

매시브한 해양구조물 적용을 위한 고로슬래그 혼입 콘크리트의 방청성능 평가에 관한 연구

A Study on the Estimation of Corrosion Protection Performance of Concrete Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Massive Coastal Structures

○ 유재강* 김동석** 박상준** 원철*** 이상수***
Yoo, Jae-Kang Kim, Dong-Suk Park, Sang-Joon Won, Chul Lee, Sang-Soo

Abstract

This paper investigates the corrosion inhibition and the reduction of hydration heat properties of Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS) added concrete. Since the massive civil structure is vulnerable to the thermal crack by hydration, adiabatic temperature rising tests were performed for water-binder ratios from 43.2% to 47.3%, while replacing 15% to 50% of cement with GGBFS of equal weight. Then, the corrosion protection performance was evaluated using cylindrical specimens embedded with steel reinforcement according to the combination of 3 W/B ratios and 2 levels of chloride ion quantity. The corrosion area of the embedded steel bars was determined using the high pressure steam curing method specified in KS F 2561.

The test results showed that the replacement of GGBFS was effective in reducing the hydration heat. The corrosion area of the embedded steel bars decreased as the replacement of GGBFS increased. However, the corrosion area of the steel bar was proportional to the autoclave cycle and the chloride ion quantity. Among the tested specimens, compressive strength, reduction of hydration heat, and corrosion inhibition performance were excellent when 50% of cement was replaced with GGBFS of equal weight.

키워드 : 고로슬래그, 수화열, 단열온도상승시험, 염소이온확산계수, 방청성능

Keywords : ground granulated blast-furnace slag, hydration heat, adiabatic temperature rising test, chloride ion diffusivity, corrosion protection performance

1. 서론

해안지역 구조물의 성능저하가 사회적인 문제로 제기되고 있으며, 이러한 구조물의 성능저하속도, 내구수명 평가, 보수공법 개발에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다.1,2,3)

해양환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 내구성을 확보하고, 성능저하 속도를 저감시키기 위한 방안으로는 그림 1에 나타낸 바와 같이 다양한 공법이 개발, 실용화되고 있으며, 이 중에서 피복콘크리트를 밀실하게 시공함으로써 내구성능을 향상시키기 위하여 각국에서는 시공되는 콘크리트의 물결합재비 및 강도에 관한 규준을 제안하고 있다.

ACI 318 규준4)에서는 황산염 및 염해환경하에 노출된 구조물에 대하여 물시멘트비 45% 이내, 혹은 설계기준강도 350kgf/cm² 이상의 품질 확보에 대하여 규정하고 있으며, 국내 콘크리트 표준시방서5)에도 내구성을 고려하여 포졸란계 재료를 사용한 혼합시멘트의 적용을 권장하고 있다. 혼화재를 사용하지 않은 경우에 비하여 혼합시멘트계를 사용하게 되면 단위시멘트량의 감소에 따른 수화열 저감효과와 장기간도 증

진 등의 특성이 있어 해양구조물과 같은 매시브한 부재의 적용시 이점이 크다. 그러나, 혼화재료의 재료적 특성 및 품질 변동 등을 고려하여 실험적인 검토단계를 거친 후에 현장적용을 할 것을 지적하고 있다.

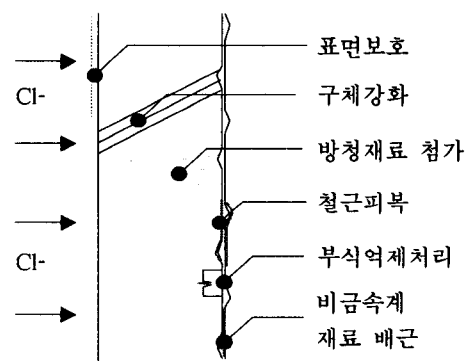


그림 1. 염해대책 방안에 관한 모식도

그러나, 현장에서는 적정수준의 혼화재 치환율 및 적용성능에 대한 검토보다는 고가의 방청제를 사용함으로써 철근부식에 대한 대책으로 적용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 해양구조물에 적용 실적이 있는 기본배합을

* (주)대우건설 기술연구소, 연구원
** (주)대우건설 기술연구소, 주임연구원
*** (주)대우건설 기술연구소, 선임연구원

바탕으로 하여 물결합재비 2수준, 고로슬래그 치환율 2수준에 따른 총 5배합을 대상으로 압축강도 및 염소이온 확산성을 평가하였으며, 소요의 성능을 만족하는 3배합에 대하여 부재 특성을 고려한 수화열 저감특성을 검토하였다. 또한, 매입철근의 방청성능평가로서 KS F 2561에 준한 촉진 철근부식시험으로서 물결합재비, 고로슬래그 치환율, 오토클레이브 사이클 반복 횟수, 첨가염화물량, 방청제 혼입량 등에 따른 방청성능을 비교검토함으로써, 고로슬래그 치환 콘크리트의 매시브한 해양구조물 적용성을 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같다. W/B 47.3%, 고로슬래그 치환율 15%의 배합을 기준배합으로 설정하였고, 예비실험을 통하여 W/B 45.6%, 43.2%와 고로슬래그 치환율 30%, 50%의 총 5수준에 대하여 압축강도, 염소이온 확산계수를 평가하였다. 수화열 발현성상을 평가하기 위하여 단일온도 상승시험을 W/B 45.6%, 고로슬래그 치환율 30%와 W/B 43.2%, 고로슬래그 치환율 50%, 그리고 기준배합인 W/B 47.3%, 고로슬래그 치환율 15%에 대하여 평가하였다. 또한, 동일배합을 사용하여 KS F 2561 철근콘크리트 방청제(부속서 2, 콘크리트 중의 철근의 부식 촉진 시험 방법)6)에 의거하여 철근매입 시험체를 제작하였으며, 염화물 첨가량(0.6%, 1.2%), 오토클레이브 반복횟수(1회, 2회)에 따른 부식면적율 평가와 방청제 혼입량(무혼입, 3kg/m³)에 따른 부식면적율 저감효과를 오토클레이브 2회반복 조건하에서 평가하였다. 표 2는 촉진 철근부식시험에 관한 실험계획을 나타낸 것이다.

한편, 본 실험에 사용한 콘크리트 배합은 표 3에 나타난 바와 같다. 설계기준강도 280kgf/cm²에 KS F 40097)의 변동계수 10%에 대한 증가계수 1.2를 곱하였으며, 타설시점에서 외기는 조건을 고려하여 온도보정치8)로 30kgf/cm²를 더한 배합강도 366kgf/cm²의 배합으로 설정하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 표 4와 같다.

2.3 측정항목 및 방법

1) 염소이온 확산시험

염소이온 확산시험체는 28일간 수중양생을 실시한 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 시험체의 일정부위를 커팅하여 사용하였다. 염소이온 확산시험은 Tang & Nilsson이 제안한 전기촉진 시험방법9)을 참조하여 0.3M의 NaOH 수용액을 양극으로, NaCl 수용액을 음극으로 하여 30V의 전압을 가하였을 때 0.2 Ω 의 저항에 걸리는 전류와 확산셀 내부의 온도를 8시간동안 측정하였다.(그림 2) 염소이온의 침투깊이는 0.1N의 AgNO₃를 분무하여 변색되는 깊이를 측정하였으며, 측정된 결과를 바탕으로 식 1에 의해 염소이온 확산계수를 산출하였다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \dots \dots \dots \text{식 1}$$

여기서, $\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - \frac{2c_d}{c_0})$

- D : 확산계수 (m²/sec)
- z : 이온의 원자가 (염소이온의 경우 z=1)
- F : 패러데이 상수 (96,481.04 J/Vmol)
- U : 양극과 음극 사이의 전압차 (V)
- R : 기체상수 (8.314 J/Kmol)
- T : 용액의 온도 (K)
- L : 시편의 두께 (m)
- x_d : 염소이온의 침투깊이 (m)
- t : 실험 지속시간
- erf : error function
- c_d : 질산에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도
- c_0 : 음극쪽 셀의 염소이온 농도

표 1. 실험계획

W/B (%)	고로슬래그 치환율 (%)	측정항목			
		압축강도	염소이온 확산성능	단일온도 상승시험	촉진철근 부식시험
47.3	15	○	○	○	○
	30	○	○	○	○
45.6	50	○	○	-	-
	30	○	○	-	-
43.2	50	○	○	○	○

표 2. 촉진 철근부식시험 계획

W/B (%)	고로슬래그 치환율 (%)	첨가 염화물량 (%)	오토클레이브 반복횟수	방청제 첨가량
47.3	15	0.6	1	-
45.6	30		2	무혼입
43.2	50	1.2		

표 3. 콘크리트 배합

W/B (%)	고로슬래그 치환율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)				
		물	시멘트	고로슬래그	잔골재	굵은골재
47.3	15	175	315	55	821	926
	30	164	252	108	844	939
45.6	50	164	180	180	842	934
	30	164	266	114	818	945
	50	164	190	190	816	942

표 4. 사용재료의 물리적 성질

시멘트	비중 : 3.14, 종류 : 보통포틀랜드 시멘트
고로슬래그	비중 : 2.91, 분말도 : 4,751cm ² /g 알칼리도 : 1.70
잔골재	비중 : 2.56, 조립율 : 2.52 종류 : 혼합사 (세척사 : 강사 = 8 : 2)
굵은골재	비중 : 2.59, 최대치수 : 25mm
고성능감수제	비중 : 1.1, 종류 : 나프탈렌계
방청제	비중 : 1.33, 종류 : 아질산칼슘계

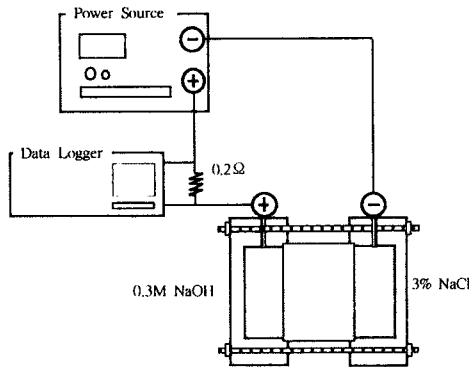
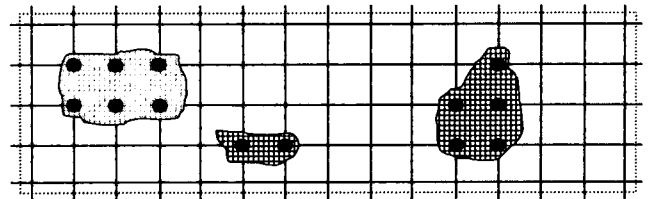


그림 2. 염소이온 확산시험기 모식도



$$\text{부식면적율}(\%) = \frac{\text{부식면적의점점수}(n)}{\text{측정면적의점점수}(N)} \times 100$$

그림 4. 철근 부식면적을 산출방법

2) 단열온도 상승시험 (KS F 5121)10)

단열온도 상승시험장치는 그림 3에 나타낸 바와 같다. 본 연구에 사용한 단열온도 상승시험식은 혼합재 및 고성능감수제 첨가에 따른 효과를 고려하여 식 2를 사용하여 온도이력을 평가하였다.

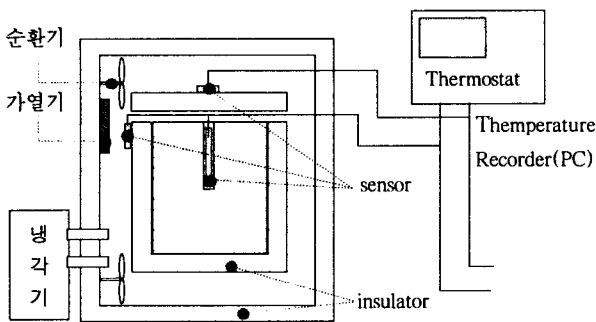


그림 3. 단열온도 상승시험기 모식도

$$Q(t) = K(1 - e^{-at}) \text{----- 식 2}$$

여기서 $Q(t)$: 재령 t일에서의 단열온도 상승량
 K : 최종 단열온도 상승량
 ab : 온도상승속도

3) 촉진철근 부식시험 (KS F 2561)6)

시험체 제작은 사진 1에 나타낸 바와 같이 2개의 원형철근을 피복두께 20mm, 45mm의 2수준으로 하여 제작하였으며, 재령 3일까지 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 양생한 후, 공시체 양면을 캐핑하고 재령 7일까지 봉함양생을 실시하였다. 이후 사진 2에 나타낸 오토클레이브 양생장치를 사용하여 촉진철근 부식시험을 진행하였으며, 철근 부식면적을 산출방법은 그림 4에 나타낸 바와 같다.



사진 1. 철근매입 시험체

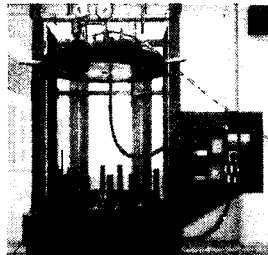


사진 2. 오토클레이브 장치

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

그림 5는 압축강도 측정결과를 나타낸 것으로 재령 28일에 W/B 45.6%, 고로슬래그 50% 치환배합을 제외한 모든배합에서 배합강도 366kgf/cm²를 상회하였다. 기준배합인 W/B 47.3%, 고로슬래그 15% 치환배합은 고로슬래그 치환율이 다른배합에 비하여 낮기 때문에 재령에 따른 강도증진 경향이 초기재령에서 다소 높고 이후재령은 완만하게 나타나고 있어 강도증진효과를 고려하면 고로슬래그 30% 이상 치환배합이 유리할 것으로 사료된다.

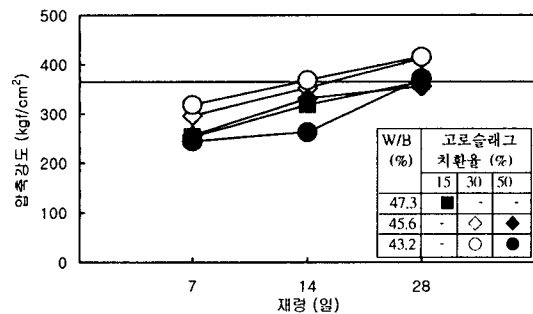


그림 5. 재령에 따른 압축강도 발현성상

3.2 염소이온 확산성능

그림 6은 재령 28일에서의 염소이온 확산계수와 총 통과전하량 측정결과를 나타낸 것이다. W/B 가 감소함에 따라, 고로슬래그 치환율이 증가함에 따라 염소이온 확산계수 및 총 통과전하량은 감소하는 경향을 보이고 있다.

기준배합인 W/B 47.3%, 고로슬래그 15% 치환배합의 경우 총 통과전하량 2400C 이상, 확산계수 $2.77 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났으나, 이외의 배합은 500 ~ 1000C, $0.9 \sim 1.3 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 낮게 측정되어 염소이온 침투저항성이 상대적으로 양호한 것으로 나타났다.

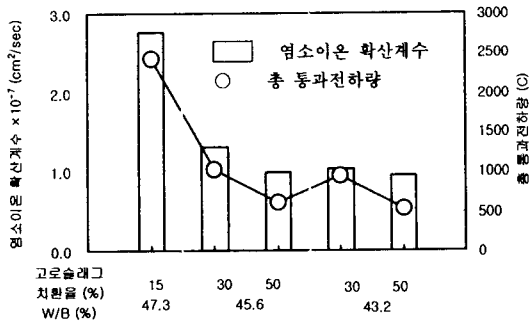


그림 6. 염소이온 환산계수 및 총 통과전하량 측정결과

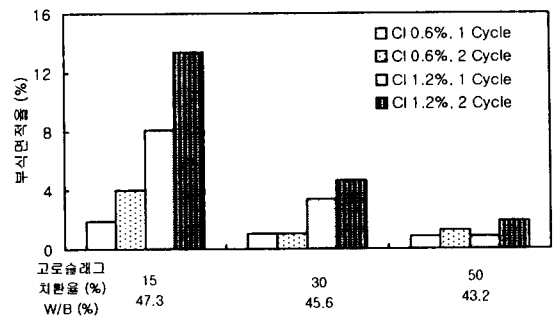


그림 8. 첨가염화물량 및 오토클레이브 사이클에 따른 부식면적을 측정결과

3.3 단열온도 상승시험

단열온도 상승시험은 W/B 45.6%(고로슬래그 치환율 30%), W/B 43.2%(고로슬래그 치환율 50%) 배합과 기준배합인 W/B 47.3%, 고로슬래그 15% 치환배합에 대하여 실시하였다. 본 배합은 압축강도가 배합강도를 만족하고 수화열에 영향을 미치는 단위시멘트량이 작은 배합을 대상으로 선정하였다. 그림 7은 측정결과를 나타낸 것으로 W/B 47.3% 배합과 W/B 45.6% 배합의 온도상승속도는 다소 차이를 보이고 있으나 최고온도는 유사한 수준으로 나타났으며, W/B 43.2%, 고로슬래그 50% 치환배합은 온도상승속도 및 최고온도가 낮게 측정되었다.

콘크리트의 온도균열은 온도상승속도와 최고온도에 영향을 많이 받기 때문에 온도상승속도 및 최고온도가 낮은 W/B 43.2%, 고로슬래그 50% 치환배합이 다른배합에 비하여 온도균열 저감에 유리할 것으로 사료된다.

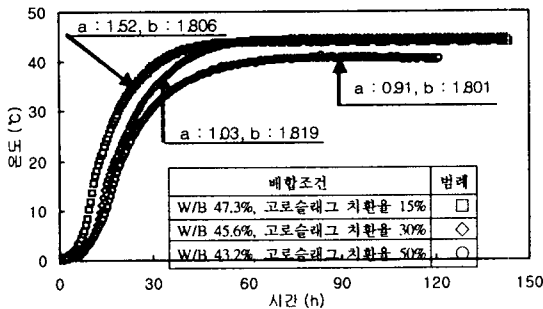


그림 7. 단열온도 상승시험 결과

3.4 철근부식 촉진시험

1) 첨가염화물량과 오토클레이브 사이클에 따른 영향

그림 8은 고로슬래그 치환율별 첨가염화물량 및 오토클레이브 사이클에 따른 철근 부식면적을 측정결과를 나타낸 것이다. 모든 배합에서 염화물 첨가량과 오토클레이브 반복횟수가 증가할수록 내부 매입철근의 부식면적율은 증가하는 경향을 보이고 있다. W/B 47.3%, 고로슬래그 15% 치환배합에서 첨가염화물량 1.2%, 오토클레이브 2회인 경우 다른 배합에 비하여 3~7배정도 부식면적이 증가되는 것으로 나타나 촉진시험을 통한 상대평가 결과 W/B 43.2%, 고로슬래그 50% 치환배합의 방청성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

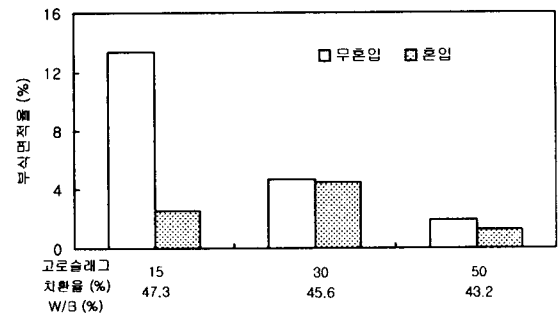


그림 9. 방청제 첨가에 따른 부식면적을 감소효과

2) 방청제 사용에 따른 영향

방청제 혼입 유무에 따른 각 배합의 방청성능 평가결과를 그림 9에 나타낸다. 방청제를 사용함에 따라 부식면적율은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 방청제의 효과는 W/B 47.3%에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. 한편, W/B가 낮고 고로슬래그 치환율이 높은 배합에서는 방청제 사용에 따른 효과는 미미한 것으로 나타났으며, 특히 W/B 43.2%, 고로슬래그 50% 치환배합의 경우 방청제를 혼입하지 않은 경우의 부식면적율은 1.9%로 기준배합에 방청제를 사용한 경우보다 더욱 낮은 방청성능을 갖는 것으로 평가되었다.

4. 결론

매시브한 해양구조물에 적용하기 위한 고로슬래그 혼입 콘크리트의 수화열 저감 및 방청성 평가 결과는 다음과 같다.

- 1) 수화열에 의한 균열발생에 대한 검토로 단열온도 상승시험을 실시한 결과 W/B가 낮은 배합에서 단위시멘트량이 적고 고로슬래그 치환율을 증대시킨 W/B 43.2%, 고로슬래그 50% 치환배합의 최대온도 및 온도상승속도는 다른배합에 비하여 작게 나타나고 있어 수화열 저감에 효과적인 것으로 나타났다.
- 2) 철근촉진 부식시험결과 첨가염화물량 및 오토클레이브 사이클수의 증가에 대하여 W/B의 저감과 고로슬래그 치환율의 증대는 매입철근의 부식면적 저감에 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 방청제의 사용성은 높은 W/B에서 효과적이며,

낮은 W/B와 고로슬래그 치환율이 높은 배합에서는 낮게 평가되었다.

- 3) 본 연구의 범위에서 배합강도 수준을 만족하며, 염소이온 침투저항성이 다소 낮고, 수화열에 의한 균열억제에 유리하며, 매입철근의 부식억제에 효과적인 배합으로 W/B 43.2%, 고로슬래그 50% 치환배합이 가장 우수한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 日本建築學會, 「鐵筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修技術(案)同解説」, 社團法人 日本建築學會, 1997
2. 김무한 외, 「물시멘트비 및 도장재 종류에 따른 콘크리트의 염소이온 확산특성에 관한 실험적 연구」, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol. 14, No. 2, pp.679~684, 2002. 10
3. 김영진 외, 「전기촉진시험에 의한 광물질 혼화제를 혼입한 콘크리트의 염소이온 확산성능 평가에 관한 연구」, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol. 14, No. 2, pp.299~304, 2002. 10
4. ACI Building Code 318, 「Requirements for Structural Concrete and Commentary, Part 3 - Construction Requirements, Durability Requirements」, American Concrete Institute, pp.35~37, 1995
5. 한국콘크리트학회, 「콘크리트 표준시방서, 15장 해양콘크리트」, 건설교통부, pp.187~192, 1999
6. KS F 2561, 「철근 콘크리트용 방청제, 부속서 2 - 콘크리트 중의 철근의 부식 촉진 시험 방법」, 한국표준협회, 1998
7. KS F 4009, 「레디믹스트 콘크리트」, 한국표준협회, 1999
8. 한천구, 「콘크리트의 특성과 배합설계」, 기문당, pp.128~144, 1998
9. L.Tang and L-O.Nilsson, 「Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field」, ACI Materials Journal, Jan-Feb, pp.49~53, 1992
10. KS F 5121, 「포틀랜드 시멘트의 수화열 시험 방법」, 한국표준협회, 1997