

석재가공 공정에서 발생하는 분진과 석영의 입자크기별 농도 특성

김성환 · 배혜정¹ · 정종현² · 피영규^{2*}

대구한의대학교 보건대학원 · ¹대구한의대학교 산업보건연구소 · ²대구한의대학교 보건학부

Particle Size-Related Dust and Quartz Concentration of Stone Grinding Operations

Seong-hwan Kim · Hye Jeong Bae¹ · Jong-Hyon Jung² · Young Gyu Phee^{2*}

Graduate School of Public Health, Daegu Haany University

¹*Institute for Industrial Health, Daegu Haany University*

²*Faculty of Health Science, Daegu Haany University*

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to evaluate quartz concentrations in airborne respirable dust and particle size-related quartz concentrations.

Methods: Respirable dust samples were collected using a 10 mm Dorr-Oliver nylon cyclone equipped with a 37 mm, 5 μ m pore size PVC filter. Dust samples were collected with a Marple's personal cascade impactor from stone grinding operations in five stone-related business located in the Gyeongsangbuk-do area.

Results: The geometric mean of quartz concentration in the respirable dust was 0.170 mg/m³, and the rate of exceeding the Korean Occupational Exposure Limit(KOEL) was 93.3%. The quartz concentration by particle size shows that it was the highest(0.115 mg/m³) in stage 5(3.50-6.00 μ m), which corresponds with the size of respirable particle. The smaller the particle sizes were, the higher quartz the content became. The mass fractions of inhalable, thoracic, and respirable dust were 72.1%, 36.0%, and 14.4%.

Conclusions: The rate of the quartz concentration in respirable dust from stone grinding operations exceeding the American Conference of Governmental Industrial Hygienists Threshold Limit Values was 100%, which means proper work environmental management is required through regular working environmental measurements. Given that the stone grinding operations had a higher small size dust concentrations, there is a need to reduce respirable dust, such as through wet operation and local exhaust ventilation.

Key words: particle distribution, quartz, stone grinding operation

I. 서 론

석재란 건물 장식재, 석공예재 등의 용도에 따라 경도, 강도, 사용 가능성, 광택성 및 장식적 특성 등의 일정한 성질을 갖는 암석으로 건축재료는 건축물의 외면, 내면, 외부 및 내부바닥 등에 사용되며, 석공예재료는 기념물, 가구, 조각상, 안장, 계단석과 기

등석 등으로 활용된다. 우리나라의 석재석산은 전국적으로 비교적 고르게 분포하고 있으며, 국내에서 채석되었던 석재석산을 대표 암(巖) 중별로 분류하면 심성암류 87%, 퇴적암류 6%, 변성암류 4% 및 화산암류가 3%이고 심성암류에서는 화강암과 섬록암, 퇴적암류에서는 사암, 변성암류에서는 대리암이 주요 채석대상 암 종이다. 그리고 건축용으로 쓰이는 석재

*Corresponding author: Young Gyu Phee, Tel: 053-819-1590, Fax: 053-819-1412, E-mail: yphee@dhu.ac.kr
Faculty of Health Science, Daegu Haany University. 1 Hannydae-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 712-715

Received: November 23, 2014, Revised: December 6, 2014, Accepted: December 20, 2014

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 화강암, 사암 및 대리석이 대표적이며 화강암 석재는 국내 석재자원의 90% 이상을 차지하고 있다. 이러한 화강암의 주요 구성광물은 석영 30%, 장석 65%, 운모 3%, 기타 2%로 생산되는 지역에 따라 조성분의 비율의 차이가 있어 석재의 색이 다르다(Jung, 2004; Lee et al., 2006).

석재산업은 화강암 등의 석재를 절단, 성형 및 가공하여 석제품을 제조하는 산업활동을 의미하며, 표준산업분류는 석제품 제조업에 해당한다(KOSTAT, 2013). 이러한 석재산업은 자연에 존재하는 이용 가치가 있는 암석에서 석재를 채취하는 채석업과 이를 가공하여 사람이 필요로 하는 제품을 만드는 석재가공업과 이들을 설치 및 시공하는 작업으로 구분된다(Lee, 1992). 채석업에서 분진은 천공기에 의하거나 골재 가공 시 크러셔 및 선별기에 의한 발생이 주원인이 되고, 석재가공 과정에서 발생하는 분진의 양은 암석의 종류, 규모 및 성상에 따라 차이가 있으며, 투입되는 장비, 작업조건 등에 따라 순간적으로 다량의 분진이 발생되기도 한다(Lee & Kim, 1992; Min et al., 2004).

이렇듯 석재가공 과정에서 공기 중으로 발생하는 광물성분진에는 산화규소 결정체인 석영이 함유되어 있다. 이러한 석영은 규폐증(Silicosis), 폐 섬유화(Lung fibrosis), 폐암 등의 원인이 되며, 규폐증은 호흡성 크기의 석영에 노출되었을 때 그 양과 깊은 관계가 있다(Hogan, 1995). 특히, 화강암에서 석영의 노출은 폐기능 저하, 기도폐색(Airway obstruction) 및 만성폐쇄성 폐질환 등이 유발되며(Malmberg et al., 1993; Rushton, 2007), 폐암과도 노출-반응관계가 명확한 것으로 알려져 있다(Attfield & Costello, 2004). 이에 국제암연구기구(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 석영을 포함한 산화규소 결정체를 인체 발암물질 1군(Group 1)으로 분류하고 있다(IARC, 1997).

선진 외국의 경우 화강암에서 공기 중 호흡성분진과 석영의 노출에 대한 연구(Theriault et al., 1974; Malmberg et al., 1993; Kullman et al., 1995; Rushton, 2007)가 다수 이루어져 왔다. 국내에서도 석탄광산, 주물사업장, 요업, 콘크리트 사업장 등을 대상으로 호흡성 분진과 석영의 노출평가에 대한 연구가 일부 수행(Choi et al., 1988; Kim et al., 1999; Shin et al., 2002; Park et al., 2003)되었지만 화강암을 주원료로

하는 석재사업장에 대한 연구는 드문 실정이다. 또한, 분진은 입자의 크기 분포가 다양하며 분진 입자의 공기역학적 직경에 의해 인체 내 침착되는 정도 및 위치가 다르다(ISO, 1981, ACGIH, 2013). 이러한 점을 감안하여 Sirianni et al.(2008)는 채석장의 화강암 분진의 입자크기 분포를 파악한 바 있고, Bello et al.(2002)는 건설작업자를 대상으로 입경분리포집기를 활용하여 입자크기별 석영의 농도와 함유량을 파악한 바 있으나 우리나라에서는 이러한 연구가 수행된 바 없다.

따라서 본 연구는 석재가공업의 가공공정을 대상으로 입자크기별 분진 및 석영의 농도 특성을 파악하여 향후 근로자 건강보호를 위한 기초자료를 제공하는데 목적이 있다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

석재 가공업체 5개소에 대하여 사전에 총분진을 채취하여 절단공정과 가공공정에서 광물성분진의 노출량을 사전에 파악하였다. 그 후 광물성분진의 농도 및 석영의 함유량이 높게 나타난 석재가공 공정을 대상으로 2012년 8월부터 11월까지 현장을 방문하여 호흡성분진은 15개의 시료를, 입자크기별 시료는 5개를 채취하였다.

2. 연구방법

1) 입자크기별 시료의 채취

(1) 호흡성분진의 채취

호흡성분진은 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH)의 0600방법에 따라 직경 37 mm, 공극 5 μ m의 PVC필터를 3 piece cassette에 장착하고 10-mm Nylon Cyclone (Dorr-Oliver, Gillian, USA)에 연결하여 유량 1.7 L/min으로 시료를 채취하였다(NIOSH, 1998).

(2) 입자크기별 시료의 채취

석재분진의 입자크기별 농도를 파악하기 위하여 입경분리포집기(Marple's personal cascade impactor, Anderson sampler, model 298, USA)를 사용하였다. 채취된 분진의 되튐으로 인한 손실을 최소화하기 위

하여 도포제(Silicon grease 316, Dow Corning)를 34 mm Mylar필터(Anderson Stock#C-290-MY, Anderson Sampler Inc., USA)에 도포하여 24시간 이상 건조시켜 사용하였으며, 충돌손실을 방지하기 위하여 유량을 2 L/min으로 채취하였다. 입경분리포집기는 개인 시료채취 펌프(Apex, Cacella CEL, Bedford, UK)에 연결하여 바닥면으로부터 1.2~1.5 m의 위치에서 240~390분간 시료를 채취하였다. 시료채취에 사용된 펌프는 건식유량보정계(BIOS Defender Calibrator 510, USA)를 이용하여 측정 전·후의 유량을 확인하였다.

2) 시료의 분석

(1) 채취시료의 중량 분석

호흡성분진 및 입경분리포집기의 각 단별 중량은 시료 채취 전·후 데시게이터에서 24시간 이상 건조시켜 수분을 제거한 후 정확도 0.01 mg의 전자저울(AG245, Mettler Toledo, Switzerland)을 이용하여 시료별로 3회 이상 칭량한 후 평균값을 사용하였고, 공시료 필터로 보정하여 농도값을 산출하였다.

(2) 채취시료의 석영 분석

호흡성분진 중 석영 농도와 입경분리포집기의 각 단별 석영 농도 및 함유량을 파악하기 위하여 FTIR(Fourier Transform Infra Red spectrophotometer, Cary 640, Agilent, USA)을 활용하였다. 각 단에 채취된 분진을 2-propanol(Sigma-Aldrich, USA)에 균일하게 희석한 후 직경 37 mm, 공극 5 μ m의 PVC필터(SK, USA)가 장착된 진공여과장치를 활용하여 여과시키고 그 필터를 데시게이터에 하루 이상 보관시켰다. 석영의 분석은 NIOSH의 7602 방법을 가급적 준용하였다(NIOSH, 2003). 미국표준과학연구소(National Institute of Standard & Technology, NIST)의 표준물질(Standard Reference Material, SRM) 1878a(Respirable quartz, NIST, USA)과 KBr(160-8010, PIKE, USA)를 혼합하여 펠렛(Pellet)화 하였고 7개 농도수준으로 검량선을 작성하였다. PVC필터는 도가니에 넣어 뚜껑을 덮은 후 회화로에서 650°C로 2시간 동안 필터 내 유기물을 회화시킨 후, KBr 200 mg을 막자사발을 사용하여 시료와 혼합하였다. 혼합된 시료를 13 mm die를 사용하여 펠렛을 만들어 FTIR로 1500 cm^{-1} ~400 cm^{-1} 까지 주사하였고,

799 cm^{-1} 에서 석영의 흡광도를 측정하였다.

(3) 흡입성, 흉곽성 및 호흡성분진 중량비율

입경분리포집기에 의해 채취된 입자의 흡입성(Inhalable), 흉곽성(Thoracic) 및 호흡성(Respirable)분진의 중량비율을 파악하기 위하여 미국 정부산업위생 전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienist, ACGIH)의 Particle size-selective sampling criteria for airborne particulate matter를 사용하여 각 단의 분진중량 비율에 각 단별 평균 포집효율을 곱한 값들을 합하여 계산하였다. 입경분리포집기의 각 단계별 흡입성, 흉곽성 및 호흡성분진의 하한, 중위 및 상한 크기별 유효한계직경에 따른 포집효율은 Simpson's Rule로 계산하였다(Bello et al., 2002).

3) 자료의 분석

자료의 분석은 통계프로그램 SPSS(Version 20.0K, USA)를 사용하였다. 각 단의 분진의 농도와 석영의 농도는 Sapiro-Wilk의 정규성 검정결과 대수정규분포를 보여 기하평균과 기하표준편차로 나타내었고 결과의 이해를 위하여 산술평균과 표준편차도 제시하였다.

III. 연구결과

1. 공기 중 호흡성 분진 및 석영의 농도

석재가공 공정의 공기 중 호흡성분진 농도의 기하평균은 1.372 mg/m^3 이었으며, 호흡성분진 중 석영의 기하평균 농도는 0.170 mg/m^3 으로 나타났다(Table 1). 우리나라 석영의 노출기준(0.05 mg/m^3) 초과율은 93.3%이었고 ACGIH의 노출기준(0.025 mg/m^3) 대비 모든 시료가 초과되었다.

2. 석재가공 시 발생하는 입자크기별 분진 및 석영의 특성

1) 입자크기별 분진의 농도

입경분리포집기의 각 단별 분진의 유효한계입경(Effective cut-point diameter)은 1단부터 8단까지 각각 21.30 μm , 14.80 μm , 9.80 μm , 6.00 μm , 3.50 μm , 1.55 μm , 0.93 μm 및 0.52 μm 이다. 석재가공 공정에서 발생하는 입자크기별 분진 농도는 그 크기가 21.30~

Table 1. Respirable dust and quartz concentrations of stone grinding operations

(Unit : mg/m³)

Concentration	N*	GM†(GSD‡)	Mean±S.D.§	Minimum	Maximum	ER¶
Dust	15	1.372(1.744)	1.567±0.777	0.548	2.657	-
Quartz	15	0.170(2.181)	0.225±0.175	0.049	0.554	93.3%

*N : Number of samples

†GM : Geometric Mean

‡GSD : Geometric Standard Deviation

§S.D. : Standard Deviation

¶ER(Exceed rate) : (Number of samples over KOEL / Number of samples) × 100

Table 2. Concentrations of stone dusts by particle size

(Unit : mg/m³)

Stage no	ECD*(μm)	GM†(GSD‡)	Mean±S.D.§	Minimum	Maximum
1	21.30	4.831(2.455)	6.318±4.235	1.519	11.128
2	14.80	2.695(2.170)	3.319±2.039	1.100	5.208
3	9.80	2.815(1.891)	3.250±1.700	1.243	4.743
4	6.00	1.678(1.836)	1.907±0.933	0.704	2.792
5	3.50	1.700(1.761)	1.910±0.935	0.801	3.051
6	1.55	0.667(1.994)	0.783±0.417	0.239	1.218
7	0.93	0.195(5.646)	0.444±0.527	0.014	1.340
8	0.52	0.120(6.729)	0.401±0.507	0.022	0.973

*ECD : Effective cut off diameter

†GM : Geometric Mean

‡GSD : Geometric Standard Deviation

§S.D. : Standard Deviation

Table 3. Quartz concentrations in stones dust by particle size

(Unit : mg/m³)

Stage no	ECD*(μm)	GM†(GSD‡)	Mean±S.D.§	Minimum	Maximum
1	21.30	0.049(2.212)	0.063±0.051	0.022	0.145
2	14.80	0.057(2.832)	0.076±0.055	0.012	0.181
3	9.80	0.078(2.671)	0.109±0.089	0.018	0.247
4	6.00	0.068(3.005)	0.104±0.091	0.019	0.202
5	3.50	0.115(2.599)	0.154±0.108	0.028	0.274
6	1.55	0.054(3.193)	0.086±0.081	0.013	0.203
7	0.93	0.048(1.743)	0.054±0.034	0.024	0.113
8	0.52	0.023(1.418)	0.025±0.009	0.016	0.039

50.00 μm인 1단에서 기하평균 4.831 mg/m³로 가장 높았고, 2단(14.80~21.30 μm) 2.695 mg/m³, 3단(9.80~14.80 μm) 2.815 mg/m³로 나타났다. 그 다음 입자크기가 6.00~9.80 μm인 4단에서의 기하평균은 1.678 mg/m³이었고 5단(3.50~6.00 μm) 1.70 mg/m³, 6단(1.55~3.50 μm) 0.667 mg/m³, 7단(0.93~1.55 μm) 0.195 mg/m³ 및 8단(0.52~0.93 μm) 0.120 mg/m³로 입자크기가 작아질수록 농도가 낮아지는 경향을 보였다(Table 2).

2) 입자크기별 석영의 농도

입자크기별로 석영의 농도를 분석한 결과 입자 크기가 21.30~50.00 μm인 1단에서 기하평균 농도는 0.049 mg/m³이었고, 2단 0.057 mg/m³, 3단 0.078 mg/m³, 4단은 0.068 mg/m³으로 석재분진의 입자 크기가 클수록 석영의 농도는 오히려 낮은 경향을 보였다(Table 3). 또한, 호흡성입자 크기인 5단(3.50~6.00 μm)에서 기하평균은 0.115 mg/m³로 가장 높은 농도를 보였고,

Table 4. Weight percent of quartz in stones dusts by particle size

(Unit : %)

Stage no	ECD* (μm)	GM† (GSD)‡	Mean±S.D.§	Minimum	Maximum
1	21.30	1.543(1.507)	1.650±0.867	1.030	2.400
2	14.80	3.348(2.640)	5.224±6.605	1.710	17.010
3	9.80	4.362(1.253)	4.450±0.972	3.320	5.010
4	6.00	4.518(1.645)	4.936±2.113	2.060	7.780
5	3.50	5.956(1.455)	5.314±2.525	3.840	10.400
6	1.55	8.364(1.907)	9.584±4.607	2.940	13.960
7	0.93	5.706(1.918)	6.980±5.776	3.430	17.160
8	0.52	6.033(1.631)	6.648±3.378	3.200	12.100

Table 5. Inhalable, thoracic and respirable particulate mass fraction of stone dusts

Stage no	ECD* (μm)	Mass fraction	Mean particulate mass fraction(%)		
			Inhalable	Thoracic	Respirable
1	21.30	0.307	0.174	0.003	0.000
2	14.80	0.171	0.115	0.017	0.000
3	9.80	0.185	0.137	0.062	0.001
4	6.00	0.115	0.094	0.077	0.007
5	3.50	0.119	0.104	0.103	0.043
6	1.55	0.049	0.046	0.046	0.040
7	0.93	0.028	0.027	0.027	0.027
8	0.52	0.026	0.025	0.025	0.025
Total		1.000	72.1	36.0	14.4

그 다음 6단 0.054 mg/m³, 7단 0.048 mg/m³ 및 8단은 0.023 mg/m³으로 역시 유효한계입경이 작을수록 농도가 낮아지는 것으로 나타났다.

분진의 흡입성분진, 흉곽성분진 및 호흡성분진의 중량 비율은 각각 72.1%, 36.0% 및 14.4%이었다(Table 5).

IV. 고 찰

3) 입자크기별 석영의 함유량

석재 분진에 대하여 입자크기별로 석영함유량을 분석한 결과는 Table 4와 같다. 각 단에서 석영함유량의 기하평균 범위는 1.54~8.36%이었다. 전체적인 입자크기별 석영 농도의 범위는 1.03~17.2%로 나타났고 전반적으로 입자크기가 작아질수록 석재분진 내 석영 함유량이 높은 경향을 보였으며, 특히 입자크기가 1.55~3.50 μm 인 6단의 경우 가장 높은 석영 함유량인 8.36%로 나타났다.

3. 석재분진의 흡입성, 흉곽성 및 호흡성분진의 중량 비율

석재가공 공정에서 입경분리포집기로 채취한 석재

우리나라 석재산업의 초기 수출형태는 주로 원석 상태로 소량 수출되었으나 1980년대 이후에는 고가의 석가공품이 수출의 주종을 이루었다. 또한 수출시장과 함께 국내시장도 건축물의 대형화 및 고급화 추세에 따라 석재의 수요가 증가하여 석재산업이 유망업종으로 부각되기 시작하였다(Lee, 1992; Jung, 2004). 중국에서도 한국과 같은 재질의 화강암이 많이 생산되고 있으며, 건축재료로서 대량 생산되는 판재, 블록, 현관문, 석관과 묘비, 석재 난간 및 계단 등과 공예재가 국내로 수출되고 있다. 중국의 일부 화강석의 광물 성분은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 각섬석 등이고 화학성분 분석결과 산화규소

가 65~70% 이상이며 석영 함유량은 20% 이상으로 알려져 있다(Kim, 2008).

분진이 원인이 되어 발생하는 직업병이 진폐증인 것은 자명한 사실이다(Benjamin & Malmes, 2002). 우리나라에서 발생한 진폐증자는 2010년 931명에서 2011년 1,018명으로 87명 증가되었다(MoEL, 2012). 이렇듯 진폐증을 예방하고 쾌적한 작업환경을 조성하기 위하여 산업안전보건법에 따라 정기적으로 작업환경측정을 실시하여야 하며(MoEL, 2014), 2008년부터 산화규소 중 결정체 석영은 0.1 mg/m³에서 0.05 mg/m³으로 강화하고 호흡성분진으로 사람에게 충분한 발암성 증거가 있는 물질인 발암성 1A로 분류하고 있다(MoEL, 2013). 따라서 본 연구는 석영의 함유량이 높고 광물성분진이 과다하게 노출되는 석재가공 공정을 대상으로 입자크기별 분진 및 석영의 농도와 함유량을 확인하고자 하였다.

ACGIH, 국제표준기구(International Standardization Organization, ISO) 및 유럽표준위원회(Comité Européen de Normalisation, CEN)는 공기 중 분진 입자에 대한 크기별 시료채취 기준을 제정하여 흡입성, 흉곽성 및 호흡성입자의 공기역학적 입경별 포집효율을 제시하고 있다(ISO, 1981; ACGIH, 2013). 작업환경이나 일반환경에서 분진을 크기별로 분리하여 포집하는 주목적은 분진의 입경 특성이 호흡기내 부위별 침착에 크게 영향을 준다는 사실을 인식하여 분진의 흡입 위험도에 대한 가장 적절한 지표를 제공하는데 있다(Lippmann, 1988). 이러한 이유로 그동안 목분진(Kim & Kim, 1994), 납입자(Park & Paik, 1995), 주물분진(Phee et al., 1997)과 일부 제조업(Kim et al., 2000) 및 터널공사(Ryoo et al., 2003) 등을 대상으로 입자크기별 특성 등에 대한 연구가 다양하게 수행되었다. 그러나 모든 선행연구는 입자크기 분포 및 분진농도 등에 초점을 두고 있으며 크기별 석영농도는 파악하지 못하였다. 광물성분진의 경우 그 농도가 상당히 높지 않으면 입자크기별 석영농도를 산출하기에는 어려움이 있다. 이 점을 감안하여 사전에 일부 석재가공업을 대상으로 총분진을 채취하였고 그 농도를 확인한 결과 절단공정은 평균 5.64 mg/m³, 가공공정은 16.15 mg/m³으로 나타나 농도가 높은 석재가공 공정을 선정하여 입자크기별 석영 농도 분포를 확인하였다.

또한, 호흡성분진과 석영에 노출되는 근로자들은

규폐증 등에 이환될 수 있기 때문에 광물성분진이 발생하는 다양한 제조업을 중심으로 노출평가에 대한 연구가 진행되어 왔다. 본 연구는 석재사업장에서 발생하는 호흡성분진의 농도를 파악한 결과 기하평균은 0.904 mg/m³(0.595~1.372 mg/m³)이었고, 석영의 농도는 0.091 mg/m³(0.048~0.170 mg/m³)으로 확인되었다. 이는 Kim et al.(1999)이 선행 보고한 석재사업장 호흡성분진 농도의 기하평균(0.24 mg/m³)과 석영 농도(0.0172~0.0241 mg/m³)보다 상당히 높은 수준이었다. 또한, Kim et al.(2002)의 연구결과 석재사업장의 호흡성분진 농도의 기하평균은 1.25 mg/m³, 석영 농도의 기하평균은 0.010~0.0297 mg/m³으로 역시 본 연구결과에 비해 낮은 수준으로 보고하였다. 이러한 이유는 Kim et al.(1999)과 Kim et al.(2002)이 수행한 석재사업장은 주로 콘크리트와 벽돌을 제조하는 사업장으로 원재료에 포함된 석영의 함량이 다소 낮고, 석영의 분석을 직접필터법으로 수행하는 등 연구방법상의 차이에도 기인된 것으로 생각된다. 또한, 외국의 경우 화강암 채석가공 산업과 석재 분쇄와 관련된 산업에서 발생하는 호흡성분진 중 석영의 노출평가를 수행한 연구를 살펴보면 핀란드 화강암 채석 사업장에서 0.12~1.47 mg/m³(Koskela et al., 1987), 스웨덴 화강암 분쇄사업장 0.16 mg/m³(Malmberg et al., 1993), 미국 석재가공 사업장 0.055~0.088 mg/m³(Donaldson et al., 1982), 0.034~0.043 mg/m³(Eisen et al., 1984), 암석 분쇄사업장 0.04~0.06 mg/m³(Kullman et al., 1995), 영국 스코틀랜드 사암 채석 및 분쇄사업장 0.04~0.09 mg/m³(Davies et al., 1994)으로 본 연구결과와 큰 차이는 없었다.

석영에 대한 직업적 노출기준의 경우 ACGIH는 1999년부터 0.1 mg/m³에서 0.025 mg/m³으로 강화하였고, 미국 산업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)의 허용노출기준(Permissible Exposure Limit, PEL)은 10 mg/m³/%SiO₂+2로 적용하고 있으며, NIOSH의 권장기준(Recommended Exposure Limits, REL)은 우리나라와 동일하게 0.05 mg/m³으로 규정하고 있다(US DoL, 1996). 또한, 일본 0.03 mg/m³, 영국 0.1 mg/m³, 독일 0.15 mg/m³, 캐나다는 0.025 mg/m³으로 설정되어 있는 등 국가마다 조금씩 차이가 있다(Roh et al., 2004). 현재 석재사업장에서 발생하는 분진에 대한 작업환경측정은 산업안전보건법 시행규칙 제

93조(작업환경측정 대상 작업장 등)에 따라 실시되고 있으나 산업안전보건기준에 관한 규칙 제 606조(적용 제외)의 규정에 따라 습식작업으로 판단하여 대부분 지정측정기관에서 측정을 수행하고 있지 않은 실정이다(MoEL, 2014). 그러나 본 연구에서 석재가공 공정의 호흡성분진 중 석영농도 분석결과 기하평균(0.17 mg/m^3)이 우리나라 노출기준 0.05 mg/m^3 을 초과하고 ACGIH의 노출기준(0.025 mg/m^3) 대비 모든 시료가 초과되는 것으로 평가되어 석재사업장은 습식작업이라 할지라도 정기적으로 작업환경측정을 수행하여 노출 수준을 파악할 필요가 있다.

한편, 입경분리포집기의 각 단별 분진의 기하평균 농도는 1단 4.831 mg/m^3 , 2단 2.695 mg/m^3 , 3단 2.815 mg/m^3 , 4단 1.678 mg/m^3 , 5단 1.700 mg/m^3 , 6단 0.667 mg/m^3 , 7단 0.195 mg/m^3 및 8단 0.120 mg/m^3 로 입자크기가 작아질수록 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 이를 흡입성, 흉곽성 및 호흡성분진의 중량 비율로 환산해보면 흡입성분진 72.1%, 흉곽성분진 36.0%, 호흡성분진 14.4%로 나타났다. Kim(1992)은 일부 분진 발생 사업장을 대상으로 호흡성분진의 비율을 파악한 결과 용접의 경우 32.67~65.05%, 연마는 41.14~52.37%로 보고하였고, Phee et al.,(1997)은 주물사업장의 호흡성분진이 차지하는 비율을 46.06~66.11%로 보고하여 본 연구결과에 비해 높은 수준을 보였다. 이는 용접흡과 주물사의 경우 석재가공 공정에서 발생하는 입자 크기의 분포가 다르고 작업방법 및 대상사업장의 차이에도 기인된 것으로 보인다. 또한, Kim & Kim(1994)이 가구공장에서 발생하는 목 분진의 흡입성분진의 중량 비율을 확인한 결과 54.4~60.5%로 나타나 본 연구결과에 비해 다소 낮은 수준으로 보고하였는데 이는 석재가공 공정의 각 단별 분진의 농도가 $14.80 \sim 50.00 \mu\text{m}$ 의 크기에 높은 점을 감안할 때 목 분진에 비해 석재분진에 큰 입경이 많이 분포하고 있다는 것을 의미한다. Ryoo et al.,(2003)의 경우 터널 건설공사에서 발생하는 흡입성, 흉곽성 및 호흡성분진 평균 중량비율이 각각 84.0%, 67.2%, 43.1%로 본 연구결과에 비해 전반적으로 높은 수준으로 보고하였다. 이러한 차이는 터널 건설 현장의 경우 밀폐공간으로 작은 입자들이 공기 중에 장기간 체류하게 되며 석재사업장의 경우 실외의 작업이 많이 이루어져 작은 입자들이 대기 중으

로 흩날리기 때문에 발생한 것으로 추측된다.

입자크기별 석영함유량을 분석한 결과 전반적으로 입자크기가 작아질수록 분진의 석영 함유량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었고, 특히 입자크기 $1.55 \sim 3.50 \mu\text{m}$ 의 평균 석영함유량이 8.36%로 가장 높았으며 절단경이 $0.93 \mu\text{m}$ 의 경우 석영함유량이 최대 17.16%로 나타났다. 따라서 석재가공 공정의 경우 호흡성입자 크기의 발생을 저감시키기 위하여 적극적인 관리가 요구된다.

본 연구의 제한점으로 연구대상이 경북 석재사업장의 일부 공정에 한정되어 우리나라 전체를 대표하기에 다소 무리가 있으며, 시료의 수가 제한됨에 따라 향후 석재사업장의 다양한 공정으로 확대하여 추가 조사를 수행할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 2012년 8월부터 11월까지 석재가공 공정에서 발생하는 분진의 노출평가를 위하여 5개소를 대상으로 호흡성분진과 입경크기별 분진 및 석영농도를 파악하였다. 그 결과 공기 중 호흡성분진의 기하평균 농도는 1.37 mg/m^3 이었고, 석영농도는 0.17 mg/m^3 으로 나타났다. 입자크기별 분진 및 석영 농도는 입자크기가 작을수록 낮아지는 경향을 보였지만, 석영함유량은 입자크기가 작을수록 증가하는 경향을 보여 입경이 크기가 작은 입자의 농도 저감을 위하여 반드시 습식작업이 필요하고 국소배기장치의 제어속도를 관리하는 등 적극적인 방안마련이 필요하다. 또한, 석재가공 공정에서 발생하는 호흡성분진 내 석영농도의 노출기준 초과율은 66.7%로 정기적인 작업환경측정을 통한 적절한 관리대책 마련이 시급한 것으로 나타났다.

References

- American Conference of Governmental Industrial hygienist(ACGIH). Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure Indices. Cincinnati, ACGIH, 2013
- Attfield MD, Costello J. Quantitative exposure-response for silica dust and lung cancer in Vermont granite

- workers. *Am J Ind Med* 2004;45(2):129-38
- Bello D, Virji MA, Kalil AJ, Workie SR. Quantification of respirable, thoracic, and inhalable quartz exposure by FT-IR in personal impactor samples from construction sites. *Appl Occup Environ Hyg* 2002;17(8):580-590
- Benjamin GS, Malmes J. The Lungs. In : Plog BA, Itasca, Illinois, Ed, *Fundamentals of Industrial Hygiene*, 5th Ed.; National Safety Council; 2002. p. 47
- Choi HC, Chun YH, Kim HJ, Lee JJ. Quantitative analysis of quartz, mica, and feldspar in Respirable coal mine dust in taebaek area by fourier transform infrared spectrophotometry. *J Prev Med Public Health* 1988;21(2):271-283
- Davies LST, Robertson A, Agius RM, Cowie HA, Cherrie JW et al. The use of compliance monitoring for assessing quarry worker's exposures to respirable dust and quartz. *Annals of Occup hyg* 1994;38(1):559-570
- Donaldson HM, Wallingford K, Jones JH. Environmental surveys in the Barre, Vermont and Elberton, Georgia granite industries. Cincinnati, OH, National Institute for Occupational Safety and Health(Natinal Technical information service Publication No. PB83-179911); 1982
- Eisen EA, Smith TJ, Wegman DH, Louis TA, Froines J. Estimation of long term dust exposures in the Vermont granite sheds. *Am Ind Hyg Assoc J* 1984;45(2):89-94
- 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 risks to humans: silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils. Vol 68. Lyon, France: World Health Organization, IARC.; 1997. p. 49, 51
- International Standard Organization(ISO), Size definition for particle sampling recommendation of AD Hoc Working Group Appointed by Committee TC 146 of the International Standards Organization. *Am Ind Hyg Assoc J* 1981 42;A64-A68
- Jung SO. A study of physical characteristic on building stone resources. Department of Resource Engineering Graduate School, Chosun University press. 2004. p.1-10
- Kim HJ, Phee YG, Roh YM, Kim HW. Study on the field application of FTIR-direct on filter method for the analysis of quartz in respirable samples. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2002;12(2):73-78
- Kim HW, Phee YG, Roh YM, Won JI. Analysis of quartz contents by XRD and FTIR in respirable dust from various manufacturing industries Part 2-Ceramics, stone, concrete, glass and briquets, etc. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1999;9(1):99-111
- Kim SY, Kim HW. Particle size distributions of wood dust by cascade impactor. *Korean J Occup Health* 1994;33(3):132-140
- Kim YH. A chinese stone study for plastic material. Fine Art Sculpture Major Department of Art, Graduate School, Kunsan National University Press. 2008. p.1-9
- Kim YS. Size distributions and respirable mass fraction of exposure dust in work environment. *J Korean Environ Sci* 1992;1(2):25-31
- Kim YW, Phee YG, Kin HW, Kin HA. Dust concentration by 37mm closed-face cassette, impactor and cyclone in manufacturing industries. *J Korean Occup Health* 2000;39(2):76-86
- Koskela RS, Mutanen P, Sorsa JA, Klockars M. Mortality and disability among granite workers. *can J Work Environ Health* 1987;13:18 - 25
- Kullman GJ, Griefe AL, Costello J, Hearl FJ. Occupational exposures to fibers and quartz at 19 crushed stone mining and milling operation. *Am J of Ind Med* 1995;27:641-660
- Lee SK, Kim YB. A basic study for prevention of accident and pollution in stone industry. *J of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Eng* 1992;29:5-64
- Lee SW. A study on domestic stone industries. Korea Energy Economics Institute 1992;1:1-137
- Lee CO, Hong SS, Lee BT, Kim BT, Kim GS et al. Spatial distribution of the dimension stone quarries in korea. *J Petrol Soc Korea* 2006;15(1):154-166
- Lippmann M. The effect of particle size on the regional deposition of inhaled particles in the human respiratory tract. *Am J Ind Hyg Assoc J* 1988;30: 257-275
- Malmberg P, Hedenström H, Sundblad BM. Changes in lung function of granite crushers exposed to moderately high silica concentrations: a 12 year follow up. *Br J Ind Med* 1993 Aug;50(8):726-31
- Min KW, Chin HI, Shin HJ, Park JD. Characterization of particulate matters from stone industry and mitigation schemes of their emission. *J of Advanced Mineral Aggregate composites* 2004;9:3-9
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure Limits for Chemical Substances and Physical Agents(MoEL Public Notice No. 2013-38).; 2013

- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational Safety and Health Act. Ministry of Employment and Labor.; 2014
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). 2011 Industrial Accident. Ministry of Employment and Labor.; 2012
- National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH). NIOSH manual of analytical methods, Particulates not otherwise regulated, RESPIRABLE: METHOD 0600, Issue 3, dated 15 January 1998;(3)
- National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH). NIOSH manual of analytical methods, silica, crystalline by IR: Method 7602, Issue 3, dated 15 March 2003;(3)
- Park DW, Paik NW. A study on the characteristic of airborne lead particle size by industry. Korean Ind Hyg Assoc J 1995;5(2):160-171
- Park YS, Roh YM, Kim HW, Han JG, Ahn YS, Kang SK, Kim JM. A study of respirable dust concentrations and quartz contents in foundry. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2003;13(1):90-97
- Phee YG, Roh YM, Lee KM, Kim HY, Kim YW, Won JI, Kim HW. Analysis of quartz content and particle size distribution of airborne dust from selected foundry operations. J Korean Soc Occup Environ Hyg 1997;7(2):196-208
- Roh YM, Kim YS, Kim HW. The establishment of occupational exposure level for free silica. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2004;14(2):165-174
- Rushton L. Chronic obstructive pulmonary disease and occupational exposure to silica. Rev Environ Health. 2007;22(4):255-72
- Ryoo JJ, Jang JG, Lee BK, Jung SJ, Kim SJ et al. The size characteristic of particles generated during road tunnel construction work. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2003;13(2):107-112
- Shin YC, Choi BS, Lee BK, Yi GY, Lee JT et al. Evaluation of workers exposure to total dust, respirable dust, and crystalline free silica by job in Korean coal mines. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2002;12(3):144-154
- Sirianni G, Hosgood HD, Slade MD, Borak J. Particle size distribution and particle size-related crystalline silica content in granite quarry dust. J Occup Environ Hyg 2008;5(5):279-285
- Statistics Korea(KOSTAT). Korean Standard Industrial Classification, 2013 <http://kostat.go.kr/kssc/stclass/StClassAction.do?method=ksscTree&classKind=1&kssc=popup>
- Theriault GP, Burgess WA, DiBerardinis LJ, Peters JM. Dust exposure in the vermont granite sheds. Arch Environ Health 1974;28(1):12-17
- U.S. Department of Labor(US DoL). Silica dust exposure can silicosis fact(OSHA sheet No.96-54).; 1996