

# 석탄재 지오폐리머의 환경영향 비교에 관한 연구

안중우, 김영실, 양인목, \*이수정, \*\*조봉규, \*\*조영주  
성신여자대학교, \*한국지질자원연구원, \*\*폐금속·유용자원재활용기술개발사업단

A study on the environmental impact comparison of geopolymers  
manufactured of coal combustion ashes

Joong Woo Ahn, Youngsil Kim, Inmog Yang, \*Sujung Lee,  
\*\*Bong Gyoo Cho, \*\*Youngju Cho

Sungshin Women's University, \*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, \*\*R&D Center  
for Valuable Recycling

## Abstract

This study has been carried out to evaluate environmental values of a coal ash recycling technology and suggest directions for improving environmental performance of the recycling technology. As the results of comparing the global warming environmental impacts of 3 types of geopolymers produced by fly ash, middle ash, and bottom ash with the impact of portland cement, Fly ash geopolymer showed 19%, Middle ash geopolymer 51%, Bottom ash geopolymer showed 133% of the impact of portland cement. The impact of Bottom ash geopolymer can be improved by reducing water use and wastewater recycling. In the case of Fly ash geopolymer and Middle ash geopolymer, energy efficiency and sodium silicate input have been found as material factors. The limitation of this study is not to consider the value of new recycling material, additional burden of coal ash dumping, and low efficiency of small amount production of a development stage. It can be inferred that the actual environmental impact of geopolymers would be lower.

## 1. 서론

화력 발전소 석탄재는 2010년 약 850만 톤이 배출되었으나, 이중 63% 정도가 재활용되어 300톤 이상의 석탄재가 매립되고 있다. 석탄재 매립은 매립 자체의 환경오염뿐만 아니라 매립지를 확보하는데도 문제가 심각한 상황이다. 이러한 환경적 문제점을 해결하기 위해 석탄재로부터 지오폐리머를 제조하는 재활용 기술이 한국지질자원연구원에서 연구되고 있다. 지오폐리머는 포틀랜드 시멘트의 대체재로서 높은 초기 압축강도, 신장강도, 낮은 수축율, 높은 내화학적, 내열성 등 기존의 시멘트에서 구현할 수 없는 성능으로 주목받고 있다.

재활용 기술은 폐기물을 자원으로 회복시키는 자체로 환경 보존과 경제적 창출에 기여하지만, 재활용 기술 역시 사용되는 에너지 및 자원, 배출되는 오염물질로 인해 환경오염이 발생된다. 따라서 재활용 기술을 활용한 재생재의 환경 영향을 분석하는 것은 재활용 기술의 환경 성능을 파악하고 환경 영향의 개선을 위해 필요한 요소를 도출할 수 있는 중요한 활동이다.

현재 석탄재를 사용하여 지오폐리머를 생산하는 재활용 기술은 석탄재의 성상에 따라 공정이 다르게 적용된다. 본 연구는 석탄재를 Fly ash, Middle ash, Bottom ash로 구분하여 각각의 ash로부터 생산된 지오폐리머의 환경 영향을 평가하고 포틀랜드 시멘트와 비교함으로써, ash 별 지오폐리머의 환경 성능을 파악하고 나아가 재활용 기술의 환경 영향을 개선할 수 있는 방향을 도출하기 위해 수행되었다.

## 2. 전과정평가 수행

### 2.1 목적 정의

지오폐리머의 전과정평가는 현재 연구 개발 중인 석탄재를 재활용하여 생산된 지오폐리머의 주요 환경영향 범주 및 물질별로 정량적인 환경영향을 파악하여 대체하려는 포틀랜드 시멘트의 환경영향과 비교하기 위하여 수행되었다.

### 2.2 범위 정의

#### (1) 기능 및 기능단위 설정

본 전과정평가의 기능, 기능단위 및 기준흐름은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> 지오폐리머의 기능 및 기능단위, 기준흐름

구분	제품명	지오폐리머(geopolymer)
기능		포틀랜드 시멘트 대체
기능단위		포틀랜드 시멘트 1kg을 대체할 수 있는 지오폐리머의 양
기준흐름		지오폐리머 1kg

#### (2) 시스템경계

본 연구의 시스템 경계는 석탄재 재활용 공정의 Gate to Gate로 설정하였다. 향후 실제 석탄재를 재활용할 때에는 석탄재를 수집하는 수집 공정, 재활용 공장으로 이동하는 수송 공정 등이 존재할 것이나, 석탄재를 매립하는 과정에서도 수집과 수송 공정이 존재하며, 본 연구의 대상 기술이 현재 개발 단계로 관련 데이터 수집이 가능하지 않아 수집, 수송 공정은 본 연구의 시스템 경계에서 제외하였다.

(3) 가정 및 제한 사항

본 연구에서는 재활용 공정에 투입되는 물질 중 석탄재는 기존에 매립되었던 폐기물을 사용하여 석탄재의 환경부하는 “0”으로 가정하였다. 기포제로 사용 된 송유와 감수제로 사용된 나프탈렌 설폰산은 누적질량기여도 99% Cut-off 원칙에 따라 제외하였다.

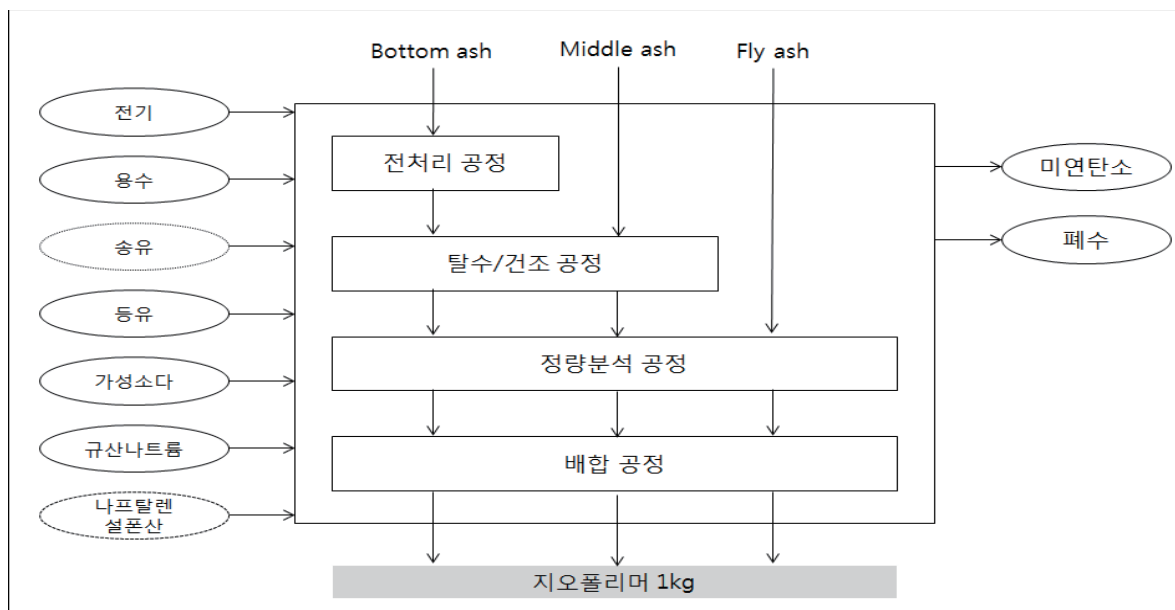
(4) 할당

대상 기술의 생산 공정에서 원료물질인 석탄재의 성상에 따라 발생하는 미연탄소는 판매가 가능하나 현재 경제적 가치가 명확하지 않아 할당을 수행하지 않았다.

2.3 전과정 목록분석

(1) 공정흐름도

석탄재 재활용을 위한 단위 공정을 기준으로 공정흐름도(process flow diagram)를 작성하였다. 단위 공정은 데이터 수집의 용이성과 공정 특성 등을 고려하여 전처리, 탈수 및 건조, 정량분석, 배합의 4개로 구분하였다. 석탄재의 성상에 따라 구분한 공정흐름도는 [Fig. 1]에 나타내었다.



[Fig. 1] 석탄재 성상에 따른 공정흐름도

## (2) 데이터 수집 및 계산

### ① 데이터 범주

본 연구의 데이터 범주는 원료물질, 보조물질, 용수, 에너지, 제품, 부산물, 대기 배출물, 수계 배출물 및 폐기물로 구분하였다.

### ② 데이터 수집

데이터 수집은 재활용 기술 개발 기관의 현장데이터를 우선 적용하기 위해 설문서를 통하여 현장 데이터를 수집하였다. 데이터 수집이 불가능한 경우 계산 및 추정을 통하여 데이터를 수집 및 보완하였다.

LCI 데이터베이스의 사용은 원료물질, 보조물질, 에너지 등의 상위흐름 및 하위흐름 연결을 위한 데이터베이스를 활용하는 것으로 국내 LCI 데이터베이스는 환경부와 산업통상자원부(구 지식경제부)에서 구축한 데이터베이스를 적용하고, 해외 LCI 데이터베이스는 Ecoinvent에서 구축한 데이터베이스를 사용하였다.

## 2.4 전과정 영향평가 특성화 값

전과정 영향평가는 분류화(Classification) 및 특성화(Characterization) 단계를 수행했으며, 특성화 값은 환경성적표지제도(환경부)의 방법론을 적용하여 도출하였다. 전과정 영향평가는 원료물질 성상에 따라 다음과 같이 구분하여 수행되었다.

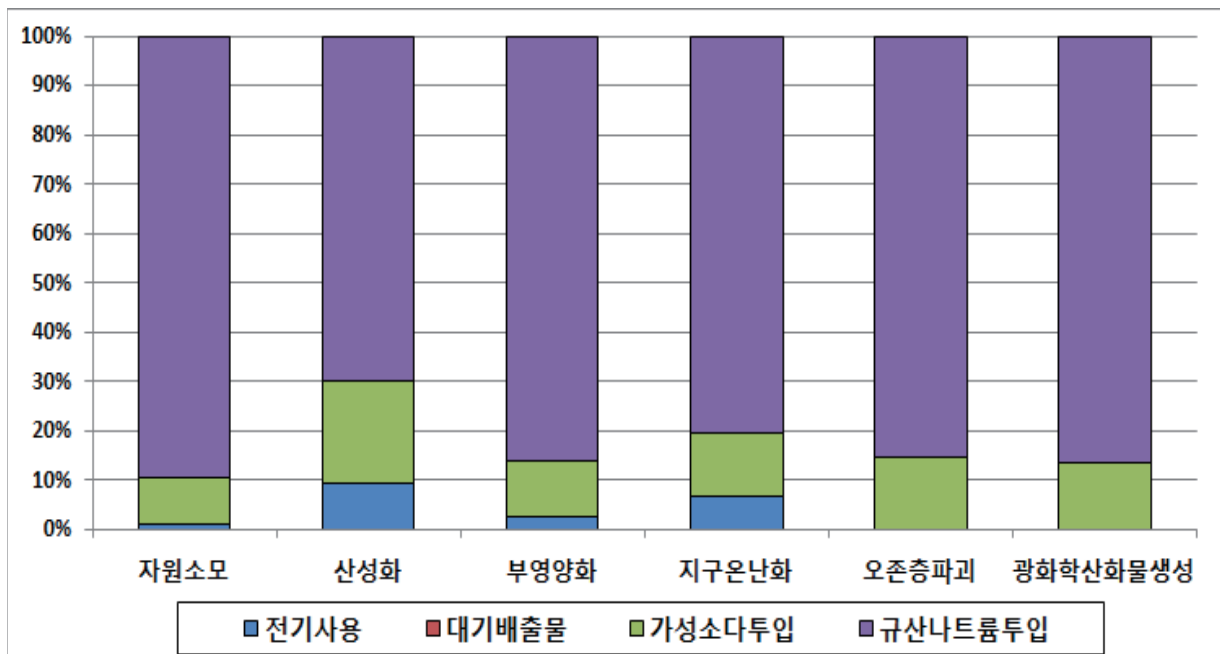
- Fly ash를 원료물질로 생산한 지오폐리머
- Middle ash를 원료물질로 생산한 지오폐리머
- Bottom ash를 원료물질로 생산한 지오폐리머

### (1) Fly ash를 원료물질로 생산한 지오폐리머의 영향평가 특성화 결과

Fly ash 지오폐리머 1kg 생산을 위한 공정에서 주요한 환경영향으로 나타난 물질은 원료물질로 투입되는 규산나트륨과 에너지로 사용된 전기로 나타났다. 규산나트륨은 자원소모( $1.77E-03$ kg Antimony)와 오존층파괴( $2.05E-08$ kg CFC11), 광화학적산화물생성 ( $6.85E-05$ kg  $C_2H_4$ )에서 높은 영향을 나타내었다. 전기 사용은 산성화( $4.16E-05$ kg)와 지구온난화( $1.26E-02$ kg  $CO_2$ ), 자원소모 ( $2.19E-05$ kg Antimony) 에서 높은 영향을 나타내었다. 물질에 의한 영향은 다음 <Table 2>와 [Fig. 2]에 나타내었다.

<Table 2> Fly ash 지오폐리머의 특성화 결과 값

물질	자원소모	산성화	부영양화	지구온난화	오존층파괴	광화학 산화물생성
단위	kg Antimony eq	kgSO <sup>2-</sup> eq	kgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	kgCO <sub>2</sub> eq	kgCFC11 eq	kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
전기사용	2.19E-05	4.16E-05	1.82E-08	1.26E-02	3.49E-13	8.98E-08
대기배출물	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
가성소다투입	1.88E-04	8.84E-05	8.19E-08	2.31E-02	3.56E-09	1.07E-05
규산나트륨투입	1.77E-03	3.03E-04	6.14E-07	1.46E-01	2.05E-08	6.85E-05
합 계	1.98E-03	4.33E-04	7.14E-07	1.82E-01	2.41E-08	7.93E-05



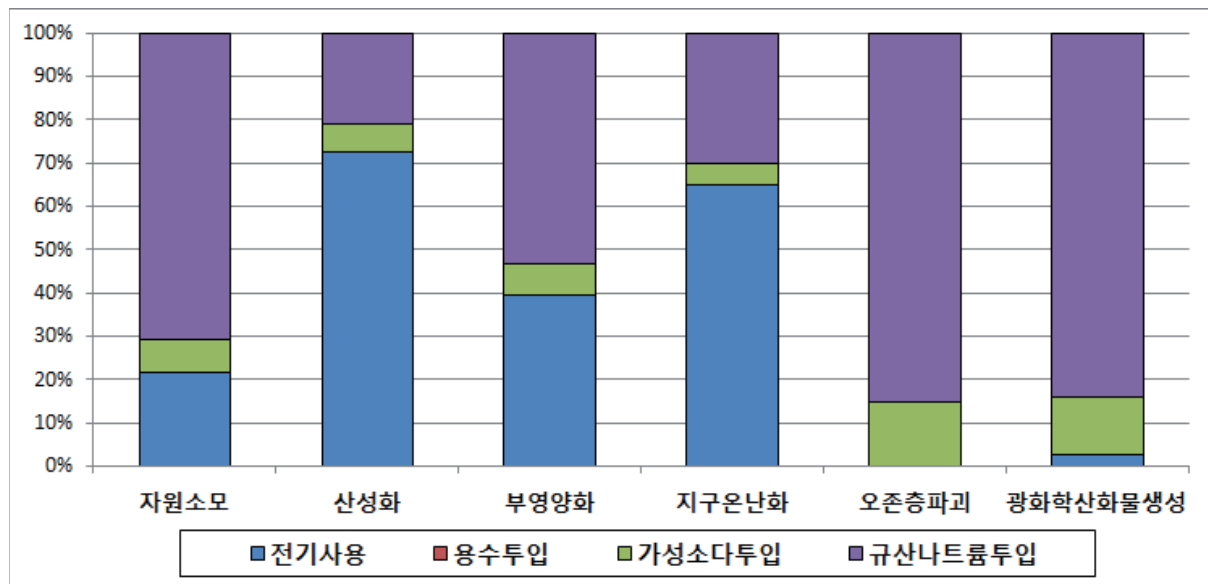
[Fig. 2] Fly ash 지오폐리머의 물질별 환경영향 비율

(2) Middle ash를 원료물질로 생산한 지오폐리머의 특성화 결과

Middle ash 지오폐리머 1kg 생산을 위한 공정에서 주요한 환경영향으로 나타난 물질은 원료물질로 투입되는 규산나트륨과 에너지로 사용된 전기로 나타났다. 규산나트륨은 자원소모(1.77E-03kg Antimony)와 오존층파괴(2.05E-08kg CFC11), 광화학적산화물생성 (6.85E-05kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)에서 높은 영향을 나타내었다. 전기 사용은 산성화(1.04E-03kg)와 지구온난화(3.15E-01kg CO<sub>2</sub>), 자원소모 (5.46E-04kg Antimony) 에서 높은 영향을 나타내었다. 물질에 의한 영향은 다음 <Table 3>과 [Fig. 3]에 나타내었다.

<Table 4> Middle ash 지오폐리머의 특성화 결과 값

물질	자원소모	산성화	부영양화	지구온난화	오존층파괴	광화학 산화물생성
단위	kgAntimony eq	kgSO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> eq	kgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	kgCO <sub>2</sub> eq	kgCFC11 eq	kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
전기사용	5.46E-04	1.04E-03	4.55E-07	3.15E-01	8.71E-12	2.25E-06
용수투입	1.35E-07	2.54E-07	8.15E-10	7.67E-05	2.12E-15	5.59E-10
가성소다투입	1.88E-04	8.84E-05	8.19E-08	2.31E-02	3.56E-09	1.07E-05
규산나트륨투입	1.77E-03	3.03E-04	6.14E-07	1.46E-01	2.05E-08	6.85E-05
합 계	2.50E-03	1.43E-03	1.15E-06	4.85E-01	2.41E-08	8.15E-05



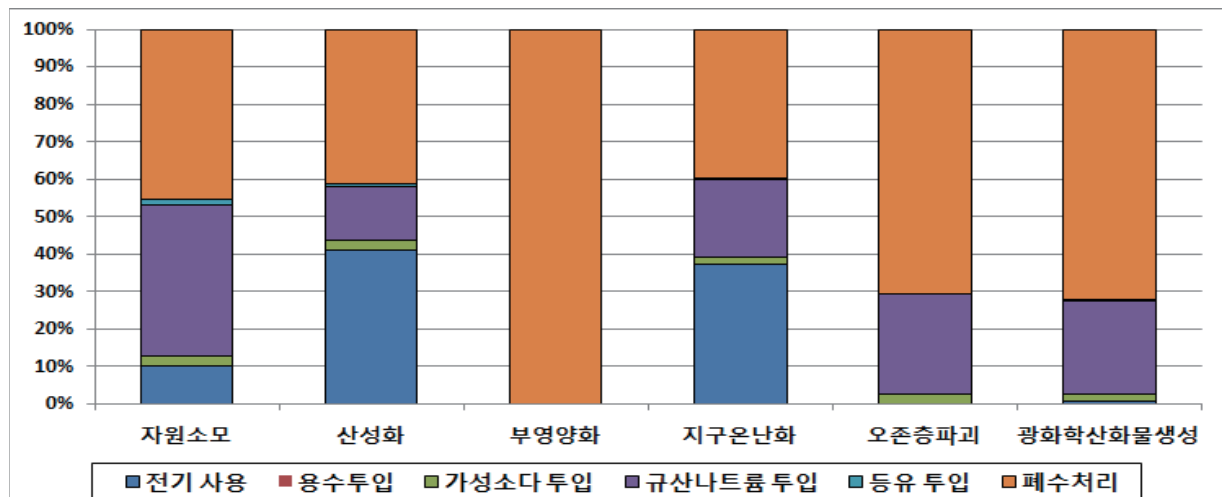
[Fig. 3] Middle ash 지오폐리머의 물질별 환경영향 비율

(3) Bottom ash를 원료물질로 생산한 지오폴리머의 특성화 결과

Bottom ash 지오폴리머 1kg 생산을 위한 공정에서 주요한 환경영향으로 나타난 물질은 폐수와 규산나트륨, 전기로 나타났다. 폐수처리에 의한 영향은 부영양화(1.591E-03kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), 오존층파괴(9.821E-08,kg gCFC11) 광화학산화물(3.636E-04kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) 등의 전 영향범주에서 큰 환경영향이 나타났다. 규산나트륨은 자원소모(3.195E-03kg Antimony)와 오존층파괴(3.710E-08kg CFC11), 광화학적산화물생성 (1.237E-04kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)에서, 전기 사용은 산성화(1.547E-03kg)와 지구온난화(4.695E-01kg CO<sub>2</sub>), 자원소모 (8.136E-04kg Antimony) 에서 중요하게 나타났다.

<Table 5> Bottom ash 지오폴리머의 특성화 결과 값

물질	자원소모	산성화	부영양화	지구온난화	오존층파괴	광화학 산화물생성
단위	kgAntimony eq	kgSO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> eq	kgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	kgCO <sub>2</sub> eq	kgCFC11 eq	kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
전기 사용	8.14E-04	1.55E-03	6.78E-07	4.70E-01	1.30E-11	3.34E-06
용수투입	3.39E-07	6.38E-07	2.05E-09	1.93E-04	5.32E-15	1.40E-09
가성소다 투입	1.88E-04	8.84E-05	8.19E-08	2.31E-02	3.56E-09	1.07E-05
규산나트륨 투입	3.20E-03	5.47E-04	1.11E-06	2.64E-01	3.71E-08	1.24E-04
등유 투입	1.14E-04	2.34E-05	4.23E-08	1.39E-03	1.12E-10	2.56E-06
폐수처리	3.58E-03	1.55E-03	1.59E-03	5.01E-01	9.82E-08	3.64E-04
합계	7.90E-03	3.76E-03	1.59E-03	1.26E+00	1.39E-07	5.04E-04



[Fig. 4] Bottom ash 지오폴리머의 물질별 환경영향 비율

### 3. 지오폐리머와 포틀랜드 시멘트의 환경영향 비교

#### 3.1 포틀랜드 시멘트의 전과정평가 값

포틀랜드 시멘트의 전과정평가 값은 산업통상자원부(구 지식경제부)에서 개발한 포틀랜드 시멘트 1종에 대한 LCI 데이터베이스(2002)를 적용하였다.

#### 3.2 전과정 영향평가 특성화 값

전과정 영향평가의 특성화 값은 환경성적표지제도(환경부)의 방법론을 적용하여 도출하였으며, 환경범주 별 특성화 결과 값은 <Table 5>에서 나타내었다.

<Table 6> 포틀랜드 시멘트의 특성화 값

영향범주 (Unit)	포틀랜드 시멘트 생산
자원소모 (kg Antimony eq/kg)	1.95E-03
산성화 (kg SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> eq/kg)	5.65E-04
부영양화 (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq/kg)	6.47E-07
지구온난화 (kg CO <sub>2</sub> eq/kg)	9.48E-01
오존층파괴 (kg CFC11eq/kg)	1.70E-08
광화학산화물생성 (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/kg)	2.48E-03

#### 3.3 환경영향 비교

##### (1) 지오폐리머와 포틀랜드 시멘트의 전과정 영향평가 비교

원료물질의 성상에 따른 지오폐리머와 포틀랜드 시멘트의 특성화 값 비교는 <Table 6>에 나타내었다.

<Table 7> 원료물질의 성상에 따른 지오폐리머와 포틀랜드 시멘트의 특성화 결과

구 분	Fly ash		Middle ash		Bottom ash	
	신재	지오폐리머	신재	지오폐리머	신재	지오폐리머
자원소모	1.95E-03	1.98E-03	1.95E-03	2.50E-03	1.95E-03	7.90E-03
산성화	5.65E-04	4.33E-04	5.66E-04	1.43E-03	5.66E-04	3.76E-03
부영양화	6.47E-07	7.14E-07	6.47E-07	1.15E-06	6.47E-07	1.59E-03
지구온난화	9.49E-01	1.82E-01	9.49E-01	4.85E-01	9.49E-01	1.26E+00
오존층파괴	1.70E-08	2.41E-08	1.70E-08	2.41E-08	1.70E-08	1.39E-07
광화학산화물생성	2.48E-03	7.93E-05	2.48E-03	8.15E-05	2.48E-03	5.04E-04



Fly ash 지오폐리머의 환경영향을 포틀랜드 시멘트와 비교한 결과, 지구온난화 19%, 산성화 77%, 광화학산화물생성 3%로 지오폐리머가 포틀랜드 시멘트에 비해 낮게 나타났으나, 자원소모 102%, 부영양화 110%, 오존층 파괴 142%로 높게 나타났다.

Middle ash 지오폐리머의 환경영향은 지구온난화 51%, 광화학산화물생성 3%로 지오폐리머가 포틀랜드 시멘트에 비해 낮게 나타났으나, 자원소모 128%, 부영양화 178%, 오존층 파괴 142%, 산성화 253%로 높게 나타났다.

Bottom ash 지오폐리머의 환경영향의 경우, 광화학산화물생성 20% 외 다른 환경범주는 모두 높게 나타났다(자원소모 405%, 산성화 665%, 부영양화 245,750%, 지구온난화 133%, 오존층 파괴 818%).

#### 4. 결론

석탄재 성상별 지오폐리머의 지구온난화 환경영향을 포틀랜드 시멘트와 비교한 결과, Fly ash 지오폐리머는 포틀랜드 시멘트의 19%, Middle ash 지오폐리머는 51%, Bottom ash 지오폐리머는 133%로 나타났다. 이는 Fly ash 지오폐리머는 1톤 생산 시 767kg의 이산화탄소가, Middle ash 지오폐리머는 1톤 생산 시 464kg의 이산화탄소가 덜 배출될 것으로 나타났다. 이 비교는 생산 과정에 대한 비교이기 때문에 재활용을 통해 새로운 소재가 만들어진다는 가치, 석탄재 매립 시 추가적으로 발생할 수 있는 환경 부하를 모두 계산하지 못하였다는 점, 그리고 연구 단계의 비효율성을 고려해 본다면, 석탄재 지오폐리머의 지구온난화에 대한 환경적 가치는 보다 향상될 것으로 추론해 볼 수 있다.

석탄재 성상별 지오폐리머의 종합적인 환경영향을 고려해보면 Fly ash 지오폐리머를 제외하고는 재활용 과정에서 환경부하를 저감시킬 수 있는 연구가 필요해 보인다. Bottom ash 지오폐리머의 경우 용수 사용과 폐수 처리의 환경영향을 줄여야 하며, Fly ash 지오폐리머와 Middle ash 지오폐리머를 생산하는 공정에서는 전기 사용의 효율성 제고와 규산나트륨 투입 개선을 통해 환경성과의 개선을 기대할 수 있다.

#### 5. 사사

본 연구는 폐금속·유용자원재활용기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 6. 참고문헌

1. 산업통상자원부(구 지식경제부), 포틀랜드 시멘트 1종에 대한 LCI 데이터베이스, 2002
2. 산업통상자원부(구 지식경제부), 혼합 폐플라스틱 매립에 대한 LCI 데이터베이스, 2002
3. 이수정, 석탄연소부산물의 지오폐리머 원료화 기술개발, 한국지질자원연구원, 2014. 4
4. 이민중 기자, 연 300만t 더 나올텐데...석탄재 재활용을 똑똑, 2010. 3.17

5. 한국석탄회재활용협회, [www.coalash.or.kr](http://www.coalash.or.kr)
6. 환경성적표지 전과정평가 소프트웨어(TOTAL), 2006
7. Ecoinvent LCI 데이터베이스, 2007
8. ISO 14040, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework
9. ISO 14040, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines