

휴대용 혈중연 분석기를 이용한 혈중연 분석

이혜진 · 유선우 · 김형아^{‡1)}

강북삼성병원 진단검사의학과 · 가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실¹⁾

Analysis on Lead in Blood using a Portable Blood Lead Analyzer

Hye Jin Lee · Sun Woo You · Hyoung-Ah Kim^{‡1)}

Department of Laboratory Medicine, Kangbuk Samsung Hospital,
Department of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea¹⁾

To evaluate the reliability and field applicability of portable anodic stripping voltammetry (ASV, LeadCare[®]), authors compared the blood lead concentration (PbB) by LeadCare[®] and graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS). Fifty seven lead workers and 40 office workers from three storage battery and electromagnetic accessory manufacturing factories were studied as the exposed and control group, respectively. Blood samples collected in "lead-free" evacuated tubes were divided into two portions; the one for on-site analysis using the Lead-Care[®] while the remaining sample for analysis using GFAAS.

The results were as follows:

1. Accuracy(%) and precision(%) of the ASV on level 1 ($6.3 \pm 3 \mu\text{g/dL}$) and level 2 ($29.9 \pm 4 \mu\text{g/dL}$) reference samples were 112.7 and 9.15, 99.7 and 3.76, respectively.

2. Blood lead levels of all subjects were normally distributed and mean concentration by GFAAS and ASV was 17.8 ± 13.2 (range: 1.0 ~ 58.4) $\mu\text{g/dL}$ and 18.1 ± 14.1 (range: 1.3 ~ 61.8) $\mu\text{g/dL}$, respectively. There was no significant difference between two methods ($p=0.408$) with mean difference of 0.21 (SD=2.44) $\mu\text{g/dL}$.

3. Mean PbB of the exposed workers by GFAAS was $26.7 \pm 9.9 \mu\text{g/dL}$ ranging from 9.6 to 58.4 $\mu\text{g/dL}$, while that by ASV was $27.3 \pm 11.2 \mu\text{g/dL}$, ranging from 11.8 to 61.8 $\mu\text{g/dL}$. GFAAS and ASV results of the control workers were 5.2 ± 3.3 (range: 1.0 ~ 13.7) $\mu\text{g/dL}$ and 4.9 ± 2.9 (range: 1.3 ~ 10.8) $\mu\text{g/dL}$, respectively. There was no significant difference between the two methods for the exposed or control workers ($p=0.173$ or $p=0.051$, respectively).

4. When the blood lead levels were grouped as 10.0 $\mu\text{g/dL}$ interval, there was no statistically significant differences between GFAAS and ASV within the groups, with mean agreement rate of 101.2%.

In conclusion, there was no statistically significant difference between GFAAS and ASV method for measuring blood lead levels. It is suggested that applicability of ASV is good to perform rapid analysis in field and/or on-site biological monitoring for lead.

Key Words: blood lead concentration (PbB), portable anodic stripping voltammetry (ASV), graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS)

I. 서 론

체내에 흡수된 연과 관련된 생물학적 노출지표로는 연중독 지표인 혈중 zinc-protoporphyrin(ZPP)량과 요중 δ -aminolevulinic acid(δ -ALA) 배설량이 있고, 연흡수 지표인 혈중연과 요중연 농도가 있다(Waldron, 1980). 그러나 혈중 ZPP량은 단기간 또는 저노출군에서 연이 heme 합성을 저해하는 정도가 심하지 않아 적용도가 낮은 것으로 알려져 있다(Novel, 1993). 요중연은 시료의 채취는 간편하지만, 혈중연에 비해 10%에 지나지 않는 미량이므로 분석하기에 어려움이 따르고, 요중에 함유된 방해물질인 나트륨, 칼륨, 칼슘, 인산염 등의 영향이 크고(Tsalev와 Zaprinov, 1983), 인산 칼륨과 연이 함께 침전하는 경향이 있어 분석 전에 이를 해결해야 한다(Stevens 등, 1972). 이에 반해 혈중연 농도는 반감기가 35일 내지 40일로서 연 노출에 의한 직접적인 노출의 정도를 나타내는 생물학적 지표로서 유효하고, 혈액 채취의 번거로움이 있지만 요를 사용했을 때에 비하여 농도 보정이 필요 없는 장점이 있다(양정선 등, 1993). 따라서 혈중연은 인체의 연흡수 정도를 나타내는 중요한 지표라고 할 수 있다.

혈중연 농도를 측정하는 방법에는 원자흡광광도계(atomic absorption spectrophotometer; AAS)에 의한 방법과 anodic 또는 potentiometric stripping voltammetry(ASV 또는 PSV)를 이용하는 방법이 있다(Clausen과 Rastogi, 1977).

원자흡광광도계를 이용한 방법에는 불꽃(flame)법과 흑연로(graphite furnace)법이 있다. 현재 국내에서는 혈중연 분석법으로 분석파장 283.3nm에서 D₂보정을 이용한 흑연로 원자흡광광도법(graphite furnace atomic absorption spectrometry; GFAAS)이 주로 이용되고 있으며, 편광 Zeeman effect 보정 방식을 이용한 분석법이 있으나 연구결과에 의하면 두 방법간에는 차이가 없다(이석기 등, 1995). 하지만 이 두가지 방법은 고가의 정밀한 시설과 경험이 축적된 실험실에서만 가능하므로 많은 시간과 노력을 필요로 한다.

초기에 ASV 방식을 이용한 장비는 실험결과 성공적이었지만, 구리(Cu)의 방해로 인해 일정한 조정을 필요로 하였으나(Roda 등, 1988), 실험실 내에서 사용하기에 적합하였으며, 혈중연 농도 측정에 선별검사 방법으로 사용되었다(Ashley, 1994).

최근 ESA사(Chelmsford, MA)와 AndCare사(Durham, NC)에서 ASV 원리를 이용하여 현장검사에 적용할 수 있는 휴대용 혈중연 분석기(LeadCare[®] Analyzer, ESA Inc., USA)가 개발되었다. FDA(Food and Drug Administration, USA) 허가표시를 받은 LeadCare[®]는 의학적 진단장비로 간편한 조작으로 혈중연 분석이 가능하다. 기존의 검사방법으로는 근로자의 혈중연 농도 결과를 얻기 위해 몇 일 또는 몇 주 동안 기다려야 했지만, 이 휴대용 혈중연 검사기기로는 몇 분 또는 몇 시간 안에 혈중연 농도를 알 수 있고, 전통적인 실험실 기술과 비교하여 고가의 장비와 시설투자 없이 저렴한 비용으로 빠른 시간 안에 혈중연 농도를 알 수 있어 효율적이다(Taylor 등, 2001).

외국에서 휴대용 ASV 장비를 이용한 연구로는 미국 보스턴 중심가에 있는 어린이 병원에서 연중독 치료 또는 1차 진료를 받은 7세 이하 어린이 231명을 대상으로 휴대용 분석기의 정확도에 관한 연구(Shannon과 Rifai, 1997)와, 연에 노출된 근로자 206명을 대상으로 휴대용 혈중연 분석기를 평가한 연구(Taylor 등, 2001)가 있으며, 국내에서는 아직 휴대용 혈중연 분석기를 사용하여 혈중연 농도를 평가한 연구는 없다. 그러므로 휴대용 혈중연 분석기를 근로자들의 혈중연 농도를 검사하는 현장검사 장비로 이용하기 위해서는 작업장내에서의 평가가 필요하리라 생각된다.

본 연구는 연 노출 근로자들의 생물학적 노출지표인 혈중연 농도를 ASV 원리를 이용한 휴대용 혈중연 분석기인 LeadCare[®]와 국내에서 주로 이용되는 분석법인 흑연로 원자흡광광도법으로 측정하여 그 결과를 비교해 봄으로써 휴대용 혈중연 분석기를 이용한 측정결과에 대

한 신뢰성과 현장적용 가능성을 평가하고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

경기도 지역에 위치한 축전기 제조 및 전자부품 제조공장 3개소에서 직업적으로 연에 노출된 근로자 57명을 노출군으로 하고, 연에 노출되지 않은 일반사무직 근로자 40명을 대조군으로 하였다.

노출군의 연령분포는 22세~57세였으며, 평균 연령은 35.2세로 30대 (35.1%)가 가장 많았고, 대조군의 연령분포는 22세~60세였으며, 평균 연령은 34.7세로 20대 (35.0%)가 가장 많았다.

2. 연구내용 및 방법

1) 흑연로 원자흡광광도계를 이용한 측정방법
혈액시료는 항응고제(sodium heparin)가 처리된 진공튜브를 이용하여 정맥혈 3 mL를 채혈한 후 혈액을 냉장 보관하여 사용하였다. 연의 손실 방지와 안정화를 위한 modifier로서 0.2% (NH₂)₄ HPO₄ (Sigma, St. Louis, MO, USA)와 1% Triton X-100 (Merck, Darmstadt, Germany)으로 혈액을 20배 희석하여, 표준 첨가법에 의해 전처리 한 후 흑연로 장치가 부착된 원자흡광광도계(GTA100; Spectra AA-880, Varian, Australia)를 사용하여 283.3nm의 분석파장에서 D₂보정 방식으로 분석하였다(Eaton과 Holcombe, 1983; Jacobson과 Quigley, 1991). 분석조건은 표 1과 같다.

2) 휴대용 혈중연 분석기를 이용한 측정방법
진공튜브를 이용하여 정맥혈 3 mL를 채혈한 후 실온(10~32 °C)에서 보관하고, 6시간 이내에 혈액 50 μ L와 LeadCare[®] treatment reagent를 혼합하였다. 혼합액 50 μ L를 센서의 활성영역 전체에 도포하여 휴대용 혈중연 분석기(LeadCare[®] Analyzer, ESA, Inc., USA)에 밀어 넣고 검사하였다

Table 1. Analytical condition of atomic absorption spectrometry with graphite furnace for blood lead analysis.

Instrument Parameter						
Instrument mode			absorbance			
Calibration mode			STD addition			
Measurement mode			peak height			
Lamp current(mA)			10.0			
Slit width(nm)			0.5			
Wavelength(nm)			283.3			
Background correction			on			
Sample volume(μ L)			10			
Furnace Parameter						
Step No.		Temp. (°C)	Time (sec)	Gas Flow (L/min)	Gas Type	Read Command
1	Drying	85	5.0	3.0	Normal	No
2		98	40.0	3.0	Normal	No
3		120	10.0	3.0	Normal	No
4		250	8.0	3.0	Normal	No
6	Ashing	450	7.0	3.0	Normal	No
5		600	10.0	3.0	Normal	No
7		600	1.0	0.0	Normal	No
8	Atomizing	2200	1.0	0.0	Normal	Yes
9		2200	2.0	0.0	Normal	Yes
10		2300	2.0	3.0	Normal	No

장비를 작동시킬 때마다 또한 새로운 검사 키트를 사용할 때마다 기기를 보정하였다. LeadCare® 정도관리 표준물질은 $6.3 \pm 3 \mu\text{g/dL}$ (Level 1)와 $29.9 \pm 4 \mu\text{g/dL}$ (Level 2)로 구성되어 있고, 시료를 검사하기 전과 후에 확인 검사하였다. 정밀도 평가를 위해서 정도관리 표준물질을 10회 반복 측정하였다. LeadCare® 장비의 측정 범위는 $1.4 \sim 65 \mu\text{g/dL}$ 이다.

Treatment reagent의 역할은 적혈구 구성성분으로부터 연을 화학적으로 분해시키고, 유리된 연은 2가의 형태로 treatment reagent에 남아있게 된다. 이러한 연의 형

태는 전극센서에서 검출 가능하며, 이 기술이 ASV로 알려져 있다(Wang과 Tian, 1992).

3. 자료의 처리 및 분석

자료의 분석은 SAS system version 8.1 (SAS Institute Inc., USA)을 이용하였다. 대상자들의 혈중연 농도가 정규분포 하는 것을 확인하였고, paired *t*-test를 이용하여 5% 유의수준에서 두 측정방법간의 차이를 검정하였으며, 단순회귀분석을 통해 두 측정방법간의 상관계수를 구하였다.

III. 연구결과

1. 휴대용 혈중연 분석기의 정밀도와 정확도 평가

휴대용 혈중연 분석기로 정도관리 표준물질을 반복 측정하여 정밀도와 정확도를 평가한 결과는 표 2와 같다. 정밀도에 대한 결과는 Level 1의 변이계수(coefficient of variation, CV)는 9.15%였고, Level 2의 변이계수는 3.76%이었다. 정확도는 Level 1과 Level 2, 각각 112.7% 및 99.7%이었다.

2. 흑연로 원자흡광광도계와 휴대용 혈중연 분석기를 이용한 분석법의 비교

흑연로 원자흡광광도계와 휴대용 혈중연 분석기로 측정한 노출군과 대조군의 혈중연 농도분포는 그림 1과 같다.

노출군의 혈중연 농도는 흑연로 원자흡광광도계로 측정한 결과 평균 $26.7 \pm 9.9 \mu\text{g}$

Table 2. Precision and accuracy for reference samples by portable anodic stripping voltammetry.

Reference (Pb, μg/L)	N	Mean ± SD	Precision*	Accuracy†
Level 1 (6.3±3)	10	7.1 ± 0.65	9.15	112.7
Level 2 (29.9±4)	10	29.8 ± 1.12	3.76	99.7

$$^* \text{Precision}(\%) = \text{CV} = \frac{SD}{Mean} \times 100$$

$$^{\dagger} \text{Accuracy}(\%) = \frac{\text{analyzed value}}{\text{reference value}} \times 100$$

/dL로 9.6~58.4 μ g/dL 범위였고, 휴대용 혈중연 분석기로 측정된 평균 혈중연 농도는 27.3 \pm 11.2 μ g/dL로 11.8~61.8 μ g/dL 범위였으며, paired *t*-test 결과 두 측정방법간에는 유의한 차이가 없었다($p=0.173$). 대조군의 혈중연 농도는 흡연로 원자흡광광도계로 측정된 결과 평균 5.2 \pm 3.3 μ g/dL로 1.0~13.7 μ g/dL 범위였고, 휴대용 혈중연 분석기로 측정된 평균 혈중연 농도는 4.9 \pm 2.9 μ g/dL로 1.3~10.8 μ g/dL 범위였으며, 두 측정방법간에는 유의한 차이가 없었다($p=0.051$). 전체 대상자 97명의 혈중연 농도는 흡연로 원자흡광광도계로 측정된 결과 평균 17.8 \pm 13.2 μ g/dL(1.0~58.4 μ g/dL 범위)였고, 휴대용 혈중연 분석기로 측정된 평균 혈중연 농도는 18.1 \pm 14.1 μ g/dL(1.3~61.8 μ g/dL 범위)으로 두 방법간에 유의한 차이가 없었다($p=0.408$) (표 3). 흡연로 원자흡광광도계와 휴대용 혈중연 분석기로부터 얻어진 혈중연 측정치의 차이는 흡연로 원자흡광광도계의 결과를 기준으로 평균 0.21 μ g/dL(SD=2.44)의 차이가 있었으며(그림2) 통계적으로 유의하지 않았다.

전체 대상군에서 흡연로 원자흡광광도계로 측정된 혈중연 농도를 독립변수로 휴대용 혈중연 분석기로 측정된 농도를 종속변수로 회귀분석한 결과 회귀방정식 $Y=1.050X-0.680(R^2=0.972)$, 상관계수(R)는 0.980으로 흡연로 원자흡광광도계와 휴대용 분석기의 측정결과는 밀접한 양의 상관관계가 있으며 통계적으로 유의하였다($p<0.05$)(그림 3).

표 4는 흡연로 원자흡광광도계와 휴대용 혈중연 분석기로 측정된 혈중연 농도를 10 μ g/dL 이하, 10.1~20.0 μ g/dL, 20.1~30.0

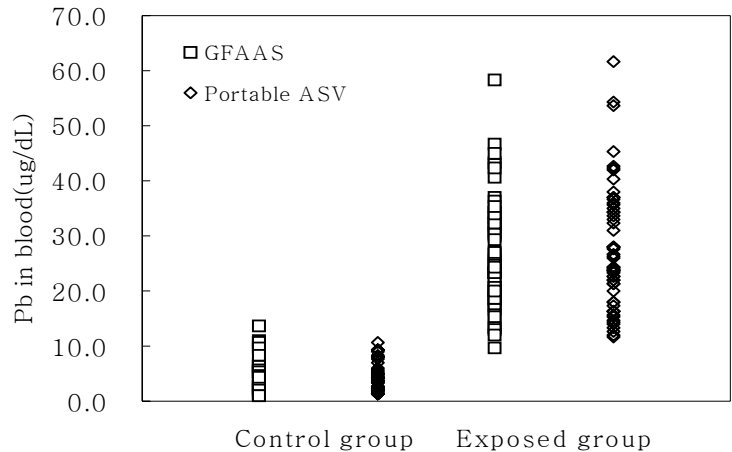


Fig 1. Distribution of blood lead levels of un-exposed control or exposed workers by graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS) and portable anodic stripping voltammetry (ASV).

μ g/dL, 30.1~40 μ g/dL, 40.1 μ g/dL 이상으로 두 방법간의 평균일치율은 101.2%이었다. 나누어 비교한 결과로 각각의 농도에서 두 측정방법간에 유의한 차이가 없었으며

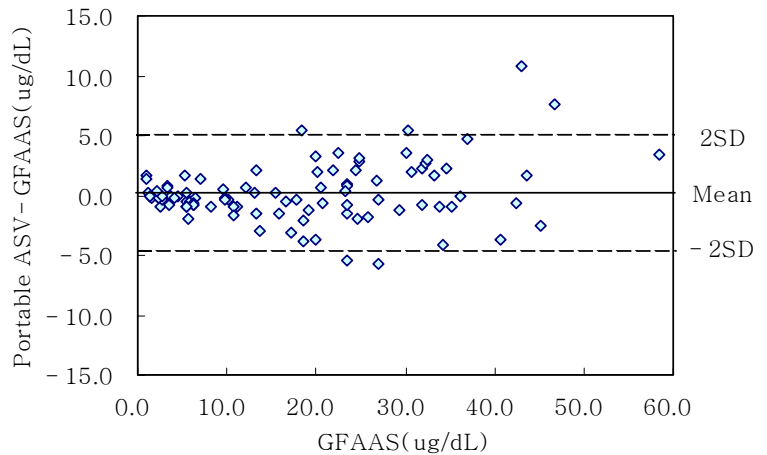


Fig 2. Differences between the portable anodic stripping voltammetry (ASV) and graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS) as measured against GFAAS.

Table 3. Mean concentration of blood lead (μ g/L) by graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS) and portable anodic stripping voltammetry (ASV).

Group	N	GFAAS		ASV		<i>p</i> -value
		Mean \pm SD	(Range)	Mean \pm SD	(Range)	
Control	40	5.2 \pm 3.3	(1.0 ~ 13.7)	4.9 \pm 2.9	(1.3 ~ 10.8)	0.051
Exposed	57	26.7 \pm 9.9	(9.9 ~ 58.4)	27.3 \pm 11.2	(11.8 ~ 61.8)	0.173
Overall	97	17.9 \pm 13.2	(1.0 ~ 58.4)	18.1 \pm 14.4	(1.3 ~ 61.8)	0.408

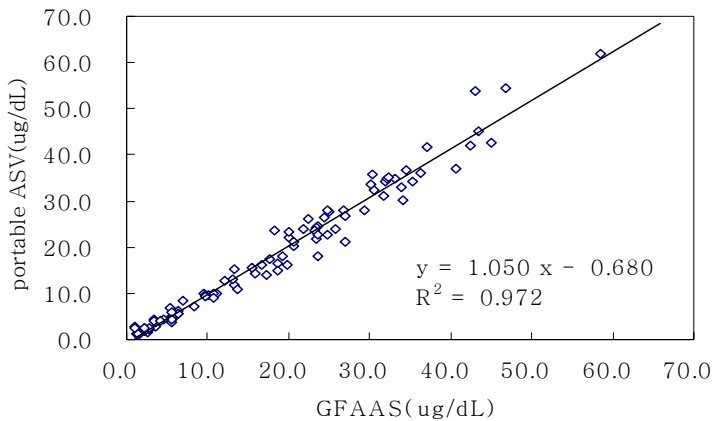


Fig 3. Correlation between graphite furnace atomic absorption spectrometry(GFAAS) and portable anodic stripping voltammetry (ASV).

IV. 고 찰

연흡수 지표인 혈중연 농도와 요중연 농도는 체내 각 조직에 함유되어 있는 전체 연량에 비하면 극히 일부분이지만, 현재 연에 노출되고 있는 근로자의 건강상태를 알 수 있는 자료를 제공한다(변정식 등, 2002).

우리나라에서는 1970년대 초 근로자 건강진단과 작업환경측정이 시작되어 연 작업자들에 대한 건강관리가 시작되었으나 초기에는 특수건강진단 기관들 간에 수준 차이가 심하여 적절한 건강관리가 이루어지지 못하였고, 연 작업장 근로자들의 혈중연이 매우 높은 수준이어서 혈중 ZPP를 선별검사로 하고 혈중연 검사를 2차로

적용하였으나, 최근에는 혈중연의 수준이 낮아지는 추세로 작업장에 따라 혈중연 검사를 바로 적용하는 것이 바람직하다(이성수, 1999). 개정된 특수건강진단체도에서는 생물학적 노출지표 검사에서 혈중연을 필수지표물질로 규정하였다(한국산업안전공단, 2000).

2000년 근로자 건강진단 실시결과에서 연으로 인한 직업병 요관찰자는 남자 722명, 여자 57명으로 총 779명으로 보고되었고, 직업병 유소견자는 9명으로 보고되어(노동부, 2001) 휴대용 혈중연 분석기를 근로자들의 혈중연 농도를 검사하는 현장 검사 장비로 이용하여 빠른 시간내에 혈중연농도를 평가한다면 근로자의 건강상태 조기 예방에 도움이 되리라 생각된다.

그러나 현재 특수건강진단 기관에서 실시되고 있는 혈중연 농도 측정 방법은 정밀한 시설과 경험이 축적된 검사실에서만 측정이 가능하고 오랜 시간과 노력을 필요로 한다. 이에 비교적 간단한 전처리로 짧은 시간에 혈중연 농도 측정이 가능한 장비에 대한 필요성이 대두되었고, 초기에 ASV 방식을 이용한 장비의 제한점을 개선한 휴대용 혈중연 장비가 개발되어 이용되고 있다.

ASV 원리를 이용한 휴대용 혈중연 분석기와 원자흡광광도계로 측정한 혈중연 농도를 비교한 외국의 연구결과를 살펴보면 미국 보스턴 어린이 병원에서 7세 이하의 어린이 231명을 대상으로 원자흡광광도계로 측정한 혈중연 농도 평균은 $9.7 \pm 9.3 \mu\text{g/dL}$ 였고, 휴대용 ASV 장비로 측정한 혈중연 농도는 평균 $9.0 \pm 9.9 \mu\text{g/dL}$ 였으며, 두 측정방법간의 상관계수(R)는 $0.948(p=0.001)$ 로 소아과의 선별검사로써 성공적으로 사용할 수 있음을 확인하였다(Shannon과 Rifai, 1997). 연에 노출된 근로자 206명을 대상으로 실시한 연구에서는 휴대용 ASV 장비와 흑연로 원자흡광광도계로 측정한 혈중연 농도의 평균 차이는 $0.79 \mu\text{g/dL}$ ($SD=5.59$, $p=0.044$)로 휴대용 ASV 장비로 측정한 혈중연 농도는 참값에서 평균 $1 \mu\text{g/dL}$ 미만 정도 과대평가 되었으며 이때 단순회귀방정식 $Y(\text{휴대용 혈중연 분석기}) = 0.91X(\text{흑연로 원자흡광광도계}) + 3.0$ ($R^2=0.67$)이었다(Taylor 등,

Table 4. Comparison of blood lead levels within the blood lead level category ($\mu\text{g/L}$).

Blood lead level	N	GFAAS*	ASV†	AR‡	p-value
≤ 10.0	36	4.5 ± 2.5	4.4 ± 2.4	97.3 ± 39.9	0.363
$10.1 \sim 20.0$	20	15.3 ± 3.4	14.6 ± 4.0	95.7 ± 13.3	0.216
$20.1 \sim 30.0$	20	24.1 ± 2.4	24.1 ± 2.9	100.0 ± 10.4	0.993
$30.1 \sim 40.0$	14	33.1 ± 2.2	34.6 ± 2.8	104.5 ± 7.8	0.057
$40.1 \leq$	7	45.7 ± 5.9	48.1 ± 8.8	105.2 ± 12.1	0.284
Total	97	17.8 ± 13.2	18.1 ± 14.1	101.2 ± 25.9	0.408

* GFAAS : graphite furnace atomic absorption spectrometry

† ASV : portable anodic stripping voltammetry

‡ Agreement Rate(%) = $\frac{\text{values by Portable ASV}}{\text{values by GFAAS}} \times 100$

2001). 본 연구결과의 평균 차이는 $0.21\mu\text{g}/\text{dL}$ ($\text{SD}=2.44$, $p=0.408$)로 두 측정방법간의 혈중연 농도의 편차가 더 작았으며 전체를 대상으로 한 단순 회귀방정식은 Y (휴대용 혈중연 분석기) = $1.050X$ (흑연로 원자흡광광도계) ~ 0.680 , $R^2=0.972$ 로 더 높은 상관을 나타내었다. 연 노출 근로자를 대상으로 한 연구에서도 휴대용 ASV 장비는 생물학적 모니터링이나 현장 평가용으로 빠른 분석이 가능함을 나타내었다.

현재 우리나라에서는 혈중연의 생물학적 노출기준(biological exposure indices, BEI)을 $40\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 제시하고 있고 한국산업안전공단, 2000), ACGIH (2001)에서는 혈중연 농도 $30\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 제시하고 있다. 그러므로 혈중연 농도 $30\mu\text{g}/\text{dL}$ 와 $40\mu\text{g}/\text{dL}$ 는 근로자들의 연 노출정도를 평가하는 의미있는 수치로 이를 기준으로 두 측정방법간에 차이가 있는지 알아보기 위해 전체 대상자의 혈중연 농도를 흑연로 원자흡광광도계로 측정한 결과를 기준으로 $10\mu\text{g}/\text{dL}$ 이하, $10.1 \sim 20.0\mu\text{g}/\text{dL}$, $20.1 \sim 30.0\mu\text{g}/\text{dL}$, $30.1 \sim 40\mu\text{g}/\text{dL}$, $40\mu\text{g}/\text{dL}$ 초과로 나누어 휴대용 혈중연 분석기로 측정한 결과와 비교한 결과, 각각의 농도 분포에서 두 측정방법간에 유의한 차이가 없었으며 평균일치율이 101.2%이었다.

본 연구의 제한점은 전체 연구 대상자 97명 중 혈중연 농도의 노출기준값인 $40\mu\text{g}/\text{dL}$ 를 넘는 시료가 7건 (7.2%)에 불과하여 고농도 노출 근로자들을 대상으로 연구가 더 추가되어야 할 것으로 생각된다. 본 연구에서 사용한 휴대용 혈중연 분석기의 측정범위는 $1.4 \sim 65\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 만약 혈중연 농도가 $65\mu\text{g}/\text{dL}$ 를 초과할 경우 화면에 "HI"라고 나타난다고 하였는데, 본 연구에서는 대상자들의 혈중연 농도가 $1.3 \sim 61.8\mu\text{g}/\text{dL}$ 범위로 $65\mu\text{g}/\text{dL}$ 를 벗어나는 시료가 없었다. 2차 제련업에서 일하는 근로자의 평균 혈중연 농도가 $85.11\mu\text{g}/\text{dL}$ (박동욱 등, 1996), 축전지 재생공장 근로자 15명의 평균 혈중연 농도는 $65.8\mu\text{g}/\text{dL}$ (범위 $9 \sim 86\mu\text{g}/\text{dL}$) (Gittleman 등, 1994)으로 연 노출작업장 근로자들의 혈중연 농도는 $65\mu\text{g}/\text{dL}$ 를 넘는 경우가 있으므로 이

를 초과하는 시료를 대상으로 회석에 따른 검사 결과의 비교 연구도 추가되어야 할 것이다.

또한 현장검사용으로 휴대용 혈중연 분석기를 작업장에서 활용하기 위해서 우리나라에서는 채혈에 대한 문제점을 고려해야 하는데, 현행 의료법에서 의료기사 등에 관한 법률 시행령 제2조에 의하면 채혈은 임상병리사의 업무로 규정되어 있다. 그렇지만 휴대용 혈중연 분석기를 현장검사(point of care testing, POCT) 개념으로 사용한다면, 보건관리자나 보건관리대행기관의 간호사나 의사가 채혈하여 검사하는 것이 가능하리라 생각된다. 현장 검사란 혈당검사의 예와 같이 검사실의 물리적 공간을 벗어나 어디에서나 환자가 있는 곳에서 의사, 간호사, 임상병리사 혹은 앰블런스 기사, 최종적으로는 환자 자신도 검사할 수 있기 때문이다. 혈중연 분석을 위한 혈액으로 본 실험에서는 정맥혈을 사용하였지만, 휴대용 혈중연 분석기의 경우 란셋(blood lancet)을 이용한 LeadCare® blood collection capillary로 정확히 $50\mu\text{L}$ 채혈하여 검사하는 방법도 있으므로 현장 검사용으로 적용하기 위해서는 채혈 방법에 따른 차이 등에 관한 추가 연구가 필요하리라 생각한다.

향후 다양한 농도 수준의 시료로 휴대용 혈중연 분석기의 정확도와 정밀도에 대한 평가가 이루어지고, 좀 더 많은 현장 근로자를 대상으로 연구가 이루어져 충분한 자료가 확보된다면, 휴대용 혈중연 분석기를 연 취급 작업장 근로자의 노출 위험도 평가와 건강관리에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결 론

연 노출 근로자들의 생물학적 노출지표인 혈중연 농도를 휴대용 혈중연 분석기인 LeadCare®와 흑연로 원자흡광광도법으로 측정하여 그 결과를 비교함으로써 휴대용 혈중연 분석기를 이용한 측정결과의 신뢰성과 현장적용 가능성을 평가하고자 경기도 일부 지역에 위치한 축전지 제

조 및 전자부품 제조 사업장에서 연을 취급하는 공정의 근로자 57명(노출군)과 연에 노출되지 않은 일반사무직 근로자 40명(대조군)을 대상으로 혈중연 농도를 측정하여 비교한 결과는 다음과 같다.

1. 휴대용 혈중연 분석기의 정확도(%)와 정밀도(%)는 Level 1과 Level 2 정도관리 표준물질(각각 $6.3 \pm 3\mu\text{g}/\text{dL}$ 및 $29.9 \pm 4\mu\text{g}/\text{dL}$)에 대해 각각 112.7과 9.15 및 99.7과 3.76이었다.

2. 전체대상자 97명의 혈중연 농도는 정규분포 하였고, 흑연로 원자흡광광도계로 측정한 평균 혈중연 농도는 17.8 ± 13.2 (범위: $1.0 \sim 58.4$) $\mu\text{g}/\text{dL}$, 휴대용 혈중연 분석기로 측정한 평균 혈중연 농도는 18.1 ± 14.1 (범위: $1.3 \sim 61.8$) $\mu\text{g}/\text{dL}$ 으로 두 검사 방법간에 혈중연 농도의 차이는 평균 $0.21\mu\text{g}/\text{dL}$ ($\text{SD}=2.44$)이었으며 두 검사 방법간에는 유의한 차이가 없었다 ($p=0.408$).

3. 노출군의 평균 혈중연 농도는 흑연로 원자흡광광도계와 휴대용 혈중연 분석기로 측정한 결과가 각각 26.7 ± 9.9 (범위: $9.6 \sim 58.4$) $\mu\text{g}/\text{dL}$ 및 27.3 ± 11.2 (범위: $11.8 \sim 61.8$) $\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 두 검사방법간에 유의한 차이가 없었다($p=0.173$). 대조군의 경우도 두 검사방법간 흑연로 원자흡광광도계와 휴대용 혈중연 분석기로 측정한 결과 각각 평균 5.2 ± 3.3 (범위: $1.0 \sim 13.7$) $\mu\text{g}/\text{dL}$ 및 4.9 ± 2.9 ($1.3 \sim 10.8$) $\mu\text{g}/\text{dL}$ 에 유의한 차이가 없었다($p=0.051$).

4. 흑연로 원자흡광광도계로 측정한 혈중연 농도를 $10\mu\text{g}/\text{dL}$ 이하, $10.1 \sim 20.0\mu\text{g}/\text{dL}$, $20.1 \sim 30.0\mu\text{g}/\text{dL}$, $30.1 \sim 40\mu\text{g}/\text{dL}$, $40\mu\text{g}/\text{dL}$ 이상으로 나누어 휴대용 혈중연 분석기로 측정한 혈중연 농도와 비교한 결과 각각의 농도에서 두 측정방법간에 유의한 차이가 없었으며 평균일치율은 101.2%이었다.

이상의 결과로 흑연로 원자흡광광도계와 휴대용 혈중연 분석기로 측정한 혈중연 농도는 통계학적으로 유의한 차이가 없으며, 휴대용 혈중연 분석기를 현장 검사용으로 근로자의 노출 정도와 건강관리에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- 노동부. 2000년 근로자 건강진단실시결과, 2001.
- 박동욱, 백남원, 최병순, 김태균, 이광용 등. 직업적으로 납에 노출된 근로자들의 혈액중 납과 ZPP농도와의 관계. 한국산업위생학회지 1996; 6(1): 88-96.
- 변정식, 이동배, 박민주, 이범식. 기고 : 연취급 남성근로자의 혈중 연농도와 혈액 검사치의 관련성. 산업보건 2002; 167: 19-32.
- 양정선, 강성규, 최병순, 박인정, 박동욱 등. 흑연로 장치가 부착된 원자흡광분석기를 이용한 혈중 납 농도 측정-직업적으로 납에 폭로된 근로자들과 비폭로된 대조군간의 혈중 납 농도 비교 분석과학 1993; 6(4): 363-368.
- 이석기, 안규동, 이병국. 편광Zeeman 보정 및 D₂ 보정 방법에 의한 혈중연 측정치의 비교 연구. 한국산업위생학회지 1995; 5(1): 59-67.
- 이성수. 문헌으로 본 국외 연사업장 실태 및 국내 연사업장의 비교. 순천향대학교 산업의학연구소, 1999.
- 한국산업안전공단. 근로자 건강진단 실무지침, 2000.
- ACGIH. TLV[®] and BEIs[®], 2001.
- Ashley K. Electroanalytical application in occupational and environmental health. Electroanalysis 1994; 6: 805-820.
- Clausen J, Rastogi S. Heavy metal pollution among autoworkers, I. Lead. Brit J Ind Med 1977; 34(3): 208-215.
- Eaton DK, Holcombe A. Oxygen ashing and matrix modifiers in graphite furnace atomic absorption Sp. Determination of lead in whole blood. Anal Chem 1983; 55: 946-950.
- Jacobson BE, Quigley G. Improved sample preparation for accurate determination of low concentration of lead in whole blood by graphite furnace analysis. Clin Chem 1991; 37(4): 515-519.
- Gittleman JL, Engalgau MM, Shaw J, Wille KK, Seligman PJ. Lead poisoning among battery reclamation workers in Alabama. J Occup Med 1994; 36(5): 526-532.
- Novel D. Blood lead measurement takes the direct approach. Anal Chem 1993; 65(5): 256A.
- Roda SM, Greenland RD, Bornschein RL, Hammond PB. Anodic stripping voltammetry procedure modified for improved accuracy of blood lead analysis. Clin Chem 1988; 34: 563-567.
- Shannon M, Rifai N. The accuracy of a portable instrument for analysis of blood lead in children. Ambul Child Health 1997; 3: 249-254.
- Stevens BJ, Sander JB, Stux R. Lead determination in blood and urine by AAS. Varian techtron, Sprinhvale, Victoria 1972.
- Taylor L, Jones RL, Kwan L, Deddens JA, Ashley K and Sanderson WT. Evaluation of portable blood lead analyzer with occupationally exposed populations. Am J Ind Med 2001; 40: 354-362.
- Tslev DL, Zaprinov ZK. Atomic absorption spectrometry in occupational and environmental health practice. Analytical aspects and health significance. CRC Press, Florida 1983; 1: 53-54.
- Waldron HA. Metals in the environment. London Academic Press 1980: 155-197.
- Wang J, Tian B. Screen-printed stripping voltammetric/potentiometric electrodes for decentralized testing of trace lead. Anal Chem 1992; 64: 1706-1709.