

OA1) 국내 주요 철강산업지역으로부터 거리에 따른 주거지역의 호흡성 분진(PM10)과 유해 무기물질의 노출 및 오염원 기여도 평가

김모근*, 조완근¹

경상북도 보건환경연구원, ¹경북대학교 환경공학과

1. 서 론

다양한 산업 활동으로 유기 및 무기화합물질을 포함한 입자상 대기오염물질의 배출량이 증가하고 이는 도시 대기환경에서 오염물질의 농도를 증가를 유발 하고, 특히 입자상 물질 중의 높은 농도의 무기화합물질은 독성을 가지며 건강에 유해한 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구는 산업단지 주변의 대기 입자상 오염물질의 노출을 과학적으로 평가하기 위하여 고안되었다. 본 연구의 목적은 산업단지 안에 위치하고 각종 대기오염물질의 배출오염원으로 예상되는 산업지역과 산업지역으로부터 인접한 거리가 다른 두 주거지역에서 PM10 중 에 포함된 화학성분을 분석하여 산업지역과 인근 두 주거지역의 주요 오염원을 정의하고, 오염원의 기여도를 정성 및 정량적으로 평가하고자 하는 것 이었다. 또한 PM10 중에 포함된 화학성분을 분석하여 산업지역, 두 주거지역에서 지역별, 계절별 부유분진의 농도특성을 평가하였다.

또한 본 연구에서는 PM10에 함유되어 있는 대기오염물질의 성분들을 주성분분석방법 (principal component analysis, PCA)을 이용하여 PM10의 가능성 있는 오염원을 통계적으로 평가하며, 절대주성분분석방법 (absolute principal component analysis, APCA)과 회귀 상관분석법을 이용하여 가능성 있는 오염원의 변수들 즉 PM10에 포함된 대기오염물질인 각각의 화학성분들을 정량적으로 평가하였다.

2. 시료채취 및 분석방법

본 연구의 시료채취는 High Volume Air Sampler와 PM10 Inlet 장비를 이용하여 포항시에 위치하는 철강 산업단지의 산업지역 1개 지점과 그 지역으로부터 약 1km 거리의 주거지역 A, 약 6.5km 거리의 주거지역 B에서 겨울, 여름 두 계절 동안 24시간 연속하여 28 - 33 일간 측정하였으며 3개 지역에서 두 계절 동안 포집한 PM10의 시료여지(Whatman QM-A, 8"×10" filter) 수는 183개 였다. 시료의 전처리는 microwave 전처리장치 (CEM MDS 2000, USA)를 이용하였으며, 전처리한 검액을 ICP-AES (PerkinElmer Optima 4300DV, USA) 분석기기와 ICP-OES WinLap32TM 소프트웨어를 이용하여 대상오염물질의 농도를 분석하였다. 본 연구에서 획득한 자료의 통계적인 분석은 SAS statistical package (version 8.1)를 이용하여 처리하였다. 산업지역, 주거지역 A, 주거지역 B, 대상물질 (입자상 물질농도, 원소

성분), 가능한 발생원별 오염원 기여도 형태를 파악하기 위하여 화학적 질량수지 수용모델링의 평가 방법으로 풍성계수법, 상관분석법, 분산분석법, 주성분분석법, 요인분석법, 다변량 회귀상관분석법을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PM10의 농도분포 및 PM10에 함유된 화학성분들의 농도특성 평가

계절별로 나타난 PM10의 농도특성을 살펴보면, 겨울철 PM10의 농도는 산업지역, 주거지역 A, 주거지역 B에서 각각의 평균값이 80.6, 52.0, 39.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 산업지역과 주거지역에서 산술적인 농도 비의 범위는 1.6-2.0 배 이었고, 여름철 PM10의 농도는 산업지역, 주거지역 A, 주거지역 B에서 각각의 평균값이 71.3, 42.2, 33.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 산업지역과 주거지역의 산술적인 농도 비의 범위가 1.7-2.1 배로 계절에 따른 지역별 농도 차이는 겨울과 여름에 있어서 유사한 것으로 나타났다. 각 지역별 겨울과 여름의 PM10의 농도 비교에 있어서는 각 지역에서 겨울의 PM10의 농도가 13-27% 정도 높게 나타났다. 산업지역과 인접한 지역인 주거지역 A와 산업지역과 다소 멀리 떨어져 있는 주거지역 B와의 PM10 농도 비교에서는 인접한 주거지역에서 PM10의 농도가 26-32% 높은 농도를 나타내어 산업지역에 인접한 주거지역 A에서 먼 주거지역 보다 인위적인 오염물질의 발생원에 영향이 더 큰 것으로 추정할 수 있다.

Pb의 평균농도 범위는 최저 농도인 여름철 주거지역 B의 16.4 ng/m^3 과, 최고 농도인 겨울철 산업지역에서의 125.1 ng/m^3 으로 그 농도 비가 7.6배가 되어, 측정 지점과 계절에 따라서 많은 농도 차이가 남을 알 수 있었다. 또한 산업지역에 가까운 주거지역 A가 주거지역 B 보다 최고 2.2배 높은 농도를 나타내어 산업지역의 인근 지역에서 Pb의 영향을 더 많이 받는 것을 확인할 수 있었다. 부유분진에 함유된 Fe의 농도는 286.2-5883.5 ng/m^3 범위로 산업지역의 농도와 주거지역 B의 농도 비가 최고 20.6로 시료 채취 지점별 농도가 다른 화학종과 비교하여 가장 높았다. 산업지역과 주거지역에 있어서 대상오염물질의 농도 차는, 발생원이 주로 인위적인 성분인 Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn 등은 높은 농도 차를 나타내는 반면, 토양 및 도로 재 비산먼지, 해양입자 등이 오염원인 Al, Ca, K, Mg, Na, Si 등은 약간 높거나 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 Ba, Na 같은 화학성분은 3개의 시료채취 지점 중에서 교통량이 빈번한 자동차도로와 인접해 있고, 해안에 가까이 위치한 주거지역 A에서 가장 높은 농도로 검출되었다.

3.2. PM10 및 화학성분간의 상관성분석

포항의 산업지역, 주거지역 A, 주거지역 B에서 일년 동안 계절별로 포집한 PM10 시료 중의 오염대상물질의 각 성분과의 상관관계는 Co, Fe, Ni, Pb, V, Zn 등에서 높은 상관성과 통계적인 유의성을 가진다. 이는 금속관련 산업, 중유 및 석탄과 같은 화석연료의 연소와 연관성이 있는 인위적인 발생원과 관련성이 있을 것으로 추정되며, 공통의 오염원을 가진다고 판단해 볼 수 있다. 다음으로 Al, Ca, Si, Ti, K 및 Na 등에서 높은 상관성을 나타내어 토양이나 도로비산 먼지관련 오염원, 해양오염원과 같은 자연발생원과 관련성이 있을 것으로 추

정되면, 공통의 오염원을 가진다고 판단해 볼 수 있다. 포항지역의 PM10과의 상관성은 Cd, Co, Fe, Ti 의 순으로 높았으며, 변수들 간의 상관성이 높은 Zn, Pb 과, Fe, Co, Ni, V, Cd 과, Al, Ti 과, Cr, Ni 이 각각 공통의 오염원을 가진다고 판단해 볼 수 있다.

3.3. 발생원별 PM10 농도 기여도 평가

산업지역의 경우 5개의 가능한 발생원별 기여도를 PM10 농도로 환산한 평가 부유분진 농도기여도는 측정된 PM10 농도에 대해 89.4% 설명이 가능하며, 중회귀상관분석을 통한 상관계수가 0.85로 비교적 높으며, 평가치와 실측치간의 상대오차가 10.6%로 나타났다. 주거지역 A의 경우 4개의 가능한 발생원별 기여도를 PM10 농도로 환산한 부유분진 농도기여도는 측정된 PM10 농도에 대해 85.9%가 설명 가능하며, 중회귀상관분석을 통한 상관계수가 0.74 이며, 평가치와 실측치간의 상대오차가 14.1%로 나타났다. 주거지역 B의 경우 5개의 가능한 발생원별 기여도 전체를 PM10 농도로 환산한 부유분진 농도기여도는 측정된 PM10 농도에 대해 89.9% 설명이 가능하며, 중회귀상관분석을 통한 상관계수는 0.81로 비교적 높으며, 평가치와 실측치간의 상대오차가 10.1%로 나타났다.

3.4. 산업지역으로부터 거리에 따른 주거지역에서 PM10에 대한 무기오염물질의 오염원 기여도 평가

산업지역, 주거지역 A, 주거지역 B의 3개 연구대상지역에 대해 주성분분석한 결과는 단일 요인 보다 제철관련/연료연소 오염원, 제철관련/ 토양오염원, 소각관련/교통관련 오염원 등의 2개 오염원이 공통요인으로 나타나는데, 이는 복합 산업단지로부터 다양한 배출오염원의 영향에 기인한 것으로 사료된다. 이와 같이 2개 이상 공통의 오염원을 분류한 방법이 Anastasia et al. (2004)에 의한 선행 연구에서도 적용 보고되었다. 산업지역에서 가능한 오염원은 제철관련/연료연소 오염원, 토양오염원, 소각관련 오염원, 구리산업 및 장거리 이송 오염원, 교통관련 오염원으로 분류되었고, 오염원별 분산비가 각각 38.8, 18.8, 10.4, 7.4, 5.3% 이고, 총 누적분산은 80.7%로 나타났으며, PM10에 함유된 농도 비는 각각 25.1, 34.7, 19.8, 11.4, 9.1%로 나타났다. 주거지역 A에서 가능한 오염원은 제철관련/토양오염원, 소각관련/교통관련 오염원, 연료연소 오염원, 구리산업 및 장거리 이송 오염원으로 분류되었고, 오염원별 분산비가 각각 45.9, 13.7, 11.7, 7.7% 이고, 총 누적분산은 79.1%로 나타났으며, PM10에 함유된 농도 비는 각각 33.4, 45.5, 21.4, 0.3%로 나타났다. 주거지역 B에서 가능한 오염원은 제철관련/소각관련 오염원, 토양오염원, 해양오염원, 연료연소 오염원, 구리산업 및 장거리 이송 오염원으로 분류되었고, 오염원별 분산비가 각각 51.1, 12.8, 7.6, 7.2, 5.3% 이고, 총 누적분산은 84.0%로 나타났으며, PM10에 함유된 농도 비는 각각 12.8, 54.0, 27.0, 0.2, 6.1%로 나타났다. 본 연구에서 포항 산업지역의 산업관련 오염원의 PM10에 대한 농도 기여도는 44.9%로 선행 연구의 다른 지역보다 훨씬 높았는데, 이는 산업관련 배출원의 밀집도가 크기 때문이라고 생각한다. 주거지역 A에서는 제철관련 오염원과 토양오염원이 공통 오염원으로 기여도가 33.4%로 나타나, 산업관련 오염원의 기여도를 뚜렷하게 분리하여 평가하기는 곤란하였다. 하지만, 주거지역 B에서 토양관련 오염원의 독립적인 농도 기여도가

54%로 높게 나타났기 때문에, 상대적으로 산업지역과 인접한 주거지역 A에서 산업관련 오염원 기여도가 높은 것을 알 수 있었다. 따라서 주거지역 A에서는 산업관련 오염원의 기여도가 높고, 주거지역 B에서는 토양오염원과 해염입자의 오염원 기여도가 더 높은 것을 평가할 수 있었다. 토양오염원의 기여도는 시골지역이 도심지역이나 산업지역 보다 PM에 대한 오염원 기여도가 높았던 반면, 교통관련 오염원의 기여도는 도심지역이나 산업지역이 시골지역 보다 PM에 대한 오염원 기여도가 높았다. 이는 핀란드 헬싱키에서 오염원 기여도 평가를 연구한 결과와도 일치하였다 (Tuomo et al., 2001).

4. 요약

주거지역 A와 주거지역 B의 PM10 평균농도 비교에서 산업지역과 인접한 주거지역 A에서 계절에 관계없이 26-32% 높은 농도를 나타내어 산업지역에 인접한 주거지역 A가 먼 주거지역 B 보다 PM10의 영향에 더 크게 노출된 것을 확인 할 수 있었다. PM10에 포함된 Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn 등의 무기성분은 대부분 인위적인 발생원과 관련성이 있는 대기 오염물질로, 인위적인 배출원의 영향정도를 파악하기 위하여 풍성계수 분석결과 높은 풍성계수를 나타내어 인위적인 오염원임을 확인 할 수 있었고, 그 평균농도는 주거지역 A가 주거지역 B 보다 높게 나타나 주거지역 A가 주거지역 B 보다 산업 오염원의 노출에 더 많은 영향을 받는다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 이들 무기화합물질의 상관성 분석결과 높은 상관성과 통계적인 유의성 ($p < 0.01$)이 있었으며, 공통의 오염원을 추정 할 수 있었다.

PM10의 가능한 오염원 기여도 평가에 있어서, 주거지역 A에서는 제철관련 오염원과 토양오염원의 공통 오염원 기여도가 33.4%로 나타나 산업관련 오염원의 기여도를 뚜렷하게 분리하여 평가하기는 곤란하였으나, 주거지역 B에서 토양관련 오염원의 독립적인 농도 기여도가 54%로 높게 나타났기 때문에, 상대적으로 산업지역과 인접한 주거지역 A에서 산업관련 오염원 기여도가 높은 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- Prahalad, A.K., Inmon, J., Dailey, L.A., Madden, M.C., Ghio, A.J., and Gallagher, J.E., 2001, Air pollution particles mediated oxidative DNA base damage in a cell free system and in human airway epithelial cells in relation to particulate metal content and bioreactivity, *Chemical Research In Toxicology* 14, 7, 879-887.
- Tuomo, A. Pakkanen, Kati Loukkola, Christina H. Korhinen, Minna Aurela, Timo Makela, Risto E. Hillamo, Paivi Aarnio, Tarja Koskentalo, Anu Kousa, and Willy Maenhaut, 2001, Sources and chemical composition of atmospheric fine land coarse particles in the Helsinki area, *Atmospheric Environment* 35, 5381-5391.
- Valiulis, D., Ceburnis, D., Sakalys, J., and Kvietkus, K., 2002, Estimation of atmospheric trace metal emissions in Vilnius City, Lithuania, using vertical concentration gradient and road tunnel measurement data, *Atmosphere Environment* 36, 6001-6014.