

고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 염화물이온에 의한 철근부식 저항성 연구

김은겸^{1)*} · 김진근²⁾ · 이동혁¹⁾ · 김영웅³⁾ · 김용철³⁾

¹⁾ 서울산업대학교 토목공학과 ²⁾ KAIST 토목공학과 ³⁾ 인천국제공항공사 건설시험소

(2002년 9월 30일 원고접수, 2003년 8월 30일 심사완료)

A Study on Corrosion Resistance of the Reinforcement in Concrete Using Blast-Furnace Slag Powder

Eun-Kyum Kim^{1)*}, Jin-Keun Kim²⁾, Dong-Hyuk Lee¹⁾, Young-Ung Kim³⁾, and Yong-Chul Kim³⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

³⁾ Research & Analysis Office, Incheon International Airport Corp., Incheon, 400-340, Korea

(Received September 30, 2002, Accepted August 30, 2003)

Abstract

This paper represents the permeability of chloride ions and the corrosion performance in the concrete blended with granulate blast furnace slag exposed to chloride environment. An ordinary cement (type I) and sulfate resisting cement (type V) were used for the experiment. The two cements were combined with 0%, 25%, 40%, and 55% of the granulated blast furnace slag.

The accelerated permeability tests of chloride ions were performed in accordance with ASTM C1202, and the accelerated corrosion tests of steel were carried out by using the method of immersion/drying cycles. After water curing 28 days, 56 days and 91 days, these tests were conducted until 30 cycles. In every cycle, test specimens were wetted in 3% NaCl solution for three days and dried again in 60 °C air for four days.

As an experimental results, the diffusion coefficient of chloride ions of the ordinary cement concrete combined granulated blast furnace slag was much lower than that of non granulated blast furnace slag concrete. Moreover, the diffusion coefficient of chloride ions of sulfate resisting cement concrete was higher than that of ordinary cement concrete. On the basis of the results of accelerated corrosion tests, corrosion resistance of the concrete mixed with granulated blast furnace slag shows good to corrosion resistance, however, the concrete with sulfate resisting cement shows bad to corrosion resistance.

Keywords : sulfate resisting cement, granulated blast furnace slag, diffusion, permeability of chloride ions, corrosion

1. 서 론

최근, 콘크리트의 내구성이 사회적인 문제로 부각되면서 고품질·고내구성을 갖는 콘크리트 개발이 절실히 요구되고 있다. 콘크리트의 내구성에 영향을 주는 요인으로는 중성화, 염해, 알칼리골재 반응, 동결융해 등 여러 가지가 있다.

특히, 해양환경의 영향을 받는 지역에 건설되는 콘크리트 구조물의 경우에는 염화물이온의 침입에 의한 철근부식으로 점차 막대한 유지관리비가 요구되는 단계에 접어들고 있다. 최근에는 해양을 통한 물동량의 증가로 인하여 항만시설물을 중심으로 더 많은 콘크리트 구조물의 건

설이 요구되고 있기 때문에, 해양환경에 대한 저항성이 우수한 콘크리트 구조물의 건설은 구조물의 안전성뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 중요한 사안이 되고 있다.

해양콘크리트의 내구성을 향상시키기 위한 방안으로 시멘트 경화체 조직을 치밀하게 하여 염화물이온 등과 같은 환경인자의 침입을 차단하는데 유효하다고 알려져 있는 고로슬래그미분말이나 플라이애쉬 등과 같은 혼화재를 활용하는 방법이 제시되고 있다. 특히, 시멘트의 일부를 고로슬래그미분말로 치환하여 사용할 경우, 잠재수경성 반응에 의한 콘크리트 세공조직의 치밀화로 인해 염화물이온의 침투를 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다^{7,8,10)}.

또한, 이것은 침입염분을 시멘트 경화체에 고정시켜 세공용액 중의 수용성 염화물량을 감소시킴으로써 철근 발청을 억제하는 효과가 큰 것으로 보고되고 있다^{7,8,10)}.

* Corresponding author

Tel : 02-970-6507 Fax : 02-948-0043

E-mail : CSL206@snut.ac.kr

Table 1 Chemical compositions and physical properties of cements

Cements	Chemical compositions(%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig. loss
Type I	21.0	5.9	3.2	62.5	3.02	0.12	0.78	2.1	1.61
Type V	22.7	4.1	4.4	62.7	2.54	0.09	0.59	1.8	1.40
Cements	Physical properties								
	Density				Blaine (cm ² /g)				
Type I	3.15				3,200				
Type V	3.15				3,250				

Table 2 Chemical compositions and physical properties of ground granulated blast-furnace slag

Chemical compositions(%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₂
33.31	14.60	0.40	41.63	7.21	0.164	0.316	0.034
Chemical compositions(%)				Physical properties			
TiO ₂	S	Cl	Density	Blaine (cm ² /g)			
1.40	0.82	0.006	2.92	4,000			

Table 3 Concrete mix design

Blast furnace slag rate(%)	W/C (%)	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	Slag (kg)
0%	41.8	46	161	385	0
25%				289	96
40%				231	154
55%				173	212
Blast furnace slag rate(%)	Crushed aggregate (kg)	Sea sand (kg)	Crushed sand (kg)	Plasticizer (kg)	
0%	977	573	247	1.60 (1.70)	
25%				1.60 (1.20)	
40%				1.55 (1.70)	
55%				1.55 (1.20)	

Note) () : cement type V

한편, 해양콘크리트의 황산염에 대한 내구성을 증진시키기 위한 대책으로서 내황산염시멘트가 사용되고 있다. 그러나, 내황산염시멘트는 해수 중의 황산염과 C₃A의 반응에 의해 형성되는 에트리팅가이드의 양을 규제하기 때문에 이상 팽창에 대한 저항성은 우수하지만, 시멘트의 C₃A양의 감소로 콘크리트에 대한 염화물 침투속도가 빨라져 철근부식을 촉진시킬 수 있다는 연구결과가 제시되고 있다⁹⁾.

본 연구에서는 1종 보통포틀랜드시멘트와 5종 내황산염시멘트에 고로슬래그미분말을 치환하여 치환율에 따른 염화물이온 투과성과 철근부식 저항성에 관한 영향을 실험을 통해 평가하고자 한다. 이를 통해 각 시멘트 종류별 염화물의 침투현상을 파악하고 고로슬래그미분말이 콘크리트의 내구성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 사용재료 및 배합선정

2.1 사용재료

실험에 사용된 시멘트의 화학조성 및 물리성질은 Table 1에 나타난 바와 같다. 잔골재는 완전히 제염한 바다모래와 부순모래를 7:3으로 혼합하여 사용하였으며, 비중은 2.6이고 표준입도를 유지하였다. 굵은골재는 비중 2.63의 부순돌이며, 최대치수는 10mm 이다. 혼화제는 슬럼프를 조절하기 위해 폴리카르복산계를 주성분으로 하는 코리아 마스터 빌더스사의 RHEOBUILD SD-8N 유동화제를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 고로슬래그미분말의 물리·화학적 시험결과를 나타낸 것으로서 분말도는 4000 g/cm²이다.

2.2 배합의 선정

콘크리트의 염화물이온 침투저항성 및 철근부식 실험을 실시하기 위해 각각의 콘크리트 시험체를 제작하였으며, 이 때 사용한 배합을 Table 3에 제시하였다.

시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트 및 5종 내황산염시멘트 2종류에 대하여 동일한 양을 사용하였으며, 염해 저항성 효과의 분석을 위해 시멘트 대신에 각각 25%, 40% 및 55%의 고로슬래그미분말을 치환하여 사용하였다.

3. 염화물의 침투저항 및 실험방법

3.1 염화물이온 투과성 및 시험방법

3.1.1 염화물이온 통과 전하량

Fig. 1은 ASTM C1202-97의 규정에 의한 염화물이온 투과성 시험용 확산의 개요를 나타낸 것이다^{1,3)}. 확산 cell 1에는 0.5 mol의 NaCl 용액을 넣고 확산 cell 2에는 포화 Ca(OH)₂ 용액을 채웠으며, 60 V의 인가 전압을 가하여 염화물이온 촉진 투과시험을 수행하였다. 수집된 데이터는 적산에 의해 전하량(coulomb)을 산정하고, Table 4에 나타난 바와 같이 ASTM C 1202-97 규정에 의하여 염화물 이온 투과성을 평가하는 것으로 하였다.

3.1.2 염화물이온 확산계수 산정방법

염화물이온의 확산계수는 ASTM C 1202-97에서 규정하고 있는 Fig. 1의 확산 cell로부터 시간변화에 따른 염화물이온의 투과량을 측정하여 구하는 것으로 하였다. 즉, 염화물이온의 농도변화는 Fig. 1의 확산 cell에 30 V의 직류전압을 인가하여 (-)극으로부터 (+)극으로 이동한 염화물량을 선택성 이온전극으로 측정하여 구하였다^{5,6)}.

확산 cell 1에 있던 염화물이온은 전기적 이동을 따라 일정 시간이 경과한 후 콘크리트 내부를 투과하여 확산

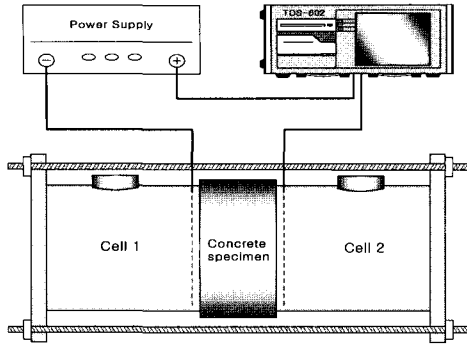


Fig. 1 Schematic view of diffusion cell and experimental set-up

Table 4 Chloride ion penetrability based on charge passed (ASTM C1202)

Charge passed(coulombs)	Chloride ion penetrability
>4000	High
2000~4000	Moderate
1000~2000	Low
100~1000	Very low
<100	Negligible

cell 2 측에 도달하게 되며, 그 이후부터 확산 cell 2의 염화물이온 농도는 거의 직선적으로 변화하게 된다. 본 연구에서는 염화물이온의 농도가 직선적으로 변화하기 시작하는 직선 부분 즉, 통용 가능한 초기 직선부분의 기울기를 식 (1) 즉, 전기적 이동량을 고려한 $D_{migration}$ 의 확산계수식에 적용하여 염화물이온의 확산계수를 산정하는 것으로 하였다.

$$D_{Cl} = \frac{RT}{Z_{Cl} F C_{Cl}} \frac{l}{\Delta E} \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} \quad (cm^2/sec) \quad (1)$$

여기서, R : 기체상수(8.31 J/K·mol)

T : 절대온도(K), Z_{Cl} : 염화물이온의 원자가

F : 패러데이 상수(9.65×10^4 C/mol)

C_{Cl} : 셀의 염화물이온 농도(mol/cm^3)

ΔE : 전위차(Volt), l : 시험체 길이(cm)

V : 확산셀 용적(cm^3), A : 시험체 면적(cm^2)

$\frac{dC}{dt}$: 염화물이온 농도변화($mol/l \cdot sec$)

3.2 부식 촉진시험 및 측정 방법

3.2.1 철근부식용 시험체의 제작

Fig. 2는 철근부식 실험용 콘크리트 시험체를 나타낸 것이다. 단면은 15cm×15cm, 길이는 50cm이다. 부식 시험용 철근으로는 D13(SD40)의 이형철근을 사용하였으

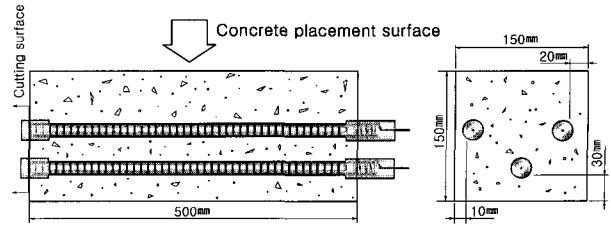


Fig. 2 Reinforcing steel layout of test specimen

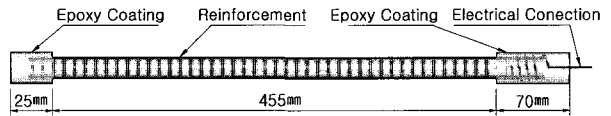


Fig. 3 Shape and dimension of reinforcing steel

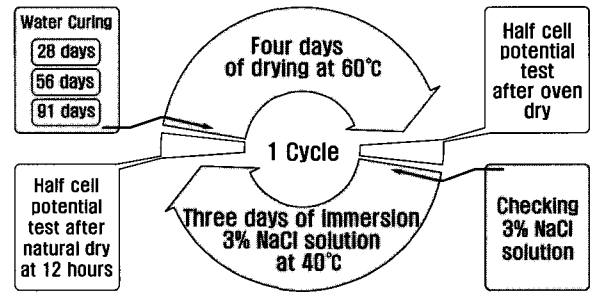


Fig. 4 Rapid corrosion test of reinforcing steel

며, 피복두께는 1cm, 2cm 및 3cm 3가지로 달리하였다. 부식용 철근은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 양쪽 끝은 에폭시로 코팅하였으며, 한쪽 끝은 통전용 구리선을 연결하여 자연전위를 측정할 수 있도록 준비하였다.

3.2.2 철근부식 시험방법

철근부식 시험은 철근부식 상태를 조기에 판단하기 위해 일반적으로 널리 사용되고 있는 촉진시험 방법을 적용하였다. Fig. 4는 촉진 시험방법을 나타낸 것으로서 3일간 40°C NaCl 3%의 염수에 침지한 후 4일간 60°C 건조로에서 건조시키는 것을 1 cycle로 정하여 30 cycle에서 시험을 종료하는 것으로 하였다.

3.2.3 자연전위 측정에 의한 철근부식 예측

콘크리트 중의 철근이 부식하기 쉬운 활성상태 또는 부식하기 어려운 부동태상태에 있는가는 철의 전위를 측정함으로써 어느 정도 예측이 가능하다. 일반적으로 철근의 전위차 측정은 ASTM C 876-99의 규정²⁾에 의해 실시하며, Fig. 5는 기준 전극으로서 포화황산동전극(CSE, Copper Sulfate Reference Electrode)을 사용한 반전지 회로도를 나타낸 것이다. 이 방법에 의하면 철근표면의 전위와 CSE 기준 전극과의 전위차를 Table 5에서 제시한

기준을 적용함으로써 콘크리트 내부에 있는 철근의 부식 상태에 관련된 개략적인 정보를 얻을 수 있다.

3.2.4 철근부식 면적 측정방법

철근부식 면적 측정법은 철근 표면의 부식 상태로부터 부식의 정도를 평가하기 위한 것으로, 발청 초기에는 철근의 표면부분에만 부식이 발생하기 때문에 이 방법의 적용이 매우 용이하다. 부식면적을 측정하기 위해서 철근부식촉진시험 30 cycle이 끝난 콘크리트 시험체로부터 추출한 철근을 격자형 투명비닐로 씌워 부식면적을 그리고, 부식 격자수와 전체 격자수의 비로부터 식 (2)에 나타난 부식 면적을 계산한다.

$$\text{부식면적율 (\%)} = \frac{n}{N} \times 100 \quad (2)$$

여기서, n : 부식된 철근면적의 교점수
 N : 전체 철근면적의 교점수

3.2.5 축진 시험체의 염화물 분석방법

염화물 분석방법은 부식축진 시험체에 대하여 염화물 이온의 침투 정도를 측정하기 위한 것이다. 본 연구에서는 부식축진시험이 완료된 콘크리트 시험체(Fig. 2 참조)의 중앙부에서 직경 5cm, 길이 7.5cm인 코어를 채취한 후, 15cm간격으로 5개의 시편을 잘라내어 ASTM C 1218-99 규정⁴⁾에 의해 가용성 염을 추출하여 분석한다.

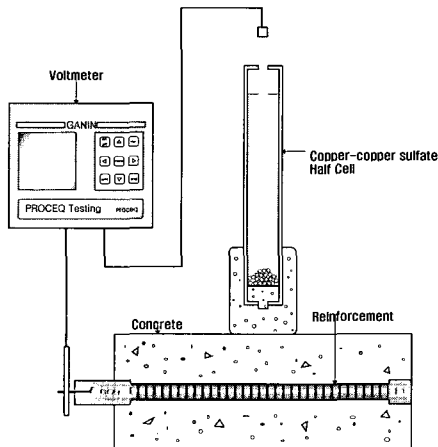


Fig. 5 Copper-copper sulfate half cell circuitry

Table 5 Estimate of corrosion on half cell potential test

Potential (mV)	Probability of the presence of active corrosion
> -200	Very high probability over 90 % of no corrosion
-200 ~ -350	Uncertainly
< -350	Very high probability over 90 % of corrosion

4. 시험결과 및 고찰

4.1 고로슬래그미분말 치환율에 따른 압축강도 특성

Fig. 6, 7은 각각 1종 및 5종시멘트와 고로슬래그미분말을 혼합한 콘크리트 공시체의 수중양생기간에 따른 압축강도 발현특성을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트의 경우 고로슬래그미분말을 치환하지 않은 콘크리트에 비하여 재령 28일 이전의 초기재령에서 압축강도 발현이 늦어지지만, 28일 이후의 장기재령에서는 동등 이상의 강도 발현을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 1종 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우 재령 14일 이후에는 고로슬래그 치환율에 관계없이 거의 동등 정도 이상의 압축강도가 발현되었으며, 재령 56일에서는 고로슬래그미분말을 40~55% 치환한

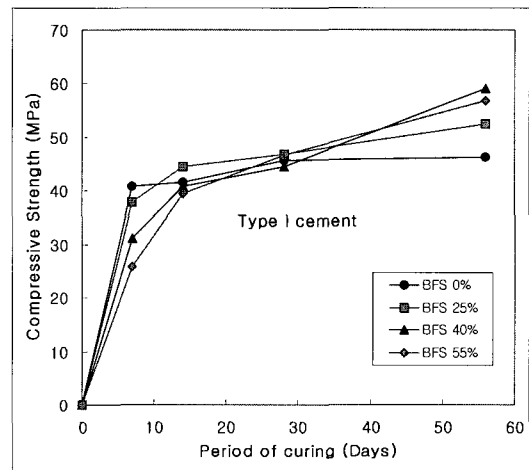


Fig. 6 Curing period versus compressive strength of specimens using type I cement with slag contents of 0, 25, 40 and 55 % respectively

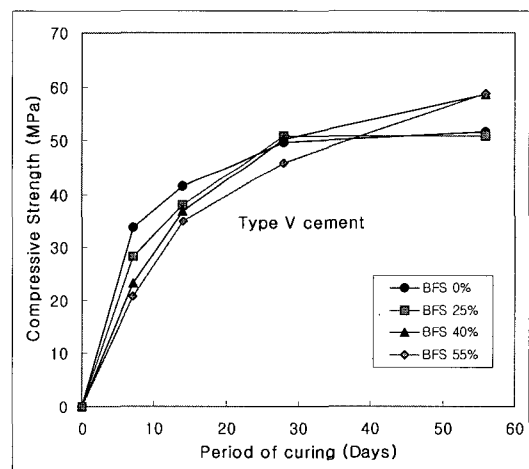


Fig. 7 Curing period versus compressive strength of specimens using cement type V with slag contents of 0, 25, 40 and 55 %

콘크리트가 무치환한 콘크리트에 비해 25~29% 정도의 강도증진을 나타내었다.

Fig. 7은 5종 시멘트에 대한 것으로서 재령 28일을 기점으로 한 압축강도는 무치환의 경우와 거의 동일한 정도의 강도발현을 나타내었으며, 재령 56일의 경우에는 고로슬래그 치환율 40~55%에서 무치환한 콘크리트에 비해 15% 정도 증진된 장기강도가 발현되고 있다.

4.2 염화물이온의 투과성 평가

Fig. 8은 재령 28일에서 1종 및 5종 시멘트를 사용한 콘크리트의 고로슬래그미분말 치환율에 따른 총 통과 전하량을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 고로슬래그미분말의 치환율이 높아질수록 시험체를 투과하는 총 통과 전하량은 작아지고 있으며, 이와 같은 현상은 1종 및 5종 시멘트를 사용한 시험체에서 서로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. Hussain⁷⁾은 보통포틀랜드시멘트를 사용한 시험체의 평균적인 공극의 크기가 고로슬래그미분말을 혼합한 것에 비해 약 1.57배 정도 크다고 하며 보고하고 있으며, Kumar⁸⁾의 실험에서는 약 2배정도 큰 값을 얻었다고 전하고 있다. 본 실험에서는 1종 시멘트에 고로슬래그미분말을 55% 치환하면 무치환의 경우에 비해 총 통과 전하량은 33% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 고로슬래그 치환에 의한 잠재수경성 반응으로 시멘트 경화체 조직이 치밀해짐으로서 공극의 크기도 작아지고 염화물이온의 통과 길이도 길어지게 되었기 때문이다. 이와 같은 결과는 Hussain과 Kumar의 실험 결과와도 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 따라서, 고로슬래그미분말에 의한 시멘트 경화체 조직의 치밀화와 그로 인한 염화물 이온 투과 저항성의 증가로 인해 염화물이온의 확산계수 또한 감소할 것으로 예상된다. 또한, 1종 시멘트를 사용한 콘크리트가 5종 시멘트를 사용한 경우 보다 총 통과 전하량이 낮게 나타나는 것은 5종 시멘트에 비해서 1종 시멘트의 C₃A 생성량이 상대적으로 더 커서 시멘트 경화체의 조직이 치밀해지고, 염화물 이온의 고정화 현상도 증진되기 때문으로 판단된다⁹⁾.

수중양생기간에 따른 총 통과 전하량 분포는 Fig. 9에 표시하였다. 여기서 염화물이온의 총 통과 전하량은 수중양생기간이 길어질수록 현저하게 감소하며, 이와 같은 현상은 고로슬래그 치환율이 높을수록 커지고 있다.

이상의 결과로부터 Table 4의 ASTM C 1202-97 규정에 의해 염화물의 투과성을 판단해 보면, 1종 시멘트나 5종 시멘트를 사용한 시험체는 고로슬래그 사용 유무에 관계없이 재령 28일에서 「moderate」 정도의 염화물이온의 투과성을 나타내고 있다. 특히, 1종 시멘트에 고로슬래그미분말을 40에서 50%정도로 다량 함유한 시험체는 재령 56일에서 「low」 정도 수준의 염화물 투과성을 보이고 있다.

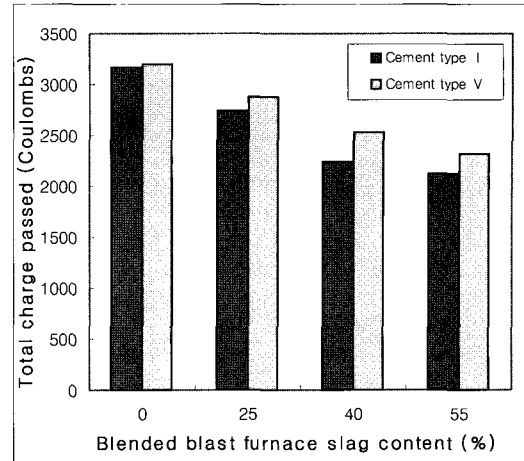


Fig. 8 Total charge passed of concrete containing blast furnace slag content powder

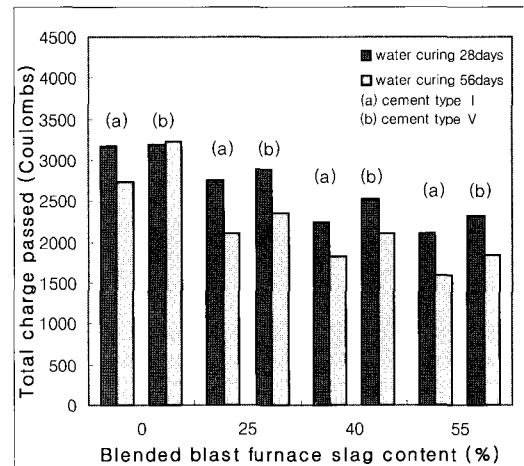


Fig. 9 Total charge passed and curing period of concrete containing blast furnace slag content powder

그러나, 5종 시멘트를 사용한 시험체는 고로슬래그를 55% 치환하여 사용한 경우에만 염소이온의 투과성이 「low」의 수준에 도달되는 것으로 관찰되었다.

4.3 염화물이온 확산계수 산정 및 평가

Fig. 10, 11은 재령 28일에서의 고로슬래그미분말 치환율에 따른 염화물 이온의 농도변화를 시간별로 나타낸 것이다. 염화물이온의 농도는 3% NaCl 용액이 Fig. 1의 cell 1에서 콘크리트 시편을 투과하는 시험초기에는 측정되지 않으며, 일정한 시간이 경과된 후 cell 2로 정상적인 이동이 이루어진 이후에 측정된다. 이와 같은 지연시간은 고로슬래그의 치환율이 높아질수록 길어지는 경향을 보이고 있다. 지연 시간이 길다는 것은 염화물이온이 콘크리트 시편을 통과하는 시간이 상대적으로 더 늘어난다는 것

을 의미하므로 이 결과는 치환율이 높을수록 콘크리트 조직이 더 치밀하다는 것을 대변하고 있다. 염화물이온은 콘크리트 시험체를 통과한 후 시간의 증가와 더불어 일정한 기울기를 유지하면서 증가하고 있으며, 이들 기울기는 5종 시멘트에 비하여 1종 시멘트를 사용한 경우가 다소 낮은 경향을 나타내었다.

Fig. 12는 사용 시멘트 및 고로슬래그의 치환율에 따른 염화물이온의 확산계수를 나타낸 것이다. 1종 시멘트를 사용한 콘크리트보다는 5종 시멘트를 사용한 경우의 확산계수가 큰 것으로 나타났으며 또한, 고로슬래그치환율의 치환이 높아질수록 거의 비례적으로 확산계수는 감소하고 있다. 특히, 1종 시멘트에 고로슬래그를 40% 이상 치환하여 사용할 경우, 염화물이온의 확산계수는 5종 시멘트를 사용한 경우에 비해 감소하는 경향이 커지고 있다. 또한, 수중양생기간을 28일에서 56일로 증가시킬 경우 염화물이온의 확산계수는 상당히 감소하는 것으로 나타나고 있어 수중양생 기간과 내염 저항성의 관계는 매우 밀접한 것으로 판단된다.

시멘트 내에 C_3A 함량에 따른 콘크리트 내부 염화물의 상태를 평가한 Rasheeduzzafar의 연구에 의하면 C_3A 의 양이 많은 시멘트를 사용한 콘크리트 시험체일수록 공극 내부의 가용성 염화물량은 줄어드는 반면에 시멘트 성분과 반응하여 생성되는 염화물의 구속량은 늘어나는 것으로 보고하고 있다⁹⁾. 이와 같은 보고는 외부로부터 콘크리트 내부로 유입되는 염화물량은 시멘트 내에 C_3A 함량이 증가, 즉 구속량이 증가함에 따라 줄어든다는 것을 의미한다. 본 실험의 결과에서도 1종 시멘트를 사용한 콘크리트는 5종 시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 염화물이온의 확산계수가 작게 나타났는데 이는 5종 시멘트의 C_3A 양이 1종 시멘트의 것보다 작기 때문인 것으로 판단된다. 특히 고로슬래그를 다량 치환하여 사용할 경우 잠재수경성 반응에 의한 시멘트 경화체 조직의 치밀화 진행으로 염화물이온에 대한 확산계수의 감소를 가져와 해양환경의 영향을 받는 콘크리트 구조물의 내구성 증진에 효과가 클 것으로 예상된다.

4.4 철근부식 촉진 시험결과 및 분석

4.4.1 염화물이온 분포

Fig. 13은 철근부식 촉진 시험 30 cycle을 완료한 후 콘크리트 시험체 깊이별 가용성 염화물함유량($Cl^-_{(aq)}$)을 나타낸 것이다. 가용성염화물은 고로슬래그를 사용하지 않은 시험체 모두에서 상당히 큰 값을 나타내었으나, 고로슬래그를 사용할 경우 특히 1종 시멘트를 사용한 시험체에서의 감소 경향은 현저하다.

즉, 고로슬래그를 사용하지 않은 경우, 가용성 염화물은 콘크리트 표면부에서 0.30 ~ 0.35 % 정도를 나타낸 반면,

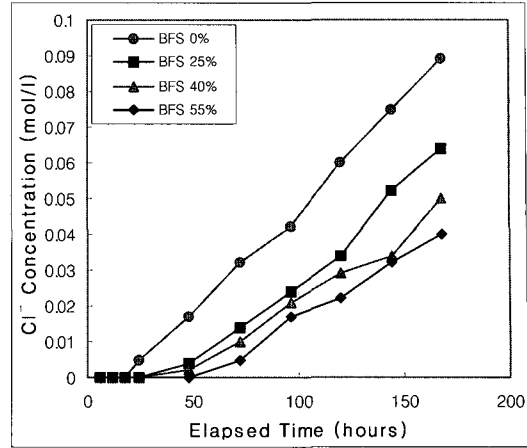


Fig. 10 Influence of chloride ion penetration in concrete containing blast furnace slag powder (type I cement)

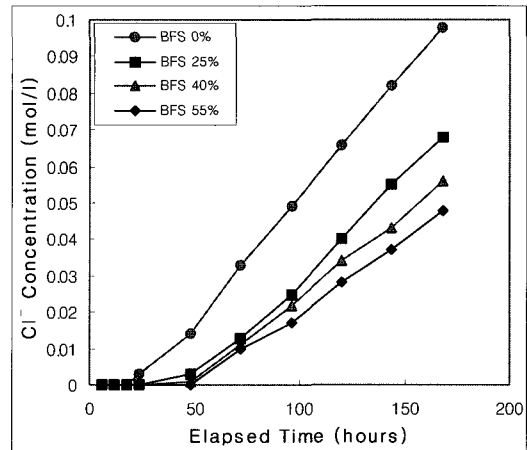


Fig. 11 Influence of chloride ion penetration in concrete containing blast furnace slag powder (type V cement)

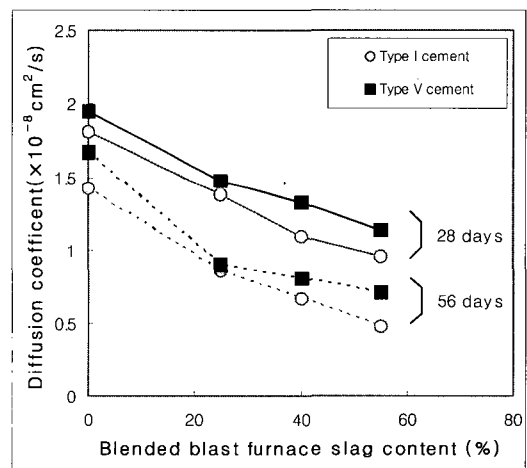


Fig. 12 Diffusion coefficient of chloride ion in concrete containing blast-furnace slag powder

고로슬래그를 40% 치환한 경우 1종 시멘트를 사용한 시험체에서는 0.15%, 5종 시멘트를 사용한 경우에는 0.2% 정도 존재하는 것으로 나타났다. 이와 같이 가용성염화물의 콘크리트 내부에 대한 침투량은 고로슬래그미분말을 사용할 경우 상당히 줄어들게 되며, 그 치환율이 커질수록 더욱 줄어드는 것으로 분석되었다. 이 사실은 확산계수 시험결과와도 서로 상응하는 것으로 생각된다.

4.4.2 자연전위에 의한 부식 평가

보통콘크리트와 혼합콘크리트와의 철근부식 저항성을 비교 평가한 Al-Amoudi의 보고에 따르면 고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트 시험체 내의 철근이 보통시멘트를 사용한 것 보다 자연전위가 높게 나타나고 있으며, 이는 철근의 부식 가능성이 적은 것이라고 한다. 이와 같이 철근의 부식 메카니즘에 있어 부식량이 증가함에 따라 자연전위에 감소하는 현상은 철근이 부식함에 따라 철 이온의 함량이 줄어들기 때문인 것으로 밝히고 있다¹⁰⁾.

Fig. 14는 본 연구에서 수행한 시멘트 종류 및 고로슬래그미분말 치환율에 따른 철근의 자연전위를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 부식촉진 cycle 수가 증가할수록 자연전위는 작아지며, 또한 고로슬래그미분말을 다량 첨가하면 철근의 자연전위는 증가하고 있음을 알 수 있다. ASTM C 876 규정에 의거하여 90% 이상의 철근부식 확률(-350mV 이하)을 살펴보면, 철근의 덮개가 1cm이고 고로슬래그 무치환인 경우 1종과 5종 시멘트 모두 10 cycle 이전에 나타나고 있다. 반면, 고로슬래그 55%를 치환한 경우에는 20 cycle 이후에 90% 이상의 철근부식 확률을 보이고 있다. 또한, 부식 촉진 20 cycle 부근을 기준으로 볼 때 철근의 자연전위는 고로슬래그 무치환의 경우 -400 mV 이하로 감소하는데 대해 고로슬래그를 55% 정도 치환하면 자연전위는 -300 mV 정도가 된다.

시멘트 종류별 자연전위를 비교해 보면, 철근피복 3cm 인 경우 철근의 자연전위는 현저한 차이가 없는 것으로 관측되었지만, 철근피복 1cm의 실험 결과에서는 5종 시멘트를 사용한 경우 철근의 자연전위가 다소 감소하는 경향을 나타내어 상대적으로 철근 발청 가능성이 높은 것으로 나타났다.

4.4.3 고로슬래그의 철근부식 억제효과

Fig. 15, 16은 철근부식 촉진 실험 30 cycle이 완료된 후 콘크리트 시험체로부터 추출한 철근의 부식 면적률을 나타낸 것이다. 여기서 고로슬래그미분말의 사용 유무 및 수중양생기간, 철근 피복두께의 정도에 따라 철근의 발청 비율은 상당한 차이를 나타내고 있다. 먼저 고로슬래그미분말의 치환율에 따른 부식률을 살펴보면, 고로슬래그를 55% 정도 다량 사용할 경우, 철근 발청은 무치환의 경우에 비해 3배 이상 억제되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

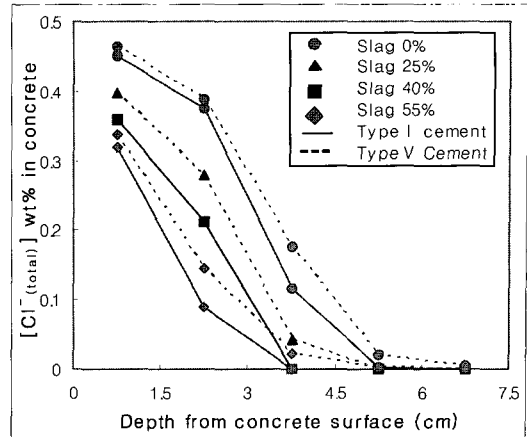


Fig. 13 Penetrations of water-soluble chloride in concrete containing blast furnace slag powder

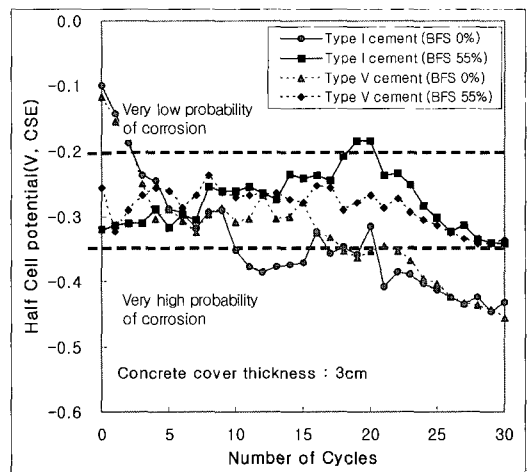
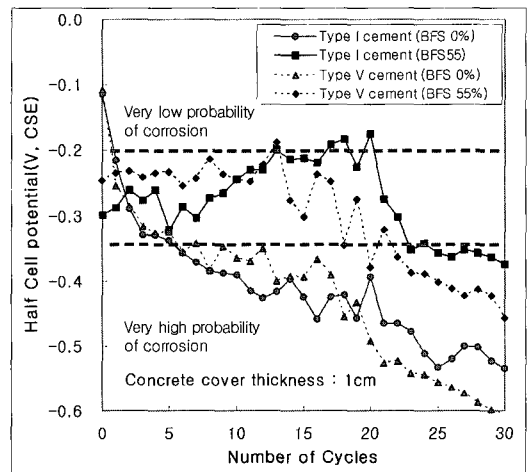


Fig. 14 Half cell potential of reinforcing steel in concrete containing blast furnace slag

5종 시멘트를 사용할 경우 철근부식 면적률은 1종 시멘트를 사용한 경우에 비해 크며, 특히 수중양생을 장기간 실시한 시험체에서 이러한 현상이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있는 것으로 측정되었다.

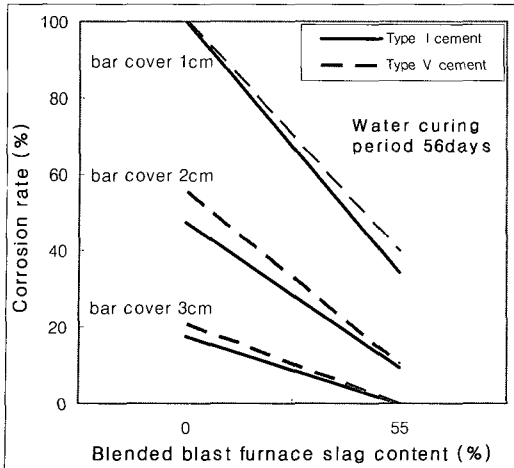


Fig. 15 Corrosion rate of reinforcing steel in concrete containing blast furnace slag

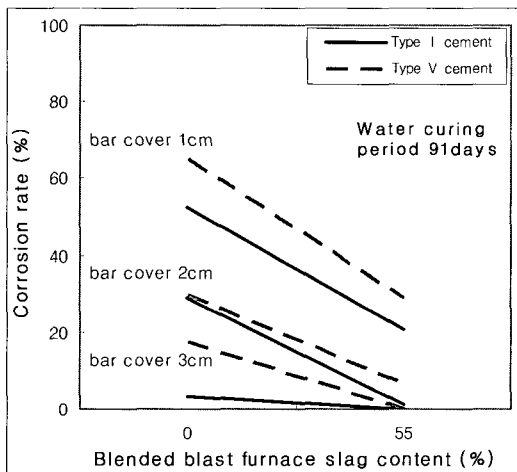


Fig. 16 Corrosion rate of reinforcing steel in concrete containing blast furnace slag

한편, 1종 시멘트에 고로슬래그를 55% 치환한 경우 철근 피복두께 3cm에서 철근 발청은 나타나지 않았으며, 피복두께 2cm의 경우라도 약간 정도의 발청만이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 해안 구조물의 철근 피복두께를 산정하는데 필요한 기초적 자료로 제시될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 17, 18은 철근의 발청 상태를 나타내고 있는 것으로 고로슬래그를 55% 치환한 경우가 무치환의 경우보다 철근부식 상태가 더 적은 것으로 측정되었다. 또한, 5종시멘트를 사용한 시험체가 1종시멘트를 사용한 시험체에 비해 부식 면적이 더 많은 것으로 관측되었다. 이와 같은 결과를 통해서 볼 때, 철근부식 저항성을 높이기 위해서는 고로슬래그미분말을 시멘트 대신에 다량 사용하는 것이 좋으며, 5종 시멘트는 1종 시멘트에 비해 염화물이온에 의한 철근부식 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서, 해양환경의 영향을 직접적으로 받는 콘크리트 구조물의 건

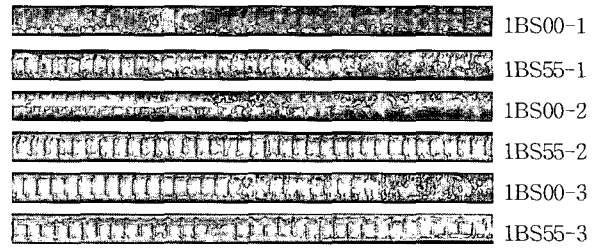


Fig. 17 Corroded reinforcing steel in area

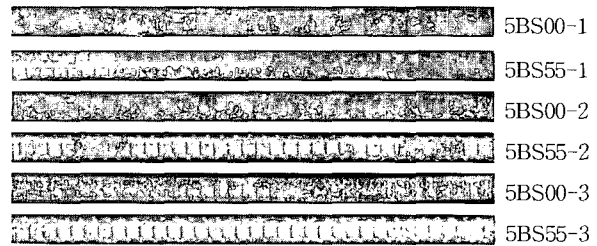


Fig. 18 Corroded reinforcing steel in area

설시 고로슬래그미분말을 다량 첨가하도록 배합을 정하고 양생기간을 길게 하는 등의 세심한 주의를 기울일 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 해양환경에 직접 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 내염 저항성을 증진시키기 위한 방안으로 염화물 이온의 차단효과가 큰 것으로 알려진 고로슬래그미분말의 치환율에 따른 염분 투과성과 철근부식 저항성을 평가하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 염화물이온 투과실험 및 철근부식 촉진 실험을 실시하였으며, 이들 실험으로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 염화물이온의 총 통과 전하량은 5종 시멘트를 사용한 경우에 비하여 1종 시멘트를 사용한 경우 감소하였으며, 고로슬래그를 다량 첨가할 경우 총 통과 전하량은 현저하게 감소하였다.
- 2) ASTM C 1202 규정에 의한 염화물이온 투과성은 「moderate」 정도를 나타내고 있으며, 특히 1종 시멘트에 고로슬래그를 다량 첨가할 경우 「low」 수준의 투과성 억제 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 3) 염화물이온의 확산계수는 고로슬래그미분말을 다량으로 치환할 경우 시멘트의 종류에 관계없이 무치환의 경우에 비해 2배 이상 감소하였으며, 5종 시멘트를 사용한 경우 확산계수는 커지는 경향을 나타내었다.
- 4) 특히, 고로슬래그를 사용한 경우 수중양생기간을 길게 하면 잠재수경성 효과에 의해 콘크리트 조직이 치밀해짐으로서 염화물이온의 확산계수는 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

- 5) 철근의 자연전위는 고로슬래그미분말의 치환율이 높아 질수록 전반적으로 커지는 경향을 보이고 있어, 철근의 부식 저항성이 증가되는 것으로 평가되었다.
- 6) 촉진시험 완료 후 철근부식 상태를 조사한 결과, 5종 시멘트를 사용한 시험체에서 철근의 부식면적이 증가하였으며, 다량의 고로슬래그미분말을 사용할 경우 철근부식 면적은 현저하게 감소하여 부식 저항성 증진에 효과가 큰 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. AASHTO T259, "Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration," Standard Specification for Transport Materials and Methods of Sampling and Testing, American Association of State Highway Transportation Officers, USA, 1980, pp.896~897.
2. ASTM C876, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete," Annual Book of ASTM Standards, USA, 1999, pp.1~6.
3. ASTM C1202, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," Annual Book of ASTM Standards, USA, 1997, pp. pp.1~6.
4. ASTM C1218/1218M, "Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete," Annual Book of ASTM Standards, USA, 1999, pp.1~3.

5. Dhir, P.K., Jones, M.R., and Ahmed, H.E.H., "Rapid Estimation of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol.42, No.152, 1990, pp.177~185.
6. McGrath, P.F., Hooton, R.D., "Influence of Voltage on Chloride Diffusion Coefficients from Chloride Migration Tests," *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.8, 1996, pp.1239~1244.
7. Hussain, S. E., "In Mechanisms of High Durability Performance Plane and Blended Cements," Ph.D. Dissertation, Department Civil Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 1991, pp.221~228.
8. Page, C.L. and Havdahl, J., "Electrochemical Monitoring of Corrosion of Steel in Microsilica Cement Pastes," *Material and Structure*, RILEM, Vol.18, No.103, Jan.-Feb. 1985, pp.41~48.
9. Rasheeduzzafar, S. Ehtesham Hussain, and S. S. Al-Saadoun, "Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete," *ACI Materials Journal*, V.89, No.1, Jan.-Feb. 1992, pp.3~12.
10. Omar Saeed Baghabra Al-Amoudi, Rasheeduzzafar, Mohammed Maslehuddin, and Abdulaziz Ibrahim Al-Mana, "Prediction of Long-Term Corrosion Resistance of Plain and Blended Cement Concretes," *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.6, Nov.- Dec. 1993, pp.564~570.
11. Gjrv, O.E. and Vennesland, Ø., "Diffusion of Sea Salts into Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.9, 1979, pp.229~238.

요 약

본 논문은 고로슬래그미분말을 혼화한 콘크리트의 염화물 침투 및 철근 발청 성능을 평가한 것이다. 실험에는 1종 보통포틀랜드시멘트와 5종 내황산염시멘트를 사용하였으며, 고로슬래그는 이들 시멘트 대신에 각각 25%, 40% 및 56%를 치환하였다. 촉진 염화물 침투 시험결과에 대한 평가는 ASTM C 1202에 규정에 따랐으며, 철근 발청은 건습반복에 의한 촉진 시험에 의해 수행되었다. 시험체는 콘크리트로 제작하였으며, 각각 수증양생 28일, 56일 및 91일간 실시하였다. 모든 콘크리트 시험체는 3일간 염수 침지한 후 4일간 건조로에서 건조시키는 것을 1 cycle로 정하여 30 cycle에서 시험을 종료하는 것으로 하였다. 염수 침지 조건은 수온 40 °C, NaCl 3%로 하였으며, 시험체의 건조는 건조로를 사용하여 60 °C에서 건조시키는 것으로 하였다.

시험결과, 고로슬래그미분말을 혼화한 1종 시멘트를 사용한 콘크리트 시험체의 염소이온 확산계수는 무치환의 경우에 비해 상당히 감소하였으며, 5종 시멘트를 사용한 경우에 있어서는 1종 시멘트를 사용한 시험체에 비해 염소이온의 확산계수는 증가하는 것으로 나타났다. 촉진시험에 의한 철근 발청은 고로슬래그미분말의 사용에 의해 상당한 저항성을 갖고 있으며, 5종 시멘트를 사용한 경우에는 철근 발청이 증가하는 현상을 나타내었다.

핵심용어 : 내황산염시멘트, 고로슬래그미분말, 확산, 염화물이온의 투과성, 철근부식