석면 공간지식베이스 구축을 통한 석면 노출위험도 작성

황재홍^{1*} · 이병주²

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Construction of an Exposure Risk Map and Spatial Knowledge Base for Asbestos in Korea

Jaehong Hwang* and Byung-Joo Lee

¹Geological Research Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Geological Environment Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

석면은 강한 독성이 있는 물질로 폐암 및 폐와 관련된 질환에 치명적이다. 최근 자연 상태의 석면이 함유된 지역에 대한 정확한 정보의 부재로 석면이 함유된 지역을 효율적으로 관리할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 효율적인 석면관리를 위해서 석면위험지역을 지역적으로 등급화 할 수 있는 자연 상태의 석면 노출위험도를 제작하는 것이다. 이를 위해서는 먼저 석면 위험지역을 평가할 수 있는 주제를 발굴하고 필요에 따라 현지조사를 통해 공간적으로 매핑 할 수 있는 주제도를 작성한다. 또한 석면 데이터에 대한 분석, 표현 및 프로세스들을 정리하여 석면 지식베이스 구축을 하고 석면노출위험을 위한 평가모델을 마련한다. 석면 노출위험도 작성을 위한 공간분석은 문헌 및 전문가의 의견에 기반을 둔 가중치 분석과 불확실한 데이터에 사용하는 퍼지 연산자들을 이용한 공간 중첩분석을 수행한다. 가중치 및 퍼지 연산에 따라 작성된 석면 노출 위험도는 지역을 계층적 관리함으로써 석면 안전 및 보상에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 공간모델링, 석면노출, 위험도, GIS분석

Asbestos is a toxic material that can lead to lung cancer and other diseases. There is no information regarding areas in Korea that contain asbestos in nature; consequently, we need to manage such areas with care. The purpose of this study was to construct a local graded map of asbestos exposure risk based on the natural occurrence of asbestos in rocks. We first developed a means of evaluating the asbestos exposure risk and produced thematic maps based on a field survey. In addition, we constructed a knowledge base for asbestos through analysis, representation and processes about asbestos data and prepare for the development of an evaluation model for asbestos exposure risk. The spatial analysis of asbestos exposure risk is based on a weighted-overlay analysis using expert opinion and the literature, and a fuzzy-overlay analysis using the uncertainty in the data. The map of asbestos exposure risk, compiled according to the weighted and fuzzy operations, is expected to be used to ensure safety and to reduce the risk of exposure to asbestos.

Key words : spatial modeling, asbestos exposure, risk map, GIS analysis

서 론

석면은 강한 독성을 지닌 발암물질로서 흡입하게 되면 폐암, 석면폐, 악성중피종 등 폐 관련 질환의 치명적인 발병원으로 알려지면서 세계 각국에서 사용이 금지되어 있지만, 아직 대다수의 국가에서는 무방비로 노출되어 있

는 실정이다. 우리나라에서도 최근 자연 상태의 석면 함유 지역에 대한 정확한 정보의 부재로 석면 함유 지역에서의 개발 행위가 이루어지고 있으며 이로 인한 석면 오염 확산 문제가 논란이 되고 있다(강동목, 2009; 윤충식, 2009).

석면은 자연 상태에서 침상의 형태로 산출되며 직접 볼 수 있을 정도로 모양과 크기가 뚜렷한 경우도 있다. 사문

*Corresponding author: hwangjh@kigam.re.kr

석 계열이나 각섬석 계열은 자연에서 서로 생성방식이 다르고, 같은 계열이라 할지라도 내부에서의 생성방식이 다양하다. 석면은 지각변동의 몇몇 단계를 거쳐서 형성되는데 모암의 일부가 열수나 고열로 용융된 습곡현상에 따른 압력 등의 영향을 받아 용해되고, 마침내 냉각된 후 재결정되어 만들어진다. 이런 과정에서 가해진 열이 어느 정도인지, 용해된 열수 용액은 얼마동안 콜로이드 상태로 있었는지 그리고 냉각시의 여러 조건들이 석면형성에 결정적인 역할을 한다. 예를 들면 온석면(chrysotile)은 사문암의 열수용액, 또는 모암에서 사문암을 용해하고 들어온 열수가 모암의 균열을 채우고, 재결정되어 광범위하게 만들어진 것이다. 그리고 모암의 틈새에 잠자고 있던 대부분의 석면은 노천에서 채굴되며 광맥을 따라 지표면의 암석을 제거하고 계단식 형태로 노출된 것이다. 우리나라는 2009년부터 석면종합대책을 수립하고 석면 사용을 전면 금지하고 있지만, 아직까지 폐석면 광산의 정확한 파악과 폐석면 광산의 적절한 복구 및 관리가 이루어지지 않아 심각한 환경오염원이 되고 있다. 그러므로 폐석면 광산 인근 지역의 안전과 건강을 위해서 종합적이고 체계적인 대책을 마련할 필요성이 대두되었다(한국광물학회 외, 2010; 이용진 외 2010).

석면광산 관련 자료는 과거 일제 강점기에 제작된 조선광물지, 광업요람, 자원총람 등이 있으며 석면관련 지질

자료 자료를 보유한 국내기관으로는 한국광물자원공사, 한국지질자원연구원, 한국광해관리공단 등이 있다. 한국광물자원공사는 광업 신청 시 제출된 시추보고서를 토대로 석면을 비롯한 주요 광물자원에 대한 국내 분포정보를 보유하고 있으며, 광산위치, 시추위치 등을 알 수 있는 광산GIS가 구축되어 있다. 한국지질자원연구원은 국내 지질특성별 다양한 지질, 광물, 지화학정보 및 여러 지질정보시스템들을 보유하고 있다. 한국광해관리공단은 국가 광구지적별로 폐광 및 가행광에 대한 광해자료 및 석면관련 조사 자료를 보유하고 있다.

따라서 본 연구에서는 충남 소재의 석면광산 일대를 연구의 대상으로 정하고 효율적인 석면관리를 위해서 석면 위험지역을 평가할 수 있는 주제 발굴을 통한 주제도를 작성하고 지공간 평가기준을 마련한다. 아울러 기층치 및 퍼지 이론에 기반을 둔 공간분석을 수행하여 석면 노출 위험도를 작성한다.

연구방법 및 연구지역

석면 노출위험도 작성을 위한 연구방법은 다음 Fig. 1과 같이 연구 계층도에 따라 수행하였다. 연구의 최종목표는 석면 노출 정도를 지도화 하는 것이다. 먼저 공간데이터 수집을 위하여 원격탐사자료, 수치지도, 토양도 등의 공

Fig. 1. Hierarchy structure of map construction for asbestos exposure risk.

간데이터를 수집하고 획득할 수 없는 중요 데이터는 현지조사를 통한 석면 오염원 조사 및 정밀지질조사를 통해서 획득한다. 더불어 수집데이터의 범위를 석면 오염원, 석면이동 잠재성, 석면 노출가능성 목록으로 한정하였다. 석면노출 위험지에 대한 주제 및 평가 기준은 문헌에 제시한 자료 분류 기준을 참고하여 공간적 매핑이 가능한 요소를 추출하고 중요한 주제는 현지조사를 통해서 지도화하였다(이민희, 2010; 최진범 외, 2011). 그리고 주제도에 따른 평가 기준을 선정하고 가중치 및 퍼지이론에 따른 공간분석을 수행한다.

인공지능분야에서 규칙을 기반으로 하는 퍼지이론(fuzzy theory)은 부정확성을 허용하여 과거에 풀 수 없었던 문제들을 해결할 수 있는 방안을 마련하였다. 퍼지 집합론은 불확실성(uncertainty), 확실한 경계가 규정되어 있지 않은 개념의 모호성(vagueness)에 대해 다루고 있으며 불확실하고, 신뢰할 수 없는 지식을 표현하고 추론하기 위한 다양한 개념들과 기법들이 포함되어 있다. 퍼지이론은 경계가 모호하거나 불완전한 데이터를 사용하는 규칙을 만들어 낼 수 있다. 이러한 퍼지집합 이론은 지질도와 같은 GIS 데이터 통합에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Dixon, 2005; Chang et al., 2008; Pathak and Hiratsuka, 2011).

조사 대상 광산 주변의 1:50,000 축척 지질도는 연구 대상 광산 일대의 경우 한국지질자원연구원에서 발간된 대흥도폭과 청양도폭을 근간으로 작성되었다(島村, 1931;

엄상호와 이문성, 1963). 정밀지질도 작성을 위해서는 암석학, 광물학, 구조지질학 등의 지질전문가에 의한 충분한 야외지질조사와 노두 조사에서 채취된 암석시료에 대한 분석 및 해석이 필수적이다. 본 연구를 통하여 실시된 석면 광산 주변 야외지질조사와 암석시료의 분석에 기반을 두어 1:50,000 축척보다 세밀한 규모의 정밀지질도를 작성한다.

Fig. 2(a)는 우리나라 1:50,000 지질도에서 석면을 포함하는 암석들을 추출하여 전국 규모로 나타낸 것이다. 우리나라 지질도 상에 나타나는 석면이 포함된 주요 암종들은 초염기성암, 석회규산염암 등이 있다. 세부 암종들로는 감람암, 사문암, 황반암, 석회규산염암, 뉴나이트 등이 있다. Fig. 2(b)는 연구 대상 광산 및 그 일대의 위성사진이다(네이버 지도 2011). Fig. 2(b)는 연구 대상 광산 및 그 일대를 표시한 것이다. 연구지역인 석면광산 일대는 충청남도 홍성군, 예산군, 청양군에 걸쳐 분포하고 있다.

현지 지질조사를 통한 자료 수치화

정밀지질조사를 통한 수치지질도 작성

연구대상 광산 주위 지질은 선캄브리아기 각섬석편마암(덕정리 편마암), 변성퇴적암류인 운모편암류, 월현리층, 유구 화강편마암, 대동계 지층인 백운사층과 운모편암 내에 분포하는 사문암 및 제4기 충적층으로 구성된다(Fig. 3). 덕정리 편마암은 선캄브리아기 지층 중 월현리

Fig. 2. Index map (a) and satellite image (b) of the study area.

층을 전체적으로 관입하고 있고, 또한 시대미상의 화강편마암류와 편상화강암, 그리고 백악기의 여러 화성암류에 의하여 관입되고 있다. 편마암 자체의 엽리 내지 편리 발달 상태는 지역에 따라 상당한 차이를 나타낸다. 시대미상의 화강편마암은 전체적으로 월현리층과 덕정리편마암을 관입하고 있으나 전체적으로 타암체와의 경계가 뚜렷하지 못하다. 주로 알카리장석, 사장석 등의 장석류, 석영, 흑운모로 구성되어 있다. 운모편암류는 갈회색을 띠는 세립~중립질암으로 주구성 광물은 장석, 흑운모이며 소량의 석영 및 백운모가 포함되기도 한다. 노두 노출은 비교적 양호한 편이나 상당히 풍화되어 있으며 변성도가 비교적 낮아 전체적으로 편리발달이 미약하다. 분포상 월현리층(PCw)에 대비될 수 있다. 화강편마암은 분포상 시대미상 화강암 또는 덕정리 편마암(PChd)에 대비될 수 있다. 각섬석편암은 운모편암과의 경계부에 분포되며 운모편암과의 접촉부에서는 장석 및 운모의 양이 현저히 증가한다. 각섬암은 각섬석편암의 중심부에 분포하며 편상 또는 괴상이다. 각섬석편암은 풍화가 심하며 노두노출이 극히 불량하며 신선한 노두 관찰이 힘들고 풍화토 내에서는 흑운모의 변질편이 포함되어 있는 데 반하여, 각섬암은 풍화토 내에 돌출된 노두를 형성하며 순수한 각섬암으로 분포하고 각섬석편암과 점이적인 변화를 보이는 곳을 관찰할 수 없는 점으로 보아 각섬암은 각섬석편암과는 별개

로 후기의 관입암체일 위험도 있다. 사문암은 운모편암 내에 부존하며 주위의 운모편암 편리방향과 대체로 일치하게 분포되며 사문암내에서는 사문암의 분포방향과 일치하는 다수의 소단층이 발달되고 단층마찰면(Slickenside)이 흔히 관찰된다. 또한 사문암내에 발달되는 열극을 따라 수많은 방해석 세맥이 피막되어 나타난다. 암녹색을 띠는 치밀한 암석으로서 변질된 사문암은 흑회색으로 지방감을 띠며 다소 연질감이 있으며 전체적으로 괴상으로 분포한다.

Table 1은 주향, 경사 등의 연구대상 광산 일대의 노두 조사 시료 채취 요약이다. 현지 지질조사는 조사 대상 지역 전체의 지질학적 암상 분포를 먼저 확인한 후, 광산 주변의 사문석, 석회석, 각섬석계의 지층 등의 암석 노두를 우선 채취 지점으로 선정하고 그다음으로 연구지역 광산 인근의 정방향 4km 이내 지역에서 암석 내 석면류 물질의 함유 개연성이 높은 화강암 또는 변성암의 경계부 변질대와 초염기성 암맥이 분포하는 지역을 시료 채취 지점으로 선정하였다. 아울러 문헌조사 및 노두 조사 지점 선정 결과를 바탕으로 현장에서 광산 및 주변 지역의 노두를 확인하여 지층 및 암석 분포를 확인하고 석면광물 조제여부를 조사하였다. 현장조사시 암석의 주요 구성광물 및 미세구조를 관찰하였으며, 광물의 변질 특성을 파악하고 석면의 존재형태를 조사하였다.

기 발간된 대흥도폭에서는 석면을 함유하는 초염기성

Fig. 3. Digital geological map based on a detailed geological survey in the study area.

Table 1. Summary of outcrop survey in the study area.

Sample ID	TM X	TM Y	Strike	Dip	Rock
N-01	179871.9531	334489.8559	N60E	70NW	Serpentinite
N-02	179838.9091	334533.2111	N60E	80SE	Serpentinite
N-03	179936.3950	334465.2926			Serpentinite(ultrabasic rock)
N-04	179638.7454	333985.4929	N75E	75SE	Hornblende schist
N-05	180133.6167	334915.3716	N40E	88NW	Biotite schist
N-06	180158.4558	334809.8935			Serpentinite(mine area)
N-07	179587.0318	334089.9262	N50E	40NW	Serpentinite
N-08	179654.2656	334108.6322			Hornblende schist
N-09	178653.9824	334267.5157	N15E	70NW	Biotite Hornblende schist
N-10	178852.5812	334153.8379	NS	60W	Mica schist
N-11	178578.5249	335987.7304			Sedimentary rock
N-12	179976.0522	333410.9929			Quartz-feldspar gneiss
N-13	181707.2051	333934.2528	N15E	80NW	Sedimentary rock
N-14	181679.6828	334051.9384	60E	60NW	Mica schist
N-15	181451.4091	334548.4582	N30E	80SE	Schist
N-16	180919.0613	333226.8673			Granite gneiss
N-17	181541.9469	334995.4699	N10W	75NE	Limestone
N-18	181853.1188	334731.8126	N50E	40NW	Sedimentary rock
N-19	181012.1019	334792.4366			Granite gneiss
N-20	181300.4844	336003.5918			Granite gneiss

Table 2. Summary of asbestos contaminant sources in the study area.

Contaminant source	Geometry type	Latitude	Longitude	Contamination grade	Current usage
Pithead 1	Point	36°30′	126°46′	3	Mountain
Quarry site	Point	36°30′	126°46′	3	Quarry
Past concentrator site of pithead 1	Point	36°30′	126°46′	2	Rice paddy
Past mine-mill site of pithead 1	Point	36°30′	126°46′	1	Fallow land
Estimated pithead 3	Point	36°30′	126°46′	1	Forest
Estimated pithead 2	Point	36°30′	126°46′	1	Forest

암맥인 사문암의 분포가 표시되지 않아, 본 조사에서는 이 사문암을 추정하여 지도에 표시하였다. 이 사문암은 200-300 m 정도의 폭으로 연장이 약 2 km 가까이 추적되었다. 뿐 만 아니라 금번 조사에서는 기 발간 대흥도폭에서 덕정리편마암, 월현리층, 유구화강편마암 등으로 표시된 범례를 실지로 석면 평가에 합당한 암상위주의 편마암류, 편암 및 화강편마암 등 암상 위주의 범례를 작성하고 각각의 분포도 재조사하여 Fig. 3과 같이 최종적으로 연구 지역의 수치지질도를 작성하였다.

현지조사를 통한 석면 오염원 위치도 작성

석면 오염원 조사는 연구지역 문헌조사를 수행하고, 연구대상 광산 일대의 정밀지질조사와 병행하여 석면의 모암을 따라 조사하였다. Table 2는 연구지역의 석면오염원 위치에 대한 것이며, 오염원 명칭, 오염원 위치 및 현재 사용 용도에 따른 위험 등급을 산정한 것이다. Fig. 4는 Table 2를 바탕으로 석면오염원 위치도를 수치화하였다.

갱구 1지역은 광산 회사의 채석장 부지와 갱구에서 흘러나오는 갱내수로 인한 오염 확산 개연성이 높아서 오염

Fig. 4. Digital map of asbestos contaminant sources in the study area.

점수를 3점으로 산정하였다. 강구 1지역의 채석장 부지는 사문석채취가 진행 중으로 채석장 사면은 급경사로 외부로의 오염 확산 가능성이 크므로 오염점수를 3점으로 산정하였다. 강구 1지역의 갱내수는 유출되어 아래에 있는

작은 저수지로 유입되어 논으로 확산될 개연성이 있으므로 2점을 산정하였다. 강구1의 과거 선광장 부지는 강구로부터 20~30 m정도 떨어져 있으며 현재는 객토되어 벼농사로 경작되어 별다른 오염원이 되지 않아 1점을 산정하였다. 강구 1의 과거 채분소 부지 역시 현재는 다른 토질로 복토되어 나대지로 활용되므로 1점을 산정하였다.

강구 2 지역과 강구 3지역은 사문암 지역으로 갭 입구의 광미와 폐석더미는 식생이나 피복 상황이 양호하며, 광미와 폐석더미 위에 식생이 강하게 분포하며, 낙엽 등에 의한 피복도가 좋다. 따라서 장마철과 같이 강우강도가 높아도 주변으로 오염이 확산될 가능성이 적으므로 강구 2 지역과 강구 3지역은 1점을 산정하였다.

석면 공간 지식베이스 구축

석면 공간지식베이스 구축은 다음 Fig. 5와 같은 구축 프로세스에 따라 수행하였다. 석면 오염원 지역(Mining Contaminant Source)으로는 연구대상 광산 인근의 과거 광산 시설물인 강구, 채석장, 선광장, 채분소 등이 있으며, 이 지역을 포인트 자료로 구축하고 다중링 버퍼 도구를 이용하여 다중 버퍼링 및 10 m 해상도로 래스터 변환하고 연구지역으로 마스크추출 및 심별화를 수행하였다.

Fig. 5. Process of constructing the asbestos spatial knowledge base.

석면을 포함하고 있는 암석(Rock included asbestos)으로는 사문암, 각섬암, 변성석회암 등이 있으며 이러한 암석들을 중심으로 야외지질조사를 통해서 연구대상 광산 일대의 정밀 지질도를 제작하였다. 제작된 지질도에서 석면의 모양이 되는 질석과 사문암 폴리곤을 추출하고 다중링 버퍼링 및 래스터 변환하고 연구지역으로 마스크 추출 및 심별화를 수행하였다.

토양배수도(Soil drainage)는 토양도(1:25,000) 중 배수능력 특성에 따라 등급화하고, 마스크 추출 및 3등급으로 재분류 및 심별화 하였다.

경작지(farmland)는 농업활동이 활발할수록 석면에 노출될 가능성이 높다. 경작지는 위성영상으로부터 추출된 토지이용도에서 나지, 산림, 논, 밭 등을 추출하고 마스크 및 심별화 작업을 수행하였다.

시가화 지역(urbanization)은 사람들의 활동이 많은 지역이므로 경작지와 마찬가지로 사람들이 석면에 노출될 확률이 높다. 위성영상으로부터 시가화 지역(주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설, 교통지역, 공공시설지역)이 추출되었으며, 추출된 지역은 폴리곤 변환, 다중 버퍼링 작업을 수행한 후, 다시 래스터화, 마스크 및 심별화 작업을 수행하였다.

도로로부터의 거리 또한 시가화 지역으로부터의 거리와 같이 사람들의 활동무대이므로 사람들이 석면에 노출될

가능성이 높다. 1:5,000 수치지도로부터 도로를 추출하고 다중링 버퍼 도구를 이용하여 50 m, 100 m, 150 m로 버퍼링 및 10 m 해상도로 래스터 변환하고 연구지역으로 마스크 추출 및 심별화를 수행하였다.

향분석도(aspect)는 1:25,000 DEM을 이용하여 제작하고 연구지역을 마스크 추출하고 재분류 및 심별화 작업을 수행하여 작성하였다. 2007~2010년도 기상청연보에 의한 최대풍속자료를 종합하면 청양 지역은 서남서(SWS) 방향향이 주풍속 방향이었으며, 이 속성을 향분석도와 연계하여 최대풍향분석도를 제작하였다(기상청, 2011).

사면도(slope) 역시 1:25,000 DEM을 이용하여 제작하고 연구지역을 마스크 추출하고 재분류 및 심별화 작업을 수행하여 작성하였다. 사면은 향과 마찬가지로 석면 노출에 따른 석면 물질의 이동과 관련이 깊다. 경사면이 급할수록 바람, 우수, 강수에 영향을 많이 받으므로 석면 물질이 재비산한다.

석면 노출 위험도 작성을 위한 평가 모델

석면 노출위험도 평가 모델을 제작하기 위해서는 먼저 각 주제도들에 대한 평가 기준을 설정해야 한다. 아울러 평가 척도 역시 동일한 척도로 제작하여야 한다. Fig. 6은 평가 등급 및 가중치 설정에 따른 평가 모델이다.

Fig. 6. Evaluation model for asbestos exposure risk map using a weight and a grade.

각 주제도들은 서로 다른 평가 기준 및 평가 척도 (evaluation scale)들을 가지고 있으므로 평가 등급을 심별화하여 3등급으로 구성하였다. 석면 오염원도는 연구대상 광산 인근의 과거 광산 시설물인 갱구, 채석장, 선광장, 제분소를 다중링 버퍼링을 통해서 500 m 이내, 500 m~1,000 m, 1,500 m 이내로 3등급으로 분류하고, 영향권내 석면오염원의 밀집도를 도시하여, 석면 오염원에 따른 거리 영향권별 잠재적 위험성을 구별할 수 있다. 석면을 포함하고 있는 사문암, 각섬암, 변성석회암 등의 암석들은 다중링 버퍼링을 통해서 500 m 이내, 500 m~1,000 m, 1,500 m 이내로 3등급으로 분류하였다. 토양배수도는 기존의 6등급을 3등급으로 재분류하였다. 암석노출지(49), 매우양호(1), 매우양호 내지 양호(2)는 3점을, 양호(3), 약간 양호 내지양호(4)는 2점을, 그리고 불량(5), 매우불량(6)은 1점으로 3등급 분류하였다. 경작지는 농업활동이 있는 지역으로 농업활동이 활발할수록 석면에 노출될 가능성이 높다. 경작지는 위성영상으로부터 추출된 토지피복도에서 나지, 산림, 논, 밭 등을 추출하여 6등급으로 만들어진 것을 3등급으로 재분류하였다. 밭, 비닐하우스, 초지, 기타 재배지 및 나지와 같이 농업활동이 활발한 지역을 3점, 논,의 경우 2점, 산림의 경우 1점으로 3등급 분류하였다. 시가화 지역은 사람들의 활동이 많은 지역이므로 경작지와 마찬가지로 사람들이 석면에 노출될 확률이 높다. 위성영상으로부터 시가화 지역(주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설, 교통지역, 공공시설지역)은 추출되고 시가화지역으로 부터의 거리는 시가화 지역으로부터 100 m 이내지역을 3점, 시가화 지역으로부터 100m에서 200m 이내지역을 2점 그리고 시가화 지역으로부터 200 m에서 300 m 이내 지역을 3점으로 3등급 분류하였다. 도로로부터의 거리 또한 시가화지역으로부터의 거리와 같이 사람들의 활동무대이므로 사람들이 석면에 노출될 가능성이 높다. 거리버퍼는 도로로부터 50 m 이내지역을 3점, 도로로부터 50 m에서 100 m 이내지역을 2점 그리고 도로로부터 100 m에서 150 m 이내지역을 3점으로 3등급 분류하였다. 풍속정보를 포함한 향분석도는 동북동(ENE) 방향(67.5°)의 최대 풍속(북북동 22.51°~동남동 112.50°)을 1점, 남동(SSE) 방향(157.5°)의 최대 풍속(동남동 112.51°~남남서 202.50°)과 북북서(NNW) 방향(247.5°)의 최대 풍속(서북서 292.51°~북북동 22.50°)을 2점, 그리고 서남서(WSW) 방향(247.5°)의 최대 풍속(남남서 202.51°~서북서 292.50°)은 최고점인 3점으로 3등급 분류하였다. 사면도는 향과 마찬가지로 석면 노출에 따른 석면 물질의 이동과 관련이 깊다. 경사면이 급할수록 바람, 유수, 강수에 영향을

많이 받으므로 석면물질이 재비산한다. 사면도는 5도 미만을 1점, 5도에서 10도를 2점 그리고 10도 이상을 3점으로 3등급 분류하였다.

이처럼 모든 주제도의 등급을 3등급으로 구성하고 2점씩 증가하는 5등급 평가척도를 이용하였다. 아울러 가중치는 2단계에 걸쳐서 부여하였는데 1단계 가중치 300%로 각 주제도별로 부여하였다. 그리고 2단계 가중치는 100%로 석면 오염원은 20%, 석면이동 잠재성은 40%, 석면 노출가능성은 40%로 설정하였다. 이렇게 가중치를 부여한 중첩분석을 수행하여 석면 노출위험도 제작할 수 있다.

공간 분석을 통한 석면 노출 위험도 작성

석면 노출위험도는 평가 모델에서 제시한 가중치 및 퍼지 공간분석을 수행하였다. 가중치에 따른 공간분석은 문헌 및 전문가의 의견에 기반하여, 공간 특성 기반 평가모델에 따라 분석을 수행하였다. 아울러 퍼지 연산을 수행하여 분석결과가 적정결과에서 크게 벗어나지 않도록 퍼지 연산을 통해 공간데이터를 통합하여 석면 노출위험도를 작성하였다. Fig. 7은 평가척도를 5등급으로 표준화하고 주제도를 통합시켜 표현한 석면 노출위험도이다.

Fig. 7의 (b)는 2단계에 걸친 가중치에 따른 지도중첩 연산을 통해 작성된 석면 노출위험도이다. 아울러 Fig. 7의 (a)는 and 연산자를 이용한 퍼지 연산 결과이며 Fig. 7의 (c)는 or 연산자를 이용한 퍼지연산 결과이다. and 연산자를 이용한 퍼지연산 결과는 가중치 연산결과와 비교해서 평가등급의 위험도가 최소가 되고 안전도는 최대로 해석된다. 반면, or 연산자를 이용한 퍼지 연산 결과는 가중치 연산결과와 비교해서 평가등급의 위험도가 최대가 되고 안전도 최소로 해석된다. 따라서 가중치 연산 결과를 중심으로 and 연산자를 이용한 퍼지 연산 결과는 석면 노출위험도에 대한 위험도를 최대한 긍정적으로 판단할 때이며, or 연산자를 이용한 퍼지 연산 결과는 석면 노출위험도에 대한 위험도를 최대한 부정적으로 판단할 때 적용할 수 있을 것이다.

Table 3은 분석된 석면 노출위험도의 위험등급에 따른 면적분포이다. 위험 등급 중 매우위험 항목을 비교해보면, 가중치 연산이 적용된 석면 노출위험도는 13%를 점하는데 비해, and 연산자를 이용한 퍼지연산이 적용된 석면 노출위험도는 0.16%를 점한다. 아울러 or 연산자를 이용한 퍼지 연산이 적용된 석면 노출위험도는 0.16%를 점한다.

Fig. 8은 가중치와 함께 and 연산자를 이용한 퍼지연산을 수행하여 주제도를 통합시킨 석면 노출위험도이다.

Fig. 7. Integrated map showing the asbestos exposure risk based on weighted and fuzzy operations: (a) fuzzy and operation, (b) weighted operation, and (c) fuzzy or operation.

Table 3. Areal distribution (km^2) of the various grades of asbestos exposure risk.

Grade	Weight operation		And operation		Or operation		And + Weight operation		Or + Weight operation	
	Area	Percent	Area	Percent	Area	Percent	Area	Percent	Area	Percent
Very Hazardous	0.5895	13	0.0072	0.16	0.8973	19.81	0.0585	1.29	0.8541	18.86
Hazardous	1.6839	37.2	0.2268	5.01	2.0385	45.00	0.6912	15.26	0.684	15.10
Slightly Safe	0.9666	21.3	1.3014	28.73	1.431	31.60	2.5389	56.05	1.5597	34.43
Relatively Safe	1.0296	22.7	0.8145	18.0	0.1431	3.16	1.1583	25.57	1.3914	30.72
Safe	0.2601	5.8	2.1798	48.1	0.0198	0.43	0.0828	1.83	0.0405	0.89
Sum	4.5297	100	4.5297	100	4.5297	100	4.5297	100	4.5297	100

Fig. 8. Integrated map showing the asbestos exposure risk using both weighted and fuzzy operations: (a) fuzzy and operation plus weighted operation, (b) weighted operation, and (c) fuzzy or operation plus weighted operation.

마찬가지로 평가척도를 5등급으로 표준화하였다.

Fig. 8의 (a)는 평가모델에 있는 주제도들을 퍼지 and 연산을 수행한 후 가중치를 수행하여 작성하였고 Fig. 8의 (c)는 평가모델에 있는 주제도들을 퍼지 and 연산을 수행하고 가중치 및 퍼지 or 연산을 차례로 수행하여 작성하였다.

가중치와 함께 and 연산자를 이용한 퍼지 연산 결과는 Fig. 7의 (a)에 있는 and 연산자를 이용한 퍼지 연산 결과와 비교하면 Table 3과 같이 안전등급은 급격히 감소하고 이외의 등급은 모두 증가하였다. 반면 가중치 연산 결과와 비교하면 상위 및 하위 등급은 증가하고 중간등급이 급격히 증가하였다.

결 론

자연 상태의 석면이 함유된 지역에 대한 정확한 정보의 부재로 석면이 함유된 지역을 효율적으로 관리할 필요가 있다. 본 연구에서는 데이터 분석, 표현 및 처리 프로세스들을 정리하여 석면 지식베이스를 구축하고 석면 노출 위험도 작성을 위한 평가 모델을 마련하였다. 이 평가 모델은 석면 노출 위험도 작성을 위한 하위 모델을 목록화하고 2단계의 가중치를 부여하였다. 석면 노출 위험도 작성을 위한 공간 분석은 문헌 및 전문가의 의견에 기반을 둔 가중치 분석과 불확실한 데이터에 사용하는 퍼지 연산자들을 이용한 공간 중첩 분석을 수행하였다. 아울러 가중치 분석과 더불어 퍼지 연산을 이용한 공간 분석을 사용하여 적정 결과에서 크게 벗어나지 않게 공간데이터를 통합한 석면 노출 위험도를 작성하였다. 가중치 및 퍼지 연산에 따라 작성된 석면 노출 위험도는 지역을 계층적으로 관리함으로써 석면 안전 및 보상에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 기초기술연구회 지상관측 위성자료 clearing house 구축과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강동목, 2009, 환경성 석면노출의 건강영향, 한국보건학회지, 35(2), 71-77.
 기상청, 2011, http://www.kma.go.kr/weather/observation/data_monthly.jsp(기상청연보), 기상청.

- (사)한국광물학회, 한국광해관리공단, 2010, 석면 표준분석법: 토양물 중 석면함유량 분석, 23(2), 171-183.
 윤충식, 2009, 석면과건강에 대한 이슈, 한국환경보건학회지, 35(5), 426-432.
 업상호, 이문성, 1963, 한국지질도 대홍도폭(1:50,000), 상공부 국립지질조사소.
 이민희, 2010, 국내 폐석면광산 정밀조사 우선순위 결정을 위한 평가기준 마련, 자원환경지질학회지, 43(4), 393-400.
 이용진, 김용배, 장은철, 조태진, 박찬호, 이영기, 안연광, 유성, 조성준, 최재웅, 2010, 일부 석면광산 인근 주민의 흉막반 양성률: 전산화 단층 촬영(CT) 소견, 대한 직업환경의학학회 2010년 추계학술대회, 431-432.
 최진범, 손일, 노진환, 2011, GIS 기법을 이용한 폐석면광산의 위해성 평가, 한국광물학회지, 24(1), 43-53.
 島村, 1931, 한국지질도 청양도폭(1:50,000), 조선총독부 지질조사소.
 Chang, N.-B., Parvathinathan, G., and Breeden, J.B., 2008, Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region, Journal of Environmental Management, 139-153.
 Dixon, B., 2005, Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool, Applied Geography, 327-347.
 Pathak, D.R. and Hiratsuka, A., 2011, An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making, Journal of Hydro-environment Research, 5, 63-77.

원고접수일 : 2011년 12월 2일

수정본채택 : 2011년 12월 22일

게재확정일 : 2011년 12월 22일

황재홍

한국지질자원연구원 국토지질연구본부
 305-350, 대전시 유성구 과학로 92
 Tel: 042-868-3058
 Fax: 042-868-3413
 E-mail: hwangjh@kigam.re.kr

이병주

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
 305-350, 대전시 유성구 과학로 92
 Tel: 042-868-3042
 Fax: 042-868-3413
 E-mail: bjlee@kigam.re.kr