

산업부산물을 활용한 CSA 첨가량에 따른 광산 차수재 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Mine Liner According to the Contents of CSA Using Industrial Byproducts

강석표¹ · 이영훈^{2*} · 강혜주³ · 조성현⁴ · 조용광⁵

Suk-Pyo Kang¹ · Yeong-Hun Lee^{2*} · Hye-Ju Kang³ · Sung-Hyun Cho⁴ · Yong-Kwang Cho⁵

(Received February 25, 2019 / Revised March 12, 2019 / Accepted March 12, 2019)

In this study, to characterize the application of CSA and dihydrate gypsum Utilizing industrial byproducts, we investigated the characteristics of CSA and dihydrate gypsum to investigate the characteristics of Mine Liner according to the addition amount. As a result of compressive strength, length change and absorption rate of mining lime wastewater according to CSA addition amount, up to 30% of CSA showed a positive effect on shrinkage and absorption reduction effect as well as strength at initial age. However, due to excessive use of CSA 50%, it was reduced by 15% compared to OPC due to increase of absorption rate and decrease of cement amount due to over expansion rather than shrinkage compensation and void filling.

키워드 : CSA계 팽창재, 이수석고, 에트링가이트, 황산염

Keywords : CSA expansive additive, Dihydrate gypsum, Ettringite, Monosulfate

1. 서론

국내에는 1980년대 말 이후 임금상승, 매장량의 고갈 및 국제 광산물 가격하락 등 여러 가지 악재로 채산성이 악화되어 많은 폐광산들이 발생하였다. 폐광산의 경우 채굴공동이 불량하게 되며 지반침하를 초래하여 도로, 철도, 농지 및 일반 주거지 등에 막대한 손상을 입히게 된다(Kim et al. 2018).

폐광산의 채굴공동을 안정화시키는 방법으로 일반적으로 갱내 충전법이 사용되고 있으며, 갱내충전법은 폐석 및 모래를 이용하여 갱내를 충전하거나 폐석과 함께 시멘트, 플라이애쉬 등 첨가제를 혼합하여 충전하고 있다. 그러나 갱내충전을 위한 채움재는 광산폐기물인 잔광, 폐석, 광물찌꺼기들과 함께 충전되고 있다. 그로 인해 채굴시점으로부터 유출되는 갱내수, 폐석 및 광물찌꺼기는 우수 및 지하수와 접촉하여 침출수를 발생시키며 중금속이 용출되

어 토양오염뿐만 아니라 주변 수계와 지하수를 오염시켜 2차적 환경오염 문제를 유발하고 있다(Lee et al. 2012).

지하수 및 침출수 억제를 위한 하나의 방안으로서 충전층에 차수층을 설치하여 충전층으로부터 물질 유출을 억제하고 차수층의 재료가 갖는 유해 금속 및 유기물질 이동 억제 기능을 이용하여 2차적 환경오염을 초기에 예방할 수 있다.

광업표준진흥회의 광산폐기물처리지침(SPS KMISA R 0003 6267: 2015)에 의하면 차수재(liner and cover material)의 공법은 연직차수공법과 표면차수공법, 두 가지 방법이 일반적으로 쓰이고 있다. 연직차수공법은 강관, 강판 또는 콘크리트, 점토, 그라우팅 등으로 지반까지 연직 차수벽을 설치하여 오염수의 경로 차단 및 지하수의 이동을 억제하는 방법으로 이를 위한 고가의 장비를 보유하기 어렵고 전문 인력 수요 및 토질에 따른 경제성 변동이 큰 단점을 가지고 있다. 반면 표면차수공법은 매립지역 전체를 차수

* Corresponding author E-mail: yeonghun7631@daum.net

¹우석대학교 건축학과 교수 (Department of Architecture, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

²우석대학교 건설공학과 석사과정 (Department of Construction Engineering, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

³우석대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Construction Engineering, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

⁴한일시멘트 수석연구원 (Hanil Cement Co., Ltd., Chungcheongbuk-do, 27003, Korea)

⁵한일시멘트 연구원 (Hanil Cement Co., Ltd., Chungcheongbuk-do, 27003, Korea)

재로 완전히 덮여 차수하는 방법으로, 고가의 장비와 전문인력 수요가 필요 없으므로 막대한 공사비용을 절감할 수 있다. 그러나 표면차수 시 원지반과 차수재 사이에 경계면이 생기면 이 경계면 사이로 우수가 침투하여 차수재가 파괴될 수 있기 때문에 차수재의 수밀성은 중요한 요소로 자리 잡고 있다.

수밀성을 향상시키는 방안으로는 잠재수경성 반응이 일어나는 슬래그와 시멘트를 혼합하는 방법이 제시되고 있지만 슬래그가 첨가되는 양에 비례하여 초기 수화반응이 늦어져 응결 지연 및 초기 강도가 저하되는 문제점이 발생되고 있다. 고로슬래그 시멘트의 단점인 낮은 초기 강도를 보완을 위한 수단으로, 분말도 상향조정 외에 용해속도가 타석고에 비해 상대적으로 낮은 II형 불용성 무수 석고를 첨가함으로써 응결 후의 지속적인 Ettringite 수화물을 생성하여 낮은 초기 강도를 다소 보완시키고 있다. 이와 같은 II형 무수 석고(II-CaSO₄)가 고로슬래그 시멘트의 초기 강도에 기여한다는 것은 일반적인 사실이지만, 이에 반해 이수석고(CaSO₄ · 2H₂O)의 종류 및 첨가량에 의한 슬래그 시멘트의 물성 검토에 관한 연구는 미비한 실정이다(Kim et al, 2012).

한편, CSA(Calcium Sulfo Aluminate)는 석고 및 알루미늄질 원료를 소성하여 제조되는 콘크리트 및 모르타르용 팽창재로 Hauyune(C₄A₃S: 3CaO 3Al₂O₃ CaSO₄) 및 CaO 등의 성분으로 이루어져 있으며, 포틀랜드 시멘트에 C₃A와 석고를 적당량 혼합하여 반응시켰을 경우 수화반응 과정에서 미세한 침상결정의 고회산염 수화물인 Ettringite(3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O)가 생성된다. Sakai (1980)은 Ettringite가 초기 수화 6시간 이내에 최대치에 도달한 후 점차 Monosulfate(3CaO · Al₂O₃ · CaSO₄ · 12H₂O)로 변화한다고 한다. 그러므로 석고의 주 역할은 C₃A의 급결을 방지하여 시멘트의 응결을 조절하며, 그 외에도 초기에 C₃S의 수화를 촉진시켜 단기 강도의 향상, 또한 C₃A와 반응하여 생성된 Ettringite결정 성장 압으로 인한 건조수축의 저감 및 내화학적 향상 등의 목적으로 사용되고 있다. 이는 초기재령에서 팽창력을 발휘하여 경화체의

구조를 치밀하게 해주고 콘크리트 및 모르타르 제품의 수축균열을 방지해 준다.

본 연구에서 사용한 H사의 CSA는 성분과 성상이 유리하고 산업부산물을 선택적으로 사용하여 조합하는 원료의 수도 줄일 수 있는 CSA 크링카를 실공정 소성온도에서 제조하였으며, 소성온도는 1종 OPC 크링카의 합성온도 보다 비교적 저온인 약 1,200~1,300℃에서 제조한 CSA를 사용하였다. 기존 연구에 의하면 CSA 팽창재는 수화초기부터 팽창력에 영향을 미치는 육각주상 Ettringite 형태의 수화물 생성이 뚜렷함을 확인할 수 있으며, 경화체 조직 공극 부위에 Ettringite 수화물을 형성하여 시멘트 콘크리트의 건조수축 및 수축균열에 대한 결점을 개선 가능한 것으로 보고되고 있다(Lee et al, 2014). CSA와 석고는 적정 중량 미만일 경우 강도발현에 문제가 발생할 수 있고 초과할 경우 응결시간이 빠르고 과팽창으로 인해 흐름성, 작업성 및 표면마감의 용이성이 저하되기 때문에 이에 대한 적정 첨가량 제시는 CSA를 사용하는 데 기초적인 자료로 요구되고 있다.

본 연구에서는 산업부산물을 주원료로 활용하여 국내에서 생산한 CSA와 이수석고를 광산 차수재에 적용하기 위한 기초자료를 제시하고자 고로슬래그를 혼합한 시멘트 모르타르에 CSA와 이수석고 첨가량에 따른 차수재의 특성을 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

CSA 첨가량에 따른 차수재의 특성을 검토하고자 하는 실험계획을 Table 1에 나타내었으며 KS L ISO 679 「시멘트의 강도시험방법」에 준하여 실험을 실시하였다. 이를 위하여 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 물결합재비는 전체 배합에 대해 14%로 하였다. 이는 KS L ISO 679에서 모르타르 제조시 물결합

Table 1. Experiment plan and mix design

Type of binder	Unit weight(%)					W/B(%)	Superplasticizer(%)	Test items
	OPC ¹⁾	CSA ²⁾	DG ³⁾	Slag	Aggregate			
Plain	25	-	-	15	60	14	0.05	- Mortar flow - Compressive strength (3days, 7days, 28days) - Rate of length change - Absorption ratio
CSA10%	22.5	1.5	1					
CSA20%	20	3	2					
CSA30%	17.5	4.5	3					
CSA50%	12.5	7.5	5					

1) OPC : Ordinary portland cement, 2) CSA : Calcium Sulfo Aluminate, 3) DG : drystalline gypsum

재비는 50%로 규정하고 있으나 제조된 광산 차수재를 뿔칠재로 사용하기 위해 플로우의 값 200mm로 측정되는 OPC첨가량 및 유동화제를 Plain으로 설정하였다. CSA 및 이수석고의 첨가량은 6:4 비율로 시멘트양에 대하여 10, 20, 30, 50%씩 내할 첨가하였다. 유동화제는 흐름성을 용이하게 하기 위해 사용하였다. 혼합방법은 KS L ISO 679의 규정방법에 따라 모르타르 혼합기를 통해 1분 동안 혼합하였다. 실험항목으로는 플로우, 압축강도, 흡수율, 기공 특성, 수화특성을 실시하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 결합재

본 연구에서 사용한 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 그리고 석고의 물리·화학적 성질을 Table 2 및 Table 3에 나타내었다. 보통 포틀랜드 시멘트는 국내 S사에서 시판하고 있는 비표면적 3,144cm²/g, 밀도 3.15g/cm³인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고로슬래그 미분말은 비표면적 4,159m²/g, 밀도 2.90g/cm³인 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 석고는 비표면적 3,816m²/g, 밀도 3.12g/cm³인 이수석고를 사용하였다.

2.2.2 팽창재

광산 차수재의 초기강도 저하 문제와 수밀성 저하 문제를 해결하기 위하여 이수석고 및 CSA를 활용하여 차수재를 제조하였다. 먼저 CSA(Calcium Sulfoaluminate, 3CaO · 3Al₂O₃ · CaSO₄, C₄A₃S) 클링커를 합성하기 위한 출발원료로 Al₂O₃원으로는 화력발전소에서 발생하는 발전회를 사용하였으며, SO₃원으로는 탈황과정에서 발생하는 탈황석고를, CaO원으로는 1종 OPC 제조 및 석회산업에 사용되는 석회석을 사용하였으며 그 물성을 Table 4에 나타내었다.

Table 2. Physical properties and chemical composition of OPC and slag

Type of binder	Specific surface area(cm ² /g)	Density(g/cm ³)	Ig. loss	Chemical composition(%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2
Slag	4,159	2.90	0.03	33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	2.08

Table 3. Physical properties and chemical composition of drystalline gypsum

Type	Specific surface area(cm ² /g)	Density(g/cm ³)	Chemical composition(%)							
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
DG	3,826	3.12	1.5	0.3	0.4	66.1	0.5	0.1	0.05	30.2

CSA 크링카는 원료 조합물을 CaO:Al₂O₃:CaSO₄=3:3:1 비율로 혼합하여 실험실 대형전기로서 1,000~1,400℃의 여러 온도 범위로 합성하였으며, CSA 크링카의 조건을 만족하는 시료에 대해 실증화 플랜트(Pilot plant) 및 실공정 소성로서 대량 제조하여 만든 H사의 것을 사용하였다.

2.2.3 골재

본 연구에서 사용한 골재는 KS L ISO 679의 표준사를 사용하였다.

2.2.4 유동화제

광산 차수재의 작업성 및 유동성을 향상시키기 위한 유동화제(superplasticizer)는 폴리카르복시산 혼화제를 분말화시킨 제품으로 황백색을 띠며 수용액 1%에서 pH 4.2±1를 나타낸다.

2.3 실험방법

2.3.1 플로우

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 플로우는 KS L 5111 「시멘트 시험용 플로 테이블」에 의거하여 측정하였다. 기 준시험체인 Plain은 국토교통부의 터널표준시방서 슛크리트 플로우에 제시되고 있는 200±20mm를 Target flow로 설정하여 비교검토 하였다.

Table 4. Chemical compositions of raw Materials

Type	Chemical composition(%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	
CSA	CaO	9.93	1.68	0.65	45.49	0.01	2.73
	Al ₂ O ₃	53.04	28.18	7.09	1.23	0.24	0.58
	CaSO ₄	0.96	1.24	0.16	31.92	38.21	1.21

2.3.2 길이변화

광산 차수재의 건조수축 안정성을 확인하기 위해 길이변화 시험은 KS F 2424 「모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법」에 준하여 40×40×160mm의 각주 시험체를 타설한 후, 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%의 항온항습실에서 양생하여 제작한 후, Fig. 1과 같이 양단에 디스크를 부착하여 재령 1일에서의 측정값을 기준으로 하여 28일 동안 항온항습기에 양생했던 온도와 습도를 그대로 유지하여 컨택트 게이지를 사용하여 길이변화율을 측정하였다(Kim et al, 2018).



Fig. 1. Demec strain gauge

2.3.3 압축강도

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 압축강도는 KS L ISO 679에 의거하여 40×40×160mm의 몰드에서 제작하였으며 탈형 후 3, 7, 28일 간격으로 중앙에 하중을 두고 절단한 다음, 절단된 공시체 위에 정사각형 철제 후판을 두고 가력하여 쪼개진 두 개의 시편의 압축강도를 각각 측정하여 평균값을 구하여 산출하였다.

2.3.4 흡수율

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 흡수율은 KS F 2476에 의거하여 실시하였다. 먼저 공시체를 50×50×50mm 몰드에 제작한 다음 28일 동안 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%의 항온항습실에서 양생하여 제작한 후, 건조기에 80℃의 온도조건에서 24시간 건조하였다. 건조기에서 꺼낸 공시체의 최소 중량을 측정하고 20℃에서 24시간 동안 침지한 후 중량을 측정하여 다음 식(1)로 계산하였다.

$$\text{흡수율} = \frac{W_b - W_a}{W_a} \times 100 \quad (1)$$

여기서 W_a : 수중침지 전의 공시체의 중량(g)
 W_b : 각 수중침지 시간의 공시체의 중량(g)

2.3.5 기공특성

기공 측정 방법은 변화되는 압력에서 수은(Hg)이 시료에 침투되는 수은압입법을 통해 Pore Size를 분석하는 Pore Size Analyzer (Porosimeter)장비를 통하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 플로우

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 플로우 측정결과를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서는 뽕칠용 차수재를 고려하여 압송하기 위한 유동성을 확보하고자 목표 플로우를 200±20mm로 설정하였다. CSA 첨가량이 증가할수록 차수재의 플로우는 감소하고 있으며, 본 연구의 범위에서 CSA 첨가량 20%까지는 목표 플로우를 만족하였다.

플로우 측정결과 Plain에서는 217mm로 측정되었으나 CSA10%에서는 195mm, CSA20%에서는 180mm, CSA30%에서는 175mm, CSA50%에서는 165mm로서 CSA 첨가량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이는 CSA 첨가량의 증가와 더불어 이수석고 첨가량이 증가되면서 CSA와 이수석고의 반응에 따른 것으로 사료된다(Han et al, 2005). CSA계 급결재를 이용한 고로슬래그 시멘트의 초기수화 이론에 의하면 이수석고는 재결정화가 이루어지면서 C_4A_3S 와 석고

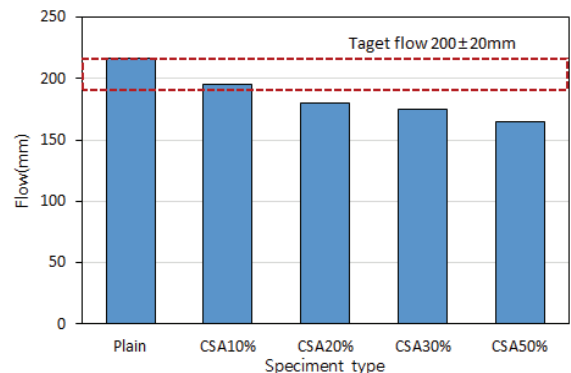
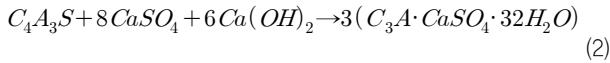


Fig. 2. Flow according to the CSA contents

의 반응으로 다음 식(2)와 같이 Ettringite가 반응 초기에 지속적으로 형성된다.



플로우의 저하는 이러한 수화과정에서 Ettringite의 형성을 위해 과량의 물이 소모되기 때문으로 본 연구의 범위에서는 광산 차수재로 활용하기 위한 작업성을 확보하기 위한 CSA 대체율은 20% 이내가 적절할 것으로 판단된다(Seo et al. 2012).

3.2 압축강도

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 압축강도 측정결과 및 Plain에 대한 압축강도비를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. CSA 첨가량이 증가할수록 광산 차수재의 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구의 범위에서 압축강도는 CSA 첨가량이 30% 이내에서 Plain와 비교하여 90% 이상 발현하고 있으나 CSA 첨가량 50%에서는 Plain와 비교하여 압축강도가 80%수준까지 감소하는 것으로 나타났다.

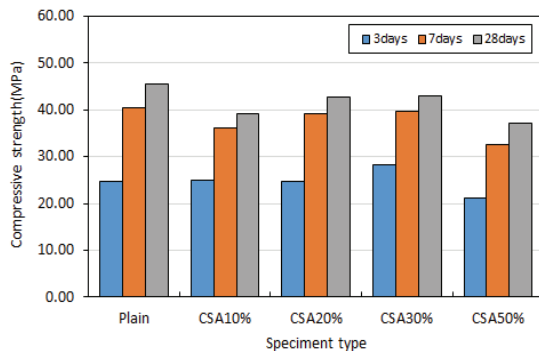


Fig. 3. Compressive strength according to the CSA contents

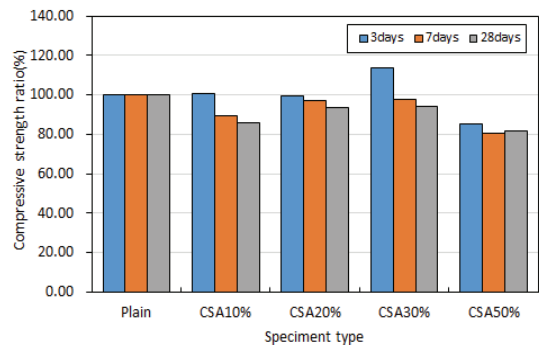


Fig. 4. Compressive strength ratio according to the CSA contents

로 나타났다. 그러나 재령 3일에서는 CSA 첨가량 30%까지는 오히려 Plain과 비교하여 동등 이상의 압축강도를 발현하고 있어 CSA는 초기강도 증진에 효과적인 것으로 나타났다.

CSA 첨가량에 따른 재령 3일의 압축강도는 Plain에서 24.8MPa, CSA10%에서 25.06MPa, CSA20%에서 24.75MPa, CSA30%에서 28.2MPa로 Plain과 비교하여 상대적으로 높은 압축강도를 발현하고 있다. 그러나 CSA50%에서는 21.2MPa로서 Plain과 비교하여 15% 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 CSA와 석고를 혼합하여 사용하게 되면 단독으로 사용하는 것보다 Ettringite와 Ca(OH)₂가 활발하게 생성되고 이로 인하여 수축 보상과 더불어 초기강도 증진에도 기여했기 때문으로 사료된다. 본 연구의 범위에서는 CSA30%까지는 초기강도에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 CSA50%에서는 CSA의 과량 사용으로 인하여 시멘트양 감소하여 수축보상 및 공극충진보다는 과팽창으로 인한 강도감소가 나타난 것으로 사료된다. 따라서 광산 차수재는 초기재령에서의 강도 및 수밀성 확보가 중요하기 때문에 CSA와 이수석고를 시멘트 대비 30% 수준에서 대체할 경우 효과적일 것으로 판단된다.

CSA 첨가량에 따른 재령 28일의 압축강도는 Plain에서 45.6MPa, CSA10%에서 39.2MPa, CSA20%에서 42.7MPa, CSA30%에서 43.1MPa, CSA50%에서 37.2MPa로 CSA를 첨가하게 되면 Plain과 비교하여 상대적으로 낮은 압축강도를 발현하고 있다. 재령 3일 압축강도에서 Plain과 비교하여 상대적으로 높게 나타난 CSA 첨가량 30%까지도 재령 28일에서는 낮은 것으로 나타났다. 이는 CSA 팽창재를 사용할 경우 초기 재령에서 Ettringite를 생성하게 되고 이로 인한 수축보상과 압축강도 증진을 나타내지만 28일 이후 장기재령에서는 효과를 나타내지 않는다는 기존 연구결과와 유사하다(Park et al. 2012).

3.3 길이변화

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 길이변화 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다. CSA 첨가량이 증가할수록 광산 차수재의 체적은 팽창하는 경향을 나타내었으며 본 연구의 범위에서는 CSA 첨가량 30% 이내에서 28일 길이변화는 0.1% 이하로 팽창하였으나 CSA 첨가량 50%에서는 0.3%까지 팽창하는 것으로 나타났다. 이는 CSA 첨가량에 따른 28일 길이변화 측정결과 Plain에서 0.27% 수축하였으나 CSA10%에서 0.03% 팽창, CSA20%에서 0.10% 팽창, CSA30%에서 0.11% 팽창, CSA50%에서 0.28% 팽창하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 CSA와 석고를 혼합하여 사용하게

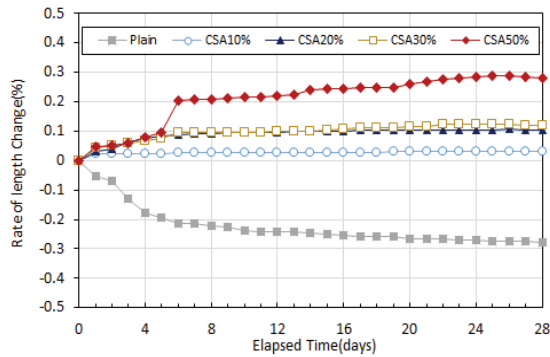


Fig. 5. Rate of length change

되면 단독으로 사용하는 것보다 Ettringite와 Ca(OH)₂가 활발하게 생성되고 이로 인하여 수화 초기에 팽창을 유발하게 된다는 기존 연구결과와 동일하게 나타났다(Sung et al. 2002). 본 연구의 범위 내에서는 CSA 첨가량 30%까지는 초기재령에서의 강도증가와 더불어 수축저감 효과가 있으나 CSA 첨가량 50%에서는 과팽창으로 인하여 초기재령에서의 강도저하가 유발된 것으로 사료된다.

3.4 흡수율

광산 차수재는 겔 공극, 기포에 의한 공극과 모세관공극, 삼투압 작용 등에 의해 수분이 침투하게 된다. 흡수율은 차수성을 가늠할 수 있는 중요한 인자로 알려져 있다. 광산 차수재의 내부로 침투되는 수분의 경우 각종 유해물질을 포함하고 있어 광산 차수재에 그대로 침투될 경우 환경오염을 유발할 수 있기 때문이다(Cho et al. 2002).

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 흡수율 측정결과를 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구의 범위에서는 CSA 첨가량이 30% 이내에서의 흡수율은 Plain과 비교하여 감소하였으나 CSA 첨가량 50%에서는 Plain과 비교하여 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

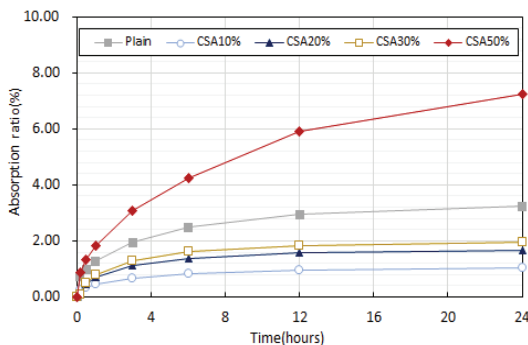


Fig. 6. Absorption ratio

CSA 첨가량에 따른 흡수율은 Plain에서 3.4%이었으나 CSA10%에서 1.2%, CSA20%에서 1.8%, CSA30%에서 2.1%로 나타나 Plain과 비교하여 상대적으로 흡수율이 감소하였다. 이는 CSA와 이수석과 Ettringite를 형성하면서 팽창되는데 그 과정에서 내부 조직이 치밀하게 형성되었기 때문으로 사료된다. 그러나 CSA50%에서 7.4%로서 Plain과 비교하여 흡수율이 2.2배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 압축강도와 길이변화에서도 언급한 바와 같이 CSA 첨가량 50%에서는 과량의 CSA 첨가로 초기재령에서 과도한 팽창이 일어남으로 인해 매트릭스 내 균열이 발생하여 흡수율이 증가한 것으로 판단된다(Joo and Lho 2015).

3.5 기공률

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 기공분포를 Fig. 7에 나타내었다. 기공분포는 CSA 첨가량 30% 이내에서는 유사한 경향을 나타내고 있으나 CSA 첨가량 50%에서는 직경 40~200nm의 모세관 기공량이 급증하는 것으로 나타났다. 이는 CSA 첨가량 50%에서는 과량의 CSA 첨가로 초기재령에서 과도한 팽창으로 매트릭스 내 균열이 발생하고 이로 인한 모세관 공극량이 증가하여 압축강

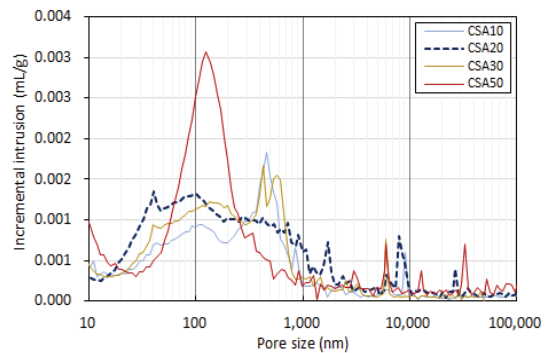


Fig. 7. Incremental void distribution volume

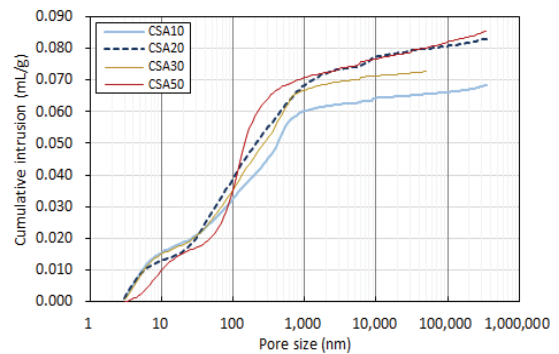


Fig. 8. Cumulative void volume

도가 저하되어 흡수율이 증가한 것으로 판단된다.

CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 누적 기공율을 Fig. 8에 나타내었다. 광산 차수재의 기공률은 CSA10%에서 0.068mL/g, CSA20%에서 0.083mL/g, CSA30%에서 0.073mL/g, CSA50%에서 0.085mL/g로서 CSA50%에서 가장 크게 나타났으나 CSA 첨가량에 따른 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 CSA와 이수석고를 광산 차수재에 적용하기 위한 기초자료를 제시하고자 CSA와 이수석고 첨가량에 따른 차수재의 특성을 검토하였으며 그 결과를 다음과 같이 나타내었다.

- 1) CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 플로우 측정결과 CSA 첨가량이 증가할수록 차수재의 플로우는 감소하고 있으며, 본 연구의 범위에서 CSA 첨가량 20%까지는 목표 플로우를 만족하였다.
- 2) 압축강도 측정결과 CSA 첨가량이 증가할수록 광산 차수재의 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구의 범위에서 압축강도는 CSA 첨가량이 30% 이내에서 Plain와 비교하여 90% 이상 발현하고 있는 것으로 나타났으며 초기강도 증진에 효과적인 것으로 나타났다.
- 3) 길이변화 측정결과 CSA 첨가량이 증가할수록 광산 차수재의 체적은 팽창하는 경향을 나타내었으며 본 연구의 범위에서는 CSA 첨가량 30%까지는 초기재령에서의 강도증가와 더불어 수축저감 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 4) 흡수율 측정결과 CSA 첨가량이 30%이내에는 Plain과 비교하여 감소하였으나 CSA 첨가량 50%에서는 Plain과 비교하여 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다. CSA 첨가량이 30% 이내에서는 CSA와 이수석고가 Ettringite를 형성하면서 그 과정에서 내부 조직이 치밀하게 형성되어 흡수율이 감소한 것으로 판단된다.
- 5) 기공분포는 CSA 첨가량 30% 이내에서는 유사한 경향을 나타내고 있으나 CSA 첨가량 50%에서는 직경 40~200nm의 모세관 기공률이 급증하는 것으로 나타났다. 이는 CSA 첨가량 50%에서는 과량의 CSA 첨가로 초기재령에서 과도한 팽창으로 매트릭스 내 균열이 발생하고 이로 인한 모세관 공극률이 증가하여 압축강도가 저하되어 흡수율이 증가한 것으로 판단된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단-탄소자원화 국가전략프로젝트사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2017M3D8A2086037).

References

- Kim, M.G., Kim, K.J., Jeong, G.C. (2018). Assessment of the cause and pathway of contamination and sustainability in an abandoned mine, *The Journal of Engineering Geology*, **28(3)**, 411–429 [in Korean].
- Lee, S.E., Park, S.J., Kim, H.S., Jang, H.S., Kim, T.H. (2012). A study on the model test for mine filling using coal ash, *Tunnel and Underground Space*, **22(6)**, 449–461 [in Korean].
- Kim, T.W., Hahm, H.G. (2012). Mechanical properties of the alkali-activated slag mortar with gypsum, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **16(3)**, 109–116 [in Korean].
- Sakai, E., Raina, K., Asaga, K., Goto, S., Kondo, R. (1980). Influence of sodium aromatic sulfonates on the hydration of tricalcium aluminate with or without gypsum, *Cement and Concrete Research*, **10(3)**, 311–319.
- Lee, H.W., Min, S.E., Lee, K.H., Kim, C.S., Eom, H.J. (2014). Characterization of high early strength type shrinkage reducing cement utilizing CSA expansion admixture of low-activity, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(2)**, 38–45 [in Korean].
- Kim, Y.U., Kim, D.B., Choi, S.J. (2018). An experimental study on the setting time and compressive strength of mortar using ferronickel slag powder, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **18(6)**, 551–558 [in Korean].
- Han, C.G., Lee, M.H., Park, Y.S., Pei, C.C. (2005). Physical properties of concrete with the contents of CSA expansive admixture, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **5**, 369–372 [in Korean].
- Park, C.B., Ryu, D.H., Seo, C.H. (2012). Properties of high volume mineral admixtures concrete using inorganic additives, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **28(3)**, 631–637 [in Korean].

Sung, C.J., Song, M.S., Lee, K.H., Han, C.G. (2002). Hydration of expansive materials with CSA-system, Journal of the Korea Concrete Institute, **14(5)**, 631-637 [in Korean].

Cho, Y.K., Nam, S.Y., Kim, C.S., Lee, H.W., Jo, S.H., Ahn, J.W. (2018). Evaluation of physical properties of mine polymer liner and cover material containing re-emulsification type EVA resin, The Polymer Society Of Korea, **42(4)**, 637-642 [in Korean].

Joo, M.K., Lho, B.C. (2015). Evaluation of properties of polymer-modified mortar with CSA, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **19(1)**, 35-44 [in Korean].

Song, H.S., Lee, C.Y., Min, C.S. (2007). Hydration of high volume mineral admixtures binder with kind of activators, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, **11(1)**, 85-94 [in Korean].

산업부산물을 활용한 CSA 첨가량에 따른 광산 차수재 특성에 관한 연구

본 연구에서는 산업부산물을 활용한 CSA와 이수석고를 광산 차수재에 적용하기 위한 기초자료를 제시하고자 CSA와 이수석고 첨가량에 따른 차수재의 특성을 검토하였으며 그 결과를 다음과 같이 나타내었다. CSA 첨가량에 따른 광산 차수재의 압축강도, 길이변화, 흡수율 측정결과 CSA30%까지는 초기재령에서의 강도증가와 더불어 수축 및 흡수율저감 효과에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 CSA50%에서는 과량 사용으로 인하여 수축보상 및 공극충진보다는 과팽창으로 인한 흡수율 증가와 시멘트양 감소로 인하여 OPC와 비교하여 15% 감소하였다.