

철근 콘크리트 구조물용 다기능 멀티센서의 부식 모니터링에 관한 연구: Part 1

진 충 국¹ · 정 진 아^{2,*} · 경 은 진³

^{1,3}한국해양대학교 기관시스템공학과

^{2,*} 한국해양대학교 운항훈련원

(2012년 11월 26일 접수, 2012년 12월 28일 수정, 2012년 12월 28일 채택)

A Study on the Corrosion Monitoring of Multi-functional Sensors for Reinforced Concrete Structures: Part 1

Chung-Kuk Jin¹, Jin-A Jeong^{2,*}, and Eun-Jin Kyoung³

^{1,3}Department of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{2,*} Sea Training Center, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received November 26, 2012; Revised December 28, 2012; Accepted December 28, 2012)

This study represents the result of corrosion monitoring on reinforced concrete specimens by means of multi-functional corrosion monitoring sensors. To confirm the effectiveness of the sensors, eight different kinds of condition were adopted. Test factors were corrosion potential, current, corrosion rate, resistivity, and temperature, which were monitored with the sensors. Through this study, judging corrosion of steel in concrete with single corrosion factor such as corrosion potential was difficult, because many other factors can have an influence on the reaction of corrosion. By using three different kinds of sensors, it could enhance the accuracy of corrosion monitoring.

Keywords : corrosion sensor, monitoring, reinforced concrete, corrosion potential

1. 서 론

철근 콘크리트는 해양 환경에서 반영구적이고 내구성이 높으면서도 상대적으로 저렴하기 때문에 해상 교량이나 침매 터널은 물론 항만 부두와 같은 대형 콘크리트 구조물에 널리 쓰이고 있다. 그러나 해양 환경에 노출된 철근 콘크리트는 그 구조물의 설계 수명 동안에 심각한 열화 과정을 거치게 되므로 수많은 보수를 필요로 한다. 많은 경우에는 철근 콘크리트의 부식 손상으로 인하여 설계 수명을 다하지 못하기도 한다.¹⁾

이미 철근 부식이 시작된 경우에는 보수 공사를 하더라도 반복적으로 부식 손상이 발생하기 때문에 부식문제에 대한 완전한 해결이 어렵다. 게다가 이를 처리하는 과정은 상당한 기간과 비용이 소요되기 때문에 철근의 부식을 조기에 감지하여 대책을 수립하는 것이 매우 중요한 문제이다.^{2),3)} 근래에는 열악한 부식 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 예방적 유지 관리 차원에서 구조물 내부의 철근 부식을 모니터링 함으로써 심각한 문제로 발전하지 않도록

하는 것이 중요시 되고 있다. 그러나 철근 콘크리트는 부식의 측정 및 분석에 많은 어려움이 있고, 측정 오류에 의한 오판의 가능성이 보고되는 등 전체적인 부식상태 진단에 있어서 많은 문제점들이 지적되고 있다.⁴⁾

콘크리트와 같은 불균일한 환경에서의 부식 열화 과정을 모니터링하고, 정량적인 철근의 부식상태를 확인하기 위해서는 정확한 측정과 세밀한 분석이 필요하다.⁵⁾ 그러므로 본 연구에서는 다양한 부식성 환경에 노출된 철근 콘크리트 시험편의 부식모니터링을 위한 기초 연구로 단기능 센서의 한계성과 다기능 멀티센서의 기능을 연구하여 다기능 멀티센서의 신뢰성을 확인하고 다양한 부식성 환경에서의 부식 데이터를 확보하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

본 연구의 시험편은 부식 센서를 통한 모니터링에만 집중하기 위하여 다기능 멀티센서(Multi-functional sensor, MF sensor)를 매입한 소형 콘크리트 시험편으로 제작하였다. 시험편의 크기는 28 cm×20 cm×14 cm(가로×세로

* Corresponding author: jina@hhu.ac.kr

×높이)이며, 다기능 멀티센서를 Fig. 1에서와 같이 수평으로 배치하였다. 시험편마다 각기 다른 부식성 환경조건을 형성하기 위해 시험편 상부에 수조를 설치하였다. 부식성 인자들이 수조를 통하여 시험편 하부로, 즉 수직방향으로 침투하도록 수조를 설치한 시험편 상부 및 시험편 하부를 제외한 나머지 시험편 표면에 에나멜을 5회 도포하였다. 제작된 수조의 크기는 25 cm×18 cm×9 cm(가로×세로×높이)이며, 실리콘을 이용하여 시험편에 부착하였다.

다기능 멀티센서는 부식전류센서, 부식전위센서, 부식속도센서, 콘크리트비저항센서 및 온도센서로 구성되어 있다. 부식전류센서는 10 cm 깊이(상부 표면 기준)에 9 cm×9 cm(가로×세로)의 스테인리스 판을 설치하였고, 직경 1 cm, 길이 4 cm의 원형 철근 4개를 스테인리스 판 상부에 높이별로 설치하였다. 각각의 철근들이 서로에게 영향을 주지 않도록 하기 위해서 서로 겹치지 않도록 사방으로 위치하도록 하였으며, 4개의 철근들은 각각 3, 4, 5, 6 cm 깊이(상부 표면 기준)로 설치하였다[Fig. 2 (b)]. 나머지 센서들은 부식전류센서와 수평으로 4 cm 깊이(상부 표면 기준)에 설치하였다. 스테인리스 판, 4개의 철근, 부식속도센서, 부식전위센서, 콘크리트비저항센서 및 온도센서의 높이 및 위치는 스페이스(spacer)를 이용하여 해당 위치에 고정하였으며 시멘트 몰탈 타설 시 센서의 위치가 이동되는 것을 방지하기 위하여 절연 테이프 및 실리콘을 이용하여 고정하였다.

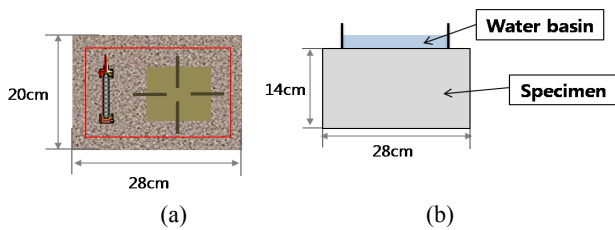


Fig. 1. Plan of specimen with dimension.

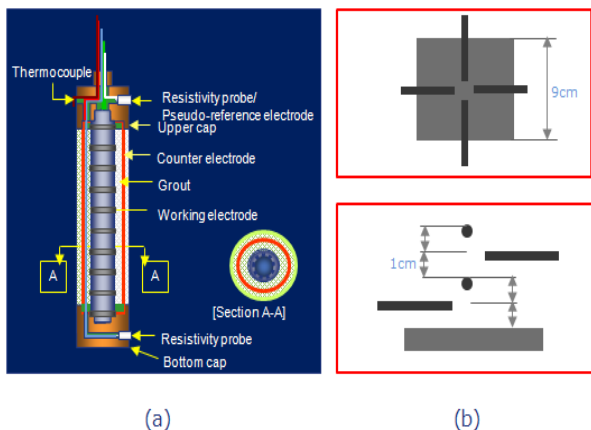


Fig. 2. Plan of sensors with dimension (a) MF sensor, (b) Galvanic current & potential sensor.

스테인리스 판 및 철근과 전선의 연결은 접촉저항을 최소화하기 위해 용접하여 연결하였다. 또한 용접 부위가 실험에 영향을 주지 않도록 열수축튜브(Heat shrink tube)를 사용하여 밀봉하였다. 배합 시 사용된 재료는 일반 시중에 판매되고 있는 포틀랜드 시멘트, 모래, 수돗물을 사용하였으며 시멘트, 모래, 물을 1:2:0.5의 비율로 배합한 몰탈을 사용하였다. 타설 시 진동기를 이용하여 내부에 남아있는 기포를 제거하였고, 양생 2주 후 거꾸집을 제거하였으며, 30일의 양생기간 후 부식실험을 시작하였다.

2.2 실험방법

실험 환경으로는 Table 1에서 나타난 실험 조건과 같이 시험편의 수조를 통하여 대기, 청수, 3% 염수, 15% 염수의 4가지 환경 조건을 형성하였다. 실험 조건으로 주어진 환경으로 청수는 일반 수돗물을 그대로 사용하였으며, 염수는 3% 염분량을 기준으로 수돗물에 정제염(NaCl)을 첨가하여 제작하였고, 부식 속도가 가속화 되도록 15% 염수를 제작하여 비교 환경을 형성하였다.

각 환경별로 실험실 실내 온도(20 °C)와 가혹한 환경의 온도(40 °C)로 구분하여 실험하였다. 총 8개의 시험편으로 가혹한 환경(40 °C)의 시험편들은 항온 실험 장치에 넣어 부식성 환경을 유지시켰다. 가혹한 환경(40 °C)의 시험편 중 15% 해수 시험편에는 철근콘크리트 전위측정용으로 사용되는 기준 전극(ERE-20)을 함께 매입하여 가장 가혹한 환경 내에서 기준 전극의 성능 검증과 더불어 다른 측정 데이터와 비교분석하였다.

다기능 멀티센서의 다양한 기능을 이용하여 4 cm 깊이에서의 부식 전위, 콘크리트 비저항, 부식 속도 등을 측정하여 부식 진단을 하였고, 콘크리트 상부 표면으로부터 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm 깊이에서 각 철근의 전위를 측정함으로써 시간이 흐름에 따른 부식 진행 상태를 모니터링 하였다. 또한, 10 cm 깊이(콘크리트 상부 표면 기준)에 설치한 스테인리스 판을 이용하여 부식이 진행된 철근과의 갈바닉 부식전류를 측정하였다.

Table 1. Environmental condition

Temperature	Environment	Title
Lab. temp. (20°C)	Atmosphere	Lap.AIR
	Fresh water	Lap.FW
	3% Salt Water	Lap.SW
	15% Salt Water	Lap.15%SW
40°C	Atmosphere	H.AIR
	Fresh water	H.FW
	3% Salt Water	H.SW
	15% Salt Water	H.15%SW

전위측정은 해수용으로 사용되는 염화은 기준전극(Silver/silver Chloride Reference Electrode)으로 실시하였다. 부식전류의 측정은 센서 각 철근의 전위를 측정하여 스테인리스 판(음극)의 전위보다 낮게 측정되는 시점부터 실시하였다. 철근의 전위가 스테인리스 판(음극)의 전위보다 높으면 부식전류 측정 시 스테인리스 판이 양극이 되어 스테인리스 판에서 철근 쪽으로 부식전류가 흐르게 되는 현상이 발생될 수 있기 때문에 철근과 스테인리스 판(음극)의 전위를 비교 측정 후 부식전류를 측정하였다.

부식속도는 Gamry Potentiostat을 이용한 3전극 시스템으로 측정하였다. 비저항은 Nilsson Soil Resistivity Meter를 이용하여 2핀 방법을 통해 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 부식전위 측정 결과

Fig. 3은 40 °C 온도 환경 조건에서의 H.15%SW 시험편의 깊이별 부식전위 변화를 나타낸 그래프이다. 철근 전위 측정을 위해 사용되는 ERE-20 기준전극은 H.15%SW 시험편에 같이 매입하여 성능 평가를 실시하였다. 초기 철근 전위의 값은 6 cm 깊이에서 가장 낮았으며 나머지 철근의 전위는 -150 ~ -200 mV vs. SSCE로 비슷하였다. 400시간 경과 후 철근 전위는 6 cm 깊이가 가장 낮았으며 5 cm 깊이, 4 cm 깊이, 3 cm 깊이의 순으로 낮게 나타났다. 초기에는 철근 전위가 철근 표면의 상태, 콘크리트 상태 등 여러 가지 인자들로 인해 고유의 전위를 가지고 있었으나, 시간의 흐름에 따라 해수의 염분이 침투되어 콘크리트 표면에서 가장 가까운 부분에서부터 부식이 진행되어 전위가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 철근들의 부식전위는 시간이 흐름에 따라 부식이 진행되어 전위가 낮아지는 경향을 나타내었는데 반해 ERE-20기준 전극의 전위는 15% 염수 환경에서

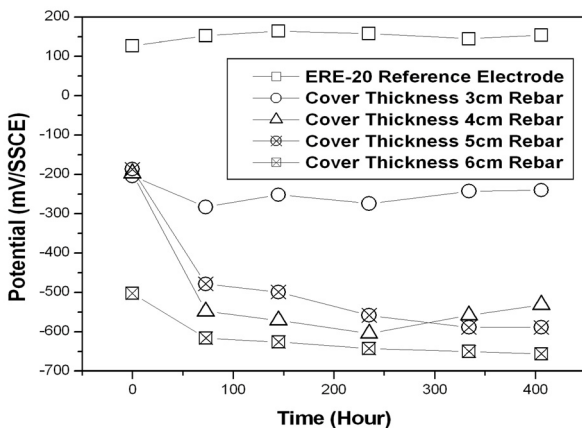


Fig. 3. Potential variations of H.15%SW specimen at temperature of 40 °C.

약 400 시간동안 약 150 mV vs. SSCE 부근의 전위를 유지하였다. 즉 ERE-20 기준 전극을 고 염분 환경에서 사용하여도 전위변화가 없기 때문에, 염분에 의한 철근 전위의 변화는 ERE-20 기준전극을 통해 정확하게 관찰할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 부식전류 측정 결과

Fig. 4는 실험실 온도에서 15% 염수 환경 조건에 노출된 시험편의 부식전류 측정결과를 나타낸 그래프이다. 시험편 상부 표면에서부터 가장 가까운 거리에 설치된 3 cm 깊이의 철근의 부식전류는 초기부터 60 μ A의 값이 측정되었으며, 시간이 흐를수록 부식전류량이 증가하여 약 400시간 경과 후에는 155 μ A로 초기 부식전류량의 약 2.5배까지 증가하였다.

4개의 철근 중 시험편 상부 표면에서 가장 먼 거리에 설치된 6 cm 깊이의 철근의 부식전류는 약 350시간이 흐른 뒤에야 측정이 가능하였으며, 그 값은 약 15 μ A를 나타내었다. 190시간이 지난 후부터 6 cm 깊이(상부 표면 기준)의 철근의 전위는 스테인리스 판(음극)의 전위 부근까지 낮아졌으나 그 전위차가 크지 않아 부식전류가 측정되지 않았고 전위차가 약 150 mV 이상 나타난 350시간 경과한 후에야 부식전류의 측정이 가능하였다.

부식이 개시된 철근에서는 특정 값 이상의 부식전류가 흐르게 되어 부식을 판단할 수 있으나 부식이 시작되지 않은 철근(양극)과 스테인리스 판(음극) 사이에도 미세한 갈바닉 전류가 흐르기 때문에 특정 값 이상이라는 불확실한 기준으로 부식여부를 판단하기에는 역부족이다. 또한 구조물에 포함되어 있는 센서의 갈바닉 전류는 용존산소량, 습도, 수분량, 온도, 콘크리트 저항 등 다양한 많은 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 단순히 갈바닉에 의한 부식전류만으로는 철근(양극)에서의 정확한 부식 판단이 어렵다고 판단된다.

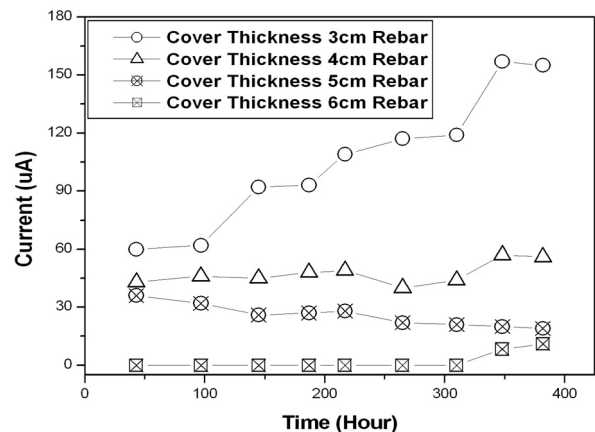


Fig. 4. Galvanic current variations of Lap.15%SW Specimen at temperature of 20 °C.

3.3 부식속도 측정 결과

Fig. 5는 실험실 온도에서 대기, 청수, 3% 염수, 15% 염수환경에 노출된 시험편의 부식속도 측정결과를 나타낸 그래프이다. 실험 초기에는 전체 시험편에서 유사한 부식속도를 나타내었다. 하지만 200시간 경과 후, 대기 및 청수 환경에서의 부식속도는 거의 변화가 없었으나 염분을 포함한 환경에서는 부식속도가 크게 증가하였다. 대기 및 청수 환경에 노출된 시험편은 400시간이 경과한 시점에서도 부식속도의 변화가 없었다. 이를 통해 시험편 내부에 설치된 센서 철근 표면의 부동태 피막은 견고하며 부식에 의한 피해가 없을 것이라는 것을 추측할 수 있었다. 하지만 염분이 포함된 환경에서는 400시간 경과 후 부식속도가 크게 증가하였다. 특히 실험 조건 중 염분을 가장 많이 함유한 실험환경인 Lap. 15SW 시험편은 초기에 비해 부식속도가 약 25배 증가하였다. 이는 시간 경과에 따라 부식성 인자인 염소 이온 및 산소에 의한 부식반응이 부식 속도에 큰 영향을 미친 것이라 판단된다.

Fig. 6은 Lap.15%SW와 H.15%SW 시험편에 설치한

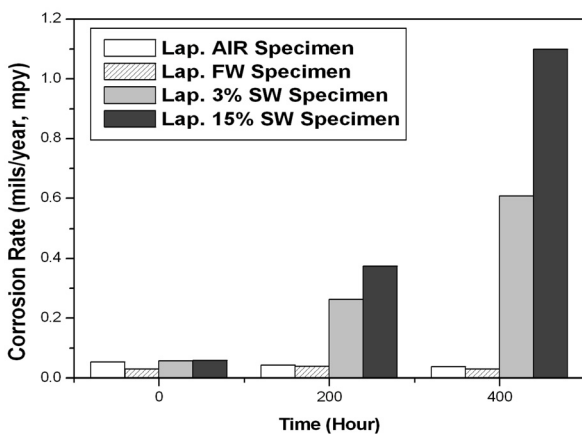


Fig. 5. Corrosion rate variations of specimens at temperature of 20°C.

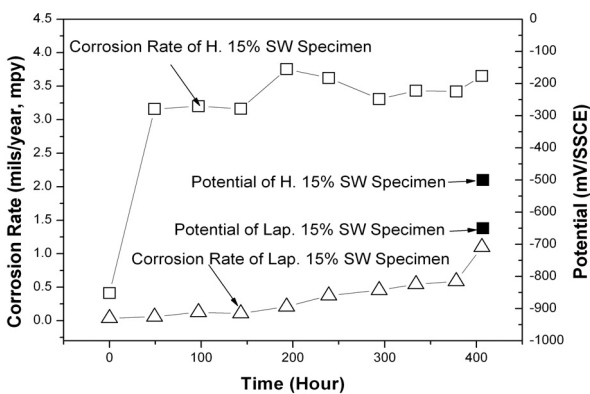


Fig. 6. Corrosion rate and potential results of specimens.

MF sensor에서 측정된 부식전위 및 부식속도 변화를 나타낸 그래프이다. 400시간이 경과한 후에도 불구하고 시험편 상부 표면에서부터 6 cm 깊이에 설치된 철근의 전위는 Lap.15%SW가 H.15%SW 시험편보다 약 150 mV 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 부식속도 측정결과와 상반되는 결과이다. 즉, 부식속도가 높다고 해서 항상 부식속도가 낮은 조건에서의 부식전위보다 전위가 낮은 것이 아니라는 것을 나타낸다. 그러므로 콘크리트 내의 철근의 경우 부식속도 및 전위의 데이터만 가지고 부식경향을 분석하기에는 많은 어려움이 있다는 것을 알 수 있다.

3.4 콘크리트 비저항 측정 결과

Fig. 7은 실험실 온도에서 대기, 청수, 3% 염수, 15% 염수환경을 조성한 시험편의 비저항 측정 결과를 나타낸 그래프이다.

Lap.AIR 시험편을 제외한 나머지 시험편은 2.5 kΩ 미만의 비교적 낮은 비저항을 나타내었다. Lap.AIR 시험편의 경우에는 나머지 시험편에 비해 상대적으로 높은 비저항을 나타내었지만, 400시간 경과 후에도 약 10 kΩ미만의 수치를 나타내었다. 국외의 연구에 의하면 2전극(2-probe) 시스템으로 측정된 콘크리트 구조물의 경우 비저항이 10 kΩ 이하는 부식 억제력이 없는 상태로 부식성이 매우 높은 환경이다. 부식전위, 갈바닉 전류, 부식속도 결과에서는 부식성이 매우 낮은 것으로 판단할 수 있었지만 비저항 측정 결과에서는 부식성이 높은 것으로 나타났다. 즉, 실험결과 비저항 측정 자료만으로 부식 상태를 판단하는 것에는 많은 문제가 있다는 것을 알 수 있다.⁶⁾

3.5 다양한 항목을 적용한 결과 분석

부식전위, 부식전류밀도, 부식속도, 비저항은 콘크리트 구조물의 부식경향을 판단할 수 있는 중요한 자료이다. 하지만

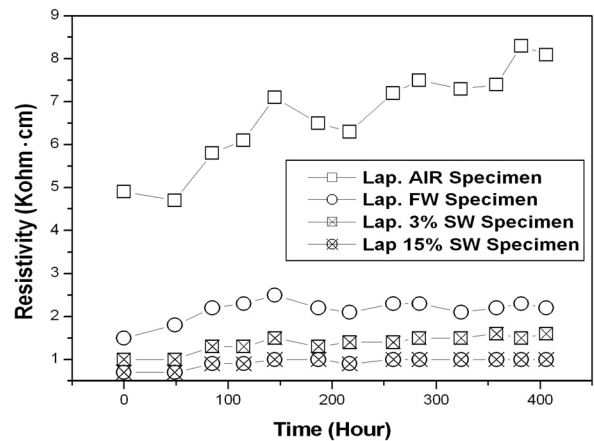


Fig. 7. Concrete resistivity variations of specimens at temperature of 20°C.

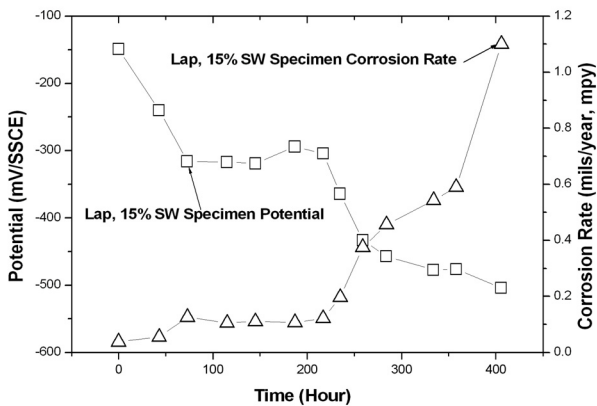


Fig. 8. Corrosion rate and corrosion potential variations of Lap. 15%SW specimen.

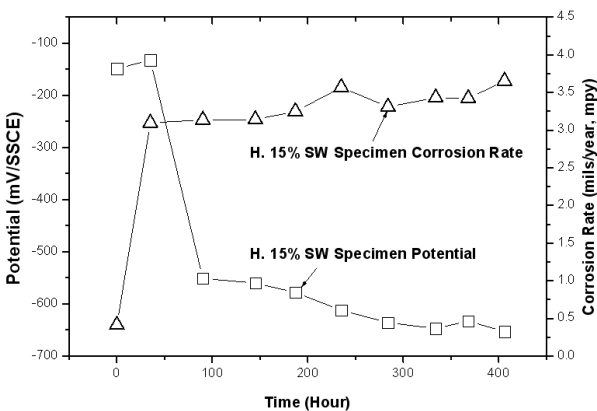


Fig. 9. Corrosion rate and corrosion potential variations of H. 15%SW specimen.

앞에서 설명한 바와 같이 각각의 요소는 부식을 진단함에 있어 한계를 가지고 있으며 한 가지 측정 요소만 가지고는 부식의 경향을 판단하기에는 무리가 있다. 따라서 여러 측정 요소의 복합적인 적용을 통하여 부식경향을 판단하는 것은 필수적이라고 할 수 있다.

Fig. 8과 9는 실험실 온도와 40 °C 온도에서 15% 염수환 경에 폭로된 시험편의 부식전위 및 부식속도를 나타낸 그래프이다.

Fig. 8과 9에서 볼 수 있듯이 부식 전위가 낮아지면 부식 속도는 증가하는 일반적인 경향을 나타낸 것을 알 수 있다. 실험실 온도에서는 100시간 경과 후 전위는 약 200 mV

감소하였다. 하지만 40 °C 온도에서는 100시간 경과 후 전위는 약 400 mV 감소하였다. 즉 온도가 높을수록 부식이 빨리 진행되어 전위가 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한, 전위가 감소할수록 부식속도는 높아지는 것을 알 수 있었다. 40 °C에 폭로된 시험편이 20 °C에 폭로된 시험편 보다 3~4배 높은 부식속도를 나타냈다. 즉 본 경우에서는 전위와 부식속도 데이터를 같이 분석함으로써 더 확실한 부식경향을 분석할 수 있었다. 부식을 진단함에 있어 다양한 항목을 적용하는 것이 단일 항목이 지닐 수 있는 오류를 최소화할 수 있다. 각 단일항목의 한계를 다른 항목들이 보완해 주어 정성적 및 정량적인 부식 진단이 가능해 짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 다기능 멀티센서를 통한 철근 콘크리트 부식 모니터링에 관한 기능 검증 및 신뢰성 확인과 데이터 확보를 목적으로 실험한 결과 센서의 성능 검증 및 그 한계와 대안 방법에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

철근 콘크리트 내부 철근의 부식을 진단할 때 부식전위, 부식속도, 부식전류, 콘크리트 비저항, 그리고 온도 등과 같은 단일 측정항목에 의한 부식진단에는 많은 오류가 포함될 수 있기 때문에 여러 가지 항목을 혼합하여 측정함으로써 종합적인 판단에 의한 부식진단을 통해 오류를 최소화할 수 있었다. 부식전위 및 부식속도 등과 같이 적어도 2가지 이상의 중요한 항목을 측정하여 서로의 오류를 보완함으로써 신뢰성 있는 부식진단이 가능해진다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Jin-A Jeong, Myung-Hoon Lee, and Ki-Joon Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **5**, 45 (2006).
2. Jin-A Jeong and Ki-Joon Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 77 (2012).
3. J. Broomfield, K. Dacies, K. Hladky, and P. Noyce, *NACE Corrosion Conference*, Paper No.03387 (2003).
4. M. Raupach, B. Elsener, R. Polder, and J. Mietz, *European Federation of Corrosion Publications*, **38**, 120 (2007).
5. S. Muralidharan, T. H. Ha, J. H. Bae, Y. C. Ha, H. G. Lee, and D. K. Kim, *Measurement*, **40**, 600 (2006).
6. J. P. Broomfield, *E & FN SPON*, London and New York, 1st edition, 62 (1997).