

과도전자탐사법에 의한 모르타르 중의 코팅 철근의 부식 측정 방법 개발*

이 상 호** · 한 정 섭***
(99년 4월 22일 접수)

The Development of Measuring Method of Coated Steel Corrosion in Mortar
by Transient Electro-Magnetic(TEM) Method

Sang-Ho Lee* · Jeong-Sub Han**

Key Words : Coated Steel Corrosion(코팅철근의 부식), Transient Electro-Magnetic Method(과도전자탐사법), Secondary Electro Motive Force(2차 기전력)

Abstract

To study measurement of coated steel corrosion in mortar, a transient electro-magnetic(TEM) method was adapted. The sensors were made of enamelled wire with diameter of 0.25mm(transmitter), 0.1mm(receiver) and the secondary electro motive force(EMF) was measured with SIROTEMIII. The sensors configuration was used as in loop configuration. After coated steels were corroded by the salt spray during 3, 7, 15, 25days, they were embedded in mortar which were made from sand : cement : water ratio of 2 : 1 : 0.5 . To investigate coated steel corrosion in mortar, the sensors were used. (sensor1 - $T_x : 4\Omega$, $R_x : 10\Omega$, $3 \times 3\text{cm}$, sensor2 - $T_x : 8\Omega$, $R_x : 10\Omega$, $3 \times 3\text{cm}$, sensor3 - $T_x : 4\Omega$, $R_x : 10\Omega$, $6 \times 6\text{cm}$, sensor4 - $T_x : 8\Omega$, $R_x : 10\Omega$, $6 \times 6\text{cm}$). The obtained results showed that the secondary EMF was decreased with specimens of 3, 7days corroded coating steel in mortar and then increased with speccimens of 15, 25days corroded one. And it was confirmed that measurement of coated steel corrosion in mortar by a transient electro-magnetic(TEM) method is possible.

* 이 논문은 1997학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

** 동아대학교 해양공학과 박사과정

*** 종신회원, 동아대학교 토목·해양공학부 교수

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 안전성 진단에는 강도(압축, 휨, 인장), 피복 두께, 변위, 강성, 균열, 콘크리트 속의 수분, 철근 위치, 철근 직경, 철근 부식 등을 대상으로 하고 있다. 이중 철근 부식은 해양구조물 뿐만 아니라 철근콘크리트 구조물의 안전성 진단에 매우 중요한 요소이다.

콘크리트의 세공 속의 수분은 수산화칼슘 용액과 그 속에 약간의 수산화나트륨과 수산화칼륨을 함유한 용액으로서 존재하며 그 pH는 약 12.5이다¹⁾. 이러한 강알칼리성 환경에서 철근은 그 표면에 부동태 피막이라고 하는 20~60 Å 두께의 수산화물($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)로 보호되고 있다²⁾. 그러나 시간이 경과함에 따라 알칼리 성분의 용출과 탄산화에 따라 콘크리트의 알칼리도가 저하되거나, 콘크리트 내에 각종 유해 성분이 혼입되면 콘크리트는 열화되어 철근의 부동태 피막은 파괴되어 진다. 이때 철근의 표면에는 철이 이온화하는 산화반응(anodic reaction)과 산소가 환원되는 환원반응(cathodic reaction)이 일어나 부식 전지가 형성된다³⁾. 산화반응과 환원반응에 의해서 철의 표면에 수산화 제1철($\text{Fe}(\text{OH})_2$)이 석출된다. 이 화합물은 용존 산소에 의해 한번 더 산화되어 수산화 제2철($\text{Fe}(\text{OH})_3$)이 된다. 더욱이 이 화합물은 물을 잃어 FeOOH 또는 붉은 녹(Fe_2O_3)이 되고, 또 일부는 산화가 불충분한 채 검은 녹(Fe_3O_4)가 되어 철근 표면에 녹층을 형성한다. 철근 표면에 부식 생성물이 생성되면 체적이 팽창하기 때문에 철근과 콘크리트 사이의 결합력이 떨어지고, 콘크리트에 균열이 발생되고, 콘크리트의 피복이 박리됨으로써 심한 경우에는 구조물이 붕괴되는 현상이 일어나기도 한다.

콘크리트 중의 철근 부식을 측정하는 방법으로는 전기화학적 방법인 자연전위법^{4~6)}, 전기비저항법^{7~8)}, 분극저항법, 교류 임피던서법, 전기화학적 노이즈법 등이 있다. 이 중 half-cell을 이용하여 부식도를 작성하여 부식된 부분을 찾아내는 자연전위법을 가장 많이 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 철근에 도선을 연결시켜야 하므로 철근 콘크리트 구조물에 손상을 입히게 되고, 함수량에

따라 측정값이 좌우되기 때문에 측정 결과의 해석에 주의해야 하는 단점이 있다. 그리고 전기 비저항법은 4전극법으로 콘크리트 표면에 4개의 전극을 배치하여 두끝의 전극사이에 전류를 흘려 보내고 안쪽 2개의 전극사이에 전압을 측정하여 비저항을 구하는 방법이다. 그러나 현재 사용하고 있는 전기 비저항법 장치는 철근 콘크리트의 특정 깊이의 콘크리트의 비저항만을 측정하여 철근의 부식을 평가하는데 이 경우 콘크리트의 성질에 따라 매우 큰 차이를 나타낼 뿐만 아니라 철근의 부식 상태를 정확하게 파악하기 어렵다는 단점을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 비파괴 검사인 광물 탐사에 주로 사용되는 과도전자탐사법을 이용하여 처음으로 모르타르 중의 코팅 철근의 부식 정도 차이를 측정하고자 한다.

2. 과도전자탐사의 원리

과도전자(transient electro-magnetic)탐사법은 지하를 탐사하는 지구물리탐사 방법 중의 하나이다. 송신루프에서 자기장을 발생시키면 지하 전도체에 와전류가 생기고 이는 다시 수신루프에 유도 전류를 야기시킨다.

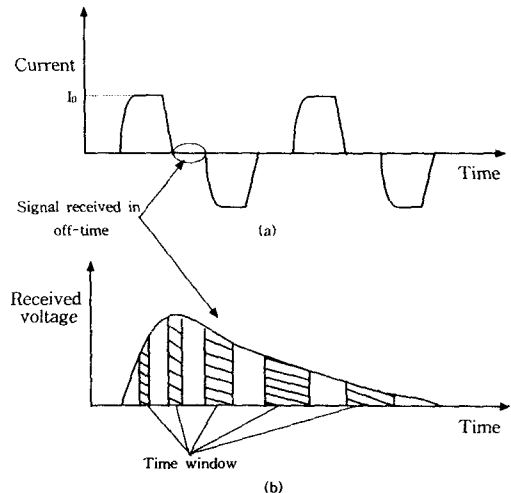


Fig. 1 (a) Transmitted signals, (b) Received signals.

Fig. 1(a)와 같이 송신루프에 I_0 의 전류를 보내다가 전류를 단절시키면, 이 전류 변화에 의하여 자장의 변화가 생기고, 이 변화가 수신 루프 및 지하전도체에 1차 기전력을 유도한다. 지하전도체 내의 이 기전력에 의한 전류의 변화는 Fig. 1(b)와 같이 수신루프에 2차 기전력을 유도하게 된다. 이 유도 기전력을 시간대별로 측정하여 지하의 암석의 종류 및 광물의 부존상태를 파악하게 된다.

수신루프에 유도되는 기전력⁹⁾은

$$e^T = e^P(t) + e^S(t) = M_{02}I_0\delta(t) - \frac{M_{01}M_{12}I_0}{L}\delta(t) + \frac{M_{01}M_{12}I_0}{L\tau}\exp(-t/\tau) \quad (1)$$

여기서,

e^T, e^P, e^S 는 총 기전력, 1차, 2차 기전력

M_{01} 은 송신루프와 지하전도체의 상호유도계수

M_{02} 는 송신루프와 수신 루프의 상호유도계수

M_{12} 는 수신루프와 지하전도체의 상호유도계수

$\delta(t)$ 는 Dirac delta 함수

L 은 지하전도체의 자기유도계수

τ 는 시정수를 말한다.

식 (1)의 첫째, 둘째 항은 송신전류를 단절시키고 동시에 유도되는 기전력으로서 측정이 어렵고 지하 전도체에 관한 정보를 별로 제공하지 못한다. 그러나 셋째 항은 수신루프에 유도되는 기전력을 시간이 지남에 따라 지수함수의 형태로 감쇠함을 뜻하는데, 이 현상은 측정할 수 있고 지하전도체에 관한 정보를 제공하기 때문에 과도전자탐사에서 가장 중요한 물리현상이다.

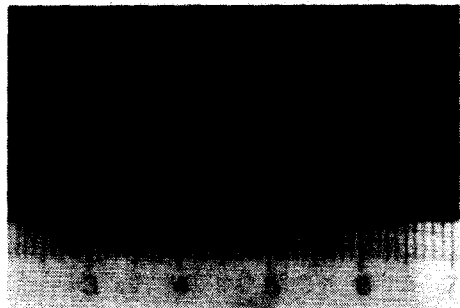
본 실험에서는 식 (1)의 셋째 항인 감쇠곡선을 이용하여 모르타르 중의 코팅 철근의 부식 차이를 측정하고자 한다.

3. 실험방법

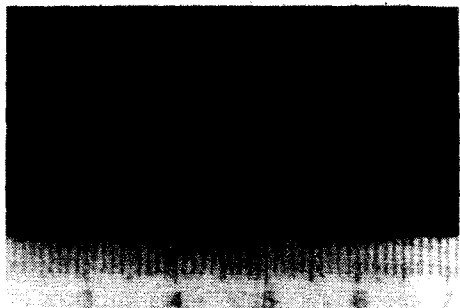
본 실험에 사용된 철근은 직경 13mm, 길이 54cm인 코팅된 이형철근을 사용하였다. 철근의

중앙부 10cm의 코팅을 제거하고 5% NaCl과 35°C로 조절된 염수분무기로 부식량을 조절하기 위해서 철근을 3, 7, 15, 25일 동안 각각 부식시켰다.

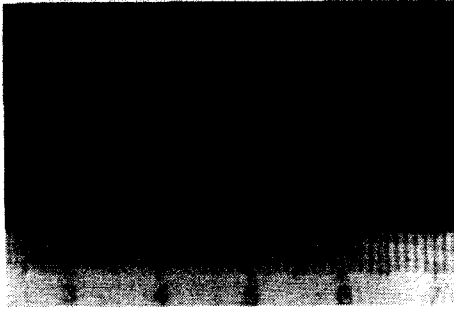
Fig. 2는 철근 표면이 3, 7, 15, 25일 부식된 사진이다. 3일 부식된 철근의 표면은 붉은 색을 띤 노란 색의 녹이 많이 형성되었고, 7일 부식된 것은 붉은 색의 녹이 많이 있으며, 15, 25일 부식된 것은 검은 색의 녹이 점점 많이 형성되어 있다. 염수분무기에서 철근은 꺼낸 뒤 철근 표면의 염수를 완전히 제거하기 위해서 흐르는 물로 철근을 충분히 세척하고, 철근을 거푸집에 넣은 뒤 모르타르를 타설한 후 진동테이블로 공기를 제거시킨 뒤 시편을 제작하였다. 사용된 모르타르는 모래, 시멘트 및 물의 비율이 2 : 1 : 0.5로 배합하였다. 제작된 시험편의 개략적인 형상을 Fig. 3에 나타내었고, 철근이 묻힌 깊이는 2cm 이며, 측정지점은 모르타르의 중앙 25cm 이고, 같은 지점에서 3번 측정하여 평균치를 취하였다.



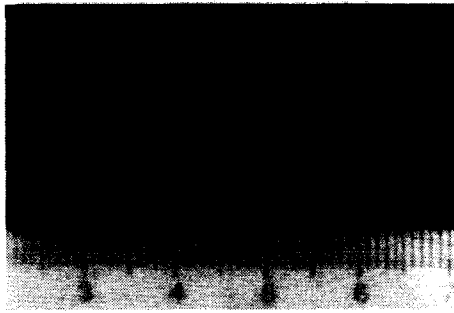
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2 Variations of steel surface with respect to corrosion time :(a) 3 days, (b) 7 days, (c) 15 days, (d) 25 days.

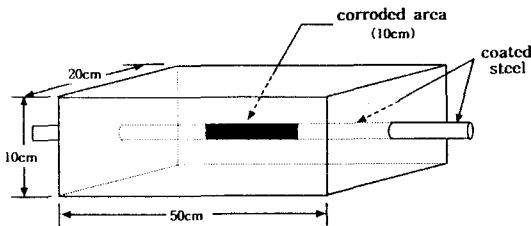


Fig. 3 Shape and dimensions of specimen.

측정기기로는 호주의 GEOEX사의 SIROTEMIII에 accelerator을 부착하여 turn off time(TOT)을 10~15배 단축시켜 짧은 시간대에서 2차 기전력을 측정할 수 있도록 하였다. window별 측정간격시간(time window) 종류는 매우 얇고, 높은 비저항 조사에 적합하고 짧은 시간대에서 2차 기전력을 측정할 수 있는 high resolution time을 선택하였

다. 1에서 35 window까지의 측정시간을 Table 1에 나타내었다. 송, 수신 코일의 배열은 송신코일 안에 수신코일이 들어가는 In loop 배열을 사용하였고, 송신코일(T_x)은 0.25mm, 수신코일(R_x)은 0.1mm의 절연코일과 아크릴을 사용하여 센서를 제작하였다. 본 실험에 사용한 센서의 종류를 Table 2에 나타내었다. 송신 전류를 일정하게 공급하고 센서에 열 발생을 억제하기 위하여 가변저항기를 장착하였다. 송신코일에 보내는 송신 전류는 1.4A로 일정하게 공급하였고, 측정 정도를 높이기 위하여 1024번 반복 측정을 하였다.

Table 1 The number of samples and sampling times with window number.

window number	number of samples	sampling times(μ s)	window number	number of samples	sampling time(μ s)
1	1	8	19	16	701
2	1	14	20	16	797
3	1	20	21	32	941
4	1	26	22	32	1133
5	2	35	23	32	1325
6	2	47	24	32	1517
7	2	59	25	32	1709
8	2	71	26	64	1997
9	4	89	27	64	2381
10	4	113	28	64	2765
11	8	149	29	64	3149
12	8	197	30	64	3533
13	8	245	31	128	4109
14	8	293	32	128	4877
15	8	341	33	128	5645
16	16	413	34	128	6413
17	16	509	35	128	7181
18	16	605			

Table 2 The characteristic of sensors used.

	sensor size(cm)		resistance (Ω)		coil diameter(mm)		turns	
	T_x	R_x	T_x	R_x	T_x	R_x	T_x	R_x
sensor 1	3×3	1×1	4	10	0.25	0.1	60	100
sensor 2	3×3	1×1	8	10	0.25	0.1	120	100
sensor 3	6×6	1×1	4	10	0.25	0.1	30	100
sensor 4	6×6	1×1	8	10	0.25	0.1	60	100

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 코팅된 철근을 포함한 모르타르와 코팅된 철근이 없는 모르타르 시편의 2차 기전력 값의 변화를 나타낸 것이다. 1~35 window 시간까지 2차 기전력 값들을 측정하였고, Y축의 단위 $\mu V/A$ (microvolt/ampere)는 송신코일에 흘렸던 단위 전류 당 수신코일에 유도된 2차 기전력 값을 나타낸다. 코팅된 철근을 포함한 모르타르 시편에서는 TEM 반응인 감쇠곡선이 나타났고, 모르타르 시편에서는 전도체가 없기 때문에 이상반응이 나타났다. 이러한 TEM 반응인 감쇠곡선을 이용하여 모르타르 중의 코팅된 철근의 부식 정도를 측정하였다.

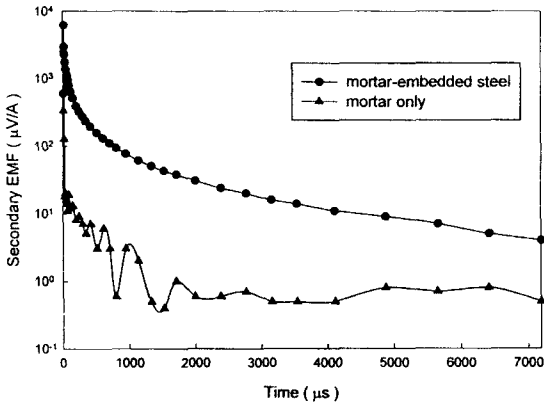


Fig. 4 The decay curves of secondary EMF with or without steel in mortar.

Fig. 5는 센서들의 변화에 따른 2차 기전력 값들의 변화를 나타낸 것이다. 시편은 코팅된 철근을 포함한 모르타르 시편을 사용하였고, 1~13 window 시간까지 나타내었다. 모든 센서에서 TEM 반응인 감쇠곡선이 나타났고 초기 window 시간대에서는 센서들에 의한 2차 기전력 값들의 차이가 크게 나타났고 후기 window 시간대로 갈수록 센서들의 2차 기전력 값의 차이가 작게 나타난다. 센서 1은 4 window(26 μs), 센서 2는 7 window (59 μs), 센서 3은 3 window(20 μs), 센서 4는 5 window(35 μs)부터 감쇠곡선이 나타났다. 이것은 송신코일과 수신코일의 간섭에 의한 노이즈현상

때문이다. 이 현상은 송, 수신코일의 저항이 클수록 노이즈가 생기는 window 시간대가 길게 나타나고, 같은 저항일 때 센서의 크기가 클수록 노이즈가 생기는 window 시간대가 짧아진다.

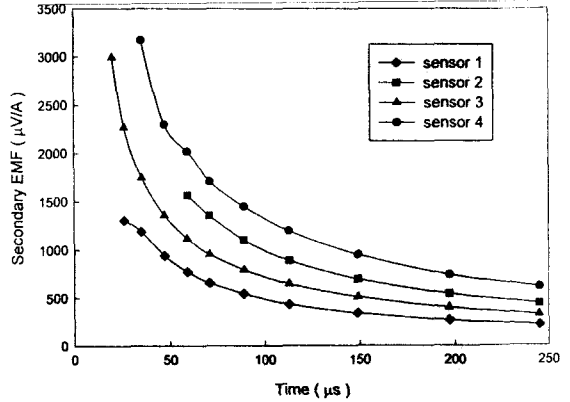


Fig. 5 Variations of secondary EMF with time by four different sensors.

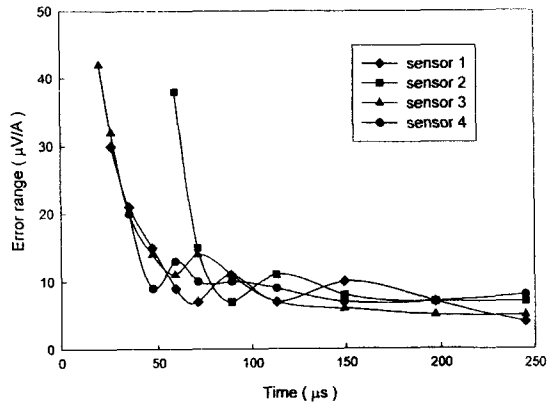


Fig. 6 Error range of secondary EMF with time by four different sensors.

Fig. 6은 센서들의 각 window 시간별 오차범위를 나타내었다. 시편은 코팅된 철근을 포함한 모르타르 시편을 사용하였고, 센서들을 시편의 중앙 위치인 25cm 지점에 고정시키고 10번씩 측정하여 최대 값과 최소 값의 차이를 나타내었다. 모든 센서들은 초기 window 시간대에서는 오차범위가 크고 후기 window 시간대로 갈수록 오차범위가 작아지는 것을 알 수 있다. 초기 window 시간대에서 모르타르 중의 코팅된 철근의 부식 정도의

차이가 크게 나타나지만 측정 정도를 고려해야만 한다. 그래서 본 실험에서는 오차 범위를 $15 \mu\text{V}/\text{A}$ 이하인 window 시간대부터 모르타르 중의 코팅된 철근의 부식 정도의 차이를 비교하였다. 센서 1, 3, 4는 6 window($47\mu\text{s}$), 센서 2는 8 window($71\mu\text{s}$)부터 데이터를 분석해야 한다.

Fig. 7은 부식량에 따른 2차 기전력 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig.7(a), (b), (c), (d)는 센서 1, 2, 3, 4을 이용하여 측정된 것으로 부식량에 따른 2차 기전력 값의 변화를 나타낸 것이다. 모든 센서에서 부식이 없고, 3, 7, 15, 25일 부식시킨 코팅된 철근을 포함한 모르타르 시편에서 TEM 반응인 감쇠곡선이 나타났고, 2차 기전력 값의 크기는 25일 부식시킨 시편이 가장 크게 나타났고, 그 다음은 부식이 시키지 않은 철근, 15일, 3일, 7일 부식시킨 코팅된 철근을 포함한 모르타르 시편 순

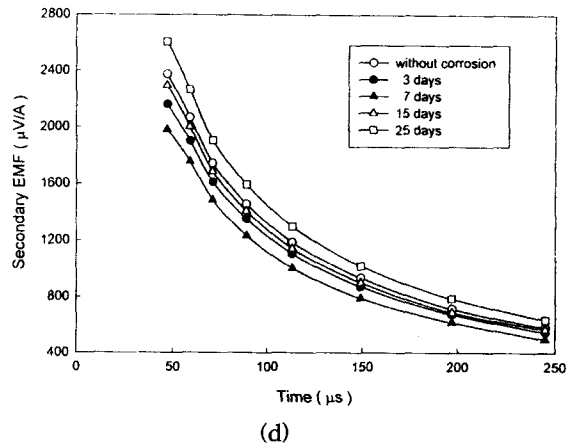
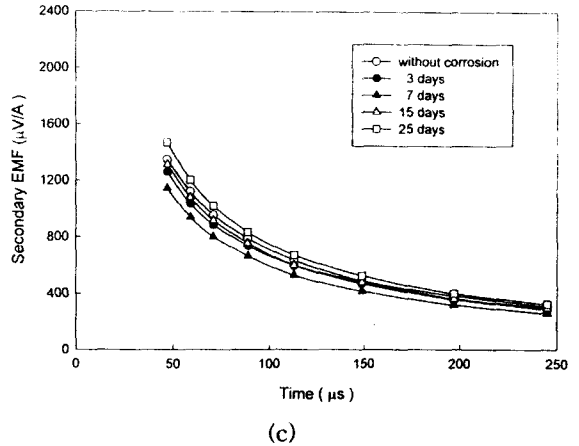
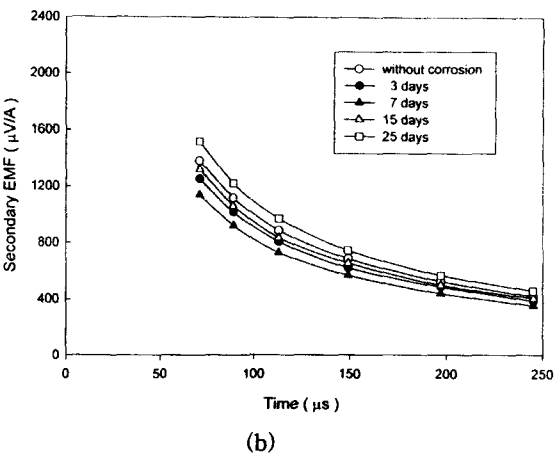
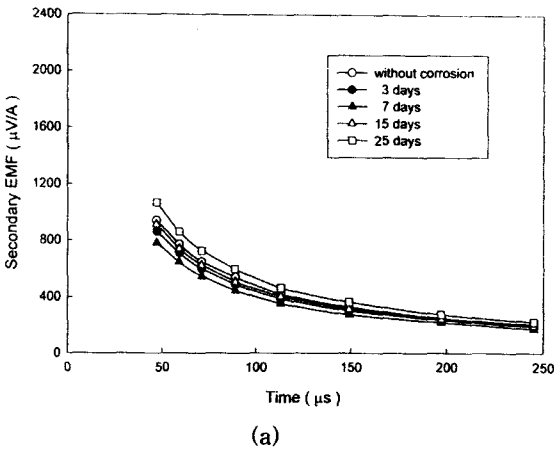


Fig. 7 Variations of secondary EMF with corroded time of coating steels : (a) sensor 1, (b) sensor 2, (c) sensor 3, (d) sensor 4

으로 나타났다. 그리고 센서 1, 3, 4에서는 6 window($47\mu\text{s}$), 센서 2에서는 8 window($71\mu\text{s}$)에서 모르타르 중의 코팅된 철근의 부식 차이가 크게 나타나다가 후기 window 시간대로 갈수록 부식 차이가 거의 나타나지 않았다. 그러므로 모르타르 중의 코팅된 철근의 부식 정도를 측정하기 위해서는 초기 window 시간대의 데이터를 분석해야 할 수 있다.

Fig. 8은 4개의 센서 중 모르타르 중의 코팅된 철근의 부식 차이가 가장 크게 나타난 센서 4의 6 window에서 부식량에 따른 2차 기전력 값의 변화를 나타내었다. 2차 기전력 값의 크기는 25일

부식(2609 $\mu\text{V}/\text{A}$), 부식시키지 않은 철근(2319 $\mu\text{V}/\text{A}$), 15일(2298 $\mu\text{V}/\text{A}$), 3일(2163 $\mu\text{V}/\text{A}$), 7일(1982 $\mu\text{V}/\text{A}$)부식시킨 코팅된 철근을 포함한 모르타르 시편 순으로 나타났다. 염수 분무기로 3, 7일 동안 부식시킨 코팅된 철근의 모르타르 시편에서 2차 기전력 값이 계속 감소하다가 15, 25일 동안 부식시킨 코팅된 철근의 모르타르 시편에서 증가하는 거동을 보이고 있다. 3, 7일 동안 부식시킨 코팅된 철근의 모르타르 시편에서 2차 기전력 값이 감소하는 이유는 부식이 계속됨에 따라 철근 표면에 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 혹은 $\gamma\text{-FeOOH}^{10}$ 등의 부식생성물이 생성되어 와전류가 약하게 생성되기 때문에 2차 기전력 값이 감소하는 것으로 판단되고, 15, 25일 부식시킨 코팅된 철근의 모르타르 시편에서 2차 기전력 값이 증가하는 것은 철근 표면의 부식생성물의 차이인 것으로 생각된다. 3일과 7일 동안 부식시킨 철근 표면은 붉은 색을 띤 노란 색의 녹이 형성되었으나, 15, 25일 동안 부식시킨 철근 표면은 검은 녹이 많이 형성되어 있었다. 검은 녹이 노란 색의 녹보다 와전류가 강하게 생성되기 때문으로 생각된다.

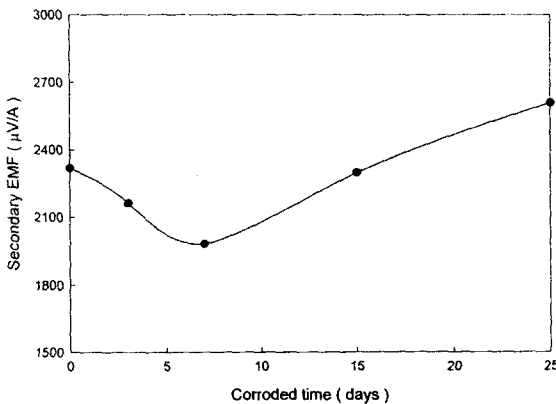


Fig. 8 Difference of secondary EMF with corroded time of coating steel at 6 window of sensor 4.

5. 결 론

과도전자탐사법에 의한 모르타르 중의 코팅된

철근의 부식 정도 측정에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 송신 코일과 수신 코일의 간섭에 의한 노이즈 현상은 센서 1에서는 1~3 window, 센서 2에서는 1~6 window, 센서 3에서는 1~2window, 센서 4에서는 1~4 window까지 생겼다. 노이즈 현상은 송,수신 코일의 저항이 클수록 window 시간대가 길게 나타나고, 같은 저항일 때 센서의 크기가 클수록 window 시간대가 짧게 나타났다.
- 2) 오차범위는 초기 window 시간대에서 크게 나타났고 센서1, 3, 4는 6window, 센서 2는 8 window부터 15 $\mu\text{V}/\text{A}$ 이하로 나타났다. 오차범위를 고려할 때 센서 4의 6 window에서 모르타르 중의 코팅 철근의 부식 차이가 가장 크게 나타났다.
- 3) 모르타르 중의 철근 부식 차이에 의해 2차 기전력 값의 변화가 생겼고, 2차 기전력 값의 크기는 25일 부식, 부식시키지 않은 철근, 15일 부식, 3일 부식, 7일 부식시킨 코팅 철근의 모르타르 시편 순으로 나타났다.

이상의 결과에서 볼 때 과도전자탐사법으로 모르타르 중의 코팅 철근의 부식 차이를 측정할 수 있음을 확인하였다. 그러나 현장에 적용하기 위해서는 모르타르 대신 콘크리트에 적용하는 연구가 앞으로의 과제라 하겠다.

참고문헌

- 1) Yonezawa, T., V. Ashworth and R.P.M. Procter, "Pore Solution Composition and Chloride Effects on the Corrosion of Steel on Concrete", National Association of Corrosion Engineers, Vol.44, No.7, pp.489~499, 1988
- 2) Sageo-Crentsil, K. K., F. P. Glasser., "Steel in Concrete", Mag. Concr. Res., Vol.41, No.149, pp.205~212, 1989
- 3) 小林豊治 外, "鐵筋腐食 診斷", 森北出版株式

- 會社, pp.1~5, 1993
- 4) Gonzales, J. A., E. Ramirez, "The Behaviour of Pre-Rustee Steel in Concrete", *Cem. Concr. Res.*, Vol.26, No.3, pp.501~511, 1996
 - 5) Spears, R. E., "The 80 Percent Solution to Inadequate Curing Problems", *Concrete International*, April, pp.15~18, 1993
 - 6) ASTM C-876, "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete", 1980
 - 7) Kellers, G. V. and F. C. Frischknecht, "Electrical Methods in Geophysical Prospecting", Pergamon Press, Oxford, pp.90~96, 1966
 - 8) Figg, I. W. and A. F. Marsden, "Development of Inspection Techniques for Reinforced Concrete", *Offshore Technology Report OTH 84205*, 1985
 - 9) 趙東行 등, "TEM 探查法の 國內適用性에 관한 研究", *韓國動力資源研究所*, 82-鑛物資源-2-12, 1983
 - 10) Misawa, T., K. Hashimoto and S. Shimodaira, "The Mechanism of Formation of Iron Oxide and Oxyhydroxides in Aqueous Solutions at Room Temperature", *Corrosion Science*, Vol.14, pp.131~149, 1974