

에폭시 도포철근의 내 부식성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Corrosion Resistance of Epoxy Coated Reinforcements

오 병 환* 엄 주 용** 권 지 훈***

Oh, Byung Hwan Um, Joo Yong Kwon, Ji Hoon

요 약

근래 들어 철근 콘크리트에 있어서의 철근 부식이 관심의 대상이 되고 있는데 그 이유는 이 현상이 실제 구조물에서 광범위하게 발생함이 확인되었고 이로 인한 보수비용이 급증하였기 때문이다. 철근의 부식이 처음 거론된 것은 해양구조물과 내화학성 구조물에서였고 최근 들어서는 교량상판, 주차공간등 염기에 노출되어 철근 부식이 우려되는 각 종의 구조물에 광범위하게 그 대책이 연구되기에 이르렀다. 이와같은 철근부식의 제어방법으로는 첫째로 콘크리트의 수밀화를 들 수 있고 다음으로 콘크리트의 표면을 처리하거나 피복두께를 늘리는 방법이 있다. 마지막으로 철근 자체에 방청성능을 직접 부여하여 철근의 부식을 방지하고자 하는 방법을 들 수 있다. 본 연구는 이러한 대책중에서 가장 적극적인 방법에 속하는 에폭시 도포 철근의 기본적인 방청성능을 고찰하기 위해 수행되었다.

ABSTRACT

The steel corrosion problem of reinforced concrete has received great attention in recent years, because of its widespread occurrence in certain types of structures and the high cost of repairs. The corrosion of steel reinforcement was first observed in marine structures and chemical manufacturing plants. More recently, numerous reports of its occurrence in bridge decks, parking structures, and other structures exposed to chlorides has made the problem particularly prominent. Measures that can be taken in reinforced concrete construction to protect the steel against corrosion can be divided into three categories : (a) design and construction practices that maximize the protection afforded by the concrete; (b) treatments that penetrate or are applied on the surface of the concrete to exclude chloride ions; (c) techniques that directly prevent steel corrosion of the concrete either by using corrosion resistant reinforcing steel or by nullifying the effects of chloride ions on unprotected reinforcement.

1. 서론

근래들어 콘크리트 잔골재로서의 강 모래 자원이 급속히 고갈되어 가고 있는 현실에 비추어 볼 때 해사의 사용은 피할 수 없는 현실이다. 이에 따라 해사 사용에 따른 여러 문제점들이 제기되고 있는데 철근의 부식, 건조 수축과 크립의 증가, 콘크리트 표면의 백태 발생등을 대표적인 열화현상으로 들 수

있다. 특히 이 중에서 철근의 부식은 구조적으로 대단히 위험하고 그 파급 효과가 큰 결점이라 할 수 있다.

이와 같은 철근 부식을 방지하는 대책으로 여러 연구가 진행되어 왔는데 그 연구 방향은 크게 두 가지로 나누어 생각 할 수 있다. 그 첫번째가 콘크리트의 배합 조성을 달리 하는 것인데 콘크리트 배합시 방청제를 투입하거나 플라이 애쉬등을 첨가하여 콘크리트의 밀실화를 꾀하는 방법이다. 두번째는 철근에 직접 방청 성능을 부여하는 것으로써 아연 도금, 수지도포, 내염성 철근 제작 등을 들 수 있다. 국내의 경우 전자에 대한 연

*서울대학교 토목공학과 부교수

**서울대학교 토목공학과 박사과정 수료

***서울대학교 토목공학과 석사과정

구는 비교적 활발하고 그 연구 실적도 상당히 축적되어 있는 편이지만 후자의 경우는 거의 연구가 진행된 바가 없는 것으로 사료된다. 이와 같은 연구 부진의 이유는 여러 가지들을 들 수 있으나 우선 적절히 처리된 철근 제작이 어렵고 이에 대한 기초적인 연구가 부족했다는 점을 들 수 있으며 또 상대적으로 고가인 철근 사용에 따른 경제적인 문제를 들 수 있다. 그러나 이와 같이 철근에 직접 방청 성능을 부여하는 것은 시공 편의성과 방청 성능에 있어 대단히 우수하며 또, 그 제작가격 역시 수요에 따라 상당히 낮아질 수 있으므로 앞으로 대단히 유망한 재료로 활용될 것이 기대된다.

따라서 본 연구는 수지도포 철근의 기본적인 방청성능을 관찰하고 이와 아울러 실제 시공시 우려되는 각종의 국부손상을 인위적으로 유도하여 그 부분의 부식거동을 고찰하였다. 본 연구에서 원용한 주된 발청기구는 철근의 염수 침지 방법이었고 이 중 대표적인 변수를 선정하여 실제 콘크리트 시편을 제작하여 고온 고압 촉진 양생을 통한 부식 발생을 유도하여 그 효과를 검토한다.

2. 수지도포 철근의 방청성능 실험

2.1. 사용재료의 특성

본 연구의 대상이 되는 수지는 방식재료로서의 수지이며 이에 우수한 접착성과 박편성이 요구된다. 이러한 성질에 부합하는 재료로는 일반적으로 열경화성의 불포화 폴리 에스테르와 에폭시수지를 들 수 있는데 이 중에서 철근도포용 수지로는 여러 연구결과 에폭시 계열이 가장 적합한 것으로 보고되고 있고 공정상 균일성을 확보하기 위해 예열된 철근에 분체형으로 에폭시를 분사하여 도포하는 것이 일반적이다. 국내의 경우 분체형 에폭시는 현재 생산 시판 중이지만 철근에 이를 적용하여 연구를 수행한 예는 아직 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 국내에서 수행된 기존의 연구결과들은 거의 모두 액상의 에폭시 수지를 대상 철근에 페인팅하거나 침지하여 도포한 것이다. 그러나 이 경우 수지의 도포두께에 있어 균일성을 기대하기 어렵고 또 그 특성 자체도 상당히 다르기 때문에 그 결과의 활용에 있어 상당한 제한이 있다. 현재 국내에서는 강관이나 주철관의 경우 방

수, 방청을 위해 도포하여 상용되고 있고 그 제작과정 역시 동일하므로 본 연구는 이에 준하여 철근에 대해 에폭시를 정전분사 도포한 수지도포 철근을 실험대상으로 하였다. 현재 국내 기술상 0.30 mm 두께로 도포가 가능하고 이러한 두께는 1985년 ASTM 규정치보다 약간 큰 정도이나 실험 결과 획득상 별 문제가 없을 것으로 사료된다. 본 연구에 있어서는 직경 19 mm의 이형철근에 0.3 mm의 두께로 에폭시를 정전분사도포한 제품을 사용하였다.

2.2. 국부손상의 유도

본 연구에서는 시공상 발생 가능한 수지도포 부위의 국부손상을 시공시 우려되는 박리와 철근 절곡 및 철근 용접 이음시의 절결로 나누어 변수를 선정하였다. 우선 시공시 우려되는 국부손상은 실제 시공 현장에서 부주의한 철근 적치나 이동, 부딪 또는 콘크리트 타설시의 손상을 상정한 것인데 이 경우에는 그 손상정도가 부식 발생 여부와 크기에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 그 이유는 기본적으로 부식 발생 기구가 양극과 음극의 조합이기 때문에 국부손상이 극히 미약할 경우 양극(anode)인 국부손상 부위가 미소할 경우 조합을 이룰 주위의 음극(cathode) 생성이 억제되기 때문에 부식은 크게 발전되지 않는다는 것이다. 이를 도시하면 아래 그림 1과 같다. 이와 같은 국부손상에 의한 부식 발생에 대한 연구는 현재 진행중인 과제이며 해외의 경우 도포면적의 2% 이내이어야 한다는 정도의 권장치만 두고 있는 실정이다. 그러나 이러한 권장치는 앞서 언급한 바와 같은 미소손상만 고려한 것으로써 실제 시공시에 발생할 수 있는 이보다 큰 손상에 대해서는 적용이 힘들다. 따라서 본 연구에서는 이러한 시공시의 국부손상을 고려하여 전체 손상면적은 동일하게 두고 손상형태를 달리하여 그 양상을 관찰하였다.

다음으로 철근 활용의 특성상 실제 시공에 있어서 철근은 다양한 형태로 구부러지게 되는 경우를 생각할 수 있는데 수지도포 철근이 절곡을 받을 때의 양상은 이종재료의 거동으로써 구부러지는 바깥쪽의 경우 철근의 변형성과 수지재료의 변형성이 다르므로

미세 균열이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 현재 해외에서 진행되고 있는 바 프리스트레싱을 가할 때의 수지재료 손상과 관련하여 생각할 수 있다. 또 구부러지는 안쪽이 손상을 입는 경우 시공 후 큰 응력을 받을 때 콘크리트가 부서질 수 있으므로 콘크리트의 미세 균열을 통해 수분등이 침입할 수 있고 이때 절곡 부위의 부식 발생이 우려된다. 따라서 본 연구에서는 철근 절곡에 따른 국부손상 효과를 관찰하기 위해 주철근 표준 갈고리 형태로 수지도포 철근을 절곡하여 실험을 수행하였다. 특히 본 시편의 경우 KS에 규정된 바 내 굴곡성 테스트에 통과할 정도의 굴곡성을 가지고 있으나 본 실험에서는 일반 건설현장의 실제적인 철근 구부러기를 원용, 그 효과를 관찰하기 위해 실제 건설현장에 의뢰하여 단 시간에 철근을 구부렸다. 그 결과 90° 절곡의 경우 구부러지는 안쪽이, 120°의 경우 구부러지는 바깥 쪽이 많은 손상을 입었다. 그 파단 정도는 120°의 경우가 90°의 경우에 비해 상대적으로 컸고 전혀 손상을 입지 않은 시편의 수도 90° 절곡의 경우가 더 많았다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 좀 더 연성이 강한 수지재료의 개발도 있어야겠으나 현재 큰 현장의 경우 굴곡시험기와 같은 철근 구부리기 장비가 많이 보급되는 추세이므로 앞으로의 연구 개발 및 장비개선이 뒤 따를 경우 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

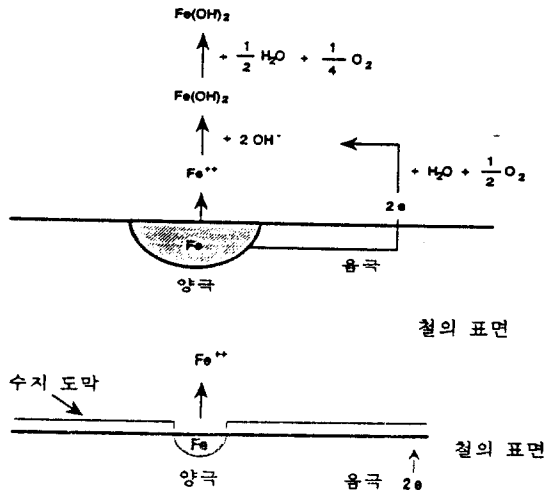


그림 1. 에폭시 수지도포 철근의 발청기구
마지막으로 철근을 용접하였을 때 발생

할 수 있는 손상인데 수지도포 철근의 경우 고온의 산소-아세틸렌 불꽃에 의한 영향을 받아 압점부 전체에 국부손상이 우려된다. 이와 같은 과정을 거쳐 용접이음 압점부에 수지도포 부위가 손상을 입은 경우 염기에 의한 부식 발생 면적은 상당히 큰 편으로 압점부 전체의 구조적인 취약을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 용접이음시의 국부손상 효과를 고려한 시편을 제작하여 실험을 수행하였다.

2.3. 국부손상을 고려한 수지도포 철근의

방청성능 실험방법의 선정

본 연구는 비전도체이며 열에 의한 변성이 예상되는 수지도포한 철근이 그 대상이므로 기존의 철근 부식유도 및 측정방법인 오토클레이브양생이나 전위차 측정방법의 적용은 무리가 있다. 따라서 본 연구는 실험변수로 선정된 매우 다양한 국부손상 효과를 관찰하기 위해 인공염수 침지에 적용되는 경우와 각 종의 규정을 고려한 콘크리트 시편에 첨가한 경우로 나누어 부식을 유도하였고 부식의 측정은 육안검사 및 면적법을 통해 수행하였다. 또 부식전후의 감량정도를 추가로 관찰하였다. 염수침지 방법은 KS에 규정된 방청제 성능 시험방법 (KS F 2561 부속서 1)을 원용, 염화물량을 조정했는데 다음 표 1에 보인 각 약품을 본 실험의 염화물량기준에 맞추어 염기이온량으로 환산, 첨가하였다.

표1. 인공염수의 조성(수용액1L당)

약품명	중량 (g)
염화나트륨	24.5
염화마그네슘	11.1
황산나트륨	4.1
염화칼슘	1.2
염화칼륨	0.7

이 규정은 또 아래와 같은 경우 부식이 발생한 것으로 판단한다.

- (1) 시험용 염수중의 철근에 황색, 적갈색, 흑색 등의 반점 또는 무늬가 생겼을 때
- (2) 시험용 염수에 부식에 의한 착색 또는 침전이 생겼을 때

본 실험의 염화물량은 앞서 언급한 바와 같이 일반 RC 및 프리스트레스트 포스트텐션 구조물의 NaCl 함량 제한치(잔 골재 절건중량의 0.1%)에 근거하고 있는데 본 실험의 경우 콘크리트 1 M³ 당 잔골재의 절건중량을 800 kg/m³ 으로 두고 배합설계를 수행하였고 이에 기준하여 해당 염화물량을 산출한 후 시험용액을 희석하여 시편을 침지하였다. 실험개요는 다음과 같다.

- (1) 부식을 발생시키는 유도기구로는 인공 염수 침지 방법과 콘크리트 시편을 제작하여 촉진양생하는 방법을 병행한다.
- (2) 염화물량은 잔 골재 절건중량(800kg/m³)에 대해 0, 0.04, 0.08, 0.15, 0.3, 0.6, 1.2 % 의 7가지 경우로 나누어 첨가하였고 콘크리트 시편 제작시에는 0, 0.04, 0.08, 0.15, 0.3, 0.6, 1.2 % 의 7가지 경우로 나누어 실험을 수행하였다.
- (3) 국부손상 효과를 관찰함에 있어 시공상 발생할 수 있는 도포 부위 박리를 유도하기 위해 전 도포면적에 대해 5%의 손상을 한 방향당 4, 10, 20mm 의 길이로 미리 시편에 가하여 실험하였다. 철근 절곡에 따른 효과를 살피기 위해 콘크리트 시방서 규정상의 철근 구부리기를 원용, 90°와 120°로 철근을 절곡하여 절곡 부위의 부식집중 효과를 관찰한다. 철근 용접이음시 우려되는 압점부의 수지도포 손상을 상정하여 시방서에 규정된 철근 용접이음에 의거, 시편을 제작하고 그 효과를 관찰하였다.

인공염수침지실험에 사용되는 시편의 크기는 $\Phi 19$ 을 20 cm 씩 절단하여 사용하였고 콘크리트 시편의 경우 10x10x50(cm) 의 각주형 모듈드를 제작하여 그 안에 수지도포 철근을 배치하였다. 이상을 통해 부식을 유도한 시편을 육안 검사와 면적법을 통해 부식을 측정하고 부식에 의한 철근 중량감소를 관찰하기 위해 감량법을 원용하였다. 다음은 본 실험의 변수와 시편기호를 보인 것이다.

- (1) 염화물량은 0, 4, 8, 15, 30, 60, 120 으로 나타내었다.
- (2) 국부손상 경우 1 (한 변 길이 4 mm)은 D1, 경우 2 (10 mm)는 D2, 경우 3 (20 mm)은 D3 로 표시하였다. 용접은 W (Welding), 미도포는 NC (Non Coating), 완전 도포는 FC

(Full Coating)로 각각 나타내었다. 90° 절곡의 경우는 B1, 120° 절곡은 B2로 각각 표시하였다.

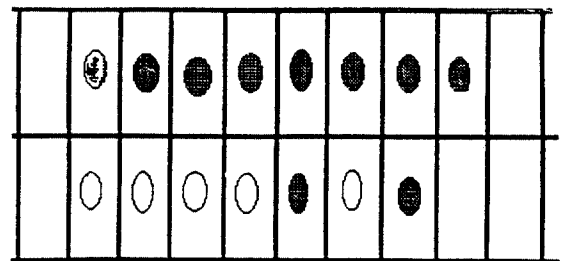
4. 실험결과 및 분석

4.1. 육안검사 및 부식면적의 측정

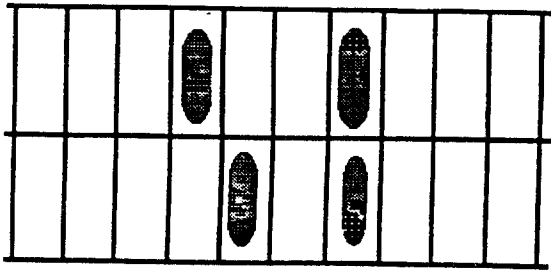
본 연구는 부식발생의 양상을 시방서 규정상의 황색, 적갈색, 흑색 세 종류로 나누어 도시하였다. 그 결과 에폭시를 완전히 도포한 경우 육안으로 발견되는 부식은 전혀 없었고 미도포 철근의 경우 염수침지 1일 만에 부식이 발생하는 것이 관찰되었다. 다음 그림은 염수침지 28일 경과후에 각 경우별 부식발생 양상을 도시한 것이다. 완전도포의 경우는 눈에 띄는 부식이 발견되지 않는 바 제외하였다.

콘크리트시편은 제작후 4 Cycles의 오토클레이브 양생을 적용하였고 시편내의 철근부식은 인공염수 침지의 경우와 유사한 경향을 보였다. 염화물량 0.3, 0.6, 1.2 % 경우의 실험 결과를 아래 그림에 보였다. 그림으로부터 알 수 있는바와 같이 염화물량의 차이에 따라 비교적 뚜렷하게 그 부식정도가 차이를 보이고 있다. 콘크리트 시편의 경우 인공염수침지 경우보다 전반적으로 적은 부식발생 정도를 보였는데 이는 콘크리트 내부의 염화물량이 여러 요인에 의해 부식에 직접 미치지 못하는데 따른 것으로 보인다. 한 가지 특기할만한 사항은 인공염수의 경우 전 철근 면적에 걸쳐 거의 고르게 부식이 발생한 반면 콘크리트 시편의 부식은 상당히 집중되는 경향을 보인 점이다. 콘크리트 시편의 경우에도 앞서와 마찬가지로 완전 수지도포의 경우 부식으로 판단될만한 발청현상이 관찰되지 않았다. 다음 그림2 는 대표적인 경우의 철근 부식양상을 도시한 것이다.

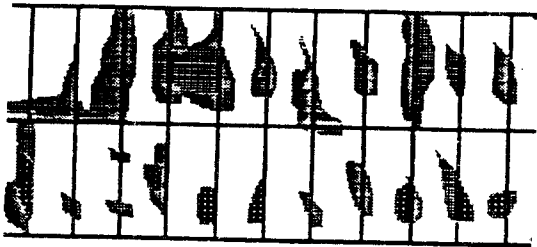
그림 2. 철근의 부식양상 (염수침지 0.3%)



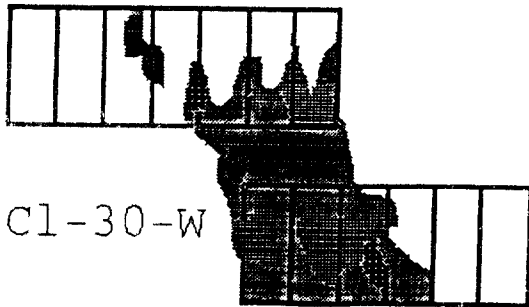
C1-30-D1



C1-30-D3



C1-30-NC



C1-30-W

이와 같은 부식발생면적을 좀 더 정량적으로 나타내기 위해 표로 보인 것이 다음 표2이다.

표2. 철근의 부식발생 면적

부식면적 (%) 시편 종류	황 색	적갈색	검은색	총부식 면 적
C1-4-D1	20	10	24	54
C1-8-D1	50	5	2	57
C1-15-D1	41	28		69
C1-30-D1	37	18	3	58
C1-60-D1	46	33	21	100
C1-120-D1	22	43	30	95
C1-30-D1-C	29	28		57
C1-60-D1-C	40	57		97
C1-120-D1-C		81	13	94
C1-0-D3	33	12	9	54
C1-4-D3	55	5		60
C1-8-D3	25	30	13	68

C1-15-D3	43	14	10	67
C1-30-D3	72	15	13	100
C1-60-D3	39	35	18	92
C1-120-D3	32	2	65	99
C1-30-D3-C	43	37		80
C1-60-D3-C	26	64	10	100
C1-120-D3-C		50	50	100

C1-0-NC	9.1	1.8	0.8	11.7
C1-4-NC	12.3	1.9	0.8	15.0
C1-8-NC	10.2	7.5	3.0	20.7
C1-15-NC	18.0	0.2	0.6	18.8
C1-30-NC	14.0	7.0	3.3	24.3
C1-60-NC	8.2	11.3	3.5	23.0
C1-120-NC	12.0	18.0	0.6	30.6
C1-30-NC-C	8.0	3.4	0.6	12.0
C1-60-NC-C	4.6	11.3		15.9
C1-120-NC-C	2.0	34.0		36.0

4.2. 부식발생에 따른 철근의 중량감소

이 방법은 물론 KS 에 규정된 방법은 아니며 그 타당성에 대한 연구도 아직 국내에서 수행된 바는 없으나 우선 그 측정기준이 육안검사보다는 정량적이며 외국, 특히 일본의 경우 중요한 부식판정기준으로 채택하고 있으므로 본 실험에서도 이를 인용하였다. 감량의 측정을 위해서 우선 부식이 발생하기 전의 시편을 0.01 g 의 精度를 가진 저울로 각각의 무게를 측정하였다. 다음으로 부식이 발생한 철근을 묶은 염산으로 깨끗이 처리하여 그 무게를 측정하였다. 이 실험에 있어 절곡 철근은 수지판단면이 들떠 있어서 표면처리가 어려운 것으로 나타나 그 측정은 제외하였다. 콘크리트 시편 제작의 경우에도 양생후 콘크리트를 파쇄하는 과정에서 흡착된 시멘트 페이스트를 완전히 제거할 수 없었으므로 감량정도 측정에서는 제외하였다. 감량정도(Weight Loss Ratio)는 다음 식을 통해 산출하였고 이를 표3에 보였다.

$$W.L.R = \frac{\Delta W}{W} \times 100(\%)$$

ΔW : 감소된 중량

W : 철근 원 중량

이상의 결과를 통해 보면 중량감소치가 각 경우, 즉 염화물량과 손상정도에 대해 완전히 엄밀하게 부합하지는 않으며 전체적인 경향에 배치되는 실험결과가 눈에 띄는 것을 알 수 있다. 그러나 시편의 종류에 따른 부식정도차이는 상당히 현격하게 나타남을 알

표3. 부식발생에 따른 중량의 감소($\times 10^{-3}$ %)

염화물량 시편기호	0	4	8	15	30	60	120
FC	3	2	0	0.5	2	5	4
D1	14	5	18	15	13	20	20
D2	28	30	33	30	40	40	40
D3	41	52	42	43	44	50	53
W	90	195	202	219	199	203	270
NC	231	263	228	263	350	400	440

수 있다. 예를 들어 국부손상 1의 경우 그 정도가 10에서 20정도에서 형성되며 2의 경우는 30에서 40정도, 경우 3은 40에서 50사이로 그 부식정도가 관찰되었다. 용접의 경우는 염화물량 0%를 제외하면 0.2%에서 0.3% 정도, 미도포의 경우는 0.3%에서 0.4% 내외의 중량감소를 보임으로써 그 경향을 확인할 수 있었다. 동일한 시편의 경우, 염화물량의 변화에 따른 감량정도는 앞서의 경우보다는 상대적으로 두드러지지 않았으나 전체적인 경향은 확인할 수 있었다. 여기서 알 수 있는 바 에폭시 도포철근의 방청성능은 완전도포의 경우 거의 완벽하다고 사료되며 표에서 보인 바 최고 0.005%의 감량은 부식의적인 요인에 의해 발생한 것으로 추측된다. 국부손상의 경우도 실험전 예측과 같이 같은 손상면적에 대해서 각각의 면적이 작은 경우일수록 발청 정도가 적은 것을 알 수 있었다. 용접의 경우 거의 전 손상면적에 부식이 발생한 것으로 관찰된 바 이에 대한 대책이 필요하다고 사료된다. 미도포 철근의 경우 전 중량에 대해 약 0.4%의 중량감소를 관찰할 수 있었는데 이 정도의 부식은 철근의 인장응력에 직접적인 영향을 미치지 않더라도 대단히 큰 량으로써 부식에 의한 팽창압이 우려되는 수준인 것으로 사료된다.

5. 실험결과의 분석 및 고찰

본 실험을 통해 얻고자한 결과는 에폭시 수지 도포 철근의 기본적인 방청성능과 여러 경우를 상정하여 그 발청정도를 파악하고자 하는 것이며 이를 정리하면 다음과 같다.

우선 완전 수지도포의 경우는 육안검사 와 면적측정 및 감량측정에 있어 공히 부식으로 판단되는 발청현상은 없음을 알 수 있

었다. 따라서 손상을 입지 않은 에폭시 도포 철근의 경우 그 기본적인 방청성능은 가장 심한 폭로상태에서도 대단히 우수함을 알 수 있었다.

다음으로 시공시 국부손상의 경우 같은 면적이더라도 손상부위 각각의 크기가 작을 수록 발청정도는 현저히 떨어짐을 알 수 있었다. 국부손상 1의 경우는 감량 정도가 경우 2의 약 절반 정도였고 경우 3에 비교할 때 1/3 정도로 나타났다. 면적측정에 있어서도 전혀 발청하지 않은 부위의 숫자가 상대적으로 더 많았다.

절곡의 경우 앞서 언급한 바와 같이 순간적인 압력에 의해 절곡됨에 따라 파단면이 발생하였는데 발청정도는 염화물량의 증가에 따라 거의 유사하게 증가하는 것으로 나타났다.

용접의 경우 열에 의해 손상을 입은 부위의 경우 거의 전 면적에 걸쳐 부식이 발생하였고 이 역시 그 발생정도는 염화물량의 증가에 따르는 것으로 나타났다. 용접이음의 경우는 특히 용접시에 상당한 악취와 연기가 발생하는 것이 관찰된 바 이에 대한 주의가 필요하다.

본 실험의 변수는 상당히 극단적인 상황을 상정한 것으로써 적절히 처리된 수지도포 철근의 경우 기본적으로 방청성능이 우수한 재료이므로 그 활용 가능성이 매우 클 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Special Issue on Effect of Chloride on Corrosion, Concrete Construction, V.27, No.10, Oct.1982, pp. 773-811
2. "Test Method for Chlorine in Organic Compounds by Sodium Peroxide Bomb Ignition," (ASTM E 256-65 R-1982), 1982 Annual Book of ASTM Standards, Part 30, ASTM, Philadelphia, 6 pp.
3. Hausman, D.A., "Steel Corrosion in Concrete," Materials Protection, Nov. 1967, pp. 19-23.