

해양 콘크리트구조물의 철근부식 모니터링을 위한 매크로셀 센서 시스템의 적용 Application of Macrocell Sensor System for Monitoring of Steel Corrosion in Concrete Structure Exposed to Marine Environment

이승태* · 문대중** · 김완중*** · 문재흠**** · 김학수*****

Seung Tae Lee*, Dae Joong Moon**, Wan Jong Kim***, Jae Heum Moon**** and Hak Soo Kim*****

요 지 : 철근부식은 해양 콘크리트 구조물의 내구성능을 저하시키는 가장 중요한 인자 중 하나이다. 본 논문은 해양 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 부식거동을 평가하기 위하여 매크로셀 센서 기법 중 하나인 anode-ladder-system의 적용성을 평가한 것이다. 해양환경으로부터 유입되는 염화물의 침투, 확산에 의한 철근부식 위험성에 노출되어 있는 철근콘크리트 구조물의 전위 및 전류를 측정하여 철근의 부식거동을 정성적으로 평가하였다. 부식 모니터링 센서는 평균 해수면으로부터 각각 3.7, 6.0 및 8.2 m 높이에 매설하였으며, 애노드 단자의 부식특성은 평균해수면의 거리에 따라 다르게 거동함을 확인하였다. 또, migration 실험을 통하여 콘크리트 강도와 확산거동과의 관계를 고찰하였다. 결론적으로, 해양 콘크리트 구조물의 부식을 방지 및 완화하기 위해서는 적절한 콘크리트 피복두께의 확보 및 초기 콘크리트의 품질 개선이 중요한 것으로 조사되었다.

핵심용어 : 매크로셀 센서, anode-ladder-system, 염화물, 철근부식, 해양환경

Abstract : Corrosion of steel embedded in concrete is one of the foremost factors that affect the durability of concrete structures in marine environments. This paper presents an application technique of anode-ladder-system to evaluate corrosion behaviours of marine concrete structure. In order to investigate the behaviours quantitatively, the measurement of potential and current was performed on the concrete elements subjected to the penetration and diffusion of chloride ions. The main variable was the heights from seawater level; namely 3.7, 6.0 and 8.2 m. As a result of the monitoring, it was found that the corrosion characteristics differently behaved with the increasing height. Additionally, through migration test, the relationship between compressive strength of concrete and diffusivity of chloride ions was observed. It is suggested, ultimately, that in order to reduce or mitigate steel corrosion, both appropriate concrete cover depth and high-quality of concrete in early ages should be done.

Keywords : macrocell sensor, anode-ladder-system, chloride, steel corrosion, marine environment

1. 서 론

오래전부터 콘크리트는 역학적 성질 및 내구성이 우수하여 철강재와 더불어 사회기반시설물 등의 건설구조물 축조에 적용되어 왔다. 그러나 콘크리트 구조물이 오랜 기간 동안 공기 중의 이산화탄소 등에 노출되어 콘크리트가 중성화 되거나 겨울철에 눈이나 얼음을 녹일 목적으로 사용되는 용빙제 또는 해양환경 하에서 염화물의 침투, 확산에 의하여 콘크리트 속에 묻힌 철근은 부식하게 되어 구조물의 공용수명을 단축시키는 결과를 야기하게 된다. 그 외에도 유해이온의 침투에 의한 콘크리트의 화학적 침식(chemical attack), 동결융해

반복작용에 의한 콘크리트의 동해(frost attack) 등 외부인자의 작용에 의하여 콘크리트의 성능은 저하되게 된다.

특히, 콘크리트는 수화반응으로 생성된 수화물의 작용으로 인하여 강알카리성을 띠게 되므로 밀실한 콘크리트 중의 철근은 부동태 피막(passive film)이 형성되어 부식으로부터 보호된다. 그러나 콘크리트 중으로 물, 산소, 염소이온 등이 침투하게 되면 철근의 부동태 피막은 파괴되어 부식이 급격하게 진행되게 된다(Mehta, 1993; Andrade and Alonso, 1996). 이때 부식발생에 의하여 생성된 물질의 체적이 팽창함에 따라 매우 큰 인장응력이 콘크리트의 주위에 작용하게 되어 균열이 발생한다. 이러한 균열은 콘크리트 내부로부터 점차적

*군산대학교 토목공학과(Corresponding author: Seung Tae Lee, Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, 573-701, Korea, stlee@kunsan.ac.kr)

**이제이텍(Dae Joong Moon, EJ-Tech, Seongnam, Kyungi, 463-800, Korea, moondaejoong@empal.com)

***이제이텍(Wan Jong Kim, EJ-Tech, Seongnam, Kyungi, 463-800, Korea, wjkim@ejtech.net)

****한국건설자재시험연구소(Jae Heum Moon, Korea Institute of Construction Materials, Seoul, 137-073, Korea, mjh4190@kicm.re.kr)

*****호남대학교 토목환경공학과(Hak Soo Kim, Department of Civil and Environmental Engineering, Honam University, Gwangju, 506-090, Korea, hakim8937@paran.com)

으로 콘크리트 표면까지 진행되어 콘크리트의 박리 및 탈락 현상이 생기며, 이로 인하여 콘크리트 구조물의 내하성 및 내구성이 크게 저하되고, 심할 경우 구조물이 붕괴되는 현상이 발생하게 된다.

현재, 장수명 콘크리트 구조물의 창출을 위하여 콘크리트의 내구성과 관련하여 국내외적으로 많은 연구가 수행되어오고 있으나, 대부분의 연구가 콘크리트 중의 유해이온의 침투 및 확산거동에 기반을 둔 물리화학적 해석이 주류를 이루어 오고 있다. 그러나, 이러한 연구는 실구조물에 적용하기 위한 모니터링 시스템에 기인하는 오차가 발생하게 되어 확보된 데이터에 대한 신뢰성 등의 문제가 발생하게 된다. 따라서, 최근 콘크리트 관련 연구자 및 기술자들 사이에서 콘크리트 구조물의 내구성을 보다 편리하게 평가하기 위한 합리적인 기법에 대한 중요성이 강조되고 있으며, 이를 실구조물에 적용하는 시스템적인 정립의 필요성도 대두되고 있다.

1990년 이후로, 전 세계적으로 해양환경과 같이 콘크리트에 유해한 환경에 콘크리트 구조물이 축조될 때, 유해이온의 침투에 의한 콘크리트 중 철근부식을 정성적으로 모니터링하기 위하여 매크로셀 센서(macro-cell sensor) 시스템을 적용해 오고 있으며, 관련 데이터도 많이 축적되고 있는 실정이다(Raupach, 1996; Sagues et al., 2003; Elsener, 2002). 특히, 독일, 일본, 덴마크 등 해양환경에 직면한 선진국에서는 해양 콘크리트 구조물에 anode-ladder-system의 적용에 대하여 국가적인 차원에서 지원하고 있으나, 아직 우리나라는 이에 대한 적용실적이 많지 않으며, 만족할만한 데이터도 충분히 확보하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 해양환경에 노출된 철근콘크리트 구조물을 대상으로 하여 매크로셀 센서를 부착한 anode-ladder-system을 콘크리트 부재에 적용하여 부식거동을 22개월간 모니터링하였으며, 그 계측결과를 제시하였다. 또, 계측대상 콘크리트 부재와 유사한 강도조건을 가진 콘크리트 공시체를 제조하여 실내실험을 통하여 비정상상태의 염소이온 확산계수를 측정하였다.

2. 매크로-셀 기법에 의한 부식거동 모니터링

매크로-셀 센서를 이용한 콘크리트 중 철근의 부식거동 모니터링은 현장 콘크리트 구조물의 성능을 빠르고 쉽게 평가하기 위하여 널리 사용되어 지고 있다. 특히, anode-ladder-system은 각 애노드 단자가 매입된 깊이에서 부식 발생 가능성을 정성적으로 인식하므로써, 향후 콘크리트 구조물의 부식에 의한 보수보강에 유용한 정보를 제공한다. 이 방법을 이용하므로써 매크로셀 센서가 설치된 장소에 애노드 간의 전기적 시그널을 측정하여 Cl^- , CO_2 등 철근부식을 일으키는 외부인자의 침투 정도를 평가할 수 있다.

Fig. 1은 애노드전극(black steel) 및 캐소드전극(noble steel)으로 구성된 매크로셀의 구성요소에 대하여 도식적으로 나타내

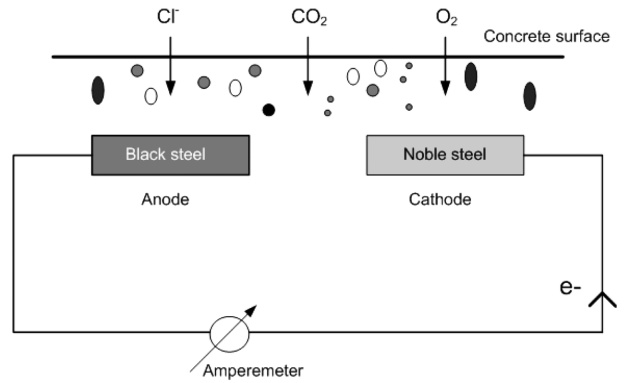


Fig. 1. Macrocell system consisting of a black steel and noble cathode.

고 있다. 해양 콘크리트의 경우 염소이온이 임계량에 도달하지 않으면 애노드 전극은 콘크리트 세공용액의 고알칼리성(high-alkalinity)으로 인하여 부식으로부터 보호받게 되나, 임계염화물량에 도달하면 캐소드에 대한 애노드의 전위차가 부식 활성태 영역으로 나타나게 된다.

또, anode-ladder-system의 최적단락시간에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 제안되었으며, 단락시간이 짧을수록 현장에서 부식모니터링이 편리해진다고 알려져 있다. 일반적으로 약 5초의 단락시간(short circuit time)이 anode-ladder-system에 의한 철근의 부식거동 모니터링에 효과적이라고 보고되고 있다(Raupach and Schiebl, 2001).

3. 계측 및 실험 개요

3.1 현장계측: Macrocell sensor 계측

3.1.1 Anode-ladder-system의 구성

Anode-ladder-system은 50mm 간격을 둔 6개의 검정 철근 애노드 단자로 구성되어 있으며, 와이어와 PT1000 집적온도 센서를 기계적으로 보호하는 에폭시 충전재로 채워져 있다(Fig. 2).

센서의 기하학적 설계는 각각의 애노드 위에 놓여진 콘크리트 피복이 센서의 일부가 영향을 받지 않도록 하며 콘크리트 내부로의 염분 침투나 탄산화의 영향을 받지 않도록 한다. 케이블과 센서구성에 필요한 모든 재료들은 부식감시 시스템의 충분히 높은 내구성과 장기 안정성이 요구된다. 따라서, 본 연

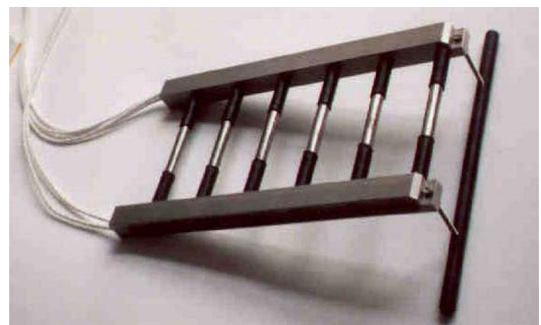


Fig. 2. Apparatus of macrocell sensor (anode-ladder-system).

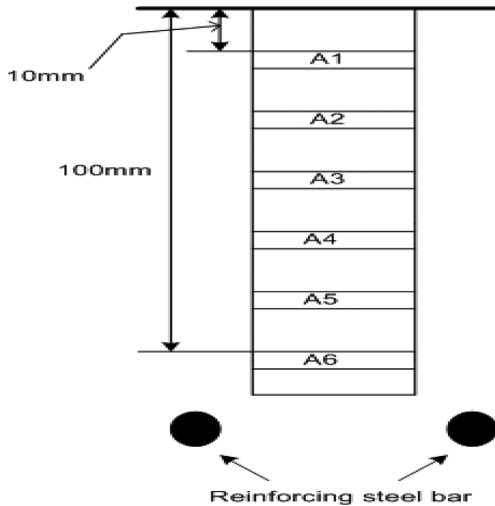


Fig. 3. Installation depth of anode-ladder-system.

구에서 사용한 anode-ladder-system은 외부인자에 의한 영향을 적게 받는 고내구성 재료로 이루어져 있다.

3.1.2 매크로 셀의 설치

Fig. 3은 anode-ladder-system의 콘크리트 중 매설깊이를 나타내고 있다. A계열 문자는 콘크리트 중에 매입된 각각의 애노드를 의미하며, 온도센서(PT1000)를 부착하여 온도변화를 직접적으로 모니터링하는 구조로 이루어져 있다. 콘크리트 중에 매설된 애노드의 위치는 콘크리트 표면으로부터 각 10 mm(A1)에서 100 mm(A6)까지 분포하고 있다. 또한, 각 애노드 사이의 상호작용을 방지하기 위하여 50 mm의 이격거리를 유지하고 있으며, 콘크리트 중 매입깊이가 부식거동 측정대상 철근의 위치를 기준으로 하여 일정한 높이가 되도록 설치하였다.

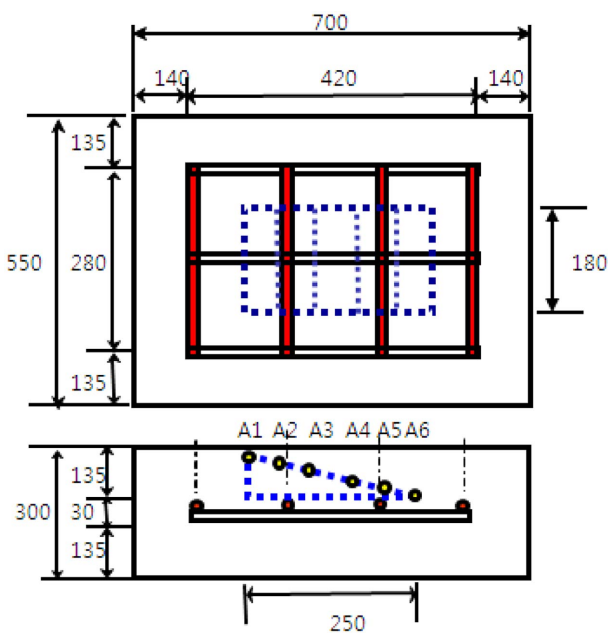


Fig. 4. Size and location of specimen for marine exposure (unit, mm).

또, 해양환경에 노출하기 위한 콘크리트의 크기 및 매설위치를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 본 연구에서는 2수준의 설계기준강도($f_{ck}=35$ 및 45 MPa)의 콘크리트 부재 중에 anode-ladder-system을 매입한 후 22개월 동안 해양환경에 노출시켜 경과시간별 부식거동을 계측하였다. 35 MPa 배합에 대해서는 구조물의 하단부인 E.L. 3.7 m 및 해상대기부인 E.L. 6.0 m에서 철근 부식상태를 측정하였으며, 고강도 콘크리트 배합인 45 MPa 콘크리트 부재에 대해서는 E.L. 8.2 m에서 부식센서를 매입하여 계측하였다.

3.1.3 계측 및 평가방법

측정방법은 접근 가능한 콘크리트 표면에 센서와 케이블을 연결한 터미널 박스에 전용 휴대용 자동 계측기(CANIN-LTM)를 연결하여 수동으로 측정하였다. 콘크리트 중에 매립한 센서로부터 5초간의 단락 후 전류 및 전압을 측정하므로써 이를 이용하여 매입철근의 부식상태를 평가하였다. 매입철근의 부식여부에 대한 판정은 Schiebl and Raupach(1990)가 제안한 -150 mV 및 $15A$ 를 한계 부식전위 및 부식전류로 설정하였다.

콘크리트 중 철근의 부식개시시기(corrosion initiation)는 철근주변 온도(T)에 크게 의존적이며, 온도가 증가함에 따라 부식개시를 위한 임계염화물량은 감소하게 된다(Kitago et al., 1996). 본 연구에서는 anode-ladder-system에 매입된 온도센서(PT1000)를 이용하여 콘크리트 중 온도를 측정 후, 이를 보정하여 철근의 부식거동을 평가하였다.

3.2 실내실험: 염소이온 확산특성

3.2.1 실험재료

현장 계측을 위한 콘크리트 부재와 유사한 강도($f_{ck}=35$ 및 45 MPa)를 발현하는 콘크리트 공시체를 제조하여 염소이온 확산특성을 평가하였다. 공시체 제조를 위하여 ASTM C 150 기준을 만족하는 비중 3.15 및 비표면적 312 m²/kg인 보통포틀랜드시멘트($C_2S=16.6\%$, $C_3S=54.9\%$, $C_3A=10.3\%$ 및 $C_4AF=9.1\%$)를 사용하였으며, 강모래(흡수율=0.80%, F.M.=2.8) 및 부순돌(흡수율=0.78%, $G_{max}=20$ mm)을 각각 잔골재 및 굵은골재로 사용하였다. 또, 콘크리트의 유동성 향상을 위하여 PC계열의 superplasticizer를 사용하였다.

3.2.2 콘크리트 배합

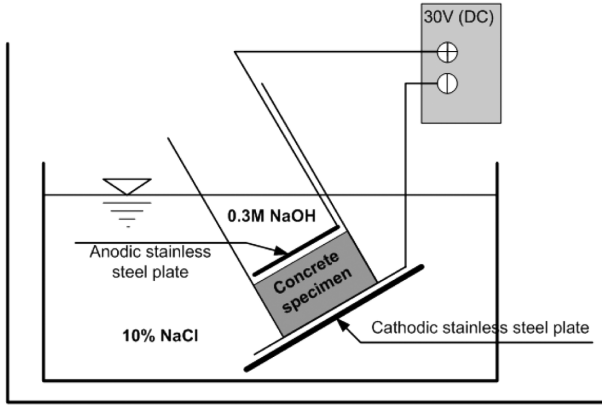
설계기준강도 35 및 45 MPa 공시체를 제조하기 위한 콘크리트 배합을 나타낸 것이 Table 1이다. 본 연구에서 사용된 콘크리트의 물-결합재비(w/b)는 각각 0.42 및 0.35이다.

3.2.3 실험방법

콘크리트의 염소이온 확산계수는 전기화학적 촉진실험법 중 Nordiest 방법인 NT BUILD 492법(1999)에 의하여 측정하였다. 콘크리트 시편의 두께는 50 mm로 하였으며, 음극셀은

Table 1. Detail of concrete mix proportions

Concrete mix	w/b ratio	cement, kg/m ³	water, kg/m ³	fine aggregate, kg/m ³	coarse aggregate, kg/m ³
35 MPa	0.42	405	170	713	1020
45 MPa	0.35	486	170	640	1027

**Fig. 5.** Detail of migration set-up.

10%의 NaCl 수용액을, 양극셀은 0.3 M의 NaOH 수용액을 사용하였다(Fig. 5). 확산셀을 구성한 후 power supplier를 이용하여 30V의 전압을 공급하였으며, 저항에 걸리는 전류와 확산셀 내부의 온도를 일정 시간동안 측정하였다. 비정상상태의 염소이온 확산계수(D_{nssm} ; non-steady state diffusion coefficient)는 다음 식으로 계산하였다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$, $\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$

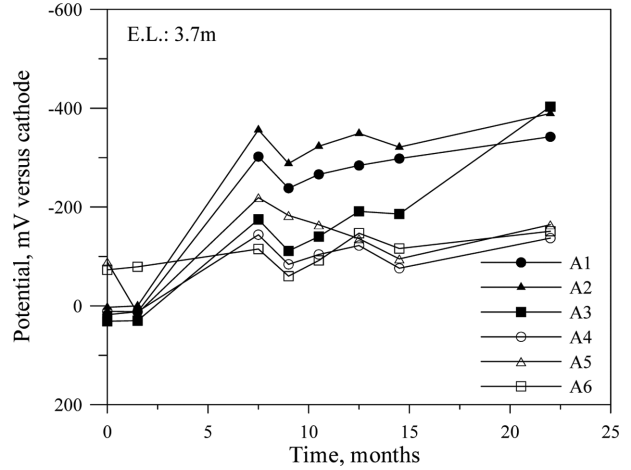
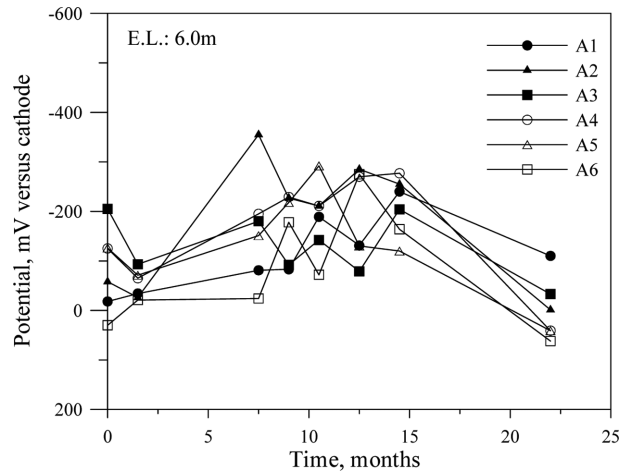
D_{nssm} : 비정상상태에서 염소이온 확산계수(m²/s), z : 이온의 원자가($z=1$), F : 패러데이 상수, U : 전압차(V), R : 기체상수, T : 용액의 온도(K), L : 시편의 두께(m), x_d : 염소이온의 침투깊이(m), t : 실험시간(s), erf : error function, c_d : 비색법에 의한 반응 농도(N) 및 c_0 : 음극셀의 염소이온 농도(2N)이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 부식전위 거동

Fig. 6-8은 anode-ladder system을 이용하여 관측된 콘크리트 중 매입 깊이별 전위거동을 도식화 하여 나타낸 것이다. 평균 해수면으로부터 3.7 m 및 6.0 m 높이에서 35 MPa 콘크리트 중에 매입된 센서의 전위거동 결과는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7이며, 평균해수면 8.2 m 높이의 45 MPa 콘크리트 중 철근의 전위거동을 나타낸 것이 Fig. 8이다.

Fig. 6에서 나타난 바와 같이 해수면으로부터 3.7 m의 높이의 콘크리트 중에 매입된 각 애노드 단자별 전위는 서로 다르게 거동함을 알 수 있다. 콘크리트 중 매입깊이가 작은 A1, A2 및 A3 단자는 해양환경에 노출된 시간의 증가와 더불어

**Fig. 6.** Potential-time behaviours of anode-ladder-system embedded in 35 MPa concrete (E.L.: 3.7 m).**Fig. 7.** Potential-time behaviours of anode-ladder-system embedded in 35 MPa concrete (E.L.: 6.0 m).

전위거동이 활성화 영역으로 나타난 반면, 콘크리트 중 매입 깊이가 큰 A4, A5 및 A6 단자는 전위거동이 확실한 활성화 영역에 포함되지 않은 것으로 관찰되었다. 다시 말해서, A3 단자가 위치한 깊이에 철근이 매입되어 있다면 철근은 부식 활성화 상태 상태임을 의미한다.

또, 35 MPa 강도의 동일한 배합 콘크리트의 해수면으로부터 6.0 m 높이에 매입된 anode-ladder-system에서 관찰된 각 단자의 전위거동을 나타낸 것이 Fig. 7이다. 해수면의 높이에 따라 전위거동이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 해양환경 노출기간의 경과에 따라 전위거동의 일정한 경향은 관찰되지 않았으며, 22개월 후 각 단자의 전위거동이 부식 불활성 영역에 포함되어 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 8에서와 같이 해수면으로부터 거리가 멀고 고강도인 콘크리트에

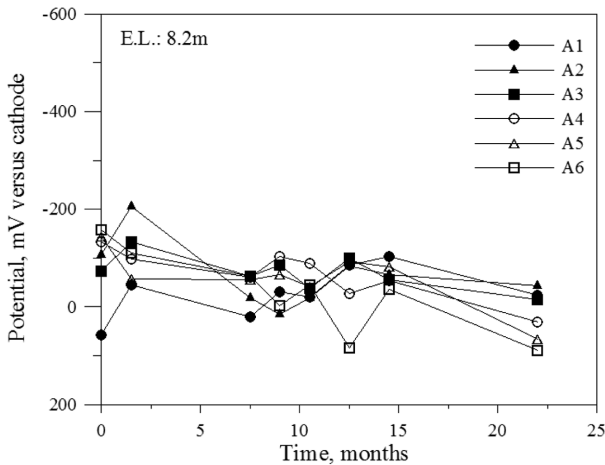


Fig. 8. Potential-time behaviours of anode-ladder-system embedded in 45 MPa concrete (E.L.: 8.2 m).

매입된 anode-ladder-system에서 더욱 분명하게 관찰되었다. 각 단자의 매입깊이에 관계없이 부식 불활성 영역의 전위가 관찰됨을 확인할 수 있다.

본 연구의 anode-ladder-system 계측결과, 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 부식전위 거동은 해수면으로부터의 거리에 의존적임을 확인할 수 있었다. 현재까지 측정된 계측결과를 바탕으로 하여 콘크리트의 강도와 철근의 부식거동과의 관계에 대한 선형적 관계를 도출하기는 어려우나, 해수면으로부터 거리가 가까울수록 콘크리트 표면에 가까운 애노드 단자는 활성화영역의 전위가 나타날 확률이 높은 것으로 조사되었다.

4.2 부식전류 거동

Anode-ladder system을 이용하여 관측된 콘크리트 중 매입 깊이별 부식전류를 계측하여 나타낸 것이 각각 Fig. 9-11이다. 전위거동에서 관찰된 경우와 마찬가지로 평균 해수면에서 3.7 m 및 6.0 m 높이에서 35 MPa 콘크리트 중에 매입

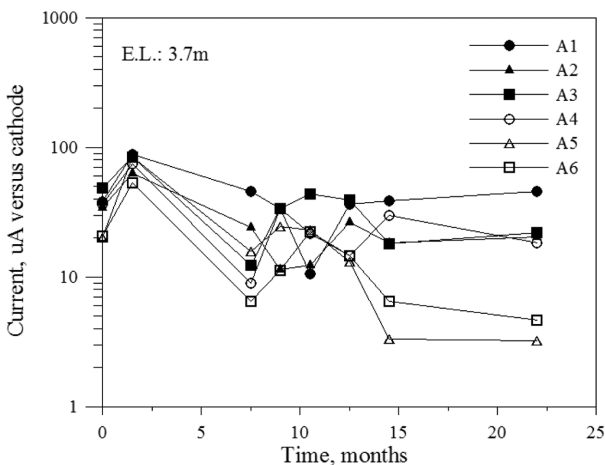


Fig. 9. Current-time behaviours of anode-ladder-system embedded in 35MPa concrete (E.L.: 3.7 m).

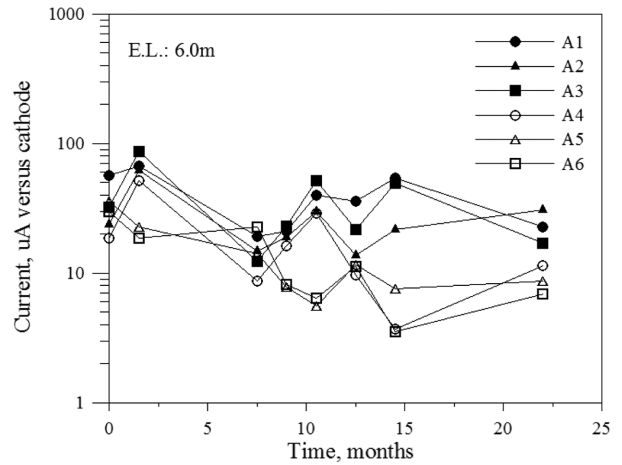


Fig. 10. Current-time behaviours of anode-ladder-system embedded in 35 MPa concrete (E.L.: 6.0 m).

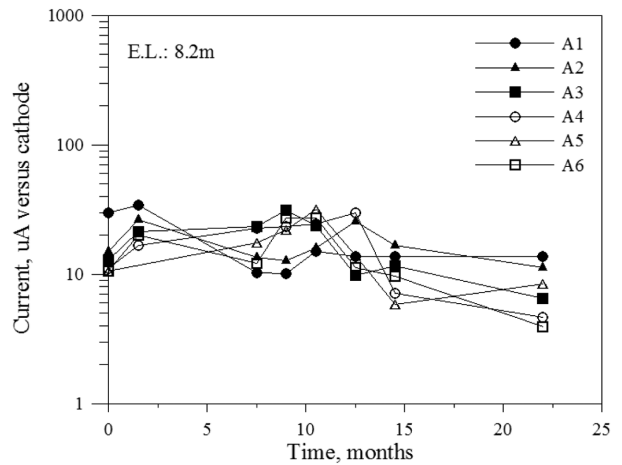


Fig. 11. Current-time behaviours of anode-ladder-system embedded in 45 MPa concrete (E.L.: 8.2 m).

된 센서의 경과시간에 대한 부식전류의 거동을 나타낸 것이 각각 Fig. 9 및 Fig. 10이며, 평균해수면 8.2m 높이의 45 MPa 콘크리트 중의 매크로셀의 전위거동을 나타낸 것이 Fig. 11이다.

Fig. 9에 나타났듯이 해수면으로부터 3.7 m 높이에서 A1 애노드는 노출초기에 비교적 높은 애노딕 전류(anodic current)를 나타내었으며, 10.5개월의 부식전류를 제외하면 전 노출 시간에서 15 μ A 이상의 부식전류가 관측됨을 확인하였다. 반면, A6 애노드의 경우 노출기간동안 비교적 작은 부식전류 값을 나타내므로써 애노드의 매입깊이에 따라 철근의 부식전류 거동이 크게 영향을 받는 것으로 조사되었다.

한편, Fig. 10은 해수면으로부터 6.0 m 높이에서 애노드 단자의 부식전류 거동을 나타낸 것으로써, 노출기간 9개월 후부터 애노드의 매입깊이에 따라 부식전류의 경향이 비교적 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 다시 말해서, 매입깊이가 작은 A1, A2 및 A3의 애노딕 전류가 매입깊이가 큰 A4, A5 및 A6의 애노딕 전류에 비하여 높게 나타나므로써, 부식 활성화의 가능성이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

고강도 콘크리트(45 MPa) 중에 매입된 애노드 단자별 부식전류 값을 노출시간별로 나타낸 것이 Fig. 11이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 매입깊이에 따른 애노드 단자의 부식전류의 차이가 크지 않았으며, 특히 장기노출시간에서 애노드 단자의 부식전류는 $15 \mu\text{A}$ 이하의 값을 나타내므로써, 콘크리트 표면부근에서도 염소이온의 침투가 적어 철근부식에 대하여 안정화된 것으로 나타났다.

이상의 계측 결과를 종합적으로 고찰해 보면, anode-ladder system의 부식전류 거동은 평균해수면으로부터 높이에 따라 상이하게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 본 연구에서 계측한 부식전류값은 2년 미만의 계측 결과로서, 보다 명확한 부식 경향을 판단하기 위해서는 보다 장기노출기간에서 측정한 계측 결과를 확보해야 할 것으로 판단된다.

4.3 부식전위와 부식전류의 관계

콘크리트 중 철근의 부식거동은 온도, 습도, 표면 염화물량, 콘크리트 종류 등 여러 인자에 의하여 영향을 받게 된다(Glass and Buenfeld, 1997; Sun et al., 2004). 또한, 콘크리트 피복두께가 작을수록 콘크리트 중 매입철근은 탄산화 및 염소이온 침투에 의한 철근부식이 발생하기 쉬워진다.

Fig. 12는 anode-ladder-system의 콘크리트 표면부근 애노드(A1)와 내부 애노드(A6)의 전위와 전류의 관계를 도식화한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 부식영역인 -150 mV 및 $15 \mu\text{A}$ 를 모두 만족하는 부식영역에서는 A1 단자만 분포하고 있으며, 비부식영역에서는 A6 단자가 주로 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 각 anode별 전위 및 전류의 선형적인 관계는 관찰할 수 없었으나, 콘크리트 매설깊이에 따른 부식영역분포가 크게 상이하게 존재하므로써, 콘크리트 중 철근의 부식을 방지하기 위한 대책의 하나로써 콘크리트 피복두께 확보가 중요한 요소라고 판단한다.

4.4 콘크리트의 염소이온 확산특성

콘크리트 중 염소이온의 확산특성은 콘크리트 구조물의 내구성 및 공용수명을 평가하는데 있어서 매우 중요한 파라미

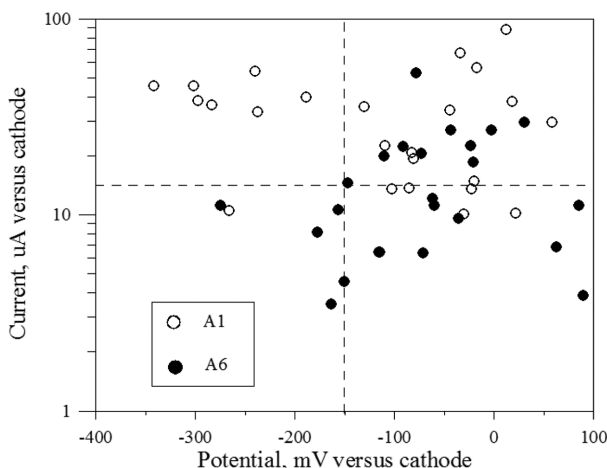


Fig. 12. Potential vs current of single anodes (A1 and A6).

터로 작용할 수 있다. 염소이온의 확산속도는 사용된 시멘트 종류, 물-결합재비, 강도, 공극량 등 콘크리트의 품질에 따라 달라지게 되며, 철근부식을 위한 임계염화물량(chloride threshold level) 산정에도 매우 중요하게 작용한다(Shekarchi et al., 2009; Song et al., 2008).

특히, 콘크리트 중의 염소이온 확산특성은 콘크리트의 공극구조와 밀접한 관계가 있으며, 고강도 콘크리트일수록 염소이온의 침투가 어려워져 철근부식 개시시기는 증가하게 된다(Johannesson, 2003). Al-khaia(1997) 및 Elahi et al., (2010)은 콘크리트의 강도에 따른 염소이온의 확산특성에 대한 연구결과를 발표하였으며, Manera et al., (2008)은 철근부식 개시시기와 콘크리트 강도와의 관계를 실험적으로 입증하였다. 본 연구에서는 앞서 고찰한 콘크리트 부재와 유사한 강도를 발현하는 콘크리트를 제조한 후 염소이온의 확산특성에 대한 실내실험을 실시하여 철근의 부식거동과 염소이온 확산계수와 의 관계를 규명하고자 하였다.

매크로셀 센서를 적용한 콘크리트 부재와 유사한 강도를 발현하는 콘크리트의 비정상상태의 염소이온 확산계수(D_{nssm})를 콘크리트 재령별로 측정하여 나타낸 것이 Fig. 13이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 초기재령(1개월)에서 35 MPa 콘크리트의 확산계수가 약 $4.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 인 반면, 45 MPa 콘크리트는 약 $2.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 확산계수를 나타내므로써, 콘크리트 배합에 따라 확산계수가 다르게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 장기재령으로 갈수록 콘크리트의 강도발현 및 조직구조의 밀실화로 인하여 콘크리트의 확산계수는 서로 유사하게 나타났으며, 재령 6개월에서 두 콘크리트의 D_{nssm} 값은 약 $0.73\text{-}0.75 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 인 것으로 관찰되었다.

따라서, Fig. 6-11의 anode-ladder-system의 부식거동 계측 결과는 콘크리트의 초기재령의 확산특성에 지배적인 영향을 받은 것으로 추정되며, 콘크리트 중 매입철근의 부식개시기 연장을 위하여 초기재령 콘크리트의 품질확보가 중요하다고 판단된다.

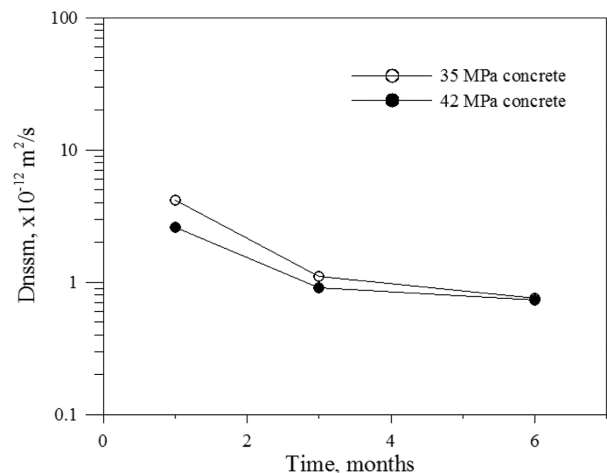


Fig. 13. D_{nssm} values in 35 MPa and 45 MPa concrete by laboratory test.

5. 결 론

본 논문은 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 철근부식 모니터링을 위한 anode-ladder-system의 적용성을 현장계측 결과를 통하여 평가한 것으로써 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) Anode-ladder-system의 전위거동 및 전류거동 계측 결과, 평균 해수면으로부터 가까운 높이에 매설된 콘크리트 표면부근의 애노드 단자는 부식거동이 활성화 영역으로 나타난 반면, 해수면으로부터 멀어질수록 불활성 영역으로 나타나므로써 매크로셀 센서의 부식거동은 해수면으로부터 거리에 크게 의존적인 것으로 관찰되었다. 그러나, 신뢰성 있는 부식거동 결과를 확보하기 위해서는 보다 장기노출기간에서 측정 한 계측결과를 확보해야 할 것으로 판단된다.

(2) 콘크리트 표면부근 애노드 단자와 내부 애노드 단자의 부식거동을 비교한 결과, 매입깊이가 작은 애노드 단자가 주로 부식영역에 분포하는 반면, 매입깊이가 큰 애노드 단자는 비부식영역의 범위에 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 내구연한을 만족하는 콘크리트 중 철근부식 방지대책으로써 콘크리트 피복두께 확보가 매우 중요하다고 판단된다.

(3) 콘크리트의 비정상상태 염소이온 확산계수를 측정 한 결과, 초기재령의 D_{nssm} 는 콘크리트의 강도에 따라 다르게 나타난 반면, 장기재령으로 갈수록 콘크리트의 확산계수는 서로 유사하게 나타났다. 따라서, 콘크리트 중 매입철근의 부식 개시시기 연장을 위하여 초기재령 콘크리트의 품질확보가 필요하다고 판단된다.

(4) 이상의 계측결과를 종합해 보면, 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 부식거동을 정성적으로 평가하기 위한 방법으로써 anode-ladder-system의 적용이 유효할 것으로 판단된다.

참고문헌

Al-Khaja, W.A. (1997). Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. *Construction and Building Materials*, 11(1), 9-13.

Andrade, C. and Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10(5), 315-328.

Elahi, A., Basheer, P.A.M., Nanukuttan, S.V. and Khan, Q.U.Z. (2010). Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 24(3), 292-299.

Elsener, B. (2002). Macrocell corrosion of steel in concrete - implications for corrosion monitoring. *Cement and Concrete Com-*

posites, 24(1), 65-72.

Glass, G.K. and Buenfeld, N.R. (1997). The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 39(5), 1001-1013.

Johannesson, B.F. (2003). A theoretical model describing diffusion of a mixture of different types of ions in pore solution of concrete coupled to moisture transport. *Cement and Concrete Research*, 33(4), 481-488.

Kitago, M., Kabayashi, S., Kikuchi, Y., Miyakawa, T. and Fujii, M. (1996). Study on influence of compound factor concerning corrosion of steel of concrete structure. *Material*, 45(9), 1048-1054.

Manera, M., Vennesland, O. and Bertolini, L. (2008). Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume. *Corrosion Science*, 50(2), 554-560.

Mehta, P.K. (1993). *Concrete: Structures, Properties and Materials*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 196.

NT BUILD 492. (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland, Nordtest.

Raupach, M. (1996). Chloride-induced microcell corrosion of steel in concrete-Theoretical background and practical consequences. *Construction and Building Materials*, 10(5), 329-338.

Raupach, M. and Schiebl, P. (2001). Macrocell sensor system for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures. *NDT&E International*, 34(6), 435-442.

Sagues, A.A., Pech-Canul, M.A. and Al-Mansur, A.K.M.S. (2003). Corrosion macrocell behavior of reinforcing steel in partially submerged concrete columns. *Corrosion Science*, 45(1), 7-32.

Schiebl, P. and Raupach, M. (1990). Corrosion of reinforcement in concrete. *International Symposium, Wishaw, Waewickshire, UK, London*, 49-58.

Shekarchi, M., Rafiee, A. and Layssi, H. (2009). Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 769-775.

Song, H.W., Lee, C.H. and Ann, K.Y. (2008). Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 113-121.

Sun, W., Zhang, Y., Liu, S. and Zhang, Y. (2004). The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1781-1785.

Thangavel, K. and Rengaswamy, N.S. (1998). Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 20(4), 283-292.

원고접수일: 2010년 3월 25일

수정본채택: 2010년 7월 9일

게재확정일: 2010년 8월 11일