

산화규소 화합물의 노출기준 개정 연구

이영섭 · 피영규 · 심상효 · 고원경



한국산업안전보건공단
산업안전보건연구원

요 약 문

1. 연구필요성 및 목적

현재 우리나라 산화규소 화합물과 관련된 노출기준은 총 8종으로 결정형 4종(석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트, 트리폴리)과 비결정형 4종(용융된 규소, 규조토, 침전된 규소, 실리카겔)으로 구분되어 상당히 복잡하게 운용되고 있다. 산화규소 화합물의 노출로 인하여 발생될 수 있는 인체영향은 대부분 결정형이 원인이 되며 그 종류로는 진폐, 폐섬유화 및 폐암 등이 있다. 이런 이유로 전 세계적으로 직업적 노출기준은 다양하게 설정되어 있다. 미국과 일본의 경우 산화규소 화합물의 노출기준은 계산식으로 제시되어 있으며, 미국산업위생전문가협회에서는 2006년 노출근로자의 폐섬유화 및 규폐발생의 사전 예방 차원에서 석영 및 크리스토파라이트의 노출기준을 0.05 mg/m^3 에서 0.025 mg/m^3 로 대폭 강화한 바 있다. 이처럼 산화규소 화합물에 대한 직업적 노출기준과 그 수준이 우리나라와는 다소 다른 양상을 보이고 있는 점과 최근 직업적 노출기준이 강화됨을 감안할 때 산화규소 화합물에 대한 현행 노출기준을 전반적으로 재검토하여 우리나라 실정에 맞게 수정·보완할 필요성이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 미국, 영국, 일본 등 선진외국의 직업적 노출기준 등의 정보를 확인하고 우리나라 산화규소 화합물 노출사업장에 대한 평가를 수행하여 국내 실정에 타당한 노출기준을 제안하는데 있다.

2. 연구내용 및 방법

국내에 합리적인 산화규소 화합물의 노출기준 제안을 위하여 다음과 같은

항목에 대한 문헌조사 및 설문조사와 현장조사를 실시하였다.

첫째, 물질의 특성과 취급현황은 국내·외 문헌조사 및 고용노동부와 환경부의 실태조사 자료를 활용하였다.

둘째, 동물에 대한 영향과 인체영향 파악을 위하여 독성관련기관과 국내외 학술자료를 파악하였다.

셋째, 각국의 노출기준 정보 확인을 위하여 전문서적 등을 활용하였고, 가급적 최신성 유지를 위하여 해당 국가의 인터넷에 공개된 자료를 조사하였다.

넷째, 광물성분진 작업환경측정, 산화규소 화합물의 노출기준 등과 관련된 문제점 등을 확인하기 위하여 작업환경측정기관을 대상으로 설문조사를 실시하였고 광물성분진 채취 및 분석방법, 장비 보유현황, 노출기준 적용현황 등을 파악하였다.

다섯째, 작업장 내 근로자 노출실태 파악을 위하여 광물성분진이 발생하는 5개 사업장(폐주물, 요업, 주물, 석재, 유리사업장)에 대하여 호흡성분진을 채취하였고 푸리에변환적외선분광분석기를 활용하여 공기 중 석영농도를 확인하였다. 또한 한국산업안전보건공단의 작업환경측정 데이터베이스를 활용하여 노출수준, 분석방법, 노출기준 초과수준을 조사하였다.

3. 연구결과

산화규소 화합물은 유리제조, 주물, 연마, 도자기 등 요업, 토사석 채취, 석재 및 건설업에서 다양하게 노출될 수 있다. 결정형 산화규소 화합물은 규폐(Silicosis)의 가장 큰 원인이 되며 폐기능 감소 및 폐암(Lung cancer) 유발도 가능한 것으로 알려져 있다.

산화규소 화합물의 직업적 노출기준으로 OSHA PEL과 일본의 관리농도는 그 기준을 계산식으로 제시하고 있으며 미국산업위생전문가협회의 노출기준(Threshold Limit Values, TLV)과 캐나다의 TWAEV(Time-Weighted

Average Exposure Values)는 결정체로서 석영과 크리스토파라이트에 대해서만 각각 0.025 mg/m³로 규정하고 있다. 국내외 광물성분진에 대한 연구를 고찰한 결과 국내에서 수행된 모든 논문은 석영에 대한 부분만 노출평가가 이루어져 있고 외국의 경우도 결정형 산화규소에 대한 연구결과가 대부분 석영에 대한 결과만 제시되어 있는 점을 감안할 때 현행 우리나라의 결정체 트리디마이트, 결정체 트리폴리, 비결정체규소(용융된) 및 비결정형 산화규소 화합물의 노출기준은 삭제해도 무방할 것으로 판단된다. 또한, 산화규소 화합물의 결정체에 대한 국제적인 공인분석방법(NIOSH 7500/XRD, Quartz, NIOSH 7602/IR, Quartz, OSHA 142/XRD, Quartz·Cristobalite)도 그 대상물질이 석영과 크리스토파라이트로 한정된 점을 감안하면 석영과 크리스토파라이트만 유지되는 것이 타당하다고 판단된다. 다만, 결정체 크리스토파라이트와 결정체 트리폴리는 별도로 공인된 분석방법은 없지만 결정형으로서 규폐, 폐기능 감소 등의 원인이 될 수 있는 점을 감안하여 존치시키는 것도 바람직한 것으로 보인다. 한편, 산화규소 화합물(결정체 석영)에 대하여 5개 사업장에 대한 노출평가 결과 현행 고용노동부의 노출기준을 30% 초과하였고, 석영의 기준을 0.025 mg/m³로 강화될 경우 60%가 초과됨에 따라 노출기준 강화는 단계적으로 이루어져야 할 것으로 보이며, 현재는 최소한의 혼란을 감소시키기 위해서 현행의 노출수준 유지가 권장된다.

4. 활용 및 기대효과

산화규소 화합물에 기초적인 정보, 독성학적 연구 및 국내 제조, 사용, 취급 실태, 그리고 현장 작업장 근로자의 노출실태 자료는 향후 고용노동부가 노출기준을 개정하는데 근거자료로서 활용이 가능하다.

5. 중심어

산화규소 화합물, 석영, 노출기준

노출기준 개정 사유

□ 노출기준 개정안

물질명	현 행	개정안
	TWA	TWA
	mg/m ³	mg/m ³
산화규소 (결정체 석영)	0.05	현행 유지
산화규소 (결정체 크리스토파라이트)	0.05	현행 유지
산화규소 (결정체 트리디마이트)	0.05	현행 유지 가능
산화규소 (결정체 트리폴리)	0.1	현행 유지 가능
산화규소 (비결정체규소, 용융된)	0.1	삭제
산화규소 (비결정체 규조토)	10	삭제
산화규소 (비결정체 침전된 규소)	10	삭제
산화규소 (비결정체 실리카겔)	10	삭제

□ 개정 사유

주요 골자

- 산화규소 화합물 결정체는 석영, 크리스토파라이트 이외 물질은 국내외에서 연구된 자료가 극히 부족하고, 국제적으로 공인된 분석방법이 없어 삭제하는 것이 타당함. 다만, 결정체의 경우 규폐 및 폐기능 감소 등의 원인이 되므로 결정체 트리디마이트와 결정체 트리폴리는 존치시키는 것도 바람직한 것으로 판단됨.
- 산화규소 화합물 비결정체는 선진외국에서 노출기준이 제시되어 있는 경우가 드물고 우리나라 기타분진과 그 규제수준이 동일한 점을 감안하여 삭제함이 타당함
- 미국과 캐나다의 석영과 크리스토파라이트의 노출수준은 0.025 mg/m³이나 노출기준 강화 시 국내 초과사업장의 대폭 증가가 예상되므로 현행유지가 타당함.

1. 외국의 노출기준 강화 시기

우리나라 (현행)	미국 ACGIH (연도)	영국 (연도)	캐나다 (연도)
2008	2006	2007	2009

차 례

요약문	1
차 례	1
I. 연구목적	1
1. 연구목적 및 필요성	1
2. 연구목표	9
II. 연구내용 및 방법	10
1. 연구내용	10
가. 제조·수입·사용실태, 발생원과 근로자의 노출원 조사	10
나. 국내 작업장에서의 작업환경측정 및 관리실태 파악	10
다. 유해인자의 물리·화학적 특성, 독성·유해성	11
라. 국내 타당한 노출기준안 제시	12
2. 전체 연구 수행 흐름도	13
3. 연구방법	14
가. 제조·수입·사용실태, 발생원과 근로자의 노출원 조사	14
나. 국내 산화규소 화합물 노출사업장 노출평가	14
다. 산화규소 화합물의 작업환경측정 및 분석	15
라. 설문조사	19
마. 산화규소 화합물의 물리·화학적 특성, 독성·유해성	20
바. 노출기준안 제시	20

사. 정기적인 전문가 회의 개최를 통한 검증 및 내용 보완	21
4. 연구추진 체계	21
Ⅲ. 연구결과	23
1. 물질의 특성	23
가. 산화규소(결정체 석영)	23
나. 산화규소(결정체 크리스토파라이트)	24
다. 산화규소(결정체 트리디마이트)	26
라. 산화규소(결정체 트리폴리)	27
마. 산화규소(비결정체 규소, 용융된)	28
바. 산화규소(비결정체 규조토)	29
사. 산화규소(비결정체 실리카 겔)	30
아. 산화규소(비결정체 침전된 규소)	32
2. 취급 현황	32
가. 제조 또는 사용 현황	32
나. 발생원 및 발생과정	33
다. 노출 경로	35
3. 동물에 있어서의 영향	35
가. 급성독성	36
나. 만성독성	37
다. 변이원성/유전독성	39
라. 생식/발육독성	39
마. 발암성	40
4. 인체영향	41
가. 인체내 작용기전	41

나. 단기노출 시 인체 유해성	41
다. 장기노출 시 인체 유해성	42
라. 인체 표적장기 독성	43
마. 인체 발암성	44
5. 각국의 노출기준 요약 및 해설	44
가. 한국	44
나. 미국	45
다. 일본	52
라. 영국	54
마. 독일	54
바. 캐나다	54
사. 요약	55
6. 산화규소 화합물의 노출평가	55
가. 작업환경측정 결과 분석	55
나. 국내 산화규소 화합물의 노출평가	62
다. 설문조사	86
7. 노출기준 제안	105
참고문헌	110
Abstact	116
부 록	118

<부록 1> 산화규소 화합물 작업환경 현장조사표	119
<부록 2> 산화규소 화합물 현장 설문지	122
<부록 3> 산화규소 화합물 작업환경측정 및 분석방법	130

표 차 례

<표. 1> 작업환경측정대상 분진 : 6종	4
<표. 2> 2009년 직업병자 발생 현황	5
<표. 3> 우리나라의 산화규소 화합물 노출기준 현황	6
<표. 4> 설문조사 관련 내용	19
<표. 5> 우리나라의 산화규소 화합물 노출기준 현황	45
<표. 6> 미국 OSHA 의 산화규소에 대한 PEL	46
<표. 7> 현재 ACGIH 의 산화규소에 대한 노출기준	50
<표. 8> 미국 NIOSH 의 산화규소에 대한 TLV	51
<표. 9> 미국의 각 주별 산화규소의 허용노출기준	52
<표. 10> 일본의 JSOH의 산화규소에 대한 OEL	53
<표. 11> 영국의 산화규소에 대한 WEL	54
<표. 12> 선진외국의 노출기준 현황	55
<표. 13> 산화규소 화합물 측정대상 사업장 현황	56
<표. 14> 연도별 산화규소 화합물 분석방법에 따른 측정 현황	57
<표. 15> 산화규소 화합물 분석방법에 따른 노출수준	57
<표. 16> 산화규소 화합물별 노출기준 초과 현황	58
<표. 17> 2010년 산화규소 화합물별 노출기준 초과 현황	59
<표. 18> 산화규소 화합물 평균농도 및 범위	59
<표. 19> 산화규소 화합물 노출기준 초과사업장의 업종 및 사업장 수	60
<표. 20> A 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도	65
<표. 21> B 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도	68
<표. 22> C 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도	70

<표. 23> D 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도	72
<표. 24> E 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도	75
<표. 25> 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도 비교	76
<표. 26> 산화규소 화합물 노출기준 초과 현황	77
<표 27> 공기 중 산화규소 노출 농도 분포	79
<표 28-1> 국내 광물성분진의 노출평가 결과(1)	81
<표 28-2> 국내 광물성분진의 노출평가 결과(2)	82
<표 29-1> 국외 광물성분진의 노출평가 결과(1)	83
<표 29-2> 국외 광물성분진의 노출평가 결과(2)	85
<표 30> 조사대상기관의 일반적 특성	86
<표 31> 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등의 인식도	89
<표 32> 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등의 규정 인식도	91
<표 33> 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등의 규정 명확도	94
<표 34> 규산 노출 작업장의 측정, 노출기준 등의 규정 준수율	97
<표 35> 광물성분진의 채취, 분석 및 장비보유 현황	98
<표 36> 산화규소 화합물 노출기준 적용 경험	100
<표 37> 광물성분진 측정대상 사업장 및 시료 수	100
<표 38> 산화규소 화합물 노출기준 적용 시 어려운 점	101
<표 39> 산화규소 화합물 분석을 위한 장비기준에 대한 의견	102
<표 40> 우리나라 산화규소 화합물의 노출기준 개정(안)	107
<표 41> 우리나라 산화규소 화합물의 노출기준 개정(안)	108

그 립 차 례

[그림. 1] 연구추진체계	22
[그림. 2] 호흡성 분진 채취장비	63
[그림. 3] A 사업장의 투입 및 선별공정	65
[그림. 4] B 사업장의 재단공정	67
[그림. 5] B 사업장의 가공공정	67
[그림. 6] C 사업장의 주물공정과 조형 합형공정	69
[그림. 7] C 사업장의 조형 틀 고정	70
[그림. 8] D 사업장의 분쇄 및 원료 투입공정	72
[그림. 9] E 사업장의 원료분쇄 전 투입 및 원료분쇄공정	74
[그림. 10] E 사업장의 원료 가마투입 및 원료투입공정	74
[그림. 11] 노출대표값의 산정을 위한 대수확율 산포도 및 최소 적합선	78
[그림. 12] 광물성분진 중 규산 측정실시 인식도	87
[그림. 13] 광물성분진의 호흡성분진 채취방법 인식도	87
[그림. 14] 광물성분진 분석(FTIR/XRD)에 대한 인식도	88
[그림. 15] 산화규소 화합물의 노출기준 인식도	88
[그림. 16] 광물성분진 중 규산 측정에 대한 규정 인식도	89
[그림. 17] 광물성분진의 호흡성분진 채취 규정 인식도	90
[그림. 18] 광물성분진 분석 규정 인식도	90
[그림. 19] 산화규소 화합물의 노출기준의 규정 인식도	91
[그림. 20] 광물성분진 중 규산 측정에 대한 규정 명확도	92
[그림. 21] 광물성분진의 호흡성분진 채취 규정 명확도	92
[그림. 22] 광물성분진 분석 규정 명확도	93

[그림. 23] 산화규소 화합물의 노출기준의 규정 명확도	93
[그림. 24] 광물성분진 중 규산 측정 규정 준수율	95
[그림. 25] 광물성분진의 호흡성분진 채취 규정 준수율	96
[그림. 26] 광물성분진 분석 규정 준수율	96
[그림. 27] 산화규소 화합물의 노출기준의 규정 준수율	97

I. 연구목적

1. 연구목적 및 필요성

화학물질은 경제 활동의 기본 물질로 현대 생활에서는 중요한 요소이다. 전 세계적으로 약 246,000종의 화학물질이 상업적으로 유통되고 있고, 우리나라에서도 2007년 11월 현재 40,731종의 화학물질이 유통되며 매년 약 400종의 신규 화학물질이 국내시장에 새로이 진입하고 있는 것으로 파악되고 있다(환경부, 2007). 또한 국제사회에서도 국제화학단체협의회(International Council for Commercial Arbitration, ICCA)의 통계자료에 의하면 우리나라 화학산업의 규모는 2006년도 화학제품 출하액 기준으로 약 103조원(USD 1,047억)으로 세계 6위이며 세계시장의 3.7%를 차지하고 있다. 또한 우리나라 화학산업의 생산액은 2006년 기준 약 89조원으로 제조업 총생산의 9.8%, 수출액은 294억불로서 국내 총 수출의 11%를 점유하고 있어 국내 경제에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다(환경부, 2007). 그러나 화학물질은 과학기술의 눈부신 발달과 인류사회에 편의를 제공하는 반면에 그 유해성으로 인하여 인체건강과 환경을 해치는 주원인으로 지목되고 있다. 화학물질은 제조, 운반, 사용, 폐기 등 제품 생산과 소비의 전 과정에서 노출이 이루어져 일반국민은 물론 근로자의 건강을 위협할 수 있다. 국민의 지식수준과 삶의 질이 향상됨에 따라 화학물질의 위해성에 대한 관심이 증대하고 있으며, 화학물질로부터의 인체 노출이 사회적으로 주요 이슈가 되고 있다. 이로 인해 세계 각국은 유해화학물질들을 관리하는 방안으로 관련 법규나 지침을 통해 유해화학물질의 노출기준을 정하여 엄격히 규제하고 있다. 이에 우리나라도 화학물질의 위해성으로부터 근로자 건강을 보호하기 위한 화학물질관리는 고용노동부의 산업안전보건법을 통해 다양한 정책을 추진해 나가고 있다.

분진(Dust)은 체내에 흡입되어 폐포 혈관으로 흡수됨으로써 인체에 독성작용

을 일으키는 무기화학물질이다. 진폐증(Pneumociniosis)이란 진폐유발 분진이 흡입되어 폐의 가스교환 부위에 축적된 후 비가역적인 섬유화 반응을 보이는 것을 말한다. 이러한 진폐증 가운데 규폐증은 작업자가 산화규소 화합물의 한 종류인 석영이 주성분인 호흡성 분진에 노출되었을 때 발생된다(Weber & Banks, 1994 ; Hogan, 1995). 우리나라에서 진폐증 발생은 과거에 석탄광업에서 주로 많이 발생되었으나(조규상, 1999) 최근에는 제조업에서도 증가하는 추세에 있으며(이원철 등, 1998) 건설업에서도 발생되고 있다(김현욱 등, 2005). 이러한 석영은 573 °C이하에서 안정된 물질로 지구표면의 약 12%이상을 차지하고 광물표면에 17%정도 존재하고 있어 광산, 주물, 채석장, 요업사업장 등에서 석영을 포함하지 않은 재료는 거의 없을 것으로 추정된다. 그러나 이러한 석영이 고온으로 올라갈수록 실리콘과 산소의 결합이 깨져 트리디마이트(Trydimite, 870 °C이상)나 크리스토파라이트(Cristobalite, 1470 °C이상)로 전이 되는데, 석영이나 비결정형규산을 가열할 수 있는 내화물산업 및 세라믹산업 등에서 근로자에게 노출될 수 있다(Smith, 1992). 이에 석영 등을 포함한 결정형규산 동형이성체를 국제암연구기구(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 인체 발암물질(Group 1)로 분류하였으며(IARC, 1997), 2000년도에 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienist, ACGIH)에서도 건강 위해성을 인지하여 석영의 노출기준을 호흡성 분진으로서 0.05 mg/m³에서 0.025 mg/m³으로 낮추었으며 발암성에 관한 분류도 인체 발암예상물질 (A2)로 엄격하게 반영하였다(ACGIH, 2011).

우리나라도 산화규소 화합물의 위해성으로부터 근로자 건강을 보호하기 위하여 고용노동부는 산업안전보건법을 통해 다양한 정책을 추진해 나가고 있다. 산업안전보건법 제24조(보건상의 조치)와 관련하여 산업안전보건기준에 관한 규칙에서는 제9장에 분진에 의한 건강장해의 예방 편에 분진의 정의, 호흡기보호프로그램, 설비 등의 기준, 분진의 유해성 등의 주지 등의 관리, 보호구 등을

언급하고 있으며 별표 16(분진작업의 종류)에 산화규소가 포함된 광물성 분진 등의 종류를 25가지¹⁾로 나열하고 있다(고용노동부, 2011).

광물성 분진 등으로 인한 근로자의 직업병 예방을 위한 작업환경측정은 산업안전보건법 제42조(작업환경측정 등)에서 규정하고 있으며 작업장의 유해인자 발생수준이나, 근로자에게 노출되는 정도를 측정하여 작업환경의 개선 등 적절한 대책을 강구함으로써 근로자의 건강을 보호하기 위함에 그 목적이 있

- 1) 1. 토석·광물·암석(이하 "암석등"이라 하고, 습기가 있는 상태의 것은 제외한다. 이하 이 표에서 같다)을 파내는 장소에서의 작업, 2. 암석등을 싣거나 내리는 장소에서의 작업, 3. 갱내에서 암석등을 운반, 파쇄·분쇄하거나 체로 거르는 장소(수중작업은 제외한다) 또는 이들을 쌓거나 내리는 장소에서의 작업, 4. 갱내의 제1호부터 제3호까지의 규정에 따른 장소와 근접하는 장소에서 분진이 붙어 있거나 쌓여 있는 기계설비 또는 전기설비를 이설(移設)·철탈·점검 또는 보수하는 작업, 5. 암석등을 재단·조각 또는 마무리하는 장소에서의 작업(제12호에 따른 작업과 화염을 이용하여 재단하거나 제작하는 장소에서의 작업은 제외한다), 6. 연마제의 분사에 의하여 연마하는 장소나 연마제 또는 동력을 사용하여 암석·광물 또는 금속을 연마·주물 또는 재단하는 장소에서의 작업(제5호에 따른 작업은 제외한다), 7. 암석등·탄소원료 또는 알루미늄박을 파쇄·분쇄하거나 체로 거르는 장소에서의 작업(제3호·제14호 또는 제18호에 따른 작업은 제외한다), 8. 시멘트·비산재·분말광석·탄소원료 또는 탄소제품을 건조하는 장소, 쌓거나 내리는 장소, 혼합·살포·포장하는 장소에서의 작업, 9. 분말 상태의 알루미늄 또는 산화티타늄을 혼합·살포·포장하는 장소에서의 작업, 10. 분말 상태의 광석 또는 탄소원료를 원료 또는 재료로 사용하는 물질을 제조·가공하는 공정에서 분말 상태의 광석·탄소원료 또는 그 물질을 함유하는 물질을 혼합·혼입 또는 살포하는 장소에서의 작업(제11호부터 제13호까지의 규정에 따른 작업은 제외한다), 11. 유리 또는 범람을 제조하는 공정에서 원료를 혼합하는 작업이나 원료 또는 혼합물을 용해로에 투입하는 작업(수중에서 원료를 혼합하는 장소에서의 작업은 제외한다), 12. 도자기·내화물(耐火物)·형사도제품 또는 연마제를 제조하는 공정에서 원료를 혼합 또는 성형하거나, 원료 또는 반제품을 건조하거나, 반제품을 차에 싣거나 쌓은 장소에서의 작업이나 가마 내부에서의 작업, 13. 탄소제품을 제조하는 공정에서 탄소원료를 혼합하거나 성형하여 반제품을 노(爐)에 넣거나 반제품 또는 제품을 노에서 꺼내거나 제작하는 장소에서의 작업, 14. 주형을 사용하여 주물을 제조하는 공정에서 주형(鑄型)을 해체 또는 탈사(脫砂)하거나 주물모래를 재생하거나 혼련(混鍊)하거나 주조품 등을 절삭하는 장소에서의 작업(제6호에 따른 작업은 제외한다), 15. 암석등을 운반하는 암석전용선의 선창(船艙) 내에서 암석등을 빠뜨리거나 한군데로 모으는 작업, 16. 금속 또는 그 밖의 무기물을 제련하거나 녹이는 공정에서 토석 또는 광물을 개방로에 투입·소결(燒結)·탕출(湯出) 또는 주입하는 장소에서의 작업(전기로에서 탕출하는 장소나 금형을 주입하는 장소에서의 작업은 제외한다), 17. 분말 상태의 광물을 연소하는 공정이나 금속 또는 그 밖의 무기물을 제련하거나 녹이는 공정에서 노(爐)·연도(煙道) 또는 연돌 등에 붙어 있거나 쌓여 있는 광물찌꺼기 또는 재를 긁어내거나 한곳에 모으거나 용기에 넣는 장소에서의 작업, 18. 내화물을 이용한 가마 또는 노 등을 축조 또는 수리하거나 내화물을 이용한 가마 또는 노 등을 해체하거나 파쇄하는 작업, 19. 실내·갱내·탱크·선박·관 또는 차량 등의 내부에서 금속을 용접하거나 용단하는 작업, 20. 금속을 녹여 뿌리는 장소에서의 작업, 21. 동력을 이용하여 목재를 절단·연마 및 분쇄하는 장소에서의 작업, 22. 면(綿)을 쉬거나 두드리는 장소에서의 작업, 23. 염료 및 안료를 분쇄하거나 분말 상태의 염료 및 안료를 계량·투입·포장하는 장소에서의 작업, 24. 곡물을 분쇄하거나 분말 상태의 곡물을 계량·투입·포장하는 장소에서의 작업, 25. 유리섬유 또는 암면(巖綿)을 재단·분쇄·연마하는 장소에서의 작업

다. 작업환경측정대상 작업장은 작업환경측정대상 유해인자²⁾에 노출되는 근로자가 있는 작업장이며 분진과 관련된 항목은 아래 <표 1>과 같이 규정되어 있으며 측정횟수는 30일 이내, 6월에 1회 이상, 3월에 1회 이상 측정, 1년에 1회 이상으로 다양하게 관리하고 있다. 이 중 광물성 분진은 크게 규산(3종)과 규산염(5종) 및 그 밖의 광물성 분진으로 구분되어 있다.

<표 1> 작업환경측정대상 분진 : 6종

유해인자의 분류		종류
광물성 분진	규산(Silica)	석영
		크리스토바라이트
		트리디마이트
	규산염(1% 미만의 결정형 규산)	운모
		포틀랜드시멘트
		습 스톤
		활석
	그 밖의 광물성 분진	흑연
		-
	곡물분진	-
면분진	-	-
나무 분진	-	-
용접흄	-	-
유리섬유	-	-

또한, 산업안전보건법 제43조(건강진단)의 경우 특수건강진단 대상유해인자는 작업환경측정 대상 유해인자와 유사하게 분진은 6종(곡물분진, 광물성분진, 면분진, 나무 분진, 용접흄, 유리섬유 분진)이 대상으로 되어 있다.

이렇듯 광물성분진으로 인한 직업병 예방을 위하여 다양한 법적관리가 진행

2) 측정대상유해인자(191종) : 화학적인자(유기화합물 113종, 금속류 23종, 산 및 알칼리류 17종, 가스상 물질류 15종, 허가대상물질 14종, 분진 6종, 금속가공유 1종), 물리적인자(소음, 고열)

되고 있지만, 2009년 현재 우리나라에서 발생된 직업병자 현황을 보면 광물성분진 등으로 인한 진폐자가 <표 2>와 같이 1,003명으로 가장 높은 점유율을 보이고 있어 산화규소 등이 포함된 광물성분진의 적절한 관리는 시급한 것으로 보인다(고용노동부, 2010).

<표 2> 2009년 직업병자 발생 현황

(단위 : 명)

구 분	직업병 종류						
	소 계	진 폐	난 청	금속 및 중금속 중독	유기용제 중독	특정화학 물질중독	기 타
2008	1,653	1,145	220	11	11	68	198
2009	1,746	1,003	205	3	7	61	467
증 감	93	-142	-15	-8	-4	-7	269

우리나라는 산화규소 등 화학물질 659종에 대한 노출기준을 설정하여 사업주로 하여금 작업장의 유해인자에 대한 작업환경개선기준과 작업환경측정결과 의 평가기준으로 활용하도록 하고 있다. 노출기준이란 1일 8시간, 주 40시간 유해물질에 반복 노출되어도 거의 모든 근로자에게 건강장해를 초래하지 않을 것으로 예상되는 농도를 의미하며 1979년에 노동청 예규로 제정하여 운영하다가 1986년 324종에서 2010년에 현재의 659종으로 확대하였다. 그러나 노출기준 설정 이후 보완이 이루어지지 않아 개정·강화의 필요성이 제기되어오며 따라 외국의 노출기준과 차이가 있거나 기준이 설정되지 않은 화학물질 42종을 선정하여 국내 실정에 맞는 노출기준 개정 연구용역을 수행하였으며, 아울러 2005년에 수행한 화학물질 86종의 노출기준 개정을 위해 공청회, 전문가 회의 등을 추진하였다. 이 연구에는 30여명의 산업위생·산업의학 전문가가 참여하여, 그동안 축적된 물리·화학적 특성, 인체 유해성, 외국의 기준 등을 참고로 새로운

노출기준을 제안하였으며 1차로 86종의 노출기준을 개정·고시하였다(노동부, 2006). 그 후, 2007년 8월 노동부는 2006년에 연구용역으로 실시된 43종(케로텐 등 11종 제정, 삼수화비소 등 30종 개정, 아크로레인 등 2종 현행유지)에 대하여 화학물질 노출기준 개정방안을 마련하고 2008년 화학물질 및 물리적인자의 노출기준(노동부고시 제2008-26호)를 개정하였다(고용노동부, 2010). 특히, 2009년 노출기준을 개정하면서 그간에 별표로 유지되어 왔던 총 분진 및 호흡성분진에 대한 노출기준이 삭제되면서 그간 작업환경측정기관에서 광물성분진 등이 포함된 분진에 대하여 중량분석을 실시하여 평가하던 방법에 다소 혼란이 가중되고 있는 것도 사실이다(고용노동부, 2010).

앞서 언급한 바와 같이 산화규소의 노출로 인하여 발생될 수 있는 인체독성은 진폐증, 폐섬유화, 폐암, 규폐증, 중피종 등이며 이런 이유로 전 세계적으로 직업적 노출기준(Occupational Exposure Limits)을 설정하여 관리하고 있다. 2011년 현재 고용노동부의 화학물질 및 물리적인자의 노출기준에 산화규소 화합물과 관련되어 규정된 종류는 총 8가지이며, 결정형은 석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트, 트리폴리이며, 비결정형은 용융된 규소, 규조토, 침전된 규소, 실리카겔이다 <표 3>.

<표 3> 우리나라의 산화규소 화합물 노출기준 현황

유해물질 명칭	노출기준 (TLV-TWA)	비 고
산화규소(결정체 석영)	0.05 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(결정체 크리스토파라이트)	0.05 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(결정체 트리디마이트)	0.05 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(결정체 트리폴리)	0.1 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(비결정체 규소, 용융된)	0.1 mg/m ³	호흡성 분진

산화규소(비결정체 규조토)	10 mg/m ³	
산화규소(비결정체 침전된 규소)	10 mg/m ³	
산화규소(비결정체 실리카겔)	10 mg/m ³	

산화규소는 크게 결정형(Crystalline)과 비결정형(Amorphous)으로 나뉘며 사실 비결정형은 분석상에 크게 문제가 되지 않는다. 다만, 석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트 등 결정형 규산의 정량방법으로는 현미경법, 원자흡광도법, 비색법, 푸리에변환적외선분광광도계법(Fourier transform infra-red spectrophotometry, FTIR), X-선 회절분석법(X-ray diffraction methods, XRD)이 있으나, 최근에는 X-선 회절분석법과 적외선분광광도계법이 호흡성 분진 내 결정형 규산의 농도를 평가하는데 가장 많이 사용되고 있다(Pickard *et al*, 1985 ; Madson *et al*, 1995). 우리나라의 경우 FTIR을 이용한 석영의 대표적인 분석방법은 미국산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 NIOSH 공정시험방법 7602가 가장 널리 이용되고 있다(NIOSH, 1994).

우리나라도 현행 규정상 작업환경측정과 관련하여 광물성분진 등 산화규소가 포함된 분진의 노출기준을 적용하기 위해서는 우선 1% 이상의 결정체가 포함되어 있는지 분석이 필요하다. 이는 채취된 분진 내 결정형 함유량을 XRD 또는 FTIR로 분석하여 확인하는 것이 선행되어야 함을 의미한다.

한편, 미국, 일본 등 선진외국의 경우에도 산화규소에 대한 직업적 노출기준이 우리나라와는 다소 다른 양상을 보이고 있는 점을 감안할 때 산화규소 화합물 8종에 대한 현행 노출기준을 우리나라 실정에 맞게 수정·보완할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은

첫째, 8종의 산화규소 화합물에 대한 작업환경측정 및 평가와 관련된 문제점을 파악하고, 제안될 노출기준에 따른 명확한 측정 및 분석방법을 제안하며, 산화규소 화합물 취급사업장에 대한 현장방문을 통하여 작업환경관리 실태를 파악하고자 한다.

둘째, 산화규소 화합물에 대한 선진외국 등의 직업적 노출기준에 대한 근거를 파악하고 제조·취급·사용 실태 및 독성학적 특성에 대한 기본 정보를 활용하여 우리나라 현실에 적합한 노출기준을 제시하는데 목적이 있다.

2. 연구목표

산화규소 화합물에 대한 작업환경 관리실태 파악 및 각국의 노출기준을 비교·검토 등을 통하여 화학물질 노출기준 개정(안)을 제시하는 것이 본 연구의 최종 목표이다. 이를 위해서 아래와 같은 구체적인 연구 목표를 설정하도록 한다.

첫째, 산화규소 화합물에 대한 제조·수입·사용실태, 취급현황, 동물에 있어서의 영향 등의 독성·유해성을 파악하여 적절한 노출기준 제안을 위한 화학물질의 기본적인 정보를 확보한다.

둘째, 산화규소 화합물을 취급하는 사업장의 노출 실태를 파악을 위하여 그간의 작업환경측정 자료를 분석한다.

셋째, 현재 산화규소 화합물에 대한 작업환경측정 및 평가와 관련된 문제점을 파악하여 향후 제안될 산화규소 화합물에 대해 타당한 측정 및 분석방법을 제안한다.

넷째, 산화규소 화합물 취급사업장에 대한 현장방문을 통하여 발생원과 근로자의 노출원을 조사하고, 작업환경관리 실태를 파악한다.

다섯째, 미국, 일본, 독일, 영국 등 선진 각국의 노출기준 및 노출기준의 설정 근거 조사를 통하여 우리나라 실정에 적합한 노출기준을 제안한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구내용

가. 제조·수입·사용실태, 발생원과 근로자의 노출원 조사

산화규소 화합물의 제조, 수입, 사용 실태 및 발생원 조사와 근로자의 노출원 조사는 국내 작업장의 수요 및 현황을 파악하고, 산화규소의 발생원과 발생공정을 제시함으로써 유해화학물질 관리에 있어 효율성을 기하고자 한다.

첫째, 산화규소 화합물의 제조, 사용 및 취급에 관한 실태조사를 한국산업안전보건공단 D/B를 활용하여 파악한다.

둘째, 산화규소 화합물의 노출이 가능한 국내 사업장의 종류 및 그 현황을 파악한다.

셋째, 그간 산업안전보건법에 의해 실시된 산화규소 화합물의 작업환경측정 결과를 활용하여 근로자의 노출원, 발생수준, 관련업종도 파악한다.

넷째, 환경부의 화학물질 유통량 조사 등을 통하여 산화규소 화합물의 연간 수입량을 파악한다.

나. 국내 작업장에서의 작업환경측정 및 관리실태 파악

산화규소 화합물에 대한 올바른 작업환경측정 방법이 적용되고 있는지와 산화규소 화합물 노출사업장에서의 취급량 및 사용량, 산업환기 등의 공학적 개선 여부, 작업방법, 개인보호구 착용상태 등 작업환경관리실태와 관련하여 필요한 정보를 수집하기 위하여 산화규소 화합물 노출사업장 5개소를 선정하였다.

산화규소 화합물은 유리, 도자기, 도기 제조, 주물, 샌드블래스팅, 화강암, 석수공, 내화, 분쇄, 연마물질 제조 등에서 노출될 수 있음을 감안하였다.

선정된 사업장에 대하여 산화규소 화합물의 취급실태와 사용현황, 작업환경 측정방법 등을 설문지와 작업환경 조사표를 이용하여 파악하였고, 조사 내용으로는

첫째, 해당 공정의 파악과 산화규소 화합물 취급공정에서 환기 등의 공학적 개선 장비의 유무, 산화규소 화합물의 취급 및 노출원 및 사용량을 파악하였다.

둘째, 취급근로자의 현황 파악은 방문 조사를 통하여 작업방법, 개인보호구 착용상태 등 필요한 정보를 수집하였다.

셋째, 산화규소 화합물 사용 사업장의 작업환경측정결과를 확인하여 측정방법 및 평가방법이 올바르게 이루어졌는지 여부와, 5개 사업장에서 작업환경 측정 및 분석을 실시하여 작업환경측정결과와 비교하였다.

넷째, 작업환경측정 및 분석에 관한 실태를 파악하기 위하여 설문지를 통하여 정보를 수집하였다.

다. 유해인자의 물리·화학적 특성, 독성·유해성

작업장내의 산화규소 화합물의 독성 및 유해성평가 자료의 수집 및 분석을 수행하여 물리·화학적 특성 및 독성 자료를 조사하였다. 구체적으로는 아래와 같이 3가지 항목으로 구성하였다.

① 물리·화학적 성질

산화규소 화합물의 물질별 물리화학적 성질은 아래와 같은 내용으로 파악하였다.

첫째, 물질의 개요 : 한글 물질명, 영문 물질명(IUPAC명, CA명), 이명(異名), CAS 번호 등

둘째, 물리적 성상 : 분자량, 비중, 녹는점, 끓는점, 증기압, 용해도, 분배계수, 증기밀도 등

셋째, 화학적 성상 : 인화점, 자연발화점, 폭발성, 산화성, 반응성, 안정성, 피해야할 물질, 소화제 등

② 독성 및 유해성 평가

산화규소 화합물의 독성 및 유해성평가 자료 수집 및 제시는 동물 실험 결과자료를 수집하여 아래와 같이 구분하여 제시하였다.

첫째, 급성독성 자료 : 급성경구독성, 급성경피독성, 급성흡입독성

둘째, 아급성독성 및 아만성독성 자료

셋째, 변이원성 : 복귀돌연변이시험(Ames test), 염색체이상시험, 소핵시험 등

넷째, 발암성 : 설치류 등 동물의 암 유발시험

다섯째, 기타 : 이외의 추가정보

라. 국내 타당한 노출기준안 제시

작업장내의 산화규소 화합물에 대하여 현행 노출기준의 타당성을 검토하고 국내·외 노출기준 수준과 개정 근거 등을 조사하여 국내 개정 가능한 노출기준을 제시하였다.

① 작업장내의 산화규소의 노출기준의 설정근거, 실태조사를 바탕으로 하여 현 노출기준 수준의 적정성을 평가하였다.

② 기준값의 제시는 TWA 기준으로 각각의 기준값을 제시하는 것으로 하였다.

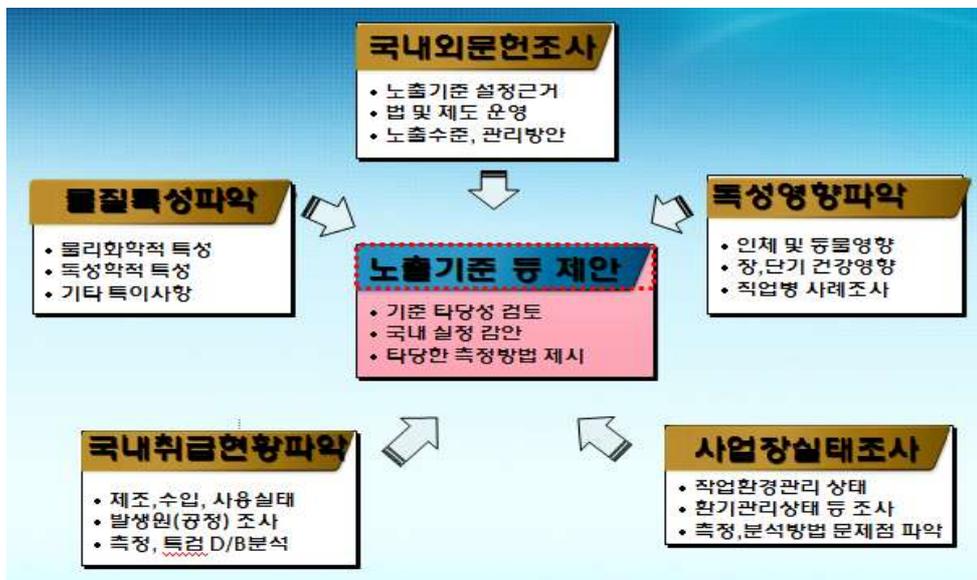
③ 제안할 노출기준 값으로의 기술적 실현가능성 및 사회적 요인에 대한 타

당성에 대하여 전문가 심의를 거쳐 확인하였다.

④ 각국의 노출기준 설정근거 조사 및 기준은 OSHA PELs(Permissible Exposure Limits), ACGIH TLVs(Threshold Limit Values), NIOSH RELs(Recommended Exposure Limits), 일본 후생노동성 노동안전위생법상의 관리농도 및 일본산업위생학회 권고노출기준, 독일 MAK(Maximum Concentration Values), 유럽의 OEL(Occupational Exposure Limits) 등을 참고하였다.

2. 전체 연구 수행 흐름도

연구의 최종 목표 및 세부 연구목표의 상공적인 달성을 위한 전체 연구의 수행 체계를 도식화하면 아래 그림과 같다.



3. 연구 방법

본 연구는 다음과 같은 범위와 방법으로 추진하였다.

가. 제조·수입·사용실태, 발생원과 근로자의 노출원 조사

산화규소 화합물의 제조, 사용 및 취급에 관한 현황 조사를 위하여 한국산업안전보건공단의 2007년 제조업체 실태조사 자료를 활용하였으며 2007년 환경부의 화학물질 유통량조사 보고서를 활용하여 동 물질의 유통수준을 파악하였다. 한편, 한국산업안전보건공단의 작업환경측정 데이터베이스로 구축된 2009년과 2010년의 작업환경측정결과를 제공받아 산화규소 화합물 취급 근로자의 노출원, 발생수준, 관련업종, 노출기준 초과여부, 측정 및 분석실정 등을 파악하였다.

또한, 산화규소 화합물과 관련된 모든 정보파악을 위하여 고용노동부, 산업안전보건공단에서 발행되는 보고서, 국제학술지(예, AOEH(Applied Occupational and Environmental Hygiene), AIHA (American Industrial Hygiene Association) Journal와 국내학술지(한국산업위생학회지, 대한산업의학회지, 한국독성학회지 등)를 조사하였다. 또한 미국 National Library of Medicine, NIOSH, OSHA, EPA, WHO, ILO, 영국 HSE, 일본 National Institute of Industrial Health 등의 홈페이지를 방문하여 관련된 구체적인 정보를 확보하였다.

나. 국내 산화규소 화합물 노출사업장 노출평가

작업환경관리 실태를 파악하기 위해서 유리, 도자기 및 도기 제조, 주물, 석

재 가공 내화, 분쇄와 연마재 제조 등 산화규소 화합물 노출사업장 중에 5개소를 선정하여 방문하여 작업환경관리 실태를 파악할 수 있는 모든 필요한 정보를 수집하였다. 조사는 정확하고 체계적으로 수행하기 위하여 일정한 양식의 작업환경 현장조사표를 활용하였다.

다. 산화규소 화합물의 작업환경측정 및 분석

(1) 사업장 정보 수집

산화규소 화합물의 노출평가를 수행하기 위해서 총 5개 사업장을 선정하였고 아래와 같은 시료채취방법과 분석방법을 활용하였다.

(2) 시료채취 방법

산화규소 화합물을 채취하기 위한 포집기구는 사이클론(nylon cyclone, aluminium cyclone)에 PVC 여과지(공극 $5.0\mu\text{m}$, 직경 37mm)를 활용하였고 개인 시료채취기에 연결하여 다음과 같은 조건으로 공기 중 시료를 채취하였다.

- 채취유량: nylon cyclone(1.7L/min), aluminium cyclone(2.0L/min)
- 총 채취유량 : 최소 400L, 최대; 800L
- 개인시료채취기(Aircheck 52, 224-52, SKC, USA), (Gil-air, IHP-513AUP, Gilian, USA)

모든 필터는 칭량 전 항습기에서 하루이상을 건조시킨 후 사용하였다. 칭량은 0.001mg의 감도를 가진 천평기(4503 MP6, Satorius, Germany)를 사용하여 5회 반복하여 무게를 칭량한 후 최대값과 최소값을 제거한 평균값을 사용하였다. 칭량한 필터를 카세트에 장착하고 각 개인시료 채취기에 연결하여 유량을 1.7L/min(nylon cyclon), 또는 2.0 L/min(aluminium cyclone)으로 보정하였다. 측정 전 cyclone에 필터가 장착된 카세트를 장착하고 개인시료채취기에 연결하

여 작업자의 호흡기영역에서 부착하였다. 채취 시 카세트와 수직으로 있는 사이클론이 수평이상으로 전도되지 않도록 주의하였고 지역시료는 같은 유량으로 삼각대 등을 이용해 지상 높이 1.5m에서 포집하였다. 공기 중 산화규소 화합물의 채취가 완료된 후 카세트를 떼어내 마개로 막아 보관하였고, 사용한 개인시료채취기는 다시 유량을 확인한 후 포집전 유량과 함께 평균값으로 유량을 산정하였다.

(3) 시료 분석 방법

공기 중 채취된 산화규소 화합물의 시료는 NIOSH Method No. 7602과 한국 산업안전공단 Method No.83번의 결정형 실리카, 간섭형 적외선분광광도법에 의한 분석 방법을 활용하는 기관에 시료를 의뢰하였으며 그 기관은 국제정도관리를 정기적으로 수행하여 정확도가 담보된 기관이었다. 그 구체적인 분석 방법은 다음과 같았다.

- 기기 : 간섭식 적외선 분석기 (FTS155, Bio Rad, USA)
- 기기조건 : 분석모드 : 흡광도
 - Scan range : $1500\text{cm}^{-1} \sim 400\text{cm}^{-1}$
 - Scan 횟수 : 16회
 - 분석파장 : 799cm^{-1} , 779cm^{-1} , 695cm^{-1}
- 회화 : 회화로(Muffle Furnace, Blue M894, Lindburg, USA)
- 회석 : KBr(221864, Sigma-Aldrich, USA)

○ 검량선 작성

농도 범위를 $0.25\text{-}200\mu\text{g/sample}$ (400L 공기량일 때 $0.00625\sim 5.0$ TLV)로 하여 이 범위 내에서 5농도 수준으로 미국 표준과학연구소(NIST) 표준물질

SRM(standard reference material) 1878a(respirable quartz)와 KBr(221864, Sigma-Aldrich, USA)를 혼합하여 표준분말을 만들고 13mm 펠렛다이로 옮겨 유압프레스를 이용하여 8톤의 압력을 가해 펠렛화 하였다. 이후 공시료와 함께 FTIR로 분석하여 스펙트럼에 대한 흡광피크 높이에 대한 결정형인 석영의 양(μg)에 대한 검량선을 작성하였다.

○ 회수율

NIST SRM 2679a(quartz on filter)를 시료와 동일한 방법으로 전처리하여 펠렛으로 만든 후 제공된 참고치와 비교하여 이를 회수율로 산정하였다.

○ 정도관리

미국정부산업위생전문가협회(ACGIH)와 미국산업위생학회(AIHA)에서 주관하는 IHPAT(Industrial Hygiene Proficiency Analytical Testing) Program에서의 정도관리 시료를 분석하여 그 결과로 정도관리를 대신하였다.

○ 시료분석

사용할 KBr은 습기를 제거하기 위하여 건조로에서 24시간 이상 건조시킨 후 200mg씩 칭량한 후 다시 건조로에서 보관하였다. 포집이 완료된 카세트는 항습기에서 24시간 이상 항습 시킨 후 필터를 분리해 칭량하였다. 칭량한 필터는 시료 손실이 없도록 신중하게 취급하면서 잘 접어 도가니에 넣어 뚜껑을 덮은 후 650°C 회화로에서 2시간동안 회화시켰다. 회화로에서 필터와 유기물들이 회화되고 실리카를 포함한 무기물 재만 남아 있는 상태에서 200mg의 KBr과 균질해지도록 혼합하였다. 이것을 펠렛으로 만들어 FTIR를 이용하여 $1500\text{cm}^{-1} \sim 400\text{cm}^{-1}$ 까지 주사하였고 799cm^{-1} , 779cm^{-1} , 695cm^{-1} 에서 석영의 흡광도를 측정하였다. 이후 측정된 흡광도를 표준분말을 이용한 검량식에 대입하여 검출량을 계산하였고 회수율로 보정하여 아래 식처럼 포집된 공기양으로 나누어 공기

중 농도를 계산하였다.

$$C = \frac{(Wq - Bq) \times 10^3}{V \times RE}, \text{ mg/m}^3$$

Wq : 시료중의 실리카 량(mg)

Bq : 공시료중의 실리카 량(mg)

RE : 회수율

V : 채취공기량(L)

○ 정밀도

합병상대표준편차(pooled relative standard deviation, Sr_{pooled})를 계산하였다.

$$Sr = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}}$$

$$Sr_{pooled} = \sqrt{\frac{(N_1 - 1) Sr_1^2 + (N_2 - 1) Sr_2^2 + \dots + (N_n - 1) (Sr_n)^2}{(N_1 - 1) + (N_2 - 1) + \dots + (N_n - 1)}}$$

N_i : 시료수, i : 농도수준

○ 검출한계, 검량한계

표준편차를 이용한 방법으로 공시료나 저농도의 시료를 반복해 분석한 후 구해진 표준편차의 3배를 검출한계로, 10배를 검량한계로 하였다. 또한 검출한계 미만의 자료는 $LOD \times \sqrt{2}$ 로 처리하였다.

(3) 기존 작업환경측정 및 분석방법 검증

산화규소 화합물에 대한 올바른 작업환경측정과 분석방법이 적용되고 있는

지를 산화규소 화합물 노출사업장 5개소를 방문하여 법적으로 수행된 작업환경 측정결과표를 확인하였다.

라. 설문조사

광물성분진 작업환경측정, 산화규소 화합물의 노출기준 등과 관련된 문제점 등을 파악하기 위하여 작업환경측정기관을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문조사에 활용된 항목과 내용은 <표 4>와 같으며, 설문항목은 광물성분진 중 규산 측정실시, 호흡성분진 채취, 분석, 산화규소 노출기준 등이었으며 각 항목에 대한 인지도, 규정의 인지도, 규정의 명확도, 규정의 준수율 등을 파악하였다. 또한, 지정측정기관별로 광물성분진 채취 및 분석방법, 장비 보유현황, 노출기준 적용현황, 노출기준 적용 시 어려운 점 등과 광물성분진 측정대상 사업장과 시료 수도 예측하였다.

<표 4> 설문조사 관련 내용

구분	내용
조사대상	지정측정기관의 작업환경측정담당자 또는 시료 분석담당자
조사방법	·설문지를 이용한 전자우편, 우편설문, 전화조사 병행 ·전국에 지정된 작업환경측정기관 161개소에 대하여 설문지 발송
조사항목	·광물성분진 중 규산 측정실시, 호흡성분진 채취 및 분석, 산화규소 노출기준 등에 대한 인지도, 규정의 인지도, 규정의 명확도, 규정의 준수율 ·지정측정기관별 광물성분진 채취 및 분석방법, 장비 보유현황, 노출기준 적용현황, 노출기준 적용 시 어려운 점 ·광물성분진 측정대상 사업장과 시료 수 예측

설문조사는 우편조사, 전자우편조사, 전화조사 등을 통하여 실시하였으며, 회수율을 높이기 위해서 전자우편 주소를 알고 있는 측정기관에는 먼저 이메일을 통하여 발송하였으며, 나머지 사업장에 대해서는 우편으로 설문지를 발송하였다. 설문지는 우편조사 시 동봉한 반송용 봉투를 활용하거나 팩스, 전자우편을 이용하여 회수하였다. 한편, 지정측정기관에서 산화규소화합물에 대한 다양한 의견수렴을 위하여 자유롭게 의견을 개진하도록 하였다.

마. 산화규소 화합물의 물리·화학적 특성, 독성·유해성

산화규소 화합물의 독성·유해성 등 기초적 자료를 확보하고자 고용노동부, 산업안전보건공단에서 발행되는 보고서를 고찰하였고 사이버 정보는 인터넷 등에서 제공되는 정보³⁾를 활용하였다. 산화규소 화합물의 개요와 물리적, 화학적 성상, 독성·유해성에 대한 자료수집은 ChemDplus(Search ChemIDplus) Patty's Toxicology, ACGIH Documentation, NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards(NPG), CRC Handbook of chemistry physics, 산업안전보건공단의 GHS MSDS, 국립환경연구원 화학물질안전관리센터, SciFinder를 이용하여 검색하였고, 미국 National Library of Medicine, IARC, NIOSH, OSHA, EPA, WHO, ILO, 영국 HSE, 일본 National Institute of Industrial Health 등의 홈페이지를 방문하여 구체적인 정보를 확보하였다.

바. 노출기준안 제시

국제학술지인 AOEH(Applied Occupational and Environmental Hygiene),

3) 위해도 분석 국제협회(Society of Risk Analysis) <http://www.epa.gov/iris>, UNEP(United Nations Environment Programme) <http://irptc.unep.ch/pic>, 미국 마이크로메덱스 회사(Micromedex), <http://www.micromedex.com/products/tomesplus/>, 미국 국립의학도서관(US National Library of Medicine) <http://www.toxnet.nlm.nih.gov>, 세계보건기구 (World Health Organization) <http://www.inchem.org>

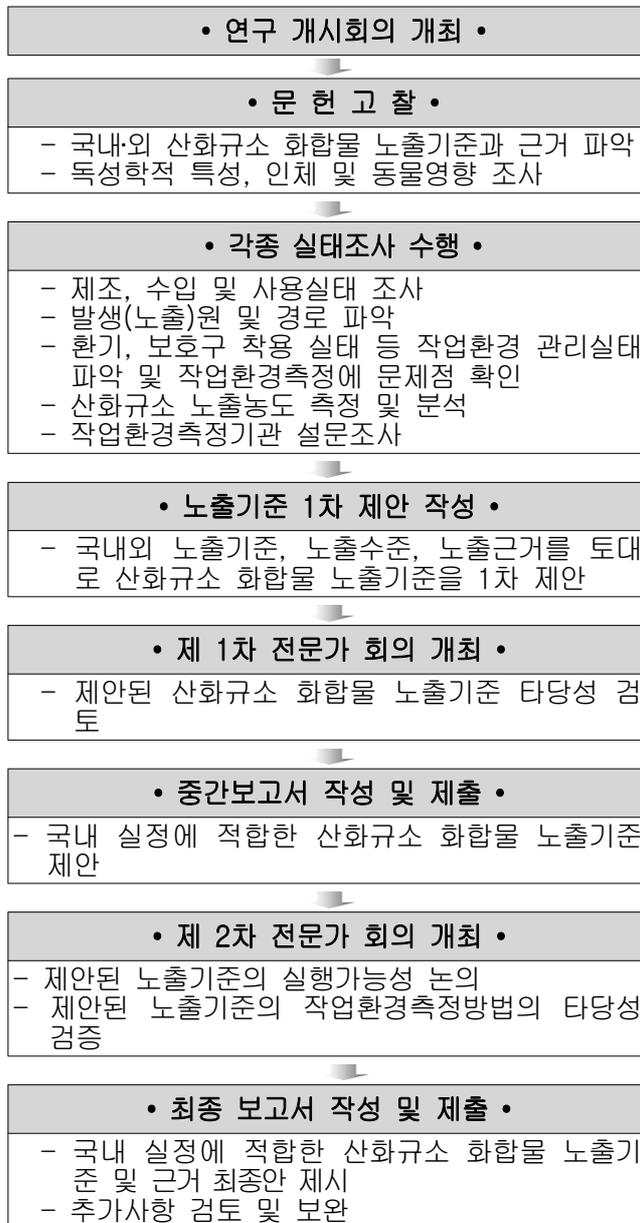
AIHA (American Industrial Hygiene Association) Journal와 국내학술지(한국 산업위생학회지, 한국환경보건학회지, 대한예방의학회지, 대한직업보건환경학회지, 한국독성학회지 등)도 활용하여 산화규소 화합물의 업종, 공정별 농도 수준을 파악하였다. 해외 각국의 노출기준 제정과 관련하여 노동부 관련 사이트를 방문하고 특히 ILO의 Chemical Exposure Limits 사이트를 중점적으로 활용하였다. 미국의 경우 OSHA PEL(Permissible Exposure Limits), ACGIH TLV(Threshold Limit Values), NIOSH REL(Recommended Exposure Limits)을, 일본은 후생노동성의 노동안전위생법상의 관리농도, 일본 산업위생학회에서 권고하는 기준과 독일 MAK(Maximum Concentration Values), 영국 WEL(Workplace Exposure Limits)에 대한 기준 제시와 설정근거를 파악하였다. 또한, 고용노동부에서 발행한 각종 제도관련 자료 및 산업안전보건공단에서 발행되는 보고서 및 간행물도 활용하여 동 물질에 대한 자료를 확보하였다.

사. 정기적인 전문가 회의 개최를 통한 검증 및 내용 보완

산화규소 화합물에 대하여 제안될 노출기준의 타당성 검증을 위하여 전문가 회의를 개최하였다. 특히 합리적이고 타당성 있는 노출기준 개정안을 제시하기 위하여 가급적 다양한 의견을 수렴하였다.

4. 연구추진체계

본 연구를 수행함에 있어 적절한 노출 기준 제안을 위하여 연구과정 중간에 3회에 걸쳐 전문가의 의견을 수렴하였으며 수행된 연구진행 체계는 아래 <그림 1>과 같다



<그림 1> 연구추진체계

III. 연구결과

1. 물질특성

가. 산화규소(결정체 석영)

(1) 물질의 개요

한글물질명 : 산화규소 (결정체 석영)

영문물질명 : α -Quartz

CAS 번호 : 14808-60-7 ; 1317-95-9

EU 번호 : 238-878-4

RTECS 번호 : VV7330000

KE 번호 : 29983

NFPA : 보건-1, 화재-0, 반응성-0

이명 : 석영(SiO_2)(QUARTZ (SiO_2)); 알파-석영(ALPHA-QUARTZ); 이산화 실리콘(SILICON DIOXIDE); 천연 석영(NATURAL QUARTZ); 실리콘 디산화물(QUARTZ)(SILICON DIOXIDE(QUARTZ)); 실리카(SILICA); 실리릭 무수물(SILICIC ANHYDRIDE); AGATE; 마메티스트(AMETHYST); 칼세도니(CHALCEDONY); FLINT; 석영모래(QUARTZ SAND); 실리카 가루(SILICA FLOUR); 크리스탈린 규소(CRYSTALLINE SILICA); 화이트 크리스탈 샌드(WHITE CRYSTAL SAND); 디나멕 미디어(DINAMEC MEDIA); 플루이드 베드 미디어(FLUID; BED MEDIA); AVENTURINE; O_2Si ; OHS09890;

분자식 : SiO_2

외관 : 희 결정 또는 가루 섬유질

상태 : 결정 또는 일정한 형태나 모양이 없는 분말

규제수준 : ACGIH TLV-TWA, 0.025mg/m³, 호흡성분진(폐섬유화 및 폐암 발생의 보호역치)

냄새 등: 무향

(2) 물리적 성상

분자량(g) : 60.09

비중 : 2.65

녹는점 : 1600℃

끓는점(760 mmHg) : 2230℃

용해도 : 불용성 (물 및 산에 녹지 않음)

(3) 화학적 성상

인화점 : 해당사항 없음

반응성 : 상온, 상압에서 안정함

휘발성 : 없음

혼합 금지 물질 : 가연성 물질, 환원성 물질

피해야 할 조건 : 분진의 발생을 억제할 것

중합반응 : 중합하지 않음

나. 산화규소(결정체 크리스토파라이트)

(1) 물질의 개요

한글물질명 : 산화규소 (결정체 크리스토파라이트)

영문물질명 : Cristobalite

CAS 번호 : 14464-46-1

EU 번호 : 238-455-4

RTECS 번호 : VV7325000

NFPA : 보건-1, 화재-0, 반응성-1

이명 : 알파-크리스토발리트(alpha-cristobalite), 메타크리스토발리트 (metacristobalite), 크리스토바라이트(SiO_2) cristobalite(SiO_2), 실리식 무수물 (silicic anhydride), OHS20640

분자식 : SiO_2

외관: 흰 결정 또는 가루 섬유질

규제수준 : ACGIH TLV-TWA, $0.025mg/m^3$, 호흡성분진

냄새: 무향

(2) 물리적 성상

분자량 : 60.08

비중 : 2.32

녹는점 : $1723^{\circ}C$

끓는점(760 mmHg) : $2230^{\circ}C$

용해도 : 불용성 (물 및 산에 녹지 않는다), 플르오르화 수소산에 녹는다.

(3) 화학적 성상

인화점 : 해당사항 없음

반응성 : 상온, 상압에서 안정함

가용성: 플르오르화 수소산, 용융된 알칼리

휘발성 : 없음

혼합 금지 물질 : 가연성 물질, 환원성 물질

피해야 할 조건 : 분진의 발생을 억제할 것

중합반응 : 중합하지 않음

다. 산화규소(결정체 트리디마이트)

(1) 물질의 개요

한글물질명 : 산화규소 (결정체 트리디마이트)

영문물질명 : Tridymite

CAS 번호 : 15468-32-3

EU 번호 : 239-487-1

NFPA : 보건-1, 화재-0, 반응성-0

이명 : 트리디마이트, 결정형 트리디마이트(Tridymite).

분자식 : SiO_2

외관: 흰 결정 또는 가루

규제수준 : ACGIH TLV-TWA, $0.05mg/m^3$, 호흡성분진

냄새: 무향

(2) 물리적 성상

분자량 : 60.08

비중 : 2.26

녹는점 : $1,710^{\circ}C$

끓는점(760 mmHg) : $2,230^{\circ}C$

용해도 : 불용성 (물 및 산에 녹지 않는다), 플루오르화 수소산, 용융된 알칼리에 녹는다.

(3) 화학적 성상

인화점 : 해당사항 없음

반응성 : 상온, 상압에서 안정함

가용성: 플르오르화 수소산, 용융된 알칼리

휘발성 : 없음

혼합 금지 물질 : 가연성 물질, 환원성 물질

피해야 할 조건 : 열, 스파크, 화염 등 점화원. 분진의 발생을 억제할 것.

중합반응 : 중합하지 않음

라. 산화규소(결정형 트리폴리)

(1) 물질의 개요

한글물질명 : 산화규소 (결정체 트리폴리)

영문물질명 : Tripoli

CAS 번호 : 1317-95-9

EU 번호 :

NFPA : 보건-1, 화재-0, 반응성-0

이명 : 트리폴리(Tripoli), 산화규소 결정체(Tripoli)

분자식 : SiO_2

외관: 흰 결정 또는 가루 섬유질

상태: 결정 또는 가루 섬유질

규제수준 : ACGIH TLV-TWA, 0.1mg/m³, 호흡성분진

냄새: 무향

(2) 물리적 성상

분자량 : 60.08

비중 : 2.65

녹는점 : 1,700℃

끓는점(760 mmHg) : 2,230℃

용해도 : 불용성

(3) 화학적 성상

인화점 : 해당사항 없음

반응성 : 상온, 상압에서 안정함

휘발성 : 없음

혼합 금지 물질 : 가연성 물질, 환원성 물질

피해야 할 조건 : 열, 스파크, 화염 등 점화원.

중합반응 : 중합하지 않음

마. 산화규소(비결정체 규소, 용융된)

(1) 물질의 개요

한글물질명 : 산화규소 (비결정체 규소, 용융된)

영문물질명 : Silica, Amorphous fused

CAS 번호 : 60676-86-0

EU 번호 : 262-373-8

NFPA : 보건-1, 화재-0, 반응성-0

이명 : 실리카, 무정형 용해된(Amorphous fused)

규소, 유리로된(silica, Vitreous), Fused quartz, Vitreous quartz,

Vitreous silica

분자식 : SiO_2

외관: 흰 결정 또는 가루 섬유질

상태: 결정 또는 가루 섬유질

규제수준 : ACGIH TLV-TWA, $0.1mg/m^3$, 호흡성분진

냄새: 무향

(2) 물리적 성상

분자량 : 60.08

비중 : 2.65

녹는점 : 1,700℃

끓는점(760 mmHg) : 2,230℃

용해도 : 불용성

(3) 화학적 성상

인화점 : 해당사항 없음

반응성 : 상온, 상압에서 안정함

휘발성 : 없음

혼합 금지 물질 : 가연성 물질, 환원성 물질

피해야 할 조건 : 열, 스파크, 화염 등 점화원

중합반응 : 중합하지 않음

바. 산화규소(비결정체 규조토)

(1) 물질의 개요

한글물질명 : 산화규소 (비결정체 규조토)

영문물질명 : Diatomaceous earth

CAS 번호 : 61790-53-2

EU 번호 :

NFPA : 보건-1, 화재-0, 반응성-0

이명 : 실리카, 비정형 규조토(Diatomaceous earth)

규조토(Kieselguhr)

분자식 : SiO_2

외관: 흰 결정 또는 가루 섬유질

규제수준 : ACGIH TLV-TWA, 10 mg/m³

냄새: 무향

(2) 물리적 성상

분자량 : 60.09

비중 : 1.9 - 2.35

녹는점 : 1,700°C

끓는점(760 mmHg) : 2,230°C

용해도 : 불용성

(3) 화학적 성상

인화점 : 해당사항 없음

반응성 : 상온, 상압에서 안정함

휘발성 : 없음

혼합 금지 물질 : 가연성 물질

피해야 할 조건 : 열, 스파크, 화염 등 점화원

중합반응 : 중합하지 않음

사. 산화규소(비결정체 실리카 겔)

(1) 물질의 개요

한글물질명 : 산화규소 (비결정체 실리카 겔)

영문물질명 : Silica Gel

CAS 번호 : 112926-00-8

EU 번호 :

NFPA : 보건-1, 화재-0, 반응성-0

이명 : 실리카, 비정형 실리카 겔(Amorphous Silica Gel),
무정형 합성 실리카 겔(Amorphous synthetic Silica Gel),

분자식 : SiO_2

외관: 고체, 일정한 형태나 모양이 없는 분말, 구슬(외관변화 : 흡습성)
무체색에서 흰색까지 있음.

규제수준 : ACGIH TLV-TWA, 10 mg/m³

냄새: 무향

(2) 물리적 성상

분자량 : 60.08

비중 : 2.1

PH : 2.3 - 7.4 (수성 현탁)

녹는점 : 1,700°C

끓는점(760 mmHg) : 2,230°C

용해도 : 불용성

(3) 화학적 성상

인화점 : 해당사항 없음

반응성 : 상온, 상압에서 안정함

가용성: 플루오르화 수소산, 뜨거운 고형 수산화 알칼리 용액

휘발성 : 없음

혼합 금지 물질 : 가연성 물질

피해야 할 조건 : 열, 스파크, 화염 등 점화원

중합반응 : 중합하지 않음

아. 산화규소(비결정체 침전된 규소)

비결정체 실리카 겔과 CAS 번호가 동일하다.

2. 취급 현황

가. 제조 또는 사용 현황

우리나라는 결정형 산화규소를 사용하는 사업장 수가 2007년을 기준으로 약 215개이고, 총 근로자는 47,725명, 취급근로자는 1,905명, 사용 취급량은 2,960,469,661 kg/년으로 알려져 있다. 또한 결정형 유리규산을 제조하는 사업장은 총 6개소, 근로자수는 190명, 취급 근로자수는 74명, 취급량은 437,624,000 kg/년으로 보고되고 있다. 비결정형 산화규소가 노출될 수 있는 전국 사업장수는 92개소이고, 총 근로자수는 6,087명, 취급자수는 515명 취급량은 268,037,424 kg/년으로 알려져 있다. 비결정형 산화규소 사용 사업장수는 90개소이며, 사업장 중 근로자수는 5,969명(1~619명), 취급근로자수는 455(1~48명), 취급량은 267,969,024kg/년 이었다. 비결정형 산화규소 제조 사업장수는 2개소이며, 총 근로자수는 118명(24~94명), 취급 근로자수는 60명(3~57명)이고, 취급량은 68,400kg/년이다(한국산업안전공단, 2007). 결정형 산화규소의 한 종류인 석영은 국내에서는 200여개 사업장 5만 여명의 근로자가 노출되고, 연간 3만톤 이상 사용되고 있고 주로 주물사를 사용하는 업종이다(김현욱 등, 2005).

나. 발생원 및 발생과정

(1) 결정형 산화규소

결정형 산화규소의 한 종류인 석영은 지각에서 두 번째로 흔한 광물이며, 침전물과 화강암에 존재한다. 화강암은 25-40%의 석영을 포함하고 있다. 석영은 SiO_2 의 가장 풍부한 형태이다. 그 이유로는 열역학적으로 순환상태와 암석이 형성되는 상태에서 가장 안정적이기 때문이다. 석영은 α -석영(low 석영)과 β -석영(high 석영)의 두 개의 형질이 있다. β -석영은 573°C도 이상에서만 일정하게 유지되며 그 이하의 온도에서는 α -석영으로 변화된다. 유리, 세라믹 그리고 실리카를 포함하는 제품을 만들기 위한 충분한 순도의 실리카를 포함한 모래의 생산량은 1983년도에 1억 8천 2백만 톤이었다. 미국에서 silica sand의 생산은 1984년에 4천1백만 톤으로 조사되었다. 또한 석영은 전기, 광학산업에서도 필요한 것으로 알려져 있으며 각종 산업에서 실리카의 이용의 유리용 모래, 37.4%; 주조용 모래, 26.7%; 연마용, 8.0%; 수압 파괴용, 4.0%; 기타 용도, 23.9%이다. 석영의 직업적 노출은 석영을 생산하고 이를 원재료로 이용할 때 발생이 가능하고 주로 단단한 바위에서 석영을 채굴하거나 세라믹 생산, 주조, 도로의 건설·유지 시 가능하다. 안전 장비와 공기 공급 후드의 설비를 이용했음에도 불구하고 이러한 직업에서 보고된 광범위한 수의 급성, 아급성의 규폐증의 발생에도 불구하고 분사기를 이용한 규사(Silica sand)의 이용은 계속되고 있다 (ACGIH, 2011).

산화규소 화합물의 발생은 대표적으로 유리제조, 주물, 연마제, 굴절렌즈의 제조, 도자기, 도기제조(유약), 샌드블래스팅 등에 사용, 노출되며, 화강암 등이 포함된 채광작업에서 노출이 이루어진다. 발생 공정으로는 대부분 분진이 날리는 투입, 혼합, 분쇄, 절단, 성형, 연마, 원료배합, 포장 등에서 발생한다. 또한 비철금속산업의 경우 용해, 조형, 탈사 등에서도 발생하는 것으로 보고되었다

(산업안전보건공단, 2007). 한편, 김현욱 등(2005)의 연구에서는 주물, 블라스팅(Abrasive blasting), 요업, 유리제조, 토사석 채취업을 주요 노출업종으로 보고하였다.

피영규 등(1997)이 주물사업장에서 발생하는 분진의 노출농도 및 석영 함유량을 분석한 결과 호흡성분진 농도가 $0.23\sim 1.28\text{ mg/m}^3$, 석영의 노출농도가 $11.0\sim 139.26\text{ }\mu\text{g/m}^3$, 호흡성먼지 중 석영의 함유량 $4.32\sim 5.36\%$ 로 분석되었다.

결정형 산화규소의 대표적인 다른 물질은 크리스토파라이트인데 이는 용결-소결 구조토의 20~25%에 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 한편, 결정편암 생산물의 61% 가량이 크리스토파라이트를 포함하고 있는 것으로 보고된 바도 있다. Flörke와 Martin(1993)에 따르면 내화벽돌은 대략 같은 분포의 석영, 트리디마이트, 크리스토파라이트와 비결정형 규산을 포함하고 있다고 한다. 온도가 상승하게 되면 비결정형 규산은 크리스토파라이트 또는 소량의 트리디마이트로 변화가 가능하다(Rabovsky, 1995).

Holroyd와 동료들(1988)은 내열성의 세라믹 섬유 단열재가 $1,100^{\circ}\text{C}$ 이상의 열에 노출되거나 알루미늄규산염 단열판이 $1,400\sim 1,700^{\circ}\text{C}$ 로 가열될 때에 크리스토파라이트와 트리디마이트가 생성된다는 것을 발견했다. Maxim과 그의 동료들은 내열성의 세라믹 섬유(RCF)와 규산을 포함한 재료를 산업용광로의 내열재의 설치와 제거 시 결정형 규산의 노출을 확인하였는데 이는 furnace-stripping공정에 이들 물질로 인한 노출로 규폐증이 유발되었다는 내용을 확인하였다. 크리스토파라이트와 트리디마이트는 모두 자연적으로 형성되지만 크리스토파라이트는 고온, 고압의 영향을 받는 구조토의 침전으로부터도 발생이 가능하다. 크리스토파라이트는 대부분 석회질의 구조토의 형태를 띠고 있는데 내열재, 연마재, 세라믹 및 에나멜을 만드는데 사용된다. 또한 기름의 표백과 정화에도 쓰이며, 복합물의 연마와 정련에 사용된다(Merck & Co., 2003).

결정형 산화규소 노출수준에 대한 연구결과를 살펴보면 김현욱 등(1999)은 제조업체(요업, 석재, 콘크리트, 유리, 연탄 등)에서 발생하는 호흡성 먼지 중

결정형 산화규소의 농도는 13.36-24.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 석재제조업에서 가장 높은 노출농도를 보였고, 호흡성분진 농도는 0.24 - 4.34 mg/m^3 로 유리제조업에서 가장 높은 노출농도를 보고 하였다. 그리고 정호근 등(1993)은 도자기제품(Pottery ware body) 등의 석영 함량 등에 대하여 조사 결과 도자기제품의 석영 함량은 15~25%, 도자기 및 요업제품의 원료의 석영 함량은 고령토 43.5~46.5%, 도석 70~80%, prophylite 66.7%, 납석 66.7%, Sericite 45~66%, 규석 98%이상, 규조토 73~91%, 장식 32~68.7%, 활석 63.5%라고 보고되어 있다(한국산업안전공단, 1991).

(2) 비결정형 산화규소

국내 비결정형 유리규산의 사용 실태를 보면 90여개 사업장에서 500여명의 근로자가 노출되며 연간 27만여 톤을 사용하는 것으로 알려져 있다. 비결정형 유리규산의 발생원을 보면 여과기, 광택기, 흡수제, 절연제 제조 등에 사용된다. fused 실리카의 경우 카메라 렌즈를 만드는데 사용되고 플라스틱 강화제로 사용된다고 알려져 있다(김현욱 등, 2005).

다. 노출 경로

노출 경로는 호흡기에 의한 흡입이 대부분이며 음식물, 흡연을 통한 경구 침투도 가능한 것으로 알려져 있다(김현욱 등, 2005).

3. 동물에 있어서의 영향

산화규소 화합물에 대한 동물영향은 그동안 수많은 연구결과가 발표되었고 특히, 국내에서 많은 보고서가 존재하여 다소 간소화하여 정리하고자 한다.

가. 급성독성

(1) 결정형 산화규소

(가) 석영

Heppleston과 Style은 급성 규폐증시 폐포 지질화를 관찰하며 원인으로 인지질의 증가를 들었다. 인지질이 증가하면 대사과정에서 arachidonic acid와 그 대사산물인 프로스타글란딘이 증가, 염증을 유발시킨다는 것이다. 동물실험에서 석영분진을 일회, 치명적 용량으로 노출시켰을 때 유해영향에 대한 근거는 별로 확인할 수 없었다. 그러나 래트에서 12 mg의 같은 종류의 석영 분진을 기관 삽입을 하루 1회씩, 21일에서 30일간 한 후 암컷과 수컷 래트에서 모두 규폐 육아종이 발견되었다.

Bowden과 Adamson은 실험 규폐증에서 제 I형 상피세포의 부종과 세포파괴를 관찰하였다. 상피세포의 형태학적 변화로 인하여 섬유소를 포함한 혈액성분이 폐포 내로 자유롭게 통과하고 유리규산 분진도 파괴된 폐포 상피를 통하여 폐실질 내로 쉽게 들어가, 제 I형 상피세포의 손상에 따라 제 II형 상피세포가 증식되고 이와 함께 여기에서 분비되는 계면활성제가 증가한다고 밝혔다.

임현우 등(1997)은 흰쥐의 기도에 투여한 유리규산 분진이 폐포 염증세포의 산소 유리기 분비에 미치는 영향을 알아보기 위하여 관찰한 실험연구에서 유리규산 투여군 1주째에 세기관지 주위에서 염증세포의 침윤이 관찰되었고, 3주째에는 호흡세기관지와 종말세기관지 주위에 많은 규폐결절이 형성되었으며, 8주째에는 1예에서 번역부에 심한 섬유화를 동반한 괴상성 병변을 보인 것으로 나타났다. 이 결과로 보아 유리규산 투여는 유리규산이 가지는 생물학적 특징 때문에 염증 세포의 지속적인 활성화를 일으키며, 이러한 활성화된 염증세포의 증가와 염증세포로부터 유리되는 산소 유리기의 양이 현저한 증가 등이 폐손상과 규폐증 발생에 영향을 미칠 것으로 보고한 바 있다.

(나) 크리스토파라이트

King 등은 레트에 기관내 크리스토파라이트를 주입하여 다른 석영이나 트리디마이트에 비해 심한 섬유화 반응이 일어나는 것을 관찰하였다.

(2) 비결정형 산화규소

동물실험에서 기관 내 비결정형 산화규소 분진 시 폐섬유화는 다른 규산 분진보다 미미한 것으로 알려져 있다. Swenson 등은 레트에서 비결정형 산화규소를 분쇄하여 기관 내 주입을 하여 산화규소를 주입한 레트의 폐와 임파선과 같은 조직반응을 관찰하였다. 그러나 결정형 산화규소에 비해 경미한 형태를 관찰하였다.

나. 만성독성

(1) 결정형 산화규소

(가) 석영

규폐증은 대기 중에 있는 호흡성분진의 흡입으로 인한 조직반응으로서 폐에 나타나는 일종의 폐섬유증이며 병인기전은 결정형규산 투여 시 염증반응과 함께 여러 가지 화학주유성인자가 폐섬유화를 촉진하는 것으로 알려져 있다.

임영과 윤임중(1991)은 흰쥐를 사용한 결정형규산 실험에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 기관지 폐포세척액내 총 세포수는 결정형규산 투여군에서 같은 시기의 대조군에 비하여 유의하게 높았다.
- 2) 결정형규산 투여군의 기관지 폐포 세척액 내 폐포대식세포 백분율은 실험기간 중 점차 감소하였다.
- 3) 기관지 폐포세척액 내의 총 세포수에 대한 호중구의 백분율은 결정형규산 투여군에서 실험기간이 경과할수록 점차 증가하였으며 대조군에 비하여 실험 3주 때부터 유의하게 높았다.

- 4) 병리조직학적 소견상 결정형규산 투여 후 1주째에는 대식세포, 호중구 그리고 섬유아세포가 모여 이루어진 조기의 규폐성 결절이 관찰되었으며 소염제 병합 투여군에서는 폐조직의 염증 및 부종성 변화는 잘 보였으나 규폐성 결절은 보이지 않았다.

결정형규산 투여 후 1일째의 호중구 출현을 증가시키는 급성 염증 반응으로 간주되나 그 이후에도 대조군에 비하여 계속 차이를 보이는 것은 유리 규산으로 인한 호중구 파괴에 대한 보상반응과 화학주성 인자분비, 그리고 자극된 호중구에서 분비되는 단백 분해 효소, 교원질 분해효소 등의 여러 가지 효소가 규폐성 결절 및 섬유화 형성에 영향을 미치는 것으로 추측하였다. 조직학적 소견상 대조군에서는 윤곽이 뚜렷한 폐포상피세포가 세포벽에서 잘 보였으나, 유리 규산 투여군의 10주째 이후부터는 상피세포의 부종과 염증물질을 폐포 내에서 관찰하였다. 규폐증에서 임파구 수의 변화에 대한 보고는 극히 적으나 Andrea는 유리규산을 생쥐의 기도에 주입한 2개월 후 병소부위에 대식세포가 주로 침착한 반면 흉선제거로 T임파구를 감소시킨 쥐에서는 대부분 호중구가 침착하는 것으로 추측하였다.

(나) 크리스토파라이트

동물연구에서 크리스토파라이트가 61%가 함유된 2,550 mppcf(0.2, 0.5, 5 mg/m³) 농도의 분진에 노출 시켰을 경우 명확한 폐섬유화는 발견되지 않았지만 폐에 세포침착이 유발되는 것으로 보고하였다(김현욱 등, 2005).

(2) 비결정형 산화규소

결과 없음

다. 변이원성/유전독성

(1) 결정형 산화규소

(가) 석영

Nehls 등은 석영에 의해 DNA의 변화가 일어난다는 결과를 발표하였다. 석영(2.5 mg의 DQ 12를 0.5 ml 생리식염수에 혼합 사용)또는 corundum (2.5 mg), 그리고 비발암성 분진을 Wistar 레트의 폐로 직접 기관 내 삽입하였다. 매 시간마다 10마리의 레트를 노출시켰고 대조군은 전처치 없이 생리 식염수를 이용하였다. 레트를 7, 21, 90일 이후에 해부하여 폐 조직을 면역 조직화학적으로 염색하여 DNA의 8-hydroxydeoxyguanosine 성분이 있는지 확인하였다. 반응성 산소 유리기가 8-hydroxydeoxyguanosine과 돌연변이로 인한 DNA 산화물을 유도할 수 있고, 이 결과로 발육하는 세포의 돌연변이를 야기한다고 보고하였다. 또한 Gu 등은 1996년 쥐 배아세포에서 transformation의 빈도는 Min-U-Sil 5분진을 전처치 했을 때 유의하게 증가한다고 하였다. 이 연구는 석영이 포유동물의 세포를 형태학적으로 transformation을 일으킬 수 있다는 것을 증명하였다.

Leigh 등(1998)은 수컷 Wistar 레트의 폐포 대식세포는 석영 노출이 시간이 지남에 따라 가중되면, 미세핵소체가 유도된다는 연구도 있다.

(나) 크리스토파라이트

결과 없음

(2) 비결정형 산화규소

결과 없음

라. 생식/발육독성

(1) 결정형 산화규소

(가) 석영

실험실 동물에서 생식기 및 발달 독성은 잘 알려져 있지 않다(LARC, 1997).

(나) 크리스토파라이트

결과 없음

(2) 비결정형 산화규소

결과 없음

마. 발암성

(1) 결정형 산화규소

(가) 석영

1987년 IARC에서는 유리규산을 흡입, 섭취, 관혈적인 경로로 동물에서 발암성을 유도하는 연구들을 점검하고 보고하면서 적절한 근거를 제시하고 있다고 공인하였다. 그 중 1986년 Groth 등이 Min-U-Sil 5 와 Novaculite 노출로 종양 발생률을 대조군과 비교한 연구에서 통계적으로 유의하게 증가했던 농도를 기준으로 하고 있다. 석영의 발암성은 노출 경로에 따라 달라질 수 있다. 각기 다른 석영 실험재료(i.e.Min-U-Sil 5, Novaculite, DQ 12, hydrogen fluoride-etched Min-U-Sil 5, Min-U-Sil과 polyvinylpyridine-N-oxide, DQ 12와 polyvinylpyridine-N-oxide, Sikron F-300 quartz)와 흡입성 분진 범위의 입자 크기를 이용하여 레트에서 흡입 실험이 다섯 가지 이루어졌다. 이 중 네 가지 실험은 기관내 분진삽입으로 수행하였다. 아홉 개의 연구 중 8개에서 폐장내 선암과 편평상피세포암의 발생율이 유의하게 증가하였다고 나타났다. 이 결과는 IARC가 1997년 유리규산에 의한 폐섬유화를 인정했을 때 상당한 기여

를 하였다. 최근에 인체 발암성이 잘 알려져 발암성 수준을 Group 1으로 분류하였으며, ACGIH에서는 A2로 구분하고 있다.

(나) 크리스토파라이트

IARC에서 동물에서 결정형 유리규산이 발암원성의 근거가 있다고 보고되었고, 레트에서 악성 림프종이 발생하였다.

(2) 비결정형 산화규소

IARC에서는 비결정형 유리규산에 의한 발암성의 증거가 동물실험에서 부적절한 것으로 나타나, 발암성이 없는 것으로 평가하였다. 또한 비결정형 규산은 인체 발암성을 규정할 수 없는 상태(Group 3)로 알려져 있다.

4. 인체영향

가. 인체내 작용기전

호흡기로 침입하여 대사작용으로는 직경 5~15 μ m인 먼지는 점액과 섬모운동에 의해서 제거되지만 직경 0.5~5 μ m의 분진은 기도의 종말부 또는 폐포에 침착한다. 폐에 침착된 분진은 대식세포(단핵탐식세포)에 잡혀서 기도 또는 폐실질로 운반, 배설된다. 그러나 배설되지 못하고 분진이 폐에 축적되는데 분진의 축적량은 첫째 노출량이 많을수록, 둘째 과거에 노출된 일이 많을수록, 셋째 폐질환 특히 폐결핵이 있을 때 많아진다.

나. 단기노출 시 인체 유해성

(1) 결정형 산화규소

(가) 석영

석영의 단기 노출 시 폐조직에 반흔조직을 형성하여 기침이 나고 숨이 차고 숨소리가 거칠다. 폐기능장해가 심하며 규폐증이 생긴다. 규폐증은 먼지에 노출된지 몇 해가 지나서 발생한다. 때때로 모래분사자(샌드블래스터)와 터널작업자와 같이 아주 고농도에 단시간 노출되었을 때 단시일 내에 발생한다. 이러한 급성 규폐증 환자에서 호흡기 증상이 심하여 사망하기도 한다. 그리고 고농도의 유리규산 분진에 노출되면 불과 2~3주 동안 작업하다가 급성형 진폐증이 생긴 예도 있다. 급성형 규폐증에서는 결절형 병리조직학적인 변화는 나타나지 않고 폐야 전체가 마치 폐수종 때와 비슷하게 유리를 갈아 놓은 것처럼 보인다.

(나) 크리스토파라이트

석영의 영향과 유사하다.

(2) 비결정형 산화규소

매우 드물게 역학 연구들이 진행되었으나 알려진 바가 없다.

다. 장기노출 시 인체 유해성

(1) 결정형 산화규소

(가) 석영, 크리스토파라이트

결정형 유리규산을 흡입하면 폐에 전형적인 결절을 형성하는 진행성인 폐섬유화를 일으켜 기능장해를 초래하고 때로는 사망한다. 결정형 유리규산 먼지에 폭로되었을 때 증상의 진행 상태는 개인의 감수성에 따라 다른데, 그것은 발생 시기, 폐의 병리조직학적인 진행속도는 폭로조건과 관계가 있다. 결정형 유리규산에 노출된지 대략 20년이 지나야 규폐증이 생긴다고 볼 수 있다. 그러나 급성 규폐증의 경우는 2년 이내에 발생 할 수도 있다. 이러한 경우는 주로 고농

도 노출과 관련이 있다. 이러한 급성형태는 굉장히 치명적이며, 주로 화강암으로 쌓인 터널 굴착 작업 시 나타나기 쉽다.

Hnizdo와 동료들(1993)은 규폐증의 방사선 상의 소견과 X-선과 생검 등으로 평균시간이 2.7년인 984명의 광부들에 대한 규폐증의 사망 후의 병리학적인 연구를 수행하였다. 생검 결과 658명은 규폐증의 병리학적 진단에서 음성판정을 받았다. 검시 결과 근소한, 보통의, 명확한 규폐증으로 진단된 몇 건의 사례들에서 가장 정확한 X-선 판독자들은 X-선을 가지고 근소한 진폐증은 75%, 보통의 진폐증은 54%, 명확한 진폐증은 26% 정도 정확하게 진단을 내리지 못하는 것으로 나타났다. 그러므로 대략 63%의 규폐증이 1/1 cutoff point의 X-선 분석만 가지고는 양성으로 진단되지 않는다. 더 낮은 cutoff point에서 거짓 음성 진단이 명확하게 증가될 것이다. 연구자들은 제한된 방사선의 진단의 유용성에 대해서 의문점을 제시하고 있다.

Malmberg와 동료들(1993)은 1976년에 화강암을 분쇄하는 45명의 노출군과 나이와 흡연력이 노출군과 일치하는 45명의 환자 대조군 연구를 실시하고 1988년에 재실시하였다. 이 실험은 폐의 기능을 검사하는 실험으로 1초 동안의 호기량을 측정하여 얼마나 폐의 기능이 줄어들었는지를 규산에 노출된 작업자들의 FEV₁(1초 동안의 노력호기량)과 FEV₁/FVC(강제 폐활량) 비율을 통해서 확인하는 실험이었다. 두 관찰 지점 사이에, 흡입할 수 있는 평균 석영의 공기 중 농도는 0.16 mg/m³이었다. 연구자들은 0.1 mg/m³의 2배 양에 노출이 되면 기도폐색의 위험성과 폐섬유화를 증가시키는 문제를 일으킨다고 제안하였다.

(2) 비결정형 산화규소

알려진 바가 없다.

라. 인체 표적장기 특성

산화규소 화합물들의 표적장기는 흡입시 노출경로인 호흡기, 기관지, 폐 등

이며, 노출 시 급성호흡곤란, 기침, 폐섬유화증, 규폐증, 폐암을 일으킬 수 있다.

마. 인체 발암성

미국 보건성에서는 1992년 국제 독성 프로그램(National Toxicology Program, NTP)을 통하여 6번째 발암물질 연감을 발행하며 산화규소 분진을 발암물질이라고 예측할 수 있다고 규정하였고 판단 기준을 정리하였고, 1996년 6월 미국 흥부의학회(ATS)는 산업 환경 보건의 전문가와 함께 공청회를 통해 공식적으로 발암성을 인정하였다. 또한 국제암연구회(IARC)에서는 1997년대 석영이나 크리스토파라이트 형태의 결정형 유리규산의 인체발암성을 선포하였다(Group 1). 이후 미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH)도 IARC와 ATS의 의견에 일치를 보았다. 1997년에 Steenland 등의 연구는 유리규산이 규폐증을 유발하는데 라돈, 비소의 영향을 배제한 관련성을 설명하고 있다. 당시 19개의 대규모 코호트, 환자대조군 연구들을 라돈과 비소의 영향이 있을 수 있는 광산이나, 주물공장을 제외한 연구대상으로 메타분석을 통해 제시한 결과에 의하면, 규폐증을 가지고 있는 집단에서 일반인구 집단에 비해 비교위험도가 2.3 (95% CI=2.2-2.6), 결정형 유리규산에 노출된 집단의 경우 일반인구집단에 비해 폐암 발생 비교위험도가 1.3 (95% CI= 1.21-1.4)으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 결정형 유리규산이 폐암을 일으키는 물질로 인정되었다.

5. 각국의 노출기준 요약 및 해설

가. 한국

2008년 1월 1일부터 산화규소(결정체 석영)만 호흡성분진으로 표기되면서 노출기준이 0.1 mg/m^3 에서 0.05 mg/m^3 으로 강화되었다. 그 후 2011년 현재 고용노동부의 화학물질 및 물리적인자의 노출기준에 산화규소 화합물과 관련된

종류는 총 8가지로 구분하고 있다. 이 중 결정형은 석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트, 트리폴리 4가지로 호흡성분진으로 표기하고, 비결정형은 용융된 규소, 규조토, 침전된 규소, 실리카겔 4가지이며 용융된 규소만 호흡성으로 표기되어 있다<표 5>.

<표 5> 우리나라의 산화규소 화합물 노출기준 현황

유해물질 명칭	노출기준 (TLV-TWA)	비 고
산화규소(결정체 석영)	0.05 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(결정체 크리스토파라이트)	0.05 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(결정체 트리디마이트)	0.05 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(결정체 트리폴리)	0.1 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(비결정체 규소, 용융된)	0.1 mg/m ³	호흡성 분진
산화규소(비결정체 규조토)	10 mg/m ³	
산화규소(비결정체 침전된 규소)	10 mg/m ³	
산화규소(비결정체 실리카겔)	10 mg/m ³	

나. 미국

(1) OSHA : PEL(Permissible Exposure Limits)

미국산업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration)에서는 산화규소 화합물⁴⁾에 대한 허용노출기준을 <표 6>와 같은 공식을 이용하도록

4) Silica, amorphous, diatomaceous earth, containing less than 1% crystalline silica
 Silica, crystalline cristobalite, respirable dust
 Silica, crystalline quartz, respirable dust
 Silica, crystalline tripoli (as quartz), respirable dust
 Silica, crystalline tridymite, respirable dust
 Silica, fused, respirable dust
 Silicates (less than 1% crystalline silica)

하고 있다. 석영의 경우 우리나라의 호흡성 분진에 대한 노출기준만 있는 것에 비하여 총분진에 대한 허용노출기준도 계산식으로 제시되어 있으며 크리스토파라이트와 트리디마이트는 석영 기준의 1/2 수준을 제시하고 있다. 한편, 비결정형 산화규소에 대한 허용노출기준 공식이 있다는 것은 다소 특징적이다.

<표 6> 미국 OSHA 의 산화규소에 대한 PEL

Substance	mppcf	mg/m ³
Silica:		
Crystalline		
Quartz (Respirable)	$\frac{250}{\%SiO_2+5}$	$\frac{10 \text{ mg/m}^3}{\% SiO_2+2}$
Quartz (Total Dust)		$\frac{30 \text{ mg/m}^3}{\% Si O_2 + 2}$
<ul style="list-style-type: none"> • Cristobalite: Use 1/2 the value calculated from the count or mass formulae for quartz. • Tridymite: Use 1/2 the value calculated from the formulae for quartz. 		
Amorphous, including natural diatomaceous earth	20	$\frac{80 \text{ mg/m}^3}{\%SiO_2}$
Silicates (less than 1% crystalline silica):		
Mica	20	
Soapstone	20	
Talc (not containing asbestos)	20 ^c	
Talc (containing asbestos) Use asbestos limit		
Tremolite, asbestiform (see 29 CFR 1910.1001)		
Portland cement	50	
Graphite (Natural)	15	
Coal Dust:		
Respirable fraction less than 5% SiO ₂		2.4 mg/m ³

Mica (respirable dust)

Soapstone, total dust

Soapstone, respirable dust

Respirable fraction greater than 5% SiO ₂		$\frac{10 \text{ mg/m}^3}{\text{SiO}_2+2} \%$
Inert or Nuisance Dust:		
Respirable fraction	15	5 mg/m ³
Total dust	50	15 mg/m ³

(2) ACGIH : TLV(Threshold Limit Values)

직업적 노출기준에 가장 권위 있는 기관이며 전 세계적으로 가장 벤치마킹을 많이 하고 있는 미국정부산업위생전문가협회(The American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)는 그간 비결정형 산화규소 및 결정형 산화규소 8종에 대하여 설정된 노출기준 내용을 2004년에 대폭 수정하였는데, 그 내용으로는 석영과 크리스토파라이트에 대해서만 호흡성분진으로 채취하고, 노출기준은 0.025 mg/m³ 으로 낮추어 권고하였다. 또한 기타 분류가 불가능한 비수용성 및 난용성 입자상물질의 권고치는 3.0 mg/m³ 으로 개정하였다. 석영과 크리스토파라이트를 제외한 이전에 권고된 나머지 물질들은 자료의 불충분 이유로 2005년도에 트리디마이트를 철회, 그리고 나머지 물질들은 2006년에 권고를 철회하였다.

나머지 물질들이 철회된 이유는 비결정형 구조토의 경우 단일물질로 노출된 자료가 불충분하며, 대부분이 결정체 규산과 함께 노출된 자료만 존재하기 때문이며(Insufficient data on single-substance exposure, most are co-exposures with crystalline silica), 비결정형 산화규소 흡, 비결정형 용융된 산화규소, 비결정형 침전된 산화규소는 노출자료가 불충분(Insufficient data)하다는 이유로 노출기준을 철회되었다(ACGIH, 2006).

그리고 트리폴리에 대해서는 결정형 산화규소(Silica, Crystalline)로 기준을 하나로 권고하고 있다(Insufficient data and unlikely single-substance exposure.

Combined into one TLV[®] and Documentation, i.e., Silica, Crystalline).

석영과 크리스토파라이트 TLV의 변천과정을 아래와 같다(ACGIH, 2011).

(1) Quartz

- 1946년-1947년 : MAC-TWA
 - 5 mppcf-high(above 50% free silica)
 - 20 mppcf- medium(5% to 50% free silica)
 - 50 mppcf-low(below 5% free silica)
- 1948년-1961년 : TLV-TWA
 - 5 mppcf-high(above 50% free silica)
 - 20 mppcf-medium(5% to 50% free silica)
 - 50 mppcf-low(below 5% free silica)
- 1962년-1971년 : TLV-TWA
 - $250 \text{ mppcf} \div (\% \text{ quartz} + 5)$
- 1968년 제안 : TLV-TWA
 - 호흡성분진, $10 \text{ mg/m}^3 \div (\% \text{ respirable quartz} + 2)$
 - 총분진, $30 \text{ mg/m}^3 \div (\% \text{ quartz} + 2)$
- 1970년 제안 : TLV-TWA
 - 호흡성분진, $300 \text{ mppcf} \div (\% \text{ quartz} + 10)$
 $; 10 \text{ mg/m}^3 \div (\% \text{ respirable quartz} + 2)$
 - 총분진, $30 \text{ mg/m}^3 \div (\% \text{ quartz} + 3)$
- 1972년-1985년 : TLV-TWA
 - 호흡성분진, $300 \text{ mppcf} \div (\% \text{ quartz} + 10)$
 $; 10 \text{ mg/m}^3 \div (\% \text{ respirable quartz} + 2)$
 - 총분진, $30 \text{ mg/m}^3 \div (\% \text{ quartz} + 3)$

- 1983년 제안 : TLV-TWA
 - 호흡성분진, 0.1 mg/m^3
 - 총분진, 0.3 mg/m^3
- 1984년 제안 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.1 mg/m^3
- 1986년-1999년 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.1 mg/m^3
- 1998년 제안 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.1 mg/m^3 , A2
- 1999년 제안 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.05 mg/m^3 , A2
- 2000년-2005년 TLV-TWA : 호흡성분진, 0.05 mg/m^3 , A2
 - : 크리스토파라이트와 TLV 통합
- 2004년 제안 TLV-TWA : 호흡성분진, 0.025 mg/m^3 , A2
 - : 크리스토파라이트와 TLV 통합
- 2006년-현재의 TLV-TWA : 호흡성분진, 0.025 mg/m^3 , A2
 - : 크리스토파라이트와 TLV 통합

(2) Cristobalite

- 1960년-1961년 : TLV-TWA : 5 mppcf(above 5% free silica)
- 1962년-1971년 : TLV-TWA : 250 mppcf/(% quartz + 5)
- 1968년 제안 : TLV-TWA :
 - 호흡성분진, $[(10 \text{ mg/m}^3) \div (\% \text{ respirable quartz} + 2)] \div 2$
 - 총분진, $[(30 \text{ mg/m}^3) \div (\% \text{ quartz} + 2)] \div 2$
- 1970년 제안 : TLV-TWA :
 - 호흡성분진, $[(300 \text{ mppcf}) \div (\% \text{ quartz} + 10)] \div 2$; $[(10 \text{ mg/m}^3) \div (\% \text{ respirable quartz} + 2)] \div 2$
 - 총분진, $[(30 \text{ mg/m}^3) \div (\% \text{ quartz} + 3)] \div 2$
- 1972년-1985년 : TLV-TWA :
 - 호흡성분진, $[(300 \text{ mppcf}) \div (\% \text{ quartz} + 10)] \div 2$; $[(10 \text{ mg/m}^3) \div (\%$

- respirable quartz + 2)] ÷ 2
- 총분진, [30 mg/m³/(% quartz + 3)]/2
- 1983년 : TLV-TWA
 - 호흡성분진, 0.05 mg/m³
 - 총분진, 0.15 mg/m³
 - 1984년 제안 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.05 mg/m³,
 - 1986년-2005년 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.05 mg/m³
 - 2004년 제안 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.025 mg/m³, A2
: α-Quartz와 TLV 통합
 - 2006년-현재 : TLV-TWA : 호흡성분진, 0.025 mg/m³, A2
: α-Quartz와 TLV 통합

<표 7> 현재 ACGIH 의 산화규소에 대한 노출기준

유해물질 명칭	TLV	Notation	비 고
산화규소(결정체 석영)	0.025 mg/m ³	A2	호흡성 분진
산화규소(결정체 크리스토파라이트)	0.025 mg/m ³	A2	호흡성 분진

(3) NIOSH : REL(Recommended Exposure Limits)

미국국립산업안전보건연구원(NIOSH)의 권고노출기준은 크게 결정형과 비결정형으로 구분하고 있으며 결정형(Quartz, Cristobalite, Tridymite, Tripoli)은 우리나라와 동일하게 호흡성분진 0.05 mg/m³으로 규정하고 있고, 비결정형(Diatomaceous earth, Diatomite, Silica gel 등)은 6 mg/m³으로 제시하고 있다.

<표 8> 미국 NIOSH 의 산화규소에 대한 TLV

Silica, crystalline (as respirable dust)	Formula: SiO ₂	CAS#: 14808-60-7	RTECS#: VV7330000	IDLH: Ca [25 mg/m ³ (cristobalite, tridymite); 50 mg/m ³ (quartz, tripoli)]
Conversion:	DOT:			
Synonyms/Trade Names: Cristobalite, Quartz, Tridymite, Tripoli				
Exposure Limits: NIOSH REL: Ca TWA 0.05 mg/m ³ See Appendix A OSHA PEL: See Appendix C (Mineral Dusts)			Measurement Methods (see Table 1): NIOSH 7500, 7601, 7602 OSHA ID142	
Silica, amorphous	Formula: SiO ₂	CAS#: 7631-86-9	RTECS#: VV7310000	IDLH: 3000 mg/m ³
Conversion:	DOT:			
Synonyms/Trade Names: Diatomaceous earth, Diatomaceous silica, Diatomite, Precipitated amorphous silica, Silica gel, Silicon dioxide (amorphous)				
Exposure Limits: NIOSH REL: TWA 6 mg/m ³ OSHA PEL†: TWA 20 mppcf [(80 mg/m ³)/%SiO ₂]			Measurement Methods (see Table 1): NIOSH 7501	
Physical Description: Transparent to gray, odorless powder. [Note: Amorphous silica is the non-crystalline form of SiO ₂ .]				

(4) 미국 각 주별 산화규소 허용노출기준

미국의 각 주별로 결정형 산화규소의 허용노출기준은 다소 차이가 있지만, ACGIH에서와 마찬가지로 호흡성분진 중심의 석영과 크리스토파라이트로 규제한다는 점은 다소 참고할 만한 여지가 있다. 그러나 그 수치는 대략 석영은 0.1 mg/m³, 크리스토파라이트는 0.05 mg/m³ 정도의 노출기준을 나타내고 있다.

<표 9> 미국의 각 주별 산화규소의 허용노출기준

California PEL	Respirable Quartz: 0.1 mg/m ³ , Respirable Cristobalite: 0.05 mg/m ³
Michigan PEL	Respirable Quartz: 0.1 mg/m ³ , Respirable Cristobalite: 0.05 mg/m ³
N. Carolina PEL	10 mg/m ³ / (% quartz + 2 x % cristobalite + 2) for respirable dust
Washington PEL	Respirable Quartz: 0.1 mg/m ³ , Respirable Cristobalite: 0.05 mg/m ³
Hawaii	Respirable Quartz: 0.1 mg/m ³ , Respirable Cristobalite: 0.05 mg/m ³
Minnesota	Respirable Quartz: 0.1 mg/m ³ , Respirable Cristobalite: 0.05 mg/m ³
Vermont	Respirable Quartz: 0.1 mg/m ³ , Respirable Cristobalite: 0.05 mg/m ³

다. 일본

일본의 노출기준의 제정은 처음에는 규제 대책 위원회 중의 허용농도 전문 위원회가 허용농도수치를 처음 발표하였으며, 그 후에는 일본 산업위생학회가 매년 총회를 거쳐서 허용농도나 노출기준 등을 권고 하고 있다.

일본후생노동성 노동안전위생법의 경우 역시 우리나라와는 달리 토석, 암석, 광물, 금속 또는 탄소의 분진에 대하여 관리 농도를 $E^5) = 3.0/(1.19Q^6)+1$ 로 규정하고 있다. 좀더 자세히 보면 일본 노동안전위생법 제 65조에서 정한 분진 농도의 측정은 분진 장해예방 규칙 제 25조에 「토석, 암석, 광물, 금속 또는 탄소분진을 현저하게 발산하는 옥내 작업장」에 대하여 실시하도록 규정하고 있으며, 분진 장해 예방규칙 제26조 제2항에는 분진농도의 측정 시에는 유리규산(SiO₂) 함유율을 반드시 측정하도록 규정하고 있다. 따라서 석영의 함유량을 파악해야 관리농도 초과여부를 파악할 수 있다. 이는 결정형규산 함유율이 변동하면 측정치가 동일하여도 평가는 달라질 수 있다는 것이다(후생노동성, 2009). 또한, 일본산업보건협회(JSOH)의 직업적 권고노출기준(Recommendation of

5) 관리 농도(단위 mg/m³)

6) 해당 분진의 유리 규산 함유율(단위 percent)

Occupational Exposure Limits)에서는 호흡성 결정형 산화규소에 대한 기준으로 0.03 mg/m³을 제시하고 있으며 결정형 이외의 분진은 1종, 2종, 3종으로 구분하되 총분진과 호흡성분진에 대한 기준이 구분되어 설정되어 있다(JSOH, 2011).

<표 10> 일본의 JSOH의 산화규소에 대한 OEL

I. Respirable crystalline silica ^{#, †, **, *} OEL-C 0.03 mg/m ³			
II. Dusts other than I			
	Dusts	OEL (mg/m ³)	
		Respirable dust [*]	Total dust ^{**}
Class 1	Activated charcoal, Alumina, Aluminum, Bentonite, Diatomite, Graphite, Kaolinite, Pagodite, Pyrites, Pyrite cinder, Talc [†]	0.5	2
Class 2	Dusts containing less than 10% free silica, Bakelite, Carbon black, Coal, Cork dust, Cotton dust, Iron oxide, Grain dust, Joss stick material dust, Marble, Portland cement, Titanium oxide, Wood dust, Zinc oxide	1	4
Class 3	Limestone [‡] , Inorganic and organic dusts other than Classes 1 and 2	2	8
Asbestos ^{***, †}		(Table III-2)	

Notes: 1. *: Respirable dust is defined as that which penetrates a particle size separator with the following characteristics:

$$P = 1 - \frac{D^2}{D_0^2} \quad (D \leq D_0), \quad P = 0 \quad (D > D_0)$$

where P = penetration rate

D = aerodynamic particle diameter (μm)

D₀ = 7.07 μm.

Respirable crystalline silica consists of particles captured by the following collection efficiency, R (d_{ae}).

$$R(d_{ae}) = 0.5[1 + \exp(-0.06d_{ae})] \cdot [1 - F(x)]$$

d_{ae}: aerodynamic diameter of particle (μm), F(x): cumulative probability function of the standardized normal variable

$$x = \ln(d_{ae}/\Gamma) / \ln(\Sigma), \ln \text{ natural logarithm}, \Gamma = 4.25 \mu\text{m}, \Sigma = 1.5$$

2. **: Total dust comprises particles with a flow speed of 50 to 80 cm/sec at the entry of a particle sampler.

라. 영국

영국의 경우는 Health and Safety Executive(HSE)의 독성물질평가실무그룹(Working Group on the Assessment of Toxic Chemicals, WATCH)에서 유리규산 기록을 검토하기 시작하였다.

영국의 작업장노출기준(Workplace Exposure Limits, WELs)은 크게 비결정형, 결정형, Fused로 구분하고 비결정형 산화규소는 흡입성과 호흡성에 대한 노출기준을 규정하고 있고 결정형에 대해서는 호흡성으로서 0.1 mg/m^3 으로 규정하고 있다.

<표 11> 영국의 산화규소에 대한 WEL

Silica, amorphous					
inhalable dust		-	6	-	-
respirable dust		-	2.4	-	-
Silica, respirable crystalline	see page 31	-	0.1	-	HSC/E plans to keep this limit under review
Silica, fused respirable dust	60676-86-0	-	0.08	-	-
Silicon	7440-21-3				
inhalable dust		-	10	-	-
respirable dust		-	4	-	-

마. 독일

크리스토티바라이트와 트리디마이트를 포함하여, 석영에 대한 MAK 값으로 0.15 mg/m^3 을 채택하고 있다.

바. 캐나다

캐나다의 OEL(Occupational Exposure Limite)은 TWA와 동일한 Time-Weighted Average Exposure Values(TWAEV)를 사용한다. TWAEV를

기준으로 석영은 호흡성으로 ACGIH TLV와 동일하게 호흡성 분진으로 0.025 mg/m³의 기준을 채택하고 있다.

사. 요약

산화규소 화합물에 대한 노출기준은 각 나라마다 모두 제정되어 있지만 국가 및 국가 기관에서 제시하는 기준의 정도는 서로 상이한 것으로 나타났다 <표 12>. 호흡성 분진, TWA를 기준으로 했을 때, ACGIH의 TLVs가 0.025mg/m³ 으로 가장 엄격한 기준으로 적용하고 있었다.

<표 12> 선진외국의 노출기준 현황

물질명	구분	노동부 고시 ('2010)	ACGIH TLVs ('11)	NIOSH RELs	OSHA PELs	Japan ROELs	Canada TWAEV
Quartz respirable	TWA	0.05 mg/m ³	0.025 mg/m ³	0.05 mg/m ³	10 mg/m ³ / %SiO ₂ +2	0.03 mg/m ³	0.025 mg/m ³

6. 산화규소 화합물의 노출평가

가. 작업환경측정 결과 분석

(1) 작업환경측정 결과 분석

2009년부터 2010년까지 산업안전보건법에 의하여 수행된 작업환경측정결과를 바탕으로 산화규소 화합물의 측정결과 및 분석방법의 특성을 파악하였다.

2009년 총 측정자료 수는 7,458건이었고, 2010년의 경우 조금 증가한 8,157건이었다. 다만, 측정결과가 누락되어 있거나 노출기준이 표시되지 않은 자료, 측

정방법 등이 불명확한 자료를 제외하고 총 13,912건(2009년 6,713건, 2010년 7,199건)을 분석에 활용하였다.

<표 13> 산화규소 화합물 측정대상 사업장 현황

구분	2009년	2010년
총 대상사업장수	2,064개소	1,531개소
총 대상건수	6,713건	7,199건
측정대상 근로자 수	196,198명	200,078명
노출기준 초과건수	219건수	196건수

산화규소 화합물의 총 측정대상 사업장수는 2009년에 2,064개소, 2010년 1,531개소이었고, 이중 노출기준 초과건수는 2009년 219건, 2010년에는 196건으로 확인되었다. 또한 대상 사업장수는 줄어들었으나, 측정대상 근로자수를 보면 조금 증가한 것으로 나타났다<표 13>. 산화규소 화합물의 분석방법은 여러 가지가 있으나, 현재 가장 많이 사용하는 방법인 중량분석법과 FTIR 측정법이 있다. 먼저 중량분석법의 경우 총계를 살펴봤을 때 2009년과 2010년 큰 변화를 볼 수 없었다. 그러나 FTIR 측정법의 경우 2009년도 총 측정 건수가 266건(3.96%)에서 2010년도는 838건(11.6%)으로 크게 확대되었다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 산화규소 화합물 노출기준 개정시기와 관련하여 2010년 상반기와 하반기를 비교해 볼 때 상반기 258건(5.39%)에서 하반기 571건(23.9%)로 크게 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 2010년 6월 개정시기와 관련하여 호흡성 분진으로 포집하여 FTIR로 분석하는 것이 확산된 것으로 판단된다<표 14>.

<표 14> 연도별 산화규소 화합물 분석방법에 따른 측정 현황

단위 : 건(%)

구 분	2009년				2010년			
	상반기	하반기	수시	계	상반기	하반기	수시	계
FTIR	150	106	10	266	258	571	9	838
	3.37%	4.72%	47.6%	3.96%	5.39%	23.9%	34.6%	11.6%
중량분석	4,271	2102	11	6,384	4,505	1,786	17	6,303
	96.0%	93.6%	52.4%	95.1%	94.2%	74.6%	65.4%	87.6%
소계	4,421	2,208	21	6,650	4,763	2,357	26	7,141
총계	4,447	2,245	21	6,713	4,784	2,394	26	7,199

분석방법에 따른 산화규소 화합물의 노출수준을 비교하면 전체적으로 FTIR 방법에 의한 결과가 낮게 나타났다<표 15>. 이는 노출기준과도 큰 상관이 있지만 FTIR방법으로 분석할 경우 호흡성 분진으로 포집하여 석영 등의 농도만 환산하는 것이 대부분이기 때문인 것으로 판단된다.

<표 15> 산화규소 화합물 분석방법에 따른 노출수준

구 분		2009년			2010년		
		상반기	하반기	수시	상반기	하반기	수시
FTIR	TWA 평균 (mg/m ³)	0.061	0.153	0.665	0.445	0.069	0.012
중량분석	TWA 평균 (mg/m ³)	0.8637	0.9433	0.7447	0.9075	0.7106	3.0906

산화규소 화합물 시료수 총 6,713건(2009년), 7,199(2010년)건에서 노출기준 초과인 경우 2009년 3.3%(219건), 2010년 2.7%(196건)로 확인되었다. 또한 규산(석영), 규산(크리스토티바라이트), 석영은 2009년에 비해서 2010년에 측정건수가 증가한 것으로 나타났다<표 16>. 규산(석영)과 석영은 같은 물질인 것으로 추정되나 작업환경 측정결과에 구분을 해 놓았기 때문에 자료를 그대로 살려서 분석했다.

<표 16> 산화규소 화합물별 노출기준 초과 현황

단위 : 건

구 분	2009년도		2010년도	
	기준미만	기준초과	기준미만	기준초과
규산(석영)	304	26	721	31
규산(크리스토티바라이트)	11	6	213	-
규산(트리디마이트)	-	-	2	-
산화규소-결정체-트리폴리	15	15	14	8
산화규소-비결정체-용융된 것	32	4	32	3
석영	89	5	228	7
유리규산(SiO ₂) 30% 미만의 광물성분진	3888	60	3955	79
유리규산(SiO ₂) 30% 이상의 광물성분진	2155	103	1838	68
계	6494	219	7003	196

<표 17>은 앞에 <표 16>의 2010년도에 대해서 자세히 살펴본 것이다. 2010년 노출기준의 개정에 의해 호흡성 분진의 기준으로 적용 시 규산(석영)의 경

우 초과건수가 2010년 상반기 2건 초과에서 하반기에 29건으로 크게 증가한 것으로 나타났다.

<표 17> 2010년 산화규소 화합물별 노출기준 초과 현황

단위 : 건

구 분	2010년 상반기		2010년 하반기		2010년 수시		합 계
	미초과	초과	미초과	초과	미초과	초과	
규산(석영)	229	2	487	29	5	-	752
규산(크리스토파라이트)	-	-	209	-	4	-	213
규산(트리디마이트)	2	-	-	-	-	-	2
산화규소-결정체-트리폴리	9	4	5	4	-	-	22
산화규소-비결정체-용융된 것	16	3	16	-	-	-	35
석영	36	2	192	5	-	-	235
유리규산(SiO ₂)30% 미만의 광물성분진	3085	64	869	14	1	1	4034
유리규산(SiO ₂)30% 이상의 분진	1285	47	549	15	4	6	1906
총합계	4662	122	2327	67	14	7	7199

<표 18> 산화규소 화합물 평균농도 및 범위

구 분	2009년		2010년	
	평균 농도 (mg/m ³)	범위	평균 농도 (mg/m ³)	범위
규산(석영)	0.059	0.0-1.77	0.017	0.00-1.41

규산(크리스토티바라이트)	0.378	0.01-1.63	0.0001	0.00-0.014
규산(트리디마이트)	-	-	0.024	0.02-0.032
산화규소-결정체-트리폴리	0.102	0.01-0.18	0.103	0.02-0.18
산화규소-비결정체-용융된 것	0.081	0.00-0.67	0.046	0.00-0.32
석영	0.760	0.00-3.04	0.014	0.00-0.11
유리규산(SiO ₂)30% 미만의 광물성분진	0.905	0.00-33.88	0.969	0.00-21.85
유리규산(SiO ₂)30% 이상의 광물성분진	0.913	0.00-53.96	0.855	0.01-6.25

산화규소 화합물의 노출기준 초과사업장을 업종별로 구분해 보면 강주물주조업이 36개소로 가장 많았고 그 다음 순으로 선철주물 주조업, 비금속광물 분쇄물 생산업, 그 외 기타 비금속광물 광업 등이 있었다.

<표 19> 산화규소 화합물 노출기준 초과사업장의 업종 및 사업장 수

업종구분	2009년	2010년	계
강주물 주조업	20	16	36
선철주물 주조업	11	9	20
비금속광물 분쇄물 생산업	3	3	6
그외 기타 비금속광물 광업	3	2	5
선박 구성부분품 제조업	2	2	4
건설용 석재 채굴업	3	1	4
금속 주조 및 기타 야금용 기계 제조업	3	1	4
타일 및 유사 비내화 요업제품 제조업	1	2	3
자동차 차체용 부품 제조업	2	1	3
합금철 제조업	2	1	3
그외 기타 자동차 부품 제조업	2	1	3
그외 기타 전자부품 제조업	3		3

기타 광학기기 제조업		3	3
그외 기타 분류안된 비금속 광물제품 제조업	1	1	2
그외 기타 1차 철강 제조업	1	1	2
금속 절삭기계 제조업	1	1	2
기타 비철금속 주조업	2		2
그외 기타 특수목적용 기계 제조업	2		2
건설용 쇄석 생산업	2		2
도장 공사업		2	2
기타 선박 건조업		2	2
광물처리 및 취급장비 제조업	1		1
석회 및 플라스터 제조업	1		1
금속 조립구조재 제조업	1		1
열간 압연 및 압출 제품 제조업	1		1
기타 제철 및 제강업	1		1
산업처리공정 제어장비 제조업	1		1
강관 제조업	1		1
주형 및 금형 제조업	1		1
자동차용 동력전달장치 제조업	1		1
주철관 제조업	1		1
기타 산업용 유리제품 제조업	1		1
화학용 및 비료원료용 광물 광업	1		1
기타 석제품 제조업	1		1
간판 및 광고물 제조업	1		1
비동력식 수공구 제조업	1		1
알루미늄주물 주조업	1		1
기타 토목시설물 건설업		1	1
조경 건설업		1	1
가정용 유리제품 제조업		1	1
제강업		1	1

제철업		1	1
철도차량부품 및 관련장치물 제조업		1	1
그외 기타 분류안된 금속가공제품 제조업		1	1
모래 및 자갈 채취업		1	1
점토 벽돌, 블록 및 유사 비내화 요업제품 제조업		1	1
골재, 벽돌 및 시멘트 도매업		1	1
기타 구조용 금속제품 제조업		1	1
총계	81	60	141

(2) 작업환경측정 결과분석 요약

2009년부터 2010년까지 산업안전보건법에 의하여 수행된 작업환경측정결과를 살펴보면, 2009년 총 측정자료 수는 7,458건이었고, 2010년은 8,157건이었다. 이중 노출기준 초과사업장은 2009년 219개소, 2010년에는 196개소로 확인되었다. 산화규소 화합물의 측정 방법에 따른 결과의 경우 FTIR 측정법이 2009년 총 측정 건수가 266건(3.96%)에서 2010년도는 838건(11.6%)으로 크게 확대된 것으로 나타났다. 또한 산화규소 화합물 노출기준 개정시기와 관련하여 2010년 상반기와 하반기를 비교해 볼 때 상반기 258건(5.39%)에서 하반기 571건(23.9%)로 크게 증가한 것을 볼 수 있었다. 그러나 중량분석법의 경우 2009년 6,384건, 2010년 6,303으로 총계를 살펴봤을 때 2009년과 2010년 큰 변화를 볼 수 없었다. 산화규소 화합물의 노출기준 기준초과에 관해서는 노출기준 개정 전·후 규산(석영)에서 초과건수가 증가한 것을 볼 수 있었다.

나. 국내 산화규소 화합물의 노출평가

산화규소 화합물의 노출평가를 위해서 5개 사업장을 선정하였다. 광물성분진이 노출되는 업종은 다양하나 가급적 다양한 업종을 선별하도록 하였으며 그

결과 석재, 폐주물, 요업, 주물, 유리제조 사업장을 대상으로 산화규소 화합물의 노출평가를 실시하였다.

공기 중 호흡성 분진의 시료채취 및 분석방법은 세계적으로 공인되어 있는 미국국립산업안전보건연구소의 공정시험법(NIOSH method, 7602)과 한국산업안전보건공단 Method No.83번을 이용하여 실시하였다. 아래와 같은 사이클론을 활용하여 시료를 채취하였다.



[그림 2] 호흡성 분진 채취장비

(1) 작업장 내 산화규소 화합물의 노출실태

(가) A 사업장(폐주물)

a. 일반적 현황

경상북도 영천시에 위치한 A 사업장은 폐주물사를 재생하는 사업장으로 지역 내 각 주물사업장에서 사용된 주물사를 입고해 불순물을 제거하여 걸러진 모래를 시멘트공장 등으로 보내는 작업이 이루어지는 사업장이다. 전체 근로자 수는 4명이었고 폐주물사를 입고하여 투입하는 공정과 이물질 등을 제거하는 공정에 노출 근로자는 3명이었으며, 주된 노출이 예상되는 투입공정, 이물질제

거 공정 4명이 상주하여 작업하고 있었다. 주원료로 사용하는 폐주물사의 사용량은 일일 약 250톤으로 상당히 많은 양을 취급하고 있었다. 폐주물사는 25톤이 차량으로 입고되고 있었다.

주로 전 공정에서 산화규소 화합물의 노출이 예상되었지만 가장 많이 노출되는 공정은 물질 선별 공정과 파쇄 공정이었으며 투입 및 선별공정에서 노출평가를 실시하였다. 이 사업장은 산업안전보건법에 의한 정기적인 작업환경측정을 실시하고 있었으며, 채취한 분진은 석영으로 분석하고 있었다.

b. 작업공정

주요 작업공정은 원료(폐주물사)입고 → 선별 → 파쇄 → 출고 순이었다. 입고된 주물사분진을 별도의 전처리 과정 없이 적재 후 페이로더 및 포크레인으로 바로 투입되어 1차로 불순물을 수작업으로 제거한 후 덩어리진 폐주물사를 파쇄하였다. 이후 컨베이어 벨트를 이용하여 이송하는 과정에서 마그네트를 이용하여 철성분의 불순물을 걸러내고 최종적으로 모래만 잔류시켜 시멘트 장 등으로 출고하고 있었다. 페이로더를 이용하여 투입되는 곳으로 옮겨진 원료는 포크레인을 이용하여 투입하고, 컨베이어 벨트로 이동 중 1차적으로 덩어리가 큰 불순물은 수작업으로 뭉쳐진 입자를 파쇄하고 있었다.



[그림 3] A 사업장의 투입 및 선별과정

c. 작업환경 측정결과 및 해석

A 사업장에서의 측정값 투입 및 선별과정에서 석영은 0.0187mg/m³, 0.0263mg/m³로 검출되었으나, 고용노동부에서 제안하는 노출기준인 0.05mg/m³ 수준에는 미치지 못하였지만 1개 공정에서 ACGIH TLV를 초과하고 있었다.

<표 20> A 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도

측정/ 근로시간	공정	측정위치	측정치	노출기준	
			TWA (mg/m ³)	고용노동부 (mg/m ³)	ACGIH (mg/m ³)
6/8	투입 및 선별	개인(조**)	0.0187	0.05	0.025
		개인(김**)	0.0263		

(나) B 사업장(석재)

a. 일반적 현황

경상북도 경주시에 위치한 B 사업장은 석물가공 사업장으로 화강암 등을 원료로 하여 건축 내/외장재, 비석 등을 생산하는 사업장이다. 전체 근로자수는 3명이었고 입고된 원석을 절단 및 연마하는 공정에 2명, 가공공정에 1명에 작업자가 배치되어 있었다.

주원료로 사용되는 원석의 사용량은 30톤/월 정도이며, 현재 국내의 원석채취 공장의 축소와 가공비용 절감을 위해 중국에서 완제품을 수입하고 있어 사용량이 감소된 상황이다. 입고된 원석은 수작업으로 적당한 크기로 절단하고 지게차를 이용하여 자동절단기로 투입되며, 제품의 종류에 따라 자동절단기로 2~4회에 걸쳐 절단과정을 거친 후 비석제품의 경우 연마공정을 거쳐 각자(刻字)공정에서 작업 후 출하되며, 그 외의 제품은 가공공정에서 작업 후 출하되고 있었다. 주로 습식작업이 이루어지고 있어 직접적인 분진의 노출은 낮은 수준으로 예측되었으나 작업장 내 퇴적된 분진의 재비산에 의해 2차적으로 노출되고 있으며 2차 노출을 최소화하기 위해 작업장 바닥에 수시로 살수작업을 진행하고 있었다. 주로 노출이 예상되는 공정은 건식작업으로 이루어지는 최종 가공공정이었다.

b. 작업공정

주요 작업공정은 원료(화강석)입고 → 재단 → (연마) → 가공 → (각자) → 출고 순이었다. 입고된 원석을 드릴을 이용해 천착을 하여 1차 절단한 후 지게차를 이용해 자동절단기로 이동된다. 그 후 제품의 크기에 따라 2차 재단, 3차 재단, 4차 재단을 거친 후 표면처리가 요구되는 제품은 연마공정에서 연마를 실시하고 표면처리가 요구되지 않는 제품은 가공공정을 거쳐 완제품이 된다.



[그림 4] B 사업장의 재단공정

연마 및 각자공정을 거친 제품 중 비석, 상석 등은 완제품으로 출고되며 그 외의 제품은 가공공정으로 옮겨져 최종 가공작업 후 완제품으로 출고되고 있었다. 가공공정에서는 건식작업과 습식작업이 병행하여 이루어지고 있으며 건식 작업은 특정제품 생산 시 작업이 이루어지고 있었다.



[그림 5] B 사업장의 가공공정

c. 작업환경 측정결과 및 해석

B 사업장에서 가공공정에서는 0.0468 mg/m^3 , 0.2704 mg/m^3 로 검출되었고 한

공정에서 고용노동부에서 제안하는 노출기준인 0.05 mg/m^3 수준을 초과하고 있었고 ACGIH의 TLV는 모든 공정에서 초과하는 것으로 나타났다.

<표 21 > B 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도

측정/ 근로시간	공정	측정위치	측정치	노출기준	
			TWA (mg/m^3)	고용노동부 (mg/m^3)	ACGIH (mg/m^3)
6/8	가공	개인(이**)	0.0468	0.05	0.025
		개인(정**)	0.2704		

(다) C 사업장(주물)

a. 일반적인 현황

강상남도 창원에 위치한 C 사업장은 금속재료를 용해하여 랩, 밸브 및 유사 장치를 제조하는 사업장이었으며 전체 근로자수는 총 76명이었다. 주요 작업은 용해, 주입, 형해체, 모래처리작업, 마무리 작업이었다. 주물은 주물사를 기본으로 사용하기 때문에 모든 공정에서 다양한 광물성분진이 발생된다. 분진의 종류, 입자직경 등에 따라서도 다르지만 일반적으로 주물사와 같은 경우 3~5%의 수분을 첨가하는 것이 분진발생방지에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 주형의 수분 함유량은 주입되는 금속에 따라 다르며, 주철용주형은 3.7~7.5%, 동합금용주형은 6.4~8.7%, 경합금용주형은 3.0~6.5% 정도이며, 이 주물사의 수분에 의해 조형작업에서는 분진발생이 비교적 억제된다. 주물제조 사업장에서의 분진은 석영을 중심으로 결정형규산이 많이 함유되어 있다. 따라서 아래 그림과 같이 조형(주물) 작업과정에서 노출이 가능할 것으로 판단하여 이 공정에 대한 작업환경측정을 실시하였다.

b. 작업공정

주요 작업공정은 자재입고 → 용해 → 조형 → 후처리 및 열처리 → 최종검사 및 포장 출하 순이었다. 용해작업공정에서는 주철, 주강, 청동주물, 황동주물을 용해하여 주틀안에 주입하는 작업으로 넘어간다. 금속제인 제품주형을 고정시키고 주물사를 골고루 채운 후 수작업으로 할 때는 다지는 붓으로 세게 쳐서 굳혀가며 조형시킨다.



[그림 6] C 사업장의 주물공정과 조형 합형공정

주입된 주물이 일정시간 방치되는 동안에 응고되면 주물을 주형으로부터 꺼내고 형틀과 모래를 나누는 작업으로 이어진다.



[그림 7] C 사업장의 조형 틀 고정

c. 작업환경 측정결과 및 해석

C 사업장에서 조형(주물)공정에서 총 362분 2 l/min 으로 포집하였고 결과는 0.01275 mg/m³, 0.000932 mg/m³으로 검출되었고 고용노동부 노출기준과 ACGIH의 TLV를 초과하는 공정은 없었다.

<표 22> C 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도

측정/ 근로시간	공정	측정위치	측정치	노출기준	
			TWA (mg/m ³)	고용노동부 (mg/m ³)	ACGIH (mg/m ³)
6/8	가공	개인(업**)	0.01275	0.05	0.025
		개인(이**)	0.000932		

(라) D 사업장(요업)

a. 일반적인 현황

울산시 울주군에 위치한 D 사업장은 티일 및 유사 비내화 요업제품 제조사업장이었으며 근로자 수는 총 30명이며 주생산품은 타일이었다. 도자기는 제조 방법 및 그 원료에 따라 점토, 석영, 장석, 도석 등을 배합하여 만드는 자기와 도기, 석기, 토기, 비금속 무기질을 주원료로 하는 뉴세라믹스 등으로 구분할 수 있다. 원료의 성분이 약간씩 다르고 구성 비율에 따라 그 종류와 특성이 달라질 수 있다. D 사업장에서 사용하는 원료 중 장석은 1000톤/월, 도석 600톤/월, 점토 250톤/월 정도이었다.

자기의 제조는 점토, 석영, 장석, 도석의 배합소지를 1,300~1,450℃로 용화할 때까지 굽고, 도기는 점토질 원료에서 석영, 도석, 납석, 장석을 배합, 1200~1300℃로 소소(素燒)하여 제조한다. 특수도자기(뉴-세라믹스) 제조법은 비금속 무기질 고체재료를 원료로 열처리하며 석가 제조는 불순물이 많은 점토를 주성분으로 해서 1200~1300℃로 충분히 굽게 된다. 도자기의 소지원료에 규사, 규석과 생산원재료로서 규산염광물 등을 포함한 토석, 광물을 사용하고 있어 안료투입과정에서 작업하는 근로자를 선정하여 작업환경측정을 수행하였다.

b. 작업공정

주요 작업공정은 원료 입고 → 조합 → 프레스 성형 → 소형 → 검사 및 포장 순이었다. 원료투입 및 혼합작업은 1인이 동시에 작업하고 있었으며, 원료 및 안료에 노출되고 있었다. 혼합된 안료는 프레스성형공정에서 원재료와 혼합하는 과정에서 노출되고 있었다.



[그림 8] D 사업장의 분쇄 및 원료 투입과정

c. 작업환경 측정결과 및 해석

D 사업장의 안료투입과정에서 361분 동안 광물성분진을 포집하였다. 석영의 분석결과 0.0546 mg/m^3 , 0.0952 mg/m^3 로 나타났고, 고용노동부 및 ACGIH TLV에서 제안하는 노출기준을 모두 초과하고 있었다. D 사업장의 경우 국소 배기 시설이 없었으며 습식공정으로 분진의 비산이 저하 될 것으로 예측되었지만 바닥의 분진의 재 비산이 원인이 되어 측정 농도가 노출기준 이상으로 나타난 것으로 판단된다.

<표 23> D 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도

측정/ 근로시간	공정	측정위치	측정치	노출기준	
			TWA (mg/m^3)	고용노동부 (mg/m^3)	ACGIH (mg/m^3)
6/8	안료투입	개인(한**)	0.0546	0.05	0.025
		개인(강**)	0.0952		

(마) E 사업장(유리제조)

a. 일반적인 현황

경기도 포천시에 위치한 E 사업장은 그 외 기타 유리제품 제조업으로 전체 근로자 수는 11명 이었고, 주요 작업은 유리제품을 생산하는 사업장이었다. 유리제품을 제조하는 공정에서 직업성 질병발생의 원인이 되는 유해인자는 다량으로 존재하는데, 그 중 주요한 원료는 규산, 알루미늄, 붕산, 알칼리, 석회, 마그네시아, 산화연, 산화바륨, 산화아연 등이 있다.

E 사업장은 월 사용량 20톤 정도의 규사를 원료로 사용하고 있었다. 유리제조 공정에서 가장 중요한 유해요인은 원료 분진이며 대부분 작업장이 영세하여 자동화가 이루어지지 않아 작업자들이 직접적으로 노출될 우려가 있었다. E 사업장에서는 가장 노출의 우려가 있는 원료 배합공정에서 작업하는 근로자를 대상으로 작업환경측정을 실시하였다.

b. 작업공정

주요 공정은 원료 입고 → 운반, 체질, 칭량, 혼합 → 용융 → 성형 → 마무리 → 검사 및 포장 순이었다. 입고된 원료(삼산화비소, 바륨 등) 및 부원료 운반장치로 부터 각 장치로 투입, 이동, 체질, 칭량, 혼합 작업을 실시하고 있었다. 또한, 용해로에 투입된 원료 및 부원료를 녹이는 작업을 거친 후 가열된 유리를 절단기 및 압축프레스 등을 이용하여 원하는 모형을 제작, 가공된 유리제품에 대한 연마작업 등을 수행한다.



[그림 9] E 사업장의 원료분쇄 전 투입 및 원료분쇄과정



[그림 10] E 사업장의 원료 가마투입 및 원료투입과정

c. 작업환경 측정결과 및 해석

E 사업장에서 배합과정에서 호흡성분진을 채취하고 석영을 분석한 결과 0.0324 mg/m^3 , 0.0198 mg/m^3 로 검출되었고 고용노동부에서 제안하는 노출기준인 0.05 mg/m^3 수준을 초과하는 공정은 없었으나 한 공정에서 ACGIH TLV를 초과하고 있었다. E 사업장의 경우 환기 시설을 없었으나 문이 개방되어 있었고

작업자가 작업 장소에 오래 머무르지 않아 노출수준 다소 낮게 나타난 것으로 추측된다.

<표 24> E 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도

측정/ 근로시간	공정	측정위치	측정치	노출기준	
			TWA (mg/m ³)	고용노동부 (mg/m ³)	ACGIH (mg/m ³)
6/8	배합	개인(이**)	0.0324	0.05	0.025
		개인(박**)	0.0198		

(3) 산화규소 화합물의 노출평가 결과

(가) 측정결과보고서와 노출평가 결과 비교

폐주물, 석재, 주물, 요업, 유리제조 사업장에 대하여 2010년 산업안전보건법에 의한 작업환경측정결과표를 확인한 결과 4개 사업장에서 광물성분진에 대하여 중량분석으로 결과를 산출하고 있었고, 1개 사업장이 석영을 분석한 결과를 보관하고 있었다. 따라서 석영의 분석결과를 비교하기에 다소 무리가 있었으며 E 사업장의 경우 석영의 분석 결과가 작업환경측정에 의해 수행된 농도와 노출평가에 의한 결과가 유사하게 나타났다.

<표 25> 사업장 산화규소의 공기 중 노출농도 비교

업종	공정	2010년		2011년	
		석영농도 (mg/m ³)	분석방법	석영농도 (mg/m ³)	분석방법
폐주물	투입 및 선별	1.678	중량분석	0.0187	FTIR
				0.0263	
석재	가공	데이터 없음		0.0468	
		데이터 없음		0.2704	
주물	조형	0.024	중량분석	0.01275	
		불검출	중량분석	0.000932	
요업	투입	0.5	중량분석	0.0546	
				0.0952	
유리	배합	0.03	FTIR	0.0324	
		0.01	FTIR	0.0198	

(나) 산화규소 화합물의 노출기준 초과 현황

고용노동부의 노출기준인 0.05 mg/m³를 초과하는 사업장은 석재, 요업의 2개소 사업장이었고, ACGIH의 TLV를 초과하는 사업장은 폐주물, 석재, 요업, 유리로 총 4개소로 나타났다. 다만, 초과공정의 경우 고용노동부 노출기준을 초과하는 공정은 3개에 불과했지만, ACGIH TLV를 적용할 경우 6개의 공정에서 노출기준 초과가 발생하며 요업과 석재사업장의 경우 모든 시료가 초과하는 것으로 나타났다.

〈표 26〉 산화규소 화합물 노출기준 초과 현황

업종	공정	노출농도 (mg/m ³)	고용노동부 노출기준	ACGIH TLV
폐주물	투입 및 선별	0.0187	미만	미만
		0.0263	미만	초과
석재	가공	0.0468	미만	초과
		0.2704	초과	초과
주물	조형	0.01275	미만	미만
		0.000932	미만	미만
요업	투입	0.0546	초과	초과
		0.0952	초과	초과
유리	배합	0.0324	미만	초과
		0.0198	미만	미만

(다) 노출평가 결과 총평

기술통계를 이용한 노출대표 값의 산정방법으로 기술통계량은 표본수(n), 최대값(max), 최소값(min)을 측정한 자료로 얻을 수 있으며, 직업적 노출기준 초과 백분율(% > OEL)의 표본평균의 계산은 다음과 같다.

◎ 영역 = 최대값 - 최소값

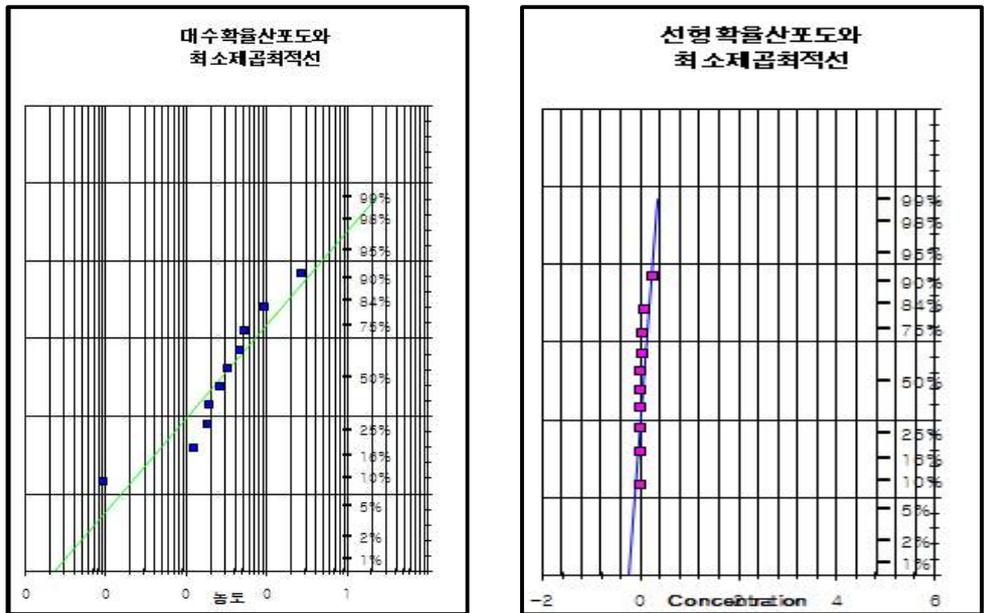
◎ 초과율(% > OEL) = 직업적 노출기준 초과 표본수/전체 표본수 X 100

◎ \bar{x} = 모든 데이터의 총계/표본수 = $\frac{\sum x}{n}$

중앙값은 정렬된 자료를 관찰함으로써 구할 수 있으며, 만약 표본수가 홀수이면 중앙값은 단순히 자료의 중간 값이 되고, 만약 표본수가 짝수이면 중앙값

은 자료의 주 증간의 평균이 된다. 대수확률 산포도와 최소 적합선에 대한 그래프는 자료를 순위화하여 통상의 방법대로 좌표 위치를 계산한 것이다. 이 자료는 통상의 방법으로 산포도를 그리고, 검출 한계값 미만을 의미하는 점들을 포함하여 각 점들을 따라 적합한 직선을 그리는데 그리는 단계는 다음과 같다.

- ㉠ 자료를 순서로 나열한다. 가장 낮은 것부터 가장 높은 것으로 선정한다.
- ㉡ 가장 낮은 것에 1을 준 후 순서대로 값을 주어 가장 높은 것에는 n을 준다.
- ㉢ 각 값에 대한 좌표 위치를 계산한다. 좌표위치=순위/(n+1)
- ㉣ 해당하는 좌표 위치에 농도를 산포도에 그린다,



<그림 11> 노출대표값의 산정을 위한 대수확률 산포도 및 최소 적합선

최적선을 그린 후 자료가 일직선에 대하여 논리적으로 적합한지 여부를 가

려내는데 (그림 11)은 일직선에 가까우므로 대수정규분포를 한다고 가정할 수가 있다. 일직선에 논리적으로 적합한 직선으로부터 기하평균, 기하표준편차, 백분위수를 추정할 그래프이다. 자료가 특정 분포에 적합한지 여부를 알아보는 방법에는 W검정이 있는데 이는 표본자료가 정규분포 대수 전환된 자료라면, 대수 정규분포에서 유래가 되었는지 여부를 결정하는 한 방법이다. W검정은 표본수(n)가 아주 적을 때($n \leq 50$) 정규 혹은 대수 정규자료의 적합성을 검정하는 가장 강력한 방법 중에 하나이다. 본 조사에서는 W검정은 정규분포 하지 않는 것으로 나타났다.

<표 27> 공기 중 산화규소 노출 농도 분포

단위 : mg/m³

	Number of samples	GM	GSD	Mean±SD	No. of samples over KOEL [†]	No. of samples over ACGIH TLV
산화규소 (Quartz)	10	0.027	4.416	0.058±0.079	3	6

[†] KOEL : Korea Occupational Exposure Limit

본 연구에서 광물성분진 발생사업장에서 산화규소 화합물 중 석영에 대한 측정값을 기술통계를 이용하여 노출평가를 수행한 결과 산술평균은 0.058 mg/m³으로 고용노동부의 노출기준을 초과하고 있는 것으로 나타났으며, 공정의 초과율은 30.0%로 파악되었다. 한편, ACGIH의 TLV를 적용할 경우 초과율은 60%로 나타나 노출기준이 강화될 경우 초과사업장이 다소 증가될 것으로 추측된다. 노출기준 강화 시 초과사업장의 정도를 정확히 알기 위해서는 규제영향분석 연구가 선행되어야 한다고 사료된다.

(4) 국내외 산화규소 화합물의 노출평가 결과

국내에서 광물성분진에 대한 연구결과를 살펴본 결과 총분진, 호흡성분진 등 다양한 형태로 포집하고 있었으며, 산화규소 화합물은 모두 석영을 분석하고 있는 것으로 나타났다. 구조토 사업장의 경우 특이하게 X-선 회절분석을 이용하여 결정형 규산 검출여부만 확인하였다. 산화규소 화합물 중 결정체 석영의 노출수준은 요업 0.01-0.08 mg/m³, 주물 0.02-0.05 mg/m³ 등으로 현행 고용노동부의 노출기준과 ACGIH TLV를 초과하는 공정이 다수 확인되었다. 한편, 석영의 경우 모두 FTIR을 이용하여 분석하고 있었다.

<표 28-1> 국내 광물성분진의 노출평가 결과(1)

업종	공정	평균농도 및 범위(mg/m ³)	분진 구분	산화규소 화합물 종류	출처
석탄광산	Drillers	2.40(0.2-18.2)	호흡성분진	비구분	윤영노와 한국산업위 제1권 제
	Coal cutters	5.25(0.3-34.7)			
	Separators	3.24(0.6-27.8)			
	Hauler	1.82(0.4-24.7)			
규조토	고노출군	18.3(8.86-35.51)	총분진	XRD 정성분석으로 석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트 검출만 제시	정회경 등, 한국산업위 제4권, 제1
	고노출군	2.20(1.18-3.65)	호흡성분진		
	저노출군	2.69(0.4-4.22)	총분진		
	저노출군	0.57(0.35-1.15)	호흡성분진		
요업	Insulator	0.0457	총분진	석영(Quartz)/FTIR	오세민 등, 한국산업위 제4권 제2
	Table Ware	0.0199	총분진		
	Table Ware	0.0263	총분진		
	Sanitary Ware	0.0862	총분진		
	Insulator	0.0058	호흡성분진		
	Sanitary Ware	0.0279	호흡성분진		

<표 28-2> 국내 광물성분진의 노출평가 결과(2)

업종	공정	평균농도 및 범위(mg/m ³)	분진 구분	산화규소 화합물 종류	
주물	Melting Molding Shakout Finishing	0.023(0.011-0.096) 0.04563(0.0197-0.139) 0.02126(0.020-0.0224)	호흡성분진	석영(Quartz)/FTIR	피영규 등 한국산업 제7권 제2
주물	Melting Molding Coremaking Shakeout Finishiing	23 μ g/m ³ /2.5-140.1 15.9 μ g/m ³ /2.1-60.7 10.8 μ g/m ³ /7.7-25.3 23.9 μ g/m ³ /6.0-75.4 31.8 μ g/m ³ /2.0-132.7	호흡성분진	석영(Quartz)/FTIR	김현욱 등 한국산업 제8권 제1
다양한 제조업	Ceramic Stone Concrete Glass Briqucts Others	0.02597(0.554) 0.01716(0.038) 0.00764(0.016) 0.01183(0.012) 0.01267(0.035) 0.0149(0.065)	호흡성분진	석영(Quartz)/FTIR	김현욱 등 한국산업 제9권 제1

외국에서 수행된 광물성분진의 측정 및 분석결과를 확인한 결과 국내와 마찬가지로 총분진, 호흡성분진, 석 결과를 수록하고 있었고, 산화규소 화합물의 경우도 국내와 마찬가지로 모두 XRD 또는 FTIR을 이용하여 대한 결과만 도출되어 있었다. 산화규소 화합물 중 결정체 석영의 노출수준은 요업 0.1-0.2 mg/m³, 0.0-0.2 mg/m³, 석재 0.04-0.06 mg/m³ 등으로 국내 광물성분진 노출사업장과 유사하게 고용노동부의 ACGIH TLV를 초과하는 공정이 많은 것으로 확인하였다.

<표 29-1> 국외 광물성분진의 노출평가 결과(1)

업종	공정	평균농도 및 범위(mg/m ³)	분진 구분	산화규소 화합물 종류	출처
Pottery	Day 1	0.096	호흡성분진	Quartz	Higgins et al., Ann Occup Hyg 29(3); 364-371
	Day 2	0.104			
	Day 3	0.096			
	Day 4	0.127			
	Day 5	0.201			
Sanitary ware	Casting	0.13	호흡성분진	결정형 규산 (Crystalline silica, quartz)	Cooper et al., Am J Ind Hyg Assoc J 54(10):600-604
	Glaz spray	0.22			
	Glaze Prep.	0.15			
Stone mining &	Limestone	0.04	호흡성분진	석영(Quartz)/XRD	Kullman et al.

milling	Granite	0.06			Am J
	Traprock	0.04			27:641-660
Construction	No vent	29.16	호흡성분진	석영(Quartz)	Flynn & S
	Low vent	2.36			Applied
	High vent	1.70			Environ
					18(4):268-2

<표 29-2> 국외 광물성분진의 노출평가 결과(2)

업종	공정	평균농도 및 범위(mg/m ³)	분진 구분	산화규소 화합물 종류	출처
Construction	Total	0.35(0.0002-3.77)	호흡성분진	Quartz	Nij et al Ann Occu 46(suppl);
Stone(Granite)	Crane operator	0.045	호흡성분진	결정형 규산 (Crystalline silica, quartz)	Wickman & Appl Occu Hyg 17(6);
	Dimamond saw	0.041			
	Mill polisher	0.050			
	Sand blaster	0.041			
	Stone cuttoer	0.044			
	Top polisher	0.085			
	Miscellaneous	0.036			
Tunnel construction	Fall	0.31	호흡성분진	결정형 규산 (Crystalline silica, quartz)	Bakke et a Appl Occu Hyg 17(11)
	Winter	0.81			
	Spring	0.58			
	Summer	0.28			

다. 설문조사

2011년을 기준으로 고용노동부에 지정된 총 161개 작업환경측정기관에 설문지를 배포하였으며 84개 기관에서 응답하였고 이중 불성실하게 응답한 2개소를 제외하고 82개 지정측정기관에 대한 자료를 분석하였다. 응답한 기관은 경상지역이 41.5%(34개소)로 가장 많았고 그 다음 순으로 경인지역 31.7%(26개소), 충청지역 11.0%(9개소) 등 이었다. 지정측정기관에서 담당하고 있는 업무는 71.3%(57명)가 작업환경측정을 담당하고 있었고 25.0%(20명)는 작업환경측정 시료를 분석하는 업무에 종사하고 있었다.

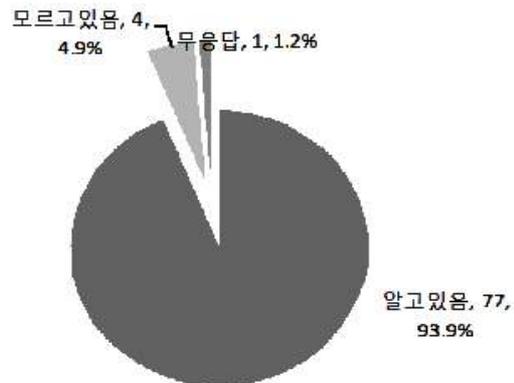
<표 30> 조사대상기관의 일반적 특성

구분		빈도	백분율(%)
지역	서울	8	9.8
	경인	26	31.7
	강원	2	2.4
	충청	9	11.0
	경상	34	41.5
	전라	3	3.7
업무	측정	57	71.3
	분석	20	25.0
	기타	5	3.7
계		82	100.0

(1) 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등의 인식도

광물성분진 중 산화규소 결정체 1% 이상에 노출되는 근로자가 있는 작업장

에 대하여 광물성분진 중 산화규소 화합물의 측정에 대한 인식도 파악결과 93.9%(77개소)가 인지하고 있는 것으로 나타났으며 4.9%는 모르고 있는 것으로 확인되었다.



[그림 12] 광물성분진 중 규산 측정실시 인식도

광물성분진을 호흡성분진을 채취할 수 있는 장비로 포집하는 방법에 대한 인식도 파악결과 95.1%(78개소)가 인지하고 있는 것으로 나타났으며 3.7%(3개소)는 모르고 있는 것으로 확인되었다.



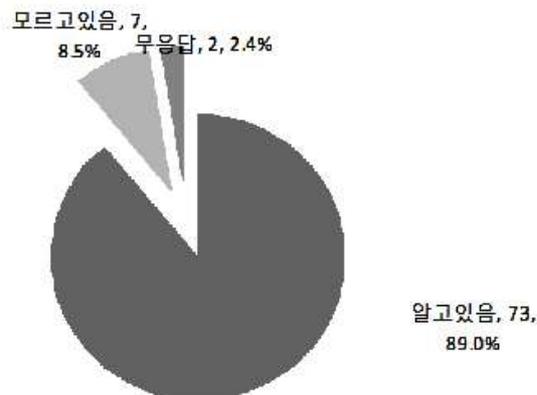
[그림 13] 광물성분진의 호흡성분진 채취방법 인식도

광물성분진을 채취한 후 X-선 회절분석 또는 Fourier 변환 적외선분광분석기로 분석하는 방법에 대한 인식도 파악결과 89%(73개소)가 인지하고 있는 것으로 나타났으며 9.8%(8개소)는 모르고 있는 것으로 확인되었다.



[그림 14] 광물성분진 분석(FTIR/XRD)에 대한 인식도

산화규소 화합물에 대하여 우리나라 노출기준을 알고 있는지 인식도 파악결과 89%(73개소)가 인지하고 있는 것으로 나타났으며 8.5%(7개소)는 모르고 있는 것으로 확인되었다.



[그림 15] 산화규소 화합물의 노출기준 인식도

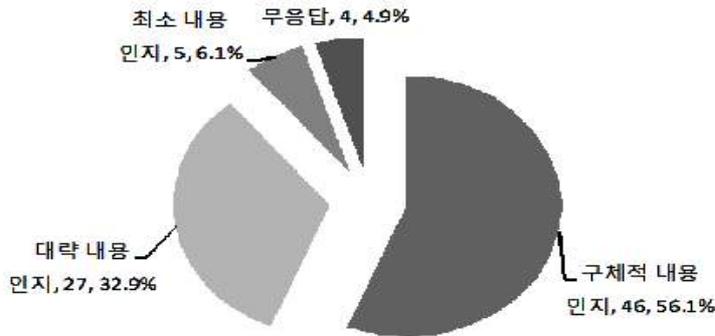
광물성분진 중 산화규소 화합물 측정, 호흡성분진 채취 및 FTIR 또는 XRD 로 분석과 산화규소 노출기준에 대한 인식도 조사결과 호흡성분진 채취에 대한 인식도가 95.1%로 가장 높았으며 분석방법과 산화규소 노출기준에 대한 인식도가 가장 낮은 것으로 확인되었다.

<표 31> 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등의 인식도

구분	알고 있음	모르고 있음	무응답
	빈도(%)	빈도(%)	빈도(%)
광물성분진 중 규산 측정 실시	77(93.9%)	4(4.9%)	1(1.2%)
호흡성분진 채취	78(95.1%)	3(3.7%)	1(1.2%)
FTIR 또는 XRD로 분석	73(89.0%)	8(9.8%)	1(1.2%)
산화규소 노출기준	73(89.0%)	7(8.5%)	2(2.4%)

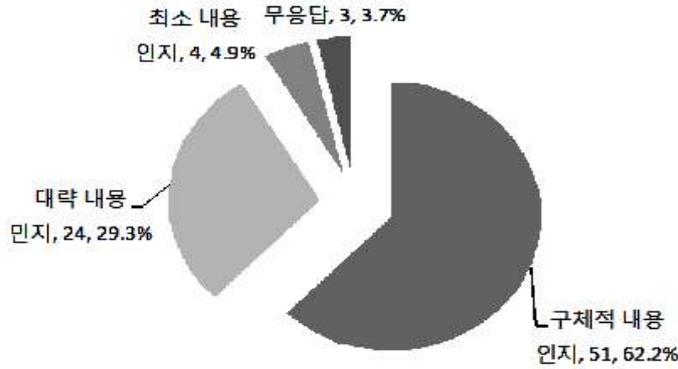
2) 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등에 대한 규정의 인식도

광물성분진 중 산화규소 화합물의 측정 규정에 대한 인식도 파악결과 구체적인 내용까지 인지하고 있는 경우가 56.1%(46개소)이었고 최소한의 내용만 인지하고 있는 경우가 6.1%(5개소)로 확인되었다.



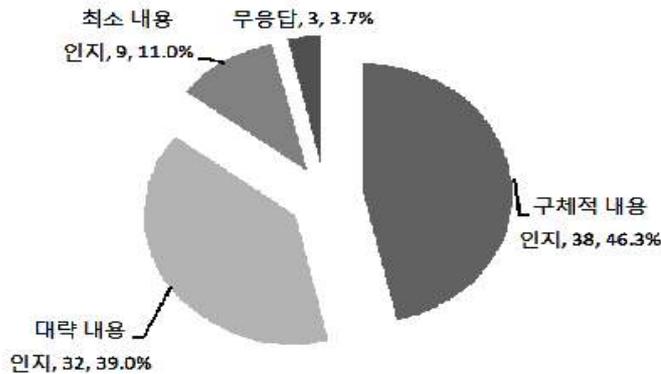
[그림 16] 광물성분진 중 규산 측정에 대한 규정 인식도

광물성분진을 호흡성분진을 채취할 수 있는 장비로 포집하는 방법에 대한 규정 인식도 파악결과 62.2%(51개소)가 구체적인 내용까지 인지하고 있는 것으로 나타났으며 4.9%(4개소)는 최소한의 내용만 인지하고 있는 것으로 확인되었다.



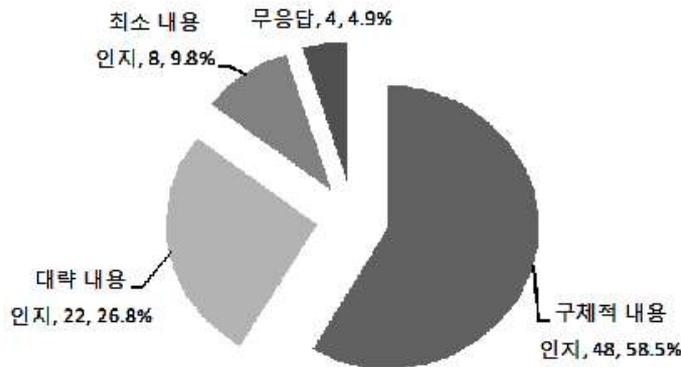
[그림 17] 광물성분진의 호흡성분진 채취 규정 인식도

광물성분진을 채취한 후 XRD/FTIR로 분석과 관련된 규정에 대한 인식도 파악결과 46.3%(38개소)가 구체적인 내용까지 인지하고 있는 것으로 나타났으며 11%(9개소)는 최소한의 내용만 인지하고 있는 것으로 확인되었다.



[그림 18] 광물성분진 분석 규정 인식도

산화규소 화합물에 대하여 우리나라 노출기준과 관련된 규정을 알고 있는지 인식도 파악결과 58.5%(48개소)가 구체적인 내용까지 인지하고 있는 것으로 나타났으며 9.8%(8개소)는 최소한의 내용만 인지하고 있는 것으로 파악되었다.



[그림 19] 산화규소 화합물의 노출기준의 규정 인식도

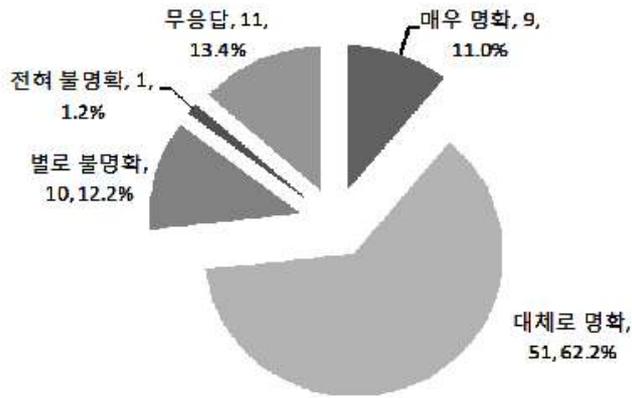
광물성분진 중 규산측정, 호흡성분진 채취 및 분석, 산화규소 노출기준에 대한 규정의 인식정도를 확인한 결과 구체적인 내용까지 인지하고 있는 경우는 호흡성분진 채취가 62.2%로 가장 높았고 분석에 대한 인지가 46.3%로 가장 낮게 조사되었다.

<표 32> 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등의 규정 인식도

구분	구체적 내용인지	대략 내용인지	최소 내용인지	무응답
	빈도(%)	빈도(%)	빈도(%)	빈도(%)
광물성분진 중 규산 측정 실시	46(56.1%)	27(32.9%)	5(6.1%)	4(4.9%)
호흡성분진 채취	51(62.2%)	24(29.3%)	4(4.9%)	3(3.7%)
FTIR 또는 XRD로 분석	38(46.3%)	32(39.0%)	9(11.0%)	3(3.7%)
산화규소 노출기준	48(58.5%)	22(26.8%)	8(9.8%)	4(4.9%)

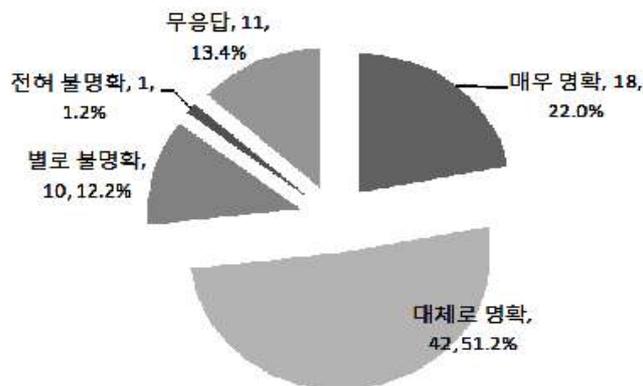
3) 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등에 대한 규정의 명확도

광물성분진 중 규산측정에 대한 규정은 73.2%(60개소)가 다소 명확한 것으로 파악되었고 13.4%(11개소)는 다소 불명확 하다고 응답하였다.



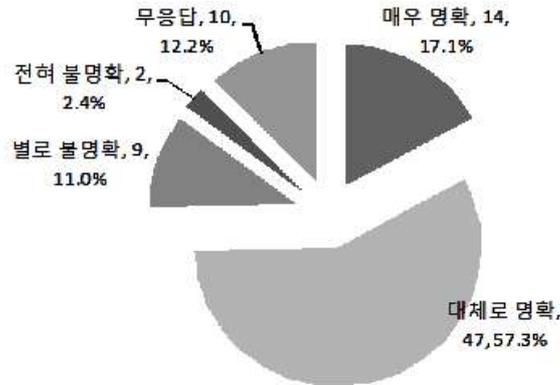
[그림 20] 광물성분진 중 규산 측정에 대한 규정 명확도

광물성분진을 호흡성분진 채취 장비로 포집하는 규정에 대한 명확도 파악결과 73.2%(60개소)가 다소 명확하다고 응답하였고 13.4%(11개소)가 다소 불명확 하다고 응답하였다.



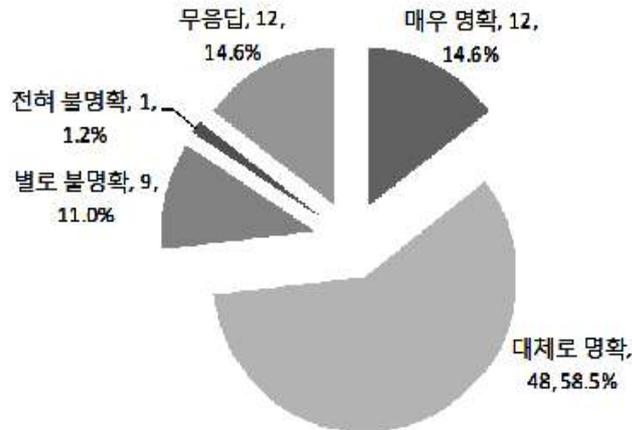
[그림 21] 광물성분진의 호흡성분진 채취 규정 명확도

광물성분진 분석과 관련된 규정에 대한 명확도 파악결과 74.4%(61개소)가 다소 명확하다고 응답하였고 13.4%(11개소)는 다소 불명확하다고 응답하였다.



[그림 22] 광물성분진 분석 규정 명확도

산화규소 화합물에 대한 노출기준 규정 명확도 파악결과 73.1%(60개소)가 다소 명확하다고 응답하였으며 12.2%(10개소)는 다소 불명확하다고 응답하였다.



[그림 23] 산화규소 화합물의 노출기준의 규정 명확도

광물성분진 중 규산측정, 호흡성분진 채취 및 분석, 산화규소 노출기준에 대한 규정의 명확도는 측정실시와 호흡성분진 채취 규정이 각각 73.2%로 가장 높았고 대부분 70%를 상회하는 것으로 분석되어 전체적으로 규정 명확도에는 문제가 없는 것으로 파악되었다.

<표 33> 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등의 규정 명확도

구분	매우 명확	대체로 명확	별로 불명확	전혀 불명확
	빈도(%)	빈도(%)	빈도(%)	빈도(%)
광물성분진 중 규산 측정 실시	9(11.0%)	51(62.2%)	10(12.2%)	1(1.2%)
호흡성분진 채취	18(22.0%)	42(51.2%)	10(12.2%)	1(1.2%)
FTIR 또는 XRD로 분석	14(17.1%)	47(57.3%)	9(11.0%)	2(2.4%)
산화규소 노출기준	12(14.6%)	48(58.5%)	9(11.0%)	1(1.2%)

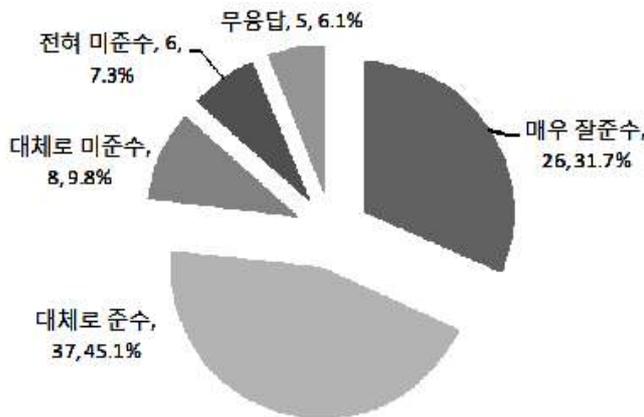
한편, 광물성분진 중 규산 측정 실시와 관련된 규정이 왜 명확하지 않은지에 대한 질문에 “PVC 필터 사용 시 정전기 제거 관련 규정 미흡”, “광물성분진작업의 종류와 정의에서 광물에 대한 정의가 불분명함”, “광물성분진이라도 별도의 기준이 설정되어 있는 포틀랜드 시멘트 등에 대해서는 별도의 결정형 규산을 분석하지 않아도 현재는 문제 될 것이 없음”, “포집방법 및 시료 운반 문제, ”대상이 광범위하며 측정, 분석상의 편차, 변위도 큼“, ”결정체, 비결정체 정성분석 모호“, ”물질안전보건자료상의 규산함유량으로 판단해야 하는지 측정 시료를 가지고 판단해야 하는지 불분명“, ”광물성 분진의 범위가 너무 포괄적이어서 규산 물질만 분석하여 노출기준을 적용시키기에 실무자 입장에서는 무리“, ”규산 외 다른 분자 함유되어있으나 규산(석영)만 분석“, ”석영만 인체에 영향을 미치는 것이 아닌데 석영만 분석(예, 주물사분자경우 용해흡·철분자·주물사 등이 혼합된 분진인데 석영만 FTIR법으로 분석 의문) 등이 있었다.

또한, 호흡성 분진 채취에 대한 규정이 명확하지 않은 이유에 대해서는 ”사

이클론의 채취 특성상 개인시료채취 시 오차 발생 및 작업환경의 다양한 변수의 작용“의 의견이 있었고, XRD 또는 FTIR로 분석하는 규정이 명확하지 않은 이유로는 “시료량, 분석방법에서 정량, 정성 시 재현 등이 불명확”, “FTIR로 분석하면 산화규소 함유량 종류 비결정체 또는 결정체 구분 여부 등”, “분석기기의 부재, 외부기관 분석의 불편함 등 산화규소 함유분진 종류가 다양함-분진종류의 규정이 극히 미비함”, “현장에서의 원료의 취급 및 발생 등이 다양하며 각 노출기준 적용이 쉽지 않음”, “결정체의 간섭으로 정확한 성분 선택 검사 어려움, 여러 가지 성분 혼재 시 함유량에 따른 노출기준 선택 어려움”, “근로자가 원료 투입 작업 시 잠시만 노출되어도 노출기준(0.05mg/m³)을 초과”, “물질의 정성분석의 난이성“등의 의견이 있었다.

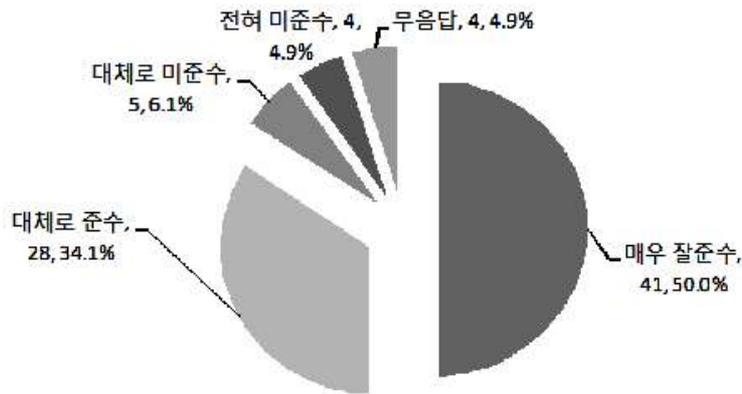
4) 산화규소 화합물의 측정, 노출기준 등에 대한 규정의 준수율

광물성분진 중 규산측정에 대한 규정의 준수여부 파악 결과 76.8%(63개소)가 다소 준수하고 있는 것으로 파악되었고 규정을 따르지 않는 경우는 17.1%(14개소)가 있었다.



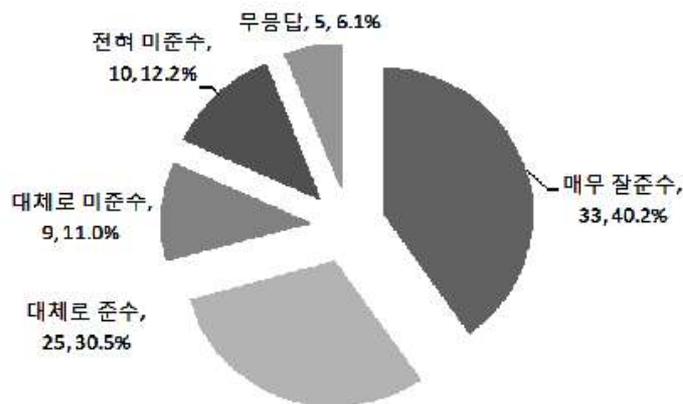
[그림 24] 광물성분진 중 규산 측정 규정 준수율

광물성분진을 호흡성분진 채취 장비로 포집하는 규정은 84.1%(69개소)가 준수하고 있었고 11.0%(9개소)는 준수하고 있지 않다고 응답하였다.



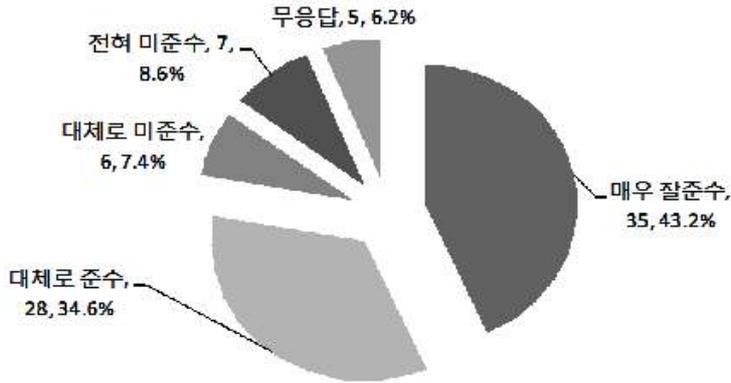
[그림 25] 광물성분진의 호흡성분진 채취 규정 준수율

광물성분진 분석 규정의 준수율은 70.7%(58개소)로 파악되었으며 23.2%(19개소)는 준수하고 있지 않다고 응답하였다.



[그림 26] 광물성분진 분석 규정 준수율

산화규소 화합물에 대한 노출기준 준수여부 파악결과 77.8%(63개소)의 준수율을 보였으며 미준수율은 16.0%(13개소)로 확인되었다.



[그림 27] 산화규소 화합물의 노출기준의 규정 준수율

광물성분진 중 규산측정, 호흡성분진 채취 및 분석, 산화규소 노출기준에 대한 규정의 준수율은 각각 76.8%, 84.1%, 70.7%, 77.8%로 나타나 산화규소 화합물의 분석관련 준수율이 가장 낮았고 호흡성분진으로 채취하는 경우의 준수율이 가장 높은 것으로 확인되었다.

<표 34> 규산 노출 작업장의 측정, 노출기준 등의 규정 준수율

구분	매우 잘 준수	대체로 준수	대체로 미준수	전혀 미준수
	빈도(%)	빈도(%)	빈도(%)	빈도(%)
광물성분진 중 규산 측정 실시	26(31.7%)	37(45.1%)	8(9.8%)	6(7.3%)
호흡성분진 채취	41(50.0%)	28(34.1%)	5(6.1%)	4(4.9%)
FTIR 또는 XRD로 분석	33(40.2%)	25(30.5%)	9(11.0%)	10(12.2%)
산화규소 노출기준	35(43.2%)	28(34.6%)	6(7.4%)	7(8.6%)

5) 작업환경측정기관의 광물성분진 측정, 분석 현황

총 82개 지정측정기관에서 산화규소 결정체 1% 이상의 광물성분진의 채취는 80%(64개소)가 사이클론 등을 이용하여 호흡성분진을 채취하고 있었고 20%(16개소)는 37 mm 카세트를 이용한 총분진으로 채취하는 것으로 조사되었다. 채취한 광물성분진은 시료를 의뢰하여 분석한다가 45.1%(37개소)로 가장 많았고 그 다음으로 중량분석 33.8%(24개소)이었고 FTIR분석 19.5%(16개소), X-선 회절분석이 2.4%(2개소)를 차지하였다. 기관에서 광물성분진을 분석할 수 있는 장비로 천칭은 대부분이 구비하고 있었고 적외선 분광분석기를 구비하고 있는 기관이 2개소, X-선회절분석기를 구비하고 있는 기관이 1개소로 확인되었다. 한편, 산화규소 화합물의 시료를 의뢰하는 기관은 총 82개의 지정측정기관 중에 33개소(40.2%)이었으며 5개 병원 및 연구소 등(N의학연구소, D협회 중앙분석실, S병원 산업의학센터, 산업안전보건연구원, I병원)을 활용하고 있었다. 수수료의 경우 35,000원에서 100,000원으로 다양하였으나 평균 약 58,621원이었다. 지정측정기관에서 의뢰하고 있는 시료 수는 총 1,268건 이었으며 시료를 의뢰하지 않는 49개 기관을 제외하면 기관당 평균 38.4건을 의뢰하고 있었다.

<표 35> 광물성분진의 채취, 분석 및 장비보유 현황

구분		빈도	백분율(%)
광물성분진 채취	총분진 (37mm 카세트)	16	20.0
	호흡성분진 (사이클론 등)	64	80.0
광물성분진 분석	중량분석	24	33.8
	X-선 회절분석	2	2.4

	FTIR 분석	16	19.5
	시료 의뢰	37	45.1
장비보유 현황	천칭	65	84.4
	X-선 회절분석기	1	1.3
	적외선 분광 분석기	9	11.7
	기타	2	2.6

6) 산화규소 화합물 노출기준 적용 경험

총 82개 지정측정기관에서 응답한 산화규소 화합물 8종에 대한 노출기준을 적용한 경험이 있는지에 대한 응답결과 결정체의 경우 석영이 53.7%(44개소)로 가장 많았고 크리스토파라이트 9.8%(8개소), 트리디마이트 10.1%(9개소) 및 트리폴리 1.2%(1개소)가 적용한 경험이 있다고 응답하였다. 한편, 비결정체 규소의 경우 실리카겔이 10.1%(9개소)로 가장 많았고 침전된 규소 9.8%(8개소), 용융된 비결정체 규소 8.5%(7개소)와 규조토 3.7%(3개소)로 확인되었다.

또한, 산화규소 결정체 1% 이하의 노출기준에 적용한 경험은 58.5%(48개소)로 상당히 높게 나타났으며, 광물성분진 시료 중 평균 47.0%를 기타분진(산화규소 결정체 1% 이하)으로 적용하고 있었으며 100% 모두 기타분진으로 적용하고 있는 기관도 5개소로 확인되었다.

<표 36> 산화규소 화합물 노출기준 적용 경험

구분	빈도(%)
산화규소(결정체 석영), 0.05 mg/m ³	44(53.7%)
산화규소(결정체 크리스토파라이트), 0.05 mg/m ³	8(9.8%)
산화규소(결정체 트리디마이트), 0.05 mg/m ³	9(10.1%)
산화규소(결정체 트리폴리), 0.1 mg/m ³	1(1.2%)
산화규소(비결정체 규소, 용융된), 0.1 mg/m ³	7(8.5%)
산화규소(비결정체 규소, 구조토), 10 mg/m ³	3(3.7%)
산화규소(비결정체 규소, 침전된 규소), 10 mg/m ³	8(9.8%)
산화규소(비결정체 규소, 실리카겔), 10 mg/m ³	9(10.1%)
산화규소(산화규소 결정체 1% 이하), 10 mg/m ³	48(58.5%)

7) 광물성분진 측정대상 사업장 및 시료 수 예측

총 82개 지정측정기관에서 응답한 광물성 분진 발생사업장 수를 예측한 결과 총 1,022개소이었으며 기관당 평균 15.7개 사업장이 해당되었고, 시료 수는 총 3,806건으로 기관당 평균 98.8개의 광물성 분진 시료가 예측된다고 응답하였다.

<표 37> 광물성분진 측정대상 사업장 및 시료 수

구분	응답 기관수	계	평균	최대	최소
사업장수(개소)	65	1,022	15.7	0	150
시료수(건)	64	3,806	98.8	0	630

8) 산화규소 화합물 노출기준 적용 시 어려운 점

산화규소 화합물 노출기준 적용 시 어려운 점에 대한 복수응답 결과 너무 많고, 복잡한 산화규소 노출기준, 분석장비(FTIR, XRD) 미보유가 각각 35.4%(46개소)로 가장 많았다. 그 다음 순으로 너무 많고 복잡한 산화규소 노출기준 29.2%(38개소), 광물성분진, 유리규산, 산화규소 등 용어 혼란이 19.2%(25개소), 광물성분진 측정대상과 산화규소 노출기준 불일치 9.2%(12개소)로 나타났다. 기타 의견으로는 “위의 사항들이 복합적으로 얽혀 있고 과태료 부과 된다고 공지한 후 실시하면 효과적 일 것이며 측정기관에만 책임을 전가하면 실제효과는 미지수”, “모든 항목이 복합적으로 문제가 있다”고 2기관에서 응답하였다.

<표 38> 산화규소 화합물 노출기준 적용 시 어려운 점

구분	빈도(%)
광물성분진 채취장비(사이클론) 미보유	4(3.1%)
분석장비(FTIR, XRD) 미보유	46(35.4%)
너무 많고 복잡한 산화규소 노출기준	38(29.2%)
광물성분진 측정대상과 산화규소 노출기준 불일치	12(9.2%)
광물성분진, 유리규산, 산화규소 등 용어 혼란	25(19.2%)
기타	5(3.8%)

9) 산화규소 화합물 분석을 위한 장비기준에 대한 의견

산화규소 화합물 분석을 위한 장비기준(X-선 회절분석기 또는 Fourier 변환 적외선분광분석기)에 대하여 복수응답으로 의견을 수렴한 결과 현재처럼 시료를 외부기관으로 의뢰하거나 선택장비로 해도 전혀 상관이 없다는 응답이 대부분(85.6%)을 차지하였으며 필수장비로 지정이 필요하다는 기관이 10.0%(9개소)가 있었다. 기타 의견으로는 ‘소규모의 지정측정기관에 관련 장비의 구입으로 인한 부담을 주지 않았으면 한다’가 있었다.

<표 39> 산화규소 화합물 분석을 위한 장비기준에 대한 의견

구분	빈도(%)
현재처럼 선택장비로 해도 무방	24(26.7%)
필수장비로 지정이 필요	9(10.0%)
현재처럼 시료를 외부기관에 의뢰해도 무방	53(58.9%)
기타	2(2.2%)

10) 산화규소 화합물 노출기준 적용과 운용에 대한 의견

산화규소 화합물의 노출기준 적용과 운용에 대한 의견으로는 “노출기준이 세분화되어 있어 간소화가 필요하고 결정형 비결정형으로 나뉘는데 대부분 사업장 정보가 부족하여 결정형 비결정형을 알 수가 없으므로 호흡성 분진으로 적용하여 측정하는 실정임”, “외부기관 시료분석 의뢰해도 무관하며 각 측정기관마다 비싼 분석 장비를 구입하는 것도 낭비이고 측정비용 증가는 사업주 쪽에서 반대하는 실정(전국분석기관 및 사업장에 일률적으로 분석비용 적용되면 좋을 듯함)”, “결정체와 비결정체 구분 방법, 산화규소 8가지의 구분 방법, 시료 샘플링 전산화 규소의 종류와 결정형 또는 비결정형 존재의 여부를 알 수 있는 방법이 필요”, “위 설문내용을 법에 준하여 실무에 적용할 경우 측정기관과 사

업장과의 관계(측정비용, 건강검진 항목추가, 사업장 담당자의 이해 등)를 생각할 경우 어려움이 증가”, “물질안전보건자료가 없는 경우 측정, 분석방법 적용에 어려움”, “산화규소의 종류가 많은 반면 시료 분석 의뢰 시 정확한 성분 분석을 실시하고 있는지, 기타분진의 정확한 측정에 대한 규정이 필요”, “물질안전보건자료로 규산에 대한 파악이 어려울 경우 노출기준 적용이 어렵고 물질도 다양하여 작업공정 발생에 따른 적용에 어려움과 정량, 정성 분석에 따른 비용면에 따른 문제점의 명확한 기준 등이 필요”, “결정체 1% 이상인 광물성 분진의 경우 '총분진'에 대해 평가할 수 있는 기준이 삭제된 것은 오류이고 1,2종 분진에 대한 기준을 다시 제정 필요”, “규정의 현실성이 필요하고 측정, 분석은 복잡해지고 비용부담도 발생”, “광물성 분진의 물질안전보건자료상 산화규소 함유량 기재에 대한 철저한 관리를 통해 함량 확인 가능, 확인이 불가능할 경우 함량 분석에 대한 적절한 방법 규정 등”, “철광석은 철(70%)+산화규소(1.5~5%)+산화알루미늄(1.4~3%)을 함유. 철광석은 석회석, 석탄 등 단일물질로 판단하고 산화철 분진 및 흙으로 측정하고 관리가 가능”, “현재 산화규소 함량에 대한 노출기준이 고시(2011-13호)에서 삭제되어 적용이 난해하며 각 사업장의 산화규소 발생 특성상 단일 물질로의 적용이 쉽지 않다. 이는 여러 다양한 복합 분진의 취급 및 사용으로 기인되며 이는 현장에 경험이 많은 산업위생전문가의 판단으로 분진 노출기준을 적용하는 것도 바람직 할 것으로도 판단”, “산화규소 내 결정체, 비결정체 선별하여 적용하는 과정이 매우 까다롭고 국내 선별 가능한 분석장비 기관이 희소하여 측정업무에 어려운 점이 많음. 크게 결정형, 비결정형으로 대분류한 후 기준을 간소화 시키고, 10 mg/m³기준을 가진 분진에 대한 명확한 판단기준을 제시”, “삭제된 총분진의 노출기준이 현장에서 측정하는 입장에서는 더 적용이 용이”, “산화규소의 분석가능기관이 적어 활용에 결과 확인 지연 등 일부 불편한 점이 있으며 해당분석기관에서 분석 시 대부분 산화규소(결정체석영)로 판정” 등의 의견이 있었다.

11) 설문결과 요약

총 82개 지정측정기관에 산화규소 화합물과 관련된 설문분석 결과 광물성분진 중 규산측정, 호흡성분진 채취 및 분석, 산화규소 화합물의 노출기준에 대한 인식도는 90%로 내외로 전반적으로 높게 파악되었다. 관련규정의 경우 호흡성분진 규정에 대한 인식도가 가장 높았고 FTIR 또는 XRD로 분석하는 규정에 대해서는 인식도가 낮은 것으로 조사되었다. 광물성분진 중 규산측정, 호흡성분진 채취 및 분석, 산화규소 노출기준에 대한 규정의 준수율은 각각 76.8%, 84.1%, 70.7%, 77.8%로 나타나 산화규소 화합물의 분석관련 준수율이 가장 낮았고 호흡성분진으로 채취하는 경우의 준수율이 가장 높았다. 산화규소 화합물을 분석할 수 있는 장비로 X-선 회절분석기는 1개소에서 구비하고 있었고 FTIR은 9개소가 보유하고 있었다. 시료를 의뢰하여 분석하고 있는 기관은 37개소이었으며 총 1,268건의 시료가 1년간 5개의 지정측정기관에 의뢰되고 있었다. 따라서 산화규소 화합물 지정측정기관은 적고 시료는 많아 높은 분석비가 책정될 수 있으며, 의뢰기관의 분석비 부담은 올라갈 수밖에 없기 때문에 산화규소 화합물의 분석관련 준수율이 낮을 수밖에 없다고 추측되어 진다. 정확한 분석은 비용편익분석 연구가 필요하다고 사료된다. 그리고 광물성분진 발생사업장 수는 1,022개소, 분석해야 할 시료의 수는 3,806건으로 예측되었다. 산화규소 화합물 노출기준 적용 시 어려운 점으로는 너무 많고 복잡한 산화규소 노출기준, 분석장비를 보유하고 있지 않은 이유가 많았다. 현장에서 복잡한 산화규소 노출기준으로 인해 적용에 어려움이 있다면 노출기준을 간소화해야 한다는 필요성을 제시하고 있다고 판단된다. 또한 분석장비의 미보유로 인해 기준 적용에 어려움을 느끼고 있는 있다고 나타났으나 다른 설문 문항에서는 산화규소 화합물 분석을 위한 장비기준은 현재처럼 선택장비로 유지시키거나, 시료를 외부기관에 의뢰해도 괜찮다고 하는 의견이 대부분(85.6%)을 차지하였다. 이는 소규모 측정기관에서 경제적 부담을 느껴서 나온 대답으로 판단되어진다. 현재와

같이 산화규소 화합물의 시료분석을 의뢰하는 방법이 유지된다면, 지정 측정기관을 늘리거나 의뢰수가를 낮추어 적극적으로 산화규소 화합물의 분석을 유도하는 것도 규정 준수율을 높이는 방법이라고 사료된다.

7. 노출기준 제안

각국의 산화규소 화합물의 직업적 노출기준은 상당히 다양하다. 미국산업안전보건청의 허용노출기준⁷⁾과 일본의 경우 그 기준을 공식⁸⁾으로 마련하고 있으며 이 기준의 경우 모든 광물성분진은 석영과 크리스토파아이트 함유여부를 파악하여야 노출기준의 도출이 가능하다. 현재 우리나라의 경우 2009년 총분진의 노출기준을 삭제하면서 산화규소 화합물(결정체 석영)을 분석하는 사례가 증가하였으나 설문조사 결과 상당한 비용부담 등을 느끼는 것으로 조사되었다. 따라서 성분 분석 후 공식에 대입하여 노출수준을 알아보는 공식화된 기준의 도입은 석영 등의 결정형 규산을 분석할 수 있는 기관이 현재 5개소임을 감안할 때 상당한 무리가 따를 것으로 추측된다.

따라서 본 연구에서 노출기준 개선안은 두 가지로 제안하고자 한다.

첫 번째 제안은 미국산업위생전문가협회와 같이 결정체로서 석영과 크리스토파아이트만으로 노출기준을 설정하는 것이다. 미국산업위생전문가협회의 노출기준(Threshold Limit Values, TLV)과 캐나다의 TWAEV(Time-Weighted Average Exposure Values)는 결정체로서 석영과 크리스토파아이트에 대하여 0.025 mg/m^3 로 제시하고 있다. 미국산업위생전문가협회에서는 평균 0.06 mg/m^3 에 노출된 근로자의 규폐가 퇴직 후 증가되는 점을 감안하여 0.05 mg/m^3 의 기준으로는 폐섬유화(Lung fibrosis)와 폐암을 예방하기에는 불충하다는 점을 감

7) 석영(호흡성) = $10 \text{ mg/m}^3/\% \text{SiO}_2+2$, 석영(총분진) = $30 \text{ mg/m}^3/\% \text{SiO}_2+2$, 크리스토파아이트와 트리디마이트는 위 기준의 1/2, 비결정형 = $80 \text{ mg/m}^3/\% \text{SiO}_2$

8) 관리농도(mg/m^3) = $3.0/(1.19Q+1)$

안하여 0.025 mg/m³으로 강화한 바 있다. 또한, 그간 다양하게 운영되었던 산화규소 화합물의 노출기준을 과감하게 정리하여 결정체로서 석영과 크리스토파라이트만 유지하였다. 그 이유로 트리디마이트의 경우 사업장에서 검출되는 사례가 극히 드물고, 비결정형은 단일물질로 노출되는 경우가 드물고 노출평가에 대한 연구자료 등이 불충분하다는 이유였다. 국내외 광물성분진에 대한 연구를 고찰한 결과 국내에서 수행된 모든 논문도 석영에 대한 부분만 노출평가가 이루어져 있고 외국의 경우도 결정형 산화규소에 대한 결과가 대부분 석영에 대한 결과만 제시되어 있는 점을 감안할 때 현행 우리나라의 결정체 트리디마이트, 결정체 트리폴리, 비결정체 규소(용융된) 및 비결정형 산화규소 화합물의 노출기준은 삭제하여도 무방할 것으로 판단된다. 또한, 결정형 규산의 국제적인 공인분석방법인 NIOSH 7500(X-ray diffraction, 분석대상 물질 : 석영), NIOSH 7602(Infrared Absorption Spectrophotometry, 분석대상물질 : 석영), OSHA 142(X-ray diffraction, 분석대상 물질 : 석영 및 크리스토파라이트)의 분석대상 물질이 석영과 크리스토파라이트로 한정된 점을 감안하면 결정체 석영과 크리스토파라이트만 설정하는 것이 타당하다고 판단된다.

<표 40> 우리나라 산화규소 화합물의 노출기준 개정(안)

항 목	개 정 전	개 정 후	비 고
산화규소 (결정체 석영)	0.05mg/m ³	현행 유지	※ ACGIH TLV, Canada TWAEV : 0.025 mg/m ³ , NIOSH REL : 0.05 mg/m ³ , HSE WEL 0.1 mg/m ³
산화규소 (결정체 크리스토파라이트)	0.05mg/m ³	현행 유지	※ ACGIH TLV, Canada TWAEV : 0.025 mg/m ³ , NIOSH REL : 0.05 mg/m ³ , HSE WEL 0.1 mg/m ³
산화규소 (결정체 트리디마이트)	0.05mg/m ³	삭제	※ 미제정 : ACGIH TLV, Canada TWAEV, HSE WEL, Germany MAK
산화규소 (결정체 트리폴리)	0.1mg/m ³	삭제	※ 미제정 : ACGIH TLV, Canada TWAEV, HSE WEL, Germany MAK
산화규소 (비결정체 규소, 용융된)	0.1mg/m ³	삭제	※ 미제정 : ACGIH TLV, Canada TWAEV, HSE WEL, Germany MAK
산화규소 (비결정체 규조토)	10 mg/m ³	삭제	※ 기타분진(산화규소 결정체 1%이하)으로 적용
산화규소 (비결정체 침전된 규소)	10 mg/m ³	삭제	※ 기타분진(산화규소 결정체 1%이하)으로 적용
산화규소 (비결정체 실리카겔)	10 mg/m ³	삭제	※ 기타분진(산화규소 결정체 1%이하)으로 적용

두 번째 제안은 사용이 극히 드물긴 하지만, 결정체로서 트리디마이트와 트리폴리가 사업장에서 발생될 수 있고 결정형의 경우 규폐와 폐기능 감소 등의 연관성을 감안한 제안으로 미국국립산업안전보건연구원의 권장노출기준과 같은 형태로 결정형 산화규소만 시간가중평균치 0.05 mg/m³으로 규정하는 안이다. 미

국립산업안전보건연구원의 권장노출기준의 경우 결정형인 석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트, 트리폴리에 대하여 시간가중평균치로 0.05 mg/m³을 제시하고 있으며, 규조토 등의 비결정형규산은 6 mg/m³으로 제안하고 있다.

<표 41> 우리나라 산화규소 화합물의 노출기준 개정(안)

항 목	개 정 전	개 정 후	비 고
산화규소 (결정체 석영)	0.05mg/m ³	현행 유지	※ ACGIH TLV, Canada TWAEV : 0.025 mg/m ³ , NIOSH REL : 0.05 mg/m ³ , HSE WEL 0.1 mg/m ³
산화규소 (결정체 크리스토파라이트)	0.05mg/m ³	현행 유지	※ ACGIH TLV, Canada TWAEV : 0.025 mg/m ³ , NIOSH REL : 0.05 mg/m ³ , HSE WEL 0.1 mg/m ³
산화규소 (결정체 트리디마이트)	0.05mg/m ³	현행 유지	※ 미제정 : ACGIH TLV, Canada TWAEV, HSE WEL, Germany MAK
산화규소 (결정체 트리폴리)	0.1mg/m ³	현행 유지	※ 미제정 : ACGIH TLV, Canada TWAEV, HSE WEL, Germany MAK
산화규소 (비결정체 규소, 용융된)	0.1mg/m ³	삭제	※ 미제정 : ACGIH TLV, Canada TWAEV, HSE WEL, Germany MAK
산화규소 (비결정체 규조토)	10 mg/m ³	삭제	※ 기타분진(산화규소 결정체 1%이하)으로 적용
산화규소 (비결정체 침전된 규소)	10 mg/m ³	삭제	※ 기타분진(산화규소 결정체 1%이하)으로 적용
산화규소 (비결정체 실리카겔)	10 mg/m ³	삭제	※ 기타분진(산화규소 결정체 1%이하)으로 적용

노출기준 강화의 경우 산화규소 화합물의 결정체 석영에 대한 노출평가를

수행한 결과 현행 고용노동부의 노출기준을 30% 초과하였고, 석영의 기준을 0.025 mg/m³로 강화할 경우 60%가 초과되어 최소한의 혼란을 감소시키려면 현행수준의 노출기준이 타당하리라 판단되고 노출기준 강화는 향후 단계적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- 1] 노동부. 전국제조업체작업환경실태조사, 2005
- 2] 노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고시 제2008-26호), 2008
- 3] 고용노동부. 2009년 산업재해 현황, 2010
- 4] 고용노동부. 작업환경측정 및 정도관리규정, 2010
- 5] 고용노동부. 산업안전보건법령, 2011
- 6] 고용노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준, 2010
- 7] 백남원. 산업위생학 개론, 신광출판사, 1995
- 8] 안규동 외 18명. 유해물질의 선정노출기준 설정 등 관리체계에 관한 연구. 노동부, 2002
- 9] 이광목 등. 현행 노출기준의 문제점분석 및 실질적 기능화 방안 연구. 한국 산업위생학회지 1994 ; 4:(1).
- 10] 일본 후생노동성. 노동안전위생법, 2000
- 11] 김현욱 등. 화학물질 노출 기준 개정 연구. 노동부 2005
- 12] 정은교. 화학물질 노출기준 제·개정 대상물질 선정절차 및 조사결과 고찰. 한국산업위생학회지 17(2) : K1-K6
- 13] 김부옥 등. 국내 시멘트 중 6가크롬, 결정형 유리규산 함량 및 입도분석. 한국산업위생학회. 2009.
- 14] 화학물질 유통·사용 실태조사 결과 보고서-유리규산. 한국산업안전공단. 2007
- 15] 환경부. 제3차 화학물질 유통량 조사, 2007

- 16] 한국산업안전보건공단. 유해물질별 작업환경측정방법, KOSHA Code A-1-2004. 한국산업안전보건공단. 2004
- 17] 김치년 등, 분진의 노출기준 개선방안 연구. 산업안전보건연구원. 2008
- 18] 김부욱 등. 주물공장 탈사공정에서 벌크시료 및 기중 석영 함유량. 한국산업위생학회. 2009.
- 19] 김현욱, 노영만, 피영규, 원정일, 김용우. 제조업체에서 발생하는 호흡성분진 중 XRD와 FTIR을 이용한 결정형 유리규산 농도의 비교분석 제 1부-주물사업장. 한국산업위생학회지 1998 ; 8 : 50-66.
- 20] 김현욱, 피영규, 노영만, 원정일, 김용우. 제조업체에서 발생하는 호흡성분진 중 XRD와 FTIR을 이용한 결정형 유리규산 농도의 비교분석 제 2부-요업, 석재, 콘크리트, 유리, 연탄 및 기타사업장. 한국산업위생학회지 1999 ; 9 : 99-111.
- 21] 오세민, 신용철, 박동욱, 이나루, 박승현, 이광용, 문영한. 일부 요업사업장의 분진, 결정형유리규산 및 납의 폭로에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1994 : 4 ; 168-179.
- 22] 이원철, 임현우, 이경재, 이세영, 맹광호, 피영규, 김현욱, 구정완, 임영, 윤임중. 제조업 진폐증의 역학적 특성. 한국역학회지 1998 ; 20 : 141-153.
- 23] 정회경, 김지용, 정해관, 임현술. 모 규모도 가공업체의 규모도 분진 폭로평가 및 개선방향에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1994 ; 4 : 81-95.
- 24] 조규상. 규폐증. 윤임중 편, 진폐증의 최신지견. 서울: 최신의학사, 1999 : 203-224.
- 25] 피영규, 노영만, 이광목, 김형아, 김현욱. 주물사업장 주공정별 발생하는 분

- 진의 석영함유량 및 크기분포 연구. 한국산업위생학회지 1997 ; 7 : 196-208.
- 26] American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure Indices. Cincinnati, ACGIH, 2011.
- 27] Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices, 8th ed. Cincinnati : 2010 pp913-921
- 28] Stanton, M.F.; Layard, M.; Tegeris, E.; et al.: Relation of Particle Dimension to Carcinogenicity in Amphibole Asbestoses and Other Fibrous Materials. J. Natl. Cancer Inst. 67:965 - -975 (1981)
- 29] Clayton GD, Clayton FE. Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, 4th ed, 1994, John Wiley & Sons, Inc., New York Donley E, J Ind Hyg Toxicol, 1936;18:134.
- 30] Keith LH, Chemical names and Synonyms, The National Toxicology Program's: Lewis Publishers, 1992
- 31] *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards and Other Databases*(DHHS [NIOSH]) Pub. No 2000 -130). Cincinnati, Ohio: NIOSH, 2000.
- 32] National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH): Method 1451. In *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards and Other Databases*(DHHS [NIOSH])
- 33] U.S. National Library of Medicine: Dimethylcarbamoyl chloride. In: Hazardous Substances Data Bank. Toxicology Data Network (TOXNET). Online at: <http://toxnet.nlm.nih.gov/>

-
- 34] National Defense Research Committee [NDRC]: Offices of Scientific Research and Development, 22:1942; 1976; data cited in RTECS; online at: <http://www.cdc.gov/niosh/rtecs/fd401640.html>
- 35] Sellakumar AR; Laskin S; Kuschner M; et al.: Inhalation carcinogenesis by dimethylcarbamoyl chloride in Syrian golden hamsters. *J Environ Pathol Toxicol* 4:107 - -115 (1980)
- 36] Sellakumar A; Snyder C; Patil G; Burns F: Inhalation carcinogenesis of dimethylcarbamyl chloride, a dose response effect and induction of naso-pharyngeal and nasal cavity tumors in rats. *Proc Am Assoc Cancer Res Ann. Meet* 30:140 (1989)
- 37] Fleig J; Thiess AM: Chromosome investigations of persons exposed to dimethyl carbamoyl chloride and diethyl carbamoyl chloride. *J Occup Med* 20:745 - -746(1978)
- 38] American Conference of Governmental Industrial Hygienists : 2006 threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. ACGIH, 2006.
- 39] Hogan TJ. Particulates. In : Plug BA, Niland J, Quinlan PJ, editors. *Fundamentals of industrial hygiene*, 4th ed, by B.A. Plog, Itasca, Illinois, National Safety Council, 1995.
- 40] 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, pp 49, 51, 1997.

- 41] Lorberau CD. Investigation of the determination of respirable quartz on filter media using fourier transform infrared spectrophotometry. Division of physical sciences and engineering. NIOSH, 1989.
- 42] Lorberau CD, Carsey TP, Fischbach TJ, Mulligan KJ. Evaluation of direct-on-filter methods for the determination of respirable α -quartz. Appl Occup Environ Hyg 1990 ; 5 : 27-35.
- 43] Lorberau CD. Investigation of the determination of respirable quartz on filter measuring fourier transform infrared spectrophotometry. Appl Occup Environ Hyg 1990 ; 5 : 348-350.
- 44] Lorberau CD, Abell MT. Methods used by the united states national institute for occupational safety and health to monitor crystalline silica. Scand J Work Environ Health 1995 ; 21 (suppl 2) : 25-38.
- 45] Madson FA, Rose MC, Cee R. Review of quartz analytical methodologies: present and future needs. Appl Occup Environ Hyg 1995 ; 10 : 991-1001.
- 46] Miles WJ. Issues and controversy: The measurement of crystalline silica; Review papers on analytical methods. Am Ind Hyg Assoc J 1999 ; 60 : 396-402.
- 47] National Institute for Occupational Safety and Health : NIOSH manual of analytical methods, 4th silica, crystalline by IR, 1994.
- 48] Osinsky FC, Stellman JM. Minerals and agricultural chemicals.

-
- Encyclopaedia of occupational health and safety. 4th ed. Geneva : ILO, Vol 4. 1998.
- 49] Pickard KJ, Walker RF, West NG. A comparison of x-ray diffraction and infrared spectrophotometric methods for the analysis of α -quartz in airborne dusts. *Ann Occup Hyg* 1985 ; 29 : 149-167.
- 50] Shinohara Y. Direct quantitative analysis of respirable cristobalite on filter by infrared spectrophotometry. *Industrial Health* 1996 ; 34 : 25-34.
- 51] Smith DK. Evaluation of the detectability and quantification of respirable crystalline silica by X-ray powder diffraction methods. Department of geoscience and material research laboratory. The Pennsylvania state University, 1992.
- 52] 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.
- 53] Weber SL, Banks DE. Silicosis. In : Rosenstock, Cullen MR editors. *Textbook of clinical occupational and environmental medicine.* by W.B. Saunders Company, 1994.

Abstract

The study on the revision of occupational exposure limit for Silicon oxide compound

Young-seop Yi¹, Young Gyu Phee², Sang Hyo Sim³, Won Kyoung Ko¹

Seoul National University of Science and Technology¹

Faculty of Health Science, College of Health & Therapy, Daegu Haany University²

Department of Occupational and Environmental Medicine, Hanyang University Medical center³

Silicon oxide compound can be exposed in various different fields, such as glass manufacture, casting, grinding and pottery in the ceramic industry and collection of soil, sand and rock and stone processing in the construction industry. Especially, crystalline silicon oxide compound is known to be the main reason for silicosis and possibly reduce pulmonary functions and even cause lung cancer.

As an occupational exposure limit for silicon oxide compound, OSHA PEL and Japanese Administrative Concentration suggest certain formulas, while both ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienist)'s Threshold Limit Values and Canada's Time-Weighted Average Exposure Values require 0.025 mg/m³ only for quartz and cristobalite as a crystalline body. As a result of examining both domestic and foreign researches on

mineral dust, it was found that all of the theses conducted in Korea carried out exposure assessments only for quartz, and even most of the foreign researches on crystalline silicon oxide suggest the results about quartz. In view of all these facts, it wouldn't be a problem to delete the existing occupational exposure limits for crystalline tripoli, crystalline tridymite, amorphous silicon (fused) and amorphous silicon oxide compound in Korea.

Moreover, since the international official analysis method for the crystalline of silicon oxide compound (NIOSH 7500/XRD, Quartz, NIOSH 7602/IR, Quartz, OSHA 142/XRD, Quartz·Cristobalite) sets limits on quartz and cristobalite only, it is reasonable to sustain exposure limit only for quartz and cristobalite in Korea.

In the results of exposure assessments of 5 silicon oxide compound (crystalline quartz) manufacturers in Korea, they were found to exceed the exposure limit of Ministry of Employment of Labor by 30%, and if the exposure limits for quartz is strengthened to 0.025 mg/m³, they will exceed the occupational exposure limit by 60%. Therefore, it is recommended to sustain the present exposure levels to reduce such a confusion as much as possible.

Keywords : Silicon Oxide Compound, Occupational Exposure Limit, Quartz

부 록

1. 산화규소 화합물 작업환경 현장조사표
2. 산화규소 화합물 현장 설문지
3. 산화규소 화합물 작업환경측정 및 분석방법

4. 조사에 따른 종합의견

- 노출 실태, 환기시스템, 근로자 보호구 착용여부 등

※ 작업환경관리 실태 및 측정 시 특이사항을 기술

5. 작업환경측정 대상 광물성 분진(산화규소 화합물질)명(해당물질에 √표)

① 규산

석영 크리스토파라이트 트리디마이트

② 규산염(결정형 규산 1% 미만)

운모 포틀랜드 시멘트 습스톤 활석 흑연

③ 기타(_____)

※ 최근 2년간 작업환경측정결과표 또는 공정별 해당 화학물질 사용실태를 확인한 후 표기

<부록 2>

산화규소 화합물 노출기준 개선방안 조사

--	--	--	--

안녕하십니까?

이번에 저희 서울과학기술대학교에서는 『산화규소 화합물의 노출기준 개정 연구』를 한국산업안전보건공단으로부터 지원을 받아 수행 중에 있으며, 본 연구의 일환으로 산화규소 화합물의 분석방법·노출기준 평가 등의 타당성에 대하여 현장에서 근무하는 여러분의 의견을 수렴하기 위하여 설문조사를 실시하게 되었습니다.

귀하의 의견은 향후 산화규소 화합물의 노출기준 관련 제도의 개선방향을 수립하는데 귀중한 자료로 사용될 예정이오니 성심껏 응답해 주시면 감사하겠습니다.

본 설문서는 설문작성자의 비밀이 보장되며 통계자료 및 연구목적 이외에는 일체 사용하지 않을 것을 약속합니다.

조사와 관계된 의문사항이 있으시면 E-mail(wkko@seoultech.ac.kr) 또는 전화(02-970-6387)로 문의(담당자 ; 고원경)하여 주시기 바라오며, 작성하신 조사지는 회송용 봉투에 넣어 회신해 주시거나, 팩스(0505-115-5940) 발송 또는 스캔 후 이메일로 보내주시면 됩니다.

2011년 7월

[조사 기관]

서울과학기술대학교

교 수 이 영 섭
 연구원 고 원 경
 연구원 심 상 효

주 소 서울시 노원구 공릉로 232
 전 화 (02) 970-6387
 팩 스 0505-115-5940

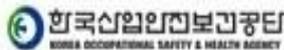


서울과학기술대학교
 SEOUL NATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

[연구 기관]

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

연구상대역 박 승 현
 전 화 (032) 5100-804



한국산업안전보건공단
 KOSHA OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH AGENCY

문 4) ○○님 ‘광물성분진(산화규소 결정체 1% 이상)의 측정 및 분석’과 관련된 **규정** (① 광물성분진 중 규산 측정 실시/②호흡성분진 채취/③FTIR 또는 XRD로 분석/④산화규소 노출기준)들을 얼마나 잘 **준수**하고 계십니까?

(○○님의 응답내용은 절대 비밀이 보장되오니 안심하고 대답해 주십시오.)

구 분	매우 잘 준수하고 있다	대체로 잘 준수하고 있는 편이다	대체로 잘 있지 않는 편이다	전혀 준수하고 있지 않다
4-1 1) 광물성분진 중 규산 측정 실시	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
4-2 2) 호흡성분진 채취	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
4-3 3) FTIR 또는 XRD로 분석	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
4-4 4) 산화규소 노출기준	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4

문 5) ○○님은 ‘광물성분진의 측정’과 관련된 **규정**(①광물성분진 중 규산의 측정 실시/②호흡성분진 채취/③FTIR 또는 XRD로 분석/④산화규소 노출기준)들이 잘 **지켜지지 않는 가장 큰 이유**가 무엇이라고 생각하십니까?

- 1. 중량분석으로 평가해도 큰 문제가 없기 때문에
- 2. 정부 등의 홍보/교육 부족으로 규정을 잘 이해 못하기 때문에
- 3. 작업환경측정 및 정도관리규정 또는 안전보건공단의 KOSHA CODE가 명확하지 않기 때문에
- 4. 타 기관도 XRD 또는 FTIR로 분석하지 않기 때문에
- 5. 고용노동관서 등의 측정기관 정기점검 시 특별한 지적이 없기 때문에
- 6. 기타(_____)

광물성분진의 측정, 분석 및 노출기준 적용 등과 관련된 내용을 몇가지 여쭙겠습니다.

문 6) ○○님 귀 기관에서는 광물성분진(산화규소 결정체 1% 이상)의 **채취**는 어떤 방법을 활용하시고 계십니까?

- 8 산화규소(비결정체 실리카겔), 10 mg/m³
- 9 기타 분진(산화규소 결정체 1% 이하), 10 mg/m³

▼
9번에 체크하신 경우 9-1)로 이동

문 9-1) 기타 분진(산화규소 결정체 1% 이하)을 적용하신 경험이 있는 경우 총 광물성분진 시료 중 몇 % 정도를 기타분진으로 적용하시고 계십니까?

1) 약 _____ %

문 10) ○○님 광물성분진 중 규산(산화규소 결정체 1% 이상)은 광물을 원료로 사용하는 사업장(주물, 요업, 석재, 시멘트, 내화, 도자기, 채석 등)에서 발생합니다. 귀 기관의 **광물성분진 측정대상 사업장**과 그 **시료 수**를 예측하신다면 얼마나 되십니까?

1) 광물성분진 발생사업장 수 : 총 _____ 개소

2) 총 예측 시료 수 : 약 _____ 개

문 11) ○○님 산화규소 화합물 **노출기준 적용**과 관련하여 가장 **어려운 점**은 무엇이라고 생각하십니까?

- 1. 광물성분진 채취장비(Cyclone) 미보유
- 2. 분석할 수 있는 장비(XRD 또는 FTIR)의 미보유
- 3. 너무 많고 복잡한 산화규소 노출기준
- 4. 광물성분진 측정대상과 산화규소 노출기준의 불일치
- 5. 광물성분진, 유리규산, 산화규소 등 용어의 혼란
- 6. 기타(_____)

문 12) ○○님 **광물성분진 중 규산(산화규소 결정체 1% 이상)의 분석**은 X-선 회절분석(XRD) 또는 Fourier 변화 적외선분광분석기(FTIR) 이용이 필수적입니다. 그 장비를 '작업환경측정기관의 **장비기준**' 적용에 대한 의견은 어떠하십니까?

- 1. 현재처럼 선택장비로 해도 무방
- 2. 필수장비로 지정이 필요
- 3. 현재처럼 시료를 외부기관에 의뢰해도 무방
- 4. 기타(_____)

-
- 문 13) 기타 산화규소 화합물에 대한 노출기준 적용과 운용에 있어서 의견이 있으시면 자유롭게 말씀해 주십시오.

지금까지 응답해 주셔서 진심으로 감사드립니다.
산업보건 관련 정책수립에 유용한 자료로 활용하겠습니다.

<부록 3>

산화규소 화합물 작업환경측정 및 분석방법

1. 시료의 채취

산화규소 화합물은 제안된 노출기준 적용을 위하여 호흡성분진으로 채취한다. 기본 원리는 호흡성분진을 분리하여 포집할 수 있는 사이클론과 칭량된 여과지를 결합하여 작업환경 중 대상물질을 채취하고 수분을 제거한 후 전자저울을 이용하여 칭량한다.

= 시료채취 개요 =

- 시료채취매체: 사이클론+PVC여과지(nylon cyclone, Higgins-Dewell[HD]cyclone, or Aluminum cyclone + tared 5 μ m PVC membrane filter)
- 유량: nylon cyclone: 1.7 L/min, HD cyclone: 2.2 L/min, Al cyclone: 2.5 L/min
- 공기량 : 최소 20 L @ 5 mg/m³ 최대 400 L
- 운반: 여과지의 시료포집 부분이 위를 향하도록 하고 마개를 닫아 밀폐된 상태에서 운반
- 시료의 안정성: 안정함
- 공시료: 시료 세트당 2~10개의 현장 공시료
- 방해작용 : 수분, 휘발성 유기화합물을 제거하지 않으면 과대 평가 가능

(1) 시료 채취전 준비

- ① 필터는 데시케이터에서 꺼낸 후 전자저울이 설치된 중량실에 최소 2시간 정도 방치하여 중량실의 온·습도 조건에 필터의 온·습도 조건을 평형

화시킨다.

- ② 필터가 일정한 무게를 나타낼 때까지 반복하여 시료채취용 필터무게 (W1) 및 공시료 필터 무게(B1)를 잰다(연속하여 잰 필터의 무게 차이가 10 μ g 이내여야 하며 이를 평균하여 무게로 사용한다.)
- ③ 3단 카세트에 패드와 함께 PVC 필터를 결합한 후 밀봉한다.
- ④ 개인시료채취펌프는 채취전 사용할 사이클론과 필터, 유연성 튜브를 결합하여 시료채취시와 동일한 연결 상태를 만든 후 각각의 사이클론에 맞는 유량으로 보정한다.

(2) 시료 채취

- ⑤ 필터가 장착된 3단 카세트를 사이클론에 장착시킨 후 유연성 튜브를 이용하여 시료채취용 펌프와 연결시킨다.
 - ⑥ 45분에서 8시간 동안 시료를 채취한다. 시료채취 시 채취되는 입자상 물질의 무게가 2 mg을 초과하지 않도록 시료채취 시간을 조정한다.
 - ⑦ 동일 현장에 채취되는 시료 세트당 최소 5개의 현장 공시료를 분석실에 제출한다.
 - ⑧ 자체정도관리: 전자저울은 국가공인 검·교정기관으로부터 주지적으로 검·교정을 받거나, 또는 표준분동을 구입하여 자체적으로 검·교정을 실시하여야 하며, 현장 시료 세트당 2~4개 정도의 반복시료를 채취하여 현장시료와 동일한 분석과정을 거쳐 중량분석을 실시한 다음, 측정값들의 차이 즉 상대표준편차를 계산하여 시료 채취 및 분석과정의 정확도 등을 검증해야 한다.
- ※ 반복시료 : 현장시료 채취시 동일한 조건 하에서 하나의 시료를 더 추가 측정한 시료를 말하며, 반복시료는 현장에서 채취할 수도 있지만 분진을 발생시키는 인공환경 챔버가 있는 경우 일정한 농도조건의 분진 인공환경을 구축한 후 이곳에서 채취한 시료를 가지고 평가할 수도 있음.

2. 시료의 분석

산화규소 화합물의 결정형의 분석은 적외선분광분석과 X-선회절분석방법에 대해서만 언급하도록 한다.

1) 적외선분광분석

분석원리는 작업환경 중 대상물질을 필터에 채취하여 회화하여 KBr로 균일하게 혼합한 후 적외선분광광도계를 이용하여 분석한다.

시료채취 개요	분석 개요
<ul style="list-style-type: none"> ○ 시료채취매체: cyclone + 필터 (5 μm PVC membrane) ○ 유량: Nylon cyclone : 1.7 L/min GS-1 cyclone : 2.0 L/min HD cyclone : 2.2 L/min aluminum cyclone : 2.5 L/m ○ 공기량-최소: 400 L -최대: 1000 L ○ 운반: 일반적 방법 ○ 시료의 안정성: 안정함 ○ 공시료: 시료 세트당 2~10개의 현장 공시료 ○ 벌크시료: 퇴적분진 등 (방해물질 확인) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 분석기술: 적외선분광법(Infrared Spectrophotometry) ○ 분석대상물질: 결정형 이산화규소 ○ 회화: 회화(전기로 또는 RF플라즈마) ○ 검량선: 10-200 μg/시료 ○ 범위: 10-160 μg/시료 ○ 정밀도: 0.15 이하(30 μg/시료, 석탄분진) ○ 검출한계: 5 μg 석영/시료

(1) 시료의 채취

- ① 각 개인시료 채취펌프를 하나의 대표적인 시료채취매체로 보정한다.
- ② 사이클론 종류에 따라 정확한 유량으로 400~1000 L의 공기를 채취하며, 여과지에 채취된 먼지가 총 2 mg을 넘지 않도록 한다.

- 주의: 사이클론을 기울이지 않도록 한다.

(2) 시료 전처리

③ 전기회화(Muffle Furnace Ashing): 여과지를 도가니에 넣고 뚜껑을 느슨하게 덮고 전기로에서 600℃(흑연이 존재할 경우, 800℃) 2시간 동안 회화한다.

- 만약 시료에 방해석이 20% 이상 함유되어 있다면 실리카는 CaSiO₃로 변화되어 손실된다. 따라서 PVC 필터를 진공 여과장치에 올려놓고 시료 필터를 여과장치의 PVC 필터위에 놓고 여과장치 상부 깔대기를 잘 고정시킨다. 9% 염산 10 mL과 이소프로필알콜 5 mL을 가하고 5분 정도 기다린다. 진공을 걸어 산과 알콜을 하부로 용리한 후 증류수로 행군 다음 진공을 제거한다.

- 300 mg 정도의 KBr(0.1 mg까지 무게를 달며, 110℃에서 건조시켜 사용)을 도가니에 가한 후 막자로 완전히 혼합한다. 필요시 막자사발로 옮겨 완전히 혼합한다.

- 13 mm 펠렛대로 옮겨 펠렛을 제조한다. 제조된 펠렛을 0.1 mg까지 무게를 잰다. 제조된 펠렛에 대한 첨가한 KBr의 무게비(펠렛/KBr)를 구한다. 일반적으로 무게비는 0.98 정도이다. 펠렛 제조시 에탄올로 기구를 세척해 가면서 제조한다.

※ KBr을 사용할 때 낮은 상대습도 환경은 시료를 다룸에 있어 용이하다.

(3) 분석

【검량선 작성 및 정도관리】

④ 시료농도(10-200 µg/시료 정도)가 포함될 수 있는 적절한 범위에서 표준 시료로 검량선을 작성한다.

- 표준물질을 정확히 무게를 달아 KBr로 혼합한다.

- 시료 전처리 방법에 따라 펠렛을 제조한다.

- 800 cm⁻¹의 파장에서 흡광도를 측정한다.

- ⑤ 전처리 과정에서 시료의 오염과 손실에 대한 확인을 위해 공시료와 기지량의 첨가시료를 시료와동일한 방법으로 처리하여 회수율을 평가한다.

【분석과정】

- ⑥ 적외선분광광도계 제조회사가 권고하는 대로 기기를 작동시키고 조건을 다음과 같이 한다.

a. 기기조건

- 분석모드: 흡광도
- scan range: 1000 - 600 cm⁻¹
- scan 횟수: 4회 이상
- 분석파장: 800 cm⁻¹

- b. 시료에 대한 흡광도를 측정한 후 대략 820 - 670 cm⁻¹의 범위에서 바탕선을 적용하여 800 cm⁻¹에서의 최대 흡광도를 측정한다. 각 시료마다 4회 반복 측정하여 평균값을 적용한다.

(4) 계산

a. 실리카 농도

$$(W_q - B_q) \times 10^3 / V$$

C : 실리카 농도 (mg/m³)

W_q : 시료중의 실리카 무게 (mg)

B_q : 공시료 중의 실리카 무게 (mg)

V : 채취 공기량 (L)

b. 실리카 함량

$$W_q \times 100 / W_s$$

Q : 실리카 함량(%)

Wq : 시료중의 실리카 무게 (mg)

Ws : 총 분진 무게 (mg)

2) X-선 회절분석

분석원리는 작업환경중 대상물질을 필터에 채취하여 회화 또는 필터를 용해한 용액을 은필터에 침착시킨 후 X선 회절분석기(XRD)를 이용하여 분석한다.

시료채취 개요	분석 개요
<ul style="list-style-type: none"> ○ 시료채취매체: cyclone + 필터 (5 μm PVC membrane) ○ 유량: Nylon cyclone : 1.7 L/min GS-1 cyclone : 2.0 L/min HD cyclone : 2.2 L/min aluminum cyclone : 2.5 L/m ○ 공기량-최소: 400 L -최대: 1000 L ○ 운반: 일반적 방법 ○ 시료의 안정성: 안정함 ○ 공시료: 시료 세트당 2~10개의 현장 공시료 ○ 벌크시료: 퇴적분진 등 (방해물질 확인) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 분석기술: X선회절분석법 (X-Ray Diffraction) ○ 분석대상물질: 결정형 이산화규소 ○ 재침착: 0.45 μm 은필터에 재침착 ○ 회화: 회화(전기로 또는 RF플라즈마) 또는 테트라하이드로퓨란(THF) 용해 ○ 기기조건: Cu X선 튜브, 단색화장치 또는 니켈필터, 회전시료대 ○ 보정: NIST SRM 1878a 석영, 1879a 크리스토포바라이트, USGS 210-75-0043 트리디마이트 /2-propanol 부유액 ○ 범위: 0.02~2.0 mg SiO₂/시료 ○ 검출한계: 0.005 mg SiO₂/시료 ○ 정밀도: 0.08 (0.05 ~ 0.2 mg SiO₂/시료)

시약	기구
<ul style="list-style-type: none"> ○ 실리카 표준물질 - 석영(SRMs 1878a, 2950, 2951, 2958) - 크리스토포바라이트(SRMs 1879a, 2960, 2957) - 트리디마이트(210-75-0043) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시료채취매체: PVC 필터(공극 5 μm, 직경 37 mm), 카세트 홀더 (THF 사용시 필터가 완전히 용해되는지 확인.Gelman VM-1 필터 등은 재가 많이 발생하고 백그라운드 높아져서 부적절함) ○ 사이클론: 10-mm nylon

<ul style="list-style-type: none"> ○ 이소프로필알코올(IPA, 특급) ○ 테트라하이드로퓨란(THF, 특급, 필터용해시) ○ 파를로디온 용액(1.5~2%) ○ 25% 염산(방해석이 존재할 경우) ○ 건조제 ○ 폴 또는 테이프 	<p>Higgins-Dewell, Aluminum 또는 GS-1, 3</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 지역시료채취펌프: PVC 필터(공극 5 μm, 직경 37 mm), 카세트 홀더 ○ 개인시료채취펌프(유연한 튜브관 연결됨), 유량 1~3 L/min ○ 은필터(직경 25 mm, 공극 0.45 μm) ○ 회전시료대, 구리타켓, 니켈필터 또는 단색화장치 장착된 X선회절 분석기(XRD) ○ 강옥, 운모 등의 안정한 참고물질 ○ 저온RF회화로(LTA) 또는 고온전기로, 초음파욕조(≥ 150 W) ○ 25 mm 진공여과장치 ○ 전자저울(1 μg), 가열자석교반기, 피펫, 플라스크, 내열도가니, 원심분리튜브(50 mL), 건조기, 데시케이터, 폴리에틸렌(PE) 세척병 ○ 전열기 ○ 테프론 시트(두께: 0.3 ~ 1 mm)
--	---

(1) 시료 채취

1. 각 개인시료 채취펌프를 하나의 대표적인 시료채취매체로 보정한다.
2. 사이클론 종류에 따라 정확한 유량으로 400~1000 L의 공기를 채취하며, 여과지에 채취된 먼지가총 2 mg을 넘지 않도록 한다.
 - 주의: 사이클론을 기울이지 않도록 한다.
3. 분진 성분에 대한 정보가 없다면 지역시료 또는 퇴적분진을 채취한다

(2) 시료 전처리

4. 다음 방법에 따라 방해물질 확인 또는 정성분석이 되어야 한다.
 - 4.1 방해물질 확인: 지역시료 또는 퇴적분진을 필터에 침착시키거나, XRD 홀더에 직접 채운다.

4.2 정성분석: 시료를 분쇄하여 공기중 분진입자 크기와 최대한 유사하도록 전처리한다.

- 벌크시료에 방해물질이 있으면 석영의 확인과 정량분석이 어려울 수 있기 때문에, 방해물질을 제거하고 석영의 손실을 줄이기 위해 고온의 인산으로 전처리 할 필요가 있다.

5. 다음의 전처리 방법 중 한가지 방법에 따라 실시한다.

5.1 저온회화(Low Temperature Ashing): 50 mL 비이커에 여과지를 넣고 기체조사의 방법에 따라 회화한다. 회화가 끝난 후에는 비이커에 조심스럽게 IPA 15 mL을 넣는다.

5.2 전기로회화(Muffle Furnace Ashing): 여과지를 도가니에 넣고 뚜껑을 느슨하게 덮고 전기로에서 600°C(흑연이 존재할 경우, 800°C) 2시간 동안 회화한다. 회화가 끝난 후 IPA 수 mL을 도가니에넣은 후 50 mL 비이커에 옮겨 담는다. 도가니를 몇 번 행구어 비어커에 담는다. 최종 약 15 mL이되도록 비이커에 IPA를 채운다.

- 만약 시료에 방해석이 20% 이상 함유되어 있다면 실리카는 CaSiO_3 로 변화되어 손실된다. 따라서 진공여과장치에서 25% 염산 10 mL, IPA 5 mL에 5분간 방치하여 방해석을 제거한다.

5.3 필터용해: 필터를 접어 50 mL 원심분리관에 넣고, THF 10 mL을 넣고 최소 5분간 방치한다.

알루미늄 호일로 시험관을 덮어 오염을 방지하면서 THF가 넘치지 않도록 하며 손으로 부드럽게 흔든다(진탕기 사용가능). 시험관을 초음파욕조에서 10분 이상 처리하여 필터가 완전히 용해되도록 한다. THF는 IPA, 시험관은 비이커로 대체되며 다음의 절차를 진행한다.

6. 비이커에 시계접시를 덮고 초음파욕조에서 3분이상 처리한다. 응집되어 있는 입자가 모두 분해되는지 관찰한다. IPA로 시계접시를 행구어 비이커에 모두 담는다.

7. 진공여과장치에 필터를 올리고 깔대기를 설치한다. IPA 2~3 mL을 깔대기에 붓고 비이커의 시료용액을 붓고 비이커를 몇 번 행구어 총 20 mL이 되도록 깔대기에 붓는다. 은필터 테두리의 시료패더링(feathering)을 최소화하기 위해 몇 분간 방치한 후 진공여과 한다. 시료가 침착된 후에는 깔대기를 행구지 않는다.

8. 여과지가 건조된 후 진공을 중단한다. 슬라이드 글라스에 파를로디온 용액 2방울을 떨어뜨린 후 그 위에 핀셋으로 여과지를 올린다. 낮은 온도의 전열기에서 필터를 완전히 건조시킨다.

(3) 분석

【검량선 작성 및 정도관리】

9. 표준시료를 6수준 이상 준비한다.

※검량선 작성용 제품을 구매해서 사용하여도 좋다.

- NIST SRM 2950(α -quartz), 2960(cristobalite)

9.1 IPA 1 L가 담겨있는 마개있는 유리병에 0.01 mg까지 정확히 칭량한 표준물질을 10 mg 또는 50 mg을 넣는다.

9.2 유리병을 초음파욕조에서 20분 이상 처리한 후 즉시 가열자석교반기로 옮긴다. 용액을 분주하기 전에는 실온으로 이동한다.

9.3 진공여과장치에 은필터를 장착하고 IPA 2~3 mL을 먼저 넣은 후 유리병(시료)의 중간쯤에서 시료를 채취하여 넣는다.

9.4 몇 분간 방치한 후 빠르게 여과하여 은필터에 침착시킨다. 침착된 이후에는 깔대기 내면을 행구지 않도록 한다. 여과지가 건조되면 진공을 중단하고 슬라이드 글라스에 파를로디온 용액 2방울을 떨어뜨린 후 그 위에 여과지를 올린다. 낮은 온도의 전열기에서 필터를 완전히 건조시킨 후 분석한다.

다. 표준시료를 3쌍씩 제조한다(예. 10, 20, 50, 100, 250, 500 μ g).

9.5 표준시료와 함께 시료, 공시료도 분석한다. 200 μ g 이상의 표준시료는 흡수보정을 한다.

9.6 각각의 표준물질 양에 대한 회절강도로 검량선을 작성한다.

※ 40 μ g 이상에서 10% 초과하는 나쁜 재현성을 보이면 표준시료를 새로 만들어야 한다. 결과치는 직선선상에 있어야 하며 가중최소자승치(weighting $1/\sigma^2$)는 적절하여야 한다.

9.7 검량선에서 기울기 m을 구하고, 절편 b는 가로좌표 원점에서 ± 5 μ g 이내에 있어야 한다.

※ 큰 절편은 바탕선 결정의 오류 또는 다른 상(phase)의 방해물질이 있음을 의미한다.

10. 사전에 보정이 불필요하다고 증명된 경우에는 다음의 흡수보정이 필요 없다. 임의의 6개 필터를 진공여과장치에서 IPA 5~10 mL을 여과하고 건조한 후 분석한다. 6개의 평균 은 강도($I^{\circ}Ag$)를 구한다.

※기기조건의 최적화와 방해물질 보정을 위해 전문지식이 필요하다. 결정구조, 회절패턴, 광물변형(상전이 등)의 이해를 위해 광물학, 결정학에 대한 교육이 선행되어야 한다.

【분석과정】

11. 지역시료(또는 벌크시료) 정성분석을 통해 실리카 다형체(polymorphs)와 방해물질(부록 참조) 유무를 확인한다. 회절피크는 다음과 같다.

물질	피크(2 θ)		
	1차	2차	3차
석영	22.66	20.85	50.16
크리스토파라이트	21.93	36.11	31.46
트리디마이트	21.62	20.50	23.28
은	38.12	44.28	77.47

※공기중 개인시료에서 석영(크리스토파라이트, 트리디마이트는 없을때)의 주요 3개 피크를 느린분석하여 그들의 회절강도 비가 순수한 석영과 비교하였을 때 15% 이내라면 실리카 분석하는데 방해물질이 없다는 적절한 증거이다.

12. 다음 절차에 따라 시료, 표준시료, 공시료를 분석한다.

12.1 각각의 필터 분석 전·후에 참고물질(reference specimen)의 실제강도(net intensity, I_x)를 결정한다. 회절피크는 빠른 분석이 가능하도록 강도가 가장 높은 것을 사용한다.

12.2 시료, 표준시료, 공시료를 분석한다(X선 조사시간이 길수록 검출한계는 낮아진다). 회절피크각각의 면적을 구한다.

12.3 피크 조사시간의 절반의 시간 동안 피크 양쪽의 바탕선을 분석한다. 이 양쪽 면적의 합이 평균 바탕선 강도이며, 각 시료의 바탕선 위치를 결정한다.

12.4 실제강도(net intensity, I_x)를 계산한다(피크 적분값 총 바탕선 적분값).

12.5 시료피크 분석시간의 5% 시간으로 방해물질이 없는 은피크를 분석하여 면적을 구한다.

12.6 시료피크 및 은피크와 동일한 2 θ 범위에서 현장 공시료도 분석하여 오염이 없는지 확인한다.

(4) 계산

13. 채취된 공기중, V(L) 결정형 실리카 농도, C(mg/m³)를 아래의 식에

의하여 계산한다.

$$C = \frac{Ix \cdot f(t) - b}{m \cdot V}, mg/m^3$$

- \hat{I}_x : 시료에서의 회절강도
- b : 검량선에서의 절편(\hat{I}_x vs. ug)
- m : 검량선에서의 기울기
- $f(t)$: $-R \ln T / (1 - T_R) =$ 흡수보정계수(표1)
- R : $\sin(\theta_{Ag}) / \sin(\theta_x)$
- T : $\hat{I}_{Ag} / (\hat{I}_{Ag}^{\circ \text{평균}}) =$ 시료투과도
- \hat{I}_{Ag} : 시료의 은 피크 강도
- \hat{I}_{Ag}° : 공시료에서 은 피크 강도(6개값의평균)

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 서울과학기술대학교 산학협력단

연구책임자 : 이 영 섭 (교 수, 공학박사, 서울과학기술대학교)

연 구 원 : 피 영 규 (조교수, 보건학박사, 대구한의대학교)

심 상 효 (연구원, 보건학박사, 한양대학교병원)

고 원 경 (연구원, 보건학석사, 서울과학기술대학교)

연구보조원 : 권윤아, 이준정, 안재호

연구상대역 : 박 승 현 (연구위원, 직업환경연구실)

〈〈연 구 기 간〉〉

2011. 06. 09 ~ 2011. 10. 31

본 연구는 산업안전보건연구원의 2011년도 위탁연구 용역사업에 의
한 것임

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식 견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원 원장

2011-연구원-1310

산화구소 화합물의 노출기준 개정 연구

발 행 일 : 2011년 10월 31일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 강 성 규

연구책임자 : 서울과학기술대학교 교수 이 영 섭

발 행 처 : **한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원**

주 소 : (403-711)인천 부평구 구산동 34-4

전 화 : (032) 5100-804

F A X : (032) 518-0864

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>
