

# 해양환경에 폭로한 콘크리트의 내염특성에 대한 실험적 연구 (I)

## An Experimental Study on the Salt Resistance Properties with Concrete Materials under Marine Exposure Environment (I)

신도철\*      김영웅\*\*      김용철\*\*\*      김동철\*\*\*\*  
Do-Chul Shin      Young-Woong Kim      Yong-Chul Kim      Dong-Chul Kim

### ABSTRACT

Protection against salt attack in seawater is obtained by using a dense, quality concrete with a low water-cement ratio, and a components appropriate for producing concrete having the needed salt resistance. The objective of this study is to evaluate the feature of corrosion with using the various concrete materials under marine exposure environment. According to the test results, slag powder and anti-corrosion inhibitor showed high chloride resistance effect. Also concrete crack have an influence on corrosion of steel in spite of mixed design for salt resistance concrete. The requirement for low permeability is essential not only to delay the effect of salt attack, but also to afford adequate protection to reinforcement with admixtures.

### 1. 서론

염해환경에 있는 콘크리트의 열화특성은 초기에는 콘크리트 균열특성, 피복두께 등에 의해 영향을 받게되지만, 최종적으로는 콘크리트 경화조직의 수밀성, 공극특성과 같은 물리적인 요인과 수화조직, 중성화와 같은 화학적인 특성에 좌우된다. 지금까지 염해환경에서의 콘크리트의 부식과 열화에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어져 왔으나 실제 콘크리트의 열화를 궁극적으로 지배하는 콘크리트 자체의 물리·화학적 특성과 균열, 피복두께 등을 같이 연계하여 평가된 연구는 미흡한 실정에 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 염해환경에서 콘크리트 경화체의 역학적 특성과 내부에 침투한 염분함량의 경시변화, 철근 부식상태 등의 상관관계를 보다 정량적으로 파악하고 향후 2, 3단계 신공항 건설공사와 콘크리트내구성 향상을 위한 기초자료로 삼고자, 2000년부터 신공항 인근의 조수간만대에서 옥외폭로 시험을 진행하고 있으며, 본 연구에서는 수행내용과 그 중간결과를 보고하고자 한다.

### 2. 실험변수 및 방법

#### 2.1 실험인자 및 수준

본 연구에서는 콘크리트 내염성 평가를 위하여 1단계 신공항건설 사업의 내염 콘크리트 사용조건을 근간으로 사용 시멘트 type과 혼화재료, 방청혼화제 첨가량 등을 주요 대상으로 검토하였다. 본 연

\* 정회원, 한국건설품질시험원 특수건설팀 부장

\*\* 인천국제공항공사 건설시험소 소장

\*\*\* 인천국제공항공사 공항설계팀 과장

\*\*\*\* 인천국제공항공사 건설시험소 과장

구에서 검토한 실험인자와 검토수준은 표 1과 같다.

### 2.2 콘크리트 배합

본 연구를 위해 사용된 콘크리트 배합 조건을 표 2에 나타내었다.

콘크리트 각 사용재료조건별 내염성 평가를 위한 기본 배합규격은 1단계 신공항건설 사업에서 지하구조물에 사용된 25-280-15 내염설계 배합을 대상으로 실험을 하였다. 아울러 강도수준(물-시멘트비)에 따른 내염특성도 같이 비교하였다.

### 2.3 시험 공시체 제작

해양의 옥외폭로대에 거치할 시험체의 제작은 표 3과 같이 크게 3가지로 구분하여 제작하였다. 해양노출시간에 따른 염분 침투량의 경시변화를 평가하기 위한 시험은 28일 양생 후 각주형 공시체는 노출부 한면만을 제외하고는 전체면을 모두 “폴리머 시멘트페이스트 + 에폭시”로 이중으로 코팅하여 해수와 접촉을 차단하고, 일방향으로만 염분침투가 되게 하였다. 균열발생에 따른 열화평가 시험은 원주형 공시체 단면에 마이크로 균열경을 부착한 후 할렬인장으로 소요 균열폭이 되게 균열을 유발시킨 후 최초의 균열상태가 유지되도록 별도로 제작된 조임틀로 시험체를 고정시켰다. 해수 노출을 위한 균열면 일부를 제외하고는 각주형 공시체와 같이 전면을 코팅한 후 폭로시험을 하였다. 이때 모든 시험체는 해양환경에 원 시험체 상태로 폭로시 장시간 후에는 각종 해양조류와 갑각류들에 의해 공시체가 원형을 유지하기 어렵고 파손될 위험이 있으며, 공시체간의 접촉에 따른 코팅부의 손상우려가 있어 부직포(토목섬유)로 제작된 주머니에 넣어 밀봉한 후 옥외폭로대에 거치하였다.

### 2.3 옥외폭로 거치대

장기간에 걸친 옥외폭로시험을 위한 장소는 지속적인 건습작용이 반복되어 해수에 의한 열화가 가장 심한 부위인 인천국제공항 북측방조제 사면의 조수간만대에 위치하였다. 공시체가 놓여질 거치대는 사진 1과 같이 강재로 제작하여 중방식 도장을 한 후 방조제 사면에 콘크리트 타설과 앵커볼트를 이용하여 고정하였다. 사진 2와 3은 공시체가 거치대에 놓여진 후 밀물에 따라 해수에 잠기는 상태를 나타낸 것이다.

### 2.4 평가항목

#### 2.4.1 콘크리트 정탄성계수

표 1 장기옥외 폭로시험을 위한 실험인자 및 수준

시험인자		시험수준
콘크리트 배합조건	시멘트 종류	보통(1종) 및 내황산염(5종) 시멘트
	강도수준	210, 280, 350 kg/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
염분환경 방치 기간		6개월, 1, 2, 3, 5 년

표 3 옥외 폭로시험공시체의 제작 모식도

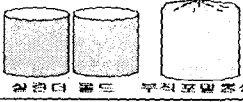


시험구분	공시체	n	시험체 형태
압축강도, 탄성계수	실린더 몰드 (Φ100mm)	225	 실린더 몰드, 부직포밀봉상태
염분침투량 및 철근부식	원주형 몰드 (100x100x400 mm)	139	 해수 노출면, 원형철근(Φ13mm), 내염코팅
균열부 염분침투 및 철근부식	실린더 몰드 (Φ100mm)	20	 고정 조임틀, 원형철근, 노출면, 내염코팅

표 2 실험인자별 콘크리트 사용배합조건

기 호	시험 구분	배합 조건	콘크리트 배합구분	콘크리트 배합조건													
				W/C (%)	S/A (%)	단위 재료 사용량 (kg/m <sup>3</sup> )											
						길함제			물	잔골재		혼화제					
1종 C/M	5종 C/M	slag	모래	부순 모래	굵은 골재	AE 감수제	유동 화제	방청 제									
Mix-1	5종단독	25-280-15	CM5+SL0+AC0	41.8	45.0	-	383	-	-	160	564	243	996	0.56	2.49	-	
Mix-2	1종단독	25-280-15	CM1+SL0+AC0	41.8	45.0	383	-	-	160	564	243	996	0.77	2.49	-		
Mix-3	시멘트 종류 및 슬래그 첨가량에 따른 영향	25-280-15	CM5+SL0+AC4	41.8	45.0	-	383	-	156	562	242	996	0.50	2.49	3.9		
Mix-4			CM5+SL25+AC4	41.8	45.0	-	287	96	156	562	242	992	0.50	2.49	3.9		
Mix-5			CM5+SL40+AC4	41.8	45.0	-	230	153	156	560	241	990	0.80	2.49	3.9		
Mix-6			CM5+SL60+AC4	41.8	45.0	-	153	230	156	559	240	987	0.85	2.49	3.9		
Mix-7			CM1+SL0+AC4	41.8	45.0	383	-	-	156	562	242	996	0.42	2.49	3.9		
Mix-8			CM1+SL25+AC4	41.8	45.0	287	-	96	156	562	242	992	0.42	2.49	3.9		
Mix-9			CM1+SL40+AC4	41.8	45.0	230	-	153	156	560	241	990	0.58	2.49	3.9		
Mix-10			CM1+SL60+AC4	41.8	45.0	153	-	230	156	559	240	987	0.77	2.49	3.9		
Mix-11			방청제 사용량에 따른 영향	25-280-15	CM5+SL25+AC0	41.8	45.0	-	287	96	160	562	242	992	0.57	2.49	0
Mix-12					CM5+SL25+AC2	41.8	45.0	-	287	96	158	562	242	992	0.57	2.49	2.0
-	(CM5+SL25+AC4)	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Mix-13	CM5+SL25+AC8	41.8	45.0	-	287	96	152	562	242	992	0.65	2.49	8.0				
Mix-14	강도 수준의 영향	25-210-12	CM1+SL0+AC0	55.0	47.8	320	-	-	176	602	259	951	0.32	-	-		
-		25-280-15	(CM1+SL0+AC0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Mix-15	25-350-15	CM1+SL0+AC0	37.0	42.5	443	-	-	164	515	221	1006	0.44	2.88	-			

\* 주) CM 1:1종 시멘트, CM 5 : 5종시멘트, SL : 슬래그분말 첨가량(시멘트중량의 0, 25, 40, 60%), AC : 방청혼화제(0~8 kg/m<sup>3</sup>)

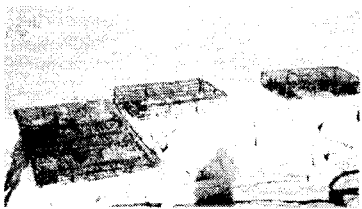


사진 1 옥외폭로시험 거치대

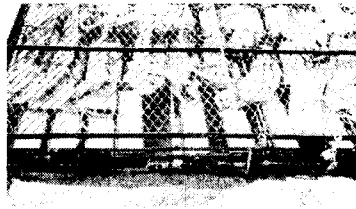


사진 2 거치대 공시체 보존상태

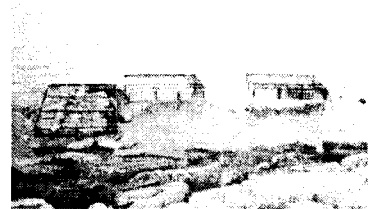


사진 3 해수 침지 중(밀물)

콘크리트 탄성계수는 콘크리트에 strain gage를 부착한 후 Datalogger (UCAM-5BT)를 이용하여 응력에 따른 하중-변위를 측정하여 KS F 2438의 탄성계수 시험방법에 따라 구하였다.

#### 2.4.2 압축강도

콘크리트 시험편은 물로 세척한 후, 다이아몬드 연마기로 콘크리트 면을 연마하였다. 연마된 시험편을 유황으로 캡핑하고 KS F 2405 콘크리트 압축강도시험의 규정에 따라 수행하였다.

#### 2.4.3 콘크리트 중 매입철근의 부식관찰

각 콘크리트 배합종류 및 철근피복두께별로 각주형 공시체에 매입된 원형철근에 대하여 콘크리트의 부식유무를 관찰하였다.

#### 2.4.4 콘크리트중의 염화물 함량

콘크리트 중의 염화물 함량은 매입철근의 부식관찰을 위해 파쇄된 각주형 시험편을 사용하였다. 염분함량은 콘크리트 표면으로부터 깊이 0~10mm, 10~20mm, 20~30mm, 30~40mm 으로 다이아몬드 컷터로 분리한 후 KS M 0100, 32.3항의 방법에 따라 분석하였다.

### 2.4.5 콘크리트 중의 반응생성물 분석

해수 중의 염화물과 황산염 이온 및 각종 염류들의 영향에 따라 열화작용을 받는 콘크리트의 반응생성물을 X-Ray Diffractionmeter(XRD, Philips Co., PW-1710) 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 압축강도 및 정탄성계수

조수간만대의 폭로시험대에 12개월간 거치된 콘크리트는 모두 건전한 상태를 보여주고 있으며, 압축강도와 탄성계수는 28일→6개월→12개월로 재령경과에 따라 점진적으로 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 재령과 콘크리트 강도간의 관계가  $\sigma = A \cdot \log \cdot t + B$  로 로그함수로 나타나며, 이에 따라 재령 1년여까지는 콘크리트의 curing effect 에 따라 시멘트의 수화반응이 지속되어 강도가 상승하는 것으로 나타났지만 재령이 더 지나고 나면 어느 수준에서 수렴되고 열화에 따른 강도저하가 예상된다.(그림 1)

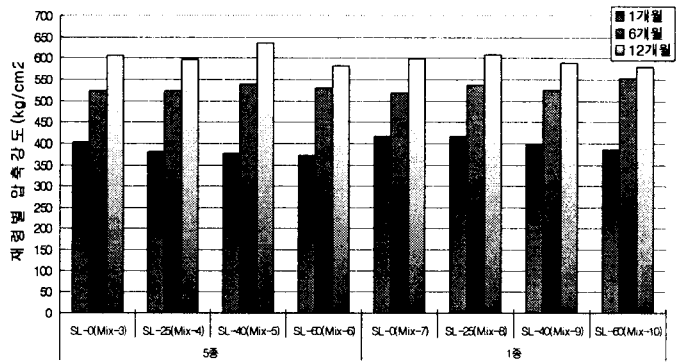


그림 1 침지기간별 슬래그첨가량과 시멘트 type에 따른 강도발현특성

### 3.2 콘크리트 중의 철근부식

균열이 없는 각주형 콘크리트에 매입한 철근에서는 6개월 및 12개월 침지 후에도 모든 시편에서 피복두께 및 배합에 상관없이 철근의 부식이 발생되지 않았다. 그러나 균열을 인위적으로 유발한 후 12개월이 경과된 시편에서는 사진 4와 같이 피복두께가 약 65mm 인데도 불구하고 균열폭이 0.3mm인 조건에서는 5종 시멘트 단독 사용조건인 CR-1이 많은 부식을 나타냈으며, 내염설계 배합인 CR-3(5종 시멘트+슬래그 25%+방청제)에서도 미세한 발청이 발생되었다. 그러나 동일 내염배합조건으로 균열폭이 0.1mm 로 작은 CR-2 조건은 발청이 발생되지 않았으며, CR-4(1종 시멘트+슬래그 25%+방청제, 균열폭 0.3mm)도 철근의 부식이 없었다.



사진 4 균열시편의 내부 철근상태(12개월 침지)

사진 4 균열시편의 내부 철근상태(12개월 침지)

### 3.3 콘크리트 중의 염화물 함량

#### 3.3.1 1종, 5종 시멘트 사용조건에 따른 영향

동일 콘크리트 배합조건에서 사용 시멘트 종류만 다른 Mix-1, Mix-2 에 대해서 6개월과 12개월까지 거치후, 염화물 함량을 측정하여 그림 2에 나타내었다.

굳지않은 콘크리트중의 염화물 규제량은 국내와 일본은  $0.3 \text{ kg/m}^3$  이하, 최대로  $0.6 \text{ kg/m}^3$  까지 허용하는데 12개월간 경과된 시험 후의 염화물 함량은 표층부(0~10mm)에서  $4\sim 5.6 \text{ kg/m}^3$ , 10~20mm 깊이에서는  $1.9\sim 2.1 \text{ kg/m}^3$  으로 비교적 높은 수치를 나타내고 있으나 20~30 mm 깊이까지는 아직 염화물이 침투되지 않은 상태를 보여주고 있다. 사용 시멘트 type에 따라서는 표층부에서는 1종 시멘트가 5종 시멘트에 비해 염화물함량이 적은 결과를 보여주고 있으나 10mm 깊이 이상에서는 1종 및 5종 시멘트간의 염화물 침투량은 동등한 수준인 것으로 나타났다.

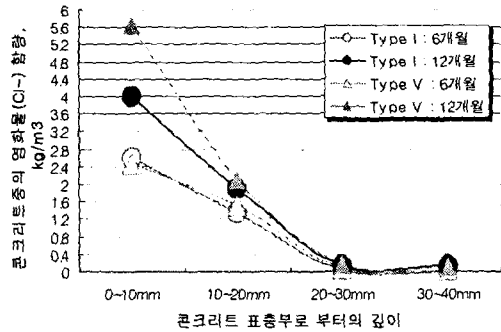


그림 2. 1종,5종 사용 시멘트 종류에 따른 콘크리트 중의 염화물 이온 침투량 변화

### 3.3.2 슬래그 미분말 첨가량에 따른 영향

슬래그 첨가량에 따른 영향은 비교적 뚜렷한 경향을 나타내고 있어, 슬래그 첨가량의 증가에 따라 표층부를 포함하여 염화물 침투량이 전반적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 특히 깊이 10~20mm 부위에서는 슬래그 무첨가 수준이 염화물 함량이  $2.8 \text{ kg/m}^3$ 로 높은데 비해 슬래그를 첨가량의 증가에 따라서 염화물 침투량은  $0.8\sim 0.3 \text{ kg/m}^3$  수준으로 크게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 염화물 이온 침투저항성 측면에서 슬래그 첨가량은 25~40% 범위가 가장 양호한 것으로 나타났으며, 그 이상 첨가에서는 동등 수준으로 나타났다. (그림.3)

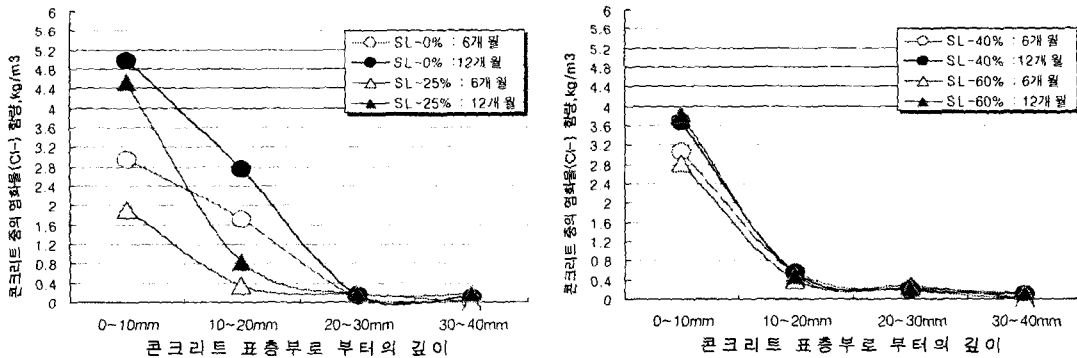


그림 3 슬래그 첨가량에 따른 콘크리트 경화체 내부의 염화물이온 침투량 변화

해양환경에 12개월간 폭로한 시험초기의 현 시점에서 속도할 수는 없으나, 시멘트의 일부를 슬래그 미분말을 첨가하는 것이 콘크리트의 염화물 이온침투 저항에 좋은 효과가 있었다.

### 3.3.3 강도수준(물/시멘트비)에 따른 영향

28일 설계기준 강도를 210 (W/C:55%), 280 (W/C:41.8%),  $350 \text{ kg/cm}^2$  (W/C:37.0%) 세수준으로 제작된 콘크리트 시편에 대하여 염화물 침투량을 분석하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 염화물 이온 침투량은 콘크리트의 강도수준(또는 물/시멘트비)에 따라서  $210 \text{ kg/cm}^2$ 의 저강도 수준으로 갈수록 염분침투량이 크게 늘어나고 있으며, 물/시멘트비 41% 수준인 기준의  $280 \text{ kg/cm}^2$  조건과는 달리 표면으로부터 20~30mm 깊이에서도  $0.7 \text{ kg/m}^3$  으로 높게 나타나고 있어 염화물함량의 침투가 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다. 따라서 콘크리트의 염화물 침투 저항성을 향상시키기 위해서는 적절한 단위 시멘트의 증가(콘크리트의 부배합)나 낮은 물시멘트비 확보가 필요하다는 것을 재확인 할 수 있었다.

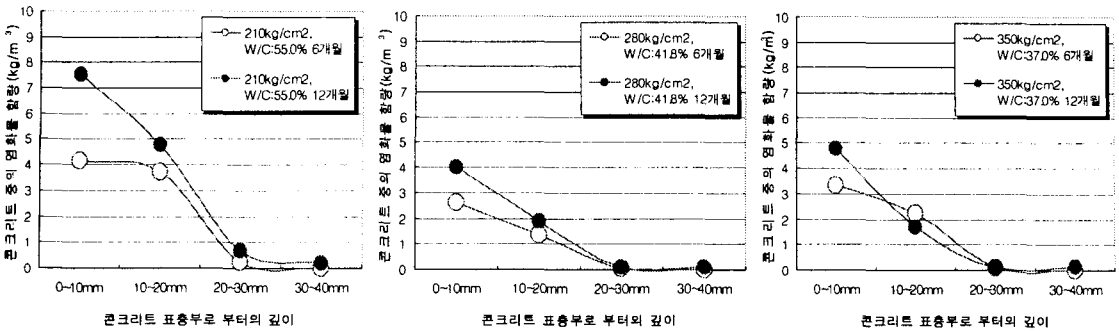


그림 4 콘크리트강도수준(W/C수준)에 따른 콘크리트 경화체 내부의 염화물이온 침투량 변화

### 3.3.4 균열 유발시편의 내부 염분침투량

콘크리트에 인위적으로 균열을 유발시킨 후 12개월간 해양환경에 침지시킨 콘크리트 시험체 내부의 염분함량은 균열발생에 따라 철근매설 위치인 깊이 65mm 까지도 염화물이 침투되어 염화물 이온함량이 5~1.5 kg/m³ 으로 높게 나타났다. 철근에 부식이 발생된 CR-1, CR-3 조건은 철근매설 부위의 염화물 함량이 5~3kg/m³ 으로 매우 높은 수준으로 나타났으며, 철근부식이 발생되지 않은 CR-2, CR-4 조건도 철근매설 부위의 염화물 함량이 1.8~1.5kg/m³ 로 규제치인 0.3kg/m³ 보다 높은 수준으로 나타났다. 고 염분함량에서 철근부식이 발생되지 않은 것은 철근 방청용 혼화제의 효과에 기인되는 것으로 판단되지만 철근부위에서의 염화물 함량이 3.0 kg/m³ 로 높은 조건에서는 발청현상이 일부 나타나고 있어 방청혼화제의 철근 방청효과는 사용량과 염분농도에 따라 적정 한계가 있는 것으로 사료된다.

### 3.3.5 콘크리트 중의 반응생성물

12개월 경과 후의 콘크리트 표층(0~10mm)과 내부(20~30mm)의 반응생성물을 X-ray 회절기로 분석한 결과 표층부에서는 주로 콘크리트 침식을 일으키는 성분중의 하나인 에트린자이트가 일부 생성된 것으로 나타났으며, Friedel's salt 생성도 확인되었다. 그러나 시멘트 광물조성 중 C<sub>3</sub>A 함량이 작은 5종 시멘트는 1종 시멘트와는 달리 에트린자이트, Friedel's salt 등이 검출되지 않았다.

## 4. 결론

조수간만대에 12개월간 침지한 시험편에 대한 중간 옥외폭로 시험결과 콘크리트 염분량은 재령 경과에 따라 염분(Cl⁻)의 침투가 진행되고 있으며, 초기단계이지만 슬래그와 방청제의 사용이 콘크리트의 내염성을 향상시키는데 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트중의 염분은 균열을 통해 내부로 침투하며 염분침투량은 균열폭과도 관계가 있는 것으로 나타났다. 방청제의 사용도 어느 한도의 염화물 함량에서는 철근방청효과가 확인되었다. 그러나 시험초기인 12개월 시점에서 사용 시멘트 type에 따른 평가는 장기재령까지의 성능평가를 통해 그 효과를 최종 유추해야 될것으로 판단되며, 본 연구의 종료시점인 2005년 말 까지 지속적으로 폭로시험체에 대한 분석이 진행될 예정으로 있어 앞으로 콘크리트의 사용재료 및 배합조건에 따른 염해특성에 대하여 보다 정확한 결과를 보고할 예정이다.

### 참고 문헌

1. ACI, "Guide to Durable Concrete," ACI Committee 201, 201.2R, American Concrete Institute, 1992.
2. N. Barovsky, "Durability of Marine Structures-State-of the Art Review and Tendencies for Further Investigation," Third CANMET/ACI Int., Conference on Concrete in Marine, 1996.