

철근 콘크리트 구조물의 내구성 평가를 위한 센서

하대현*, 배정효, 이현구, 하운철
한국전기연구원

Sensors for Durability Assessment in Concrete Structures

Tae-Hyun Ha*, Jeong-Hyo Bae, Hyun-Goo Lee, Yoon-Cheol Ha
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - Many extensive researches in the area of sensor's technology for durability assessment in concrete structures have increasingly been carried out in recent years. In this paper, the principles and use of various sensors involved in the health monitoring of concrete structures are described.

1. 서 론

북미, 유럽, 중동을 비롯한 그 밖의 일부 국가에서는 철근 콘크리트 구조물의 철근 부식이 중요한 문제로 대두되고 있다. 염화물 침투에 의한 철근 부식은 주로 추운 기후에서 제빙용 소금을 사용하거나 해양 환경에 노출되어 발생한다. Mehta와 Burrows는 이러한 환경에서 계속 유지될 수 있는 콘크리트 구조물을 건설하기 위하여, 21세기 콘크리트 사용은 강도보다 내구성을 고려하여야 한다고 보고하였다[1].

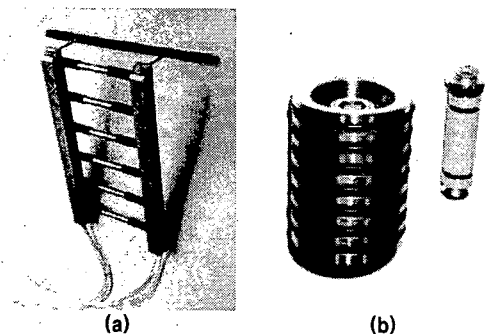
최근에는 신축이나 기존의 철근 콘크리트 구조물의 내구성 평가를 하기 위하여 상용 센서시스템들을 사용하고 있으며, 이들 시스템은 대부분 센서와 계측장비가 분리된 형태로써 운영되고 있다.

본 논문에서는 철근 콘크리트 구조물에 있어서 최근에 관심 있는 내구성 평가용 센서의 원리 및 사용법에 대하여 기술하고자 한다.

2. 콘크리트 구조물의 내구성평가용 센서

2.1 링 센서 또는 매크로 셀 센서

1990년부터 사다리형 양극시스템이라고 하는 매크로 셀 시스템이 신축 콘크리트 구조물을 감시하기 위하여 광범위하게 사용되고 있다. 기존의 콘크리트 구조물 감시에는 확장형 링 시스템이 사용되고 있다. 그림 1은 콘크리트 구조물내의 철근 부식을 감시하기 위하여 사용되는 사다리형 양극시스템과 확장형 링 시스템을 나타낸 것이다.

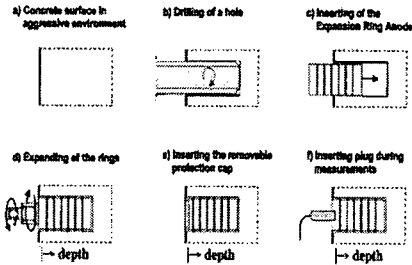


〈그림 1〉 사다리형 양극시스템(a)과 확장형 링 시스템(b)

이 센서 시스템은 부식이 시작되는 임계 염화물 함량의 깊이, 즉 부식과 관련된 철근의 임계 깊이를 가리킨다. 결과적으로 시간-부식 관계를 예측하여 균열과 박락이 발생하기 전에 건물주가 예방 대책을 세울 수 있다. 센서 주변부의 전위와 콘크리트 전기저항을 측정함으로써 습도, 산소 가용성 그리고 부동태피막 파괴 이후의 부식 거동을 평가할 수 있다.

사다리형 양극시스템은 주 감시센서로서 온도센서가 포함된 6개 양극, 사다리형 양극과 철근에 대한 대응전극(counter electrode)으로서 40cm 길이와 백금 피복 티타늄(8mm 직경)의 음극을 가지는 사다리형 양극 요소로 구성된다. 확장형 링시스템은 확장형 링 양극으로써 콘크리트 표면에서 1cm 간격으로 6개의 측정 링이 있고, 음극봉은 2개의 확장형 백금 피복 봉으로 구성된다. 양극과 음극사이의 거리는 5~15cm 범위내에 두어야 한다. 부식 환경에 있는 콘크리트 내부에 확장형 링 양극을 단계적으로 설치하는 과정을 그림 2에 나타내었다.

부식 감시 센서의 개발은 콘크리트 내 염화물에 의한 강 매크로 셀 부식에 영향을 미치는 주요 인자에 대한 광범위한 연구과제에서 비롯되었다. Raupach와 Schiebl은 변화하는 환경조건하에서 콘크리트 혼합이 각각 다른 500개 이상의 콘크리트 시편을 조사한 바 있다[2]. 이들 조사에서는 철근의 표면에서 양극영역과 음극영역사이에서 흐르는 매크로 셀 전류를 측정하



〈그림 2〉 확장형 링 양극의 설치 과정

였다. 이 시험에서 이러한 기법은 정해진 위치에 설치된 각각의 강봉사이의 전기신호를 측정함으로써 염화물과 같은 부식유발 이온의 침입이나 탄산화를 감시하는데 사용될 수 있다는 것을 보여준 것이다. 염화물이 없고 탄산화 되지 않은 콘크리트의 경우 콘크리트 공극 내부의 알칼리성 용액 때문에 양극과 음극 모두 부식으로부터 보호된다(부동태 상태). 양 전극사이에서 흐르는 전류는 이러한 상태 하에서는 무시할 만큼 낮다. 그러나 임계 염화물 함량에 도달되거나 탄산화 때문에 콘크리트의 pH값이 낮아지면 양극의 철근 표면은 더 이상 부식으로부터 보호되지 않는다. 염화물에 오염되거나 탄산화된 콘크리트에 내식성의 음극 재료를 선택하고 충분한 수분과 산소가 주어진다면 음극봉의 표면에서 산소 환원이 발생한다. 양극과 음극으로 작용하는 영역을 분리하면 촉각과 귀속속 사이에 전자의 흐름이 일어나게 되며 외부 케이블 연결을 이용하여 손쉽게 측정할 수 있다.

측정 전극은 동일 깊이에 있는 철근과 동시에 부식을 개시할 수 있도록 보강 철근과 유사한 성분을 가진 강로 제작된다. 독일 아헨공과대학교 건축재료연구소에서 수행한 바 있는 비교시험에서 콘크리트 시편 내부에 장착하기 전에 여러 단계로 미리 부식시킨 것을 사용할 때 측정용 전극으로 사용되는 강(양극)과 보강 철근의 부식 거동에는 중대한 차이가 없음을 보여주었다. 사다리형 양극시스템에 대한 시험설 및 현장조사 결과 다음의 전류값에 따른 경고값으로 한계를 둔다[3].

- (1) 결합 후 5초간 전류값 <math>< 15\mu A</math>(24시간 후 전류값 <math>< 1.5\mu A</math>): 부식 없음
- (2) 결합 후 5초간 전류값 >math>> 15\mu A</math>(24시간 후 전류값 >math>> 1.5\mu A</math>): 부동태피막 파괴

이러한 한계값들은 침수되지 않는 외부 노출에 대한 보통 콘크리트에 관한 것이다. 특수한 콘크리트 조성이나 환경조건에 대해서는 약간 다를 수도 있다.

이 센서는 다른 센서와 비교하여 다음과 같은 장점을 지닌다.

- (1) 이 센서는 철근의 부식 여부를 알려줄 뿐만 아니라 철근이 부식하기 시작하는 시점을 예측할 수 있다.
- (2) 부식 감시 시스템은 임계 염화물 함량을 바로 나타내지만 절대 염화물 함량은 아니다. 경험적으로 알려진 바와 같이 염화물 농도분포 측정과 비교하면 절대 염화물 함량을 판단하는 것은 일반적으로 어렵기 때문에 이 센서에게는 결정적인 장점이 된다. 따라서 염화물 농도분포 측정을 하기 위하여 부식 감시 센서를 설치하는 것은 콘크리트 샘플만으로 얻을 수 있는 것 과 대체될 수 없다.
- (3) 특히 터널의 외벽이나 교각의 조수 간만대와 같이 사람이 접근하기 어려운 위치에 부식 감시 시스템을 이용하면 경제적이다.
- (4) 부식 감시 시스템이 실제로 유지관리 프로그램의 통합요소로 사용된다면 검사나 유지 보수 비용과 같은 운영비용을 상당히 줄일 수 있다.

관심 있는 응용 분야는 다음과 같다.

- (1) 부식환경에 노출되어 있는 철근 콘크리트 구조물(해양구조물, 해안 인근 건축물, 주차용 건축물, 터널, 기초 등)
- (2) 접근하기 어렵거나 아무도 접근하지 못하는 지역(터널과 배관 외부, 기초와 탱크, 교각, 수위 부근의 교량 받침 등)
- (3) 특히 100년 정도의 높은 설계 사용수명을 가진 신축 구조물을 위한 전용 방식시스템의 내구성 모니터링(고성능 콘크리트, 코팅, 부식억제제 등)
- (4) 전용 보수시스템의 내구성 모니터링(음극 방식, 제염, 코팅, 부식억제제 등)

2.2 염화물 이온 센서

철근 콘크리트에 제빙제로 사용되는 염화물 이온은 매설 철근을 부식 시켜서 교량, 도로 및 주차용 건축물과 같은 콘크리트 기반 국가간시설물을 위협한다. 실제로는 염화물 이온의 침입은 이 구조물들의 주요 원인으로 있다. 콘크리트 내부에 매설된 보강철근의 부식은 매설 철근에 연결된 콘크리트에 염화물 이온의 농도가 0.2%에 도달한 이후에 발생한다. 콘크리트 기간시설물의 부식은 노출된 환경, 매설 철근의 깊이 그리고 콘크리트의 품질에 따라 빠르면 초기 몇 년에서 늦으면 구조물의 수명인 25년에 시작될 수 있다. 이러한 매설 철근의 시간-부식 파라미터는 구조물의 수명을 결정하는 요소이다. 콘크리트 품질, 노출 그리고 콘크리트 내부의 초기 염화물 농도에 관하여 시간-부식 관계를 고찰하기 위하여 많은 연구가 착수되었다. 기간시설물의 일상적인 유지보수에서뿐만 아니라 이 연구에 있어서 염화물 함량과 농도 분포는 콘크리트 샘플을 부수고 습식화학을 통해서 추출된 염화물의 값을 구함으로써 측정되었다. 이 방법은 콘크리트 샘플 자체의 중량에 근거하여 염화물 함량을 측정하는 것이다. 이 시험은 대체로 구조물이 예측된 수명에 가까워졌을 때이거나 열화의 증거가 잠재적인 부식문제를 가리킬 때 구조물 수명의 말기 동안 수행되었다. 또한 부식의 개시를 감지하는 다른 방법들도 개발되어왔다. 이 방법들은 부식 잠재력을 측정하기 위하여 염화물 함량과 같은 파라미터를 감지 또는 의존하지 않지만, 부식이 실제로 발생할 때 감지한다. 콘크리트의 염화물 함량은 부식이 개시할 때를 측정하는 파라미터만은 아니지만, 부식에 기여하는 주요 요인으로 잘 확인된 하나의 파라미터이다.

따라서 콘크리트 구조물의 내부에서 염화물 농도를 알려주는 센서가 필요하다. 특히 콘크리트의 염화물 농도를 측정하는 매설형 핵자기 공명 진단장치(nuclear magnetic resonance; NMR)는 이 문제에 대한 해결책으로 관심을 끌게 될 것이다. 왜냐하면 핵자기 공명 진단장치가 염화물의 확인에 있어서 매우 명확하기 때문이다. 또한 염화물에 대해 장치의 화학적 상호작용이 없으므로 핵자기 공명 진단장치는 구조물의 수명에 대응으로 동작하도록 쉽게 설계할 수 있다.

핵자기 공명 진단장치는 원칙적으로 염화물의 존재 여부와 농도를 측정할 수 있다. 핵자기 공명 진단장치는 영 아닌(nonzero) 핵스핀을 가진 원자핵들이 에너지 상태들 사이에서 전이를 일으킬 때 신호가 발생하는 현상이다. 자계(B₀)를 인가하면 원자핵의 자기 모멘트는 자장 방향으로 배향된다. 관심 있는 핵종의 주파수 특성의 전자파를 가진 이들 모멘트가 여기하면 감지할 수 있는 에너지 전이를 일으킨다. 기저의 주파수에서 측정할 수 있는 전이가 존재하면 그 핵종의 존재를 진단하는 것이다. 염소 이온은 영 아닌 스핀을 가지며 최대 동위원소 존재비에서 3/2이다. 따라서 염소 이온은 기본적으로 핵자기 공명 진단장치로 감지할 수 있다. 원거리에 배치된 핵자기 공명 진단장치 센서의 주요 구성은 균일한 자계(B₀)를 제공하도록 설계된 영구자석, 샘플 내에서 약자계(B₁)을 발생시켜서 샘플로부터 되돌아오는 신호를 받아들이는 코일 그리고 코일로부터 읽어 들인 신호를 여과, 혼합, 디지털화 및 가산하는 전자소자로 되어 있다. 주요 관심사는 이 기능을 모두 통합한 소형 시스템이 콘크리트 내에서 염화물을 감지할 수 있을 것인지 여부이다.

샘플 크기는 존재할 것으로 예상되는 원자의 개수에 좌우되므로 가장 중요하다. 콘크리트 기간시설물에 배치할 경우 전체 시스템은 콘크리트의 얇은 골재의 최대 크기에 가까운 면에서 5cm 보다 작은 특정 길이를 가져야만 한다. 대체로 7~19T의 자계가 신호를 얻는데 사용되지만, 현장에서 사용되는 핵자기 공명 진단장치 센서는 1T 이하의 영구자석 재료로 제한될 것이다. 자석은 최대의 자계 세기와 균일성을 전달해야하므로 장치에서 대부분의 부피를 차지한다. 전자회로에 연결된 솔레노이드 코일은 2~4mm 직경을 가지며 특별히 설계된 영구자석 통 안에 두게 된다. 그런 패키지 내부에서 균질 자장으로부터 계산하기 위해서는 샘플 크기는 대개 1mm³까지 제한한다. 따라서 학술적인 의문은 1T 미만의 자계 세기로 특정 치수 1mm의 체적 내에 있는 염화물을 감지하는 것을 합리적으로 기대해도 되는지이다.

저농도의 콘크리트에서 핵자기 공명 진단장치에 의해 염화물의 감지가 실제로 가능한지 여부를 알아보기 위해 펄스 핵자기 공명 진단장치를 사용하여 시멘트 매트릭스에서의 염화물을 감지하기 위한 실험실 실험이 수행된 바 있다[4]. 이 연구는 시멘트 중량의 2%이하던 염화물을 첨가하는 것으로만 국한하였다. 핵자기 공명 진단장치 센서는 3가지 환경, 즉 수용액, 실험실 제작 시멘트 샘플 그리고 현장에서 20년간 열화된 콘크리트 샘플의 염화물에 대하여 시험하였다

염소 이온 신호는 NaCl과 혼합 양생된 백색 포틀랜드시멘트에서 2.35T 핵자기 공명 분광기로 감지되었다. 잔류 자유 염화물은 핵자기 공명 진단장치를 사용하여 시멘트 내에서 감지할 수 있었다. 현장에서 채취된 샘플로부터 측정된 염소 이온 신호를 사용하면 자계 강도, 코일 직경 그리고 0.5T 자계와 2~4mm 직경 마이크로 코일을 사용할 제한된 현장용 핵자기 공명 진단장치의 신호잡음비(signal to noise ratio; SNR) 평가를 위한 측정시간에 대하여 여러 가지 값을 가지고 매개변수 연구를 수행하였다. 이 매개변수 연구에 따르면 0.5T 평균계와 2~4mm 코일 직경을 가진 핵자기 공명 진단장치 센서의 24시간 평균 신호잡음비는 1이하였다. 그러나 약 2~3T의 자계 세기에서와 약 50~70mm의 코일 직경에서 최소한의 샘플링 시간인 3시간 동안 평균한 결과 신호잡음비는 약 5의 값을 얻었다. 문제는 이 크기의 균일한 자계 세기는 원거리에서는 발생시키기 어려울 것이다. 시도해 볼 수 있는 것은 여타한 염화물을 농축시키고 신호를 추출하기 위하여 충분한 시간 동안 평균을 취하는 것이다.

콘크리트에서의 염화물 농도 현장 측정용 센서로써 Ag/AgCl 와이어 전극의 사용 가능성에 대하여 연구하기 위하여 NaCl 함유량을 여러 가지로 혼합시킨 일련의 모르타르에 이들 전극을 매설하였다. 이 전극들은 전체의

염화물 이온 농도에 대하여 민감한 전위차 반응을 보였다. 측정된 전위의 안정성은 염화물 농도에 의존하여서 이들 전극이 단기간 시험에 있어서 염화물 함유량 센서로써 사용될 수 있음을 인정하였다[5]. Ag/AgCl은 용액에서 Ag⁺ 또는 Cl⁻이온의 활동도의 변화에 따라 전위차 반응을 보이는 전극이며, 원칙적으로는 기계적 안정성이 있으므로 콘크리트에 매설할 수 있다. 최근 Yang 등은 다중, 부식성, 소형화 전극으로 이루어진 국부 부식 센서와 이 센서를 여러 가지 화학적인 환경에서 시험한 결과를 보고하였다[6]. 소형화 전극은 각각의 전극들이 저항을 통해 공동 접합부에 서로 연결되어 있으며 각 전극은 금속이 부식하는 한 영역을 모의하는 것이다. 국부 부식 환경에 있어서 양극 전류는 가장 많이 부식된 전극 쪽으로 흘러 들어 오고 음극 전류는 부식이 덜되거나 부식되지 않는 전극으로 흘러나간다. 이 전류는 저항 양단의 전압으로 측정된다. 소형화 전극으로부터 측정된 갈바니 전류사이의 변동은 국부 부식과 관련된 환경의 변화에 잘 반응하였다. 표준편차나 90%의 양극값과 같이 소형화 전극을 통해 흐르는 전류로부터 도출되는 통계학적 파라미터가 국부 부식의 척도로서 사용될 수 있는 것이 입증되었다.

2.3 매설형 반전지 센서

매설형 기준전극들은 장기간에 걸쳐 콘크리트 구조물의 부식 모니터링과 철근 콘크리트의 전위차 제어형 음극방식에 매우 유용하다. 실험실 작업과 현장 노출 시험에 사용되는 이들 전극은 실험실과 현장 작업사이의 확실한 데이터 변환 목적으로 권장할 만하다. 원격 모니터링 사용이 증가함에 따라 장시간에 걸쳐 신뢰성 있고 안정한 성능을 발휘하는 능력이 있는 기준전극을 요구한다. 콘크리트 내에서 기준전극을 사용하기에는 몇 개의 난제가 주어진다. 종래의 Cu/CuSO₄ 전극은 외부 콘크리트 표면에 쉽게 위치시킬 수 있지만 강과 콘크리트 표면 사이에 자주 있는 큰 저항경로, 접촉점과 유동 전위의 존재, 전극 끝 부위에 있는 콘크리트의 수분의 시간에 따른 급격한 변동 그리고 매질의 전반적인 불균질성과 같은 다양한 요인들 때문에 중대한 오차가 나타날 수 있다. 이상적으로는 매설형 전극을 강표면에 근접하여 설치해야 한다. 우수한 매설형 전극은 다음의 조건을 따라야한다. 즉, 안정되어야 하고, 콘크리트에서의 화학적 열적 변화에 불변하고, 기후 조건에 견디고, 최소한의 분극과 히스테리시스 영향과 함께 미소전류를 통과시킬 수 있는 능력이 있고, 장기간 성능을 발휘하고, 경제적이고, 환경적으로 안전한 제작 과정이 결과물이어야 한다. Ag/AgCl 기준전극은 철근의 전위를 측정하기 위하여 콘크리트 구조물에 일반적으로 사용되지만, 추운 조건하에서의 안정성과 장기간의 성능은 여전히 의문스럽다[7]. 혹은 또한 콘크리트에서 충분한 성능을 발휘하지만 열역학적으로 진짜 기준전극이 아니다. 콘크리트 매설용 기준전극 센서로써 아연, 상용용 MMO(mixed metal oxide) 그리고 이산화망간 기준전극이 사용되고 있다[8].

3. 결 론

미래에는 지능형 재료와 구조물의 개발이 모든 공학 분야에서 주된 역할로 수행될 것이다. 센서 기술을 이용하는 것은 가장 중요한 구조물 건전성 모니터링 중의 하나가 될 것이다. 이에 따라 구조물의 내구성이 크게 향상되어 본질적으로는 구조물의 안전을 향상시킬 것이다. 센서 기술을 이용함에 있어 토목공학 측면에서 실용적인 문제와 장기간의 성능안정 문제가 해결될 수 있도록 지속적인 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.K.Mehta and R.W.Burrows, "Building Durable Structures in the 21st Century", Concrete International, vol.16, pp.57, 2001
- [2] M.Raupach and P.Schiebl, "Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures", NDT & E International, vol.34, pp.435, 2001
- [3] Anode-ladder-system for corrosion monitoring-Specifications, 05/03, S + R SENSORTEC GmbH, Germany, pp.10
- [4] H.Yun, M.E.Patton, J.H.Garrett Jr., G.K.Fedder, K.M. Frederick, J.J.Hsu, I.J.Lowe, I.J.Oppenheim and Paul J. Sides, "Detection of free chloride in concrete by NMR", Cement and Concrete Research, vol.34, pp.379, 2004.
- [5] M.A.Climent-Llorca, Estanislao Viqueira-Perez and Ma Mar Lopez-Atalaya, "Embeddable Ag/AgCl sensors for in-situ monitoring chloride contents in concrete", Cement and Concrete Research, vol.26, pp.1157, 1996
- [6] L.Yang, N.Sridhar, O.Pensado, and D.S.Dunn, "An in-situ galvanically coupled multielectrode array sensor for localized corrosion", Corrosion, vol.58, pp.1004, 2002
- [7] J.E.Bennett and T.A.Mitchell, "Reference electrodes for use with reinforced concrete structures", Corrosion/92, Paper No. 191, (Houston, TX. NACE 1992)
- [8] H.Arup and B.Sorenson, "A new embeddable reference electrode for use in concrete", Corrosion/92, Paper No.208, (Houston, TX. NACE 1992)