Journal of Environmental Science International
24(7); 927~937; July 2015

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2015.24.7.927

**ORIGINAL ARTICLE**

# 공장과 주택 슬레이트지붕의 석면 노출특성 비교

**정재원*・유은철・이상준[1)]・박근태[2)]**

부산광역시보건환경연구원, [1)]부산대학교 환경연구소, [2)]부산대학교 나노소재공학과

# Comparison on the Releasing Characteristics of Asbestos Fiber from Plant Slate Roof and House Slate Roof

Jae-won Jeong*, Eun-chul Yoo, Sang-Jonn Lee[1)], Geun-Tae Park[2)]

*Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan 611-813, Korea*

*[1)]Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

*[2)]Department of Nanomaterials Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

## Abstract

This study was performed to identify and quantify the asbestos fibers released from two types of asbestos-cement slate roofs. One is a plant roof installed in 1987 which contained 15% chrysotile, and the other is a residential roof installed before 1983 which contained 12% chrysotile. The concentrations of asbestos fibers in air surrounding asbestos-cement slate roofs and in the falling water harvested from the same roofs on rainy days ranged from 0.0012 to 0.0018 f/mL and from 1,764 f/L to 10,584 f/L, respectively. The concentration of inorganic fibers in the soil around asbestos-cement slate roofs was from 217 to 348 f/g. With the above results, 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 which indicates that the levels do not exceed "the acceptable risk(1.0E-05)" recommended by WHO. The asbestos concentration in air, drained rainfall and soil around the plant slate roof was higher than that around residential slate roof, but the excess lifetime cancer risk (ELCR) from residential slate was higher than that from plant slate. This suggested that the enclose and encapsulation of residential roofs have priority in removal policy to minimize the exposure risk.

**Key words** : Asbestos-cement slate roof, Airborne fibers, Drained rainwater from asbestos slate, The excess lifetime cancer risk (ELCR)

## 1. 서 론

석면슬레이트는 통상 시멘트(80~85%)와 백석면(15~20%)으로 구성되어 있으며(KOSHA, 2007), 석면의 유연성과 고온에 대한 높은 저항성, 강알칼리 pH에 대한 안정성 등과 같은 특성으로 인해 물리・화학적으로 내구성이 강한 시멘트의 제조를 위해 슬레이트와 혼합하여 사용되어졌다.

이러한 석면은 1987년 국제암연구소(IARC)에서 1급 발암물질로 지정하기 이전까지 상기에 나열한 우수한 광물학적 특성에 의해 전 세계적으로 건설현장, 산업현장 및 일반가정에서 널리 사용되어 왔다. 우리나라에서도

**Received** 5 March, 2015; **Revised** 31 March, 2015;
**Accepted** 1 April, 2015
***Corresponding author** : Jae-won Jeong, Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan 611-813, Korea
Phone: +82-51-309-2926
E-mail: jjw6411@korea.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1930년대 국내 생산이 시작된 이후, 모든 석면제품의 생산 · 수입 · 양도 · 제조 · 사용이 금지된 2009년 전까지 꾸준히 사용되었는데, 특히 1960년대에 정부주도의 경제개발계획으로 슬레이트 사용이 증가하기 시작하여 1970년대 새마을운동의 전국적인 전파에 따라 석면슬레이트 제품의 생산 및 사용이 급증하였다(Kim 등, 2010).

그러나 석면슬레이트는 시간이 지남에 따라 바람, 온도, 습도의 영향에 의해 결합력이 점차 약해지는 특성이 일반적인 광물보다 강한데 특히 빗물의 침투에 의해 파괴가 더욱 가속화 되어 석면섬유가 주변 환경으로 방출되는 것으로 알려져 있다(Dias 등, 2008). 그 중에서도 대기 중으로 방출된 미세한 석면섬유는 공기 중에 부유·정체 하다가 호흡기를 통하여 인체로 흡입되면 10~40년의 잠복기를 거쳐 석면폐증, 폐암, 악성중피종 등을 유발시킬 수 있으며, 섭취 시에는 장관계의 암과 인후두암, 신장암, 췌장암, 임파선암 등을 유발하는 것으로 알려져 있다. 따라서 우리 주변에 존재하고 있는 석면함유 건축물과 석면슬레이트지붕으로부터 발생될 수 있는 건강에의 위해성을 파악하고 대책을 마련할 필요가 있다.

환경부의 조사에 의하면 전국에 설립된 건축물 중 약 123만동 슬레이트지붕으로 덮여 있는 것으로 파악되고 있다. 그 중 대부분이 주거용 건축물(88만동, 71.4%)로 사용되고 있는데 도심지에 66만 여동, 농어촌에 57만 여동 분포하고 있었다. 또한, 이런 주거용 건축물의 설립 연식으로 볼 때에는, 70년대 이전의 건물이 다수(55.4%)를 차지해, 노후화에 따른 석면비산의 가능성이 높을 것으로 추측되어졌다(MOE, 2010a).

한편, 부산광역시에의 경우에는 3.8%에 해당하는 47,300여동의 슬레이트 건축물이 있는 것으로 조사되었으며, 이러한 수치는 서울시 및 타 광역시보다 2~4배 높은 비율로서 도심 내 저소득층이 밀집한 주거공간지역이 대부분(82.3%)을 차지하는 것으로 조사되었다. 부산광역시 슬레이트지붕 건축물의 용도별 조사결과에 의하면, 주택이 89.0%로 가장 많았고, 시설 6.2%, 공장 4.0%, 창고 0.7%, 축사 0.1% 등으로 나타났는데, 그 중에서도 무허가 주택의 슬레이트지붕 설치비율이 가장 높은 것으로 나타났다(Busan metropolitan city, 2011, 2013).

그러나 공장 건물이 차지하는 비율은 건축물수로 비교를 하면 전체 건축물 수의 4.0% 밖에 되지 않지만 대부분의 공장건물 면적이 주택에 비해 넓다는 점을 감안하여, 지붕을 덮고 있는 슬레이트의 면적 비율로 환산하여 비교해보면 전체면적의 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 면적대비로는 61.4%인 것으로 밝혀졌다(Table 1).

도시민의 건강보호를 위해서는 모든 슬레이트지붕의 철거 및 교체가 시급히 이루어지는 것이 가장 이상적이기는 하지만, 현재 진행되고 있는 정부주도 방식의 슬레이트지붕 교체사업은 비용과 처리 등의 문제로 향후 10년 이상 걸릴 것으로 예상된다. 따라서 교체가 진행되는 기간에는 석면슬레이트 지붕으로부터의 석면방출을 줄일 수 있는 대책을 마련하고, 또한 슬레이트지붕으로부터 주변 환경으로의 석면 노출정도와 위해성을 파악하고 이를 바탕으로 효율적인 철거계획 및 관리의 필요성이 있다.

이에 본 연구는 부산광역시에서 면적면에서 가장 많은 1, 2순위를 덮고 있는 공장과 주택의 슬레이트지붕으로부터 공기, 빗물, 토양으로의 석면노출 실태를 파악하고 거주자에 대한 건강 위해도를 평가함으로써 향후 슬레이트지붕 건축물의 관리 방안에 참고가 되는 조사결과를 제시하고자 하였다.

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

| | Total | residential | facility | factory | warehouse | livestock shed |
|---|---|---|---|---|---|---|
| buildings | 47,035 | 41,870 | 2,895 | 1,893 | 314 | 63 |
| | | (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 |
| | | **(61.4%)** | (11.1%) | **(25.5%)** | (1.4%) | (0.6%) |

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사대상

부산의 슬레이트지붕 건축물 중 가장 많은 면적을 차지하는 주택지역 중 외관상 평균이 될만한 지역 한 곳(부산광역시 남구 문현동의 무허가 주택마을)과 공장(부산광역시 사하구의 대규모 목재공장)을 조사대상으로 선정하였다(Fig. 1). 조사지점의 선정은 공장전체의 슬레이트지붕 규모와 주택지의 총 슬레이트지붕의 총면적 규모가 비슷한 지점을 지도상으로 확인하여 최종적으로 선정하였다. 공장 슬레이트는 기록상의 근거로 1987년에 설치된 것을 알 수 있었으나, 무허가 주택지의 건물에 대해서는 일률적이지도 않을 것으로 예상되고 또한 정확한 건축년도를 알 수 없었다. 그러나 오랫동안 거주한 주민의 구두증언에 의하면 최소 1983년 이전에 슬레이트가 설치된 것으로 추정되었다. 슬레이트 지붕의 손상 정도면에서는 금이 가거나 파손된 곳이 없는 것으로 선정하였으며, 특히 공장 슬레이트는 물리적 관리상태가 외관상 주택 슬레이트보다 양호하였다. 1차적으로 전자현미경(SEM-EDX)으로 석면함유율을 살펴본 결과에 의하면, 공장을 덮고 있는 슬레이트에는 백석면(chrysotile)이 15% 그리고 주거용 건축물 지붕에는 12%정도 함유되어 있었다. 이를 요약하여 표 2에 제시하였으며, 각 건축물 지붕의 대표적 형태 이미지는 Fig. 2와 같다.

### 2.2. 공기 중 석면 노출농도 측정

공기 중 석면 노출정도는 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 48시간 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 개방형 필터홀더를 사용하여 10 L/min의 유량으로 2,400 L가 되도록 채취하였다.

포집한 시료 필터의 절반은 실내공기질공정시험기준

**Fig. 1.** Sampling sites of asbestos-cement slate roofs in Busan.

**Table 2.** The characteristics of sampling slates

| slate roof | installed year | contained asbestos | appearance |
|---|---|---|---|
| plant | 1987 | chrysotile 15% | good |
| residential | before 1983 | chrysotile 12% | not good |

a) the roof of a plant : good b) the roof of a residential house : not good

**Fig. 2.** Appearance of sampled asbestos-cement slate roofs.

(환경부고시 제2010-24호) ES 02303.1『실내공기 중 석면 및 섬유상 먼지 농도 측정방법 - 위상차현미경법』에 따라 분석하였고, 나머지는 ISO 14966 방법에 따라 주사전자현미경(SEM-EDX)에 의해 분석하였다.

2.2.1. 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 이상의 섬유를 계수하는 방법이다. Walton-Beckett graticule의 1시야 당 면적이 0.00785 $mm^2$ (400배율)로 계산되어지는데, 따라서 100시야의 면적은 0.785 $mm^2$에 해당된다. 그러나 위상차현미경법에 의한 결과는 공기 중의 석면 뿐만 아니라 섬유상 먼지입자를 구분하기 힘들어 결과에 오류의 가능성이 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 섬유상먼지의 농도($C_{PCM}$)는 식 (1)에 의하여 계산된다. 이때 A는 유효 포집면적(MCE필터의 포집면적, 385 $mm^2$)이며, $N_1$은 위상차현미경에서 계수된 시료의 총 섬유수(f), $N_2$는 위상차현미경에서 계수된 바탕시료의 총 섬유수(f), $a$는 현미경 1시야의 면적(0.00785 $mm^2$), V는 포집한 공기량(L), n은 계수한 시야수를 의미한다.

2.2.2. 주사전자현미경법 (Scanning Electron Microscopy)

공기포집 시료와 토양 시료에서 검출된 섬유입자의 석면여부 확인을 위해 EDS(Energy-dispersive X-ray spectroscopy, 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 관찰하였다. 관찰 중 계수는 길이가 5 μm 이상이고, 길이 대 지름의 비가 3:1 이상되는 섬유상 입자를 대상으로 하였다. 주사전자현미경은 가속전압 15 kV, 작업거리(working distance) 15 mm에서 분석하였으며, 계수한 입자는 10,000~15,000 배율에서 EDS를 이용하여 원소 스펙트럼 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 계산하였

다. 이때 A는 유효 포집면적(MCE필터의 포집면적, 385 $mm^2$), N은 전자현미경에서 계수된 총 석면 입자수(f), *a*는 전자현미경의 1시야의 면적(0.0020 $mm^2$:전자현미경 2,000배율에서 관찰화면 크기, 가로 50 μm × 세로 40 μm), V는 포집한 공기량(L), n은 계수한 시야수를 말한다. ISO 14966법에서는 1 $mm^2$ 이상의 필터 면적을 관찰할 것을 권고하고 있으므로, 500시야를 관찰하고 계수하여 총 관찰면적이 1.0 $mm^2$가 되도록 하였다.

### 2.3. 빗물 중 석면농도 측정

공기 중 석면시료를 포집한 지점과 동일한 지점의 슬레이트 지붕에서 흘러내리는 빗물을 채취하기 위해 동일 슬레이트지붕 부위의 아래에 깔대기를 고정시키고 물통을 이용해 시료를 채취하였다.

채취된 빗물 시료는 충분히 혼합한 후, 1 L를 취하여 진공펌프를 이용하여 직경 47 mm, pore size 0.45 ㎛의 MCE 필터로 1차 여과한 다음, 불순물과 유기물을 제거하기 위해 450 ℃의 회화로에서 24시간 동안 회화 처리한 것을 1M-HCl로 산 처리한 다음, 직경 47 mm의 MCE 필터로 다시 2차적으로 여과하고 건조시켰다. 상기의 설명과 같이 전처리한 MCE 필터는 아세톤-트리아세틴법에 의해 투명화시킨 후, 위상차현미경 400배율에서 총 100시야를 관찰하면서 석면입자를 계수하였다. 위상차현미경 400배율에서 100시야의 면적은 0.785 $mm^2$이다. 47 mm MCE 필터의 유효면적(유효직경 42 mm로부터 환산)은 1384.7 $mm^2$로 계산되어 위상차현미경에서 100시야를 관찰한 농도의 1,764배를 하여 결과를 도출하였다.

### 2.4. 토양 중 석면농도 측정

공기 및 빗물내 석면의 유출정도를 조사한 슬레이트 지붕 건축물의 주변 토양을 함께 채취하여, 석면슬레이트로부터 주변 토양으로의 석면 노출실태를 알아보고자 하였다. 공장과 주택의 바닥은 콘크리트로 덮여 있어 순수토양을 채취할 수 없었기 때문에 대신 공장지붕 주변의 작은 화단과 주택지붕아래의 화분에서 흙을 채취하였다.

시료의 채취는 모종삽을 이용하여 화단이나 화분 또는 표층 토양을 약 10~50 g 정도 채취하여 무색의 폴리에틸렌병에 담아 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 실험실 후드 내에서 48시간 동안 자연 건조시킨 후, 500 μm 크기의 체(seive)를 통과시켜 균질화 하였다. 체를 통과한 토양시료를 1차적으로 실체현미경(Olympus, SZ51)을 이용해 관찰하여 시료의 균질여부, 섬유상 물질의 존재여부, 섬유상 물질의 색과 형태 등을 확인하였다. 석면으로 의심할 만한 섬유상 입자는 핀셋으로 골라내어 카본테이프가 붙어있는 주사전자현미경 전용 시료대에 장착한 후, 200초간 백금 코팅하고 2,000~20,000배율에서 섬유의 형태를 관찰하고, EDX를 사용하여 입자의 화학조성을 확인하였다.

육안으로 1차 확인한 토양시료 중 약 10 g을 분취하여 비이커에 담고 증류수 250 mL를 넣어 1분 이상 혼합시키고 1시간 방치함으로서 상등액을 분리하였다. 이 과정을 수차례 반복하여 상등액의 양을 1L로 맞추고, 이 액을 진공펌프를 이용하여 직경 47 mm의 MCE 필터로 여과하였다. 이후의 절차는 빗물 시료의 분석방법과 동일하게 처리하였으며, 위상차현미경과 전자현미경으로 관찰하였다.

### 2.5. 인체 위해성평가

석면 노출에 대한 인체 위해성 평가는 미국 EPA에서 제시하고 있는 발암위험도 평가방법(EPA, 1987, 2008)을 바탕으로, 환경부의 『석면광산 등 석면발생지역의 토양환경 관리지침』의 위해성 평가방법(MOE, 2010b)과 미국 EPA IRIS(Integrated Risk Information System) 데이터를 이용하였다(EPA, 1986). 공기 중 석면의 발암위해도는 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) : 흡입단위위해도(흡입노출로 인한 단위위험도)

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

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

흡입단위위해도(IUR)는 최초 노출된 나이와 노출기간에 따른 암 발생 위험도로서, EPA IRIS에서 제시한 값을 근거로 결과를 도출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 석면슬레이트 지붕 주변의 공기 중 석면농도

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

PCM법에 의한 조사 결과, 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 결과 간에는 유의할 만한 차이가 없는 것($p<0.05$)으로 나타났다. 공기 중 입자상물질의 조사를 위해서는 적어도 강우 48시간 이후의 조건에서 조사함이 타당함을 알 수 있었는데 이는 강우 24시간 이내에 포집한 공기 중 시료에서는 2지점 모두에서 섬유상 입자가 불검출 되었기 때문이다.

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 모니터링을 통해 얻어진 결과와도 유사하였다. 검출된 석면은 모두 백석면이었으며, 공장 슬레이트지붕 주변 공기 중에서 2개의 석면입자를, 주택 슬레이트지붕 주변 공기 중에서 1개의 석면입자를 확인하였다(Fig. 3). 이러한 결과는 두 슬레이트의 설치년도와 외관상 손상정도로 예상하였던 결과와 상반되는 것이었다. 이와 같이 공장 슬레이트 주변의 공기 중 석면농도가

**Table 3.** Airborne fibers concentration in asbestos slate roofs by PCM and SEM

| buildings | | dry condition | in 24hrs after rainfall | after 48hrs after rainfall |
|---|---|---|---|---|
| plant | sampling date | 2013. 8. 20. | 2013. 9. 30. | 2013. 10. 4. |
| | temp. (℃) | 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. (℃) | 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** |

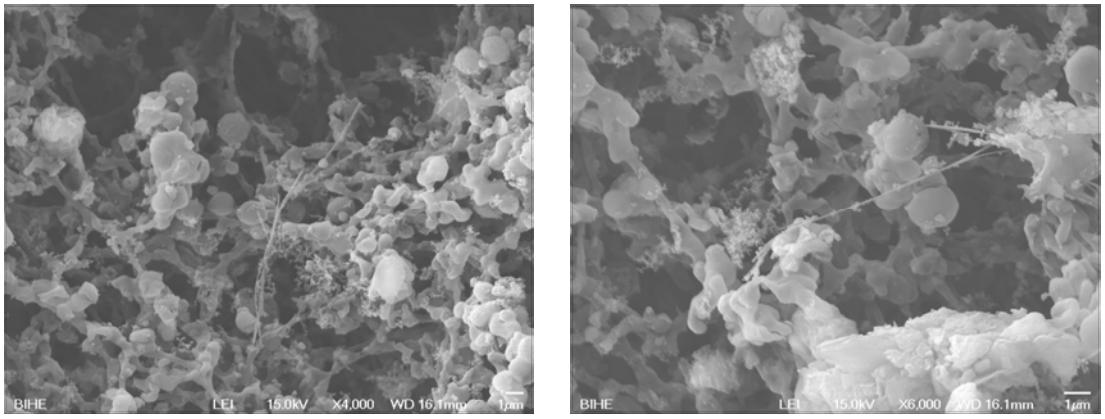


**Fig. 3.** Asbestos(chrysotile) fibers in air around slate roof by SEM image.

더 높게 나타난 것은 공장슬레이트의 석면함유량이 15%로써 주택의 슬레이트 석면함유량(12%)보다 높은 것이 주원인 중의 하나일 것으로 유추되었으나, 현재까지는 함량대비 석면유출에 대한 실험적 결과가 보고된 바가 없어 추후 관련 연구의 필요성을 보여주었다.

### 3.2. 슬레이트지붕으로부터 유출된 빗물 중 석면농도

석면슬레이트 지붕으로부터 유출된 빗물 중의 석면함유량 조사는 공장과 주택에서 2013년 하절기에 각 3회 측정하였다. 빗물 채취 시의 강수량은 기상청 자료를 참고하였으며, 집수통에 모인 빗물의 양과 빗물 중의 석면농도를 Table 4에 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. 동일한 강우일에 유출된 빗물 중의 석면 함유량을 비교해 보면, 공장슬레이트로부터 유출된 석면입자가 더 많거나 같은 것으로 조사되었다. 이는 공기 중 석면농도의 경향과 일치하였는데, 이 결과는 2 종류 슬레이트의 석면함유량의 차이에서 기인하는 것으로 사료되었다.

슬레이트 지붕에서 유출된 빗물시료의 pH는 6.6~7.0의 범위였으며, 강수량, 지붕 유형이나 지붕 면적 등과 상관성을 찾을 수 없었다. 슬레이트 지붕을 통과하지 않은

**Table 4.** Asbestos concentration of drained rainwater from ASR 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 |

강우의 pH를 동일한 강우일에 조사하지 않아 직접적 비교가 어렵지만, 부산광역시보건환경연구원의 결과에 의하면 시료채취일과 비슷한 시기의 강우 중 동일지역에서 일반 빗물 낙하시료에서 얻어진 pH가5.0~5.5 수준으로 조사되었다는 점을 감안한다면, 빗물이 슬레이트 지붕을 통과하면서 pH가 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중의 석면방출에 대한 연구를 최초로 실시한 Kim 등(2010)은 방출된 석면섬유 농도가 7,152 f/L~31,202 f/L의 범위였으며, 슬레이트 설치연한이 오래 경과되었을수록, 강우량이 증가할수록 방출량이 증가한다고 보고하였다. 또한, Jang 등(2011)도 설치연도가 다른 3종류의 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중 석면 농도를 강우 경과시간에 따라 분석하여 4,645 f/L～8,996 f/L의 석면 방출량을 나타내었고, 초기 강우에서 석면입자가 유의하게 많이 유출된다는 연구결과를 보고한 바 있다.

본 연구결과를 이들 결과와 비교하여 살펴보면, 유출된 빗물 중의 석면 농도면에서는 Kim 등(2010)의 연구결과보다 낮게 조사되었으며, 강수량에 따른 석면 방출량의 변화에서도 차이가 있었다. 그러나 강수량이 적을 때의 농도가 더 높게 나타난 점은 Jang 등(2011)의 결과와 유사하였다.

### 3.3. 슬레이트지붕 주변의 토양 중 석면농도

슬레이트지붕 주변의 화단의 흙을 채취하여 실체현미경을 이용한 1차 육안확인 결과는 석면이 검출되지 않았으나, 수차례 씻어 내린 증류수 여과액에서는 석면입자가 검출되었다. 1 L의 여과액 중의 석면입자를 위상차현미경으로 계수하고, 관찰 시야를 필터의 유효면적으로 환산하였을 때의 농도는 Table 5에 나타낸 바와 같다.

여과액을 전처리한 MCE 필터의 일부분을 전자현미경(SEM-EDX)으로 관찰하였을 때 다수의 무기성 섬유상 입자와 함께 백석면 입자를 확인할 수 있었다(Fig. 4). 여과액 1L는 토양 시료 50 g을 씻어낸 양이므로, 석면슬레이트 아래의 토양 1 g 중에는 석면을 포함한 무기성 섬유입자가 적어도 217~348개 이상은 존재한다고 짐작할 수 있었다.

요약하면, 공장슬레이트 주변 토양 여과액 중의 석면 농도가 주택슬레이트 주변 토양보다 높게 나타났는데 이

**Table 5.** Asbestos concentration of soil around the slate

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

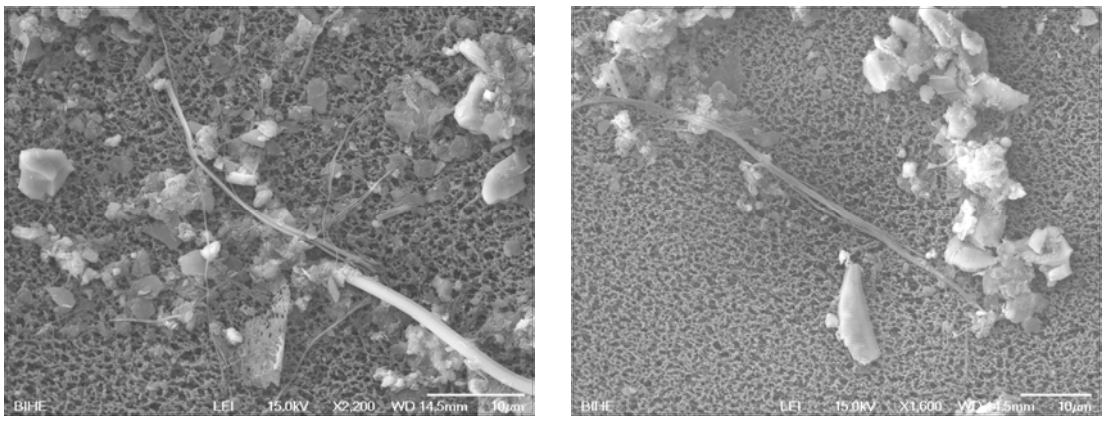


**Fig. 4.** Asbestos fibers and non-asbestos fiber in soil filtrate by SEM image.

**Table 6.** Calculation of TWFs in the ASR buildings

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

는 공기 중 석면농도 및 빗물 유출수 중 석면농도가 높았던 결과와 일치함을 알 수 있었다.

이상과 같은 관찰을 통해 볼 때, 위상차현미경 400배율에서의 섬유입자의 계수에서는 빗물시료나 토양 여과시료 중의 석면입자와 공기 포집시료간에는 성상에 차이가 있는 것으로 나타났다. 즉, 빗물과 토양시료의 경우 대부분의 입자가 섬유다발 형태로 존재해 Walton-Beckett graticule보다 큰 경우가 많았고, 회화 전처리에 의해 유기물 입자를 제거하였다고 해도 무기성 비석면 섬유입자도 많이 함유되어 있었다. 따라서 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.

또한, 석면슬레이트는 노후화가 진행될수록 바람, 온도, 습도, 빗물의 영향으로 파괴가 가속화되어 석면입자를 환경으로 유출시키게 된다. 유출된 석면입자는 바람에 의해 직접적으로 대기 환경으로 유입되거나, 빗물에 용출되어 지붕과 배관 등을 타고 마당, 토양 등에 머물다가 건조된 후, 바람에 의해 공기 중으로 재유입되기도 한다. 이와 같은 사실은 이미 Kim 등(2010)에 의해 빗물에 씻겨 내려가는 비율이 대기 중 유출보다 훨씬 높으며, 토양으로부터의 재비산은 건물 주변에서의 2차 오염의 우려가 높다고 보고된 바가 있다.

### 3.4. 인체 위해성평가

석면슬레이트지붕으로부터의 발암 위해도를 산정하기 위해 각 지점에서 SEM-EDX법으로 조사했을 때, 가장 높게 측정된 공기 중 석면농도를 노출농도(EPC)로 사용하였다. 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 주 5일 8시간 근무로 가정하였다(Table 6).

흡입단위위해도(IUR)는 주택 거주자의 경우 35세부터 25년 동안의 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 발암위해도(ELCR)는 Table 7과 같다.

결과에 의하면, 석면함유 슬레이트지붕 주택 거주자에 대한 발암위해도는 6.5E-06(백만명당 6.5명 발암가능) 수준으로 나타났으며, 석면슬레이트 지붕이 설치된 공장 근로자의 발암위해도는 5.5E-06(백만 명당 5.5명 발암가능) 수준으로 나타났다.

이론적인 발암물질의 허용위해도는 자연발생적 사망률에 상응하는 1.0E-06(백만 명당 1명)라고 정하고 있으나, 현실적으로는 환경성 발암물질의 경우, 여러 가지 투자비용에 대한 경제적 손익 및 공학처리 기술이나 분석기술에 대한 조건들이 감안되어 1.0E-05(십만 명당 1명)

**Table 7.** Calculation of ELCRs in the ASR 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** |

수준으로 결정되고 있으며, WHO에서도 발암성 물질의 평생초과 발암위해도(ELCR)를 1.0E-05(십만 명당 1명)로 제안하고 있다. 이에 따르면 본 연구의 위해성 평가 결과 석면슬레이트 지붕 건축물 이용자의 발암위해도는 WHO 허용위해도를 초과하지 않은 것으로 나타났다. 그러나, 슬레이트 지붕 아래의 토양 중에 석면을 포함한 무기섬유 입자가 217~348 f/g 이상 존재하는 것으로 확인된 것으로 미루어볼 때, 토양이 파헤쳐지거나 풍속이 높은 경우 등에는 허용위해도를 초과할 가능성이 높다고 판단된다. 이미 Jung 등(2006)의 연구에서도 국내 2004~2005년 사이 악성중피종으로 진단된 45건의 사례 중 6건이 슬레이트 가옥에서의 환경노출이었음을 보고된 바가 있으므로 상기의 기준치 내에 있다고 할지라도 상황에 따라 유의할 필요가 있을 것이다.

유의할 만한 본 연구의 결과로는 공기, 빗물 유출수 및 토양에서의 석면농도는 석면함유량이 높은 공장슬레이트 주변에서 모두 높게 조사되었으나 발암위해도는 주택슬레이트 거주자가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 발암위해도 산정요건 중 공장에서의 근로시간보다 주택에서의 노출시간이 더 많기 때문이며, 주택거주자의 경우 최초 노출 시기가 더 낮아진다면 흡입단위위해도(IUR)의 값이 더 커짐에 따라 발암위해도는 더욱 높아질 것으로 예상되는 바, 석면슬레이트지붕 주택의 관리가 우선적으로 진행될 필요가 있음을 시사하였다.

이에 대한 대책으로는 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 고형화제를 분무시켜 표면을 견고하게 함으로써 철거되기 전까지 석면입자의 비산을 방지하는 등의 노력을 기울여야 할 것이다.

## 4. 결론

석면슬레이트 지붕으로부터의 석면 노출특성을 알아보고자 1987년에 설치된 공장슬레이트와 1983년 이전에 설치된 것으로 추정되는 주택슬레이트를 선정하여, 특성을 파악하고 주변 공기, 빗물 유출수, 토양에서의 석면 함유량을 측정하였다. 결과에 의하면, 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 섬유입자 농도의 차이는 없었다. 전자현미경에 의한 석면농도는 0.0006 f/mL 이내로 나타났으며, 건조시기의 공기 중에서만 석면이 검출되었다. 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. 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.

전자현미경으로 분석한 공기 중 석면농도를 노출농도(EPC)로 가정하여 인체 위해성평가를 수행한 결과, 발암위험도는 5.5E-06(공장근로자 백만 명당 5.5명 발암가능)~6.5E-06(주택 거주자 백만 명당 6.5명 발암가능) 수준으로 계산됨으로써, 두 지역 모두에서 석면입자의 방출에 대한 WHO 허용위해도(1.0E-05)를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

주목할 점은 본 연구를 통해 공장 슬레이트로부터의 석면 방출량이 주택 슬레이트보다 많은 것으로 나타났음에도 불구하고 발암위험도는 연간 이용시간이 더 많은 석면슬레이트 주택에서 더 높게 나타났다는 것이다. 부산광역시의 슬레이트 건축물 가운데 89%인 41,870동이 주택 건축물이다. 슬레이트지붕 주택의 대부분은 무허가 슬레이트 지붕을 가진 경제적 취약계층이 거주하는 곳이며, 설립연도도 오래되고 관리가 허술하여 노후화가 심할 뿐만 아니라 인구 밀집도가 높은 지역에 편중되어 있음을 고려할 때, 무허가 슬레이트 주택건축물에 대해 상대적으로 시급한 관리 대책이 추진될 필요가 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCE

Bassani, C., Cavalli, R. M., Cavalcante, F., Cuomo, V.,

Palombo, A., Pascucci, S., Pignatti, S., 2007, Deterio-ration status of asbestos-cement roofing sheets assessed by analyzing hyperspectral data, Remote Sensing of Environment, 109, 361-378.

BIHE(Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment), 2011, The Annual Report of Busan metropolitan City Institute of Health & Environment, 21(2), 240-260.

Busan metropolitan city, 2011, The report of total inspection for slate roofing in Busan.

Busan metropolitan city, 2013, The 2013 report of total inspection for slate roofing in Busan.

Dias, C. M. R., Cincotto, M. A., Savastano Jr., H., John, V. M., 2008, Long-term aging of fiber-cement corru-gated sheets - The effect of carbonation, leaching and acid rain, Cement & Concrete Composites, 30, 255-265.

EPA, 1987, Part 763-Asbestos ; subpart E-asbestos-containing materials in schools.

EPA, 2008, Framework for investigating asbestos-contaminated superfund sites. OSWER Directive #9200.0-68.

EPA, 1986, Quantitative estimate of carcinogenic risk from inhalation exposure.

EPA, 1993, Asbestos(CASRN 1332-21-4), Integrated Risk Information System, http://www.epa.gov/iris.

ISO, 2002, ISO 14966 : Ambient air - determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles -scanning electron microscopy method.

Jang, B. K., Ryu, J. Y., Park, J. H., Yoon, S. H., Jo, Y. H., Tak, H. W., Cho, C. G., Kong, J. H., Lee, J. W., 2011, Releasing of asbestos fibers in rainwater drained from asbestos cement slate roofing by the time elapsed of rainfall, Soonchunhyang J. Nat. Sci., 17(2), 161-168.

Jung, S. H., Kim, H. R., Koh, S. B., Yong, S. J., Choi, B. S., Ahn, Y. S., Park, T. I., Chung, M. J., Kim, Y. M., Song, J. S., Chung, Y. K., Myung, J. P., 2006, Epidemiologic characteristics revealed with a malignant mesothelioma surveillance system in Korea, Korean J. Occup Environ Med, 18(1), 46-52.

KATS(Korean Agency for Technology and Standards), 2013, KS L 5114:2013, http://www.kats.go.kr.

Kim, H. W., Park, G. Y., Han, J. G., Han, Y. S., H, B. G., Lee, J. H., 2010, Releasing of asbestos fibers from the weatherd asbestos cement slate roofing, J. Korean Soc Occup Environ Hyg, 20(2), 88-93.

KOSHA(Korea Occupational Safety & Health Agency), 2007, A survey for asbestos containing products and databases construction.

MOE(Ministry of Environment), 2009, A comprehensive survey for asbestos management.

MOE(Ministry of Environment), 2010a, A comprehensive measure for slate management.

MOE(Ministry of Environment), 2010b, Guidelines for soil environment management of asbestos-affected areas, such as asbestos mines, etc.

WHO, 2000, Air Quality Guidelines-Second Edition, Chapter 6.2 Asbestos.