

CO₂ 양생을 이용한 Mg(OH)₂ 혼입 시멘트 페이스트의 물리화학적 특성

Physicochemical Properties of Cement Paste Containing Mg(OH)₂ Cured by CO₂ curing Method

진 정 심¹

이 한 승^{2*}

Chen, Zheng-Xin¹

Lee, Han-Seung^{2*}

Department of Architectural System Engineering, HanYang University, Sangnoku-Gu, Ansan, 15588, Korea ¹

Department of Architectural and Architectural Engineering, HanYang University (ERICA), Sangnoku-Gu, Ansan, 15588, Korea ²

Abstract

Corrosion of the rebar is one of the main factors affecting the durability of reinforced concrete in the world which lead to the failure of the reinforced concrete structures. In this research, a new method of fixing CO₂ is practiced to improve the carbonation resistance of the concrete. Brucite(Mg(OH)₂), a kind of common CO₂ fixation materials, was added into ordinary Portland cement paste. Samples containing 0%, 5%, 10%, and 15% Mg(OH)₂ were exposed to an accelerated carbonation curing regime with 20% concentration of CO₂, 60% relative humidity, and a temperature of 20°C until tested at 3d, 7d, 14d and 28d. After 28d of CO₂ accelerated curing, in the paste containing Mg(OH)₂, magnesian calcite was detected by SEM-EDX. Meanwhile, the paste containing Mg(OH)₂ exhibit the better pore distribution than ordinary Portland cement paste and the compressive strength of the cement paste containing Mg(OH)₂ were more than 50Mpa.

Keywords : CO₂ fixation material , Mg(OH)₂, CO₂ accelerated curing , carbonation

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 장수명화가 대두됨에 따라 내구성문제에 대한 중요성이 증대되고 있다. 그중 콘크리트의 내구성에 큰 영향을 미치는 것이 탄산화이다. 콘크리트의 탄산화는 대기 중의 CO₂가 구조물 내부로 침투하여 발생하는데 염기성을 띠는 수화물이 CO₂가 용해되어 생긴 탄산이온(CO₃²⁻)과 화학반응을 하여 진행된다. 이러한 콘크리트의

탄산화는 구조물 내부의 pH를 저하시켜 철근 부식에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[1,2].

최근 콘크리트 구조물의 탄산화로 인한 내구성 저하를 제어하기 위하여 다양한 방법이 이용되고 있다. 주로 결합재의 종류, 물-결합재비[3], 표면 코팅처리[4,5], 감수제 종류[6,7] 등을 이용하여 탄산화에 대한 저항성을 향상시키는 것이 일반적이다. 이러한 방법들은 콘크리트 내 공극의 크기를 줄이거나 표면을 코팅하여 탄산화 반응 초기에 CO₂의 침투를 억제하는 것에 초점을 맞추고 있다.

한편, 탄산화는 공극내부의 수분과 탄산이온에 의해 반응이 일어나며, 공극 내부에 탄산염생성으로 인하여 공극량을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다[8,9]. 탄산화 반응 초기에 침투되는 CO₂와 콘크리트 공극 주변의 염기성 물질의 반응성이 높은 조건이면 공극 내부에 탄산염이 형성됨과 동시에

Received : September 4, 2017

Revision received : October 24, 2017

Accepted : April 4, 2018

* Corresponding author : Lee, Han-Seung

[Tel: 82-31-436-8159, E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr]

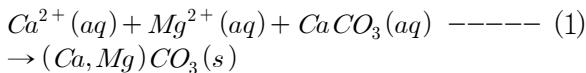
©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

콘크리트 표면부분의 공극량을 급격하게 감소시킨다.

따라서 콘크리트 표면에서의 탄산화가 급격하게 진행되면 추후에 침투되는 CO₂의 양은 줄일 수 있다는 가정 하에 시멘트 결합재의 탄산화 반응성을 높이는 방안이 필요하다. 시멘트 결합재로서 Ca, Mg계 무기물질은 다른 알칼리토금속이나 2가 양이온보다 탄산염물질을 쉽게 형성할 수 있는 것으로 알려져 있다[10,11]. 대표적 Mg 계열의 광물로는 사문석, 감람석, 활석 등이 있고, Ca 계열의 광물로는 규회석, γ-C₂S 등이 있다[12,13,14].

탄산염물질을 쉽게 형성시킬 수 있는 다양한 물질이 있지만, 본 연구에서는 Mg 계열의 물질을 선정하였다. Mg 계열의 물질을 선택한 이유는 Mg의 몰 질량이 Ca보다 크기에 따라 단위질량 당 CO₂ 고정량이 높은 것으로 알려져 있기 때문이다[15].

또한, 시멘트 결합재 내에 Mg의 비율이 낮으면, 시멘트 결합재에서 탄산화가 이루어질 때 CaCO₃ 뿐만 아니라, Mg가 CaCO₃ 내 임의로 결합되어 생긴 Magnesian Calcite ((Ca, Mg)CO₃)가 생성 된다. Magnesian Calcite의 생성 반응은 식 (1)과 같다[16,17,18].



이때 생성된 Magnesian Calcite는 순수한 CaCO₃의 비해 더 작은 크기의 공극 비율이 높은 것으로 알려져 있고, 이는 CO₂의 침투효과를 낮출 수 있다[16,17].

따라서 본 연구에서는 Mg 계열의 물질 중 Mg(OH)₂가 혼입된 시멘트 페이스트의 CO₂ 양생에 따른 물리화학적 특성에 대하여 분석하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 개요

시멘트는 KS L 5201에 준하는 국내 S사 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 Mg(OH)₂는 국내 A사의 제품을 사용하였다. Table 1은 XRF (X-Ray Fluorescence) 분석을 통한 실험에 사용한 보통포틀랜드시멘트의 화학조성을 나타내었다. Table 2는 Mg(OH)₂의 화학조성을 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of ordinary portland cement

chemical compositions	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃
content(%)	69.38	18.72	4.01	3.48	4.23

Table 2. Chemical compositions of brucite

chemical compositions	Mg(OH) ₂	Cl	Al	Ca	Na
content(%)	≥95	≤0.5	≤0.02	≤0.7	≤0.05

시멘트 페이스트 공시체 제작을 위해 50mm × 50mm × 50mm의 크기의 몰드를 사용하였다. 시멘트 페이스트의 배합은 Table 3에 나타냈다. 시멘트 페이스트 배합을 위해서 보통포틀랜드시멘트와 Mg(OH)₂를 투입한 후 30초 동안 건비빔을 실시하였고, 물을 투입하여 1분 30초 동안 저속으로 배합 후 30초 동안 고속으로 배합하였다. 시험체 양생은 24시간 동안 밀봉양생을 하였고, 그 후 CO₂ 농도 20%, 온도 20℃, 상대습도 60%의 조건으로 CO₂ 양생을 실시하였다.

Table 3. Mix proportion of cement mortar samples

Sample	W/b(%)	Mix design(kg/m ³)		
		water	cement	Mg(OH) ₂
OPC			1132	-
MH5	0.55	622.6	1075.4	56.6
MH10			1018.8	113.2
MH15			962.2	169.8

2.2 측정 항목

2.2.1 탄산화 깊이

탄산화 깊이 측정을 위하여 각 시험체를 1일간 기건양생 후 CO₂ 농도 20%, 온도 20℃, 상대습도 60%의 조건으로 CO₂ 양생 실시하였다. 시험체 CO₂ 양생 후 재령 3일, 14일, 28일에 페놀프탈린 분무법으로 절단면의 탄산화 깊이를 측정하였다.

2.2.2 압축강도

압축강도 측정을 위해 50mm × 50mm × 50mm 크기의 공시체를 제작하였고, CO₂ 양생 재령 3일, 7일, 14일, 28일 후 시험체의 압축강도를 30Ton급 UTM을 이용하여 각 재령 별 3개의 시험체에 대한 압축강도를 측정하여 평균값을 산출하였다.

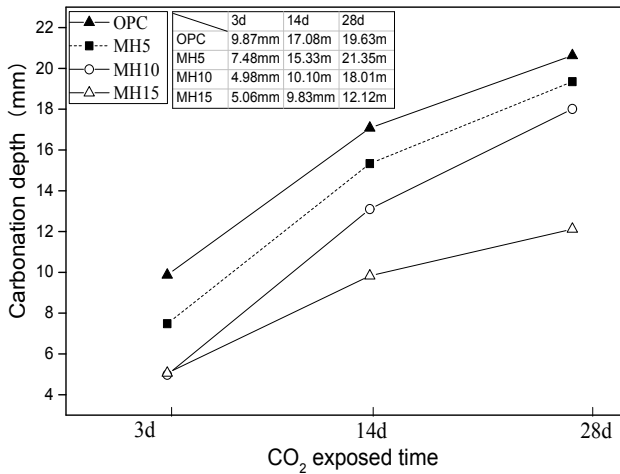


Figure 1. Carbonation depth of samples

2.2.3 공극분포

탄산화 깊이 결과에 의해 cutting기를 사용하여 각각 시험체의 탄산화 된 부분과 탄산화 되지 않은 부분을 분리하였다. 공극분포 측정을 위해서 탄산화 된 부분의 시료를 5mm 크기로 분쇄하였고 mercury intrusion porosity (MIP) 실험을 이용하여 공극분포의 측정을 실시하였다.

2.2.4 반응생성물

Thermogravimetry / differential thermal analysis (TG-DTA), X-ray diffraction analysis(XRD), Scanning electron microscope/energy dispersive spectrometer analysis(SEM/EDX)를 이용하여 각각 시험체의 탄산화 된 부분의 수화생성물을 확인하기 위해 탄산화 된 부분과 탄산화 되지 않은 부분을 분리 하였고, 탄산화 된 부분의 시료를 분쇄하여 150 μ m 이하의 분말을 채취하였다. TG-DTA의 승온속도는 10 $^{\circ}$ C/min으로 1000 $^{\circ}$ C까지 측정을 실시하였으며, XRD 분석은 4 $^{\circ}$ /min로 2 θ =10~70 $^{\circ}$ 범위에서 측정을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탄산화 깊이 측정

Figure 1은 CO₂ 양생기간 별 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이 결과를 나타내었다. OPC 질량의 0%, 5%, 10%, 15%가 Mg(OH)₂로 치환된 시멘트 페이스트를 3일 동안의 CO₂ 양생시킨 후에는 9.87mm, 7.48mm, 4.98mm, 5.06mm의 탄산화 깊이가, 14일 동안의 CO₂ 양생에서는 17.08mm, 15.33mm, 10.10mm, 9.83mm의 탄산화 깊이가, 28일 동

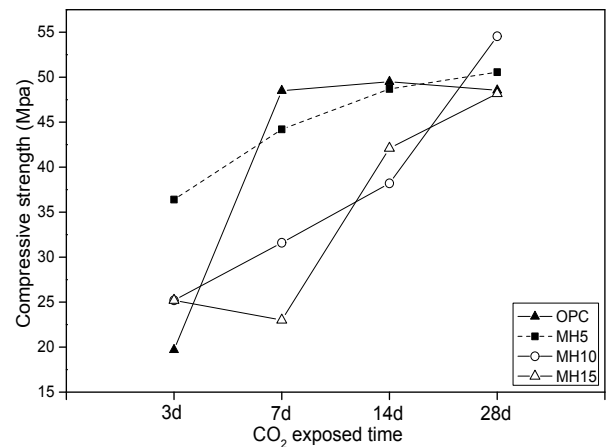


Figure 2. Compressive strength of samples with CO₂ curing

안의 CO₂ 양생에서는 21.63mm, 20.35mm, 18.01mm, 12.12mm의 탄산화 깊이가 측정되었다.

각각 시험체에서 Mg(OH)₂의 혼입량이 많을수록 탄산화 깊이가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 시험체 표면에서 Mg(OH)₂와 CO₂가 쉽게 반응함에 따라 표면의 공극을 충전시켜 CO₂ 확산속도에 영향을 주어 탄산화 깊이를 감소시키는 것으로 판단된다[15].

3.2 압축강도 특성

Figure 2는 각 시험체별 압축강도를 나타낸 그래프이다. CO₂ 양생 3일차에서 OPC 공시체의 강도 보다 Mg(OH)₂를 혼입한 공시체의 강도가 더 높았으나, CO₂ 양생 7일차에서는, OPC 공시체의 강도가 Mg(OH)₂를 혼입한 다른 공시체의 강도보다 높았다. 이는 CO₂ 양생 3일차에서는 무기계염인 Mg(OH)₂가 Ca(OH)₂ 보다 많은 양의 CO₂와 반응하여 공극을 충전한 것으로 판단되며, 공시체의 강도에 영향을 미친것으로 사료된다. 하지만 CO₂ 양생 3일차 이후에는 탄산화가 더 빠르게 이루어졌기 때문에, CaCO₃ 생성으로 인한 공극의 부피가 빠르게 줄어든 것이 주요한 원인으로 판단된다. CO₂ 양생 7일차 이후부터는 OPC 공시체의 강도증진이 나타나지 않았는데, 이는 CaCO₃의 생성으로 인한 Ca²⁺의 소모가 시멘트의 수화반응에 영향을 준 것으로 판단된다. Mg(OH)₂가 혼입된 공시체에서는 Mg(OH)₂가 탄산화반응에 필요한 Mg²⁺를 충분하게 제공할 수 있는 공시체로 작용한 반면에, 클링커와 석고에서 용출되는 Ca²⁺로 탄산화반응이 진행되는 OPC 공시체에서는 충분한 Ca²⁺가 제공될 수 없는 것으로 판단된다.

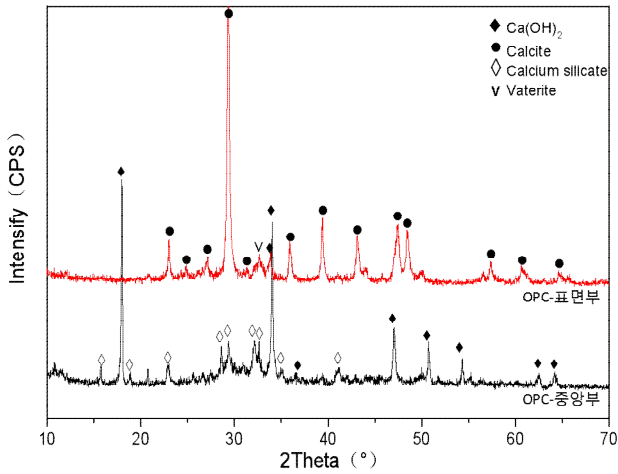


Figure 3. XRD patterns of carbonated and noncarbonated parts of OPC

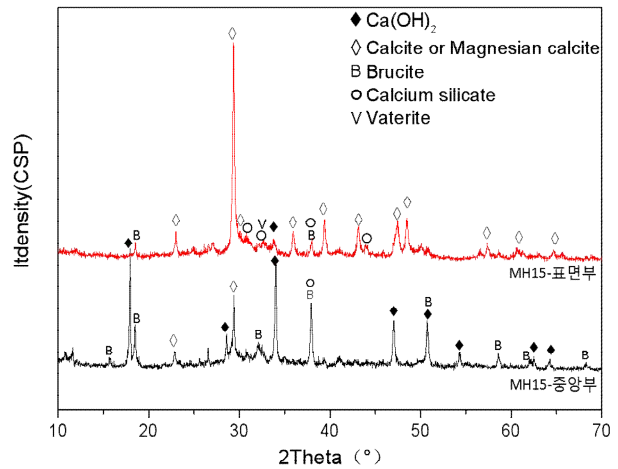


Figure 6. XRD patterns of carbonated and noncarbonated parts of MH15

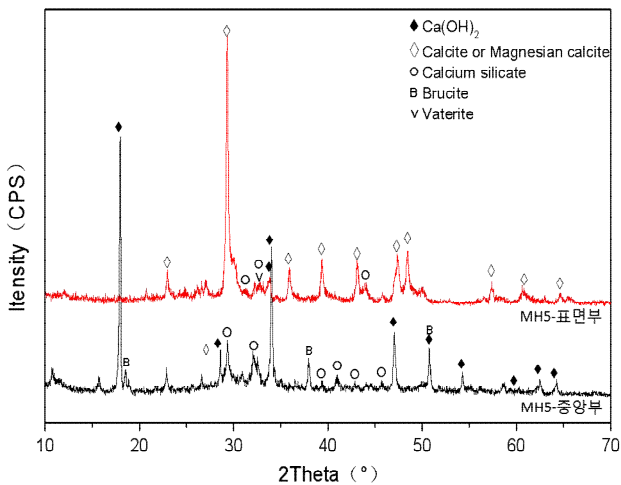


Figure 4. XRD patterns of carbonated and noncarbonated parts of MH5

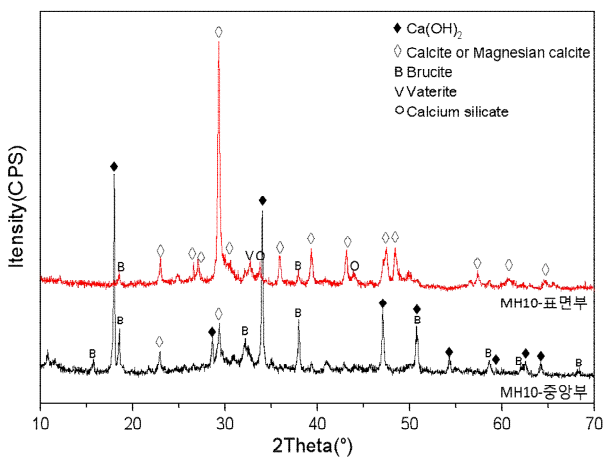


Figure 5. XRD patterns of carbonated and noncarbonated parts of MH10

3.3 XRD 분석

Figure 3은 OPC의 XRD 분석결과를 나타내었다. 탄산화가 거의 일어나지 않은 OPC 시험체의 중양부 그래프를 보면, 공시체의 중양부에서는 Ca(OH)₂의 피크가 발견된 것을 볼 수 있다. Figure 4, Figure 5, Figure 6는 MH5, MH10, MH15 각각의 XRD 분석 결과를 나타내었다. Mg(OH)₂를 혼합한 시험체의 중양부에서도 Ca(OH)₂ 피크를 확인할 수 있었으나, 반응하지 않은 Mg(OH)₂의 피크가 관찰 되었다.

Figure 3에서 탄산화가 일어난 OPC 공시체의 표면부 그래프를 보면, Ca(OH)₂의 피크의 세기는 줄어들고 Calcite계 CaCO₃ 피크가 생성되었다. 하지만 Figure 4, Figure 5, Figure 6에서, Mg(OH)₂ 혼합한 시멘트 페이스트의 경우에는 Mg²⁺이온이 calcite의 경체구조 내부에 형성된 Magnesian calcite의 피크를 확인할 수 있다. Magnesian calcite와 Calcite의 피크는 같은 범위에 나타나기 때문에 SEM-EDX을 이용한 분석을 통해서 구별할 수 있었다.

3.4 열중량 분석

Figure 7과 Figure 8은 28일 동안 CO₂로 양생된 각 시멘트 페이스트 표면부의 TG-DTA 분석을 나타낸 결과이다. Figure 7은 각 페이스트의 DTG(Derivative Thermogravimetric)곡선이 이며 Figure 8은 각 페이스트의 TGA(Thermogravimetric Analysis)곡선이 이다.

Figure 7는 각 페이스트의 DTG곡선으로 750-900°C의 범위에서 피크를 확인할 수 있으며, 이는 탈탄산반응이 일어난 결과로 분석된다. 탈탄산반응은 모든 시멘트 페이스트 시료에서 나타났

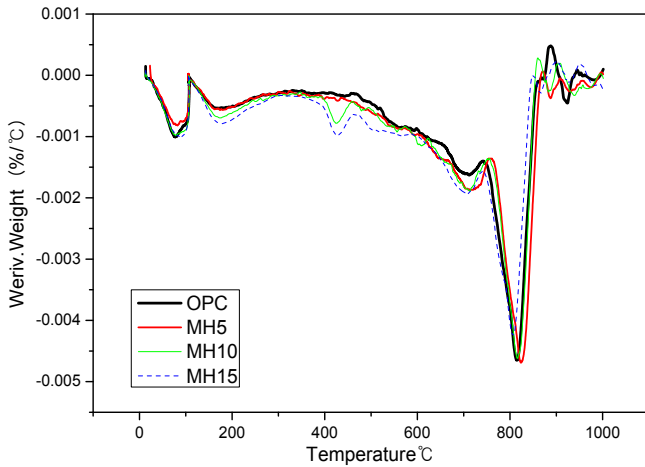


Figure 7. DTG curves of the samples after 28d CO₂ curing

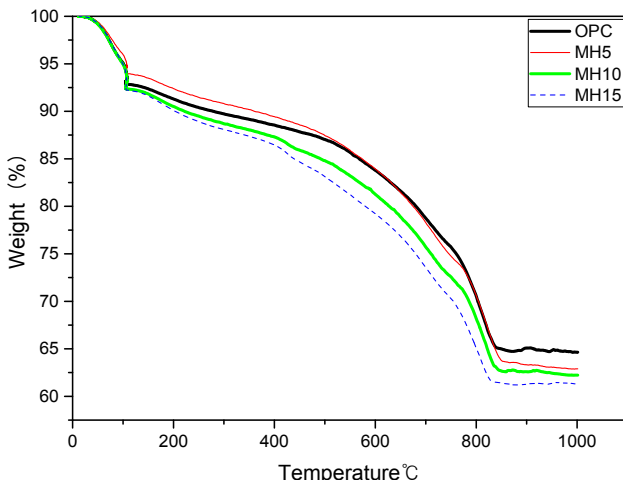


Figure 8. TGA curves of the samples after 28d CO₂ curing

으며, 탈탄산반응으로 인하여 중량손실이 크게 나타난 것을 Figure 8에서 확인할 수 있다. 또는 550–750°C의 범위에서 명확한 피크가 없지만, Figure 8에서 같은 범위에서 지속적인 중량손실이 관찰되었으며, 이는 무정형의 calcium carbonates의 탈탄산반응이 때문인 것으로 판단된다.

Mg(OH)₂를 혼입한 시멘트 페이스트의 경우는 Figure 7에서 탈탄산반응의 피크가 750–900°C의 범위에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 연구를 통해 비교분석해 보면, magnesium calcite와 calcite의 탈탄산반응에 의한 것으로 판단된다[16,17]. 또한, MH10과 MH15에서는 OPC와 MH5와 달리 450°C의 온도 부근에서 피크가 나타나는데, 이는 반응되지 않은 Mg(OH)₂가 MgO로 분해되는 반응 때문에 나타난 피크로 판단된다. TGA의 결과를 보면, 550 ~ 850°C의 온도 범위내의 중량손실은 주로 Mg계 또는

Ca계 생성물의 탈탄산반응 때문에 나타난 것으로 판단된다. Table 4는 Figure 8에서 TGA곡선에 의해 각각 시멘트 페이스트 내부의 Mg계 또는 Ca계 탄산화 반응생성물의 양을 나타낸 것이다.

Table 4. Estimated CO₂ uptake in carbonated cement pastes

Sample	Estimated CO ₂ uptake(%)
OPC	22.03
MH5	20.73
MH10	22.13
MH15	23.69

Table 5. Porosity of the samples

Sample	Porosity(%)
OPC-Surface	18.74
OPC-Center	21.19
MH5-Surface	21.97
MH10-Surface	20.96
MH15-Surface	20.80

3.5 공극구조 분석

시멘트 페이스트의 공극구조 분석을 위하여 MIP실험을 한 결과 Table 5와 같이 나타났다. Table 4에서 28일 동안 CO₂로 양생된 각 시멘트 페이스트 표면부의 공극량을 나타내었다. OPC, MH5, MH10, MH15에서 탄산화가 일어난 표면부의 공극량을 보면, 각각 18.74%, 21.97%, 20.96%, 20.8%, 인 것을 확인할 수 있다. OPC에서 공극량이 가장 작았으나, 탄산화 깊이 결과에서 Mg(OH)₂를 혼입한 모든 시멘트 페이스트가 OPC보다 탄산화 깊이가 작았기 때문에, 시멘트 페이스트 내 공극량은 CO₂ 침투에 주요한 영향을 미친 것으로 판단된다.

특히, OPC 중앙부의 공극량을 탄산화가 일어난 OPC 표면부의 공극량과 비교해 보았을 때, 공극량이 21.19%에서 18.74%로 줄어드는 결과가 나타났다. 따라서 탄산화가 발생하면 공극량이 줄어든다는 것을 확인할 수 있었으나, CO₂ 침투가 일어나는데 다른 요인도 영향을 줄 것이라 판단된다.

Figure 9는 CO₂ 침투로 인하여 탄산화가 진행된 표면부의 공극분포를 분석한 결과이며 Figure 10은 시멘트 페이스트 표면부의 누적 공극량 변화를 나타낸 것이다. Figure 9와 Figure 10에서, OPC 표면부보다 Mg(OH)₂를 혼입한 시멘

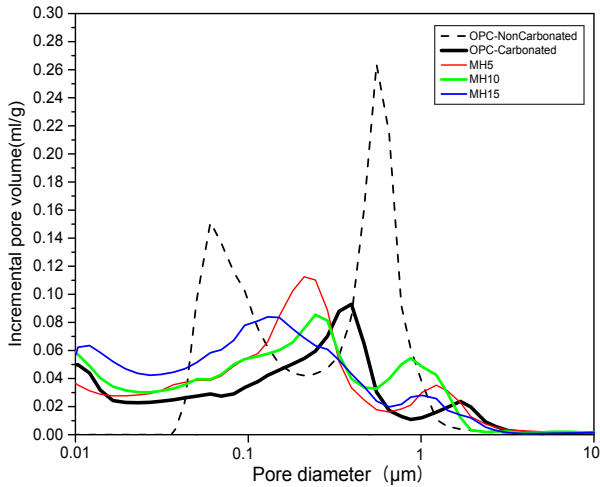


Figure 9. Pore size distribution of the samples

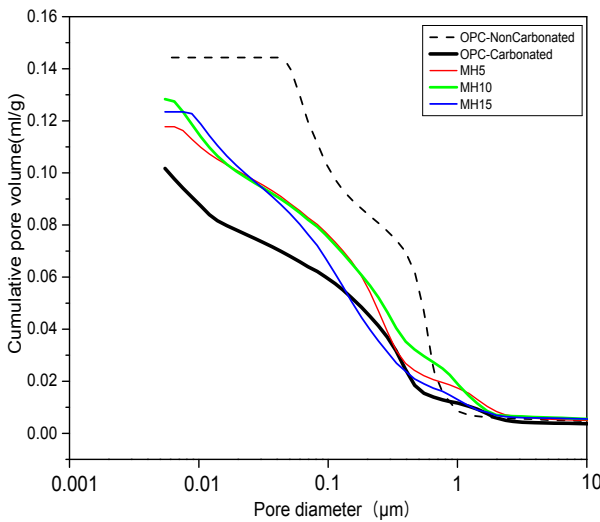


Figure 10. Cumulative pore size distribution of the samples

트 페이스트에서 0.3 μm 이하의 공극의 비율이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 특히, Mg(OH)₂ 혼입량이 증가할수록 시멘트 페이스트의 공극분포에서 0.1 μm 이하의 공극비율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 CO₂ 고정재료인 Mg(OH)₂가 혼입된 시멘트 페이스트일수록 탄산화가 일어났을 때 Magnesian Calcite (Ca_(1-x)Mg_xCO₃)의 생성 비율이 증가하고, 생성된 magnesian calcite는 calcite보다 분자량이 크며 이에 따라 시멘트 페이스트 내 공극을 더 밀실하게 메우기 때문으로 판단된다. 따라서 Mg(OH)₂ 혼입한 후 CO₂ 양생 시 탄산화 반응물 생성이 공극구조 개선 효과에 기여함을 확인할 수 있었다.

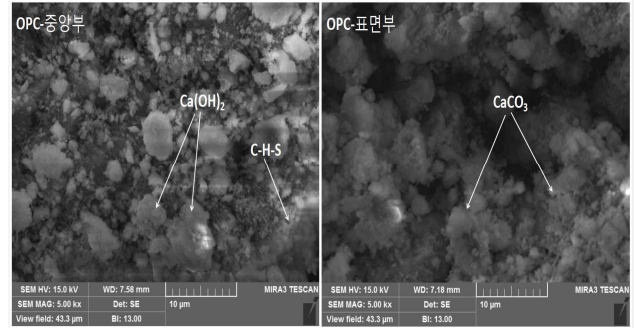


Figure 11. SEM image of noncarbonated part and carbonated part of OPC

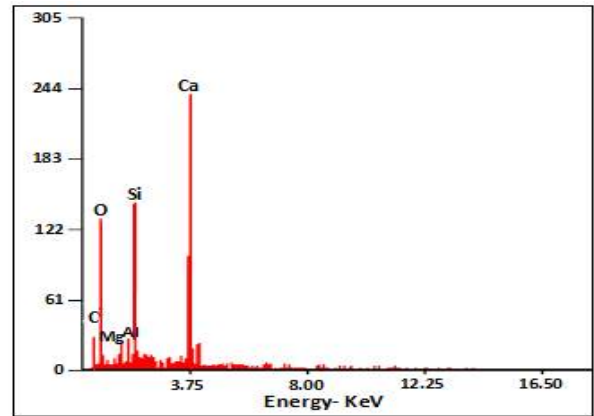


Figure 12. EDX analysis of carbonated part of OPC

3.6 수화생성물 분석

Figure 11는 28일 동안 CO₂로 양생된 OPC 공시체의 표면부와 중앙부를 SEM-EDS를 이용해 촬영한 그림이다. 탄산화가 거의 이루어지지 않은 중앙부에서 수화생성물인 C-S-H와 Ca(OH)₂를 확인할 수 있었다. 이와 달리, 탄산화가 이루어진 표면부에서는 Calcite계 CaCO₃의 agglomerate가 공극내부에 형성되어 있는 모습을 Figure 12에서 확인할 수 있었다. EDX결과는 Figure 12에서 나타났다.

Figure 13은 28일 동안 CO₂로 양생된 MH15 공시체의 표면부와 중앙부를 SEM-EDS를 이용해 촬영한 그림이다. Figure 13를 보면, Mg²⁺ 이온과 Calcite가 결합하며 둥근 표면을 갖고 있는 Magnesium calcite의 모습이 관찰됨에 따라, Mg²⁺ 이온이 생성물에 영향을 주었음을 확인할 수 있었다. Figure 14은 Figure 13의 SEM-EDX 분석 결과를 나타내며, Figure 14에서 나타내는 생성물의 주요 구성원소로 Ca, Al, Mg, Si, O의 피크가 나타났다.

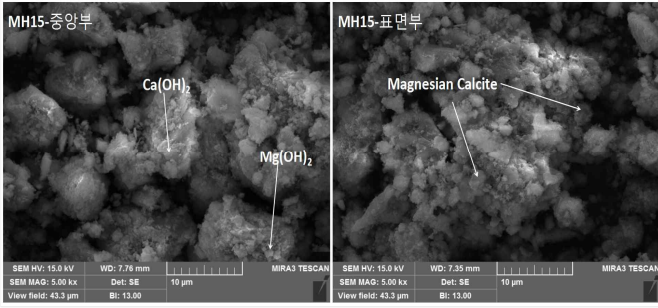


Figure 13. SEM image of noncarbonated part and carbonated part of MH15

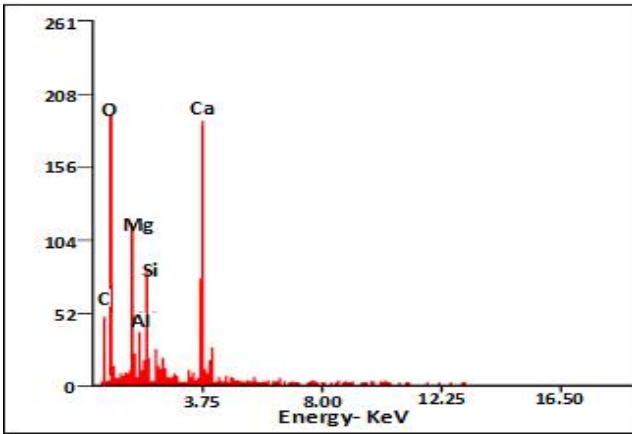


Figure 14. EDX analysis of carbonated part of MH15

4. 결 론

본 연구에서는 Mg(OH)₂를 혼입한 시멘트 페이스트의 탄산화 저항성에 대한 연구를 진행하였다. Mg(OH)₂를 혼입한 시멘트 페이스트에서 탄산화 저항성이 더 높은 결과를 나타냈으며, 이에 대한 원인을 분석하고자 결합재의 물리화학적 특성에 대한 분석을 진행하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) OPC 질량의 5%, 10%, 15%를 Mg(OH)₂로 치환한 시멘트 페이스트에서 Mg(OH)₂의 혼입률이 증가할수록 탄산화 깊이가 더 작아지는 결과를 나타냈다.
- 2) 시멘트 페이스트의 탄산화가 이루어졌을 때, OPC만을 사용한 시멘트 페이스트에서는 대부분이 Calcite가 형성되었으나, Mg(OH)₂를 혼입한 시멘트 페이스트에서는 Magnesium calcite가 추가 생성되는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 시멘트 페이스트 내 탄산화가 이루어졌을 때, 공극률이

작아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 탄산화 과정으로 Calcite가 생성되는 경우보다 Magnesium calcite가 형성 되는 경우에, 0.3 μm 이하의 공극 비율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 0.3 μm 이하의 공극 비율이 높아질수록 탄산화 저항성이 더 높아지는 것으로 판단된다.

요 약

철근콘크리트 구조물의 장수명화가 대두됨에 따라 내구성 문제에 대한 중요성이 증대되고 있다. 이에 대해 본 연구에서는 Mg(OH)₂를 혼입한 시멘트 페이스트의 탄산화 저항성에 대한 연구를 진행하였다. Mg(OH)₂가 CO₂의 고정 재료로서 5%, 10%, 15%의 비율로 Mg(OH)₂를 보통 시멘트 페이스트에 치환하여 CO₂ 농도 20%, 상대습도 60%, 온도 20℃의 환경에서 양생 시킨 3, 7, 14, 28일 후에 탄산화 깊이 측정, 압축강도 측정, XRD, TG/DTA, MIP과 SEM등을 통해 샘플의 특성에 대해 연구를 진행했다. 그 결과, Mg(OH)₂의 혼입률이 증가할수록 탄산화 깊이가 더 작아지며 Mg(OH)₂ 혼입한 페이스트는 Magnesium calcite가 형성되어, 0.3 μm 이하의 공극 비율이 높아 탄산화 저항성이 더 높아지는 것을 알 수 있었다.

키워드 : CO₂고정 재료, Mg(OH)₂, CO₂축진 양생, 탄산화

Acknowledgement

This research was supported by a grant (17SCIP-B10370 6-03) from Construction Technology Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. Chang CF, Chen JW, The experimental investigation of concrete carbonation depth, Cement and Concrete research, 2006 Sep;36(9):1760-7.
2. Savja B, Lukovic M, Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, Constructi on and Building Materials, 2016 Aug;117:285-301.
3. Leemann A, Nygaard P, Kaufmann J, Loser P, Relation between

- carbonation resistance, mix design and exposure. *Cement & Concrete Composites*. 2015 Sep;62:33–4.
4. Pan XY, Shi ZG, Shi CJ, Ling TC, Li N. A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance. *Construction and Building Materials*. 2017 Feb;133:81–90.
 5. Giovana C, Philippe G, Paulo M. Exploring the potential of siloxane surface modified nano-SiO₂ to improve the Portland cement pastes hydration properties. *Construction and Building Materials*. 2014 Mar;54:99–105.
 6. Shi C, He TS, Zhang G, Wang X, Hu YY. Effects of superplasticizers on carbonation resistance of concrete. *Construction and Building Materials*. 2016 Apr;108:48–55.
 7. Huang HL, Qian CX, Zhao F, Qu J, Guo JQ, Danzinger M. Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PEC) and its influence on durability of concrete. *Construction and Building Materials*. 2016 May;110:293–9.
 8. Wu B, Ye G. Development of cement paste blend with supplementary cementitious materials after carbonation. *Constructions and Building Materials*. 2017 Aus;145:52–61.
 9. Ashraf W. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. *Constructions and Building Materials*. 2016 Sep;120:558–70.
 10. Pan SY, Chang EE, Chiang PC. CO₂ capture by accelerated carbonation of alkaline wastes: A review on its principles and applications. *Aerosol and Air Quality Research*. 2012 Jan;12(5):770–91.
 11. Zhang JS, Zhang R, Bi JC. Fundamental research on CO₂ mineralization: I. Leaching kinetics of forsterite and serpentine with hydrochloric acid. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 2011 Sep;39(9):706–11.
 12. Bearat H., McKelvy M, Chizmeshya A, Shama R, Carpenter R. Magnesium hydroxide dehydroxylation/ carbonation reaction processes: Implications for carbon dioxide mineral sequestration. *Journal of the American Ceramic Society*. 2002 Apr;85(4):742–8.
 13. Fagerlund J, Highfield J, Zevenhoven R. Kinetics studies on wet and dry gas–solid carbonation of MgO and Mg(OH)₂ for CO₂ sequestration. *RSC Advances*. 2012 Sep;2(27):10380–93.
 14. Zhao L, Sang LQ, Chen J, Ji JF. Aqueous carbonation of natural brucite relevance to CO₂ sequestration. *Environmental Science & Technology*. 2010 Nov;44(1):406–11.
 15. Zhu C, Zhao L, Gao X, Ji JF, Chen J. The study based on the reaction kinetics of brucite sealed up in carbon dioxide. *Quaternary Sciences*. 2011 May;31(3):438–46.
 16. Mo L, Daman KP. Accelerated carbonation—A potential approach to sequester CO₂ in cement paste containing slag and reactive MgO. *Cement and Concrete Composites*. 2013 Oct;43:69–77.
 17. Mo LW, Panesar DK. Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes containing reactive MgO. *Cement and Concrete Research*. 2012 Jun;42(6):769–77.
 18. De silva P, Bucea L, Sirivivatnanon V. Chemical, microstructural and strength development of calcium and magnesium carbonate binders. *Cement and Concrete Research*. 2009 May;39(5):460–5.
 19. Reddymm, Nancollas GH. The crystallization of calcium carbonate IV. The effect of magnesium, strontium and sulfate ions. *Journal of Crystal Growth*. 1976 Aug;35(1):33–8.
 20. Sung MJ, Cho HK, Lee HS. Properties of cement paste containing high volume γ -C₂S and MgO Subjected to CO₂ Curing. *Journal of Korea Institute of Building Construction*. 2015 Jun;15(3): 281–9.
 21. Xu J, Yan C, Zhang FF, Hriomi K, Xu HF, Teng H. Testing the cation–hydration effect on the crystallization of Ca–Mg–CO₃ systems. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2013 Oct;110(44):17750–5.