GIS 기법을 이용한 폐석면 광산의 위해성 평가

Health Risk Assessments using GIS Method for the Abandoned Asbestos Mines

최 진 범(Jin Beom Choi)^{1,*} · 손 일(III Son)² · 노 진 환(Jin Hwan Noh)³

¹경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소
(Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Sciences,
Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

²부산대학교 지리교육과
(Department of Geography Education, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

³강원대학교 지질학과
(Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

요약 : 폐석면 광산의 위해성 평가는 통상 ABS 방식에 의해 이루어지지만, 조사지역 전반에 관한 위해성 경향을 파악하는 데 그치는 한계를 지닌다. 이 연구에서는 새로운 평가방식으로 잠재적 위해지수(PIHR)라는 개념을 도입하여 석면 위해도를 계량화하였다. PIHR 값에 대해 석면이 인체에 위해를 주는 요인들을 고려하여 적절한 가중치를 부여한 후, 토양 내 석면 농도 값을 적용하여 지리정보시스템(GIS)의 적지선정기법을 활용하여 위해성 평가를 실시하였다. 충청남도 보령시에 위치한 어느 폐석면 광산에 적용한 결과, 잠재적 위해 지수가 매우 높은 지역은 전체 면적의 7.8%에 해당되는 27.3 ha이며, 위해성 평가는 미국 환경보호청의 종합위해정보시스템(IRIS) 모델을 적용하여 각각 만 명당 1명(석면농도 0.36% 이상), 3만 명당 1명(석면농도 0.1% 이상), 10만 명당 1명(석면농도 0.04% 이상) 평생초과 발암 위험도 기준으로 관리할 경우 3.0, 12.9, 19.5 ha로 면적이 증가한다. 이러한 결과는 향후 광해 복원범위 선정에 효과적으로 적용할 수 있다.

주요어 : 위해성 평가, 폐석면 광산, 잠재적 위해지수, 지리정보시스템, 종합위해정보시스템, 평생초과 발암 위험도

ABSTRACT : Health risk assessments for the abandoned asbestos mine were usually performed with activity-based sampling (ABS) method, which was not a effective tool for indexing health risk on an exact small area of mine. A newly proposed potential index of health risk (PIHR) was applied with proper spatial determination of geographical information system (GIS) to assess quantitatively health risks. A new trial was applied to a certain abandoned mine in Boryong as follows: A high grade area of PIHR was estimated 7.8% of the whole area of the mine (about 27.3 ha). Based on US EPA IRIS (integrated risk information system) model considering lifetime excess cancer risk (LECR), the health risk assessment indicated that the high grade area increased from 3.0 ha through 12.9 ha to 19.5 ha with an increase of asbestos contents in soil from 0.36% (1E-04 level) through 0.1% (3E-05 level) to

*교신저자: jbchoi@gnu.ac.kr

0.04% (1E-05 level). These results can be effectively applied to determine reclamation area of the abandoned asbestos mine.

Key words : Health risk assessment, abandoned asbestos mine, potential index of health risk (PIHR), geographical information system (GIS), integrated risk information system (IRIS), lifetime excess cancer risk (LECR)

서 언

석면은 섬유상으로 산출되는 천연의 함수 규산염광물을 통칭하는 용어로서 온석면(또는 백석면, chrysotile), 청석면(crocidolite), 갈석면(amosite), 직섬석(anthophyllite), 투각섬석(tremolite), 양기석(actinolite)의 6종이 있다. 석면은 강철보다 강하고 불에 타지 않으며 열과 추위에 잘 견디고 부식되지 않으며 전기를 통하지 않는 뛰어난 특성으로 기적의 광물로 불리며 고대로부터 사용되었으며 지난 수십 년간 수 천종의 상업적 제품으로 사용되었다(최진범, 2009).

그러나, 70년대 들어 석면이 강한 독성을 가진 발암 물질로서 흡입할 경우 석면폐(asbestosis), 폐암, 악성중피종(mesothelioma) 등 폐 관련 질환에 치명적인 발병원으로 알려지면서(Wagner and Berry, 1969; Liddell *et al.*, 1997; Luo *et al.*, 2003; Anastasiadou and Gidarakos, 2007; Carbone *et al.*, 2007; Constantopoulos, 2007), 선진국을 비롯한 일부 나라에서 사용이 금지되고 있지만 아직 대다수의 국가에서는 여전히 석면에 무방비로 노출되고 있다. 우리나라는 2009년 범정부 석면종합관리대책을 수립하고 현재 석면사용을 전면 금지하고 있다. 이에 국내 폐석면 광산들과 주변 지역에 대한 광해방지를 종합적이고 체계적인 대책을 수립할 필요성이 제기되었으며, 한국광해관리공단에서는 폐석면 광산 지역의 토양, 수질, 공기 등을 대상으로 석면함량에 대한 정확한 분석을 실시하고 효율적인 복구방안 수립을 위한 석면광해 복원기준 설정, 위해성평가 연구를 실시하였다((사)한국광물학회, 2010a, 2010b).

석면에 의한 위해성 평가는 중금속 오염지역에 대한 위해성 평가와는 전혀 다르다((사)한국지하수도환경학회, 2003). 인체 위해성이 중금속의 경우 주로 구강을 통한 섭취에 의해 이루어지는 반면, 석면은 인체가 석면에 의해 노출되면서 호흡에 의해 이루어지기 때문에 석면의 공기 중 농도 및 경로, 경로별 인체노출량, 위해도 결정 등

여러 가지 복합적 요인에 의해 판단되어야 한다(Dusek and Yetman, 1993; Anderson *et al.*, 2005; US DHHS, 2006; Price, 2008). 따라서 외국의 평가 사례(Berman and Crump, 2001; US EPA, 2003, 2004a, 2004b, 2005, 2008)에서 보듯이, 인체에 노출될 수 있는 실제 상황을 반영하여 ABS (activity-based sampling)를 실시하여 시나리오별로 위해성을 평가하고 있다. 그러나 ABS 실시에 따른 위해성 평가는 조사 지역에 대한 전반적인 위해성의 정도는 파악할 수 있을지 몰라도 석면광해 복원기준 설정을 위한 위해성 평가에는 한계가 있다((사)한국광물학회, 2010b).

따라서 지리정보시스템(GIS, geographical information system)의 적지 선정 기법(박지연, 1998; 박기학 외, 2001; 박정준과 신은철, 2008)을 이용하여 폐석면 광산 지역의 석면광해에 대한 새로운 방식의 위해성 평가를 실시하였다.

연구 방법

석면 위해성에 영향을 미치는 요인

석면의 인체 위해성은 토양 내 석면이 비산을 통해 공중에 떠올라 인체에 노출될 때이므로 석면 위해성은 토양 내 석면을 공중으로 비산시키는 요인과 인체 노출에 영향을 미치는 요인을 함께 고려하여 평가되어야 한다. 전자의 요인으로는 자연적 요인으로 지형적 요인, 기상학적 요인, 토양 물성적 요인이 있으며, 후자의 경우 인간활동과 연관된 사회·경제적 요인으로서 주거요인, 도로 요인, 토양이용도 등이 있다. 지형적 요인은 지형의 경사 정도와 경사면의 방향(향이라 부름)이 바람의 세기에 영향을 받기 때문에 석면의 비산에 영향을 미치게 되며, 기상 요인으로 풍향은 석면의 비산 범위에 영향을 주기 때문에 조사지역의 탁월풍은 중요한 요인이 된다. 토양의 물성 중 토양의 입도에 따라 배수 정도가 달라지는데 젖은 토양과 건조한 토양은 석면 비산에 직접적인 영향을 주게 된다.

Table 1. Factors and their values of health risk assessments

목	요 인	점 수	범 위	산정 기준 방법
토지 피복도	시가화 지역	3 (상)	0~100 m	인구 활동이 많은 지역일수록 석면에 노출될 가능성이 높음.
		2 (중)	100~200 m	
		1 (하)	200~300 m	
	도로	3 (상)	0~100 m	교통량이 많은 지역일수록 석면에 노출될 가능성이 높음.
		2 (중)	100~200 m	
		1 (하)	200~300 m	
토양도	토양배수	3 (상)	매우 양호	토양이 배수가 불량한 지역의 경우, 석면의 공기 중 노출정도가 낮음
		2 (중)	양호~약간 양호	
		1 (하)	불량	
지형	경사	3 (상)	10% 이상	경사가 급할수록 탁월풍과 우수 및 강수의 영향에 노출될 가능성이 높음
		2 (중)	5~10%	
		1 (하)	5% 미만	
	향	3 (상)	북-동	충남의 경우 탁월풍의 방향(북동풍)이 우세함.
		2 (중)	동-남, 서-북	
		1 (하)	남-서	
토지이용	논/밭/삼림	3 (상)	밭+기타	경작의 집약도와 지표노출 정도에 따라 재비산될 확률이 높음.
		2 (중)	논	
		1 (하)	삼림	

한편, 사회·경제적 요인은 석면에 비산된 지역에 인체 노출의 정도에 영향을 주는 것으로 시가화지역은 인간이 활동하며 머무는 지역으로 주거지역의 위치는 위해성에 영향을 주며, 도로는 사람이 통행하거나 차량이 이동하는 곳으로 석면에 노출될 가능성이 높은 곳이다. 폐석면 광산 지역은 주로 농촌지역이며 농업활동에 따라 석면 노출에 영향을 주게 된다. 이들 위해성에 영향을 미치는 각 요인들에 대해 산정기준을 정하고 3등급으로 나누어 평가 요인별 가중치를 부여하였으며, 이를 다음 표 1에 정리하였다.

토양 내 석면제거 기준

위해성 평가에 근거한 토양 내 석면 제거에 대한 뚜렷한 기준은 없다. 다만 석면광산 복원 사례로부터 제거 기준을 적용할 수 있다. 미국 몬타나주 리비(Libby) 광산의 복원 사례(US EPA, 2003)에 따르면 다음과 같다.

미국 환경보호청(US environmental protection agency, US EPA)의 연구(US EPA, 1993)에 따르면 평생초과 발암위험도(LECR: lifetime excess cancer risk)를 만 명당 1명(1E-4) 이상 암이 발생

하는 경우를 위해도의 기준으로 삼고 있으며, 이때 사용한 석면 독성치는 US EPA IRIS (integrated risk information system)를 적용하여 0.23 per f/cc를 사용하였다. 이에 따라 발암 위험에 근거한 토양 내 석면 농도는 위험수준 만 명당 1명일 경우 0.36% 이상이며, 10만 명당 1명일 경우 0.04% 이상, 그리고 1만 명당 3명(3E-04)일 경우 0.1%를 제시하였다.

잠재적 위해 지수(PIHR)

잠재적 위해 지수(PIHR: potential index of health risk)는 석면의 인체위해성에 영향을 미치는 각 요인들에 등급을 매기고 적절한 가중치를 부가하여 이를 정량화한 값을 의미하여 GIS 기법에 사용하는 자료로 활용하기 위해 새롭게 도입한 용어이다. 지리상 특정 지점(i)에서의 PIHR_i은 다음과 같이 주어진다.

$$PIHR_i = S(f)_i + U(f)_i + R(f)_i + W(f)_i + T(f)_i + A(f)_i \quad (1)$$

여기서, S는 토지이용, U는 시가화지역, R은 도로,

W는 토양배수, T는 지형경사, A는 향 요인들이며 f는 산정 기준에 따라 부여된 점수이다. 폐석면 광산지역이 농촌 지역임을 고려하여 석면의 대기 중 비산과 인체노출의 요인들의 영향에 따라 가중치를 부여하였으며, 토지이용에 가장 높은 가중치(3)를 부여하고 시가화지역, 및 도로에 중간 가중치(2), 그리고 나머지 토양배수, 경사 및 향에 낮은 가중치(1)를 각각 부여한 후 $PIHR_w$ 식은 다음과 같다.

$$PIHR_w = 3 \times S(f) + 2 \times \{U(f) + R(f)\} + W(f) + T(f) + A(f) \quad (2)$$

GIS 분석

위해성 평가 모델링을 위해 지리공간분석에 널리 사용되는 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 잠재적 위해지수를 구한 후 요인의 기여도에 따라 가중치를 부가하여 계산된 값에 토양 내 석면함유량 분포도에 US EPA IRIS 위험모델을 적용하여 위해성 평가 모델을 구하였다. 사용된 기본 자료는 토지피복도(1:25,000), 수치지형도(1:5,000), 토양도(1:25,000) 등 3가지이며, 지형의 경사와 향을 분석하기 위해 DEM (digital elevation model) 자료에는 수치지형도(1:25,000)를 이용하였다. 이렇게 구축된 자료를 바탕으로 경사도와 향 지도를 제작(공간해상도 20 × 20 m)하였으며, 국가수자원 정보시스템에서 획득한 토양도를 바탕으로 토양배수능력(공간해상도 30 × 30 m)을 추출하였다. 토지피복도에는 시가화지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역 등 총 7개 지목으로 대분류되어 있다.

GIS 분석에서는 공간추정방법 중 거리반비례평균법을 이용하여 토양 내 석면농도를 공간적으로 지도화 하였으며, 각 위해성 요인들을 등급 값을 추출하고 레이어별 주제도를 작성하였다(그림 1). 이들 각 레이어들에 요인별 가중치를 부가하고 GIS 적지분석법을 활용하여 중첩시킴으로써 종합적으로 석면 위해성이 높은 지역(잠재적 위해 지역)을 결정하였다. 이 분석에 사용된 환경인자는 크게 자연환경 요인과 사회·경제적 환경 요인으로 구분하였다. 전자는 경사, 향 및 토양배수능력을 선정하였으며, 후자는 시가화지역, 도로로부터의 거리, 및 농업적 토지이용을 선정하였다. 선정된 각각의 평가인자에 대해 GIS를 이용한 DB 구축 작업을 실시하였다.

결과 및 고찰

생성된 개별 주제도에 대한 설명

그림 1에 나타난 개별 주제도에 대한 설명은 다음과 같다.

시가화지역(그림 1A)은 사람들의 활동이 많은 지역으로, 토양 속 석면에 노출될 가능성이 높아 시가지에서 가까울수록 위험도가 높다. 따라서 본 연구에서는 토지피복도에서 시가화지역(주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설, 교통지역, 공공시설지역)을 추출하고, GIS의 버퍼(buffer) 분석법을 시도하였다. 즉, 시가화지역에서 100 m 이내 지역, 100~200 m 떨어진 지역, 200~300 m 떨어진 지역을 구분하고, 각각에 대해 3 (상), 2 (중), 1 (하)의 점수를 부여하였다.

도로(그림 1B) 역시 시가화지역과 마찬가지로 사람들의 활동이 많은 지역으로 토양 속 석면에 노출될 가능성이 높아 도로에서 가까울수록 위험도가 높다. 따라서 본 연구에서는 토지피복도에서 도로를 추출하고, GIS의 버퍼 분석법을 시도하였다. 즉, 도로에서 100 m 이내 지역, 100~200 m 떨어진 지역, 200~300 m 떨어진 지역을 구분하고, 각각에 대해 3 (상), 2 (중), 1 (하)의 점수를 부여하였다.

토양이 젖어 있을 경우 그렇지 않을 경우에 비해 석면의 비산이 극도로 제한을 받기 때문에 토양배수 능력은 석면의 재 비산에 큰 영향을 미친다. 토양도 배수능력 범례 중, <암석 노출지>, <매우 양호>, <매우 양호 내지 양호>는 3 (상), <양호>와 <약간 양호 내지 양호>는 2 (중), <불량>과 <매우 불량>은 1 (하)로 각각 점수를 주고 GIS의 재분류화 분석법(reclassification)을 시도하였다.

지면의 경사(그림 1C)가 급할수록 탁월풍에 영향을 받는 정도와 유수 및 강수에 영향을 받은 정도가 높기 때문에 재 비산에 영향을 주는 요인으로 선정했다. DEM을 바탕으로 GIS의 경사 분석법을 시도한 후, 이를 다시 점수에 따라 GIS의 재분류화 분석법을 시도했다. 경사가 10% 이상인 경우 3 (상), 5~10%인 경우 2 (중), 5% 미만인 경우 1 (하)의 점수를 부여했다.

향(그림 1D)이란 사면의 방향을 의미하는 변수로 탁월풍에 직각으로 영향을 받을수록 바람의 영향이 커지고, 그 결과 석면의 재비산 정도도 높아진다. DEM을 바탕으로 GIS의 향 분석법을 시도

Fig. 1. Prediction maps based the five factors. (A) Urbanized area. (B) Road. (C) Slope. (D) Inclination. (E) Land use.

한 후, 이를 다시 점수에 따라 GIS의 재분류화 분석법을 시도했다. 이 지역의 탁월풍이 북동풍이기 때문에 이 풍향의 바람맞이인 북향(0°)과 동향(90°) 사이는 3 (상)으로, 바람의지인 남향(180°)과 서향(270°) 사이는 1 (하)로 하였고, 나머지 동향(90°)과 남향(180°), 그리고 서향(270°)과 북향(360°) 사이를 2 (중)로 각각 점수를 부여하였다.

한편, 농업적 토지이용(그림 1E)의 경우 경작의 집약도 및 계절별 지면 노출 정도에 따라 석면의 비산과 인간에 대한 위해 정도가 달라진다. 즉, 농업활동의 집약도가 높을수록, 지면 노출정도가 높을수록 비산의 확률이 높고 인체 노출의 가능성도 높아진다. 따라서 밭, 비닐하우스, 초지, 과수원, 기타 재배지 및 나지의 경우 3 (상), 논외의 경우 2 (중), 산지의 경우 1 (하)로 점수를 부여하였다.

잠재적 위해지수(PIHR) 분석 결과

PIHR를 구하는 공식에 따라 시도하는 중첩 분석은 GIS 적지분석에 기본적으로 사용하는 오버레이(overlay) 분석법을 말한다. 오버레이 분석법에서는 2가지 문제를 해결해야 한다. 첫 번째는 요인별 가중치를 인정할 것인지, 아닌지를 결정해야 한다. 즉, 토양 내 석면의 공중 비산과 그로 인해 인체 노출에 모든 요인들이 같은 강도로 영향을 미친다고 가정할 것인지, 아니면 개별 요인마다 다르게 작용할 것인가를 결정하는 일이다. 석면 위해성은 토양이든 공중이든 석면함유량의 많고 적음보다는 석면에 대해 인체노출의 정도가 중요하기 때문이다. 따라서 이번 분석에서는 비산된 석면에 인체 노출의 정도는 자연 요인보다 사회·경제적 요인에 더 크게 좌우될 것이라는 판단되어 가중치를 부여하였다(식 (2) 참조).

두 번째 고려사항은 향과 토지이용의 경우처럼 0 값을 가지는 픽셀이 생성될 수 있으므로, 오버레이 분석과정에서 이를 적절하게 반영하지 못하면 그 결과에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이번 분석에서는 0 값을 가지는 픽셀에 최대값 이상의 값을 주고, 중첩 결과 최대값을 초과하는 픽셀을 제외하는 방법을 썼다. 6가지 요인 모두를 만족하면서 각 요인의 하(1점)만으로 중첩된다면 최소값 10점을 얻는다. 한편 6가지 요인 모두를 만족하면서 각 요인의 상(3점)으로 중첩되는 지역은 최대값 30점을 얻게 된다.

인체 위해성에 영향을 미치는 각 요인들에 대한

GIS 중첩분석 결과, 6가지 요인 모두가 중첩된 지역의 픽셀값은 최대 30점에서 최소 10점으로 주어진다. 분석의 편의를 위해 이를 등간격으로 5가지 계급으로 나누어서 잠재적 위해 등급을 각각 매우 높음(30~26점), 높음(25~22점), 중간(21~18점), 낮음(17~14점) 및 매우 낮음(13~10점)으로 구분하였다.

그림 1에 나타내었던 개별 주제도에 가중치를 부가하고 6가지 요인 모두를 중첩시킨 결과를 그림 2에 나타내었다. 등급 <매우 높음>은 모두가 중첩되는 지역(잠재적 위해 지수가 높은 지역), 등급 <중간>은 상당히 중첩되는 지역, 등급 <매우 낮음>은 약하게 중첩되는 지역으로 구분된다. 그림 2에서 보듯이, 위해 지수가 높은 지역은 시가화지역과 도로 주변을 따라 분포하고 있으며, 등급 <매우 높음> 지역의 면적은 7.8%, <높음> 지역은 22.6%, <중간> 지역은 33.6%, <낮음> 지역은 30.8%, <매우 낮음> 지역은 5.3%를 각각 차지하고 있다.

석면위해성 평가 분석 결과

잠재적 위해 지수의 등급을 나타낸 잠재적 위해 지역(그림 2)은 기본적으로 전 지역의 토양 내 석면 농도가 동일하다는 가정 하에서 분석한 것이다. 하지만 토양 내 석면 농도가 지점별로 각기 다르고, 인체에 미치는 위해 정도도 그 농도에 따라 다르다. 따라서 토양 내 석면농도(토양 내 석면함유량 분포도)와 잠재적 위해 지역을 중첩시켜 보다 실질적인 석면 위해성 지역을 결정하게 된다.

이 과정에 적용되는 모델인 US EPA (1993)가 제안한 IRIS는 보편적으로 널리 적용되는 위험 모델이며, 분석법은 편광현미경법(PCM/PCME)으로 수행되어 우리나라 위해도 평가에 적용해도 무난할 것으로 보인다. 이에 따르면 미국의 석면위해 관리수준은 1만 명당 1명(1E-04 level)의 평생초과발암 위험도 수준에서 관리하자면 토양 내 석면농도가 0.36% 이상이 되며, 10만 명당 3명(또는 3만 명당 1명, 3E-05 level) 수준이면 토양 내 석면농도가 0.1% 이상이 된다. 또한, 평생초과발암 위험도를 10만 명당 1명(1E-05 level)로 관리한다면 석면농도 0.04% 이상이 된다. 국내의 경우 국민의 건강에 관한 높은 관심과 폐석면 광산 주변 주민의식을 고려할 때, 1E-04 수준은 위험하고 1E-05 이상 수준은 안전하다고 잘라 말하기가 매우 어렵

Fig. 2. Potential map of health risk for the abandoned asbestos mine in Boryong area.

다. 따라서 어느 수준에서 석면 위해성 관리를 하는 것이 좋은 지는 광산 지역 주민의 정서를 고려하는 합리적인 기준과 복원 비용을 고려한 효율적이고 경제적인 복원 기준 설정에 따라 달라질 것이다.

위해성 평가 사례

여기에 소개하는 사례는 충청남도 보령시에 위치한 폐석면 광산 중 하나로서 2006년까지 약 5,118톤의 석면이 채굴되었고 현재는 휴광 중인 광산이다. 광산이 개발되던 지역은 현재 밭으로 복토되었으나 통행하는 도로에서는 석면질 투각 섬석편들이 산재되어 확인되는데 이는 석면 운반

에 따른 차량 운행 시 석면이 흩날려 분산된 것으로 보인다.

폐석면 광산에 대해 석면 위해에 영향을 미치는 6가지 요인을 이용한 잠재적 위해 지역(PIHR 분포도) 분석 결과를 표 2와 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보듯이, 잠재적 위해 등급이 높은 지역이 시가화지역과 도로를 따라 집중적으로 분포하는 경향을 보여준다. 6가지 요인 모두가 중첩되는 지역(잠재적 위해 등급 <매우 높음>)의 면적은 0.27 km^2 (전체 면적의 7.8%)이며, 시가화지역과 도로 주변을 따라 분포하고 있다.

이 광산의 위해성 평가는 IRIS 위험 모델을 적용하여 10만 명~만 명당 1명 범위의 평생초과 발암 위험도 수준에서 실시하였다. 10만 명당 1명의

Table 2. Grades of PIHR for the abandoned asbestos mine (within 2 km)

등 급	범 위	면 적(m ²)
매우 높음	30~26	273,846.7 (7.8%)
높 음	25~22	794,435.1 (22.6%)
중 간	21~18	1,179,044.8 (33.6%)
낮 음	17~14	1,080,643.7 (30.8%)
매우 낮음	13~10	184,996.0 (5.3%)

발암 위험도 수준(토양 내 석면농도가 0.04% 이상), 3만 명당 1명 위험도 수준(석면농도 0.1% 이상)과 1만 명당 1명의 위험도 수준(석면 농도 0.36% 이상)으로 평가한 결과를 표 3과 그림 3A, B, C에 각각 나타내었다. 표 3에서 보듯이, 위해성 평가 등급이 <매우 높음> 지역은 만 명당 1명에서 3만 명당 1명, 10만 명당 1명 순으로 발암 위험도 기준으로 관리수준을 높일수록 3.0, 12.9 및 19.5 ha로 면적이 증가한다. 그림 3A에서 보듯이, 1만 명당 1명 발암 수준에서의 위해성 평가 결과, 위해성 평가 등급 <매우 높음> 지역이 광산 인근 마을 회관 주변 도로의 농지 일부와 북서쪽 40번 국도와 410번 지방도가 만나는 삼거리 부근 나대지, 그리고 반경 2 km 경계 내 남동쪽에 흩어져 분포하고 있으며 총면적은 30,061.5 m² (3.0 ha)이다. 이들 지역이 긴급하게 석면 제거 및 복원 대상이 된다.

위험관리 수준을 조금 높여 3만 명당 1명(그림 3B) 발암 수준에서 평가하면 위해성 등급 <매우 높음> 지역이 광산 주변을 포함하여 40번 국도를 따라 여러 군데 분포하고 있으며, 북쪽에 놓인 610번 지방도의 일부 지역에도 분포하고 있다. 그림 3A와 마찬가지로 2 km 반경 가장자리를 따라 남동쪽에 시가화지역과 농경지에도 산재해 있다. 이들 지역(128,895.9 m², 12.9 ha)이 석면 제거 및 복원 대상이 된다. 따라서 이 수준에서 관리할 경우, 복원 비용을 고려하여 현장 상황을 고려하여 일부 배제할 수 있다.

한편, 10만 명당 1명(그림 3C) 발암 수준에서의 위해성 평가는 위해도 등급 <매우 높음> 지역이 시가화 지역과 도로를 대상으로 넓게 분포(195,220.1 m², 19.5 ha)하고 있어 복원 비용을 고려할 때 현실성이 떨어진다.

따라서 위해성 평가 결과, 이 광산은 3만 명당 1명 발암 수준에 위해도 등급 <매우 높음> 지역

Table 3. Grades and areas by the health risk assessment for the abandoned asbestos mine

석면 농도	등 급	등급별 면적(m ²)	총면적(m ²)
0.36%	매우 높음	30,061.5 (6.2%)	483,307.5 (100%)
	높 음	120,892.7 (25.0%)	
	중간	149,000.2 (30.8%)	
	낮 음	144,116.0 (29.8%)	
	매우 낮음	39,237.1 (8.1%)	
0.1%	매우 높음	128,895.9 (6.9%)	1,861,384.0 (100%)
	높 음	433,038.5 (23.3%)	
	중간	638,495.4 (34.3%)	
	낮 음	554,688.6 (29.8%)	
	매우 낮음	106,265.6 (5.7%)	
0.04%	매우 높음	195,220.1 (7.0%)	2,793,656.1 (100%)
	높 음	616,535.4 (22.1%)	
	중간	938,837.1 (33.6%)	
	낮 음	889,578.9 (31.8%)	
	매우 낮음	153,484.6 (5.5%)	

(붉은 색)을 대상으로 현장 방문평가를 통해 일부 지역을 배제한 지역이 석면 제거 및 복원 대상이 될 수 있다.

결 론

이번 연구에서는 위해성 평가를 위해 새로운 평가방식으로 잠재적 위해지수(PIHR)라는 개념을 도입하고 석면이 인체 위해에 영향을 주는 모든 요인들을 고려하여 각 요인들에 적절한 가중치를 부가하였다. 이 PIHR 식에 토양 내 석면농도를 이용하여 GIS로 분석하였다. 그 결과, 충청남도 어느 폐석면 광산의 경우 PIHR 매우 높은 지역은 27.3 ha 정도(전체 면적의 7.8%에 해당)이며, 위해성 평가는 미국 환경보호청이 제안한 IRIS 위험 모델을 적용하여 만 명당 1명(석면농도 0.36% 이상) 평생초과 발암 위험도 기준으로 관리할 경우 발암 위험도가 매우 높은 지역은 3.0 ha 정도이며, 3만 명당 1명(석면농도 0.1% 이상) 기준의 경우 12.9 ha로 평가되며, 10만 명당 1명(석면농도 0.04% 이상)의 경우 19.5 ha로 증가한다. 따라서 폐석면 광산에 대한 복원을 실시한다면 이들 지역이 우선 대상이 된다.

이러한 평가방식은 당연히 새로운 시도이기 때

Fig. 3. Potential maps measured by health risk assessments based on IRIS model for the lifetime excess cancer risk (LECR) (US EPA, 1993). (A) Risks more than 1 in 10,000 (1E-04 level) (asbestos contents in soil > 0.36%). (B) Risks more than 1 in 30,000 (3E-05 level) (asbestos contents in soil > 0.1%). (C) Risks more than 1 in 100,000 (1E-05 level) (asbestos contents in soil > 0.04%).

Fig. 3. continued

문에 인체 위해에 영향을 미치는 요인의 종류, 요인별 점수, 가중치 등 논란의 여지가 있을 것으로 생각된다. 그러나 기존의 ABS 실시에 의한 위해성 평가가 대상 지역의 위해 관리 측면에서는 유용할지 모르나 광해복원을 위한 기준 설정이나 복원범위를 정하는 데는 실용적이지 못한 점을 고려한 어려운 선택임을 밝혀둔다. 또한, PIHR는 많은 현장 조사나 실제 분석 등 추후 개선을 통해 앞으로 계속 수정 보완해 나가야 할 것이다.

사 사

이 연구는 한국광해관리공단의 지원을 받아 수행한 석면광해 위해성 평가방안에 관한 연구용역(2009) 결과의 일부이다. 이 논문을 심사해 주신 고상모 박사와 익명의 심사자에게 감사한다.

참고문헌

최진범 (2009) 석면류 광물의 광종 유형과 그 분류 체

계. 제1기 한국석면아카데미. 한국광물학회, 1-10.

박기학, 조성준, 유영대 (2001) GIS 기법을 활용한 대기 오염관리에 관한 연구(I)-서울시 VOCs 오염도를 중심으로. 한국환경위생학회지, 27, 100-107.

박정준, 신은철 (2008) GIS 기법을 이용한 인천지역의 토양오염도 작성에 관한 연구. 환경복원녹화, 11, 1-11.

박지연 (1998) GIS 공간분석기능을 이용한 울산지역 PM₁₀ 중 중금속 위해성 평가에 관한 연구. 한양대학교 석사학위논문.

(사)한국광물학회 (2010a) 석면광해 복원기준 설정 방안 마련을 위한 용역보고서. 한국광해관리공단, 71p.

(사)한국광물학회 (2010b) 석면광해 위해성 평가방안-위해성 평가방법, 기준설정 및 위해성 평가. 한국광해관리공단, 166p.

(사)한국지하수토양환경학회 (2003) 『토양오염 위해성 평가방안』 마련을 위한 연구용역 - 위해성에 근거한 토양복원전략 모색. 환경부, 221p.

Addison, J., Davis, L.S.T., Robertson, A., and Wiley, R.J. (1988) The Release of Dispersed Asbestos Fibers from Soil. IOM Research Report TM/88/14.

Anatasiadou, K. and Gidarakos, E (2007) Toxicity evaluation for the broad area of the asbestos mine of

- northern Greece. *J. Haz. Mat.*, 9-18.
- Anderson, B.A., Dearwent, S.M., Durant, J.T., Dyken, J.J., Freed, J.A., Moore, S.M., and Wheeler, J.S. (2005) Exposure pathway evaluations for sites that processed asbestos contaminated vermiculites. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 208, 55-65.
- Berman, D.W. and Crump, K.S. (2001) Technical Support Document for a Protocol to Assess Asbestos-Related Risk. Prepared for Mark Raney, Volpe Center, U.S. Department of Transportation, 55 Broadway, Kendall Square, Cambridge, Ma 02142 (Under EPA review).
- Carbone, M., Emiri, S., Dogan, A.U., Steele, I., Tuncer, M., Pass, H.I., and Baris, Y.I. (2007) A mesothelioma epidemic in Cappadocia: Scientific developments and unexpected social outcomes. *Nat. Rev. Cancer*, 7, 147-154.
- Constantopoulos, S.H. (2007) Environmental mesothelioma associated with tremolite asbestos-lessons from the experiences of Turkey, Greece, Croatica, New Caledonia and Cyprus. *Regul. Toxic. Pharma.*, 52, S110-115.
- Dusek, J.M. and Yetman, J.M. (1993) Control and Prevention of Asbestos Exposure from Construction in Naturally Occurring Asbestos. Fairfax County Health Department, 9p.
- Liddell, F.D.K., McDonald, A.D., and MacDonald, J.C. (1997) The 1891-1920 birth cohort of Quebec chrysotile miners and millers: Development from 1904 and mortality to 1992. *Annals Occup. Hygiene.*, 41, 13-36.
- Luo, S., Liu, X., and Mu, S. (2003) Asbestos related diseases from environmental exposure to crocidolite in Da-yao, China: 1. Review of exposure and epidemiological data. *J. Occup. Environ. Med.*, 60, 35-42.
- Price, B. (2008) Exposure to airborne amphibole structures and health risks: Libby Montana. *Regul. Toxic. Pharma.*, 52, S97-109.
- U.S. DHHS (Department of Health and Human Services) (2006) Health Consultation Community Concerns North Ridge Estates Klamath Falls, Klamath County, Oregon.
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency) (1993) IRIS, Asbestos, <http://www.epa.gov/ncea/iris/subst/0371.htm>
- U.S. EPA (2003) Libby Asbestos Site Residential/Commercial Cleanup Action Level and Clearance Criteria Technical Memorandum. DRAFT FINAL Region 8-Denver, CO 80202.
- U.S. EPA (2004a) El Dorado Hills Naturally Occurring Asbestos Multimedia Assessment El Dorado Hills, California Activity-Based Outdoor Air Sampling of Community Park Children's Playground Field Sampling Plan WORKING DRAFT.
- U.S. EPA (2004b) El Dorado Hills Naturally Occurring Asbestos Multimedia Exposure Assessment El Dorado Hills, California Activity-Based Outdoor Air Sampling of Community Park and Schools Field Sampling Plan WORKING DRAFT.
- U.S. EPA (2005) Guidelines for carcinogen risk assessment. EPA/630/P-03/001F, Washington, DC.
- U.S. EPA (2008) Clear Creek Management Area (CCMA) Asbestos Exposure and Human Health Risk Assessment.
- Wagner, J.C. and Berry, G. (1969) Mesotheliomas in rats following inoculation with asbestos. *Brit. J. Cancer*, 23, 567-581.

접수일(2011년 3월 23일), 수정일(1차 : 2011년 3월 28일),
게재확정일(2011년 3월 28일)