발 간 등 록 번 호
11-B551172-000007-14

WWW.NCC.RE.KR
VOL.1

석면

ASBESTOS

–
발암 요인 보고서

국립암센터
NATIONAL CANCER CENTER

석면

ASBESTOS

발암 요인 보고서

KEY FINDINGS

- IARC(국제암연구소) 발암 물질 분류에서 사람에게 발암성이 확인된 물질로 분류함(Group 1)
- 석면은 자연에 존재하는 광물이며, 광물이 변성 과정을 거친 많은 지역에서 발견되고 있음. 대규모 천연 퇴적물이나 다른 광물의 오염 물질로도 발생할 수 있으며, 풍화를 거쳐 자연적 및 인위적인 모든 오염원에서 공기로 방출되고 있음
- 여러 경로를 통해 석면 가루를 흡입할 수 있으며, 석면 같은 광물질은 인체가 자연적으로 분해하기 어렵기 때문에, 광물 먼지가 세포막과 접촉하면 막이 손상되고 염증이 지속되면서, 석면폐증, 폐암, 악성중피종과 같은 질병을 유발할 수 있음
- 석면은 주로 건축자재의 원료로 사용되었으며, 국내 석면 사용이 금지되면서 최근에는 석면을 함유한 선박 해체 작업, 건축물 해체 작업 등에서 석면에 노출될 위험이 있음. 여러 가지 경로로 석면가루가 코나 입으로 들어올 수 있기 때문에, 석면이 사용된 건물을 철거할 때 반드시 정부에 등록된 석면전문 철거업체를 이용하고, 안전수칙을 잘 지켜 석면 피해를 예방해야 함

01 노출 현황

환경적 노출

석면은 자연에 존재하는 광물이며, 광물이 변성 과정을 거친 많은 지역에서 발견됩니다. 가장 흔하게 발생하는 석면 형태는 백석면이며, 대규모 천연 퇴적물이나 다른 광물의 오염 물질로도 발생할 수 있습니다. 또한 석면은 상온에서 휘발하지 않으나, 풍화를 거쳐 자연적, 인위적인 모든 오염원에서 공기로 방출 될 수 있으며, 인위적 오염원에는 인위적인 활동이 대기석면의 주요 원천입니다. 그 원천에는 채굴 작업, 석면 제품 제조 및 석면 함유 재료, 섬유 폐기물의 운송 및 처리 등이 있습니다. 또한 석면은 수중 환경(지하수 및 지표수)과 풍화 및 석면 함유 암석의 침식이나 매립지의 석면이 함유된 폐기물 처리 등과 같은 발생원을 통해 토양 및 퇴적물에도 흡수되어 노출될 수 있습니다. 석면은 공기 중 분산으로 인한 흡입, 주로 호흡기를 통해 노출이 되고 장기간 노출될 경우 호흡기에 영향을 미칠 수 있습니다.

직업적 노출

과거에는 석면 광산, 석면 방직 공장, 석면 제품 생산 등이 석면 노출 우려가 높은 대표 직종이었으나, 최근에는 선박 해체 작업, 건축물 해체 작업 등이 석면에 노출될 수 있는 업종입니다. 산업용 활석의 경우 다양한 광물의 혼합물이기 때문에 활석 생산 작업 및 활석 사용 산업현장에 종사하는 근로자들에게 활석 분진 흡입에 따른 노출이 발생할 수 있습니다. 또한, 직업상 광물 석면을 함유한 불티 방지포를 사용해 용접하는 작업, 석면을 함유한 자동차 부품을 취급하여 정비하는 자동차 정비소에서 일하는 근로자들에게도 노출될 가능성이 있습니다.

02 연구에서의 인체 발암성

국제보건기구 산하의 국제암연구소(IARC)는 6가지 석면(청석면, 갈석면, 백석면, 악소필라이트석면, 트레몰라이트석면, 악티노라이트석면)을 인간에서 악성중피종, 폐암을 유발하는 확실한 발암물질로 분류하고 있습니다. 그 외에도 다른 암과 관련이 있을 수 있으며, 미국 Institution of Medicine(IOM) 보고서에 따르면 제한적이지만, 석면 노출과 인두암, 후두암, 식도암, 위암, 대장암, 난소암 간의 연관성이 있다고 보고하고 있습니다.

03 노출 기준

- **환경부** : 0.1(개/cm^3) (작업환경 노출 기준치)
- **고용노동부** : 0.1(개/cm^3) (작업환경 노출 기준치)
- **식품의약품안전처** : 0.01(개/cm^3) (학교 시설 공간 노출 기준치)

04 노출 저감법

석면 노출 저감의 핵심은 석면 사용을 엄격하게 금지하는 것입니다. 이미 국내에서는 석면 사용을 전면 금지하고 있어서, 석면으로 인한 국민들의 노출은 현저히 줄어들었습니다. 다만 과거 사용하였던 석면제품, 석면 건축물 등을 취급하거나 해체하는 작업 과정에서 석면 노출이 발생할 위험이 있습니다. 오래된 건축물을 해체하고자 할 때는 허가된 기관을 통해 대기 중으로 석면노출이 발생하지 않도록 공정법에 의해 해체가 이루어져야 하며, 석면이 토양에 존재하는 경우도 있기 때문에 석면노출이 높은 일정 지역에는 출입하지 않도록 제한하는 것이 필요합니다.

슬레이트 해체 작업 시 작업 장소나 가까운 곳에 작업복, 탈의실, 샤워실 등의 위생설비를 설치하고 필요한 용품과 용구 비치하기

석면 노출 위험성이 있는 큰 건축물은 석면건축물로 지정하고, 석면건축자재 경고표시 붙이기

사업장에서 방진마스크, 방진복, 장갑 등 개인보호구 착용하기

자연발생석면 노출이 높은 지역을 '자연발생석면 광역지질도'를 통해 확인하고, 석면 노출이 높은 일정 지역에는 가급적 출입을 삼가하기

05 제언

석면은 폐암, 악성종피종을 유발하는 발암물질로서, 자연에만 존재하는 광물입니다. 국내에서 석면은 더 이상 사용되지 않도록 금지하고 있지만, 과거 사용한 석면 제품 및 석면 건축물을 해체하는 작업에서 여전히 노출될 위험이 있습니다. 오래된 건축물을 철거하는 과정에서 공정법에 의해 해체가 이루어져야하며, 이런 공정이 잘 이루어지도록 정부의 관리감독이 필요합니다.

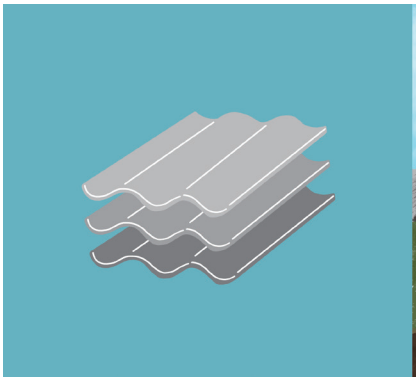
석면

Asbestos

- [CAS[1] 번호] 1332-21-4
- [UN[2] 번호] 2590
- 석면은 자연에 존재하는 광물로 사문석계, 각섬석계로 크게 2가지 계열의 6가지 세부 종류로 구분할 수 있음
- 석면은 주로 건축 자재의 원료로 사용되었으며, 자동차나 산업 기계 등의 마찰재, 기관이나 배관의 보온 단열재로도 사용되었음
- 여러 경로를 통해 석면 가루를 흡입할 수 있으며, 석면 같은 광물질은 인체가 자연적으로 분해하기 어렵기 때문에 광물 먼지가 세포막과 접촉하면 막이 손상되고 염증이 지속되면서 석면폐증, 폐암, 악성 중피종과 같은 질병을 유발할 수 있음
- IARC(국제암연구소) 발암 물질 분류에서 사람에게 발암성이 확인된 물질로 분류함(Group 1)

석면의 명칭

명칭	CAS 번호	동의어	색깔	화학식
Asbestos	1332-21-4	Unspecified		
Serpentine group of minerals				
Chrysotile	12001-29-5	Serpentine asbestos; white asbestos	White, grey, green, yellowish	$[Mg_3Si2O_5(OH)_4]_n$
Amphibole group of minerals				
Crocidolite	12001-28-4	Blue asbestos	Lavender, blue green	$[NaFe^{2+}{}_3Fe^{3+}{}_2Si_8O_{22}(OH)_2]_n$
Amosite	12172-73-5	Brown asbestos	Brown, grey, greenish	$[(Mg,Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2]_n$
Anthophyllite asbestos	77536-67-5	Ferroanthophyllite; azbolen asbestos	Grey, white, brown-grey, green	$[(Mg,Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2]_n$
Actinolite	77536-66-4	Unspecified	Green	$[Ca_2(Mg,Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2]_n$
Tremolite	77536-68-6	Silicic acid; calcium magnesium salt (8:4)	White to pale green	$[Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2]_n$



1) CAS : Chemical Abstract Service Register Number, 미국 화학회에서 운영하는 고유 숫자 식별자로 화학 구조나 조성이 확정된 화학 물질에 부여된 고유 번호

2) UN : 유엔 경제사회이사회에 설치된 위험물운송 전문가위원회로부터 운송 위험 및 유해성이 있는 화학 물질에 부여된 번호

석면의 종류(석면 건축물 안전관리 가이드북, 환경부, 2018)

종류	내용
백석면	백석면은 사문석계로 비단 같은 광택이 있으며 매우 가는 섬유상으로 방사성(紡絲性)이 좋은 데다 전기절연성이 좋고 품질이 뛰어나 생산량이 매우 많다(세계 석면 소비량의 약 93% 이상 차지). » 주요 생산지는 캐나다 퀘벡 지역과 러시아 우랄 지방 등으로 알려졌다.
갈석면	갈석면은 회색, 갈색, 황색의 약간 단단한 섬유로 여러 가지 장점이 있지만, 백석면과 달리 품질이 떨어져 생산량과 소비량은 적다. » 내열성이 강해 과거 보온재로 주로 사용되었고 남아프리카 북동부 지역에서 생산된다.
청석면	청석면은 백석면보다 섬유가 짧고 단단하다는 결점이 있지만, 섬유 강도와 내산성이 뛰어나다. » 주로 내산성 패킹재나 전기분해용 융막 재료로 사용되었으며 독성이 가장 강해 사용이 가장 먼저 금지되었다(생체 독성 순서 : 청석면 > 갈석면 > 백석면).
안소필라이트 석면	안소필라이트 석면은 바늘 모양의 곧고 흰 섬유로 취성(脆性)*을 나타내며 절단된 파편 형태로 존재한다. 무색이나 밝은 갈색을 띠고 큰 섬유 다발 끝이 분산된 모양이다. * 취성 : 외부에서 힘을 받았을 때 물체가 소성 변형을 거의 보이지 아니하고 파괴되는 성질.
트레몰라이트 석면	트레몰라이트 석면은 바늘 모양의 곧은 섬유로 무색이며 일반적으로 절단된 파편 형태로 존재한다. 실험실에서 화학 약품을 필터링하는 데 사용한다.
악티노라이트 석면	악티노라이트 석면은 바늘 모양의 곧은 섬유로 녹색이나 약한 다색성을 띠며 일반적으로 절단된 파편 형태로 존재한다. 주로 산업 현장에서 사용된다.

01

노출 현황

환경적 발생

01 자연적 발생

석면은 자연에 존재하는 광물이며, 광물이 변성 과정을 거친 많은 지역에서 발견된다(Atsdr, 2001; USGS, 2001). 가장 흔하게 발생하는 석면 형태는 백석면(chrysotile)이며, 대규모 천연 퇴적물이나 다른 광물의 오염 물질로도 발생할 수 있다(예: 트레모라이트(tremolite) 석면은 백석면(chrysotile), 질석(vermiculite), 활석(talc)에서 발생). 상업적 가치가 있는 퇴적물은 일반적으로 5-6% 석면을 함유하고 있지만, 미국 캘리포니아의 콜링가에서 백석면(chrysotile)과 같은 일부 퇴적물에선 50% 이상 석면을 함유하는 것으로 보고되었다(USGS, 2001; Virta, 2006). 한국에서는 자연발생석면[3]을 함유할 가능성이 있는 암석의 분포 현황을 담은 '자연발생석면 광역지질도'를 공개하고 있으며 (환경부, 석면관리 종합정보망), 광역지질도에 따르면 국토 면적(100,708㎢)의 약 0.44%가 자연발생석면 함유 가능성이 있는 것으로 보고되었다(환경부, 2019).

3) 자연발생석면은 지질 작용 등의 자연 활동으로 인해 암석이나, 토양에 존재하는 석면을 뜻함

02 공기

석면은 상온에서 휘발하지 않으나, 풍화를 거쳐 자연적 및 인위적인 모든 오염원에서 공기로 방출될 수 있다. 자연적 오염원에는 석면 함유 암석의 풍화 작용이 있으며, 자연적인 오염원에서 공기로 방출되는 석면의 양에 대한 추정치는 없다(Atsdr, 2001). 인위적 오염원에는 인위적인 활동이 대기 석면의 주요 원천이며, 그 원천에는 채굴 작업, 석면 제품 제조, 석면 함유 재료, 석면 함유 폐기물의 운송 및 처리, 석면 함유 제품(단열재, 내화재, 천장 및 바닥 타일, 지붕 슬레이트, 시멘트 등)으로 건설된 건물의 철거 등이 있다(Atsdr, 2001; NTP, 2005). 미세한 석면입자가 공기 중에 부유하게 되고 석면 섬유에 호흡기를 통하여 노출되면 10~40년의 잠복기를 거쳐 질환(석면폐증, 폐암, 악성중피종 등)을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다(정재원 등, 2012).

03 물

석면은 자연 및 인위적인 발생원에서 수중 환경으로 유입될 수 있으며, 지하수 및 지표수 샘플 모두에서 측정되었다. 자연적인 발생원은 석면 함유 암석의 침식이며, 인위적인 발생원은 석면을 포함하는 폐기물의 침식, 석면-시멘트 파이프의 부식, 석면이 포함된 지붕재의 붕괴 및 산업 폐수 유출(Atsdr, 2001) 등이다. 한국에서는 슬레이트 지붕 처마에 매달린 고드름에서 최대 15%의 백석면(Chrysotile)이 검출된 사례가 보고된 바 있다(환경보건시민센터조사, 2011).

04 토양

석면은 자연적(예: 풍화 및 석면 함유 암석의 침식) 및 인위적(예: 매립지의 석면이 함유된 폐기물 처리) 발생원을 통해 토양 및 퇴적물에 흡수된다. 매립하는 방식으로 석면을 함유한 물질을 폐기하는 형태는 과거에 더 일반적이었으며, 많은 국가가 규제 또는 법률에 따라 제한하고 있다 (Atsdr, 2001; Yoon,. & Roh, Y, 2016)

일반 인구집단에서의 노출

활석(Talc)[4]은 화장품 중 파운데이션, 색조 화장품 중 파우더 종류에 주요 사용되는 원료로, 특히 트레몰라이트가 활석의 불순물로 포함된 것으로 보고되었으며, 소비자 제품 중 화장품, 의약품을 통해 일반 인구가 석면에 노출된다. 피부 도포 시 공기 중 분산으로 인한 흡입이 노출의 주요 경로이며, 여러 식품 제조물(예: 껌)에서도 점착 방지제로 사용되기 때문에 섭취량은 미량일 수 있으나, 잠재적인 노출 경로일 수 있다(IARC, 2012).

4) 활석(Talc)은 천연 암석에서 채굴한 무기물질이며, 석면을 함유하고 있는 사문석과 결합된 경우가 많음.

직업적 노출

과거에는 석면 광산, 석면 방직 공장, 석면 제품 생산 등의 직업이 석면 노출 우려가 큰 대표적인 업종이었으나, 최근에는 선박 해체 작업, 건축물 해체 작업 등이 석면에 노출될 수 있는 업종이다. 활석(talc) 분진 흡입에 따른 노출은 활석 생산 산업 및 활석 사용 산업에서 발생하며, 산업용 활석(industrial talc)은 다양한 광물의 혼합물이기 때문에 직업상 광물 분진의 혼합물에 노출될 수 있다(IARC, 1987b). 또한 석면을 함유한 불티 방지포를 사용해 용접하는 작업, 석면을 함유한 자동차 부품을 취급해 정비하는 자동차 정비소 등에서 일하는 노동자들도 노출 가능성이 있다(Lee, N., & Yi, G, 2016).

02

발암성

구분	분류
IARC(국제암연구소)	Group 1(인간에게 발암성이 확인된 물질)
NTP(미국 국립 독성 프로그램)	K(인간에게 발암성이 있는 것으로 알려진 물질을 말함)
US EPA(미국 환경청)	Group A(인간에게 발암성이 확인된 물질)
EU ECHA(유럽 화학물질청)	Category 1A(인간에 대한 잠재적 발암성이 알려진 물질)

인체 발암성

01 폐암(Lung cancer)

A. 직업상 노출로 인한 폐암 사례 연구

석면 노출에 의해 폐암이 유발될 수 있다는 징후는 석면폐증 근로자들에게 발생한 폐암 사례에 대한 보고에서 처음 제기되었다(Gloyne, 1935; Lynch & Smith, 1935). 석면에 노출된 근로자 중 폐암의 증거를 나타내는 첫 번째 연구는 석면 방직 공장 근로자에 대한 연구였으며(Doll, 1955), 이 연구에서 일반인구 사망률을 기준으로 0.8건(P<0.00001), 폐암 환자에 비해 11명이 폐암 사례로 보고되었다.

Berman & Crump(2008)는 15개의 석면 코호트 연구 데이터를 포함하는 메타 분석 결과를 발표했다. 이 연구는 섬유 크기가 폐암 위험에 미치는 영향을 고려했으나, 폐암 효능이 섬유의 크기에 의존한다는 강력한 증거를 보여주지는 않았다. 섬유 크기 정보는 코호트 연구 중 하나에서만 사용할 수 있었고 다른 연구에서 유사한 산업 환경에서 수행된 데이터로 분석한 결과, 모든 너비(P = 0.07)를 사용하는 모델에서 긴 섬유(길이 > 10μm)가 짧은 섬유(5μm < 길이 < 10μm)보다 더 강력하다는 약한 증거가 있었다. 이러한 실험 연구들의 결과에 따르면 길고 가는 섬유가 짧고 굵은 섬유보다 석면이 더 강력하게 인간의 폐암을 유발하는 것으로 의심되지만, 크기별 데이터가 부족하기 때문에 크기별 위험 추정치를 파악하는 것은 제한적인 측면이 있다. Stayner et al. (2008)은 투과전자현미경(TEM)을 사용해 보관된 공기 시료를 재분석한 정보로 폐암 사망률에 대한 섬유 크기별 추정치를 평가한 사우스캐롤라이나 석면 섬유 집단의 분석 결과를 발표했다(Dement et al., 2008). 이 연구에서는 긴 섬유(> 10μm)와 가는 섬유(< 0.25μm)가 폐암 사망률의 가장 강력한 예측 인자로 밝혀졌다.

Loomis et al. (2010)은 노스캐롤라이나의 4개 공장에서 일하는 섬유 노동자 코호트에서 사망률 연구를 수행하였다. 연구 대상자들은 주로 퀘벡에서 수입된 백석면에 노출되었으며, 한 공장의 작업에 소량의 갈석면이 사용되었다. 전반적으로, 이 연구에서 과도한 폐암이 관찰되었다(SMR: 1.96, 95% CI: 1.73-2.20).

B. 환경 노출과 폐암 간의 연관성

뉴칼레도니아에서 트레몰라이트가 포함된 현장 먼지와 트레몰라이트가 포함된 화이트워시("po") 사용이 폐암과 환경 노출 사이의 연관성에 대한 증거가 보고되었다(Luce et al., 2000). 또한 석면에 대한 주거지 노출과 폐암 간의 연관성은 아모사이트 광산 지역인 남아프리카공화국 북부 지방의 폐암 환자-대조군 연구에서 관찰되었으며(Mzileni et al., 1999), 상대적으로 고노출 지역에 거주하는 남성보다 여성에게서 5.4배 더 높게 나타났다(95% CI: 1.3-22.5).

C. 비상업적인 각섬석 섬유 노출과 폐암 간의 연관성

석면 섬유 형태의 비상업적 각섬석 광물들에 발암 가능성이 있다는 역학적 증거가 나타나고 있다. 이 각섬석 섬유 형태 광물들은 기술적으로는 '석면'이 아니며 상업적으로 판매된 적이 없으나, 석면과의 유사성과 이 문제에 대한 대중의 우려로 이러한 섬유에 관한 최신 증거들에 대한 논의 중요성이 대두되고 있다.

여러 연구에서 미국 몬태나주 리비에서 채굴된 질석에 오염물로 포함되어 있는 각섬석 섬유와 폐암이 좋지 않은 연관성이 있다고 보고되고 있다. 이 섬유는 원래 tremolite-actinolite 시리즈(IARC, 1987a)로 특성화되었지만, 최근에 US Geological Society(미국 지질학회)에 의해 윈차이트 84%, 릭테라이트 11%, 트레모라이트 6%로 기술했다(Meeker et al., 2003). Sullivan(2007)은 국가 연령, 인종 및 성별 특정 비율에 기초한 사망 원인 데이터와 기대사망률을 사용해 표준화 사망비(SMR)를 산출했으며, 15년 전 석면에 노출된 인구집단에서 모든 암(SMR: 1.4, 95% CI: 1.2-1.6, n = 202) 및 폐암(SMR: 1.7, 95% CI: 1.4-2.1, n = 89)의 표준화사망비가 증가했다.

02 중피종(Mesothelioma)

흉막 및 복막 중피종은 중피 세포에서 발생하는 매우 드문 악성 종양이다. 석면 노출과 중피종 사이의 연관성에 대한 첫 번째 보고는 남아프리카공화국의 청석면 광산 지역에서 중피종의 발생을 기술한 Wagner et al. (1960)의 연구진에 의해 이루어졌다. 연구 결과, 흉막중피종은 약 80%, 복막중피종은 50~70%가 석면과 관련이 있다고 보고하였다. 악성중피종의 경우 한꺼번에 다량의 석면을 들이마시거나 적은 양을 꾸준히 들이마실 때 발병 위험도가 높아진다. 또한 과거 석면 취급 근로자가 퇴근 때마다 작업복이나 머리카락 등 몸에 묻혀 온 석면이 집안 공기를 오염시켜, 간접적인 석면 노출을 통해 오랜 시간이 경과한 후 가족 구성원의 악성중피종 발병 사례가 많았다(환경부, 2018).

A. 환경 노출과 중피종 발생 사례 연구(광산 근처 사는 사람들)

석면에 환경적으로 노출된 지역사회에 대한 여러 연구에서 다수의 중피종이 관찰되었다. 터키의 마을에 사는 사람들을 대상으로 한 연구에서 집을 하얗게 칠하는 데 사용되는 에리오나이트에 노출된 사람들에게서 중피종 발병률이 크게 초과된 것으로 보고되었다(Baris et al.,1987). 남아프리카공화국와 서호주(Wagner & Pooley, 1986)의 청석면 광산 지역 근처에 사는 사람들, 사이프러스(McConnochie et al., 1987) 및 뉴칼레도니아(Luce)의 트레몰라이트 오염 지역에 거주하는 사람들 사이에서도 과도한 중피종 발병이 보고되었으며(Luce et al., 2000), 유럽(Magnani et al., 2000), 이탈리아(Magnani et al., 2001), 캘리포니아(Pan et al., 2005)에서는 석면 작업자의 가족 구성원 사이에서도 비직업적 중피종이 발생한 것으로 보고되었다(Anderson et al., 1976; Ferrante et al., 2007).

B. 각섬석 섬유와 중피종의 연관성(Non-commercial asbestiform fibres)

여러 연구에서 미국 몬태나주 리비에서 채굴된 질석에 오염물로 포함된 감섬석계 석면 섬유와 건강에 좋지 않은 연관성이 있다고 설명하고 있다. 이 섬유는 원래 tremolite-actinolite 시리즈(IARC, 1987a)로 특성화되었지만, 최근에 US Geological Society(미국 지질학회)에 의해 윈차이트 84%, 릭테라이트 11%, 트레모라이트 6%로 기술되었다(Meeker et al., 2003). Sullivan(2007)은 국가 연령, 인종 및 성별 특정 비율에 기초한 근본적인 사망 원인에 대한 사망 원인 데이터와 기대 사망률을 사용해 표준화사망비(SMR)를 보고했다. 15년 동안 석면에 노출된 인구집단에서 중피종(SMR: 14.1, 95%CI: 1.8-54.4, n=2) 및 흉막암(SMR: 23.3, 95%CI: 6.3-59.5, n=4)의 표준화 사망비가 증가한 것으로 나타났다. 또한 이탈리아 동부 시칠리아의 도시인 비앙카빌라(Biancavilla) 거주자에게서 중피종의 높은 발병률이 보고되었다(SMR: 7.21, 95%CI: 3.59-13.00). 환경 연구에 따르면, 형태와 구성이 트레몰라이트 악티노라이트 계열과 매우 유사한 섬유인 풀루오르-에데나이트(fluoro-edenite)에 노출로 인해 종피종이 발병했을 가능성이 가장 컸다(Comba et al., 2003; Bruno et al., 2006; Putzu et al., 2006).

03 기타 암

폐암과 중피종 외에 석면과 다른 암 사이의 연관성을 조사한 연구는 드문 실정이다. 지난 50년에 걸친 임상 및 역학 연구에 따르면 석면은 폐암 및 중피종 외에도 다른 암과 관련이 있을 수 있으며, 이러한 연관성을 조사하기 위해 미국 IOM(2006)은 석면에 의한 인두, 후두, 식도, 위, 결장 및 직장암의 원인과 관련된 증거를 평가한 보고서를 발표하였다.

A. 인두암

석면과 인두암에 대한 16개의 코호트 연구를 살펴보면, Selikoff & Seidman(1991) 연구에서 인두암 사망자가 총 48명으로 나타났고, 가장 많은 인원을 구성한 코호트 연구로서 미국과 캐나다 전역의 17,800명의 남성 석면 단열 작업자 집단 중 2.18(95%CI: 1.62-2.91)의 구인두암 사망률이 관찰되었다. Piolatto et al. (1990)은 백석면에 노출된 북부 이탈리아의 석면 광부 1,058명 집단에서 2.31(95%CI: 0.85-5.02)의 구강인두암 SMR이 관찰되었으며, 직업 종사 기간에 따른 연관성은 보이지 않았다. 갈석면 광부 서브 코호트(SMR, 0.42; 95%CI: 0.00-1.97)에서는 인두암에 대한 초과 사망률은 없었지만, 청석면 광부 서브 코호트에서 인두암에 대한 SMR은 2.94(95%CI: 1.16-6.18), Pira et al. (2005)은 1996년 근로자 코호트에서 인두암에 대한 SMR은 2.26(95%CI: 0.90-4.65, 7명의 사망 기준)으로 관찰되었다.

6건의 환자-대조군 연구 중 석면과 인두암 사이의 연구는 Marchand et al. (2000)가 프랑스에서 206명의 하인두암 사례와 305명의 대조군에 대한 병원 기반 환자-대조군 연구를 수행했다. 그 결과 161건의 사례에서 상대 위험도가 1.80(95%CI: 1.08-2.99)임을 발견했으며, Berrinoet al. (2003)의 유럽에서 하인두암에 대한 다기관 환자-대조군 연구를 수행한 결과 석면 노출에 대한 교차비(OR)가 1.8 (95%CI: 0.6-5.0)임을 발견했다. 이 연구는 하인두암에 대한 분석으로 제한되었으며, 석면 노출 가능성이 있는 경우의 승산비(Odds ratio)는 1.80(95%CI: 0.90-3.90)이었고, 이는 담배와 알코올에 대한 노출을 보정한 결과였다.

Zheng et al. (1992)는 중화인민공화국 상하이에서 인구 기반의 인두암에 대한 환자-대조군 연구(암 발병: 204건, 대조군: 414건)를 수행했는데, 석면 비노출군에 비해 석면 노출군에서 인두암의 상대 위험도는 1.81(95%CI: 0.91-3.60)이었다.

B. 후두암

직업적으로 석면에 노출된 근로자에 대한 코호트 연구를 통해 광범위한 산업 분야에서 석면 노출과 후두암 사이의 연관성에 대한 증거를 발견했다.

국제암연구소(IARC)에서는 석면과 후두암 사망(또는 발병)에 관련된 29개 코호트 연구를 검토했으며, 15개의 환자대조군 연구 중 14개의 연구에서도 석면 노출과 후두암은 관련성이 있는 것으로 나타났다. 또한 흡연과 음주를 보정한 메타분석에서도 석면 노출과 후두암 사이에 관련성이 있는 것으로 나타났다.

석면에 노출된 35명의 근로자를 포함한 29개의 코호트 연구를 검토한 결과, 작업 횟수와 공기 중 석면 누적 노출, 후두암으로 인한 사망 위험 사이에 양의 용량-반응 관계가 있었으며 후두암에 대한 SMR은 석면 섬유 노출 누적 기간이 길수록 사망률이 높은 것으로 나타났다.

C. 식도암

직업적으로 석면에 노출된 코호트에 대한 25개의 연구 중 주요 결과를 살펴보면, Selikoff & Seidman(1991)의 연구 결과 미국과 캐나다 전역의 석면 단열재 작업자 17,800명의 코호트 중 식도암에 대한 SMR이 1.61(95%CI: 1.13-2.40)이었다. 석면 작업자의 암은 잠복기와 관련이 매우 밀접하며, 석면에 직업적으로 노출되고 25년 이상 지난 후에는 대부분 위험이 증가하는 것으로 나타났다. McDonald et al. (1980)의 연구에서는 1975년까지 주로 백석면에 노출된 캐나다 퀘벡의 남성 10,939명과 여성 440명의 석면 광부와 분쇄 작업자 집단에서 식도암과 위암의 사망률이 높아지는 것으로 나타났다(SMR, 1.27). Hein et al. (2007)은 2001년까지 직업적으로 백석면에 노출된 사우스캐롤라이나의 석면 방직 작업자 3,072명의 코호트에서 식도암의 SMR이 1.87 (95%CI: 1.09-2.99)로 관찰되었다.

석면 노출과 식도암 사이의 연관성을 조사한 환자-대조군 연구에서는 다음과 같은 연구 결과가 나타났다. 캐나다 퀘벡에서 실시한 환자-대조군 연구에서는 코와 식도 편평 세포 암종 진단을 받은 17명의 환자가 대조군보다 석면 노출군에서 2.0배(95%CI: 1.1-3.8) 증가했으며(Parent et al., 2000), 약 400,000명의 스웨덴 건설 노동자 코호트에서 실시된 환자-대조군 연구에서는 석면 노출과 식도 선암 사이에 양의 상관 관계가 있는 것으로 나타났다(Jansson et al., 2005).

D. 위암

석면과 위암 간의 연관성에 대한 코호트 연구 결과를 살펴보면, Selikoff et al. (1964)은 직업적으로 석면 먼지에 노출된 뉴욕과 뉴저지의 단열재 작업자 632명에서 위암에 대한 거의 3배의 초과 사망률(12명 관찰 vs 4.3명 예측)이 나타났다. 이 집단 내에서 추가 분석(Selikoff et al., 1979)한 결과, 석면 노출 기간(년 단위)과 위암으로 인한 사망 위험 사이의 용량-반응 관계에 대한 증거(20년 동안 노출된 근로자: SMR 0.00, 20-35년 노출된 근로자: SMR 4.00)를 발견했다. Meurman et al. (1974)은 위암에 대한 SMR이 유의하지 않게 증가했으며, 핀란드에서 안소필라이트 석면에 노출된 736명의 석면 광부 집단에서 SMR이 1.42(95%CI: 0.76-2.43)이었다. Berry et al. (2000)은 위암으로 인한 사망 위험이 다소 유의미하지 않은 것으로 나타났으며, 영국 런던에서 석면 단열재를 생산하는 공장 근로자를 대상으로 한 코호트 연구에서는 석면 반응과 위암 사이에 강한 양의 용량-반응 연관성이 관찰되었다.

환자-대조군 연구에서의 주요 연구 결과를 살펴보면, 폴란드의 한 연구(Krstev et al., 2005)에 따르면 석면에 노출되지 않은 근로자에 비해 노출된 근로자의 위암 발생률이 1.5배(95%CI: 0.9-2.4) 높은 것으로 나타났다. 석면과 위암 사이의 연관성을 조사하기 위한 대규모 환자-대조군 연구(Cocco et al., 1994)에서는 석면에 노출된 적이 있는 근로자의 경우 비노출 근로자보다 위암의 발생률이 0.7배(95%CI: 0.5-1.1), 21년 이상 석면에 노출된 근로자의 경우는 1.4배(95%CI: 0.6-3.0) 더 높은 것으로 나타났다.

E. 대장암

직업적인 석면 노출과 직장암 사이의 연관성은 1964년도에 미국 뉴욕과 뉴저지에 있는 632명의 남성 단열 작업자 집단에서 처음 보고되었다(Selikoff et al., 1964). 이 코호트 연구에 대한 추가 분석에서 석면의 작업 기간에 따라 대장암 위험이 양의 관계가 있음을 발견했다(Selikoff & Hammond, 1979). Selikoff et al. (1967)은 두 번째 보고서에서 미국과 캐나다 전역 17,800명의 석면 단열재 작업 인구에서 직업적인 석면 노출과 직장암 사이의 연관성을 발견했다(SMR: 1.37, 95%CI: 1.14-1.64). Seidman et al. (1986)은 미국 뉴저지주 패터슨에 있는 공장 노동자 820명을 대상으로 갈석면에 노출된 노동자가 전체 인구보다 직장암으로 인한 표준화사망비가 증가하는 것으로(SMR: 2.77, 95%CI: 1.16-2.80) 보고했고, 석면 근로자에서 대장암은 잠복기가 긴 질병의 경향이 있다고 언급했다.

다양한 산업 현장에서 직업적으로 노출된 집단에 대한 여러 코호트 연구에서도 석면 노출과 대장암 사이의 연관성을 보인 연구들이 있었다(Puntoni et al., 1979: Hilt et al., 1985; Jakobsson et al., 1994; Raffn et al., 1996; Szeszenia-Dabrowska et al., 1998; Smailyte et al., 2004).

CARET(Beta Carotene and Retinol Efficacy Trial)의 대장암 발생률 보고서에 따르면 직업적으로 석면에 노출된 3,987명의 흡연자가 석면에 노출되지 않은 흡연자에 비해 1.36배(95%CI: 0.96-1.93) 대장암이 발생하는 것으로 나타났으며, 석면 유발 흉막반이 있는 흡연자는 석면에 노출되지 않은 흡연자에 비해 대장암의 발생률이 1.54배(95%CI: 0.99-2.40) 높았다. 이에 연구자들은 흉막반의 존재를 석면에 대한 개인의 과도한 노출을 나타내는 지표로 해석했으며, 폐석면 폐증이 악화될수록 결장직장암의 위험도가 증가하는 것으로 나타났다(Aliyu et al., 2005).

환자-대조군 연구 사례에서는 석면 노출과 대장암 사이의 연관성이 나타나지 않은 연구들도 있었지만(Gardner et al., 1986; Hodgson & Jones, 1986; Garabrant et al., 1992; Dement et al., 1994; Tulchinsky et al., 1999; Hein et al., 2007; Loomis et al., 2010), De Verdier et al. (1992)는 직업상 최초 노출 이후 간격별로 대장암 발병률을 조사한 코호트 연구 결과, 석면에 노출된 피험자의 경우 잠복기가 39년 이상일 때 위험도가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 북유럽 국가 및 미국의 환자-대조군 연구에서도 직업적으로 노출된 집단에서 석면 관련 발병 위험도가 크게 증가한 것으로 보고되었다(Fredriksson et al., 1989; De Verdier et al., 1992; Vineis et al., 1993; Kang et al., 1997; Goldberg et al., 2001).

F. 난소암

석면 노출과 난소암의 연관성을 조사한 연구는 상대적으로 드물었다. 왜냐하면 직업(광산, 조선소, 건설 및 석면 단열 작업)에서 석면에 직업적으로 노출된 인력이 주로 남성이었기 때문이다. 이러한 이유로 The Institute of Medicine(IOM)은 이전에는 석면과 난소암의 연관성에 대한 조사는 수행하지 않았으나, 2006년부터 난소암과의 연관성에 대한 연구도 수행하고 있다.

Acheson et al. (1982)은 2차 세계 대전 전후에 영국의 석면 함유 방독면을 제조한 별도의 공장(n = 1327)에서 두 그룹의 여성으로 구성된 코호트 연구를 진행했다. 한 공장은 청석면, 다른 공장은 백석면을 사용했는데 청석면을 사용한 757명의 여성 중 12명이 난소암으로 사망한 것으로 관찰되었다. Berry et al. (2000)은 런던 동쪽 끝에 있는 석면판 단열재 제조 회사에 고용된 700명의 여성 공장 근로자에 대한 코호트 연구를 30년 이상 추적한 결과, 난소암으로 인한 9명의 사망(SMR: 2.53, 95%CI: 1.16-4.80)이 관찰되었으며, 양의 노출-반응 관계가 나타났다.

인구 기반 코호트 연구 중 Pukkalaet al. (2009) 연구는 북유럽 국가(덴마크, 핀란드, 아이슬란드, 노르웨이, 스웨덴)에서 다양한 직업 범주에 고용된 여성의 난소암 발병률을 조사했으며, 조사된 그룹 중 직업적으로 석면에 노출된 것으로 알려진 직업은 배관공이며 총 4개의 난소암이 발생한 것으로 나타났다. 노르웨이의 여성 펄프 및 제지 노동자 집단과 관련한 중첩 환자-대조군 연구에서는 예상치 24명 대비 난소암 37명(SIR: 1.50, 95% CI: 1.07-2.09)이 관찰되었다(Langseth & Kjærheim, 2004).

2020년 5월 존슨앤존슨(Johnson & Johnson)의 베이비파우더로 사용된 활석에 오염 물질인 트레몰라이트 석면이 포함된 것으로 알려져 논란이 되면서, 2023년부터 전 세계적으로 활석 포함 베이비파우더의 판매가 전면 중단되었다. 이유 중 하나는 활력분 속 석면의 성분이 난소암을 비롯한 상피성암 발병을 유발한다는 연구 결과 때문이다. 최근 24개의 환자대조군과 3개의 코호트 연구 기반으로 메타 분석한 연구 결과에서 여성의 회음부 활석 사용이 난소암 발생 위험을 증가시키는 것으로 나타났다(W. Berge, K. 2017, R. Penninkilampi, G.D., 2018). 그러나 미국 샌프란시스코 캘리포니아대(UCSF) 산부인과에서 여성 25만 명을 대상으로 한 연구에서는 활석 사용과 난소암 사이에 통계적으로 유의한 연관성을 찾지 못했다(O'Brien, Katie M., et al., 2020). 따라서 2017년에는 존슨앤존슨(Johnson & Johnson)의 대표 제품 중 하나인 베이비파우더가 난소암을 일으켰다는 이유로 제기됐던 소송에서 존슨앤존슨이 승소한 바 있다. 또한 2018년에 보고된 연구 결과에서는 활석을 회음부 주위에 사용한 경험이 있는 여성이 사용하지 않은 여성에 비해 난소암 위험이 1.3배(95% CI = 1.24-1.39) 높았지만, 코호트 연구만으로 살펴봤을 때는 유의성을 찾을 수 없었다. 활력분 속 석면에 노출된 여성들을 대상으로 파우더를 처음으로 사용한 나이, 활석 노출 평가, 양 반응 관계에 대한 증거를 찾기 위한 연구 등을 지속해야 한다.

동물 실험에서 나타난 암

종류	실험결과
랫드(Rat)	• 모든 상업적으로 사용되는 형태의 석면을 복강에 투여한 결과 Wistar 래트(Rat)에서 중피종의 유발을 야기했다. • 청석면, 갈석면, 캐나다 백석면, 로도지아 백석면, 젤라틴으로 코팅한 섬유 유리 외과용 거즈에 49mg 용량의 석면 분진을 래트에 투여한 결과, 3개의 UICC 시료인 청석면, 갈석면, 로도지아 백석면 모두에서 래트의 60%에서 중피종을 유발하는 것으로 나타났다(IARC, 1973). • 악성 중피종의 발생에 관여하는 인자로는 직업적 혹은 환경적 석면 노출이 가장 큰 비중을 차지하며 실험적으로 동물의 흉막강 내에 석면 섬유를 주입함으로써 인체와 동일한 중피세포종을 일으킨다는 사실을 증명했다(Wagner et al, 1974).
마우스(Mouse)	• 모든 상업적으로 사용되는 형태의 석면에 대해 발암성을 시험했을 때, 직경이 0.5μm 미만인 섬유는 종양 생성을 더욱 활발하게 유도했다(IARC, 1977). • 석면을 20마리의 암컷 마우스에게 피하 주사를 투여한 결과, 3종류의 섬유(청석면, 갈석면, 백석면)의 유형이 흉부와 복부의 피하 조직에서 발견되었으며, 광범위한 염증성 변화와 일부 육종이 주사 부위에서 발생했다(Roe FJC et al, 1985).

03

기타 관련 자료

체내의 독성동태

01 공기동력학 및 해부학적 요인(Aerodynamic and anatomical factors)

흡입은 광물 섬유에 노출되는 가장 중요한 경로이며, 폐와 흉막의 비악성(non-malignant) 질환 및 폐, 후두, 흉막 및 복막 내막에서 발생하는 악성 질환의 발생과 관련이 있다(IOM, 2006). 폐에서 입자 및 섬유의 침착은 기하학적 구조, 종횡비(IARC, 2002) 및 밀도의 함수인 공기역학적 직경에 따라 달라진다(Bernstein et al., 2005).

입자와 섬유는 점액에 침착된 상태에서 섬모 운동에 따른 전달로 비강 기관지 영역에서 제거될 수 있으며(Lippmann et al., 1980), 원위 기도와 폐포에 침착된 후, 폐포 대식 세포에 의한 식세포 작용에 따라 짧은 섬유가 더 천천히 제거된다. 섬유는 폐 상피 세포와 상호 작용하고, 간질로 침투해 흉막과 복막 또는 더 먼 부위로 전이될 수 있다. 설치류에서 인공 섬유를 사용하는 만성 흡입독성 실험에서 섬유 길이 및 생체 지속성을 지속적인 염증, 섬유증, 폐암 및 악성 중피종과 연관시켰다(Bernstein et al.,2005). 그러나 인간에게 설치류 흡입 연구의 결과를 추정할 때 고려해야 하는 흡입 입자 및 섬유의 폐포 침착에는 종간 차이가 있다(IARC, 2002).

02 석면 및 에리오나이트의 생물학적 지속성(Biopersistence of asbestos and erionite fibres)

직업적 석면 노출의 이력이 없는 도시 지역에 거주하는 40세 이상의 거주자에게서 다양한 상업용 및 비상업적 석면 섬유가 확인되었다(Churg & Warnock, 1980). 이러한 연구 및 기타 연구에서 석면 섬유가 생물학적으로 지속성을 가지고 폐 조직과 림프절에 축적되었다(Dodson et al.,1990; Dodson & Atkinson, 2006). 석면 섬유는 부검 후 흉막과(Gibbs et al.,1991; Suzuki & Yuen, 2001), 흉강경 검사 중 채취한 두정 흉막(Boutin et al., 1996)에서도 확인되었다.

실험 동물에서 폐에 침착된 갈석면(amosite)의 림프관 전이가 관찰되었지만, 폐에서 먼 부위로의 석면 섬유의 전위 경로는 아직 규명되지 않았다(Hesterberg et al., 1999; McConnell et al., 1999; IOM, 2006; NIOSH, 2009).

에리오나이트는 석면 섬유로 분류되지 않지만 석면 섬유와 같이 중피종, 폐섬유화 등을 일으키는 섬유상 광물로, 국제암연구소도 이 물질을 중피종을 일으키는 그룹1 발암 물질로 분류한 바 있다. 터키의 카파도키아 지역은 에리오나이트 지형을 이루는데 이 중 Karain, Tuzky 및 Sarihidir 마을을 대상으로 중피종 및 폐섬유화 등 비악성 질환에 대한 역학적 연구가 이루어졌다(안연순, 2009, Siemiatycki J. et al. 2004). 또한 에리오나이트 섬유에 대한 환경적 노출은 터키의 카파도키아(Cappadocia) 지역의 3개 시골 마을에서 확산된 악성 중피종과도 관련이 있었다(Baris & Grandjean, 2006). 이 마을에서 채취한 인간의 폐섬유 소화물에는 많은 양의 에리오나이트 섬유가 들어 있었고, 에리오나이트 섬유를 둘러싼 석면소체(ferruginous bodies)가 기관지 폐포 세척액에서 발견되었다(Sébastien et al., 1984; Dumortier et al., 2001). 활석의 경우, 시골 및 도시 거주자와 활석(Talc) 광부 모두의 부검 결과 폐에서 활석 입자가 발견되었으며, 활석 입자는 폐에서 생체 내 잔류해 작업 노출이 중단된 지 21년 후에 작업자로부터 얻은 기관지-폐포 세척액에서 회수되었다(Dumortier et al., 1989). 석면에 오염된 활석은 폐암 및 악성 중피종의 발병과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(IARC, 1987b).

석면의 발암 메커니즘

01 독성과 관련된 광물 섬유의 물리학적 특성(Physicochemical properties of mineral fibres associated with toxicity)

석면은 유사한 화학적 조성(실리케이트 구조에는 다양한 금속 양이온이 포함되어 있으며, 일반적으로 Mg^{2+}, Ca^{2+}, $Fe^{2+/3+}$, Na^{+}가 포함)을 가지고 있으나, 기다란 섬유상 형태를 만들어 내는 결정학적 제한 조건이 대부분 다르다. 독성의 주요 결정 요인은 섬유의 형태와 크기, 표면의 화학적 성상, 생체 지속성이며, 체액에서 섬유의 변형, 전위 및 용해성은 누적 노출을 조절하는 요인인 생체 지속성에 영향을 미친다(Fubini, 1997; Bernstein et al., 2005; Fubini & Fenoglio, 2007; Sanchez et al., 2009).

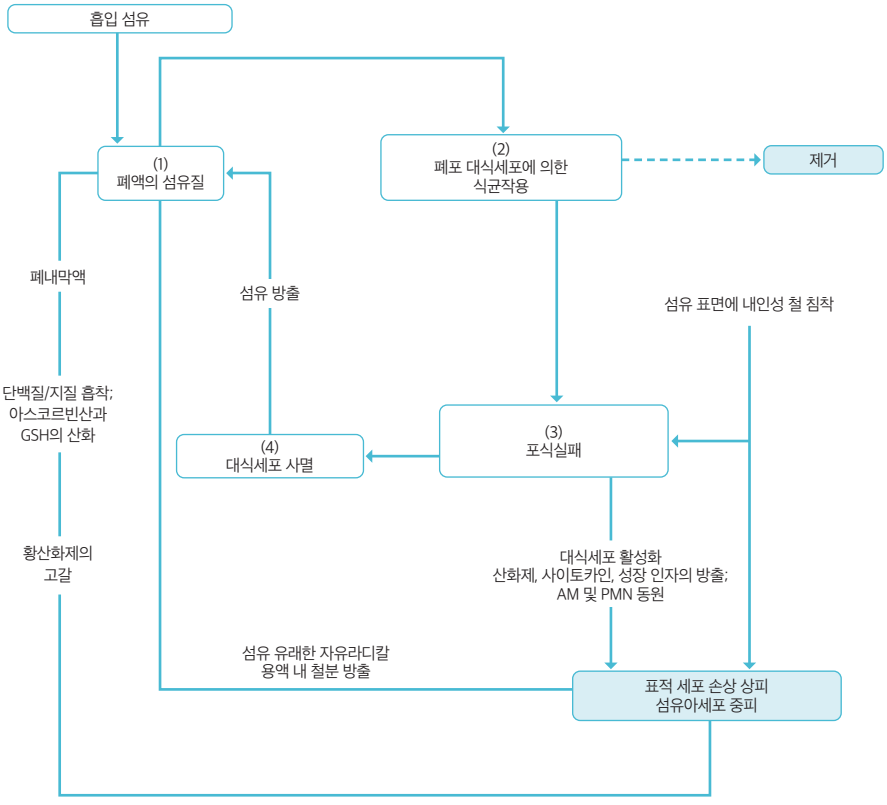


그림 1. 석면 섬유의 생물학적 활동과 관련된 물리화학적 특성(IARC, 2012)

02 직접적인 유전 독성(Direct genotoxicity) 및 간접 메커니즘 (Indirect mechanisms)

섬유상 광물질은 활성산소의 생성을 촉매해 적절하게 복구하지 않으면 유전자 돌연변이를 일으키는 산화 DNA 염기 및 DNA 가닥을 파괴해 유전 독성을 직접적으로 유도할 수 있다. 석면과 에리오나이트 섬유의 경우 모두 활성산소에 의해 매개되는 DNA 손상을 유발할 수 있다. 또한 석면 섬유는 유사 분열 기구를 물리적으로 방해해 이수성, 배수성, 그리고 석면 관련 암의 특징적인 특정 염색체 변형을 초래할 수 있다(Jaurand, 1996). 세포 내 신호전달 경로의 활성화, 세포 증식 및 생존의 자극, 후성 유전적 변화의 유도는 그림과 같다(그림 2).

석면 섬유는 폐포 대식 세포에 독특하고 강력한 영향을 미치며, 만성 폐섬유화(석면증) 및 폐암을 유발한다(Shukla et al., 2003). 대식 세포의 아포프토시스[5] 또는 각섬석 석면 섬유로 오염된 질석에 노출된 미국 몬태나주 리비 거주자의 자가면역질환 발병률 증가에 기여한다고 가정되었으며(Noonan et al., 2006; Blake et al., 2008), 석면 섬유를 포식한 대식 세포는 직접적 및 간적접인 메커니즘에 의해 활성산소 및 질소 종의 과잉 생성을 초래한다(Manning et al., 2002). 또한 석면 섬유는 표면 반응성이 높고 산화 환원 활성 철을 가지고 있어 하이드록실 라디칼을 생성해 지질 과산화, 단백질 산화, DNA 손상을 유발해 지속적인 염증으로 증폭되는 폐 손상을 유발한다.

5) 세포가 막결합성의 입자로 단편화되고, 그것이 식작용에 의해 다른 세포에 포식되어 소멸하는 것

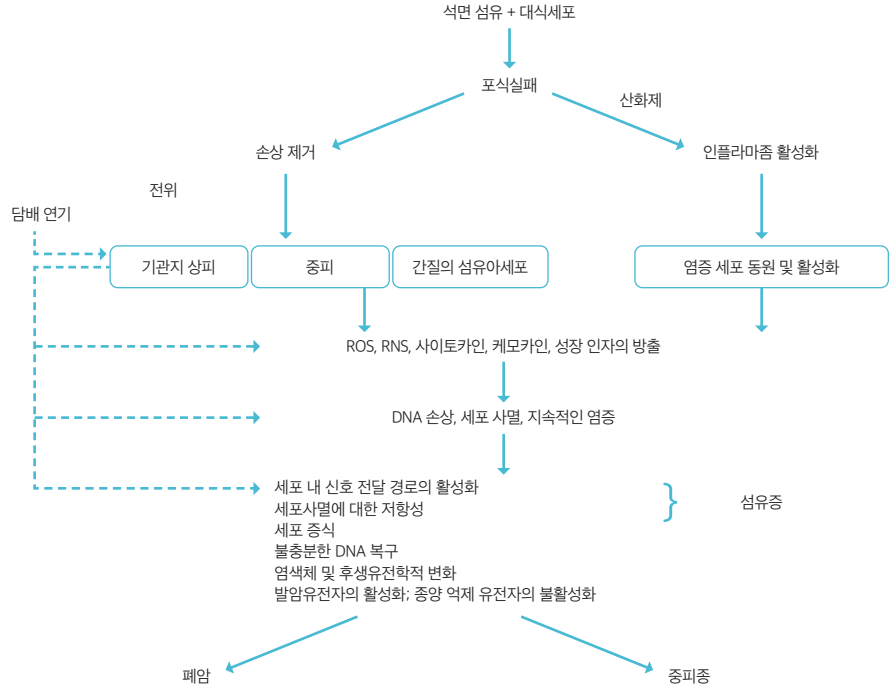


그림 2. 석면 섬유의 발암성에 대한 기전 제안(IARC, 2012)

취약 계층
(Susceptible populations)

외인성 환경 및 직업 노출과 유전적 감수성을 포함한 내인성 요인 모두 폐암(NIOSH, 2009)과 미만성 악성 중피종(Weiner & Neragi-Miandoab, 2009) 발병의 원인이 되며, 후두암과 폐암 발병에서 석면 섬유의 주요 보조 인자인 외인성 노출의 가장 좋은 예는 흡연이다(IARC 2004).

담배 연기와 섬유상 광물에 함께 노출되면, 담배 연기 발암 물질에 의해 유발된 유전자 돌연변이가 증폭되며, 후두암과 폐암 발병 위험을 증가시키는 조직 손상에 대응해 세포 증식이 증폭될 수 있다(Nymark et al., 2008). 알코올과 자극 물질에 대한 직업적 노출도 후두암 발병에 기여할 수 있으며, 담배 연기 흡입과 유사한 이러한 자극제는 호흡기 상피에 반복적인 손상을 일으켜 이형성을 유발할 수 있다. 또한 2개의 DAN 종양 바이러스(HPV 고위험 하위 유형)는 후두암 및 미만성 악성 중피종의 위험을 증가시킬 수 있다.

악성 중피종 발병과 관련된 가장 강력한 위험 요인은 에리오나이트(erionite) 석면 섬유, 석면 섬유로 오염된 활석(talc)과 질석(vermiculite)에 대한 환경적 또는 직업적 노출을 포함한다(표. 1). 석면 섬유로 오염된 혼합분진 노출의 발암 효과가 전적으로 석면 섬유 때문인지 아니면, 활석이나 질석 분진에 동시 노출이 생체 내에서 석면 섬유의 유지 또는 생물학적 활성을 강화하는지는 알려져 있지 않다(Davis, 1996).

표 1. 미만성 악성 중피종 발병 위험 요인(IARC, 2012)

노출	참고 문헌
석면 섬유(Asbestos fibres)	IARC (1987a, 2012b)
에리오나이트(Erionite)	IARC (1987a, 2012b)
석면 섬유를 함유한 활석(Talc containing asbestiform fibres)	IARC (1992, 2012e)
석면 섬유로 오염된 질석 (Vermiculite contaminated with asbestos fibres)	Amandus & Wheeler (1987), IARC (1987a, 2012e), McDonald et al. (2004)
토로트래스트(Thorotrast)	IARC (2001, 2012a)

04

노출 기준

※ 석면 노출 권고/규제 기준(국외/국내)

구분	기관	기준 수치				관련 내용
		백석면	갈석면	청석면	기타	
국외	미국 산업위생사협회 (ACGIH)	0.1/%(함량)				해체/제거 대상
	미국 직업안전건강 관리청(OSHA)	0.1(개/cm^3))				작업장 내 - 적용 대상 : 석면 노출을 포함한 건설 작업과 철거에 관련된 근로자를 보호하기 위한 규정 - 관리의 내용 : 석면 유해성 경감책으로 제거, 화학적 처리, 물리적 봉인, 수리, 유지 관리, 청소, 운송, 폐기물 취급과 관련된 내용이 담겨 있음
	미국 환경청 (EPA) (AHERA)	1%(함량)				석면 위험 비상 대응법(Asbestos Hazard Emergency Response Act, AHERA)에서 기준 - 적용 대상 : 모든 국공립 초등학교와 중고등학교, 외국에 있는 미국 영토 내의 학교는 1988년까지 석면 조사를 완료해야 하고 3년에 한 번씩 재조사, 6개월에 한 번씩 건축물의 자재 상태를 조사해야 함 - 석면 관리 내용 : 각 학교는 석면 조사 결과, 공기질 측정, 교육, 관리 프로그램, 석면 관련 사고 등과 관련된 내용을 실행하고, 관련 자료를 정부에 제출해야 한다. 또한 석면이 사용된 자재에는 석면 함유 물질 경고 표시를 해야 함
	영국 건강보호국 (HSE)	0.6(개/cm^3)				작업장 내 노출 시간 10분 기준
	호주	1.0	0.1	0.1	0.1	작업장 내 기준(개/cm^3)
	스페인	0.6	0.3	0.3	0.3	작업장 내 기준(개/cm^3)
	핀란드	0.1(개/cm^3)				작업장 내(최대 허용)
		0.01(개/cm^3)				작업장 내(청정 지역)
	일본	0.1%				석면을 0.1% 이상 초과하는 제품을 다루는 작업은 '작업주임자'를 선임하고(노동안전위생법 제14조), 석면 분진을 흡입하지 않도록 근로자를 지휘해야 함
국내	환경부	0.01(개/cm^3)				건축물 석면 해체/제거 공사
		0.1% 초과				폐기물관리법(지정 폐기물 기준)
	고용노동부	0.1(개/cm^3)				- 석면 취급 작업 공간(산업안전보건법 기준) - 사무실 공간(산업안전보건법, 사무실 공기 관리 지침)
		0.01(개/cm^3)				석면 해체/제거 후 작업 후 실내 공기 (산업안전보건법 기준)
		0.1% 초과				제조/수입/양도/제공/사용 금지
	교육과학기술부	0.01(개/cm^3)				학교 시설 공간(학교보건법 기준)

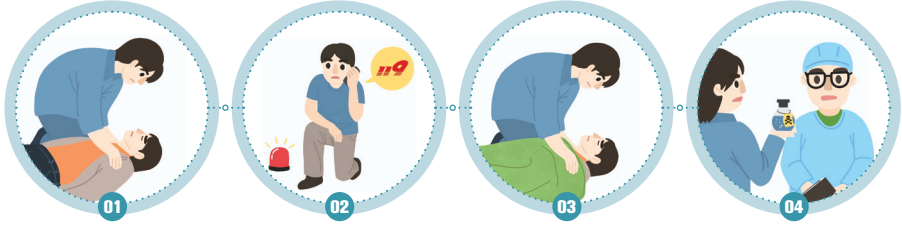
05

보호 방법

석면 노출을 줄일 수 있는 가장 확실한 방법은 석면 사용을 엄격하게 금지하는 것이다. 이미 국내에서는 석면 사용이 전면 금지되어 국민의 석면 노출이 현저히 줄어들었다. 다만, 과거 사용했던 석면 제품, 혹은 석면 건축물 등을 취급하거나 해체하는 과정에서 노출될 위험이 있다. 석면 해체 작업 중에 작업자 및 주변 거주민에게 석면 피해가 발생할 수 있으므로, 경고 표지 및 위생 설비 설치, 개인 보호구 착용, 습윤제 사용으로 석면 가루가 날리지 않도록 노출 및 안전에 주의를 기울여야 한다.

국내에서는 이미 오래된 공공기관의 건축물에 대해 석면 자재가 있는지 파악하도록 하고 있고, 오래된 정도에 따라 이를 교체하거나 보존 상태를 확인하도록 하는 작업을 수행하고 있다. 오래된 건축물을 해체하고자 할 때는 허가된 업체를 통해 작업자의 석면 노출을 최소화하고 관련 공정법에 따라 석면이 대기 중으로 비산되지 않게 해체해야 한다.

응급조치



01 피해자를 신선한 공기가 있는 곳으로 옮긴다.

02 119 또는 응급의료기관에 연락한다.

03 피해자를 따뜻하게 해 주고 안정시킨다.

04 의료진에게 사고 물질의 특성을 알려, 적절한 보호 조치를 해야 한다.

경구

- 입을 헹구고, 의료진에게 치료를 받는다.

경피

- 오염된 의복을 다량의 물로 세척한다.
- 오염 의복을 제거하고, 다량의 물로 피부를 세척하거나 샤워한다.

흡입

- 신선한 공기를 흡입하며, 휴식을 취한다.
- 필요 시 의료진에게 진료를 받는다.

안구

- 다량의 물로 몇 분간 눈을 세척하고, 의료진에게 진료를 받는다.

06
관계 법령

고용노동부에서는 산업안전보건법 제104조(유해인자의 분류기준)에 의거해 근로자의 건강 문제를 유발하는 화학 물질 및 물리적 인자들을 유해 물질로 지정하고, 고용노동부령이 정하는 기준에 따라 분류해 관리하고 있다. 이에 따라 6가지 석면을 1군 발암 물질(A1)로 지정하고 있다.

환경부에서는 「석면피해구제법」(법률 제17842호)을 제정하고 석면에 노출되어 석면 질병에 걸린 피해자를 구제하기 위해 석면피해구제제도를 운영해 폐암, 악성중피종, 석면폐증을 석면 질환으로 인정해 보상하고 있다.

구분	요양생활수당지급비율	비고
원발성 악성중피종 또는 원발성 폐암	2인 가구 기준 중위소득의 475/1000 ['22년 기준 1,548,540원/월]	유효기간 동안 지급
석면폐증(제1급) 및 미만성 흉막비후	2인 가구 기준 중위소득의 342/1000 ['22년 기준 1,114,940원/월]	
석면폐증(제2급)	2인 가구 기준 중위소득의 228/1000 ['22년 기준 743,290원/월]	최초 24개월 동안 지급 (24개월이 지나면 지급사유 소멸)
석면폐증(제3급)	2인 가구 기준 중위소득의 114/1000 ['22년 기준 371,640원/월]	

※ 기준 중위소득 기준 : 「국민기초생활보장법」 제6조의2에 따른 지급신청 당시 기준 중위소득 ('22년도 기준 중위소득 3,260,085원)
※ 출처 : 한국환경기술산업원 석면피해구제 시스템 https://www.adrc.or.kr/user/pay/tab2/payType.do

또한, 2012년 4월 「석면안전관리법」을 제정하여 석면으로 인해 발생할 수 있는 건강성 위험을 체계적으로 관리하고 있다. 연면적 500m^2 이상인 공공건축물, 의료시설, 유치원 및 학교, 일정 면적 이상의 다중 이용 시설 등의 소유자는 건축물 사용 승인 1년 이내에 전문기관에 의한 건축물 석면 조사를 받도록 하고 있으며, 조사 결과 석면 건축 자재가 사용된 면적의 합이 50m^2 이상이거나 석면이 함유된 분무재나 내화피복재를 사용한 건축물은 석면건축물로 등록되어 「석면안전관리법」상의 관리 기준을 준수해야 한다.

REFERENCES

- Acheson, E. D., Gardner, M. J., Pippard, E. C., & Grime, L. P. (1982). Mortality of two groups of women who manufactured gas masks from chrysotile and crocidolite asbestos: a 40-year follow-up. *Occupational and Environmental Medicine*, *39*(4):344-348.
- Aliyu, O. A., Cullen, M. R., Barnett, M. J., Balmes, J. R., Cartmel, B., Redlich, C. A., ... & Omenn, G. S. (2005). Evidence for excess colorectal cancer incidence among asbestos-exposed men in the Beta-Carotene and Retinol Efficacy Trial. *American journal of epidemiology*, *162*(9), 868-878.
- Anderson, H. A., Lilis, R., Daum, S. M., Fischbein, A. S., & Selikoff, I. J. (1976). Household-contact asbestos neoplastic risk. *Annals of the New York Academy of Sciences, 271*(1), 311-323.
- Atsdr, U. (2007). Toxicological profile for arsenic. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Toxicology, Atlanta, GA.*
- Baris, I., Artvinli, M., Saracci, R., Simonato, L., Pooley, F., Skidmore, J., & Wagner, C. (1987). Epidemiological and environmental evidence of the health effects of exposure to erionite fibres: a four-year study in the Cappadocian region of Turkey. *International Journal of Cancer, 39*(1), 10-17.
- Baris, Y. I., & Grandjean, P. (2006). Prospective study of mesothelioma mortality in Turkish villages with exposure to fibrous zeolite. *Journal of the National Cancer Institute, 98*(6), 414-417.
- Berrino, F., Richiardi, L., Boffetta, P., Estéve, J., Belletti, I., Raymond, L., ... & Merletti, F. (2003). Occupation and larynx and hypopharynx cancer: a job-exposure matrix approach in an international case-control study in France, Italy, Spain and Switzerland. *Cancer Causes & Control, 14*(3), 213-223.
- Berry, G., Newhouse, M. L., & Wagner, J. C. (2000). Mortality from all cancers of asbestos factory workers in east London 1933-80. *Occupational and Environmental Medicine, 57*(11), 782-785.
- Bernstein, D., Castranova, V., Donaldson, K., Fubini, B., Hadley, J., Hesterberg, T., ... & Warheit, D. B. (2005). Testing of fibrous particles: short-term assays and strategies: report of an ILSI Risk Science Institute Working Group. *Inhalation toxicology, 17*(10), 497-537.
- Berman, D. W., & Crump, K. S. (2008). A meta-analysis of asbestos-related cancer risk that addresses fiber size and mineral type. *Critical reviews in toxicology,* 38(sup1), 49-73.
- Blake, D. J., Wetzel, S. A., & Pfau, J. C. (2008). Autoantibodies from mice exposed to Libby amphibole asbestos bind SSA/Ro52-enriched apoptotic blebs of murine macrophages. *Toxicology,* 246(2-3), 172-179.
- Boutin, C., Dumortier, P., Rey, F., Viallat, J. R., & De Vuyst, P. (1996). Black spots concentrate oncogenic asbestos fibers in the parietal pleura. Thoracoscopic and mineralogic study. *American journal of respiratory and critical care medicine, 153*(1), 444-449.
- Bruno, C., Comba, P., & Zona, A.(2006). Adverse Health Effects of Fluoro-Edenitic Fibers: Epidemiological Evidence and Public Health Priorities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1076(1), 778-783.
- Churg, A., & Warnock, M. L. (1980). Asbestos fibers in the general population. *American Review of Respiratory Disease*, 122(5), 669-678.
- Cocco, P., Palli, D., Buiatti, E., Cipriani, F., DeCarli, A., Manca, P., ... & Fraumeni, J. F. (1994). Occupational exposures as risk factors for gastric cancer in Italy. *Cancer Causes & Control,* 5(3), 241-248.
- Comba, P., Gianfagna, A., & Paoletti, L. (2003). Pleural mesothelioma cases in Biancavilla are related to a new fluoro-edenite fibrous amphibole. Archives of *Environmental Health: An International Journal,* 58(4), 229-232.
- Davis, J. M. G., Brown, D. M., Cullen, R. T., Donaldson, K., Jones, A. D., Miller, B. C., ... & Searl, A. (1996). A comparison of methods of determining and predicting the pathogenicity of mineral fibers. *Inhalation toxicology*, 8(8), 747-770.
- Dement, J. M., & Brown, D. P. (1994). Lung cancer mortality among asbestos textile workers: a review and update. *The annals of occupational hygiene, 38*(4), 525-532.
- Dement, J. M., Kuempel, E. D., Zumwalde, R. D., Smith, R. J., Stayner, L. T., & Loomis, D. (2008). Development of a fibre size-specific job-exposure matrix for airborne asbestos fibres. *Occupational and environmental medicine, 65*(9), 605-612.
- De Verdier, M. G., Plato, N., Steineck, G., & Peters, J. M. (1992). Occupational exposures and cancer of the colon and rectum. *American journal of industrial medicine, 22*(3), 291-303.
- Dodson, R. F., Williams, M. G., Corn, C. J., Brollo, A., & Bianchi, C. (1990). Asbestos content of lung tissue, lymph nodes, and pleural plaques from former shipyard workers. *American Review of Respiratory Disease, 142*(4), 843-847.
- Dodson, R. F., & Atkinson, M. A. (2006). Measurements of asbestos burden in tissues. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1076*(1), 281-291.
- Doll, R. (1955). Mortality from lung cancer in asbestos workers. *British journal of industrial medicine, 12*(2), 81.
- Dumortier, P., De Vuyst, P., & Yernault, J. C. (1989). Non-fibrous inorganic particles in human bronchoalveolar lavage fluids. *Scanning microscopy, 3*(4), 21.
- Dumortier, P., Coplü, L., Broucke, I., Emri, S., Selcuk, T., De Maertelaer, V., ... & Baris, I. (2001). Erionite bodies and fibres in bronchoalveolar lavage fluid (BALF) of residents from Tuzköy, Cappadocia, Turkey. *Occupational and environmental medicine, 58*(4), 261-266.
- Ferrante, D., Bertolotti, M., Todesco, A., Mirabelli, D., Terracini, B., & Magnani, C. (2007). Cancer mortality and incidence of mesothelioma in a cohort of wives of asbestos workers in Casale Monferrato, Italy. *Environmental Health Perspectives, 115*(10), 1401-1405.
- Fredriksson, M., Bengtsson, N. O., Hardell, L., & Axelson, O. (1989). *Colon cancer, physical activity, and occupational exposures. A case-control study. Cancer, 63*(9), 1838-1842.
- Fubini, B. (1997). Surface reactivity in the pathogenic response to particulates. *Environmental Health Perspectives, 105*(suppl 5):1013-1020.
- Fubini, B., & Fenoglio, I. (2007). *Toxic potential of mineral dusts. Elements, 3*(6):407-414.
- Garabrant, D. H., Peters, R. K., & Homa, D. M. (1992). Asbestos and colon cancer: lack of association in a large
- Garabrant, D. H., Peters, R. K., & Homa, D. M. (1992). Asbestos and colon cancer: lack of association in a large case-control study. *American journal of epidemiology, 135*(8), 843-853.
- Gibbs, A. R., Stephens, M., Griffiths, D. M., Blight, B. J., & Pooley, F. D. (1991). Fibre distribution in the lungs and pleura of subjects with asbestos related diffuse pleural fibrosis. *Occupational and Environmental Medicine, 48*(11), 762-770.
- Gardner, M. J., Winter, P. D., Pannett, B., & Powell, C. A. (1986). Follow up study of workers manufacturing chrysotile asbestos cement products. *Occupational and Environmental Medicine, 43*(11), 726-732.
- Gloyne, S. R. (1935). Two cases of squamous carcinoma of the lung occurring in asbestosis. *Tubercle*, 17, 5-10.
- Goldberg, M. S., Parent, M. É., Siemiatycki, J., Désy, M., Nadon, L., Richardson, L., ... & Valois, M. F. (2001). A case-control study of the relationship between the risk of colon cancer in men and exposures to occupational agents. *American journal of industrial medicine, 39*(6), 531-546.
- Hein, M. J., Stayner, L. T., Lehman, E., & Dement, J. M. (2007). Follow-up study of chrysotile textile workers: cohort mortality and exposure-response. *Occupational and environmental medicine, 64*(9), 616-625.
- Hesterberg, T. W., Axten, C., McConnell, E. E., Hart, G. A., Miiller, W., Chevalier, J., ... & Oberdorster, G. (1999). Studies on the inhalation toxicology of two fiberglasses and amosite asbestos in the Syrian golden hamster. Part I. Results of a subchronic study and dose selection for a chronic study. *Inhalation toxicology, 11*(9), 747-784.
- Hilt, B., Langård, S., Andersen, A., & Rosenberg, J. (1985). Asbestos exposure,

REFERENCES

smoking habits, and cancer incidence among production and maintenance workers in an electrochemical plant. *American journal of industrial medicine, 8*(6), 565-577.

- Hodgson, J. T., & Jones, R. D. (1986). Mortality of asbestos workers in England and Wales 1971-81. *Occupational and Environmental Medicine, 43*(3), 158-164.
- Hodgson, J. T., & Darnton, A. (2000). The quantitative risks of mesothelioma and lung cancer in relation to asbestos exposure. *Annals of occupational hygiene, 44*(8), 565-601.
- IARC (1973). Some inorganic and organometallic compounds. IARC Monogr Eval Carcinog Risk Chem Man, 2: 1-181.
- IARC (1977). Some miscellaneous pharmaceutical substances. IARC Monogr Eval Carcinog Risk Chem Man, 13: 1-255
- IARC (1987a). Silica and some silicates. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol, 42.*
- IARC (1987b). Overall evaluations of carcinogenicity: an updating of IARC Monographs volumes 1 to 42. IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans: Suppl, 7. *Iarc, 7,* 1-440.
- IARC (2002). Man-made vitreous fibres. IARC Monographs Evalution Carcinogenic Risks Hummans, 81: 1-381.
- IARC (2004). Tobacco smoke and involuntary smoking.IARC Monographs Evalution Carcinogenic Risks Hummans, 83: 1-1438.
- IARC (2012). IARC Monographs: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts [Internet]. Vol. Volume 100C A review of human carcinogens.
- IOM (2006). Asbestos: Selected Cancers. Institute of Medicine of the National Academy of Science [http://books.nap.edu/catalog/11665.html]
- Jakobsson, K., Albin, M., & Hagmar, L. (1994). Asbestos, cement, and cancer in the right part of the colon. *Occupational and Environmental Medicine, 51*(2), 95.
- Jansson, C., Johansson, A. L., Bergdahl, I. A., Dickman, P. W., Plato, N., Adami, J., ... & Lagergren, J. (2005). Occupational exposures and risk of esophageal and gastric cardia cancers among male Swedish construction workers. *Cancer Causes & Control, 16*(6), 755-764.
- Jaurand, M. C. (1996). Use of in-vitro genotoxicity and cell transformation assays to evaluate the potential carcinogenicity of fibres. *IARC Scientific Publications*, (140), 55-72.
- Kang, S. K., Burnett, C. A., Freund, E., Walker, J., Lalich, N., & Sestito, J. (1997). Gastrointestinal cancer mortality of workers in occupations with high asbestos exposures. *American journal of industrial medicine, 31*(6), 713-718.
- Krstev, S., Dosemeci, M., Lissowska, J., Chow, W. H., Zatonski, W., & Ward, M. H. (2005). Occupation and risk of stomach cancer in Poland. *Occupational and Environmental Medicine, 62*(5), 318-324.
- Langseth, H., & Kjærheim, K. (2004). Ovarian cancer and occupational exposure among pulp and paper employees in Norway. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 356-361.
- Lee, N., & Yi, G. (2016). Exposure assessment to asbestos and diesel engine exhaust particulate matter in urban bus garage. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene,* 26(2):219-224.
- Lippmann, M. D. B. R. E., Yeates, D. B., & Albert, R. E. (1980). Deposition, retention, and clearance of inhaled particles. *Occupational and Environmental Medicine, 37*(4), 337-362.
- Loomis, D., Dement, J., Richardson, D., & Wolf, S. (2010). Asbestos fibre dimensions and lung cancer mortality among workers exposed to chrysotile. *Occupational and environmental medicine, 67*(9), 580-584.
- Luce, D., Bugel, I., Goldberg, P., Goldberg, M., Salomon, C., Billon-Galland, M. A., ... & Brochard, P. (2000). Environmental exposure to tremolite and respiratory cancer in New Caledonia: a case-control study. *American journal of epidemiology, 151*(3), 259-265.
- Lynch, K. M., & Smith, W. A. (1935). Pulmonary asbestosis III: Carcinoma of lung in asbesto-silicosis. *The American Journal of Cancer, 24*(1), 56-64.
- Magnani, C., Agudo, A., Gonzalez, C. A., Andrion, A., Calleja, A., Chellini, E., ... & Terracini, B. (2000). Multicentric study on malignant pleural mesothelioma and non-occupational exposure to asbestos. *British Journal of Cancer, 83*(1), 104-111.
- Magnani, C., Dalmasso, P., Biggeri, A., Ivaldi, C., Mirabelli, D., & Terracini, B. (2001). Increased risk of malignant mesothelioma of the pleura after residential or domestic exposure to asbestos: a case-control study in Casale Monferrato, Italy. *Environmental Health Perspectives, 109*(9), 915-919.
- Manning, C. B., Vallyathan, V., & Mossman, B. T. (2002). Diseases caused by asbestos: mechanisms of injury and disease development. *International immunopharmacology, 2*(2-3), 191-200.
- Marchand, J. L., Luce, D., Leclerc, A., Goldberg, P., Orlowski, E., Bugel, I., & Brugère, J. (2000). Laryngeal and hypopharyngeal cancer and occupational exposure to asbestos and man-made vitreous fibers: Results of a case-control study. *American journal of industrial medicine, 37*(6), 581-589.
- Meurman, L. O., Kiviluoto, R., & Hakama, M. (1974). Mortality and morbidity among the working population of anthophyllite asbestos miners in Finland. *Occupational and Environmental Medicine, 31*(2), 105-112.
- McConnochie, K., Simonato, L., Mavrides, P., Christofides, P., Pooley, F. D., & Wagner, J. C. (1987). Mesothelioma in Cyprus: the role of tremolite. *Thorax, 42*(5), 342-347.
- McConnell, E. E., Axten, C., Hesterberg, T. W., Chevalier, J., Miiller, W. C., Everitt, J., ... & Kotin, P. (1999). Studies on the inhalation toxicology of two fiberglasses and amosite asbestos in the Syrian golden hamster. Part II. Results of chronic exposure. *Inhalation toxicology, 11*(9), 785-835.
- McDonald, J. C., Liddell, F. D., Gibbs, G. W., Eyssen, G. E., & McDonald, A. D. (1980). Dust exposure and mortality in chrysotile mining, 1910-75. *Occupational and Environmental Medicine, 37*(1), 11-24.
- Meeker, G. P., Bern, A. M., Brownfield, I. K., Lowers, H. A., Sutley, S. J., Hoefen, T. M., & Vance, J. S. (2003). The composition and morphology of amphiboles from the Rainy Creek Complex, near Libby, Montana. *American Mineralogist, 88*(11-12), 1955-1969.
- Murthy, S. S., & Testa, J. R. (1999). Asbestos, chromosomal deletions, and tumor suppressor gene alterations in human malignant mesothelioma. *Journal of cellular physiology, 180*(2), 150-157.
- Musk, A. W., De Klerk, N. H., Reid, A., Ambrosini, G. L., Fritschi, L., Olsen, N. J., ... & Berry, G. (2008). Mortality of former crocidolite (blue asbestos) miners and millers at Wittenoom. *Occupational and environmental medicine, 65*(8), 541-543.
- Mzileni, O., Sitas, F., Steyn, K., Carrara, H., & Bekker, P. (1999). Lung cancer, tobacco, and environmental factors in the African population of the Northern Province, South Africa. *Tobacco Control, 8*(4), 398-401.
- Newhouse, M. L., Berry, G., Wagner, J. C., & Turok, M. E. (1972). A study of the mortality of female asbestos workers. *Occupational and Environmental Medicine, 29*(2), 134-141.
- Nelson, H. H., Christiani, D. C., Wiencke, J. K., Mark, E. J., Wain, J. C., & Kelsey, K. T. (1999). K-ras mutation and occupational asbestos exposure in lung adenocarcinoma: asbestos-related cancer without asbestosis. *Cancer Research, 59*(18), 4570-4573.
- NIOSH (2009). Asbestos fibres and other elongated mineral particles: state of the science and roadmap for research Report. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control.
- Noonan, C. W., Pfau, J. C., Larson, T. C., & Spence, M. R. (2006). Nested case-control study of autoimmune disease in an asbestos-exposed population. *Environmental health perspectives, 114*(8), 1243-1247.
- NTP (2005). *Report on Carcinogens, Eleventh Edition. Silica, Crystalline (Respirable Size*).* U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Program.

- Nymark, P., Wikman, H., Hienonen-Kempas, T., & Anttila, S. (2008). Molecular and genetic changes in asbestos-related lung cancer. *Cancer Letters, 265*(1), 1-15.
- O'Brien, K. M., Tworoger, S. S., Harris, H. R., Anderson, G. L., Weinberg, C. R., Trabert, B., ... & Wentzensen, N. (2020). Association of powder use in the genital area with risk of ovarian cancer. *The Journal of the American Medical Association, 323*(1):49-59.
- Parent, M. É., Siemiatycki, J., & Fritschi, L. (2000). Workplace exposures and oesophageal cancer. *Occupational and Environmental Medicine, 57*(5):325-334.
- Pan, X. L., Day, H. W., Wang, W., Beckett, L. A., & Schenker, M. B. (2005). Residential proximity to naturally occurring asbestos and mesothelioma risk in California. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 172*(8), 1019-1025.
- Pfeifer, G. P., Denissenko, M. F., Olivier, M., Tretyakova, N., Hecht, S. S., & Hainaut, P. (2002). Tobacco smoke carcinogens, DNA damage and p53 mutations in smoking-associated cancers. *Oncogene*, 21(48), 7435-7451.
- Piolatto, G., Negri, E., La Vecchia, C., Pira, E., Decarli, A., & Peto, J. (1990). An update of cancer mortality among chrysotile asbestos miners in Balangero, northern Italy. *Occupational and Environmental Medicine, 47*(12), 810-814.
- Pira, E., Pelucchi, C., Buffoni, L., Palmas, A., Turbiglio, M., Negri, E., ... & La Vecchia, C. (2005). Cancer mortality in a cohort of asbestos textile workers. *British Journal of Cancer, 92*(3), 580-586.
- Puntoni, R., Vercelli, M., Merlo, F., Valerio, F., & Santi, L. (1979). Mortality among shipyard workers in Genoa, Italy. *Annals of the New York Academy of Sciences, 330*, 353-377.
- Putzu, M. G., Bruno, C., Zona, A., Massiccio, M., Pasetto, R., Piolatto, P. G., & Comba, P. (2006). Fluoro-edenitic fibres in the sputum of subjects from Biancavilla (Sicily): a pilot study. *Environmental Health, 5*(1), 1-5.
- Pukkala, E., Martinsen, J. I., Lynge, E., Gunnarsdottir, H. K., Sparén, P., Tryggvadottir, L., ... & Kjaerheim, K. (2009). Occupation and cancer-follow-up of 15 million people in five Nordic countries. *Acta oncologica, 48*(5), 646-790.
- Raffn, E., Villadsen, E., & Lynge, E. (1996). Colorectal cancer in asbestos cement workers in Denmark. *American journal of industrial medicine, 30*(3), 267-272.
- Reid, A., Ambrosini, G., De Klerk, N., Fritschi, L., & Musk, B. (2004). Aerodigestive and gastrointestinal tract cancers and exposure to crocidolite (blue asbestos): incidence and mortality among former crocidolite workers. *International journal of cancer, 111*(5), 757-761.
- Roe FJC et al; Int J Cancer 2: 628-38 (1967) as cited in USEPA, Officeof Drinking Water; Criteria Document (Draft): Asbestos p.III-9 (1985)
- Sanchez, V. C., Pietruska, J. R., Miselis, N. R., Hurt, R. H., & Kane, A. B. (2009). Biopersistence and potential adverse health impacts of fibrous nanomaterials: what have we learned from asbestos?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology, 1*(5):511-529.
- Sébastien, P., Bignon, J., Barris, Y. I., Awad, L., & Petit, G. (1984). Ferruginous bodies in sputum as an indication of exposure to airborne mineral fibers in the mesothelioma villages of Cappadocia. *Archives of Environmental Health: An International Journal, 39*(1), 18-23.
- Seidman, H., Selikoff, I. J., & Gelb, S. K. (1986). Mortality experience of amosite asbestos factory workers: Dose-response relationships 5 to 40 years after onset of short-term work exposure. *American journal of industrial medicine, 10*(5-6), 479-514.
- SSelikoff IJ, Churg J, Hammond EC (1964). Asbestos exposure and neoplasia. *The Journal of the American Medical Association*, 188:22-26.
- Selikoff, I. J., Bader, R. A., Bader, M. E., Churg, J., & Hammond, E. C. (1967). Asbestosis and neoplasia. *The American Journal of Medicine, 42*(4), 487-496.
- Selikoff, I. J., & Hammond, E. C. (1979). Asbestos and smoking. *The Journal of the American Medical Association, 242*(5):458-459.
- Selikoff, I. J., & Seidman, H. (1991). Asbestos-associated deaths among insulation workers in the United States and Canada, 1967-1987. *Annals of the New York Academy of Sciences, 643*(1), 1-14.
- Shukla, A., Gulumian, M., Hei, T. K., Kamp, D., Rahman, Q., & Mossman, B. T. (2003). Multiple roles of oxidants in the pathogenesis of asbestos-induced diseases. *Free Radical Biology and Medicine, 34*(9), 1117-1129.
- Smailyte, G., Kurtinaitis, J., & Andersen, A. (2004). Cancer mortality and morbidity among Lithuanian asbestos-cement producing workers. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 64-70.
- Siemiatycki, J., Richardson, L., Straif, K., Latreille, B., Lakhani, R., Campbell, S., ... & Boffetta, P. (2004). Listing occupational carcinogens. *Environmental health perspectives, 112*(15):1447-1459.
- Stayner, L., Kuempel, E., Gilbert, S., Hein, M., & Dement, J. (2008). An epidemiological study of the role of chrysotile asbestos fibre dimensions in determining respiratory disease risk in exposed workers. *Occupational and environmental medicine, 65*(9), 613-619.
- Sullivan, P. A. (2007). Vermiculite, respiratory disease, and asbestos exposure in Libby, Montana: update of a cohort mortality study. *Environmental health perspectives, 115*(4), 579-585.
- Suzuki, Y., & Yuen, S. R. (2001). Asbestos tissue burden study on human malignant mesothelioma. *Industrial health, 39*(2), 150-160.
- Szeszenia-Dabrowska, N., Wilczyńska, U., Szymczak, W., & Laskowicz, K. (1998). Environmental exposure to asbestos in asbestos cement workers: a case of additional exposure from indiscriminate use of industrial wastes. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 11*(2), 171-177.
- Tulchinsky, T. H., Ginsberg, G. M., Iscovich, J., Shihab, S., Fischbein, A., & Richter, E. D. (1999). Cancer in ex-asbestos cement workers in Israel, 1953-1992. *American journal of industrial medicine, 35*(1), 1-8.
- USGS (2001). Some Facts about Asbestos (USGS Fact Sheet FS-012-01), pp 4.
- Vineis, P., Ciccone, G., & Magnino, A. (1993). Asbetos Exposure, Physical Activity and Colon Cancer: A Case-Control Study. *Tumori Journal, 79*(5), 301-303.
- Virta RL (2006). *Worldwide asbestos supply and consumption trends from 1900 through 2003. Reston, VA: US Geological Survery*, Circular 1298.
- Wagner, J. C., Sleggs, C. A., & Marchand, P. (1960). Diffuse pleural mesothelioma and asbestos exposure in the North Western Cape Province. *Occupational and Environmental Medicine, 17*(4), 260-271.
- Wagner, J. C., Berry, G., Skidmore, J. W., & Timbrell, V. (1974). The effects of the inhalation of asbestos in rats. *British journal of cancer, 29*(3):252-269.
- Wagner, J., & Pooley, F. D. (1986). Mineral fibres and mesothelioma. *Thorax, 41*(3), 161.
- Weiner, S. J., & Neragi-Miandoab, S. (2009). Pathogenesis of malignant pleural mesothelioma and the role of environmental and genetic factors. *Journal of cancer research and clinical oncology, 135*(1), 15-27.
- Yoon, S., & Roh, Y. (2016). Asbestos-Containing Waste: Technology of Asbestos Detoxification and Economic Feasibility. *53*(4):377-384
- Zheng, W., Blot, W. J., Shu, X. O., Diamond, E. L., Gao, Y. T., Ji, B. T., & Fraumeni Jr, J. F. (1992). Risk factors for oral and pharyngeal cancer in Shanghai, with emphasis on diet. *Cancer epidemiology, biomarkers & prevention: a publication of the American Association for Cancer Research, cosponsored by the American Society of Preventive Oncology, 1*(6), 441-448.
- 안연순, 김형렬(2009). 비직업적 근접 노출에 의한 석면폐증 집단발생 사례. *J Korean Med Assoc.* 52(5):472-481
- 환경부(2018). 석면건축물 안전관리 가이드북
- https://asbestos.me.go.kr/user/ge/geologicMapStatViewList.do# (환경부 석면관리 종합정보망)
- 석면함유 건축물의 석면 노출 및 위해성평가. 정재원 등(2012), 한국환경과학회지 제21권(제9호), 1069-1078.

발암 요인 보고서 〔 석면 〕

발간에 참여하신 분들

국립암센터 연구진

김병미 국립암센터 암예방사업부
김효선 국립암센터 암예방사업부
김세영 국립암센터 암예방사업부
김태월 국립암센터 암예방사업부
최은정 국립암센터 암예방사업부

영역별 참여 전문가

권지운 소방청
백도명 국립암센터
예신희 산업안전보건연구원
이철우 국립환경과학원

석면

ASBESTOS

–

발암 요인 보고서

국립암센터
NATIONAL CANCER CENTER

ISSN 2982-771X