

# 화력발전소와 제철소 발생 산업부산물을 활용하여 4시간 이내 개방강도 확보가 가능한 지반복원용 고유동성 채움재 현장적용 시스템 개발

Development of on-site application system for CLSM(Controlled Low Strength Material) for ground restoration which can secure Traffic Opening strength within 4 hours by utilizing industrial by-products from thermal power plants and steel mills



이현기 Hyeon-Gi Lee  
(주) 브리콘랩  
대표이사  
E-mail: hyeongi84@gmail.com

## 1. 서론

### ○ 산업부산물(바텀애시 및 페로니켈슬래그)의 낮은 재활용률

발전소 산업부산물인 바텀애시는 공극률, 흡수율이 높은 특성이 있다. 이러한 특성은 품질저하의 원인이 되며 일반적인 건설재료로서의 재활용이 제한되어 발생량의 약 89%가 매립되고 있는 상황이다.



그림 1. 산업부산물(바텀애시) 발생 현황/개요



그림 2. 산업부산물(페로니켈슬래그) 발생 현황/개요

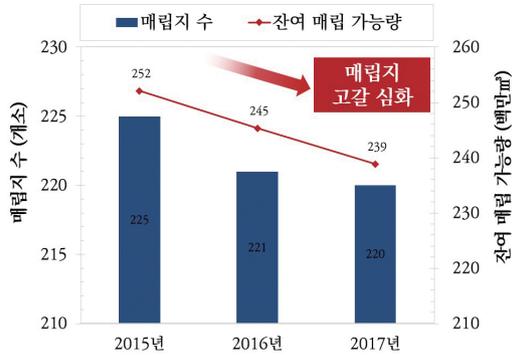


그림 3. 매립지수 및 잔여매립 가능량 현황

또한, 제철소 산업부산물(스테인리스 스틸)인 페로니켈슬래그는 안정된 화학적 성질로 건설재료로 재활용 가능성이 높은 산업부산물이나, 연간 약 200만 톤이 발생하는 가운데 산업부산물로의 낮은 인식으로 인해 재활용 실적이 매우 저조하여 매립에 의존하는 것이 현실이다.

산업부산물의 매립비용은 2016년 기준 4,500 원/㎡로 약 1천억 원에 달하여 꾸준히 상승 중인데다 각각의 매립지가 부족해지고 있는 국내 상황에 비추어볼 때 산업부산물 매립의 증가는 환경부담 증가 및 경제적 부담 가중을 유발하고 있으며, 처리장 조성지역이 대부분 해안가 지역으로 환경훼손 및 오염의 우려 또한 증가하는 상황이다.

이와 같이 매립에 의존되는 산업부산물을 재활용한다면 매립량을 최소화하여 폐기처리 비용 절감, 환경부하 저감을 도모할 수 있을 것이다.

### ○ 신속한 지반개량(고유동 고화토 사용) 공사의 필요성

도로침하(싱크홀) 복구, 상하수도 교체 및 개량 공사 등 도심지에서의 신속한 지반개량이 요구되는 사례가 다수 발생하고 있다.

그러나, 기존의 되메우기 공법은 모래 또는 발생토를 다짐하는 공법으로 상당한 시간 및 비용이 발생하며 매설관의 하부 혹은 공동 내부 채움재의 다짐불량, 토사의 손실 등으로 취약해진 지반상태에서는 공동 발생, 침하, 함몰 등으로 인한 하수관의 파손, 누수 및 도로침하(싱크홀) 현상의 발생 위험이 높다.



그림 4. 도로침하(싱크홀) 및 상하수도 교체 공사

또한 대부분의 하수관 교체 및 보수 공사는 다짐 시 소음, 진동, 분진 등이 발생하여 주변 환경에 대한 오염 및 공해에 대한 문제점이 발생한다.

더욱이 도로침하(싱크홀)나 상하수도 손상 발생은 신속한 성능복구를 요하는 현상이기에, 신속한 시간 안에 손상 인프라에 대한 회복이 이루어져야 한다.

따라서, 본 고에서는 현재 국가연구개발 사업으로 진행하고 있는 화력발전소에서 발생하는 바텀애시(Bottom ash)와 제철소에서 발생하는 산업부산물인 페로니켈슬래그를 활용하여 개방강도 확보가 가능한 지반복원용 고유동성 채움재 현장 적용 시스템 개발과 현장에 적용가능한 무다짐 채움재 개발 및 현장 적용 시스템 구축 기술 연구를 소개하고자 한다. 기존의 되메우기 공법의 문제점에 대한 해결방안을 제안하는 것으로 화력발전소에서 발생하는 산업부산물을 재활용하여 현장 적용 가능한 지반개량 고유동성 결합재 개발을 목적으로 한다.

## 2. 산업부산물

### 2.1 바텀애시(Bottom ash)

석탄회가 포집되는 장소에 따라 플라이애시(Fly ash), 바텀애시로 구분되어 지며 물리적, 화학적 특성상 알루미늄 실리카 계열의 구형 입자 형태로 포졸란성(Pozzolan)을 지니고

있어 여러 측면에서 시멘트 대체재로 우수한 특성을 가지고 있다.

바텀애시의 배출방식은 습식 및 건식의 두가지 방식이 있으며 일반적으로 습식공정 바텀애시로 배출하고 있다. 습식공정 배출방식은 보일러 하부에 수조를 설치 후 바텀애시가 떨어져 수조에서 냉각 후 분쇄하여 배출된다. 건식공정 바텀애시는 보일러의 하부에 컨베이어 벨트를 설치 후 하부에 냉각 공기를 상부방향으로 공급하여 벨트 위로 배출된 바텀애시를 지속적으로 연소 후 냉각하여 골재 형식의 바텀애시를 배출한다.

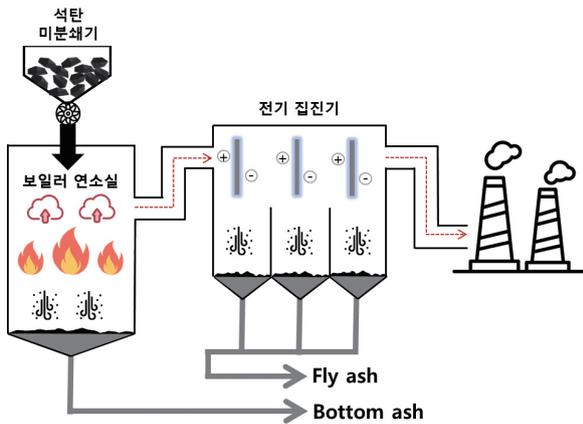


그림 5. 석탄회의 발생 공정 및 종류

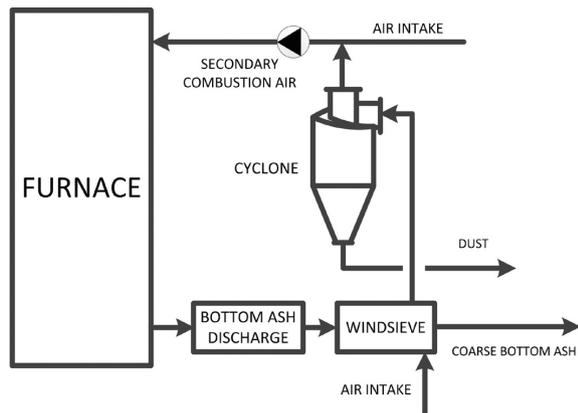


그림 6. 건식공정 바텀애시 배출방식 개념도

플라이애시의 70 %는 건설분야에 시멘트와 같이 대체재나 혼화재로 재활용 되고 있지만 바텀애시는 89%가 매립되고 있다.

습식으로 공정된 바텀애시의 문제점은 미연탄 함량으로 미연탄은 높은 염화물 농도와 다공질 골재의 형태로 콘크리트 재료로 사용할시 강도성능과 내구성을 저하시키며 콘크리트 내의 철근 부식에도 큰 영향을 주며 매립시에는 매립토양을 오염시켜 매립지 부족과 환경오염을 일으켜 큰 문제점으로 시사되고 있다. 건식으로 배출된 바텀애시는 해수 사용이 없으므로 염화물의 농도가 낮아 재활용성에 대한 기대가 있지만 미연탄 함량 등의 또 다른 문제점과 폐기물의 인식으로 적용 범위 확장에 큰 영향을 주고 있다.

## 2.2 페로니켈슬래그

제철소에서 산업부산물로 생성되는 페로니켈슬래그는 스테인리스강의 주원료인 페로니켈의 생산과정에서 파생되는 부산물이며 니켈광석, 유연탄 등이 고온에서 용융되어 페로니켈과 분리되어 생성된다. 2016년 기준 연간 100만 톤이 생성되고 있으며 국내에서는 콘크리트용 페로니켈 슬래그 잔골재(KS F 2527)가 제정되어 일부 콘크리트에 적용되고 있다. 페로니켈슬래그의 주성분은 MgO, SiO<sub>2</sub> 구성되어져 있으며 페로니켈슬래그의 용출평가 결과 중금속 성분은 검출되지 않았다. 페로니켈슬래그는 환경적으로 문제가 없으며 팽창 반응 또한 문제가 없었으며 가공공정에 의해 제조된 콘크리트용 잔골재를 적용시 천연골재에 비해 콘크리트의 유동성과 압축강도가 향상되고 수축과 내염해성 등에 내구성능 향상 또한 가능하다고 평가된다.

[표 1] 페로니켈슬래그 중금속 평가

(단위 : mg/l)

항목	Cd	Hg	Cr <sup>+6</sup>
결과	불검출	불검출	불검출
기준	0.3	0.005	1.5
항목	Pd	As	CN
결과	불검출	불검출	불검출
기준	3.0	1.5	1.0

### 3. 국내 연구 동향

기존에 추진되었던 국가 연구과제 이력을 통해 기존 기술의 추이를 고찰하고, 본 진행과제와의 차별성을 검토해보았다.

‘열병합 발전소 저품위 플라이애시의 활성화 메커니즘에 의한 지반 고화제 제조’, ‘석회계 토질안정제 및 고화제의 개발’ 연구 과제는 고품질의 플라이애시 및 석회질을 이용한 재료 개발의 측면이 유사한 부분이 있으나, 본 연구 개발은 화력발전소에서 발생하는 바텀애시의 입도조정 및 전처리 과정을 거쳐 개발 고유동성 채움재에 사용함으로써 차별성을 확보하고 있다.

[표 2] 국내 관련 연구과제 진행 이력

주관부처	연구기간	연구과제명
교육과학기술부	2009 ~2012	열병합 발전소 저품위 플라이애시의 활성화 메커니즘에 의한 지반 고화제 제조
중소벤처기업부	2018 ~2020	최적 전처리 공정 확보를 통한 열병합 발전소 발생 건식 바텀애시 재활용 지반개량재 개발
중소벤처기업부	2018 ~2020	순환유동층 보일러 바텀애시를 30% 이상 자극제로 활용한 매입말뚝용 고정재 및 적용공법 개발
중소기업청	2007 ~2009	환경친화적 무기첨가제인 토양 고화제 개발 및 고화제를 활용한 콘크리트 2차 제품 제조기술 개발
중소기업청	2008 ~2009	슬러지의 고화 및 무해화 처리를 위한 유-무기 고화제 개발
중소기업청	2012 ~2013	굴폐각과 석탄회를 이용한 무다짐 처리공법용 친환경 고화제 개발
중소벤처기업부	2017 ~2018	현장발생토를 이용한 유동화토 최적 배합비 도출
산업자원부	2003 ~2007	석회계 토질안정제 및 고화제의 개발
중소벤처기업부	2017 ~2018	페로니켈슬래그를 활용한 레미콘용 3성분계 콘크리트 개발
산업자원부	2007 ~2010	페로니켈슬래그의 재활용 및 고부가가치화
건설교통부	2006 ~2008	건설현장 발생토를 이용한 무다짐 유동화 처리 공법의 실용화 연구

‘최적 전처리 공정 확보를 통한 열병합 발전소 발생 건식 바텀애시 재활용 지반개량재 개발’, ‘순환유동층 보일러 바텀애시를 30% 이상 자극제로 활용한 매입말뚝용 고정재 및 적용 개발’ 연구 과제는 고화제 및 지반개량재 개발을 위한 바텀애시 사용과 관련성이 있으나, 본 연구 개발 과제는 배출방식에 구애받지 않는 바텀애시를 활용하고 환경친화적 재료 개발을 위한 화학첨가제를 혼입하여 고유동성 결합재를 개발하고 이를 페로니켈슬래그와 배합하여 산업부산물을 재활용한 고유동성 채움재 개발이 최종 목표이다.

‘페로니켈슬래그를 활용한 레미콘용 3성분계 콘크리트 개발’ 연구는 페로니켈슬래그의 재료적 측면에서 유사성이 있으나, 본 연구 개발에서는 화력발전소와 제철소에서 발생하는 산업부산물을 활용한 유동화토를 개발하고, 연구 개발에 따른 현장별 최적 배합비 및 배합기술과 현장 적용 공정 라인을 도출하고 현장 적용성 시험을 통한 추적조사 및 장기 모니터링을 진행함에 있어 차별화된 과제 수행이 가능하다.

‘현장발생토를 이용한 유동화토 최적 배합비 도출’, ‘건설 현장 발생토를 이용한 무다짐 유동화 처리 공법의 실용화 연구’ 과제는 유동화토 및 무다짐 공법 측면에서는 유사성이 있으나, 본 연구 개발 기술은 화력발전소에서 발생하는 바텀애시 및 플라이애시를 활용한 고유동성 결합재 개발의 요소 기술에 상당한 연구를 통한 공정 시스템을 개발할 계획에 있으며, 개발 제품의 품질 평가 및 공정 개선점을 도출하여 다양한 토사별 현장 고유동성 채움재에 적용함으로써 차별성을 확보하고자 하였다.

### 4. 연구개발 목표 및 내용

#### ○ 적용 환경에 따른 채움재 성능 검토

현장 굴착부의 함수량에 따라 유동성의 변화가 발생하며, 지하수위 발생의 경우 유동성 및 품질의 변동성을 초래할 수 있으며, 배수 및 재료 유출에 기인한 변동성 및 물량의 증감을 고려하여야 하므로, 적용 환경 변수에 따른 재료 보정 등에 대한 연구 개발을 진행하고 있다.

○ 지역 발생 재료의 특성에 따른 채움재 배합/ 조성비 보정 연구 필요

수급되는 바텀애시 재료의 특성, 성분 분석 등을 통해 재료의 성능 범위를 표준화하고, 제품 적용 시 보정이나 추가적 선처리 등에 따른 적용 평가 과정을 수행하고 있으며, 현장 변수를 모사한 실증 등 현장 적용성 단계를 거쳐 개발기술의 제품·특성화를 도모하고 있다.

○ 조기교통 개방 가능한 채움재 성능 지표 근거

유동성을 판단하기 위한 플로우(Flow) 값은 미국 유동성 채움재 설계기준(ACI Committee 229, ASTM C-939)을 적용하여 200 mm 이상으로 설정하였으며, 채움재 적용 후 재굴착을 위한 강도는 ASTM D4832에서 규정하는 재굴착이 가능한 강도 값 범위 1.5MPa로 설정하였다. 또한, 서울시 동공관리등급 분류 및 복구기준의 긴급복구에 준하는 조건(동공 상태 확인 후 6시간 이내 복구)을 만족하기 위한 4시간 강도 발현을 목표로 하였고, 교통개방강도는 일본 유동화 처리토 이용기술 매뉴얼에서 제시하고 있는 교통개방 시 0.13 MPa 이상을 참조하여 교통개방강도 0.15 MPa로 설정하여 연구를 진행하고 있다.

[표 3] 연구 목표

구분	내용
연구 목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 바텀애시를 비롯한 산업부산물을 활용한 고유동성 결합재 개발</li> <li>· 페로니켈슬래그, 바텀애시 및 현장발생토를 활용한 무다짐 고유동성 채움재 개발</li> <li>· 실제 현장 환경 모사 시험시공을 통한 현장 환경 변수에 따른 성능 검증</li> <li>· 제품의 현장 적용을 위한 현장 적용 프로세스 구축</li> <li>· 고유동성 채움재 시방/가이드라인 정립</li> </ul>

5. 맺음말

산업부산물을 재활용하여 화력발전소 및 제철소에서 발생하는 산업부산물을 활용한 결합재 개발 및 바텀애시(Bottom ash) 및 페로니켈슬래그를 활용하여 현장 적용 가능한 무다짐 채움재 개발 및 현장 적용 시스템을 구축 후 기대 효과는 다음과 같다.

· 본 연구인 “화력발전소와 제철소 발생 산업부산물을 재활용한 고유동성 결합재 및 무다짐 고유동성 채움재 개발”은 기존의 매립하던 화력발전소와 제철소의 산업부산물의 고부가가치적 활용 기술을 개발함으로써 산업부산물에 대한 사회적 인식을 전환시킬 수 있으며, 건설·토목 산업의 천

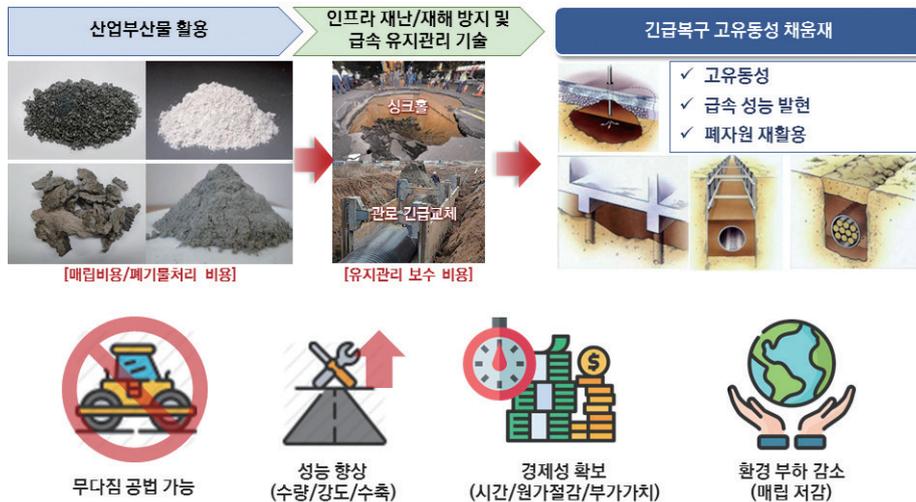


그림 7. 연구개발 성과 활용계획

연골재 대체도 가능

• 또한, 입도조정 및 전처리 공정을 거쳐 다양한 환경에 적용시킬 수 있어 토목 분야의 과급효과는 상당할 것으로 예상되며, 공정을 통한 2차 제품 개발을 통한 신규 일자리 창출이 가능

현재 진행 과제에서 개발하고자 하는 고유동성 채움재는 물리·화학적 성능 평가 검증을 통하여 선진 기술을 확보하며, 자원 순순환에 따른 저탄소·친환경 건설 시장 구축과 함께 환경에 무해한 재료를 사용하므로 쾌적한 환경과 녹색 성장에 이바지할 수 있는 것으로 기대된다.

하지만 아직까지 국내에서는 산업부산물의 자원 활용에 대한 인식이 낮아 바텀애시 및 페로니켈슬래그를 재활용하

기 위해서는 본 연구와 같이 활용 타당성 검증 및 안전성 검증으로 산업부산물의 자원 순환에 대한 사회적 인식 개선을 위한 연구 및 기술적 성과에 대한 신뢰성 확보가 선행되어야 할 것이며 더불어 순환 자원 활용을 위한 제도적 뒷받침을 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통지역혁신기술개발 사업인 ‘화력발전소와 제철소 발생 산업부산물을 활용하여 4시간 이내 개방강도 확보가 가능한 지반복원용 고유동성 채움재 현장적용 시스템 개발’ 과제[21RITD-C162290-01]의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김주형, 조삼덕, 공진영, 정혁상, 천병식 (2010), "석탄회를 사용한 저강도 고유동화재의 경화 특성 분석", 한국지반환경공학회 논문집, 제11권 제11호
2. 박승호 (2018), 콘크리트용 잔골재 및 결합재로 활용하기 위한 바텀애시의 성능개선, 박사학위논문, 대전대학교 대학원
3. 조용광, 김춘식, 남성영, 조성현, 이형우, 안지환 (2018), "산업부산물을 활용한 저강도 고유동 채움재의 유동성 및 물성평가"
4. 박상순, 소병탁, 임법규, 정세영, 서현석 (2016), "페로니켈슬래그 미분말을 혼합한 모르타르의 강도 및 내구성 평가", 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, Vol.28 No.1
5. 조봉석, 이훈하, 최연왕, 박동천, 최영철 (2014), "페로니켈슬래그의 콘크리트용 잔골재 적용성 검증 연구", 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, Vol.26 No.2

담당 편집위원 : 김성경(금오공과대학교)

●● 학회 특별회원사 동정 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학계, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 특별회원사의 최신 정보 및 기술현황 등의 홍보사항을 학회지에 무료로 게재하여 널리 홍보하고자 하오니 관심 있는 특별회원은 아래 사항을 참조하여 원고를 송부하여 주시기 바랍니다.

1. 특별회원사 홍보내용

특허, 신기술, 신제품, 수상실적, 세미나 및 시연회, 사회공헌 등

2. 원고 분량

A4 2~4매 내외이나 특별한 제한이 없음(그림 또는 사진 포함 가능)

3. 보내실 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 차장(E-mail : rcr@rcr.or.kr, Tel. : 02-552-4728)