

ORIGINAL ARTICLE

급결제 종류에 따른 광산 차수재의 특성 연구

조용광 · 남성영 · 이용무 · 김춘식 · 서신석 · 조성현 · 이형우 · 안지환^{1)*}

한일시멘트 테크니컬센터, ¹⁾한국지질자원연구원 탄소광물화사업단

Study on the characteristic of liner and cover material by accelerating agent type

Yong-Kwang Cho, Seong-Young Nam, Yong-Mu Lee, Chun-Sik Kim, Shin-Seok Seo,
Sung-Hyun Jo, Hyoung-Woo Lee, Ji-Whan Ahn^{1)*}

Technical Center, HANIL CEMENT Co.Ltd., Daejeon 34361, Korea.

¹⁾Center for Carbon Mineralization, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, 34132, Korea.

Abstract

At present research on mining backfill materials is being carried out to prevent ground subsidence and breaking by underground cavern of exhausted mines. However, backfill materials can cause secondary environmental issues such as ground pollution. To solve these issues, liner and cover materials are constructed before backfill materials constructed, to inhibit toxic substances from moving to the surroundings. Liner and cover materials, however, should have an accelerating performance after construction and when the accelerating performance is degraded, the work efficiency can be lowered, and the construction cost can be increased, by many rebound content. Therefore, this study develops mining liner and cover materials, and evaluates their accelerating performance and physical properties of liner and cover materials by types and content of accelerating agent. In case of aluminate accelerating agent, it is mixed with more than 5% of liner and cover materials(binder/ratio); thus an accelerating performance satisfying Korean Industrial Standards(KS) occurs, and in case of alkali-free accelerating agent, when it is mixed with more than 7%(binder/ratio), accelerating performance satisfying KS occurs. The more the accelerating agent capacity increases, the more compressive strength decreases. In addition, it is confirmed that compressive strength of aluminate accelerating agent is more degraded than compressive strength of the alkali-free accelerating agent. It is also confirmed that drying shrinkage stability of the alkali-free accelerating agent is better than the drying shrinkage stability of the aluminate accelerating agent.

Key words : Liner and cover material, Accelerating agent, Wast Mine

1. 서론

국내에는 가행광산과 휴·폐광산을 합하여 약 5,000

개 이상의 광산이 존재하며 이 중 지하 공동이 존재하는 광산은 약 2,000개 이상으로 추정되고 있다(Kim and park, 2015). 이러한 광산의 존재로 인해 다양한

Received 4 December, 2017; Revised 31 January, 2018;

Accepted 9 February, 2018

*Corresponding author: Ji-Whan Ahn, Center for Carbon Mineralization, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), 34132, Korea.

Phone : +82-42-868-3573

E-mail : ahnjw@kigam.re.kr

The Korean Environmental Sciences Society. 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.

환경오염 문제가 제기되고 있다. 광산이 환경적 오염으로 문제가 되기 시작한 1990년대 중반 이후부터 정부의 환경오염정화 정책이 추진되어 왔다(Kong et al., 2010). 현재 국내에서 발생하고 있는 폐광산 주변 지역의 오염은 산성광산배수와 침출수 유출 등의 문제가 발생되고 있으며, 지반 침하 등으로 인한 싱크홀 발생으로 인한 안전사고를 유발시킬 수 있다(Gray et al., 1977). 폐광산을 안정화시키기 위한 방법으로는 갱내충전법이 있다. 갱내충전법으로는 단순하게 폐석을 단독으로 충전하거나 폐석과 함께 시멘트, 플라이애쉬 등 첨가제를 혼합하여 충전하는 방법으로 구분되고 있으며, 현재 다양한 충전재에 관한 연구가 진행 중에 있다(Han et al., 2016). 그러나 충전재의 경우 토양오염 등 2차적인 환경문제를 일으킬 가능성이 있으며 이러한 문제를 해결하기 위해 충전층에 차수층을 설치하여 유해물질이 주변 환경으로 이동하는 것을 차수층의 두께와 투수속도로 예측되는 기간 동안 지연시키는 역할을 하여 환경적인 문제를 해결하고 있다. 또한 유출된 유해물질을 인위적으로 처리함으로써 주변 환경에 미치는 영향을 최소화하고 차수층 재료가 갖는 유해 금속 및 유기물질의 이동 억제능을 이용하여 2차 방어 효과를 발현하는 역할을 한다(Chang et al., 2007). 이러한 차수재를 시공하기 위해서는 타 설압에 대한 반발률을 감소시키고 조기 응결을 얻음으로써 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerating agent) 사용이 필수적이다(Lee et al., 2005). 한편 급결제를 과량 첨가할 경우 급격한 물성저하를 가져올 수 있으며 소량 첨가할 경우 급결 성능이 떨어지기 때문에 급결제의 함량 조절 및 급결제 선정이 무엇보다 중요한 요소로 작용되고 있다(Jeon et al., 2012). 급결제의 종류에는 실리케이트계(silicate based accelerator), 알루미늄네이트계(aluminate based accelerator), 알칼리프리계(alkali free based accelerator)가 사용되고 있다. 하지만 실리

케이트 급결제는 낮은 초기 강도와 장기강도의 저하, 인체에 대한 유해성을 가지고 있으며, 알루미늄네이트 급결제의 경우에도 피부 자극 및 화상의 위험성을 가지고 있지만 현재 터널, 상하수도 등의 시공 현장에서 많이 활용되고 있다. 반면 알칼리프리계급결제의 경우 황산알루미늄을 주성분으로 하는 급결제로서 장기강도 저하가 크지 않고 인체의 자극성이 적어 친환경 제품으로 각광 받고 있다. 이러한 급결제 사용은 점차 증가하는 추세이나 급결제를 사용한 제품의 표준화에 대한 연구는 열악한 상태이다(Shin et al., 2005). 따라서 본 연구에서는 광산 차수재 배합을 설계하고 급결제의 종류 및 함량에 의한 차수재의 급결 성능과 물성에 대해 기초특성 평가를 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험 재료

골재는 I지역의 건조 해안사를 이용하였으며, 강도 보강제로서 효율성을 발현하기 위해 입도사이즈별로 세사(0.15~0.71 mm), 중사(0.71~2.00 mm), 왕사(2.00~4.75 mm)로 분류하여 사용하였다. 포틀랜드시멘트와 CSA(Calcium Sulfo-Aluminate)는 H사의 것을 사용하였으며, Slag는 P지역의 Blast Furnace Slag를 사용하였다. 차수재의 작업성 및 유동성을 향상시키기 위해 Polycarbonate (PC계) 유동화제(superplasticizer)를 C사의 것을 사용하였다. 급결제는 S사의 알루미늄네이트계급결제와 알칼리프리계급결제를 사용하였으며 급결제의 특성은 Table 1에 나타내었다. 두 급결제 사이에 pH 값의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이는 급결제의 주 원료인 수산화칼슘과 황산알루미늄(황산염)이 용해되면 각각 알칼리, 산성의 수소이온농도를 나타내기 때문이다.

2.2. 실험 방법

차수재의 경우 슛크리트 배합과 유사한 경향으로

Table 1. Characteristic of accelerating agent type

Type	Specific gravity(25℃)	pH(25℃)	Solid content(%)	Alkali content(%)
Aluminate-based accelerator	1.46	13.44	44.70	21
Alkali free based accelerator	1.36	2.65	40.30	1

Table 2. Compositions of liner and cover material

NO	Aggregate	Binder			Superplasticizer
		OPC	CSA	slag	
Compositions	64.0	18.9	2.1	15.0	0.05

Table 3. Content of liner and cover materials

Type	Ratio				
Aluminate-based accelerator	0%	5%	6%	7%	8%
Alkali free based accelerator					

인해 이를 바탕으로 Table 2와 같이 배합을 설계하였다. 차수재 현장 시공시 뿔칠장비에 막힘 현상을 차단하기 위해 flow는 200 mm를 기준으로 두고 물 비율을 확인하였으며, 적정 물비율로 18%(W/R)를 선정하였다. 유동화제는 흐름성을 용이하게 하기 위해 사용하였다. 유동화제 특성은 차수재의 입자들의 분산을 용이하게 만들기 때문에 유동성이 증가되지만 일정 함량 이상 첨가하게 될 경우 재료분리로 인해 물성저하를 가져 올 수 있기 때문에 정량 사용하였다. 시료의 혼합방법은 KS L ISO 670의 규정방법에 따라 모르타르 혼합기를 통해 1분 동안 혼합하였다. 제조된 차수재는 Table 3에 나타내었듯이 바인더 함량 대비 0, 5, 6, 7, 8% 급결제를 종류별로 혼합하여 공시체를 제작하였다. 실리케이트계급결제는 환경적 문제와 인체에 유해성이 상대적으로 심해 사용이 제재되고 있어 제외하였다.

2.3. 분석방법

급결 성능을 확인하기 위해 자동응결측정기(EL38, UK)를 사용하였으며 분당 1회씩 측정하여 차수재의 초결(initial set), 종결(final set)을 확인하였다. 길이변화율은 제작된 시험체를 KSF2424 기준에 의거하여 콘택트 스트레인게이지(293-252, Japan)를 통해 탈형 후 3, 7, 14, 21, 28일 기준으로 측정하여 건조수축변화 및 팽창성을 확인하였다. 압축강도는 압축강도 측정기(X2000, Montauban, France)를 사용하였으며, 제작된 시험체를 KS L ISO 679에 의거하여 재령 1, 3, 7, 28일의 압축강도를 측정하였다. 흡수율은 KS F2476에 의거하여 실시하였다. 먼저 28일 동안 양생

한 공시체를 건조기에서 80℃의 온도조건에서 24시간 건조하였다. 건조기에서 꺼낸 공시체의 최소 중량을 측정하고 20℃의 수중에서 48시간 동안 침지한 후 중량을 측정한 다음 (1)식으로 계산하였다.

$$\text{흡수율} = \frac{W_b - W_a}{W_a} \times 100 \tag{1}$$

여기서 W_a : 수중침지전의 공시체의 중량(g)

W_b : 각 수중침지 시간의 공시체의 중량(g)

3. 결과 및 토론

3.1. 급결 성능 평가

차수재의 급결 성능은 KS L 2782기준에 의거하여 초결은 5분, 종결은 15분 이내에 발현되어야 한다고 제시하고 있다. 이러한 급결 성능이 요구되는 이유는 굴착면을 침식으로부터 보호하고, 리바운드 함량 저감을 통한 효율적인 시공과 후속작업이 원활히 진행될 수 있도록 지내력을 증대시키기 위함이다(Jeon et al., 2012). 따라서 급결제 함량 및 종류에 따른 성능평가를 Table 4에 나타내었다. 알루미네이트계급결제와 알칼리프리계급결제의 성능을 비교한 결과 알루미네이트계급결제의 급결 성능이 더 우수한 것을 확인하였다. 알루미네이트계 급결제의 경우 5% 이상만 사용하여도 KS기준을 충족하는 결과를 확보할 수 있었으나, 알칼리 프리계급결제의 경우 7% 이상 사용하여야 KS기준을 충족할 수 있는 결과를 확보할 수 있었다. 알루미네이트계급결제의 경우 Na_2O 와 Al_2O_3 가 약

Table 4. Setting time evaluation of liner and cover materials

[unit/min]

Content accelerator	0%		5%		6%		7%		8%	
	initial set	final set	initial set	final set	initial set	final set	initial set	final set	initial set	final set
hardened aluminate based accelerator	270	290	5	10	4	6	4	5	3	4
alkali free based accelerator	270	290	40	45	20	26	5	11	4	9

1.3 ~ 1.6 몰비로 구성되어 있으며, NaOH와 Al(OH)₃로 분해하여 NaOH가 칼슘 실리케이트상의 수화를 촉진시킨다. 이때 생성된 수산화칼슘과 Al(OH)₃와 반응하여 Ca-Al-H₂계 수화물을 생성시켜 급결성이 발현된다고 보고되고 있다.(Palgia et al., 2001) 또한 알칼리 자극제로서 C₃A와 반응을 촉진시켜 급결성이 발현되는 것으로 판단된다. 알칼리프리계급결제의 경우 수산화칼슘과, 황산알루미늄이 주원료로 구성되어 있으며, 알루미늄 성분과 황산염이 3CaO·Al₂O₃(C₃A)와 반응하여 다량의 ettringite 침상결정이 초기에 생성되기 때문에 급결성을 발현한다고 보고되고 있다.(Heo et al., 2005) 하지만 알칼리프리계의 경우에는 알루미늄계 대비 자극제로서 C₃A와 반응 속도가 상대적으로 저하되어 급결 성능이 저하되는 것으로 판단된다. 또한 알루미늄계급결제의 경우 6% 이상부터는 급결 시간 단축이 저하되고, 알칼리 프리계의 경우 7%부터 급결시간 단축이 저하되는 것을 확인할 수 있는데 이러한 이유는 차수재의 알칼리 자극제가 일정

함량 이상 증가할 경우 증가된 성분은 더 이상의 자극제로서 역할을 크게 하지 못하고 평형을 이뤄 생긴 결과로 판단된다.

3.2. 압축강도 특성

일반적으로 모르타르에 급결제를 혼합한 배합의 경우 혼합하지 않은 동일한 배합의 시편보다 압축강도가 감소한다고 보고되고 있다(Shin et al., 2005). Fig.1(A)는 차수재에 알루미늄계 급결제를 혼합한 압축강도를 나타내었으며, Fig.1(B)는 차수재에 알칼리프리계 급결제를 혼합한 압축강도를 나타내었다. 급결제를 혼합한 배합 모두 혼합하지 않은 배합 대비 압축강도가 감소한 것을 확인하였으며, 급결제 혼합량이 증가할수록 압축강도는 감소한 것을 확인하였다. 알루미늄계 급결제를 혼합한 경우 혼합하지 않은 차수재 대비 41.6~48.9% 감소한 결과를 확인하였으며, 알칼리프리계 급결제를 혼합한 경우에는 20.6~37.2% 감소한 결과를 확인하였다. 이러한 결과는 급결제가 강도 증진에 큰 기여를 하는 Calcium

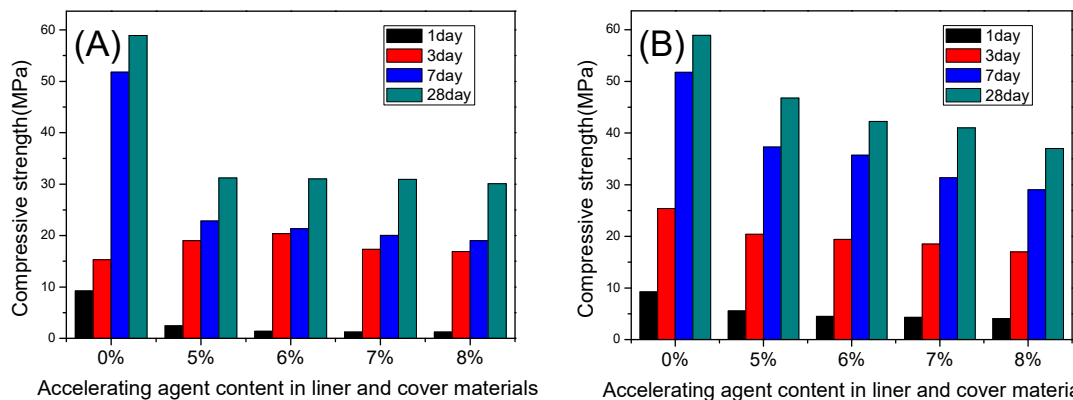


Fig. 1. Compressive Strength of aluminate based accelerator in liner and cover materials (A) and alkali free based accelerator in liner and cover materials(B).

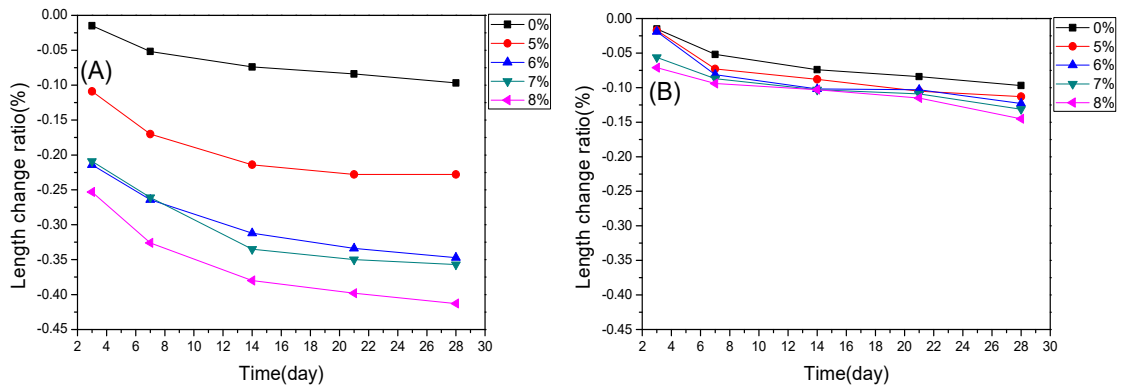


Fig. 2. Length change ratio of aluminate based accelerator in liner and cover materials (A) and alkali free based accelerator in liner and cover materials(B).

silicate(C₂S, C₃S)의 수화 반응에 영향을 미치지기 때문에 판단된다. 즉 알루미늄이트계급결제의 경우 초기의 과량의 수산화칼슘 생성으로 강도 증진에 기여하는 C₂S 또는 C₃S에 의해 생성되는 C-S-H겔 성장에 악영향을 주기 때문에 판단된다. 알칼리프리계의 경우 알칼리 성분과 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 반응하여 차수재 경화체 중의 수용성 NaOH 양이 증가되거나 OPC 성분 중 알루미늄이트와 반응하여 생성되는 알루미늄-실리카-겔의 침전을 촉진하여 결과적으로 수화반응을 방해하여 초기강도가 감소되는 것으로 판단된다. 하지만 알루미늄이트계급결제 대비 자체 황산염의 지속적인 공급과 반응 단계에서 가소(plasticity) 상태를 유지하기 때문에 C-S-H겔 성장에 상대적으로 악영향이 미치지 않기 때문에 강도가 알루미늄이트계급결제를 혼합하였을 경우보다 높은 것으로 판단된다.

3.3. 길이변화 특성

길이변화율은 차수재를 시공할 경우 건조수축변화가 일어남에 따라 균열이 발생될 경우 차수재로서의 기능이 저하될 우려가 있기 때문에 측정하였다(Yang et al., 2013). Fig.2(A)는 차수재에 알루미늄이트계급결제를 혼합한 길이변화율을 나타내었으며, Fig.2(B)는 차수재에 알칼리프리계급결제를 혼합한 길이변화율을 나타내었다. 급결제를 혼합한 배합의 경우 혼합하지 않은 동일한 배합의 시편보다 건조수축변화가 크게 발생하였다. 급결제를 혼합하지 않은 차수재의

경우 28일 기준으로 -0.097% 건조수축변화가 일어났으나, 알루미늄이트계급결제의 경우 5%만 혼합하여도 -0.228%의 건조수축변화가 발생하였으며, 8% 혼합한 경우에는 -0.413%의 건조수축변화가 발생하였다. 하지만 알칼리프리계급결제의 경우 5% 혼합할 경우 -0.113% 건조수축변화가 발생하였으며, 8% 혼합한 경우에도 -0.145%의 건조수축변화가 발생하여 알루미늄이트계급결제 대비 건조수축안정성이 우수한 것을 확인하였다. 이러한 결과는 급결성능평가에서 언급한바와 같이 급결제가 자극제로서 차수재의 C₃A와 반응을 촉진시켜 수화반응으로 인한 건조수축변화가 발생된 것으로 판단된다. 또한 차수재의 급결성을 발현하기 위해서 수분 증발이 빠르게 일어나고 이로 인해 공극률 증가로 건조수축저항성이 낮은 것으로 판단된다(Cho et al., 2017). 알루미늄이트계급결제 대비 알칼리프리계급결제의 경우 알루미늄이트계급결제 대비 자극제로서 차수재의 C₃A의 반응속도가 상대적으로 저하되어 생긴 결과로 판단된다.

3.4. 흡수율 측정

차수재의 경우, 겔 공극, 기포에 의한 공극과 모세관 공극, 삼투압 작용 등에 의해 수분이 침투하게 된다. 차수재의 내부로 침투되는 수분의 경우 각종 유해물질을 포함하고 있어 차수재에 그대로 침투될 경우 토양오염 등의 환경오염을 유발할 수 있다. 따라서 차수

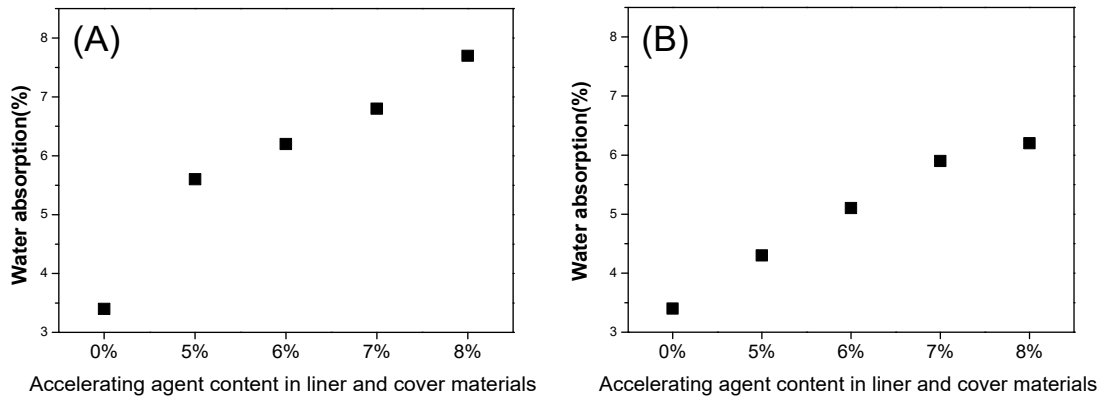


Fig. 3. Water absorption of aluminate based accelerator in liner and cover materials (A) and alkali free based accelerator in liner and cover materials(B).

재에 있어서 흡수율은 차수성능을 가늠할 수 있는 중요한 인자로 알려져 있다.(Jo and Hyung, 2013) Fig.3(A)는 알루미늄네이트계급결제를 혼합한 차수재의 흡수율을 나타낸 것이며, Fig.3(B)는 알칼리프리계급결제를 혼합한 차수재의 흡수율을 나타낸 것이다. 측정결과 급결제를 혼합하지 않은 차수재의 흡수율은 3.4%인 것을 확인하였다. 알루미늄네이트계급결제를 혼합한 차수재의 경우에는 최대 7.7%로 기존대비 흡수율이 증가하여 차수성능이 저하되는 것을 확인하였다. 반면 알칼리프리계급결제를 혼합한 차수재의 경우에는 최대 흡수율이 최대 6.2%로 알루미늄네이트계 급결제 대비 상대적으로 차수성능이 우수한 것을 확인하였다. 이러한 결과는 길이변화특성 결과 분석에서도 언급하였듯이 급결제가 급결 성능을 발휘하기 위해 차수재의 수분 증발이 빠르게 일어나고 이로 인해 공극률이 증가함에 따라 흡수율이 급결제를 혼합할수록 높아진 것으로 판단된다. 따라서 급결 성능이 우수한 알루미늄네이트계급결제의 경우 수분 증발이 알칼리프리계 대비 빠르게 일어나고 이로 인해 공극률 또한 알칼리프리계급결제 대비 증가하여 흡수율이 높은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 광산 차수재 배합을 설계하고 급결제의 종류 및 함량에 의한 차수재의 급결 성능과 물성

에 대해 기초특성 평가를 실시하였다.

1. 급결제의 성능 평가 결과 알칼리 자극제의 역할로 인해 급결성을 발현할 수 있었으며, 알루미늄네이트급결제의 경우 차수재에 5% 이상만 혼합하여도 KS기준을 만족하는 결과 값을 확보할 수 있었으나, 알칼리프리계의 경우 7% 이상 혼합하여야 KS기준을 만족하는 결과를 확보할 수 있었다.

2. 차수재의 압축강도 측정 결과 강도증진에 큰 기여를 하는 Calcium silicate (C_2S , C_3S) 수화반응 영향으로 인해 급결제 혼합량이 증가할수록 압축강도는 감소한 것을 확인하였다. 알루미늄네이트급결제를 혼합한 경우 혼합하지 않은 차수재 대비 41.6~48.9% 감소한 결과를 확인하였으며, 알칼리프리계급결제를 혼합한 경우에는 20.6~37.2% 감소한 결과를 확인하였다.

3. 차수재의 길이변화율 측정결과 급결제를 혼합한 배합의 경우 혼합하지 않은 동일한 배합의 시편보다 건조수축변화가 크게 발생하였다. 급결제를 혼합하지 않은 차수재의 경우 28일 기준으로 -0.097% 건조수축변화가 발생하였다. 알루미늄네이트급결제의 경우 5%만 혼합하여도 -0.228%의 건조수축변화가 발생하였으며, 8% 혼합한 경우에는 -0.413%의 건조수축변화가 발생하였다. 한편 알칼리프리계 급결제의 경우 5% 혼합할 경우 -0.113% 건조수축변화가 발생하였으며, 8% 혼합한 경우에도 -0.145%의 건조수축변화가 발생하여 알루미늄네이트급결제 대비 건조수축안정성이

우수한 것을 확인하였다.

4. 본 연구 결과를 통해 알루미늄계 급결제의 경우 급결 성능은 우수하지만 물성 저하가 알칼리프리계 급결제 대비 크게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 차수재에 급결제를 혼합할 경우 급결 성능 확보와 물성 안정성을 위해서는 알칼리 프리계 급결제를 7% 혼합할 경우 적절한 함량이 될 것으로 판단된다

5. 흡수율 측정결과 급결제를 혼합하지 않은 차수재의 경우 3.4%인 것을 확인하였으며, 알루미늄계 급결제를 혼합한 차수재의 경우에는 흡수율이 최대 7.7%로 기존 대비 차수성능이 저하되는 것을 확인하였다. 반면 알칼리프리계급결제를 혼합한 차수재의 경우에는 최대 흡수율이 최대 6.2%로 알루미늄계 급결제 대비 상대적으로 차수성능이 우수한 것을 확인하였다. 이러한 결과는 급결제 적용한 차수재 및 모르타르 배합 설계 및 표준화하는데 있어 기초 연구 자료로서 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

REFERENCES

- Chang, Y. C., Kim, J. C., Jeong, O. K., 2007, Experimental study on engineering characteristic of the waste landfill soil admixed linear, *Journal of the Korean geotechnical society*, 8, 13-20.
- Cho, Y. K., Nam, S. Y., Lee, Y. M., Kim, C. S., Seo, S. S., Jo, S. H., Lee, H. W., Ahm, J. W., 2017, Characterization of controlled low-strength materials utilizing CO₂-solidified CFBC coal ash, *Journal of Environmental Science International*, 26, 1267-1274.
- Gray, R. E., Bruhn, R. W., Turka, R. J., 1977, Study and analysis of surface subsidence over mined pittsburgh coalbed, in final report, Formally US Bureau of Mines, Contract J0366047, NTISPB 282511, 362.
- Han, W. J., Lee, J. S., Byun, Y. H., Cho, S. D., Kim, J. Y., 2016, Study on characteristics of controlled low strength material using time domain reflectometry, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 17, 33-37.
- Heo, G., Choi, H. S., Yi, S. T., 2005, Experimental study on setting time of cement paste mixed accelerating admixtures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17, 879-884.
- Jeon, J. T., Park, H. T., Lee, Y. K., 2012, Experimental study on reduced amount of rebound in wet process shotcrete works by upon accelerator contents, 32, 615-622.
- Jo, Y. K., Hyung, W. G., 2013, Properties of polymer cement mortar based on styrene-butyl acrylate according to emulsifier and monomer ratios, 37, 148-155.
- Kim, S. L., Park, J. H., 2015, Research and development trends for mine subsidence prevention technology in korea, *Tunnel & Underground Space*, 25, 408-416.
- Kong, D. H., Kwon, B. H., Yu, H. S., Kim, S. O., 2010, Discharge characteristics of heavy metals in acid mine drainage from the abandoned ilgwang mine, *The Journal of Engineering Geology*, 20, 79-87.
- Lee, S. H., Kim, Y. H., Hahm, H. G., Kim, K. J., 2005, Setting time, strength and rebound of shotcrete according to accelerators, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17, 427-434.
- Palglia, C., Wombacher, F., Bohni, H., 2001, The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems-I. characterization of the setting behavior, *Cement & Concrete Research*, 31, 913-918.
- Shin, J. Y., Kim, J. Y., Hong, J. S., Sub, J. K., Rho, J. S., 2005, The hydraulic characteristics of liquid shotcrete accelerators within cement system, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17, 1011-1018.
- Yang, W. H., Ryu, D. W., Kim, W. J., Park, D. C., Seo, C. H., 2013, An Experimental study on early strength and drying shrinkage of high strength concrete using high volumes of Ground Granulated Blast-furnace Slag(GGBS), *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 13, 391-399.