

# 저온 소성한 MgO 분말을 함유한 플라이애시 콘크리트의 장기재령에서의 내구특성

장봉석\* · 최슬우\*\* · 이광명\*\*\*

Bong-Seok Jang\*, Seul-Woo Choi\*\*, Kwang-Myong Lee\*\*\*

## Long-term Durability Characteristics of Fly ash Concrete Containing Lightly Burnt MgO Powder

### ABSTRACT

Concrete containing lightly burnt MgO has long term expansibility. It also could compensate for the thermal shrinkage of mass concrete, because the hydration of MgO proceeds at a slow pace to long-term age. Thus, lightly burnt MgO has been applied to the construction of mass concrete such as dams. Recently, the expansion characteristics of MgO concrete with fly ash that could be applied to mass concrete for the reduction of hydration heat have been studied and however, limited studies on its durability. This study investigates the long-term durability characteristics of fly ash concrete with lightly burnt MgO. The durability tests on carbonation, freezing-thawing, diffusion of chloride, and resistance to sulfate attack were carried out for MgO concrete with curing for 360 days in submerged condition with different temperature of 20 and 50°C. The results reveal that MgO concrete shows a greater resistance of carbonation, diffusion of chloride, and resistance to sulfate attack. On the other hand the resistance of freezing-thawing was little influenced by MgO powder.

**Key words** : MgO, FA Concrete, Durability, Carbonation, Freezing and thawing

### 초 록

저온에서 소성된 산화마그네슘 분말을 치환한 MgO 콘크리트는 장기적인 팽창성을 가진다. 또한 MgO의 수화반응이 느린 속도로 장기재령까지 일어나기 때문에 매스콘크리트의 온도수축을 효과적으로 보상할 수 있다. 따라서 저온 소성한 MgO는 매스콘크리트 구조물인 댐에 주로 적용되었다. 최근 수화열 저감을 위해 매스콘크리트에 많이 사용되는 플라이애시를 사용한 MgO 콘크리트의 팽창특성에 대한 연구가 진행되어 왔지만 이러한 콘크리트의 내구성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 이 연구에서는 플라이애시 콘크리트에 저온 소성한 MgO 분말을 치환하여 MgO 분말 치환에 따른 장기재령에서의 내구특성을 확인하였다. 재령 360일까지 20, 50°C에서 수중 양생을 실시한 후 탄산화, 동결융해 및 염화물 확산, 황산염 침투 저항성을 평가하였다. 실험결과, MgO 분말을 치환한 시편에서 탄산화 저항성 및 염해 저항성, 황산염 침투 저항성이 다소 향상되는 것을 확인하였다. 반면 동결융해 저항성은 MgO 분말 치환에 거의 영향을 받지 않았다.

**검색어** : 산화마그네슘(MgO), FA 콘크리트, 내구성, 탄산화, 동결융해

\* 정희원 · 교신저자 · 한국수자원공사 K-water 연구원, 책임연구원, 공학박사 (Corresponding Author · K-water · concrete@kwater.or.kr)

\*\* 정희원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (sinope16@skku.edu)

\*\*\* 정희원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, 공학박사 (leekm79@skku.edu)

Received January 22 2013, Revised February 1 2013, Accepted March 7 2013

## 1. 서론

저온에서 소성된 산화마그네슘(MgO) 분말을 치환한 콘크리트는 MgO의 수화반응을 통해 생성되는 수산화마그네슘(Mg(OH)<sub>2</sub>)이 MgO와 H<sub>2</sub>O보다 큰 부피를 가지기 때문에 팽창성을 가지게 된다. 또한 MgO의 수화반응이 느린 속도로 장기재령까지 일어나기 때문에 그 팽창효과가 4년 이상 지속되어 매스콘크리트의 온도 수축을 효과적으로 보상하는 것으로 보고된 바 있다(Du, 2005; Mo et al., 2010; Liu et al., 1991; Gao et al., 2008; Lingling et al, 2005). 따라서 저온 소성한 MgO는 매스콘크리트 구조물인 댐에 주로 적용되었으며, 수화열 저감을 위해 많이 사용되는 플라이애시와 함께 팽창특성에 대한 연구가 진행되어 왔다(Li, 1997; 1998). 하지만 이러한 플라이애시 사용 및 MgO 분말 치환에 따른 콘크리트의 내구성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 일반적으로 플라이애시는 장기재령에서 수밀성 및 내구성을 향상시키는 것으로 알려져 있으나(Kim et al., 1991; Lee et al., 1999; Naik et al., 1994), 저온 소성한 MgO는 장기적으로 팽창성이 유지되기 때문에 장기재령에서의 내구성은 꼭 검토해야 할 인자이다.

콘크리트의 내구성은 구조물의 수명을 결정하는 주요 요소로 최근에는 한계상태 설계에서와 같이 구조물의 목표수명을 만족시키기 위한 내구성 검토가 구조물 설계 단계에서부터 실시되고 있다. 따라서 앞으로 콘크리트 구조물에 저온 소성한 MgO 콘크리트의 적용을 위해서는 내구성 평가가 반드시 필요하게 될 것으로 판단된다.

이 연구에서는 MgO 분말 치환에 따른 장기 재령에서의 내구 특성을 규명하기 위해 저온 소성한 MgO 분말을 5% 수준으로 세 가지 강도의 플라이애시 콘크리트 배합에 치환하여 재령 360일까지 20, 50℃에서 수중 양생을 실시하였다. 그 후 탄산화, 동결융해 및 염화물 확산, 황산염 침투 저항성을 평가하여 그 결과를 MgO 분말을 치환하지 않은 플라이애시 콘크리트와 비교, 분석하였다.

## 2. 실험 연구

### 2.1 재료

이 연구에서는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)을 만족하는 국내 S사의 1종 시멘트(밀도: 3.14g/cm<sup>3</sup>)와 국내 S사의 플라이애시(밀도: 2.20g/cm<sup>3</sup>), 중국의 료녕해성에서 수리구조물 전용으로 저온 소성한 MgO 분말(밀도: 3.56g/cm<sup>3</sup>)을 결합재로 사용하였으며, 그 화학조성 및 물리적 성질은 Table 1에 정리되어 있다. 콘크리트 배합에 사용한 골재의 성질은 Table 2에 정리하였다. 굵은 골재는 콘크리트의 목표 강도에 따라 최대치수가 다른 골재를 사용하였

Table 1. Properties of binders

|         | SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | MgO (%) | CaO (%) | SO <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Insol. (%) | Blaine (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|----------------------|------------------------------------|---------|---------|---------------------|------------------------------------|------------|-----------------------------|
| Cement  | 21.60                | 6.00                               | 3.40    | 61.40   | 2.50                | 3.10                               | 0.21       | 3,539                       |
| Fly ash | 67.80                | 18.27                              | 0.80    | 3.17    | 2.40                | 2.40                               | -          | 3,234                       |
| MgO     | 1.56                 | 0.34                               | 93.58   | 1.21    | 0.08                | 0.40                               | 7.80       | -                           |

Table 2. Properties of aggregates

|                | G <sub>max</sub> (mm) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Absorption (%) | Note         |
|----------------|-----------------------|------------------------------|----------------|--------------|
| Fine aggregate | -                     | 2.60                         | 1.07           | Sea sand     |
| Gravel 1       | 25                    | 2.70                         | 0.44           | Crushed rock |
| Gravel 2       | 40                    | 2.73                         | 0.57           | Crushed rock |

Table 3. Mix proportions of concrete

| Mix Type | G <sub>max</sub> (mm) | W/B (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m <sup>3</sup> ) |       |      |      |       |       |
|----------|-----------------------|---------|---------|----------------------------------|-------|------|------|-------|-------|
|          |                       |         |         | W                                | C     | FA   | MgO  | S     | G     |
| 12-0     | 40                    | 65      | 52      | 175.0                            | 215.4 | 53.8 | 0    | 928.7 | 900.2 |
| 12-5     |                       |         |         | 175.0                            | 201.9 | 53.8 | 13.5 | 928.9 | 900.3 |
| 24-0     | 25                    | 48      | 48      | 165.0                            | 275.0 | 68.8 | 0    | 837.6 | 942.3 |
| 24-5     |                       |         |         | 165.0                            | 257.8 | 68.8 | 17.2 | 837.8 | 942.6 |
| 45-0     | 25                    | 35      | 46      | 165.0                            | 377.1 | 94.3 | 0    | 749.9 | 914.2 |
| 45-5     |                       |         |         | 165.0                            | 353.6 | 94.3 | 23.6 | 750.2 | 914.6 |

는데 12MPa인 콘크리트에는 최대 치수 40mm, 24MPa과 45MPa인 콘크리트에는 최대 치수가 25mm인 굵은 골재를 사용하였다. 화학 혼화제로는 유동성 확보와 공기량 조절을 위하여 국내 H사의 폴리카르본산계 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

### 2.2 배합비

이 연구에서는 목표 강도 12, 24, 45MPa의 총 3가지 배합을 기준으로 플라이애시를 20% 수준으로 치환하였다. MgO 분말은 기존 연구인 Jang et al.(2011) 및 Du(2005)의 연구결과를 참고하여 적정량의 최대치로 사료되는 결합재 질량비 5% 수준으로 치환하였으며, 실험에 사용한 6 종류의 콘크리트 배합비는 Table 3과 같다.

### 2.3 실험 방법

#### 2.3.1 배합 및 공기량 측정

콘크리트는 KS F 2425(실험실에서 콘크리트 시료를 만드는 방법)에 따라 제조하였으며, 콘크리트의 배합시간은 MgO 분말의 균질성을 위해 4분으로 하였다. 공기량은 KS F 2421(압력법에 의한 균지 않은 콘크리트의 공기량 실험 방법)에 따라 측정하였다.

### 2.3.2 시편 제작 및 양생

콘크리트 시편은 각각의 내구성 실험 조건에 따라 100 × 100 × 400mm의 휨 몰드와 Φ 100 × 200mm의 실린더 몰드를 사용하여 제작하였다. 제작한 시편은 온도가 20 ± 1℃ 이고, 습도가 60 ± 3%인 항온항습실에서 24시간 동안 양생한 후 탈형을 실시하였다. 이후 내구성 실험을 실시할 때까지 20, 50℃의 항온수조에서 재령 360일까지 수중 양생을 실시하였다.

### 2.3.3 탄산화

탄산화 실험용 시편은 Φ 100 × 200mm의 공시체를 Φ 100 × 100mm 크기로 절단하여 만들었으며, 실험은 KS F 2584(콘크리트의 촉진 탄산화 실험방법)를 따라 수행하였다. 그리고 탄산화 환경 노출 후 재령 28, 90, 180 일에서 KS F 2596(콘크리트 탄산화 깊이 측정방법)에 의해 탄산화 깊이를 측정하였다.

### 2.3.4 동결융해

동결융해 실험은 100 × 100 × 400mm 시편을 사용하여 KS F 2456(급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 실험 방법)의 방법 B(가중 급속 동결 후 수중 융해 실험 방법)에 따라 실시하였다. 실험의 결과는 KS F 2437(공명 진동에 의한 콘크리트의 동탄성 계수 및 푸이송비 실험 방법)에 의해 시편의 동탄성 계수를 측정하여 다음의 식을 이용하여 상대 동탄성 계수로 나타내었다.

$$P_c(\%) = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $P_c$ 는 동결 융해 C 사이클 후의 상대 동탄성 계수,  $n_0$ 는 동결 융해 0 사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수 (Hz),  $n_c$ 는 동결 융해 C 사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수 (Hz)이다.

### 2.3.5 염소이온 확산계수

염소이온 확산 실험은 Φ 100 × 200mm의 공시체를 Φ 100 × 50mm 크기로 절단하여 진행하였다. 실험은 NT Build 492을 따라 실시하였으며, 양극용액은 0.3N NaOH을 사용하였고 음극용액은 10% NaCl을 사용하였다. 염소 이온의 침투 깊이는 KS F 2737(지시약에 의한 콘크리트의 염화물 침투 깊이 측정방법)에 따라 측정하였으며, 그 결과를 다음의 식에 대입하여 염소이온 확산계수를 산정하였다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (2)$$

여기서,  $D_{nssm}$ 는 염소이온 확산계수( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ),  $U$ 는 가인 전압의 절대값(V),  $T$ 는 측정 전후의 용액의 평균 온도(℃),  $L$ 은 시편의 두께(mm),  $x_d$ 는 염소이온의 침투 깊이(mm),  $t$ 는 실험 지속 시간(hour)이다.

### 2.3.6 황산염 저항성

황산염 저항성 실험에 대한 규격은 국내에 아직 제정되어 있지 않기 때문에 일본 건재실험센터에서 제정한 JSTM C 7401(콘크리트의 용액침지에 의한 내약품성 실험방법)에 의하여 황산염 침투 저항성 실험을 수행하였다. 질량변화는 100 × 100 × 400mm의 시편을 사용하였으며, 압축강도 변화는 Φ 100 × 200mm 크기의 시편을 사용하여 관찰하였다. 시편을 10% 황산나트륨에 침지하여 침지 전후 질량변화 및 압축강도의 변화를 관찰하였으며, 결과는 침지 전 시편의 질량 및 압축강도에 대한 변화율로 나타내었다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 공기량

Fig. 1에 나타난 공기량 측정 결과를 보면 MgO 분말을 치환한 콘크리트(MgO-5)의 공기량은 MgO 분말을 치환하지 않은 콘크리트(MgO-0)와 비교하여 다소 차이를 나타냈다. 하지만 그 범위는 -0.4 ~ +0.2% 수준으로 MgO 치환에 따른 공기량의 증가 혹은 감소가 크지 않기 때문에 MgO 치환이 콘크리트의 공기량에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

### 3.2 압축강도

각각의 시편을 목표 강도 - MgO 치환률 - 양생 온도의 순서로 정리하여 압축강도를 Fig. 2에 정리하였다. 재령 28일에서 MgO-5

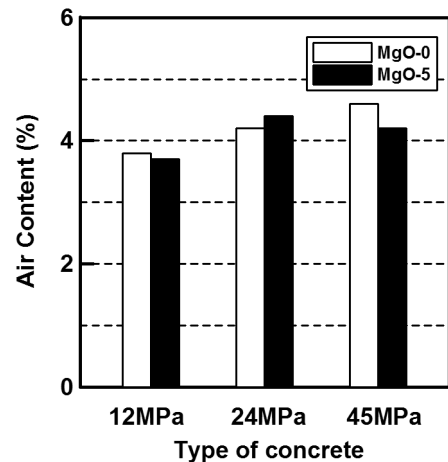
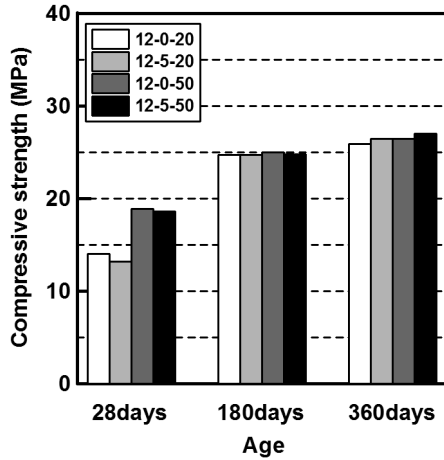


Fig. 1. Air content of concretes

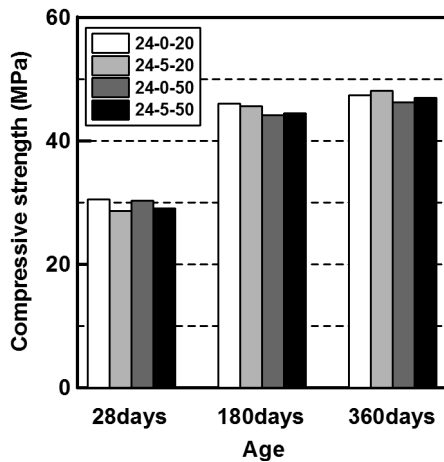
의 압축강도가 MgO-0에 비해 다소 낮게 관찰되었다. 반면 재령 360일에서는 MgO-5의 압축강도가 MgO-0에 비해 약간 높거나

비슷하게 나타났으며, 이는 장기재령에서 MgO의 팽창으로 인한 공극충전 효과에 기인한 것으로 사료된다(Liu et al., 1992; Jang et al., 2011; Salomao et al., 2007).

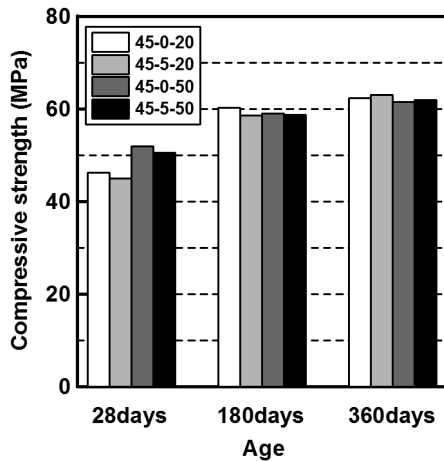
재령 28일에서 50℃에서 양생한 시편의 경우 20℃에서 양생한 시편보다 전반적으로 높은 압축강도를 나타냈다. 반면 재령 360일에서는 저강도 콘크리트인 12MPa 콘크리트를 제외하고 50℃에서 양생한 시편이 20℃에서 양생한 시편보다 낮은 압축강도를 보였다. 일반적으로 고온에서 양생한 콘크리트의 경우 초기 빠른 수화 속도로 인해 콘크리트의 강도 증가가 빨라지지만 수화 생성물의 불규칙한 확산으로 공극률 및 미세균열의 증가로 장기강도가 저하된다고 알려져 있다(Kim et al., 1998). 따라서 이러한 이유로 고온에서 양생한 콘크리트의 장기강도가 저하되는 것으로 사료된다. 반면 12MPa의 경우 고온양생으로 인한 장기재령에서의 강도 저하보다 초기 강도 상승폭이 더 크기 때문에 상대적으로 고온양생으로 인한 강도 저하가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 또한 전체적으로 MgO-5가 MgO-0보다 높은 압축강도를 보였는데, 이러한 결과로부터 고온에서도 MgO 분말 치환에 따른 장기재령에서의 강도 증진효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 12MPa



(b) 24MPa



(c) 45MPa

Fig. 2. Compressive strength of concretes

### 3.3 탄산화

재령 360일까지 양생한 콘크리트 시편을 5% CO<sub>2</sub> 환경에 노출한 후 28, 90, 180일에서의 탄산화 침투 깊이를 Fig. 3에 나타내었다. 콘크리트의 탄산화는 물-결합제비, 혼화재 등에 영향을 받으며, W/B가 클수록 공극률 및 세공용액이 증가하여 탄산화에 취약하게 된다(Choi et al., 2009; Oh et al., 2003). 실험 결과 W/B가 낮을수록 이산화탄소의 침투속도가 느리게 나타났으며, 특히 45MPa 콘크리트의 경우에는 탄산화 환경 노출 후 28일 동안 탄산화가 진행되지 않았다.

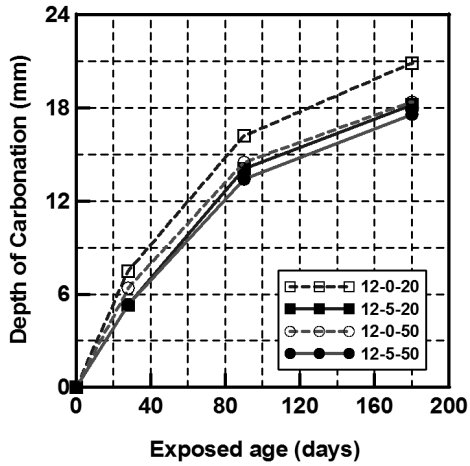
CO<sub>2</sub> 환경에 노출 후 180일까지 재령이 증가할수록 탄산화 침투 깊이 증가폭이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, MgO-5의 경우 양생온도와 무관하게 전 재령에서 MgO-0보다 작은 탄산화 깊이를 보였다. 이를 통해 충분한 재령동안 양생을 거칠 경우, 즉 장기재령에서 저온 소성한 MgO 분말이 콘크리트의 탄산화 저항성을 향상시키는 것을 알 수 있다. 이는 MgO의 팽창효과를 통해 주변 시멘트 페이스트의 미세구조가 밀실해짐으로써 공극률 및 미세공극의 분포에 영향을 주기 때문으로 판단된다(Liu et al., 1991; Choi et al., 2011).

50℃에서 양생한 콘크리트의 경우 20℃에서 양생한 콘크리트에 비해 전체적으로 탄산화 침투 깊이가 작게 나타났다. 또한 MgO-5의 탄산화 침투 속도가 MgO-0보다 느리게 관찰되어 50℃에서 양생한 MgO-5가 가장 작은 탄산화 침투 깊이를 보였다. 이는 고온 양생을 통해 MgO분말의 수화반응이 촉진되어 수화 생성물

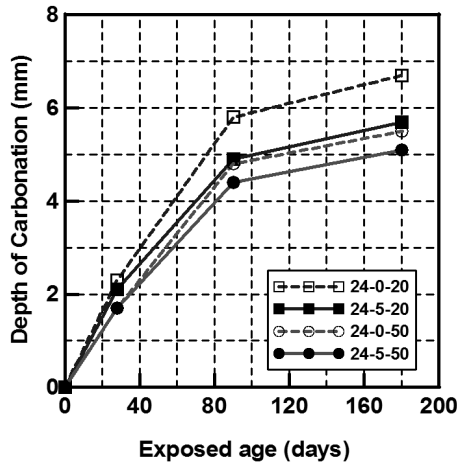
생성에 따른 공극률 감소로 인한 것으로 판단된다(Amaral et al., 2010; Liu et al., 1991).

### 3.4 동결응해

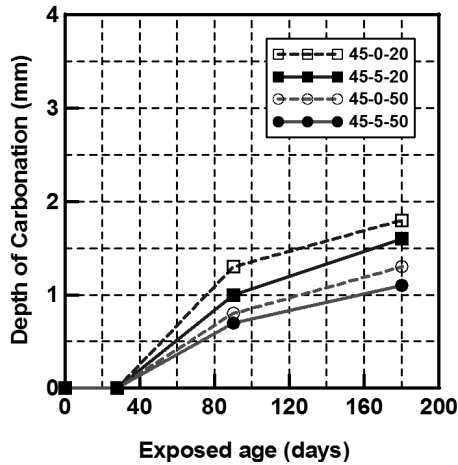
Fig. 4에 상대 동탄성 계수를 목표 강도에 따라 나타내었다.



(a) 12MPa

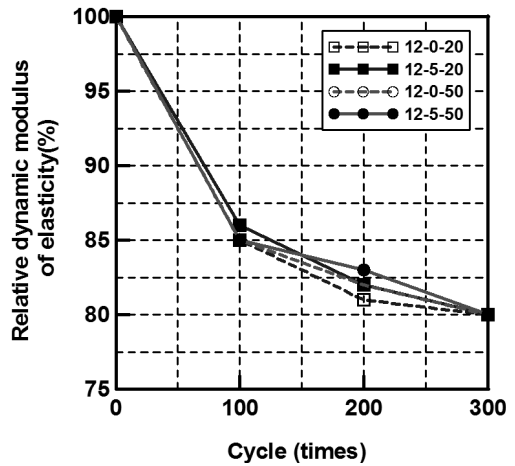


(b) 24MPa

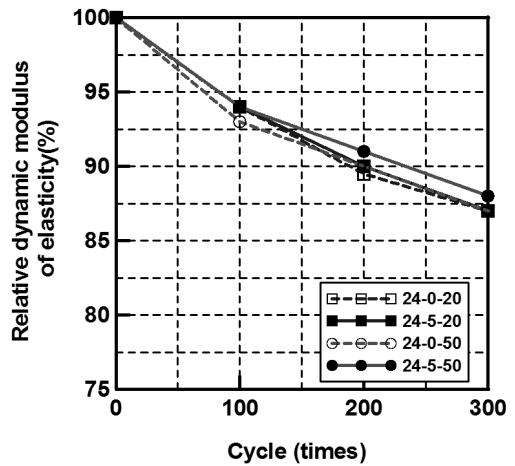


(c) 45MPa

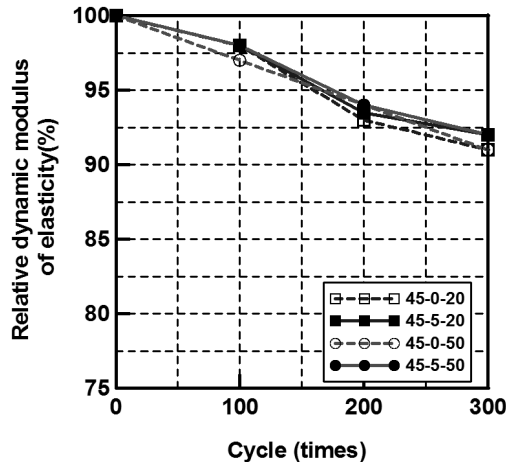
Fig. 3. Carbonation depth of concrete after 1 year



(a) 12MPa



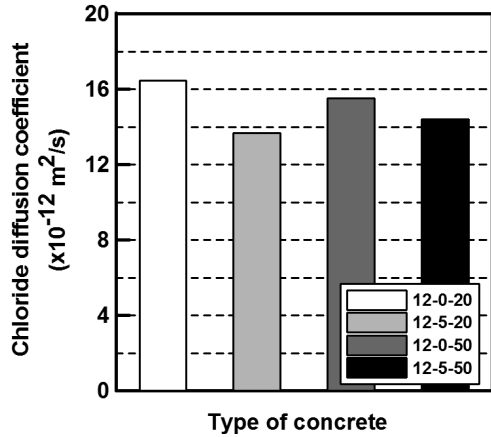
(b) 24MPa



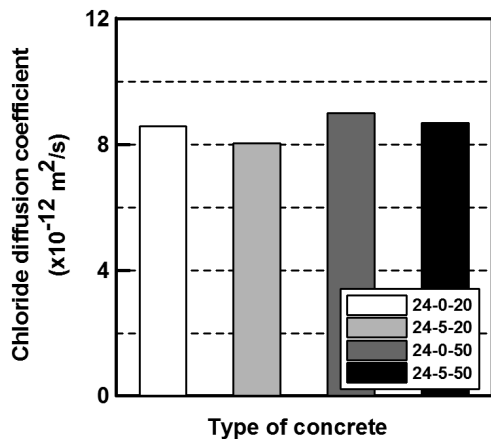
(c) 45MPa

Fig. 4. Relative dynamic modulus of elasticity after 1 year

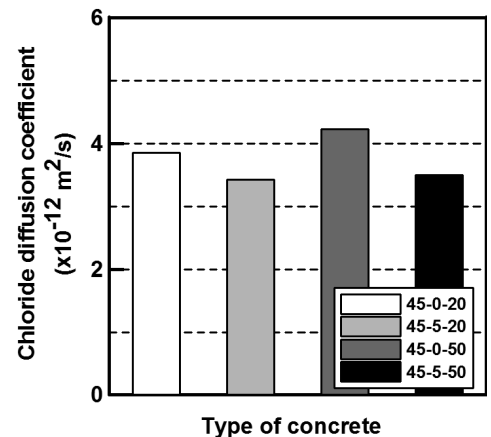
연구에 사용한 콘크리트 배합의 공기량 측정 결과를 통해 W/B와 MgO 치환에 따른 연행공기량의 차이가 크지 않은 것을 확인하였다. 따라서 배합의 연행공기량의 작은 차이가 동결융해 실험 결과에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.



(a) 12MPa



(b) 24MPa



(c) 45MPa

Fig. 5. Chloride diffusion coefficient of concrete after 1 year

실험 결과에 따르면 W/B에 따라 상대 동탄성 계수의 감소 폭이 다르게 나타났으며, 고강도 콘크리트에서 동결융해 저항성이 크게 나타났다. 또한 강도별로 MgO-0와 MgO-5의 상대 동탄성 계수 감소 경향이 근사하게 나타났다. 20°C 에서 양생한 12-5의 경우 12-0과 비교하여 100, 200 cycle에서 다소 향상된 동결융해 저항성을 보였으나 300 cycle에서 동일한 상대동탄성 계수를 나타내었다. 50°C 에서 양생한 시편 역시 20°C 에서 양생한 시편과 비슷한 동결융해 저항성을 나타냈으며, 이러한 경향은 24, 45MPa 콘크리트에서 동일하게 관찰되었다. 따라서 콘크리트의 동결융해 저항성은 MgO 분말의 치환에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 일반적으로 MgO 치환에 콘크리트의 공극률 및 공극분포가 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 하지만 5 $\mu\text{m}$  이상의 큰 공극은 MgO 치환에 따른 공극 변화에 큰 영향을 받지 않는다(Mo et al., 2012). 따라서 콘크리트의 내동해 저항성에 중요한 50 $\mu\text{m}$  이상의 독립된 공극은 MgO 치환에 따른 영향을 거의 받지 않기 때문에 MgO 치환에 따른 동결융해 저항성의 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

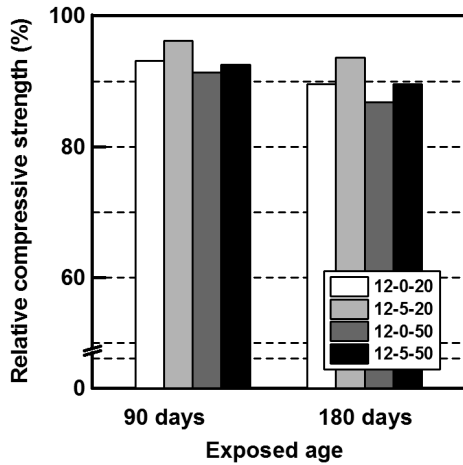
### 3.5 염소이온 확산계수

염소이온 확산계수 실험을 통해 얻은 결과를 목표 강도에 따라 Fig. 5에 정리하여 나타내었다. 염소이온 확산계수는 콘크리트 내부 미세구조 및 공극에 영향을 많이 받기 때문에 W/B에 따라 크게 달라진다. 실험결과 W/B가 큰 저강도에서 W/B가 작은 고강도로 갈수록 염소이온 확산계수가 현저히 작아졌으며, 목표 강도 및 양생온도와 무관하게 모든 MgO-5가 MgO-0에 비해 낮은 염소이온 확산계수를 나타내는 것으로 보아 MgO 분말 치환에 따라 염해 저항성이 다소 향상되는 것으로 사료된다.

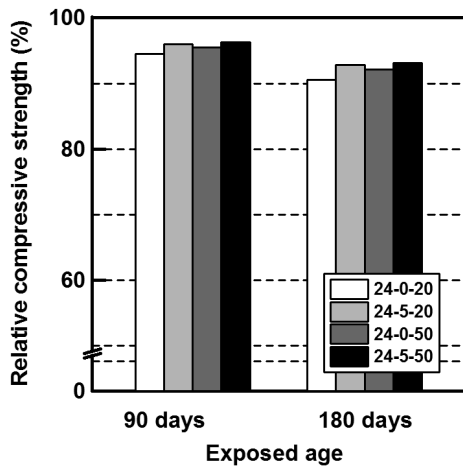
50°C 에서 양생한 경우 12MPa 콘크리트를 제외하고 모든 시편에서 염해저항성이 다소 저하된 결과를 나타냈다. 이는 콘크리트 압축강도와 동일한 경향으로 콘크리트의 공극률 및 공극 크기 분포가 압축강도 및 염소이온 확산속도와 높은 상관관계를 가지기 때문으로 판단된다(Yoon et al., 2005; Kim et al., 2007).

### 3.6 황산염 저항성

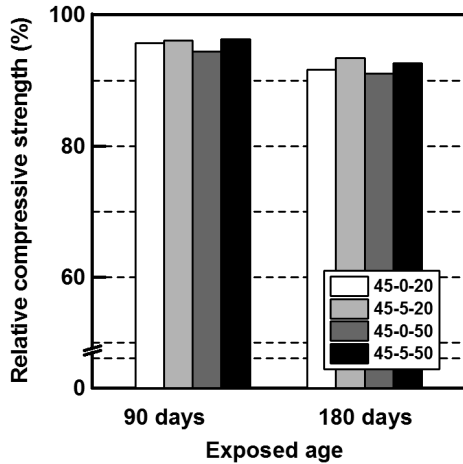
황산염 침지 전후 질량변화 및 압축강도의 비를 Fig. 6 및 Table 4에 정리하여 나타내었다. 화학적 침식은 온도, 결합재의 종류 및 양, 물-결합재 비(W/B) 및 양생 기간 등의 여러 인자들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Bae et al., 2010). 실험결과를 살펴보면 W/B가 낮을수록 침지 전 후 질량 변화 및 상대 압축강도의 변화가 작게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 W/B가 낮을수록 수밀성이 증가하고 치밀한 미세구조를 가지므로 황산나트륨 침투의 열화 진행이 느리게 일어난 것으로 판단된다.



(a) 12MPa



(b) 24MPa



(c) 45MPa

Fig. 6. Relative compressive strength of concrete after 1 year

황산염 침지 후 재령 180일에서의 질량변화를 살펴보면, 목표 강도 및 양생온도와 관계없이 모든 MgO-5가 MgO-0보다 비슷

Table 4. Mass change of concrete after 1 year (%)

| Type \ Exposed days | 90 days | 180 days |
|---------------------|---------|----------|
| 12-0-20             | 2.9     | 3.3      |
| 12-5-20             | 1.4     | 1.8      |
| 12-0-50             | 2.8     | 3.1      |
| 12-5-50             | 1.1     | 1.4      |
| 24-0-20             | 1       | 1.3      |
| 24-5-20             | 1.1     | 1.4      |
| 24-0-50             | 1.1     | 1.5      |
| 24-5-50             | 1.2     | 1.6      |
| 45-0-20             | 0.9     | 1.2      |
| 45-5-20             | 0.8     | 1        |
| 45-0-50             | 0.8     | 1.1      |
| 45-5-50             | 0.7     | 1        |

하거나 다소 작은 질량변화율이 관찰되었다. 특히 12MPa의 경우 MgO-5 시편이 1.5% 이상 질량변화 저항성이 향상된 반면 24, 45MPa 콘크리트의 경우 MgO-5과 MgO-0이 비슷한 질량변화율을 보였다. 또한 침지 후 재령 180일에서의 압축강도의 변화를 살펴보면, 모든 MgO-5에서 강도 저하가 작게 나타났다. 이러한 실험결과로부터 MgO 분말의 치환으로 인하여 황산염 저항성이 향상되는 것을 확인할 수 있으며, 특히 저강도 콘크리트에서 황산염 저항성 향상 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 50℃에서 양생한 경우, 전반적으로 20℃에서 양생한 시편보다 큰 염소이온 확산계수를 나타냈으나, MgO-5에서 상대적인 황산염 저항성 향상을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 MgO 분말을 치환하지 않은 FA 콘크리트(MgO-0)와 MgO 분말을 5% 수준으로 치환한 콘크리트(MgO-5)에 대하여 장기 재령에서의 내구성 평가를 위해 재령 360일까지 각각 20, 50℃로 유지되는 항온수조에서 양생한 뒤 탄산화, 동결융해, 염화물 확산 및 황산염 침지 실험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MgO-5 콘크리트의 압축강도는 MgO-0과 비교하여 초기 재령에서는 강도 저하가 나타났지만 재령 360일에서는 MgO-0보다 다소 높은 압축강도를 나타냈다.
- (2) MgO-5에서 탄산화 침투속도가 감소하였으며, 특히 기존의 연구 결과와 비교하여 MgO-5의 탄산화 저항성이 크게 향상된 것을 확인할 수 있었으며 따라서 MgO 분말의 치환이 장기재령

에서 콘크리트의 탄산화 저항성을 향상시키는 것으로 사료된다.

- (3) 동결융해 실험 결과 MgO-0와 MgO-5의 동결융해 저항성은 비슷한 수준으로 관찰되었다. 이는 콘크리트의 내동해 저항성에 중요한 50 $\mu$ m 이상의 독립된 공극이 MgO 치환에 따른 영향을 거의 받지 않기 때문으로 판단된다.
- (4) MgO-5의 염소이온 확산계수가 작게 관찰되었으며, 황산염 침지 전후 MgO-5에서 질량 변화 및 강도 손실이 MgO-0에서 동등 또는 다소 작게 나타났다. 또한 저항도인 12MPa 콘크리트에서 MgO 분말 치환에 따른 염해 저항성 및 황산염 저항성이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 저온소성한 MgO 분말의 치환이 장기재령에서의 콘크리트의 염해 저항성 및 황산염 저항성을 향상시키는 것으로 사료되며, 특히 저항도 콘크리트에서 큰 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(09기술혁신F03)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### References

- Amaral, L. F., Oliveira, I. R., Salomao, R., Frollini, E., Randolfelli, V. C. (2010). "Temperature and common-ion effect on magnesium oxide (MgO) hydration." *Ceramics International*, Vol. 36, No. 3, pp. 1047-1054.
- Bae, S. H., Park, J. I., Lee, K. M. (2010). "Influence of mineral admixture on the resistance to sulfuric acid and sulfate attack in concrete." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 2, pp. 219-228 (in Korean).
- Choi, S., Lee, K. M., Jung, S. H., Kim, J. H. (2009). "A study on the carbonation characteristics of fly ash concrete by accelerated carbonation test." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 4, pp. 449-455 (in Korean).
- Choi, S. W., Kim, J. H., Lee, K. M., Kwon, Y. G., Jang, B. S. (2011). "Durability characteristics of concrete containing lightly burnt MgO powder." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 5, pp. 609-615 (in Korean).
- Du, C. (2005). "A Review of magnesium oxide in concrete." *Concrete International*, Vol. 27, No. 12, pp. 45-50.
- Gao, P., Wu, S., Lu, X., Deng, M., Lin, P., Wu, Z., Tang, M. (2007). "Soundness evaluation of concrete with MgO." *Construction and Building Materials* 21, Vol. 21, No. 1, pp. 132-138.
- Gao, P., Geng, F., Hou, J., Li, X., Lin, H., Lu, X., Shi, N. (2008). "Production of MgO-type expansive agent in dam concrete by use of industrial by-products." *Building and Environment*. Vol. 43, No. 4, pp. 453-457.
- Jang, B. S., Kwon, Y. G., Choi, S. W., Lee, K. M. (2011). "Fundamental properties of cement composites containing lightly burnt MgO powders." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, pp. 225-233 (in Korean).
- Kim, J. K., Moon, Y. H., Eo, S. H., Choi, E. K. (1998). "The effect of different curing time and temperature on compressive strength of concrete." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No.3, pp. 143-152 (in Korean).
- Kim, J. K., Park, Y. D., Sung, K. Y. (1991). "The long-term strength and the workability of high-strength fly ash concrete." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 3, No. 4, pp. 107-115 (in Korean).
- Kim, N. W., Yeo, D. G., Song, J. J., Bae, J. S. (2007). "A study on the characteristic of capillary pore and chloride diffusivity by electrical difference of high-strength concrete using metakaolin." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 4, pp. 499-506 (in Korean).
- Lee, C. Y., Choi, S. H., Kang, S. H., Lee, K. M. (1999). "Influence of fly ash content with respect to the fresh and mechanical properties in concrete." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 11, No. 6, pp. 25-33 (in Korean).
- Li, C. M. (1997). "Effect of fly ashes on deformation and mechanic properties of MgO concrete." *Study on Hydroelectric Engineering*, pp. 1-9 (in Chinese).
- Li, C.M. (1998). "Long-term self-volume deformation of concrete with MgO." *Hydro power Generation*, pp. 53-57 (in Chinese).
- Lingling, X., Deng, M. (2005) "Dolomite used as raw material to produce MgO-based expansive agent." *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 1480-1485.
- Liu Z., Cui X., Tang M. (1991). "MgO-type delayed expansive cement." *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, No. 6, pp. 1049-1057.
- Mo, L., Deng, M., Tang, M. (2010). "Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials." *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 3, pp. 437-446.
- Mo, L., Panesar, D. K. (2012). "Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes containing reactive MgO." *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 6, pp. 769-777.
- Naik, T. R., Singh, S. S., Hossain, M. M. (1994). "Permeability of concrete containing large amount of fly ash." *Cement and concrete research*, Vol. 24, No. 5, 1994, pp. 913-922.
- Oh, B. H., Jung, S. H., Lee, M. K. (2003). "Influence of porosity on the CO<sub>2</sub> diffusion characteristic in concrete." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 3, pp. 443-453 (in Korean).
- Salomao, R., Bittencourt L. R. M., Pandolfelli, V. C. (2007). "A novel approach for magnesia hydration assessment in refractory castables." *Ceramics International*, Vol. 33, No. 5, pp. 803-810.
- Yoon, E.S., Lee, T. W., Park, S. B. (2005). "Analysis of correlation between compressive strength, void ratio and chloride diffusion coefficient of concrete using various kinds of cement." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 5, pp. 735-742 (in Korean).