

## 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 침투 저항성에 관한 연구

송하원<sup>1)\*</sup> · 권성준<sup>1)</sup> · 이석원<sup>2)</sup> · 변근주<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 연세대학교 사회환경 시스템 공학부 <sup>2)</sup> LG건설 주식회사

(2002년 8월 28일 원고접수, 2003년 5월 22일 심사완료)

### A Study on Resistance of Chloride Ion Penetration in Ground Granulated Blast-Furnace Slag Concrete

Ha-Won Song<sup>1)\*</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>1)</sup>, Suk-Won Lee<sup>2)</sup>, and Keun-Joo Byun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749 Korea

<sup>2)</sup> LG Construction, Seoul, 100-722, Korea

(Received August 28, 2002, Accepted May 22, 2003)

#### ABSTRACT

Chloride ion inside concrete destroys the so-called passive film surrounding reinforcing bars inside concrete so that the so-called salt attack accelerates corrosion which is the most critical factor for durability as well as structural safety of reinforced concrete structures. Recently, as a solution of the salt attack, the ground granulated blast-furnace slag(GGBFS) have been used as binder or blended cement more extensively.

In this paper, characteristics of chloride ion diffusion for the GGBFS concrete, which is known to possess better resistance to damage due to the chloride ion penetration than ordinary portland cement(OPC) concrete possesses, are analyzed and a chloride ion diffusion model for the GGBFS concrete is proposed by modifying an existing diffusion model for the OPC concrete. The proposed model is verified by comparing diffusion analysis results using the model accelerated chloride penetration test results for concrete specimens as well as field test results for an RC bridge pier. Then, an optimal resistance condition to chloride penetration for the GGBFS concrete is obtained according to degrees of fineness and replacement ratios of the GGBFS concrete. The result shows that the GGBFS concrete has better resistance to chloride ion penetration than OPC concrete has and the resistance is more affected by the replacement ratio than the degree of fineness of the GGBFS.

**Keywords :** *ground granulated blast-furnace slag(GGBFS), chloride ion, diffusion model, accelerated chloride penetration test*

#### 1. 서 론

콘크리트는 우수한 내구성을 보유하고 있는 경제적인 건설재료이다. 건설재료로서 많은 장점을 가지고 있지만 다양한 환경에 노출된 콘크리트 구조물은 사용기간의 증가에 따라 내구적인 문제점을 보이게 되며 구조적인 문제로 전과되어 사용중의 성능저하를 초래하게 된다. 특히 이러한 내구적인 문제점 중 염해는 외부로부터의 염화물 유입, 해사의 사용과 같은 내부로부터의 염화물 혼입을 통하여 철근부식을 유발하게 되고, 철근부식은 구조적 안전성에도 영향을 미치게 된다. 염해에 의한 내구성 문제에서 주된 관심사가 되는 이유는 다른 열화인자에 비하여 침투 및 확산 속도가 빠르고 철근부식에 가장 직접적인

영향을 미치기 때문이다.

이러한 염해 문제는 해양 구조물 또는 해수와 접한 콘크리트 구조물에서 주로 발생하게 되지만 교량, 도로와 같은 육상 구조물에서도 제설제의 성분인 염화나트륨(NaCl), 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>)의 해리에 따라 염화물 이온이 콘크리트에 침투되어 피해를 나타내기도 한다.

기존의 연구결과에 의하면 콘크리트의 pH는 12.5~13.0에 이르는 알칼리 상태에 있기 때문에 철근주위에 부동태 피막(passive film)이라 불리는 보호막이 형성되어 철근부식을 억제하게 된다. 그러나 외부환경 또는 콘크리트 자체의 문제로 인해 염화물 이온 또는 산성 음이온이 일정치 이상 존재하게 되는 경우 철근주위의 부동태 피막은 파괴되게 되고 이로 인한 철근부식으로 인해 균열발생, 내하력 저하 등의 문제를 초래하게 된다. 이러한 내구적인 문제에 적극적으로 대처하기 위하여 혼합시멘트 또는 혼화재료를 사용하게 되는데 최근에는 고로슬래그 미분말의

\* Corresponding author

Tel : 02-2123-2806 Fax : 02-364-5300

E-mail : song@yonsei.ac.kr

사용과 그에 따른 연구가 활발하게 진행되고 있다. 용광로 방식의 제철작업에서 선철과 동시에 알루미늄이나 규산염을 주성분으로 한 고온 슬래그를 물, 공기 등에 의하여 급냉시켜 제작한 고로 슬래그는 잠재수경성을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며 장기강도 개선, 수밀성의 향상, 수화발열 속도의 저감 등의 장점을 가지고 있다.

최근에는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 물리적, 화학적 실험을 통한 정성적인 연구에서 고로슬래그 미분말 콘크리트의 초기재령 거동<sup>1)</sup>, 초기재령 콘크리트에서의 염화물 이온에 따른 강도 및 투수특성<sup>2,4)</sup> 등과 같은 정량적인 연구로 연구분야도 확대되어 가고 있다.

본 논문에서는 염화물 이온에 대해 침투저항성이 우수하다고 알려져 있는 고로슬래그 미분말 (Ground Granulated Blast-Furnace Slag: GGBFS)을 혼화재료로 사용한 콘크리트와 보통포틀랜드 시멘트 (Ordinary Portland Cement: OPC)를 사용한 콘크리트를 염화물 이온의 침투저항성에 대한 확산특성을 비교 분석하였으며 기존 OPC 콘크리트에 대한 확산모델을 수정하여 GGBFS 콘크리트의 확산모델을 제안하였다. 검증된 모델을 사용한 유한요소해석, 축진시험 등의 결과를 통해 GGBFS의 치환율과 분말도에 대한 특성을 고찰하였다. 한편 실험을 통하여 도출된 GGBFS의 치환율에 따른 공극률 분포를 이용하고 초기재령 콘크리트에서의 염화물 이온 이동을 고려하여 유한요소 해석을 수행한 뒤, 대상 콘크리트의 염화물 이온의 침투 거동을 분석하였다.

## 2. GGBFS 콘크리트의 염화물 이온 확산

### 2.1 GGBFS 콘크리트의 염화물 이온 확산 특성

GGBFS는 잠재수경성 반응에 의하여 콘크리트 미세구조를 치밀하게 하는 혼화재료 알려져 있다. GGBFS과 물이 접촉하게 되면 슬래그 표면에 불투수성의 산성피막이 발생하게 되며, 반응을 일으키기 위해서는 강알칼리에 의한 피막의 파괴가 필요하다. 콘크리트 내부의 수화물에 의한 강알칼리에 의해서 수화반응이 발생하게 되는데 일반적으로 이러한 성질을 잠재수경성이라고 한다<sup>5,6)</sup>. 이러한 장기재령하에서의 GGBFS의 잠재수경성 반응은 콘크리트 내의 공극을 메워서 미세구조를 치밀하게 하는 효과가 있어, 재령 28일 정도에서도 염화물 이온의 확산에 대한 저항성이 증가한다. 전기영동실험의 경우, 경과시간에 따라 일정하게 염화물 농도의 구배가 발생하기 이전에 비정상상태가 발생하게 되는데, GGBFS를 사용하게 될 경우, 염화물 이온이 콘크리트 내부에 고착화되고 이에 따른 비정상상태인 기간이 OPC에 비하여 길어지므로 염화물 이온의 침투속도가 낮아 진다.<sup>7)</sup>

### 2.2 GGBFS 콘크리트의 염화물 이온 확산 모델

염화물 이온 확산은 1차원으로 제한하는데 Fick의 1법칙에 총염화물과 자유염화물의 농도를 이용한 구속능 (binding capacity)를 적용하여 (1)과 같은 확산 방정식을 사용한다.<sup>8)</sup>

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial C_t} \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{cl} \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \quad (1)$$

여기서,  $C_t$ 는 콘크리트 중량당 총염화물량(g/g)으로 표현하는 총염화물 농도를 나타내고,  $C_f$ 는 콘크리트 중량당 자유 염화물량(g/g)으로 표현하는 자유 염화물 농도이다.  $dC_f/dC_t$ 는 구속능(binding capacity)을,  $D_{cl}$ 은 염화물이온의 확산계수를 나타낸다.

Xi et al.(1999)<sup>8)</sup>은 염화물이온의 확산계수에 영향을 주는 인자를 골재효과, 미시구조 의존성, 온도의존성, 농도의존성을 고려하여 다음과 같이 제시하였는데 이는 식(2)와 같다.

$$D_{cl} = f_{cl} D_m \left\{ 1 + \frac{g_i}{[(1-g_i)/3] + [1/(D_i/D_m - 1)]} \right\} \cdot \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] [1 - k_{ion} (C_f)^m]$$

$$f_{cl} = \left[ \frac{1}{4} + \frac{(28 - t_0)}{300} \right] \left( \frac{w}{c} \right)^{6.55} + \frac{28 - t_0}{62,500} \quad (2)$$

여기서,  $f_{cl}$ 은 물-시멘트비와 시멘트 풀의 재령에 대한 함수( $t_0 > 28$ 일에서의 콘크리트에 대해,  $f_{cl}$ 은  $t_0 = 28$ 에서의 값),  $D_i$ 는 골재의 확산계수,  $D_m$ 은 시멘트 풀의 확산계수,  $g_i$ 는 골재의 체적비,  $T_0$ 와  $T$ 는 기준온도 및 현재온도(K),  $U$ 와  $R$ 은 활성화 에너지(KJ/mol)과 기체상수,  $k_{ion}$ 과  $m$ 은 각각  $\sqrt{70}$ 과 0.5이다.

OPC를 사용한 콘크리트에 대해서는 식(2)에 따른 확산계수를 산정할 수 있으나 GGBFS 등과 같이 혼화재를 사용한 콘크리트 대하여 염화물 이온의 확산 거동을 규명하기에는 추가적인 가정이 필요하다.

본 논문에서는 식(2)에서는 사용되는  $D_m$ 값에 대하여 GGBFS를 사용할 경우, 치환율에 대한 공극률 변화 특성을 고려할 수 있도록 실험을 통해 도출된 공극률과의 함수를 이용하여 수정된 GGBFS 시멘트 풀의 확산계수 식을 제안하였으며 이를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

### 3. GGBFS 콘크리트의 염해 특성 실험

#### 3.1 실험 개요

염해에 대한 GGBFS 콘크리트의 특성 변화 및 침투저항성을 실험하기 위해 GGBFS 미분말의 치환율을 30%, 50%, 70%로 설정하였으며 분말도는 4,000, 6,000, 8,000 g/cm<sup>2</sup>으로 설정하였다. GGBFS 콘크리트 특성변화에서는 공극률과 공극경을 수은압입법(MIP : Mercury Intrusion Porosimeter) 실험을 통하여 수행하였으며 침투저항성 실험에서는 염화물 이온 분무 후 치환율 및 분말도에 따른 침투깊이 및 깊이별 염화물량을 분석하였다.

Table 1 Condition of MIP test

Advancing contacting angle	130.0 deg
Receding contacting angle	130.0 deg
Mercury density	13.5335 g/mL
Mercury surface tension	485.0 dyn/c
Maximum head pressure	4.4500 psi
Stem volume	0.3920 ml
Penetrometer weight	63.9570 g
Penetrometer volume	6.0020 mL
Penetrometer constant	10.79 /pF

Table 2 Mix proportions of GGBFS concretes

Code	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	W/B (%)	S/a (%)	SG/B (%)	Unit weight (Kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	SG	Gyp <sup>-</sup> sum	FA	CA
OPC	-			0	387	0	1.7	750.9	992.8	
S34	4000	45	44	30	271	116	6.4	746.9	988.7	
S54				50	184	194	9.5	744.8	986.5	
S74				70	104	272	12.6	741.9	983.4	
S36				6000	30	175	271	116	6.4	746.9
S76	70	104	272		12.6	741.9	983.4			
S38	8000	45	44	30	271	116	6.4	746.9	988.7	
S58				50	184	194	9.5	744.8	986.5	
S78				70	104	272	12.6	741.9	983.4	

· G<sub>max</sub> : 19 mm      · Slump : 15 cm  
 · Code AB (Replacement ratio: A×10%, Fineness: B×1,000g/cm<sup>2</sup>)

Table 3 Condition of accelerated chloride test

Specimen size	10×20 (cylinder)	Specimen condition
No. of specimen	3 per code	· Wax coating for 1-D penetration · 2 Weeks curing in water and 2 Weeks curing in air (20°C)
Period	4 weeks	
RH(%)	100	
Chloride concentration(%)	3	

아래의 Table 1은 MIP 실험 조건을 나타내고 있으며 Table 2는 GGBFS의 배합표를 나타내는데, Code SAB는 GGBFS를 사용한 시편(S)으로 치환율(A), 분말도(B)을 나타낸다(예를 들어, Code S74에서 사용된 S는 GGBFS를 나타내며 치환율 70%, 분말도 4,000 g/cm<sup>2</sup>). 한편 촉진 염화물 이온 분무실험에 사용된 종합내구성 실험기의 사용 조건은 Table 3과 같다.

#### 3.2 GGBFS 콘크리트의 특성 분석

GGBFS를 사용한 콘크리트는 OPC에 비하여 공극률 및 최대공극경이 감소하는 것으로 알려져 있다. 공극률에 대한 결과를 Table 4와 Fig. 1로 나타내었으며 최대공극경(최대용적을 차지하는 입경의 변화)은 Table 5에 나타내었다. 실제로 GGBFS를 사용하는 경우, 장기적으로는 공극률이 감소하는 것이 일반적이지만 4주 수중양생이 아닌 2주 수중, 2주 기중양생을 하였으며 비교적 단기간인 재령 28일을 대상으로 하였으므로 실험값이 OPC에 비하여 낮은값으로 평가되지는 않았다. MIP실험을 통하여 얻은 GGBFS의 치환율에 따른 회귀분석을 수행하면 식(3a)와 같은 지수함수의 회귀분석식을 도출할 수 있는데 이 경우는 오히려 치환률의 증가

Table 4 Porosities of specimen

Specimen	OPC	S34	S36	S38	S54	S74	
Porosity, V <sub>p</sub> (%)	3 days	19.98	21.70	23.62	21.33	22.90	20.80
	28 days	18.12	19.97	21.43	20.02	20.71	19.94

Table 5 Diameter of maximum volume

Specimen	OPC	S34	S36	S38	S54	S74
Pore diameter (μm)	3 days	0.0534	0.0498	0.0494	0.0493	0.0409
	28 days	0.0611	0.0306	0.0307	0.0301	0.0313

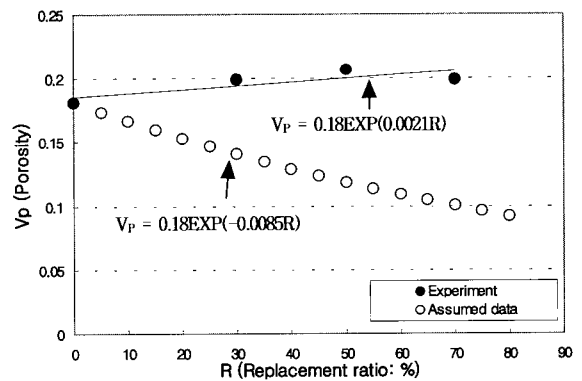


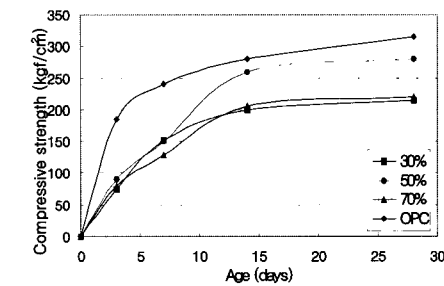
Fig. 1 Relationship of replacement ratios and porosities

에 따른 공극률의 증가를 나타내게 된다. 이러한 공극률의 증가는 확산계수의 증가를 가져오게 되므로 치환률이 증가할수록 염화물 침투가 증가하게 된다. 해석시에는 GGBFS의 함유량 증가에 따른 공극률의 감소 및 표면유입계수의 감소를 고려하기 위해서 실험에서 구한 식(3a) 대신 식(3b)를 사용하였다. 식(3b)는 Table 5와 같이 실험에 의한 최대공극경이 28일 경과시 50% 정도 감소하는 것을 기준으로 공극률 역시 50%정도 감소한다고 가정하여 지수함수식으로 가정한 것이다.

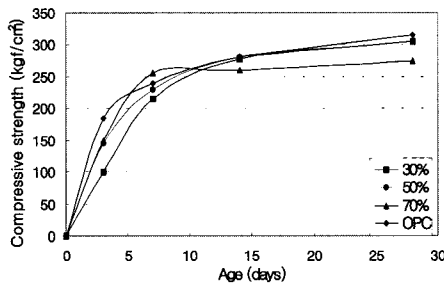
$$V_p = 0.18 \exp(0.0021R) \quad (3a)$$

$$V_p = 0.18 \exp(-0.0085R) \quad (3b)$$

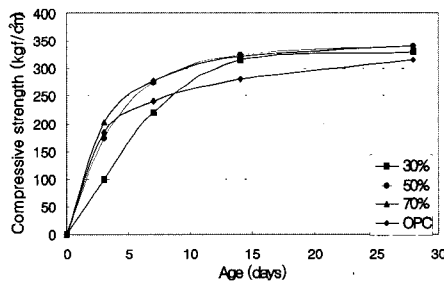
여기서  $V_p$ 는 공극률(%),  $R$ 은 GGBFS의 치환률(%)를 나타낸다.



(a) Fineness 4000 cm<sup>3</sup>/g



(b) Fineness 6000 cm<sup>3</sup>/g



(a) Fineness 8000 cm<sup>3</sup>/g

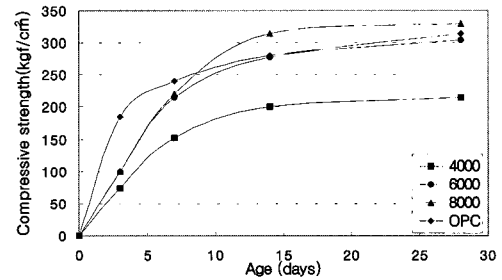
Fig. 2 Compressive strength with different replacement ratio of GGBFS for fixed fineness

### 3.3 GGBFS 혼입에 따른 역학적 특성 분석

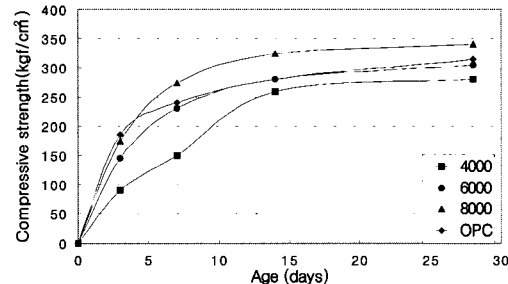
본장에서는 GGBFS 혼입에 따른 역학적 특성에 대해 분석하기 위해 분말도와 치환률을 변화시켜하도록 한다. 실험에서는 분말도를 4000 cm<sup>3</sup>/g, 6000 cm<sup>3</sup>/g, 8000 cm<sup>3</sup>/g으로 분류하였으며 각각에 대하여 치환율 30%, 50%, 70%로 하여 GGBFS를 혼입하였다. 물결합재비는 50%로 고정하였으며, 석고 함유량은 결합재량의 5%가 되도록 하였다. 시편은 50.8 mm×50.8 mm×50.8 mm의 입방체로 제작하였으며, 재령 1일 후 탈형하여 수중양생(20 °C)후 실험을 수행하였다.

#### 3.3.1 치환률에 따른 강도특성 분석

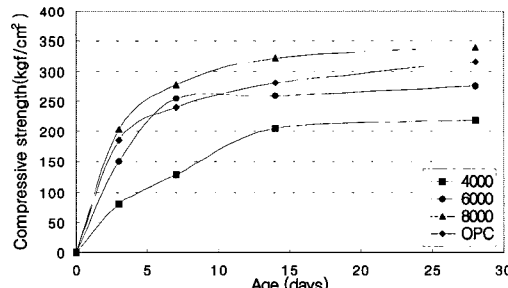
Fig 2에서는 분말도 4000 cm<sup>3</sup>/g인 경우 OPC 모르타르에 비하여 초기강도발현이 매우 낮았으며 치환율 30%, 70%의 경우 28일 강도는 치환율 50%의 경우보다 낮다는 것을 알 수 있었다. 분말도 6,000 cm<sup>3</sup>/g에서는 치환율이 70%



(a) 30% replacement



(b) 50% replacement



(c) 70% replacement

Fig. 3 Compressive strength with different fineness of GGBFS for fixed replacement ratio

로 가장 높은 경우 28일 강도가 가장 낮았으나 OPC 모르타르와 같은 수준의 강도발현을 하고 있으며, 치환률에 따른 변화가 가장 적은 분말도임을 알 수 있다. 분말도 8,000 cm<sup>3</sup>/g인 경우, 치환률이 30%인 경우의 강도발현은 낮았으나, 치환률 50%, 70%에서 초기강도발현이 OPC와 거의 같은 수준이었으며 치환률에 관계없이 28일 강도는 OPC 이상의 값을 나타내었다. 아래의 Fig. 2는 치환률에 따른 강도의 변화를 나타내고 있다.

### 3.3.2 분말도에 따른 강도특성

Fig 3에서는 치환률을 일정하게 하고 분말도에 따른 강도발현을 분석한 결과인데, 분말도가 높을수록 강도발현이 증가되는 것을 알 수 있다. 재령 28일에서 분말도 8,000 cm<sup>3</sup>/g은 치환에 의한 강도발현의 결과가 거의 비슷하므로 고분말도에서는 치환에 의한 영향이 비교적 작게 평가됨을 알 수 있다. 한편 28일 이하의 초기재령에서 OPC와 동등이상의 강도발현을 얻기 위해서는 분말도 6,000 cm<sup>3</sup>/g이상의 GGBFS를 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 아래의 Fig 3에서는 분말도에 따른 강도특성을 나타내고 있다.

### 3.4 염화물 침투 저항성 분석

염화물은 철근부식에 직접적으로 영향을 미치는 자유염화물과 고착화된 복염의 형태로 존재하는 고정염화물로 분류할 수 있다. 일반적으로 복염으로 알려진 프리델염은 화학적으로 불안정한 상태를 유지하고 있으며 이산화탄소의 유입 또는 유해 음이온의 유입시 고정되고 있는 자유염화물의 일부를 해리하므로써 화학적으로 안정하게 된다.<sup>9)</sup>

GGBFS와 OPC를 사용한 콘크리트의 염화물 침투저항성을 평가하기 위해 염화물 이온 분무실험을 수행한 뒤 시편을 깊이방향으로 1cm 단위씩 커팅하여 깊이별 염화물 함유량을 측정하였다. 측정방법은 JCI-SC4<sup>10)</sup> 방법을 통하여 시편을 처리하고 자유염화물량을 측정하였다. 한편 아래의 Table 6에서는 깊이에 따른 자유염화물량을 나타내었으며 이를 Fig. 4에 나타내었고 염화물 이온의 침투 깊이만을 배합별로 Fig. 5에 나타내었다.

이상의 실험결과에서 알 수 있듯이 염화물 침투 깊이 및 깊이별 염화물 함유량에 대해서 GGBFS 콘크리트가 OPC 콘크리트에 비하여 우수하게 평가되었다. 특히 S74, S76, S78의 경우 가장 내염해성이 우수한 것으로 평가되었는데 분말도가 클수록, 치환율이 높을수록 내염해성이 우수하게 평가되었다. 한편 치환율과 분말도에 대한 영향을 분석하기 위해 치환율 70%인 경우와 분말도 8,000 g/cm<sup>3</sup>인 경우로 분류하여 OPC에 대한 염화물 침투 저항성을 비율(%)로서 나타내면 아래의 Fig. 6 및 Fig. 7로 나타낼 수 있다.

Fig. 6, 7에서 알 수 있듯이 동일한 치환율(70%)에 대해서는 분말도의 차이에 따른 영향은 거의 없으며 자유염화물량의 비가 매우 낮게 나타남을 알 수 있다. 한편 동일한 분말도(8,000 g/cm<sup>3</sup>)에서는 치환율에 따른 변화의 폭이 상대적으로 크게 나타나며 자유염화물량의 비가 깊이가 0.5cm에서는 43~93%, 깊이 1.5cm에서는 28~78%로 평가되었다. 실험결과로부터 분말도보다는 치환율에 의한 염화물 이온의 침투저항성이 지배적임을 알 수 있다.

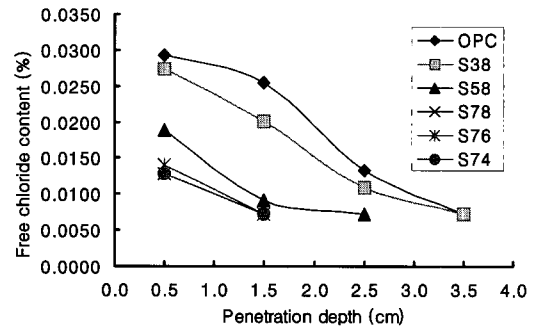


Fig. 4 Free chloride content for each penetration depth

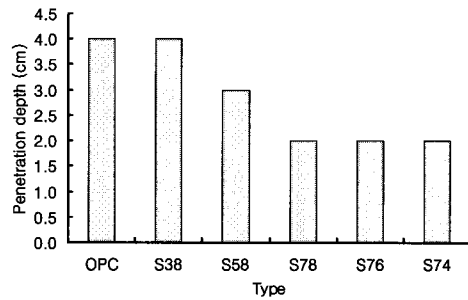


Fig. 5 Penetration depth for each specimen types

Table 6 Free chloride content for each penetration depth

Specimen type	Depth (cm)	Free chloride content (%)
OPC	0.0~1.0	0.02920
	1.0~2.0	0.02555
	2.0~3.0	0.01338
	3.0~4.0	0.00730
S38	0.0~1.0	0.02738
	1.0~2.0	0.02008
	2.0~3.0	0.01095
	3.0~4.0	0.00730
S58	0.0~1.0	0.01886
	1.0~2.0	0.00913
	2.0~3.0	0.00730
S78	0.0~1.0	0.01278
	1.0~2.0	0.00730
S76	0.0~1.0	0.01399
	1.0~2.0	0.00730
S74	0.0~1.0	0.01278
	1.0~2.0	0.00730

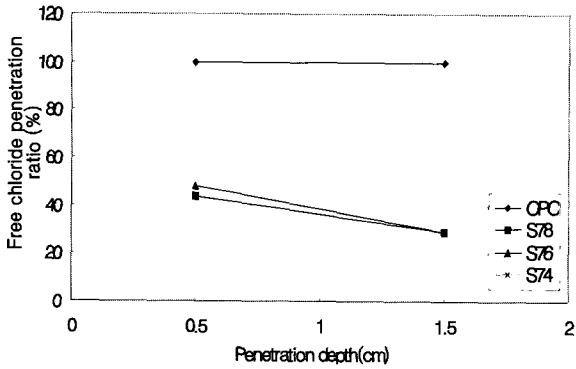


Fig. 6 Free chloride ratio in the same replacement ratio (GGBFS = 70%)

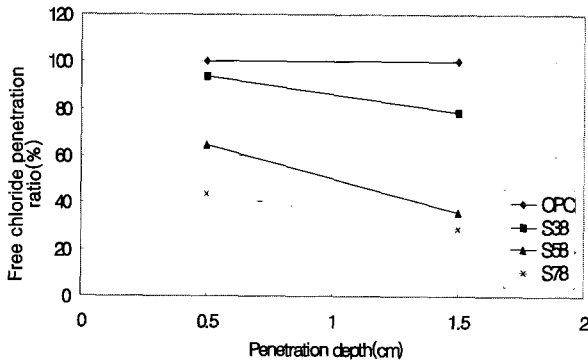


Fig. 7 Free chloride ratio in the same fineness of GGBFS (fineness = 8000 g/cm²)

#### 4. 유한요소 해석을 통한 GGBFS 콘크리트의 염화물 이온 확산

##### 4.1 염화물 이온 확산해석 기법

##### 4.1.1 GGBFS의 치환율을 고려한 확산계수의 도출

유한요소 해석으로 GGBFS 콘크리트의 염화물 확산 거동을 규명하기 위해서는 실험결과에서 알 수 있듯이 가장 큰 영향인자인 치환율의 변화를 고려해야 한다.

식(2)에서 사용되는  $D_m$ 은 시멘트 풀의 확산계수를 나타내는데 GGBFS의 치환율의 변화에 따른 공극구조의 변화를 적용하기로 한다.

Martys et al.(1997)<sup>13)</sup>은 확산계수의 미시구조 의존성을 나타내는 Kozeny-Carman식에 임계 공극률  $V_p^c$ 를 적용하는 것을 제안하였다.<sup>11-13)</sup>  $V_p^c$ 는 공극 공간에 처음으로 삼투가 되는 공극률이며 물리적 의미는 임계공극지름과 유사한데 0.03이라는 상수로 취급한다. Martys et al.은 식(4)와 같이 제안하였으며,  $f$ 는 4.2로 나타내었다.

$$D_m = \frac{2[1 - (V_p - V_p^c)]}{S^2} (V_p - V_p^c)^f \quad (4)$$

여기서,  $V_p$ 는 식(3b)에서 도출된 공극률이며, 식(3b)를 식(4)에 대입하면 최종적으로 식(2)에서 사용될 확산계수 방정식을 도출하게 된다.

##### 4.1.2 유한요소의 정식화

염화물이온 확산방정식의 공간영역에서의 유한요소 정식화를 위해 비선형 방정식에 적용 가능한 중첩잔차법(weight residual method)를 이용하여 식(5)와 같은 행렬 형태로 전환한다.

$$[K]\{C_{cl}\} - [C]\left\{\frac{\partial C_{cl}}{\partial t}\right\} + \{Q\} = 0 \quad (5)$$

여기서,  $[K]$ 는 염화물 이온 확산 행렬이며,  $[C]$ 는 염화물이온 용량 행렬로서 형상함수를 이용한 요소 행렬을 이용해 식(6a, 6b)으로 나타낸다.

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (6a)$$

$$[C] = \int [N]^T [N] dV \quad (6b)$$

여기서  $[B]$ 는 변형률 텐서,  $[D]$ 는 확산계수를 나타내는 텐서,  $[N]$ 은 형상함수를 나타낸다.

한편 시간영역에서의 식(5)의 해를 구하기 위해 시간  $t_0 + \theta \Delta t$ 에서의 절점 염화물량 벡터인  $\{C_{cl}\}$ 를 포함하는 비선형 방정식을 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$R(\{C_{cl}\}) = 0 \quad (7)$$

$$R = [K] - \frac{1}{\theta \Delta t} [C] \{C_{cl}\} + \frac{1}{\theta \Delta t} [C] \{C_{cl_0}\} + \{Q\}$$

여기서, 시간  $t_0$ 에서의 절점 염화물량 벡터인  $\{C_{cl_0}\}$ 는 최초 단계에서의 초기 염화물량에 해당하는 기지값이고  $\{C_{cl}\}$ 은 반복계산을 통해서만 구해질 수 있으므로, 반복계산법을 도입한다. 식(7)을 미분하면 식(8)을 도출할 수 있으며 수렴조건 ( $R \ll 0$ )이 만족되지 않으면 결과가 수렴될 때까지 식(9)의 과정으로 반복 계산이 진행된다.

$$dR = [E] d\{C_{cl}\} \quad (8)$$

$$[E] = [K] - \frac{1}{\theta \Delta t} [C] + \int \frac{\partial Q}{\partial C_l} [N]^T [N] dV$$

$$\{C_{cl}^{(i+1)}\} = \{C_{cl}^{(i)}\} + \{dC_{cl}^{(i)}\} \quad (9)$$

이러한 과정으로 시간  $t_0 + \theta \Delta t$ 에서 구한 해로부터 절점 염화물량 벡터  $\{C_{clt}\}$ 는 선형 보간법을 이용해 식(10)을 이용하여 도출한다.

$$\{C_{clt}\} = \{C_{cl_0}\} + [\{C_{cl}\} - \{C_{cl_0}\}] / \theta \quad (10)$$

## 4.2 유한요소해석을 통한 GGBFS 콘크리트의 염화물 이온의 확산 거동 검증

### 4.2.1 GGBFS를 사용한 콘크리트의 염화물 이온의 확산 거동

염화물 이온의 확산 해석을 위하여 유한요소해석을 실시하였으며 아래의 Fig. 8과 같이 1차원 유한요소모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 초기 및 경계조건은  $t = t_0$  에서  $C_f = C_{ini}$  ,  $x = L$ 에서  $C_f = C_{en}$ 이고,  $x = 0$  에서  $dC_f/dx = 0$  이다. 여기서,  $C_{ini}$ 는 콘크리트의 초기 자유 염화물 농도를 나타내며,  $C_{en}$ 은  $C_f$ 와 같은 단위인 외부환경의 염화물이온 농도이고,  $L$ 은 염화물 침투 방향으로의 콘크리트 시편의 길이이다.

대상 시편에 대한 실험결과는 Table 6에 제시되어 있으며 해석결과와의 비교를 아래의 Fig. 9~14에 나타내었다. 전반적으로 자유염화물량의 농도(%)를 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다.

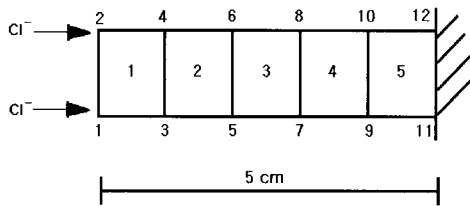


Fig. 8 1-D Chloride diffusion model using the analysis

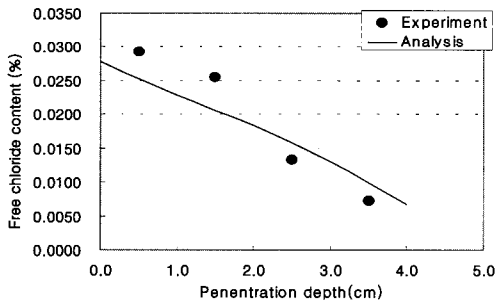


Fig. 9 Free chloride content for each penetration depth (OPC)

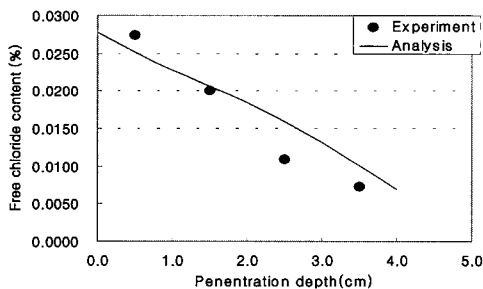


Fig. 10 Free chloride content for each penetration depth (S38)

### 4.2.2 염화물 이온의 확산 거동의 적용

제한된 염화물이온 확산 해석기법의 적용을 위하여 염해환경에 직접 노출되어 있는 OPC 콘크리트로 시공된

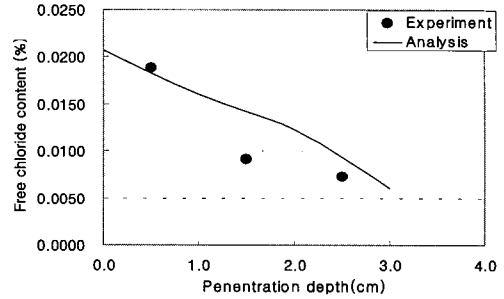


Fig. 11 Free chloride content for each penetration depth (S58)

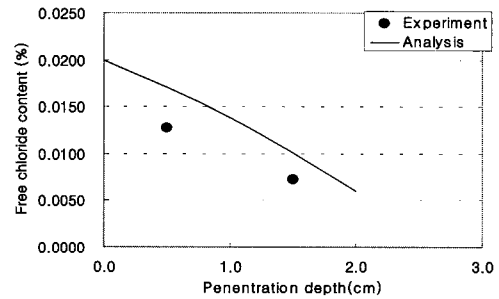


Fig. 12 Free chloride content for each penetration depth (S78)

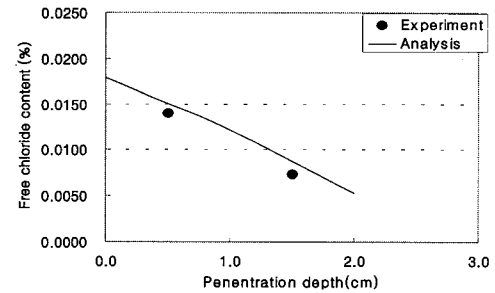


Fig. 13 Free chloride content for each penetration depth (S76)

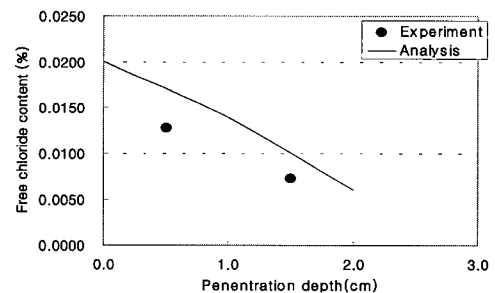


Fig. 14 Free chloride content for each penetration depth (S74)

RC교량 구조물에 해석기법을 적용하여 해석하였다. 해석 대상 구조물은 국내의 S교량의 교각부위로서, 시공 10년 뒤 조사결과 철근위치인 10 cm 깊이에 이미 철근부식 임계염화물량(0.052%)보다 2배나 많은 0.1020%의 염화물량이 침투되어 있음을 확인하였다.

교량의 이 교량의 제원을 Table 7에 나타내었고, 해석을 위한 모델링은 Fig. 15와 같으며 일반적인 배합강도(240 kgf/cm<sup>2</sup>)를 가정하여 해석을 수행하였다. 도출된 기법을 통하여 해석한 결과는 Fig. 16에 나타냈는데 해석치와 실측치가 거의 비슷하게 나타나고 있으며 염화물 이온의 거동을 정확히 예측하고 있음을 나타내었다.

Table 7 Dimensions of S bridge

Chloride ion test time	2000. 3
Exposure period	10 (year)
Exposure condition	Sea water
Exposure chloride concentration	3.5 (%)
Concrete cover depth	10 (cm)
Measured total chloride concentration	0.1020 (%) wt. of concrete

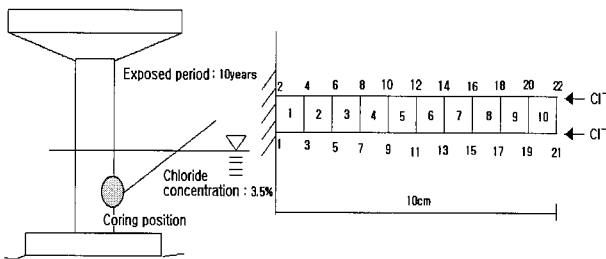


Fig. 15 1-D chloride diffusion model using the analysis for existing submerged bridge pier

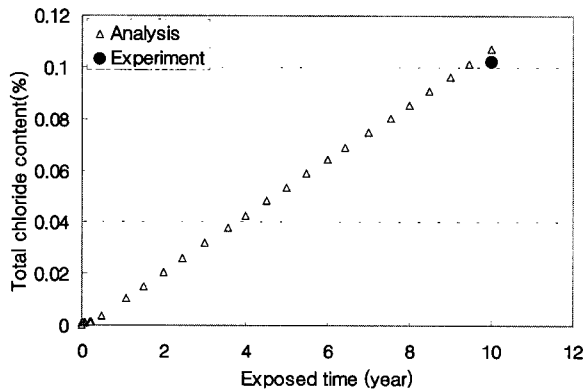


Fig. 16 Comparison of calculated results with experimental data

## 5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 수은압입법 실험을 수행하여 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 공극률 변화를 회귀분석하여 상관관계를 도출하였으며 도출된 식을 이용하여 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트에 적용할 수 있는 확산계수식을 제안하였다. 한편 제안된 확산계수를 이용하여 1차원 유한요소해석을 수행하였으며 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트 시편 및 기존구조물에 적용하므로써 제안된 제안식의 타당성을 검증하였다.
- 2) 고로슬래그 미분말 콘크리트를 사용한 콘크리트는 보통 포트랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 내염해성이 우수한 것으로 평가되었으며, 고로슬래그 미분말 치환율 70%의 경우 보통 포트랜드 시멘트 콘크리트의 침투된 자유 염화물 농도의 25~40% 수준으로 평가되었다.
- 3) 동일한 분말도(8,000 g/cm<sup>3</sup>)에서는 보통 포트랜드 시멘트 콘크리트에 비하여 자유 염화물량의 비가, 콘크리트 깊이 0.5 cm에서는 43~93%, 콘크리트 깊이 1.5 cm에서는 28~78%로 평가되었는데, 실험결과로부터 고로슬래그 미분말의 분말도보다는 치환율이 염화물 이온의 침투저항성에 지배적인 인자임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Song, H. W., Byun, K. J., Kim, S. H., and Choi, D. H., "Early-age Creep and Shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS," *Proc. of 2nd International Workshop on Self-Compacting Concrete*, Univ. of Tokyo, Oct. 23-25, Tokyo, Japan, pp.413-422, 2001.
2. Song, H. W., Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K. J., and Maekawa, K., "Early-age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structure," *Concrete Science and Engineering*, Vol. 3, pp.62-72, 2001.
3. 박상순, 송하원, 변근주, "균열을 갖는 콘크리트의 염화물 확산 및 투수모델", 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 6-A호, pp.915-924, 2001.
4. 송하원, 박상순, 변근주, "초기재령에서 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 침투 해석", 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 6-A호, pp.925-936, 2001.
5. Fulton, F. S., *The Properties of Portland Cements Coating milled Granulated Blast Furnace Slag*, The Portland Cement Institute, Johannesburg, pp.78, 1974.
6. 한국 전자재 시험 연구원, "공극률슬래그 미분말을 활용한 시멘트·콘크리트 생산기술 개발", 1999.



7. 한국도로공사 도로연구소, “콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 시멘트 종류별 특성 연구”, pp.129-133, 1999.
8. Xi, Y. and Bazant, Z. P., “Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 58-65, 1999.
9. 岸谷孝一, “小林一輔, 樫野紀元, 宇野祐一, “鹽化物を含むコンクリート中における鐵筋腐食と中性化との關係”, *コンクリート工學論文集*, Vol. 2, No. 1, pp.77-83, 1991.
10. 日本コンクリート工學協會, “コンクリート構造物の腐食・防食に關する試驗方法ならびに規準(案)”, pp.17-26, 1998.
11. Martys, N. S. and Ferraris, C. F., “Capillary Transport in Mortars and Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.5, pp.747-760, 1997.
12. Xi, Y., “A Model for Moisture Capacities of Composite Materials. Part I:Formulation,” *Computational Materials Science*, Vol.4, pp.65-77, 1995.
13. Xi, Y., “A Model for Moisture Capacities of Composite Materials. Part II: Application to Concrete,” *Computational Materials Science*, Vol. 4, pp.78-92. 1995.

## 요 약

염화물 이온은 철근의 부동태 피막을 파괴하여 부식을 촉진시키는 요인이며 철근의 부식은 콘크리트 구조물의 내구성뿐만 아니라 안전성에 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이러한 염해에 대해 적극적으로 대처하기 위하여 최근에는 공극률 슬래그 미분말의 사용이 본격화 되고 있다.

본 논문에서는 염해, 특히 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트 보다 우수한 염화물 이온의 침투저항성을 보유한 것으로 알려져 있는 공극률 슬래그 미분말 콘크리트에 대해 염화물 이온의 확산특성을 분석하였고, 염화물 이온의 거동을 해석할 수 있는 모델을 기존의 보통콘크리트 확산모델을 수정하여 제안하였다. 제안된 공극률슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 이온 확산모델은 공극률슬래그 미분말 콘크리트에 대한 촉진염화물 분무실험 결과와 실제 RC 교량 교각부의 현장 염화물 실험결과와의 비교를 통하여 타당성을 검증하였으며, 검증된 모델을 이용한 해석과 실험을 통하여 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 이온의 침투에 따른 치환율 및 분말도에 따른 최적조건을 도출하였다. 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 이온 침투저항성은 고로슬래그 미분말을 사용함에 따라 보통 콘크리트에 비하여 우수하게 개선되었으며, 사용한 고로슬래그 미분말의 분말도보다 치환율에 영향을 더 받는 것으로 분석되었다.

**핵심용어 :** 고로슬래그 미분말, 염화물 이온, 확산 모델, 염화물 침투 실험