

# 해수의 건습반복 촉진열화에 따른 콘크리트의 내해수성

## Sea Water Resistance of the Concrete Deteriorated by Repeat of Immersing and Drying in Sea Water

박 춘 근*	김 병 권**	최 재 응***	고 만 기****
Park, Choon-Keun	Kim, Byung-Kwon	Choi, Jae-Woong	Ko, Man-Ki

### ABSTRACT

The sea water resistance of cement and concrete must be compared when it used for construction in the ocean. The sea water resistance of the concrete specimens using three types of cements such as ordinary Portland cement, sulfate resistance Portland cement, blastfurnace slag cement were studied. In this study, an accelerated test for access sea water resistance by subjecting the concrete specimens to repeated cycles of concentrated sea water immersion and hot wind drying was employed. This study proved that sulfate resistance Portland cement had higher resistance for sea water.

Keywords : Sea water resistance, sulfate resistance portland cement

### 1. 서 론

영종도 신공항을 비롯한 대형 SOC 건설사업이 본격화되면서 해양구조물의 내구성에 대한 관심이 과거 어느 때보다 더 강해지고 있다. 특히 바닷물에 직접 침적되거나 간접적으로 영향을 받는 구조물에 대한 지침이 국내에는 아직 정립되어 있지 않다. 그러나 선진국인 미국, 일본, 유럽 등에서는 시멘트 재료적인 측면과 시공적인 측면에서 확고한 지침을 확립하여 실제로 적용하고 있다.

해양 환경에서의 열화는 해수의 각종 염류 성분에 의한 화학적인 침식 뿐만 아니라 철근의 부식으로 동반된 팽창 파괴, 동결 용해, 감조지역에서의 건습반복, 파랑이나 기타 부유물 등에 의한 물리적인 충격 등을 복합적으로 받으므로 이들을 모두 고려하여 평가하여야 한다<sup>1-3)</sup>. 이를 위해서는 실제 자연적인 해양환경 하에 노출시켜 거동을 관찰하는 것이 바람직하나, 장기간이 소요된다는 애로점이 있어 실험실적으로 촉진 열화를 시켜 내해수성을 검토하고 있다.

\* 쌍용중앙연구소 시멘트연구실 실장, 공학박사  
\*\* 쌍용중앙연구소 시멘트연구실 선임연구원  
\*\*\* 쌍용중앙연구소 시멘트연구실 연구원  
\*\*\*\* 공주대학교 토목공학과 교수

## 2. 실험방법

### 2.1 사용재료

본 실험에서는 시중에서 유통되는 KS규격의 보통 포틀랜드 시멘트 (1종), 내황산염 포틀랜드 시멘트 (5종), 혼합시멘트로서 특급 고로 슬래그 시멘트를 사용하였다. 표 1 과 표 2 에 이들 시멘트에 대한 화학분석 결과와 물리시험 결과를 나타내었다. 잔골재와 굵은 골재는 부강산 강모래(조립율 2.7, 비중 2.6)와 청원산 쇄석(조립율 7.0, 비중 2.73)을 사용하였으며, 혼화제는 국내 T사의 AE감수제를 사용하였다.

표 1 사용 시멘트의 화학분석 결과

구 분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI
보 통	20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	0.12	0.92	2.1	1.2
내황산염	21.4	4.2	3.6	63.7	3.0	0.10	0.57	2.0	1.2
슬래그시멘트	25.2	9.0	2.2	53.4	4.5	0.18	0.74	2.5	1.3

표 2 사용 시멘트의 물리시험 결과

구 분	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	용 결 특 성		압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )			
	시멘트	초결(분)	종결(시간:분)	1 일	3 일	7 일	28일
보 통	3250	245	6:30	101	190	272	378
내황산염	3200	270	7:30	95	179	260	370
슬래그시멘트	3920	290	8:30	70	145	220	390

### 2.2 공시체 제작

콘크리트 배합조건은 최대골재치수 25mm, 설계 강도 240kg/cm<sup>2</sup>으로 하여 단위 시멘트량 320kg/m<sup>3</sup>, W/C는 50~65%로 하여 슬럼프 12±2cm, 공기량을 4±1.0%로 맞추어 제조하였다. 콘크리트 배합을 표 3에 나타내었다. 콘크리트 제조는 50L의 팬타입 강제식 믹서에서 행하였는데 시멘트와 모래를 먼저 30초간 건비빔한 후 물과 AE감수제를 넣어 몰탈상태로 60초 혼합하여 유동화시킨 다음 굵은 골재를 넣어 90초간 혼합하여 제조하였다.

표 3 콘크리트 배합

구 분	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m <sup>3</sup> )				AE감수제 (Cx%)
			C	W	S	G	
보 통	50	37	320	160	672	1201	0.2
	55	40		176	710	1118	
	60	43		192	745	1037	
내 황산염	50	39	320	160	709	1165	0.2
	55	42		176	746	1082	
	60	45		192	781	1002	
슬래그 시멘트	50	39	320	160	704	1157	0.3
	55	42		176	741	1075	
	60	45		192	775	995	

### 2.3 공시체 양생 및 인공해수 침지 실험

제조한 콘크리트 공시체를 1일후 탈형하여 압축강도, 건조수축, 축진 중성화 시험을 하였다. 내해수성 평가는 해수의 건습이 반복되는 조건을 모사하여 상온의 5배농도 인공해수에서 12시간 침적 후  $45 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 열풍중에 12시간 노출시킨 것을 한 사이클로 하여 이를 반복시켜 일정 시간 경과 후에 꺼내어 압축강도와 철근 부식을 측정하였다. 비교를 위해 5배농도의 인공해수에 단순 침적시킨 시험도 진행하였다. 철근 부식은 9mm 직경의 SD20 원형철근을 표면에서 2cm떨어진 곳에 집어 넣어 해수중에 축진 열화를 시킨 후 일정 재령이 지난 후 ASTM C 876에 나와 있는 Copper-Copper sulphate half-cell을 이용하여 electric potential을 측정하여 철근 부식 상태를 추정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 콘크리트의 기본 특성

그림 1 에 콘크리트 공시체를 표준양생하였을 때 재령에 따른 압축강도 측정값을 나타내었다. 압축강도는 W/C가 감소됨에 따라 증진되는 경향을 보이고 시멘트 별로는 5종과 1종 동등하게 양호하게 나왔고, 슬래그시멘트는 28일에 강도 증진율이 우수하였다. 시멘트 종류별 W/C=55% 공시체에 대한 건조수축 실험결과는 그림 2 와 같다. 건조수축은 1주간 수중 양생한 후 20°C 상대습도 60%의 조건에서 기중 양생하여 길이변화를 측정하였다. 그 결과 시멘트 종류별로 차이가 나지는 않았으나, 5종 시멘트가 1종, 슬래그 시멘트 대비 우수한 것으로 나타났다. 또한 W/C=55%로 제조한 공시체에 대한 축진중성화 깊이 결과를 그림 3 에 나타내었다. 축진 중성화 시험은 28일간 수중 양생 후 14일간 기중 양생한 다음 40°C, 습도 60%, CO<sub>2</sub> 10%의 조건에서 축진 중성화 시켜 페놀프탈레인 용액으로 중성화 침투 깊이를 측정하였다. 그 결과를 보면 5종>1종>슬래그 시멘트 순으로 양호하게 나타났다.

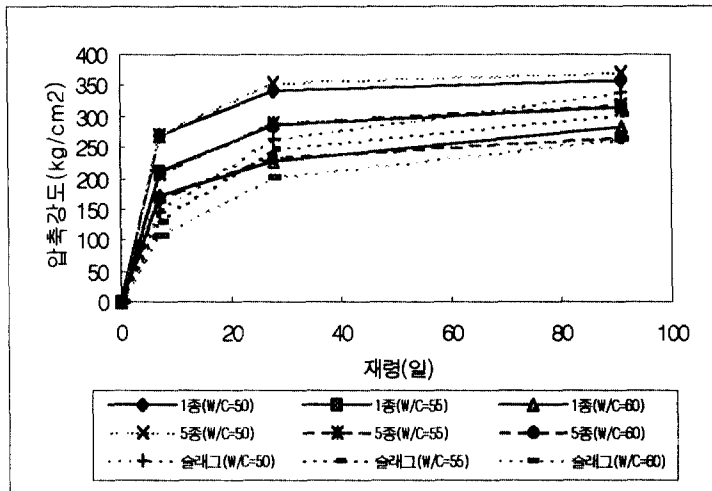


그림 1 시멘트 종류별 콘크리트 압축강도 특성

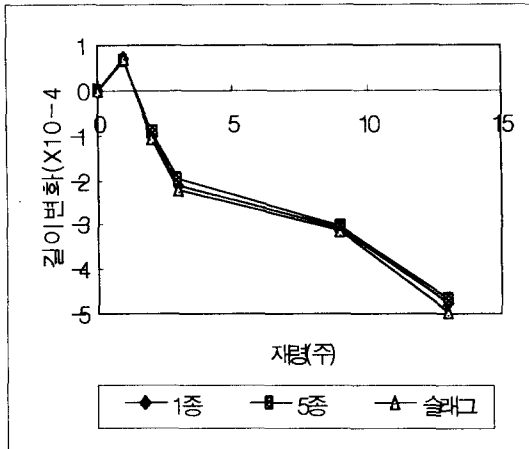


그림 2 시멘트 종류별 건조수축 결과

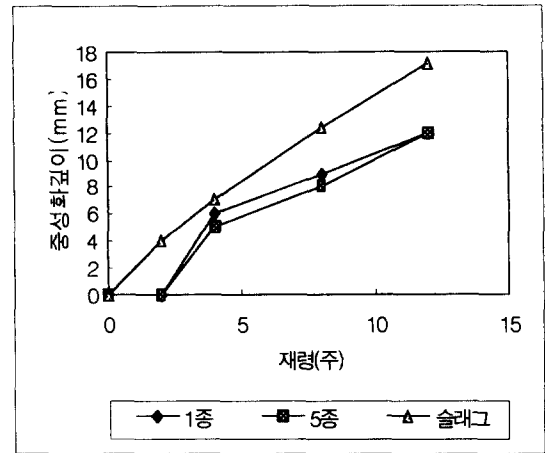


그림 3 시멘트 종류별 중성화 깊이 결과

### 3.2 콘크리트의 내해수성 평가

5배 농도 인공해수 중에서 12시간 침적 후 12시간을  $45 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 열풍에 노출시킨 것을 한 사이클로 축진 열화시켜 내해수성을 평가하였다. 비교를 위해 상온의 5배 농도 인공해수에 단순 침적시킨 것도 함께 평가하였다.

#### 3.2.1 강도변화

축진 열화에 의한 측정결과는 그림 4에 단순 해수 침적에서의 결과는 그림 5에 나타내었다. 축진 재령이 2개월을 정점으로 서서히 열화가 시작되는 것으로 보인다. 다만 시멘트 재료가 따라 1종 시멘트가 가장 열화 정도가 크고 슬래그 시멘트와 5종의 순서였다. 또한 W/C가 클수록 열화 정도가 큰 것을 알 수 있다. 단순 침적시를 보면, 5종 뿐만 아니라 슬래그 시멘트로 제조한 콘크리트도 양호한 결과를 보여주는 것이 확인되었다. 즉 해양 환경이 물리적인 열화를 받지 않고 해저에 침적되어 있는 곳에서는 해수 성분에 의한 화학적인 침식 이외에 중성화, 동결 용해와 같은 열화 현상이 없으므로 치밀한 수화 조직을 갖는 혼합계 시멘트도 전치 양생만 주의한다면 바람직한 재료라 보여지나, 물리적인 작용을 복합적으로 받을 경우 이와 같은 작용이 해수에 의한 화학적 침식을 더욱 촉진시키므로 표면경화 특성과 중성화 특성이 떨어지는 혼합계 시멘트의 사용할 때 주의해야 할 것으로 보인다. 이는 건습 반복에 의한 해수중의 염의 농축과 중성화 축진으로 인해 콘크리트 표피가 떨어져 나가는 scaling 현상이 생기고 이러한 물리적인 열화가 해수중의 이온 성분들의 콘크리트 매트릭스와의 반응을 촉진시키는 것으로 보인다. 또한 본 실험에서는 AE감수체만 사용한 일반 배합의 콘크리트를 대상으로 하였으나 해양환경에 노출되는 콘크리트는 단위수량과 W/C를 낮추는 배합으로 하고 시멘트 재료로는 내구성이 우수한 5종 시멘트를 사용하는 것이 바람직하다고 하겠다.

#### 3.2.2 철근부식 결과

W/C=55% 공시체에 철근을 삽입하여 28일간 상온의 수중에서 양생시킨후 앞서와 마찬가지로 5배 인공해수중에서 건습 반복의 축진 열화를 시키면서 축진 재령에 따른 자연 전위를 측정하였고 그결과를 그림 6에 나타내었다. 축진 열화 전의 자연 전위값은 5종 시멘트가 가장 크게 나타났고 재령이 경과하면서도 5종 시멘트 사용 콘크리트의 자연전위가 상대적으로 큰 값을 나타내었고 1종과 슬래그 시멘트가 작은 전위값을 나타내었다. 철근의 피복 두께를 20mm로 하여 시험을 하였기 때문에 건습 반

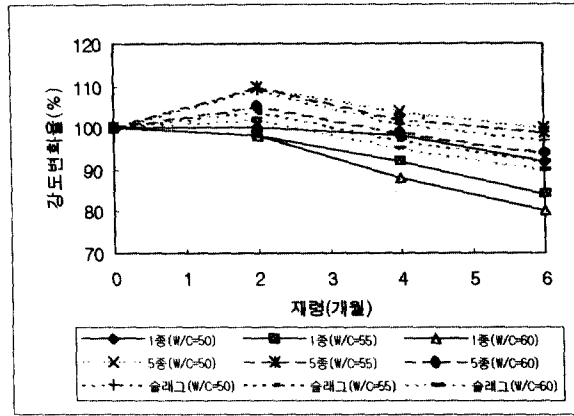


그림 4 해수염화 시험에 따른 시멘트 종류별 강도변화

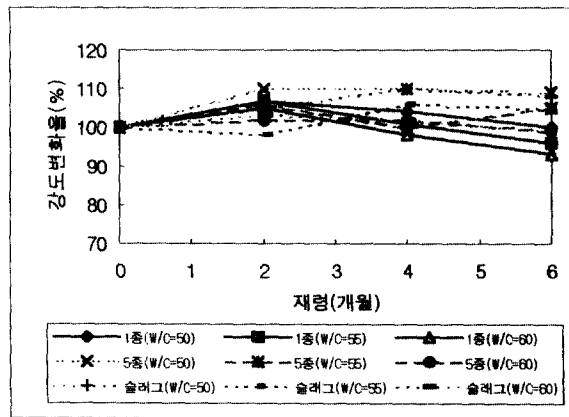


그림 5 단순해수침적에 따른 시멘트 종류별 강도 변화

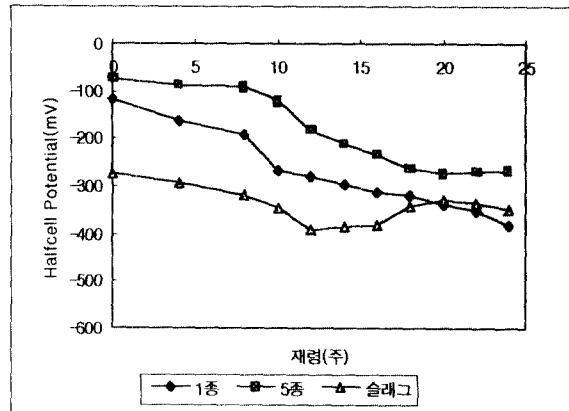


그림 6 해수에서 축진 열화시 half-cell potential 측정 결과

복에 의한 해수중의 염의 농축과 중성화로 인해 콘크리트 표피가 떨어져 나가는 scaling 현상이 생기고 이러한 물리적인 열화가 해수중의 이온 성분들의 콘크리트 매트릭스와의 반응을 촉진시켜 콘크리트 조직의 열화로 인한 결함이 Cl 이온의 확산과 중성화로 인해 철근 부식을 촉진 시키는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

1종, 5종, 슬래그 시멘트 등 3종류의 시멘트로 제조한 콘크리트에 대해 5배 농도 인공해수중과 45±5℃의 열풍에 반복해 노출시켜 건습이 반복되는 조건으로 실험실적으로 촉진 열화시켜 각 콘크리트 공시체에 대한 특성을 비교 고찰하였다.

1) 표준양생시의 압축강도는 W/C가 감소됨에 따라 증진되는 경향을 보이고 시멘트 별로는 5종과 1종 동등하게 양호하게 나왔고, 슬래그시멘트는 28일에 강도 증진율이 우수하였다. 시멘트 종류별 공시체에 대한 건조수축 실험결과 시멘트 종류별로 차이가 나지는 않았으나, 5종 시멘트가 1종, 슬래그 시멘트 대비 우수한 것으로 나타났고 촉진중성화 결과 5종>1종>슬래그 시멘트 순으로 양호하였다.

2) 해수중에서 건습을 반복시켜 촉진열화시 재령이 2개월을 정점으로 서서히 열화가 시작되는 것으로 나타났는데 시멘트 재료에 따라 1종 시멘트가 가장 열화 정도가 크고 슬래그 시멘트와 5종의 순서였으며 W/C가 클수록 열화 정도가 큰 것으로 나타났다. 단순 해수 침적시에는 5종 뿐만 아니라 슬래그 시멘트로 제조한 콘크리트도 양호한 결과를 보여주는 것이 확인되었다. 슬래그 시멘트의 건습 반복에 의한 열화 현상은 해수중의 염의 농축과 중성화 촉진으로 인해 콘크리트 표피가 떨어져 나가는 scaling 현상이 생기고 이러한 물리적인 열화가 해수중의 이온 성분들의 콘크리트 매트릭스와의 반응을 촉진시키는 것으로 보인다.

3) 공시체에 철근을 삽입하여 28일간 상온의 수중에서 양생시킨후 5배 인공해수중에서 건습 반복의 촉진 열화를 시키면서 촉진 재령에 따른 자연 전위를 측정된 결과 재령이 경과하면서도 5종 시멘트 사용 콘크리트의 자연전위가 상대적으로 큰 값을 나타내었고 1종과 슬래그 시멘트가 작은 전위값을 나타내었다. 철근의 피복 두께를 20mm로 하여 시험을 하였기 때문에 건습 반복에 의한 해수중의 염의 농축과 중성화로 인해 scaling 현상이 생기고 이러한 물리적인 열화가 해수중의 이온 성분들의 콘크리트 매트릭스와의 반응을 촉진시켜 콘크리트 조직의 열화로 인한 결함이 Cl 이온의 확산과 중성화로 인해 철근 부식을 촉진 시키는 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. D. M. Roy, "Mechanism of Cement Paste Degradation due to Chemical and Physical Process", 8th Inter. Cong. Chem. Cement, Vol.4, 1986, 362.
2. Y. Kasai, N. Nakamura, "Accelerated Test Method for Durability of Cement Mortars in Sea Water", ACI. SP65-21, 1980, 379.
3. O. S. B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, M. M. Saudi, "Effect of Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate on the Durability Performance of Plain and Blended Cements", ACI Materials J. 1-2, 1995, 15.