한국환경과학회지 제21권(제9호), 1069~1078, 2012 http://dx.doi.org/10.5322/JES.2012.21.9.1069
Journal of the Environmental Sciences

석면함유 건축물의 석면 노출 및 위해성 평가

정재원 · 김광수 · 조순자[1] · 이상준[2)*]
부산광역시보건환경연구원, [1)]부산대학교 환경공학과, [2)]부산대학교 미생물학과
(2012년 4월 2일 접수; 2012년 6월 29일 수정; 2012년 8월 31일 채택)

Asbestos Exposure and Health Risk Assessment in Asbestos-Containing Buildings

Jae-Won Jeong, Kwang-Su Kim, Sunja Cho[1], Sang-Joon Lee[2)*]
Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan 611-813, Korea
[1)]Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
[2)]Department of Microbiology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Manuscript received 2 April, 2012; revised 29 June, 2012; accepted 31 August, 2012)

Abstract

This study was performed to evaluate the asbestos exposure levels and to calculate excess lifetime cacer risks(ELCRs) in asbestos-containing buildings for maintenance and management. The range of airborne asbestos concentration of 33 buildings was 0.0018 ~ 0.0126 f/cc and one site exceeded indoor air-quality recommended limit 0.01 f/cc. And ELCRs based on US EPA IRIS(Integrated risk information system) model are 1.5E-06 ~ 3.9E-05 levels, and there was no site showed 1.0E-04 (one person per million) level or more, and 11 sites showed 1.0E-05 (one person per 100,000 people) level or more. To prevent the release of asbestos fibers, it needs operation and maintenance of asbestos-containing building materials, and there are some methods such as removal, repairment, enclosure and encapsulation. In conclusion, a risk-based air action level for asbestos in air is an appropriate metric for asbestos-containing building management.

Key Words : Asbestos, Health risk assessment, Excess lifetime cacer risks(ELCRs)

1. 서 론

석면(Asbestos)은 백만 년 전 화산활동에 의해 만들어진 화성암의 일부가 열수나 고열에 녹은 마그마 및 습곡현상에 따른 압력 등의 영향을 받아 용해되고 마침내 식으면서 섬유상으로 재결정되어 만들어지게 되는데, 모암의 종류에 따라 사문석(Serpentine)계열과 각섬석(Amphibole)계열로 크게 나눌 수 있다. 어느 계열이든 규소(Si), 수소(H), 산소(O), 마그네슘(Mg) 등의 원소로 구성되어 있고, 그들의 조성은 석면이 생성된 모암의 조성과 동일하게 된다. 구불구불한 섬유다발 형태의 사문석계 석면에는 백석면(Chrysotile)이 있으며, 날카로운 바늘형태의 각섬석계(Amphibole) 석면에는 갈석면(Amosite), 청석면(Crocidolite), 트레몰라이트(Tremolite), 악티놀라이트(Actinolite), 안소필라이트(Anthophyllite) 등 총 6종의 석면을 총칭하고 있다. 이 중 백석면은 극히 가늘고 유연성과 품질이 매우 뛰어나 생산량이 다른 석면들보다 가장 많았으며, 청석면은 섬유의 강도와 내산성이 좋아 많이 사용되었으나, 독성이 강해 가장 일찍 사용이 금지되었다

*Corresponding author : Sang-Joon Lee, Department of Microbiology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2268
E-mail: sangjoon@pusan.ac.kr

(AHN과 KANG, 2009).

석면은 비단과 같이 부드러운 감촉과 광택을 갖추고 있으면서도 높은 강도와 불에 타지 않는 내열성, 불연성, 절연성, 단열성 등을 갖추고 있고, 내마모성, 내부식성, 내화학성, 내약품성과 같은 다양한 특성이 있어 일반가정에서 뿐만 아니라 건설 및 산업현장에서 널리 사용되어 왔다.

최초로 인류가 석면을 사용한 흔적은 핀란드의 도자기에서 발견되었고 기원전 2,500년으로 추정되며, 그리스, 이집트, 중국에서 석면섬유를 사용하여 직포를 짰던 기록도 있다. 석면이 본격적으로 사용되기 시작한 시기는 산업혁명 이후로 석면의 방적법이 개량되어 석면포, 석면지 등이 대량 생산되었으며, 1862년 런던 만국박람회에는 캐나다산 석면원석이 전시되었고, 1877년 캐나다 퀘벡지방과 남아프리카에서 대광맥이 발견되었다. 특히 전쟁에서 필요한 군함, 전차, 군용기 및 방독마스크 필터 등에 석면이 사용되면서 석면산업의 호황이 이루어졌다(환경부, 2009).

석면이 일반가정에서 주로 사용되는 곳은 비닐타일, 온수파이프, 천장재 등이 있고, 건설자재로서 석면은 주로 각종 석면 슬레이트, 비닐타일, 벽의 칸막이, 천장재 등으로 방화용, 방음용 및 강도를 높이고 마모를 방지할 목적으로 사용되고 있다. 또한 산업현장에서는 브레이크 라이닝, 클러치 페이싱, 디스크 패드 등의 마찰재 및 윤활제, 접착제, 페인트 등의 첨가재로서 사용되고 있을 뿐만 아니라 우수한 단열성으로 인해 방화용 및 방음용 부착재, 전선의 피복재, 기계 · 기구의 단열재, 개스킷, 실링재, 그리고 화학약품공업에서 쓰이는 필터류 등으로 이용되고 있다.

그러나 석면은 구조상 poly filamentous structure로써 직경이 작은 섬유가 합쳐져 한 섬유를 구성하고 있어 섬유가 분절될 때마다 잘려지면서 직경이 작은 섬유로 분리되며 수가 증가된다. 이러한 특성상 미세한 석면입자가 공기 중에 부유하게 되고 석면 섬유에 호흡기를 통하여 노출되면 10~40년의 잠복기를 거쳐 석면폐증, 폐암, 악성중피종 등을 유발하며, 섭취 시에는 장관계의 암과 인후두암, 신장암, 췌장암, 임파선암 등을 유발하는 것으로 알려져 있다.

미세하게 분절된 석면입자는 보통 0.1~10㎛ 정도의 길이를 가지고 있는 것으로 알려져 있는데 호흡기계 질환과 주로 관련 있는 것은 길이 8 ㎛ 이상, 직경 0.25 ㎛ 이하의 크기를 가진 입자이며, 이 정도 크기의 석면섬유는 호흡기계를 통해 폐에 쉽게 침착될 수 있다. 미국 산업안전보건연구원(NIOSH)과 산업안전보건청(OSHA)에서 석면섬유를 5.0㎛ 이상으로 길이 대 직경의 비(aspect ratio)가 3:1이상인 경우로 정의하고 있는 것은 이와 같은 이유이다.

1977년 WHO 산하 국제암연구소(IARC)에서는 석면을 1급 발암물질로 지정하였으며, 우리나라에서도 노동부고시(제2008-26호)로 석면을 발암물질로 지정했다. 세계보건기구(WHO)는 1억 2,500만 명이 직업상 석면에 노출되고 이 가운데 적어도 9만 명이 해마다 석면관련 질환으로 사망하고 있으며, 더불어 비직업적 노출(환경성 노출)로 인한 사망자는 수천 명이 될 것으로 추정하고 있다(WHO, 2006).

우리나라에서 1993년부터 2007년 6월까지 석면노출로 인해 암으로 인정받은 근로자수는 총 60명이고, 이 중 50명이 2000년 이후에 발생하였다. 그러나 1970년대 ~ 1990년대에 석면사용이 많았던 우리나라의 경우 2010년 이후 석면관련 질환의 발병이 급증할 것으로 예상되고 있다(최 등 1998).

1978년의 전 세계의 석면 총 생산량은 약 600만 톤이었고, 주 생산지는 러시아, 캐나다, 남아프리카공화국 등이었으며, 핀란드 직업건강연구소(Finish Institute of Occupational Health)의 2001년 발표 자료에 의하면 2000년을 기준으로 전 세계의 석면 생산량은 200만톤 이상으로 주요 생산국은 러시아, 중국, 캐나다 등으로 생산된 거의 모든 석면들은 세계 각국으로 수출되고 있다고 보고하였다(한국산업안전공단, 2006).

우리나라의 석면광산은 1930년 중반부터 채굴을 시작하여 1944년에 4,815톤을 생산하였고, 해방당시 전국의 석면광산은 총 28개로 남한에는 충남 홍성과 충북 제천, 충주 등에서 16개의 광산이 있었으며, 1984년 폐광될 때 까지 총 생산량이 145,000 톤으로 대부분 백석면이었다.

석면원재료 수입은 1976년부터 1996년까지 약 20년간 꾸준히 증가하였으나 석면으로 인한 피해사례가 늘면서 1997년부터 청석면과 갈석면의 수입사용을 금지한 이후 지속적으로 감소하여 2008년까지 총 1,229,206톤을 수입하였다(한국산업안전공단, 2006).

우리나라에 수입된 석면은 주로 건축자재의 원료로 많이 사용되었는데, 1970년대의 경우 약 96%가 건축자재인 슬레이트 원료로 사용되었으나, 1990년에는 슬레이트와 보온 단열재 등으로 약 82.3%, 마찰재인 브레이크 라이닝과 패드 등에 약 10.5%, 석면 방직제품인 석면포 등에 약 5.5%, 그리고 기타 개스킷과 단열제품에 1.7%가 사용되었다(환경부, 2009).

우리나라를 비롯하여 선진국 등에서는 이미 석면에 대한 취급, 수입, 사용에 대한 엄격한 관리를 시행하고 있지만 과거의 노출로 인한 석면의 피해는 여전히 진행되고 있으며 향후 20년 ~ 30년 사이에 그 피해의 규모가 절정에 이를 것으로 예측되고 있다.

우리나라의 경우 청석면 및 갈석면은 1997년부터 제조・수입・양도・제조・사용을 금지하였으며, 악티노라이트석면, 안소필라이트석면, 트레모라이트석면은 2003년 7월에 산업안전보건법을 개정하여 추가로 금지하였다. 2009년 1월부터는 석면의 제품 중량의 0.1 %를 초과하는 모든 석면제품의 제조・수입・양도・제조・사용을 금지하고 있다. 그러나 수입 및 사용 등이 금지되기 이전까지 석면은 일반 건축물에 광범위하게 사용되었으며, 석면이 함유된 건축자재가 사용된 건축물의 안전한 관리를 위해서는 건축물내의 석면분포를 파악하고, 적절한 관리 조치를 취하는 것이 중요하다.

2012년 4월부터 시행되고 있는 석면안전관리법에는 석면이 함유된 건축물 관리를 위해 석면지도 작성 및 석면건축자재 위해성 평가를 의무화하고, 석면건축물 관리기준을 지켜야 하며, 석면건축물 안전관리인을 지정하도록 되어 있다. 이는 석면이 함유된 건축물을 완전 멸실 시까지 안전하게 관리함으로써 거주자와 작업 근로자의 건강피해를 예방하기 위함이다.

본 연구는 석면이 함유된 건축물 내에서의 공기 중 노출농도를 측정하여 건축물 이용자에 대한 건강 위해도를 평가해 봄으로써 향후 석면함유 건축물의 관리 방안을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사대상

본 연구의 조사대상으로는 부산광역시 90개 공공기관 건축물에 대한 석면조사 결과를 바탕으로 석면비산가능성에 따라 7단계의 건축물 석면비산 위해등급을 나누고, 각 등급별 건축물을 선정하여 공기 중 석면노출 정도를 조사하였다. 건축물 손상정도가 심한 1, 2등급 건축물은 모두 조사하였고, 그 외는 건축물 용도별로 다양하게 선택하여 조사하였다.

2.2. 건축물 위해등급 기준

석면함유 건축물로부터 공기 중 석면비산 가능성을 평가하기 위한 방법으로는 US EPA의 AHERA rule, UK의 HSE rule, USA ASTM rule 등이 있으며, AHERA rule은 건축물 위해등급을 현재상태 및 잠재적 손상가능성(공기와의 접촉 가능성, 접근가능성, 진동)에 따라 7단계로 구분하고, HSE rule은 제품형태, 손상정도, 표면처리, 석면종류 등에 따라 4단계로 구분하며, ASTM rule은 현재상태와 잠재적 손상가능성에 따라 4단계로 구분한다.

Table 1. Considerations of physical assessment by EPA AHERA rule

type of ACM*	condition of the material	suspected causes
thermal system insulation, surfacing, miscellaneous, others	significantly damaged, damaged, suspected	accessibility, disturbance, air erosion, vibration, water

* Asbestos Containing Material

Table 2. Categories of physical assessment by EPA AHERA rule

physical assessment categories
1) Damaged or significantly damaged thermal system insulation ACBM
2) Damaged friable surfacing ACBM
3) Significantly damaged friable surfacing ACBM
4) Damaged or significantly damaged friable miscellaneous ACBM
5) ACBM with potential for damage
6) ACBM with potential for significant damage
7) Any remaining friable ACBM or friable suspected ACBM

AHERA rule에 따른 건축물 위해도 평가법의 고려사항과 7단계의 범주를 Table 1과 Table 2에 나타내

Table 3. Target buildings for airborne asbestos exposure

physical assessment	No. of investigation area	explanation of ACM
1	4	1. A-market management office (ceiling board, chrysotile 3~7%) 2. A-market toilet (ceiling board, chrysotile 3~7%) 3. B-museum elevator engine room (cement wall board, chrysotile 13%) 4. C-youth training center warehouse (cement wall board, chrysotile 7.2%)
2	4	5. D-fire station warehouse (slate roof, chrysotile 9.8%) 6. E-youth training center engine room (pipe gasket, chrysotile 20%) 7. F-environmental co. engine room (acoustic wall board, chrysotile 5~8%) 8. F-environmental co. control room (acoustic wall board, chrysotile 5~8%)
3	9	9. G-sports stadium office (cement wall board, chrysotile 15%) 10. G-sports stadium office (cement wall board, chrysotile 9.4%) 11. H-museum engine room (cement wall board, chrysotile 10~15%) 12. H-museum engine room (cement wall board, chrysotile 10~15%) 13. I-youth training center toilet (cement wall board, chrysotile 13%) 14. J-environmental co. office (cement wall board, chrysotile 13.3%) 15. J-environmental co. sports center (cement wall board, chrysotile 13.3%) 16. K-fire station stairs (cement wall board, chrysotile 13.5%) 17. L-fire station toilet (cement wall board, chrysotile 12%)
4	6	18. C-youth training center shower room (ceiling board, chrysotile 14.2%) 19. G-sports stadium office (cement ceiling board, chrysotile 9~14%) 20. G-sports stadium office (cement ceiling board, chrysotile 11~12%) 21. D-fire station office (ceiling board, chrysotile 8%) 22. K-fire station lounge (ceiling board, chrysotile 3~5%) 23. C-youth training center warehouse (ceiling board, chrysotile 5%)
5	3	24. H-museum building engine room (pipe gasket, chrysotile 40%) 25. M-environmental co. office (acoustic wall board, chrysotile 5~10%) 26. Institute BIHE boiler room (pipe gasket, chrysotile 40%)
6	3	27. M-environmental co. dining building (cement wall board, chrysotile 13%) 28. I-youth training center hallway (gypsum ceiling board, chrysotile 8%) 29. Institute BIHE 3 floor (cement wall board, chrysotile 10~12%)
7	4	30. C-youth training center warehouse (ceiling board, chrysotile 3%) 31. H-museum management center warehouse (ceiling board, chrysotile 3~8%) 32. Institute BIHE 1 floor (ceiling board, chrysotile 5~7%, Amosite 7~10%) 33. Institute BIHE 2 floor (ceiling board, chrysotile 2%)

었으며, AHERA rule의 위해등급 7단계를 기준으로 Table 3과 같이 33개 지점을 선정하여 위해성 평가를 실시하였다.

2.3. 건축물내 공기중 석면농도 측정

실내공기질공정시험기준(환경부고시 제2010-24호) ES 02303.1『실내공기중 석면 및 섬유상 먼지 농도 측정방법 - 위상차현미경법』에 준하였으며, 셀룰로오스에스터(MCE, mixed cellulose ester) 재질의 여과지가 장착된 open face형 필터홀더를 사용하여 바닥으로부터 1.2~1.5 m 위치에서 10 L/min의 유량으로 1,200 L 되도록 채취하였고 주사전자현미경(SEM-EDX) 확인을 위해 동일조건으로 PC(Polycarbonate) 필터에 동시 채취하였다. 위상차현미경법을 위해 포집한 시료 필터는 아세톤-트리아세틴법에 의해 투명화시켰으며, 위상차현미경 400배율에서 총 200시야가 되도록 계수하였다. 주사전자현미경 확인을 위해 포집한 시료필터는 탄소테이프를 이용해 시료대에 고정시키고 charge-up을 방지하기 위해 백금 코팅한 후 2,000배율 이상에서 관찰하였다.

2.4. 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(환경부, 2010)과 미국 EPA IRIS(Integrated Risk Information System) 데이터를 이용하였다(EPA, 1986). 미국 EPA에서 제시하고 있는 방법은 발암물질의 3대 노출경로인 섭취, 호흡, 피부노출 중 석면의 경우 피부에 의한 흡수는 거의 없고 섭취에 따른 발암성도 밝혀진 바 없으므로 호흡을 통한 노출만을 고려하여 발암 위해도를 산정한 것이다.

석면의 발암위해도는 노출농도, 노출시간, 최초 노출로부터 경과시간을 이용하여 계산한다.

$$ELCR = EPC \times TWF \times IUR$$

- ELCR(Excess Life Cancer Risk) : 생애초과발암위험도(석면노출의 결과로서 암이 발생할위험도)
- EPC(Exposure Point Concentration) : 노출농도(해당 활동을 수행함으로써 노출되는 공기 중 석면농도, 개/cc)
- TWF(Time Weighting Factor) : 시간가중인자(1년 동안 실제 석면에 노출되는 기간의 비가 어느 정도 되는지를 반영)
- IUR(Inhalation Unit Risk) : 흡입단위위해도(흡입노출로 인한 단위위험도)

노출농도는 고정식 시료채취와 활동시 공기측정농도를 사용하며, 시간가중인자는 아래의 식을 이용하여 산정한다.

$$TWF = \frac{\text{Exposure} - time(hours/day)}{24} \times \frac{\text{Exposure} - frequency(day/year)}{365}$$

여기서 시간가중인자는 활동을 위한 $TWF_{ABS(Activity\ Based\ Sampling)}$와 비활동시 $TWF_{Amb(Ambient)}$ 로 구분하고, 각각 활동시 공기측정농도와 고정식시료채취농도(실내공기질 및 실외공기질 농도)와 곱하여 산정한다. TWFs는 하루(24시간)중 활동시간과 1년중 활동일로 구하며, TWF_{Amb}는 실내 및 실외거주시의 영향을 고려한다. 실내 거주시의 영향은 하루(24시간)중 실내거주시간과 1년중 거주시간을 이용한다. 또한 실외 거주시의 영향은 하루(24시간)중 실외거주시간과 1년중 거주시간을 이용한다.

흡입단위위해도는 최초 노출된 나이와 노출기간에 따른 암 발생 위험도로서 EPA IRIS에서 제시한 값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건축물 등급별 석면 노출농도

석면이 함유된 건축물로부터의 공기 중 석면노출

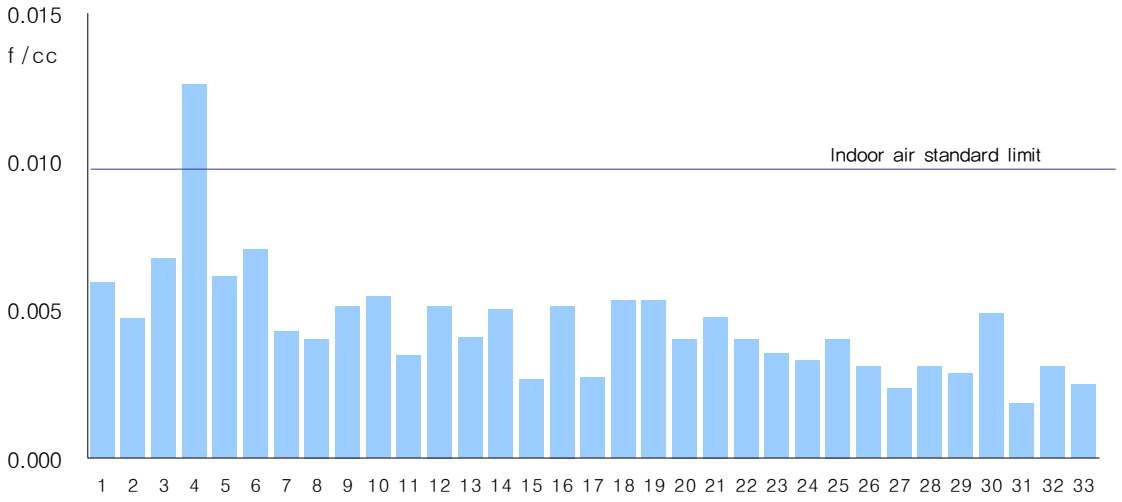

Fig. 1. Asbestos concentration for public buildings by PCM.

농도는 위상차현미경법 분석 결과, 총 33개 조사지점의 기하평균이 0.0042 개/cc였고, 0.0018 ~ 0.0126 개/cc 의 범위를 나타냈으며, 1등급 건축물 1지점에서 실내공기질 권고기준인 0.01 개/cc를 초과하였다.

석면비산 위해도 1등급으로 조사된 시설은 3개 시설이며, A상가시설 내 5지점, B박물관 1지점, C수련관 1지점 등 총 7개 지점이었으며, 그 중 4개 지점을 조사한 결과 0.0047 ~ 0.0126 개/cc의 공기 중 석면농도를 나타내었다. 조사지점 중 C수련관 물품보관창고는 석면함유 시멘트보드 벽체가 심하게 손상되어 있었으며, 창고 내부에 섬유제품 자재가 다량 보관되어 있어 위상차현미경으로 분석한 공기 중 석면농도가 실내공기질 석면 권고기준인 0.01 개/cc를 초과한 0.0126 개/cc를 나타내었다. 같은 지점에 대한 주사전자현미경(SEM) 확인 결과, MCE필터에서 백석면을 확인 할 수 있었으며 PC필터 및 다른 지점의 시료에서는 전자현미경에 의한 석면섬유가 검출되지 않았다.

석면비산 위해도 2등급 건축물은 3개 시설이며, D소방서 1지점, E수련관 1지점 및 환경공단 F사업소 내 7개 지점 등 총 9개 지점 중 4개 지점에 대해 조사하였고 0.0040 ~ 0.0070 개/cc의 결과를 나타내었다.

90개 공공기관 중 8개 시설의 10개 지점이 3등급 시설로 평가되었고, 그 중 9개 지점에 대한 조사 결과는 0.0027 ~ 0.0054 개/cc 였으며, 4등급 ~ 7등급 시설에서는 3 ~ 6지점의 공기 중 석면농도를 조사하여 0.0018 ~ 0.0053 개/cc 범위의 결과를 나타내었다. 이는 대기환경 중의 석면농도보다는 약간 높고 지하상가 내 공기 중 석면농도와 유사한 결과이다.

건축물 위해등급별 공기 중 석면농도를 부산시보건환경연구원에서 실시한 대기환경 중 석면농도* 및 지하상가 내 공기 중 석면농도(부산시보건환경연구원보 (2009~2011)와 비교해 보면, 대기환경 평균농도인 0.0019 개/cc 보다 높고 지하상가 평균농도인 0.0041 개/cc는 5, 6, 7등급 건축물내의 석면농도와 유사하였다.(Fig. 3)

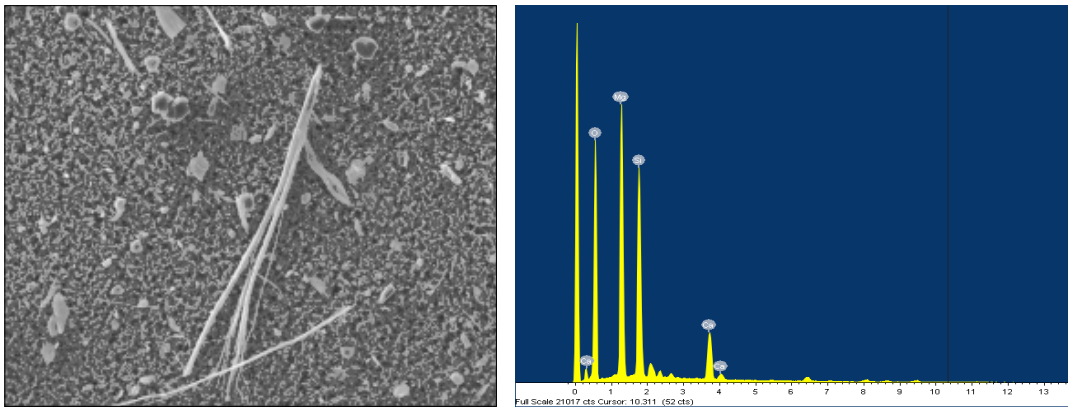

Fig. 2. Chrysotile asbestos fiber observed by SEM.

Table 4. Asbestos-in-air concentration on physical assessment for public buildings (unit : f/cc)

physical assessment	No. of investigation site	average concentration	range of concentration
1	4	0.0070	0.0047 ~ 0.0126
2	4	0.0052	0.0040 ~ 0.0070
3	9	0.0042	0.0027 ~ 0.0054
4	6	0.0044	0.0035 ~ 0.0053
5	3	0.0034	0.0031 ~ 0.0040
6	3	0.0028	0.0024 ~ 0.0031
7	4	0.0029	0.0018 ~ 0.0049

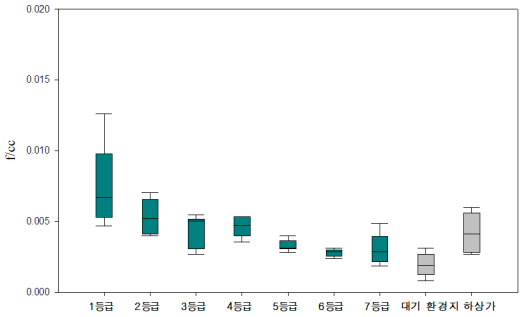

Fig. 3. Comparison on airborne asbestos concentration of public buildings.

2011년 서울시보건환경연구원에서 충북지역 폐석면광산 주변 20개 지점 대기 중에서 위상차현미경법으로 분석한 결과 0.0025 ~ 0.0029 개/cc로 조사되어 석면함유 건축물내 공기 중 석면농도가 대체로 일반 대기농도보다는 높게 나타남을 알 수 있었다(신 등, 2011).

국립환경과학원에서 2008년 전국 다중이용시설 109개소에 대해 위상차현미경 분석법으로 공기 중 석면농도를 조사한 결과 11개 시설에서 0.01 개/cc를 초과한 것으로 나타났으며(임 등, 2008), 박 등은 전국 공공건물 224개소에 대한 석면함유 여부 및 공기 중 석면농도 조사를 실시하였는데 224개소 중 170개소(75.9 %)에서 석면이 검출되었으며, 위상차현미경 분석법에 의한 공기 중 석면농도는 0 ~ 0.0111 개/cc로 본 조사와 유사한 결과를 나타냈다(박 등, 2009). 또한 외국의 조사결과는, 석면함유 학교건물에서 0.0010 ~ 0.0400 f/cc(미국), 0.0005 f/cc(영국) 등으로 조사되었고, 석면함유 사무실 건물에서 0.0220 f/cc(오스트리아), 0.00042 f/cc(캐나다) 등의 노출농도를 나타내어 지역간 큰 차이를 나타내었다(강, 2009). 투과전자현미경(TEM)을 이용해 미국 전역의 석면이 함유된 공공·상업시설의 공기 중 석면농도를 조사한 결과는 0.0021 S/ml 였으며, 학교건물에서는 0.0274 S/ml, 대기환경에서는 0.0011 S/ml로 비슷한 결과를 나타내었다(Lee와 Orden, 2008).

3.2. 인체 위해성평가 결과

조사대상 공공기관 근로자에 대한 발암 위험도를 산정하기 위해 노출 농도(EPC)는 각 지점에서 조사된 공기 중 석면농도를 사용하였으며, 시간 가중인자(TWF) 계산은 Table 5와 같이 연 근무시간은 280일, 사무실 시설은 하루 8시간 사용, 휴게실 시설은 하루 4시간 사용, 체력단련실·계단 등은 하루 2시간, 화장실·보일러실·창고 등의 시설은 하루 1시간 사용하는 것으로 산정하였다.

Table 5. Calculation of TWFs(Time Weighting Factors)

investigation area	exposure activities scenarios	TWF
toilet, engine room, warehouse	280 days per year using, 1 hour per day exposure	0.0320
practice room, weight room, stairs	280 days per year using, 2 hours per day exposure	0.0639
offices of sports stadium	100 days per year using, 8 hours per day exposure	0.0913
fire station lounge	280 days per year using, 4 hours per day exposure	0.1279
office room	280 days per year using, 8 hours per day exposure	0.2557

흡입단위위해도(IUR)는 공공기관의 평균 취업 시작연령인 30세부터 부서이동 등을 고려하여 10년으로 산정하여, 0.026으로 계산하였다.

건축물별 조사된 석면노출 농도와 시간가중인자(TWF) 및 흡입단위위해도(IUR)를 이용해서 계산한 발암위험도(ELCR)는 Table 6과 같다.

Table 6. Calculation of ELCRs(Excess Life Cancer Risks)

physical assessment	No. of investigation area	EPC (f/cc)	TWF	IUR$(f/cc)^{-1}$	ELCR
1	4	0.0047 ~ 0.0126	0.032 ~ 0.256	0.026	3.9E-06 ~ 3.9E-05
2	4	0.0030 ~ 0.0070	0.032 ~ 0.064	0.026	3.3E-06 ~ 1.0E-05
3	9	0.0027 ~ 0.0054	0.032 ~ 0.256	0.026	2.3E-06 ~ 3.3E-05
4	6	0.0035 ~ 0.0053	0.032 ~ 0.256	0.026	4.4E-06 ~ 1.3E-05
5	3	0.0031 ~ 0.0040	0.032	0.026	2.5E-06 ~ 3.3E-06
6	3	0.0024 ~ 0.0031	0.032 ~ 0.256	0.026	2.0E-06 ~ 1.9E-05
7	4	0.0018 ~ 0.0049	0.032	0.026	1.5E-06 ~ 4.0E-06

미국 EPA의 연구에 따르면 생애초과발암위험도(ELCR)가 1.0E-04(만명 당 1명) ~ 1.0E-06(백만명 당 1명)의 수준으로 관리되어야 하며, 1.0E-04 이상일 경우는 저감대책을 추진해야 한다고 설명하고 있다(EPA, 2005). 석면함유 공공기관 건축물내의 이용자에 대한 발암위험도는 1.5E-06 (백만명당 1.5명 발암가능) ~ 3.9E-05(십만명당 3.9명 발암가능) 수준으로 나타났으며, A상가 사무실에서 가장 높게 나타났다. 이 지점은 백석면이 함유된 천장텍스가 심하게 손상되어 있었고 공간이 매우 협소하였으며, 사무실의 성격상 근로자가 거의 실내에 상주하고 있었으므로 발암위험도가 가장 높게 나타났다. C수련관의 물품보관실 또한 백석면이 함유된 시멘트보드 벽체가 심하게 손상되어 있었고 공기중 석면농도 또한 가장 높게 측정되었으나, 창고시설로서 사용 빈도가 낮아 발암위험도는 두 번째로 높게 나타났다. 위해도 평가를 실시한 33개 조사시설 중 1.0E-04(만명 당 1명) 이상의 발암위험도를 나타낸 곳은 한 지점도 없었으며, 1.0E-05(십만명 당 1명) 이상의 발암위험도를 나타낸 곳은 11지점이었다. 1등급 시설에서 2지점, 2등급 시설 1지점, 3등급 시설 3지점, 4등급 시설 4지점, 6등급 시설 1지점으로, 주로 사용시간이 긴 사무실 등이 해당되었다. 건축물의 석면비산 가능성이 높고 공기 중 석면농도가 높게 측정되어도 보일러실, 창고 등의 사용빈도와 접근성이 낮은 지점은 상대적으로 발암위험도가 낮게 조사되었다.

3.3. 석면함유 건축물의 유지관리

미국 EPA의 Asbestos hazard Emergency and Response Act(AHERA)에 의하면 건축물내 석면함유물질에 대한 대응 방안은 우선적으로 제거하거나 비석면 물질로 대체하여야 하며, 두 번째로 손상된 부분에 대한 보수가 필요하며, 고형화 또는 밀폐 등의 방법으로 손상가능성을 저감시킬 수 있다.

조사대상 시설 중 손상상태가 심하고 잠재적 손상위험성이 큰 1, 2등급 시설물은 적절한 관리방안이 시급한 상황이었으며, 1등급 시설인 A상가 천장텍스, B박물관 엘리베이터기계실 벽체, C수련관 물품보관실 벽체 등은 석면함유 자재를 비석면 자재로 즉시 교체하였고, 교체 후 동일 지점의 공기 중 석면농도를 재조사하였다. 2등급 시설인 D소방서 안전센터의 창고는 2012년에 이전 계획 중이며, E수련관 지하보일러실의 가스켓을 포함한 보일러시설을 제거한 후 공기 중 석면농도를 재측정하였으며, 환경공단 F사업소의 보일러실 등 7개 지점의 다공판텍스 벽체에는 페인트를 덧칠해 비산 가능성을 저감하는 방안을 사용하였는데, 페인트칠 후 석면농도를 재조사하였다. 석면함유 자재의 제거, 교체 및 보수작업 이후의 공기 중 석면농도 및 ELCRs의 변화는 Table 7과 같다.

Table 7. Airborne asbestos concentrations of public buildings after repairing

physical assessment	investigation area*	ACM	response actions	asbestos-in-air concentration (f/cc) **(ELCRs)**		
				before actions	after actions	decresing rate
1	A	office, toilet ceiling board	remove	0.0059 **(3.9E-05)**	0.0037 **(2.5E-05)**	37.3 %
	B	elevator engine room wall board	remove	0.0067 **(5.6E-06)**	0.0033 **(2.7E-06)**	50.7 %
	C	warehouse wall board	remove	0.0126 **(2.1E-05)**	0.0038 **(6.3E-06)**	69.8 %
2	D	warehouse slate roof	-	0.0070	-	-
	E	boiler-room pipe gasket	remove	0.0070 **(5.8E-06)**	0.0035 **(2.9E-06)**	50.0 %
	F	air-conditioning room etc.	covering	0.0043 **(3.5E-06)**	0.0030 **(2.5E-06)**	30.2 %

* A-agricultural market, B- museum, C-youth training center, D-fire station, E-youth training center, F-Busan environmental corporation

교체・제거 등의 보수 후의 건축물내 공기 중 석면농도는 0.0030 ~ 0.0038 개/cc로 일반 다중이용시설의 실내공기질 석면농도와 비슷한 수준이었으며, 교체, 제거, 페인트 안정화 방법 등이 모두 30 ~ 70%의 저감효율을 나타내어 석면함유 건축물의 유지관리 방안으로 적절하게 나타났다. 그러나 페인트칠과 같은 2차적 방법은 건축물 멸실 시까지 유지・관리되어야 하고 마지막 철거 시에 비용이 추가 발생할 수도 있는 단점이 있다.

미국 EPA에 따르면 교통사고의 위험도는 1.0E-02 ~ 1.0E-03 수준이며, 번개에 맞을 위험도가 1.0E-04 ~ 1.0E-05 수준으로, 대기오염물질에 의한 생애초과발암위험도(ELCR)는 1.0E-04 ~ 1.0E-06의 수준으로 관리되는 것이 적절하며, 1.0E-04 이상일 경우는 적극적인 저감대책을 추진할 것을 권유하고 있으므로, 중간값인 1.0E-05 수준(십만명당 1명 발암가능성)으로 석면함유 건축물을 관리하고자 할 때의 유지 노출정도를 산정하여 보았다(Table 8).

석면함유 건축물 내에서 8시간 일하면서 10년간 근무하는 조건이라면, 건축물 내 공기 중 석면노출량을 0.0015 개/cc 이하가 되도록 관리하여야 하며, 2시간 정도 노출되는 환경에서 5년 간 근무한다면 공기 중 석면 노출량을 0.0105 개/cc 이하로 관리한다면, 십만명 당 1명의 발암가능성이 있다는 의미이다.

4. 결 론

석면함유 공공건축물에 있어서의 공기 중 노출정도 측정하고 그에 따른 인체 위해성을 평가한 결과는 다음과 같다.

공공기관 석면함유 건축물에 대한 공기 중 석면농도는 대부분 실내공기질 권고기준 미만이었으나 일부 시설에서 초과하였고, 대기환경 중의 석면농도보다는 약간 높고 지하상가 내 공기 중 석면농도와 유사한 결과를 나타내었다.

인체 위해성평가를 위해 산정한 발암위험도는 조사시설 중 1.0E-04(만명 당 1명) 이상의 발암위험도를 나타낸 곳은 없었으며, 1.0E-05(십만명 당 1명) 이상의 발암위험도를 나타낸 곳은 11 지점이었다. 건축물의 석면비산 가능성이 높고 공기 중 석면농도가 높게 측정되어도 보일러실, 창고 등의 사용빈도와 접근성이 낮은 지점은 상대적으로 발암위험도가 낮게 조사되었다.

석면비산 가능성이 큰 1, 2등급 건축물 16개 지점 중 7개 지점은 석면자재를 교체하였고, 1개 지점은 이전계획 중이며, 1개 지점은 시설 제거하였고, 나머지 7개 지점은 페인트칠을 통한 안정화 방법을 사용하였는데 모두 30 ~ 70%의 저감효율을 나타내어 석면함유 건축물의 유지관리 방안으로 적절하게 나타났다. 석면비산 가능성 저감을 위한 관리 방안에는 근원적 차단으로 제거・교체가 있으나 불가능할 경우 폐쇄, 밀봉, 고형화, 안정화 등의 방법이 있으며, 페인트칠과 같은 간단한 조치도 효과가 있는 것으로 나타났다.

결론적으로 석면이 함유된 건축물의 경우, 단순히 공기 중 석면노출 농도의 높고 낮음으로 관리하는 것보다 근로자 또는 거주자의 노출기간, 노출빈도 등을 고려한 인체위해성 평가 결과를 이용하여 관리되는 것이 타당하며, 목표 위해도를 정하고 그에 맞추어 석면함유 건축물의 관리방안을 운용한다면 시민 건강피해 예방에 매우 효율적일 것으로 판단된다.

Table 8. ELCRs(Excess Life Cancer Risk) for various exposure scenarios

exposure scenario	ELCR	TWF	IUR(f/cc)$^{-1}$	EPC (f/cc)
work 8 hours/day, 10years exposure	1.0E-05	0.256	0.026	0.0015
work 4 hours/day, 10years exposure	1.0E-05	0.128	0.026	0.0030
work 2 hours/day, 10years exposure	1.0E-05	0.064	0.026	0.0060
work 8 hours/day, 5 years exposure	1.0E-05	0.256	0.015	0.0027
work 4 hours/day, 5 years exposure	1.0E-05	0.128	0.015	0.0052
work 2 hours/day, 5 years exposure	1.0E-05	0.064	0.015	0.0105

참 고 문 헌

강동묵, 2009, 환경성 석면노출의 건강영향, 한국환경보건학회지, 35(2), 71-77.

박향, 조윤희, 정준식, 김윤신, 노영만, 박화미, 장성기, 임호주, 최성호, 2009, 공공건물에서의 석면분포 특성 연구, 한국실내환경학회 학술대회논문집, 6, 201-204.

부산광역시, 2010, 공공기관 석면지도 작성용역 종합보고서, (주)이노엔비 엑스퍼커뮤니티.

신진호, 이승철, 정숙녀, 오석률, 김남진, 황순용, 김지희, 남은정, 엄석원, 채영주, 2011, 충북 폐석면광산지역의 석면 실태조사, 한국환경분석학회지, 14(2), 110-119.

안종주, 2008, 침묵의 살인자, 도서출판 한울, 85-87.

임호주, 장성기, 이우석, 서수연, 임정연, 유재혁, 진용철, 윤상렬, 정현성, 2008, 다중이용시설의 석면함 유물질 사용 실태와 관리지침 마련을 위한 실태조사, 국립환경과학원보, 30, 207-215.

최정근, 백도명, 백남원, 1998, 우리나라의 석면생산과 사용 및 근로자수와 노출농도의 변화, 한국산업위생학회지, 8(2), 242-253.

한국산업안전공단, 2006, 석면에 의한 건강장해예방 연구.

한국산업안전공단, 2006, 석면 함유제품의 사용금지 효과에 대한 연구.

환경부, 2009, 석면관리총람.

환경부, 2010, 석면광산 등 석면발생지역의 토양환경 관리지침.

Ahn, Y. S., Kang, S. K., 2009, Asbestos- related Occupational Cancers Compensated under the Industrial Accident Compensation Insurance in Korea. Ind Health, 47, 113-122.

ASTM E2308-05 Stadard Guide for Limited Asbestos Screens of Buildings, http://www.astm.org.

Health and Safety Executive, http://www.hse.gov.uk/asbestos/managing.

Lee, R .J., Van Orden, D. R., 2008, Airborne asbestos in buildings, Regulatory Toxicology and Pharmacology, 50, 218-225.

US EPA, 1986, Quantitative Estimate of Carcinogenic Risk from Inhalation Exposure.

US EPA, 1987, Part 763-Asbestos ; subpart E-Asbestos-Containing Materials in Schools.

US EPA, 2005, Asbestos Exposure and Human Health Risk Assessment, Asbestos Air Sampling, Conducted September 27th through 29th, 2005, Clear Creek management Area, Califonia; Adult and Child Exposure.

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

WHO, 2006, Elimination of asbestos-related diseases, WHO/SDE/OEH/06.03.