

분극저항법에 의한 철근부식의 정량적 평가

A Quantitative Evaluation on Steel Corrosion by Polarization Resistance Method

정우용* 손영무** 윤영수*** 변근주****
Jung, Woo-Yong Sohn, Young-Moo Yoon, Young-Soo Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

Recently great efforts and investment have been made in order to evaluate concrete durability by steel corrosion. But most of study is relatively or qualitatively estimated, therefore it has a great limitation in evaluating a remaining service life of concrete. In this research, steel corrosion rate was measured quantitatively by polarization resistance method and multi-regressed considering chloride, carbonation, coverage depth, relative humidity, W/C, and the use of deicing salts. And a half cell potential method was used at the same time for the purpose of comparing with polarization resistance method.

1. 서론

내구성 설계와 안전진단에 대한 관심이 증가하면서 철근부식에 대한 평가방법의 연구가 늘어나고 있다. 그러나 현재 가장 많이 쓰여지고 있는 반전지전위법은 철근부식에 대한 정성적인 평가이지 정량적인 평가수단이 아니기 때문에 수명평가를 위한 자료로서는 한계점을 가지고 있다. 본 연구에서는 정량적 해석방법 중 하나인 분극저항법을 여러 가지 조건에 대하여 적용시킨 뒤 다중회귀를 통해 부식속도 예측의 정량화를 시도하였으며 반전지전위법도 동시에 사용하여 부식특성을 비교하였다.

2. 시험개요

부식특성을 정량화하기 위한 시험은 그림1과 같이 표준용과 환경용으로 나누어 수행되었다. 분극저항은 일정기간 동안 EG&G사 M273기종의 포텐시오스탯(Potentiostat)으로 ASTM G3-89에 근거하여 -30mV부터 +30mV까지 0.167mV/s 가압하여 전류의 변화량을 측정하여 구하였다. 분극저항의 시간에 대한 적분값을 실제질량감소량과 비교하여 변환계수값을 실험적으로 결정하였으며 변환계수값에 의하여 분극저항을 부식속도로 나타내었다. 중성화 축진은 CO₂ 10%, 온도 20±2℃, 습도 50±5%의 조건으로 W/C=50% 시료가 20mm이상 진행할때까지 수행하였다. 또한 여러 가지 조건에 대한 부식속도값을 SAS를 이용하여 다중회귀분석식으로 표현하였다.

실제부식질량은 콘크리트 타설전 1/100g까지 측정된 뒤 일정기간이 지난 뒤 콘크리트를 부순 후 샌드브러쉬(Sand Brush)를 통하여 산회피막과 녹슨 부분을 깎아내어 질량의 차이값을 측정하였다. 이

* 정회원, (주)동일기술공사 부설 기술연구소 연구원

** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원

*** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

**** 정회원, 고려대학교 토목공학과 교수

때 온전한 철근에 대하여 산화피막만을 깎는 작업을 통해 산화피막의 질량을 구하고 녹슨 부분만의 질량을 계산하였다. 보편적으로 많이 쓰이는 정성적 시험방법인 반전지전위법(Half Cell Potential Method)도 ASTM C 876에 근거하여 함께 수행하여 비교하였다.

분극저항측정 시험장치는 그림 2와 같으며 전극을 내부에 장착한 이유는 전해질을 사용한 외부 전극형을 사용할 경우 측정에 의해 염화이온이 침투하기 때문이다. 기준전극(R)은 경제적인 이유로 백금대신 스테인레스를 사용했으며 음극전극(C)은 Carbon을 사용하였다. 양극전극(W)에 해당하는 철근은 지름 10mm의 이형철근을 사용하였다. 시험체의 모양은 가로, 세로, 높이가 각각 25mm, 20mm, 10mm이며 모든 측면 방향은 파라핀으로 도포하였다. 또한 철근의 노출부는 무초산 실리콘으로 전선연결부를 제외하고 모두 도포하였다. 피복두께는 20mm, 30mm, 40mm로 달리하였으며 환경용 시료의 경우 기준극을 외부에 설치하였다.

3. 부식속도와 분극저항과의 관계

부식속도를 측정하는 방법에는 분극저항법, AC 임피던스법, 전기화학적 노이즈법, 타펠법 등이 있다. 그러나 AC 임피던스법이나 전기화학적 노이즈법의 경우는 적용방법이 복잡하고 현장에서 사용하기에는 불편한 점을 많이 가지고 있으며 타펠법은 시간이 오래 걸릴 뿐 아니라 부식속도를 측정하면서 부식을 유발할 수도 있다. 반면에 분극저항법은 가장 간단하며 부식속도를 측정하면서 부식을 유발하지 않는다. 다만 분극저항법은 식(1)에서 보여주듯이 타펠계수인 β_a 와 β_c 를 알아야만 사용할 수 있다. 그러나 이러한 타펠계수는 역시 타펠법을 사용해야만하고 정확히 구하기도 힘들므로 콘크리트 구조물에서 실제로 타펠계수를 구하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다. 부식전류는 패러데이법칙인 식(2)에 의하여 질량으로 환산되어질 수 있으므로 식(3)과 같이 시간에 대한 분극저항의 역수를 적분한 값과 실제질량 감소량을 비교하여 변환계수 B 값을 유추하는 시험을 시행하였다. 엄밀히 말해 B 값은 재령과 시료에 따라 변하지만 현재로서는 대표값을 사용하였으며 R_p 도 콘크리트저항에 의한 전압강하를 고려하여 구해야 하지만 B 값 자체가 실험적으로 구해진 것이므로 콘크리트 저항이 일정하다고 가정하면 R_p 를 그대로 사용해도 무리는 없다고 사료된다. 또한 염화이온 함유량을 크게 하여 부식질량을 크게 유도하여 측정오차를 줄이고자 하였다. 그림 3은 변환계수를 구하기 위한 데이터를 1차 회귀분석한 것이며 변환계수 B 는 0.044V로 산출되었고 상관계수 R 도 비교적 높게 나타났다.

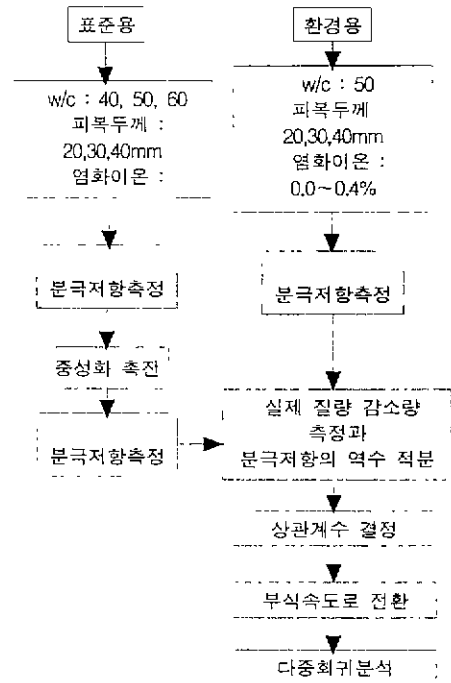


그림 1 부식시험순서도



그림 2 분극시험장치

$$R_p = \frac{dV}{di_{app}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (1)$$

$$m = \frac{M i_{corr} t}{z F} \quad (2)$$

$$Q_{corr} = \frac{55.85 \times A}{z \cdot F} \int dt_{corr} = \frac{55.85 \times A}{2 \times (96500)} E \int \frac{dt}{dt_p} \quad (3)$$

여기서 R_p 는 분극저항($\Omega \cdot \text{cm}^2$), V 는 전압(V), B 는 변환계수, m 은 질량(g), i_{corr} 은 부식전류(A/cm^2), A 는 철근의 단면적(cm^2), t 는 시간, M 은 철에 대한 1몰의 질량(55.85g), z 는 이온수이고 여기서는 2로 계산되고, F 는 96500A, Q_{corr} 은 부식질량(g)을 나타낸다.

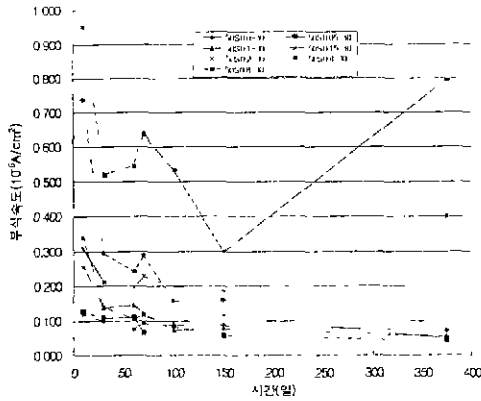


그림 4 W/C=50%, 피복두께 30mm의 염화이온과 재령에 따른 부식속도

4. 여러 가지 조건에 따른 부식특성

4.1 염화이온 함유량에 따른 부식특성

염화이온에 의한 임계부식농도는 pH와 관련이 있기 때문에 중성화도와 연관되어 작용한다. 철근 주변의 pH가 떨어지면 더 적은 염화이온에 의해 철근은 부식될 수 있다. 해사를 사용할 경우에 가장 문제가 되는 것은 염화이온은 처음부터 존재하는 것이기 때문에 임계부식농도보다 많은 염화이온이 함유될 경우 초기재령부터 부식이 일어날 수 있다는 것이다. 그림 4에서 부식속도는 재령 100일까지는 불안정한 특성을 보이다가 그 이후에 염화이온량에 따라 정량적인 크기를 나타내었다 이는 초기 재령 시 콘크리트가 수화반응이 아직 끝나지 않았고 내부의 수분이 많은 불안정한 상태이기 때문으로 사료된다. 따라서 부식속도에 대한 평가는 재령 100일에서 150일 이후에 측정하는 것이 바람직하다고 사료되며 이는 기존의 연구와도 부합한다. 그림 5는 염화이온 첨가량에 따라 반전지전위를 재령에 따라 나타낸 것이며 초기 재령시에는 뚜렷한 성향을 나타내지 않았으나 300일 이후에는 부식여부를 정성적으로 나타내었다.

4.2 상대습도에 따른 부식특성

중성화에 의한 부식과 염화이온에 의한 부식은 모두 수분을 필요로 한다. 일반적으로 염화이온 함유량이 없고 상대습도가 60%미만인 경우는 부식이 거의 일어나지 않으며 60%이상부터 부식속도가 증가하여 98%에서 부식이 가장 빠르다고 한다 또한 염화이온량이 증가하면 상대습도가 60% 미만인 경우도 부식이 일어날 수 있다 본 연구에서는 항온항습조를 표준화용 시료에 대해 사용하였기 때문에 서로 다른 습도 조건과 일정한 온도를 유지하는 설비의 부족으로 실내온도 조건에서 대략적이거나 다른 습도조건 상태에서 부식특성을 측정하였다. 360일간 90일 간격으로 4번 측정하였으며 90일까지는 실내에 방치하였고 90일 이후부터 서로 다른 세 가지 조건인 실내방치 상태(평균 68%, HA), 조금 물을 분사한 비닐로 포장(평균 75%, HB), 많이 물을 분사한 비닐로 포장(평균 90%, HC) 상태로 보관하

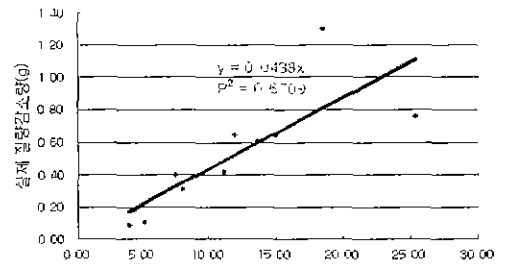


그림 3 변환계수 B결정을 위한 회귀분석

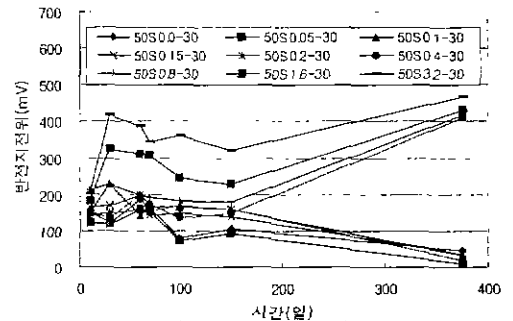


그림 5 W/C=50%, 피복두께 30mm의 염화이온과 재령에 따른 반전지전위

였다 상당히 대략적인 조건이나 누적된 부식량을 측정하는 것이 아니라 특정시간에 측정한 상대습도에 따른 부식속도를 측정하는 것이기 때문에 습도의 영향을 어느 정도는 파악할 수 있었다. 그림 6과 7은 채령 150일인 시료에 대하여 상대습도와 염화이온에 따른 부식속도와 반전지전위를 나타낸 것이다. 상대습도가 증가할수록 동일한 염화이온에 대하여 부식속도가 증가하였으며 염화이온이 커질수록 상대습도 증가에 따른 상승비율이 커졌다.

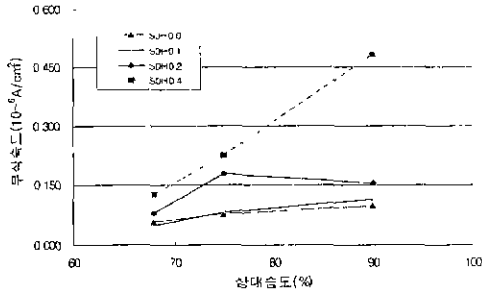


그림 6 W/C=50%, 피복두께 20mm의 상대습도에 따른 부식속도

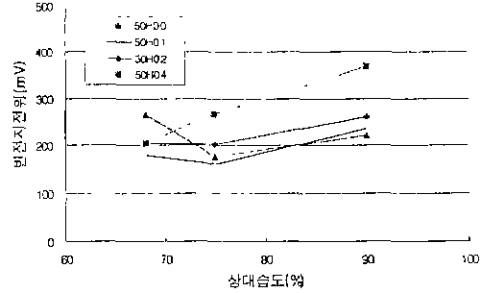


그림 7 W/C=50%, 피복두께 20mm의 상대습도에 따른 반전지전위

4.3 피복두께에 따른 부식특성

피복두께가 증가할수록 외부의 침투물질인 수분, 염화이온, 해빙제, 중성화 진행 등의 영향이 작아질 뿐만 아니라 균열이 적게 발생한다. 하지만 피복두께가 두껍더라도 해사를 사용한 경우에는 염화이온 분포가 피복두께에 상관없이 일정하다. 또한 비가 온 뒤 장시간동안 건조하다면 피복두께가 깊은 쪽이 수분이 더 많을 수 있다. 그림 8에서 부식속도는 피복두께가 증가할수록 감소하였으나 염화이온의 침투에 의한 것이 아니므로 큰 변화를 보이지 않았으며 그림 9에서 반전지전위는 피복두께에 따라 명확한 성향을 보이지 않았다.

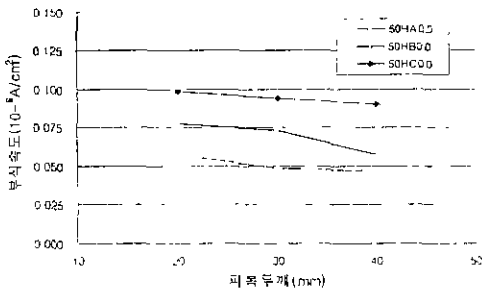


그림 8 W/C=50%, Cl=0.0의 피복두께에 따른 부식속도

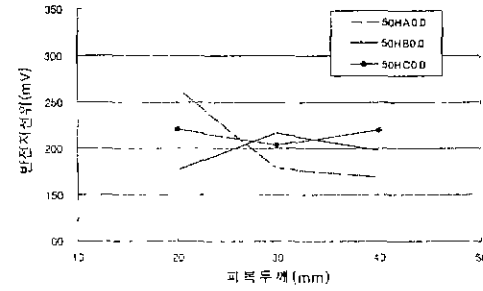


그림 9 W/C=50%, Cl=0.0의 피복두께에 따른 반전지전위

4.4 W/C에 따른 부식특성

W/C가 큰 경우에는 공극률이 커지므로 습도가 높아지면 W/C가 작은 콘크리트보다 내부 습도가 빠르게 높아지며 수분함유량도 많아진다. 반면, 습도가 낮아지면 내부 습도도 빨리 떨어진다. 그림 10과 11은 표준용 시료의 W/C에 따른 평균 부식속도와 반전지전위를 나타낸 것이며 두 가지 모두 W/C에 대하여 특별한 성향을 나타내지 않았다 이러한 이유는 시험 대상 시료의 상대습도 조건이 50%이어서 부식에 대한 공극률의 특성을 나타내지 못한 것으로 사료된다.

4.5 중성화에 따른 부식특성

콘크리트는 대기와 접해있는 이상 중성화는 필연적인 작용이다 그러나 중성화 작용은 일반적으로 더디게 일어나므로 피복두께가 충분하다면 콘크리트의 수명에는 큰 영향을 주지 않는다. 다만 피복두께가 두껍지 않거나 다른 열화요인이 뚜렷이 나타나지 않을 때 중성화는 제 1 성능저하 인자가 된다.

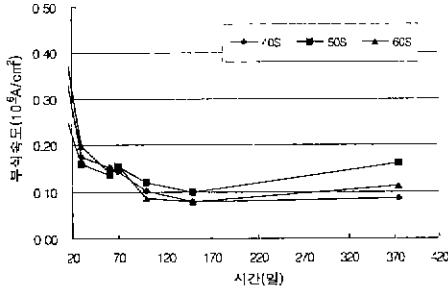


그림 10 W/C에 따른 부식속도(상대습도 50%)

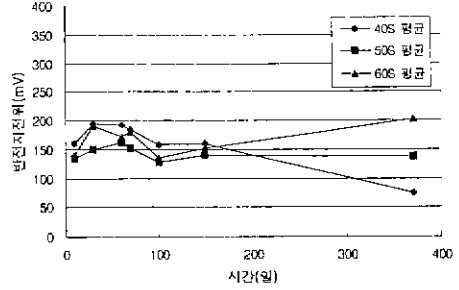


그림 11 W/C에 따른 반전지전위(상대습도 50%)

CO₂는 일반적으로 콘크리트가 포화 흡윤상태에서는 침투하기 어려우며 아주 건조한 상태에서는 콘크리트와 반응하기 어렵다. Parrott에 의하면 중성화에 의한 부식은 수분과 산소의 공급이 중요한 요소이기 때문에 상대습도 95~98%에서 가장 빠르다고 하며 상대습도 60% 미만에서는 중성화가 일어나도 부식이 거의 일어나지 않는다고 한다. 그림 12는 중성화가 20~25mm까지 진행된 후까지 측정된 결과로서 콘크리트 중성화 이후에도 염화이온 0.4를 제외하고는 부식속도가 오히려 감소하였다. 이는 상대습도가 50%이하에서는 중성화가 일어나도 부식이 일어나지 않는다는 것을 보여주며 그림 13도 비슷한 결과를 보여주었다.

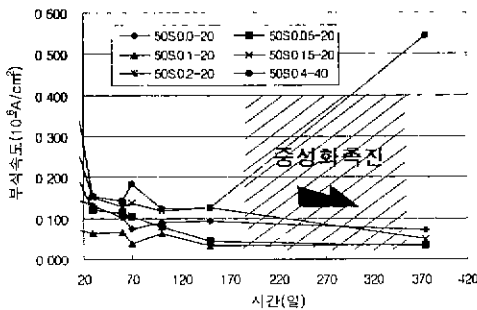


그림 12 피복두께 20mm의 중성화에 따른 부식속도

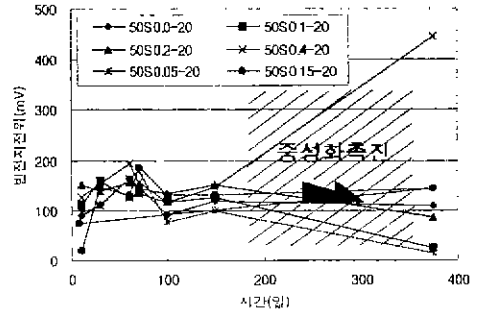


그림 13 W/C=50%, 피복두께 20mm의 중성화에 따른 반전지전위

5. 분극저항법에 의한 철근의 정량적 평가

본 연구에서 측정된 분극저항법에 의한 부식속도를 통계해석 프로그램 SAS를 통해 다중회귀분석하였다. 부식속도에 영향을 주는 인자 중 염화이온, 상대습도, 피복두께만으로 한정하였으나 부식에 의한 수명예측 중 가장 연구가 미흡한 해사를 사용한 경우에 대해서 의미있는 추정식이 될 것이다.

5.1 상대습도 60%이상인 경우의 부식속도

w/c가 50이고 상대습도가 60% 이상인 경우에 대하여 상대습도와 피복두께의 영향력이 나타났다 따라서 부식속도를 식(4)와 같이 염화이온, 상대습도, 피복두께의 지수승으로 다중회귀 분석하였다. SAS에 의하면 T검정에서 유의수준 1% 미만의 적합함을 보였으며 잔차분포도에서도 함수설정이 타당함을 보여주었다. 여기서 *Cl*은 시멘트에 대한 염화이온의 중량%(0~0.4%), *De*는 피복두께로 cm(20~40cm), *Hu*는 상대습도로 %(68~90%)를 나타낸다. 또한 그림 14와 15에서 두 데이터 값이 거의 일치함을 보여 다중회귀의 신뢰도를 알 수 있다

$$I_{corr} = 0.01169e^{2.8899Cl - 0.0130De + 0.0289Hu} \mu A/cm^2 \quad (4)$$

5.2 상대습도 60% 미만인 경우의 부식속도

상대습도 50% 밖에 자료가 없으므로 습도변수를 따로 고려하지 않았으며 피복두께에 대한 T검정 통계량의 유의수준이 40%를 넘어서므로 염화이온에 대해서만 식(5)와 같이 회귀분석하였다. 여기서 Cl 은 시멘트에 대한 염화이온의 중량%(0~0.8%)를 나타내며 그림 16은 상대습도 50%에 대한 부식시험 데이터와 회귀분석을 나타낸다.

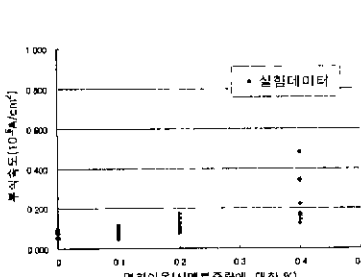


그림 14 부식실험데이터 (상대습도 60%이상)

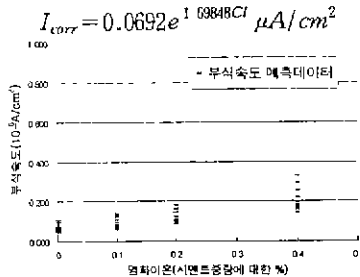


그림 15 부식속도 예측식 데이터 (상대습도 60%이상)

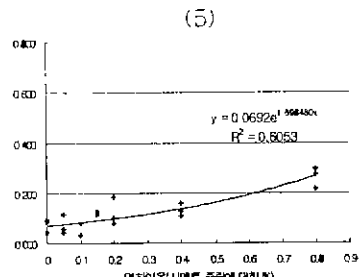


그림 16 부식시험 데이터와 회귀분석 (상대습도 50%)

$$I_{corr} = 0.0692e^{1.06840Cl} \mu A/cm^2 \quad (5)$$

6. 결론

- (1) 여러 가지 조건에 대한 부식특성 시험은 정성적 평가인 반전지전위법보다 정량적 평가인 분극저항법이 보다 명확한 결과를 보여주었다
- (2) 콘크리트 내부의 철근부식은 초기재령시에는 수화반응 및 내부의 잔여수분으로 인해 부식상태가 불안정하므로 부식특성을 전기화학적인 시험으로 해석하고자하면 표준상태(상대습도 50%, 온도 $20 \pm 2^\circ C$)의 경우 약 150일정도가 지나서 시행하는 것이 바람직하겠다.
- (3) 표준용 시료의 경우 분극저항과 부식전류와의 관계를 나타내는 변환계수는 실제질량감소량에 의한 시험에 의해서 0.0438V로 분석되었다.
- (4) 상대습도가 낮은 경우에는 중성화가 발생하여도 부식속도가 작게 측정되었으며 피복두께와의 상관성도 떨어지게 나왔다. 하지만 염화이온이 많은 경우에는 다른 조건에 관계 없이 부식이 빨리 일어났다.
- (5) 염화이온, 상대습도, 피복두께를 고려한 재령에 대한 부식속도를 정량화 하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 연구비 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사의 마음을 표시하는 바입니다. 아울러 연구 과정에 많은 도움을 주신 KIST의 조원일 교수님과 남상철 박사님, 홍익대학교의 이재호 교수님 그리고 실험 과정에 크나큰 도움을 주신 고려대학교 김강진 교수님과 분석화학연구소 연구원 여러분들에게도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- (1) J.Kropp and H.K. Hilsdorf, "Performance Criteria for Concrete Durability", RILEM Report 12, E&FN SPON, 1995
- (2) A. Bentur, S. Diamond and N.S. Beike, "Steel Corrosion in Concrete", E&FN SPON, 1997
- (3) John P. Broomfield, "Corrosion of Steel in Concrete", E&FN SPON, 1997
- (4) P. Schiessl, "Corrosion of Steel in Concrete", Report of the Technical Committee 60-CSC RILEM, Chapman and Hall, 1988
- (5) S. Felii, "Determining Polarization Resistance in Reinforced Concrete Slabs", Corrosion Science, Vol.29, No 1, pp.105-113
- (6) Denny A. Jones, "Principle and Prevention of Corrosion", 2th, Prentice Hall, 1996
- (7) 윤영수외, "잔존수명 예측모델의 개발", 고려대학교 방재과학 기술연구센터, 1999.4
- (8) 염함유 콘크리트 철근의 부식예측 및 방식대책연구, 한국과학기술연구원, 1998.12
- (9) 건설교통부, "해사 및 일반잔골재를 사용한 콘크리트 품질 및 내구성 향상 기술", 1999.4