

광물찌꺼기 적치장 유지관리를 위한 모니터링 방안 연구

오삼주^{1*} · 김기준¹ · 송재용¹ · 최의규²

¹(주)산하이앤씨, ²한국광해관리공단

Study of Monitoring Methods for Maintenance Management of Tailings Dams

Sam-Ju Oh^{1*}, Ki-Joon Kim¹, Jea-Yong Song¹, and Uikyoo Choi²

¹SanHa E&C Co., Ltd

²Mine Reclamation Crop. (MIRECO)

Received 8 November 2016; received in revised form 12 December 2016; accepted 19 December 2016

본 연구는 환경유해시설인 광물찌꺼기 적치장의 효과적 유지관리를 위한 모니터링 방안을 수립하기 위해 수행하였다. 광물찌꺼기 적치장 유지관리를 위한 모니터링은 세분된 점검항목 및 평가항목의 선정을 통해 상세한 조사가 필요하며, 조사결과를 효과적으로 활용하기 위하여 불량정도 및 그 진행성 여부에 대한 평가가 필요하다. 따라서 모니터링 항목을 옹벽구조물(콘크리트 옹벽, 석축, 돌망태) 및 일반시설물(차수층, 복토층, 사면, 광물찌꺼기, 우수배제시설, 침출수, 식생)로 점검항목을 세분하고, 각 항목별 모니터링 결과에 대한 상태평가를 수행하여 등급 및 점수화를 통해 체계적인 유지관리가 될 수 있도록 모니터링 개선안을 제안하였다. 개선안에 따른 현장 적용성 평가 결과, 기존 모니터링에 비해 최대 16건(우수배제시설)의 하자 발생 건수가 추가로 확인되는 등 기존 모니터링에 비해 세부적인 평가가 가능한 것으로 확인되었으며, 등급에 따른 광물찌꺼기 적치장별 종합점수는 금장광산이 89.3점으로 가장 양호하고 거풍광산이 22.2점, 화천광산이 27.8점으로 가장 불량한 것으로 확인되었다. 이와 같이 개선안을 적용할 경우, 보다 상세한 모니터링을 수행할 수 있고 각각의 항목에 대한 정량적인 평가가 가능하다. 이러한 정량적 평가는 향후 광물찌꺼기 적치장의 보수 우선순위를 결정하고 중점관리항목 선정, 유지보수 계획수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 광물찌꺼기 적치장, 모니터링, 유지관리

This study aims to establish a monitoring method for managing the effective maintenance of tailings dams. The monitoring of a tailings dump area involves several parameters and their investigation through a selection of evaluation items. The extents of defects and progressive failures also need to be effectively estimated. Therefore, the monitoring items can be subdivided into categories relating to the retaining wall structure (concrete wall, reinforcing stone wall, mesh gabions) and general facilities (liner, covering soil, slope, tailings, rain protection facility, leachate, planting), and quantitative evaluations can then be conducted for each condition. In doing so, we developed a systematic monitoring method that assesses the dam maintenance condition with grades and scores. The field application of the monitoring method results showed it to provide a more detailed evaluation than existing monitoring methods: the method detected an additional 16 defects missed by conventional methods. The evaluation gave scores of 89.3, 22.2, and 27.8 to the Geumjang mine tailings dam, the Gupoong mine tailings dam, and the Hwachun mine tailings dam, respectively. The advanced method can provide quantitative evaluation and perform detailed monitoring of the dams. This quantitative evaluation can be used to decide on maintenance priorities, select the main management items, and establish schedules of maintenance.

Key words: Tailing dam, Monitoring, Maintenance management

*Corresponding author: ssams78@naver.com

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

광물찌꺼기는 금속광산에서 분쇄·선광공정을 거쳐 유용 광물을 회수하고 남은 부산물로 대부분 맥석광물로 구성되지만 일부 광석광물이 잔존하여 다양한 중금속을 포함하고 있으며, 크기는 수백 마이크로미터(μm)에서 작게는 수 마이크로미터(μm)의 입도분포를 보이고 있다. 입도가 작을수록 표면적이 넓어지기 때문에 광물찌꺼기가 물과 산소와 만날 경우 쉽게 중금속이 용출되며, 선광·제련과정에서 사용되는 수은, 시안 등과 같은 화학약품을 함유하고 있는 경우도 있다(한국광해관리공단, 2012). 따라서 광물찌꺼기는 금속광산 인근지역 토양오염의 주요 원인으로 작용하며, 우수 및 지하수와 반응하여 침출수가 유출될 경우 수질오염원으로 작용하기도 한다. 이와 같이 금속광산에서 발생하는 광물찌꺼기는 가행과정에서도 다양한 환경적인 문제를 야기하지만 폐광 후에도 오염 확산 방지를 위한 적절한 조치가 시행되지 않아 비산, 유실, 침출수 유출 등 지속적인 광해를 발생시키고 있다. 2011년 광해유형별 광해발생현황 조사에 따르면, 전국에 2,166개소의 금속광산이 분포하며, 이 중 238개소의 금속광산에서 광물찌꺼기에 의한 광해가 발생된 것으로 확인되었다(Table 1, Table 2).

이러한 광물찌꺼기에 의한 오염 확산을 방지하기 위하여 한국광해관리공단에서는 관련법령(광산피해의 방지 및 복구에 관한 법률)에 의거하여 광해방지사업의 일환으로 광물찌꺼기 유실방지사업을 통해 광물찌꺼기 매립·차단시설인 광물찌꺼기 적치장을 조성함으로써 주변 환경에 미치는 영향을 최소화하고 있다. 그러나 시간경과에 따른 시설의 노후화, 자연재해로 인한 시설파손 등으로 인해 적치장 내 광물찌꺼기 등이 유실되거나 침출수가 유출되어 주변 환경을 오염시키는 사고가 발생하고 있으며, 이에 광물찌꺼기 적치장

유지보수 등의 사업을 재추진하는 사례가 발생하고 있다. 따라서 사고발생 이전 사전조치의 중요성이 높아지고 있으며, 광물찌꺼기 유실방지 사업지에 대한 체계적인 모니터링을 통한 효과적 유지관리의 중요성 또한 높아지고 있다.

지금까지의 광물찌꺼기 적치장 사후관리는 한국광해관리공단 자체규정에 따라 광물찌꺼기 노출, 복토층의 유실, 사면 유실, 주요구조물(옹벽 등)의 손상, 배수로 손상 및 막힘 발생, 침출수 발생, 식생불량 등에 대한 정기적인 현장(육안)조사 등 현상 파악 위주의 모니터링만을 실시하고 있다(한국광해관리공단, 2012, 2013, 2014). 그러나 기존 모니터링은 모니터링 결과에 대한 정량화, 객관화가 어렵고 근본적인 해결방안을 제시하는데도 한계가 있다. 따라서 현재 정기적인 현장(육안)조사 위주로 관리되고 있는 광물찌꺼기 적치장에 대하여 세부적인 검토 및 분석을 통한 체계적인 모니터링 및 안정성평가방안이 도출되어야 하며, 궁극적으로 효율적이고 효과적인 유지관리를 위한 모니터링 방안 및 평가기법 개발이 필요하다.

연구지역

국내 조성된 광물찌꺼기 적치장은 총 57개소로 모두 한국광해관리공단에서 전담하여 유지관리를 수행하고 있다. 이 중 21개소는 한국광해관리공단 설립 후 「광산피해의 방지 및 복구에 관한 법률」에 근거하여 광해방지사업의 일환으로 조성하였으나, 그 외 36개소는 공단설립 이전에 광물찌꺼기가 분포하는 각 지자체에서 조성한 적치장이다. 지자체에서 조성한 적치장은 모두 한국광해관리공단으로 이관되어 사후관리하고 있다(Table 3).

본 연구에서는 한국광해관리공단에서 조성한 광물찌꺼기 유실방지사업지 21개소 중 무해화 시범사업지인 호남권 1

Table 1. Current conditions of mines in Korea (Korea Mine Reclamation Corp, 2011).

Division	General mine (site)			Coal mine (site)	Total (site)
	Metal mine	Non-metal mine	Subtotal		
Operating property	56	531	587	6	593
Dormant mine	21	101	122	-	122
Exhausted mine	2,089	2,198	4,287	394	4,681
Total	2,166	2,830	4,996	400	5,396

Table 2. Types of mine damage (Korea Mine Reclamation Corp, 2011).

Division	Water pollution	Forest·debris	Tailling	Land pollution	Waste facilities	Land subsidence	Total (site)
Coal mine	46	203	-	117	163	96	625
Metal mine	60	966	238	762	431	444	2,901
Non-metal mine	6	934	-	63	340	73	1,416
Total	112	2,103	238	942	934	613	4,942

Table 3. Number of managed tailings dam sites (Korea Mine Reclamation Corp, 2013).

Department	2009	2010	2011	2012	2013
Gyungin branch	5	5	7	7	7
Gangwon branch	8	9	10	11	11
Youngnam branch	19	21	21	21	21
Honam branch	4	4	4	4	4
Total (site)	47	50	54	56	57

Table 4. Current condition of post management for tailings dams (Korea Mine Reclamation Corp, 2014).

No.	Department	Area	Mine	Volume (m ³)	Period	Expenses (One thousand won)	Completion	Remark
1	Chungcheong	Gongju	Deokgok	2,755	'07.12~'08.07	571,000	'08.07	
2	Yeungnam	Uiseong	Okdong	44,585	'07.12~'08.12	3,560,000	'08.12	
3	Gangwon	Gangneung	Okgye	3,446	'07.12~'09.03	897,604	'09.03	
4	Yeungnam	Uljin	Geumjang	79,690	'07.12~'09.04	3,958,000	'09.04	
5	Yeungnam	Bonghwa	Jingok	30,806	'08.10~'09.08	1,355,000	'09.08	
6	Yeungnam	Uljin	Ssangjeon	88,301	'08.12~'09.11	1,957,000	'09.11	
7	Yeungnam	Yeongdeok	Hwacheon	6,250	'09.10~'10.06	720,622	'10.06	
8	Yeungnam	Yeongdeok	Sejum	46,600	'09.06~'10.09	1,715,138	'10.09	
9	Kyeonggi	Yangpyeong	Geumwang	3,895	'09.06~'10.10	1,046,474	'10.10	
10	Kyeonggi	Yeuju	Yeosu	2,400	'10.06~'10.11	278,956	'10.11	
11	Gangwon	Samcheok	Je2yeonwha	765,000	'08.12~'10.11	5,107,779	'10.11	2 places
12	Chungcheong	Jecheon	Eugene	1,275	'10.05~'10.12	71,276	'10.12	
13	Chungcheong	Okcheon	Geopung	42,168	'09.12~'10.12	2,696,376	'10.12	
14	Kyeonggi	Pocheon	Yongseok	12,851	'10.06~'11.04	690,514	'11.04	
15	Honam	Jeongeup	Daedu	60,000	'10.06~'11.06	1,259,519	'11.06	
16	Gangwon	Goseong	Dongbo	2,605	'11.07~'12.09	158,891	'12.09	
17	Honam	Haenam	SMC	-	'11.12~'12.10	1,844,812	'12.10	
18	Honam	Jangsu	Youngdae	24,579	'11.03~'12.11	344,200	'12.11	
19	Chungcheong	Cheongyang	Chengyang	17,182	'11.12~'12.12	950,268	'12.12	
20	Chungcheong	Eumseong	Mooguk	-	'12.10~'13.02	100,000	'13.02	

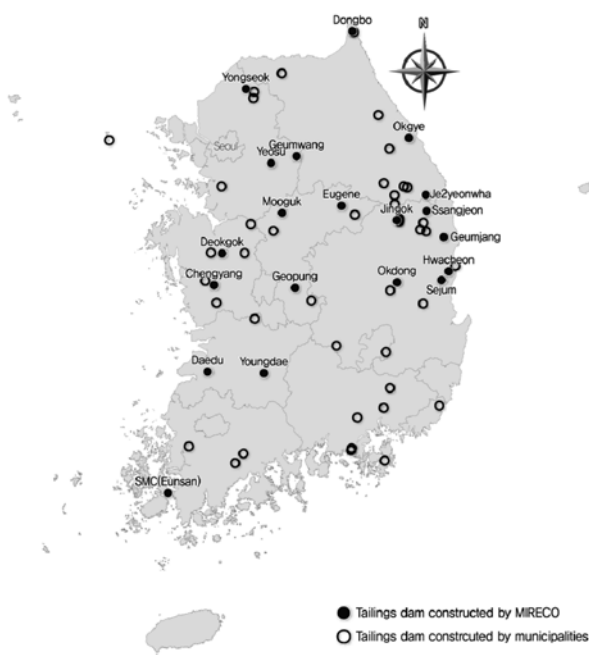


Fig. 1. Distribution of tailings dams stockyard in Korea.

개소(SMC 은성광산)를 제외한 경인권 3개소, 강원권 4개소, 영남권 6개소, 충청권 5개소, 호남권 3개소 등 총 20개 광물찌꺼기 적치장을 연구지역으로 선정하여 모니터링 및 평가를 수행하였다(Table 4).

기존 모니터링 내용 및 문제점

한국광해관리공단 사후관리 기준

한국광해관리공단에서는 광물찌꺼기 적치장 사후관리 항목을 차수층, 복토층, 식재, 우수배제시설, 유실방지시설, 침출수유도관 등으로 세분하여 각 시설물에 대한 사후관리 기준을 설정하여 관리하고 있다(Table 5).

기존 모니터링 평가항목 및 방법

사후관리 기준에 따라 수행한 기존 모니터링은 광물찌꺼기, 복토층/사면, 구조물(옹벽/배수로), 유도배수로, 침출수, 식생으로 구분하였으며, 평가항목을 각 시설물에 대해 노출, 비산, 유실, 파손, 막힘 등으로 설정하여 하자발생 「있음/

Table 5. Standard of post management at the tailings loss-prevention project.

Division	Standard of post management
Liner	• Evaluation of liner efficiency by monitoring groundwater level.
Covering soil layer	• Regular monitoring is needed to prevent from sweeping away by heavy rain. • Stability evaluation of covering soil layer through field permeability test.
Planting	• Replanting or seed spray as needed.
Rain protection facility	• Regular cleaning in rain protection facility. • Repair is needed when facility is broken.
wash-out prevention facility	• Repair is needed when erosion, crack, detachment occur.
leachate delivery pipe	• Regular monitoring is needed to prevent seepage water guide pipe from clogging. • Cause repair is needed when seepage water is found around mine tailing dam.

Table 6. Evaluation item and manner of existing monitoring.

Division	Evaluation list	Evaluation manner	Etc.
Tailing	Exposure, scattering, sweep	YES/NO GOOD/BAD	Other opinion
Covering sand layer/Slope	Soil loss		
Retaining wall	Damage		
Drainage	Clogging, Damage		
Leachate	Occurrence/effect of surrounding water system		
Planting	Vegetation condition of surrounding/top of dam		

없음», 「양호/불량」과 같이 단순평가를 수행하도록 되어 있다. 또한 사후모니터링 항목에 대해 조사의견 및 특이사항을 기재하여 정성적인 평가가 가능하도록 하였다(Table 6).

기존 모니터링 결과

광물찌꺼기 적치장 안정성평가 및 유지관리기술 개발(한국광해관리공단, 2014)에서 수행된 광물찌꺼기 적치장 모니터링 결과에 의하면, 광물찌꺼기는 여수광산, 복토층은 여수, 유진, 영대광산, 사면은 용석광산, 옹벽구조물은 여수, 거풍광산, 배수로는 여수, 용석, 쌍전광산, 침출수는 거풍, 댐골, 직내골, 옥동, 쌍전, 화천광산, 식생은 용석, 유진광산에서 불량한 것으로 평가되었다. 그 외 식재, 석축, 사면, 배수로 등에 대하여 불량이 확인되어 하자보수 공사이력이 있는 것으로 확인되었다(Table 7).

적치장별 조사의견에 따르면, 여수광산은 석축파손으로 인해 복토층이 유실되고 광물찌꺼기가 일부 노출되었으며, 석축의 파손범위가 점차 확대될 것으로 예상하였다. 용석광산은 복토층 경사배수가 높아 사면토사가 유실되었으며, 이로 인해 배수로가 막혔고 상부 미립토가 유실되어 토성이 불균형함을 지적하였다. 유진광산은 배수로 부재로 복토층이 유실되고 있으며, 이로 인해 식생상태를 지적하였다. 거풍광산은 석축파손 및 그로인한 침출수 발생을 지적하였으며, 쌍전광산은 배수로 파손 및 지하수위 상승으로 인한 침출수 발생을 지적하였다. 영대광산은 세류현상으로 인한 복토층 유실을 지적하였다.

평가항목별 하자발생률은 침출수 발생이 30.0%로 가장

높게 나타났으며, 배수로 파손 및 막힘(15.8%), 복토층 유실(15.0%), 식생불량(10.0%), 사면유실(7.1%) 및 광물찌꺼기 노출, 옹벽 구조물 파손(각 5.0%)로 확인되었다(Table 8). 공사가 끝난 후 모니터링 결과 하자가 발생하여 이를 보수한 광산은 20개 사업대상지 중 7개소로 35.0%에 달한다.

기존 모니터링 방법의 문제점

상기와 같이 광물찌꺼기 적치장 사후관리 기준에 따른 모니터링 결과에서는 다음과 같은 문제점이 확인되었다.

첫째, 기존 주 평가항목은 노출, 비산, 유실, 파손, 막힘, 발생, 주변영향 등에 대한 유무(있음/없음)와 단순평가(양호/불량) 등으로 현황을 평가하였으며, 이와 같은 육안검사 및 현상위주의 파악으로는 각 항목에 대한 문제를 정량화하고 객관화하기 어렵다. 이러한 정성적인 평가는 평가자의 주관에 의존하는 경향이 강하기 때문에 평가자의 경험 차에 따라 결과가 달라질 개연성이 있다. 또한 정량적인 평가가 되지 않기 때문에 지속적인 모니터링 과정에서도 하자의 진행사항을 평가할 수 없는 단점이 있다. 둘째, 광물찌꺼기 적치장의 하자가 발생하더라도 그 중요도에 따라 우선순위를 선정하여 처리하는 것이 바람직하나 기존 모니터링 방법에서는 각 항목의 중요도나 하자정도를 고려한 하자보수의 우선순위를 평가하기가 곤란한 측면이 있다. 마지막으로 기존 평가방법으로는 각 평가항목에 대한 불량 발생유무는 확인할 수 있으나 원인에 대한 검토항목이 없으므로 복구를 하더라도 문제의 원인이 제거가 되지 않아 동일한 문제가 지속적으로 발생할 개연성이 있다.

Table 7. Results of existing monitoring (Korea Mine Reclamation Corp, 2012, 2013, 2014).

Mine	Tailing	Covering soil layer	Slope	Retaining wall	Drainage	Leachate	Planting	history of repair
Kyeonggi	Geumwang	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Planting
	Yeosu	Exposure	Loss	-	Damage	Defect	Good	Reinforcing stone wall
	Yongseok	Good	Good	Soil loss	Good	Blockage	Good	Imbalance
Chungcheong	Deokgok	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Slope
	Eugene	Good	Loss	-	Good	-	Good	Imbalance
	Geopung	Good	Good	Good	Failure	Good	Runoff	Reinforcing stone wall
	Chengyang	Good	Good	-	Good	Good	Good	Good
	Mooguk	Good	-	Good	Good	Good	Good	Good
Gangwon	Okgye	Good	Good	-	Good	Good	Good	Good
	Damgol	Good	Good	Good	Good	Good	Trail	Safety
	Jiknaegol	Good	Good	Good	Good	Good	Runoff	Good
	Dongbo	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
Yeungnam	Okdong	Good	Good	Good	Good	Good	Runoff	Good
	Geumjang	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Safety
	Jingok	Good	Good	-	Good	Good	Good	Good
	Ssangjeon	Good	Good	-	Good	Good	Runoff	Good
	Hwacheon	Good	Good	Good	Good	Good	Runoff	Good
	Sejum	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
Honam	Daedu	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Drainage
	Youngdae	Good	Loss	Good	Good	Good	Good	Good

Table 8. Defect rate of each evaluation item according to monitoring results.

구 분	Tailing	Covering soil layer	Slope	Retaining wall	Drainage	Leachate	Planting	Total
Number of analysis	20	20	14	20	19	20	20	-
Number of defect site	1	3	1	4	3	6	2	20
Defect rate (%)	5.0	15.0	7.1	5.0	15.8	30.0	10.0	-

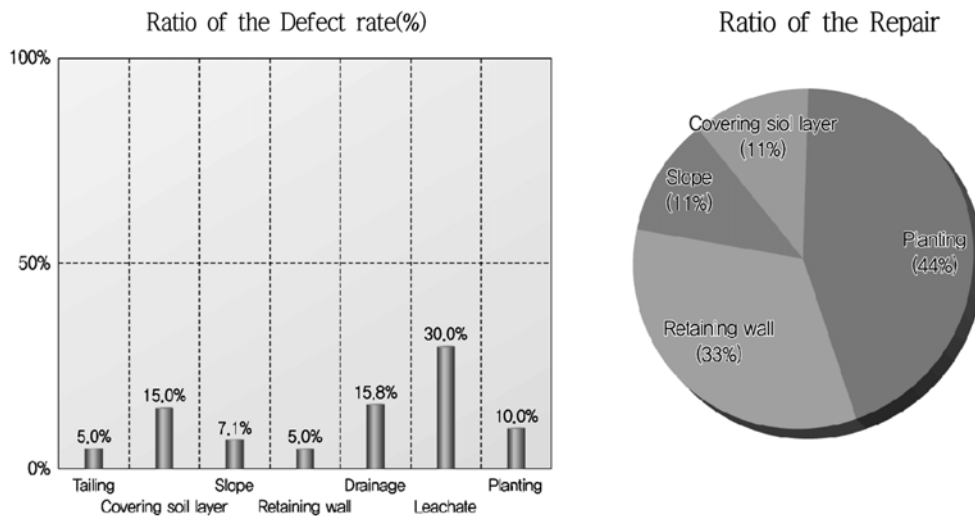


Fig. 2. Ratio of the defect & repair in the tailing dam.

이를 개선하기 위해서는 모니터링을 정량화하고 객관화할 수 있도록 세부적인 모니터링 항목의 재정립 필요하며, 세부항목의 각 평가방향에서는 평가자의 주관이 최소화될 수 있도록 발생 가능한 하자요인에 대한 객관적인 세부기준이 수립되어야 한다. 또한, 각 항목에 대한 점수를 부여하여 최종 평가 시 종합 및 개별 등급을 평가할 수 있는 방안이 마련되어야 하며 중요도에 따라 가중치를 주어 보수 우선순위를 명확한 근거 하에 선정하는 틀을 만들어야 한다. 그리고 모니터링 과정에서 하자의 원인을 정확히 제시할 수 있도록 하여 보수 시 하자원인에 대한 처리가 동시에 이루어질 수 있도록 해야 한다.

효과적 · 효율적 유지관리를 위한 모니터링 방안 제안

모니터링 항목 재정립

광물찌꺼기 적치장의 주요 평가항목으로는 콘크리트 옹벽, 석축, 자연석 쌓기 및 돌망태 옹벽 등의 옹벽구조물과 차수층, 복토층, 사면, 광물찌꺼기, 우수배제시설, 식생 등의 관련시설물 및 광물찌꺼기와 우수 및 지하수가 반응하여 생성·유출되는 침출수로 구분할 수 있다. 이러한 각 항목에서 발생 가능한 하자유형을 세분하여 모니터링을 수행해야 적치장 상태에 대한 상세한 결과를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 기존 모니터링 항목을 바탕으로 각 시설물에 대한 모니터링 평가항목을 재정립하였다(Table 9, 11).

기존 모니터링에서는 구조물의 파손 여부에 대한 모니터링을 수행하였으나 옹벽구조물에서 가장 중요한 모니터링 항목은 구조물의 변위발생 여부이다. 침하, 활동, 전도, 세

굴 등의 변위가 발생할 경우, 해당 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치므로 변위발생 여부에 대한 면밀한 점검이 필요하다. 그 외 파손, 손상, 균열 등의 변상과 콘크리트 마모/침식, 재료분리 등의 재질열화 항목에 대해서도 면밀한 점검을 통해 구조물의 안정성을 평가할 수 있는 기초자료를 획득하도록 평가항목을 수립하였다. 옹벽구조물에 대해서는 구조물과 기초지반에 발생할 수 있는 변위/변상/재질열화 등과 이에 의한 기능의 손상이나 상실 여부를 기준으로 평가가 이루어지도록 하였다.

차수층의 상태에 대한 기존 모니터링 평가방법은 현장 적용 시 모호한 개념이므로 차수층의 역할(광물찌꺼기 적치장 내로 내리는 우수의 침투를 차단함으로써 침출수의 발생을 억제하는 역할)에 따라 노출 및 훼손상태를 기준으로 평가가 이루어지도록 하였다.

식생의 기반이 되고 하위 차수층을 보호하는 역할을 하는 복토층은 일정한 두께를 유지하는 것이 중요하다. 또한 표면상태도 평활성을 유지해야 우수가 당초 조성된 구배를 따라 자연스럽게 배수됨으로써 연못화 현상 등에 의해 차수층에 가해질 수 있는 부담을 감소시킬 수 있다. 따라서 기존 토사유실 여부에 대한 모니터링에서 세굴, 침식 등을 추가하여 평가가 이루어지도록 하였다.

토사유실에 대해서만 모니터링을 수행한 사면은 파괴징후와 파괴발생 여부를 기준으로 평가가 이루어지도록 하였다.

광물찌꺼기는 핵심적인 오염원으로서 복토층과 차수층에 의해 보호되나 이들 상위 시설물이 훼손될 경우 노출될 수 있으며, 비산이나 유실에 의해 주변으로 오염을 확산시킬 수 있다. 따라서 광물찌꺼기는 노출 여부와 비산/유실 발생 유무를 기준으로 평가가 이루어지도록 하였다.

Table 9. Re-establish for the monitoring items.

Existing monitoring		Improvement plan of monitoring	
Check item	Evaluation item	Check item	Evaluation item
Retaining wall	Damage	Concrete retaining wall	Displacement, Damage, Degradation
		Reinforcing stone wall	Displacement, Damage, Degradation
		Mesh gabions	Displacement, Damage, Degradation
Liner	Yes/No, Condition	Liner	Yes/No, Condition, Groundwater level
Covering soil/Slope	Soil loss	Covering soil	Soil preparation, Soil loss
		Slope	Sign of destruction, Condition of destruction
Tailing	Exposure, Scattering, Sweep	Tailing	Exposure, Scattering, Sweep
Structure (drainage)	Damage	Rain protection facility	Stability, Watertightness, Flow ability
Leachate delivery pipe	Clogging	Leachate	Occurrence, Contamination level, Condition of delivery pipe, Effect of water system
Planting	Condition of surrounding area/Top	Planting	Condition of growth, Soil contamination level, Physicochemical property of soil

Table 10. Detailed standard of each item.

Division	Grade	Detailed standard
Retaining wall	1	• No displacement/compensating/degradation on structure and foundation ground
	2	• Displacement/compensating/degradation on structure and foundation ground happens but function is normal
	3	• Displacement/compensating/degradation on structure and foundation ground happened, potential damage of function
	4	• Displacement/compensating/degradation on structure and foundation ground happened, damage of function
	5	• Displacement/compensating/degradation on structure and foundation ground happened, loss of function
Liner	1	• Noo damage on liner
	2	-
	3	• Liner is exposed but no damage.
	4	• Damage on liner
	5	• Damage on liner, mine tailing is exposed or seepage of leachate
Covering soil	1	• No damage of covering soil layer, normal function
	2	• Damage of covering soil layer because of local scouring, irregular erosion
	3	• Narrow and shallow groove on surface (streamlet erosion)
	4	• High possibility of exposure of tailing due to deep groove caused by continuous streamlet erosion (gully erosion)
	5	• Exposure of liner or tailing due to loss of covering soil layer
Slope	1	• Nice condition (no destructor sign)
	2	• Local unevenness or exposure of slope protection
	3	• Destruction sign on slope such as crack of 선형 which has bad extensity
	4	• Ground transformation such as tension crack, inflation, sink and relaxation. transformation under structure of slope
	5	• Occurred to slop failure
Tailing	1	• No exposure of tailing
	2	-
	3	-
	4	• Exposure of tailing
	5	• Flowing or scattering of exposed tailing into downstream by rain/wind
Rain protection facility	1	• Excellent condition of safety and drainage
	2	-
	3	• Safety issue exist but no effect yet
	4	• Simple repair is needed due to reduced drainage function caused by incoming outside soil
	5	• No drainage function due to damage and structural reason
Leachate	1	• No seepage of leachate
	2	• Seepage of leachate exist but no contamination sign like yellow boy
	3	• Seepage of leachate like yellow boy exist, but no seepage yet
	4	• Seepage of leachate exists, but no downstream spread
	5	• Seepage of leachate, yellow boy exists on downstream
Planting	1	• Excellent taking root
	2	• Bad growth less than 25% of land
	3	• Bad growth less than 50% of land
	4	• Bad growth less than 75% of land
	5	• Bad growth more than 75% of land or no grass

우수배제시설(배수로)은 선형의 구조물로 국부적인 기능 손상이 전체적 기능 손상으로 연결되는 독특한 시설물이다. 기능 손상이 토사 등 이물질에 의해 발생한 경우에는 간단한 정비를 통해 기능이 회복될 수 있으나, 파손이나 변형으

로 경사도나 선형의 변화가 발생한 경우에는 구조적인 보수를 실시해야 한다. 따라서 우수배제시설에 대해서는 기능의 유지 여부 및 기능 손상의 정도에 따라 평가가 이뤄지도록 하였다.

Table 11. Standard of state assessment.

Grade	State	Standard of evaluation	Score
1	Excellent	No change on original condition	4
2	Good	Little change on original condition but function is normal	3
3	Okay	Change on original condition and potential damage of function	2
4	Bad	Change on original condition and damage of function	1
5	Worst	Change on original condition and loss of function	0

Table 12. Results of evaluation of field applicability.

Mine	Retaining wall			General facility							
	Concrete retaining wall	Reinforcing stone wall	Mesh gabions	Liner	Covering soil	Slope	Tailing	Rain protection facility	Leachate	Planting	
Kyeong-gi	Geumwang	-	defect	-	good	good	good	good	defect	good	good
	Yeosu	-	defect	-	-	defect	good	defect	defect	good	good
	Yongseok	defect	-	-	good	good	good	good	defect	good	good
Chung-cheong	Deokgok	good	-	-	good	good	defect	good	defect	good	good
	Eugene	-	good	-	-	defect	-	good	defect	good	defect
	Geopung	defect	defect	-	defect	defect	defect	defect	defect	defect	good
	Chengyang	good	-	-	good	good	-	good	defect	good	good
	Mooguk	good	-	-	-	-	good	good	defect	defect	good
Gang-won	Okgye	-	defect	-	good	good	-	good	defect	good	good
	Damgol	-	-	-	good	good	good	good	defect	defect	good
	Jiknaegol	-	-	-	good	good	good	good	defect	defect	good
	Dongbo	-	-	-	defect	defect	defect	good	defect	defect	defect
Yeung-nam	Okdong	defect	-	-	good	defect	good	good	defect	good	defect
	Geumjang	-	-	-	good	good	good	good	defect	good	good
	Jingok	-	defect	-	good	good	-	good	defect	good	good
	Ssangjeon	-	defect	-	defect	good	-	good	defect	defect	defect
	Hwacheon	defect	defect	-	-	defect	defect	defect	good	defect	good
	Sejum	-	-	-	good	good	good	defect	defect	good	good
Ho-nam	Daedu	-	-	-	good	defect	defect	good	defect	defect	defect
	Youngdae	-	-	-	defect	defect	good	good	defect	defect	good

침출수는 유출여부, Yellow-boy 등 오염징후 및 하류수계를 따라 오염 확산 범위에 대한 모니터링이 수행될 수 있도록 구성하였으며, 침출수 유도관이 설치되었을 경우, 유도관 상태에 대한 모니터링도 추가하였다.

식생은 활착 유무가 가장 중요한 점검항목이므로 생육불량 상태를 면적기준으로 정량화하여 평가가 이루어지도록 하였다.

모니터링 결과는 관리 대상이 준공 또는 보수한 상태를 유지하는지와 기능이 정상적으로 유지되는지를 평가하여 상태에 따라 5단계의 등급을 설정하고 등급별로 배점을 하여 정량적 평가가 가능하도록 하였다(Table 11).

개선안에 따른 현장 적용성 평가

기존 모니터링 수행대상 광물찌꺼기 적치장(총 20개소)에

대해 개선안에 따른 모니터링 항목을 기준으로 현장조사를 통해 그 적용성을 평가하였다.

현장 적용성 평가 결과, 7개 적치장에 적용된 콘크리트 옹벽은 용석, 거품, 옥동 및 화천광산 등 4개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었으며(57.1%), 8개 적치장에 적용된 석축(자연석 포함)은 금왕, 여수, 거품, 옥계, 진곡, 쌍전 및 화천광산 등 7개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었다(87.5%).

16개 적치장에 적용된 치수층은 거품, 동보, 쌍전 및 영대광산 등 4개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었으며(25.0%), 19개 적치장에 적용된 복토층은 여수, 유진, 거품, 동보, 옥동, 화천, 대두 및 영대광산 등 8개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었다(42.1%). 15개 적치장에 적용된 사면은 덕곡, 거품, 동보, 화천 및 대두광산 등 5개소에서

Table 13. Defect rate of each evaluation item according to evaluation of field applicability.

구 분	Retaining wall			General facility						
	Concrete retaining wall	Reinforcing stone wall	Mesh gabions	Liner	Covering soil	Slope	Tailing	Rain protection facility	Leachate	Planting
Number of analysis	7	8	-	16	19	15	20	20	20	20
Number of defect site	4	7	-	4	8	5	4	19	9	5
Defect rate (%)	57.1	87.5	-	25.0	42.1	33.3	20.0	95.0	45.0	25.0

Table 14. State assessment according to the result of evaluation of field applicability.

Mine	Retaining wall			General facility							Total score	
	Concrete retaining wall	Reinforcing stone wall	Mesh gabions	Liner	Covering soil	Slope	Tailing	Rain protection facility	Leachate	Planting		
Kyeong-gi	Geumwang	-	3	-	1	1	1	1	4	1	1	27/32 (84.4)
	Yeosu	-	3	-	-	5	2	5	4	1	1	14/28 (50.0)
	Yongseok	5	-	-	1	1	2	1	4	1	2	23/32 (71.9)
Chung-cheong	Deokgok	1	-	-	1	2	5	1	4	1	1	24/32 (75.0)
	Eugene	-	1	-	-	3	-	1	5	1	2	21/24 (87.5)
	Geopung	5	4	-	4	4	5	5	4	5	1	8/36 (22.2)
	Chengyang	2	-	-	1	1	-	1	4	1	1	24/28 (85.7)
	Mooguk	2	-	-	-	-	1	1	4	4	1	17/24 (70.8)
Gang-won	Okgye	-	3	-	1	2	-	1	5	1	1	21/28 (75.0)
	Damgol	-	-	-	1	2	1	1	4	3	1	22/28 (78.6)
	Jiknaegol	-	-	-	1	2	2	1	4	4	1	20/28 (71.4)
	Dongbo	-	-	-	4	4	5	1	4	5	5	7/28 (25.0)
Yeung-nam	Okdong	3	-	-	1	2	1	2	4	3	2	22/32 (68.8)
	Geumjang	-	-	-	1	1	1	1	4	1	1	25/28 (89.3)
	Jingok	-	4	-	1	1	-	1	4	1	1	22/28 (78.6)
	Ssangjeon	-	3	-	5	2	-	1	4	5	2	13/28 (46.4)
	Hwacheon	5	5	-	-	5	2	5	1	5	2	10/36 (27.8)
	Sejum	-	-	-	1	2	1	5	5	1	1	19/28 (67.9)
Ho-nam	Daedu	-	-	-	1	2	5	1	4	2	2	18/28 (64.3)
	Youngdae	-	-	-	4	5	1	1	4	5	1	14/28 (50.0)

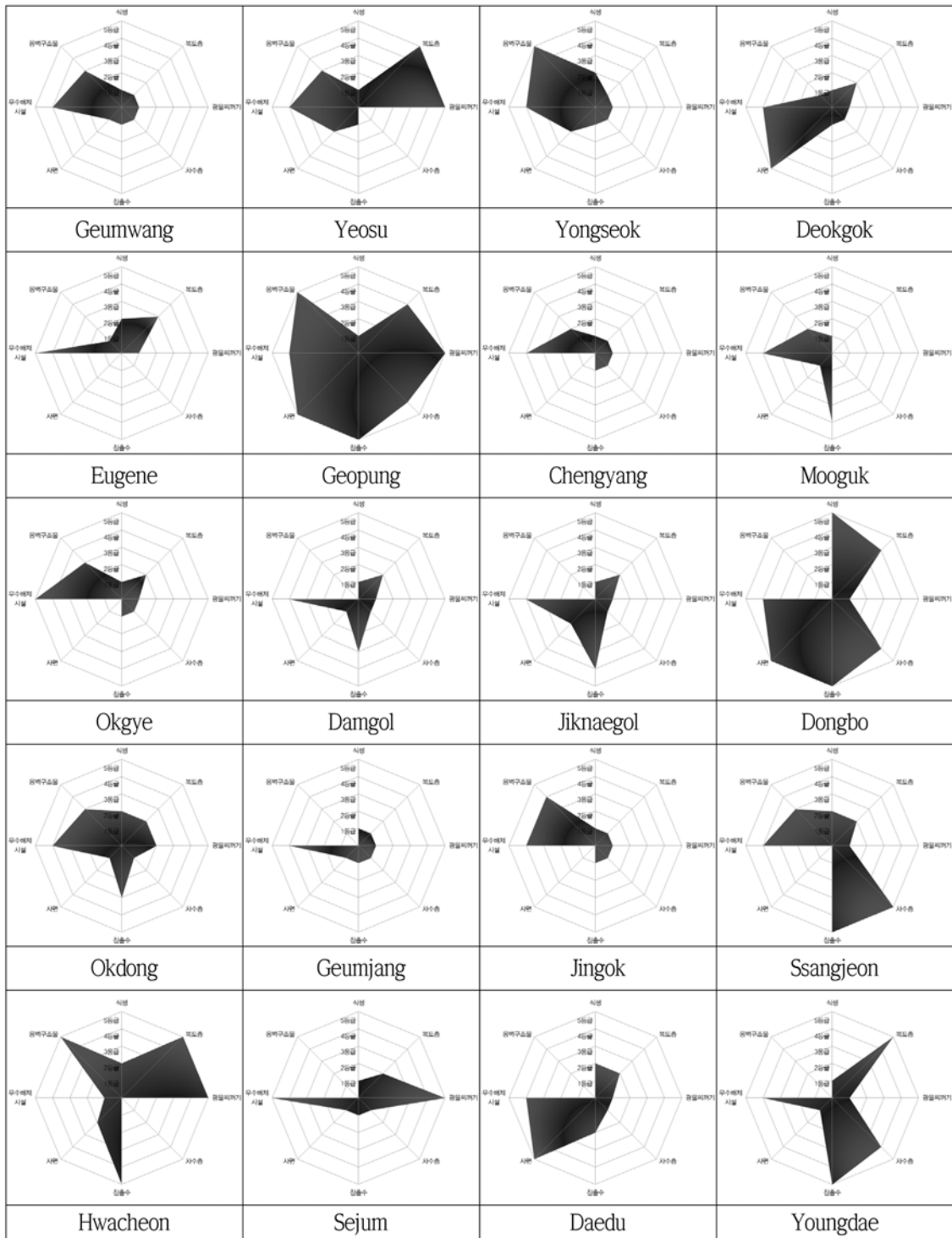


Fig. 3. Result of the state Assessment at the tailing dam.

하자가 발생한 것으로 평가되었으며(33.3%), 광물찌꺼기는 여수, 거풍, 화천 및 서점광산 등 4개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었다(20.0%). 우수배제시설은 화천광산을 제외한 19개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었다(95.0%). 침출수는 거풍, 무극, 땀골, 직내골, 동보, 쌍전, 화천, 대두 및 영대광산 등 9개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었

다(45.0%). 식생은 유진, 동보, 옥동, 쌍전 및 대두광산 등 5개소에서 하자가 발생한 것으로 평가되었다(25.0%)(Table 12, Table 13).

현장 적용성 평가결과의 항목별 불량건수를 기존 모니터링 결과와 비교한 결과, 용벽구조물 7건, 차수층 4건, 복토층 5건, 사면 4건, 광물찌꺼기 3건, 우수배제시설 16건, 침

출수 3건, 식생 3건의 하자발생 사항을 추가적으로 확인하였다. 이와 같이 다양한 하자요인이 기존 모니터링 대비 추가로 확인되는 것은 모니터링 시점차이에 의한 영향을 배제할 수는 없다. 그러나 주요 원인은 모니터링 항목 재정립에 따라 점검 및 평가항목을 세분화하고 정성적 판단 외 정량적 측정을 추가함으로써 보다 상세한 평가가 이루어졌기 때문으로 판단된다. 따라서 재정립된 평가항목을 적용하여 광물찌꺼기 적치장 모니터링을 수행할 경우, 기존 모니터링에 비해 상세하고 객관적이며, 표준화된 모니터링이 수행될 수 있을 것으로 사료된다.

개선안에 따른 항목별 상태평가

본 연구에서는 현장 모니터링에서 확인된 평가결과를 기준으로 적치장별, 모니터링 항목별 상태평가를 수행하여 항목별 등급, 배점을 부여할 수 있도록 하였다. 상태평가 결과는 광물찌꺼기 적치장의 정량적 평가에 활용할 수 있으며, 정량적 평가결과에 따라 적치장별 모니터링 주기설정, 항목별 및 광물찌꺼기 적치장별 유지관리 우선순위 선정 등에 활용할 수 있다.

상태평가는 광물찌꺼기 적치장 조성당사의 원상태를 유지하는 매우양호(1등급)에서 파손 및 손상이 발생하여 주변 환경으로 악영향을 미치는 매우불량(5등급)으로 구분하였으며, 등급별 배점을 부여하여 평가항목별 점수 및 적치장별 점수를 부여하였다(Table 11).

상태평가 결과, 콘크리트 옹벽은 용석, 거풍, 화천광산에서, 석축(자연석)은 화천광산에서 매우불량(5등급)으로 평가되었다. 차수층은 쌍진광산, 복토층은 여수, 화천, 영대광산, 사면은 덕곡, 거풍, 동보, 대두광산, 광물찌꺼기는 여수, 거풍, 화천, 서점광산, 우수배제시설은 유진, 옥계, 서점광산, 침출수는 거풍, 동보, 쌍진, 화천, 영대광산, 식생은 동보광산에서 매우 불량한 상태인 5등급으로 평가되었다. 적치장별 종합점수는 거풍광산이 8/36점(22.2점), 화천광산이 10/36점(27.8점)으로 낮은 점수군에 해당하며, 금장광산 25/28점(89.3점), 유진광산 21/24점(87.5점) 및 청양광산 24/28점(85.7점)으로 높은 점수군을 형성하였다(Table 14, Fig. 2).

이와 같이 모니터링 결과에 따른 상태평가를 수행할 경우, 적치장별 관리항목과 중점 관리대상 적치장을 선별할 수 있으며, 이는 광물찌꺼기 적치장 유지관리에 있어 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 항목별 하자발생률을 보면, 87.5%의 석축(자연석)이 파손 및 손상 가능성이 잠재되어 있는 3등급 이상으로 평가되었으므로 향후 광물찌꺼기 유실방지 사업에서는 석축을 배제하거나 적용할 경우에도 추가적인 보강대책이 필요함을 의미한다. 우수배제시설의 경우, 95.0%에서 4등급 이상으로 평가되었으나 이는 우수배제시설의 훼손·파손에 의한 결과가 아니라 광물찌꺼기 적치장이 대부분 산지에 분포하는 지

형적 특성에 기인하여 낙엽 및 토사 등의 이물질이 우수배제시설 내에 축적되어 발생하는 유하성능 저하가 그 원인이므로 유지관리 시 우수배제시설의 유하성능 향상을 위한 토사 등의 이물질 제거를 적극적으로 해야 함을 의미한다.

결론

환경유해시설에 해당하는 광물찌꺼기 적치장 유지관리를 위한 모니터링은 세분된 점검항목 및 평가항목의 선정을 통해 상세한 조사가 필요하며, 조사결과를 효과적으로 활용하기 위하여 불량정도 및 그 진행성 여부에 대한 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 효과적·효율적 유지관리를 위한 모니터링 방안을 다음과 같이 제안하였다.

첫째, 모니터링 항목을 옹벽구조물(콘크리트 옹벽, 석축, 돌망태) 및 일반시설물(차수층, 복토층, 사면, 광물찌꺼기, 우수배제시설, 침출수, 식생)으로 점검항목을 세분화하고 각 항목별 평가항목을 제시하였다(Table 9, 10).

둘째, 개선안에 따라 조사된 모니터링 결과에 대해 항목별 상태평가를 수행하여 매우양호에서 매우불량까지 총 5등급으로 평가하도록 계획하였다. 또한 등급별로 배점을 주어 점수화를 수행할 경우, 적치장별 종합 평가점수를 산출하여 체계적인 유지관리가 될 수 있도록 하였다(Table 10, Table 11).

개선안에 따른 현장 적용성 평가 결과, 기존 모니터링에 비해 최대 16건(우수배제시설)의 하자 발생 건수가 추가로 확인되는 등 기존 모니터링에 비해 세부적인 평가가 가능한 것으로 확인되었다. 광물찌꺼기 적치장별 종합점수는 금장광산이 89.3점으로 가장 양호한 것으로 확인되었으며, 거풍광산이 22.2점, 화천광산이 27.8점으로 불량한 것으로 확인되었다. 이상과 같이 모니터링 개선안을 적용한 결과 현장 조사에서 보다 상세한 모니터링을 수행할 수 있는 것으로 평가되었으며, 또한 현장조사 결과를 바탕으로 각각의 항목에 대한 정량적인 평가가 가능하였다. 이러한 정량적 평가는 향후 광물찌꺼기 적치장의 보수 우선순위를 결정하고 중점관리항목 선정, 유지보수 계획수립에 활용될 수 있다.

본 연구에 더하여 계층적 분석과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)를 적용하여 모니터링 항목별 중요도를 평가하고 이에 대한 가중치를 부여하여 종합점수를 산출할 계획이다. 이러한 각 모니터링 항목별 가중치를 적용한 적치장 종합점수는 적치장별 모니터링 주기를 결정하거나 대책을 수립하는데 활용성이 클 것으로 판단된다. 또한 모니터링 결과분석을 통해 적치장의 하자원인을 체계적으로 분석할 수 있고 이를 설계에 Feedback함으로써 설계내용이 개선되고 향후 시공되는 적치장의 하자발생을 최소화할 수 있는 자료로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2015년도 한국광해관리공단 “광물찌꺼기 적치장 효율적·효과적 유지관리를 위한 모니터링 방안 및 평가기법 개발 연구” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Jung, M. C. and Jung, M. Y., 2006, Evaluation of environmental contamination for abandoned metal mine and management plan, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 43(5), 383-394.
- Korea Mine Reclamation Corporation, 2011, Technical level of mine reclamation, development project of mine reclamation technique.
- Korea Mine Reclamation Corporation, 2011, Monitoring of behavior characteristic of heavy metal in tailing and control of spread.
- Korea Mine Reclamation Corporation, 2011, Statistics.
- Korea Mine Reclamation Corporation, 2012, Safety evaluation and development of maintenance technique for tailing dam.
- Korea Mine Reclamation Corporation, 2013, Safety evaluation and development of maintenance technique for tailing dam.
- Korea Mine Reclamation Corporation, 2014, Safety evaluation and development of maintenance technique for tailing dam.
- Kwon, H. H., Nam, G. S., 2009, Mine reclamation engineering, Donghwa, p 373.
- Min, J. S., 2002, Mine reclamation and recovery of abandoned metal mine, Policy of Mine Reclamation and Technique Symposium, KIGAM, 37-53.
- MOLIT, 2011, Safety check and detailed safety check detailed guide manual (common).
- MOLIT, 2011, Safety check and detailed safety check detailed guide manual (retaining wall).

오삼주

(주)산하이앤씨

462-120 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124

Tel: 031-776-0682

Fax: 031-776-0688

E-mail: ssams78@naver.com

김기준

(주)산하이앤씨

462-120 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124

Tel: 031-776-0682

Fax: 031-776-0688

E-mail: kkj@sanhaenc.com

송재용

(주)산하이앤씨

462-120 경기도 성남시 중원구 사기막골로 124

Tel: 031-776-0682

Fax: 031-776-0688

E-mail: sjy1010@hanmail.net

최의규

한국광해관리공단

26464 강원도 원주시 세계로 2(반곡동, 한국광해관리공단)

Tel: 031-902-6735

Fax: 031-902-6739

E-mail: ukchoi@mireco.or.kr