

## 논문

# 도시생활폐기물 소각장 주변지역 대기입자의 화학적 특성

## Chemical Properties of Atmospheric Particles Collected around a Municipal Waste Incinerator

마창진, 강공언<sup>1),\*</sup>

일본 후쿠오카여자대학교 환경과학과, <sup>1)</sup>원광보건대학교 의무행정과

Chang-Jin Ma, Gong-Unn Kang<sup>1),\*</sup>

Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, Fukuoka, Japan

<sup>1)</sup>Department of Medical Administration, Wonkwang Health Science University, Iksan, Republic of Korea

접수일 2022년 2월 14일

수정일 2022년 3월 10일

채택일 2022년 3월 30일

Received 14 February 2022

Revised 10 March 2022

Accepted 30 March 2022

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)63-840-1286

E-mail : gukang@wu.ac.kr

**Abstract** This study attempted to clarify the characteristics of elemental components and PAHs in the particulate matter (PM) collected at nearby points in incinerator chimney by season. In addition, in order to estimate whether the air quality near the incinerator was affected by the incinerator emission pollutants, the fly ash was also collected in the incinerator chimney. The elemental concentrations among the three points (Ansim, Samsan, Wansan) differed according to the elements, and there was no significant difference in concentration overall. The seasonal fluctuations of the integrated concentration of hazardous elements show that the concentration of harmful heavy metals was relatively higher in Samsan and Wansan located in the downwind of incinerator than in Ansim, which is the upwind of incinerator. The integrated concentration of the six heavy metals at the sites of this study was similar to that of nearby Samcheon but was significantly lower than those of Daejeon and Seosan. In the case of PAHs concentration of ambient TSP, phenanthrene, fluoranthene, pyrene, and chrysene were relatively high in Ansim and Samsan regions. Meanwhile, in the Wansan region, chrysene, benzo[j+k] fluoranthene, benzo[b] fluoranthene, benzo[a] anthracene were relatively high. The result of enrichment factor for PAHs showed that Samsan, in particular, was found to be affected by incinerator. It was also found that all three regions were more affected by the PAHs originated from incinerators in spring than in winter.

**Key words:** Atmospheric particle, Incinerator, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, Element, PAHs

## 1. 서론

현재, 우리나라의 폐기물 처리현황에서 소각 및 재활용 비율이 증가하고 있다. 이는 정부의 폐기물관리 정책에 의하여 매립처분보다 우선 순위에 있기 때문이라고 볼 수 있다. 그러나, 생활수준의 향상과 패스트푸드 및 패스트 패션 등의 영향에 따른 폐기물의 증가로 인해 기존 소각장의 처리용량이 한계에 이르러 전국에서 소각장의 신·증축을 필요로 하고 있다. 소각장의 신설을 위해서는 먼저 소각장의 입지조건과 더불어 소각장 운용에 있어 관련시설이 생태환경적 친

화성을 가지는지, 또한 소각장에서 배출되는 오염물질의 건강 위해성은 없는지 등의 평가가 절대적으로 필요하다. 생태환경적 친화성 평가에 있어서는 소각장 신설에 따른 대기 및 수질오염과 악취 등의 환경영향이 발생하지 않도록 사전에 철저한 원인분석이 이루어져야 한다(Amutha *et al.*, 2008).

소각장의 운영에 있어서는 무엇보다 인근 주민들의 건강 위해성 평가가 중요하다고 볼 수 있는데, 환경민원과 대응방안 마련에 있어 주민들이 가장 관심을 갖는 대기질 및 악취와 관련하여 객관적이고 과학적인 환경상영향조사가 필수적이라고 할 수 있다(Kida *et*

al., 1991). 현재 소각시설의 운영상태를 진단할 수 있도록 소각장 배출구에는 굴뚝자동측정시스템(TMS)이 설치되어 먼지(TSP), 질소산화물, 일산화탄소, 염화수소 등의 대기오염물질과 소각로 온도 등 운전조건에 대한 상시적인 모니터링이 이루어지고 있다. 또한 「폐기물처리시설 설치운영에 따른 환경상영향조사의 조사항목 및 횟수에 관한 기준」에서는 소각장 주변지역을 대상으로 「환경정책기본법 시행령」에서 정하고 있는 대기환경기준 항목을 대상으로 3년마다 분기별 4회 이상 조사하도록 규정하고 있으나, 이들 기준 대기오염물질의 경우 주로 화석연료의 연소와 밀접한 관련이 있어 주변지역 주민들을 대상으로 한 수용자 중심의 환경보건학적 관점에서 소각장에 의한 건강영향을 파악하기에는 한계를 지닌다고 볼 수 있다. 주변지역 주민들의 실질적인 건강권 확보를 위해서는 도시생활폐기물 소각장 배출구에서 발생 가능한 유해물질을 중심으로 하여 조사항목을 고려할 필요가 있으며, 소각장의 풍하쪽에 위치하고 있는 여러 지점에서 보다 장기적으로 집중적인 조사가 필요하다고 할 수 있다.

소각시설 주변지역 대기질의 경우 만성 호흡기질환과 연관성이 크다고 할 수 있는 대기입자의 정량적 평가와 입자의 화학적 조성에 대한 정성적 평가가 중요하다 할 수 있다. 대기입자에 미량으로 존재하는 중금속 성분 중 일부는 강한 독성을 가지고 있으며, 발암 위해성 또한 높은 것으로 알려져 있다(Chillrud et al., 2004; Heyder et al., 1986). 중금속이란 비중이 4~5 이상인 금속으로 일반적으로 인체에 유해한 성질을 갖는데, 수은, 납, 구리, 망간, 크롬 등과 같은 중금속의 경우 체내에 흡수 및 축적되어 중금속 중독을 일으킨다. 중독 메커니즘은 다양하게 발생하는데 유기금속염, 특히 메틸수은과 같이 단백질과 결합력이 강해 생물체에 흡수되어 축적되기가 쉬운 경우도 있다(Chillrud et al., 2004; Heyder et al., 1986). 무기 중금속염은 생물체에 비교적 늦게 흡수되지만, 일단 흡수, 축적되면 단백질 변성을 일으키므로 해당 생물체에 큰 영향을 미친다고 보고되었다(Mori et al., 2007). 급성 중독의 경우 즉사하거나 치료 시 치유되기도 하지만, 만성

중독의 경우 서서히 진행되는 가운데 확실한 치료법이 없어 최종적으로 사망하거나 세대 유전으로 인해 다음 세대에 기형으로 이어질 수 있어 장기적인 모니터링과 그에 따른 대책수립 등 예방적 차원의 관리방안이 필요하다고 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 도시생활폐기물 소각장 인근 간접영향권 및 주변지역의 3개 지점에서 대기 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 및 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 대기입자를 채취하여 중금속을 중심으로 한 원소성분의 정성 및 정량적 농도 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 발암성 물질로 알려진 다환방향족탄화수소(PAHs)에 대해서도 측정지점별 PAHs 농도에 미치는 소각장의 영향 여부를 평가하였다. 최종적으로는 소각장 주변 풍상 및 풍하측 지점에서 장기간에 걸친 실측을 통해 정도 높은 분석자료를 확보하여 소각시설의 운영상태를 진단하고, 이를 통해 기존의 매체 중심의 환경관리에서 벗어나 수용자 중심의 환경보건학적 정책구현 및 선진소각시설의 운영에 필요한 유의미한 정보를 제공하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 시료채취

도시생활폐기물 소각장 주변 대기입자의 화학적 특성을 파악하기 위한 시료채취는 전북 전주시 완산구 상림동 산 180-6번지 일원에 위치하고 있는 전주권소각자원센터에서 이루어졌다. 전주권소각자원센터는 2009년에 완공된 후 현재에 이르고 있으며, 하루 400톤(200톤×2기)을 처리할 수 있다. 주요 설비는 소각시설, 연소가스 냉각설비, 연소가스 처리설비, 여열이용설비 등으로 소각은 화격자(Stoker) 방식으로 이루어지고 있으며, 2020년 기준 하루 274톤을 처리하고 있다.

전주권소각자원센터 주변지역 환경상영향조사를 위한 대기질 측정지점으로는 삼산마을(북위 35°48'20.7", 동경 127°04'31.8"), 완산고등학교(북위 35°48'20.7",

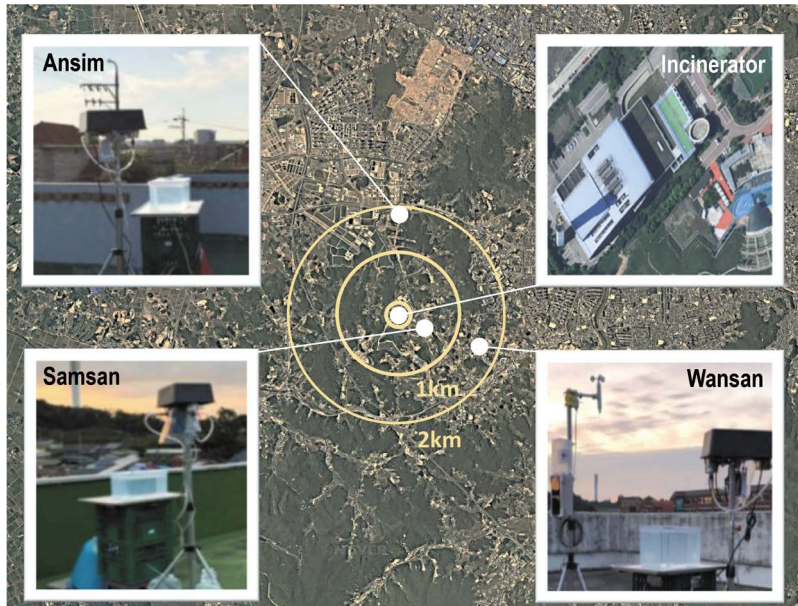


Fig. 1. The locations of incinerator and three sampling sites with the measurement instruments.

동경 127°04'31.8", 이하 완산고) 그리고 안심마을(북위 35°49'27.1", 동경 127°04'09.5")을 선정하였다. 그림 1은 전주권소각자원센터와 주변지역 대기질 측정지점의 위치를 나타낸 것이다. 여기에서 삼산마을(Samsan)의 경우 소각장에 가장 인접한 곳으로서 현재 간접영향권으로 설정되어 매년 폐기물 반입량에 따라 조성된 주민지원기금의 지원을 받고 있다. 측정기간 동안 그림 2에서와 같이 주풍향인 북서풍의 영향을 고려할 때 완산고(Wansan)와 삼산마을(Samsan)은 소각장의 풍하측에 각각 0.5 km와 1.5 km 떨어져 위치하고 있는 반면, 안심마을(Ansim)의 경우 풍상측에 위치하고 있어 대조지역으로서의 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

대기입자의 계절별 특성을 평가하기 위하여 시료채취는 가을(2019년 10월 18일~11월 3일), 겨울(2020년 1월 28일~2월 8일), 봄(2020년 4월 6일~4월 16일), 여름(2020년 6월 1일~9일)으로 나누어 하루 주기로 3개 측정지점에서 동시에 이루어졌다. 대기입자의 포집에는 MCI (Multiple Cascade Impactor, Tokyo Dylec. Co.) 샘플러를 사용하였다. 이것은  $PM_{2.5}$ 와  $PM_{10-2.5}$ 를 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 멤브레인

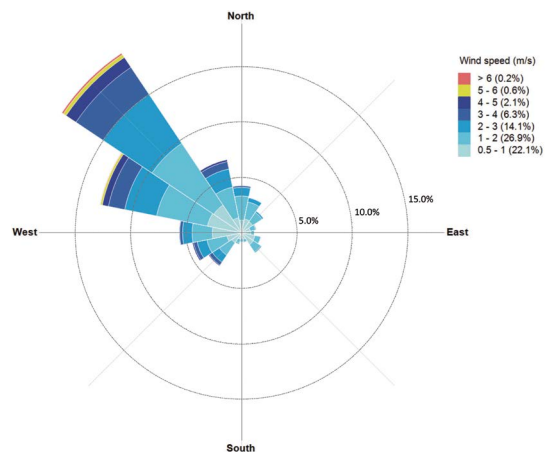


Fig. 2. The meteorological conditions at Wansan site during the seasonal sampling period.

필터(ADVANTEC)상에 각각 분리 포집할 수 있도록 구성되어 있다. 여기에 포집된  $PM_{2.5}$ 와  $PM_{10-2.5}$  시료의 경우 중금속 등 원소성분의 분석에 사용하였다. 또한 건강유해성이 크다고 알려진 대기 중 다환방향족 탄화수소류(PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons)를 측정하기 위해서 별도의 총부유먼지(TSP, Total

suspended particle) 시료를 포집하였다. 대기 중 TSP 시료의 경우 MFC (Mass flow controller)가 장착된 고용량샘플러 (TE-PNY1123 High-volume Air Sampler, Tisch Environmental Inc., USA)를 이용하여 그림 1의 3개 측정지점에서 겨울과 봄에 각각 2회씩 (24시간/회) 연속으로 포집하였다. TSP 채취에는 8" × 10" 석영섬유필터 (QMA filter, Whatman Inc., USA)를 사용하였으며, 시료채취 전에 PAHs를 포함한 유기성 불순물을 제거하기 위하여 메탄올 (HPLC grade Methanol, Burdick & Jackson, USA)에 담근 후 초음파추출기 (PowerSonic 420, 화신테크, Korea)를 이용하여 전처리를 수행하였다.

또한, 소각장 주변 3개 측정지점의 대기질이 소각장 배출원 입자의 영향을 받았는지를 파악하기 위하여 PM<sub>10</sub>을 대상으로 소각장 굴뚝에서도 비산재 (Fly ash)를 포집하였다. 굴뚝에서 입자상 물질에 대한 시료채취는 대기오염공정시험기준 (ES 01301.1a 5.6)에 의한 채취방법에 따라 굴뚝의 곡부분이나 단면 모양이 급격히 변하는 부분을 피해 배출가스의 흐름이 안정되고 측정작업이 쉬운 안전한 곳을 선정하여 겨울과 봄 기간에 이루어졌다.

## 2.2 시료 전처리 및 성분 분석

원소분석용 시료의 전처리를 위해 초특급 질산과 과산화수소의 혼합액에 대기입자가 포집된 여지를 넣고, 9,000 mbar 압력과 200°C 고온에서 1시간 동안 마이크로파 (Microwave) 분해기로 추출하였다. 전처리가 끝난 시료에 대해서는 초순수로 희석한 후 주사기여지 (Syringe filter)를 사용해 필터링하고 나서 유도결합플라즈마-질량분석기 (ICP-MS, Inductively Coupled Plasma-Mass, Agilent 7700x)로 정성 및 정량분석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 ICP-MS의 경우 극미량 및 다원소 동시분석 기능을 지닌 무기원소 분석장치 중 환경시료 분석에 활용도가 가장 높은 원소분석장치 중의 하나이다 (Houk *et al.*, 1980). 이 장치의 분석원리는 아르곤 가스를 이용하여 고온의 시료 중에 존재하는 원소를 플라즈마 내에서 이온화시킨 다음

이온화된 원자들을 질량대 전하비 (Mass to charge ratio, m/z)로 측정하는 것이다. 그러나, ICP-MS 분석의 경우 공존하는 다른 원소에 의한 간섭은 적은 편이나 P, S, Si 성분에 대해서는 간섭효과 (Matrix effect)가 발생하여 이들 원소에 대한 분석 결과의 경우 신뢰성 확보에 문제가 있다고 볼 수 있다.

다환방향족탄화수소 (PAHs) 분석을 위해서는 먼저 10 µg/mL의 PAHs 대리표준물질 (6 deuterated PAHs, NISTSRM 2270) 100 µL를 문힌 석영섬유필터를 추출용 Cell (Unilab Korea, 내경 2 cm, size 33 mL)에 말아 넣고 전처리장비 (ASE 200E, Dionex Corp, USA)에 세팅하였다. 세팅된 Cell에 대해서는 장비 내부에 연결된 유리병에 채워진 추출용매 (헥산과 Ethyl ether 혼합용매, 부피비 9:1)로 150°C에서 15분 동안 추출하였다. 추출된 시료의 경우 회전증발농축증발기 (Heidolph, Germany)와 자동농축장치 Turbovap (Zymark, USA)을 사용하여 최종 1 mL까지 농축하였다. 이들 시료 분석에는 Agilent GC/MS (HP-6890/HP-5973N)를 이용하여 EPA TO-13A Method와 국내 대기오염공정시험기준 (ES 01802.1)의 분석절차를 적용하였다. GC 칼럼은 HP-5로 길이 30 m, 외경 0.32 mm, 내경 0.25 µm로 이루어져 있으며, 시료는 2.5 µL씩 주입하여 분석하였다. PAHs 성분의 경우 표준시료를 SCAN 모드로 분석하여 개별 PAHs의 질량 스펙트럼을 확인하는 정성작업을 통해 대상물질의 체류시간을 확정하였고, 이를 바탕으로 선택이온검출 (SIM) 모드로 분석하였다. GC/MS 분석 후에는 시료추출 전에 주입한 대리표준물질 (surrogate standard, SS)의 회수율을 이용하여 개별시료의 추출에 의한 손실율을 계산하고 이를 농도 보정에 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 대기입자의 화학적 성상특성

그림 3은 전체 측정기간 중 안심마을, 삼산마을, 완산동의 3개 측정지점에서 포집한 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 중 원



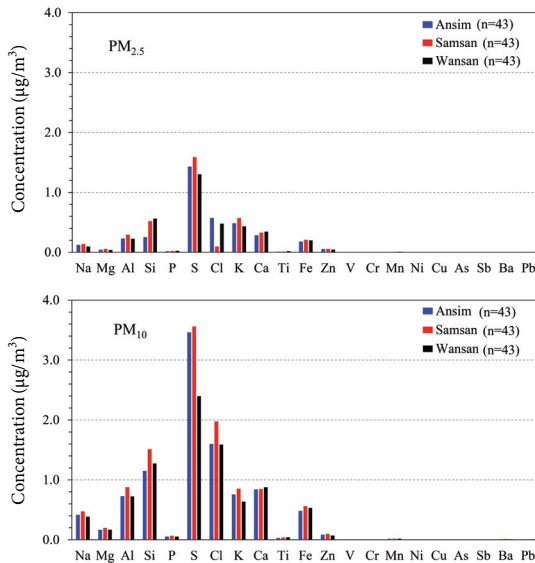


Fig. 3. The elemental concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  at three sites during the whole period.

소성분의 평균농도를 지점별로 나타낸 것이다. 여기에서 평균농도를 살펴보면 S, Si, C, K, Ca의 경우  $PM_{2.5}$ 와  $PM_{10}$  모두에서 다른 원소성분에 비해 상대적으로 고농도를 나타내었다. 3개 측정지점 간 농도 우위성은 원소에 따라 상이하였으나, 전반적으로 그 차이는 크지 않았다.

그림 4는 전체 측정기간 중 측정지점별  $PM_{2.5}$  및  $PM_{10}$  중 유해중금속 성분의 평균농도를 나타낸 것이다.  $PM_{2.5}$ 에서 중금속 성분의 평균농도를 살펴보면  $Mn > Pb > Ba$  순이었으며, 전체 유해중금속 성분 중 농도 우위를 보인 Mn과 Pb의 경우 완산고에서 약간 높게 나타났다.  $PM_{10}$ 의 경우  $Mn > Ba > Pb$  순으로 고농도를 보였으며, 전체 유해중금속 성분 중 농도 우위를 보인 성분들의 경우 대조지역인 안심마을에 비해 소각장의 풍하측에 위치한 삼산마을과 완산고에서 약간 높은 농도를 나타내었다. 소각장 등 고정발생원에서 배출되는 대기오염물질은 일반적으로 풍향/풍속, 기압분포 등의 기상요인에 더하여 배출가스량, 배출가스와 대기의 온도차, 굴뚝의 유효높이, 풍하측의 지형 및 지표 상황 등 여러 요인의 영향을 받아 확산이

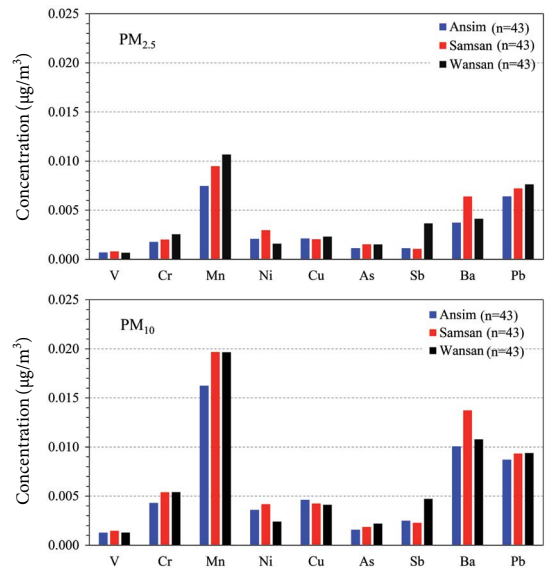


Fig. 4. The hazardous elemental concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  at three sites during the whole period.

일어나게 된다. 여기에서 삼산마을과 완산고의 경우 모두 소각장의 풍하측에 위치하고 있는 지리적 여건에서 일부 유해중금속 성분의 경우 소각장에 인접한 삼산마을(0.5 km)보다 멀리 떨어져 있는 완산고(1.5 km)에서 다소 높은 농도를 보이는데, 이것은 소각장 유효굴뚝의 높이에 의한 영향으로 사료된다. 선행연구(Ma and Kang, 2019)로 이루어진 익산시 소재의 도시생활폐기물 소각장에서 배출된 대기오염물질의 확산에 대한 평가 결과 굴뚝으로부터 풍하측으로 1.5 km 떨어진 지점에서 최고농도를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 이들 유해중금속 성분의 경우 일변량 분산분석(one-way ANOVA) 결과 풍상 및 풍하측 지점 간 농도 차이는 모두 통계적으로 유의한 수준을 보이지 않았다.

그림 5는 각 측정지점별  $PM_{2.5}$ 의 원소성분 중 건강유해성이 높은 중금속 성분에 대한 누적농도의 계절적인 변동을 나타낸 것이다. 여기에서 9개 성분의 중금속 성분에 대한 농도 분포를 살펴보면 대조지역인 안심마을에 비해 삼산마을과 완산고에서 상대적으로 고농도를 나타내었다. 이들 3개 측정지점에서의 계절

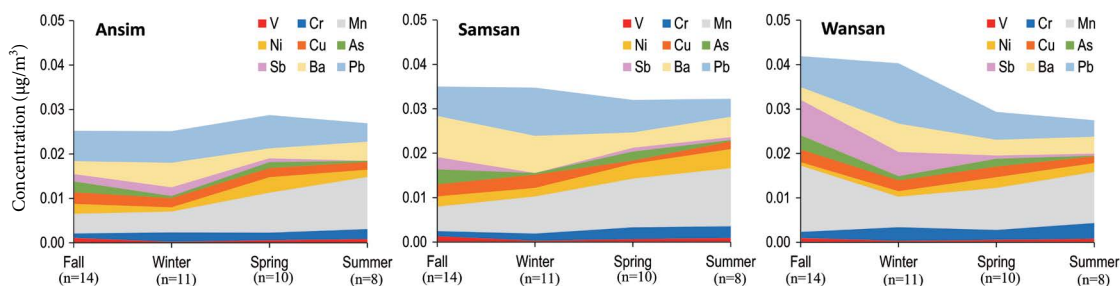


Fig. 5. The seasonal variation of hazardous elements in  $PM_{2.5}$  measured at three sites.

변동에 대한 유사성은 확인되지 않았으나, 삼산마을과 완산고의 경우 농도에 차이를 보이지만 계절변동에 따른 유사성을 보이고 있다. 이것은 소각장과 측정지점의 지리적인 위치를 고려할 때 삼산마을과 완산고의 경우 소각장의 풍하쪽에 위치하고 있다는 점에서 비슷한 계절 변동이 발생한 것으로 사료된다. 한편, 완산고에서는 다른 측정지점에 비해 약간 높은 농도를 보이면서, 측정기간별 농도변화 또한 현저하게 나타났다. 계절별 화학조성을 살펴보면 3개 지점 모두 Mn, Pb, Ba이 상대적으로 고농도를 보였다. 이들 원소 성분의 누적농도는 삼산마을과 완산고의 경우 겨울에 상대적으로 높게 나타난 반면, 안심마을의 경우 여름에 높게 나타났다.

도시생활폐기물 소각장 주변지역에서의 대기질 특성을 이해하기 위하여 본 연구에서는 안심마을, 삼산마을, 완산고의 3개 지점에서 측정한 대기입자 중 유해중금속 성분의 농도를 같은 기간 동안의 국내 다른 지역 농도자료와 비교하였다. 그림 6은  $PM_{10}$  중 유해중금속 성분의 농도가 상대적으로 높게 나타난 겨울을 대상으로 안심마을, 삼산마을, 완산고 지점에서의 6개 성분에 대한 평균농도와 비교 대상인 전주시 삼천동, 광주, 대전, 서산의 평균농도를 나타낸 것이다. 여기에서 전주시 삼천동을 포함한 다른 지역 중금속 성분 농도의 경우 환경부의 2020년 대기환경연보(MOE, 2021) 자료를 인용하였다. 전주권소각자원센터 3개 지점에서의 6개 유해중금속 성분의 누적농도 분포를 살펴보면 소각장에서 근거리에 위치하고 있는

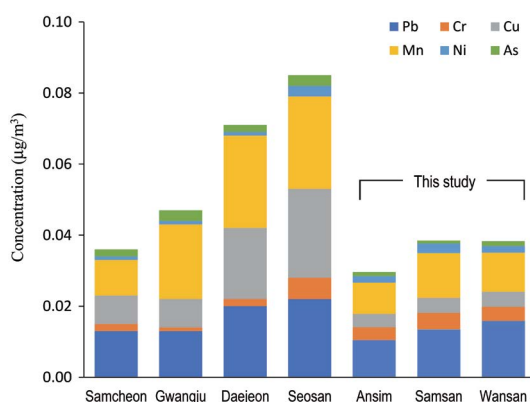


Fig. 6. Six hazardous elements in the wintertime  $PM_{10}$  at three sites of this study with other four regions.

전주시 삼천동과는 비슷한 수준이었으나, 대전과 서산에 비해서는 현저히 낮았다.

그림 7은 그림 5에 제시된 6개 유해중금속 성분의 누적농도를 지도상에 표시한 것이다. 여기에서 3개 측정지점의 평균농도는 전주권소각자원센터 인근에 위치하고 있는 전주시 삼천동과는 동일한 수준을 보인 반면, 광주와 대전 및 서산에 비해서는 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 특히, 서산의 경우 지리적으로 중국과 가까워 상대적으로 중국의 영향을 쉽게 받을 수 있는데다 발전용량이 600만 KW의 대규모 석탄화력발전소인 당진화력발전소와 한 달에 약 35만 톤 정도의 석탄을 사용하는 현대제철소가 가깝게 위치하고 있어 현저하게 높은 농도를 보이는 것으로 사료된다.

본 연구결과 도시생활폐기물 소각장에서 발생 가능

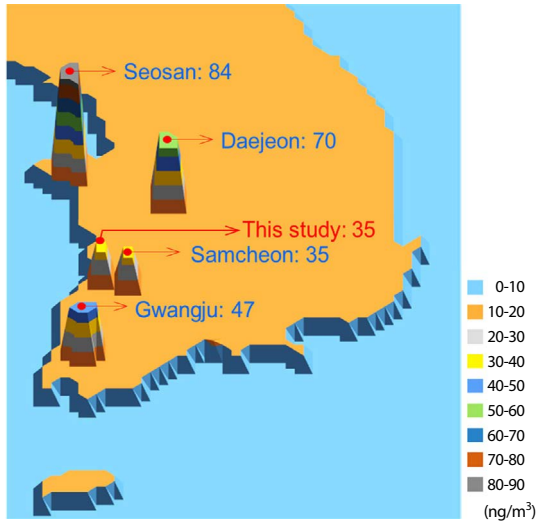


Fig. 7. The sum of six hazardous elements in PM<sub>10</sub> at this study (average of three sites) with other four regions.

한 유해중금속 원소성분의 경우, 풍하측에 위치한 인근의 삼산마을과 완산고 지점이 안심마을에 비해 소각장의 영향을 다소 받았던 것으로 나타났으나, 국내 다른 지역에 비해 상대적으로 낮은 수준임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 대상인 전주권소각자원센터에서 배출된 대기오염물질은 주변의 일부 지역에는 미미한 영향을 끼치고 있으나, 인근 지역의 대기질을 심각하게 악화시키는 정도는 아닌 것으로 사료된다. 그러나 건강위해성이 현저하게 높다고 알려져 있는 Pb의 경우 인근의 전주시 삼천동 도심지역 및 대도시인 광주와 거의 비슷한 농도를 보이고 있어 향후 이에 대한 지속적인 모니터링을 통해 원인 규명 및 관리 방안을 모색할 필요가 있는 것으로 사료된다.

### 3.2 유해중금속 원소의 발생원 영향평가

도시생활폐기물 소각장 주변 3개 측정지점에서의 대기질이 소각장 굴뚝에서 배출된 입자의 영향을 받았는지를 알아보기 위해 삼각분포도(Ternary plot)를 작성하였다. 이것은 임의의 3개 성분을 X, Y, Z로 한 상대적인 비율을 표현하기 위한 것으로 3개 성분의 비율을 등삼각형의 위치로서 표현하였다. 본 연구에

서는 소각장 굴뚝에서 포집한 입자의 원소성분과 소각장 주변 3개 측정지점에서 포집한 대기입자의 원소 중에 선정된 3개 성분 간의 상호 농도비를 구한 다음 그 결과를 바탕으로 측정지점별 대기입자에 미치는 소각장의 영향 여부를 평가하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 조건이 충족되는 원소를 대상으로 삼각분포도를 작성하였다.

- 비교대상 양측(굴뚝 배출원 입자와 주변 대기입자)의 데이터에 결손치가 없을 것
- 선정된 3개 성분 간의 비에 극단치가 없을 것
- 소각장의 배출 특성을 반영하는 성분일 것

위의 조건을 충족시키는 원소로서 Cr, Mn, Ni를 선정하였다. 도시생활폐기물 소각장의 지표원소로 알려진 Zn에 대해서는 굴뚝 배출 입자의 원소분석 결과 일부 시료에서 검출한계를 초과하지 않아 배제하였다. 평가대상 시점은 대기입자와 소각장 굴뚝 배출원 입자의 측정이 동시에 이루어진 겨울 및 봄 측정기간을 대상으로 하였다.

그림 8은 겨울과 봄철의 Cr, Mn, Ni 성분을 대상으로 한 삼각분포도를 나타낸 것이다. 여기에서 삼각분포도 안의 동그라미 기호는 안심마을, 삼산마을, 완산고의 3개 측정지점에서 각각의 측정일에 포집된 입자 중 Cr, Mn, Ni 성분에 대한 상호비의 위치관계를 그리고 점선의 경우 소각장 굴뚝 배출원 입자 중 Cr, Mn, Ni 성분 간의 농도비를 의미한다. 따라서 동그라미가 점선에 근접한 경우 굴뚝 배출원 입자와 관련성이 높은 즉, 소각장 배출원 입자의 영향을 받았을 가능성이 큰 측정일로 판단할 수 있다. 겨울에는 안심마을의 경우 10일 중 4일, 삼산마을의 경우 11일 중 9일, 완산고의 경우 9일 중 7일이 소각장 배출원 입자의 영향을 받았을 가능성이 있다고 볼 수 있다. 봄에는 안심마을의 경우 9일 중 5일, 삼산마을의 경우 9일 중 5일, 완산고의 경우 9일 중 8일이 소각장 배출 입자의 영향을 받았을 가능성이 있다고 볼 수 있다.

결론적으로 겨울에는 대조지역인 안심마을에 비해 삼산마을 및 완산고가 현저하게 소각장의 영향을 받

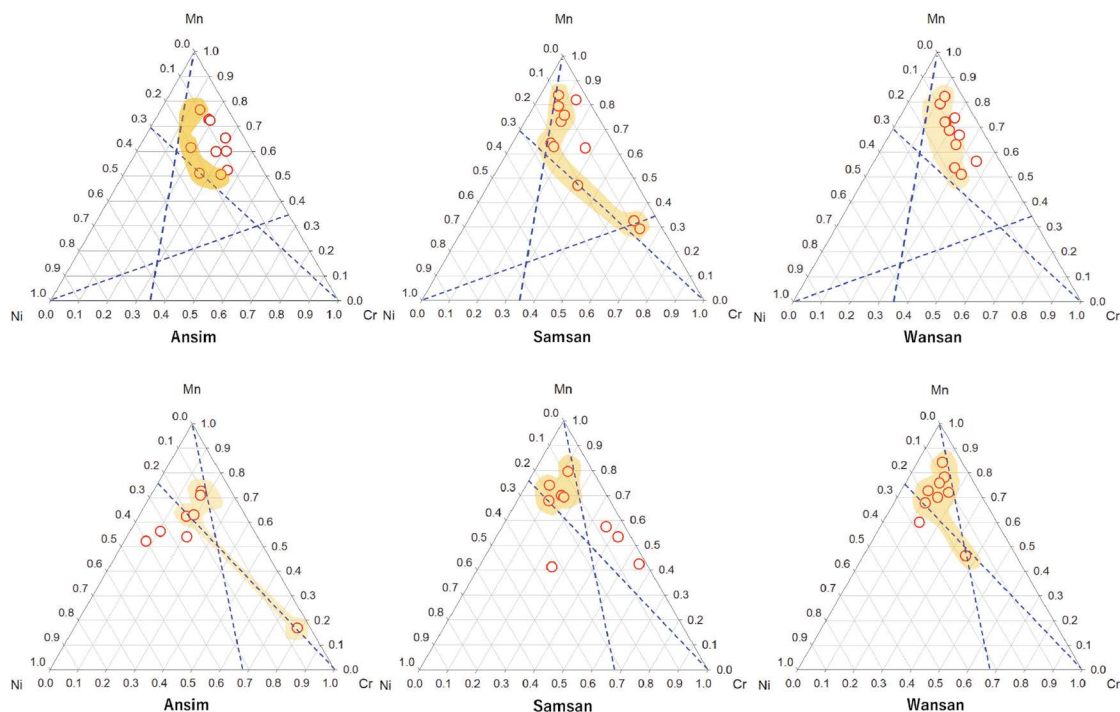


Fig. 8. Ternary plot of the relative concentration ratios among Ni, Cr, Mn of  $PM_{10}$  collected in the wintertime (top) and the springtime (bottom).

고 있다고 할 수 있으며, 봄에는 안심마을 및 삼산마을에 비해 완산고가 상대적으로 많은 영향을 받는 것으로 추정된다.

### 3.3 대기 중 PAHs 특성 및 소각장 영향평가

도시생활폐기물 소각장 주변지역 대기 중 PAHs 농도 분포를 살펴보면(표 1), 안심마을과 삼산마을에서는 Phenanthrene, Fluoranthene, Pyrene, Chrysene이 상대적으로 높게 나타난 반면, 완산고에서는 Chrysene, Benzo[j+k] fluoranthene, Benzo[b] fluoranthene, Benz[a] anthracene이 높은 농도를 나타내었다.

계절에 따른 농도 분포를 살펴보면 겨울에는 전체 PAHs 성분의 누적농도가 완산고( $3.52 \text{ ng/m}^3$ ) > 안심마을( $3.24 \text{ ng/m}^3$ ) > 삼산마을( $2.66 \text{ ng/m}^3$ )의 순으로 나타났다. 반면, 봄에는 삼산마을( $1.82 \text{ ng/m}^3$ ) > 완산고( $1.11 \text{ ng/m}^3$ ) > 안심마을( $0.69 \text{ ng/m}^3$ ) 순으로 겨울과

는 상이한 결과를 나타내었다. 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)의 발암성 등급이 2B 이상인 11개 성분의 누적농도(겨울 및 봄철 평균)는 완산고( $1.19 \text{ ng/m}^3$ ) > 삼산마을( $1.05 \text{ ng/m}^3$ ) > 안심마을( $1.01 \text{ ng/m}^3$ ) 순이었다.

이와 같이 도시생활폐기물 소각장 주변지역 3개 측정지점 모두 봄에 비해 겨울에 상대적으로 고농도를 보이고 있는데, 이것은 서울지역 대기 중의 PAHs 분포 특성 및 발생원에 관한 Park *et al.* (2010)의 연구결과와 일치하였다. 전주권소각자원센터 주변지역 3개 측정지점에서의 PAHs 평균농도는 봄에 비해 겨울이 약 3배 높은 반면, 서울시 관악지역과 서대문지역의 경우 겨울이 봄에 비해 약 2배 높은 수준이었다(Park *et al.*, 2010). 본 연구에서는 Jung *et al.* (2011)이 2010년 10월 포항에 위치한 철강공단 및 주변지역에서의 동일한 16개 성분을 대상으로 측정한 결과와 비교하였



**Table 1.** The PAHs concentrations measured at three sampling sites (n = 2) and the incinerator stack (n = 2). (ng/m<sup>3</sup>)

| Class of IARC | Class                          | Ambient site |        |        |        |        |        | Stack  |        |
|---------------|--------------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               |                                | Ansim        |        | Samsan |        | Wansan |        | Winter | Spring |
|               |                                | Winter       | Spring | Winter | Spring | Winter | Spring |        |        |
| 2B            | Naphthalene                    | 0.14         | 0.07   | 0.15   | 0.29   | 0.10   | 0.01   | 27.05  | 6.39   |
| X             | Acenaphthylene                 | 0.04         | 0.00   | 0.03   | 0.02   | 0.02   | 0.00   | 0.56   | 0.00   |
| 3             | Acenaphthene                   | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 3             | Fluorene                       | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 3             | Phenanthrene                   | 0.42         | 0.12   | 0.36   | 0.18   | 0.44   | 0.10   | 2.68   | 7.09   |
| 3             | Anthracene                     | 0.04         | 0.01   | 0.04   | 0.03   | 0.04   | 0.02   | 1.20   | 1.50   |
| 3             | Fluoranthene                   | 0.56         | 0.09   | 0.49   | 0.21   | 0.64   | 0.11   | 0.98   | 1.23   |
| 3             | Pyrene                         | 0.40         | 0.02   | 0.38   | 0.09   | 0.52   | 0.04   | 1.17   | 0.00   |
| 2B            | Benzo[c]phenanthrene           | 0.10         | 0.02   | 0.08   | 0.04   | 0.12   | 0.05   | 0.73   | 0.29   |
| 2B            | Benzo[a]anthracene             | 0.19         | 0.03   | 0.16   | 0.05   | 0.25   | 0.06   | 0.52   | 1.57   |
| 2B            | Chrysene                       | 0.50         | 0.07   | 0.39   | 0.11   | 0.61   | 0.20   | 1.92   | 1.46   |
| 2B            | Benzo[b]fluoranthene           | 0.37         | 0.09   | 0.10   | 0.21   | 0.22   | 0.23   | 0.80   | 0.26   |
| 2B            | Benzo[k]fluoranthene           | 0.24         | 0.04   | 0.10   | 0.10   | 0.22   | 0.08   | 0.70   | 0.13   |
| X             | 7,12-Dimethylbenz(a)anthracene | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 3.86   | 0.00   |
| 3             | Benzo[e]pyrene                 | 0.08         | 0.13   | 0.17   | 0.37   | 0.24   | 0.08   | 21.49  | 4.22   |
| 1             | Benzo[a]pyrene                 | 0.16         | 0.00   | 0.20   | 0.13   | 0.10   | 0.12   | 0.00   | 1.22   |
| X             | 3-Methylcholanthrene           | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 2B            | Indeno[1,2,3-cd]pyrene         | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 2A            | Dibenzo[a,h]anthracene         | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 3             | Benzo[g,h,i]perylene           | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 2B            | Dibenzo[a,h]pyrene             | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 2B            | Dibenzo[a,i]pyrene             | 0.00         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| Sum of PAHs   |                                | 3.24         | 0.69   | 2.66   | 1.82   | 3.52   | 1.11   | 63.66  | 25.35  |

다. 본 연구에서 겨울 및 봄 측정기간 동안 PAHs 16개 성분의 누적평균농도는 안심마을 1.01 ng/m<sup>3</sup>, 삼산마을 1.05 ng/m<sup>3</sup>, 완산고 1.19 ng/m<sup>3</sup>이었다. 반면 Jung *et al.* (2011)의 연구결과에 따르면 공단 인근 3개 지역의 농도는 5.55~23.095 ng/m<sup>3</sup> (평균 11.685 ng/m<sup>3</sup>)이었으나, 비공단지역의 경우 3.04 ng/m<sup>3</sup>로 보고되었다. 따라서, 본 연구에서 측정한 도시생활폐기물 소각장 주변 지역 3개 지점의 평균농도는 포항시 공단 인근지역보다 매우 낮은 수준이며, 비공단지역보다도 낮다는 것을 알 수 있다. 또한 2020년 환경부의 대기환경연보 자료(MOE, 2021)에서 동일한 측정시점인 2월과 4월의 측정결과를 살펴보면 소각장 인근의 전주시 삼천동, 광주, 대전에서 이들 평균농도는 각각 9.67 ng/m<sup>3</sup>, 11.02 ng/m<sup>3</sup>, 10.75 ng/m<sup>3</sup>이었다. 이것은 전주권소각장 원센터 3개 지점 PAHs 농도의 경우 이들 지역의 약

10% 수준에 그치고 있음을 의미한다.

본 연구에서는 소각장 주변 3개 측정지점에서 일반 대기 중 PAHs 농도가 소각장 배출원 입자의 영향을 받았는지 평가하고자 하였다. 평가에는 발암성 등급 분류와 관계없이 소각장 주변 대기입자와 소각장 배출원 입자 모두에서 분석된 성분만을 대상으로 하였다. 기준성분으로는 대상성분 중에서 소각장 굴뚝에서 포집한 배출원 입자의 PAHs 중 농도가 상대적으로 높은 나프탈렌(naphthalene)을 선정하여 다른 성분과의 비율 즉, 농축계수(Enrichment factor, EF)를 산출하였다. 나프탈렌은 여러 종류의 소각시설에 있어서 가장 많이 배출되는 PAHs 중의 한 성분으로 알려져 있다(Li *et al.*, 2015; Mi *et al.*, 2001).

Rahn (1976)에 의해 제시된 농축계수법은 특정 발생원에서 배출된 대기오염물질의 영향을 받았는지를

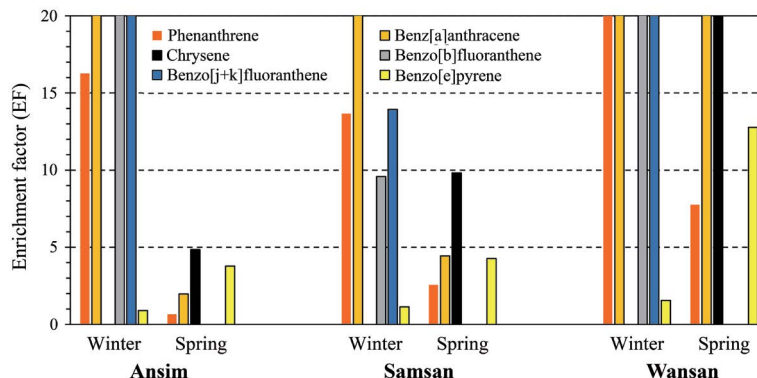


Fig. 9. Enrichment factors of 6 PAHs measured at three sites in wintertime and springtime.

평가하기 위한 방법 중의 하나이다. 농축계수 산출을 위한 계산식은 다음과 같다.

$$EF_x = \frac{Cx,p/Cref,p}{Cx,s/Cref,s}$$

여기에서,  $Cx,p$ 와  $Cref,p$ 는 대기입자의 PAHs 성분과 선정된 지표성분(naphthalene)의 농도를 각각 의미한다.  $Cx,s$ 와  $Cref,s$ 는 소각장 굴뚝에서 포집한 배출원 입자의 PAHs 성분과 선정된 지표성분의 농도를 각각 의미한다. 농축계수의 경우 1에 가까울수록 해당 PAHs 성분이 소각장 굴뚝 배출원 입자의 영향을 강하게 받았다고 볼 수 있으며, 이 값이 클수록 다른 발생원의 영향이 지배적이라고 할 수 있다. 그림 9는 안심마을, 삼산마을, 완산고에서 겨울과 봄에 측정된 PAHs의 조성을 이용하여 계산한 농축계수의 산정사례를 나타낸 것이다. 여기에서 농축계수는 분석대상의 검출한계와 자료의 결측치를 고려해 상대적으로 고농도가 검출된 시점의 시료를 기준으로 산정하였다. 농축계수 5를 기준으로 소각장 기원의 영향 정도를 판단했을 때 3개 지점 중 삼산마을의 경우 PAHs 중 6개 성분이 소각장의 영향을 받았을 가능성이 있는 것으로 사료된다. 측정시기별로는 겨울에 비해 봄에 3개 지점 모두 소각장의 영향을 더 받은 것으로 추정된다. 그러나 본 연구에서는 소각장 주변지역에서 측정된 PAHs 시료수가 충분하지 않기 때문에 이로 인한 자료해석이 제한적 의미를 가질 수 있음을 밝힌다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도시생활폐기물 소각장의 주변지역 대기 중 미세먼지 및 초미세먼지를 채취하여 대기입자 중 중금속을 중심으로 한 원소성분과 발암성 물질로 알려진 PAHs의 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

건강유해성이 높은 중금속 성분의 누적평균농도는 소각장을 기준으로 풍상지역인 안심마을보다 풍하쪽에 위치하고 있는 삼산마을과 완산고에서 상대적으로 높게 나타났으나, 그 차이는 통계적으로 유의한 수준을 보이지 않았다. 삼산마을과 완산고의 계절변동에서는 다른 계절보다 겨울에 고농도를 보인다는 유사성이 있었다. 소각장 주변지역 3개 측정지점의 유해중금속 농도는 전주시 삼천동과는 비슷하였으나, 대전과 서산에 비해서는 현저히 낮은 수준이었다.

발암성 물질로 알려진 PAHs의 농축계수 산출결과 삼산마을의 경우 PAHs중 6개 성분이 소각장의 영향을 받았을 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 시기별로는 겨울에 비해 봄에 3개 측정지역 모두 소각장의 영향을 더 받은 것으로 나타났다. 하지만, 본 연구에서 측정된 소각장 주변 3개 지점의 PAHs 농도는 포항시공단 인근지역보다 매우 낮았으며, 비공단지역보다도 낮은 수준이었다. 또한 대기환경연보 자료에 비교해보면 측정지점 인근의 전주시 삼천동, 광주, 대전에 비

해 약 10% 농도 수준이었다.

결론적으로 본 연구에서는 도시생활폐기물 소각장의 간접영향권을 포함한 주변지역에서 1년 동안 분기별 실측을 통해 정도 높은 분석자료를 확보하였으며, 이를 통해 기존의 매체중심의 환경관리에서 벗어나 수용자 중심의 환경보건학적 정책구현 및 선진소각시설의 대기질 관리에 필요한 유의미한 정보의 제공이 가능하였다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2020년도 전주권소각자원센터 주변지역 환경상영향조사(전주시)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Amutha, R.D., Boccaccini, A.R., Deegan, D., Cheeseman, C.R. (2008) Air pollution control residues from waste incineration: Current UK situation and assessment of alternative technologies, *Waste Management*, 28, 2279-2292.
- Chillrud, S.N., Epstein, D., Ross, J.M., Sax, S.N., Pederson, D., Spengler, J.D., Kinney, P.L. (2004) Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system, *Environmental Science and Technology*, 38, 732-737.
- Heyder, J., Gebhart, J., Rudolf, G., Schiller, C.F., Stahlhofen, W. (1986) Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005-155  $\mu\text{m}$ , *Journal of Aerosol Science*, 17, 811-825.
- Houk, R.S., Fassel, V.A., Flesch, G.D., Svec, H.J., Gray, A.L., Taylor, C.E. (1980) Inductively coupled argon plasma as an ion source for mass spectrometric determination of trace elements, *Analytical Chemistry*, 52, 2283-2289.
- Jung, J.H., Phee, Y.G., Cho, S.W., Ok, G., Shon, B.H., Lee, K., Lim, H.S. (2011) Concentration levels and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at ambient air in industrial complex area, *Clean Technology*, 17(4), 379-388.
- Kida, A., Noma, Y., Kounobe, K. (1991) Chemical composition of ash produced from municipal incinerators and the analogy of the behavior of 36 elements, *Journal of the Japan Society of Waste Management Experts*, 2(1), 11-20.
- Li, H., Liu, G., Cao, Y. (2015) Levels and environmental impact of PAHs and trace element in fly ash from a miscellaneous solid waste by rotary kiln incinerator, China, *Natural Hazards*, 76, 811-822. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1520-x>
- Ma, C.-J., Kang, G.U. (2019) Chemical property of the fly ash collected at an incinerator and its effects on near ambient particles, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(2), 136-143.
- Mi, H.H., Chiang, C.F., Lai, C.C., Wang, L.C., Yang, H.H. (2001) Comparison of PAH emission from a municipal waste incinerator and mobile sources, *Aerosol and Air Quality Research*, 1, 83-90.
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Annual report of air quality in Korea, 2020. <https://library.me.go.kr/>
- Mori, T., Inudo, M., Takao, Y., Koga, M., Takemasa, T., Shinohara, R., Arizono, K. (2007) In vitro evaluation of atmospheric particulate matter and sedimentation particles using yeast bioassay system, *Environmental Sciences*, 14, 203-210.
- Park, J.G., Yoon, S.K., Bae, W.K. (2010) Distribution and emission source of PAHs in ambient air of Seoul, *Analytical Science & Technology*, 23(3), 269-277.
- Rahn, K.A. (1976) The chemical composition of the atmospheric aerosol, Technical Report, Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Kingston, 265.

## Authors Information

마창진 (일본 후쿠오카여자대학교 환경과학과 교수)

(ma@fwu.ac.jp)

강공언 (원광보건대학교 의무행정과 교수) (gukang@wu.ac.kr)