

슬레이트 지붕의 설치년도와 면적에 따른 공기 및 유출 빗물 중의 석면 농도

장봉기^{1*} · 류제영² · 탁현욱¹ · 송수진¹ · 이종화¹ · 이강호² · 최재호³

¹순천향대학교 환경보건학과 · ²한국농어촌공사 · ³안산대학교 방사선과

Asbestos Concentrations in Ambient Air and Drained Rainwater from Slate Roofing by Construction Year and Roof Area

Bong-Ki Jang^{1*} · Je-Young Ryu² · Hyun-Wook Tak¹ · Su-Jin Song¹ · Jong-Wha Lee¹
Gang-Ho Lee² · Jae-Ho Choi³

¹Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

²Korea Rural Community & Agriculture Corporation

³Department of Radiological Technology, Ansan University

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study is to analyze the number and influence factors of asbestos fibers in the air of farmhouses with asbestos cement slate roofing, as well as in rainwater per unit area of the asbestos cement slate roofing.

Methods: At a distance of 1 m from the end of asbestos cement slate roofing in 20 farmhouses, the asbestos fiber in the air was collected three times on a clear day downwind from the prevailing wind. Rainwater falling from the slate roofing was collected four times with a 1.05-m rainwater pipe on a rainy day at the 20 farmhouses, filtered with a MCE filter, and analyzed with a phase contrast microscope.

Results: The geometric mean of the number of asbestos fibers in the air of farmhouses with slate roofing was 0.11 fiber/L, and no samples exceeded the recommended standard of 10 fiber/L. As a result of multiple regression analysis, a factor which gave a significant influence to the asbestos fiber content in the air was the gross area of slate roofing at the target farmhouses. The number of asbestos fibers included in rainwater collected per 1 m² of slate roofing was 1,753 fiber/L·m². As a result of multiple regression analysis, the number of asbestos fibers contained in rainwater per 1 m² of slate showed a significantly higher tendency as the year of slate roofing installation at the target farmhouses receded.

Conclusions: It was confirmed for the first time in Korea that asbestos from asbestos cement slate roofing scatters into the air.

Key words : Asbestos, Slate roofing, Airborne, Rainwater

I. 서 론

석면은 안정적인 화학적 특성으로 전 세계적으로 많이 사용되어져왔고, 우리나라에서는 1960년도에 정부의 경제개발에 따라 사용이 증가하기 시작하여 1970년대부터는 전국에 있는 초가지붕을 개량하면서 석면 슬레이트 지붕으로 대폭 교체함에 따라 석면사용이 급증하

기 시작하였다.

우리나라에 수입된 석면은 1960년도부터 시작하여 1992년에 백석면 9만 5천톤으로 가장 많았으나, 그 후에는 수입량이 급감하기 시작하여, 2009년부터는 석면의 수입 및 사용이 전면 금지되었다(Kim et al., 2010).

1930년대에 현재의 용산지역에 위치한 아사노 슬레이트 회사가 2000년대 중반까지 생산한 석면 슬레

*Corresponding author: Bong-Ki Jang, Tel: 041-530-1268, E-mail: jangbk@sch.ac.kr

Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, 22 Soonchunhyang-ro, Asan-si Chungnam 336-745

Received: June 6, 2013, Revised: July 16, 2013, Accepted: July 25, 2013

이트는 약 70년 이상의 역사를 가지고 있으며, 새마을 운동의 영향으로 그 후 관련 사업이 크게 확장되었다 (Choi et al., 1998). 시멘트에 백석면(10~20%)을 첨가하여 생산하는 석면 슬레이트는 국내 한국슬레이트와 금강 두 회사에서 대부분을 생산하였고, 농어촌 지붕개량 사업으로 사용된 슬레이트의 양은 정확히 파악할 수는 없으나, 2010년 6월 현재까지도 전국에 123만여 동의 슬레이트 지붕이 남아 있다(MoE, 2010).

최근 석면사용으로 인한 피해가 보고되고, 폐석면 광산에서도 인근 주민의 석면에 의한 질병발생 등으로 인하여 석면에 대한 관심이 증대되고 있다. 정부에서도 석면과 관련한 법을 제정하고, 2010년에는 석면이 함유되어 있는 슬레이트 관리 종합대책을 세우면서 국민 건강 보호 및 주거환경 개선을 추진 중이며, 10여 년간 약 40만동의 슬레이트 지붕을 철거, 처리하는 비용을 지원할 계획이다(MoE, 2010).

하지만 여전히 석면 슬레이트 가옥에서 거주하는 사람이 아주 많고, 전국적으로 슬레이트 지붕의 분포도 너무나 많다. 이러한 슬레이트 지붕은 자연풍화와 시간이 경과하면서 빗물에 의해 석면 섬유가 유출되고 있으며 시멘트에 붙어있던 석면 섬유가 탈리되면서 주변 환경과 그 농가에 거주하는 주민들에게도 영향이 미칠 수 있다. 또한 작은 외부 압력에도 쉽게 부스러지기 때문에 석면 분진은 바로 공기 중으로 비산 될 수 있다. 현재까지 석면 슬레이트 지붕을 가진 농가에 대한 논문은 슬레이트 지붕 노후화에 따른 석면 섬유 방출량 (Kim et al., 2010), 강우 경과시간에 따른 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물에서의 석면 섬유 방출량(Jang et al., 2011)이 있고, 석면 슬레이트 해체, 제거 작업 시 공기 중 석면 섬유량을 측정한 연구(Cho, 2012), 석면 해체, 제거 작업자의 공기 중 석면 노출수준과 영향 요인에 대한 연구(Kim et al., 2009) 등 슬레이트의 석면 노출 등에 대한 연구는 과거에도 많이 수행되어 왔지만, 석면 슬레이트의 단위면적당 빗물로 유출되는 석면농도를 조사한 연구와 석면 슬레이트 지붕에서 비산되는 석면의 공기 중 농도를 보고한 논문은 아직까지 없었다.

따라서 본 연구는 석면 슬레이트 지붕을 가진 농가에서의 공기 중 석면 섬유 농도와 슬레이트 지붕의 단위면적당 유출된 빗물 중에 함유된 석면 섬유 농도에 영향을 미치는 요인들을 분석하여 석면 슬레이트 지붕에 대한 관리대책 수립에 도움이 되고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구는 충남 아산시 지역의 농가 중에서 백석면이 함유된 것으로 확인된 슬레이트 지붕을 가진 20가구를 대상으로 하여 각각 다른 3번의 맑은 날에 공기 중 60개의 시료를 채취하여 석면 섬유 농도를 분석하였다. 또한, 대상 가구에서 유출되는 빗물 수집은 각각 다른 4번의 비가 오는 날에 시료를 채취하였고, 5개 시료 수집을 실패하여 총 75개의 빗물시료를 대상으로 슬레이트에서 유출된 빗물 1 L당 석면 섬유 농도와 슬레이트 단위면적(m^2)당 석면 섬유 유출량을 분석하였다. 슬레이트 지붕의 면적은 골부분의 표면적을 고려하지 않고 평면으로 가정하여 산정하였으며, 조사 대상의 시료 채취지점을 Figure 1과 2에 나타내었다.

2. 공기 중 시료채취 및 분석

슬레이트 지붕을 가진 농가에서의 공기 중 시료 채취 방법은 비가 그친 후 2일 이상 경과한 맑은 날에 슬레이트 지붕의 주풍향 하에 지붕 끝에서 1 m



Figure 1. Sampling sites in Sinchang myeon, Asan city

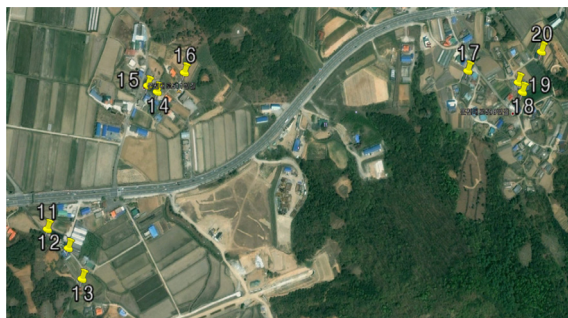


Figure 2. Sampling sites in Dogo myeon, Asan city

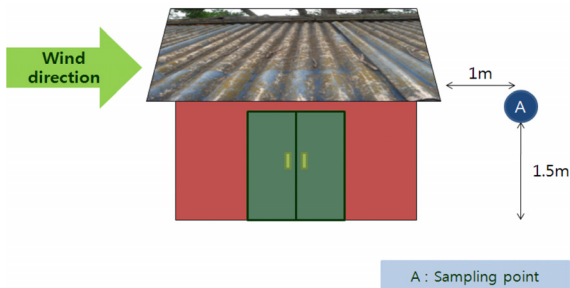


Figure 3. Sampling point of asbestos fibers in ambient air

떨어진 지점의 1.5 m 높이에서 시료를 포집하였다 (Figure 3).

시료채취는 개인시료포집기(GilAir 3, Gilian, U.S.A.)로 유량을 2 L/min 전후로 보정한 후 채취 매체(0.8 μ m pore size, 직경 25 mm membrane cellulose ester filter, 50 mm extension cowl이 장착된 카세트)를 사용하여 Open face 방법으로 6시간 이상 채취하였다.

분석방법으로는 아세톤 증기화 장치로 시료를 투명화 한 후 Walton Beckett graticule이 장착된 위상차현미경(Eclipse 80i, Nikon, Japan)으로 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NOISH) 7400 “A”방법(NIOSH, 1994)으로 계수하였으며, 불검출된 시료는 기하평균을 산출하기 위하여 0.000001/c.c로 임의로 값을 주었다.

3. 빗물 시료채취 및 분석

슬레이트 지붕을 가진 농가에서의 공기 중 석면 섬유 농도 측정 대상과 같은 장소에서 비가 올 때 지붕에서 흘러내리는 빗물을 물받이를 사용하여 시료를 채취하였다. 물받이의 길이는 슬레이트 끝에서 끝 부분까지 포함한 거리인 1.05 m로 하였다(Figure 4). 채취된 빗물 시료는 진공펌프를 이용하여 직경 47 mm의 MCE(Mixed Cellulose Ester) 필터로 여과한 후, 불순물과 유기물을 제거하기 위해 도가니에 필터를 넣어 전기회화로(Muffle furnace)에서 서서히 온도를 높여 450°C를 유지하여 24시간 동안 회화 처리하고 1 M-HCl로 산 처리한 다음 직경 47 mm 필터(MCE)에 진공펌프를 이용하여 다시 여과한 후 건조시켰다. 전처리 한 MCE 필터는 아세톤과 글리세롤 트리아세테이트를 사용하여 투명화시킨 후 공기 중 시료분석과 동일한 방법인 위상차 현미경법으로 계수하였다. 100 시야에서 석면 섬유수를 계수하면 1시야 당 면적이

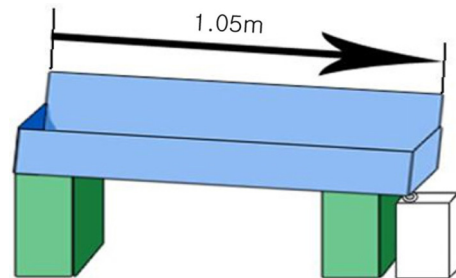


Figure 4. Sampling drainpipe for asbestos fibers in rainwater

0.00785 mm²이므로 100시야의 면적은 0.785 mm²이며, 실제필터에 여과된 유효직경 42 mm 필터(MCE)의 면적은 $(42/2)^2 \times 3.14 = 1384.7$ mm²이고, 100시야의 면적 0.785 mm²로 나누어 주면 약 1,764배로 환산된다. 이를 계수된 석면 섬유 수에 곱하여 유출 빗물 L당 석면 섬유 농도로 계산하였다.

4. 자료의 분석

석면 슬레이트를 가진 농가의 공기와 빗물 중 석면 섬유 농도의 측정 자료는 SPSS 20.0(Version 20.0K, IBM, USA)과 엑셀 프로그램을 이용하여 통계분석 하였다.

공기 중 시료에서의 석면 섬유 농도 분포는 정규 분포하지 않은 것으로 나타나 각 측정치를 자연대수(ln)화 하여 그 분포를 기하정규분포로 변환하였으며, 각 변수별 공기 중 석면 섬유 농도는 기하평균으로 산출하여 비교하였고, 통계학적 차이 검정은 자연대수화한 값으로 t-test 또는 분산분석으로 하였다.

빗물 중 석면 섬유 농도 측정 자료는 정규분포를 이루고 있어 각 변수별 석면 섬유 농도의 차이는 산술평균으로 t-test 또는 분산분석으로 통계학적인 차이 검정을 실시하였고, 단위 면적당(m²)으로 환산한 슬레이트 지붕 설치년도에 따른 유출 빗물 1 L중의 석면 섬유 농도 간의 유의한 선형성(Linearity)을 검토하였다.

공기 및 빗물 중 석면 섬유 농도에 영향을 미치는 독립변수들 간의 상호 관련성을 배제하기 위하여 다변량회귀분석을 실시하였으며, 통계적 유의수준은 p 값이 0.05미만일 때 유의한 것으로 하였다.

III. 결 과

1. 석면 슬레이트 지붕의 특성

본 연구의 대상인 20개 농가의 슬레이트 지붕의 설

치년도, 슬레이트 지붕 전체의 면적 및 빗물을 받은 슬레이트의 지붕길이를 Table 1에 나타내었다. 슬레이트 지붕의 평균 건축년도는 1982년이며, 1970년대와 1980년대에 건축된 것이 대부분이었다. 대상 농가의 슬레이트 지붕 전체의 평균 면적은 98.3 m²이었고, 빗물을 받은 슬레이트의 평균 지붕길이는 3.27 m이었다.

Table 1. Characteristics of slate roofing

Sampling Number	Construction year	Roof area (m ²)	Roof length (m)
1	1982	114.0	3.80
2	1990	171.0	4.50
3	1987	449.3	3.60
4	1986	134.0	5.00
5	1992	71.0	3.20
6	1980	19.6	3.50
7	1976	70.9	3.38
8	1976	122.4	3.32
9	1976	87.4	1.82
10	1975	162.0	3.28
11	1992	58.9	2.40
12	1977	82.6	5.20
13	1972	77.4	2.25
14	1985	10.6	2.41
15	1985	62.4	3.63
16	1987	46.1	2.48
17	1985	126.5	5.70
18	1980	17.5	1.65
19	1980	68.4	2.60
20	1980	13.2	1.75
Mean	1982	98.3	3.27
Min.~Max.	1972~1992	10.6~449.3	1.65~5.70

2. 슬레이트 지붕을 가진 농가의 공기 중 석면 섬유 농도

슬레이트 지붕을 가진 농가에서의 측정 일자별 공기 중 석면 섬유 농도를 Table 2에 나타내었다. 전 지점에서 날짜별로 채취한 석면 섬유 농도범위는 불검출에서 최대 8.47 fiber/L이었다.

전 지점 모두 환경부의 다중이용시설 등의 실내공기 질관리법의 권고기준인 10 fiber/L(0.01 fiber/c.c)를 초과한 곳은 없었다. 전체 시료 60개 중 불검출 된 시료는 23개로 불검출율은 38.3%이었다.

슬레이트 지붕을 가진 대상 농가의 지역, 슬레이트 설치년도, 시료 채취 시 평균풍속 및 비 온 후 경과시간, 측정 대상 농가의 슬레이트 지붕 총 면적에 따른 공기 중 석면 섬유 농도의 기하평균과 기하표준편차, 산술 평균 및 표준편차를 Table 3에 나타내었다.

전체 슬레이트 지붕 가옥의 공기 중 석면 섬유 농도는 기하평균 0.11 fiber/L이었으며, 산술평균은 1.78 fiber/L 이었고 농도범위는 불검출~8.47 fiber/L이었다. 대상 농가의 지역과 슬레이트 지붕의 설치년도, 시료 채취 시 평균 풍속 및 비가 온 후 경과시간에 따른 유의한 차이는 보이지 않았으나, 측정 대상 농가의 슬레이트 지붕의 총 면적이 120 m² 이상일 때 공기 중 석면 섬유 농도가 유의하게 높았다($p<0.05$).

공기 중 석면 섬유 농도에 영향을 미치는 각각의 독립변수들 간의 상호 관련성을 통제하기 위해 다변량회귀분석(Multiple regression analysis)을 적용하였다. 공기 중 석면 섬유 농도에 자연로그(ln)를 취해 종속변수로

Table 2. Ambient air concentrations of asbestos by sampling date

				(Unit: fiber/L)			
No.	2012/9/15	2012/9/22	2012/9/24	No.	2012/10/7	2012/10/14	2012/10/21
1	1.67	N.D.*	N.D.	11	N.D.	2.03	N.D.
2	7.21	5.12	1.36	12	N.D.	N.D.	0.67
3	8.20	3.37	1.99	13	0.65	0.68	1.35
4	5.99	N.D.	1.98	14	1.33	N.D.	N.D.
5	N.D.	3.42	N.D.	15	2.63	N.D.	N.D.
6	6.57	N.D.	N.D.	16	0.72	2.04	1.27
7	N.D.	N.D.	N.D.	17	0.95	2.77	N.D.
8	N.D.	3.74	0.68	18	N.D.	2.04	1.32
9	8.47	3.41	N.D.	19	0.67	1.70	2.05
10	8.19	3.94	2.03	20	1.71	2.78	N.D.

* N.D. : Not detected

Table 3. Ambient air concentrations of asbestos by general characteristics

(Unit: fiber/L)					
General characteristics	N	GM [†] (GSD) [‡]	Mean \pm S.D. [*]	Range	p-value
Area					
Sinchang myeon	30	0.13 (60.42)	2.58 \pm 2.91	N.D. [§] ~ 8.47	0.749
Dogo myeon	30	0.10 (35.32)	0.98 \pm 0.95	N.D. ~ 2.78	
Construction year					
<1979	18	0.10 (48.79)	1.88 \pm 2.70	N.D. ~ 8.47	0.874
1980~1985	24	0.06 (47.04)	1.17 \pm 1.53	N.D. ~ 6.57	
≥ 1986	18	0.30 (40.25)	2.48 \pm 2.58	N.D. ~ 8.20	
Average wind velocity					
<2.5 m/sec	20	0.07 (53.34)	1.42 \pm 1.90	N.D. ~ 8.47	0.408
2.5~2.9 m/sec	20	0.07 (36.64)	1.83 \pm 2.46	N.D. ~ 8.19	
≥ 3.0 m/sec	20	0.29 (47.87)	2.09 \pm 2.54	N.D. ~ 8.20	
Rain after the elapsed time (hour)					
<100	20	0.13 (60.71)	2.65 \pm 3.32	N.D. ~ 8.47	0.787
100~149	20	0.17 (47.72)	1.85 \pm 1.67	N.D. ~ 5.12	
≥ 150	20	0.07 (36.64)	0.84 \pm 0.87	N.D. ~ 2.63	
Total roof area in the house with a slate roofing					
<60 m ²	18	0.07 (47.69)	1.21 \pm 1.64	N.D. ~ 6.57	0.031
60~119 m ²	24	0.04 (45.86)	1.14 \pm 1.91	N.D. ~ 8.47	
≥ 120 m ²	18	0.79 (23.32)	3.20 \pm 2.75	N.D. ~ 8.20	
Total	60	0.11 (45.28)	1.78 \pm 2.29	N.D. ~ 8.47	

* S.D. : Standard deviation, [†] GM : Geometric mean, [‡] GSD : Geometric standard deviation, [§] : Not detected

Table 4. Multiple regression analysis of selected independent variables on ambient air concentrations of asbestos in the house with a asbestos slate roofing

	Unstandardized		Standardized	t	R ²
	B	Std. error	Beta		
(Constant)	82.556	167.434		0.493	
Construction year	-0.045	0.085	-0.068	-0.528	
Average wind velocity	1.086	0.888	0.158	1.223	0.126
Rain after the elapsed time	-0.002	0.009	-0.030	-0.233	
Total roof area in the house with a slate roofing	0.012	0.005	0.302	2.335*	

* : p<0.05

하고 분석한 결과 Table 4와 같이 슬레이트 지붕을 가진 농가에서의 공기 중 석면 섬유 농도에 통계학적으로 유의한 영향을 미치는 요인으로는 대상 농가의 슬레이트 지붕의 총 면적이었으며(p<0.05), 이들 4개의 독립변수들로 구성된 회귀방정식의 설명력(R²)은 12.6%이었다.

3. 측정일자별 슬레이트 유출 빗물 중 석면 섬유 농도

슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중 석면 섬유 농도는 Table 5와 같이 빗물 1 L당으로 환산하여 나타내었다. 시료 채취 장소 20곳 모두 일자별로 석면 섬유가 다량 검출되었으며, 시료 채취를 실패한 곳은 5개였다.

4. 유출된 빗물에서의 변수별 석면 섬유 농도

슬레이트 지붕을 가진 대상 농가의 지역, 슬레이트

Table 5. Asbestos concentration of drained rainwater from asbestos cement slate roofing by sampling date

(Unit: fiber/L)									
No.	2012/9/28	2012/10/22	2012/10/27	2012/11/4	No.	2012/10/16	2012/10/22	2012/10/27	2012/11/4
1	3,714	2,714	2,940	4,620	11	-	8,400	5,880	5,593
2	7,240	7,384	5,880	11,308	12	4,200	10,524	7,056	11,433
3	8,301	6,720	5,460	4,620	13	-	7,980	5,880	7,840
4	7,529	7,560	3,780	-*	14	5,571	7,560	4,200	3,360
5	2,384	5,040	2,520	1,680	15	-	5,880	6,468	8,820
6	2,262	4,200	3,360	4,200	16	-	3,360	5,880	2,646
7	5,618	7,140	4,620	5,040	17	7,744	6,272	4,312	3,920
8	4,704	5,880	2,520	3,780	18	6,402	6,720	3,360	3,360
9	8,820	5,460	5,880	6,300	19	4,200	4,312	3,920	4,312
10	8,269	4,620	7,140	6,720	20	3,267	5,040	3,360	3,374

* : Failed sampling

Table 6. Asbestos concentration of drained rainwater from slate roofing by general characteristics

(Unit: fiber/L)					
General characteristics	N	Mean \pm S.D.	GM (GSD)	Range	p-value
Area					
Sinchang myeon	39	5,331 \pm 2,125	4,897 (1.54)	1,680 ~ 11,308	0.456
Dogo myeon	36	5,622 \pm 2,152	5,253 (1.45)	2,646 ~ 11,433	
Construction year					
<1979	23	6,410 \pm 2,111	6,076 (1.41)	2,520 ~ 11,433	0.012
1980~1985	31	4,637 \pm 1,618	4,391 (1.39)	2,262 ~ 8,820	
\geq 1986	21	5,675 \pm 2,409	5,122 (1.64)	1,680 ~ 11,308	
Rain after the elapsed time (hours)					
<119	45	5,083 \pm 2,104	4,703 (1.49)	1,680 ~ 11,433	0.051
\geq 120	30	6,054 \pm 2,064	5,660 (1.48)	2,262 ~ 10,524	
Roof length					
<2.5 m	25	5,420 \pm 1,839	5,109 (1.43)	2,646 ~ 8,820	0.008
2.5~3.4 m	24	4,518 \pm 1,677	4,206 (1.49)	1,680 ~ 8,269	
\geq 3.5 m	26	6,400 \pm 2,411	5,962 (1.48)	2,714 ~ 11,433	
Total roof area in the house with a slate roofing					
<60 m ²	22	4,607 \pm 1,671	4,337 (1.42)	2,262 ~ 8,400	0.045
60~119 m ²	30	5,577 \pm 2,367	5,087 (1.57)	1,680 ~ 11,433	
\geq 120 m ²	23	6,159 \pm 1,985	5,842 (1.41)	2,520 ~ 11,308	
Total	75	5,471 \pm 2,129	5,065 (1.50)	1,680 ~ 11,433	

설치년도, 전 회 비 온 후 경과시간, 시료 채취 부분의 지붕길이, 측정 대상 농가의 슬레이트 지붕의 총 면적에 따른 유출 빗물 중 석면 섬유 농도를 1 L당으로 환산하여 산술평균, 산술평준편차, 기하평균, 기하표준편차 및 범위를 Table 6에 나타내었다.

슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중에 함유된 석면 섬유

농도는 전체 평균이 5,471 fiber/L, 최소값이 1,680 fiber/L, 최대값이 11,433 fiber/L이었다. 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중 석면 섬유 농도는 슬레이트 지붕의 설치년도가 1979년 이전인 경우에 6,410 fiber/L로 유의하게 높았으며(p<0.05), 지붕길이가 3.5 m 이상인 시료에서 유의하게 높았고(p<0.01), 측정 대상 농가

의 슬레이트 지붕 총 면적이 넓을 때 유의하게 높았다($p < 0.05$). 그러나 지역 간에는 유의한 차이가 없었고, 전 회 비 온 후 경과시간이 120시간(5일) 이상일 때 더 높은 석면 섬유 농도를 나타내었으나 경계선급 유의성을 나타내었다($p=0.051$).

5. 유출된 빗물에서의 슬레이트 단위면적당 석면 섬유 농도

시료를 채취한 부분의 슬레이트 길이에 따라 유의하게 많은 석면이 유출되므로 이를 석면 슬레이트 지붕의 단위 면적당(m^2)으로 환산한 슬레이트 지붕 설치년도에 따른 유출 빗물 1 L에서의 석면 섬유 농도는 Table 7과 같다. 1979년 이전에 설치된 지붕에서 유출된 빗물 중 석면 섬유 농도가 2,089 fiber/L \cdot m², 1980년에서 1985년에 설치된 지붕에서는 1,630 fiber/L \cdot m², 1986년 이후에 설치된 지붕에서는 1,566 fiber/L \cdot m²로 슬레이트 지붕 설치년도에 따라 유출되는 석면 섬유 농도가 유의하게 높아지는 양상을 나타내었다($p < 0.05$).

슬레이트에서 유출되는 빗물 중 석면 섬유 농도에 영향을 미치는 독립변수들 간의 상호 관련성을 통제하기 위해 다변량회귀분석을 실시하였다. 슬레이트 지붕의 단위 면적당(m^2) 유출되는 빗물 1 L당 석면 섬유 농도

를 종속변수로 하여 분석한 결과는 Table 8과 같이 통계학적으로 유의한 영향을 미치는 요인으로 슬레이트 지붕의 설치년도이며($p < 0.05$), 이들 3개의 독립변수들로 구성된 이 회귀방정식의 설명력(R^2)은 7.7%였다.

IV. 고 찰

석면 슬레이트 지붕의 노후화에 따른 슬레이트 지붕의 손상으로 인해 대기 중으로 석면이 유출된다는 보고(Bornemann & Hildebrandt, 1986)가 있었고, 석면 슬레이트 지붕에 포함된 시멘트의 주성분인 수산화칼슘은 산성비에서 특히 용해도가 증가하는 것으로 보고되었다(Dyczek, 2006).

우리나라에서는 석면 슬레이트 지붕과 관련한 연구들은 주로 슬레이트 지붕 철거 작업 시 석면 섬유의 방출에 관한 연구(Choi et al., 2010; Cho, 2012)이며, 철거 시 습윤제와 물을 사용하여 권고기준 이하의 공기 중 석면 섬유 농도를 유지할 수 있다고 보고하였으나, 우리나라의 수많은 석면 슬레이트 지붕에서 발생할 수 있는 석면의 비산에 대한 연구는 아직 없었다.

이에 본 연구에서 석면 슬레이트 가옥에서 공기 중으로 비산 되는 석면 섬유 농도를 우리나라 최초로 측정하였고, 이에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 슬레

Table 7. Asbestos concentration of drained rainwater from unit area (m^2) of slate roofing by construction year

					(Unit: fiber/L \cdot m ²)
Construction year	N	Mean \pm S.D.	GM (GSD)	Range	Linearity p-value
< 1979	23	2,089 \pm 971	1,881 (1.61)	723 ~ 4,615	0.029
1980 ~ 1985	31	1,630 \pm 823	1,454 (1.63)	615 ~ 3,879	
\geq 1986	21	1,566 \pm 695	1,416 (1.61)	500 ~ 3,333	
Total	75	1,753 \pm 858	1,562 (1.63)	500 ~ 4,615	

Table 8. Multiple regression analysis of selected independent variables on asbestos concentration of drained rainwater from unit area (m^2) of slate roofing

	Unstandardized		Standardized	t	R^2
	B	Std. error	Beta		
(Constant)	77439.6	34852.9		2.222*	0.077
Construction year	-38.177	17.591	-0.252	-2.170*	
Total roof area in the house with a slate roofing	-0.722	1.052	-0.081	-0.686	
Rain after the elapsed time	0.393	1.875	0.024	0.209	

* : $p < 0.05$

이트 지붕의 설치년도와 측정 시 풍속, 비 온 후 경과 시간 및 측정대상 가옥의 슬레이트 지붕 총 면적에 대하여 분석한 결과, 슬레이트 지붕 가옥에서의 공기 중 석면 섬유 농도의 기하평균 농도는 0.11 fiber/L이었으며, 모든 시료에서 우리나라 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법 권고기준인 10 fiber/L를 초과한 곳은 없었다. 다변량회귀분석 결과 공기 중 석면 섬유 농도에 유의한 영향을 미치는 주 요인은 대상 농가의 슬레이트 지붕의 총 면적으로 나타났지만, 슬레이트 지붕의 노후화가 계속되면 앞으로 더 큰 영향을 보일 수 있을 것이라 여겨진다.

세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 보고에 따르면 오염이 없는 시골지역에서의 대기 중 석면 섬유 농도는 <0.1 fiber/L인 반면에 오염이 심하고 교통량이 많은 혼잡한 도시지역에서는 0.1 ~ 1 fiber/L로 보고되었다(WHO, 2000). 본 연구에서 조사된 석면 슬레이트 가진 농가에서의 공기 중 석면 섬유 농도의 기하평균 농도는 0.11 fiber/L, 산술평균은 1.78 fiber/L로서 오염이 심하고 교통량이 많은 혼잡한 도시지역에서의 값을 나타내고 있으며, 이는 석면 슬레이트 지붕에 의한 것으로 추정되었다.

슬레이트 지붕의 노후화에 따른 빗물에 의한 석면 섬유 방출에 대한 연구는 Kim et al.(2010)에 의해 국내에서 처음으로 시도되었으며, 슬레이트 지붕의 설치년도가 오래 될수록 빗물에 의한 석면 섬유 유출이 증가함을 보고하였고, Jang et al.(2011)은 강우의 지속 시간이 짧을수록 빗물중의 석면 섬유 농도가 높음을 보고한 바 있다.

본 연구에서 석면 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 1 L중에 함유된 석면 섬유 평균 농도는 5,471 fiber로 나타났으며, 이는 총 6개의 유출 빗물에서 조사한 Kim et al.(2010)의 슬레이트 지붕 연식에 따라 빗물 1 L에 유출된 석면 섬유 농도인 1960년대 31,202 fiber, 1970년대 16,935 fiber, 1980년대 7,152 fiber보다는 낮은 수준이었으나, 총 15개의 유출 빗물에서 조사한 Jang et al.(2011)의 4,860 fiber와는 유사하여 측정 시점과 측정 대상 슬레이트 지붕의 길이, 설치년도, 기상상황 등에 따라 차이가 있을 것으로 생각된다.

석면 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 1 L중에 함유된 석면 섬유 농도에 영향을 미치는 요인으로는 슬레이트 지붕 설치년도, 빗물 유출 부분의 슬레이트 길이, 대상 농가의 슬레이트 지붕의 총 면적으로 분석되었다.

이의 주된 요인이 빗물 유출 부분의 슬레이트 길이로 분석되어, 슬레이트 지붕 단위면적(m^2)당 유출된 빗물 1 L중에 함유된 석면 섬유 농도로 환산한 결과 평균 농도는 1,753 fiber이었으며, 다변량회귀분석 결과, 석면 슬레이트 1 m^2 당 유출된 빗물 1 L중 석면 섬유 농도는 대상 농가의 석면 슬레이트 지붕 설치년도가 오래된 것일수록 유의하게 높았다.

전국적으로 슬레이트 지붕을 가진 건물의 55.4 %는 설치년도가 30년이 넘었으며, 슬레이트 지붕을 가진 가옥은 총 123만동으로 모든 건축물 683만동 중 18%를 차지하고 있다(Kim et al., 2010). 이는 슬레이트 건축물의 평균 면적을 100 m^2 로 가정 했을 때 우리나라 전체에서는 $1.23 \times 10^8 m^2$ 의 면적이 된다. 본 연구결과인 석면 슬레이트 단위 면적당(m^2) 유출 빗물 1 L에 1,753 fiber의 석면 섬유가 방출되는 것으로 계산하면, 이는 전국의 슬레이트 총 면적 $1.23 \times 10^8 m^2$ 에서 비가 오는 날 2.156×10^{11} fiber의 석면 섬유가 빗물 1 L에 유출될 수 있을 것으로 추정된다.

빗물로 유출된 석면 섬유는 토양을 2차적으로 오염시킬 수 있으며, 이들이 건조되고 바람에 의해 대기 중으로 재비산될 수 있기에 이러한 슬레이트 지붕에서의 석면 유출을 방지할 수 없는 것으로 판단된다.

석면 슬레이트의 노후화에 따른 부식, 풍화로 인하여 공기 중으로의 석면 섬유가 비산되고, 빗물에 의해서도 유출이 되는 것으로 보아 궁극적인 대안은 슬레이트 지붕의 제거가 우선이지만, 국내의 많은 슬레이트 가옥들을 일시에 교체하는 것은 어렵기 때문에 슬레이트 지붕의 건축년식에 우선순위를 두어 해체 제거가 조속히 이루어지도록 하여야 할 것이다.

V. 결 론

석면 슬레이트 지붕을 가진 농가의 공기 중 석면 섬유 농도와 그 영향 요인 및 슬레이트 지붕의 단위 면적(m^2)당 유출된 빗물 중에 함유된 석면 섬유 농도와 이에 영향을 미치는 요인을 분석하고자 하였다.

공기 중 석면 섬유 농도는 20개 농가의 슬레이트 지붕 끝으로부터 1 m거리의 주풍향 하에서 3번의 맑은 날에 각각 채취하였고, 슬레이트 지붕 유출 빗물 중 석면 섬유 농도는 같은 20개 농가에서 4번의 비가 오는 날 1.05 m 길이의 물받이를 이용하여 각각 받아 MCE 필터로 여과하여 모두 위상차현미경법으로 분

석하였으며, 공기와 빗물을 각각 L당 석면 섬유 농도로 환산하였다.

석면 슬레이트 지붕 가옥의 공기 중 석면 섬유 농도의 기하평균 농도는 0.11 fiber/L이었으며, 모든 시료에서 권고기준인 10 fiber/L를 초과한 곳은 없었다. 다변량회귀분석 결과 공기 중 석면 섬유 농도에 유의한 영향을 미치는 요인은 대상 농가의 석면 슬레이트 지붕의 총 면적이었다.

석면 슬레이트 지붕에서 유출된 빗물 중에 함유된 석면 섬유 평균 농도는 5,471 fiber/L이었으며, 슬레이트 지붕 설치년도, 빗물 유출 부분의 슬레이트 길이, 대상 농가의 슬레이트 지붕의 총 면적에 따라 유의한 차이를 보였다. 슬레이트 지붕 m²당 유출된 빗물 중에 함유된 석면 섬유 농도는 평균 1,753 fiber/L · m²이었으며, 다변량회귀분석 결과 슬레이트 m²당 유출된 빗물 중 석면 섬유 농도는 대상 농가의 슬레이트 지붕 설치년도가 오래된 것일수록 유의하게 높았다.

석면 슬레이트 지붕에서 공기 중으로 석면이 비산되고 있음을 우리나라 최초로 확인하였고, 슬레이트 지붕의 총 면적이 넓을수록 공기 중으로 석면 섬유가 유의하게 많이 비산되며, 빗물을 통하여도 많은 양의 석면이 유출되고, 슬레이트 지붕 설치년도가 오래된 것에서 석면농도가 유의하게 높은 수준을 보이고 있으므로, 노후화된 슬레이트 지붕에 대한 해체 및 제거 대책이 시급히 마련되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행하였음(과제번호 20120660).

참고문헌

- Bornemann P, Hildebrandt U. On the problem of environmental pollution by weathering products of asbestos cement. *Staub Reinhalt Luft* 1986;46(11): 487-489
- Cho YJ. A study on the airborne asbestos concentration and health management status of the asbestos abatement and removal working area [dissertation]. [Seoul]; Korea University; 2012
- Choi JK, Paek DM, Paik NW. The production, the use, the number of workers and exposure level of asbestos in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1998;8(2): 242-253
- Choi SJ, Suk MH, Paik NM. Asbestos-containing materials and airborne asbestos levels in industrial building in Korea. *J UOEH* 2010;32(1):31-43
- Dyczek J. Surface of asbestos-cement(AC) roof sheets and assessment of the risk of asbestos release. WS-B-07 Jerzy Dyczek, Krakow, Poland, 2006
- Jang BK, Ryu JY, Park JH, Yoon SH, Jo YH, Tak HW, Cho CG, Kong JH, Lee JH. Releasing of asbestos fibers in rainwater drained from asbestos cement slate roofing by the time elapsed of rainfall. *College of Natural Science, Sonnnchunhyang Univ* 2011; 17(2):161-168
- Kim HW, Park GY, Han JG, Han YS, Hwang BG, Lee JH. Releasing of asbestos fibers from the weathered asbestos cement slate roofing. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2010; 20(2):88-93
- Kim JY, Lee SK, Lee JH, Lim MH, Kang SW, Phee YG. A study on the factors affecting asbestos exposure level from asbestos abatement in building demolition sites. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2009;19(1):8-15
- Ministry of Environment(MoE). Slate management comprehensive plan. 2010
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Asbestos and other fibers by PCM: 7400. NIOSH Manual of Analytical Method(NMAM), 4th ed. 1994
- WHO. Air quality guidelines for Europe. 2nd ed. Geneva: World Health Organization; 2000