

혈장 중 납의 만성독성 지표로의 활용에 관한 연구

이성배^{1*} · 임철홍¹ · 김남수²

¹산업안전보건연구원 산업화학연구실, ²순천향대학교 환경산업의학연구소

The Study on Possibility of Use of Lead in Plasma as a Chronic Toxicity Biomarker

Sung-Bae Lee^{1*} · Cheol-Hong Lim¹ · Nam Soo Kim²

¹Chemicals Research Bureau, Occupational Safety & Health Research Institute

²Institute of Environmental and Occupational Medicine, Soonchunhyang University

ABSTRACT

Objectives: This study was performed to confirm whether plasma lead can be used as a chronic biomarker for the biological monitoring of exposure to lead.

Methods: Lead concentrations in 66 plasma samples from retired lead workers (G.M. 60.25 years, Median 61.00 years) and 42 plasma samples from the general population (G.M. 53.76 years, Median 56.50 years) were measured using ICP/Mass. Tibia, whole blood, hemoglobin, hematocrit, and blood zinc protoporphyrin (ZPP) concentrations and urinary δ -aminolevulinic acid (δ -ALA) were measured for correlation analysis with plasma lead.

Results: The geometric mean concentration of lead in plasma was 0.23 μ g/L for the retired lead workers and 0.10 μ g/L for the general population sample. A simple correlation analysis of biomarkers showed that plasma lead concentration among the retired lead workers was highly correlated with lead concentration in the tibia and with blood lead concentration, and the plasma lead concentration among the general population correlated with ZPP concentration in the blood. The lead concentration in the tibia and the lead concentration in the whole blood increased with length of working period. As the period in the lead workplace increased, the ratio of lead in plasma to lead concentration in whole blood decreased.

Conclusion: This study confirmed the possibility of a chronic biomarker of lead concentration in blood plasma as a biomarker. In the future, comparative studies with specific indicators will lead to more fruitful results.

Key words: General population, ICP/Mass, lead, plasma, retired lead worker

I. 서 론


납은 푸른빛이나 은회색을 띠는 연성의 중금속으로, 일반 금속 중에서도 유해성이 가장 많이 알려져 있다. 또한 납은 파괴되거나 소멸되지 않고 다른 물질로도 변환되지 않는 특성을 가지고 있으며, 재생이 용이하여 계속적으로 사용하기 때문에 일반 생활환경에서 줄어들지 않고 계속적으로 양이 증가하고 있다. 납의 용도는 배터리 제조,


각종 화학반응, 제조공정의 안정제, 유리 제조, 페인트류 제조에 사용되고 있으며 기타 전선 피복제, 연·경화제, 합금, 도금, 용접 등 매우 광범위한 분야에 걸쳐서 사용되고 있다(MoE, 2007). 이중 축전지에 사용된 납은 2차 제련과정을 거쳐 약 80%가 회수되어 재사용된다.


현재 납의 노출기준은 국내 시간가중평균노출기준(Time Weighted Average, TWA)와 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental

*Corresponding author: Sung-Bae Lee, Tel: 042-869-8512, E-mail: sblee@kosha.or.kr
Chemicals Research Bureau, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, 30, Expo-ro 339beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34122

Received: March 7, 2019, Revised: June 19, 2019, Accepted: June 25, 2019

 Sung-bae Lee <https://orcid.org/0000-0001-5539-3081>

 Cheol-Hong Lim <https://orcid.org/0000-0001-7805-7259>

 Nam Soo Kim <https://orcid.org/0000-0002-2534-012X>

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.

Industrial Hygienists, ACGIH)에서 0.05 mg/m³로 규정하고 있으며, 생물학적 노출지수(Biological Exposure Indices, BEI)는 전혈 중 납 농도의 경우 30 µg/dl, 혈중 ZPP(Zinc Protoporphyrin) 농도의 경우 적혈구에서 250 µg/dl, 전혈에서 100 µg/dl로 규정하고 있다(ACGIH, 2001). 전혈 중 납 농도의 반감기는 4~6주 이므로 최근의 납 노출수준을 잘 반영하고 있어서 아직도 현직 근로자에 대한 납 중독을 평가하는 대표적인 지표로 이용되고 있다. 납 노출 사업장에서 오랫동안 종사하였다가 퇴직하는 근로자들이 납 중독에 의한 영향을 보이고 있는데, 실제로 반감기가 1달 정도에 불과한 전혈 중 납 농도가 의외로 높게 나타나고 있다. 이러한 이유는 여러 연구자들(Cake et al., 1996; Hu et al., 1998; Kim et al., 2001; Kim et al., 2006)이 연구한 결과에 따르면, 골(骨) 내의 납이 혈액 속 혈장을 통하여 인체 조직으로 이동하게 되며 조직 내에서 납이 활성화되어 만성적인 독성 영향을 나타내는 것으로 보고 있다.

이러한 생체 내 골 중 납의 농도를 분석하기에는 K셸 x-선 형광(K-shell x-ray fluorescence, KXRF) 시스템이 많이 활용되고 있으나, 불활도의 고려 문제, 부피가 큰 장비, 고가의 유지관리비, 라이선스 절차 필요 등의 단점이 있다(Behinaein et al., 2017; Gherase and Al-Hamdani, 2018; Specht et al., 2018). 최근에는 휴대용 KXRF를 개발하였으나 부드러운 조직두께에 제한적으로만 사용될 수 있다(Specht et al., 2017). 최근까지 전혈을 이용하여 분석하고 있는 원자흡광도법(atomic absorption spectrometry, AAS)은 매트릭스의 영향을 많이 받고, 약간의 전처리로도 상이한 분석결과를 주기 때문에 정확한 결과를 얻기 어려운 단점이 있다(Park & Kim, 1997; Choi & Lee, 2002; Palmer et al., 2006). 이와 비교하여 유도결합플라즈마 질량분석기(inductively coupled plasma-mass spectroscopy, ICP/Mass)는 높은 감도, 낮은 정량한계, 우수한 직선성, 양호한 정밀성과 정확성의 장점을 가지고 있다(Lee et al., 2012; Lee et al., 2013).

납에 노출된 임신여성이나 어린이들에 대한 연구 보고(Cake et al., 1996; Hu et al., 1998; Hernández-Avila et al., 1998; Barbosa et al., 2005)에 따르면 체내(골)에 축적된 납이 장기간 동안 혈액을 통하여 생체내로 노출되어 독성영향을 나타내고 있으며, 이 때 골 중 납은 혈장을 이동경로로 이용하고 있다. 이를 볼 때, 납 노출 사업장에서 오랫동안 근무하였던 퇴직 근로자의 경우도 골 중 납이 생체내로 노출되어 만성독성을 일으키게 될 것

이다. 따라서 본 연구는 장기간 납에 노출되었던 납 사업장의 퇴직 근로자와 일반인의 혈장 중 납 농도를 분석하였으며, 이 자료와 골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도 등과의 상관관계를 비교하고 혈장 중 납 농도의 생물학적인 만성지표로서의 유용성을 검토하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상은 동일한 납 노출 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직 근로자 66명과 납 노출 사업장에서 근무 경력이 없는 일반인 42명을 대상으로 하였다. 납 노출 사업장의 근무경력이 있는 퇴직 근로자는 2010년도에 S대학교 환경산업의학연구소에서 조사한 자료와 혈액은행의 혈장시료를 이용하였으며, 노출 사업장에서 근무 경력이 없는 일반인은 2004년도의 조사 자료와 혈액은행의 혈장시료를 이용하였다. 상기의 시료는 경골(tibia)내의 납 농도 측정 데이터가 있는 시료로 혈장 중 납 농도와 비교를 위해서 혈액은행 시료 중에서 선별하였다. 기타 개인관련 연구변수인 근무기간 및 연령, 성별, 음주 및 흡연여부 등은 S대학교 환경산업의학연구소에서 기 실시한 표준화된 설문지를 이용한 결과를 활용하였다.

2. 시료의 제조

혈장시료 제조에 사용하는 초자 기구들은 10% 및 5% 질산수용액 용기에 하루이상 담근 후 초 순수 탈 이온수로 깨끗하게 세척하고 건조시켜 사용하였다. ICP/Mass 시료 주입기 세척 용액은 18MΩ의 초 순수 탈 이온수에 반도체급 HNO₃을 희석하여 1% v/v HNO₃을 제조하여 사용하였다. 혈장시료의 전처리는 Schütz et al.(1996)이 제안하고 Bergdahl et al.(1999)와 Rezende et al.(2010)이 사용하였던 방법을 기반으로 Triton X-100 0.1 g/L, Na₂EDTA 0.2 g/L, 28% 암모니아수 5.0 g/L, 그리고 내부표준용액(internal standard solution) Rh 1 µg/L 탈이온 희석용액을 혼합 제조하였다(Lee et al., 2012). 혈장시료 분석은 오염을 최대한 줄이기 위하여 class 1,000 청정실 안에 설치한 무균실험대 내에서 전처리 작업을 수행하였으며, 분석에 관한 그 외의 모든 작업도 class 1,000 청정실 안에서 실시하였다.

3. 비교지표

납 관련 생물학적 독성지표인 경골 중 납 농도, 전혈

중 납 농도, 혈중 ZPP 농도, 그리고 요중 δ -ALA(δ -aminolevulinic acid) 배설량, 혈색소량, 적혈구용적률 등은 S대학교 환경산업의학연구소에서 제공받아 활용하였다.

4. 자료의 분석

납 노출 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직근로자 66명과 납 노출 사업장에 근무 경력이 없는 일반인 42명을 대상으로 하였으며, 납 노출지표, 혈장 중 납 농도 등의 검사 결과에 대한 상관성은 PASW statistics version 18(IBM SPSS, USA) 및 Sigmaplot 12®을 이용하여 분석하였다. 혈장 중 납 농도를 종속변수로 하고 독립변수는 전혈 중 납 농도, 혈중 ZPP 농도, 요중 δ -ALA 배설량, 혈색소량, 혈구 용적률, 흡연 및 음주여부로 하였으며, 퇴직근로자 집단의 경우 납 노출 사업장 근무기간에 따른 단순상관 분석을 수행하였고, 일반인 집단에 대해서는 연령에 따른 단순상관 분석을 수행하였다. 아울러, 근무기간에 따른 퇴직근로자 집단의 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 그리고 혈장 중 납 농도에 대하여 등분산 검정을 실시하였으며, 등분산 되지 않았을 경우 Kruskal-Wallis test로 검정하였고, 유의성이 인정된 경우에는 군간 차이를 Dunn's Rank Sum test로 분석하였다.

III. 결 과

Table 1은 납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단과 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단의 성별과 연령을 비교한 것이다. 납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 42명에 대한 성별의 경우 남성은 17명, 여성은 25명이었으며, 연령은 35세부터 69세(중앙값, 56.5세)이었고, 기하평균에 따른 연령은 53.76세이었다. 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴

직 근로자 66명에 대한 성별의 경우 남성은 13명, 여성은 53명이었으며, 연령은 47세부터 72세(중앙값, 61.0세)이었고, 기하평균에 따른 연령은 60.25세이었다.

연구결과 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직 근로자들 집단의 경우 혈장 중 납의 기하평균 농도는 0.23 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 납 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단의 경우 혈장 중 납의 기하평균 농도는 0.10 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 혈장 중 납 농도는 퇴직근로자 집단이 일반인 집단보다 약 2배 높았으며, 퇴직근로자 집단에서 혈장 중 납 농도는 전혈 중 납 농도(45.7 $\mu\text{g/L}$)의 약 0.50% 수준이었다. 퇴직근로자 집단의 tibia누적 납 농도는 27.15 mg/kg이었으며, 일반인 집단의 tibia누적 납 농도는 7.70 mg/kg이었다.

Table 2에서 보는바와 같이 납 노출 사업장 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단의 생체지표에 대한 단순 상관관계 분석결과, 혈장 중 납 농도는 경골 중 납 농도(0.612) 및 혈중 납 농도(0.768)와 높은 양의 상관성을 보였다. 그러나 혈중 ZPP 농도, 요중 δ -ALA 배설량과는 비교적 낮은 상관성을 보였다. 이 중에서 혈장 중 납 농도와 경골 중 납 농도의 경우 금연과 음주하는 군에서 0.753으로 가장 높은 상관성을 보였으며, 혈장 중 납 농도와 전혈 중 납 농도의 경우 흡연 및 음주하는 군에서의 상관관계가 0.946으로 전체집단보다 높은 상관성을 보였다. 이와 비교하여 Table 3에서 보는바와 같이 납 노출 사업장 근무경력이 없는 일반인 집단의 생체지표에 대한 단순 상관관계 분석결과, 혈장 중 납 농도는 혈중 ZPP 농도와 0.52로 가장 높은 양의 상관성을 보였다. 이 중에서 금연 및 음주하는 군에서 혈장 중 납 농도와 경골 중 납 농도의 상관관계가 0.768로 전체집단보다 높은 상관성을 보였고, 혈장 중 납 농도와 전혈 중 납 농도의 상관관계에서도 0.529로 높은 상관성을 보였다.

Table 4는 납 노출 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직

Table 1. Gender and age comparison of the general population group and the retired lead workers group

Group	Gender	Persons	GM*(GSD [†]) (ages)	Median (ages)	Min (ages)	Max (ages)
General population	Total	42	53.76(1.21)	56.50	35	69
	Men	17	45.76(1.21)	47.00	35	63
	Women	25	60.00(1.08)	59.00	52	69
Retired lead workers	Total	66	60.25(1.10)	61.00	47	72
	Men	13	59.01(1.14)	61.00	47	70
	Women	53	60.56(1.09)	61.00	47	72

*GM : Geometric Mean

†GSD : Geometric Standard Deviation

Table 2. Summary statistics of study subjects by lead concentration of the retired lead workers

Variables	Unit	r (vs Pb in plasma)	GM(GSD)	Median	Max	Min
Total (exposed to lead): 66						
Tibia	mg/kg	0.612	27.15±32.92 [¶]	23.00	175.00	-10.00
ZPP [*]	μg/L	0.113	53.81(1.28)	54.50	89.00	28.00
ALA [†]	mg/L	0.065	1.79(1.68)	2.15	4.03	0.38
PB [‡]	μg/L	0.768	45.7(17.3)	42.1	178.2	19.4
PP [§]	μg/L	1.000	0.23(0.002)	0.21	0.97	0.10
Smoking and drinking 4/66						
Tibia	mg/kg	0.617	83.75±61.55 [¶]	64.50	173.00	33.00
ZPP [*]	μg/L	-0.693	42.31(15.41)	42.00	65.00	28.00
ALA [†]	mg/L	-0.921	2.53(0.59)	2.59	3.16	2.00
PB [‡]	μg/L	0.946	110.1(38.4)	118.2	158.6	66.9
PP [§]	μg/L	1.000	0.42(0.22)	0.47	0.70	0.23
Smoking and no-drinking 1/66						
Tibia	mg/kg	-	12			
ZPP [*]	μg/L	-	51			
ALA [†]	mg/L	-	4.03			
PB [‡]	μg/L	-	57.7			
PP [§]	μg/L	-	0.45			
No-smoking and drinking 10/66						
Tibia	mg/kg	0.753	38.10±51.80 [¶]	26.00	175.00	0
ZPP [*]	μg/L	0.611	49.34(14.31)	46.50	89.00	41.00
ALA [†]	mg/L	-0.468	2.22(0.85)	2.22	3.93	1.04
PB [‡]	μg/L	0.841	53.2(58.6)	43.5	178.2	23.6
PP [§]	μg/L	1.000	0.30(0.31)	0.22	0.97	0.12
No-smoking and no-drinking 51/66						
Tibia	mg/kg	0.154	20.86±19.31 [¶]	22.00	66.00	-10.00
ZPP [*]	μg/L	0.095	55.84(12.21)	60.00	82.00	28.00
ALA [†]	mg/L	0.129	1.64(0.76)	2.01	3.57	0.38
PB [‡]	μg/L	0.482	41.2(22.5)	40.1	134.9	19.4
PP [§]	μg/L	1.000	0.20(0.08)	0.20	0.44	0.10

*ZPP : zinc protophorphyrin, †ALA : δ-Aminolevulinic acid, ‡PB : Pb concentration in Whole blood, §PP : Pb concentration in plasma, ||GM(GSD) : Geometric mean(Geometric standard deviation), ¶Pb concentration in Tibia is arithmetic mean±SD

근로자 집단에 대한 연구변수들의 상호관련성을 나타낸 것이다. 납 노출지표 중 전혈 중 납 농도는 경골 중 납 농도와 0.764의 유의성 있는 상관관계를 보였으며, 혈색소량의 경우에는 경골 중 납 농도, 혈중 ZPP 농도, 전혈 중 납 농도와 0.246, -0.282, 0.378의 유의성 있는 상관관계를 보였다. 또한, 적혈구 용적률의 경우에는 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 그리고 혈색소량과 0.307, 0.380, 0.948

의 유의성 있는 상관관계를 보였다. 혈장 중 납 농도의 경우에는 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 혈색소량, 적혈구 용적률과 0.612, 0.768, 0.309, 0.325의 유의한 상관관계를 보였다. 또한 흡연 및 음주 유무, 그리고 근무기간에 따라 유의한 상관관계가 있는지 확인한 결과, 퇴직 근로자 흡연군의 경우에 혈중 ZPP 농도를 제외하고 모든 변수와 유의성을 보였다. 이 중에서 경골 중 납 농도, 전혈 중

Table 3. Summary statistics of study subjects by lead concentration of the general population

Variables	Unit	r (vs Pb in plasma)	GM(GSD)	Median	Max	Min
Total (general population): 42						
Tibia	mg/kg	0.243	7.70±10.61 [¶]	7.50	51.00	-13.00
ZPP [*]	μg/L	0.520	31.52(1.83)	38.00	81.00	10.00
ALA [†]	mg/L	0.257	1.54(1.81)	1.77	4.20	0.21
PB [‡]	μg/L	-0.063	24.5(13.2)	24.2	41.2	12.1
PP [§]	μg/L	1.000	0.10(0.002)	0.12	0.27	0.01
Smoking and drinking 5/42						
Tibia	mg/kg	-0.141	8.60±7.83 [¶]	11.00	15.00	-5.00
ZPP [*]	μg/L	-0.640	19.84(7.38)	25.00	28.00	13.00
ALA [†]	mg/L	-0.170	1.19(0.86)	1.84	2.46	0.37
PB [‡]	μg/L	0.301	28.1(5.8)	30.1	32.8	18.8
PP [§]	μg/L	1.000	0.08(0.03)	0.08	0.13	0.05
Smoking and no-drinking 1/42						
Tibia	mg/kg	-	6	-	-	-
ZPP [*]	μg/L	-	21	-	-	-
ALA [†]	mg/L	-	1.46	-	-	-
PB [‡]	μg/L	-	24.8	-	-	-
PP [§]	μg/L	-	0.08	-	-	-
No-smoking and drinking 10/42						
Tibia	mg/kg	0.768	4.40±6.92 [¶]	5.00	18.00	-4.00
ZPP [*]	μg/L	0.441	23.88(18.59)	19.00	71.00	10.00
ALA [†]	mg/L	0.356	1.38(0.80)	1.70	2.77	0.21
PB [‡]	μg/L	0.529	29.1(6.0)	28.4	41.5	20.1
PP [§]	μg/L	1.000	0.09(0.04)	0.11	0.15	0.04
No-smoking and no-drinking 26/42						
Tibia	mg/kg	0.156	8.96±12.45 [¶]	8.00	51.00	-13.00
ZPP [*]	μg/L	0.455	38.94(18.40)	44.00	81.00	10.00
ALA [†]	mg/L	0.209	1.69(0.84)	1.83	4.20	0.67
PB [‡]	μg/L	-0.001	22.3(7.0)	21.1	37.6	12.1
PP [§]	μg/L	1.000	0.11(0.06)	0.15	0.27	0.01

*ZPP : zinc protophorphyrin, †ALA : δ-Aminolevulinic acid, ‡PB : Pb concentration in Whole blood, §PP : Pb concentration in plasma, ||GM(GSD) : Geometric mean(Geometric standard deviation), ¶Pb concentration in Tibia is arithmetic mean±SD

납 농도, 혈색소량, 그리고 혈장 중 납 농도와는 보다 더 유의한 상관관계를 보였다. 퇴직 근로자 음주군의 경우에는 모든 변수와 유의성을 보였으며, 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 혈색소량, 혈장 중 납 농도, 그리고 흡연을 한 경우에서 보다 더 유의한 상관관계를 보였다. 근무기간에 따른 유의성은 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 혈장 중 납 농도, 그리고 흡연군에 대하여 유의한 상관관계를 보였다.

Table 5는 납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단에 대한 연구변수들의 상호관련성을 나타낸 것이다. 일반인 집단의 혈장 중 납 농도는 혈중 ZPP 농도와 0.520의 유의성 있는 상관관계를 보였으며, 경골 중 납 농도 및 요 중 δ-ALA 배설량, 전혈 중 납 농도와는 유의성은 없었고, 혈색소량, 그리고 적혈구용적률과는 각각 -0.424, -0.306로 유의한 음의 상관관계를 보였다. 일반인 집단의

Table 4. Correlation matrix of the retired lead workers group

Variables	unit	ZPP	ALA	PB	HGB	HCT	PP	Smoking	Drinking	W.P**
Tibia	r ⁺⁺	.113	-.049	.764**	.246*	.254*	.612**	.370**	.381**	.471**
	p	.365	.694	.000	.046	.040	.000	.002	.002	.000
ZPP*	r		-.131	.001	-.282*	-.206	.016	-.217	-.262*	.023
	p		.294	.993	.022	.097	.895	.080	.034	.854
ALA [†]	r			.022	-.075	-.128	.065	.305*	.270*	.054
	p			.862	.548	.307	.607	.013	.028	.667
PB [‡]	r				.378**	.380**	.768**	.409**	.424**	.568**
	p				.002	.002	.000	.001	.000	.000
HGB [§]	r					.948**	.309*	.260*	.382**	.014
	p					.000	.012	.035	.002	.913
HCT	r						.325**	.279*	.313*	.055
	p						.008	.024	.011	.663
PP [¶]	r							.348**	.464**	.321**
	p							.004	.000	.009
Smoking	r								.412**	.315**
	p								.001	.010
Drinking	r									.176
	p									.158

*ZPP : zinc protophorphyrin, [†]ALA : δ -Aminolevulinic acid, [‡]PB : Pb concentration in Whole blood, [§]HGB : Hemoglobin, ^{||}HCT : Hematocrit, [¶]PP : Pb concentration in plasma, **W.P : Working period, ⁺⁺r : pearson correlation coefficients
* p<0.05, ** p<0.01

Table 5. Correlation matrix of the general population group

Variables	unit	ZPP	ALA	PB	HGB	HCT	PP	Smoking	Drinking	Age
Tibia	r**	.314*	-.235	.070	.202	.215	.243	.019	-.140	.239
	p	.049	.144	.667	.212	.182	.131	.909	.387	.137
ZPP*	r		.509**	-.413**	-.547**	-.443**	.520**	-.340*	-.437**	.662**
	p		.001	.007	.000	.003	.000	.028	.004	.000
ALA [†]	r			-.211	-.433**	-.420**	.257	-.157	-.162	.139
	p			.179	.004	.006	.100	.322	.306	.381
PB [‡]	r				.278	.163	-.063	.156	.420**	-.241
	p				.074	.301	.690	.325	.006	.124
HGB [§]	r					.952**	-.424**	.401**	.553**	-.588**
	p					.000	.005	.008	.000	.000
HCT	r						-.306*	.338*	.482**	-.517
	p						.049	.029	.001	.000
PP [¶]	r							-.267	-.329*	.456**
	p							.087	.033	.002
Smoking	r								.406**	-.623**
	p								.008	.000
Drinking	r									-.481**
	p									.001

*ZPP : zinc protophorphyrin, [†]ALA : δ -Aminolevulinic acid, [‡]PB : Pb concentration in Whole blood, [§]HGB : Hemoglobin, ^{||}HCT : Hematocrit, [¶]PP : Pb concentration in plasma, **r : pearson correlation coefficients
* p<0.05, ** p<0.01

전혈 중 납 농도는 혈중 ZPP 농도, 음주에 대해서만 -0.413, 0.420의 유의한 상관관계를 보였으며, 일반인의 혈장 중 납 농도의 경우는 흡연과 음주 간의 상관성은 약하였다. 또한 일반인 집단의 연령에 따른 혈중 ZPP, 혈장 중 납 농도의 경우는 각각 0.662, 0.456으로 유의한 상관관계를 보였다. 이외에 일반인의 연령에 따른 적혈구 용적률과 흡연, 그리고 음주와의 상관관계는 각각 -0.588, -0.623, -0.481로 유의성 있는 음의 상관관계를 보였다.

납 노출 사업장에서 근무 경력이 없는 일반인 집단의 생체지표(Tibia, PB, PP) 평균값과 납 노출 사업장에서의 근무경력이 있는 퇴직근로자 집단의 근무기간에 따른 생체지표 값을 4분위 빈도분석을 수행하고 이들의 전혈 중 납 농도에 대한 혈장 중 납 농도 비율(PP/PB)을 Table 6

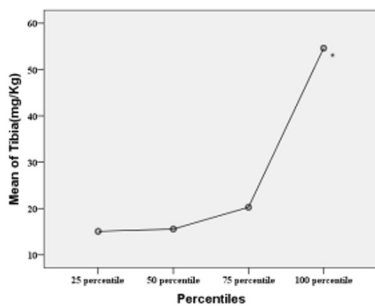
에 나타내었다. 퇴직 근로자 집단에서 생체지표인 경골 중 납 농도와 전혈 중 납 농도, 혈장 중 납 농도 모두 근무기간이 늘어남에 따라 증가하였다. 일반인 집단에서 경골 중 납 농도는 7.70 mg/kg(남성 : 6.06 mg/kg, 여성 : 8.79 mg/kg), 퇴직 근로자 집단에서 경골 중 납 농도는 27.15 mg/kg(남성 : 14.06 mg/kg, 여성 : 26.40 mg/kg)이었다. 일반인 집단에서 전혈 중 납 농도는 24.45 µg/L(남성 : 28.47 µg/L, 여성 : 22.05 µg/L), 혈장 중 납 농도는 0.10 µg/L(남성 : 0.06 µg/L, 여성 : 0.15 µg/L)이었으며, 퇴직 근로자 집단에서 전혈 중 납 농도는 45.65 µg/L(남성 : 74.22 µg/L, 여성 : 40.52 µg/L), 혈장 중 납 농도는 0.23 µg/L(남성 : 0.35 µg/L, 여성 : 0.20 µg/L)이었다. 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단에서 전혈 중 납

Table 6. Comparison of lead concentration between biomarkers of the general population group and the retired lead workers group

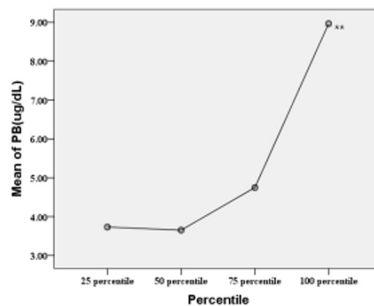
Group	Gender	n	Tibia* (mg/kg)	PB† (µg/L)	PP‡ (µg/L)	PP/PB (%)	
General population	Men	17	6.06	28.47	0.06	0.21	
	Women	25	8.79	22.05	0.15	0.68	
	Total	42	7.70	24.45	0.10	0.41	
Retired lead workers	Men	13	14.06	74.22	0.35	0.47	
	Women	53	26.40	40.52	0.20	0.49	
	Working period	25 percentile	17	15.56	35.23	0.20	0.57
		50 percentile	16	15.0	34.15	0.20	0.58
		75 percentile	15	20.27	43.32	0.22	0.50
		100 percentile	18	54.61*	78.98**	0.29	0.37
Total	66	27.15	45.65	0.23	0.50		

*Tibia : Arithmetic mean of lead concentration in Tibia, †PB : Geomean of lead concentration in Whole blood, ‡PP : Geomean of lead concentration in plasma

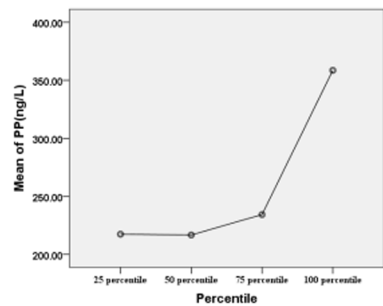
* p<0.05, ** p<0.01



a) Lead concentration in tibia



b) Lead concentration in whole blood



c) Lead concentration in plasma

* p<0.05, ** p<0.01

Figure 1. Comparison of lead concentration among biomarkers of retired lead workers group

농도에 대한 혈장 중 납 농도의 전체 평균 비율은 0.50%이었으며, 4단계로 분석한 결과 25 percentile은 0.57%, 50 percentile은 0.58%, 75 percentile은 0.50%, 그리고 100 percentile은 0.37%로 납 사업장 근무기간이 증가할수록 전혈 중 납 농도에 대한 혈장 중 납 농도 비율은 감소하였다.

IV. 고 찰

납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직자 집단의 연령 중앙값은 61.0세이었는데, 전체 66명 중에 남성은 13명으로 기하평균 연령이 59.01세이었고, 여성은 53명으로 기하평균 연령이 60.56세로 성별에 따른 연령은 비슷한 것으로 볼 수 있다. 연령분포를 보게 되면 40대는 2명, 50대는 26명, 60대는 34명, 그리고 70대는 4명이었으며, 일반인 집단과 연령 차이는 기하평균 연령은 6.49세, 중앙값 연령은 4.5세로 퇴직자의 연령이 더 높았다. 성인과 청소년 정도의 연령차이라면 전혈 중 납 농도가 큰 차이가 나겠지만, 고령의 성인이기 때문에 상호 비교하는데 무리가 없다고 생각된다. 환경부에서는 2009년부터 국민환경보건 기초조사를 실시하여 우리나라 국민 체내속의 환경유해물질 농도를 발표하고 있으며, 현재 제3기까지 진행되었다. 성인의 전혈 중 납 농도를 보면 제1기의 경우 17.7 $\mu\text{g/L}$, 제2기의 경우 성인의 전혈 중 납 농도는 19.4 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 이 중 남성은 22.8 $\mu\text{g/dl}$, 여성은 16.6 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 제3기는 3세 이상 어린이와 18세 이하 청소년까지 확대하여 조사하였으며, 중고생의 전혈 중 납 농도는 8.0 $\mu\text{g/L}$, 성인은 16.0 $\mu\text{g/L}$ 로 성인의 전혈 중 납 농도가 청소년에 비해 약 2배 높게 나타났다(MoE, 2018).

본 연구의 대상자 중 납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단의 전혈 중 납 농도는 24.45 $\mu\text{g/L}$, 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단의 전혈 중 납 농도는 45.65 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 본 연구의 표본으로 추출한 납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단의 연령 중앙값은 56.5세이었고, 전체 42명 중에 남성은 17명으로 기하평균 연령이 47세이었고, 여성은 25명으로 기하평균 연령이 60세로 여성이 13세정도 더 많았다. 연령 분포가 30대는 4명, 40대는 6명, 50대는 20명, 그리고, 60대는 12명이었으며, 일반인의 경우 ZPP와 혈장 중 납 농도는 연령과 유의한 상관성을 나타냈지만, 연령에 따른 전혈 중 납 농도와는 상관관계가 높지 않았기 때문에 연령에 따른 영향을 논할 수는 없었다. 본 연구와 국민환경보

건 기초조사 자료는 시기적 차이와 특정지역에 대한 조사 결과라는 점 때문에 직접적으로 비교하기는 어렵겠지만, 일반적으로 남성이 여성보다 사회생활의 빈도가 높기 때문에 납 전혈 중 납 농도가 높았던 것으로 추측된다.

퇴직 근로자 집단이 납 사업장에 근무하는 현직 근로자 집단보다 전혈 중 납 농도 수준은 낮다고는 하지만 만성 지표인 골 중 납 부담률이 결코 낮다고 볼 수 없다. 이 때문에 퇴직 근로자 집단에 대한 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 그리고 혈장 중 납 농도에 대한 상관성을 볼 필요가 있다. Hu et al.(1998)는 전혈 중 납의 반감기는 약 30일이기 때문에 최근의 납 노출 수준은 잘 반영하지만, 장기간 동안 지속적으로 노출되어 누적된 납 수준은 반영하지는 못한다고 보고하였으며, 납은 구조적으로 칼슘과 비슷하기 때문에 골 조직 내의 칼슘을 대신하여 침착될 수 있는데, 이 골 조직은 납 노출이 지속되는 동안 계속적으로 칼슘 대신 골 조직 내에 침착되고 그 양도 지속적으로 증가하게 된다고 하였다. 만약, 납 노출이 중지된다고 하여도 골 조직 중 납은 긴 반감기를 가지고 있어서 장기간에 걸쳐 생체 내로 방출되기 때문에 장기간의 지표로 활용할 수 있다. Kim et al. (2001)의 연구결과에서도 전혈 중 납 농도는 직업적 노출의 모니터링에 일반적으로 이용할 수 있지만, 체내의 축적된 납 부담지표로서는 부족하다고 하였다.

1990년대 후반부터 임신여성이나 유년기에 대한 연구가 활발하게 진행되어왔으며, 이 들의 연구결과(Silbergeld 1990; Cake et al., 1996; Hu et al., 1998; Hernández-Avila et al., 1998; Barbosa et al., 2005)에서 골 조직 중 납은 골 회전율(뼈가 생성되고 신체 조직으로 흡수되는 것이 반복되는 속도)이 높을수록 장기간 납 독성에 더 큰 영향을 받게 된다고 보고하였다. 그 요인으로는 유년기, 임신과 수유, 치매 및 골다공증, 갑상선과다증 같은 내분비상태 변화, 기타 병적인 상태에 기인하는 것으로 볼 수 있다. Hernández-Avila et al.(1998)은 골 조직 중의 납은 혈장을 통하여 이동하는데, 이 혈장은 세포를 잘 통과하기 때문에 부드러운 조직에 저장되는 납의 주요 이동수단이 되기에 충분하다고 하였다.

납 노출 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직 근로자 집단의 흡연과 음주를 하는 군에서 혈장 중 납 농도가 전체 평균보다도 높았다. 혈장 중 납 농도와 전혈 중 납 농도의 관계에서도 흡연 및 음주를 하는 군에서 상관관계가 0.946으로 전체집단(0.768)보다 높은 상관성을 나타내었고, 혈장 중 납 농도와 경골 중 납 농도의 관계에서도 흡연 및 음

주하는 군에서의 상관관계가 0.617로 전체집단(0.612)보다 높은 상관성을 나타내었다. 반면에 퇴직 근로자 집단의 금연 및 금주를 하는 군에서 혈장 중 납 농도는 전혈 중 납 농도 및 경골 중 납 농도와 상관성이 각각 0.482, 0.154로 낮은 결과로 볼 때 납 노출과 흡연, 음주와 관련이 높다고 판단된다. 아울러, 납 노출 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직 근로자 전체 집단의 혈장 중 납 농도는 경골 중 납 농도 및 전혈 중 납 농도와 높은 양의 상관성을 보임으로써 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다.

납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단의 혈장 중 납 농도는 전혈 중 납 농도와의 상관관계에서 흡연 및 음주하는 군(0.301)보다는 금연을 하고 음주를 하는 군(0.529)에서 더 높은 상관성을 나타내었고, 혈장 중 납 농도와 경골 중 납 농도의 관계에서도 역시 흡연 및 음주하는 군(-0.141)보다 금연을 하고 음주를 하는 군(0.768)에서 더 높은 상관성을 나타내었다. 따라서 일반인의 경우에 있어서 혈장 중 납 농도는 흡연보다는 음주에 영향을 더 받는 것으로 판단된다. Table 2와 Table 3에서 tibia 납 농도는 K형 X-선 형광분석(K-type X-ray fluorescence analysis, KXRF) 장비로 tibia에 누적된 납 농도를 분석한 것이며, 기준 값보다 작을 경우 기하평균 계산이 불가능하여 산술평균 결과 값으로 나타내었다. 납 노출 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직 근로자 집단에서 음주와 흡연하는 군의 tibia 누적 납 평균 농도는 83.75 mg/kg로 전체 집단의 평균 농도 27.15 mg/kg 보다 3배 이상 높았으며, 이는 음주와 흡연과의 높은 상관성을 뒷받침해준다. 납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단에서 금연과 금주를 하는 군의 tibia 누적 납 평균 농도는 8.96 mg/kg로 전체 집단의 평균 농도 7.70 mg/kg보다 높은 결과를 보였다. 생체의 납 농도는 흡연 또는 음주를 하는 경우가 금연과 금주를 하는 경우보다 상관성이 높다(Jou et al., 2009)는 결과와 상반된 결과인데, 납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단의 경우 유전요인, 환경인자, 개개인의 생활습관 등에서 노출된 차이로 직접적으로 상호 관련성을 논하기는 어렵다고 판단된다.

납 노출 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직 근로자 집단에 대한 Pearson 상관관계수 결과에서도 경골 중 납 농도와 전혈 중 납 농도, 그리고 경골 중 납 농도와 혈장 중 납 농도는 각각 0.764(p<0.01)와 0.612(p<0.01)로 높은 유의성을 갖는 상관성을 보였으며, 전혈 중 납 농도와 혈장 중 납 농도 사이에서도 0.768(p<0.01)로 높은 유의성을 갖는 상관성을 보였다. Kim et al.(2006)의 연구결과에 따

르면 경골 납 농도와 전혈 중 납 농도 사이에는 0.664의 유의한 상관관계가 있다고 하였으며, 본 연구와 부합하였다. 또한, 납 노출 변수인 흡연과 음주, 그리고 근무기간에 대해서도 유의한 상관성을 보였다. 이는 생체에 있는 납은 전혈 내의 혈장을 이동수단으로 여러 표적장기로 이동하여 독작용을 나타내기 때문이며, 전혈 중 납 농도의 증가는 표적장기 독작용 발현의 선행조건이라고 한 연구들(Hernández-Avila et al., 1998; Kim et al., 2006)을 볼 때, 세 지표 Tibia, PB, PP는 경골에 의한 내부 납 노출에 서로 깊은 관련이 있다. 내부 납 노출은 노출 변수인 흡연 및 음주, 그리고 근무기간에도 관련이 있었으나, ALA, HGB, HCT 등의 건강영향지표와는 상관성이 낮았는데, 이를 토대로 볼 때, 퇴직근로자에서 ALA, HGB, HCT의 건강영향지표는 장기간 노출지표로 활용하기에는 부족하다고 판단된다.

납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단과 달리 퇴직 근로자 집단에서 혈장 중 납 농도와 전혈 중 납 농도의 상관관계는 유의한 상관성을 보였으며, 경골 중 납 농도는 전혈 중 납 농도 및 혈장 중 납 농도와의 상관관계에서도 유의한 상관성을 보였다. ALA, HGB, HCT 등의 기존 납 건강영향지표보다 혈장 중 납 농도가 경골 중 납 농도와의 상관성이 높았고, 장기간 노출지표인 경골 중 납 농도는 혈장 중 납 농도뿐만 아니라, 전혈 중 납 농도와의 상관성도 높았다. 경골 중 납 농도가 혈장 중 납 농도와 전혈 중 납 농도와의 상관성이 혈색소량과 적혈구 용적률보다는 높은 결과로 볼 때, 납이 골 조직으로부터 인체 내부로의 순환될 때 수송주체가 전혈 중에 있는 적혈구가 아닌 혈장이라는 것을 뒷받침한다. 이들의 상관관계 결과는 Hu et al.(1998)의 연구결과에서 보고한 바와 같이 경골 조직 중에 포함되어 있는 납이 혈장을 통하여 인체 내부 조직으로 이동하는 것이다.

2015년도의 국민건강영양조사 전체 흡연율은 22.6%(남성 39.3%, 여성 5.5%)이었으며, 전체 음주율은 60.6%(남성 75.2%, 여성 46.5%)이었다(MHW, 2016). 본 연구에서 납 노출 사업장 근무경력이 있는 퇴직근로자 집단 66명중 61명(92%)이 여성이었다. 남성의 경우 퇴직 후에 타 직종으로 재취업을 함에 따라 퇴직 근로자로 분류되는 대상자가 적었고, 여성의 경우 퇴직할 때까지 근무하였거나, 퇴직 후 재취업을 하지 않았기 때문에 대상자가 많았다고 판단된다. 또한, 퇴직근로자의 대부분이 여성이었기 때문에 흡연율과 음주율이 낮은 경향을 보였다. Jou et al.(2009)은 전혈 중 납 농도는 비흡연군과 비교하여 흡연

군이 1.30배, 그리고 비음주군과 비교하여 음주군이 1.26배 높았다고 하였다. 현직근로자 집단의 경우 음주 또는 흡연 여부와 낮은 상관성을 나타낸 것(Lee et al., 2013)과 대조적으로 퇴직근로자와 일반인의 경우에 유의한 상관성을 나타낸 것은 개인의 운동 등 생활습관이나 환경적인 요인, 유전이나 식이 요인 등의 원인이 있다고 보는 견해도 있다(Roberts et al., 2000; Jou et al., 2009).

퇴직근로자 집단 및 일반인 집단에서 혈중 ZPP는 Table 4와 Table 5에 나타낸 바와 같이 음주인 경우에 유의성을 보였으며, 퇴직근로자 집단의 ZPP 값이 $53.8 \mu\text{g/L}$ 로 일반인의 ZPP 값인 $31.5 \mu\text{g/L}$ 보다 약 1.7배 높았다. 특히, 비음주일 경우에 혈중 ZPP가 더 높은 경향을 보였다. Park et al.(1996)의 연구결과, 직업적으로 납에 노출된 근로자들의 전혈 중 납 농도와 ZPP 농도와 관계에서 전혈 중 납 농도와 혈중 ZPP 농도는 흡연, 성별에 따라 차이가 없었다고 한 반면, Lee et al.(1998)의 연구 결과에서는 일반건강진단군과 연특수건강진단군 모두 비음주군이 음주군보다 혈중 ZPP가 유의하게 높았다고 하였다. Yoon et al.(2006)연구에서 혈중 ZPP의 누적지수가 체내 납부담 지표로 효용성이 있다고 입증하여, 전혈 중 납 농도보다 혈중 ZPP의 누적지수가 체내 납 부담 대리지표로 더 좋은 것으로 보고하였다. 그러나 본 연구의 결과를 볼 때 혈중 ZPP의 누적지수의 체내 납 부담 지표가 납 사업장에서 근무 경력이 있는 퇴직 근로자 집단에서의 상관성은 보이지 않았고, 납 사업장에서 근무경력이 없는 일반인의 혈장 중 납에서만 유의성있는 상관성(0.520)을 보였으며, 경골 중 납 농도와 전혈 중 납 농도와는 상관성을 보이지 않았기 때문에 만성지표로는 활용하기에는 부족하다고 판단된다.

납 노출 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단의 여성이 남성보다 전혈 중 납 농도는 낮았으나, 경골 중 납 농도와 혈장 중 납 농도의 경우는 더 높았다. 이에 따른 전혈 중 납 농도에 대한 혈장 중 납 농도의 비율도 0.68%로 여성이 남성보다 약 3배 높은 결과를 보였다. 일반인의 경우 여성이 기하평균 연령이 60세, 남성이 45.76세로 약 14세 더 높기 때문에 폐경기에 따른 골다공증 등의 영향을 받아 골 교체율 증가 속도가 남성보다 높았기 때문이라 추측되지만, 생활습관, 유전요인, 식이요인 등의 영향도 함께 검토해야 좀 더 명확한 판단이 가능할 것이다. 이와 비교하여, 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단에서 경골 중 납 농도는 여성이 남성보다 높았으나, 전혈 중 납 농도와 혈장 중 납 농도의 경우 여성이 남성보

다 더 낮았다. 퇴직 근로자 집단에서 생체지표내 납 농도가 일반인보다 모두 높기는 하였으나, 동일한 양상을 보이지는 않았다. 경골 중 납 농도와 함께 혈장 중 납 농도도 높을 것이라 예상한 결과는 얻지 못하였다. 아마도 여성과 남성의 연령이 서로 비슷하기는 하였지만, 생활습관, 병적인 상태, 유전요인 등에 의한 다양한 변수가 있었기 때문으로 보이며 앞으로 이에 대한 검토가 더 필요할 것이다.

퇴직 근로자 집단의 경골 중 납 부담은 27.15 mg/kg 으로 일반인 집단의 경골 중 납 부담 7.70 mg/kg 보다 약 3.5배 높았다. 이는 퇴직 근로자 집단이 납 사업장에서 근무하는 동안 납 노출이 지속되어 골 조직 내에 계속적으로 침착된 결과로 판단된다. 또한, 납 사업장에서 퇴직하여 납 노출이 중지되었다고 하여도 골 조직 중에 포함되어있는 납은 긴 반감기를 가지고 있어서 장기간에 걸쳐 생체내로 방출되었기 때문에 퇴직한 이후에도 일반인보다 높게 나타난 것으로 사료된다. 퇴직근로자 집단의 근무기간에 대한 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 그리고 혈장 중 납 농도를 통계 분석한 결과 경골 중 납 농도와 전혈 중 납 농도의 유의성이 인정되었다. 군간 차이를 비교한 결과 경골 중 납 농도의 100 percentile과 25 percentile은 $P<0.05$ 이었고, 전혈 중 납 농도의 100 percentile과 25 percentile은 $P<0.001$ 이었다. 그리고 혈장 중 납 농도에서 근무기간이 늘어남에 따라 납 농도가 증가하였으나, 모든 군 간의 유의성은 인정되지 않음으로써, 다른 변수나 요인에 대하여 심도있는 검토가 더 필요할 것으로 본다.

전혈 중 납 농도의 경우 생물학적 노출지수(BEI)는 납 노출 사업장 근무 경력이 있는 퇴직 근로자 집단과 근무경력이 없는 일반인 집단에서 모두 기준 값인 $300 \mu\text{g/L}$ 이하의 결과를 보였다. BEI 값을 기준으로 퇴직 근로자들의 경우 15.2%($45.65 \mu\text{g/L}$) 수준, 일반인의 경우 8.2%($24.45 \mu\text{g/L}$)의 수준이었다. 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단의 전혈 중 납 농도에 대한 혈장 중 납 농도의 기하평균은 납 사업장 근무기간이 증가할수록 비율이 감소하였다. 이는 유전요인이나 식이요인, 그리고 운동 등 생활습관과도 일부 영향이 있겠으나, Bergdahl & Skerfving(2008) 연구에서 혈장 중 납이 목표장기(Target Organ)로 빠르게 이동하여 빠르게 turnover한다고 한 것을 볼 때, 신체 내부를 순환하고 있는 혈장이 골에서 용출된 납을 태운 다음 목표장기에 도달하여 납을 내려다 놓는 과정을 거치기 때문이라 생각된다. 아울러, 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직근로자 집단의 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 그리고 혈장 중

납 농도는 근무기간이 증가할수록 높았다. Hu et al. (1998)과 Telléz-Rojo et al.(2004)의 연구 결과에 따르면 근무기간이 증가할수록 골 조직 내 축적 양이 증가하기 때문이다. 또한, 납 순환의 내부 근원 역할은 골 교체율 증가 또는 감소 요인으로 인하여 인체에 독성 영향을 주는 정도가 다르게 나타나는데, 이는 경골 조직 중 납 교체율이 유년기, 임신과 수유, 치매, 골다공증, 갑상선과다증 같은 내분비 질환, 그리고 위장질환, 골수질환 등 기타 병적인 상태로 인하여 급속하게 증가하는데 기인한다고 하였다(Kim et al., 2006). 즉, 근무기간이 증가할수록 골 조직 내에 납 축적 양은 증가하게 되며, 고령화됨에 따라 골다공증, 내분비 질환, 위장질환 등의 병적인 상태로 인하여 신체 내부에 독성 영향이 높아지게 되는 것이다. 만약, 운동과 식이갈습, 비타민 D 섭취 등에 의해서 골 교체율이 감소된다면 인체에 독성 영향을 반대로 완화시킬 수도 있을 것이다.

본 연구는 납 사업장 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단과 납 사업장에서 근무경력이 전혀 없는 일반인 집단의 자료가 같은 시기에 조사한 것이 아니기 때문에 함께 비교하기에는 제한점이 있다. 그러나 납 사업장 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단과 납 사업장에서 근무경력이 없는 일반인 집단 간의 혈장 중 납 농도를 분석하여 만성지표로 활용되는 경골 중 납 농도와 상관성이 있다는 것을 확인했다는 점에서 의미가 있다. 향후 근로자들의 작업공정, 납 노출 농도, 납 노출 기간 등의 변수도 고려하여 수행할 필요가 있을 것이며, 일반적인 건강영향 지표인 ALA, HGB, HCT 등 보다는 특이성 있는 지표인 신장의 RBP (Retinol Binding Protein), BUN(blood urea nitrogen), creatinine의 청소율, 중추신경계의 neurofibrillary tangles, 유전자 변화, 임상에서 감각기능 검사, 신경행동학적 검사 등과 혈장 중 납의 비교 연구를 통하여 좀 더 성과 있는 결과가 도출 될 수 있을 것이다.

V. 결 론

ICP/Mass 활용하여 동일한 납 노출 사업장에서 근무경력이 있는 퇴직 근로자 집단과 납 노출 사업장에서 근무경력이 전혀 없는 일반인 집단을 대상으로 혈장 중 납 농도를 분석하였으며, 기존의 생물학적 지표들과 상관관계를 비교하여 혈장 중 납 농도의 만성지표로의 활용성을 검토하였다.

혈장 중 납의 기하평균 농도는 퇴직 근로자의 경우

0.23 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 일반인의 경우는 0.10 $\mu\text{g/L}$ 이었다.

생체지표에 대한 단순 상관관계 분석결과, 퇴직 근로자들에 대한 혈장 중 납 농도는 경골 중 납 농도 및 전혈 중 납 농도와 높은 상관성을 보였으며, 일반인의 혈중 ZPP 농도는 혈장 중 납 농도와 상관성을 보였으나, 경골 중 납 농도와 전혈 중 납 농도와는 상관성이 없었다.

연구변수들의 상호관련성 결과, 퇴직 근로자들의 혈장 중 납 농도의 경우에는 경골 중 납 농도, 전혈 중 납 농도, 혈색소량, 적혈구 용적률과 유의한 상관관계를 보였으며, 흡연을 한 퇴직 근로자들의 경우에서 혈중 ZPP 농도를 제외한 모든 변수와 유의성을 보였다.

퇴직 근로자 집단에 대해서 경골 중 납 농도와 전혈 중 납 농도, 그리고 혈장 중 납 농도 모두 근무기간이 늘어남에 따라 납 농도도 증가하였다. 특히, 경골 중 납 농도와 전혈 중 납 농도는 근무기간에 따른 유의성도 확인하였다.

따라서, 혈장 중 납 농도가 납의 만성노출시 경골, 전혈 등과 함께 생물학적 비교지표로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

References

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Lead, elemental and inorganic. ACGIH lead BEI1-15, 2001.
- Barbosa Jr. F, Tanus-Santos JE, Gerhach RF, Parsons PJ. A critical review of biomarkers used for monitoring human exposure to lead: advantages, limitations, and future needs. *Environ Health Perspect* 2005; 113(12):1669-1674 DOI: 10.1289/ehp.7917
- Behinaein S, Chettle DR, Fisher M, Manton WI, Marro L et al. Age and sex influence on bone and blood lead concentrations in a cohort of the general population living in Toronto. *Physiol Meas* 2017;38(3):431-451 DOI: 10.1088/1361-6579/aa57b9
- Bergdahl IA, Vahter Marie, Counter SA, Schütz A, Buchanan LH et al. Lead in plasma and whole blood from lead-exposed children. *Environ research section A* 1999;80:25-33 DOI: 10.1006/enrs.1998.3880
- Bergdahl IA, Skerfving S. Biomonitoring of lead exposure-alternatives to blood. *J. Toxicol Environ Health Part A* 2008;71:1235-1243 DOI: 10.1080/15287390802209525
- Cake KM, Bowins RJ, Vaillancourt C, Gordon CL, McNutt RH et al. Partition of circulating lead between serum and red cells is different for internal and external

- sources of lead. *Am J Ind Med* 1996;29(5):440-445
DOI: 10.1002/(SICI)1097-0274(199605)29:5<440::AID-AJIM2>3.0.CO;2-Q
- Choi S-S and Lee S-H. Determination of trace iron by inductively coupled plasma mass spectrometry. *J Korean Soc Environ Adm* 2002;8(4):331-337
- Gherase MR, Al-Hamdani S. A microbeam grazing-incidence approach to L-shell x-ray fluorescence measurements of lead concentration in bone and soft tissue phantoms. *Physiol Meas* 2018;39:035007 (open access paper) DOI: 10.1088/1361-6579/aaad5a
- Hernández-Avila M, Smith D, Meneses R, Sanin LH, Hu H. The influence of bone and blood lead on plasma lead levels in environmentally exposed adults. *Environ Health Perspect* 1998;106(8):473-477 DOI: 10.1289/ehp.106-1533211
- Hu H, Rabinowitz M, Smtih D. Bone lead as a biological marker in epidemiologic studies of chronic toxicity: conceptual paradigms. *Environ Health Perspect* 1998;106(1):1-8 DOI: 10.1289/ehp.981061
- Jou H-M, Cho T-J, Yang W-H, Lee J-W, Son BS. Lead Levels in Blood of Residents in Industrial Area. *J Env Hlth Sci* 2009;35(2):86-94
- Kim N-S, Kim J-H, Kim H-S, Kim-H-S, Lee S-S et al. Effect of bone demineralization and tibia lead on blood lead in retired lead workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2006;16(4):324-333
- Kim HS, Lee SS, Kim YB, Hwang BY, Lee KS et al. The effect of ALAD polymorphism on the relationship of blood and bone lead with hematologic biomarkers in lead exposed workers. *Korean J Occup Environ Med* 2001;13(1):75-86
- Lee CK, Kim YB, Lee GS, Hwang KY, Kim HS et al. The effect of smoking and drinking habit on the health status of lead workers. *Korean J. Preventive Med* 1998;31(4):708-718
- Lee S-B, Yang J-S, Choi S-B, Shin H-S. Trace level analysis of Pb in plasma by inductively coupled plasma/mass spectrometry. *Anal Sci Technol* 2012;25(3):190-196
- Lee S-B, Yang J-S, Choi S-B, Kim N-S, Lee B-K et al. Analysis of Trace Level and Correlation of Lead in the Plasma of Field Workers and General Public by ICP-MS. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2013; 23(2):65-74
- Ministry of Environment(MoE). Lead Risk Assessment Report. Ministry of Environment.; 2007. p. 10-18
- Ministry of Environment(MoE). Notice/Publicity Press, National Institute of Environmental Research, 2018.12.27. Available from: URL:http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardId=932040&boardMasterId=1
- Ministry of Health and Welfare(MHW). National Health Statistics I: National Health and Nutrition Survey, 3rd year(2015). Ministry of Health and Welfare Disease control center.; 2016. p. 2-3
- Palmer CD, Lewis Jr. ME, Geraghty CM, Barbosa Jr. F and Parsons PJ. Determination of lead, cadmium and mercury in blood for assessment of environmental exposure: A comparison between inductively coupled plasma-mass spectrometry and atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta part B* 2006;61:980-990 <https://doi.org/10.1016/j.sab.2006.09.001>
- Park KS, Kim ST. A study on the determination of lead in whole blood by ICP/MS. *Anal Sci Technol* 1997; 10(4):240-245
- Park D-W, Paik N-W, Choi B-S, Kim T-G, Lee K-Y et al. Model between lead and ZPP concentration of workers exposed to lead. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1996;6(1):88-96
- Rezende VB, Amaral JH, Gerlach RF and Barbosa Jr. F. Should we measure serum or plasma lead concentrations? *J Trace elem Med Biol* 2010;24: 147-151 DOI: 10.1016/j.jtemb.2010.01.008
- Roberts FJ, Ebdon L. and Hill SJ. A preliminary clinical investigation into the potential of blood lead levels to measure bone resorption in patients with skeletal metastases, using ICP-MS. *J Trace Elem Med Biol* 2000;14:108-115 DOI: 10.1016/S0946-672X(00) 80040-1
- Schütz A, Bergdahl IA, Ekholm A, Skerfving S. Measurement by ICP-MS of lead in plasma and whole blood of lead workers and controls. *Occup Environ Med* 1996;53:736-740 DOI: 10.1136/oem. 53.11.736
- Silbergeld EK. Toward the twenty-first century: Lessons from lead and lessons yet to learn. *Environ Health Perspect* 1990;86:191-196 DOI: 10.1289/ehp.9086191
- Specht AJ, Weisskopf MG, Nie LH. Theoretical modeling of a portable x-ray tube based KXRF system to measure lead in bone. *Physiol Meas* 2017;38(3): 575-585 DOI: 10.1088/1361-6579/aa5efe
- Specht AJ, Parish CN, Wallens EK, Watson RT, Nie LH et al. Feasibility of a portable x-ray fluorescence device for bone lead measurements of condor bones. *Sci Total Environ* 2018;615:398-403 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.123
- Telléz-Rojo MM, Hernández-Avila M, Lamadrid-figueroa H, Smith D, Hernández-Cadena L et al. Impact of

bone lead and bone resorption on plasma and whole blood lead levels during pregnancy. *Am J Epidemiol* 2004;160:668-678 DOI: 10.1093/aje/kwh271

Yoon G-H, Kim N-S, Kim J-H, Kim H-S, Lee B-K. Effect of cumulative blood lead and cumulative blood ZPP as lead body burden on renal lead biomarkers. *Korean J Occup Environ Med.* 2006;18(4):298-306

Yoon CS, Choi IJ, Park SK, Kim RH. Comparisons of sample preparation (acid digestion and microwave digestion)

and measurement (inductively coupled plasma mass spectrometry and graphite furnace atomic absorption spectrometry) in the determination of bone lead. *Anal Sci Technol* 2003;16(2):152-158

이성배(연구위원), 임철홍(연구위원), 김남수(교수)