

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트 내의 철근부식에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Reinforcement Corrosion in Concrete Using Granulated Blast Furnace Slag

이동혁* 김은겸** 김영웅*** 김영철****
Lee, Dong Hyouk Kim, Eun Kyum Kim, Young Ung Kim, Young Chul

ABSTRACT

This paper was performed to verify the effect that granulated blast furnace slag gets in reinforcement corrosion resistance about chloride ion that invade from outside.

An experiment accelerated for the reinforcement corrosion through repeat of brine digestion and dry. Reinforcement corrosion investigated half cell potential method of measurement by ASTM C876 and corrosion area ratio.

If granulated blast furnace slag metathesis ratio is high generally that looked the corrosion of reinforcement decreasing as a result that evaluate reinforcement corrosion by ASTM C876 canon in this research.

It showed high resistance about reinforcement corrosion that use normal portland cement and increase the metathesis rate of granulated blast furnace slag, as a result that evaluate metathesis rate effect of granulated blast furnace slag according to cement kind.

when the test piece split destroying, area rate of reinforcement corrosion showed about result of half cell potential measurement.

1. 서론

최근 해사 사용의 증가와 해양 구조물 건설의 증가로 인해 철근콘크리트 구조물의 부식문제가 사회적으로 중요한 사안으로 대두되고 있다. 이러한 부식에 영향을 미치는 인자에는 여러 가지가 있지만 특히, 염화물 이온으로 인해 발생하는 부식문제가 심각한 실정이다. 해양환경하에 위치한 구조물의 경우, 철저한 시공관리로서 혼입염분을 방지하더라도 외부로부터 침입되는 염분에 의해 철근이 부식함으로써 구조물의 내구성이 저하하게 된다. 따라서 침입염분을 억제하여 철근의 부식저항성을 높이고 더 나아가서 구조물의 내구성을 증진시키는 방안이 필요하다.

* 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 소장

**** 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 대리

콘크리트의 내구성은 실리카 폼, 플라이 애쉬, 고로슬래그 미분말 등의 혼화재를 적당량 사용함으로써 증진시킬 수 있다는 연구 결과들이 발표되고 있다.

본 연구에서는 염해 저항성에 탁월한 효과가 있고 현장 적용성이 우수한 고로슬래그 미분말을 사용하여 제작한 시험체에 대해서 외부로부터 침입하는 염화물 이온으로 인한 고로슬래그 미분말이 철근 부식 저항성에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 또한 적용성 측면에서 현장에서 사용이 용이한 고로슬래그 미분말을 사용하여 콘크리트 내의 철근 부식저항성을 평가한 자료로서 기존에 건설된 해양 구조물의 내구성 평가와 앞으로 건설될 예정인 해양 구조물의 내염 증진 대책에 대한 기초적 자료를 확보하고자 행한 것이다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

시험체 제작에는 1종 및 5종 시멘트에 고로슬래그 미분말을 시멘트 중량비로 0%, 25%, 40%, 55% 치환하여 결합재로서 사용하였다. 각각의 물리적 화학적 구성 성분은 표 1에 나타내었다.

표 1 사용시멘트의 화학성분 및 물리적 성질

항목 구분	화학성분(%)									물리적 성질	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.loss	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
1종시멘트	21.0	5.9	3.2	62.5	3.02	0.12	0.78	2.1	1.61	3.15	3,200
5종시멘트	22.7	4.1	4.4	62.7	2.54	0.09	0.59	1.8	1.40	3.15	3,250

2.1.2 골재

굵은 골재는 부순돌을 사용하였으며 잔골재로는 바다모래와 부순모래를 2.3:1비율로 섞어서 사용하였다. 각각의 물리적 성질은 표 2에 나타내었다.

표 2 골재의 물리적 성질

항목 구분	최대치수 (mm)	표건비중	흡수량 (%)	조립률	단위중량 (kg/m ³)	마모율 (%)
굵은골재	10	2.63	0.5	6.66	1617	28
잔골재	바다모래	-	2.60	0.8	2.85	1775
	부순모래	-	2.61	0.8	2.78	1693

2.1.3 철근

직경 13mm인 이형철근의 양쪽 끝을 에폭시 코팅하였으며, 한쪽 끝은 통전용 구리 선을 연결하였다. 시험체 제작에 사용된 철근의 형상 및 치수는 그림 1과 같다.

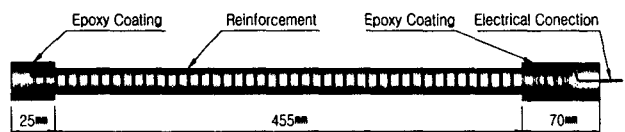


그림 1 철근의 형상 및 치수

2.2 콘크리트의 배합

콘크리트의 배합은 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 콘크리트 내의 철근 부식저항성을 알아보기

위하여 시멘트 대신에 고로슬래그 미분말을 25%, 40%, 55%로 각각 치환하였다. 또한 해양환경하에 위치한 구조물임을 감안하여 시멘트를 1종과 5종 두 종류로 사용하였다. 이때 굵은 골재의 최대치수는 시험체의 최소 피복두께를 고려하여 10mm로 정하였다. 시험체 제작에 사용된 배합표는 표 3에 나타내었다.

표 3 콘크리트의 배합

Type	W/C (%)	S/A (%)	C (kg)	G (kg)	바다모래 (kg)	부순모래 (kg)	Slag (kg)	유동화제 (kg)	Slump (cm)	치환율 (%)	Remark
1종	41.8	46	385	977	573	247	0	1.17	15±1	0	1BS00
			231				154	1.17		40	1BS40
			173				212	1.2		55	1BS55
5종	41.8	46	385	977	573	247	0	1.6	15±1	0	5BS00
			289				96	1.6		25	5BS25
			173				212	1.55		55	5BS55

2.3 시험체 제작

그림 2와 같이 150×150×550mm의 콘크리트 휨강도 측정용 몰드에 콘크리트를 타설하여 시험체를 제작하였다. 시험체에 피복두께 10mm, 20mm, 30mm로 철근을 배치하였으며, 각 시험변수별로 총 36개의 시험체를 제작하였다.

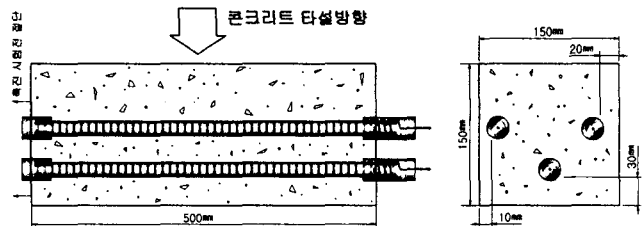


그림 2 시험체의 형상 및 치수

2.4 시험방법

2.4.1 철근부식 촉진시험방법

철근부식을 단기간내에 촉진시키기 위해 건습반복, 염수침지 등의 복합적인 방법을 취하였다. 철근부식 촉진 시험체는 해수와 유사한 조건인 NaCl 3%의 염수에 침지하였으며, 실내 온도 40℃의 건조로에서 4일간 건조시킨 후, 60℃의 인공염수 속에서 3일간 침지시켜 이것을 1 cycle로 정하였다. 그림 3은 철근부식 촉진시험 방법의 모식도를 나타낸 것이다.

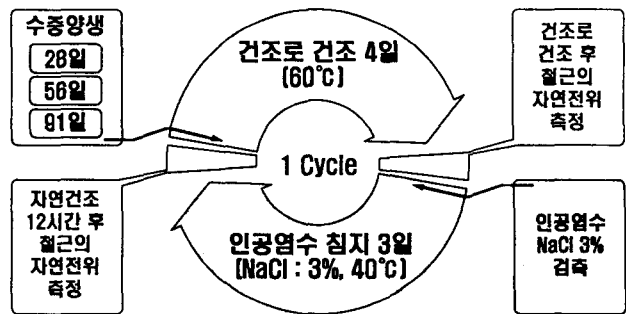


그림 3 철근부식 촉진시험방법

2.4.2 철근의 자연전위

철근의 발청상태는 ASTM C876-91규정에 의한 자연전위 측정방법에 의해 포화황산동 전극(CSE)을 참조전극으로 사용하여 측정하였다. 측정된 자연전위로부터 철근의 부식상태를 간접적으로 파악할 수 있다. 본 실험에서는 CSE에 대한 자연전위를 7일 간격으로 시험체의 상부표면에서 6점을 산정하여 측정하였다. 그림 4에 철근의 자연전위 측정 모식도를 나타내었다. 콘크리트내의 철근의 자연전위는 공극내의 함수상태에 따라 유동적으로 변화하므로 자연건조 상태에 노출되는 실제의 콘크리트 구조물

의 함수 상태에 가깝게 하기 위하여 염수 침지 후 12시간 실내에서 자연건조시킨 시험체의 경우와 건조로 건조 후의 경우에 대하여 자연전위를 측정하였다.

2.4.3 철근의 부식면적을

할열 파괴한 시험체로부터 철근을 추출하여 철근의 부식발생 부위를 얇은 비닐로 감싸고 부식면적을 유성펜으로 스케치하였다. 얇은 비닐을 철근으로부터 분리시킨 후 넓게 펴고 격자모양의 트레이싱지를 덮어 부식면적을 정밀하게 스케치하였다. 철근의 부식면적율은 식 1로부터 산정하였다.

$$\text{부식면적율(\%)} = \frac{n}{N} \times 100 \quad (1)$$

여기서, n은 부식면적의 교점수이며, N은 철근 면적의 전체교점수이다.

3. 시험결과 분석

시멘트 종류에 따른 염해 저항성을 알아보기 위해 철근의 자연전위를 12시간동안 자연 건조시킨 경우와 건조로 건조시킨 경우에 대하여 측정하여 각각 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 같이 12시간동안 자연 건조시킨 시험체의 경우 1종 시멘트를 사용한 콘크리트는 5종 시멘트를 사용한 경우에 비해 자연전위 절대치가 작게 나타나고 있다. 또한, 그림 6에서와 같이 노건조 후에 측정된 자연전위의 경우에 있어서도 12시간동안 자연 건조시킨 경우와 거의 동일한 경향을 나타내었다. 그리고 대체로 사이클이 증가함에 따라 자연전위 절대치가 다소 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기서 12시간 자연 건조시킨 시험체에 대하여 철근의

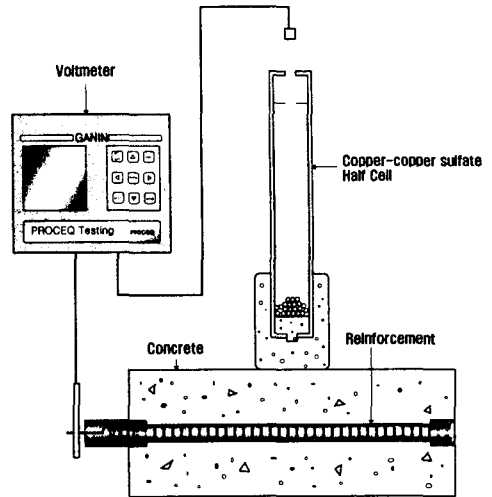


그림 4 철근의 자연전위 측정 모식도

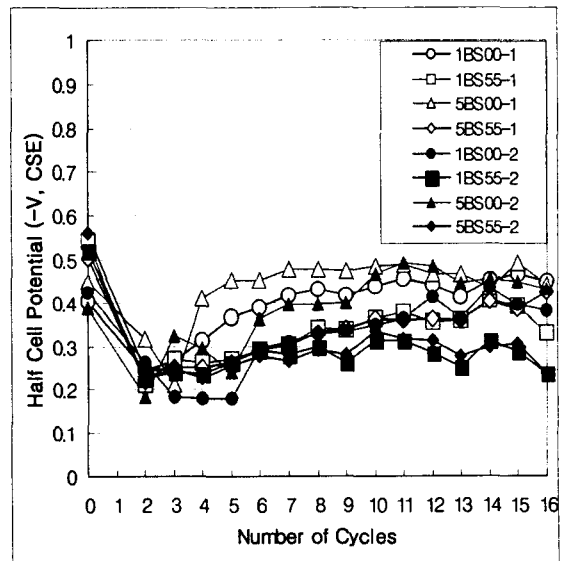


그림 5 시멘트 종류에 따른 자연전위(자연건조 12시간)

자연전위를 측정할 경우 사이클 초기에 자연전위 절대치가 높게 나타나고 있는데 이것은 초기에 생성된 철근의 부동태 피막이 불안정하여 나타난 결과로 사료된다. 따라서, 자연전위 측정결과를 고려할 때 5종시멘트에 비해 1종시멘트를 사용한 경우가 철근부식 저항성이 다소 큰 것으로 나타났다.

고로슬래그 미분말 치환율에 따른 염해 저항 특성을 파악하기 위하여 1종 및 5종 시멘트를 사용하고 고로슬래그 미분말을 각각 25%, 40% 55%치환한 시험체에 대하여 철근의 자연전위를 측정하여 그림 7 및 8에 나타내었다. 고로슬래그 미분말 치환율과 자연전위와의 관계에 있어서는 철근 피복 두께 1cm 및 2cm의 경우 촉진 사이클수가 증가할수록 자연전위 절대치가 증가하는 경향을 보이고 있으나, 피복두께 3cm의 경우에는 촉진 16사이클까지 거의 일정한 양상을 보이고 있다. 특히 고로슬래그 미분말을 전혀 치환하지 않은 경우 촉진 사이클수의 증가에 따라 자연 전위 절대치는 100~200mV 정도 크

게 나타나고 있다. 일반적으로 ASTM C876의 규준(부록)을 적용할 때 자연전위에 따른 철근부식관계를 살펴보면 1종 시멘트를 사용하고 고로슬래그 미분말을 치환하지 않은 시험체는 피복두께 1cm, 2cm, 3cm 모두의 경우에서 자연전위 값이 $-350 \sim -500\text{mV}$ 사이에 있어 철근 부식 위험성이 큰 것으로 나타났다. 한편 고로슬래그 미분말을 치환함에 따라 대체로 철근의 자연전위 절대치가 낮아짐으로서 염해에 대한 저항성이 커지는 것으로 나타났다.

5종 시멘트를 사용한 경우에 철근의 자연전위 절대치는 1종 시멘트를 사용한 경우에 비해 약간 커지는 경향을 나타내고 있지만 그 차는 매우 미미한 것으로 생각된다. 고로슬래그 미분말을 치환하지 않은 경우에 있어서 피복두께 1cm와 2cm에 대한 철근의 자연전위 절대치는 대략 $400 \sim 500\text{mV}$ 부근에 근접하고 있어 철근부식 가능성이 가장 높게 나타났다. 하지만 고로슬래그 미분말 치환율이 증가할수록 자연전위 절대치는 점차 감소하는 경향을 나타내어 1종 시멘트를 사용한 경우와는 달리 55% 치환율에서 가장 큰 철근부식 저항효과가 있는 것으로 나타났다.

철근부식 시험체 가운데 철근부식 가능성이 가장 높다고 판단되는 시험체에 대하여 할렬파괴에 의한 철근 부식상태 확인 및 부식면적율을 측정하였다. 표 4는 철근의 부식면적율을 정리하여 나타낸 것이다. 시멘트 종류에 따른 철근의 부식 저항성을 비교해 보면 고로슬래그 미분말을 치환하지 않은 경우에 있어서 1종 시멘트를 사용한 경우가 5종 시멘트를 사용한 경우 보다 철근의 부식면적율이 현격히 작게 나타남으로서 1종 시멘트를 사용하는 것이 5종 시멘트를 사용하는 것보다 큰 염해 저항성을 갖는 것으로 나타났다. 또한 피복두께 1cm에서 2cm로 증가함에 따른 부식면적 감소율을 비교해본 결과 1종 시멘트의 경우 77%로 나타나는 반면 5종 시멘트를 사용하는 경우에는 61%로 나타나고 있다. 피복두께 3cm의 경우에는 모든 시험체에서 철근의 부식이 발견되지 않았다. 이로써 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 경우에 있어서 피복두께를 증가시키는 것에 따른 철근 부식 저항성은 1종 시멘트를 사용하는 것이 더욱 효과적인 것으로 판단된다. 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 염해 저항성을 비교해 보면 1종 시멘트를 사용하는 경우에 있어서 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 철근의 부식면적율은 치환율이 증가함에 따라 감소하고 있다. 따라서 고로슬래그 미분말을 치환

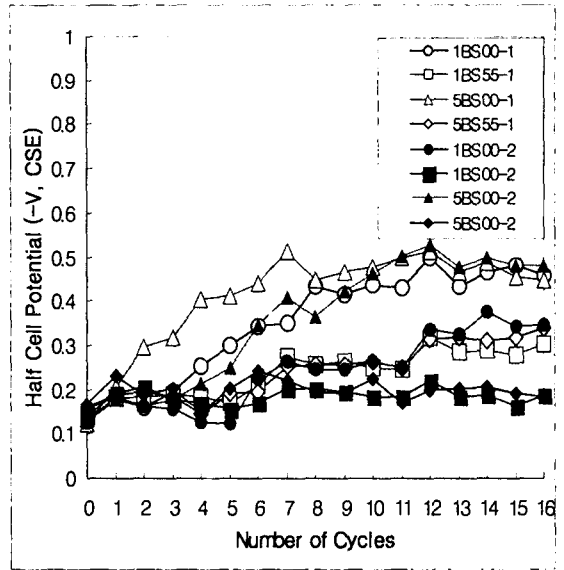


그림 6 시멘트 종류에 따른 자연전위(건조로 건조후)

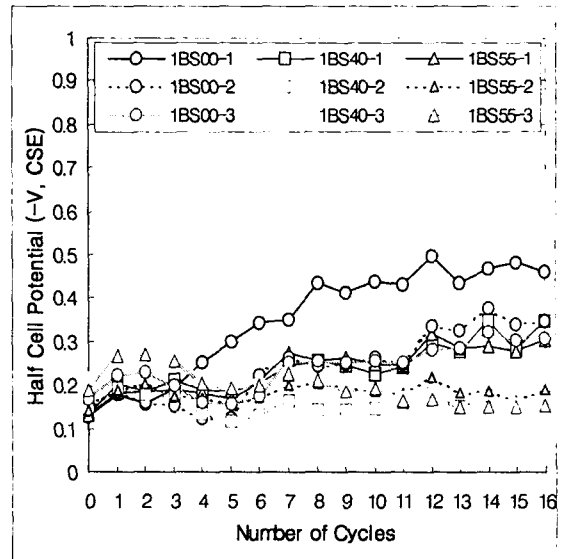


그림 7 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 자연전위 관계

함에 따라 철근 부식 저항성을 높일 수 있음을 알 수 있다. 또한 고로슬래그 미분말 치환율 40%와 55%의 경우에는 철근의 발청 면적에는 거의 차이가 없게 나타났다. 이는 철근의 자연전위 측정 결과와도 부합된다. 한편, 5종 시멘트를 사용한 경우에 있어서 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 철근 부식 면적율은 1종 시멘트의 경우와는 달리 치환율이 증가함에 따라 큰 폭으로 감소하고 있다. 고로슬래그 미분말을 치환하지 않은 경우의 시험체에 있어서 철근 부식면적율은 전체의 시험체 중에서 가장 크게 나타나고 있는 것에 비해 55%의 치환율에서 가장 작은 부식면적율을 나타내고 있다. 따라서 5종 시멘트를 사용하는 경우에는 고로슬래그 미분말 치환율을 55%로 하는 것이 가장 큰 철근부식 저항성 효과가 있는 것으로 판단된다.

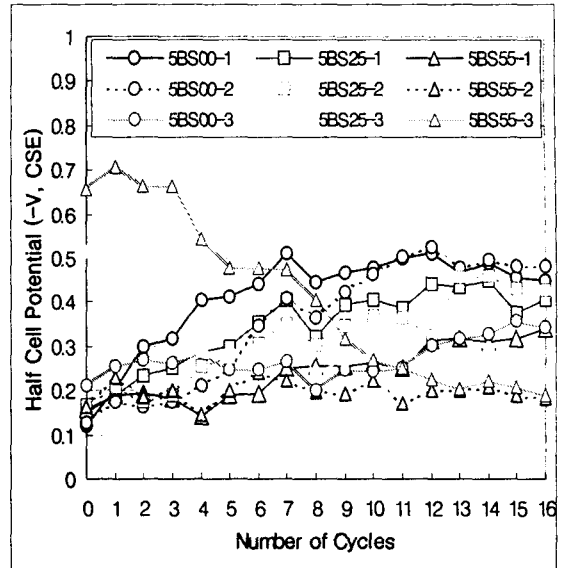


그림 8 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 자연전위 관계

표 4 철근의 부식면적율

(unit: %)

		시험체명					
		1BS00	1BS40	1BS55	5BS00	5BS25	5BS55
피복두께 (cm)	1	18.03	9.77	9.21	42.31	29.24	4.77
	2	4.17	-	-	16.36	7.31	-
	3	-	-	-	-	-	-

4. 결론

고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트의 철근부식 촉진 시험체로부터 촉진 16cycle까지의 자연전위 측정결과 및 할렐파피에 의한 직접적인 철근부식 면적율을 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 경우 시멘트 종류에 따른 염해 저항성을 자연전위 측정을 통해 평가한 결과 1종 시멘트를 사용한 시험체가 5종 시멘트를 사용한 경우에 비해 자연전위 절대치가 작게 나타냄으로서 1종 시멘트를 사용하는 것이 염해 저항성에 우수한 것으로 나타났다.
- (2) 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 염해 저항 특성을 평가한 결과 철근의 자연전위측정과 부식면적율 측정결과 모두에서 고로슬래그 미분말 치환율이 높아질수록 염해 저항성이 커지는 것으로 나타났다. 특히 5종 시멘트를 사용하는 경우 고로슬래그 미분말 치환율이 증가함에 따라 높은 염해 저항성을 나타내어 치환율 55%에서 가장 높은 염해 저항성을 나타내었다.
- (3) 피복 두께에 따른 염해 저항 특성을 평가한 결과 1종 시멘트를 사용하고 고로슬래그를 치환하지 않은 경우 피복두께를 1cm에서 2cm로 증가시킬 때 철근부식 감소율은 77%를 나타냈으며 5종 시멘트를 사용한 경우에는 철근부식 감소율이 61%로 나타났다. 또한 5종 시멘트에 고로슬래그를 25%치환한 경우 피복두께 증가에 따른 철근 부식감소율은 75%로 나타났다. 따라서 피복두께가 증가함에 따라 염해 저항성이 크게 증가되는 것으로 관찰되었다.