

납에 대한 국내 직업적 노출 문헌 자료 고찰을 통한 노출 특성 평가

최상준^{1,8*} · 서성철² · 박주현³ · 고동희⁴ · 김환철⁵ ·
박동욱⁶ · 최희은⁷ · 성예지^{1,8} · 오세은⁸ · 고경윤¹

¹가톨릭대학교 보건의료경영대학원, ²서경대학교 나노화학생명공학과, ³동국대학교 통계학과,
⁴가톨릭관동대학교 성모병원, ⁵인하대학교, ⁶한국방송통신대학교, ⁷울지대학교 보건환경안전학과, ⁸가톨릭대학교 대학원

Evaluation of Lead Exposure Characteristics Using Domestic Occupational Exposure Literature Data

Sangjun Choi^{1,8*} · Sung Chul Seo² · Ju-Hyun Park³ · Dong-Hee Koh⁴ · Hwan-Cheol Kim⁵ ·
Donguk Park⁶ · Hee Eun Choi⁷ · Yeji Sung^{1,8} · Se-Eun Oh⁸ · Kyoung Yoon Ko¹

¹Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea

²Department of Nano, Chemical and Biological Engineering, Seokyeong University

³Department of Statistics, Dongguk University

⁴Department of Occupational and Environmental Medicine, International St. Mary's Hospital,
Catholic Kwandong University

⁵Department of Occupational and Environmental Medicine, Inha University

⁶Department of Environmental Health, Korea National Open University

⁷Department of Environment Health and Safety, Eulji University

⁸Graduate School, The Catholic University of Korea

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study is to evaluate exposure characteristics of lead using data from the domestic occupational exposure literature.

Methods: Occupational airborne exposure data on lead reported in the domestic literature from 1981 to 2018 were collected and re-analyzed. The exposure levels in the data were expressed as an estimated arithmetic mean and a weighted arithmetic mean (WAM) of the number of samples. Lead exposure characteristics were analyzed by industry, process, and year.


Results: From a total of 14 documents, 8,305 airborne lead measurements for 17 industries were identified, and the WAM concentration in eight industries exceeded the occupational exposure limit of 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Three industries (battery manufacturing, lead smelting, and litharge manufacturing) accounted for 95% of the total data, and exposure trends could be confirmed over 10 years. Exposure levels continue to decrease in all three industries.


Conclusions: Considering the distribution outlook of lead and lead compounds, the main management targets are lead storage battery manufacturing and secondary smelting for lead regeneration.


Key words: Job-exposure matrix, lead, systematic review


*Corresponding author: Sangjun Choi, Tel:02-2258-7363, E-mail: junilane@gmail.com
Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea, 222 Banpo-daero,
Seocho-gu, Seoul, 06591, Korea


Received: January 4, 2022, Revised: February 5, 2022, Accepted: March 2, 2022


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


 Ju-Hyun Park <https://orcid.org/0000-0001-9675-6475>


 Hwan-Cheol Kim <https://orcid.org/0000-0002-3635-1297>


 Hee Eun Choi <https://orcid.org/0000-0003-0931-9539>


 Kyoung Yoon Ko <https://orcid.org/0000-0001-6616-5164>

 Sung Chul Seo <https://orcid.org/0000-0001-8301-6355>

 Donghee Koh <https://orcid.org/0000-0002-2868-4411>

 Donguk Park <https://orcid.org/0000-0003-3847-7392>

 Yeji Sung <https://orcid.org/0000-0003-2267-5490>

 Se-Eun Oh <https://orcid.org/0000-0002-0888-4969>

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.

I. 서 론

납(lead)은 은회색의 광택을 가지며 가공성이 좋고 내식성이 강해서 산업용으로 널리 사용되어 왔으나, 체내에 들어오면 대사되지 않고 체내 혈액, 연부조직, 뼈 속에 축적되며 여러 건강장해를 유발하는 대표적인 독성 금속이다(Wani et al., 2015). 특히 신경계에 미치는 영향이 큰데, 납에 장기간 노출될 경우 인지 능력 장애를 유발하고, 어린이의 경우 낮은 농도의 납 노출에도 민감하게 반응하여 행동 장애, 지적 능력 장애 등이 보고되었다(Rubin & Strayer, 2008). 또한 납에 장기간 노출될 경우 뇌와 신장에 손상을 주며, 임산부의 경우 유산 위험이 있고, 남성 생식능력 저하에도 영향을 준다(Sokol & Berman, 1991). 납 노출과 암 발생과의 관계에 대해 국제 암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 무기 납 및 화합물에 대한 6개의 코호트 연구결과에 기초하여 인체 발암 우려물질(Group 2A, probably carcinogenic to humans)로 분류 하였다(IARC, 2006). 이 6개 코호트 연구 중 4개 연구에서 납 노출에 의해 위암은 일관되게 30-50% 증가한다고 보고되었고, 신장과 뇌의 암은 일부 연구에서 발생 위험이 증가하였으나 일관되지는 않았다.

납은 내연기관 자동차의 노킹방지제로 유연휘발유로 사용되어 왔는데, 국내에서는 1987년부터 촉매장치 설치 의무화와 자동차 제조에 관한 규제가 시작되며 무연휘발유 판매가 이루어졌으며, 1993년에는 유연휘발유 판매가 금지되었다(NIER, 2016). 그러나 산업에서의 납 사용은 여전히 많은데, 국내 유통되는 납 및 납 화합물은 2006년 기준으로 약 48만톤으로 추정되었고 이 중 90%는 납괴로 유통되었다. 납괴의 약 90%는 납 축전지에 사용되고 나머지는 납 합금 및 납 화합물, 납 추, 라이닝, 전선제조 등에 사용되었다. 납 합금은 주로 전자산업에서 납땀(soldering)의 재료로 사용되었고, 납 화합물의 약 72%는 PVC 안정제, 17%는 광명단(Pb₃O₄), 나머지 11%는 리사지(PbO, litharge) 제조에 사용되었다. PVC 안정제는 사출업체 등 PVC 제조업체에서 PVC의 열분해를 막기 위해 사용되며, 광명단은 페인트의 방청제 즉 녹 방지를 위해 사용되고, 리사지는 도자기 유약, 유리 제조시 유리의 광택 및 성형의 안정성 확보를 위해 사용 된다(Park et al., 2008).

이와 같이 환경적 납 노출의 주요 원인인 자동차 휘

발유에 대한 규제는 1990년대에 실시되었으나 여러 산업에서의 납 사용은 계속되고 있기 때문에 사업장 근로자들의 직업적 노출 뿐만 아니라 사업장 주변 환경 오염의 원인으로 관리의 주요 대상이라고 할 수 있다(Park et al., 2019).

이에 본 연구는 국내에서 수행된 납 관련 직업적 노출 문헌 자료를 체계적으로 고찰하여 각 문헌에서 보고된 납 노출 농도를 산업, 공정, 연도별로 통합 하여 납의 직무노출 매트릭스(job-exposure matrix, JEM)를 만들고, 주요 납 노출 산업과 공정, 그리고 연도별 변화 추이 등 노출 특성을 평가하였다.

II. 대상 및 방법

1. 자료 수집 및 선택/배제 기준

국내 사업장을 대상으로 납 노출농도가 조사되고 peer-review된 후 발표된 문헌자료를 수집 하였다. 국내자료 수집 후 분석에 활용할 자료의 선택 및 배제 기준은 다음과 같았다.

- 선택 기준(inclusion criteria)
 - 공기 중 납 농도 측정 자료
 - 수집된 문헌 중 peer-review된 후 발표된 문헌 자료
 - 사업장 내부 공간에서 측정된 자료(근로자의 노출을 추정할 수 있는 자료)
 - 개인 노출 평가 및 지역 노출 평가 자료
- 배제 기준(exclusion criteria)
 - 생물학적 노출지표(예: 혈중 납, 요중 납) 조사 자료
 - 사업장 주변 및 일반 대기환경 측정 자료
 - 전문가들에 의해 검증되지 않은 채 발표된 자료 (정기적으로 발행되는 기관 잡지의 기고)

납, lead, 소변, 요중 납, 뇨중 납, 혈중 납, 폭로, 납 취급, 납 노출, 납 근로자 등 주요 키워드를 이용하여 학술연구정보서비스(Research Information Sharing Service, RISS), 국가과학기술정보센터 (National Digital Science Library, NDSL), 국내 학술지 데이터베이스 (DataBase Periodical Information Academic, DBpia), 한국학술정보(주) (Korean Studies Information Service System, KISS), 정책연구용역종합관리시스템 (Policy Research Information Service & Management,

PRISM), 국가정책연구포털 (National Knowledge Information System, NKIS)로부터 자료를 조사하여 총 495개의 문헌 정보를 수집하였고, 위의 선택/배제 기준에 의해 검토한 결과 총 14개의 문헌을 분석 대상으로 최종 선정하였다. 분석 대상 14개 문헌의 세부 정보는 Supplementary Table 1에 제시하였다.

연도별 납의 직업적 노출 수준의 변화 경향을 대기 환경 중 농도 변화와 비교하기 위해 추가로 대기 환경 중 납 농도 자료를 수집하였다. 자료 수집 기간은 1981

년부터 2018년까지 이고, 1980년대는 국립환경연구소 보고된 국내 대기환경 농도의 평균값을 이용하였고, 1990년부터 2018년까지는 환경부 대기환경연보로 보고된 대기환경 농도의 평균값을 이용하였다.

2. 산업 분류

문헌에서 보고된 자료의 산업 정보를 한국표준산업분류 10차 개정안(KSIC-10)에 따른 표준산업 코드와 코드명으로 재분류하였다. KSIC-10은 대분류(1-digit)부

Table 1. Weighted arithmetic mean concentration of lead by industry

Year	Industry (KSIC-10)		Process	N	WAM, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Type	Ref No.
	Code	Name					
1981	24	Manufacture of basic metals	Soldering	3	490.0	Area	3
1987-2006	282	Manufacture of batteries and accumulators	Lead battery manufacturing, casting, lead powder, plate pasting, hydro-setting, assembling	6635	281.6	Personal, Area	6,8,13,14
1994	232	Manufacture of refractory and non-refractory ceramic products	Glaze spraying	10	256.3	Personal	9
1994-2007	20131	Manufacture of metal oxides for inorganic pigments and related products	Litharge manufacturing	456	488.6	Personal, Area	6,10
1988, 1994-2007, 2018	24213	Manufacture of smelting, refining and alloys of lead and zinc	Preparation, casting, dismantling, smelting, refining	800	118.7	Personal, Area	6,8,10,11
1992-1994	2013	Manufacture of inorganic dyes, pigments, tanning materials and other coloring agents	Dyes and pigments manufacturing	36	103.1	Area	7
1994	291	Manufacture of general-purpose machinery	Assembling (brazing)	6	66.0	Personal	4
2012	24112	Manufacture of basic steel	Melting	100	63.7	Personal, Area	12
1994	241	Manufacture of basic iron and steel	Plating	5	40.8	Personal	4
1994	301	Manufacture of motor vehicles and engines for motor vehicles	Welding, brazing	55	30.1	Personal	4
1994	25121	Manufacture of industrial heating boilers and radiators	Radiator manufacturing (dipping, soldering, leak test)	43	25.2	Personal	6
1994	24123	Manufacture of steel wire	Plating	5	19.5	Personal	4
1994	285	Manufacture of domestic appliances	Assembling (welding)	20	18.2	Personal	4
1994	319	Manufacture of other transport equipment	Welding	5	15.0	Personal	4
1996	311	Building of ships and boats	Grand/Sub assembling (welding)	81	11.6	Personal	5
2003	303	Manufacture of parts and accessories for motor vehicles (new products)	Assembling, printing, surface processing, drying, processing	37	0.8	Personal	1
2004	861	Hospital activities	Radiation oncology department workshop	8	0.4	Area	2

KSIC-10: Korea Standard Industrial Classification 10th revision, N: number of samples, WAM: weighted average mean, Ref No.: reference number described in Supplementary Table 1

터 세세분류(5-digit)까지 구분되는데, 최대한 문헌에서 보고된 산업과 부합한 세세분류명을 할당하고자 하였고, 문헌에서 산업에 대한 충분한 정보가 없는 경우엔 상위 분류(대, 중, 소, 세분류)로 할당하였다.

3. 납 농도 추정

문헌마다 납 농도를 보고하는 방법이 다른데, 일부 자료에서는 산술평균(AM)만 기재된 자료가 존재하고, 일부 자료에서는 기하평균(GM), 기하표준편차(GSD)가 작성되어 자료의 통합 분석을 위해 대푯값을 사용해야 했다. JEM에 의해 유해인자의 인체 흡수와 노출 부하량(body burden)을 잘 나타내는 지수는 기하평균보다는 산술평균으로 알려져 있다(Seixas et al., 1988). 따라서 본 연구에서도 납 노출 수준을 문헌 보고 자료의 통합 평가를 위해 추정 산술평균(AM_EST)을 사용하였다.

문헌에서 보고된 산술평균이 있는 경우엔 그대로 추정 산술평균으로 사용하였고, 만일 최소-최댓값인 범위만 보고된 경우엔 최솟값과 최댓값을 대수로 변환시키고 그 중간값(μ_1)과 대수로 변환한 최솟값과 최댓값의 차이를 4로 나눈 값(σ_1^2)을 구하여 아래 식 (1)에 대입하여 추정 산술평균을 계산하였다.

$$AM_EST1 = \exp[\mu_1 + 1/2 \sigma_1^2] \quad (1)$$

기하평균과 기하표준편차를 함께 보고한 경우는 아래 식(2)에 대입한 후 추정 산술평균을 계산하였다(Aitchison & Brown, 1963).

$$AM_EST2 = GM \times \exp[1/2 (\ln(GSD))^2] \quad (2)$$

최종 추정 산술평균 결정은 1) 문헌에서 보고된 산술평균값, 2) 최소-최댓값을 이용한 추정값(AM_EST1), 3) 기하평균과 기하표준편차로 추정값(AM_EST2)의 우선순위에 의해 선정하였다.

동일 변수(예: 업종, 공정 등)에 대해 여러 문헌에서 보고된 자료를 통합 분석 할 때는 각 보고된 문헌의 시료 수가 다르기 때문에 시료 수를 가중한 가중산술평균(weighted arithmetic mean, WAM)을 아래 식 (3)과 같이 계산하였다. 예를 들어, 축전지 제조업 관련 2개의 문헌에서 각각 추정 산술평균 농도가 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=10), 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=40)일 경우 축전지 제조업의 대표 산술평

균 농도는 시료수를 고려하지 않을 경우 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 되지만, 시료수를 가중하여 구하면 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 된다.

$$WAM = \frac{(N_1 \times AM_1) + (N_2 \times AM_2) + \dots + (N_n \times AM_n)}{N_t} \quad (3)$$

여기서 N=시료 수, AM=산술평균, Nt=총 시료 수이다.

III. 연구결과

1. 산업, 공정 별 납 농도 수준

총 14개 문헌에서 8,305개의 공기 중 납 측정 자료가 확인되었고, 보고된 자료를 산업별, 공정별 그리고 연도별 납 농도 수준으로 정리 하였다. 문헌에서 보고한 세부 결과와 추정 산술평균 농도는 Supplementary Table 1에서 확인할 수 있다.

표준산업 할당 결과 Table 1과 같이 17개 산업별 WAM이 추정되었다. 산업별 납 농도(WAM) 수준을 높은 순서 대로 비교해 보았을 때, '1차 금속 제조업(KSIC=24)'(490.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 높았고, 다음으로 '무기 안료용 금속 산화물 및 관련 제품 제조업(KSIC=20131)'(488.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), '일차전지 및 축전지 제조업(KSIC=282)'(281.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), '내화 비내화 요업제품 제조업(KSIC=232)'(256.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), '연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업(KSIC=24213)'(118.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), '무기안료, 염료, 유연제 및 기타 착색제 제조업(KSIC=2013)'(103.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), '일반 목적용 기계 제조업(KSIC=291)'(66.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), '제강업(KSIC=24112)'(63.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 공기 중 납 노출기준(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다.

납 노출 기준을 초과한 산업의 공정 중 최대 추정 산술평균 농도를 나타낸 공정들을 Table 2에 요약하였다. '일차전지 및 축전지 제조업(KSIC=282)'의 경우 납 가루가 도포된 기판을 버프 연마기에 의해 연마(grinding) 하는 공정이 5,304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 수준을 보였고, '무기 안료용 금속 산화물 및 관련 제품 제조업(KSIC=20131)'은 리사지 제조 공정(1,125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), '내화 비내화 요업제품 제조업(KSIC=232)'은 유약 스프레이 공정(987.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 그리고 '연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업(KSIC=24213)'은 제련(smelting) 공정(662.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 노출기준의 10배 이상 수준을 나타냈다.

Table 2. Comparison of the maximum estimated arithmetic mean concentration by process in an industry where the weighted arithmetic mean concentration exceeds the occupational exposure limit

Industry(KSIC-10 code)	Process	Maximum AM_EST	Year	Ref. No.
Manufacture of batteries and accumulators (282)	Grinding	5,303.8	1994	6
	Casting	2,296.4	1994	6
	Assembling	1,138.8	1994	6
	Lead powder and pasting	695.4	1994	6
	Soldering	607.8	1994	6
	Melting	234.5	1994	6
	Grid production	108.2	1994	6
	Hydrosetting	60.9	1988	8
Manufacture of metal oxides for inorganic pigments and related products (20131)	Litharge manufacturing	1,125.4	1996	10
Manufacture of refractory and non-refractory ceramic products (232)	Glaze spraying	987.3	1994	9
Manufacture of smelting, refining and alloys of lead and zinc (24213)	Smelting	662.4	1994	6
	Dismantling	236.3	1988	8
	Refining	121.1	2018	11
	Casting	75.1	2018	11
	Preparation	26.3	2018	11
Manufacture of basic metals (24)	Soldering	490.0	1981	3
Manufacture of inorganic dyes, pigments, tanning materials and other coloring agents (2013)	Dyes and pigments manufacturing	221.0	1992	7
Manufacture of basic steel (24112)	Melting	86.4	2012	12
Manufacture of general-purpose machinery (291)	Assembling	66.0	1994	4

KSIC-10: Korea Standard Industrial Classification 10th revision, AM_EST: estimated arithmetic mean, Ref No.: reference number described in Supplementary Table 1

2. 연도별 납 농도 수준

전체 17개 산업 자료를 이용하여 각 조사 연도별 WAM 농도를 비교하면 Figure 1과 같이 1981년부터 2018년까지 매년 약 13.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 감소하는 추세를 보였고($R^2=0.445$), 2000년 이후 노출기준(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이하의 WAM 농도가 확인되었다. 일반 대기환경 중 납 농도의 경우 1980년대까지 0.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하였다가 1990년대부터 급격히 감소하는 추이를 보였다 (Figure 1). Figure 1의 연도별 WAM 농도는 17개의 산업 자료가 혼합된 것이기 때문에 보다 동질적인 동일 산업의 유사 사업장을 대상으로 연도별 관찰된 자료에 대한 비교가 필요하다.

총 17개 산업 중 ‘일차전지 및 축전지 제조업 (KSIC=282)’, ‘연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업

(KSIC=24213)’, 그리고 ‘무기 안료용 금속 산화물 및 관련 제품 제조업(KSIC=20131)’의 리사지 제조업에서 조사된 시료들의 연도분포는 각각 1987년-2006년, 1988년-2018년, 1994년-2007년으로 연도별 변화 경향 파악이 가능하였다. 특히 위 3개 업종에 대한 자료 중 두 개 문헌(Choi et al.(2010), Choi et al.(2007))에서 동일한 기관(순천향대학교 환경산업의학연구소)에서 다년간 측정된 결과를 보고하고 있어 이 문헌 자료를 활용하여 연도별 추이 변화 분석을 하였다. 세 개 업종의 자료에 대한 연도별 비교 결과 Figure 2와 같이 축전지 제조업은 매년 22.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($R^2=0.4884$), 납 제련업은 29.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($R^2=0.6885$), 그리고 리사지 제조업은 82.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($R^2=0.6392$) 씩 매년 감소하는 것으로 나타났다.

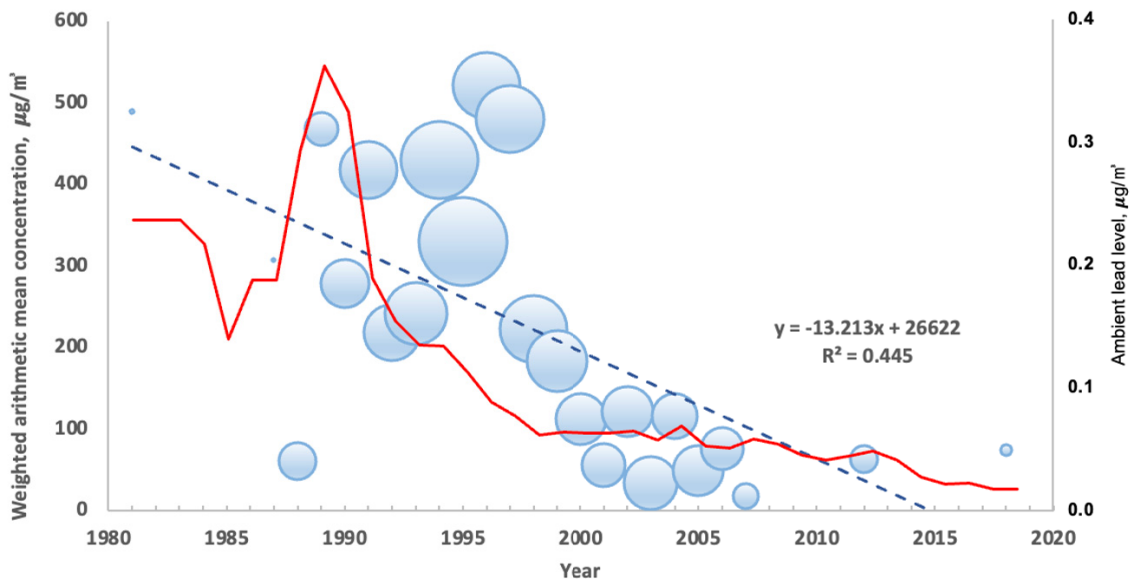


Fig 1. Annual changes in occupational exposure to lead (The center of each bubble plot indicates the weighted arithmetic mean concentration of occupational exposure, and the bubble area reflects the number of samples. The curved line graph indicates ambient air mean concentration of lead.)

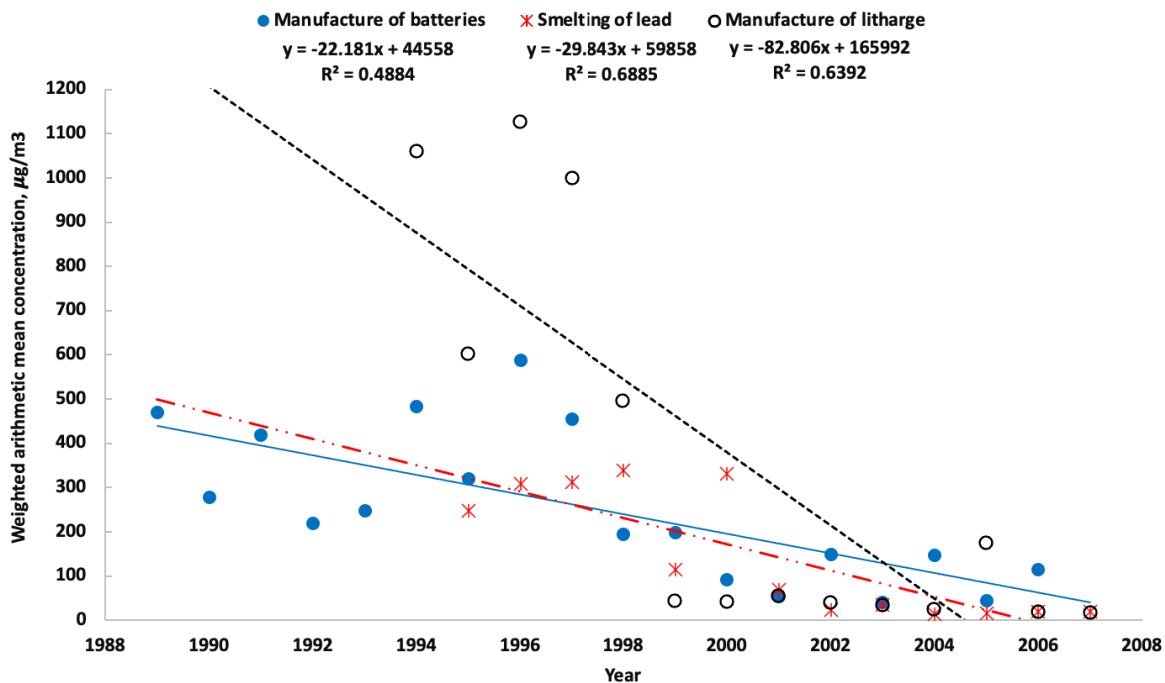


Fig 2. Comparison of annual changes in lead exposure levels between manufacture of batteries, smelting of lead, and manufacture of litharge.

IV. 고찰

본 연구는 국내 납 취급 사업장에서 조사된 공기 중 납 노출 농도를 최대한 수집하여 주요 산업, 공정 및 연

도별 변화 추이를 분석하고자 하였다. 환경적 납 노출 연구나 혈중 납 농도 등의 자료를 모두 제외하였고, 작업장 공기 중 납 노출 농도가 보고된 문헌 자료만을 대상으로 하였기에 최종 분석된 논문은 14편으로 많지 않

았다. 각 문헌에서 채취 시료수의 정보가 대부분 제시되었으나, 한 문헌(Chung(1982))의 경우 시료 수 정보가 없고 산술평균, 최소값, 최댓값만 제시되어 있어 시료 수는 최소 3개 이상이라고 보아 시료 수를 3개로 간주하여 분석하였다. 최종 14개 문헌에서 보고된 총 시료 수는 8,305개였고, 17개 산업에 대한 납 노출 수준을 확인할 수 있었다. 그러나 전체 시료 수의 80%(6,635개)가 '일차전지 및 축전지 제조업(KSIC=282)'에서 조사되었고, 전체 시료 수의 9.6%(800개)는 '연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업(KSIC=24213)', 그리고 5.5%(400개)는 '무기 안료용 금속 산화물 및 관련 제품 제조업(KSIC=20131)'의 리사지 제조 관련 자료로 전체 시료 수 중 95%가 이 세 업종에서 조사되었다. Koh et al.(2021)은 2015년부터 2016년까지의 작업환경측정 자료 중 납 측정자료 47,575개를 이용하여 같은 해 특수건강진단 실시 자료(혈중 납)와 매칭 한 결과 총 64개 산업(소분류)에 대한 납 노출 수준을 보고하였다. 이와 비교했을 때, 본 연구에서 수집한 국내 문헌 자료가 작업환경측정 제도에 의해 조사되고 있는 납 노출 산업 수에 비해 매우 적은 산업에 대해서만 보고되었음을 알 수 있다.

14개 문헌에서 보고된 납 노출 수준은 Koh et al.(2021)의 작업환경측정 자료에 대한 2015년 2016년 납 노출수준과 비교하면 매우 높은 수준이었다. 문헌자료 분석 결과 총 17개 산업 중 8개 산업의 WAM 값이 노출기준을 초과하였는데, Koh et al.(2021)의 연구결과에서는 평균 농도가 노출기준을 초과하는 업종은 없었다. '일차전지 및 축전지 제조업(KSIC=282)'의 경우 본 연구 결과 1987년부터 2006년까지 각 년도별 WAM 농도는 $39.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2003년)부터 $587.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1996년)까지였고, 2003년($39.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 2005년($44.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 제외하고 모두 노출기준을 초과하였다(Figure 2). 반면에 Koh et al.(2021)는 산술평균 농도는 $6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 95 백분위(X95) 농도는 $22.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모두 노출기준의 1/2 미만 수준이었다. 이러한 차이는 조사 년도의 차이가 크기 때문으로 판단되는데, Figure 2에서 보듯이 축전지 제조업의 경우 매년 약 $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 감소하는 추이를 보이고 있다.

대기 중 납 농도와 직업적 납 노출 수준의 연도별 변화 추이는 Figure 1과 같이 비슷한 경향을 보였다. Oh et al.(2017)은 대기 중 납 농도는 유연휘발유에 대한 사용 금지 조치 이후 1990년대부터 급격히 감소하기

시작해서 2010년대 이후에는 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮아졌고, 대기 중 연평균 농도의 변화와 일반인의 혈중 납 농도의 변화가 동일한 경시적 양상을 보여서 납에 대한 규제조치가 노출 농도 저감에 영향을 주었다고 분석하였다.

국내에서 보고되었던 주요 직업관련 납 중독 사건은 1978년 장항제련(Lee & You, 1992), 1983년 반월(Lee et al., 2004), 1986년 축전지 회사 집단 납 중독(Kang et al., 1998) 등 주로 1970-80년대에 발생하였고, Lee et al.(2014)은 특수건강진단 자료를 분석한 결과 2000년부터 2013년까지 혈중 납 농도가 일반 인구 집단 보다는 노출량이 높으나, 현저히 감소 추세를 보였다고 보고하였다. 본 연구 결과에서도 납의 대표적인 노출 산업인 축전지 제조업, 제련업, 리사지 제조업의 연도별 노출수준이 Figure 2와 같이 지속적으로 낮아지는 경향을 보였으며, 특히 2000년대에 노출기준 미만 수준을 보였다. 이는 납 중독 사례 보고에 따른 고용부의 관리 감독이 강화되고 2009년 납의 허용기준 설정 등 규제 강화의 영향이라고 볼 수 있다. 그러나 Koo et al.(2013)은 납 제련 업체가 아닌 납 페인트가 칠해진 고철을 용해하는 작업장 근로자들의 집단 납 중독 사례를 보고하였고, 2015년 부산 녹산단지 주물공장 근로자의 납 중독 사례가 이슈화 되는 등 여전히 2000년 이후에도 직업적 고노출 사례가 보고되고 있다. 특히 납 제련 및 재생 업체는 주요 납 노출 산업이며, 사업장 인근 주민들에게도 납 노출의 주요 원인이 될 수 있기 때문에 관리가 필요하다(Kim et al., 2017; Park et al., 2019).

전 세계적으로 1차 납 제련 양은 감소하는 반면 축전지 납 재생 등 2차 제련 양이 증가하는 추세를 보이고 있고, 특히 전기자동차 생산 확대에 따른 납 수요의 75%는 배터리산업이 차지한다고 분석하였다(Roberts, 2003). 국내 납 생산 및 유통 실태에 대한 최근 Sohn(2019)의 보고에 따르면 1986년 고려아연에서 연산 35,000톤 규모의 납제련을 시작하며 납 생산량이 증가하였으나 2010년부터는 납 재생(2차 제련)에 따른 생산비율이 증가하여 2015년에 약 53%를 차지하였다. 납은 주로 납 축전지(약 85%)용으로 사용되고 전선 피복용, 납땀용 등에 일부 사용되며, 납 화합물은 염화비닐 안정제나 안료로 사용되는 것으로 보고하고 있다. 따라서 향후 납 노출 관리를 위해 주목해야 할 산업은 납 축전지 제조 및 납 재생을 위한 2차 제련업, 그리고 납

제련업이 아니지만 고철 용해 공정을 갖고 있는 재생업이라고 할 수 있다.

본 연구는 몇 가지 제한점이 있다. 최대한 국내 납 노출 사업장을 대상으로 조사된 정량적 노출 자료를 수집하고자 하였으나 일부 누락된 자료가 있을 수 있다. 특히 주로 국내 자료 검색사이트를 위주로 검색하였기 때문에 국외 저널에 발표된 문헌의 경우 제외되었을 가능성이 있다. 또한 혈중 납 자료도 직업적 납 노출 수준을 판단할 수 있는 지표이지만 본 연구에서는 공기 중 노출 농도 자료만을 대상으로 하였기 때문에 제외하였다. 따라서 분석 대상 문헌이 14편으로 적기 때문에 국내 납 노출 산업과 공정을 모두 대표한다고 볼 수 없다. 그러나 14편 모두 peer-review된 문헌 자료이기 때문에 자료의 신뢰성이 높다는 장점이 있으며, 특히 직업적 납 노출이 높은 주요 산업과 공정 및 연도에 대한 정보를 제공하는 점에서 의미가 있다. 향후 국내 작업환경측정 자료를 포함하여 보다 많은 노출 자료를 활용하여 납의 주요 노출 산업, 공정 및 연도별 경향에 대한 평가가 필요하다고 판단된다.

V. 결 론

1981년부터 2018년까지 국내 문헌에서 보고된 납의 직업적 노출 자료를 수집하여 재 분석한 결과 총 14개 문헌에서 17개 산업, 8,305개의 공기 중 납 측정 자료가 확인되었고, 전체 자료 중 95%가 3개 산업(축전기 제조업, 납 제련업, 리사지 제조업)에 집중되었다.

특히 1차 금속 제조업은 1981년, 무기 안료용 금속 산화물 및 관련 제품 제조업(1996년), 일차전지 및 축전기 제조업(1988년, 1994년), 내화 비내화 요업제품 제조업(1994년), 연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업(1994년, 1988년, 2018년), 무기안료, 염료, 유연제 및 기타 착색제 제조업(1992년), 일반 목적용 기계 제조업(1994년), 제강업(2012년) 등 8개 산업의 경우 2018년까지도 노출기준을 초과하는 공정이 확인되었다. 연도별 노출 자료가 확인된 3개 산업(축전기 제조업, 납 제련업, 리사지 제조업)의 경우 10여년에 걸쳐 노출 경향을 확인할 수 있었는데 3개 산업 모두 지속적으로 노출 수준이 낮아지는 경향을 보였다. 향후 납 및 납 화합물의 유통 전망을 고려할 때 납 축전기 제조업과 납 재생을 위한 2차 제련업이 주요 납 노출 관리 산업이라고 할 수 있다.

References

- Aitchison J, Brown JAC. The lognormal distribution. Cambridge University 1963 Press: 8
- Choi JW, Kim NS, Cho KS, Ham JO, Lee BK. The change of air lead concentration 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, Ahn KD, Lee BK. A study on the change of air lead concentration in lead-acid battery plants. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2007;17(4):261-271
- Chung KS. The study on health status of workers in metal manufacturing industries. Kor. J. Env. Hlth. soc. 1982;8(1):67-80
- International Agency Research Center(IARC). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. 2006. [Accessed 2021]. Available from: URL:https://monographs.iarc.who.int/
- Kang PG, Kim YB, Ahn IS, Lee GJ. Occupational lead exposure of storage battery industry workers in Korea. Korean J Occup Environ Med 1998;10(4):438-49(DOI:10.35371/kjoem.1998.10.4.438)
- Kim SH, Kim YH, An HC, Sung JH, Sim CS. Levels of blood lead and urinary cadmium in industrial complex residents in Ulsan. Ann Occup Environ Med. 2017; 29(1):26(DOI:10.1186/s40557-017-0179-7)
- Koh DH, Park JH, Lee SG, Kim HC, Jung HJ et al. Estimation of lead exposure intensity by industry using nationwide exposure databases in Korea. Saf Health Work 2021;12(4):439-444(DOI:10.1016/j.shaw.2021.07.008)
- 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 (DOI:10.35371/kjoem.2012.24.4.441)
- Lee IJ, Ahn KD, Jo KS, Kim NS. A study on the soil pollution in lead industry. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2004;14(3):290-300
- Lee JS, You IS. A study on contents of heavy metal in water, soil, rice and urine of inhabitants along the Kum river. Korean J Occup Environ Med 1992;18(1):69-75
- Lee SG, Kim JH, Park JO. In-depth analysis of lead exposure using special health examination data. Occupational Safety and Health Research Institute.; 2014. p. 9-16
- National Institute of Environmental Research(NIER). Understanding regulations for automobile environment management. 2016. [Accessed 2021

- Dec. 29]. Available from: URL:https://www.nier.go.kr/NIER/tprc/index.do
- Oh SE, Kim GB, Hwang SH, Ha M, Lee KM. Longitudinal trends of blood lead levels before and after leaded gasoline regulation in Korea. *Environ Health Toxicol.* 2017;32(4):e2017019(DOI:10.5620/eh.t.e2017019)
- Park CH, Park YK, Oh YH, Choi IJ, Cha WS et al. Comparison of airborne lead concentration in and around lead production plant. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019;29(1):34-41(DOI:10.15269/JKSOEH.2019.29.1.34)
- Park JS, Byun IG, Cho KA. Survey on the status of using lead and its compounds in Korea.; KOSHA. 2008. p. 132-133
- Roberts H. Changing patterns in global lead supply and demand. *J Power Sources* 2003;116(1-2):23-31 (DOI:10.1016/S0378-7753(02)00701-2)
- Rubin R, Strayer DS. Environmental and Nutritional pathology. *Rubin's pathology Clinicopathologic Foundations of Medicine*. 5th ed. Lippincot Williams & Wilkins.; 2008. p. 266-268
- Seixas NS, Robins TG, Moulton LH. The use of geometric and arithmetic mean exposures in occupational epidemiology. *Am J Ind Med* 1998;14(4):465-77 (DOI:10.1002/ajim.4700140410)
- Sohn HS. Current status of lead smelting and recycling. *Korean Institute of Resources Recycling* 2019;28(4):3-14(DOI:10.7844/kiirr.2019.28.4.3)
- Sokol RZ, Berman N. The effect of age of exposure on lead-induced testicular toxicity. *Toxicology* 1991;69(3):269-278(DOI:10.1016/0300-483X(91)90186-5)
- Wani AL, Ara A, Usmani JA. Lead toxicity: a review. *Interdiscip Toxicol* 2015;8(2):55-64 (DOI:10.1515/intox-2015-0009)

<저자정보>

최상준(교수), 서성철(교수), 박주현(교수), 고동희(교수), 김환철(교수), 박동욱(교수), 최희은(석사과정), 성예지(박사과정), 오세은(박사과정), 고경윤(석사과정)