

철근 콘크리트 시험편의 철근방식에 관한 측정법

Corrosion Measurements on Reinforcing Rebars in Reinforced Concrete Specimen

이 강 균¹⁾
Lee, Gang Gyun

장 지 원²⁾
Jang, Ji Won

한 기 훈³⁾
Han, Gi Hoon

정 영 수⁴⁾
Chung, Young Soo

Abstract

Recent construction activities and maintenance of marine facilities have been accelerating to keep up with rapid economic growth in Korea. Marine concrete structures are exposed to salts and chloride from ocean environments. The corrosion of reinforcement steel caused by chloride-penetration into concrete may severely affect the durability of concrete structures. The objective of this research is to develop a durable concrete by investigating the corrosion resistance of various corrosion protection systems utilizing different water/cement ratio, silica fumes, corrosion inhibitors and etc. A two-year verification test on various corrosion protection systems has been doing in the laboratory and at the seaside. Corrosion investigations on reinforcement steel are now under progress for more than 180 concrete specimen. Corrosion-related measurements include macrocell corrosion current, instant-off voltage between corroding and noncorroding reinforcement, chloride contents, the corroded surface areas on the reinforcement steel, and etc. A low level of corrosion is investigated on reinforcement steels in concrete specimen made with corrosion inhibitors or applied aqueous impregnating corrosion inhibitors into their surface, even though high chloride contents of concrete specimen.

Keywords: Corrosion Current, Corrosion Inhibitors, Corrosion Protection, Chloride-Penetration, Marine Concrete

1. 서 론

급속한 경제성장에 따른 항만구조물의 건설 및 유지관리에 관한 관심이 급격히 고조되고 가운데 이러한 항만구조물이 해양환경에 노출되어 콘크리트에 매입된 철근의 부식을 야기시키는 요인에 접해있다. 이러한 콘크리트 내부의 염분침투는 매입철근의 부식을 가속화시켜 콘크리트 구조물의 내구성에 상당히 큰 피해를 입힐 수 있어 경제적인 손실이 막대한 실정이다.

-
- 1) 중앙대학교 토목공학과 대학원 석사과정
 - 2) 정회원, 계면공학 연구소 연구실장
 - 3) 정회원, 중앙대학교 토목공학과 대학원 석사과정
 - 4) 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

본 연구의 목적은 여러 가지 방식재를 사용함과 동시에 물/시멘트비를 달리한 실험변수를 이용한 시험체에 대한 부식평가 및 매입철근의 적절한 부식방지 기법의 개발에 있다. 해양환경 조건을 Simulation한 해수 및 담수 순환장치를 이용한 실내시험체의 철근 부식도 평가 및 항만현장에 직접 거치된 시험체 등 다양한 조건하의 2년간의 실험이 현재 진행중에 있다. 40주에 걸쳐 간헐침투되는 해수조건에서 60개의 콘크리트 시험체의 철근 부식도 평가결과를 기초하여 180여개의 콘크리트 시험체를 새로이 제작하여 Half-Cell Test를 통한 Instant-Off Potential, Current Method를 통한 Corrosion Current, Chloride Content 및 시험 종료후 시험체를 파쇄하여 부식된 철근의 무게측정 등을 통하여 철근부식의 거동 및 부식을 예측·평가하고 이를 통한 부식방지기법을 개발하고자 한다.

2. 연구수행내용

본 연구는 시험체의 대기상황, 해수상황, 담수상황 및 농도변화의 조건에 대한 각각의 시험체의 부식에 대한 거동을 파악하기 위하여 보시험체 철근 부식실험과 Slab시험체 철근부식실험으로 실험을 2회로 구분하여 수행하였다.

2.1 보시험체 철근 부식실험

2.1.1 배합실험

실험에 필요한 시험체는 총 10배치(1배치당 시험체 10개)로서 총 시험체는 100개를 제작하였으며, 사용된 방식재는 8종류로서 실리카 흙, Grace社의 DCI, MCI社의 2000와 2005, Sika Korea社의 Ferroguard 901과 903, Gero社의 Steel-Seal과 Hydro-Seal이었다. 사용된 굵은 골재는 경기도 안성지역의 쇠석골재(13mm)를, 잔골재는 일반 건조잔골재에 해사의 효과를 얻기위해 시방서 규정에 근거하여 절대건조 잔골재량에 0.1%의 NaCl를 혼합시켜 사용하였으며, 사용된 Cement는 동양시멘트 제품을 사용하였다. 사용된 시험체의 배합비는 표1과 같다.

표1. 보시험체의 배합비

방식재 종류	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위량 (kg/m ³)							28일 강도 (kg/cm ²)
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	NaCl	혼화재료		
									방식재	AE 감수제 (C×0.3%)	
무처리	60	6	16	185	308	792.2	975.7	0.79	—	0.93 (C×0.3%)	247
실리카흙	60	9	17	185	262	784.8	966.6	0.78	실리카흙 46.25	0.93 (C×0.3%)	291
G社 DCI	60	5.4	19	185	308	792.2	975.7	0.79	3 ℓ/m ³	0.93 (C×0.3%)	251
M社 2000 (mixing)	60	9	20	185	310	792.2	975.7	0.79	1 ℓ/m ³	0.93 (C×0.3%)	232
M社 2020 (도포형)	60	6.6	16	185	310	792.2	975.7	0.79	—	0.93 (C×0.3%)	247
S社 901 (mixing)	60	4.4	20	185	310	792.2	975.7	0.79	6.16 (C×2%)	0.93 (C×0.3%)	291
S社 903 (도포형)	60	6.6	16	185	310	792.2	975.7	0.79	—	0.93 (C×0.3%)	247
고강도	38	2.1	19	180	426	680.5	946.9	0.68	실리카흙 47.37	고성능 감수제 7.11	534
GE社 Steel-Seal	60	6	16	185	308	792.2	975.7	0.79	-	0.93 (C×0.3%)	296
GE社 Hydro-Seal	60	6	16	185	308	792.2	975.7	0.79	-	0.93 (C×0.3%)	213

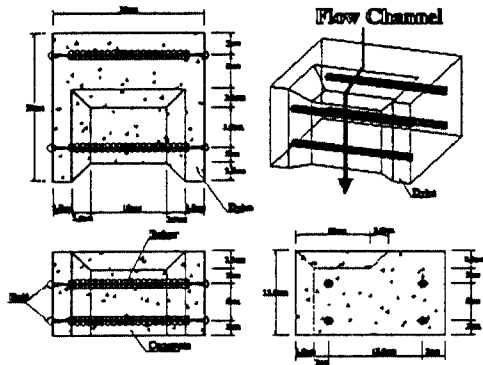


그림1. 실내실험 보시형체

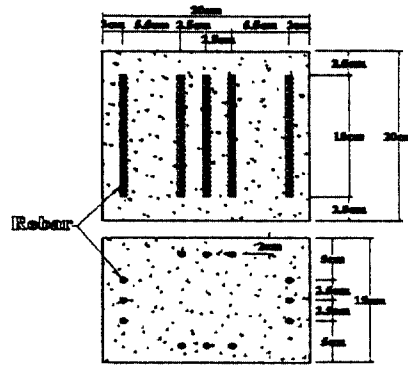


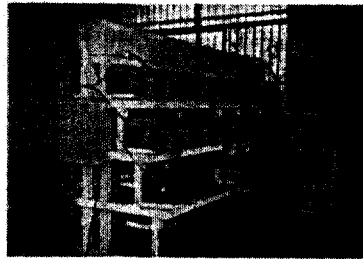
그림2. 현장실험 보시형체

2.1.2 부식도 측정 실험개요

본 연구에서는 전위차와 전류값을 이용한 매입철근의 내부식성을 평가하였다. 시험체를 실험틀 위에 올려놓고, 물흐름장치에 의해 차례대로 시험체위에 담수와 해수가 떨어져 유통하게끔 만들고, 바닥에 놓인 집수정으로 모인 해수는 pumping을 통하여 다시 circulation되며, timer에 의해 해수가 12시간마다 순환되도록 제작하였다. 또한, 각 시험체에서 나오는 2종의 전선을 data logger에 각각 연결하여 일정한 2시간의 interval을 주어 check 되는 전류값을 측정하여 시험체에 매입된 철근의 내부식성을 check하였다. 실험틀의 개략도는 사진1과 같다.



(a) 담수조건



(b) 염수조건



(c) 대기조건

사진1. 조건별 계측모습

2.2 Slab 시험체 철근부식실험

2.2.1 배합실험

실험에 필요한 시험체는 총 9배치로서 총 시험체는 81개를 제작하였으며, 사용된 방식재는 4종류로서 DCI와 Ferrogard 901, Steel-Seal, Hydro-Seal이다. 각각의 방식재에 대하여 적정사용량에 대한 사용량의 변화에 따른 부식거동을 파악하기 위하여 적정사용량과 1/2배, 2배를 사용하여 부식전류를 측정하였다. 각각의 실험체에 대한 공시체는 12개씩 제작하여 조기강도 및 28일강도와 장기강도를 Check하여 방식재에 의해 강도의 저하효과가 유발되는지에 대해 조사하였다.

표2. Slab시험체의 배합비

방식재 종류	W/C (%)	공기량 (%)	슬랩프 (cm)	단위량 (kg/m ³)							28일 강도 (kg/cm ²)
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	NaCl (%)	혼화재료		
									방식재	AE 감수제 (C×0.4%)	
무처리	60	6	16	185	308	792.2	975.7	상부 3% 하부 0.1%	-	1.23	171
GE社 Steel-Seal	60	9	22	185	308	792.2	975.7	"	-	1.23	205
GE社 Hydro-Seal	60	9	22	185	308	792.2	975.7	"	-	1.23	205
G社 DCI	60	4.7	17	185	308	792.2	975.7	"	1.5 l/m ³	1.23	178
	60	5.4	19	185	308	792.2	975.7	"	3 l/m ³	1.23	183
	60	6.5	20	185	308	792.2	975.7	"	6 l/m ³	1.23	183
S社 Ferroguard 901 (mixing)	60	5.5	17	185	308	792.2	975.7	"	C×1%	1.23	172
	60	4.4	20	185	308	792.2	975.7	"	C×2%	1.23	170
	60	22	22	185	308	792.2	975.7	"	C×4%	1.23	147

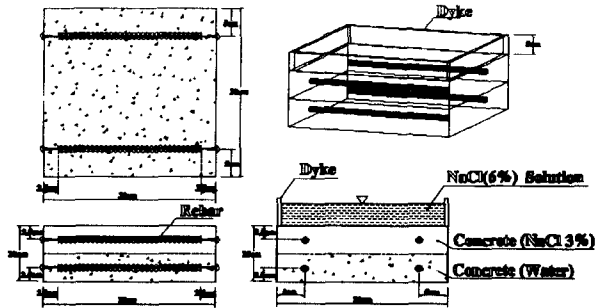


그림3. 슬래브 형태의 시험체 (Ponding Type)

2.2.2 부식도 측정 실험개요

본 실험에서는 슬래브 형태의 시험체에 상부가 이미 염분침투가 진행된 상태를 Simulation하기 위하여 물량에 대한 3%의 NaCl를 첨가하여 배합하였고 하부는 해사사용효과를 위하여 잔골재 사용량의 0.1%의 NaCl를 첨가하여 배합하였다. 양생된 시험체는 실험틀 위에 올려놓고, 시험체의 사면에 접촉시킨 아크릴 판에 6%의 NaCl용액을 담수시켜 각 시험체에서 나오는 2종의 전선을 TDS-601 장치에 각각 연결하여 Check 되는 전위차를 측정하여 시험체에 매입된 철근의 내부식성을 Check하였다.

3. 실험 및 계측방법

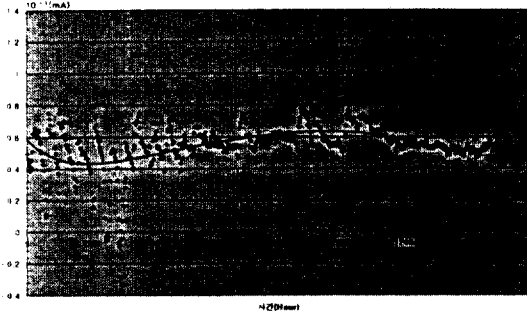
본 실험에서는 보형태의 시험체(100개)와 슬래브 형태의 시험체(81개)에 대해 Current Method와 Polarization Resistance Method, 염분농도 변화측정, 철근중량비 변화측정, 파쇄후 표면부식 측정하여 부식정도를 평가하였다.

- ① Current Method : 시험체에서 나온 Cathode선과 Anode선의 전류값의 변화량 측정
- ② Polarization Resistance Method : Stern-Geary 방정식을 이용한 Corrosion Rate 측정
- ③ 염분농도 변화측정 : 담수·염수순환조건하의 공시체의 염분농도 및 pH 변화를 측정
- ④ 철근중량비 변화측정 : 각각의 철근에 대하여 무게를 계측하여 부식후의 무게감량을 측정
- ⑤ 표면부식 측정 : 28일 양생후 3개월마다 절편을 채취하여 현장실험과 실내실험의 비교

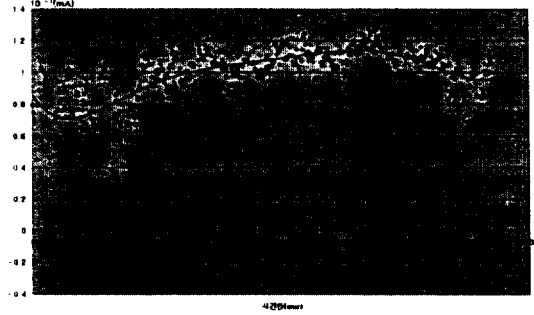
4. 결과분석 및 연구평가

4.1 Current Method

본 실험에서는 실험기간동안의 실시된 시험체중 대표적인 시험체(G社의 DCI 제품과 Normal Concrete)에 대한 Current Method를 통한 전류측정 결과값을 다음과 같이 부식정도를 이해하기 위하여 Graph로 도시하였으며 Polarization Resistance Method를 통한 각각의 공시체에 대한 I_{corr} 를 구하여 Corrosion Rate평가를 하였다.



그래프1. 해수조건의 Normal Concrete 제품



그래프2. 해수조건의 G社 제품

위의 결과를 통하여 1년간의 계측을 통하여 얻어진 결과를 통하여 방식재를 첨가하거나 도포하여진 시험체의 부식거동에 있어서 전류값의 변화가 방식재를 처리하지 않은 시험체가 초기값을 제외하고는 아직까지 유사한 양상을 나타내고 있는 상황으로 더욱 방식성능에 있어서 Current Method로 평가할 수 있는 단계에 이르지 못한 상태이며 이러한 평가는 현재 진행중인 각각의 철근에 대한 무게측정 및 염분농도의 변화측정, Half-Cell Survey를 동시에 측정하므로써 신뢰할 수 있는 결론에 도달할 수 있으리라 판단된다.

4.2 Polarization Resistance Method

3LP 장비를 통한 Polarization Resistance Method에서 측정된 각각의 시험체에 대한 Static Potential과 Polarization Value를 통하여 Stern-Geary Equation을 이용하면 다음과 같은 식으로 부식 전류 I_{corr} 을 구할 수 있다.

■ Stern-Geary Equation :
$$I_{corr} = \left(\frac{\Delta I_{app} (\beta_a \times \beta_c)}{2.3 \Delta \Phi (\beta_a + \beta_c)} \right)$$

I_{corr} : 부식전류 (mA) I_{app} : 극성화 전류값(mA) $\Delta \Phi$: Absolute Value of Cathodic Polarization

β_a : Anodic Tafel Slope β_c : Cathodic Tafel Slope

위의 방정식을 통하여 구한 값에서의 I_{corr} 은 평가기준에 의하여 부식정도를 판단할 수 있다.

아래 표를 통한 Normal Concrete와 G社의 DCI제품은 부식정도는 방식제 사용한 제품의 부식정도가 부식제 사용하지 않은 제품보다 우수하게 평가되었다. 그러나, 계측과정에서 Prewet의 정도차와 계측 시간의 일관성 등의 계측조건 및 초기시험체의 불안정상태 등 여러 가지 요인으로 인하여 일부 시험체에서 방식제를 사용한 제품의 부식정도가 오히려 심하게 나타나고 있었다. 이러한 요인들은 시험이 더욱 진행될수록 감소될 것이다.

표3. Normal Concrete Polarization Value

종류 및 조건		Static Potential (mV)	Polarization (mV)		Polarization Resistance (OHM-FT)	I_{corr} (mA/SQ · FT)
B-NS	담수 조건	204	0mV	0.0000	53	0.7720
			4mV	0.0066		
			8mV	0.0107		
			12mV	0.0149		
	해수 조건	226	0mV	0.0000	50	0.8195
			4mV	0.0102		
			8mV	0.0146		
			12mV	0.0158		

표4. DCI Concrete Polarization Value

종류 및 조건		Static Potential (mV)	Polarization (mV)		Polarization Resistance (OHM-FT)	I_{corr} (mA/SQ · FT)
B-GR	담수 조건	213	0mV	0.0000	48	0.8448
			4mV	0.0059		
			8mV	0.0092		
			12mV	0.0167		
	해수 조건	245	0mV	0.0000	70	0.5793
			4mV	0.0072		
			8mV	0.0102		
			12mV	0.0112		

4.3 표면부식 측정

시험체의 Current Method가 끝나고 매입된 철근의 부식면적을 분석하여 부식의 정도를 비교분석한다. 1차년도 실험후 철근부식면적을 조사한 Normal Concrete 시험체와 대표적인 방식재의 시험체를 그림4와 그림5에 나타내었다. 여기서 방식처리된 시험체의 방식성능평가가 가능하다고 본다.

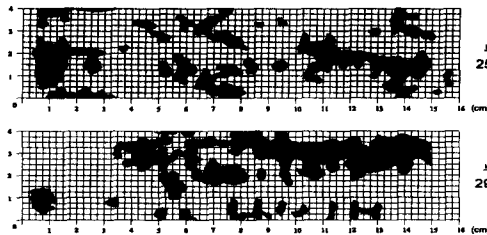


그림4. 방식재가 첨가된 시험체의 철근부식면적

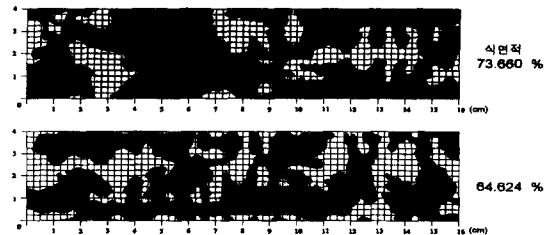


그림5. 방식재가 첨가되지 않은 시험체의 철근부식면적

5. 추후연구과제 및 연구수행상의 문제점

본 연구에서는 6% 염농액을 생성시키어 최악의 환경조건을 Simulation함으로 부식의 진행을 촉진시키었으나 전위 및 전류측정법에 의한 콘크리트 구조물의 철근의 부식실험은 장시간의 실험기간을 요구하는 것이 통상적이다. 또한 장기적인 실험에 의한 결과값들이 신뢰성 있는 Data로 생각되며 이를 근거로 합리적인 철근방식기법을 도출할 수 있으리라 생각된다. 2년간의 철근부식에 관련된 자료 및 data를 통하여 실내부식실험 및 현장부식실험의 연구는 급속히 진전될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 지원하여 주신 건설교통부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Peter Pullar-Strecker, "Concrete Reinforcement Corrosion," Training Course Notes of Colebrand, UK
- 2) Chong D. Lee, "Detection of Reinforcement Corrosion," Ilkwang Publishing Co., Korea, 1996.
- 3) M. Moriya, "Evaluation Repair Methods for Reinforced Concrete Exposed to A Marine Environment," Report on the Technical Research Committee on Concrete Repair, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 16, No. 1, 1994.
- 4) J.W. Jang and I. Iwasaki, "Rebar corrosion Under Simulated Concrete Conditions Using Galvanic Current Measurements," Corrosion Engineering, Vol. 47, No. 11, 1991.