

스테인리스 스틸 슬래그 AOD 혼입 시멘트 페이스트의 탄산화 양생에 의한 공극특성

황철성¹, 박경태², 최영철^{3*}

Pore Characteristics of Stainless Steel Slag AOD Blended Cement Pastes by Carbonation Curing

Chul-Sung Hwang¹, Kyoung Tae Park², Young Cheol Choi^{3*}

Abstract: In this study, the mechanical and micro-structural change of cement pastes incorporating Stainless-Steel Slag Argon Oxygen Decarburization Slag (STS-A) containing γ -C₂S as a carbon capture materials were investigated with carbonation curing condition. γ -C₂S is non-hydraulic, therefore does not react with water. But γ -C₂S has a reactivity under carbonation curing condition with water. The reaction products fill up the pore in pastes. The microstructure of STS-A blended cement pastes could be densified by this reaction. The pore structure of cement pastes incorporating STS-A was measured using mercury intrusion porosimetry (MIP) after carbonation curing (CO₂ concentration is about 5%). Also the fractal characteristics were investigated for the effect of carbonation curing on the micro-structural change of paste specimens. From the results, the compressive strength of carbonated specimens incorporating STS-A increased and pore-structure of carbonated paste is more complicated.

Keywords: Stainless steel slag, γ -C₂S, Carbonation, Carbon-capture, Binder, CO₂ uptake

1. 서 론

전 세계적으로 철과 시멘트의 수요가 증가하면서 대기 중으로 이산화탄소 방출량이 증가하고 있으며, 이에 따른 산업 활동에서 발생하는 이산화탄소는 온실가스 효과에 큰 영향을 미치고 있다. 또한, 산업 부산물은 많은 양이 매립 처분되고 있어, 막대한 처리비용과 매립장 한계 등의 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 이산화탄소 처리 및 산업 부산물의 유효처리에 대한 다수의 연구가 수행되어 오고 있다(Chen, K.-W., 2016.)

국제에너지기구(IEA)는 정부 간 기후변화 패널(IPCC)에서 요구한 “2050년까지의 기후변화 2°C 이내”를 위해 2050년 CO₂ 예상 배출량(620억 톤)을 2005년 배출량(280억 톤)의 약 50%까지 감축한 140억 톤으로 유지할 것을 에너지기술전망 보고서(2008)를 통해 권고하고 있다. 이러한 요구를 실현하기 위해 IEA는 에너지효율 향상기술, 재생에너지, 원자력, 이산

화탄소 포집 및 저장기술(Carbon Capture & Storage, CCS)을 적극 활용할 것을 제시하고 있다.

CCS는 산업장에서 발생하는 이산화탄소를 분리, 포집, 압축, 수송하여 지중 또는 해저의 지층에 대규모로 저장시켜 장기간 격리시킴으로써 원천적으로 이산화탄소의 대기방출을 봉쇄하는 기술이다.

COP17 회의에서, 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술은 Clean Development Mechanism(CDM) 기술로 기후변화협약기구(UNFCCC)에서 인정하였으며, 에너지 집약 산업에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 탄소포집 및 저장기술의 개발 및 구현은 전 세계적으로 큰 관심을 끌고 있다(Chang, E.-E. 2013.).

현재 이러한 기술개발에 관한 연구는 각국에서 활발히 진행 중에 있는데, 그 방법으로는 지중저장법, 광물탄산화법 등이 있다. 그 중 광물탄산화 기술은 화력발전소, 제철소 등의 배출원에서 포집된 이산화탄소를 산업체에서 배출되는 무기계 산업부산물 또는 자연산 광물과 반응시켜 방해석, 마그네사이트 등으로 만들어 탄산염 광물의 결정구조 내에 온실가스를 고정화하여 저장하는 기술이다. 이산화탄소를 포함하고 있는 물질 중에서 탄산염 광물이 열역학적으로 가장 안정한 상태이므로 광물탄산화는 인위적 산업 활동으로부터 발생된 이산화탄소를 고정화하기 위한 매력적인 기술로 평가되어 있다. 이에 따라 많은 나라에서 다수의 연구자들에 의해 연구가

¹정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 교수

²정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 석사과정

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 2018년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

수행되고 있다. 온실가스 저장에 응용할 수 있는 무기계 산업 부산물은 페콘크리트, 슬래그, 석탄재, 석고 등이 있다. 또한, 무기계 부산물은 제철소, 발전소 및 산업체 부근에서 저가로 다량 이용할 수 있다는 점 때문에 경제적으로 유리하다. 대한민국에서는 이러한 부산물이 연간 약 5,000만 톤이 발생되고 있으며 이를 광물탄산화법에 활용 시 이론적으로 매년 약 1,200만 톤의 온실가스를 고정화 할 수 있다.

무기계 부산물 중 광물탄산화를 위한 대상 물질로는 유동층 화력발전에서 발생하는 석탄재, 도시 고형 폐기물 소각재, 제강산업으로부터 배출되는 슬래그 등이 있다. 미국에서는 슬래그와 고로슬래그에 의한 이산화탄소 저장 가능성을 연간 4.6 Mt CO₂로 평가하였다. Bertos 등은 영국의 도시 고형 폐기물 소각로에서 발생하는 바닥재와 공기 오염 제거 소각재를 사용하여 실험실 규모로 탄산화를 수행한 결과, 소각재와 바닥재의 경우, 각각 7%와 3%가 탄산화 되었음을 관찰하였다. Huijgen 등은 제강슬래그 슬러리를 사용한 광물탄산화 연구를 수행하였다. 그들은 직경 106 μm 이하의 제강슬래그를 대상으로 고체-액체 비 10, 200°C, 20 bar 및 이산화탄소 가스 농도 100% 조건하에서 제강슬래그 내부의 약 70%의 칼슘이 탄산화가 됨을 확인하였다(Huijgen, W.J.J., Witkamp, G.-J., Comans, R.N.J., 2005.).

스테인리스 스틸 제조 공정으로부터의 부산물인 Stainless-Steel Argon Oxygen Decarburization (STS-A)는 칼슘이 풍부하지만, 물과 직접적으로 반응을 하지 않는 특성을 가지고 있다. STS-A는 대기 중의 이산화탄소와 높은 반응성을 보이는 성분인 γ -C₂S를 다량 함유하고 있다. γ -C₂S를 포함하고 있는 STS-A는 탄산화 양생에 의해 공극이 치밀해 지면서 압축강도가 향상되는 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 대기 중의 이산화탄소와 반응하여 이를 연구 포집하면서, 역학적 특성이 향상되는 STS-A를 대상으로 탄소포집 건설재료로서의 가능성 확인에 중점을 두었고 STS-A의 탄산화 양생에 의한 공극분포 특성 분석을 통해 역학적 특성 향상 메커니즘을 살펴보고자 한다. 이를 위해 γ -C₂S를 함유한 STS-A를 혼입한 페이스트를 제작하여 탄산화 양생 유무에 따른 역학적 특성을 분석하였다. 또한 탄산화 양생에 따른 γ -C₂S의 반응 생성물 분석과 이에 따른 페이스트 내부 공극의 변화를 분석하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에서는 원재료로 보통포틀랜드 시멘트(OPC)와 STS-A를 사용하였다. 시멘트는 밀도 3.14g/cm³, 분말도 332

m²/kg의 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였다. STS-A는 국내에서 생산되는 제품을 사용하였으며, 밀도와 분말도는 각각 2.91g/cm³, 359m²/kg이다. XRF분석을 통한 OPC의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이는 CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃성분이 주요 성분으로 각각 54.3%, 17.7%, 9.2%, 6.4%로 나타났다. OPC의 주요 성분은 Bogue의 식에 의해 C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF가 중량기준으로 각각 58.1%, 15.0%, 8.1%, 9.2%이다.

Table 1 Chemical composition of raw materials

	Chemical Compositions (wt.%)	
	OPC	STS-A
SiO ₂	20.8	17.7
Al ₂ O ₃	4.9	6.4
Fe ₂ O ₃	3.5	3.0
CaO	62.4	54.3
MgO	1.6	9.2
K ₂ O	0.9	0.2
Na ₂ O	0.3	0.1
SO ₃	2.2	0.4
LOI	2.7	1.7
Sum	98.82	99.05

OPC 및 STS AOD 슬래그의 Laser diffraction에 의해 측정된 입자크기 분포는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 STS AOD 슬래그의 d50의 값이 25.5mm로 OPC의 평균 직경 15.5mm보다 큰 것을 알 수 있다. OPC는 입자크기 15.2mm에서 피크 값을 갖는 단종 분포를 보이지만, 의 경우 13.2mm와 77.6mm에서 2개의 피크 값을 갖는 양봉 분포를 보이고 있다.

2.2 배합 및 실험방법

본 연구에서는 γ -C₂S를 함유하고 있는 STS-A의 탄산화에 의한 역학적 특성 영향을 살펴보기 위해, OPC 중량의 50%를 STS-A로 치환하여 모르타르 시험체를 제작하였다. Table 2는 사용된 모르타르 시험체의 배합표를 나타내고 있으며, 모든 시험체의 물-바인더 비를 0.5로 고정하였다. 탄산화 양생에 의한 공극 특성 변화를 살펴보기 위해 Table 2와 배합은 동일하게 페이스트 시험체를 제작하였다. 배합은 원재료들이 충분히 혼합되도록 건비빔을 시행한 후 물을 가하여 1.5분간 혼합 믹서에서 혼합하여 40mm×40mm×160mm크기의 몰드에 타설하였다.

모르타르 시험체의 탄산화에 의한 압축강도 영향을 살펴보기 위해 두 가지 방법으로 양생하였다. 첫 번째는 페이스트 성

형 3일 후 몰드에서 탈형한 시험체를 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온항습 챔버에서 양생하는 방법으로 이 방법은 이산화탄소를 인위적으로 공급하지 않는 양생법이다. 두 번째 방법은 시험체를 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온항습 챔버에 5% 농도의 이산화탄소를 지속적으로 공급하는 탄산화 양생법이다(Fig. 2참고).

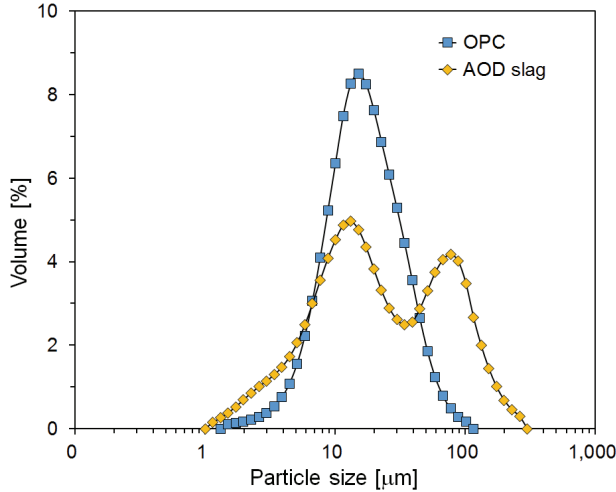


Fig. 1 Particle size distributions of raw materials

Table 2 Mix proportions of mortar specimens

	OPC	Water	STS-A	Sand
Plain	100	50	-	150
C50	50	50	50	150

페이스트의 공극구조는 콘크리트의 투수성이나 콘크리트 내부로의 이온 확산 등 물질이동 특성을 설명하는 중요한 요소이다. 또한 콘크리트의 역학적 특성을 결정하는 요소로 좌우한다.

수은압입법(mercury intrusion porosimetry, MIP)은 무기계 재료의 공극구조 특성을 연구하는데 일반적으로 사용되고 있는 방법이다. 수은을 시편에 압입하여 들어간 수은의 양으로부터 공극의 크기를 측정하는 방법이다. MIP는 단순한 원리를 이용하여 간단히 공극의 크기 및 분포를 측정할 수 있다.

탄산화 양생 유무에 따른 공극분포 및 미세구조 분석을 위하여 압축강도 측정 후 파쇄된 시편을 5mm 크기로 분쇄한 후 건조조에서 $60 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도로 24시간 동안 건조시킨 후 MIP를 이용하여 공극측정을 실시하였다.

페이스트의 압축강도 측정은 ISO 679에 따라 각 실험 재령 7일과 28일에 실시하였다. 압축강도 시험을 위한 페이스트 시험체는 크기 40mm×40mm×160mm의 각주형 페이스트 시험체를 제작하여 각 재령별로 6개씩 강도를 측정하고, 그 평균을 결과 값으로 사용하였다.

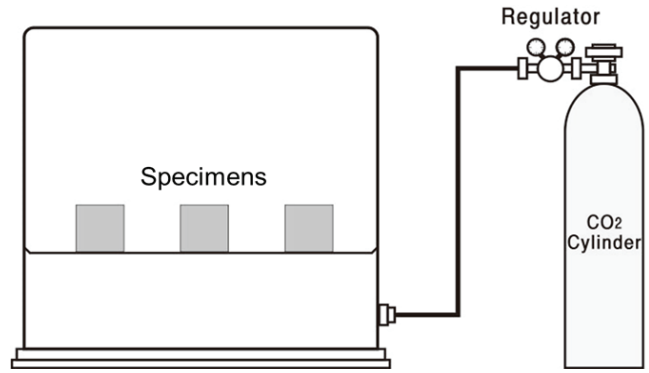


Fig. 2 Carbon dioxide curing chamber

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 탄산화 양생에 따른 압축강도 특성

γ -C₂S는 클링커광물 Belite계 광물로써 분자구조가 매우 안정적인 물질이다. γ -C₂S는 Belite계 광물인 β -C₂S가 서서히 냉각되어 더스팅현상에 의해 체적팽창이 발생됨에 따라 발생하는 분말형태의 재료이다. 시멘트의 β -C₂S와 달리 γ -C₂S는 물과 반응하지 않는 비수경성 성질을 가지고 있어서 일반적으로 바인더로서 사용되지 않는다. 그러나 직접 CO₂와 반응하여 CaCO₃가 생성된다.

이러한 γ -C₂S는 시멘트계 재료에 혼입 시 CO₂와의 빠른 반응으로 인하여 공극이 충전됨에 따라 표면부가 치밀해지는 효과가 있으며 이로 인하여 염해, 황산염 등의 성능저하인 자차단 및 압축강도 향상에도 기여한다. 이는 시멘트 수화과정의 생성물인 Ca(OH)₂와 플라이애시의 규산염의 포졸란 반응에 생성된 C-S-H, C₄AH₁₃, C₂AH₈ 등의 추가 반응 생성물에 의한 내부 공극 감소에 의한 미세구조 치밀화에 의한 내구성 향상 현상과 유사하다. 포졸란 반응에 의해 추가적으로 생성된 수화물은 콘크리트의 공극 크기를 감소시키며, 미세구조를 더욱 치밀하게 하여 콘크리트의 불투수성과 내구성을 향상시킨다.

Table 3과 Fig. 3에 각 시험체의 CO₂ 양생유무에 따른 압축강도 측정 결과를 나타냈다. Plain의 경우, CO₂ 양생 시 재령 7일, 28일별 압축강도가 각각 37.4MPa, 46.8MPa로, Non-CO₂ 양생을 기준으로 약 2.2%, 4.9% 향상하였다. 즉, Plain의 경우, Non-CO₂ 양생과 CO₂ 양생에 의한 페이스트의 압축강도 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. C50의 경우 CO₂ 양생 시 재령 7일, 28일별 압축강도가 각각 30.4MPa, 38.9MPa로, Non-CO₂ 양생을 기준으로 약 142.4%, 154.2% 증가하였다. CO₂ 양생 시 STS-A의 γ -C₂S가 CO₂와 직접 반응하여 C-S-H와 탄산염 광물을 형성하여 높은 압축강도가 발현된 것이다.

Table 3 Compressive strengths of specimens

Curing method	Compressive strength (MPa)			
	Plain		C50	
	Non-CO ₂	CO ₂	Non-CO ₂	CO ₂
7 days	36.6	37.4	12.54	30.4
28 days	44.6	46.8	15.3	38.9

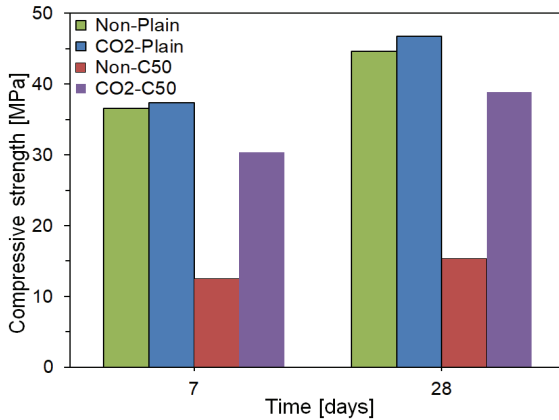


Fig. 3 Compressive strength of specimen

STS-A를 대부분 구성하고 있는 γ -C₂S는 물과 반응하지 않는 비수경성 성질을 가지고 있어서 일반 기건양생 조건에서는 수화물 생성에 의한 강도 증진 효과가 없다. 하지만, 적당량의 물이 존재하는 조건에서 CO₂와 반응하여 탄산화 되는 경향이 있다. 즉, CO₂ 양생을 통해 탄산화 반응이 진행됨에 따라 시멘트 수화물 이외에 추가적인 반응 생성물(CaCO₃)이 형성된다. 이러한 생성물들에 의해 시멘트 매트릭스 내부의 조직을 더욱 치밀하게 되고, 결과적으로 압축강도 증진효과가 나타난다. STS-A를 치환한 경우에도 STS-A의 치환을 뿐만 아니라 CO₂ 양생조건에 따라 압축강도 차이가 발생한다.

Xuemaο Guan는 STS-A의 다양한 CO₂ 양생조건을 모사하기 위하여, CO₂ partial pressure 및 온도를 변화시킬 수 있는 탄산화 장치(carbonation reactor)를 사용하여 independent influence of parameters를 연구하였다. STS-A 페이스트의 압축강도의 변화는 8bar 조건에서 약 18±1.4MPa로 가장 높게 나타났으나, 4bar, 12 bar, 16 bar, 20 bar 양생 조건에서의 평균 압축강도는 13.85MPa로 압력 증가에 따른 명확한 압축강도의 증가는 나타나지 않았다. 또한, 양생 온도조건 20°C~40°C 범위에서 페이스트의 점진적인 압축강도 감소가 나타났으나, 40°C~80°C 범위에서는 압축강도의 증가가 나타났음을 보고하였다.

3.2 탄산화 양생에 따른 공극특성 변화

탄산화 양생에 따른 공극특성 변화를 살펴보기 위해, Fractal model에 근거한 분석과 CO₂ 양생유무에 따른 재령별

각 시험체의 공극크기 분포에 대하여 분석하였다.

수은압입법(mercury intrusion porosimetry, MIP)실험에서 Zhang and Li (1995) model의 다공성 재료의 공극표면에 수은이 충돌할 때 발생하는 표면에너지 원리와 Mandelbrot이 제안한 Fractal 차원을 가진 표면적과 그 표면을 둘러싸고 있는 부피의 상관관계 원리를 적용하면, 식 (1)과 같은 최종적인 스케일링 관계가 성립된다.

$$W_n = \sum_{t=1}^n \bar{P}_t \Delta V_t \propto r_n^{2-D} V_n^{D/3} = Q_n \quad (1)$$

여기서, n은 압력 구간의 수, \bar{P}_t 는 t번째 압력 구간에서의 평균 압력, ΔV_t 는 t번째 압력 구간에서의 침투된 수은 부피, V는 공극 표면에 의해 둘러싸인 부피, D는 공극 표면의 r은 공극 반지름을 나타낸다.

위의 식 (1)를 정리하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\ln\left(\frac{W_n}{r_n^2}\right) = D \ln\left(\frac{V_n^{1/3}}{r_n}\right) + C \quad (2)$$

식 (2)에 의하면, MIP 실험 결과를 이용하여 $\ln(W_n/r_n^2)$ 과 $\ln(V_n^{1/3}/r_n)$ 사이의 관계를 이중 대수의 그래프로 나타내면 그래프의 기울기가 시편의 Fractal 차원의 공극의 형상을 의미하는 surface fractal dimension(SFD(D))이다.

이러한 SFD(D)를 판단할 때 Fractal의 기하학적인 관점에서 SFD(D)값이 2일 경우 2차원의 면을 의미하여 공극 표면이 매끄러운 형상으로 판단할 수 있으며, SFD(D)값이 3일 경우 공극이 매우 치밀하고 복잡하게 이룬 형상을 의미하기 때문에 Zhang and Li (1995) model에 근거하여 SFD(D)를 산정할 때 이 값이 2와 3사이라 가정하였으며, 그 외의 범위일 경우에는 기하학적인 관점에서 물리적으로 판단할 수 없다.

Fig. 4는 STS-A 혼입 시멘트 페이스트의 전체 공극에 대해 Zhang and Li(1995) model을 이용하여 산정된 SFD(D)로 Fig. 4, Fig.5와 Table 4에 Ds로 나타내었다. Zhang and Li (1995) model을 산정시, SFD(D)값이 2와 3사이라 가정하였으며, 그 외의 범위일 경우에는 기하학적인 관점에서 물리적으로 판단할 수 없다는 것을 바탕으로 결과값을 비교해보면 SFD(D) 값은 2와 3사이에서 나타나는 것을 확인할 수 있고 Non-CO₂ curing와 CO₂ curing의 탄산화의 유무를 비교하면 탄산화를 하였을 때 CaCO₃ 형성으로 인하여 공극구조가 더욱 복잡하고 치밀해지는 것을 Fractal의 기하학적인 관점에서 확인할 수 있다. 따라서 전체 공극 영역에 대하여 SFD(D)를 산정하면 모델의 가정 사항에 적합한 결과가 나타난다.

Table 4 Surface fractal dimension of specimens

	Non-CO ₂ curing		CO ₂ curing	
	meso	micro	meso	micro
C50 7days	2.6052	2.6981	2.8907	2.7025
C50 28days	2.6622	2.6596	2.7584	2.5593

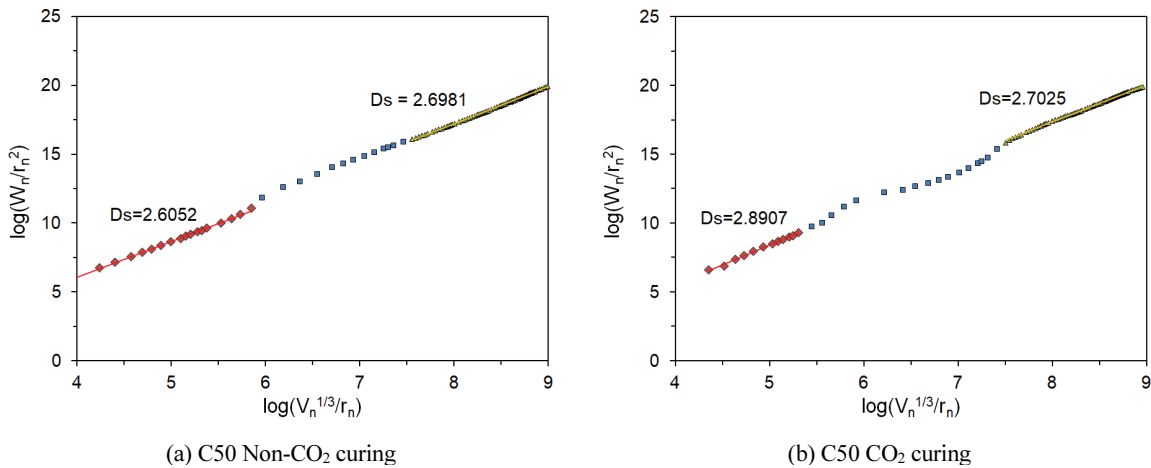


Fig. 4 C50 7day Surface fractal dimension

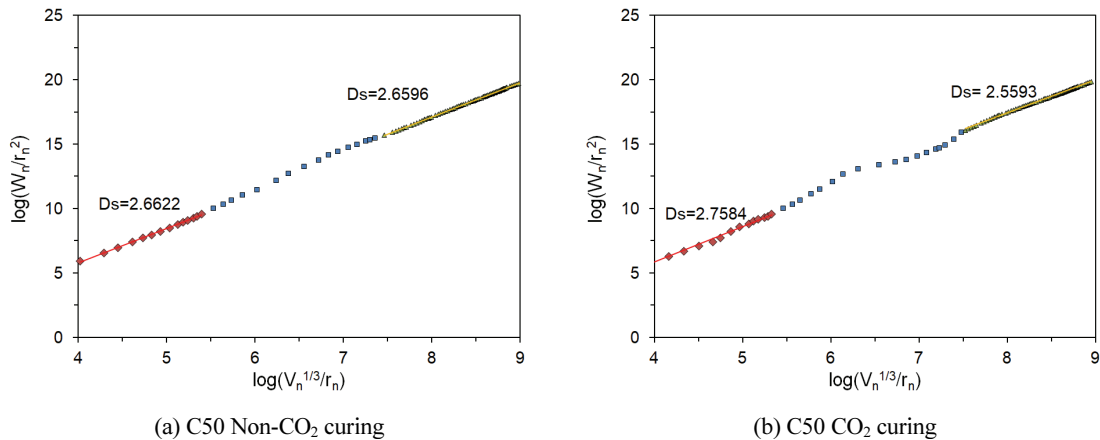


Fig. 5 C50 28day Surface fractal dimension

Fig. 7은 CO₂는 양생유무에 따른 재령별 각 시험체의 공극 크기 분포 및 누적 공극량 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로, STS-A의 치환율이 높을수록 CO₂ 양생유무에 따른 최대 공극 크기와 누적공극량의 감소폭이 두드러지는 현상이 나타났다.

C50의 경우, 일반 양생 시 크기 약 100~3000 μ m의 공극이 많이 측정되었으며, Plain과 비교하여 볼 때 공극량이 다소 증가한 것으로 측정되었다. 이는 비수경성 특성을 갖는 STS-A의 높은 치환에 따른 낮은 OPC 함량으로 인해 시험체가 충분히 경화되지 못하여 공극이 많이 발생한 것이다.

반면 CO₂ 양생 시, 공극이 약 80~300 μ m, 800~2500 μ m 범위에 다수 분포하였다. 이는 γ -C₂S가 CO₂와 반응하여 생성된 생성물에 의해 내부 공극이 치밀해 진 것으로 판단된다. CO₂ 양생 유무에 따른 C50의 압축강도 변화 결과와도 일치하는 결과이다. CO₂ 양생 시 재령 7일, 28일별 압축강도가 Non-CO₂ 양생을 기준으로 약 142.4%, 154.2% 증가한 것으로 보아, 공극량 감소와 큰 관계가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 누적공극량을 비교한 결과 직경이 커질수록 누적공극량이 증가하는 것으로 보아 이는 γ -C₂S가 CO₂와 반응하여 다량 생성된 CaCO₃가 공극감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.

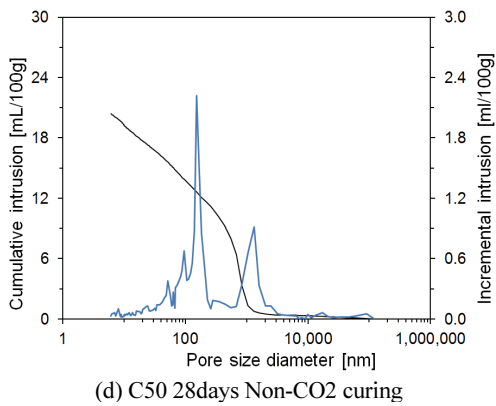
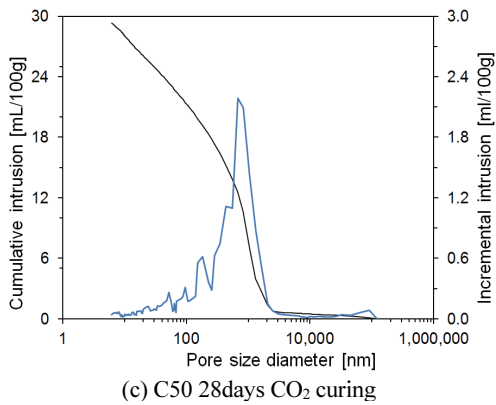
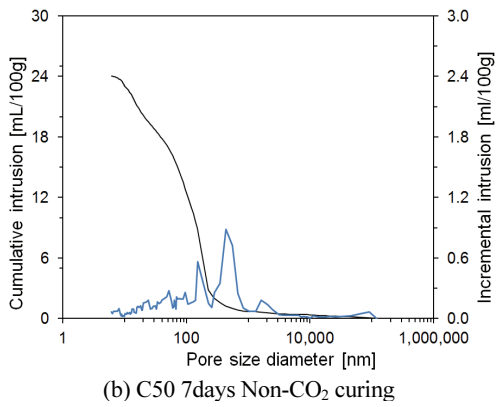
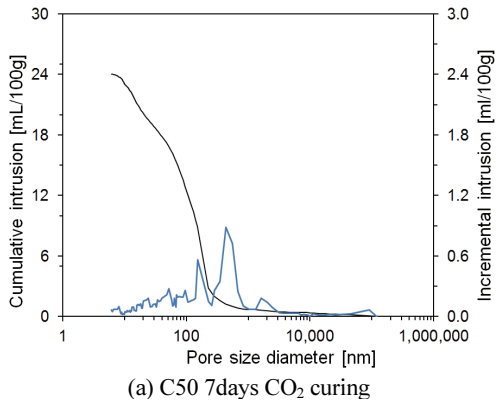


Fig. 6 C50 28day Surface fractal dimension

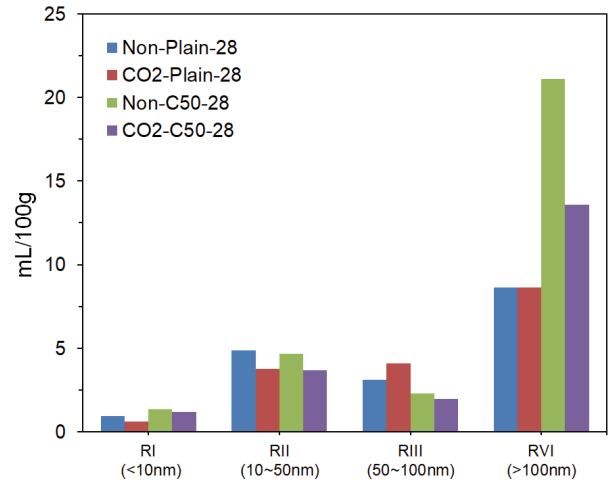


Fig. 7 Cumulative pore volume

4. 결론

본 논문에서는 STS-A 혼입물과 탄산화 양생에 따른 페이스트의 압축강도, 공극특성 변화를 파악하기 위해 Plain과 STS-A 치환율 50%의 배합을 이용하여 실험을 수행하였으며, 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압축강도는 Plain의 경우, Non-CO₂ 양생과 CO₂ 양생에 의한 페이스트의 압축강도 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. C50의 경우 CO₂ 양생 시 재령 7일, 28일별 압축강도가 Non-CO₂ 양생을 기준으로 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) Fractal model 에 근거한 공극특성 변화는 Zhang and Li (1995) model을 산정시, SFD(D) 값이 2와 3사이에서 나타나고, D=3일 때 전체 공극이 채워진다고 가정하였기 때문에 C50의 탄산화 유무와 재령별 공극의 값이 적합한 것으로 나타났다.
- (3) CO₂ 양생 유무에 따른 재령별 공극특성 변화는 STS-A의 치환율이 높을수록 CO₂ 양생유무에 따른 최대공극 크기와 누적 공극량의 감소폭이 두드러지는 현상이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(17CTAP-C129778-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Chang, E.-E., Chen, T.-L., Pan, S.-Y., Chen, Y.-H., Chiang, P.-C. (2013), Kinetic modeling on CO₂ capture using basic oxygen furnace slag coupled with cold-rolling wastewater in a rotating packed bed, *J. Hazard. Mater.*, 260, 937-346.
- 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, *J. Clean. Prod.*, 124, 350-360.
- E.-E. Chang, Tse-Lun Chen, Shu-Yuan Pan, Yi-Hung Chen, Pen-Chi Chiang, (2013), Kinetic modeling on CO₂ capture using basic oxygen furnace slag coupled with cold-rolling wastewater in a rotating packed bed, *Journal of Hazardous Materials*, 260, 937-346.
- Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 124(2016), 1072-1080.
- Huijgen, W.J.J., Witkamp, G.-J., Comans, R.N.J., 2005. Mineral CO₂ Sequestration by Steel Slag Carbonation. *Environ. Sci. Technol.* 39, 9676-9682. doi:10.1021/es050795f
- Lackner, K.S. (2002), Carbonate chemistry for sequestering fossil carbon. *Annu. Rev. Energy Environ*, 27, 193-232.
- 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.
- Saito, T., Sakai, E., Morioka, M., Otsuki, N. (2010), Carbonation of γ -Ca₂SiO₂ and the Mechanism of Vaterite Formation. *J. Adv. Concr. Technol.* 8, 273-280.
- Santos, R.M., Van Bouwel, J., Vandeveld, E., Mertens, G., Elsen, J., Van Gerven, T. (2013), Accelerated mineral carbonation of stainless steel slags for CO₂ storage and waste valorization: Effect of process parameters on geochemical properties. *Int. J. Greenh. Gas Control*, 17, 32-45.
- Soo-Chun Chae, Young-Nam Jang and Kyoung-Won Ry (2009), Mineral Carbonation as a sequestration method of CO₂, *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(5), 527-555.
- Zhihua Zhang, Donald Huisinigh (2017), Carbon dioxide storage schemes: Technology, assessment and deployment, *Journal of Cleaner Production*, 142, 1055-1064.

Received : 03/09/2018

Revised : 04/16/2018

Accepted : 04/26/2018

요 지 : 본 연구에서는 탄소 포집 물질인 γ -C₂S를 함유하고 있는 Stainless Steel Slag AOD를 포함한 시멘트 페이스트의 역학적 및 미세구조 변화를 연구하였다. γ -C₂S는 비수경성이며 그러므로 물과 반응하지 않는다. 그러나 γ -C₂S는 물에 의한 탄산화 양생조건에서 반응성을 가지고 있다. 그 반응은 페이스트 안의 공극을 치밀하게 형성하기 때문에 STS-A를 사용한 시멘트 페이스트의 공극구조는 탄산화 (CO₂ 농도는 약 5%) 후에 수은압입시험에 의해 측정될 수 있다. 또한 Fractal 특성은 시멘트 페이스트의 미세구조변화는 탄산화 영향에 대하여 연구하였다. 그 결과로부터 STS-A를 포함하는 탄산화 시멘트 페이스트는 강도가 증가하였고 공극구조는 더 치밀해졌다.

핵심용어 : Stainless steel slag, γ -C₂S, Carbonation, Carbon-capture, Binder, CO₂ uptake
