

## 인공해수 건습반복조건에 따른 콘크리트배합별 부식촉진시험법과 염화물 침투해석평가

# Evaluate the Concrete mix by Type Accelerated Corrosion Test and Chloride Penetration Analysis with Artificial Seawater Cyclic Wet and Dry Condition

박상순<sup>1\*</sup> · 김민욱<sup>2</sup>

Sang-Soon Park<sup>1\*</sup> · Min-Wook Kim<sup>2</sup>

(Received November 30, 2013 / Revised December 19, 2013 / Accepted December 20, 2013)

Cyclic wet and dry conditions in the marine environment structures corrosion is known to be the fastest rising. For that reason, accelerated corrosion test methods for the reproduction of tidal environment has been actively conducted. However, many studies have estimated threshold value for steel corrosion or concentrated in chloride penetration analysis. In this study, cyclic wet and dry conditions to reproduce the structure of the environment in accelerated corrosion and chloride penetration test analysis was performed. Corrosion was determined by the result of reinforcement corrosion monitoring based on galvanic potential measurement and half-cell potential method. Accelerated corrosion test results for each formulation was different corrosion periods, the order OPC> FA> BS> High-strength concrete. FEM durability interpretation program DuCOM was conducted under the same conditions as in accelerated corrosion test. The experimental RCPT tests demonstrated the validity of the result.

**키워드** : 건습반복법, 부식촉진시험, 간만대 환경, 염화물침투해석

**Keywords** : Cyclic wet and dry condition, Accelerated corrosion test, Chloride penetration analysis

## 1. 서론

삼면이 바다로 둘러싸여 있고 산악지역이 많은 우리나라는 이 이용할 수 있는 국토가 한정적이다. 이런 한정된 국토공간의 효율적인 이용을 위해서 해양개발에 대한 필요성이 중요시 되고 있으며, 동시에 많은 해양 콘크리트 구조물이 증가하고 있다. 이로 인해 해양 콘크리트 구조물에 대한 구조적 성능과 내구성에 대한 관심 또한 높아지고 있는 실정이다. 특히, 해안선을 따라 건설된 콘크리트 구조물의 부식으로 구조적성능이나 내구성능의 저하로 구조물의 수명단축 및 유지보수 비용으로 많은 국가예산이 손실되고 있다. 해양콘크리트 구조물은 폭로조건에 따라 구조물의 열화 되는

정도가 다르다. 이러한 폭로조건으로 해수중, 간만대, 비말대로 나눌 수 있다. 이러한 폭로조건에서 철근의 부식이 가장 활발히 일어나는 부분은 산소의 공급과 염화물이온의 침투가 활발한 건습반복이 이루어지는 간만대 라고 볼 수 있다.

철근콘크리트 구조물의 내구수명평가는 여러 가지 요인으로 나눌 수 있으나, 염해환경에 노출된 구조물의 내구수명은 철근의 부식시기로 결정된다고 볼 수 있다. 철근의 부식시기판단은 일반적으로 콘크리트 표면에서 내부철근의 위치까지 염화물 이온이 침투하여 부식임계농도에 도달하는 시간으로 결정된다.

구조물 내부철근의 부식시기 판단은 실제 해양환경에 직접 폭로시켜 부식상태를 모니터링 하는 방법이 가장 신뢰성 있는 방법이지만 시험결과까지 장기간이 소요되며 자연재해 등으로 인한 시

\* Corresponding author E-mail: parks87@smu.ac.kr

<sup>1</sup>상명대학교 건설시스템공학과 조교수 (Department of Civil Engineering, Sang Myung University, Assistant Professor, Chungnam, 330-720, Korea)

<sup>2</sup>상명대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Sang Myung University, Master course, Chungnam, 330-720, Korea)

편의 유실, 폭로시험장을 제외한 다양한 장소의 부재 등이 단점으로 작용한다. 이를 대체하는 수단으로 실내 실험실에서 실시할 수 있는 다양한 방법의 부식촉진시험이 연구되었다. 대표적인 실험방법으로 항온 항습기에 의한 건습 반복법(일본콘크리트공학협회, 1991)이 있다. 이 방법은 항온 항습기를 이용하여 건습과 습윤을 한 주기로 하여 시험을 실시하며 철근 콘크리트 구조물의 부식조건을 모사한 것으로 생각할 수 있으며, 콘크리트 배합 시 혼입한 염분에 의해 철근 부식여부를 비교적 단기간에 판단할 수 있다.

본 연구는 일본에서 제안한 항온 항습기에 의한 건습 반복법을 기준으로 시험을 실시하여 콘크리트 배합재료에 따라 철근부식 개시시점의 차이를 규명하고, DuCOM, RCPT 시험을 통하여 실험결과에 대한 타당성을 입증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 재료

시멘트는 국내에서 제조한 보통 포틀랜드 시멘트로 H사 제품을 사용하였으며 고로슬래그 미분말(BS)은 3종, 플라이애시는 2종을 사용하였다. 이들의 물리·화학적 성질은 Table 1, 2에 나타내었다. 잔골재는 충남 공주 강모래이며, 굵은 골재는 쇄석골재 20mm

Table 1. The chemical composition and strength properties of cement

Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Compressive Strength(MPa)		
				3 Days	7 Days	28 Days
3.15	2.1	2.2	3500	26.7	41.2	57.6

Table 2. Blast furnace slag and fly ash chemical composition and properties

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)
BS	32.7	13.9	0.41	2.83	45.2	5.8	4326
FA	64.2	19.89	4.45	0	3.82	1.1	3580

Table 3. Physical properties of the fine aggregate and coarse aggregate

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Surface absorption rate (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Aggregate	2.6	1.5	2.5	1597
Coarse aggregate	2.7	0.9	6.5	1655

를 사용하였다. 이들의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 부식촉진시험

본 실험은 간만대 환경에서 콘크리트 배합시 재료에 따라서 부식속도를 비교해보기 위해 배합재료를 변수로 부식촉진 시험을 실시하였으며, 실험모식도는 Fig. 1과 같다. 실험방법으로 습윤 기간 동안 인공해수에 침지시켜 온도 60℃를 유지하였으며, 건조 기간 동안 항온 항습기를 이용하여 20℃, 습도 60%를 유지하여 간만대 환경을 재현하였다. 인공해수농도는 KS F 2599를 기준으로 제작하였으며, 해수의 성분표는 Table 4에 나타내었다. 습윤 기간3일 건조 기간 4일을 1사이클로 하여 시험을 실시하였고, 철근부식 모니터링은 1사이클을 기준으로 측정하였다. 빠른 철근부식을 유도하기 위해 W/C비를 높게 설정하였으며, 실험에 사용된 배합은

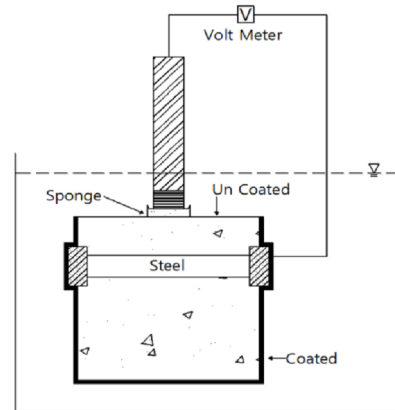


Fig. 1. Overview of experiment

Table 4. Artificial seawater composition table (g/L)

NaCl	MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl
24.5	11.1	4.1	1.2	0.7

Table 5. Experiment formulation table

Mix	W/C (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )						28 Days Compressive Strength (MPa)
		W	C	FA	BS	Sand	Gravel	
OPC60	60	165	275	-	-	840	975	32
OPC35	35	165	471.4	-	-	840	975	55
FA	60	165	220	55	-	840	975	37
BS	60	165	192.5	-	82.5	840	975	41

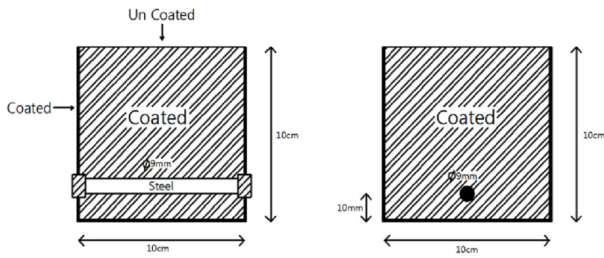


Fig. 2. Specimen

Table 5와 같다.

실험에 사용된 시편은 피복두께 10mm의 100×100×100mm 정사각형 몰드를 사용하였다. 철근의 코팅밀 이물질을 제거하기 위하여 연마지를 사용하여 표면처리를 실시하였다. 시험체에 매입되는 철근의 길이는 120mm이며, 전선은 방수가 가능한 방수커넥터를 사용하였다. 가장 중요한 철근과 전선의 이음부분은 산소 및 수분 침투를 방지하기 위해 에폭시 코팅처리를 하였다. 완성된 시편은 재령 6일까지 수중 양생한 후 시편 6면 중 염화물을 침투시킬 1면을 제외한 나머지 5면을 에폭시로 코팅하였다. 에폭시 코팅 24시간 경과 후(재령 7일)부터 인공해수에 침지시켜 일방향 염화물 침투를 유도하였다. 갈바닉전위측정법과 반전지전위법으로 철근 부식모니터링을 실시하여 철근부식개시시점을 판단하였다.

### 2.2.2 염화물침투해석

DuCOM은 초기재령 콘크리트의 거동을 열전도 거동, 수분확산 거동 그리고 구조 및 역학적 거동으로 대별하고 각 거동간의 상호작용을 고려할 수 있도록 복합수화발열 모델, 공극구조 형성 모델, 수분이동 모델, 자유수축 모델 및 응력해석 모델을 연성하여 해석할 수 있는 프로그램이다. 따라서, DuCOM 프로그램을 이용하여 초기재령 콘크리트의 수화반응에 의한 열의 발생과 구조물내의 온도분포, 그리고 수분이동에 따른 건조수축변형 등을 정량적으로 해석할 수 있다(김호진, 2003). 본 연구는 DuCOM을 사용하여 부식촉진시험과 같은 배합과 조건으로 모델링해석을 실시하였으며,

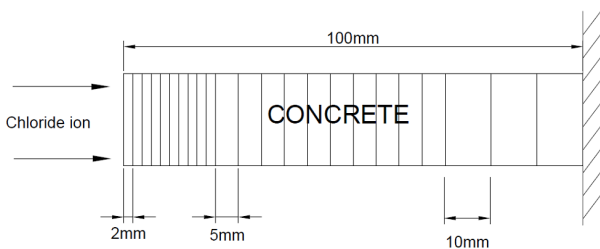


Fig. 3. DuCOM modeling

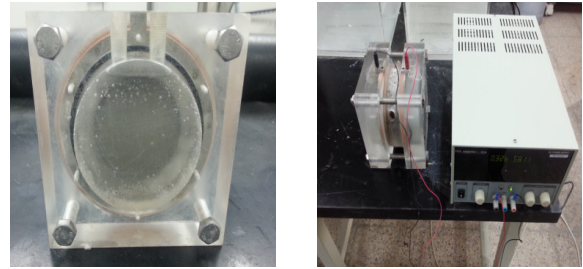


Fig. 4. Resistance to chloride ion penetration test

해석결과를 검증하기위해 KS F 2711 “전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험방법”에 의해 실험을 실시하였다.

### 2.2.3 염소이온 침투 저항성 시험

KS F 2711 “전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험방법”에 의해서 염화물 이온 침투저항성 평가를 수행하였다.

염화물이온 침투저항성 시험은 제작된 공시체를 시험셀에 장착한 후 전원은 60V의 직류를 ±0.1V 정도로 안정적으로 공급하며, 전류의 측정은 기지(既知)의 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정함으로써 얻을 수 있다. 확산셀에 들어가는 전해질 용액은 Applied Voltage Cell의 (-)전극에 3.0%의 NaCl 용액을 채우고 (+)전극에는 0.3N의 NaOH 용액을 채운다. 시험 중 30분마다 저항에 걸리는 전류값을 6시간까지 측정하여 기록한다.

30분 간격으로 6시간 동안 양단에 걸리는 전류값을 측정하고 다음 식 (1)을 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 산정한다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서, Q = 회로를 통과한 전하량 (Coulombs)

$I_n$  = 실험시작 후 n분이 경과하였을 때의 전류(A)

시험결과는 공시체 5개에 대하여 측정값 중 최고값과 최소값을 제외한 공시체 3개의 평균값으로 하여 소수점이하에서 끝맺음하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 철근부식모니터링결과

갈바닉 전위측정법과 반전지전위법을 사용하여 1주일을 주기로 철근부식모니터링을 실시하였으며 총 28주동안 실험을 진행하

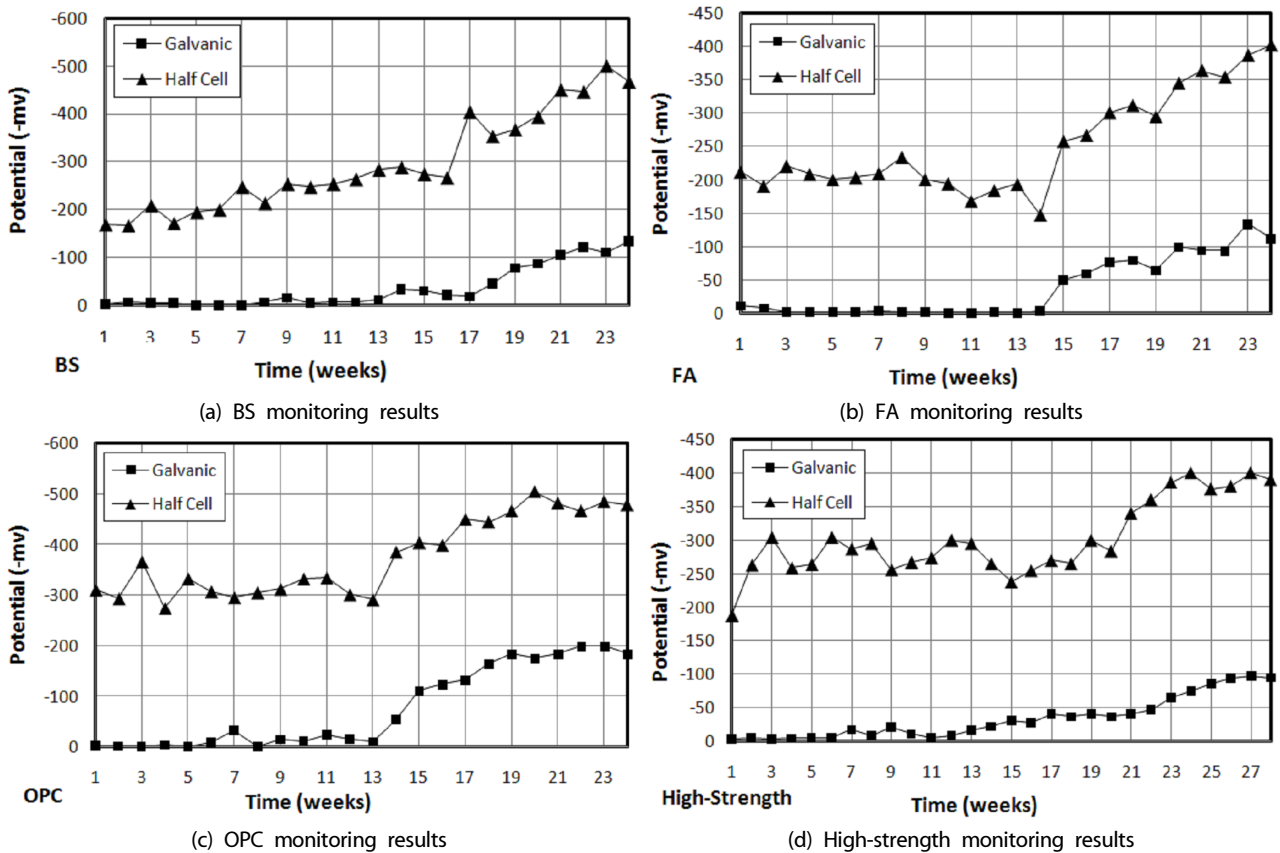


Fig. 5. Result of accelerated corrosion test

였다. 갈바닉 전위측정법은 전위밀도의 상승구간을 부식개시시점이라 판단하였다(Gowripalan and Mohamed, 1998). 반전지전위법은 황산구리전극을 사용하였으며, 부식개시판단시점은 전위값이  $-350\text{mV}$  이하일 때 부식이 일어났다고 판단하였다. 갈바닉 전위측정법과 반전지전위법의 결과는 다음 Fig. 5에 나타내었다.

갈바닉 전위측정법과 반전지전위법으로 철근부식모니터링을 실시한 결과 모든 시편에서 부식이 발생하였다고 판단되었다. 측정된 결과 값을 보면 갈바닉 전위측정법과 반전지전위법 모두 초반에는 비교적 안정적인 값을 보이다가 부식개시시점으로 판단되는 구간에서 비슷한 시기에 전위가 급격히 상승하는 경향을 보였다.

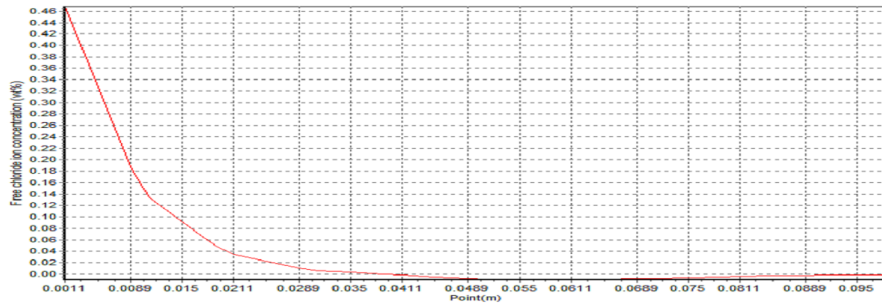
각 시편의 종류별로 부식개시시점이라고 판단되는 기간이 모두 달랐으며, 빠른 시기 순으로 OPC > FA > BS > 고강도 순으로 나타났다. 이는 각 재료별로 콘크리트 내부구조의 밀실함에 미치는 영향이 달라 염화물의 침투정도가 달라져 차이가 나는 것으로 판단된다. 철근부식모니터링의 결과는 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Result of accelerated corrosion test

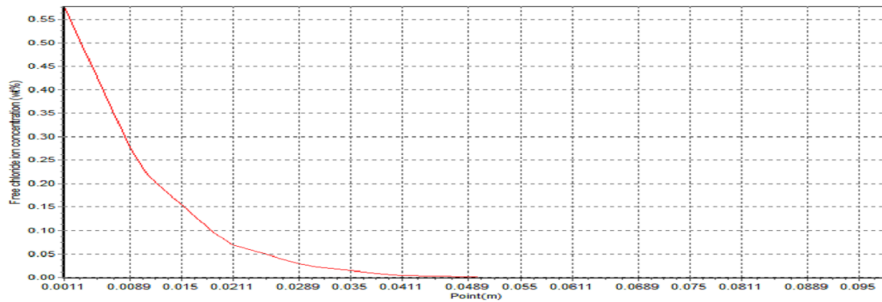
Type	Monitoring	Result	Corrosion initiation time (weeks)
BS	Galvanic	○	18
	Half cell	○	17
FA	Galvanic	○	15
	Half cell	○	15
OPC	Galvanic	○	14
	Half cell	○	14
High-strength	Galvanic	○	23
	Half cell	○	21

### 3.2 염화물침투 해석결과

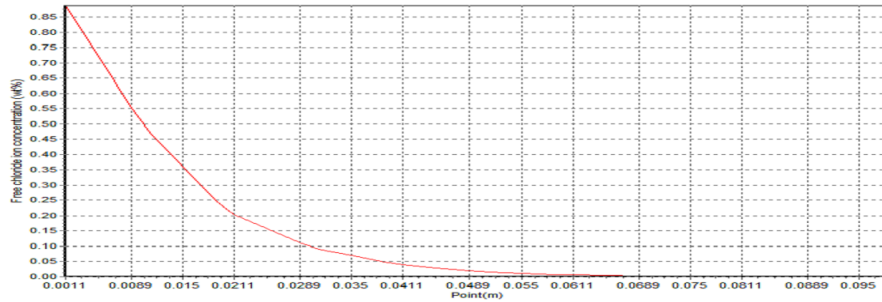
본 논문에서 초기 조건은  $20^\circ\text{C}$ ,  $1000\text{Pa}$ 로 설정하였다. 건조반복시험법과 동일한 조건으로 온도 $20^\circ\text{C}$  습도60% 건조기간 4일, 온도 $60^\circ\text{C}$  습도80% 습윤기간 3일을 1주기로 하여 총 28사이클(196일)로 설정하였다. DuCOM을 이용하여 콘크리트 내부의 자유염화물 농도를 해석한 결과 철근의 위치까지인 10mm부근을 기준으로



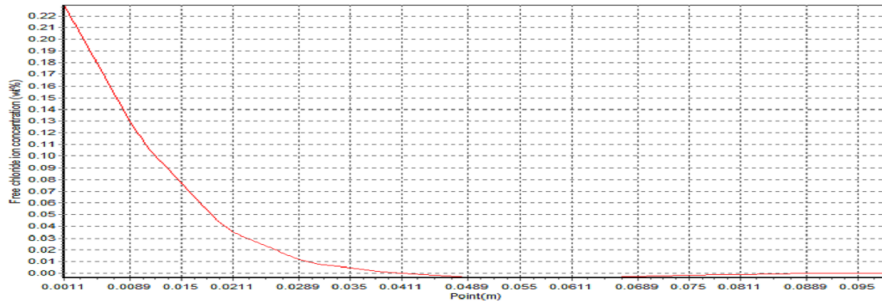
(a) BS analysis result



(b) FA analysis result



(c) OPC analysis result



(d) High-strength analysis result

Fig. 6. DuCOM analysis results

FA > OPC > BS > 고강도 순으로 나타났다. 전체적으로 실험결과와 해석결과는 비슷한 경향을 보였으며, FA의 경우 자유 염화물 농도가 철근위치에서 OPC보다 높다고 해석되었다. 그러나 철근부식촉진시험결과에 따르면 OPC가 FA보다 1~2주 빠르게 부식이 되었다. 이는 FA의 특성상 OPC에 비해 초기강도가 떨어져 밀실성이

낮기 때문에 초기염화물의 침투가 용이하여 나타난 해석이라고 판단된다. 이럼에도 불구하고 실험에서 OPC가 더 빠르게 부식이 일어난 이유는 건습반복작용에 의한 고온의 영향으로 수화반응의 속도가 촉진되었기 때문으로 판단된다.

**Table 7. The charge on the chloride ion permeability**

Coulombs (C)	Chloride ion permeability
> 4,000	High
2,000~4,000	Normal
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
< 1000	Negligible

**Table 8. Resistance to chloride ion penetration test results**

Specimen	Coulombs	Chloride ion permeability
OPC	3514	Normal
FA	3316	Normal
BS	2335	Normal
High-strength	1950	Low

### 3.3 염소이온침투저항성 결과

KS F 2711에서는 전하량에 따른 염소이온 침투저항성을 Table 7와 같이 규정하였으며, 염소이온침투저항성 평가결과 OPC와 FA의 통과전하량은 비슷한 값을 나타냈으며, 고강도는 월등히 침투저항성이 높은 것으로 나타났다. 결과는 Table 8에 나타내었다.

### 3.4 실험결과 분석

건습반복에 의한 철근부식속진 시험결과 콘크리트 배합에 사용된 재료의 종류에 따라서 시편의 부식시기가 모두 다르게 나왔다. 기본적인 배합의 OPC의 부식개시시점이 가장 빠르게 나타났으며, 이후 FA, BS, 고강도 순으로 부식이 발생하였다. 이는 아무것도 첨가하지 않은 기본배합인 OPC에 비하여 FA와 BS의 수밀성 향상과 장기강도의 증진, 고강도의 밀실성 때문이라고 판단된다.

철근부식모니터링의 결과는 갈바닉 전위측정법과 반전지전위법 모두 부식개시시점판단에 있어 비교적 비슷한 경향을 보였다.

DuCOM을 통한 해석모델링결과를 보면 부식속진시험과 비슷한 결과를 보였다. 그러나 OPC와 FA의 해석모델링결과와 부식속진시험결과는 약간의 차이를 보였다. 실험에서 OPC가 1~2주 빨리 부식이 일어났으나 모델링 해석으로는 철근깊이까지의 자유염화물량은 FA가 더 높게 나타났다. 이 결과는 초기에 상대적으로 밀실하지 못한 FA에 빠른 속도로 염화물이 침투되었으며, 건습반복시험법에 의하여 주기적으로 고온의 영향을 받아 수화반응이 촉진되어 나타난 결과라 판단된다. FA의 초기 밀실성은 KS F 2711에 의한 실험에서 뒷받침해주고 있다. 재령 14일의 시편을 사용한 두

실험에서 FA의 염화물침투저항성은 OPC보다 낮게 평가되었다. 정리해보면, FA는 상대적으로 초기에 밀실성이 떨어지기 때문에 염화물의 침투가 용이하여 DuCOM 모델링 해석이나, 염소이온침투저항성 실험에서 OPC보다 염화물량이 높게 나왔으나, 건습반복 시험의 고온의 영향과 장기강도발현특성에 의한 성질로 인해 산소의 공급이 차단되어 장기적인 실험에서는 OPC보다 FA의 부식이 억제된 것으로 판단된다.

## 4. 결론

간만대 환경을 재현한 건습반복법을 통하여 콘크리트배합에 사용된 재료별 시편의 부식개시시기를 알아보기 위해 철근부식모니터링을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 건습반복시험법에 의한 철근부식모니터링 결과, 갈바닉 측정법과 반전지전위법의 결과는 비슷한 동향을 보였으며, 부식개시시기로는 OPC > FA > BS > 고강도 순으로 나타났다. 상대적으로 물-시멘트비가 낮고 시멘트가 많이 들어간 고강도 시편은 다른 시편들보다 부식개시시기가 월등히 길었으며, OPC와 FA의 부식개시 시기는 1~2주의 적은 차이를 보였다.
2. DuCOM모델링을 사용하여 자유염화물량과 염화물침투 깊이를 해석하였으며, 철근부식속진시험의 결과와 비슷한 경향을 보였다. 염화물 침투깊이는 OPC > FA > BS > 고강도 순이었으나, 철근 위치에서의 자유염화물량은 FA > OPC > BS > 고강도 순으로 나타났다.
3. 염화물침투저항성을 평가한 결과 종합적으로 FA > OPC > BS > 고강도 순으로 나타났으며 KS F 2711 실험에서 비슷한 경향의 결과 값을 얻었다.

위의 결과 값들을 종합하여 보면, 콘크리트 내부의 철근의 부식은 밀실성이 가장 큰 영향을 끼친다는 사실을 확인 하였다. 초기에 염화물이 철근 깊이까지 침투하였더라도, 부동태가 활성화되기 전에 콘크리트의 내부가 밀실해진다면 산소의 공급이 차단되어 부식의 발생이 억제된다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Jung, R. (2002) "Development of Measurement Techniques According to the Corrosion Level of Embedded Reinforcement and Evaluation of Structural Performance of Corroded Reinforced Concrete Structures," Dankook University, Korea.
- KS F 2711 (2002) "Testing method for resistance of concrete to chloride ion penetration by electrical conductance," Korean Industrial Standards.
- No, S.J. (2003) "Study on the evaluation of corrosion protection effect with  $\text{LiNO}_2$  inhibitor using corrosion sensor," M.S. Hanyang University, Korea.
- Lee, H.W. (2004) "A study on numerical modeling of nondestructive surface measurement method for steel corrosion in concrete," M.S. Yonsei University, Korea.
- Kim, J.G. (2004) "Development of crack control technique of concrete structures," KIST.
- Lee, S.H. (2005) "Studies on the Durability Design of Reinforced Concrete Structures," M.S. Changwon University, Korea.
- Oh, B.H., Lee, S.K., Lee, M.K., Jung, S.H. (2005) "Influence of Carbonation for Chloride Diffusion in Concrete," Journal of Korea Concrete Institute **17(2)** 179–189.
- Lee, S.S. (2007) "(A) study on the improved durability design of concrete bridge in a marine," M.S. Yonsei University, Korea.
- Hong, I.S. (2008) "Estimation of Critical Chloride Content for Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete by Cyclic Wet and Dry Salt Water Method," M.S. Andong University, Korea.
- KS F 2599-2 (2008) "Standard test method for the accelerated corrosion of reinforced concrete (wet-drying cycles method)," Korean Industrial Standards.
- Lee, C.H. (2009) "Experimental Study on Artificial Crack Healing for Concrete Using Electrochemical Deposition Method," Journal of Korea Concrete Institute **21(4)** 409–417.
- Song, H.W. (2009) "A Study on Corrosion Potential of Cracked Concrete Beam According to Corrosion Resistance Assessment," Journal of Structural Maintenance Korea **13(1)** 97–105.
- Lim, J.S. (2010) "Durability Assessment of Railway Structure under Marine Environments," M.S. Seoultech University, Korea.
- Choi, P.G. (2010) "Early-Age Shrinkage and Air Void Structure of Very-Early Strength Latex-Modified Concrete Using Ultra-Fine Fly Ash," Ph.D thesis, Kangwon University, Korea.
- Kang, G.H. (2011) "Evaluation of chloride attack resistibility of concrete damaged considering finish surface coatings," M.S. DongEui University, Korea.
- Lee, H.J. (2011) "An experimental study on the alkali-activated slag cement using recycling water of ready mixed concrete," M.S. Hanyang University, Korea.
- Ryu, D.W. (2012) "An Experimental Study on the Freezing-Thawing and Chloride Resistance of Concrete Using High Volumes of GGBS," Journal of Korea Institute Building Construction **12(3)** 315–322.
- Gowripalan, N. and Mohamed, H. M.(1998). "Chloride Ion Induced Corrosion of Galvanized and Ordinary Steel Reinforcement in High-performance Concrete," Cement Concrete Reserch, **28(8)** 1119–1131.
- ASTM C 876-91(1999), Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- Karthik, Obla (2000) "Durability of Concrete Containing Fine Pozzolan," International HPC Symposium in Orlando, Florida.
- JCI SC3 (1991), "The accelerated corrosion test for reinforcing steel in concrete"

### 인공해수 건습반복조건에 따른 콘크리트배합별 부식촉진시험법과 염화물 침투해석평가

해양환경 조건 중 건습반복환경인 간만대는 구조물내 철근부식이 가장 빨리 일어나는 것으로 알려져 있다. 때문에 부식촉진시험 방법 중 간만대 환경을 재현한 시험방법이 가장 활발하게 진행되어왔다. 그러나 많은 연구들이 부식임계농도 추정이나 염화물침투해석에 집중되어 있는 상황이다.

본 논문에서는 건습반복조건을 재현하여 구조물내 철근부식촉진시험과 염화물 침투해석을 실시하였다. 배합에 사용된 재료의 종류를 변수로 시험을 실시하였으며, 철근부식모니터링 방법으로 갈바닉 전위측정법과 반전지전위법을 사용하여 철근부식의 유무를 판단하였다. 부식촉진시험결과 각 배합별로 부식기간이 차이가 났으며, 순서는 OPC > FA > BS > 고강도 순으로 나타났다. 부식촉진시험과 동일한 조건으로 FEM 내구성 해석 프로그램인 DuCOM, RCPT 시험을 실시하여 실험결과 값에 대한 타당성을 입증하였다.