

충청남도 산업단지 인근지역 주민의 생체시료 중 중금속 농도평가

주요섭* · 노상철***†

*단국대학교 의과대학 직업환경의학교실

**단국대학교병원 농업안전보건센터

Exposure Assessment of Heavy Metals using Exposure Biomarkers among Residents Living Near a Chungcheongnam-do Province Industrial Complex Area

Yosub Joo* and Sangchul Roh***†

*Department of Occupational and Environmental Medicine, College of Medicine, Dankook University

**Center for Farmers' Safety and Health, Dankook University Hospital

ABSTRACT

Objectives: This study was designed to assess the level of physical exposure to heavy metals among residents who live around a Chungcheongnam-do Province industrial complex and to provide baseline data on the effects and harms of heavy metals on the human body by comparing their exposure levels to those of people from control regions.

Methods: We measured blood lead and cadmium levels and urine mercury and chromium levels and conducted a survey among 559 residents from the affected area and 347 residents of other areas.

Results: Blood lead and cadmium levels and urine mercury levels were significantly higher in the case region than among those in the control region ($p=0.013$, $p<0.001$, $p<0.001$, respectively). In the thermoelectric power plant area, blood cadmium and urine mercury levels were significantly higher than in the control region ($p<0.001$, $p<0.001$, respectively). In the steel mill and petrochemical industry areas, blood cadmium level was significantly higher than that in the control region ($p<0.001$). Dividing groups by the reference level of blood cadmium ($2 \mu\text{g/L}$), the odds ratios between the case and control regions were 2.56 (95% CI=1.83-3.58), 3.11 (95% CI=2.06-4.71) for the thermoelectric power plant area, 1.78 (95% CI=1.19-2.65) for the steel mill area and 4.07 (95% CI=2.40-6.89) for petrochemical industry area.

Conclusion: This study showed that the levels of exposure to heavy metals among residents living near a Chungcheongnam-do Province industrial complex were significantly higher than those in the control region. This seems to be attributable to exposure to heavy metals emissions from the industrial complex. Further research and safety measures are required to protect residents' health.

Keywords: Blood cadmium, blood lead, Chungcheongnam-do Province industrial complex, urine chromium, urine mercury

[†]Corresponding author: Department of Occupational and Environmental Medicine, College of Medicine, Dankook University, Dandaero 119, Dong-nam gu, Cheon-an, Chung-nam, Republic of Korea 330-714, Tel: 82-41-550-3956, Fax: 82-41-556-6461, E-mail: scroh@dku.edu

Received: 13 May 2016, Revised: 1 June 2016, Accepted: 9 June 2016

I. 서 론

산업의 발달과 더불어 화석연료와 중금속 등의 유해한 물질들의 사용이 증가함에 따라, 주변환경과 주변에 거주하는 주민들의 건강에 미치는 영향 또한 커지고 있다. 각종 산업단지와 발전소 그리고 제철소 등에서 배출하는 황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x), 폴리염화비페닐류(PCBs), 다핵방향족탄화수소류(PAHs), 휘발성 유기화합물질(VOCs), 특정대기유해물질(HAP), 그리고 중금속 등과 같은 오염물질들이 대기와 토양으로 배출되고 있으며, 이를 해결하기 위한 대책들에 대한 관심과 노력이 높아지고 있다.¹⁻⁵⁾

환경오염물질 노출에 의한 아토피, 천식 등의 질환이 증가하고 있으며, 각종 만성질환과 암과의 관련성에 대해서도 관심이 높아지고 있다. 이러한 환경적 변화에 대한 대응을 위해 국가의 환경정책 또한 변화가 있어 왔다. 과거의 대기과 수질 등 매체별 관리 중심의 환경정책에서, 국민건강에 중점을 둔 환경보건정책으로 바뀌고 있다. 특히, 공단지역 주민들의 건강 피해를 우려하여, 공단지역에 거주하는 주민들을 대상으로 유해환경오염물질의 노출실태와 건강영향을 평가 및 감시해야 할 필요성이 제기되었고, 2003년부터 우리나라 주요 산업단지인 울산, 포항, 광양, 시화·반월 등을 대상으로 20년간의 장기 추적 조사를 목적으로 하는 연구사업이 시작하였다.⁶⁻⁹⁾ 이와 더불어 2006년엔 ‘환경보건 10개년 종합계획(2006년~2015년)’이 세워져 진행되었으며, 이 계획은 2008년 ‘환경보건법’이 제정됨에 따라 법정 종합계획으로서의 재수립이 추진되었고, 2015년에는 ‘수정계획(2011년~2020년)’이 발표되었다.¹⁰⁻¹²⁾

당진과 서산 등 충남 서북부지역에도 화력발전소, 제철단지, 석유화학단지과 같은 대규모 산업단지가 위치하고 있으며, 다양한 환경오염물질을 다량으로 배출하고 있다. 이 지역의 주변에는 일반 주민들이 거주하는 주거지역이 인접해 있으며, 해륙풍에 의해 산업단지에서 배출된 환경오염물질이 주거지역으로 이동하기 쉬운 지리적 요건을 보이고 있다.

충청남도는 지난 2013년도부터 충남 서북부 환경취약 지역의 주민건강에 대한 우려와 건강관리를 위한 과학적 근거 마련을 위해 ‘충청남도 환경오염 취약지역 주민건강영향 조사’를 실시해 왔다. 이 조사

의 목적은 노출 가능 오염물질에 의해 체내에 축적되는 물질에 대한 ‘생물학적 노출지표’의 모니터링을 통하여, 체내노출, 생화학적 영향 및 생물학적 건강영향을 평가하고, 최종적으로 이들의 건강장해와 질환 등을 조사함으로써, 오염에 의한 관련 영향을 파악하는 데 있으며, 환경오염에 대한 적절한 관리대책을 마련하고, 효과적인 장기적 대응전략을 세우는 데 필요한 과학적 근거를 제시하고자 함에 있다. 특히 화력발전소, 제철단지, 석유화학단지에서 배출될 가능성이 높은 납, 수은, 카드뮴, 크롬 등 중금속들의 영향에 중점을 두고 있다. 납의 경우, 빈혈을 발생시킬 수 있으며,^{13,14)} 뇌병증을 일으키고,¹⁵⁾ 신장기능을 손상시킬 수 있으며,^{16,17)} 수은의 경우 가장 민감하게 영향을 받는 장기는 중추신경계로, 수은 노출 수 발생하는 신경학적 장애는 지속적으로 진행하게 되고, 폭로기간과 양에 따라 심해지고 비가역적일 수도 있으며¹⁸⁾ 신중후군¹⁹⁾ 등을 일으킬 수 있다. 카드뮴은 신세뇨관 손상²⁰⁾ 일으키고 근골격계에 미치는 영향이 크며, 폐암과 신장암 그리고 전립선암의 발생과 관계가 있다.²¹⁾ 크롬은 비중격천공과²²⁾ 호흡기계 암²³⁾ 일으킨다.

중금속이 인체에 노출될 수 있는 경로는 매우 다양하고, 흡수 및 대사 등이 개인에 따라 다르며, 중금속의 지속적인 노출로 인한 생체내의 축적을 통해 건강에 영향을 미치게 된다. 따라서 인체의 중금속 노출 평가를 위해 생물학적 노출지표를 이용하여 보다 정확한 노출정도를 예측하고 위험도를 평가하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 2013년도부터 2015년까지 충청남도 내의 화력발전소, 제철단지, 석유화학단지 인근에 거주하는 주민들을 대상으로, 중금속에 대한 생물학적 노출지표인 혈중 납, 혈중 카드뮴, 요중 수은, 요중 크롬의 농도를 분석하여, 주민들의 중금속 노출 실태를 파악하고, 비교지역 주민들과의 비교를 통해 취약지역 주민들의 건강피해 예방을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 측정 대상 및 기간

총 3차년도에 걸쳐서 진행되었으며, 1차년도 조사는 2013년 4월 1일부터 12월 31일까지, 2차년도 조

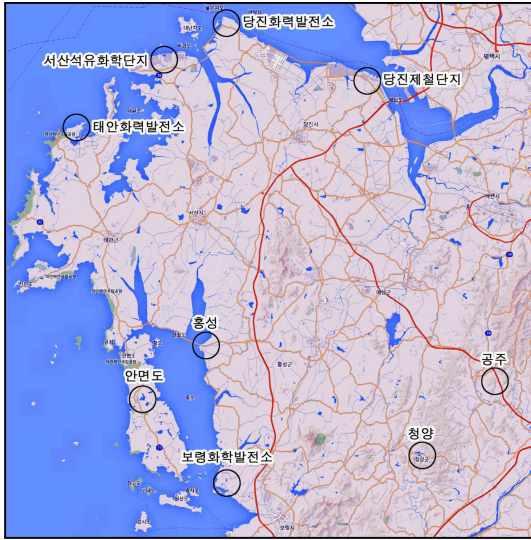


Fig. 1. Chungnam industrial complex areas and control regions.

사는 2014년 5월 23일부터 12월 31일까지, 그리고 3차년도 조사는 2015년 6월 5일부터 12월 31일까지 진행되었다. 취약지역과 비교지역으로 나누어 진행되었으며, 발전소 3곳, 제철단지 1곳, 석유단지 1곳을 취약지역으로 선정하였고, 비교지역은 취약지역으로부터 20 km~50 km 이상 떨어진 농촌지역 4곳을 선정하였다. 취약지역의 경우, 당진 화력발전소(2개 마을) 51명, 보령 화력발전소(8개 마을) 71명, 태안 화력발전소(3개 마을) 79명, 당진 제철단지(9개 마을) 266명, 서산 석유단지(6개 마을) 92명을 대상으로 하였으며, 비교지역의 경우 청양(5개 마을) 83명, 홍성(1개 마을) 56명, 공주(11개 마을) 119명, 안면도(6개 마을) 89명을 대상으로 하여, 총 9개 지역 51개 마을에서 실시되었고, 취약지역은 559명, 비교지역은 347명, 총 906명을 대상으로 하였다(Fig. 1). 본 연구는 기관생명윤리위원회의 승인을 받았으며 (DKUH 2013-10-005), 모든 대상자들에게 사전동의 (informed consent)를 받고 진행되었다.

2. 측정 및 분석 방법

실문지를 통하여 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 생선 섭취 등의 인구학적 특성과 생활습관을 조사하였으며, 중금속은 혈중 납, 혈중 카드뮴, 요중 수은, 요중 크롬을 측정 대상으로 하였다.

모든 생체시료는 51th G-EQUAS(THE GERMAN EXTERNAL QUALITY ASSESSMENT SCHEME For Analyses in Biological Materials)를 통해 각 항목별 정확도(Accuracy)와 정밀도(Precision)를 분석하여 분석 정도관리를 시행하였다.

혈액 시료는 항응고제(EDTA)가 포함되어 있는 혈액채취용기에 채취 한 후 밀봉하여 분석할 때까지 -20°C 로 동결 보관하였으며, 측정장비는 흑연로 원자흡광 광도계(GF-AAS, AAnalyst 600, Perkin Elmer, USA)를 사용하였다. 요중 시료 역시 분석할 때까지 -20°C 로 동결 보관하였으며, 측정장비는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, ELAN DRC-II, Perkin Elmer, USA)를 사용하였다. 농도 분석 과정은 표준용액과 1% 질산을 사용하여 만들어진 보정용 표준용액을 가지고 표준물첨가법을 이용하여 흡광도를 측정하였고, 각 물질에 해당되는 흡광도와 보정용 표준용액의 농도 사이에서 발생된 상관성을 구하여 검정곡선을 작성하였다.

3. 통계 분석

인구학적 특성과 생활습관은 기술통계를 통해 빈도와 분포를 파악하였으며, 카이제곱검정(Chi-square test)을 이용하여 취약지역과 비교지역을 비교하였다. 체내 중금속 측정 결과 LOD(limit of detection) 미만의 결과를 나타낸 대상자는 분석에서 제외하였고, 906명의 대상자는 모두 LOD 이상의 수치를 보인 대상자들이다. 혈중 납, 혈중 카드뮴, 요중 수은, 요중 크롬은 산술평균값과 기하평균값을 구하였으며, 독립표본 t검정(independent t-test)을 통해 취약지역과 비교지역을 비교하였고, 일원배치 분산분석(one way ANOVA)과 사후검정(Tukey test)을 통해 발전단지, 제철단지, 석유화학단지 각각을 비교지역과 비교하였다.

선형회귀분석(Linear regression analysis)을 통해 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 생선섭취 정도를 보정하여, beta-coefficient 값과 standard error 값을 구하여, 취약지역과 비교지역을 비교하였고, 발전단지, 제철단지, 석유화학단지 각각을 비교지역과 비교하였다.

혈중 카드뮴의 경우 근로자건강진단 실무지침에서 제시한 일반인 기준치($2\ \mu\text{g/L}$)를 기준으로²⁴⁾ 기준치 미만인 그룹과 기준치 이상인 그룹으로 나누어 카이제곱 검정을 통해 비교하였으며, 로지스틱 회귀분석

Table 1. General characteristics of the study subjects

Characteristics	Near by industrial complex area								Not near by industrial complex area (n=347)		NICA vs NNICA p-value*
	Thermoelectric Power Plant (n=201)		Steel Mill (n=266)		Petrochemical Industries (n=92)		Total (n=559)				
Sex	Male	99 (49.3)	129 (48.5)	33 (35.9)	261 (46.7)	185 (53.3)			0.053		
	Female	102 (50.7)	137 (51.5)	59 (64.1)	298 (53.3)	162 (46.7)					
Age	Mean±SD	66.3±11.1	64.2±10.3	60.4±11.7	64.4±11.0	64.5±9.6			0.007		
	<50	17 (8.5)	25 (9.4)	20 (21.7)	62 (11.1)	20 (5.8)					
	50-59	37 (18.4)	57 (21.4)	27 (29.3)	121 (21.6)	92 (26.5)					
	60-69	54 (26.9)	93 (35.0)	23 (25.0)	170 (30.4)	128 (36.9)					
	70-79	68 (33.8)	77 (28.9)	15 (16.3)	160 (28.6)	86 (24.8)					
	≥80	25 (12.4)	14 (5.3)	7 (7.6)	46 (8.2)	21 (6.1)					
Smoking	Non smoker	116 (58.0)	190 (71.4)	73 (79.3)	379 (67.9)	215 (62.3)			0.208		
	Past smoker	56 (28.0)	32 (12.0)	7 (7.6)	95 (17.0)	72 (20.9)					
	Current Smoker	28 (14.0)	44 (16.5)	12 (13.0)	84 (15.1)	58 (16.8)					
Alcohol	Non drinker	91 (45.7)	153 (57.5)	45 (48.9)	289 (51.8)	155 (44.9)			0.052		
	Past drinker	34 (17.1)	21 (7.9)	2 (2.2)	57 (10.2)	31 (9.0)					
	Current drinker	74 (37.2)	92 (34.6)	45 (48.9)	211 (37.9)	159 (46.1)					
Fish intake frequency	≤1 per a week	72 (36.4)	161 (60.8)	43 (46.7)	276 (49.7)	213 (61.9)			<0.001		
	≥2 per a week	126 (63.6)	104 (39.2)	49 (53.3)	279 (50.3)	131 (38.1)					

* ; Calculated by Chi-square test

Values are expressed as a number, percentage or mean±SD.

Numbers may not sum to total due to missing information.

Definition of abbreviation : NICA = Near by industrial complex area, NNICA = Not near by industrial complex area

(Logistic Regression)을 통해 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 생선섭취정도를 보정하여 비교지역에 대한 각 취약지역의 비차비(odds ratio)를 구하여 비교하였다.

추가로, 각 산업단지과 거주지 간의 거리에 따른 체내 중금속 농도를 살피기 위해, 산업단지로부터 1 km, 2 km를 기준으로 근거리 거주민과 원거리 거주민의 체내 중금속 농도를 비교하였다.

III. 결 과

대상자 중 취약지역은 남성 261명(46.7%), 여성 298명(53.3%), 비교지역은 남성 185명(53.3%), 여성 162명(46.7%)이었다(p=0.053). 연령은 취약지역의 평균이 64.4세(±11.0세)였고, 비교지역은 64.5세(±9.6세)였으며 유의한 차이를 보였다(p=0.007). 흡연상태의 경우 비흡연자가 594명(65.8%), 과거 흡연자가 167

명(18.5%), 현재 흡연자는 142명(15.7%)이었으며, 취약지역과 비교지역간의 분포상 유의한 차이는 없었다(p=0.208). 음주상태는 비음주자가 444명(49.2%), 과거 음주자가 88명(9.8%), 현재 음주자는 370명(41.0%)이었고, 취약지역과 비교지역간의 유의한 차이는 보이지 않았다(p=0.052). 생선섭취의 경우 ‘주 1회 이하’ 섭취군과 ‘주 2회 이상’ 섭취군으로 분류하였으며, 489명(54.4%)가 주 1회 이하의 빈도로 생선섭취를 하고 있었고, 410명(45.6%)이 주 2회 이상의 빈도로 생선섭취를 하고 있었다. 취약지역의 경우 두 그룹이 각각 276명(49.7%), 279명(50.3%)이었으며, 비교지역은 두 그룹이 각각 213명(61.9%), 131명(38.1%)으로 나타나 취약지역과 비교지역간의 유의한 차이를 보였다(p<0.001)(Table 1).

혈중과 요중 시료에서의 중금속 검출율은 발전단지가 99.0%, 제철단지가 94.7%, 석유화학단지가

Table 2. Distribution of concentration for heavy metals

		Near by industrial complex area				Not near by industrial complex area	NICA vs NNICA p-value*
		Thermoelectric Power Plant	Steel Mill	Petrochemical Industries	Total		
Blood Lead (µg/dL)	Mean±SD	(n=201) 2.48±0.97	(n=266) 2.49±0.94	(n=92) 2.46±0.78	(n=559) 2.48±0.93	(n=347) 2.44±1.02	0.159
	GM(95% CI)	2.33(2.22-2.44)	2.32(2.22-2.43)	2.34(2.19-2.50)	2.33(2.26-2.40)	2.24(2.15-2.34)	
Blood Cadmium (µg/L)	Mean±SD	(n=201) 2.04±1.09	(n=266) 1.63±0.72	(n=92) 2.16±0.99	(n=559) 1.86±0.94	(n=347) 1.41±0.77	<0.001
	GM(95% CI)	1.77(1.65-1.91) ^a	1.48(1.40-1.56) ^b	1.97(1.81-2.15) ^c	1.65(1.59-1.72)	1.24(1.17-1.31) ^{abc}	
Urine Mercury (µg/g Cr)	Mean±SD	(n=189) 0.72±0.70	(n=126) 0.51±0.42	(n=92) 0.55±0.42	(n=407) 0.62±0.58	(n=314) 0.46±0.39	<0.001
	GM(95% CI)	0.49(0.43-0.56) ^a	0.37(0.31-0.43)	0.45(0.40-0.51) ^c	0.44(0.41-0.48)	0.35(0.32-0.38) ^{ac}	
Urine Chromium (µg/g Cr)	Mean±SD	(n=51) 1.04±1.26	(n=264) 1.08±1.65	(n=92) 2.24±4.77	(n=407) 1.34±2.70	(n=139) 0.97±1.41	0.093?
	GM(95% CI)	0.65(0.50-0.84)	0.64(0.57-0.71)	0.88(0.68-1.14) ^c	0.69(0.62-0.76)	0.58(0.50-0.68) ^c	

* ; Calculated by independent t-test

^a indicates statistically significant between Thermoelectric Power Plant and NNICA, ^b indicates statistically significant between Steel Mill and NNICA,

^c indicates statistically significant between Petrochemical Industries and NNICA (one way ANOVA with Tukey test)

Definition of abbreviation : NICA = Near by industrial complex area, NNICA = Not near by industrial complex area, SD = standard deviation

GM = Geometric mean, 95% CI = 95 percentile confidence interval, Cr = Creatinine

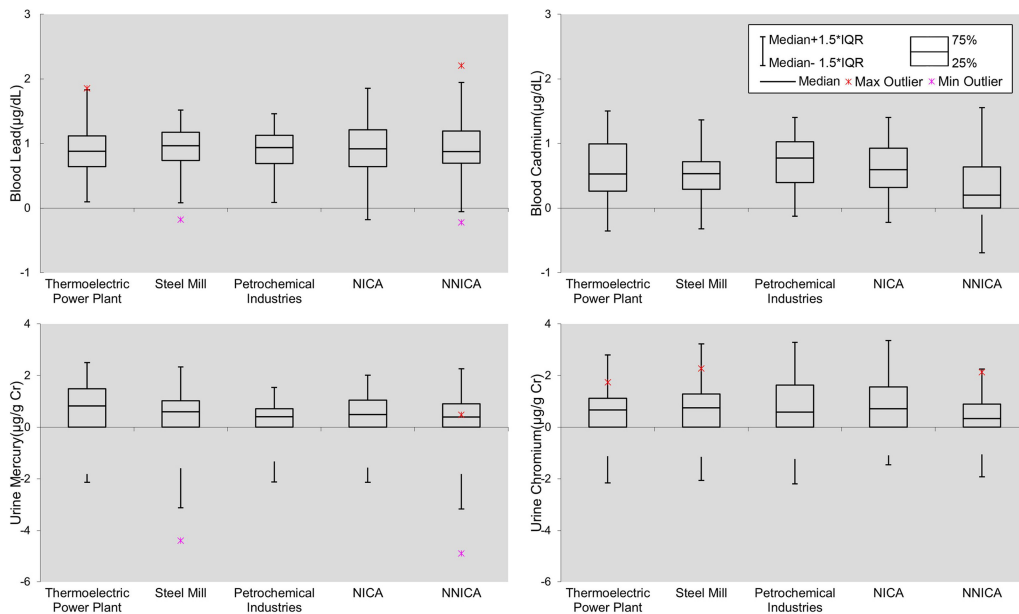


Fig. 2. Distribution of concentration for heavy metals, box plot in logarithmic scale

Definition of abbreviation ; NICA = Near by industrial complex area, NNICA = Not near by industrial complex area, IQR = Interquartile range, Max = maximum, Min = minimum

Table 3. Beta coefficients of concentrations for heavy metals according to areas

		crude			adjusted*		
		β	SE	p-value	β	SE	p-value
TPP vs NNICA	Blood Lead($\mu\text{g}/\text{dL}$)	0.037	0.035	0.294	0.051	0.033	0.115
	Blood Cadmium($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.361	0.046	0.000	0.333	0.045	<0.001
	Urine Mercury($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.352	0.078	0.000	0.375	0.077	<0.001
	Urine Chromium($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.107	0.151	0.480	0.077	0.156	0.624
SM vs NNICA	Blood Lead($\mu\text{g}/\text{dL}$)	0.035	0.033	0.279	0.060	0.031	0.055
	Blood Cadmium($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.177	0.040	0.000	0.180	0.038	<0.001
	Urine Mercury($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.062	0.090	0.490	0.055	0.087	0.528
	Urine Chromium($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.092	0.098	0.349	0.093	0.098	0.344
PI vs NNICA	Blood Lead($\mu\text{g}/\text{dL}$)	0.042	0.047	0.372	0.086	0.045	0.055
	Blood Cadmium($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.467	0.058	0.000	0.456	0.057	<0.001
	Urine Mercury($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.275	0.092	0.003	0.206	0.092	0.026
	Urine Chromium($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.413	0.144	0.005	0.433	0.150	0.004
NICA vs NNICA	Blood Lead($\mu\text{g}/\text{dL}$)	0.037	0.026	0.159	0.061	0.024	0.013
	Blood Cadmium($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.291	0.034	0.000	0.283	0.033	<0.001
	Urine Mercury($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.245	0.063	0.000	0.246	0.062	<0.001
	Urine Chromium($\mu\text{g}/\text{g Cr}$)	0.167	0.099	0.092	0.160	0.098	0.103

* ; β coefficients and Standard errors were estimated by linear regression analysis adjusted for sex, age, smoking, alcohol drinking and fish intake frequency

Definition of abbreviation ; TPP=Thermoelectric Power Plant, SM=Steel Mill, PI=Petrochemical Industries, NICA = Near by industrial complex area, NNICA = Not near by industrial complex area, Cr = Creatinine

Table 4. Distribution of groups according to blood cadmium level and odds ratios and 95% confidence intervals of the regions

	Group1*	Group2 [†]	p-value [‡]	crude		adjusted [§]	
				OR	95% CI	OR	95%Ci
NNICA	285 (82.1)	62 (17.9)	<0.001	1.00	reference	1.00	reference
NICA	362 (64.8)	197 (35.2)		2.50	1.81-3.46	2.56	1.83-3.58
NNICA	285 (82.1)	62 (17.9)	<0.001	1.00	reference	1.00	reference
TPP	122 (60.7)	79 (39.3)		2.98	2.01-4.42	3.11	2.06-4.71
NNICA	285 (82.1)	62 (17.9)	0.002	1.00	reference	1.00	reference
SM	191 (71.8)	75 (28.2)		1.81	1.23-2.65	1.78	1.19-2.65
NNICA	285 (82.1)	62 (17.9)	<0.001	1.00	reference	1.00	reference
PI	49 (53.3)	43 (46.7)		4.03	2.46-6.61	4.07	2.40-6.89

* ; Group 1 = Blood Cadmium <2.0 $\mu\text{g}/\text{L}$, [†] ; Group 2 = Blood Cadmium \geq 2.0 $\mu\text{g}/\text{L}$

[‡] ; Calculated by chi-square

[§] ; Odds ratios and 95% confidence intervals were estimated by logistic regression analysis adjusted for sex, age, smoking, alcohol drinking and fish intake frequency

Definition of abbreviation ; TPP=Thermoelectric Power Plant, SM=Steel Mill, PI=Petrochemical Industries, NICA = Near by industrial complex area, NNICA = Not near by industrial complex area

97.9%였다. 혈중과 요중 중금속 농도 분석 결과, 혈중 납의 기하평균값은 취약지역이 2.33 $\mu\text{g}/\text{dL}$, 비교지역이 2.24 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 였으며 유의한 차이를 보이지 않

았다. 혈중 카드뮴의 기하평균값은 취약지역이 1.65 $\mu\text{g}/\text{L}$, 비교지역이 1.24 $\mu\text{g}/\text{L}$ 였으며 유의한 차이를 보였고($p<0.001$), 취약지역별로도 비교지역과 유의한

차이를 보였다. 요중 수은의 기하평균값은 취약지역이 $0.44 \mu\text{g/g Cr}$, 비교지역이 $0.35 \mu\text{g/g Cr}$ 였으며 유의한 차이를 보였고($p < 0.001$), 취약지역별로는 발전단지와 석유화학단지가 비교지역과 유의한 차이를 보였다. 요중 크롬의 기하평균값은 취약지역이 $0.69 \mu\text{g/g Cr}$, 비교지역이 $0.58 \mu\text{g/g Cr}$ 였으며 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 2, Fig. 2).

각 중금속 수치들을 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 생선섭취빈도에 대해 보정한 결과, 혈중 납, 혈중 카드뮴, 요중 수은이 취약지역에서 비교지역에 비해 유의하게 높았다. 취약지역별로 나누어 분석한 결과, 발전단지는 혈중 카드뮴, 요중 수은이 비교지역에 비해 유의하게 높았고, 제철단지는 혈중 카드뮴만 비교지역에 비해 유의하게 높았으며($p < 0.001$), 석유화학단지 역시 혈중 카드뮴만 비교지역에 비해 유의하게 높았다($p < 0.001$)(Table 3).

근로자건강진단 실무지침에서 제시한 혈중 카드뮴의 일반인 기준치($2 \mu\text{g/L}$)를 기준으로 나눈 그룹간의 비교에서는 취약지역과 비교지역이 유의한 차이를 보였고($p < 0.001$), 취약지역별로도 유의한 차이를 보였다. 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 생선섭취빈도에 대해 보정한 결과, 비교지역과 취약지역의 비차비는 $2.56(95\% \text{ CI}=1.83\text{-}3.58)$ 이었고, 발전단지와의 비차비는 $3.11(95\% \text{ CI}=2.06\text{-}4.71)$, 제철단지와의 비차비는 $1.78(95\% \text{ CI}=1.19\text{-}2.65)$, 석유화학단지와의 비차비는 $4.07(95\% \text{ CI}=2.40\text{-}6.89)$ 로 모두 유의한 결과를 나타냈다(Table 4).

각 산업단지를 기준으로 1 km 밖에 거주하는 주민들보다 1 km 미만의 거리에 거주하는 주민들에서 제철단지 혈중 납($p=0.003$), 제철단지 혈중 카드뮴($p=0.034$)과 석유화학단지 요중 수은($p=0.005$)이 유의하게 높았다. 2 km를 기준으로 한 경우, 발전단지 요중 크롬($p=0.036$)과 석유화학단지 요중 수은($p=0.012$)이 유의하게 높았다.

IV. 고 찰

비교적 짧은 기간동안 급속한 산업화가 이루어지는 동안, 각종 제품들의 원료를 제공하는 석유화학단지와 제철단지, 그리고 전기 공급을 위한 발전소 건설은 매우 중요한 역할을 담당해왔다.²⁵⁾ 하지만, 이러한 산업단지로 인해 발생하는 환경오염 문제들

은 인근에 거주하는 주민들의 건강에도 큰 영향을 끼쳐왔고, 이러한 주민들의 건강은 중요한 문제로 부각되었다.

환경오염으로 인한 건강문제를 파악하기 위해서는 단기노출과 장기노출 모두가 고려되어야 하지만, 과거 우리나라의 연구들은 예산 등의 문제로 인해 단기간에 그치는 경우가 많았다.^{26,27)} 외국의 경우 코호트 구축을 통한 장기간의 연구들이 수행되고 있으며,²⁸⁾ 독일의 GerES(Germany Environmental Survey), 미국의 NHANES(National Health and Nutrition Examination Survey), 유럽의 EXPOLIS(Air Pollution Exposure Distributions of Adult Urban Populations in Europe) 등 전국민을 대상으로 한 연구들이 체계적으로 진행되고 있다.²⁹⁻³¹⁾ 우리나라도 환경오염의 장기노출에 대한 체계적 연구를 위해, 2003년부터 주요 울산, 포항, 광양, 시화·반월 등의 주요 산업단지를 중심으로 20년 단위의 연구들이 수행되기 시작했다.⁶⁻⁹⁾ 충청남도 지역의 산업단지 인근의 주민건강에 대한 평가는 다른 지역들에 비해 시작이 늦었지만, 2013년부터 꾸준히 진행되어 3차년도에 걸쳐 조사가 진행되어 왔다.^{32,33)}

본 연구결과를 살펴보면, 혈중 납의 기하평균값은 취약지역이 $2.33 \mu\text{g/dL}$ 로 비교지역의 $2.24 \mu\text{g/dL}$ 와 유의한 차이를 보이지 않았다. 취약지역 60세 이상의 기하평균값은 $2.31 \mu\text{g/dL}$ 로, 우리나라 국민건강영양조사 결과 중 만 60세 이상의 혈중 납 기하평균값 $2.32 \mu\text{g/dL}$ 과 비슷한 결과를 보여, 취약지역 주민들의 혈중 납 농도가 비교지역이나, 우리나라 일반 인구집단에 비해 높지 않은 것으로 나타났다.³⁴⁾ 하지만, 미국의 3차 국민건강영양조사의 대상자들을 분석한 연구에서 낮은 혈중 납 농도에서도 납에 의한 신장기능의 저하가 발생할 수 있다는 결과를 발표하였고,³⁵⁾ 납은 사구체여과율을 감소시켜 수축기 혈압을 상승시킬 수 있다고 알려져 있다.³⁶⁾ 따라서 낮은 농도의 납 노출에 대한 관리와 연구가 지속적으로 필요하다.

혈중 카드뮴의 경우, 취약지역의 기하평균값이 $1.65 \mu\text{g/L}$ 로 비교지역의 $1.24 \mu\text{g/L}$ 보다 유의하게 높았으며, 발전단지, 제철단지, 석유화학단지 모두 비교지역에 비해 유의하게 높았다. 이처럼 취약지역 전체, 그리고 취약지역별로 비교지역과 유의하게 명확한 차이를 보이는 혈중 카드뮴에 대해, 근로자건강

진단 실무지침에서 제시하는 일반인 기준치($2 \mu\text{g/L}$)를 기준으로 나누어 분석을 실시하였다. 취약지역에서 기준치 이상인 그룹의 비율이 유의하게 높은 결과를 나타냈으며($\text{OR}=2.56$, $95\% \text{ CI}=1.83\text{-}3.58$), 취약지역별로 나누어 살펴본 결과도 발전단지, 제철단지, 석유화학단지 모두에서 유의하게 높았다. 우리나라 국민건강영양조사 결과, 60세 이상의 혈중 카드뮴 기하평균값은 $1.28 \mu\text{g/L}$ 로 비교지역 60세 이상의 $1.24 \mu\text{g/L}$ 와 큰 차이가 없었지만, 취약지역 60세 이상의 혈중 카드뮴 기하평균값은 $1.75 \mu\text{g/L}$ 로 큰 차이를 보였다.³⁴⁾ 카드뮴은 인체에 흡수되어 주로 신장에 축적되며, 카드뮴의 제거는, 초기 급속한 제거 단계(대략 100일의 반감기) 이후 느린 제거 단계(대략 10년의 반감기)의 2단계로 이루어진다.³⁷⁾ 이처럼 느린 반감기를 가진 카드뮴의 혈중 농도에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 흡연인데, 흡연력을 보정했음에도 취약지역의 농도가 유의하게 높고, 우리나라 인구집단과의 비교에서도 월등하게 높다는 점은, 취약지역 주민들의 카드뮴 노출이 심각한 상태임을 의미한다.

요중 수은 역시, 취약지역의 농도($0.44 \mu\text{g/g Cr}$)가 비교지역의 농도($0.35 \mu\text{g/g Cr}$)에 비해 유의하게 높은 것으로 나타났으며, 발전단지, 석유화학단지에서의 농도가 비교지역보다 높았다. 요중 크롬은 취약지역과 비교지역 간에 유의한 차이를 보이지 않았으나, 석유화학단지에서만 비교지역보다 유의하게 높았다($p=0.004$).

본 연구에서 체내 중금속 농도에 영향을 주는 나이, 흡연, 음주, 생선섭취를 보정했음에도 취약지역 주민들의 체내 중금속 농도가 비교지역 주민들에 비해 전체적으로 높은 수치를 보이고 있으며, 이는 산업단지 인근에 거주하는 주민들이 산업단지에서 배출되는 중금속에 노출됨으로 인한 것으로 보인다.^{38,39)} 산업단지와 거주지역간의 거리에 따른 차이를 살펴본 결과, 거리에 따른 차이는 유의한 결과를 나타냈다. 본 연구의 2차년도 조사에서 실시한 대기 중 중금속 농도 측정 결과, 발전단지와 제철단지 그리고 석유화학단지 주변의 대기 중 총중금속 농도(각각 $35.870 \mu\text{g/day/cm}^2$, $68.404 \mu\text{g/day/cm}^2$, $47.995 \mu\text{g/day/cm}^2$)가 비교지역($16.392 \mu\text{g/day/cm}^2$)에 비해 월등하게 높은 것으로 나타났다.³²⁾ 이처럼, 산업단지와 가까울수록 체내와 대기의 중금속 농도가 높다는 점을 고

려할 때, 이곳에서 배출되는 중금속이 인근 주민들의 체내 중금속 농도에 영향을 주는 원인 중 하나일 수 있다.

또한 취약지역 내에서도 산업단지에 따라 체내 중금속 농도 수준의 차이가 있음을 확인할 수 있는데, 이는 산업단지별 특성과 중금속의 배출량과 배출경로 등에 기인한 것으로 보인다. 이러한 차이는 각 산업단지에서 배출되는 중금속에 대해 중금속 종류별, 배출경로별 측정과 평가를 통해 추후 확인이 필요하다. 현재 환경영향 평가시, 유해오염물질 배출량을 산정하는데 활용되는 배출계수가 국내의 문헌별로 차이가 존재하여 동일한 물질에 대해 다른 기준이 적용되고 있는 점을 고려할 때에, 이에 대한 명확한 기준 마련과 이를 적용한 배출량 평가가 우선시되어야 할 것이다.⁴⁰⁾

그러나 산업단지 인근 주민들을 조사한 모든 연구 결과에서 산업단지 인근 주민들의 체내 중금속 농도가 높게 나온 것은 아니다. 울산의 경우, 요중 수은이 취약지역($\text{GM } 1.68 \mu\text{g/g Cr}$)에서 비교지역($\text{GM } =2.30 \mu\text{g/g Cr}$)에 비해 낮은 농도를 나타냈으나, 요중 카드뮴은 취약지역($\text{GM}=0.83 \mu\text{g/g Cr}$)이 비교지역($\text{GM}=0.60 \mu\text{g/g Cr}$)에 비해 높은 농도를 나타냈다.⁶⁾ 광양만권의 경우, 요중수은은 취약지역($\text{GM}=0.78 \mu\text{g/g Cr}$)과 비교지역($\text{GM}=0.83 \mu\text{g/g Cr}$)이 큰 차이를 보이지 않았고, 요중 카드뮴은 취약지역($\text{GM}=1.15 \mu\text{g/g Cr}$)이 비교지역($\text{GM}=1.37 \mu\text{g/g Cr}$)에 비해 낮은 농도를 나타냈다.⁸⁾ 이는 체내 중금속 수치에 미치는 다른 요소들이 존재함을 의미하며, 단순히 거주 지역만을 변수로 고려하거나 중금속의 절대적 기준치만으로 판단할 수 없음을 말해준다. 세계보건기구(WHO)에서는 대기오염 물질에 대한 환경 기준치를 설정하였고, 보통 이 기준치보다 낮은 수준으로 노출될 때에는 인체에 건강장해가 일어나지 않을 것이라고 인식되어져 왔다. 그러나 실제로는 특별히 감수성이 높은 집단이 존재할 수 있고, 대기오염 물질은 한 가지가 아니며, 여러 다양한 화학물질들이 복합적으로 작용하여 인체에 영향을 미치고, 같은 물질이라 하더라도 노출의 경로가 다양하고 그 결과가 다를 수 있다. 따라서 측정된 대기오염 수준이 기준농도 미만이거나, 생체노출지표 값이 기준치 미만이라 해도 건강장해가 나타날 수 있다는 점을 간과해서는 안 된다.

이러한 점들을 고려할 때에, 조사지역과 비교지역 간의 단순한 차이를 보기 보다는 산업단지의 가동시기, 유해물질의 사용과 배출의 변화 등을 비롯한 과거와 현재의 환경에 대한 심도 있는 분석을 통해 관련성을 파악할 필요성이 있다. 이를 위해선, 주민들의 생물학적 노출지표의 측정뿐만 아니라, 각 산업단지에서 배출되는 유해물질에 대한 측정과 평가, 그리고 거주지역의 대기 및 토양, 수질 평가 등이 함께 이루어져야 하며, 장기간에 걸쳐 체계적인 조사 결과의 축적이 요구된다.

본 연구는 충청남도 내의 환경적 취약지역인 화력 발전단지, 제철단지, 석유화학단지를 중심으로 진행된 연구로써, 각 산업단지에서 배출되는 중금속들이 인근 주민들에게 미치는 영향을 살폈다는 의미가 있으나, 충청남도 지역의 면적과 지리적 요건 등을 고려할 때에 대조군으로 선정할 비교지역이 산업단지들에 의한 영향에서 완전히 배제되었다고 할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 추후 연구에서는 대조군으로 선정할 지역이 가질 수 있는 환경적 영향 등에 대한 고려가 더욱 심층적으로 이루어져야 하며, 코호트 구축을 통하여 취약지역 주민들의 생물학적 노출지표와 건강영향에 대한 지속적이고 체계적인 관리와 모니터링이 이루어져야 한다.

V. 결 론

본 연구는 2013년부터 2015년까지 3차년에 걸쳐서 시행되었으며, 충남지역 발전단지와 제철단지, 석유화학단지 그리고 비교지역의 주민들 906명의 혈중 납, 혈중 카드뮴, 요중 수은, 요중 크롬의 농도를 측정하였고, 그 결과는 다음과 같다.

혈중 납의 기하평균값은 취약지역이 2.33 $\mu\text{g}/\text{dL}$, 비교지역이 2.24 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 였으며 유의한 차이를 보이지 않았고, 혈중 카드뮴은 취약지역이 1.65 $\mu\text{g}/\text{L}$, 비교지역이 1.24 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 유의하게 높았다($p < 0.001$). 요중 수은은 취약지역이 0.44 $\mu\text{g}/\text{g Cr}$, 비교지역이 0.35 $\mu\text{g}/\text{g Cr}$ 으로 유의한 차이를 보였고($p < 0.001$), 요중 크롬은 취약지역이 0.69 $\mu\text{g}/\text{g Cr}$, 비교지역이 0.58 $\mu\text{g}/\text{g Cr}$ 였으며 유의한 차이를 보이지 않았다.

각 중금속 수치들을 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 생선섭취빈도에 대해 보정한 결과, 혈중 납, 혈중 카드뮴, 요중 수은이 취약지역에서 비교지역에 비해 유

의하게 높았다.

혈중 카드뮴의 일반인 기준치(2 $\mu\text{g}/\text{L}$)를 기준으로 하는 그룹간의 비교에서는 취약지역과 비교지역이 유의한 차이를 보였다($p < 0.001$). 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 생선섭취빈도에 대해 보정한 결과, 비교지역과 취약지역의 비차비가 2.56(95% CI=1.83-3.58)이었고, 발전단지와의 비차비는 3.11(95% CI=2.06-4.71), 제철단지와의 비차비는 1.78(95% CI=1.19-2.65), 석유화학단지와의 비차비는 4.07(95% CI=2.40-6.89)로 모두 유의한 결과를 나타냈다.

본 연구에서 취약지역 주민들의 체내 중금속 농도가 비교지역 주민들에 비해 전체적으로 높은 수치를 보이고 있으며, 이는 산업단지 인근에 거주하는 주민들이 산업단지에서 배출되는 중금속에 노출됨으로 인한 것으로 보이며, 이에 대한 추가적인 연구와 대책수립이 요구된다. 본 연구의 결과는 충남지역 산업단지 인근 주민들의 중금속 노출로 인한 체내 중금속 농도를 제시함으로써, 해당 주민들의 질병 및 장애예방을 위한 중요한 데이터로 활용될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 충청남도의 연구지원에 의하여 수행되었습니다.

References

1. Jung JH. A study on reaction characteristic of SO₂/NO_x simultaneous removal for alkali absorbent/additive in FGD and waste incinerator process. [Dissertation]. [Pusan]: Pusan National University; 1999.
2. Jung JH. Effects of air pollutants on the health/environmental risk assessment and weathering of stone cultural properties in Gyeongju and its vicinities. [Dissertation]. [Daegu]: Daegu Haany University; 2008.
3. Choi BW, Jung JH, Choi WJ, Jeon CJ, Shon BH. Distribution characteristics of ambient heavy metals based on the pollution source and their carcinogenic risk assessment in Ulsan, Korea. *Korean Journal of Environmental Health*. 2006; 32(5): 522-531.
4. Choi BW, Jung JH, Choi WJ, Shon BH, Oh KJ.

- Characteristics of the distribution of high ambient air pollutants with sources and weather condition in Ulsan. *Korean Journal of Environmental Health*. 2006; 32(4): 324-335.
5. Jung WS. A study on the medium-range transport of air pollutants associated with regional-scale atmospheric circulation system. [Dissertation]. [Pusan]: Pusan National University; 2001
 6. National Institute of Environmental Research. Monitoring study on exposure level and biomarkers of environmental pollutants (Ulsan, 7th year); 2010
 7. National Institute of Environmental Research. Monitoring study on exposure level and health effects of environmental pollutants (Sihwa-Panwol, 5th year); 2010
 8. National Institute of Environmental Research. Monitoring study on exposure level and biomarkers of environmental pollutants (Kwangyang, 4th year); 2010
 9. National Institute of Environmental Research. Monitoring study on exposure level and biomarkers of environmental pollutants (Pohang, 4th year); 2009
 10. Ministry of Environment. 10 years of Environmental Health Master Plan (2006~2015); 2006
 11. Environmental Health Act. [Enforcement Date 22. Mar, 2009.] [Act No.8946, 21. Mar, 2008.]
 12. Ministry of Environment. 10 years of Environmental Health Master Plan(2011~2020); 2015.
 13. Gurer-Orhan H, Sabir HU, Ozgunes H. Correlation between clinical indicators of lead poisoning and oxidative stress parameters in controls and lead-exposed workers. *Toxicology*. 2004; 195: 147-154.
 14. Schuhmacher M, Paternain JL, Domingo JL, et al. An assessment of some biomonitors indicative of occupational exposure to lead. *Trace Elem Electrolytes*. 1997; 14(3): 145-149.
 15. Kumar S, Jain S, Aggarwal CS, et al. Encephalopathy due to inorganic lead exposure in an adult. *Jpn J Med*. 1987; 26: 253-254.
 16. Diamond GL. Risk assessment of nephrotoxic metals. In: Tarloff J, Lash L, eds. *The toxicology of the kidney*. London: CRC Press; 2005. p.1099-1132.
 17. Loghman-Adham M. Renal effects of environmental and occupational lead exposure. *Environ Health Perspect*. 1997; 105: 928-939.
 18. Bluhm RE, Bobbitt RG, Welch LW, et al. Elemental mercury vapour toxicity, treatment, and prognosis after acute, intensive exposure in chloralkali plant workers: Part I. History, neuropsychological findings and chelator effects. *Hum Exp Toxicol*. 1992; 11(3): 201-210.
 19. Friberg L, Hammarstrom S, Nystrom A. Kidney injury after chronic exposure to inorganic mercury. *Arch Ind Hyg Occup Med*. 1953; 8: 149-153.
 20. NIOSH. Health hazard evaluation report HETA 80-096-1359, Eureka Company, Bloomington, IL. Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services, National Institute of Occupational Safety and Health. PB85163574.
 21. IARC. Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Man. Geneva: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, 100C-8.
 22. Rumack BH POISINDEX(R) Information System Micromedex, Inc., Englewood, CO, CCIS; 2012. P.154.
 23. IARC. Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Man. Geneva: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, 100C-9.
 24. Workers' health diagnostic practices. Korea Occupational Safety and Health Agency; 2015.
 25. Hong JS. Study on Korea Petrochemical Industry Complex and the construction of Yeocheo Petrochemical Industry. *Journal of business administration*. 1997; 10(2), 26-29.
 26. Cho YS, Lee JT, Son JY, Kim YS. A meta-analysis of air pollution in relation to daily mortality in seven major cities of Korea, 1998-2001. *Korean Journal of Environmental Health*. 2006; 32(4): 304-315.
 27. Yu SD, Cha JH, Kim DS, Lee JT. Effects of fine particles on pulmonary function of elementary school children in Ulsan. *Korean Journal of Environmental Health*. 2007; 33(5): 365-371.
 28. Dockery DW, Pope DA, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*. 1993; 329: 1753-1759.
 29. Schulz C, Conrad A, Becker K, Kolossa-Gehring M, Seiwert M, Seifert B. Twenty years of the German Environmental Survey (GerES) : Human biomonitoring - Temporal and Spatial (West Germany/ East Germany) differences in population exposure. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2007; 210: 271-297.
 30. Whitmore RW, Byron MZ, Clayton CA, Thomas KW, Zelton HS, Pellizzari ED, et al. Sampling design, response rates, and analysis weights for the National Human Exposure Assessment Survey (NHEXAS) in EPA Region 5. *Journal of Exposure*

- Analysis and Environmental Epidemiology*. 1999; 9: 369-380.
31. Jantunen MJ, Hanninen O, Katsouyanni K, Knopel H, Kuenzli N, Lebre E, et al. Air pollution exposure in European cities : the "EXPOLIS" study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 1998; 8: 495-518.
 32. The environmental health center of DKUH. Study on the Health Status of the Residents near areas vulnerable to Environmental pollution in Chungnam Province (1st year); 2013.
 33. The environmental health center of DKUH. Study on the Health Status of the Residents near areas vulnerable to Environmental pollution in Chungnam Province (2nd year); 2014.
 34. Ministry of Health and Welfare. Korean National Health and Nutrition Examination Survey(3rd year); 2012.
 35. Jeffrey JF, Ana NA, Maria TP, Eliseo G, Virginia MW, Susan LF. Blood Lead Level and Kidney Function in US Adolescents: The Third National Health and Nutrition Examination Survey. *Arch Intern Med*. 2010; 170(1): 75-82.
 36. Vaziri ND, Sica DA. Lead-induced hypertension: Role of oxidative stress. *Curr Hypertens Rep*. 2004; 6:314-320.
 37. Conklin AW, Skinner CS, Felten TL, et al. Clearance and distribution of intratracheally instilled vanadium-48 compounds in the rat. *Toxicol Lett*. 1982; 11: 199-203.
 38. Vupputuri S, Longnecker MP, Daniels JL, Guo X, Sandler DP. Blood mercury level and blood pressure among US women: results from the National Health and Nutrition Examination Survey 1999-2000. *Environ Res*. 2005; 97(2): 195-200
 39. Lee B, Ha J. The Effects of smoking and drinking on blood lead and cadmium levels: data from the fourth Korea National Health and Nutrition Examination Survey. *Korean J Occup Environ Med*. 2011; 23(1): 31-41.
 40. Basic study on Estimation of HAP Emission from Power Plants and Waste Incinerators for Environment impact assessment. Korea Environment institute; 2013.