

부식센서를 이용한 콘크리트 철근부식 모니터링 기술 개발 연구

On the Development of Monitoring Technique for Rebar Corrosion in Concrete using Sensor

김 용 철* 장 상 업** 조 용 범*** 이 한 승**** 신 성 우*****
Kim, Yong Cheol Jang, Sang Yup Cho, Yong Bum Lee, Han Seung Shin, Sung Woo

ABSTRACT

By introducing corrosion monitoring techniques, steel corrosion in concrete may be evaluated at early stage. The monitoring probes in concrete detect the causes (chlorides and CO₂) of steel corrosion by being cast into the concrete or diffusing in from the outside. Various systems for corrosion monitoring in concrete are reviewed in this paper. These techniques are classified according to monitoring purposes such as corrosion potential or corrosion rate of steel and causes for corrosion etc.. Today, special interests are converged in development of corrosion sensor as a monitoring method of new concept.

1. 서 론

콘크리트 내 철근의 부식은 전 세계적으로 중요한 사안 중의 하나가 되었다. 특히, 제설제 염(deicing salts) 및 해수 등에 노출된 구조물이나, 주변의 공격성 환경에 노출된 교량, 터널, 해안 접안 시설 등에 있어서 그 심각성은 더욱 증대되고 있는 실정이다.

콘크리트 내 철근 표면에서의 부식진행 상황 및 정도를 측정하기 위해서는 다양한 전기화학적 측정 방법들이 활용되고 있다¹⁾. 그러나 이러한 방법들은 현장에서의 측정에 어려움이 있을 뿐만 아니라 철근의 부식이 진행되는 시점에서야 비로소 그 상태를 판단할 수 있는 다소 소극적인 방법이라 할 수 있다. Tuutti의 철근부식 모델²⁾을 고려한다면, 철근의 부식발생 이전 단계인 잠복기에 해당하는 시기에는 구조물 내 철근으로부터 부식진행상황에 대한 어떠한 정보도 감지하기 어렵다는 것이 예견된다.

* 정회원, 한국가스공사 연구개발원 선임연구원
** 정회원, 한국가스공사 연구개발원 연구원
*** 정회원, 한국가스공사 연구개발원 선임연구원
**** 정회원, 한양대학교 건축공학과 조교수
***** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

따라서 기존의 전기화학적인 철근의 부식속도 측정방법과는 다른 개념으로써, 철근 부식의 잠복기 단계에서부터 적극적으로 대처할 수 있는 방안에 대해 많은 관심이 모아지게 되었다. 그 중 철근 부식을 유발하는 부식유해인자들의 구조물 내 존재유무 또는 외부로부터의 침투여부 등을 인지할 수 있는 방법에 대한 연구들이 실효성 높게 진행되어 오고 있다. 예를 들면, 부식유해인자에 의해 철근의 부식 반응과 동일하지만 더욱 빠른 시간에 반응할 수 있는 대체 기기의 응답성으로부터 철근의 부식 위험성을 모니터링 하고자 하는 연구 또는 유해인자가 철근까지 도달하는 예상경로 상에 미리 설치된 장치로부터 유해인자의 침투 진행상황을 모니터링하여 철근의 부식을 예견하는 연구 등이다. 이와 같은 부식 모니터링 방법은 콘크리트 구조물 내의 삽입 장치(probe 또는 센서 등)로부터 측정 가능한 데이터를 구하여 철근의 부식진행상황을 예견한다는 원리이다. 그간 다양한 상품품들이 개발되어 시판되고 있으며, 이들 개발품들에 대한 측정원리와 적용 예 등을 살펴보았다. 그리고 이와는 완전히 새로운 개념의 전기저항형 박막 부식센서에 대한 개발 진행내용을 간단히 소개하고자 한다.

2. 콘크리트 내 철근 부식 모니터링 기술 현황

모니터링 기기들은 콘크리트 구조물 내에서 철근의 부식이 발생하기 이전에 부식유발인자들과 반응하여 응답성을 보여줌으로써, 철근의 부식진행을 사전에 예견할 수 있도록 개발된 것이다. 따라서 철근과 동일한 철 성분이 주요 반응부분으로 구성되어 있는데, 철근 그대로 또는 철 와이어 형태로 사용하거나, 경우에는 박막형태로 제작되기도 한다. 이들의 사용을 위해서는 철근에 바로 고정하거나, 콘크리트 커버와 철근 사이의 콘크리트 매체에 적절히 위치시킨다. 측정원리별로 구분하여 살펴보았다.

2.1. 철근 부식전위 모니터링용

이것은 매립형 기준전극을 콘크리트 내 철근에 인접하게 위치시켜 수시로 철근의 자연전위를 측정하고, 이 측정 자연전위로부터 철근의 부식진행 경향성을 정성적으로 판단하고자 하는 방법이다. 모니터링된 철근의 자연전위 값을 ASTM C 876 기준³⁾에 의거하여 철근의 상태를 평가하게 된다.

이러한 매립형 기준전극으로 철근에 인접하게 위치시키는 방법을 이용함으로써, 기존의 콘크리트 커버 외부에 기준전극을 올려놓고 측정하는 방법에 비해 콘크리트 커버로 인해 발생하는 전압강하(iR drop) 요인을 제거할 수 있는 장점을 나타낸다.

- V2000 monitoring electrode

- ERE 20 reference electrode

2.2. 철근 부식속도 모니터링용

이 모니터링 방법은 철근과 유사한 부식 거동을 나타내는 probe를 콘크리트 구조물 내 철근에 인접하게 위치시켜 놓고, probe의 부식진행상황을 측정하게 된다. 이 probe가 철근의 부식진행상황과 동일한 거동을 보인다는 전제하에 probe의 측정값을 활용하여 철근의 상태를 대신하여 판단하고자 하는 방법이다.

- CORRATER

- CORROSOMETER

2.3. 부식유해인자 모니터링용

앞에서 설명한 모니터링 방법들은 나름대로는 철근 표면에서의 부식 발생 및 진행 상황에 대한 중요한 정보를 제공하고 있다. 그러나 이 방법들은 부식유해인자들이 철근에 도달하여 부식이 진행되고 서야 비로소 모니터링의 결과가 파악되게 된다.

따라서 이러한 방법들보다 선행적으로 철근의 부식 개시단계를 예견하는 조기 경고 시스템으로써의 모니터링 방법들에 대한 필요성이 대두되었다. 이와 같이 이른 단계에 부식 가능성을 감지할 수만 있다면, 구조물의 보수비용 절감뿐만 아니라 사용수명 연장의 효과를 더욱 기대할 수 있을 것이다. 이 방법들은 구조물 내에 이미 존재하는 유해인자에 대한 반응성은 기본이고, 더욱 중요한 기능은 외부에서부터 구조물 내부로 침투되어 들어오는 유해인자를 깊이별로 모니터링 하고자 하는 관점에서 개발된 시스템들이다.

- Anode-ladder-system
- Expansion-ring-system
- Multi-depth sensor
- CorroWatch multiprobe
- FORCE probe
- Wire sensor

3. 부식센서 개발⁴⁾

이상에서 살펴본 부식유해인자 모니터링용 probe들에서는 벌크형(막대 또는 와이어)의 센서부분에서 부식유발인자와의 반응성을 애노드 부위의 갈바닉 전류 증가 또는 저항 변화를 측정하는 방법을 이용하고 있다. 이러한 방법들은 센서부분에 유해인자가 도달하는 시점과 센서로부터 외부 측정자가 신호를 감지할 수 있는 시점 사이에는 부피가 큰 벌크 형태의 철 표면에서 부식반응 전개에 소요되는 시간에 상응하는 모니터링 지연 시간차가 발생할 가능성이 있다. 이것은 와이어형 센서의 측정 결과에서도 나타나는데, 와이어가 단락되어 무한대의 저항으로 급변하기 이전 시점에서의 저항변화는 거의 감지되지 않고 있다.

본 연구진에서는 이상에서 살펴본 기존의 모니터링용 상용품들과는 완전히 새로운 개념의 부식센서를 개발하고자 하는 목표에 의해 연구개발 중에 있다. 이 센서의 가장 두드러진 특징은 부식유해인자와의 민감한 반응성에 있다. 벌크형의 센서부분을 채택하고 있는 여러 모니터링용 probe들에 비해 이 센서는 부식유해인자와의 반응과 함께 바로 그 응답성을 외부에서 모니터링할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3.1. 원리 및 모형

알루미늄 기판 위에 철근과 동일한 철 성분을 박막(최대 10 μm)으로 증착하고, 용도에 따라 하나 또는 여러 가닥의 세선 형태(그림 1)로 디자인되어 있다.

철근에 부식을 유발하는 부식유발인자들이 부식센서에 도달하게 되면, 센서 선에서의 부식반응에 의해 선이 얇아지거나 단락되게 된다. 이러한 부식센서의 형상변화에 의해, 선 양단에서 측정되는 전기저항의 변화(그림 2)가 감지된다. 벌크 상태의 철과는 달리 이 센서의 얇고 가는 선은 부식유발인자에 아주 민감하게 반응하는 응답성을 보여줌으로써, 모니터링 지연 시간을 최소화할 수 있는 장점을 지니고 있다.

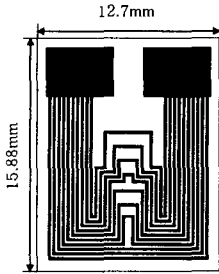


그림 1 부식센서 모형

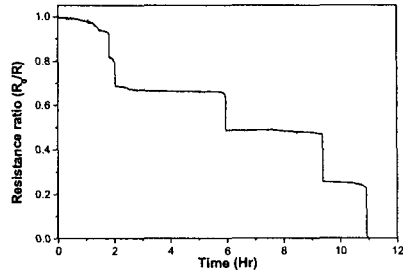


그림 2 부식센서의 응답성 개략도

3.2. 부식센서의 적용성 실험

현재까지 내재 및 비래 염분에 대한 뚜렷한 응답성 감지를 모니터링하기 위한 디자인 개발 및 다양한 실험이 진행되고 있다.

3.2.1. 내재 염분에 대한 반응

크기 100×150×80 mm (길이×폭×높이), w/c 0.5의 모르타르 시험체를 제작하였는데, 각 시험체의 부식환경을 변화시키기 위해서 염분의 양을 0.5, 1.0, 1.5 %로 조절하였다. 시험체 내에는 두께 6 μ m의 10가닥 세선을 갖는 전기저항형 부식센서를 각각 매설해 놓았으며, 초기 저항값(R_0)에 대해 매 시간별 측정된 저항값(R)의 비율(R_0/R)을 그림 3에 나타내었다.

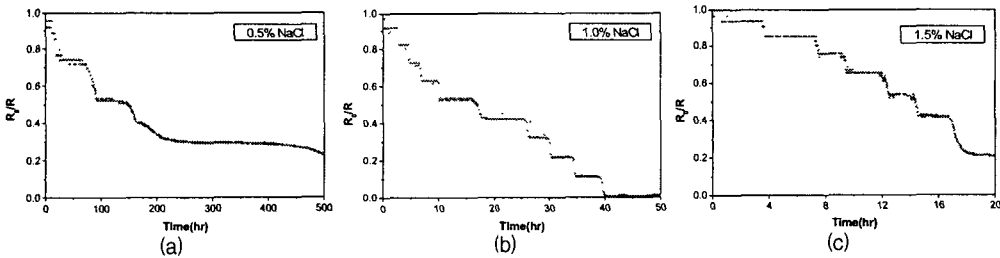


그림 3 모르타르 내 내재 염분에 대한 부식센서의 응답성

모르타르 시험체 내에 존재하는 염분에 대해서 부식센서의 뚜렷한 반응 특성을 보여주고 있는데, 특히 염분농도에 따라 반응의 상이한 경향을 적절히 구분하여 감지되고 있음을 나타낸다.

3.2.2. 비래 염분에 대한 반응

콘크리트 내 철근에서 부식이 발생하기 이전에 외부로부터 콘크리트 내로 부식유발인자들(염화물 또는 CO₂ 등)이 침투해 들어오는 과정을 모니터링하기 위한 부식센서의 활용성을 검토하였다. 그림 4의 개략도에 나타낸 바와 같이, 비래염분이 철근에까지 도달하는 중간 경로인 콘크리트 내에 부식센서를 깊이별로 위치시켜 놓으면, 순차적으로 부식센서으로부터 응답성이 나타나게 된다. 이로 부터 비래염

분의 침투 경로 및 속도 등에 대한 정보를 모니터링할 수 있게 된다.

모르타르 내로 염화물(Cl^-) 이온의 확산에 따른 부식센서의 반응 거동을 알아보기 위하여 모르타르 시험체를 제작하였는데, 시험체 내에서 NaCl 용액을 빠르게 확산시키기 위해 모르타르 내 공극율이 크게 되도록 조성비율을 조정하였다. 모래와 시멘트의 비율을 5:1로, 물-시멘트(w/c) 비를 0.7로 하였다. 직경 약 10 cm, 높이 20 cm의 원기둥 시험체 내부에 표면으로부터 1.0 cm, 8.5 cm 깊이별로 부식센서를 삽입해 두었다. 1주일간 수중 양생 후, 시험체 표면 부위에만 5 wt%의 NaCl 용액을 분사하고 건조시키는 사이클을 주기적으로 반복해 주었다. 시간의 경과에 따른 박막센서의 저항변화율(R_0/R) 결과를 그림 5에 나타내었다.

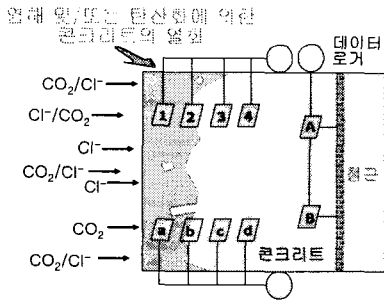


그림 4 비래염분의 영향을 모니터링하기 위한 부식센서의 활용 방안 개략도

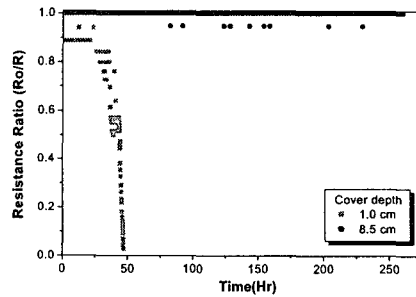


그림 5 비래염분에 대한 모르타르 내 깊이별 부식센서의 응답성

표면으로부터 1.0 cm 깊이에 있는 센서는 1 일 만에 반응이 나타나기 시작하였고, 2 일 후에 센서의 저항변화율이 약 0.1 이하까지 감소하고 단락되었다. 그러나 표면으로부터 8.5 cm 거리(깊이)에 있는 센서는 11 일 경과 후에도 저항 변화가 나타나지 않고 있다.

이상에서 살펴 본 비래염분에 대한 모니터링용 박막센서의 활용 실험 결과, 박막센서가 유해인자의 확산거동에 대해서 빠르게 응답을 보이고 표면으로부터 깊이별 위치에 따라 시차를 뚜렷이 구분하여 정확히 감지하는 등 개발 목적에 부합하는 결과를 확보할 수 있었다.

4. 결 론

콘크리트 내 철근의 부식을 진단하기 위하여 다양한 시스템을 적용하여 부식 위험성을 모니터링하고자 하는 노력에 의해 여러 종류의 probe(또는 센서)가 상용화되어 있다. 각 방법들의 측정원리를 따져 보면, 철근의 부식전위 모니터링용, 철근의 부식속도 모니터링용, 부식유발인자 모니터링용 그리고 다용도 동시 모니터링용 등으로 구분이 가능하다. 공통적으로는 각 모니터링용 센서 부분이 부식유발인자와 우선적으로 반응을 하여 변화되는 상태를 측정함으로써, 철근의 부식진행 상황을 예측하는 방법들이다. 각각의 방법들은 활용 상에 장, 단점이 지적되고는 있으나, 다양한 디자인 형태 및 측정원리에 의해 이미 상용품으로 제작되어 실제 콘크리트 구조물에 적용되고 있다.

전기저항형 박막 부식센서는 독자적인 국내 기술로 연구 개발되어, 그 활용성에 있어서는 토양 및

수용액 분위기에서는 이미 모니터링 결과가 확보된 상태이다. 그리고 현재까지 콘크리트 분위기에서의 적용성에 대한 연구수행 결과, 기본적인 적용 개념에 대한 성능을 확인하는 데이터를 충분히 확보한 상태이다. 향후 적절한 연구수행과 상품화 노력에 의해서 기존의 모니터링 방법과는 차별화되는 성능 및 활용성이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2001 건설기술연구개발사업(과제번호: 목적 F-01) 및 KISTEP의 국가지정 연구실사업(과제번호: 2000-N-NL-01-C-006)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 조용범, 김용철, 고영태, 장상엽, 전기저항형 센서 및 전기화학적 방법을 이용한 철근콘크리트 구조물의 부식속도 측정 방법에 관한 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제 13권 2호, 2001, pp.1185~1190
2. A.Bentur, S.Diamond and N.S.Berke, Steel Corrosion in Concrete, E&FN Spon, London, UK, 1997.
3. ASTM C 876, 1991.
4. 2001 건설기술연구개발사업 (목적 F-01) 연차보고서, 2002.