

우리나라 실리콘카바이드 취급사업장의 공기 중 분진 노출평가 Exposure Assessment of Airborne Dust in Manufacturing Industries Using Silicon Carbide in Korea

이준정 · 피영규^{1*}

Jun Jung Lee · Young Gyu Phee^{1*}

대구한의대학교 산업보건연구소, 대구한의대학교 보건학부

Institute for Industrial Health, Daegu Haany University

¹*Faculty of Health Science, Daegu Haany University*

ABSTRACT

Occupational exposure to silicon carbide dust of manufacturing industries has seldom been evaluated in Korea. Accordingly, we evaluated various silicon carbide dust concentrations in the breathing zone of workers between May 2010 and July 2010. To compare silicon carbide dust concentrations, three dust samplers including the Institute of Occupational Medicine (IOM) sampler, 37mm cassette sampler, and Aluminum cyclone sampler were used. A total of 5 manufacturing industries producing abrasive and refractory materials using silicon carbide were investigated. The geometric mean concentrations were 2.04, 0.97, and 0.48 mg/m³ in inhalable, total and respirable silicon carbide dust, respectively. The geometric mean concentrations of silicon carbide in abrasive material manufacturing industries were slightly higher than that of refractory manufacturing industries, and finishing operations were higher than that of other operations. It was found that the results of exposure assessment in airborne dust at manufacturing industries using silicon carbide in Korea showed exceeding rate to American Conference of Governmental Industrial Hygienists Threshold Limit Value (3 mg/m³) was 10% in respirable dust samples. Therefore, with the consideration of the close relationship between smaller dust size and the occurrence of occupational respiratory diseases, it is suggested to promulgate the new occupational exposure limit for respirable silicon carbide dust.

Key words : Silicon carbide, inhalable dust, total dust, respirable dust, exposure assessment

I. 서 론

실리콘카바이드는 카보런덤(Carborundum)으로도 알려져 있으며, 천연계에 존재하지 않는 광물로 1892년 미국의 Acheson이 다이아몬드 합성실험 도중에 우연히 발견한 인공적인 광물이다. 이 물질은 250개의 결정형 형태로 구성되어 있으며, 1,700°C 이상에서 육각형 결정 구조인 α -실리콘카바이드를 가장 흔하게 접할 수 있고 β -실리콘카바이드는 1,700°C 이하에서 형성되며 다이아몬드와 유사한 구조를 가진다(Cheung, 2006). 우리나라 실리콘카바이드의 연간 취급량은 2009년을 기준으로 약 4만 톤 정도로 추산되고 있으며(노동부, 2009), 제조량은 2,747 톤, 수입량은 7,381 톤, 사용량은 11,919 톤으로 알려져 있다

(환경부, 2007).

실리콘카바이드는 연마재와 내화재 및 가열재 등에 사용되고 이를 제조하는 사업장의 근로자에게 노출될 수 있으며, 특히, 실리콘카바이드 원재료를 생산하는 사업장의 분진 노출농도가 가장 높은 것으로 알려져 있다(Burgess, 1995; Foreland et al, 2008). 우리나라에서 사용하는 실리콘카바이드의 원료 대부분은 중국에서 수입되고, 실리콘카바이드와 보오크사이트(Bauxite)를 주원료로 하는 연마재 생산이 가장 많다.

공기 중 실리콘카바이드 분진을 근로자가 흡입할 경우 폐질환의 주요 원인이 되며 호흡곤란, 폐기능의 감소, 진폐증 등이 발생할 수 있다(Smith et al, 1984; Peters et al, 1984; Masse et al, 1988; Durand et al, 1991; Dufresne et al, 1993; 1995; Infante Rivard et al, 1994). 우리나라의 경우 실리콘카바이드 취급 근로자의 건강보호를 위하여 노출기준을 설정하여 관리하고 있으며, 그 기준은 총분진 10 mg/m³으로 설정되어 있다(고용노동부, 2011a). 그러나 미국정부산업위생전문가협회(ACGIH)의 서한도(Thre-

*Corresponding author: Young Gyu Phee

경북 경산시 유곡동 290번지 대구한의대학교 보건학부

Tel: 053-819-1590, Fax: 053-819-1209

E-mail: yphee@dhu.ac.kr

Received: 2011. 8. 10, Revised: 2011. 9. 20

Accepted: 2011. 9. 27.

should Limit Values, TLVs)와 영국 보건안전부(Health Service Executive, HSE)의 작업장 노출기준(Workplace Exposure Limit, WELs)에서는 실리콘카바이드에 대한 노출 기준을 크게 섬유상 형태와 비섬유상 입자로 구분하고 있다. 본 연구는 섬유상 형태가 아닌 실리콘카바이드 비섬유상 입자만을 대상으로 하였으며, 입자의 경우 그 크기에 따라 흡입성, 호흡성 또는 충분진으로 분류하여 노출기준을 제시하고 있다. 미국산업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)은 실리콘카바이드에 대한 허용노출기준(Permissible Exposure Limit, PEL)을 충분진과 호흡성분진으로 구분하여 각각 10 mg/m^3 과 5 mg/m^3 으로 규정하고 있으며, ACGIH-TLVs에서는 흡입성분진(10 mg/m^3)과 호흡성분진(3 mg/m^3) 두 가지로 노출기준을 제시하고 있다(CFR, 2011; ACGIH, 2010a). 이처럼 대다수의 선진외국에서는 실리콘카바이드의 노출기준을 흡입성분진과 호흡성분진으로 나누어서 관리하고 있으며, 각각의 기준도 다르게 설정되어 있다. 하지만 우리나라의 경우 실리콘카바이드 분진에 대한 노출기준이 입자의 크기를 감안하지 않는 충분진으로만 설정되어 있기 때문에 사업장에서 공기 중으로 부유하는 모든 크기의 분진을 포집하게 된다(고용노동부, 2011b). 또한, 실리콘카바이드는 노출기준만 마련되어 있을 뿐 작업환경측정 대상물질로서 명확히 설정되어 있지 않아 현재 작업환경측정기관에서 이 물질에 대한 노출평가는 거의 수행되고 있지 않는 실정이다. 이런 이유로 미국, 영국 등 대부분의 선진외국에서는 실리콘카바이드에 대한 충분진 및 호흡성분진에 대한 노출평가 연구가 다소 이루어졌으나 국내에서 수행된 실리콘카바이드 노출평가에 관한 연구는 전혀 없는 실정이다(Dion et al, 2005; Foreland et al, 2008).

따라서 본 연구는 우리나라 실리콘카바이드 취급 사업장을 대상으로 입자크기별 분진의 노출수준을 파악하고, 노출기준의 추가 설정 타당성 등을 검토하여 동종업종 근로자 건강보호를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구대상

우리나라에서 실리콘카바이드를 원재료로 사용하여 연마재와 내화재를 제조하는 사업장 5개소에 대하여, 2010년 5월 4일부터 7월 2일까지 현장조사를 실시하였다. 생산제품별로 연마재 제조 사업장의 시료는 7개이었고 내화재 제조 사업장 시료는 10개이었으며, 공정별로는 혼합이 7공정으로 가장 많았고 성형 6공정 및 후처리 4공정이었다.

2. 물질시료의 분석

실리콘카바이드 물질시료의 섬유상물질 포함여부와 원소 성분별 함유량을 확인하기 위하여 에너지 분산형 X-선 분광기 장착 전기장 방사형 전자주사현미경

(SEM-EDXA, Model S-4200, Hitachi, Japan)을 사용하였으며, 분석을 위하여 물질시료를 고르게 분포시킨 후 0.5 g의 시료를 디스크에 압축시킨 후, 기기의 조건은 전압 15 kV, 광선전류 100 pico Amps를 사용하였다. 또한, X-선 형광 분광기(XRF, Model PW2400, Philips, Netherlands)를 활용하여 실리콘카바이드의 물질시료의 구성성분을 파악하였으며 분석 시 측정강도를 얻기 위한 전압, 전류는 각각 3 kW, 30 mA이었고 시편제작은 950℃에서 가열한 시료와 di-lithium tetraborate($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)를 1:5로 혼합하고 자동유리편 기구로 1,200℃에서 용해시켜 유리편을 제작하여 분석에 이용하였다.

3. 공기 중 시료의 채취 및 분석

1) 시료의 채취

실리콘카바이드의 흡입성분진의 채취는 IOM (Institute of Occupational Medicine) 포집기(SK, USA)에 PVC 여과지(직경 25 mm, 공극 5 μm)를 장착하여 사용하였고, 충분진은 폴리스틸렌 재질의 3단 카세트에 PVC여과지(직경 37 mm, 공극 5 μm)를 장착하여 채취하였다. 또한, 호흡성분진의 농도측정은 NIOSH의 0600 공정시험법에 따라 aluminum cyclone(SK, USA)에 PVC여과지(직경 37 mm, 공극 5 μm)를 장착하여 사용하였다(NIOSH, 1998). 고용량 펌프(Gilian, USA)에 각각의 분진채취기를 연결하였으며 시료 채취 시 유량은 1.7-2.5 Lpm이었고, 측정 전·후에 건식유량보정계(BIOS Defender 510, USA)로 유량을 확인하였다.

2) 시료의 분석

사전에 공기 중 실리콘카바이드 시료가 섬유상 형태인지 비섬유상 입자인지 확인을 위하여 50 mm 카울(Cowl)이 장착된 카세트에 MCE (Mixed Cellulose Ester) 여과지를 활용하여 위상차현미경(Nikon 50i, Japan)으로 검증한 결과 모든 시료에서 섬유상 형태는 관찰되지 않았다. 채취된 흡입성분진, 충분진 및 호흡성분진은 중량 분석법을 이용하여 농도값을 산출하였으며, 측정 전·후의 시료는 데시게이터(AS ONE OH-3S, Japan) 내에서 24시간 이상 보관하여 수분을 충분히 제거한 후 중량을 확인하였다. 중량분석에 사용된 전자저울(Sartorius CP244S, Germany)의 정확도는 0.01 mg이며, 시료측정 전·후의 필터 중량차에 유량을 나누고 공시료의 무게 변화를 보정한 값을 최종결과치로 활용하였다.

4. 자료의 분석

공기 중 실리콘카바이드 분진의 농도는 엑셀(Microsoft, USA)을 이용하여 입력하였고 통계분석은 SAS 9.1 통계프로그램(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 사용하였다. 분진의 농도는 Sapiro-Wilk의 정규성 검정결과 대수정규분포를 보여 기하평균과 기하표준편차로 제시하였고 결과의 이해를 위하여 산술평균과 표준편차도 결과에 수록하였다. 군간 비교는 자료의 분포가 정규성을

가정할 수 없어 비모수 방법으로 비교하였고 생산제품별 두 군의 평균농도차이는 Wilcoxon rank sum test를, 3군 이상(공정, 시료채취기)의 평균농도는 Kruskal-Wallis test를 이용하여 검정하였다.

III. 연구 결과

1. 실리콘카바이드 물질시료의 성분분석

1) 원소 성분 및 함유량

실리콘카바이드 물질시료를 전자주사현미경으로 확인한 결과 Fig. 1과 같이 대부분 돌모양의 다각형 형태의 덩어리 입자(1-300 μm)로 구성되어 있었다. 이는 위상차 현미경으로 공기 중 시료를 관찰한 결과 섬유상 물질이 관찰되지 않았다는 것을 어느 정도 입증할 수 있는 결과이었다.

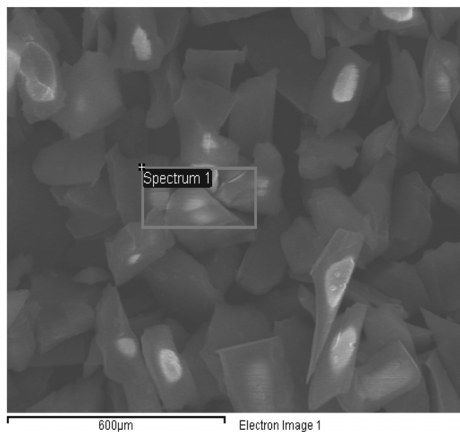


Fig. 1. A shape of silicon carbide in bulk sample analyzed by SEM-EDXA.

한편, 물질시료에 대한 성분분석을 수행한 결과 약 2 keV에서 실리콘 피크를 볼 수 있었으며, 주 성분은 실리콘이 60% 이상, 탄소가 약 37% 내외로 확인되었다(Table 1).

Table 1. Weight percent of element in silicon carbide bulk samples analyzed by SEM-EDXA

Element	No. of Samples	Mean(%)	D	Min(%)	Max(%)
Carbon	2	36.67	4.893	33.21	40.13
Silicon	2	63.33	4.893	59.87	66.79

2) 화학적 구성성분

실리콘카바이드 물질시료의 X-선 형광분석결과 아래 Fig. 2와 같이 실리콘에 대한 스펙트럼에서 2 θ 값이 142.2와 144.6에서 특징적으로 피크가 높게 검출되었으며 철(Fe)의 경우 85.8의 2 θ 값에서 철 성분에 해당하는 피크가 높게 나타났다.

Table 2와 같이 실리콘카바이드 물질시료의 화학적 구성성분을 파악한 결과 Si 중심의 규산성분인 SiO₂가 약 84% 정도를 차지하고 있었고 철성분 등을 함유한 Fe₂O₃ 등이 추가적으로 검출되었으나 그 성분은 미미하였다.

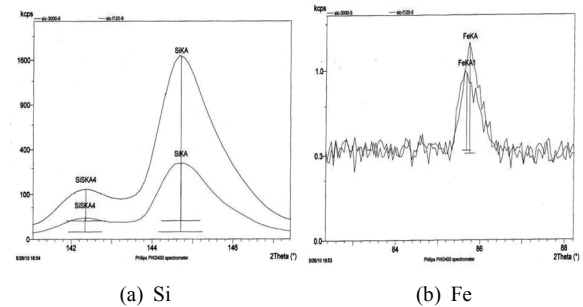


Fig. 2 Spectrums of silicon carbide bulk sample by XRF.

Table 2. Chemical compositions of silicon carbide in bulk sample analyzed by XRF

Chemical composition	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	NaO	K ₂ O ₃
Component ratio(%)	83.9	trace	trace	trace	trace	trace	trace	trace

2. 공기 중 실리콘카바이드의 노출수준

1) 흡입성분진의 농도

실리콘카바이드 취급 사업장의 흡입성분진의 기하평균농도는 2.04 mg/m³이었고, 범위는 0.54-7.45 mg/m³으로 최대노출농도의 경우도 ACGIH-TLV의 74.5% 수준으로 나타났다. 생산제품별 기하평균농도는 연마재를 제조하는 사업장(2.08 mg/m³)이 내화재 제조 사업장(1.98 mg/m³)에 비하여 높게 나타났으나 그 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(Table 3).

Table 3. Inhalable dust concentrations of silicon carbide by product

Product	No. of Samples	GM (mg/m ³)*	GSD†	Mean(mg/m ³)±SD‡	Range (mg/m ³)	p-value
Refractory	7	1.980	1.920	2.350 ± 1.383	0.810 - 4.104	0.1964
Abrasive	10	2.081	2.418	2.878 ± 2.388	0.538 - 7.450	
Total	17	2.039	2.168	2.661 ± 1.999	0.538 - 7.450	

*Geometric Mean

† Geometric Standard Deviation

‡ Standard Deviation

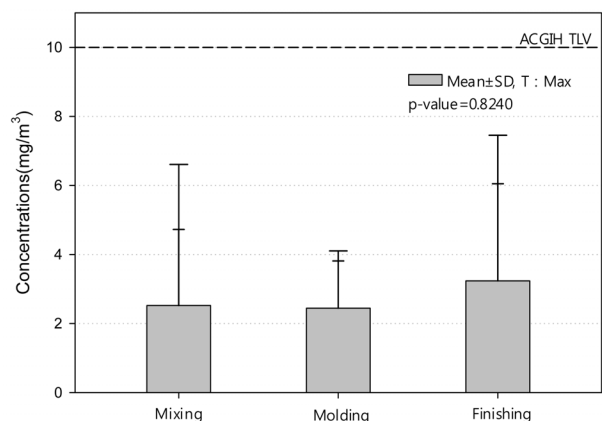


Fig. 3 Inhalable dust concentrations of silicon carbide by process.

공정별로는 후처리(2.60 mg/m³)로 가장 높았고 성형 2.00 mg/m³, 혼합 1.80 mg/m³ 순이었으나 그 차이가 통계적 유의성은 없었다. 한편, 모든 시료는 ACGIH에서 제시하고 있는 흡입성분진의 노출기준인 10 mg/m³을 초과하지 않았다(Fig. 3).

2) 총분진의 농도

실리콘카바이드의 총분진 노출평가결과 기하평균농도는 0.97 mg/m³이었고, 최대 농도는 5.67 mg/m³으로 우리나라 노출기준(10mg/m³)의 56.7% 수준으로 나타났다. 생산제품별 기하평균농도는 흡입성분진과 마찬가지로 연마재를 제조하는 사업장이 1.04 mg/m³으로 내화재 제조 사업장(0.87 mg/m³)보다 높게 나타났지만 그 차이가 통계적으로 유의하지는 않았다(Table 4).

Table 4. Total dust concentrations of silicon carbide by product

Product	No. of Samples	GM (mg/m ³)	GSD	Mean (mg/m ³) ±SD	Range (mg/m ³)	p-value
Refractory	10	0.874	2.662	1.277 ± 1.198	0.144 - 4.343	0.2453
Abrasive	14	1.037	3.121	1.763 ± 1.769	0.181 - 5.671	
Total	24	0.966	2.874	1.561 ± 1.546	0.144 - 5.671	

Fig. 4를 보면 공정별 기하평균농도는 후처리(1.27 mg/m³), 혼합(0.91 mg/m³), 성형(0.88 mg/m³) 순으로 높게 나타났지만 통계적으로 유의한 차이는 없었고 OSHA-PEL을 초과한 시료는 없었다.

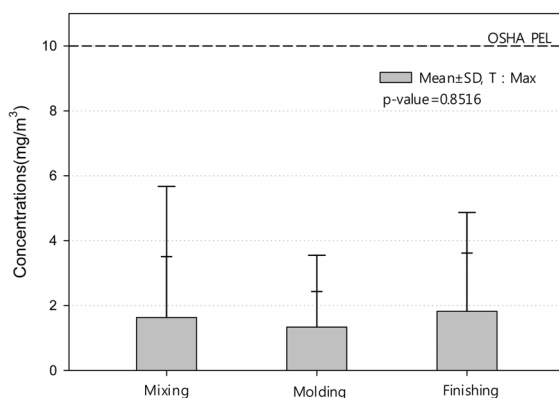


Fig. 4. Total dust concentrations of silicon carbide by process.

3) 호흡성분진의 농도

공기 중 실리콘카바이드의 호흡성분진의 기하평균농도는 0.48 mg/m³이었고, 내화재 및 연마재 사업장에서 각각 1개의 시료가 ACGIH-TLV(3 mg/m³)를 초과하는 것으로 나타나 약 10%의 초과율을 보였다. 생산제품별 기하평균농도는 흡입성분진, 총분진 농도와 마찬가지로 연마재를 제조하는 사업장이 0.58 mg/m³으로 내화재 제조 사업장 0.35 mg/m³보다 높게 나타났으나 역시 그 차이가 통계적으로 유의하지는 않았다(Table 5).

Table 5. Respirable dust concentrations of silicon carbide by product

Product	No. of Samples	GM (mg/m ³)	GSD	Mean (mg/m ³) ± SD	Range (mg/m ³)	ER*(%)	p-value
Refractory	8	0.350	3.931	0.779 ± 1.145	0.059 - 3.481	1(12.5)	0.9943
Abrasive	12	0.584	3.962	1.149 ± 1.169	0.075 - 3.686	1(8.3)	
Total	20	0.475	3.903	1.001 ± 1.144	0.059 - 3.686	2(10.0)	

* Exceed rate : (Number of samples over ACGIH TLV / Number of samples) × 100

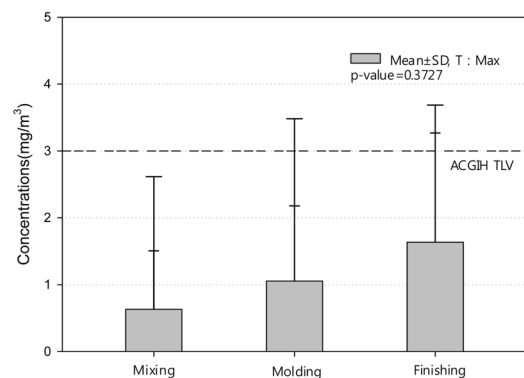


Fig. 5. Respirable dust concentrations of silicon carbide by process

공정별 기하평균농도를 살펴보면 후처리공정이 0.78 mg/m³으로 성형(0.62 mg/m³), 혼합(0.28 mg/m³) 공정에 비해 높게 나타났으나, 그 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 한편, Fig. 5와 같이 성형과 후처리 공정에서 각각 ACGIH-TLV를 초과하는 시료가 각각 1건이 있었다.

3. 측정방법별 분진의 농도 비교

Fig. 6은 실리콘카바이드를 취급하는 사업장에서 채취한 흡입성분진, 총분진, 호흡성분진의 노출농도를 비교한 결과이다. 전체적으로 흡입성분진의 기하평균농도는 2.04 mg/m³, 총분진 0.97 mg/m³, 호흡성분진 0.48 mg/m³ 순으로 나타났으며 측정방법별 평균농도의 차이는 통계적으로 유의하게 나타났다(p<0.01). 총분진을 호흡성분진과 비교할 경우 2.0배 정도 높은 수준으로 나타났고, 흡입성분진은 호흡성분진에 비해 4.25배 더 높게 나타났다.

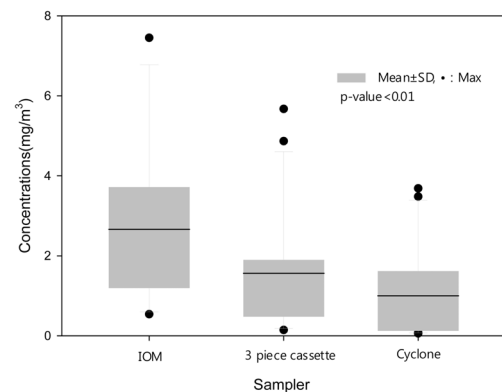


Fig. 6. Dust concentrations of silicon carbide by sampler

IV. 고 찰

실리콘카바이드는 내산화성, 내마모성, 내부식성 및 열충격 저항성이 우수하여 연마 및 연삭재료, 전기로의 저항발열체와 각종 노(爐)공업의 내화재료 등에 중요한 공업재료로 사용되고 있다. 이렇듯 실리콘카바이드를 원료로 활용하여 제품을 생산하는 사업장의 근로자들에게 입자상 물질로 노출될 수 있으며, 주요한 노출경로는 호흡을 통한 흡입으로 폐에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있고, 피부흡수는 되지 않는 것으로 보고되어 있다(ACGIH, 2010b). 특히, 실리콘카바이드 섬유상물질이 공기 중 동시에 존재하는 경우에는 폐섬유화, 폐암 및 중피종 유발도 가능한 것으로 알려져 있다(Johnson & Hahn, 1996).

Hayashi & Kajita(1988)는 연마재 제조 공장에서 10년간 노출된 진폐 근로자의 건조된 폐조직을 분석한 결과 실리콘카바이드 43%, 산화알루미늄 24%, 홍연석 2.3%, 석영 2.0% 정도로 실리콘카바이드가 진폐증의 주 원인물질임을 제안하였다. 또한, Funahashi et al(1984)은 벽돌제조 공장에서 수년간 실리콘카바이드에 노출된 두 명의 근로자를 대상으로 연구한 결과 호흡곤란 호소와 조직학적 검사 결과 섬유성 폐조직과 철 함유 소체에서 다량의 실리콘카바이드가 존재하고 있음을 확인하면서 실리콘카바이드가 다른 광물성 분진보다 더 섬유조직을 잘 생성시킨다고 주장한 바 있다. 한편, Osterman et al(1989, 1990)은 실리콘카바이드에 16년간 평균 0.63 mg/m^3 ($0.18\text{--}1.42 \text{ mg/m}^3$)에 노출된 156명의 근로자들의 폐기능을 조사한 결과 비흡연자 중에서 노력성호기량과 노력성폐활량이 각각 17.8 ml, 7.0 ml가 감소되는 원인을 누적된 호흡성 분진의 노출과 관련이 있다고 하였다. 따라서, 실리콘카바이드 노출 근로자의 경우 호흡곤란 호소, 폐기능 감소, 폐섬유화 및 진폐증과 분명 연관이 있을 수 있다고 판단된다.

본 연구에서 실리콘카바이드의 총분진 평가결과 그 농도의 범위가 $0.54\text{--}7.45 \text{ mg/m}^3$ 으로 나타났다. 이는 Foreland et al(2008)이 실리콘카바이드 생산 사업장에 대하여 총분진을 평가한 기하평균 농도 범위($0.29\text{--}21.0 \text{ mg/m}^3$)에 비하여 다소 낮은 수준을 보였는데 그 원인은 실리콘카바이드 생산사업장의 경우 이를 원료로 연마재나 내화재 등을 생산하는 사업장에 비해 그 노출농도가 높다는 Burgess(1995)의 보고처럼 대상 사업장의 차이 때문인 것으로 보인다.

한편, 이번 연구결과 실리콘카바이드의 호흡성 분진 기하평균농도는 0.48 mg/m^3 을 보여 Osterman et al(1989, 1990)의 평균 0.63 mg/m^3 으로 나타난 연구결과와 다소 유사한 수준이었다. 또한, 국내 실리콘카바이드 취급사업장의 호흡성분진 ACGIH-TLV 초과율은 10% 수준으로 이는 Foreland et al(2008)의 연구결과 실리콘카바이드 호흡성분진 측정결과 노르웨이의 노출기준인 5 mg/m^3 을 초과하는 경우는 노(爐)작업 26%, 유지관리 및 보수작업

15%에 비하여 다소 낮게 나타났다. 그러나 본 연구의 조사결과 호흡성분진에 대한 농도 범위의 경우 $0.06\text{--}3.69 \text{ mg/m}^3$ 으로 Smith et al(1984)은 실리콘카바이드 생산 근로자들의 호흡성 분진 노출의 기하평균 범위 $0.1\text{--}1.46 \text{ mg/m}^3$ 와 Dion et al(2005)이 조사한 실리콘카바이드 제조 사업장의 호흡성분진을 측정한 결과 공정별 기하평균의 농도가 검출한계- 0.61 mg/m^3 에 비하여 다소 높게 나타났다. 이는 Peter et al(1984)이 수행한 실리콘카바이드 노출에 의한 폐의 영향을 평가하기 위해 실행한 연구에서 흉부 방사선사진의 원형 음영은 호흡성 분진과 관련이 있고, 폐기능 실험에서 강제 폐활량은 호흡성 입자의 노출 수준과 관련이 있으며, 입자가 폐에 미치는 영향은 현재 허용 노출수준 이하에서도 근로자들에게 발생하고 있는 것처럼 보인다는 점을 감안할 때 호흡성분진의 농도 파악과 직업적 노출기준 초과여부는 상당히 중요한 의미가 있다고 할 수 있다.

우리나라의 경우 실리콘카바이드에 대한 노출기준을 10 mg/m^3 으로 제안하고 있지만 흡입성, 호흡성을 구분하지 않고 있어 총분진의 노출기준으로 해석된다(고용노동부, 2011). 그러나 OSHA-PEL도 총분진과 호흡성분진으로 구분하고 있으며, ACGIH-TLV에서도 흡입성분진과 호흡성분진으로 제시하고 있고 NIOSH-REL도 흡입성분진(10 mg/m^3)과 호흡성분진(5 mg/m^3)로 제안되어 있다(NIOSH, 2005). 한편, 영국의 WEL도 흡입성입자(10 mg/m^3)와 호흡성입자(4 mg/m^3)로 나뉘어져 있다(HSE, 2007). 분명한 것은 실리콘카바이드에 대한 호흡성분진의 노출기준은 모두 마련되어 있다는 것이다. 이처럼 실리콘카바이드 분진을 입자크기별로 구분하여 노출기준을 설정하는 이유는 그 직경이 인체조직의 침착효율에 가장 크게 영향을 받기 때문이다. 이러한 이유로 작업환경에서 분진을 크기별로 분리하여 포집하는 주목적도 분진의 입경 특성이 호흡기내 부위별 침착에 크게 영향을 준다는 사실을 인식하여 분진의 흡입 위해도에 대한 가장 적절한 지표를 제공하는데 있다(Lippmann, 1988). 또한, 본 연구결과에서는 공기 중 실리콘카바이드가 섬유상 형태로 관찰되지는 않았지만, ACGIH-TLV와 HSE-WEL의 경우 그 기준을 섬유상 형태와 비섬유상 입자로 구분하기 때문에 사업장에서 발생하는 공기 중 실리콘카바이드는 우선 그 형태가 섬유상인지 입자상인지 사전에 감별하여 적절한 노출기준을 적용할 필요가 있다.

한편, 실리콘카바이드의 공기 중 농도는 흡입성분진>총분진>호흡성분진 순으로 나타났는데 이는 연구대상 입자의 차이는 있지만 IOM 포집기, 3단 카세트 및 사이클론을 활용하여 측정한 면분진(피영규 등, 2009), 용접 흄(강용선 등, 2010)과 목분진(이동원 등, 1996)의 측정방법별 농도 차이와 동일함을 보였다. 이는 ACGIH에서 제시하는 흡입성입자와 호흡성입자의 절단경(Cut point)이 각각 $100\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ 임을 감안할 때 다소 결과를 예측할 수 있었다(ACGIH, 2010a)

우리나라 실리콘카바이드를 취급하는 사업장을 대상

으로 분진의 노출수준을 평가한 결과 연마재를 제조하는 사업장의 분진 농도가 높고 공정별로는 후처리공정이 높은 수준을 보여 향후 실리콘카바이드를 취급하는 근로자의 건강보호를 위하여 연마재 제조사업장과 후처리 공정을 우선 관리할 필요가 있다고 판단된다. 한편, 입자 크기별 평가결과 흡입성분진, 총분진은 국내외 기준을 초과하는 사업장은 없는 것으로 나타났다. 그러나 호흡성분진의 경우 시료의 10%가 ACGIH-TLV를 초과하고 있었고 노출농도의 범위도 선진외국에 비해서 높게 나타났다. 따라서 실리콘카바이드가 노출근로자가 진폐 등의 직업성 폐질환과 큰 연관이 있는 것을 감안할 때 호흡성분진의 농도를 파악하는 것은 중요한 의미를 가지고 있다. 따라서 현재 총분진으로 실리콘카바이드 분진을 평가하는 방법은 호흡성분진에 대한 특성을 반영하지 못하기 때문에 향후 호흡성분진을 채취할 수 있는 사이클론 등을 이용하여 측정하는 것이 권장된다. 또한, 총분진은 에어로졸 내의 모든 분진크기를 포집하는 것을 가정하지만 흡입성 분진의 경우 그 절단경이 100 μm 로 다소 명확하고(Born, 2007), OSHA-PEL을 제외한 대부분의 국가에서 실리콘카바이드의 노출기준으로 활용함을 감안할 때 향후 노출기준 개정이 고려되어야 하고 노출기준 개정 시 IOM 포집기를 활용해야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구는 우리나라에서 실리콘카바이드를 원재료로 사용하여 제품을 생산하는 연마재, 내화재 제조사업장 5 개소에 대하여 실리콘카바이드 분진에 대한 노출평가를 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실리콘카바이드의 분진 크기별 노출평가 결과, 흡입성분진의 기하평균농도는 2.04 mg/m^3 , 총분진 0.97 mg/m^3 , 호흡성분진 0.48 mg/m^3 으로 나타났으며, 호흡성분진의 경우 ACGIH-TLV를 10% 초과하고 있었다.
2. 연마재를 제조하는 사업장의 흡입성분진, 총분진 및 호흡성분진의 기하평균농도는 각각 2.08 mg/m^3 , 1.04 mg/m^3 , 0.58 mg/m^3 으로 내화재를 생산하는 사업장(1.98 mg/m^3 , 0.87 mg/m^3 , 0.35 mg/m^3)에 비하여 높게 나타났다.
3. 공정별로는 후처리공정에서 실리콘카바이드의 흡입성분진, 총분진 및 호흡성분진의 기하평균농도가 각각 2.08 mg/m^3 , 1.04 mg/m^3 , 0.58 mg/m^3 으로 성형(2.0 mg/m^3 , 0.88 mg/m^3 , 0.62 mg/m^3) 및 혼합(1.80 mg/m^3 , 0.91 mg/m^3 , 0.28 mg/m^3)공정에 비해 높은 수준을 보였다.
4. 실리콘카바이드 물질시료의 원소성분은 실리콘이 60%, 탄소가 약 37% 내외로 확인되었으며, 화학적 구성 성분은 SiO_2 가 약 84% 정도로 대부분을 차지하고 있었다.

우리나라 실리콘카바이드 취급 사업장의 공기 중 분진 노출평가 결과 호흡성분진의 경우 ACGIH-TLV 초과율은 10%로 나타났다. 따라서 실리콘카바이드 분진의 크기가

작을수록 호흡곤란 호소, 폐기능 감소, 폐섬유화 및 진폐증 등 직업성 폐질환과 큰 연관이 있고 노출수준과 직접적인 관련이 있음을 감안할 때 우리나라도 선진외국처럼 흡입성분진과 호흡성분진에 대한 노출기준 설정을 신중히 고려할 필요가 있다.

REFERENCES

- 강용선, 심상효, 이송권, 빈성오, 최문석. 조선소 용접작업자들의 총용접흡과 호흡성분진농도 비교연구. 한국환경보건학회지 2007;33(4):276-282.
- 고용노동부, 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고시 제2011-13호), 2011a.
- 고용노동부, 작업환경측정 및 정도관리규정 (노동부 고시 2011-25), 2011b.
- 고용노동부, 산업안전보건법령, 2011c.
- 노동부, 전국제조업체작업환경일제조사, 2009.
- 이동원, 김현욱. 목재분진 농도 측정에 대한 37 mm closed-face 카세트법과 IPM 측정법 비교. 한국산업위생학회지 1996;6(1):67-76.
- 피영규, 김현욱, 변상훈. 시료채취방법에 따른 먼분진의 공기 중 농도 비교. 한국환경보건학회지 2009;35(5):386-392.
- 환경부, 제3차 화학물질 유통량 조사, 2007.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure Indices. Cincinnati, ACGIH, 2010a.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Silicon carbide, In documentation of TLVs and BEIs, 7th ed, ACGIH, 2010b.
- Burgess WA. Abrasive products. In : Recognition of health hazards in industry(A review of materials and processes), 2th ed, John Wiley & Sons, Canada, 1995.
- Born C. Laboratory methods of sizing particulates. In : The AIHA connection2007.
- CFR; 29 Code of Federal Regulation 1910, Occupational Safety & Health Standards. Subpart Z., 2011.
- Cheung, Rebecca . Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments. Imperial College Press. p. 3. ISBN 1860946240. <http://books.google.com/books?id=hJySnYNE3B0C&hl=en>, 2006.
- Dion C, Dufresne A, Jacob M, Rerrault G. Assessment of exposure to quartz, cristobalite and silicon carbide fibres in a silicon carbide plant, Ann Ind Hyg 49(4):355-343, 2005.
- Durand, P.; Bégin, R.; Samson, L.; et al.: Silicon carbide pneumoconiosis: a radiographic Assessment. Am. J. Ind. Med. 20:37-47, 1991.
- Dufresne, A.; Loosereewanich, P.; Harrigan, M.; et al.: Pulmonary dust retention in a silicon carbide worker. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 54:327-330, 1993.
- Dufresne, A.; Loosereewanich, P.; Armstrong, B.; et al.: Pulmonary retention of ceramic fibers in silicon carbide workers. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 56:490-498, 1995.
- Funahashi, A.; Schlueter, D.P.; Pintar, K.; et al.: Pneumoconiosis in workers exposed to silicon carbide. Am. Rev. Respir. Dis. 129:635-640, 1984.
- Foreland S, Bye E, Bakke B, Eduard W. Exposure to fibres, crystalline silica, silicon carbide and sulphur dioxide in the Norwegian Silicon carbide Industry.

- Ann Occup Hyg 52(5):317-336, 2008.
- Hayashi, H.; Kajita, A.: Silicon Carbide in lung tissue of a worker in the abrasive industry. Am. J. Ind. Med. 14:145-155, 1988.
- Health and Safety Executive(HSE); List of approved workplace exposure limits, 2007.
- Infante-Rivard, C.; Dufresne, A.; Armstrong, B.; et al.: A cohort study of silicon carbide workers. Am. J. Epidemiol. 140:1009-1015, 1994
- Johnson, N.F.; Hahn, F.F.: Induction of Mesothelioma After intrapleural inoculation of F344 rats with silicon carbide whiskers or continuous ceramic filaments. Occup. Environ. Med. 53:813-816, 1996.
- Lippmann, M.: Asbestos exposure indices. Environ. Res. 46:86-106, 1988.
- NIOSH, Particulates not otherwise regulated, respirable 0600, In manual of analytical methods, 4th ed, NIOSH, 1998.
- NIOSH, National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH Pocket guide to chemical hazards (DHHS [NIOSH])Publication No. 2005-14, 2005.
- Osterman, J.W.; Greaves, I.A.; Smith, T.J.; et al.: Respiratory symptoms associated with low level sulphur dioxide exposure in silicon carbide production workers. Br. J. Ind. Med. 46:629-635, 1989.
- Osterman, J.W.; Greaves, I.A.; Smith, T.J.; et al.: Work related decrement in pulmonary function in silicon carbide production workers. Br. J. Ind. Med. 46:708-716, 1989.
- Osterman, J.W.; Brochu, D.; Thériault, G.: Evaluation of the ATS respiratory diseases questionnaire among French-speaking silicon carbide workers. Can. J. Publ. Health 81:66-72, 1990.
- Masse, S; Begin, R; Cantin, A: Pathology of silicon carbide pneumoconiosis. Modern Pathology. 1:104-108, 1988.
- Peters, J.M.; Smith, T.J.; Bernstein, L.; et al.: Pulmonary effects of exposures in silicon carbide manufacturing. Br. J. Ind. Med. 41:109-115, 1984.
- Smith, T.J.; Hammond, S.K.; Laidlaw, F.; Fine, S.: Respiratory exposures associated with silicon carbide production: Estimation of cumulative exposures for an epidemiological study. Br. J. Ind. Med. 41:100-08, 1984.