

TEM 법에 의한 철근 부식 측정 센서 개발에 대한 기초 연구

이상호* · 한정섭**

*동해대학교 건축공학과, **동아대학교 토목·해양공학부

The Elementary Study on the Development of a Sensor for Measurement of Steel Corrosion by Transient Electro-Magnetic (TEM) Method

SANG-HO LEE AND JEONG-SEB HAN

*Department of Architecture Engineering, Tonghae University

**Division of Civil & Ocean Engineering, Dong-A University

KEY WORDS: Transient electro-magnetic method 과도전자탐사법, Secondary electro motive force 2차 기전력, Coincident loop configuration 동일루프배열

ABSTRACT: In order to measure steel corrosion in mortar by a transient electro-magnetic (TEM) method, the development of the sensors have been studied. The sensors were made of enamelled wire with diameter of 0.25mm and Acril. The sensor configuration was used as a coincident loop type. The secondary electro motive force(EMF) was measured with SIROTEMIII. The accelerator was equipped with the SIROTEMIII. The accelerator permits the transmitter to turn off approximately 10~15 times faster than normal. The high resolution time series used for very shallow or high resistivity investigation was selected. The steels were embedded in mortar which were made from sand : cement : water ratio of 2 : 1 : 0.5. The mortar specimen was 50cm long, 20cm wide and 10cm thick. To investigate steel corrosion in mortar, the sensors used were with $2 \times 2\text{cm}^2$ (3, 6, 9 Ω), $3 \times 3\text{cm}^2$ (3, 6, 9 Ω) and $6 \times 6\text{cm}^2$ (3, 6, 9 Ω). The obtained result showed that the sensor 8 ($6 \times 6\text{cm}^2$, 6 Ω) was the proper sensor for the measurement of steel corrosion in mortar.

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물을 장기간 사용하기 위해서는 구조물의 안전성을 진단하여 필요한 조치를 취하는 것이 필요하지만 대부분 철근 콘크리트 구조물은 강구조물과는 달리 강도만 충분하면 유지 관리 없이 반영구적으로 사용할 수 있다고 생각해 왔기 때문에 구조물의 안전성 진단을 거의 하지 않고 이용해 왔다고 해도 과언이 아니다. 그러나 최근에 들어 철근 콘크리트 구조물의 안전성 진단에 큰 관심을 보이고 있다.

철근 콘크리트 구조물의 안전성 진단에는 콘크리트의 압축 강도, 탄성계수, 피복두께, 변형과 균열, 콘크리트의 내부 결함, 콘크리트 중의 수분, 철근의 위치, 철근의 직경, 철근의 부식 등을 대상으로 하고 있다. 이 중 철근 부식은 철근 콘크리트 구조물의 안전성 진단에 매우 중요한 요소이다. 콘크리트 중의 철근 부식 상태를 판정하는 비파괴 검사 방법으로는 전기 화학적인 방법과 물리적인 방법이 있다. 전기 화학적인 방법으로는 철근의 자연 전위 측정으로 철근 부식 상태를 판정하는 자연전위법, 콘크리트의 비저항을 이용하여 철근 부식 상태를 판정하는 전기저항법, 미소 직류를 가하여 분극 저항을 구한 후 철근의 부식속도를 결정하는 분극저항법, 미소 교류를 가하고 철근의 저항 특성을 이용하여 철근의 부식속도를 결정하는 교류 임피던스법, 전위변동 스펙트럼 해석으로 철근의 부식상태와 부식속도를 추정하는 노이즈법 등이 있다. 이 중 자연전위법과 전기저항법이 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 방법이

다.

자연전위법은 철근과 조합전극(주로 포화 황산동 전극)을 도선으로 전압계의 단자에 접속하여 콘크리트 표면에서 철근의 전위를 측정하여 ASTM C-876의 평가 기준에 의해 콘크리트 중의 철근 부식 상태를 측정하는 방법이다. 그러나 이 평가 기준은 염해를 받는 교량의 상판과 같은 구조물에 대해서 적용한 것으로, 모든 환경의 철근 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 평가 기준은 아니다. 특히 염화물 피해로 인한 철근 부식 가능성이 큰 수중 철근 콘크리트 구조물에서는 이 평가 기준으로 철근의 부식 상태를 판정할 수 없다. 또한 철근에 도선을 연결시켜야 하므로 철근 콘크리트 구조물에 손상을 입히게 되고, 함수량에 따라 측정값이 좌우되기 때문에 측정결과와 해석에 주의해야 하는 단점이 있다.

그리고 전기저항법은 4전극법으로 콘크리트 표면에 4개의 전극을 배치하여 두 끝의 전극사이에 전류를 흘려 보내고 안쪽 2개의 전극 사이에 전압을 측정하므로써 콘크리트의 비저항을 구하여 철근 부식 평가 기준에 의해 콘크리트 중의 철근 부식 상태를 판정하는 방법이다. 그러나 이 방법은 콘크리트만의 비저항을 측정하므로 콘크리트의 성질과 함수량에 따라 비저항값의 차이가 크게 나타나므로 콘크리트 중의 철근 부식 상태를 정확하게 파악하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

물리적인 비파괴 검사 방법으로는 초음파법, 적외선법, 전자유도를 이용한 방법이 많이 사용되지만 현재까지는 콘크리트의 피복 두께와 콘크리트의 균열 및 내부 결함, 콘크리트 중의

철근의 위치, 철근 직경과 철근 간격 등을 검사하는데 그치고 있는 상황이다.

그러므로 비파괴 검사 방법으로서 콘크리트 중의 철근 부식 정도를 좀 더 정확하게 측정할 수 있는 방법이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비파괴 검사인 과도 전자탐사법을 이용하여 모르타르 중의 철근 부식 측정을 위한 센서 개발에 대한 연구를 하고자 한다.

2. 과도전자탐사법

과도전자(transient or time-domain electro-magnetic)탐사법은 Fig. 1과 같이 송신 루프(transmitter)에서 전자파를 발생시키면 지하전도체에 와전류(eddy current)가 생기고 이는 다시 수신루프(receiver)에 유도전류를 야기시킨다. 이 유도전류를 야기시키는 2차 유도기전력을 시간대별로 측정하여 지하의 암석 및 광물의 부존 상황을 파악하게 된다.

실제 탐사시스템을 Fig. 2에서처럼 송신(Tx)루프, 수신(Rx)루프, 및 지하전도체(C)루프로 구성된다고 가정하고, 상호유도계수를 각각 M_{01} , M_{12} , M_{02} 라 가정하자. 그러면 이 가정들에 의해서 표토층 및 모암의 존재가 무시되며, 변위전류의 존재도 무

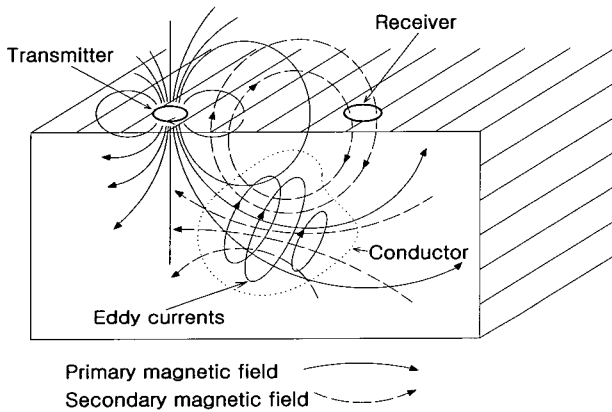


Fig. 1 Principle of transient electro-magnetic method

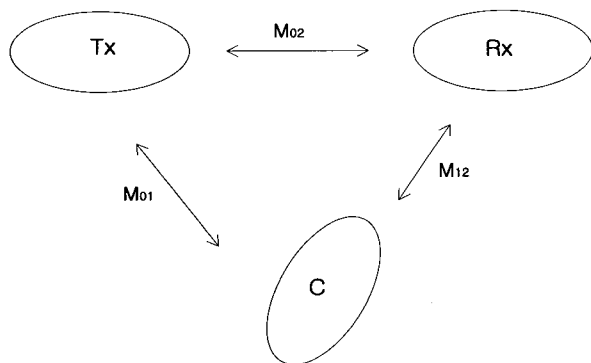


Fig. 2 Schematic diagram of TEM survey (M_{01} , M_{02} , M_{12} : mutual inductances)

시된다. 또한 실제 지하전도체루프는 각종 크기의 수없이 많은 루프로 구성될 것이나 단일 루프로 대치한 것이다.

송신(Tx)루프에 Fig. 3(a)와 같은 I_0 전류를 보내다가 $t = 0$ 인 순간에 전류를 단절시키면, 이 전류 변화에 의하여 자장의 변화가 생기고, 이 변화가 Fig. 3(b)에서와 같이 수신(Rx)루프 및 지하 전도체에 1차 기전력을 유도한다. 지하전도체내의 이 기전력에 의한 전류의 변화는 Fig. 3(c)와 같이 수신(Rx)루프에 2차 기전력을 유도하게 된다.

수신 루프에 유도되는 기전력은

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

여기서,

- e^T, e^P, e^S : 전체, 1차, 2차 기전력
- M_{01} : 송신루프와 지하전도체의 상호유도계수
- M_{02} : 송신루프와 수신루프의 상호유도계수
- M_{12} : 수신루프와 지하전도체의 상호유도계수
- $\delta(t)$: Dirac delta 함수
- L : 지하전도체의 자기유도계수
- τ : 시정수($\frac{L}{R}$)
- R : 지하전도체의 루프의 비저항

식 (1)의 첫째, 둘째 항은 송신전류를 단절시킴과 동시에 유도되는 기전력으로써 측정이 어렵고, 지하 전도체에 관한 정보를 별로 제공하지 못한다. 그러나, 셋째 항은 수신 루프에 유도되는 기전력이 시간이 지남에 따라 지수 함수의 형태로 감쇠함을 뜻하는데, 이 현상은 측정할 수 있고, 지하 전도체에 관한 정보를 제공하기 때문에 과도전자탐사에서 가장 중요한 물리 현상이다. 기전력의 감쇠 정도는 시정수(τ)에 관계되는

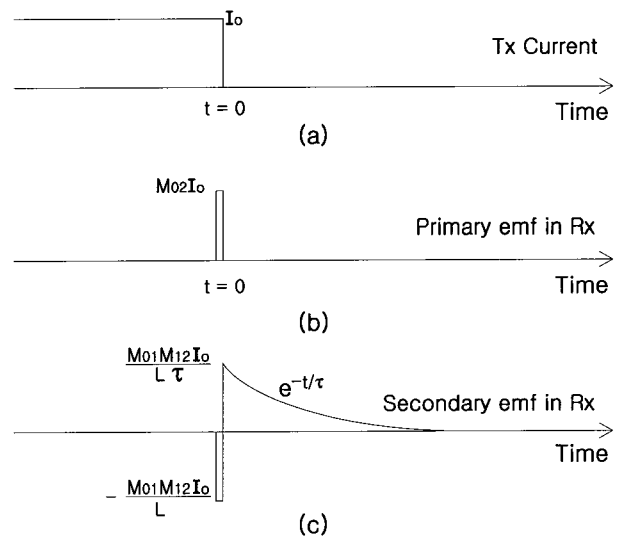


Fig. 3 Transient response of simplified TEM system

데, 시정수가 클수록 즉, R이 작거나 L이 클수록 유도 기전력은 서서히 감소한다. 시정수는 지하 전도체의 고유한 상수이며, 시정수에 대한 정보는 지하 전도체의 규모와 전기 전도체에 대한 정보를 제공한다.

본 실험에서는 식 (2.1)의 셋째 항인 감쇠곡선을 이용하여 모르타르 중의 철근 부식의 정도를 측정하기 위한 센서를 개발하고자 한다.

3. 탐사기기

본 실험에서는 호주의 Geo Instrument사에서 제작한 SIROTEMIII 기기를 사용하였다. SIROTEMII 기기는 1977년에 G. Buselli 박사팀이 소련의 MPPO-1를 모델로 개량 제조한 것으로 그 당시 한 측정 지점에서 수 천 회의 반복측정을 자동적으로 하여 평균 처리할 수 있다는 점에서 획기적이었다. SIROTEMIII기기는 SIROTEMII기기보다 샘플링 시간(sampling time)과 샘플링 시간간격이 단축되었고, 초기 delay time이 짧아졌으며, 측정정도를 많이 향상시킨 최근에 나온 측정 기기이다. 이 기기의 송신 전류 파형은 Fig. 4와 같이 양극의 구형파(bipola square wave)이고, 전류가 가해지는 시간(on-time)과 전류가 단절된 시간(off-time)은 같고 high resolution time series에서의 그 시간은 8.333 ~ 108.333ms이고, 선택된 Window 번호에 따라 8.33ms의 배로 증가한다. Table 1에 on-time 과 off-time의 시간을 나타내었다.

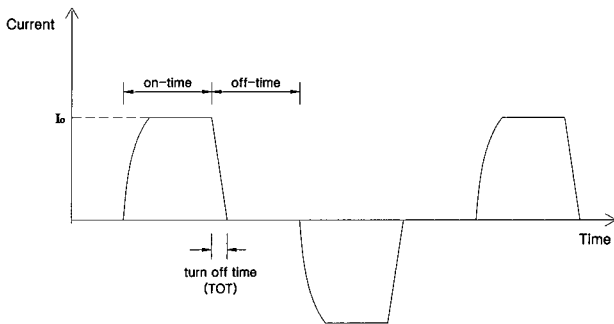


Fig. 4 Transmitter current waveform

Table 1 Transmitter on/off time at high resolution time series

Window number (finish window)	On-time (ms)	Off-time (ms)
1 ~ 35	8.333	8.333
36 ~ 40	16.667	16.667
41 ~ 43	25.000	25.000
44 ~ 45	33.333	33.333
46 ~ 47	41.667	41.669
48	50.000	50.000
49 ~ 50	58.333	58.333
51 ~ 52	83.333	83.333
53	108.333	108.333

정(+) on-time에 의한 off-time과 부(-) on-time에 의한 off-time에서 각각 수신된 데이터를 평균하여 1번 측정(1stack)으로 간주한다. off-time동안 수신코일(receiver)에서 유도된 2차 기전력이 Fig. 5와 같이 감쇠곡선으로 수신되어진다. 측정은 Window 시간별로 일정한 시간간격(sampling time interval)을 두고 이루어지며 Window 번호가 증가할수록 샘플링 시간은 두배씩 늘어난다.

Table 2 Window delay time and sampling time at high resolution time series

Window number	Number of samples	Sampling time(ms) (6 μs intervals)	Window delay time(ms)
1	1	0.008	0.008
2	1	0.014	0.014
3	1	0.020	0.020
4	1	0.026	0.026
5	2	0.032 ~ 0.038	0.035
6	2	0.044 ~ 0.050	0.047
7	2	0.056 ~ 0.062	0.059
8	2	0.068 ~ 0.074	0.071
9	4	0.080 ~ 0.098	0.089
10	4	0.104 ~ 0.122	0.113
11	8	0.128 ~ 0.170	0.149
12	8	0.176 ~ 0.218	0.197
13	8	0.224 ~ 0.266	0.245
14	8	0.272 ~ 0.314	0.293
15	8	0.320 ~ 0.362	0.341
16	16	0.368 ~ 0.458	0.413
17	16	0.484 ~ 0.554	0.509
18	16	0.560 ~ 0.650	0.605
19	16	0.656 ~ 0.746	0.701
20	16	0.752 ~ 0.842	0.797
21	32	0.848 ~ 1.034	0.941
22	32	1.040 ~ 1.226	1.133
23	32	1.232 ~ 1.418	1.325
24	32	1.424 ~ 1.610	1.517
25	32	1.616 ~ 1.802	1.709
26	64	1.806 ~ 2.186	1.997
27	64	2.192 ~ 2.570	2.381
28	64	2.576 ~ 2.954	2.765
29	64	2.960 ~ 3.339	3.149
30	64	3.344 ~ 3.722	3.533
31	128	3.728 ~ 4.490	4.109
32	128	4.496 ~ 5.258	4.877
33	128	5.264 ~ 6.026	5.645
34	128	6.032 ~ 6.794	6.413
35	128	6.800 ~ 7.562	7.181

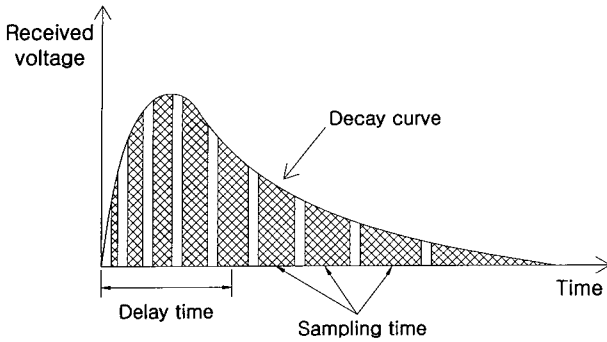


Fig. 5 Transient decay curve

이 기기의 최대 송신 전류는 10A, 송신루프와 수신루프의 최소 저항은 2Ω이고 한 지점에서 9,999번까지 반복측정을 자동적으로 행하고 이들 값을 평균한다. Delay time 종류는 composite, early time, standard time, high resolution time series의 4종류가 있으며, 본 실험에서는 샘플링 시간, 샘플링 시간간격과 delay time이 굉장히 짧아서 비저항이 높거나, 측정 깊이가 얇은 조사에 적합한 high resolution time series를 사용하였다. Table 2에 Window delay time과 샘플링 시간(sampling time)을 나타내었다.

본 실험에서는 초기 delay time의 2차 기전력 값이 중요함으로 SIROTEMIII기기에 accelerator를 장착하여 송신 전류를 완전히 끊는데 소요되는 시간(turn-off-time : TOT)을 10 ~ 15배 단축시켜 초기 Window 측정 시간대에서 발생하는 노이즈를 줄였다. 이 기기의 측정시간은 선택된 Window 번호와 반복 측정 횟수에 좌우된다. 즉 1~35 Window와 1,024번 반복 측정을 선택하였다면 Table 1에서 on-time과 off-time은 각각 8.333ms이며, 한번 측정은 on-time과 off-time이 각각 두 개이므로 33.332ms 걸리고, 1,024번 반복 측정이므로 측정시간은 34초 걸린다.

4. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 철근은 H철강에서 생산된 철근 콘크리트용 SD40 이형철근이며, 직경 13mm, 길이 54cm, 무게 520g으로 동일하게 제작하여 사용하였다. Table 3에 화학성분, Table 4에 기계적 성질을 나타내었다.

Table 3 Chemical composition of steel rebar(wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.29	0.16	1.21	0.029	0.029

Table 4 Mechanical properties of steel rebar

Yield strength (kgf/mm ²)	Ultimate strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
44	64	23

모르타르 시험편은 모래, 시멘트 및 물의 비율이 2 : 1 : 0.5로 배합하여 거푸집에 타설한 뒤 진동테이블로 공기를 제거하여 모르타르 피복두께(철근이 묻힌 깊이)가 각각 2, 3, 4cm로 제작하였다. 24시간 후 거푸집을 해체하여 공기 중 양생을 하였고, 모르타르 피복두께를 스위스의 PROCEQ사에서 제작한 자기감응식 철근 탐지기(Profometer 4)로 검증하였다. Fig. 6에 시험편의 개략적인 형상을 나타내었다.

과도전자탐사법은 깊이가 주로 수십 미터 내지 수백 미터인 지하 자원 및 지하문제를 취급하는데 이용되었고, 깊이가 얇은 지역의 탐사에는 적용되지 못했다. 이것은 짧은 시간대의 정밀한 동적 TEM 반응의 측정 기술 부족과 초기 시간대의 간섭현상으로 정확한 2차 기전력(secondary electro motive force)을 측정할 수 없었기 때문이다.

본 실험에서는 측정 기기인 SIROTEMIII에 accelerator를 부착하여 송신 전류를 완전히 끊는데 소요되는 시간(Turn-off-time)을 10~15배 단축시켜 초기시간대의 간섭현상으로 인한 노이즈를 감소시켰고, delay time이 가장 짧은 high resolution time series를 선택하여 짧은 시간대에서 2차 기전력을 측정할 수 있게 하였다. 송, 수신 코일의 배열은 송신코일과 수신코일의 면적이 같은 동일 송, 수신(coincident loop)형태를 사용하였고, 센서는 직경이 0.25mm의 절연코일과 아크릴을 사용하여 센서를

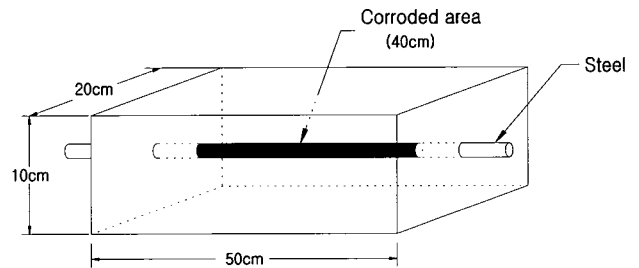


Fig. 6 Shape and dimensions of specimen

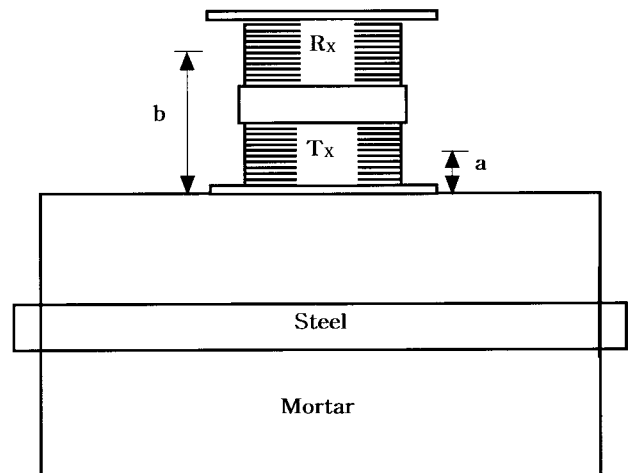


Fig. 7 Schematic diagram of sensor

(a, b : distance from mortar surface to Tx, Rx)

제작하였다.

센서의 개략적인 형상을 Fig. 7에 나타내었고, Table 5에 센서의 종류를 나타내었다. 송신전류를 일정하게 공급하고, 센서에 열 발생을 억제하기 위하여 가변저항기를 장착하였으며, 송신코일에 보내는 송신전류는 1.4A로 일정하게 공급하였다. 그리고 측정정도를 높이기 위하여 한 측정지점에서 1,024회 자동 반복 측정하여 평균치리를 하였다. Delay time인 0.008~7.181ms (Window 1~35)까지 측정하였고, 측정시간은 1,024번 반복측정과 Window 35까지 선택하여 측정하였으므로 34초 걸린다(Table 1 참조). Fig. 8에 실험장치의 개요를 나타내었다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 센서에 따른 2차 기전력 값의 변화

Fig. 9은 철근을 포함한 모르타르, 무철근 모르타르 시편과 공기 중에서의 2차 기전력(EMF : Electromotive Force) 값들의 변화를 나타낸 것이다. 센서 8을 사용하여 0.008~7.181ms (Window 1~35)까지 2차 기전력 값들을 측정하였다. Y축의 단위 $\mu\text{V}/\text{A}$ (Microvolt/Ampere)는 송신(Tx) 코일에 흘렸던 단위 전류 당 수신(Rx) 코일에 유도된 2차 기전력 값들을 나타낸다.

Table 5 Characteristics of sensors

Sensor	Size (cm)	Resistance (Ω)	Turns (numbers)	Distance (cm)	
				T _X (a)	R _X (b)
1	2×2	3	90	0.80	2.20
2	2×2	6	180	0.80	2.20
3	2×2	9	270	0.75	2.25
4	3×3	3	60	0.70	2.20
5	3×3	6	120	0.70	2.20
6	3×3	9	180	0.75	2.25
7	6×6	3	30	0.45	1.85
8	6×6	6	60	0.70	2.20
9	6×6	9	90	0.55	1.75

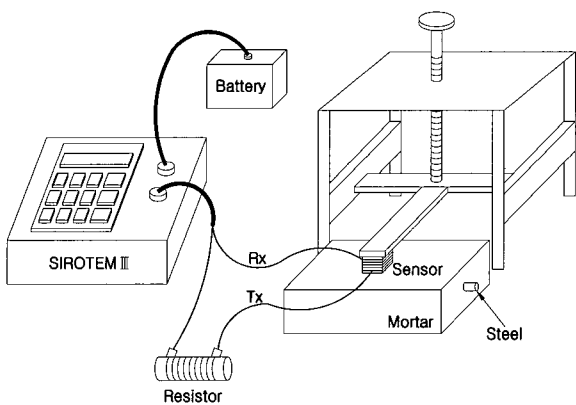


Fig. 8 Schematic diagram of experiment

철근을 포함한 모르타르 시편에서는 과도전자탐사(TEM) 반응인 감쇠곡선(decay curve)이 나타났고, 모르타르 시편과 공기 중에서는 전도체가 없기 때문에 이상반응이 나타났다. 이러한 과도전자탐사 반응인 감쇠곡선을 이용하여 모르타르 중의 철근 부식 정도 차이를 측정하기 위한 적합한 센서를 연구하고자 한다.

Fig. 10은 반복측정횟수에 따른 2차 기전력 값의 오차 범위를 나타낸 것이다. 센서 8과 피복두께(cover depth : d) 3cm인 모르타르 시편을 사용하였고, 센서를 시편의 중앙위치 25cm 지점에 고정시키고 각각 10번씩 측정하였다. 반복측정횟수가 증가할수록 오차범위가 줄어들고 1,024번과 2,048번 반복측정은 오차범위가 거의 비슷하게 나타났다. 2,048번 반복 측정할 때 걸리는 시간(68초)은 1,024번 반복 측정할 때 걸리는 시간(34초)보다 두 배 더 길고, 센서에 열도 두 배 더 발생된다. 센서에 열이 많이 발생되면 측정간격시간이 길어지므로 본 실험에서는 반복측정횟수를 1,024번으로 선택하였다.

Fig. 11~13은 센서와 모르타르의 피복두께 변화에 따른 2차

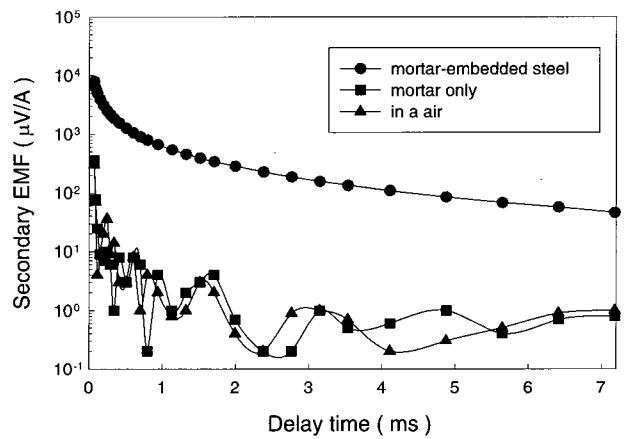


Fig. 9 Decay curves in the different mediums

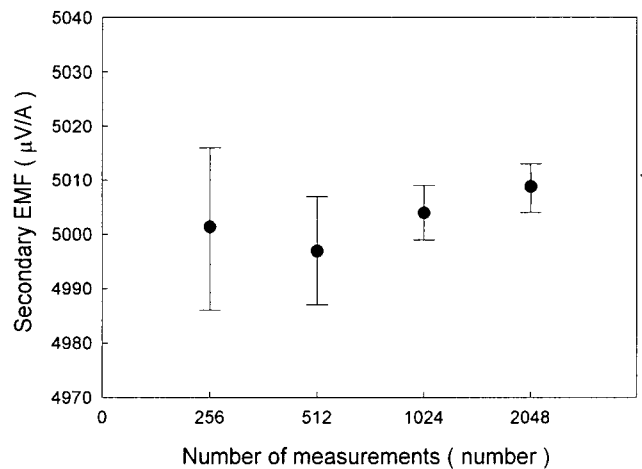


Fig. 10 Error range of secondary EMF according to the number of measurement

기전력 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11은 센서의 크기가 $2 \times 2\text{cm}^2$, 송,수신 코일 저항이 3, 6, 9 Ω 인 센서 1~3을 사용하였고, Fig. 12는 센서의 크기가 $3 \times 3\text{cm}^2$, 송,수신 코일 저항이 3, 6, 9 Ω 인 센서 4~6을 사용하였고, Fig. 13은 센서의 크기가 $6 \times 6\text{cm}^2$, 송,수신 코일 저항이 3, 6, 9 Ω 인 센서 7~9를 사용하였다.

Delay time 1.709ms(Window 25)까지의 2차 기전력 값들을 나타내었다. 같은 센서에서 피복두께가 증가할수록 2차 기전력 값들이 감소하고, 피복두께가 같은 철근을 포함한 모르타르 시험편에서는 송,수신 코일의 저항(코일의 감은 수)이 증가함에 따라 2차 기전력 값들이 크게 나타남을 알 수 있었다. 이것은 송, 수신 코일의 감은 수가 증가하면 자기의 세기가 커지므로 2차 기전력 값들도 크게 유도되기 때문이다. 센서들마다 감쇠곡선이 시작되는 delay time이 다르게 나타났고, 후기 delay time으로 갈수록 센서들의 2차 기전력 값의 차이가 감소하였다.

같은 크기의 센서에서는 저항이 증가할수록 감쇠곡선이 시작되는 delay time은 늦어지고, 같은 저항에서는 센서의 크기가 클수록 감쇠곡선이 시작되는 delay time은 빨라지고 있다.

이것은 송, 수신 코일의 저항이 증가할수록 송신코일과 수신코일의 간섭효과에 의한 노이즈가 많이 나타나기 때문이다. 센서들의 감쇠곡선이 시작되는 delay time은 다음과 같다. 센서 1은 0.059ms(Window 7), 센서 2는 0.113ms(Window 10), 센서 3은 0.197ms(Window 12), 센서 4는 0.035ms(Window 5), 센서 5는 0.089ms(Window 9), 센서 6은 0.149ms(Window 11), 센서 7은 0.026ms(Window 4), 센서 8은 0.071ms(Window 8), 센서 9는 0.113ms(Window 10)로 나타났다. 모든 센서에서 과도전자탐사 반응인 감쇠곡선이 나타났지만, 센서 1, 2는 피복두께(cover depth : d) 4cm의 모르타르 시험편에서는 과도전자탐사 반응이 굉장히 미약하게 나타났다.

Fig. 14에 센서들의 저항에 따른 온도의 변화를 나타내었다. 송신전류는 1.4A, 반복측정횟수는 1,024번, 1~35 Window를 선택하여 실험을 하였다. 센서의 온도 측정은 미국의 Fluke사에서 제작한 Thermo Couple을 사용하였고, 송,수신 코일의 저항이 3, 6, 9 Ω 일 때의 온도변화는 10, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다.

송,수신 코일의 9 Ω 인 경우는 2차 기전력 값은 크게 나타났지만 송, 수신 코일의 간섭현상에 의한 노이즈 때문에 초기

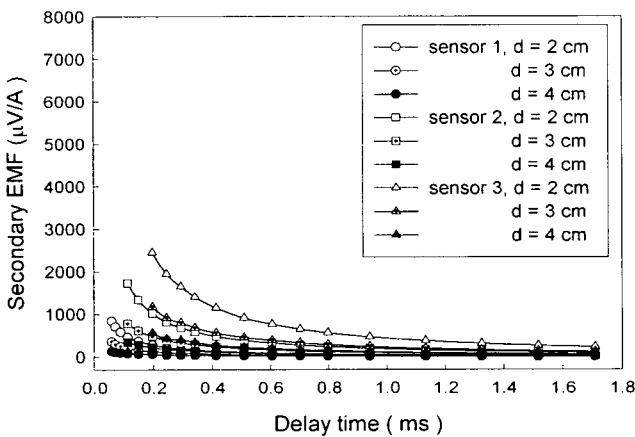


Fig. 11 Decay curves to cover depth (d) at sensor 1, 2 & 3

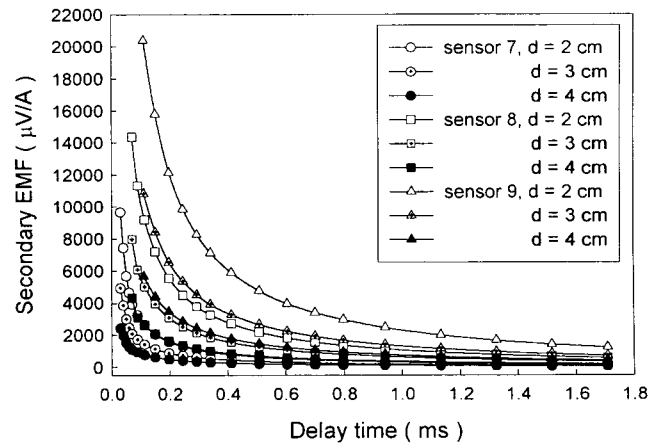


Fig. 13 Decay curves to cover depth(d) at sensor 7, 8 & 9

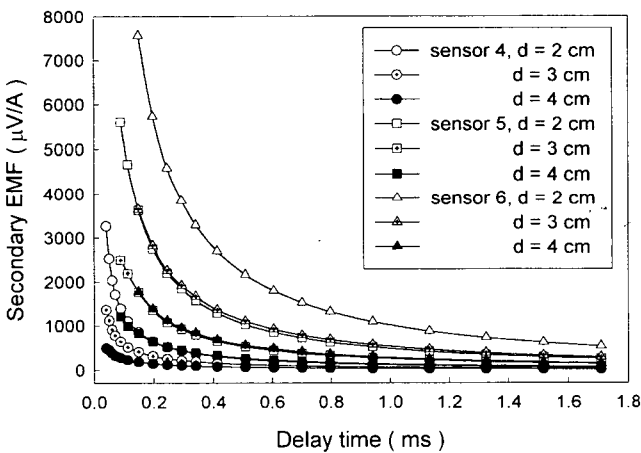


Fig. 12 Decay curves to cover depth (d) at sensor 4, 5 & 6

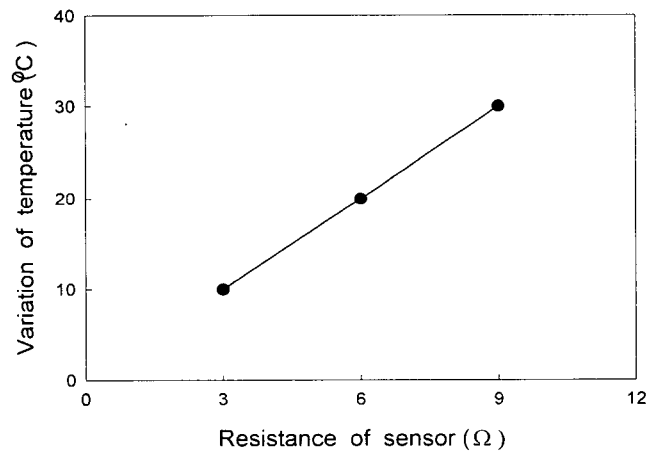


Fig. 14 Relationship between temperature and resistance of sensors

delay time의 2차 기전력 값을 얻을 수 없었고, 센서에 열이 많이 발생되어 측정간격시간이 너무 길어졌다.

본 실험에서는 오차범위, 2차 기전력 값 및 측정간격시간을 고려할 때 센서 4(3×3cm², 3Ω), 센서 5(3×3cm², 6Ω), 센서 7(6×6cm², 3Ω), 센서8(6×6cm², 6Ω)이 적당하다고 판단되어진다.

5.2 Delay time에 따른 오차범위

Fig. 15(a)~(d)는 센서 4, 5, 7, 8의 delay time별 오차범위를 나타낸 것이다. 피복두께가 2, 3, 4cm에서 실험을 하였고, 시편의 중앙위치인 25cm 지점에 센서지시대로 센서를 고정시키고, 10번씩 측정하여 최대 값과 최소 값의 차이를 나타내었다. 센서 4는 0.035~0.797ms (Window 5~20), 센서 5는 0.089~0.797ms (Window 9~20), 센서 7은 0.026~0.797ms (Window 4~20), 센서 8은 0.071~0.797ms (Window 8~20)까지의 2차 기전력 값들을 나타내었다. 센서 4에서의 오차범위는 0.035~0.089ms (Window 5~9)까지 감소하다가 0.089ms (Window 9)부터는 불규칙 경향을 보이면서 10 μV/A이하로 나타나고 있다. 이것은 Table 2에서 보듯이 delay time이 0.089ms(Window 9)부터 샘플링 수가 4개 이상 되므로 정도가 높은 것으로 판단된다. 피복두께(cover depth : d)에 따른 오차범위의 차이는 나타나지 않았다. 센서 5에서의 오차범위는 0.089~0.149ms(Window 9~11)까지 감소하다가 delay time 0.149ms부터 불규칙 경향을 보이면서 오차범위가 10 μV/A 이하로 나타나고 있다. 센서 4와 마찬가지로 피복두께 차이에 의한 오차범위는 거의 비슷하게 나타나고 있다. 센서 7에서의 오차범위는 0.047ms(Window 6)에서 약간 증가하지만 전체적으로 0.026~0.089ms(Window 4~9)까지 감소하다가 delay time 0.089ms부터 불규칙 경향을 보이면서 10 μV/A 이하로 떨어지고 있다. 모르타르 피복두께에 따른 오차범위의 차이는 거의 비슷하게 나타났다. 센서 8에서의 오차범위는 0.071~0.149ms (Window 8~11)까지 감소하다가 0.149ms (Window 11)부터 불규칙 경향이 나타나고 있으며 0.113ms (Window 10)부터 오차범위가 10 μV/A 이하였다. 다른 센서와 마찬가지로 모르타르의 피복두께의 차이에 의한 오차범위는 거의 비슷하게 나타났다.

5.3 모르타르의 피복두께에 따른 2차 기전력 값의 변화

Fig. 16~18은 모르타르의 피복두께(cover depth : d)에 따른 모르타르와 공기 중의 철근에 대한 2차 기전력 값의 변화를 나타낸 것이다. 피복두께가 2, 3, 4cm인 철근을 포함한 모르타르와 공기 중에서 실험을 하였고, 시편의 중앙위치인 25cm 지점에서 센서 지시대로 센서를 고정시키고 3번씩 측정하여 평균을 취하였다. 0.797ms(Window 20)까지의 2차 기전력 값들을 센서별로 나타내었다. 모든 센서에서 과도전자(TEM)탐사 반응인 감쇠곡선이 나타났고 delay time이 후기로 갈수록 센서들간의 2차 기전력 값의 차이가 줄어들었다. 2차 기전력 값의 크기는 센서 8, 센서 5, 센서 7, 센서 4 순으로 나타났다. 그리고 철근을 포함한 모르타르와 공기 중의 2차기전력 값은 거의 같게 나타났다. 철근 직경 13mm와 철근까지의 깊이(피복두께) 2, 3, 4cm인 조건하에서는 2 차 기전력 값은 모르타르의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

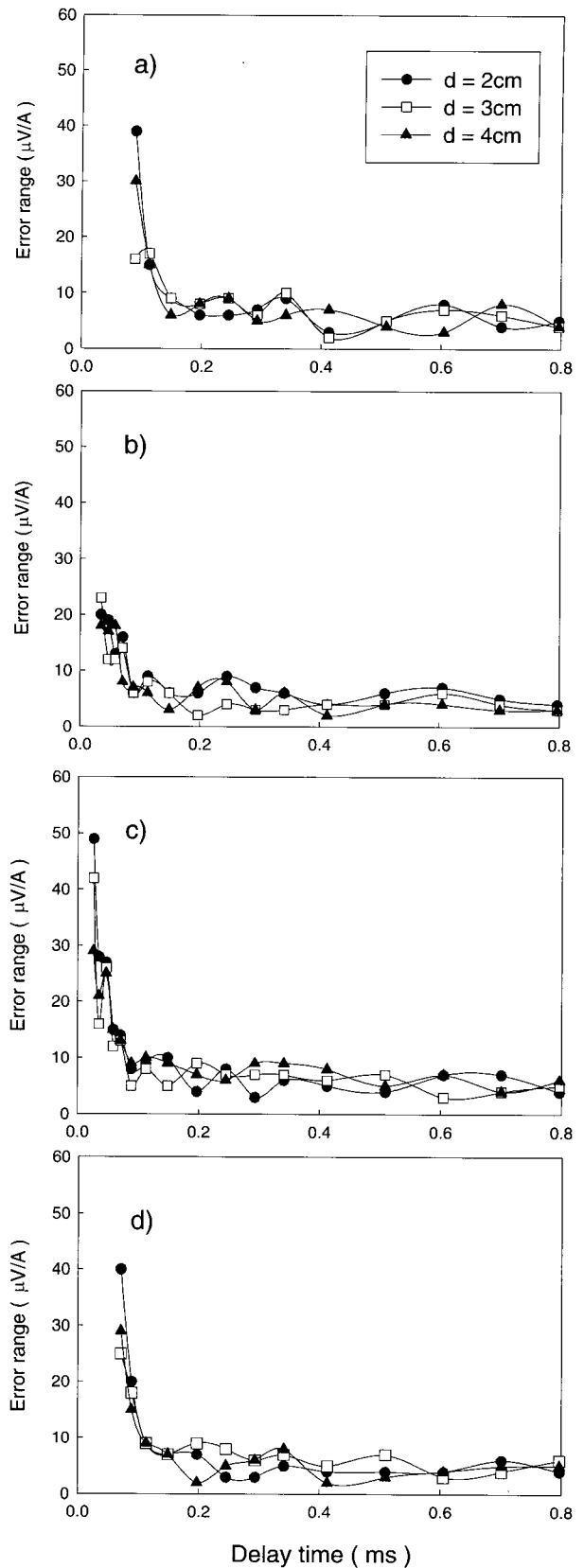


Fig. 15 Error range of secondary EMF to delay time (a: sensor4, b: sensor5, c: sensor7, d: sensor8)

Fig. 19는 모르타르의 피복두께에 의한 2차 기전력 값의 변화를 나타낸 것이다. 각 센서들의 2차 기전력 값들을 delay time 0.149ms(Window 11)에서 비교하였다. 모르타르의 피복두께가 증가함에 따라 2차 기전력 값들은 감소하였고, 각 센서들의 2차 기전력 값들의 차이도 감소하였다. 또한 모르타르의 피복두께가 증가함에 따라 2차 기전력 값의 감소 비율이 감소하였다. 이것은 자기장의 세기는 거리의 3승에 반비례하기 때문이다. 또한 모르타르의 피복두께에 따라 2차 기전력 값의 차이가 나타났으므로 모르타르의 피복두께를 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

Delay time 0.149ms(Window 11)에서의 각 센서들의 2차 기전력 값들은 다음과 같다. 피복두께가 2cm인 경우 센서 4는 874 $\mu\text{V/A}$, 센서 5는 3,636 $\mu\text{V/A}$, 센서 7은 2,063 $\mu\text{V/A}$, 센서 8은 7,192 $\mu\text{V/A}$ 이고 피복두께가 3cm인 경우 센서 4는 416 $\mu\text{V/A}$, 센서 5는 1,773 $\mu\text{V/A}$, 센서 7은 1,139 $\mu\text{V/A}$, 센서 8은 3,954 $\mu\text{V/A}$, 피복두께가 4cm인 경우 센서 4는 191 $\mu\text{V/A}$, 센서 5는 854 $\mu\text{V/A}$, 센서 7은 622 $\mu\text{V/A}$, 센서 8은 2,081 $\mu\text{V/A}$ 이었다.

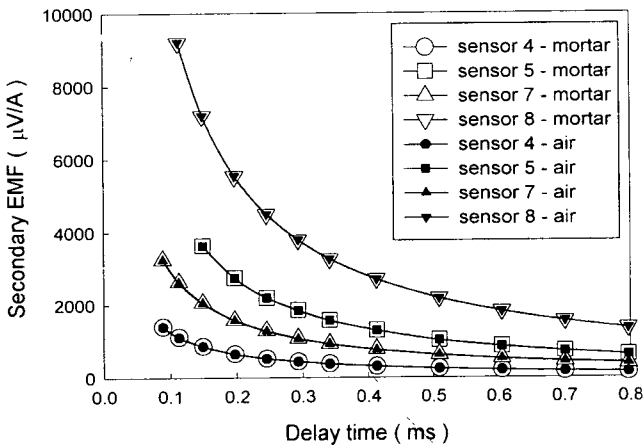


Fig. 16 Decay curves to steel in mortar and air at d = 2cm

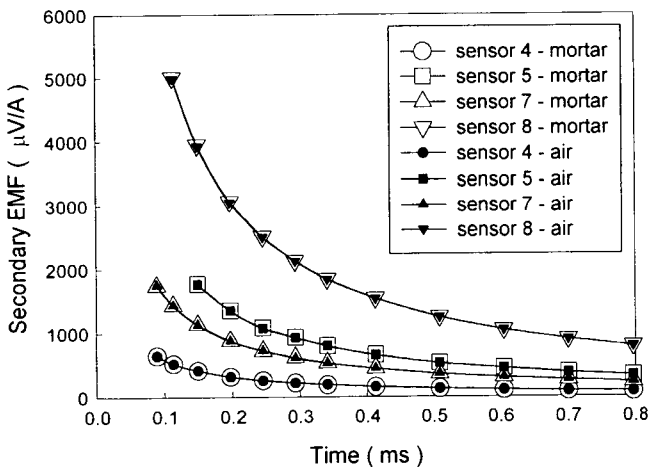


Fig. 17 Decay curves to steel in mortar and air at d = 3cm

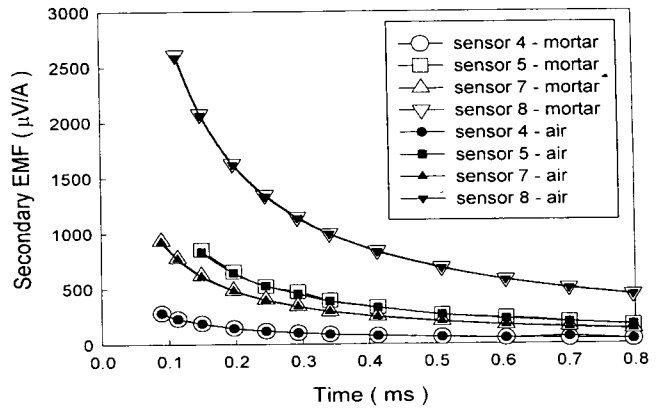


Fig. 18 Decay curves to steel in mortar and air at d = 4cm

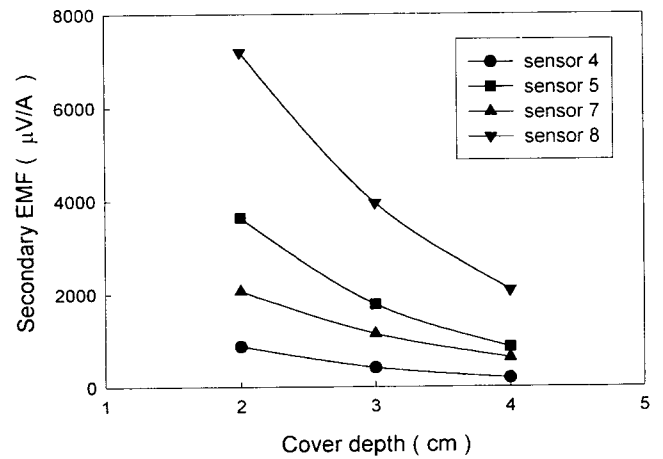


Fig. 19 Variation of secondary EMF with cover depth

5.4 센서에 따른 철근 부식 경과시간에 의한 2차 기전력 값의 변화

Fig. 20은 철근 부식 정도 차이에 따른 2차 기전력 값의 변화를 나타내었다. 4일간, 25일간 부식시킨 철근을 포함한 모르타르 시험편을 사용하였고, 모르타르의 피복두께(cover depth : d)는 3cm였다. 시험편의 중앙위치인 25cm 지점에서 센서 지지대로 센서를 고정시키고 3번씩 측정하여 평균을 취하였다. 그리고 센서 4, 5, 7, 8을 사용하였고, Delay time 0.149ms(Window 11)에서의 2차 기전력 값을 나타내었다. 모든 센서에서 2차 기전력 값의 차이는 나타났지만 센서 8에서 가장 큰 차이가 나타났다. 4일간, 25일간 철근을 부식시킨 모르타르 시험편에서 각 센서들의 2차 기전력의 차이 값은 다음과 같다. 센서 4는 38 $\mu\text{V/A}$, 센서 5는 152 $\mu\text{V/A}$, 센서 7은 73 $\mu\text{V/A}$, 센서 8은 244 $\mu\text{V/A}$ 였다. 그러므로 본 실험에서 사용한 9개 센서 중 오차 범위, 유도된 2차 기전력 값의 크기, 측정시간간격 및 철근의 부식정도에 의한 2차 기전력 차이 값을 고려할 때 센서 8이 가장 적합하다고 판단된다.

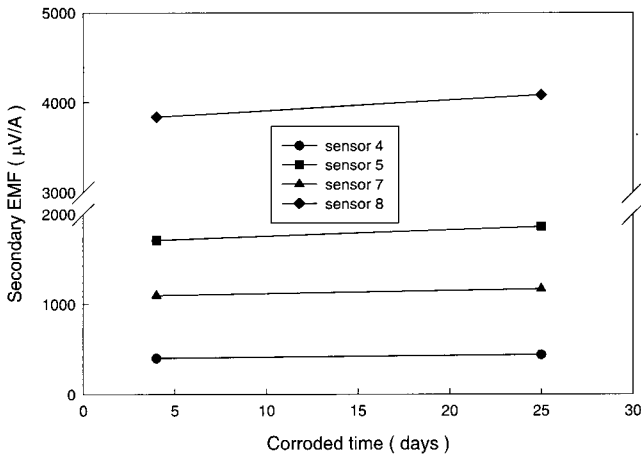


Fig. 20 Variation of secondary EMF with corroding time at d=3cm

6. 결 론

과도전자(TEM)탐사법에 의한 모르타르 중의 철근 부식 차이 측정을 위한 센서 개발에 대한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 오차범위, 유도된 2차 기전력 값의 크기, 측정시간간격 및 철근의 부식정도에 의한 2차 기전력 차이 값을 고려할 때 9개 센서 중 센서 8(6×6cm², 6Ω)이 가장 적합하다고 판단된다.
- (2) 초기 Delay time에서는 2차 기전력 값이 크게 유도되지만, 측정 오차가 크게 나타났으며, 후기 Delay time으로 갈수록 오차가 작아짐을 알 수 있었다. 측정오차가 10µV/A 이하로 되는 센서들의 Delay time은 다음과 같이 나타났다. 센서4는 0.089ms (Window9), 센서5는 0.149ms (Window11), 센서7은 0.089ms (Window9), 센서8은 0.149ms(Window 11)부터 나타났다.
- (3) 모르타르와 공기 중의 철근에 대한 2차 기전력 값은 거의 비슷하게 나타났다. 철근 직경 13mm와 철근까지의 깊이(피복 두께) 2, 3, 4cm인 조건하에서는 2차 기전력 값은 모르타르의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.
- (4) 모르타르의 피복두께에 따라 2차 기전력 값의 차이가 나타났으므로 모르타르 피복두께를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1999학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

ASTM (1991). "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", American Society for Testing and Materials, C-876, pp 434~439.
 Suryavanshi, K. S., Syam, S. and Nayak, B. U. (1991). "A

Comparison of Surface Potentials of R. C. Structures Using Reference Electrodes - Part 1", Corros. Prev. Contr., August, pp 105~107.
 Suryavanshi, K. S., Syam, S. and Nayak, B. U. (1991). "A Comparison of Surface Potentials of R. C. Structures Using Reference Electrodes - Part 2", Corros. Prev. Contr., October, pp 128~131.
 Loto, C. A. and Okusanya, A. (1989). "The Influence of Clay Addition on the Electrochemical Corrosion Behaviour of Mild Steel in Concrete", Corros. Prev. Contr., August, pp 103~108.
 Loto, C. A. and Odumbo, E. T. (1989). "Electrochemical Potential Monitoring of Corrosion and Coating Protection of Mild Steel Reinforcement in Concrete", Corrosion, Vol. 45, No. 7, pp 553~557.
 Raharivaivo, A., Brevet, P., Pannier, G. and Grimald, G. (1986). "The Influence of Concrete Deterioration on Reinforcement Rusting", Corros. Prev. Contr., August, pp 83~87.
 Lopez, W. and Gonzalez, J. A. (1983). "Influence of the Degree of Pore Saturation on the Resistivity of Concrete and the Corrosion Rate of Steel Reinforcement", Cem. Concr. Res., Vol. 23, No. 2, pp 368~376.
 Lakshminarayanan, V., Ramesh, P. S. and Rajagopalan, R. (1992). "A New Technique for the Measurement of the Electrical Resistivity of Concrete", Mag. Concr. Res., Vol. 44, No. 158, pp 47~52.
 Gonzalez, J. A., Ramirez, E., Bautista, A. and Feliu, S. (1996). "The Behaviour of Pre-Rusted Steel in Concrete", Cem. Concr. Res., Vol. 26, No. 3, pp 501~511.
 Berke, N. S., Dallairo, M. P., Hicks, M. C. and Hoopos, R. J. (1993). "Corrosion of Steel in Cracked Concrete", Corrosion, Vol. 49, No. 11, pp 934~943.
 Sehgal, A., Li, D., Kho, Y. T. (1992). Osseo - Asare, K. and Pickering, H. W., "Reproducibility of Polarization Resistance Measurements in Steel-in-Concrete Systems", Corrosion, Vol. 48, No. 9, pp 706~714.
 Feliu, S., Gonzalez, J. A., Andrade, C. and Feliu, V. (1988). "On-Site Determination of the Polarization Resistance in a Reinforced Concrete Beam", Corrosion, Vol. 44, No. 10, pp 761~765.
 Mckenzie, S. G. (1987). "Techniques for Monitoring Corrosion of Steel in Concrete", Corros. Rev. Contr., February, pp 11~17.
 Chung, H. W. (1978). "Effects of Embedded Steel Bars upon Ultrasonic Testing of Concrete", Mag. Concr. Res., Vol. 30, No. 102, pp 19~25.
 Reynolds, W. N., Wilkinson, S. J. and Spooner, D. C. (1978). "Ultrasonic Wave Velocities in Concrete", Mag. Concr. Res., Vol. 30, No. 104, pp 139~144.
 Gaydecki, P. A. and Burdekin, F. M. (1989). "An Inductive Scanning System for Two-Dimensional Imaging of Reinforcing Components in Concrete Structures", Electromagnetic

- Screening by Reinforced Concrete, *Mag. Concr. Res.*, Vol. 41, No. 148, pp 163~169.
- Rajagopalan, P. R., and Prakash, J. (1983). "An Electromagnetic Method of Checking Reinforcements in Concrete", *Research and Industry*, Vol. 28, pp 273~276.
- Buselli, G. (1980). "Interpretation of SIROTEM Data from Elura", *Bull. Aust. Soc. Explor. Geophys.*, Vol. 11, pp 264~271.
- 조동행, 구자학, 구성분, 임무택(1983). "TEM 탐사법 국내적용성 연구", 한국동력자원연구소 연구보고, 82-광물자원-2-12, pp 409~431.
- 임무택, 현병구(1984). "관상 광체에 대한 TEM 법의 실험적 연구", 대한 광산 학회지, Vol. 21, pp 185~196.
- Parums, R. (1984). "SIROTEM Borehole Scale Modelling", Report, Department of Geology, Melbourne Univ., pp 1~5.
- Buselli, G., Mcracken, K. G. and Rutter, H.(1985). "Manual for SIROTEM Field Procedures and Data Interpretation", CSIRO Division of Mineral Physics and Mineralogy.
- 정현기, 최종호, 김광은(1989). "TEM 탐사기기 개발연구", 연구보고서, 한국동력자원연구소.
- 황학수, 이상규, 송무영(1989). "관상광체에 대한 TEM 반응의 극성 변화의 감쇠특성", 한국자원공학회지, Vol. 26, pp 364~377.
- 민경덕, 서정희, 권병두(1994). "응용지구물리학", 우성, pp 349~440.
- Geo Instrument Pty. Ltd. (1995). "SIROTEM III Operator's Manual", Geo Instrument, Australia.

2000년 10월 23일 원고 접수

2001년 1월 16일 수정본 채택