

재생 납 생산 공장과 인근 지역의 공기 중 납 농도 수준 비교

박창환^{1,2} · 박윤경² · 오윤희³ · 최인자³ · 차원석⁴ · 최상준^{2*}

¹대한산업보건협회 경북산업보건센터, ²대구가톨릭대학교 산업보건학과,
³원진직업병관리재단 부설 노동환경건강연구소, ⁴근로복지공단 직업환경연구원

Comparison of Airborne Lead Concentration in and Around Lead Production Plant

Changhwan Park^{1,2} · Yunkyung Park² · Younhee Oh³ ·
Inja Choi³ · Wonseok Cha⁴ · Sangjun Choi^{2*}

¹Korean Industrial Health Association

²Department of Occupational Health, Daegu Catholic University

³Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health

⁴Korea Workers' Compensation and Welfare Service

ABSTRACT

Objective: This study is conducted to evaluate airborne lead concentration in and around lead production plant.

Methods: Airborne lead concentration was monitored simultaneously inside of the processes of lead recycling factory and outside of factory which include stack, boundary of factory and residential area 1 km and 7.5 km from factory, respectively. All samples were measured three times at 1.5 m from the ground and analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometer, inductively coupled plasma optical emission spectrometer or flame atomic absorption spectrometer.

Results: All airborne lead concentrations measured inside of factory(13.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -252.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and outside of factory(0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -54.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) showed log-normal distribution. Geometric mean lead concentration, 54.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, measured inside of factory was significantly higher than outside of factory, 0.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($p<0.01$). Among the samples measured inside the factory, lead concentration was the highest in the refining process(59.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -252.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In the case of the samples outside the factory, the nearest chimney was the highest(3.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -54.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), and the lead concentration at the farthest place, 7.5 km from the factory was the lowest(0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). The arithmetic lead concentration, 0.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the residential area near the factory was below the atmospheric environment standard of 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, but the maximum concentration of 3.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ was exceeded.

Conclusions: Airborne lead concentration in residential area, 1 km away from lead recycling plant, may exceed ambient air standard of 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Key words: lead, lead recycling plant, residential area

1. 서 론

납(lead)은 뛰어난 가공성으로 인해 인류가 오랜 시간 동안 사용한 중금속 중의 하나로 산업체 여러 분야에서 필수적인 원자재로 이용되었으며, 특히 20세

기에 들어와서 자동차의 등장과 더불어 납의 수요는 더욱 증가하였다(Fischbein & Hu, 2007). 납 수요의 증가는 납 사업장 근로자들의 납중독을 유발하였을 뿐만 아니라, 일반 대기환경의 납도 증가시켜 일반 대중의 과다 납 노출을 초래하였다(Zenz, 1994). 대부분

*Corresponding author: Sangjun Choi, Tel: 053-850-3738, Email: junilane@gmail.com

Department of Occupational Health, Daegu Catholic University, 13-13, Hayang-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, 38430

Received: February 26, 2019, Revised: March 14, 2019, Accepted: March 15, 2019

Changhwan Park <https://orcid.org/0000-0002-9266-5290>

Younhee Oh <https://orcid.org/0000-0002-5966-0893>

Wonseok Cha <https://orcid.org/0000-0002-6453-4891>

Yunkyung Park <https://orcid.org/0000-0002-5244-1620>

Inja Choi <https://orcid.org/0000-0002-7847-392X>

Sangjun Choi <http://orcid.org/0000-0001-8787-7216>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 납중독은 장기간 동안 저 농도에 노출되어 발생되는 만성 중독으로 신경, 신장 및 내분비계 등에 해로운 영향을 주는 것으로 나타났으며(Weinhold, 2004), 혈중 납의 증가는 전신 염증반응과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(Pashko et al., 2018). 국제 암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 무기 납 및 화합물에 대해 인체 발암 우려물질(Group 2A, probably carcinogenic to humans)로 분류하고 있으며(IARC, 2006), 세계 보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 납 노출에 대한 민감도가 성인에 비해 높은 어린이의 경우 체중 당 공기 노출이 성인에 비해 2.3배 높은 것으로 나타나 일반 대기 환경 중 저 농도의 납이라도 어린이의 건강에 치명적일 수 있다고 보고한 바 있다(WHO, 2005).

우리나라의 경우 1980년대 무연휘발유의 사용 및 무연 페인트의 사용 등의 정책으로 인해 일반인의 혈중 납 농도는 지속적으로 감소하는 것으로 나타났고(Park et al., 2008), 2017년 환경부의 대기환경연보에 의하면 국내 주요 도시의 대기 중 연평균 납 농도 수준도 지속적인 감소 추세를 보이고 있으며, 근래에 들어서는 대기 중 납 농도가 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 수준으로 비교적 관리가 잘되고 있는 상태로 보고된 바 있다(MoE, 2017). 미국의 소비자 제품 안전 개선 법(Consumer Product Safety Commission, CPSIA, USA), 유럽연합(EU)의 완구 안전지침 및 중국의 강제인증제도 실시 등 현재 전 세계 각국에서는 직업 관련성 및 일상생활 속에서의 납 노출에 대한 규제를 하고 있다. 특히 어린이에 대한 납중독의 위해를 줄이기 위한 노력과 납 노출로 인한 건강장애에 대한 연구가 많이 수행되고 있으나, 국내의 경우는 주로 직업적 노출에 관한 건강상의 영향 및 노출평가를 중심으로 연구가 수행되었고(Kang et al., 2007; Choi et al., 2010), 산업단지 및 폐 광산지역 등으로 인한 인근 주거지역의 납 노출평가 등에 대한 일부 연구가 수행되었다(Song et al., 2010; Kang et al., 2018).

대표적인 직업 관련 납 노출 산업으로는 제련, 정련, 축전지 제조 등을 들 수 있으며, 전 세계적으로 광산을 통한 납의 생산은 점차 감소 추세이나 재활용을 통한 정제 납은 지속적인 증가 추세로, 우리나라의 경우도 정제 납이 전체 납 생산의 30%를 넘고 있다(Koo et al., 2012; ILZSG, 2017). 우리나라에서 직업 관련성으로 인한 납 노출 사건은 장항제련소 납중독

사건(1983년),반월 납중독 사건(1986년), 축전지회사의 집단 납중독 사건 등이 있으며, 이를 계기로 납 취급 작업장에 대한 보다 엄격한 보건관리의 필요성이 제기되면서(Koo et al., 2012) 사업장의 작업환경개선 및 근로자건강관리를 위한 규정 등의 강화(KOSHA, 2002)와 납에 대한 허용기준 제정(MoEL, 2009)등의 납 노출 관리 실시 후 직업적 노출관리가 강화되고 있는 추세이지만 최근 부산 녹산 산업단지 주물공장 근로자의 납중독 발생(Kim, 2017)과 같이 여전히 산업체에서는 빈번하게 고 농도의 납에 노출이 되고 있는 실정이다. 현재 우리나라의 대기 중 주요 납 배출원은 철 제련공장, 비철 제련공장, 배터리 제조업체 등으로(KOSTAT, 2015) 일부 선행연구에서는 납 생산 공장의 공기 중 납 농도는 작업장 노출기준($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 것으로 보고하였으며(Kim et al., 2002; Choi et al., 2010), 제련소, 폐 광산, 공단지역 인근 주민의 혈중 납 및 공기 중 납의 수준이 일반 도시지역보다 높은 것으로 평가되었다(MoE, 2010; Kim et al., 2016; Kim et al., 2017).

이에 본 연구는 직업적 노출평가(Kang et al., 2007; Choi et al., 2010) 또는 일반 주거지역의 노출평가(Song et al., 2010; Kang et al., 2018)에 국한하여 수행한 선행연구와는 달리 납 생산 공장의 내부, 외부(굴뚝, 공장 경계 지점)의 공기 중 납 농도 수준과 동시에 인근에 위치한 주거지역의 납 농도수준 파악을 통해 실제 납 생산 공장이 인근지역에 미치는 수준을 알아보고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

2018년 3월부터 9월까지 경상권 내 재생 납 생산 공장 한 곳과 인근 지역, 대조군 지역을 선정할 후 총 3회(3월, 4월, 9월)의 샘플링을 실시하였다. 납 생산 공장은 폐기물 및 폐배터리 등에서 납을 추출하여 연간 30,000톤 이상의 정련 납을 생산하는 2차 제련업체로 공장 내 주요 작업 공정은 크게 전처리(preparation), 제련(refining), 주조(casting)의 공정으로 구분 지을 수 있다. 각 작업 공정별로 국소배기장치를 가동하여 납 노출에 대한 관리(control)를 하고 있는 상태이다.

총 3개의 공장이 위치한 납 생산 공장에서 본 연구는 중앙에 위치한 공장을 중심으로 수행되었으며, 공

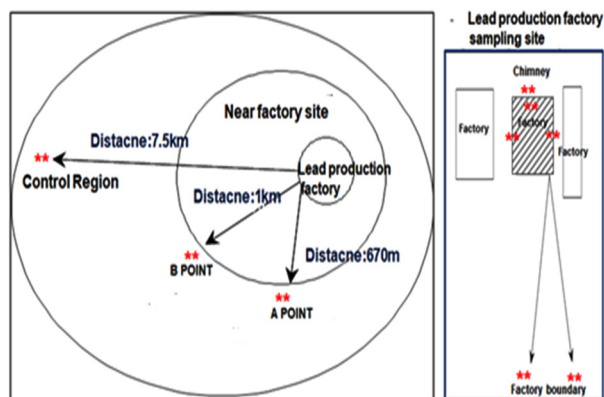


Figure 1. Location of sampling site

장 인근 지역은 공장에서 약 0.67 km, 1 km 떨어진 두 곳을 선정하였고, 공장에서 약 7.5 km 떨어진 대조군 지역을 선정하였다. 본 연구의 개략적인 측정위치는 Figure 1과 같다.

2. 연구 방법

1) 공기 중 납 농도 수준 평가

공기 중 납 농도 측정은 공장 내부의 3지점과, 공장 경계 2지점, 공장 인근 지역 2지점, 대조군 지역 1지점을 선정한 후 작업자의 호흡 영역(breathing zone)을 고려하여 지면으로부터 1.5 m 높이에서 샘플링을 실시하였다. 공장 내부에서 집진 된 납 먼지는 여과정화장치 및 습식세정장치를 거쳐 공장 외부로 배출되고 있는 상태로 공장 배출구(굴뚝)에서 샘플링이 가능한 가장 가까운 위치(거리: 5 m 전·후, 높이: 18 m 전·후)를 선정하였으며, 각 지점별 2건 이상의 샘플을 동일한 날짜와 시간대에 실시하였다.

2) 공기 중 납 농도 측정 및 분석

공기 중 납을 측정하기 위하여 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 공정시험법인 NIOSH method 7300을 준용하였다(NIOSH, 2016). 개인 시료채취펌프(ESCORT ELF, MSA, USA)를 이용하여 약 2.5 ℓ/min으로 mixed cellulose ester(MCE) 막 여과지(37 mm diameter, 0.8 μm pore size, Millipore, USA)에 6시간 이상 공기 중 납을 포집하였고, 펌프의 유량에 따른 오차를 보정하기 위하여 시료 채취 전, 후 유량 보정계(Defender 510, MesaLabs, USA)를 이용하여 보정하였다.

시료의 분석을 위해 여과지를 비커에 넣고 질산

(60%, SAMCHUN, Korea) 5 ml를 첨가한 후 시계접시로 덮고 상온에서 30분간 방치 후 120℃ 핫플레이트(hot plate)에서 가열하였다. 용액이 증발하여 0.5 ml 정도가 될 때까지 가열 후 2 ml의 회화용액을 다시 넣고 가열하는데 용액이 선명해질 때까지 이 과정을 반복하였다. 증류수로 시계접시와 비커를 세정 후 시계접시를 제거하고 150℃ 핫플레이트(hot plate)에서 가열하여 0.5 ml정도 남을 때까지 증발시키고 희석용액(60% 질산 50 ml + 증류수 950 ml)을 주입하여 시료 최종 용량을 10 ml 전후로 만든 후 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry;

Table 1. Analytical condition of inductively coupled plasma mass spectrometer

Item	Condition
Radio frequency power	1300 W
Lens voltage	7.25 V
Pulse stage voltage	120 V
Nebulizer gas flow	0.98 L/min
Auxiliary gas flow	1.3 L/min
Plasma gas	19 L/min

Table 2. Analytical condition of inductively coupled plasma optical emission spectrometer

Item	Condition
Radio frequency power	1,300 W
Plasma gas flow	15 L/min
Nebulizer gas flow	0.6 L/min
Auxiliary gas flow	0.2 L/min
Pump flow rate	1.5 mL/min
Replicates	3

Table 3. Analytical condition of flame atomic absorption spectroscopy

Item	Condition
Lamp current	10 mA
Slit width	1 nm
Burner height	7 mm
Wavelength	217 nm
Flame type	Nitrous oxide/Acetylene
Sample introduction	Manual
Background correction	on

ICP-MS, ELAN 9000, PerkinElmer, USA) 유도결합플라즈마 분광분석기(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry; ICP-OES, Optima 7300 DV, PerkinElmer, USA), 원자흡광분석기(Atomic Absorption Spectrometry; AAS, 200 series, Agilent, USA)를 이용하여 분석하였다. 분석기기별 분석조건은 Table 1, Table 2, Table 3에 요약하였다.

3) 공기 중 납 농도 평가

공기 중 납의 농도는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 표시하였으며, 산술평균과 표준편차, 기하평균과 기하표준편차, 최대값과 최소값을 구하였다. 분석결과 중 검출한계 미만인 경우는 검출한계(Limit of detection, LOD)의 LOD/2로 처리하였으며(Hornung, 1990), 분석기기별 LOD는 Table 4에 요약하였다.

납 생산 공장 및 인근 지역, 대조군 지역의 공기 중 납 농도 정규성 검정을 실시하였으며, 공장 내부와 외부의 농도의 비교와 각 샘플링 위치별 다중비교 분석을 위해 T-검정(Independent T-test)과 일원분산분석

(One-way ANOVA)을 실시하였다. 모든 통계적 분석은 Microsoft Office Excel 2010, SPSS for Windows Release 20.0(SPSS Inc. USA)을 이용하였다.

III. 결 과

1. 공기 중 납 농도

공기 중 납 농도 측정 결과를 공장 내부와 공장 외부(굴뚝 주변, 공장 경계, 공장 인근 지역, 대조군 지역)로 나누어 농도 분포와 Shapiro and Wilk Test (W-test)를 통한 정규성 검정 결과를 Figure 2에 나타내었다. 공장 내부와 공장 외부의 공기 중 납 농도 수준은 대수정규분포를 하는 것으로 나타났으며($p>0.05$), 공장 내부와 공장 외부의 공기 중 납 농도 수준은 통

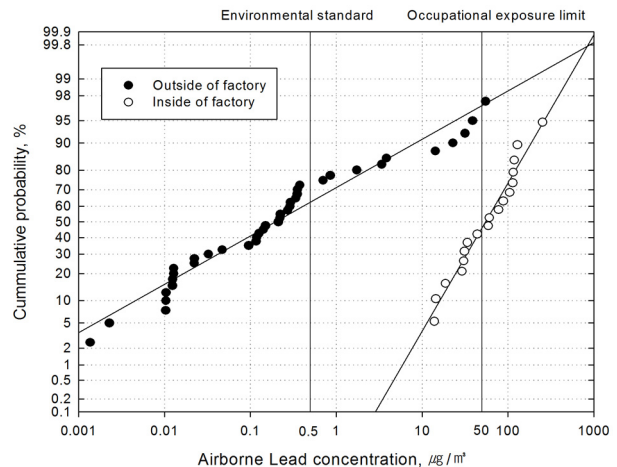


Figure 2. Distribution of airborne lead concentrations

Table 4. Limit of detection by analytical equipment

Analytical equipment	LOD [§]
ICP-MS [*]	0.0025 $\mu\text{g}/\text{sample}$
ICP-OES [†]	0.0053 $\mu\text{g}/\text{sample}$
AAs-Flame [‡]	0.0300 $\mu\text{g}/\text{sample}$

*: Inductively coupled plasma mass spectrometer

†: Inductively coupled plasma optical emission spectrometer

‡: Atomic absorption spectroscopy

§: Limit of Detection

Table 5. Summary of airborne lead concentrations by sampling sites

Sampling site	Airborne lead concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
	N [*]	AM [†] ± SD [‡]	GM [§] (GSD)	Min [¶]	Max ^{**}
Inside factory ⁺⁺	18	74.17±59.59	54.81(14.42)	13.89	252.88
Preparation	6	26.25±7.06	25.12(1.37)	14.44	33.59
Refining	6	121.12±62.51	108.57(1.57)	59.02	252.88
Casting	6	75.13±40.02	60.37(2.12)	13.89	128.88
Outside factory ⁺⁺	39	4.53±12.01	0.20(2.29)	0.001	54.97
Chimney	6	27.71±16.62	20.93(2.38)	3.84	54.97
Factory boundary	12	0.26±0.16	0.22(1.97)	0.05	0.70
Near factory site	12	0.45±0.91	0.10(6.20)	0.01	3.39
Control site	9	0.22±0.54	0.02(7.49)	0.001	1.73

*: number of samples, †: arithmetic mean, ‡: standard deviation, §: geometric mean, ||: geometric standard deviation, ¶: minimum,

** : maximum, ++: $p<0.01$, independent t-test between inside and outside of factory

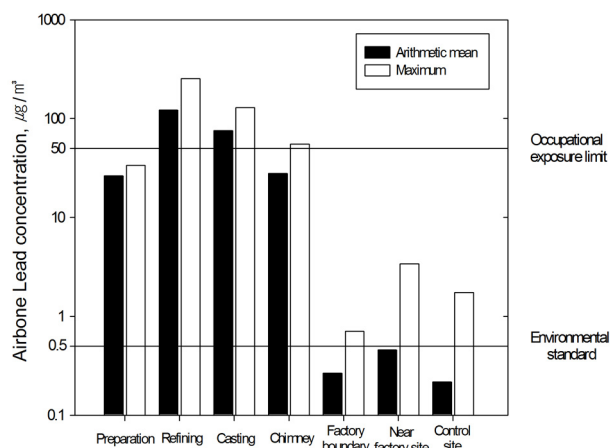


Figure 3. Comparison of airborne lead concentrations by sampling sites

계적으로 유의한 차이가 나타났다($p < 0.01$).

공장 내부와 공장 외부의 납 농도 수준을 Table 5와 Figure 3에 요약 비교하였고, 세부 결과는 Table 6에 나타내었다. 전처리, 제련, 주조 및 굴뚝 주변의 공기 중 납 농도 수준은 전처리와 굴뚝 주변의 농도 수준이 비슷한 값을 보였으나, 제련과 주조의 경우는 $121.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $75.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높은 수준을 나타내었고 작업장 노출기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났다. 공장 경계 지역, 공장 인근 지역, 및 대조군 지역은 공장 경계 지역과 대조군 지역이 $0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 비슷한 농도 수준을 보였으나 공장 인근 지역은 $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 대기환경기준인 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근접하였으며, 대조군 지역에 비해 약 2배 정

Table 6. Detailed descriptive statistics of airborne lead concentrations by sampling time and sites

Sampling by sequence	Sampling site	N*	AM [†]	SD [‡]	GM [§]	GSD	Min [¶]	Max ^{**}
First sampling	Preparation	2	22.80	8.35	21.21	1.47	14.44	31.15
	Refining	2	165.20	87.68	140.01	1.81	77.52	252.88
	Casting	2	28.92	15.03	24.70	1.78	13.89	43.95
	Chimney	2	9.03	5.19	7.39	1.92	3.84	14.22
	Factory boundary	4	0.27	0.07	0.25	1.38	0.15	0.35
	Near factory site	4	1.19	1.29	0.66	2.93	0.22	3.39
	Control site	3	0.62	0.79	0.07	19.06	0.001	1.73
Second sampling	Preparation	2	24.59	5.84	23.89	1.27	18.75	30.43
	Refining	2	109.36	4.46	109.27	1.04	104.90	113.82
	Casting	2	101.77	13.52	100.87	1.14	88.25	115.29
	Chimney	2	46.90	8.07	46.20	1.19	38.83	54.97
	Factory boundary	4	0.25	0.10	0.22	1.69	0.10	0.35
	Near factory site	4	0.16	0.13	0.11	2.75	0.02	0.38
	Control site	3	0.02	0.01	0.01	3.23	0.002	0.03
Third sampling	Preparation	2	31.37	2.22	31.29	1.07	29.14	33.59
	Refining	2	88.79	29.77	83.65	1.42	59.02	118.55
	Casting	2	94.70	34.18	88.32	1.46	60.52	128.88
	Chimney	2	27.20	4.37	26.84	1.18	22.83	31.57
	Factory boundary	4	0.28	0.25	0.18	2.64	0.05	0.70
	Near factory site	4	0.01	0.00	0.01	1.02	0.01	0.01
	Control site	3	0.01	0.00	0.01	1.00	0.01	0.01
Total**	Preparation	6	26.25	7.06	25.12	1.37	14.44	33.59
	Refining	6	121.12	62.51	108.57	1.57	59.02	252.88
	Casting	6	75.13	40.02	60.37	2.12	13.89	128.88
	Chimney	6	27.71	16.62	20.93	2.38	3.84	54.97
	Factory boundary	12	0.26	0.16	0.22	1.97	0.05	0.70
	Near factory site	12	0.45	0.91	0.10	6.20	0.01	3.39
	Control site	9	0.22	0.54	0.02	7.49	0.001	1.73

*: number of samples [†]: arithmetic mean, [‡]: standard deviation, [§]: geometric mean, ^{||}: geometric standard deviation,

[¶]: minimum, **: maximum

도 높은 수준을 보였다. 공기 중 납 농도의 최댓값은 세 지역 모두 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 공장 인근 지역의 경우는 기준치의 7배에 가까운 수준으로 나타났다.

3. 공장 외부 거리별 납 농도 비교

납 생산 공장 외부의 거리별 공기 중 납 농도 분포를 Figure 4에 나타내었다. 납 생산 공장의 납 배출원인 굴뚝 주변의 공기 중 납 농도 수준의 기하평균은 $20.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으나 최대값의 경우는 $54.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 특정 대기유해물질의 배출 적용기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 납 생산 공장과 가장 근접한 위치의 공장 경계 지역의 공기 중 납 농도 수준의 기하평균은 $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 공장 인근 지역과 대조군 지역은 $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 수준으로 거리의 증가에 따라 공기 중 납 농도 수준이 감소하였다.

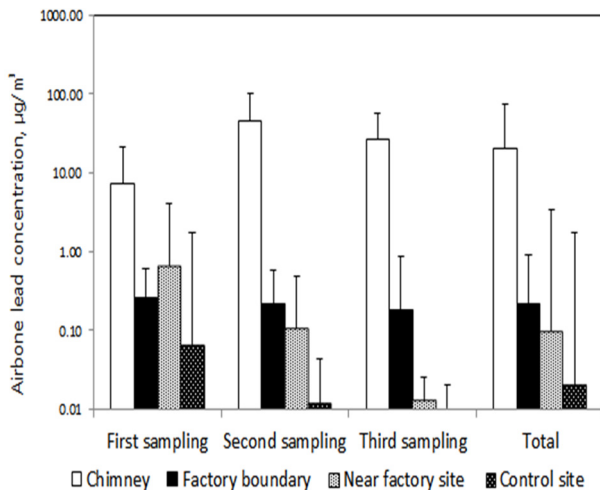


Figure 4. Comparison of airborne lead concentrations by sampling sites outside of factory (Bar and error bar are represented as geometric mean and maximum value, respectively)

2. 공장 내부와 외부 거리별 납 농도 비교

납 생산 공장 내부와 납 생산 공장 외부의 거리별 공기 중 납 농도 분포를 Figure 5에 나타내었다. 납 생산 공장 내부 공기 중 납 농도 수준의 기하평균은 $54.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 굴뚝 주변의 공기 중 납 농도 수준인 $20.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 2배 이상 높은 수준이며, 공장 경계 지역의 249배, 공장 인근 지역의 548배였으며, 대조군 지역보다는 2740배 이상의 높은 농도 수준을 나타내었다.

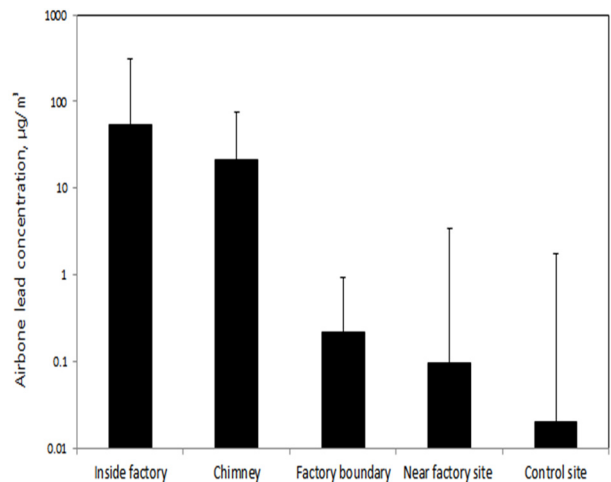


Figure 5. Comparison of airborne lead concentrations by sampling sites outside of factory and inside of factory (Bar and error bar are represented as geometric mean and maximum value, respectively)

IV. 고 찰

유엔환경계획에서는 배출시설을 통해 배출되는 납의 대부분은 배출원 인근에 침적되나, 일부는 확산을 통해 장거리 이동을 하여 노출이 중요한 부분을 차지하는 조건이나 인구집단을 찾아내고 관리의 필요성을 제시하였다(UNEP, 2010). 본 연구에서는 납의 배출원인 납 생산 공장과 배출구, 인근 지역 및 대조군 지역의 동시 샘플링을 통해 납 생산 공장의 공기 중 납 농도수준과 인근 지역에 미치는 영향을 평가하였다.

공기 중 납 농도분포는 대수정규분포를 하는 것으로 나타났으며, 공장 내부의 공기 중 납 농도 수준이 공장 외부에 비하여 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다. 공장 내부의 공기 중 납 농도 기하평균은 제련($108.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 주조($60.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 전처리($25.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 순으로 나타났으며, 제련공정과 주조공정의 납 농도 산술평균은 $121.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $75.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 작업장 노출기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 것으로 나타나 이에 대한 중점적인 관리가 요구된다.

제련공정의 납 농도 산술평균은 전국 6개 축전지 및 그 부품제조 사업장의 작업환경 중 납 농도 산술평균인 $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮았고(Kim et al., 2007), 기하평균 또한 Choi et al.(2010)이 조사한 1994년~2007년까지 우리나라 납 사업장의 작업환경 측정 자료를 바탕으로 조사한 2차 제련사업장의 용해 공정의 납 농

도 기하평균인 $125.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 수준으로 나타났다. 국내 납 사업장의 납 농도 수준은 2000년을 전후하여 정부의 엄격한 규제 등으로 인하여 환경의 질이 많이 변화된 상태로(Choi et al., 2007), 선행연구(Choi et al., 2010)의 연구결과도 이와 같은 양상을 보이고 있으며, 90년대의 농도 수준을 포함한 전체적인 평균 값을 산출한 것으로 본 연구결과보다 높은 수준을 나타낸 것으로 판단된다.

집진장치를 거친 후 굴뚝을 통해 배출되는 공기 중 평균 납 농도 수준은 $27.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 대기환경보전법의 배출기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮았으나, 최대값의 경우는 $54.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이를 초과하는 것으로 나타났다.

납 생산 공장과 가장 근접한 위치의 공장 경계 지역의 공기 중 납 농도의 기하평균은 $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다으며, 공장 인근 지역과 대조군 지역은 $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 수준으로 거리의 증가에 따라 공기 중 납 농도 수준이 감소하는 것으로 나타났다.

1970년대부터 일반 환경에서의 저 농도의 납 노출로 인한 건강영향에 많은 관심을 두고 산업단지 인근 지역 및 대도시를 중심으로 선행연구가 수행되어왔으며, 국가차원에서 납에 대한 노출평가나 직업적 노출에 대한 대책 수립에 많은 노력을 하고 있는 상태이다. Kang et al.(2018)의 연구에서는 국내 주요 산업단지와 인근 지역의 평균 납 농도 수준은 $0.021 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.554 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.024 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 지역에 따른 편차가 큰 것으로 나타났으며, 국내 주요 도시의 평균 납 농도 수준은 $0.051 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.077 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 보고하였다. 환경부에서 조사한 연도별 국내 대기 중 납 농도 수준은 98년 이후 지속적인 감소 추세로 2016년도는 $0.0237 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타내었고, 국내 주요 도시 별 납 농도는 $0.0158 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.0399 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포였으며, 주요 산업단지가 분포되어 있는 경기($0.0399 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 울산($0.0340 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 여수($0.0281 \mu\text{g}/\text{m}^3$)지역이 높은 농도 분포를 보였으나 산업단지 인근에서 조사된 연구 자료의 납 농도 수준보다는 낮은 수준을 나타내었다(MoE, 2017). 2005년 서울 북부 지역의 공기 중 중금속 농도에 관한 연구를 수행한 Park et al.(2005)의 연구에서는 평균 납 농도 수준이 $0.204 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타내었으나 최고치의 경우는 $0.839 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다.

본 연구에서 조사된 납 생산 공장 인근 지역의 납 농도 수준은 $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 3.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기존 선행연구

구(Park et al., 2005; Kang et al., 2018)결과와 비교해 볼 때 산업단지 인근 지역 및 국내 주요 도시의 공기 중 평균 납 농도보다는 높은 수준이었으나, 국내 주요 산업단지 중 납 농도 수준이 높은 지역과 서울 일부 지역의 공기 중 납 농도 수준이 높은 날과 비슷한 결과를 보였다. 공장 인근 지역과 대조군 지역의 평균 납 농도 수준을 비교하여 보면 2배 이상의 차이를 보이고 있으며, 공장 내부의 공기 중 납 농도와 굴뚝에서 납 농도 수준이 높은 2회 차의 경우는 공장 인근 지역이 대조군 지역에 비해 8배 높은 수준으로 나타났다.

본 연구는 공기 중 납 농도에 영향을 줄 수 있는 풍향 및 풍속과 공장 인근 지역 토양의 납 농도에 대한 연구를 수행하지 못한 제한점이 있어 이에 대한 추가연구가 필요하다고 판단되나 납 생산 공장이 인근 지역에 영향을 미치는 것으로 나타나 납 생산 공장의 주요 납 배출공정 및 집진설비의 관리 강화 등의 납 배출 저감활동과 납 배출설비의 연속적인 측정망 구축 및 오염에 대한 정보 등을 통해 납 생산 공장 근로자와 인근 거주민의 건강보호가 필요하다고 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 납 생산 공장 내부와 배출구, 부지 경계 및 인근 지역과 대조군 지역을 선정하여 동 시간대에 공기 중 납 농도 수준을 평가하여, 납 생산 공장이 인근 지역에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

공장 내부의 공기 중 납 농도 수준은 작업장 노출기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타나 공장 외부에 비해 유의하게 높은 수준으로 나타났다.

납 생산 공장의 굴뚝주변에서의 공기 중 평균 납 농도 수준은 대기환경보전법의 특정대기유해물질의 배출적용기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮았지만 최댓값의 경우는 기준을 초과하였고 공장 인근 지역의 공기 중 납 농도 수준이 대조군 지역에 비해 약 2배의 높은 수준으로 나타나 납 생산 공장과의 거리가 증가할수록 공기 중 납 농도 수준이 감소하였다. 이상의 연구 결과를 종합해 볼 때 납 생산 공장이 인근 지역의 공기 중 납 농도에 영향을 미치는 것으로 판단되므로 납 발생을 억제할 방안이나 납 배출저감을 위한 다양한 대책의 마련이 필요하다.

References

- Choi JW, Kim NS, Choi KS, Ham JO, Lee BK. The change of air lead concentrations in litharge making and smelting industries. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2010; 20(1):10-18
- Choi SH, Kim NS, Kim JH, Cho KS, Ham JO, et al. A study on the change of air lead concentrations in lead-acid battery plants. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2007; 17(4):261-271
- Fischbein A, Hu H. Occupational and environmental exposure to lead. In *Environmental and Occupational Medicine*, ed Rom WN, Boston, Lippincott, 2007. p. 954-990
- Ho MK, Lim YW, Lim JH, Yang JY, Sin DC. Association between blood mercury concentration and factor of health/life. *Korean J Environ Toxicol* 2006;21(3):229-238
- Hornung RW, Reed LD. Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Appl. J Occup Environ. Hyg* 1990;5(1)
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. sup 7, 2006;87
- International Lead and Zinc Study Group, ILZSG, Review of trend in 2017 lead
- Kang BW, Kim MJ, Baek KM, Seo YK, Lee HS, et al. A study on the concentration distribution of airborne heavy metals in major Industrial Complexes in Korea. *J Korean Soc Atmos Environ* 2018;34(2):269-280
- Kim HK, "Investigate the actual situation of lead worker lead poisoning." *The Kookje Daily News*, December 27, 2017 [Accessed 2018 December 5]; Available from: URL: <http://www.kookje.co.kr/new/s2011/asp/news/body.asp?code=0300&key=20171228.22011012452>
- Kim NS, Kim JH, Jang BK, Kim HS, Ahn KD, et al. The association of lead biomarkers of lead workers with airborne lead concentration in lead industries. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2007;17(1):43-52
- Kim SH, Kim YH, An HC, Sung HS, Sim CS. Levels of blood lead and urinary cadmium in industrial complex residents in Ulsan. *Annals of Occupational and Environmental Medicine* 2017. p. 29-26 DOI: 10.1186/s40557-017-0179-7
- Kim Y, Lee H, Lee CR, Park DU, Yang JS, et al. Evaluation of lead exposure in workers at secondary lead smelters in South Korea: with focus on activity of erythrocyte pyrimidine 5-nucleotidase (P5N). *Sci Total Environ* 2002;286(1-3):181-9
- Kim YD, Eom SY, Yim DH. Environmental exposure to arsenic, lead and cadmium in people living near Janghang copper smelter in Korea. *J Korean Med Sci* 2016;31(4):489-496 DOI: 10.3346/jkms.2016.31.4.489
- Koo BH, Kim YK, Lee SG, Kang DM, Kim JE. Detection of cases and a cause of lead exposure in Korean steel company. *Korean J Occup Environ Med* 2012;24(4):441-448
- Ministry of Environment(MoE), Atmospheric Environment Annual Report, 2017. p. 17-26
- Ministry of Environment(MoE), Enforcement Rule of Atmospheric Environment Conservation Act, 2017
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Industrial Safety and Health Act. 2009
- Ministry of Employment and Labor(MoEL), 2016 Employee Health Checkup Results ; 2016. p. 23
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Lead method 2016. 2003. p. 1-8
- Park EJ, Kang MI, You DE, Kim DS, Yu SD, et al. Health risk assessment of heavy metals in fine particles collected in Seoul metropolitan area. *J Environ Toxicol* 2005;20(2):179-186
- Park JU, Oh SW, Kim SH, Kim YH, Park RJ, et al. A study on the association between blood lead levels and habitual tobacco and alcohol use in Koreans with no occupational lead exposure. *Korean J Occup Environ Med* 2008; 20(3):165-173
- Pashko R, Camaj, Joseph H, Graziano, Emine Preteni, Dusan Popovac, et al. Long-Term Effects of Environmental Lead Exposure on Blood Pressure and Plasma Soluble Cell Adhesion Molecules in Young Adults: A Follow-Up Study of a Prospective Cohort in Kosovo. *J Environ Public Health* 2018;(4):1-10 DOI: 10.1155/2018/3180487
- Pirkle JL, Kaufmann RB, Brody DJ, Hickman T, Gunter EW, et al. Exposure of the U.S Population to lead, 1991-1994. *Environ Health Perspect* 1998;(106):745-750 DOI: 10.1289/ehp.98106745
- Song SH, Eom SY, Kim YD, Kim H, Hong JS. Blood Lead Level in Populations Resident in Some Abandoned Mine Area. *Environ Sci* 2010;19(4):527-532
- Statistics Korea(KOSTAT), Air pollution status 2015. p. 8
- The Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA). Health Effects and Care of Lead. 2002. p. 61-66
- United Nations Environment Programme, "Final review of scientific information on lead", 2010. p.60-72
- Weinhold B. Getting to the heart of the matter; environmental cardiology. *Environ Health Perspect* 2004;112(15):881-887 DOI: 10.1289/ehp.112-a880
- WHO, Children's health and environment-developing action plans, 2005. p. 6
- Zenz C. Lead and Its Compounds. In Leon A & Zenz C, Occupational medicine, Chicago: Year Book Medical Publishers Inc. 1994. p. 506-541

<저자정보>

박창환(연구원), 박윤경(대학원생), 오윤희(연구원),
최인자(박사후연구원), 차원석(연구원), 최상준(교수)