

흑연로 장치가 부착된 원자흡광분석기를 이용한 혈중 납 농도 측정—직업적으로 납에 폭로된 근로자들과 비폭로 대조군간의 혈중 납 농도 비교

양정선[†] · 강성규 · 최병순 · 박인정 · 박동욱 · 오세민 · 정호근

한국 산업안전공단 산업보건연구원

(1993. 12. 2. 접수)

Determination of blood lead concentration by the atomic absorption spectrometry with graphite furnace—Comparison of blood lead concentration between occupationally exposed workers and control group

Jeong Sun Yang[†], Seong Kyu Kang, Byung Sun Choi, In Jeong Park, Dong Wook Park,

Se Min Oh, Ho Keun Jeong

Korea Industrial Safety Corporation, Industrial Health Research Institute, 34-4, Kusan-dong, Puk-Ku,

Incheon 403-120, Korea

(Received Dec. 2, 1993)

요약: 흑연로 장치가 부착된 원자흡광분석기를 이용하여 혈중 납 분석을 위한 최적 조건을 검토하고 납 사용 작업장에서 일하면서 직업적으로 납에 폭로되어 온 근로자들의 혈중 납 농도를 측정하였다. 일반 작업장에서 일하는 근로자들과 비폭로 대조군 간의 혈중 납 농도를 비교하고 작업 연한과 흡연 정도에 따른 상관성을 검토하였다.

Abstract: Blood lead concentrations of occupationally exposed workers were measured by the atomic absorption spectrometry with graphite furnace. The concentrations of the unexposed group were also checked and compared with those of the exposed one. The correlation of smoking habit and work duration with the blood lead concentration was also surveyed.

Key words: Blood lead concentration, Atomic absorption spectrometry, Graphite furnace, Smoking habit, Work duration.

1. 서론

산업체에서 유해물질에 노출되었을 경우 그 노출의 정도를 근로자 개인별로 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 같은 정도의 유해물질에 폭로되더라도 발현하는 위해도는 각 개인의 신체상태에 따라 다르게 나타나기 때문이다.¹ 혈액이나 요와 같은 생물

학적 시료를 분석하는 생물학적 모니터링은 유해물질의 폭로 정도를 반영하는 생물학적 지표로서 무엇을 분석 대상으로 하느냐가 아주 중요한 문제이다.² 납의 경우 그 폭로의 정도를 나타내는 간접적 지표로서 사용되는 것은 혈중 protoporphyrin(EP), zinc protoporphyrin(ZPP) 등이다.³ 이들 혈액학적 지표들은 납이 인체 내에 들어가면 heme 합성을 저해하여 free

protoporphyrin을 유리하고 유리된 free protoporphyrin은 세포질의 zinc와 킬레이트를 형성하게 되는데, 이때 형성된 zinc protoporphyrin이 형광을 가진다는 것을 이용한 것으로 형광분석기로 형성된 zinc protoporphyrin의 양을 분석하는 것이다. 다수의 분석 대상자들을 상대로 분석하는 스크리닝을 위하여 운반 가능한 휴대용 hematofluorometer가 개발되어 사용되기도 하였다. 그러나 이들 혈액학적 지표들은 만성적이고 폭로군에서는 효용성이 있으나 단기간 또는 저폭로군에서는 납이 heme 합성을 저해하는 정도가 심하지 않으므로 그 적용도가 낮은 것으로 알려져 있다.⁴

이에 반해 혈중 납 농도는 반감기가 35일 내지 40일로서 납 폭로에 의한 직접적인 노출의 정도를 나타내는 생물학적 지표로서 유효하다. 혈액 채취의 번거로움이 있기는 하지만 요를 사용했을 때에 비하여 농도 보정을 할 필요가 없다는 장점이 있다. 납 노출 정도를 나타내는 직접적인 지표로서 혈중 납 농도의 측정은 anodic 또는 potentiometric stripping voltammetry (ASV 또는 PSV)에 의한 방법과 원자흡광분석기를 이용하는 방법이 있다.⁵ ASV법이나 PSV법을 이용한 휴대용 측정기가 다수 근로자들을 상대로 한 스크리닝에 사용되었으나 검출감도는 $10\mu\text{g}/\text{d}$ 로 원자흡광분석기에 비하여 높다. 따라서 혈액이나 요 중의 미량 금속 성분을 정량하는 데는 주로 흑연로를 이용한 원자흡광분석기를 사용하고 있다.

인간은 태어나면서부터 일정량의 납을 체내에 보유하고 있고 성장함에 따라 점차 많은 양을 축적해 나가는 것으로 알려져 있다.⁶ 외기나 음식물에 의해 섭취된 납은 90%가 뼈에 침착되며 일부가 머리카락, 손톱, 발톱, 요 등으로 배설된다. 히말라야 오지에 떨어져 사는 주민의 혈중 납 농도는 $3\mu\text{g}/\text{d}$ 이며 건강한 도시 주민의 경우 $7\sim 22\mu\text{g}/\text{d}$ 로 알려져 있다.⁷ 직업적으로 납에 폭로된 근로자들에 대한 생물학적 기준치는 우리나라의 경우 설정된 것이 없고 미국 산업위생가협회 (ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists INC.)의 생물학적 기준치 (BEI, Biological Exposure Indices) $60\mu\text{g}/\text{d}$ 를 참고로 하고 있다.⁸

본 연구에서는 흑연로 장치가 장착된 원자흡광분석기를 사용하여 혈중 납 분석을 위한 최적 조건을 검토하였다. 또한 직업적으로 납에 폭로된 근로자들의 혈중 납 농도를 측정하고 근무 연한, 흡연 습관에 관한 상관

도를 조사하였다. 또한 비폭로 대조군과 분석 수치를 비교하고 정상인들의 경우에서도 흡연 습관과 혈중 납 농도를 구하였다.

2. 실험방법

2. 1. 분석 대상

1993년도 3월부터 8월까지 납을 주로 사용하는 공장에서 직접 납에 폭로되는 경우가 있는 근로자 131명 (level 3)과 직접 납에 폭로되지는 않더라도 간접 폭로의 가능성이 있는 공장 근로자 25명 (level 2), 직업적으로 폭로될 가능성이 거의 없는 사무직 근로자 44명 (level 1)을 대상으로 하였다.

2. 2. 기기 및 시약

혈중 납 농도 측정에 사용된 원자흡광광도계는 GTA model 96이 장착된 Varian사의 Spectraa 400을 사용하였다. 원심분리기는 한일 MF 550 탁상형 다목적 원심분리기를 사용하였다. 개인별 혈액 시료는 해파린 처리된 Bacton Dickinson사의 Vacuutainer 튜브와 1회용 주사기를 이용하여 채취하였다. 납의 기준용액은 Sigma사의 1000ppm 용액을 탈이온수 (Milli Q™ System, Millipore Co.)로 희석하여 사용하였다. 혈액의 균질화를 위한 세포 소화 용액은 Sigma사의 Triton X-100을 탈이온수로 희석하여 사용하였다.

2. 3. 전처리 및 기기 조건

혈액 채취는 각 근로자별로 작업장 밖의 일정 장소에서 작업시간 중에 정맥혈 약 2cc를 EDTA가 들어 있는 Vacuutainer에 취하였다. 혈액은 ice box에 넣어 이송하였고 이송 후 4℃ 냉장고에 보관하였다. 혈액 200 μL 를 0.1% Triton X-100으로 10배 희석하여 3000rpm에서 5분간 원심분리하여 상등액을 원자흡광광도계용 측정 시료로 하였다.

시료에 일정량의 기준 용액을 첨가하는 standard addition법에 의하여 검량선을 얻었다. 시료 주입은 Table 1과 같이 자동시료주입기를 통하여 최종 시료량이 16 μL 되게 흑연로에 주입하였으며 기준용액은 100 $\mu\text{g}/\text{d}$ 를 사용하였다.

혈중 납 분석을 위한 원자흡광광도계의 분석 조건은 Table 2와 같다.

Table 1. Standard addition dilution scheme.

	standard (μL)	sample (μL)	blank (μL)	concentration expected ($\mu\text{g}/\text{dL}$)
blank	-	-	16	blank
addition 0	0	8	8	x(original sample concentration)
addition 1	2	8	6	$25\mu\text{g}/\text{dL} + x$
addition 2	4	8	4	$50\mu\text{g}/\text{dL} + x$
addition 3	8	8	0	$100\mu\text{g}/\text{dL} + x$

2. 4. 통계분석

혈액을 채취한 근로자 200명 중 일부에 대하여 각 level별로 근무 연한, 흡연 경력에 대한 설문을 조사하였다. 근무 연한의 경우 현 직장에서 하는 일과 동일한 일을 했던 경력이 있는 경우는 그 경력을 합산하였다. 각 level별 혈중 납 농도는 SAS 프로그램을 이용하여 정규분포하는 것을 확인하여 비교하였고, 각 변수와의 상관성은 Quattro 프로그램을 이용하여 조사하였다.

Table 2. Analytical parameters for graphite tube atomizer.

Instrumental parameters	
lamp current :	4 mA
slit width :	0.5 nm
slit height :	normal
wavelength :	283.3 nm
sample introduction :	sampler automixing
measurement time :	4 sec
background correction :	by Deuterium lamp
Furnace parameters	
drying step :	250 °C, 25 sec
ashing step :	500 °C, 20 sec
atomizing step :	1800 °C, 3 sec
Argon purge gas flow :	5 ml/min

3. 결과 및 고찰

3. 1. 혈중 납농도 분석

혈액과 같은 생물학적 시료들은 화학적으로 복잡한

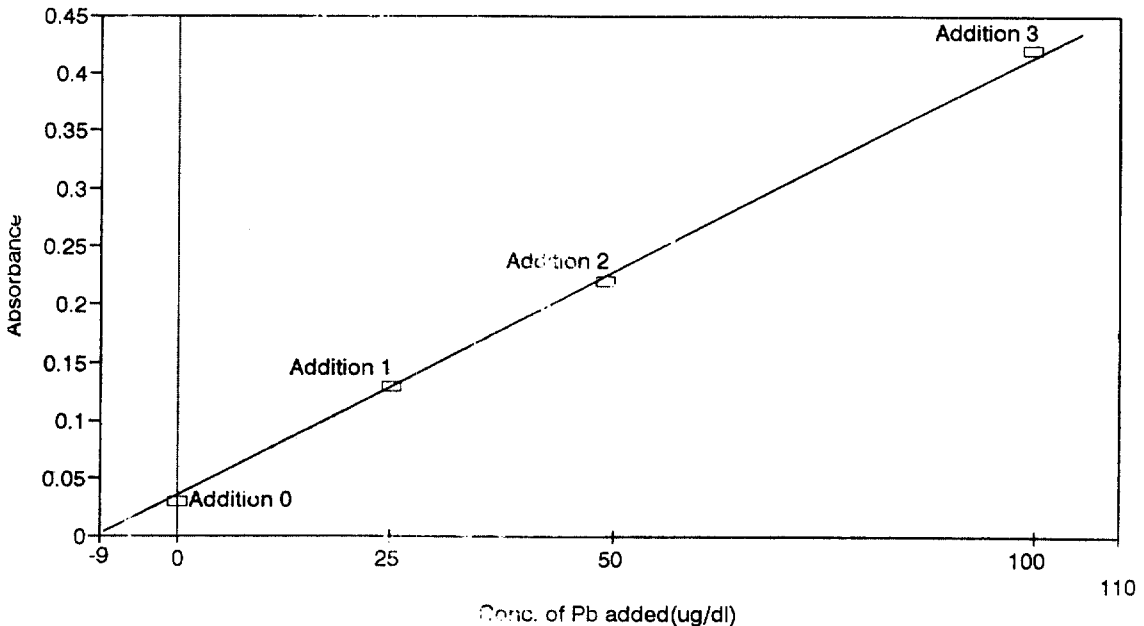


Fig. 1. Standard addition calibration graph of a standard sample. By the extrapolation to zero absorbance, the concentration of analyte in the standard sample can be determined from the intercept on the concentration axis.

물질들의 혼합체이므로 원칙적으로 조성이 같은 표준 물질의 제조가 불가능하다. 시료의 비중이나 공존하는 염, 단백질 등의 방해물질의 영향 등을 제거하기 위하여 시료에 일정량의 표준 물질을 첨가하는 표준물질 첨가법에 의하여 Fig. 1과 같이 검량선을 얻었다. 25, 50, 100 $\mu\text{g/dL}$ 에 해당하는 표준용액을 첨가하였고 검량선이 x축과 만나는 절편의 값으로부터 시료 중의 납 농도값을 얻었다.

3. 2. 조사 대상자들의 혈중 납 농도

조사 대상자들의 혈중 납 농도의 평균치는 Table 3과 같다.

비폭로 대조군인 level 1이 14.8 $\mu\text{g/dL}$, 간접 폭로군인 level 2가 31.1 $\mu\text{g/dL}$, 직접 폭로군인 level 3가 53.3 $\mu\text{g/dL}$ 로 각 level 간의 납 농도는 통계적으로 유의한

차이가 있었다. level 3에서 미국의 생물학적 기준치인 60 $\mu\text{g/dL}$ 을 초과한 근로자는 48명이었고 level 2에서도 기준치를 초과한 사람이 3명이었다. Fig. 2에 각 level별로 혈중 납 농도 분포를 나타내었다.

Table 3. Analytical results of blood lead concentration.

level	n	Max. ($\mu\text{g/dL}$)	Min. ($\mu\text{g/dL}$)	Mean ($\mu\text{g/dL}$)	S. D.
1	44	26.9	5.7	14.8	27.9
2	25	81.4	10	31.1	18.4
3	180.2	150.0	11	53.3	4.3

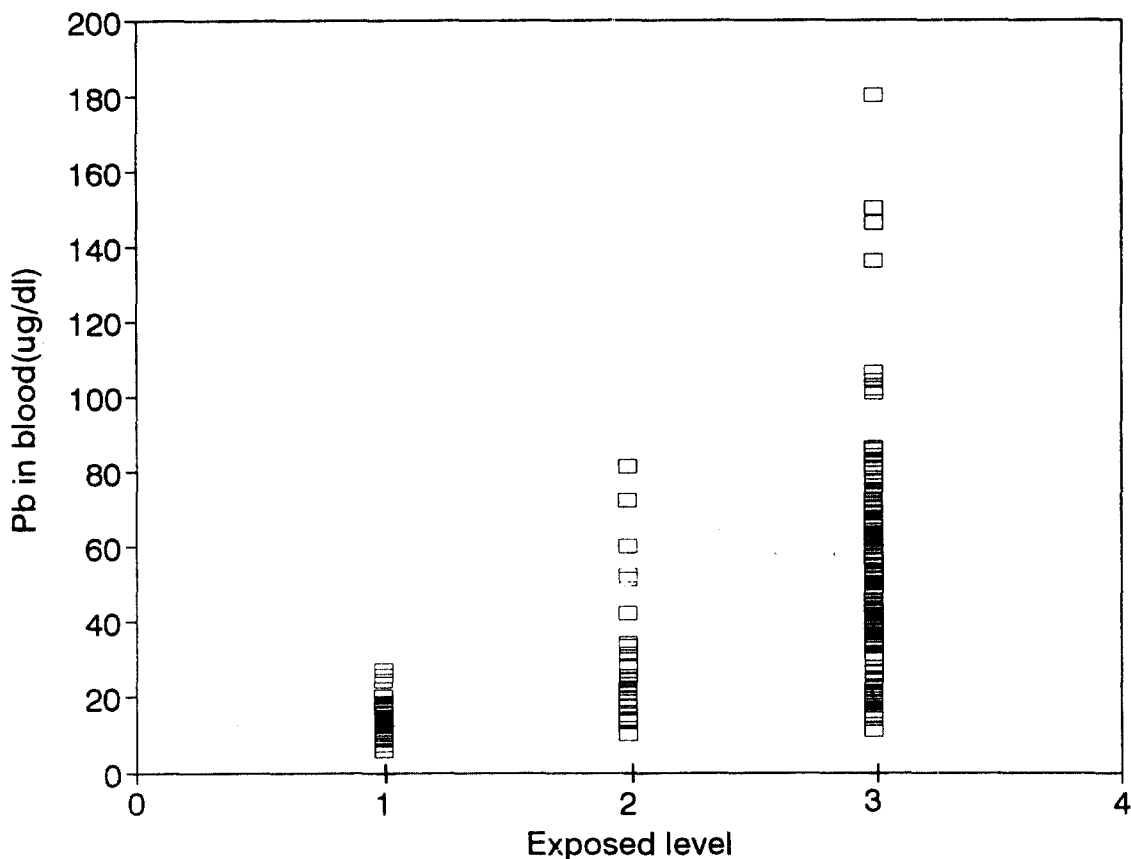


Fig. 2. The distribution of blood lead concentration of three levels. Level 1 : unexposed control group, Level 2 : indirectly exposed group, Level 3 : occupationally exposed group.

3. 3. 흡연, 근무 연한과 혈중 납 농도의 상관성

본 연구에 동의하여 설문에 응한 근로자들을 중심으로 흡연 정도와 근무 경력, 나이와 혈중 납 농도와의 상관성을 조사하였다. Fig 3의 (A), (B)에 level 1과 level 3에서 혈중 납과 흡연 정도와의 상관성을 표시하였다.

고폭로군인 level 3에서는 흡연 정도의 영향이 작업환경 영향에 비하여 상대적으로 낮으므로 상관성이 없었으나($r=0.16, P>0.41$) 비폭로군인 level 1에서는 흡연 정도와 혈중 납 농도의 상관성이 높은 것으로 나타났다($r=0.61, P<0.087$).

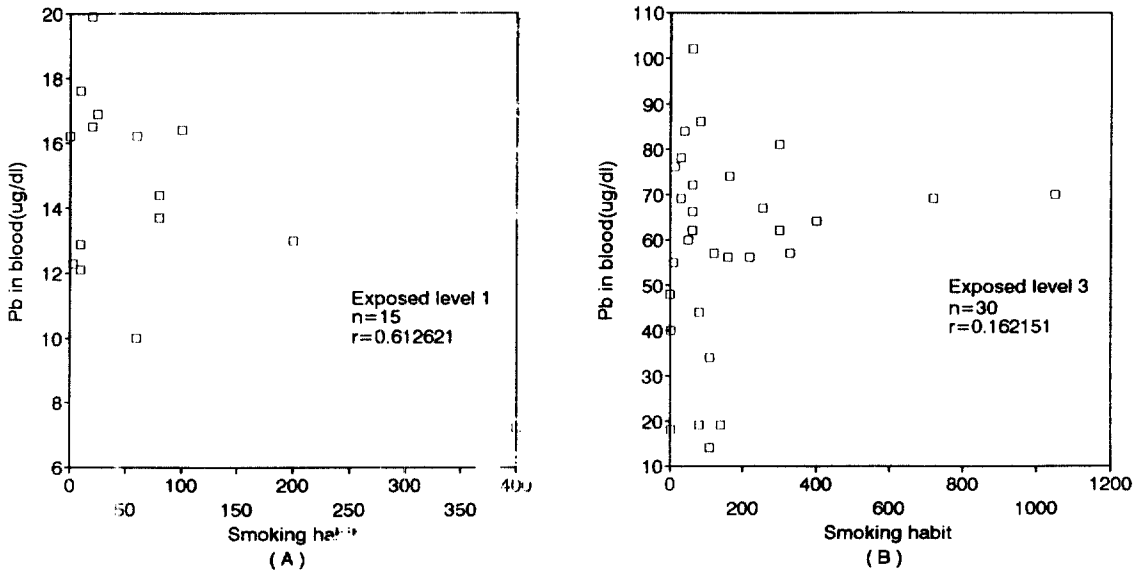


Fig. 3. The correlation of blood lead concentration and smoking habit. Smoking habit : smoking years \times No. of cigarets per day (A) : level 1, (B) : level 3

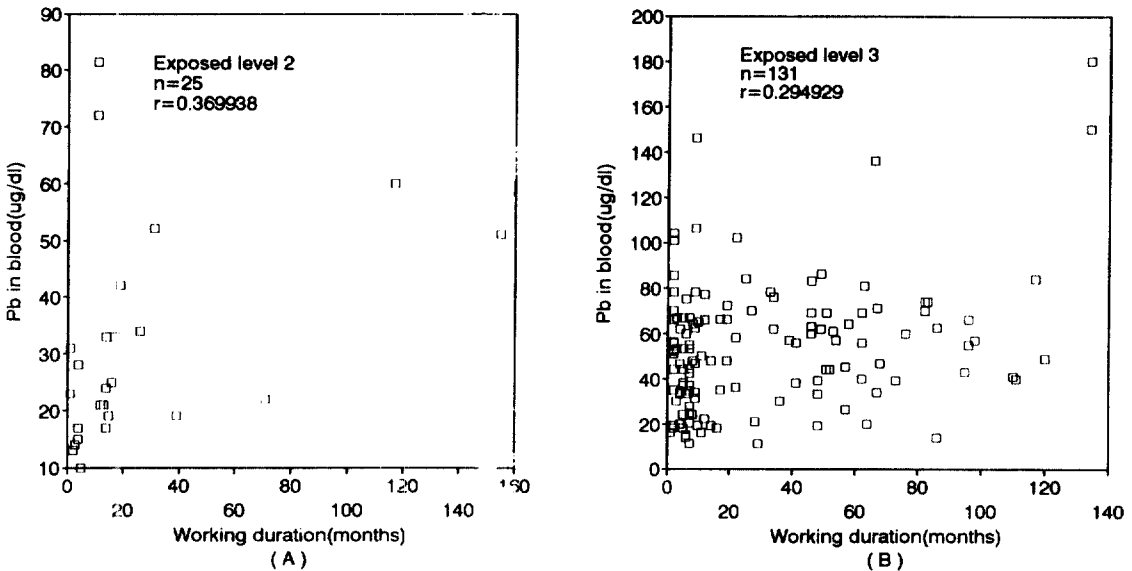


Fig. 4. The correlation of blood lead concentration and work duration. (A) : level 2, (B) : level 3

Fig. 4의 (A), (B)에 level 2와 level 3에서의 혈중 납 농도와 근무 연한과의 상관성을 표시하였다. 고품로군인 level 3과 간접 품로군인 level 2에서 각각 $r=0.29$, 0.37 의 상관성을 나타내었다. 고품로군에 비하여 간접 품로군의 상관성이 더 높게 나타난 것은 고품로군의 경우 작업환경 영향에 의한 단기 과폭로에 가장 큰 상관성을 가지는 반면 품로군의 경우 만성적인 노출에 의한 영향이 상대적으로 크게 작용했기 때문으로 생각된다.

4. 결론

1. 흡연로 장치가 부착된 원자흡광도계를 이용한 혈중 납 분석을 위한 최적 조건을 조사하였다.
2. 직업적으로 납에 폭로된 근로자 131명의 혈중 납 농도의 평균치는 $53.2\mu\text{g}/\text{dL}$, 간접 품로군 25명의 평균값은 $31.1\mu\text{g}/\text{dL}$, 비폭로 대조군 44명의 평균값은 $14.8\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 나타났다.
3. 흡연 경력과 혈중 납 농도와의 상관도는 비폭로 대조군의 경우 $r=0.61$ 로 상관성이 있었고 품로군에서는 상관성이 약하였다.
4. 근무 경력과 혈중 납과의 상관성은 간접 품로군 ($r=0.37$)이 직접 품로군 ($r=0.29$)보다 높게 나타났다.

참고문헌

1. P. O. Droz, Biological Monitoring I: Sources of Variability in Human Response to Chemical Exposure, *Appl. Ind. Hyg.*, **4**(1), F20, 1989.
2. R. L. Zielhuis, "Approaches in the Development of Biological Monitoring Methods," p. 373, A. Aitio, V. Rihimaki and H. Vaino, Ed., Hemisphere, Washington, D. C., 1984.
3. M. M. Joselow and J. C. Flores, Application of Zinc Protoporphyrin Tests as a Monitor of Occupational Exposure to Lead, *Am. Ind. Hyg. Asso. J.*, **18**, 63, 1977.
4. D. Novel, Blood Lead Measurement Takes the Direct Approach, *Anal. Chem.*, **65**(5), 265A, 1993.
5. J. Clausen and S. C. Rastogi, Heavy Metal Pollution among Autoworkers, I. Lead, *Brit. J. of Ind. Med.*, **34**, 208, 1977.
6. P. S. I. Barry, A Comparison of Concentrations of Lead in Human Tissues, *Brit. J. Ind. Med.*, **32**, 119, 1975.
7. S. Piomelli, L. Corash and M. B. Corash, Blood Lead Concentrations in a remote Himalayan population, *Science*, **210**, 1135, 1980.
8. ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists INC.), "Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices," 5th Ed., BEI-19, ACGIH, Cincinnati, Ohio, 1986.