

# 납 취급 근로자의 Monte-Carlo simulation을 이용한 노출 및 건강위해성평가

염정호 · 권근상<sup>†</sup> · 이주형 · 정주원

전북대학교 의과대학 예방의학교실

## Exposure and Health Risk Assessment of Lead Workers using Monte-Carlo Simulation

Jung Ho Youm · Keun Sang Kwon<sup>†</sup> · Ju-Hyoung Lee · Joo-Won Jeong

*Department of Preventive Medicine and Public Health, School of Medicine Chonbuk National University*

**Objective :** This study was conducted to quantify chronic lead exposure from various media(ie. working environment, food, ambient air), and to certify the usefulness of exposure assessment using Monte-Carlo simulation in the fields of occupational health.

**Methods :** Data were obtained from Korean Industrial Health Association, Korea Food and Drug Administration, and the Ministry of Environment. Then lead worker's exposure was estimated indirectly from various media and parameters (ie. volume inhaled, body weight, dietary intake, etc.). Uncertainty was analyzed by Monte Carlo simulation with Crystal Ball software. Exposure doses and hazard indices were simulated with various hypothetical scenarios including weekly working hours and respiratory protective equipment.

**Results :** Without respiratory protective equipment, the total exposure dose per kilogram of body weight of lead workers was

estimated as  $5.45 \times 10^{-3}$  mg/kg/day, and hazard index was estimated as 2.26, and exposure contributions were calculated as follows : working environment(82.42 %); foods(17.57 %); and ambient air(0.01 %). But, if working condition has changed - reduction of working hours and using respiratory protective equipment, the total exposure dose per kilogram of body weight was estimated between  $1.34 \times 10^{-3}$ - $1.49 \times 10^{-3}$  mg/kg/day, and hazard index was estimated between 0.56 - 0.62.

**Conclusions :** This study suggested that occurrence of hazardous impact(ie. increased blood pressure) through lifetime lead exposure would be expected, and that the Monte-Carlo simulation was useful for the fields of occupational health.

**Key Words :** lead, Monte-Carlo simulation, occupational health

## I . 서 론

문명의 이기를 추구함에 있어 사용된 화학물질은 생활의 편의와 더불어 과다사용에 따른 건강장해를 초래하는 양면

성을 내포하고 있어, 적정한 사용과 건강장해의 예방을 위하여 각 매체에 따른 관리기준의 설정이 필요하다. 또한 그 건강장해 및 기준을 논의함에 있어, 단순히 오염도에 국한되지 않고 발생 가능한 인체영향에 대한 계량적인 정보와 이를 토

“※ 이 논문은 2004년-2005년 전북대학교 해외연구교수지원에 의하여 이루어졌음.”

접수일 : 2005년 11월 1일, 채택일 : 2006년 5월 1일

† 교신저자 : 권근상 (전북 전주시 덕진구 금암동 산 2-20 전북 의대 예방의학교실,

Tel : 063-270-3137, Fax : 063-274-9881, E-mail : drkeunsang@chonbuk.ac.kr)

대로 허용 가능한 오염수준을 제시할 필요성이 있으며, 위해성 평가(risk assessment)가 이에 상응하는 방법이라 할 수 있다(US EPA, 1989; Kofi, 1998). 최근의 위해성 평가는 여러 가지 물질, 여러 종류의 식품을 통한 동시노출평가(cumulative risk assessment), 또는 다매체 환경 속에서 가능성 있는 모든 노출상황을 고려한 동시 다중노출평가(combined risk assessment)에 관심이 집중되는데(이효민 등, 2001), 노출경로 추정 시 수질, 토양, 대기, 음식과 더불어 거주지나 직장에서의 노출 또한 고려되어야 하는 것으로 알려져 있어(US EPA, 1992; Page, 1994), 일반생활환경 및 작업환경에서의 동시 다중노출에 대한 고려가 필요한 실정이다.

현재 국내 작업환경 내 유해물질에 대해서는 허용농도(TLV : threshold limit value)가 적용되고 있는데, 이 값은 대다수의 근로자가 일일 작업시간 동안 매일 노출되어도 건강장해를 받지 않을 것으로 추정되는 작업공간 내 유해물질의 농도를 의미하며(ACGIH, 2001), 산업안전보건법에 의거하여 관리되고 있다. 또한 일반생활환경, 즉 대기, 수질, 토양 및 식품 등에 포함되어 있는 유해물질 역시 각기 다른 관련법령에 의하여 관리되고 있으며 각 매체의 복합적 노출에 의한 건강장해를 통합하여 관리할 수 있는 체계는 미흡한 실정이다.

한편 납은 전 세계적으로 다양한 산업에 이용되고 있으며 환경 중에도 널리 존재하여(IPCS, 1989, 1995), 식품, 대기 등을 통하여 일생동안 노출되는 것으로 알려져 있으며(Buchet 등, 1983; Bono 등, 1995; Ikeda 등, 2000b), 최근에는 폐광주변 지역의 노출에 의한 소아의 건강장해가 논의되고 있다(Glorennee, 2006). 이러한 납에 대한 위해성 평가는 국내에서 이효민 등(1999), 정용 등(1999)에 의하여 이루어져 왔으나 모두 건강한 일반 성인을 대상으로 이루어져 왔으며, 작업환경 및 일반 생활환경을 동시에 평가하고자 한 연구는 없었다.

이에 본 연구에서는 납을 취급하는 전라북도 한 사업장의 근로자를 대상으로, 식품, 대기, 토양 등 일상생활환경에서 노출과 더불어 가상시나리오를 적용한 작업환경에서의 추가 노출을 고려한 총 노출량을 Monte-Carlo simulation을 이용하여 평가하고, 이를 토대로 위험지수(hazard index)를 산출함으로써, 납 취급근로자의 건강위해성 및 작업환경에서 Monte-Carlo simulation을 이용한 노출평가의 유용성을 확인하고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 납 오염도 조사

#### 1) 작업환경 내 납 농도

축전지를 생산하는 전라북도 내 한 사업장의 4개년간의 작업환경측정결과를 바탕으로 하였다. 측정은 Escort® LC sampling pump(MSA, USA)를 이용한 개인시료포집이었으며, 분석은 원자흡수분광광도계(atomic absorption spectrophotometer, G&G Korea, ANALAB 9200)를 이용하였다.

#### 2) 식품 중 납 농도

식품 중 납 오염도자료는 국립보건원보, 식품의약품안전청연보 등으로부터 수집된 1992년부터 1998년까지의 자료를 활용하였다. 우리나라의 경우 농작물 생산, 유통, 소비의 지역 간 차이가 뚜렷이 구분되지 않는 특성이 있어(정용 등, 1999) 본 연구에서는 전국 평균자료를 이용하였다.

#### 3) 대기 중 납 농도

대기 중 납의 오염도는 2001년부터 2003년 상반기까지의 월 평균자료를 환경통계연보 및 환경부 홈페이지에서 수집하였으며, 전국평균자료를 이용하였다.

#### 4) 메타분석

수집된 오염도자료의 비연속성과 통계적 신뢰도 보안을 위하여 메타분석을 실시(이효민 등, 2000) 가중 평균을 구하였고, 유도된 가중 평균과 실제 평균에 대한 동질성 검정을 실시하였으며(송혜향, 2003), 이 모든 검정은 SAS 8.1을 이용하였다.

### 2. 노출량 평가

#### 1) 노출 시나리오

노출 시나리오를 추정하기 위하여 본 사업장 근로자를 대상으로 자기기입식 설문조사를 실시하였다. 설문조사 항목은 근무기간, 작업시간 및 하루 일과에 대한 질문 등으로 구성되어 있으며, 결과는 SAS 8.1을 이용하여 빈도분석을 하였다.

#### 2) 노출인자(exposure factors)

매체별 인체 만성 노출량 계산을 위하여 위한 기본수식은 아래와 같으며, 사용된 노출인자 값은 Table 1과 같다(US EPA, 1989, 1992; Kofi, 1998). 흡입에 의한 섭취에서 접촉률인 호흡률은 대기에 의한 노출에서 0.45 m<sup>3</sup>/hour, 작업환경에서 1.2 m<sup>3</sup>/hour를(ICRP, 1981) 적용하였으며, 보호구를 착용한 경

우리는 이를 보정하기 위하여 섭취율(FC : fraction of intake from contaminated source)을 0.1 (Nicas와 Neuhaus, 2004; Martyny 등, 2002)로 적용하였다. 그리고 식품에 의한 노출에서 접촉률인 일일 식품 섭취량(g/day)은 이서래 등(2000)의 평균 소비량을 적용하였다(Table 1). 오염도 자료는 Crystal Ball® software를 이용하여 최적분포(best-fit distribution)를 추정하였고(Crystal Ball®, 2000), 확률적 위험도 산출을 위하여 Monte-Carlo simulation을 시행하였으며, 매체별 인체노출량의 percentile 값을 구하였다.

### 3. 위험도 결정

위험도 결정에 필요한 독성 값, 즉 비발암영향에 대한 참고치(RfD; reference dose) 또는 1일 허용 노출량(ADI; acceptable daily intake), 발암영향에 대한 발암 잠재력(cancer potency; q1\*) (US EPA, 2002)은 주로 US EPA의 IRIS(Integrated Risk Information System)에서 제시하는 자료를 인용하고 있다(US EPA, 2003). 그러나 납의 경우 참고치가 제시되지 않아, 본 연구에서는 이효민 등(1999)이 산출한 RfDBMD =  $2.41 \times 10^{-3}$  mg/kg/day(독성 종말점 : 혈압상승)를 이용하였으며, 각 매체별 노출량의 총합과 RfDBMD의 비인 위험지수(hazard index)를 산출하여 납 취급 근로자의 혈압상승 위험도를 추정하였다. 또한 본 논문에서 사용한 참고치(RfDBMD =  $2.41 \times 10^{-3}$  mg/kg/day)는 납의 대기환경기준( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 호흡률 및 평균 체중을 고려하여 계산해도 비슷한 수치를 얻을 수 있었다.

### 4. 가상 시나리오에 의한 위험도 평가

보호구 착용 여부 및 작업시간 조정을 고려한 4가지 가상 시나리오에 따른 노출량 평가를 실시하고, 이에 따른 위험지수를 비교하였다.

## III. 결과

### 1. 설문 조사 결과

노출 시나리오를 추정하기 위하여 실시한 설문조사 결과 평균 근무기간은 3.5년이며, 2조 1교대의 작업형태로 일일 평균 작업시간이 10시간, 주당 평균 작업일이 6일 이었다(Table 1).

### 2. 각 매체별 노출량

#### 1) 메타분석

본 연구를 위하여 수집된 자료의 연속성 및 통계적 신뢰도를 극복하기 위하여 실시한 메타분석 결과, 작업환경 오염도의 경우 원 자료(raw data)  $0.018145 \pm 0.016966$  ppm과 모수효과 모형에 의한 가중 평균  $0.016973 \pm 0.001623$  ppm은 동일하였으며( $p>0.05$ ), 식품 및 대기 오염도 역시 비슷한 결과를 보여 동질성을 확인할 수 있었다.

$$\text{Inhalation (mg/kg/day)} = \frac{C \times \text{IRi} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{FC}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

$$\text{Food intake (mg/kg/day)} = \frac{C \times \text{FC} \times \text{IRf} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

C : concentration in media ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

IRf : ingestion rate, food (g/day)

IRi : inhalation rate ( $\text{m}^3/\text{hour}$ )

FC : fraction of intake from contaminated source (dimensionless)

ET : exposure time (hour/day)

EF : exposure frequency (day/7days)

ED : exposure duration (year)

BW : body weight t(kg)

AT : averaging time (days, equal to exposure duration)

### 2) 작업환경 내 납 오염도 및 노출량

연구대상 사업장은 축전기 제조공장으로 「연분투입 - CRS - 혼합 - 도포 - 스택커(STACKER) - 건조 - 조립 - 화성장 - 마무리 - 포장」등의 공정에 114명의 근로자가 종사하고 있었다. 작업환경 내 납의 오염도는  $0.018145 \pm 0.016966$  ppm으로 연도별 차이는 없었으며(Table 2), Crystal Ball®software를 이용하여 최적분포를 추정한 결과 Weibull 분포를 보였다(Fig. 1-a). 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우 작업환경 내 납의 인체 노출량을 산출한 결과, 평균 노출량은  $4.39 \times 10^{-3} \pm 0.0048$  mg/kg/day 이었으며, 중앙값은  $2.68 \times 10^{-3}$  mg/kg/day, 95th percentile 값은  $13.18 \times 10^{-3}$  mg/kg/day 이었다(Table 3, Fig. 2-a).

### 3) 식품 내 납 오염도 및 노출량

본 연구에서는 쌀을 비롯한 총 47종의 식품에 대하여 오염도를 조사하였다. 식품 중 납의 오염도는 최저 0.003, 최고 0.71 mg/kg 범위이었으며, exponential distribution을 보이는 보리, 밀치, 새우, 낙지 이외의 식품은 extreme value distribution을 보였다. 인체 노출량을 산출한 결과, 식품에 의한 총 노출량은  $1.06 \times 10^{-3} \pm 0.001$  mg/kg/day 이었으며, 중앙값은  $1.03 \times$

$10^{-3}$  mg/kg/day, 95th percentile 값은  $1.54 \times 10^{-3}$  mg/kg/day 이었다(Table 3, Fig. 2-b). 또한 식품군별 노출량은 곡류가 40.2%로 가장 높았으며, 수산물, 육류, 채소류, 두류, 감자류, 과일류 순이었다(Table 4).

### 4) 대기 중 납 오염도 및 노출량

대기 중 납의 오염도는  $0.067 \pm 0.07$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 국내 대기환경기준인 1.5 ppm 이하이었으며, lognormal 분포를 보였다(Fig. 1-b). 인체 노출량을 산출한 결과, 평균 노출량은  $0.3 \times 10^{-3} \pm 0.0003$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$  이었으며, 중앙값은  $0.22 \times 10^{-3}$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ , 95th percentile 값은  $0.81 \times 10^{-3}$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$  이었다(Table 3, Fig. 2-c).

### 5) 총 노출량 및 매체별 노출기여도

보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우 납의 평균 총 노출량은  $5.45 \times 10^{-3} \pm 0.005$  mg/kg/day 이었으며, 중앙값은  $3.75 \times 10^{-3}$  mg/kg/day, 95th percentile 값은  $14.3 \times 10^{-3}$  mg/kg/day 이었다(Table 3). 총 노출량에 대한 각 매체별 노출기여도를 산출한 결과 작업환경에서의 노출이 82.42 %로 가장 높았으며, 식품 17.57 %, 대기 0.01 % 순이었

Table 1. Human exposure values and equations used in exposure quantification human exposure factors

Human exposure factors	Value		
	Food intake	Ambient air	Working environment
Concentration in media(C : $\text{mg}/\text{m}^3$ )	—	—	—
Contact rate	*	$0.45^{\dagger}$	$1.2^{\dagger}$
Fraction of intake from contaminated source (FC : dimensionless)	—	—	0.1
Exposure frequency(EF : day/7days)	—	7	6
Exposure time(ET : hour/day)	—	14	10
Exposure duration(ED : year)	70	70	40
Body weight(BW : kg)	65	65	65
Averaging time(AT : days, equal to ED)	25,550	25,550	14,600

\* ingestion rate, food(IRf) : g/day

$^{\dagger}$  inhalation rate(IRi) :  $\text{m}^3/\text{hour}$

Table 2. Lead concentration in the working environment

	Pb (ppm)	
First year (n = 29)	$0.0161 \pm 0.0135$	(ND $^{\dagger}$ - 0.045)
Second year (n = 28)	$0.0155 \pm 0.0139$	(ND - 0.045)
Third year (n = 24)	$0.0218 \pm 0.0216$	(0.0006 - 0.080)
Fourth year (n = 10)	$0.0225 \pm 0.0226$	(0.0005 - 0.057)

$^{\dagger}$  ND : non detectable

다(Table 4).

#### 6) 가상 시나리오에 따른 노출량 평가

일일 평균 작업시간 및 주당 평균 작업일을 각각 10시간과 6일에서 8시간과 5일로 조정한 가상 시나리오와, 호흡 보호구 착용 여부에 따른 가상 시나리오 등 총 4가지 경우의 노출량을 비교하였다. 현재의 작업조건, 즉 1주 6일 1일 10시간 동안의 작업조건에서 보호구를 미착용 시에는 총 노출량은  $5.45 \times 10^{-3} \pm 0.005$  mg/kg/day로, 착용 시  $1.49 \times 10^{-3} \pm 0.005$  mg/kg/day에 비하여 높은 수준을 보였다. 작업조건이 1주 5일 1일 8시간으로 조정되었을 경우 총 노출량은 보호구 미착용 시  $3.98 \times 10^{-3} \pm 0.004$  mg/kg/day, 착용 시  $1.34 \times 10^{-3} \pm 0.001$  mg/kg/day로 추정되었다(Table 5).

#### 3. 위해도 결정

납 취급 근로자들에 있어 작업환경과 더불어 식품, 대기 등을 통하여 동시노출된 납에 의한 비발암 독성의 위해도를 결정하기 위하여 RfDBMD  $2.41 \times 10^{-3}$  mg/kg/day와 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우의 인체 총 노출량  $5.45 \times 10^{-3}$  mg/kg/day의 비인 위험지수를 추정한 결과 2.26으로 유해영향, 즉 혈압상승이 기대되었으며, 특히 중앙값인 50th percentile 이상에서 위험지수가 1을 초과하였다.

또한 가상 시나리오의 노출평가 결과, 보호구를 착용하지 않을 경우에는 작업시간 단축에도 불구하고 평균 위험지수

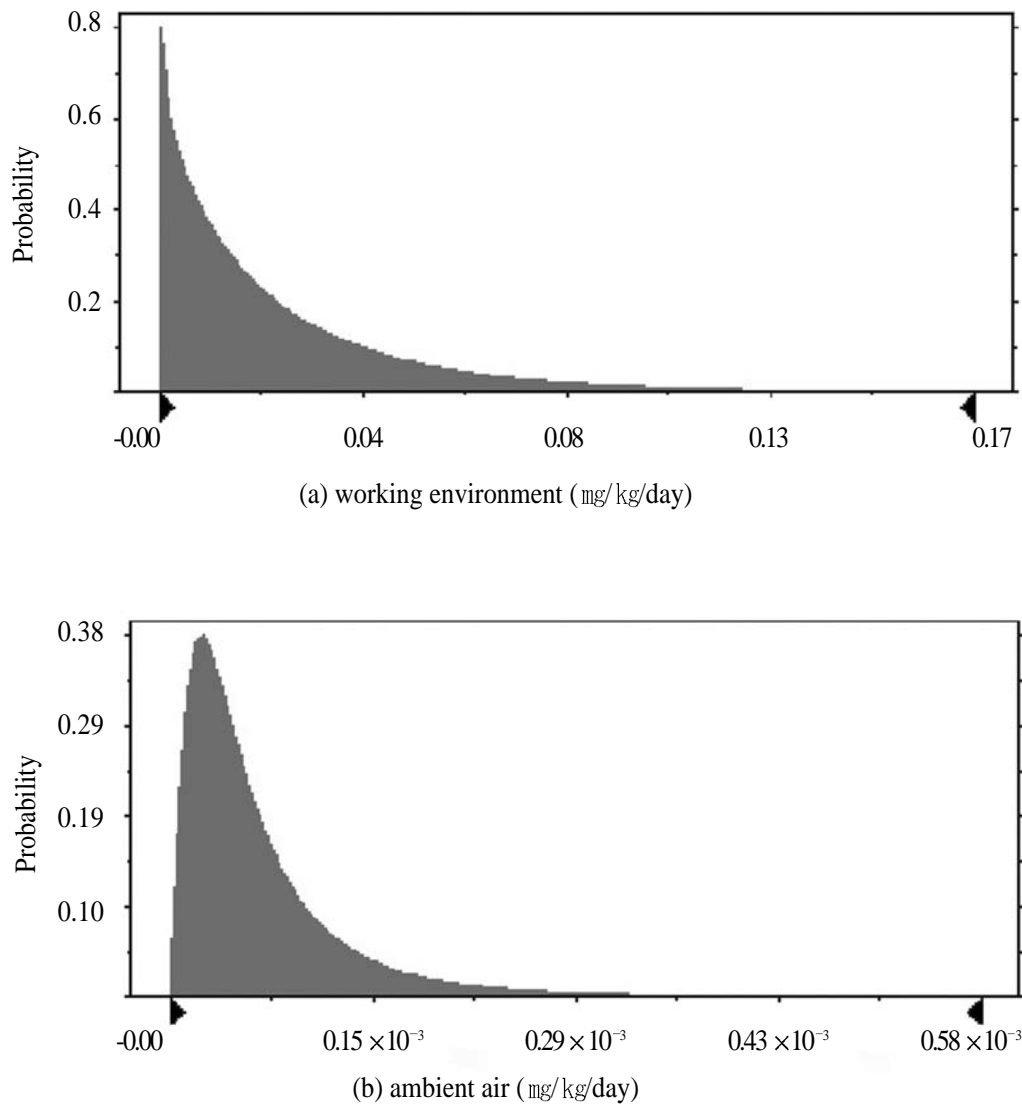


Fig. 1. Lead concentration of working environment and ambient air.

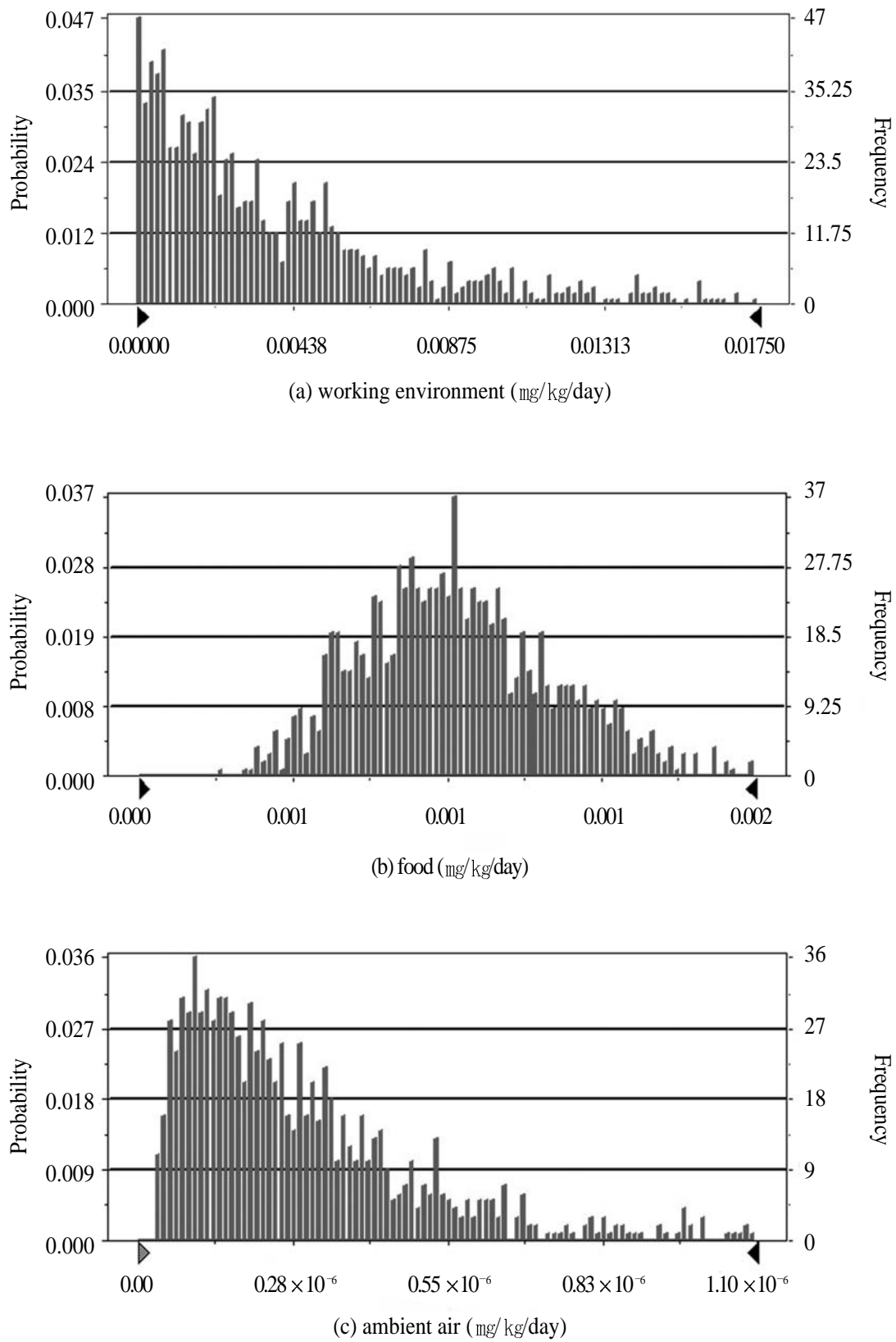


Fig. 2. Distribution of lead exposure using Monte-Carlo simulation.

Table 3. Comparison of lifetime daily exposure using Monte-Carlo simulation

	Total	Working environment <sup>†</sup>	Food	Ambient air
Mean	$5.45 \times 10^{-3}$	$4.39 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-3}$	$0.30 \times 10^{-6}$
percentile				
10th	$1.44 \times 10^{-3}$	$0.39 \times 10^{-3}$	$0.76 \times 10^{-3}$	$0.08 \times 10^{-6}$
25th	$2.15 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-3}$	$0.87 \times 10^{-3}$	$0.13 \times 10^{-6}$
50th	$3.75 \times 10^{-3}$	$2.68 \times 10^{-3}$	$1.03 \times 10^{-3}$	$0.22 \times 10^{-6}$
75th	$7.48 \times 10^{-3}$	$6.36 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-3}$	$0.39 \times 10^{-6}$
90th	$11.18 \times 10^{-3}$	$10.24 \times 10^{-3}$	$1.40 \times 10^{-3}$	$0.62 \times 10^{-6}$
95th	$14.29 \times 10^{-3}$	$13.18 \times 10^{-3}$	$1.54 \times 10^{-3}$	$0.81 \times 10^{-6}$
Exposure contribution		82.42 %	17.57 %	0.01 %

\* unit : mg/kg/day

<sup>†</sup> working condition : 60 hours per week, no respiratory protector

Table 4. Chronic dietary intake of lead estimated by food group

Food group	Consumption rate (g/day/person)	Exposure dose (mg/kg/day)	Exposure contribution(%)
Cereals	382.0	$0.366 \times 10^{-3}$	40.2
Fishery products	86.0	$0.282 \times 10^{-3}$	30.9
Meets	63.5	$0.099 \times 10^{-3}$	10.9
Vegetables	341.8	$0.073 \times 10^{-3}$	8.0
Legumes, nuts, seeds	29.0	$0.035 \times 10^{-3}$	3.8
Potatoes	26.6	$0.032 \times 10^{-3}$	3.5
Fruits	116.5	$0.025 \times 10^{-3}$	2.7
Total	1,045.4	$0.910 \times 10^{-3}$	100

Table 5. Amount of total lead exposure according to various hypothetical condition

	Assuming that working condition has changed			
	Current (60hours per week)		After (40hours per week)	
	Respiratory protector		Respiratory protector	
	do not use	use	do not use	use
Mean	$5.45 \times 10^{-3}$	$1.49 \times 10^{-3}$	$3.98 \times 10^{-3}$	$1.34 \times 10^{-3}$
percentile				
10th	$1.44 \times 10^{-3}$	$0.93 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$0.89 \times 10^{-3}$
25th	$2.15 \times 10^{-3}$	$1.11 \times 10^{-3}$	$1.77 \times 10^{-3}$	$1.04 \times 10^{-3}$
50th	$3.75 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^{-3}$	$2.85 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-3}$
75th	$7.48 \times 10^{-3}$	$1.77 \times 10^{-3}$	$5.39 \times 10^{-3}$	$1.58 \times 10^{-3}$
90th	$11.18 \times 10^{-3}$	$2.13 \times 10^{-3}$	$7.81 \times 10^{-3}$	$1.86 \times 10^{-3}$
95th	$14.29 \times 10^{-3}$	$2.46 \times 10^{-3}$	$9.91 \times 10^{-3}$	$2.08 \times 10^{-3}$
Exposure contribution <sup>†</sup>	82.4 %	31.9 %	75.8 %	23.8 %

\* unit : mg/kg/day

<sup>†</sup> exposure contribution = (amount of lead exposure from working environment) / (amount of total lead exposure)

가 1을 초과하였고, 중앙값인 50th percentile에서도 1을 초과하였다. 그러나 현재와 동일한 작업시간에서 보호구를 착용한 경우에는 평균 위험지수는 0.62이었으며, 95th percentile 이상에서만 1 이상의 위험지수를 보였으며, 작업시간의 단축과 더불어 보호구를 착용한 경우에는 평균 위험지수는 0.56이었으며, 95th percentile에서도 1 미만의 위험지수를 나타내었다(Table 5).

#### IV. 고찰

건강 위해성 평가는 인간이 환경적 위험(hazard)에 노출되었을 경우 발생 가능한 영향을 정성 또는 정량적으로 추정하는 과정으로 위험의 확인(hazard identification), 노출평가(exposure assessment), 용량-반응평가(dose-response assessment) 및 위험도 결정(risk characterization)으로 구성되어 있으며, 선진국의 여러 규제기관 즉 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency : US EPA), 식품의약국(Food and Drug Administration : FDA) 등에서는 이를 응용하여 관리 기준을 제시하고 있는 실정이다. 이 중 노출평가는 위험성이 확인된 물질이 다양한 환경매체를 통해 얼마나 노출되는가를 결정하는 단계로, 노출경로의 추정 및 다양한 노출인자의 가정 등에 따라 불확실성(uncertainty)의 발생이 수반되지만, 수집된 자료와 가정이 타당하고 신뢰할 수 있다면 불확실성 분석을 위하여 Monte-Carlo simulation을 이용한 확률적 노출평가(probabilistic exposure assessment)가 추천되고 있다(EPA, 1998; Nicas와 Hussband, 2003). 물론 Monte-Carlo simulation이 불충분하거나 객관적이지 못한 자료의 선택 시 이에 따른 오류, 연구자간 상이한 확률분포를 선택함에 따른 오류, 부적절

한 결과의 과신(unjustified overconfidence), 및 risk communication의 어려움 등의 단점이 제기되고 있지만(US EPA, 1997, 1999; Vose, 2000), 평균 또는 최대 오염도 등의 단일 값(point value) 사용으로 인한 오류 및 비현실적 추정을 최소화할 수 있는 장점을 고려하여(Price 등, 1996; Helton과 Shiver, 1996; Kofi, 1998; Faustmann과 Omenn, 2001), 본 연구에서도 Monte-Carlo simulation을 실시하여 노출량과 매체별 납 오염도의 분포값을 제시하였다.

노출평가에 있어서 수질, 대기, 토양 및 음식 등 다양한 노출경로를 통하여 인체에 유입되는 오염물질의 양은 일차적으로는 각 환경매체에서의 농도, 즉 오염도가 가장 중요한 요소이지만, 이와 더불어 각 노출매체와의 접촉율, 접촉기간, 체중 등의 노출인자들에 의해 영향을 받게 된다(US EPA, 1997). 따라서 정확한 노출평가를 위해서는 타당성 있는 노출 시나리오와 노출인자의 결정이 선행되어야 하지만, 아직 국내에서는 대표성 있는 노출인자 값을 제시하지 못하고 US EPA(1997)의 값을 인용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 체중(국립기술품질원, 1997), 식품섭취량(이서래 등, 2000) 등은 현재까지 조사된 국내자료를 이용하였으나, 설문조사를 이용한 노출시나리오를 결정하여 작업환경 및 대기 중 노출량 평가의 신뢰도를 높이고자 하였다. 물론 근로자가 노출되는 미세환경(microenvironment)을 작업환경 및 대기로만 구분함에 따라 가옥, 차량내부 등에서의 노출을 간과할 수 있는 가능성이 있다. 그러나 가옥이나 차량내부에서의 납 오염도에 대한 신뢰할만한 국내자료가 없어, 작업환경 이외의 환경을 대기조건에 적용시켜 분석을 실시하였다. 한편 호흡률은 성인 남성에게 있어 하루 20 m<sup>3</sup>를 권장하고 있으나(US EPA, 1997), 가상 시나리오, 즉 작업시간의 변화에 따른 노출량 변화를 확인하고자 작업과 비작업 시간으로 구분하여 각

Table 6. Hazard index of total lead exposure according to various hypothetical condition

	Assuming that working condition has changed			
	Current (60hours per week)		After (40hours per week)	
	Respiratory protector		Respiratory protector	
	do not use	use	do not use	use
Mean	2.26	0.62	1.65	0.56
percentile				
10th	0.60	0.39	0.53	0.37
25th	0.89	0.46	0.73	0.43
50th	1.56	0.57	1.18	0.53
75th	3.10	0.73	2.24	0.65
90th	4.64	0.88	3.24	0.77
95th	5.93	1.02	4.11	0.86

\* hazard index = (amount of total lead exposure) / RfDBMD



각 1.2, 0.45 m<sup>3</sup>/hour를 적용하였다(ICRP, 1981). 그리고 비작업 시간 동안의 구분, 즉 수면과 휴식시간의 구분이 필요하겠으나, 대상 사업장의 2조 1교대의 근무조건 상 실질적인 휴식 또는 여가시간의 구분은 없었으며, 오히려 지나친 가정에 의한 오류발생을 줄이기 위하여 비작업 시간을 하나의 노출단위로 평가하였다.

일반생활환경에서의 납의 노출은 음용수, 토양, 대기 및 식품 등에 의하여 이루어진다. 이 중 음용수 및 토양의 경우는 중앙값으로 대표되는 오염도가 불검출로 조사되었기 때문에 인체 노출량을 산출할 수 없어 제외하였다. 그리고 대기 중 납에 의한 노출량은 총 노출량의 0.02%의 낮은 수준이었으며, 정용 등(1999)의 결과에 비하여 낮게 평가되었다. 이는 노출인자의 차이 또는 대상지역의 차이에 따른 결과일 수도 있으나, 대기 중 납 오염의 주원인이었던 유연 휘발유의 사용억제에 따른 효과로 생각된다(Sanolo 등, 1995; Moon 등, 2003). 한편 식품에 의한 노출평가에 있어 식품섭취량은 중요한 노출인자로 국내에서는 아직 확정적인 자료를 제시하지 못하고 있어 그 간의 연구들은 국민건강영양조사서 또는 식품수급표에 의하여 산출되었으나(이효민 등, 1999, 2000, 2001; 정용 등, 1999), 본 연구에서는 이서래 등(2000)이 국민건강영양조사에 근거하여 제시한 평균소비량을 적용하였다. 식품에 의한 평균 노출량은  $1.06 \times 10^{-3}$  mg/kg/day로 이효민 등(1999)이 국민건강영양조사서에 의해 추정된  $1.03 \times 10^{-3}$  mg/kg/day과 일치되는 결과를 보였다. 그러나 Moon 등(1995, 2003), Ikeda 등(2000a)이 섭취하는 음식을 분해하여 얻은 납 섭취량  $0.331 \pm 1.855 \mu\text{g/kg/day}$  과는 다소 상이한 결과를 보이고 있는데, 이는 분석 시 식품의 건습상태 및 계절적 변동차이에 의한 것으로 생각되며, 음식을 분해하는 방법일 경우는 시료 수 제한에 따른 대표성에 문제가 있을 것으로 판단된다. 그리고 각 식품군 별 노출 기여도에 있어서는 곡류와 해산물이 약 80%를 차지하고 있으며, 이효민 등(1999)의 연구결과에 비해 곡류는 다소 낮게, 해산물은 높게 추정된 양상을 보였다. 그러나 이러한 결과는 분석대상 식품 및 식품분류에 의한 차이에 의한 것으로 추측되며, 향후 정확한 식품섭취량의 평가가 필요할 것으로 생각된다.

일반생활환경 이외의 추가노출로 고려된 작업환경에서의 노출은 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근무조건인 경우 전체 노출량의 82.4%로 가장 높은 비중을 차지하고 있어 작업장에서의 관리가 중요함을 시사하고 있다. 현재 국내 작업환경 관리기준인 TLV는 만성 혹은 일생동안 노출의 상한값(upper limit value)이 아니라 매 근로일(working day) 작업시간 동안의 평균노출의 상한값으로 해석해야 하는 것으로 보고(Hewett, 1997; Whaley 등, 2000)되고 있다. 그러나 TLV는 그 기준 설정에 있어 적정 수준에 미치지 못하는

자료에 근거한다는 비판과(Castleman과 Ziem, 1988; Ziem과 Castleman, 1989; Ruden, 2003), 독성 역치(toxic threshold) 보다 경제적, 기술적 편이를 바탕으로 한 설정 등으로 인하여 건강장해 예방의 제한이 초래된다는 보고도 있었다(Roach와 Rappaport, 1990; Rappaport, 1993). 또한 TLV는 거의 모든 근로자에 있어 건강장해가 없음을 바탕으로 하지만 기준 이하의 농도라 할지라도 개인의 다양한 감수성으로 인하여 소수에서는 건강장해가 발생할 수 있으며(ACGIH, 2001; Kotseva, 2001), TLV 선정 시 개체간 변이 또는 중간 변이 등 불확실성 계수의 반영이 필요하다는 의견을(Whaley 등, 2000) 고려하면, 노출평가 시 노출량을 평균 또는 최대값 등의 단일 값에 의한 평가와 더불어 분포값을 함께 제시하는 것을 대안으로 고려할 수 있었다. 이에 일반생활환경 및 작업환경의 총 노출량을 Monte-Carlo simulation을 이용하여 추정한 결과 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우 평균 위험지수는 2.26이었으며, 중앙값인 50th percentile 또한 1.56으로 혈압상승의 건강장해를 기대할 수 있었다. 이러한 유해영향 발생 억제를 위한 관리대안이 필요할 것으로 판단되는데, 이를 위해서는 각 사업장에 적합한 가상의 노출 시나리오 및 노출평가를 수행하고 이 결과를 토대로 접근가능하고 효율적인 대안의 선정이 필요할 것으로 생각되었다. 본 연구에서도 작업시간 단축과 보호구 착용이라는 접근 가능한 관리대안을 토대로 가상의 노출평가를 실시하였다. 그 결과 작업시간의 단축 없이 보호구만을 착용한 경우 평균 위험지수는 0.62이었으나, 95th percentile 이상에서 1을 초과하여 비록 소수이지만 고 노출의 위험에 있는 집단이 존재할 수 있음을 추정할 수 있었다. 그러나 작업시간의 단축과 더불어 보호구를 착용한 경우에는 평균 위험지수는 0.56이었으며, 95th percentile에서도 1 미만의 위험지수를 나타내는 양상을 보였으며, 노출기여도 역시 23.8%로 급감하였다. 이러한 결과는 작업시간 단축 및 보호구 착용이 노출량 감소방법임을 추정할 수 있었고, 특히 보호구 착용이 노출량 결정에 있어 주된 요인임을 추정하게 하며, 이를 바탕으로 사업주와 근로자의 입장에서 접근 가능한 대안의 모색이 가능할 것으로 생각되었다. 또한 이러한 가상시나리오에서 중요한 노출인자는 연구대상들이 작업 중 착용하는 보호구, 즉 면체여과식 반면형 방진마스크의 효율일 것이다. 그러나 그간의 보호구 효율에 관한 연구는 분진 또는 입자 농도를 고려한 일부 연구(Wu, 2002) 외에는 유발검사(Muller-Wening과 Repp, 1989), 폐기능 검사(Taivainen 등, 1998; Li 등, 2002), 증상 발현(Grammer 등, 2002) 등에 의한 효율평가가 이루어져 왔다. 그러나 최근 Nicas와 Hubbard(2003)에 의해 탄저균에 대한 보호구 통과율(respirator penetration values)을 고려한 위해성 평가가 이루어져, 작업환경 내 유해물질에 대한 노출평가에

있어서도 이러한 보호구 효율을 고려해야 할 것으로 생각된다. 현재 사용되고 있는 보호구 중 100% 효율을 가진 장비는 없는 것으로 알려져 있으며(NIOSH, 1987), 작업환경 내에서 사용되는 면체여과식 반면형 방진마스크의 경우는 이론적 보호율(theoretical protection factor)이 10인 것으로 보고되고 있어(Nicas와 Neuhaus, 2004; Martyny 등, 2002), 본 연구에서는 이 값의 역수인 0.1을 FC값으로 사용하여 노출량을 계산하였다.

한편 위험지수 산출을 위해서는 추정된 노출량과의 비교를 위한 참고치가 필요하며, 본 연구에서는 혈압상승을 독성종말점으로 하는  $RfDBMD = 2.41 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$ (이효민 등, 1999)를 이용하였다. 앞서 연구방법에서 논의되었듯이 납의 비발암 독성에 대한 참고치는 US EPA에서는 제시하고 있지 않으나, FAO/WHO에서는 주간잠정섭취허용량(provisional tolerable weekly intake : PTWI)를  $25 \mu\text{g/kg/week}$ 로 제시하고 있다(JECFA, 1999). 이를 이용하여 모의실험을 실시한 결과 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간 근무하는 경우 평균 위험지수는 1.56으로 본 연구의 추정치 2.26에 비하여 낮은 수치를 보였으며, 근무시간의 단축과 더불어 보호구를 착용한 경우 역시 평균 위험지수가 0.38로 본 연구의 추정치 0.56보다 낮은 수치를 보여, 건강장해 가능성은 본 연구결과보다 낮게 추정되었으나 결과양상은 비슷하였다. 그러나 위해성평가에서는 가급적 가장 보수적인(conservative : 동일 용량에서 보다 높은 위해도를 보이는, 건강장해에 보다 엄격한) 값을 이용하는 것이 일반적인 점을 고려하여 이효민 등(1999)의  $RfDBMD$ 를 참고치로 적용하였다.

본 연구를 수행함에 있어 다음과 같은 제한점이 있었다. 첫째, 오염도자료는 측정시기, 측정기관 등이 상이하여, 이에 대한 보완방법으로 메타분석에 의한 동질성 검정을 실시 문제점을 극복하고자 하였다. 그러나 각 매체 간 측정시기, 즉 1990년대 자료인 식품 외에 기타 매체의 자료는 2000년대 자료로 이로 인한 오류 발생이 가능하나, 이는 현재 국내의 모니터링 체계에 의한 결과이며 향후 이 부분이 보완될 경우 보다 정확한 위해도 평가가 이루어질 것으로 생각한다. 둘째, 화학물질의 체내 침입에 있어 타당성 있는 보호구 효율, 체내 흡수율 및 생체지표(biological marker) 등이 고려되어야 한다. 비록 본 연구에서는 작업환경 내 보호구 효율을 10으로 추정하였으나 향후 정확한 효율검정이 필요할 것으로 판단되며, 체내 흡수율 및 생체지표 또한 PBPK 모형(physiologic based pharmacokinetics model) 등에 의한 계량화가 필요하며(Mukesh 등, 2005) 이에 대한 보완이 이루어져야 할 것으로 생각된다. 특히 호흡물의 경우 신체활동에 따른 호흡률은 연구자간에 차이를 보여주고 있으며(EPA, 1997), 국내자료 또한 미비한 실정으로 이로 인한 오류 가능성이 있다. 그러나

본 연구에 있어 각기 다른 지표를 적용한 모의실험 결과, 정도의 차이는 있으나 본 논문의 결과와 비슷한 경향을 보였으며, 특히 작업과 비작업시간을 1.2, 0.45 m/hour로 적용하였을 경우 하루 총 합이 20 m<sup>3</sup>를 넘지 않아 US EPA (2002)의 권고를 만족하여 결과의 신뢰도를 인정할 수 있을 것으로 생각된다.

그러나 이러한 제한점에도 불구하고 본 연구는 일반생활환경과 더불어 작업환경에 의한 납의 추가노출 시 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우 혈압상승의 건강장해가 기대되었으나, 작업시간 단축 및 보호구 착용 등의 근로조건 개선 시 안전수준으로 관리할 수 있음을 예측할 수 있었다. 특히 Monte-Carlo simulation을 이용한 노출평가는 작업장 보건관리에 있어서 제한적이거나 유용한 도구로 사용 가능함을 확인할 수 있었다.

## V. 결론

납 취급 근로자의 건강위해성평가 및 작업환경에서 Monte-Carlo simulation을 이용한 노출평가의 유용성을 확인하고자, 납을 취급하는 전라북도 한 사업장 근로자를 대상으로 작업환경 및 일반 생활환경매체(식품, 대기)에서의 노출을 평가한 결과는 다음과 같았다.

납 취급 근로자가 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우 납의 평균 총노출량은  $5.45 \times 10^{-3} \pm 0.005 \text{ mg/kg/day}$ , 각 매체에 의한 평균 총 노출량은 식품  $1.06 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$ , 대기  $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{g/kg/day}$  이었으며, 작업환경 내 납 노출량은  $4.39 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$  로, 노출기여도는 작업환경에서의 노출이 82.42%로 가장 높았으며, 식품 17.57%, 대기 0.01% 순이었다.

가상 시나리오에 의한 총 노출량은 주당 60시간의 작업조건에서 보호구 착용 시에는  $1.49 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$  이었으며, 주당 40시간으로 조정되었을 경우에도 보호구 미착용 시  $3.98 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$ , 착용 시  $1.34 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$  이었다.

납에 의한 비발암 독성의 위해도는  $RfDBMD (= 2.41 \times 10^{-3} \text{ mg/kg/day}$ , 독성종말점 ; 혈압상승)와 총 노출량의 비인 위험지수를 이용하였다. 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우 작업환경, 식품, 대기 등의 매체에 의한 평균 총 노출의 위험지수는 2.26으로 혈압상승의 유해영향이 기대되었으며, 가상 시나리오의 노출평가 결과, 보호구를 착용하지 않을 경우에는 작업시간 단축에도 불구하고 평균 위험지수가 1을 초과하였다. 그러나 현재와 동일한 작업시간에서 보호구를 착용한 경우에는 평균 위험지수는 0.62이었으며, 95th percentile 이상에서만 1 이상의 위험지수를 보

였으나, 작업시간의 단축과 더불어 보호구를 착용한 경우에는 평균 위험지수는 0.56 이었으며, 95th percentile에서도 1 미만의 위험지수를 나타내었다.

이상의 결과로 보아 일반생활환경과 더불어 작업환경에 의한 납의 추가노출 시 보호구를 착용하지 않은 상태로 주당 60시간의 근로조건인 경우 혈압상승의 건강장해가 기대되었으나, 작업시간 단축 및 보호구 착용 등의 근로조건 개선 시 안전수준으로 관리할 수 있음을 예측할 수 있었다. 특히 Monte-Carlo simulation을 이용한 노출평가는 작업장 보건관리에 있어서 제한적이나마 유용한 도구로 사용 가능함을 확인할 수 있었다.

## REFERENCES

- 국립기술품질원. 산업제품의 표준치 설정을 위한 국민표준 체위 조사 보고서. KRIS-97-114-IR, 1997
- 송혜향. 의학, 간호학, 사회과학 연구의 메타분석법. 청문각. 2003
- 이서래, 이효민, 허근, 이미경. 한국인을 위한 식품 평균소비량(1990년대) 자료의 최적화. 한국식품위생안전성학회지 2000;15(2):68-78
- 이효민, 임철주, 김중욱, 최시내, 윤은경 등. 식품중 납의 위해성평가. 식품의약품안전청연보 1999;3:60-73
- 이효민, 임철주, 윤은경, 김중욱, 최시내 등. 식품중 카드뮴의 위해성평가. 식품의약품안전청연보 2000;4:67-77
- 이효민, 한지연, 윤은경, 김효미, 황인균 등. 식품을 통한 유기인계농약류의 동시노출위해성평가. 한국식품위생안전성학회지 2001;16(1):21-26
- 정용, 황만식, 양지연, 조성준. 납의 다경로 노출에 의한 건강위해성평가 : 우리나라 일부 지역 성인들을 대상으로. 한국환경독성학회지 1999;14(4):203-216
- 환경부. <http://www.me.go.kr>
- ACGIH. Documentations of the threshold limit values and biological exposures indices. In : Introduction to the documentations of the chemical substances TLVs. 7th Ed. American Conference of Governmental Industrial Hygienist, Cincinnati, 2001.
- Bono R, Pignata C, Scursatone E, Rovere R, Natale P et al. Updating about reduction of air and blood lead concentrations in Turin, Italy, following reductions in the lead content of gasoline. Environ Res 1995;70:30-34
- Buchet JP, Lauwerys R, Vandevoorde A, Pycke JM. Oral daily intake of cadmium, lead, manganese, copper, chromium, mercury, calcium, zinc and arsenic in Belgium. A duplicate meal study. Food Chem Toxicol 1983;21:19-24
- Castleman BI, Ziem GE. Corporate influence on threshold limit values. Am J Ind Med 1988;13:531-559
- Castorina R, Woodruff TJ. Assessment of potential risk levels associated with U.S. Environmental Protection Agency reference values. Environ Health Perspect 2003;111(10):1318-1325
- Castorina R, Crystal Ball®2000 Users Guide. Decisioneering, Inc.; 2000. p. 172-180
- Faustman EM, Omenn. Risk assessment. In : Klassen CD. Casarett & Doull's Toxicology. 6th ed. McGraw Hill; 2001. p. 83-104
- Glorennec P. Analysis and reduction of the uncertainty of the assessment of children's lead exposure around an old mine. Environ Res 2006;100(2):150-158
- Grammer LC, Harris KE, Yarnold PR. Effect of respiratory protective devices on development of antibody and occupational asthma to an acid anhydride. Chest 2002;121:1317-1322
- Helton JC, Shiver AW. A Monte-Carlo procedure for the construction of complementary cumulative distribution functions for radioactive waste disposal. Risk Anal 1996;16(2):43-45
- Hewett P. Mean testing: I. Advantages and disadvantages. Appl Occup Environ Hyg 1997;12(5):339-346.
- ICRP. International Commission on Radiological protection. Report of the task group on reference man. New York: Pergamon Press. 1981
- Ikeda M, Zhang ZW, Shimbo S, Watanabe T, Nakatsuka H et al. Exposure of women in general populations to lead via food and air in east and southeast Asia. Am J Ind Med 2000a;38:271-280
- Ikeda M, Zhang ZW, Shimbo S, Watanabe T, Nakatsuka H et al. Urban population exposure to lead and cadmium in east and south-east Asia. Sci Total Environ 2000b;249:373-384
- IPCS. Environmental health criteria 85. Lead. environmental aspects. International Programme on Chemical Safety, World Health Organization, Geneva, 1989
- IPCS. Environmental health criteria 165, Inorganic lead. International Programme on Chemical Safety, World Health Organization, Geneva, 1995
- JECFA, Summary and Conclusions 53rd Meeting. World Health

- Organisation, Joint FAO/OMS Expert Comitee on Food Additives, Geneva. 1999.
- Kofi AD. Risk assessment in environmental management. A guide for managing chemical contamination problems. West Sussex : John Wiley & Sons Ltd.; 1998. p. 181-192
- Kotseva K. Occupational exposure to low conc of carbon disulfide as a risk factor for hypercholesterolaemia. *Int Arch Occup Environ Health* 2001;74:38-42
- Li H, Wang ML, Seixas N, Duchtman A, Lee Petsonk E. Respiratory protection : Associated factors and effectiveness of respirator ode among underground coal miners. *Am J Ind Med* 2002;42:55-62
- Martyny J, Glazer CS, Newman LS. Respiratory protection. *N Engl J Med* 2002;347(10) :824-830
- Moon CS, Zhang ZW, Shimbo S, Watanabe T, Moon DH et al. Dietary intake of cadmium and lead among general population in Korea. *Environ Research* 1995;71:46-54
- Moon CS, Paik JM, Choi CS, Kim DH, Ikeda M. Lead and cadmium levels in daily foods, blood and urine in children and their mothers in Korea. *Int Arch Occup Environ Health* 2003;76:282-288
- Muller-Wening D, Repp H. Investigation od the protective value of breathing masks in farmer's lung using an inhalation provocation test. *Chest* 1989;95:100-105
- Mukesh Shamara, Mayank Maheshwri, Morisawa S. Dietary and inhalation intake of lead and estimation of blood lead levels in adults and children in Kanpur, India. *Risk Anal* 2005;25(6):1573-1588
- Nicas M, Hubbard A. A risk analysis approach to selecting respiratory protection against airborne pathogens used for bioterrorism. *Am I Ind Hyg Assoc* 2003;64(1):95-101
- Nicas M, Neuhaus J. variability in respiratory protection and the assigned protection factor. *J Occup Environ Hyg* 2004;1(2):99-109
- NIOSH. NIOSH guide to industrial respiratory protection. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, September, 1987. DHHS Publication No. 87-116 (URL : <http://www.cdc.gov/niosh/87-116.html>)
- Page NP. Human health risk assessment. In : Cockerham LG, Shane BS. Basic Environmental Toxicology. Florida : CRC Press Inc.; 1994. p. 563-565
- Price PS, Su SH, Harrington JR. Uncertainty and variation in Indirect exposure to Tetrachlorodibenzo-p-dioxin from a beef consumption pathways. *Risk Anal* 1996;16(2):43-46
- Rappaport SM. 1993. Threshold limit values, permissible exposure limits, and feasibility : The bases for exposure limits in the United States. *Am J Ind Med* 1993;23:683-694
- Roach. SA, Rappaport SM. But they are not thresholds: A critical analysis of the documentation of threshold limit values. *Am J Ind Med* 1990;17:727-753
- Ruden C. Scrutinizing ACGIH Risk Assessments : The trichloroethylene case. *Am J Ind Med* 2003;44:207.213
- Sannolo N, Carell G. De Lorenzo, Castellino N. Sources, properties, and fate of airborne lead. In : Castellino N, Castellino P, Sannolo N. Inorganic lead exposure. Metabolism and intoxication. Florida : CRC Press Inc.; 1995. p. 60
- Taivainen AI, Tukiainen HO, Terho EO, Husman KR. Powered dust respirator helmets in the prevention of occupational asthma among farmers. *Scand J work Environ Health* 1998;24(6):503-507
- US EPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume I . Human health evaluation manual, PartA. Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC, December 1989, EPA/540/1-89/002. Available from: <http://www.epa.gov/oerpage/superfund/programs/risk/index.htm>
- US EPA. Guidelines for exposure assessment. Exposure Assessment Group, Office of Health and Environmental Assessment, Washington DC, May 29, 1992, EPA/600/Z-92/001. Available from: URL:<http://www.epa.gov/nceawww1/raf/pdfs/exposure.pdfs>
- US EPA. The exposure factors handbook. Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington DC, 1997, EPA/600/P-95/002FaUS. Available from: URL:<http://www.epa.gov/ncea/pdfs/efh>
- US EPA. Guiding Principles for Monte Carlo Analysis. EPA/630/R-97/001March 1997. Available from: URL:<http://www.epa.gov/ncea/raf.montecar.pdf>
- US EPA. Guidance for submission of probabilistic exposure assessments to the office of pesticide program's health effects division. Office of Pesticide Programs, Washington DC, December 1998
- US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume 3 Part A: Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment (RAGS 3A) (DRAFT) Washington DC, 1999. Available from: URL:<http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/rags3adt/pdf/chapters.pdf>
- US EPA. A Review of the reference dose and reference concentration process. Risk Assessment Forum, Washington

- DC, December 2002, EPA/630/P-02/002E. Available from:  
URL:[http:// cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recorddisplay.cfm?  
deid=55365](http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recorddisplay.cfm?deid=55365)
- US EPA. Integrated Risk for Information System. Office of  
Research and Development, National Center for Environmental  
Assessment, Washington DC, 2003. Available from:  
URL:[http:// www.epa.gov/iris](http://www.epa.gov/iris)
- Vose D. Risk analysis. A quantitative guide. West Sussex : John  
Wiley & Sons Ltd.; 2000. p. 17
- Whaley DA, Attfield MD, Bedillion EJ, Walter KM, Quilong YI.  
Regression method to estimate provisional TLV/WEEL-  
equivalents for non-carcinogens. Ann occup Hyg 2000;44(5)  
:361–374
- Wu MT. Assessment of the effectiveness of respirator usage in Coke  
oven workers. Am J Ind Hyg Assoc 2001;63(1):72–75
- Ziem GE, Castleman BI. Threshold limit values : Historical  
perspectives and current practice. J Occup Med 1989;31:910–  
918