

투과전자현미경을 이용한 공원조경석 중 자연발생석면의 형태 연구

입자연구팀

정숙녀 · 이수현 · 김지성 · 김창규 · 강미혜 · 하광태 · 정종흡 · 어수미

Morphological Study of Naturally Occurring Asbestos using TEM in Landscape Rock in Parks

Particle Research Team

**Sook-nye Chung, Su-hyun Lee, Ji-sung Kim, Chang-kyu Kim,
Mi-hae Kang, Kwang-tae Ha, Jong-heub Jung and Su-mi Eo**

Abstract

This study provided data that can be used to discriminate asbestiform and non-asbestiform amphiboles contained in landscaping rocks in recreational parks. The length and width of fibers being at least $5\ \mu\text{m}$ long and with a minimum aspect ratio of 3 : 1, were measured using a Transmission Electron Microscope(TEM) and compared to an reference sample of asbestos. In addition, airborne asbestos concentrations around landscaping rocks in the parks were evaluated. The samples were thicker than $1\ \mu\text{m}$ (average $1.2\ \mu\text{m}$) while the Health and Safety Executive(HSE) reference sample averaged $0.3\ \mu\text{m}$ in width with 100% thinner than $1.0\ \mu\text{m}$. The average aspect ratios were 7.3 for the park samples and 37.6 for the HSE reference sample. Based on these distributions, the amphibole fibers in the sampled landscape rocks were found to be thicker and had lower aspect ratios than those of the reference sample. The airborne concentration was below analytical sensitivity. The results of this study can contribute to the public policy for managing and controlling of landscaping rocks containing naturally occurring asbestos(NOA) and also to communicate about risk with park-using citizens who are concerned about the possible health risks resulting from NOA contained in landscaping rocks.

Key words : Naturally occurring asbestos(NOA), Amphibole, Width, Aspect ratio,
Landscape rock

서 론

석면은 석면형태(asbestiform)로 산출되는 규산염광물로 지질학적 작용에 의해 자연적으로 생성된 광물이다. 넓은 의미에서 모든 석면은 자연발생석면(Naturally Occurring Asbestos)이지만, 광산 등에서 채굴되어 상업적으로 활용된 석면과 구별하여 암반이나 토양에서 자연 그대로의 상태로 발견되는 석면을 자연발생석면으로 정의하기도 한다(1~4). 본 연구에서는 상업적으로 활용된 석면을 제외한 석면을 자연발생석면으로 다루고자한다.

조경석 중 석면분석은 석면함유가능물질 분석방법인 환경부고시(5)에 따라 공기 중 석면 계수기준과 일관성을 유지하기 위해 길이 대 너비 비율(aspect ratio) 3 : 1 이상인 섬유상을 석면으로 분류한다. 조경석과 같은 자연발생석면 분석에 공기 중 석면분석기준을 적용하면 고행석면 분석기준(6)인 길이 대 너비 비율 20 : 1 이상의 석면입자뿐만 아니라 기다란 비석면형태(elongated non-asbestiform)의 각섬석계 광물입자도 석면으로 분류될 가능성이 있다. 석면형태와 독성 관련 선행연구에서 비석면형태의 각섬석계 석면은 발암상을 보이지 않는다고 보고된바 있어(7~8) 조경석에 함유된 석면이 석면형태인지 비석면형태인지 구분할 필요가 있다.

현재까지 석면형태와 비석면형태를 구분하는 명확한 분석기준은 확립되지 않았지만 섬유상의 너비, 길이 대 너비 비율 등의 형태적 특성을 살펴 석면형태와 비석면형태의 구분을 시도한 연구들이 있다(9~11). 본 연구에서는 조경석에서 검출된 자연발생석면의 석면형태 여부를 확인하기 위해 석면을 함유한 것으로 조사된 공원조경석을 채취하여 투과전자현미경으로 길이와 너비를 측정하여 석면표준시료와 비교하였다. 또한 공원 조경석 주변 공기 중 석면농도를 분석하여 조경석에 의한 석면의 공기 중 비산여부를 평가하였다.

재료 및 연구방법

1. 연구대상

석면관리를 위해 자연석 석재 석면함유 실태조사를 실시한 서울시관리공원 중 정밀조사결과 석면을 함유한 것으로 판정된 조경석이 3지점 이상 발견된 5개 공원을 연구대상으로 선정하였다.

2. 시료채취 및 분석

1) 고행시료

공원에 분포한 조경석의 표면을 육안으로 확인하여 석면으로 의심되는 물질 또는 섬유상 형태의 물질이 분포하고 있는 조경석에서 공원별로 5~10개의 고행시료를 채취하였다. 시료는 편광현미경을 이용하여 석면함유가능물질 분석방법(5)에 따라 분석하였다.

검출된 섬유의 형태적 특성을 투과전자현미경으로 관찰하기 위해 조경석시료를 공원별로 1개씩 선택하였다. 미국 EPA의 고행시료 석면분석방법(6) 중 전자현미경분석을 위한 시편제작방법에 따라 조경석시료를 막자사발로 분쇄 후 소량의 아세톤에 혼합하고, 초음파분산기에서 약 5분간 분산시켜 마이크로피펫으로 시료 일부를 취해 탄소 코팅된 그리드에 올려 건조시켰다. 투과전자현미경(Tecnai G2, FEI company 120 keV)을 이용하여 길이 5 μm 이상이고 길이 대 너비 비율이 3 : 1 이상인 입자 중 에너지분산형 X선 분광스펙트럼(energy dispersive X-ray spectrum)과 제한시야 회절패턴(selected area diffraction pattern)으로 화학조성과 결정구조 분석결과 석면으로 확인된 입자 50개의 길이와 너비를 측정하였다. 석면형태 비교를 위해 영국안전보건청의 악티노라이트 표준시료(HSE Reference Actinolite)를 조경석시료와 같은 방법으로 전처리하여 분석하였다.

2) 공기 중 시료

고행시료 분석결과 석면을 함유한 것으로 확인된 공원 조경석 주변 2지점을 선정하여 공기 중 시료를 채취하였다. 시료채취와 분석은 ISO의 대

기 중 석면섬유 측정방법을 따랐다. 시료채취펌프 (SARA-4000, KEMIK)를 이용하여 공극크기 0.8 μm , 직경 25 mm MCE(mixed cellulose ester) 필터가 장착된 카세트에 유량 약 10 L/min으로 1210 L를 포집한 뒤, 투과전자현미경으로 약 18,500배의 배율에서 길이 5 μm 이상인 석면섬유와 다발을 분석감도 0.0009 f/cc로 분석하고 1개의 석면섬유도 관찰되지 않은 시료는 분석민감도 미만으로 표기하였다.

결과 및 고찰

1. 자연발생석면의 형태적 특성

조경석 표면을 육안으로 확인한 뒤 석면함유 의심부위 31곳의 고형시료를 채취하여 편광현미경으로 분석한 결과 절반 이상인 17개 시료에서 석면

이 검출되었다. 공원별로 석면이 검출된 고형시료를 1개씩 선택하여 투과전자현미경으로 섬유상 석면입자 50개씩을 관찰한 결과 표 1에서와 같이 악티노라이트와 트레모라이트가 검출되었다.

조경석에서 검출된 석면섬유의 형태와 인체유해성을 가진 전형적인 석면형태를 비교하기 위해 석면표준시료(HSE)의 형태적 특성과 비교하였다. 표 2~3은 조경석에서 검출된 석면섬유의 너비분포와 길이 대 너비 비율의 분포특성을 석면표준시료(HSE)의 특성과 비교하여 나타낸 것이다. 너비와 길이 대 너비 비율 자료의 분포특성을 파악하기 위해 SPSS 24를 이용한 Kolmogorov-Smirnov 검정 결과 대부분 대수정규분포를 따르는 것으로 나타나 시료의 대푯값은 기하평균으로 표시하였다.

조경석시료의 경우 섬유의 평균 너비는 1.0~1.3 μm 이고, 너비 0.5 μm 및 1.0 μm 이하인 섬유의 비율은 각각 4~14%와 28~46%이었다.



Fig. 1. Field sampling for the bulk sample and airborne asbestos sample.

Table 1. Characteristics of bulk sample from the landscape rock

Park number	Number of bulk sample	Number of bulk sample containing asbestos	Asbestos type by TEM
1	6	3	Actinolite
2	10	4	Actinolite
3	5	4	Tremolite-Actinolite
4	5	3	Actinolite
5	5	3	Actinolite

HSE 석면표준시료의 경우 평균너비는 $0.3\mu\text{m}$ 이고, 너비 $0.5\mu\text{m}$ 및 $1.0\mu\text{m}$ 이하인 섬유는 각각 90%와 100%로 나타났다(표 2).

조경석시료의 경우 섬유의 평균 길이대너비 비율은 6.6~8.2이고, 길이대너비 비율이 10:1 및 20:1 이상인 섬유는 각각 8~26% 및 2~10%로 나타났다. HSE 석면표준시료의 경우 평균 길이대너비 비율은 37.6이고, 길이대너비 비율 10:1 및 20:1 이상인 섬유의 비율은 각각 96% 및 86%로 나타났다(표 3).

5개 조경석시료 중 석면섬유의 평균너비는 $1.2\mu\text{m}$ 로 Wylie(12)가 역학조사, 동물실험결과 등을 바탕으로 암이나 중피종 같은 인체유해성과 관련이 있다고 보고한 너비 $1\mu\text{m}$ 이하보다 두껍다. 평균 길이 대 너비 비율은 7.3으로 90~98%의 석면 섬유가 고형석면 분석방법(6)에서 정한 석면형태 기준인 20:1 이상을 만족시키지 못한다. 또한

Chatfield(10)가 제안한 석면형태의 기준인 너비 $1.5\mu\text{m}$ 이하, 길이 대 너비 비율 20:1 이상을 만족시키는 입자는 2~10%로 조경석시료 중 석면 섬유는 대부분 비석면형태로 분류된다.

그림 2에 석면표준시료(a, b)와 조경석시료(c, d)에서 관찰되는 대표적인 입자형태를 나타내었다. 곧은 형태의 가늘고 긴 석면표준시료와 달리 조경석시료는 상대적으로 두껍고 반듯하지 않은 입자가 대부분으로 형태적으로 확연한 차이를 보인다.

관찰된 섬유상 석면입자의 길이대너비 비율과 너비 분포를 함께 나타낸 그림 3도 조경석시료(a~e)와 석면표준시료(f)의 차이를 뚜렷하게 보여준다. 너비 $1\mu\text{m}$ 이하, 길이 대 너비 비율 20:1 이상인 섬유가 대부분인 석면표준시료와 달리 조경석시료는 너비가 $1\mu\text{m}$ 이상, 길이 대 너비 비율 10:1 이하인 섬유가 절반 이상을 차지한다.

Table 2. Width data of tremolite-actinolite $5\mu\text{m}$ and longer with a minimum aspect ratio of 3:1

Park number	Particles analyzed	Mean(μm)	Width $\leq 0.5\mu\text{m}$ (%)	Width $\leq 1.0\mu\text{m}$ (%)
1	50	1.1	14	42
2	50	1.0	10	46
3	50	1.2	4	34
4	50	1.3	6	28
5	50	1.3	6	32
HSE Reference Actinolite	50	0.3	90	100

Table 3. Aspect ratio data of tremolite-actinolite $5\mu\text{m}$ and longer with a minimum aspect ratio of 3:1

Park number	Particles analyzed	Mean(μm)	Aspect ratio $\geq 10:1$ (%)	Aspect ratio $\geq 20:1$ (%)
1	50	7.1	16	10
2	50	8.2	26	4
3	50	7.8	24	2
4	50	6.8	20	4
5	50	6.6	8	2
HSE Reference Actinolite	50	37.6	96	86

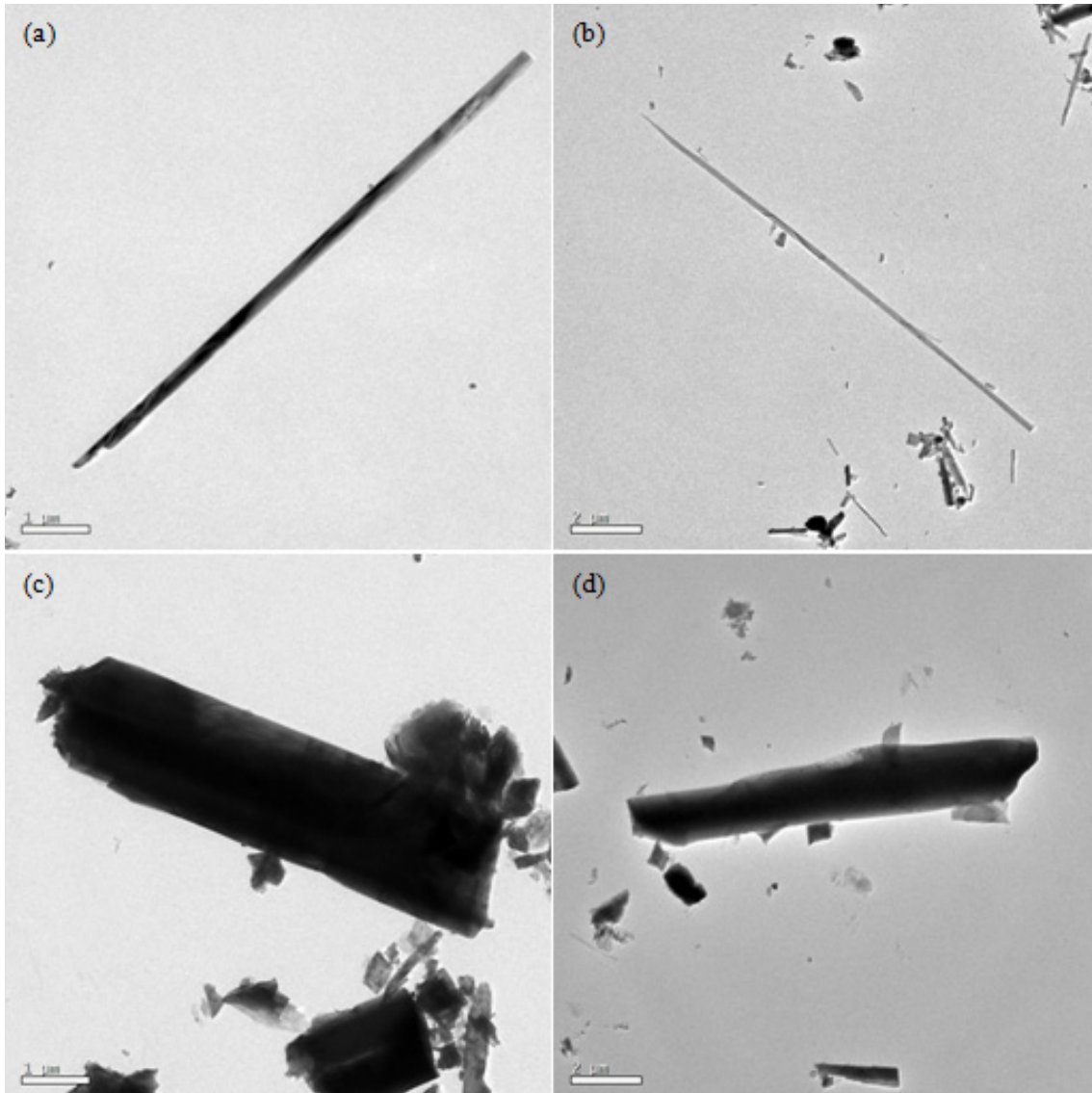


Fig. 2. Comparison of actinolite detected from HSE Reference Actinolite(a, b) and actinolite detected from the park samples(c, d).

2. 조경석 주변 공기 중 석면농도

연구대상 공원의 조경석 주변 공기를 포집하여 전문가그룹에 의해 인체발암성이 높은 것으로 밝혀진 길이 $5\mu\text{m}$ 이상의 석면농도를 투과전자현미경으로 분석하였다(13). 분석결과 공기 중 석면농도는 표 4에서와 같이 분석민감도 0.0009 f/cc 미만으로 공기 중에서 석면이 검출되지 않아 호흡을 통한 석면노출가능성은 우려할 수준이 아닌 것

로 판단된다. 석면은 공기 중으로 비산되어 호흡기를 통해 인체에 유입되는 경우 유해성을 가진다. 토양이나 광산 등에 함유된 자연발생석면이 인위적인 활동(땅파기 등 개발 및 교란)에 의해 공기 중으로 비산될 가능성이 높은 반면, 공원 조경석의 경우 공기 중으로 석면의 비산은 주로 자연적인 풍화에 의한 것으로 조경석 표면에 석면이 노출되어있다고 하더라도 건강 위해성은 낮을 것

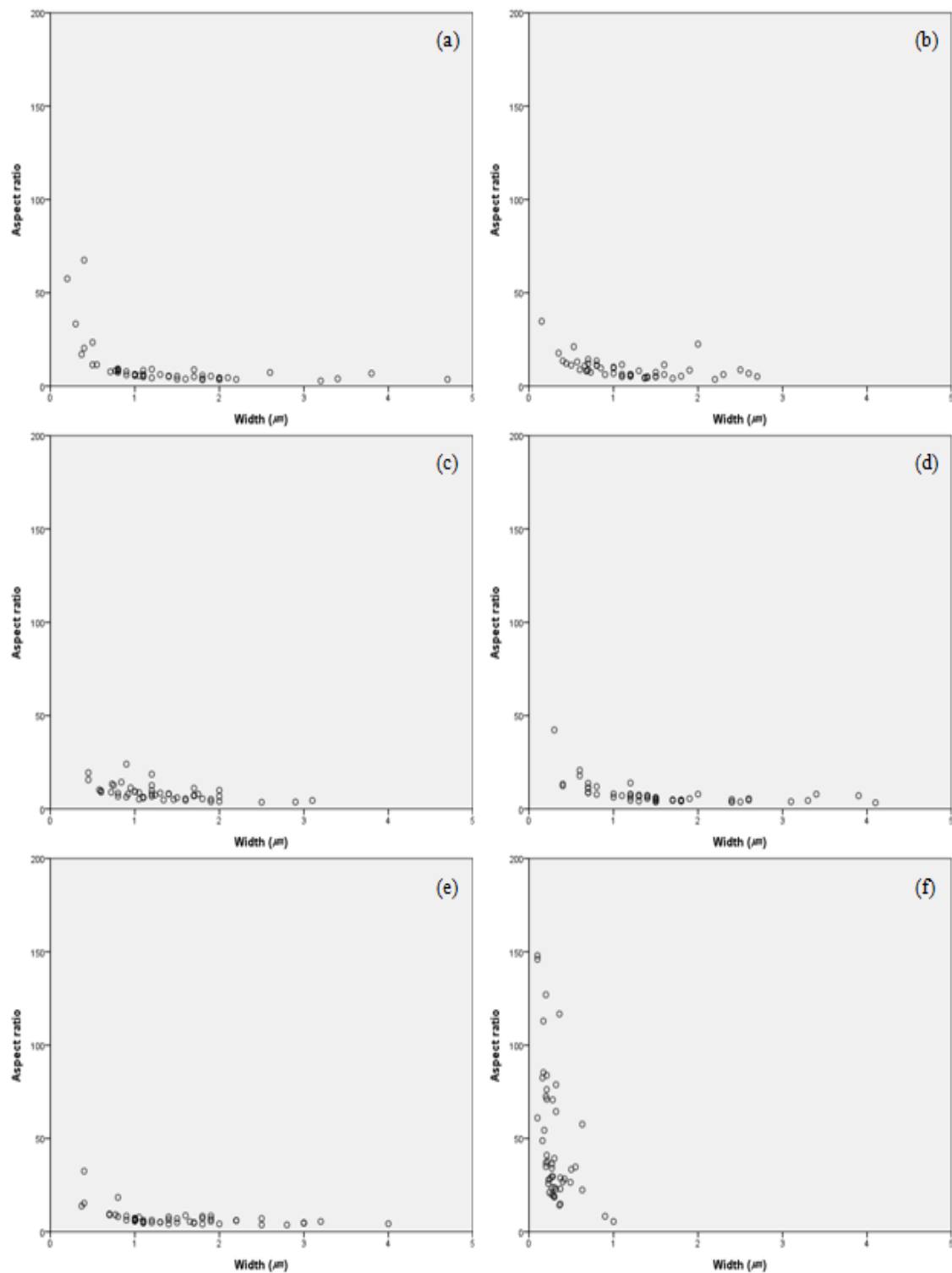


Fig. 3. Distribution of width and aspect ratio for (a) Park 1, (b) Park 2, (c) Park 3, (d) Park 4, (e) Park 5 and (f) HSE Reference Actinolite.

Table 4. Airborne concentrations of asbestos fibers and bundles longer than 5 μm

Park number	No. samples	Concentration(f/cc)
1	2	< 0.0009
2	2	< 0.0009
3	2	< 0.0009
4	2	< 0.0009
5	2	< 0.0009

으로 예상된다.

결론

공원 조경석에서 검출된 자연발생석면의 형태적 특성을 투과전자현미경으로 관찰하여 석면표준물질과 비교하고, 조경석 주변의 공기 중 석면농도를 분석하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 석면형태 구분을 위해 입자의 형태, 너비와 길이대너비 비율 분포 등을 분석하여 석면표준시료와 비교한 결과 연구대상 5개 공원 조경석에 함유된 트레모라이트-악티노라이트는 상업적으로 활용된 석면이 보이는 전형적인 석면형태를 보이지 않았다.
2. 비석면형태의 각섬석계 석면은 발암성을 보이지 않는다는 석면형태와 독성 관련 연구결과(7, 8)를 바탕으로 하면 본 연구대상 공원의 조경석에 함유된 트레모라이트-악티노라이트는 석면형태 석면의 유해성을 보일 가능성은 낮을 것으로 보인다.
3. 석면은 공기 중으로 비산되어 호흡기를 통해 인체에 유입되는 경우 유해하다. 본 연구대상 조경석 주변 공기 중 석면농도는 분석민감도 0.0009 f/cc 미만이었다. 공원 조경석의 경우 공기 중으로의 석면 비산은 주로 자연적인 풍화에서 기인한 것으로 비석면형 각섬석계 석면이 조경석 표면에 일부 노출되어있다고 하더라도 석면이 공기 중으로 비산되어 인체 유해성

을 나타낼 가능성은 낮을 것으로 사료 된다.

4. 연구대상 공원의 조경석은 섬유상 형태로 석면을 분류하는 국내법에 따르면 석면함유 조경석으로 분류되지만 연구결과 전형적인 석면형태가 아니고 공기 중으로 비산될 가능성이 낮으므로 무석면 조경석으로 교체하는 대신 예방적 차원에서 향후 공기 중 석면농도를 주기적으로 모니터링할 것을 관리대책으로 제안 한다.
5. 조경석에 함유된 자연발생석면의 형태적인 특성 분석결과와 주기적인 공기 중 석면모니터링 결과는 합리적인 조경석 관리방안을 결정하고, 조경석에 함유되어 있는 자연발생석면에 대해 불안감을 가진 시민들과의 리스크 커뮤니케이션에 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김정옥, 정명채, 김동진, 전기석, 이창환 : 자연발생석면 분포지역의 효율적인 조사와 관리 방안. 지하수도양환경, 16:10~18, 2011.
2. 환경부 : 석면관리총람. p.446, 2009.
3. Hendrickx, M : Naturally occurring asbestos in eastern Australia : a review of geological occurrence, disturbance and mesothelioma risk. Environ. Geol., 57: 909~926, 2009.
4. Lee, RJ, Strohmeier, BR, Bunker, KL, and Van Orden, DR : Naturally occurring asbestos-A recurring public policy

- challenge. Hazardous Materials, 153:1~21, 2008.
5. 환경부고시 제 2015-209호 : 석면함유가능물질 조사·분석을 위한 시료채취 및 분석방법. 2015.
 6. US EPA : EPA/600/R-93/116 METHOD FOR THE DETERMINATION OF ASBESTOS IN BULK BUILDING MATERIALS, 1993.
 7. Addison, J and McConnell, EE : A review of carcinogenicity studies of asbestos and non-asbestos tremolite and other amphiboles. Regul. Toxicol. Pharmacol., 52:S187~S199, 2008.
 8. Gamble, JF and Gibbs, GW : An evaluation of the risks of lung cancer and mesothelioma from exposure to amphibole cleavage fragments, Regul. Toxicol. Pharmacol., 52:S154~S186, 2008.
 9. Harper, M, Lee, EG, Doorn, SS and Hammond, O : Differentiating Non-Asbestiform Amphibole and Amphibole Asbestos by Size Characteristics, Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 5:761~770, 2008.
 10. Chatfield, EJ : A procedure for quantitative description of fibrosity in amphibole minerals, ASTM Johnson conference, Vermont, 2008.
 11. Van, Orden, DR, Lee, RJ, Allison, KA and Addison, J : Width distributions of asbestos and non-asbestos amphibole minerals. Indoor Building Environ., 18:531~540, 2009.
 12. Wylie, AG, Bailey, KF, Kelse, JW and Lee, RJ : The Importance of Width IN Asbestos Fiber Carcinogenicity AND ITS IMPLICATIONS FOR PUBLIC POLICY, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 54:239~252, 1993.
 13. Eastern Research Group, Inc. : Report on the Expert Panel on Health Effects of Asbestos and Synthetic Vitreous Fibers : The Influence of Fiber Length, Prepared for Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Health Assessment and Consultation, p.5~7, 2003.