

# 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 염화물 침투특성에 관한 연구

## A Study on the Chloride Ion Penetration Characteristic of Concrete containing Ground Granulated Blast Furnace Slag

김 현 수<sup>\*</sup>      지 남 용<sup>\*\*</sup>  
Kim, HyunSu      Jee, NamYong

---

### ABSTRACT

There are two types of chloride in concrete; one is added as concrete materials' chloride when concrete's mixing, and the other is penetrated from the air and sea water in the sea-shore area. These chlorides penetrate into concrete, and they are accumulated inside the concrete with aging.

This study aimed to evaluate the chloride ion penetration resistance of concrete containing GGBFS in the sea-shore area.

Therefore, the specimens made with the replacement ratios(0, 0.30, 0.45, 0.60) of GGBFS were put into 3% NaCl solution according to the chloride accelerating test of JCI-SC3, and then investigated the weight changes, compressive strength, chloride ion with the depths of the specimens by aging.

The result is that the diffusion coefficient of chloride ion is decreased with the increase of replacement ratios when compared to OPC

---

#### 1. 서론

콘크리트의 염해는 충분히 세척되지 않은 해사의 사용에 따른 염분의 초기 혼입 뿐만 아니라 시공 후 해안지역 등에서 비래염분 등에 의해 콘크리트 내부로 염화물이 침투됨으로써, 콘크리트 구조체의 균열과 내력저하 등의 성능저하를 초래하게 된다. 특히, 콘크리트 내부로 침투한 염화물은 발생 빈도나 손상 정도 면에서 성능저하에 매우 심각한 요인으로 거론되고 있다.

환경친화적인 건설재료의 개발과 산업부산물의 자원으로의 재활용 측면에서 고로슬래그미분말을 사용하는 콘크리트의 경우, 조직이 더욱 치밀하게 되어 압축강도의 증진과 함께 염화물 이온 및 산소의 침투에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있으며, 콘크리트 구조물의 내구성 설계와 내구수명 예측을 위해서는 염화물 이온의 침투 및 확산의 평가가 선행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 염수 침투조건하에서 재령의 증가에 따른 염화물 침투특성을 파악하기 위하여 중량변화, 압축강도, 깊이별 염화물량을 측정하고자 하며, 궁극적으로 염해 환경조건에서의 염화물침투저항성 및 내구성 저하를 예측하기 위한 기초자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

---

\* 정희원, 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정

\*\* 정희원, 한양대학교 건축공학부 조교수

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 S사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 화학조성 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1 시멘트 화학조성 및 물리적 특성

비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	lg-loss (%)	응결시간(h-m)		안정도	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
									초결	종결		3일	7일	28일
3.15	3,400	21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	2.58	3-50	6-50	0.1	230	300	410

#### 2.1.2 고로슬래그미분말

본 실험에 사용된 고로슬래그미분말은 KS F 2563의 품질 규정에 따른 고로슬래그미분말 3급으로서, 비중 2.90, 분말도 4550(cm<sup>2</sup>/g)인 S사 제품을 사용하였다. 화학조성 및 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 2 고로슬래그미분말의 화학조성 및 물리적 특성

비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	lg-Loss	Cl <sup>-</sup> (%)	압축강도	
										7일	28일
2.90	4550	34.69	15.42	0.23	41.98	6.36	-	0.04	0.002	-	-

#### 2.1.3 골재

본 실험에 사용된 잔골재는 세척해사이고, 굵은 골재는 안산암계 부순돌로서 최대크기는 19mm이하로 조정하였다. KS F 2531~2511의 시험방법에 따른 잔골재와 굵은 골재의 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3 골재의 물리적 특성

골재	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	실적율 (%)	최대치수 (mm)	조립율
잔골재	2.59	0.89	1,675	64.39	5	2.64
굵은골재	2.67	1.21	1,429	53.48	19	6.61

## 2.2 실험인자 및 수준

본 실험의 실험인자 및 수준은 표 4와 같다.

표 4 실험인자 및 수준

실험인자	수준	수준수	비고
고로슬래그미분말 치환율(%)	0, 30, 45, 60 %	4	· 물/결합재 비: 0.50 · 양생방법: 16±1℃기중 봉함양생 · 침지 재령: 7, 14, 28, 56, 84일
침지 조건	침지 · 건조반복, 계속침지	2	

침지 방법은 JCI-SC 3(건습방법에 의한 방법)에 따라 3% NaCl 수용액에 60℃ 수중침지 3일 그리고 20℃ 60%의 건조상태 4일간을 1사이클로 한 침지 · 건조반복조건과 수중침지 7일을 1사이클로 한 계속침지조건으로 구분하였다.

### 2.3 콘크리트 배합 및 시험체 제작

표 5의 배합설계에 따라, 깊이별 염화물량 측정을 위한 100×100×200mm의 각주형시험체와, 콘크리트의 압축강도와 중량측정을 위한  $\phi$ 100×200mm의 원주형시험체를 제작하였다. 제작한 시험체는 재령 1일째 탈형 후, 1방향 침투를 유도하기 위하여 염분침투대상부위를 제외한 면을 에폭시 코팅처리 하였다. 양생은 16±1℃ 기중에서 27일간 봉함양생을 실시하였다.

표 5 배합설계

배합기호	s/a (%)	W/(C+BF)	감수제 (C×0.1%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )					슬럼프 (cm)	공기량 (%)
				W	C	BF	S	G		
opc	46	0.50	350g	175	350	0	803	972	16	3.4
BF/(C+BF) : 0.30	46	0.50	350g	175	245	105	799	967	17	3.2
BF/(C+BF) : 0.45	46	0.50	350g	175	193	158	798	965	17	3.0
BF/(C+BF) : 0.60	46	0.50	350g	175	140	210	796	963	19	2.4

### 2.4 측정항목 및 방법

#### 2.4.1 압축강도

KS F 2405에 따라 원주형시험체를 대상으로, 용량 200tonf의 만능시험기를 이용하여 압축강도를 측정하였다.

#### 2.4.2 중량변화

원주형시험체를 대상으로 중량차와 중량변화율을 식 (1)과 (2)에 의하여 구하였다.

$$\text{중량차 (g)} = \text{계속침지시킨 공시체 중량} - \text{침지전조반복시킨 공시체 중량} \quad (1)$$

$$\text{중량변화율 (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

$W_1$  : 침지 전 시험체 중량,  $W_2$  : 측정재령일에 측정된 시험체 중량

#### 2.4.3 깊이별 염화물량

100×100×200mm의 각주형시험체를 대상으로, 1cm 깊이별로 4cm깊이까지 콘크리트 시료를 절단하여 분쇄한 후, JAMES INSTRUMENTS INC.사의 염화물 측정기(CL-2000)를 이용하여 염화물량을 측정하였다. 또한, 깊이별 염화물량을 기초로 Fick의 제2법칙에 의해 콘크리트의 염화물 확산계수를 구하였으며, 산출식은 식 (3)과 같다.

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (3)$$

$C(x, t)$  : 깊이 x에서의 콘크리트중의 염화물량 (kg /m<sup>3</sup>)

$C_0$  : 콘크리트 표면의 염화물량 (kg /m<sup>3</sup>)

t : 사용기간 ( 초 )

x : 콘크리트 표면으로부터 깊이 ( cm )

D : 콘크리트의 겉보기 염화물 확산계수( cm<sup>2</sup>/sec )

erf : 오차함수

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 고로슬래그 치환 콘크리트의 압축강도 발현 특성

그림 1은 봉합양생기간 중 압축강도변화를 나타낸 것으로, 양생재령이 3일에서 28일로 경과함에 따라, 치환율 45%가 치환율 30%와 60%보다 압축강도발현이 우수함을 알 수 있다. 또 양생재령 28일의 경우, 고로슬래그를 치환한 경우에서 OPC를 사용한 콘크리트에 비해 압축강도가 낮게 나타났다. 이는 봉합양생으로 인한 충분한 강도발현이 이루어지지 않은 이유 때문인 것으로 판단된다.

그림 2는 OPC를 사용한 콘크리트 강도에 대한 고로슬래그 치환 콘크리트의 강도비를 나타낸 것으로, 치환율 45%의 경우를 제외한 치환율 30%와 60%의 경우 전반적으로 압축강도발현이 미비하였다. 본 실험에서, 치환율 45%일 때, 가장 강도발현성이 우수한 것을 알 수 있다.

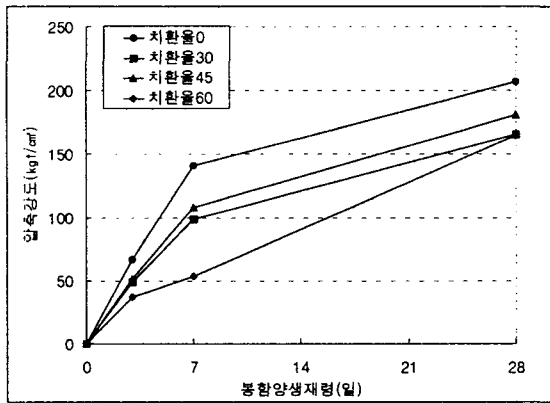


그림 1 봉합양생기간에 따른 콘크리트 압축강도

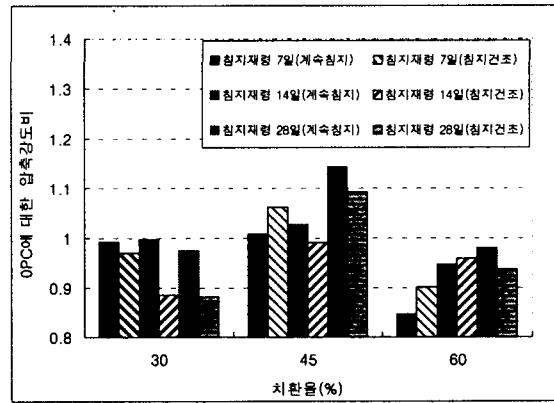


그림 2 OPC 사용 콘크리트에 대한 압축강도비

#### 3.2 침지조건에 따른 시험체의 중량변화

그림 3과 4는 침지재령에 따른 중량변화를 나타낸 것으로, 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 경우, 중량변화율은 치환율의 증가에 따라 작게 나타났다. 이는 고로슬래그치환율이 증가할수록 세공용적이 감소하여 수분의 유입량이 줄어들게 됨으로써 중량변화율이 작아진 것으로 판단된다.

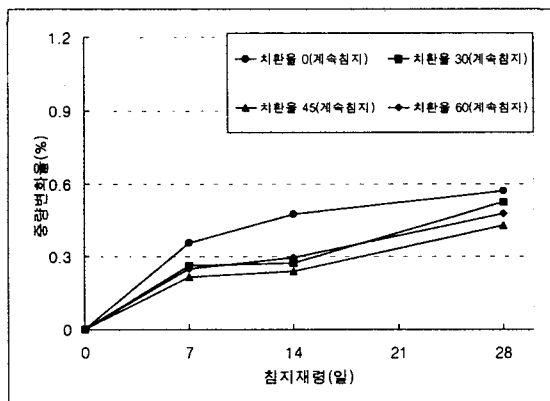


그림 3 침지재령별 콘크리트 중량변화율

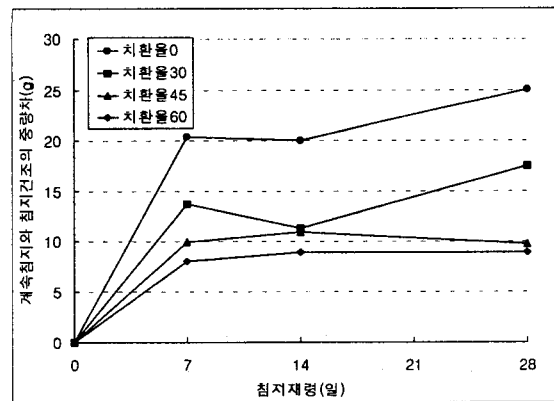


그림 4 침지조건에 따른 콘크리트 중량차

### 3.3 고로슬래그 치환 콘크리트의 깊이별 염화물량

침지조건에 따른 콘크리트는 내부의 깊이별 염화물량은 침지재령 7일, 14일의 경우, 침지·건조의 경우보다 계속침지의 경우가 더 크게 나타났다. 그림 5와 6의 침지재령 28일 경우, 침지건조의 침지조건에서 깊이별 염화물량이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 건조 시 콘크리트중의 공극수 증발에 따른 표면부와 내부 공극용액중의 염화물이온농도차가 계속침지의 경우보다 더 커지기 때문으로 판단된다.

침지조건에 관계없이 고로슬래그 치환율이 증가할수록 동일 깊이에서의 염화물량은 낮게 나타났다. 이는 치환율 증가에 따라 세공용적이 감소하여 염화물이온의 침투가 억제된 것으로 판단된다.

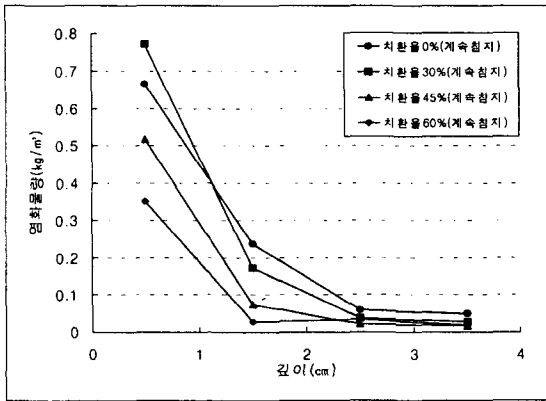


그림 5 계속침지조건시, 콘크리트 깊이별 염화물량

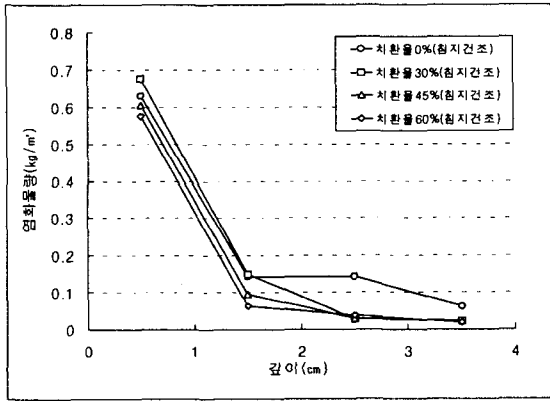


그림 6 침지·건조조건시, 콘크리트 깊이별 염화물량

### 3.4 침지조건별 염화물 확산계수

그림 7은 침지재령 28일의 4cm 깊이에서의 염화물확산계수를 나타낸 것으로, 고로슬래그 치환율이 증가함에 따라 확산계수는 작아진다. 각각의 침지조건하에서, 치환율과 확산계수에 대한 회귀식은 식 (4)와 (5)로 표현되며, 결정계수가 각각 0.91과 0.87로, 상관관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 확산계수는 분말도와 치환율이 높아질수록 작아진다는 기존의 보고와 일치한다.<sup>8)</sup>

· 계속침지조건 :  $Y = -0.0104 \cdot X + 3.4862$  ( $R^2 = 0.91$ ) ..... (4)

· 침지건조조건 :  $Y = -0.0123 \cdot X + 3.5917$  ( $R^2 = 0.87$ ) ..... (5)

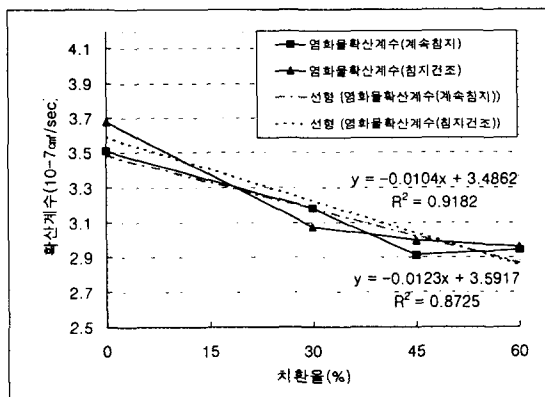


그림 7 치환율별 4cm 깊이에서의 염화물확산계수

#### 4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 압축강도 발현특성은, 재령 초기에 OPC를 사용한 콘크리트에 비해 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 압축강도가 낮게 나타났는데, 이는 기중 봉함양생에 기인한 것으로 충분한 수분 공급이 이루어지지 않은 이유 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 경우, 초기 양생에 있어서 수분 손실에 대한 주의가 요구된다.

2) 콘크리트의 중량변화율은 고로슬래그미분말 치환율의 증가에 따라 작게 나타났다. 이는 치환율 증가에 따라 세공용적이 줄어 수분이동 감소에 따른 것으로 판단된다.

3) 고로슬래그미분말 치환율이 증가할수록 동일 깊이에서의 염화물량은 낮게 나타났다. 이는 치환율 증가에 따라 세공용적이 감소하여 염화물이온의 침투가 억제된 것으로 판단된다.

4) 고로슬래그미분말 치환율이 증가할수록 동일 깊이에서의 염화물확산계수는 감소하였다. 침지재령 28일의 4cm 깊이에서의, 치환율과 염화물확산계수에 대한 회귀식은 다음과 같으며, 각각의 침지조건에 대한 결정계수가 0.91과 0.87로 상관관계가 있음을 알 수 있다.

$$\cdot \text{계속침지조건} : Y = -0.0104 \cdot X + 3.4862 \quad (R^2 = 0.91) \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$\cdot \text{침지건조조건} : Y = -0.0123 \cdot X + 3.5917 \quad (R^2 = 0.87) \quad \text{-----} \quad (5)$$

여기서, X : 치환율(%),

Y : 확산계수( $10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/sec)

▣ 본 연구는 한양대학교 부설 초대형구조시스템연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 김형래, 박형주, 김상규, 송병창, 지남용, “염수에 침지시킨 콘크리트의 염분침투특성에 관한 연구”, 대한건축학회학술발표논문집, 第17卷 第2號, 1997년 10월
- 2) 건설도서, “콘크리트의 균열과 방지의 포인트”, 2000년
- 3) 김홍삼, “전기화학적 기법에 의한 콘크리트 중의 염소이온 확산평가 및 철근부식 개시시간 예측”, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사학위 논문, pp170~171, 2000년 12월
- 4) 대한주택공사 주택연구소, “구조물거동 및 재료내구성에 관한 조사”, 1996년 11월
- 5) A. M. NEVILLE, “Properties Of Concrete, Fourth And Final Edition”, pp385~386
- 6) Mehta, “Concrete, Second Edition”
- 7) “高爐スラグ微粉末を用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮”, 콘크리트工學年次論文報告集, vol 20, no. 2, 1998
- 8) “高爐スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐海水性”, 콘크리트工學年次論文報告集, vol. 14, no. 1, 1992
- 9) “ニューラルネットワークによるコンクリートの鹽化物透過性の評価”, 콘크리트工學年次論文報告集, vol. 19, no. 1, 1997