

납 사업장의 공기 중 납 농도 및 납 노출 근로자들의 납 관련 생물학적 노출 지표의 관련성에 관한 조사

김남수¹ · 김진호¹ · 장봉기² · 김화성¹ · 안규동¹ · 이병국^{1*}

¹순천향대학교 산업의학연구소 · ²순천향대학교 환경보건학과

The Association of Lead Biomarkers of Lead Workers with Airborne Lead Concentration in Lead Industries

Nam-Soo Kim¹ · Jin-Ho Kim¹ · Bong-Ki Jang² · Hwa-Sung Kim¹ · Kyu-Dong Ahn¹ · Byung-Kook Lee^{1*}

¹*Institute of Industrial Medicine, Soonchunhyang University*

²*Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University*

This study was designed to investigate the difference of airborne lead concentration by type of lead industries and type of lead exposure and to evaluate their association with lead biomarkers of lead workers in 11 lead using industries. Total of 182 lead workers (male: 167, female: 15) from 11 lead industries were participated for this study from March, 2004 to August, 2005.

Airborne lead concentration were measured by representative personal sampling of workers in each unit workplace and applied same concentration value to the workers in the same unit workplace who did not measure their airborne lead with personal air sampling. Tibia lead, blood lead, zinc protoporphyrin in whole blood, δ -aminolevulinic acid in urine, hemoglobin and hematocrit were selected as study variables of indices of lead exposure. Information about type of lead exposure (fume or non-fume other), age, work duration, smoking & drinking habit were also collected.

Significant differences were seen in the means of zinc protoporphyrin, blood lead and tibia lead in lead workers by different airborne lead concentration in workplace. While blood lead and tibia lead in lead workers were significantly higher in secondary smelting than other types of lead industries, zinc

protoporphyrin, δ -aminolevulinic acid in urine and airborne lead concentration were significantly higher in litharge manufacturing.

While the mean blood lead was significantly higher in the lead workers working in fume type unit workplace than those of non-fume lead workers, the mean airborne lead concentration of fume workers was significantly lower than non-fume lead workers.

In the multiple regression analysis of airborne lead concentration and the type of lead exposure on tibia lead and lead exposure indices after adjustment of related covariates, airborne lead concentration was statistically significantly associated with blood lead and tibia lead, but the type of lead exposure was only associated with blood lead. To verify the causal association of airborne lead concentration on blood lead and tibia lead, further studies are needed.

Key Words : airborne lead concentration, lead biomarker, lead worker

I. 서론

작업환경에 존재하는 유해물질 중에서 납은 기원전부터 그 취급 및 사용에 따른 유해성이 일반적인 금속 중에서도 가장 많이 알려져 오고 있다. 그러나 이러한 유해성에도 불구하고 그 유연성과 할로젠 물질과의 반응성, 산화물의 이용 가능성 때문에 사업장에서 그 사용이 더욱 많아지고 있으며, 1990년대 이후 생산성의 제고와 작업환경관리를 위하여 일부 사업장에서 설비의 개선이 이루어졌으나 혁신적인 작업환경관리의 실현은 아직도 어려운 것이 현실이다. 이병국 등 (1999)의 연구에서 우리나라 납 취급 사업장의 공기 중 납 농도는 허용기준을 대부분 초과하고 있고, 특히 2차 제련업 및 리사지 제조업종은 허용기준의 3배에서 200배를 초과하고 있으며 납 노출지표도 이들 업종에서 모두 높은 수준이었다. Weaver 등 (2005)이 1997년에서 1999년까지 우리나라 현직 및 퇴직 근로자 803명을 대상으로 한 연구에서는 평균 혈중 납량이 $32.0 \pm 15.0 \mu\text{g}/\text{dl}$ (범위: $4.3 \sim 85.7 \mu\text{g}/\text{dl}$) 이었고 경골 납량은 $37.2 \pm 40.4 \mu\text{g}/\text{g}$ (범위: $-7.4 \sim 337.6 \mu\text{g}/\text{g}$) 로 높은 수준임을 확인한 바 있으며, 최근에 직업적 납 노출의 문제는 작업환경에 대한 지속적인 개선노력과 생물학적 모니터링, 보호구 프로그램 등으로 근로자의 납 노출수준이 감소하였으며 소규모 사업장을 제외하고는 혈중 납량과 납 노출지표의 감소에도 기여하였으나, 아직도 일부 납 취급사업장에서는 납 중독의 사례가 보고 되고 있는 실정이다(노동부, 2004).

납 취급 근로자들의 건강장해를 예방하고 더 나아가 건강증진을 도모하기 위해서는 정기적으로 납 노출수준을 확인하고 납에 의한 영향을 모니터링 할 필요가 있다. 동일한 환경농도를 유지하여도 성별, 연령, 건강습관, 영양상태 등과 같은 개인적 특성이나 유전적소인, 작업강도, 호흡방식, 기타 개인보호구 착용여부에 따라 실질적인 체내 납 흡수는 달라진다(Ahn 등, 1999). 납 사업장의 경우 생물학적 모니터링은 납 취급 근로자들의 실질적인 체내의 납 노출을 반영하기 때문에 작업환경측정과 같은 환경모니터링보다 개인의 납 노출정도를 더 잘 반영한다(이병국 등, 1999).

직업적으로 무기납에 노출되면 호흡기를 통하여 폐혈류를 거쳐 혈액으로 들어온다. 체내에 들어온 납은 조혈기능에 가장 먼저 영향을 주어 혈색소합성의 장애를 가져온다. 특히 혈색소합성에 관여하는 δ -aminolevulinic acid dehydratase 효소와 heme synthetase 효소의 작용을 선택적으로 억제하여 이들 효소작용의 억제로 인한 δ -aminolevulinic acid(ALA)의 양이 혈액에 증가하여 나중에는 소변의 농도를 증가시키고 혈

액의 protoporphyrin의 양을 증가시켜, 증가된 protoporphyrin이 혈액중의 아연과 결합하여 혈액중의 zinc protoporphyrin(ZPP)의 농도를 증가시키고, 중국에는 혈색소합성의 감소를 초래한다(WHO, 1980).

납 노출로 인한 인체의 영향을 크게 납 흡수와 납 중독으로 나누어서 구분한다. 전자의 지표로는 혈중 및 요중 납량을 들 수 있고, 후자의 지표로는 혈색소량, 그리고 혈색소 형성과정의 전구물질과 이에 관련된 효소 활성치를 측정하는 것을 들 수 있다. 납 흡수지표인 혈중 납량과 혈액학적 독성지표로 사용하고 있는 혈중 ZPP, 요중 δ -ALA 배설량과의 관련성은 잘 알려져 있으며, 이중 혈중 ZPP는 검사가 신속하고 용이하며 납에 의한 독성효과를 비교적 잘 반영하기 때문에 국내에서도 납 사업장의 근로자에 대한 보건관리에 이용되고 있다. 혈중 납량은 최근의 납 노출 정도를 가장 잘 반영하고 성별, 연령, 인종 및 개인적 다양성의 영향을 적게 받고, 증상이 나타나기 전에 측정이 가능하기 때문에 생물학적 모니터링의 단일지표로서 가장 좋은 것으로 알려져 있다(Zielhuis, 1975). 그러나 혈중 납량의 체내 반감기는 28-36일 정도 밖에 되지 않아 과거 장기간 체내의 축적으로 인한 체내 총 납 수준의 정도를 알아내는 납 부담 지표로서는 부족하다. 납은 구조적으로 칼슘과 비슷하여 골 조직 내의 칼슘 대신 침착된다. 특히 경골에 침착된 납은 장기간 골 조직 내에 존재하여 반감기가 10년이 넘는 것으로 알려졌다. 골 조직 내의 납은 체내의 과거 납 노출 정도를 알아내는 지표로서 유용할 뿐만 아니라 골 조직 내의 납이 혈액으로 다시 나오면 활성화된 납이 되어 혈중 납량을 증가시켜 골 조직 내의 납이 내부의 납 노출의 발생원 역할을 함으로써 독성학적 의미가 있다(김화성 등, 2001).

납 사업장의 정기적인 작업환경관리와 납 노출 근로자들에 대한 지속적인 생물학적 모니터링에 의해 우리나라 납 사업장 근로자들의 건강관리는 과거보다 개선되어 왔다. 그러나 일부 납 사업장의 특수건강진단에서 납 중독의 사례가 매년 보고 되고 있으며, 최근에도 납 사업장 내 노출 허용기준을 초과하는 작업환경에서 장기간에 걸쳐 직업적으로 노출되고 있어 이들에 대한 확인 및 체계적인 작업환경관리를 위해 노출농도와 노출지표의 기여부분에 대한 연구가 필요한 실정이다. 이를 위해 국내에서 납이 가장 많이 사용되고 제조되는 업종 중심으로 전국의 사업장 규모에 따라 각각 축전지 및 그 부품제조사업장 6곳, 이차제련업체 3곳, 리사지 및 기타 연분제조업체 2곳, 총 11개 사업장을 선정하고 업종이나 단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태, 공기 중 납 농

접수일 : 2006년 9월 25일, 채택일 : 2007년 1월 31일

✉ 교신저자 : 이병국 (충남 아산시 신창면 읍내리 646 학예관 H205,

TEL: 041-530-1760, E-mail: bklee@sch.ac.kr)

도 등에 따른 경골 납량과 납 노출지표의 관련성을 확인하여 납 노출 근로자의 노출지표에 대한 기여부분에 대해 평가하므로 향후 납 사업장의 작업특성이나 납 입자크기, 개인보호구 종류 및 착용실태 등에 따른 납 노출 근로자의 인체 영향에 대한 추가연구를 위한 기초 자료로 이용될 수 있을 것이다.

따라서 본 연구는 납 사업장의 공기 중 납 농도와 납 노출 근로자들을 대상으로 경골 납량 및 혈중 납량, 혈중 ZPP, 혈색소, 혈구용적치, 요중 δ-ALA배설량 등의 납 노출지표에 대하여 조사하였으며, 업종이나 단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태, 공기 중 납 농도에 따른 납 관련 생물학적 노출 지표의 기여부분에 대한 규명으로 납 사업장의 작업공정이나 형태, 납 입자의 특성에 따른 영향정도에 따라 보다 세분화된 작업환경관리 및 근로자의 건강관리를 위한 자료를 마련하고 향후 납 사업장의 작업공정이나 납 입자의 특성, 개인보호구 종류 및 착용실태에 따른 추가적인 연구를 위한 기초 자료를 마련하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

고농도의 납 노출 가능성이 있는 축전지 및 그 부품제조 사업장 6곳, 이차제련업체 3곳, 리사지 및 기타 연분제조업체 2곳, 총 11개 사업장의 현직근로자 182명을 대상으로 2004년 3월부터 2005년 8월까지 조사하였다. 연구기간동안 납 노출 근로자들이 연구 참여를 위한 동의서에 서명한 후 연구에 참여하도록 하였다. 또한 혈액의 연구목적 이용에는 본 저자의 소속된 연구윤리위원회의 승인이 있었다.

2. 연구방법

납 관련 생물학적 노출지표 중 흡수지표로는 경골 납량과 혈중 납량, 독성(intoxication)지표로는 납에 의한 조기영향의 지표로서 이미 신뢰도나 특이도가 확인된 혈중 ZPP, 요중 δ-ALA배설량을 선정하였다(Castellino 등, 1995). 또한 납에 의한 조혈기능의 임상적 영향지표로서 혈색소와 혈구용적치를 측정하였다.

기타 개인관련 연구변수인 성별, 연령, 작업기간, 음주 및 흡연여부 등은 표준화된 설문지를 이용하여 연구자가 개별 면담으로 확인하였으며, 신장 및 체중에 의한 BMI(body mass index)를 구하였다.

업종과 단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태(흡 노출과 비 흡 노출)의 구분은 해당 연구년도의 사업장별 연 2회 측정되는 작업환경측정결과 자료를 활용하였다. 또한 공기 중 납 농도는 해당 연구년도의 작업환경 측정결과를 기준으로 단위작업장소의 동일 작업을 동일노출그룹으로 구분하고 근로자의 측정결과를 평균하여 동일 근로자에 대한 공기 중 납 농도로 적용하였다. 생물학적 노출지표를 위한 시료의 채취는 작업환경측정이 실시된 후 2주 이내에 측정하여 기준 노출에 의한 생물학적지표의 영향을 평가하고자 하였다. 경골 납량의 측정은 XRF 방법에 의한 일일 측정인원이 제한되어(10명 내외) 일부 근로자들의 경우 혈중납량의 측정과 3개월의 간격이 있었으나, 경골의 납량은 장기간의 노출에 의한 축적을 나타내는 지표이어서 이에 따른 변이는 기기의 측정 오차 범위이었다.

1) 경골 납량의 측정 및 분석

경골 납량은 형광 엑스레이를 이용한 K-shell XRF방법을 이용하였다. 경골 중앙에 방사성 동위원소인 Cd¹⁰⁹에서 나오는 감마선을 30분간 조사하면 골 조직 내의 납 원자가 여기 상태(exciting)가 되었다가 원래의 상태로 돌아올 때 형광 방사선이 발생되는데 이것을 컴퓨터로 부호화하여 분석하였다. 표준 시료(phantom)를 이용하여 표준 검량선을 작성하기 때문에 경골 납량이 음의 값을 나타내는 경우가 발생할 수 있으나 분석오차를 줄이기 위하여 이를 그대로 통계분석에 이용하였다.

2) 혈액 및 소변분석

혈중 납량은 전혈 0.5ml를 2.5ml의 1% Triton X-100으로 희석하여 비 불꽃 원자흡광광도계(Hitachi 8100, Polarized Zeeman effect AAS)로 분석하고 표준곡선은 standard addition 법으로 작성하였다(Fernandez, 1975). 혈중 ZPP는 채혈 즉시 근로자들의 정맥혈 한 방울을 커버글라스에 떨어뜨린 후 휴대용 Hematofluorometer(model : Aviv-206)를 이용하여 형광 스펙트럼 423nm에서 측정하였다(Blumberg 등, 1977). 요중 δ-ALA배설량은 Tomokuni법을 이용하여 측정한 후 요비중 1.024로 보정하였다(Tomockuni 등, 1992). 혈색소는 Cyanmethemoglobin법으로 측정하였으며(이삼열과 정윤섭, 1984), 혈구용적치는 capillary tube에 혈액을 넣어 12000rpm에서 원심분리 후 측정하였다.

3) 자료분석

자료분석은 SAS 9.1 통계 프로그램을 이용하였다. 업종과 단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태, 공기 중 납 농도에 따른 경골 납량과 납 노출지표와의 유의성은 분산분석

(ANOVA)을 실시하였으며, 공기 중 납 농도와 경골 납량, 납 노출지표의 상관분석은 Pearson 상관계수를 이용하였다. 또한 단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태와 공기 중 납 농도가 납 관련 생물학적 노출지표에 미치는 영향을 보기 위하여 대상자의 성별이나 연령, 작업기간, 음주 및 흡연여부, BMI의 교란변수를 통제한 후 중회귀분석을 실시하였다.

간은 유의한 차이를 보이지 않았으며($p>0.05$), 연령은 유의한 차이를 보였다($p<0.01$). 흡연 상태는 남성의 경우 조사대상자의 58.1%, 여성의 경우 6.7%가 현재 흡연을 하고 있었으며, 음주의 경우 남성의 85%, 여성의 53.3%가 현재 음주를 하고 있는 것으로 나타났다. 그 내용은 표 1과 같다.

III. 결과

1. 연구대상자의 일반적 특성

남성 납 노출 근로자의 작업기간은 평균 14.1 ± 6.8 년을 나타냈고 연령은 평균 45.8 ± 7.1 세로 여성과 비교하여 작업기

2. 공기 중 납 농도에 따른 경골 납량과 납 노출지표

사업장의 공기 중 납 농도에 따른 납 노출근로자들의 경골 납량과 납 노출지표의 분산분석 결과는 표 2와 같다. 공기 중 납 농도에 따라 평균 혈중 ZPP와 혈중 납량, 경골 납량이 유의한 차이를 보였으며(각각, $p<0.01$, $p<0.001$, $p<0.001$), 공기 중 납 농도가 0.05mg/m^3 이하에서 혈중 ZPP와 혈중 납량, 경골

Table 1. General characteristics of study subjects

Variable	Male(N=167)				Female(N=15)			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Age, years	45.8	7.1	31	72	51.7	5.0	44	61
Work duration, years	14.1	6.8	1	32	14.0	5.2	4	25
Weight, kg	65.9	8.9	40	89	54.8	7.1	46	72
Height, cm	167.2	5.8	150	180.2	150.8	6.6	140.7	164.6
Smoking								
Current, n(%)			97(58.1)				1(6.7)	
Never & Ex-smoker, n(%)			70(41.9)				14(93.3)	
Drinking alcohol								
Current, n(%)			142(85.0)				8(53.3)	
Never & Ex-drinker, n(%)			25(15.0)				7(46.7)	

Table 2. Summary statistics of study subjects by airborne lead concentration in 182 lead workers

Variable	Airborne lead concentration(mg/m^3)				p-value
	<0.05 (N=49)	0.05-0.15 (N=34)	0.16-0.25 (N=60)	>0.25 (N=39)	
	Mean \pm SD	Mean \pm SD	Mean \pm SD	Mean \pm SD	
Age, years	43.1 ± 5.98	45.0 ± 6.28	48.6 ± 7.96	47.8 ± 6.41	<0.001
WD, years	14.2 ± 5.67	14.2 ± 5.28	15.8 ± 7.81	11.3 ± 6.31	0.011
BMI, kg/m^2	20.6 ± 3.08	19.3 ± 2.69	20.5 ± 2.61	19.8 ± 2.30	0.083
ZPP, $\mu\text{g/l}$	48.9 ± 28.2	67.0 ± 54.4	86.8 ± 56.2	91.3 ± 93.4	0.003
Blood lead, $\mu\text{g/dl}$	23.6 ± 10.5	28.0 ± 15.1	35.0 ± 13.4	35.5 ± 11.0	<0.001
Tibia lead, $\mu\text{g/g}$	20.2 ± 21.3	25.5 ± 23.4	42.8 ± 37.5	35.8 ± 31.9	<0.001
ALAU, mg/l	1.60 ± 0.87	3.02 ± 4.52	2.42 ± 2.28	2.69 ± 2.24	0.075
Hb, g/dl	14.4 ± 1.0	13.9 ± 1.0	13.9 ± 1.3	14.2 ± 1.4	0.184
Hct, %	45.1 ± 3.1	43.5 ± 2.8	43.9 ± 4.3	45.2 ± 4.0	0.070

BMI : body mass index, ZPP : zinc protoporphyrin in whole blood, ALAU : δ -aminolevulinic acid in urine, Hb : hemoglobin, Hct : hematocrit

납량은 각각 $48.9 \pm 28.2 \mu\text{g}/\ell$ 과 $23.6 \pm 10.5 \mu\text{g}/\text{dl}$, $20.2 \pm 21.3 \mu\text{g}/\text{g}$ 이었다. 공기 중 납 농도가 높을수록 혈중 ZPP와 혈중 납량은 유의하게 증가하였으며, 경골 납량은 공기 중 납 농도가 $0.16\text{--}0.25 \text{mg}/\text{m}^3$ 군까지 유의하게 증가 후 감소하였고, 요중 $\delta\text{-ALA}$ 배설량과 혈색소 및 혈구용적치는 공기 중 납 농도에 따라 차이가 없었다.

업종과 단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태에 따른 사업장의 공기 중 납 농도와 근로자들의 경골 납량, 납 노출 지표의 결과는 표 3, 4와 같다. 2차 제련업종에서 평균 혈중 납량과 경골 납량이 유의하게 높았으며(각각, $p < 0.001$), 리사지 제조업종에서는 혈중 ZPP와 요중 $\delta\text{-ALA}$ 배설량, 공기 중 납 농도가 유의하게 높았다(각각, $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.001$). 납 노출형태에 따라서는 흡 노출 근로자들의 평균 혈중 납량이 유의하게 높았으나($p < 0.05$), 공기 중 납 농도는 유의하게 낮은 농도를 보였다($p < 0.01$).

3. 업종과 근로자의 납 노출형태에 따른 공기 중 납 농도와 경골 납량, 납 노출지표

Table 3. Summary statistics of study subjects by industry in 182 lead workers

Variable	Industry			p-value
	Secondary smelting (N=23) Mean \pm SD	Battery manufacturing (N=128) Mean \pm SD	Litharge manufacturing (N=31) Mean \pm SD	
Age, years	50.5 ± 5.75	45.2 ± 7.16	47.7 ± 6.80	0.002
WD, years	9.91 ± 6.47	15.4 ± 6.11	11.9 ± 7.38	<0.001
BMI, kg/m^2	20.5 ± 2.91	20.1 ± 2.78	20.1 ± 2.45	0.861
ZPP, $\mu\text{g}/\ell$	97.4 ± 58.6	61.2 ± 45.8	109.2 ± 99.0	<0.001
Blood lead, $\mu\text{g}/\text{dl}$	46.4 ± 8.46	25.5 ± 11.1	40.7 ± 10.5	<0.001
Tibia lead, $\mu\text{g}/\text{g}$	51.4 ± 42.7	25.3 ± 24.2	41.7 ± 35.4	<0.001
ALAU, mg/ℓ	3.46 ± 5.47	1.90 ± 1.62	3.48 ± 2.38	0.001
Hb, g/dl	14.4 ± 1.09	14.0 ± 1.13	14.1 ± 1.55	0.338
Hct, %	44.3 ± 3.38	44.2 ± 3.53	45.6 ± 4.56	0.142
ALC, mg/m^3	0.217 ± 0.202	0.145 ± 0.130	0.907 ± 0.483	<0.001

ALC : Airborne lead concentration

Table 4. Summary statistics of study subjects by type of lead exposure in 182 lead workers

Variable	Type of lead exposure		p-value
	Fume (N=52) Mean \pm SD	Non-fume (N=130) Mean \pm SD	
Age, years	48.1 ± 7.15	45.6 ± 7.05	0.028
WD, years	13.5 ± 7.60	14.4 ± 6.28	0.433
BMI, kg/m^2	20.1 ± 3.15	20.2 ± 2.55	0.710
ZPP, $\mu\text{g}/\ell$	75.6 ± 47.1	73.3 ± 67.9	0.828
Blood lead, $\mu\text{g}/\text{dl}$	34.7 ± 15.0	29.2 ± 12.5	0.012
Tibia lead, $\mu\text{g}/\text{g}$	35.7 ± 35.5	28.3 ± 29.7	0.229
ALAU, mg/ℓ	2.60 ± 3.77	2.28 ± 2.02	0.449
Hb, g/dl	14.4 ± 1.07	14.0 ± 1.24	0.043
Hct, %	44.6 ± 3.29	44.4 ± 3.90	0.776
ALC, mg/m^3	0.158 ± 0.159	0.334 ± 0.415	0.003

4. 공기 중 납 농도와 경골 납량, 납 노출지표의 상관관계 및 회귀분석

공기 중 납 농도와 상관성이 가장 높은 납 노출지표는 혈중 납량이었으며, 그 다음은 혈중 ZPP 순이었다. 경골 납량도 유의한 상관관계를 보였으며 그 내용은 표 5와 같다.

납 노출형태와 공기 중 납 농도에 따라 경골 납량과 납 노

출지표에 미치는 영향을 보기위하여 대상자의 성별이나 연령, 작업기간, 음주 및 흡연여부, BMI의 교란변수를 통제한 후 중회귀분석을 실시한 결과는 표 6과 같다. 중회귀분석에서 공기 중 납 농도는 혈중 납량과 경골 납량에 유의한 영향을 나타냈으며(모델1과 모델2), 납 노출형태는 혈중 납량에 유의한 영향을 보였으나(모델1), 혈중 ZPP, 요중 δ-ALA배설량에는 유의한 영향이 없었다.

Table 5. Correlation matrix of study variables

	ALC	ZPP	Blood lead	Tibia lead	ALAU	Hb
ZPP	0.247**					
Blood lead	0.312**	0.550**				
Tibia lead	0.189*	0.336**	0.587**			
ALAU	0.140	0.427**	0.394**	0.345**		
Hb	0.003	-0.333**	0.060	-0.024	-0.061	
Hct	0.083	-0.265**	0.058	0.030	0.019	0.919**

** : p<0.01, * : p<0.05

Table 6. Multiple linear regression analysis of lead exposure indices on airborne lead concentration and type of lead exposure after adjustment of covariates

Variable	Estimate	SE	t-statistic	No.	R ²
Model 1 with blood lead				182	0.54
Intercept	18.2503	7.0500	2.5887*		
Type of lead exposure(fume=1, non-fume=0)	3.5274	1.7206	2.0501*		
Airborne lead concentration(mg/m ³)	4.8608	2.2024	2.2070*		
Tibia lead(μg/g)	0.2765	0.0296	9.3261***		
Model 2 with tibia lead				182	0.36
Intercept	-49.4153	17.6870	-2.7939**		
Type of lead exposure(fume=1, non-fume=0)	2.8696	4.4076	0.6510		
Airborne lead concentration(mg/m ³)	15.8727	5.5182	2.8764**		
Model 3 with ZPP				182	0.42
Intercept	-54.5405	38.0421	-1.4337		
Type of lead exposure(fume=1, non-fume=0)	-8.5360	9.2194	-0.9259		
Airborne lead concentration(mg/m ³)	8.7522	11.8231	0.7403		
Tibia lead(μg/g)	1.9698	0.4037	4.8799***		
Blood lead(μg/dl)	0.0915	0.1926	0.4752		
Model 4 with ALAU				182	0.23
Intercept	0.6492	1.8445	0.3520		
Type of lead exposure(fume=1, non-fume=0)	-0.0483	0.4470	-0.1081		
Airborne lead concentration(mg/m ³)	0.1251	0.5732	0.2183		
Blood lead(μg/dl)	0.0345	0.0196	1.7618		
Tibia lead(μg/g)	0.0203	0.0093	2.1785*		

In addition to variables listed under each model, models also adjusted for age, sex, work duration, BMI, smoking and drinking for all subjects.

*** : p<0.001, ** : p<0.01, * : p<0.05

IV. 고찰

납 취급 근로자들의 건강 위해요인은 납 사용량, 납 입자의 크기 및 공기 중 납 농도, 작업공정, 국소 및 전체 환기의 효율성 등 작업장의 일반적 위생수준의 영향을 받으며, 동일한 환경에서도 개인의 작업강도, 호흡방식, 보호구 착용여부에 따라 실질적인 체내 납 흡수는 달라지므로 납 취급 근로자들의 납중독을 예방하고 건강증진을 가져오기 위해서는 환경 모니터링과 함께 생물학적 모니터링을 병행하여 수행하는 것이 바람직하다고 한 바 있다(이병국 등, 1999).

납 노출에 의해 흡수된 납은 대부분 적혈구의 단백질과 결합하여 각 조직과 기관으로 전달, 배설하게 되며, 골은 가장 큰 납의 저장소로 체내 부담량의 90% 이상을 차지하고 과거 노출에 의한 축적량을 나타낸다. 납 노출에 의한 인체영향중 가장 잘 알려진 혈액학적 독작용은 혈색소합성에 관여하는 효소의 활성도를 저하시킴으로 혈색소 감소를 유발하여 산화 대사와 관련된 조직과 기관에 영향을 미친다. 이러한 납 노출의 평가방법으로는 환경적 노출 측정을 통한 외부 노출량과 인체에 흡수된 양을 측정하는 내부 노출량, 표적 장기나 세포내의 생물학적 유효량 등이 있고 납 노출이나 영향, 감수성의 지표로 공기 중 납 농도를 측정함으로 외부노출을 확인할 수 있으며, 체내 흡수된 양은 혈중 납량 측정으로 내부 및 외부 노출원에 대한 평가 및 개인 간의 흡수차이를 설명한다고 하였다(황규윤과 이병국, 2000).

Waldron(1971)은 납 노출지표를 납 흡수와 납 중독의 지표로 나누어서 전자는 혈중 납량과 같이 단순히 체내에 흡수되어 존재하는 것을 나타내고 후자는 혈중 ZPP나 요중 δ -ALA 배설량과 같이 납의 체내 흡수로 인하여 실제로 영향을 받은 정도를 나타내는 것으로 구분하여 설명하였고, 납 노출의 정도를 알아보기 위해서는 혈중 납량의 측정이 가장 좋은 지표이지만 동시에 납 중독의 지표를 측정하는 것이 납에 의한 인체의 영향을 알아보는 좋은 방법이라고 하였다. Blecker 등(1995)은 직업적 노출의 모니터링에 일반적으로 이용되는 혈중 납량은 반감기가 25-35일로 최근의 납 노출수준을 반영하고 골중 납량은 반감기가 15-25년으로 체내 총 부담의 90-95%를 설명하며, 혈중 납량과 골중 납량이 생물학적 모니터링에 함께 이용되었을 때 표준지표로서 내부나 외부변수에 의한 납의 특이적 기여도를 명확히 설명한다고 하였다. Pizent 등(1995)은 납 흡수의 생물학적 지표로 혈중 납은 주로 현재의 수준을 잘 반영하고 요중 δ -ALA 배설량은 장기간 축적된 납 노출수준을 반영한다고 하였으며, Antunes 등(1998)은 납 노출평가에 혈중 및 요중 납량, 요중 δ -ALA 배설량, 코프로피린 측정을 제안하였다.

공기 중 납 농도는 0.05mg/m³ 이하의 노출대상자가 49명

(26.2%)인 것으로 나타났으며 0.05mg/m³ 이상인 노출대상자는 133명(73.8%)으로 이는 안규동 등(2001, 2004)의 연구에서보다 높았으며(각각 60%, 27.4%) 업종별 공기 중 납 농도는 이차제련업종이 평균 0.217±0.202mg/m³ 이었고, 배터리 제조업종과 리사지 제조업종은 각각 0.145±0.130mg/m³ 과 0.907±0.483mg/m³ 으로 리사지 업종이 가장 높게 나타났고, 납 노출형태에 따라서는 비 흡 노출 작업장의 공기중 납 농도가 0.334±0.415mg/m³ 으로 흡 노출작업장 보다 높아 노출형태에 따라 차이를 보였다. 공기 중 납 농도에 따라 경골 납량 및 납 노출지표에 대한 본 조사에서 공기 중 납 농도가 높을 수록 혈중 ZPP와 혈중 납량은 증가하였으며, 경골 납량은 공기 중 납 농도가 0.16-0.25mg/m³까지는 증가하였으나 0.25mg/m³ 이상에서는 다소 감소하였는데 이는 비교 그룹 간에 작업기간을 고려하면 공기 중 납 농도의 증가에 따라 경골 납량의 증가에 유의한 영향을 줄 것으로 사료된다. 황보영 등(1996)의 연구에서 보면 근무 개월 수를 독립변수로 하고 납 노출지표(혈중 납량, 혈중 ZPP, 혈중 logZPP)를 종속변수로 하는 단순 일차 회귀분석에서 공기 중 납 농도의 기하평균이 낮은 공장군일수록 회귀계수가 낮아 공기 중 납 농도가 낮을 수록 납 노출지표에 낮은 영향을 주었고, 박동욱과 백남원(1996)은 납 입자 크기별 농도 범위를 산출하여 납입자의 크기별로 혈중 납량의 변화에 서로 다른 영향을 미치는 것을 확인바 있다. 반면에 Lormphongs 등(2003, 2004)의 연구에서는 공기 중 납 농도와 혈중 납량 간에 유의한 차이를 보이지 않았으며, 작업자의 평균 혈중 납량에 유의한 감소요인으로 작업자에 대한 산업보건교육이 의미 있는 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 연령의 증가에 따라 공기중 납 농도가 증가하는 경향을 보이는 것은 축전지 제조업과 비교하여 리사지 및 2차 제련업종에서 작업하는 근로자의 평균 연령이 높고, 상대적으로 축전지 제조업에 비하여 리사지 및 2차 제련업종의 작업환경내 공기중 납 농도가 높기 때문으로 이는 작업환경이 열악한 사업장에 대한 신규 근로자의 채용시 고령자의 채용이 많고 작업자의 힘든 일에 대한 기피현상으로 인해 리사지 및 2차 제련업종의 근로자 평균연령이 높기 때문으로 사료된다.

공기 중 납 농도와 상관성이 가장 높은 납 노출지표는 혈중 납량이었으며, 경골 납량도 유의한 상관관계를 보였다. 이병국(1973)은 공기 중의 납 농도가 높을수록 혈중 납량 및 요중 납량, 혈색소량과 밀접한 상관관계가 있다고 하였다. 또한 납 노출지표간의 상관관계에서 혈중 납량과 유의한 상관성이 있는 지표는 요중 납량, 요중 ALA, 혈중 ZPP, 혈색소, δ -ALA 활성치, 혈중 납량 대신에 혈중 ZPP의 측정으로도 납 노출의 정도를 알아내는 데 무리가 없다고 하였고(이병국 등, 1984), 특히 혈중 납량의 측정이 어렵거나 비용 등이 문제가 될 경

우 혈중 ZPP의 측정은 납 작업자들의 생물학적 모니터링의 좋은 지표가 될 수 있다고 한바 있다(이병국 등, 1989). Nuyts 등(1993)은 혈중 ZPP 농도의 검사만으로도 납 노출 수준을 평가하는데 큰 문제는 없었으나 과거보다 혈중 납 농도 수준이 많이 낮아졌고 특히 혈중 납량이 $30\mu\text{g}/\text{dl}$ 이하인 경우 혈중 ZPP나 요중 δ -ALA 배설량과의 상관은 아주 미약하거나 없어져서 이들 지표로 납 노출수준을 평가하는 것은 어려움이 있다고 하였다. 한편 혈중 납량 측정은 비교적 용이하고 최근의 납 노출 뿐 아니라 과거 노출에 의한 체내 축적된 납의 부담을 포함함으로 최근과 과거의 노출을 동시에 나타내는 지표이며, 체내 부하량과 과거 노출평가에 이용되는 골중 납량은 내부 흡수량 지표이나, 아직 실험적, 연구적인 목적에 한정되어 측정되고 있다(황규윤과 이병국, 2000).

업종에 따른 납 노출지표의 수준은 2차 제련업종에서 납 노출 근로자들의 평균 혈중 납량과 골중 납량이 유의하게 높은 것으로 나타났는데, 직업적으로 납에 노출된 근로자들의 혈중 납량은 작업장의 납 노출수준에 따른 호흡기를 통한 체내 납 흡수와 이미 체내에 축적된 뼈속의 납에서 용출된 납이 합쳐져서 혈중 납량의 수준을 결정하는 것으로 알려져 있으며(Cake 등, 1996), 납 입자의 크기 특성에 따라 혈중 납량과 유의한 관련성이 있고(박동욱과 백남원, 1996), 특히 $1\mu\text{m}$ 미만의 납과 혈중 납량이 가장 높은 상관관계가 있다고 보고된 바 있어(박동욱과 하권철, 2005) 작업공정상 흡 노출 근로자들이 주로 많은 2차 제련업종에서 다른 업종보다 혈중 납량이 높은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 한편 리사지업종의 경우 제품 포장 및 생산과정에서 작업시간이 길고 분말상태의 납 분진이 작업장 바닥이나 시설물에 축적된 후 2차 분진이 비산되는 경우가 많아 다른 업종보다 공기 중 납 농도가 높은 결과를 나타내었다고 본다.

단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태에 따른 평균 혈중 납량은 흡 노출 근로자들이 유의하게 높았으나, 공기 중 납 농도는 유의하게 낮은 농도를 보였다. 흡은 입자크기가 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 로 비 흡 노출작업에서 발생하는 분진이나 미스트보다 작고 이러한 노출형태에서 발생하는 납 입자의 크기는 혈중 납량에 유의한 영향을 주고 있는 것으로 판단된다. 또한 Bleecker 등(1995)은 동일한 작업공정의 두 그룹에서 혈중 납량에 공기 중 납 농도가 기여하는 부분이 다른 것은 개인 보호 장비의 이용에 따른 것임을 확인하였고, 작업환경의 개선이 어려운 납 작업장에서 근로자들의 무보수 호흡용 보호구 착용이 납 취급 근로자들의 납 흡수를 감소시키는데 기여하는 것으로 보고된 바 있어(심윤보와 이병국, 1991; Lee 등, 1993), 개인 보호구의 착용이 혈중 납량의 감소에 기여하고 있는 것으로 사료된다.

한편 본 연구에서는 공기 중 납 농도가 납 노출지표(혈중

납량 및 골중 납량)와 납 중독지표(혈중 ZPP, 요중 δ -ALA 배설량)에 미치는 영향을 규명하고자 하였으나, 공기 중 납 농도가 법정허용치를 넘는 납 사업장의 경우 의무적으로 보호구를 착용하고, 공기 중 납 농도가 기준치를 하회하는 경우에도 우리나라 대부분의 납 사업장에서는 납 근로자들의 건강보호와 잠재적 납 과다노출의 예방을 위하여 호흡용 보호구의 착용이 상용화 되어 있다. 따라서 작업장의 공기 중 납 농도가 높더라도 보호구의 적절한 착용여부에 따라 실제로 체내에 흡수되는 납의 양은 작업장에 따라 그리고 근로자들의 보호구착용 적정성유무에 따라 달라질 수 있다. 작업장의 공기 중 납 농도와 노출 및 중독지표간의 관련성에 보호구착용이라는 중요한 교란변수가 존재함에도 불구하고 공기 중 납 농도가 높을수록 혈중납량이 증가한 결과는 시사하는 바가 크다. 즉 보호구착용이 적절하더라도 공기 중 납 농도가 높을수록 납 노출의 위험은 더 커질 수밖에 없는 것을 확인할 수 있었다. 특히 본 연구에서 흡 부서의 공기 중 납 농도는 다른 부서의 납 농도보다 상대적으로 낮았음에도 불구하고 혈중납량과 기타 중독의 지표들의 평균이 오히려 높았던 것은 흡 상태의 납이 분진상태의 납보다 호흡성입자가 더 많기 때문에 실제로는 체내에 더 많이 흡수되어 혈중납량을 증가시킨다고 판단할 수 있다. 그러나 흡 작업부서에서는 적절한 호흡용 보호구의 착용이 바람직하나 우리나라의 납 작업장에서는 아직 납 작업의 특성에 따라 보호구가 지급되지 않는 경우가 있어 분진형태의 납에 노출되는 납 근로자들보다 흡에 노출되는 근로자들이 실제로는 더 많은 체내 납 노출이 발생하는지에 대한 검토가 필요하다. 본 연구결과에서 작업장 공기 중 납 농도가 납 노출지표인 혈중 납량의 증가에 유의한 영향이 있음이 확인되며, 납 사업장의 공기 중 납 농도의 감소노력은 지속되어야 할 것이며, 향후 납 근로자들의 공기 중 납 노출과 중독지표간의 관련성 연구에는 납 사업장의 납 노출형태에 대한 정량적 연구와 납 근로자들의 보호구 착용실태, 적정착용여부에 따른 납 근로자들의 건강지표 변화에 대한 연구가 필요하다고 본다. 한편 본 연구에서 연 2회 측정된 공기 중 납 농도의 측정결과를 납 노출지표와 비교하여 작업공정 전반의 납 노출수준으로 반영하기에는 다소 제한점이 있을 것으로 생각되며 이를 보완하기 위해서는 이후 연구에서는 월별이나 분기별 일정기간 작업환경의 노출수준에 대한 평가가 함께 이루어져야 할 것이다.

V. 결론

납 작업장의 공기 중 납 농도가 업종이나 단위작업공정에서 근로자의 납 노출형태 등에 따라 납 근로자들의 납 노출

지표와 증독지표에 미치는 영향을 알아보기 위하여 납 사업장의 공기 중 납 농도를 확인하였고 납 노출 근로자들을 대상으로 경골 납량 및 혈중 납량, 혈중 ZPP, 혈색소, 혈구용적치, 요중 δ -ALA배설량 등의 납 관련 생물학적 노출지표에 대하여 조사하였다.

연구대상은 11개 사업장의 납 노출 남성 근로자 167(91.8%)명과 여성 15(8.2%)명 등 총 182명으로 하였으며, 연구기간은 2004년 3월부터 2005년 8월까지 조사하였다.

사업장의 공기 중 납 농도에 따라 납 노출 근로자들의 평균 혈중 ZPP와 혈중 납량, 경골 납량이 유의한 차이를 보였으며, 공기 중 납 농도가 높을수록 혈중 ZPP와 혈중 납량은 유의하게 증가하였으나 경골 납량은 공기 중 납 농도가 0.16-0.25mg/m³군까지 유의하게 증가한 후 감소하였고, 요중 δ -ALA배설량과 혈색소 및 혈구용적치는 차이가 없었다.

2차 제련업종에서 납 노출 근로자들의 평균 혈중 납량과 경골 납량이 유의하게 높았으며, 리사지 제조업종에서는 혈중 ZPP와 요중 δ -ALA배설량, 공기 중 납 농도가 유의하게 높았다. 단위작업공정의 납 노출형태에 따른 구분에서 흡 노출 근로자들의 평균 혈중 납량은 유의하게 높았으나, 공기 중 납 농도는 유의하게 낮은 농도를 보였다.

성과 연령 그리고 유관한 교란변수를 통제한 후 공기 중 납 농도와 단위작업공정의 납 노출형태에 따라 경골 납량과 납 노출지표에 미치는 영향을 보기위한 중회귀분석에서 공기 중 납 농도는 혈중 납량과 경골 납량에 유의한 영향을 나타내었으나, 납 노출형태는 혈중 납량에만 유의한 영향을 보였고 경골 납량과 혈중 ZPP, 요중 δ -ALA배설량에는 영향이 없었다.

본 연구에서 공기 중 납 농도는 혈중 납량과 경골 납량에는 유의한 관련성이 있었다. 그러나 작업공정 및 납 노출형태, 납 입자의 특성, 보호구착용 실태 등 공기 중 납 농도 증가 이외의 요인이 골중 납량과 혈중 납량 등의 납 노출지표에 어느 정도 영향을 주고 있는지는 추가 연구를 통하여 규명되어야 할 것이다.

REFERENCES

김화성, 이성수, 김용배, 황보영, 리갑수, 안규동, 장봉기, 이병국 연작업자들에서 혈중 및 골중 연량과 조혈기능 검사지표 사이의 관련성에 ALAD 다형질성이 미치는 영향. 대한산업의학회지 2001; 13(1): 75-86
 노동부. 근로자건강진단실시결과. 2004
 박동욱, 백남원. 공기중 납입자의 크기특성과 혈액 중 납 농

도와의 관계에 의한 허용농도 추정. 한국산업위생학회지 1996; 6(2): 265-271
 박동욱, 백남원. 업종별 공기중 납입자의 입경별 분포특성에 관한 조사 연구. 한국산업위생학회지 1995; 5(2): 160-171
 박동욱, 백남원, 최병순, 김태균, 이광용, 오세민, 안규동. 직업적 납에 노출 된 근로자들의 혈액중 납과 ZPP농도와 의 관계. 한국산업위생학회지 1996; 6(1): 88-96
 박동욱, 하권철. 납 흡수에 영향을 미치는 요인분석; 납 크기 특성과 혈액 중 납과의 관계. 한국환경보건학회지 2005; 31(4): 316-321
 심윤보, 이병국. 연취급 근로자들의 건강증진에 미치는 호흡용 보호구 및 생물학적 모니터링의 효과. 대한산업의학회지 1991; 4(1): 1-13
 안규동, 김남수, 김진호, 이익진, 조광성, 이성수, 이병국. 휴대용 x-ray fluorescence와 high volume air sampler를 이용한 작업장 공기 중 납 농도 비교 연구. 한국산업위생학회지 2004; 14(1): 71-76
 안규동, 이종천, 조광성, 김진호, 이성수, 이병국. 연 노출 근로자들의 ALAD genotype에 따른 연 노출지표 및 증상과의 관련성. 한국산업위생학회지 2001; 11(2): 111-117
 이병국. 연 작업자의 요중 δ -Aminolevulinic Acid 배설량. 가톨릭대학 의학부 논문집 1973; 24: 485-492
 이병국, 김정만, 이광목, 조규상, 이은영, 조영선. 연제련 작업자들에서의 연 폭로에 관련된 생물학적 지표들의 상호관계. 한국의 산업의학 1984; 23(1): 1-7
 이병국, 안규동, 남택승. 연작업자들의 보건관리시 혈중 ZPP 측정의 의의. 한국의 산업의학 1989; 28(4): 110-115
 이병국, 김용배, 리갑수, 안현철, 김화성, 이용진, 황규운, 장봉기, 이성수, 안규동. 업종에 따른 연 취급 사업자의 기중 연 농도 및 연 노출 수준 평가. 순천향산업의학 1999; 5(1): 1-13
 이삼열, 정운섭. 임상병리 검사법(개정판), 연세대학교 출판부. 서울 1984; 119-120
 황규운, 이병국. 연에 의한 건강장해 및 생물학적 표식자. 대한산업의학회지 2000; 39(3): 99-108
 황보영, 김용배, 리갑수, 이성수, 안규동, 이병국, 김정순. 축전지 제조업에서 입사 1년 미만 남자 사원들의 연 노출 지표치에 관한 연구. 예방의학회지 1996; 29(4): 747-764
 Ahn HC, Hwang KY, Kim YB, Lee GS, Lee SS, Ahn KD, Lee BK. Different effects of serum iron status on the relationship between blood lead and zinc protoporphyrin in lead workers in Korea. J Occup Health 1999; 41(3): 166-171
 Antunes I, De Albuquerque M, Pereira L, Vieira DN, Marques EGP etc. Occupational exposure to lead. Toxicology letters

- 1998; 95(suppl.1): 139
- Bleecker ML, McNeill FE, Lindgren KN, Masten VL, Patrick Ford D. Relationship between bone lead and other indices of lead exposure in smelter workers. *Toxicology letters* 1995; 77: 241-248
- Blumberg WE, Eisinger J, Lamola AA, Zuckerman DM. Zinc protoporphyrin level in blood determination by a portable hematofluorimeter; A screening device for lead poisoning. *J Lab Clin Med* 1977; 89: 712-723
- Cake KM, Bowins RJ, Vaillancourt C, Gordon CL, McNutt RH, Laporte R, Webber CE, Chettle DR. Partition of circulating lead between serum and red cells is different for internal and external sources of lead. *Am J Ind Med* 1996; 29: 440-445
- Castellino N, Castellino P, Sannolo N. *Inorganic lead exposure: Metabolism and Intoxication*. Lewis Publishers, London 1995
- Fernandez FJ. Micromethod for lead determination in whole blood by atomic absorption with use of graphite furnace. *Clin Chem* 1975; 21: 555-561
- Lee BK. The role of biological monitoring in the health management of lead-exposed workers. *Toxicology letters* 1999; 108: 149-160
- Lee BK, Lee CW, Ahn KD. The effect of respiratory protection with biological monitoring on the health management of lead workers in a storage battery industry. *Int Arch Occup Environ Health* 1993; 65: S181-S184
- Lomphongs S, Miyashita K, Morioka I, Chaikittiporn C, Miyai N, Yamamoto H. Lead exposure and blood lead level of workers in a battery manufacturing plant in Thailand. *Ind Health* 2003; 41(4): 348-353
- Lomphongs S, Morioka I, Miyai N, Yamamoto H, Chikittiporn C, Thiramanus T, Miyashita K. Occupational health education and collaboration for reducing the risk of lead poisoning of workers in a battery manufacturing plant in Thailand. *Ind Health* 2004; 42(4): 440-445
- Nuyts GD, Elseviers MM, De Broe ME. Healthy worker effect in a cross-sectional study of lead workers. *J Occup Med* 1993; 35(4): 387-391
- Weaver VM, Jaar BG, Schwartz BS, Todd AC, Ahn KD, Lee SS, Wen J, Parsons PJ, Lee BK. Associations among lead dose biomarkers, uric acid, and renal function in Korea lead workers. *Environ Health Perspect* 2005; 113(1): 36-42
- WHO. Recommended health-based limits in occupational exposure to heavy metals, WHO Tech Report, Ser. No. 647 1980