

자연발생석면 분포지역의 효율적인 조사와 관리 방안

김정욱¹ · 정명채^{2*} · 김동진³ · 전기석⁴ · 이창환⁴

¹세종대학교 지구환경과학과

²세종대학교 에너지자원공학과

³환경부 토양지하수과

⁴한국환경공단 토양지하수처

Effective Strategies for Investigation and Management of Naturally Occurring Asbestos Areas

Jeong Wook Kim¹ · Myung Chae Jung^{2*} · Dong Jin Kim³ · Gee Seok Jeon⁴ · Chang Hwan Lee⁴

¹Department of Earth and Environmental Science, Sejong University

²Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University

³Department of Soil and Groundwater, Ministry of Environment

⁴Department of Soil and Groundwater, Korea Environment Corporation

ABSTRACT

This study presents a state of the art in evaluation on naturally occurring asbestos (NOA) areas and effective strategies for investigation and management of NOA areas in Korea. First of all, we defined and classified the NOA area as compiling various countries' regulations, then discussed the best methods for evaluation and management of NOA for reducing exposure of asbestos in the vicinity of NOA areas. According to the literature survey, a three-steps management strategy was suggested in this study. The first step is a confirmation stage of asbestos contamination possibility and the second step is an assessment stage of asbestos contamination using investigation, analysis, evaluation and reclamation. The final step is a following-up control stage. These three management steps for NOA area will give the maximum effectiveness of NOA control in Korea.

Key words : Naturally Occurring Asbestos (NOA), Asbestos investigation, Asbestos management, Effective strategies

1. 서 론

석면은 기계적 강도가 뛰어나고, 불연성, 단열성, 내구성, 절연성, 보온성이 좋아 방음과 흡음효과가 높아서 지난 수세기동안 다양한 재료로 사용되어 왔으며, 1970년대 까지 다양한 종류의 석면으로 약 3,000여 가지의 제품이 생산되었다. 하지만, 1970년대 후반부터 석면에 대한 다양한 인체 위해성이 밝혀지면서(Doll, 1955; Becklake, 1976; Artvinii and Bais, 1979, Maclure, 1987) 이들의 사용을 억제하거나 금지하는 국가들이 많아졌다. 특히, 선진국에서는 지난 1970년대 또는 1980년대에 이들의 사용

을 전면 금지하는 각종 법령을 제정하여 비교적 효율적인 관리를 하고 있다(환경부, 2009). 하지만, 이들 대부분은 주로 산업에서 활용된 석면에 대한 규제가 주종을 이루고 있었으며, 석면을 함유한 광물에 의한 자연발생석면의 조사, 분석, 평가 및 복원에 대한 방안의 수립과 운영은 다소 부족한 실정이었다. 다행히 최근 십여 년간 미국, 호주 및 이탈리아 등 환경선진국에서는 자연발생석면(Naturally Occurring Asbestos, NOA)을 포함한 석면관련 지침의 제정과 운영을 하고 있으며, 국내에서도 이에 대한 적절한 관리 방안에 대해 관심을 갖고 추진하고 있다(환경부, 2009).

*Corresponding author : jmc65@sejong.ac.kr

원고접수일 : 2011. 9. 20 심사일 : 2011. 11. 2 게재승인일 : 2011. 11. 3
질의 및 토의 : 2012. 2. 29 까지

전 세계에서 자연발생석면에 대한 조사 및 관리에 있어 가장 선두적인 역할을 하고 있는 국가는 미국이며, 그 중에서도 캘리포니아주에서는 자연발생석면 조사의 기본적인 관리 방안으로서 자연발생석면조사지침(Guidelines for Geologic Investigations of Naturally Occurring Asbestos in California)을 제정하여 국가 및 각 주정부의 석면관련 조사에 대한 기본서로 적극 활용하고 있다(Clinkenbeard et al., 2002). 또한, 이탈리아의 환경부(MATT)에서 자연발생석면지역, 석면광산 및 광산 개발과 관련된 모든 시설 등에 대해 석면의 수치지도를 제작하여 석면과 관련된 제반 사항을 효율적으로 관리하고 있다(Coraglia et al., 2006). 이외에도 호주, 캐나다, 영국 등에서도 자연발생석면지역에 대한 대기, 토양 및 수질 환경오염의 특성 평가, 오염 현장의 다양한 특성에 따른 적절한 조사 방법과 절차 등을 수립하여 효율적으로 관리하고 있다(DOH, 2009; TNO, 2005; US EPA, 2008; Hardaker, 2009).

우리나라에서도 지난 수세기동안 다양한 종류의 산업물질로서 석면을 활용하였지만 국제적으로 석면의 사용이 규제됨에 따라 선택적으로 산업용 석면에 대하여 규제를 시행하였다. 하지만, 최근 충남 홍성군과 보령시, 충북 제천시와 단양군, 경기도 가평군 등에서 석면광산 개발로 인한 환경문제가 제기되면서 이들에 대한 관심이 고조됨에 따라 환경부에서는 2009년에 오염개연성 확인을 위해 과거 석면광산으로 개발된 전국 21개 지역에 대한 개황조사를 수행하였으며, 충남 홍성군에 소재하는 광천광산과 신석석면광산을 시작으로 매년 2~3개소의 석면발생지역에 대한 정밀조사를 수행하고 있다(환경부, 2010a; 환경부, 2010b). 하지만, 이러한 조사는 대부분 과거 석면을 개발한 광산지역에 대하여 우선적으로 시행되고 있어 광산개발이 이루어지지 않았지만 자연적으로 석면오염 개연성이 있는 자연발생석면지역에 대한 조사와 평가는 미미한 수준이다. 특히, 우리나라에서 초염기성암과 염기성암석 분포 지역 중에서 사문암 등의 석면함유물질을 포함하고 있는 충남 홍성군, 보령시 및 경기도 가평지역에서 석면이 확인된 바 있으며(환경부, 2010b), 특수한 경우로서 석회암의 변질로 형성된 백운석에 일부 석면이 함유되어 있는 충북 제천시 등 자연발생석면이 존재할 것으로 판단되는 지역에 대한 조사 및 평가는 매우 시급한 실정이다.

이러한 현황 분석뿐만 아니라 석면관리에 있어 매우 중요한 석면의 유해성과 인체위해성 평가의 정확한 규명기준의 제시, 그리고 분석방법의 표준화 등에 대하여 완벽한 제도화가 이루어지지 않아 다양한 사회적 문제가 제기되기도 한다(함승원 등, 2009).

따라서, 본 연구에서는 우선 국내의 자료를 분석하여 정확한 자연발생석면의 정의와 이들 지역의 효율적 관리를 위해 기존의 이용 가능한 자료들을 검토하고 최적의 석면 관리방안을 제시하고자 한다. 이러한 연구 결과는 향후 자연발생석면지역의 범위 설정, 조사방법 설정 및 정화방법 선정 등 석면관리를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1. 자연발생석면의 정의와 분류

일반적으로 석면에 대한 정의는 국가에 따라 다소 다르지만 포괄적인 의미로서는 석면상(asbestiform)으로 산출되는 규산염광물로서 규정하고 있다. 이러한 석면은 주로 초염기성암, 염기성암 및 탄산염계열의 암석이 단층작용 및 응력을 받아 일종의 변질광물의 형태로 배태된 섬유상 광물로서 통상 사문석계열(serpentine group)과 각섬석계열(amphiboles group)로 구분하고 있다. 일반적으로 사문석계열에는 백석면(운석면, chrysotile) 1종이 있으며, 각섬석계열에는 청석면(crocidolite), 갈석면(amosite), 양기석(액티노라이트, actinolite), 안소필라이트(직섬석, anthophyllite) 투각섬석(트레몰라이트, tremolite) 등 5종으로 구분되어 총 6종의 석면으로 구분하고 있다(환경부, 2010c).

한편, 자연발생석면지역에 대한 정의는 국가에 따라 다소 차이는 있지만 일반적으로는 ‘지질적 특성에 따라 자연적으로 토양 내에 함유 될 수 있는 석면 또는 지질작용에 의해 자연적으로 석면이 생성되는 지대’로 정의하고 있다(환경부, 2009). 또한, 미국 환경청(US EPA)에서 규정한 자연발생석면의 정의는 ‘암석 형성에서 특정 유형에서 발견되는 섬유상 광물들을 포함하고 있고, 길고 얇은 분리 섬유의 형태를 취할 수 있으며, 자연적 풍화와 인간의 교란활동에 의해 미세한 섬유로 분리되거나 공기 중으로 쉽게 비산될 수 있는 것’으로 규정하였다. 한편, 호주의 연구 결과로서 Hendrickx(2009)에 의하면 모든 석면은 자연 기원이며, 자연발생석면은 상업 및 산업에서 발생하는 석면과는 구별하여 정의한 바 있다. 특히, Van Gosan(2007)의 연구 결과에서는 자연발생석면은 석면함유 암석이 인간의 활동, 자연적 풍화와 광산개발 등의 교란으로부터 공기 중으로 비산될 수 있고, 석면함유가능 암석들은 선광과정에서 석면이 부산물으로써 발생할 수 있다고 보고하였으며, Harper(2008)에 의하면 석면은 지구의 지각에서 자연스럽게 발생하는 광물이며, 과거 석면을 개발했던 지역과 현재 석면광산지역에만 국한되는 것은 아

나라고 지적하였다.

한편, 국내의 연구에서 기술된 자연발생석면의 정의도 큰 차이는 없지만, Lee et al.(2008)에서 제시된 자연발생석면의 정의는 일반적으로 자연적 그대로의 상태에서 발견된 석면 모두를 아우르는 용어로서 광산 및 상업적 이용에는 적합하지 않고 낮은 양이 발견되는 것으로 정의하고 있다. 또한, 윤충식(2009)은 지각이 형성될 때 일정조건에서 석면이 형성되어 다른 광물사이에 혼재된 석면을 인류가 채광하여 사용하게 되었으며, 석면이 섞여 있는 암반은 주로 초염기성암과 사문암이라고 알려져 있으며 자연발생석면이란 이런 암반이나 토양 중에 존재하는 석면 또는 이들이 인간의 활동 또는 풍화작용으로 공기 중으로 비산된 석면섬유를 의미한다고 보고하였다.

이러한 국내외의 자연발생석면에 대한 정의를 비교해 보면 자연발생석면에 대한 지질학적 생성에 대해서는 문제의 여지가 없지만, 상업적인 경우를 포함여부에 따라 자연발생석면에 대한 주장과 의견에 차이가 있다. 따라서 이 연구에서는 자연발생석면은 지질작용 등 자연활동으로 인하여 암석 또는 토양에 붙어 있는 석면으로 정의하며, 이들은 자연적인 풍화과정 또는 인간의 활동(개발 및 교란 활동 등)에 의해 석면이 확산되거나 공기 중으로 비산될 수 있음을 강조하고자 한다. 이러한 정의는 자연발생석면을 광의적으로 해석하는 것으로써 토양 및 암석에 석면이 존재하면 모두 자연발생석면으로 간주되는 것이며, 만약에 그 지역에서 석면 또는 석면관련 광산이 개발되었다고 하더라도 넓은 의미에서는 이들 모두 자연발생석면지역으로 다루고자 한다.

물론, 이러한 자연발생석면지역에 대한 정의를 광범위하게 규정할 경우에는 그 범위의 설정도 필요하다. 즉, 지질학적 작용에 의해 석면이 발생하는 지역과 광산개발, 도로 공사 및 건설 등의 개발행위에 의해 석면의 오염개연성이 높은 지역 등으로의 구분이 필요할 것이다. 특히, 광산의 경우 석면광산 뿐만 아니라 석면을 함유할 수 있는 석면함유기능광산에 대한 논의도 필요할 것이다. 그러므로 석면의 분포 규모와 환경영향을 고려하여 광의의 자연발생석면지역과 협의의 자연발생석면지역으로 구분하여 설정하는 것이 바람직하다. 즉, 광의의 자연발생석면지역은 1) 석면의 분포 밀도가 높고 경제성이 있어 석면광산으로 개발된 지역, 2) 활석(talc), 질석(vermiculite), 해포석(sepiolite) 및 탄산염암의 변질대 등과 같이 채굴과정에서 석면이 부산물로 산출될 가능성이 있는 석면함유기능광산 및 3) 지질학적 작용을 통해 형성되는 광물 중에서 섬유상의 유해한 석면물질이 포함되어 있는 협의의 자연

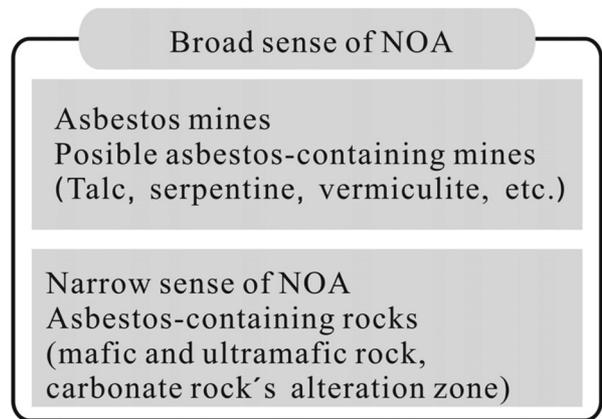


Fig. 1. Conceptual diagram of naturally occurring asbestos (NOA).

발생석면지역 등을 포함하는 포괄적 의미로 해석되어야 한다. 특히, 석면광산 및 석면함유기능광산지역은 자연발생석면 분포지역 중에서도 비교적 오염의 개연성이 높을 것으로 판단되며, 조사 및 정확에 있어 시급성이 요구될 것으로 판단된다. 또한, 지질학적으로 석면이 분포되어 있지만 그 발생량이 광산으로 개발할만한 경제적 가치가 없거나 존재 형태가 산점상 또는 특정의 노출지점에서만 관찰될 경우에는 비교적 석면의 노출로 인한 건강위해성이 낮은 수준일 것이며, 이러한 경우에는 협의의 자연발생석면지역으로 규정함이 바람직하다. 이러한 기준으로 구분된 자연발생석면의 범위를 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 광의의 자연발생석면지역에는 협의의 자연발생석면지역과 석면광산 및 석면함유기능광산을 포괄하고 있으며, 이러한 분류를 통해 협의의 자연발생석면지역과 석면광산 및 석면함유기능광산에 대한 조사 및 정화 방법 등에 대해 효율적인 관리가 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 분류를 기초로 자연발생석면지역을 효율적으로 관리하기 위해 가장 필요한 것은 국내의 자연발생석면 분포지역에 대한 지질도의 작성일 것이다. 이 지질도에는 우리나라에 지질학적 작용에 의해 자연적으로 생성된 석면 함유 물질의 종류, 위치, 분포량 및 분포 형태 등에 대한 개괄적인 자료가 수록되어야 할 것이다. 즉, 우리나라의 지질학적 분포 또는 형성 특성에 의해 초염기성암, 염기성암 및 탄산염계 암석이 단층작용 또는 각종 암석역학적 인력의 변화에 의해 석면이 생성되어 있는 지역의 지질도 작성이 가장 우선적으로 이루어져야 할 것이다.

2.2. 자연발생석면지역의 조사 방법

국외의 자연발생석면지역에 대한 조사 방법에 대한 기

준은 일부 선진국에서만 설정되어 있다. 대표적으로 이탈리아에서는 자연발생석면지역의 정보를 확보하기 위하여 석면을 함유할 수 있는 암석, 석면광산, 광산 개발 중에 사용되었던 시설, 폐석 및 광물찌꺼기 적치장 등 석면과 관련된 모든 사항을 검토하여 수치지도에 각각의 레이어로 정리하여 활용하고 있다(Coraglia et al., 2006). 네덜란드에서는 문헌조사 및 자료조사를 통해 석면존재여부와 직접적인 영향이 있는지를 확인하는 예비부지조사와 현장답사 및 시료채취를 통해 오염개연성을 확인하는 현장조사, 마지막으로 상세부지조사의 3단계로 구분하여 수행하고 있다(TNO, 2005). 또한, 호주는 예비조사 단계에서 확보 가능한 다양한 자료를 수집하고, 이 단계에서 상세부지조사에 대한 시료채취와 분석계획에 대한 정보의 확보 및 나아가 관리 방안을 위한 가능한 아이디어를 확보함으로써 호주의 특성에 맞는 체계적이고 세심한 가이드라인을 제시하고 있다(DOH, 2009). 하지만 이들 국가들의 대부분은 자연발생석면에 대한 구체적인 방안의 제시라기보다는 석면오염 현상 전체에 대한 조사기준을 설정하고 있다고 평가하는 것이 더 적절할 것이다. 물론 포괄적인 의미에서는 자연발생석면을 포함한 석면개발에 따른 제반 환경문제의 조사, 분석, 평가 및 관리를 위한 방안을 제시하고 있지만 세부적으로는 자연발생석면만을 규정한 사례는 거의 없다는 것이다.

더불어 이들 국외의 조사 방법들은 자국의 특수한 상황에 맞추어 설정한 것이므로 우리의 경우에는 이들 자료를 기반으로 우리 실정에 맞는 조사 방법을 연구하여 효과적으로 설정하는 것이 매우 중요하다. 특히, 좁은 국토 면적과 높은 인구 밀도를 가진 우리나라의 경우, 지질학적으로 선캄브리아기의 지층에서 신생대 지층에 이르기까지 다양한 지층과 암석이 분포하고 있고 선캄브리아기의 변성암류와 고생대 퇴적암류 및 중생대의 심성암류는 여러 번에 걸친 지각변동과 백악기 이후에 일어난 융기, 침식 및 퇴적 작용에 의하여 크게 노출되었다. 따라서 국내 실정에 맞는 자연발생석면지역 조사방법에 대한 논의는 지속적으로 연구되어야 할 것이며, 이 연구에서는 자연발생석면지역 조사를 위하여 필수적으로 고려될 수 있는 7가지의 중요한 사항들을 선정하여 다음과 같이 정리하였다.

2.2.1. 지질도 작성 및 조사

초염기성암/염기성암 및 탄산염암의 변질대 등 석면을 함유할 수 있는 다양한 암석에 대한 조사 및 지질도 작성을 수행하며, 이러한 지질도는 석면을 함유할 수 있는 지층 및 오염원에 대하여 주제별로 구분하여 수치지질도

를 작성한다. 이러한 자료는 기존 문헌을 이용하여 수집할 수 있으며, 광산 개발과 관련된 자료들을 이용하여 세부적인 지질구조를 파악할 수도 있다.

2.2.2. 석면광산 및 석면함유가능광산 조사

자연발생석면지역을 판단하기 위해 석면광산과 활석광산, 질석광산 등 석면이 부산물로 산출되는 광산들에 대한 DB를 작성하고 이를 수치지도에 광종별로 표기한다면 석면 오염개연성에 대한 개략적 판단에 활용할 수 있다. 또한, 광산 개발 부지에 대한 조사는 선광장, 선광시설, 폐석 적치장 및 광물찌꺼기 적치장에 대한 내용과 광산 개발 기간 및 가행 기간에 대한 자료에 대한 조사도 수행되어야 한다.

2.2.3. 식생조사

초염기성암 및 염기성암 지역의 토양은 다량의 Mg이 존재하므로 이러한 지역에서 우점종을 포함한 식물종의 조사는 암석뿐만 아니라 토양 조사에서도 중요한 자료로 활용될 것으로 판단된다. 이 분야의 선도적 역할을 하고 있는 미국 캘리포니아의 경우는 자연발생석면의 오염개연성 확인을 위해 야외조사 항목에 식생조사를 포함하고 있다. 이러한 식생조사는 자연발생석면지역의 조사 범위 설정 및 모니터링 계획 등에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히, 국내 농촌진흥청에서 운영하는 한국환경토양정보시스템에서는 토양 내 Mg 함량에 대한 정보를 포함하여 토양에 대한 다양한 정보를 제공하고 있다.

2.2.4. 석면관련 질병의 통계학적 조사

석면에 대한 질병은 많은 연구가 이루어졌으며, 대표적으로 미국 캘리포니아 지역에서는 자연발생석면지역으로부터 거리에 따른 질병의 발생비율에 대한 연구가 활발히 진행되었다(Pan et al., 2005). 또한, 국내에서는 석면에 대한 유해성과 위해성 인식이 높아지면서 이러한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 폐석면광산 주변 주민들을 대상으로 석면폐증이나 흉막반 등 석면 관련 질환을 조사한 바 있다(안연순·김형렬, 2009). 이러한 자료들은 자연발생석면지역의 설정 및 범위를 설정하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2.2.5. 항공사진(과거 및 현재)

우리나라는 일제강점기 시대에 많은 광산들의 개발이 시작되었고, 그 후 산업의 발달과 더불어 1978년부터 1983년까지 연간 10,000톤 이상을 개발하였다(최정근 외,

1998). 현재는 경제적 가치가 없는 많은 광산들이 폐광 및 휴지 상태로 존재하고 있으며, 주변 지역의 주요한 오염원으로 존재하고 있다. 이러한 광산들의 과거 이력 조사를 위해서 항공사진은 매우 유용한 정보를 제공해 준다. 즉, 석면광산의 경우에는 대부분 노천채광이 주로 이루어진 점을 고려할 때 항공사진은 과거 채굴부지의 규모를 파악하는데 도움이 될 수 있을 것이다. 또한, 이러한 자료는 자연발생석면지역의 오염 범위 및 정화 범위 설정에도 활용될 수 있다. 특히, 자연발생석면 지역의 과거 토지 이용 현황과 개발 행위 등 다양한 정보를 확보할 수 있다.

2.2.6. 청취조사

자연발생석면 예상 지역으로 판단되는 지역에 대하여 거주민들에 대한 청취조사를 수행한다. 청취조사 시 수행되어야 할 사항은 석면 발생 지역에 대한 개발이력, 거주 주민들의 폐관련 질환 및 거주 지역의 농업활동 및 교통수단 등 생활 패턴에 대한 조사가 이루어져야 한다. 이러한 청취조사를 통해 그 지역에서 과거 및 현재 일어나는 상황(질병, 토목공사, 광산 개발 등)에 대한 정보를 수집할 수 있고, 이러한 정보는 자연발생석면지역 조사 방법 및 범위를 설정하는데 이용할 수 있다. 특히, 거주 주민과의 의사소통을 통해 석면에 대한 위험도를 예측하는 자료

로 활용할 수 있다.

2.2.7. 현장조사

자연발생석면지역의 조사를 위한 현장조사는 석면의 존재 및 오염 범위의 개략적 윤곽을 확인하며 향후 수행될 조사 및 정화를 위한 시료채취와 분석 계획 및 관련된 정보를 제공한다. 또한, 적절한 관리방안을 위한 아이디어를 제공하며 즉각적인 반응 조치들이 요구되는지를 판단할 수 있다. 또한, 자연발생석면지역에서 개발된 석면광산 및 관련 광산들에 대한 조사와 선광장 및 광물찌꺼기 적치장 위치 등 다양한 정보를 얻을 수 있다. 특히, 현장조사는 청취조사와 병행하여 조사 지역의 현황을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있다.

2.3. 자연발생석면지역의 관리방안

다양한 지질작용과 인간의 교란활동 등에 의해 형성된 자연발생석면지역을 효율적으로 관리하기 위해서는 여러 가지 방안이 있지만 우선적으로는 전체적인 관리 체계의 수립이 필요하다. 이를 위하여 국내 자연발생석면 관리를 사전관리, 조사, 분석, 평가, 복원 등의 처리 개념 및 이후 효율적인 사후관리 방안으로 설정함이 가장 적절할 것으로 판단된다.

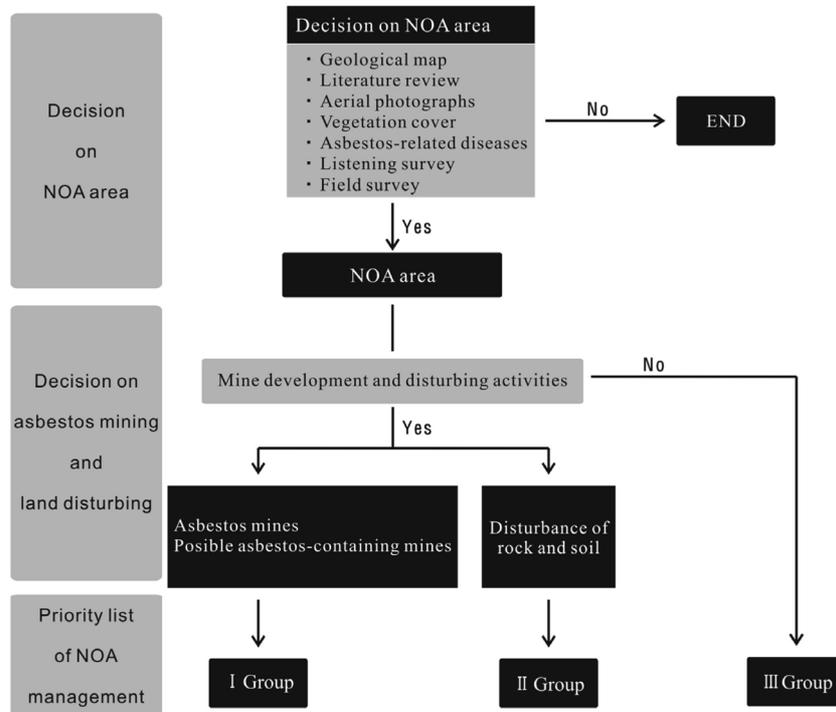


Fig. 2. Three-group classification of NOA management as degrees and extents of asbestos occurrence.

우선 국내 자연발생석면지역의 사전관리 방안은 다음과 같이 수립하고자 한다. 즉, 다양한 문헌 및 현장 조사에 의해 자연발생석면지역으로 판단되면, 그 지역에서 광산 활동 등의 자료 분석을 통해 석면 발생 가능성을 평가한다. 또한, 식생 및 석면 관련 질병 등의 가용한 다양한 자료들을 활용하여 자연발생석면지역에 대한 범위를 설정한다. Fig. 2는 자연발생석면지역의 사전관리를 위한 수행 체계도를 도시하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 자연발생석면지역으로 판단되면 그 지역의 기반암의 종류와 특성 등의 지질특성과 과거 광산 활동 및 교란활동 유/무 등에 대한 내용을 확인하여 자연발생석면지역에 대한 종합적인 관리를 위한 우선순위를 설정할 수 있다. 이러한 우선순위 설정을 위한 과정은 지질 및 광상, 문헌조사, 석면관련 질병, 식생조사, 청취조사 및 현장조사 등을 기초로 광산개발 및 인간에 의한 교란활동 등에 따라 다음과 같은 3개의 그룹으로 분류할 수 있다.

제1그룹은 초염기성암 및 염기성암 등 석면이 함유된 지층이 모암으로 존재하며, 이 지역에서 석면광산 및 석면함유가능광산 개발이 이루어진 기록이 있는 경우이다. 제2그룹은 초염기성암 및 염기성암 등 석면이 함유된 지층이 모암으로 존재하며, 이 지역에서 토목공사, 건설 및 산림훼손 등의 인간에 의한 교란활동이 이루어진 기록이 있는 지역이다. 제 3그룹은 초염기성암 및 염기성암 등 석면이 함유된 지층이 모암으로 존재하며(협의의 자연발생석면지역) 광산개발 및 인간의 교란활동이 이루어지지 않은 지역으로 분류된다.

이와 같은 방법으로 자연발생지역에 대한 우선순위가 결정되면, 각 순위별로 적절한 조치를 취한다. 즉, 제1그룹은 석면 오염개연성이 확실시 되는 지역으로 국내 “석면광산 등 석면발생지역의 토양환경 관리지침”에 준하여 조사 및 평가가 이루어질 수 있고, 제2그룹은 오염개연성 여부를 판단하여 관리지침에 따라 기초·개황조사 및 모니터링 단계로 구분된다. 오염개연성판단은 광산 채굴적 및 인위적 교란 지역에서의 암석시료 채취와 토양시료 채취 및 분석 등이 포함될 수 있으며 경우에 따라 대기 모니터링도 포함될 수 있다. 이러한 개략적인 조사 결과를 바탕으로 오염개연성이 있는 것으로 평가되면 관리지침에 준하여 기초·개황조사를 실시한다. 제3그룹은 협의의 자연발생석면지역으로 이 지역은 노두 및 주변 현황 등을 조사하여 조사자가 석면노출여부 및 오염여부를 판단한다 (Fig. 3). 이 단계에서는 미국 캘리포니아주에서 제시하는 현장 육안 석면관찰 방법은 유용할 것이다. 또한, 노두 및 주변 토양에 대한 박편 분석 및 주변 토양의 시료채취 및 분석 등을 이 단계에 포함시킬 수 있을 것이다. 석면 노출여부 판단결과 오염의 개연성이 없으면 종료하며, 개연성이 있으면 환경기준초과 여부에 따라 정화 및 개선대책 수립 단계로 구분한다. 특히, 협의의 자연발생석면지역은 규모면에서 폐석면 광산 및 인위적 교란활동 지역에 비해 작을 것으로 판단되며 이러한 지역에 대한 석면조사와 평가 및 복원대책은 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 하지만, 소규모의 노두 및 산사면은 현재 광해 복구방법 중에서 주로 적용되는 사면 안정화 공법, 슛크

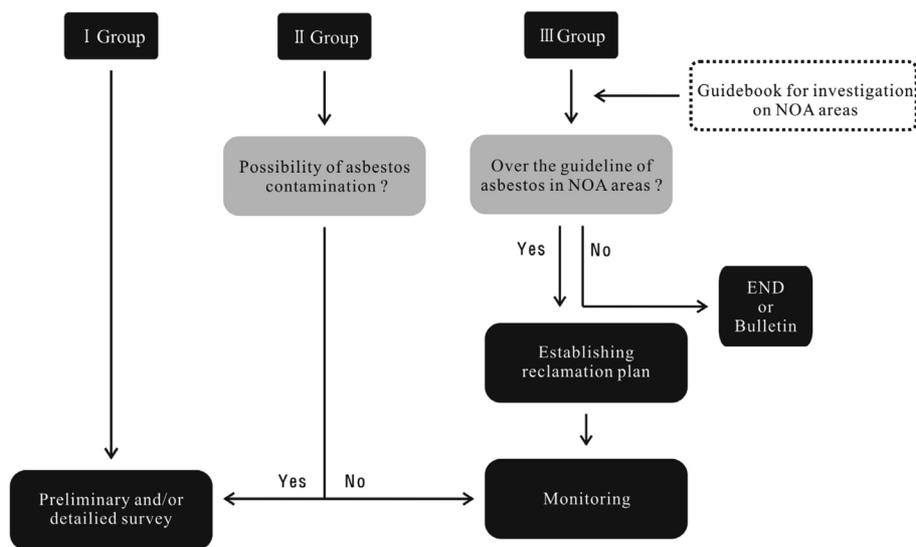


Fig. 3. Flow chart showing investigation, management and following-up control of NOA areas classified as three groups by degrees and extents of asbestos occurrence.

Table 1. Stepwise action plan for investigation, analysis, reclamation and management of NOA areas for minimizing exposure of asbestos

	First step	Second step	Third step
Program	Know-Asbestos	Act-Asbestos	Monitor-Asbestos
Contents	Collecting NOA related materials Evaluation on contamination possibility Line up the national priority list (NPL)	Action program for investigation, analysis, evaluation and reclamation of NOA areas	Following-up control
Detailed items	Published geology of asbestos Set up asbestos regulation Detailed survey for setting NPL	Preliminary investigation, Detailed investigation Reclamation of NOA areas	Report on following-up control program

리트(shotcrete), 녹생공법 및 고행화 등 기존 복구 방법을 활용하여 충분히 오염원을 차단시킬 수 있을 것으로 판단 된다.

2.4. 그룹별 환경관리방안

미국의 캘리포니아주 클리어크릭 관리지역(Clear Creek Management Area, CCMA)은 세계에서 가장 큰 자연발생석면 분포지역이며 슈퍼펀드 사이트인 아틀라스 석면광산(Atlas mine)을 포함하고 있으며, 식생분포, 토양지도, 소방관리지역, 대기관리지역 및 풍속 등 가용한 다양한 자료들을 고려하여 관리지역을 설정하여 이 지역에 대한 석면 위험성을 공고하거나 위험경고를 표시한 바 있다(BLM, 2009). 또한, 이 지역 내에 있는 아틀라스 석면광산의 경우, 접근금지, 비산방지대책, 녹지화, 하천우회 및 선광장 철거 등 적극적인 개선활동을 수행하였다. 특히, 개선작업 및 정화작업을 수행 후 5년 단위로 검토보고서를 제출하고 있으며, 최근에는 매년 정밀조사 보고서를 제출하여 이 지역에 대한 지속적인 관리를 수행하고 있다(US EPA, 2006). 그리고 호주의 경우에는 오염지역의 거주민을 이주시키는 것으로 끝나지 않고, 관광객들에 대한 위험성 평가를 실시하여 석면 오염에 대한 지속적인 관리를 수행하고 있으며(DOC, 2009), 자연발생석면지역에 대한 범위를 설정하여 조사, 정화 및 모니터링 계획 등을 수행하고 있다(OCC, 2006).

국내에는 좁은 국토와 높은 인구 밀집도를 보이고 있어 지속적이고 적절한 사후관리는 필수적이다. 특히, 자연발생석면지역 내에서 토지이용에 대한 논의는 지속적인 모니터링을 통해 이루어져야 할 것으로 판단된다. 따라서 우리나라의 경우 자연발생석면지역의 사후관리를 위한 접근은 크게 다음의 두 가지로 분류될 수 있다. 첫 번째는 정화 및 개선사업이 이루어진 부지에서 향후 오염 재발(기상현상 및 토지이용에 따른) 가능성의 지속적인 평가와 정화 시설물들의 사후관리이며, 두 번째는 협의의 자

연발생석면지역에 대한 전반적인 관리이다. 즉, 첫 번째는 앞에서 3개의 그룹으로 분류한 것 중에서 제1그룹과 제2그룹으로 분류된 지역에 대하여 정화사업 이후의 사후관리 과정이다. 이들 지역은 과거 광산 활동 및 교란활동으로 인하여 주변 환경에 많은 영향을 미쳤을 것으로 판단되고, 오염개연성 또한 높을 것이며, 정화 방법도 복토 및 굴토 후 환토 등 적극적인 정화방법이 적용될 것이다. 이러한 경우, 정화작업 완료 후 일정기간에 걸쳐 사후관리가 수행되어야 하며 국내 휴·폐금속광산 사후관리 지침에 따라 적용이 가능하다. 휴·폐금속광산 중에서 광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경 오염영향조사 지침에서는 5년간 사후관리를 실시하도록 명시되어 있으며, 오염정후가 발견되지 않을 경우에는 관계기관과 협의하여 사후관리를 종료하도록 하고 있다(환경부, 2007).

두 번째는 협의의 자연발생석면지역으로 우선적으로 조사지침에 대한 마련이 시급하다. 조사지침은 조사방법 및 조사범위 등이 명시되어야 하며, 특히 오염원의 규모적인 측면에서 다양한 조사방법이 제시되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 지역은 석면오염 조사결과 종료되거나 정화 및 개선대책 방법에 따라 사후관리도 달라진다. 즉, 종료된 부지의 경우 오염개연성이 없는 것으로 판단되거나 지질학적으로 모암이 석면을 함유할 가능성이 높으므로 도로 공사, 사면 절토 및 일부 출입 통제 등을 통해 관리되어야 한다. 즉, 이러한 지역은 오염개연성은 현재 낮지만 개발행위 등 교란활동에 의해 오염이 확산될 가능성이 있으므로 지자체 및 관련 기관에서 지속적인 감시와 모니터링이 수행되어야 한다. 또한, 정화 및 개선작업이 수행된 지역의 경우 앞서 기술한 사후관리 지침을 준용할 수 있으며, 경우에 따라 관리 주기 및 빈도를 조절할 수 있다. 특히, 비거주지역이며 인근 거주지와 거리가 매우 떨어져 있을 경우 정화를 하지 않거나, 정화 후 사후관리에 대한 빈도를 감축하여 수행될 수 있다.

2.5. 그룹별 환경관리방안

지금까지 대표적인 자연발생석면 분포지역에 대한 효율적 관리 방안에 대해 기술하였으며 이러한 사항을 종합하여 석면오염 토양정화 등 석면노출 최소화 사업을 위한 연차별 수행 전략을 정리하였다(Table 1). 표에서 제시한 바와 같이 제 1단계(석면오염 개연성을 확인하는 단계, 사전관리 단계), 제 2단계(석면오염도 평가를 위한 조사, 분석, 평가 및 저감을 위한 정화 단계) 및 제 3단계(석면발생 지역의 사후관리 단계) 등 총 3단계로 구분하여 수행하는 것을 제안하였고 각 단계에서 필요한 사업 수행 내용과 절차도 포함되었다. 그러므로 이러한 단계별 환경관리를 통해 석면을 관리함으로써 인력과 장비 및 각종 비용의 절감과 더불어 효율적인 자연발생석면의 관리가 이루어질 것으로 판단된다.

3. 결 론

자연발생석면은 지표에 노출된 석면 함유 광물에 의한 주변지역의 오염현상이므로 개연성이 있는 지질대 모두가 그 영향권에 포함되는 것은 아닐 것이다. 또한 오염개연성이 있는 노두가 분포하는 지역이라 하더라도 석면의 종류에 따라 독성의 정도도 다르며, 비산되는 특성 역시 변화될 수 있다. 이와 더불어 자연발생석면 분포지역의 지형학적 특성, 기후 특성 및 인간에 의한 개발행위 등에 따라서도 그 오염의 정도가 현저하게 상이할 수 있다. 그러므로 석면오염이 발생될 가능성이 있는 지역에 대해 모든 사항을 고려하여 평가함이 바람직하다. 하지만 경제성, 효율성, 기술성 등의 제반 사항을 충분히 고려하여 종합적인 관리대책을 수립하고 운영함이 가장 최선의 방법일 것이다.

자연발생석면 분포지역에 대해 해외 선진국의 경우 가장 많이 적용하고 있는 방법은 소위 ‘폐쇄 조치’로 대변되는 접근 금지 방법이다. 오염의 개연성이 있는 지역에 대해 지역 주민을 다른 안전한 곳으로 이주시키고 오염지역에 대한 사람의 접근을 금지함으로써 노출을 최소화하는 방안을 적용하고 있다. 하지만, 우리나라와 같이 국토가 협소하여 제한된 지역에서 다양한 토지의 이용을 하는 경우에는 주민들의 접근을 막고 타 지역으로의 이주 처리 등은 현실적으로 어려운 적용 방법일 것이다. 그러므로 현장에서 발견된 또는 우려되는 석면오염원인물질의 적극적인 제거가 가장 우선적으로 고려될 수 있는 방안일 것이다. 즉, 토양 및 대기로의 석면 이동, 분산 또는 확산 가능성이 있는 지역에 대한 면밀한 조사결과를 바탕으로 오

염의 정도에 따른 차등화 처리 방법의 적용이 필요할 것이다. 즉, 토양 내 석면이 1% 이상 검출된 오염필지는 객토 또는 복토와 같은 토양교환방식이 가장 적절한 오염최소화 방안일 것이다. 특히, 대부분의 석면 오염토양은 표토에 국한되는 특성을 보이므로 경작심도(통상 30 cm 전후) 주변까지 깨끗한 비오염 토양으로 환토하는 방법이 효율성과 경제성에 맞는 방법이다.

석면오염의 원인들 중에서 가장 중요한 것은 지표에 노출된 섬유상 물질의 풍화과정일 것이다. 이러한 지역은 석면지질도상에 직접 표기되어 있어야 할 것이다. 이들 지역에 대한 가장 확실한 정화 또는 처리 방법은 당연히 그 해당 암석의 제거이겠지만 이 역시 현실적으로는 적용성에 한계가 있다. 그러므로 이들 지역에 대한 가장 적절한 오염최소화 방안으로는 해당 노두 지역에 대한 오염원의 근원적 차단일 것이다. 즉, 노출된 노두의 표면을 시멘트 또는 포졸란과 같은 고형화 물질을 활용하여 표면을 적절히 피복하거나 슛크리트 및 녹생공법 등으로 석면이 지표면 또는 대기 중으로 비산되는 것을 방지하는 방법이다.

종합적으로 국가에서 앞으로 자연발생석면지역의 효율적 관리를 위해서는 오염개연성과 주변에 대한 영향 및 지질학적인 자료를 망라한 종합적인 자료를 바탕으로 단계별로 수행함이 바람직하다. 즉, 제1단계(석면오염 개연성을 확인하는 단계, 사전관리 단계), 제2단계(석면오염도 평가를 위한 조사, 분석, 평가 및 저감을 위한 정화 단계) 및 제 3단계(석면발생 지역의 사후관리 단계) 등 총 3단계로 구분하여 수행함으로써 인력과 장비 및 각종 비용의 절감과 더불어 효율적인 자연발생석면 관리가 이루어질 것으로 평가된다.

사 사

이 연구는 한국환경산업기술원(환경부)의 토양·지하수오염방지기술개발사업(과제번호: 172-111-015)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

안연순, 김형렬, 2009, 비직업적 근접 노출에 의한 석면폐증 집단 발생 사례, 대한의사협회지, 52(5), 472-481.
 윤충식, 2009, 석면과 건강에 대한 이슈, 한국환경보건학회지, 35(5), 426-432.
 최정근, 백도명, 백남원, 1998, 우리나라의 석면 생산과 사용 및 근로자 수와 노출농도의 변화, 한국산업위생학회지, 8(2), 242-253.

- 함승원, 황성호, 윤충식, 박동욱, 2009, 석면분석방법에 대한 고찰, 한국산업위생학회지, **19**(3), 213-232
- 환경부, 2005, 광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경 오염영향조사 지침, p. 21.
- 환경부, 2009, 석면관리총람, 환경부, p. 446.
- 환경부, 2010a, 폐석면광산 주변 토양 · 지하수 석면 함유 실태조사(정밀조사), 환경부, p. 449.
- 환경부, 2010b, 폐석면광산 주변 토양 · 지하수 석면 함유 실태조사(개황조사), 환경부, p. 841.
- 환경부, 2010c, 석면광산 등 석면발생지역의 토양환경 관리지침, 환경부, p. 58.
- Artvinii, M., Bais, Y.I., 1979, Malignant mesotheliomas in a small village in the Anatolian region of Turkey; *An epidemiologic study JNCI*, **63**, 17-22.
- Becklake, M.R., 1976, Asbestos-related diseases of the lung and other organs, Their epidemiology and implications for clinical practice. *Am Rev Respir Dis*, **114**, 187-227.
- BLM (US Bureau of Land Management), 2009, Clear Creek management area draft resource management plan & draft environmental impact statement, DOI, California, p. 690.
- Clinkenbeard, J.P., Churchill, R.K., and Lee, K.-Y., 2002, Guidelines for Geologic Investigations of Naturally Occurring Asbestos in California, CGS, California, p. 70.
- Coraglia, B., Forlati, F., Fusetti, E., Giacomelli, L., Morelli, M., Piazzano, P., Schellino, G., and Wojtowicz, M., 2006, Naturally occurring asbestos mapping project : the experience of regione Piemonte, *Proceedings of European Conference on Asbestos Risk and Management*, Rome, Italy, 1-56.
- DOC (Western Australian Department of Commerce), 2009, Reading-The Wittenoom Disaster. DOC, p. 59.
- DOH (Western Australian Department of Health), 2009, Guidelines for the Assessment, Remediation and Management of Asbestos-Contaminated Sites in Western Australia, DOH, p. 68.
- Doll, R., 1955, Mortality from lung cancer in asbestos workers, *Brit. J. Industr. Med.*, **12**, 81-86.
- Hardaker, B., 2009, Risk Assessment of Asbestos-Contaminated Soils: An International Perspective, *The Winston Churchill Memorial Trust of Australia*, p. 40.
- Harper, M., 2008, 10th Anniversary Critical Review: Naturally occurring asbestos. *J Environ Monit.*, **10**, 1394-1408.
- Hendrickx, M., 2009, Naturally occurring asbestos in eastern Australia: a review of geological occurrence, disturbance and mesothelioma risk, *Environ Geol.*, **57**, 909-926.
- Lee, R.J., Strohmeier, B.R., Bunker, K.L., and Van Orden, D.R., 2008, Naturally occurring asbestos - A recurring public policy challenge. *J Hazardous Materials*, **153**, 1-21.
- Maclure, M., 1987, Asbestos and renal adenocarcinoma: A case-control study, *Environ Res*, **42**, 353-361.
- OCC (Orange City Council), 2006, Naturally Occurring Asbestos Planning Procedures, Orange City, NSW, OCC Planning Procedures Document, OCC, p. 53.
- Pan, X.L., Day, H.W., Wang, W., Beckett, L.A., and Schenker, M.B., 2005, Residential Proximity to Naturally Occurring Asbestos and Mesothelioma Risk in California, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **172**, 1019-1025.
- TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research), 2005, NEN 5707: Soil-Investigation, Sampling and Analysis of Asbestos in Soil (translated to English by US EPA). Standardisation Centre, Netherlands Standards Institute, TNO, p. 104.
- US EPA, 2006, Five-year review report for Atlas asbestos mine superfund site and Coalinga asbestos mine(Johns-Manville mill) superfund Fresno County, California, p. 250.
- US EPA, 2008, Framework for investigating asbestos-contaminated superfund sites, EPA, p. 37.
- Van Gosan, B.S., 2007, The geology of asbestos in the United States and it's practical application, *Environmental & Engineering Geoscience*, **13**(1), 55-68.