# 유한요소법과 인공지능을 이용한 자성체 탐사

이강우 * 박일한
숭실대학교 전기공학과

# Magnetic Substance Search Using Finite Element Method and Neural Network

Kang-woo Lee * Il-han Park
Dept. of Electrical Eng. Soongsil Univ.

**Abstract** - This paper consider a simple Nondestructive Testing(NDT) having eddy currnt effect.

We analyzed the two dimension modeling of alternative magnetic field, eddy current with voltage source. And, the current magnitude and phase data obtained from each different frequency ,five object position is used for learning the neural network. Therefore, we can recognize an object position pattern from new input current magnitude, phase data.

## 1. 서 론

비파괴 검사(Nondestructive Testing)는 시험체에 손상을 입히지 않고 시험체가 갖는 물리적 성질을 조사하는 방법이다. 본 논문에서는 비파괴검사의 간단한 원리인 와전류를 이용한 탐사법을 생각해 보았다. 와전류로 인한 전류크기,위상변화 해석에 유한요소법을 사용하였고 수식적으로 표시하기 힘든 데이터들에 대한 비선형 매핑(mapping)의 특성을 가진 신경망 알고리즘을 이용하여 시험체의 위치를 패턴분류하였다. 먼저, 투자율, 도전률을 가진 물체를 전영역이 공기인 곳에 위치시키고 센서(sensor)코일을 이동시켜 가면서, 전류크기와 전류위상 데이터를 얻는다. 여기서, 교류자장, 와전류 해석기법을 전압원인 jw 유한요소법으로 2차원 모델링하여 해석하였고 60~1000[Hz]의 주파수를60[Hz]와100[Hz]에서1000[Hz]까지를100[Hz]간격으로 5개의 위치패턴에 대하여 전류크기,전류위상 데이터를 얻었으며, 신경망의 학습데이터로는 60[Hz]와 짝수 주파수에 의해 얻어진 데이터를 사용하였고 테스트 데이터로는 홀수 주파수의 데이터들에 의해 얻어진 데이터들을 사용하여 학습결과를 시험해 보았다.

학습 후, 모든 테스트 데이터에 대하여 패턴분류가 잘 됨을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 유한요소해석

사용한 유한요소법은 교류자장, 와전류해석기법을 전압원으로 해석한 jw법 2차원 모델링이다.

해석대상 영역에 전류밀도 $J_o$ 이 주어진 경우, 이 영역의 시간적 변화에 의하여 시변자계가 형성되고, 이 자계의 영향으로 도체에 유도전류가 흐르게 된다. 이 유도전류밀도 $J_e$ 에 의한 자계가 반대방향으로 작용하여 $J_o$에 의한 본래의 자계와 합성되어 종합자계를 형성시키고 이 영향으로 전류크기와 전류위상의 변화를 가지고 오게 된다.

#### 2.1.1 Galerkin법에의한 지배방정식의 정식화

유한요소정식화 식은

$$\int\int_{\Omega'} \frac{1}{\mu}\left[\frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x}+\frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y}\right)dxdy\, A_i + jw\sigma\int\int_{\Omega'} N_i N_j\, dxdy\, A_i - \int_{\Omega'} N_i\left(\frac{N}{S}I\right)dxdy = 0 \qquad (2.1)$$

N : 권선수

S : 권선부분의 단면적

#### 2.1.2 회로방정식

$$V = RI + L\frac{dI}{dt} + \frac{d\lambda}{dt} \qquad (2.2)$$

$\frac{d\lambda}{dt}$ 는 유한요소 해석영역이며, 정상상태 입력전압이므로 시간에 대한 미분항 $\frac{d}{dt}$를 jw 로 변환하여 유한요소 정식화 식과 함께 다음의 행렬식으로 나타낼수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S+T] & [B] \\ [B]^T & [C] \end{bmatrix}\begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ [F] \end{bmatrix}$$

$[F] = -\frac{V}{jwl}$, $l$ : 코일의 z 축방향 길이

$[B] = -(\pm)\frac{N\triangle}{3S}$

$[C] = \frac{R+jwl}{-jwl}$

$[S+T]$ : 시스템 행렬

[$I$] : 전류

[$A$] : 벡터 자기포텐셜

## 2.2 신경망을 이용한 패턴분류

### 2.2.1 신경망 구조

어떤 시스템의 입출력 데이터가 주어졌을 때 이러한 데이터들로부터 주어진 시스템의 입출력 특성을 연결강도에 저장함으로써 시스템을 근사화 할 수 있다. 본 논문에 적용된 신경망은 대표적인 오차역전파 알고리즘으로 학습되는 MLP(Multi layer perceptron)이며 구조는 다음과 같다.

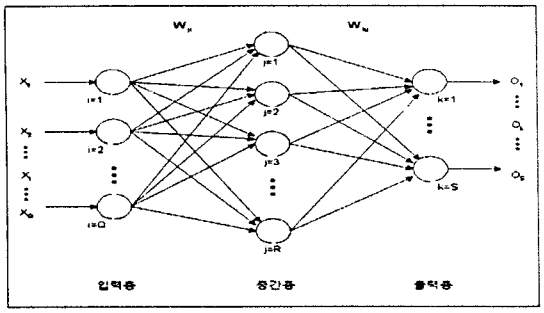



그림 1. MLP 구조

$X_1 \ldots X_Q$ : 입력벡터

$O_1 \ldots O_S$ : 출력벡터

$W_{ij}$ : 입력층과 은닉층 사이의 Weight

$W_{kj}$ : 은닉층과 출력층 사이의 Weight

제곱 오차합은 다음과 같이 정의한다.

$$E = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{s}(d_k - o_k)^2 \qquad (2.3)$$

$d_j$ : 목표값

### 2.2.2 신경망의 적용

여기서는 학습데이터로{[주파수1개 데이터,전류크기11개 데이터,전류위상 11개 데이터], [목표값 3개 데이터]}의 총 23차원의 입력벡터와 3차원의 목표값 벡터로 이루어진 30개 데이터쌍을 사용하였다.

입력데이터의 크기가 지수형 소수점이하 14자리수이므로 정규화시켜 학습능력을 향상시켰으며, 정규화식은 다음과 같다.

$$N_{ij} = \frac{x_{ij} - m_i}{\sigma_i^2} \qquad (2.4)$$

$N_{ij}$ : 정규화 값

$x_{ij}$ : 실제 데이터값

$m_i$ : 평균

$\sigma_i^2$ : 표준편차

목표치는 1, -1을 사용하여 5개의 위치패턴으로 표현했으며 은닉층과 출력층의 활성함수를 모두 bipolar continuous and binary function 를 사용하였다. 또한, 학습속도를 향상시키고 국소최소점에 머물지 못하도록 모멘텀을 사용하여 학습시켰으며 사용변수값은 다음과 같다.

표1. 사용변수값

| 내 용 | 사 용 변 수 값 |
|---|---|
| 은 닉 층 뉴 런 수 | 26 |
| 출 력 층 뉴 런 수 | 3 |
| 모 멘 텀 상 수 | 0.95 |
| 학 습 상 수 | 0.003 |
| 반 복 횟 수 | 20,000 |

표2. 패턴 코드표

| 패 턴 | 코 드 | 내 용 |
|---|---|---|
| 1 | 1 -1 -1 | 깊이20[mm] |
| 2 | -1 1 -1 | 깊이40[mm] |
| 3 | 1 1 -1 | 깊이60[mm] |
| 4 | -1 -1 1 | 깊이80[mm] |
| 5 | 1 -1 1 | 깊이100[mm] |

## 2.3 적용사례

### 2.3.1 해석모델

앞에서 언급한 전압원 jw 유한요소법을 사용하여 그림2 의 센서코일을 오른쪽에서 왼쪽으로 10[mm] 간격으로 이동시키면서 전류크기와 전류위상 데이터를 얻는다.

해석결과가 좌우대칭이므로 중심에서 100[mm] 왼쪽방향으로의 구간만을 해석하였고 센서 코일의 중심에서의 위치를 0으로 보고 10 까지의 총 11개의 거리구간으로 표시하였다.

입력전압 220+j0 [v] 에 대해서 주파수를 60~1000 [Hz] 까지 100[Hz] 씩 증가시켜가면서 전류크기,전류위상 데이터를 측정하였고, 물체는 20[mm] 간격으로 상(上)에서 하(下)로 위치시키면서 측정하였다. 물질상수는 철(iron)의 물질상수인 $\mu = 1000$[H/m] , $\sigma = 103 \times 10^{-5}$[S/m]의 값을 사용했다.

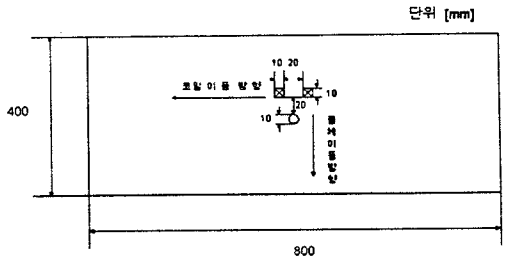



그림 2. 해석 모델

표3.해석 내용값

| 내 용 | 사 용 값 |
|---|---|
| 코 일 간 격 | 20 [mm] |
| 코 일 턴 수 | 100[turn] |
| 코 일 이 동 거리 | 100[mm] |
| 코일의 z축방향길이 | 300 [mm] |
| 물 체 도 전 률 | $103\times10^{-3}$ [S/m] |
| 물 체 투 자 율 | 1 [H/m] |
| 사 용 주 파 수 | 60, 100~1000 [Hz] |
| 사 용 전 압 | 220 + j 0 [V] |

### 2.3.2 해석결과

60[Hz] 와 1000[Hz]에 대한 전류크기와 위상 데이터 곡선은 다음과 같다. 60[Hz]에서는 전류크기의 변화가 완만하고 1000[Hz]의 경우에는 거리 0에서 큰 변화폭과 전체적으로 작은 전류값을 보여주고 있다.

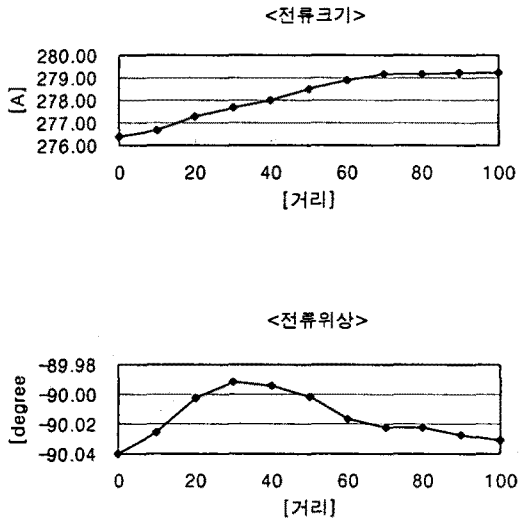
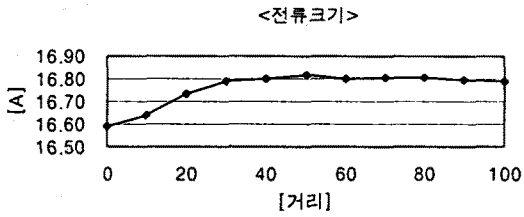



그림.3 60[Hz] 입력전압



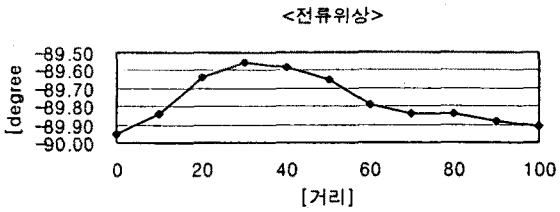




그림.4 1000[Hz] 입력전압

학습데이터는 60,200,400,600,800,1000[Hz]의 입력전압 주파수에 대해 물체의 깊이를 변경해가며 측정한 전류크기,전류위상 데이터를 주파수와 함께 입력데이터로 사용하였다.

학습반복횟수가 20,000 번 이상이거나 제곱오차합이 0.01이하로 되면 학습을 종료하도록 하였다.

학습후 학습데이타에 대해서는 완벽하게 학습했음을 보여주고 있다.

표4. 신경망의 학습결과

| | 학 습 결 과 |
|---|---|
| 데이터의 학습결과 | 100 % |
| 제 곱 오 차 합 | 0.065 |
| 은 닉 층 뉴 런 수 | 26 |

테스트 데이터는 주파수 100,300,500,700,900[Hz]의 25개의 데이터쌍을 사용하였으며, 완벽한 패턴인식이 됨을 보여주고 있다.

표5. 테스트 데이터에 대한 신경망의 출력

| | 물 체 위 치 | 테스트 결과 |
|---|---|---|
| 판 별 률 | 20[mm]깊이 | 100 % |
| | 40[mm]깊이 | 100 % |
| | 60[mm]깊이 | 100 % |
| | 80[mm]깊이 | 100 % |
| | 100[mm]깊이 | 100 % |

## 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 신경망의 학습에 필요한 데이터를 얻었으며 이 데이터를 가지고 신경망을 통해 학습한 결과 여러가지 전류크기, 위상 파형에 대한 물체의 위치패턴인식이 잘 실행됨을 보였다.

향후 과제는 유한요소법의 다양한 해석방법을 사용, 다양한 종류의 물리적 특성 데이터를 얻어 여러 상황에 대한 패턴인식이 가능토록 하는 것이다.

## [참 고 문 헌]

[1] Sheppard J. Salon "Finite Element analysis of Electrical Machines",1995

[2] 최명준 "유한요소법을 이용한 단상변압기 권선의 운동특징 해석",1996

[3] 이호섭 "카오스 특징 추출에 의한 시계열 신호의 패턴인식",1996