

호흡성 분진중 석영분석시 FTIR-직접필터법의 현장적용 가능성 연구

김형준 · 피영규¹⁾ · 노영만²⁾ · 김현욱[‡]

가톨릭대학교 산업보건대학원, 산업안전국 산업보건환경과¹⁾, 가톨릭산업의학센터²⁾

Study on the field-application of FTIR-direct on filter method for the analysis of quartz in respirable dust samples

Hyung-Jun Kim, Young Gyu Phee¹⁾ · Young Man Roh²⁾ · Hyunwook Kim[‡]

Graduate school of Occupational Health, The Catholic University of Korea, Dept. of Industrial Health & Environment,
Industrial Safety & Health Bureau, Ministry of Labor¹⁾, Catholic Industrial Medical Center²⁾

To study if the fourier transform infrared spectrophotometry(FTIR)-direct on filter(DOF) can be utilized for estimating quartz content in airborne respirable dusts from various manufacturing industries, analytical results were compared with those of the traditional KBr transfer (NIOSH 7602) methods. Respirable dust samples were collected using the 10mm Dorr-Oliver nylon cyclone equipped with a 25 mm cassette. 30 area samples were collected from the stone, foundry, concrete and brickmaking factories. Quartz content was estimated using the intensity of the absorption peak of quartz at 799 cm^{-1} by a FTIR.

Respirable dust concentrations ranged from 0.25 to 1.25 mg/m^3 , and were highest at the stone treating factory. Quartz

contents quantified by the transfer method were higher than those of by DOF method for samples from the foundry, brick, and concrete factories. No statistically significant difference of quartz content in samples from the stone factory was found.

The results of the study suggest that, although possible to use the FTIR-DOF method as a suitable substitute for analyzing quartz content, it is necessary to correct the influence of the interfering minerals in order to adopt the FTIR-DOF for routine analytical tool.

Key Words : Quartz, Respirable dust, Manufacturing industry, Direct on filter, Transfer method

I. 서 론

석영은 규산의 가장 풍부한 동형이성체의 한 형태로서, 화강암이나, 퇴적암, 변성암에 포함되어 있으며 모래, 토양에 많이 존재하고 있다. 이러한 석영은 광업, 농업, 건설업과 제조업(주물업, 유리 및 점토제조, 시멘트생산, 도자기 제조 등)을

포함한 다양한 작업환경에서 노출될 수 있다. 규폐증 발생의 원인은 석영 등의 결정형 규산 입자를 흡입함으로써 발생되고, 규폐증이 아니더라도 광물의 흡입은 다른 만성적 호흡기 질환으로 발전될 위험이 크다. 따라서 안전보건과 관련된 여러 연구기관에 의해 직업적 노출기준이 제정되었는데 세계적으로 많이 활용되고

있는 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 노출기준은 석영, 크리스토파라이트, 트리디마이트에 대해 0.5 mg/m^3 으로, 트리폴리는 1.0 mg/m^3 으로 규정하고 있으며(ACGIH, 2001), 우리나라에서는 총분진의 경우 유리규산의 함량에 따라 제1, 2, 3종 분진으로 분류하여 각각 2, 5, 10 mg/m^3 으로, 호흡성 분진은 석영 및 트리폴리는 0.1 mg/m^3 , 크리스토파라이트 및 트리디마이트는 0.05 mg/m^3 으로 설정하여 관리하고 있다(노동부, 1998).

접수일 : 2002년 3월 29일, 채택일 : 2002년 7월 31일

‡ 교신저자 : 김현욱(서울 서초구 반포동 505번지 가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실)

Tel : 02-590-1237, Fax: 02-532-3820, E-mail : hwkim@catholic.ac.kr

호흡성 분진내 석영에 대한 포집 및 분석은 NIOSH의 공정시험방법이 많이 활용되고 있으며 측정방법으로는 기중분진 중 호흡성부분을 37mm 필터를 이용하여 10mm 나일론 사이클론으로 포집하도록 되어 있다. 그 후 포집된 필터는 엑스선 회절(X-ray diffraction, XRD) 분석 (NIOSH 7500) 또는 적외선분광광도(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 분석 (NIOSH 7602, 이하 회화법)을 위해 적당한 매체(은막필터 또는 KBr 등)로 이동시킨 후 분석하도록 되어있다(NIOSH, 1994a; 1994b). 이중 FTIR 방법은 초기 설치비가 저렴하고 XRD에 비해 민감도가 높아 우리나라를 비롯한 여러 국가에서 석영분석을 위해 사용하고 있다(Madson 등, 1995). 우리나라에서 석영분석에 관한 연구는 FTIR 방법을 이용한 경우가 대부분으로, 초기에는 주로 탄광을 대상으로 하였으며(최호춘 등, 1987; 1988; 송세욱과 이광목, 1994), 그 이후 90년대에 들어서야 제조업을 대상으로 XRD와 병행한 연구들이 시작되어 FTIR 방법과 석영의 분석결과에 차이가 없다는 내용을 보고하였다(정회경 등, 1994; 김현욱 등, 1998; 1999). 그러나 이 방법은 공인된 분석방법으로서의 의미가 있지만 전처리가 복잡하고 시간 소모적인 면이 있다. 한편, 외국에서는 시료의 손실이 없으며 석영의 정량분석을 빠르게 할 수 있는 FTIR-직접필터법을 실제 사업장에 적용하는 연구를 하고 있지만(Pickard, 1981; Toffolo와 Lockington, 1985), 국내에서는 현장 시료를 대상으로 직접필터법에 의한 분석은 이루어진 바 없으며, 그나마 FTIR-직접필터법에 대한 연구는 실험실 연구에 국한되고 있는 실정이다(고원경, 2000).

따라서, 본 연구의 목적은 광물성분진이 발생하는 일부 제조업체에서 포집한 호흡성 분진중 석영에 대해 전처리 과정이 필요 없이 빠르게 분석 가능한 FTIR-직접필터법과 공인된 회화법의 결과를 비교분석하여 향후 현장시료 분석시 FTIR-직접필터법 활용에 기초자료를 제공하고 자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상

경인지역의 제조업체중 결정형 규산이 포함된 광물성 분진이 발생하는 벽돌, 콘크리트제품, 주물, 석재가공 사업장 4곳을 선정하였고, 각 사업장에서 6~9개의 지역시료를 채취하였으며, 총 시료수는 30개이었다.

2. 측정 및 분석

호흡성분진은 DM 800 필터(Gelman DM-800, 직경 25mm, 공극 0.8 μ m)를 2-pieces 25mm 카세트 홀더에 담아 10mm Dorr-Oliver 나일론 사이클론에 장착시켜 포집하였다. 사이클론에 개인시료 채취기(SKC, Model 224-52, USA)를 연결하였고, 그 유속은 비누거품 보정계(Gilian, Model 713, USA)를 이용하여 1.7 리터/분으로 보정하였다. 분진포집 후 유량을 재측정하여 평균 유량값을 최종 유량 계산에 사용하였다. 시료는 지역시료 포집방법을 활용하였고, 분진이 발생하는 공정에서 근무하는 근로자의 작업 위치로부터 최대한 가까운 지점을 선정하여 포집시간 300~362분 동안 채취하였다. 필터는 포집 전후 24시간 동안 건조시켜 습기의 영향을 제거하고 난 후, 정전기 제거기(SIMCO, Model 4000464, USA)를 이용하여 필터의 정전기를 제거한 후 0.001mg의 감도를 가진 천평기(Sartorius, Model 4503MP6, Germany)로 3회 반복하여 무게를 칭량한 후 평균값을 사용하였다.

직접필터법은 석영이 포집된 필터를 항습기에서 24시간 보관한 후 필터홀더(직경 25mm)에 고정시켜 FTIR(Bio Rad, Model FTS-155, USA)에 장착하였다. 분석시에는 필터를 120° 각도로 3회 회전시켜 흡광도를 측정하였는데 이것은 포집된 호흡성 분진이 필터 표면에 고르게 분포되지 않을 수 있는 점을 감안하여 그 영향을 배제하기 위함이었다. 석영 함량의 정량은 799, 779, 695 cm^{-1} 흡수대를 이용하였으며 조사 파장(scanning wavelength)의 범위는

1200-400 cm^{-1} 이었다.

직접필터법으로 분석한 후, 사용한 필터를 항습기에 24시간 보관한 후, 다시 칭량하고 이 필터를 회화법(NIOSH의 공정시험법 7602)에 따라 전처리하였다. 전처리된 시료는 13mm 펠렛으로 제작하였으며 이것을 FTIR에 장착시켜 분석하였다. 검량선 작성에는 석영의 표준물질(NBS, SRMs # 2679a, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, D.C. 20234)을 사용하였고 이 검량선으로 분진중의 석영을 정량하였다.

3. 자료분석

공기중 호흡성 분진과 석영 농도의 정규분포 여부를 확인하기 위하여 Shapiro-Wilk test를 하였으며, 각 사업장별 호흡성 분진 및 석영농도의 차이는 일반선형모형(General Linear Model)을 이용하여 Duncan의 다중비교를 실시하였다. 또한 직접필터법과 회화법을 이용한 석영농도의 비교는 paired t-test를 수행하였고 모든 통계검정은 $\alpha=0.05$ 수준에서 하였다.

III. 결 과

1. 호흡성 분진의 농도

각 사업장별 호흡성 분진의 농도는 대수정규분포($p>0.05$)를 보였으며, 이에 모든 농도는 기하평균(Geometric mean, GM)과 기하표준편차(Geometric standard deviation, GSD)로 표시하였다. 사업장별 호흡성 분진 농도의 기하평균은 벽돌 사업장의 경우 0.77 mg/m^3 이었으며, 콘크리트 사업장 0.25 mg/m^3 , 주물 사업장 0.37 mg/m^3 , 석재 사업장 1.25 mg/m^3 이었다. 각 사업장별 호흡성 분진농도를 비교했을 때 Duncan의 다중비교결과 각 사업장간의 호흡성분진농도가 통계적으로 유의한 차이를 보였으나, 석재사업장이 가장 높은 농도를 보였다($p<0.05$) (Table 1).

Table 1. Comparison of respirable dust concentrations in area filter samples

Industry	N	GM [†] (mg/m ³)	GSD [‡]	Range (mg/m ³)
Block	9	0.77 ^c	1.20	0.65-1.00
Concrete	6	0.25 ^a	1.08	0.22-0.27
Foundry	9	0.37 ^b	1.25	0.29-0.55
Stone	6	1.25 ^p	1.30	0.89-1.74

a, b, c, d : The same superscripts in a row were not significantly different at p<0.05 by Duncan's multiple range test

† GM : Geometric mean, ‡ GSD : Geometric standard deviation

2. 석영의 농도

Table 2는 지역시료를 직접필터법과 회화법으로 분석한 석영농도를 나타낸 것으로 직접필터법의 경우 사업장별 평균범위는 23.17-313.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 벽돌, 콘크리트, 주물사업장에 비해 석재사업장이 통계적으로 유의하게 높은 석영농도를 보였다 (p<0.05).

또한 동일시료를 회화법으로 분석한 결과 사업장별 석영농도의 평균범위는 7.52-296.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 주물, 석재사업장에 비해 벽돌, 콘크리트사업장이 낮은 석영농도를 보였고 직접필터법의 결과와 마찬가지로 석재사업장은 벽돌, 콘크리트, 주물사업장에 비해서 통계적으로 유의하게 높은 석영농도를 보였다(p<0.05). 전체적으로 직접필터법을 이용한 결과에 비해

회화법을 이용한 결과가 낮은 경향을 보였다.

Table 3은 각 사업장별로 포집된 호흡성 분진중 석영 함유량을 나타낸 것으로 직접필터법에 의한 평균 석영 함유량의 범위는 벽돌 사업장 3.84 %에서 석재사업장 25.12 %이었으며 각 사업장간의 석영 함유량은 통계적으로 유의하게 다른 결과를 보였다(p<0.05). 회화법은 벽돌 사업장 1.84 %에서 석재사업장 23.41 %의 석영함유량을 보이며 콘크리트와 주물사업장에 비해 벽돌사업장은 낮은 석영함유량을, 석재사업장은 통계적으로 유의하게 높은 석영함유량을 보였다(p<0.05).

Fig 1은 각 사업장에서 채취한 분진 시료중 석영농도에 대한 직접필터법과 회화법간의 상관관계를 비교한 것으로, 정량에 사용된 흡수대는 799 cm^{-1} 이었다. 석영

의 농도가 낮은 벽돌, 콘크리트, 주물 사업장에 대한 두 분석방법은 낮은 상관성 ($R^2=0.318$)을 나타냈으며, 상대적으로 석영농도가 높은 석재사업장의 경우에는 R^2 값이 0.976으로서 두 분석방법이 거의 유사한 것으로 나타났다.

직접필터법과 회화법의 관계를 측정하기 위하여 각 사업장에서 얻은 자료를 이용하여 선형회귀분석을 실시하였다(Table 4). 선형회귀분석시 독립변수의 경우 확률오차가 반영되지만 종속변수에 대한 확률오차는 반영되지 않기 때문에 직접필터법과 회화법의 각각의 석영농도를 독립변수로 지정하여 두 번의 회귀분석을 실시하였다. 기울기가 1인 경우가 완벽한 일치를 나타내지만 회화법의 농도를 독립변수로 취했을 때 기울기는 0.322로 X축으로 치우쳐 짐을 보였다.

Table 2. Comparison of quartz content in area filter samples analyzed by DOF and Transfer methods

Industry	N	DOF method			N	Transfer method		
		GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD	Range ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		GM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	GSD	Range ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Block	9	29.43 ^a	1.38	20.73 - 46.27	9	10.04 ^{a,b}	1.34	6.12 - 14.79
Concrete	6	25.61 ^a	1.18	19.99 - 31.27	6	7.52 ^a	1.14	6.49 - 8.83
Foundry	9	23.17 ^a	1.54	9.39 - 39.66	9	12.48 ^b	1.67	5.41 - 25.24
Stone	6	313.56 ^b	1.31	211.34 - 445.53	6	296.84 ^c	1.42	165.80 - 447.17

a, b, c : The same superscripts in a row were not significantly different at p<0.05 by Duncan's multiple range test

Table 3. The comparison of weight percent of quartz in area filter samples analyzed by DOF and Transfer methods

Industry	N	DOF method		N	Transfer method	
		Mean(%)	SD		Mean(%)	SD
Block	9	3.84 ^a	0.63	9	1.84 ^a	0.22
Concrete	6	10.27 ^c	1.34	6	4.68 ^b	1.23
Foundry	9	7.01 ^b	3.47	9	4.48 ^b	2.34
Stone	6	25.12 ^d	1.00	6	23.41 ^c	1.97

a, b, c, d : The same superscripts in a row were not significantly different at p<0.05 by Duncan's multiple range test

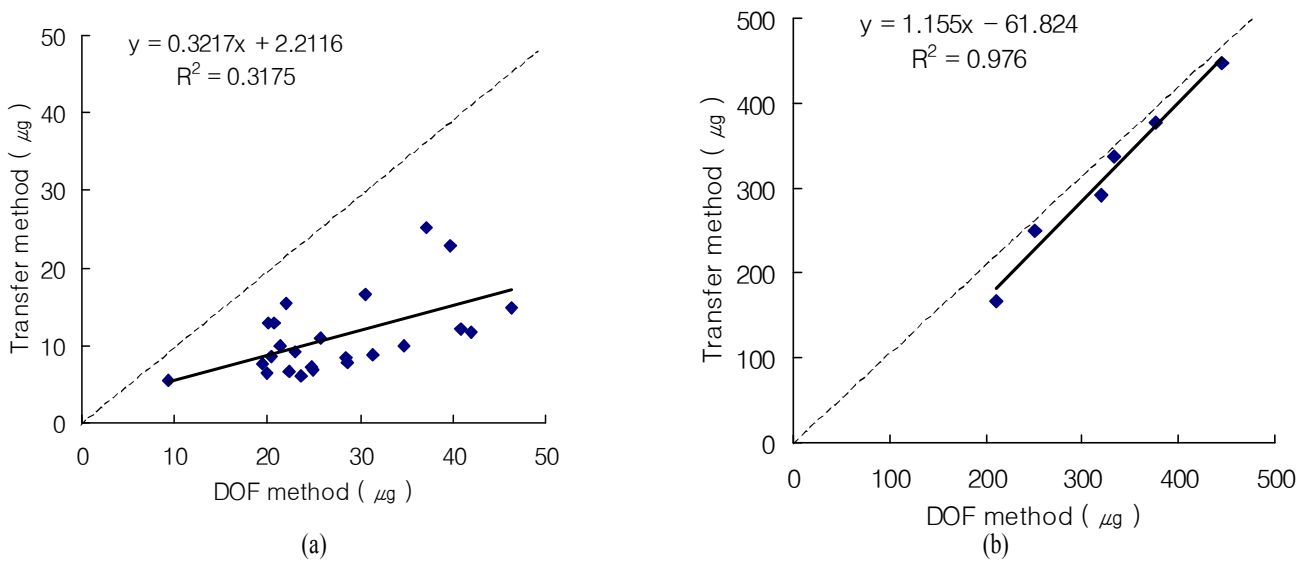


Fig. 1. Comparison of quartz content analyzed by DOF and Transfer methods.
(a) samples from block, concrete, and foundry (b) samples from stone industry

회귀직선상 직접필터법을 독립변수로 하고, 회화법을 종속변수로 했을 때, 또한 그 독립 및 종속변수를 반대로 취했을 때 일치도를 나타내는 기울기 1과 y절편 0에 대해 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 two tailed t-test를 수행하였다(Table 5). 그 결과 기울기 1, y절편 0과 추정된 지역시료의 기울기에 대해서 각각 직접필터법과 회화법을 독립변수로 취했을 때 블록, 콘크리트, 주물사업장에서는 통계적으로 유의한 차이를 보여 두 분석방법간에 일치도가 낮은

경향을 보였고, 석재사업장에서는 통계적으로 유의한 차이가 없어 두 분석방법간에 일치도가 높았다.

IV. 고 찰

우리나라 직업성 질환자 수를 유해인자별로 구분하면 소음, 분진, 특정화학물질, 유기용제, 금속 및 중금속, 기타 순으로, 분진에 대한 과노출이 아직까지도 산업보

건분야에서 직업병 발생에 많은 영향을 주고 있는 것으로 보인다(노동부, 2002).

분진에 의한 건강영향은 분진중 포함된 석영의 양과 관계 있음에도 불구하고 현재 우리나라에서는 법적으로 호흡성 분진 내 석영의 측정이 제대로 이루어지지 않고 있다(노동부, 2001). 본 연구에서는 4개 분진발생 제조업체를 대상으로 호흡성 분진 및 석영에 대한 노출정도를 파악하였으며, 분석방법으로서 FTIR-직접필터법과 회화법을 비교하여 직접필터법의 사업

Table 4. The results of liner regression analysis on quartz content in area filter samples analyzed by DOF and Transfer methods

Industry	Regression equation	Slope ^b	S.E of slope	Intercept ^a	S.E of intercept
Block, concrete, foundry	Y on X	0.322	0.101	2.212	2.890
	X on Y	0.987	0.309	16.516	3.728
Stone	Y on X	1.155	0.091	-61.823	30.089
	X on Y	0.845	0.066	59.998	21.479

X : quartz contents by DOF method, Y : quartz contents by Transfer method, S.E : standard error of estimate, $Y = bX + a$

Table 5. Two-tailed t-test applied regression data from table 4

Industry	Regression equation	t-value(slope)	t-value(intercept)
Block, concrete, foundry	Y on X	6.713*	0.765
	X on Y	0.042	4.430*
Stone	Y on X	1.703	2.055
	X on Y	2.348	2.793

* significant at $\alpha = 0.05$

장 적용가능성 여부에 대해 알아보았다. 사업장별 지역시료의 호흡성 분진 평균농도는 석재사업장의 경우가 $1.25\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며 그 다음순으로 벽돌, 주물, 콘크리트 사업장이었다. 이는 핀란드의 석재사업장의 호흡성 분진 농도 ($0.12\text{--}1.47\text{mg}/\text{m}^3$)와는 유사하였으나(Koskela 등, 1987), 미국의 Kullman 등(1995)의 연구결과 ($0.04\text{--}0.06\text{mg}/\text{m}^3$)에 비해서는 높게 나왔는데 그 이유로는 화강암을 옥내 또는 옥외에서 연마기로 가공작업을 하였고 습식작업이 아닌 건식작업이 원인인 것으로 생각된다. 주물 사업장의 경우 호흡성 분진의 평균농도는 $0.37\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 김현욱 등(1998)의 연구결과($0.58\text{mg}/\text{m}^3$)와 유사한 농도를 보였으며, $0.90\text{mg}/\text{m}^3$ 을 보인 미국 주물분진의 농도에 비해서는 낮은 결과를 보였다(Oudiz 등, 1983).

호흡성 분진중 평균 석영 함유량은 회화법의 경우 석재사업장이 23.41 %로 가장 높았는데 이는 Saiyed 등(1995)의 4.2-27.7 %의 석영 함유량을 보인다는 결과와 유사하였다. 일반적으로 석재사업장의 경우 3-35 % 정도의 석영 함유량을 보이며 원재료가 화강암인 경우 석영 함유량이 더 높다(Guenel 등, 1989).

FTIR은 광물성 물질의 정성 및 정량분석에 사용이 가능하며, 특히 미량인 경우도 정량이 가능하다는 장점이 있다. 또한 그 분석 결과는 XRD와 비교시 유사한 결과를 보인다는 것은 이미 입증된 바 있다(Pickard, 1981; 김현욱 등, 1998; 1999). 그러나 FTIR을 이용한 석영분석 방법중 직접필터법과 회화법의 비교는 이루어진 바 없어 이 두 방법의 결과를 분석하여 FTIR-직접필터법의 현장응용가능성을 파악해 보고자 하였다.

광물성 분진이 발생하는 각 사업장에서 채취한 시료중 석영농도에 대한 직접필터법과 회화법 간의 차이를 비교한 결과, 석영농도($5.4\text{--}46.3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 낮은 벽돌, 콘크리트, 주물 사업장에 대한 두 분석방법은 일치도가 떨어지는 것으로 나타났으며, 전반적으로 동일시료에 대해서 FTIR-직접필터법이 회화법보다 높은 결과를 보였다. 이는 직접필터법이 회화법에 비해서

결과가 과대평가 되었을 수 있으며, 역으로 회화법이 저평가 되었다는 것을 의미할 수도 있다. 이러한 영향을 줄 수 있는 인자로는 방해물질, 습도, 시료의 손실, 포집면의 비균일성, 입자의 크기 등이 있지만 구체적인 영향인자를 파악할 수는 없었다. 다만, 석영을 정량함에 있어 가장 영향을 주는 인자로는 방해물질이 널리 알려져 있으며, 실제 주물 사업장에서는 고령토, 백운모, 산화철, 크리스토파라이트가 방해물질로 영향을 줄 수 있다. 그러나 고령토와 백운모의 발생은 극미량인 것으로 알려져 있으며, 석영의 정량분석에는 보정이 필요하지 않지만(Toffolo와 Lockington, 1981), 종종 산화철이 존재함으로써 적외선검출기에 도달하는 방사선을 방해하여 석영결과를 낮출 수도 있다는 보고도 있다(Foster와 Walker, 1981). 이러한 방해물질들은 직접필터법 뿐만 아니라 회화법에서도 영향을 미치게 되나 직접필터법은 회화하는 과정이 생략됨으로서 조금 더 영향을 받을 수 있을 것으로 추측되지만, 그 정도는 확인할 수 없었다. 벽돌제조 시료중에는 고령토가 많이 발견되며(Pickard 등, 1985), 콘크리트 사업장은 대부분 모래와 시멘트가 원료로 이용된다. 고령토 등의 광물성분진은 정도의 차이는 있지만 회화법에서도 영향을 받는 것으로 알려져 있어 고령토 이외의 방해물질이나 또는 다른 원인에 의해 직접필터법이 높게 평가된 것으로 생각된다.

반면, 석영농도($165.8\text{--}447.2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 높은 석재사업장의 경우에는 두 방법이 거의 유사하여 두 분석방법간에 높은 일치도를 보였다. 석재사업장에서 사용하는 원재료는 일반적으로 석회암, 화강암, 화성암의 3개 암석형태로 나뉘게 되고, 석회석 가공과정에서는 방해석, 백운석 등 탄산염계 광물이 우선적으로 발생되며, 석영을 포함한 규산염광물도 검출된다. 화강암 및 화성암에서 발생하는 시료는 대부분 규산염광물이 발견된다(Kullman 등, 1995). 이렇듯 석재사업장에도 여러 방해물질이 존재할 수 있지만 주물, 콘크리트, 벽돌 사업장과는 달리 두 방법은 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이는 규산

염 광물이 직접필터법과 회화법에서 동시에 영향을 미치거나 아니면 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 추측할 수 있다.

본 연구의 제한점으로 좀더 정확한 두 방법의 비교 측정을 위해서는 조사대상 사업장을 확대하여 광물성분진이 발생하는 다양한 업종을 대상으로 하는 연구가 필요하고, 시료내에 방해물질의 존재를 확인하여 그 영향을 보정한 후 결과를 비교하여 보는 과정이 필요할 것으로 보이며, 또한 결과를 XRD 방법과 병행하여 검증해 보는 것도 필요할 것으로 생각된다.

V. 결 론

본 조사는 2001년 2월에서 4월까지 경인지역의 광물성분진이 발생하는 4개 사업장을 대상으로 지역시료로서 호흡성 분진의 기중농도를 파악하고, FTIR을 이용하여 호흡성 분진내 석영의 농도와 함유량을 직접필터법과 회화법으로 각각 분석하여 비교함으로써 직접필터법의 현장적용 가능성을 연구하였다. 그 결과는 다음과 같았다.

1. 사업장별 호흡성 분진 농도는 콘크리트 사업장 $0.25\text{mg}/\text{m}^3$ 에서 석재 사업장 $1.25\text{mg}/\text{m}^3$ 이었으며 석재사업장이 통계적으로 유의하게 높은 농도를 보였다.
2. 사업장별 석영농도는 FTIR-직접필터법 분석시 $23.17\text{--}313.56\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 석재사업장에서 통계적으로 가장 높은 석영농도를 보였으며, 회화법으로 분석하였을 때는 $7.52\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3\text{--}296.84\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 석재사업장에서 가장 높은 농도를 보였다.
3. 사업장별 석영 함유량은 FTIR-직접필터법의 경우 3.84-25.12 %로 석재 사업장이 통계적으로 유의하게 높았으며, 회화법의 경우 1.84-23.41 %로 직접필터법과 마찬가지로 석재사업장이 통계적으로 유의하게 높은 함유량을 보였다.
4. 두 방법간 석영농도의 비교결과 석재사업장에서는 높은 일치도($R^2=0.976$)를 보였으나, 벽돌, 콘크리트, 주물사업장은 낮은 일치도($R^2=0.318$)를 보였다.

이상과 같은 결과로 보아 사업장 시료에 대한 FTIR-직접 필터법은 회화법에 비하여 노동집약적, 경제적, 시간 절약형의 장점은 있으나, 대부분의 사업장 시료에 대하여 회화법을 사용한 결과와 비교해 일치도가 낮으므로 실제 현장시료에 적용하기전에 FTIR-직접 필터법에 영향을 주는 인자를 반드시 규명하여야 하고 이를 보정하는 적절한 방법을 연구하는 것이 추가적으로 필요하다.

REFERENCES

- 고원경, 피영규, 노영만, 김현욱. 푸리에 변환 적외선분광법을 이용한 결정형 유리규산 분석시 직접필터법과 회화법의 비교. 1999년 한국산업위생학회 추계학술대회 연제집 1999;20
- 김현욱, 노영만, 피영규, 원정일, 김용우. 제조업체에서 발생하는 호흡성분진 중 XRD와 FTIR을 이용한 결정형 유리규산 농도의 비교분석 제1부-주물 사업장. 한국산업위생학회지 1998;8: 50-66
- 김현욱, 피영규, 노영만, 원정일. 제조업체에서 발생하는 호흡성분진중 XRD와 FTIR을 이용한 결정형 유리규산 농도의 분석 제2부-요업, 석재, 콘크리트, 유리, 연탄 및 기타사업장. 한국 산업위생학회지 1999;9:99-111
- 노동부. 2001년 산업재해분석. 2002
- 노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출 기준. (고시 제 97-65호) 1998;110-12
- 노동부. 작업환경측정 및 정도관리규정. (고시 제2001-39호) 2001
- 송세욱, 이광목. 일부 석탄광산의 공정별 호흡성분진 및 결정형 유리규산의 폭로농도. 한국의 산업의학 1994;33: 153-61
- 정회경, 김지용, 정해관, 임현술. 모 구조토 가공업체의 구조토 분진 폭로평가 및 개선방향에 관한 연구. 한국산업 위생학회지 1994;4(1):81-95
- 최호춘, 천용희, 윤영노, 김해정. 태백 및 강릉지역 석탄광의 호흡성 분진과 석영농도에 관한 조사. 예방의학회지 1987;20:261-69
- 최호춘, 천용희, 김해정, 이정주. 간섭식 적외선 분광기에 의한 태백지역 석탄광의 호흡성 분진 중 석영, 운모 및 장석의 정량분석. 예방의학회지 1988;21:271-83
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2001 Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. ACGIH, 2001
- Foster RD, and RF Walker: Quantitative determination of crystalline silica in respirable-size dust samples by infrared spectrophotometry. Analyst 1984;109:1117
- Guenel P, Breum NO, Lyng E. Exposure to silica dust in the Danish stone industry. Scan J Work Environ Health 1989;15:147-53
- Koskela RS, Klockars M, Järviene E, Kolari PJ. Mortality and disability among granite workers. Scand J Work Environ Health 1987;13:18-25
- Kullman GJ, Greife AL, Costello J, Hearl FJ. Occupational exposure to fibers and quartz at 19 crushed stone mining and milling operations. Am J Ind Med 1995;27:641-660
- Madson FA, Rose MC, Cee R. Review of quartz analytical methodologies: present and future needs Appl Occup Environ Hyg 1995;10(12):991-1001
- National Institute for Occupational Safety and Health (a): NIOSH manual of analytical methods, crystalline 7602 SILICA, CRYSTALLINE by IR, 1994
- National Institute for Occupational Safety and Health (b): NIOSH manual of analytical methods, crystalline 7500 SILICA, CRYSTALLINE, by XRD, 1994
- Oudiz J, Brown JW, Ayer HE, Samuels S. A report on silica exposure levels in United States foundries. Am Ind Hyg Assoc J 1983;44:374-376
- Pickard KJ, Wallker 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;29:149-67
- Saiyed HN, Ghodasara NB, Sathwarw NG, Patel GC, Parikh DJ, Kashyap SK. Dustiness, silicosis & tuberculosis in small scale pottery workers. Indian J Med Res 1995;102:138-42
- 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;42:579-85