

공단지역 토양 중 환경오염물질 농도 분포 특성

정중현*, 조상원[†], 임현술[‡]

대구한의대학교 보건학부

712-715 경북 경산시 한의대로 1번지

[†]한국폴리텍VII대학 에너지환경과

642-772 경남 창원시 성산구 외동반림로 51-88

[‡]동국대학교 의과대학 의학과

780-714 경북 경주시 석장동 707

(2012년 3월 30일 접수; 2012년 5월 20일 수정본 접수; 2012년 5월 21일 채택)

Distribution Characteristics of Environmental Contaminant at Soil in an Industrial Complex Area

Jong-Hyeon Jung*, Sang-Won Cho[†], and Hyun-Sul Lim[‡]

Faculty of Health Science, Daegu Haany University

1 Hanuidae-ro, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 712-715, Korea

[†]Department of Energy & Environment, Korea Polytechnic VII College

51-88 Oe-dong Ballim-ro, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 642-772, Korea

[‡]Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dongguk University

707 Seokjang-dong, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do, 780-714, Korea

(Received for review March 30, 2012; Revision received May 20, 2012; Accepted May 21, 2012)

요 약

본 연구는 공단지역 주민들의 환경오염물질에 의한 건강피해를 예방하기 위한 기초연구의 일환으로 수행되었다. 이를 위하여 공단지역 및 대조지역에 대한 토양 중의 환경오염물질과 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준 및 분포특성을 조사하였다. 시료채취는 공단지역과 대조지역의 토양을 대상으로 실시하였으며, 토양 중의 중금속, VOCs(휘발성 유기화합물), PAHs 및 PCB(폴리클로리 네이티드비페닐) 등 토양오염물질 농도를 분석하였다. 직접노출군에 속하는 가까운 거리의 송도동, 해도동, 제철동 등은 거리가 먼 장기면에 비하여 비교적 높은 농도를 나타냈다. 특히 배출원 주변의 직접노출지역(제철동)이 대조지역(장기면) 보다 오염물질의 농도가 높은 것으로 조사되었다. 토양 중의 중금속 농도는 제1지역 우려기준에 비해 대체로 낮은 것으로 나타났으나, 아연은 전 지역이 제1지역 우려기준(300 mg/kg)의 약 20.8~58.9% 수준으로 비교적 높은 농도를 나타내었다. 불소는 모든 지점에서 기준치 이하로 나타났으나, 직접노출지역인 제철동의 경우 제1지역의 우려기준(400 mg/kg)의 약 74% 수준으로 조사되어, 불소에 대한 모니터링과 배출원 관리가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 유기인, PCB, 페놀류와 VOCs인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 등은 분석기기의 검출한계 이하로 나타났고, 석유계탄화수소(TPH)의 경우에는 송도동이 높게 나타났다. 한편, 토양 중 PAHs 화합물의 농도 수준은 18.71~1744.59 ng/g이었으며, 발암가능물질 6종에 대한 PAHcarc의 농도수준은 6.54~695.94 ng/g을 나타내었다. 송도동에서 가장 높은 농도수준을 나타내어, 직접노출지역인 공업단지로부터 근거리 지점에서의 PAHs 농도가 원거리 지점인 간접노출지역보다 비교적 높은 농도를 나타내었다.

주제어 : 다환방향족탄화수소화합물(PAHs), 공단지역, 토양오염, 환경오염물질

Abstract : This study was performed to prevent the health damage of environmental contaminants in Industrial Complex Area. And, this study aimed to identify the concentration levels and distribution characteristics of environmental contaminants and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at soil in Industrial Complex Area and control area. The concentration of the soil pollution standard such as the heavy metals in the soil, VOCs, PAHs, and PCB were measured and analyzed using the soil specimens in the Industrial Complex Area and control area. Soil specimens from the Industrial Complex Area (the direct exposure area) and the control area were surveyed. Songdo-dong, Haedo-dong and Jechul-dong, which are in the direct exposure area and near the emission source, showed relatively high concentrations of contaminant materials when compared with Jangki-myeon,

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: airgas@dhu.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2012.18.2.200

which is far off and in the control area. The concentration of zinc was 20.8-58.9% of the level of concern (300 mg/kg) in the 1st region, which is a relatively high concentration. The concentration of fluoride was under the standard in every region, but it was about 74% of the level of concern (400 mg/kg) in the 1st region. It is recommended that controlling fluoride emissions is necessary. Levels of organic phosphate, phenol, and VOCs like benzene, toluene, ethylbenzene and xylene were under the detection limit of the analysis instruments. The concentration of TPH was high in Songdo-dong. The concentration of contaminants in Jechul-dong was high. In addition, it was observed that the level of soil contamination changed depending on the distance from the emission source. The concentration of PAH compounds in the soil was 18.71-1744.59 ng/g, and the concentration of six potential cancer-causing PAH materials was 6.54-695.94 ng/g. The highest concentration was in Songdo-dong. The PAH concentration in the direct exposure area near the complex was relatively high compared to the indirect exposure area.

Keywords : Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs, Industrial complex area, Environmental contaminants

1. 서론

환경성 질환이란 코호트(cohort) 및 기타 역학조사 등을 통하여 환경오염물질, 유해화학물질 및 기타 유해인자와 상관성이 있다고 인정되는 질환을 지칭하며, 환경보건법 제9조에 따르면 환경성 질환이란 환경보건위원회의 심의와 보건복지가족부 장관과의 협의를 거쳐 환경부령으로 정하는 질환을 의미한다[1-3]. 우리나라는 2006년 환경보건법 제정을 추진하였으며, 동법이 2009년 3월부터 우리나라 전역에서 시행되고 있다. 환경보건 분야에서는 환경정책기본법 제3조 제4호에 따른 환경오염과 유해화학물질 관리법 제2조 제8호에 따른 유해화학물질 및 환경유해인자 등에 의한 사람의 건강과 생태계에 미치는 영향을 조사 및 평가하고, 이를 예방 및 관리하는 다양한 기술 활동 및 공학적인 대책을 포함한다[1-4]. 최근 산업단지 주변지역은 산업수요의 증가로 인한 고정오염원의 증대와 이동오염원의 증가로 인하여 환경오염물질의 영향이 사회전반에 걸쳐 지속적으로 발생하고 있으며[1,5,6] 환경성 질환은 많은 사회적 보건·환경민원 문제를 유발하고 있다. 이러한 보건·환경민원 문제는 우리나라 전역의 산업단지 지역에서 공통적으로 나타나고 있으며, 산업시설 및 배출원에서 발생하는 환경오염물질은 다양한 경로를 통하여 토양에 축적되기도 하며, 지역주민들의 생활에 많은 악영향을 미치고 있고, 도심지역의 시정장애 감소, 호흡기질환 등을 유발시키기 때문에 주요한 사회적 문제로 대두되고 있는 실정이다[1,5-8].

이러한 여러 악영향 문제를 해결하기 위한 방안의 일환으로 정부에서는 수년전부터 환경보건 10개년 종합계획을 수립하였으며, 환경보건 종합계획의 수립과 시행, 환경유해인자의 위해성 평가 및 관리, 환경영향평가에서의 건강영향 검토 및 평가, 환경 관련 건강피해의 예방과 관리, 어린이의 건강을 보호하기 위한 환경유해인자 등을 관리하기 위해 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다[2,3]. 이 연구의 대상지역인 포항 공단지역에서는 2006년도부터 지역주민 3,000여명을 대상으로 인체영향 조사 및 코호트 작업을 수행하고 있다. 특히 공단 및 지역주민을 대상으로 한 건강검진과 생체시료분석 등 건강영향 감시 및 생체시료 모니터링을 실시하면서 지속적인 기반구축을 위해 역학조사 및 코호트 구축 대상자를 추적조사를 수행하고 있다[7-11]. 따라서 이 연구는 공단지역 주민들의 환경오염물질에 의한 건강피해를 예방하기 위한 기초연구의 일환으로 수행되었다. 또한 공단지역에서 발생하는 환경오염물질의 노출

상태를 확인하기 위하여 산업단지 및 주변지역에서의 토양오염물질의 축적 현황을 모니터링 하고자 한다. 이를 위하여 공단지역 및 대조지역에 대한 토양 중의 환경오염물질과 PAHs의 농도수준 및 분포특성을 조사하였다. 시료채취는 공단지역과 대조지역의 토양을 대상으로 실시하였으며[1,7] 향후 산업단지 및 주변지역에서의 지역주민 코호트(cohort) 및 역학조사 작업의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상

이 연구에서는 철강공단지역의 토양오염 정도를 조사하기 위하여 공단으로부터 직접 영향을 받는 가까운 거리에 위치한 직접노출지역과, 공단지역으로부터 먼 거리에 위치하여 영향이 거의 없는 대조지역으로 구분하였으며, 직접배출원이나 인위적인 영향을 줄이기 위하여 내대지 토양을 시료로 채취하였다. 토양오염 조사는 대기질 조사의 연구계획 및 방법과 연계하여 추진하였으며, 조사지점은 직접노출군 3개와 대조지역 1개 등 총 4개 지점을 선정하였고[1,7] Figure 1에는 토양오염물질 시료 채취지점 및 위치를 나타내었다. 직접노출지역은 송도동(S1지점, 송도동 기상대 부근), 해도동(S2지점, 남구 해도동 형산파출소 부근), 제철동(S3지점, 제철동 엘림교회 부근)을 선정하였다. 대조지역은 공단경계로부터 약 10 km 이상

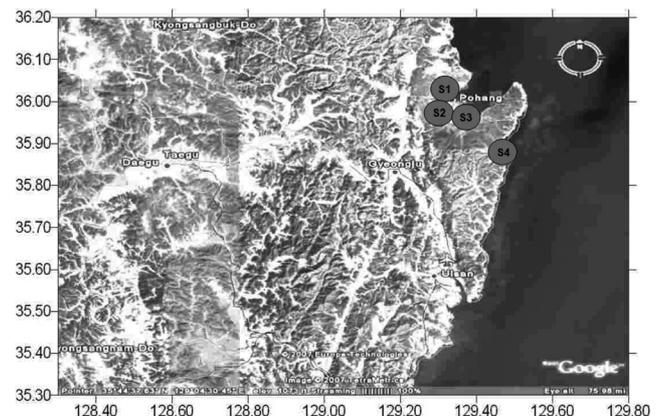


Figure 1. Location of sampling sites in Industrial Complex Area. (S1: Songdo-dong, S2: Haedo-dong, S3: Jechul-dong, S4: Jangki-myeon)

떨어진 장기면 주거지(S4지점, 장기면 주민센터 부근)를 선정하였다.

이 연구에서는 철강산업단지 주변의 토양 시료를 이용하여 환경오염물질의 농도분석을 수행하였다. 특히 동일 기간에 진행되고 있는 대기오염 조사 항목 및 인체 조사항목을 고려하여 중금속[철(Fe), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 수은(Hg), 비소(As), 니켈(Ni), 크롬(Cr)], VOCs, PCB 등의 항목을 선정하였다[12]. 이와 함께 PAHs의 농도수준 및 분포특성도를 조사 및 분석하였다[13-16]. 토양 시료 채취는 2010년 5월 24일부터 29일 및 2010년 7월 19일부터 24일까지 수행되었다. 분석결과는 경상북도 보건환경연구원에서 조사된 국가 토양측정망[17] 분석결과와 비교하였다. 한편, 채취된 시료는 하나의 시료 당 2회씩 각각 분석하였으며, 이를 평균값으로 계산하여 나타내었다.

2.2. 연구방법

토양 시료채취는 간단한 작업이지만 토양은 수직으로나 수평적으로 균일하지 않으므로 채취한 시료가 대상지역의 토양을 대표해야 한다는 점에서 세심한 주의가 필요하다. 시료채취 오차는 분석측정 오차보다 항상 크기 때문에 토양 시료는 신중하고 정확하게 채취해야 한다. 이 연구를 위해 토양 시료는 대상지역의 지역적 특성을 고려하였으며, 4개의 조사지점(S1, S2, S3, S4)에 대한 시료를 채취 및 분석하였다. 각 조사지점의 시료는 토양오염공정시험법에 근거하여 채취·운반하였으며[1,7] 각 항목별로 적합한 전처리를 거쳐 농도분석을 수행하였고, 중금속 농도는 AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, Shimadzu AA 6701)를 사용하여 분석하였다.

특히 PAHs의 농도분석을 위하여 각 지점별로 채취한 토양 시료는 갈색의 유리병에 채취한 후 실험실로 운반하여 동결 건조시켜 나무와 풀, 돌멩이 등을 제거한 후 가볍게 분쇄하고 채를 이용하여 250 μm 이하의 토양 입자를 균질화 하여 시료로 사용하였다. 균질화 한 토양 시료의 일정량을 분취하고 톨루엔 300 mL를 사용하여 16시간 동안 속실험 추출하였다. 추출용액의 시료는 회전증발농축기(EYELA社)로 농축하여 정제용 시료로 사용하였다. 이 중 1 mL를 분취하여 PAHs 분석용 시료로 하였다. 추출된 시료는 회전증발농축기를 사용하여 농축한 후에 keeping solvent로 n-Nonane (Pesticide residue analysis, Fluka) 500 μL 를 첨가한 후 질소로 퍼지하여 n-Hexane (Ultra residue analysis, J.T.Baker, USA)으로 용매를 전환하여 정제용 시료로 하였다. 이 연구에 사용된 기기는 중금속의 경우 AAS (AA670, Shimadzu)와 ICP (Inductively Coupled Plasma, Varian Liberty Series II)를 사용하였으며, PAHs 등은 기체크로마토그래피/질량분석기(Agilent 6890N/5973MSD)를 사용하였고 분리를 위해 사용된 모세관 칼럼은 HP-5MS(30 m \times 0.32 mm \times 0.25 μm)를 사용하였다[1,7]. 16종 PAHs에 대한 GC/MS 분석조건을 Table 1에 나타내었으며, 분석에 사용된 각 그룹별 이온과 이온비율을 Table 2에 나타내었다. 또한 Table 3에는 16종의 PAHs standards (EPA Method 610)의 물리·화학적 특성을 나타내었다.

Table 1. Instrumental conditions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by GC/MS

Item	Conditions
GC/MS	Agilent 6890N/5973MSD
Column	HP-5MS (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm)
Ion source temp.	230 $^{\circ}\text{C}$
Injector temp.	280 $^{\circ}\text{C}$
Carrier gas	He (1.2 mL/min)
Injection mode	Splitless
Ionization mode	EI mode
GC oven program	80 $^{\circ}\text{C}$ (1 min) \rightarrow 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ \rightarrow 280 $^{\circ}\text{C}$ (0 min) \rightarrow 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ \rightarrow 300 $^{\circ}\text{C}$ (10 min) \rightarrow 320 $^{\circ}\text{C}$ (7 min)

Table 2. Selected ions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by GC/MS

Compounds	Selected ion (m/z)	Retention time (min)
Naphthalene	128 129	4.62
Acenaphthylene	152 153	9.59
Acenaphthene	154 153	10.22
Fluorene	166 165	12.38
Phenanthrene	178 179	16.67
Anthracene	178 179	16.82
Fluoranthene	202 200	22.12
Pyrene	202 200	23.08
Benzo(a)anthracene	228 229	28.78
Chrysene	228 229	28.92
Benzo(b)fluoranthene	252 253	33.45
Benzo(k)fluoranthene	252 253	33.55
Benzo(a)pyrene	252 250	34.61
Indeno(1,2,3)pyrene	276 277	38.78
Dibenz(a,h)anthracene	276 277	38.95
Benzo(g,h,i)perylene	278 279	39.59

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 중 환경오염물질 농도 수준 및 특성

Table 4에는 공단지역 및 대조지역에서 채취·분석한 토양 오염도 측정결과를 평균값으로 나타내었다. 항목별 조사 및 분석결과를 살펴보면, 납의 경우에는 해도동 지역이 57.94 mg/kg으로 제1지역의 우려기준인 200 mg/kg의 약 29%에 해당하였고, 아연의 경우에는 전 지역이 제1지역 우려기준인 300 mg/kg의 약 20.8~58.9%에 상당하는 것으로 조사되어 비교적 높은 농도를 나타내었다. 특히 불소의 경우에는 모든 지점에서 기준치 이하로 나타났으나, 송도동(S1) 83.3 mg/kg, 장기면(S4) 107.1 mg/kg, 해도동(S2) 169.2 mg/kg, 제철동(S3) 294.9 mg/kg 순으로 나타났다. 제철동(S3)의 경우 제1지역의 우려기준 400 mg/kg에 근접하고 있으며, 제철공정으로부터 배출되어 지는 불소에 대한 모니터링과 배출원 관리에 대한 검토가 필

Table 3. Physicochemical characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

Compound	Abbreviation	Chemical Formula	Molecular Weight (g)	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Vapor Pressure (mmHg, 25 °C)	Structure
Napthalene	Nap	C ₁₀ H ₈	128.16	80	218	7.1×10 ⁻²	
Acenaphthylene	AcPy	C ₁₂ H ₈	152.20	93	275	6.7×10 ⁻³	
Acenaphthene	AcP	C ₁₂ H ₁₀	154.21	96	279	2.2×10 ⁻³	
Fluorene	Flu	C ₁₃ H ₁₀	166.22	117	295	6.0×10 ⁻⁴	
Phenanthrene	PhA	C ₁₄ H ₁₀	178.22	100	340	1.2×10 ⁻⁴	
Anthracene	AnT	C ₁₄ H ₁₀	178.22	218	342	6.0×10 ⁻⁶	
Fluoranthene	FluA	C ₁₆ H ₁₀	202.26	110	393	9.2×10 ⁻⁶	
Pyrene	Pyr	C ₁₆ H ₁₀	202.26	156	404	4.5×10 ⁻⁶	
Benzo(a)anthracene	B(a)A	C ₁₈ H ₁₂	228.29	159	435	2.1×10 ⁻⁷	
Chrysene	Chr	C ₁₈ H ₁₂	228.29	256	448	6.4×10 ⁻⁹	
Benzo(b)fluoranthene	B(b)F	C ₂₀ H ₁₂	252.32	168	393	N.R.	
Benzo(k)fluoranthene	B(k)F	C ₂₀ H ₁₂	252.32	217	480	9.6×10 ⁻¹¹	
Benzo(a)pyrene	B(a)P	C ₂₀ H ₁₂	252.32	177	496	5.6×10 ⁻⁹	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	InP	C ₂₂ H ₁₂	276.34	162	534	N.R.	
Dibenzo(a,h)anthracene	DbA	C ₂₂ H ₁₄	278.35	262	535	N.R.	
Benzo(g,h,i)perylene	BghiP	C ₂₂ H ₁₂	276.34	273	542	1.01×10 ⁻¹⁰	

요한 것으로 판단된다. 또한 유기인과 PCB(클로리네이티드 비페닐)는 분석기기의 검출한계인 0.05 mg/kg 이하로 나타났고, 페놀류도 0.02 mg/kg 이하로 나타났으며, 휘발성 유기화합물인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 등도 분석기기의 검출한계인 0.1 mg/kg 이하로 나타났다. 시안의 경우에는 모든 지점에서 0.02~0.03 mg/kg의 낮은 농도로 나타났고 지점 간에는 농도 차이가 작은 것으로 조사되었다. 한편, 송도동(S1) 시료채취 지점에서는 시내버스 및 대형 버스 정류장이 위치하고 있으며, 석유계 총탄화수소(TPH)의 경우 송도동(S1) 지점에서 채취한 토양 시료를 분석한 결과, 정기적으로 주차되어 있는 시내버스 및 차량 배가스의 영향을 일부 받는 것으로 판단되며, 조사된 석유계 총탄화수소(TPH)의 농도가 송도동(S1) 지점에서의 농도가 높게 나타났다.

Table 5에는 2008년부터 2009년까지의 토양오염 분석결과를 비교하여 나타내었으며, 이 대상지역에서의 연구결과와 국

가측정망(경상북도 보건환경연구원 : <http://inhen.gyeongbuk.go.kr/>) 자료를 비교 및 분석하였다[17]. 일부 항목에서 분석 농도가 보건환경연구원 자료보다 다소 높거나 비슷한 수준으로 나타났다. 그러나 공단지역인 장흥동 지역에서는 아연의 경우 일부 기준치를 초과하는 것으로 나타났으며, 향후에도 지속적인 모니터링을 수행하여야 할 것으로 판단된다. 한편, Table 4에서 확인된 바와 같이 공단지역 및 대조지역의 토양오염을 조사한 결과, 모든 항목이 토양오염 우려기준치 이하로 나타났다. 그러나 공단지역의 직접영향권역인 송도동(S1), 해도동(S2), 제철동(S3)의 경우에는 대조지역인 장기면(S4)에 비해 상대적으로 토양오염도가 비교적 높은 것으로 조사되었다. 또한 공단지역 및 인근 산업단지의 영향이 없는 것으로 예상되어지는 대조지역인 장기면(S4)의 경우에는 전반적으로 오염도가 직접노출군 지역에 비해 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다.

Table 4. Concentration of soil contaminant in Industrial Complex Area and control area

Contaminants	Sites	Direct exposure area				Control area	Standard level
		Songdo (S1)	Haedo (S2)	Jechul (S3)	Mean	Jangki (S4)	
Cadmium		0.16	0.23	0.36	0.25	0.06	4
Copper		8.97	32.99	20.82	20.93	6.64	150
Arsenic		2.96	2.65	2.40	2.67	0.69	25
Mercury		0.04	0.03	0.01	0.03	0.05	4
Lead		30.59	57.94	27.50	38.68	16.79	200
Cr ⁶⁺		< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	5
Zinc		75.38	176.60	141.79	131.26	62.34	300
Nickel		6.46	13.47	21.87	13.93	2.44	100
Fluoride		83.30	169.2	294.9	182.47	107.1	400
Organic phosphate		< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	10
PCB		< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	1
Cyanogen		0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	2
Phenol		< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	4
Benzene		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1
Toluene		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	20
Ethylbenzene		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	50
Xylene		0.10	0.12	0.11	0.11	0.12	15
TPH		249.50	133.5	62.5	148.50	79.5	500
TCE		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	8
PCE		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	4
Benzo(a)pyrene		0.135	0.014	0.012	0.05	0.004	0.7

Table 5. Concentration of soil contaminant in Industrial Complex Area and its vicinities (Unit : Mean ± S.D. mg/kg)

Contaminants	Sites	Jangheung		Hodong		Daesong		Heunghae	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Cadmium		0.19	0.08	0.37	0.39	0.36	0.32	0.05	0.04
Copper		3.76	2.04	3.96	4.18	3.43	2.15	3.62	1.77
Arsenic		0.65	0.20	0.63	0.33	0.89	0.23	0.87	0.87
Mercury		0.05	0.05	0.08	0.05	0.08	0.09	0.02	0.01
Lead		4.34	2.06	4.62	3.29	4.13	5.48	2.27	2.32
Zinc		368.11	324.92	247.77	130.25	258.09	162.92	65.35	20.81
Nickel		52.92	71.48	23.17	9.98	33.23	23.36	10.47	4.43

이와 병행하여 대기오염물질 배출원으로부터 거리에 따른 토양오염에 대한 분석결과, 직접노출군에 속하는 가까운 거리의 송도동(S1), 해도동(S2), 제철동(S3) 등은 거리가 먼 장기면(S4)에 비하여 비교적 높은 농도를 나타내었다. 배출원으로부터 같은 방향으로 위치한 제철동과 장기면을 비교하여도 가까운 거리의 제철동이 거의 모든 물질의 농도가 높은 것으로 조사되어 배출원으로부터 거리에 따라 토양오염도가 달라지는 것을 확인하였다. 그러나 이러한 근거리 지역의 토양오염도가 타 시도의 지역에 비해 월등히 높은 수준은 아니며, 자연함유량과 비교해도 크게 높은 것이 아니므로 인체에 유해한 수준의 오염물질이 배출된다고 보기는 어려운 것으로 판단된다.

3.2. 지점별 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 농도 수준 및 특성

PAHs의 경우 토양기준에는 포함되어 있지 않지만 인체에 악영향을 미치며 유해성이 높은 물질이므로 현재 토양오염 기준항목에 포함시키기 위한 노력이 계속되고 있다. 이 연구에서는 공단지역의 PAHs에 대한 농도분포 특성을 조사·분석하였으며, 그 결과를 Figure 2~8에 나타내었다. Figure 2에는 토양 중 16종 PAHs와 발암 가능성 물질인 PAHcarc. 농도에 대하여 상관성을 나타내었으며, 각 화합물에서의 결정계수 $R^2 = 0.9965$ 로 나타나 매우 높은 상관성을 나타내었다. 본 연구대상 공단 및 주변지역의 경우에는 총 PAHs 농도가 높은 경우

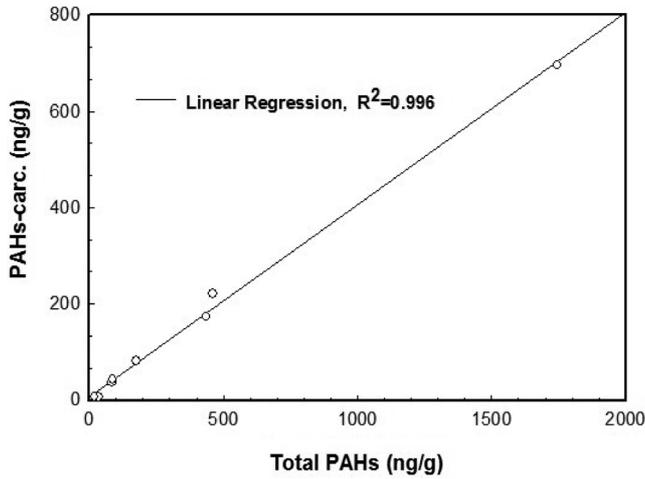


Figure 2. Correlation of total PAHs and PAHcarc. at soil in Industrial Complex Area and non-industrial area.

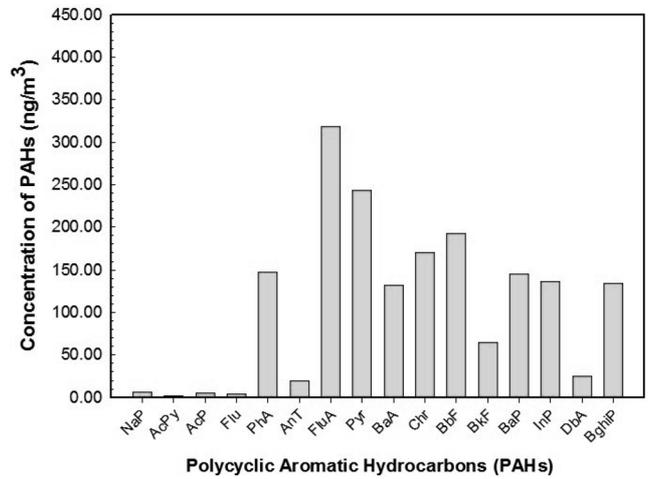


Figure 5. Effect of total PAHs on PAHs concentration at soil in Songdo-dong (S1).

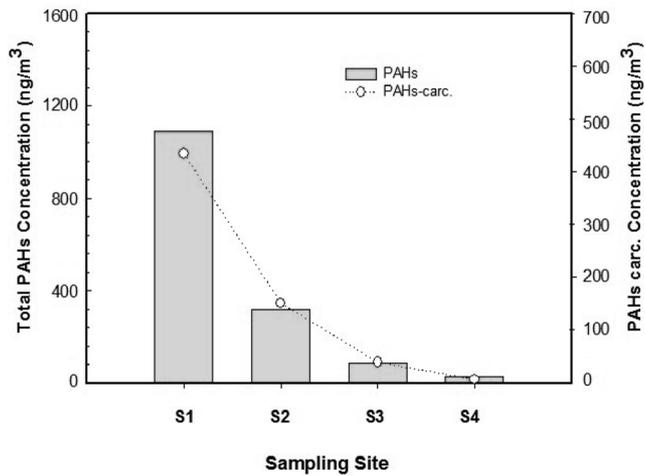


Figure 3. Effect of sampling site on total PAHs and PAHcarc. concentration at soil in Industrial Complex Area and non-industrial area.

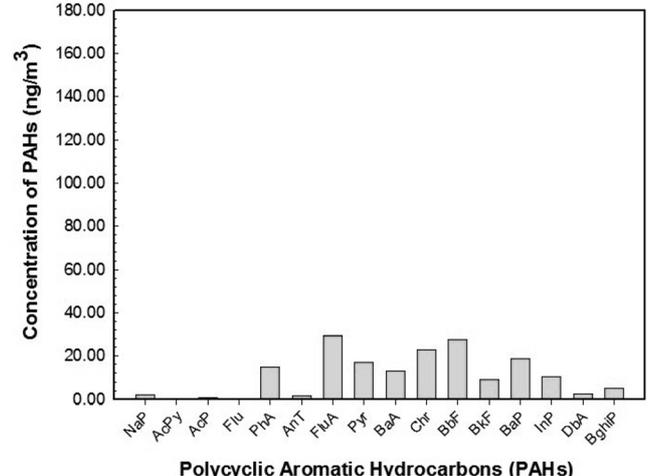


Figure 6. Effect of total PAHs on PAHs concentration at soil in Haedo-dong (S2).

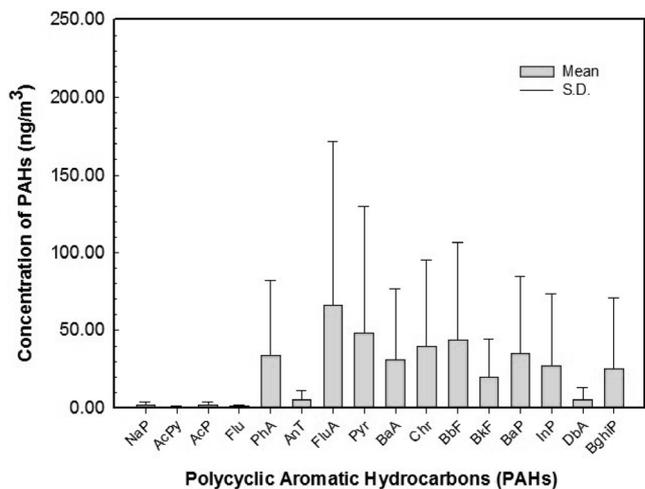


Figure 4. Effect of total PAHs on PAHs concentration at soil in Industrial Complex Area and non-industrial area.

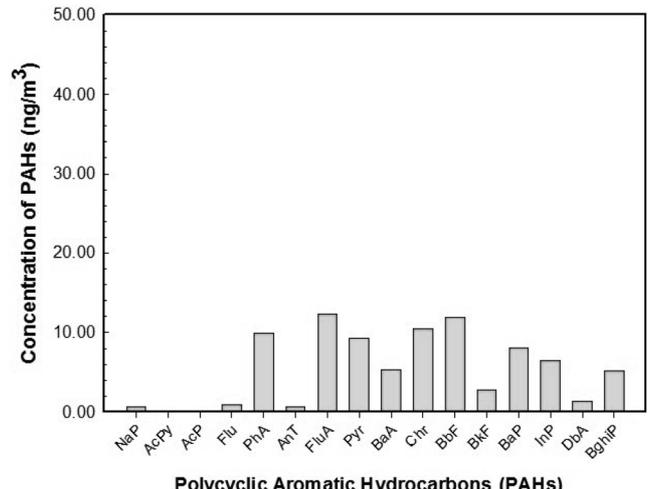


Figure 7. Effect of total PAHs on PAHs concentration at soil in Jechul-dong (S3).

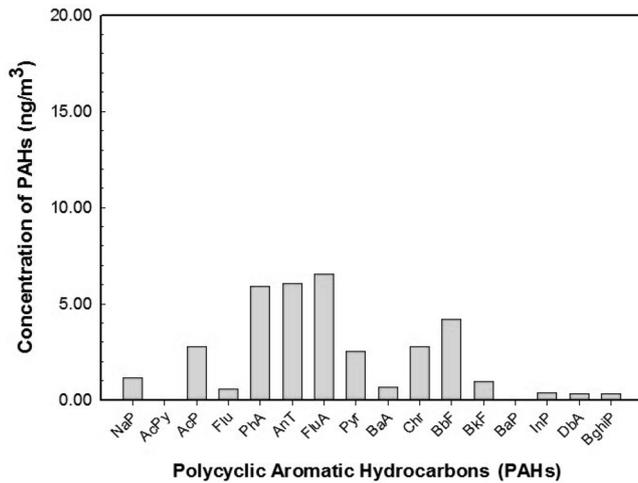


Figure 8. Effect of total PAHs on PAHs concentration at soil in Jangki-myeon (S4).

에는 PAHcarc. 농도도 함께 높은 것으로 조사되었다. Figure 3에는 채취된 토양 시료 중의 16종 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)과 국제암연구센터(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 지정한 발암가능물질 6종 PAHcarc (BaA + BbF + BkF + BaP + InP + DahA)의 평균 농도수준을 각 지점별로 비교하여 나타내었다. 연구결과 토양 중의 PAHs 화합물 농도 수준은 18.71~1744.59 ng/g이었으며, 발암가능물질 6종의 PAHcarc의 농도수준은 6.54~695.94 ng/g을 나타내었다. 각 지점별 PAHs 화합물 농도 수준을 살펴보면, 조사지점 중 공단지역 인근의 송도동(S1)에서 평균 1090.49 ng/g으로 가장 높은 농도수준을 나타내었다. 공단지역에서 가장 멀리 떨어진 대조지역인 장기면(S4)에서의 평균농도는 26.91 ng/g으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 한편 PAHcarc의 농도수준을 분석한 결과도 PAHs 화합물 농도수준 분석결과와 같이 송도동(S1)에서 434.62 ng/g으로 가장 높게 나타났고 해도동(S2) 151.17 ng/g, 제철동(S3) 39.40 ng/g, 장기면(S4) 6.54 ng/g 순으로 조사되었다.

Figure 4에서는 공단지역으로부터 근거리에 위치한 직접노출지역과 원거리에 위치한 대조지역 토양에서 분석된 총 PAHs에 대한 평균농도와 표준편차를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 PAHs의 프로파일 구성을 보면 전반적으로 중-고 비점의 벤젠환이 많은 PAHs가 차지하는 비율이 다소 높았으며, PAHs 중 발암성이 높은 벤조(a)피렌이 장기면(S4) 지점을 제외하고 대부분의 지역에서 검출되어 공단지역의 유해환경오염물질의 유입에 의하여 공단 주변지역이 영향을 받는 것으로 판단된다.

Figure 5~8에서는 총 PAHs에 대한 평균농도와 표준편차 값을 각 지점별로 나타내었다. Table 6에는 국내 주요 지역 및 외국의 토양 중 PAHs 농도를 분석한 연구결과를 나타내었다. 조사 대상지역에서의 PAHs 농도는 국내 다른 지역 및 외국의 토양 중 PAHs의 농도보다 높지 않은 것으로 조사되었다. 그러나 지점별로 PAHs 물질별 농도에는 약간 차이가 있으나 대체로 중-고 비점의 벤젠환이 많은 PAHs가 차지하는 비율이 다소 높은 것을 알 수 있다. 또한, Figure 3에서 확인한 결과 송도동(S1)에서 가장 높은 농도수준을 나타내었으며, 대조지역인 장기면(S4)에서 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이러한 결과는 공단지역으로부터 배출되어진 PAHs 화합물질이 인근 지역의 토양에 영향을 주기 때문으로 판단되어지므로, 대기 중의 PAHs 농도분석을 통하여 토양 중의 PAHs 농도 분석 결과와의 연관성을 조사할 필요가 있는 것으로 판단된다.

이 연구의 조사 대상지역인 철강공단지역에서의 분석농도는 전반적으로 인체에 영향을 줄 수 있는 유의할 만한 수준이라고 하기는 어려우나, 일부 항목의 경우에는 토양오염 우려기준에 근접하는 수준으로 나타났고 직접노출지역의 농도수준이 대조지역의 농도수준보다 높은 것으로 조사되어 대기오염물질 배출원에 대한 관리가 필요한 지역으로 판단된다. 특히 연구대상 지역인 공단지역은 향후 인체 독성이 강하며 악영향을 미치는 PAHs에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다. 또한 이 연구결과는 환경오염과 관련된 의사결정은 물론, 질병군 등 환경오염 취약집단에 대한 보호대책 마련에도 활용이 가능하

Table 6. Comparison of concentration for PAHs levels in soil samples from references area[18]

Location (Country)	Concentration (ng/g d.w.)	Sampling date	Sample (n)	PAHs (n)	References
Gyonggido (Korea)	848-10971	2004. 10	17	16	Oh et al. (2008)
Ulsan (Korea)	124-7100	2003. 03	17	16	Hwang et al. (2003)
Deagu (Korea)	83-513	1999. 10	9	16	Kim et al. (2001)
Changwon (Korea)	11-835	1999. 09	12	16	Kim et al. (2001)
Seoul (Korea)	15-1219	2000. 05	33	16	Kim et al. (2001)
Busan (Korea)	50-5930	1997. 05. 06 / 1998. 05. 06	24	16	Ok et al. (1998)
Seine River basin (France)	450-5650	2000. 11	37	14	Massei et al. (2004)
Tarragona Country (Spain)	112-1002	2002. 01	24	16	Nadalet al. (2004)
New Orleans (USA)	731-2927	-	38	16	Mialke et al. (2004)
Beijing (China)	16-3884	2000. 04	47	16	Ma et al. (2005)
Beijing (China)	219-277825	-	31	16	Tang et al. (2005)
Bayreuth (Germany)	163-185961	-	49	20	Krauss et al. (2003)

며, 향후 환경오염과 관련된 건강영향 평가에서 기초자료로서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구는 공단지역 주민들의 환경오염에 의한 건강피해를 예방하기 위한 기초연구의 일환으로 수행되었다. 공단지역 주변의 토양 시료를 이용하여 환경오염물질 직접노출지역과 대조지역을 선정하여, 토양오염기준물질 21개 항목과 PAHs의 농도수준과 분포특성에 관하여 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 토양오염 기준물질을 조사한 결과, 모든 항목이 기준치 이하로 나타났고, 배출원 주변지역인 직접노출지역이 대조지역 보다 농도가 높은 것으로 조사되었다. 중금속 농도는 기준치 대비 대체로 낮은 수준으로 나타났다. 아연은 전 지역이 제1지역 우려기준(300 mg/kg)의 약 20.8~58.9% 수준이며, 비교적 높은 농도를 나타내었다. 또한, 불소는 모든 지점에서 기준치 이하로 나타났으나, 불소에 대한 모니터링과 배출원 관리가 필요한 것으로 판단된다.

2) 토양 중 16종 PAHs와 발암 가능성의 PAH_{carc} 농도에 대하여 상관성을 나타낸 결과 $R^2 = 0.9965$ 의 높은 상관성을 나타냈다. 전반적으로 중-고 비점의 벤젠환이 많은 PAHs가 차지하는 비율이 다소 높았으며, PAHs 중 발암성이 높은 벤조(a)피렌이 S4 지점을 제외하고 대부분 검출되어 공업단지로부터 배출되어진 PAHs가 인근지역의 토양에 영향을 주는 것으로 판단된다. 토양 시료 중의 평균농도 수준을 각 지점별로 분석한 결과, PAHs 화합물의 농도 수준은 18.71~1744.59 ng/g이었으며, 발암가능물질 6종의 PAH_{carc}의 농도수준은 6.54~695.94 ng/g을 나타내었다.

3) 지점별 PAHs 농도 수준을 조사한 결과, 공단지역 인근의 송도동(S1 지점)에서 평균 1090.49 ng/g으로 가장 높은 농도 수준을 나타냈으며, 공단지역에서 가장 멀리 떨어진 장기면(S4)에서 평균 26.91 ng/g으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. PAH_{carc}의 농도수준을 분석한 결과, 송도동에서 434.62 ng/g으로 가장 높게 나타났고 장기면은 6.54 ng/g으로 조사되었다. 이러한 결과는 공단지역으로부터 배출되어진 PAHs 화합물질이 인근 지역의 토양에 영향을 주는 것으로 조사되었으며, 대기 중의 PAHs 농도분석을 통하여 토양 중의 PAHs 농도 분석결과와의 연관성을 조사할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4) 유기인, PCB(폴리클로리 네이티드비페닐), 페놀류와 VOCs인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 등은 분석기기의 검출한계 이하로 나타났고, 석유계총탄화수소(TPH)의 경우에는 송도동이 높게 나타났다. 대기오염물질 배출원으로부터 가까운 거리의 제철동의 오염물질 농도가 높은 것으로 조사되어, 배출원으로부터 거리에 따라 토양오염도가 달라지는 것을 일부 확인하였다.

5) 조사 대상지역은 전반적으로 인체에 영향을 줄 수 있는 유익할 만한 수준이라고 하기는 어려우나, 일부 항목의 경우에

는 토양오염 우려기준에 근접하는 수준으로 나타났고 직접노출지역의 농도수준이 대조지역의 농도수준보다 높은 것으로 조사되어 대기오염물질 배출원에 대한 관리가 필요한 지역으로 판단되며, PAHs에 대한 지속적이 모니터링이 요구된다. 향후 이 연구결과는 환경오염과 관련된 의사결정은 물론, 질병군 등 환경오염 취약집단에 대한 보호대책 마련에도 활용이 가능하며, 향후 환경오염과 관련된 건강영향 평가에서 기초자료로서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사

본 연구는 국립환경과학원의 2010년도 지원사업[지역주민 환경오염 노출수준 및 생체지표 모니터링(포항, 5차년도)]으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Jung, J. H., "Health Risk Assessments and Concentrations of Environmental Pollutants in an Industrial Complex," *Ph.D Dissertation, Dongguk University, Seoul*, 2012.
2. Gang, I. G., "Environmental Health," *Hanul*, 5-288 (2009).
3. Jung, J. H., "Risk Factors of Environmental Diseases in an Industrial Complex Area," *Korean J. Ind. Heal.*, **5**, 69-77 (2011).
4. Jung, J. H., Phee, Y. G., Cho, S. W., Ok, G., Shon, B. H., Lee, K., and Lim, H. S., "Concentration Levels and Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at Ambient Air in Industrial Complex Area," *Clean Technol.*, **17**(4), 379-388 (2011).
5. Jung, J. H., "A Study on Reaction Characteristic of SO₂/NO_x Simultaneous Removal for Alkali Absorbent/Additive in FGD and Waste Incinerator Process," *Ph.D Dissertation, Pusan National University, Busan*, 1999.
6. Jung, J. H., "Effects of Air Pollutants on the Health/Environmental Risk Assessment and Weathering of Stone Cultural Properties in Gyeongju and Its Vicinities," *Ph.D Dissertation, Daegu Haany University, Daegu*, 2008.
7. National Institute of Environmental Research, "The Monitoring Study on Exposure Level and Biomarker of Environmental Pollutants in the Pohang Industrial Complex (5th Annual Report)," (2010).
8. National Institute of Environmental Research, "The Monitoring Study on Exposure Level and Biomarker of Environmental Pollutants in the Pohang Industrial Complex (4th Annual Report)," (2009).
9. National Institute of Environmental Research, "The Monitoring Study on Exposure Level and Biomarker of Environmental Pollutants in the Pohang Industrial Complex (3rd Annual Report)," (2008).
10. National Institute of Environmental Research, "The Monitoring Study on Exposure Level and Biomarker of Environmental

- Pollutants in the Pohang Industrial Complex (2nd Annual Report),” (2007).
11. National Institute of Environmental Research, “The Monitoring Study on Exposure Level and Biomarker of Environmental Pollutants in the Pohang Industrial Complex (1st annual report),” (2006).
 12. Jung, J. H., Shon, B. H., and Yoo, K. S., “Effects of Air Pollutants on the Environmental Health Risk Assessment of Gyeongju and Pohang in South Korea,” ACS Symposium Series 240, American Chemical Society, Boston, MA, **232**, (2010).
 13. Aryal, R. K., Furumai, H., Nakajima, F., and Boller, M., “Characteristics of Particle Associated PAHs in a First Flush of a Highway Runoff,” *Water Sci. Technol.*, **53**, 245-251 (2006).
 14. Blumer, M., Blumer, W., and Reich, T., “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of a Mountain Valley : Correlation with Highway Traffic and Cancer Incidence,” *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 1269-1278 (1977).
 15. Keiichi, A., S. Takashi, Y. Masahiro and Yasushi, K., “Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Concentration and Mutagenic Activity in Soils Sampled at Roadsides,” *J. Japan Soc. Air Pollut.*, **27**(4), 190-197 (1992).
 16. Tang, L., Tang, X. Y., Zhu, Y. G., Zheng, M. H., and Miao, Q. L., “Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Soils in Beijing,” *China Environ. Int.*, **31**, 822-828 (2005).
 17. <http://inhen.gyeongbuk.go.kr/>
 18. Sim, Y. J., “Profile Characteristic of Dioxins (PCDDs/DFs and PAHs) and Source Identification and Application of CMB Model in Ambient Air Industrial Complex, Korea,” *Master Dissertation, Pukyong National University, Busan*, 2010.