

철근 콘크리트 구조물의 부식감시를 위한 센서의 최신기술동향

하태현*, 배정효, 하운철, 이현구, 박경화, 김대경
한국전기연구원

Role of Sensors in Corrosion Monitoring in Concrete Structures : the State of the Art

Tae-Hyun Ha*, Jeong-Hyo Bae, Yoon-Cheol Ha, Hyun-Goo Lee, Kyung-Wha Park, Dae-Kyeong Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - Many extensive researches in the area of sensor's technology for corrosion monitoring in concrete structures have increasingly been carried out in recent years. This paper gives a brief discussion on the principles and usage of the role of sensors involved in both corrosion initiation and propagation steps of reinforcement corrosion monitoring in concrete structures. Special attention was given to the review of various sensing devices, selection of reliable sensing devices for detecting reinforcement corrosion at the particular environment and at the efficiency of the devices used. Various sensing operations in new and existing concrete structures are also described.

개시 및 진전단계를 감시하기 위한 센서의 원리 및 사용법, 특정 환경에서의 철근 부식을 감지하기 위한 센서 장치의 선정법 그리고 신설 및 기설 콘크리트 구조물의 센서 운용에 대하여 기술하고자 한다.

2. 부식프로브의 필요성

부식감시의 한 가지 방법은 부식 측정을 위하여 구조물 자체를 이용하는 것이다. 그러나 이것을 실제 적용할 수 없을 때는 부식감시를 위한 별도의 부식센서를 설치할 수 있다. 부식센서는 비교적 작은 센서 면적을 가진 프로브를 통하여 적절한 방법으로 부식 손상을 측정한다 [4]. 모니터링용 부식프로브 사용시 장점은 다음과 같다.

- (1) 부식 측정은 제어방식을 통하여 실제 구조물에 영향을 끼치지 않으면서 수행될 수 있다.
- (2) 프로브는 보통 주 구조물로부터 주기적으로 제거하여 상세 시험을 할 수 있는 작은 "시편"을 의미한다.
- (3) 시편을 제거할 수 있도록 하면 센서의 부식 특성과 센서 신호와의 상관관계를 쉽게 파악할 수 있다.
- (4) 프로브는 재료, 표면 마무리, 열처리, 용력크기의 변화 그리고 전기방식시스템의 운전정지 등의 평가에 사용될 수 있다.
- (5) 센서에 의한 고감도 부식 측정을 통하여 부식전위에 이상발생시 조기 경보용으로 활용할 수 있다.

직접적인 부식 측정을 위하여 센서를 사용하는데 있어서 센서가 사실상 감시하고 있는 구조물을 대표한다는 것은 중요하다. 만약 부식 센서에 근본적인 결함이 있다면, 복잡한 모니터링 하드웨어, 컴퓨터 시스템, 데이터 전송 그리고 소프트웨어에 투자한 비용은 엄청난 낭비가 될 것이다. 센서 설계, 제작 그리고 설치의 복잡하지만 공식적인 지침서나 규격들은 거의 없다. 따라서 센서 설계 및 위치 선정은 최악의 상태를 가상하여 이 신중하게 판단해야 한다.

3. 콘크리트 구조물의 상태조사

구조물의 상태조사는 이상현상에 대한 이해를 요구하며 대책방안을 필요로 한다. 이러한 조사는 콘크리트 구조물에의 접근이 제한되고 복잡하더라도 필요하다. 노후화된 구조물을 감시하기 위한 몇 가지 필수 단계들은 다음과 같다.

- (1) 환경의 부식성 : 환경의 부식성은 염화물의 오염 정도와 대기 중의 황화물을 분석 검토한다. 염화물에 대해서는 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$ 이상의 염도와 미량의 황화물은 철근 부식이 발생하기 쉬운 값이라고 보고 되었다[5]. 또한 수중에서의 pH, 경도, 염화물 그리고 황화물의 수치를 분석하여야 한다.
- (2) 전기저항법 : 철근의 부식이 시작하는 시점과 진행 정도는 시멘트 풀과 콘크리트의 투수성에 달려있다. 콘

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. 또한 대기 중이나 수중의 탄산가스에 의한 콘크리트의 중성화는 중요한 콘크리트 열화현상 중의 하나이다. Mehta와 Burrows는 이러한 환경에서 계속 유지될 수 있는 콘크리트 구조물을 건설하기 위하여, 21세기 콘크리트 사용은 강도보다 내구성을 고려하여야 한다고 보고하였다[1]. 대부분의 철근 콘크리트 구조물은 최소의 유지관리로 우수한 내용성을 보여주고 있다. 그러나 기간 시설물들이 노후화됨에 따라 환경이 원래 생각했던 것보다 더 열악해지고, 건축 및 설계상의 문제점들에 의해 초기 예상보다 사용 수명이 더 짧아지면서 유지비용이 더 높아지게 된다는 점을 알게 되었다. 이러한 문제점 중 최악의 것은 pH의 저하(중성화)나 국부 부식(염화물 침투)에 기인한 콘크리트 내의 철근의 부식에 의한 것이다. 미국에서 가장 최근의 통계 자료에 의하면 제빙염만에 의해 교량과 주차장의 손상비용이 연간 3.25~10억 달러 사이라는 것이다. 영국의 교통부는 도로 교량의 부식 손상으로 인한 총 수리비용을 6.165억 파운드라고 추산하였다. 이런 교량들은 영국내의 총 교량 중 약 10%를 차지한다[2,3]. 유럽과 특히 중동의 경우에도 유사한 통계가 있다. 열화는 교량뿐만 아니라 건축물과 기타 구조물에서도 발생한다.

구조물의 보수나 복구하기에 앞서 신속이나 기존의 철근 콘크리트 구조물에 대한 부식의 진행을 감시하기 위하여 영구 매설형 부식 모니터링 장치에 대한 필요성이 연구되어왔다. 부식 문제를 조사하기 위한 장치들은 많다. 이것은 현재 구조물에 대하여 얼마나 많은 손상이 존재하는지 그리고 시간에 따라 얼마나 빨리 손상이 증가할 것인지를 기술자에게 알려주는 단일 기술이 존재하지 않기 때문이다.

본 논문에서는 콘크리트 구조물에 있어서 철근의 부식

크리트의 전도성은 시멘트 매트릭스의 간극수내의 이온 이동에 의해 발생하는 전해 과정이기 때문에 고투수성의 콘크리트는 높은 전도성과 낮은 전기저항을 가진다. 따라서 콘크리트의 전기저항을 측정함으로써 콘크리트에 매설된 철근의 부식 가능성을 알 수 있다.

(3) 콘크리트 피복 : 매설된 철근을 덮고 있는 콘크리트의 실제 피복두께는 와전류 원리로 구동하는 철근탐지기(profometer)를 사용하여 평가한다.

(4) 육안 검사 : 구조물의 여러 취약 부분은 육안으로 시험한다. 이것은 콘크리트 구조물의 부식감시에 있어서 기본 단계이다.

(5) 염기도 저하와 염화물 오염 : 염기도의 저하와 염화물의 오염은 콘크리트 구조물의 부식성을 의미한다.

(6) 반전지 전위 조사 : 반전지 전위 조사는 철근 부식의 가능성만을 제공한다. 열역학적인 양으로서의 개로전위의 측정은 부식률과 부식의 정도를 의미하지는 않는다 [6].

(7) 표면 전위 측정 : 표면 전위 측정은 노출되지 않은 철근을 감시하기 위하여 행한다. 이 방법 역시 부식율을 의미하지는 않는다.

(8) 비저항계 : 4-프로브 또는 2-프로브 비저항계가 사용된다.

(9) 부식전지 정도 : 이 값은 표면 전위와 비저항의 측정으로부터 계산된다.

콘크리트의 비저항, 선형분극법과 반전지 전위 조사는 신축 및 기존의 철근 콘크리트 구조물에 있어서 영구적인 부식감시 기술로 고려된다.

콘크리트 구조물에 대한 부식률을 감시하기 위하여 몇 가지 장비들이 개발되었으며, 문헌에 보고된 장비들은 다음과 같다[3,7]. GECOR(GEOCISA, Madrid, Spain)[8], FHWA(Federal Highway Work Administration, Washington, DC)[9], CAPCIS (Corrosion and Protection Centre Industrial Services, Manchester, UK), 3LP(K. C. Clear, Inc.)[10], Portable Corrosion Monitor (Nippon Steel Corporation)[11] 그리고 ULFACIS (Ultra Low Frequency AC Impedance Spectroscopy, Standard Research Institute, Menic Park, CA).

각각의 기술들은 장단점을 가지고 있다. 본 논문의 목적은 여러 종류의 센서와 감지 동작 방식 그리고 콘크리트 구조물의 부식 감시에 있어서 센서의 역할을 고찰하는데 있다.

4. 콘크리트 구조물의 부식감시의 중요성

철근 부식으로 손상된 철근 콘크리트 구조물에 대한 상태조사를 수행하기 위한 기술은 현재 잘 기록되어 있으며, 다수의 기술들이 이러한 평가를 수행하는데 사용되고 있다[12~19]. Muralidharan 등은 염화물로 오염된 콘크리트 내에서 플라이 애시 혼합 시멘트의 부식 평가를 검토하기 위하여 다수의 전기 화학적 기술들을 사용하였다[20~25]. 이러한 기술들은 모두 구조물의 상태에 일관되게 접근하기 위하여 단독이나 복수의 방법을 결합하여 사용될 수 있다. 그러나 콘크리트 기술자들은 구조물의 노후화 정도에 관심을 가지고 있기 때문에 시간에 따른 상태변화를 감시하는 것이 유용하다. 이것은 현재 장수명을 요구하는 신축 구조물에 적용되고 있으며 오래된 구조물은 부식 손상이 발견된 적이 있고 비용이나 다른 이유 때문에 보수가 지연될 때 적용되고 있다. 현재 적용할 수 있는 프로브는 모든 요구 사항을 만족시키지는 않는다. 따라서 기존의 구조물을 감시하기 위하여 혁신적인 저비용의 프로브가 개발되어지고 있으며, 중요한 열화 매커니즘, 즉 철근 부식, 콘크리트의 중성화, 동결융해 손상, 알칼리 골재 반응 그리고 기계적 손상(과하중)을 다루고 있다.

이들 매커니즘의 진행과정은 표면에서 또는 구조물의

콘크리트를 통한 단면도로써 기계적인 파라미터(변형, 휨, 진동, 음향)뿐만 아니라 주 재료의 파라미터(온도, 수분, pH, 염화물 농도, 부식전류, 부식률, 부식개시)를 감시함으로써 예측될 수 있다.

결론적으로 기존 구조물의 감시하기 위한 통합시스템이 되기 위해서는 다음사항이 포함되어야 한다.

- (1) 통합 감시시스템용 장치
- (2) 현장 진단을 위한 감시시스템 대한 설명서
- (3) 손상부 진행에 대한 통합 모델 장치
- (4) 혁신적인 저비용 프로브
- (5) 장거리 데이터 전송 시스템과 연계된 데이터 수집 장치. 이 시스템의 사용으로 현재 운용비용의 15%의 저감 효과가 있을 것으로 추산된다. 더욱이 신축 구조물 설계시 향상된 예측 모델을 적용함으로써 수명연장에 따른 10%의 부가적인 비용 절감 효과를 낼 수 있다.

그 밖의 현장에서의 감시방법은 다음과 같다.

- (1) 레이더, 고에너지 방사선법 그리고 탄성파(Impact Echo, SASW and UPV)와 같은 고도의 비파괴적인 기술을 사용한 콘크리트 구조물의 현장시험과 상태평가
- (2) 반전지 전위와 정전류 펄스와 같은 철근 부식 상태의 평가를 위한 전기화학적 방법
- (3) 매설형 프로브와 기존 전극으로 콘크리트 상태와 철근 부식의 영구적인 감시
- (4) 콘크리트 구조물의 잠재적인 내구성의 평가와 유지 보수를 위한 적절한 방법의 준비
- (5) 암석화적인 분석, 중성화 측정, 염화물 분포의 확인 그리고 부식 개시에 대한 염화물 함유량 규제치와 같은 콘크리트의 실험실 분석
- (6) 콘크리트 구조물의 철근에 대한 전기방식 설계와 설치시의 품질보증

교량, 원자력, 주택, 건축물, 항만 구조물 등을 포함한 다양한 산업 분야에서 부식 감시를 위하여 센서를 사용하고 있다.

5. 콘크리트 구조물의 부식감시용 센서

센서는 감지기능과 동작방법에 따라 여러 가지 범주로 분류된다. 콘크리트용으로 가장 광범위하게 사용되는 센서들을 다음에 기술한다.

5.1 부식센서

5.1.1 Chemical microsensors

일반적인 크기의 센서에 비해 화학마이크로센서는 부식 위험도에 더 많이 노출되어 있다[26]. 부식 감지는 화학적으로 감지하는 층의 매질에서 직접 측정하는 것과 기관 재질의 부식을 측정하는 것 그리고 피막으로 싸인 재질을 통해 수분의 흡수나 침투에 의한 전기적인 접촉을 통해 이루어진다. 화학센서의 부식현상은 저항과 임피던스 측정, 중량 측정법 그리고 시편의 전자현미경 관찰에 의해 전극전위와 센서출력신호의 측정 또는 전기화학적 노이즈의 측정과 같은 전기화학적 방법을 사용하여 연구되어 오고 있다. pH 유리 전극, pH 센서, 반도체 기반 소형 산소 센서와 지르코니아 기반 전위차계형 가스 센서도 이러한 범주에 속해 있다[27]. 센서의 수명과 성능은 센서의 동작 온도와 분석될 화학적 환경에 영향 받는다. 주로 도전율과 전위 측정법[28], 분극법, 임피던스 분광법, 전기화학적 노이즈의 조사 그리고 현미경 법(광학 & SEM)이 구조물 재료의 부식 거동을 연구하는데 이용된다.

5.1.2 Ring sensors or macrocell sensors

1990년 이래로 소위 사다리꼴 양극 시스템이라고 불리는 특별한 마이크로셀 시스템이 다른 시스템에 부가하여 신축 콘크리트 구조물을 감시하기 위하여 광범위하게 사용되고 있다. 그림 1은 콘크리트 구조물내의 철근 부식을 감시하기 위해 사용되는 사다리꼴 양극 시스템을

나타낸 것이다.

이 센서 시스템은 부식을 일으키기 시작하는 임계 염화물 침투 깊이, 즉 부식에 관련된 철근의 깊이를 표시한다. 결론적으로 시간에 따른 부식관계를 결정할 수 있으므로 건물주가 균열과 파손이 발생하기 전에 예방이 가능하다.

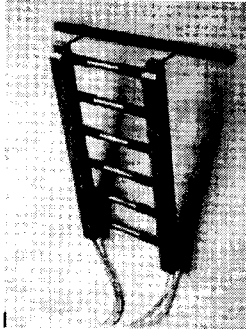


그림 1. Anode-ladder system

5.2 Acoustic sensor

음향 센서 시스템은 음향 방사 원리에 기초한 것이다. 이 센서 시스템의 성능은 센서가 주변 노이즈에 대해 부식으로 발생하는 음향신호를 얼마나 감지하고 다른 음향 신호와 얼마나 구별하느냐에 달려있다.

5.3 Chloride ion sensors

염화물 이온 센서는 콘크리트 구조물의 내부에 염화물 농도를 측정할 수 있다. NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 센서와 Ag/AgCl 와이어 센서가 이 범주에 속한다.

5.4 Automated mapping sensor

자동 mapping 센서는 전기자기(Electromagnetic covermeters), 자기계(Magnetometer), 마이크로파(Microwave scanners), 방사선(Radiographic sensory systems), 비저항(Electrical resistivity measurement systems)의 원리를 기초로 설계되었다.

5.4.1 SOFO sensors

Glisac과 simon은 토목구조물의 변형을 측정하기 위하여 단일 모드의 섬유 내의 저결합 간섭계에 기초한 SOFO(Surbeillard d'Oubrage par Fibers Optiques-광학 섬유에 의한 구조물의 감시) 시스템을 개발하였다[29]. SOFO 센서는 그림 2에 나타나 것처럼 측정용과 기준용 광섬유로 구성되어 있다. 측정용 광섬유는 주 구조물에 기계적으로 결합되어 있고 기준용 광섬유는 느슨하게 풀려서 구조물과 별개로 거동한다. 구조물의 변형은 두 광섬유 사이의 길이 차이에 변화를 일으킨다. 따라서 SOFO 센서는 열화 초기에 콘크리트의 변형을 감지하기에 적합하다.

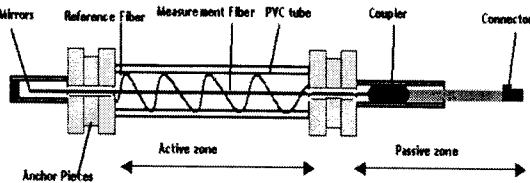


그림 2. Standard SOFO sensor

5.4.2 Strain gages and accelerometers

변형 감지는 지능형 구조물에 요구되는 기능이다. 비가역적 변형 감지는 구조물 안전감시에 사용되며, 가역

적 변형 감지는 동적 하중 감시에 사용된다.

가속도계의 데이터는 도로 교량의 동적 상호작용을 측정하는데 유용하며 차량에 의한 충격인자를 산정하기 쉽게 해준다.

5.5 Optical fiber sensors

구조물 내부에 완전 일체화된 광섬유는 콘크리트 내에서 다양한 기계적인 요인이나 환경적인 요인에 기인한 열화의 발생과 진행을 감시할 수 있다. 현재 3 가지 형태의 광섬유 센서가 실제 응용분야에 개발된 바 있다. 즉 국부형, 복합형 및 분포형이 있다. 국부형 광섬유 변형 센서는 그림 3과 같다.

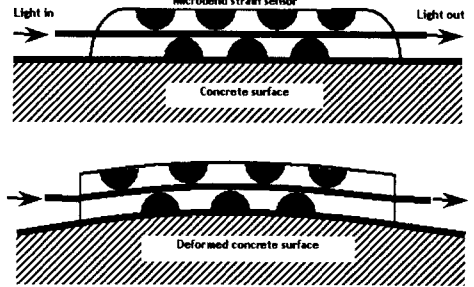


그림 3. Localized optical fiber sensor

5.6 Ribbonlike sensors

사기적으로 유연한 리본 형태의 센서는 부식감시뿐만 아니라 온도와 응력을 측정에 이용되며, 동작원리는 자기호출 신호에 반응하는 센서에 의해 발생하는 고차 고조파 크기의 변화를 이용한 것이며 하중에는 무관하게 동작한다.

5.7 Covercrete sensor

콘크리트의 투수 특성은 콘크리트 피복에 센서열로 구성된 covercrete 센서를 매설하여 전기신호를 측정한다.

5.8 Humidity sensors

습도 센서는 장기간에 걸쳐 콘크리트의 표면과 센서가 설치된 깊이 사이의 수분 함량의 측정할 수 있다.

5.9 Embeddable half-cell sensors

매설된 기준전극들은 장기간에 걸쳐 콘크리트 구조물의 부식감시 및 콘크리트 내 철근의 음극방식제어에 유용하다. 또한 실험실과 현장노출 시험에서 실험실과 현장작업 사이의 데이터 호환용으로 적합하다. 본질적으로 정확한 측정은 과방식이 미방식 만큼 위험해질 수 있는 프리스트레스 구조물에 경우에는 필수적이다. 또한 원격 감시의 사용이 증가함에 따라 장시간에 걸쳐 신뢰성과 안정성이 있는 기준전극이 필요하다. 콘크리트 매설용 기준전극에 대해서는 현재 많은 연구자들이 도전하고 있다.

6. 결 론

센서의 주요 파라미터는 콘크리트 재료와 콘크리트의 적합성, 습도, 염화물 함량과 온도에 달려있다. 적절한 센서를 선택하여 데이터를 판독하기 위한 지능의 발전은 사람들이 적절한 시기에 예방대책을 강구하도록 함으로써 콘크리트 구조물의 내구성을 연장시킬 수 있다. 현재는 센서가 콘크리트 내부에 부착될 수 있거나 매설될 수 있고 콘크리트 구조물의 상태를 진단하는데 이용될 수 있다. 그러나 보다 더 중요한 것은 실험실에서와 실제 현장에서 사용되었던 측정 정확도는 매우 다르다는 것이다. 실제 환경에서는 날씨, 작업자들의 거친 취급 그리

고 콘크리트 주입과정 때문에 센서의 손상이 쉽게 발생한다. 최근에 성공한 센서가 많이 보고 되었음에도 불구하고, 실제로 이러한 센서 기술을 이용함에 있어서 현실적으로 도시공학 응용 분야에서 기존의 구조물과 새로운 구조물에서 경험된 여러 가지 실용적인 문제를 해결하기 위해 더 많은 연구를 필요로 한다.

[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] J.P.Broomfield, P.E.Langford and A.J.Ewins, "The Use of a Potential Wheel to Survey Reinforced Concrete Structures, Corrosion Rates of Steel in Concrete", ASTM STP 1065, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA., pp.157, 1990
- [3] J.P.Broomfield, "The determination of rates of highway bridge deterioration. Rehabilitation and life cycle costing under the strategic highway research program", NACE Corrodible Structures Conference, (Houston, TX: NACE, 1991).
- [4] P.Schiebl and M.Raupach, "Instrumentation of structures with sensors-why and how? In: R.K.Dhir and M.R.Jones (Edt.)", Proc. of the Concrete in the Service of Mankind Conference, E and EF sponsors, London, pp.1-15, 1996
- [5] N.S.Rengaswamy, S.Srinivasan, T.M.Balasubramanian, Y.Mahadeva Iyer, N.U.Nayak and R.H.Suresh Babu, "Corrosion survey of reinforced and prestressed concrete structures- methodology of approach", Transaction of SAEST, vol.23, pp.207, 1998
- [6] ASTM C876: Standard, Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [7] J.Flis, S.Sabol, H.W.Pickering, A.Sehgal, K.Osseo-Asare and P.D.Cady, "Electrochemical measurements on concrete bridges for evaluation of reinforcement corrosion rates", Corrosion, vol.49, pp.601, 1993
- [8] S.Feliu, J.A.Gonzalez, S.Feliu (Jr) and M.C.Andrade, ACI Materials Journal, 87M47 Sept/Oct., pp.457, 1990
- [9] E.Escalante, E.Whitenton and F.Qiu, "Measuring the rate of corrosion of reinforcing steel in concrete", Final Report, NBS, NBSIR 86-3456, Oct., pp.1-27, 1986
- [10] K.C.Clear, "Transportation Research Record 1211", Transportation Research Board 86th Annual Meeting, January (Washington, D.C., : TSB), pp.28-37, 1989
- [11] K.Matsuoka, H.Kihira, S.Ito and T.Murata, "Corrosion monitoring for reinforcing bars in concrete", ASTM-STP1065, pp.103, 1991
- [12] C.Andrade and Alonso, "Corrosion rate monitoring in the laboratory", Construction and Building Materials, vol.5, pp.315, 1996
- [13] J.Mietz and B.Isecke, "Monitoring of concrete structures with respect to rebar corrosion", Construction and Building Materials, vol.10, pp.367-373, 1996
- [14] S.Ahmad, "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction a review", Cement and Concrete Composites. vol.25, pp.459, 2003
- [15] B.Elsener, "Macrocell corrosion of steel in concrete-implications for corrosion monitoring", Cement and Concrete Composites, vol.24, pp.65, 2002
- [16] B.Elsener and H.Bohni, "Potential Mapping and Corrosion of Steel in Concrete, Corrosion Rates of Steel in Concrete", ASTM STP 1065, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA., pp.143-156, 1990
- [17] K.R.Gowers, S.G.Millard, J.S.Gill and R.P.Gill, "Programmable linear polarisation meter for determination of corrosion rate of reinforcement in concrete structures", British Corrosion Journal, vol.29, pp.25, 1994
- [18] M.I.Jafar, J.L.Dawson and D.G.John, "Electrochemical Impedance and Harmonic Analysis Measurements on Steel in Concrete, Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation", ASTM STP 1188, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1993
- [19] J.Flis, H.W.Pickering and K.Osseo-Asare, "Assessment of Data from Three Electrochemical Instruments for Evaluation of Reinforcement Corrosion Rates in Concrete Bridge Components", Corrosion, vol.51, pp.602, 1995
- [20] S.Muralidharan, V.Saraswathy, K.Thangavel and S.Srinivasan, "Competitive role of inhibitive and aggressive ions in the corrosion of steel in concrete", Journal of Applied Electrochemistry, vol.30, pp.1255, 2000
- [21] V.Saraswathy, S.Muralidharan, R.M.Kalyanasundaram, K.Thangavel and S.Srinivasan, "Evaluation of a composite corrosion-inhibiting admixture and its performance in concrete under macro cell corrosion conditions", Cement and Concrete Research, vol.31, pp.789, 2001
- [22] V.Saraswathy, S.Muralidharan, K.Thangavel and S.Srinivasan, "Activated fly ash cements: tolerable limit of replacement for durable steel reinforced concrete", Advances in Cement Research. vol.14, pp.9, 2002
- [23] V.Saraswathy, S.Muralidharan, K.Thangavel and S.Srinivasan, "Influence of activated fly ash on corrosion resistance and strength of concrete", Cement and Concrete Composites, vol.25, pp.673, 2003
- [24] V.Saraswathy, S.Muralidharan and S.Srinivasan, "Electrochemical studies on the corrosion performance of activated fly ash blended cements", Materials Engineering, vol.14, pp.261, 2003
- [25] R.Selvaraj, S.Muralidharan and S.Srinivasan, "The influence of silica fume on the factors affecting the corrosion of reinforcement in concrete-a review", Structural Concrete, vol.4, pp.19, 2003
- [26] U.Guth, W.Oelbner and W.Vonau, "Investigation of corrosion phenomena on chemical microsensors", Electrochimica Acta, vol.47, pp.201, 2001
- [27] P.Schiebl and M.Raupach, "Monitoring system for the corrosion risk for steel in Concrete", Concrete International, vol.7, pp.52, 1992
- [28] M.A.Ilyushchenko and A.V.Danilenko, "Corrosion potentiometric sensors: properties, theory and origin mechanism of pseudo-Nernstian electrode response", Sensors and Actuators, vol.44, pp.542, 1997
- [29] B.Glisic and N.Simon, "Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor", Cement and Concrete Composites, vol.22, pp.115, 2000