CSA를 사용한 친환경 지반보수용 현장 기포콘크리트의 기초 특성 검토

§우양이* · 박근배* · 마영** · 송헌영***

*(주)에이지, ** 재인스기초건설(주), ***동부엔지니어링(주)

The Fundamental Properties of Foamed Concrete as the Eco-friendly Ground Repair System for Cast in Site Using the CSA

§Yang-Yi Woo*, Keun-Bae Park*, Young Ma** and Hun-Young Song***

*Research Center, AZ Co., Ltd. Chungcheongnam-do 33415, Korea

**Jaeins Foundation Construction Co., LTD. Songpa-gu, Seoul 05538, Korea

***Dongbu Engineering, 372, Hangang-daero, Yongsan-gu, Seoul 04323, Korea

요 약

본 연구는 시멘트 대비 산업부산물을 90% 이상 대체한 친환경 결합재를 이용하여 저강도·고유동을 갖는 지반보수용 기포콘크리트 소재를 개발하기 위한 연구로서, 산업부산물을 다량 활용시 발생하는 기포콘크리트의 초기 침하율 및 체적변화를 개선하기 위하여 CSA(Calcium sulfo aluminate)를 소량 대체하여 기초특성을 평가하였다. 기포콘크리트용 친환경 결합재 대비 CSA의 대체율은 2.5, 5, 10%로, 굳지않은 특성, 경화특성, 공극구조 및 수화물을 분석하였다. 실험결과 친환경 결합재 사용시의 높은 침하깊이를 CSA 2.5% 사용만으로도 개선할 수 있었으며, 그로인해 경화 후에도 타설된 시험체의 상중하의 중량편차도 개선되었다. CSA 첨가에 따라 공극구조도 작고 균일한 사이즈의 독립기포 형성에 기여하였으며, 초기강도는 개선되었다. 그러나 CSA의 혼입률의 증가에 따라 장기강도는 감소하였으나, 5% 이하를 사용할 경우 목표강도를 만족하였다. 이로써 산업부산물을 다량 활용한 친환경 결합재에 CSA의 2.5% 첨가만으로도 목표성능의 저강도 고유동을 갖는 지반 보수용 기포콘크리트 제조가 가능한 것을 확인하였다.

주제어 : 기포 콘크리트, 저강도 고유동 충전재, 순환 유동층 보일러 플라이애시, 급결제, 지반 보수제

Abstract

This study aimed to develop a foam concrete material for a ground repair system that has low strength and low fluidity by using an eco-friendly binder, which substitutes industrial by-products for more than 90% of cement. Basic properties were evaluated after substituting a small amount of calcium sulfo aluminate (CSA) for the binder to improve the sinking depth rate and volume change, commonly found when it had a large amount of industrial by-products. The substitution rates of CSA for the eco-friendly binder used for the foam concrete were 2.5, 5, and 10%. Fresh properties, hardened properties, pore structure, and hydrates were analyzed. Experimental results showed that using only 2.5% of CSA could improve the deep sinking depth which occurred when using an eco-friendly binder. As a result, the weight difference between the upper, middle, and lower parts of cast specimens was improved even after being hardened. The addition of CSA also contributed to the formation of small, uniformly sized closed pores and improved initial strength. However, when the proportion of CSA increased, the long-term strength decreased. However, it satisfied the target strength when 5% or less of CSA was used. The results of this study revealed

· Received : December 11, 2019 · Revised : February 10, 2020 · Accepted : February 14, 2020

§ Corresponding Author : Yang-Yi Woo (E-mail : wooyi@daum.net)

Department of R & D Center, AZ Co., Ltd., 26, Gwansangongdan-gil, Jupo-myeon, Boryeong-si, Chungcheongnam-do 33415, Korea
©The Korean Institute of Resources Recycling. 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.

that it was possible to manufacture foam concrete with low strength and high fluidity for repairing ground satisfying target qualities by adding 2.5% of CSA to the eco-friendly binder containing a large amount of industrial by-products.

Key words : foam concrete, CLSM(Controlled Low Strength Material), CFBC(Circulating Fluidized Bed Combustion) ash, quick-setting agent, ground repair system

1. 서 론

2017년 환경부가 발표한 전국 폐기물 발생량은 연간 총 1억5천톤 이상으로 이중 생활계 폐기물이 12.9%, 사업장 배출 폐기물이 39.8%, 건설폐기물이 47.3%를 점유한다. 이중 가연성 재료가 82%를 차지하는 생활폐기물과는 상반되게 사업장 폐기물은 불연성 재료가 75%, 건설폐기물은 99%에 달한다. 이와 같은 불연성 폐기물은 재활용되지 못하는 경우 대부분 매립되어진다¹⁾.

우리 인류가 매일 배출하는 폐기물의 양은 일천평의 대지 위에 17층 규모의 건물 높이와 같으며, 이에 세계는 지금 급증하는 쓰레기의 처리문제로 고심하고 있다. 급증하는 폐기물에 대한 해결책은 매립을 최대한 억제하고, 재활용을 적극적으로 실시하며, 배출량을 최소화하는 길뿐이다²⁾. 생활폐기물 및 건설폐기물의 재활용 용도는 이들 폐기물의 자원화를 위해 다방면의 연구가 진행되고 있지만, 재자원화 및 유효 활용되지 못하는 부산물들을 수용할 수 있는 활용처는 수용력 및 스펙트럼이 광범위한 건설산업이라 할 수 있다. 현재도 부산물의 다량이 토목공사용 재료 및 건축용 소재로 재활용되고 있다.

한편 건설산업 또한 환경문제에 자유롭지 못하다. 건설산업의 주요 재료인 시멘트 산업은 무분별한 채광 및 CO₂ 다배출 산업으로서 환경규제에 강화에 따른 업계의 고민은 깊어지고 있다. 따라서 시멘트 산업에서의 환경적인 문제 해결을 위해 시멘트의 원료 및 혼화재로서 산업부산물을 활용한 친환경 건설소재 연구 및 실용화가 활발해지고 있다.

최근 건설소재로서 시멘트의 사용량을 최소화하고 산업부산물의 활용율을 극대화하여 도로보수 및 연약지반의 보강재로 사용하는 CLSM(Controlled low strength material, 저강도 고유동 충전재)에 대한 연구가 2000년 초반 미국을 시작으로 국내에서도 2010년도부터 진행되기 시작하였다. CLSM의 주요 원료는 활용도가 낮은 산업부산물을 사용하는 것으로 원재료비 절감, 시공비 절감 등의 경제성 면에서 장점이 있으며, 무수축과 높은 충전

성을 갖는 시공이 가능한 것이 특징이다³⁾.

본 연구는 이와 같이 친환경 건설소재 및 공법 개발을 위하여 국내 철강 및 전력산업에서 발생하는 부산물을 OPC(Ordinary portland cement, 보통 포틀랜드 시멘트)에 90% 이상 대체하여 저강도·고유동의 선발포 기포 콘크리트를 제조하고, 이를 시공하기 위한 연구의 일환이다.

선행연구를 통하여 선발포 기포 콘크리트를 통한 저강도·고유동 지반보강재 배합 최적화를 완료⁴⁾하였으나, OPC의 다량을 초기 반응성이 낮은 산업부산물로 대체할 경우 침하에 의한 불안정한 체적안정성을 보인다.

기포콘크리트의 용액상태의 기포는 일반적으로 3단계로 변화하면서 파괴된다고 알려진다. 기포가 서로 연결된 부분 없이 구 모양을 형성하는 초기단계의 기포에서 기포 표면을 형성하고 있는 페이스트가 비중 차이로 아래 부분으로 흘러내리며 배수현상이 일어나 기포가 용액의 표면으로 이동하며, 최종적으로는 배수현상에 의해 표면의 기포들이 합체되어 다각형 구조의 기포로 변하며 사이즈가 증대된다⁵⁾. 따라서 기포와 혼합된 페이스트가 경화되기까지 기포는 상하부의 재료분리가 발생하고, 표면 기포의 결합을 통한 침하가 발생하게 된다.

이에 본 논문은 저강도·고유동 지반 보수용 배합에 빠른 경화를 통한 기포의 안정성을 확보하고, 체적 변화를 최소화하기 위하여 급결제로서 CSA(Calcium Sulfo Aluminate, Hauyne)를 일부 적용하여 저강도 고유동 지반 보수재의 품질기준을 만족하는 배합을 선정하고자 하였다. 또한 CSA를 사용하여 초기 강도를 확보할 경우 연약지반 보수재로 사용시 신속복구를 요하는 지반에 적용하여도 후속 공정을 위한 대기시간이 단축된다는 장점도 있다.

국내에서는 초속경 시멘트 원료로서 주로 CA(Calcium Aluminate)계와 CSA계가 일반화되었으나, 수화시 불안정성의 CAH 수화물을 생성하는 CA계 광물⁶⁾과 달리 물과 반응하여 팽창성의 에트린자이트를 형성하여 장기적인 물리성능 및 내구성이 우수한 CSA계의 사용율이 높다.

따라서 본 연구에서는 지반 보수용 현장 기포콘크리트

의 초기 경화촉진 및 체적안정성 확보를 위하여 CSA를 결합재에 소량 대체하여 지반보수를 위한 기포 콘크리트의 품질 특성을 평가하였고, 이를 친환경 소재를 이용한 지반안정과 공법용 소재로서 활용하기 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험의 친환경 지반보수용 현장 기포콘크리트 제조를 위해 사용된 기본 결합재는 선행 연구를 통해 선정된 AZ 배합(연구기관의 임시 제품명)을 사용하였다. AZ 결합재는 OPC 10% 미만에 고로슬래그(Ground granulated blast furnace slag, 이하 GGBS)와 플라이애시(Fly ash, 이하 FA), 순환유동층 플라이애시(Circulating fluidized bed combustion ash, 이하 CFBC ash)의 산업부산물을 90% 이상 사용하여 제조된 지반보수용 기포콘크리트를 위한 결합재이다. 결합재에 급결성을 부여하기 위하여 AZ 배합에 10% 이하의 CSA를 수준별로 첨가하여 실험하였으며, 첨가된 CSA를 포함한 모든 결합재의 산화물 조성을 Table 1에 나타내었다.

페이스트의 유동성 개선을 위하여 국내 'D'사의 고성능 감수제를 결합재량 대비 0.1% 사용하였고, 기포 및 페이스트의 재료분리로 인한 침강방지를 위하여 결합재의

0.01%의 침강방지제를 첨가하여 물결합재비 50%의 페이스트를 제조하였다.

기포 콘크리트의 공극을 형성하기 위한 기포제는 안정적인 기포 형성을 위하여 pH 7±1, 비중 1±0.05, 고형분 함량 3%를 갖는 국내 'H'사의 독립 기포용 기포제를 사용하였다.

페이스트와 기포의 사용 비율은 페이스트 용적 대비 140%의 선발포 폼을 혼합하여 기포콘크리트 슬러리를 제조하였다.

2.2. 실험계획 및 방법

2.2.1. 실험계획

지반보수용 현장 기포콘크리트의 CSA계 급결제 사용에 따른 기초특성 평가를 위한 실험계획을 Table 2에 나타내었다. 실험의 변수는 기포콘크리트용 페이스트의 결합재 타입으로서, Plain 배합으로 보통포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement, 이하 OPC) 100%와 지반보강재용 최적배합인 AZ100%(선행연구를 통해 선정된 배합⁴⁾), 여기에 CSA를 2.5%, 5%, 10% 혼합한 총 5수준의 결합재를 이용하여 제조된 기포 콘크리트의 굳지않은 특성 및 경화특성을 각각 측정하였다.

2.2.2. 시험체 제작 및 측정방법

기포콘크리트는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 기포 제조

Table 1. Chemical composition of the binders used in paste(by XRF)

Oxide composition(wt.%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Ig.loss	Etc.	SUM
GGBS	32.0	13.7	0.9	43.2	3.4	2.3	0.5	0.4	0.0	2.1	1.5	100
FA	56.0	13.2	8.9	5.2	1.2	1.0	2.8	0.6	1.5	8.2	1.4	100
CFBC ash	37.6	18.8	4.3	14.1	3.6	2.3	1.2	3.1	0.6	13.0	1.4	100
CSA	24.3	7.5	3.1	53.4	4.3	3.7	1.0	0.6	1.2	-	0.9	100

Table 2. Experiment plan

Test levels		Test items
Plain	OPC100%	<ul style="list-style-type: none"> • Flow(KS F 4039) • Unit weight(paste, foam concrete)(KS F 2459) • Porosity at fresh state(KS F 2459) • Setting time of paste(KS L ISO 9597) • Sinking depth(KS F 4039) • Compressive strength(KS F 2459) • Micro structure and hydrates(by SEM & XRD)
Base	AZ100%	
CSA	2.5%, 5%, 10%	

기를 통해 선발포 된 기포를 별도 믹싱된 슬러리 상태의 페이스트와 함께 믹싱한다. 믹싱된 슬러리 상태의 기포콘크리트를 굳지않은 상태에서 유동성 및 단위중량을 측정하고, 시험체를 성형하여 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 습도 60%의 항온항습실에서 재령에 따라 기건양생 후 시험 항목별로 측정된다.

측정항목으로는 굳지않은 상태의 flow와 단위용적중량, 응결시험을 측정하였다. 기포 콘크리트용 flow는 KS F 4039에 따라 측정되었으며, 단위중량은 기포가 혼합되지 않은 페이스트와 기포의 단위용적당 중량을 각각 구하고, 믹싱된 기포콘크리트의 단위중량을 측정하여, 슬러리 상태의 기포콘크리트의 기포율을 계산하였다. CSA 함량에 따른 작업성 및 초기 응결시간을 평가하기 위한 시험은 KS L ISO 9597에 따라 기포를 혼합하지 않은 페이스트를 이용하여 초결 및 종결시간을 측정하였다.

기포 콘크리트의 침하깊이 측정은 KS F 4039에 준하여 안지름 약 145mm, 높이 300mm인 투명 아크릴 용기에 시료를 상부까지 붓고 2시간 후의 상부 침하 깊이의 최대값을 1mm 단위까지 측정하였다.

경화된 기포 콘크리트의 시험체 위치에 따른 기포의 분리와 단위중량을 측정하기 위한 시험체를 Fig. 2와 같이 제작하였다. 양생된 지름 10cm 실린더형 시험체의 상중하를 높이 5cm로 잘라 단면을 폴리싱하여 24시간 이상 100°C 의 오븐에서 향량이 될 때까지 건조 후 각 위치별 절건밀도를 측정하여 비교하였다.

경화된 기포 콘크리트 시험체의 압축강도 시험은 KS F 2405에 준하여 $\varnothing 10\text{cm}\times 20\text{cm}$ 의 실린더 몰드에 제작된 시험체를 재령 1, 3, 7, 28일에 각각 측정하였다.

각 시험체의 재령 28일 시험체를 대상으로 공극구조와 수화물 분석을 위하여 체코 Tescan 사 MIRA LMH 모델의 고분해능 주사전자 현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope)과 일본 Rigaku 사 MiniFlex600 모델의 X-선 회절 분석기(X-ray Diffractometer)를 사용하였다.

Fig. 1. Making process for pre-foaming foam con..

Fig. 2. Specimen for unit weight according to a section.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 굳지않은 기포콘크리트의 특성

Fresh 상태에서의 기포 콘크리트 슬러리의 특성을 Table 3에 나타내었다.

첫 번째 굳지않은 특성으로 기포 콘크리트의 유동성 평가를 위한 flow 측정 결과 OPC의 flow가 215mm 이며, 지반보수재 기본 배합인 AZ100은 195mm로 10%의 유동성이 감소하였다. AZ 배합은 초기 반응성이 낮은 고로슬래그와 구형 입형으로 유동성 증대 효과를 갖는 FA를 사용하였음에도 불구하고 OPC 시험체 대비 오히려 유동성은 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 기포콘크리트 슬러리의 단위용적에 기인된 것으로, 페이스트 슬러리 용적대비 모든 시험체에서 140%의 폼을 혼합하였음에도 불구하고

Table 3. Properties of foam concrete at fresh state

	Flow (mm)	Foam con. Weight(kg/L)	Paste weight (kg/L)	Matrix ratio (%)	Porosity (%)	Foam ratio (paste vol.%)	Sinking Depth (mm)
OPC100	215	0.694	1.805	38.5%	61.5%	160.0%	10
AZ100	195	1.061	1.700	62.4%	37.6%	60.2%	12
CSA2.5	185	0.988	1.691	58.4%	41.6%	71.2%	0
CSA5	175	1.111	1.700	65.4%	34.6%	53.0%	0
CSA10	150	1.150	1.699	67.7%	32.3%	47.7%	0

Fig. 3. Setting time according to the CSA content.

OPC 시험체는 오히려 기포의 비율이 혼합과정에서 160% 까지 증가한 반면, AZ를 기본배합으로 한 모든 배합에서 급격히 감소한 것을 볼 수 있다. 기포의 감소로 인하여 전체 시험체 내의 기공률 또한 감소하고, 그로인하여 단위 중량 또한 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

이는 Table 1에 나타난 바와 같이 FA 및 CFBC ash는 높은 강열감량을 갖기 때문에 분석된다. FA는 활용도가 낮은 비정제 플라이애시를 사용하였고, CFBC ash는 800-900°C로 상대적으로 낮은 소성온도에 따른 미연탄 소분이 다량 포함되어 있다. 기존 문헌에 따르면 미연탄 소분은 내부의 미세한 공극의 존재에 의해 기포를 흡착한다 보고된다⁵⁾. 그로인해 기포가 흡착되어 급격히 낮아진 소포율은 기포에 의한 볼베어링 효과의 유동성 증대 효과도 감소시켜 결과적으로 flow 값을 낮추는 영향을 보인다.

CSA 함량에 따라서는 초기 반응을 통한 응결로 혼입량이 증가할수록 유동성 및 작업성에 악영향을 준다. 이러한 영향은 Fig. 3의 응결 시험 결과에서도 확인할 수 있다.

OPC의 일반적인 초결시간의 기준은 60분 이상이며, 실험에 사용된 'H'사의 시멘트 성적서상 초결시간은 190분인 반면, OPC 함량이 낮고 잠재반응성을 갖는 산업부산물을 다량 활용한 AZ100% 시험체는 초결이 530분으로 매우 느린 초결로 인하여 기포 콘크리트의 침하를 유발한다. 그러나 CSA를 사용할 경우 2.5%의 사용만으로도 초결 및 종결시간은 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. CSA 사용량 2.5%, 5%, 10% 사용에 따라 초결시간은 60분, 43분, 20분이며, 종결 또한 85분, 70분, 30분으로 2시간 이내 모두 종결을 보여 재료의 분리 및 시간에 따른 기

Fig. 4. Sinking depth according to the binder type.

포의 소실 방지에 기여할 수 있을 것이라 판단된다. 산업부산물을 다량 함유하는 Base 배합에 CSA를 사용할 경우, 굳지않은 상태의 잠재반응성 페이스트 내부에 빠른 속도로 에트린자이트를 생성 및 분포시켜 유동성이 감소된다. 또한 Base 내에 다량 포함된 고로슬래그 미분말은 잠재수경성 재료로서 알칼리 또는 황산염에 의해 자극되어 수화되는 재료로서, CSA에 포함된 Sulfur 이온과 알칼리성 분위기에 자극되어 반응을 통한 응결은 더욱 촉진된다^{7,8)}.

Table 3과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 그에 따른 침하깊이 측정결과에서도 CSA의 초기 반응을 통한 응결시간이 영향을 준 것을 확인할 수 있다. 기포 침하방지제를 사용하였음에도 OPC100 및 AZ100 시험체에서는 KS F 4039의 기준 침하깊이인 6mm를 초과하는 10mm 이상의 침하깊이를 보인다. 그러나 CSA를 2.5%만 사용하여도 침하깊이는 0으로 안정적인 체적변화율을 보여준다. 또한 에트린 자이트 생성의 장기적인 수축보상 효과로 체적안정성 또한 확보가 가능할 것이라 판단된다.

3.2. 경화된 기포콘크리트의 특성

CSA 혼입량에 따른 압축강도와 재령 28일의 단위용적 중량을 Fig. 5에 나타내었다.

문헌에 의하면 저장도 고유동 충전재(CLSM)의 강도는 재령 28일 양생 후 0.1~0.5MPa 정도이면 지하 공동 충전재로서 충분하다고 알려져 있다⁹⁻¹¹⁾. 따라서 친환경 결합재를 사용한 본 현장 기포 콘크리트의 압축강도는 1MPa 이상이면 충분한 것으로 판단되어 1MPa를 목표강도로 설정하였다. 그러나 CSA 급결제를 사용하여 초기 강도를 확보할 경우 후속 공정 단축이 가능하며, 긴급복구용으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 5. Compressive strength and unit weight according to the binder types.

실험결과 동일한 조건에서 결합재로 OPC를 100% 사용할 경우 재령 28일 강도는 2.6MPa를 발현한다. 그에 대비 산업부산물이 90% 이상 대체된 AZ100 시험체의 경우 오히려 OPC 시험체보다 높은 강도를 발현한다. 이는 기포의 소포로 OPC 대비 상대적으로 낮은 공극률에 의한 겉보기 밀도에 기인한다. 그러나 AZ 시험체는 1일의 초기 강도 발현 및 시험용 몰드의 탈형이 불가능할 정도로 후속 작업성이 떨어졌다. CSA를 사용할 경우 AZ100 시험체와 절건밀도는 유사한 수준을 보이나, 초기 강도 및 탈형 등을 위한 강도가 발현되는 것을 볼 수 있다. CSA를 2.5% 사용한 시험체 또한 탈형은 가능하였으나, 초기 헨들링 강도는 확보되지 못하여 강도 측정은 불가능하였다.

CSA는 OPC와의 혼합에도 강도저하가 발생하지 않는다고 보고되지만, AZ100 시험체 대비 CSA 첨가에 따른 강도저하 현상은 시험체 제작 과정 중에서의 급격히 발생한 응결로 인하여 강도저하가 발생한 것이라 판단된다. 속경성 재료를 이용할 경우 시험체 성형 전의 응결은 오히려 생성된 수화물 매트릭스가 성형과정에서 파괴됨으로써 강도에 악영향을 미친다고 보고된다. 그러나 CSA를 5% 사용한 시험체에서 0.5MPa의 초기강도를 보여 문헌에 의한 CLSM 강도를 만족하였으며, CSA 2.5% 혼합 시험체에서도 재령 28일 강도 또한 목표 강도인 1MPa를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

경화 전 페이스트의 침하 및 기포의 상승으로 인한 시험체 상하부의 재료분리를 판단하고자 경화 시험체를 대상으로 상,중,하로 분류하여 단위중량을 측정하여 비교하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. OPC100 시험체 대비 AZ100 시험체는 상대적으로 높은 상,중,하 단위중량의

Fig. 6. Unit weight according to the binder types.

표준편차를 보인다. 그러나 CSA를 첨가할 경우 첨가량의 증가에 따라 표준편차가 낮아져 균일한 단위중량값을 보인다. 특히 CSA 첨가에 의해 상중하의 중량차는 0.45% 미만으로 낮은 차이를 보이는 반면, AZ100 시험체는 1.5%로 큰 차이를 보인다. 또한 CSA를 사용하지 않은 OPC100과 AZ100 시험체 모두 시험체 상부 면에서 기포의 분리로 인해 다소 낮은 단위중량을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 침하깊이의 결과 값과도 동일한 경향을 보이고 있다. 따라서 경량기포 콘크리트의 초기 시험체의 기포의 분리 저항성 및 침강방지, 체적안정성에 CSA의 첨가가 2.5% 혼합만으로도 효과를 발현하는 것을 확인하였다.

3.3. 경화된 기포콘크리트의 공극 및 수화물 분석

경화된 기포 콘크리트의 CSA 첨가에 따른 공극의 형상을 SEM을 이용한 이미지로 Fig. 7에 비교하여 나타내었다.

공극의 사이즈는 OPC100 시험체와 AZ100 시험체 모두 1mm 이상의 상대적으로 큰 공극을 가지며, CSA 첨가량이 증가할수록 공극의 사이즈는 감소하고, 공극의 형상 또한 독립기포에 가까운 것을 볼 수 있다. OPC100 및 AZ100 시험체의 경우 페이스트가 경화하기까지 소요되는 시간동안 기포는 점차 결합하여 크기는 증가하고 연속 공극을 형성하게 된다. 그와 반대로, CSA를 첨가한 시험체에서는 초기 생성된 기포의 크기를 유지하여 기포의 크기가 균일하고 독립적으로 형성되어진다.

각 시험체의 연속기포 및 독립기포 분포의 이미지 구분을 용이하게 하고자 공극내 백색 필러 충전을 통하여 매트릭스와 공극의 구분을 명확화 한 이미지를 Fig. 8에 나타

Fig. 7. Pore structure of foam concrete by SEM($\times 50$). Fig. 9. Hydrates of foam concrete by SEM($\times 5,000$). Fig. 8. Pore structure of foam concrete by microscope($\times 20$).

내었다. SEM 이미지보다 쉽게 연속기포 및 독립기포의 유무를 확인할 수 있다. SEM 이미지와 마찬가지로 OPC 만을 사용한 시험체에서는 경화시까지 결합된 공극으로 대부분 연속공극을 형성한 것을 볼 수 있으며, AZ 시험체는 연속공극을 형성하나, 소포에 따른 매트릭스 두께가 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다. 또한 CSA 첨

가량이 증가할수록 기포의 사이즈는 작아지고, 독립기포를 형성한 것 또한 뚜렷히 확인할 수 있다.

경화된 기포 콘크리트의 수화물 이미지를 Fig. 9에 나타내었다.

OPC100 시험체는 일반적으로 알려진 바와 같이 재령 28일에 C-S-H 수화물 및 판상형의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. AZ100 시험체의 경우 OPC 사용량을 최소화하고 잠재수경성 및 포졸란 반응성을 갖는 GGBS와 FA가 다량 포함되어 대부분 C-S-H 수화물을 형성하고 있다. AZ시험체에 CSA를 첨가한 시험체는 첨가량이 증가할수록 침상형의 에트링자이트가 곳곳에 생성된 것을 볼 수 있다.

또한 AZ 기본 배합을 이용한 시험체에는 CFBC ash가 포함되어 생석회에 의한 미셀(micells)구조¹²⁾를 이루고 있는 것을 Fig. 10의 (a)와 (b)에서 확인할 수 있다. CSA를 사용한 경우 이러한 미셀(micells)구조와 에트링자이트의 생성으로 초기 압축강도 개선에도 효과가 있다. 그러나 미셀막 구조에 의한 수화물 관찰이 어려움에 따라, BSE(Backscattered electron)를 이용하여 이미지화한 결

Fig. 10. Unhydrated particles by BSE($\times 5,000$).

Fig. 11. Hydrates of foam concrete by XRD.

과 Fig. 10의 (c), (d)와 같이 미세구조 내부에 무수한 미수 화입자를 포함하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 OPC의 광물 대비 AZ를 구성하는 재료들이 반응성이 낮기 때문에, 이러한 미수화된 입자는 장기적인 수화를 통한 포졸란 반응으로 강도발현에 기여할 것이라 기대된다.

수화물 분석을 위해 XRD를 통한 수화물 피크를 확인하였고, Fig. 11에 나타내었다. SEM 이미지에서 확인한 바와 같이 OPC100 시험체는 일반적인 C-S-H와 CH의 피크가 디텍팅되었으며, AZ를 사용한 시험체에서는 미수화

된 입자들에 의해 SiO_2 피크가 높게 나타났다. 그러나 CSA의 첨가에 생성된 에트린자이트는 SEM 이미지를 통해서 일부 확인하였으나, 생성량이 미량이기 때문에, 뚜렷한 피크로서 디텍팅되지는 않았다. 이는 수화물 대비 뚜렷한 결정상을 갖는 SiO_2 의 피크에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 CSA 첨가량에 따른 XRD의 그래프상의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다.

4. 결 론

본 연구는 저장도 · 고유동 지반 보수용 현장 기포콘크리트의 기포 안정성 및 체적 안정성 확보를 위하여 CSA를 소량 첨가함으로써, 친환경 소재를 활용한 지반안정화 공법용 소재를 개발하기 위한 기초연구이다. 본 연구의 실험결과를 토대로 얻어진 결론은 아래와 같다.

- 1) 동일한 기포율을 사용한 시험체라도 사용된 결합재마다 기포 콘크리트 슬러리의 유동성은 차이를 보인다. OPC만을 사용한 시험체 대비 산업부산물을 다량 활용한 AZ100 배합은 미연탄소의 영향으로 낮은 기포율과 그로인한 높은 단위용적, 기포의 감소로 인한 볼베어링 효과 저하로 유동성 또한 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) AZ 기본배합에 CSA 소량 대체에 따른 기포콘크리트의 굳지않은 특성 평가 결과 첨가량이 증가할수록 빠른 초기 응결속도로 인하여 시간에 따른 기포의 소실에 영향을 준다. 그로인하여 CSA를 2.5%만 사용하여도 침하깊이가 개선되어 굳지않은 기포콘크리트의 체적안정성을 확보한다.
- 3) 경화 기포 콘크리트의 특성 평가 결과 OPC시험체 대비 AZ100 배합에서 기포의 소실에 따른 겉보기 밀도의 증가와 그에 기인하여 압축강도는 다소 높게 나타났다. CSA 대체량이 증가할수록 초기 압축강도는 증가하나, 시험체 성형중의 응결에 의한 수화물의 파괴로 장기강도는 오히려 감소하는 현상을 보인다. 그러나 CSA 5% 이하 혼입 시험체는 저장도 · 고유동 지반 보강재를 위해 설정한 1MPa 이상의 목표강도를 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 경화된 시험체를 대상으로 기포의 분리에 의한 시험체의 상,중,하의 중량비교 차를 비교한 결과, CSA 첨가율이 높아질수록 초기 빠른 응결에 의한 기포의 안정화로

상,중,하 시험체 중량의 편차가 낮아지는 것으로 나타났다. CSA를 사용하지 않은 시험체는 하부 대비 상부의 겉보기 밀도가 다소 낮은 것을 볼 수 있다.

- 5) 경화된 기포콘크리트의 공극구조 분석결과, CSA 첨가량의 증가에 따른 응결시간이 빠를수록 기포의 결합이 적어 독립기포의 형상을 보이고, 기포의 사이즈가 작으면서 균일하게 나타났다.
- 6) 수화물 분석 결과 친환경 결합재를 사용한 시험체에서 전체적인 C-S-H 수화물이 발견되었으며, CSA 첨가량이 증가할수록 에트린자이트의 생성을 확인할 수 있었다. 이는 장기적인 내구성 및 체적안정성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부의 지원으로 수행한 사업(18CTAP-C143696-01-000000)을 기반으로 하였으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Korea Waste Association, 2017 : The Present Status of Waste Emission and Treatment in Korea.
2. Seunghyun, Lee, 2011 : Importance of the environment and recycling, www.ywca.or.kr >magicboard>labray.
3. ReSEAT Analysis Report, 2005 : Application of CLSM in Japan.
4. Yang-yi, Woo, Keun-bae, Park, 2019 : Study on optimum mixture of industrial by-products for lightweight foamed filler production by mixture experimental design, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 7(1), pp.37-43.
5. Jinman, Kim, Eungu, Kwank, Kwangchin, Oh, et al., 2011 : Properties of Bubble According to Types and Concentrations of Concrete Foaming Agent, Journal of the Korea Concrete Institute, 23(2), pp.151-158.
6. Sunmi, Choi, Jinman, Kim, Dongyeop, Han, et al., 2016 : Hydration properties of ladle furnace slag powder rapidly cooled by air, Construction and Building Materials, 113, pp.682-690.
7. L, Coppola, D, Coffetti, E, Crotti, et al., 2018 : CSA-based Portland-free binders to manufacture sustainable concretes for jointless slabs on ground, Construction and Building Materials, 187, pp.691-698.
8. Xiaolu Guo, Huisheng Shi, Wenpei Hu, Kai Wu, 2014 : Durability and microstructure of CSA cement-based materials from MSWI fly ash, Cement and Concrete Composites, 46, pp.26-31.
9. Hayashido, Yasushi, Shinohara, Masaki, Yoshitake, Hideki, 2013 : Development of filler for underground cavities "SMART GROUT" using granulated blast furnace slag, JFE Research Journal 31, p.58.
10. Jeong-Ryol, Shin. Jae-Im, Park, An-Ho, Lee, et al., 2015 : Characteristics of light weight mixed soil using eco-friendly solidification material, Autumn Conference of the Korean Society of Railway.
11. Yong-Sun, Ryu, Jin-Gyu, Han, Woo-Ri, Chae, et al., 2016 : Development of rapid hardening backfill material for reducing ground subsidence, J. Korean Geosynthetics Society, 14(3), pp.13-20.
12. Guanghong, Sheng, Qin, Li, Jianping. Zhai, 2012 : Investigation on the hydration of CFBC fly ash, Fuel, 98, pp.61-66.

우 양 이

- 군산대학교 공과대학 신소재공학과 공학박사
- 현재 ㈜에이지 부사장 / 기술연구소장 / 기술사

박 근 배

- 충남대학교 산업대학원 석사
- 현재 ㈜에이지 수석연구원

마 영

- 건국대학교 농공학과 학사
- 현재 재인스기초건설(주) 상무이사

송 현 영

- 중앙대학교 건설사업관리(CM) 석사
- 현재 동부엔지니어링(주) 기술연구소 책임연구원