

Original Article

화력발전소 영향권 주민 거주지의 이격 거리별 중금속 및 휘발성유기화합물 대사체 노출 농도 비교 분석

노지현¹ , 김병권^{1,2*} , 권정연¹ , 주현지² , 김나영² , 임현주² , 이승호^{1,2} , 유병철³ , 김수진⁴ , 홍영섭^{1,2}

¹동아대학교 의과대학 예방의학교실, ²부산광역시 환경보건센터, ³고신대학교 의과대학 예방의학교실, ⁴국립환경과학원 환경보건연구과

Comparative Analysis of Heavy Metal Exposure Concentrations and Volatile Organic Compound Metabolites among Residents in the Affected Area According to Residential Distance from a Coal-fired Power Plant

Jee Hyun Rho¹, Byoung-Gwon Kim^{1,2*}, Jung-Yeon Kwon¹, Hyunji Ju², Na-Young Kim², Hyoun Ju Lim², Seungho Lee^{1,2}, Byeng-Chul Yu³, Suejin Kim⁴, and Young-Seoub Hong^{1,2}

¹Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University, ²Environmental Health Center for Busan, Dong-A University, ³Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Kosin University, ⁴Environmental Health Research Department, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

Background: There are concerns about the health effects of various environmental pollution exposures among residents living near coal-fired power plants (CFPP).

Objectives: This study attempted to compare the concentrations of heavy metals in blood and urine and those of urinary volatile organic compound (VOC) metabolites according to the residential separation distance.

Methods: Participants in the study totaled 334 people who have lived for more than 10 years in areas within 10 km of a CFPP. The separation distance was analyzed in quartiles by dividing it into Q1 (88 people), Q2 (89 people), Q3 (89 people), and Q4 (68 people). We explained the purpose of this study to the participants and collected blood and urine after obtaining signatures on a participation agreement.

Results: The study participants were 102 males (30.5%) and 232 females (69.5%), with an average age of 71. The average length of residence and distance were 43.8 years and 4,800 meters. The geometric mean concentrations of Pb, Cd, and Hg in blood and As and Cd in urine were respective 1.35 µg/dL, 1.43 µg/L, 3.16 µg/L. They were 167.88 µg/g creatinine and 1.58 µg/g creatinine. The metabolite concentrations of VOCs were 50.67 µg/g creatinine in t, t-muconic acid (t, t-MA), 10.73 µg/g creatinine in benzyl mercapturic acid, 317.05 µg/g creatinine in phenylglyoxylic acid, 123.55 µg/g creatinine in methylhippuric acid, and 190.82 µg/g creatinine in mandelic acid. The concentration of Pb in the blood and Cd and t, t-MA in the urine of residents within affected area of the CFPP showed statistically significant differences among distance groups.

Conclusions: The concentration of urinary VOCs metabolites, especially t, t-MA, differed according to the distance groups of residents within the affected area of CFPP (p<0.05).

Key words: Coal-fired power plant, heavy metals, VOC metabolites, biomonitoring

Received January 15, 2024

Revised February 8, 2024

Accepted February 13, 2024

Highlights:

- A health impact assessment was conducted based on proximity to coal-fired power plants.
- The blood lead and cadmium concentration of residents differed according to residential distance from a coal-fired power plant.
- A difference in t, t-MA among the VOC metabolites was observed according to residential distance.

*Corresponding author:

Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University, 32 Daesin Gongwon-ro, Seo-gu, Busan 49201, Republic of Korea
Tel: +82-51-240-2770
E-mail: medikim@dau.ac.kr

I. 서 론

화석 연료를 태워서 나온 열을 이용하는 석탄화력발전소는

한국의 주요 전기 공급원이다. 석탄화력발전은 에너지 생산에서 큰 비중을 차지하고 있고 경제성 등의 이유로 현재까지가 동중이다. 그러나 석탄의 채굴에서 연소까지 이르는 전 과정에

서 각종 중금속과 미세먼지,¹⁾ 질소산화물,²⁾ 휘발성유기화합물³⁾ 등의 오염물질이 비산재의 형태로 대기와 인근의 지하수, 토양까지 오염시키기 때문에 인근 주민 건강과 환경에 영향을 미친다.^{4,5)}

환경으로 유입되는 수은(Hg), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) 등은 인체에 독성을 유발하며 장기간 생체 축적은 다양한 신체 조직과 기관에 독성을 유발한다.⁶⁾ 석탄화력발전소로 인한 대기 오염물질과 석탄재의 다양한 중금속에 대한 노출은 주변 거주민의 조기 사망률을 높이고, 호흡기 질환 및 폐암, 심혈관계 질환의 위험을 증가시킨다.^{7,8)} 특히 화력발전소의 석탄 연소는 독성물질 방출의 가장 큰 기여요인이기 때문에 인근 지역주민의 중금속에 대한 건강영향 평가는 지속적으로 필요하다.⁹⁾

휘발성유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)은 환경에 널리 분포하며 대표 물질로는 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 자일렌(xylene) 등이 있다. VOCs는 자동차 배기가스, 소각로, 담배연기¹⁰⁾ 그리고 석탄화력발전소에 의해 배출되며¹¹⁾ 흡입,¹²⁾ 섭취,¹³⁾ 피부 접촉¹⁴⁾을 통해 인체에 유입되어 만성 폐쇄성 폐 질환(COPD), 천식, 폐암, 심혈관질환, 중추신경계 기능 장애 및 피부 질환 등의 영향을 미친다.¹⁵⁾ VOCs의 인체 내 노출 지표는 소변 중 대사체인 t, t-muconic acid (t, t-MA), hippuric acid (HA), mandelic acid (MA) 등을 이용하여 평가한다.¹⁶⁻¹⁹⁾

2016년 환경부의 “발전소 주변 주민 건강영향조사 방안 마련 연구”에서 전국의 11개 화력발전소를 대상으로 운영현황, 영향 범위, 대기 오염 현황, 예상되는 건강영향 등에 대한 종합적인 분석과 우선순위 선정을 통해 본 연구 지역에 대한 조사가 우선적으로 요구되었다.²⁰⁾ 화력발전소 인근 토양이나 대기에 대한 연구는 많이 발표되고 있지만 화력발전소 10 km 이내²¹⁾에 거주하는 대상자를 중심으로 인체 내 중금속과 VOCs 노출 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다.²²⁾ 최소 근접 거리 지정은 많은 환경 역학 연구에서 사용되는 방법²³⁾이지만 노출원에서 근접 거리의 지정이 대부분 임의적이며, 명확하게 표기하지 않은 경우²⁴⁾도 있어 영향권의 거리 선정에 어려움이 있다. 건강영향 평가의 공간적 범위는 집단의 다양성 때문에 환경영향평가의 대기 질, 악취 항목의 공간적 범위를 따르거나,²⁵⁾ 개발사업의 제한 범위를 참고로 하여 분석 범위를 정하는 경우가 많다. 국내 연구 사례의 경우 대기 및 산업 폐수로 환경오염물질이 노출되는 광양만 산업단지 영향권을 5 km 이내로,²⁶⁾ 대기 오염을 통한 고농도 중금속에 노출되는 장항제련소는 4 km,²⁷⁾ 대기, 토양, 상수도 오염 등에 노출되는 포항 철강 산업단지는 15 km,²⁸⁾ VOCs 대기 노출 지역인 청주 산단 영향권을 3 km²⁹⁾로 분석하였으며 국외의 경우 비산재의 대기 오염 노출 영향을 받는 석탄화력발전소 영향권을 발전소에서 2마일 간격으로 5개 구역으로 나누어 분석한 연구와³⁰⁾ 매우 근거리(1 km 이하), 근거리(1~3 km), 먼 거리(3~5 km)로 나누어 분석한 연구³¹⁾ 등 다

양한 사례가 있다.

석탄화력발전소 인근 지역은 대기 오염에 의한 중금속과 VOCs 등의 환경유해 인자의 영향을 받는 지역으로³²⁻³⁴⁾ 대기 중 VOCs 특성과 지역적 영향을 조사한 연구에서 스페인, 중국, 브라질의 화력발전소 근처의 주변 대기 중 VOCs는 화력발전소에 의한 배출의 영향을 많이 받는다고 보고되었다.³⁵⁻³⁷⁾ 중금속과 VOCs 요 중 대사체는 주로 산단/공단 주변지역에서 많이 보고되었으나 석탄화력발전소 인근 지역에 거주하는 주민들의 생체노출평가 연구는 미흡하였다.²²⁾ 석탄화력발전소 인근 토양 분석의 경우 발전소 주변 10 km 이내 범위에서 1 km 단위로 지점을 나누어 분석하는^{38,39)} 등 대기 오염에 의한 환경유해인자 노출은 거리에 따른 영향이 다를 것으로 추정되어⁴⁰⁾ 생체내 노출 수준도 주거지 거리에 따른 노출 농도의 차이를 보는 것이 필요해 보인다.

따라서 본 연구에서는 석탄화력발전소로부터 10 km 이내 대상자를 오염원으로부터 이격 거리를 사분위로 나누어 거리에 따른 중금속과 VOCs 대사체의 생체 내 노출 수준을 확인하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 지역 및 연구 참여자

연구 지역으로 선정한 석탄화력발전소는 유연탄을 발전원으로 이용하여 총 시설용량 4,000 MW의 국내 4번째 규모의 발전소이다. 1997년에 1, 2호기가 준공된 이후 현재는 7호기까지 준공되어 가동중이다. 대상자는 2020년 12월부터 2021년 12월 사이에 석탄화력발전소 영향권 범위인 반경 10 km 미만 지역을 선정하여 행정구역 상 3개의 읍면에서 연구 참여 동의한 주민 총 334명을 모집 후 오염원으로부터 사분위로 이격 거리를 Q1 (3,100 m 이하), Q2 (3,100 m 초과~4,900 m 이하), Q3 (4,900 m 초과~6,700 m 이하), Q4 (6,700 m 초과)로 나누어 생물학적 노출 평가를 실시하였으며 거주지는 QGIS (Quantum GIS)를 이용하여 지도상에 파랑, 노랑, 빨강색의 점으로 3개의 읍면을 구분하여 표시하였다(Fig. 1). 대상자는 해당 지역에서 10년 이상 거주한 주민으로 선정하였으며 성, 연령 분포를 고려하여 20세 이상 성인을 대상으로 하였고, 표준화된 설문지를 통하여 성별, 나이, 흡연력, 음주력, 직업력, 가구 수입 그리고 체질량지수 등의 인구학적 특성과 생활습관을 조사하였고, 전체 334명 대상자 직업력에서 발전소 근무 이력 여부를 확인하였다. 연구는 동아대학교 생명윤리위원회(IRB)의 검토 및 승인을 받았으며(2-1040709-AB-N-01-201805-HR-012-16) 조사 참여자에게 생물학적 시료 제공 등에 대한 사전 동의를 받아 수행되었다.

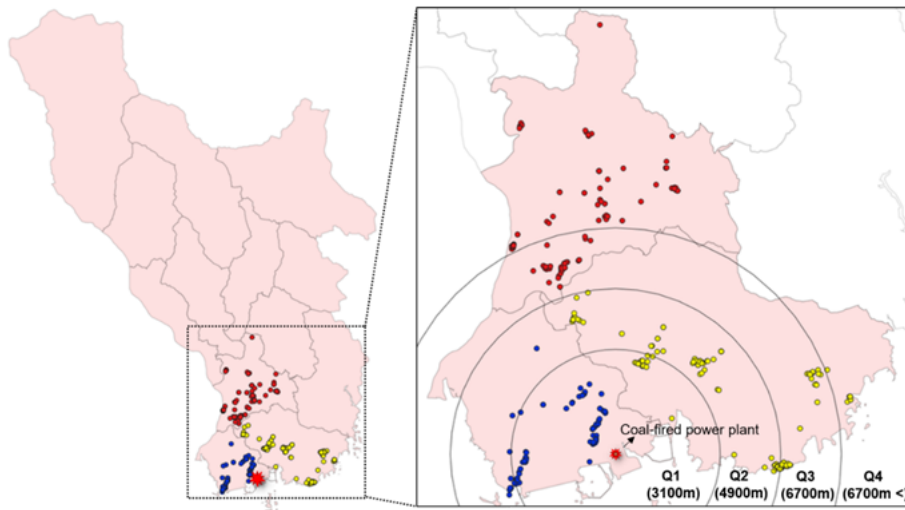


Fig. 1. Residential area of 334 study subjects living within a radius of 10 km around coal-fired power plant in Korea

2. 생체 시료 채취

전혈 시료는 항응고제(EDTA)가 포함되어 있는 혈액채취 용기(Vacutainer royal blue cap)를 이용하여 3 mL 혈액을 채취하고, 요 시료는 일시뇨 전용 Urine cup (Polypropylene)을 사용하여 중간뇨를 최소 10 mL 이상 채취하여 냉장 또는 냉동상태로 검사기관까지 이송하였다. 시료 상태 및 검체 리스트 확인 후 분석 전까지 동결 보관(-70°C 이하)하고 분석 시에는 해동한 후 실온에서 30분 이상 롤 믹서(roll mixer)로 충분히 교반한 후 사용하였다.

3. 중금속 분석방법

혈 중 카드뮴과 납은 각각의 희석 용액(혈 중 카드뮴: 0.2% Palladium, 1% Triton X-100, HNO₃ 26 mL, 혈 중 납: 0.2% Ammonium phosphate, 0.2% Triton X-100)을 사용하여 1:10 비율로 희석하여 Graphite furnace atomic absorption spectrometer (PinAAcle 900Z, PerkinElmer, Waltham, MA, USA) 분석 기기로 분석하였다. 검량선 작성에는 검량 표준액 5개의 농도를 만들어 분석하였고 분석방법의 검증을 위하여 표준 물질로 Whole Blood metals control level 1 (Serorm, SERO AS, Billingstad, Norway), Whole Blood Control Clinchek Level 1, 2 (RECIPE CHEMICALS, Germany)를 사용하여 매 검사마다 측정법의 정확성을 확보하였다.

혈 중 수은은 골드 아말감 수은전용분석기(Gold amalgamation direct mercury analyzer, MA-3000, Nippon Instruments Corporation, Japan)로 253.7 nm 파장에서 분석하였다. 검량선은 1,000 mg/L 수은 표준액(Kanto chemical, Japan)을 0.01% L-Cystein (in 0.2% HNO₃) 희석액으로 희석하여 분석하였다. 혈액의 표준 물질로 Whole Blood metals control level 1 (Serorm, SERO AS, Billingstad, Norway), Clinchek level II

(Recipe, Germany)를 사용하여 확인하였다.

요 중 카드뮴과 비소 분석 기기는 ICP-MS (Agilent 7700x, Agilent Technologies, CA, USA)를 이용하였다. 2% 1-butanol, 0.05% EDTA, 0.05% Triton X-100, 1% NH₄OH (Sigma-Aldrich, USA)를 이용하여 제조된 희석 용액을 1:20 비율로 희석하여 분석하였다. 표준 물질로 Urine control Clinchek level 1, 2 (RECIPE CHEMICALS, Germany)를 사용하여 정확성을 확인하였다. 중금속 분석은 국립환경과학원 '생체 시료 중 환경오염물질 분석 매뉴얼' 표준운영지침(Standard Operation Procedure, SOP)⁴¹⁾을 따라 수행되었다. 중금속 검출한계(Limit of Detection, LOD)값은 혈 중 카드뮴, 혈 중 납, 혈 중 수은, 요 중 카드뮴, 요 중 비소가 각각 0.069 µg/L, 0.063 µg/dL, 0.017 µg/L, 0.039 µg/L, 0.061 µg/L였다. 혈액 및 요 검량선의 R²값은 0.999 이상이었으며, 정확도는 96.1~111.5%로 기준 값의 ±20% 이내, 정밀도는 0.8~8.3%로 10% 이내로 적합 범위 인정받았다.

4. 휘발성유기화합물(VOCs) 대사체 분석방법

VOCs 대사체 분석은 국립환경과학원 '생체시료 중 유기화합물질 분석' SOP⁴¹⁾를 준용하여 HPLC-MS/MS법으로 분석이 수행되었다. VOCs 대사체는 t, t-muconic acid (t, t-MA), benzyl mercapturic acid (BMA), phenylglyoxylic acid (PGA), methylhippuric acid (MHA) 그리고 mandelic acid (MA)로 총 다섯 항목을 분석하였다. 각 물질 별 표준 용액을 7개의 농도로 만들어 검량선을 작성하였고 정도관리물질(RM)과 인증정도관리물질(NIST SRM; National institute of standards and technology, Gaithersburg, MD, USA)을 사용하여 5배치마다 분석하여 정확도를 평가하였다.

LOD 값은 분석방법을 이용하여 분석 기기가 검출할 수 있

는 최저 농도 또는 양이며, 불검출 시료는 분석 기기에서 검출 자체가 되지 않은 시료로 개수(n)를 제시하였다. 또한 생물학적 노출 평가를 위한 소변 시료는 계절이나 수분 섭취에 따른 개인간의 변화를 표준화하는 것이 필요하며 본 연구에서는

요 중 크레아티닌(creatinine, cr)을 사용하여 보정하였다.^{42,43)} t, t-MA, BMA, PGA, MHA, MA의 LOD 값은 각각 0.280 µg/L, 0.030 µg/L, 0.310 µg/L, 0.800 µg/L, 0.600 µg/L이며 MHA (n=2)와 MA (n=5)에서 불검출 시료가 있었다.

Table 1. General characteristics of study subjects (n (%))

Characteristics	Total	Quaternary distance from coal-fired power plant					p-value
		Q1 (≤3,100 m)	Q2 (>3,100 m~ ≤4,900 m)	Q3 (>4,900 m~ ≤6,700 m)	Q4 (>6,700 m)		
Distance (meter)	Mean±SD	4,800.3±2,252.8	2,012.6±882.4	4,059.6±614.0	5,944.9±550.0	7,879.4±1,011.4	
Gender	Total	334 (100)	88 (100)	89 (100)	89 (100)	68 (100)	
	Male	102 (30.5)	30 (34.1)	23 (25.8)	28 (31.5)	21 (30.9)	0.685 [†]
	Female	232 (69.5)	58 (65.9)	66 (74.2)	61 (68.5)	47 (69.1)	
Age	Mean±SD	71.0±11.1	66.7±14.1	75.3±8.5	70.9±8.9	71.1±10.4	<0.001*
	≤49	16 (4.8)	12 (13.6)	0 (0.0)	3 (3.4)	1 (1.5)	
	50~59	29 (8.7)	13 (14.8)	2 (2.2)	6 (6.7)	8 (11.8)	
	60~69	94 (28.1)	21 (23.9)	25 (28.1)	27 (30.3)	21 (30.9)	<0.001 [†]
	70~79	121 (36.2)	26 (29.5)	32 (36.0)	40 (44.9)	23 (33.8)	
	80≤	74 (22.2)	16 (18.2)	30 (33.7)	13 (14.6)	15 (22.1)	
Residence (year)	Mean±SD	43.8±23.4	39.7±25.0	47.6±24.5	44.8±21.9	42.6±21.0	0.141*
	≤20	77 (23.1)	22 (25.0)	20 (22.5)	20 (22.5)	15 (22.1)	
	21~40	76 (22.8)	31 (35.2)	14 (15.7)	15 (16.9)	16 (23.5)	0.024 [†]
	41≤	181 (54.2)	35 (39.8)	55 (61.8)	54 (60.7)	37 (54.4)	
Smoking status	No	254 (76.0)	67 (76.1)	73 (82.0)	62 (69.7)	52 (76.5)	
	Yes	79 (23.7)	21 (23.9)	16 (18.0)	26 (29.2)	16 (23.5)	0.420 [†]
	No response	1 (0.3)	1 (0.0)	0 (0.0)	1 (1.1)	0 (0.0)	
Drinking status	No	204 (61.1)	48 (54.5)	55 (61.8)	56 (62.9)	45 (66.2)	
	Yes	129 (38.6)	40 (45.5)	34 (38.2)	32 (36.0)	23 (33.8)	0.500 [†]
	No response	1 (0.3)	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (1.1)	0 (0.0)	
Job	None	171 (51.2)	41 (46.6)	61 (68.5)	44 (49.4)	25 (36.8)	0.001 [†]
	Production job	138 (41.3)	34 (38.6)	23 (25.8)	42 (47.2)	39 (57.4)	
	etc	18 (5.4)	9 (10.2)	4 (4.5)	2 (2.2)	3 (4.4)	
	No response	7 (2.1)	4 (4.5)	1 (1.1)	1 (1.1)	1 (1.5)	
Income (ten thousand won)	<50	164 (49.1)	36 (40.9)	51 (57.3)	39 (43.8)	38 (55.9)	0.012 [†]
	50~200	110 (32.9)	24 (27.3)	29 (32.6)	37 (41.6)	20 (29.4)	
	>200	47 (14.1)	21 (23.9)	7 (7.9)	10 (11.2)	9 (13.2)	
	No response	13 (3.9)	7 (8.0)	2 (2.2)	3 (3.4)	1 (1.5)	
BMI (kg/m ²)	Total	331 (100)	88 (26.6)	89 (26.9)	88 (26.6)	66 (19.9)	0.578*
	<18.5	13 (3.9)	4 (4.5)	2 (2.2)	4 (4.5)	6 (4.5)	
	18.5~24.9	185 (55.9)	47 (53.4)	57 (64.0)	48 (54.5)	33 (50.0)	0.690 [†]
	25~29.9	109 (32.9)	31 (35.2)	24 (27.0)	27 (30.7)	27 (40.9)	
	≥30	24 (7.3)	6 (6.8)	6 (6.7)	9 (10.2)	3 (4.5)	

Mean: arithmetic mean, SD: standard deviation, BMI: body mass index.

*The p value indicates significance between subgroups using ANOVA.

[†]The p value calculated by χ^2 test.

5. 통계분석방법

통계분석은 IBM SPSS (ver. 23.0) Statistics (SPSS, Chicago, USA)를 이용하였다. 화력발전소로부터 이격 거리별 사분위 영역(Q1~Q4)에 따라 일반적인 특성을 제시하였으며, 조사대상자의 성별, 연령, 거주 기간, 흡연력, 음주력, 체질량지수 중 범주형 변수는 카이제곱검정(Chi-square test)을 실시하고 연속 변수는 일원배치분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다.

중금속과 VOCs 대사체 농도는 오른쪽으로 치우친 분포를 보여 자연 로그 변환 후 각 화학물질에 대한 샘플 수(n), 산술 평균(arithmetic mean), 기하평균(geometric mean), 95% 신뢰

구간(95% Confidence interval, CI) 및 분위수를 제시하였다. 이격 거리별 농도 비교에서는 ANOVA로 유의성을 확인하였고 사후 검정은 본페로니(Bonferroni correction)를 사용하였으며, 성별, 연령, 거주기간, 직업력, 음주력 그리고 흡연력을 독립변수로 설정하여 각각의 물질 농도에 대하여 다중회귀분석을 실시하였다. 소변 샘플은 요 중 크레아티닌 농도가 WHO 참고 값인 0.3 g/L 미만이거나 3.0 g/L를 초과하는 경우 분석에서 제외하였다(n=38).⁴⁴⁾ LOD 미만의 값은 LOD/√2로 처리하여 분석을 진행하였으며, 불검출 시료는 분석에서 제외하였다. 모든 통계적 검증은 p값이 0.05 미만인 경우를 유의한 것으로 보았다.

Table 2. Concentration of heavy metals by quaternary distance from coal-fired power plant

Element (distance)	n (%)	Mean±SD	GM (95% CI)	P25	P50	P95	p*
Blood Pb (µg/dL)							
Total	334 (100)	1.59±1.19	1.35 (1.28, 1.44)	0.98	1.33	3.11	
Q1≤3,100 m	88 (26.3)	1.44±0.81 ^{ab}	1.28 (1.16, 1.42)	0.94	1.29	2.69	0.027
3,100 m<Q2≤4,900 m	89 (26.6)	1.90±1.74 ^a	1.55 (1.39, 1.76)	1.06	1.51	5.25	
4,900 m<Q3≤6,700 m	89 (26.6)	1.43±0.65 ^b	1.30 (1.18, 1.42)	0.98	1.25	2.78	
Q4>6,700 m	68 (20.4)	1.57±1.18 ^{ab}	1.28 (1.11, 1.50)	0.81	1.29	3.8	
Blood Cd (µg/L)							
Total	334 (100)	1.55±0.65	1.43 (1.36, 1.49)	1.13	1.42	2.71	
Q1≤3,100 m	88 (26.3)	1.42±0.70	1.28 (1.17, 1.41)	0.92	1.31	2.81	0.061
3,100 m<Q2≤4,900 m	89 (26.6)	1.66±0.62	1.55 (1.44, 1.70)	1.21	1.5	2.89	
4,900 m<Q3≤6,700 m	89 (26.6)	1.60±0.66	1.49 (1.37, 1.61)	1.23	1.44	3.15	
Q4>6,700 m	68 (20.4)	1.50±0.59	1.38 (1.25, 1.52)	1.12	1.41	2.64	
Blood Hg (µg/L)							
Total	334 (100)	3.70±2.25	3.16 (2.97, 3.35)	2.08	3.07	8.02	
Q1≤3,100 m	88 (26.3)	4.16±2.54	3.52 (3.12, 3.98)	2.90	3.26	9.5	0.065
3,100 m<Q2≤4,900 m	89 (26.6)	3.80±1.95	3.35 (2.99, 3.72)	2.34	3.38	7.6	
4,900 m<Q3≤6,700 m	89 (26.6)	3.47±2.37	2.97 (2.67, 3.35)	2.01	2.8	7.81	
Q4>6,700 m	68 (20.4)	3.27±1.99	2.75 (2.35, 3.16)	1.86	2.69	7.97	
Urine As (µg/g cr)							
Total	296 (100)	225.58±262.26	167.88 (153.93, 182.50)	102.77	166.57	505.37	
Q1≤3,100 m	78 (26.4)	214.72±154.06	163.44 (137.46, 193.74)	96.14	170.81	511.94	0.452
3,100 m<Q2≤4,900 m	77 (26.0)	217.16±137.25	180.19 (156.70, 206.22)	128.25	182.53	475.22	
4,900 m<Q3≤6,700 m	81 (27.4)	264.38±403.18	179.90 (152.15, 213.94)	106.93	162.95	653.43	
Q4>6,700 m	60 (20.3)	198.12±255.30	144.59 (120.89, 175.05)	80.66	140.16	449.12	
Urine Cd (µg/g cr)							
Total	296 (100)	1.85±1.05	1.58 (1.48, 1.68)	1.10	1.55	3.95	
Q1≤3,100 m	78 (26.4)	1.48±0.80 ^a	1.26 (1.10, 1.44)	0.88	1.32	2.89	0.002
3,100 m<Q2≤4,900 m	77 (26.0)	1.99±1.02 ^{bc}	1.74 (1.54, 1.97)	1.29	1.62	4.10	
4,900 m<Q3≤6,700 m	81 (27.4)	2.07±1.23 ^c	1.77 (1.58, 1.98)	1.15	1.72	4.81	
Q4>6,700 m	60 (20.3)	1.86±1.01 ^{abc}	1.60 (1.37, 1.84)	1.18	1.49	3.90	

Mean: arithmetic mean, SD: standard deviation, GM: geometric mean, CI: confidence interval.

^{abc}Bonferroni post-hoc grouping; estimates with the same letter are not significantly different.

*The p value indicates significance between subgroups using ANOVA.

III. 결 과

1. 대상자의 일반적 특성

본 연구에 참여한 대상자의 일반적 특성은 Table 1과 같다. 화력발전소에서부터 연구 참여자 주거지까지의 평균 거리는 4,800.3 m였으며 대상자 수는 Q1이 88명, Q2가 89명, Q3가 89명, Q4가 68명으로 총 334명이었다. 성별 분포는 남성이 102명(30.5%), 여성이 232명(69.5%)으로 여성의 비율이 높았다. 전체 평균 나이는 71.0세이며 분포는 49세 이하 대상자는 16명(4.8%), 50대가 29명(8.7%), 60대가 94명(28.1%), 70대

가 121명(36.2%), 80세 이상이 74명(22.2%)으로 70대의 대상자가 가장 많았다. 대상자들의 현 주거지에서의 평균 거주 기간은 43.8년이었고 흡연과 음주 여부 확인 결과 흡연자는 79명(23.7%)이고 비흡연자는 254명(76.0%)으로 비흡연자의 비율이 높았으며 음주자는 129명(38.6%)이고 비음주자는 204명(76.0%)으로 비음주자의 비율이 높았다.

2. 사분위 이격 거리별 체내 중금속 분석

혈 중 시료에서의 납, 카드뮴, 수은의 전체 기하평균농도(95% CI)는 각각 1.35 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (1.28, 1.44), 1.43 $\mu\text{g}/\text{L}$ (1.36,

Table 3. Concentration of VOCs metabolites by quaternary distance from coal-fired power plant

Element (distance)	n (%)	Mean \pm SD	GM (95% CI)	P25	P50	P95	p*
t, t-MA ($\mu\text{g}/\text{g cr}$)							
Total	296 (100)	69.62 \pm 70.49	50.67 (46.47, 55.63)	29.50	50.48	185.76	
Q1 \leq 3,100 m	77 (26.0)	71.29 \pm 51.17 ^{ab}	55.43 (46.92, 65.25)	33.64	60.16	159.67	0.015
3,100 m<Q2 \leq 4,900 m	78 (26.4)	66.15 \pm 72.30 ^{ab}	47.14 (39.83, 55.76)	29.79	41.14	220.30	
4,900 m<Q3 \leq 6,700 m	81 (27.4)	54.35 \pm 40.36 ^a	42.69 (36.42, 49.99)	24.59	43.60	163.31	
Q4>6,700 m	60 (20.3)	92.61 \pm 107.53 ^b	62.54 (51.40, 77.30)	33.12	56.20	310.02	
BMA ($\mu\text{g}/\text{g cr}$)							
Total	296 (100)	18.36 \pm 27.84	10.73 (9.63, 11.96)	5.18	10.18	67.10	
Q1 \leq 3,100 m	77 (26.0)	16.51 \pm 16.88	11.53 (9.60, 14.01)	6.29	11.49	50.19	
3,100 m<Q2 \leq 4,900 m	78 (26.4)	19.57 \pm 31.85	10.91 (8.80, 13.59)	5.34	9.93	90.99	0.811
4,900 m<Q3 \leq 6,700 m	81 (27.4)	17.34 \pm 28.80	10.08 (8.06, 12.34)	4.45	10.24	45.64	
Q4>6,700 m	60 (20.3)	18.36 \pm 27.84	10.42 (8.05, 13.95)	4.27	8.15	86.32	
PGA ($\mu\text{g}/\text{g cr}$)							
Total	296 (100)	383.71 \pm 245.67	317.05 (293.94, 341.84)	229.06	327.53	806.47	
Q1 \leq 3,100 m	77 (26.0)	426.55 \pm 200.41	382.84 (345.58, 426.40)	371.84	386.14	792.14	0.333
3,100 m<Q2 \leq 4,900 m	78 (26.4)	379.71 \pm 253.42	310.30 (265.81, 359.35)	235.67	307.65	923.73	
4,900 m<Q3 \leq 6,700 m	81 (27.4)	360.99 \pm 269.31	284.95 (237.53, 334.38)	207.32	307.13	930.93	
Q4>6,700 m	60 (20.3)	383.71 \pm 245.67	295.66 (248.69, 353.97)	198.85	286.22	800.13	
MHA ($\mu\text{g}/\text{g cr}$)							
Total	294 (100)	258.91 \pm 439.56	123.55 (107.47, 142.69)	63.07	103.74	992.33	
Q1 \leq 3,100 m	77 (26.2)	305.43 \pm 300.49	193.98 (154.53, 243.10)	91.95	186.34	1,007.07	0.436
3,100 m<Q2 \leq 4,900 m	77 (26.2)	256.41 \pm 406.91	132.84 (103.71, 169.17)	66.16	107.20	1,264.42	
4,900 m<Q3 \leq 6,700 m	81 (27.6)	196.60 \pm 335.88	88.43 (63.92, 119.01)	53.01	90.84	921.89	
Q4>6,700 m	59 (20.1)	287.00 \pm 689.99	98.74 (71.72, 140.73)	50.17	86.68	1,294.15	
MA ($\mu\text{g}/\text{g cr}$)							
Total	291 (100)	284.41 \pm 312.33	190.82 (170.33, 214.70)	119.20	205.26	847.56	
Q1 \leq 3,100 m	77 (26.5)	331.01 \pm 403.84	200.22 (153.11, 258.68)	108.31	204.43	1,162.06	0.385
3,100 m<Q2 \leq 4,900 m	72 (24.7)	288.83 \pm 346.54	170.85 (127.65, 222.02)	121.98	190.23	1,114.33	
4,900 m<Q3 \leq 6,700 m	81 (27.8)	246.18 \pm 256.64	184.51 (157.31, 220.45)	119.43	187.03	624.77	
Q4>6,700 m	61 (21.0)	271.41 \pm 173.30	213.94 (176.40, 263.83)	132.04	258.77	616.75	

t, t-MA: t, t-muconic acid, BMA: benzyl mercapturic acid, PGA: phenylglyoxylic acid, MHA: methylhippuric acid, MA: mandelic acid, Mean: arithmetic mean, SD: standard deviation, GM: geometric mean, CI: confidence interval.

^{ab} Bonferroni post-hoc grouping; estimates with the same letter are not significantly different.

*The p value indicates significance between subgroups using ANOVA.

1.49), 3.16 µg/L (2.97, 3.35)였다. 석탄화력발전소 영향권 내 주민의 사분위 혈 중 납 농도는 Q1이 1.28 µg/dL (1.16, 1.42), Q2가 1.55 µg/dL (1.39, 1.76), Q3가 1.30 µg/dL (1.18, 1.42), Q4가 1.28 µg/dL (1.11, 1.50)로 거리별 농도에 유의한 차이가 있었지만(p<0.05), 오염원으로부터 거리가 멀어질수록 농도가 감소하는 경향성을 보이지는 않았다. 혈 중 수은의 경우 거리가 멀어질수록 농도는 감소하는 경향성이 있으나 이격 거리별 통계적 유의성은 없었다. 요 중 비소와 카드뮴을 크레아티닌으로 보정한 기하평균 농도는 각각 167.88 µg/g cr (153.93, 182.50), 1.58 µg/g cr (1.48, 1.68)로 나타났다. 요 중 카드뮴의 크레아티닌 보정 농도는 이격 거리간 사분위에서 Q1이 1.26 µg/g cr (1.10, 1.44), Q2가 1.74 µg/g cr (1.54, 1.97), Q3가 1.77 µg/g cr (1.58, 1.98), Q4가 1.60 µg/g cr (1.37, 1.84)로 나타나 통계적인 차이가 있었다(p<0.05) (Table 2).

3. 사분위 이격 거리별 체내 VOCs 대사체 분석

대상자 전체에 대한 요 중 VOCs 대사체 기하평균농도 (95% CI)는 t, t-MA가 50.67 µg/g cr (46.47, 55.63), BMA가 10.73 µg/g cr (9.63, 11.96), PGA가 317.05 µg/g cr (293.94, 341.84), MHA가 123.55 µg/g cr (107.47, 142.69), MA가 190.82 µg/g cr (170.33 214.70)였다. 석탄화력발전소 영향

권 주민들의 사분위 거리별 t, t-MA 기하평균 농도가 Q1이 55.43 µg/g cr (46.92, 65.25), Q2가 47.14 µg/g cr (39.83, 55.76), Q3가 42.69 µg/g cr (36.42, 49.99)이고 Q4가 62.54 µg/g cr (51.40, 77.30)로 거리별 농도에 유의한 차이가 있었다 (p<0.05). t, t-MA를 제외한 BMA, PGA, MHA, MA의 경우 석탄화력발전소로부터 사분위 이격 거리 간 농도에 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 3).

4. 생체 시료 농도 관련 다변량 회귀분석

석탄화력발전소 인근 주민들의 생체 시료 중 중금속과 요 중 VOCs 대사체 농도는 대상자의 거주지 거리를 그룹별로 나누어 Q1을 기준으로 하여 Q2~Q4에 대해서 물질별 각각에 대하여 성별, 연령, 거주기간, 직업력, 음주력, 흡연력 등을 보정하여 다중회귀분석을 실시하였다. Table 4에서 중금속 농도와 관련된 요인들을 보정한 후에도 혈 중 납은 Q2에서, 혈 중 수은 Q4에서, 요 중 카드뮴은 Q3에서 통계적으로 거주지 거리별 그룹 간에 유의하게 차이가 있는 것을 확인하였다(p<0.05). Table 5는 요 중 VOCs 대사체와 관련된 요인들을 분석한 결과이며 통계적으로 유의한 결과는 나타나지 않았다.

Table 4. Relationship between heavy metals levels and various independent factors

	Blood Pb			Blood Cd			Blood Hg			Urine As-cr			Urine Cd-cr		
	β*	SE†	p-value	β	SE	p-value	β	SE	p-value	β	SE	p-value	β	SE	p-value
Distance															
Q1 (ref)	-			-			-			-			-		
Q2	0.579	0.183	0.002	0.021	0.099	0.834	0.157	0.350	0.654	-6.753	44.409	0.879	0.230	0.157	0.143
Q3	0.006	0.176	0.972	0.057	0.095	0.548	-0.410	0.335	0.222	45.614	42.553	0.285	0.456	0.150	0.003
Q4	0.073	0.191	0.700	-0.072	0.103	0.485	-0.843	0.364	0.021	-27.536	46.162	0.551	0.287	0.163	0.079

*β: Regression coefficient.
 †SE: Standard error of regression coefficient.
 Adjusted by gender, age, residence, job, smoking and drinking status.

Table 5. Relationship between urinary VOCs metabolites levels and various independent factors

	t, t-MA			BMA			PGA			MHA			MA		
	β*	SE†	p-value	β	SE	p-value	β	SE	p-value	β	SE	p-value	β	SE	p-value
Distance															
Q1 (ref)	-			-			-			-			-		
Q2	-0.723	11.755	0.951	-1.946	4.610	0.673	-70.476	41.180	0.088	34.063	454.546	0.940	-47.907	53.793	0.374
Q3	-14.130	11.264	0.211	-1.065	4.417	0.810	-64.436	39.459	0.104	-86.677	435.549	0.842	-87.536	50.762	0.086
Q4	22.941	12.219	0.061	1.664	4.792	0.729	-69.135	42.806	0.107	757.706	472.492	0.110	-67.706	55.052	0.220

*β: Regression coefficient.
 †SE: Standard error of regression coefficient.
 Adjusted by gender, age, residence, job, smoking and drinking status.

IV. 고 찰

본 연구는 지역사회 주민을 대상으로 한 단면연구형태의 환경역학연구로서 석탄화력발전소로부터 10 km 이내 영향권 지역에 거주하는 연구 참여자들의 거주지를 거리별로 사분위로 나누어 중금속 농도와 VOCs 대사체 농도를 분석하여 거리에 따른 환경노출 수준을 보고자 하였다.

연구 지역의 조사 시기에 해당하는 월별 평균 풍속은 1.3 m/sec 이며(2010~2020년 기상청), 2021년 바람 장미(wind rose)를 계절별로 분석한 결과 가을에는 고요한(Clam, 풍속 0.4 m/sec 이하) 경우가 24.5%이며 동풍(14.1%)과 동남풍(13.7%)이 주로 나타났다.⁴⁵⁾ 선행연구에서도 계절별 부는 바람의 방향이 다르며 평균 풍속은 1.1 m/sec으로 보고하고 있어³⁹⁾ 풍향보다는 거리에 중점을 두고 분석을 하였다.

전체 대상자의 체내 중금속 평균 농도는 혈 중 납 1.35 µg/dL, 혈 중 카드뮴 1.43 µg/L, 혈 중 수은 3.16 µg/L, 요 중 비소 167.88 µg/g cr 그리고 요 중 카드뮴 1.58 µg/g cr으로 나타났고 평균 농도는 국내 일반인구집단과 국내 산단지역 대상의 농도와 비교하였다. 환경보건기초조사(KoNEHS)⁴⁶⁾의 국내 일반인구집단의 중금속 평균 농도는 혈 중 납 1.51 µg/dL, 혈 중 수은 2.96 µg/L, 요 중 카드뮴은 0.39 µg/g cr이며 2017년 국민건강영양조사(KNHANES, 나이≥40세)⁴⁷⁾의 국내 일반인구집단의 혈 중 카드뮴 평균 농도는 1.10 µg/L로 본 연구 대상자의 혈 중 납은 일반인구집단 보다 낮았으며 혈 중 카드뮴, 혈 중 수은, 요 중 카드뮴의 평균 농도는 높게 나타났다. 산업단지 대상자들의 체내 중금속 농도와 비교해 보면 본 연구 대상자의 혈 중 납은 포항 철강산업단지(반경 5 km 이내) 대상자의 혈 중 납(2.48 µg/dL)보다 낮았으며 요 중 카드뮴(1.20 µg/g cr)의 농도는 높았다.²⁸⁾ 충청남도 산업단지보다 혈 중 납(2.33 µg/dL)과 카드뮴(1.65 µg/L)은 낮았으나 요 중 카드뮴(0.69 µg/g cr)은 높았다.⁴⁸⁾ 광양·여수 공단지역 반경 5 km 이내 거주자의 요 중 카드뮴 농도(1.27 µg/g cr, 0.97 µg/g cr)⁴⁹⁾보다 본 연구 대상자의 농도가 높게 나타났다. 장항제련소(반경 4 km 이내) 대상자의 혈 중 수은(4.90 µg/L)보다는 낮게 나타났다.⁴⁷⁾ 장항제련소는 국내 비철금속산업의 중심적인 역할을 해왔으며 음용수나 농작물에 중금속 노출이 높다고 보고되어 있다.⁵⁰⁾ 또한 혈 중 수은의 경우 해산물 섭취 등 같은 다른 노출원의 영향을 배제할 수 없어서 높은 농도에 의미를 부여하기 어려운 것으로 여겨진다.⁵¹⁾

본 연구 대상자들의 요 중 카드뮴의 농도는 일반인구집단의 평균과 산업단지 인근 거주민 대상의 평균 농도보다 높게 나타났으며, 이에 대한 원인에 대해서는 다각도의 검토가 필요하지만, Lee 등²⁶⁾의 연구에 따르면 해당 지역 토양에서 카드뮴의 농도가 우려기준으로 초과하였다는 보고가 있으며, 토양 내 카드뮴은 농작물에 쉽게 노출 후 흡수되어 인간의 체내에 영향을

주며 또한 장기간 저농도 노출도 골격, 폐, 신장 등에 강한 독성을 나타내기 때문에 본 연구 대상자들의 농도는 추적 관찰이 필요하다.

선행 연구에서 환경 노출의 영향을 받는 국가 산단 지역의 건강영향평가지역은 노출원에서부터 1~15 km까지로 차이가 있었다. 석탄화력발전소 인근 지역은 대기 오염을 통한 환경 노출이 우려되는 지역이며 거리에 따른 중금속 노출 평가를 위해 대상자의 거주지를 사분위로 나누어 분석한 결과(Table 2) 혈 중 납, 카드뮴 그리고 요 중 비소가 Q2에서 가장 높은 농도를 보이며 혈 중 수은은 Q1, 요 중 카드뮴의 농도는 Q3에서 가장 높은 농도를 보였으며 Q4에서는 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 혈 중 납, 혈 중 수은 그리고 요 중 카드뮴의 농도는 성별, 연령, 거주기간, 음주 여부, 흡연 여부 등의 잠재적인 요인들을 보정한 후에도 석탄화력발전소로부터 10 km 내 대상자들의 거주지 거리별 그룹간에 통계적으로 유의하게 나타났다($p < 0.05$).

석탄화력발전소 관련 선행 연구에서 오염원과 거주지와의 거리를 바탕으로 한 연구들을 보면 미국의 경우 화력발전소와의 거리가 30 km 이상의 떨어진 곳에 사는 사람들에게 비해 화력발전소에서 5 km 이내에 사는 대상자의 호흡 기능이 더 나쁜 결과를 보였고, 인도의 경우 화력발전소로부터 대상자 거주지의 거리를 매우 근거리(1 km 미만), 근거리(1~3 km 미만), 원거리(3~5 km)로 나누어 호흡기 질환, 알레르기, 신경학적 증상과의 상관성을 본 연구 등 근접성과의 상관관계를 제시하였다.^{31,52,53)} 국내의 선행 연구에서도 발전소로부터 거주지 거리에 따른 생물학적 시료 비교 분석결과 5 km 이내 거주자(1.39 µg/g cr)가 10 km 이내 거주자(1.23 µg/g cr)보다 소변내 수은의 농도가 유의하게 높게 나타났다($p = 0.017$).²⁶⁾ 충청남도 산업단지 인근 주민의 혈중 카드뮴과 납이 노출 지역으로부터 거리에 따라 1 km 미만 거주자와 1 km 이상 거주자에서 유의한 차이를 보이며, 노출원에서 거리와 중금속 노출과의 상관성을 보였다.⁴⁸⁾

국내에서는 환경 화학물질의 노출과 주요 결정 요인을 식별하기 위한 항목 중 하나로 요 중 VOCs 대사체를 조사하여 일반 인구 집단 농도를 제시하고 있다.⁴⁶⁾ VOC의 대표적인 물질인 benzene, styrene, toluene, xylene은 체내에서 대사과정을 거쳐 각각 t, t-MA, MA, HA, MHA⁵⁴⁾ 형태로 소변으로 배출되므로, 요 중 시료에서 대사체의 농도를 측정하여 노출 지표로 사용한다.⁵⁵⁾ 1977~2021년까지 우리나라 환경오염지역 발생원에 따라 조사된 생물학적 노출 지표를 보면 요 중 VOCs 대사체는 석탄 화력발전소에서 보고된 사례는 아직 없어²²⁾ 평균 농도는 국내 산단 지역의 수치와 비교하였다.

본 연구 전체 대상자의 요 중 VOCs 대사체 평균 농도는 t, t-MA 50.67 µg/g cr, BMA 10.73 µg/g cr, PGA 317.05 µg/g cr, MHA 123.55 µg/g cr 그리고 MA 190.82 µg/g cr로 나타났다. 국내 일반인구집단의 VOCs 대사체 평균 농도는 t, t-MA가

64.6 µg/g cr, BMA 5.02 µg/g cr, PGA 214.0 µg/g cr, MHA 318.0 µg/g cr 그리고 MA가 210.0 µg/g cr로 본 연구 대상자의 요중 t, t-MA, MHA, MA는 일반인구집단에 비해 낮았고 BMA와 PGA는 높게 나타났다.⁴⁶⁾ 본 연구 대상자의 t, t-MA는 여수 산단 지역 t, t-MA (49.82 µg/g cr)보다 높았고 MA (303.16 µg/g cr)보다는 낮았으며⁵⁶⁾ 부산 신평·장림 산단 지역의 t, t-MA, MHA, MA (86.96 µg/g cr, 391.51 µg/g cr, 201.36 µg/g cr)보다 낮았고 BMA (3.43 µg/g cr)와 PGA (163.25 µg/g cr)보다는 높았다.¹⁹⁾ 청주 산업단지 3 km 이내 거주자의 VOCs 평균 농도는 t, t-MA 51.17 µg/g cr, PGA 159.59 µg/g cr, MA 209.89 µg/g cr로 본 연구 대상자의 t, t-MA는 청주 산업단지와 유사한 농도였으며 MA는 낮게 나타났고 PGA는 높게 나타났다.²⁹⁾ ‘제3기(2018~2022년) 국가 산단 지역 주민 환경오염노출 및 건강영향조사’에서 시화·반월, 여수, 울산, 대산 산단 지역의 PGA와 BMA보다 본 연구 지역의 농도가 높았으며 그리고 광양, 온산 산업 단지의 PGA 농도, 온산 산업단지의 MHA 농도, 청주 산업단지의 BMA 농도보다 본 연구의 농도들이 높게 나타났다.⁵⁷⁾

본 연구에서 석탄화력발전소 인근 지역 거주자의 VOCs 대사체를 사분이 이격 거리별로 분석한 결과에서 집단 간의 유의성을 보이는 것은 요 중 t, t-MA (p<0.05)였으며 다른 대사체에서는 유의성이 없었다. BMA, PGA, MHA는 Q1에서 가장 높은 농도를 나타냈고 Q4로 갈수록 농도가 떨어지는 추세를 보이며, t, t-MA와 MA의 경우 Q4가 가장 높은 농도를 보여 대사체 별로 거리별 사분위에서 농도에 차이가 나타났다. 요 중 BMA와 PGA는 우리나라 일반 인구 평균농도보다 높게 나타났으며 다른 산단지역과의 비교에서도 높게 나타났다. VOCs 노출은 환경오염뿐만 아니라 주거지의 실내공기질, 거주 유형, 난방 연료, 음주력, 흡연력 등 개인적인 요인들이 영향을 미칠 수 있다.⁵⁸⁻⁶⁰⁾ 요 중 VOCs 대사체 농도를 잠재적 여러 요인인 성별, 연령, 거주기간, 직업력, 음주력, 흡연력 등으로 보정하여 다중회귀분석 실시 한 결과 통계적으로 유의한 결과는 나타나지 않았다.

본 연구의 제한점으로는 거리별 인체 노출 수준에 대한 비교는 하였으나 거리에 따른 환경 노출에 대한 분석이 동반되지 않아 환경 노출과 인체 노출 수준을 함께 비교 분석하지 못하였다는 점이다. 발생원으로부터 모든 지역이 전방위로 분포한 거리에 위치하는 것이 아니라 반원 형태의 분포 구성으로 거리에 따른 환경 노출 자료의 향후 연구 보완 비교가 필요하다. 또한 연구 대상 지역이 주변 환경에 존재하는 다른 산업 단지의 영향력을 완전히 배제할 수 없었으며 단면 연구로서 가지는 단점을 모두 제한점으로 가지고 있어 향후 추가 연구를 통해 지역 주민들의 체내 VOCs 대사체 농도와 대기 중 VOCs 농도 비교, 거주지의 지리적 특성, 식이습관(농작물 섭취, 취수 등) 연구도 필요할 것으로 여겨진다.

V. 결 론

본 연구는 석탄화력발전소 인근 거주 지역 주민들 334명의 혈 중 납, 카드뮴, 수은 그리고 요 중 비소, 카드뮴의 농도를 측정하였다. VOCs 요 중 대사체로는 t, t-MA, BMA, PGA, MHA, MA로 총 5가지를 요에서 분석하여 제시하였다. 본 연구 결과에서 석탄화력발전소 영향권 내 주민의 이격 거리별 중금속 농도는 거리별로 혈 중 납과 크레아티닌 보정 후 요 중 카드뮴이 차이가 있었으며(p<0.05) 혈 중 카드뮴과 수은, 요 중 비소는 차이가 관찰되지 않았다. 대사체는 t, t-MA만 이격 거리별 차이가 관찰되었고(p<0.05) 나머지 대사체는 차이가 관찰되지 않았다. 이상의 결과에서 석탄화력발전소 영향권 내 주민에게서 환경 오염물질의 대표적인 생물학적 지표인 중금속과 VOCs의 인체 노출 영향 가능성을 확인하였으며, 노출원로부터 주거지 근접성과 관련하여 거리를 사분위로 나누어 분석하는 변수를 제시하였다. 향후 석탄화력발전소 환경오염물질 배출 관리에 대한 지역사회의 지속적인 모니터링의 필요성과 지역 주민을 대상으로 한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원(NIER-SP2020-343)의 자금 지원을 받아 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Zhang C, Yao Q, Sun J. Characteristics of particulate matter from emissions of four typical coal-fired power plants in China. *Fuel Process Technol.* 2005; 86(7): 757-768.
2. Ma Z, Deng J, Li Z, Li Q, Zhao P, Wang L, et al. Characteristics of NOx emission from Chinese coal-fired power plants equipped with new technologies. *Atmos Environ.* 2016; 131: 164-170.
3. Xu J, Zhu F, Ge X, Li H, Zhao X, Tian W, et al. Research progress on volatile organic compounds emissions from coal-fired power plants. *Curr Pollut Rep.* 2022; 8(3): 303-314.
4. Che K, Chen CM, Zheng QY, Fan H, Wei ML, Luo P, et al. Heavy metal emissions from coal-fired power plants and heavy metal pollution characteristics and health risks in surrounding soils. *Huan Jing Ke Xue.* 2022; 43(10): 4578-4589.
5. Wu W, Wu P, Yang F, Sun DL, Zhang DX, Zhou YK. Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. *Sci Total Environ.*

- 2018; 630: 53-61.
6. Balali-Mood M, Naseri K, Tahergorabi Z, Khazdair MR, Sadeghi M. Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Front Pharmacol.* 2021; 12: 643972.
 7. Cropper M, Cui R, Guttikunda S, Hultman N, Jawahar P, Park Y, et al. The mortality impacts of current and planned coal-fired power plants in India. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2021; 118(5): e2017936118.
 8. Kravchenko J, Lyerly HK. The impact of coal-powered electrical plants and coal ash impoundments on the health of residential communities. *NC Med J.* 2018; 79(5): 289-300.
 9. Raj D, Maiti SK. Sources, bioaccumulation, health risks and remediation of potentially toxic metal(loid)s (As, Cd, Cr, Pb and Hg): an epitomised review. *Environ Monit Assess.* 2020; 192(2): 108.
 10. Jain RB. Distributions of selected urinary metabolites of volatile organic compounds by age, gender, race/ethnicity, and smoking status in a representative sample of U.S. adults. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2015; 40(2): 471-479.
 11. Li AJ, Pal VK, Kannan K. A review of environmental occurrence, toxicity, biotransformation and biomonitoring of volatile organic compounds. *Environ Chem Ecotoxicol.* 2021; 3: 91-116.
 12. Lamplugh A, Harries M, Xiang F, Trinh J, Hecobian A, Montoya LD. Occupational exposure to volatile organic compounds and health risks in Colorado nail salons. *Environ Pollut.* 2019; 249: 518-526.
 13. Ruenz M, Bakuradze T, Eisenbrand G, Richling E. Monitoring urinary mercapturic acids as biomarkers of human dietary exposure to acrylamide in combination with acrylamide uptake assessment based on duplicate diets. *Arch Toxicol.* 2016; 90(4): 873-881.
 14. Creta M, Poels K, Thoelen L, Vranckx K, Collaerts P, Jansen F, et al. A method to quantitatively assess dermal exposure to volatile organic compounds. *Ann Work Expo Health.* 2017; 61(8): 975-985.
 15. Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Front Public Health.* 2020; 8: 14.
 16. Ding YS, Blount BC, Valentin-Blasini L, Applewhite HS, Xia Y, Watson CH, et al. Simultaneous determination of six mercapturic acid metabolites of volatile organic compounds in human urine. *Chem Res Toxicol.* 2009; 22(6): 1018-1025.
 17. Salthammer T, Zhang Y, Mo J, Koch HM, Weschler CJ. Assessing human exposure to organic pollutants in the indoor environment. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2018; 57(38): 12228-12263.
 18. Soleimani E. Benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene: current analytical techniques and approaches for biological monitoring. *Rev Anal Chem.* 2020; 39(1): 168-187.
 19. Yoon MR, Jo HJ, Kim GB, Chang JY, Lee CW, Lee BE. Exposure to PAHs and VOCs in residents near the Shinpyeong · Jangrim industrial complex. *J Environ Health Sci.* 2021; 47(2): 131-143.
 20. Bae HJ, Park JG, Shin YS, Suh YW, Jung DW, Moon NK, et al. A study on the health impact investigation plan for residents around power plants in Korea. Sejong: Ministry of Environment; 2016.
 21. Ministry of Environment. Guidelines for setting the scope of environmental impact assessment. Sejong: Ministry of Environment; 2013.
 22. Choi KH, Kim S, Jang HA, Han D, Kwon HJ, Cho YM. Literature review on health effect surveys of residents in environmentally contaminated areas in South Korea from 1997 to 2021. *J Environ Health Sci.* 2023; 49(3): 134-148.
 23. Huang YL, Batterman S. Residence location as a measure of environmental exposure: a review of air pollution epidemiology studies. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 2000; 10(1): 66-85.
 24. Heo J, Kim HM, Lee JT. A study of the relationships between proximity to an industrial complex and blood lead levels and urinary cadmium levels. *J Environ Health Sci.* 2012; 38(2): 95-104.
 25. Lee YS. Development of health impact assessment techniques and pilot project research (II) (Appendix). Sejong: Ministry of Environment; 2008.
 26. Lee K, Lee S, Ahn R, Kim JH, Son BS. A study on the concentration of biomarkers for heavy metals and VOCs in the residents living in the vicinity of Gwangyang industrial complex in Korea. *J Odor Indoor Environ.* 2019; 18(3): 228-235.
 27. Eom SY, Yim DH, Moon SI, Ochirpurev B, Choi YS, Park CH, et al. The association of blood concentrations of heavy metals and blood pressure in residents living near Janghang copper smelter in Korea. *J Agric Med Community Health.* 2017; 42(1): 13-23.
 28. Min YS, Lee K. The association between HbA1c and the biological exposure index for heavy metals in community. *J Agric Med Community Health.* 2022; 47(3): 181-188.
 29. Im YJ, Song MS, Park TH, Cho HK, Lee JH, Kim YD, et al. Exposure of volatile organic compounds to residents living near Cheongju industrial complex. *Chungbuk Med J.* 2020; 30(1): 1-8.
 30. Zierold KM, Myers JV, Brock GN, Sears CG, Sears LL, Zhang CH. Nail samples of children living near coal ash storage facilities suggest fly ash exposure and elevated concentrations of metal(loid)s. *Environ Sci Technol.* 2021; 55(13): 9074-9086.
 31. Adappa S, Tiwari RR, Kamath R, Guddattu V. Health effects and environmental issues in residents around coal-fired thermal power plant, Padubidri: a cross-sectional study. *J Environ Occup Sci.* 2017; 6(1): 8-11.
 32. Du X, Jin X, Zucker N, Kennedy R, Urpelainen J. Transboundary air pollution from coal-fired power generation. *J Environ Manage.* 2020; 270: 110862.
 33. Wang G, Deng J, Zhang Y, Zhang Q, Duan L, Hao J, et al. Air pollutant emissions from coal-fired power plants in China over the past two decades. *Sci Total Environ.* 2020; 741: 140326.
 34. Shon ZH, Kang M, Park G, Bae M. Impact of temporary emission reduction from a large-scale coal-fired power plant on air quality. *Atmos Environ X.* 2020; 5: 100056.
 35. Fernández-Martínez G, López-Mahía P, Muniategui-Lorenzo S, Prada-Rodríguez D, Fernández-Fernández E. Distribution of volatile organic compounds during the combustion process in coal-fired power stations. *Atmos Environ.* 2001; 35(33): 5823-5831.
 36. Shi J, Deng H, Bai Z, Kong S, Wang X, Hao J, et al. Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China. *Sci Total Environ.* 2015; 515-516: 101-108.
 37. Moreira dos Santos CY, de Almeida Azevedo D, de Aquino Neto FR. Atmospheric distribution of organic compounds from urban

- areas near a coal-fired power station. *Atmos Environ.* 2004; 38(9): 1247-1257.
38. Song CW, Han HJ, Lee JU. Investigation on heavy metal distribution in soils around Boryeong coal-fired power plant. *J Korean Soc Miner Energy Resour Eng.* 2019; 56(1): 10-22.
 39. Song CW, Han HJ, Lee JU. Investigation on geochemical characteristics of heavy metals in soils in the vicinity of Samcheonpo and Hadong coal-fired power plants in Korea. *Econ Environ Geol.* 2019; 52(2): 141-158.
 40. Kim JH, Park YK. Numerical simulation of dispersion of air pollutants from combined cycle power plants. *J Korean Oil Chem Soc.* 2016; 33(3): 529-539.
 41. National Institute of Environmental Research (NIER). Manual for analysis of environmental pollutants in biological samples. Incheon: NIER; 2006.
 42. Franz S, Skopp G, Boettcher M, Musshoff F. Creatinine excretion in consecutive urine samples after controlled ingestion of water. *Drug Test Anal.* 2019; 11(3): 435-440.
 43. Verschaeve L, Koppen G, Gorp UV, Schoeters G, Jacobs G, Zwijnen C. Seasonal variations in spontaneous levels of DNA damage; implication in the risk assessment of environmental chemicals. *J Appl Toxicol.* 2007; 27(6): 612-620.
 44. World Health Organization (WHO) Unit of Occupational Safety. Biological monitoring of chemical exposure in the workplace guidelines. Geneva: WHO; 1996.
 45. Korea Meteorological Administration (KMA). KMA weather data service. Open MET data portal. Available: <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do> [Accessed 7 February 2024].
 46. Statistics Korea. Korean Statistical Information Service. Available: <https://kosis.kr/index/index.do> [Accessed 20 October 2023].
 47. Kwon JY, Lee S, Surenbaatar U, Lim HJ, Kim BG, Eom SY, et al. Association between levels of exposure to heavy metals and renal function indicators of residents in environmentally vulnerable areas. *Sci Rep.* 2023; 13(1): 2856.
 48. Joo Y, Roh S. Exposure assessment of heavy metals using exposure biomarkers among residents living near a Chungcheongnam-do province industrial complex area. *J Environ Health Sci.* 2016; 42(3): 213-223.
 49. Jou HM, Choi SH, Chung EK, Jung SW, Yang WH, Son BS. Heavy metal levels in urine of residents in industrial area. *J Environ Sci.* 2011; 20(5): 565-574.
 50. Jeong S, An J, Kim YJ, Kim G, Choi S, Nam K. Study on heavy metal contamination characteristics and plant bioavailability for soils in the Janghang smelter area. *J Soil Groundw Environ.* 2011; 16(1): 42-50.
 51. You CH, Kim BG, Jo EM, Kim GY, Yu BC, Hong MG, et al. The relationship between the fish consumption and blood total/methylmercury concentration of coastal area in Korea. *Neurotoxicology.* 2012; 33(4): 676-682.
 52. Karavuş M, Aker A, Cebeci D, Taşdemir M, Bayram N, Cali S. Respiratory complaints and spirometric parameters of the villagers living around the Seyitomer coal-fired thermal power plant in Kütahtaya, Turkey. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2002; 52(3): 214-220.
 53. Hii M, Beyer K, Namin S, Malecki K, Rublee C. Respiratory function and racial health disparities with residential proximity to coal power plants in Wisconsin. *WMJ.* 2022; 121(2): 94-105.
 54. Inoue O, Seiji K, Kawai T, Watanabe T, Jin C, Cai SX, et al. Excretion of methylhippuric acids in urine of workers exposed to a xylene mixture: comparison among three xylene isomers and toluene. *Int Arch Occup Environ Health.* 1993; 64(7): 533-539.
 55. Amann A, Costello Bde L, Miekisch W, Schubert J, Buszewski B, Pleil J, et al. The human volatilome: volatile organic compounds (VOCs) in exhaled breath, skin emanations, urine, feces and saliva. *J Breath Res.* 2014; 8(3): 034001.
 56. Woo K, Park H, Kang T, Kim G, Jeon J, Jang B, et al. Concentration of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air and level of residents in industrial area. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2015; 25(1): 104-114.
 57. Kwon HJ, Bae SH, Roh SC, Lim HR, Choi KH, Choi JH, et al. Comprehensive assessment on the result of the third Survey of Exposure to Environmental Pollutants and Health Effects among Residents near the National Industrial Complex (2018-2022). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2022 Dec. Report No.: NIER-SP2022-129.
 58. Lee CW, Jeon HL, Hong EJ, Yu SD, Kim DS, Son BS. A study on the correlation and concentration in volatile organic compounds (benzene, toluene, xylene) levels according to the indoor/outdoor and the type of residents' house in industrial area. *J Environ Health Sci.* 2010; 36(5): 351-359.
 59. Chambers DM, Ocariz JM, McGuirk MF, Blount BC. Impact of cigarette smoking on volatile organic compound (VOC) blood levels in the U.S. population: NHANES 2003-2004. *Environ Int.* 2011; 37(8): 1321-1328.
 60. Kim KM, Eom SY, Yim DH, Moon SI, Kim YD, Kim H. Urinary hippuric acid and trans,trans-muconic acid levels according to commuting mode and duration, residential environment, and intake of preservative-added foods and beverages in university students. *Korean J Occup Environ Med.* 2012; 24(1): 61-71.

〈저자정보〉

노지현(연구원), 김병권(교수), 권정연(박사과정),
 주현지(석사과정), 김나영(연구원), 임현주(연구원),
 이승호(교수), 유병철(교수), 김수진(과장),
 홍영습(교수)