

조수간만대 환경의 콘크리트 조인트에서 철근의 부식

Corrosion of Steel Bars in Concrete at Joints under Tidal Environment



이준구*
Joon-Gu Lee



박광수**
Kwang-Su Park



김명원*
Myung-Won Kim



김관호*
Kwan-Ho Kim

본 번역기사는 미국콘크리트학회(ACI) Materials Journal에 게재된 Tarek Wddin Mohammed와 Hidenori Hammada의 논문 (Vol.100, No.4, July-August 2003)을 번역한 것이다.

초 록

다양한 조인트를 갖도록 제작된 콘크리트 실험체내 철근의 부식에 대한 상세한 조사가 이루어졌다. 실험체들은 25년 동안 조수간만대에 노출되었다. 몇몇 실험체들은 25년 후에 가속챔버 내에서 보다 가혹한 열화환경에 노출되었다. 실험항목은 부착강도, 중성화깊이, 염분농도, 부식의 전기화학적, 물리적 측정, 그리고 조인트부 생성물이다^{1,2)}. 에폭시나 라텍스 페이스트로 처리된 조인트면을 제외하고 조인트면에 자동생성되는 생성물은 콘크리트 내 철근의 부식을 막는다. 철근과 콘크리트 계면에서의 공극은 국부부식의 주원인이다. 조인트 표면의 레이탄스 제거가 조인트면의 중성화 깊이를 줄인다. 레이탄스 제거 후 모르타르 코팅처리가 라텍스 페이스트나 에폭시코팅처리에 비해 가장 작은 중성화 깊이를 보인다. 레이탄스 제거후 에폭시코팅처리는 가장 강한 부착력을 갖지만 절점부 콘크리트 내 철근부식 방지에는 가장 우수한 성능을 보이지 못한다³⁾.

1. 서 론

조인트는 높이변화, 연속타설, 타설지연 등과 같은 여러 가지 이유에 의해 피할 수 없이 만들어진다. 일반적으로 조인트가 있음으로 인한 철근부식 메커니즘, 부착강도 등에 관한 연구는 축진실험으로는 수행되었지만 여러 유형의 조인트에 대한 장기간의 성능연구에 관한 문헌은 찾아보기 어렵다. 따라서 철근덮개

20, 40, 70 mm를 갖도록 직경 150 mm, 높이 300 mm 콘크리트 공시체에 철근을 매립하여 그 부식에 대한 상세한 연구를 수행하였다. 조인트는 각 공시체의 중간높이 정도에 의도적으로 만들었다. "두개의 연속된 층에서 재료의 일체화를 방해할 충분한 타설지연으로부터 야기되는 콜드조인트"를 정의하는 ACI 116 R에 따라 본 연구에서 조사되는 조인트는 콜드조인트로 분류한다.

2. 연구 중요성

본 조사의 중요한 세 가지 사항은 1) 조수간만대 환경에 노출시킨 25년이란 기간 2) 거시적 부식과 미시적 부식을 분리하여 측정하는 실험 방법 3) 7가지 유형의 조인트에 대한 조사(조인트 표면처리 기법에 따른 분류)이다.

이 연구는 조수간만환경에서 여러 가지 조인트 종류의 성능에 대한 판단을 내릴 때 유용할 것이다. 또한 조인트 부위 콘크리트 내 철근의 거시적 부식과 미시적 부식의 범위와 절차가 정해질 수 있다. 대기환경에 노출된 또 다른 일련의 동일재령 실험체가 별도로 조사되었다⁴⁾.

3. 연구 범위

7가지 종류의 조인트가 들어있는 25년 재령의 철근이 매립된 직경 150 mm, 높이 300 mm의 원주형 실험체들이 분석되었다. 조인트 면처리 방법에 따른 조인트 유형의 분류가 뒤에 언급된다. 실험체는 25년동안 조수간만에 노출되었다. 25년간의 노출 후에 몇몇 실험체들은 조인트 성능의 명확한 평가를 위해 추가적 열화작용을 받도록 가속챔버에 넣어졌다. 조사항목은 부착강도, 중성화 깊이, 철근주위 염분함량, 콘크리트에서 부식의 전기화학적, 물리적 평가, 그리고 조인트면에 수직인 철근과 콘크리트 계면에서 가깝거나 먼 위치의 조인트면 위에 생성되는 생성물이다.

* 정희원, 한국농촌공사 농어촌연구원 주임연구원
leejk@ckr.or.kr

** 정희원, 한국농촌공사 정보관리실 실장

4. 재 료

보통포틀랜드시멘트(OPC)가 사용되었다. 물리적 특성과 화학적 분석 결과를 <표 1>에 나타내었다. 강자갈쇄석과 모래가 각각 굵은골재와 잔골재로 사용되었다. 모래의 비중, 흡수율, 조립률은 각각 2.58, 2.25%, 2.75였다. 굵은골재는 각각 2.63, 0.97%, 6.89였다. 일본산업규격(JIS SR24)철근이 사용되었다. 철근에서 탄소, 규소, 망간, 인, 황, 철 함량은 각각 0.1%, 0.21%, 0.66%, 0.02%, 0.02%, 98.9%였다. 철근의 항복강도는 230 MPa 였다. 화학적 성분은 JIS G3112를 만족하였다.

5. 배합비

콘크리트 배합비는 <표 2>와 같이 요약된다. 물시멘트 비(w/c)는 0.5로 하였다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량은 각각 12±2 cm, 4±1%였다. 리그노설피산산계 감수제가 혼화제로 사용되었다. 배합수는 음용수가 사용되었다.

6. 실험체, 양생, 폭로조건

표 1. 시멘트의 물리·화학적 성분

Specific Gravity	3.13
Blaine fineness, cm ² /g	4,260
Ignition loss, %	1
SiO ₂ , %	21.0
Al ₂ O ₃ , %	4.8
CaO, %	66.0
MgO, %	1.1
SO ₃ , %	2.6
Fe ₂ O ₃ , %	2.7

표 2. 콘크리트 배합표

구 분	단위량 (kg/m ³)
G _{max} (mm)	25
Slump(cm)	12±2
Air(%)	4±1
w/c(%)	49.7
s/a(%)	43.2
Water(kg/m ³)	149
Cement(kg/m ³)	300
Sand(kg/m ³)	820
Gravel(kg/m ³)	1,099
Water-reducing admixture(kg/m ³)	0.750

주) G_{max}=굵은골재 최대치수, s/a=잔골재율

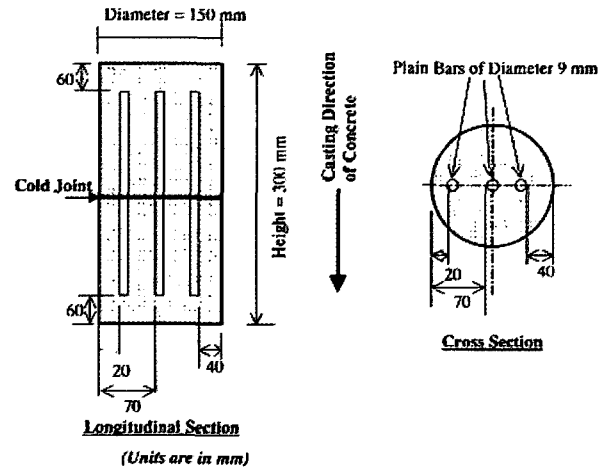


그림 1. 실험체 설계도

철근이 매입된 직경 150 mm 높이 300 mm 원주형 공시체는 <그림 1>에 보인 바와같이 제작되었다. 먼저 철근뿔개 20, 40, 70 mm가 되도록 철근을 몰드에 설치하고 몰드바닥부터 절반의 콘크리트를 채운 후 다졌다. 또한 나무망치로 몰드를 가볍게 다졌다. 몰드에 커버를 씌워 상대습도 80% 이상, 온도 20℃의 실내에 보관하였다. 24시간 후 탈형하고 경화된 콘크리트 표면을 다음에 설명되는 순서에 따라 조치하였다. 그 후 상부절반을 채우고 또 24시간 양생하였다. 양생조건은 전과 같이 하였다. 7가지 종류의 조인트는 다음과 같이 조인트 표면에 시도된 조치에 따라 만들어졌다(표 3 참조).

24시간 후 실험체는 탈형되었고, 28일 동안 상대습도 80% 이상, 온도 20℃ 실내에서 양생되었다. 실험체는 25년 동안 조수간만에 폭로되었다. 이 폭로는 폭로유형 A(25년 조수간만노출)로 정의되며, 풀은 해안가에 위치한다. 해수는 6시간 간격으로 바다에서 풀로 급수되고 바다로 자동 배수되었다. 조수간만 풀 내 실험체 설치위치와 수위의 변화는 <그림 2>와 같다. 실험체는 그 위치와 풀에서 수위의 변화에 따라 매 사이클마다 9시간 동안 해수에 잠겨있는 후 3시간 대기 건조되는 과정을 거쳤다. 실험체의 중심선을 기준으로 측정되었다. 매년 정기적 혹은 기타 뜻하지 않은 이유에 의해 이를 동안은 유지관리를 위해 조수간만 풀

표 3. 7가지 종류의 조인트

콜드조인트 유형	콜드조인트 표면처리
A	레이턴스 제거 없음
B	레이턴스 제거 없이 5 mm 두께 모르타르 코팅
C	레이턴스 브러싱 제거
D	레이턴스 브러싱 제거 후 5 mm 두께 모르타르 코팅
E	레이턴스 제거 없이 에폭시 코팅
F	레이턴스 브러싱 제거 후 에폭시 코팅
G	레이턴스 브러싱 제거 후 라텍스 페이스트 코팅

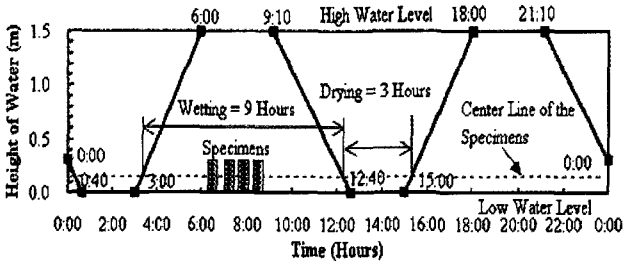


그림 2. 조수간만대 물내 수위변화와 실험체 위치

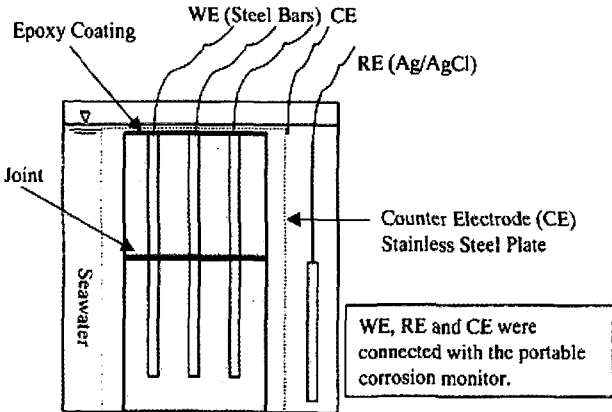


그림 3. 휴대용 부식모니터를 이용한 측정법(일반조사)

을 비우게 되었다. 폭로지역의 위도와 경도는 각각 35°N, 138°E 이다. 폭로지역의 연간 월평균 기온은 6에서 30 °C까지 변한다. 실험체는 어떠한 동결융해작용의 영향도 받지 않았다.

해수의 비중과 pH는 각각 1.022와 7.77이었다. 해수의 나트륨, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 염화물, 황산염, 그리고 탄산염 함량은 각각 9290, 346, 356, 1167, 17087, 2378, 그리고 110 ppm이었다. 조수간만대 해수에 25년간 노출된 후 몇몇 실험체는 보다 가혹한 열화작용을 받도록 가속챔버 내에서 10사이클 동안 노출되었다. 이 폭로는 폭로유형 B(25년 조수간만노출 + 가속 10사이클)로 정의된다. 한 사이클은 7일이 소요된다: 3.5일은 60 °C 해수침지, 3.5일은 약 25 °C 정상 대기온도에 기전노출, 건조기간동안 일정한 건조를 위해 전기팬이 사용되었다.

7. 평가 방법

25년간의 폭로후에 각 조건마다 4개의 실험체를 폭로영역에서 실험실로 옮겨 깨끗이 씻었다. 우선 <그림 3>에서와 같이 실험체 윗면에서 70 mm두께의 원반모양을 잘라내고 매입된 철근에 전선을 연결하였다. 철근의 부식에 대한 일반적인 전기화학적 조사가 수행되었다. 반전지전위, 분극저항, 그리고 콘크리트 저항이 휴대용 부식측정기에 의해 측정되었다. Ag/AgCl 대표전극

(RE)이 사용되었다. 분극저항과 콘크리트 저항은 10 mHz 저주파와 20 Hz 고주파로 고정된 채 교류임피던스법에 의해 측정되었다. 실험체는 측정전 1일동안 해수에 침지되어 있다. 스테인레스 재질의 계수전극(CE)이 실험체 주변에 설치된다. 실험 과정에서 철근의 미소전지 부식전류밀도는 분극저항값자료와 아래 주어진 Stern-Geary 방정식을 이용하여 계산되었다⁵⁾.

$$I_{mic} = \frac{B}{R_p} \times 10^6$$

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)}$$

여기서, I_{mic} 는 미소전지전류밀도로서 단위는 $\mu A/cm^2$ 이다. B 값은 양극과 음극 분극곡선(β_a 와 β_c 각각)의 기울기에 따라 변한다. β_a 와 β_c 를 120 mV/decade로 가정하면, B 값은 0.026 V^2 로 추정될 수 있다. 변수 R_p 는 분극저항으로 단위는 $\Omega \cdot cm^2$ 이다.

실험체를 쪼개어 벌린 후 조인트 영역 주변 철근에서 특별한 부식을 발견하지 못하였다. 그래서 매 조건마다 두 개의 실험체를 축진실험공간에 넣고 조인트들의 성능을 명확히 비교하기 위해 추가로 열화축진을 시켰다. 10회의 반복 열화축진 후 앞에 사용했던 일반적인 전기화학적 조사방법과 동일한 방법으로 매 조건의 한개 실험체를 사용하여 측정하였다. 전술한 실험법들로는 1) 조인트부 철근의 미소전지부식과 2) 미소전지 부식형성 메커니즘을 평가할 수 없었다는 점은 중요하다. 그래서 특별한 실험 방법들로서 보다 상세한 실험적 조사 방법이 적용되었다. 이를 위해 매 조건마다 한개씩의 실험체를 다이아몬드 커터로 잘라, 상부, 조인트부(중앙부), 바닥부로 세 조각을 만들었다. 가운데 부분은 조인트가 중앙에 포함되고 꼭 60 mm가 되도록 잘랐다. 철근에 전선을 연결하고 고정저항 1Ω을 부착하였다. 매저항의 끝에서 전압강하를 측정하기 위해 저항이 사용된 것이다. 이 전압은 저항을 통해 흐른 전류와 수치적으로 동일할 것이다. 실험체는 해수중에 보관되었다. 해수중에서 24시간을 보낸 후에 한시간 간격으로 66시간동안 저항을 통과한 전압강하가 데이터 로거에 의해 계속 측정되었다. 한번에 29개 채널을 측정하기 위해 스위치 박스를 함께 사용하였다.

측정시스템의 조정을 위해 기지전류 10 μA 를 1Ω의 저항에 흘려 앞에서 언급한 장치로 계속적으로 데이터를 얻어들었다. 실험장치도는 <그림 4>에 보인 바와 같다. 이 경우에서는, 철근 덮개 20 mm와 70 mm인 철근만 조사되었다. 해수에 침지되기 전 절단된 모든 면들은 에폭시레진으로 코팅처리 되었다. 상부, 중앙부, 바닥부에 위치한 각 철근에서 기록된 전압자료로부터

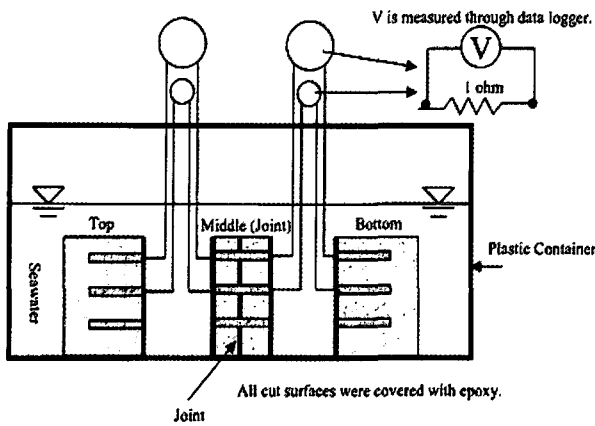


그림 4. 거대전지의 부식측정(상세조사)

미소전지전류밀도는 다음 식에 의해 계산되었다.

$$I_{mac} = \frac{I_o - I_i}{A}$$

여기서, I_{mac} 는 철근영역의 미소전지전류밀도로서 단위는 $\mu A/cm^2$ 이고 I_o 는 철근영역으로부터의 유출전류로서 단위는 μA 이며 I_i 는 철근영역으로의 유입전류로서 단위는 μA 이다. 그리고 A 는 철근영역 표면적으로 단위는 cm^2 이다. 만약 I_{mac} 가 양이면 미소전지 전류는 양극이고, 음이면 미소전지 전류는 음극이다.

앞에서와 같이 각 실험체의 상부, 중앙부, 바닥부에 매립된 철근영역의 반전지 전위와 미소전지부식은 휴대용부식측정기로 각각 측정되었다. 이 경우, 한개 철근영역에 대해 측정하는 동안 그 철근영역은 다른 영역들로부터 독립되었다. 이러한 방법들은 상부, 중앙부, 바닥부 각각의 미소전지 부식의 정량적 측정을 가능하게 하였다.

전술한 조사 후에 철근뎡개 20, 70 mm에 묻힌 철근(상부, 중앙부, 바닥부)의 양극분극곡선이 얻어졌다. 이를 위해, 철근의 자연 전위는 1 mV/s의 속도로 1V까지 양의 방향으로 이동되었다.

조인트영역에서의 염화물 해석을 위해 중앙부가 사용되었다. 철근뎡개 20, 40, 70 mm 아래 철근 주위 5 mm에서 콘크리트 샘플이 채취되었다. 샘플들은 잘게 부수어지고 진동밀에서 가루로 만들어졌다. 그리고나서 가루샘플 내 염화물 함량은 JCI SC4에 따라 측정되었다. 또한 실험 자료들을 분명하게 하기 위해 실험체의 높이에 따른 염화물함량의 보다 상세한 조사가 이루어졌다.

전기화학적 조사 후 모든 실험체는 쪼개져 열렸다. 중성화깊이는 1% 페놀프탈레인 용액을 새롭게 절단하거나 부순면들에 뿌림으로서 측정되었다. 중성화깊이는 조인트평면과 새로 쪼개진 다른 면들을 따라 측정되었다. 조인트면은 그 표면에서 중성

화깊이를 측정하기 위해 쪼개졌다. 철근을 모아서 부식된 영역에 트레이싱지를 대고 부식영역을 추적한 후 디지털구적기로 그 면적을 측정하였다.

본 연구에서 부식된 면적은 철근 위의 어느 곳이든 진한 갈색 녹을 가진 면적이나 국부적으로 진한 흑색 녹 면적으로 정의된다. 또한 부식 깊이는 와이어 브러쉬로 철근을 청소한 후 측정하였다. 이를 위해 철근을 24시간동안 10% 시트르산수소이암모늄용액에 침지시켰다. 0.5 mm 이상의 구멍깊이를 측정하기 위해 깊이 측정 눈금이 있는 바늘이 사용되었다.

측진열화에 노출되지 않은 나머지 4개의 실험체는 SEM분석에 사용되었다. 조인트영역과 그 영역의 철근과 콘크리트 계면에서의 생성물을 검사하기 위하여 SEM조사를 실시하였다. 이를 위해 가운데에 조인트가 오도록 실험체 중심에서 원판모양을 잘라냈다. 조인트부가 파괴된 실험체는 조심스럽게 다루어졌다. 모든 실험체들은 SEM 조사전에 탄소코팅되었다.

불행히도, 철근이 없는 실험체는 만들지 않았었다. 그래서 부착강도는 정성적으로 평가되었다. 실험체를 길이방향으로 쪼갬 후에 햄머를 이용하여 조인트를 따라 그 부분을 쪼갬다. 조인트의 정성적 부착강도는 약함, 보통, 강함으로 평가되었다. 부착강도 강함의 경우는 조인트부에서 파괴면이 없는 경우이다.

8. 실험 결과와 그 고찰

본 연구의 조사 결과는 다음 7개의 소단원에서 설명된다.

8.1 부착강도

조인트면을 따라 실험체를 쪼개는 동안 정성적 평가에 기준을 두었다. 상대적인 부착강도는 <표 4>과 같이 평가된다. 레이탄스를 브러쉬로 제거하는 것이 부착강도를 개선시킨다는 점도 발견된다. 레이탄스를 브러쉬로 제거하지 않고 에폭시나 모르타르로 코팅한 경우는 부착강도를 개선하는데 효과적이지 않다. 가장 강한 부착강도는 F조건에서 관찰된다.

즉, 레이탄스를 브러쉬로 제거하고 에폭시코팅한 경우이다. 이 경우에 조인트 평면은 쪼개져 열릴 수 없다. 에폭시가 콘크리트보다 강하기 때문이었다. <그림 5>에 부서진 면이 보인다. 하지만 가장 강한 조인트는 나중에 설명하겠지만, 콘크리트 내 철근의 부식이나 염화물 침투, 중성화에 대해 좋은 성능을 보여주지 못한다.

8.2 중성화 깊이

조건 A, C, D 그리고 E에 대해 페놀프탈레인 용액 분무 후

표 4. 조인트부의 정성적인 부착강도와 중성화 깊이

Type	Bond strength	Exposure type A		Exposure type B	
		Carbonation depths,* cm		Carbonation depths.† cm	
		Sound concrete	Joint	Sound concrete	Joint
A	Weak	0	0.6	0	1.7
B	Weak	0	0.6	0	1.1
C	Moderate	0	0	0	0
D	Moderate	0	0	0	0
E	Weak	0	2.6	0	2.5
F	Strong	0	‡	0	‡
G	Moderate	0	0.6	0	1.7

* 실험체 한 개로부터 얻어진 자료, † 두개 실험체의 평균자료, ‡ 부착면을 따라 파괴되지 않음

쫄갸-열림 조인트 면의 상태가 <그림 6>에 보인다. 서로 다른 조건에 대한 콘크리트의 중성화 깊이가 <표 4>에 나열된다. 건전한 콘크리트를 통한 중성화 깊이는 거의 영(zero)에 해당된다. 에폭시코팅 조건의 조인트 영역에서 중성화 깊이는 철근뎡개 20 mm의 철근을 넘어선다. 가속노출이 많은 실험체 폭로유형 B에서 보다 많은 중성화 경향을 보인다. 레이탄스를 브러쉬로 제거하고 모르타르 코팅처리한 경우가 에폭시나 라텍스 페이스트로

코팅한 경우에 비하여 중성화 면의 진전을 줄이는데 보다 효과적인 것으로 보인다.

8.3 염화물 농도

폭로유형 B에서 조인트 영역 철근 주변에서 측정된 수용성 염화물 농도는 <그림 7>에 보여진다. 조건과 철근뎡개에 상관없이 철근주변 염화물 수준이 시멘트량의 2%를 넘는다. 이는 철근주변의 활발한 부식의 가능성을 의미한다⁶⁾. 실험체의 높이에 따른 염화물농도의 보다 많은 결과는 전기화학적 자료를 분명히 하기 위해 나중에 설명된다.

8.4 미소전지 부식의 일반적 조사

서로 다른 철근뎡개를 가진 철근의 미소전지전류밀도는 <그림 8>에 보여진다. 조건에 상관없이 미소전지전류밀도는 부동태 한계 $0.1 \mu A/cm^2$ 를 넘는다^{4,7)}. 대부분의 경우에서, 전류밀도가 철근의 활발한 부식을 의미하는 $1 \mu A/cm^2$ 를 넘는다. 조인트들

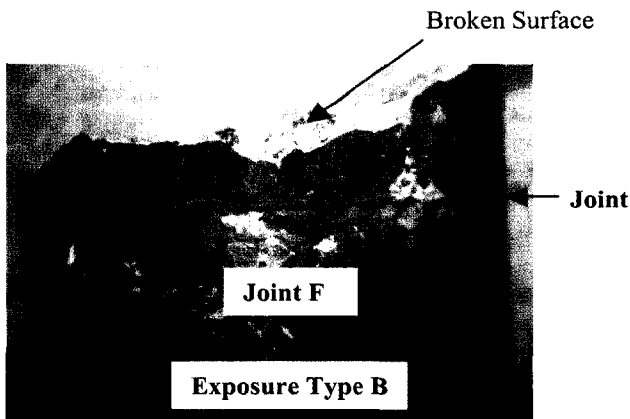


그림 5. 조인트 F의 파괴 양상

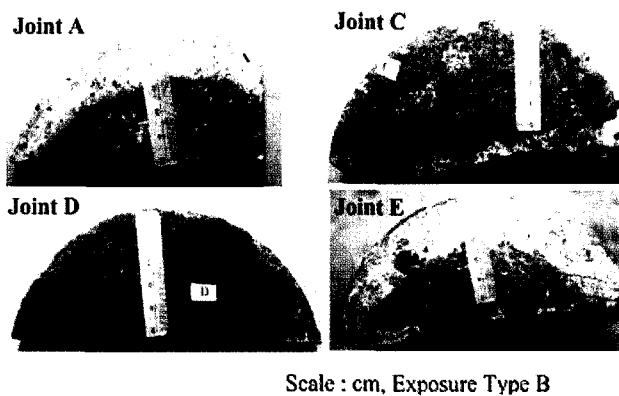


그림 6. 콘크리트 중성화

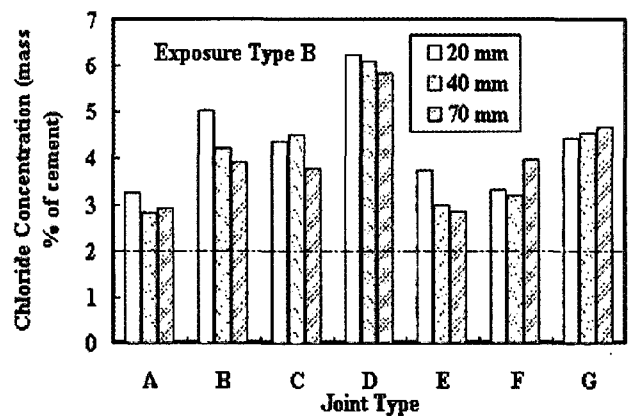


그림 7. 조인트부 철근주위 염화물농도

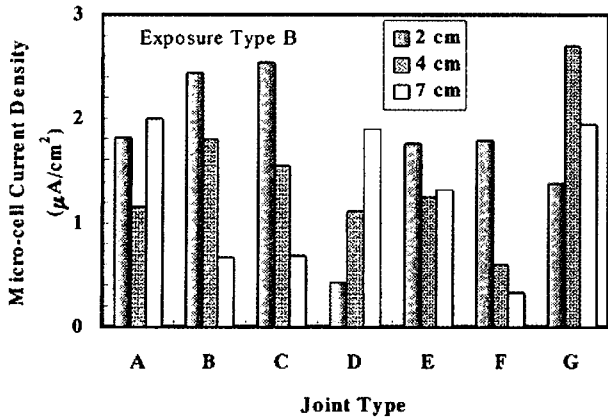


그림 8. 미소전지 전류밀도 (일반조사)

의 성능이나 부식과정에 대한 다른 특별한 결론이 이 안에서는 논의되지 않았지만, 반전지전위와 콘크리트 저항자료는 물론 미소전지부식자료 기반 위에서 만들어질 수 없다.

8.5 미소전지와 거대전지 부식에 대한 상세조사

전술한 일반조사에 이어 철근의 상태를 시각적으로 검사하기 위해 실험체들을 쪼개어 열었다. 대부분 경우 조인트 영역에서 특별한 부식이 발견되지 않았다. 그래서, 매 경우 2개의 실험체를 꺼내 추가로 열화작용을 받도록 가속챔버 내에 노출시켰었다. 10사이클 후에 동일한 일반조사를 수행하였다. 전과같이 조인트 간의 비교뿐만 아니라 부식과정의 평가에 실패하였다. 조인트 영역에서 그리고 조인트에서 멀리 떨어진 영역에서 미소전지 부식활성도 평가와 미소전지 부식의 형성을 조사하기 위해 매 경우마다 한 개의 실험체를 꺼내 상부, 조인트부, 바닥부 이렇게 세 부분으로 잘랐다. 이 과정은 앞서 언급했듯이 상세조사로 정의된다. 철근덮개 20과 70 mm 상부, 조인트부, 바닥부 영역에서 미소전지 전류밀도는 <그림 9, 10>에 보여진다. 바닥부의 미소전지 전류밀도가 다른 영역보다 확연히 높다. 상부의 미소전지 전류밀도는 상대적으로 중앙부보다 높다. 그 결과는 단부 평행면이 아무것도 씌워져 있지 않기 때문에 실험체 단부를 통해 보다 많은 염화물이 침투할 지도 모른다고 필자로 하여금 믿도록 하였다. 그래서 실험체 높이에 따른 염화물 농도에 대한 추가적 해석이 수행되었다. 그 결과는 <그림 11>에 보여진다. 실험체의 조인트 영역 뿐만 아니라 단부영역에서도 많은 염화물이 관찰된다. 자연발생 생성물(힐링)은 조인트 영역에서 지속적인 부식에 비우호적 환경을 야기시킨다는 점이 납득된다.

연구진은 15년간 조수간만대에 노출시켰던 또 다른 균열 콘크리트 실험체의 조사에서도 또한 이러한 현상을 발견하였다. 그 결과는 <참고문헌 8, 9>에서 얻어질 수 있다. 철근덮개 20과 70

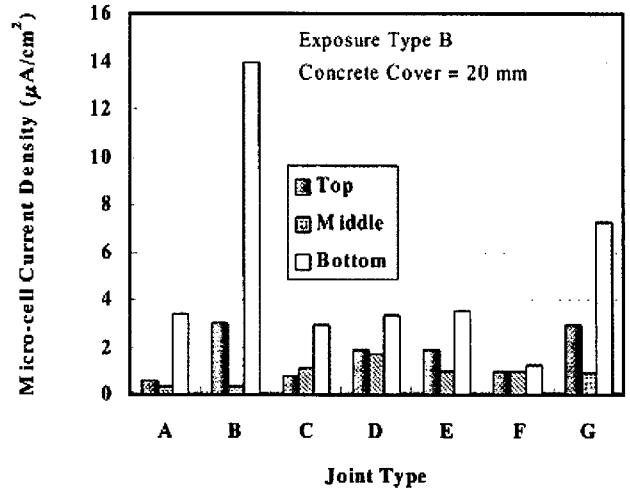


그림 9. 미소전지 전류밀도 (상세조사)

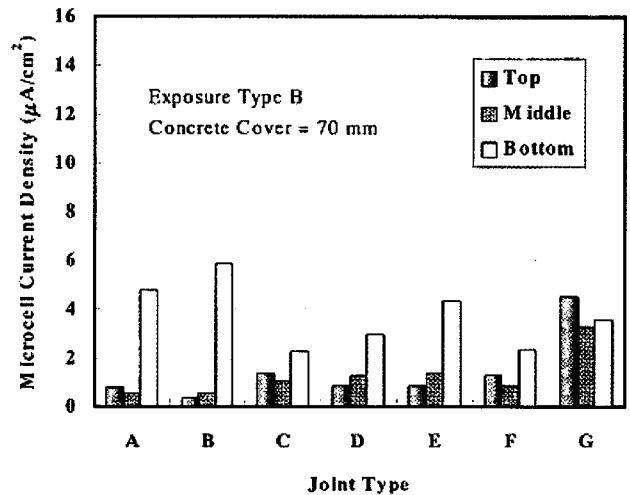


그림 10. 미소전지 전류밀도(상세조사)

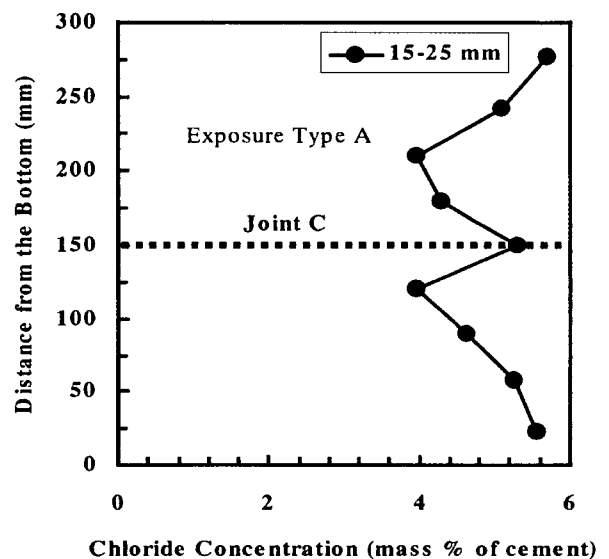


그림 11. 철근주변 염화물 농도

mm인 철근의 상, 중, 하 영역에서의 미소전지 전류밀도는 <그림 12, 13>에 각각 보여진다. 양극 영역이 조인트영역에만 있는 것은 아니다. 철근덮개 20 mm의 경우 조인트 유형 A, B 그리고 G에서 조인트 영역은 양극으로 반응한다. 철근덮개 70 mm의 경우 조인트 유형 A, B 그리고 F에서 조인트 영역은 양극으로 반응하였다. 철근-콘크리트 계면에서는 공극의 존재로 인하여 단부(바닥부 혹은 상부)는 양극이 된다. 부식면적, 구멍크기, 그 위치는 나중에 설명된다.

철근의 전형적인 양극분극 곡선들이 <그림 14, 15>에 보여진다. 조인트부 영역이 다른 영역 특히 바닥 영역보다 좋은 부동태도를 갖는 것을 나타내는 바닥부 철근의 양극분극곡선이 전위 축으로부터 멀리 올라간 것을 볼 수 있다. 많은 부식 면적과 깊은 깊이를 가진 많은 수의 부식홀은 바닥영역에서 관찰된다. 이들 자료는 나중에 설명된다.

8.6 SEM그래프

철근 근처 조인트 영역위와 조인트 영역 횡단면에서의 전형적인 생성물들이 <그림 16>에 보여진다. 조인트영역에서 선행

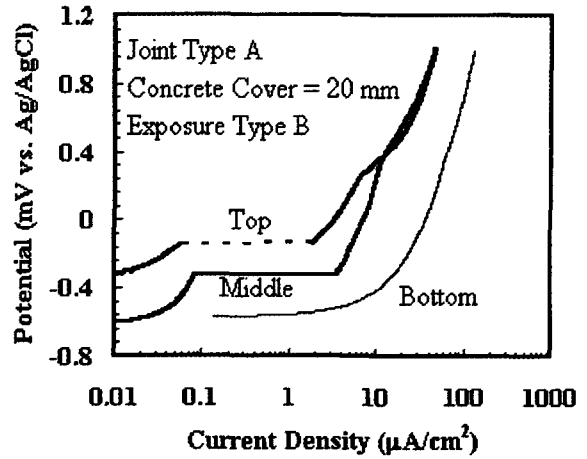


그림 14. 양극 분극곡선 (상세조사)

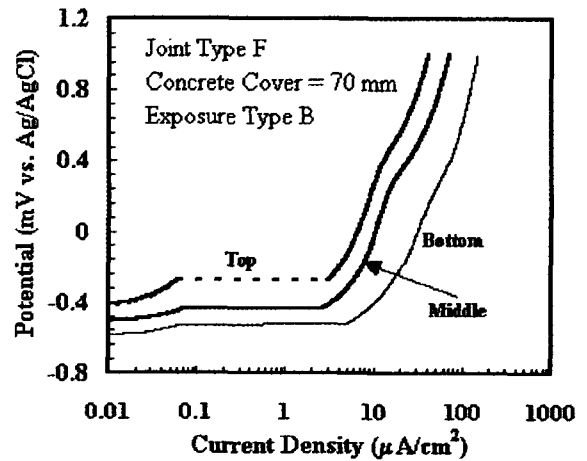


그림 15. 양극분극곡선(상세조사)

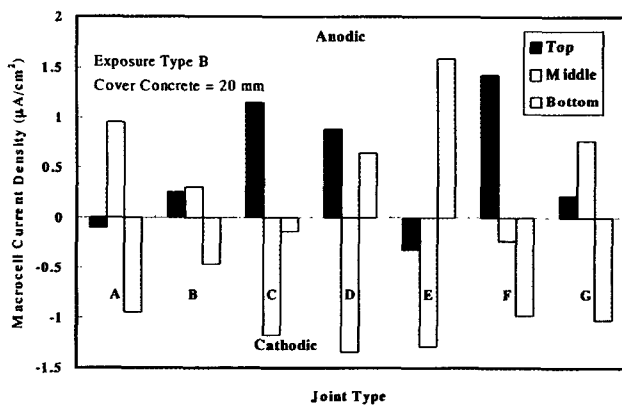


그림 12. 거대전지 전류밀도(상세조사)

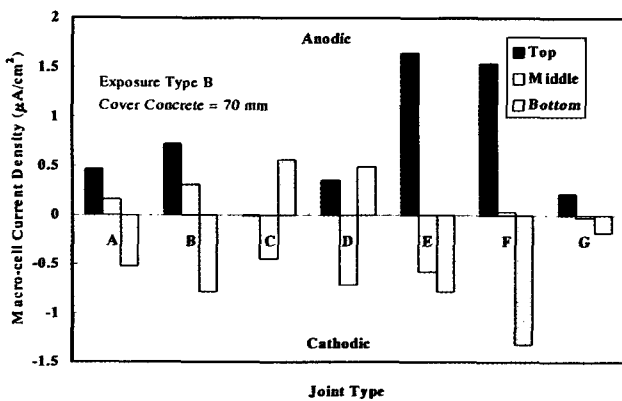


그림 13. 거대전지 전류밀도(상세조사)

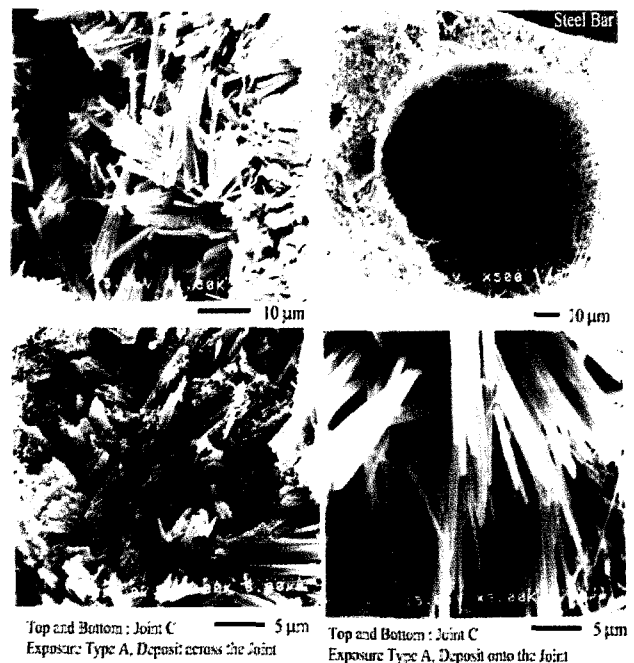


그림 16. 조인트부 생성물을 보여주는 SEM 그래프

한 에트링자이트의 생성물이 관찰된다. 공격표면은 에트링자이트에 의해 덮여 있다. 동일한 결과는 다른 균열 실험체의 분석에서도 관찰되었다^{8,9)}.

8.7 부식의 물리적 평가

세 개의 실험체에서 다른 깊이의 철근덮개 아래 매입된 철근의 부식면적이 <그림 17>에 각각 표시된다. 이 그림에 철근의 각 부분 총면적 대비 부식면적 비율로 각각 표시된다. 꼭대기 그림은 25년간 조수간만대에 노출(폭로유형A)한 실험체에서 수집한 철근에 해당된다. 가운데 그림은 25년간 조수간만대 노출 후에 촉진가속노출(폭로유형B)을 더한 실험체에서 수집한 철근에 해당된다. 이 경우에는 실험체를 상부, 중부, 바닥부로 나누지 않고 일반적인 조사를 수행하였다. 바닥그림은 폭로유형 B에 해당되지만 실험체를 상부, 중부, 바닥부로 나누어 상세조사를 수행한 것에 해당된다. 조인트유형 E, F, G를 제외하고 대부분 경우에 조인트 영역에서 부식면적이 더 작았다. 많은 경우에 바닥영역이나 꼭대기 영역에 많은 부식면적이 관찰된다. 레이턴스를 브러쉬로 제거하고 에폭시를 코팅한 경우가 가장 강한 부식 강도를 보였다는 것은 앞에서 설명하였다. 하지만 철근 위 부식의 물리적 평가로부터 최소의 부식을 확인하는데 가장 강한 부식 강도가 필수조건이 아니라는 결론이 내려진다.

콘크리트 실험체를 쪼갬 후 벌려 수집한 철근들이 <그림 18>에 보여진다. 일반적으로 조인트 영역에서 조금 있더라도 갈색

녹이 관찰되었다. 다른 영역에서는 진한 검은색 녹이 관찰되었다. 철근과 콘크리트 계면 공극은 검은 빛 녹물로 채워진 것이 관찰되었다.(깊이로 0.5 mm 이상 된) 측정 홀 크기는 <표 5, 6>에 보여진다.

녹을 청소한 후 철근들은 <그림 19>에 보인다. 많은 수의 홀

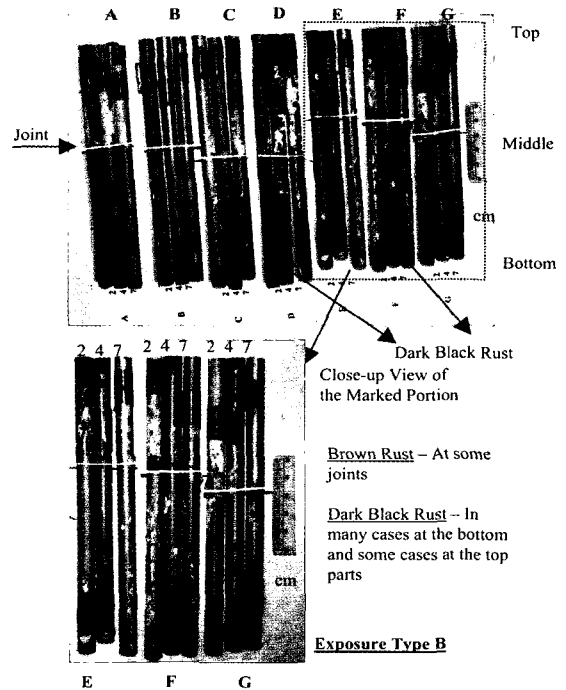


그림 18. 철근의 부식위치

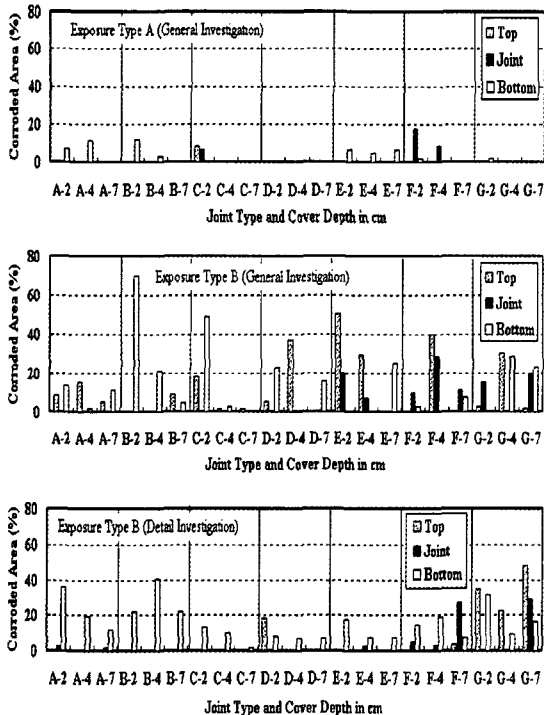


그림 17. 세 개의 서로 다른 실험체의 철근의 부식면적

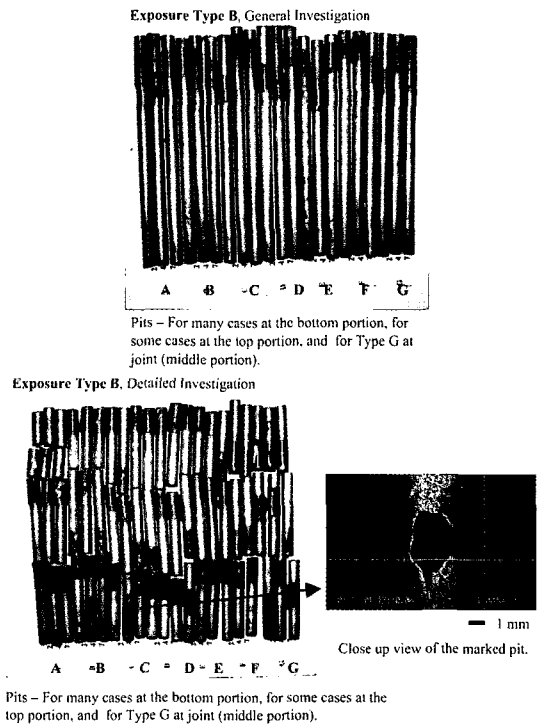


그림 19. 철근표면을 세척한 후 부식의 위치

표 5. 철근의 부식 깊이(일반조사 - 폭로유형 B)

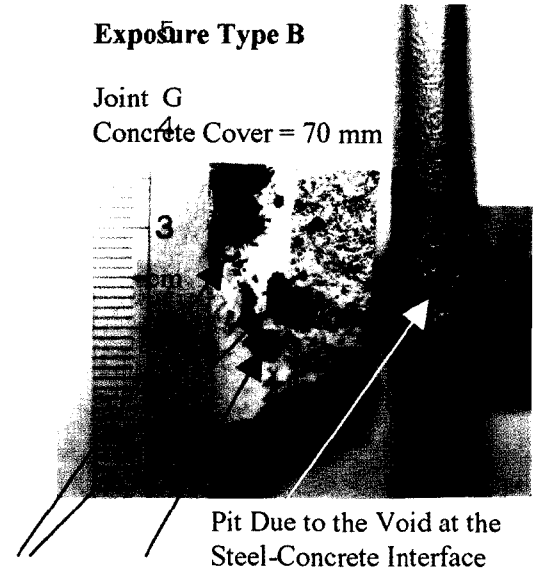
Joint type and concrete cover, cm	Pit size(length × width × depth, mm)		
	Top*	Middle*	Bottom*
2	5×5×1	-	-
A	4	-	2×2×1, 1×1×0.5
	7	-	1×1×0.5
	2	-	7×3×0.5
B	4	-	7×1×0.5
	7	-	3×2×0.5, 1×1×0.5
C	2	-	2×4×0.5, 2×1×0.5
	4	-	1×1×0.5, 1×1×0.5, 1×1×0.5
	7	-	-
D	4	5×4×0.5, 5×3×0.5	-
	7	-	4×3×1
E	2	2×4×0.5	-
	4	-	-
	7	-	-
F	2	-	-
	4	-	2×1×0.5
	7	-	5×7×0.5
G	2	-	-
	7	-	7×10×0.5

* <그림 4>의 상부, 중부, 바닥부로 나뉜 위치에서의 부식율을 표현하기 위함

표 6. 철근의 부식률 깊이(상세조사 - 폭로유형 B)

Joint type and concrete cover, cm	Pit size(length x width x depth, mm)		
	Top	Middle	Bottom
2	-	-	-
A	4	-	-
	7	-	-
B	2	-	5×5×0.5
	4	-	2×2×1, 4×5×0.5, 2×5×0.5
	7	-	3×3×0.5
C	2	-	5×5×0.5
	4	-	5×6×0.5
D	7	-	-
	2	2×7×0.5, 2×5×0.5	-
	4	-	-
E	7	-	-
	2	-	-
	4	-	-
F	7	-	-
	2	-	-
	4	-	-
G	7	-	-
	4	5×3×0.5, 1×1×0.5	-
7	-	-	

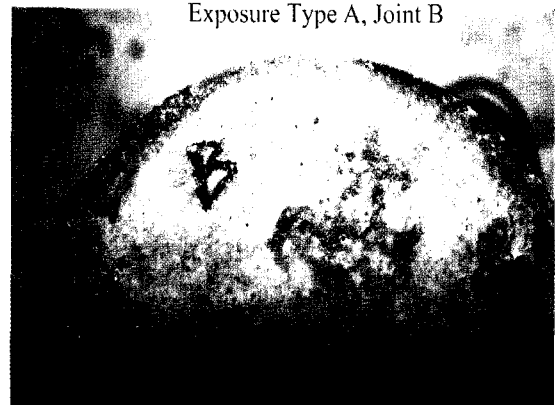
Exposure Type B



Voids at the Steel-Concrete Interface Covered with Rust

그림 20. 철근-콘크리트 계면의 공극으로 인한 깊은 국부부식

Exposure Type A, Joint B



Clear white deposit of AgCl is found over the surface.

그림 21. 0.1 N 농도 질산은(AgNO3)용액을 살포한 후 조인트 표면

이 바닥 영역에서 관찰되고 꼭대기 영역에서는 조금 관찰되었다. 조인트 유형 F와 G를 제외하고는 조인트 영역에서는 어떠한 홀도 없었다. 유형 F와 G의 조인트부 홀은 <그림 20>에서 보인바와 같이 조인트에서 공극의 존재에 기인한다. 철근 주위의 염화물 농도는 시멘트량 대비 2%를 증가한다(그림 7, 11 참조). 깨끗한 흰색 생성물 AgCl은 <그림 21>에 보인바와 같이 0.1 N AgNO₃ 용액을 조금-열린 조인트 면에 뿌린 후에 관찰된다. 자동생성 생성물은 에폭시와 라텍스 페이스 코팅의 경우를 제외하고 철근의 부식을 막는다고 결론짓는다. 레이탄스를 브러쉬로 제거하고 모르타르를 코팅처리한 경우가 해양환경에서 지속가능한 콘크리트를 만드는데 가장 좋은 조인트를 만드는 방법인 것 같다.

9. 결 론

다음 결론은 본 연구를 바탕으로 얻어진 것들이다.

- 1) 조인트면에 자동생성 생성물은 에폭시와 라텍스 페이스트로 된 조인트를 제외하고 조인트에서 콘크리트 내 철근의 부식을 막아준다.
- 2) 조인트 영역은 반드시 양극영역으로 반응하는 것은 아니다. 또한, 조인트 영역에서 미소전지 부식의 크기는 크지 않다.
- 3) 철근콘크리트 계면에 공극의 존재가 국부적 부식홀 생성의 주인인 것 같다. 장기간의 내구성 확보를 위해선 그러한 공극을 제거하는 적절한 기술이 개발되어야 할 것이다.
- 4) 레이턴스 제거는 중성화면이 콘크리트 내부로 이동하는 것을 감소시키는데 필요하다. 조인트에서 철근부식과 중성화에 대해서는 모르타르 피복이 라텍스 페이스트나 에폭시 피복에 비해 가장 좋은 성능을 보인다.
- 5) 레이턴스 제거 후 에폭시 도포된 조인트는 가장 강한 부착 강도를 보인다. 그렇지만, 조인트에서 철근의 부식에 대한 가장 좋은 성능을 보이지는 못한다.

감사의 글

본 연구를 수행할 수 있도록 지원해주신 일본 독립행정법인 연구소인 항만공학기술연구소 소장님께 경의와 감사를 전합니다. 항만공학기술연구소 재료분과 직원에게 25년 전 본 실험을 계획하신 데 대해 심심한 감사와 고마움을 전합니다. 항만공학기술연구소 재료분과 직원에게 본 연구에 대한 유용한 토론과 지원에 대해 감사드립니다. ☐

참고문헌

1. Miyazato, S., Otsuki, N., and Kimura, H., "Experimental Study on the Corrosion Mechanism of Steel Reinforcement Near Mortar Joint," *7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Kochi, Japan, 1999, pp.1502~1507.
2. Nagataki, S.; Otsuki, N., Moriwake, A., and Miyazato, S., "Influence of Macrocell on embedded Bars in Repaired Concrete Members," *Proceedings of the Conference Concrete under Severe Conditions*, Sapporo, Japan, 1995, pp.605~614.
3. ACI Committee 116, *Cement and Concrete Terminology* (ACI 116R-90), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1990, 66pp.
4. Mohammed, T. U., and Hamada, H., "Effect of Construction Joint Preparation on Corrosion of Reinforcing Bars under Atmospheric Environment," *Durability of Concrete, Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference*, SP-12, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2003, pp.259~277.
5. Fontana, M. G., and Greene, N. D., *Corrosion Engineering*, Second Edition, McGraw-Hill, 1983, 197pp.
6. Browne, R. D., "Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures", *Performance of Concrete in Marine Environment*, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1980, pp.169~204.
7. Andrade, C. and Alonso, C., "On-Site Measurement of Corrosion Rate of Reinforcements," *Proceedings of a Special Technical Session on Near-Surface Testing for Strength and Durability of Concrete*, P. A. M. Basheer, ed., Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, 2000, pp.171~183.
8. Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hamada, H., and Yamaji, T., "Macrocell and Microcell Corrosions of Steel Bars in Cracked Concrete Exposed to Marine Environment," *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, Singapore, Supplementary Papers, 2001, pp.155~169.
9. Mohammed, T. U., Yamaji, T., Toshiyuki, A., and Hamada, H., "Corrosion of Steel Bars in Cracked Concrete Made with Ordinary Portland, Slag and Fly Ash Cements," *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Seventh CANMET/ACI International Conference*, SP-199, Vol.2, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2001, pp.699~718.