

# 해양골재로 제작한 철근 콘크리트의 부식특성

## Corrosion Characteristics of Reinforcement Concrete made by Marine Aggregate

남진각\* 정진아\* 문경만\*\* 이명훈\*\* 김기준\*\*\*  
Nam, Jin Gak Jeong, Jin A Moon, Kyong Man Lee, Myong Hoon Kim, Ki Joon

### ABSTRACT

In these days, most of marine structures are constructed by reinforcement concrete due to economic reason. Theoretically, it is widely recognized that rebar in sound concrete is safe against corrosion because of the high alkalinity of concrete. However, corrosion for reinforcement concrete made by marine aggregate and exposed to ocean environments has become serious social problem. Especially in Korea, with the rapid economic growth construction activities have been accelerated and needed more natural aggregate. Therefore, inevitably marine aggregate had to be used due to limitation of good quality aggregate. In this study, as a part of efforts to establish the fundamental counterplan on corrosion problems related to marine aggregate, concrete specimens with chloride containing material and inhibitor have been studied. And, in order to analyze corrosion characteristics several electrochemical techniques including half-cell potential survey, linear and cyclic polarization tests were carried out.

### 1. 서론

해양구조물은 대부분 값싼 철근 콘크리트로 건설되는데 이론적으로 건전한 콘크리트 내의 철근은 콘크리트의 고 알칼리 특성(약 pH 12.5)에 의하여 부동태 피막을 형성하므로 부식에 안전하다고 알려져 있다. 그러나, 알칼리도가 낮아지거나  $Cl^-$  이온에 의해 철근 표면의 부동태 피막이 파괴되면 부식이 가속되며 콘크리트 내에 발생한 부식생성물에 의해 팽창압을 유발하여, 콘크리트 구조물의 조기 손상을 초래하여 시설물의 수명을 단축시킬수 있다. 철근 콘크리트의 부식에 관한 연구는 외국에서 이미 오래전부터 활발히 진행되어 왔으며, 현재는 상당한 수준에 이르러 대부분의 건설공사에 방식설계를 적용하여 시설물을 장기간 사용할 수 있게 되었다. 그러나, 국내의 경우 환경의 취약성 및 양질의 골재부족으로 바다모래(해사) 사용이 증가하고 있어 철근부식

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 교수

\*\*\* 정희원, 한국해양대학교 교수

문제가 심각히 대두되고 있다. 또한, 앞으로도 이러한 추세는 계속될 것이므로 이에 대한 대책마련이 절실한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 해사를 사용한 철근 콘크리트의 방식대책을 위한 기초연구의 일환으로 배합재료에 따른 철근의 부식특성 및 인히비터 첨가시의 방식효과 등을 자연전위 측정(half-cell potential survey), 선형 분극시험(linear polarization test), 사이클릭 분극시험(cyclic polarization test) 및 전기화학적 분광시험(EIS) 등의 전기화학적 실험을 통하여 조사하였으며, 철근 콘크리트 부식 판정시 상기 시험방법에 따른 적합성 여부도 조사하였다.

## 2 시험편제작 및 실험방법

### 2.1 시험편 제작

#### 2.1.1 사용재료

시험편 제작시 잔골재는 건조된 해사를, 굵은 골재는 부순돌(쇄사)을 사용하였다. 쇄사는 세척 없이 그대로 사용하였으며, 잔골재는 2종류로 수돗물로 충분히 세척한 세척사(L)와 건조된 해사  $1/2\text{m}^3$ 에 4ℓ의 해수를 인위적으로 공급한 해사(S)로 하였다. 그리고, 청수배합시는 일반 수돗물(F)을, 해수(S) 배합시는 수돗물 50%, 천연해수 50%로 하였고, 해사를 사용한 철근 콘크리트의 방식특성을 연구할 목적으로 방청제( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  : I)를 사용하였다.

#### 2.1.2 시험편의 형상 및 배합설계

슬랩형 시험편은 직경 16mm, 길이 35cm의 철근을 피복두께 3, 4, 6, 8cm, 철근 사이의 수평 간격을 5cm로 하여 그림 1과 같이 제작하였으며, 피복 3cm의 주 철근 중앙에 길이 5cm 분극시험용 시험편(면적 :  $8.711\text{cm}^2$ )을 주 철근에 1cm까지 근접시켜 별도로 설치하였다. 그리고, 배합설계시 물/시멘트 비율 0.45로 하였으며, 방청제( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) 첨가시 방청제 1ℓ당 0.84kg의 수량을 감하였다. 실린더형 시험편은 그림 2와 같이 피복두께 T를 1, 2, 3, 4, 5, 6cm로 하여 제작된 재령

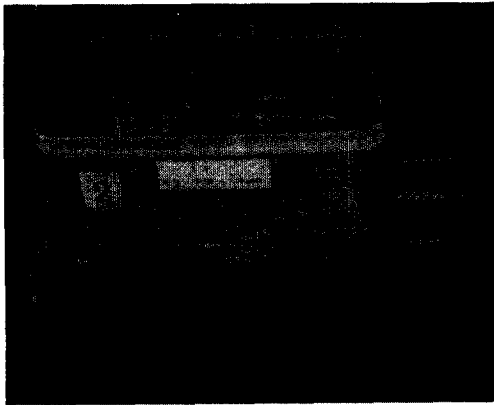


그림 1. 슬랩형 시험편

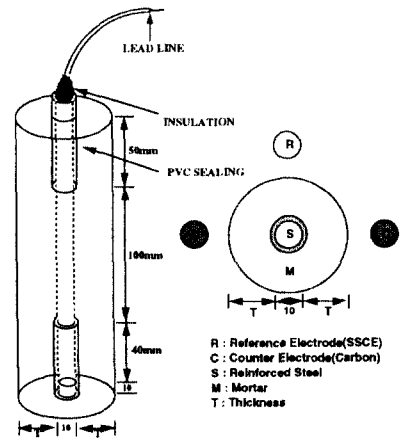


그림 2. 실린더형 시험편

7년된 기존 시험편을 사용하였다. 철근 시편은 직경 10mm 원형강봉을 사용하였고, 분극시험을 위하여 단면적을  $31.4\text{cm}^2$ (길이 10cm)노출시켰다. 그리고, 배합설계는 시멘트 : 모래 : 배합수의 비를 1 : 2 : 0.45로 하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 자연전위 측정

재령 28일 이후 해수로 시험편을 침전시켰으며, 자연전위 측정시 초기에는 전위가 안정된 값을 가질때까지 1일 간격으로 측정하였고, 전위가 안정된 후부터는 1주 간격으로 측정하였다. 자연전위 측정시 기준전극으로는 해수용 염화은전극(Ag/AgCl)을, 전위차계는 Multi-meter(LG DM-334)를 사용하였다.

### 2.2.2 Cyclic 분극시험

사이클릭 분극시험은 인히비터의 성능을 정성적으로 비교, 검토할 목적으로 수행하였으며, 시험시기는 3차 분극저항 및 EIS 시험 후 1회 실시하였다. 분극시험시 전위 주사속도는 #1 시험편에 대해서는  $14\text{mV/sec}$ 로 하였고, #2 시험편은  $1.4\text{mV/sec}$ 로 하였다. 그리고, 역전위 주사는 분극전위를 기준으로 2V까지 양분극 시킨 후 실시 하였으며, 시험종결 전위는  $-200\text{mV}$ (vs. OCP)로 하였다.

### 2.2.3 분극저항시험 및 정량화 분석

분극저항시험은 개로전위(vs. OCP)를 기준으로  $-20\sim 20\text{mV}$  구간에 대하여  $0.167\text{mV/sec}$ 의 주사속도로 매 3개월마다 시행하였으며, 기타 세부사항은 ASTM 규정 G5에 따라 실시하였다. 그리고, 얻어진 실험 데이터를 분극저항법과 타펠법을 이용하여 분극전위( $E_{\text{corr}}$ ), 부식전류( $I_{\text{corr}}$ ) 및 분극저항( $R_p$ ) 값을 구하여 비교, 분석하였다. 데이터 분석시 전위범위는 기본적으로 실험범위와 같은  $-20\text{mV}\sim 20\text{mV}$ (vs. OCP)으로 하여 타펠방식을 적용하였고, 타펠기울기가 구해지지 않는 데이터에 대해서는 전위구간을 보다 줄인 후  $\beta_a$ 와  $\beta_c$ 를  $120\text{mV/decade}$ 로 설정한 후 분극저항법을 이용하여 분석하였다.

## 3 실험결과 및 고찰

### 3.1 자연전위결과

그림 3은 네종류 표준시험편에 대한 피복 3cm 주 철근의 자연전위 측정결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 배합수로 해수(S)를 사용한 SSC와 LSC 시험편이 낮은 전위분포를 나타내었으며, 배합수를 청수(F)로 하여 제작한 LFC와 SFC 시험편은 거의 유사하게 높은 전위특성을 보였다. 그리고, 초기에 두 그룹 사이에 큰 전위차를 보였는데, 이는 SSC와 LSC 시험편의 경우 콘크리트 내에 전기전도성이 높은  $\text{Cl}^-$ 가 콘크리트 내부에 골고루 분포하여 철근과 콘크리트 계면사이의 전기저항을 감소시킴으로서 부식전류의 흐름을 보다 용이하게 하였으며, 콘크리트의 비저항을 전체적으로 감

소시켜 전위측정시 비저항의 영향이 LFC와 SFC 시험편에 비해 작았기 때문으로 사료된다.

그림 4는 인히비터의 함량에 따른 SFC와 SSC 계열 철근의 자연전위특성을 보여주고 있는데, 전반적으로 SFC 계열의 전위가 SSC 계열에 비해 상대적으로 귀(貴)하였고, 최종적으로 SFC4I를 제외하고 시간의 경과에 따라 30mV 이내로 수렴하는 특성을 보였다. 그리고, 인히비터(I)의 양에 의한 전위변화보다 배합수에 따른 전위의 변화가 더 큰 것으로 관찰되었는데, 이는 재령이 짧은 콘크리트의 초기 전위특성은 인히비터에 의한 산화피막의 치밀함 보다 내부와 외부로부터 Cl<sup>-</sup>이온에 의한 비저항 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 추정된다.

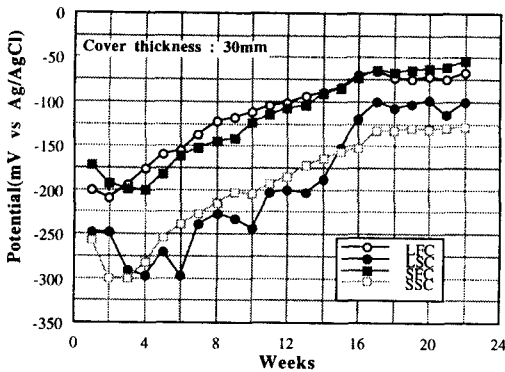


그림 3. 4종류 표준시험편의 자연전위특성

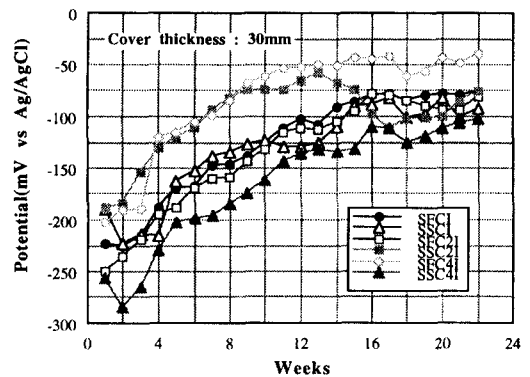


그림 4. 인히비터함량에 따른 자연전위특성

### 3.2 사이클릭 분극시험결과

그림 5는 배합재료에 따른 4종류 슬랩형 표준시험편의 사이클릭 분극특성을 보여주고 있다. 초기 부식전위는  $-0.05 \sim 0V$  사이에 분포하였고, 역전위 주사시 양·음극전환전위(Anodic to Cathodic Transition Potential)는 대략 0.7V 근방에 위치하였다. 그리고, 그림에서와 같이 양분극의 형태가 부동태의 형상을 띄지않고 귀(貴)전위로 갈수록 전류밀도가 증가하는 것으로 보아 현재 철근은 균일부식을 일으키고 있으며, 서서히 부동태피막을 형성하고 있는 도중이라 판단된다. 왜냐하면, 양·음극전환전위가 존재하고 부식전위와 큰 차이를 나타내는 것은 현재 피막의 상태가 산화와 환원반응에 민감하다는 것이며, 산화피막이 부식전류의 증감에 영향을 거의 받지 않고 균일부식을 일으키는 경우 양분극과 역전위 분극시 전류밀도가 거의 일치하게 되기 때문이다.

그림 6은 배합재료를 해사와 해수 및 4.3% 인히비터로 하고, 피복을 1, 2, 3, 5cm로 하여 제작한 재령 7년된 실린더형 시험편의 사이클릭 분극시험 결과를 서로 비교하고 있다. 분극전위와 양·음극전환전위는  $-0.5 \sim 0V$  사이에 넓게 분포하였으며, 전반적으로 피복의 두께가 두꺼울수록 귀(貴)한 전위를 나타내었다. 양분극특성 역시 피복두께가 두꺼운 시험편이 부식전류밀도 값이 작아 우수하였으며, 피복두께가 2~3cm에서 큰 차이를 보였다. 이것으로 보아 인히비터 4.3% 첨가시 재령 7년 현재, 피복 3cm까지는 방식효과가 여전히 지속되고 있다고 판단된다. 그리고, 피복이

5cm의 경우 부식전류밀도가 피복 2cm이하에 비해 수십배 감소하였으며, 역전위 주사시 역전위분극특성 역시 재령이 짧은 슬랩시편의 양상과 유사하게 측정되어 아직까지 별다른 외부의 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

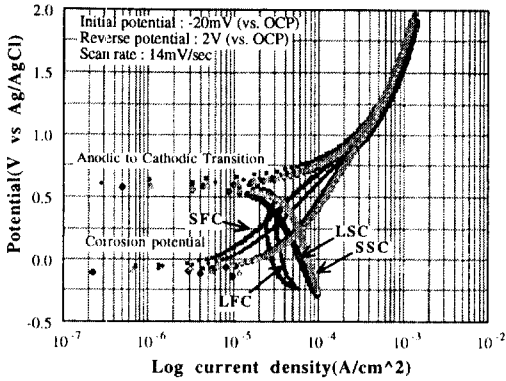


그림 5. 4종류 표준시편의 사이클릭 분극특성

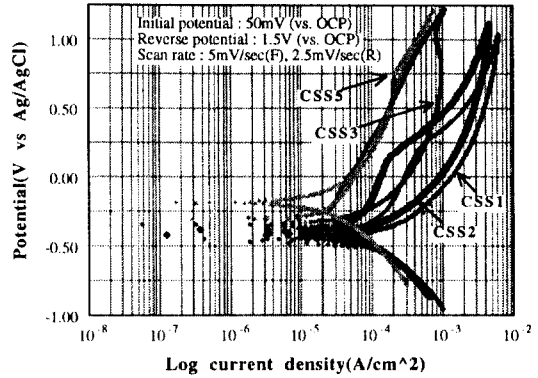


그림 6. 피복두께에 따른 사이클릭 분극특성

### 3.3 분극저항시험 및 정량화 분석결과

그림 7은 부식전류밀도  $I_{corr}$ 에 대한 분석결과로 시간의 경과에 따라 감소하였으며, LFC와 SFC 계열의 부식전류가 LSC와 SSC 계열에 비해 상당히 작은 값을 나타냈다. 그리고, SFC 시편에 비해 인히비터를 함유한 SFC 계열의  $I_{corr}$ 가 오히려 증가하였으며, SSC 계열의 경우 인히비터의 첨가량이 증가할수록 감소하였다. 이는 SFC 계열의 경우 인히비터  $Ca(NO_2)_2$ 가 환원제로 작용하여 철근의 부식전류를 증가시키는데 일조했다고 생각되며, SSC 계열의 경우  $Ca(NO_2)_2$ 가  $Cl^-$ 이온과 경쟁적으로 반응하여  $Cl^-$ 이온의 악영향을 다소 완화 시킨 것으로 여겨진다.

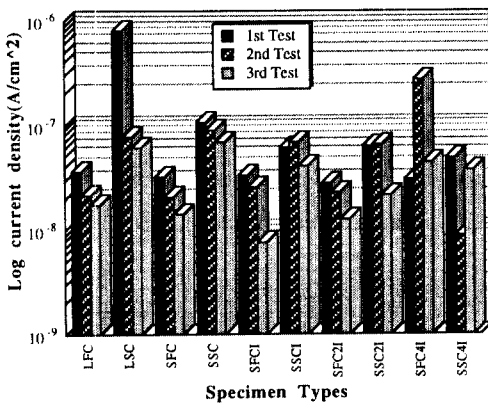


그림 7.  $I_{corr}$ 에 대한 정량분석결과

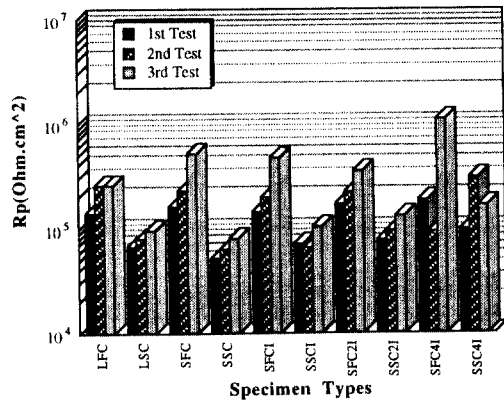


그림 8.  $R_p$ 에 대한 정량분석결과

분극저항  $R_p$ 는 그림 8에서와 같이 시험단계에 따라 순차적으로 증가하였다. 이는 콘크리트와 같이 고 알칼리성의 조밀한 환경에서 철근이 부식하게 되면 부식생성물은 철근표면에 강하게 흡착하여 반응저항으로 작용하게 되며, 시간의 경과에 따라 철근은 더욱 부식되어 초기에 다공성 (porous) 산화피막이 점차 치밀해 지기 때문에 사료된다. 그리고, 인히비터 함량의 증가에 의한 별다른 경향은 보이지 않았고, SFC 계열에 비해 SSC 계열의  $R_p$ 가 훨씬 작았다. 이것은 자연전위 분석시 기술한 바와같이 전기전도성이 큰  $Cl^-$ 이온이 작용하여 철근 피막 및 콘크리트의 비저항을 감소시킨 것으로 판단된다.

#### 4 결론

본 연구는 차세대 골재를 해사로한 철근 콘크리트의 방식대책 마련을 위한 기초연구의 일환으로 몇가지 전기화학적 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자연전위 측정결과 모든 시험편이  $-200mV$  이상에 분포하여 아직까지 심한 부식은 발생하지 않았으며, 배합수를 청수로, 인히비터의 함량을 증가시킬수록 양호한 전위특성을 보였다.
- 2) 사이클릭 분극시험결과 콘크리트의 재령이 짧아 인히비터의 함량에 따른 분극특성은 보이지 않았으며, 전체적인 형상으로 보아 균일부식이 진행중임을 확인할 수 있었다.
- 3) 분극저항시험 결과 전반적으로 SFC와 LFC 계열 시험편이 SSC와 LSC 계열 시험편에 비해  $E_{corr}$ ,  $I_{corr}$ ,  $R_p$  및  $mpy$  특성이 우수하였다.
- 4) 몇가지 전기화학적 실험결과 철근 콘크리트 부식 판정시 자연전위 측정 및 분극저항 시험법이 간편하면서도, 비교 가능할만한 결과를 얻을 수 있는 유용한 시험법임을 확인하였다. 그리고, 현장 적용시 비저항, 염화물 농도 등의 측정을 병행한다면 보다 정확한 철근의 부식진단을 할 수 있으리라 생각되었다.

#### 참고문헌

1. David C. Silverman, "Tutorial on Cyclic Potentiodynamic Polarization Technique", NACE International, Paper No. 299, 1998
2. N. S. Berke, M. C. Hicks and P. G. Tourney, "Evaluation of Concrete Corrosion Inhibitors", NACE, 12th International Corrosion Congress, Vol. 5A, 1993
3. "CMS100 Framework Software", Operator's Manual, Gamry Instruments, Inc., 1994
4. N. J. M. Wilkins and P. F. Lawrence, "The Corrosion of Steel Reinforcements in Concrete Immersed in Sea Water", Corrosion of reinforcement in concrete construction, pp. 119~141, 1983
5. D. M. Harriott, Joseph F. Lamond, John P. Broomfield, Cara J. Tate and Carina S. Hreib, "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete", SHRP-S-360, Concrete Bridge Protection, Repair and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion: A Methods Application Manual, pp. 1