

대전 3, 4 공단지역의 대기중 독성금속의 인체 위해도 평가

이진홍 · 장미숙 · 임종명 · 구부미

충남대학교 환경공학과

Health Risk Assessment of Airborne Toxic Metals in Taejon Third and Fourth Industrial Complexes

Lee, Jin-Hong · Jang, Mi-Suk · Lim, Jung-Myung · Ku, Bu-Mi

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

Abstract

The research centers on the health risk assessment of airborne toxic metals in Taejon third and fourth industrial complexes. Total suspended particulates were collected on glass microfibre filters by high volume air samplers. Fifteen toxic metals including 6 carcinogenic metals were analyzed by ICP-MS and ICP-AES after the pre-treatment of mixed acid extraction. The following results were summarized from the research : 1) the concentrations of TSPs were $17.7 \sim 219.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ while the arithmetic mean concentration was $101.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 2) the arithmetic mean concentrations of human carcinogens such as arsenic, hexavalent chromium and nickel subsulfide were 10.22, 6.96 and $6.42 \text{ ng}/\text{m}^3$, respectively while those of probable human carcinogens such as beryllium, cadmium and lead were 0.13, 3.41, $97.65 \text{ ng}/\text{m}^3$, respectively; 3) the point risk estimate for the inhalation of carcinogenic metals was 1.5×10^{-4} , which was much higher than a risk standard of 10^{-5} ; 4) approximately 93% of the cancer risk were to the inhalation of human carcinogens, arsenic and hexavalent chromium, which should be properly managed in Taejon third and fourth industrial complexes.

Key words : Health Risk Assessment, Airborne Toxic Metals, Taejon Third and Fourth Industrial Complexes

I. 서 론

도시 대기중의 중금속의 농도는 낮지만 독성이

크기 때문에 이로 인한 인체 위해도는 그 밖의 유해 대기 오염물질로 인한 것보다 작지가 않을 것이다. 특히, 공단지역의 경우 발암금속을 포함

한 독성금속으로 인한 인체 위해도도 더욱 크리라 예상되고 따라서, 공단지역을 대상으로 독성금속의 농도를 지속적으로 파악하고 인체 위하도를 평가하는 것은 중요한 일이다.¹⁾ 본 연구는 대전 3, 4 공단지역의 1999년의 계절별 독성금속의 농도를 분석하였고 독성금속의 호흡으로 인한 주변 주민의 인체 위하도를 평가하였다. 발암금속 6종을 포함한 15종의 독성금속을 선정하여 검출한계와 재현성이 매우 뛰어난 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 분광분석기(ICP-AES)를 이용하여 대상 지역내 5개 지점의 농도를 분석하였다. 대전광역시 3, 4 공단지역은 조립금속업종 63, 화학관련업종 23, 제조업관련업종 5, 음료관련업종 4, 섬유관련업종 7업체 등 120여개 이상의 생산업체가 밀집되어 있고 지원기관 또는 업체로 폐수종말처리장, 특정폐기물처리업체, 열병합발전소, 생활폐기물소각장 등 20여 업체가 입주해 있는 상대적으로 대기오염이 심하리라 예상되는 지역이다.

II. 연구 방법 및 자료

1. 시료의 포집 및 분석 방법

조사지점은 독성금속으로 인한 인근 주민의 위하도를 평가하기에 적합하도록 주변 주민들의 거주지와 공단지역내 대기질 현황을 적절히 파악, 비교 분석할 수 있는 지점을 중심으로 공단내의 3개 지점(A-1, A-2, A-5)과 주변 2개 지점(A-3, A-4), 총 5개 지점을 선정하였다. 조사지점은 의정확한 위치는 표 1에 나타나 있다. 계절별 조사기간은 겨울은 '99년 2월 23 - 27일, 봄은 5월 18 - 24일, 여름은 8월 23 - 30일, 가을은 11월 15 - 20일 이다. 대기중 총부유분진은 high-volume air sampler (Kimoto Model - 121 FT, Sierra Andersen : SAUB-1H Model, Tripod GMWT 2200)를 이용

하여 유리섬유여지(Whatman EPM 2000)에 포집하였다. 총부유분진내 독성금속 성분을 분석한 이유는 독성금속의 입경별 농도분포가 질량평균직경(MMD: mass median diameter)은 2.5 μ m이하의 미세분진 영역이지만 금속에 따라서는 10 μ m 이상의 분진내에도 얼마간 분포하고 있기 때문이다.²⁾ 이 보다 더 큰 이유는 역학 조사(epidemiological study)에 근거하여 평가된 발암금속의 발암력(cancer potency)이 입경 구별없이 총부유분진내 금속의 농도에 기초하고 있다는 점이다. High volume air sampler의 유속 변화에 따른 공기 흡입량은 유량 기록지를 이용하여 시료채취 시작부터 종료까지 연속적으로 유량을 측정하여 환산하였고, 500시간 경과 후 motor brush를 교환할 때마다 orifice calibrator(GMW-25)를 이용하여 유속을 보정하였다. 분진을 채취한 여지는 실험실에서 건조시켜 평량하고 무게를 잰 후, 시료 분석전까지 데시케이터에 보관하였다.

시료의 전처리 방법으로 마이크로파 시료용해 방법³⁾을 적용하였고, 기기는 충남대학교 공동실습관이 보유하고 있는 MLS-MEGA model을 이용하였다. 전처리 방법은 세척과정을 마친 각 용기에 분진 시료를 1/10로 잘라 혼합산(질산 : 과염소산 = 4 : 1)을 넣고 장치를 세팅한 후 프로그램을 입력하여 20여분 동안 산분해를 한다. 이렇게 산분해한 시료를 꺼내어 식힌 후 1% 질산 용액으로 수회 씻어 폴리에틸렌 용기에 옮기고 저울에서 20g으로 맞추어 ICP 분석용으로 보관한

Table 1. Sampling sites

Site	Location	
A-1	Moksang-dong office	0.5 km E from the center
A-2	Head office of the complexes	The center of the complexes
A-3	Pyongan church	2.5 km SW from the center
A-4	Duckam-dong office	2.0km ESE from the center
A-5	Hanbat cooperative association	1.8 km S from the center

다. 산분해한 시료는 대덕연구단지내의 기초과학 지원연구소가 보유한 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS; VG PQII + Model) 및 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP-AES; SHIMAZ ICPS-IV Model)와 충남대학교 공동실습관이 보유한 ICP-MS(Perkins Elmer Instrument ELAN-6000 Model)를 이용하여 15종의 독성금속 성분을 분석한 후 대기중 농도로 환산하여 위해도 평가 자료로 사용하였다.

2. 위해도 평가방법

위해도 정량화의 최종 단계는 위해도의 결정인데, 발암 물질인 경우 발암 위해도를 평가하고, 비발암 물질인 경우 일일 노출량을 평가하여 기준 선량(RfD: Reference dose) 또는 호흡 노출경로에 대해 기준 농도(Reference concentration)와의 비교치인 위해 지표(Hazard index)로 비발암 위해도를 평가한다. 위해도 평가방법은 기 발표된 논

문¹⁾에 자세히 기술되어 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 독성금속의 대기중 농도

표 2는 3, 4 공단지역의 5개 측정지점별 총부유분진과 독성금속의 산술평균농도를 보여주고 있다. 총부유분진의 각 지점별 평균농도는 A-1, A-2, A-3, A-4, A-5 지점에서 각각 90.98, 95.40, 103.45, 97.07, 121.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 A-1 지점 즉, 공단본부 동쪽 0.5 km 지점인 목상동 동사무소에서 가장 낮은 농도를 보였고, A-5 지점 즉, 공단본부 남쪽 1.8 km 지점인 한밭공동화 협동조합에서 가장 높은 농도를 보였다. Cd를 제외한 모든 발암 금속과 Ba, Cu, Sb를 제외한 모든 비발암 독성금속 역시 A-5 지점에서 최대농도를 보였는데, 그 이유는 공단남쪽의 오염원 하단에 위치한 이 지

Table 2. Concentration of metals at each site

(unit : ng/m^3)

Metal	Site	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	Ave 2
Carcinogenic metals							
As		9.89	7.91	9.35	10.49	13.77	10.22
Be		0.10	0.11	0.14	0.13	0.17	0.13
Cd		2.80	3.06	4.53	3.81	2.91	3.41
Cr(hexavalent)		7.17	3.82	7.89	6.08	10.62	6.96
Ni(subsulfide)		7.86	3.56	5.84	5.62	9.10	6.42
Pb		79.35	103.56	88.03	84.74	132.54	97.65
Non-carcinogenic metals							
Mn		40.35	36.92	46.80	61.04	64.84	49.99
Ba		379.03	319.90	452.57	439.03	393.02	395.54
Co		1.88	1.09	1.09	1.28	2.10	1.49
Cu		99.52	75.07	91.45	82.52	87.49	87.21
Sb		5.62	4.36	6.33	8.45	5.22	6.00
Se		1.24	1.09	1.04	1.00	1.52	1.19
Ti		41.54	43.20	54.31	54.23	63.35	51.33
V		13.88	7.95	9.11	13.30	16.56	11.90
Zn		182.85	179.75	284.15	235.09	326.48	241.66
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		90.98	95.40	103.45	97.07	121.47	101.67

Table 3. Concentration of metals in TSP

(unit : ng/m³)

Metal	All sites	No. of samples	Range	Arithmetic mean	Standard error	Geometric mean
Carcinogenic metals						
As		58	0.40~30.88	10.22	1.23	5.62
Be		38	0.01~0.52	0.13	0.02	0.08
Cd		58	0.31~12.35	3.41	0.36	2.44
Cr(hexavalent)		56	0.04~23.41	6.96	0.99	2.44
Ni(subsulfide)		53	0.08~35.18	6.42	0.91	2.65
Pb		60	12.44~330.93	97.65	7.08	83.56
Non-carcinogenic metals						
Mn		60	5.93~166.62	49.99	4.70	37.07
Ba		33	20.92~953.30	395.54	28.96	311.72
Co		59	0.08~9.79	1.49	0.20	1.01
Cu		60	16.26~325.46	87.21	6.36	76.14
Sb		52	0.01~46.20	6.00	1.11	1.70
Se		49	0.18~4.54	1.19	0.10	0.96
Ti		60	1.49~142.67	51.33	4.48	38.02
V		32	2.59~23.40	11.90	0.85	9.65
Zn		45	7.41~891.24	241.66	28.91	135.44
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		60	17.67~219.58	101.67	6.93	87.20

점이 공단지역의 주풍향인 북풍계열(N, NNW, NNE)의 풍하방향에 있기 때문인 것으로 판단된다. 표 3은 모든 지점에서 측정된 자료를 합한 것으로 각 독성금속의 농도범위, 산술평균농도, 표준오차 등을 보여주는데, 가급적 지역내 농도를 대표할 수 있는 값이라 할 수 있고 따라서 이 농도에 바탕하여 위해도가 평가되었다. 이는 본 연구의 위해도 평가가 지역 주민이 일생동안 받을 수 있는 위해도를 평가하는 것인 바, 대상 지역내 측정지점의 농도는 지역내 대기확산을 고려하면 지점간의 장기간 평균농도의 차이를 특화시키기 어려울 정도로 인접해 있으며 실제로 측정지점에 따른 대기중 농도 차이와 이로 인한 위해도 차이가 작기 때문이다. 산술평균농도가 중요한 이유는 발암영향과 같이 선량-반응 함수가 볼록한(convex) 경우 산술평균농도가 기하평균농도보다 노출된 집단의 발암 위해도를 대표하는 값이기 때문이다.⁴⁾ 인체 발암물질인 As, Cr(hexavalent), Ni(subsulfide)의 대기중 농도는 각각 산술평균

로 10.22, 6.96, 6.42 ng/m³이며 인체에 유력한 발암물질인 Be, Cd, Pb의 평균농도는 각각 0.13, 3.41, 97.65 ng/m³로 나타났다. 비발암 물질인 Mn의 평균농도는 49.99 ng/m³이다. 기타 비발암 독성금속인 Ba, Co, Cu, Sb, Se, Ti, V, Zn 중에서는 Ba와 Zn의 평균농도가 각각 395.54 ng/m³와 241.66ng/m³로 높게 나타났다. 대전 1, 2 공단지역과 비교하면¹⁾ 3, 4 공단지역은 Pb를 제외한 모든 발암금속의 농도가 1.5배 이상 높게 나타났는데, 이는 두 지역의 대기확산특성의 차이로 인한 것도 있겠지만 발암금속의 배출량에 기인한 것으로 사료되어 향후 배출원에서의 발암금속의 배출량이 상세히 조사되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구는 직접노출경로인 호흡노출경로만 고려하며 일일 호흡량은 20m³, 몸무게는 한국인의 평균 체중인 60kg로 가정하고 측정된 자료를 바탕으로 대기중 산술평균농도를 사용하였다. IRIS(Integrated Risk Information System)⁵⁾의 단위 위해도는 한국인의 노출 변수에 대하여 보정되었고

Cr(hexavalent)과 Ni(subsulfide)의 농도는 총 Cr과 Ni 농도의 약 10%로 가정되었다. 대기내 총 Cr 중 Cr(6)의 분율에 관한 자료는 거의 없지만, 소각로로부터 배출되는 Cr중 10%이하가 Cr(6)이고^{6,7)} 단위 위해도 추정치의 바탕이 된 Mancuso의 역학조사⁸⁾에서도 Cr 중 1/7이 Cr(6)로 가정된 바 있다. 최근의 연구 결과⁹⁾에 따르면 환경대기중 Cr(6)의 분율은 총 Cr 중 약 20~25%로 나타났지만, 여전히 자료가 부족하고 이 경우에도 발암 위해도의 평가치는 변하지 않는데, 이는 단위 위해도가 Cr(6)의 분율에 따라 그만큼 낮게 보정되기 때문이다. 환경대기내 총 Ni중 subsulfide의 분율에 관한 자료는 거의 없기 때문에 본 연구에서는 Cr(6)의 분율과 같이 약 10%로 가정되었다.

2. 독성금속의 위해도

표 4에서 보듯이, 독성금속으로 인한 발암 위해도는 1.5×10^{-4} 으로 허용 위해도 기준¹⁰⁾인 10^{-5} 을 크게 초과하고 있다. 인체 발암물질(human carcinogen)인 As, Cr(hexavalent), Ni(subsulfide)로 인한 위해도가 1.4×10^{-4} 이고 유력한 발암물질(probable human carcinogen)인 Be, Cd로 인한 위해도는 7.2×10^{-6} 이다. Pb의 경우 단위 위해도에 대한 평가치가 없기 때문에 위해도를 산출할 수 없었다. 인체 발암물질인 As와 Cr(hexavalent)로

부터의 위해도가 독성금속 위해도의 약 93%를 점유하고 있다. 독성금속으로 인한 비발암 위해도는 Mn으로 인한 위해 지표만이 1.0으로 나타나 독성금속으로 인한 비발암 인체 영향이 발생할 가능성을 더 조사할 필요가 있다. 이는 Pb를 비롯한 많은 독성금속에 대한 호흡경로를 통한 기준농도 자료가 없었기 때문에 위해 지표가 산출되지 않은 점을 고려해야 하기 때문이다.

한편, 위해도 평가는 시료 채취 및 분석 오차, 개인적 노출 조건등에 따른 불확실성이 외재되어 있고 특히, 근본적인 불확실성으로 용량-반응 평가시 작업장 대기중 고농도로부터 환경 대기 중의 저농도로의 외삽에 기인한 불확실성이 크게 내재되어 있다는 점이 강조되어야 할 것이다. 그리고 이러한 위해도 평가는 주변 주민의 평생에 걸친 노출에 대한 것이기 때문에 장기간의 대기질 자료의 확보가 필수적이다. 특히, 유해 대기오염물로 인한 인체 위해도를 평가하기 위해서는 1년이라는 단기적인 농도조사는 제한적이고 적어도 3년 이상의 장기적인 조사가 필수적이다. 따라서 대전 3, 4 공단지역에 대한 본 위해도 평가는 그 결과의 의미가 현재로서는 제한적이며 울산 공단지역과 여천 공단지역에서 보듯이 발암 위해도가 큰 10여종의 발암 휘발성 유기화합물에 대한 정밀한 농도조사 및 위해도 평가가 또한, 수행되어야 할 것이다.

Table 4. Average carcinogenic risk from the inhalation of toxic metals in Taejon third and fourth industrial complexes

Metal	Carcinogenic group	arithmetic mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Unit risk ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	Carcinogenic risk
As	A	1.02×10^{-2}	4.8×10^{-3}	4.9×10^{-5}
Be	B2	1.30×10^{-4}	2.7×10^{-3}	3.5×10^{-7}
Cd	B1	3.41×10^{-3}	2.0×10^{-3}	6.8×10^{-6}
Cr(hexavalent)	A	6.96×10^{-3}	1.3×10^{-2}	9.0×10^{-5}
Ni(subsulfide)	A	6.42×10^{-3}	5.3×10^{-4}	3.4×10^{-6}
Pb	B2	9.77×10^{-2}	NA ^{a)}	
Total carcinogenic risk		1.5×10^{-4}		

a) Not Available

IV. 결 론

본 연구는 대전지역 대기중 독성금속의 오염이 상대적으로 심하리라 예상되는 대전 3, 4공단지역을 대상으로 5개 지점을 선정하여 1999년의 계절별 독성금속의 농도를 분석하였고 독성금속의 호흡으로 인한 주변 주민의 인체 위해도를 평가하였다. 발암금속 6종을 포함한 15종의 독성금속을 선정하여 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 분광분석기(ICP-AES)를 이용하여 분석한 결과, 인체 발암물질인 As, Cr(hexavalent), Ni(subsulfide)의 대기중 산술평균농도가 각각 10.22, 6.96, 6.42 ng/m³이며 인체에 유력한 발암물질인 Be, Cd, Pb의 산술평균농도는 각각 0.13, 3.41, 97.65 ng/m³로 나타났다. 독성금속의 호흡으로 인한 발암 위해도는 1.5×10^{-4} 으로 허용 위해도 기준인 10^{-5} 을 크게 초과하고 있다. 인체 발암물질인 As, Cr(hexavalent), Ni(subsulfide)로 인한 위해도가 1.4×10^{-4} 이고 유력한 발암물질(probable human carcinogen)인 Be, Cd로 인한 위해도는 7.2×10^{-6} 이다. 인체 발암물질인 As와 Cr(hexavalent)로부터의 위해도가 독성금속 위해도의 약 93%를 점유하고 있어 이에 대한 적절한 관리가 시급하다. 그리고 울산 공단지역과 여천 공단지역에서 보듯이 발암 위해도가 큰 10여종의 발암 휘발성 유기화합물에 대한 정밀한 농도조사 및 위해도 평가가 또한, 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 한국과학재단(핵심전문연구, 과제번호: 971-1106-037-2)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이진홍 외 4인, 1999, 대전공단지역의 대기중 독성금속에 대한 위해도 평가, 한국환경영향평가학회지, 8 (2) : 1-8.
2. Schroeder, W.H., Dobson, M., Kane, D.M., Johnson, N.D., 1987, Toxic Trace Elements Associated with Airborne Particulate Matter : a Review, JAPCA, 37 : 1267-1285.
3. Greenberg, A.E., Clesceri L.S., Eaton A.D., 1992, Standard Method, 18th edition, American Public Health Association, 3.6.
4. Crump, K.S., 1998, On Summarizing Group Exposures in Risk Assessment : Is an Arithmetic Mean or a Geometric Mean More Appropriate ?, Risk Analysis, 18 : 293-297.
5. U. S. EPA, 1999, Integrated Risk Information System (IRIS), U. S. EPA.
6. Jerry, Z.M. and Mills, R.J., 1988, Emissions from Mass Burn Resource Recovery Facilities, Risk Analysis, 8 : 315-321.
7. U. S. EPA, 1986, Hazardous Waste Management System : Standard for Owners and Operators of Boilers and Industrial Furnaces, U. S. EPA, 1986.
8. Mancuso, T.F., 1975, Consideration of Chromium as an Industrial Carcinogen, International Conference on Heavy Metals in the Environment, Toronto, Oct. 27-31.
9. Bell, R.W. and Hipfner, J.C., 1997, Airborne Hexavalent Chromium in Southwestern Ontario, J. Air and Waste Manage. Assoc., 47 : 905-910.
10. U. S. EPA, 1987, Burning of Hazardous Waste in Boilers and Industrial Furnaces : Proposed Rule, Federal Register, 52(87) : 16982-17050.