적치댐 유실 예방 관점에서 본 광물찌꺼기 특성

박제현^{1)*} · 최홍일¹⁾ · 양인재¹⁾

Mine Tailings Characteristics with a View of Prevention of Tailings Dam Failure

Jay-Hyun Park*, Hong-Il Choi, and In-Jae Yang

(Received 23 August 2018; Final version Received 29 August 2018; Accepted 29 August 2018)

Abstract : Tailings wasted in mine activity, has smaller silty size than fine aggregates. When tailings included heavy metals exposed to the atmosphere, they act as contamination source of soil and streams in the area surrounding mine. worthless tailings are stacked in tailings facility built on idle land near mine and covered by liner and top soil layers. The type of most of tailings dams in domestic mines is upstream dam. Unfortunately, as upstream dam is vulnerable to earthquakes and heavy rain, it should be managed continuously to prevent tailings loss. To prevent dam failure, measurement system such as leachate rate, water level, pore pressure and vertical or horizontal movement should be installed to secure quantitative data and analyzed data to develop indicator related dam failure. However, these measurement technologies related to analysis on local slope, subsidence, strain are quite expensive so that new technologies in various field should be actively incorporated to activate tailings facilities monitoring.

Key words : Tailings, Tailings dam, Dam failure, Upstream dam

요 약 : 광업활동에 의해 발생하는 광물찌꺼기는 잔골재보다 작은 실트질 토질 특성을 가진다. 폐광지역 금속 광산 광물찌꺼기는 방치되어 중금속 용출로 주변 수계나 토양의 오염원으로 작용한다. 광물찌꺼기는 경제성이 적어서 광산 주변 유희부지에 댐을 쌓아 적치하며, 침출수 발생 최소화를 위한 상부복토 등 차폐층을 광물찌꺼기 적치장 상부에 설치하는 것이 일반적이다. 대다수 광물찌꺼기 적치댐은 상류(upstream)형이며 이는 지진, 집중호우에 취약해서 적치댐 유실사고를 예방하기 위한 지속적 관리가 필요하다. 적치댐의 유실을 예방하기 위해서 침출수량, 적치장 및 댐내 지하수위, 댐내 간극수압, 댐내 수직 및 수평 움직임 등 계측시설 설치로 정량적 데이터를 확보하고 유실관련 지표개발을 위한 데이터 분석을 수행한다. 국부적 사면계측, 침하분석, 변형분석 등을 위한 계측기술은 엄격한 사전 및 사후 조치가 필요하며, 적치댐 사후관리 활성화를 위한 다양한 기술이 접목될 필요성이 절실하다.

주요어 : 광물찌꺼기, 적치댐, 유실사고, 상류(upstream)형 댐

서 론

2015년 11월 BHP사와 Vale사의 합작회사에서 운영하는 브라질 Samarco 광산에서는 광물찌꺼기 적치댐(TSF, Tailings storage Facility)의 붕괴사고가 발생하였다. 이 사건으로 19명이 사망하였고, 브라질 역사상 최대의 환경재난으로 기록되었다. 이들 회사는 브라질 주정부 및 브라질 여러 공공기관들과 15년간 댐붕괴로 발생한 환경오염을 정화하고 보상하는 협약을 맺었으며, 추정되는 정화 및 보

상규모는 24억불(약 2조 6천 400억 원)에 해당하며 투자자에게 미친 손해 5천만불을 지불해야 한다(Paula Concha, 2018). 이 사건으로 주변 5,000여 개 하천지류에 광물찌꺼기가 쌓였고, 생태보호구역 16,000헥타르와 하천둑 주변 1,200헥타르에 걸쳐 광물찌꺼기가 쌓였으며, 인근 생태계와 1백만 명에 달하는 사람들의 삶에 영향을 미쳤다(BHP, 2017; Fernandes *et al.*, 2016). 지난 백년간 알려진 전세계 약 18,400여개 광산에서 보고된 광물찌꺼기 적치댐 붕괴건수는 230여개로 붕괴사고율은 약 1.2%인 반면, 저수조댐(water retention dam)의 붕괴율은 0.01%로 나타나 광물찌꺼기 적치댐 붕괴사고율이 일반댐보다 100배 이상 높은 것으로 나타났다(ICOLD, 2001). 광물찌꺼기 적치댐이 취약한 이유는 댐체 제방 재질을 광산에서 발생하는 광물찌꺼기, 폐석 등 불균질 재질의 사용, 가뭄중 지속적으로

1) 한국광해관리공단 기술연구센터

*Corresponding Author(박제현)

E-mail; jayhp@mireco.or.kr

Address; Institute of mine reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation, 2, Saegye-ro, Wonju-si, Kangwon-do, Korea

담체를 쌓아올리면서 기하급수적으로 증가하는 유출수량, 적치장 안정성에 대한 시공 규정 미비, 부적절한 관리 혹은 관리부재 등이 있다(Rico *et al.*, 2008). 국내에서는 가행중인 광산보다는 폐광산이 많이 존재하며, 광물찌꺼기 적치장을 보유했어야 하는 금속광산은 가행광산 대비 폐광산 비율은 더욱 높아진다. 따라서 관리해야 할 폐광이 많은 국내에서 주목해야 할 적치담의 취약점은 관리측면이다.

최근 지구온난화 등에 의한 이상기후로 날씨의 변동폭이 커지면서 국지적 집중호우, 태풍, 홍수와 가뭄 등 자연재해의 발생이 빈번해지고 있으며, 발생 기간도 점점 장기화되는 경향을 나타내고 있다(IPCC, 2001). 이는 적치담을 비롯한 광산재해를 야기시킬 수 있는 요소들이 이상기후에 매우 취약해질 수 있음을 의미한다.

본 지에서는 광물찌꺼기 적치장의 특성을 살펴보고 적치장의 취약점과 예방방안에 대해 살펴보았다.

광물찌꺼기의 특성

광석의 분쇄 및 분리공정을 거친 후 발생하는 광물찌꺼기는 분쇄과정을 거치기 때문에 일반 토양에 비해 미립의 특성을 갖는다. 통상적으로 부유선별 공정을 거치는 광석

의 크기를 보면 D_{80} (전체 양의 80%의 입자가 통과되는 체의 크기)은 40~100 μm 인 것으로 보고된다(Johnson, 2002) 선광과정을 거치면 미립자들이 *entrainment* 등의 이유로 정광쪽으로 유입이 되는 경우가 많아 광물찌꺼기의 입자크기는 선광전 입자보다 약간 커지는 경향을 보인다.

국내 50여 개의 광물찌꺼기를 조사한 결과 D_{80} 은 70~400 μm 정도로 해외 보고사례보다 큰 편으로 나타났다. 한편, 광물찌꺼기에 존재하지 말아야 할 4.75 mm 이상 자갈의 양은 평균 2.2%로 나타나는 것으로 보아 조사된 광물찌꺼기들 대부분은 적치장에 오랜 기간 노출 혹은 복토재의 영향 등으로 인해 외부 토양 및 자갈과 혼입된 것으로 보인다.

Fig. 1은 국내 49개 금속광산 광물찌꺼기의 0.075 mm이하 입자의 함량을 나타낸 것으로 입도가 매우 폭넓게 존재함을 알 수 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 금속 광석내 내포된 유가광물(valuable minerals)의 크기(grain size)는 매우 다양하게 존재하기 때문에 광물찌꺼기의 입도는 매우 다양하게 나타날 수밖에 없으며, 특정 크기로 일반화하는 것이 매우 어렵다. 광물찌꺼기들의 비중은 2.61~4.00 g/cm^3 로 나타나며, 평균은 2.82 g/cm^3 로 일반 토양 비중 2.65 g/cm^3 보다 약간 무거운 편이다.

Fig. 1의 자료를 토대로 광물찌꺼기를 흙의 토양분류법

Fig. 1. Ratio of particle under 0.075 mm in surveyed domestic mine tailings.

Table 1. The range of mine tailings in the Unified Soil Classification System (USCS).

Criteria for assigning group symbols and group names			Symbol ¹⁾	Soil clasification	
Coarse-grained soils (More than 50% retained on No. 200 Sieve)	Gravels (More than 50% of coarse fraction on No. 4 Sieve)	Clean Gravels Less than 5% fines	$Cu \geq 4$ and, $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Well graded gravel
			$Cu < 4$ and, $Cc < 1$ or $Cc \geq 3$	GP	Poorly graded gravel
		Gravels with fines more than 12% fines	Fines classify as ML or MH	GM	silty gravel
			$4 \leq PI \leq 7$	GM-GC	silty-calvey gravel
			Fines classify as Cl or CH	GC	clayey gravel
	Sands (50% or more of coarse fraction passes No. 4 Sieve)	Clean sands Less than 5% fines	$Cu \geq 6$ and/or, $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Well graded sand
			$Cu < 6$ and/or, $Cc < 1$ or $Cc \geq 3$	SP	Poorly graded sand
		sands with fines more than 12% fines	Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand
			$4 \leq PI \leq 7$	SM-SC	Silty-calvey sand
			Fines classify as Cl or CH	SC	clayey sand
Fine-grained soils (50% or more passes the No. 200 Sieve)	Silts and clays (LL less than 50)	Inorganic	$PI < 4$ and plots below “A”line	ML	silt
			$PI > 7$ and plots on or above “A”line	CL	lean clay
			Organic	OL	Organic clay
	Silts and clays (LL less 50 or more)	Inorganic	PI plots below “A”linei plots	MH	Elastic silt
			PI plots on or above “A”line	CH	Fat clay
			Organic	OH	Organic alay, Organic silt
Highly organic soils			Pt	Peat	

¹⁾ First character(G: Gravel, S: Snad, M: Silt, C: Clay, O: Organic), Second character(W: Well graded, P:Poorly graded, H:High Plasticity, L:Low plasticity)

(ASTMD2487-11, 2011)에 따른 토성분류를 Table 1에 표시하였다. 광물찌꺼기는 SM, SC, ML, CL, MH, CH의 토성에 해당한다.

광물찌꺼기의 아터버그 한계(Atterberg Limit)를 측정하여 Table 2에 나타내었다. 국내 광물찌꺼기들은 점토질이 섞인 모래(SC)가 전반적으로 많이 나타나는 경향이 있으며, 실트질이 섞인 모래(SM), 저압축성 무기질 실트(ML) 등의 특성을 가진 것들이 나타난다.

Fig. 2는 조사된 광물찌꺼기들의 XRF 분석 자료의 평균치들이다. 모든 광종에서 가장 많은 것은 실리카 성분과 알

루미나 성분이며, 금, 은 광물찌꺼기가 다른 광종들에 비해 실리카 성분이 약 10%정도 높게 나타나는 경향이 있다. 알루미늄, 철, 석회성분 등은 광종에 상관없이 대동소이하다.

광물찌꺼기에 존재하는 오염물로는 중금속류가 있다. 주로 구리, 납, 아연 등 비철금속 광산의 광물찌꺼기에서 구리, 납, 아연, 비소 등 중금속 존재가능성이 있으며, 금, 은 광산 광물찌꺼기에서는 주로 일반 금속보다는 비소가 존재할 가능성이 높다. Fig. 3은 조사된 광물찌꺼기들을 광종별로 구분하여 오염기준 초과율을 보면 금은광산 광물찌꺼기들중 비소의 토양오염공정시험법에 의한 토양오염기준 초

Table 2. Atterberg Limit and Classification of Mine tailings.

mine	Liquid Limit (LL)	Plastic Limit (PL)	Plastic index (PI=LL-PL)	Shrinkage limit (SL)	Classificaation by USCS
Yangyang		NP(non plastic)		13.22	
Keodo	19.26	15.15	4.11	12.46	SC
Okryung2	25.34	21.98	3.36	15.45	SM
Asung	50.36	26.11	24.25	11.76	CH
Palbo	42.37	25.79	16.58	19.02	SC
Ypungjoong	39.60	26.07	13.53	17.94	CL
Yongseok	21.59	15.88	5.71	11.17	ML
Kuimyung		NP		11.81	
Koonbook	28.75	21.92	6.83	15.54	SC
Deokchon	20.57	14.15	6.42	10.85	SC
Chonam	24.46	18.28	6.18	12.65	SC
Deukeum	27.67	21.22	6.45	15.49	SC
Moodeung		NP		12.62	
Bongwhang	30.51	19.59	10.92	14.21	SC
Eunjeok		NP		14.39	
Deokon		NP		13.23	
Daebong		NP		12.14	
Bowon	26.29	18.95	7.34	13.33	ML
Keumho	23.68	18.00	5.68	12.74	SC

Fig. 2. Main chemical components of surveyed mine tailings (XRF analysis).

과 비율은 32%로 카드뮴, 구리, 납 등 일반중금속의 오염비율 14%에 비해 높은 것을 볼 수 있다. 연, 아연 광산 광물찌꺼기는 카드뮴이나 납의 오염기준 초과율은 29%인 반면 비소의 오염기준 초과율은 매우 낮았다. 조사된 금은광산 광물찌꺼기들중 중금속 토양오염기준 초과율은 78%, 연, 아연 광물찌꺼기들중 중금속 토양오염기준 초과율은 100%, 중석, 몰리브덴 광물찌꺼기들중 중금속 토양오염기준 초과율은 40%로 나타났다. 한편 조사된 금, 은광산 광물찌꺼기들중 49%, 연, 아연광산 광물찌꺼기들중 72%, 중석, 몰리브덴광산 광물찌꺼기들중 40%가 폐기물공정시험법에 의한 중금속 폐기물오염기준 초과율을 초과하였다.

Fig. 4는 조사된 광물찌꺼기들의 paste pH와 황함량을 나타낸 것이다. pH는 광종과 상관없이 2.5~8.5의 범위에서 폭넓게 존재한다. 국내 금, 은, 중석, 몰리브덴 광물찌꺼기는 산성광물뿐 아니라 석회석이나 백운석 등 알칼리광물을 함유하는 것으로 보이며, 연, 아연 광물찌꺼기에는 석회석이나 백운석 성분은 없는 것으로 파악된다. 금, 은광산 광물찌꺼기들의 황함량은 0~32%까지 매우 폭넓게 존재하고

있으며, 중석, 몰리브덴 광물찌꺼기의 황함량은 ~2.8%까지 비교적 낮은 값으로 나타났다.

광물찌꺼기 적치장의 유형

광물찌꺼기 적치장은 댐의 형태로 지어진다. 일반 물저장댐과 차이가 있다면 광물찌꺼기 적치장 댐은 광산이 진행되는 동안 광물찌꺼기가 쌓이는 높이만큼씩 서서히 건설하는 것이다. 일반적으로 알려진 적치댐의 형태는 상류(upstream)형, 하류(downstream)형, 중심선(centerline)형, 저수(water retention)형의 4가지가 일반적이다. Fig. 5는 광물찌꺼기 적치장에 일반적으로 사용되는 댐의 형태를 나타낸 것이다(Vick, 1983). 전세계적으로 경제적으로 댐건설비용이 가장 저렴한 상류(upstream)형 댐으로 적치장을 건설하는 경우가 많다. 상류(upstream)형 댐이 경제적이긴 하지만 댐붕괴 등 가장 사고가 많이 나는 적치장 형태이기도 하기 때문에 강우량이 많은 지역이나 집중호우 지역, 지진 발생가능 지역에서는 적용시 제외되어야 하는 유형이

(a) Soil Pollution Standard in Korea

(b) Waste Pollution Standard in Korea

Fig. 3. Heavy metal pollution standard excess rate of surveyed domestic mine tailings.

(a) pH variation

(b) Sulfur variation

Fig. 4. Variation of pH and sulfur contents in surveyed domestic mine tailings.

다. 상류(upstream)형 댐은 댐체물질 사용량이 가장 적기 때문에 적치장의 안정성을 확보하기 위하여 모래질 광물찌꺼기와 실트질 광물찌꺼기를 구분하여 적치한다. 보통 선광플랜트에서 적치담까지 광물찌꺼기는 펌프로 파이프이송된다. 적치장쪽 파이프 끝단에는 싸이클론을 연결하여 모래질 광물찌꺼기와 실트질 광물찌꺼기를 분리하며, 모래질 광물찌꺼기는 댐체에 가깝게 적치하고 실트질 광물찌꺼기는 댐체로부터 멀리 적치시킨다. 댐체와 인접한 모래질 광물찌꺼기 지역은 투수성이 확보됨으로서 댐체를 지지하는 역할을 한다. 국내에서는 대부분 상류(upstream)형 적치담을 건설하는 경우가 많으며, 잘 알려진 옥동광산, 몽골 에르데넛구리광산 등이 대표적 상류(upstream)형 댐 적치장이다.

구조적으로 가장 안전한 형태의 댐은 하류(downstream)형 댐과 저수(water retention)형 댐으로 알려져 있다. 모양과 댐체 물질 규모로 볼 때 하류(downstream)형 댐과 저수(water retention)형 댐은 매우 유사하다. 이들 댐의 장점은 댐체의 크기가 크므로 구조적으로 안전한 것이나, 단점은

댐체 물질이 많이 필요하다는 것이며 보통 댐체는 광산에서 구하기 쉬운 폐석이나 모래질 광물찌꺼기, 주변지역 외부 암석들을 복합적으로 활용한다. 건설시 ARD(Acid rock drainage) 발생가능성이 높은 폐석은 광물찌꺼기와 접하는 내부 댐체 물질로 사용하며, 댐체 바깥쪽 물질은 보통 ARD 발생가능성이 없는 외부 암석이나 토양을 충전물질로 사용한다. 이런 댐들은 건설비용은 높으나 구조적으로 안정하므로 스웨덴 등에서는 광물찌꺼기 적치담은 모두 저수(water retention)형 댐으로 건설한다(Garnish, 2015). 충남 청양에 위치한 삼광광산 주광미댐과 필리핀 라푸라푸광산 광물찌꺼기 적치담의 경우 내부에 점토 core가 있는 저수(water retention)형 댐으로 건설되었다.

국내에서는 계곡형 적치장이나 중대형 광물찌꺼기 적치장을 건설할 때 댐을 건설하고, 소형의 사면형 적치장이나 평지형 적치장은 옹벽을 사용한다. 국내 광물찌꺼기 적치장의 약 80%는 1만 m^3 이하의 소형 적치장이며 백만 m^3 이상의 대형 적치장은 약 1% 정도를 차지한다(Fig. 6).

Fig. 5. Type of Mine tailings dam.

Fig. 6. Distribution of domestic mine tailings facilities by scale.

광물찌꺼기 유실

광물찌꺼기 적치댐 사고 연대기(WISE, 2018)와 ICOLD 발표자료(ICOLD, 2001)로부터 얻은 전 세계 광물찌꺼기 적치댐 발생현황은 Fig. 7과 같다. 1960년대부터 2018년 상반기까지 보고된 적치댐 붕괴사고는 230여건으로 나타났다. 1960년대부터 1980년대까지 연간 평균 5.5건 정도의 적치댐 붕괴와 관련된 사고들이 발생하였다. 1990년대는 연간 평균 3.2건 정도로 감소하였고, 2000년 이후부터는 연간 평균 2.2건 정도로 감소하였다. 하지만 Bowker and Chambers(2015)의 보고에 따르면, 100,000 m³ 이상의 광물찌꺼기가 유실되고(and/or) 사망자가 발생한 “심각한” 붕괴사고는 총 38건인데 이중 17건에 해당하는 45%가

1990년부터 2009년까지 20년 동안에 발생하였고, 1,000,000 m³ 이상의 광물찌꺼기/오염수가 유실되거나(and/or) 광물찌꺼기가 20km 이상 이동되거나 20인 이상의 사망자가 발생한 “매우 심각한” 붕괴사고는 1910년 이후 역사상 29건이며 이중 55%인 16건이 1990년부터 2009년까지 20년 동안에 발생하였다.

2010년 이후 2018년 상반기까지 8년 6개월 동안 “심각한” 붕괴사고는 22건중 6건으로 27%가 해당되며, “매우 심각한” 붕괴사고는 22건중 7건으로 32%에 해당한다. 최근의 붕괴사고가 건수로 보아도 2000년대와 비슷하며, 발생비율도 2000년대와 근접하고 있다. 이처럼 광물찌꺼기 유실사고 건수는 과거 60-80년대와 비교하면 많이 감소하였으나 유실사고의 규모는 더욱 커졌다고 보는 것이 타당

Fig. 7. Tailings Dam Failure after 1960s.

Fig. 8. The cause of Tailings Dam Failure in the world between 1960-2009 (Source : ICOLD, 2001; Bowker and Chambers, 2015).

하다. Bowker and Chambers(2015)는 광물의 평균품위가 감소하지만 광물의 생산량은 증가하여 전체적으로 광물찌꺼기의 양이 증가하고 이로 인해 광물찌꺼기 적치장의 규모도 커지면서 유실사고의 규모도 커진 것으로 추정했다. 실제로 1885년 호주에서 구리광석의 평균품위는 10%였으나 2005년에는 0.77%로 낮아졌다(Giurco, 2010). 12년이 지난 2017년도의 생산되는 구리광석의 평균 품위는 0.58%까지 더 낮아졌다(AME Research, 2018).

적치댐 붕괴사고 원인은 물넘기, 사면불안정, 지진, 연약지반, 침출수, 구조불안, 표면침식, 지반침하, 원인불명 이렇게 9가지로 대별된다(Fig. 8)(ICOLD, 2001; Bowker and Chambers, 2015). 광물찌꺼기 적치장 붕괴사고의 주요 원인은 사면불안정, 물넘기, 지진을 들 수 있다. 사면불안정은 사면이 국부적 혹은 전체적으로 포화되 되면 변형이 발생되면서 사면붕괴가 발생하므로 사면 특히 관리구간은 건조상태로 장시간 유지시켜야 한다. 두 번째로 많은 붕괴사고의 원인은 물넘기(overtopping)이다. 특히 상류(upstream)형 댐이 집중호우 등의 원인으로 포화되어 물넘기가 발생하거나 지진이 발생하면 액상화(Liquifaction) 현상의 발생으로 댐붕괴 사고가 발생한다. 다음으로 지진의 발생으로 적치장 붕괴사고가 많이 발생했다. 상류(upstream)형 댐이 또한 여러 댐 형태중 지진에 가장 취약한 형태이다. 연약지반에 의한 붕괴사고는 점토나 광물찌꺼기의 존재 등 지반 안정성이 확보되지 않은 상태에서 적치댐을 건설하여 발생한 경우이며, 구조불안은 적치댐이나 배수로 등 설계를 잘못하여 구조물이 제기능을 못하는 경우이다. 침출수 원인은 광물찌꺼기 적치장내 침출수에 의한 내부침식의 발생으로 파이핑 현상이 나타나고 이것이 발전되어 댐의 붕괴를 야기시키는 경우이다. 표면침식은 외부침식으로 지표배출(run-off)되는 물줄기가 모여 큰 세굴을 발생시키고 세굴의 발생으로 지표배출수의 속도가 빨라지면 침식이 커지면서 사면이 무너져 내리는 경우이다. 그 외 지반침하로 인해 붕괴사고가 발생하기도 했지만 지반침하는 다른 원인들에 비해 빈도가 낮고 유래가 드문 편이다.

붕괴원인들을 살펴보면 댐관리와 상관없는 외적요인에 의한 사고는 지진, 지반침하에 의한 경우이며, 댐 시설물 건설과 관련되어 사전 설계 및 시공을 잘 수행하면 예방되는 사고는 구조불안, 연약지반, 사면불안정에 의한 경우이다. 그 외 물넘기, 침출수, 표면침식과 같이 강우량에 영향을 받는 경우는 관리를 통해 예방해야 하는 사고유형이다. 국내 광물찌꺼기 적치장 사업을 수행할 때는 사면안정해석을 통해 사면불안정을 대비하고 있으며, 사전조사를 통해 연약지반을 기본적으로 피하기 때문에 이런 유형의 사고발생가능성은 높은 편은 아니다. 하지만 물넘기, 침출수, 표면침식은 대량의 집중호우나, 홍수 등에 의해 발생가능성이 있는

사고이기 때문에 철저한 관리가 필요하다. 폐광산 광물찌꺼기 적치장의 경우는 구조불안, 연약지반, 사면불안정에 의한 붕괴사고 가능성은 낮은 편이다. 물넘기와 침출수 발생을 최소화하기 위해 시공단계에서 차폐와 배수시공을 수행하고 있으나 차폐와 배수성능의 유효성이 어느 정도까지 지속되는지에 대해 관리차원에서의 확인은 되지 못하는 실정이다.

관리주체의 부재 및 폐광 후 관리비용이 없어 우회수로 관리, 막힌 배수로 정비, 식생관리, 소규모로 발생된 표면침식구간 정비, 구조물의 파손을 지속적으로 수행하지 않으면 표면침식이 발전될 가능성이 높다. 따라서 폐광에 대한 기본적인 사후관리는 매년 지속적으로 수행되어야 한다. 국내는 집중호우 기간이 6월에서 9월에 집중되므로 사전정비를 통해 표면침식 가능성을 많이 낮출 수 있다. 하지만 물넘기, 침출수에 의한 내부침식은 사전정비를 수행할 수 없다. 그 사유는 국내 광물찌꺼기 성분중에 모래질 성분이 앞서 살펴본 바처럼 많은 함량을 차지하여 내부침식이 발생할 가능성이 있다는 점이다. 현재로서는 적치장의 포화상태 관리(지하수위 관리), 침출수 발생을 실시간 관리를 통해 내부침식 징후를 사전에 인지하면 붕괴사고 발생시 사전 대응 등을 통해 피해를 최소화할 수 있다.

폐광이후 적치장 사후관리

폐광이후에도 광물찌꺼기 적치장의 모니터링은 주기적으로 수행되어야 한다. 하지만 현실적으로 전 세계에서는 폐광이후 광산시설의 관리는 광산에서 하지 않으며, 지자체에서도 실질적 관리를 수행하지는 않는다. 이로 인해 광물찌꺼기 적치장의 장기적인 특성에 관련된 자료는 매우 부족한 현실이다.

ICOLD(International Commission on Large Dam)-UNEP (United Nations Environmental Program) 는 광물찌꺼기 적치장의 장기 모니터링 및 유지관리를 위해 필요한 모니터링 요소들로 댐, 기초, 교각 등을 통과하여 발생하는 침출수량, 적치장 및 댐내 지하수위, 댐내 간극수압, 댐내 수직 및 수평 움직임을 선정하였다(ICOLD, 1996). 이후 ICOLD는 추가적으로 광물찌꺼기의 풍화, 침식, 빙하영향, 동식물의 훼손영향 등이 댐의 장기 안정성에 영향을 미치는 요소로 포함시켰다(ICOLD, 2006).

폐광후 광물찌꺼기 적치댐의 장기 안정성을 담보하기 위해서는 반영구적으로 주기적으로 모니터링을 수행해야 하며, 모니터링으로 발견된 결함발생을 찾아 보수하는 작업들이 필요하며 이를 위해서는 조사비용과 수리비용이 지속적으로 필요하나, 안타깝게도 예기치 못한 천재지변으로 인해 보수에 필요한 비용 예측은 상당히 어려운 단점이 있다.

적치댐의 사후관리를 위해 사물인터넷(IoT, Internet of things)기술과 클라우드 컴퓨팅(CC, Cloud computing)기술을 기반으로 사전경보시스템을 설치할 수도 있다. Sun *et al.*(2012) 등은 적치장에 간극수압계, 지하수위센서, 변형율센서, 강우계, GPS를 기반으로 사물인터넷 네트워크와 클라우드 컴퓨팅을 연결하여 관련자들과 데이터를 공유하는 시스템을 구축하여 적치장 위험 사전경고시스템으로 활용하는 방안을 제시하였다. 조사원이 수많은 적치장을 돌아다니면서 주기적으로 조사하는 것은 비용도 많이 소요되기 때문에 사후관리는 사물인터넷 기술을 적극적으로 활용하는 방향으로 나아가야 한다. 사전경고시스템으로 가기 위해서는 다양한 센서들을 활용한 충분한 빅데이터를 확보하고 전조증상이나 이상 징후여부를 파악하기 위한 분석작업을 수행해야 한다. 하지만 현재 계측기술은 점포인트 분석을 중심으로 이루어져 있으며, 국부적 사면분석, 침하분석, 변형분석 등을 위한 계측기술은 아직 확보되지 못한 상황이거나 아니면 매우 고가의 기술이다. 이와 관련하여 좀 더 많은 분야가 융합되어 새로운 기술들이 적극적으로 접목되어야 할 필요가 있다.

결 론

광산활동에서 발생하는 대표적인 오염의 형태중 하나가 광물찌꺼기의 유실이다. 광물찌꺼기의 유실은 단기적으로 저수댐의 붕괴와 같은 하부지역 인명피해나 재산피해를 입힐 뿐만 아니라 장기적으로 주변 수계를 오염시켜 수생태계를 파괴시키고, 주변 토양을 오염시켜 농작물 작황에 피해를 입히거나 인체의 건강에 악영향을 미칠 수 있다. 실제로 국내 광해방지사업비의 약 55~60%정도는 수질정화사업과 토양정화사업에 사용된다. 광물찌꺼기는 수질과 토양의 오염원으로 작용할 수 있으므로 광물찌꺼기의 유실방지는 매우 중요하다. 한번 하천 등으로 유실된 광물찌꺼기는 확산으로 인해 복구비용이 단순 유실방지사업의 몇 배에서 몇 백배에 이른다. 따라서 광물찌꺼기 유실방지를 위한 시설물 구축을 잘 수행하는 것뿐만 아니라 완료된 반영구적 시설물의 지속적인 사후관리 노력이 절실하다. 하지만 폐광시설의 주체가 불분명하다는 이유나, 관리비용에 대한 책임소재가 명확하지 않아 방치하게 되면 해당 폐광시설에서는 환경오염 등 문제가 언젠가 반드시 하천 유실 등 큰 광해로 발생할 것이다. 폐광이후라는 이유로 적치장의 관리를 소홀히 하고 모니터링에서 발견된 결함들을 보수하는 등의 관리를 수행하지 않고 방치하면 적치댐은 노후화 등 이유로 안정성이 서서히 낮아지고 미래 어느 시점에서는 붕괴되는 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 광물찌꺼기 적치시설에 대한 지속적인 보수와 더불어 노후화에

따른 안정성 문제도 검토해야 한다. 이런 조사분석과 시설 보수는 비용을 동반하므로 비용절감을 위한 모니터링 계측 시스템의 도입 및 계측결과를 바탕으로 광물찌꺼기 적치시설에 대한 안정성 평가지표를 마련하고 시설물의 수명에 대한 적절한 평가방안 도출을 통해 적치댐 붕괴 사전 예방 시스템을 구축해야 한다. 또한 안전을 위한 사전경보알림 서비스를 구축하는 등 충분한 사례검토를 바탕으로 재난안전에 대해 대비하여야 한다. 한국광해관리공단은 이러한 광물찌꺼기 적치장의 붕괴로 인한 사고에 대응하여 IoT/ICT 기술을 접목한 다양한 연구를 수행하고 있으며, 이러한 연구를 통하여 국내 광물찌꺼기 적치시설을 안전하게 관리할 기준이 마련될 것으로 기대한다.

References

- Paulina Concha Larrauri and Upmanu Lall, 2018. Tailings Dam Failures: Updated Statistical Model for Discharge Volume and Runout. *Environments*, 5(28), 1-10.
- AME Research, 2018. Copper-Declining copper ore grades Market Outlook, AME Research, 2018.08.09, <https://www.amegroup.com/Website/FeatureArticleDetail.aspx?falid=437>.
- ASTM D2487-11, 2011. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bowker L.N. and Chambers D.M., 2015. The risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures, Earthwork Act, 2015-waterlegacy.org.
- Fernandes, G.W., Goulart, F.F., Ranieri, B.D., Coelho, M.S., Dalesf, K., Boesche, N., Bustamante, M., Carvalho, F.A., Carvalho, D.C., Dirzo, R., *et al.*, 2016. Deep into the mud: Ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Nat. Conserv.*, 14, 35-45.
- Ganesh M., Erling N., Sven K., and Hans T., 2015. Tailings Dams Monitoring in Swedish Mines using Self-Potential and Electrical Resistivity Methods. *Eeectronic J. of Geotechnical Engineering*, 20, 5859-5875.
- Giurco, D., 2010. Peak Minerals in Australia: A Review of Changing Impacts and Benefits, Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney; Department of Civil Engineering, Monash University.
- ICOLD, 1996. Monitoring of Tailings Dams, Review and Recommendations, Bulletin 104, International Commission on Large Dams-United Nations Environmental Programme, 21p.
- ICOLD, 2001. Tailings Dams-Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences. *Bulletin 121*, 12p.
- ICOLD, 2006. Improving Tailings Dam Dafety, Critical

- Aspects of Management, Design, Operation and Closure, Bulletin 139, International Commission on Large Dams-United Nations Environmental Programme, 44p.
- IPCC, 2018.08.03, http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/010.htm#28.
- Johnson, N.W. and Munro P.D., 2002. Overview of flotation Technology and Plant Practice for Complex Sulphide Ores, Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control, Published by the society for mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1104p.
- Renova Foundation Update, 2018.08.08, http://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2017/170607_renovafoundationupdate.pdf.
- Rico M., Benito G., Salgueiro A.R., Diez-herrero A., and Pereira H.G., 2008. Reported tailings Dam failures: a review of the european incidents in the worldwide context. *J. Hazardous Materials*, 152(2), 846-852.
- Sun Enji, Zhang Xingkai, Li Zhongxue, 2012. The internet of things (IOT) and cloudcomputing (CC) based tailings dam monitoring and pre-alarm system in mines. *Safety Science*, 50, 811-815.
- Vick, S.G., 1983. *Planning Design and Analysis of Tailings Dams*, Wiley, New York., 25p.
- WISE, 2018.08.08, <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>.

박 제 현

1997년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 한양대학교 대학원 자원환경공학과 공학석사
 2006년 한양대학교 대학원 지구환경시스템공학과 공학박사

현재 한국광해관리공단 지반안정기술팀 팀장
 (E-mail: jayhp@mireco.or.kr)

최 흥 일

현재 한국광해관리공단 기획예산팀 대리
 (本學會誌 第53卷 第5号 参照)

양 인 재

현재 한국광해관리공단 기술연구센터 센터장
 (本學會誌 第54卷 第5号 参照)