

스테인리스 스틸 AOD 슬래그를 이용한 폼 콘크리트의 탄소포집 성능

김병준¹, 유성원², 최영철^{3*}

Carbon-capture Performance of foam Concrete Using Stainless Steel Slag

Byung Jun Kim¹, Sung Won Yoo², Young Cheol Choi^{3*}

Abstract : The purpose of this study is to investigate the mechanical and carbon-capture properties of foam concrete containing stainless steel argon oxygen decarbonization(AOD) slag. AOD slag was used as a binder, and foam concrete having a foaming ratio of $69 \pm 0.5\%$ and a slurry density of 573.2 to 578.6 kg/m^3 was produced. In order to examine the effect of carbonation, blended specimen was cured by two types : normal curing and CO_2 curing. As a result of the experiment, the specimens incorporating AOD slag showed higher compressive strength than Plain after CO_2 curing. According to the analysis of the image of foam concrete, it was confirmed that the ST30 has a lower total pore volume and average pore size than plain, resulting in high compressive strength. The SEM analysis confirmed the formation of calcite by carbonation of AOD slag. Through the thermogravimetric analysis, the increase of CO_2 uptake was confirmed by the incorporation of AOD slag. Foam concrete has a higher porosity than normal concrete, so it is expected that carbon-capture performance can be improved by using a AOD slag.

Keywords : foam concrete, stainless steel AOD slag, carbonation, CO_2 uptake

1. 서 론

건설 산업에서 시멘트와 콘크리트는 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 건설재료인 동시에, 시멘트 1톤 생산 시 발생하는 이산화탄소의 양이 약 0.8톤으로 대량의 이산화탄소 발생 산업 중 하나이다(Chen et al., 2016). 산업 활동에서 배출되는 이산화탄소 저감을 위해 유효처리 및 자원화 방안이 요구되고 있으며 건설 재료에 활용하기 위한 다수의 연구가 수행되어 오고 있다.

이산화탄소 저감에 대한 방안으로 탄소 포집 및 저장기술(carbon capture & storage, CCS)에 대한 연구가 주로 수행되었다(Gartner, 2004; Barkera et al., 2009; Zhang and Huisingh, 2017). CCS는 산업장에서 발생하는 이산화탄소를 분리, 포집, 압축, 수송하여 지층이나 해저의 지층에 대규모로 저장시키는 기술이다. 최근에는 이산화탄소를 포집하는데 그치지 않고 포집된 이산화탄소를 재사용하고자 하는 탄소 포집 및 활용(carbon capture utilization, CCU) 기술이 주목 받고 있다

(Bachu, 2004). CCU 기술을 접목한 건설재료 개발을 위해 화력 발전 및 철강 산업에서 발생하는 산업부산물로 보통 포틀랜드시멘트(ordinary Portland cement, OPC)를 대체할 수 있는 보조 시멘트질 재료(supplementary cementitious materials, SCMs)를 활용한 연구가 활발히 진행 중에 있다(Dindi et al., 2019). Chung et al.은 OPC를 대체하여 실리카 폼과 플라이애시를 사용한 시멘트 복합체의 강도 및 미세구조를 분석하였고 압축강도가 향상되는 것을 확인하였다(Chung et al., 2020). Sun et al.은 지오폴리머, 알칼리 활성화 슬래그 등의 산업부산물을 OPC의 100%로 대체하여 콘크리트의 압축강도, 투과성 등을 연구하였다(Sun et al., 2018).

스테인리스 스틸 AOD 슬래그(stainless steel argon oxygen decarbonization slag)는 스테인리스 스틸의 생산 과정에서 발생하는 산업 부산물이다. AOD 슬래그를 구성하는 주요 화합물 $\gamma\text{-C}_2\text{S}(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ 는 OPC를 구성하는 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 와 다르게 비수경성 성질을 갖고 있지만, 물과 이산화탄소가 함께 존재하는 경우 이산화탄소를 흡수하여 탄산칼슘을 생성한다(Young et al., 1974). 이러한 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 의 탄산화 특성을 이용하여 몇몇 연구자들은 AOD 슬래그를 보조 시멘트질 재료로 사용하기 위한 연구를 수행하였다. Mo et al.은 철강 슬래그를 OPC 대비 80%, 100% 치환한 시멘트 페이스트를 제조하여 탄산화 양생하였다. 탄산화 양생 기간이 늘어날수록 탄산칼슘의 생성량이 늘어나 공극이 치밀해짐을 확인하였다(Mo et al., 2016). Moon and Choi는 ST-AOD 슬래그를 바인더로 사용한 페이스트를 탄산화 양생

¹정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 석사과정

²정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 교수

³정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 부교수, 교신저자

*Corresponding author: zerofe@gachon.ac.kr

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Seongnam-si, 13120, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2020년 10월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하여 탄산칼슘을 생성하고 압축강도가 증가하는 것을 확인하였다(Moon and Choi, 2018). Salman et al.은 AOD 슬래그를 혼입한 시멘트 페이스트를 탄산화 양생하여 압축강도 및 생성물의 화학적 성분 분석을 하였다(Salman et al., 2014). 이러한 γ - C_2S 의 탄산화 특성을 이용하여 콘크리트의 바인더로 활용하기 위한 다수의 연구가 수행되고 있다. 하지만 AOD 슬래그의 탄소포집 특징을 규명하기 위한 연구에 한정되어 있으며, AOD 슬래그가 함유된 건설재료의 탄소포집 효율 향상을 위한 연구는 미흡한 실정이다. 폼 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 비표면적과 전체 공극량이 크고, 열린 기공이 많아 이산화탄소의 포집에 유리한 구조를 지니고 있다.

Li et al.은 나노 실리카 및 그래핀이 함유된 기포제를 사용하여 밀도 500 kg/m^3 의 폼 복합체를 제조하였다. 나노 실리카가 있는 기포제를 사용하였을 때 공극이 균일하게 분포된 복합체를 얻었다. 이를 통해 기포제에 따라 공극 특성이 달라지는 것을 확인하였다(Li et al., 2019). Oren et al.은 고로 슬래그 (granulated blast furnace slag, GBS)를 혼입한 폼 콘크리트의 9가지 배합에 대해 역학적 거동을 연구하였다. 실험을 통해 모래 대신 45 % GBS의 혼입으로 폼 콘크리트의 압축강도가 증가함을 확인하였고, 100 % GBS의 혼입에는 높은 공극률로 압축강도가 낮음을 확인하였다(Oren et al., 2020).

본 연구에서는 AOD 슬래그를 사용한 폼 콘크리트의 역학적 특성 및 탄산화 양생에 의한 영향을 조사하였다. 폼 콘크리트는 OPC, AOD 슬래그를 바인더로 사용하였으며 기포제는 동물성 단백질을 사용하였다. 탄산화 양생의 영향을 조사하기 위하여 일반양생과 탄산화 양생 두 가지 방법의 양생을 하였다. 폼 콘크리트의 역학적 성능 평가를 위해 압축강도 시험을 하였으며, 탄산화에 의한 화학 반응을 살펴보고자 SEM 이미지 분석을 하였다. 또한 ASTM C 457 방법을 통한 이미지 분석으로 폼 콘크리트 표면의 공극 구조를 살펴보았으며, 이산화탄소 저장 성능을 평가하기 위하여 열중량분석 (TG analysis)을 통해 CO_2 uptake를 분석하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에서는 원재료로 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였고, 스테인리스 스틸 AOD 슬래그를 바인더로 사용하였다. AOD 슬래그는 국내 제철소에서 스테인리스 스틸의 생산 과정에서 발생하는 산업부산물물을 이용하였다. 또한 AOD 슬래그는 기존의 전기로 환원슬래그와 공정이 달라 C_2S 가 감마상으로 바뀌고 체적이 팽창하여 스스로 분화하는 특징이 있

다(Watenabe et al., 2012). 시멘트와 AOD 슬래그의 밀도는 각각 3.14 g/cm^3 , 2.91 g/cm^3 이다. 형광 X선 분석법을 통한 OPC와 AOD 슬래그의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다. AOD 슬래그의 주성분은 CaO, SiO_2 , MgO, Al_2O_3 로 각각 54.3%, 17.7%, 9.2%, 6.4%로 나타났다. OPC의 주성분은 CaO, SiO_2 , Al_2O_3 로 각각 62.4%, 20.8%, 4.9%로 나타났다. Bogue식에 의한 OPC의 광물 성분은 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , CaSO_4 가 중량 기준으로 각각 47.8%, 23.6%, 7.1%, 10.6%, 3.74%이다.

Fig. 1은 레이저 회절 방법(Beckman Coulter LS 230)에 의한 OPC 및 AOD 슬래그의 입자크기 분포(particle size distributions, PSDs)를 나타낸다.

OPC 및 AOD 슬래그의 평균 직경(d_{50})은 각각 15.17mm, 19.90mm로 AOD 슬래그의 평균 직경이 더 크게 측정되었다. OPC의 경우 평균 입자크기가 15.17mm가 최고점인 정규분포 형태를 나타내지만, AOD 슬래그의 경우 2개의 최고점을 갖

Table 1 Chemical composition of raw materials

| | Chemical Compositions (wt.%) | |
|-----------------------------|------------------------------|----------|
| | OPC | AOD slag |
| SiO_2 | 20.8 | 17.7 |
| Al_2O_3 | 4.9 | 6.4 |
| Fe_2O_3 | 3.5 | 3.0 |
| CaO | 62.4 | 54.3 |
| MgO | 1.6 | 9.2 |
| K_2O | 0.9 | 0.2 |
| Na_2O | 0.3 | 0.1 |
| SO_3 | 2.2 | 0.4 |
| Cr_2O_3 | - | 2.8 |
| MnO | 0.1 | 0.5 |
| TiO_2 | 0.1 | 0.9 |
| Density (g/cm^3) | 3.14 | 2.91 |

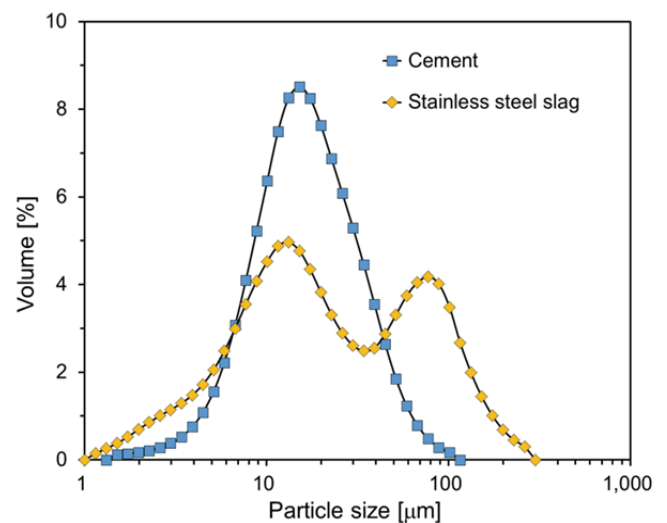


Fig. 1 Particle size distributions of raw materials

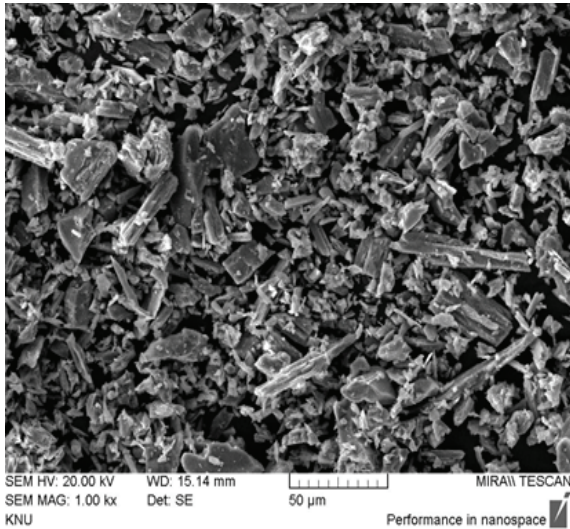


Fig. 2 SEM image of AOD slag

는 이봉분포를 나타낸다. Fig. 2는 AOD 슬래그 분말의 SEM 이미지를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 AOD 슬래그는 구형 형태가 아닌 대부분이 각진 형태로 존재하였다.

2.2 배합

본 연구에서는 AOD 슬래그를 사용한 폼 콘크리트의 역학적 특성 및 탄산화 양생에 의한 영향을 조사하기 위하여 OPC 및 AOD 슬래그를 혼합한 바인더를 사용하였다. OPC 부피의 30 %를 AOD 슬래그로 치환하고, KS F 2403에 준하여 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 크기의 폼 콘크리트 공시체를 제작하였다.

Table 2는 폼 콘크리트 공시체의 배합표를 나타내었다. AOD 슬래그의 치환율은 OPC 중량대비 28% (부피비 30%)로 하였으며, 물-바인더 비는 0.3으로 고정하였다. 기포제로는 동물성 단백질을 사용하였으며, 기포율(%)은 $69 \pm 0.5\%$ 가 되도록 하였다. 슬러리 밀도는 $573.6 \sim 578.6 \text{ kg/m}^3$ 로 측정되었다.

Plain 시편 및 ST30 시편의 탄산화 양생에 따른 특성을 분석하기 위해 두 가지 양생 방법을 이용하였다. 첫 번째는 배합한 시편을 24시간 동안 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, RH 100% 챔버에서 양생한 이후 탈형하여, $20 \pm 1^\circ\text{C}$, RH $60 \pm 10\%$ 챔버에서 목표 재령까지 양생을 하는 방법이다. 두 번째는 첫 번째와 동일한 조건에서 탄산화 챔버에 5% 농도의 CO_2 를 공급하여 탄산화 양생을 하는 방법이다. 탄산화 양생 방법은 Fig. 3과 같다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 탄산화 양생에 따른 폼 복합체의 역학적 성능 평가를 위해 ISO 2736-2:1986에 따라 압축강도를 측정하였다. Table 2의 배합에 따라 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 크기의 폼 콘크리트

Table 2 Mixture proportions of carbon-capture foam composites

| Specimens | W/B (-) | Binder (wt.%) | | Foaming ratio (%) | Slurry density (kg/m^3) |
|-----------|---------|---------------|----------|-------------------|------------------------------------|
| | | OPC | AOD slag | | |
| Plain | 0.3 | 100 | - | 69.24 | 578.6 |
| ST30 | | 72 | 28 | 69.17 | 573.6 |

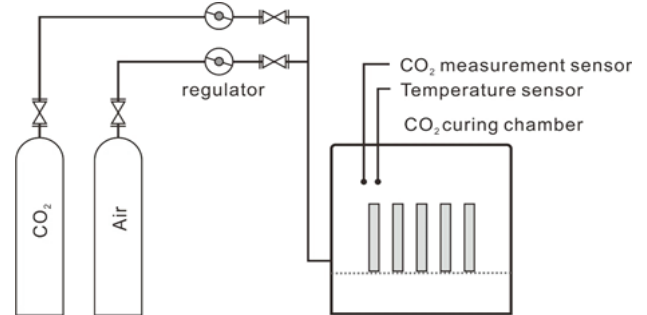


Fig. 3 Chamber for CO_2 introduction

트 공시체를 제작하였다. 재령 7, 28일에 3개씩 압축강도를 측정 후, 그 평균을 결과로 이용하였다. 압축강도 측정 시 하중을 가하는 속도는 압축 응력도의 증가율이 $(0.6 \pm 0.4) \text{ MPa/sec}$ 가 되도록 하였다. 탄산화 양생의 영향을 살펴보기 위해 동일 시험체에 대해 일반양생과 탄산화 양생을 비교하여 압축 강도를 측정하였다.

폼 콘크리트의 공극 구조를 분석하기 위해 ASTM C 457 “Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air Void System in Hardened Concrete” 방법을 이용하였다. 기공 특성 분석을 위해 $\varnothing 100 \times 20 \text{mm}$ 크기의 원주형 시편을 제작하였다. 폼 복합체의 광학이미지를 Grey level로 변환한 뒤, 임계값에 의해 흑백으로 구분하여 각 공극의 크기를 측정하였다. 측정된 모든 공극을 합하여 전체 공극률과 평균 공극의 크기를 계산하였다. 그리고 폼 콘크리트의 일반양생, 탄산화 양생한 시험체의 화학반응물을 살펴보고자 SEM 이미지 분석을 수행하였다.

폼 콘크리트의 CO_2 uptake를 평가하기 위하여 탄산화 양생 유무에 따른 재령별 폼 콘크리트의 일부를 채취하여 열중량 분석기 (EA 1108 CHNS-O/FISONS)를 사용하였다. TG-DTG 분석기를 통하여 온도 증가에 따른 중량 변화를 측정하였다. 이때 승온속도를 10°C/min 으로 설정하여 1000°C 까지 상승시켰다. 분석에 사용된 시료는 시편의 중앙부를 일부 채취하여 미세하게 분말로 분쇄한 후, $150\mu\text{m}$ 체에 통과시킨 분말을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 탄산화 양생에 따른 압축강도 특성

탄산화 양생에 따른 폼 콘크리트의 압축강도는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 탄산화 양생을 한 공시체의 압축강도가 일반 양생을 한 공시체보다 높게 나타났다. Plain의 경우 탄산화 양생에 의해 압축강도가 증가하였으나 효과는 미미하였다. AOD 슬래그를 30% 혼입한 폼 콘크리트의 압축강도는 탄산화 양생 시 크게 향상되었다. 일반 양생한 시편의 압축강도는 재령 7일에 1.68Mpa, 재령 28일에 2.43MPa로 나타났다. 재령 7일의 경우 ST30시편이 일반 양생한 Plain 시편보다 강도가 낮았으나 재령 28일에서는 1.6% 정도 압축강도가 미미하게 높았다. 탄산화 양생한 ST30 시편의 압축강도가 재령 7일, 28일에 각각 2.92 Mpa, 3.27 Mpa로 나타났는데 이는 일반 양생한 경우에 비해 재령 7일의 경우 73.8%, 28일의 경우 34.6% 증가하였다. 이는 탄산화 양생 시 AOD 슬래그의 γ -C₂S가 이산화탄소와 직접 반응하여 실리케이트 겔과 탄산칼슘을 형성하여 높은 압축강도를 발현하였다(Watanabe et al., 2006). γ -C₂S는 물과 반응하지 않는 비수경성 성질을 가지고 있지만 물이 있는 경우에서는 이산화탄소와 반응하여 탄산화가 된다. 따라서 탄산화 반응에 의해 공극에 침투된 이산화탄소는 시멘트 수화물 이외의 탄산칼슘을 생성한다. 생성된 탄산칼슘은 시멘트 매트릭스 내부의 조직을 더 치밀하게 하고 결과적으로 압축강도를 증진시켰다(Saito et al., 2008). AOD 슬래그를 혼입한 공시체의 강도는 재령 28일에서 가장 크게 나타났다. 이는 탄산화에 의해 대부분의 바인더가 반응하여 공극을 치밀하게 하여 압축강도가 가장 높은 것으로 판단된다.

Guan et al.은 γ -C₂S을 활용한 모르타르 시편을 24시간 동안 탄산화 양생한 경우의 압축강도는 61.82 Mpa이었다. 하지

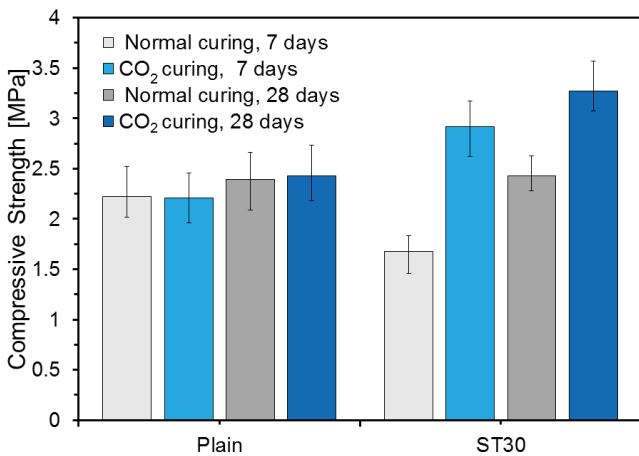
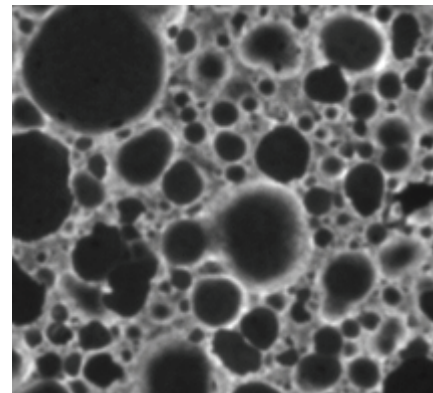


Fig. 4 Compressive strength of foam concrete

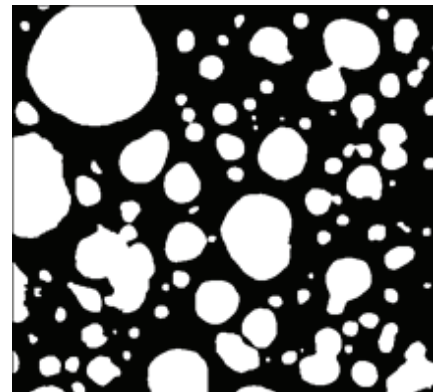
만 탄산화 양생하지 않는 시편의 압축강도는 0.05 ~ 0.19 MPa로 나타났다(Guan et al., 2016).

3.2 폼 콘크리트의 이미지 분석

폼 콘크리트의 기공특성을 분석하기 위해 \varnothing 100×20mm 크기의 원주형 시편을 제작하였다. 그 후 제작한 시편의 표면을 수평으로 연마하여 ASTM C 457 “Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air Void System in Hardened Concrete” 방법을 이용하여 이미지 분석을 수행하였다. Fig. 5에 나타나듯이 폼 콘크리트의 광학이미지를 grey level로 변환하고, 임계값에 의해 흑백으로 구분하여 각 공극의 크기를 측정하였다. 측정된 모든 공극 면적을 합하여 측정된 전체 면적으로 나누어 전체 공극률을 구하였다. 평균 공극 크기는 전체 공극의 지름의 평균값으로 산정하였다. 일반양생 (NC) 및 탄산화 양생(CC)한 시편의 공극률은 Fig. 6에 나타내었다. Plain의 경우 NC의 전체 공극률은 48.6%, CC의 경우 46.7%로 약간 감소하였다. 평균 공극 크기는 NC의 경우 0.424mm, CC의 경우 0.410mm로 탄산화 양생에 의해 미세하게 감소하였다. 이와 반대로 ST30의 경우 NC의 전체 공극률은 34.2%, CC는 36.4%로 증가하였다. 평균 공극 크기는 NC 0.382mm, CC



(a) Optical image of plain



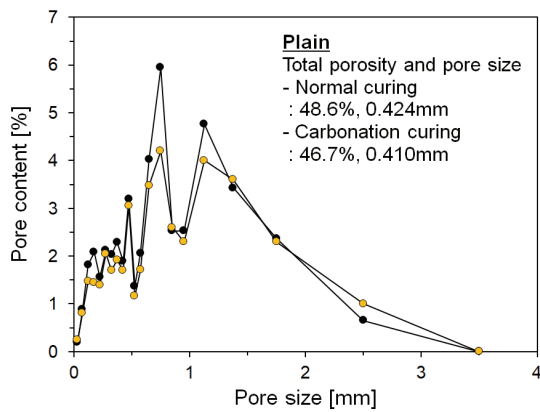
(b) Transformed image

Fig. 5 Image analysis

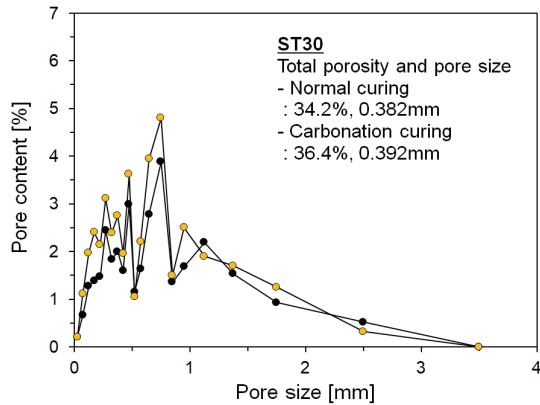
0.392mm로 나타났다. 또한 Fig. 6에서 나타나듯이 Plain 시편의 경우 일반양생 및 탄산화 양생 모두의 경우 공극 크기의 75 % 이상이 1mm이하임을 확인하였다. ST30 시편의 경우 공극 크기의 90 % 이상이 1mm이하로 Plain 시편보다 공극 크기가 작았다. 이미지 분석결과를 통해 ST30시편이 Plain시편 보다 공극률이 낮으며 평균 공극 크기도 작아 압축강도가 높음을 확인할 수 있었다. AOD 슬래그에 포함된 γ -C₂S의 탄산화에 의해 생성된 반응물은 주로 실리케이트 겔과 탄산칼슘으로 그 크기가 작아 주로 마이크로 공극의 크기에 영향을 준다. 따라서 매크로 공극을 측정하는 이미지 분석에서는 탄산화 양생에 의한 효과를 확인하기 어려웠다. 하지만 배합 설계 시 폼 콘크리트의 목표 기공률을 확인하기에는 적합할 것으로 판단된다.

3.3 SEM 분석

탄산화 양생의 유무에 따른 폼 콘크리트 내부의 화학적 및 미세조직 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 7에서 나타나듯이 SEM분석을 하였다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(c)는 일반 양생한 폼 콘크리트 시편의 SEM 이미지이며, (b)와(d)는 탄산화 양생 이후



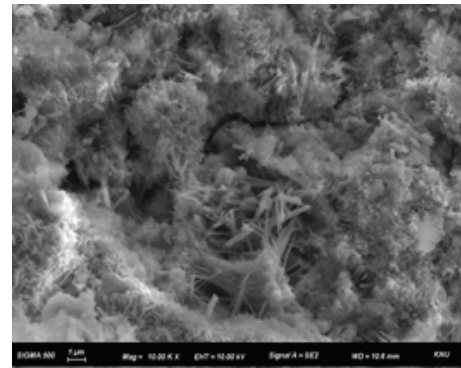
(a) Plain



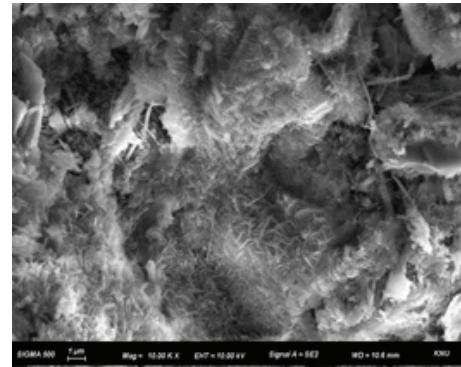
(b) ST30

Fig. 6 Pore content of foam concrete

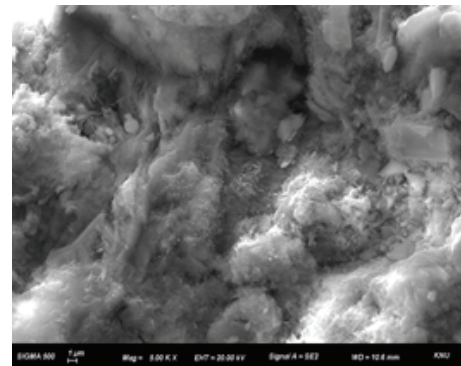
의 SEM 이미지를 나타내었다. 일반 양생한 Plain 시편에서 시멘트의 수화 반응에 의해 생성되는 C-S-H와 같은 수화 생성



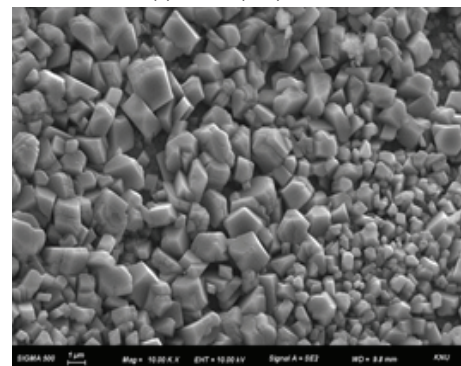
(a) Plain (NC)



(b) Plain (CC)



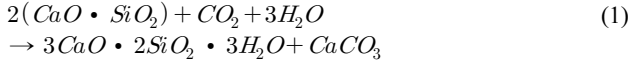
(c) ST30 (NC)



(d) ST30 (CC)

Fig. 7 SEM observations of foam concrete

물이 나타났다. 그리고 탄산화 양생 이후에 수화 생성물의 변화가 나타나지 않았다. 하지만 ST30의 경우에는 탄산칼슘으로 보이는 각진 형상이 나타났다. γ -C₂S의 탄산화 반응식은 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 탄산화 양생을 통해 C-S-H 겔과 탄산칼슘을 생성한다(Mo et al., 2016).



이를 통해 AOD 슬래그 혼입한 폼 콘크리트가 γ -C₂S의 탄산화에 의해 내부 조직을 치밀하게 함을 확인할 수 있었다.

다른 연구자들도 이러한 부피가 증가하는 반응으로 인해 γ -C₂S가 포함된 재료를 시멘트계 재료에 사용할 경우, 탄산칼슘이 생성되어 공극을 치밀하게 만들어 강도증가, 내구성능을 향상시킨다고 보고하였다(Watanabe et al., 2012)

Salman et al.은 AOD 슬래그를 혼입한 시멘트 페이스트를 탄산화 양생하여 압축강도 및 생성물의 화학적 성분 분석을 하였다. 탄산화 양생에 따른 압축강도 증가는 CO₂ uptake에 의해 추가적으로 생성되는 탄산칼슘에 의한 것으로 확인하였으며, SEM 분석에서도 탄산칼슘의 결정상을 확인하였다(Salman et al., 2012).

3.4 CO₂ uptake

본 연구에서는 탄산화 양생 유무에 따른 AOD 슬래그를 혼입한 폼 콘크리트의 일부를 열중량 분석을 하였다. 시멘트 경화체 조직의 변화에서는 발열, 흡열 등 중량의 변화를 가져온다. 또한 콘크리트는 다양한 수화물로 구성되어 있으며, 수화물의 종류에 따라 분해되는 온도 영역이 달라진다. 이 과정에서 상태변화를 조사하여 시편에 들어있는 물질을 정량화 할 수 있다. 일반적인 콘크리트의 경우 550°C ~ 850°C에서는 탄산칼슘의 CO₂분해로 인한 중량 변화가 나타난다. 따라서 탄산칼슘의 양은 CO₂의 중량 감소량 측정을 통해 산정할 수 있다. 탄산칼슘은 아래의 식 (2)를 통해 계산할 수 있다(Moon and Choi, 2018).

$$CO_2 \text{ uptake [wt.\%]} = \frac{\Delta W_{550-850^\circ C}}{W_{105^\circ C}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, W_{105°C}는 105°C에서 건조시킨 시편의 중량을 나타내며, $\Delta W_{550-880^\circ C}$ 는 550°C - 850°C의 온도에서 탄산화 양생 전후의 중량 차이를 나타낸다.

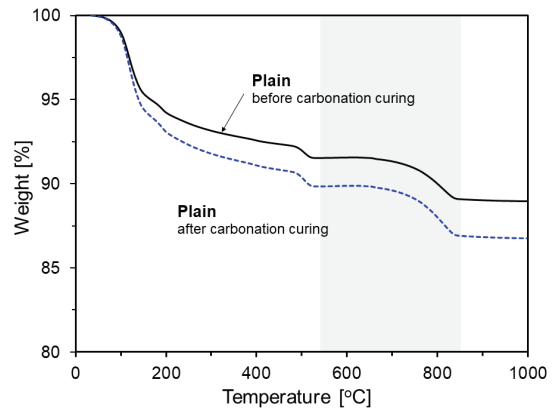
Fig. 8은 폼 콘크리트를 열중량 분석한 그래프로 온도 증가별 중량 감소 그래프이다. 그래프의 음영 표시한 구간은 550°C ~ 850°C로 탄산칼슘의 분해가 이루어지는 구간이다. Table 3

에 나타나듯이 일반 양생한 Plain 시편의 경우 탄산칼슘의 분해에 의한 중량 변화는 2.45% 인 것으로 나타났다. 탄산화 양생한 시편의 경우 중량 변화는 2.93%로 일반 양생한 시편에 비해 미세하게 증가하였다. Fig. 8(b)에서 일반 양생한 ST30 시편의 그래프의 경향은 Plain 시편과 유사하였다. 하지만 탄산화 양생한 경우 ST30 그래프의 경향이 달라졌다. AOD 슬래그를 혼입함에 따라 OPC가 감소하여 C-S-H의 탈수에 의한 중량 감소가 줄어들어 300°C 이하에서 그래프가 더 완만하였다. ST30의 경우 중량 변화가 일반양생, 탄산화 양생 각각 5.18%, 17.42%로 탄산화 양생하였을 때 중량 변화가 가장 컸다. 이를 통해 AOD 슬래그를 혼입한 시편의 탄산화 양생을 통하여 탄산칼슘이 많이 생성되었음을 확인할 수 있었다.

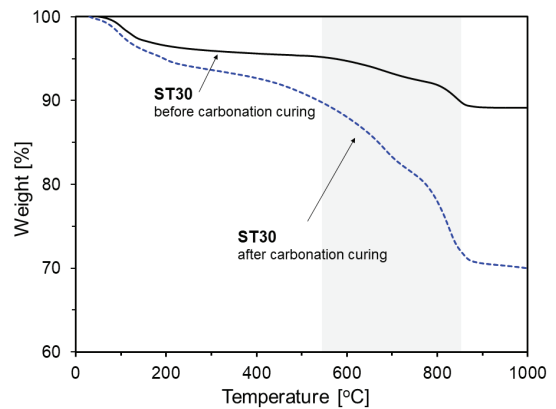
Guan et al.은 1300°C에서 합성한 γ -C₂S을 활용한 모르타

Table 3 CO₂ uptake of specimens

| Specimens | CO ₂ uptake [wt. % by binder] | |
|-----------|--|--------------------|
| | Normal curing | Carbonation curing |
| Plain | 2.45 | 2.93 |
| ST30 | 5.18 | 17.42 |



(a) Plain



(b) ST30

Fig. 8 Thermogravimetric analysis (TGA) of foam concrete

르 시편을 24시간 동안 탄산화 양생하였다. TG-DTA분석을 통해 DTA 그래프는 789 °C 부근에서 흡열 반응의 발생을 나타내어 탄산칼슘이 증가한다는 것을 확인하였다(Guan et al., 2016). Moon and Choi는 AOD 슬래그를 다량 치환한 페이스트 시편의 탄산화 양생에 따른 CO₂ uptake 평가를 하였다. 그 결과 치환율의 증가에 따라 CO₂ uptake가 증가하는 것을 확인하였다(Moon and Choi, 2018).

4. 결론

본 논문에서는 AOD 슬래그를 이용한 폼 콘크리트의 역학적 및 탄소포집 성능을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 AOD 슬래그를 중량대비 28% 치환한 폼 콘크리트를 제작하였다. 양생은 일반양생 및 탄산화 양생 두 가지로 하였다. 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압축강도는 Plain, ST30의 경우 모두 바이더 종류와 관계없이 탄산화 양생하는 경우 압축강도가 증진하는 것으로 나타났다. ST30의 강도 증진률은 재령7일, 28일 각각 73.8%, 34.6%로 Plain에 비해 높았다.
- (2) 이미지 분석에 따른 공극 특성은 ST30 시편이 Plain 시편 보다 공극률이 낮았으며 평균 공극 크기도 작아 압축강도가 높음을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 통해 탄산화에 의한 영향은 분석하기 어려웠으나 목표 기포율을 확인하기에는 적합할 것으로 판단하였다.
- (3) SEM 분석에서 Plain 시편의 경우 탄산화에 의한 수화물 변화가 보이지 않았으나 ST30 시편의 경우 탄산화에 의한 탄산칼슘이 나타났다.
- (4) TGA를 통한 분석결과 ST30 시편의 경우 탄산화 양생에 따라 550 ~ 850 °C 사이에서 중량 감소가 증가하였다. 이는 탄산칼슘의 분해가 이루어지는 구간으로 AOD 슬래그의 탄산화 반응으로 인해 탄산칼슘이 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

폼 콘크리트는 일반적인 콘크리트보다 공극률이 높아 시편 내부로 이산화탄소의 유입이 유리할 것으로 판단된다. 따라서 탄산화 양생을 통한 이산화탄소의 저감과 강도의 증진으로 환경적 및 역학적 측면의 증대를 기대할 수 있다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구제

단의 지원을 받아 수행된 연구임(2020R1A2C2008926). 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반공공 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2016000700003)

References

1. Chen, K.-W., Pan S.-Y., Chen, C.-T., Chen, Y.-H., Chiang, P.-C. (2016), High-gravity carbonation of basic oxygen furnace slag for CO₂ fixation and utilization in blended cement, *Journal of Cleaner Production*, 124, 350-360.
2. E. Gartner, (2004), Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements, *Cem. Concr. Res*, 34, 1489-1498.
3. D.J. Barkera, S.A. Turner, P.A. Napier-Moorea, M. Clarkb and J.E. Davisonc, (2009), CO₂ Capture in the Cement Industry, *Energy Procedia*, 02, 87-94.
4. Z. Zhang, D. Huisingh, (2017), Carbon dioxide storage schemes: Technology, assessment and deployment, *Journal of Cleaner Production*, 142, 1055-1064.
5. S. Bachu, (2004), Evaluation of CO₂ sequestration capacity in oil and gas reservoirs in the Western Canada Sedimentary Basin, *Alberta Geological Survey, Alberta Energy and Utilities Board March*, 114. 1 1-77.
6. A. Dindi, D.V Quang, Lourdes F. Vega, Enas Nashef, Mohammad R. M. Abu-Zahra, (2019), Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage, *Journal of CO₂ Utilization*, 29, 82-102.
7. S.Y. Chung, J.S. Kim, C. Lehmann, D. Stephan, T.S. Han, M.A. Elrahman, (2020), Investigation of phase composition and microstructure of foamed cement paste with different supplementary cementing materials, *cement and concrete composites* 109, 103560.
8. Z. Sun, X.C Lin, A. Vollpracht, (2018), Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers, *Construction and Building Materials*, 189, 797-803.
9. J. Young, R. Berger, J. Breese, (1974), Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂, *J. Am. Ceram. Soc*, 57, 394-397.
10. L.W. Mo, F. Zhang, (2016), Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, *Min Deng Cement and Concrete Research*, 88, 217-226.
11. E.J. Moon, Y.C. Choi, (2018), Development of carbon-capture binder using stainless steel argon oxygen decarburization slag activated by carbonation, *Journal of Cleaner Production* 180, 642-654.
12. M. Salman, O. Cizer, Y. Pontikes, R.M. Santos, R. Snellings, L. Vandewalle, B. Blanplain, K.V. Balen, (2014), Effect of accelerated carbonation on AOD stainless steel slag for its valorisation as a CO₂-sequestering construction material, *Chemical Engineering Journal*, 246, 39-52.
13. L. Hou, J. Li, Z. Lu, Y.H. Niu, J. Jiang, T. Li, (2019), Effect of nanoparticles on foaming agent and the foamed concrete, *Construction and Building Materials* 227, 116698.
14. O.H. Oren, A. Gholampour, O. Gencel, T. Ozbakkaloglu, (2020),

Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate, Construction and Building Material, 238, 117774.

15. Kenzo W, Kosuke Y, Noboru S, Etsuo S, (2012), The mechanism of pore reduction due to carbonation reaction of γ -2CaO·SiO₂ and pozzolanic admixtures with low-heat-portland-cement Journal of Japan Society of Civil Engineers, 68(1), 83-92.
16. K. Watanabe, K. Yokozeki, R. Ashizawa, N. Sakata, M. Morioka, E. Sakai, M. Daimo, (2006), High durability cementitious material with mineral admixtures and carbonation curing, Waste Management 26, 752-757.
17. Saito G, Sakai E, Watanabe K, Morioka M, Otsuki N.,(2008), Carbonation reaction of calcium silicate hydrates containing γ -2CaO-SiO₂ and mechanisms of vaterite formation. J Soc Inorg Mater Japan, 15,284-92.
18. X. Guan, S. Liu, C. Feng, M. Qiu,(2016), The hardening behavior

of γ -C₂S binder using accelerated carbonation, Construction and Building Materials 114, 204-207.

19. H. Cui, W.C Tang, W. Liu, Z. Dong, F. Xin, (2015), Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms, Construction and Building Materials, 93, 522-527.
20. Kriskova, L., Pontikes, Y., Cizer, zlem, Mertens, G., Veulemans, W., Geysen, D., Jones, P.T., Vandewalle, L., Van Balen, K., Blanpain, B., (2012), Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags. Cem. Concr. Res, 42, 778-788.

Received : 05/19/2020

Revised : 06/23/2020

Accepted : 06/29/2020

요 지 : 본 연구에서는 스테인리스 스틸 AOD 슬래그를 이용한 폼 콘크리트의 역학적 및 탄소포집 성능을 조사하였다. AOD 슬래그 바인더로 사용하며 기포율이 $69 \pm 0.5\%$ 이고, 슬러리 밀도는 $573.2 \sim 578.6 \text{ kg/m}^3$ 인 폼 콘크리트를 제작하였다. 탄산화에 의한 영향을 살펴보기 위해 배합을 마친 폼 콘크리트는 일반 양생 및 탄산화 양생 두 가지로 하였다. 압축강도 측정결과 Plain 시편에 비해 AOD 슬래그를 30% 치환한 ST30 시편은 탄산화 양생에 따라 강도가 증가하였다. 폼 콘크리트의 이미지 분석결과에서도 ST30시편이 Plain시편 보다 공극률이 낮으며 평균 공극 크기도 작아 압축강도가 높음을 확인할 수 있었다. 또한 SEM 분석을 통하여 AOD 슬래그의 탄산화에 의한 탄산칼슘의 생성을 확인하였다. TGA 분석을 통해 AOD 슬래그의 혼입으로 CO₂ uptake의 증가를 확인하였다. 폼 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 공극률이 높으므로 AOD 슬래그를 이용하면 탄산화 속도가 빨라 탄소 포집 성능 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : foam concrete, stainless steel AOD slag, carbonation, CO₂ uptake
