

콘크리트구조물의 전기방식 원리와 적용

Principle and Application of Cathodic Protection for Concrete structures



김기준*
Ki-Joon Kim



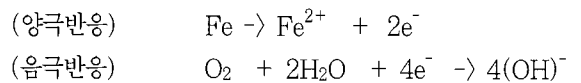
이명훈**
Myeong-Hoon Lee



문경만***
Kyung-Man Moon

1. 서 언

전기 방식(cathodic protection)법은 지중과 해수중 금속의 방식 공법으로 처음 소개되었으며, 현재 지중매설관, 선박, 항만 강구조물 등의 방식법으로 필수불가결한 기술이 되어있다. 이 전기 방식법이 콘크리트 구조물의 보수 공법으로 적용되기 시작한 것은 1970년대 들어서이며, 1990년대에는 국제적으로 많은 실질적 적용이 이루어져, 이제는 철근 부식방지의 효용성이 널리 증명된 상태이다. 국내에도 최근 이 보수 공법이 소개되어 적용되기 시작하고 있으며 점차 그 범위가 확대되고 있다. 이 공법의 특징은 일반 콘크리트 구조물의 물리적인 보수법과 달리 전기화학적 원리를 응용한 방식법이기 때문에 다소의 전문적인 지식이 필요하다는 것이다. 따라서 본 고에서는 전기방식법의 원리, 설계, 적용 등의 기본적인 배경과 콘크리트 구조물에 적용할 때의 기초적인 실무 내용을 소개한다.



2. 콘크리트 내의 철근의 부식과 방식 기초

2.1 금속의 부식

콘크리트 내의 철근에 염화물과 같은 부식환경이 조성되면 금속이 가지고 있는 에너지를 버리고 안정된 상태, 즉 산화물상태로 되돌아가려는 경향을 갖게 되는데 이것이 부식(corrosion)이다. 금속의 부식은 전기화학적(electrochemical) 현상으로 이온화경향이 큰 양극(anode)이 부식되며, 상대적으로 불활성인 곳인 음극(cathode)은 보호되는데 대표적인 철의 부식 반응은 다음과 같다.

금속이 갖는 에너지를 수치로 표시한 것이 전위(potential)이다. 금속의 전위 변화는 전류를 동반하는데 이와 같이 전위와 전류가 동시에 변하는 현상을 분극(polarization)이라 한다. <그림 1>은 대표적인 분극도이다. 금속에 부식환경으로 양극과 음극이 생기면 같은 전위에 도달 할 때까지 양극(anode)은 전위가 상승하고 음극(cathode)은 전위가 저하한다. 이 분극은 항상 전류밀도(current density)가 증가하는 방향으로 발생하며 두 극이 서로 만나는 점에서 부식전위(corrosion potential)와 부식전류(corrosion current)를 형성한다. 이와 같이 분극은 전위와 전류가 동시에 변하는 현상이며, 해양환경과 같이 부식성이 높은 곳에서는 분극저항값이 낮으므로 부식전류는 증가한다.

금속의 전위는 pH(산/알칼리도)에 따라 변한다. 금속의 전위와 pH의 관계를 부식도(corrosion diagram)라 하는데, <그림 2>는 염화물이 있는 콘크리트 내의 철근의 부식도이다. 콘크리트는 고알칼리환경(pH = 12 - 13)에서 표면에 보호성피막인 부동태(passivity)를 형성한다. 이 상태에서 정상적인 철근은 부식되지 않으나, 콘크리트의 균열, 외부 부식성 물질의

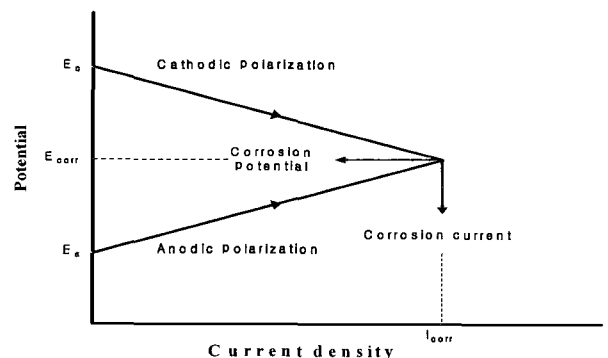


그림 1. 대표적 분극도

* 정희원, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수
corr@hhu.ac.kr

** 한국해양대학교 기관시스템공학부 부교수

*** 정희원, 한국해양대학교 기계소재공학과 교수

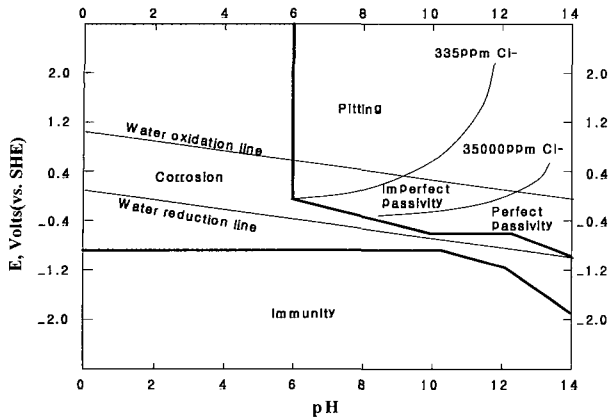


그림 2. 염화물이 있는 콘크리트 철근의 부식도(pH-전위)

침투 등의 부식환경에서 pH와 전위가 변하여 부동태영역을 벗어나면 부식된다. 따라서 철근콘크리트를 보호하기 위해서는 pH를 회복하여 완전부동태영역(perfect passivity)으로 이동시키거나 전위를 낮추어 안정역(immunity)으로 이동한다. 여기에서 후자를 음극방식(cathodic protection)이라 하는데 이는 전위를 이동한다하여 전기방식이라 부른다.

2.2 콘크리트 구조물의 열화

콘크리트 구조물의 대표적 열화원인에는 염해, 탄산화, 동결융해, 알칼리 골재 반응 및 황산염 반응 등이 있다. 구조물의 열화는 그 원인이 무엇이든 간에 결국 콘크리트 손상을 일으켜 유해성 인자의 침입을 동반한 철근부식으로 이어진다. 일단 철근이 부식되면 균열을 일으키게 되며 이러한 손상은 철근부식을 더욱 가속화하여 전체 구조물의 안전성을 저해한다.

2.3 철근부식 메커니즘

정상적인 콘크리트 내에서 철은 세가지 형태로 존재한다. 즉, Fe, Fe²⁺(ferrous), Fe³⁺(ferric)인데, 이중 Fe²⁺, Fe³⁺은 활성상태로 철근표면에 보호성 부동태피막(passive film)을 만든다. 이 부동태 피막은 20-60 Å 두께의 치밀한 산화피막($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)으로 부식을 억제하는 역할을 한다. 그러나 염분과 같은 유해성분이 침입하면 철근 표면에서는 전기화학적 반응이 일어나 결국 부식으로 이어진다.

<그림 3>은 콘크리트 내 철근의 부식반응을 도식적으로 나타낸 것이다. 부식된 철근은 전자(e⁻)를 발생하며 Fe²⁺이온이 되고, 전자는 부근의 음극화된 곳에서 산소와 물과 반응하여 수산화기(OH⁻)를 만든다. 이렇게 형성된 수산화기(OH⁻)는 철이온과 반응하여 부식생성물인 수산화제1철(ferrous hydroxide, Fe(OH)₂)을 만들며, 다시

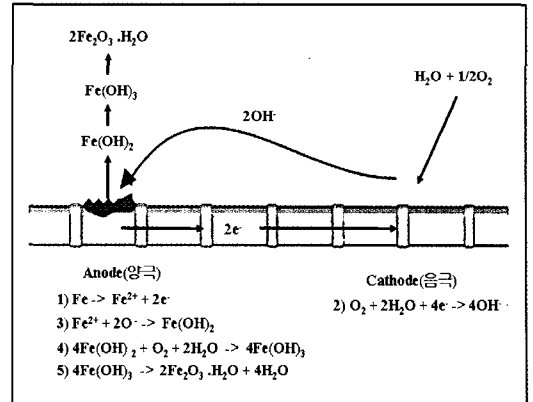


그림 3. 철근의 부식 메커니즘

산소와 물이 더해지면서 Fe(OH)₃로 변화했다가 붉은 녹인 제2산화철(ferric oxide)인 Fe₂O₃가 된다.

2.4 콘크리트 구조물의 부식방지 및 보수

콘크리트 구조물의 부식방지 및 보수법을 신설구조물과 기설 구조물로 분류하여 요약하면 다음과 같다.

2.4.1 신설 콘크리트구조물의 부식방지 방법

- 충분한 콘크리트 피복두께(cover thickness) 확보
- 밀실하고 양질의 콘크리트 배합
- 에폭시 피복 철근(epoxy coating rebar) 사용
- 금속피복(metal cladding) 철근 사용 (아연/티타늄/니켈/동/스테인리스강 도금)
- 부식방지제(corrosion inhibitors)
- 전기방식(cathodic prevention)

여기에서 전기방식법은 음극보호(cathodic protection)가 아니라 구조물 건설과 동시에 철근(음극)에 방식전류를 공급하는 것으로서 철근이 부식되기 전부터 철을 음극화하여 염소이온(Cl⁻)과 같은 유해성 음이온이 철근에 접근하지 못하게 하는 부식예방(cathodic prevention)법이다. 이 경우 이미 부식된 상태에서 방식하는 것보다 방식에 필요한 전류밀도가 매우 적으므로, 기존 구조물에 적용하는 정도의 전기방식으로 수명이 수배에서 수십배까지 연장될 수 있다.

2.4.2 기설 콘크리트 구조물의 부식방지 및 보수법

- 전통적인 패칭(patching) 보수
- 부식방지제(corrosion inhibitors)
- 전기방식(cathodic protection)

- 전기화학적 탈염
(desalination, electrochemical chloride extraction)
- 전기화학적 재알칼리화(electrochemical realkalization)

전통적인 패칭은 부식 손상된 콘크리트 부를 제거한 후 새로운 콘크리트나 모르타르로 채우는 보편화된 보수법이다. 그러나 이렇게 패칭된 구조물은 얼마 지나지 않아 보수부 주위가 다시 부식되는 문제가 자주 발생하여 왔다. 요즘은 보수 기술과 재료의 발달로 많이 개선되긴 했지만 아직도 부식과 보수의 반복되는 문제는 미해결로 남아 있다. 이것은 새로 패칭한 콘크리트나 모르타르가 주위의 기존 콘크리트와 달리 염화물이 없는 양질의 상태이기 때문에 이곳의 철근이 음극(cathode)이 되고 그 바로 주위의 철근이 양극이 되기 때문이다. 따라서 양극이 된 주위부는 음극인 패칭부와 갈바니부식(galvanic corrosion)을 일으킬 수 있다. 이러한 패칭부 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방법으로는 전기방식이 최적이다. 전기방식을 적용하면 패칭부와 기존 콘크리트의 구분(전위차)이 없어지며 철근전체가 음극이 되어 방식된다. 전기 방식에 대한 자세한 설명은 뒤에서 다룬다.

그리고 전기화학적 탈염 및 재알칼리화 공법은 모두 전기 방식과 같은 원리이다. 다만 사용하는 도구, 적용하는 기준, 적용 기간이 다를 뿐이다. 즉, 전기 방식은 방식하고자 하는 철근을 음극화하여 방식전류를 장기간 공급함으로써 철의 이온화를 계속적으로 억제하는 반면, 탈염 및 재알칼리화는 방식에 사용하는 전원을 단기간 높게 공급함으로써 음이온인 염화물을 음극인 철근으로부터 밀어 내어 철근주위의 알칼리도를 회복시키는 방법이다. 본 고에서는 전기방식만 다룬다.

지금까지 신설 구조물과 기설 구조물에 대한 각종 부식방지 및 보수 공법을 간단히 소개하였는데 각 공법 간의 중요한 차이점은 다음과 같다. 전기 방식(탈염 및 재알칼리화 포함)을 제외한 다른 모든 부식방지 및 보수법은 방어적(defensive)인 방식법인 반면, 오직 전기방식만이 유일하게 공격적(offensive)인 방식법이라는 사실이다. 다시 말하면 다른 부식방지 및 보수법은 더 이상의 부식이 발생하지 않도록 부식인자들을 수비적으로 막아 방식하려는 방법이므로 시간이 흐를수록 방식 능력이 저하되는 반면, 전기 방식은 방식하고자 하는 철근에 방식전류를 공급(전선을 통해 전자 공급)함으로써 연속적으로 방식상태를 유지 할 수 있는 반 영구적인 공격적 방식법인 것이다. 이 전기 방식법에 대해 구체적인 특성을 알아본다.

3. 콘크리트 구조물의 전기 방식 특성

3.1 콘크리트 구조물의 전기 방식 개요

철근의 부식은 양극으로 작용하는 철이 이온이 되면서 시작된다. 따라서 전기 방식법은 철근에 외부전원의 (-)단자나 상대적으로 더 부식성(이온화경향)이 강한 금속을 연결하여 음극화함으로써 양극(부식)반응을 억제하는 것이다. 이러한 전기 방식의 정확한 명칭은 음극방식인데 이것은 방식하고자 하는 대상(철근)을 음극(-)한다는 의미를 가지고 있다. 전기 방식이란 용어는 전기화학적 방식(electrochemical protection)의 준말이며 이에 양극방식(anodic protection)과 음극방식(cathodic protection)이 있는데, 일반적으로 토양, 해수, 콘크리트 등 다양한 환경에 널리 적용되는 방식법이 음극방식이기 때문에 전기 방식은 통상 음극방식을 지칭하는 말이 되었다.

앞의 부식도(그림 2)에서 철의 전기방식은 철의 전위를 불안정한 부동태영역(passivity)이나 부식영역(corrosion)으로부터 안정영역(immunity)으로 낮춤으로써 부식을 막는 방법이다. 이 전기방식은 방식전류의 공급 방법에 따라 두가지로 세분된다. 첫째는 외부로부터 강제전류를 공급하는 외부전원법(impressed current cathodic protection, ICCP)이며, 둘째는 철보다 더 부식성이 큰 금속을 연결하여 희생시킴으로써 방식하는 희생양극법(sacrificial anode cathodic protection, SACP)이다. 이 두 전기방식법은 독특한 특성이 있으며 서로의 장단점을 보완적으로 가지고 있어 용도에 따라 적절히 선택하면 유용한 방식 목적을 이룰 수 있다. 이 두 전기 방식법의 원리를 설명한다.

3.2 외부전원법(impressed current cathodic protection, ICCP)의 원리

외부전원법이란 방식전류를 외부 전원장치로부터 강제로 공급하는 시스템이며, <그림 4>는 이 외부전원법의 개념도이다. 방식전류는 직류가 필요하므로, 교류를 직류로 정류하여 사용한다. 정류기(rectifier)의 (+)극에 양극(anode)을 연결하고 방식하려는 철근에는 (-)극을 연결한다. 철근에 공급된 전자는 철(Fe)이 부식될 때 발생하는 전자의 생성을 억제하므로 철근을 방식한다. <그림 5>는 외부전원법에 의한 전기방식의 분극도(polarization diagram)이다. 철근이 부식될 때 철근표면의 국부적 음극(A점)에서는 산소환원반응이 일어나고, 양극에서는 철의 용해(부식)반응이 일어난다. 부식도의 산소환원반응은 A점으로부터 음극분극(cathodic polarization)을 일으키며 C점에 이르고, 철은 양극분극(anodic polarization)을 일으키며 B점에서 C점에 이르러 부식전위(E_{corr})와 부식전류밀도(i_{corr})를 형성한다. 이 때 외부전원을 공급하면 양극분극은 C점에서 B'점을 지나 B점까지 부식전류밀도가 감소하여 방식되고, 음극에서는 C점에서 C'점을 지나 D점에 이르며 산소환원반응은 증가한다. 여기에서

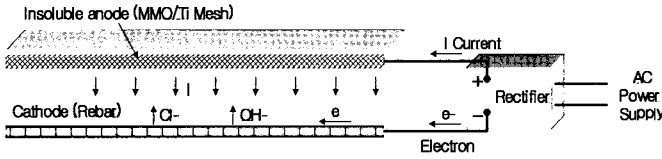


그림 4. 외부전원법(ICCP) 개념도

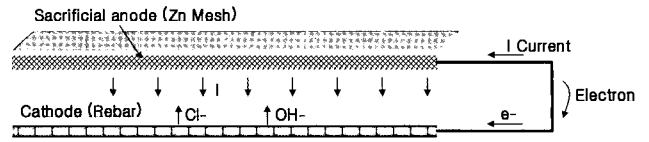


그림 6. 희생양극법(SACP) 개념도

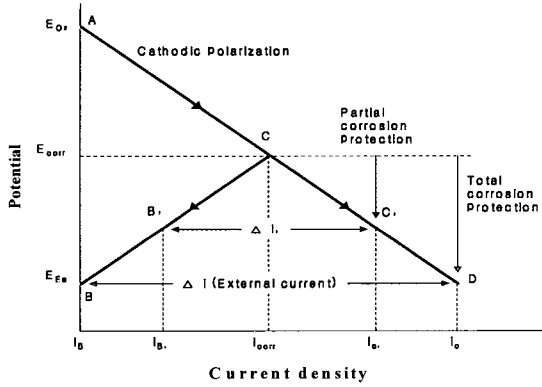


그림 5. 외부전원법 분극도

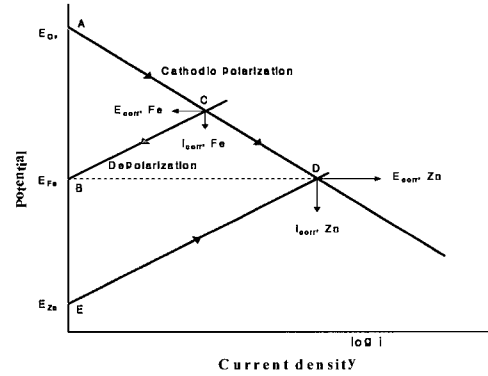


그림 7. 희생양극법 분극도

외부공급 전류가 부족하면 B'C'전위에서 $i_C' - i_B' = \Delta i'$ 만큼의 전류가 흐르며 부분방식(partial corrosion protection)되고, 전류가 충분하면 BD전위에 이르며 $i_D - i_B = \Delta i$ 만큼의 전류가 공급되면서 전체방식(total corrosion protection)된다.

외부전원법에서 가장 중요한 것은 양극(anode)이다. 이 양극은 장기간 계속해서 전류를 공급해야 하므로 소모성이 적은 금속이나 특수 표면처리된 금속을 사용하는데 후에 다룬다.

3.3 희생양극법 (sacrificial anode cathodic protection, SACP)의 원리

희생양극법은 유전양극법 또는 갈바닉 방식법이라고도 부르며, 피방식체(철근)보다 전위가 상대적으로 낮은 금속을 연결하여 희생적으로 부식시킴으로써 피방식체를 보호하는 자연 방식법이다. (그림 6)은 희생양극법의 개요도이다. 콘크리트 표면에 설치된 희생양극을 단순히 철근과 연결해 놓음으로써 두 금속간의 전위차에 의해 전류가 자연스럽게 흐르면서 전자가 철근에 공급된다. (그림 7)은 희생양극식 전기방식의 분극도이다. 희생양극(Zn)이 없을 때는 철근이 B점에서 양극분극되어 C점에 이르게 되고 철근표면의 국부적 음극에서 음극분극에 의해 A점에서 C점에 이르러 철근의 부식전위($E_{corr, Fe}$)와 부식전류밀도($i_{corr, Fe}$)를 형성한다. 희생양극(Zn)을 설치하게 되면, Zn양극표면은 E점에서 양극분극되어 D점에 이르게 되고, C점이었던 부식전위는

D점까지 낮아지면서 Zn표면에서는 강한 부식전류($i_{corr, Zn}$)가 흐르는 반면, 철표면에서는 C점에서 B점으로 복극(depolarization, 분극회복, 분극의 반대)되어 부식전류가 감소하면서 방식된다.

3.4 외부전원법과 희생양극법의 장단점

이상 설명한 외부전원법과 희생양극법의 장단점을 비교하면 <표 1>과 같다. 외부전원법은 전원 공급가능한 곳에서 환경에 관계없이 사용할 수 있는 장점이 있는 반면, 장치가 복잡하고, 유지관리가 어려우며, 고가인 단점이 있다. 희생양극법은 외부전원법의 특성과 반대로 단순하고 작동이 쉬운 반면 출력조절이 어려움으로 전도성이 좋은 해양환경외의 사용에 제한이 있다.

4. 전기방식의 설계 및 시공

콘크리트 구조물의 전기방식 설계를 위해서는 사전조사와 필요한 시험을 거쳐야 하며, 설계와 시공 시 적절한 방식기준에 맞아야 한다. 일반적으로 통용되고 있는 전기방식의 설계와 시공에 대한 주요부분에 대해 설명한다.

4.1 설계를 위한 조사

전기방식을 위해서는 해당 구조물의 사전조사, 육안조사 및 정밀조사가 필요하다. 정밀조사는 손상된 구조물의 대략 10 ~ 20%정도

표 1. 외부전원법과 희생양극법의 장단점 비교

외부전원법(ICCP)		희생양극법(SACP)	
장점	단점	장점	단점
· 환경에 대한 방식출력 조절 가능	· 전원공급이 불가능한 곳에 적용 불가	· 유지 관리가 거의 필요 없음	· 양극 수명 유한하여 정기적 교체 필요
· 고 비저항에서도 방식 가능	· 고가의 외부전원장치 필요	· 방식시공이 쉬움	· 출력조절 어려움
· 장기간 방식 가능	· 부분적 고장이 전체 시스템 작동 영향	· 전원이 없는 곳에 사용가능	· 고 비저항 육상구조물에 사용이 어려움
· 자동 모니터링 가능	· 누설전류에 의한 간섭 문제 발생 가능	· 가격이 저렴	· 고 알칼리 환경에서 부동태를 형성할 수 있음
· 육상이나 해양환경 모두 적용 가능	· 설치와 사용에 전문가적 지식 필요	· 부분적 미방식 문제의 전체 방식 영향 적음	
	· 유지 관리비가 많음	· 해양환경 등 비저항이 낮은 환경에 적합함	

표 2. 부식전위에 따른 ASTM 부식성 판정

부식전위, 황산동전극기준(CSE)	부식성 정도
> -200 mV	낮음 (부식위험 10%이하)
-200 ~ -350 mV	중간 (부식위험 10 ~ 90%)
< -350 mV	높음 (부식위험 90%이상)
<-500 mV	극심

표 3. 부식전류밀도와 철근의 부식상태

부식 전류 밀도(mA/m ²)	철근 상태
$I_{corr} < 1$	부동태 상태
$1 < I_{corr} < 5$	낮은 부식상태
$5 < I_{corr} < 10$	중간 부식상태
$10 < I_{corr}$	높은 부식상태

의 요소들에 대해 실시하며 이들 결과에 따라 보수, 보강법을 결정한다. 정밀조사 중 전기화학적 방법에는 콘크리트 철근의 부식전위, 철근의 부식속도(corrosion rate)와 미주전류(stray current)조사가 포함된다. 철근의 부식전위 측정은 고저항 전위차계와 기준전극을 사용하며 콘크리트 표면에서 측정한다. 기준전극으로 황산동전극(CSE)이나 염화은전극(SSCE)이 주로 사용된다. <표 2>는 ASTM C867의 측정전위에 대한 부식정도의 판정기준이다.

측정된 전위값에 대해 유의해야 할 사항은 전위값이 부식영역에 있다하여도 실제적 부식속도는 높지 않을 수 있다는 것이다. 해수 중과 같이 콘크리트 내로 산소의 공급이 어려운 곳은 전위값이 부식영역에 있다 하여도 부식속도가 무시할 정도로 낮을 수 있다. 따라서 최종 부식상태의 판정은 여러 측정치를 종합해서 내려야 한다. 부식속도(corrosion rate) 측정에 가장 많이 이용되는 방법은 선형분극저항법(linear polarization resistance method)이다. 이 시험은 전기화학적 분극시험장치(포텐쇼스타트, 기준전극, 대응전극 시스템)를 사용하는데 단시간(몇 분이내)의 시험으로 분극저항(Rp)을 측정하고 $I_{corr} = B/R_p$ 식에 의해 부식속도(I_{corr})를 산출할수 있다. 여기에서 B는 상수로 콘크리트에서는 철근의 부동태 또는 활성태 상태에 따라 26 ~ 52 mV 범위의 값을 갖으며 산출된 I_{corr} 값은 <표 3>의 기준으로 부식상태를 판정한다.

상기 부식속도(부식전류밀도) 값은 사용하는 장치와 측정조건에 따라 달라질 수 있으므로 전위측정과 같이 염화물농도, 콘크리트 비저항, 상대습도 및 온도 등의 측정치를 고려한 종합적 판단이 필요하다.

4.2 전기방식 기준(cathodic protection criteria)

전기방식 기준은 지중 또는 해중 전기방식 분야에서 먼저 제안되었으나 국제적으로 아직도 통일된 기준이 정립되어 있지 못한 실정이다. 여러 국가에서 채택하고 있는 방식기준으로는 100 mV 분극, 300 mV 전위강하, 그리고 E-Log I의 세 종류인데 이에 대해 설명한다.

4.2.1 100 mV 분극기준

100 mV 분극(100 mV polarization/decay)기준은 NACE(미국부식협회) 등 국제적으로 가장 폭넓게 인정되고 있으며, 피방식체(철근) 전위를 100 mV이상 음극분극시키는 방법이다. 이 때 음극분극(cathodic polarization) 전위는 콘크리트나 외부 환경적 저항에 의한 전위변화(IR drop)를 제외한 순수 분극 전위변화가 100 mV이상 되어야 하는데, 그것은 <그림 8>에서와 같이 전기방식 공급전원을 일시적으로 차단하는 Instant-off 시험을 통해 측정한다. 즉, 방식전류 공급상태에서 전원을 차단하면 순간적으로 전위가 상승하는데, 전원차단 초기(5초 이내)에 전위는 급상승(jump)하며, 그 후 서서히 둔화된다. 여기에서 초기 전위의 급상승은 콘크리트 자체의 저항으로 인한 전위강하(IRc drop)값이며, 그 후 서서히 일어나는 전위변화가 전기방식으로 음극분극되었던 철근표면이 원래의 자연부식상태로 회복되는 복극(depolarization)부분이다. 따라서 전체 전위변화(ΔE)로부터 초기 전위강하(IRc drop)을 뺀 값이 순수한 전기방식으로 분극되었던 전

위(IRp)값이며 이것이 100 mV이상일 때 적정 방식이라 판단한다.

$$IR_p = \Delta E - IR_c$$

이 Instant-off 시험에서 전원차단 후 복극 전위의 측정은 일정시간(12시간, 24시간) 동안 측정하는데, 최근에는 시험의 편의를 위해 측정시간을 단축한 4시간 기준을 많이 적용하고 있다. 그리고 콘크리트의 염화물량, 함수율, 통기성, 온도 등에 따라 전기방식에 필요한 분극전위값이 변한다. <표 4>는 염화물량에 따라 달라지는 전기방식 분극전위이다.

4.2.2 300 mV 전위변이 기준

앞의 100 mV 분극기준은 전원장치의 차단 후 상당시간(최소 4시간) 동안 전위의 변화를 측정해야 하는 불편이 있다. 그래서 단순한 전위 측정만으로 전기방식 상태를 판정할 수 있는 기준이 300 mV 전위변이 기준이며, 철근의 자연 부식전위(corrosion potential) 보다 -300 mV이하(그림 8)가 되면 방식상태로 판정한다. 전위만 측정하기 때문에 멀티미터와 기준전극이 있으면 충분하며, 측정시간도 장시간 기다릴 필요가 없고, 전원차단(100 mV 분극기준)과 같은 복잡한 절차도 없다. 그러나 이 기준은 단순히 전위만으로 방식상태를 판단하기 때문에 콘크리트 환경변화에 따라 예러가 발생할 수 있다. 즉, 측정된 전위상으로는 미방식상태 일지라도 산소가 부족한 환경에서 부식이 발생하지 않을 수 있으며, 반대로 전위상 방식상태에 있을지라도 국부부식이 발생할 수 있다. 그러나 이러한 오류의 가능성에도 불구하고 편리함 때문에 정밀진단이 아닌 일반 구조물의 방식조사에 많이 이용되고 있다.

4.2.3 E-Log I 기준

E-Log I 기준은 <그림 9>와 같이 분극곡선으로부터 얻어진다. 철근의 음극분극(cathodic polarization)곡선은 자연 부식전위로부터 전위가 저하하면서 분극되어 전류도 증가하는데 일정 전위에 이르면 곡선적 변화로부터 선형으로 변하는 변곡점(A점)이 있다. 이 A점이하 직선적 변화구간은 발견자의 이름을

표 4. 염화물 농도에 따른 전기방식 필요 분극전위

염화물 농도(kg/m ³ 콘크리트)	전기 방식 필요 분극 전위(mV)
< 0.6	0
0.6 ~ 1.2	60
1.2 ~ 3.0	80
3.0 ~ 6.0	100
6.0 ~ 12.0	150

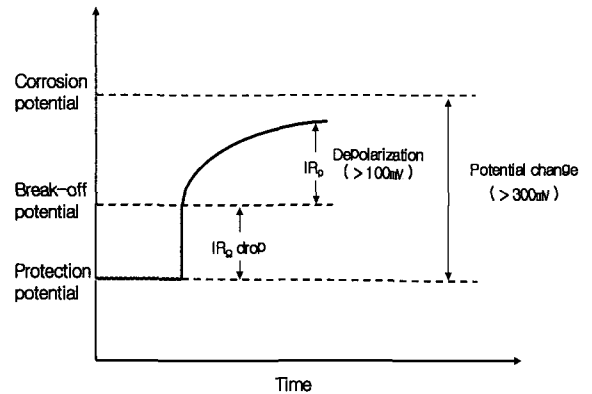


그림 8. Instant-off 시험에 의한 전기방식 기준

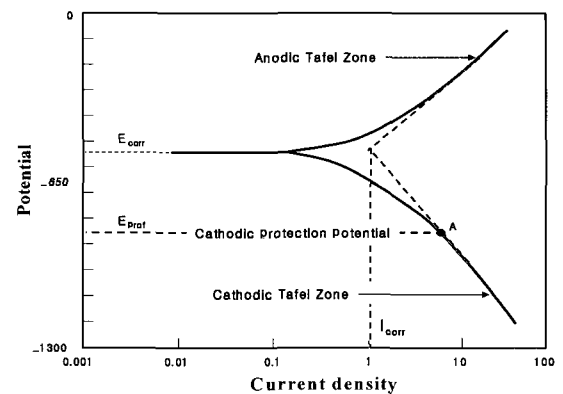


그림 9. E-log I 전기방식 기준

붙여 타펠구간(tafel zone)이라 부르는데 이 A점에서의 전위를 최소 전기방식기준으로 판정한다. A점의 전위는 IR drop(예러)이 없는 순수한 분극전위이며 이때의 가로축에 표시되는 전류밀도(Log 좌표)는 방식에 필요한 최소전류밀도가 된다. 이 방법 또한 이론적 원리에 기초한 것이 아닌 오랜 경험에 의해 정해진 기준이며, 음극분극시험만으로 전기방식 전위와 전류를 알 수 있는 장점이 있으나, 직선적인 타펠구간이 뚜렷하지 않은 경우 판정의 어려움이 있으므로, Instant-off시험법이 개발되고 부터는 잘 사용하지 않고 있다.

4.3 방식전류밀도(Protection current density)

전기방식설계를 위해 적정 방식전류밀도값을 결정하는 것은 매우 중요하다. 방식전류밀도(A/m²)에 방식면적(철근의 표면적, m²)을 곱하면 전체 방식전류(A)가 계산되며 이것에 의해 전원 장치의 크기, 개수, 양극의 종류 등 전체 시스템에 대한 구체적인 항목들이 결정된다. 따라서 전기방식 설계 중 방식전류밀도의 결정은 가장 중요한 설계 과정이라 할 수 있다. 그러나 불행하게도 국제적으로 아직까지 방식전류밀도값은 정립되어 있지

표 5. 철근 주위의 환경에 따른 방식전류밀도

철근 환경	방식전류밀도 (mA/m ²)
- 알칼리환경, 부식 미발생, 낮은 산소 농도	0.1
- 알칼리환경, 부식 미발생, 대기 노출	0 ~ 3
- 알칼리환경, 염화물 존재, 건조 상태, 양질 콘크리트, 피복두께 큼, 미미한 부식관찰	3 ~ 7
- 염화물 존재, 습한 상태, 저질 콘크리트, 피복 두께 보통, 넓은 범위의 공식(pitting) 발생, 일반부식 발생	8 ~ 20
- 고농도 염화물, 전습반복환경, 높은 산소농도, 고온, 심한 부식상태, 얇은 피복두께	30 ~ 50

못한 실정인데, 그 이유는 주위 환경(염화물, 알칼리도 등)에 따라 크게 영향을 받기 때문이다. 문헌상 철근의 대표적인 방식전류밀도값은 10 ~ 20 mA/m² 범위이다. <표 5>는 이러한 환경에 따른 경험적 전류밀도값을 나타낸 것이다. 철근주위의 콘크리트가 알칼리도를 유지하고 있으며 염화물이 거의 없고, 외부로부터의 유해인자의 침투가 낮은 상태라면 철근은 거의 부식되지 않으며, 사실 전기방식도 필요 없다. 그러나 다른 극단인 콘크리트 피복두께도 얇고, 온도와 습도가 높으며, 염분과 산소가 많고 반복적 건습을 상황이라면 필요한 전기방식 전류밀도는 매우 높아진다.

4.4 전류분포(current distribution)

4.4.1 방식전류분포의 중요성

방식상 또 하나의 중요한 항목이 양극 배치이다. 이것은 전체 시스템의 균형적 방식을 위해 양극으로부터 음극(철근)까지 흐르는 전류가 균일하게 공급되어야 하기 때문이다. 방식전류가 불균일하면 국부적으로 과방식(over-protection)되거나 미방식(under-protection) 될 수 있다. 방식전류의 균일 분포에 영향을 미치는 요인들은 양극의 형태, 콘크리트의 비저항 등이다. 콘크리트 표면설치용 양극의 경우 전류가 비교적 균일하게 분포되나, 봉(rod)형 또는 와이어(wire)형상의 개별 양극(discrete anode)의 경우는 전류 분포가 락비공형대로 불균일하게 된다. 그러므로 구조물의 형상에 따라 적절한 양극을 배치하는 것이 필요하다. 또한 콘크리트의 비저항이 변하면 방식전류는 비저항이 적은 곳으로 흐르므로 방식전류의 집중현상이 발생한다.

4.4.2 전류의 균일분포를 위한 예

전기 방식 설계상 균일한 전류분포를 위해 몇가지 사례를 들면 다음과 같다. 다중 철근인 콘크리트 구조물의 전기방식은 침투한 염화물 등 부식성 인자에 따라 방식전류밀도를 정한다. 한 예로 피복두께가 50 mm이며 둘레 열의 철근위치가 300 mm인

곳에서 염화물이 70 mm까지 침투했다면, 적절한 방식전류밀도는 정상적인 콘크리트일 때보다 방식전류밀도가 1.5배정도는 되어야 한다. 이때 염분침투로 인해 방식전류가 둘레열 철근까지 불필요하게 흐르게 되는데, 그 누설전류는 전체 방식전류의 10% 정도로 추정된다. 콘크리트에 균열이 발생한 경우는 피복두께가 감소되는 효과가 있으며, 균열틈을 통해 산소공급이 증가하여 국부부식되어 방식전류는 적정치의 두배까지 증가될 수도 있다. 그리고 복잡한 콘크리트 구조물에서는 평면부에 메쉬형 양극을 설치하고, 코너와 같이 굴곡부에는 개별 양극(discrete anode)을 병용하여 전류분포를 개선할 수 있다. 해중 터널은 외부가 해수중에 있고 내부는 공기와 접하기 때문에 외부에서의 해수 침투와 내부에서의 공기 침투로 부식이 콘크리트 구조물 중간부분에 집중될 수 있다. 따라서 전기방식시 내부 철근 방식전류의 1.5배정도가 필요하게 되며 외부쪽 철근으로 전류누설의 가능성이 있어 콘크리트의 비저항을 고려하여 양극위치와 전류의 크기를 결정해야 한다.

4.4.3 과방식의 문제점

과방식이란 방식전류 분포가 균일하지 못하고 국부적으로 집중되는 곳에서 많이 발생한다. 일반 콘크리트 구조물은 과방식에 의해 특별한 문제가 없으나, 프리스트레스트 콘크리트(pre-stressed concrete) 구조물과 같이 응력을 받고 있는 부분은 과방식에 의해 취성파괴의 위험성이 있다. 과방식이 되면 음극(철근)표면에서 수소가 발생하는데 응력상태에서 금속내부로 수소원자가 침투하여 금속원자간의 결합력을 약화시키며, 심한 경우 금속이 유리가 깨지듯 갑작스럽게 파괴될 수 있는 수소취화(hydrogen embrittlement) 현상을 일으킬 수 있다. 이와 같이 과방식의 위험이 있는 구조물에는 외부전원법(ICCP)보다 희생양극법(SACP)이 더 선호된다.

4.5 전기방식법의 선택

콘크리트 구조물의 보수법으로 전기 방식법을 선택하기 위해서는 다음의 세부적인 사항을 검토해야 한다. 외부전원법과 희생양극법을 나누어 각각 세부적으로 고려해야 할 사항을 요약하면 다음과 같다.

4.5.1 외부전원법

- 전원(교류)공급 가능여부
- 연속적인 방식 모니터링 가능여부
- 과방식으로 인한 피해(수소취화) 위험성
- 누설전류(stray current)의 발생
- 시스템 전체의 관리 및 비용

표 6. 전기방식용 양극의 적용 영역별 종류

외부전원식 (ICCP)	표면 적용형 (surface applied)	전도성 피복 양극(conductive coating anode) 아크 용사 아연 양극(arc sprayed Zn) 열 용사 티타늄 양극(thermally sprayed Ti)
	캡슐형 (encapsulated)	티타늄 메쉬 양극(Ti mesh anode) 티타늄 리본 양극(Ti ribbon anode) 분리형 양극(discrete anode) 티타늄 메쉬 파일 자켓 시스템(Ti mesh pile jacket system)
	침수형(immersed)	주철(cast iron) 또는 MMO Ti 양극
희생양극식 (SACP)	표면 적용형 (surface applied)	아크 용사 아연 양극(arc sprayed Zn anode) 아크 용사 알루미늄합금 양극(arc sprayed Al-Zn-In anode) 아연접착용 양극(Zn adhesive anode)
	캡슐형(encapsulated)	아연 메쉬 파일 자켓 시스템(Zn mesh pile jacket system)
	침수형(immersed)	주철(cast iron) 또는 알루미늄 양극

4.5.2 희생양극법

- 충분한 방식전류 공급 가능 환경 (양극의 출력)
- 필요한 출력에 맞는 양극 종류
- 콘크리트의 비저항 등 환경적 요인
- 희생양극의 성능 (알칼리성 콘크리트 내 불활성화 문제)
- 양극의 수명 및 교체의 용이성

4.6 전기 방식 회로설계

전기 방식용 회로에는 전원장치로부터 수백개의 양극으로 연결되는 방식전류공급선, 모니터링을 위한 기준전극 회로, 자동 제어용 회로 등 복잡하게 구성되므로 설계시 면밀한 검토가 필요하다. 특히 외부에 장기간 노출되는 전원공급선의 경우 자외선에 견딜 수 있는 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene) 전선 등 내구성이 확보되어야 한다. 외부전원법에서 중앙 집중식 모니터링을 하는 경우는 구조물 각부의 양극 및 기준전극으로부터 중간 연결단자를 거쳐 통제실까지 전선이 길게 연결되어야 하므로 케이블 관을 이용한다. 희생양극법의 경우는 구획마다 현장에서 양극과 철근을 직접 연결하므로 비교적 간단하며 모니터링시스템을 설치하는 경우는 케이블 관을 사용한다. 방식 모니터링용 센서에는 외부설치용과 콘크리트 내장형이 있다. 현재 상업용 모니터링센서가 다수 소개되어 있으며, 철근 전위(전류) 모니터링이 주 기능이며 이 외에 다기능센서로 콘크리트의 비저항, 습도, 온도, 부식속도(corrosion rate)의 측정이 가능한 종류도 소개되고 있다. 현재에도 센서의 성능과 내구성에 대하여는 국제적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 소형, 다기능이면서 정밀 측정이 가능한 센서 개발에 초점이 맞추어져 있다.

4.7 전기 방식 양극의 종류와 특성

전기 방식용 재료 중 가장 중요한 것이 양극이다. 외부전원식

양극은 장기간 손상없이 사용되어야 하므로 Ti, Nb 등의 귀금속이나 표면에 MMO(mixed metal oxide) 등 특수 코팅된 재료가 사용된다. 그리고 희생양극식 양극은 자체가 소모성이며 사용기간 동안 필요한 전위차를 일정히 유지하면서 연속적으로 방식전류를 공급할 수 있는 재료가 필요한데 해양환경에서 Zn 양극이 많이 쓰인다. 그러나 희생양극재료는 콘크리트의 강 알칼리 환경에서 표면이 부동태화(passivation)되거나 소모성 양극으로서의 활성상태를 잃지 않아야 한다. 희생양극의 형상으로는 콘크리트 표면에 부착하는 형태의 표면적용형(surface applied type)과 양극과 보호커버를 일체식으로 만들어 설치하는 캡슐형(encapsulated type) 그리고 수중에 설치하는 침수형(immersed type)이 있다. <표 6>은 콘크리트용 전기방식 양극을 영역별로 분류한 것이다.

외부전원식의 표면적용형에는 주차장의 바닥용 전도성 피복, 해양성 환경의 교량이나 부두 구조물용의 아크용사 아연양극, 그리고 열 용사에 의한 티타늄 양극 등이 있다. 아크 용사 아연 양극은 소모성이므로 수명에 따라 양극의 두께를 고려해야 한다. 그리고 캡슐형으로는 Ti 메쉬, Ti 리본, 개별분리형 등이 있는데 양극표면은 백금도금이나 MMO(mixed metal oxide) 피복된 것이 많이 쓰인다. 희생양극식은 주로 Zn을 사용하며 알루미늄합금(Al-Zn-In)도 쓰인다. 적용 방법은 콘크리트 표면에 용사(spray)하거나 접착하며 특히 캡슐형의 아연메쉬 파일자켓은 아연판을 망사형태로 늘인 양극을 유리섬유강화 플라스틱 커버 내부에 장착하여 교량의 교각 등에 사용하기도 하며 해수중에서는 Zn양극(벌크형태)을 침수용으로 사용하기도 한다. 양극의 종류는 전기 방식 대상물과 주변 환경, 수명, 시공성, 비용 등을 종합적으로 고려하여 결정하는데 이 양극의 선정이야말로 전기 방식 전체 시스템 중 가장 중요한 부분이다.

4.8 전기 방식의 시공 상 주의점

4.8.1 철근의 연속성과 (-)단자 연결

효과적인 전기 방식을 위해서는 모든 철근은 전기적으로 연결되어 있어야 한다. 그러므로 전기 방식 시공 시 구조물을 구간별로 철근의 전기적 연결성 시험을 하는데, 특히 외부전원법의 경우 DC 전원의 (-)단자 하나 당 전류의 공급정도가 어느 정도 인지를 확인한다. 전기적 연결이 좋지 않은 부분에 대해서는 용접(thermite welding, pin brazing, electrical arc welding 등)에 의해 확실하게 연결한다. 그리고 안전한 방식전류의 공급을 위하여 DC 전원장치로부터 구간별로 두 개이상의 (-)단자에 연결을 한다. 장기간에 걸친 전원공급 중 어느 하나에 문제가 발생하여도 부가 단자에 의해 방식전류 공급에 문제가 없게 하기 위함이다. 그리고 전원장치(정류기와 제어장치 포함)의 위치는 장기간 기상변화에도 견딜 수 있는 위치에 선정하며 배선 및 중간 단자함(junction box)도 UV나 부식성 환경에 내구성이 충분한 재료를 사용해야 한다.

4.8.2 간섭(interaction)

외부전원식 전기 방식에서는 상당히 큰 직류(수십 A)가 흐르게 되는데 양극과 철근의 거리가 너무 가깝거나 주위에 강파이프나 철펠과 같은 금속체가 있을 때, 전기 방식용 전류의 일부가 이러한 금속체로 흐르려 들어가는 간섭(interaction)이 일어날 수 있다. 이러한 전류는 금속체로 흘러들어 가는 부분에는 별 영향을 주지 않으나 금속체로부터 다시 흘러나오는 부분은 집중적으로 부식되는 미주전류부식(stray current corrosion)을 일으킨다. 따라서 시공 시 사전조사를 통하여 이러한 간섭이 발생하지 않도록 하는 것이 최선이며, 어쩔 수 없는 경우에는 방식전류 공급용 주 정류기의 전압을 낮추고, 선택배류법이라는 방법을 사용하여 미주전류의 흐름을 억제하기도 하며, 소형의 희생양극을 설치하여 방식하기도 한다.

4.9 전기방식 설계 흐름도(flow chart)

〈그림 10〉은 이상 언급했던 전기방식 설계 과정을 flow chart로 정리한 것이다. 방식면적(m^2)은 환경별로 나누어 산출하는데, 해양환경은 대기부, 비발대부(splash zone), 해수부가 있다. 이것은 환경별 방식전류밀도(protection current density)값이 다르기 때문인데, 각 환경별 면적에 그 환경의 방식전류밀도를 곱한 후 합산하여 전체 방식전류량(A)을 계산한다. 그리고 이 후의 단계는 외부전원법(ICCP)과 희생양극법(SACP)이 달라지는데 ICCP의 경우는 불용성양극의 종류를 정하고 전원장치의 최대 출력용량을 고려하여 전체 전류량에 해당되는 전원장치의 공급용량과 수량을 산출하고, 전체 구조물의 방식상태를 대표하여 측정할 수 있는

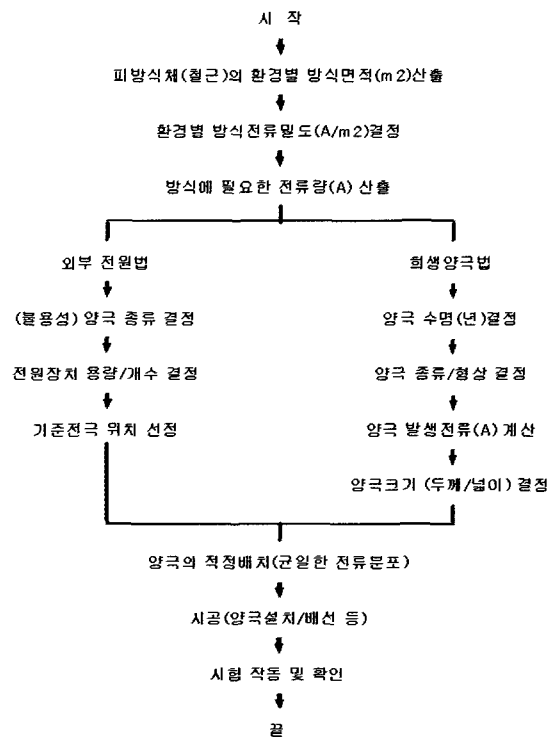


그림 10. 전기방식 설계 flow chart

기준전극의 위치를 정한다. SACP의 경우 양극의 교체 기간을 고려하여 수명, 양극의 종류(Zn 또는 Al합금) 및 형상(표 6)을 결정하며, 이에 따라 양극의 발생전류량(A)을 계산하여 양극의 크기(메쉬 또는 판형 양극의 두께와 넓이)를 정한다.

전기 방식 시스템이 결정되면 방식전류가 균일하게 분포되도록 양극의 위치를 정하는데 주로 경험으로 결정한다. 최근 최적 양극위치의 선정에 수치해석 프로그램을 이용하기도 하기도 하는데 아직은 초보단계이다. 모든 설계 절차를 마치면 양극 설치와 배선 등 시공을 하게 되며, 시공완료 후 작동시험을 통해 방식시스템을 확인한다. 외부전원법은 대부분 자동조정되므로 시스템의 작동상태와 방식전위 및 전류값을 주기적(주 1회 또는 적어도 월 1회)으로 확인하는데, 최근 모니터링 기술의 발달로 디지털 점검이 가능하다. 희생양극법은 초기 방식상태만 확인되면 운전 중 시스템의 제어가 별도로 필요 없으므로 특별한 이상이 없는 한, 년 1-2회 정도의 점검으로도 충분하다.

5. 전기 방식법의 적용 예

5.1 외부전원 시스템 (MMO Ti mesh anode system)

MMO 티타늄 메쉬 양극 시스템은 대표적 외부전원법으로 주차장이나 교량, 부두 등 육상과 해상에 널리 적용된다. 〈그림 11〉

은 주차장 바닥부에 MMO/Ti 메쉬 설치 후 모르타르 타설 직전의 광경이다. 이 시스템의 설치 공정을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

- 설계 : flow chart(Fig. 10)에 따라 실시
- 방식할 콘크리트 표면 청소(부식손상부는 패칭 등 보수 후 표면 청소)
- 구조물의 평평한 표면에 맞게 메쉬 양극 절단 및 배
- 철근과 메쉬양극의 전기적 연결(용접방법: thermit welding, pin brazing 등)
- 전위측정용 기준전극 또는 방식상태 모니터링용 센서 부착(기설 구조물은 콘크리트에 구멍을 뚫어 설치함)
- 메쉬양극과 센서 등에 콘크리트/모르타르 타설(메쉬부가 외부로 노출되지 않도록 주의. 노출되어 타 금속에 접촉되면 누전으로 방식되지 않을 수 있음. 콘크리트에 균열이 발생하는 경우 전기방식 상태 점검 필요)
- 메쉬양극과 각단 연결함(junction box)에 연결(다수의 연결단자함이 하나의 전원장치에 연결됨)
- 전원장치(변압기/정류기)의 위치 선정과 설치 (보통의 전원장치는 20 V이하의 소용량이나 교량 등 대형구조물의 경우, 다중 채널을 가진 대용량을 사용하며, 한 대의 전원장치로 교량 전체를 방식하기도 함. 2천 채널과 4천 기준전극의 모니터링까지 있다함)
- 메쉬양극 설치 후 콘크리트/모르타르의 충분한 양생기간(상태에 따라 몇 주에서 몇 개월까지)후 전원을 공급함.
- 처음 전원공급시 제어장치의 작동상태(기준전극/센서의 작동, 전원공급, 모니터링 등)를 점검하고, 적정 방식 전위 및 전류가 되도록 조정함. 대부분 자동 조절되나 양극의 손상으로 전원공급이 중단될 수 있으므로 월 1 회 정도의 점검 필요

〈그림 12, 13〉은 신설 구조물의 Ti 리본양극과 건축물 바닥의 전도성 피복양극 설치 광경이다.

5.2 희생양극 시스템 (Zn mesh anode system)

희생양극 시스템은 전위차의 제한 때문에 전기전도도가 높은 해양 환경에서 주로 사용한다. 여기에서 소개되는 시스템은 아연 메쉬 양극으로 해상 교각의 교각 방식용으로 사용되는 캡슐형 자켓(제품명 LifeJacket) 시스템이다. 해상 교각은 수위에 따라 네 부분으로 나누어지는데, 수중부(immersed zone), 간만부(tidal zone), 비말대(splash zone), 그리고 대기부(atmospheric zone)이다. 이중 가장 부식 손상이 심한 곳이 비말대와 간만대인데 이 부분이 방식된다면 전체 교각

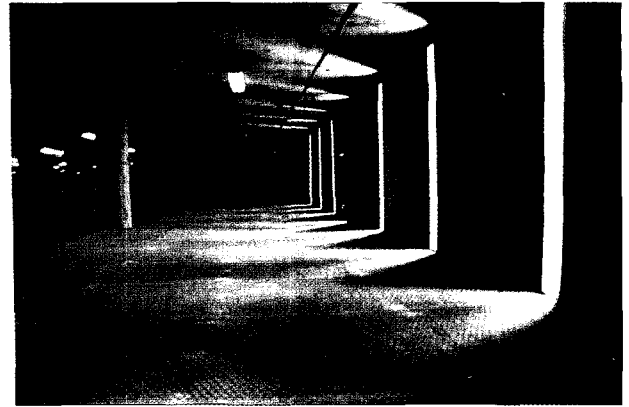


그림 11. 외부전원식 MMO/Ti 메쉬 양극의 주차장 바닥 설치 광경



그림 12. 신설구조물의 Ti 리본 양극 그림



그림 13. 건물의 전도성 피복 양극 적용 모습

의 안전을 확보할 수 있기 때문에 전기 방식의 경우 이 부분에 집중하여 실시한다. 이 부분은 해수가 충분히 흡수되어 전기전도도가 낮기 때문에 아연 메쉬의 양극으로도 충분히 방식 가능하다. 캡슐형 자켓 시스템의 설치 공정은 다음과 같다.

- 교각의 방식 구간 결정(보통 비말대 상부로부터 최저 간만대 아래 500 mm까지 방식)
- 교각의 단면 크기에 맞는 유리섬유자켓 사전 제작(공장 주문)

- 아연 메쉬 양극을 크기에 맞게 절단하여 자켓내부에 고정 (공장제작 가능)
- 철근 손상부는 철근을 용접에 의해 보강(심한 손상이 아닌 경우 보수작업 필요없음)
- 교각내 아연메쉬가 장착된 자켓을 교각에 조립
- 부식 및 방식 모니터링용 기준전극이나 센서가 있는 경우 설치
- 자켓의 하부를 막은 다음 모르타르를 자켓과 교각 사이에 채움
- 모르타르 응고 후 메쉬양극과 철근을 전기적으로 연결(이 때 메쉬양극과 철근은 몰탈 타설 전에 미리 전선을 연결해 놓음)
- 해수중은 방식전류가 상대적으로 많이 필요하므로 아연 양극을 소형 봉형으로 가공하여 별도로 수중에 설치
- 설치완료 후 기준전극 또는 센서에 의해 방식상태 점검



그림 14. 희생양극식 아연 메쉬양극을 내장한 유리섬유 자켓

〈그림 14, 15〉는 해상 교각의 아연메쉬 캡슐형 자켓과 시공이 완료된 광경이다.

6. 결 언

콘크리트 구조물의 전기 방식법은 유일한 공격적(offensive) 방식법이며 설비에 문제가 없다면 환경변화의 조절 능력도 있는 유용한 방식법이다. 하지만 효과적인 방식을 위해서는 적절한 전기화학적 시스템을 갖추어야 하며, 외부전원법이나 희생양극법의 선정, 양극 종류의 선택, 환경에 맞는 설계인자의 결정, 방식 모니터링 시스템 도입 등 전문적인 기술이 필수적이다. 국제적으로 전기 방식법은 오랜 기간 실적과 시행착오를 겪으면서 많은 노하우의 축적이 이루어져 왔으며, 방식 기술로서의 효용성이 증명되었다. 현재 국제적으로 콘크리트 구조물의 부식손상과 보수의 반복되는 유지관리의 문제 해결을 위해 전기 방식법은 계속 확대되어 가고 있다.

그러나 아직 국내는 콘크리트 분야의 전기 방식 도입 초기 단계이다. 해상 교량이나 부두시설물 등 부식손상이 큰 대형 구조물의 경우 장기간의 유지관리 측면에서 이제는 전기 방식의 도입이 적극 검토되어야 할 것이다. □

참고문헌

1. J. P. Broomfield, *Concrete of Steel in Concrete-Understanding, Investigation and Repair*, E & Fn Spon, 1997, pp.30~72, 107~164.
2. *Cathodic Protection of Steel in Concrete*, ed. P. Chess, Gronvold & Karnov, E & Fn Spon, 1998, pp.37~58, 111~131.
3. *Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures-Prevention, Monitoring, Maintenance*, ed. R. Weydert, COST 521, 2002, pp. 63~80.
4. J. Bennet & T. Turk, *Criteria for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements*, SHRP-S-359, SHRP, US, 1994, pp.3~14.
5. *Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements*;, A State-of-the-Art Report, SHRP-S-337, SHRP, US, 1993, pp.13~29.
6. *Corrosion Protection: Concrete Bridges*, FHWA-RD-98-088, FHWA, US, 1998, pp.38~56.
7. J. Bartholomew, J. Bennett & T. Turk, *Control Criteria and Materials Performance Studies for Cathodic Protection of Reinforced Concrete*, SHRP-S-670, SHRP, 1993, pp.9~12.
8. *Long-Term Effectiveness of Cathodic Protection Systems on Highway Structures*, FHWA-RD-01-096, FHWA, US 2003, pp. 1-1~2-6.

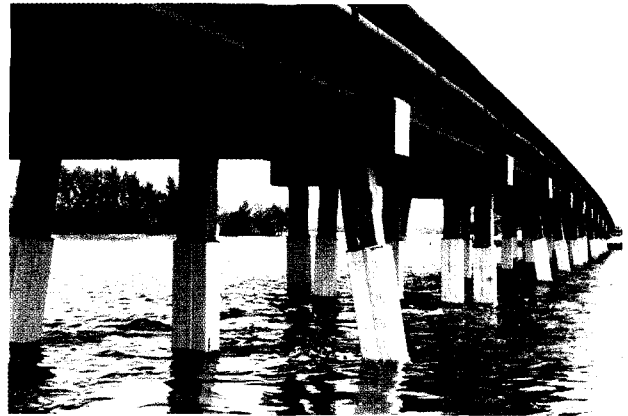


그림 15. 아연 메쉬 양극 자켓 시공완료 모습