

산업부산물을 활용한 저강도 고유동 채움재의 유동성 및 물성평가

조용광 · 김춘식 · 남성영 · 조성현 · 이형우 · 안지환*[†]

한일시멘트 단양공장, 한국지질자원연구원 탄소광물화사업단*

(2018년 10월 26일 접수, 2018년 11월 28일 수정, 2018년 11월 30일 채택)

Properties Evaluation and flowability of Controlled Low Strength Materials Utilizing Industrial By-Products

Yong-Kwang Cho · Chun-Sik Kim · Seong-Young Nam

Sung-Hyun Cho · Hyoung-Woo Lee · Ji-Whan Ahn*[†]

Danyang Factory, Hanil Cement Co.Ltd., Chungbuk, Korea

*Center for Carbon Mineralization, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea

(Received 26 October 2018, Revised 28 November 2018, Accepted 30 November 2018)

요 약

산업부산물인 화력발전소 석탄재와 제강슬래그의 활용방안을 확대하고, 폐광산의 지반침하를 방지하기 위해 저강도 고유동 채움재를 제조하였다. 중금속 용출 억제 등의 환경적 안정성을 확보하기 위해 화력발전소 바닥재(bottom ash)와 KR 슬래그는 7:3으로 혼합하여 탄산화반응(CO₂고정화)을 실시하였다. 효율적인 폐광산 충진을 위해 유동성에 따른 작업성 평가와 물성평가를 실시하였다. 유해성 분석결과 탄산화 반응을 실시할 경우 중금속 용출이 억제되는 것을 확인하였다. 비표면적 차이에 의해 각 배합별 물 비율을 확인하였다. flow 차이에 따른 작업 효율성을 평가한 결과 flow 300mm의 경우 flow 260mm 대비 효과적으로 충진이 가능한 것을 확인하였다. 압축강도 측정결과 flow 300mm 대비 flow 260mm의 경우 단위수량 감소로 인한 공극수가 적어 압축강도가 상대적으로 높은 것을 확인하였다.

주요어 : 산업부산물, 채움재, 탄산화반응, 유동성, 광산

Abstract - The purpose of this study is to expand the use of coal ash and coal slag in thermal power plants. In addition, controlled low strength materials was developed to prevent mine settlement. Bottom ash and KR slag are mixed at ratio of 7:3 to expand the use of industrial by-products through carbonate reaction and inhibit the exudation of heavy metals. In order to efficiently fill the abandon mine, workability and physical properties were evaluated according to flow. As a result of elution of harmful substance experiment, it was confirmed that the carbonation reaction inhibited the elution of heavy metals. It was confirmed that the difference in water ratio was the difference in specific surface area of the controlled low strength materials. It was confirmed that the working efficiency is excellent when the flowability is 300mm compared to 260mm. compressive strength measurement result was relatively high at 260mm compared to 300mm because the number of pores due to decrease of water ratio was small.

Key words : Industrial By-Products, backfill, carbonate reaction, flowability, mine

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : 042-868-3573 E-mail: ahnjw@kigam.re.kr

1. 서론

산업이 발달하면서 우리의 삶은 전과 다르게 편리해지고 있으며, 또한 높은 경제성장을 가져 왔다. 하지만 빠른 경제성장 뒤에는 다양한 산업으로 인해 발생하는 산업부산물로 인해 환경적인 문제가 크게 대두되고 있다. 특히 철강산업은 우리나라의 경제발전과 함께 성장하였다. 2015년 국내에서는 약 6,967만 톤의 철강이 생산되었으며, 제조 공정의 특성상 각종 부산물을 대량으로 발생시키는데 그중 철강슬래그가 대표적인 부산물이다. 철강슬래그는 철광석으로부터 선철을 제조하는 과정 중에 발생하는 고로슬래그(blast furnace slag)와 철에서 강을 만드는 과정 중에 발생하는 제강슬래그(steel slag)로 구분된다. 2015년 국내에서 발생된 고로슬래그는 1,611만톤과 제강슬래그 1,095만 톤의 재활용률은 98% 이상으로 보고되고 있다.(1) 고로슬래그의 경우 많은 연구를 통해 수산화칼슘(CaOH₂)과 수화반응을 일으키는 잠재수경성이 입증되어 건축분야에 다양하게 활용되고 있다. 하지만 제강슬래그의 경우 화학적 성분이 불안정하다는 이유로 다양하게 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 제강슬래그를 재활용할 수 있는 방안을 검토 중에 있지만 효율적으로 활용할 수 있는 방안은 아직까지 부족한 실정이다.

한편, 미분된 석탄을 사용하는 화력발전소에서는 석탄의 연소 후에 많은 양의 발전회가 발생된다. 이러한 발전회는 전기집진기에 포집되는 비산재(fly ash)와 자중에 의해 보일러 하부에 발생하는 바닥재(bottom ash)로 구분된다. 전체 발전회 발생량 중에 바닥재는 약 20~40%가 발생된다.(2) 발생하는 발전회 중 비산재는 대부분 시멘트 제조 원료 및 콘크리트 혼화재 등으로 재활용되고 있으나, 약 20%는 활용되지 못하고 매립되고 있는 것으로 보고되고 있다.(3) 특히 바닥재의 경우 비산재 대비 활용 범위가 떨어져 대부분이 매립되고 있는 실정이다. 이러한 많은 양의 발전회가 지속적으로 매립됨으로 인해 매립지의 포화문제와 토양 및 수질오염 등의 환경파괴의 문제로 발전회를 올바른 처리와 재활용 방안의 모색이 시급한 실정이다. 미국의 경우 발전회를 재활용하기 위한 방안으로 도량개량제, 건설 및 도로재료, 채움재 등으로 활용할 수 있도록 가이드라인을 제시하고 있다. 하지만 국내에서는 이러한 발전회를 활용할 수 있는 기초 연구 등이 부족하여 다양하게 적용되지 못하고 있는 실정이다.(4) 국내 석탄광산 대부분은 휴·폐광산이며 갱구 및 폐석에서 발생하는 AMD(acid mine drainage)는 황철석(FeS₂)과 같은 황화광물의 산화로 인해 발생되며, 주변 지하수 및 토양 등 산성화와 오염물질의 이동

을 통한 환경오염 등을 발생시킨다.(5) 따라서 휴·폐광산을 충전시키면서 환경오염을 억제할 수 있는 채움재에 대한 연구가 필요한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 알칼리성(pH12 이상)으로 중금속제거 및 AMD의 중화처리가 가능한 것으로 보고되고 있는 제강슬래그와 발전회를 활용하여 광산 채움재를 제조하였다.(6) 채움재의 작업효율성 확보 및 휴·폐광산의 효율적 충진을 위해 유동성(flowability)에 따른 작업성 평가와 물성 평가를 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2-1. 실험재료

화력발전소 비산재와 바닥재의 경우 A지역 화력발전소에서 발생하는 것을 사용하였으며, 제강슬래그의 경우 P지역의 제철소에서 부산물로 발생하는 것을 사용하였다. 중금속 용출 억제 등 환경안정성을 확보하기 위해 바닥재와 제강슬래그는 탄산화시켜 사용하였다. 화력발전소의 비산재는 정제 후 사용하였다. 채움재의 강도를 부여하기 위해 사용된 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며 건조수축변화 안정성을 확보하기 위해 팽창제로 Calium Sulfo-Aluminate(CSA)는 H사의 것을 사용하였다.

2-2. 실험방법

PC바닥재와 제강슬래그("KR slag"로 명함)의 탄산화 반응을 실시하기 위해 필요한 CaO 성분을 높이고자 7(PC바닥재):3(제강슬래그)의 비율로 혼합("CO₂-PC:KR"로 명함)으로 혼합하여 탄산화 반응을 실시하였다. 탄산화 시키는 방법은 가속탄산화 방식으로 탄산염의 침전 반응을 통해 CO₂고정화를 통하여 calcium, magnesium 및 metal oxide와 같은 물질이 CO₂와의 반응을 통해 안정화되어 용해되지 않는 탄산염이 생성되는 메커니즘을 가지고 있다. 본 연구에서의 배합은 질량배합으로 실시하였고 배합표는 Table 1에 나타내었다. flow별 특성 변화를 확인하기 위해 260mm 와 300mm를 각각 평가하였다. 채움재의 혼합과 시험체 제작은 KS L ISO 679 "시멘트의 강도시험방법"의 규정에 따라 실시하였다.

2-3. 분석방법

제강슬래그(KR-슬래그)와 화력발전소 바닥재와 CO₂-PC:KR의 화학적 성분을 분석하기 위해 X선 형광분석기(XRF, ZSX100e, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 탄산화 전과 후의 유해성 평가를 실시하기 위해 폐기물공정시험법에 의해 유해물질

용출량 실험을 실시하였다. flow를 확인하기 위해 ACI committee229에서 규정하고 있는 방법으로 지름이 76mm 높이가 152mm인 원형 실린더 몰드를 사용하였으며, 몰드를 들어올린 다음 30초 후 퍼진 지름의 4방향으로 측정된 후 평균을 구하여 flow를 확인하였다. 채움재의 유동성에 따른 충전성을 평가하기 위해 v-funnel실험과 l-flow 실험을 실시하였다. v-funnel실험은 KSCE-03을 참고하여 모형 제작 및 실험을 진행하였다. v-funnel 깔때기에 채움재를 표면까지 채우고 개폐장치를 열어 채움재가 모두 유출되는 시간을 스톱워치로 체크하여 유출되는 시간에 따른 유동성을 각 배합별 및 flow별로 측정하여 비교하였다. l-flow 실험방법 및 모형제작은 EFNARC-2002를 참고하여 l-flow모형을 제작하였

으며, 각 배합별 및 flow별로 l-flow측정을 실시하였다. 시험체 제작은 KSL4151에 의거하여 40×40×160 mm³ 몰드에서 7일간 양생실에서 양생한 후 탈형과 동시에 20±3℃의 조건에서 기건 양생을 실시하였다. 블리딩율은 KSF2433에 규정된 주입모르타르 블리딩 시험방법에 의거하여 실시하였다.

3. 결과 및 토론

3-1. 재료의 화학적 성분 및 유해성 분석

PC바닥재와 KR슬래그 그리고 PC바닥재(7)와 KR슬래그(3) 복합원료의 화학조성 분석결과를 Table 2에 나타내었다. PC 타입 발전소에서 발생하는 바닥재의 화학성분을 분석한 결과, 탄산화가 가능한 물

Table 1. Compositions of controlled low strength materials

No	OPC	CSA	CO ₂ -PC:KR	Fly ash
B-1	7.2	0.8	62.0	30.0
B-2	9.0	1.0	60.0	30.0
B-3	10.8	1.2	58.0	30.0
B-4	12.6	1.4	56.0	30.0

Table 2. Chemical composition of bottom ash, slag and pc Bottom ash : kr slag

	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ig (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)
PC-Bottom ash	57.8	4.0	22.9	1.2	1.1	10.2	-	1.3	0.1
KR-Slag	11.2	51.0	2.7	2.7	0.1	16.8	7.2	0.4	4.3
PC Bottomash + KR slag	42.9	18.0	16.6	2.0	0.8	12.1	2.8	0.9	1.4

Table 3. Elution of harmful substance of pc bottom ash : kr slag

	As (mg/L)	Pb (mg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Cd (mg/L)	Ni (mg/L)	Zn (mg/L)
PC Bottom ash+KR slag Before carbonatization	0.100	0.015	0.027	0.014	0.001	N.d.	N.d.
PC Bottom ash+KR slag After carbonatization	0.066	N.d.	0.013	0.007	N.d.	N.d.	N.d.

질인 CaO, MgO, K₂O, Na₂O 등의 성분이 소량 함유되어 있는 것을 확인하였다. KR 슬래그는 제강과정 중 유황을 제거하기 위해 석회석을 투입함으로써 발생하는 슬래그 부산물로서 51.0%로 CaO를 다량 함유하고 있는 것을 확인하였다. PC 타입 바닥재와 KR 슬래그를 7:3으로 혼합한 원료의 경우 약 16%의 CaO, 1.6%의 MgO 등을 함유하고 있으며, 이에 탄산화를 진행하기에 적절한 원료로 판단된다.

정제되지 않은 PC바닥재와 KR슬래그의 경우 채움재 원료로 그대로 사용할 경우 중금속 용출 등으로 인해 토양오염 등 환경적인 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 탄산화 시킨 CO₂-PC:KR와 탄산화 전 PC바닥재와 KR슬래그의 유해물질 용출실험 결과를 Table 3에 나타내었다. 탄산화 전의 PC타입 바닥재와 KR슬래그 복합처리된 원료의 중금속 용출시험 결과 0.100mg/L의 비소, 0.015mg/L의 납, 0.027mg/L의 구리, 0.014mg/L의 크롬, 0.001mg/L의 카드뮴이 용출되는 것을 확인하였다. 하지만 탄산화 후에는 최소 34%에서 최대 100%까지 중금속이 안정화되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 탄산화를 할 경우 CaO와 CO₂와 반응을 통해 생성된 CaCO₃의 capsulation효과로 인해 PC바닥재+KR슬래그에 막을 형성하여 중금속이 용출되는 것을 억제하는 것으로 판단된다.

3-2. 저강도 고유동 채움재의 물비율

채움재의 물비율의 경우 채움재가 경화된 후에 내구성에 많은 영향을 주는 인자로서 물비율이 너무 높으면 내구성 저하의 원인이 되며, 너무 적으면 시공성(workability) 및 충전성이 저하되어 시공이 어렵게 된다. 본 연구에서는 채움재에 flow를 260mm와 300mm로 설정하여 소요되는 물비율을 확인하였다. Fig.1(A)는 채움재의 flow 값이 260±10 mm일 경우 필요한 물비율을 나타낸 것이고 Fig.1(B)는 채움재의 flow 값이 300±10 mm일 경우 필요한 물비

율을 나타낸 것이다. flow 260mm와 flow 300mm의 물비율의 차이는 약 3% 정도 차이가 나는 것을 확인하였다. 각 배합별 물비율을 확인한 결과 물비율이 가장 높은 B-1과 물비율이 가장 낮은 B-4의 차이는 1% 인 것으로 나타나 배합별 단위수량 차이는 크지 않은 것을 확인하였다. 일반적인 단위수량은 혼합되는 원료의 비표면적 및 입자 특성에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.⁽⁷⁾ PC바닥재와 KR슬래그의 경우 골재 대응으로 사용될 만큼 입자 사이가 크므로 분체인 OPC대비 비표면적이 작은 것으로 알려져 있다. 따라서 비표면적 특성으로만 비교할 경우 CO₂-PC:KR함량이 가장 많은 B-1의 물비율이 가장 낮아야 하며, CO₂-PC:KR 함량이 가장 적은 B-4의 물비율이 가장 높아야 하지만 실제 실험 결과는 상반되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 CO₂-PC:KR에 70% 조성을 가지고 있는 PC바닥재는 기공이 많은 것으로 보고되고 있으며, 이로 인해 PC바닥재의 기공 속에 수분이 침투하게 되어 물 비율이 증가한 것으로 판단된다.⁽⁸⁾ 하지만 OPC와 CO₂-PC:KR의 비표면적 차이에 의해 단위수량 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

3-3. 저강도 고유동 채움재의 유동성 평가

광산 충진을 진행할 경우 작업 효율성을 확인하기 위해 유동성 및 충전성을 평가를 실시하였다. 배합별 및 flow별 V패널 유출 통과 시간을 측정된 결과를 Table 4에 나타내었다. 실험결과 각 배합별 유출 통과시간은 동등 수준인 것을 확인하였다. flow별 유출통과 시간을 확인한 결과 flow 300mm의 경우 260mm 대비 모든 배합에서 1.4초 이상의 차이가 나타났으며 이는 최소 유출 통과 시간이 35% 단축된 것을 의미한다.

L-flow의 경우 충전성 측정을 통한 작업효율성을 확인하기 위해 측정하였다. L-flow의 경우 결과 값이 1에 가까울수록 고유동성을 가지는 것을 의미한

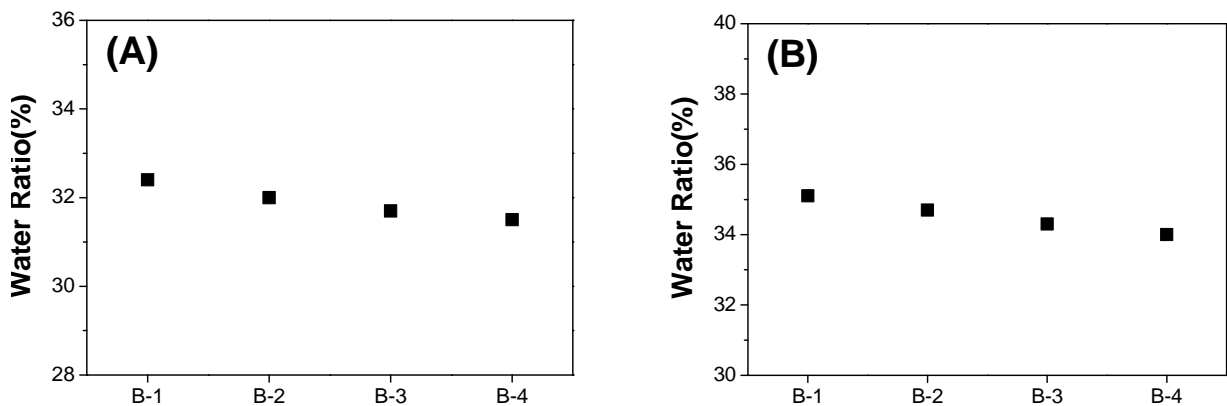
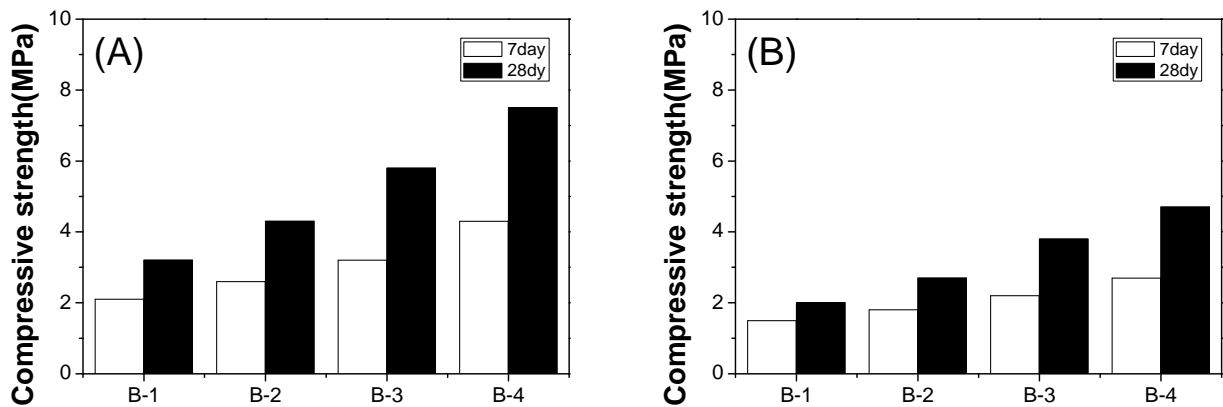


Fig 1. Water ratio of controlled low strength materials of flow:260mm(A) and flow:300mm(B)

Table 4. V-Funnel and l-flow test of controlled low strength materials

	flow 260mm		flow 300mm	
	V-Funnel(sec)	L-flow	V-Funnel(sec)	L-flow
B-1	3.9	0.84	2.3	1.00
B-2	3.9	0.73	2.5	1.00
B-3	4.1	0.45	2.5	1.00
B-4	4.2	0.40	2.5	1.00

**Fig 2.** Compressive strength of controlled low strength materials of flow:260mm(A) and flow:300mm(B)

다. 배합별 flow 260mm의 채움재의 경우 OPC대비 CO₂-PC:KR의 함량이 높은 B-1이 충전성이 가장 우수한 것을 확인하였다. 하지만 flow 300mm 이상의 경우 완전 충진을 나타내는 1의 결과 값을 가지는 것을 확인하였다. 이로 인해 일정 이상의 유동성을 가지는 flow를 확보할 경우 완전 충진이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 충전하고자 하는 광산의 특성에 따라 flow를 조절하여 시공하면 될 것으로 판단된다.

3-4. 저장도 고유동 채움재의 압축강도

저장도 고유동 채움재의 압축강도는 2.1~8.3 MPa의 압축강도에서 백호 굴착이 가능하다고 보고되고 있으며, 고강도를 발현할 경우 재 굴착의 어려움을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다.⁽⁹⁾ 압축강도는 구성하고 있는 성분과 물 비율에 영향을 받으며, 물 비율이 높을 경우 워커빌리티(workability)는 증가되지만 압축강도는 저하된다고 보고되고 있다⁽⁷⁾. flow 260mm의 압축강도 측정결과는 Fig.2(A)에 나타내었으며, flow 300mm의 압축강도 측정결과는 Fig.2(B)에 나타내었다. flow별 압축강도 차이를 확인한 결과 flow가 상대적으로 낮아 단위수량이 300mm에

비해 상대적으로 적게 소요되는 260mm의 경우 압축강도가 큰 것을 확인하였다. 이는 물 비율이 증가할수록 채움재의 공극수가 증가함으로 인해 압축강도는 감소하며, 단위수량이 감소할수록 압축강도는 증가된다고 보고되고 있는 것과 동일한 것으로 해석할 수 있다. 각 배합별 압축강도를 비교한 결과 OPC함량이 증가할수록 압축강도가 큰 것으로 확인할 수 있다. 이러한 결과는 채움재의 수화반응물 생성에 영향으로 인한 것으로 판단된다. OPC의 수화반응 생성물은 OPC 입자를 구성하고 있는 C₃A, C₂S, C₃A, C₄AF에 의해 이루어진다. 이들은 물과 반응하여 수화생성물인 ettringite(3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O)와 calcium silicate(C-S-H) 등을 생성시켜 강도를 증진시킨다. 따라서 OPC함량이 감소할 경우 생성되는 수화반응 생성물이 적어 압축강도가 낮은 것으로 판단된다. 특히 배합 B-1(flow 300mm)의 경우 기준 조건에 못 미치는 2.0MPa인 것을 확인하였다. 이는 OPC(7.2%) CSA(0.8%)로 단위수량 증가로 인한 공시체의 공극률 증가와 ettringite 등 수화생성물이 다른 배합대비 적어 강도발현이 크지 않은 것으로 판단된다. 나머지 다른 배합의 경우 ACI299R 기준에 의거하는 저장도 고유동 채움재의 압축강도

조건에 만족하는 결과를 확보하였다. 따라서 현장 각기 다른 현장 조건을 파악하여 OPC함량을 조절을 통한 광산채움재의 배합을 설계가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 산업부산물인 제강슬래그와 KR슬래그를 활용한 저장도 고유동 광산채움재를 제조하였으며, 채움재의 유동성에 따른 물성평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 채움재 원료 중 산업부산물의 화학성분 분석 결과 PC 타입 바닥재와 KR 슬래그를 7:3으로 혼합한 원료의 경우 약 16%의 CaO, 1.6%의 MgO 등을 함유함으로써 인해 탄산화를 진행하기에 적절한 원료인 것을 확인하였다.

2. 탄산화 전후 중금속 용출량의 경우 PC타입 바닥재와 KR슬래그 복합처리된 원료의 중금속 용출 시험 결과 0.100mg/L의 비소, 0.015mg/L의 납, 0.027mg/L의 구리, 0.014mg/L의 크롬, 0.001mg/L의 카드뮴이 용출되는 것을 확인하였다. 하지만 탄산화 후에는 최소 34%에서 최대 100%까지 중금속이 안정화되는 것을 확인하였다.

3. 물비율의 경우 flow를 260mm 와 300mm로 고정할 경우 물비율의 차이는 flow가 큰 300mm의 채움재의 경우 약 3% 정도 높은 것을 확인하였다. 기공수가 많은 PC바닥재 함량이 가장 높은 배합.1의 물비율이 가장 높은 것을 확인하였다.

4. 저장도 고유동 채움재의 유동성을 확인하기 위해 V패널을 측정된 결과 flow 300mm의 경우 260mm 대비 모든 배합에서 최소 유출 통과 시간이 35% 단축된 것을 확인하였다. L-flow실험결과 flow 260mm의 채움재의 경우 OPC대비 CO₂-PC:KR의 함량이 높은 B-1이 충전성이 가장 우수한 것을 확인하였다. 하지만 flow 300mm 이상의 경우에는 모든 배합에서 완전 충진을 나타내는 1의 결과 값을 가지는 것을 확인하였다.

5. 압축강도 측정결과 flow가 상대적으로 낮아 단위수량이 300mm에 비해 상대적으로 적게 소요되는 260mm의 경우 압축강도가 큰 것을 확인하였다. 배합별 압축강도 측정결과 시멘트 수화반응물 생성 영향으로 인해 OPC함량이 가장 높은 배합. B-4의 압축강도가 가장 높은 것을 확인하였다. 배합. B-1을 제외한 나머지의 경우 채움재 기준 조건에 만족하는 2.0MPa을 만족하는 것을 확인하였다.

본 연구결과를 통해 광산 채움재의 현장 시공을 진행하게 될 경우 채움재의 유동성에 따른 시공효

율성 및 물성을 확인하는데 기초 연구 자료로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20141010101880).

References

1. Kim, JM., Kwon, SJ., 2016 Resources Recycling in Concrete Industry, Magazine of Korea Concrete Institute, Vol. 28(4) pp. 15~19.
2. Park, HY., Seo, SI., Kim, SC., Kang, DS. 2007, Reburning of bottom ash in a coal fired powder plant and its effect on the plant management, J. Korea Solid Wastes Eng. Soc. Vol, 24(5) pp472-481.
3. Kim, KD., Kang, SG., 2007, Manufacturing artificial lightweight aggregates using coal bottom ash and clay, J. Korea Cryst. Tech. Vol. 17(6) pp277-282.
4. ASTM (American Society for Testing and Materials) E2277-14, 2014 : Standard Guide for Design and Construction of Coal Ash Structural Fills.
5. 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., Vol. 22(4), pp. 3013-3022.
6. Yoo, J.C, Ji, SW, Ahn, JW, Kim, CS, Shin, HY, 2017, A Case Study of Mine Environmental Restoration using Coal Ash, J. of Korea Inst of Resources Recycling, Vol. 26(2), pp. 80-88.
7. Lee, B. K., Kim, G. Y., Koo, K. M., Shin, K. S., 2014, Properties of Compressive Strength of Mortar Based on High-activated Blast Furnace Slag using the Slag by-product as an Activator, Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 14, pp.37-44.
8. kim, K. D., Kang, S.G., 2007, Manufacturing artificial lightweight aggregates using coal bottom ash and clay” Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, Vol. 17(6) pp. 277-282.
9. ACI, 229R, 2005, Controlled low strength materials, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.