

국내 폐석면광산 정밀조사 우선순위 결정을 위한 평가기준 마련

이 민 희*

부경대학교 지구환경과학과

Study on the Evaluation Standards for the Ranking of the Precise Investigation to Asbestos-Contaminated Abandoned Mines, Korea

Minhee Lee*

Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

1. 서 론

전 세계적으로 석면에 의한 환경피해가 심각한 것으로 나타나고 있으나, 석면 오염 부지의 오염도 평가를 위한 정량적인 평가기준은 국내외 모두 아직 마련되어 있지 않다. 우리나라는 현재까지 폐석면광산의 정확한 수도 파악하지 못하고 있는 실정이며, 알려진 폐석면광산의 대부분이 적절한 복구나 관리가 이루어지지 않아 심각한 환경오염원으로 작용하여왔고, 2009년에 와서야 환경부에서 오염이 심각한 것으로 판단되는 국내 20개 광산들을 대상으로 체계적인 석면 오염 개황조사가 시작되었다(NIER, 2009). 본 연구에서는 개황조사를 마친 국내 폐석면광산의 오염도를 정량적으로 파악하고, 향후 정밀조사 우선순위 결정을 위해 반드시 필요한 국내 폐석면광산 오염 평가 기준안을 마련하였다.

토양정밀조사 선정, 복원우선순위선정, 국가우선순위 선정, 위해성 평가 등과 관련된 16개의 국외 인용문헌과 7개의 국내 인용문헌을 포함해 총 23개의 국내외 문헌을 참고하였고, 국내 20여개 폐석면광산 개황조사 결과를 바탕으로 평가 기준안의 27개 세부 평가항목을 선정하였다. 평가영역을 크게 오염원특성(Contaminant characteristics) 평가, 오염분포현황(Contaminant migration potential) 평가, 노출가능성(Exposure possibility) 평가의 3가지 영역으로 분류하였으며, 각 영역은 다시 3개 분야로 나누어 각 분야별 세부 평가항목을 선정하고 항목별 중요도에 따라 가중치를 부여하여 폐석면광산 정밀조사 우선순위 결정을 위한 정량화된 평가 기

준안을 제시하였다. 본 평가 기준안에 포함된 세부 평가항목 및 가중치 평점들은 향후 국내 폐석면광산 오염도 평가 및 복원 우선순위 결정에도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 폐석면광산 오염도 평가와 관련된 국내외 기준

석면오염도 및 부지 복원 사업을 결정하는 정량적인 평가 기준은 국내외 모두 아직 확립되어있지 않으며, 특히 국내 토양 및 수질 오염 분석 대상 항목에 석면은 제외되어 있어서 석면 오염 부지를 관리하는 법적 근거조차 없는 실정이다. 본 연구에서는 선진국 및 국내에서 토양오염 부지의 오염도 평가 및 우선순위 선정을 위해 마련되어 있는 평가 기준안들을 검토하였으며, 이들 중 가장 보편적으로 사용되는 평가 체계를 국내 석면 정밀조사 우선순위 결정을 위한 평가 기준안을 마련하는데 적용하였다.

2.1. 국외 오염부지 우선순위 결정 및 복원순위 기준 사례

미국환경보호청(USEPA)은 '종합적 환경반응, 보상 및 책임에 관한 법(CERCLA; Comprehensive Environment Response, Compensation, and Liability Act or 'Superfund Act')'에 근거하여 미국 내 유해물질과 연관된 부지의 사후관리 및 복구 사업을 수행하고 있으며, 1992년에 미국환경청(USEPA)에서 국가우선목록

*Corresponding author: heelee@pknu.ac.kr

(NPL, National Priorities List) 선정을 위해 작성한 '유해물질 오염 지역 복원 우선순위 산정법(HRS; Hazard Ranking System)'을 제도화하여 지금까지 수십만 개로 추정되는 오염 부지의 우선순위를 결정하고 있다(USEPA, 1989a; USEPA, 1990; USEPA, 1991; USEPA, 1992a; USEPA, 1992b; ASTM, 2004). HRS는 자체적으로 개발한 유해물질의 4개 노출경로(지하수, 지표수, 공기 및 토양)에 의한 오염 누출 가능성을 점수화하는 방법으로, 노출경로별 세부 평가항목을 선정한 후 각 항목에 대하여 점수를 부여하고(각 경로별 최대 100점으로 표준화함), 경로별 점수를 제곱한 수치의 평균값에 대한 제곱근(root square)으로 계산하여 각 오염 부지에 해당하는 최종 점수(S 값: Site score)를 계산한다. 평가 대상 광산의 S 값이 28.50 이상인 경우에는 NPL(국가우선목록)에 등록되고, 토양선별지침(SSG; Soil Screening Guidance)에 따라 토양선별기준이상인 경우 정밀조사와 복원 계획을 수립하게 된다(USEPA, 1989b; Kelly, 1993).

캐나다는 자국의 오염지역을 평가하기 위해 1992년부터 '오염지역에 대한 국가 등급시스템(NCS; National Classification System for contaminated sites)'을 개발하여 활용하고 있다(CCME, 2008). NCS는 평가항목을 크게 3영역, 즉 오염물질의 특성, 노출경로 및 노출수용체로 나누어 영역별 비슷한 비중의 점수(각각 33-34점)를 부여하고 있으며, 이들을 합산한 점수(총점 100점)로 오염 지역을 평가한다. 각 세부 평가항목에 대하여 기본 평가 방법은 평점 가산식이며, 평가 점수에 따라 모든 평가 대상 지역을 1, 2, 3, N, I 등급으로 분류한다. 평점이 70-100점에 해당되는 1등급의 경우 인간과 환경에 대하여 유해한 것으로 판단되어 긴급 복구조치가 취해진다.

네덜란드의 경우 토양에 존재하는 유해물질에 의해 유발되는 인간건강의 위해성을 평가하여 오염 부지의 오염정도를 평가하는 'CSOIL 모델(Dutch model for the assessment of the risks to human health caused by hazardous substance in land via various exposure pathways)'이 적용되고 있다(van Sandick and Keuzenkamp, 1994; van den Berg, 1993). CSOIL은 노출경로를 섭취, 접촉, 흡입으로 구분하고, 이를 다시 9개의 소분류로 구분하여 최종 생태위해농도(SRC_{eco}; Serious Risk Concentrations for Ecosystem)를 산정하고 이에 근거하여 부지 오염 정도를 평가하고 있다. 영국과 독일은 오염 부지 복원을 위한 정량적인 평가기준을 마련하고 있지 않으나 네덜란드와 비

슷하게 위해성평가를 중심으로 오염 토양을 관리하고 있으며, 주로 노출경로와 노출량과 관련된 평가항목을 적용하고 있다(DEFRA, 2002; Germany, 1999). 이들 외국 기준안을 검토한 결과 오염 부지의 우선순위 선정이나 복원순위 선정에 적용된 평가항목들이 대부분 오염원특성, 오염분포상태, 노출가능성 등의 3영역으로 구분되어 있음을 알 수 있었으며, 이 후 설명할 국내의 관련 기준안들은 국외의 이러한 3개 영역을 그대로 적용하여 평가 기준안을 마련한 것으로 나타났다.

2.2. 국내 오염부지 우선순위 결정 및 복원순위 관련 기준

국내의 경우 2000년 이전까지는 오염 토양 부지 복원을 위한 정량적인 기준안이 없고 법률상 토양오염대책기준을 초과하는 토양오염에 대한 복원 시행 명령만이 존재하였다(MOE, 2009). 더욱이 석면은 토양 오염 대상 항목에 제외되어 있어서 폐석면광산 주변 부지에 대한 법적 관리 체계는 현재까지 전무한 실정이다(NIER, 2009). 적절한 오염 부지 복원 계획 수립을 위한 정밀조사 우선순위나 복원순위 결정과 관련된 최초 기준마련은 2005년 환경부에서 중금속으로 오염된 폐금속광산을 대상으로 최초로 수행하였는데, 2001년 이후 수행된 100여 개 광산의 개황조사 자료로부터 폐광산 주변 부지의 오염정도를 점수화하여 권역별 정밀조사 대상 광산 지역을 결정하는 정밀조사 선정을 위한 기준안이 마련되었다(MOE, 2005). 하지만 이 기준안은 오염도 평가 대상이 광미, 광폐석, 갱내수에 국한되어 전체 오염부지 평가에 한계점이 있었으며, 평가항목도 오염원의 규모에만 한정되어있어서, 정밀조사 우선순위 선정을 위한 실제적 기준으로 활용되지 못하였다. 현재 폐금속광산 주변 정밀조사는 폐광산 주변 지역 토양의 일부라도 토양오염 대책기준을 초과하는 경우 모두 실시하고 있다.

2006년 환경부에서는 2004년까지 개황조사나 정밀조사를 수행한 156개 폐금속광산 중에서 복구가 완료된 13개 광산과 1996년부터 2004년까지 산자부에서 광해방지사업을 수행한 22개 광산 등 총 35개 광산을 제외한 121개 광산에 대해 복구우선순위 선정을 위한 기준안을 마련하였다(MOE, 2006a). 이 기준안은 평가영역을 크게 오염원특성, 오염분포상태, 오염영향(노출가능성)으로 나누고 총 11개의 세부 평가항목으로 구분하였으며, 세부 평가항목의 정량화된 가중치값 산정이 어려워 121개 광산에 대한 정량적인 순위의 선정보다는 대상 광산을 크게 4개의 오염등급으로 구분하여

북구 우선순위 목록을 작성하였다. 2006년 한국지질자원연구원에서 국내 1005개 폐금속광산 주변 부지에 대하여 국가우선순위(NPL, National Priorities List) 도출을 위한 평가기준을 마련하여 우선순위를 평가한 결과, 1005개 폐금속광산 중 85개의 광산 부지를 국가우선순위 대상 폐광산부지로 선정하였다(MOST, 2006). 이 두 기준안 모두 평가항목을 국의 평가체계와 동일하게 오염원특성, 오염물질의 농도와 오염면적 등을 고려한 오염분포현황, 및 주변 환경 여건에 따른 오염영향(노출가능성) 등 3가지 주요 영역으로 나누고 영역별 세부 항목을 선정하여 항목별로 오염 규모 및 정도를 점수화 하였다. 하지만 평가항목의 가중치와 배점을 정성적으로 부여하는 부분이 많아 현재까지 통일된 평가기준으로 적용되지 못하고 있다.

3. 정밀조사 대상 폐석면광산 우선순위 평가를 위한 기준안 마련

2009년 환경부에서 기존의 석면광산 이력과 지상에 노출된 석면 적치량 등을 고려하여 국내 20개 폐석면광산을 대상으로 광산 주변지역 개황조사를 수행하였으나(MOE, 2010), 개황 조사 결과를 활용하여 향후 정밀조사를 진행할 대상 광산 결정을 위한 평가기준이 존재하지 않아, 폐석면광산의 오염정도를 평가하는 것은 물론 향후 복원 계획을 수립하는 것이 불가능한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 국내외 관련 기준안들을 검토하여 개황조사결과로부터 가장 정량적인 폐석면광산의 오염도를 평가할 수 있는 평가항목 및 가중치를 선정하여 대상 광산의 오염도를 점수화함으로써 향후 정밀조사를 위한 우선순위를 결정할 수 있으며, 궁극적으로 광산 복구 계획 수립을 위한 자료로 사용될 수 있는 폐석면광산 오염 평가 기준안을 제시하였다.

3.1. 정밀조사 우선순위 결정을 위한 평가항목 설정

폐석면광산 정밀조사 우선순위 결정을 위한 평가항목 선정에 위해 정밀조사 선정, 복원우선순위선정, 국가우선순위선정과 관련된 16개의 국외 인용문헌과 7개의 국내 인용문헌을 포함해 총 23개 문헌을 참고하여 총 27개의 세부 평가항목을 선정하였다. 인용문헌 대부분에서 사용한 평가영역의 대분류 기준을 그대로 적용하여 크게 오염원특성, 오염분포현황, 노출가능성의 3가지 평가영역으로 나누었으며, 각 평가영역에 10개, 6개, 11개의 세부 평가항목들을 포함시켰다. 정밀조사 우선순위 결정을 위해 적용된 세부 평가항목들과 이를

적용한 기준 인용문헌들을 정리하여 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

3.1.1. 석면 오염원특성 평가영역

석면 오염원특성 영역을 크게 폐석 적치장 현황, 채굴적 유무 그리고 폐광산 이력 및 선광시설 존치 여부를 포함하는 세 가지 분야로 나누었다. 폐석 적치장 분야는 적치장 분포면적, 폐석량, 폐석사면 상태, 적치장 상부 식생 분포상태(capping) 여부 등이 세부 평가항목으로 선정되었고, 채굴적 유무 분야는 채굴적 노출면적, 석면노두 노출여부, 채굴형태(노천채굴/갱내채굴) 등이 평가항목에 포함되었다(CCME, 2008; USEPA, 1992a; MPCA, 1993; McHarg, 1995; JCECA, 2002). 마지막으로 폐광산 이력 및 선광시설 존치 여부 분야는 과거 광산의 채굴량, 채굴기간, 선광 및 제분시설 존치 여부 등이 세부 평가항목으로 포함되었다(USEPA, 1989b; MOE, 2001a; NIER, 2009).

3.1.2. 석면 오염분포현황 평가영역

석면 오염분포현황에 따른 피해영향인자를 도출하기 위하여, 크게 광산주변 석면포함 개연성이 있는 암석노두 분포현황 평가, 토양 오염상태 그리고 수환경 내 분포상태를 포함하는 세 분야로 나누었다(USEPA, 1992a; CCME, 2008). 암석노두 분포현황 분야는 사문석, 각섬석, 변성석회암과 같은 석면을 포함하는 모암의 노두 분포 현황을 평가항목으로 선정하였으며, 토양 오염상태 분야는 광산 주변 토양의 석면분포율, 오염농도(석면 함유량), 석면이 일정농도(토양시료의 석면검출율 1%) 이상 되는 부지 면적 등이 평가항목으로 선정되었다. 수환경 분야의 경우 지표수/지하수/갱내 유출수의 석면 검출율 및 검출농도가 평가항목에 포함되었다(USEPA, 1987; USEPA, 1989a; USEPA, 1992a; Albering *et al.*, 1999; ASTM, 2004; MOE, 2006b).

3.1.3. 석면 노출가능성 평가영역

오염물질의 노출가능성(개연성)에 따른 피해영향인자를 도출하기 위하여, 크게 농경지 석면 오염현황, 기상현황 그리고 주거지 오염현황을 포함하는 세 가지 부분으로 나누었으며, 농경지 오염현황 부분에서는 광산 오염원과의 이격거리, 농경지 석면 검출율 등이 평가항목으로 선정되었다(USEPA, 1992; MOE, 2001b; CCME, 2008). 기상 현황 부분은 평균 풍속, 주거지에서 서의 주 풍향, 강우량, 강우강도 등이 평가항목으로 선

Table 1. References cited in the ranking standards for the precise investigation to asbestos-contaminated abandoned mines, Korea

Reference number	References cited
1	CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), 2008, National classification system for contaminated Sites (Guidance document), ISBN 978-1-896997-80-3.
2	USEPA, 1992a, Hazard ranking system guidance manual, EPA 540-R-92-026.
3	USEPA, 1991, Guidance for performing preliminary assessments under CERCLA, EPA/540/G-91/013.
4	USEPA, 1992b, Guidance for performing site inspections under CERCLA, EPA/540-R-92-021.
5	USEPA, 1990, Hazard ranking system; Final rule, Federal Register v. 55 no.241, 14-12-90.
6	Margaret M. Kelly, 1993, Contaminated site cleanup in the United States: Trends in innovative technologies, in Workshop "Contaminated soils- risks and remedies", Stockholm, p.95-101.
7	Onno Z. van Sandick, Kees W. Keuzenkamp, 1994, Policy and legal framework regarding contaminated sites in the Netherlands, in Vortrag vor dem International Workshop "Contaminated sites in the European Union: Policies and strategies", Bonn, p.8-9.
8	Reinier van den Berg, 1993, Human exposure to contaminated soil: a model (CSOIL) used for the assessment of human-toxicological intervention values for soil clean-up, in: F. Arendt, G.J. Annokke, R. Bosman, W.J. van den Brink (eds.): Contaminated Soil, Dordrecht, Boston, London, p.481-482.
Foreign	
9	Albering, H.J., van Leusen, S.M., Moonen, Edwin J.C., Hoogewerff, J.A., Kleinjans, Jos C.S., 1999, Human health risk assessment: A Case study involving heavy metal soil contamination after the flooding of the river reuse during the winter of 1993-1994, Environmental Health Perspect, 107, p.37-43.
10	MPCA (Minnesota Pollution Control Administration), 1993, Voluntary Investigation and Cleanup Guidance Document, Version 2.0.
11	Ian L. McHarg, 1995, Design with nature, John Wiley & Son.
12	USEPA, 1989a, Risk assessment guidance for Superfund Volume I: Human health evaluation manual (Part A), EPA/540/1-89/002.
13	USEPA, 1989b, Exposure factors handbook; Final report, EPA 600/8-89/043.
14	USEPA, 1987, DRASTIC: A Standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings.
15	ASTM(American Society for Testing and Materials), 2004, Standard guide for risk-based corrective action, ASTM E2081-00.
16	JCECA (Japan Central Environmental Counsellor Association), Technical note for soil pollution acts, 2002.
17	MOE (Ministry of Environment), 2005, General soil investigation for abandoned heavy metal mines in Kyungsang province; Final report.
18	MOE (Ministry of Environment), 2001a, Guidance for the maintenance of landfill site, 675-10-1242.
19	MOST (Ministry of Science and Technology), 2006, Assessment of soil pollution state and the development of natural attenuation technology; Final report, OAA2004030-2006(3).
Domestic	
20	MOE (Ministry of Environment), 2001b, Regulation for an assessment of environmental impact, 12-2.
21	MOE (Ministry of Environment), 2006a, Evaluation of the remediation ranking system in the report "Soil pollution state for abandoned heavy metal mines"; Final report.
22	MOE (Ministry of Environment), 2006b, Guidance for Soil risk assessment, MOE regulation 283.
23	NIER (National Institute of Environmental Research), 2009, Guidance of soil/groundwater sampling for abandoned asbestos mines, Korea.

정되었고, 주거지 오염현황 부분은 오염원으로부터 최단 주거지 이격거리, 주거지역 석면 오염율, 인구밀집도 등이 평가항목으로 포함되었다(MOE, 2006b; NIER, 2009).

3.2. 세부 평가항목의 가중치 부여 및 오염 순위선정을 위한 평가항목 점수화

국내의 기준안의 가중치점수를 참고하여 평가항목 총점을 500점으로 결정하였으며 오염원 평가, 오염분

Table 2. Evaluation factors used in the ranking for the precise investigation to asbestos-contaminated abandoned mines, Korea

Evaluation categories	Sub-categories	Factor number	Evaluation factors	Cited reference numbers in Table 1
Contaminant characteristics	Contamination source (waste rock & tailings)	1	Source storage area	1, 2,3,5,18,21
		2	Source storage volume	1,2,3,4,5,17,18,19,21,23
		3	Storage state and slope angle	1,11,17,18,19,20,21
		4	Vegetative cover	1,8,2,3,4,5,16,17,23
	Mining activity state	5	Uncovered mining pit (and shaft) area	10,12,19
		6	Uncovered asbestos-bearing rock outcrop	1,10,12
		7	Mining type (subsurface or surface mining)	1,10,19
	Mining history	8	A term of mining	1,13,19,23
		9	Existence of refining or post-treatment facility	1,10,19,23
		10	Total mining outturn	1,12
Contaminant migration potential	Geological potential	11	Asbestos-bearing rock distribution	1,14,20,23
		12	Contaminated area (>asbestos concentration limit)	1,15,19,21,22
	Soil contamination	13	Contaminated state (according to contaminated soil sample number vs. total sample number)	1,2,3,6,7,15,19,20,21,23
		14	Highest asbestos concentration in soil	1,2,3,7
	Water contamination	15	Ratio of asbestos-containing stream water	1,2,3,7,9,10,19,20,21,23
		16	Ration of asbestos-containing groundwater	1,2,3,7,10,19,20,21,22,23
Exposure possibility	Farmland contamination	17	Distance from the mining source	2,3,7,8,10
		18	Ratio of farmland area vs. total site area(within 4km radius from the source zone)	1,2,3,7,10,19
		19	Ratio of asbestos-containing farmland soil	1,2,3,7,10,19,21
		20	Mean annual wind speed	1,2,3,8,12,20
	Meteorological condition	21	Consistency of the main wind direction to the residential area	1,2,3,12,20
		22	Topographic slope	14,20
		23	Annual rainfall	1,2,3,4,8,20
	Exposure to the resident	24	Rainfall strength (Heavy rainy day per year)	1,2,3,4,8,20
		25	Distance from the mining source	1,2,3,7,8,10,18,21,23
		26	Ratio of asbestos-containing soil in the residential district	1,2,3,7,10,21
		27	Population density according to the distance from the source	2,3,7,10,18,19,21,23

포현황 평가, 노출가능성 평가영역에 각각 100점, 200 점, 200점씩 부여하였다. 세부 평가항목의 경우 항목별 중요도를 고려하여 5-50점 범위에서 점수를 부여하여 정밀조사 우선순위 결정을 위한 정량화된 평가 기준안을 마련하였다(MOST, 2006; USEPA, 1992a). 전체 27개의 평가인자 항목 중 개황조사를 통해 정량화된 결과를 얻을 수 있었던 항목들은 점수를 부여하는데 큰 어려움이 없었으나, 수치로 계량화가 어렵고 ‘유’ 내지 ‘무’ 등으로 구분되는 항목인 폐석사면상태, 식생

상태, 석면노두 노출여부, 가공시설(선광장 내지 제분소) 운영 여부, 석면모암 분포 정도, 주풍향과의 상관성 유무 등의 6가지 평가항목에 대해서는 국내·외의 사례와 문헌 등을 참고하여 설정한 별도의 기준을 이용하여 정성적으로 점수를 부여하였다. 개별 세부 평가항목들에 대한 가중치 평점을 부여한 기준(criteria)은 국내 20개 폐석면광산의 기초/개황조사 결과를 활용하여 각 평가항목 값에 대한 20개 광산의 ‘평균값’과 ‘최소값’을 항목 당 부여하는 평점의 ‘최대값’과

Table 3. Results of 20 abandoned asbestos mines for each evaluation factor of the ranking standards

Evaluation factor (weighted score)	Factor number	Results from the general investigation for 20 abandoned asbestos mines, Korea				
		Arithmetic mean	Minimum	Median	Maximum	
Contaminant characteristics	Contamination source	1	816.4	0.0	287.0	8,280.0
		2	625.3	0.0	330.5	4,140.0
		3	<5°: 8 mines, 5~30°: 3 mines, >30°: 9 mines			
	Mining activity state	4	no plant capping: 10 mines, <1 m in plant height: 3 mines, >1 m in plant height: 7 mines			
		5	16,814.	20	10,686	89,377
		6	Existence: 13 mines, Nonexistence: 7 mines			
	Mining history	7	Surface: 8 mines, Subsurface: 12 mines			
		8	4.2 year	1.0 year	2.0 year	26.0 year
		9	Existence: 11 mines, Nonexistence: 9 mines			
		10	6,759 ton	3 ton	673 ton	75,381 ton
Contaminant migration potential	Geological potential	11	>1/3 of asbestos bearing rocks in the site area: 10 mines, <1/3 of site area: 4 mines, None: 6 mines			
		12	127,255	0.0	9,362	1,959,739
	Soil contamination	13	2.2%	0.0%	0.42%	22.8%
		14	4.11%	0.25%	2.63%	32.75%
		15	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Water contamination	16	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
		17	152 m	20 m	80 m	1,000 m
	Farmland contamination	18	24.7%	3.7%	29.2%	45.4%
		19	2.5%	0.0%	0.0%	19.2%
		20	2.5 m/s	2.0 m/s	2.0 m/s	4.5 m/s
21		Consistency: 11 mines, Discordance: 9 mines				
Exposure possibility	Meteorological condition	22	8.2°	0.6°	5.5°	24.9°
		23	1,237 mm/yr	851 mm/yr	1,237 mm/yr	1,640 mm/yr
		24	10.6 day	7.0 day	7.5 day	22.0 day
		25	439.0 m	10.0 m	320.0 m	1,980.0 m
	Exposure to the resident	26	4.1%	0.0%	0.0%	33.3%
		27	2,106 persons	41 persons	1,205 persons	10,706 persons

“최소값”으로 설정하여 그 사이 구간 값에 대하여 선형 가중치(Linear Interpolation)를 부여함으로써 각 평가항목별 점수를 산정하였으며, 평가항목별 점수를 합산하여 우선순위 결정을 위한 최종 평가값(FS; Final score)으로 사용하였다.

평가기준안 마련을 위해 국내 20개 폐석면광산(경기도에 2개소, 강원도에 1개소, 충청남에 12개소, 충북에 1개소, 경북에 2개소, 전남에 2개소)의 개황조사결과로부터 계산된 각 평가항목 당 평균값, 최소값, 중앙값, 최대값을 Table 3에 나타내었다. Table 3의 결과를 이용한 선형 가중치값 부여 기준과 평가항목 당 부여된

평점을 포함한 정밀조사 우선순위 결정을 위해 완성된 최종 평가 기준안을 Table 4에 나타내었다. 위의 정밀조사 우선순위 평가 기준안을 적용하여 개황조사를 마친 20개 광산에 대한 평가 총점을 계산하였고, 이 중 최고점수를 받은 충북에 위치한 A광산에 대한 평가값(FS)을 Table 4에 함께 나타내었다. A광산의 경우 오염원 평가영역에서 84.00점(100점 만점)을 받아 20개 광산 중 5위를 차지하였고, 오염분포 현황 평가영역에서는 180.00점(200점 만점)을 받아 대상 광산 중 1위를 차지하였으며, 노출가능성 평가영역에서 132.02점(200점 만점)을 받아 총 396.02점(500점 만점)을 받아

Table 4. Criteria to weight the score for each evaluation factor and FS (final score) of A mine calculated by using the evaluation standards of the ranking system

Evaluation factor (weighted score)	Factor number	Weighted Score (500)	Criteria to weigh the score for each factor	A mine		
				Results	Score	
Contaminant characteristics (100)	Contamination source (30)	1	10	1 point per 81 m ²	274 m ²	4.00
		2	10	1 point per 62.5 m ³	712 m ³	10.00
		3	5	<5°: 0 point , 5~30°: 3 point, >30°: 5 point	62°	5.00
	Mining activity state (30)	4	5	no plant capping: 5 point, <1 m in plant height: 3 point, >1 m in plant height: 5 point	None	5.00
		5	10	1 point per 1,6810 m ₂	49,500 m ₂	10.00
		6	10	Existence: 10 point, Nonexistence: 0 point	Existence	10.00
	Mining history (40)	7	10	Surface: 10 point, Subsurface: 5 point	Surface	5.00
		8	10	1 point per 0.4 year of mining activity	No data	5.00
		9	10	Existence: 10 point, Nonexistence: 0 point	Existence	10.00
		10	20	6750 ton: 10 point, -1 point per -338 ton from 6750 ton	6759 ton	20.00
Contaminant migration potential (200)	Geological potential (40)	11	50	>1/3 of asbestos bearing rocks in the site area: 50 point, <1/3: 30 point, None: 20 p	>1/3	50.00
		12	50	1 point per 2,830 m ₂	1,959,739 m ₂	50.00
	Soil contamination (100)	13	50	1 point per 0.08% (the ration of area having > 1% of asbestos in soil sample)	22.80%	50.00
		14	30	>4%: 10 point, -1 point per -0.65% from 4%	12%	30.00
	Water contamination (60)	15	10	Existence of asbestos-bearing stream water: 10 point, Nonexistence: 0 point	0%	0.00
		16	10	Existence of asbestos-bearing groundwater: 10 point, Nonexistence: 0 point	0%	0.00
Exposure possibility (200)	Farmland contamination (90)	17	40	1 point per - 3.3 m from 152 m	70 m	24.85
		18	20	>20%: 20 point, -1 point per -0.85% from 20%	11.67%	10.20
		19	30	1 point per 0.07%	19.15%	30.00
		20	10	1 point per 0.2 m/s	2.5 m/s	10.00
		21	10	Consistency: 10 point, Discordance: 0 point	Consistency	10.00
	Meteorological condition (40)	22	10	0~2%: 1, 2~6%: 3, 6~12%: 5, 12~18%: 9, >18%: 10 point	2.45%	3.00
		23	5	5 point x (annual rainfall of the site/1,302 mm/yr)	1276 mm/yr	4.90
		24	5	>10day: 5 point, -1 point per -0.75day	13day	5.00
	Exposure to the resident (70)	25	30	<430m: 1 point, +2 point per -28.6 m from 430 m	100 m	23.07
		26	10	1 point per 0.4%	33%	10.00
27		30	>2100 person: 30 point, -1 point per -71 person from 2100 person	41	1.00	

20개 대상 광산 중 가장 높은 FS 값을 나타내었다. 20개 석면폐광산에 대하여 본 평가 기준안으로 FS 값을 계산한 결과, 20개 대상 광산 중 5개 광산이 300 점을 초과하였으며, 12개 광산이 125-300점 사이 값을 가지는 것으로 나타났다. 우선순위평가에 대상이 되었던 국내 20개 광산명과 우선순위 산정 결과는 본 논문

에서 공개하지 않았으나, 2010년 후반부에 환경부 최종보고서에 수록되어 일반에게 공개될 예정이다.

4. 결 론

정밀조사 대상 폐석면광산의 우선순위를 선정하기

위해 석면 오염원특성, 오염분포현황, 노출가능성 등 3 가지 평가영역에 대한 총 27개의 세부 평가항목과 가중치값을 결정하여 평가기준안을 작성하였다. 선정된 기준안을 근거로 개황조사가 완료된 국내 20개 폐석면 광산의 평가점수를 산출하였으며, 현재 환경부에서는 본 기준안에 근거하여 20개 대상 광산을 평가하여 최종 평가 점수(FS)가 높은 광산 순서에 의해 정밀조사 사업을 진행할 계획을 세우고 있다. 본 기준안은 석면 오염과 관련하여 국내외 최초로 마련된 평가기준안이라는 점에서 학술적, 기술적 가치가 있으며, 기준안에 포함된 세부 평가항목과 가중치값은 폐석면광산 정밀조사 우선순위 결정뿐 아니라 복원 우선순위 결정을 위한 기초 자료로도 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(2009-0085781). 논문을 세심하게 검토하여 주신 익명의 심사자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- Albering, H.J., van Leusen, S.M., Moonen, Edwin J.C., Hoogewerff, J.A. and Kleinjans, Jos C.S. (1999) Human health risk assessment: A Case study involving heavy metal soil contamination after the flooding of the river reuse during the winter of 1993-1994, *Environmental Health Perspect*, 107, p.37-43.
- ASTM (American Society for Testing and Materials) (2004) Standard guide for risk-based corrective action, ASTM E2081-00.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment) (2008) National classification system for contaminated Sites (Guidance document), ISBN 978-1-896997-80-3.
- DEFRA (Department of Environment, Food and Rural Affairs) (2002) The contaminated land exposure assessment model(CLEA): Technical basis and algorithms (R&D Publication CLR 10).
- Germany (1999) Federal soil protection and contaminated sites ordinance.
- JCECA (Japan Central Environmental Counsellor Association) (2002) Technical note for soil pollution acts.
- Kelly, M.M. (1993) Contaminated site cleanup in the United States: Trends in innovative technologies, in Workshop "Contaminated soils- risks and remedies", Stockholm, p.95-101.
- van Sandick, O.Z. and Keuzenkamp, K.W. (1994) Policy and legal framework regarding contaminated sites in the Netherlands, in Vortrag vor dem International Workshop "Contaminated sites in the European Union: Policies and strategies", Bonn, p.8-9.
- van den Berg, R. (1993) Human exposure to contaminated soil: a model (CSOIL) used for the assessment of human-toxicological intervention values for soil clean-up, in: F. Arendt, G.J. Annokkee, R. Bosman, W.J. van den Brink (eds.): *Contaminated Soil*, Dordrecht, Boston, London, p.481-482.
- McHarg, I.L. (1995) *Design with nature*, John Wiley & Son.
- MOE (Ministry of Environment) (2001a) Guidance for the maintenance of landfill site, 675-10-1242.
- MOE (Ministry of Environment) (2001b) Regulation for an assessment of environmental impact, 12-2.
- MOE (Ministry of Environment) (2005) General soil investigation for abandoned heavy metal mines in Kyungsang province; Final report.
- MOE (Ministry of Environment) (2006a) Evaluation of the remediation ranking system in the report "Soil pollution state for abandoned heavy metal mines"; Final report.
- MOE (Ministry of Environment) (2006b) Guidance for Soil risk assessment, MOE regulation 283.
- MOE (Ministry of Environment) (2009) Soil Environmental Preservation Law.
- MOE (Ministry of Environment) (2010) General investigation of 20 abandoned asbestos-mines, Korea; Final report, printed in 2010.
- MOST (Ministry of Science and Technology) (2006) Assessment of soil pollution state and the development of natural attenuation technology; Final report, OAA2004030-2006(3).
- MPCA (Minnesota Pollution Control Administration) (1993) Voluntary Investigation and Cleanup Guidance Document, Version 2.0.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2009) Guidance of soil/groundwater sampling for abandoned asbestos mines, Korea.
- USEPA (1987) DRASTIC: A Standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings.
- USEPA (1989a) Risk assessment guidance for Superfund Volume I: Human health evaluation manual (Part A), EPA/540/1-89/002.
- USEPA (1989b) Exposure factors handbook; Final report, EPA 600/8-89/043.
- USEPA (1990) Hazard ranking system; Final rule, Federal Register v. 55 no.241, 14-12-90.
- USEPA (1991) Guidance for performing preliminary assessments under CERCLA, EPA/540/G-91/013.
- USEPA (1992a) Hazard ranking system guidance manual, EPA 540-R-92-026.
- USEPA (1992b) Guidance for performing site inspections under CERCLA, EPA/540-R-92-021.
- van Sandick, O. Z., Keuzenkamp, K. W. (1994) Policy and legal framework regarding contaminated sites in the Netherlands, in Vortrag vor dem International Workshop "Contaminated sites in the European Union: Policies and strategies", Bonn, p.8-9.
- van den Berg, R. (1993) Human exposure to contaminated soil: a model (CSOIL) used for the assessment of human-toxicological intervention values for soil clean-up, in: F. Arendt, G.J. Annokkee, R. Bosman, W.J. van den Brink (eds.): *Contaminated Soil*, Dordrecht, Boston, London, p.481-482.