

발전회를 이용한 광산환경 복원사례 연구

유종찬 · 지상우 · §안지환 · 김춘식* · 신희영

한국지질자원연구원, *한일시멘트

A Case Study of Mine Environmental Restoration using Coal Ash

Jong-Chan Yoo, Sang-Woo Ji, §Ji-Whan Ahn, Chun-Sik Kim* and Hee-Young Shin

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

**Hanil Cement Co., Ltd.*

요 약

전 세계적으로 매년 증가하는 발전회의 매립을 위한 부지는 현저히 부족한 실정이며, 이를 재활용 하는 방안에 관한 연구는 지금까지 활발히 진행 중이다. 또한, 휴폐광산의 갱구, 폐석 더미, 지하공동에서 발생하는 다양한 광해는 심각한 인명피해 및 환경오염을 일으킨다. 따라서 본 연구에서는 국내 석탄, 금속, 석회석 광산에서 발생하는 AMD (Acid Mine Drainage), 지반침하 등의 광해방지에서 발전회의 활용 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 발전회는 그 물리화학적 특성에 따라 AMD 중화, 노천광산에서의 차폐재, 지하광산의 채움재 및 토양 개량제로써 활용할 수 있으며, 미국, 호주, 일본, 캐나다 등의 국외에서는 관련 지침을 마련하여 현장 적용사례가 충분히 확보된 상태이다. 하지만 국내의 경우 현장 적용을 위한 몇몇 연구들은 수행돼 왔지만, 현재 발전회를 사업장폐기물로 분류하고 있기 때문에 현장 적용사례가 미흡하며, 이와 관련된 연구도 부족한 실정이다. 따라서 국내에서도 국외의 관련 선행 적용사례들을 참고하여 광해방지사업에서 발전회의 활용을 위한 구체적인 기준 및 관리체계가 필요할 것이다.

주제어 : 발전회, 발전회 재활용, 광산, 광산복원, 광해복구

Abstract

Globally, there has been a lot of research related to recycling coal ash from power plant stations. This research is happening because there is a considerable shortage of sites for reclamation of increased coal ash every year. In addition, a variety of environmental pollutants have appeared because of mining activity. Abandoned coal mine, pits, and mine tailing piles caused pollutants to come to the surface resulting in serious damage for humans and the environment. Therefore in this study, we investigated whether or not coal ashes have the ability to prevent several environmental problems by mining in Korea and a manageable form recycling coal ashes. In overseas countries, there is a sufficient field of applicable cases where coal ash is used for neutralizing AMD (Acid Mine Drainage), covering of the waste materials, grouting, and soil amendments. However in Korea, since the coal ash is classified as a 'waste', there is an insufficient field applicable cases so far. Therefore it is necessary to establish a specific standard and management system for the utilization of coal ash based on the relevant precedent cases applied abroad in order to prevent environmental pollution caused by mining activity in Korea.

Key words : Coal ash, Recycling of coal ash, Mine, Mine restoration, Mine reclamation

· Received : February 17, 2017 · Revised : March 15, 2017 · Accepted : March 27, 2017

§ Corresponding Author : Jiwhan Ahn (E-mail : ahnjw@kigam.re.kr)

Mineral Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34132, 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

미분탄연소물에서 석탄연소과정의 부산물인 발전회는 국내에서 연간 800만 톤 이상이 발생하는 것으로 보고 되었다¹⁾. 국내의 경우 매년 증가하는 발전회의 처리를 위한 매립지가 부족하며, 이를 신실하기 위한 부지확보도 어려운 실정이기 때문에 발전회를 재활용하는 방안 에 대한 연구가 필요하다. 발전회는 공기의 흐름에 의 해 바닥으로 떨어지는 조립질의 bottom ash와 배기가스 에서 정전기 또는 기계적인 침전으로 포획되는 미립질 의 fly ash으로 나눌 수 있다. 발전회 내 fly ash는 bottom ash보다 약 5-10배 많이 발생하는 것으로 알려 져 있으며, 이를 시멘트, 건설업, 광산채움재, 토양개량, 농경지, 폐기물 안정화제 등으로 재활용하는 방안 에 대한 연구는 활발히 진행 중이다. 이렇게 다양한 발전회 의 재활용방안이 있음에도 불구하고, 국내 발전회 재활 용은 2004년 환경부 및 산업자원부에서 고시한 “철강 슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용지침”에 따라 콘 크리트 혼화재, 시멘트 원료, 각종 골재 등의 9가지의 항목의 용도로만 제한하고 있다²⁾.

휴폐광산의 갱구 및 폐석더미에서 발생하는 AMD (Acid Mine Drainage)는 황철석(FeS_2)과 같은 황화광물 의 산화로 인하여 생성되며, 주변 하천, 지하수 및 토양 의 산성화 및 중금속 등의 오염물질의 이동성을 증가시 키는 환경문제를 유발한다³⁾. 이 때, 발전회는 일반적으로 pH 12 이상의 알칼리 상태이기 때문에 AMD의 중 화처리 및 금속제거에 뛰어난 효과가 있는 것으로 알려 져 있다. 또한 발전회를 휴폐광산의 채움재로 사용할 경우, 광산부지 인근에서의 건설작업으로 인한 지반균 열, 지하광산의 채굴로 인한 지하공동, 석회암 지반의 용해로 인한 지하공동, 지하수유출로 인한 지반침하 및 AMD 발생억제, 중금속 안정화제로서 토양개량효과 등 이점이 많지만, 발전회의 적용 후 중금속 등 오염물질 들이 주변 토양 및 지하수로의 거동을 확인하는 지속적 인 모니터링이 필요하다. 이러한 이유로, 해외에서는 노 천광산 및 지하광산의 복구 및 갱내충진(backfill)을 위 한 발전회의 활용 가이드라인을 제시하며 실제 적용사 례도 많다(ASTM⁴⁻⁷⁾, JCOAL⁸⁾, EPA⁹⁾, EU-legislation¹⁰⁻¹⁴⁾, DOE¹⁵⁾, CCSD¹⁶⁾, MEND¹⁷⁾). 미국에서는 이를 “표준 방법”으로 지정하여 각 석탄발전소에서 발생하는 발전 회의 종류에 따라 석탄광산 채움재 뿐만 아니라 토양 개량제, 건설 및 도로재료, 중금속 안정화제로서 사용가 이드라인을 제시하며, 여기에는 발전회의 적용 후 사후

관리에 대한 지침도 포함되어 있다^{4-7,18)}. 실제로, 호주 에서는 2003년 기준으로, 연간 약 1,300만 톤의 발전회 가 발생하였으며, 그 중 약 250만 톤은 광산부지의 정 화를 위한 재활용에 사용되었다¹⁹⁾. 또한 미국의 경우, 2000년 기준 약 9,800만 톤의 발전회가 발생하였으며, 이 중 약 2%이 광해방지 및 토양 개량제 등으로 재활 용되었다²⁰⁾. 그 밖에도, 멕시코에서는 매년 약 400만 톤의 발전회가 노천광산의 복구를 위하여 사용되어져 오고 있으며²¹⁾, 유럽(ECOBA)에서 발생되는 약 5,500 만 톤의 발전회 중, 약 52%이 지하광산 및 건설업에 사용되었다고 보고되었다²²⁾. 하지만, 국내에서는 발전회 를 ‘사업장폐기물’로 분류하고 있어 광해복구를 위한 발 전회의 적용이 제한되어 있기 때문에, 실험실규모의 연 구와 더불어 발전회의 적용에 따른 주변 환경으로의 위 해성을 판단하기 위한 몇몇의 연구들만이 제한적으로 수행되어져 왔다²³⁻²⁶⁾.

따라서, 본 연구에서는 국내의 광산부지에서 발생하 는 지반침하 혹은 AMD 발생문제를 해결함에 있어 발 전회의 사용을 위하여, 현재까지 개발된 해외 선진기술 의 연구 및 적용사례와 비교하여 국내에서 보유하고 있 는 기술의 개선사항에 대하여 파악하고자 한다. 또한, 이러한 연구결과를 바탕으로 국내 광산지역의 토양 및 수질 개선, 지반침하 방지 등 환경복원에 발전회의 효 과적인 적용방안을 제시하고자 한다.

2. 광산환경 복원을 위한 발전회의 적용사례

2.1. AMD 처리사례

앞서 언급한 바와 같이, 휴폐광산 등지에서 발생하는 광산배수는 FeS_2 이 공기 및 산화박테리아에 노출됨에 따라 산화되어 수소이온농도의 증가로 인해 산성(pH 2-6)을 띠며, 황산염(sulfate; SO_4^{2-})의 함량이 높고 중금 속의 이동성이 크기 때문에 주변토양 및 지하수 환경오 염문제를 야기한다²⁷⁾. 특히, 휴폐석탄광산으로부터 생 성되는 AMD는 알루미늄 및 철의 함량이 높고, 이는 수중에서 백화 또는 적화현상을 유발하기 때문에 심미 적으로도 불쾌감을 유발한다. 이를 처리하기 위한 중화 처리, 이온교환, 전기화학, 미생물, 호기성 및 혐기성 소 택지처리법 등의 많은 연구들은 지난 수십 년 전부터 현재까지 국내외에서 활발히 수행되어져 오고 있다²⁸⁾. 그 중에서, 발전회는 일반적으로 pH 및 Si, Ca, Mg 등의 농도가 높기 때문에 직접적으로 AMD의 발생을 억제할 뿐만 아니라 중금속의 안정도를 증가시키고 광

Table 1. Cases of abroad AMD processing using coal ash

| Coal ash type | Application site | Technique | Summary | Reference |
|---------------------------------|--|---|--|-----------|
| Fly ash (PPS) | Navigation, Bank, Brugspruit AMD, South Africa | AMD neutralization batch test | - Increase of pH with decrease of EC and SO ₄ as the ratio of applied fly ash - Reduction effect at pH of each element | 31 |
| Fly ash (PPS) | Navigation AMD, South Africa | AMD neutralization bench scale | - Reduction of TDS, Fe, Al, SO ₄ , Cu, Co, Th conc. with increase of pH depending on amount of fly ash | 32 |
| Limestone, dolomite, fly ash | Artificial AMD | AMD neutralization Lab. scale | - Decrease of Fe conc. with increase of pH and Ca conc. according to the ratio of limestone, dolomite and fly ash | 33 |
| Sulfite derived FGD sludge | Roberts-Dawson mine, USA | Mine grouting and sealing field scale | - Reduction of AMD - Different compressive strengths depending on the combination of materials | 34 |
| Fly ash (PPS) | Omega AMD, Virginia, USA | Mine grouting field scale | - Reduction of AMD and processing cost - Insufficient of water quality | 35 |
| Fly ash (PPS) | Landau AMD, South Africa | AMD neutralization by disposal Lab.-pilot scale | - Increase of pH and decrease of Fe, Al, Al, SO ₄ , depending on application rate of fly ash and time | 36 |
| Fly ash (PPS), clinker, zeolite | Parys Mountain AMD, Wales | Metal adsorption Lab. batch test | - pH increase by use of mixture of fly ash and faujasite, clinker and faujasite | 37 |
| Fly ash (PPS) | Red Oak coal mine USA | Mine grouting field scale | - pH dramatically increase then gradually decrease after 6 months - Dramatically decrease of Fe, Mg, Al conc. with pH increase | 38 |

산부지의 지반침하를 포함한 광해를 방지할 수 있는 물질로 잘 알려져 있다^{29,30}). 발전회를 이용한 국외 AMD 처리사례를 Table 1에 정리하였다.

국외의 적용사례에서 확인할 수 있듯이, 파일럿규모 이상의 AMD 중화처리는 주로 비산회의 살포를 통해 수행되었다. 실제로, 비산회의 적용은 해당 AMD의 pH 증가와 더불어 Fe, Al, SO₄²⁻, EC 및 중금속의 이동성 및 농도가 현저히 저감되는 효과를 보였다. 또한, 비산회와 시멘트 혹은 석회, 물의 혼합물을 시추공에 직접적으로 주입하여 석탄광산으로부터 AMD의 발생을 억제와 더불어 지하공동 및 지하충전의 방지를 효과를 얻을 수 있었다. 이 때, 비산회에 포함되어 있는 B³⁹), As, Se, Cr, V⁴⁰) 등 미량의 중금속들의 침출 가능성에 대한 정기적으로 모니터링은 필수적이며, 이러한 유해 미량원소들의 안정화에 대한 고려가 반드시 포함되어야 한다고 강조하였다. 하지만, 국내의 경우 AMD처리를 위하여 대학, 연구소 등에서의 다양한 연구들은 실험실 규모에서 제한적으로 수행되어지고 있으며, 현재까지 실

제로 적용한 사례는 없다. 권순동과 김선준(1999)⁴¹)은 AMD의 중화처리에 있어 제강슬래그의 활용가능성에 대하여 평가하였으며, 적용 후 높은 pH 유지 및 24시간 반응실험에서 Fe, Al, Ni, Co, Cu, Zn의 높은 제거율의 확보가능성을 제시하였다.

2.2. 토양 개량제 적용사례

광산작업 후 별도의 정화처리 없이 방치된 광산부지의 토양 및 수계는 중금속 등의 오염물질에 의해 주변 환경 및 인근 거주민의 건강에 심각한 악영향을 초래할 수 있다. 앞서 AMD 복원사례에서도 확인했듯이, 발전회의 적용은 토양 및 수계의 pH를 증가시키고 동시에 유해원소의 이동성을 저감시키는 효과가 있다는 것을 확인하였다. 국외에서 발전회는 광해방지뿐만 아니라 토양 개량의 용도로 사용되어져 왔다, 국외 토양 개량을 위한 발전회의 적용사례를 Table 2에 정리하였다.

적용 사례에서 확인할 수 있듯이, 비산회는 광산폐기물, 갱구, 폐재 등으로부터 발생되는 오염물질의 이동성

Table 2. Cases of abroad soil amendment using coal ash

| Coal ash type | Application site | Technique | Summary | Reference |
|--------------------------|------------------------------------|--|---|-----------|
| Dry FGD | Coal mine site, USA | Soil amendment field scale | - Increase pH from 4 to 7 in effluent - Reduction of soluble Al - Increase of conc. of SO ₄ , Mg, B, Cl, F temporarily by dissolution of FGD | 34 |
| FGD by-product | Acidic mine site, USA | Soil amendment monitoring for 2 yr | - Increase of conc. of B in groundwater, effluent, and plant - Insignificant change in conc. of elements except Ca, SO ₄ , B, Mg | 42 |
| Fly ash (PPS) | Coal mine waste disposal ares, USA | Soil amendment field scale | - Positive effect on growth of various grasses, beans, plants, and trees due to pH increase and improvement of soil quality | 43 |
| Fly ash | Strip mine, USA | Soil amendment on-site crop cultivation | - Positive effect on plant (soybean, grass) growth due to increase of water holding capacity and soil quality | 44 |
| Fly ash (PPS) | Metal mine, Australia | Soil amendment on-site plant cultivation | - Improvement of plant growth over the years - Insignificant toxicity to plants | 45 |
| Fly ash and coal residue | Metal mine, China | Covering field scale | - Positive effect on revegetation after treatment | 46 |
| Fly ash (PPS) | Pb-contaminated soil, France | Covering field scale | - Reduction of heavy metals mobility in plants | 47 |

저감과 더불어 물리, 화학, 생물학적으로 토양질을 향상시키는 효과가 있다. Jala and Goyal (2006)⁴⁸⁾와 Pandey 등(2009)⁴⁹⁾은 토양 개량제로서 발전회의 적용에 있어 얻을 수 있는 토양 pH의 증가, 오염물질들의 이동성 저감, 발전회 내 K, Mg, Fe, Zn, Ca와 같은 필수요소들의 투입, 수분보유량 증가, 토양의 물리화학적 그리고 생물학적 질을 향상시키는 등의 장점들에 대하여 상세히 설명하였다. 국내의 연구결과, 토양 개량제의 용도로서 발전회의 사용은 토양 내 대부분의 중금속을 토양 내 비교적 강하게 결합하는 유기물결합태 혹은 잔류태로 하여 작물의 생장에 큰 영향을 미치지 않았으며, 이는 발전회의 적용에 따른 pH와 유효인산의 증대로 인한 결과인 것으로 밝혀졌다⁵⁰⁾.

2.3. 노천광산복원 적용사례

석탄 등을 채굴하는 광산 활동의 과정에서 만들어진 갱구와 광산폐기물 등은 광산 인근 계곡부에 적치하여, 여기에 포함된 중금속 등의 오염물질 및 FeS₂의 산화는 토양, 지하수, 및 주변하천의 산성화와 더불어 환경오염을 야기할 개연성이 크다. 이러한 위험요소의 발생을 최소화하기 위한 광산폐기물의 차폐제는 중요한 하나의

대안이 될 수 있다. 국외 발전회 이용 노천광산 복원사례를 Table 3에 나타내었다.

Dutta and Sarkar (2016)⁵⁵⁾은 인도에서 석탄광산 등의 채움제로서 발전회의 사용 가이드라인 및 장점에 대하여 제시하였으며, 적용 후 발생하는 침출수 내 미량 원소에 대한 사후 모니터링 또는 관리에 대한 중요성을 강조하였다. 국내의 적용사례를 살펴보면, 오세진 등(2011)²⁴⁾은 중금속을 포함하는 폐광산에 적치된 폐석으로부터 발전회를 이용한 실험실규모의 오염물질 안정화 컬럼실험에서, 비산회 및 바다회는 pH의 증가와 더불어 Cu, Pb, As, Al 등이 안정화된다고 보고하였다.

2.4. 지하광산복원 적용사례

노천광산과는 달리 지하광산의 채굴은 많은 지하공동을 야기하며, 시멘트, 석회석, 골재 등의 채움재를 이용한 지반균열 및 지반침하와 같은 광해방지는 필수요소이다. 국외에서는 지하광산을 복원하기 위하여 일반적으로 사용되는 골재, 모래 등을 대체하기 위하여 발전회를 사용해왔다⁵⁵⁾. Table 4는 국외 지하광산복원을 위하여 발전회 적용사례를 보여준다.

위의 적용사례에서도 확인할 수 있듯이 광산채굴 층

Table 3. Cases of abroad restoration of strip mine using coal ash

| Coal ash type | Application site | Technique | Summary | Reference |
|--------------------------------|------------------------------|--|---|-----------|
| FGD-cement mixture | Appalachian coal mine, USA | Grouting field scale | - Application of FGD for AMD, ground subsidence, mine void prevention - 40 ft of underground mine void filling | 34 |
| Fly ash-biosludge mixture | Galberget mine, Sweden | Dry covering field scale | - Decrease of Fe ²⁺ and SO ₄ conc. with application time - Gradually increase of pH with application time - Potential leaching of heavy metal compounds into the environment due to increase of DOC conc. | 51 |
| Coal ash | Wheelabrator-Morea mine, USA | Grouting field scale | - Decrease of trace elements such as Fe along with increase of alkalinity for 15 years after application of coal ash | 52 |
| FGD and PCW mixture | Mettki mine USA | Covering field scale | - Decrease of Al and Fe conc. with increase of pH and alkalinity | 53 |
| Coal ash and bentonite mixture | - | Liner or cover construction Lab. scale | - The applicability investigation of coal ash to actual waste disposal area with liner or cover after confirmation the optimum moisture content and dry density | 54 |

Table 4. Cases of abroad restoration of underground mine using coal ash

| Coal ash type | Application site | Technique | Summary | Reference |
|--|------------------------------|-----------------------------------|--|-----------|
| FBC ash and bentonite mixture | Fairfax mine, USA | Underground injection pilot scale | - Above 600 psi of compressive strength after injection of mixture | 34 |
| FBC ash, fly ash, cement, kiln dust, limestone mixture | Long Ridge mine, USA | Grouting field scale | - Design strength of 250 psi by mixing water and mixture in a ratio of 1:1 | 34 |
| Fly ash, bottom ash, FGD sludge mixture (PPS) | Coal mine, USA | Underground injection field scale | - Above 300 psi of 28 days compressive strength - Injection at 105 ton/hr with 2 boreholes | 34 |
| FGD and coal waste | Mettki coal mine, USA | Grouting field scale | - Simultaneously decrease of Al and Fe conc. with increasing pH and alkalinity | 53 |
| PFA and fly ash | Mons Hill limestone mine, UK | Grouting field scale | - Application of PFA as a filling material for limestone mine - Continuous monitoring to minimize dust and water contamination during operation | 57 |

전체로서 발전회를 사용할 때, 충전재 적용 시 시추공에서의 주입압력 및 주입유량에 따라 적용 후 충분한 강도의 확보는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 시추공을 통한 발전회의 주입방법은 건식 혹은 습식으로 나눌 수 있으며, 그 방법에 따라 주입압력이 달라진다⁵⁶⁾. Mishra and Karanam (2006)⁵⁸⁾은 광산채굴 충전재로서 기존에 사용해오던 모래 대신에 화력발전소에서 배출되는 비산회, 석회, 석고의 혼합물을 사용함에 따라 56일 압축강도의 증가와 더불어 지하수질의 향상을 보고하였다. 발전회의 적용 후 토양, 지하수 및 주변 하천으로의

유해미량원소의 침출에 관한 사후 모니터링을 지속적으로 실시하는 것 또한 중요하다. 이상은 등(2012)²⁵⁾은 실제 광산부지의 조건과 동일한 모형경도를 제작하여 화력발전소에서 배출되는 발전회를 이용한 충전특성을 확인한 결과, 발전회와 물의 혼합비율에 따라 충전재의 유동성 및 침강특성에 있어 큰 차이를 보였다고 보고하였다. 또한 이관호와 김성경(2012)⁵⁹⁾은 비산회, 바닥회, 시멘트 등을 이용하여 지하매설관용 뒤채움재로서의 적용을 위하여 실험실규모의 실험결과, 배합조건에 따라 유동성, 일축압축강도 및 점착력 등이 영향을 받는다는

것을 보고하였다. 국내의 경우, 지하광산의 채굴공동의 방지를 위하여 모래, 석회석, 콘크리트를 이용한 사례는 있지만, 발전회의 적용사례는 없으며, 여기에 따른 연구 또한 미흡한 실정이다.

3. 국내 발전회 활용 광산환경 복원연구

2014년 4월부터 16개월 동안 ‘한국남부발전’에서는 강원도 삼척시 ‘삼척그린파워’에서 발생하는 연간 70만 톤의 발전회를 이용하여, 국내 석회석 채굴공동의 발전회 충전 가능여부에 관한 연구를 수행하였다. 삼척그린파워 인근에 위치한 석회석 광산의 채굴공동은 지반침하를 야기함과 동시에 침출수로 인한 주변환경의 오염 가능성이 있으며, 경제적, 환경적 사용가치가 높은 미활용 발전회를 이용한 석회석광산충전을 목적으로 하였다. 광산 채굴공동 충전으로 발전회의 사용은 지반의 안정화를 증대하며, 폐기물 재활용에 따른 친환경적 사업, 시멘트, 콘크리트, 골재 등의 충전재를 제작하는데 소모되는 비용절감 등의 강점이 있다.

연구를 수행하기에 앞서, 국내 주요 화력발전소의 연도별 발전회 발생 및 재활용 현황을 조사하여, 발전회 재활용 관련 국내·외 관련규정에 대한 조사를 우선적으로 실시하였다. 또한, 발전회 재활용관련 국내·외의 연구 동향을 파악하여, 이를 바탕으로 국외의 선진기술들에 관한 피드백을 실시하였으며, 이후에 진행된 주된 연구는 석회석 광산의 시험충전방법 및 채굴공동 형상 검토, 발전회 운송방안 검토, 지반조사, 안정성 평가를 위한 해석모델링 수행, 공동 차단벽 검토 및 설계, 지하수 영향평가를 위한 지하수 유동 및 오염원 확산 모델링 분석, 교통영향 분석, 경제성 분석, 삼척시 관계계획 검토(인·허가 관련), 발전회 매립방안 제안으로 이루어 졌다. 해당 연구과제는 국내 석회석 광산의 시험충전을 위해 발전회의 재활용에 있어 안정성, 교통성, 경제성 등의 분석결과를 보였지만, 연구과정에서 발전회 시험충전을 위한 삼척시의 인·허가를 시도하였으나 국내 현행법상 발전회는 ‘사업장폐기물’로 구분하고 있기 때문에 석회석광산 채굴공동에 있어 발전회 충전의 승인을 받지 못하였다.

4. 결 론

현재 미국(ASTM, EPA, DOE), 호주(CCSD), 일본(JCOAL), 캐나다(MEND) 등의 국가기관에서는 광해를

방지하기 위하여 발전회 및 광미를 활용한 갱내충전을 실시하여 AMD 및 지반침하의 문제해결과, 더 나아가서는 환경영향평가를 실시하여 적용 후 발생할 수 있는 환경유해요소들에 대한 안정성 평가를 통해 광해문제를 해결하고자 하는 노력이 활발히 진행 중이며, 실제 적용사례도 상당히 많은 수준이다. 국외의 적용사례를 바탕으로, 발전회는 친환경적 관리체계 하에 적용 후 주변 환경영향을 파악하는 사후 모니터링과 충분한 관리가 포함된다면, 광해방지와 더불어 토양 개량제로서 많은 이점이 있기 때문에 국내에서도 충분히 사용가능할 것으로 사료된다. 발전회의 활용은 기술적으로 기존에 사용해오던 석회, 모래, 골재 등의 충전재와 비교하여 지반의 안정화, 채움재 제조 및 운반에 소모되는 경제적 부담의 해소, 폐기물의 재활용에 따른 국가 이미지 개선, 오염물질의 안정화에 따른 환경영향 최소화 등의 기술적, 경제적, 환경적으로 활용 가능성이 기대된다. 하지만 우리나라의 경우 관련 현행법상 광해방지를 위한 발전회의 직접적인 사용을 규제하기 때문에 관련 연구들 또한 부족한 실정이다. 따라서, 국외의 선진기술들을 참고하여 국내에서도 광해방지용으로 발전회의 활용이 추진될 수 있도록 하는 구체적인 기준 및 관리방법들이 관련법규의 개정을 통해 마련되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 유용자원 재활용 기술개발 사업(과제번호: 2016002230004)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Cho, H., Maeng, J.-H., 2016 : A study on Eco-friendly Use of Coal Ash at Mine Reclamation Sites, J. Korea Soc. Waste Manage., 33(4), pp. 328-337.
2. Ministry of Trade, Industry and Energy, 2016 : Recycling guidelines for steel slag and coal ash companies.
3. Park, S. M. et al., 2015 : Selective recovery of dissolved Fe, Al, Cu, and Zn in acid mine drainage based on modeling to predict precipitation pH, Environ. Sci. Pollut. Res., 22(4), pp. 3013-3022.
4. ASTM (American Society for Testing and Materials) E2277-14, 2014 : Standard Guide for Design and Construction of Coal Ash Structural Fills.
5. ASTM (American Society for Testing and Materials) E2243-13, 2013 : Standard Guide for Use of Coal Com-

- bustion Products (CCPs) for Surface Mine Reclamation: Re-contouring and Highwall Reclamation.
6. ASTM (American Society for Testing and Materials) E2060-06, 2014 : Standard Guide for Use of Coal Combustion Products for Solidification/Stabilization of Inorganic Wastes.
 7. ASTM (American Society for Testing and Materials) E50, 2016 : Standard Practices for Apparatus, Reagents, and Safety Considerations for Chemical Analysis of Metals, Ores, and Related Materials.
 8. JCOAL (Japan Coal Energy Center) : Programs for Coal Resources Development.
 9. USEPA, 2001 : Coal Remining - Best Management Practices Guidance Manual.
 10. BS EN 450-1, 2012 : Fly Ash for Concrete. Definition, Specifications and Conformity Criteria.
 11. BS EN 197-1, 2011 : Cement. Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements.
 12. BS EN 3892 Part 1, 1982 : Pulverised fuel ash for use as a cementitious component in structural concrete.
 13. BS EN 3892 Part 2, 1996 : Specification for pulverised-fuel ash for use as a Type I addition.
 14. BS EN 3892 Part 3 1997 : Specification for pulverised-fuel ash for use in cementitious grouts.
 15. DOE (Department of Energy), 2006 : Use of Coal Combustion Products in Mine-Filling Applications: A Review of a Vailable Literature and Case Studies.
 16. CCSD (Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development), 2006 : Use of Coal Ash in Mine Backfill and Related Applications.
 17. MEND (Mine Environment Neutral Drainage), 2006 : Paste Backfill Geochemistry – Environmental Effects of Leaching and Weathering.
 18. Park, S.-U. et al., 2015 : Evaluation of Some Rare Metals and Rare Earth Metals Contained in Coal Ash of Coal-fired Power Plants in Korea, *J. Korean Inst. Resource Recycling*, 24(4), pp. 67-75.
 19. Heifrich et al., 2005 : Case study: CCPs' potential to lower greenhouse gas emissions for Australia, *Proceedings of World of Coal Ash Symposium*, Lexington, Kentucky, USA, pp. 20.
 20. Kalyoncu, R. 2001 : Coal combustion products-production and uses, *Proceeding of 18th Pittsburg International Coal Conference*, Newcastle, Australia, pp. 16.
 21. Young A., 2002 : Ashes to ashes: returning CCBs to the ground at Navajo Mine, *Proceedings of Interactive Technical Forum on Coal Combustion By-Products and Western Coal Mine*, Golden, Colorado (ed. K.C. Borries and D. Throgmoton), pp. 105-114.
 22. vom Berg, Feureborn, 2005 : Present situation and perspectives of CCP management in Europe, *Proceedings of World of Coal Ash Symposium*, Lexington, Kentucky, USA, pp. 10.
 23. Oh, M.-T., Sung, Y. J., 2012 : Evaluation of Applicability of Bottom Ash as Inorganic Filler, *J. Korea TAPPI*, 44(5), pp. 80-86.
 24. Oh, S.-J. et al., 2011 : Evaluating Stabilization Efficiency of Coal Combustion Ash (CCA) for Coal Mine Wastes: Column Experiment, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 44(6), pp. 1071-1079.
 25. Lee, S.-E. et al., 2012 : A study on the Model Test for Mine Filling using Coal ASH, *Tunner & Underground Space*, 22(6), pp. 449-461.
 26. Cho, K.-S., Roh, Y., Chung, D.-H., 2007 : A Biogeochemical Study on the Heavy Metal Leaching from Coal Fly Ash Disposed by Dangjin Fire Plant in the Coastal Environment, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 28(1), pp. 112-122.
 27. Gazea, B., Adan, K., Kontopoulos, A., 1996 : A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage, *Miner. Eng.*, 9(1), pp. 23-42.
 28. Johnson, D. B., Hallberg, K. B. 2005 : Acid mine drainage remediation options: a review, *Sci. total Environ.*, 338(1), pp. 3-14.
 29. Potvin, Y., Thomas, Ed., Fourie, A., 2005 : *Handbook on Mine Fill*, Australia Centre for Geomechanics, Perth, pp. 179.
 30. Mulligan, C., Young, E. N., Gibbs, B. F., 2001 : Remediation technologies for metal-contaminated soils and ground-water: an evaluation, *Eng. Geol.*, 60(1), pp. 193-207.
 31. Gitari, M. et al., 2006 : Treatment of acid mine drainage with fly ash: removal of major contaminants and trace elements, *J. Environ. Sci. Heal., A*, 41(8), pp. 1729-1747.
 32. Petrik, L. F. et al., 2003 : Utilization of South African fly ash to treat acid coal mine drainage, and production of high quality zeolites from the residual solids, *Proceedings of the Ash Utilization Symposium*, Lexington, KY, USA.
 33. Potgieter-Vermaak, S. et al., 2006 : Comparison of limestone, dolomite and fly ash as pre-treatment agents for acid mine drainage, *Miner. Eng.*, 19(5), pp. 454-462.
 34. Aljoe, W. W., Renninger, S. 1999 : CCB's in Mining Applications-An Overview of Projects Sponsored by DOE-FETC, *Proceedings of the International Ash Utilization Symposium*, Kentucky, USA, pp. 50.
 35. Gray, T. et al., 1997 : Plan for injection of coal combustion byproducts into the Omega Mine for the reduction of acid mine drainage, *American Society for Surface Mining and Reclamation*, Princeton, WV, USA.
 36. Surender, D., Petrik, L., 2005 : Development of a Co-disposal Protocol for the neutralization and amelioration of acid mine drainage with fly ash, *Proceedings of World of Coal Ash Symposium*, Lexington, Kentucky, USA.

37. Rios, C. A., Williams, C. D., Roberts, C. L., 2008 : Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites, *J. Hazard. Mater.*, 156(1), pp. 23-35.
38. Canty, G. A., Everett, J. W., 2006 : Alkaline injection technology: Field demonstration, *Fuel*, 85(17), pp. 2545-2554.
39. Polat, H. et al., 2004 : A new methodology for removal of boron from water by coal and fly ash, *Desalination*, 164(2), pp. 173-188.
40. Genthe B. et al., 2013 : Health risk implications from simultaneous exposure to multiple environmental contaminants, *Ecotox. Environ. Safe.*, 93(1), pp. 171-179.
41. Kwon, S.-D., Kim, S.-J., 1999 : A Study on the Treatment of the Acid Mine Drainage using the Steel Mill Slag, *J. Korean Soc. of Groundwater Environ.*, 6(4), pp. 206-212.
42. Kost, D. A., Vimmerstedt, J. P., Stehouwer, R. C., 1997 : Reclamation of Acid, Toxic Coal Spoils Using Wet Flue Gas Desulfurization BY-Products, Fly ash, and Sewage Sludge. Final report.
43. Capp, J. P., Adams, L. M., 1971 : Reclamation of coal mine wastes and strip spoil with fly ash. ACS Div, *Fuel Chem, Preprints*, 15(2), pp. 26.
44. Fail, J. L., 1987 : Growth response of two grasses and a legume on coal fly ash amended strip mine spoils, *Plant and soil*, 101(1), pp. 149-150.
45. Hunter, G. D., Whiteman, P. C., 1975 : Revegetation of mine wastes, Mt. Isa, Queensland. 2. Amendment of nutrient status and physical properties of tailings for plant growth, *Aus. J. Exp. Agr. Anim. Husbandry*, 15(77), pp. 803-811.
46. Ye, Z. H. et al., 2000 : Revegetation of Pb/Zn mine tailings, Guangdong Province, China, *Restoration Ecology*, 8(1), pp. 87-92.
47. Lopareva-Pohu, A. et al., 2011 : Influence of Fly Ash Aided Phytostabilisation of Pb, Cd and Zn Highly Contaminated Soils on *Lolium Perenne* and *Trifolium Repens* Metal Transfer and Physiological Stress, *Environ. Pollut.*, 159, pp. 1721-1729.
48. Jala, S. Goyal, D., 2006 : Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production-a review, 97, pp. 1136-1147.
49. Pandey, V. C., Abhilash, P. C., Singh, N., 2009 : The Indian perspective of utilizing fly ash in phytoremediation, phytomanagement and biomass production, *J. Environ. Manage.*, 90, pp. 2943-2958.
50. Hong, C. O. et al., 2006 : Evaluating Possibility of Heavy Metal Accumulation by Fly Ash Application in Rice Paddy Soils, *Korean J. Environ. Agri.*, 25(4), pp. 331-338.
51. Hallberg, R. O., Granhagen, J. R., Liljemark, A., 2005 : A fly ash/biosludge dry cover for the mitigation of AMD at the falun mine, *Chem. Erde-Geochem.*, 65, pp. 43-63.
52. Menghini et al., 2005 : Beneficial use of FBC coal ash for mine reclamation in the anthracite region at the wheelabrator Frackville and mount carmel co-gen sites, *Proceeding of Regulation, risk, and reclamation with coal combustion by-products at mines: a technical interactive forum*, Lexington, Kentucky, USA, pp. 33-43.
53. Ziemkiewicz, P. F., Skousen, J., 2000 : Use of coal combustion products for reclamation, *Green Lands Magazine*, pp. 36-47.
54. Mollamahmutoğlu, M., Yilmaz, Y., 2001 : Potential use of fly ash and bentonite mixture as liner or cover at waste disposal areas, *Environ. Geol.*, 40(11-12), pp. 1316-1324.
55. Dutta, A. B., Sarkar, T., 2016 : Fly ash an alternative for mine void filling in India, *Int. J. Sci. Technol.*, 5(4), pp. 144-148.
56. Ahmaruzzaman, M., 2010 : A review on the utilization of fly ash, *Prog. Energ. Combust.*, 36(3), pp. 327-363.
57. UKQAA (United Kingdom Quality Ash Association), 2004 : Case Study : Grouting of lime stone caverns Mons Hill Dudley, West Midlands, UK.
58. Mishra, M. K., Karanam, U. M. R., 2006 : Grototechnical Characterisation of fly ash composites for backfilling mine voids, *Geotech. Geol. Eng.*, 24(6), pp. 1749-1765.
59. Lee, K.-H., Kim, S.-K., 2012 : Eco-Friendly Backfill Materials with Bottom Ash, *J. Korea Academia-Ind.*, 13(3), pp. 1385-1390.

영문설명문 목록

- AMD : Acid Mine Drainage
 ASTM : Americal Standard Test Method
 JCOAL : Japan Coal Energy Center
 EPA : Environmental Protection Agency
 DOE : Department of Energy
 CCSD : Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development
 MEND : Mine Environment Neutral Drainage
 ECOBA : European Coal Combustion Products Association
 EU : European Union
 FGD : Flue Gas Desulphurisation
 DOC : Dissolved Organic Carbon
 FBC : Fluidized Bed Combustion
 PFA : Pulverized Fuel Ash
 PPS : Power Plant Station
 PCW : Pulverized Coal Waste



유 종 찬

- 금오공과대학교 토목환경공학부 공학사
- 금오공과대학교 환경공학과 공학석사
- 전북대학교 환경공학과 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 전략기술 연구본부 박사후연수자



지 상 우

- 현재 한국지질자원연구원 전략기술 연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제25권 3호 참조



안 지 환

- 현재 한국지질자원연구원 탄소광물화 사업단 단장
- 당 학회지 제10권 4호 참조



김 춘 식

- 경남대학교 신소재공학과 공학사
- 경남대학교 재료공학과 공학석사
- 현재 한일시멘트 테크니컬센터 선임연구원



신 희 영

- 현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제25권 3호 참조