

# 동결융해 및 중성화를 받은 콘크리트의 철근 부식 특성

## Corrosion of Steel in Concrete Deteriorated by Freezing/Thawing and Carbonation

정 해 문\*      김 종 우\*\*      이 대 근\*\*      최 광 일\*\*\*  
Cheong, Hai Moon    Kim, Jong Woo    Lee, Dae Keun    Choi, Kwang Il

### ABSTRACT

Corrosion of steel reinforcing in concrete deteriorated by freezing/thawing and carbonation was characterized. Concrete specimens were prepared using various kinds of cements such as ordinary portland cement(type I), low heat portland cement(type IV, belite rich cement), sulphate resistance portland cement(type V), blastfurnace slag portland cement and ternary blended cement. Of various cements, type V and type IV with lower  $C_3A$  content revealed better steel corrosion resistance after freezing/thawing and carbonation.  $C_3A$  content in cement might affect freezing/thawing resistance in sea water.

Keywords : Steel corrosion, Freezing and thawing, Carbonation, Marine environment

### 1. 서 론

철근 콘크리트 구조물이 자체적 혹은 외부 환경에 의해 열화되어 철근 부식이 발생하면 철근 자체의 단면 손실 뿐만 아니라 약 2.5배의 팽창으로 인한 팽창압으로 균열을 발생시키게 된다. 균열이 발생하게 되면 산소나 물의 공급이 용이하게 되어 철근의 부식이 촉진되고 결국에는 피복 콘크리트가 탈락하여 구조물의 성능은 현저하게 저하된다. 철근 부식에 영향을 주는 콘크리트의 요인으로는 염소 이온, 중성화, 균열유무, 콘크리트 배합 등을 들 수 있는데, 특히 염소 이온이 함유되어 있는 해양환경에서는 철근 부식의 문제가 더욱 중요하다고 볼 수 있다<sup>1,2)</sup>

이러한 철근 부식 특성을 평가하기 위해서는 실제 사용환경하에 노출시켜 평가하는 것이 가장 타당하나, 콘크리트 내부의 철근이 부식되기 위해서는 장기간의 소요되므로 실험실적으로 조기 추정을 위해 촉진 부식을 시키는 평가 방법을 많이 사용하고 있지만 실제 조건과 가깝게 모사하면서 촉진 부식 시키는 것은 매우 어려우며 또한 내구 연한의 산정도 어렵다<sup>3)</sup> 철근부식이 중요한 해양 환경의 경우 동결 융해를 받거나 파랑과 수압을 받는 지역, 건조 습윤이 반복되는 건조 지역 등 물리적인 작용을 복합적으로 받게 되므로 철근 부식의 평가도 이와 같이 실제적인 경우 비슷하게 모사하여 평가하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다<sup>4)</sup>.

\* 정희원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원, 공학박사

\*\* 정희원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 연구원

\*\*\* 정희원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 수석연구원

본 연구에서는 물리적인 작용을 받을 경우 철근 부식 추정에 대한 실제적인 모사 평가 방법을 제시하고자 기초 실험으로 시멘트 종류별로 제조한 콘크리트에 대해 동결융해와 중성화를 가한 후 철근 부식 특성을 측정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 사용 재료

본 실험에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(1종), 내황산염 포틀랜드 시멘트(5종), 저열 포틀랜드 시멘트(4종, 벨라이트 시멘트), 고로 슬래그 혼합 시멘트, 3성분계 혼합시멘트 등이다. 표 1과 2에 이들 시멘트에 대한 화학 분석 결과와 물리 시험 결과를 나타내었다. 이들 시멘트 들은 모두 당사 제품을 사용하였다. 잔골재는 공주산 강모래를 굵은 골재는 청원산 채석을 사용하였으며 이들의 기본적 물성을 표 3에 나타내었다. 혼화제는 국내 J사 나프탈렌계의 고성능 감수제와 AE조제를 사용하였다.

### 2.2 공시체 제작

콘크리트 배합 조건은 최대 골재 치수를 25mm로 하여 시멘트 종류에 따른 영향을 보기 위해 단위 시멘트량 340kg/m<sup>3</sup>, W/C는 50%, 잔골재를 45%로 동일하게 하여 제조하였다. 표 4에 배합을 나타내었는데, 공기량은 4 ± 1%를 목표로 AE조제로 맞추었고 고성능 감수제 첨가량에 따른 시멘트 분산성의 차이로 강도 특성이 차이가 날 수 있기 때문에 시멘트량에 대해 0.8%로 고정하였다.

표 1 사용 시멘트의 화학 분석 결과

구분	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	비고
보 통(1종)	21.3	6.5	3.1	61.3	2.8	0.1	0.8	2.1	1.6	쌍용양회
내황산염(5종)	22.7	4.1	4.4	62.7	2.7	0.1	0.6	1.9	0.9	"
저 열(4종)	25.9	3.0	2.8	63.0	2.1	0.1	0.6	2.2	1.1	"
슬 래 그	25.5	9.8	2.2	54.1	4.3	0.1	0.7	2.7	1.1	"
3 성 분 계	33.8	15.6	2.9	40.2	4.0	0.1	0.7	2.7	1.2	"

표 2 사용 시멘트의 물리 시험 결과

구분	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)	비 중	용 결(길모아방법)		압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		
			초결(분)	종결(시-분)	3일	7일	28일
보 통	3250	3.15	270	6-50	200	287	378
내황산염	3200	3.18	320	8-00	186	269	365
저 열	3450	3.20	350	8-50	136	201	365
슬래그	3980	3.04	295	8-10	155	245	410
3성분계	3920	2.85	390	9-40	113	186	325

표 3 사용 골재의 기본적 특성

구분	산 지	비 중	흡수율(%)	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	실적율(%)	조립율	마모율(%)
잔 골 재	공주산 강모래	2.58	1.2	1626	63	2.73	-
굵은 골재	청원산 채석	2.73	0.7	1486	-	7.53	20

표 4 콘크리트 배합

구 분	W/C (%)	S/a (%)	단위 재료량 (kg/m <sup>3</sup> )				혼화제(Cx%)		Slump (cm)	Air(%)
			C	W	S	G	SP	AEA		
보 통	50	45	340	170	791	1024	0.8	0.02	10.5	4.1
내황산염	50	45	340	170	793	1025	0.8	0.045	18.5	4.3
저 열	50	45	340	170	794	1027	0.8	0.04	19.0	4.5
슬래그	50	45	340	170	787	1018	0.8	0.06	15.3	4.1
3성분계	50	45	340	170	778	1007	0.8	0.06	20.0	4.0

### 2.3 공시체 평가

#### 2.3.1 기본 특성 평가

시멘트 종류별로 표 4에 의해 제조한 콘크리트 공시체에 대해 기본적인 강도 특성과 내구 특성을 검토하였다. 재령에 따른 압축강도와 건조수축, 촉진 중성화, 동결 융해 등을 측정하였다. 압축강도는 콘크리트 공시체를 1일 후 탈형하여 20℃ 수중에서 양생하여 재령에 따라 측정하였고, 건조 수축은 수중에서 1주간 양생한 후 온도 20℃, 습도 60%의 대기중에서 양생하여 길이변화를 측정하였다. 또한 중성화는 수중에서 28일간 양생한 후 대기 중에서 14일간 방치시킨 다음 40℃, 습도 60%, CO<sub>2</sub> 농도 10%의 조건에서 촉진 중성화시켜 10% 페놀프탈레인 용액으로 중성화 침투 깊이를 측정하였으며 동결융해 저항성은 수중 28일 양생후 동결 융해 실험 캐비닛에 넣고 동탄성계수를 측정하여 평가하였다. 동결 융해의 경우 담수와 2배 인공해수 환경에서 측정하였다.

#### 2.3.2. 철근 부식 특성

물리적인 작용을 받았을 때의 철근 부식 특성을 검토하기 위해 시멘트 종류별로 콘크리트 공시체 제조시 직경 10cm 압축강도 측정용 몰드에 직경 9mm 길이 300mm의 SR30 원형철근을 집어 넣어 철근 부식 측정용 공시체를 만들었다. 이렇게 만든 공시체를 28일간 수중 양생 후 각각 2.3.1의 촉진 중성화와 동결 융해를 가하면서 일정 시간 경과 후 ASTM C 876의 Copper-Copper sulphate half-cell 로 half-cell potential을 측정해 철근 부식을 추정하였다. 표 5에 측정 조건을 나타내었다.

표 5 철근 부식 특성 측정 조건

구 분	측정 조건
중성화	● 촉진 중성화 진행에 따른 half-cell 전위 측정
동결 융해	● 담수 동결융해 진행에 따른 half-cell 전위 측정
	● 2배 해수중 동결융해 진행에 따른 half-cell 전위 측정

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 콘크리트 공시체 기본 물성

시멘트 종류별 콘크리트의 재령 경과에 따른 압축강도를 그림 1에 나타내었다. 동일 시멘트량으로 실험하였기 때문에 28일 강도값이 1종, 5종, 슬래그, 4종, 3성분계의 순으로 높게 나타났다. 그림 2에 나타난 건조수축 결과를 보면 시멘트 종류에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났으나 상대적으로 5종 시멘트의 건조수축이 작은 것으로 나타났다. 촉진 중성화(그림 3)결과를 보면 혼합 시멘트인 슬래그 시멘트와 3성분계 시멘트가 1, 4, 5종 포틀랜드 시멘트에 비해 중성화 깊이가 더 크게 나타났다. 한편 동결 융해 저항성의 경우를 그림 4에 나타내었는데, 담수의 경우는 300사이클까지 상대 동탄성 계

수의 저하가 모두 80% 이상으로 양호하게 나타났으나, 해수에서의 동결 용해 시험을 한 경우 100싸이클 이전에 모두 열화되었다. 슬래그 혼합 시멘트와 3성분계의 경우 30싸이클부터 표면의 박리현상이 심하게 나타났고, 60싸이클 이후에서는 모든 콘크리트에서 박리 현상이 생겼다. 5종 시멘트와 4종 시멘트가 다른 시멘트에 비해 상대 동탄성 계수가 크게 나타나 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 다만 모든 공시체에 대해 공기량을 4% 정도로 맞추었는데도 불구하고 담수와 달리 해수에서 이와 같이 열화가 심하게 나타난 것은 해수중의  $Cl^-$ 과  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$ 와 같은 이온이 동결 용해에 의한 열화를 더욱 촉진시키기 때문으로 보인다<sup>5)</sup>.

### 3.2 철근 부식 특성

시멘트 종류별로 제조한 콘크리트 공시체에 대해서 축진 중성화와 동결 용해를 가하면서 철근 부식 특성을 측정하였다. 축진 중성화시킨 공시체에 대한 철근 부식 추정 결과를 half-cell potential 값으로 그림 5에 나타내었다. 열화 시험 전의 자연 전위는 5종과 4종이 큰 값을 보이고 슬래그와 3성분계 혼합시멘트가 작은 값을 나타내고 있다. 축진 중성화시켰을 경우에도 5종과 4종, 1종 등 포틀랜드 시멘

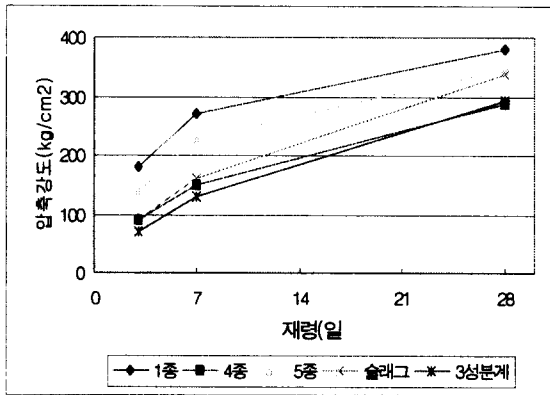


그림 1 재령에 따른 압축강도 결과

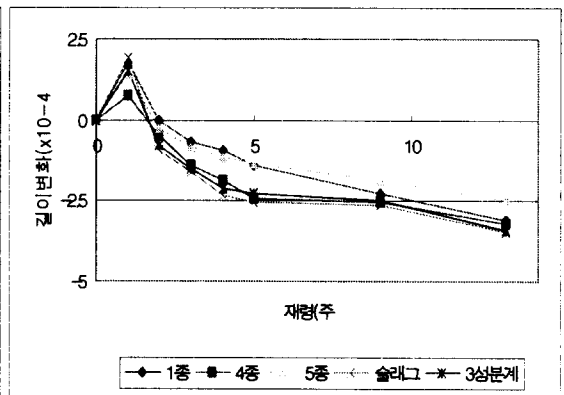


그림 2 건조 수축 결과

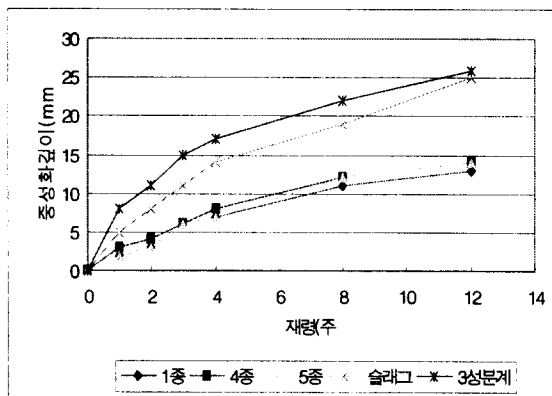


그림 3 축진 중성화 깊이 결과

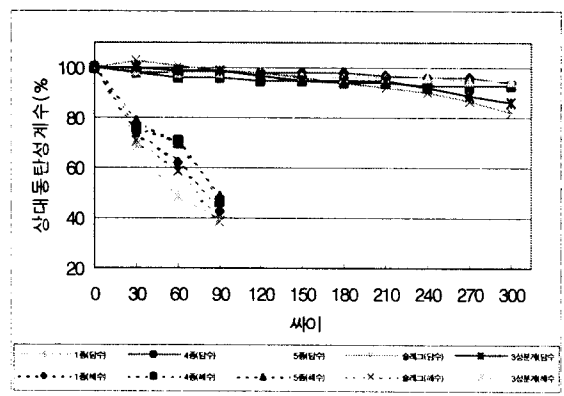


그림 4 담수 및 해수 동결용해 실험 결과

트가 혼합 시멘트에 비해 큰 자연 전위를 보이고 있다. 이는 앞서 콘크리트 축진 중성화 깊이 결과와 비교해 보면 알듯이 혼합시멘트가 포틀랜드 시멘트에 비해 초기 pH가 낮고 포졸란 반응에 의해 생성된  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 소모되므로 중성화 속도가 빠르기 때문이다. 철근 부식은 콘크리트 내부의 pH가 11.5 이하가 될 때 촉진되는 것으로 알려진 결과와 비교해 보았을 때 결과가 잘 일치된다고 볼 수 있다.

그림 6에 동결 용해를 가했을 때 경과에 따른 half-cell potential 값을 나타내었다. 모든 공시체에서 30사이클 이후에 -400mV 이하의 값을 보여 주고 있다. 특히 해수에서 동결 용해를 가한 시편은 그 값이 모두 -600mV 이하의 매우 작은 값을 나타내었다. 그림에서 보이듯이 담수 동결 용해 실험시 5종과 4종이 다른 시멘트에 비해 큰 자연 전위 값을 나타내고 있고, 해수 동결 용해 실험에서도 특히 5종과 4종이 상대적으로 큰 자연 전위 값은 물론 시간 경과에 따른 자연 전위 감소의 폭도 작은 것으로 나타나 상대적으로 우수한 특성을 보여주고 있다. 이는 5종과 4종과 같이 시멘트 중의  $\text{C}_3\text{A}$ 의 함량이 낮을수록 해수 중의 동결 용해에 대한 저항성이 높은 것으로 보여  $\text{C}_3\text{A}$  함량과 해수중의 동결 용해와 상관관계가 있는 것으로 보인다. Deicing salt가 존재할 때 동결 용해에 대한 저항성이  $\text{C}_3\text{A}$ 의 함량이 낮을수록 우수하다는 보고들<sup>56)</sup>과 비교해 보았을 때 유사한 결과라고 보여진다. 콘크리트의 해수 동결 용해의 열화현상은 앞서 3.1의 기본 특성 평가에서와 마찬가지로 콘크리트 공시체에 대해 공기량을 약 4%로 모두 확보를 하였지만 해수중의  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 와 같은 이온의 영향으로 동결용해에 의한 열화를 촉진시킨 것으로 보인다. 동결 용해 작용으로 물의 팽창압에 의한 콘크리트 조직이 열화된 상태에서 이와 같은 해수중의 성분 들이 열화된 조직으로 침투해 콘크리트 조직과의 화학적인 반응에 의해 조직의 다공화, 팽창 파괴 등을 더욱 촉진시키는 것으로 보인다.

시멘트 종류별로 보면 5종과 4종이 중성화와 동결 용해를 받았을 때 철근 부식 특성이 가장 좋은 것으로 보인다. 우리나라와 같이 해양 환경이 동결 용해를 받고, 구조물 부위에 따라서 감소 등에 의해 건습을 반복해 받아 염농축과 외기에의 노출 등에 의한 중성화 등 물리적인 열화를 복합적으로 받을 경우 시멘트의 선정은 5종과 4종의 선정이 타당하다고 보인다.

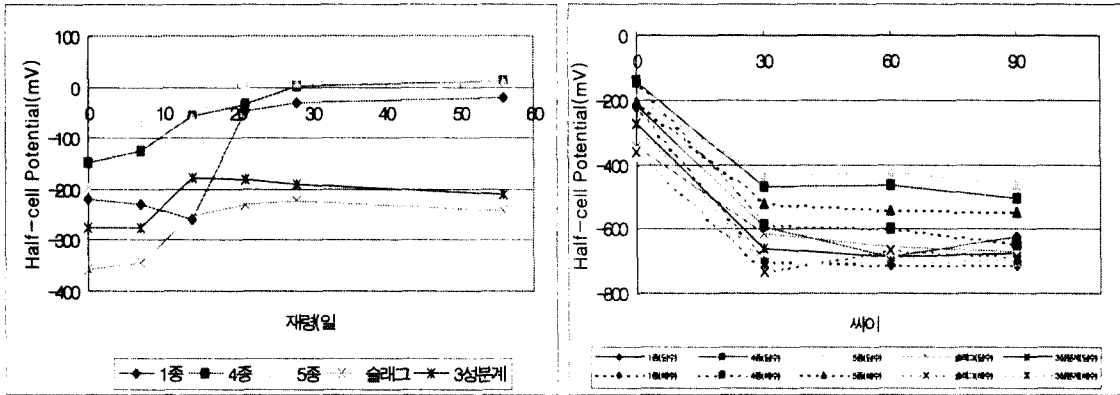


그림 5 축진 중성화 경과에 따른 자연전위 측정 결과 그림 6 담수 및 해수동결용해 경과에 따른 자연전위 결과

#### 4. 결론

물리적인 작용을 받을 경우 철근 부식 추정에 대한 실제적인 모사 평가 방법을 제시하고자 시멘트 종류별로 제조한 콘크리트에 대해 동결용해와 중성화를 가한 후 철근 부식 특성을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시멘트 종류별로 제조한 콘크리트의 압축강도는 동일 시멘트량으로 실험하였기 때문에 28일 강도

값이 1종, 5종, 슬래그, 4종, 3성분계의 순으로 높게 나타났고, 건조수축 결과는 시멘트 종류에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났으나 상대적으로 5종 시멘트의 건조수축이 작은 것으로 나타났다.

2) 촉진 증성화 결과는 혼합 시멘트인 슬래그 시멘트와 3성분계 시멘트가 1, 4, 5종 포틀랜드 시멘트에 비해 증성화 깊이가 더 크게 나타났다. 한편 동결 용해 저항성의 경우는 담수의 경우는 300사이클까지 상대 동탄성 계수의 저하가 모두 80% 이상으로 양호하게 나타났으나, 해수에서의 동결 용해 시험을 한 경우 100사이클 이전에 모두 열화되었으나 5종 시멘트와 4종 시멘트가 다른 시멘트에 비해 상대 동탄성 계수가 크게 나타나 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 다만 모든 공시체에 대해 공기량을 4% 정도로 맞추었는데도 불구하고 담수와 달리 해수에서 이와 같이 열화가 심하게 나타난 것은 해수중의  $Cl^-$ 과  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$ 와 같은 이온이 동결 용해에 의한 열화를 더욱 촉진시키기 때문으로 보인다.

3) 촉진 증성화시킨 공시체에 대한 half-cell potential 측정 결과 5종과 4종, 1종 등 포틀랜드 시멘트가 혼합 시멘트에 비해 큰 자연 전위를 보여 철근 부식 가능성이 작은 것으로 나타났다. 이는 혼합시멘트가 포틀랜드 시멘트에 비해 초기 pH가 낮고 포졸란 반응에 의해 생성된  $Ca(OH)_2$ 가 소모되므로 증성화 속도가 빠르기 때문으로 보인다.

4) 동결용해를 가한 모든 공시체에서 30사이클 이후에 -400mV 이하의 값을 보였으나 이 중 5종과 4종 시멘트가 상대적으로 큰 전위 값을 나타내었고 시간 경과에 따른 자연 전위 감소의 폭도 작은 것으로 나타났다. 시멘트 중의  $C_3A$ 의 함량이 낮을수록 해수 중의 동결 용해에 대한 저항성이 높은 것으로 보인다.

#### 참 고 문 헌

1. A.Rosenberg, C.M.Hansson and C.Andrade, "Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete" Materials Science of Concrete I, The American Ceramic Society, Ohio, 1989, pp.285-313.
2. 岸谷孝一, 西澤紀昭, "鹽害(I)" 技報堂出版 1986
3. 樫野紀元, "鐵筋 콘크리트 造構造物の耐久性-鐵筋腐食とその對策," 鹿島出版 1988
4. K.Mehta, "Durability of Concrete in Marine Environment-A Review", Performance of Concrete in Marine Environment, ACI Publication SP-65, 1980, pp.1-20.
5. J.Marchand, R.Pleau and R.Gagne, "Deterioration of Concrete Due to Freezing and Thawing" Materials Science of Concrete IV, The American Ceramic Society, Ohio, 1989, pp.355-389.
6. G.Fagerlund, "Effect of Air-Entraining and Other Admixtures on the Salt Scaling Resistance of Concrete" International Seminar on Some Aspects of Admixtures and Industrial By-products on the Durability of Concrete, Gotheburg, 1986.