전위차 부식촉진법을 이용한 철근 콘크리트의 내부식성 예측을 위한 실험 연구

An Experimental Study on the Prediction of Corrosion Resistance of Reinforced Concrete Using Accelerated Potentiometric Corrosion Test

오 병 환*, 조 윤 구**, 차 수 원**, 정 원 기***
Oh, Byung Hwan Cho, Yun Ku Cha, Su Won Chung, Won Ki

ABSTRACT

Recently, large scale concrete structures exposed to severe environment are increasingly built in various locations. The corrosion may affect severely the durability and service life of such a concrete structure. It is, therefore, necessary to develop durable concrete to enhance the corrosion resistance. The corrosion resistance of concrete can be identified through accelerated corrosion test. The purpose of the present paper is, therefore, to devise a reasonable and accurate method to predict the amount of corrosion of reinforcing steels. The proposed method which is basically based on the concept of Faraday's Law, determines the corroded amount of a re-bar according to accelerated corrosion time. The corrosion is accelerated by employing the potentiometric corrosion test arrangement. The effects of admixtures in concrete including fly ash and silica fume have been also studied to explore the relative corrosion resistance of concrete.

1. 서론

건설재료 중에서 철강재와 더불어 가장 큰 비중을 차지하는 콘크리트는 내구성이 우수하여 반영구적인 구조물 축조에 적용되어 왔다. 주지하는 바와 같이 해양환경하에 건설된 철근콘크리트 구조물의 경우 구조물 외부로부터 침투되는 염분의 영향으로 인하여 콘크리트 내부에 묻힌 철근은 녹슬게 되고 이 녹이 진행되어 콘크리트 구조물에 균열, 박리 등과 같은 열화현상이 나타남으로써 구조물이 치명적인 손상을 받게 된다. 그러므로 해양콘크리트 구조물은 철근부식에 대한 내구성과 신뢰성을 확보해야 하는 문제가 매우 중요시 된다.[1][2] 따라서 철근 부식의 메카니즘과 이에 대한 내구성 평가기법 및 실험기법에 대한 연구가 절실히 요구되지 않을 수 없는 상황이다. 그러므로 본 논문에서는 이에 대한 실험 및 분석방법중 현재 정립되지 않았지만 효과가 탁월한 것으로 사료되는 전위차에 의한 부식실험기법에 대해서 연구하였다.

철근 콘크리트중의 철근의 부식실험에는 여러가지 기법이 현재 제안되어 표준규격으로 제정된 것도 있지만 대부분이 수개월에서 1년이상의 장시간이 소요되고 부식의 발생량에 대한 추정 및 확인이 어렵고 고품질 콘크리트일 경우에는 수년이상이 소요되는 단점이 있다. 그러나 적정 내구연한을 가지는 콘크리트의 설계시 필요한 자료제공을 위한 실험에는 단기간에 결과를 얻을 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서

* 서울대학교 토목공학과 교수
** 서울대학교 대학원 박사과정
*** 동아건설(주) 기술연구소 선임연구원

는 단기간의 실험시간과 명확한 결과를 얻을 수 있는 기법으로 아직 실용화단계는 아니지만 그 우수한 성능과 결과를 제시할 수 있는 전위차 부식촉진법에 대한 기초 연구를 수행하였다.

본 실험방법은 현재 국내, 국외에서도 연구성과가 없는 기법이다. 제안된 방법은 분석화학에서 주로 사용하고 있는 정량분석방법이며 주로 화학물질의 석출이나 분리를 위해 사용하는 방법이다. 근본 원리는 패러데이 법칙[13]이며, 장점으로는 콘크리트시편을 파괴하지 않고도 부식량을 계산에 의해 정확하게 예측할 수 있고 필요한 만큼의 부식량을 조절할 수 있는 기법이다. 또한 촉진비율을 추정하여 장기 내구연한 예측에도 이용할 수 있는 자료를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 부식의 과정중에서 확산에 의한 염분의 침투에 관해서는 배제하고 부식발생의 시점에서의 구조물의 한계상황에 대한 규정으로 균열발생과 덮개 탈락과정까지 수행하고 각 단계에서 발생한 부식량과 부식이 부착강도에 미치는 효과를 부착강도 실험을 통하여 고찰하였다.

2. 내부식성 평가 기법

내부식성의 평가기법에는 여러가지가 제안되어 있다. 각 기법들을 본 장에서 요약하여 그 특성 및 장단점을 간단히 분석하고자 한다. 일례로, 일반적으로 알려진 부식촉진 방법에는 시편을 염수에 침지시켜 장시간 관찰을 한다. 이 경우 촉진의 방법으로 염수의 농도를 조절하고 덮개를 작게하며, 배합을 저강도용으로 제작한다. 그리고 판별법으로 부식면적율을 이용한다. 이외에 자연전위측정법, 양극분극법, auto clave 기법등이 있다. 이들을 크게 부식면적율에 의한 방법과 전압이나 전하량을 이용한 전기화학적 방법으로 대별한다.[4][7][8]

3. 전위차 촉진법에 의한 부식 실험

3.1 개요

철근부식 실험방법에는 모두 짧은 시간안에 소정의 목적을 이루기 위해 사용되며 각기 장단점을 갖고 있다. 즉 수십년이 소요되는 부식기간을 길게는 1-2년 짧게는 몇달안에 그 결과를 나타낸다.

특히 이들에 비해 전위차 부식방법은 가장 적은 시간(1~2주 이내)이 소요되며 우수한 결과를 보여 주는 실험법인데 지금까지는 이 결과를 분석하는 기법이 정립되지 못하였다. 이에 본 논문에서는 각 배합별로 전위차 부식실험을 수행하고 결과에 대한 해석방법을 제시하려고 한다.

3.2 실험재료

350kg/m^3, 380kg/m^3 및 550kg/m^{3}의 세 종류의 단위시멘트량과 혼화재의 혼입률을 고로 슬래그(Blast furnace slag)는 12.5%, 25%로 달리 하였고, 실리카 흄(Silica fume)에서는 10%, 20%로 달리하였다. 350kg/m^{3}배합은 혼화재를 사용하지 않았다.

3.3 실험방법 및 측정

3.3.1 압축강도 실험방법

압축강도시험은 KS F2405 콘크리트의 압축강도시험의 규정에 따라 수행하였다. 실험시편은 10×20cm 원형공시체이고, 제작한 시편은 시험전까지 20±2℃의 항온수조에 수중양생시킨후 최대용량 200t의 MTS의 변위제어방법으로 행하였다.

3.3.2 내부식성 실험방법

철근 부식 실험은 5% NaCl 용액에 철근을 매설한 시편을 침지하여 20V 직류전원공급장치의 (+)극은 철근에 (-)극은 NaCl 용액에 연결하여 직류회로를 구성한다. 그림 4.1은 철근 부식실험의 장치도를 보여주고 있다. 그림의 회로에서 양극과 음극의 전위차는 염소이온의 침투를 촉진시킬 뿐 만 아니라 철근 부식 역시 촉진시키는 작용을 한다.

시편의 부식 측정 방법은 철근의 부식으로 인한 팽창압으로 균열이 생겨 콘크리트의 균열사이로 전해질이 침투해 전류량이 크게 증가하게 된다. 이러한 시점을 측정하기 위한 장치로 각 시편마다 10Ω의 저항을 연결하여 저항에 걸리는 전압을 측정하여 전류로 환산한다. 직류전압의 측정은 Data Logger를 이용하여 30분마다 측정한다.

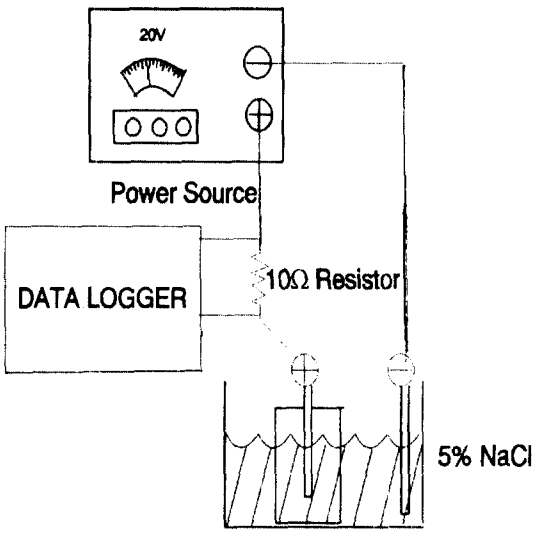

그림 3.1 철근 부식실험의 장치도

3.3.3 부착강도 실험방법

부식으로 인한 단면감소보다 철근의 리브의 손상으로 인한 부착강도의 측정을 위하여 MTS 인장시험기로 슬립이 발생하는 최대강도를 측정하였고 부식을 유도하지 않은 시편에 대한 상대값으로 표현하였다.

4. 결과분석

4.1 개요

본 논문에서 사용되는 이론은 철근의 부식이 전기 화학적인 반응이라는 점에서 착안하여 반응에 사용되는 총 전하량이 보존된다는 페러데이법칙에 근거한다. 즉 전기부식방법에 사용되는 총전하량과 자연 부식에 사용되는 총전하량이 같아야 한다는 점에서 자연전위를 측정함으로써 자연부식에 소요되는 총시간을 구한다는 이론이다.[13] 초기에 철근의 분자수를 중량에 의한 몰수비교로 구한다음 일정 전압하에서 소요되는 전하량의 누적값을 구한다.

이것을 철근의 부식량을 가리키는 대표값으로 인식하여 각 단계에 해당하는 자연전류량을 측정하여 실제 부식량과 부식시간에 근사한다는 이론이다. 따라서 전기 부식법으로 구한 각 시험변수의 결과는 실제 구조물이 해양 환경하에서의 부식발생후 부식시간을 산정한다. 또한 철근의 부식으로 인한 단면의 감소보다 리브의 손상으로 인한 부착강도의 감소가 클것으로 생각되므로 부착시험도 수행하여 고찰하였다.

4.2 실험결과

Data-Logger에 매시간마다 측정된 전압값을 저항값으로 나누어 전류량을 산출하고 전류량과 시간과의 관계로서 결과를 나타내었다. 그림 4.1은 혼화재와 시멘트의 종류및 사용량의 영향에 따른 부식저항성을 그래프로서 표현한 것이다. 부식실험결과에서 알 수 있듯이 각 시편에 따라 명확한 결과를 보이며 이는 본 실험방법으로 각 배합이나 덮개에 따른 내부식성능의 평가가 가능하다는 것을 나타낸다. 그림 4.1에서 보면 각 혼화재의 혼입에 따른 부식저항성을 표현하고 있는데 급격한 전류의 상승이 이루어질때까지의 시간이 길수록 부식저항성이 우수한 것으로 평가된다.

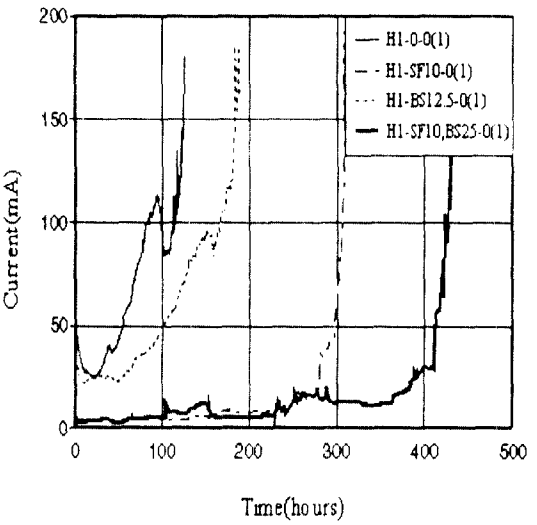

그림 4.1 부식저항 그래프

실제로 전위차 부식법으로 각 시편의 상호평가를 한 예는 몇몇 연구자가 수행한 예가 있다. 그러나 본 논문에서는 부식으로 인한 덮개의 탈락을 주 연구대상으로 하지 않고 부식량의 판별에 중점을 두었다. 그래프에서 보이는 전류값은 그 시점에서의 철근의 화학반응속도를 의미하며 이는 그 시점에서의 콘크리트의 비저항이나 또는 투수성능을 나타내는 지표로도 응용할 수 있다고 사료된다.

본 논문에서 부식량을 추정하기 위해 사용된

법칙은 Faraday's Law이며 이를 이용하여 그림에서 나타난 각 시편의 전류 - 시간 그래프에서 시간에 대한 전류량의 적분값이 부식량을 표현한다. 그리고 Faraday's Law에 따라 철분자 1몰당 2F(1F = 96500 C)이 소요되므로 아래와 같은 식으로 철의 부식량을 결정할 수 있다.[13] 또한 철분자 1몰이 55.847g이므로 몇 g의 철분자가 산화하였는가를 추정할 수 있는 것이다. 본 논문에서 전류량의 적분값을 구하는 방법으로 Data Logger에서 받아들이는 각 단계에서의 time step을 기준으로 구분구적법을 응용한 program으로 계산하였다.

$$\text{부식량(몰)} = \frac{1}{2\times 96500}\int q\,dt$$

일정량을 부식시킨 후 부착강도를 측정한 결과를 그림 4.2에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 부식량이 부착강도에 매우 큰 영향을 끼치고 있음을 나타낸다.

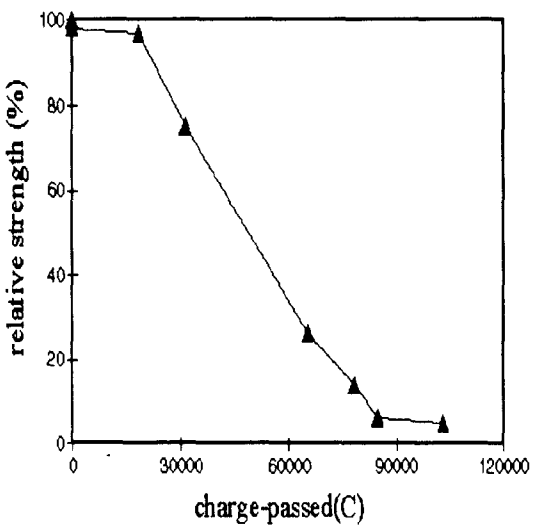

그림 4.2 부착강도 그래프

전위차 부식촉진실험을 수행하면서 덮개의 탈락과정까지의 실험기간을 가지는 경우와 각 단계별로 일정량을 부식시켜서 시편을 준비한 후 부착강도를 측정하여 부식과 부착과의 관계를 고찰하였다. 부착강도 실험은 철근의 몰수를 구한다음 부식발생량을 계산에 의해 추정한 다음 부식가능량에 대한 상대값(%)을 변수로 하였다.

4.3 결과분석

각 실험결과를 종합해 보면 혼화재별로 또는 강도별로 뚜렷한 차이를 보이는 양상을 나타낸다. 즉 혼화재의 혼입으로 인한 부식의 저항능력이 향상되었음을 보여준다. 특히 실리카흄(Silica fume)의 혼입은 철근 부식억제에 효과적임을 나타내고 있다. 앞에서 제시한 결과는 전체실험에서 일부만 제시한 것이며 위의 그래프상의 차이만으로도 각 배합의 부식저항성의 상대비교가 가능하리라고 생각된다. 그리고 전위차촉진부식이나 실제의 자연부식이나 그 종점에서 부식의 발생량은 같아야 한다는 가정을 한다면 자연부식전류량의 측정으로 전위차촉진부식으로 손실된 철근의 양만큼이 부식하기 위한 자연부식시간을 계산할 수 있다는 결론에 도달한다.[13] 이 가정에 따른 계산과정을 도식화하면 그림 4.3와 같다.

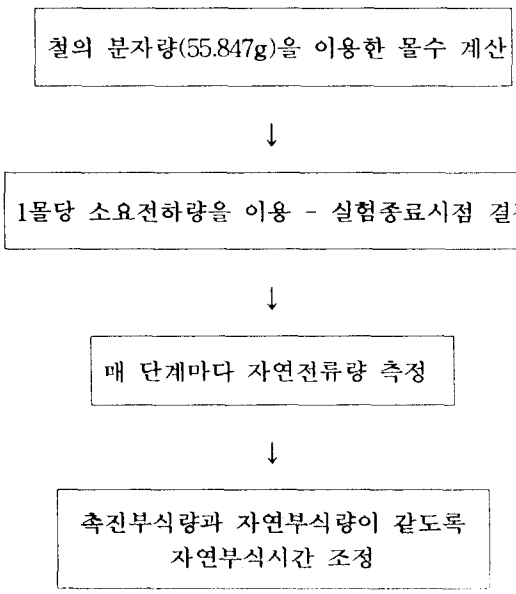

그림 4.3 자연부식기간(내구연한) 산정

이 방법에 따라 계산한 결과가 그림 4.4 및 4.5에 제시되었다.

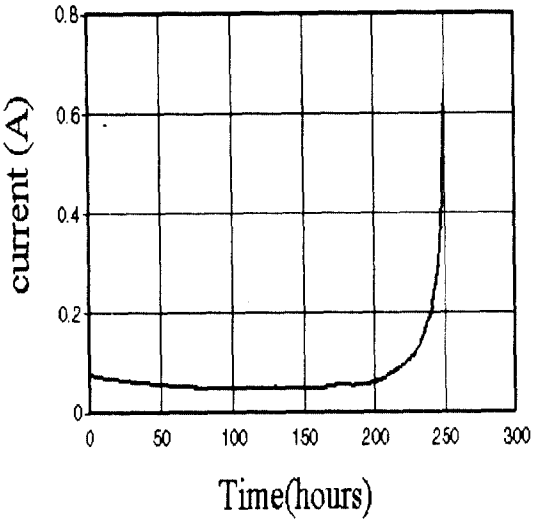

그림 4.4 부식저항 그래프

이 시편은 사용된 전하량이 65121.64C이다. 철분자의 분자량이 55.847g이고 2가 원소이므로 96500*2=193000(C)이 1몰의 철을 부식시키는데 필요한 소요 전하량이다. 그러므로 부식가능량이 93.33g으로 보면 1.67몰에 해당하고 이를 전하량으로 환산하면 322547.91C이다. 따라서 그림에 표시된 시편은 약 20%의 부식이 발생한 것이다. 그리고 최종점에서의 자연전류량이 0.36mA이므로 이를 고려하여 환산한 결과는 약 55년의 부식기간(덮개:4.35cm)이 산정된다. 이 값은 철근부식만을 고려한 값이며 실제 구조물인 경우는 외부하중에 의한 균열 및 마모등에 의한 요인은 고려되지 않았다. 따라서 본 실험의 응용으로 실제구조물에의 적용도 검토해 볼 필요가 있다고 사료된다.

참고로 이 시편의 부착성능은 1368kg에서 슬립이 발생하였고 부식을 시키지 않은 시편은 5143kg에서 슬립이 일어났다. 따라서 20%의 단면감소에 74%의 부착강도의 저하를 보였다. 즉 철근의 부식으로 인한 단면감소로 인한 인장저항력의 감소보다는 부착강도의 저하가 더 심각한 열화요인이 될 수 있다는 것이다. 따라서 좀 더 많은 실험으로 이 부분에 대한 많은 자료축적이 필요하다고 할 수 있으며, 또한 본 연구의 결과를 이용한다면 약 10%의 철근부식이 발생한 점을 한계값으로 본다면(약 20%의 부착강도 감소) 철근부식만을 고려한 내구연한은 약 35년정도가 된다.

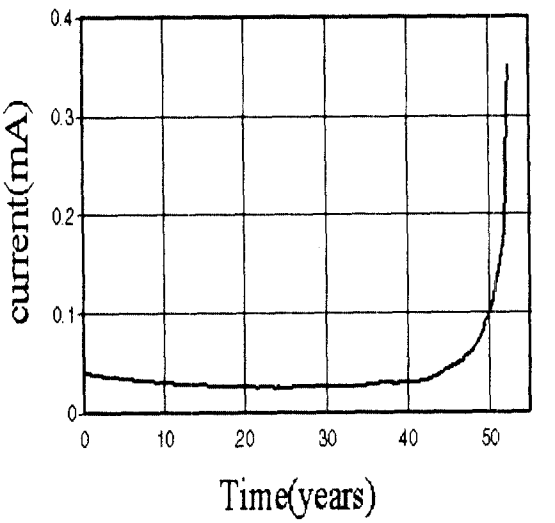

그림 4.5 내구연한 산정그래프

본 실험의 결과로서 기존 부식면적율에 의한 실험방법과의 차이점을 나타내 보면 그림4.6과 같다.

- 기존 부식면적율에 의한 실험 -

- 실험배합간의 상호비교
- 부식발생량 - 육안에 의한 부식면적검토
- 충분한양의 부식유도 - 장시간의 실험시간
- 시편의 파괴없이 부식량판별이 불가능
- 심층적인 실험에 응용하기 어려움

⇓

- 전위차 부식촉진법 -

- 실험배합간의 상호비교
- 부식발생량 - 계산에 의해 추정가능
- 충분한 양의 부식유도 - 단시간에 가능
- 시편의 파괴없이 부식량 판별이 가능
- 구조적이고 심층적인 실험에 응용 가능
  - 부착강도 평가, 내구성 평가등

그림 4.6 부식실험방법의 비교

5. 결론

본 논문에서는 철근 콘크리트의 부식으로 인한 내구성 감소를 촉진법에 의하여 평가할 수 있는 실험법의 정립을 위한 기초 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 다른 부식촉진법에 의한 결과보다 단기간의 시간에 명확한 결과를 유도할 수 있었다.
(2) 철근콘크리트 구조물의 철근 부식으로 인한 내구연한 평가에 기초 자료를 제시할 수 있었다.
(3) 철근의 부식이 부착성능저하요인으로 작용할 수 있다는 것을 밝혔다.
(4) 필요한 양만큼의 부식을 자유자재로 유도할 수 있으며 부식으로 인한 균열발생, 덮개 탈락등의 모사가 실험실에서 가능하게 되었다. 따라서 부식문제에 대한 본격적인 연구의 기틀이 마련되었다고 할 수 있다.
(5) 실험결과의 세부결과에 대해 언급한다면 이 실험법에 의하면 시멘트량의 증가나 물-시멘트비의 감소는 부식저항성을 늘려주며, 혼화재의 적절한 사용이 시멘트량의 변화보다 부식저항에 효과적일 수 있다는 사실을 밝혀내었다.

6. 참고문헌

1. 오병환 외 5인, "농업토목 구조물의 내구성 향상을 위한 고품질 콘크리트에 관한 연구", 서울대학교 공학연구소, 1994
2. 서울대학교 공학연구소, "해사활용기술 연구(II)", 1992
3. 한국 콘크리트학회, "서해대교 콘크리트 품질방안 연구", pp 62-121, 1994
4. 전대회, "부식방지에 관련된 국내외의 법규와 해설",한국 부식학회지
5. 한국 건설방식 기술연구회, "콘크리트 철근의 부식과 방식대책", 1994
6. 전대회, "방식제에 의한 콘크리트중의 철근 방식법의 해설", 한국부식학회지, Vol.21, No.2, June.,1992
7. 심보현, "콘크리트 구조물의 염해", 럭키개발 건설기술 연구보고, pp.13-29, 1992
8. 문한영, 김성수, 유재석, "해양환경하에 방치한 콘크리트 중의 철근의 부식추정에 대한 연구" 한국콘크리트학회 논문집, 제6권 제2호, pp.129-137, 1994. 4
9. B.B.Hope, Corrosion of Steel in Concrete Made with Slag Cement. ACI Materials Journal, Nov.-Dec., pp.525-531, 1987
10. M.A. Mustafa and K.M.Yusof, "Atmospheric Chloride Penetration into Concrete in Semitropical Marine Environment", Cement and Concrete Research, Vol.24, No.4, 1994
11. D.GE, Z.ZHANG, C.ZHANG, N.XU, "Improved cathodic protection under above ground tank with coating containing solid electrolyte", British Corrosion Journal, Vol.29, No.3, pp.237-239, 1994
12. Neal S. Berke, "Corrosion Inhibitors in Conctete", Concrete international, 1989
13. 崔圭源, "分析 化學", (株) 養英閣, 1994