

## 희생양극식 음극방식이 적용된 해안 교량 구조물의 방식거동

하 지 명<sup>1</sup>·진 충 국<sup>2</sup>·정 진 아<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(주)콘크리닉, <sup>2</sup>한국해양대학교

(2012년 11월 19일 접수, 2012년 12월 13일 수정, 2012년 12월 13일 채택)

### Cathodic Protection Behavior of Coastal Bridge Structure with Sacrificial Anode Cathodic Protection System

Ji-Myung Ha<sup>1</sup>, Chung-Kuk Jin<sup>2</sup>, and Jin-A Jeong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Conclinic Co., Ltd Seoul, 134-030, Korea

<sup>2</sup>Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

(Received November 19, 2012; Revised December 13, 2012; Accepted December 13, 2012)

This measurement represents the effectiveness of sacrificial anode cathodic protection (SACP) system in a coastal bridge structure. To verify the cathodic protection (CP) effect, the monitoring sensor (DMS-100) that could measure potential, corrosion rate, current, concrete resistivity, and temperature was embedded. The measurement conducted for three years after CP system was installed. Specifically, due to the fact that fresh water and sea water was repeated in the bridge structure, this bridge structure presented special CP behavior. Measurement factors were CP potential, CP current, concrete resistivity, and depolarization potential. In addition, visual inspection was also carried out. As a result of current and depolarization measurement, CP system was well activated in most piers.

**Keywords** : cahtodic protection, potential, concrete resistivity, SACP, depolarization

## 1. 서 론

일반적으로 콘크리트는 시멘트 수화작용에서 생성된 수산화칼슘으로 인하여 강알칼리성 (pH 12~14)을 띠고 있으며, 철근 표면에 부동태 피막을 형성한다.<sup>1)~3)</sup> 이렇게 형성된 부동태 피막으로 인해 콘크리트 내의 철근은 일반적으로 잘 부식되지 않는 특성을 가지고 있다. 하지만 염화물에 의한 콘크리트 내 철근의 부동태 피막 파괴, 이산화탄소 침투로 인한 콘크리트 내부의 중성화 등으로 인해 콘크리트 내의 철근은 부식된다. 특히 항만구조물이나 해안에 인접한 교량 구조물의 경우 염화물에 의한 철근부식이 심각한 실정이다.<sup>4)</sup> 지금까지 염해 환경에 놓여있는 철근 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키기 위한 많은 노력이 이루어져 왔다. 대표적인 방법으로는 고밀도 콘크리트 사용, 피복 증가, 내식성이 좋은 재료사용, 콘크리트 표면 코팅, 철근 에폭시 코팅, 음극방식 등이 있다.<sup>5),6)</sup> 이 중에서 음극방식은 지중과 해수중 금속의 부식을 억제하기 위한 공법중의 하나로써, 콘크리트 구조물에도 적용되고 있다. 음극방식은 1970년대에 콘크리트 구조물의 보수 공법으로 도입되었으며, 1990

년대 이후에는 국제적으로 많은 실질적 적용이 이루어져 왔다.<sup>7)</sup> 국내에서는 지중의 매설관, 선체 등에 본 공법이 적용되어 왔으나 콘크리트 구조물의 경우 그 시공 사례가 적다. 음극방식은 크게 희생양극식 음극방식 (Sacrificial anode cathodic protection, SACP)과 외부전원식 음극방식 (Impressed current cathodic protection, ICCP)으로 구분된다. 그 중에서 희생양극식 음극방식은 피방식체 보다 낮은 전위의 금속을 전기적으로 연결하여 방식하는 방법으로, 설치 및 관리가 간단하고 유지·보수 비용이 적다. 국외의 경우 해수환경에서 콘크리트 구조물의 방식을 위해 희생양극식 음극방식을 적용한 사례를 많이 볼 수 있다. 하지만 국내의 경우 콘크리트 구조물의 방식을 위해 희생양극식 음극방식을 적용한 사례가 전무한 실정이며, 해수와 청수가 반복되는 환경에 건설된 콘크리트 구조물의 방식을 위해 희생양극을 사용하여 방식한 경우는 보고된 바 없다. 본 연구에서는 방식 대상으로 현재 부식이 진행되어 콘크리트 표면에 균열이 발생한 남해안의 철근콘크리트 교량을 선정하여 Zn-Mesh 양극을 이용한 희생양극식 음극방식을 적용하였다. 방식한 교량의 경우 해수와 청수가 반복되는 구간에 위치하고 있으며, 3년간에 걸쳐 구조물의 방식거동을 분석하였다.

\* Corresponding author: jina@hhu.ac.kr

## 2. 음극방식 시공

### 2.1 음극방식 설계

대상 구조물은 남해와 인접한 고속도로상에 있는 교량으로 연장 330 m, 폭 23 m인 T형 다주식 교각 구조물이다. 음극방식을 적용하기 전에 대상 구조물의 육안검사를 실시하였다. 콘크리트 교각의 설치 환경이 해수에 근접해 있기 때문에 콘크리트 비저항이 적어 희생양극식 음극방식을 적용할 경우에도 방식 효율이 좋을 것으로 예상되어 Zn-Mesh 양극을 이용한 희생양극식 음극방식을 적용하였다.

국외에서 보고된 자료에 의하면 신설된 철근 콘크리트 구조물에 음극방식을 적용하는 음극예방 (Cathodic prevention)의 경우 소요 전류밀도는 0.2~2.0 mA/m<sup>2</sup>이고, 부식이 진행된 철근 콘크리트 구조물에 음극방식을 적용하는 음극방식 (Cathodic protection)의 경우 소요 전류밀도는 2.0~20 mA/m<sup>2</sup>이다.<sup>8)~11)</sup> 본 연구에서는 콘크리트 교각에서 이미 부식이 진행된 경우이기 때문에 방식에 필요한 소요 전류밀도를 15 mA/m<sup>2</sup> 기준으로 하여 방식 설계를 하였다. 사용된 희생양극으로는 7.81 kg/m<sup>2</sup> (1.6lb/ft<sup>2</sup>)의 Zn-Mesh를 양극으로 사용하였다. 양극의 성분 및 기계적 특성은 Table 1과 같다. Zn-Mesh의 최소 예상수명은 Faraday 법칙에 따른다 (1).

$$W = K \cdot I \cdot T \tag{1}$$

여기서, W = Weight of reacted metal

K = Constant

I = Current flow through wire

T = Flow time of current

위의 식을 변형하여 양극의 수명을 계산하면 다음과 같다 (2).

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

Table 1. Composition and mechanical properties of zinc anode

Composition (wt. %)	
Lead	0.005 max
Iron	0.010 max
Cadmium	0.005 max
Copper	0.7 ~ 0.9
Zinc	Balanced
Mechanical Properties	
Ultimate Tensile Strength	152 ~ 200 MPa
Hardness (Rockwell 15T)	59 ~ 69
Ductility, Minimum	7.1 mm

여기서,

W = Weight of zinc mesh =

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

e = Zinc mesh efficiency = 90%

f<sub>u</sub> = Utilization factor = 85%

I<sub>a</sub> = Required CP current output =

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

C<sub>r</sub> = Consumption rate of zinc = 10.7 kg/A · year

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

### 2.2 방식 시공

그림 1은 음극방식 시공순서를 나타낸 흐름도이다. 먼저 교각과 새로 설치할 콘크리트 표면과의 접착력을 높이기 위해 콘크리트 교각 표면에 그라인딩 (Treatment grinding) 및 칩핑 (Chipping) 작업에 의한 표면처리를 실시하였다. 그리고 음극과 양극을 전기적으로 연결하기 위해 철근과 전선을 연결하였다. 그 후에 양극 및 거꾸집을 설치하고 모르타르를 주입하였다. 주입완료 후 철근과 양극을 전선을 통해 전기적으로 연결하였다. 모든 전기적 접촉 부분은 단락에 의한 결함이 발생되지 않도록 이중으로 연결하였다. 모르타르의 강도를 높이기 위해 주입 후 약 30일간 양생을 실시하였다. 그림 2는 양극이 설치된 후 교각의 외형을 나타낸 그림이다. 양극 설치 후 콘크리트 피복에 균열의 흔적이 없으며 균일한 외관 상태를 나타내었다.

### 2.3 측정

그림 3은 교각의 위치 및 명칭을 나타낸 그림이다. 총 60개의 교각에 Zn-Mesh 양극을 사용하여 방식을 실시하였다. 방식특성의 측정은 양극 설치 후 한달 동안 총 3회 실시하였다. 그리고 준공 3년 후 다시 측정하여 방식 특성을 확인

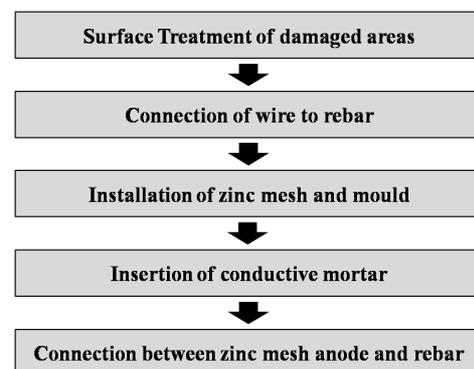


Fig. 1. Flow chart of CP construction.



Fig. 2. Concrete cover condition after 3 years of CP construction.

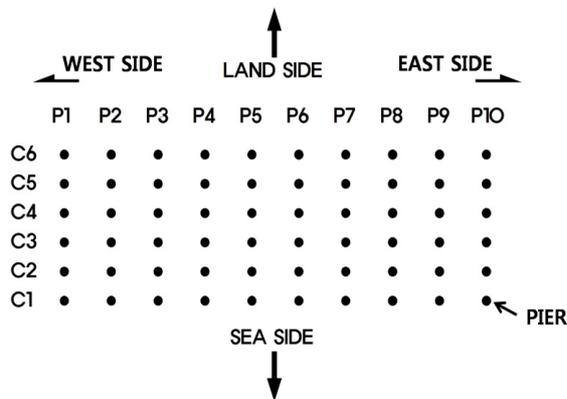


Fig. 3. Piers' arrangement of coastal bridge structure.

하였다. 음극방식의 성능을 확인하기 위하여 방식전류, 방식 전위, 복극전위를 측정하였다. 방식전류는 멀티미터 (3801-50 Digital hitester, HIOKI)와 저항 (Resistor)을 이용하여 양극과 음극 양단간의 전압차를 측정하여 환산하였다. 방식전위 측정에 사용된 기준전극으로는 해수용으로 사용되는 염화은 기준전극 (Silver/silver chloride reference electrode)을 사용하였다. 복극전위는 포테쇼스타트 (Potentialostat, Reference 600, Gamry)를 이용하여 방식연결을 차단한 후 순간적인 전위상승(Potential shift)분을 배제한 12시간 후의 변화된 전위차를 계산하였다. 그리고 모니터링 센서(DMS-100, Conclinc Co.)를 이용하여 방식전류밀도, 콘크리트 비저항을 측정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 육안검사결과

육안검사결과 그림 4와 같이 비말대 및 간만대 영역에 염분이 다량 침투하여 부식이 진행된 것을 볼 수 있다. 총 60개의 교각 중에서 23개 교각에서 균열이 발생되었으며, 또한 해수의 영향 및 온도의 영향을 많이 받은 해상쪽 (남쪽) 교각에서 부식이 심각하게 진행된 것을 확인할 수 있었다. 이



Fig. 4. Results of view inspection (Left: P2C1, Right: P5C1).

는 다른 교각에 비해 염분농도가 높고, 태양광으로 인한 건조가 반복되었기 때문에 사료된다. 방식 시공 후 3년에 걸친 육안검사결과 일부 교각에서 균열이 발생하였다. 하지만 균열의 길이는 15 cm 미만으로 우려할 정도는 아니며 그림 3과 같이 대체적으로 온건한 상태를 유지하였다. 그리고 양극, 음극과 전선의 연결부 상태를 검사한 결과 별다른 부식의 흔적이 발견되지 않았다.

#### 3.2 방식 전류 측정결과

그림 5은 교각의 위치 별로 방식전류 분포를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 해안가에 위치한 교각에서 대체적으로 방식전류가 높게 나타났다. P5교각의 경우에는 육지 쪽에 위치한 교각보다 약 10배 이상의 높은 방식 전류가 공급되었다. 이는 해안가에 위치한 경우 상대적으로 높은 염분량으로 인해 콘크리트 비저항이 감소되어 방식전류의 공급에 영향을 미친 것으로 사료된다. 이는 모니터링 센서의 비저항 측정결과를 통해 확인 할 수 있었다. 그림 6은 P5 교각에 설치한 모니터링 센서들의 비저항을 나타낸 그래프이다. 그림 6과 같이 육지 방향의 비저항값은 해안가 쪽의 비저항에 비해 약 5배 높은 것을 알 수 있었다. 그림 7은 모니터링 센서에 공급된 방식 전류밀도를 나타낸 그래프이

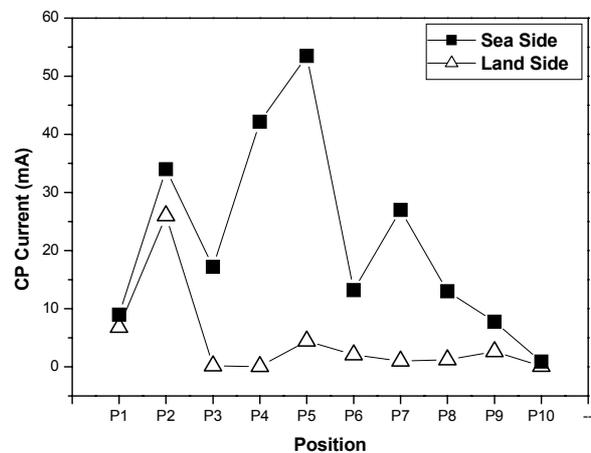


Fig. 5. Current distribution of piers.

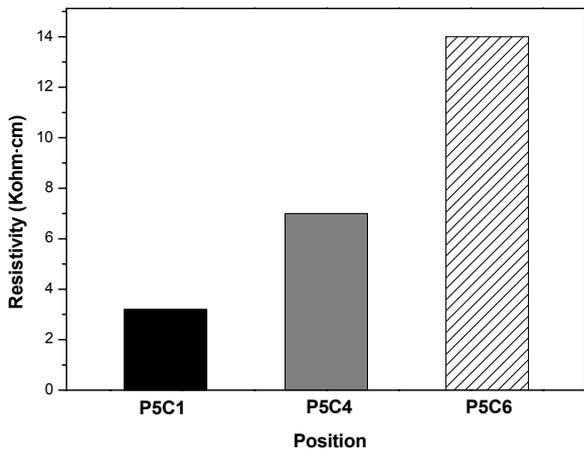


Fig. 6. Resistivity of P5 piers.

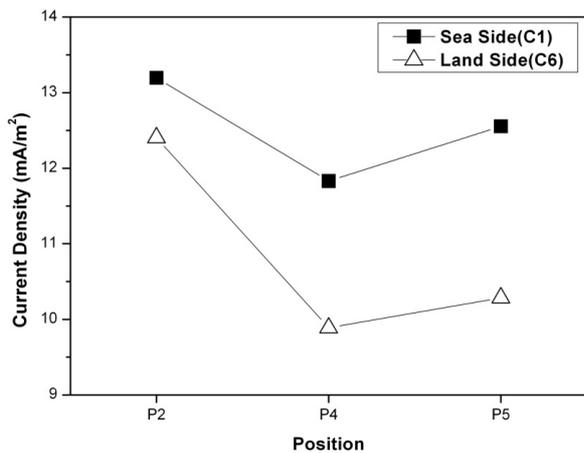


Fig. 7. Current density of piers.

다. 교각 구조물 전체의 철근에 공급되는 방식전류값을 비교하는 것 보다는 전류밀도값의 비교가 정량적인 기준을 제시할 수 있기 때문에 방식 성능 평가에 필수적이다. 앞서 설명한 바와 같이 음극방식 전류밀도가 2~20 mA/m<sup>2</sup> 정도면 철근의 충분한 방식이 가능하다. 그림 7에서와 같이 전 구역에서 10 mA/m<sup>2</sup> 이상의 방식 전류가 철근에 공급되었다. 즉 방식전류 기준으로 보면 전반적으로 교각에 적절한 방식 전류가 공급되어 방식이 되고 있다는 것을 알 수 있다. 방식 전류 측정결과와 동일하게 육지 쪽에 위치한 교각에서보다 해안가 쪽의 교각에서 상대적으로 높은 방식전류밀도 값을 나타내었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 해안가 쪽 교각은 상대적으로 비저항이 낮기 때문에 양극으로부터 높은 전류를 철근에 공급하였기 때문으로 사료된다.

### 3.3 복극량 측정결과

복극량은 외부 환경에 의한 전압강하 (IR drop)를 배제한 금속의 순수한 방식 성능을 판단할 수 있는 방식 기준이다.

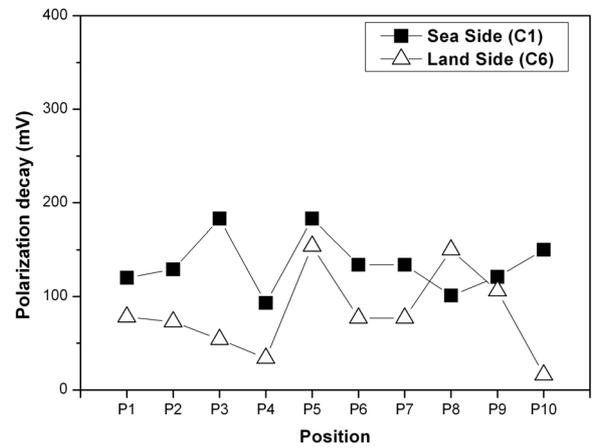


Fig. 8. Depolarization Potential of piers (depending on sea and land side).

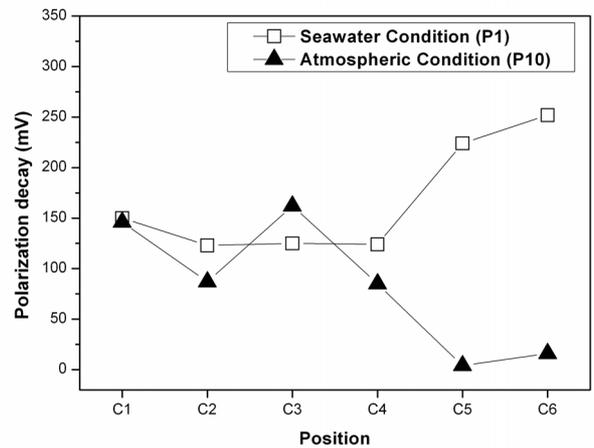


Fig. 9. Depolarization potential of piers (depending on atmospheric or seawater conditions).

철근 콘크리트의 경우 NACE SP0290 기준에 따른 100 mV 복극량 기준이 가장 많이 사용되고 있다.<sup>12)</sup> 본 교량의 경우에도 100 mV 복극량 기준을 적용하여 방식 성능을 평가하였다. 그림 8은 해안가 및 육지 방향에 위치한 교각의 복극량을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 해안가 방향에 위치한 교각의 경우 100 mV 이상의 복극량 값을 나타내었다. 하지만 육지 방향에 위치한 교각의 경우 전반적으로 100 mV 이하의 복극량을 나타내었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 염분량의 차이로 인한 콘크리트 비저항 변화 때문이라고 사료된다. 그림 9는 교각의 위치에 따른 복극량을 나타낸 그래프이다. P10 교각의 경우 설치위치상 전체적으로 대기 중에 폭로되어 있었다. 반면 P1 교각의 경우는 해수중에 침지되어 있었다. 그림 9와 같이 해수중에 침지되어 있는 P1 교각의 경우 모두 100 mV 이상의 복극량을 나타내었다. 하지만 P10 교각의 경우 몇몇 교각을 제외하고는 100 mV 이하의 복극량을 나타내었다. 희생양극식 음극방식의 경우

에는 비저항이 높은 지역에서는 적용이 제한되는데 본 경우에서도 비저항이 높은 환경인 대기중에 폭로되어 있는 교각에서는 100 mV 이하의 복극량을 나타내고 있으므로 이 교각은 콘크리트의 높은 비저항에 의해 방식전류의 공급이 억제되어 미방식 되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

남해안의 실제 철근콘크리트 교량에 Zn-Mesh 희생양극식 음극방식을 적용하여 방식상태를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 시공 완료 후 3년이 경과한 이후 육안검사 결과 전반적으로 콘크리트 표면에 균열의 흔적은 없었고, 시공 전과 유사한 외관을 유지하였다.

2) 모니터링 센서에 의한 방식전류밀도의 측정결과 전체적으로  $10 \text{ mA/m}^2$  이상의 방식전류가 공급되었다. 설계 당시 방식전류밀도를  $15 \text{ mA/m}^2$ 로 설정하였고  $10 \text{ mA/m}^2$  이상의 방식전류가 공급되는 것으로 보아 교각이 적절하게 방식되고 있다는 것을 판단할 수 있었다.

3) 복극전위 측정결과 교각의 설치 위치에 따라서 방식특성이 다르게 나타났다. 대기중에 폭로되어 있는 교각보다는 해수에 인접한 교각에서 높게 나타났으며, 해안가 방향의 교각에서는 100 mV 이상의 복극전위 값을 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Saleem, M. Shameem, S. E. Hussain, and M. Maslehuddin, *Construct. Build. Mater.*, **10**, 209 (1996).
2. B. Sederholm, and J. Almqvist, *NACE International*, **Paper No. 09203**, 1 (2009).
3. G. Blanco, A. Bautista, and H. Takenouti, *Cement Concr. Compos.*, **28**, 212 (2006).
4. M. Raupach, B. Elsener, R. Polder, and J. Mietz, European Federation of Corrosion Publications (2007).
5. T. Tsuru, *Corros. Sci.*, **9**, 233 (2010).
6. I. R. Sohn, J. C. Park, and J. S. Kim, *Corros. Sci.*, **9**, 259 (2010).
7. K. J. Kim, M. H. Lee, and K. M. Moon, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **18**, 23 (2006).
8. L. Bertolini, and E. Redaelli, *Corros. Sci.*, **51**, 2218 (2009).
9. L. Bertolini, F. Bolzoni, T. Pastore, and P. Pedferri, *NACE International Conference*, **Paper No. 244**, 1 (1997).
10. L. Bertolini, M. Gastaldi, M. P. Pedferri, E. Redaelli, *Corros. Sci.*, **44**, 1497 (2002).
11. L. Bertolini, Proceedings of the European Workshop Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures, Queens University, 28-31 August, p.107 (2000).
12. NACE International SP 0290, Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures (2007).