

수은 폭로 근로자들의 생물학적 폭로지표와 호흡량 및 폭로 기간과의 상관성에 관한 연구

박혜경 · 박종태 · 이은일 · 엄용태

고려대학교 의과대학 예방의학교실

= Abstract =

The Study on the Relationships Between Inhalation Volume and Exposure Duration and Biological Indices of Mercury among Workers Exposed to Mercury

Hye Kyung Park, Jong Tae Park, Eun Il Lee, Yong Tae Yum

Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Korea University

This study was conducted to evaluate the relationships between the environmental exposure and biological monitoring among workers exposed to metallic mercury. We interviewed each workers to get the medical history including previous hazardous occupational history. We measured the respiration rate and tidal volume of each worker in order to calculate the 8-hour inhaled mercury of workers. And we wanted to evaluate the effect of exposure duration to mercury concentrations in blood and urine as biologic exposure indices of metallic mercury. The regression and correlation analysis were done to the relationships of 8-hour inhaled mercury and mercury in blood and urine.

The results were as follows;

1. The subjects were 35 fluorescent lamp manufacturing workers. The mean age of subjects was 24.8 years old, and the mean work careers of workers was 1.19 years. 89% of the total was consisted man.
2. The correlation coefficients between 8-hour inhaled mercury and mercury in blood and urine were higher than that of only considered air mercury concentration.
3. The correlation coefficients of 8-hour inhaled mercury and mercury in blood and urine were above 0.9 in workers who had exposed to mercury more than 1 year.
4. The R-square value and -value of regression analysis between the 8-hour inhaled mercury and mercury in blood and urine was also higher in workers who had exposed to mercury over 1 year than in workers who had less than 1 year working experience.

The important results of this study were that relationships between the 8hr-inhaled mercury and mercury in blood and urine was very high than that with air mercury concentration only. And the results were very apparent when considering workers 1 year or more. Therefore we concluded that the work career and respiratory volume of each individuals should be considered in evaluation the results of biological monitoring of worker-exposed to metallic mercury.

Key words: mercury, work career, 8-hr inhaled mercury, biological indices of mercury

서 론

수은 화합물(Mercurous Compound, HgCl)을 이뇨제로서 의료에 사용하기 시작하면서 나타난 수은 중독의 증상과 증후에 대해 1557년 프랑스의 Jean Fernel이 처음 기술한 이래로 수은은 직업병을 이유로 법률적인 조치를 취하게 된 최초의 물질이 되었지만(Zenz C, 1988), 아직까지도 산업화 사회에서 중독문제를 야기시키는 흔한 금속으로 알려져 있다.

외국에서도 빈번한 수은중독 사례가 보고되고(Birdstrup 등, 1951; Trachtenberg, 1969; Smit 등, 1975; Selffer와 Neudert, 1975; Doull 등, 1980; Hryhorczuk, 1982; Shapiro와 Cornblath, 1982), 우리나라의 경우도 1988년 1월 모 형광등업체의 수은 폭로 근로자들에게서 집단으로 수은중독이 발생하였으며(장미영 등, 1989), 현재도 조명기구, 온도계, 체온계 및 화학제품제조 등의 각종 산업장에서 일하고 있는 수은 취급 근로자에서의 중독문제는 산업보건학적인 면에서 간과할 수 없는 문제가 되고 있다. 또한 산업장 시료의 채취와 분석이 근로자의 옷이나 오염된 피부 등 미세환경에 의한 영향을 받을 수 있음에도 불구하고(Bell 등, 1973; Stopford 등, 1978) 과거 연구들은 이러한 영향을 고려하지 않았으며, 현재도 이러한 미세환경을 고려하지 않는 것이 일반적인 상황이다.

금속수은의 폭로와 관련하여 공기중 농도와 인체내에서의 흡수, 축적 및 배설에 대한 대사모델

로서 유용한 것은 아직 없지만, 우리나라에서 직업성 폭로가 문제시되고 있는 금속수은은 그 흡기와 분진의 호흡기를 통한 체내 흡수가 80% 이상으로 대부분을 차지하고, 주 배설 경로는 소변을 통해서 이루어지며 대변이나 땀으로도 배설이 된다. 소변을 통한 수은의 배설은 수은폭로량과 관계가 있으며 여러가지 요소에 의해 각 개인마다 많은 차이를 보일 수 있지만 공기중 수은농도 0.05 mg/m³에서 최소 6개월동안 주당 5일간의 직업적인 폭로가 있었던 근로자들은 요중 수은농도가 평균 약 150 µg/L로 나타난다(WHO, 1976; Zenz C, 1988).

Ladou(1990)가 정의한 생물학적 모니터링이란 폭로평가의 목적으로 생물학적 시료에서 화학물질, 대사물질, 또는 유해하지 않은 생화학적인 영향을 측정하는 것이다. 이 개념은 공기중 유해물질을 측정하는 환경측정방법에 비해 피부나 음식을 통한 폭로도 반영할 수 있고, 개인마다 다른 화학물질의 섭취, 흡수, 생화학적 대사(Biotransformation), 배설 등을 반영할 수 있으며, 또한 환경개선에 대한 평가에도 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 생물학적 모니터링에서는 체내에 들어온 물질을 측정하는 것이므로 폭로(Exposure) 보다는 양(Dose)에 가까운 것으로 생각할 수 있다. Checkoway 등은 "양(Dose)"을 특정 시간동안 생물학적 표적에 있는 물질의 양으로, "Burden"은 일정 시간에 신체, 더 자세하게 표현하면 표적장기나 조직에 존재하는 물질의 양으로 정의하였다. 양(Dose)은 폭로 정도뿐 아니라 투입경

로, 표적장기에서 흡수(Uptake)되는 정도, 대사, 제거율(Clearance), 잔류시간(Residence Time), 숙주요인(체내 지방, 운동량, 연령, 성, 건강상태) 등에 영향을 받는다.

금속수은에 폭로된 근로자들의 환경농도와 소변내 수은농도와는 1:1에서 1:2.6 정도의 비율을 보인다고 하므로(Ehrenbeg, 1991), 소변내 수은농도를 생물학적 모니터링의 기초로 하고 있으며, 기타 땀이나 침에 의한 배설량은 뚜렷한 가치가 없으나 심호흡을 하고 있는 근로자에게는 땀을 통한 배설이 소변을 통한 것보다 많다는 연구도 있다(Lovejoy, 1974).

본 연구는 형광등 제조에 수은을 사용하고 있는 두 업체의 근로자들을 대상으로, 동일한 작업장내에서 작업을 하면서 동일한 공기중 수은농도에 폭로된다고 해도 각 근로자들의 작업장도나 호흡기능의 개체간 차이에 의해 실제 폭로량이 달라질 수 있다는 전제하에 개개인의 수은 폭로량과 혈액과 24시간 소변내의 수은량과의 관련 모델을 제시하고자 수행되었다. 근로자들의 호흡수와 1회 호흡량 및 작업시간을 고려해준 8시간 수은 흡입량이라는 새로운 변수를 산출하여 이 환산치와 혈액 및 24시간 소변내의 수은농도와의 관련성을 알아보고, 단지 공기중 수은농도만을 일괄적으로 적용해 주었을 경우와 비교해 보고자 하였다. 또한 수은 폭로의 생물학적 지표들과 폭로 기간과의 관련성을 보기 위해 대상 근로자들을 근속 년수 1년을 기준으로 구분하여 두 변수간의 상관성 및 설명력의 변화를 보고자 하였다.

연구대상 및 방법

1. 연구 대상

경기도 지역에 위치한 형광등 제조업체 2개소를 대상으로 비교적 폭로기간이 짧고, 이전 유해작업부서 근무경력이 없는 남녀 근로자 19명과 16명, 총 35명을 대상으로 하였으며, 성별로는 남자가 89%였고, 연령별로는 20대가 71%로 가장 높은 구성비를 보였다(Table 1).

Table 1. Distribution of the study population by company (): %

	Company			
	A		B	
	M	F	M	F
< 20	4 (11.4)			
20 ~ 29	14 (40.0)		7 (20)	4 (11.4)
> 29	1 (2.9)		5 (14.3)	

No. of Subject : 35

두 업체에서 각각 5일과 2일간에 걸쳐 계속적으로 24시간 소변, 개인 수은폭로량과 혈액 등의 시료 채취 및 호흡수, 1회 호흡량 등의 이학적 검사를 실시하였다.

2. 연구 방법

1) 일반적 검사

- ① 신체 계측: 각 연구대상 근로자들의 신장과 체중을 측정하였다.
- ② 병력 조사: 각 업체의 대상 근로자 전원에 대해 조사 첫날 면담을 통하여 신장질환과 호흡기계 질환 등의 과거력과 가족력 및 근무경력 등을 확인하였다.
- ③ 호흡수(Respiratory Rate) 측정: 연구에 필요한 이학적 검사로서, 호흡수는 근로자들이 작업중인 상태에서 흉곽의 운동상태를 살펴 매일 1일 4회, 측정시마다 15~20초 동안 측정 하여 분당 호흡수로 환산해 주었다. 근로자들은 1일 근무하는 동안 거의 동일한 반복적인 작업을 하게 됨에 따라 측정 간격은 오전, 오후 2회씩 작업을 시작한 지 1시간과 3시간이 지난 시점을 기준으로 측정하였다.
- ④ 1회 호흡량(Tidal Volume): 근로자들로 하여금 충분한 휴식을 취하게 한 후 Spiro Analyzer(ST-250, FUKUDA SANGYO)를 이용하여 폐기능 검사를 2회 이상 실시하여 얻어진 1회 호흡량의 평균값을 취하였다.

⑤ 24시간 소변검사: 대상 근로자들에게서 그 날 그날의 일시뇨를 채취하기 위하여 연구자는 근로자들이 요의를 느낄 때마다 연구자에게로 와서 Polyethylene 용기를 받아 소변을 담아 오도록 하였다. 이렇게 모아진 일시뇨에 각각 채취된 시각을 적고, 각 일시뇨의 소변량을 측정하였다. 이렇게 각 용기에 모아진 일시뇨들을 모두 모아 Mass Cylinder에 넣고 충분히 섞은 후 24시간 뇨 시료로 사용하였다.

⑥ 혈액검사: 두 사업장 모두 연구가 끝나는 날 작업종료를 전후하여 근로자들에서 혈액을 채취하여 혈중 수은농도 및 일반 생화학검사를 실시하였다.

2) 공기중 수은농도 측정

대상자로 선정된 근로자들에게 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health, USA, 1989) Method 6009에 준하여 개인시료포집기(Personal Air Sampler, Gilian, Instru, Corp., USA)에 Hopcalite 흡착제를 부착하여 근로자들이 호흡하는 위치에서 유속 0.15~0.25 LPM으로 5~6시간 동안, A 업체는 5일간, B 업체는 2일간 채취하였다.

50 ml Volumetric Flask에 공기 시료를 채취한 Hopcalite 흡착제 및 앞층 유리솜을 함께 집어넣고 conc-HNO₃와 conc-HCl을 가한다. 흡착제가 완전히 용해될 때까지 1시간 정도 방치한 후 탈이온수를 사용하여 50 ml로 희석한다. 상기 용액 일정량을 100 ml Volumetric Flask에 넣고 탈이온수로 희석한 후 원자흡광광도계의 Cold Vapor Generator(IL-551 ENGLAND)에서 10% SnCl₂로 수은을 환원시켜 파장 253.7 nm에서 측정하였다. 이때 공기를 통과시키지 않은 흡착제는 모든 시료와 동일하게 처리한 후 Blank로 하여 농도 계산시에 이를 보정하였다.

3) 8시간 수은 흡입량(8-hr Inhaled Mercury)

이 연구의 분석을 위해 8시간 수은 흡입량이라

는 환산치를 산출하였는데, 이는 개인 시료포집기를 이용하여 측정된 liter 당 수은농도에 개인의 1회 호흡량(Tidal Volume)과 분당 호흡수 및 시간수를 곱한 값으로 구하였다. 이렇게 구해진 값은 8시간을 기준으로 근로자들이 작업중 흡입한 수은증기의 절대량이 되며, 이 값의 단위는 mg으로 표시된다.

$$8\text{-hr Hg}_1^+ = A_{Hg^{++}}(\text{mg}/\text{m}^3) * T.V(\text{ml}) * \text{분당 호흡수}(\text{회}/\text{min}) * 8\text{hr} * 60\text{ min}/\text{hr} * 0.001$$

$$+ 8\text{-hr Inhaled Mercury}$$

$$+ \text{Geometric Mean of Mercury in the Air}$$

4) 요중 및 혈중 수은농도 측정

각 근로자들의 24시간 소변 시료중 5ml를 취하여 conc-HNO₃ 2ml를 첨가하고 Microwave Digestion System(QESTRON, USA)을 사용하여 유기물을 분해하였다. 이때 용기내 최고 압력은 160psi, 최고 마이크로파력은 900 W이며 온도는 180℃였다. 분해가 완료된 후 -20℃의 냉동실에서 용기를 냉각시키고 탈이온수를 이용하여 정확히 100ml로 희석한다. 이 용액을 원자흡광광도계의 Cold Vapor Generator(IL-551, ENGLAND)에서 10% SnCl₂로 수은을 환원시켜 파장 253.7 nm에서 측정한다.

측정한 각 요중 수은농도는 요 비중으로 보정하였다.

혈중 수은농도는 요중 수은분석방법과 동일한 과정을 거친 후 희석과정에서 탈이온수를 이용, 50ml로 희석한다. 이 용액을 원자흡광광도계의 Cold Vapor Generator(IL-551, ENGLAND)에서 10% SnCl₂로 수은을 환원시켜 파장 253.7 nm에서 측정한다.

3. 분석 방법

1) 연구 대상자의 구분

① 업체별

② 폭로군별: ACGIH의 TLV-TWA 기준(0.05 mg/m³)

③ 폭로기간별: 근속 년수 1년 기준

2) 상관분석 및 회귀분석

위의 대상구분별로 생물학적 폭로지표인 요중 및 혈중 수은농도와 공기중 수은농도 또는 8시간 수은흡입량과의 상관분석과 회귀분석을 실시하였다.

결 과

1. 연구 대상자의 일반적 특성 및 시료중 평균 수은농도

조사 대상자를 업체별로 구분하였을 때의 평균 연령은 A, B업체 각각 22.8세와 27.1세였으며, 평균 근속기간은 0.58년과 1.9년이었다. 시료 분석 결과, 두 업체의 대상 근로자들이 폭로된 공기중 수은농도의 평균치는 0.068, 0.021 mg/m³, 혈중 평균 수은농도 5.526, 1.555 μg/dl, 요중 평균 수은농도 232.591, 42.499 μg/L로 나타났다(Table 2). 이 때 공기중 수은의 평균 농도는 단변량분석에 의한 분포 양상에 따라 기하평균을 사용하였다.

폭로 정도에 따른 영향을 알아 보고자 연구 대상자들을 작업장 환경농도의 공기중 수은농도 한계치(ACGIH, TLV-TWA)를 기준으로 구분하여 0.05 mg/m³ 이상의 고폭로군과 0.05 mg/m³ 미만의 저폭로군으로 구분하였을 때 각 군에 속한 근로자들의 평균 연령은 21.1세와 25.9세였고, 평균

근속 년수는 0.58년과 1.38년으로 고폭로군에서 평균 연령과 평균 근속 년수 모두 저폭로군에 비해 낮게 나타났다. 각 군별로 근로자들의 혈중, 요중 평균 수은농도를 비교한 결과에서는 혈액은 6.744와 2.498 μg/dl, 소변에서는 277.880과 92.817 μg/L로 고폭로군에서 혈중과 요중 수은농도 모두 유의하게 높은 농도를 나타냈다(Table 3).

근속 년수와 수은 폭로에 대한 생물학적인 지표들 사이의 관련성을 살펴 보고자 대상자들을 근속 년수 1년 미만인 군과 1년 이상인 군으로 나누어 비교하였다. 평균 근속 년수는 고폭로군과 저폭로군에서 각각 0.46년과 2.8년이었고, 평균 연령은 23.5세와 27.2세로 나타났다. 그러나 혈중과 요중 평균 수은농도를 비교해 본 결과 두 군 사이에 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다(Table 4).

2. 호흡량을 고려한 수은 폭로량과 다른 요인들과의 관계

작업중인 근로자들의 호흡수를 측정하여 분당 호흡수로 환산해 준 값들의 매일매일의 평균치를 Repeated Measure ANOVA를 이용하여 분석한 결과 조사기간중 일간 변화나 업체간 변이를 보이지 않았으므로(P > 0.05) (Table 5), 개개인의 호흡수 대표값은 조사기간중 측정된 각 개인의 호흡수 평균값을 분석에 이용하기로 하였다. 또한 분당 호흡수는 남녀간에 통계적으로 유의한

Table 2. General characteristics of the study population (): Standard Deviation

Company	No.	Age (year)	Work Career* (year)	A _{Hg} * (mg/m ³)	B _{Hg} * (μg/dl)	U _{Hg} * (μg/L)
A	19	22.789 (8.052)	0.579 (0.333)	0.068 (0.109)	5.526 (2.731)	232.591 (181.729)
B	16	27.125 (5.045)	1.921 (1.642)	0.021 (0.014)	1.555 (0.634)	42.499 (28.306)

A_{Hg}: Geometric Mean of Mercury Concentration in Air

B_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Blood

U_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Urine

*: P < 0.001

Table 3. Mean mercury concentration of air, blood, urine and mean values of age, and work career by exposure group (): Standard Deviation

Exposure Group	No.	Age (year)	Work Career* (year)	A _{Hg} * (mg/m ³)	B _{Hg} * (μg/dl)	U _{Hg} * (μg/L)
High*	8	21.125 (1.553)	0.563 (0.398)	0.103 (0.145)	6.744 (3.113)	277.880 (218.160)
Low**	27	25.852 (7.740)	1.380 (1.426)	0.024 (0.012)	2.498 (1.597)	92.817 (101.520)
P-Value		< 0.01	< 0.05	> 0.05	< 0.01	< 0.05

* Geometric Mean of Mercury Concentration in Air 0.05 mg/m³ or more

** Geometric Mean of Mercury Concentration in Air below 0.05 mg/m³

A_{Hg}: Geometric Mean of Mercury Concentration in Air

B_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Blood

U_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Urine

Table 4. Mean mercury concentration of air, blood, urine and mean values of age, and work career by work career group (): Standard Deviation

Exposure Duration	No.	Age (year)	Work Career* (year)	A _{Hg} * (mg/m ³)	B _{Hg} * (μg/dl)	U _{Hg} * (μg/L)
< 1	23	23.522 (7.433)	0.457 (0.220)	0.059 (0.101)	4.367 (2.621)	165.225 (160.322)
>= 1	12	27.167 (5.967)	2.604 (1.37)	0.023 (0.020)	2.454 (2.975)	108.253 (173.013)

A_{Hg}: Geometric Mean of Mercury Concentration in Air

B_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Blood

U_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Urine

*: P > 0.05

Table 5. Daily variation of respiratory rate of the study subjects by company (): Standard Deviation

Company	No.	1st (Mon)	2nd (Tue)	3rd (Wed)	4th (thu)	5th (Fri)
A	19	24.453 (3.555)	22.333 (2.337)	22.132 (2.429)	22.557 (2.705)	22.525 (2.235)
B	16	20.787 (1.043)	20.500 (1.633)			

차이를 보이지 않았다(P > 0.05).

폐기능 검사를 통해 얻어진 각 근로자들의 1회 호흡량의 평균값은 두 업체간 통계적으로 유의한

차이를 보였다(Table 6). 1회 호흡량의 성별간 차이를 보았을 때도 남녀간에 유의한 차이를 보였다(Table 7).

Table 6. Mean value with standard deviation of tidal volume by company (unit: ml)

Comp	No.	Mean	S.D
A	19	834.7	346.2
B	16	619.4	202.1

P = 0.03

S.D: Standard Deviation

Table 7. Mean value with standard deviation of tidal volume by sex (unit: ml)

Sex	No.	Mean	S.D
M	31	766.8	309.6
F	4	500.0	122.5

P < 0.01

S.D: Standard Deviation

연구방법에서 기술한 바와 같이 이러한 결과들을 이용하여 8시간 수은 흡입량을 계산하였으며 이 값을 이용하여 혈중과 요중 평균 수은농도와 의 상관관계를 살펴보고, 공기중 수은농도만을 사용한 상관분석의 결과와 서로 비교하였다.

35명의 근로자 전체를 대상으로 하였을 때 공기중 평균 수은농도와 혈중 수은량과의 상관계수는 0.615를 나타냈으나, 8시간 수은 흡입량을 이용하면 그 값이 0.653으로 커지는 것을 볼 수 있었다. 요중 수은량과도 8시간 수은 흡입량과의 상관계수가 공기중 평균 수은농도와 의 0.519에서 0.553으로 증가되었다(Table 8).

8시간 수은 흡입량과 공기중 평균 수은농도에 대한 혈중 및 요중 평균 수은농도와 의 상관관계를 근속 년수별로 나누어 비교해 보면, 근속 년수가 1년 이상인 군에서는 혈중 및 요중 수은 농도에 대해서 상관계수가 0.928에서 0.935로, 그리고 0.932에서 0.941로 각각 증가된 것을 볼 수 있다(Table 8). 그러나 근속 년수 1년 미만인 군에서는

두 변수 모두에서 상관계수가 감소하여 호흡에 관한 변수를 고려한다는 것이 의미를 갖지 않을 수 있었다. 그리고 근속 년수 1년 미만인 군보다는 1년 이상인 군에서의 r-값이 전체를 대상으로 한 경우보다 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 보아 혈중 또는 요중 평균 수은농도와 독립 변수로 삼은 공기중 평균 수은농도나 8시간 수은 흡입량이 근속 년수가 1년 이상인 비교적 장기 근무를 하고 있는 근로자들에게서 더 강한 상관관계를 갖는 것으로 보인다.

4. 혈중 및 요중 평균 수은농도에 대한 각 독립 변수들과의 선형회귀분석 결과

1) 혈중 평균 수은농도에 대한 선형 회귀분석 결과

혈중 평균 수은농도를 종속변수로 한 선형 회귀방정식을 중요한 독립변수에 대해 구해보면 Table 9와 같다. 공기중 평균 수은농도, 8시간 수은 흡입량에 대한 기율기계수와 설명력이 모두 근속 년수 1년 이상인 군에서 증가되고 있음을 볼 수 있다.

2) 요중 평균 수은농도에 대한 선형 회귀분석 결과

요중 수은농도와 여러 독립변수에 대한 회귀방정식을 구해보면 혈중 수은농도에 대한 회귀분석 결과와 마찬가지로 근속 년수 1년 이상인 군에서 기율기계수와 설명력이 통계적인 유의성의 증가와 함께 향상되었음을 알 수 있다(Table 10).

고 찰

본 연구의 대상이 되었던 두 사업장은 직관 및 곡관 형광등 제품을 주로 생산하는 업체로서 산업안전보건법(노동부, 1991)에 의거, 매년 정기적인 작업환경측정과 수은 폭로 근로자에 대한 특수건강진단을 실시해 왔다. 이중 한 업체는 지난

Table 8. Correlation coefficients between mean mercury concentration in blood and other independent variables by exposure duration (): P-Value

Exposure Group	No.	Variables	(r) with B _{Hg}	(r) with U _{Hg}
I >	23	A _{Hg} (mg/m ³)	0.66 (0.0006)	0.537 (0.008)
		8-hr Hg _i	0.630 (0.0013)	0.508 (0.013)
		U _{Hg} (μg/L)	0.737 (0.0001)	—
I =<	12	A _{Hg} (mg/m ³)	0.928 (0.0001)	0.932 (0.0001)
		8-hr Hg _i	0.935 (0.0001)	0.941 (0.0001)
		U _{Hg} (μg/L)	0.985 (0.0001)	—
Total	35	A _{Hg} (mg/m ³)	0.615 (0.0001)	0.519 (0.0014)
		8-hr Hg _i	0.653 (0.0001)	0.553 (0.0006)
		U _{Hg} (μg/L)	0.829 (0.0001)	—

A_{Hg}: Geometric Mean of Mercury Concentration in Air

B_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Blood

U_{Hg}: Mean Mercury Concentration in Urine

8-hr Hg_i: 8-hr Inhaled Mercury

Table 9. Linear regression analysis between mean mercury concentration in blood and other independent variables

Exposure Duration	No.	Variables	Parameter Estimate	P-Value	R-square
I >	23	A _{Hg}	17.224	0.0006	0.437
		8hr Hg _i	2.752	0.0013	0.397
I <=	12	A _{Hg}	135.209	0.0001	0.861
		8hr Hg _i	12.513	0.0001	0.874
Total	35	A _{Hg}	21.037	0.0001	0.378
		8hr Hg _i	3.614	0.0001	0.4260

A_{Hg}: Geometric Mean of Mercury Concentration in Air

8-hr Hg_i: 8-hr Inhaled Mercury

Table 10. Linear regression analysis between mean mercury concentration in urine and other independent variables

Exposure Duration	No.	Variables	Parameter Estimate	P-Value	R-square
I >	23	A _{Hg}	855.075	0.0083	0.288
		8hr Hg _i	135.757	0.0133	0.258
I <=	12	A _{Hg}	7900.628	0.0001	0.870
		8hr Hg _i	732.737	0.0001	0.886
Total	35	A _{Hg}	1022.944	0.001	0.269
		8hr Hg _i	176.418	0.0006	0.306

A_{Hg}: Geometric Mean of Mercury Concentration in Air

8-hr Hg_i: 8-hr Inhaled Mercury

해 수은 특수검진 대상자 128명 중 11명(8.6%)이 요중 수은 $100\mu\text{g/L}$ 이상, 21명(16.4%)이 $200\mu\text{g/L}$ 이상을 나타내는 등 작업환경 관리상의 문제가 제기되는 곳이었고, 다른 업체는 수은 특수검진 대상자 83명으로 요중 수은농도가 법적인 한계치를 초과하는 근로자는 나타나지 않았다.

최근까지 공기중 수은증기의 농도 0.1mg/m^3 미만은 안전하다고 생각되어 왔으나, $0.05\sim 0.1\text{mg/m}^3$ 정도의 농도에서도 신장과 신경행태학적인 이상이 나타나고 소변내 수은 배설농도가 $300\mu\text{g/L}$ 미만, 즉 $50\sim 100\mu\text{g/g}$ Cr으로 나타나는 근로자에서도 신경행태학적 그리고 신장기능 이상이 나타난다는 보고가 있다(Roels 등, 1985).

독성학적인 특성을 토대로 수은은 크게 금속수은, 무기수은, 유기수은의 세가지 형태로 존재하는데, 수은증기와 분진의 흡입이 직업성 수은중독의 주 원인으로 밝혀져 있으며, 농도, 흡수경로, 폭로기간 등의 여러 변수에 따라 서로 다른 효과와 성질을 갖기 때문에 여러 의학적 연구 결과가 혼란을 가져올 수 있다(Zenz, C, 1988).

금속수은에 폭로된 후 공기중 농도와 관련하여 인체에서의 흡수, 축적, 배설에 관한 완벽한 수은 대사모델로서 유용한 것은 아직 없다. 인체 폭로의 대부분(80%)은 호흡에 의하며, 폐의 세기관지 및 큰 기관지의 벽을 통해 흡수된다고 주장하였지만(Teisinger 등, 1965), 계속된 연구들에서는 혈류안으로 흡수되는 주된 부위가 폐포 영역이라고 지적하였다(Berlin 등, 1969). 금속수은이나 수은화합물은 주로 폐포막을 통해 흡수되어 과산화수소 분해효소에 의해 수은염으로 산화된 후 적혈구내로 흡수되고 2가 수은으로 변형되어 혈액 내 지방성분을 따라 이동하게 되며, 상당한 부분은 금속수은인 상태로 말단부위로 이동한다.

흡입된 수은증기의 약 80%는 신체조직에 체류한다는 것이 인간과 동물실험을 통해 밝혀졌다(Teisinger와 Fiserova, 1965). 인체에 흡수된 수은은 신체 각 조직에 분포하게 되는데, 처음 분포가 완료된 후 흡수된 양의 약 2%가 전체 혈액 1L

내에 분포되었다. 적혈구내에 흡수되는 것은 수시간내에 완료되지만 혈장 흡수가 최고에 이르는 데는 약 하루가 걸린다. 적혈구내 수은의 농도는 혈장보다 약 2배가 되며 이러한 비율은 폭로 후 최소 6일간 지속되며, 반감기는 평균 3.3일로 양쪽 모두 비슷하였다. 수은의 체내 반감기는 부위에 따라 다르며, 혈액은 3일과 30일의 두가지 구획의 반감기를 가지며 평균 반감기는 3.3일이다. 혈중 수은농도는 최근의 수은폭로지표로서 작용하는 반면에 요중 수은농도는 장기 폭로와 관련이 있고 이는 개인차가 커서 오직 집단을 근거로 했을 때만이 의미를 가질 수 있다(EPA, US, 1978). 수은에 단기간 폭로 후에는 소변을 통한 배설이 전체의 13%를 차지하나, 장기간의 직업적 폭로 후에는 약 58%를 차지하며 흡입된 양의 약 7%는 호기를 통해 배출된다.

수은의 주 배설경로는 소변이며, 대변이나 땀으로도 배설된다. 소변을 통한 수은의 배설은 수은의 형태, 섭취량, 폭로후 시간 경과 등에 의해 각 개인마다 많은 차이가 있다(Doull 등, 1992). 소변은 수집하기에 가장 손쉬운 체액이며, 24시간 소변은 폭로를 평가하는데 가장 정확한 수치를 제공해 줄 수 있다. 그러나 작업장에서는 실제 수행상의 이유로 대개 일시뇨를 사용하게 되는데 일시뇨에는 소변농도의 변화에 의해 유의할 정도의 변이가 존재하게 된다. 이러한 변화는 요 비중(SG 1.014)이나 요중 크레아티닌(1g Creatinine) 농도로 보정해줌으로써 감소하게 된다. 고농도로 농축(SG > 1.030, Cr > 3g/L)되거나 매우 희석(SG < 1.010, Cr < 0.3~0.5g/L)된 요 시료는 생물학적인 감시를 위한 시료로는 적당하지 않다(Ladou, 1990). 소변을 통한 배설은 고농도의 수은에 폭로된 경우에 더욱 현저하고, 공기중 수은의 농도와 거의 비례하여 공기중 평균 수은농도 0.05mg/m^3 에서 주당 5일동안 최소한 6개월의 직업성 폭로가 있었다면 요중 평균 수은농도는 약 $150\mu\text{g/L}$ 가 된다(MAC Committee, 1969). NIOSH에서는 공기중 수은의 TWA를 0.05mg/m^3 로 규

정하고 있으며 이는 혈중 수은 $3.0\mu\text{g}/\text{dl}$, 요중 수은 $100\mu\text{g}/\text{L}$ 에 상당하는 값이다(Rom, 1992).

본 연구에서는 금속수은의 주 흡수 경로인 호흡의 변이가 혈중 및 요중 수은농도에 미치는 영향을 살펴보고, 근속 년수 1년 이상인 근로자들의 생물학적 폭로지표들을 근속 년수 1년 미만의 근로자들과 비교하여 환경농도와의 연관성의 차이를 알아보고자 하였다. 본 연구의 대상 근로자들은 모두 작업과정중 수은에 폭로된다고 할 수 있으며, 이전에 수은 또는 타 유해물질에 폭로된 경력이 없으므로 폭로기간을 현재 근무하고 있는 업체에서의 근속 년수로 대치할 수 있었다.

두 업체간의 작업장내 공기중 평균 수은농도는 0.068 과 $0.021\text{mg}/\text{m}^3$, 대상 근로자들의 평균 근속 년수는 0.58 과 1.92 년으로 나타났으며, 작업장내 공기중 평균 수은농도가 높은 업체에서 일하는 근로자들의 근속 년수가 짧은 것이 결과의 해석에 영향을 미칠 수 있으리라고 생각된다. 근속 년수 1년 미만군에서 오히려 혈중과 요중의 평균 수은농도가 높게 나타난 것은 작업환경농도가 열악한 업체에서 일하는 근로자들의 근속 년수가 작업환경농도가 낮은 다른 업체에 비해 짧기 때문에 나타난 결과라고 생각된다.

연구방법에서 설명된 것과 같이 1회 호흡량을 구하기 위해 Spiro Analyzer(ST-250, FUKUDA SANGYO)를 이용하여 대상 근로자들의 폐기능 검사를 실시하였으며, 그 결과 모든 대상지에서 폐기능상의 이상소견은 보이지 않았다. 폐기능 검사는 안정상태에서 실시하였고 2회 이상 실시하여 평균값을 취하였다. 두 업체간에 1회 호흡량의 평균값이 통계적으로 유의한 차이를 보인 것은 두 업체간의 연령 구성과 성비의 차이, 즉 A 업체가 평균 연령이 낮고 전원이 남자로 구성되어 있는 데서 온 결과라고 할 수 있다(Table 6, 7).

작업장내 공기중 수은농도가 요중 수은 배설량과 관련이 있다는 연구(박승희 등, 1989; 김광종 등, 1990)는 다수 있었고, 본 연구에서도 혈중 또는 요중 평균 수은농도와 다른 독립변수들간의

상관성이 상관계수 0.8 이상으로 높은 상관성을 나타냈다. 일반적으로 인정되고 있는 수치는 없으나 금속수은에 직업적으로 폭로되는 근로자들에 있어서 공기중 수은농도와 소변내 수은농도와는 $1:1$ 에서 $1:2.6$ 까지의 비율을 나타낸다고 한다. 또한 소변을 통한 수은의 평균 배설량은 음주나 흡연습관, 연령, 교육정도 및 총 근무기간 등에 영향을 받지 않고, 다만 개개인에 대한 환경중 농도와 가장 상관성이 있다고 하였다(Ehrenberg 등, 1991; Augworth 등 1991).

생물학적인 안정상태가 이루어진 후에야 공기중 수은농도와 혈중 수은농도가 선형관계를 이루게 된다. 그러므로 채용시의 기초 혈중 수은량이 측정되어 있어야만 폭로가 증가되고 있음을 알 수 있다(Rom, 1992). 인체의 생물학적 반감기에 대한 제한된 정보들에 의하면, 폭로 후 1년이 되기까지는 직업적으로 수은증기에 폭로되는 근로자들은 생물학적인 평형상태(균형상태, Steady State)에 도달하지 않게 된다. 결론적으로 최소 1년의 폭로가 있는 후에야 공기중 수은농도와 요중 또는 혈중 수은농도가 일정한 관련성을 나타낸다고 볼 수 있게 된다(WHO, 1976).

근속 년수를 구분하여 분석한 연구 결과에 따르면 근속년수 1년 이상군에서는 전체적인 양상에 비해 상관성이 증가된 결과를 보이지만, 1년 미만군에서는 오히려 감소하는 결과를 보였는데 이는 수은의 체내 분포가 근속 년수 1년 미만인 군에서 생물학적 지표들이 평형상태에 도달하지 않았기 때문에 생긴 변이에 의한 것으로 생각된다. 또한 환경이 열악한 업체에서의 실내온도가 공정에 따라 35°C 이상인 장소가 있어 그곳에서 작업하는 근로자들은 혈중이나 요중 수은의 농도 뿐만 아니라 땀을 통해 배설되는 수은의 양도 상당히 높아 체내 수은의 전체적인 균형을 생각할 때 고려해야 할 것(WHO, 1976)이지만, 본 연구에서는 그 양을 결과에 반영시키지 못한 제한점이 있다.

혈중과 요중 평균 수은량을 각각 종속변수로 하여 중요 독립변수들과 선형 회귀분석을 실시한 결

과에서도 근속 년수가 1년 이상인 군에서 모든 독립변수에 대한 기울기계수 및 설명력이 증가되어 나타나 근속 년수가 1년이 지난 근로자들에게서 작업환경농도와 생물학적 지표간의 연관성이 잘 반영된다는 것을 말해주는 결과라 할 수 있었다.

결 론

이 연구는 수은폭로 근로자들의 작업장내 수은폭로와 생물학적 모니터링간의 관련을 조사하기 위한 것이다. 연구에 참여한 근로자들의 근무시간을 8시간으로 간주하고 그 시간동안 흡입한 수은량을 산출하기 위해 각 근로자의 호흡수, 1회 호흡량(Tidal Volume)을 측정하고, 근로자들의 호흡기 위치에서의 공기중 수은농도의 기하평균을 구하였다. 급속수은의 생체내 평형상태를 고려하기 위해 대상 근로자들을 근속 년수 1년을 기준으로 구분하여 8시간 수은흡입량과 요중 및 혈중 수은량과의 관련성에 대한 상관 및 회귀분석을 실시하였다. 그 결과는 아래와 같다.

1. 연구 대상자들은 35명의 형광등 제조업체 근로자들이었으며, 이들의 평균 연령은 24.8세, 평균 근속 년수는 1.19년이였다. 이중 남자는 89%, 여자는 11% 이였다(Table 2).
2. 대상 근로자들의 8시간 수은 흡입량과 혈중 및 요중 수은농도와의 상관계수는 공기중 수은농도만으로 보았을 때보다 증가하였다(Table 8).
3. 특히 근속 년수 1년 이상인 군에서는 혈중 및 요중 수은농도와 독립변수들간의 상관계수가 모두 0.9 이상으로 높은 상관성을 나타냈다(Table 8).
4. 8시간 수은 흡입량과 혈중 및 요중 수은량간의 선형 회귀분석 결과 근속 년수 1년 이상인 군에서는 1년 이하인 군이나 전체를 대상으로 분석한 경우에 비해 기울기계수나 설명력이 크게 증가하였다(Table 9, 10).

이상의 결과에서 앞으로 수은폭로 근로자들의 생물학적 지표 평가에서는 개인별 변이 또는 근무 강도와 관련이 있는 호흡량이라는 변수를 고려해야 할 것이며, 생물학적 지표들의 결과 분석에 있어서도 근속 년수 즉 폭로기간을 고려한 해석을 해야 할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

- 김광중, 차철환. 전국 형광등제조 업체에 있어서 공기 중 및 요중 수은농도에 관한 연구. 대한산업의학회지 1990; 2(2): 179-185
- 노동부. 유해물질의 허용농도. 노동부고시 제91-21호. 1991
- 박승희, 김광중, 장성훈, 차철환. 모 형광등업체에 있어서의 공기중 수은농도 및 요중 수은량 조사. 대한산업의학회지 1989; 1(2): 197-205
- 이은일. 직업병 역학연구에 있어서 폭로의 평가. 한국역학회지 1993; 15(1): 29-35
- 장미영, 김광중, 염용태. An Intervention Study on the Outbreak of Occupational Mercury Poisoning. 고의대논집 1989; 26(1): 67
- 차철환, 김광중, 염용태. 우리나라 수은 취급업체의 작업공정 및 수은중독 위험도에 관한 연구. 대한산업의학회지 1991; 3(4)
- Amdur MO, Doull J. Toxicology, 4th ed. McGraw-Hill International Editions, 1992; 646-651
- Augworth SI, Elinder CG, Gothe, Vesterberg O. Biological Monitoring of Environmental and Occupational Exposure to Mercury. Int Arch Occup Environ Health 1991; 63: 161-167
- Bell ZG Jr, Lovejoy HB, Vizena TR. Mercury Exposure Evaluations and Their Correlation with Urine Mercury Excretion. J Occp Med 1973; 15(6): 501-508
- Bell ZG Jr, Wood MW, Kuryla LA. Mercury Exposure Evaluations and Their Correlation with Urine Mercury Excretion. J Occp Med 1973; 15(5): 420-422
- Ehrenberg RL, Vogt RL, Smith AB, Brondum J, Brightwell WS, Hudson PJ, McManus KP, Hannon WH, Phipps FC. Effects of Elemental Mercury Exposure at a Thermometer Plant. Am J Ind Med 1991; 19: 495-507
- EPA. Mercury Health Effects Update. 1978
- Goldwater LJ, Jacobs MB, Ladd AC. Absorption and

- Excretion of Mercury in Man. Arch Environ Health* 1962; 5: 537-541
- Hodgson E, Levi PE. *Introduction to Biochemical Toxicology, 2nd Ed. Appleton & Lange. 1994: 32-35*
- Ladou J. *Occupational Medicine, 1990: 311-313*
- Lauwerys RR, Buchet JP. *Occupational Exposure to Mercury Vapors and Biological Action. Arch Environ Health* 1973; 27: 65-68
- Lovejoy HB, Bell ZG Jr, Vizona TR. *Mercury Exposure Evaluations and Their Correlation with Urine Mercury Excretion. J Occp Med* 1973; 15 (7) : 590-591
- Lovejoy HB, Berry J, Bell ZG Jr. *Mercury Exposure Evaluations and Their Correlation with Urine Mercury Excretion. J Occp Med* 1973; 15 (8) : 647-648
- Lovejoy HB, Zeb G, Bell Jr. *Mercury Exposure Evaluations and Their Correlation with urine Mercury Excretion. J Occp Med* 1973; 15 (12) : 964-966
- Moore DJ, Timbs AE. *Mercury-a Health Risk. Chemistry in Britain* 1984; 20 (7) : 622-624
- Rom WN. *Environmental and Occupational Medicine, 2nd ed. 1992; 759-766*
- Sallsten G, Barregard L, Schutz A. *Decrease in Mercury Concentration in Blood After Long Term Exposure, a Kinetic Study of Chloralkali Workers. Br J Ind Med* 1993; 50: 814-821
- Sallsten G, Barregard L, Schutz A. *Kinetics of Mercury in Blood and Urine After Brief Occupational Exposure. Arch Envir Health* 1992; 47 (3) : 176-184
- Smith TJ. *Exposure Assessment of Occupational Epidemiology. Am J Ind Med* 1987; 12: 249-268
- Vostal JJ, Clarkson TW. *Mercury as an Environmental Hazard. J Occp Med* 1973; 15 (8) : 649-656
- WHO. *Environmental Health Criteria. Geneva, 1976*
- Zenz C. *Occupational Medicine. Principles and Practical Application. 2nd Ed. 1988; 590-596*
-