

비산재가 포함된 폐광산 채움재의 위해성 평가 전략

지상우* · 조환주* · 신희영* · §이상훈** · 안지환*

*한국지질자원연구원 광물자원연구본부, **계명대학교 환경학부 환경과학전공

A Strategy for the Risk Assessment of Abandoned Mine Filler Materials

Sangwoo Ji*, Hwanju Jo*, Hee-young Shin*, §Sang-hun Lee** and Ji-Whan Ahn*

*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Mineral Resources Division, Daejeon, Korea

**Dept. of Environmental Science, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Daegu, Korea

요 약

본 연구에서는 국내 폐광산에 이용될 채움재의 위해성 평가작업을 위한 전략과 방법론을 개념적 측면에서 제시하였다. 채움재는 석탄발전소 비산재와 고형재로 구성되어 있으며 탄산염 등 위해도가 적은 물질이 대부분을 차지하지만 일부 중금속 성분이 포함되어 있어서 이에 대한 위해성 평가가 요구된다. 위해성 평가는 주로 인체내 발암 및 비발암성 유발 가능성을 정량화하는 것이 목적이며, 본 연구의 경우 국내/외 토양 및 광해 위해성평가 기법을 참조 할 수 있을 것으로 판단된다. 이 때 독성이나 분배계수 등 항목별 주요 인자 값은 국내 토양위해성평가 가이드라인에서 제시하는 수치를 주로 이용할 수 있다. 오염도에 대한 정확한 위해성평가는 현장답사와 실측 등을 통한 노력과 시간이 요구된다. 또한 채움재내 중금속 성분 및 농도가 매우 다양하고 반응이 복잡하여 이를 전부 상세하게 평가한다는 것은 비효율적이다. 따라서, 효과적인 위해성 평가를 위하여 일단 문헌 자료와 채움재 시료 특성분석결과를 이용한 예비위해성평가를 먼저 실시하고, 그 이후 상세 위해성 평가에서 예비위해성평가에서 선정된 유의 사항을 중점적으로 다뤄야 할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 신뢰성 있는 시료분석기법과 노출경로 및 관련 메커니즘에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다.

주제어 : 위해성 평가, 중금속, 독성, 노출, 채움재

Abstract

This study suggests a conceptual strategy and methodology for the risk assessment of the domestic abandoned mine fillers with fly ash. The fillers are composed of coal fly ash and solidification materials, and contain little toxic substances such as carbonates but also some heavy metals; therefore, those requires a risk assessment. The risk assessment should primarily focus on estimation of the effects to human health both on carcinogen and non-carcinogen aspects. The significant data such as toxicity and partition coefficients can be obtained from the national soil or mine environmental risk assessment guidelines. Accurate risk assessment of heavy metal contamination in the fillers may consume lots of time and efforts through site survey and instrumental analyses, etc. Moreover, it is inefficient to explore all of the factors as concentrations and categories in every heavy metal in the fillers, due to a high variety and complexity. Therefore, implementation of a preliminary risk assessment is suggested by using the literature data and the basic characteristics of the filler samples prior to the detailed risk assessment. Certainly, this presumes a thorough understanding of reliable sample analysis methods, exposure pathways, and relevant physicochemical and biological mechanisms.

Key words : Risk analysis, heavy metals, toxicity, exposure, abandoned mine filler

· Received : July 16, 2019 · Revised : August 5, 2019 · Accepted : August 19, 2019

§ Corresponding Author : Sang-hun Lee (E-mail: shlee73@kmu.ac.kr)

Department of Environmental Science, Keimyung University, Osan Hall 303, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. 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.

1. 서 론

최근 국내 폐기물관리에 자원순환이라는 개념이 폭넓게 도입되면서 자원 리사이클링이 활성화되고 있다¹⁾. 이에 위해성 평가 등 다양한 리사이클링 물질에 대한 환경성 평가가 철저히 요구되는 실정이다²⁾. 예를 들어, 폐광산의 경우 채움재를 주입하여 구조적 안정성을 높일 수 있는데 이때 석탄화력 발전소 폐기물인 비산재 고품재와 혼합하여 채움재로 활용할 수 있을 것이다³⁾. 문제는 비산재 등에 중금속 오염물질이 함유되어 있어, 활용 전 물질의 환경오염 및 피해 유발 가능성을 미리 예측하여 합리적인 활용방안을 수립해야 할 것이다. 일반적으로 리사이클링 제품 등 어떤 물질의 보건 또는 환경측면에서의 피해 유발 가능성을 논의할 때 흔히 독성(toxicity) 혹은 유해성(Hazard) 등의 단어를 언급하는데, 이 때 유독물질 혹은 유해물질이 수용체(인간 및 환경)에 악영향을 일으킬 수 있는 성질 또는 물질임을 의미하는 것이다. 위해성 평가는 해당 물질이 실질적으로 인체 또는 환경 등 수용체에 얼마나 위해(Risk)를 끼칠 수 있는지 합리적으로 파악할 수 있는 기법이다⁴⁾.

이러한 위해성 평가를 실시하려면 채움재 원료나 환경매체 등의 성상 분석과 더불어 다양한 오염물질의 혼합 독성/유해성, 용량-반응평가 및 노출평가가 이루어져야 하고 각 단계에서 채움재 및 해당 매체에 맞는 기준치를 선정하여 평가에 이용해야 한다. 그러나, 토양 같은 일반 환경매체와는 달리⁵⁾ 폐광산 채움재/고형재 및 함유 오염물질에 대한 별도의 위해성 관련 자료가 많지 않아 상당량의 현장특성분석 및 실측없이 정확한 위해성 평가를 시도하기가 쉽지않은 실정이다. 다만 상세 위해성 평가 전 기존 문헌자료 및 간단한 시료 분석결과를 통해 간단하고 신속한 예비 위해성 평가를 실시하고 그 결과를 토대로 중요한 항목을 선정하여 보다 효과적인 상세 위해성 평가를 이행할 수 있을 것이다^{6,7)}. 특히 이러한 절차의 이행은 효과적인 개념적 전략 및 기법 수립이 전제되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 예비 및 상세단계에서 위해성 평가 전략을 어떻게 수립할 것인지 개념적 기법을 제시하도록 한다.

2. 위해성 평가의 개요 및 일반적 내용

위해성은 유해물이 수용체(인간이나 생태계)에 노출될 경우 독성/유해성이 발생될 가능성을 나타낸다고 볼 수 있으며, 흔히 [위해성 = 유해성 × 노출량]이라는 식

으로 표현된다^{2,4,5,7)}. 여기서 노출이란 수용체가 유해물과 직접적으로 접촉된 상태를 의미하며 노출량이 높다는 것은 이러한 접촉이 많이 발생한다는 것을 나타낸다. 노출량은 노출강도 혹은 노출의 심각성을 나타내는 인자를 포함할 수도 있다(예를 들어 유해물질을 섭취하면 피부에 접촉하는 것보다 더 심각한 피해를 야기할 수 있다). 독성/유해성이 위해성과 다른 가장 큰 특징 중 하나는 해당 물질의 자체적 특성뿐 아니라 환경매체 및 수용체의 분포, 성상 및 거동에 기인하는 노출량 또는 노출강도 등을 고려한다고 보면 될 것이다. 따라서 위해성평가를 통해 채움재의 독성/유해성만 고려할 경우보다 수용체 입장에서 더 실질적이며 합리적인 피해 가능성을 예측할 수 있을 것이다. 노출량 및 노출강도를 정량화하는 과정은 노출평가라고 하며, 위해성 평가과정 중 독성/유해성 평가, 용량-반응평가 다음 단계에서 주로 이행된다.

독성/유해성평가는 채움재의 독성이나 유해성을 확인하는 과정인데 실측이나 문헌을 통해 유해성분 종류나 정도를 분석한다. 독성/유해성이 존재하는 것으로 확인되면 독성/유해성의 용량 및 시험동물체(수용체)내로의 노출량 변화에 따른 악영향 여부를 관측한다. 노출용량이 어느 정도로 감소할 때 악영향이 발생하지 않는지(비발암성의 경우 악영향무관찰량) 혹은 기준치이하로 발생(발암성의 경우 발암 가능성 10^{-6} 이하)하는지를 규명한다⁵⁾. 그리고 적절한 가정과 변환절차를 통해 그 결과가 사람에게 적용될 경우 인체내 악영향을 나타내지 않는 혹은 무시해도 좋을 만한 노출량을 산출한다. 용량-반응 평가는 사람의 건강영향을 대상으로 하는 인체와 생태수용체에 대한 영향을 대상으로 하는 환경평가의 두 가지 경우로 나누어 수행되는데 채움재와 유사한 환경인 국내 토양환경 위해성 평가의 경우 인체의 경우에 대해서 어느 정도 가이드라인이나 기법이 설정되어 있으며⁵⁾, 환경내 동식물 같은 생태 수용체는 보다 더 많은 연구를 통한 기준 및 기법 설정이 필요할 것으로 보인다⁷⁾.

노출평가에서는 다양한 환경매체를 통해 수용체가 유해물에 노출되는 정도를 추정하며 노출경로, 노출강도, 노출기간/빈도 등을 추정하여 정량화한다. 노출평가까지 완료되면 수용체내 노출량 및 노출정도가 어떤지 예측할 수 있다. 이를 이용, 적절한 계수 및 지표표를 통해 마지막 단계에서 위해도를 산정하여 평가 대상 채움재가 과연 수용체에 위해성이 있는지를 판정한다. 위해성의 판정 지수로는 비발암성의 경우 유해지수(Hazard

Quotient: HQ)가 사용된다, 즉 된 유해지수(HQ) 값이 1 보다 작은 경우 비발암성 위해 가능성은 낮다고 보는 반면, 그 반대의 경우에는 악영향이 우려된다고 판단한다. 또한 발암성의 경우 노출평가에 의해 산출된 노출량에 적절한 계수를 곱하여 발암가능성을 산정하는데 그 가능성이 10^{-6} 이상이면 보통 무시할 수 없는 수준으로 본다^{4,7)}.

3. 폐광산 채움재 위해성 평가 전략 및 개념적 기법

우선 위해성평가의 목표 및 큰 틀에서의 시나리오 설정이 중요하다. 위해성 평가시 해당 항목에 대한 기준치(위해성평가 지표)가 존재하며 이러한 기준치를 상회하면 위해성에 대한 우려를 하는 것이 보통이지만 폐광산의 경우에는 잔존 중금속 등 자연상태의 광석내 다양한 중금속이 토양보다 많이 존재할 수 있다. 이러한 경우 일반적인 토양의 기준치보다는 해당 폐광산 인근의 광미 혹은 토양의 기준치를 조사하고 이를 토대로 위해성 평가 기준치를 재설정하는 것도 고려해 볼 수 있다. 이러한 과정이 무시되고 그냥 일반적인 기법을 적용한다면 위해성 평가에서 비현실적으로 이상적이거나 단순화된 결과가 도출될 수 있다, 이를 방지하기 위해서는 (예를 들어) 해당 채움재를 사용할 경우의 시나리오와 채움재가 아닌 인근 토양으로 채워질 경우의 시나리오를 설정하여 위해도를 비교해 보는 것도 생각해 볼 수 있다, 반면, 만약 향후 토양을 정화하여 부지의 적용성을 확대한다는 방안을 생각한다면 그에 따른 다른 시나리오와 비교분석을 적용해야 할 것이다.

위해성 평가는 통상적으로 예비(Preliminary)와 상세(In-depth) 평가로 구분하여 이행된다⁶⁻⁷⁾. 예비(혹은 초기) 위해성평가는 위해발생 가능성을 스크리닝 수준으

로 진단하는 과정으로 상세평가에서 소모되는 시간 및 비용을 절약하는데 효과적이다. 이는 주로 실측보다는 기존의 연구자료를 주로 활용하여 실시하고 평가 대상 채움재 시료의 일부 분석자료만 가지고도 실시할 수 있다. 이 경우 만성적 악영향이나 복잡한 노출경로 탐색 및 실측 모니터링 등은 상세 위해성 평가시 수행하도록 한다⁶⁻⁷⁾. 본 연구에서와 같이 수행전략 구축 단계에서는 예비 위해성평가를 먼저 고려하는 것이 당연하다. 예비 또는 상세평가시 참조할 만한 기존 기법으로는 폐광산 채움재 위해성 평가 결과가 있으면 가장 좋겠지만 그렇지 못한 경우에는 국내/외 토양위해성 평가, 광해 위해성 평가 및 고형화 매립 위해성평가 등 유사한 Case의 기법 및 평가 결과를 선별적으로 참조할 수 있다. 예비 평가에서는 가능한 각 성분별 위해도가 최대가 되도록 산출하는 것이 일반적이다. 따라서 예비 평가의 결과는 실제 위해도 보다 다소 높게 나온다고 전제해야 하며 어디까지나 상세평가를 위한 스크리닝으로 인식해야 할 것이다. 위해성 평가시 전략 및 개념적 기법의 세부사항은 다음과 같이 제시될 수 있다.

3.1. 채움재 및 함유물질 특성반영

채움재의 함유물질 특성 및 성상에 대한 정확한 파악은 위해성 평가를 하는데 가장 중요한 것 중 하나이다. 채움재내 오염물질 함유량 및 종류는 반드시 측정해야 되는데 이는 설사 채움재가 용출시험에 사용된 용매가 아니더라도 어찌면 다른 성상의 용매(예로 산성광산배수)나 다른 노출경로(분진)로 수용체에 전달될 수도 있기 때문이다. 채움재는 일반 토양이나 지반재(Geomaterials)과 달리 비산재와 고형첨가제의 혼합으로 인한 일체형 벌크(Bulk) 고형물질의 성상이라고 볼 수 있는데 이는 이산체 입자인 토양과는 다른 성상이다. 채움재는 일반 토양이나 광미에 비해 공기/물/토양 같은

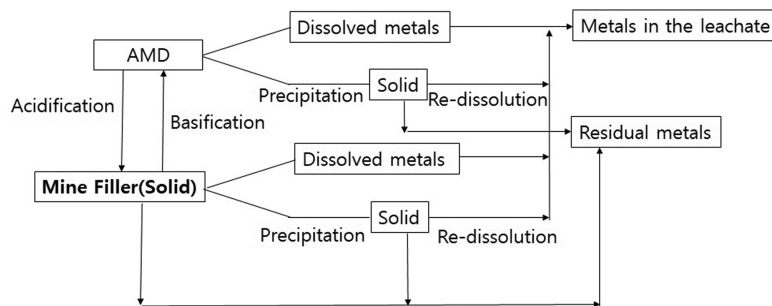


Fig. 1. Schematic illustration of the various reactions and the relevant products on the potential contaminants in mine fillers.

환경매체에 노출되어 있는 접촉면적이 작다고 볼 수 있지만 장기간에 걸쳐 부스러지거나 갈라질 경우 접촉면적이 증가하거나 거동이 쉬운 다른 물질로 전환되는 것은 아닌지 표준화된 기법으로 분석해야 할 것이다⁸⁾. 또한 채움재 원료내 다양한 금속, 비금속, 중금속이나 준금속 등이 함유될 수 있는데 이러한 성분은 여타 성분과는 별개로 독립적으로 유해성을 나타내기도 하지만 많은 경우 다른 성분과의 상호작용으로 유해성이 증가(synergism) 혹은 감소(antagonism)할 수 있다⁴⁾. 특히 채움재내 주성분이 지하수와 반응, pH가 증가할 경우 금속물질이 침전될 수도 있다(Fig. 1 참조)⁹⁾. 이러한 혼합오염물질의 특성은 독성/유해성 평가뿐 아니라 용량-반응평가에도 영향을 미친다. 이러한 분석은 채움재내 오염항목이 다양할 경우 분석 시간이 많이 소모될 수 있으므로 예비 위해성 평가 단계에서는 일단 각 성분의 개별적 독성/유해성 평가 결과나 용량-반응평가 결과를 문헌조사를 통해 유추하거나 유해성분을 이동성 및 반응성이 가장 큰 화학종(일반적으로 자유이온) 형태의 경우를 전제하는 것이 합리적일 수 있다⁴⁾.

3.2. 수용체 선정

위해성 평가의 대상 수용체는 일차적으로 인근 거주민이 될 것이고 부가적으로 동식물 등 환경생태요소를 고려할 수 있다. 그러나 후자의 경우 수용체의 종류나 특성이 너무 다양하여 올바른 위해성 평가에 장시간과 비용이 소모될 수도 있을 것이다. 특히 광산 및 폐광으로 인한 생태계의 영향이 이미 존재할 것이기 때문에 이러한 영향을 감안하여 채움재의 생태적 영향을 예측한다는 것은 쉬운 일이 아닐 것으로 생각된다. 인체를 대상으로 하는 위해성평가에도 작물의 뿌리 등을 통한 오염물질의 흡수 및 생물농축도 고려될 수 있다^{4,5,7,10)}. 따라서 위해성평가시 일차적으로 인체에 대한 영향을 고려하는 것이 합리적이다. 인체를 대상으로하는 환경위해성 평가에서는 일반적으로 어린이와 어른을 구분하며 발암성과 비발암성 정도의 영향을 고려한다. 생태요소의 영향을 가늠할 경우에는 생물뿌리나 생태피라미드에 따른 오염물질의 생태계내 농축여부를 중점적으로 보는 것이 바람직하다고 사료된다⁵⁾.

3.3. 오염거동 및 노출경로

토양 위해성 평가 가이드라인에 따르면 토양내 오염성분이 수용체가 노출되는 경로는 (1) 오염물질이 토양에서 지하수에 용출 되었는데 그 지하수가 수용체(인간)

거주지역까지 흘러가 수용체가 그 지하수를 마시는 경우 (2) 오염물질이 함유된 미세토양 입자가 공기중으로 이동되었는데 그 미세입자를 수용체가 흡입한 경우 (3) 토양오염물질이 작물의 뿌리 등에 흡수되어 농축되었는데 그 작물을 수용체가 섭취한 경우 (4) 오염물질이 함유된 토양이 수용체의 피부에 접촉한 경우 (5) 오염성분이 공기 중으로 휘발되어 실내의 공기를 오염시켰는데 그 오염물질을 수용체가 흡입한 경우로 구분할 수 있다⁵⁾. 본 연구에서 다루는 채움재의 경우 거의 대부분 무기질인 점 그리고 원료인 비산재가 석탄화력발전소에서 나온 점을 감안하면 중금속 등 무기오염물질이 주가 될 것이다, 이러한 노출경로를 상세히 파악하는 것이 시간이 걸린다면 예비 위해성 평가에서의 노출경로는 최대한 채움재 오염원에 가깝게 설정하는 것을 고려해 볼 수 있을 것이다. 노출경로가 짧고 단순할수록 수용체에 노출량이 많이 산정될 것이다, 이는 예비 위해성 평가에서는 대체로 평가작업이 신속하고 용이하도록 하며 위해도가 최대한 높게 나오도록 한다는 점을 감안하면 이러한 노출경로의 가정은 예비 위해성 평가의 취지에 대체로 부합하다고 볼 수 있다, 다만, 이러한 가정은 장기간에 복잡한 생태계내 먹이사슬 시스템에 관련된 생물농축이나 다양한 형태의 혼합, 침전 혹은 반응으로 인한 위해도 상승작용은 무시된다는 단점이 있으므로 조심해야 할 것이다.

예비평가 이후 상세 평가시에는 전술한 노출경로가 상세히 검토되어야 할 것이다. 폐광산 위치 인근에 상시 거주민의 인구밀도가 상당히 희박하다고 가정하면 상기 노출경로 중 (1) 채움재에서 용출된 지하수는 토양매질을 거치게 될 경우 상당 기간이 지난 이후에야 상시 거주민이 위치한 지역에 다다를 것이며 이 경우 토양매질내 이온물질이나 관련 생태 요소 등과의 반응으로 침전 혹은 전환될 수 있다. 따라서 용출된 지하수가 보다 유속이 빠른 인근 수계에 이르러 오염시키는 점을 고려할 수 있다. 이 경우 인근 지역의 수계 시스템 분석이 필요하다. (2) 고형화된 채움재가 미세입자가 되려면 장기간에 걸친 자연적 혹은 인공적 파쇄로 부스러지거나 침전되거나 해서 공기 등 환경매질을 통해 이동되어야 한다. 이는 전술된 바와 같이 일단 고형화 채움재 성상분석을 통해 파악하며 이 경우 채움재 입자내 오염물질 함유량을 고려해야 한다. (3) 채움재내 오염물질이 인근 식물 뿌리에 흡수되어 축적이 되는 경우를 상상해 볼 수 있다. 이 경우 해당 식물이 인간이 직접 섭취하는 작물은 아니더라도(폐광산 인근에 농경지가 없

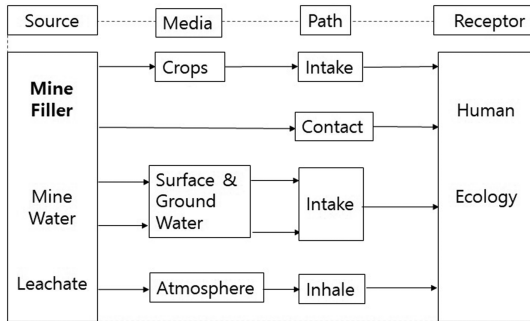


Fig. 2. Schematic illustration of the major exposure pathways in the environmental risk assessment of mine fillers (Lee et al.¹¹ 연구 참고).

음) 이를 초식동물 등이 섭취하여 생물농축이 장기적으로 심화되는 과정을 고려할 수 있다. (4)의 경우, 피부 접촉에 의한 노출은 다른 섭취나 호흡으로 인한 노출에 비해 상대적으로 위해성이 크지 않을 것으로 생각되며 (5)는 해당 물질이 비휘발성이기 때문에 일부 수은 같은 특이한 성분 외에는 본 채움재의 노출경로에서 무시해도 좋다고 생각한다(Fig. 2 참조).

마지막으로 채움재 원료가 되는 비산재나 고형재내에는 중금속, 희유금속 등 상당히 다양한 오염항목이 존재한다, 기존 국내의 토양 혹은 광해 위해성평가시에는 대체로 유해도가 높은 일부 중금속에 한정하는 경우가 많은데^{5,7)} 이 경우 여타 다른 물질은 저농도라도 그 항목이 다양하면 유해도는 높게 산출될 수도 있다. 이는 유해도가 각각의 성분을 적절한 변환을 거쳐 합산하는 식으로 계산되기 때문이다. 다만 이때 주의할 점은 해당 폐광산의 바탕시료(인근 토양이나 광미)내 해당 물질의 함유량을 고려해야 할 것이다. 사실 폐광산 인근에는 중금속 등 다양한 물질이 일반토양보다 많이 함유될 가능성이 있다. 이 경우 채움재에 다양한 오염성분이 있다고 해도 동일한 해당 성분이 바탕시료에 더 많이 존재한다면 해당 성분의 함유량이나 농도를 성급히 위해성 평가에 추가하는 것은 종종 비현실적일 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 제시한 국내 폐광산 채움재의 위해성 평가 전략시 중요하다고 생각된 점을 간추리면 다음과 같다. (1) 유해도 산정시 적합한 목적과 시나리오를 고민해야 한다, 폐광산 부지는 자연상태에서도 여러 오염물질의 존재로 인해 유해도가 높게 나올 수도 있으므로

(상세 위해성 평가시에) 일반적인 기법을 그대로 적용하기 보다는 해당 폐광산 부지의 바탕시료 분석 등을 통해 위해성 평가치가 현실적 여건에 부합하도록 해야 한다. (2) 채움재는 위해성평가가 제도화된 유사 매질(토양이나 매립재)과 성상이 다른 점을 인지해야 하며 철저한 채움재 시료분석을 통해 시료내 주요 오염물질의 함유량 및 노출량뿐 아니라 다른 특성 예를 들면 장기간에 걸친 기계적 강도나 부스러짐 등도 조사하여 상세 위해성 평가에 고려되어야 한다. 특히 채움재내 오염성분이 혼합되어 있으므로 상세 위해성 평가시에는 이들과 여타 다른 성분과의 반응으로 독성/유해성 상승 (synergism) 여부가 규명되어야 한다. 다만 이 경우 해당 성분이 저농도의 경우 평가시 채움재 인근 바탕시료내 함유량이나 반응성을 고려하여야 한다, (3) 채움재의 위해성을 판단하려면 상세 위해성 평가작업까지 원료가 되어야 하나 이 경우 상당 기간과 비용이 필요하므로 예비위해성 평가를 실시하여 효과적인 상세 위해성 평가를 위한 스크리닝을 하는 것이 당연하다, 예비 위해성 평가는 실제 유해도와는 달리 급성 유해도가 최대치가 되도록 산출하는 것이 일반적이다. 이를 위해 채움재내 함유된 오염물질의 이동성 및 반응성을 최대치로 설정한다던가 노출경로를 짧고 단순하게 한다던가하는 전제를 설정할 수 있으나 이 경우 생물농축 같이 장기간에 걸쳐 발생할 수 있는 유해도를 추가적으로 고려해야 할 것이다.

Acknowledgement

This research was supported by the National Strategic Project-Carbon Upcycling of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (NRF-2017M3D8A2084752).

References

1. Ministry of Environment of Korea, 2018 : The first master plan for resource recirculation. Public document.
2. Kwon, J.-H. et al., 2012 : Establishment on the methodology of risk assessment of recycled products including hazardous substances, Final report of National Environment Science Institute.
3. Cho, H. and Park, J.-Y., 2018 : Development of a leaching

- assessment framework for the utilization of coal ash at South Korean mine reclamation sites, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, pp.1437-1447.
4. U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), 2007 : Framework for metals risk assessment, EPA report: 120/R-07/001.
 5. National Law Information Center (Korea), 2015 : The guideline of soil contaminant risk assessment, Report no. 044-201-7178.
 6. Ministry of Environment of Korea, 2009 : Commentary of initial risk assessment using the information on chemical discharges, <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/091/023/009/5558738.pdf>.
 7. MIRECO (Mine Reclamation Corp.), 2016 : Establishment of an integrated system for risk assessment of mining areas, Technical (research) report no. : 2015-42.
 8. Jang, J.-C., Ji, S.-W., and Ahn, J.-W., 2017 : Utilization of circulating fluidized bed combustion ash and related specifications for mine backfills, *Korean Society Resource Recycling*, 26, pp.71-79.
 9. Yoo, J.-C., Ji, S.-W., Ahn Ji-W., Kim, C., and Shin, H.-Y., 2017 : A case study of mine environmental restoration using coal ash, *Korean Society Resource Recycling*, 26, pp.80-88.
 10. Jeong, H. W., Cha, J.-M., Kim, S. O., and Lee, S.-W., 2014 : A study on the risk assessment and bioconcentration Factor (BCF) for heavy metals in soil, *Journal of Korean Society of Mineral Energy and Resource Engineering*, 51, pp.876-884.
 11. Lee, S.-W., Lim, T.-Y., Park, M. J., Lee, S.-H., Cha, J.-M., and Kim, S.-O., 2015 : Study on exposure factors and model specialized for human risk assessment of abandoned mine area, Korea, *Journal of Korean Society of Mineral Energy and Resource Engineering*, 52, pp.488-499.

지 상 우

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제25권 3호 참조

조 환 주

- 고려대학교 지질학 학사
- 고려대학교 지질공학 석사
- 고려대학교 지질공학 박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 선임연구원

신 희 영

- 한양대학교 자원공학과 박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제25권 3호 참조

이 상 훈

- 퍼듀대학교 Biological Engineering 박사
- 현재 계명대학교 환경학부 환경과학전공 조교수
- 당 학회지 제27권 6호 참조

안 지 환

- 현재 한국지질자원연구원 탄소광물화사업단 단장
 - 당 학회지 제27권 3호 참조
-