted mainstream smoke and side-stream smoke of different types of cigarettes," *Carcinogenesis*, **8**, 729~731(1987).
10. Lansberger, S. and Wu, D., "The impact of heavy metals from environmental tobacco smoke on indoor air quality as determined by Compton suppression neutron activation analysis," *Sci. Total Environ.*, **173**, 323~337(1995).
11. U. S. EPA, "Health Effects of Exposure to Environmental Tobacco Smoke," Final report(1997).
12. Zhou, R., Li, S., Zhou Y. and Haug, A., "Comparison of environmental tobacco smoke concentrations and mutagenicity for several indoor environments," *Mutat. Res.*, **465**, 191~200(2000).
13. Nazaroff, W. W., Hung, W.-Y., Sasse, A. G. B. M. and Gadgil, A. J., "Predicting regional lung deposition of environmental tobacco smoke particles," *Aerosol Sci. Tech.*, **19**, 243~254(1993).
14. Hussein, T., Glytsos, T., Ondráček, J., Dohányosová, P., Ždímal, V., Hämeria, K., Lazaridis, M., Smolík, J. and Kulmala, M., "Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house," *Atmos. Environ.*, **40**, 4285~4307(2006).
15. Ott, W., Switzer, P. and Robinson, J., "Particle concentrations inside a tavern before and after prohibition of smoking: Evaluating the performance of an indoor air quality model," *J. Air Waste Manage.*, **46**, 1120~1134(1996).
16. Wallace, L., "Indoor particles: a review," *J. Air Waste Manage.*, **46**, 98~126(1996).
17. Slezakova, K., Pereira, M. C. and Alvim-Ferraz, M. C., "Influence of tobacco smoke on the elemental composition of indoor particles of different sizes," *Atmos. Environ.*, **43**, 486~493(2009).
18. Böhländt, A., Schierl, R., Diemer, J., Koch, C., Bolte, G., Kiranoglu, M., Fromme, H. and Nowak, D., "High concentrations of cadmium, cerium and lanthanum in indoor air due to environmental tobacco smoke," *Sci. Total Environ.*, **414**, 738~741(2012).
19. WHO, "Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide," WHO/SDE/PHE/OEH/06.22(2006).
20. National Research Council, "Environmental Tobacco Smoke: Measuring Exposures and Assessing Health Effects, Washington DC," National Academy Press(1986).
21. Shin, D. C., Lee, H. M., Kim, J. M. and Chung, Y., "A Study on the Indoor Air Pollution Level and Its Health Significance in Working and Living Spaces," *J. KAPRA*, **6**, 73~84(1990).
22. Baek, S. O., Kim, Y. S. and Perry, R., "Indoor air quality in homes, office, and restaurants in Korea urban area-indoor/outdoor relationships," *Atmos. Environ.*, **31**, 529~544(1997).
23. Baek, S. O. and Park, S. K., "Measurement of Environmental Tobacco Smoke in the Air of Offices in Urban Areas," *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **20**, 715~727(2004).
24. Repace, J. L. and Lowery, A. H., "Indoor air pollution, tobacco smoke, and public health," *Science*, **208**, 464~472(1980).
25. Ballard, J. A., "Health effects of passive smoking," *Professional Saf.*, pp. 28~32(1992).
26. Paoletti, L., De Berardis, B., Arrizza, L. and Granato, V., "Influence of tobacco smoke on indoor PM10 particulate matter characteristics," *Atmos. Environ.*, **40**, 3269~3280(2006).
27. Quann, R. J., Neville, M., Janghorbani, M., Mims, C. A. and Sarofim, A. F., "Mineral matter and trace-element vaporization in a laboratory-pulverized coal combustion system," *Environ. Sci. Technol.*, **16**, 776~781(1982).
28. Landsberger, S., "Trace element determination of airborne particles by neutron activation analysis," *Elemental Analysis of Airborne Particles*, Gordon and Breach, Malaysia(1999).
29. Salma, I. and Zemplén-Papp, "Instrumental neutron activation analysis for studying size-fractionated aerosols," *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Reser.*, **A435**, 462~474(1999).
30. Tian, W., "Reactor Neutron Activation Analysis of Airborne Particulate Matter," NAHRES-53, IAEA, Vienna(2000).
31. Lansberger, S. and Wu, D., "Determination of airborne cadmium in environmental tobacco smoke by instrumental neutron activation analysis with a Compton suppression system," *Anal. Chem.*, **65**, 1506~1509(1993).
32. Chao, C. Y. and Wong, K., "Residential indoor PM10 and PM2.5 in Hong Kong and elemental composition," *Atmos. Environ.*, **36**, 265~277(2002).
33. Yli-Tuomi, T., Venditte, L., Hpoke, P. K., Basunia, M. S., Landsberger, S., Viisanen, Y. and Paatero, J., "Composition of the Finnish Arctic aerosol: collection and analysis of historic filter samples," *Atmos. Environ.*, **37**, 2355~2364(2003).

34. Begum, B. A., Kim, E., Biswas, S. K. and Hopke, P. K., "Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and semi-urban areas in Bangladesh," *Atmos. Environ.*, **38**, 3025~3038(2004).
35. Hänninen, O. O., Lebre, E., Ilacqua, V., Katsouyanni, K., Künzli, N., Srám, R. J. and Jantunen, M., "Infiltration of ambient PM<sub>2.5</sub> and levels of indoor generated non-ETS PM<sub>2.5</sub> in residences of four European cities," *Atmos. Environ.* **38**, 6411~6423(2004).
36. Gemenetzi, P., Moussas, P., Arditoglou, A. and Samara, C. "Mass concentration and elemental composition of indoor PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in university rooms in Thessaloniki, northern Greece," *Atmos. Environ.*, **40**, 3195~3206(2006).
37. Lim, J. M., Lee, J. H. and Chung, Y. S., "Chemical characteristics and sources of fine ambient particulate matter from the third and fourth industrial complex area of Daejeon city, Korea," *Anal. Sci. Technol.*, **20**, 33~40(2007).