

## CA<sub>2</sub>혼입 페이스트의 부식저항성에 관한 연구

### A Study on Corrosion Resistance of CA<sub>2</sub>-Mixed Paste

김재돈<sup>1</sup>, 장일영<sup>2\*</sup>

Jae-Don Kim<sup>1</sup>, Il-Young Jang<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Deterioration in durability of structures due to the steel corrosion is difficult to determine whether or not corrosion is initiated and how much propagated, and moreover, repair and maintenance are not easy to deal with. Therefore, preventive treatments can be the best option to avoid the deterioration. Various methods for preventing corrosion of steel, such as electrochemical treatments, anti-corrosion agents and steel surface coatings, are being developed, but economic and environmental aspects make it difficult to apply them to in-situ field. Thus, the purpose of this study was to improve corrosion resistance by using CA-based clinker that are relatively simple and expected to be economically profitable. Existing CA-based clinkers had problems such as flash setting and low strength development during the initial hydration process, but in order to solve this problem, CA clinker with low initial reactivity were used as binder in this study. The cement paste used in the experiments was replaced with CA<sub>2</sub> clinker for 0%, 10%, 20%, and 30% in OPC. And the mixture used in the chloride binding test for the extraction of water-soluble chloride was intermixed with Cl<sup>-</sup> 0.5%, 1%, 2%, and 3% by weight of binder content. To evaluate characteristic of hydration heat evolution, calorimetry analysis was performed and simultaneously chloride binding capacity and acid neutralization capacity were carried out. The identification of hydration products with curing ages was verified by X-ray diffraction analysis. The free chloride extraction test showed that the chlorine ion holding ability improved in order OC 10 > OC 30 > OC 20 > OC 0 and the pH drop resistance test showed that the resistance capability in pH 12 was OC 0 > OA 10 > OA 20 > OA 30. The XRD analyses showed that AFm phase, which can affect the ability to hold chlorine ions, tended to increase when CA<sub>2</sub> was mixed, and that in pH12 the content of calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>), which indicates pH-low resistance, decreased as CA<sub>2</sub> was mixed.

**Keywords :** CA<sub>2</sub>, Steel Corrosion, Chloride Binding

<sup>1</sup> 정회원, 주저자, 금오공과대학교 토목공학과, 박사과정

<sup>2\*</sup> 정회원, 교신저자, 금오공과대학교 토목공학과, 교수

E-mail: jbond@kumoh.ac.k

<sup>1</sup> Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology

<sup>2\*</sup> Dept. of Civil engineering, Kumoh national Institute of Technology

## 1. 서론

철근콘크리트는 철근과 콘크리트의 장점을 살린 우수한 복합재이다. 철근은 콘크리트와 달리 높은 인장력을 가지므로 콘크리트에 적절하게 배근하면 연성파괴를 유도할 수 있고, 콘크리트로 철근을 피복하게 되면 높은 알칼리성에 의해 철근의 표면에 얇은 산화피막을 형성해 부식으로부터 보호한다[1-2]. 그러나 다공성인 콘크리트는 외부로부터 침투하는 유해 이온을 완벽하게 차단하지 못하기 때문에 제설제, 해수 등에 포함되어 있는 염화물에 의해 산화 피막이 손상되어 부식을 유발할 수 있다[3-4]. 부식은 두 가지 방식으로 철근 콘크리트 구조물을 손상시킨다. 첫째, 철근의 단면 손실을 유발하여 구조성능을 저하한다. 둘째, 철근보다 부피가 큰 부식 물질을 생성하여 인장응력을 발생시키므로 균열 및 구조적 파손을 초래한다[5]. 철근콘크리트의 특성상 철근의 부식을 조기 발견이 어렵고 보수 비용이 시공비의 2~3배가 투입되므로 예방적 단계에서 부식을 억제하는 것이 가장 효율적이다. 부식을 예방하기 위해서 화학적인 방법과 물리적인 방법이 적용될 수 있다. 부식억제제와 같은 대부분의 화학적 예방방법은 대부분 독성이 있거나 콘크리트 강도에 부정적인 영향을 미치는 화학반응을 일으킬 수 있다[6-8]. 대표적인 물리적 예방 방법으로 철근의 에폭시 코팅이 있다. 이 방법은 유해 물질로부터 철근을 물리적으로 차단 가능하지만 코팅층에 결함이 발생할 경우 국부적 부식이 심각하게 발생하여 위험성을 증가시키는 것으로 나타났다[9-11]. 또한 에폭시를 도포하기 전에 철근의 세척 및 결합에 따라서 부식이 가속화될 수 있다[10].

칼슘 알루미네이트 시멘트(calcium aluminate cement; CAC)에 포함되어 있는 CA계열 클링커의 수화로 생성된 AFm 수화물은 염화물 침투 저항성을 향상시키는 것으로 알려져 있다. AFm 수

화물의 이중 층 구조 ( $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_6$ , Layered double hydroxide; LDH)로 이루어져 있어 염소 이온 농도가 높은 환경에서 해당 이온을 양전하층 (Positively charged layer) 사이에 고정시킨다(12-13). 이러한 현상은 공극 내 염소 이온 농도를 감소시키는 효과를 가져오고 결과적으로 철근 깊이까지의 염소 이온 침투가 지연된다. CA계열 클링커는 대표적으로  $\text{C}_3\text{A}$ , CA 및  $\text{CA}_2$ 가 있으며 각각의 특징은 다음과 같다.  $\text{C}_3\text{A}$ 는 보통 포틀랜드 시멘트의 주요 클링커 중 하나로 수화반응이 즉각적이기 때문에 급결반응을 야기할 수 있으며 초기 재령에서 강도 발현에 많은 기여를 한다. 또한 시멘트 내에서 성분비가 높아질수록 프리델염을 다량 생성하여 염소이온을 고정화하는 능력이 상승하는 것으로 알려져 있다[14-16]. CA는 칼슘 알루미네이트 시멘트에 다량 포함된 주요 광물로써 산화칼슘( $\text{CaO}$ )과 산화 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )이 결합되어 생성된 화합물이고 초기 수화 과정에서 비교적 높은 반응성을 나타내며 이로 인해 조기강도 발현 특성을 가진다[17-18]. CA 함량을 조절하여 염소 이온 고정화 능력 및 침투 저항성에 따른 철근 부식 저항성을 평가한 결과 총 염소 이온 농도 1.5% 이하인 경우 CA의 함량이 높아질수록 염소 이온 고정화 능력은 증가하였으나 확산계수 역시 증가하는 경향을 나타냈다[19].  $\text{CA}_2$ 는 주로 산화 알루미늄 함량이 높은 HAC에 존재하며 우수한 열특성으로 인해 내화성이 요구되는 구조물에 사용될 수 있으나, 낮은 수화반응성으로 인해 사용빈도는 낮은 편이다. 하지만 최근 제설제 및 해수와 같은 염소이온에 노출된 환경에서 AFm 수화물의 높은 염소이온 고정화 능력으로 인해  $\text{CA}_2$ 를 혼화제로 사용하여 AFm수화물 생성을 유도하는 연구가 진행되고 있다[20-21].

본 연구에서는 부식 저항성을 향상시키기 위한 방법으로 부식억제제나 에폭시 도막 철근 등의 위

험부담이 큰 방법이 아닌 부식 저항성이 뛰어난 CA계열 클링커를 OPC에 치환적용 하고자 한다. CA 계열 클링커 중 비교적 연구가 많이 이루어지지 않고 OPC와의 혼입에서 급결반응을 일으킬 가능성이 없는 CA<sub>2</sub>가 연구에 사용되며, CA<sub>2</sub>가 치환된 시멘트 페이스트를 통해 염소이온 고정화 능력, 산 중화 능력, 수화물 조성 분석을 진행하여 CA<sub>2</sub> 클링커의 혼입이 가져올 수 있는 철근부식 영향성을 평가해 보고자 한다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용 재료

본 연구에서 사용된 시멘트는 KS L 5201을 만

Table 1. Physical and chemical properties of CA<sub>2</sub>

|                                       |                                | OPC  |
|---------------------------------------|--------------------------------|------|
| Oxides (%)                            | Na <sub>2</sub> O              | 0.3  |
|                                       | MgO                            | 0.3  |
|                                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 71.0 |
|                                       | SiO <sub>2</sub>               | 0.6  |
|                                       | CaO                            | 27.3 |
|                                       | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.3  |
| Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> ) |                                | 3.01 |
| Fineness (cm <sup>2</sup> /g)         |                                | 1080 |
| Average diameter (μm)                 |                                | 63   |

Table 2. Mix design of CA<sub>2</sub>-mixed paste

| Abbrev. | Binder(wt%) |                 | W/C Ratio |
|---------|-------------|-----------------|-----------|
|         | OPC         | CA <sub>2</sub> |           |
| OC 0    | 100         | 0               | 0.4       |
| OC 10   | 90          | 10              |           |
| OC 20   | 80          | 20              |           |
| OC 30   | 70          | 30              |           |

족하는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland cement; OPC)를 사용하였다.

CA<sub>2</sub>는 합성을 통해 확보 하였으며 합성에 사용된 CaO와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말은 D사의 CP(Chemical Pure) 등급 제품을 사용하였다. CA<sub>2</sub>합성은 CaO와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 기계적 혼합기에서 300RPM의 속도로 10분간 교반하여 전기로에서 소성과정을 거쳤다. CaO와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 분자비가 1:2가 되도록 계량 하였으며, 소성온도에서 견딜 수 있는 알루미늄나 도 가니에 담겨 전기로에 배치하였다. 승온속도 5℃/min, 최대온도 1550℃, 유지시간 120분 조건으로 소성하였으며 이후 자연냉각 하여 150μm채를 통과가능 할 때 까지 분쇄한다.

Table 1에 합성된 CA<sub>2</sub>의 물리·화학적 특성을 나타내었다. X선 회절 분석 데이터를 토대로 리트벨트법을 이용한 정량분석 결과 CA<sub>2</sub>(CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 90%, CA(CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 7%, CA<sub>6</sub>(CaO·6Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 3%로 나타났다.

### 2.2 배합 및 시료준비

분석에 사용될 배합은 골재의 영향성을 배제하기 위해 결합재와 증류수만을 사용한 페이스트로 하였다. 배합비는 표와 같이 물-결합재 비 0.4, 시멘트 중량대비 CA<sub>2</sub>분말 치환율 0%, 10%, 20% 및 30%이며, 치환율에 따른 배합의 명칭은 OC 0, OC 10, OC 20 및 OC 30으로 명명한다. 배합은 기계적 배합으로 이루어지며, 건비빔 3분 진행 후 증류수를 첨가하여 2분간 혼합한다. 상대습도 60% 온도 20℃ 환경에서 목표한 기간 동안 양생을 거쳐 입경 150μm 이하가 되도록 분쇄하여 준비한다.

### 2.3 미소수화열

CA<sub>2</sub> 혼입에 따른 수화열 발생 특성을 분석하기

위해 미소수화열 측정실험을 진행하였다. 미소수화열 측정기는 물과 시멘트가 혼합된 순간부터 수화열을 측정하는 특징을 가지고 있다. 따라서 혼합물이 수화에 미치는 영향을 분석하기에 유용한 도구이며, 시간에 따른 Heat Flow를 확인가능하다. 미소수화열 측정기는 Tokyo-Riko 사의 Three-point Multi-purpose Condition Calorimeter를 이용하였다. 수화열 데이터의 획득은 물-바인더 비 0.4, 20°C의 환경에서 72시간동안 이루어졌다.

## 2.4 염소이온 고정화 능력

CA<sub>2</sub>의 혼입에 따른 염소이온 고정화 능력의 변화를 측정하기 위해 모르타르 및 콘크리트의 수용성 염화물 측정방법(KS F 2715)에 준하여

진행하였다. 측정을 위한 시료는 배합 시에 시멘트 중량의 0.5%, 1%, 2% 및 3%에 해당하는 양의 염소이온을 추가적으로 혼입하였고, 28일 양생 이후 150 $\mu$ m이하의 크기로 분쇄된 시료는 5g씩 50°C 증류수 100ml에 혼합한다. 가열교반기를 활용하여 증류수의 온도를 일정하게 유지하면서 30분간 염소이온을 용해한다. 추출이 끝난 용액은 거름종이를 이용하여 시료 분말을 수용액과 분리하고 염소이온 전극을 활용하여 수용액의 염소이온 농도를 3회 측정하여 그 값을 평균한다.

## 2.5 pH저하 저항성

CA<sub>2</sub>혼입 시멘트 페이스트의 pH저하 저항성을 평가하기 위해 산성 용액을 이용한 저항성 평가를 진행하였다. 28일의 양생을 거친 페이스트 시편을 분쇄하여 시료를 확보하고 4g씩 계량하여 서로 다른 37단계의 pH의 산성용액에 투입하였다. 산성 용액은 시료의 무게당 질산농도가 0.5M/kg - 40M/kg 범위로 준비되었고, 시료가 혼합된 용액

은 교반기를 통해 30분 동안 교반을 거치고 밀봉되어 2주간 유지하였다.

## 2.6 X선 회절 분석

CA<sub>2</sub> 치환율 및 재령에 따른 클링커와 수화물의 조성을 분석하기 위해 X선 회절 분석을 진행하였다. 재령 1, 3, 7, 및 28일의 페이스트를 분쇄 및 아세톤을 이용한 수화 정지과정을 거쳤으며, 진공 데시케이터에서 24시간 건조 후 분석을 진행하였다. X선 회절분석기는 Rigaku사의 SmartLab 장비를 이용하였다. 회절각 5-65°, 스캔속도 4°/min, 전압 40 kV, 전류 100mA의 조건으로 분석을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미소수화열

CA<sub>2</sub> 치환율에 따른 미소수화열 특성을 Fig. 1에 나타냈다. 모든 배합에서 20시간 이내에 급격한 수화열을 발생하고 지속적으로 감소하여 수렴하는 경향을 나타냈다. 또한 수화열의 발생 시간

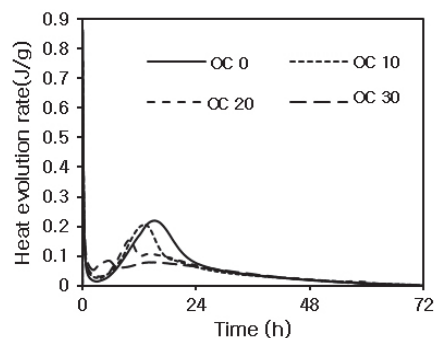


Fig. 1 Cumulative heat of hydration according to substitution rate

과 크기의 차이를 보였다. CA<sub>2</sub>의 혼입량이 많을수록 수화열 피크의 발현 시간이 빨라지는 것이 확인 가능하다. 이는 반응성이 낮은 CA<sub>2</sub>에 의한 희석효과에 기인한 것으로 판단된다. CA<sub>2</sub>는 물과 접촉 후 10시간 이후부터 수화반응을 시작하기 때문에 그 이전까지는 OPC의 클링커들과 반응 가능한 물의 양이 증가하게 되며, 각 클링커들의 반응시간을 단축시키게 된다. 또한 치환율이 높아짐에 따라 수화열 발생량 피크가 낮아짐을 확인할 수 있다. 피크의 발생은 알라이트(C<sub>3</sub>S)에 의해 형성되는 것으로 클링커 시멘트 클링커인 알라이트는 CA<sub>2</sub>의 치환율이 높아짐에 따라 함량이 낮기 때문에 발생시킬 수 있는 수화열의 양이 감소한 것으로 사료된다. 알라이트는 OPC 클링커 중에 가장 많은 부분을 차지하고 있으며 반응 시 수산화칼슘과 규산칼슘 수화물을 생성하며 500J/g의 수화열이 발생한다고 알려져 있다.

Fig. 2에는 72시간 동안 발생한 수화열을 누적하여 나타냈다. CA<sub>2</sub>가 혼입된 시료에서 치환율에 따라 12-16시간 까지 OC 0보다 높은 누적수화열을 나타냈다. 이 또한 CA<sub>2</sub> 치환에 의한 희석효과에 기인한 것으로 초기에 상대적으로 클링커가 가용 가능한 물이 증가하여 빠른 속도로 수화반응을 일으켜 초기에 많은 양의 열을 발생시킨 것으로

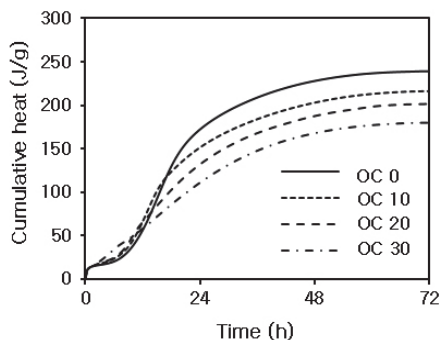


Fig. 2 Cumulative heat of hydration according to substitution rate2

판단된다. 72시간 동안 발생한 OC 0, OC 10, OC 20 및 OC 30의 누적수화열은 238.88J/g, 215.95J/g, 201.24J/g 및 179.66J/g으로 나타났다. CA<sub>2</sub> 치환율이 커질수록 발생한 수화열이 낮게 나타난 것으로 OC 0에 비해 OC 10은 10%, OC 20은 16%, OC 30 25% 낮은 누적수화열을 나타냈다. OPC 클링커에 비해 CA<sub>2</sub>가 발생시킬 수 있는 g당 수화열이 낮으며, 장시간에 걸쳐 수화하는 CA<sub>2</sub>의 특성상 수화를 끝마치지 못하여서 나타난 결과로 사료된다.

### 3.2 염소이온 고정화 능력

철근콘크리트에서 염소이온의 침투는 내구성에 치명적일 수 있으나 일정부분 시멘트 클링커나 수화생성물과 반응하거나 물리적으로 고정된다. 특히 염소이온은 시멘트에 포함되어 있는 칼슘알루미늄하이드레이트 상 즉, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 수화생성물 중 모노설페이트 ([Ca<sub>2</sub>Al(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>·(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)·nH<sub>2</sub>O, AFm)와 결합하여 프리델염 또는 칼슘클로 페라이트를 형성하여 일정수준 화학적으로 고정된다.

시멘트 페이스트 수용액의 염소이온 농도측정 결과와 투입된 염소이온 농도를 이용하여 계산한 염소이온 고정화 능력(Binding Capacity)를 Fig. 3

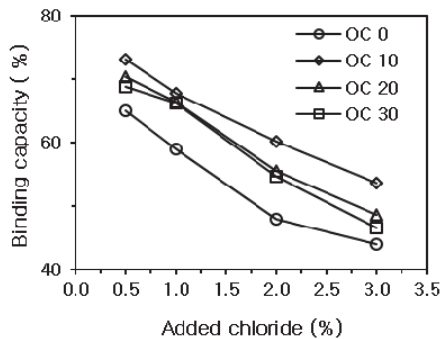


Fig. 3 Binding capacity

에 나타냈다.

Fig. 3에서 모든 종류의 배합에서 투입된 염화물의 양이 증가할수록 고정화 능력이 감소하는 경향을 나타냈으며, CA<sub>2</sub>가 혼입된 경우에서 그렇지 않은 경우보다 뛰어난 염소이온 고정화 능력을 나타냈다. 가장 큰 능력차이를 나타낸 것은 OC 0과 OC 10이었으며, 염소이온 농도 0.5%에서 8%, 1%에서 8.6%, 2%에서 11.7%, 3%에서 8.8%의 차이를 보였다. 하지만 OC 20과 OC 30간의 고정화 능력차이는 크지 않았으며 0.5%, 2%, 3%에서 미소하게 OC 30이 더 높게 나타났다.

### 3.3 pH 저하 저항성

CA<sub>2</sub>혼입에 따른 pH 저하 저항성 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 모든 배합은 특정한 pH에서 저항성

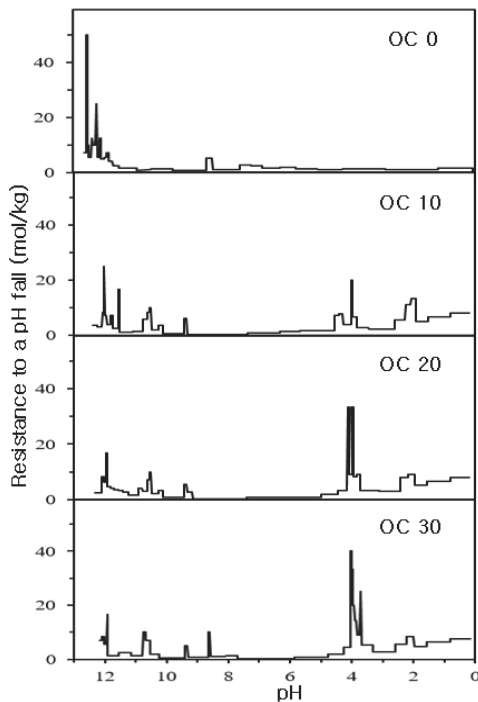
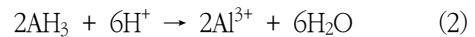
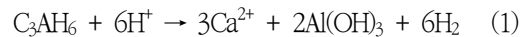


Fig. 4 Acid neutralization capacity

을 보였으며 pH 12부근의 수산화칼슘에 의한 저항성은 CA<sub>2</sub>의 혼입량이 증가할수록 감소하였다. OC 0에서 pH 12 부근에서의 저항성은 50mol/kg의 값을 나타냈지만 OC 10, OC 20, OC 30에서 26mol/kg, 18mol/kg, 18mol/kg로 낮아지는 경향을 보였다. 10% 혼입에서 OC 0에 비해 약 50%의 큰 저항성 감소를 나타냈고 20%와 30%는 별다른 차이를 나타내지 않았다. CA<sub>2</sub>의 치환 비율이 높아짐에 따라 OPC 클링커가 감소하여 수산화칼슘의 생성이 함께 감소한 것으로 판단되며 치환율에 비해 큰 저항성의 감소가 확인된다.

OC 0은 pH 12 부근 이외에서는 저항성을 나타내지 않았지만 CA<sub>2</sub>가 혼입된 경우에는 추가적인 피크를 나타냈다. 특히 pH 10.5, pH 10 및 pH 4 부근에서 나타나는 저항성은 CA<sub>2</sub>의 수화생성물인 C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>, AH<sub>3</sub> 의한 것으로 알려져 있으며 아래의 식과 같은 반응을 통해 산에 저항한다. 10%-30%의 혼입률에서 pH 10.5부근의 저항성은 큰 차이를 나타내지 않지만 pH 4 부근의 저항성은 치환율과 함께 상당량 상승하는 것이 확인 가능하다. CA<sub>2</sub>의 혼입량증가는 C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>의 생성 증가보다 AH<sub>3</sub>의 생성을 유도하여 pH 4부근의 저항성을 향상한 것으로 사료된다.



### 3.4 X선 회절분석

물과 혼합하지 않은 미수화 바인더상태와 물을 혼합하여 28일간의 양생을 거친 CA<sub>2</sub> 혼입 페이스트분말의 X선 회절분석 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 공통적으로 모든 배합의 미수화 바인더에서 OPC 클링커 피크(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF)가 확인되

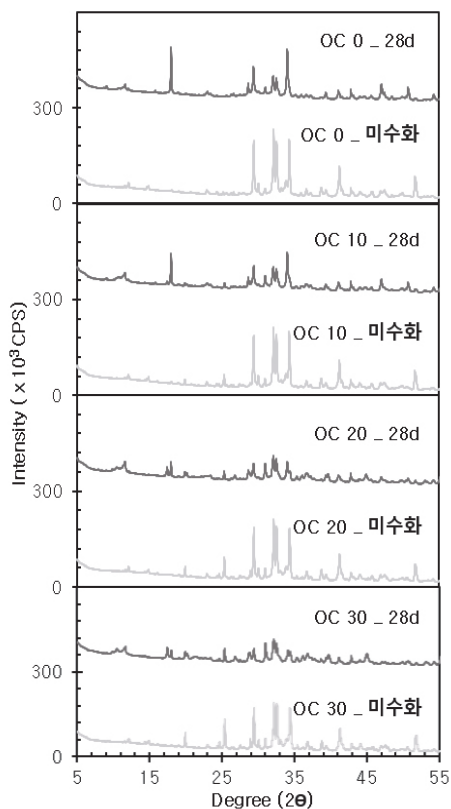


Fig. 5 XRD Pattern of CA<sub>2</sub>-mixed paste

었으며 CA<sub>2</sub>가 포함된 OC 10, OC 20, OC 30에서는 추가적으로 합성 CA<sub>2</sub>에 포함되어 있는 물질(CA, CA<sub>2</sub>, CA<sub>6</sub>)의 피크가 나타났고 그 강도는 CA<sub>2</sub>의 함량이 높을수록 뚜렷하게 나타났다.

28일 결과의 모든 배합에서 염소이온을 화학적으로 고정한다고 알려진 AFm(3CaO·(Al, Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>·nH<sub>2</sub>O) 피크가 확인되었다. AFm은 염소이온과 반응하여 프리델염(Fridel's salt, Ca<sub>2</sub>Al(OH)<sub>6</sub>(Cl, OH)·2H<sub>2</sub>O)을 형성하므로 화학적으로 고정하게 된다. AFm은 클링커에 산화 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 함량이 높을수록 다량 생성되며, CA<sub>2</sub>를 혼입한 시멘트의 경우 산화 알루미늄이 추가 공급으로 인해 염소이온 고정능력이 상승하게 된다. 이는 CA<sub>2</sub> 혼입 페이스트의 X선 회절분석 결과에서 혼입물

이 높아질수록 AFm 피크의 세기가 강해지는 것을 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과는 3.2 염소이온 고정화 능력의 내용을 뒷받침해 준다.

pH저하 저항성에 영향을 주는 물질로는 앞서 밝힌 바와 같이 Ca(OH)<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>, AH<sub>3</sub> 등이 있으며 각 물질은 pH 12, 10.5, 4의 저항성을 가진다. 3.3 pH 저하 저항성 결과에서 pH 12부근의 저항성은 OC 0이 가장 뛰어났으며 CA<sub>2</sub>의 혼입량이 증가함에 따라 낮아지는 경향을 나타냈으며, pH 10.5, 4에서는 OC 0의 저항성이 가장 낮고 CA<sub>2</sub>의 혼입률이 높아질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 Fig. 5에서 Ca(OH)<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> 및 AH<sub>3</sub>의 피크로 설명이 가능하다. OPC 클링커의 수화생성물인 Ca(OH)<sub>2</sub>는 CA<sub>2</sub>의 치환률이 증가함에 따라 급격한 감소를 나타내며, C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> 및 AH<sub>3</sub>는 CA<sub>2</sub>의 치환율과 함께 증가하는 경향을 보였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 합성 CA<sub>2</sub>를 혼화재로 사용하여 철근 방식 재료로서의 활용 가능성을 평가했으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미소수화열 실험 결과 반응성이 낮은 CA<sub>2</sub>의 치환율이 높아질수록 전체적인 수화열의 발생량이 감소함과 동시에 OPC 클링커들의 수화반응 개시 속도가 향상됨을 확인할 수 있었다.
2. CA<sub>2</sub>가 혼입된 시료에서 OPC보다 뛰어난 염화물 고정능력을 나타냈으며 이는 CA<sub>2</sub>의 혼입에 따라 염화물을 고정한다고 알려져 있는 AFm 수화물이 다량 생성되었기 때문인 것으로 판단된다.
3. 산 중화 시험을 통해 pH 저하 저항성을 평

가해 본 결과 pH 12 부근에서는 OC 0이 가장 높은 저항성을 나타냈으며  $CA_2$ 의 치환율이 높아질수록 저항성은 떨어지는 것으로 나타났다. 그에 반해 pH 10.5, pH 4 부근에서의 저항성은  $CA_2$ 의 치환율이 높아질수록 향상되는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] Pei, Xiaofei, et al. "Cementitious coatings for improved corrosion resistance of steel reinforcement." *Surface and Coatings Technology* 315 (2017): 188-195.
- [2] 윤일로, and 권용길. "철근콘크리트기둥의 손상지표 설정과 손상도 평가." *한국산업융합학회 논문집* 10.3 (2007): 149-155.
- [3] Mohammed, Tarek Uddin, Hidenori Hamada, and Toru Yamaji. "Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment." *Cement and concrete research* 34.4 (2004): 593-601.
- [4] Dias, W. P. S., G. A. P. S. N. Seneviratne, and S. M. A. Nanayakkara. "Offshore sand for reinforced concrete." *Construction and Building Materials* 22.7 (2008): 1377-1384.
- [5] Choi, Yoon Suk, et al. "Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens." *Construction and Building Materials* 54 (2014): 180-189.
- [5] Faustino, Pedro, Ana Brás, and Thomaz Ripper. "The effect of corrosion inhibitors on the modelling of design lifetime of RC structures." *Materials and Structures* 48.5 (2015): 1303-1319.
- [7] Liu, Zhiyong, Lei Yu, and Qingzhong Li. "Synergic mechanism of an organic corrosion inhibitor for preventing carbon steel corrosion in chloride solution." *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 30.2 (2015): 325-330.
- [8] Montes-Garcia, Pedro, V. Jiménez-Quero, and H. López-Calvo. "Assessment of high performance concrete containing fly ash and calcium nitrite based corrosion inhibitor as a mean to prevent the corrosion of reinforcing steel." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 582. No. 1. IOP Publishing, 2015.
- [9] Ahn, S. H., et al. "Localized corrosion mechanisms of the multilayered coatings related to growth defects." *Surface and Coatings Technology* 177 (2004): 638-644.
- [10] Daigle, Edward, Pratheesh George, and Chris Gilmore. "Evaluation and Analysis of Coatings for Rebar and Prestressed Concrete Strands." *MATERIALS PERFORMANCE* 54.4 (2015): 36-40.
- [11] Dong, ShiGang, et al. "Corrosion behavior of epoxy/zinc duplex coated rebar embedded in concrete in ocean environment." *Construction and Building Materials* 28.1 (2012): 72-78.
- [12] Matschei, Thomas, Barbara Lothenbach, and F. P. Glasser. "The AFm phase in Portland cement." *Cement and concrete research* 37.2 (2007): 118-130.
- [13] Puerta-Falla, Guillermo, et al. "Monovalent ion exchange kinetics of hydrated calcium-alumino layered double hydroxides." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 56.1 (2017): 63-74.
- [14] Hussain, S. Ehtesham, and S. S. Al-Saadoun. "Effect of tricalcium aluminate content of cement on chloride binding corrosion of reinforcing steel in concrete." *Materials Journal* 89.1 (1993): 3-12.
- [15] Hussain, S. Ehtesham, and Ahmed S. Al-Gahtani. "Influence of sulfates on chloride binding in cements." *Cement and Concrete Research* 24.1 (1994): 8-24.
- [16] Hussain, S. E., A. Al-Musallam, and A. S. Al-Gahtani. "Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete." *Cement and Concrete Research* 25.7 (1995): 1543-1555.
- [17] Harrison, Arthur Michael. "Constitution and



- Specification of Portland Cement.” *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* 5 (2019): 87-155.
- [18] Pöllmann, Herbert. “Calcium aluminate cements—raw materials, differences, hydration and properties.” *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 74.1 (2012): 1-82.
- [19] Ann, Ki Yong, and Chang-Geun Cho. “Corrosion resistance of calcium aluminate cement concrete exposed to a chloride environment.” *Materials* 7.2 (2014): 887-898.
- [20] Kırca, Önder. “Temperature effect on calcium aluminate cement based composite binders.” (2006).
- [21] Florea, M. V. A., and H. J. H. Brouwers. “Chloride binding related to hydration products: Part I: Ordinary Portland Cement.” *Cement and Concrete Research* 42.2 (2012): 282-290.

---

(접수: 2022.03.15. 수정: 2022.04.06. 게재확장: 2022.04.07.)