

해상 교량에 설치된 희생양극식 전기방식의 8년 이후의 성능에 관한 연구

정진아¹ · 하지명² · 이두형³ · 이상득[†]

(Received May 2, 2016 ; Revised July 14, 2016 ; Accepted July 19, 2016)

A study on the performance of the sacrificial anode used for cathodic protection of a marine bridge after 8 years

Jin-A Jeong¹ · Ji-Myung Ha² · Du-Young Lee³ · Sang-Deuk Lee[†]

요약: 최근 우리나라의 남해고속도로 상에 있는 해상 교량의 교각에서 부식이 발생하였다. 이 해상 교량의 부식 손상부위를 보수하기 위하여 희생양극식 전기방식을 설치하였다. 본 연구에서 소개한 해상교량의 경우, 구조물의 상부에서는 부식이 발생되지 않았기 때문에 해수에 의한 조수간만의 영향을 받는 간만대와 비말대 부분에만 희생양극식 전기방식을 설치하였다. 해상교량에 희생양극식 전기방식을 설치한 후 약 8년이 경과된 시점에서 희생양극식 전기방식의 성능을 검증하기 위하여 방식전류, 방식전위 및 복극량을 측정하였다. 전체 60개의 교각에 설치된 희생양극식 음극방식의 성능에 관한 실험 결과는 방식 양호(13개 교각), 부분 방식(27개 교각), 일시적 오류(7개 교각), 피복 들뜸(13개 교각)과 같이 4 부분으로 분류하였다. 방식성능이 불량한 교각에 대해서는 양극의 추가 설치 및 Jacket 시공 등과 같은 추가적인 조치가 필요하다고 판단된다.

주제어: 희생양극, 음극방식, 분극, 전류, 전위

Abstract: Recently, corrosion occurred on the piles of a marine bridge located on the NamHae expressway in Korea. A sacrificial anode cathodic protection system was installed to prevent corrosion damage in the marine bridge. In the case of the marine bridge in this study, the sacrificial anode cathodic protection system was applied at the tidal and splash zones of the piles because the upper part of the structure was not corroded, and because corrosion occurs at the tidal and splash zones due to sea tides. To verify the performance of the sacrificial anode cathodic protection system 8 years later, cathodic protection (CP) current, CP potential, and degree of depolarization were measured. The experimental results on the performance of the sacrificial anode cathodic protection system from a total of 60 piles were classified into 4 categories: good CP effect results (13 piles), partial CP effect results (27 piles), temporarily erroneous results (5 piles), and need for maintenance because of delamination (15 piles). It was determined that additional repairs are required, such as the application of bulk anodes and jacket casings, for piles where the CP effect is poor.

Keywords: Sacrificial anode, Cathodic protection, Depolarization, Current, Potential

1. 서론

철근콘크리트 구조물의 내구성을 증진시키기 위한 일환으로 최근 철근콘크리트 구조물의 수명을 연장시키는 다양한 방법들이 연구되고 있다. 철근콘크리트 구조물의 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 콘크리트 내부에 배근된 철근에서 발생하는 부식이다[1]. 특히 해상 교량과 같이 해양환경에 노출된 구조물이나 겨울철 쌓인 눈을 녹이기 위해 제설제가 사용된 도로 및 교량에서는 염분에 의한 철

근 부식으로 인해 구조물의 내구성에 심각한 영향을 끼치는 것으로 보고되고 있고 그에 대한 대책이 시급하다[2].

국내 남해고속도로 상에 있는 해상 교량의 교각에 철근 부식으로 인한 손상부위가 발생되었고 그에 대한 보수방법으로 2007년에 Zn-Mesh를 양극으로 사용하는 희생양극식 전기방식설비가 설치되었다. 본 연구에서 소개된 해상 교량의 경우에는 상부 슬래브 구조물에는 부식이 발생되지 않았고, 해수의 조수 간만에 의한 영향으로 간만대(tidal

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-904X>): Department of Ship Operation, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: sdlee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5096

1 Department of Ship Operation, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jina@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5084

2 Conclinic.ltd, E-mail: jmha@conclinic.co.kr, Tel: 02-478-6026

3 Department of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: dhlee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4870

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

zone)와 비말대(splash zone) 영역에서 철근부식이 발생하였기 때문에 수면하(submerged zone) 부분, 간만대 및 비말대 구간에만 희생양극식 전기방식 설비가 적용되었다[3].

일반 철근콘크리트 구조물은 비저항이 크기 때문에 희생양극식 전기방식의 경우에는 방식전류의 공급이 제한되는 특징이 있기 때문에 희생양극식 전기방식을 적용하는 것이 곤란하나 본 연구에서 소개된 해상교량과 같이 조수 간만에 의한 영향을 받아 바닷물에 노출되는 곳에 위치하는 교각의 수면하 부분, 간만대 및 비말대 구간에는 콘크리트에 흡수된 해수에 의해 콘크리트의 비저항이 감소되기 때문에 희생양극식 전기방식의 경우에도 방식전류가 잘 전달된다. 그러나 해수면의 위치가 변하고, 온도 및 날씨에 따라 교각이 가지고 있는 함수량 및 습도가 달라지기 때문에 그에 따른 전기방식의 효과도 구조물의 영역별로 다르게 나타나게 된다[4].

본 연구에서 소개된 해상 교량의 경우 국내에서 철근콘크리트 구조물에 희생양극에 의한 전기방식공법을 처음 적용하여 시공되었기 때문에 지속적이고 주기적인 점검을 통해 전기방식 성능을 모니터링 함으로써 방식 성능과 효과를 더욱 정밀하게 분석, 판정할 필요가 있으며, 방식성능이 불량한 일부 교각에 대해서는 수면하 부분에 별도로 양극(bulk anode)의 추가 설치 및 Jacket 시공 등과 같은 추가적인 조치가 필요하다고 판단된다[5].

2. 실험 방법

2.1 희생양극식 전기방식의 설계

희생양극식 전기방식 설계를 하기 위해서는 피방식체 즉, 방식이 필요한 대상 구조물의 면적을 계산하고, 구조물이 노출된 환경에 적합한 방식전류밀도를 결정하여 구조물의 면적에 대한 방식 전류량을 산출한다. 그리고 양극의 수명, 종류 및 형상을 선정하고 양극의 발생 전류량을 계산하여 양극의 크기를 결정한다. 양극의 배치는 방식 전류가 균일하게 분포될 수 있도록 적정 간격으로 배치해야 하며 구조물과는 단선을 고려하여 2중으로 연결해야 한다[6]. 본 연구에서의 대상 구조물은 남해고속도로 상에 있는 교량으로 연장 330m, 폭 23m인 T형 다주식 교각 구조물이며, 희생양극식 전기방식을 적용하기 전에 육안으로 대상 구조물을 점검하였다. 콘크리트 교각의 설치 환경이 해수에 근접해 있기 때문에 콘크리트 비저항이 낮아 희생양극식 음극방식을 적용할 경우에도 방식 효율이 좋을 것으로 예상되어 Zn-Mesh 양극을 이용한 희생양극식 음극방식을 적용하였다. Pedferri 등은 방식설비를 설치하는 시기에 따라서 신설된 철근 콘크리트 구조물에 음극방식을 적용하는 음극예방(Cathodic prevention)과 부식성 환경에 설치되어 부식이 진행되고 있는 기존 철근콘크리트 구조물에 방식을 적용하는 음극방식(Cathodic protection) 2 가지로 분류하였다 [7][8]. 그는 음극예방의 소요 전류밀도는 0.2~2.0 mA/m² 이고, 음극방식의 경우 소요 전류밀도는 2.0~20 mA/m² 까지 증가한다

고 하였다. 즉, 음극예방에 비해 음극방식의 소요전류밀도가 크게 증가하게 된다고 주장하였다. 본 연구는 철근콘크리트 교각에서 이미 부식이 진행된 경우이기 때문에 방식에 필요한 소요 전류밀도를 15 mA/m² 기준으로 방식 설계를 하였다. 사용된 희생양극으로는 7.81 kg/m² (1.6lb/ft²)의 Zn-Mesh를 양극으로 사용하였다. 양극의 성분은 Table 1에 나타내었고, 양극의 기계적 특성은 Table 2와 같다. Zn-Mesh의 최소 예상수명은 다음 식 (1)에 의해 계산하였다[9].

$$W = K \cdot I \cdot T \quad (1)$$

여기서,

W = 양극의 중량

K = 상수

I = 전선에 흐르는 방식전류

T = 방식전류의 공급 시간

위의 식을 변형하여 양극의 수명을 계산하면 식 (2)과 같다.

$$T = \frac{W \cdot f_u \cdot e}{I_a \cdot C_r} = \frac{88.27 \text{ kg} \cdot 0.85 \cdot 0.9}{0.1695 \text{ A} \cdot 10.7 \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{year}}} = 37.2 \text{년} \quad (2)$$

여기서,

W = 아연 양극의 중량

$$= 1.6 \text{ lb/ft}^2 \times 11.3 \text{ m}^2 \times 10.764 \text{ ft}^2/\text{m}^2 = 88.27 \text{ kg}$$

e = 아연 양극의 효율 = 90%

f_u = 적용 계수 = 85%

I_a = 방식 소요 전류 출력

$$= 11.3 \text{ m}^2 \times 15.0 \text{ mA/m}^2 = 169.5 \text{ mA} = 0.1695 \text{ A}$$

C_r = 아연 양극의 소모율 = 10.7 kg/A·year

상기 계산에 의하면 본 교량에 적용된 Zn-Mesh 희생양극은 최소 37년 이상의 수명을 유지할 것으로 판단된다. 실제로는 조수간만 차의 영향, 염분의 농도 등의 영향을 고려해 볼 때 계산된 수명보다 양극의 수명은 더 길어질 것이라 판단된다.

Table 1: Composition of Zinc-Mesh anode

Composition (wt. %)	
Lead	0.005 max
Iron	0.010 max
Cadmium	0.005 max
Copper	0.7 ~ 0.9
Zinc	Balanced

Table 2: Mechanical properties of Zinc-Mesh anode

Mechanical Properties	
Ultimate Tensile Strength	152 ~ 200 MPa
Hardness (Rockwell 15T)	59 ~ 69
Ductility, Minimum	7.1 mm

2.2 희생양극식 전기방식설비의 설치

콘크리트 교각의 부식 손상된 부분을 제거하고 새롭게 설치할 시멘트 모르타르가 교각의 콘크리트 표면에 잘 부착될 수 있도록 접착력을 높이기 위해 콘크리트 교각 표면에 그라인딩(grinding) 및 칩핑(chipping) 작업에 의한 표면 처리를 실시하였다. 교각의 표면에 Zn-Mesh 양극 및 거푸집을 설치하고 음극인 철근과 Zn-Mesh 양극을 전기적으로 연결하기 위해 전선을 연결하였다. 단선될 경우를 대비하기 위하여 철근과 양극은 전선을 통해 2중으로 연결하였다. 그 후에 양극이 설치된 거푸집 안에 모르타르를 주입하였다. 모든 전기적 접촉 부분은 외부 부식인자들의 침투 및 단락에 의한 결함이 발생되지 않도록 에폭시 수지 및 실리콘 수지로 밀봉하였다.

모르타르는 강도를 높이기 위해 주입 후 약 30일간 양생을 실시하였다. 모르타르의 기계적 특성은 Table 3과 같다. Figure 1은 T형 다주식 철근콘크리트 구조물의 교각 표면에서 녹물이 배어나온 부분을 제거한 후 Zn-Mesh 양극을 설치한 교각의 외형을 나타낸 사진이다. 양극 설치 후 콘크리트 피복에 균열의 흔적이 없으며 균일한 외관 상태를 나타내고 있다.

Table 3: Mechanical properties of conductive mortar

Mechanical Properties	
Bending Strength	50 kgf/cm ²
Compressive Strength	300 kgf/cm ²
Bond Strength	10 kgf/cm ²



Figure 1: Cathodic protection system applied to the reinforced concrete piles

2.3 전기 방식의 측정 방법

Figure 2는 철근콘크리트 구조물의 교각 위치 및 명칭을 나타낸 그림이다. 총 60개의 교각에 Zn-Mesh 양극을 사용하여 전기방식을 적용하였다. 측정은 해상 교량에 희생양극식 전기방식을 적용한 후 약 8년이 경과된 시점에서 실시하였다.

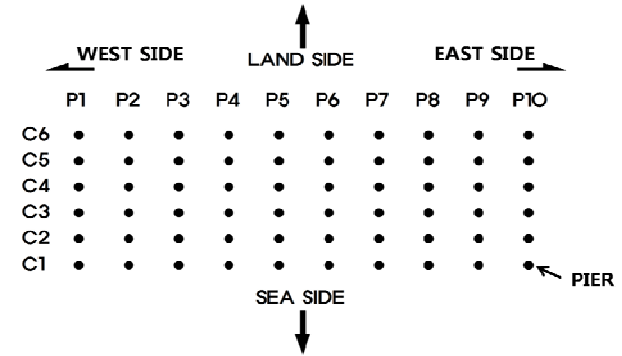


Figure 2: Nomenclature and arrangement of bridge piles

전기방식의 성능을 확인하기 위하여 방식전류, 방식전위, 복극량을 측정하였고, 측정결과를 분석하여 방식이 양호한 교각, 부분적으로 방식이 되는 교각, 일시적인 오류에 의해 측정이 불가능한 교각, 그리고 교각의 일부 들뜸 현상으로 인하여 철근 전위의 측정이 불가능한 교각으로 분류하여 나타내었다.

방식전류는 멀티미터(3801-50 Digital multimeter, HIOKI)와 저항(Resistor)을 이용하여 양극과 음극 양단간의 전압차를 측정하여 전류로 환산하였다. 전위 측정에 사용된 기준전극으로는 해수용으로 사용되는 염화은 기준전극(Silver/silver chloride reference electrode)을 사용하였다[10]. 복극전위는 전위차계(Potentiostat, Reference 600, Gamry)를 이용하여 방식연결을 차단한 후 순간적인 전위상승(Potential shift)분을 배제한 12시간 후의 변화된 전위차를 계산하여 복극량(Degree of depolarization)을 확인하였다[11]. 그리고 모니터링 센서(DMS-100, Conclinic Co.)를 이용하여 방식전류밀도를 측정하였다[12].

3. 실험 결과

3.1 방식 전류 측정결과

Figure 3은 교각의 위치 별로 방식전류 분포를 나타낸 그래프이다. 해안가 방향(Sea side)에 있는 교각 3개의 방식전류량 및 육지 방향(Land side)에 있는 교각 3개의 방식전류량의 평균값을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 해안가에 위치한 교각에서 대체적으로 방식전류가 높게 나타났다. P3 및 P8 교각의 경우에는 육지 쪽에 위치한 교각보다 약 150~200배 높은 방식전류가 공급되었다. 이는 해안가에 위치한 경우 상대적으로 높은 염분량으로 인해 콘크리트

트 비저항이 감소되어 방식전류의 공급에 영향을 끼치는 것으로 사료된다. Figure 4는 모니터링 센서에 공급된 방식전류밀도를 나타낸 그래프이다. 교각 구조물 전체의 철근에 공급되는 방식전류값을 비교하는 것 보다는 전류밀도값의 비교가 정량적인 기준을 제시할 수 있기 때문에 전류밀도의 측정은 방식 성능 평가에 필수적이다. 앞서 설명한 바와 같이 음극방식 전류밀도가 2~20 mA/m² 정도면 철근의 충분한 방식이 가능하다.

Figure 4에서와 같이 대부분의 교각에서 10.5~29.4 mA/m² 범위의 방식 전류가 철근에 공급되었다. 즉 방식전류밀도 기준으로 보면 전반적으로 교각에 적절한 방식전류가 공급되어 방식이 되고 있다는 것을 알 수 있다. 방식을 하기 전에 염분에 의해 철근부식이 진행된 일부 교각에서는 방식전류량이 큰 폭으로 증가하는 등 국부적으로 양극의 소모량이 증가할 것으로 판단되며, 콘크리트에 흡수된 해수의 함수량 증가로 인하여 비저항이 감소되어 방식전류가 증가된 것으로 판단된다.

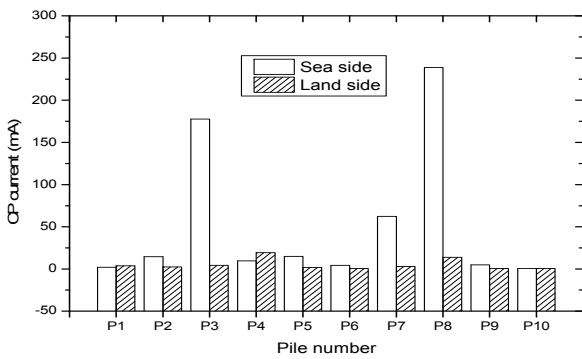


Figure 3: The CP current of bridge piles

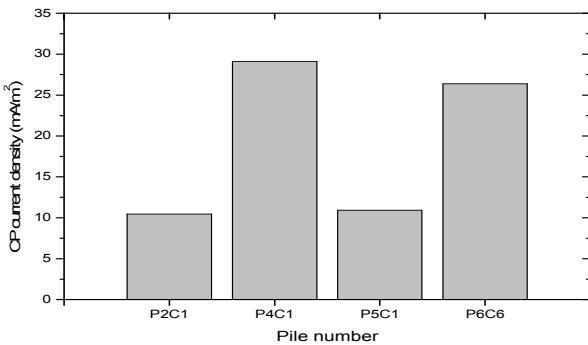


Figure 4: The CP current density of bridge piles with monitoring sensors

3.2 복극 전위 측정결과

복극량은 외부 환경에 의한 전압강하 (IR drop)를 배제한 금속의 순수한 방식 성능을 판단할 수 있는 방식 기준이다. 철근 콘크리트의 경우 NACE SP0290 기준에 따른 100 mV 복극량 기준이 가장 많이 사용되고 있다[13]. 본 연구에서 소개된 교량의 경우에도 100 mV 복극량 기준을 적용하여 방식 성능을 평가하였다. Figure 5는 해안가 방향에 위치한

교각의 복극량을 나타낸 그래프이다. 방식설비를 설치한 후 2년이 경과된 2010년에 측정된 복극량 결과들은 전반적으로 해수에 인접하고 있는 교각의 경우 100 mV 이상의 복극량을 나타내었다. 하지만 일부 해수에 인접하고 있지 않은 교각의 경우 전반적으로 100 mV 미만의 복극량을 나타내었다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 콘크리트 교각에 함유된 염분량의 차이로 인한 콘크리트 비저항의 변화 때문이라고 사료된다. 2014년 및 2016년에 측정된 복극량 측정결과에서는 시간이 경과함에 따라 전체적으로 복극량이 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 복극량이 감소하고 있다는 것은 콘크리트 내부 철근에 희생양극에서 공급되는 방식전류에 의한 음극분극이 정상적으로 되지 않았기 때문으로 판단된다. 희생양극식 음극방식의 경우에는 비저항이 높은 지역에서는 적용이 제한되는데 본 경우에서도 비저항이 높은 교각에서는 100 mV 이하의 복극량을 나타내고 있으므로 이 교각은 콘크리트의 높은 비저항에 의해 방식전류의 공급이 억제되어 미방식 되는 것을 확인할 수 있었다. 일부 교각에서는 전기방식의 연결을 차단한 상태에서 12시간 후 복극된 철근의 부식전위가 측정되지 않았다. 전위가 측정되지 않은 교각에서는 Zn-Mesh 양극을 매립하기 위해 교각 표면에 도포된 모르타르에서 들뜸 현상이 발생한 것으로 판단된다.

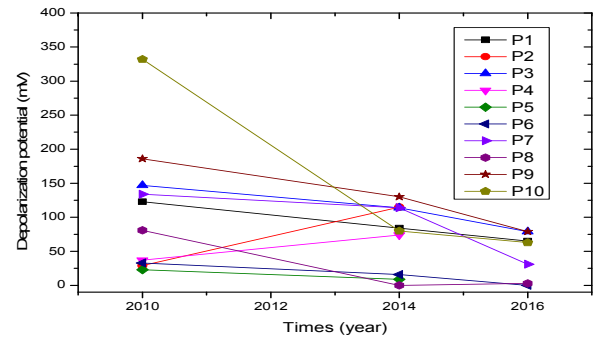


Figure 5: The depolarization potential results of bridge piles with times

3.3 교각별 전기방식 성능 결과

해당 교각의 방식점검 결과는 적정 방식전류가 공급되고 100 mV 이상의 복극량이 측정된 교각은 방식 양호(Good CP)로 분류하고, 방식설비를 설치할 초기 방식전류보다 방식전류량이 감소되고 100 mV 미만의 복극량이 측정된 교각은 부분 방식(Partial CP)으로 분류하였으며, 방식 적용 전·후 역전위가 측정된 교각을 일시적 오류(Temporary error)로 분류하였다. 그리고 방식전류가 공급되더라도 피복 부위에 들뜸 현상에 발생하여 철근의 전위가 측정되지 않은 교각을 피복 들뜸(Delamination)으로 분류하여 Table 4와 같이 나타내었다. 전기방식 설치 후 8년이 경과한 전기방식 설비의 성능을 분석하기 위하여 방식전류, 방식전위 및 복극량을 측정된 결과, 전체 60개의 교각 중 13개의 교각에서는 양호한 방식성능이 나타났으며, 27개의 교각은 부분적인 방식이

되었고, 15개의 교각에서는 피복에 들뜸 현상이 발견되었고, 나머지 5개의 교각에서는 일시적인 오류로 인하여 전체적인 방식설비의 점검이 필요한 것으로 나타났다.

Table 4: Classification of piles according to the performance of cathodic protection

Pile No.	Cathodic protection results			
	Good CP	Partial CP	Temporary Error	Delamination
P1	C1		○	
	C2		○	
	C3			○
	C4	○		
	C5	○		
	C6	○		
P2	C1			○
	C2	○		
	C3		○	
	C4		○	
	C5		○	
	C6			○
P3	C1		○	
	C2		○	
	C3	○		
	C4		○	
	C5		○	
	C6	○		
P4	C1			○
	C2			○
	C3			○
	C4			○
	C5			○
	C6		○	
P5	C1		○	
	C2		○	
	C3		○	
	C4	○		
	C5		○	
	C6		○	
P6	C1		○	
	C2		○	
	C3	○		
	C4		○	
	C5		○	
	C6	○		
P7	C1		○	
	C2		○	
	C3		○	
	C4	○		
	C5			○
	C6			○
P8	C1		○	
	C2			○
	C3			○
	C4		○	
	C5		○	
	C6			○
P9	C1		○	
	C2		○	
	C3	○		
	C4		○	
	C5		○	
	C6		○	
P10	C1		○	
	C2			○
	C3	○		
	C4	○		
	C5		○	
	C6		○	

3.4 육안 점검결과

방식 시공 후 8년이 경과된 시점에서 육안 점검결과 일부 교각에서 모르타르가 도포된 교각 표면에서 균열이 발생하였다. 그리고 양극, 음극과 전선의 연결부 상태를 검사한 결과 별다른 부식의 흔적이 발견되지 않았다. 교각의 표면을 두드려보았을 때 전체 60개의 교각 중 13개의 교각에서 모르타르 표면이 들떠있는 타격음이 들리는 것으로 보아 콘크리트 표면과 양극이 설치된 모르타르 피복에 들뜸 현상이 발생한 것으로 판단된다. 기존 구조물에서 부식이 발생한 부위를 제거하지 않고 시공하여 콘크리트 내부 부식이 진행된 철근에서 부식 팽창으로 인해 들뜸 현상이 발생한 것으로 판단된다. 또한 민물과 바닷물이 교차하는 구간이라 겨울철 동결융해에 의한 영향으로 들뜸 현상이 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 해풍의 영향으로 교각 상부에 설치된 전기방식 측정 단자함(Control box) 개방용 레버가 부식 고착되어 파손되었고, 일부 단자함들은 밀폐가 되지 않고 파손된 부분도 발견되었다. 밀폐가 되지 않을 경우 해풍에 의해 단자함 결선부위가 부식되기 때문에 방식전류의 공급에 문제가 발생할 수 있으며, 전기방식의 측정 데이터에도 오차가 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 보수가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 남해고속도로 상에 있는 해상 교량에 희생양극식 전기방식이 설치된 후 약 8년이 경과된 전기방식 설비의 성능을 분석하기 위한 목적으로 방식 상태를 점검한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 모니터링 센서에 의한 방식전류밀도의 측정결과 10.5 ~ 29.4 mA/m² 의 방식전류가 공급되었다. 설계 당시 방식전류밀도를 15 mA/m² 로 설정하였고 10 mA/m² 이상의 방식전류가 공급되는 것으로 보아 Zn-Mesh 양극에 의한 방식전류가 교각에 적절히 공급되고 있다는 것을 알 수 있었다.
2. 복극전위 측정결과 전체적으로 시간이 경과함에 따라 복극량이 감소되었으며, 교각의 설치 위치에 따라서 방식특성이 다르게 나타났다. 대기중에 노출되어 있는 교각 보다는 해수에 인접한 교각에서 높게 나타났으며, 해안가 방향의 교각에서는 100 mV 이상의 복극전위 값을 나타내었다.
3. 전기방식 설치 후 8년이 경과한 전기방식 설비의 성능을 분석하기 위하여 방식전류, 방식전위 및 복극량을 측정 한 결과, 전체 60개의 교각 중 13개의 교각에서는 양호한 방식성능이 나타났으며, 27개의 교각은 부분적인 방식이 되었고, 13개의 교각에서는 피복에 들뜸 현상이 발견되었고, 나머지 7개의 교각에서는 일시적인 오류로 인하여 전체적인 방식설비의 점검이 필요한 것으로 나타났다.

4. 육안점검 결과 전반적으로 콘크리트 표면에 균열의 흔적은 없었고, 시공 전과 유사한 외관을 유지하였으나 일부 교각에서는 균열 및 피복 들뜸 현상이 발견되었다. 균열 및 피복 들뜸 현상이 발견된 일부 교각 및 방식성능이 불량한 교각에 대해서는 양극의 추가 설치 및 Jacket 시공 등과 같은 추가적인 조치가 필요하다고 판단된다.

References

- [1] J. P. Broomfield, *Corrosion of Steel in Concrete*, 2nd Edition, London and New York, the US: Taylor & Francis, 2007.
- [2] D. A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd Edition, Upper Saddle River, New Jersey, the US: Prentice-Hall, 1996.
- [3] J. M. Ha, C. K. Jin, and J. A. Jeong, "Cathodic protection behavior of coastal bridge structure with sacrificial anode cathodic protection system," *Corrosion Science and Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 242-243, 2012.
- [4] J. A. Jeong and C. K. Jin, "The effect of temperature and relative humidity on concrete slab specimens with impressed current cathodic protection system," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 260-262, 2013.
- [5] J. A. Jeong, W. S. Chung, and Y. H. Kim, "Electrochemical measurements of cathodic protection for reinforced concrete piles in a marine environment using embedded corrosion monitoring sensors," *Journal of Metal & Materials International*, vol. 19, no. 3, pp. 445-452, 2013.
- [6] J. A. Jeong and C. K. Jin, "Three year performance of sacrificial anode cathodic protection system in the reinforced concrete bridge structures," *Advanced Materials Research*, vol. 753-755, pp. 467-475, 2013.
- [7] L. Bertolini and E. Redaelli, "Throwing power of cathodic prevention applied by means of sacrificial anode to partially submerged marine reinforced concrete piles: Results of numerical simulations," *Corrosion Science*, vol. 51, no. 9, pp. 2218-2230, 2009.
- [8] L. Bertolini, F. Bolzoni, A. Cigada, T. Pastore, and P. Pedefferri, "Cathodic protection of new and old reinforced concrete structures," *Corrosion Science*, vol. 35, no. 5-8, pp. 1633-1639, 1993.
- [9] K. M. Moon, K. H. Lee, H. R. Cho, M. H. Lee, Y. H. Kim, and J. K. Kim, "Effect of cathodic protection of adjacent steel piles on the life of sacrificial anode," *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, vol. 22, no. 3, pp. 76-81, 2008 (in Korean).
- [10] J. Carmona, P. Garces, and M. A. Climent, "Efficiency of a conductive cement-based anodic system for the application of cathodic protection, cathodic prevention and electrochemical chloride extraction to control corrosion in reinforced concrete structures," *Corrosion Science*, vol. 96, pp. 102-111, 2015.
- [11] J. A. Jeong and C. K. Jin, "Tidal water effect on the hybrid cathodic protection systems for marine concrete structures," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, no. 12, pp. 389-394, 2012.
- [12] J. A. Jeong, W. S. Chung, and Y. H. Kim, "Electrochemical measurements of cathodic protection for reinforced concrete piles in a marine environment using embedded corrosion monitoring sensors," *Metals & Materials International*, vol. 19, no.3, pp. 445-452, 2013.
- [13] National Association of Corrosion Engineers, "Impressed current cathodic protection of reinforcing steel in atmospherically exposed concrete structures," NACE SP2090, 2007.