

업종별 공기중 납입자의 입경별 분포특성에 관한 조사 연구

한국산업안전공단 산업보건연구원 · 서울대학교 보건대학원*

박동욱 · 백남원*

— Abstract —

A Study on the Characteristic of Airborne Lead Particle Size by Industry

Dong Wook Park, and Nam Won Paik*

*Industrial health Research Institute KISCO,
Seoul National University, School of Public Health**

The size characteristics of lead particle which is one of the important factors associated with absorption of lead were ignored in establishing lead standard. This study was conducted to investigate distribution of lead particles by operation of industry. Aerodynamic Mass Median Diameters (MMD) of airborne lead particles in the battery and litharge manufacturing industry were $14.1 \mu\text{m}$ and $15.1 \mu\text{m}$, respectively. There was no significant difference between those two values ($p>0.05$). However, the diameters in radiator manufacturing and secondary smelting industry were $1.3 \mu\text{m}$, $4.9 \mu\text{m}$, respectively. Those were significantly smaller than the particle sizes in other industries ($p<0.05$). Total lead concentrations in the secondary smelting industry were higher than those in the battery and litharge manufacturing industry. Total lead concentrations in other industries except radiator manufacturing industry exceeded the standard of $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Only radiator manufacturing industry indicated lead concentrations significantly lower than those in other industries ($p<0.05$). Concentrations of lead particles smaller than $1 \mu\text{m}$ defined as respirable fraction by OSHA's CPA model assumption were $72.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the secondary smelting industry, exceeding $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The relationship of concentrations between total lead and lead of particles smaller than $1 \mu\text{m}$ was $\log Y = 0.46 \log X + 0.06$ ($n=119$, $r^2 = 0.44$, $p=0.0001$). Relationship of respirable lead concentrations between OSHA and ACGIH was significantly detected in the litharge and battery manufacturing industry ($p=0.0001$), but was not significant in the radiator ($p=0.2720$) and secondary smelting manufacturing industry ($p=0.2394$). As MMDs of lead particles generated in industry were small, difference of respirable lead concentration between OSHA and ACGIH became smaller. There was a significant difference between concentrations respirable lead defined by two organizations such as OSHA and ACGIH in the battery and litharge manufacturing industry. Average concentration of respirable lead by ACGIH definition was 43.3 % of total lead in secondary smelting and 48.9 % in radiator manufacturing industry, and lower fractions were indicated in battery and litharge manufacturing industry. Relationships of total lead

with IPM, TPM, and RPM were significant respectively($p=0.0001$) and lead concentrations by particle size could be estimated using this relationship. Linear regression equation between total lead concentration(X) and ACGIH-RPM concentration(Y) was $\log Y = 0.76 \log X - 0.40$ ($r^2 = 0.89$, $p=0.0001$).

Key Words : Mass Median Diameter(MMD), OSHA's CPA Model, Respirable Particulate Mass of ACGIH

I. 서 론

인체조직의 부분별 침착위치와 효율(deposition efficiency)은 호흡된 입자의 공기 역학적 직경(aerodynamic diameter)에 가장 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Hodgkins, 1990; ISO, 1981; Soderholm, 1991; Harrison 등, 1981).

많은 유해물질은 인체의 침착위치가 특정한 질병의 형태를 나타낸다. 예를 들면 석면과 실리카 입자의 주된 침착위치는 폐로서 여기서 폐암 또는 규폐증을 야기할 가능성을 나타낸다. 이러한 이유 때문에 공기중에 존재하는 입자 크기와 크기별 농도의 평가는 매우 중요하게 취급되어야 한다(Ernhart 등, 1990). 과거에 보고된 여러 산업위생과 역학 연구에서 근로자에 노출되는 양(dose)을 추정하는데 어려운 점은 상세한 입자의 크기별 특성과 분포자료가 거의 없다는 데 있다. 관심의 대상이 되는 유해물질의 입자 크기별 분포의 특성은 역학적인 연구에서 특별히 더 중요하다. 왜냐하면 이것은 직업병이 발생되었을 때 어떤 유해물질의 입자 크기별 농도의 추정을 위한 중요한 자료로 활용될 수 있기 때문이다.

ACGIH와 ASP위원회 그리고 ISO (International Standard Organization, ISO)는 분진입자에 대한 허용농도(Threshold Limit Value, TLV)를 흡입성입자(Inhalable Particulate Mass, IPM-TLV: 이하 흡입성농도라 한다), 흉곽성입자(Thoracic Particulate Mass, TPM-TLV:이하 흉곽성농도라 한다), 및 호흡성입자(Respirable Particulate Mass, RPM-TLV:이하 호흡성농도라 한다)로 구분하여 발생하는 입자 크기를 보다 정확하게 측정함으로써 노출특성을 구체화 시키고자 하고 있다(Bartley 등, 1985; Vincent 등, 1981; ACGIH, 1984; ACGIH, 1994; Hewett, 1991)

Soderholm 등(1993)은 ACGIH의 총분진에 대한 허용농도(TLVs of total dust)를 흡입성과 흉곽성 농도로의 변경을 주장하였다. 즉, 현재의 총분진 허용농도는 흡입성농도로 하고 이 농도의 0.75배 농도를 흉곽성 농도로 구분하여 허용농도를 설정하는 것이다(Soderholm 등, 1993).

Hewett 등(1991)은 서로 다른 크기의 입자에 노출되는 코호트 그룹을 대상으로 역학조사를 할 경우 총 농도 측정과 크기별 분포 및 특성자료가 반드시 제시되어야 한다고 주장하였다(Hewett 등, 1991). 코호트가 동일한 크기의 입자에 노출되지 않는다면 노출-반응관계나 모델이 서로 다르다는 것이다.

현재, ACGIH는 카드뮴 화합물, 실리카, 석탄 분진 등에 대해서 총분진과 호흡성분진으로 허용농도를 구분하였다(ACGIH, 1994). 입자 크기별 기준이 석탄과 실리카 이외의 다른 유해물질에도 적용되어야 한다는 주장도 많다(Knight, 1991; Hewett, 1991). 그러나 납에 대한 허용농도는 OSHA와 ACGIH 모두 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다(ACGIH, 1994). 납은 입자의 크기별 농도의 구분이 없고 단지 총농도로서 규정되어 있다.

King 등(1970)은 납축전지제조업, 색소제조업(pigment), 1차 납제련업(primary smelting)에 근무하는 101명의 근로자에 대하여 납입자의 직경을 조사하였다(King, 1979). Froines 등(1986)은 2차 제련업에서 공정별로 납입자의 직경을 제시하고 공정별로 직경의 크기가 다르므로 납입자의 크기별 시료채취가 필요하다고 주장하였다(Froines 등, 1984). Hodgkins(1990)는 2개 공장의 납축전지제조업에서 공정별로 납입자의 크기와 함께 크기별 농도를 제시하였다(Hodgkins, 1990). 이제까지의 국내에서도 납입자의 크기별 특성과 관련된 연구는 많지 않고 우리나라는 전혀 없다.

본 연구의 궁극적인 목적은 업종별로 발생하는 납입자의 입경별 분포특성을 분석하고 비교하는 것이다. 보다 구체적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 업종별로 발생하는 공기중 납의 질량중위직경을 비교한다.

둘째, 총 납농도와 입자크기별 농도와의 관계모델을 제시한다.

셋째, ACGIH와 OSHA의 정의에 의한 호흡성농도를 비교한다.

본 연구결과는 납입자 크기별로 허용농도를 설정하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

II. 연구대상 및 방법

1. 대상

표 1에서 보는 바와 같이 조사대상은 총 4개 업종의 12개 사업장이었다. 조사대상 공정은 납에 노출되는 근로자가 근무하는 곳으로 한정하였다. 납입자의 시료를 채취한 근로자 수는 총 119명 이었다.

2. 방법

가. 납입자의 크기별 시료채취

납입자의 크기를 측정하기 위한 시료는 8단계의 Marple Personal Cascade Impactor(Model 298, Anderson Sampler, Inc., U.S.A)와 개인용 시료채취기(Model MSA 87004, MSA, U.S.A)를 사용하여 채취하였다. 적정 채취 유속은 2 L/min으로 하여 한 단계(impactor stages)에서 포집된 입자가 다음 단계로 되튀어 일어 나지 않도록 하였다(Hinds 등, 1985; Lodge 등, 1986; Rubow 등, 1987).

Table 1. Type of Industries and Operations Studied and Number of Workers Sampled for Measurement of Airborne Lead Concentration

Industry	No. of Plants	Workers Sampled
Secondary smelting	2	6
Radiator manufacturing	3	43
Battery manufacturing	4	44
Litharge manufacturin	3	26
Total	12	119

각 단계에서 구분되어 채취되는 납입자의 유효한 계직경(effective cut-point diameter, ECD)은 표 2와 같다. 각 단계의 충돌기판은 시료채취 후 아세톤으로 적신 형짚으로 닦고 증류수로 3번 세척하여 오염을 제거하여 사용하였다.

Table 2. Cut-Point Diameter of Personal Cascade Impactor at 2 Lpm

Impactor Stage No.	Cut-Point Diameter(microns)
1	> 21.3
2	14.8
3	9.8
4	6.0
5	3.5
6	1.55
7	0.93
8	0.52
Backup filter	0

나. 납입자의 크기분포 및 농도 환산

1) 크기별 납 분석

시료채취 후 각 단계별로 Mylar Substrate와 PVC여과지에 채취된 납을 분석하였다. 시료 전처리에는 초음파시스템(microwave digestion system, CEM corporation, U.S.A)을 이용하였다. 납분석은 원자흡수분광광도계(Varian 300 plus, Varian, Australia)를 이용하였다.

2) 납입자의 크기별 농도 환산

각 단계별로 채취된 납의 크기 분포는 대수확률 그래프(log - probability graph)에 표시하였다. 납입자의 평균직경은 누적 농도비 50 %에 해당되는 크기로 하였고 납입자 직경의 기하표준편차는 평균 직경을 누적 농도비 16%에 해당되는 크기로 나누어서 구하였다. 납입자의 크기별 농도는 총농도, OSHA의 1 μ m 이하의 농도 및 소화성 농도 그리고 ACGIH의 흡입성, 흡광성, 호흡성농도로 구분하여 환산하였다(ACGIH, 1994; Hinds 등, 1985).

III. 결과 및 고찰

1. 공기중 납입자의 크기 분포

업종 및 공정별 납입자의 직경은 표 3과 그림 1에

제시되어 있다. 업종별로 납입자의 평균직경은 납축전지 제조업에서 14.1 μm , 리사지 제조업에서 15.1 μm 로서 매우 컸고, 2차 납 제련업은 4.9 μm 그리고 방열기 제조업은 1.3 μm 로서 작았다. 축전지와 리사지 제조업의 직경은 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$). 그러나 2차 제련업과 방열기 제조업에서는 다른 업종과 유의하게 다른 직경분포를 보였다($P < 0.05$).

2차 제련업의 공정별로 노출되는 납입자의 중위질량직경을 보면 납분을 용해하고 출탕하여 납괴를 생산하는 용해작업자(furnace)에서는 1.6 μm 로서 폐축전지의 플라스틱 케이스 분리와 용해작업을 동시

에 수행하는 근로자(scrap and furnace)에서의 평균 14.5 μm 에 비해 훨씬 작았다. 2차 제련업은 대부분 영세하고 소규모이므로 폐축전지로 부터 플라스틱 케이스 분리와 용해공정이 작은 공간에서 이루어지고 있었다. 그러므로 동일한 근로자가 2개의 공정을 동시에 담당하는 경우가 많았다. 폐 축전지 케이스를 분리하는 공정에서 발생하는 납은 황산에 용해된 습식상태이나 용해로의 고온 등으로 작업장 바닥에서 건조되기 쉽다. 건조된 납은 다시 비산되어 축전지 제조 당시의 직경크기(14.5 μm)를 나타냈다. 반면, 용해과정에서 발생하는 납입자는 고온의 용해로에서 폐축전지 내의 납분을 순수 납으로 환원시키므로 용해과정과 출탕작업시에는 흡인 상태로 발생되었다. Froines 등(1986)이 1차 납제련업의 공정별로 지역시료채취에 의한 직경크기 조사에서 1차 제련의 용해로(furnace)는 3.3 μm 그리고 주조(pouring)는 2.1 μm 로 본 연구의 결과(1.6 μm)보다 조금 컸다(Froines 등, 1986). 방열기 제조공정에서는 냉각튜브와 동판을 조립하여 그 간극을 채우는 dipping공정이 2.5 μm 로서 가장 컸다. 탱크 헤드와 동판을 밀봉하는 가스용접은 1.4 μm 그리고 수압 테스트에 의해 매워지지 않은 부분을 다시 용접하는 공정은 0.1 μm 였다. 용접은 아세틸렌이나 프로필렌에 의한 2000 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온을 이용한 용접작업 특성에 따른 것으로 발생하는 납입자의 형태는 대부분이 흡상태이다.

축전지 제조업은 공정별로 평균직경이 12.3 μm -16.6 μm 의 범위로 큰 차이가 없었다($p = 0.0001$). 납기판을 제조하는 공정에서 16.6 μm 로서 직경이 가장 컸다. 이외의 납분 도포(paste), 군조(cast-on-strap, COS), 용접(soldering) 등은 비슷하였다. 이것은 공정이 서로 인접해 있고, 연도공정의 납분이 도포, 건조, 조립, 용접 등의 과정을 통해 계속 비산되는 발생특성 때문이었다.

Hodgkins(1992)가 수행한 2개의 축전지 제조업의 공정별 직경을 보면 연도기(paste machine)가 23.4 μm 로서 가장 높고 다른 공정들은 10.9 μm - 19.8 μm 의 범위를 보여 본 연구와 큰 직경의 차이는 보이지 않았다(Hodgkins, 1992). 한편, 셀에 납 기판을 차입한 후 단자를 연결하는 용접작업자를 별도로 구분하여 직경을 본 결과 13.2 μm 로서 다른 공정과 큰 차이가 없었다. 이것은 용접공정이 군조

Table 3. Mass Median Diameter(MMD) of Lead Aerosols by Industry and Operation

Industry	MMD		
	No. of Sample	MMD(μm)	GSD
Secondary smelting	6	4.9	5.0
Radiator manufacturing	43	1.3	9.6
Battery manufacturing	44	14.1	1.5
Litharge manufacturing	26	15.1	1.7
Total	119	5.8	6.3

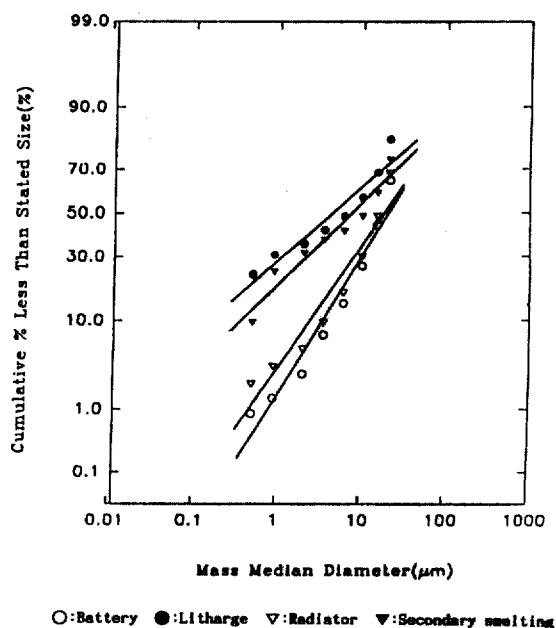


Fig. 1. Mass median diameter by type of industry.

공정과 바로 인접해 있어 셀 차입과 조립시 발생되는 납분진이 함께 노출된 때문으로 판단된다.

리사지와 광명단을 제조하는 업종의 직경은 포장공정이 22.4 μm 이고 다른 공정은 12.3 μm - 14.5 μm 의 범위를 보였다. 축전지 제조공정에서 발생되는 납입자의 직경과 비슷한 것으로 나타났다.

업종의 공정별로 직경의 기하표준편차를 보면 축전지 제조업과 리사지 제조업은 1.5와 1.7로 대부분 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 2차 납제련업과 방열기 제조업은 공정별로 직경의 변이가 5.0과 9.6로서 컸다. 업종별로 납입자의 직경의 변이에 의해서 납입자의 분포를 설명할 수 있었다. 2차 제련업의 용해, 방열기 제조업에서 발생하는 납은 직경 크기가 작은 입자가 많아 다른 업종에 비해 상대적으로 편평한 직선분포를 보였다(표 3 및 그림 1 참조). 납입자와 관련된 연구들의 직경 변이를 보면 Fronies는 1차 제련업에서 2.4 - 15.7 그리고 동제련업에서 10.3 - 12.8, 그리고 Hodgkins의 축전지 제조업은 2.2 - 5.2 였다(Hodgkins, 1992). 이러한 연구결과들과 비교해 볼 때 직경의 크기가 작은 방열기 제조업과 2차 제련업의 GSD가 매우 크고 다른 업종은 비슷한 것을 볼 수 있었다. 방열기 제조업과 2차 제련업의 용해공정은 이중적인 납질량누적분포(divergent cumulative mass distribution)를 보였다. 이것은 상대적으로 크기가 작은 납입자가 많다는 것을 나타내는 것이다(Harrison, 1981).

2. 납입자의 크기별 농도

가. 총 납농도

업종별 공정별 총납의 기하평균농도는 표 4의 칼람 (1)과 그림 2에 제시되어 있다. 업종별 납의 기하평균농도는 2차 제련업이 575 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고 축전지 제조업이 355 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 그리고 리사지 제조업이 269 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 한편, 업종별로 납농도의 차이를 분석해 본 결과 방열기 제조업만 다른 업종과 유의한 농도차이를 보였다($p < 0.05$). 이 업종은 근로자수 20여명 이내의 영세하고 소규모인 특성을 가지고 있어 모든 조사대상 사업장이 용해로에 적절한 국소배기시설이 설치되어 있지 않았고 불량한 작업방법 그리고 과도한 작업시간 및 양 등으로 노출농도의 증가를 가져오는 요인을 갖고 있다.

Gittleman 등(1993)이 알라바마(Alabama)의 폐축전지 제련업의 14명 근로자에 대한 노출농도 범위는 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 이 중 10명이 OSHA의 허용농도를 초과한 것으로 보고하였다(Gittleman 등, 1993). 2차 제련업의 납노출농도는 매우 높고 관리가 쉽지 않은 것을 알 수 있었다.

축전지 제조업은 납분이 도포된 기판을 버프 연마기에 의해 마무리하는 공정(grinding)이 5012 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고 기판 제조공정은 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮았다. Matte 등(1989)은 자마이카의 3개 축전지 사업장에서의 평균 납노출농도의 범위를 0.03 mg/m^3 에서 5.3 mg/m^3 으로 보고하였고(Matte 등, 1989), Kalim등(1986)은 수단(Sudan)에서 축전지 제조공장의 공기중 평균 납농도 범위를 1.8 mg/m^3 - 2.2 mg/m^3 으로 보고하였다(Karim 등, 1986). 이러한 농도는 본 연구결과(354.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 훨씬 높다. Chavalintnitikul 등 (1984)이 미국의 한 축전지 제조업에서 보고한 공정별 납농도는 납분도포 공정이 99.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위는 90.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 114.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 군조(조립포함)공정은 71.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위는 16.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 164.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 보고

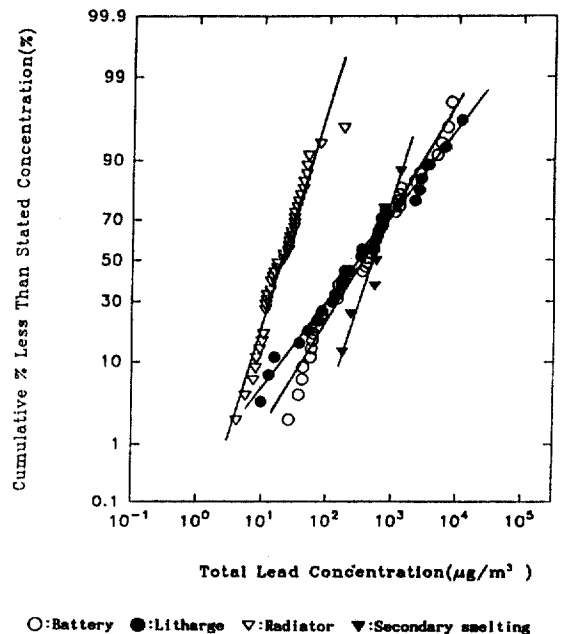


Fig. 2. Cumulative frequency distribution of total lead concentrations by industry.

Table 4. Respirable Fraction(Lead < 1 μm) of Total Lead under CPA Model Assumption of OSHA

Industry	Operation	(1) Total Lead		(2) Lead < 1 μm		Ratio (2)/(1) (%)
		GM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD	GM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD	
Secondary smelting						
	Furnace	758.6	1.6	316.2	1.5	44.0 \pm 16.5
	Scrap and furnace	436.5	1.8	16.6	3.0	5.1 \pm 3.5
	Subtotal	575.4	1.7	72.4	5.9	24.5 \pm 23.8
Radiator manufacturing						
	Dipping	12.9	1.9	4.5	1.7	37.4 \pm 15.0
	Soldering	20.4	2.1	6.9	2.2	40.2 \pm 19.6
	Soldering after leak test	25.1	2.2	15.1	2.2	63.0 \pm 18.3
	Subtotal	19.1	2.1	6.9	2.2	41.3 \pm 19.4
Battery manufacturing						
	Remelt	138.0	2.8	5.9	1.2	5.5 \pm 3.8
	Paste	257.0	4.1	10.0	2.6	4.9 \pm 3.0
	Grid production	85.1	2.0	4.6	2.1	6.2 \pm 4.0
	Encapsulation	776.3	2.4	15.5	1.6	2.4 \pm 1.5
	Caste on strap	537.0	5.5	12.3	2.9	3.1 \pm 2.8
	Soldering	309.0	3.2	32.4	4.1	14.2 \pm 15.1
	Grinding	5011.9	1.4	40.7	1.4	0.9 \pm 0.3
	Subtotal	354.8	4.7	12.0	2.9	5.3 \pm 6.4
Litharge manufacturing						
	Reaction	338.8	7.2	9.6	6.3	4.4 \pm 3.6
	Cracking	36.3	3.6	2.1	2.4	6.6 \pm 3.8
	Packing	389.1	4.4	8.3	3.6	2.4 \pm 1.7
	Subtotal	269.2	6.9	7.9	5.5	4.3 \pm 3.5
	Total	117.5	7.1	9.8	3.6	19.1 \pm 21.8

Lead < 1 μm : lead concentration of particle < 1 μm size by OSHA's CPA Model

하였다(Chavalitnitikul 등, 1984). Kononen 등 (1989)은 1980-1985년 까지 6개의 축전기 제조 사업장의 1,100 여명 근로자를 대상으로 납노출농도의 변화를 조사하였다 (Kononen 등, 1989). Hodgkins(1990)는 2개의 축전기 제조사업장에서 근로자 노출 평균 납농도가 37.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고 범위는 7.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 보고하였다(Hodgkins, 1990). 대부분이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 본 연구결과(355 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)나 위에서 언급한 후진국에서의 농도 보다는 훨씬 낮았다. 이러한 농도의 차이는 여러가지 원인으로 추정할 수 있는데 축전기 제조공법의

차이가 큰 요인이리라 판단된다. 선진외국의 경우 중이를 부착함으로써 납분의 탈락을 방지하는 개별 극판을 만드는 신공법(expanded type)을 이용하는 경우가 많다. 이공법은 제품의 공정이동이나 조립 등의 과정에서 납분의 탈락을 방지할 수 있어 관리가 훨씬 용이하다. 반면, 후진국이나 우리나라 축전기 제조의 공법은 대부분이 주조공법(casting type)이다. 기판위에 도포된 산화 납은 공정간의 이동과 지속적인 배열 등의 수작업으로 탈락, 비산, 낙하되는 가능성을 가지고 있었다. 필연적인 작업장 농도의 상승요인이 될 수 밖에 없었다. 리사지

(litharge : PbO)와 광명단(Pb_3O_4)의 제조공정도 반응이 $339 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 제품포장이 $389 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 모두 납의 허용농도인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 6배 이상 초과하고 있었다. 특히, 포장공정은 제품(리사지, 광명단)을 일정 양씩 용기에 수동으로 담는 작업으로 높은 농도의 노출가능성이 있었다.

방열기 제조업에서 납에 노출되는 공정은 냉각튜브에 납을 도포하는 작업 동판과 튜브간격을 매우는 Dipping, 공정의 기하평균 납농도는 $12.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 주된 작업이 용접에 의한 납취급으로 발생하는 평균 직경이 작았고($1.3 \mu\text{m}$) 이에 따라 납의 총농도는 작은 것으로 나타났다.

나. 총 납농도와 크기별 농도

1) 총 납농도 중 $1 \mu\text{m}$ 이하 크기의 농도 비율

표 4의 칼람 (2)는 OSHA의 모델 가정에 의해 총 납농도 중 $1 \mu\text{m}$ 이하의 납입자 크기에 해당하는 농도를 정리한 것이다. 업종별 공정별로 납입자의 크기가 $1 \mu\text{m}$ 크기 이하인 농도를 보면, 2차 제련업이 $72.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 방열기 제조업이 $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 축전지 제조업이 $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 리사지 제조업은 $7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 이 중 2차 제련업은 $1 \mu\text{m}$ 이하의 농도만으로도 납의 허용농도인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다.

업종별로 총 납농도 중 $1 \mu\text{m}$ 이하인 납입자 농도가 차지하는 비율을 보면, 방열기 제조업이 41.3%로서 가장 높고 축전지 제조업과 리사지 제조업은 5.3%와 4.3%로서 낮았다. 이것은 공정 및 작업의 특성으로 인해 발생하는 납입자의 크기 등의 차이 때문으로 판단된다. 용접 및 용해 등이 주된 작업인 경우 발생하는 납입자의 크기는 작고 이에 해당되는 호흡성농도는 상대적으로 큰 비율을 차지하는 것이다.

그림 3은 총 납농도와 총납에 대한 $1 \mu\text{m}$ 이하인 입자의 비율과의 관계를 최적회귀곡선(curve fit)으로 나타낸 것이다. 모델식은 $Y = -1.186 + 183.64/X^{0.5} - 154/X$, $r^2=0.41$, $n=119$ 이었다. 총 납농도가 $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이상일 때는 회귀선이 x축과 평행으로 나타나 총납 중에 $1 \mu\text{m}$ 이하 입자가 차지하는 비율이 일정한 것을 알 수 있었다. 다시 말하면 총 납농도가 증가함에 따라 $1 \mu\text{m}$ 이하 입자의 농도도 같이 증가한다는 것을 나타내는 것이다(그림 3과 4참조).

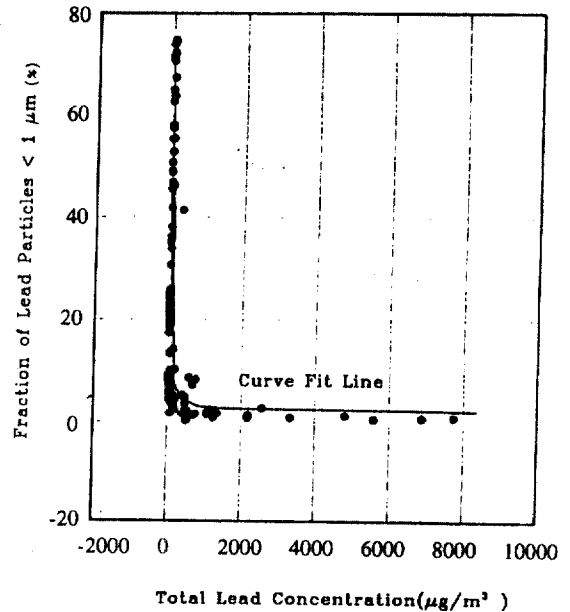


Fig. 3. Relationship between total lead concentration and fraction of lead particle $< 1 \mu\text{m}$ size.

총 납농도가 $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이하인 경우에는 $1 \mu\text{m}$ 이하 입자가 차지하는 비율의 변화가 컸다.

Hodgkins(1990)는 축전지 제조업을 대상으로 총 납과 총납에 대한 $1 \mu\text{m}$ 이하 입자농도가 차지하는 비율의 관계를 $y = 141 x^{-1.16}$ ($n=40$, p 와 r 은 제시되지 않음)으로 나타냈다(Hodgkins, 1990). 이 관계식에 따르면 총 납농도 중에서 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자농도는 일정하다는 것을 나타낸다. 즉, 총납의 농도가 증가하여도 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자가 차지하는 농도는 $1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일정하다고 하여 본 연구 결과와는 달랐다.

2) 총 납농도와 $1 \mu\text{m}$ 이하 크기 농도와의 관계

표 5와 그림 4는 업종별로 총 납농도와 $1 \mu\text{m}$ 이하 크기의 농도와의 관계를 나타낸 것이다. 총 납농도와 $1 \mu\text{m}$ 이하 크기 농도와의 관계를 업종별로 구분하여 보면 서로 차이가 있었다. 2차 제련업에서는 그 관계가 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이것은 납입자 크기가 작은 때문으로 판단된다. 방열기, 축전지 그리고 리사지 제조업은 납의 총 농도와 $1 \mu\text{m}$ 이하 크기 농도와의 관계는 유의한 것으로 나타났다.

모든 업종을 종합한 총 농도와 $1 \mu\text{m}$ 이하의 농도

와의 관계는 $\log Y = 0.06 + 0.46 \log X$ ($n=119$, $r^2=0.44$, $p=0.0001$)였다.

3) CPA모델과 비교

OSHA CPA모델의 가정은 납의 총농도 중에 1 μm 이하의 크기 농도는 항상 일정하며 그 농도는 12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이라고 가정하였다. 이것은 12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지만 1 μm 이하의 크기로 구성되고 그 이상의 농도에서는 폐포에 침착가능성이 없는 1 μm 이상의 크기로 구성된다는 것이다(Froines 등, 1986; Ulenbelt 등, 1990)

Hodgkins(1990)는 총 납농도 중에서 1 μm 이하의

입자농도는 항상 일정하며 그 농도는 1.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 라고 하였다. CPA모델의 가정과 일치하는 점은 총 납농도 중에서 1 μm 이하 입자 농도는 일정하다는 점이다(Hodgkins, 1990).

본 연구에서는 총 납농도 중에서 1 μm 이하의 입자 농도는 일정하지 않았고 총납의 농도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타나 CPA모델의 가정이나 Hodgkins(1990) 연구와는 차이가 있었다(그림 4와 5참조). 본 연구와 Hodgkins(1992) 연구와는 연구 대상 업종과 총 납농도의 범위가 차이가 있었다. 총 납의 농도범위가 본 연구에서는 7 mg/m^3 까지로 높은 데 비해 Hodgkin은 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 낮은 농도였었다.

본 연구결과에 의하면 총납의 농도가 증가하면 1 μm 정도의 입자크기가 작은 납의 농도도 증가하므로 폐포의 침착가능성은 높아진다고 할 수 있다. 따라서 총납에 의한 허용농도의 설정만으로는 근로자의 납에 대한 노출을 효율적으로 관리할 수 없다고 판단된다.

4) ACGIH의 흡입성, 흉곽성 및 호흡성 납농도

표 6은 ACGIH에서 입자 크기별 시료채취기구의 기준에 따라 납의 총 농도를 흡입성, 흉곽성, 호흡성 농도로 각각 구분하였다.

흡입성 납농도는 방열기 제조업의 16.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 제외하고는 다른 업종은 허용농도를 훨씬 초과하였다. 2차 제련업은 457.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 축전기 제조업은 239.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 리사지 제조업은 195.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 흉곽성농도도 방열기 제조업을 제외한 다른 업종에서는 허용농도를 훨씬 초과하였다. 호흡성 농

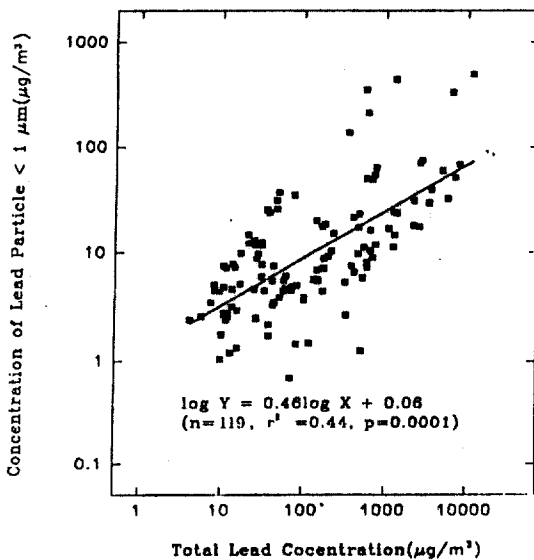


Fig. 4. Relationship between lead concentration <1 μm particle size and total lead concentration.

Table 5. Relationship between OSHA Respirable Concentration(Lead < 1 μm Size) and Total Lead Concentration

Industry	Dependent variable = Lead < 1 μm size				
	Model	α	β	r^2	p
Secondary smelting	$\log y = 1.93 \log x - 3.46 (n=6)$	1.24	0.68	0.38	0.1957
Radiator manufacturing	$\log y = 0.75 \log x - 0.13 (n=43)$	0.75	0.25	0.48	0.0001
Battery manufacturing	$\log y = 0.55 \log x - 0.31 (n=44)$	0.06	0.28	0.64	0.0005
Litharge manufacturing	$\log y = 0.76 \log x - 0.96 (n=26)$	0.09	0.39	0.74	0.0001
Total	$\log y = 0.46 \log x + 0.06 (n=119)$	0.05	0.42	0.44	0.0001
Hodgkins(1990)	$y = -0.005 x + 1.12 (n=40, \text{battery})$				

α = Standard Error of Slope, β = Standard Error of intercept

Table 6. Lead Concentrations of Inhalable, Thoracic and Respirable Particulate Mass Defined by ACGIH.

Industry	Operation	IPM		TPM		RPM	
		GM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD	GM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD	GM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD
Secondary smelting							
	Furnace	645.7	1.5	512.9	1.2	446.7	1.2
	Scrap and furnace	323.6	1.9	166.0	2.2	97.7	2.7
	Subtotal	457.1	1.8	295.1	2.2	208.9	2.8
Radiator manufacturing							
	Dipping	10.5	1.8	7.1	1.7	5.3	1.7
	Soldering	17.0	2.2	12.0	2.2	8.5	2.2
	Soldering after leak test	22.4	2.2	19.1	2.1	16.2	2.2
	Subtotal	16.2	2.1	11.5	2.1	8.3	2.2
Battery manufacturing							
	Remelt	97.7	2.8	46.8	2.3	15.5	1.8
	Grid production	60.3	2.0	25.1	1.9	8.9	2.1
	Paste	182.0	3.9	85.1	3.2	26.3	2.8
	Encapsulation	537.0	2.2	218.8	1.9	57.5	1.6
	Caste on strap	371.5	5.4	151.4	4.9	42.7	4.1
	Soldering	173.8	3.4	81.3	3.2	39.8	2.8
	Grinding	3467.4	1.3	1548.8	1.3	398.1	1.3
	Subtotal	239.9	4.7	107.2	4.3	33.9	3.7
Litharge manufacturing							
	Reaction	245.5	7.1	123.0	7.1	44.7	6.0
	Cracking	26.9	3.4	14.8	2.6	8.7	2.1
	Packing	269.2	4.1	81.3	2.4	24.0	1.7
	Subtotal	195.0	6.8	91.2	6.3	33.1	5.1
	Total	89.1	6.6	47.9	5.7	22.4	4.4

도는 2차 제련업의 경우 208.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 허용농도를 4배 이상 초과하고 었다.

2차 제련업에서 발생되는 납입자의 크기별 농도특성을 볼 때 인체흡수 농도 및 가능성이 다른 업종에 비해 매우 높다고 판단된다.

표 7은 대수변환한 총 납농도와 흡입성, 흉곽성, 호흡성 농도와의 관계를 업종별로 제시한 것이다. 총 납농도와 흡입성, 흉곽성, 호흡성 농도와는 모두 유의한 상관관계를 보였다($p=0.0001$). 총 농도가 증가 함에 따라 흡입성, 흉곽성, 호흡성 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 업종별 관계모델은 측정된 총 납농도로 부터 관심이 되는 입자부분의 농도를 예측하는데 이용

할 수 있다. 축전지 제조업에서 총납 농도와 ACGIH의 호흡성입자농도와의 관계는 $\log Y = 0.76\log X - 0.40$ ($p=0.0001$)이고 설명력은 89%로서 다른 업종에 비해 높았다.

다. OSHA와 ACGIH의 호흡성 농도의 비교

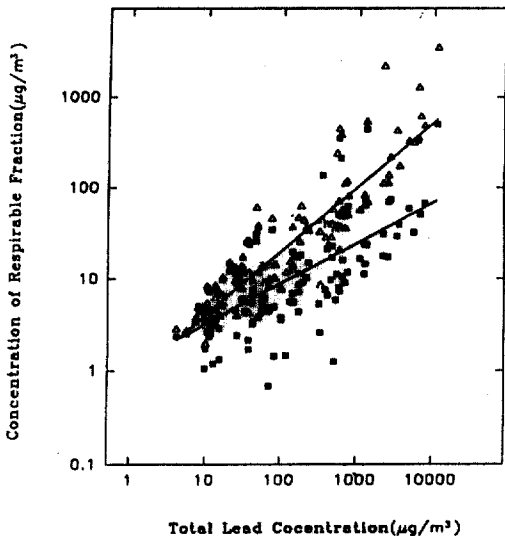
표 8은 OSHA와 ACGIH에서 정의한 호흡성 농도가 총 납농도에서 차지하는 비율을 비교한 것이다. 그림 5는 두 기관에서 정의한 호흡성 농도와 총 농도와의 회귀모델을 비교한 것이다. 축전지 제조업은 총 납농도 중에서 OSHA에서 정의한 1 μm 이하 크기 농도의 함유비율은 5.3%이고 ACGIH는 10.9%이었다. 리사지 제조업은 총 납농도 중에서

Table 7. Relationship between Total Lead Concentration and Concentration of ACGIH Classified Fraction (Independent, X=Total Lead, Dependent, Y=IPM,TPM,RPM)

Industry	Relationship between Total Lead and		
	IPM	TPM	RPM
Secondary smelting	$y = 1.04x - 0.21$ ($r^2=0.96, p=0.0005$)	$y = 1.20x - 0.86$ ($r^2=0.72, p=0.0326$)	$y = 1.45x - 1.69$ ($r^2=0.61, p=0.0650$)
Radiator manufacturing	$y = 0.98x - 0.05$ ($r^2=0.99, p=0.0001$)	$y = 0.90x - 0.10$ ($r^2=0.86, p=0.0001$)	$y = 0.77x - 0.08$ ($r^2=0.59, p=0.0001$)
Battery manufacturing	$y = 0.98x - 0.11$ ($r^2=0.98, p=0.0001$)	$y = 0.88x - 0.23$ ($r^2=0.97, p=0.0001$)	$y = 0.76x - 0.40$ ($r^2=0.89, p=0.0001$)
Litharge manufacturing	$y = 0.10x - 0.17$ ($r^2=0.95, p=0.0001$)	$y = 0.99x - 0.44$ ($r^2=0.93, p=0.0001$)	$y = 0.87x - 0.53$ ($r^2=0.80, p=0.000001$)
Total	$y = 0.96x - 0.06$ ($r^2=0.98, p=0.0001$)	$y = 0.87x - 0.12$ ($r^2=0.95, p=0.0001$)	$y = 0.71x - 0.09$ ($r^2=0.80, p=0.0001$)

y = log(total lead), $\mu\text{g}/\text{m}^3$

x = log(IPM, TPM or RPM), $\mu\text{g}/\text{m}^3$



△:ACGIH-RPM(log Y=0.71log X-0.09, $r^2=0.80, p=0.0001$)
 ■:OSHA-Respirable(log Y=0.62log X+4.61, $r^2=0.57, p=0.0001$)

Fig. 5. Relationship of total and respirable lead concentration(OSHA's and ACGIH's definitions respectively).

OSHA의 호흡성 농도의 함유율은 4.3%이고 ACGIH는 16.5%로 차이가 있었다. 축전기 제조업과 리사지 제조업은 두 기관에서 정의한 호흡성 농도 간에 유의한 차이가 있었다($p=0.0001$).

2차 제련업은 총농도 중에 OSHA의 호흡성 농도

의 함유비율은 24.5%이고 ACGIH는 43.5%이었다. 그리고 방열기 제조업은 총 납농도에 대한 두 기관에서 정의한 호흡성 농도의 함유율은 41.3%와 48.9%로서 비슷하게 나타났다. 방열기 제조업과 2차 제련업은 ACGIH의 호흡성 농도가 다소 높은 것으로 나타났으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p=0.2720$ 및 0.2394). 따라서 납입자의 직경이 다른 업종에 비해 작았던 방열기 제조업과 2차 제련업은 두 기관에서 정의한 호흡성 농도의 함유비율이 비슷하다고 할 수 있다.

OSHA와 ACGIH에서 정의한 호흡성 농도의 총 농도에 대한 함유율을 비교해 본 결과, 발생되는 납입자의 직경이 작을 수록 두 기관에서 정의한 호흡성 농도의 차이는 작았다.

그림 5를 보면 두 기관에서 정의한 호흡성 농도는 총농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에서는 기울기가 비슷하였다. 그러나 총 납농도가 증가하면서 두 기관에서 정의한 호흡성농도의 차이는 커지고 있었다. 즉, ACGIH의 호흡성 농도 증가가 보다 큰 것으로 나타났다

IV. 요약 및 결론

공기중 납의 허용농도는 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 규정되어 있으며 이것은 납 총량의 농도이다. 납의 흡입에 중요한 영향을 미치는 요인인 납입자의 크기가 고려되

Table 8. Comparison of ACGIH Respirable Fraction and OSHA's Small Particle(< 1 μm)

Industry	Operation	Total Lead		Respirable Fraction(%)	
		GM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD	OSHA	ACGIH
Secondary smelting					
	Furnace	758.6	1.6	44.0 \pm 16.5	61.30 \pm 18.0
	Scrap and furnace	436.5	1.8	5.1 \pm 3.5	25.30 \pm 17.0
	Subtotal	575.4	1.7	24.5 \pm 23.8	43.3 \pm 25.6
Radiator manufacturing					
	Dipping	12.9	1.9	37.43 \pm 15.0	42.4 \pm 18.8
	Soldering	20.4	2.1	40.18 \pm 19.6	48.6 \pm 23.8
	Soldering after leak test	25.1	2.2	63.00 \pm 18.3	67.5 \pm 18.3
	Subtotal	19.1	2.1	41.3 \pm 19.4	48.9 \pm 22.5
Battery manufacturing					
	Remelt	138.0	2.8	5.5 \pm 3.8	12.5 \pm 6.2
	Grid production	85.1	2.0	6.3 \pm 4.1	11.9 \pm 7.1
	Paste	257.0	4.1	4.9 \pm 3.0	11.9 \pm 6.8
	Encapsulation	776.3	2.4	2.4 \pm 1.5	8.8 \pm 6.7
	Caste on strap	537.0	5.5	3.1 \pm 2.8	8.6 \pm 4.3
	Soldering	309.0	3.2	14.2 \pm 15.1	12.8 \pm 1.9
	Grinding	5011.9	1.4	0.9 \pm 0.3	8.4 \pm 3.1
	Subtotal	354.8	4.7	5.3 \pm 6.4	10.9 \pm 5.7
Litharge manufacturing					
	Reaction	338.8	7.2	4.4 \pm 3.6	16.2 \pm 10.1
	Cracking	36.3	3.6	6.6 \pm 3.8	26.9 \pm 13.5
	Packing	389.1	4.4	2.4 \pm 1.7	9.9 \pm 7.6
	Subtotal	269.2	6.9	4.3 \pm 3.5	16.5 \pm 10.7
	Total	117.5	7.1	19.1 \pm 21.8	27.5 \pm 23.5

지 않은 것이다. 업종별로 발생되는 납입자의 입경별 분포 특성을 알아 보고자 본 연구를 실시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 납입자의 평균질량중위직경 (Aerodynamic Mass Median Diameter, MMD)은 납축전지 제조업이 14.1 m, 리사지 제조업이 15.1 m로서 가장 크며, 2차 축전지 제련업은 4.9 m 그리고 방열기 제조업은 1.3 m로 나타났다. 납축전지와 리사지 제조업의 질량중위직경사이에는 통계적으로 유의한 차이가 없었고($p>0.05$), 2차 제련업과 방열기 제조업의 직경은 다른 업종보다 유의하게 낮았다($p<0.05$).

2. 업종별 총 납입자의 기하평균농도를 보면 2차 제련업에서 575 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고 축전지 제조업에서는 355 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 그리고 리사지 제조업에서는 269 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 방열기 제조업을 제외하고는 모든 업종에서 허용농도 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 방열기 제조업에서만 다른 업종보다 유의하게 낮았다($p<0.05$).

3. 납입자의 크기가 1 μm 이하인 납의 농도 (OSHA-Respirable)를 보면, 2차 제련업에서 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 허용농도인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 총 납의 농도(X)와 1 μm 이하의 입자 농도(Y)와의 관계는 $\log Y = 0.46 \log X + 0.06$ ($n=119$, $r^2=0.44$)

였다.

OSHA와 ACGIH에서 정의한 호흡성입자 농도간에는 축전지 제조업과 리사지 제조업에서 유의한 차이가 있었고($p=0.0001$), 방열기 제조업과 2차 제련업은 차이가 없었다. ($p=0.2720$ 및 $p=0.2394$). 발생되는 납입자의 질량중위직경이 작을 수록 두 기관에서 정의한 호흡성입자 농도간에는 차이가 작았다.

4. 총 납농도 중 ACGIH의 정의에 의한 호흡성입자가 차지하는 비율은 2차 제련업에서 43.3%, 방열기 제조업에서 48.9%로 축전지 제조업의 10.9%, 리사지제조업의 16.5%보다 높았다.

5. 총납의 농도와 흡입성, 흡광성, 호흡성입자 농도와의 상관관계는 모두 유의하였다($p=0.0001$). 축전지 제조업에서 총납 농도(X)와 ACGIH의 호흡성입자 농도(Y)와의 관계는 $\log Y = 0.76 \log X - 0.40$ ($n=119$, $r^2=0.89$)였다. 이러한 상관 관계모형을 이용하여 총납 농도로 부터 흡입성, 흡광성, 호흡성 및 1 μ m이하 크기의 납입자 농도들을 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

American Conference of Governmental Industrial Hygienists : *Particle Size Selective Sampling in the Workplace*. Ann. Am. Conf. Gov. Ind. Hyg. 11:1(1984).

American Conference of Governmental Industrial Hygienists : *1994-1995 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. ACGIH. ISBN : 1-882417-16-2(1994).

Bartley, D.B. and L.J. Domeny : *Critique of 1985 ACGIH Report on Particle Size-Selective Sampling in the Workplace*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 47(8):443-447(1985).

Chavalitnitikul, C., L. Levin and L. C. Chen : *Study and Models of Total Lead Exposures of Battery Workers*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 45(2):802(1984).

Froines, J.R., W.V. Liu, W.C. Hinds, and D.H. Wegman : *Effect of Aerosol Size on the Blood Lead Distribution of Industrial Workers*. Am. J. Ind. Med. 9:227(1986).

Harrison, R.M. and C.R. Williams : *Characterization of Airborne Heavy Metals Within Primary Zinc-Lead Smelting Works*. Environ. Sci. Technol. 15(10):1197(1981).

Hewett, P. : *Limitations in the Use of Particle Size-Selective Sampling Criteria in Occupational Epidemiology*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 6(4):290-300(1991).

Hinds, W.C., W.V. Liu, and J.R. Froines : *Particle Bounce in a Personal Cascade Impactor : A Field Evaluation*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 46:517(1985).

Hodgkins, D.G. : *The Effect of Lead-in-Air Particle Size on Lead-in-Blood Levels of Lead-Acid Battery Workers*. Doctoral Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan(1990).

International Standards Organization : *Size Definitions for Particle Sampling. Recommendations of Ad Hoc Working Group Appointed by Committee TC 146 of the International Standards Organization*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 42:A64-A68(1981).

Karim, M.A.A., A.S. Hamed, Y.A.A. Elhaimi and Y. Osman : *Effects of Exposure to Lead among Lead-Acid Battery Factory Workers in Sudan*. Arch. Environ. Health 41(4):261-265(1986).

King, E., A. Conchie, D. Hiatt and B. Milligan : *Industrial Lead Absorption*. Ann. Occup. Hyg. 22:213-239(1979).

Kononen, D.W., J.K. Halline, and K.R. Bivol : *Air Lead Exposures and Blood Levels Within a Large Automobile Manufacturing Workforce, 1980-1985*. Arch. Environ. Health 44(4):244-251(1989).

Knight, G. : *Development of Impactor Size-selective Dust Samplers at the Elliot Laboratory*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 52(4):164-171(1991).

Lodge, J.P. and T.L. Chan : *Cascade Impactor Sampling and Data Analysis*. American Industrial Hygiene Association. ISBN #0-932627-24-2(1986).

Matte, T.D., J.P. Figueroa, G. Burr, J.P. Flesch, R.A. Keenlyside, and E.L. Baker : *Lead Exposure Among Lead-Acid Battery Workers in Jamaica*. Am. J. Ind. Med. 16:167-177(1989).

Rubow, K.L., V.A. Marple, J. Olin, M.A. McCawley : *A Personal Cascade Impactor: Design, Evaluation and Calibration*. Am. J. Ind. Med. 48(6):532-538(1987).

Soderholm, S.C. : *Why Change ACGIH's Definition of Respirable Dust ?* Appl. Occup. Environ. Hyg. 6(4):248-250(1991).

Ulenbelt, P., M.E.G.L. Lumens, H.M.A. Geron, R.F.M. Herber, and S. Broersen : *Work Hygienic Behaviour as Modifier of the Lead air-lead Blood Relation*. Occup. Environ. Health 62:203-207(1990).

Vincent, J.H. and L. Armbruster : *Short Communication on the Quantitative Definition of the Inhalability of Airborne Dust*. Ann. Occup. Hyg. 24(2):245-248(1981).