Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 27, No. 6, pp. 641~649, December, 2015
http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.6.641

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842

# 다량의 광물질 혼화재를 사용한 고강도 콘크리트의 내구성 평가

백철우 [1)]* · 김훈상 [1)] · 최성우 [1)] · 조현태 [1)] · 류득현 [1)]

[1)]유진기업(주) 기술연구소

# Durability Assessment of High Strength Concrete with High Volume Mineral Admixture

**Chul-Woo Baek,[1)]* Hoon-Sang Kim,[1)] Sung-Woo Choi,[1)] Hyun-Tae Jo,[1)] and Deug-Hyun Ryu[1)]**

[1)]R&D Center, Eugene Corporation Co., Ltd., Goyang 10566, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The purpose of this study was to assess the durability of high-strength concrete with high volume mineral admixture (HVMAC) derived from previous studies within ternary blended concrete (TBC) and normal concrete (NC). Four durability evaluation types such as chloride penetration resistance, freezing and thawing resistance, carbonation resistance in two pre-treatment conditions, and sulfuric acid and sulfate resistance using 5% sulfuric acid ($H_2SO_4$), 10% sodium sulfate ($Na_2SO_4$), and 10% magnesium sulfate ($MgSO_4$) solution were selected and performed in this study. HVMAC showed the excellent chloride penetration resistance in any age and the freezing and thawing durability close to 100%. In addition, HVMAC affected more reduction in carbonation resistance than TBC. When the curing time was increased, to create a concrete internal organization densely improved resistance to carbonation. HVMAC also showed the most superior in sulfuric acid and sulfate resistance. As the reduction of calcium hydroxide and $C_3A$ to apply a large amount of admixture reduced the swelling and cracking of concrete, the strength reduction and mass change of concrete was found to be small indicated.

**Keywords :** high volume mineral admixture, durability, chloride penetration resistance, sulfuric acid and sulfate resistance

## 1. 서 론

최근 국내외적으로 지구환경보전 방안으로 온실가스를 저감시키고자 다양한 정책 및 기술개발이 이루어지고 있다. 국내의 경우 저탄소 녹색성장 기본법 시행에 따라 2020년까지 $CO_2$ 배출량을 온실가스 배출전망치(BAU) 대비 30% 감축 목표를 설정하였으며, 건설산업 중 시멘트의 제조과정에서 발생하는 $CO_2$ 배출량은 2008년도에 46.8백만톤으로 국가 전체 배출량의 10%를 차지하기 때문에 시멘트 분야에서 $CO_2$ 저감기술 개발이 요구되고 있다.[1)]

이러한 측면에서 시멘트 사용량을 줄이고 고로슬래그 미분말 및 플라이애시 등의 광물질 혼화재를 다량 사용하는 방법들의 연구가 활발히 진행되고 있다.[2-5)]

혼화재를 사용한 콘크리트의 경우 일반적으로 유동성 증진, 장기강도 우수 및 수화열 저감 등의 많은 장점을 가지고 있는 반면, 다량의 혼화재 적용시 시멘트 사용량 감소에 따른 초기 강도 발현이 저하되기 때문에 일반적으로 혼화재의 사용량을 크게 증가시키는 데는 한계가 있는 실정이다.[6-9)] 이에 따라 다량의 혼화재를 사용한 콘크리트에 대한 역학적 특성은 물론 내구성에 대한 구체적 검토를 통해 탄소저감형 콘크리트의 실용화 가능성 타진 및 기술적 토대를 구축할 필요가 있다고 판단된다.

이에 본 연구에서는 기존 선행연구[10)]의 결과를 토대로 시멘트 사용량을 전체 결합재의 10% 수준으로 낮추고 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 주요 결합재로 한 다량의 광물질 혼화재를 사용한 콘크리트(High Volume Mineral Admixture Concrete, HVMAC)의 역학적 특성과 염해, 화학저항성, 동해 및 탄산화 등과 같은 다양한 내구성능을 비교 평가하여 탄소저감형 건설재료로서 HVMAC의 기술 개발 확대 및 실용화를 위한 기반을 조성하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 실험에 사용된

*Corresponding author E-mail : backtrue@hanmail.net
Received May 06, 2015, Revised August 4, 2015, Accepted August 6, 2015

**Table 1** Design of experiment

| Factors | | Levels |
|---|---|---|
| Mixture | Target Slump flow (mm) | 600±100 |
| | Target air (%) | 3.5±1.5 |
| Experiment | Fresh concrete | · Slump flow<br>· Air content |
| | Hardened concrete | · Compressive strength<br>· Chloride penetration resistance<br>· Resistance of concrete to rapid freezing and thawing<br>· Accelerated carbonation<br>· Resistance to sulfuric acid & sulfate attack |

콘크리트 배합은 Table 2와 같다. HVMAC는 선행연구를 통해 도출된 콘크리트로서 결합재의 구성은 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC) 10%, 고로슬래그 미분말(Ground Graduated Blast furnace Slag, GGBS) 60%, 플라이애시(Fly Ash, FA) 20%와 혼화재의 반응성을 활성화시키기 위해 무기질 자극제를 10% 사용하였으며, 무기질 자극제로서는 천연무수석고(Anhydrous Gypsum, AG) 5%, 그리고 열병합발전소에서 발생하는 산업부산물인 열병합애시(combined Heat power plant fly Ash, HA) 5%를 사용하였다.

HVMAC의 내구성을 평가하기 위해 비교용 배합으로서는 동일한 배합 조건에 대해서 무기질 자극제를 사용하지 않은 3성분계 콘크리트(Ternary Blended Concrete, TBC)와 OPC를 100% 사용한 일반 콘크리트(Normal Concrete, NC) 배합을 적용하였다.

굳지 않은 콘크리트의 목표 슬럼프 플로는 600 ± 100 mm, 목표 공기량은 3.5 ± 1.5%를 만족하도록 화학혼화제를 조절하여 배합실험을 진행하였다.

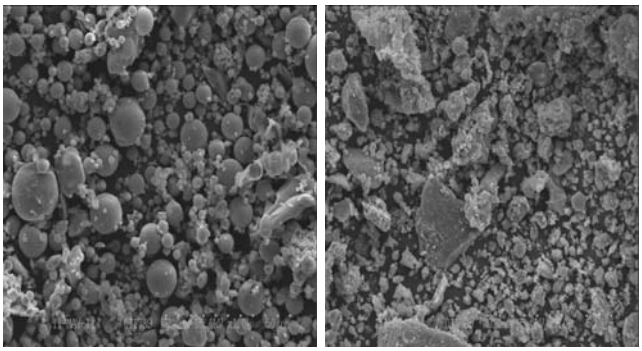
### 2.2 사용재료

본 연구에 사용된 결합재들에 대한 물리 화학적 특성을 Table 3에 나타내었다.

무기질 자극제로 사용한 HA의 경우 열병합발전소에서 연료의 연소과정에서 발생되는 부산물로서 연소과정에서 발생하는 부산물이라는 점은 FA와 유사하지만 사용하는 원료 및 연소 온도 등의 차이에 기인하여 화학 조성 및 입자 형상에 차이가 있다. HA의 화학성분은 $SiO_2$ 27.6%, CaO 35.3%, $SO_3$ 5.6%이고, FA보다 $SiO_2$는 낮고 CaO와 $SO_3$ 함량이 높은 특성이 있다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 SEM을 통해 FA와 HA의 입자 형상을 관찰하였을 때 FA는 대부분 구형의 입자 형태를 나타내고 있으나, HA의 경우 조대한 각형의 입자들과 함께 미세 입자들이 혼재해 있는 것을 확인할 수 있다.

HA와 함께 무기질 자극제로 사용된 AG는 천연무수석고로서 화학조성을 살펴보면 50.6 %의 높은 $SO_3$ 함량을 나타내고 있다.

잔골재는 바다모래를 사용하였으며, 굵은골재는 최대



(a) FA (b) HA

**Fig. 1** SEM image of FA & HA

**Table 2** Mix proportion of concrete

| MIX | W/B (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m$^3$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | W | OPC | GGBS | FA | HA | AG | S | G | AD |
| NC | 26.0 | 44.7 | 155 | 596 | 0 | 0 | 0 | 0 | 721 | 899 | 8.4 |
| TBC | | | | 60 | 417 | 119 | 0 | 0 | 693 | 864 | 4.8 |
| HVMAC | | | | 60 | 358 | 119 | 30 | 30 | 693 | 864 | 5.7 |

**Table 3** Physical and Chemical Properties of Cementitious Materials

| Items / Types | Chemical composition (%) | | | | | | | Density (g/cm$^3$) | Blaine (cm$^2$/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | L.O.I | | |
| OPC | 21.6 | 5.6 | 3.8 | 60.8 | 2.1 | 2.4 | 2.2 | 3.10 | 3 342 |
| GGBS | 34.1 | 15.4 | 0.5 | 41.6 | 4.2 | 3.2 | 0.3 | 2.90 | 4 191 |
| FA | 60.0 | 22.7 | 5.9 | 7.1 | 0.0 | 0.2 | 3.7 | 2.27 | 3 432 |
| HA | 27.6 | 13.0 | 6.9 | 35.3 | 6.0 | 5.6 | 4.5 | 2.82 | 4 848 |
| AG | 3.0 | 1.4 | 0.4 | 38.8 | 1.6 | 50.6 | 3.9 | 2.82 | 3 643 |

**Table 4** Physical Properties of aggregate

| Classification | Types | $G_{max}$ (mm) | Density ($g/cm^3$) | Absorption (%) | FM |
|---|---|---|---|---|---|
| Fine aggregate | Sea sand | 5 | 2.58 | 0.70 | 2.72 |
| Coarse aggregate | Crushed stone | 25 | 2.61 | 0.78 | 6.93 |

치수 25 mm 부순골재를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 4와 같다. 화학혼화제는 폴리카르본산계(Polycarboxylate, PC) 고성능 AE감수제를 사용하였다.

### 2.3 실험방법

#### 2.3.1 굳지 않은 콘크리트

슬럼프 시험은 KS F 2402, 공기량 시험은 KS F 2421에 준하여 시험을 수행하였다.

#### 2.3.2 압축강도

HVMC, TC, NC의 염소이온 침투 저항성, 동결융해 저항성, 탄산화 저항성, 황산 및 황산염 침투 저항성 시험에 사용된 콘크리트의 압축강도를 확인하기 위하여 KS F 2405에 따라 압축강도 시험을 수행하였다.

#### 2.3.3 염화물 침투 저항성

염해 환경 하에서 콘크리트 배합별 내 성능을 비교 평가하기 위해 전기적 촉진시험법인 NT BUILD 492 「chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments」[11]에 준하여 재령 3, 7, 28 및 56일에 염소 이온 확산계수를 산출하였다.

#### 2.3.4 동결융해 저항성

동결융해 저항성 평가는 KS F 2456 「급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법」에 준하여 기중 급속 동결 및 수중 융해 시험방법(B방법)에 따라 30사이클마다 공시체의 질량 변화와 동탄성계수를 측정하여 콘크리트 배합별 내동해성능을 비교하였다.

#### 2.3.5 탄산화 저항성

콘크리트 배합조건에 따른 탄산화 저항성 시험은 KS F 2584 「콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법」에 준하여 실험을 진행하였다. 양생기간 변화에 따른 탄산화 저항성 변화를 평가하기 위해 2가지 전처리 조건(수중양생 기간: 28일, 56일)에 대하여 실시하였다. 이후 촉진 탄산화 시험을 진행하였으며, 촉진 탄산화 재령 7, 14, 28, 56일에 KS F 2596 「콘크리트 탄산화 깊이 측정 방법」에 준하여 탄산화 깊이와 탄산화 속도계수를 측정하였다.

#### 2.3.6 황산 및 황산염 침투 저항성

다량의 혼화재를 포함한 HVMAC의 내화학성을 평가하기 위해 JSTM C 7401 「콘크리트의 용액침지에 의한 내약품성 시험방법」[12]에 준하여 5% 황산($H_2SO_4$) 용액과 10% 황산나트륨($Na_2SO_4$) 및 10% 황산마그네슘($MgSO_4$) 수용액을 사용하였으며, 재령 28일까지 표준수중양생한 시험체를 수용액에 침지시킨 후 침지 재령에 따른 콘크리트의 열화 정도를 평가하였다. 평가 방법은 육안검사에 의한 공시체의 외관 변화를 관찰하였으며, 침지 재령별 공시체의 질량변화와 압축강도 변화를 동일 기간 표준양생한 공시체와 비교하여 내화학성을 평가하였다.

### 2.4 황산 및 황산염 침식 메커니즘

황산 및 황산염 침식 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다.

1) 콘크리트가 황산에 노출된 경우, 식(1), (2)와 같이 황산이 콘크리트 내의 수화생성물인 수산화칼슘($Ca(OH)_2$) 및 규산칼슘수화물(C-S-H)과 반응하여 석고가 생성되면서 체적 팽창이 발생하며, 이 석고가 식(3)과 같이 $C_3A$와 반응하여 에트린자이트를 생성시킴으로써 2차 체적팽창이 발생하여 콘크리트의 균열을 유발하는 것으로 알려져 있다.[13]

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \quad (1)$$

$$CaO \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + Si(OH)_4 + H_2O \quad (2)$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 14H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \quad (3)$$

2) 황산나트륨은 식(4)와 같이 시멘트 수화물과 화학반응하면 석고가 생성되며, 생성된 석고는 다시 시멘트의 칼슘알루미네이트 수화물($C_4AH_{13}$), 모노설페이트($C_4A\overline{S}H_{12}$) 및 $C_3A$와 반응하여 2차 에트린자이트를 생성하여 팽창과 균열을 유발하는 것으로 알려져 있다.[14-15]

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH \quad (4)$$

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 14H_2O \rightarrow 6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaO_3 \cdot 32H_2O + Ca(OH)_2 \quad (5)$$

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_3 \cdot 12H_2O + 2CaSO_4 \cdot 2H_2O + 16H_2O \rightarrow 6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O \quad (6)$$

3) 황산마그네슘은 콘크리트 내의 시멘트 수화물인 수산화칼슘과 반응할 경우, 식(7)과 같이 석고와 불투수성의 브루사이트(brucite, $Mg(OH)_2$)를 생성한다. 생성된 브

루사이트의 불용성으로 인해 pH가 낮아져 C-S-H와 에트린자이트를 불안정하게 만들게 된다. C-S-H는 낮아진 pH를 상승시키고 용액 내에서 평형을 유지하기 위해서 석회를 유리시키게 된다. 이때 유리된 석회는 다시 황산마그네슘과 반응하여 브루사이트를 생성하면서 이중층의 농도를 증가시키게 된다. 증가된 브루사이트는 식(8)과 같이 $S_2H$와 반응함으로써 C-S-H는 점진적으로 칼슘을 잃고 비결합재질의 규산마그네슘수화물(non-cementitious M-S-H)로 변환되어 심각한 강도저하 현상이 발생하게 된다.[16]

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2 \quad (7)$$

$$4Mg(OH)_2 + SiO_2 \cdot nH_2O \rightarrow 4MgO \cdot SiO_2 \cdot 8.3H_2O + (n-4.5)H_2O \quad (8)$$

## 3. 실험결과

### 3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

Fig. 2는 결합재 종류에 따른 콘크리트의 슬럼프 플로와 고성능 AE감수제 사용량을 나타내었다.

다량의 혼화재를 포함한 TBC와 HVMAC는 FA의 볼베어링 작용과 GGBS의 입자 표면 특성으로 인해 우수한 유동 특성을 나타내고 있다. 반면, 혼화재를 포함하지 않은 NC의 경우 목표 슬럼프 플로 600 ± 100 mm를 확보하기 위한 고성능 감수제의 사용량이 HVMAC에 비해 약 1.5배 증가하면서 상대적으로 유동성이 크게 저하하는 결과를 보이고 있다. TBC의 경우 혼화재 다량 사용에 따른 유동성 증진 효과가 잘 나타나고 있고, HVMAC의 경우 HA의 입자가 각형이어서 TBC에 비해 고성능 감수제의 사용량이 소폭 증가하였으나 우수한 유동성을 확보할 수 있었다.

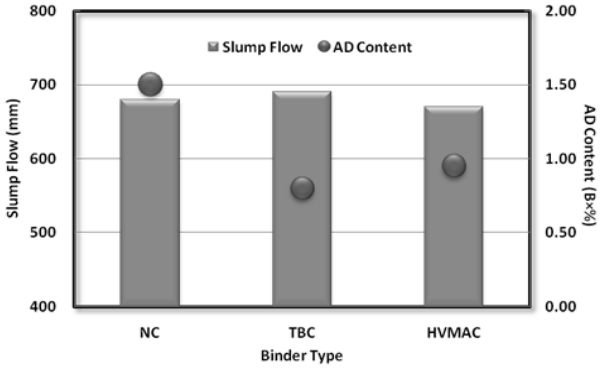



**Fig. 2** Slump flow & AD content

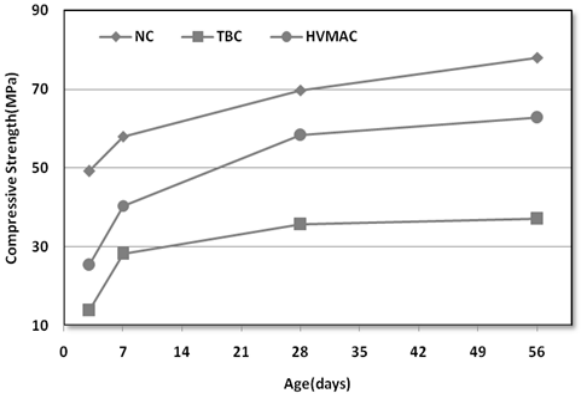



**Fig. 3** Compressive strength of concrete

### 3.2 압축강도

Fig. 3은 결합재 배합 조건에 따른 재령별 콘크리트 압축강도를 나타낸 그래프이다. 시멘트만을 결합재로 사용한 NC의 경우 모든 재령에서 강도 발현이 가장 우수하며, 특히 재령 3일에서의 압축강도가 50 MPa 내외로 비교 배합 중 초기강도 발현이 현저히 높게 나타나고 있다.

혼화재를 다량 사용한 경우, TBC는 모든 재령에서 가장 낮은 강도 발현 수준을 나타내고 있으며, 재령 7일 이후의 강도 발현특성에 있어서도 NC와 HVMAC와 비교하여 강도 증진 경향이 완만하고 소폭 증가하였다. 이는 다량의 혼화재 첨가로 인해 초기 수화가 크게 지연되고, FA와 GGBS의 포졸란 반응 및 잠재수경성을 유발하는 $Ca(OH)_2$의 생성량이 낮아 장기재령까지 강도발현이 원활하지 않는 것으로 판단된다.

HVMAC는 재령 56일까지 NC에 비해 강도발현이 낮은 수준을 나타내고 있다. 그러나, TBC와 비교할 경우 초기 재령부터 큰 폭의 강도 증진 결과를 나타내고 재령 28일에는 60 MPa 이상의 압축강도를 발현하고 있다. 특히, TBC와 동일 수준의 시멘트 배합비를 고려할 경우, 장기재령까지 우수한 강도발현성을 확인하였는데, 이는 무기질 자극제 중 AG에 함유된 $SO_3$이온 공급으로 GGBS의 잠재수경성을 촉진시켜 초기 강도 발현성능이 향상되고, HA에 함유된 CaO가 지속적으로 Ca이온을 공급하여 FA의 포졸란 반응을 활성화시켜 장기재령에서의 강도 증진효과도 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

### 3.3 염화물 침투 저항성

Fig. 4에 결합재 설계 조건에 따른 재령별 염소 이온 확산계수의 변화를 나타내었다.

NC는 전 재령에 걸쳐 압축강도 발현 특성이 가장 우수한 결과를 보이고 있으나, 대부분의 재령에서 비교 배합 중 가장 높은 염소 이온 확산계수를 나타내고 있다.

혼화재를 다량 사용한 TBC의 경우 재령 3일까지 가장 높은 확산계수 값을 나타내고 있으나, 재령이 경과함에 따라 확산계수 값이 큰 폭으로 감소하면서, 재령 28일 이후에는 HVMAC와 유사 수준으로 매우 낮은 확산계수 결과를 나타내고 있다. 이는 초기 재령에서 TBC 내부조직

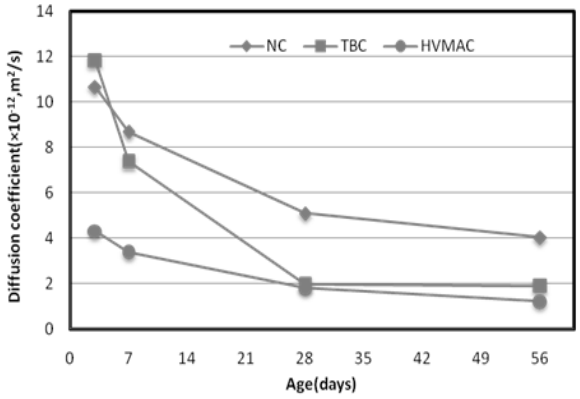



**Fig. 4** Diffusion coefficient of concrete

의 치밀도가 현저히 낮아 염소 이온의 확산이 용이하지만, 재령이 경과함에 따라 조직의 치밀도가 향상되고, GGBS 및 FA에 의해 염소이온이 고정화되었기 때문으로 판단된다.[17)]

HVMAC는 초기 재령 3일부터 30 MPa 내외로 비교적 높은 강도 수준을 확보하면서 콘크리트 내부 조직이 비교적 치밀해지고 TBC와 동일하게 GGBS와 FA에 의해 염화물 이온이 고정화되어 모든 배합 중 가장 우수한 내염해성을 나타내고 있다.

이상의 결합재 설계 조건에 따른 염화물 침투 저항성을 비교 평가한 결과, GGBS 및 FA 적용시 혼화재의 염소이온 고정화에 따른 염소이온 침투 저항성이 크게 증진되었으며, 특히 무기질 자극제을 사용하였을 경우 수화반응 촉진에 의해 초기 재령에서도 콘크리트의 조직이 치밀해져 내염해성 증진에 효과가 매우 큰 것으로 나타났다.

### 3.4 동결융해 저항성

Fig. 5~6은 결합재 종류에 따른 상대동탄성계수와 질량변화율을 나타낸 그래프이다.

실험결과 결합재 설계 조건과 관계없이 모든 콘크리트에서 상대동탄성계수가 90% 이상으로 내구성 지수가 높게 나타났으며, 동결융해의 반복에 따른 콘크리트 표면의 박리현상으로 인한 질량 변화 역시 발생하지 않는 것으로 나타났다.

혼화재를 다량 사용한 HVMAC의 경우 동결융해시험 개시 시점에서의 콘크리트 강도 발현 수준이 약 50 MPa 내외로서, 고강도 특성을 갖고 있기 때문에 동해에 대한 내구성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 무기질 자극제를 사용하지 않은 TBC의 경우에 있어서도, 동결융해 개시 시점의 강도 발현 수준이 약 30 MPa 내외로서 높은 강도 수준을 확보하고 있었기 때문에 일정 강도 수준만 확보한다면 결합재의 설계 조건과 관계없이 동해에 대한 내구성능을 충분히 확보 가능할 것으로 판단된다.

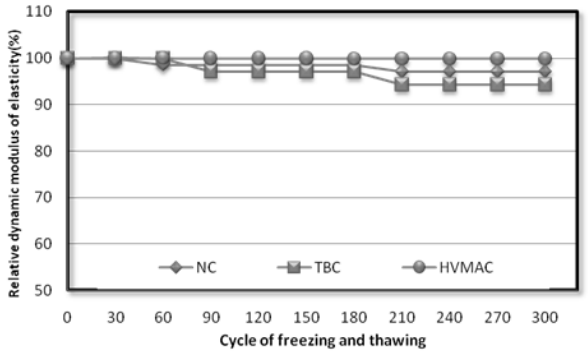



**Fig. 5** Relative dynamic modulus of elasticity of freezing and thawing

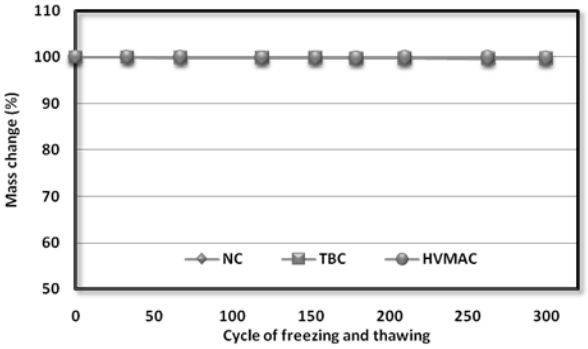



**Fig. 6** Mass change of freezing and thawing

### 3.5 탄산화 저항성

결합재 설계 조건에 따른 탄산화 깊이를 Fig. 7에, 탄산화 속도 계수를 Fig. 8에 나타내었다.

촉진 탄산화 개시 전 전처리 과정의 차이에 따른 탄산화 진행에서 표준양생방법인 28일 수중양생을 적용한 경우, NC(28)은 재령 56일까지 탄산화의 진행이 거의 없는 것으로 나타났다. 혼화재를 다량 사용한 경우에는, NC(28)과 달리 초기 재령부터 탄산화가 진행된 것으로 나타났으나, 무기질 자극제를 사용한 HVMAC(28)는 상대적으로 무기질 자극제를 사용하지 않은 TBC(28)에 비해 탄산화 진행이 지연되는 것으로 나타났다. 일반적으로 탄산화는 콘크리트 내부에 유입된 이산화탄소가 수산화칼슘과 반응하여 탄산칼슘으로 변환되면서 콘크리트의 pH가 8.5~10 정도로 낮아지는 과정에서 진행되는데 무기질 자극제를 첨가한 HVMAC(28)의 경우, 수화가 촉진되어 TBC에 비해 콘크리트의 조직이 치밀하고, HA내에 존재하는 CaO에서 용출된 Ca이온이 콘크리트의 pH를 증가시켜 상대적으로 탄산화 진행을 지연시키는 것으로 사료된다.

촉진 탄산화 개시전 전치리 방법 중 표준수중양생의 2배인 56일 양생을 실시한 경우 표준수중양생(28일)을 실시한 경우에 비해 탄산화 진행이 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. HVMAC(56)의 경우에는 초기 재령에서 탄산화가 소폭 진행된 이후 재령 56일까지 큰 변화를 보이지 않았다.

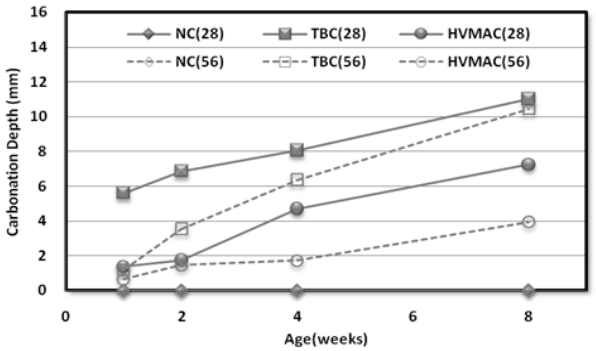



**Fig. 7** Carbonation depth according to concrete

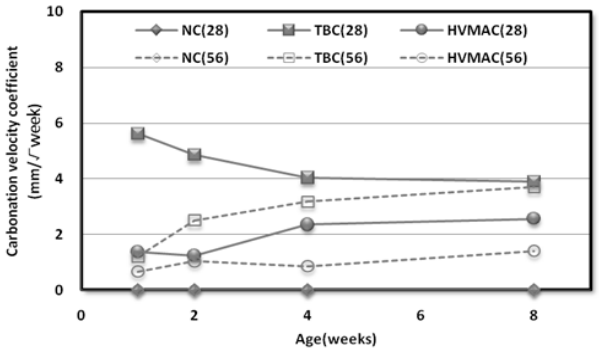



**Fig. 8** Carbonation velocity according to concrete

무기질 자극제를 사용하지 않은 TBC(56)의 경우 표준수중양생에 비해 초기 재령에서의 탄산화의 진행이 크게 감소한 결과를 보이고 있으나, 장기 재령으로 갈수록 탄산화 속도가 증가하면서 표준수중양생과 유사 수준의 탄산화 깊이를 나타내고 있다.

따라서, 혼화재를 다량 사용한 콘크리트의 탄산화를 저감시키기 위해서는 혼화재의 반응성을 고려하여 시공과정에서 충분한 양생을 실시하고, 혼화재의 반응 활성화를 위한 무기질 자극제 사용이 매우 효과적일 것으로 판단된다.

### 3.6 황산 및 황산염 침투 저항성

#### 3.6.1 외관 변화

Fig. 9는 콘크리트 결합재 조건에 따라 황산 및 황산염 용액에 재령 28, 56, 91 및 180일 동안 침지시킨 콘크리트 공시체의 외관변화를 나타낸 것이다.

5% 황산용액에 침지시킨 경우, 재령이 증가할수록 화학적 침식에 의한 공시체의 열화가 눈에 띄게 발생하였다. 특히 시멘트만 사용한 NC는 침지 재령 28일부터 공시체 표면의 열화에 의한 골재 노출이 확인되었으며, 침지재령이 증가할수록 열화가 심화되어 표면부 박리에 의한 단면 손실이 크게 발생하고 있다. 혼화재를 다량 사용한 TBC 및 HVMAC의 경우, NC에 비해 열화 진행이 지연되고 있어서, 재령 91일에서 모서리 부위로 열화 현상이 일부 확인되었고, 재령 180일에서 표면부의 골재의 노출을 확인할 수 있었다.

10% 황산나트륨 용액에 침지한 경우, 황산에 침지시킨 경우와 달리 재령 180일까지 열화에 의한 박리현상을 확인할 수 없으나, NC의 경우에는 재령 91일부터 팽창에 기인한 것으로 추정되는 미세한 균열의 발생을 확인하였다.[13-14]

10% 황산마그네슘 용액에 침지시킨 공시체의 경우 재령 91일부터 표면부의 열화 현상을 확인할 수 있는데, 황산에 의한 열화와 달리 NC에 비해 TBC와 HVMAC의 열화가 상대적으로 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있다.

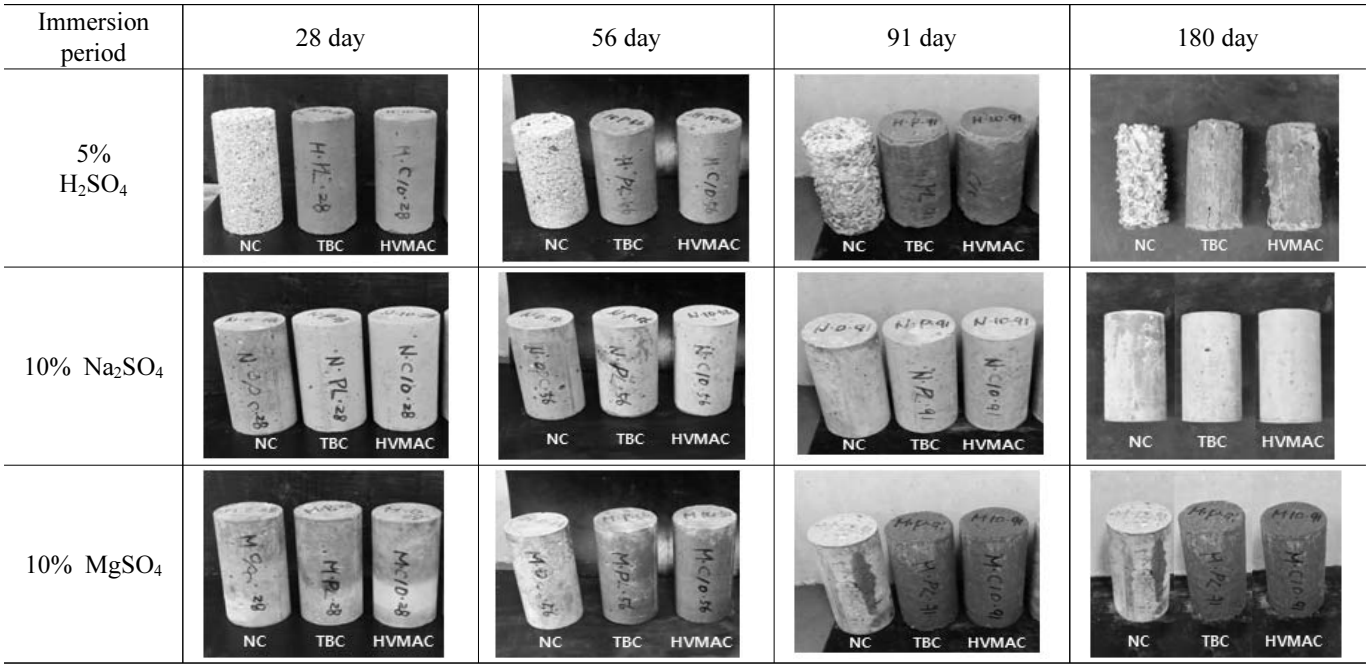



**Fig. 9** Visual appearance changes with immersion ages

### 3.6.2 질량변화율

Fig. 10은 결합재 설계 조건별 침지재령에 따른 콘크리트의 질량변화율을 나타낸 것이다.

5% 황산 용액에 침지시킨 경우, NC는 질량변화가 가장 큰 것으로 나타나 침지 재령 180일에 약 40%의 질량 손실이 발생하고 있다. 이는 콘크리트 내의 수화생성물인 수산화칼슘($Ca(OH)_2$) 및 규산칼슘수화물(C-S-H)이 $SO_3$이온과 반응하여 석고가 생성되면서 체적 팽창이 발생하고, 생성된 석고는 $C_3A$ 및 모노설페이트 수화상 등과 반응하여 에트린자이트가 생성되면서 2차 체적 팽창에 의한 조직의 박리가 지속적으로 진행되었기 때문으로 판단된다.

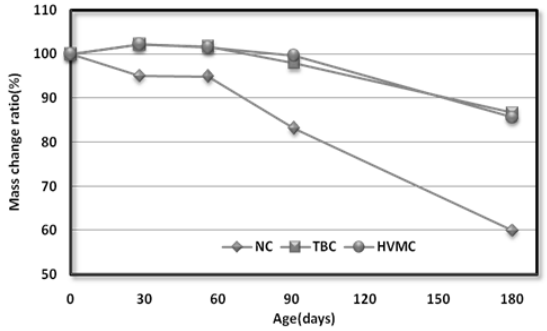
혼화재를 다량 사용한 HVMAC와 TBC의 경우 NC와 달리 재령 56일까지 질량이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 이 후 외관 변화에서 확인된 바와 같이 화학적 침식에 의한 표면부 열화현상이 진행되면서 질량이 점차적으로 감소하고 있다.

10% 황산나트륨 용액에 침지시킨 경우, 침지 재령 180일까지 질량변화율에 큰 변화가 없는 것으로 나타나, 공시체의 외관 관찰 결과를 고려할 경우 황산 및 황산마그네슘에 비해 황산나트륨에 의한 콘크리트 열화진행 속도가 가장 느린 것으로 판단된다.

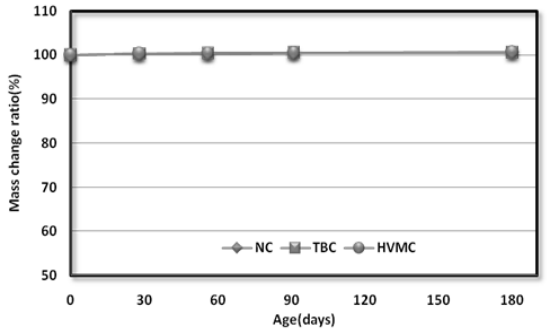
10% 황산마그네슘 용액에 침지시킨 경우 결합재 설계 조건에 관계없이 재령 91일까지 소폭 질량이 증가하는 경향을 보인 이후, 표면부에 열화현상이 발생하면서 점차적으로 질량이 감소하는 결과를 보이고 있다. 이는 열화 초기 콘크리트 내의 수화물들이 황산마그네슘과 반응하여 다량의 결합수를 포함한 수화물로 전이되면서 질량이 소폭 증가하지만, 재령의 경과에 따라 공시체의 열화가 촉진되면서 표면부의 박리가 발생하고 질량이 감소하는 것으로 판단된다.

### 3.6.3 압축강도비

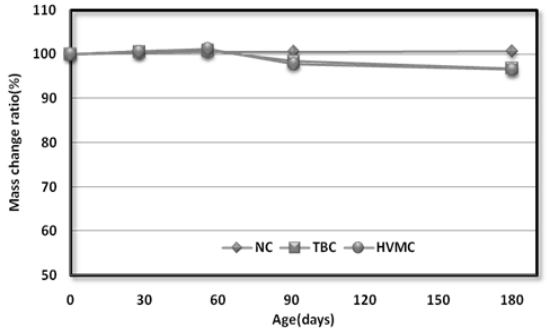
재령 56일까지는 압축강도가 소폭 증가하다가 침지 재령이 증가할수록 표준수중양생 공시체에 비해 압축강도



(a) 5% $H_2SO_4$

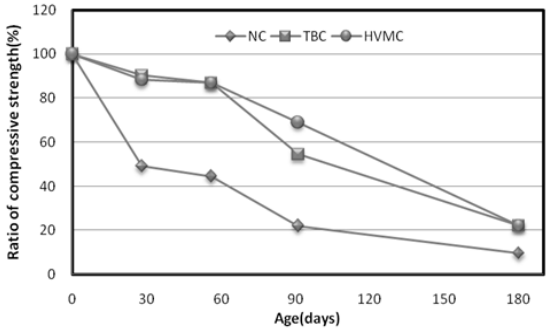


(b) 10% $Na_2SO_4$

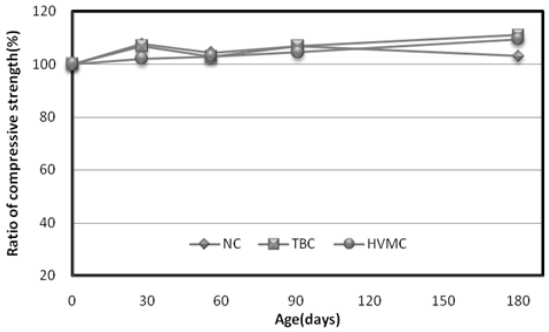


(c) 10% $MgSO_4$

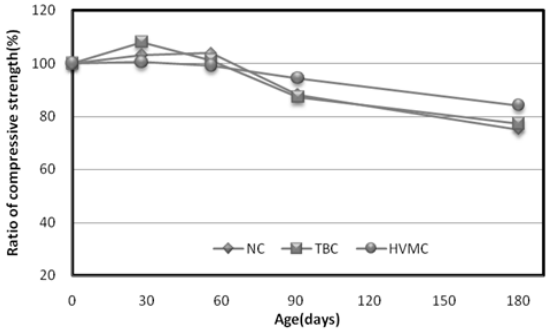
**Fig. 10** Mass change of concrete



(a) 5% $H_2SO_4$



(b) 10% $Na_2SO_4$



(c) 10% $MgSO_4$

**Fig. 11** Ratio of compressive strength of concrete

가 저하하는 경향을 나타내고 있으나, 황산의 화학적 침식에 비해 압축강도비의 저하 폭이 낮고 결합재의 설계 조건에 따른 변화가 크게 나타나고 있지 않다.

일반적으로 황산마그네슘에 의해 열화한 콘크리트는 수산화칼슘과 황산마그네슘의 반응에 의해 브루사이트-석고이중층을 형성하고, 이 이중층이 황산염 이온의 확산속도를 지연[16]시키기 때문에 혼화재를 첨가할 경우 수산화칼슘의 생성량이 감소하여 열화가 상대적으로 빠르게 진행되는 것으로 알려져 있다. 그러나, 본 연구에서는 침지 재령 180일까지 결합재 설계 조건에 따른 변화가 크게 발생하지 않고 있는데, 이는 혼화재를 다량 사용한 콘크리트의 압축강도 발현 성상이 일반적인 콘크리트와 큰 차이가 있고, 황산마그네슘에 의한 화학적 침식으로 생성되는 반응물의 생성메커니즘이 상이하기 때문인 것으로 추정되며 추후 이에 대한 세부적 연구를 진행하여 정확한 원인 규명이 필요할 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 광물질 혼화재를 다량 사용한 고강도 HVMAC의 역학적 특성에 대한 후속 연구로서 실용화 구축을 위한 일환으로 내구성 평가를 진행하였다. 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 압축강도 측정결과, HVMAC는 NC 대비 모든 재령에서 강도가 감소하였으나, 무기계 자극제의 활성화 작용에 의해 재령 28일 이후 약 60 MPa 이상의 고강도를 확보할 수 있었으며, TBC와 비교하여 모든 재령에서 월등히 높은 안정적인 강도특성을 나타냈다.
2) 염화물 침투 저항성 평가결과, HVMAC가 초기 재령부터 콘크리트 조직 치밀화 및 혼화재의 염소이온 고정화 작용으로 모든 배합 중 가장 낮은 염소이온 확산계수를 나타내며 우수한 내염해 특성을 발휘하고 있다.
3) 동결융해저항성 평가에서는 HVMAC 동결융해에 대한 내구성 지수가 100%에 가까운 우수한 결과를 나타내었다.
4) 광물질 혼화재를 사용한 콘크리트의 탄산화 저항성 평가 결과, 무기질 자극제 사용에 의한 혼화재의 반응 활성화를 유도한 HVMAC가 TBC보다 탄산화 저감효과가 있었으며, 표준양생기간을 증가시켰을 때 콘크리트 내부조직이 치밀화 되어 탄산화 저항성이 향상되었다.
5) HVMAC와 TBC가 황산 및 황산염에 의한 화학적 침식에 비교적 우수한 성능을 발휘하고 있다. NC의 경우 황산의 화학적 침식에 의해 석고 및 2차 에트린자이트가 다량 생성되어 체적 팽창에 의한 열화가 빠르게 발생하였으며, 이는 압축강도 저하 및 질량 손실로 이어졌다. 그러나, 혼화재를 다량 사용한 경우 황산염에 대한 저항성이 NC와 유사 수준을 발휘하고 있는데 이는 압축강도 발현 성상과 반응물 생성메커니즘이 상이하기 때문인 것으로 판단되며, 이에 대한 추가 연구를 통해 정확한 규명이 필요할 것을 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술연구사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Cho, J. W., "$CO_2$ Reduction Cement", *Technologies, Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.6, 2011, pp.32-35.
2. Park, C. B., Ryu, D. H., and Sae, C. H., "Hydration of High Volume Mineral Admixture Binder with Kind of Activators", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.28, No.10, 2012, pp.89-96.
3. Choi, S. W., Ryu, D. H., Kim, H. S., and Kim, G. Y., "Hydration Properties of Low Carbon type Low Heat Blended Cement", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.13, No.3, 2013, pp.218-226.
4. Choi, Y. C., Moon, G. D., Kim, J. H., and Cho, Y. K., "Effect of Anhydrite on the Mechanical and Durability Properties of High Volume Slag Concrete", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.2, No.3, 2014, pp.239-246.
5. Halit, Y., Mert, Y., Husyinn, Y., Serdar, A., and Selcuk, T., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag", *Cement & Concrete Composite*, Vol.32, 2010, pp.639-648.
6. Choi, S., Lee, K. M., Jung, S. H., and Kim, J. H., "A Study on the Carbonation Characteristics of Fly Ash Concrete by Accelerated Carbonation Test", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.4, 2009, pp.449-455.
7. Kim, J. P., "Selection of Portland Cement for Prevention of Sulfate Attack - Part 1 Sodium Sulfate Attack", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.4, 2009, pp.441-447.
8. Bleszynski, R., Hooton, R. D., Thomas, M. D. A., and Rogers, C. A., "Durability of Ternary Blend Concrete with Silica Fume and Blast-Furnace Slag: Laboratory and Outdoor Exposure Site Studies", *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.5, 2002, pp.499-508.
9. Song, H. W., Lee, C. H., Kim, J. H., and Ann, K. Y., "Chloride Penetration Resistance of Ternary Blended Concrete and Discussion for Durability", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.4, 2008, pp.439-449.
10. Baek, C. W., Park, C. B., Choi, S. W., Jo, H. T., and Ryu, D.

H., “Mechanical Properties of High Strength Concrete with High Volume Mineral Admixture”, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.2, No.3, 2014, pp.180-187.
11. Nordtest Method, NT-BUILD 492, Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials, Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Nordtest, Finland, 1999.
12. JSTM C 7401, “Method of test for chemical resistance of concrete in aggressive solution”, 1999, pp.1-10.
13. Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., Taerwe, L., Van Gemert, D., and Verstraete, W., “Chemical, Microbiological, and in Situ Test Methods for Biogenic Sulfuric Acid Corrosion of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.4, 2000, pp.623-634.
14. Bae, S. H., Park, J. I., and Lee, K. M., “Influence of Mineral Admixtures on the Resistance to Sulfuric Acid and Sulfate Attack in Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.22, No.2, 2010, pp.219-228.
15. Shanahan, N., and Zayed, A., “Cement Composition and Sulfate Attack Part”, *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.4, 2007, pp.618-623.
16. Santhanam, M., Cohen, M. D., and Olek, J., “Me-chanism of Sulfate Attack : A Fresh Look Part 2 : Proposed Mechanisms”, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, No.3, 2003, pp.341-346.
17. Maruya Tsuyoshi, “Construction of the analysis method on the movement of the chloride ions in the concrete”, Reaearch Report, The University of Tokyo, Japan, 1995, pp.41-45.

**요 약** 본 연구는 선행연구에서 도출한 다량의 광물질 혼화재를 사용한 고강도 콘크리트(HVMAC)의 내구성을 3성분계 콘크리트(TBC)와 시멘트만 사용한 콘크리트(NC)에 대해서 비교·평가하고자 하였다. 내구성 평가 종류는 염화물 침투 저항성, 동결융해 저항성, 두가지 전처리 조건으로 비교 평가한 탄산화 저항성, 5% 황산($H_2SO_4$), 10% 황산나트륨($Na_2SO_4$) 및 10% 황산마그네슘($MgSO_4$) 용액을 선정하여 황산 및 황산염 저항성 평가를 수행하였다. HVMAC는 모든 재령에서 우수한 염화물 침투 저항성을 나타내었고, 동결융해에 대한 내구성 지수가 100%에 가까운 우수한 결과를 나타내었다. 탄산화 저항성 평가 결과, HVMAC가 TBC보다 저감효과가 있었으며, 양생기간을 증가시켰을 때 콘크리트 내부조직을 치밀하게 만들어 탄산화 저항성을 향상시켰다. 황산 및 황산염 저항성 평가에서 HVMAC가 가장 우수한 것으로 나타났다. 다량의 혼화재 적용에 따른 수산화칼슘 생성량과 $C_3A$가 적어 황산 및 황산염에 의한 열화가 저감된 효과로 강도 감소 및 질량 변화가 작게 나타난 것으로 확인되었다.

**핵심용어 :** 다량의 광물질 혼화재, 내구성, 염화물 침투 저항성, 황산 및 황산염 침투 저항성