



주물사업장의 공정별로 발생하는 호흡성분진 중 결정형 유리규산(SiO_2)의 농도 비교

대한산업보건협회 산업보건환경연구원 / 전 영 준·안 선 희
홍 좌 령·전 봉 환·최 호 춘

개요

현재 우리나라에서는 280만 명의 제조업 근로자 중 15만 명 이상이 진폐증을 유발시킬 수 있는 분진에 노출되고 있다(한국산업안전보건연구원 2005).

진폐증이란 진폐 유발 분진을 흡입하여 이 분진이 폐의 가스교환부위에 축적된 후 비가역적인 섬유화 반응을 보이는 것을 말한다.

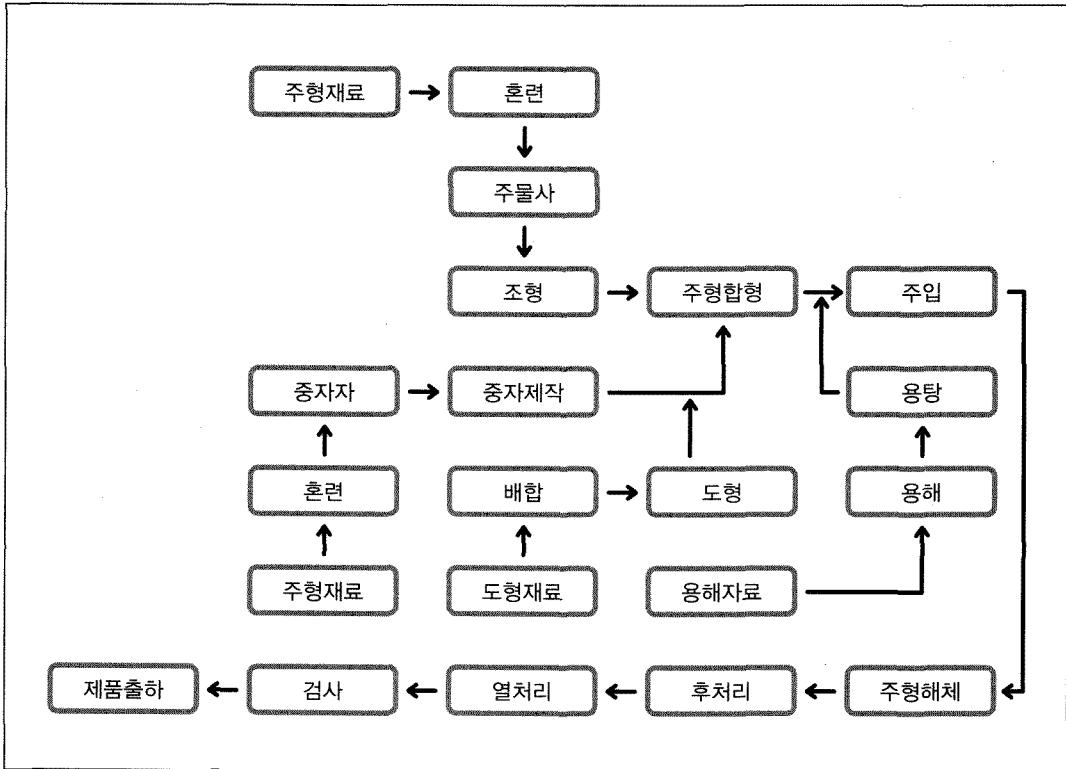
결정형 유리규산은 그 자체로 진폐증을 발생시킬 뿐 아니라, 석탄분진, 활석, 규조토와 같이 혼합되면 분진의 독성을 더욱 증가시킨다. 결정형 유리규산의 발암성에 대해서는 차츰 규명되어가고 있어, 국제 암 연구기관과 NIOSH(National Institute of Occupational Safety and Health)에서는 결정형 유리규산을 Group 1 으로 구분하고 있다(NIOSH, 2010).

우리나라는 광물성 분진을 총분진과 호흡

성분진으로 구분하여 허용기준을 따로 정하고 있다. 유리규산의 경우, 함유량에 따라 총분진을 1,2,3종 분진으로 분류하여 왔으나 2010년 노출기준의 법안이 변경되면서 호흡성분진의 노출기준을 0.05 mg/m^3 으로 정하고 있다(고용노동부, 2010).

보통 유리규산은 비결정형, 결정형과 규산염으로 나눌 수 있고 결정형 구조의 일반 형태로 석영(quartz)과 트리디마이트(Tridymite), 크리스토팔라이트(Christobalite)가 있다(Hogan, 1995).

이러한 독성물질인 유리규산에 가장 많이 노출되고 있는 사업장은 주물사업장이다. 주물사업장에서 발생하는 유해인자는 유리규산, 일산화탄소, 금속성 흡, 휘발성 콜타르 피치, 소음, 진동, 고열, 전리방사선 등이 있는데 그중 작업자의 건강에 가장 문제가 되는 것은 결정형 유리규산을 함유한 분진이다(Burgass, 1995).



〈그림 1〉 주물제조 공정도

주물공정이란 금속을 용해로 속에서 가열하여 액상으로 용해시킨 후 제품의 형상을 본 뜬 주형 속에 흘려보내 식힌 후 원하는 제품을 얻어내는 작업이다(산업안전보건연구원, 2005).

산철이나 고철을 용해시켜 모래입자, 점결제, 수분, 첨가제를 섞은 주물사로 조형한 조형틀에 용탕을 주입시키고 주물사를 제거시키는 탈사공정을 거쳐 제품을 가공하는 후처리까지를 일반적인 공정으로 본다.

〈그림 1〉은 주물공장 내에서의 전반적인 작업 흐름에 대한 공정도를 나타내었다.

주물분진 중 호흡성분진은 규폐증, 폐의 섬유화, 기도협착, 폐암 등을 일으킬 수 있다. 또한 주물사업장과 같이 고온에서 작업을 하면 독성이 강한 크리스토파라이트(Christobalite)나 트리디마이트(Tridymite) 등에 노출될 수 있다(Occupational Safety and Health Administration,

〈표 1〉 조사대상

공정	시료수
용해	38
중자	48
조형	47
탈사	45
기타*	40
Total	218

*기타 : 지게차, 합형/도형, 사상, 사처리

〈표 2〉 표준시료의 농도

	석영(ug)
Blank	0
표준시료 1	50
표준시료 2	100
표준시료 3	200

OSHA, 2010).

현재 주물사업장에 대한 노출평가 뿐만 아니라 주물공장 건강장해와 관련해서도 연구된 것이 많지 않은데 주물사업장 분진의 석영 함유율에 관한 연구(박용선 등, 2003; 정지연 등, 1995; 피영규 등, 1997)와 주물 공정에서 발생하는 호흡성분진의 특성에 관한 연구(안정연 등, 2002) 등이 있다.

매년 실시되고 있는 건강진단에서도 진폐증을 제외하고는 주물공장 근로자들에 대한 건강장해에 대하여 거의 밝혀진 것이 없으며 건강진단의 특성상 밝혀지기도 어렵다.

따라서 호흡성분진으로 인한 근로자의 건강보호를 위해서는 공정별로 발생하는 결정형 유리규산의 농도를 반드시 파악하고 이에 따른 적절한 평가가 필요하다.

본 연구의 목적은 주물사 공정에서 채취한 개인 시료를 분석하여 근로자에게 노출될 수 있는 결정형 유리규산의 공정별 농도를 파악하고, 최종적으로 주물사업장의 호흡성분진에 포함된 결정형 유리규산에 대한 농도를 통하여 정확한 작업환경 평가와 개선에 대한 기초자료를 제공하고자 실시하였다.

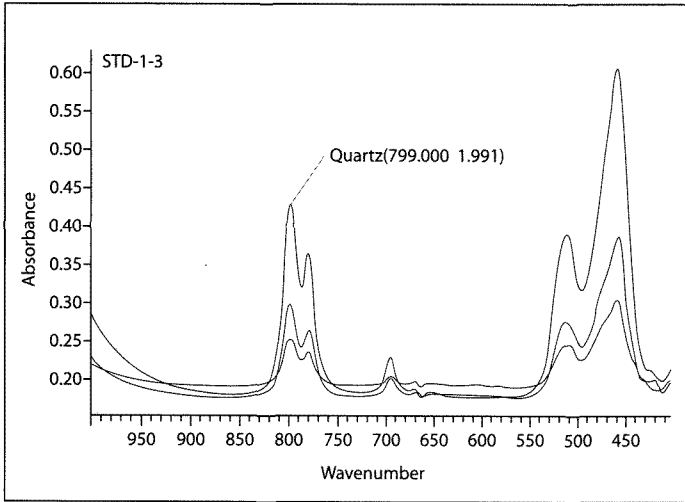
대상 및 방법

1. 대상

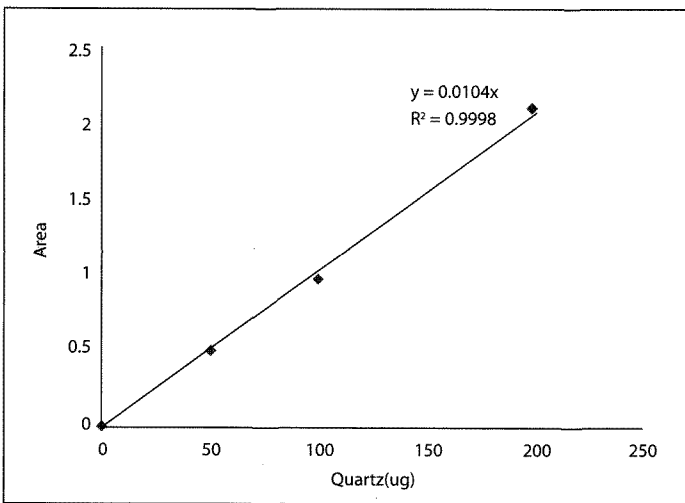
조사대상은 전국에 소재한 호흡성분진에 노출되는 작업을 하는 근로자가 10인 이상인 주물사업장 30곳을 선정하였다.

단, 결정형 유리규산이 많이 발생하는 용해, 중자, 조형, 탈사의 작업공정이 모두 행해지는 주물사업장을 선정하여 각 작업과정별 개인 시료의 측정과 포집된 개인 시료의 결정형 유리규산의 농도를 비교 분석하였다.

각 공정에 대한 시료의 수는 아래 〈표 1〉과 같다.



〈그림 2〉 Quartz Spectrum



〈그림 3〉 Quartz Calibration Curve

호흡성분진의 측정으로는 NIOSH method 7602 방법인 37 mm, 5 um pore 크기의 PVC 필터를 사용하여 근로자의 호흡영역에서 cyclone 포집기를 부착시켜 시료를 채취하였으며, 분당 1.7 리터로 360분간 측정하였다.

2) 유리규산의 분석방법

(1) 표준시료 제조

표준시료의 농도수준은 NBS 1878 Respirable Alpha Quartz Standard를 이용하여 Blank, 50 ug, 100 ug, 200 ug의 수준으로 농도를 제조하였다.

Pellet에 이용된 분말용 브롬화칼륨(KBr)은 막자사발(옥사발) 안에 넣고 20분 동안 곱게 간 후 100-110 °C에서 하룻밤 동안 탈수하여 사용했다.

제조된 표준시료의 농도는 다음 〈표 2〉와 같다.

2. 분석 방법

1) 호흡성분진의 측정

표준시료의 Spectrum과 calibration curve는 아래 〈그림 2〉, 〈그림 3〉과 같다.

(2) 시료 전처리와 분석

호흡성분진과 물질시료의 유리규산 농도를 파악하기 위해 간섭식 적외선 분광기(Fourie Transfirm Infrared Spectroscopy : FT-IR, VARIAN 640-IR)로 분석하였으며 국내에서 사용된 분석방법을 인용하였다(최호춘 등, 1989).

적외선 분광기용 KBr은 습기를 제거하기 위해 100-110 °C에서 하룻밤 건조시킨 후 사용하였고, 시료의 전처리는 650 °C의 머플로에서 2시간동안 여과지 및 유기물질을 회화시켰다.

KBr은 200 mg으로 하여 시료에 첨가 막자사발을 사용하여 혼합시켰으며, 13 mm die 펠렛(pellet)을 만들었고, 이 펠렛을 FT-IR을 이용하여 1,000 cm^{-1} - 400 cm^{-1} 까지 주사하여 투광도의 스펙트럼을 얻은 후 석영(Quartz)은 799 cm^{-1} 에서 크리스토팔라이트(Christobalite)는 622 cm^{-1} , 트리디마이트(Tridymite)는 568 cm^{-1} 에서 흡수도를 측정하였다.

3. 통계처리

자료의 분석은 SPSS(PASW Statistics 18) 통계분석 프로그램을 활용하였다.

석영의 농도는 분포검정 결과 대수정규분

포를 합에 따라 기하평균과 기하표준편차로 나타내었으며, 주물사업장의 공정과 결정형 유리규산농도와의 관계는 일원배치분산분석(ANOVA test)을 실시하였다.

결과 및 고찰

분진에 의한 장애는 작업환경 중 분진의 입경 분포에 따라 크게 영향을 받는다는 것은 널리 알려진 사실이다.

진폐증을 일으킬 수 있는 분진은 인체의 폐포 조직에 도달 할 수 있는 크기의 분진이어야 하는데 이러한 입경의 분진을 호흡성 분진이라한다(박용선 등, 2003).

일반적으로 호흡성 분진은 입경이 10 μm 이하인 것을 말하며 ACGIH에서는 기하평균입경이 4.0 μm 인 분진을 호흡성 분진이라고 정의하고 있다(ACGIH, 2010). 즉, 호흡성 분진 측정 시 ACGIH 및 OSHA에서 권고하는 10 mm nylon cyclone을 사용해야 하는데 이는 사람의 폐와 유사하게 작용되도록 고안되어 있어 이 분별기를 통과한 분진이 실제로 폐포에 도달하는 분진이라고 할 수 있기 때문이다(박용선 등, 2003).

이러한 호흡성 분진에 포함된 유리규산은 자연 상태에서 대부분 석영으로 존재하기 때문에 산업보건 분야에서는 주로 석영에 관한 농도로 평가되고 있으며(최호춘 등,

〈표 3〉 유리규산의 검출건수

공정	시료수	검출건수		
		석영	크리스토팔라이트	트리디마이트
용해	38	38	0	0
중자	48	48	0	0
조형	47	47	0	0
탈사	45	45	0	0
기타	40	40	0	0
Total	218	218	0	0

〈표 4〉 공정별 기하평균과 기하표준편차

공정	시료수	석영 농도 (ug/m ³)		
		기하평균	기하표준편차	범위
용해	47	11.45	0.42	1.90-42.00
중자	45	9.86	0.47	2.90-41.90
조형	48	13.60	0.46	1.70-41.90
탈사	38	13.81	0.41	1.40-84.00
기타	40	4.60	0.43	0.60-22.40
합계	218	10.66	0.44	0.60-84.00

1989) 직업적 노출로서 유리규산의 정량에 대한 평가는 FT-IR과 XRD 방법이 가장 적절한데 본 연구에서는 FT-IR법을 사용하였다.

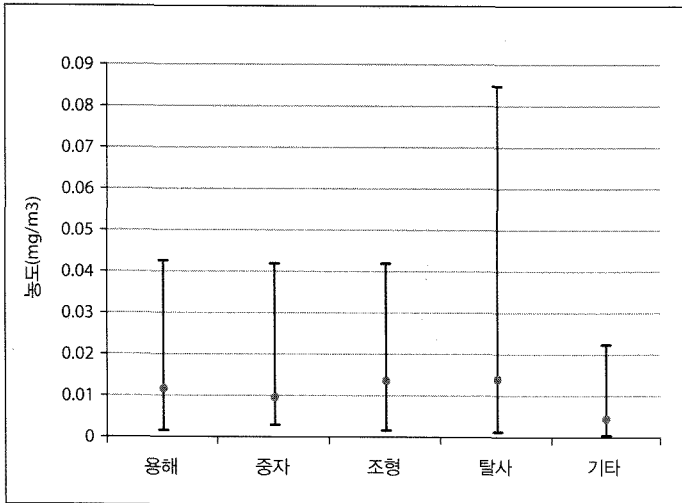
본 연구에 사용된 FT-IR에서는 석영(Quartz)을 검출할 수 있는 특징피크인 799 cm⁻¹, 크리스토팔라이트(Christoba-lite)는 622 cm⁻¹, 트리디마이트(Tridy-mite)는 568 cm⁻¹을 선택하여 정량하였다.

주물사 사업장 30곳 218건에 대한 시료의 분석 결과 결정형 유리규산(SiO₂) 중 석영

만이 검출되었고 트리디마이트나 크리스토팔라이트는 검출되지 않았다(표 3).

결정형 유리규산은 800-1,000 °C에서 가열되면 트리디마이트로 변성되며 1,100-1,400 °C에서는 크리스토팔라이트로 변성될 수 있음(Jone, 1983)을 감안해 볼 때 주로 고온에서 이루어지는 주물사업장의 상황이 있음에도 불구하고 크리스토팔라이트와 트리디마이트는 검출되지 않았다.

앞서 주물사업장의 호흡성분진에 대한 연구에서도 결정형 유리규산 중 석영만이 검출



〈그림 4〉 공정별 Geometric Mean

되었고 크리스토팔라이트나 트리디마이트에 대한 연구 결과는 언급되지 않았다(박용선 등, 2003; 피영규 등, 1997).

본 연구결과의 해석 시 시료수가 218개로 한정된 점과 분석이 FT-IR 방법으로 이루어진 점으로 추후 XRD 방법으로 주물사업장에 대한 기중 석영 함유량과 크리스토팔라이트, 트리디마이트의 발생유무를 다시 확인해 볼 필요가 있다.

XRD의 경우 FT-IR에서 검출되지 않는 미량의 크리스토팔라이트나 트리디마이트가 검출되는 경우가 있다(김현욱 등, 1998).

본 연구의 자료 분석 결과, 호흡성분진의 농도를 대수분포하여 공정별로 검출된 석영

의 농도를 분석하고 기하평균과 기하표준편차를 평가하였다. 결과는 〈표 4〉와 같다.

〈표 4〉에서 나타난 결과와 같이 기타 작업을 제외한 주요작업 공정별에 따른 농도간 차이를 보기위해 분산분석을 실시한 결과, 주요 공정간 노출정도의 차이는 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았으나($p>0.05$) 기타 작업을 포함한 모든 공정별로 조사한 결과 통계적으로 유

의한 차이를 보였다($p<0.05$).

이는 기타작업에 포함된 지게차, 합형/도형, 사상, 사처리 등의 작업은 주요 공정에 비해서 주물사를 직접적으로 사용하지 않아 호흡성분진의 비산이 적으며 비교적 개방된 장소에서 작업이 이루어지기 때문에 주요 공정과 기타 공정을 비교했을 때 호흡성분진의 농도차이가 나타난 것으로 보인다.

연구결과를 보면 조형 공정과 탈사 공정의 기하평균이 각각 13.60 ug/m^3 (범위: $1.70\text{--}41.90 \text{ ug/m}^3$), 13.81 mg/m^3 (범위: $1.40\text{--}84.00 \text{ ug/m}^3$)로 가장 높았으며 용해공정 11.45 ug/m^3 (범위: $1.90\text{--}42.00 \text{ ug/m}^3$)과 증자공정 9.86 ug/m^3 (범위: $2.90\text{--}41.90 \text{ ug/m}^3$) 그리고 기타 공정 4.60 ug/m^3 (범위: $0.60\text{--}22.40 \text{ ug/m}^3$) 순

으로 평가 되었다(그림 4).

결론

본 조사는 2010년 1월에서 2011년 7월까지 30개의 주물사업장을 대상으로 조형, 탈사, 중자, 용해, 기타 작업 시 발생하는 결정형 유리규산의 노출 정도를 파악하고, 비교하기 위해 FT-IR 분석을 한 결과로 다음과 같다.

1. 결정형 유리규산을 분석한 결과 석영(Quartz)만이 검출되었고, 크리스토팔라이트(christobalite)와 트리디마이트(tridymite)는 모두 불검출 되었다.

2. FT-IR 방법으로 분석한 공정별 개인 시료의 호흡성분진 중 석영의 기하평균 농도는 탈사 13.81 ug/m³, 조형 13.60 ug/m³, 용해 11.45 ug/m³, 중자 9.86 ug/m³, 기타 4.60 ug/m³ 로 탈사 작업에서 가장 높은 농도를 보였다.

3. 작업 공정별에 따라 주물사업장 석영의 기하평균 농도는 10.66 ug/m³, 농도 범위

는 0.60-84.00 ug/m³으로 조사되었으며, 각 공정 중 탈사공정이 조금 높게 평가되었고 기타 공정은 낮게 평가되어 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05).

4. 기타 공정을 제외한 나머지 주요 공정에서 용해, 조형, 중자, 탈사 작업의 석영 농도는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(p>0.05).

고용노동부에서 제시한 석영의 노출기준은 0.05 mg/m³이다.

30곳의 사업장을 조사한 결과, 탈사 작업장의 한 곳을 제외하고는 모두 노출기준을 초과되지 않았다.

하지만 모든 작업공정이 노출기준과 근접한 수치로 평가 되어 장기간 노출될 경우 석영으로 인한 직업병 유발에 안전하다고 볼 수는 없다.

현재 주물사 공정에서 작업하는 근로자들에 대한 각별한 주의가 필요하다.

또한 호흡성분진에 노출되기 쉬운 작업공간에는 적절한 후드 설치나 보호구 등의 안전장치가 시급한 것으로 보여 진다. ☞

참고 문헌

1. 박용선, 노영만, 김현욱, 한진구, 안연순, 강성규, 김정만. 주물사업장에서 발생하는 호흡성분진의 농도 및 석영 함유량에 관한 연구. 한국산업위생학회지 2003;13(1) :90-97
2. 최호춘, 정호근, 김해정. 호흡성분진 중 유리규산 농도 분석법. 근로복지공사 중앙병원부설 직업병연구소 1989;2-89-2
3. 송세욱, 이광목. 일부 석탄광산의 공정별 호흡성분진 및 유리규산의 폭로농도 1994.
4. 구정완. 유리규산 분진이 주물 작업 근로자들의 환기기능에 미치는 영향. 가톨릭대학교 대학원 보건학 박사 학위논문 1998.
5. 최호춘, 천용희, 김해정, 이정주. 간섭식 적외선 분광기에 의한 태백지역 석탄광의 호흡성분진 중 석영, 운모 및 장석의 정량분석. 대한예방의학회지 1988;21(2) :271-283
6. 피영규, 노영만, 이광목, 김형아, 김용우, 원정일, 김현욱. 주물사업장 주 공정별 발생하는 분진의 석영 함유량 및 크기의 분포 연구, 한국산업위생학회지 1997; (2) :196-208
7. 피영규, 김봉년. 산업환기효율 향상에 관한 연구(주물사업장 고열작업공정을 중심으로), 산업안전보건연구원 연구자료, 2005
8. 안정언, 전기준, 박영옥, 정용원. 주물공장에서 발생하는 PM10 및 호흡성분진의 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회 2002추계학술대회 논문집, 2002
9. 김현욱, 노영만, 피영규, 원정일, 김용우. 제조업체에서 발생하는 호흡성분진 중 XRD와 FT-IR을 이용한 결정형 유리규산 농도의 비교분석 제1부-주물사업장, 한국산업위생학회지 1998 제8권 제1호
10. 고용노동부. 작업환경측정 및 정도관리 규정 (노동부고시 제 2011-25호). 2011.
11. 고용노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준 (고시 제 2010-44호) 2010.
12. Burgass WA. Foundry Operations. In : Recognition of hearth hazards in industry 2nd. 1995
13. Jone RN. Silicosis in Environmental and Occupational Medicine. ed. by W.N.Room, Little Brown and Company, Boston, 1983;197.
14. Occupational Safety and Health Administration, OSHA, 2010
15. National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH) : Method 7602.