



## 슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 공극구조와 염화물 확산계수와의 관계에 대한 실험적 연구

김태상<sup>1)\*</sup> · 정상화<sup>1)</sup> · 최영철<sup>1)</sup> · 송하원<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국건설자재시험연구원 건설기반기술센터 <sup>2)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부

## An Experimental Study on Relation between Chloride Diffusivity and Microstructural Characteristics for GGBS Concrete

Tae-Sang Kim,<sup>1)\*</sup> Sang-Hwa Jung,<sup>1)</sup> Young-Cheol Choi,<sup>1)</sup> and Ha-Won Song<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Construction Material Research Center, Korea Institute of Construction Materials, Seoul 137-707, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**ABSTRACT** In order to evaluate the durability of reinforced concrete structures under chloride attack from sea water and frost damage, it is important to analyze both the microstructural characteristics of concrete and its diffusion resistance of concrete against chloride ingress. In this study, a relation between micro-pore structures of concrete obtained by the Mercury Intrusion Porosimetry and accelerated chloride diffusivity as well as long term chloride diffusivity were studied for ground granulated blast furnace slag(GGBS) concrete. Different water-cement ratio of 40, 45, 50% and different unit cement concrete of 300, 350, 400 or 450 kg/m<sup>3</sup> of the GGBS concrete along with OPC concrete were used and freeze and thawing, and the change in diffusivity and micro-structure were observed for both GGBS concrete and damaged GGBS concrete due to rapid freezing and thawing.

**Keywords :** microstructure, durability, chloride diffusivity, ground granulated blast furnace slag(GGBS), concrete

### 1. 서 론

최근에는 국내에서도 콘크리트구조물의 사용수명을 예측하기 위해 많은 연구가 진행되고 있고, 이를 바탕으로 다양한 예측기법들이 개발되고 있으며, 성능평가형 내구성 설계 방법에 의해 실제 구조물의 설계단계에서부터 반영될 수 있도록 노력하고 있다. 염해환경에서 철근의 부식은 콘크리트구조물의 주요 열화요인의 하나로서 염화물 이온이 존재하는 콘크리트내에 산소와 수분의 침투는 철근의 부식을 일으키며 이는 내구성 저하를 가져오는데, 이를 예측하기 위해서는 염화물 확산계수의 산정이 매우 중요하다. 또한 염화물 확산계수는 콘크리트의 공극시스템의 특성에 의해 의존하게 되므로 콘크리트 내구성 평가를 위해 공극구조 형성모델을 도입하여 염화물 확산계수를 공극률의 함수로 도출하는 연구가 많이 진행되었다.<sup>1,3,5)</sup> 콘크리트구조물은 장기적인 측면에서 사용수명(service life)을 늘릴 수 있는 고내구성을 고려한 설계가 이루어져야 하며,<sup>2)</sup> 가장 대표적인 내구성 설계방법으로 기존에 사용되던 OPC 콘크리트 보다 밀실한 고내구

성 배합으로 시공하는 것으로서 플라이애쉬나 고로슬래그 미분말(GGBS) 또는 실리카폼의 활용을 들 수 있다. 이러한 혼화재를 사용함으로써 콘크리트에 유동성, 장기강도, 수밀성 개선 등에 효과가 있다고 알려져 있으며, 염화물 이온의 침투관점에서는 공극률의 감소를 통한 확산계수의 감소와 염화물 구속력의 증가를 통한 자유염화물량의 감소 효과가 있다.<sup>6)</sup> 염화물 확산에 대한 연구는 지속적으로 발전하고 있으나 아직까지는 확산계수 도출 및 시간의존성에 따른 거동변화는 실험을 통한 값을 사용하거나 시간에 대한 지수함수형태로 모델링하여 사용하고 있으며, 공극률의 경우는 해석적 기법으로 예측하여 사용하고 있다. 다공질의 복합체인 콘크리트가 동결융해 영향을 받을때는 재료구성의 다양성에 따라 손상의 정도가 다르며, 설계수명 동안 받게 되는 외부조건에 따라 동해의 정도가 다를 수 있으며 많은 변수들이 서로 연계되어 작용하게 되며, 최근 들어서는 여러 변수들의 영향정도를 분석하여 수치해석적 모델을 개발하는 연구들이 국내에서도 진행되고 있다.<sup>27,28)</sup>

이 논문에서는 수은압입법(MIP)에 의해 구해지는 공극률 및 공극구조 특성 및 염해와 동결융해 손상이 발생한 OPC 및 GGBS 콘크리트의 염화물 확산계수 변화를 비교 분석하여 이들의 상관관계를 분석하고자 한다. 이를 위하여 기존의 문헌을 조사하여 대표적인 치환율을

\*Corresponding author E-mail : kts740@kicm.re.kr

Received April 13, 2009, Revised June 5, 2009

Accepted June 5, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

선정하고, 기 수행되었던 내구적 재료 측면에서의 실험과 비교하기 위하여 물시멘트비를 40%, 45%, 50%로 변화시키고, 단위시멘트량을 300 kg/m<sup>3</sup>, 350 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 450 kg/m<sup>3</sup>로 변화시킨 OPC 및 GGBS 콘크리트에서의 재령 28일과 540일의 시편에 대하여 동결융해에 의해 손상된 콘크리트에서의 확산계수 변화를 관찰하고, 재령 28일 시편에 대해서는 MIP를 이용하여 구한 미세공극구조 자료와 염화물 확산계수와의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 시편의 제작 및 실험 방법

#### 2.1.1 시멘트

시멘트는 KS L5201을 만족하는 국산 S사의 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며 화학적 조성표는 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 고로슬래그 미분말(GGBS)

고로슬래그 미분말은 K 제철에서 발생하는 것을 사용하였다. 사용재료의 화학적 조성표는 Table 1과 같다.

#### 2.1.3 골재

배합에 사용된 잔골재는 비중이 2.58이고, 흡수율이 1.07인 해사를 사용하였으며, 굵은골재는 최대 치수가 25 mm이고 비중은 2.61, 흡수율이 0.83인 쇠석을 사용하였다.

#### 2.1.4 화학 혼화제

화학혼화제는 공기량 확보를 위해 공기연행제(AE)와, 유동성을 확보하기 위해 유동화제를 사용하였다. 유동화제는 멜라민계를 사용하였으며, 화학적·물리적 조성은 Table 2와 같다.

#### 2.1.5 공시체 제작

OPC와 GGBS는 Tables 3, 4와 같은 배합으로 원재료가 충분히 혼합되도록 건비빔한 후, 물을 가하여 콘크리트 믹서로 1.5분간 강제 혼합 믹서에서 혼합하여 압축강도 측정용 원주형 공시체인 100 mm × 200 mm 몰드에 타설하였으며, 표준 양생실에서 1일간 양생한 다음 20±2°C 인 수중에서 28일 및 540일간 양생하여 콘크리트 압축강도(KS F 2405)를 측정하였으며, MIP 실험을 위하여 분쇄하여 모르타르 부분을 추출하였고, 공시체의 중앙부분을 기준으로 양쪽으로 50 mm로 절단하여 동결융해 전

Table 2 Material property of chemical admixture

	State	Color	Specific gravity	Residue (%)	Quantity (B×wt %)
Water-reducing agent	Liquid	Translucency	1.19	38	0.5
AE	Liquid	Translucency	1.04	28	0.01

Table 3 Mix proportions of OPC

Specimen	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	GGBS	S	G
OPC-300-40	40	40	120	300	0	781	1158
OPC-350-40			140	350	0	743	1128
OPC-400-40			160	400	0	705	1070
OPC-450-40			180	450	0	668	1013
OPC-350-45	45		157.5	350	0	725	1100
OPC-350-50	50		175	350	0	706	1072

Table 4 Mix proportions of GGBS

Specimen	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	GGBS	S	G
GGBS-300-40	40	40	120	120	180	781	1158
GGBS-350-40			140	140	210	743	1128
GGBS-400-40			160	160	240	705	1070
GGBS-450-40			180	180	270	668	1013
GGBS-350-45	45		157.5	140	210	725	1100
GGBS-350-50	50		175	140	210	706	1072

후 염화물 확산계수를 측정하기 위한 시편을 준비하여 실험을 실시하였다.

### 2.2 미세공극구조 분석

시멘트페이스트의 공극구조는 투수성이나 이온의 확산 등 이동 특성을 설명하는 중요한 요소이다.<sup>7)</sup> 그러므로, 시멘트계 재료의 이동특성을 모델링하기 위해서는 이러한 특성을 가장 잘 결정지을 수 있는 인자들을 찾아내어 미세구조를 구명해야 한다. 수은압입법(mercury intrusion porosimetry: MIP)은 시멘트계 재료의 공극구조특성을 연구하는데 널리 사용되어져 온 방법중의 하나로 수은을 시편에 압입하여 들어간 수은의 양으로 부피를 측정하는 방법이다.<sup>8)</sup> 최근 몇 년 동안 이 방법은 수화된 시멘트페이스트, 모르타르, 콘크리트의 공극구조 특성을 연구하기 위하여 국내에서도 많이 도입되었다.

MIP는 단순한 원리를 이용하여 간단히 공극의 크기 및

Table 1 Chemical composition of OPC and GGBS

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>3</sub>	Insol. (%)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	21.60	6.00	61.40	3.10	3.40	2.50	-	-	-	-	0.21	3.15	3,539
GGBS	34.2	11.7	41.2	1.43	8.81	-	0.31	0.29	0.3	0.58	-	-	-

분포를 측정할 수 있다. 이때 사용되는 방정식이 식 (1)로 표현되는 Washburn 식이며, 공극의 모양을 실린더형 모세관으로 정의하여 수은이 침투하는 공극의 크기는 적용된 압력에 반비례 하는 것을 나타내었다.<sup>9)</sup>

$$D = \frac{4\gamma \cos \theta}{P} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 수은 압입 압력(psia),  $\gamma$ 는 수은의 표면장력(dynes/cm),  $\theta$ 는 고체와 수은의 접촉각(degrees),  $D$ 는 공극직경이다( $\mu\text{m}$ ). 또한 공극의 총 체적은 압입된 수은의 양으로 나타내어진다.

염화물 확산계수를 결정하는 콘크리트 공극의 영향은 매우 복잡하다. 콘크리트 내부로 침투하는 염화물의 침투성은 시멘트페이스트 부분의 공극의 분포, 공극들의 크기, 그리고 연결성과 관계가 있다. 콘크리트와 모르타르에서는 이러한 공극구조가 시멘트페이스트와는 달리 골재의 존재에 영향을 받는다. Winslow and Liu<sup>10)</sup>는 순수 시멘트페이스트와 골재가 있는 페이스트의 공극구조가 매우 다르다는 것을 MIP를 사용하여 밝혀냈다. 골재-페이스트 계면은 상당히 높은 공극률과 큰 공극을 포함하기 때문에 공극 크기 분포에 뚜렷한 영향을 미친다. 천이영역이 작은 공극 덩어리로 독립적으로 되었을 때 이동률은 확연히 낮아지며 천이영역이 겹쳐지게 되면 이온의 이동이 쉽게 되는 연결된 통로를 만들어 낸다. 이러한 상호연결성은 소위 ‘Percolation’이라 정의되며 이동 특성의 중요한 요소가 된다. 시멘트페이스트에 있는 공극은 0.001  $\mu\text{m}$ 부터 1000  $\mu\text{m}$ 까지의 범위를 가지는 공극으로 구성되며 공극의 크기를 잘게 나누어 분류하여 중간층 공극(interlay pore), 겔공극, 모세관공극 그리고 기공으로 나누는 것이 일반적이다. 그러나 각 공극의 크기에 따른 정의는 연구자마다 다르게 정의되었다.<sup>11)</sup>

Bentz et al.<sup>12)</sup> 등은 모세관 공극의 발달은 수화정도에 따라 달라지게 되는데, 한계 수화도를 기점으로 이보다 이전의 경우에는 페이스트에서의 이동현상이 모세관공극에 의해 지배되고, 이후에는 C-S-H겔 공극에 의해 지배되는 것을 밝혀내기도 했다.

그 동안의 연구 결과들을 보면 MIP를 사용하여 측정한 결과는 수은이 좁은 공극들의 연결된 통로와 공극 자체를 채우는 양으로 계산되기 때문에 접촉각, 수은의 표면장력 설정, 시료의 형태 및 종류, 시료의 건조기술, 적용압력의 증가율 등에 영향을 받는다고 알려져 왔다. 그러므로 시료의 형태와 종류, 시료건조방법, 수은의 접촉각 등을 재료에 맞게 선택할 필요가 있으며, 이렇게 해서 얻어진 결과들이 확산이나 투수 특성에 중요한 영향을 미치는 공극의 크기를 측정하는데 있어서는 다른 방법으로 얻어진 결과들보다 실제와 보다 유사한 수치들을 나타낸다고 보고되고 있다.<sup>13)</sup> 총 공극률의 경우 MIP는 공극이 너무 작아서 수은이 들어갈 수 없을 정도의 독립적인 공극의 존재에도 불구하고 실제적인 값에 가장

**Table 5** Conditions for measuring porosity through MIP

Contacting angle	130°
Mercury surface tension	485 dynes/cm
Stem volume	0.392 ml
Bulb volume	5 cc
Pemeterometer constant	10.79 / pF
High pressure measurement	33,000 psi

근접하다고 할 수 있다.<sup>14)</sup>

이 실험에서는 콘크리트 시편을 분석이 가능하게 작은 조각으로 파쇄한 후, 수화정지를 위하여 아세톤에 침지시켰다. 이후 105°C의 건조로에서 24시간 동안 건조시켜 시편 내부의 수분을 제거한 후 미세공극을 측정하였다. 측정은 Micromeritics Auto Pore 9505 수은압입장비를 사용하였으며, 측정조건은 Table 5와 같다.

### 2.3 염화물 확산계수 측정

염해 내구성을 평가하기 위해서는 염화물의 확산계수를 구하는 것이 필수적인데 이것을 구하는 방법은 크게 침지실험, 정상상태 확산실험, 전기적 실험방법 등으로 나뉘어진다. 특히 신속한 확산계수 측정을 위해 많은 연구자들이 전기적인 실험방법을 연구하였는데, 이전에는 전류를 6시간 동안 적용하여 비정상상태의 총 통과전하량을 측정하여 염화물 이온의 콘크리트 침투저항성을 평가하는 ASTM C 1202(RCPT) 방법이 대표적이었다.<sup>15)</sup>

Feldman<sup>16,17)</sup> 등은 RCPT로 획득한 6시간 전하량과 초기 전류 및 시험시작시 측정된 콘크리트의 전도성이 선형적인 관계가 있음을 밝혀내어 짧은 시간에 측정된 전하량을 통해 장기적인 콘크리트의 염화물 확산계수를 예측할 수 있게 되었다. 또한 Sugiyama<sup>18)</sup> 등은 콘크리트의 이동계수가 24시간 동안 전류를 흘려 측정된 총 통과 전하량과 선형적인 관계가 있음을 보고했다. Truc<sup>19)</sup> 등은 양극부 용액의 염화물 농도의 저하를 측정하는 방법으로 정상상태의 염화물 확산계수를 측정하기도 했다. Castellote<sup>20)</sup> 등은 확산(migration)시험에서 양극부분의 전도도와 염화물 농도 사이에 선형적 관계가 있음을 보여줬다. 이것은 확산계수가 염화물 농도측정 없이 양극부의 전도도를 간단히 측정 함으로써 얻어질 수 있다는 것을 말한다.

한편 북유럽에서는 Tang, Nilsson 등을 중심으로 90년대부터 축진실험으로부터 염화물의 확산과 이동의 이론적 관계를 연구하여 비정상상태의 축진시험법을 개발하였는데 최종적으로 NT Build 492 ‘전기영동에 의한 비정상 상태의 시험에 의한 염화물 확산계수 산정방법’이다.<sup>21)</sup> 이 방법은 최근 축진시험법에 의해 염화물 확산계수를 구할 때 많이 사용되는 방법으로 국내에서도 최근 콘크리트의 염화물 확산계수를 측정하는데 사용되곤 한다.<sup>22)</sup>

이 논문에서는 비정상상태의 염화물 이동계수를 구할

수 있는 전기적인 실험방법인 NT Build 492에 따라 실험을 하였으며, 이 방법은 Fig. 1과 같은 형태로 시편을 거치하여 음극 부분에는 10% NaCl 용액을 넣고, 양극 부분에는 0.3 N NaOH 용액을 넣어 염화물이 이동하도록 하여 측정하는 방법이다.

실험을 실시하기 위해서는 Ø100 × 200 mm 콘크리트를 제작하여 양생한 후 중앙부분에서 약 50 mm의 시편을 절취해서 진공 데시게이터에 넣고 절대압력을 10 ~ 50 m bar(1~5 kPa)의 범위로 압력을 낮추고, 진공펌프는 계속 가동이 되는 상태로 3시간을 유지한 뒤에 Ca(OH)<sub>2</sub> 포화 용액을 시편이 잠기도록 채운다. 이후 데시게이터에 공기가 들어가지 않도록 진공을 유지하면서 18±2시간 동안 용액 속에 침지한다. 이렇게 시편이 포화상태가 되도록 전처리된 후 초기에 30 V의 전압을 주고, 초기 전류를 측정된 뒤, 측정된 전류에 따라 지속적으로 인가할 전압을 결정하고 이에 따라 적정한 시간동안 일정한 전압으로 콘크리트 시편에 전류를 흘려서 염화물 이온이 강제로 투과하도록 하였으며, 이후 시편을 절단하여 통과한 염화물의 침투깊이를 측정하여 비정상 상태의 염화물 확산계수를 계산하였다. 염화물 확산계수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \quad (2)$$

$$E = \frac{U-2}{L}, \alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left[1 - \frac{2C_d}{C_0}\right] \quad (3)$$

여기서  $D_{nssm}$ 는 비정상 상태에서 구한 전위차 촉진 염소 이온 확산계수(m<sup>2</sup>/sec),  $R$ 은 기체 상수(8.314J/(K·mol)),  $T$ 는 절대온도(K),  $L$ 은 시편 두께(m),  $z$ 는 이온 전자가(염화물은  $z=1$ ),  $F$ 는 패러데이 상수(9.648 × 10<sup>4</sup>J/(V·mol)),  $U$ 는 전위차(V),  $x_d$ 는 비색법에 의한 평균 침투 깊이(m),  $t$ 는 전위차의 적용 시간(sec),  $C_0$ 는 음극셀의 염소이온 농도(≈2N),  $C_d$ 는 비색법에 의한 반응 농도(OPC의 경우 ≈0.07N), erf<sup>-1</sup>는 오차 함수의 역함수를 나타내며, 이 연구에서 GGBS의 경우  $C_d$ 를 0.07 N으로 가정하고 계산하였다.

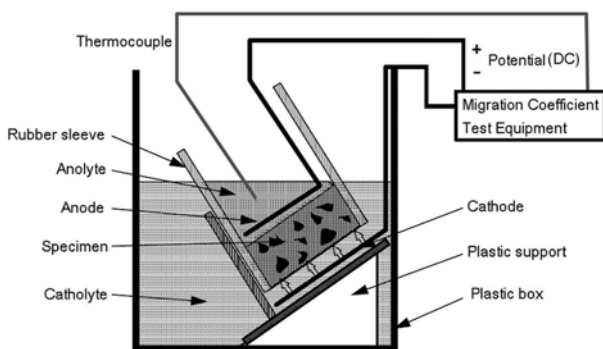


Fig. 1 NT Build 492 migration test set-up

## 2.4 동결융해 시험

콘크리트 내 공극을 차지하고 있는 물은 동결할 때에 최대 9%의 체적팽창이 발생하고 시멘트페이스트 내부에서는 공극의 벽으로 팽창이 이동된다. 이 체적 팽창률을 완화하는데 필요한 공기로 가득 찬 공극이 존재하지 않을 경우 큰 압력이 발생한다.<sup>23)</sup> 이것이 열화와 동결융해의 원인이 될 수 있다. 온도가 떨어지면 우선 큰 공극 중의 물이 동결하게 되며 이어서 작은 공극 중의 물이 동결되며 이 과정에서는 큰 공극 중에 생긴 얼음 결정에 의해 팽창이 구속된다. 이 팽창을 완화하는 만큼의 자유 공극이 존재하지 않는 경우에는 큰 정수압이 공극의 벽에 작용하여 발생한 응력이 인장강도에 도달했을 때에 균열이 발생한다. 이러한 팽창압의 반복 작용으로 결국에는 콘크리트 표면이 파괴, 또는 박락에 이르게 된다. 이 공극에 작용하는 정수압은 콘크리트가 냉각되는 속도, 함수량 및 콘크리트 중의 기포와 기포의 간격에 따라 다르다.<sup>24)</sup>

물의 동결로 발생하는 팽창량 이상의 공기로 가득 찬 공간이 있고 기포와 기포의 간격이 작으면 미동결수의 이동에 따른 압력이 발생하기 어려우므로 콘크리트를 동결에 의한 피해로부터 보호하게 된다. 반대로 큰 기포가 떨어져 존재하는 경우에는 이동수가 기포에 도달하기 전에 압력이 콘크리트의 균열을 발생시킬 정도로 높아지게 되는데, 이러한 이유로 AE제 등에 의한 연행공기(entrained air)는 갇힌공기(entrapped air)에 비해서 동결융해의 방지에 유효한 효과를 발휘할 수 있는 것이다. 또한 세공크기에 따라 동결온도가 달라지는데, Fig. 2는 콘크리트 내의 공극반경과 동결온도의 관계를 나타낸 것이다.

온도가 저하하는 경우에 0°C 부근의 온도에서 모세관 중의 물이 동결하며, 세공내의 수분은 온도의 저하에 따라 큰 세공지름에서 점차적으로 동결해 간다. 이 때 시멘트 경화체중에는 세공지름의 크기에 따라 과냉각 상태를 포함하여, 동결한 부분과 미동결의 부분이 존재하게 된다.

실험은 KS F 2456에 의해 기중동결 수중융해 방법에 따라 Table 6의 조건으로 동결융해를 실시하였다.

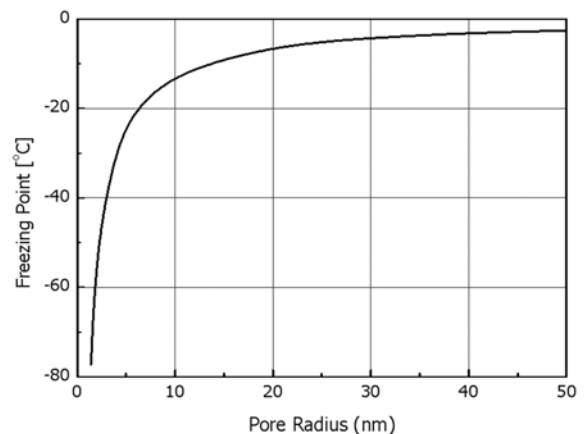


Fig. 2 Relationship between freezing point and pore radius<sup>25)</sup>

**Table 6** Freezing and thawing cycle

Test method		Min. temp.	Max. temp.	Thawing time (1 cycle)	1 cycle
A	Water freezing and water thawing	-18 ± 2°C	4 ± 2°C	More than 25%	2~4 hours
B	Air freezing and water thawing			More than 20%	

이 논문에서는 -18°C까지의 기중동결 조건으로 실험을 실시하였으며, 이때 공극지름은 약 5 nm인 수준까지 동결융해 영향을 받는다고 볼 수 있다.

### 3. 실험 결과 검토 및 분석

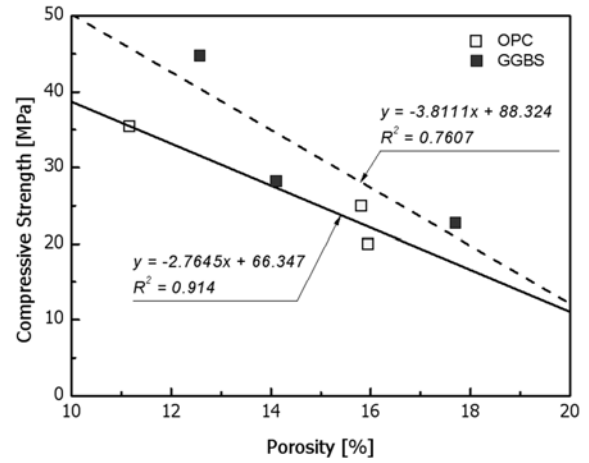
#### 3.1 공극률, 압축강도 및 염화물 확산계수 평가

재령 28일 및 540일에 측정된 실험 결과를 정리하여 보면 Tables 7 및 8과 같다. Fig. 3은 재령 28일에서 단위시멘트량 350 kg에 물시멘트비가 40%, 45%, 50%로 변화되는 OPC 및 GGBS 콘크리트의 압축강도와 공극률 측정 결과를 나타낸 것이다.

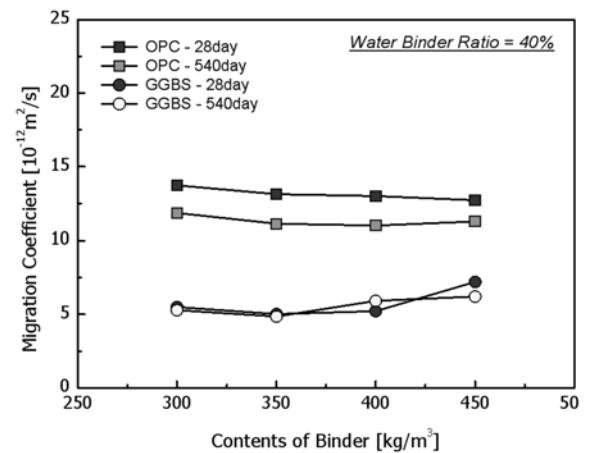
OPC와 GGBS 모두 강도가 감소할수록 공극률이 감소하며, 선형으로 회귀분석할 경우 GGBS 보다는 OPC가 더 높은 상관성을 보이고 있다.

재령 28일과 재령 540일 된 시험편에 대해 염화물 확산계수를 측정된 결과를 Figs. 4 및 5에 나타내었다.

GGBS의 염화물 확산계수가 같은 재령, 같은 물시멘트



**Fig. 3** Compressive strength vs. Porosity (28 days)



**Fig. 4** Effect of binder on migration coefficient

**Table 7** Test result(28 days)

Specimen	Comp. strength (MPa)	Migration coefficient (×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	Porosity (%)	Capillary pore vol. (%)	Critical pore dia. (nm)	Specimen	Comp. strength (MPa)	Migration coefficient (×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	Porosity (%)	Capillary pore vol. (%)	Critical pore dia. (nm)
OPC-300-40	41.39	13.72	11.99	8.17	14.47	GGBS-300-40	45.76	5.50	10.09	6.27	38.21
OPC-350-40	35.46	13.12	11.15	7.98	13.00	GGBS-350-40	44.87	5.02	12.56	9.08	14.87
OPC-400-40	34.61	13.00	14.40	9.04	11.56	GGBS-400-40	34.11	5.22	12.78	9.61	10.75
OPC-450-40	36.49	12.72	18.25	11.96	26.00	GGBS-450-40	38.68	7.21	14.49	10.04	58.94
OPC-350-45	25.00	16.04	15.94	10.00	42.75	GGBS-350-45	28.24	7.70	14.10	10.49	68.81
OPC-350-50	19.99	18.68	17.13	10.18	56.50	GGBS-350-50	22.79	7.08	17.69	7.89	78.41

**Table 8** Test result(540 days)

Specimen	Migration coefficient (×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	Porosity (%)	Capillary pore vol. (%)	Critical pore dia. (nm)	Specimen	Migration coefficient (×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	Porosity (%)	Capillary pore vol. (%)	Critical pore dia. (nm)
OPC-300-40	11.85	3.41	1.68	66.25	GGBS-300-40	5.29	-	-	-
OPC-350-40	11.12	-	-	-	GGBS-350-40	4.85	7.94	5.77	36.46
OPC-400-40	10.99	9.71	6.19	35.81	GGBS-400-40	5.91	10.29	6.81	7.86
OPC-450-40	11.27	7.86	4.27	24.27	GGBS-450-40	6.21	15.04	11.27	18.10
OPC-350-45	12.52	7.63	4.13	2.20	GGBS-350-45	4.11	10.29	7.29	7.90
OPC-350-50	13.24	4.39	2.47	21.39	GGBS-350-50	1.84	10.50	6.81	46.86

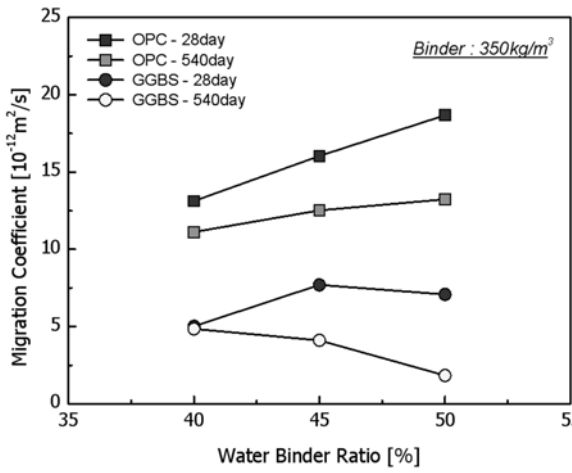


Fig. 5 Effect of W/B on migration coefficient

비인 경우 OPC보다 약 55%~60% 정도 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 물시멘트비 40%에 바인더 400 kg/m<sup>3</sup>인 경우의 GGBS의 확산계수가 13.3% 증가한 경우를 제외하면 기존의 연구 결과와 같이 재령이 오래 될수록 염화물 확산계수가 저하되고 있는데, 물시멘트비가 40%로 고정되어 있고 바인더가 증가하는 경우 재령 540일에서 28일의 경우보다 OPC는 평균적으로 13.9%의 감소를 보이

고 있으며, GGBS의 경우에는 평균적으로 1.9%의 감소를 보이고 있어, GGBS가 상대적으로 작은 감소를 보이고 있다. 또한 같은 물시멘트비의 경우 OPC는 바인더가 300 kg/m<sup>3</sup>에서 450 kg/m<sup>3</sup>로 증가함에 따라 28일 재령에서는 7.2% 감소하고, 540일의 경우에는 4.9% 감소하였으나, GGBS의 경우는 반대로 바인더의 증가에 따라 28일 재령에서는 31.2% 증가하고, 450일의 경우에는 17.5% 확산계수가 증가하고 있다.

바인더가 350 kg/m<sup>3</sup>인 경우 재령 28일의 확산계수는 OPC와 GGBS 모두 물시멘트비가 높을수록 높게 나타나고 있지만, 재령 540일의 확산계수는 물시멘트비가 증가함에 따라 GGBS는 감소하고 있다. 재령에 따른 감소율을 보면 OPC의 경우에는 물시멘트비 50%에서 28일 재령에 비해서 29.1%가 감소하였고, GGBS의 경우에는 74% 감소하였다. 이러한 실험 결과는 슬래그 미분말이 충분히 수화하여 조직이 치밀해졌기 때문이라고 판단된다.

### 3.2 동결융해 시편의 염화물 확산계수 평가

동결융해 60cycle, 120cycle 시점에서의 염화물 확산계수를 측정하여 동결융해에 따른 확산계수의 변화를 Fig. 6에 도시하였다. 재령 28일의 경우는 OPC나 GGBS의 경

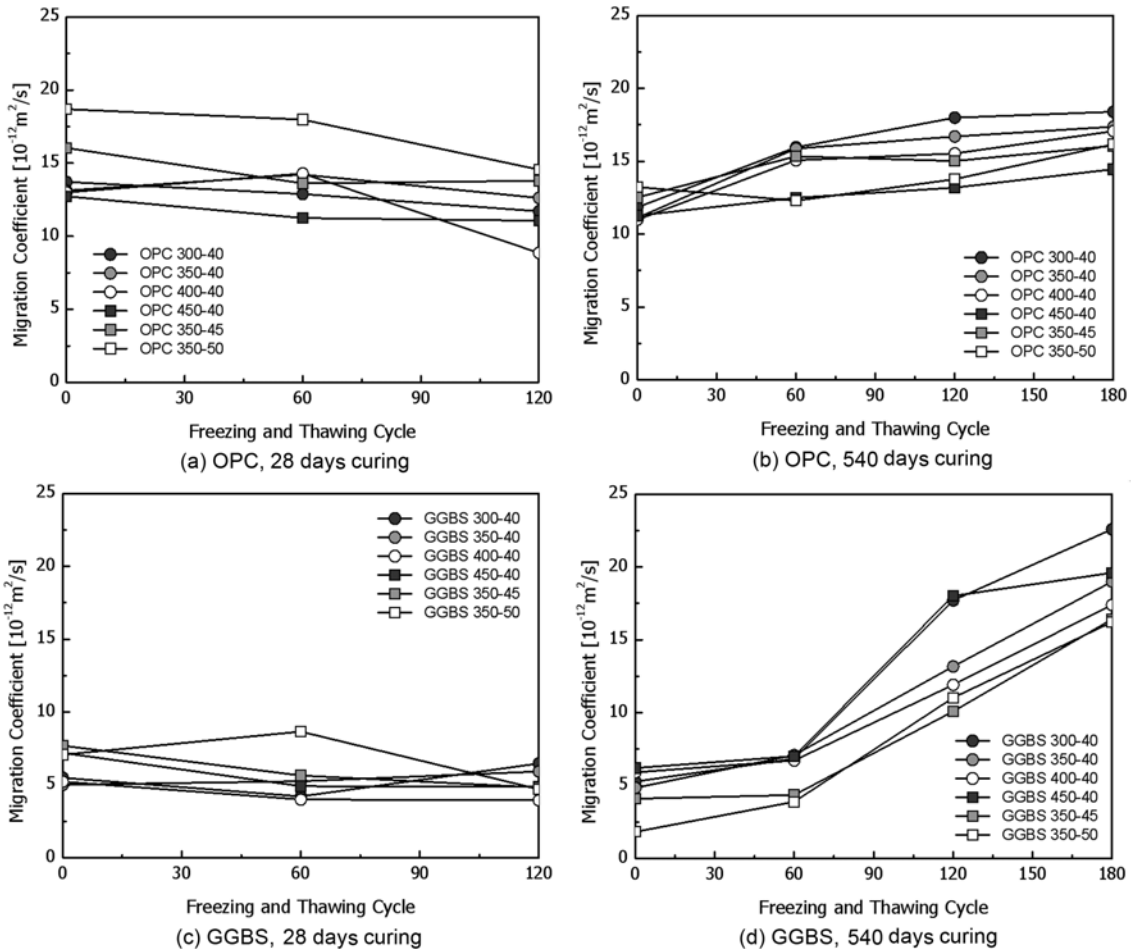


Fig. 6 Effect of freezing and thawing cycles on chloride migration coefficient

우 동결융해 사이클에 따라서 확산계수의 증가가 나타나지 않고 오히려 약간 감소하고 있으나 540일 양생한 경우에는 확산계수의 증가가 뚜렷이 나타나고 있다. 또한 조직이 치밀해진 재령 540일의 OPC의 경우 120cycle 시점의 확산계수는 1~1.5배 증가하였으나, GGBS의 경우에는 2~6배 증가하고 있다. 이를 통해 수화가 완전히 진행된 뒤에 동결융해의 영향으로 확산계수의 증가가 커진다는 것을 알 수 있는데 이는 급속 동결융해를 받아서 실제보다 가혹한 환경이었기 때문이라고 판단된다.

### 3.3 염화물 확산계수 및 공극구조의 평가

일반적으로 염화물의 확산은 콘크리트 조직의 공극을 통한 이동으로 알려져 있으며, 공극 중에서도 모세관 공극과 이러한 모세관 공극의 연결성이 콘크리트 내의 물질이동에 있어서 가장 중요한 특성이라고 알려져 있다.

이러한 공극구조 자료들 중에서도 한계공극지름(threshold diameter of pores)은 내부 연결공극의 가장 큰 요소라고 확인되어지고 있다.<sup>26)</sup> 이 논문에서 한계공극지름은 MIP 결과의 공극지름과 수은압입량 곡선이나 곡선의 최대값으로 구하였으며, 모세관 공극량은 10 nm~1,000 nm 범위에 해당되는 크기의 공극량을 구하였다<sup>7)</sup>(Fig. 7).

Fig. 8은 한계공극지름과 염화물 확산계수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 OPC의 경우와 GGBS의 경우 한계공극지름은 비슷하지만 염화물 확산계수는 3배 정도의 차이를 보이고 있으며, 각각의 경우에 있어서는 회귀 분석 결과 염화물 확산계수와 한계공극지름이 분명한 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

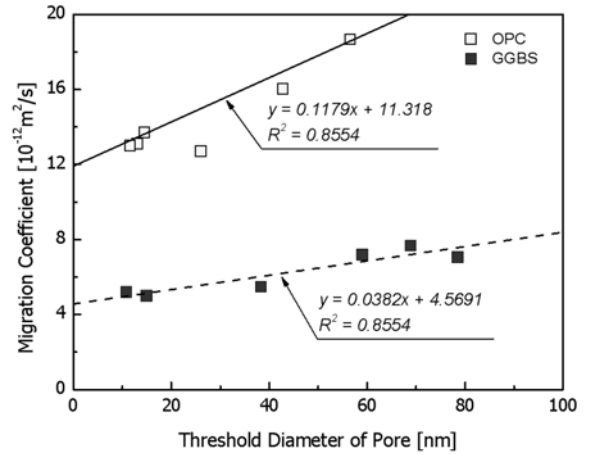


Fig. 8 Migration coefficient vs. threshold diameter

여기서 확산계수의 차이는 GGBS를 60% 치환한 경우에 염화물 이온의 구속효과 등의 차이에 기인하며, 이외에도 각 공극들의 연결성에 차이가 있어 OPC의 경우와 상당한 차이가 있는 것으로 판단된다. Fig. 9에 나타내고 있는 모세관 공극과 염화물 확산계수의 관계에 있어서도 OPC와 GGBS 혼합 콘크리트의 염화물 확산계수는 뚜렷한 차이를 보이고 있으나 모세관 공극과 확산계수의 회귀 분석 결과 상관관계가 상대적으로 약함을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

고로슬래그 미분말 60%를 혼합한 GGBS 콘크리트와 OPC 콘크리트의 시편에 대하여 KS F 2456 방법에 따라

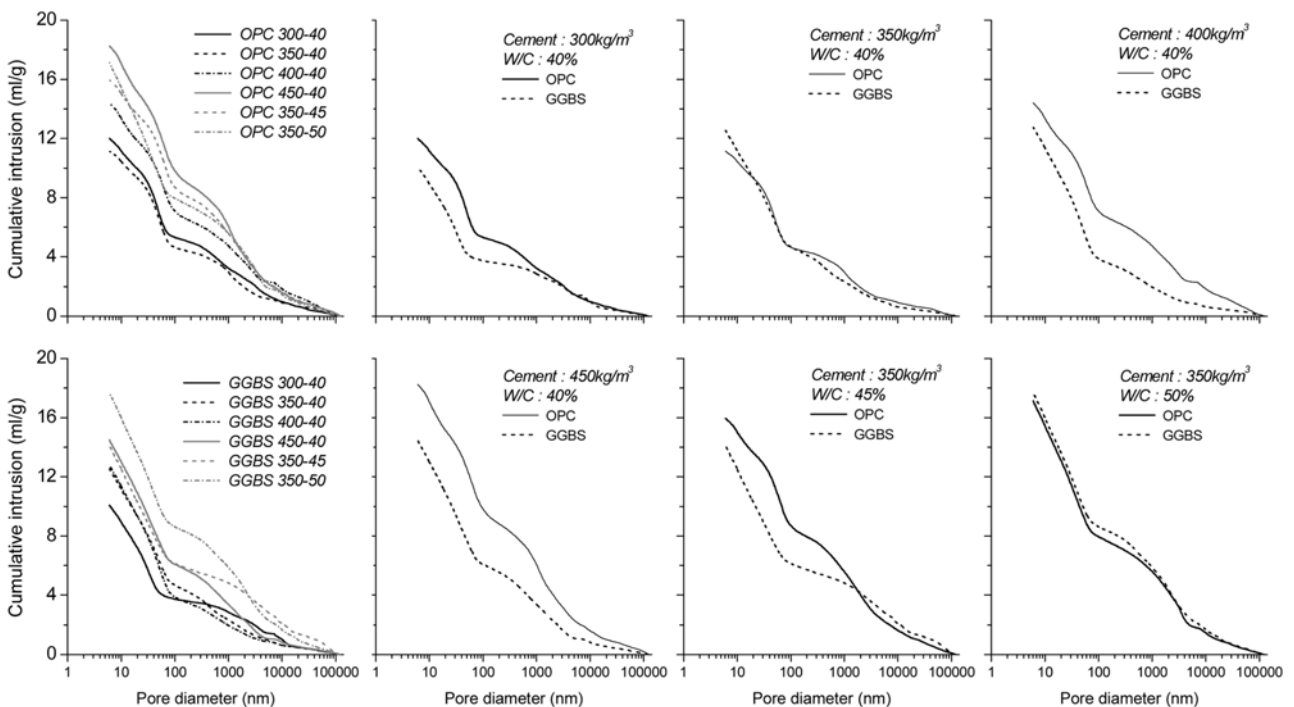


Fig. 7 Cumulative intruded pore volume of Hg curves measured from MIP(28 days curing)

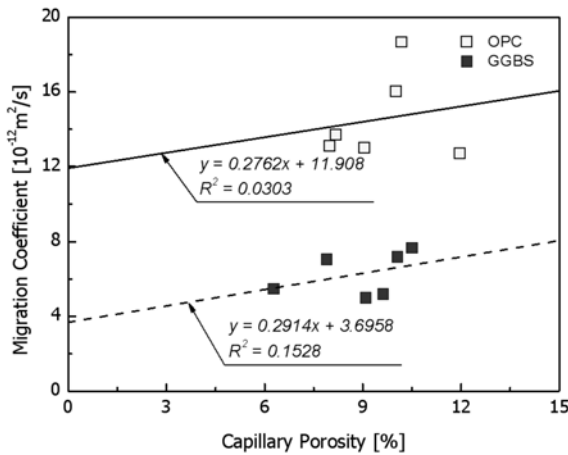


Fig. 9 Migration coefficient vs. capillary porosity

동결융해 0, 60, 120, 180 cycle 이후 염화물 확산계수를 NT Build 492에 따라 측정하였으며, 콘크리트의 모르타르 부분만을 추출하여 MIP 방법으로 공극구조를 측정하였다. 이 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 재령 28일에 측정된 콘크리트의 강도가 감소할수록 그에 따른 공극률 역시 감소하고 있음을 알 수 있었으며, 실험값에 따른 회귀분석결과 GGBS 보다 OPC가 더욱 높은 상관성을 보이고 있음을 확인하였다.
- 2) 재령에 따른 확산계수는 물시멘트비 40%의 경우에는 OPC의 확산계수 저하율이, 50%에서는 GGBS의 확산계수 저하율이 크게 증가하였는데 이는 슬래그 분말의 충분한 수화 반응에 따라 매트릭스내의 내부 조직을 치밀화하는데 기인한 것으로 판단된다.
- 3) 초기재령에서, OPC나 GGBS의 경우 동결융해 사이클에 따른 확산계수는 오히려 약간 감소하는 경향을 보인 반면, 540일의 장기재령 이후에서 확산계수의 뚜렷한 증가가 나타나 수화가 완전히 진행된 이후에 동결융해에 따른 확산계수가 증가함을 확인하였다.
- 4) OPC와 GGBS의 한계공극지름 값은 비슷한 경향을 가지고 있으나 동해된 시편의 염화물 확산계수는 GGBS의 경우가 OPC에 비해 3배 이상 차이를 나타내는 것으로 나타나 결합재 혼입에 따른 충전효과 및 염해 침투 저항성을 향상시키고 있음을 확인하였다.
- 5) 염화물 확산계수와 한계공극지름이 분명한 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있었으며, 모세관 공극과 확산계수의 상관관계가 한계공극지름과의 관계보다 상대적으로 약함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 “고성능·다기능 콘크리트의 개발 및 활용 기술(과제번호:05핵심D11)” 및 “건설생산성 향상을 위한

건설자재 표준화연구(과제번호:06기반구축A02)”의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규, “혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 25권, 1A호, 2005, pp. 213~223.
2. Song, H. W., Kim, H. J., Saraswathy, V., and Kim, T. H., “A Micro-mechanics Based Corrosion Model for Predicting the Service Life of Reinforced Concrete Structures,” *Int J. Electro Sci.*, Vol. 2, No. 4, 2007, pp. 341~354.
3. Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London and New York, 1999, 44 pp.
4. Song, H. W., Pack, S. W., Lee, C. H., and Kwon, S. J., Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration, *J. of Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 12, No. 4, 2006, pp. 265~284.
5. Ishida, T., Maekawa, K., and Kishi, T., “Enhanced Modeling of Moisture Equilibrium and Transport in Cementitious Materials under Arbitrary Temperature and Relative Humidity History,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 4, 2007, pp. 565~578.
6. Song, H. W., Lee, C. H., Jung, M. S., and Ann, K. Y., “Development of Chloride Binding Capacity in Cement Pastes and the Influence of the pH of Hydration Products,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, No. 12, 2008, pp. 1427~1434.
7. Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, New Jersey, 1993, 31 pp.
8. Winslow, D. N. and Diamond, S., “A Mercury Porosimetry Study of the Evolution of Porosity in Cement,” *ASTM J. Materials*, Vol. 5, No. 3, 1970, pp. 564~585.
9. Ritter, H. L. and Drake, L. C., “Pore-size Distribution in Porous Materials,” *Industrial and Engineering Chemistry*, 17, 1945, 782 pp.
10. Winslow, D. Liu, “Pore Structure of Cement Paste in Concrete,” *Cem. Concr. Res.*, Vol. 20, No. 2, 1990, pp. 227~235.
11. Breugel, *Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based Materials*, Delft, 1991, 74 pp.
12. Bentz, D. P. and Garboczi, E. J., “Water Permeability and Chloride Ion Diffusion in Portland Cement Mortars,” *Cem. Concr. Res.*, Vol. 25, No. 4, 1995 pp. 790~802.
13. Garboczi, E. J., “Permeability, Diffusivity, and Microstructural Parameters: A Critical Review,” *Cem. Concr. Res.* Vol. 20, No. 4, 1990., pp. 591~601.
14. Cook, R. A. and Hover, K. C., “Mercury Porosimetry of Hardened Cement Pastes,” *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29, No. 6, 1999, pp. 933~943.
15. Whiting, D., “Rapid Measurements of Chloride Permeability of Concrete,” *Public Roads*, Vol. 45, No. 3, 1981, pp. 101~112.
16. Feldman, R. F., Chan, G. W., Brousseau, R. J., and Tumida-



- jski, P. J., "Investigation of the Chloride Permeability Test," *ACI Mater. J.*, Vol. 91, No. 2, 1994, pp. 246~255.
17. Feldman, R. F., Prudencio Jr., L. R., and Chan, G., "Rapid Chloride Permeability Test on Blended Cement and Other Concretes: Correlations between Charge, Initial Current and Conductivity," *Constr. Build. Mat.*, Vol. 13, No. 3, 1999 pp. 149~154.
  18. Sugiyama, T., Tsuji, Y., and Bremner, T. W., "Relationship between Coulomb and Migration Coefficient of Chloride Ions for Concrete in a Steady-state Chloride Migration Test," *Mag. Concr. Res.*, Vol. 53, No. 1, 2001, pp. 13~24.
  19. Truc, O., Ollivier, J. P., and Carcasses, M., "A New Way for Determining the Chloride Diffusion Coefficient in Concrete from Steady State Migration Test," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 30, No. 7, 2000, pp. 217~226.
  20. Castellote, M., Andrade, C., and Alonso, C., "Measurement of the Steady and Nonsteady-state Chloride Diffusion Coefficients in a Migration Test by Means of Monitoring the Conductivity in the Anolyte Chamber Comparison with Natural Diffusion Tests," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 31, No. 10, 2001, pp. 1411~1420.
  21. Tang, L. and Nilsson, L. O., "Rapid Determination of Chloride Diffusivity of Concrete by Applying an Electric Field," *ACI Mater. J.*, Vol. 89, No. 1, 1992, pp. 49~53.
  22. 김성운, 박상준, "염해 내구성 콘크리트의 제조 및 시공," 콘크리트구조물의 염해 내구성에 관한 국제 심포지엄, 한국콘크리트학회, 2006, pp. 119~155.
  23. Pogeon, M. and Pleau, R. *Durability of Concrete in Cold Climates*, E&FN Spon, 1995, 12 pp.
  24. Powers, T. C., "The Mechanisms of Frost Action in Concrete," Stanton Walker Lecture Series on the Material Science, 1965, 3 pp.
  25. Setzer, M. J., *Development of the Micro-ice-lens Model. Frost Resistance of Concrete*, Essen, Germany, RILEM, 2002, pp. 133~146.
  26. Halamickova, P., Detwiler, R. J., Bentz, D. P., and Garboczi, E. J., "Water Permeability and Chloride Ion Diffusion in Portland Cement Mortars: Relationship to Sand Content and Critical Pore Diameter," *Cem. Concr. Res.*, Vol. 25, No. 4, 1995, pp. 790~802.
  27. 조태준, 김이현, 조효남, "콘크리트구조물의 반복적 동결융해에 대한 수치 해석적 열화 예측 및 신뢰성 모델 개발," 콘크리트학회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 13~22.
  28. Mihashi, H. and Zhou, Z. Y., "Micro Mechanics Model to Predict Macroscopic Behavior of Concrete under Frost Action," *RILEM Proceeding, Pro.* 24, 1997, pp. 235~241.

---

**요 약** 바닷물에 의한 염해와 동결융해 환경에 노출된 철근 콘크리트구조물의 내구성을 평가하기 위해서는 콘크리트의 미세구조적 특성 및 염화물 침투성에 대한 콘크리트의 확산 저항성을 동시에 분석하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 고로슬래그 미분말(GGBS)을 혼합한 콘크리트에 대하여 수은압입법(MIP)에 의해 얻어진 콘크리트의 미세공극 구조와 장기 및 단기 재령의 염화물 확산성과의 상관성에 대하여 연구하였다. 물시멘트비는 40, 45, 50%로 변화시키고, 단위시멘트량을 300, 350, 400, 450 kg/m<sup>3</sup>으로 변화시킨 OPC 및 GGBS 콘크리트 시편에 대하여 동결융해에 의해 손상된 GGBS 콘크리트에서의 확산성과 미세구조의 변화를 관찰하였다.

**핵심용어** : 미세구조, 내구성, 염화물 확산성, 고로슬래그 미분말(GGBS), 콘크리트