

공단지역 대기 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준 및 분포특성

정종현*, 피영규, 조상원[†], 옥 곤[‡], 손병현^{††}, 이 관^{‡‡}, 임현술^{††}

대구한의대학교 보건학부
712-715 경북 경산시 한의대로 1번지
[†]한국폴리텍VII대학 에너지환경학과
642-772 경남 창원시 성산구 외동반림로 51-88
[‡]부경대학교 환경대기과학과
608-737 부산광역시 남구 용소로 45
^{††}한서대학교 환경공학과
356-706 충청남도 서산시 해미면 한서1로 46
^{‡‡}동국대학교 의과대학 의학과
780-714 경북 경주시 석장동 707

(2011년 11월 18일 접수; 2011년 12월 12일 수정본 접수; 2011년 12월 14일 채택)

Concentration Levels and Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at Ambient Air in Industrial Complex Area

Jong-Hyeon Jung*, Young-Gyu Phee, Sang-Won Cho[†], Gon Ok[‡]
Byung-Hyun Shon^{††}, Kwan Lee^{‡‡}, and Hyun-Sul Lim^{††}

Faculty of Health Science, Daegu Haany University
Hanui-daero, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do, 712-715, Korea
[†]Department of Energy & Environment, Korea PolytechnicVII College
51-88, Oe-dong Ballim-ro, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 642-772, Korea
[‡]Department of Environmental Engineering, Pukyong National University
45, Yongso-ro, Daeyeon Campus, Nam-gu. Busan, 608-737, Korea
^{††}Department of Environmental Engineering, Hanseo University
Hanseo-ilro Hemi myeon, Seosan, Choongchungnam-do, 356-706, Korea
^{‡‡}Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dongguk University
707, Seokjang-dong, Gyeongju, Gyeongsangbuk-do, 780-714, Korea

(Received for review November 18, 2011; Revision received December 12, 2011; Accepted December 14, 2011)

요 약

본 연구는 공단지역의 대기 시료를 이용하여 다환방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)의 농도수준, 분포특성 및 생체 중 농도에 관하여 조사하였다. 시료는 공단지역 및 주변지역 4개 지점에서 채취하였으며, 지역적 특성에 따라 다환방향족 탄화수소(PAHs) 농도의 변화를 다음 결과에 나타내었다. 공단지역의 대기 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 평균농도 수준은 14.52~193.48 ng/m³로 조사되었다. 발암가능물질 6종 PAH_{carc}의 평균농도 수준은 1.65~13.44 ng/m³로 나타났다. 농도 수준은 대체적으로 낮았지만 제철동지점은 지속적인 관심이 필요한 지역으로 조사되었다. 모든 지점의 대기 시료에서 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene)의 검출이 확인되었으나 농도는 높지 않았다. 그러나 제철동 지점에서 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene)의 농도는 2.89 ng/m³로 유럽연합(EU)의 기준(1 ng/m³)을 초과하는 것으로 나타났다. 직접노출군 240명의 전혈 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 농도수준을 조사한 결과, 남자의 경우 1.12~11.45 ng/m³, 여자의 경우 1.20~26.89 ng/m³로 조사되었다. 성별에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 고령자의 혈중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 농도가 높게 나타나 생체 축적성을 예측할 수 있었다. 본 연구결과 공단지역 및 주변지역은 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 및 환경오염물질의 영향을 받고 있는 지역으로 공단지역에 대한 환경오염물질 원인배출원에 대한 감시체계의 보완, 집중관리, 지역 주민의 건강 보호를 위하여 보건·환경성질환에 영향을 미치는 위해인자 및 오염물질을 원천적으로 저감하는 작업이 지속적으로 수행되어야 할 시점이다.

주제어 : 다환방향족탄화수소화합물, PAHs, 공단지역, 환경오염물질

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: airgas@dhu.ac.kr

Abstract : The purpose of this study was to investigate the concentration levels, distribution characteristics and blood concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at ambient air in Industrial Complex Area. The samples were collected at 4 sites in Industrial Complex Area and its vicinities. The result indicated that there was the difference of PAHs concentration as followed local characteristics. The level of average concentration of PAHs in the air in Industrial Complex Area was 14.52-193.48 ng/m³. The level of average concentration of six materials with possibility of cancer creation was 1.65-13.44 ng/m³. The concentrations of PAHs were generally low, but Jechul-dong is considered an area where consistent monitoring of PAHs is required. In addition, benzo(a)pyrene was detected in every atmospheric sample, however the concentration was not high. The level of concentration of benzo(a)pyrene in the air in the Jechul-dong was 2.89 ng/m³. But, the concentration of the PAHs in Jechul-dong showed that the Benzo(a)pyrene concentration is above 1 ng/m³ of air quality standard(EU). The results of the concentration level of PAHs in the blood from 240 persons who were exposed directly were surveyed, it was 1.12~11.45 ng/m³ for man and 1.20~26.89 ng/m³ for woman. It was indicated that the difference between the genders was very little. The accumulation inside human was anticipated as the PAHs concentration in the blood for the aged was very high. Industrial Complex Area and its vicinities are an area which has been greatly influenced by PAHs and environmental contaminants. It is necessary to control the emission sources of PAHs and to construct an observation system at Industrial Complex Area from now on. It is time to reduce the risk factors for health and environmental disease to protect the health of resident in Industrial Complex Area and its vicinities.

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

1. 서론

최근 일본 후쿠시마 원자력발전소 방사능 유출문제 이전부터 환경오염 문제는 국제사회의 중요 요인으로 작용하고 있으며, 환경오염문제는 지역과 국가를 초월하여 전 지구적 문제로 대두되고 있다. 우리나라는 급속한 경제개발과 산업발전, 국내 산업활동의 증가, 에너지원 다변화정책, 화석연료의 과다한 사용 등의 문제가 부각되고 있다. 국내에서 이용하고 있는 발전용 연료 중에서 석탄은 석유나 원자력에 비해 안정적으로 장기간 공급이 가능한 에너지원이나, 석탄 사용시 오염배출량의 증가는 문제점으로 지적되고 있다. 또한 각종 산업공정, 발전시설, 폐기물 소각로, 공단지역, 산업공정에서는 다량의 입자상물질, 산성가스, 일산화탄소, 질소산화물, 산성오염물질, 휘발성유기화합물질(VOCs), 유해성대기오염물질(hazardous air pollutant, HAP), 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), 환경호르몬류 등과 같은 환경오염물질을 지속적으로 배출하고 있다. 특히 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)는 다양한 경로를 통하여 환경 중으로 배출되고 있으며, 주요 발생원은 화석연료 연소 과정에서 발생하는 것으로 보고되고 있으며[1-3] 자동차 배출가스, 보일러, 쓰레기 소각공정, 알루미늄 제조업, 산불, 소각장, 철강산업 공정중의 코르크스와 아스팔트 제조공정, 식품의 조리, 담배연기 등의 불완전 연소가 일어나는 과정 중에서도 다환방향족탄화수소(PAHs)의 생성은 활발한 것으로 확인되고 있다[4-9].

본 연구에서는 공단지역 주민들의 건강에 영향을 미치는 대기오염물질 중 다환방향족탄화수소류(PAHs) 위해인자를 파악하는 것은 공단지역 주민들의 건강관리를 위하여 필요한 작업이며, 이들 물질 중 다환방향족탄화수소류(PAHs)의 출현 양상과 인체영향을 조사하는 것은 환경오염물질 관리를 위하여 매우 필요한 작업으로 판단된다. 따라서 본 연구는 공단지역 환경성 질환 및 호흡기계 질환에 영향을 미치는 대기오염물

질 중 다환방향족탄화수소류(PAHs)를 중심으로 보건·환경학적 위해인자 파악에 필요한 농도 기초자료를 수집하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 지역적 환경오염수준을 평가할 수 있는 공단지역의 대기 시료를 이용하여 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준, 분포특성 및 인체영향에 관하여 조사하였으며, 향후 공단지역 오염물질의 저감 및 개선을 위한 방안을 마련할 수 있는 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상

공단지역 생활환경의 위해인자 기초자료 확보 및 환경성 조사와 위해성을 평가하기 위하여 산업단지로부터 인접지역을 직접노출지역을 설정하였으며, 홍해지역을 간접노출지역으로 구분하였다. 직접노출지역은 송도동(A지점, 남구 송도동 송도동주민센터, TM (36.031913, 129.375528), 해도동(B지점, 남구 해도동 해도동주민센터, TM (36.016101, 129.370733), 제철동(C지점, 남구 제철동 남구보건소/제철동주민센터, TM (35.992313, 129.397166)을 선정하였으며, 간접노출지역은 북쪽에 위치한 주거지역인 홍해읍(D지점, 북구 홍해읍 홍해읍사무소, TM (36.107129, 129.342084)을 선정하였고, Figure 1과 Table 1에서는 대기오염물질 시료 채취지점 및 위치를 나타내었다.

본 연구는 2010년 10월 철강공단 및 주변지역의 대기 중 다환방향족탄화수소(PAHs)의 농도수준 및 분포특성을 조사하기 위하여 대기질 모니터링 작업을 수행하였으며, 1차 시료채취는 2010년 10월 7일부터 8일까지 수행되었고, 2차 시료채취는 2010년 10월 18일부터 19일까지 수행되었으며, 두 차례에 걸쳐 각각 24시간 연속 측정을 통하여 시료를 확보하였다. 대기시료는 A, B, C, D 4개의 지역을 2번씩 채취하여 총 8개의 시료를 채취하였으며, 이를 분석하여 지점별로 평균값을 제시하였다.

Table 1. Location of sampling sites in Industrial Complex Area and its vicinities

Sites	Locations	Comparison
Songdo(A)	Songdo-dong, Namgu	Direct exposure group
Haedo(B)	Haedo-dong, Namgu	
Jechul(C)	Jechul-dong, Namgu	
Heunghae(D)	Heunghae, Bukgu	Indirect exposure group

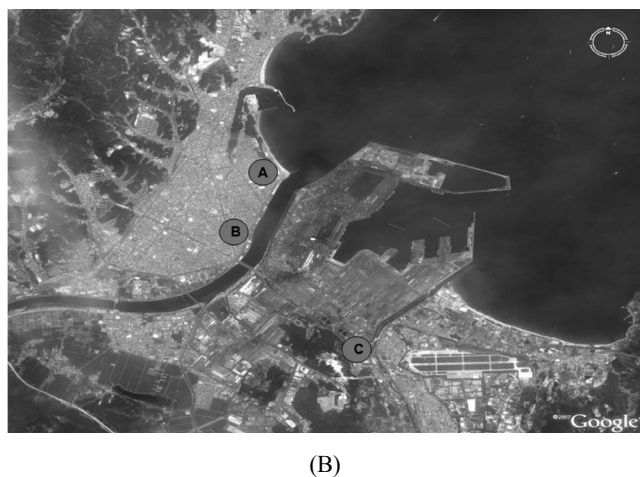
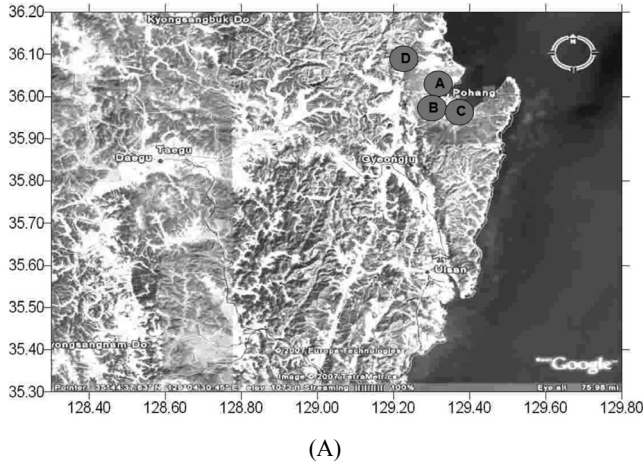


Figure 1. Location of sampling sites in Industrial Complex Area.

2.2. 연구방법

대기시료는 입자상물질에 함유된 PAHs를 측정하기 위하여 유리섬유여과지(quartz fiber filter: QFF, Whatman International Ltd.)를 고용량공기시료채취기(High Volume Air Sampler, HVAS, SIBATA, JAPAN)에 장착하여 총부유먼지(TSP: 대기 중에 떠다니는 모든 먼지를 통칭하는 용어로서 Total Suspended Particles)를 포집하였으며, 가스상의 PAHs를 측정하기 위해서 폴리 우레탄폼(Polyurethane foam, PUF) 플러그가 장착된 고용량 공기시료채취기(High volume air sampler: HVAS, SIBATA, JAPAN)를 이용하여 각각의 지점에서 일일 24시간 동안 채취하였고, 총 채취용량은 1000 m³/day 이상으로 하였다.

대기 중의 총 부유먼지를 채취하기 위해서 사용한 유리섬유

여지는 사용 전에 600 °C 5시간 이상 고온에서 가열하여 불순물을 제거한 후 사용하였으며, PUF는 아세톤(JT. baker)을 용매로 하여 속슬렛 추출기로 14~18시간 이상 추출하여 건조시킨 후 사용하였다. 채취된 각각의 유리섬유여과지는 회수하여 진공 데시케이터에서 24시간 동안 수분을 제거한 후 질량을 측정하였으며, 시료포집 전·후의 무게차이를 측정한 후에 가로, 세로 각각 0.5 cm의 크기로 자른 후 톨루엔을 추출용매로 16시간 이상 속슬렛 추출하였다. 또한 채취된 PUF는 추출 전까지 4 °C 냉암소에서 보관 후 아세톤 용매를 사용하여 16시간 이상 속슬렛 추출하였다. 추출된 시료는 회전증발농축기를 사용하여 농축한 후에 keeping solvent로 n-Nonane(Pesticide residue analysis, Fluka) 500 µL를 첨가한 후 질소로 purge하여 n-Hexane(Ultra residue analysis, J. T. Baker, USA)으로 용매를 전환하여 정제용 시료로 하였다.

대기시료를 추출하여 용매 전환한 시료는 600 °C에서 2시간 활성화된 활성 실리카겔 칼럼 크로마토그래피(Activated silica gel column chromatography: 70-230 mesh, 중성, Merck)를 이용하여 정제하였다. 시료용액은 정제 전에 정제용 내부표준물질 labeled standard(ES 2528)를 5 ng을 첨가하였다. 시료의 정제과정의 용출은 첫 번째 분획으로 n-헥산 10 mL, 두 번째 분획은 10% CH₂Cl₂/n-헥산 80 mL로 용출시켰다. 두 번째 분획을 받아 회전증발농축기로 농축한 후 질소가스로 농축하여 최종 농축하여 분석용 시료로 하였다. 본 연구에 사용된 기기는 기체크로마토그래피/질량분석계(Agilent 6890N/5973MSD)이며, 분리를 위해 사용된 모세관칼럼은 HP-5MS(30 m × 0.32 mm × 0.25 µm)를 사용하였다. 16종 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)에 대한 GC/MS 분석조건을 Table 2에 나타내었으며, 분석에 사용된 각 그룹별 이온과 이온비율을 Table 3에 나타내었다.

한편, 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준, 분포특성에 따른 인체영향을 부분적으로 확인하기 위하여 2010년도에 동국대학교 의과대학 본 연구팀 및 국립환경과학원이 공동으로 발표한[4,10] 직접노출지역에 거주하고 있는 주민들(240명)의 전혈 중 다환방향족탄화수소류(PAHs) 농도와 비교 및 분석하였다.

Table 2. Instrumental conditions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) by GC/MS

Items	Conditions
GC/MS	Agilent 6890N/5973MSD
Column	HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 µm)
Ion source temp.	230 °C
Injector temp.	280 °C
Carrier gas	He (1.7.5 mL/min)
Injection mode	Splitless
Ionization mode	EI mode
GC oven program	80 °C (1 min) → 5 °C/min → 280 °C (0 min) → 10 °C/min → 300 °C (10 min) → 320 °C (7 min)

Table 3. Selected ions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) by GC/MS

Compounds	Selected ion (m/z)	RT (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. PAHs와 PAHcarc의 농도분포 및 상관성

다환방향족탄화수소류(PAHs)는 실온에서 고체상태이며 비점과 융점이 높으나 증기압이 낮고, 여러 유기용매에 용해되며, 친유성이 높은 화학물질이고, 방향족 고리가 2~4개인 경우 기체 또는 고체에 흡착된 형태로 분포하지만 5개 이상이 되면 주로 고체에 흡착된 상태로 존재하며, PAHcarc는 PAHs 가운데 발암성이 높은(BaA + BbF + BkF + BaP + InP + DahA)를 의미한다. 특히, 발생원에서 배출되어 대기 중에 잔존하는 다환방향족 탄화수소(PAHs)는 대기광화학 반응이 일어나며, NO₂와 반응하여 nitro-PAHs 등이 생성된다[4].

본 연구에서는 공단지역 대기 중 16종 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준 및 분포특성에 대하여 TSP에 포함된 PAHs 측정방법과 PUF를 장착하여 포집한 방법으로 조사하였고, 특히 국제암연구센터(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 발암 관련 화합물로 간주하고 있는 6종 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준에 대해서도 분석하여 PAHcarc (BaA + BbF + BkF + BaP + InP + DahA)로 나타내었으며, 이들 사이의 상호 상관성에 대하여 조사 및 분석하였다. Figure 2와 3은 공단지역 대기 중 분석된 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 16종과 PAHs 6종 농도 수준인 PAHcarc (BaA + BbF + BkF + BaP + InP + DahA)의 상관성을 각각 TSP를 포집하여 분석한 PAHs 및 PUF를 장착하여 분석한 PAHs에 대해 나타낸 그림이다. 대기 중 PAHs (16종)의 농도수준과 발암성 PAHcarc (6종) 농도수준에 대한 TSP를 포집하여 분석한 PAHs 및 PUF를 장착하여 분석한 PAHs의 상관성을 조사한 결과, 각각 상관도 R² = 0.956과 R² = 0.9581로 나타났다.

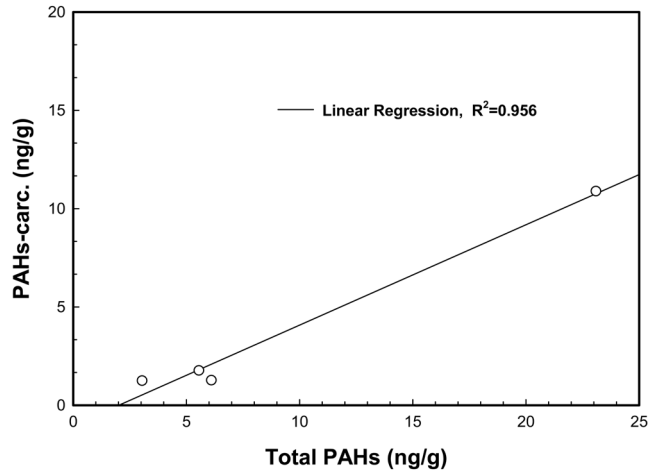


Figure 2. Correlation of ΣPAHs (TSP) and ΣPAHcarc (TSP).

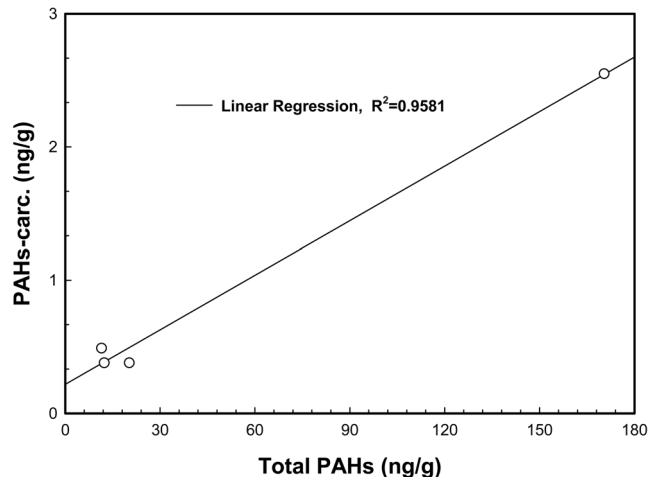


Figure 3. Correlation of ΣPAHs (PUF) and ΣPAHcarc (PUF).

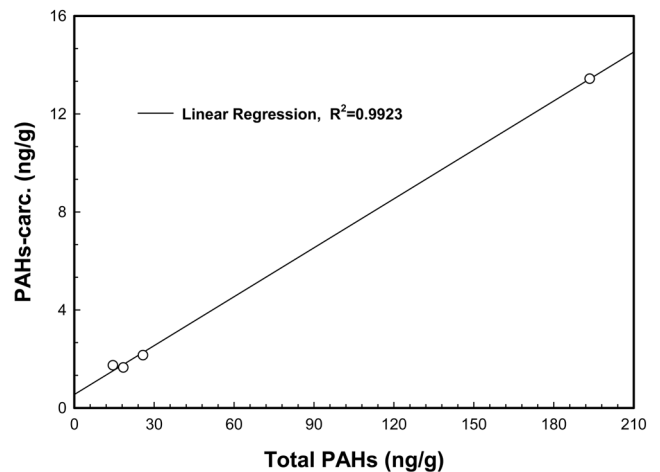


Figure 4. Correlation of ΣPAHs (TSP + PUF) and ΣPAHcarc (TSP + PUF).

Figure 4에는 ΣPAHs (TSP + PUF)와 ΣPAHcarc (TSP + PUF)의 상관도에 대한 그림을 나타내었으며, R² = 0.9923으로 높

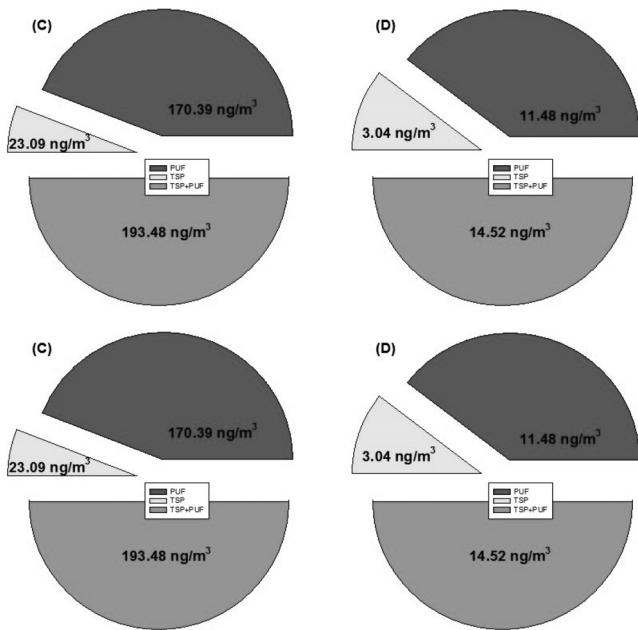


Figure 5. Comparison of concentration levels of ΣPAHs (TSP + PUF), ΣPAHs (TSP) and ΣPAHs (PUF) at ambient in Industrial Complex Area and non-industrial area.

은 상관성을 나타내었다. 또한, Figure 5에는 ΣPAHs (TSP + PUF)에 대한 ΣPAHs (TSP)의 기여도 및 ΣPAHs (TSP + PUF)에 대한 ΣPAHs (PUF)의 기여도를 나타내었으며, 그림에서 알

수 있듯이 TSP의 비율은 33.11%(A), 21.50%(B), 11.93%(C), 20.93%(D) 이었으며, PUF의 경우 66.89%(A), 78.50%(B), 88.07%(C), 79.07%(D)의 비율로 확인되었다.

따라서, 본 연구대상 지역에서는 일반적으로 PAHs (16종) 농도수준이 높으면 PAH_{carc} (6종) 농도수준도 높게 나타났고, TSP를 포집하여 분석한 PAHs 측정값 보다 PUF를 장착하여 분석한 PAHs 측정값이 더 높게 나타났다. 따라서 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)을 분석 및 측정할 경우 TSP를 포집하여 분석한 PAHs 측정 방법과 함께 PUF를 장착하여 PAHs를 분석한 방법으로도 반드시 측정 및 분석하여야 하며, PAHs (16종)는 물론 발암성이 높은 PAH_{carc} (6종) 관리에도 많은 주의가 필요한 것으로 판단된다.

3.2. 지점별 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 농도 분석결과

본 연구에서는 공단 대기 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준 및 분포특성을 조사하기 위하여 4개 지점에서 채취된 총 16종 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도와, 현재 IARC에서 발암 관련화합물로 간주하고 있는 Benzo(a)anthracene (BaA), Benzo(b)fluoranthene (BbF), 벤조(k)플루란센(Benzo(k)fluoranthene) (BkF), 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene) (BaP), Dibenzo(a,h)anthracene (DbA), 인데노(1,2,3-cd)피렌(Indeno(1,2,3-cd)pyrene) (InP) 등 6종의 다환방향족탄화수소류(PAHs) 분석결과를 Table 4 및 Figure 6~11에 나타내었다.

Table 4. Concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at ambient in Industrial Complex Area and non-industrial area

Compounds and site/samples	A (Songdo)		B (Haedo)		C (Jechul)		D (Heunghae)	
	TSP	PUF	TSP	PUF	TSP	PUF	TSP	PUF
Naphthalene	0.07	1.25	0.14	2.13	0.61	4.54	0.07	0.78
Acenaphthylen	0.01	0.11	0.07	0.03	0.07	1.36	0.02	0.12
Acenaphthene	1.65	0.11	0.72	0.23	1.24	1.96	0.33	0.06
Fluorene	0.11	0.48	0.07	0.63	0.13	3.85	0.01	0.52
Phenanthrene	0.89	5.90	0.37	9.28	0.89	75.89	0.18	5.93
Anthracene	0.93	0.34	0.55	0.63	0.82	10.11	0.04	0.48
Fluoranthene	0.36	1.72	0.56	3.59	2.11	34.06	0.34	1.52
Pyrene	0.29	1.80	0.11	2.96	2.39	32.98	0.28	1.29
Benzo(a)anthracene	0.28	0.11	0.24	0.13	1.49	1.58	0.13	0.15
Chrysene	0.26	0.22	0.71	0.39	2.15	3.08	0.23	0.28
Benzo(b)fluoranthene	0.33	0.04	0.56	0.04	3.47	0.16	0.34	0.01
Benzo(k)fluoranthene	0.17	0.01	0.30	0.01	1.26	0.04	0.27	0.01
Benzo(a)pyrene	0.23	0.02	0.19	0.03	2.78	0.11	0.17	0.04
Indeno(1,2,3)pyrene	0.23	0.19	0.41	0.14	1.51	0.65	0.30	0.25
Dibenzo(a,b)anthracene	0.03	0.01	0.07	0.03	0.38	0.01	0.04	0.03
Benzo(g,h,i)perylene	0.26	0.01	0.48	0.01	1.79	0.01	0.29	0.01
ΣPAHs (ng/m ³)	6.1	12.32	5.55	20.26	23.09	170.39	3.04	11.48
ΣPAHs (TSP + PUF)	18.42		25.81		193.48		14.52	
ΣPAH _{carc} (ng/m ³)	1.27	0.38	1.77	0.38	10.89	2.55	1.25	0.49
ΣPAH _{carc} (TSP + PUF)	1.65		2.15		13.44		1.74	

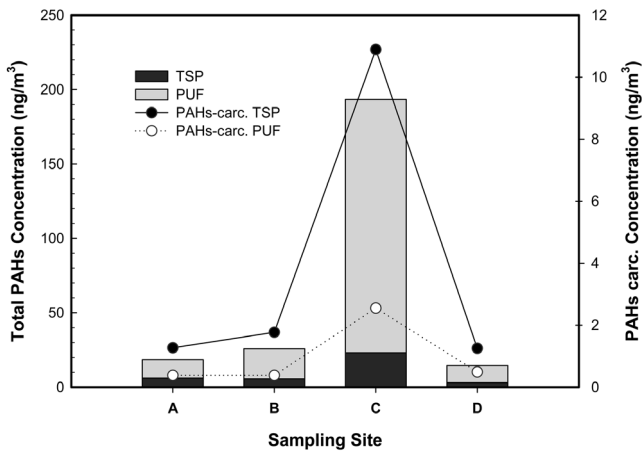


Figure 6. Concentration levels and trends of PAHs and PAHcarc in gas/particle portion at ambient air.

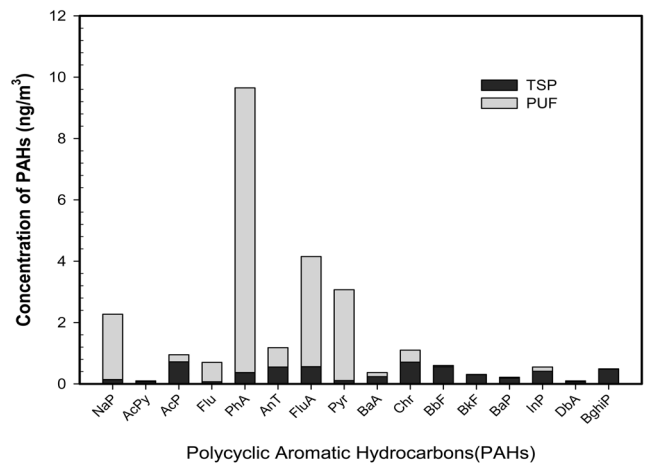


Figure 9. Profile patterns of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at ambient air samples in Haedo.

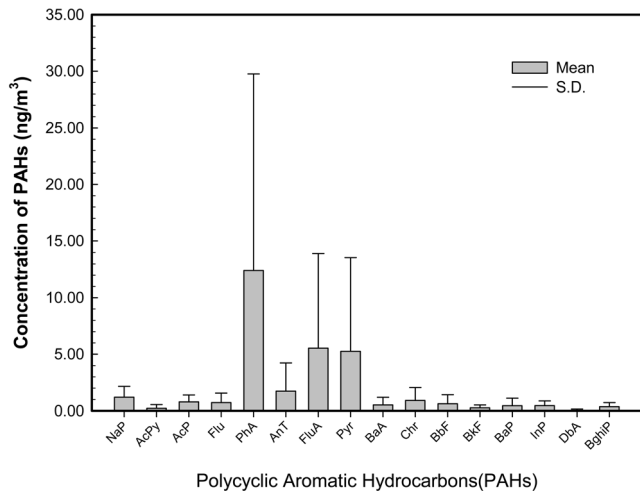


Figure 7. Profile patterns of total PAHs in ambient air in Industrial Complex Area and non-industrial area.

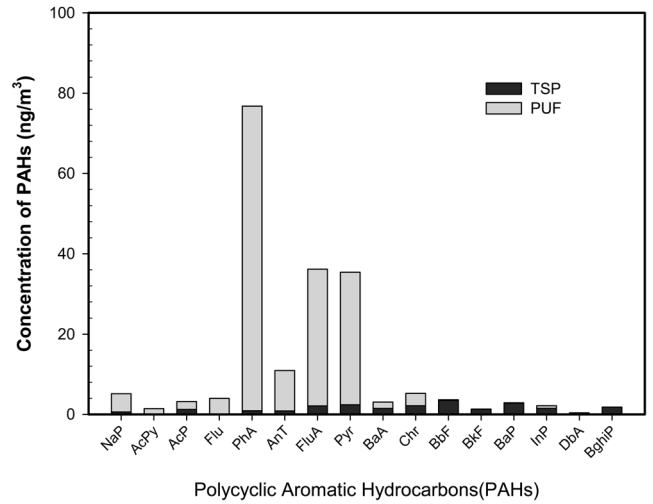


Figure 10. Profile patterns of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at ambient air samples in Jeochul.

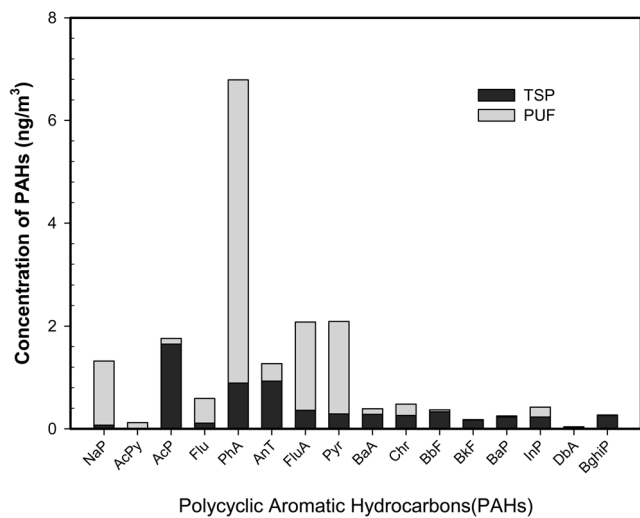


Figure 8. Profile patterns of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at ambient air samples in Songdo.

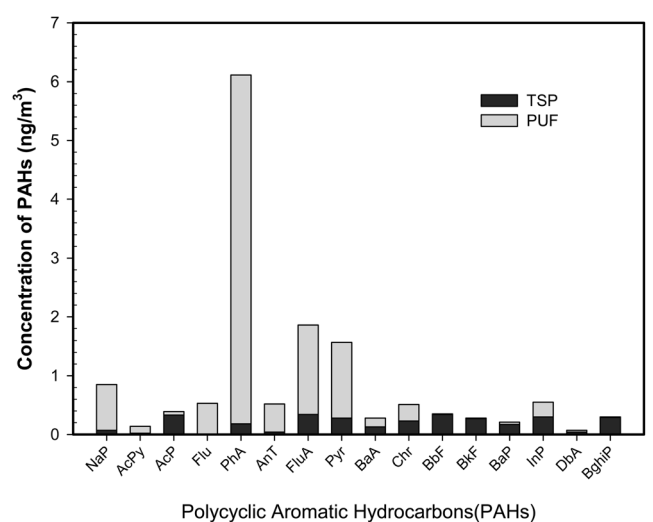


Figure 11. Profile patterns of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at ambient air samples in Heunghae.

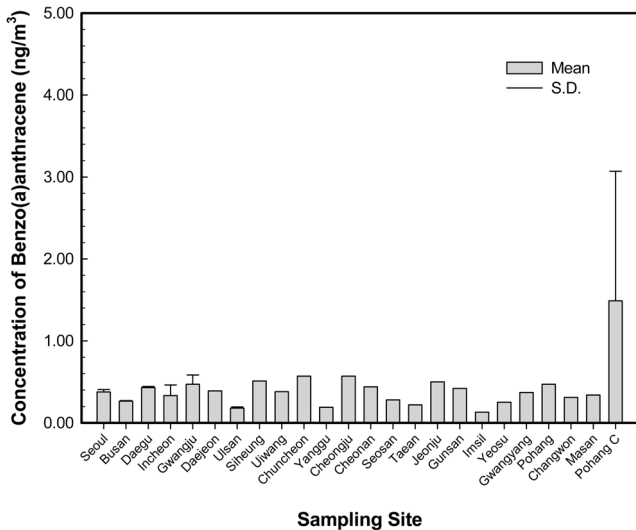


Figure 12. Variation of Benzo(a)anthracene concentration as a function of investigation region in Korea.

Figure 6, 7에서는 연구대상 지역의 대기 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 지점별 평균 농도수준과 평균적인 프로파일 특성을 나타내었고, Figure 8~11에는 각 지점별 프로파일 특성을 나타내었다. 연구조사 결과 모든 대기시료 중에 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) profile은 Benzo(a)anthracene, Chrysene, Benzo(b)fluoranthene, 벤조(k)플루안센(Benzo(k)fluoranthene), 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene), Indeno(1,2,3)pyrene, Dibenzo(a,b)anthracene, Benzo(g,h,i) perylene 같은 고분자량은 모든 지점에서 낮은 농도 분포를 나타내었으나, 나프탈렌

(Naphthalene), 페난트렌(Phenanthrene), 안트라센(Anthracene), 프루안텐(Fluoranthene)과 피렌(Pyrene) 같은 저분자량 화합물이 높은 농도 분포를 나타내었다. 특히 페난트렌(Phenanthrene)의 농도가 모든 지점에서 지배적인 결과를 나타내었다. 또한 고분자량의 농도는 그다지 높지는 않았지만, 모든 대기 시료에서 발암성이 큰 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene)이 검출되었다. 특히 대기 중 다환방향족탄화수소(PAHs)를 분석한 결과, 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene)은 제철동에서 2.89 ng/m³로 유럽연합(EU) 기준(1 ng/m³)을 초과하였으나, 그 이외 해도 및 송도 지역은 0.21~0.25 ng/m³ 수준으로 확인되었다.

본 연구에서는 특히 IARC에서 지정한 발암가능물질 6종 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 농도는 PAHcarc (BaA + BbF + BkF + BaP + InP + DahA)의 농도수준으로 나타내었으며, 본 연구기간 중 측정 및 분석한 대기 중 PAHs 화합물의 평균농도는 TSP를 포집하여 분석한 PAHs의 경우 3.04~23.09 ng/m³ 이었고, PUF의 경우 11.48~170.39 ng/m³의 농도분포를 나타내었다. 발암가능물질 6종의 PAHcarc의 농도수준은 TSP를 포집하여 분석한 PAHs의 경우 1.25~10.89 ng/m³이었고, PUF를 장착하여 분석한 PAHs 경우 0.38~2.55 ng/m³로 조사되었다. PAHs (TSP + PUF)의 경우, 공업지역인 C(제철동) 지점에서 193.48 ng/m³로 가장 높은 농도를 나타내었고, 비공업지역인 D(홍해) 지점에서 14.52 ng/m³로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한, PAHcarc의 경우에도 공업지역인 C(제철동) 지점에서 13.44 ng/m³로 가장 높은 농도를 나타내었고, 나머지 지점에서는 1.65~2.15 ng/m³로 거의 비슷한 농도분포를 나타내었다. 한편, Figure 12에서는 우리나라 전역의 Benz(a)anthracene의 농도를 나타내었다. 우리나라 전역에서의 측정된 Benzo(a)

Table 5. Concentration for PAHs levels in ambient of each Industrial Complex Area in Korea[4,15] (Unit: ng/m³)

Industrial region	A	B	C	D	E	F	G	Mean
Naphthalene	2.044	1.457	0.995	0.910	3.442	3.487	5.068	2.486
Acenaphthylene	0.762	0.101	0.100	0.059	1.553	1.719	0.337	0.662
Acenaphthene	0.040	0.010	0.000	0.136	0.984	0.000	1.777	0.421
Fluorene	3.647	1.195	1.415	1.084	2.834	4.760	2.534	2.496
Phenanthrene	15.833	5.786	6.047	4.466	11.376	20.942	10.360	10.687
Anthracene	1.181	0.206	0.354	0.092	1.071	2.489	0.738	0.876
Fluoranthene	6.239	2.492	2.534	1.981	4.433	7.555	4.455	4.241
Pyrene	6.528	2.605	2.497	1.901	4.200	7.655	3.761	4.164
Benzo(a)anthracene(*)	0.752	0.149	0.194	0.201	0.901	1.104	0.900	0.600
Chrysene	1.848	0.497	0.734	0.793	1.675	2.319	1.804	1.381
Benzo(b)fluoranthene(*)	1.501	0.426	0.645	0.710	1.289	1.943	1.743	1.180
Benzo(k)fluoranthene(*)	0.448	0.138	0.205	0.283	0.425	1.936	0.955	0.627
Benzo(a)pyrene(*)	0.673	0.124	0.190	0.233	0.908	1.068	1.180	0.625
Indeno(1,2,3)pyrene(*)	1.255	0.628	0.862	0.588	1.134	1.239	1.335	1.006
Dibenzo(a,b)anthracene(*)	0.390	0.450	0.482	0.203	0.246	0.215	0.436	0.346
Benzo(g,h,i)perylene	1.302	0.746	0.844	0.611	1.085	1.383	1.324	1.042
ΣPAHs	44.444	17.010	18.097	14.250	37.555	59.815	38.706	32.840
ΣPAHcarc.(*)	5.019	1.914	2.577	2.218	4.901	7.506	6.549	4.383

Table 6. Concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at blood in Industrial Complex Area[4,6]

PAHs (In blood)		Mean concentration		
		Songdo (N=114)	Haedo (N=76)	Jechul · Cungrim (n=12)
PAHs (µg/L)	Benzo(a)pyrene	N.D.**	N.D.	N.D.
	Benzo(a)anthracene*	<0.02	<0.02	<0.02
	Dibenzo(a,h)anthracene	N.D.	N.D.	N.D.
	Benzo(b)fluoranthene	N.D.	N.D.	N.D.
	Benzo(k)fluoranthene	N.D.	N.D.	N.D.
	Indeno(1,2,3)pyrene	N.D.	N.D.	N.D.
	Naphthalene	3.21	2.58	2.22
	Acenaphthylene	N.D.	N.D.	N.D.
	Acenaphthene	N.D.	N.D.	N.D.
	Fluorene	0.06	0.05	0.05
	Phenanthrene	0.10	0.09	0.09
	Pyrene	0.10	0.08	0.07
	Anthracene	0.02	0.01	0.01
	Fluoranthene	0.12	0.10	0.08
	Benzo(ghi)perylene	N.D.	N.D.	N.D.
	Crysene*	<0.02	<0.02	<0.02

* N.D : Not Detected

anthracene은 0.13~0.57 ng/m³의 농도 분포를 나타내었다. 상대적으로 연구대상지역인 제철동에서의 Benzo(a)anthracene 측정값이 높은 것으로 나타났다. 모든 지점의 대기 시료에서 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene)의 검출이 확인되었으나 농도는 높지 않았다.

본 연구조사를 수행한 결과 공단지역에서 가까운 지점에서의 다환방향족탄화수소류(PAHs) 농도합은 높게 나타났고, 공단지역에서 먼 거리에 위치한 지점의 다환방향족탄화수소류(PAHs) 농도는 낮은 것으로 나타나, 공단지역에서 발생한 PAHs는 인근 대기 중의 농도에 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다. 또한, 본 연구결과를 Table 5에 나타내었듯이 기존 연구자의 대기 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 연구결과와[4,5,11,15] 비교한 결과 공단지역의 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 농도 수준은 제철동 지점을 제외하면 다른 공업지역과 비교하여 높지 않은 농도 수준을 나타내었다.

3.3. 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 생체 중 농도

공단지역 직접노출지역에 거주하고 있는 주민들의 전혈 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)이 인체에 미치는 악영향을 부분적으로 확인하기 위하여 국립환경과학원(NIER)에서 지원한 본 연구팀의 Cohort 연구결과[4,6]와 비교하였으며, Table 6에서는 2008년도에 수집한 직접노출군 240명의 지역주민들의 전혈 중 다환방향족탄화수소류(PAHs) 농도를 송도, 해도, 제철·청림지역으로 구분하여 나타내었다.

연구결과, 직접노출군에서의 나프탈렌(Naphthalene)은 0.65~26.58 µg/L의 농도분포를 보였으며 기하평균은 2.88 µg/L이었고, 프로렌(Fluorene)은 0.02~0.11 µg/L의 농도분포를 보였으며

기하평균은 0.05 µg/L이었다. 페난트렌(Phenanthrene)은 0.04~0.57 µg/L, 기하평균은 0.09 µg/L이었고, 안트라센(Anthracene)은 0.01~1.34 µg/L, 기하평균은 0.01 µg/L이었다. 또한, 직접노출군 240명의 전혈 중 검출된 다환방향족탄화수소류(PAHs)의 농도를 조사한 결과, 남자의 경우 1.12~11.45 µg/L, 여자의 경우 1.20~26.89 µg/L의 농도분포를 나타내었다. 한편 비교지역의 나프탈렌(Naphthalene) 농도는 0.99~12.76 µg/L의 분포를 보였으며 기하평균은 1.96 µg/L이었고, 프로렌(Fluorene)은 0.02~0.12 µg/L의 농도분포를 보였으며 기하평균은 0.06 µg/L이었다. 페난트렌(Phenanthrene)은 0.04~0.14 µg/L, 기하평균은 0.08 µg/L이었고, 안트라센(Anthracene)은 0.01~0.13 µg/L, 기하평균은 0.02 µg/L이었다. 고령자에서의 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 혈중 농도가 증가하는 경향이 확인되었으며, 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)은 대부분 축적성이 강한 물질로서 연령이 많을수록 축적에 의해 증가하는 것으로 판단된다[4].

따라서 본 연구결과, 직접노출 지역에 거주하는 사람들의 혈중 PAHs 농도가 간접노출 지역에 거주하는 사람들의 혈중 PAHs 농도보다 높은 것으로 나타나, 대상지역의 환경오염은 인접 공단의 영향을 받는 것으로 추정되며, 특히 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 등의 오염도를 줄이려는 노력과 함께 추가 정밀조사가 필요하다. 이와 함께 일부 공업단지 및 주변지역에서의 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)에 대한 모니터링을 지속적으로 수행하고, 효과적인 저감방안 제시 및 보다 과학적이고 체계적인 연구를 지속적으로 수행하여야 할 시점으로 판단된다. 특히, 환경오염물질과 건강장해와의 관련성을 파악하는 것은 대단히 어려우며, 대기환경에서 저농도로 노

출되는 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)에 의한 인체 영향을 파악하기는 더욱 많은 어려움이 있고, 현재의 지표로서는 제한점이 있을 수밖에 없다. 따라서 직접노출군과 대조군 연구를 지속적으로 확대하고 다른 공단지역에서 공통지표로서의 생체지표(biomarker) 및 공통 위험인자를 공동으로 선정하여 관리해 나가는 적극적인 방안도 병행하여 실시하여야 할 시점으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 공단지역의 대기 시료를 이용하여 다환방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)의 농도수준과 분포특성에 관하여 조사하였으며, 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 오염물질의 농도를 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 연구대상 공단지역 대기 중 PAHs (16종)의 농도수준과 발암성 물질인 PAHcarc (6종) 농도수준에 대한 TSP를 포함하여 분석한 PAHs 및 PUF의 상관성을 조사한 결과, 각각 상관도 $R^2 = 0.956$ 과 $R^2 = 0.9581$ 으로 나타났으며, Σ PAHs (TSP + PUF)와 Σ PAHcarc (TSP + PUF)의 상관도 $R^2 = 0.9923$ 으로 높은 상관성을 나타내었다. 또한, PAHs (16종) 농도수준이 높으면 PAHcarc (6종) 농도수준도 높게 나타났고, PUF 방법으로 측정·분석한 결과의 PAHs 농도수준이 TSP를 포함하여 분석한 방법에 의해 측정·분석한 PAHs 농도수준 보다 더 높은 것으로 조사되어, 대기 중 PAHs 농도 조사시 TSP 분석방법만으로 측정하는 것은 과소평가될 위험이 매우 높은 것으로 나타났다.

2) 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 중 고분자 물질은 모든 지점에서 낮은 분포를 보였으나, 나프탈렌(Naphthalene), 페난트렌(Phenanthrene), 안트라센(Anthracene), 프루안텐(Fluoranthene)과 피렌(Pyrene) 같은 저분자량 화합물은 주요한 분포를 나타내었다. 특히 페난트렌(Phenanthrene)의 농도가 모든 지점에서 지배적인 결과를 나타내었다. 또한 고분자량의 농도는 그다지 높지는 않았지만, 모든 대기 시료에서 발암성이 큰 벤조(a)피렌(Benzo(a)pyrene)이 검출되었다.

3) 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 평균농도는 TSP를 포함하여 분석한 PAHs의 경우 $3.04\sim 23.09 \text{ ng/m}^3$ 이었고, PUF를 장착하여 분석한 PAHs의 경우 $11.48\sim 170.39 \text{ ng/m}^3$ 로 나타났으며, 발암가능물질 6종의 PAHcarc의 농도수준은 TSP를 포함하여 분석한 PAHs의 경우 $1.25\sim 10.89 \text{ ng/m}^3$ 이었고, PUF를 장착하여 분석한 PAHs의 경우 $0.38\sim 12.55 \text{ ng/m}^3$ 로 조사되었다.

4) PAHs (TSP + PUF)의 경우, 공업지역인 A3(제철동) 지점에서 193.48 ng/m^3 로 가장 높은 농도를 나타내었고, 비공업지역인 A4(홍해) 지점에서 14.52 ng/m^3 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한, PAHcarc의 경우에도 공업지역인 A3(제철동) 지점에서 13.44 ng/m^3 으로 가장 높은 농도를 나타내었고, 나머지 지점에서는 $1.65\sim 2.15 \text{ ng/m}^3$ 로 거의 비슷한 농도분포

를 나타내어, 공단지역에서 가까운 지점의 다환방향족탄화수소화합물(PAHs) 농도는 높게 나타났고, 공단지역에서 먼 거리에 위치한 지점의 농도는 낮은 것으로 나타나, 공단지역이 인근 대기 중의 농도에 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다.

5) 직접 노출군 240명의 전혈 중 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)의 생체 농도를 분석한 결과, 남자의 경우 $1.12\sim 11.45 \text{ ng/m}^3$, 여자의 경우 $1.20\sim 26.89 \text{ ng/m}^3$ 로 조사되었으며, 연도별 큰 차이는 없었으나 고령자의 혈중 농도가 젊은 사람들보다 높은 것으로 나타나 생체 축적성이 있는 것으로 예측되어졌다. 따라서 연구 대상지역의 환경오염은 인접 공단의 영향을 받는 것으로 추정되므로, 공업단지 및 주변지역에서의 다환방향족탄화수소화합물(PAHs)에 대한 정밀조사와 모니터링필요하고, 효과적인 저감방안 제시와 체계적인 연구를 지속적으로 수행하여야 할 것으로 판단된다.

감사

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

참고문헌

1. Jung, J. H., "A Study on Reaction Characteristic of SO_2/NO_x Simultaneous Removal for Alkali Absorbent/Additive in FGD and Waste Incinerator Process," Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Busan, 1999.
2. 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.
3. 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).
4. 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).
5. National Institute of Environmental Research, "Report of Environmental Health Assessment in the Pohang Industrial Complex and its Vicinities," (2010).
6. 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).
7. 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).

8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. 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).
13. 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. Environment International*, **31**, 822-828 (2005).
14. Yang, H.-H., Lai, S.-O., Hsieh, L.-T., Hsueh, H.-J., and Chi, T.-W. "Profiles of PAH Emission from Steel and Iron Industries," *Chemosphere*, **48**, 1061-1074 (2002).
15. Sim, Y.-J., "Profile Characteristic of Dioxins(PCDDs/PCDFs and PAHs) and Source Identification and Application of CMB Model in Ambient Air Industrial Complex Korea," M. S. Dissertation, Pusan National University, Busan, 2010.