

슬레이트 지붕으로부터의 석면 노출특성 연구

정재원[†] · 곽진 · 차영욱 · 유은철
대기보전과

A Study on the Characteristics of Released Asbestos Fiber from Asbestos-Cement Slate Roofs

Jeong Jae-won[†], Kwak Jin, Cha Young-wook and Yoo Eun-chul

Air Preservation Division

Abstracts

This study was performed to quantify and identify the asbestos fibers released from two types of asbestos-cement slate roofs. One is plant roof of big size which was established in 1987 and contained 15 % chrysotile, and the other is house roof of small size which was established before 1983 and contained 12 % chrysotile. The range of airborne fiber concentration around asbestos-cement slate roofs was from 0.0012 to 0.0018 f/mL, and the concentration of asbestos fibers in the drained rainwater from asbestos slate was from 1,764 f/L to 10,584 f/L. The concentration of asbestos fibers in the drained rainwater was higher when the amount of rainfall was low, but the concentration of asbestos fibers in the drained rainwater per unit area(m²) was increased with the amount of rainfall. The concentration of nonorganic fibers contained asbestos in the soil around asbestos slate was from 217 f/g to 348 f/g and more asbestos fibers was identified in the sediments below the slate and mossy slate. And the excess lifetime cancer risk(ELCR) for the risk assessment of the asbestos fibers released from asbestos-cement slate based on US EPA IRIS(Integrated risk information system) model is within 5.5E-06 - 6.5E-06 levels, these results indicate that the cancer risk from asbestos-cement slate roof did not exceed "the acceptable risk(1.0E-05)" by WHO. It was confirmed that asbestos fibers released from asbestos-cement slate roof through the rainfall, and existed in soil and mossy slate. Therefore, it needs urgent measures such as removal, encloser and encapsulation to minimize exposure asbestos fibers from asbestos cement slate roof.

Key words : Asbestos-cement slate roof, airborne fibers, drained rainwater from asbestos slate, the excess lifetime cancer risk(ELCR)

서론

석면(Asbestos)은 섬유상의 규산염 광물질로서, 비단과 같이 부드러운 감촉과 유연성을 가지고 있으면서도 높은 강도와 불에 타지 않는 내열성, 불

연성, 절연성, 단열성 등을 갖추고 있고, 내마모성, 내부식성, 내화학성, 내약품성과 같은 다양한 특성이 있어 전 세계적으로 건설현장, 산업현장 및 일 반가정에서 널리 사용되어 왔다.

국내의 경우 1930년대부터 석면광산이 개발되기

[†] *Corresponding author.* E-mail : jjw6411@korea.kr
Tel : +82-51-309-2926, Fax : 82-51-309-2929

시작하여 1990년까지 총 145,533톤이 생산 및 사용되었으며, 석면원재료의 수입은 관세청으로부터 수입량 확인이 가능한 1976년부터 1995년까지 약 20년간 꾸준히 증가하였다. 그러나 석면으로 인한 피해사례가 증가하기 시작한 1997년부터 청석면과 갈석면의 수입사용을 금지한 이후 수입이 지속적으로 감소하였으며 2008년까지 총 1,229,206톤을 수입하였던 것으로 파악된다¹⁾. 석면제품의 생산은 1930년대부터 용산의 아사노 슬레이트 공장을 필두로 시작되었으며²⁾, 1960년대에 정부의 경제개발계획으로 슬레이트 사용이 증가하기 시작하여 1970년대 새마을운동의 전국적인 전파에 따라 석면슬레이트 제품의 생산 및 사용이 급증하였다³⁾. 1976년에 수입된 석면의 96 %가 건축자재인 슬레이트에 사용되었다고 보고되었으며, 1993년까지 지속적으로 슬레이트를 포함한 건축자재에 국내 석면의 약 80 % 이상이 사용된 것으로 파악되었다⁴⁾.

석면의 유연성과 고온에 대한 높은 저항성, 강알칼리성 pH에 대한 안정성 등에 의해 물리·화학적으로 내구성이 강한 시멘트의 제조를 위해 오래전부터 광범위하게 석면을 첨가하여 왔으며, 그 중 약 95 %가 백석면으로 조사되었다⁴⁾. 우리나라에서도 1980년대 이전까지 건축자재로 가장 많이 사용된 슬레이트의 주성분은 시멘트(80 - 85 %)와 백석면(15 - 20 %)으로 파악된다⁵⁾.

석면슬레이트는 시간이 지남에 따라 바람, 온도, 습도의 영향에 의해 결합력이 점차 약해지는데, 특히 빗물의 침투에 의해 파괴가 더욱 가속화 되어 석면섬유가 주변 환경으로 방출되는 것으로 알려져 있다. 이는 황산화물에 의해 생성된 산성비가 탄산화 반응을 유도하여 시멘트의 주원료인 수산화칼슘을 수용성인 탄산칼슘과 황산칼슘(석고)으로 변화시켜 물과 함께 유출시킴으로써 파괴가 진행되는 것으로 판단된다⁶⁾.

대기 중으로 방출된 석면섬유는 공기 중에 부유하게 되며, 호흡기를 통하여 미세한 석면 섬유가 인체로 흡입되면 10 - 40년의 잠복기를 거쳐 석면 폐증, 폐암, 악성중피종 등을 유발시킬 수 있으며, 섭취 시에는 장관계의 암과 인후두암, 신장암, 췌장암, 임파선암 등을 유발하기도 한다. 미세하게 분절된 석면입자는 보통 0.1 - 10 μm 정도의 길이를 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 주로 길이 8 μm 이상, 직경 0.25 μm 이하의 크기를 가진 석면 섬유가 호흡기계를 통해 폐에 쉽게 침착될 수 있다. 1987년 WHO 산하 국제암연구소(IARC)에서는 석면을 1급 발암물질로 지정하였고, 우리나라에서도 노동부고시(제2008-26호)로 석면을 발암물질로 지정하였으며, 2007년 1월부터 산업안전보건법에 의해 슬레이트의 생산 및 사용이 전면 중단되었다.

환경부의 조사에 따르면 전국에 약 123만동의 건축물이 슬레이트지붕이며, 도심지에 66만 여동, 농어촌에 57만 여동 분포하고 있으며 그 중 대부분(88만동, 71.4 %)이 주거용 건축물로 사용되고 있다. 또한 건축 연식으로 70년대 이전의 건물이 다수(55.4 %)를 차지해, 노후화에 따른 석면비산의 가능성이 증가할 것으로 우려되고 있다. 또한 그 중 부산광역시에는 3.8 %에 해당하는 47,300 여동의 슬레이트 건축물이 있는 것으로 조사되었는데 서울시 및 타 광역시보다 2 - 4배 높은 비율로서 도심 내 저소득층 주거공간이 대부분(82.3 %)을 차지하는 것으로 조사되었다⁷⁾.

주변에 산재에 있는 노후화된 슬레이트지붕으로부터 석면의 방출은 현재 진행 중이며, 시민 건강 보호를 위해서는 모든 슬레이트지붕의 철거 및 교체가 시급히 이루어져야 할 것이나, 현재 진행되고 있는 정부주도 방식의 슬레이트지붕 교체사업은 비용과 처리 등의 문제로 향후 10년 이상 걸릴 것으로 예상된다. 따라서 석면슬레이트 지붕으로부터

의 석면방출을 줄일 수 있는 대책을 마련하고, 또한 슬레이트지붕 건축물로부터 대기환경으로의 석면 비산정도와 인체에서 어느 정도의 위해성을 나타내는지를 파악하고 관리할 필요성이 있다. 이에 본 연구는 두 종류의 슬레이트지붕으로부터 공기, 빗물, 토양으로의 노출 실태를 파악하고, 석면이 함유된 슬레이트지붕 건축물 주변에서의 공기 중 석면 노출농도를 측정하여 거주자에 대한 건강위해도를 평가해 봄으로써 향후 슬레이트지붕 건축물의 관리 방안을 제시하고자 하였다.

석면슬레이트 현황 및 특성 고찰

부산광역시 석면슬레이트 현황

2011년 부산광역시 슬레이트지붕 건축물을 건축행정정보시스템으로 확인하였을 때, 총 46,624동이었으며, 직접 확인조사 결과 총 21,267동의 슬레이트 건축물이 확인되어 약 54.4%가 감소한 것으로 나타났다. 이러한 슬레이트지붕 건축물 감소의 주요인은 노후 도심지역의 재건축 및 재개발(63.2%)로 나타났으며, 나머지는 개인별 지붕개량(36.8%)에 의한 감소였다⁸⁾. 그러나 2013년 25,048동의 무허가 슬레이트 건축물이 추가 조사되어, 2013년

현재 부산광역시의 슬레이트 건축물은 총 47,035동으로 집계되었다⁹⁾(Fig. 1).

슬레이트지붕 건축물의 용도별 분포를 살펴 보면, 주택이 89.0%로 가장 많았고, 시설 6.2%, 공장 4.0%, 창고 0.7%, 축사 0.1% 등으로 나타났으며, 그 중에서도 무허가 주택의 슬레이트지붕 설치비율이 가장 높은 것으로 나타났다(Table 1).

건축물수로 비교를 하면 공장 건물이 차지하는 비율은 전체 건축물 수의 4.0% 밖에 되지 않으나, 대부분의 공장건물의 면적이 주택에 비해 넓어, 지붕을 덮고 있는 슬레이트의 면적 비율로 비교해 보면 25.5%에 해당하는 것으로 나타났다. 또한 창고, 축사, 시설 등의 슬레이트지붕 면적도 주택보다는 넓은 것이 일반적이어서 슬레이트 주택의 경우, 동수 대비는 89.0%를 차지하였으나 면적대비는 61.4%인 것으로 조사되었다.

부산광역시 슬레이트지붕 건축물의 지역별 분포 현황은 주거인구 밀집지역이 많은 남구, 부산진구, 강서구, 서구 등이 높게 나타났으며, 특히 남구, 부산진구, 서구, 동구 등은 무허가 슬레이트지붕 건축물이 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 동래구, 연제구 등의 행정중심구역 및 북구, 수영구 등 재개발이 활발하게 추진된 도심지

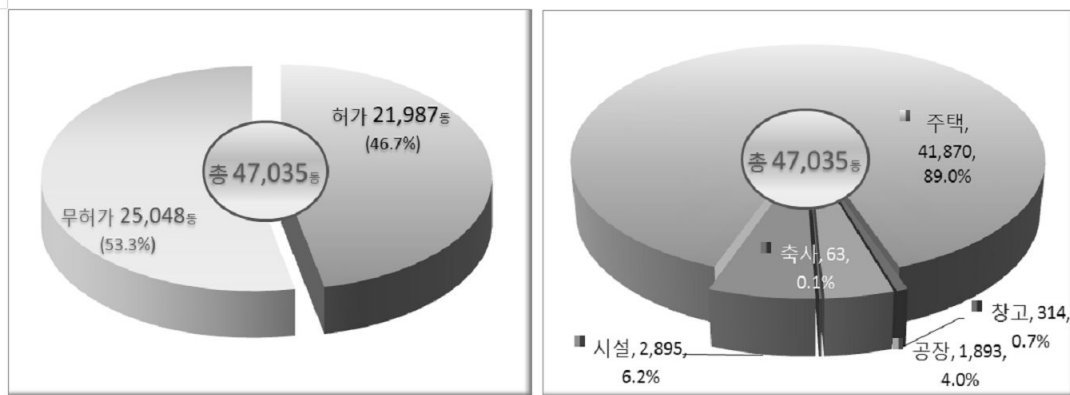


Fig. 1. Classification of ASR(asbestos-cement slate roofing) buildings in Busan.

Table 1. Classification of ASR(asbestos-cement slate roofing) buildings on usage

		Total	residential	facility	factory	warehouse	livestock shed
total	buildings	47,035	41,870	2,895	1,893	314	63
	percentage		89.0 %	6.2 %	4.0 %	0.7 %	0.1 %
	area(m ²)	4,721,852	2,899,802	522,163	1,206,385	66,417	27,085
permitted building	buildings	21,987	18,909	1,332	1,500	194	52
	percentage		86.0 %	6.1 %	6.8 %	0.9 %	0.2 %
	area(m ²)	2,742,543	1,449,784	204,971	1,019,258	49,805	19,265
unpermitted building	buildings	25,048	22,961	1,563	393	120	11
	percentage		91.7 %	6.2 %	1.6 %	0.5 %	0.04 %
	area(m ²)	1,979,308	1,450,016	317,192	187,127	16,612	7,820

역 등은 상대적으로 슬레이트가 적게 분포하는 것으로 나타났다(Table 2).

2011년 건축대장 확인이 가능한 슬레이트지붕 건축물에 대해서 건축연도별 분포를 살펴 보면, 1970년대 건축물이 43.61 %로 가장 많았고, 1980년대 36.48 %, 1960년대 11.40 % 순으로 나타났다. 노후화가 우려되는 가장 오래된 슬레이트 건축물인 1920년대 이전 건축물 189동 가운데 185동이 강서구에 분포하고 있었으며, 1950년대 이전 건축물 898동 가운데 56 %인 505동이 강서구에, 28.5 %인 256동이 기장군에 분포하는 것으로 나타났다. 또한

강서구와 기장군의 슬레이트지붕 건축물은 타 지역에 비해 창고 및 축사의 비율이 높고, 사상구는 공장의 분포비율이 높다는 것이 특징적이었다.

슬레이트로부터 석면 비산의 특성

슬레이트는 주성분이 시멘트와 백석면으로 시멘트는 시간이 경과함에 따라 풍화작용을 받아 부식이 진행된다고 한다(Fig. 2). 석면 시멘트의 화학적 구성은 calcium silicate hydrate(60 - 80 %), calcium hydrate(10 - 12 %), calcium aluminate hydrate(3 - 10 %), calcium aluminate sulfate hydrate(0 - 5 %),

Table 2. Numbers of ASR(asbestos-cement slate roofing) buildings classified by administrative district (unit : buildings)

District	total	permitted building	unpermitted building
Nam-gu	6,216(13.2 %)	2,135(9.7 %)	4,081(16.3 %)
Busanjin-gu	5,916(12.6 %)	1,286(5.8 %)	4,630(18.5 %)
Gangseo-gu	5,208(11.1 %)	3,308(15.0 %)	1,900(7.6 %)
Seo-gu	4,943(10.5 %)	1,321(6.0 %)	3,622(14.5 %)
Youngdo-gu	4,619(9.8 %)	2,409(11.0 %)	2,210(8.8 %)
Dong-gu	4,487(9.5 %)	1,184(5.4 %)	3,303(13.2 %)
Saha-gu	4,085(8.7 %)	2,822(12.8 %)	1,263(5.0 %)
Sasang-gu	1,939(4.1 %)	1,503(6.8 %)	436(1.7 %)
Geumjeong-gu	1,891(4.0 %)	887(4.0 %)	1,004(4.0 %)
Haewundae-gu	1,776(3.8 %)	1,340(6.1 %)	436(1.7 %)
Gijang-gun	1,550(3.3 %)	1,405(6.4 %)	145(0.6 %)
Yeonje-gu	1,345(2.9 %)	465(2.1 %)	880(3.5 %)
Dongrae-gu	1,111(2.4 %)	841(3.8 %)	270(1.1 %)
Suyoung-gu	819(1.7 %)	640(2.9 %)	179(0.7 %)
Buk-gu	590(1.3 %)	177(0.8 %)	413(1.6 %)
Jung-gu	540(1.1 %)	264(1.2 %)	276(1.1 %)



Fig. 2. Asbestos-cement slate roofs and SEM image of chrysotile in the slate roofs.

그리고 반응하지 않는 시멘트로 구성되어 있다¹⁰⁾. 대기 중에 존재하는 SO_2 , NO_2 또는 황산염·질산염 입자들이 공기 중 수분과 결합하여 산성비가 되고, 산성 강우에 의해 시멘트 내의 칼슘과 알루미늄 성분을 용해시킨다. 이는 물에 용해되지 않는 규산칼슘을 물에 잘 용해되는 황산칼슘 또는 질산칼슘으로 변형시키기 때문이다¹¹⁻¹³⁾. 따라서 슬레이트는 시간이 흐르면서 표면이 부식되고 그 부식 정도는 1년에 약 0.01 - 0.024 mm/yr이며¹⁴⁾, 부식된 석면 슬레이트에서 방출되는 석면의 양은 연간 약 3 g/m²라고 추산하였다¹⁵⁾. 또한 산성비에 의해 용해도는 더욱 증가하게 되며¹⁰⁾, 부식된 표면에서 발생하는 석면은 80 %가 빗물에 씻겨 나가고, 20 % 정도는 대기 중으로 방출된다는 보고가 있다^{14,16)}.

국내에서 석면 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중의 석면방출에 대한 연구는 김현욱 등³⁾에 의해 처음 시도되었는데 석면 슬레이트 지붕의 설치연도가 오래 되었을수록 빗물로의 석면섭유 방출량이 증가함을 보고하였고, 장봉기 등¹⁷⁾은 강우의 지속시간이 짧을수록 빗물 중의 석면 섭유수가 많음을

보고하였다.

재료 및 방법

조사대상

석면슬레이트 지붕로부터의 석면 노출정도를 평가하기 위해 석면슬레이트가 설치되어 있는 공장건물과 주택건물을 임의로 선정하였다. 공장은 부산광역시 사하구의 대규모 목재공장의 슬레이트 지붕을 선정하였고, 주택은 부산광역시 동구 범천동의 무허가 주택의 슬레이트지붕을 선정하였으며, 슬레이트의 특성을 Table 3에 나타내었다. 공장 슬레이트는 1987년에 설치되었으며, 무허가 주택건물은 정확한 건축년도를 알 수 없었으나 거주 주민의 30년 이상 거주했다는 설명에 따라 적어도 1983년 이전에 슬레이트가 설치된 것으로 추정하였다.

슬레이트 지붕들의 상태는 금이 가거나 파손된 곳이 없었으며, 특히 공장 슬레이트는 관리상태가 매우 양호하였다(Fig. 3). 전자현미경(SEM-EDX)에 의한 분석 결과, 두 슬레이트에 백석면(chrysotile)

Table 3. The Characteristics of sampling slates

Slate roof	established year	contained asbestos	appearance
plant	1987	chrysotile 15 %	good
residential	before 1983	chrysotile 12 %	not good



a) The roof of a plant



b) The roof of a residential house

Fig. 3. Appearance of sampled asbestos-cement slate roofs.

이 12 - 15 % 함유되어 있었다.

공기 중 석면 노출농도 측정

석면 슬레이트지붕의 공기 중 석면 노출정도를 측정하기 위하여 슬레이트지붕 끝에서 주풍향의 풍하방향으로 1 m 떨어진 지점의 1.5 m 높이에서 시료를 포집하였다.

포집 시기는 건기(2주 이상 비가 오지 않은 날)와 강우 직후(비가 그친 후 24시간 이내) 및 강우 48 시간 이후의 3가지 조건에서 채취하였다. 시료 포집은 대기오염공정시험기준(환경부고시 제2007-145호) ES 01357.1 『환경대기 중 석면 시험방법』에 따라 셀룰로오스에스터(MCE, mixed cellulose ester) 재질의 여과지가 장착된 open face형 필터홀더를 사용하여 10 L/min의 유량으로 2,400 L가 되도록 채취하였다.

포집한 시료 필터의 절반은 실내공기질공정시험 기준(환경부고시 제2010-24호) ES 02303.1 『실내공기 중 석면 및 섬유상 먼지 농도 측정방법 - 위상차

현미경법』에 따라 분석하였고 나머지는 ISO 14966 방법에 따라 주사전자현미경(SEM-EDX)으로 분석하였다¹⁸⁾.

1) 위상차현미경법(Phase Contrast Microscopy)

위상차현미경법은 공기를 포집한 MCE필터를 아세톤-트리아세틴법에 의해 투명화시킨 후, Walton-Beckett graticule이 장착된 위상차현미경(Olympus, BX51) 400배율에서 총 100시야를 관찰하여 길이가 5 μm 이상이고, 길이 대 지름의 비가 3:1 이상되는 섬유를 계수하는 방법으로서, Walton-Beckett graticule의 1시야 당 면적이 0.00785 mm²이므로 100시야의 면적은 0.785 mm²에 해당된다. PCM법에 의한 결과는 공기 중의 석면 뿐만 아니라 섬유상 먼지입자도 함께 계수되므로 정확한 석면농도라고 말할 수 없는 단점이 있다.

$$C_{PCM} = \frac{A \times (N_1 - N_2)}{a \times V \times n} \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

공기 중 석면 및 섬유상면지의 농도(C_{PCM})는 식(1)에 의하여 계산하며, 이때 A 는 유효 포집면적으로서 MCE필터의 포집면적인 385 mm^2 , N_1 은 위상차현미경에서 계수된 시료의 총 섬유수(f), N_2 는 위상차현미경에서 계수된 바탕시료의 총 섬유수(f), a 는 현미경 1시야의 면적인 0.00785 mm^2 , V 는 포집한 공기량(L), n 은 계수한 시야수를 말한다.

주사전자현미경법(Scanning Electron Microscopy)

공기포집 시료와 토양 시료에서 검출된 섬유입자의 석면여부 확인을 위해 EDX(에너지분산형 X-선 분석장치; Oxford, INCA)를 장착한 주사전자현미경(FE-SEM; Jeol, JSM-6701F)을 사용하였으며, ISO 14966 방법에 따라 분석하였다.

공기 및 빗물시료의 확인을 위해 포집한 MCE 필터를 적당한 크기로 일부분을 절단하여 카본테이프를 이용해 시료대에 고정시키고 charge-up을 방지하기 위해 백금 코팅한 후 전자현미경의 2,000배율에서 500시야를 관찰하여 길이가 $5 \mu\text{m}$ 이상이고, 길이 대 지름의 비가 3:1 이상되는 섬유상 입자를 모두 계수하였다. 주사전자현미경은 가속전압 15 kV, 작업거리(working distance) 15 mm에서 분석하였으며, 계수한 입자는 10,000 - 15,000 배율에서 EDX(에너지분산형 X-선 분석기)를 이용하여 원소스펙트럼 분석을 실시하였고, 분석 결과 석면의 특성이 나타나지 않은 섬유는 계수에서 제외하였다.

$$C_{SEM} = \frac{A \times N}{a \times V \times n} \times \frac{1}{1000} \quad (2)$$

공기 중 석면농도(C_{SEM})는 식(2)에 의하여 계산하며, 이때 A 는 유효 포집면적으로서 MCE필터의 포집면적인 385 mm^2 , N 은 전자현미경에서 계수된 총

섬면 입자수(f), a 는 전자현미경의 1시야의 면적으로 0.0020 mm^2 (전자현미경 2,000배율에서 관찰화면 크기: 가로 $50 \mu\text{m}$, 세로 $40 \mu\text{m}$), V 는 포집한 공기량(L), n 은 계수한 시야수를 말한다. ISO 14966법에서는 1 mm^2 이상의 필터 면적을 관찰할 것을 권고하고 있으므로 500시야를 계수하여 총 관찰면적이 1.0 mm^2 가 되도록 하였다.

빗물 중 석면농도 측정

공기 중 석면시료를 포집한 지점과 동일한 지점의 슬레이트 지붕에서 흘러내리는 빗물을 채취하기 위해 슬레이트지붕 아래에서 깔대기를 고정시킨 물통을 이용해 시료를 채취하였다. 깔대기의 지름은 15 cm로서 대골 슬레이트의 경우 1골, 소골 슬레이트의 경우 2골에 해당되었다.

석면슬레이트는 소골 슬레이트와 대골 슬레이트의 두 종류가 있는데, 소골은 주로 주택용으로 사용되고, 공장이나 창고용으로 대골 슬레이트가 대부분 사용된다. 소골은 골 사이의 폭이 약 6 cm이고 전체 폭은 72 cm, 대골의 골 사이 폭은 13 cm, 폭은 96 cm이며, 두께는 0.9 cm, 길이는 180 cm, 210 cm, 240 cm의 3가지 규격이 있다. 단위면적당 중량은 약 10.5 kg/m^2 이며, 석면함유량은 $10 \pm 3 \%$ 라고 한국산업표준에 수록되어 있다¹⁹⁾(Fig. 4).

채취된 빗물 시료는 충분히 혼합한 후 1 L를 취하여 진공펌프를 이용하여 직경 47 mm, pore size $0.45 \mu\text{m}$ 의 MCE 필터로 여과한 다음, 불순물과

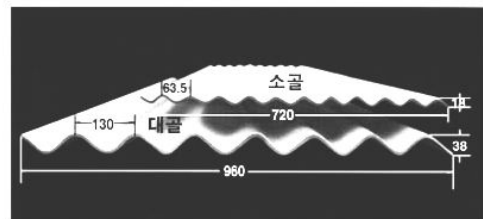


Fig. 4. The type of cement slate.

유기물을 제거하기 위해 도가니에 필터를 넣어 450 °C의 회화로에서 24시간 동안 회화 처리하고 1M-HCl로 산 처리한 다음 직경 47 mm의 MCE 필터로 다시 여과하고 건조시켰다. 전처리한 MCE 필터는 아세톤-트리아세틴법에 의해 투명화시킨 후, 위상차현미경 400배율에서 총 100시야를 관찰하고 석면입자를 계수하였다. 위상차현미경 400배율에서 Walton-Beckett graticule의 1시야 당 면적이 0.00785 mm²이므로 100시야의 면적은 0.785 mm²이다. 47 mm MCE 필터의 유효직경이 42 mm이고, 필터의 유효면적은 1384.7 mm²이므로 위상차현미경에서 100시야를 관찰한 농도의 1,764배로 환산하였다.

토양 중 석면농도 측정

석면슬레이트로부터 주변 토양으로의 석면 오염을 알아보기 위해, 공기 중 석면농도를 조사한 슬레이트지붕의 주변 토양을 함께 채취하였는데, 공장과 주택의 바닥은 콘크리트로 덮여 있어 순수토양을 채취할 수 없었고 주변의 작은 화단에서 흙을 채취하였고, 지붕아래 침전물이 쌓여 있는 곳의 퇴적물도 함께 채취하였다(Fig. 5).

시료의 채취는 모종삽을 이용하여 화단이나 화분 또는 표층 토양을 약 10 - 50 g 정도 채취하여 무색

의 폴리에틸렌병에 담아 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 실험실 후드 내에서 48시간 동안 자연 건조시킨 후, 500 μm 크기의 체(seive)를 통과시켜 균질화하였다. 토양시료를 1차로 실체현미경(Olympus, SZ51)을 이용해 관찰하여 시료의 균질여부, 섬유상 물질의 존재 여부, 섬유상 물질의 색과 형태 등을 확인하였다. 실체현미경에서 확인된 섬유상 입자를 모두 골라내어 카본테이프가 붙어있는 주사전자현미경 전용 시료대에 장착한 후, 200초간 백금 코팅하고 2,000 - 20,000배율에서 섬유의 형태를 관찰하고, EDX를 사용하여 입자의 화학조성을 확인하였다.

1차 육안으로 확인한 토양시료 중 약 10 g을 분취하여 비이커에 담고 증류수 250 mL를 넣어 1분 이상 혼합시키고 1시간 방치하여 상등액을 분리하였다. 이 과정을 수차례 반복하여 상등액의 양을 1 L로 맞추었다. 상등액 1 L를 진공펌프를 이용하여 직경 47 mm의 MCE 필터로 여과한 다음, 빗물 시료의 분석방법과 동일하게 처리하였으며, 위상차현미경과 전자현미경으로 관찰하였다.

인체 위해성평가

석면 노출에 대한 인체 위해성 평가는 미국 EPA



Fig. 5. The flower garden and flowerpot around slate roof.

에서 제시하고 있는 발암위험도 평가방법^{20,21)}을 바탕으로, 환경부의 『석면광산 등 석면발생지역의 토양환경 관리지침』의 위해성 평가방법²²⁾과 미국 EPA IRIS(Integrated risk information system) 데이터를 이용하였다^{23,24)}. 석면의 경우 미국 EPA에서 제시하고 있는 방법은 발암물질의 3대 노출경로인 섭취, 호흡, 피부노출의 경로 중에서 피부에 의한 흡수는 거의 없고 섭취에 따른 발암성도 밝혀진 바 없으므로 호흡을 통한 노출만을 고려하여 발암위험도를 산정한 것이다. 이상의 내용을 바탕으로 석면의 발암위험도는 노출농도, 노출시간, 최초 노출로부터 경과시간을 이용하여 식(3)과 같이 계산하였다.

$$ELCR = EPC \times TWF \times IUR \quad (3)$$

- ELCR(excess life cancer risk) : 생애초과발암위험도 (석면노출의 결과로서 암이 발생할 위험도)
- EPC(exposure point concentration) : 노출농도(해당 활동을 수행함으로써 노출되는 공기 중 석면농도, f/mL)
- TWF(time weighting factor) : 시간가중인자(1년 동안 실제 석면에 노출되는 기간의 비가 어느 정도 되는지를 반영)
- IUR(inhalation unit risk) : 흡입단위위험도(흡입 노출로 인한 단위위험도)

식(3)에서 노출농도(EPC)는 공기 중 석면 측정 농도를 사용하였으며, 시간가중인자(TWF)는 아래의 식(4)를 이용하여 산정하였다.

$$TWF = \frac{\text{노출시간(hrs/day)}}{24 \text{ hrs}} \times \frac{\text{노출빈도(days/year)}}{365 \text{ days}} \quad (4)$$

흡입단위위험도(IUR)는 최초 노출된 나이와 노출기간에 따른 암 발생 위험도로서, EPA IRIS

에서 제시한 값을 사용하였다. 석면은 잠복기가 길기 때문에 첫 노출 시기의 연령이 얼마나에 따라 유해도 발생확률이 달라진다. 따라서 흡입 노출에 의한 발암 위험도를 산출할 때, 첫 노출 연령을 고려하여 IUR을 적용하여야 한다. 예를 들면, IRIS에서 제시하고 있는 IUR 0.23 per f/mL는 평생 노출의 경우를 가정하여 첫 노출연령이 0세이며, 노출기간은 70년의 조건이다.

US EPA에서는 발암물질의 허용위험도(acceptable risk)를 1.0E-06(백만 명당 1명) - 1.0E-04(만 명당 1명)의 초과발암확률 범위로 제안하고 있다. 1.0E-06(백만 명당 1명)의 위험도는 “de minimis risk(최소위험도)”로서 1980년대 수준에서의 자연 발생적 사망률에 상응하는 매우 낮은 위험확률이다. 이 위험도에 상응하는 농도를 실제안전용량(virtually safe dose, VSD)이라 한다. 그러나 현실적으로 환경성 발암물질의 경우 여러 가지 투자비용에 대한 경제적 손익, 공학처리 기술이나 분석 기술에 대한 조건들이 감안되어 1990년대 후반부터는 환경오염으로 인한 허용위험도는 1.0E-05(십만 명당 1명) 수준이 적합하며, 1.0E-04(만 명당 1명)의 위험수준일 경우 법적인 규제와 같은 적극적인 저감활동이 필요하다고 제안하고 있다. WHO에서도 발암성 물질의 경우, 인체 보호 권고치를 1.0E-05(십만 명당 1명)의 평생초과발암위험도에 해당하는 농도로 제안하고 있다²⁵⁾.

결과 및 고찰

석면슬레이트 지붕 주변의 공기 중 석면농도

석면슬레이트 지붕 주변의 공기 중 석면농도를 2주 이상 비가 오지 않은 날과 강우 직후(24시간 이내) 및 강우 48시간 이후의 3회에 걸쳐 조사하고 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Airborne fibers concentrations in asbestos slate roofs by PCM and SEM

	buildings	dry condition	in 24 hrs after rainfall	after 48 hrs after rainfall
plant	sampling date	2013. 8. 20.	2013. 9. 30.	2013. 10. 4.
	temp.(°C)	32.4	23.2	22.5
	wind speed(m/s)	1.7	3.0	5.5
	humidity(%)	62	82	57
	fibers conc. by PCM(f/mL)	0.0016	0.0000	0.0018
	asbestos conc. by SEM(f/mL)	0.0006	0.0000	0.0000
residential	sampling date	2013. 8. 21.	2013. 9. 30.	2013. 10. 4.
	temp.(°C)	32.0	23.3	24.2
	wind speed(m/s)	2.3	2.8	3.4
	humidity(%)	62	83	60
	fibers conc. by PCM(f/mL)	0.0012	0.0000	0.0012
	asbestos conc. by SEM(f/mL)	0.0003	0.0000	0.0000

PCM법에 의한 조사 결과, 강우 24시간 이내에 포집한 공기 중 시료에서는 2지점에서 전부 섬유상 입자가 불검출 되었고, 건조시기의 공기 중 섬유상 입자의 농도는 0.0012 - 0.0016 f/mL로 조사되었으며, 강우 48시간 이후의 공기 중 섬유상 입자의 농도는 0.0012 - 0.0018 f/mL로 조사되어 두 결과의 차이가 없는 것으로 나타났다(p<0.05).

공장 슬레이트지붕의 경우 3번의 조사 중 풍속이 높을 때(5.5 m/s)의 농도가 낮을 때(1.7 m/s)보다 섬유상입자의 농도가 약간 높게 조사되었으나, 주택 슬레이트는 풍속과 상관없이 동일한 농도를 나타내어 상관관계가 성립되지 않았다. 본 연구의 관측수가 너무 적었고, 다른 요인의 영향이 배제된 실험환경 조건이 갖추어지지 않았으며, 풍속의 크기 또한 확연한 차이를 나타내지 못해 풍속에 따른 공기 중 섬유상입자의 농도 차이를 확인하지 못하였다.

SEM-EDX법에 의한 분석에서는 건조시기의 공기 중 석면농도가 0.0003 - 0.0006 f/mL로 조사되었으며, 강우 24시간 이내 및 48시간 이후의 공기 중 시료에서는 석면이 검출되지 않았다. 이러한 조사결과는 부산광역시보건환경연구원에서 2011 - 2013년 조사한 슬레이트지붕 밀집지역의 대기환경 모니터

링 결과와도 유사하였다²⁶⁾. 검출된 석면은 모두 백석면이었으며, 공장 슬레이트지붕 주변 공기 중에서 2개의 석면입자를, 주택 슬레이트지붕 주변 공기 중에서 1개의 석면입자를 확인하였다(Fig. 6).

슬레이트지붕으로부터 유출된 빗물 중 석면농도

석면슬레이트 지붕으로부터 유출된 빗물 중의 석면 함유량 조사는 공장과 주택에서 각 3회 측정하였다. 빗물 채취 시의 강수량은 기상청 자료를 참고하였으며, 집수통에 모인 빗물의 양과 빗물 중의 석면농도를 Table 5에 나타내었다.

강수량이 각기 다른 빗물 유출수중의 섬유상 입자 농도는 최저 1,764 f/L에서 최고 10,584 f/L까지 큰 차이를 나타냈으며, 강수량이 가장 적을 때의 농도가 가장 높았고 강수량이 많아질수록 농도가 낮아지는 경향을 보였다.

슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중의 석면방출에 대한 연구는 방출된 석면섬유 농도가 7,152 f/L - 31,202 f/L의 범위였으며, 슬레이트 설치연한이 오래 되었을수록, 강우량이 증가할수록 방출량이 증가한다는 김현욱 등(2010)의 연구³⁾가 최초이다. 그 후 장봉기 등(2011)¹⁸⁾은 설치연도가 다른 3종류의 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중 석면 농도를

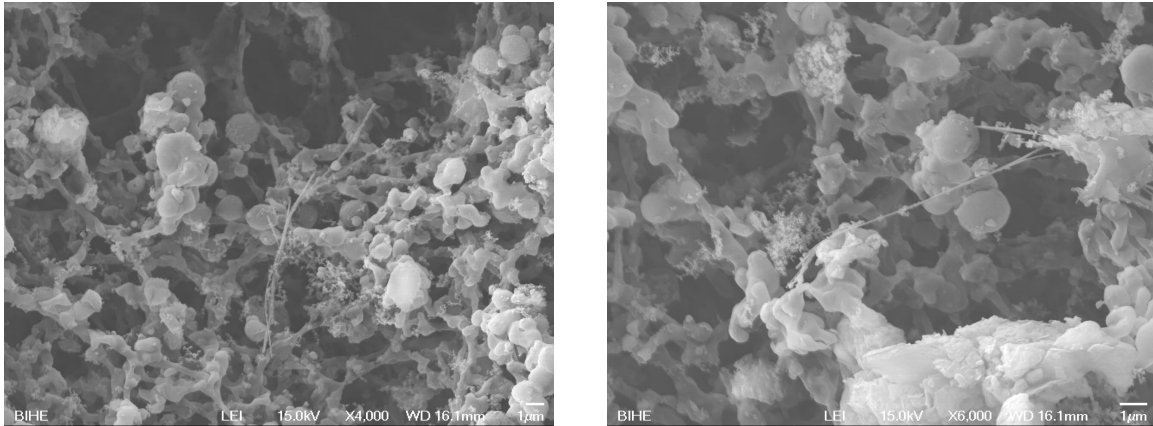


Fig. 6. Asbestos(chrysotile) fibers in air around slate roof by SEM image.

Table 5. Asbestos concentration of drained rainwater from ASR(asbestos-cement slate roofing) buildings

buildings		1st	2nd	3rd
sampling condition	sampling date	2013. 7. 28.	2013. 8. 26.	2013. 9. 9.
	amount of rainfall(mm)	8.0	100.0	16.5
plant	sampling volume(L)	2.7	36.5	6.2
	pH	7.0	6.6	6.7
	asbestos conc.(f/L)	10,584	3,528	5,292
residential	sampling volume(L)	1.8	23.6	3.8
	pH	7.0	6.8	6.8
	asbestos conc.(f/L)	8,820	1,764	5,292
geometric mean		9,662	2,495	5,292

강우 경과시간에 따라 분석하여 4,645 f/L - 8,996 f/L의 석면 방출량을 나타내었고, 강우 초기에 유의하게 많이 방출된다는 연구결과를 보고하였다.

본 연구에서 유출된 빗물 중 석면 농도는 김현욱 등³⁾의 연구결과보다 낮게 조사되었고 강수량에 따른 석면 방출량의 변화에서도 차이가 있었으나, 강수량이 적을 때의 농도가 더 높게 나타나 장봉기 등¹⁸⁾의 결과와는 유사하게 나타났다.

슬레이트 지붕에서 유출된 빗물시료의 pH는 6.6 - 7.0의 범위였으며, 강수량, 지붕 유형이나 지붕 면적 등과 상관성을 찾을 수 없었다. 지붕으로 흘러들기 전의 강우의 pH를 조사하지 못하여 비교가 어렵지만, 부산광역시보건환경연구원의 결과에 의하

면 시료채취일과 비슷한 시기의 강우 중 pH는 대략 5.0 - 5.5 수준으로 조사되어 빗물이 슬레이트 지붕을 통과하면서 pH가 상승하는 것을 확인할 수 있었다²⁶⁾.

본 연구의 조사대상인 공장 슬레이트는 대골 슬레이트이고, 주택지붕은 소골 슬레이트로서 슬레이트 골의 넓이가 상이하였으나, 빗물을 수집할 때는 동일한 크기의 깔대기를 사용하였으므로 슬레이트의 가로길이는 0.13 m로 동일하게 산정하였다. 슬레이트의 세로길이는 지붕에 따라 상이하였는데, 공장지붕은 3.5 m, 주택지붕은 2.2 m로 조사되었다.

실제로 수집 물통에 채취된 빗물의 양은 강우 조건에서의 이론적인 빗물 유출량의 74.2 % - 82.6 %

를 차지하였으며, 이는 강우 초기에 슬레이트 내부로 스며들거나 증발의 가능성이 있고, 강한 강우 시에는 빗방울이 외부로 튀는 현상 등이 반영된 결과로 보인다(Table 6).

수집된 빗물 중의 총 석면 농도를 계산하여, 빗물이 유출된 슬레이트 면적으로 나누어 슬레이트 지붕 단위면적당(m²) 석면유출 농도를 환산한 결과는 Table 7과 같다. 강수량이 많을수록 단위면적당 석면 유출량이 많은 것으로 조사되었고 강수량이 적을 때의 유출농도는 높았으나, 슬레이트 단위면적당 유출량은 강수량에 비례하는 것으로 나타났다.

슬레이트지붕 주변의 토양 중 석면농도

공장 슬레이트지붕 주변의 화단의 흙을 채취하여 분석해 본 결과, 실체현미경을 이용한 1차 육안확인 결과는 석면이 검출되지 않았으나, 수차례 씻어 내린 증류수 여과액에서는 석면입자가 검출되었다. 주택의 슬레이트지붕 아래에 놓여 있던 화반에서 채취한 흙에서는 백석면 입자를 실체현미경과 전자

현미경으로 확인할 수 있었으며(Fig. 7), 증류수 여과액에서도 석면입자가 검출되었다.

1 L의 여과액 중의 석면입자를 위상차현미경으로 계수하고, 관찰 시야를 필터의 유효면적으로 환산하였을 때의 농도는 Table 8에 나타낸 바와 같다. 여과액 1 L는 토양 시료 50 g을 씻어낸 양이므로, 석면슬레이트 아래의 토양 1 g 중에는 무기성 섬유입자가 적어도 217 - 348개 이상은 존재한다고 짐작할 수 있었다. 여과액을 전처리한 MCE 필터의 일부분을 전자현미경(SEM-EDX)으로 관찰하여 다수의 무기성 섬유상 입자와 함께 백석면 입자를 확인할 수 있었다(Fig. 8, 9).

빗물시료나 토양 여과시료 중의 석면입자를 계수하기 위해 위상차현미경 400배율에서 섬유입자를 계수하였으나, 공기 포집시료와는 성상이 크게 다르게 나타났다. 대부분의 입자가 섬유다발 형태로 존재해 Walton-Beckett graticule보다 큰 경우가 많았고, 회화 전처리에 의해 유기물 입자를 제거하였다고 해도 무기성 비석면 섬유입자도 많이 함유되

Table 6. Theoretical drained rainwater from ASR(asbestos-cement slate roofing) buildings


	plant	residential	sampling area
width(m)	0.13	0.13	
length(m)	3.5	2.2	
slate area(m ²)	0.455	0.286	
theoretical drained rainwater (L)	8.0 mm	3.6 L	2.3 L
	100 mm	45.5 L	28.6 L
	16.5 mm	7.5 L	4.7 L

Table 7. Asbestos concentration of drained rainwater from unit area(m²) of slate by rainfall (unit : f/L · m²)

amount of rainfall	8.0 mm	100.0 mm	16.5 mm
plant	62,806	283,015	72,111
residential	55,510	145,561	70,313
Geometric mean	59,046	202,968	71,206

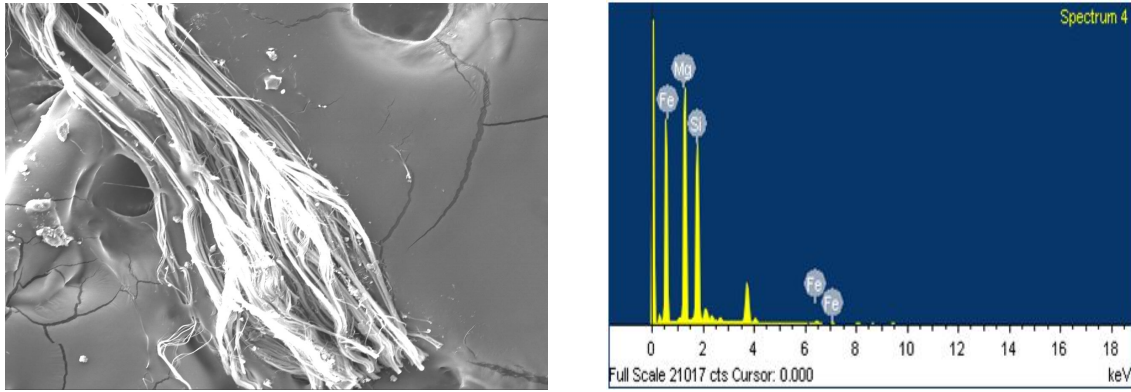


Fig. 7. Asbestos(chrysotile) fibers and EDX spectrum peak in soil filtrate by SEM image.

Table 8. Asbestos concentration of soil around the slate roofs

	asbestos fiber by stereoscopy	filtering	
		PCM(f/L)	SEM-EDX
plant	N.D.	17,422	chrysotile
residential	1 fiber	10,584	chrysotile

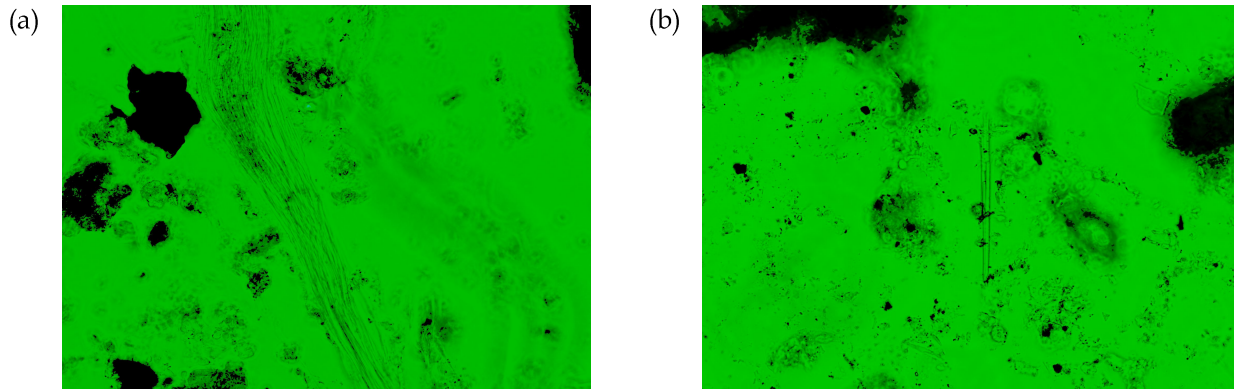


Fig. 8. Asbestos fibers(a) and non-asbestos fiber(b) in soil filtrate by PCM image.

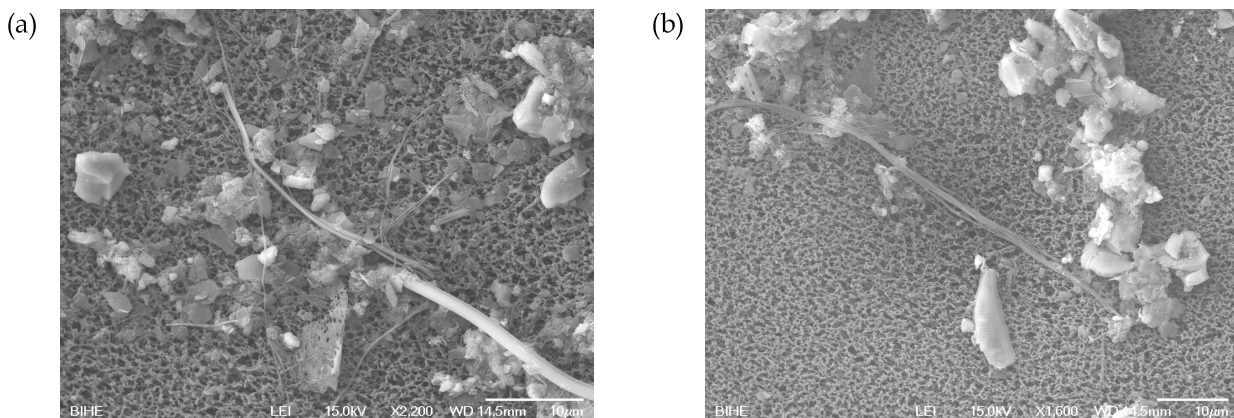


Fig. 9. Asbestos fibers(a) and non-asbestos fiber(b) in soil filtrate by SEM image.

어 있었다. 따라서 근본적으로 위상차현미경에 의한 계수방법은 정확한 석면입자 농도를 나타내지 못한다는 단점이 있었다. 전자현미경(SEM 또는 TEM)을 이용해 석면입자의 확인과 계수가 되어야만 정확한 석면농도를 산출할 수 있을 것으로 사료되며, 전자현미경으로 계수할 경우 발견할 수 있는 석면입자 수는 더욱 많아지고 관찰하는 유효면적은 더욱 작아지게 되므로 빗물이나 토양 중의 석면 농도는 더욱 커질 것으로 추정된다. 석면슬레이트는 노후화가 진행될수록 바람, 온도, 습도, 빗물의 영향으로 파괴가 가속화되어 석면입자를 환경으로 방출시키게 된다. 석면입자의 방출은 바람에 의해 직접

적으로 대기 환경으로 유입되거나, 빗물에 용출되어 지붕과 배관 등을 타고 마당, 토양 등에 머물다가 건조된 후 바람에 의해 공기 중으로 유입되기도 한다. 김현욱 등은 빗물에 씻겨 내려가는 비율이 대기 중 방출보다 훨씬 높고, 토양으로부터의 재비산으로 건물 주변에서 2차 오염의 우려가 높다고 보고하였다³⁾.

또한 공장 슬레이트 지붕 위를 덮고 있는 이끼와 슬레이트 지붕아래 쌓여있는 퇴적토도 함께 채취하여 실체현미경과 전자현미경(SEM-EDX)으로 확인한 결과, 실체현미경에 의한 육안으로도 석면입자를 쉽게 확인할 수 있었다(Fig. 10). 퇴적토는 빗물

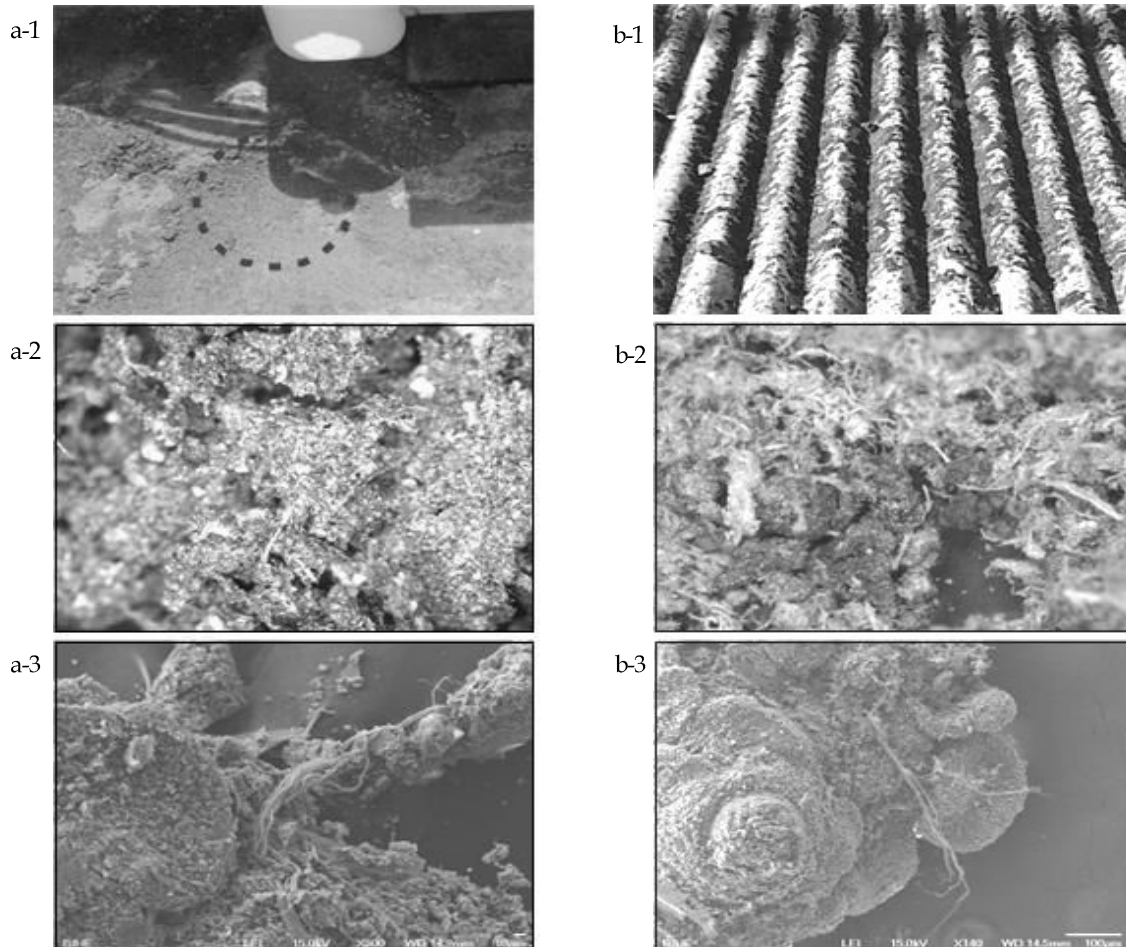


Fig. 10. Asbestos(chrysotile) fibers in sediment below the slate(a-1,2,3) and moss on the slate(b-1,2,3). (a-2, b-2 : stereomicroscopy ; a-3, b-3 : scanning electronic microscopy).

등에 씻겨 내린 슬레이트지붕 성분과 주변 토양, 먼지 등이 긴 시간동안 쌓인 물질이므로 석면입자의 함유량이 매우 높은 것으로 추측되었다. 이끼류에는 슬레이트 입자와 석면입자가 뒤섞여 붙어 있었는데, 슬레이트 표면에서 떼어냈을 때 석면입자의 함유 정도가 매우 많고 노출 정도도 심하였다. 슬레이트의 이끼류는 표면을 보호해 주는 역할을 하고, 이끼의 대사산물이 석면섬유의 화학적 성분을 변환시켜 무해한 물질로 만들기도 한다는 연구 결과도 있으나^{27,28)}, 본 조사에서는 슬레이트 표면의 이끼류가 외부 환경의 영향으로 떨어져 나갈 때, 더욱 많은 석면입자를 방출시킬 가능성이 있을 것으로 나타났다.

2010년 환경부의 슬레이트 지붕재로부터 5 m 반경 내의 토양에 대한 조사에 따르면, 슬레이트 연식이 오래될수록 토양시료 내 석면 검출률이 높았으며, 지붕 처마끝 빗물받이 시료의 경우 70 %에서 석면이 검출되었고, 빗물 낙하지점 토양의 40 %, 5 m 반경 토양의 15 %에서 석면이 검출되었다고 보고하였다⁷⁾. 본 조사에서는 빗물, 토양, 퇴적토 등 동일한 매체가 아니므로 석면 함유량을 비교할 수는 없으나, 토양보다 유출빗물 중에 석면입자가 더욱 많이 존재하고, 슬레이트 아래 퇴적토 중에서 더 많은 석면입자가 검출되었으며, 슬레이트 표면의 이

끼류 덩어리에는 석면입자가 가장 많이 함유되어 있었다.

인체 위해성평가

석면슬레이트지붕으로부터의 발암 위험도를 산정하기 위해 각 지점에서 SEM-EDX법으로 조사된 공기 중 석면농도를 노출농도(EPC)로 사용하였으며, 시간 가중인자(TWF) 계산은 주택에서의 체류시간은 주 5일 근무를 가정하여 연중 250일은 12시간, 115일의 휴일은 22시간으로, 실외 체류시간은 매일 2시간으로 가정하여 산정하였으며, 공장 근로자의 경우는 주5일 8시간 근무로 가정하였다(Table 9).

흡입단위위해도(IUR)는 주택 거주자의 경우 35세부터 25년 노출로 가정하여 0.035로 계산하였고, 공장 근로자의 경우 취업연령인 30세부터 20년간 노출로 가정하였다.

건축물별 조사된 석면노출 농도와 시간가중인자(TWF) 및 흡입단위위해도(IUR)를 이용해서 계산한 발암위험도(ELCR)는 Table 10과 같다.

석면함유 슬레이트지붕 주택 거주자에 대한 발암 위험도는 6.5×10^{-6} (백만명당 6.5명 발암가능) 수준으로 나타났으며, 석면슬레이트 지붕이 설치된 공장 근로자의 발암위험도는 5.5×10^{-6} (백만 명당 5.5명 발암가능) 수준으로 나타났다. 이론적인 발암물질의

Table 9. Calculation of TWFs in the ASR(asbestos-cement slate roofing) buildings

activity space	exposure activities scenarios	TWF
residential	- 250 days per a year, 12 hours per a day exposure	0.620
	- 115 days per a year, 22 hours per a day exposure	
plant	- 250 days per a year, 8 hours per a day exposure	0.228

Table 10. Calculation of ELCRs in the ASR(asbestos-cement slate roofing) buildings

buildings	EPC(f/mL)	TWF	IUR(f/mL) ⁻¹	ELCR
residential	0.0003	0.620	0.035	6.51E-06
plant	0.0006	0.228	0.040	5.47E-06

허용위해도는 자연발생적 사망률에 상응하는 1.0×10^6 (백만 명당 1명)라고 정하고 있으나, 현실적으로는 환경성 발암물질의 경우 여러 가지 투자비용에 대한 경제적 손익, 공학처리 기술이나 분석기술에 대한 조건들이 감안되어 1.0×10^5 (십만 명당 1명) 수준으로 결정되고 있으며, WHO에서도 발암성 물질의 평생초과 발암위해도(ELCR)를 1.0×10^5 (십만 명당 1명)로 제안하고 있다. 본 연구의 위해성 평가 결과 석면슬레이트 지붕 건축물 이용자의 발암위험도는 WHO 허용위해도를 초과하지 않은 것으로 나타났으나, 슬레이트 지붕 아래의 토양 중에 석면을 포함한 무기섬유 입자가 217 - 348 f/g 이상 존재하는 것으로 확인되어 토양이 파헤쳐지거나, 풍속이 셀 경우 등에는 허용위해도를 초과할 가능성이 높을 것으로 사료되었다. 정순희 등²⁹⁾의 연구에서도 국내 2004년 - 2005년 사이 악성중피종으로 진단된 45건의 사례 중 6건이 슬레이트 가옥에서의 환경노출이 있었음을 보고하였다.

결 론

석면슬레이트 지붕으로부터의 석면 노출특성을 알아보고자 1987년에 설치된 공장슬레이트와 1983년 이전에 설치된 것으로 추정되는 주택슬레이트를 선정하여, 특성을 파악하고 주변 공기, 빗물 유출수, 토양에서의 석면 함유량을 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 두 슬레이트 지붕 주변의 공기 중 섬유상 입자 농도는 0.0012 - 0.0018 f/mL로 나타났으며, 강우 24시간 이내 포집 공기에서는 섬유상 입자가 검출되지 않았으며, 건조시기와 강우 48시간 이후의 공기 중 섬유상 입자 농도의 차이는 없었다. 전자현미경에 의한 석면농도는 0.0000 - 0.0006 f/mL였으며, 건조시기의 공기 중에서만 석면이 검출

되었다.

2. 석면슬레이트 지붕으로부터 유출된 빗물 중의 석면 함유량을 조사한 결과, 최저 1,764 f/L에서 최고 10,584 f/L까지 큰 차이를 나타냈으며, 강수량이 가장 적을 때의 농도가 가장 높았고 강수량이 많아질수록 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 또한 강수량이 많을수록 단위면적당 석면 유출량이 많은 것으로 조사되었고 강수량이 적을 때의 유출농도는 높았으나, 슬레이트 단위면적당 유출량은 강수량에 비례하는 것으로 나타났다.
3. 슬레이트지붕 주변 토양 중에도 석면을 비롯한 무기성 섬유입자가 217 - 348 f/g 이상 존재하고 있으며, 전자현미경(SEM-EDX) 관찰 결과 다수의 백석면 입자를 확인할 수 있었다. 슬레이트를 덮고 있는 이끼와 슬레이트 아래 쌓여 있는 퇴적토에 대해 실체현미경과 전자현미경(SEM-EDX)으로 관찰한 결과, 빗물이나 토양보다 훨씬 많은 수의 석면입자가 확인되었다.
4. 전자현미경으로 분석한 공기 중 석면농도를 노출농도(EPC)로 가정하여 인체 위해성평가를 수행한 결과, 발암위험도는 5.5×10^6 (백만 명당 5.5명 발암가능) - 6.5×10^6 (백만 명당 6.5명 발암가능) 수준으로, 슬레이트지붕으로부터 석면입자의 방출이 WHO 허용위해도(1.0×10^5)를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 공장 슬레이트로부터의 석면 방출량이 주택 슬레이트보다 많은 것으로 나타났으나, 발암위험도는 연간 이용시간이 더 많은 석면슬레이트 주택에서 더 높게 나타났다. 부산광역시의 슬레이트 건축물 가운데 89 %인 41,870동이 주택 건축물이며, 슬레이트지붕 주택의 대부분은 경제적 취약계층이 거주하고 있으면서, 노후화가 심하고 인구 밀집도가 높은 지역에 편중되어 있다. 특히, 무허가 슬레이트지붕 주택은 건축연도를 정확하게 알 수 없으나 대부분 20 - 30년 이상의 노후 건축물

이며 파손 정도도 허가 건축물보다 심한 경향이 있으므로 더욱 철저한 관리 대책이 필요한 실정이다. 노후 슬레이트 유지관리의 대표적 방안으로 철거 및 지붕개량사업이 추진되고 있으며, 완전한 개량 대신에 시멘트 기와나 플라스틱 기와를 덧씌우는 방법, 슬레이트지붕 위에 페인트칠을 하는 방법, 슬레이트 고품화제를 분무시켜 표면을 견고하게 함으로써 석면입자의 비산을 방지하는 등의 노력이 뒤따라야 할 것이다.

참고문헌

1. 환경부, “석면관리총람”(2009)
2. 최정근, 백도명, 백남원, “우리나라의 석면 생산과 사용 및 근로자 수와 노출농도의 변화”, 한국산업위생학회지, 8(2), 242 - 253(1998)
3. 김현욱, 박계영, 한진구, 한영선, 황범구, 이준혁, “슬레이트 지붕 노후화에 따른 석면 섬유 방출량”, 한국산업위생학회지, 20(2), 88 - 93 (2010)
4. Bassani, C., Cavalli, R. M., Cavalcante, F., Cuomo, V., Palombo, A., Pascucci, S., Pignatti, S., “Deterioration status of asbestos-cement roofing sheets assessed by analyzing hyperspectral data”, *Remote Sensing of Environment*, 109, 361 - 378(2007)
5. 한국산업안전공단, “석면함유 제품 실태조사 및 DB구축 연구”(2007)
6. Dias, C. M. R., Cincotto, M. A., Savastano Jr., H., John, V. M., “Long-term aging of fiber-cement corrugated sheets - The effect of carbonation, leaching and acid rain”, *Cement & Concrete Composites*, 30, 255 - 265(2008)
7. 환경부, “슬레이트관리 종합대책”(2010)
8. 부산광역시, “부산광역시 슬레이트지붕 전수조사 보고서”(2011)
9. 부산광역시, “2013년 부산광역시 슬레이트건축물 실태조사 보고서”(2013)
10. Dyczek J., “Surface of asbestos-Cement(AC) Roof Sheets and assessment of the Risk of Asbestos Release”, Krakow, Poland(2006)
11. Zivica V., Bajza A., “Acidic attack of cement based materials - a review. Part I. Principle of acidic attack”, *Const. Bdlg Mtrl*, 15, 331 - 340(2001)
12. Xie S, Qi L, Zhou D., “Investigation of the effects of acid rain on the deterioration of cement concrete using accelerated tests established in laboratory”, *Atmos Environ*, 38, 4457 - 4466(2004)
13. Beddoe RE, Domer HW, “Modelling acid attack on concrete : part I. The essential mechanisms”, *Cement Concrete Res*, 35, 2333 - 2339(2005)
14. Spurny, K. R., “On the release of asbestos fibers from weathered and corroded asbestos cement products”, *Environmental Research*, 48, 100 - 116(1989)
15. Bornemann p, Hildebradt U., “On the problem of environmental pollution by weathering products of asbestos cement”, *Staub Reinhalt. Luft*, 46(11), 487 - 489(1986)
16. Meyer E., “Examination of the importance of weathering asbestos cement planes for the concentration of asbestos fibers in the environment”, *Staub Reinhalt. Luft*, 46(11), 482 - 484(1986)

17. 장봉기, 류제영, 박지혜, 윤설희, 조윤희, 탁현욱, 조충기, 공지훈, 이종화, “강우 경과시간에 따른 석면 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중 석면 섬유 방출량”, *순천향 자연과학연구논문집*, 17(2), 161 - 168(2011)
18. ISO, “ISO 14966 : Ambient air - determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles - scanning electron microscopy method”(2002)
19. 산업통상자원부 기술표준원, “KS L 5114: 2013”, <http://www.kats.go.kr>(2013)
20. US EPA, “Part 763-Asbestos ; subpart E-asbestos-containing materials in schools”(1987)
21. US EPA, “Framework for investigating asbestos-contaminated superfund sites”, OSWER Directive #9200.0-68(2008)
22. 환경부, “석면광산등 석면발생지역의 토양환경 관리지침”(2010)
23. US EPA, “Quantitative estimate of carcinogenic risk from inhalation exposure”(1986)
24. US EPA, “Asbestos(CASRN 1332-21-4), Integrated Risk Information System”, <http://www.epa.gov/iris>(1993)
25. WHO, “Air Quality Guidelines-Second Edition, Chapter 6.2 Asbestos”(2000)
26. 부산광역시보건환경연구원, “보건환경연구원보”, 2011 - 2013.
27. Favero-Longo SE., Castelli D., Fubini B., Piervittori R., “Lichens on asbestos-cement roofs; Bioweathering and biocovering effects”, *J. Haz. Mtrl.*, 162, 1300 - 1308(2009)
28. Turci F, Favero-Longo SE, Tomatis M, Martra G, Castelli D, Piervittori R, Fubini B, “A biomimetic approach to the chemical inactivation of chrysotile fibers by lichen metabolites”, *Chem Eur J.*, 13, 4081 - 4093 (2007)
29. 정순희, 김형렬, 고상백, 용석중, 최병순, 안연순, 박태인, 정명자, 김윤미, 송지선, 정윤경, 명준표, “감시체계를 통해 파악한 악성중피종의 역학적 특성”, *대한산업의학회지*, 18(1), 46 - 52(2006)