

염화물 침투 콘크리트의 균열 특성에 따른 철근 부식에 관한 연구

Rapid Corrosion Test on Reinforcing Steels in Chloride-Penetrating Structures with Various Crack Patterns

류 금 성* 유 환 구** 김 국 환*** 이 상 국**** 정 영 수*****
Ryu, Gum Sung Yu, Hwan Gu Kim, Kook Han Lee, Sang Kuk Chung, Young Soo

ABSTRACT

Reinforced concrete is, in general, known as high durability construction material under normal environments due to strong alkalinity of cement. It is, however, well known that moderate or minor cracks in reinforced concrete should be most serious causes to deteriorate the durability of RC structures. Furthermore, chloride contents penetrating through unexpected cracks in reinforced concrete bridges get to weaken corrosion resistance of reinforcement steel in concrete and then to accelerate the deterioration of concrete durability.

The objective of this experimental research is 1) to evaluate the effect of various corrosion protection systems for reinforced concrete specimens with moderate or minor cracks which are exposed to cyclic wet and dry seawater, and then 2) to develop effective corrosion protection systems for reinforced concrete bridges under the exposure of various detrimental environments such as seawater, deicing and etc.

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물은 시멘트의 강알칼리성으로 인하여 일반적인 자연환경하에서는 강한 내구성을 갖고 있다. 그러나, 철근 콘크리트 구조물에서 대·소의 균열발생은 철근의 부식을 초래하여 구조물의 내구성을 저하시키는 가장 큰 요인으로 인식되고 있다. 더욱이 해수에 인접한 교량등의 철근 콘크리트 구조물은 철근 부식이 촉진될 수 있는 유해한 환경에 노출되어 있어, 콘크리트에 발생된 균열을 통한 염화물의 침투는 철근 방식기능을 쉽게 약화시켜 콘크리트 구조물의 내구성을 급격히 저하시킨다. 철근콘크리트에서 균열과 철근부식의 관계에 대해 많은 연구가 진행되어 왔지만 여전히 해결되지 않은 상태로 남아있고 적절한 기술적인 해결책도 제시되지 않고 있다. 또한, 1999년에 개정된 통합 구조설계기준의 철근피복두께 산정방식은 콘크리트 균열과 철근부식에 대한 영향뿐만 아니라 염소

* 정회원, 한국 건설기술연구원 토목연구부

** 정회원, 중앙대학교 건설대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 연구원

**** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

***** 정회원, 중앙대학교 지구환경시스템공학과 석사과정

이온의 침투에 대하여 고려하고 있지 않으며, 이의 산정방식에 대한 명확한 근거를 제시하지 못하고 있다. 따라서, 본 연구는 염화물 침투 콘크리트의 균열특성에 따른 철근부식거동에 관한 철근부식촉진 실험을 수행하는 것으로서, 철근 피복과 철근 방식과의 관계, 균열특성에 따른 철근 부식거동, 방청제 등의 적절한 방식기법 사용시 철근 부식억제효과등을 실험적으로 규명하고자 한다.

2. 연구수행내용

시험체의 Anode부분의 매입철근의 부식을 촉진시키기 위하여, 콘크리타설시 시험체에 여러 형태의 초기 균열을 형성한 후에 적정 하중을 작용시키어 추가로 계획된 균열을 자체적으로 제작한 균열 유도장치(Advanced Spade Model)에 의해 균열폭을 고정하였고, 유사자연환경에 노출된 휨 시험체의 균열양상 즉 균열의 폭, 깊이 및 빈도(단위 길이당 균열의 수)에 따른 매입철근의 부식 진전도를 실험적으로 조사 분석하고자 하였다. 또한 균열을 가정한 상태와 가정하지 않은 상태에서 각종 국내의제품의 철근 방청제를 사용한 콘크리트 시험체의 강도 등의 물성 조사와 방청제의 성능평가를 실시하였다. 실내에서의 부식환경 조성은 자연 해수순환장치를 구성하여 부식을 촉진시켰고, 철근 부식의 정량적 계측방법은 Current Method를 사용하여 Anode 철근의 부식정도를 측정하였다. 이들 측정결과를 적정 기간에 측정한 시험체의 Chloride성분과 비교하고, 부식실험 종료후 철근표면에 발생한 부식면적 및 무게변화등을 측정하고자 한다. 일부의 시험체는 항만현장의 비말대에 거치하여 철근의 부식촉진을 가속화중에 있다. 아래의 사진 1은 보 시험체의 해수 Shower모습이고 그림 1은 보시험체의 철근의 부식전류 계측도이다.

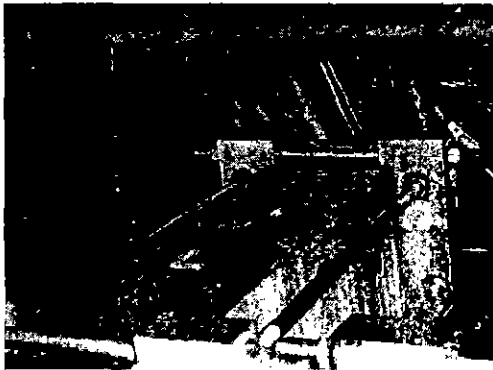


사진 1 보 시험체의 해수 Shower 모습

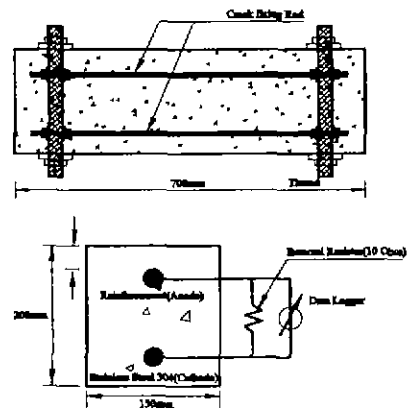


그림 1 철근의 부식전류 계측도

2.1 배합시험 및 실험변수

콘크리트 배합은 설계압축강도 240, 280 및 350kg/cm²의 3 종류를 선택하였다. 시험체의 총 수량은 약 108여개 이상으로 기준 설계압축강도 280kg/cm²의 시험체는 I, II로 구분하며 280kg/cm²(I)은 동일한 배합조건하에 시험체를 제작하기 위하여 레미콘을 사용하였다. 그리고 압축강도 240, 280(II) 및 350 kg/cm²의 시험체들은 물량이 소량이었기에 레미콘 타설을 실시할 수 없으므로 실내에서 배합하였다. 표 1은 시험체의 배합비 및 압축강도를 나타내고, 표 2는 실험변수를 나타내고 있다.

표 1 시험체의 배합비 및 압축강도

설계강도 (kg/cm ²)	W/C (%)	S/a (%)	물	시멘트	잔골재	굵은골재	AE 감수제	유동화제	방청제		압축강도 (kg/cm ²)
240	52.0	44	170	326.0	785.37	1011.09	C×0.2%	-	-	-	265.1
280(I)	47.1	46	178	397.0	810.00	927.00	C×0.3%	-	-	-	271.4
350	36.0	43	160	444.4	725.50	965.40	C×0.2%	C×0.28%	-	-	549.4
280(II)	47.1	46	178	397.0	775.69	906.88	C×0.3%		-	-	345.2
									12 l/m ³	A제품	352.3
									5 l/m ³	B제품	334.4
									0.7 l/m ³	C제품	304.1
											334.3

표 2 실험변수

실험변수	범 위 (변수갯수)	고 정 변 수						
		균열폭 (mm)	균열깊이 (cm)	철근직경	에폭시 코팅	철근갯	강도 (kg/cm ²)	방청제
균열폭 (Crack Width)	0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, mm	-	Not Controlled	D25	Not Coated	4	280	Not Confined
균열깊이 (Crack Depth)	0, 2, 3, 4, 6, 8, cm	0.15	-	D25	Not Coated	4	280	Not Confined
균열빈도 (Crack Number)	1, 3, 5, 7, 9개	0.15	Not Controlled	D25	Not Coated	4	280	Not Confined
철근직경 (Steel Diameter)	D19, 25, 32	0.15	4	-	Not Coated	4	280	Not Confined
에폭시코팅 (Epoxy Coating)	Coated, Not Coated, Coated-Scratched	0.15	4	D25	-	4	280	Not Confined
피복두께 (Cover Thickness)	2, 4, 6, 8, 10cm	0.30	Not Controlled	D25	Not Coated	-	280	Not Confined
압축강도 (Compressive Strength)	240, 280, 350kg/cm ²	0.15	4	D25	Not Coated	4	-	Not Confined
방청제 (Corrosion Inhibitor)	Confined	0.15	4	D25	Not Coated	4	280	-

2.2 균열 보시험체의 제작 및 균열확보

균열의 특성과 철근의 부식정도를 검토하기 위한 시험체는 휨부재를 고려하여 보 시험체를 제작하였다. 시험체의 크기는 700×150×200mm로 철근의 피복두께를 확보할 수 있고 균열의 깊이를 확보할 수 있도록 충분한 크기로 제작하였다. 상단에는 양극(Anode)으로 사용되는 철근을 변수에서 설정된 직경별로 각각 삼입하고 하단에는 부식정도의 정확도를 위하여 전위의 변화가 거의 없는 Stainless Steel 304를 삼입하여 음극(Cathode)으로 사용하였다. 특히, Stainless Steel 304를 사용한 이유는, 철근 콘크리트 부재에서 철근의 부식이 발생한 경로는 철근의 Micro-Cell 작용에 의한 경우와 Macro-Cell의 작용에 의한 경우로 분류할 수 있는데, 본 실험에서는 균열특성 및 철근의 피복두께에 의한 영향에 의해서만 철근의 부식을 평가하여야 하므로, 즉 균열에 따른 철근부식과 철근피복두께에 따른 철근부식을 검토하여야 하므로 매입된 철근 자체에서 Micro-Cell 작용에 의한 철근부식의 영향을 배제하여야 한다. 따라서, 철근과의 전위차가 큰 Stainless Steel 304를 사용하여 오직 철근에서만 양극(Anode) 반응을 발생하게 만들어 철근에서 발생된 철 이온을 Stainless Steel 304에서 모두 소모토록 구성하였다.

2.3 매립철근의 Epoxy도막처리

보 시험체에 매립되는 철근은 Micro-Cell에 의한 철근의 부식 가능성을 최소화하기 위하여 철근의 부식되는 범위를 최소한으로 한정하였다. 따라서 매립되는 철근의 길이는 70cm(철근의 총 길이는 75cm)이지만 부식이 유도되는 범위는 균열이 1개인 경우 철근의 중심부위에서 15cm 범위로 한정하였고 균열 빈도에 대한 경우에는 철근의 부식부위를 60cm로 한정하였다. 또한, 철근을 매립하기 전에 감도 1/1000g 저울을 이용하여 쇼팅전, 후 및 에폭시 도막처리 후에 각각 계량하였고 이는 시험이 완료된 후 철근부식 중량을 계량하는데 활용하고자 한다. 아래의 그림 2는 철근의 부식부위와 에폭시 코팅 처리모습을 나타내고 있다.

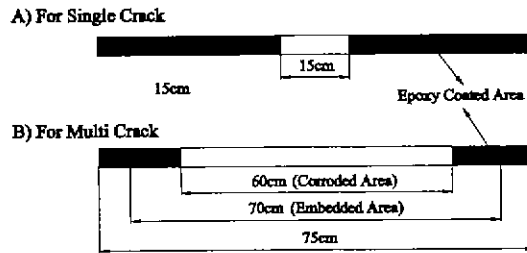


그림 2 철근의 부식부위와 에폭시 코팅 처리

3. 부식계측 및 결과분석

본 실험에서는 시험체에 대해 Current Method의 방법으로 측정하여 부식정도를 이해하기 위하여 Graph로 도시하였다. Current Method는 부식과정에서 발생하는 전자의 흐름을 Data Logger장비를 통하여 각각의 시험에 대한 Steel과 Stainless 304의 자연전위차를 측정하였고 측정된 부식 전류는 콘크리트 내에서 철근의 부식이 발생하는 속도를 알 수 있다. 즉, Anode(철근부위)와 Cathode(Stainless Steel 부위) 사이에 저항을 설치하여 사이의 IR 전위차를 측정하여 Ohm의 법칙에 따라서 전류흐름의 단절을 피하고 측정한다. 저항 양단간의 전압강하는 아래 식 (3.1)과 같이 전류와 저항의 곱으로 표현되므로 전압강하를 측정한 후 알고 있는 저항 값으로 나누어주면 부식전류를 얻을 수 있다.

$$V_{\text{measured}} = I_{\text{corr}} \times R_{10\Omega} \quad \therefore I_{\text{corr}} = \frac{V_{\text{measured}}}{R_{10\Omega}} \quad (\mu A) \quad (3.1)$$

여기서, I_{corr} 은 부식전류(μA)이고, V_{measured} 는 측정된 전압(μV ; $mV \times 10^3$), $R_{10\Omega}$ 은 저항(10 Ohm)이다.

4. 결과분석 및 연구평가

시험체의 Current Method에 의한 전위차는 아래의 그림 3~10에 나타내었고 각각의 변수별로 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 그림 3에서 철근콘크리트의 균열 폭이 증가함에 따라 부식전류의 값이 증가한다. 따라서 철근의 부식도 또한 증가하는 경향을 보이고 있다.

(2) 그림 4에서 첫째의 경우는 균열의 깊이가 증가할수록 철근부식의 개시 시기는 빨라지며, 둘째의 경우는 균열의 깊이가 4cm 인 경우까지는 철근의 부식이 발생되지 않았다.

(3) 그림 5에 나타나 있듯이 ①의 균열이 5, 7개인 경우와 ②의 균열이 9개인 경우는 비슷한 시기에 철근의 부식이 개시되었으며 ③과 같이 균열이 1, 3개인 경우는 약 2배의 시험기간이 지난 후에 철근의 부식이 개시되었다.

(4) 그림 6에서 초기에는 철근의 직경과 부식속도와의 상관성이 발견되지 않았다가 시간이 지남에 따라서 철근의 직경이 작을수록 부식속도가 증가하는 경향을 보이고 있다.

(5) 그림 7에서 역폭시 코팅의 경우에는 실험시작 후 약 4000시간이 경과한 후에도 철근의 부식이 발생되지 않는 것을 보면 방식효과는 확실한 것으로 판단된다. 그러나 역폭시 코팅을 하지 않은 경우에는 ①과 같이 약 3000 시간이 경과한 후에 급격한 철근부식 경향을 보이고 있고 역폭시 코팅이 손상된 경우에는 ②와 같이 약 3200시간 경과 후 철근의 부식이 감지되다가 약 3800시간이 경과한 후에 다시 회귀하는 현상을 보이고 있는데, 역폭시 코팅이 손상된 경우에는 아직까지 철근의 부식이 활성화 상태에 있지 않는 것으로 판단된다.

(6) 그림 8의 ①에서와 같이 철근의 피복두께가 가장 낮은 2cm의 경우에서 철근의 부식이 가장 먼저 발생되고 있으며 ②에서와 같이 4cm인 경우에서도 철근의 부식이 관측되고 있다. 기타의 경우에는 철근의 부식이 거의 감지되고 있지 않는데 이는 그림 3의 실험결과(균열 폭과 철근부식)에서와 같이 균열 폭이 0.15mm이고 피복두께가 4cm를 초과하는 경우에는 철근의 위치에서의 균열 폭이 0.05mm 이하인 것으로 판단되며 철근의 부식에 대한 안전한 것으로 보인다

(7) 그림 9에서 균열이 발생한 경우의 콘크리트 압축강도에 따른 철근부식의 정도도 비슷한 경향을 보이고 있는데 그림에서 ①과 같이 240kg/cm²인 경우가 다른 강도에 비해 가장 먼저 철근의 부식이 발생되며 강도가 증가할수록 철근의 부식이 개시시기가 늦어지거나 발생되지 않고 있다.

(8) 그림 10의 ①과 같이 콘크리트에 방청제를 혼합하지 않은 콘크리트의 경우가 철근의 부식이 발생되었고, ②의 경우는 방청제 A제품으로 약 2100시간 후에 철근의 부식이 감지되다가 ③의 약 3400시간에 다시 철근의 부식이 없는 것으로 나타났다. 전체적으로 볼 경우 방청제를 혼합한 경우와 혼합하지 않은 경우의 방식효과는 확실하지만 장기적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

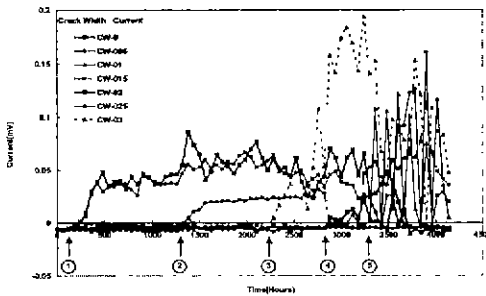


그림 3 균열 폭에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

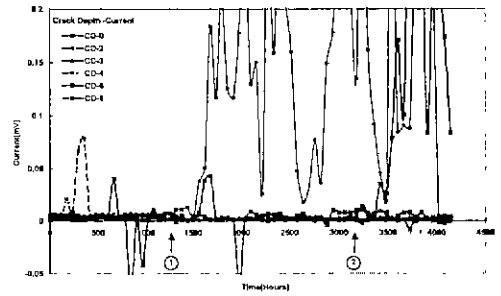


그림 4 균열 깊이에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

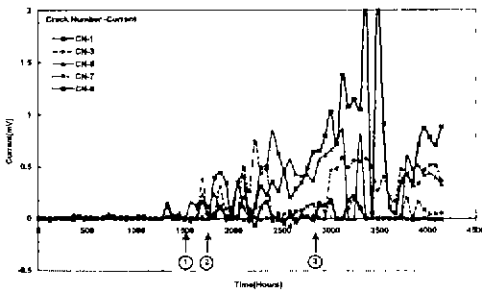


그림 5 균열빈도에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

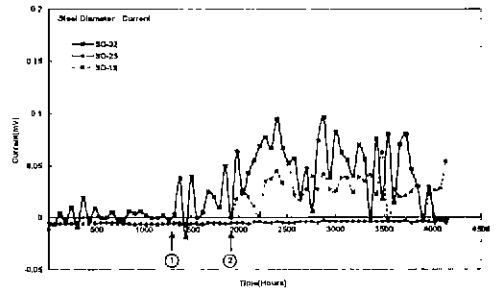


그림 6 철근직경에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

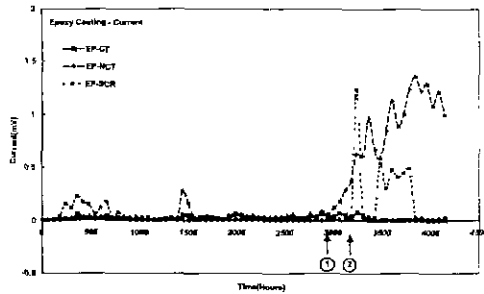


그림 7 역폭시 코팅에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

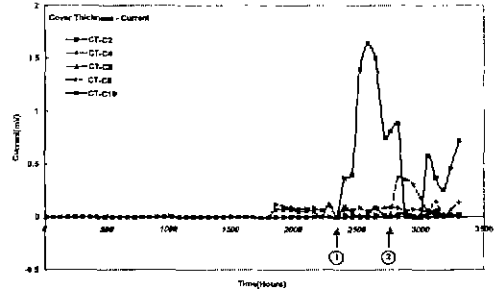


그림 8 피복두께에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

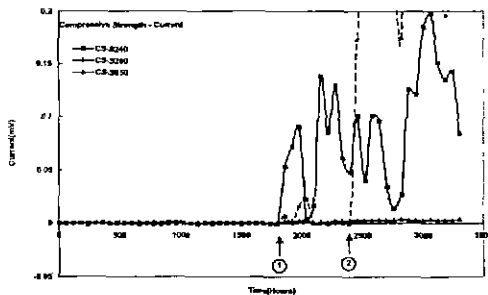


그림 9 콘크리트 압축강도에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

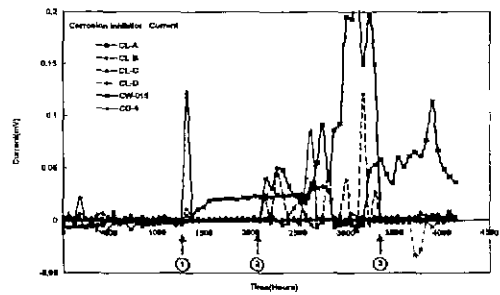


그림 10 방청제에 따른 철근의 부식전압(mV) 값

5. 결 론

본 연구에서는 기건상태 및 염농액 흡윤상태의 노출조건에 따른 철근 부식을 촉진하고 있으나 짧은 시간이 요구하리라 판단되며, 또한 장기적인 실험에 의한 결과값들이 신뢰성 있는 Data로 생각되며 이를 근거로 합리적인 철근방식기법을 도출할 수 있으리라 생각된다. 한편, 본 연구와 관련하여 제작한 항만노출 현장 시험체를 지속적으로 10년~20년 동안 계속적으로 측정하므로써 항만에 거치한 시험체의 철근부식결과 등을 실내부식실험에 대한 결과와 비교하여 각종 철근 방청제의 현장활용성을 평가하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 한국도로공사의 1998~1999년도 연구비 지원 및 중앙대학교의 교내 연구기자재 지원사업의 지원을 받아 수행되고 있으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 222, "Corrosion of Metals in Concrete", ACI 222R-85, ACI Journal, Proceedings, Vol.82, No.1, pp3-32, January-February 1985.
2. ASTM, Annual book of ASTM standards, "Concrete and Aggregate", Vol.04, 1990.
3. Chung Y. S., "Experimental Research on Corrosion Protection Systems for Reinforcement Steel Embedded in Concrete", Norwegian Concrete Association, CONSEC'98, 1998.
4. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서", 건설교통부, 1996.
5. 건설교통부, "도로교 표준시방서", 건설교통부, 1996.
6. 이종득, "철근부식 진단" 도서출판 일광.
7. 정영수, "염화물 침투 콘크리트의 균열 특성에 따른 철근부식에 관한연구", 한국도로공사 1999년 최종보고서