

알칼리계 활성화제의 종류 및 첨가량이 고로슬래그-제올라이트 지오폐리머 페이스트의 탄소포집에 미치는 영향에 관한 연구

Influence of Alkali Activator Type and Amount of Addition on CO₂ Uptake of GGBFS Geopolymer Pastes Containing Zeolite

박장현¹ · 김효민^{2*}

Jang-Hyun Park¹ · Hyo-Min Kim^{2*}

(Received March 21, 2023 / Revised March 31, 2023 / Accepted March 31, 2023)

In this study, the variations in CO₂ uptake according to the type and amount of alkali-based activator (Ca(OH)₂, CSA) of geopolymer paste were evaluated. As the amount of activator added to the geopolymer paste increased, the fluidity of the paste is decreased and the compressive strength increased. According to the type of activator, it was confirmed that the addition of Ca(OH)₂ had a greater effect on improving the compressive strength than CSA. As a result of changes in chemical properties according to carbonation curing, the amount of C-S-H and C-A-S-H gels produced before carbonation increased as the amount of activator increased, and amount of CaCO₃ produced after carbonation increased. The reactivity of the blast furnace slag and zeolite increased due to the addition of the activator, and the reactivity tended to increase as the amount of addition increased. As a result of CO₂ uptake, 10.3 wt% when Ca(OH)₂ 10 % was added and 8.77 wt% when CSA 10 % was added was confirmed. It increased by 421 % and 388 % respectively, compared to the case where no activator was added.

키워드 : 자극제, CSA, 소석회, 탄산화, 탄소포집

Keywords : Activator, Calcium sulfo-aluminate, Calcium hydroxide, Carbonation, CO₂ uptake

1. 서론

콘크리트에 사용되는 대표재료인 보통 포틀랜드 시멘트 (Ordinary Portland Cement, OPC)는 제조과정에서 1톤의 시멘트를 제조시 약 0.8톤의 이산화탄소(CO₂)를 배출하는 것으로 알려져 있다(Gartner et al. 2004). 이에 따른 콘크리트 제조과정에서 발생하는 CO₂는 전체배출량 중 8 %에 해당하는 것으로 알려져 있으며, 콘크리트 제조과정에서 CO₂의 배출량을 감축하고, 순환자원 등을 활용한 친환경 콘크리트를 개발하기 위한 전세계적인 노력이 지속적으로 진행 중에 있다(Gartner and Quillin 2007; Kwon and Wang 2019; Wang and Lee 2019).

보통 포틀랜드 시멘트를 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS), 플라이애시(Fly-Ash, FA)와 같은 산업부산물로 대체하여 콘크리트 제조과정에서 발생하는 이산화탄소 발생부하를 줄이고, 친환경성을 높이는 기술은 지속적으로 연구되어 널리 이용되고 있다. 최근에는 CO₂ 부하 저감을 위하여, 시멘트를 사용하지 않는 지오폐리머(Geopolymer) 또는 알칼리 활성 슬래그(Alkali Activated Slag) 콘크리트에 관한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Ryu et al. 2013; Amer et al. 2021).

철강제조공정의 산업부산물인 고로슬래그 미분말은 Ca 성분을 다량 함유하고 있어 지오폐리머 제조에 사용할 경우 반응성을 증진시키고 경화체의 성능을 향상시킬 수 있으며, 반응 초기에 보통

* Corresponding author E-mail: hyominkim@kict.re.kr

¹한경대학교 산학협력단 스마트융합기술연구센터 선임연구원 (Smart Convergence Technology Institute, Hankyong National University, Gyeonggi-do, 17579, Korea)

²한국건설기술연구원 건축연구본부 수석연구원 (Department of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

Copyright © 2023 by Korean Recycled Construction Resources Institute

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

포틀랜드 시멘트의 수화생성물과 유사한 C-S-H gel 및 C-A-S-H gel을 생성하는 것으로 알려져 있다(Guerrieri et al, 2009; Nath and Kumar 2013).

또한, 제올라이트는 알루미늄, 실리콘으로 골격이 형성되어 있어 양이온 교환 및 분자체로서의 특징을 통해 촉매제, 흡착제 등으로 사용되고 있는 포졸란계 천연광물이다. 콘크리트의 혼화재료로 이용하고자 하는 연구가 시도되어 왔으며(Jo et al, 2011; Yoon and Lee 2020), 특히 CO₂ 흡착효과를 이용한 2차 제품 적용연구가 활발히 진행 중에 있다(Yoon et al, 2021). 그러나 보통 포틀랜드 시멘트를 알루미늄 실리케이트계 산업부산물인 고로슬래그 미분말로 100 % 치환하여 사용하는 경우 시멘트를 대체할 수 있는 물성이 나오지 않아, 지오폐리머의 품질을 효과적으로 향상시키기 위한 연구들이 수행 중에 있으며, 고농도 알칼리 용액을 활성화제로 사용하는 경우가 대표적이다(Ryu et al, 2013; Amer et al, 2021).

본 연구에서는 고로슬래그 미분말-제올라이트 지오폐리머의 알칼리 활성화제 첨가량에 따른 물리적 성능과 CO₂ 양생에 의한 CO₂포집성능을 비교 평가하기 위하여, 강알칼리계이면서 Ca를 다량 함유하고 있는 Ca(OH)₂와 CSA를 활성화제로 사용하였으며, 페이스트 시험체를 제작하여 28일간 표준양생을 실시한 후 CO₂ 양생을 통한 탄산화를 실시하였다. 이후 활성화제 첨가량에 따른 압축강도를 평가하고, 이산화탄소 흡수성능을 평가하기 위하여 열중량 분석을 실시하였으며, 그 결과를 활용하여 CO₂ 흡수량(CO₂ uptake)를 계산하고 비교평가 하였다.

2. 실험 개요 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서는 KS F 2563에 명시되어 있는 비표면적 4000 cm²/g 고로슬래그 미분말 3종과 경복 포항에서 채광된 비표면적 3000 cm²/g 천연제올라이트를 결합재로 사용하였으며, 각 결합재별 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다.

고로슬래그 미분말과 제올라이트를 대상으로 XRF(X-ray Fluorescence) 분석을 실시하였으며, 이에 따른 화학적 조성비를

Table 1. Physical property of used material

Name	Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
GGBFS	2.88	4000
Zeolite	1.92	3000

Table 2. Chemical composition of raw material

Name	Oxide contents (wt%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	etc.
GGBFS	33.35	13.36	0.33	44.62	1.40	4.12	2.82
Zeolite	68.87	16.36	5.31	2.64	0.07	1.03	5.72
CSA	1.56	10.62	0.39	53.60	27.04	1.13	5.66

Table 3. Mix proportion of geopolymer paste

Name	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)				
		Water	GGBFS	Zeolite	Ca(OH) ₂	CSA
Control	40	530	1060	265	0	0
CH2.5					33.13	0
CSA2.5					0	33.13
CH5					66.25	0
CSA5					0	66.25
CH10					132.5	0
CSA10					0	132.5

Table 2에 나타내었다. 고로슬래그 미분말과 제올라이트의 주요 성분은 SiO₂, Al₂O₃, CaO 등으로 나타났으며 두 재료의 주요성분은 유사하나 성분의 함량비는 큰 차이가 나타남을 확인하였다.

알칼리 활성화제로서는 CSA(Calcium Sulfo Aluminate, DENKA CSA#20)와 소석회(Calcium Hydroxide, DUKSAN Assay 95 %)를 사용하였으며, CSA의 화학적 조성을 Table 2에 나타내었다. 또한, 활성화제의 첨가량에 따른 지오폐리머 페이스트의 배합비를 Table 3에 나타내었다. 혼화제의 첨가량은 결합재 중량대비 2.5 %, 5 %, 10 % 세 가지 수준으로 구분하여 첨가하였으며 혼화제를 첨가하지 않은 시험체를 기준으로 구분하여 총 7개의 실험 수준을 설정하였다.

2.2 시험체 배합 및 양생

본 실험에 사용된 지오폐리머 페이스트는 물-결합재비(W/B) 0.4로 배합한 후 시험체 제작을 위하여 KS L 5105 기준에 따라 50×50×50(mm) 몰드에 타설하였으며, 진동다짐기를 이용하여 30초간 다진 후 20±2 °C, RH 60±5 % 환경에서 24시간 동안 양생을 실시하였다. 이후 시험체를 몰드에서 탈형하여 20±2 °C 환경의 수중에 완전히 침지하였으며, 28일간 양생을 실시하였다. 탄산화에 의한 특성 변화를 평가하기 위한 시험체는 동일한 양생 과정을 거친 후, CO₂ 농도 10±0.5 % 환경의 챔버에서 14일간 추가적으로 양생을 실시하여 시험체를 완전히 탄산화시키고자 하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 페이스트의 유동성 시험

배합된 지오폴리머 페이스트의 굳기 전 유동 특성을 평가하기 위하여, KS L 5111에 준하여 플로우 시험을 실시하였다. 페이스트의 플로우 시험은 3회를 반복하여 실시하고, 그 평균값을 최종값으로 기록하였다.

2.3.2 페이스트의 압축강도 시험

제작된 지오폴리머 페이스트 시험체의 압축강도는 KS L 5015 기준에 따라, 시험체의 양생일(3일, 7일, 28일)을 기준으로 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 압축강도 평가를 실시하였다. 또한, CO₂ 양생이 압축강도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 28일간 양생을 마친 동일한 시험체를 대상으로 CO₂ 농도 10±0.5 % 환경(20±2 °C, RH 60±5 %)에서 14일간 양생을 실시하고, 압축강도 평가를 실시하였다.

2.3.3 CO₂ 양생에 따른 화학적 특성 평가

지오폴리머 페이스트의 CO₂ 양생에 의한 화합물의 변화를 비교하기 위하여, XRD 분석을 실시하였다. 분석에 사용된 시료는 CO₂ 양생을 실시하기 전 28일 압축강도를 평가한 시험체의 중앙 부분에서 채취하였으며, CO₂ 농도 10±0.5 % 환경에서 14일간 양생한 시험체의 경우 절단하여 탄산화 깊이측정을 통하여 탄산화가 이루어진 것으로 판단되는 시험체의 중앙 부분에서 채취하였다. 채취된 시료는 수화정지 후 분쇄하여 200 μm 크기의 체를 활용하여 체가름을 실시한 후 시료의 분석을 실시하였다. 시료의 분석은 Rigaku사의 Smartlab 장비를 활용하여 수행되었으며, 측정조건은 40 kV/30 mA에서 CuKα 튜브 X-ray를 사용하여 0.01° /step으로 10° 부터 70° (2θ)까지 분석을 실시하였다.

2.3.4 이산화탄소 흡수량 및 생성물 분석

지오폴리머 페이스트의 CO₂ 양생에 이산화탄소 흡수량을 평가하기 위하여 열중량 분석(Thermogravimetric analysis, TGA)을 실시하였다. 분석에 사용된 시료는 XRD 분석을 위하여 준비한 시료와 동일한 조건으로 준비하였으며, 열중량 분석은 Rigaku사의 STA8122 장비를 활용하여 40 °C부터 1000 °C까지 10 °C/min의 속도로 승온하여 실시하였으며, 온도 변화에 따른 중량감소 결과를 비교 평가하였다(Moon and Choi 2018).

3. 실험 결과 및 분석

3.1 페이스트의 유동성 시험결과

알칼리계 활성화제의 종류 및 첨가량에 따른 고로슬래그 미분말-제올라이트 지오폴리머 페이스트의 유동성 시험 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

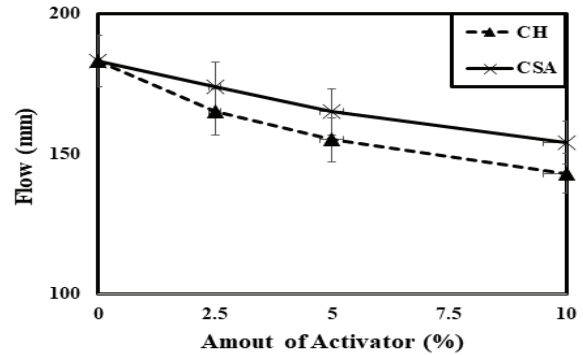


Fig. 1. Result of flow test with alkali activator

Ca(OH)₂와 CSA 첨가량의 증가에 따라 slump flow값이 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 알칼리계 활성화제의 첨가에 따라 굳기 전 페이스트의 pH가 증가하고, 이로 인한 응집성이 증가하는 것으로 판단된다(Zhang et al, 2021). 또한, 양이온 Ca²⁺에 의한 bridge 효과로 인하여 페이스트 내 고로슬래그 미분말과 제올라이트가 분산성을 잃고 응집하는 경향이 나타나는 것으로 판단된다(Madani et al, 2012). 이외에도 알칼리계 활성화제의 첨가량에 따른 분체(Binder)량이 증가하였으며, 이로 인한 W/B가 감소 효과가 발생하면서 페이스트의 유동성이 감소한 것으로 판단된다.

3.2 페이스트의 압축강도 시험결과

제작된 지오폴리머 페이스트 시험체의 수중양생일에 따른 압축강도 시험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 시험체가 수중양생일이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향이 나타났으며, 알칼리 활성화제의 첨가량이 증가할수록 압축강도 역시 증가하는 경향이 확인되었다. 양생 28일을 기준으로 각 시험체별 압축강도는 CH10 18.8 MPa, CH5 16.4 MPa, CSA10 12.3 MPa, CSA5 11.6 MPa, CH2.5 7.4 MPa, CSA 2.5 3.2 MPa, Control 1.9 MPa 순으로 높게 나타났다. 알칼리 활성화제를 첨가하지 않은 시험체의 경우 양생일에 상관없이 압축강도가 거의 발현되지 않았으며, 중합반응의 활성화가 이루어지지 않은 것으로 판단된다(Zhao et al, 2007).

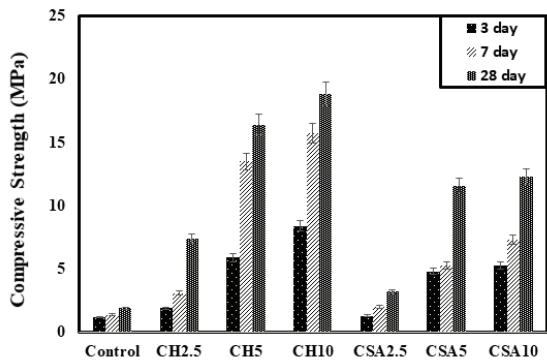


Fig. 2. Compressive strength of geopolymer paste according to amount of activator & curing days

Ca(OH)₂를 10 % 첨가한 시험체의 경우 첨가하지 않은 시험체 대비 압축강도가 약 9.9배 증가하였으며, CSA를 10 % 첨가한 시험체의 경우 첨가하지 않은 시험체 대비 약 6.5배 증가 효과가 나타났다. 이는 알칼리 활성화제 첨가로 인하여 지오폐리머 페이스트의 pH가 증가하였으며, 고로슬래그 미분말의 잠재수경성과 제올라이트의 포졸란 반응을 촉진하여 C-S-H gel과 C-A-S-H gel의 생성을 도운 것으로 판단된다(Guerrieri et al, 2009; Nath and Kumar 2013).

Control 시험체 대비 압축강도 증진율은 2.5 % 첨가 시 Ca(OH)₂ 3.89배, CSA는 1.68배, 5 % 첨가 시 Ca(OH)₂ 8.63배, CSA 6.11배 증가하여 모든 수준에서 Ca(OH)₂를 첨가한 시험체가 CSA를 첨가한 시험체보다 압축강도가 높게 나타났으며, Ca(OH)₂ 첨가 시 CSA첨가 대비 최소 1.41배, 최대 2.31배의 압축강도 증진 효과가 있는 것으로 확인되었다. 고로슬래그 미분말 기반의 제올라이트가 혼입된 지오폐리머 페이스트의 압축강도 발현을 위해서는 Ca(OH)₂가 CSA보다 효과가 좋은 것으로 판단되며, 이는 페이스트 내에서 Ca(OH)₂에 포함된 수산화이온(OH⁻)의 발생이 빠르고, 발생된 수산화이온이 페이스트의 중합반응을 증가시키고 경화를 촉진하는 효과를 발생시키는 것으로 판단된다(Kim et al, 2010).

그러나 알칼리 활성화제 첨가량을 5 %에서 10 %로 증가시킨 시험체의 압축강도를 비교평가 한 결과 Ca(OH)₂ 1.14배, CSA 1.06배 증가한 것으로 나타났으며, Ca(OH)₂와 CSA 모두 결합재량 대비 5 % 이상을 첨가하는 경우 압축강도의 증진율의 상승폭이 감소하는 것으로 확인되었다. 알칼리 활성화제의 첨가량이 5 %까지 증가하는 경우 무첨가 대비 페이스트의 pH증강에 따른 초기경화 및 압축강도에 미치는 영향이 높게 나타났으며, 이는 활성화제 첨가에 의하여 페이스트 내 Ca/Si 비율 등의 변화로 인하여 압축강도 발현율이 증가한 것으로 판단된다(On et al, 2021).

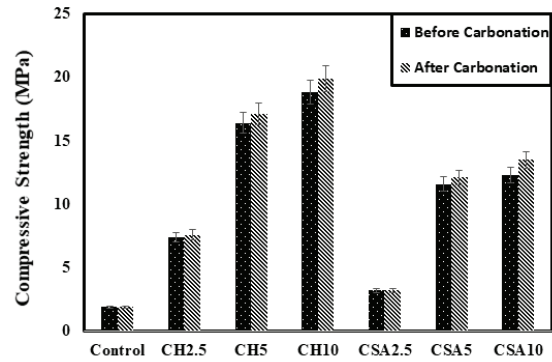


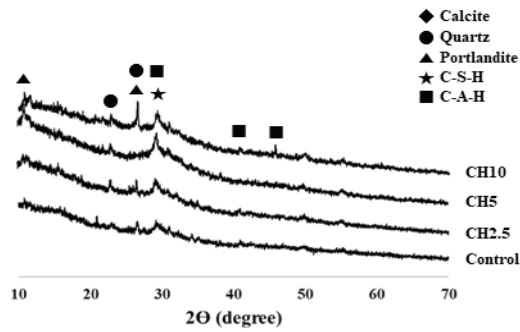
Fig. 3. Compressive strength of geopolymer paste according to amount of activator & carbonation curing

CO₂ 양생 전과 후의 지오폐리머 페이스트 시험체의 압축강도 시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

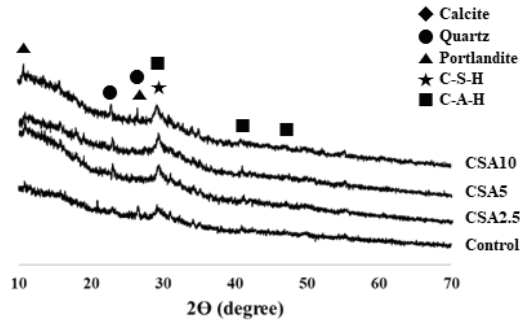
CO₂ 양생에 따른 압축강도 평가 결과, 활성화제를 첨가하지 않은 Control 시험체와 CSA 2.5 첨가 시험체의 압축강도는 소폭 감소하거나 유지되는 경향이 나타났으며, 이외의 실험 수준에서는 모두 압축강도가 증가하는 경향이 확인되었다. 일반적인 시멘트를 사용한 페이스트는 탄산화 반응을 일으키는 경우 페이스트 내부의 C-S-H gel이 CO₂와 반응하는 과정에서 SiO₂로 변환되며 압축강도가 감소되는 것으로 알려져 있으나(Lee et al, 2009), 시멘트를 사용하지 않은 고로슬래그 미분말, 제올라이트 기반 지오폐리머 페이스트의 경우 탄산화 생성물인 SiO₂가 페이스트 내부의 Ca(OH)₂와 반응하여 C-S-H gel을 생성하는 연쇄반응이 발생하였기 때문에 판단된다(Ahn and Song 2017).

3.3 CO₂ 양생에 따른 화학적 특성 변화

CO₂ 양생에 따른 페이스트의 화학적 조성 변화를 분석하기 위하여, CO₂ 양생 전후의 지오폐리머 페이스트의 시험체의 XRD 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 탄산화 이전의 지오폐리머 페이스트의 경우 알칼리 활성화제 첨가량이 증가할수록 활성화제의 종류에 상관없이 C-S-H와 C-A-S-H의 peak가 증가하는 경향이 나타났으며, 활성화제 첨가량이 5 %를 초과하는 경우 Ca(OH)₂와 SiO₂의 peak가 소폭 증가하는 경향이 나타났다. 이는 첨가된 활성화제가 지오폐리머 페이스트 내에서 충분한 중합반응을 일으키지 못하고 남아있는 것으로 판단된다. 탄산화 이후에는 Calcite의 peak가 증가하는 경향이 나타났으며, Vaterite의 peak도 관찰되었다. 또한, C-A-H와 Ca(OH)₂의 peak 감소하고, CaCO₃의 peak가 관측되는 범위가 넓어졌으며, 이는 페이스트 내에서의 탄산화 반응으로 알려져 있는 Ca(OH)₂와 CO₂의

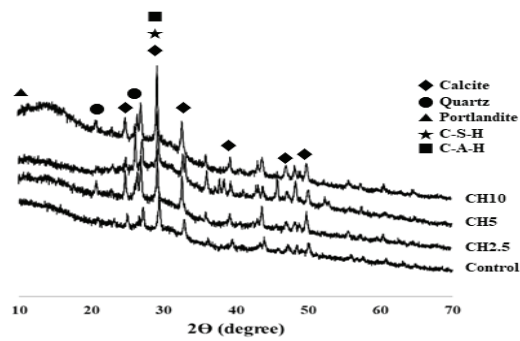


(a) According to amount of CH

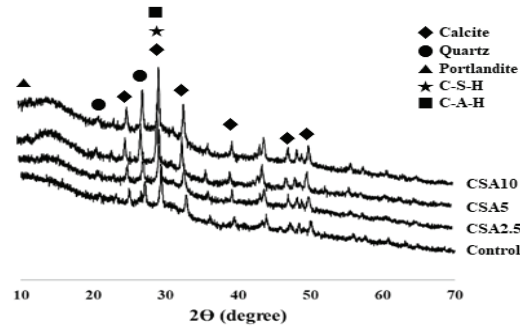


(b) According to amount of CSA

Fig. 4. XRD patterns of specimens before carbonation



(a) According to amount of CH



(b) According to amount of CSA

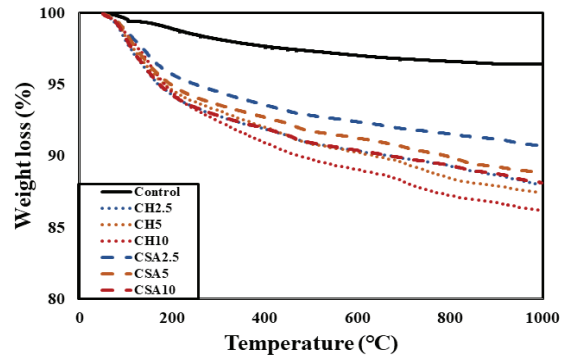
Fig. 5. XRD patterns of specimens after carbonation

반응이 충분히 진행된 것으로 판단된다(Moon and Choi 2018; Amer et al. 2021).

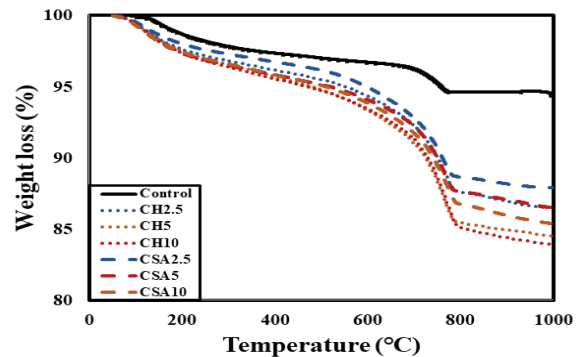
탄산화 이후의 CaCO_3 peak는 Ca(OH)_2 를 첨가한 시험체가 더 높게 관찰되었으며, 활성화제 첨가량이 증가할수록 peak도 증가하는 경향이 나타났다. 고로슬래그 미분말과 제올라이트로 이루어진 지오폐이머 페이스트의 중합반응과 탄산화 반응으로 인한 CO_2 포집 능력은 Ca(OH)_2 를 첨가하는 경우가 CSA를 첨가하는 경우보다 반응성이 더 높은 것으로 판단되며, 추후 양생온도 등 양생과정에서의 변화를 통한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다(Ahn and Song 2017).

3.4 이산화탄소 흡수량 및 생성물 분석 결과

지오폐이머 페이스트 시험체의 수중양생과, CO_2 양생에 따른 지오폐이머 페이스트 내 생성물 및 이산화탄소 흡수량 정량평가를 위하여, 탄산화 전후의 시험체에 대하여 열중량 분석(TGA)을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.



(a) Before carbonation curing



(b) After carbonation curing

Fig. 6. Thermogravimetric analysis of specimen

Table 4. Contents of Ca(OH)₂ and CaCO₃ each specimen

Name	Before carbonation (wt%)		After carbonation (wt%)	
	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
Control	0.40	0.66	0.35	2.24
CH2.5	0.91	1.68	0.63	7.69
CH5	1.13	2.46	0.87	8.96
CH10	1.39	2.41	0.80	9.43
CSA2.5	0.84	1.28	0.53	7.23
CSA5	0.86	1.66	0.65	7.32
CSA10	0.89	2.03	0.72	8.17

지오폐이머 페이스트는 다양한 수화반응 및 중합반응 생성물로 구성되어 있으며 생성물 종류에 따라 열분해되는 온도영역이 달라진다. 이 과정에서 상태변화를 조사하여 시험체에 포함되어있는 물질을 정량화 할 수 있으며, 일반적으로 350 °C~450 °C 영역에서 Ca(OH)₂가 분해되며 550 °C~850 °C 영역에서 CaCO₃가 분해되며 중량변화가 나타난다. 분해온도별로 구분될 수 있는 두 가지 생성물의 생성량에 대한 열중량 분석결과를 Table 4에 나타내었다.

알칼리 활성화제 첨가량이 증가할수록 Ca(OH)₂와 CaCO₃의 생성량이 증가하였으며, CO₂ 양생 이후에 그 증가율이 더 뚜렷하게 나타나는 경향이 확인되었다. Ca(OH)₂ 10 % 첨가 시 Ca(OH)₂ 생성량은 1.39 %, CaCO₃ 생성량은 2.41 %로 첨가하지 않은 시험체 대비 각각 3.48배, 3.65배 증가하였으며, CO₂ 양생 이후에는 CaCO₃ 생성량이 9.43 wt%로 활성화제를 첨가하지 않은 시험체 대비 4.21배 증가하며 가장 높은 생성량을 나타내었다.

앞서 설명한 바와 같이 550 °C~850 °C에서 CaCO₃의 CO₂ 분해가 이루어지며, CaCO₃ 분해량을 기반으로 지오폐이머 페이스트의 CO₂ 흡수량(uptake)을 산정할 수 있다(Moon and Choi 2018). 지오폐이머 페이스트의 CO₂ 양생에 따른 CO₂ uptake 계산식을 식 (1)에 나타내었다.

$$CO_2 \text{ Uptake (wt\%)} = \frac{\Delta W_{550-850^\circ C}}{W_{105^\circ C}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, W_{105 °C}는 105 °C에서 건조된 시편의 중량을, ΔW_{550-850 °C}는 550-850 °C 구간에서 CO₂ 양생 전후에 따른 각 시험체의 감소된 중량의 차이를 나타낸다. 식 (1)을 활용하여 각 실험 수준별 CO₂ uptake를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 7과 Table 5에 나타내었다.

알칼리 활성화제 2.5 % 첨가 시의 CO₂ uptake는 Ca(OH)₂ 8.59

Table 5. CO₂ uptake for carbonation cured paste according to amount of activator

Name	W _{550-850°C} (wt%)		ΔW _{550-850°C} (wt%)	CO ₂ uptake (wt%)
	Before carbonation	After carbonation		
Control	0.66	2.24	1.58	2.26
CH2.5	1.68	7.69	6.01	8.59
CH5	2.46	8.96	6.5	9.29
CH10	2.41	9.43	7.02	10.03
CSA2.5	1.38	7.23	5.85	8.36
CSA5	1.46	7.32	5.86	8.37
CSA10	2.03	8.17	6.14	8.77

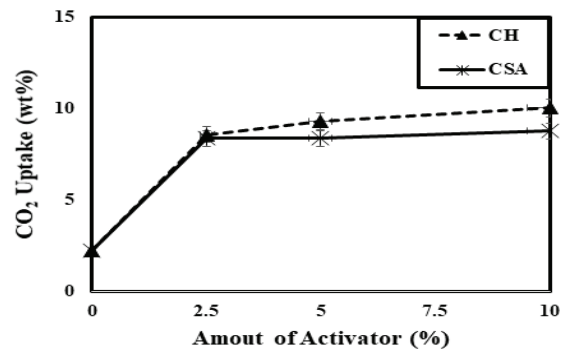


Fig. 7. CO₂ uptake for carbonation cured paste according to amount of activator

wt%, CSA 8.36 wt%로 서로 유사한 포집 특성을 갖는 것으로 확인되었다. 그러나 알칼리 활성화제의 첨가량이 증가할수록 CSA를 첨가한 시험체보다 Ca(OH)₂를 첨가한 시험체의 CO₂ uptake가 높게 나타나는 경향이 나타났으며, 10 % 첨가 시 Ca(OH)₂ 10.30 wt%, CSA 8.77 wt%로 Ca(OH)₂를 첨가하는 경우 무첨가 대비 4.43 배, CSA 첨가 시험체 대비 1.14배 높은 CO₂ uptake 효과가 나타나는 것을 확인하였다.

이는 압축강도 시험, XRD 분석 결과에서 추정된 바와 같이 고로슬래그 미분말-제올라이트로 이루어진 지오폐이머 페이스트에 알칼리 활성화제 첨가량이 증가할수록 수중양생에 의한 C-S-H, C-A-S-H gel의 생성량이 증가하였으며, CaCO₃ 생성량도 함께 증가한 것으로 판단된다. 또한, 생성된 C-S-H, C-A-S-H gel의 양의 증가에 따라 CO₂ 양생에 의한 CaCO₃ 생성량이 증가하였으며, 이로 인하여 CO₂ 흡수능력이 증가한 것으로 판단된다 (Guerrieri and Sanjayan 2009; Nath and Kumar 2013). 추후 γ-C₂S와 같은 비수경성 재료와의 병행첨가에 따른 CO₂ 흡수 특성 분석 등을 통하여 CO₂ 흡수량 향상에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 고로슬래그 미분말-제올라이트로 구성된 지오폴리머 페이스트의 알칼리계 활성화제($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CSA)의 종류 및 첨가량에 따른 압축강도 및 화학적 조성의 변화, CO_2 포집량을 비교평가 하였다. CO_2 양생 전/후에 대한 변화를 중심으로 평가하였으며, 비교평가 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 물리적 성능 평가 결과, 지오폴리머 페이스트에 첨가되는 알칼리계 활성화제의 첨가량이 증가할수록 굳기 전 페이스트의 유동성은 감소하였으며, 압축강도가 증가하는 경향을 확인하였다. 활성화제 종류에 따른 비교평가 결과, CSA를 첨가하는 것보다 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 첨가하는 것이 압축강도 향상에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.
2. CO_2 양생에 따른 화학적 특성의 변화를 비교평가 한 결과, 모든 실험 수준에서 알칼리계 활성화제의 첨가량이 증가할수록 탄산화 전 C-S-H, C-A-S-H gel의 peak 증가가 확인되었으며, 탄산화 이후 Calcite의 peak 증가가 확인되었다. 알칼리계 활성화제 첨가에 따른 지오폴리머 페이스트의 포함된 고로슬래그 미분말과 제올라이트의 반응성이 증가하였으며, 첨가량이 증가할수록 반응성도 증가하는 경향이 나타났다.
3. 지오폴리머 페이스트의 열중량 분석결과, 알칼리계 활성화제의 첨가량이 증가할수록 열분해에 의한 중량 감소율이 증가하는 경향이 나타났다. 또한, 550–850 °C 구간에서 CO_2 양생 전 후에 따른 각 시험체의 감소 된 중량의 차이가 증가하여 10 % 첨가 시 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 경우 10.3 wt%, CSA의 첨가 시 8.77 wt%의 CO_2 uptake가 발생하였으며, 활성화제를 첨가하지 않은 경우의 CO_2 uptake 2.26 wt%보다 각 4.21배, 3.88배 증가한 것으로 확인되었다.
4. 수용성 알칼리계 활성화제의 첨가량이 증가할수록 고로슬래그 미분말-제올라이트 지오폴리머 페이스트의 압축강도와 CO_2 양생에 의한 CO_2 포집 효과가 증가하는 것으로 확인되었다. 추후 γ - C_2S 와 같은 비수경성 재료와의 혼합사용을 통한 지오폴리머 페이스트의 CO_2 포집량을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대되며, 콘크리트 제조 및 사용단계에서의 CO_2 포집량의 연구가 지속적으로 필요한 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다.(과제번호 23UMRG-B158194-04)

References

- Ahn, H.Y., Song, J.H. (2017). Changes of compressive strength and chemical characteristics of alkali-activated slag concrete before and after carbon dioxide exposure, *Journal of Korea Society of Waste Management*, **34(7)**, 697–704.
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M.S., Rashad, A., Khalaf, M.A. (2021). Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete, *Ain Shams Engineering Journal*, **12(1)**, 135–144.
- Gartner, W.B., Gartner, W.C., Shaver, K.G., Carter, N.M., Reynolds, P.D. (2004). *Handbook of Entrepreneurial Dynamics: The Process of Business Creation*, Sage.
- Gartner, E., Quillin, K. (2007). Low- CO_2 Cements Based on Calcium sulfoaluminates, *Sustainability in the Cement and Concrete Industry*, Norwegian Cement Association, September, **16**, 95–105.
- Guerrieri, M., Sanjayan, J., Collins, F. (2009). Residual compressive behavior of alkali-activated concrete exposed to elevated temperatures, *Fire and Materials: An International Journal*, **33(1)**, 51–62.
- Jo, B.W., Kang, S.W., Park, S.K., Choi, J.S. (2011). A fundamental study on the characteristics of zeolite cement mortar, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **23(2)**, 203–209.
- Kim, J.T., Seo, D.S., Kim, G.J., Lee, J.K. (2010). Influence of alkaline-activator content on the compressive strength of aluminosilicate-based geopolymer, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **47(3)**, 216–222.
- Kwon, S.J., Wang, X.Y. (2019). Optimization of the mixture design of low- CO_2 high-strength concrete containing silica fume, *Advances in Civil Engineering*, **2019**, 7168703.
- Lee, S.H., Lee, S.B., Lee, H.S. (2009). Study on the evaluation CO_2 emission-absorption of concrete in the view of carbonation, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **21(1)**, 85–92.
- Madani, H., Bagheri, A., Parhizkar, T. (2012). The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, **42(12)**, 1563–1570.
- Moon, E.J., Choi, Y.C. (2018). Development of carbon-capture binder using stainless steel argon oxygen decarburization slag

- activated by carbonation, *Journal of Cleaner Production*, **180**, 642–654.
- Nath, S.K., Kumar, S. (2013). Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*, **38**, 924–930.
- On, J.K., Kim, G.Y., Sasui, S., Lee, Y.C., Eu, H.M. (2021). Factors effecting the strength & durability of geopolymer binder: a Review, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(4)**, 460–468.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, *Construction and Building Materials*, **47**, 409–418.
- Wang, X.Y., Lee, H.S. (2019). Effect of global warming on the proportional design of low CO₂ slag-blended concrete, *Construction and Building Materials*, **225**, 1140–1151.
- Yoon, C.B., Lee, H.S. (2020). Study on the effect of fineness and substitution rate of natural zeolites on chemical reaction and physical properties of cement mortar, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **24(3)**, 96–103.
- Yoon, S.P., Park, J.C., Kim, H.T., Koo, J.M. (2021). A experimental investigation of selective CO₂ adsorption in landfill gas with differently pre-treated zeolite13X, *Journal of Energy Engineering*, **30(4)**, 67–78.
- Zhang, Q.L., Li, Y.T., Chen, Q.S., Liu, Y.K., Feng, Y., Wang, D.L. (2021). Effects of temperatures and pH values on rheological properties of cemented paste backfill, *Journal of Central South University*, **28(6)**, 1707–1723.
- Zhao, F.Q., Ni, W., Wang, H.J., Liu, H.J. (2007). Activated fly ash/slag blended cement, *Resources, Conservation and Recycling*, **52(2)**, 303–313.

알칼리계 활성화제의 종류 및 첨가량이 고로슬래그-제올라이트 지오폴리머 페이스트의 탄소포집에 미치는 영향에 관한 연구

본 연구에서는 고로슬래그 미분말-제올라이트로 구성된 지오폴리머 페이스트의 알칼리계 활성화제(Ca(OH)₂, CSA)의 종류 및 첨가량에 따른 압축강도 및 화학적 조성의 변화와 CO₂ 포집량을 비교평가 하였다. 지오폴리머 페이스트에 첨가되는 알칼리계 활성화제의 첨가량이 증가할수록 굳기 전 페이스트의 유동성은 감소하였으며, 압축강도가 증가하였다. 활성화제 종류에 따른 평가 결과, CSA보다 Ca(OH)₂를 첨가하는 것이 압축강도 향상 효과가 큰 것으로 확인되었다. CO₂ 양생에 따른 화학적 특성의 변화를 비교평가 한 결과, 모든 실험 수준에서 알칼리계 활성화제의 첨가량이 증가할수록 탄산화 전 C-S-H, C-A-S-H gel의 생성량이 증가하였으며, 탄산화 이후 CaCO₃ 생성량이 증가하였다. 알칼리계 활성화제 첨가로 인하여 고로슬래그 미분말과 제올라이트의 반응성이 증가하였으며, 첨가량이 증가할수록 반응성도 증가하는 경향이 나타났다. 열중량 분석 결과, 알칼리계 활성화제의 첨가량이 증가할수록 CO₂ 양생에 따른 CaCO₃ 분해구간에서의 질량감소율이 증가하였으며, 10 % 첨가 시 Ca(OH)₂의 경우 10.3 wt%, CSA의 첨가 시 8.77 wt%의 CO₂ uptake가 발생하였으며, 활성화제를 첨가하지 않은 경우보다 각 4.21배, 3.88배 증가한 것으로 확인되었다.