

# 해양환경에 폭로한 콘크리트의 내염특성에 대한 실험적 연구 (폭로기간 : 5년)

## An Experimental Study on the Salt Resistance Properties with Concrete Materials under Marine Environment (Exposure period : 5 years)

김용철\*                      석준열\*\*                      신도철\*\*\*  
Kim, Yong Chul              Suk, Jun Yeoll              Shin, Do-Chul

### ABSTRACT

The IIA structures exposed to marine environment is subject to many different types of potential attack. The physical attack due to drying and wetting would increase the internal stress of concrete. The chemical attack resulting from the diffusion of ions( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^+$ ) from seawater through the pores in concrete. Therefore the sea water resistance of concrete must be considered when it is used for structure in the ocean. The objective of this study is to evaluate chloride diffusion and corrosion characteristics of concrete when using the various concrete materials under marine environment. After 5 years of exposure, concrete incorporating 40% blast-furnace slag as replacement for type I cement with low w/c ratio of 0.42 and using the inhibitor shows excellent performance.

### 1. 서론

바다를 매립하여 건설된 인천국제공항은 콘크리트 구조물로서는 드물게 바다 한가운데 위치하고 있어 해수와 해풍, 매립층의 지하수 등에 의한 염해가 매우 클 것으로 판단된다. 이에 따라 1단계 건설공사에 사용된 콘크리트 구조물들은 염해에 의한 철근부식과 콘크리트 열화방지를 위해 다양한 내염설계가 적용된 바 있다. 본 연구에서는 1단계 내염설계조건을 근간으로 콘크리트 사용재료와 균열특성이 콘크리트 염분침투특성과 철근부식에 미치는 영향을 조사하기 위해 2000년 12월부터 인천국제공항 현장 인근의 조수간만대에서 옥외폭로 시험을 진행하고 있으며, 본 연구에서는 옥외폭로 후 60개월이 경과된 콘크리트 시험편에 대하여 지금까지 진행되어온 콘크리트의 역학적 물성변화와 염분침투량의 경시 변화 및 철근부식 등에 대한 정량적인 평가를 통해 해양 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 기초 자료로 삼고자 한다.

### 2. 실험개요 및 방법

#### 2.1 콘크리트 사용 배합조건

본 연구에 사용된 콘크리트 배합은 1단계 인천국제공항 건설사업의 내염설계 콘크리트 배합조건을 기본으로, 사용 시멘트의 종류(1종, 5종)와 혼화재료(슬래그분말), 방청제 사용량을 주요 대상으로 검토하였다. 본 연구에서 검토한 배합인자와 실험수준은 표 1과 같으며, 콘크리트 각 사용재료조건별 내염 특성 평가를 위한 기본 배합규격은 1단계 공항건설 사업에서 지하구조물에 사용된 25-280-15 내염설

\* 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 품질과장

\*\* 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 소장

\*\*\* 정회원, 한국건설품질시험원 건재연구팀장

계 배합을 대상으로 하였으며, 아울러 강도수준 (W/C비 변화)에 따른 내염특성도 같이 비교하였다.

## 2.2 시험 공시체 제작

해양의 옥외폭로대에 거치할 시험체의 제작은 3가지 형태로 제작하였다. 해양 폭로시간에 따른 염분 침투깊이는 각주형 시편을 제작하여, 염분침투가 한방향으로만 일어나도록 한면을 제외하고는 코팅처리를 하였다. 균열발생에 따른 내염성시험은 원주형 공시체 단면에 균열경을 이용하여 할렬인장으로 소요 균열폭이 되게 균열을 유발시킨 후 최초의 균열상태가 유지되도록

별도로 제작된 조임틀로 시험체를 고정시켰다. 해수 노출을 위한 균열면 일부를 제외하고는 각주형 공시체와 같이 코팅처리 후 폭로시험을 하였다. 이때 모든 시험체는 해양조류에 의한 오염과 공시체간의 충격에 따른 손상방지를 위해 부직포(토목섬유)에 넣어 거치하였다.

표 3. 장기옥외 폭로시험을 위한 실험인자 및 수준

시험인자		시험수준
콘크리트 배합조건	시멘트 종류	보통(1종) 및 내황산염(5종) 시멘트
	강도수준	210, 280, 350 kgf/cm <sup>2</sup>
	방청제 사용량	0, 2, 4, 8 kg/m <sup>3</sup>
	슬래그 첨가량	0, 25, 40, 60 %
철근 피복두께		3, 5, 8cm
균열유무		균열폭 : 0.1, 0.3 mm, 깊이 : 철근
조수간만대 폭로기간		6개월, 1, 2, 3, 5 년

## 2.3 옥외폭로 거치대

장기간에 걸친 옥외폭로시험을 위한 장소는 지속적인 건설작용이 반복되어 해수에 의한 열화가 가장 심한 부위인 인천국제공항 북측방조제 사면의 조수간만대에 위치하였다.



사진 1 옥외폭로 거치대

## 2.4 평가항목

침지재령 6, 12, 24, 36, 60 개월 경과 때 마다 시편을 수거하여 압축강도와 정탄성계수의 경시변화를 측정하였다. 콘크리트 내염성은 콘크리트 표면으로 부터의 깊이별 염화물이온 함량 분석을 통해 염분침투 특성과 확산계수를 비교하였으며, 아울러 피복깊이에 따른 콘크리트 매입 철근의 부식상태와 균열발생에 따른 철근부식 및 염화물 이온침투량 등을 같이 분석하였다. 해수 중의 염화물과 황산염 이온 및 각종 염류들의 영향에 따라 열화작용을 받는 콘크리트의 반응생성물과 경화체 미세조직 상태는 X-Ray Diffractionmeter(XRD, X'pert PRO)와 전자주사현미경(SEM, ABT-150F)으로 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 압축강도 특성

콘크리트 압축강도는 12개월까지는 점진적으로 증가되는 것으로 나타났으나, 12개월 후 부터는 염분에 의한 열화현상을 지속적으로 받아 강도증진이 종료되고 수렴되는 현상을 보여주고 있다. 시멘트 종류에 따라서는 5종 시멘트는 압축강도가 12개월 침지 후 부터 전반적으로 떨어졌다가 다시 변동없이 수렴하는 경향(60개월)을 보이고 있으며, 1종 시멘트를 사용하는 조건에서는 5종 시멘트 사용 조건과는 달리 12~24개월 사이에서 최고강도를 나타내며 그 후 부터는 증가하지 않고 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 또한 60, 36개월/12개월 압축강도비로 분석한 결과(그림 3,4) 침지재령에 따른 강도저하는 슬래그 첨가량이 증가할수록 크게 감소하는 특성을 보여주고 있다. 압축강도 측면에서 1종 시멘트와 5종 시멘트 간에는 큰 차이가 없었으나, 혼합제로 슬래그분말의 사용에 따라서는 따라 슬래그 첨가량은 25% 사용조건 보다는 40% 수준이 양호한 것으로 나타났다.

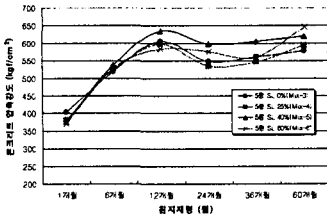


그림.1 5종시멘트+슬래그 첨가량  
에 따른 강도변화

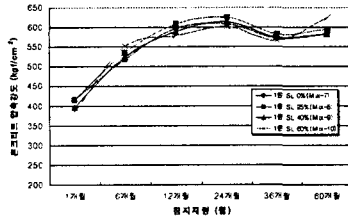


그림.2 1종시멘트+슬래그 첨가량에  
따른 강도변화

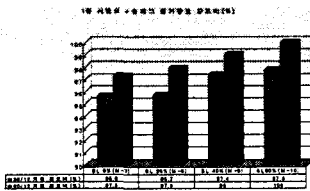


그림 3 압축강도 증진율(1종)

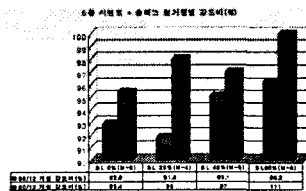


그림 4 압축강도 증진율(5종)

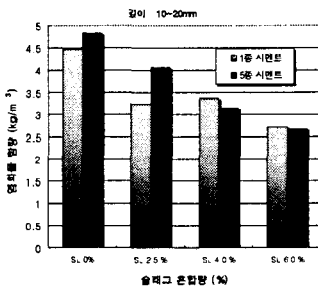


그림 5 깊이 10~20mm에서 Cl⁻ 함량

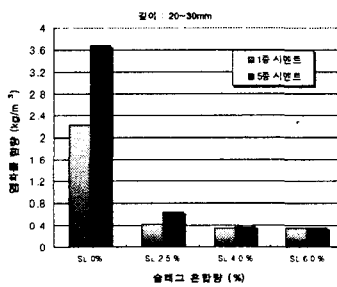


그림 6 깊이 20~30mm에서 Cl⁻ 함량

된 염화물량이 임계부식 농도를 초과한데 반해 슬래그 25% 첨가 조건에서 부터는 시멘트 Type에 상관없이 철근부식농도 이하를 모두 나타내고 있다.

### 2) 물-시멘트비(W/C)에 따른 영향

그림 7에서와 같이 W/C 비를 달리하여(55%, 41.8%, 37%) 제조된 콘크리트에 대하여 염화물 침투량을 분석한 결과 콘크리트 깊이에 따른 염화물 함량은 물-시멘트비가 높은 210 kg/cm<sup>2</sup>의 저장도 수준으로 갈수록 염분침투량이 크게 늘어나고 있다. W/C 55% 조건의 경우 표면으로 부터 40~50mm 깊이에서도 약 2.5 kg/m<sup>3</sup> 으로 부식임계 농도의 2배정도 높게 나타나는데 반해 W/C 41.8, 37%로 낮은 조건은 표면으로 부터 30mm 이상 깊이부터는 임계농도 이하로 나타나고 있다. 고강도나 낮은 W/C에서는 염분 침투저항성이 크게 향상된다는 것을 재 확인할 수 있었다.

### 3) 염화물이온 확산계수

60개월간 폭로시험 후의 콘크리트의 염화물 이온(Cl<sup>-</sup>) 확산계수는 재료사용조건에 상관없이 기본 규격인 25-280-15 규격에서 1.9~2.8x10<sup>-8</sup>cm<sup>2</sup>/sec 수준으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 Collepardi,

3.2 콘크리트 중의 염화물이온 침투량 60개월간 해양 옥외폭로대에 거치된 각주형공시체에 대하여 해수에 접하는 면으로 부터 콘크리트 내부로 10mm간격으로 콘크리트에 침투한 염화물 함량분포를 배합조건에 따라 비교하였다.

### 1) 슬래그 첨가량과 사용 시멘트종류 (1종,5종)의 영향

표층부에서는 염화물 함량이 5종 시멘트 조건인 경우 8~11 kg/m<sup>3</sup>, 1종 시멘트에서도 7~11 kg/m<sup>3</sup> 으로 높게 나타난다. 10~20mm 깊이에서는 염화물 함량이 5종 시멘트 조건인 경우 36개월 경과 때 1.5~3.5 kg/m<sup>3</sup>에서 60개월 후 2.7~4.8 kg/m<sup>3</sup> 으로, 1종 시멘트에서는 0.8~2.3 kg/m<sup>3</sup> ⇒ 2.7~4.5 kg/m<sup>3</sup> 으로 크게 증가되었다. 20~30mm 깊이에서는 1,5종 시멘트 모두 슬래그를 첨가하지 않은 조건들만 염화물 함량이 임계부식 농도를 초과하고 있다. 슬래그 첨가량에 따른 영향은 슬래그 사용량의 증가에 따라 염화물 침투량이 직선적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 깊이 20~30mm 부위에서는 슬래그 무첨가 조건의 경우 침투

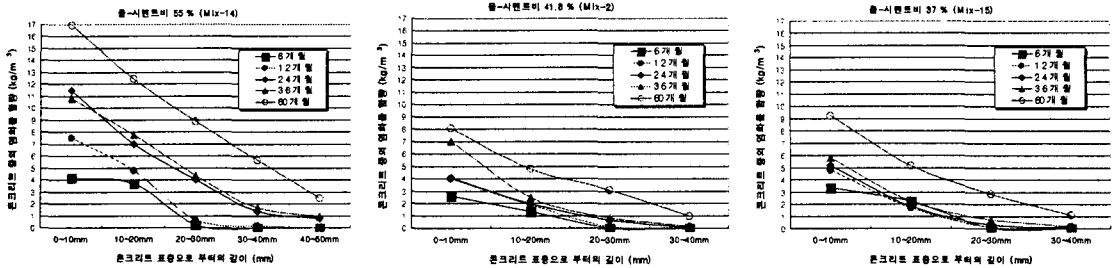


그림 7 물-시멘트비(W/C)에 따른 콘크리트 중의 염화물이온 침투량 변화

Alexander, Berke 등이 발표한 기존의 연구결과와 유사하게 나타나고 있다. 동일 배합조건에서 시멘트 단독 사용조건간에는 1종 시멘트  $2.08 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ , 5종 시멘트  $2.88 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$  수준으로 1종 시멘트가 염화물이온 확산계수가 작은 것으로 나타났다.

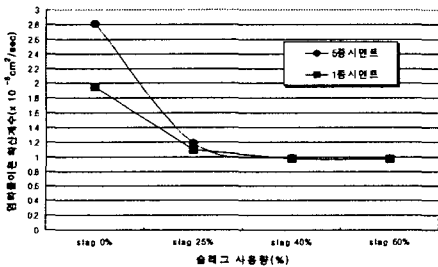


그림 8 결합재 조건별 염화물이온 확산계수

슬래그분말을 첨가함에 따라 확산계수는  $1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$  이하 수준으로 감소하여 염화물이온 침투억제에 효과가 큰 것으로 나타나고 있으며, 특히 5종 시멘트가 슬래그 첨가에 따른 확산계수 감소효과가 큰 것으로 나타나고 있다. 슬래그 사용량 40% 이상부터는 사용 시멘트 Type 이나 슬래그 함량에 따른 확산계수의 차이는 크지 않았다.

#### 4) 콘크리트 중의 철근상태 및 염화물이온 함량

표 4 발청된 철근의 부식면적 및 철근위치에서 Cl-함량

시험체 조건		염화물 함량	발청면적율
발청 배합	Mix-14 W/C:55%, 피복 5cm	2.47 kg/m <sup>3</sup>	4.4 %
	Mix-16 W/C:41.8%, 피복3cm, 일반배합 (5종 단독)	2.11 kg/m <sup>3</sup>	3.5 %
	Mix-18 W/C:41.8%, 피복3cm, 일반배합 (1종 단독)	1.28 kg/m <sup>3</sup>	1.4 %
Mix-20,22 (5종,1종)	W/C:41.8%, 피복3cm, (슬래그 25%+방청제)	0.63~0.91 kg/m <sup>3</sup>	부식 없음

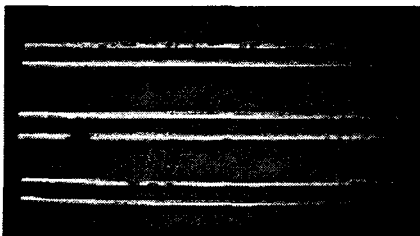


사진 2 5년 침지후의 부식철근 외관

W/C가 높거나, 피복이 작은 일반배합에서 철근발청이 나타났으며, 내염설계 배합은 건전하였다. 발청이 발생된 부위에서의 콘크리트 염화물 함량은 약 2.5~4 kg/m<sup>3</sup> 으로 모두 부식 임계농도를 2~3배 정도 초과하고 있으며, 특히 염화물 농도가 높을 수록 발청면적이 크게 나타나고 있어 염화물이온 농도가 철근부식에 직접적으로 작용하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

조수간만대에서 5년이 경과된 후 콘크리트 재료 및 배합조건에 따른 내염특성을 분석한 결과 콘크리트 내염성 향상에는 차염성이 높은 슬래그의 사용과 물-시멘트비 제한이 효과적이며, 아울러 철근 부식방지 측면에서 방청혼화제의 사용도 단기적으로 효과를 확인할 수 있었다. 현재까지 결과로 볼 때 1, 2단계 공항건설에 사용되고 있는 내염설계 콘크리트는 염분확산계수가 매우 낮아 균열이 없을 경우 철근부식이 일어나는 임계농도 도달시기가 공용년수 100년을 훨씬 넘을 것으로 도출된다. 앞으로 본 연구결과를 토대로 개항 5년차가 지난 공항구조물에 대해서 주기적인 정밀점검과 구조물의 내구성 평가를 통해 보다 내구적이면서 경제적인 공항 구조물을 위한 유지관리체제를 구축할 예정이다.