

다중 코일에 의한 콘크리트내의 철근 탐지 시 신호 특성

Signal Characteristics of Multi-coil Probe for the Test of Reinforcement Embedded in Concrete

김영주*, 이승석*, 윤동진*

Young-Joo Kim*, Seung-Seok Lee* and Dong-Jin Yoon*

초 록 본 연구는 콘크리트내의 철근의 굵기와 깊이를 동시에 측정할 수 있는 기술 개발에 관한 것이다. 개발된 탐촉자는 기존의 철근 탐지기와 다른 구조를 지니는데 감지 코일이 세 개로 구성되어 있다. 따라서 세 가지 신호를 동시에 측정하여 분석함으로써 철근의 굵기와 깊이를 분석하도록 되어 있다. 탐촉자 내 코일의 전압과 위상 변화를 임피던스 분석기를 이용하여 조사하고 그 전달함수의 궤적을 분석하였다. 여기 코일 내부에 장착된 감지 코일은 알려진 바와 같이 단순한 변화 형태를 나타내었으나 여기 코일 밖에 장착된 코일의 경우 변화 곡선이 복잡하였다. 실제 철근 탐지 실험은 일반 와전류 탐상기를 이용하였는데 여러 가지 철근의 굵기와 깊이에 대하여 실험하였다. 철근 깊이에 따른 신호 변화는 임피던스 분석기에 의한 전달함수 변화에서 나타낸 것과 비슷한 경향을 나타내었으며 감지 코일마다 다른 전압의 변화를 이용하여 철근의 굵기와 깊이의 동시 측정이 가능하였다.

주요용어: 철근 탐지기, 철근, 철근 깊이, 철근 굵기, 콘크리트

Abstract This study suggests a rebar detection technique for simultaneous detection of size and cover of embedded reinforcement in concrete. The structure of the probe made in this study is somewhat different from commercial ones. This probe has three sensing coils. Rebar size and cover depth can be evaluated by detecting and analyzing the signal from them. Amplitude and phase variation of each coil in the probe was investigated using an impedance analyzer and the loci of transfer functions of the coils were analyzed. The locus of transfer function from the sensing coil positioned inside excitation coil was simple as well known, but the others from the coils outside excitation coil were not so. Actual experiment on rebar detection was performed with our probe and an eddy current test system for various rebar sizes and depths. The signal shape according to variation of cover depths showed the same tendency with the transfer function loci acquired by impedance analyzer. The different variation pattern of signal enabled to evaluate rebar size and cover depth simultaneously.

Keywords: covermeters, rebar, reinforcement, rebar depth, rebar diameter, concrete

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물에 전혀 손상을 입히지 않고 철근 탐지를 수행하여야 할 경우에는 비파괴 검사를 적용하여야 한다. 철근 탐지를 위한 비파괴 검사로는 전자 유

도법이 널리 사용되고 있는데 전자 유도법은 코일에 교류를 가하여 발생하는 교류 자장을 철근에 접근시킨 후 철근에 의하여 변화되는 자기장의 변화를 측정하여 철근을 탐지하는 방식이다. 이 방법을 기본으로 하는 철근 탐지기는 코일의 형태와 크기, 방향, 코일의 개수 등이 서

로 다른 다양한 종류가 시판되고 있으나 원리는 거의 유사하다. 즉 변화되는 자장의 세기 측정이다. 이 방법은 전자파를 이용하는 레이더 방법과는 달리 콘크리트가 전기전도도를 갖거나 자성을 갖는 골재를 쓰지 않는 한 콘크리트 재질에 전혀 영향을 받지 않는다. 이는 전자 유도 방식은 재료의 전기전도도와 자기 투자율의 변화가 신호에 영향을 미치고 유전율의 변화에는 거의 영향을 받지 않기 때문이다. 따라서 레이더 방식에 비하여 탐상 속도가 빠르고 간편하다는 장점을 지니고 있다. 반면에 time domain에서의 신호가 아닌 신호의 크기만을 갖고 분석을 하기 때문에 결과분석이 용이하지 않다.

현재 유통되고 있는 철근 탐지기는 근본적으로 철근의 깊이와 굵기를 동시에 측정하는 것이 매우 어렵다. 상용 탐지기들은 한 개의 여기 코일(excitation coil)과 한 개의 감지 코일(sensing coil)로 이루어져 있어 감지 코일에 유도되는 전압을 측정하여 철근을 분석한다. 철근의 굵기가 변하는 것과 깊이가 변하는 것은 모두 감지 코일의 전압의 크기를 변화시키는데 불행히도 위상의 방향도 함께 변화한다[1,2]. 따라서 하나의 감지 코일로는 깊이와 굵기를 분리할 수 없다. 어떤 상용 탐지기는 감지 코일이나 수 있는 것이 있는데 이것은 단지 철근의 수평적 위치를 찾기 위한 것으로 이것 역시 철근의 깊이와 굵기를 동시에 찾는 것은 불가능하다. 그 이유는 감지 코일이 모두 여기 코일의 안쪽에 장착이 되어 있는데 이 영역에서는 자장의 변화 양상이 동일하기 때문이다.

기존의 탐지기를 이용한 철근의 굵기와 깊이 판정에 대한 연구는 오래 전부터 시도되어 왔다[3-6]. 그러한 연구의 내용들은 대부분 공간적 분포를 모두 조사하는 방법이다. 즉 철근에서 먼 곳으로부터 철근 바로 위까지 거리에 따른 철근 탐지기의 신호 크기를 측정하여 측정값이 완만한 변화를 보이면 굵은 철근이고 변화가 급할수록 가는 철근으로 분리한다거나 철근의 바로 위에서 측정되되 비금속 판재를 이용하여 높이를 증가시키면서 변화 값을 읽으면 철근의 굵기에 따라 측정값이 감소해 가는 기울기가 약간 차이가 나는데 이 차이를 분석하는 등의 방법으로서 시간이 오래 걸리고 불편하며 부정확하다. 본 연구에서는 기존의 철근 탐지기로는 어려웠던 철근의 정량적인 탐지를 위하여 다중 코일로 이루어진 탐촉자를 개발하고 이를 이용하여 철근의 깊이와 굵기를 동시에 측정하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 연구 결과는 기존의 탐지기들과 마찬가지로 철근 한 가닥을 기준으로 시험한 결과이다. 물론 실제의 경우는 철근 탐지기가 지시하는 값이 단근

에 대하여 시험한 결과에 비하여 달라지게 되는데 그 달라지는 정도는 철근 사이의 간격과 사용한 가닥수에 따라 달라진다. 본 연구 이후에 실제 상용화 연구가 진행된다면 철근의 여러 가지 다양한 조건에 대한 시험을 거쳐 그 결과를 표준 데이터로 사용되어야 하겠으나 철근 탐지기의 구조적 성능 개선을 목표로 하는 본 연구에서는 범위에 포함시키지 않았다.

2. 철근 탐지용 코일

본 연구에서 개발한 철근 탐지기는 여기 코일(excitation coil)의 지름 안쪽의 자장 분포와 여기 코일의 지름 바깥쪽의 자장 분포의 변화가 코일의 끝 부분에서 멀어짐에 따른 변화 양상이 확연히 다른 점을 이용하여 제작하였다. Fig. 1에 제작된 탐촉자를 나타내었는데 여기서 굵은 선으로 제작된 여기 코일은 자력선을 발생시키는 기능을 담당하며 가는 선으로 제작한 나머지 코일들은 모두 감지 코일들이다. 여기 코일과 감지 코일들은 그림에서와 같이 모두 상, 하 두 개의 코일이 한 쌍으로 이루어져 있다. 상, 하 두 개의 감지 코일은 감겨진 방향이 서로 상반되게 제작하여 직렬로 연결하였으므로 이 두 개의 코일에 유도되는 전압의 크기는 거의 동일하나 위상은 반대이다.

따라서 코일 주위에 전기전도체나 자성체가 없는 평형 상태에서는 두 감지코일에서 나오는 전압은 거의 영 볼트가 된다. 즉 전체의 입력 전압의 크기를 줄이고 철근이 근접한 상태에서의 변화되는 전압만을 측정하기 위한 것이다. 이러한 구조는 결함 탐지를 주요 목적으로 하는 일반적인 와전류 탐촉자에서는 많이 사용하는 방법이나 상

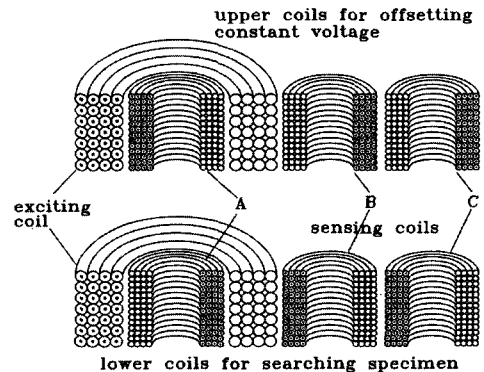


Fig. 1 Multi-coil probe composed of a pair of exciting coil and three pair of sensing coils

용 철근 탐지기에서는 잘 채택하지 않고 있으며 하나의 코일만을 사용하고 전자 회로를 이용한 영점 조절 기능을 통하여 평형 상태에서의 출력이 영점이 되게 한다. 본 연구에서는 일반 와전류 탐촉자에서 사용하는 방법을 채택하는 것이 앰프의 게인을 증가시켜 감도를 높일 수 있다고 판단하여 Fig. 1과 같이 제작하였다.

3. 코일의 전압 및 위상

금속으로 이루어진 봉체가 탐촉자에 가까이 있을 때 Fig. 1에서 여기 코일 내부에 있는 A코일과 여기 코일밖에 있는 B, C 코일의 유도된 전압은 변화 양상이 서로 다를 것으로 예상되어 A 코일과 B 코일에 유도되는 전압의 크기와 위상을 Fig. 2와 같이 측정하였다.

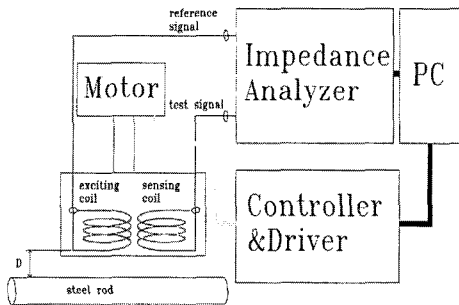


Fig. 2 Experimental system for measuring a gain and phase

시험체는 직경이 16mm인 강봉이며 코일의 밀면과 시험체의 거리를 1mm씩 밀리하면서 거리를 0mm~100mm 까지 측정하였다. 측정 방법은 임피던스 분석기를 이용하여 여기 코일에 800Hz의 교류 전류를 흘린 후 이의 크기와 위상을 기준 전압으로 하고 감지 코일에 유도된 전압의 크기와 위상을 측정하였다. Fig. 3은 시험체가 접근한 상태에서 측정된 전압을 시험체가 없을 때의 전압의 크기로 나눈 정규화한 값들을 나타낸 것이다. A 코일의 전압의 크기와 위상은 이는 이미 잘 알려진 사실로써[2] 그 변화 양상은 주변 물체에 따른 코일의 임피던스 변화 곡선과 그대로 일치한다.

B 코일의 전압과 위상은 코일이 물체에 많이 접근한 상태에서는 전압의 변화 방향이 A 코일과 유사하나 조금 떨어진 상태에서는 방향이 반대로 전환하는 것을 확인하였다. 이러한 이유는 B 코일의 유도 전압에 미치는 인자가 여러 가지이기 때문이다.

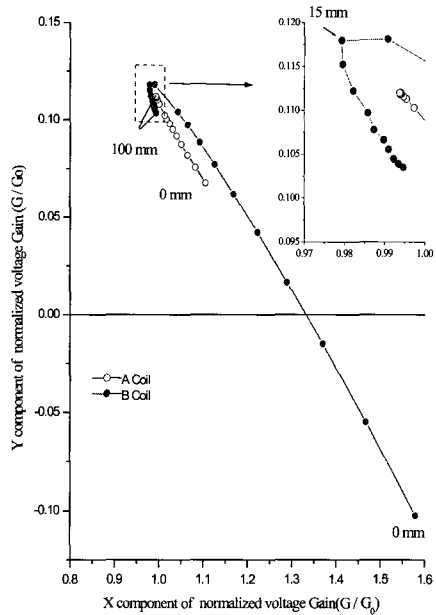


Fig. 3 Normalized gain phase locus by impedance analyzer

여기 코일에서 발생한 자력선을 $\overline{\Psi}_i$ 라고 하면 $\overline{\Psi}_i$ 가 금속에 입사되면 와전류가 생성되는데 이 와전류로부터 자력선이 발생되며 이를 $\overline{\Psi}_e$ 라고 하면 이 자력선, $\overline{\Psi}_e$ 의 위상은 $\overline{\Psi}_i$ 와 서로 반대이다. 감지 코일의 유도 전압은 $\overline{\Psi}_i$ 와 $\overline{\Psi}_e$ 에 기인하는데 A 코일의 경우 여기 코일에서 발생한 거의 모든 자력선이 쇄교하게 된다. 강봉이 접근하게 되면 $\overline{\Psi}_i$ 와 $\overline{\Psi}_e$ 가 모두 증가하게 된다. 따라서 A 코일을 쇄교하는 총 자력선은 증가하며 유도 전압도 이와 같은 형태로 증가하게 된다. 한편 B 코일에 유도되는 전압은 식 1과 같이 모두 네 가지 자력선에 의해서 결정되는데 여기 자력선 $\overline{\Psi}_i$ 가 공기 중으로 방사되어 감지되는 성분 $a\overline{\Psi}_{i1}$ 와 매질인 강봉을 지나오는 $b\overline{\Psi}_{i2}$, 강봉에 입사되는 여기 자력선에 의해 발생한 와전류에 의한 $c\overline{\Psi}_{e1}$ 그리고 강봉을 빠져나가는 여기 자력선에 의해 생성된 와전류에 의해 발생한 $d\overline{\Psi}_{e2}$ 가 더하여져 결정된다.

$$\overline{\Psi}_s = a\overline{\Psi}_{i1} + b\overline{\Psi}_{i2} + c\overline{\Psi}_{e1} + d\overline{\Psi}_{e2} \quad (\text{식 1})$$

여기서 상수 a, b, c, d는 코일과 강봉간의 거리, 강봉의 굵기 등의 형태 등 주위 환경에 따라 달라진다. B 코일에서 감지되는 자력선 $\overline{a\Psi_{i1}}$, $\overline{b\Psi_{i2}}$, $\overline{c\Psi_{e1}}$ 의 Z 축 방향은 서로 같으나 $\overline{d\Psi_{e2}}$ 의 방향은 반대가 된다. 강봉이 멀리부터 코일로 접근함에 따른 네 가지 자력선에 의한 $\overline{B_s}$ 의 변화량 $\Delta\overline{\Psi_s}$ 의 크기 변화는 강봉이 먼 거리에서는 와전류에 의한 변화가 먼저 시작되며 가까워지면 여기 자력선의 변화가 와전류에 의한 자력선의 변화를 압도하게 되는 것으로 판단된다.

4. 철근 탐지

철근은 강봉과는 달리 철근과 콘크리트의 접합을 강화시키기 위하여 표면에 많은 요철이 있다. 따라서 완전한 봉재 형태를 이루고 있지는 않으나 코일의 유도 전압 변화는 봉재와 유사한 것으로 평가되었다. 따라서 앞서 언급한 방법에 의하여 철근의 굵기와 깊이가 판정 가능할 것으로 생각하고 개발한 철근 탐지기를 이용하여 시험을 실시하였다. 시험 장치는 임피던스 분석기 대신 와전류 탐상기를 사용하였는데 와전류 탐상기는 코일의 전압과 위상의 변화를 매우 민감하게 측정할 수 있는 장비로서 임피던스 분석기에 비하여 아주 작은 변화량도 측정이 가능하다. 가장 큰 기능의 차이는 영점 조절 기능으로서 이는 일반 철근 탐지기 대부분 지니고 있는 기능이어서 철근 탐지기 본체 역할을 위해 임피던스 분석기 보다 사용하기 편리하다. 시험 방법은 Fig. 2와 같이 철근 탐촉자를 주사 장치에 물린 후 철근으로부터 멀리 후퇴시킨 후 영점을 조절한 다음 거리를 1mm 간격으로 접근시키며 신호의 변화량을 측정하였다.

직경이 각각 10, 13, 16, 19, 22, 25mm 인 철근에 대하여 시험한 측정값을 Fig. 4에 나타내었다. 이 그래프들은 탐촉자와 철근의 거리가 20mm ~ 80mm 일 경우 적당한 출력이 되도록 프리앰프 gain을 조절하였을 경우를 나타낸다. A 코일의 신호 파형은 철근에 접근해 갈수록 증가하는 모습을 나타내는데 이는 임피던스 분석기를 이용한 Fig. 2의 결과와 일치하고 있다. 그리고 대체로 철근이 굵을수록 큰 신호를 나타내고 있으나 철근에 따라서는 그 값 차이가 미미해서 측정 오차에 따라 순서가 뒤바뀔 수도 있는 것으로 나타났다. B, C 코일에 유도된 전압은 파형이 다소 다르긴 하지만 역시 예상한 바와 같이 멀어질수록 감소하다 다시 증가하며 다시 감소하는

모습을 나타내고 있다. 또한 철근과 탐촉자가 먼 상태에서는 철근 굵기에 따른 신호 크기가 철근이 굵을수록 큰 순서로 나타났으나 중간 단계에서는 순서가 일관성이 없으며 그림에는 나타나 있지 않으나 별도로 조사한 근접한 경우의 측정값 역시 굵을수록 큰 신호를 나타냈다.

탐촉자로부터의 측정값을 이용하여 철근의 굵기와 깊이를 동시에 측정할 수 있는지에 대하여 고찰하였다. 측정값은 전압의 크기에 국한하고 위상은 고려하지 않았는데 그것은 전압의 크기만으로도 철근의 분류가 가능하다면

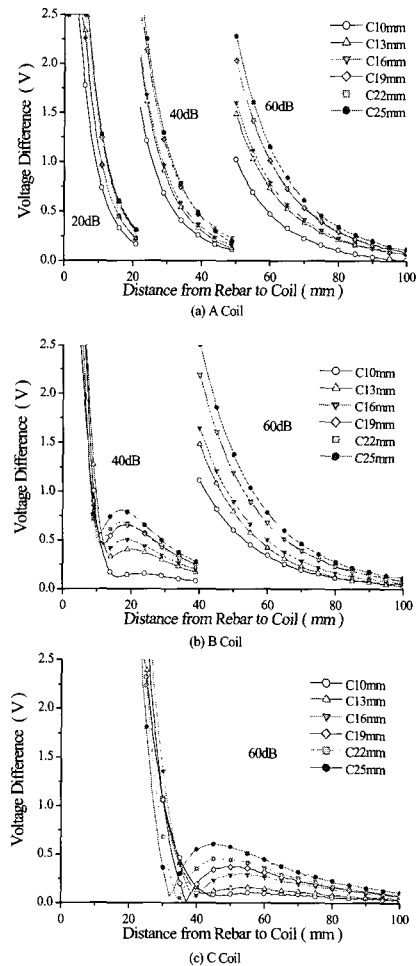


Fig. 4 Voltage signals from sensing coils using an eddy current test system according to lift-off distance

복잡하게 위상까지 고려할 필요가 없으며 이는 측정기의 구조를 단순화시켜 장비 개발 시 원가 절감의 효과가 있으며 또한 위상의 미묘한 변화를 정량화된 값으로 측정하기도 쉽지 않았기 때문이다.

우선 임의의 철근에 대하여 측정된 전압 값이 Table 1 과 같다고 하면 이 값을 미리 모든 철근의 조건에서 측정해 놓은 표와 대조하여 굵기와 깊이를 추정할 수 있는지 확인하였다. 본 연구에서는 제작한 탐촉자를 이용하여 6종의 철근에 대하여 1mm 간격으로 철근과 탐지기의 거리가 0mm ~ 100mm 까지 측정하고 표로 작성하였다. 이 표에서 우선 A 코일의 측정값이 1023mV를 나타낼 수 있는 경우를 발췌하여 Table 2에 나타냈다. Table 2에서 볼 수 있듯이 A 코일이 1023mV를 나타내는 경우는 모든 직경의 철근에서 가능하다. 따라서 A 코일의 전압만 측정해서는 철근의 굵기와 깊이를 전혀 알 수가 없음을 확인할 수 있다. 그런데 A 코일의 전압이 1023mV 일 때의 나머지 B, C 코일의 전압을 비교해 보면 직경 10mm 철근이 51mm 거리에 있는 경우와 16mm 코일이 56~57mm 거리에 있는 두 가지 경우로 줄어든다. 그런 다음 C 코일의 값을 비교하면 오직 10mm 직경의 철근이 51mm 거리에 있는 경우만이 측정된 Table 1의 값을 만족하며 이 결과로부터 철근의 굵기와 깊이를 결정할 수 있다.

Table 1 Measured values from three sensing coils

Value of A Coil	Value of B Coil	Value of C Coil
1023	604	91

Table 2 Various cases that output voltages of A coil indicating 1023 mV

Rebar Dia.	Distance(mm)	Value of A	Value of B	Value of C
10mm	51~52	1023~943	604~568	91~90
13mm	55~56	1026~960	575~545	156~158
16mm	56~57	1041~966	634~591	293~289
19mm	59~60	1075~1010	710~679	319~309
22mm	59~60	1087~1017	708~678	376~375
25mm	61~62	1075~1009	746~705	444~432

을 시도하였다. 본 연구에서 개발한 탐촉자의 감지코일은 세 개의 다중 코일로 이루어져 있어 철근의 굵기와 깊이에 따라 세 개의 감지 전압이 서로 다른 양상으로 변화한다. 내부의 감지 코일의 유도 전압은 와전류와 내부 자장에 의해서 변화하며 와전류와 내부 자장은 철근이 코일에서 멀어지거나 철근의 굵기가 가늘어지는 두 가지 현상에 대하여 동일한 위상으로 단조 감소하므로 감지 코일에 유도된 전압의 변화가 과연 어떤 요인에서 이루어 졌는지 알 수가 없다. 그러나 외부 코일을 제2, 제3의 감지 코일로 사용하여 전압을 측정하면 철근의 굵기와 거리에 따른 전압의 변화 양상이 내부 코일과는 다른 양상을 보이며 이 전압을 측정하여 내부 감지코일의 전압과 더불어 분석하면 철근의 굵기와 깊이를 동시에 추정할 수가 있다.

참고 문헌

- [1] D. J. Hagemaiier, Eddy current Impedance Plane Analysis. Material eval. Feb. 41:211-218 (1983)
- [2] D. J. Hagemaiier, Fundamentals of Eddy Current. ASNT Ch. 10. (1990)
- [3] N. C. Das Gupta, C. T. Tom. Nondestructive Technique for Simultaneous Detection of Size and Cover of Embedded Reinforcement. British J. NDT, Nov. 1983: pp. 301-304
- [4] J. Alldred, J. Chua, D. Chamberlain. Determination of Reinforcing Bar Diameter and Cover by Analysing Traverse Profiles from a Cover Meter, Conf. proc. NDT in Civil Eng, Vol.1, Berlin, Sep. 1995 : 721-728
- [5] M. Poepel, C. flohrer. Combination of Covermeter with a Radar System-an Improvement of Radar Application in Civil Engineering. Conf. proc. NDT in Civil Eng, Vol.1, Berlin, Sep. 1995 : 737-743
- [6] <http://www.protoval.co.uk/abtpi.html>

5. 결 론

새로운 탐촉자를 개발하여 진일보된 정량적 측정 기술