

## 주물사업장 주공정별 발생하는 분진의 석영함유량 및 크기분포 연구

가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실, 산업보건대학원\*, 노동부 작업환경과\*\*

피영규\* · 노영만 · 이광목 · 김형아 · 김용우\* · 원정일\*\* · 김현욱†

### — Abstract —

### Analysis of Quartz Content and Particle Size Distribution of Airborne Dust from Selected Foundry Operations

Young Gyu Phee\*, Young Man Roh, Kwang Mook Lee, Hyoung-Ah Kim,  
Yong Woo Kim\*, Jeoung Il Won\*\*, Hyunwook Kim†

*Department of Preventive Medicine, College of Medicine,  
The Catholic University*

*Graduate School of Occupational Health, The Catholic University\**

*Industrial Safety Bureau, Ministry of Labour\*\**

This study was performed to estimate quartz contents in the both bulk and airborne dust samples and to determine particle size distribution of airborne dust from the selected foundry operations. Total dust samples were collected by a 37mm cassette and respirable by a 10 mm nylon cyclone. Particle size distributions were determined by a Marple's 8-stage cascade impactor at the melting, molding, shakeout and finishing operations. The presence of elements in the dust samples were confirmed by the scanning electron microscopy equipped with the energy dispersive x-ray spectrometry. The quartz contents were estimated using the intensity of the absorption peak of quartz at 799 cm<sup>-1</sup> by the Fourier Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR).

The results were as follows:

1. The analysis of data from cascade impactor showed bimodal distributions of particle size at the melting, molding and shakeout operations. Mass median aerodynamic diameters for the distributions determined by histogram were 0.48-1.65  $\mu\text{m}$  for small and 13.43-19.58  $\mu\text{m}$  for large modes. In the dust

\* 이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

† Corresponding Author : 가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실

samples collected at the finishing operations, however, only a large mode of  $18.89 \mu\text{m}$  was found.

2. The percentages of total to respirable dust concentration calculated from the impactor data ranged from 42 % to 66 %. The average concentrations of respirable dust by cyclone were 0.85-1.28 mg/m<sup>3</sup> collected from the workers, and were 0.23-0.56 mg/m<sup>3</sup> from the areas surveyed. Dust concentrations of personal samples were statistically significantly higher than those of area samples. The highest dust concentration was obtained from the personal samples of the finishing operation.

3. The mean percentages of silicon and oxygen estimated by SEM-EDXA in the bulk samples ranged from 35.83 % to 36.02 % and from 39.93 %-41.64 %, respectively.

4. The average quartz contents estimated by FTIR in the respirable dust from personal samples ranged from 4.32 % to 5.36 % and 4.54 % to 4.70 % in the bulk samples. No statistical difference of quartz content was found between foundry operations.

In this study, quartz content was quantified by FTIR. Although no statistically significant difference in quartz content between airborne and bulk samples and between different foundry operations was found, it is recommended that quartz content in the individual sample of respirable dust be analyzed and the results be used either to select an applicable quartz limits or to calculate the exposure limit.

Further studies, however, are needed to compare the results by FTIR and XRD since it is reported that the quartz content determined by FTIR is different from that by XRD.

**Key Words :** Quartz, Crystalline Silica, Foundry operation, FTIR, XRD, XRF, SEM-EDXA

## 서 론

주물사업장에서 발생하는 유해인자로는 유리규산, 일산화탄소, 금속성 흙, 휘발성 코올타르 피치, 소음, 진동, 고열, 전리방사선 등이 있는데 그 중 작업자의 건강에 가장 문제가 되는 것은 결정형 유리규산을 함유한 분진이다(Burgess, 1995). 보통 유리규산은 비결정형, 결정형과 규산염으로 나눌 수 있고 결정형 구조의 일반 형태로 석영(quartz)과, 크리스토파라이트(crystobalite), 트리디마이트(tridymite)가 있다(Hogan, 1995). 주물분진중 호흡성 분진(respirable particulate)은 규폐증, 폐의 섬유화, 기도협착, 폐암 등을 일으킬 수 있다(Perrault et al, 1992). 또한 주물사업장과 같이 고온에서 작업을 하면 독성이 강한 크리스토파라이트나 트리디마이트 등에 노출될 수 있다(Occupational Safety and Health Administration, OSHA, 1991).

우리나라에서는 '91년 특수건강진단결과 진폐증이 전체 직업병의 43.3%를 차지하고 있다(대한산업보건협회, 1991). 이와같이 우리 나라 직업병의 우선순위를 차지해온 진폐증 가운데 유리규산이 원인이

되는 규폐증은 고농도의 결정형유리규산을 함유하는 분진을 흡입함으로써 폐장에 섬유화가 일어나는 질환으로 비교적 소량의 분진이 폐장에 축적되어도 그 조직반응이 심하여 여러 진폐증 가운데에서도 발병의 위험성이 가장 높은 것으로 알려져 있다(이승한, 1985). 그 중 크리스토파라이트와 트리디마이트는 석영과는 다른 결정구조를 가지고 있기 때문에 규폐증에 걸릴 수 있는 위험이 크며(Hogan, 1995), 국제암연구기관(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 결정형 유리규산을 잠재성 발암물질로(IARC, 1987), 또한 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 발암물질로 규정짓고 있다(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH, 1994).

제조업 근로자 약 280만명 중에서 분진노출 근로자는 약 15만명으로 집계되고 있으며, 진폐증이 과거에는 석탄광업에서 발생율이 높았지만 1988년 정부의 석탄합리화정책으로 석탄광업 근로자는 점차 감소하는 반면, 이들 제조업에서의 진폐증이 차지하는 비율이 점차 증가하여 유해부서 특수건강진단상 진폐증 환자중 비광업 진폐증이 차지하는 비율이 증

가하고 있는 실정이다(이원철 등, 1997). 1994년 제조업에서 발생한 진폐증에 대한 보고를 보면 금속 제품 제조업에서 가장 많은 진폐증 발생건수를 보이고 있으며(노동부, 1994b), 1995년 전국 사업장을 대상으로한 작업환경측정결과 분진의 허용농도 초과율은 제 1차 금속산업의 경우 33.2%로 매우 높은 수준을 보이고 있다(작업환경측정 기술협의회, 1995). 이에 산업안전보건법에서는 진폐증 예방을 위해 분진발생 작업장에 대한 작업환경측정을 통해 유해정도를 평가토록 규정하고 있으며, 그 평가기준으로 사용되는 유해물질의 허용농도에서도 유리규산의 함유량에 따라 총분진을 제 1, 2, 3종 분진으로 분류하여 허용농도를 달리 정하고 있으며, 호흡성분진으로서 결정형 유리규산의 경우 석영은  $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ , 크리스토파라이트는  $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ , 트리디마이트는  $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 허용농도를 규정하고 있다(노동부, 1994a). ACGIH의 경우는 우리나라와 동일하며 (ACGIH, 1994), OSHA에서는 석영의 경우  $10/(\% \text{SiO}_2) + 2\text{mg}/\text{m}^3$ , 크리스토파라이트와 트리디마이트는  $10/(\% \text{SiO}_2) + 2\text{mg}/\text{m}^3$ 의 1/2로 적용하며, 혼합물질 경우는  $10/(\% \text{quartz}) + 2(\% \text{crystobalite}) + 2(\% \text{tridymite}) + 2\text{mg}/\text{m}^3$ 로 정하고 있다(U.S. Department of Labor, 1996).

그러나 현재 작업환경측정기관에서 결정형유리규산의 성분별 정량분석과 호흡성분진의 측정이 동시에 이루어지지 않고 있으며, 대부분 중량분석법 또는 상대농도법으로 결과를 추정하여 총분진의 허용농도에 적용하고 있다(작업환경측정 기술협의회, 1995). 또한 고온작업에서 주물분진은 결정형유리규산이 형성되므로 이에 대한 노출평가는 결정형 유리규산의 종류별 기중 농도를 근거로 하여야 하나 노동부 허용기준 규정에는 이에 대한 언급이 없다(노동부, 1994b). 그리고 일부 연구에서도 유리규산이 함유된 분진을 총분진의 중량분석으로 평가하였고(김병수 등, 1986) 호흡성분진에 관한 조사도 일부 이루어져 왔으나(김희만과 김돈관, 1993) 성분에 대한 분석이 이루어지지 않았으며, 성분에 관한 분석 연구는 유리규산의 함유율이 5% 미만인 석탄광업을 대상으로 실시되었다(최호준 등, 1987; 윤영노와 김영식, 1991; 윤영노와 정호근, 1991; 송세욱과 이광목, 1994). 그러므로 규폐증의 예방과 주물사업장에서 일하는 근로자의 건강보호를 위해서는 근로자

가 호흡성 분진에 노출되는 정도와 결정형 유리규산의 종류별 함량에 따른 공기중 농도를 반드시 파악하고 이에 따른 적절한 평가가 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 주물사업장에서 채취한 물질시료를 분석하여 근로자에게 노출될 수 있는 분진의 종류와 성분을 파악하고, 총분진, 호흡성분진 및 입경분포를 작업공정별로 측정하여 공정별 노출실태와 분진크기분포를 파악하는데 있으며, 최종적으로 주물사업장의 호흡성분진에 포함된 결정형유리규산중 석영에 대한 함유량분석을 통하여 정확한 작업환경 평가와 유리규산 함유량에 따른 허용기준 설정에 대한 기초 자료를 제공하고자 실시하였다.

## 대상 및 방법

### 1. 대 상

조사대상은 인천, 경기, 서울 지역에 소재한 5인 이상 100인 이하의 분진발생 사업장 13곳으로 주물사 등의 사용으로 분진의 발생농도 및 유리규산 함유량이 높을 것으로 생각되는 주물공정중 용해, 조형, 형해제, 마무리작업을 선정하였다. 각 작업공정별, 공기중 분진농도 측정과 포집된 분진 및 물질시료의 유리규산 함유량을 분석하였고, 포집시간은 약 100 - 300분이었다(표 1).

**Table 1.** Number of samples collected by selected foundry operations

Operations	Cyclone sampler		37 mm cassette	Impactor sampler
	Personal	Area	Area	Area
Melting	2	2	2	2
Molding	9	15	13	14
Shakeout	7	6	7	7
Finishing	5	4	4	5
Total	23	27	26	28

### 2. 방 법

#### 1) 총분진, 호흡성 분진의 측정

총분진포집방법으로는 NIOSH method 0500방법인 37mm closed-face cassette를 이용하여 37mm, 5 $\mu\text{m}$  pore 크기의 PVC 멤브레인 필터를 사용

하였으며, 호흡성분진은 10mm Doll-Oliver nylon cyclone에 위와 동일한 필터를 사용하였다 (NIOSH, 1994). 개인시료 채취기(SKC, Model 224-52, USA)를 사용하였으며, 유량은 비누 거품 보정계(Gillian, Model 713, USA)를 이용하여 총분진포집시 분당 2.0 리터, 호흡성분진포집시 분당 1.7 리터로 보정하였고, 측정 후 유량을 다시 측정하여 산출된 평균유량값을 사용하였다. 총분진 및 호흡성분진의 중량분석은 측정 전-후에 0.01 mg 까지 판독할 수 있는 직시천평(Ohaus, model ap250d, Switzerland)으로 3회 이상 칭량한 후 평균값을 사용하였다. 개인시료포집은 근로자의 호흡영역에서 cyclone 포집기를 부착시켜 시료를 채취하였고, 지역시료의 포집은 분진이 발생하는 공정에 종사하는 근로자의 작업 위치로부터 최대한 가까운 지점을 선정하여 카메라 삼각대를 이용, 지상 1.5m 높이에서 cyclone 포집기, 37mm closed-face cassette, 다단계 입경포집기를 부착하여 시료를 채취하였다.

## 2) 입경분포의 측정

분진의 입경분포를 측정하기 위하여 8 단계의 다단계 입경포집기(Marple personal cascade impactor, Anderson Sampler, Model 298, USA)와 개인시료 채취기(SKC, Model 224-PCXR7, USA)를 사용하였다. 유량은 비누거품 보정계(Gillian, Model 713, USA)를 이용하여 분당 2.0 리터로 보정하였으며 필터는 mylar filter를 사용하였다. 분진 포집시 입자가 튀어 손실되는 것을 방지하기 위해 도포제 silicon grease

316(Dow Corning, USA)를 도포한 후 상온에서 24시간 이상 건조시킨 후 무게를 칭량하였으며 측정 후에도 같은 조건으로 무게를 칭량하였다. 각 단계에서 구분되어 채취되는 분진의 유효한계입경(effective cut-point diameter)은 표 2와 같다.

## 3) 물질시료의 채취

포집기를 부착한 근로자가 작업을 하는 곳에서 물질시료병을 이용하여 수집하였다.

## 3. 분석 방법

### 1) 총분진 및 호흡성 분진의 농도 비교

분진의 농도 분포 및 자료의 분석은 각 공정별 총분진 및 호흡성 분진 농도에 대해서는 대수정규분포를 검정(Sapiro-Wilk test, SAS/STAT, 1988)한 후, 분산분석(Kruskal-Wallis test, SAS/STAT, 1988)을, 호흡성 분진의 개인시료와 지역시료의 농도비교는 Wilcoxon rank sum test를 실시하였다(SAS/STAT, 1988).

### 2) 입경분포

분진에서의 크기분포를 알기 위하여 Quattropro™의 microcomputer spread-sheet를 이용하여 0.1-100 $\mu$ m 까지 분진의 크기를 히스토그램으로 작성하였고(Hewett & MaCawley, 1991), SAS 통계 프로그램을 이용하여 분진 농도의 기하평균과 기하표준편차를 구하였다.

**Table 2.** Design parameters and cut-point diameters of the personal cascade impactor used

Stages	Nozzle shape	No. of nozzles	Nozzle(cm)		Slot length (cm)	Cut-point diameter ( $\mu$ m)
			Width	Diameter		
1	slot	6	0.2640	-	0.953	21.30
2	slot	6	0.1450	-	0.953	14.80
3	slot	6	0.0813	-	0.953	9.80
4	slot	6	0.0432	-	0.953	6.00
5	slot	6	0.0254	-	0.953	3.50
6	slot	6	0.0173	-	0.480	1.55
7	round	12	-	0.0457	-	0.93
8	round	12	-	0.0318	-	0.52

### 3) 유리규산 분석

#### (1) 에너지 분산 X선 분광기장치 전자주사현미경 - Field Emission Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDXA)

물질시료의 원소를 확인하기 위해 SEM-EDXA (Hitachi, Model S-4200, Japan)를 사용하였으며 기기의 조건은 전압 15 kV, 광선전류 100 pico Amps를 사용하였다. 분석은 물질시료를 고르게 분포시킨 후 0.5 g의 시료를 디스크에 압축시킨 후 각 원소의 함유량을 파악하였다.

#### (2) X선 형광 분광기 - X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

물질시료의 유리규산함유량과 다른 구성성분을 알기 위해 XRF (Philips, Model PW1480, Netherlands)를 사용하였으며 분석시 측정강도를 얻기 위한 전압, 전류는 각각 40 kV, 30 mA이었고 시편 제작은 950 ℃에서 가열한 시료와 di-lithium tetraborate ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )를 1 : 5로 혼합하여 자동 유리편 기구 (automatic bead machine)로 1,200 ℃에서 용해시켜 유리편 (glass bead)을 제작하여 분석에 이용하였다. 검정에 이용된 표준물질은 미국 지질조사소 (U.S Geological Survey, USGS)에서 제작한 국제공인표준물질 (Standard Reference Material, SRM) 12개와 상용으로 시판되는 표준물질 12개이며, 이 시료들의 화학조성의 범위가 한정되어 있어 그 범위를 확장시키기 위해 표준물질 및 표준 시약을 이용해 15개의 표준시료를 만들었으며, 이들은 각각 950 ℃에서 30분 이상 가열시킨 후 표준시편을 제작하여 물질시료의 유리규산 함유량을 구하였다.

#### (3) 간섭식 적외선 분광기 - Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

호흡성분진과 물질시료의 유리규산 함유량 파악을 위해 FTIR (BIO-RAD, Model FTS-155, USA)로 분석을 하였으며, 국내에서 사용된 분석방법을 인용하여 분석하였다 (최호춘 등, 1988; 정호근 등, 1989). 적외선 분광기용 KBr은 습기를 제거하기 위해 110 - 120 ℃에서 하룻밤 건조시킨 후 사용하였고, 시료의 전처리에는 650 ℃의 머플로 (muffle furnace)에서 2시간동안 여과지 및 유기물질을 회화시켰다 (Freedman et al, 1974). KBr은 200mg

으로 하여 시료에 첨가 막자사발을 사용하여 혼합시켰으며, 13mm die로 펠렛 (pellet)을 만들었고, 이 pellet을 FTIR Spectrophotometer를 이용하여  $1,000\text{cm}^{-1}$  -  $400\text{cm}^{-1}$ 까지 주사하여 투광도의 스펙트럼을 얻은 후  $799\text{cm}^{-1}$ 에서 흡수도를 측정하였다 (Pickard et al, 1985). 유리규산 표준분말 (Min-U-Sil 5, U.S. Silica Company., Washington, D.C.)과 석영의 표준물질 (NBS, SRMs # 2679a, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, D.C. 20234)을 사용한 표준곡선으로 분진 및 물질시료중에 유리규산을 정량하였다.

## 성 적

### 1. 입경 분리 포집기를 이용한 분진의 크기 분포 분석 결과

입경 분리 포집기에서 얻은 자료를 각 단계별로 평균값을 구하여 작성한 히스토그램의 기하평균과 기하표준편차를 그림으로 나타내었다. 용해작업에서 이산형 분포를 볼 수 있었으며 분포별 기하평균과 (기하 표준편차)는 small mode에서  $1.50\mu\text{m}$  (30.54), large mode가  $13.43\mu\text{m}$  (1.36)이었다 (그림 1). 조형작업에서는 이산형 분포를 볼 수 있었으며 분포별 기하평균과 기하 표준편차는 small mode에서  $1.65\mu\text{m}$  (10.09), large mode가  $19.40\mu\text{m}$  (1.90)이었다 (그림 2).

형해제작업에서도 이산형 분포를 볼 수 있었으며 분포별 기하평균과 기하 표준편차는 small mode에서  $0.48\mu\text{m}$  (5.04), large mode가  $19.58\mu\text{m}$  (1.90)이었으나 (그림 3) 마무리작업에서는 단일한 분포를 보였으며 기하평균은  $19.40\mu\text{m}$  기하표준편차는 1.58였다 (그림 4).

### 2. 총분진 및 호흡성 분진의 농도

#### 1) 개인시료

호흡성분진농도의 기하평균과 (기하표준편차)는  $1.06\text{mg}/\text{m}^3$  (2.09)이었으며, 각 공정별로 개인 시료의 호흡성 분진을 측정한 결과 기하평균과 (기하표준편차)는 용해공정  $0.96\text{mg}/\text{m}^3$  (1.35), 조형공정  $0.85\text{mg}/\text{m}^3$  (1.58), 형해체공정  $1.20\text{mg}/\text{m}^3$  (3.11), 마무리공정  $1.28\text{mg}/\text{m}^3$  (2.03)으로 마무리공정과 형

해체 공정에서 다소 높은 노출수준을 나타내었으나 통계적으로는 유의하지는 않았다(표 3). 주물사업장의 경우 용해작업은 큐폴라(cupola)를 이용하여 생

산하였고, 용융금속을 이동하는 작업은 용해작업이나 조형작업을 하는 작업자가 실시하였으며, 쇳물의 이동, 주입 및 식히기 등은 조형작업자가 하였다.

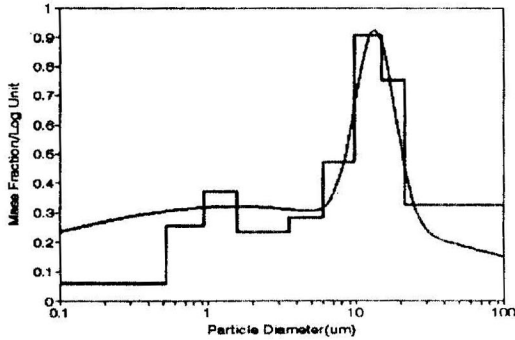


Fig. 1. Particle size distribution in melting operation

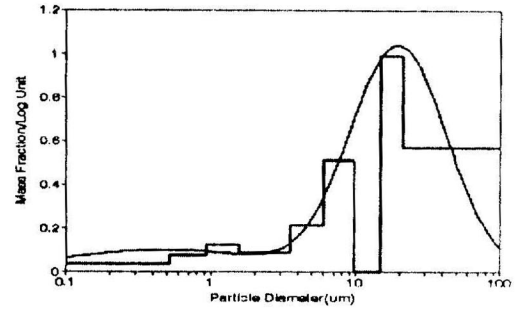


Fig. 3. Particle size distribution in shakeout operation

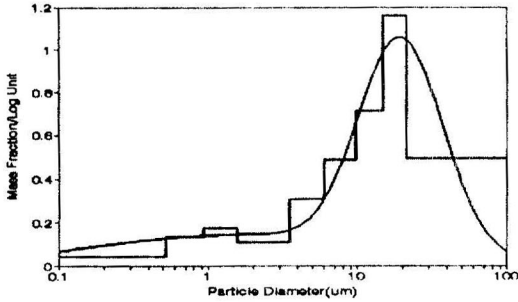


Fig. 2. Particle size distribution in molding operation

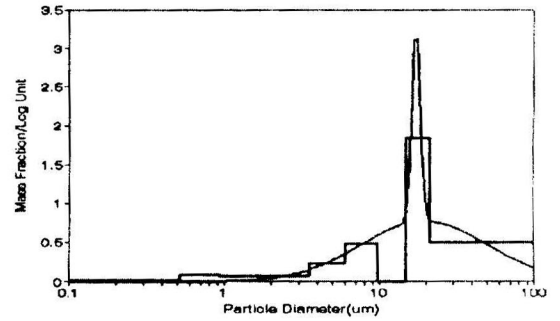


Fig. 4. Particle size distribution in finishing operation

Table 3. Comparison of respirable and total dust concentrations by operations

			Concentrations (mg/m <sup>3</sup> )						
Operations	Method	N	Cyclone			N	37 mm closed-face cassette		
			GM*	GSD**	Range		GM	GSD	Range
Melting	Personal	2	0.96	1.35	0.78-1.19	-	-	-	-
	Area	2	0.45	2.62	0.23-0.89	2	2.40	2.85	1.14-5.03
Molding	Personal	9	0.85	1.58	0.38-1.54	-	-	-	-
	Area	15	0.41	3.18	0.08-3.94	13	1.89	2.48	0.34-11.22
Shakeout	Personal	7	1.20	3.11	0.16-5.36	-	-	-	-
	Area	6	0.56	1.57	0.31-0.94	7	2.32	2.44	0.77-10.81
Finishing	Personal	4	1.28	2.03	0.53-3.43	-	-	-	-
	Area	4	0.23	3.43	0.06-0.82	4	3.32	2.91	1.29-14.15
Total	Personal	22	1.06	2.09	0.16-5.36	-	-	-	-
	Area	27	0.40	2.68	0.06-3.94	26	2.94	3.37	0.02-14.15

\* GM : Geometric Mean

\*\* GSD : Geometric Standard Deviation

조형작업은 다지는 붓을 가지고 하는 수동작업과 기계작업이 있었으나 수동작업이 대부분이었다. 형해체 작업의 경우 분진의 비산이 많았으며 대부분 손으로 파쇄하여 주물을 꺼낸 후 기계로 완전히 털어내는 형태로 작업을 하였고, 컨베이어를 이용하는 곳은 1개 사업장이었다. 마무리작업은 형해체 공정 옆에서 작업을 하는 경우가 많았고, 작업형태는 절단작업과 연삭작업이 대부분이었으며 분진이 많이 발생하였다. 작업장소는 반정도가 개방된 형태로 자연환기를 하는 작업장이 대다수였으나 환기가 제대로 이루어지지 않았고, 국소배기시설을 이용하는 경우는 4개사업장이 있었으나 가동하지 않거나 효율이 떨어지는 곳이 대부분이었다.

## 2) 지역시료

호흡성분진농도의 기하평균과 (기하표준편차)는 0.40mg/m³ (2.68)이었으며, 공정별 기하평균과 (기하표준편차)는 용해공정 0.45mg/m³ (2.62), 조형공정 0.41mg/m³ (3.18), 형해체공정 0.56mg/m³ (1.57), 마무리공정 0.23mg/m³ (3.43)으로 형해체

공정에서 가장 높은 노출수준을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다. 총분진 노출농도의 기하평균과 (기하표준편차)는 2.94mg/m³ (3.37)이었고 각 공정별 기하평균과 (기하표준편차)는 용해공정 2.40mg/m³ (2.85), 조형공정 1.89mg/m³ (2.48), 형해체공정 2.32mg/m³ (2.44), 마무리공정 3.32mg/m³ (2.91)으로 마무리공정에서 가장 높은 노출수준을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다(표 3). cyclone 포집기를 이용한 지역시료 주물분진 농도의 기하평균은 개인시료로 포집한 농도에 비하여 용해작업에서 46.9%, 조형작업에서 48.2%, 형해체작업에서 46.7%, 마무리작업은 18.0%정도 낮게 포집되었다(표 3).

각 공정별로 개인시료와 지역시료간 호흡성분진 농도의 기하평균과 범위를 도식화하였다(그림 5).

## 3. 유리규산의 농도

### 1) 기중시료

석영의 농도는 개인시료와 지역시료에서 대수변환한 값에 대해 정규분포를 보였다(P>0.05). 표 4에

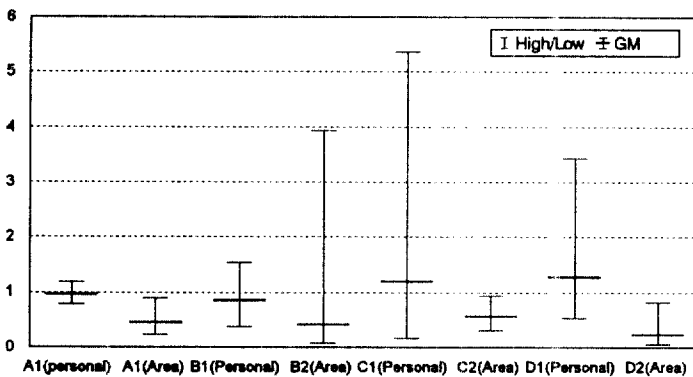


Fig. 5. Comparison of respirable dust concentrations between personal and area sampling by operations

A1, A2 : Melting operation  
B1, B2 : Molding operation  
C1, C2 : Shakeout operation  
D1, D2 : Finishing operation

Table 4. Quartz concentrations by foundry operations

Operations	N	Personal Cyclone		N	Area Cyclone	
		Quartz ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Range		Quartz ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Range
Melting	-	-	-	2	15.19	13.72- 16.84
Molding	11	27.75	11.00- 95.80	10	20.32	9.96- 36.32
Shakeout	7	45.63	19.69-139.26	6	30.91	14.75- 50.41
Finishing	2	21.26	20.17- 22.41	4	34.57*	10.28-113.33

\* P < 0.05

**Table 5.** Weight percent of quartz in filter samples analyzed by FTIR

Operations	N	Personal Sample			N	Area Sample		
		GM*	GSD**	Range		GM	GSD	Range
Melting	-	-	-	-	2	3.36	2.27	1.88- 6.00
Molding	11	4.32	1.96	1.23-15.87	10	6.35	1.74	2.51-13.99
Shakeout	7	4.84	1.41	2.64- 7.53	6	4.59	1.35	3.50- 7.53
Finishing	2	5.36	1.32	4.41- 6.51	4	14.69***	1.50	9.30-22.67
Total	20	4.60	1.71	1.23-15.87	22	6.39	1.90	1.88-22.67

\* GM : Geometric Mean

\*\* GSD : Geometric Standard Deviation

\*\*\* P &lt; 0.001

**Table 6.** Weight percent of element in bulk samples analyzed by EDXA (Unit : % Mean SD)

Elements	Operations			
	n	Molding	n	Shakeout & Finishing
Si	13	36.02±15.71	7	35.83±5.64
O	13	39.91±12.24	7	41.64±4.51
Mg	8	1.36± 0.61	5	1.78±1.16
Al	13	12.57±14.45	7	10.15±8.41
Na	9	2.70±1.82	5	2.91±1.54
K	9	2.58±2.46	6	1.26±0.42
Ca	8	2.93±3.22	6	1.23±0.45
Fe	9	6.63±4.41	6	5.67±3.22
Cl	3	0.75±0.30	1	0.51±
Cu	1	3.62	2	4.21±1.12
S	1	0.41	-	-
Zr	-	-	2	2.32±0.38
Ti	1	1.52	-	-

서 보면 개인시료에 대한 석영농도의 기하평균은 조형공정 27.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 형해체공정 45.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 마무리공정 21.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 공정간의 유의한 차이는 없었으며, 지역시료에 대한 석영의 농도의 기하평균은 용해공정 15.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 조형공정 20.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 형해체공정 30.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 마무리공정 34.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 유의성 검정결과 공정별 분진노출농도에 있어서 조형공정, 형해체공정간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나 마무리공정은 조형공정, 형해체공정에 비해 통계적으로 유의하게 높았다(P<0.05).

표 5는 호흡성분진중 석영함유량을 나타낸 것으로 개인시료의 기하평균은 조형작업 4.32%, 형해체작업 4.84%, 마무리공정 5.36%으로 공정간에 유의

**Table 7.** Chemical compositions of silica in bulk samples analyzed by XRF (Unit : % Mean SD)

Elements	Operations			
	n	Molding	n	Shakeout & Finishing
SiO <sub>2</sub>	14	83.21±11.34	6	74.06±16.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14	5.81± 3.90	6	11.83±15.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9	1.80± 1.35	5	2.89± 2.04
TiO <sub>2</sub>	9	0.21± 0.12	5	0.16± 0.09
MnO	9	2.04± 0.04	5	0.04± 0.02
CaO	9	0.82± 0.84	5	0.73± 0.46
MgO	9	0.47± 0.40	5	0.75± 0.53
K <sub>2</sub> O	9	1.60± 1.01	5	1.02± 0.92
Na <sub>2</sub> O	7	1.08± 0.41	5	1.13± 0.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9	0.03± 0.01	5	0.03± 0.02
LOI*	9	3.89± 2.71	5	2.43± 1.48

\* LOI : Loss on ignition

한 차이는 없었으며, 지역시료 석영함유량의 기하평균은 용해작업 3.36%, 조형작업 6.35%, 형해체작업 4.59%, 마무리공정 14.69%를 보였고 공정간 석영함유량에 있어서 용해, 조형, 형해체공정간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나 마무리공정에서 통계적으로 유의하게 높은 차이를 나타내었다(P<0.001).

## 2) 물질시료

### (1) 에너지 분산 X선 분광기장착 전자주사현미경 (SEM-EDXA)

원소함유량에 대한 SEM-EDXA의 분석결과, 규소는 조형공정 36.02%, 형해체 및 마무리공정

35.83%이었으며, 산소는 조형공정 39.91%, 형해체 및 마무리공정 41.64%로 SiO<sub>2</sub>가 될 수 있는 최대함유량은 두 공정에서 약 70%이상을 보였다(표 6).

### (2) X선 형광 분광기

XRF 분석에 의한 공정별 유리규산의 함유량은 조형공정 83.21%, 형해체 및 마무리공정 74.06%를 보였으며, 그 다음으로 많은 구성성분은 알루미늄으로 나타났다. 물질전처리시 2.4-3.9% 정도의 시료손실이 있었다(표 7).

### (3) 간섭식 적외선 분광기

FTIR을 이용하여 분석한 물질시료의 석영함유량은 조형작업장소에서 채취한 물질은 4.54%, 형해체 작업 및 마무리작업장소에서 채취한 물질은 4.70%이었다(표 8).

**Table 8.** Weight percent of quartz in bulk samples by FTIR

Operations	n	Quartz (%)		
		Mean	SD	Range
Molding	13	4.54	4.45	0.15-18.10
Shakeout & Finishing	7	4.70	4.69	0.33- 8.83

## 고 찰

### 1) 호흡성분진의 농도

산업장내 공기 중의 입자상 물질의 농도는 정규분포보다는 대수정규분포를 한다고 하며(백남원, 1995), 본 연구의 자료분석결과 호흡성분진과 총분진의 농도를 각각 대수 변환하였을 때 정규분포를 보였다( $P>0.05$ ). 개인시료의 호흡성분진의 평균농도는 1.06mg/m<sup>3</sup>이었다. 이는 독일의 여러 주물사업장에서 채취한 75개 개인시료의 호흡성분진농도 0.8mg/m<sup>3</sup>과 유사한 농도를 보였다(IARC, 1987). 또한 Perrault의 연구 중 4개의 주물사업장을 대상으로 한 개인시료의 호흡성분진 평균농도 1.08mg/m<sup>3</sup>와도 유사함을 보였다(Perrault et al, 1992).

공정별 개인시료의 호흡성분진농도는 용해공정 0.96mg/m<sup>3</sup>, 조형공정 0.85mg/m<sup>3</sup>, 형해체공정 1.20mg/m<sup>3</sup>, 마무리공정 1.28mg/m<sup>3</sup>으로 마무리공정과 형해체공정에서 다소 높은 노출수준을 나타내었다. 이

는 불가리아의 강철주물사업장에 대한 공정별 호흡성분진의 개인노출수준으로 조형공정 1.2mg/m<sup>3</sup>, 형해체공정 1.7mg/m<sup>3</sup>, 마무리공정 1.5mg/m<sup>3</sup>로 형해체공정 및 마무리공정에서 분진의 농도가 높은 경향과 유사함을 보였고(IARC, 1987), 핀란드의 강철주물사업장에서 개인시료에 대한 호흡성분진농도가 조형공정 0.27mg/m<sup>3</sup>, 형해체공정 0.42mg/m<sup>3</sup>, 마무리공정 0.45mg/m<sup>3</sup>으로 본 연구에서의 노출농도 보다는 낮은 경향을 보였으나, 역시 형해체공정과 마무리공정에서 높은 결과를 보였다(Siltanen et al, 1976). 본 연구대상 사업장에서 형해체작업과 마무리작업은 대부분이 실내작업이었고, 국소배기 장치가 없거나 거의 가동이 안되는 상태로 작업을 하였으며, 대부분 특별한 환기 장치 없이 자연환기로 작업을 수행하므로 분진의 비산이 많았다. 이런 결과로 형해체공정과 마무리공정은 다른 공정과는 달리 엄격한 작업환경관리가 요구된다 하겠다.

### 2) 입경분포

주물분진의 입경분포를 분석한 결과 마무리작업을 제외한 모든공정에서 large mode와 small mode의 분진을 볼 수 있었다. 주로 large mode의 분포를 보인다는 Perrault의 연구(MMAD 6.8, 12.6, 2.1, 7.8 $\mu$ m)와는 상응하였으나 본 연구에서 분진 크기가 더 큰 경향을 보였다(Perrault et al, 1992). 또한 입경분리포집기에서 호흡가능성 분진이 차지하는 비율은 용해작업 66.11%, 조형작업 48.58%, 형해체작업 46.06%이었으며 마무리작업이 41.77%이었고, 입경포집기로 포집한 분진중 호흡성분진이 차지하는 비율과 cyclone으로 포집한 호흡성분진의 비교시 입경포집기의 호흡성분진 비율이 다소 높게 나타났는데, 다른연구(Groves 등; 1994, 정지연 등; 1995)에서 보인 연구결과와 다소 차이가 있었다. 이는 Groves 등이 사용한 필터(pore size 0.8 $\mu$ m, membrane filter)와 본 연구에서 사용한 필터(pore size 5 $\mu$ m, PVC filter)가 달라 포집효율 면에서 차이가 생겨 발생한 것으로 사료된다.

### 3) 물질시료의 유리규산 함유량

첫째, 에너지 분산 X선 분광기장치 전자주사현미경(EDXA)은 나트륨부터 우라늄까지 모든성분에 특이적으로 분석이 가능하다. 그러나, 유도결합플라

즈마 (Inductively Coupled Plasma-Mass, ICP-MS) 등은 Na, K, Si 등에 의한 내부분자의 간섭으로 검출할 수 없으나(Bark, 1992), EDXA는 주물사업장의 물질시료 원소함량을 검출하는데 적당한 것으로 사료된다. 둘째, X선 형광분석기(XRF)방법의 물질시료중 유리규산 함유량은 IR 방법에 비하여 훨씬 높게 나타났다. 이는 XRF의 전처리과정에서 물질시료가 고온으로 가열되면서 비결정형유리규산이 결정형유리규산(석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트, 트리폴리)으로 변해서 생기는 오류와 비결정형유리규산(diatomaceous earths, pyrogenic silica, colloidal silica, precipitated silica, silica gel)도 구별이 불가능하여 총유리규산의 함량으로 나타나 과대평가가 된 것으로 생각되며, 산업보건분야에서 물질시료중 문제시 되는 결정형 유리규산의 함유량에 대해 정확한 분석결과를 나타낼 수 없는 것으로 사료된다. 셋째, 간섭식 적외선 분광기(FTIR)를 이용한 석영함유량은 기중시료보다 낮은 석영함유량을 보였다. 이는 물질시료의 경우 개인시료보다 더 유리규산의 함유량이 낮게 나타난다는 Janko의 연구와 상응한 결과를 보였다(Janko et al, 1989).

#### 4) 기중시료중 호흡성분진의 석영함유량

유리규산을 분석하는 방법으로는 비색법(colorimetric method), 분말 X선회절분석(powder XRD), 간섭식적외선분광기(FTIR), 원자흡광법(Atomic Absorption), 핵자기공명법(Nuclear Magnetic Resonance), 현미경법(Microscopy Methods) 등이 있으나 현재 국제적인 사용경향은 XRD 방법이 가장 우선 순위에 있으며, IR 방법이 그 다음 순위를 차지하고 있고 비색법은 거의 사용하고 있지 않다(Madsen et al, 1995). 또한 시료의 전처리가 필요 없는 직접필터법(Direct on Filter technique, XRD & IR)을 사용하는 일부국가도 있다(Madsen et al, 1995). 유리규산은 자연상태에서 대부분 석영으로 존재하여 산업보건분야에서는 주로 석영에 관한 농도 평가를 하고 있고(정호근 등, 1989), 직업적 노출로서 유리규산의 정량에 대한 평가는 IR 방법과 XRD 방법이 가장 적합하다(Pickard et al, 1985). 본 연구의 유리규산함유량 분석에 사용된 IR은 장점으로서 새로운 물질이나 알

지못하는 순수한 물질에 대해 IR 스펙트럼을 정보로 하여 혼합물의 구조를 예측하는 정성분석에는 용이하나, 비결정형유리규산(amorphous silica), 방해석(calcite), 크리스토파라이트, 고령토(kaolinite), 트리디마이트 등 간섭물질의 영향으로 정량분석을 하는데 약한 단점이 있다(Madsen et al, 1995; NIOSH, 1994; Pickard et al, 1985). XRD는 운모(mica), 장석(feldspar), 규선석(sillimanite), 지르콘(zircon), 흑연(graphite), 규회석(wollastonite), 백류석(leucite), 정장석(orthoclase)에 대해 간섭영향을 받을 수 있지만, 비결정형 유리규산에 대한 간섭은 배제할 수 있다(NIOSH, 1994). 그러나 기중 결정형유리규산을 분석하는데 XRD 방법이나 IR 방법에 대한 유리규산함유량의 결과는 차이가 적으며(Pickard et al, 1985), IR 방법은 XRD 방법과 병행 될 때 결정형유리규산의 농도를 더 정확히 평가할 수 있다(Toffolo & Lockington, 1981). IR방법으로 시행한 본 연구에서 지역시료의 석영농도는 용해작업  $15.19\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 조형작업  $20.32\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 형해체작업  $30.91\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 마무리공정  $34.57\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보였다. 이는 4개의 주물사업장을 대상으로 지역시료의 석영농도에 대한 Perrault의 연구결과  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 유사함을 보였다(Perrault et al, 1989).

호흡성분진의 석영함유량의 평균은 개인시료에서 4.60%, 지역시료에서 6.39%로, Boone과 Houten의 연구결과 석영함유량이 개인시료에서 6.0%, 지역시료에서 6.8%를 보인 것과 유사하였으며 보통 개인시료보다는 지역시료에서 조금 높은 경향을 보인다(Boone & Houten, 1976). 국가별 석영함량에 관한조사를 보면 스웨덴의 경우 1968년부터 1971년까지 철주물사업장에서 821개의 시료에 대한 개인시료 조사결과 13.0%로 나타났으며(IARC, 1987), 1976부터 1981년까지 미국에 있는 주물사업장을 OSHA에서 1743개의 개인시료중 호흡성분진에 대한 조사결과 7.3%에서 12.0%로 나타났으며(Oudiz et al, 1983), 독일은 여러 주물사업장에서 채취한 75개의 개인시료에 대한 유리규산의 함유량은 13-19%이었다(IARC, 1987). 스웨덴, 미국, 독일의 경우 석영의 함유량이 10%를 넘었는데 본 연구와는 달리 좀더 높은 함유량을 보였다. 이는 각 국가별 주물사에 함유된 석영농도, 국소배기시설의

유무, 작업방법 등의 차이에 기인된 것으로 사료된다. 개인시료에 대한 공정별 호흡성분진중 석영함유량은 조형작업 4.32%, 형해체작업 4.84%, 마무리공정 5.36%로 이는 정지연 등의 연구의 용해공정 1.68%, 조형공정 1.52%, 후처리 3.91%와 비교시 마무리공정에서 다소 높은 결과를 나타낸것과 일치하였만 함유량에 있어서는 차이가 있었다(정지연 등, 1995). 그리고 Janko 등은 주물공장에서 크리스토파라이트는 함유율은 마무리공정에서 3.2%~7.8%, 형해체공정에서 19~41%를 함유하고 있다고 말하고 있다(Janko et al, 1989). 이는 주물사업장에서 일어나는 고온에서의 작업이 주물분진중 함유된 석영이 크리스토파라이트로 변성되어 발생하는 것으로 추후 크리스토파라이트에 대한 함량연구가 이루어져야 하며 주물분진의 평가시 크리스토파라이트도 함께 이루어져야 할 것으로 사료된다. 각 국가별 호흡성분진중 석영에 대한 노출기준은 벨기에, 덴마크, 프랑스, 이태리, 스웨덴, 영국, 미국(OSHA, MSHA, ACGIH), 유고슬라비아 등이 0.10mg/m<sup>3</sup>으로 정하고 있으며 오스트리아 0.10mg/m<sup>3</sup>, 불가리아 0.07mg/m<sup>3</sup>, 핀란드와 노르웨이 0.20mg/m<sup>3</sup>, 독일, 네덜란드, 스위스 0.15mg/m<sup>3</sup>, 미국 NIOSH가 0.05mg/m<sup>3</sup>로 제시하고 있다(IARC, 1987). 현재 미국에서는 허용농도를 더 엄격히 해야 한다는 의견이 분분하다. 이에 본 연구에서는 현재 우리나라 작업환경측정기관에서 총분진중 1, 2, 3종으로 분류하여 평가하는 방법으로 평가하려 하였으나 주물분진이 몇 종으로 분류되어 있는지 알 수 없었고, 또한 유리규산의 함량에 따른 분진분류가 기중시료의 유리규산함량에 따른 분류인지 물질시료의 유리규산함량에 따른 분류인지도 구분할 수 없었다. 이에 우리나라 기준인 호흡성분진중 석영에 대한 기준 0.1mg/m<sup>3</sup>에 적용하여 평가한 결과 조형작업에서 1곳이 초과하였다. 또한 OSHA 기준에 적용시 초과하는 곳은 조형작업 2곳, 형해체작업 4곳이었으며, NIOSH 기준에 적용시 조형작업에서 2곳, 형해체작업에서 3곳이 허용기준을 초과하였다. 이러한 결과로 보아 현재 총분진으로 측정을 하여서는 주물작업장에서 발생하는 분진농도를 올바르게 평가하기 불가능하다. 이에 호흡성 분진을 측정하는 포집기를 사용하여 결정형유리규산중 주물사업장에서 발생하는 석영과 크리스토파라이트에 대한 혼합물질의 평

가의 기준으로 현재 미국 OSHA에서 사용되는 다음과 같은 식에 의한 평가가 올바른 것으로 사료되며, 우리나라도 이에 따른 평가기준이 새로이 설정되어 올바른 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

$$10\text{mg/m}^3$$

$$(\% \text{ quartz}) + 2(\% \text{ cristobalite}) + 2(\% \text{ tridymite}) + 2$$

본 연구결과와 해석시 시료수가 44개로 한정된 점과 분석이 IR 방법으로 이루어진 점으로 추후 XRD 방법으로 주물사업장에 대한 기중석영함유량과 크리스토파라이트의 발생유무를 다시 확인해 볼 필요가 있고, 앞으로 우리나라의 진폐증의 발생이 가능한 제조업에 대해 결정형유리규산함유량을 파악할 필요가 있으며 이에 따른 평가의 연구가 필요하다.

## 맺 음 말

본 조사는 1996년 4월에서 12월까지 13개 주물사업장을 대상으로 용해, 조형, 형해체 및 마무리작업시 발생하는 주물분진의 입경분포를 파악하고, 호흡성분진의 농도와 석영함유량을 알기 위해서 IR 분석을 한 결과는 다음과 같다.

1. 주물사업장에서 분진의 입경분포는 용해작업은 small mode에서 기하평균 1.50 $\mu\text{m}$ , large mode에서 13.43 $\mu\text{m}$ 의 MMAD를 가지는 이산형 분포를 보였고, 조형작업에서도 이산형 분포를 보이며 기하평균이 small mode에서 1.65 $\mu\text{m}$ , large mode에서 19.40 $\mu\text{m}$ 을 보였으며, 형해체작업에서도 이산형 분포를 볼 수 있었으며 기하평균이 small mode에서 0.48 $\mu\text{m}$ , large mode에서 19.58 $\mu\text{m}$ 이었으나 마무리작업에서는 단일한 분포를 보였으며 기하평균은 19.40 $\mu\text{m}$  이었다.

2. 공정별 개인시료의 호흡성분진농도는 용해작업 0.96mg/m<sup>3</sup>, 조형작업 0.85mg/m<sup>3</sup>, 형해체작업 1.20mg/m<sup>3</sup>, 마무리작업 1.28mg/m<sup>3</sup>로 마무리작업에서 가장 높은 농도를 보였으며, 지역시료의 호흡성분진농도는 용해작업 0.45mg/m<sup>3</sup>, 조형작업 0.41mg/m<sup>3</sup>, 형해체작업 0.56mg/m<sup>3</sup>, 마무리공정은 0.23mg/m<sup>3</sup>으로 형해체작업에서 가장 높은 농도를 보였다. 또한 지

역시료로서 총분진은 형해체작업 2.40mg/m<sup>3</sup>, 조형작업 1.89mg/m<sup>3</sup>, 형해체작업 2.32mg/m<sup>3</sup>, 마무리작업 3.32mg/m<sup>3</sup>으로 마무리작업에서 가장 높았다. .

3. IR 방법으로 분석한 개인시료의 호흡성분진중 석영농도는 기하평균이 조형작업 27.75 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 형해체작업 45.63 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 마무리공정이 21.66 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 보였으며, 지역시료의 호흡성분진중 석영농도는 기하평균이 용해작업 15.19 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 조형작업 20.32 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 형해체작업 30.91 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 마무리공정에서 34.57 $\mu$ g/m<sup>3</sup>을 보였으며, 마무리공정에서 통계적으로 유의하게 높았다 (P<0.05).

4. IR 방법으로 분석한 물질시료의 석영함유량은 조형공정 4.54%, 형해체 및 마무리공정에서 4.70%를 보여 개인시료 보다는 적은 함유량을 나타내었다.

5. 개인시료의 공정별 석영함유량은 조형작업 4.32%, 형해체작업 4.84%, 마무리공정 5.36%로 마무리공정에서 다소 높은 결과를 나타내었고 지역시료의 경우 용해작업에서 3.36%, 조형작업에서 6.35%, 형해체작업에서 4.59%, 마무리공정에서 14.69%를 보였으며 마무리공정에서 통계적으로 유의하게 높았다. (P<0.01).

이와 같은 결과에서 볼 때 현재 사용되고 있는 총분진의 측정으로는 주물 분진을 정확히 평가하기 어렵다. 그러므로 호흡성 분진을 채취할 수 있는 cyclone 포집기를 사용하여 각 공정별 개인포집을 하여야 하며 이에 대한 결정형 유리규산의 종류별에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다. 이에 주물사업장에서 발생하는 석영과 크리스토파라이트에 대한 혼합물질의 평가의 기준으로 올바른 평가가 이루어져야 할 것이다.

## REFERENCES

김병수, 김성천, 이채언, 전진호, 김진욱, 김준연. 제조업 산업장의 작업공정과 분진 작업장내의 분진농도에 관한 조사 연구. 인제의학 1986;7(2):61-69.

김희만, 김돈근. 분진 발생 작업장의 분진 발생 실태 및

영향인자에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1993;3(2):227-239.

노동부a. 작업 환경 측정 편람, 1994;178.

노동부b. '94 산업재해분석, 1994;13,250-253.

대한산업보건협회. 특수건강진단 종합연보, 1991;35.

백남원. 산업위생학개론. 서울: 신광출판사, 1995;61-67.

송세옥, 이광목. 일부 석탄광산의 공정별 호흡성 분진 및 유리규산의 폭로 농도. 한국의 산업의학 1994;33(4):153-161.

윤영노, 김영식. 일부 석탄광산 기증 부유분진의 입경 분포와 호흡성 분진 비율. 한국산업위생학회지 1991;1(1):62-67.

윤영노, 정호근. 태백지역 석탄광산의 작업부서별 호흡성 분진 폭로농도. 한국산업위생학회지 1991;1(1):47-55.

이승한. 규제증, 조규상 편, 진폐증. 서울: 최신의학사, 1985;203-224.

이원철, 임현우, 맹광호, 김현욱, 구정완, 임영, 윤임중. 제조업 진폐증의 역학적 특성, 가톨릭대학교 산업의학 연구소 1997.

작업환경측정 기술협의회. 작업환경측정 종합 연보. 1995.

정지연, 이윤근, 장순문, 신용철. 주물사업장의 분진폭로 실태와 입경분포 특성. 서울대학교 10주년기념 학술 논문집 1995;172-186.

정호근, 최호춘, 김해정. 호흡성분진 중 유리규산 농도 분석법. 근로복지공사 중앙병원부설 직업병연구소. 직연보 2-89-2. 1989.

최호춘, 천용희, 윤영노, 김해정. 태백 및 강릉지역 석탄광의 호흡성 분진과 석영농도에 관한 조사. 예방의학회지 1987;20(2):261-269.

최호춘, 천용희, 김해정, 이정주. 간섭식 적외선 분광기에 의한 태백지역 석탄광의 호흡성 분진 중 석영, 운모 및 장석의 정량분석. 대한예방의학회지 1988;21(2):271-283.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure Indices 1994-1995. Cincinnati, ACGIH. 1994.

Barg E. Studies of beryllium geochemistry in soils: Feasibility of using 10Be/9Be ratios for age determination. University of California, San Diego, 1992;68-71.

Boone CW, Houten RW. Comparison of foundry dust evaluation by various methods. Am Ind Hyg Assoc J 1976;537-540.

Burgess WA. Foundry Operations. In : Recognition of health hazards in industry(A review of materials and processes), 2th ed, John Wiley & Sons, Canada. 1995.

Freedman RW, Toma SZ, Lang HW. On-filter analysis of quartz in respirable coal dust by infrared absorp-

tion and x-ray diffraction. *Am Ind Hyg Assoc J* 1974;41:1-8.

Groves WA, Hanne RA, Levine SP, Schoch MA. A field comparison of respirable dust samplers. *Am Ind Hyg Assoc J* 1994;55(8):748-755.

Hewett P, MaCawley AM. A microcomputer spreadsheet technique for analyzing multimodal particle size distribution. *Appl Occup Environ Hyg* 1991;10:865-873.

Hogan TJ. Particulates. In : *Fundamentals of industrial hygiene*, 4th ed, by B.A. Plog, Itasca, Illinois, National Safety Council, 1995.

International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans: Silica and some silicates. Vol 42. Lyon, France: World Health Organization, IARC, pp 49, 51 1987.

Janko M, McCrae R E, O' Donnell J F, Austria R J. Occupational exposure and analysis of microcrystalline cristobalite in mullite operations. *Am Ind Hyg Assoc J* 1989;50(9):460-465.

Madsen FA, Rose MC, Cee R. Review of quartz analytical methodologies: present and future needs *Appl Occup Environ Hyg* 1995;10(12):991-1001.

National Institute for Occupational Safety and Health

: NIOSH manual of analytical methods, 4th SILICA, CRYSTALLINE by IR 1994.

Occupational Safety and Health Administration : OSHA analytical methods manual, 2th ed, Quartz and cristobalite in workplace atmospheres 1991.

Oudiz J, Brown JW, Ayer HE, Samuels S. A report on silica exposure levels in United States foundries. *Am Ind Hyg Assoc J* 1983;44:374-376.

Perrault G, Dion C, Ostiguy C, Michaud D, Baril M. Selective sampling and chemical speciation of airborne dust in ferrous foundries *Am Ind Hyg Assoc J* 1992;53(7):463-70.

Pickard KJ, Walker RF, West NG. A comparison of x-ray diffraction and infrared spectrophotometric methods for the analysis of  $\alpha$ -quartz in airborne dusts. *Ann Occup Hyg* 1985;29(2):149-67.

SAS/STAT User's guide, release 6.03, SAS institute Inc., Cary, NC, USA, 1988.

Toffolo D, Lockington N. Direct infrared spectrophotometric analysis of free crystalline silica in respirable dust from a steel foundry *Am Ind Hyg Assoc J* 1981;42:579-585.

U.S. Department of Labor. Silica dust exposure can cause silicosis fact sheet No. OSHA 96-54, 1996.