

## 광산폐기물 적치장 침출수의 사후관리 우선순위 평가

박창구<sup>1</sup> · 윤경욱<sup>1</sup> · 김정욱<sup>1</sup> · 정명채<sup>1\*</sup> · 이진수<sup>2</sup> · 지원현<sup>2</sup> · 이준학<sup>2</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 지구자원시스템공학과, <sup>2</sup>한국광해관리공단 기술연구소

## Priority Assessment of Leachate Management of Reclaimed Mine Waste Dump Sites

Chang Koo Park<sup>1</sup>, Kyung Wook Yoon<sup>1</sup>, Jung Wook Kim<sup>1</sup>, Myung Chae Jung<sup>1\*</sup>, Jin Soo Lee<sup>2</sup>, Won Hyun Ji<sup>2</sup> and Joon Hak Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy Resources and Geosystem Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Institute of Mine Reclamation Technology, Korea Mine Reclamation Corporation, Wonju, Korea

(Received: 11 November 2020 / Revised: 14 December 2020 / Accepted: 21 December 2020)

This study was performed to develop a priority list for post-managements of leachates from 64 mine waste dump sites in Korea. For this, leachate quality, leachate quantity, and other factors were considered as evaluation criteria and the weights of 10 subfactors were calculated using Analytic Hierarchical Process (AHP) based on a survey from 20 experts in the field of mining environment. Calculated weights were 0.769, 0.147 and 0.084 for leachate quality, leachate quantity, and others, respectively, indicating that experts consider leachate quality as most important. Based on this approach, we classified the 64 mine waste dump sites into five grades from Grade I to Grade V. Ten were classified as Grade I, 1 as Grade II, 1 as Grade III, 33 as Grade IV, and 19 as Grade V.

**Key words :** Mine waste dump site, Leachate, Priority, Analytic Hierarchy Process, Weights

이 연구의 목적은 국내 광산폐기물 적치장 64개소에서 발생하는 침출수의 사후 관리 우선순위를 도출하는 것이다. 이를 위하여 계층분석법(AHP)을 활용하여 침출수 수질, 유출량, 기타 영향요소 등의 평가항목들과 총 10가지의 세부 요소를 선정하고 각각의 가중치를 산출하였다. 가중치는 침출수의 수질 0.769, 유출량 0.147, 기타영향요소 0.084로 산출되어 관리를 위한 우선순위 선정 시 수질부분이 설문조사 평가자들이 가장 중요하게 생각하는 항목으로 확인되었다. 조사결과를 바탕으로 총 64개 적치장 침출수 평가결과는 관리의 시급성에 따라 I~V 등급으로 구분하였으며, I 등급 10개소, II 등급 1개소, III 등급 1개소, IV 등급 33개소, V 등급 19개소로 평가되었다.

**주요어 :** 광산폐기물 적치장, 침출수, 우선순위, 계층분석법, 가중치

### 1. 서 론

국내에는 5,048개소의 폐광산이 전국에 산재되어 있으며, 이들 중 광물찌꺼기 및 폐(광)석 등의 광산폐기물이 존재하여 광해가 발생하고 있는 광산은 230개소

로 조사되었다(MIRECO, 2018a). 이러한 광산폐기물은 지정폐기물로 분류하고 있기 때문에 광산이 존재하는 위치의 지정된 광구 지역 내에서만 이송 및 운반이 가능하며, 외부지역으로 반출 및 반입 등의 행위를 금지하고 있다. 때문에 과거부터 현재까지 지속적으로 광

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 original work is properly cited.

\*Corresponding author: [jmc65@sejong.ac.kr](mailto:jmc65@sejong.ac.kr)

산 주변에 조성된 광산폐기물 적치장에 매립을 하고 있다. 하지만 광산이 개발된 지역은 지리적으로 대부분 임야 또는 계곡의 상류지역에 위치하고 있는 특성을 지니기 때문에 이곳에 위치한 광산폐기물 적치장들은 하류 수계에 잠재적인 오염원으로 작용할 가능성이 높다. 실제적으로 광해방지사업을 수행한 광산지역의 수계 및 농경지 토양 등 환경매체의 오염 평가와 관련된 연구사례를 살펴보면, 하류 수계의 수질은 물론 지속적으로 침출수 내 존재하는 오염물질의 확산 및 축적으로 퇴적토까지 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2018; Yoon *et al.*, 2020). 이처럼 복원 이후에도 환경적 문제를 발생시키고 있는 광산지역에 대한 사후관리의 중요성이 부각되면서, 환경부 및 한국광해관리공단 등 유관부처에서는 폐광산 주변지역의 사후환경오염 영향조사 지침, 광해방지시설의 사후관리 및 운영업무 시행세칙 및 휴·폐광산 유출수 현장조사 시행세칙 등의 관련 규정을 마련하여 운영 중에 있다(MoE, 2018; MIRECO 2019b, 2020). 하지만 이들 모두 조사·분석에 대한 규정만을 중점적으로 명시하고 있기 때문에 조사결과에 대한 평가와 사후관리를 위한 프로세스 및 정량화된 점수체계의 시스템 자체가 부재한 현실이다. 또한 Lee(2007)에 따르면 광해방지사업이 완료된 광산지역에서 지속적으로 광해가 발생하는 원인으로 복원공법 선정의 적절성이 미흡한 점과 사후관리에 대한 대비책이 없는 것으로 평가하였다. 즉 적치장에서 발생한 침출수의 오염도 평가 이후 복원·재조사·모니터링 등의 사후관리를 위한 우선순위 선정 시스템과 관련한 사전 연구가 시급한 실정하다.

이에 본 연구에서는 전국에 분포하고 있는 모든 광산폐기물 적치장을 대상으로 침출수의 오염도 및 유출량, 기타 영향요소 등을 계층분석방법(Analytic Hierarchy Process)을 활용하여 적치장별 사후 관리우선순위를 선정하였다. 향후 이러한 평가시스템을 활용하여 적치장별 우선순위를 도출함으로써 보다 합리적이고 효율적인 사후 관리가 가능할 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 기존에 조사 및 연구된 침출수의 유출 특성과 우선순위 선정 관련 자료들을 검토하고, 사후 관리를 위한 우선순위 평가항목을 선정하였다. 그리고 계층분석법을 활용하여 설문조사 및 일관성을 평가하고 각각의 평가항목별 가중치를 산출하였다. 이후 64개소의 광산폐기물 적치장에서 발생하는 침출수의 사후 관리 우선순위를 평가하였다.

### 2.1. 국내 광산폐기물 적치장 현황 및 침출수 유출 특성

한국광해관리공단 자료(MIRECO, 2018a)에 따르면 국내 광산폐기물 적치장 중 침출수가 발생하는 적치장은 총 64개소이며, 권역별로 살펴보면 경기도(A)에 6개소, 강원도(B) 11개소, 충청도(C) 13개소, 전라도(D) 7개소, 경상도(E) 27개소가 분포하고 있다(Fig. 2). 또한 개발광종별로 구분하면 금-은광산이 48개소(75%), 연-아연광산이 6개소(9%), 중석-철 등 기타 광종을 개발한 광산이 10개소(16%)로 이들의 맥석 광물과 광물 찌꺼기 등이 광산폐기물 적치장에 매립되어 있다. 이들 적치장의 형태는 사면형 30개소(47%), 계곡형 21개소(33%), 평지형 13개소(20%) 순으로 조사되었다. 이

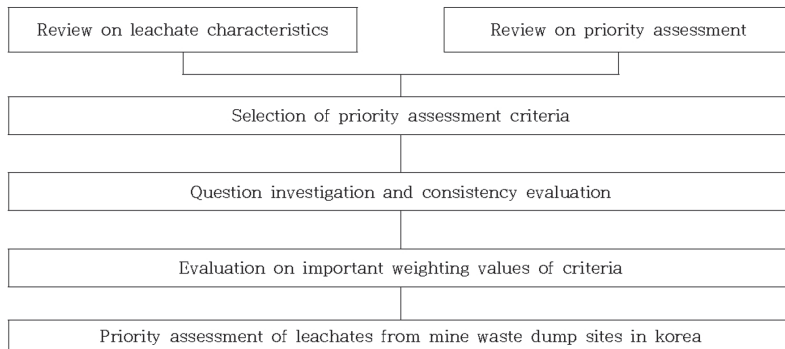


Fig. 1. Method and procedure of this study.

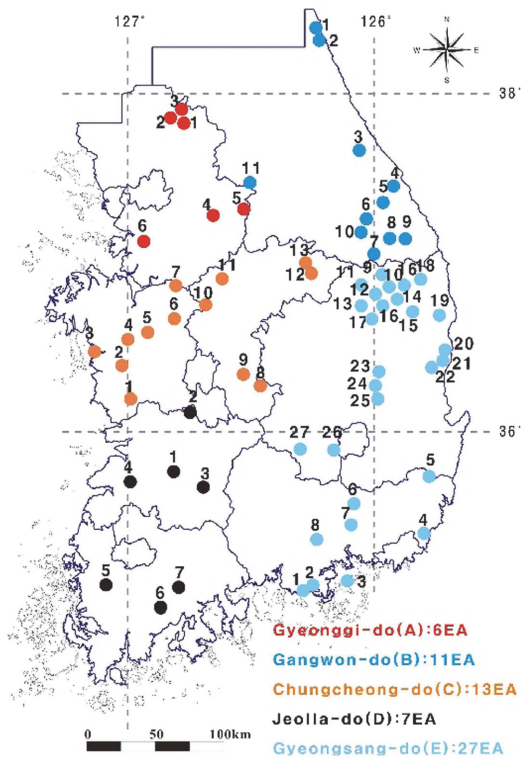


Fig. 2. Map showing 64 mine waste dump sites with leachate in Korea.

러한 광산폐기물 적치장에서 발생하는 침출수의 유출 특성을 살펴보면, 개발광종에 따라 용출되는 오염 원소들이 다소 상이하지만, 공통적으로 As, Cd, Fe, Mn, Zn 항목의 오염부하가 기준치를 초과하는 것으로 조사되었다. 각 적치장별 침출수의 유출량은 지역별 강수량, 상류 및 주변 수계에서 유입되는 하천수와 그 지역 일대에 함양되어 있는 지하수 유동 특성 등에 의한 영향으로 유출량에 변화가 발생하는 것으로 조사되었다(Park *et al.*, 2018).

2.2. 우선순위 선정 기존 연구사례 검토

광산지역의 정밀조사 및 복원 우선순위 선정 관련 자료를 검토한 결과, 우선순위를 선정하기 위한 평가 항목들은 오염원, 오염상태, 오염영향 등 3가지로 구분되었다. 각각의 평가 항목과 세부기준은 국외 국가우선순위(National Priorities List, NPL)을 참고하여 선정하였으며, 평가항목별 가중치는 전문가의 자문을 통하여 평가목적에 따라 상이한 수치를 부여하고 있다.

즉, 정밀조사 우선순위의 경우 오염상태 항목에 가장 높은 50%의 가중치를 부여하고 있으며, 복원 우선순위의 경우 오염원 20%, 오염상태 40%, 오염영향 40%의 가중치를 부여하고 있다(KEI, 1994; Lee, 2010; KECO, 2012, 2018). 단, 광산의 종류별로 평가 항목의 용어가 서로 상이하고, 침출수를 오염원의 한 가지 종류로만 구분하기 때문에 침출수에 대한 세부적인 평가를 적용하고 있지는 않았다.

2.3. 우선순위 선정을 위한 평가항목 및 배점 산출

침출수 발생 및 특성 규명을 연구한 사례(MIRECO, 2019a)를 검토하여 평가항목을 선정하였다. 선정된 주요 평가항목은 침출수의 수질(Quality), 침출수의 유출량(Quantity), 기타영향요소 등 총 3가지로 구분할 수 있으며, 각각의 평가항목을 대분류에 위치시키고 다시 그 세부요소들을 중분류로 구분하였다. 즉, 침출수의 수질을 평가하는 요소로 오염도지수(Pollutant Index, PI)를 선정하였으며, 침출수의 유출량을 평가하는 요소로 항상 유출과 우기 시 간헐적인 유출형태로 구분하였다. 기타 영향요소는 침출수의 수질 및 수량에 영향을 미치는 연평균 강수량, 상류수계 및 주변 오염시설 존재 유무, 광물찌꺼기 적치량, 적치형태 등으로 구분하였으며, 추가적으로 복원의 시급성을 판단하기 위하여 하류오염 확산여부, 주거지 및 농경지 인접거리 등을 고려하였다. 각각의 중분류 항목을 다시 세분화하여 소분류 및 배점을 적용하였으며, 총 64개 적치장에서 발생하는 침출수의 특성을 반영하기 위하여 최솟값, 중앙값, 최댓값을 확인 후 기준범위를 설정하고 점수를 분배하였다.

2.4. 평가항목별 가중치 선정 방법

계층분석법(Analytic Hierarchy Process)은 복잡한 프로세스나 대안의 의사결정을 위한 방법론 중 하나로 다양한 대안들을 계층화하여 요인들을 주요요인과 세부요인들로 구분하고 각각의 평가인자들을 쌍대비교(pairwise comparison)하여 상대적 우선순위 및 중요도에 따른 가중치를 보다 합리적으로 결정할 수 있는 방법이다. 이러한 계층분석의 방법론 연구와 이를 적용한 사례는 그동안 많은 연구자들에 의하여 다양한 분야에서 광범위하게 연구가 진행되어 왔다(Saaty, 1978, 1980, 1990; Ryu *et al.*, 2003; Kim and Choi, 2007; Kim *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014; Huh *et al.*, 2016). 특히 광해 분야에서도 계층

분석법을 활용한 복원 우선순위 평가 연구 사례를 확인할 수 있다(KIGAM, 2005; Kim, 2010). 본 연구에서도 평가항목별 가중치를 산출하기 위하여 계층분석법을 활용하였으며, 계층분석 모형을 적용하기 위한 절차 및 방법은 다음과 같다.

1) 평가항목 중 대분류 3가지, 중분류 10가지 요소에 대하여 광해분야 전문가 20명을 대상으로 9점 척도의 설문지를 활용하여 설문조사를 수행한다(Appendix. 1).

2) 설문조사 결과를 취합하여 식 (1)과 같이 항목별 또는 요소들 간의 쌍대비교를 수행하였다. 즉, n개의 요소로 구성되어 있다면 모두 n(n-1)/2회의 비교를 중요성의 척도에 따라 수집하여 쌍대비교행렬(A)을 작성한다.( $a_{ij}=1/a_{ji}$ ,  $a_{ii}=1$ )

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{식 (1)}$$

3) 쌍대비교에 의한 평가인자( $F_{ij}$ )에 대한 가중치( $W_{ij}$ )는 식(2)와 같이 계산하였다. 여기서  $\tilde{R}_{ij} = (R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{in})^{1/n}$ 는 i 인자에 대한 j 인자의 상대중요도 점수( $R_{ij}$ )의 기하평균값이다.

$$W_{ij} = \frac{\tilde{R}}{\sum_{i=1}^n \tilde{R}_{ij}} \quad \text{식 (2)}$$

4) 설문대상자인 표본 집단의 논리적 모순을 측정하기 위하여 일관성 지수(Consistency Index, CI) 및

일관성 비(Consistency Ratio, CR)를 계산하여 일관성의 정도를 측정한다.  $CI=(\lambda_{max} - n)/(n-1)$ 과 같이 정의되며,  $CR=(CI/RI)$ 로 계산된다. 여기서 무작위 지수 또는 난수지수(Random Index, RI)는 Saaty(1980)가 제시한 값으로 1 ~ 9까지의 수치를 임의로 설정하여 역수행렬을 작성하고 이 행렬의 평균 일관성 지수를 산출한 값으로 일관성의 허용한도를 나타낸다. 완벽한 응답일관성을 보일 경우 오차는 1이며, 최대 고유값  $\lambda_{max} = n$  이다. 일반적으로 CR값이 0.1 이하의 기준을 적용할 경우 합리적인 평가가 가능하며, 0.2 이하 일 경우에는 허용할 수 있는 평가로 간주한다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1. 평가항목 및 요소별 가중치 산출 결과

이 연구에서는 일관성 비(CR)를 0.2 이하로 설정하였으며, 설문조사 대상자의 일관성 정도를 계산한 결과, 표본 집단 20명(A~T) 중 응답자 A, E, N, P, S, T 등 6명을 제외한 14명만이 일관성이 유효한 것으로 판단되어 가중치 선정을 위한 표본자료로 활용하였다 (Table 1).

설문조사에서 신뢰할 수 있는 14명의 결과만을 종합하여 각각의 평가항목별 쌍대비교 분석을 수행한 결과, 사후 관리 우선순위 선정에 있어서 침출수의 수질이 0.769의 가장 높은 가중치로 계산되었으며, 침출수의 유출량 0.147, 기타영향요소 0.084의 순으로 확인되었다(Table 2).

침출수 수질( $F_1$ )을 평가하는 요소는 오염도 지수(PI) 단일항목(CI=0)으로 가중치는 1이다. 침출수 유출량( $F_2$ )의 경우 평가요소가 항시 유출( $F_{21}$ )과 간헐적 유출

**Table 1.** Consistency index and consistency ratio of respondent question investigation using AHP method

구분	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
CI	0.205	0.027	0.113	0.069	0	3.556	0.069	0.005	0.069	0.001
CR	0.354	0.047	0.196	0.120	0	6.130	0.119	0.007	0.119	0.002
구분	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
CI	0.001	0.001	0.069	1.431	0.043	1.517	0.043	0.050	0.116	0.288
CR	0.001	0.003	0.119	2.468	0.075	2.615	0.074	0.086	0.201	0.496

**Table 2.** Weight values of the primary factors and consistency ratio

Factors		$F_1$	$F_2$	$F_3$	Weight value	CI	CR
Leachate quality	$F_1$	1	6.786	6.571	0.769	0.0417	0.0719
Leachate quantity	$F_2$	0.147	1	2.286	0.147		
The other factors	$F_3$	0.152	0.437	1	0.084		

**Table 3.** Matrix for weight values, consistency index and consistency ratio of the leachate quantity

Factor		F <sub>21</sub>	F <sub>22</sub>	Weight value	CI	CR	
Leachate quantity (F <sub>2</sub> )	Always leak	F <sub>21</sub>	1.000	2.821	0.738	< 0.000	-
	Intermittent leak	F <sub>22</sub>	0.354	1.000	0.262		

**Table 4.** Matrix for weight values, consistency index and consistency ratio of the other factors

Factor		F <sub>31</sub>	F <sub>32</sub>	F <sub>33</sub>	F <sub>34</sub>	F <sub>35</sub>	F <sub>36</sub>	F <sub>37</sub>	Weight value	CI	CR	
The other factors	Average annual precipitation	F <sub>31</sub>	1	0.836	1.482	2.583	0.770	0.419	1.288	0.141	0.0269	0.0204
	Upstream condition	F <sub>32</sub>	1.196	1	1.976	3.143	0.940	0.679	1.780	0.182		
	Mine facilities	F <sub>33</sub>	0.675	0.506	1	2.586	0.925	0.595	1.071	0.122		
	Type of mine waste dam	F <sub>34</sub>	0.387	0.318	0.387	1	0.752	0.360	0.814	0.071		
	Mine waste quantity	F <sub>35</sub>	1.299	1.064	1.081	1.330	1	0.830	1.643	0.156		
	Dispersion effect on downstream	F <sub>36</sub>	2.387	1.473	1.681	2.778	1.205	1	1.774	0.225		
	Distance from household and farmland	F <sub>37</sub>	0.776	0.562	0.934	1.229	0.609	0.564	1	0.103		

(F<sub>22</sub>) 형태 2가지 항목으로 Table 3과 같이 항시 유출이 0.738, 간헐적 유출이 0.262의 가중치로 계산되었다.

기타 영향요소(F<sub>3</sub>)는 대상지역의 연평균 강수량(F<sub>31</sub>), 적치장 상류 수계 존재 여부(F<sub>32</sub>), 주변 오염시설물 존재 여부(F<sub>33</sub>), 적치형태(F<sub>34</sub>), 광물찌꺼기 량(F<sub>35</sub>), 하류 수계 오염 확산 여부(F<sub>36</sub>), 주거지 및 농경지 인접거리(F<sub>37</sub>) 등 총 7가지의 세부평가항목으로 각각의 항목에 대한 가중치를 계산한 결과, 하류수계 오염 확산 여부의 가중치가 0.225로 기타 영향요소들 중 평가자들이 가장 중요하게 생각하는 요소로 확인되었다(Table 4).

### 3.2. 적치장별 침출수 사후관리를 위한 우선순위 평가결과

사후 관리를 위한 국내 64개소 적치장에서 발생하는 침출수를 평가하기 위하여 평가항목별 산출된 각각의 가중치를 기입하고, Table 5와 같은 평가표를 작성하여 우선순위 평가를 위해 활용하였다.

Table 6과 같이 침출수 평가 결과 모든 적치장이 1점 이상의 점수로 확인되었으며, 평균 및 표준편차는 1.741점(±1.202), 범위는 1.018 ~ 4.711점이다. 또한 각각의 적치장에서 발생하는 침출수에 대한 사후 관리의 시급성을 I ~ V 등급으로 나타내었으며 평가 점수에 따라 구분하였다. 단, 13위(B7) ~ 64위(B7)에 해당하는 52개소의 적치장이 1점과 2점 사이 구간에 평

가되어 IV 등급과 V 등급을 구분하기 위하여 중앙값 1.186(Q1=1.111, Q3=1.360)을 고려하여 등급을 구분하였다. 등급별 개소수를 확인해보면 I 등급 10개소, II 등급 1개소, III 등급 1개소, IV 등급 33개소, V 등급은 19개소로 확인되었다. 각각의 등급별 적치장의 침출수 유출특성을 살펴보면, I, II, III 등급에 해당하는 12개소의 적치장들은 침출수의 오염도 지수(PI)가 1.3을 초과하고 최대 28.7의 값으로 오염부하가 매우 높은 것으로 확인되었으며, 5 ~ 100 m<sup>3</sup>/day 이상의 침출수가 항시 유출되고 있는 특성을 보인다. 이러한 결과는 반드시 적극적 처리 방법으로 오염수질개선 사업이 시급히 이루어져야하는 적치장들로 평가된다. IV 등급에 해당하는 33개소의 적치장들은 침출수의 오염도 지수가 약 0.05 ~ 1.0 범위 수준을 보이고 있으며, 이 중 21개소의 적치장에서 침출수의 유출이 간헐적인 형태를 보이는 특성을 지닌다. V 등급에 해당하는 19개소의 적치장들은 침출수의 오염도 지수가 매우 낮으며, 모두 우기 시 간헐적인 유출형태를 보인다. 즉, IV 등급, V 등급에 해당하는 적치장들은 오염도 재조사 또는 연간 모니터링을 통한 재평가 이후 환경적 측면과 경제성 및 정책제도 등을 종합적으로 반영하여 복원의 필요성을 고려한 후 복원방법(복원, 오염도조사 및 모니터링 등)을 결정하는 방식이 적합할 것으로 판단된다.

**Table 5.** Evaluation form for priority decision of leachate from mine waste dump sites

Score	Weight	Primary category	Weight	Secondary category	Subdivision and grade	Point
5	0.769	Leachate quality	1.000	Pollutant index(PI)	> 1.6	5
					1.4 ~ 1.6	4
					1.2 ~ 1.4	3
					1.0 ~ 1.2	2
					< 1.0	1
	0.147	Leachate quantity	0.738	Always leak	> 15 m <sup>3</sup> /day	5
					10 ~ 15 m <sup>3</sup> /day	4
					5 ~ 10 m <sup>3</sup> /day	3
					1 ~ 5 m <sup>3</sup> /day	2
					< 1 m <sup>3</sup> /day	5
	0.262	Intermittent leak	0.141	Average annual precipitation	> 1,200 mm	5
					1,100 ~ 1,200 mm	4
					1,000 ~ 1,100 mm	3
					800 ~ 1,000 mm	2
					< 800 mm	1
	0.182	Upstream condition	0.122	Mine facilities	existing	5
					non-existing	1
	0.071	Type of mine waste dam	0.156	Mine waste quantity	existing	5
					valley type	5
					slope type	3
	0.084	The other factors	0.225	Dispersion effect on downstream	flatland type	1
					> 100,000 ton	5
					50,000 ~ 100,000 ton	4
					25,000 ~ 50,000 ton	3
1,000 ~ 25,000 ton					2	
0.103	Distance from household and farmland	0.225	Dispersion effect on downstream	< 1,000 ton	1	
				affected	5	
				non-affected	1	
				< 0.5 km	5	
				0.5 ~ 1.0 km	4	
0.103	Distance from household and farmland	0.103	Distance from household and farmland	1.5 km under	3	
				2.0 km under	2	
				2.0 km over	1	

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내 64개소 광산폐기물 적치장에서 발생하는 침출수를 대상으로 20명의 전문가 설문조사 및 계층분석과정을 수행하고 각각의 평가인자별 가중치를 산출하여 관리우선순위를 평가하였다. 평가결과 I, II, III 등급에 해당하는 12개소의 적치장들 중 7개소의 경우 현재 수처리시설을 설치하여 오염수질개선 사업을 운영 중에 있으며, 2개소는 수처리시설을 시공 중에 있거나 설치를 계획하고 있다. 따라서 본 연구에서 작성한 평가표 및 평가방법이 결과적으로 잘 반영되는 것으로 보이며, 사후 관리 우선순위 선정을 위한

적합한 방법으로 판단된다. 단, 본 연구결과는 제한적으로 1회 현장조사 및 분석결과 자료를 활용하여 지표로 유출되는 침출수만을 대상으로 평가가 이루어졌기 때문에 향후 실제 현장의 침출수 유출특성을 반영하기 위해서는 연중 지표수의 모니터링 결과와 추가적으로 지하로의 유출경로도 함께 고려하면 더욱 유용한 자료가 될 것이다. 즉, 수질과 유출량 부문에 평가항목을 지표 및 지하로 유출경로를 세분화하여 관측정을 활용한 분기별 오염초과율 및 유출량 등이 고려된다면 사후관리 우선순위를 선정하기 위한 정확하고 보다 효과적인 평가방법으로 발전될 것이다.

**Table 6.** Management classification on priority assessment of leachate from 64 mine waste dump sites in Korea

Priority list	Mark of mine(ID)	Score (5)	Grade (I~V)	Priority list	Mark of mine(ID)	Score (5)	Grade (I~V)
1	E8	4.711	I	33	B1	1.185	V
2	A6	4.670	I	34	E20	1.184	V
3	E15	4.543	I	35	E23	1.166	V
4	E10	4.481	I	36	D7	1.164	V
5	C2	4.464	I	37	B3	1.147	V
6	D5	4.334	I	38	E22	1.139	V
7	E2	4.236	I	39	C1	1.137	V
8	C6	4.224	I	40	E19	1.135	V
9	E11	4.195	I	41	E21	1.134	V
10	E3	4.138	I	42	E24	1.133	V
11	A5	3.520	II	43	E25	1.132	V
12	A1	2.717	III	44	E1	1.125	V
13	B7	1.592	IV	45	C8	1.124	V
14	C9	1.556	IV	46	C13	1.115	V
15	E17	1.553	IV	47	C7	1.112	V
16	E18	1.375	IV	48	B11	1.111	V
17	D4	1.355	IV	49	C3	1.110	V
18	A3	1.314	IV	50	B10	1.103	V
19	E14	1.309	IV	51	B5	1.100	V
20	E13	1.226	IV	52	A4	1.099	V
21	E6	1.217	IV	53	D3	1.096	V
22	E16	1.216	IV	54	B9	1.095	V
23	B4	1.214	IV	55	C12	1.087	V
24	E12	1.213	IV	56	C5	1.086	V
25	E7	1.211	IV	57	A2	1.084	V
26	E9	1.202	IV	58	E27	1.083	V
27	B8	1.199	IV	59	D1	1.076	V
28	B2	1.198	IV	60	C11	1.073	V
29	D6	1.191	IV	61	C10	1.061	V
30	D2	1.188	IV	62	E4	1.059	V
31	E26	1.187	IV	63	C4	1.036	V
32	E5	1.186	IV	64	B6	1.018	V

## 사 사

본 연구는 한국광해관리공단의 연구과제(20200104BC0-00) “광산폐기물 적치장별 침출수 현황조사 및 특성구명”(3차년도)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Huh, S.Y., Jo, M.S. and Lee, Y.G. (2016) Analysis of Priorities of Constructive Factors of New and Renewable Energy Policy in South Korea using Analytic Hierarchical Process. *Innovation Studies*, v.11, p.29-69.
- Jung, G.B., Kwon, S.I., Hong, S.C., Kim, M.K., Chae, M.J., Kim, W.I., Lee, J.S. and Kang, K.K. (2012) Contamination Assessment of Water Quality and Stream Sediments Affected by Mine Drainage in the Sambo Mine Creek. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, v.31, p.122-128.
- Jung, S.M., Ju, H.J. and Cho, J.Y. (2013) Analyzing the priority of promoting sustainability in support of the social welfare agency sponsors based on AHP. *Korean Journal of Local Government & Administration Studies*, v.27, p.205-222.
- Kang, M.H., Lee, P.K. and Choi, S.H. (2007) Seasonal Variation and Natural Attenuation of Trace Elements in the Stream Water Affected by Mine Drainage from the Abandoned Indae Mine Areas. *Economic and Environmental Geology*, v.40, p.277-293.
- KECO (Korea Environment Corporation) (2012) Study on the mid/long-term plans for precise investigation to abandoned coal-mines, Korea, KECO report,

- Incheon, Korea, p.49-81.
- KECO (Korea Environment Corporation) (2018) Investigation of heavy metal pollution around abandoned mine soils for cultivation, KECO report, Incheon, Korea, p.42-43.
- KEI (Korea Environment Institute) (1994) The Management Planning of Pollutant Area in abandoned metal mines, KEI report, Sejong, Korea, p.278-295.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) (2005) A Study on Guide to Management for Environmental Mining Hazards, KIGAM report, Daejeon, Korea, p.64-71.
- Kim, G.B., Ahn, J.S. and Atsunao M. (2009) Analytic hierarchy models for regional groundwater monitoring well allocation in Southeast Asian countries and South Korea. *Environ Earth Sciences*, v.59, p.325-338.
- Kim, H.J., Yang, J.E., Ok, Y.S., Lee, J.Y., Park, B.K., Kong, S.H. and Jun, S.H. (2005) Assessment of Water Pollution by Discharge of Abandoned Mines. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, v.10, p.25-36.
- Kim, J.A. (2010) A Study on the Priority Decision Supporting System for Restoration of Environment Damage around Abandoned Mine, Hansung University, Master Thesis, p.46-49.
- Kim, J.S., Han, S.H., Choi, S.H., Lee, K.J., Lee, I.K. and Lee, P.K. (2002) Correlation interpretation on the leachate flow by AMD of the geophysical and geochemical data from Jangpoong abandoned mine. *Journal of the Korean Geophysical Society*, v.5, p.19-27.
- Kim, J.Y., Choi, U.K., Baek, S.H., Choi, H.B. and Lee, J.H. (2016) A Study on Chemical Compositions of Sediment and Surface Water in Nakdong River for Tracing Contaminants from Mining Activities. *Journal of the Korean Earth Science Society*, v.37, p.211-217.
- Kim, J.Y., Jang, Y.D., Kim, Y.H. and Kim, J.J. (2014) Characteristics of Precipitates and Geochemistry of Mine and Leachate Water in Janggun Mine. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, v.27, p.125-134.
- Kim, S.H. and Choi, J.K. (2007) The Weights Analysis of Evaluation Areas and Items for the Informatization Program by means of the AHP. *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, v.32, p.123-140.
- Lee, J.W. (2007) Study on the Management of Abandoned Metal Mines after Restoration, Kwangwoon University, Master Thesis, p.34.
- Lee, M.H. (2010) Study on the Evaluation Standards for the Ranking of the Precise Investigation to Asbestos-Contaminated Abandoned Mines, Korea, *Economic and Environmental Geology*, v.43, p.393-400.
- Lee, M.J., Kim, M.K. and Lee, S.D. (2014) Weight setting of major environmental assessment items using Analytical Hierarchy Process – Case for the selection of railroad route. *Journal of Environmental Impact Assessment*, v.23, p.517-526.
- MIRECO (Korea Mine Reclamation Corporation) (2018a) Mine Pollution Statistical Yearbook, MIRECO report, Wonju, Korea, 147p.
- MIRECO (Korea Mine Reclamation Corporation) (2018b) Investigations on characteristics of seepage from various mine waste dumping sites(I), MIRECO report, Wonju, Korea, p.1-13.
- MIRECO (Korea Mine Reclamation Corporation) (2019a) Investigations on characteristics of seepage from various mine waste dumping sites(II), MIRECO report, Wonju, Korea, p.1-13.
- MIRECO (Korea Mine Reclamation Corporation) (2019b) The rules of investigation on seepage from abandoned mines, MIRECO rules, Wonju, Korea, p.1-14.
- MIRECO (Korea Mine Reclamation Corporation) (2020) The rules of post-management & operation method, MIRECO rules, Wonju, Korea, p.1-28.
- MoE (Ministry of Environment) (2018) The regulations of post-environmental impact investigation to abandoned mine areas, MoE regulations. Sejong, Korea, p.1-2.
- Park, C.K., Kim, J.W., Jung, M.C., Park, H.S., Kim, D.K. and Oh, Y.S. (2018) Current Occurrence and Heavy Metal Contamination Assessment of Seepage from Mine Waste Dumping Sites in Korea. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, v.55, p.588-595.
- Ryu, J.W., Kim, J.H. and Jung, E.H. (2003) A Study on the Importance Analysis of Environmentally-Friendly Planning Factors Using Analytic Hierarchy Process. *Journal of the Environmental Sciences*, v.12, p.897-903.
- Saaty, T.L. (1978) Modeling unstructures decision problems-The theory of analytical hierarchies. *Mathematics and Computers in Simulation*, v.20, p.147-158.
- Saaty, T.L. (1980) *Analytic Hierarchy Process*, Mcgrow-Hill., p.3-10.
- Saaty, T.L. (1990) How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v.48, p.9-26.
- Yoon, K.W., Jung, M.C., Kim, J.W., Jeon, S.W., Han, S.H., Lee, J.S., Ji, W.H. and Kwon, O.H. (2020) Environmental Assessment of Water Quality Affected by Mine Drainage from Tailings Dam in the Sambo Pb-Zn Mine. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, v.57, p.12-23.



**Appendix 1.** Questionnaire sheet for primary and secondary factors used in this study.

1. Which category of requirements is more important for the comparison of leachate management priority, and to what degree ?

Criteria	Extremely important					←	Equally					→	Extremely important					Criteria
Leachate quality	⑨	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	Leachates Quantity
Leachate quantity	⑨	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	Influence factors
The other factors	⑨	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	Leachates Quality

2. Evaluate the relative importance of each secondary factor for leachate quality management priority

Criteria	Components	Importance
Leachate quality	Pollutant index(PI)	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
Leachate quantity	Always leak	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
	Intermittent leak	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
The other factors	Average annual precipitation	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
	Upstream condition	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
	Mine facilities	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
	Type of mine waste dam	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
	Mine waste quantity	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
	Dispersion effect on downstream	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨
	Distance from household and farmland	----- ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨