

비접촉식 전자기 측정 시스템에서 자성물체의 형상판정에 관한 연구

김재민

LS산전 전력연구소, 충북 청주시 흥덕구 송정동, 306-720

윤승호 · 원혁 · 박관수*

부산대학교 전자전기공학부, 부산시 금정구 장전동 산30번지, 609-735

(2010년 3월 22일 받음, 2010년 4월 6일 최종수정본 받음, 2010년 4월 6일 게재확정)

비파괴검사는 탐지물체에 물리적 손상을 가하지 않고 내부 정보를 파악할 수 있어 다양한 분야에서 이용되고 있다. 그 중 전자기장을 이용한 물체의 형상추정방법의 경우 역 유한요소법을 이용하여야 하지만 이는 비선형성이 강하고 수치계산이 복잡하고 측정 센서의 개수가 미지수의 개수보다 훨씬 적어 정확한 결과를 얻는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 탐지물체에 의한 자기장 변화 신호만을 이용하여, 물체의 시스템 내 각 센서별 위치에서 물체와 등가면적의 원의 비교를 통해 비교적 간편하게 자성물체의 부피를 판정하고 형상추정을 위한 다양한 보정과정을 거쳐 탐지물체의 형상판정이 가능한 알고리즘을 제안하고 검증하였다.

주제어 : 비파괴검사, 유한요소법, 형상추정, 전자기측정

I. 서 론

최근 산업분야에서는 탐지물체 주위에 센서를 부착하여 탐지물체의 물성변화에 따른 단면 형상을 실시간으로 관측하여 탐지물체에 물리적인 손상을 가하지 않고 외부에서 측정된 자료를 통해 내부를 검사하는 비파괴 검사 기술이 개발되고 있다.

이와 같은 기술은 비파괴검사를 통한 건축구조물 검사, 용접결합검사, 식품 공정과정 중의 금속검출기 등 여러 산업에서 사용되고 있다. 그러나 현재까지의 비파괴검사 기술에서는 검출되는 대상물체의 유무나 결함은 검출 가능하지만 형상은 추정하기 힘들다.

비파괴 검사방법 중 전자기를 이용한 방법을 통해 물체의 상태를 추정하기 위해서는 역 유한요소법(Inverse Finite Element Method)을 사용하여야 한다. 하지만 이는 비선형성이 강하고 수치계산이 상당히 복잡하므로 신뢰성 있는 알고리즘 개발이 요구된다. 일반적으로 역 유한요소법은 측정 센서의 개수가 미지수의 개수보다 훨씬 적기 때문에 제대로 된 결과를 얻는데 어려움이 있다. 따라서 부족한 측정 센서의 개수를 가지고 물체의 형상을 측정하기에 현실적으로 많은 제약이 따른다.

본 논문에서는 탐지물체에 의한 자기장 변화 신호만을 이용하여 비교적 간편하게 자성물체의 부피를 판정하고 탐지물체의 형상판정이 가능한 알고리즘을 제안하고 검증하였다.

II. 비접촉식 전자기 측정시스템의 원리

1. 비접촉식 전자기 시스템의 구조

비접촉식 전자기 측정 시스템의 기본 구성은 Fig. 1과 같이 크게 세 부분으로 구성된다. 첫째로 자기장을 발생시키고 자기장의 변화를 감지하는 센서 부가 있으며, 둘째로 센서부에서 발생하는 아날로그 신호를 PC에서 모델링하기 위해 디지털 신호로 변환해주는 신호변환 부, 셋째로 신호변환부에서 받은 신호를 데이터 통신을 통하여 모델링하고 Display하는 모니터 부가 있다. 비접촉식 전자기 측정 시스템은 시스템 외부에서 직류자기장을 인가하게 되면 시스템 내에 발생하는 균일한 자기장 내부에서 자성물체의 비 투자율(Relative

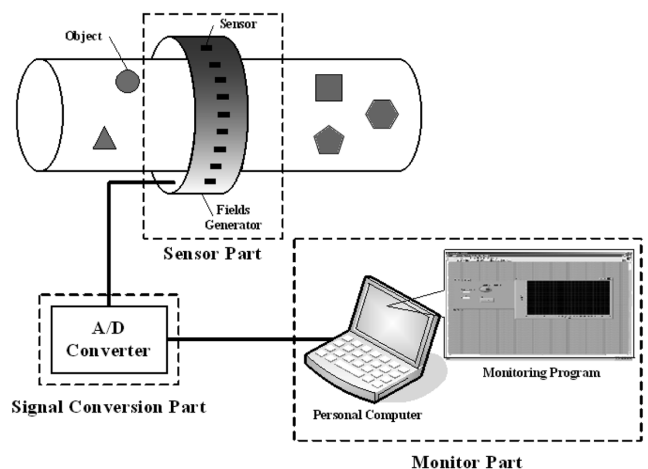


Fig. 1. Diagram of non-contact electromagnetic measurement system.

*Tel: (051) 510-2788, E-mail: gspark@pusan.ac.kr

Permeability)에 의해 자계의 왜곡이 발생하고, 왜곡된 자계의 분포를 측정함으로써 탐지물체의 크기, 위치, 부피, 형상 등의 물체 정보를 판별할 수 있다.

2. 유한요소법을 이용한 자기장분포 해석

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 맥스웰(Maxwell)방정식과 그 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$B = \mu H \tag{2}$$

이로부터 자기 벡터포텐셜 A는

$$B = \nabla \times A \tag{3}$$

로 정의된다. 이를 정리하면 다음과 같은 Poisson 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$-\nabla^2 A = \mu J \tag{4}$$

다시 자기 벡터포텐셜 형태로 정의하면

$$I(A) = \int \left[\frac{1}{2\mu} (\nabla \times A)^2 - JA \right] dv \tag{5}$$

와 같다. 이것을 유한개의 요소로 나누기 위해서 2차원일 경우 보간 함수

$$A(x,y) = \sum_{e=1}^n N_e A_e^e(x,y) \tag{7}$$

를 사용하며 고정 경계조건(A = g(s))과 자연 경계조건((∂A/∂n) = h(s))을 만족시키는 유한요소로 정식화시켜 범함수형태로 비편 간략화하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n K_{ij} A_j = f_i \tag{8}$$

이 행렬에 고정경계조건과 자연경계조건을 대입한 후 자기 벡터 포텐셜 A를 구할 수 있고 이로부터 탐지물체의 자계의 분포를 구한다.

III. 자속변화량에 의한 물체의 부피 판정

1. 자기장 측정방법

시스템에 직류자기장을 인가하면 Fig. 2와 같이 시스템 내 균일한 Magnetic field가 발생하게 되고 임의의 물체가 시스템 내 투입되게 되면 물체의 물성에 따라 자기장 왜곡정도로 물체에 대한 특성을 파악할 수 있다.

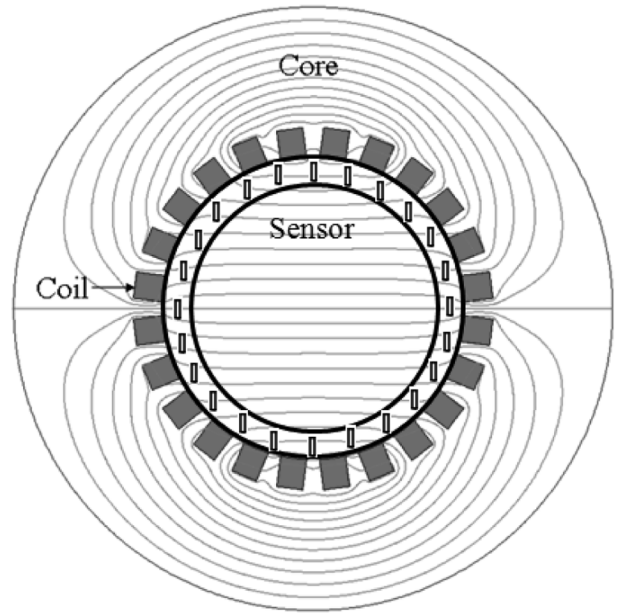


Fig. 2. Magnetic potential line in system.

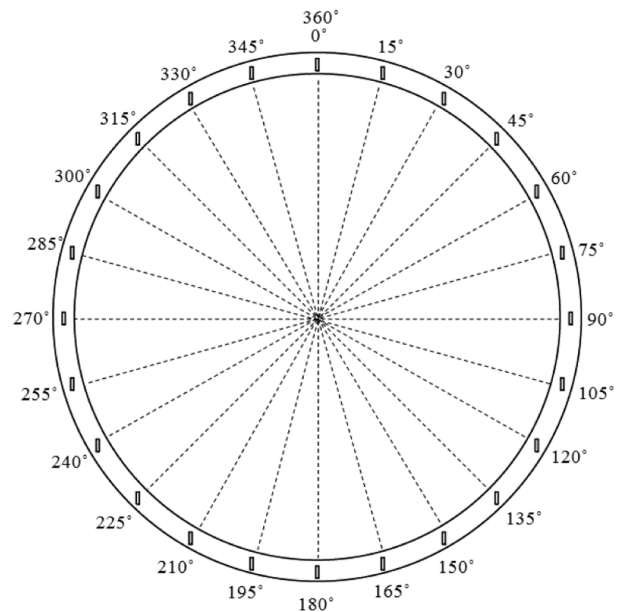


Fig. 3. Array of hall sensors.

자기장 변화는 시스템 내에 물체가 들어가서 자계의 왜곡이 발생할 때 각 센서위치에서 자기장을 측정하여 물체가 없을 경우 각 센서위치에서 측정되는 자기장 분포 값과의 차이이다.

물체에 따라 변화하는 자기장의 크기는 홀센서를 통해 검출된다. 본 연구에서 사용된 홀센서는 Allegro사의 A3515의 모델로써 자기장 측정 범위는 -500[G]~500[G]이며 Resolution은 5[mV/G], Noise는 0.4~0.6[G], 온도범위는 -40~150 °C이다.

자기장의 변화를 측정하는 센서부는 Fig. 3과 같이 0° 센서를 기준으로 15°씩 총 24개의 홀센서로 배열되어 있으며 수평으로 인가된 자기장을 측정할 수 있도록 수직으로 배열되어 있다.

1. 자속변화량을 통한 물체의 부피추정

시스템 내 투입된 물체에 의한 자속변화량은 센서위치별 자기장 변화값의 적분을 통하여 알 수 있다. 이는

$$\Delta\Phi = \int_0^{2\pi} \Delta B_x \cdot dS \tag{9}$$

로 표현되며 여기서 $\Delta\Phi$ 는 탐지물체에 의하여 왜곡되는 자속량의 변화량을 나타내며 ΔB_x 는 물체의 비투자율에 의해 x방향으로 발생하는 자기장의 변화량이다. 이를 한 주기 구간에서 적분을 통하여 자속변화량을 알 수 있다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 2로부터 자속변화의 크기가 일정하게 증가할 때 부피도 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

자속변화량과 부피관계는 Fig. 4에서와 같이 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Volume} = k\Delta\Phi \tag{10}$$

또한 탐지물체와 면적이 같은 등가로 모델링 된 원의 반경을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Volume} = \pi r_0^2 \tag{11}$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{k}{\pi} \Delta\Phi} \tag{12}$$

탐지물체의 자속변화량으로 구해진 단위길이당 Volume을 통해 등가면적을 갖는 원을 알 수 있고 두 물체로부터 본 논문에서 제시한 형상추정 알고리즘을 통해 형상추정을 할 수 있다.

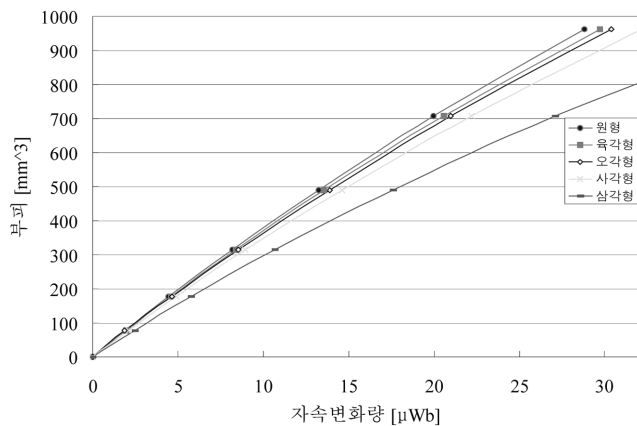


Fig. 4. Relation between magnetic flux and volume.

IV. 자기장 분포변화에 의한 형상판정

1. 형상추정을 위한 기본개념

Fig. 5는 센서위치별 특정 형태 물체와 같은 단면적으로 모델링 된 등가의 원을 나타낸 것이다.

사각형을 예로 들면, 배열된 센서 위치에서의 사각형과 단면적이 같은 등가로 모델링 된 원과 사각형과의 길이 차를 $\Delta P_i (i=0, 15, 30 \dots 360, i = \text{각 센서위치})$ 라 정의내리고 그 그래프 형태로 그릴 수 있다. 이는 원의 반경을 r_0 라 표현하고 사각형과 원과의 길이 차이를 ΔP_i 로 정의하면 각 센서위치별 물체의 길이를 $r_i = r_0 + \Delta P_i (i=0, 15, 30 \dots 360)$ 로 표현할 수 있다.

Fig. 6은 사각형태의 물체의 ΔP_i 를 센서위치에 따라 나타낸

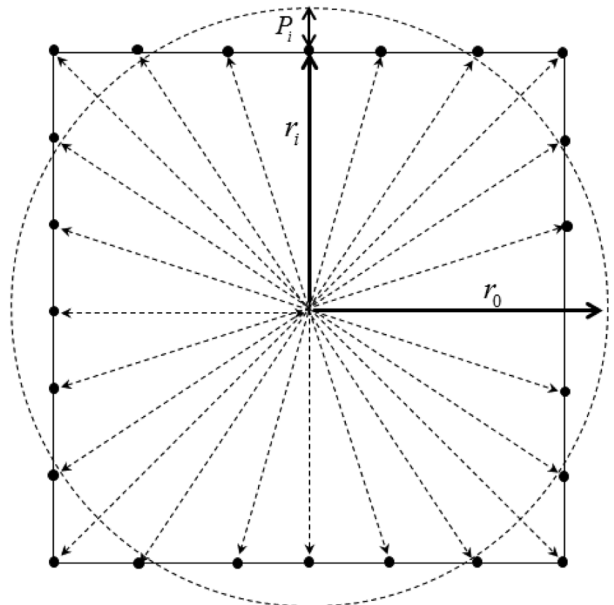


Fig. 5. Basic principle of the shape detection.

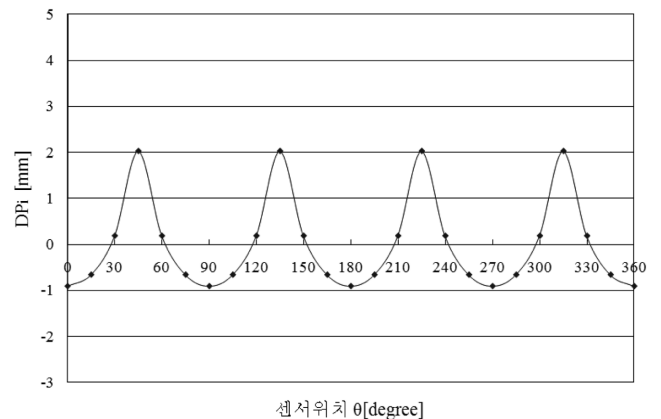


Fig. 6. ΔP_i at the location of each sensor by object shape.

그래프이다. 모서리부분에 자기장의 변화가 크기 때문에 그림과 같이 양의 최대값의 개수는 물체의 꼭지점과 같다. 이로 부터 물체의 모서리 개수와 검출 신호의 상관관계를 알 수 있다.

2. 자기장 변화에 의한 물체의 형상추정

각 센서위치별 자기장 변화 크기를 통해 탐지물체와 등가 원의 반경 r_0 를 기준으로 자기장의 변화(ΔB)만을 합한 값을 통해 각 위치별 형상추정 길이 r_i 를 구하여 형상추정을 하였다. 각 물체의 모서리에서 자기장의 변화가 가장 크기 때문에 탐지물체와 등가 원의 자기장 변화의 차이를 비교하면, 탐지물체의 꼭지점 위치에서 ΔB 도 최대값이 나타날 것이라 예측할 수 있다.

센서위치별 자기장 변화 ΔB_i 와 r_i , r_0 는 다음과 같이 비례 관계를 가지므로

$$r_i - r_0 \propto B_i \tag{13}$$

으로 표현되고 이에 따라 다음과 같은 수식으로 정리될 수 있다.

$$r_i = r_0 + k\Delta B_i \tag{14}$$

이 결과를 이용하여, 센서위치별 자기장 변화신호 ΔB 를 등가 원의 반경 r_0 에 더한 각 위치별 형상추정 길이 r_i 를 이용

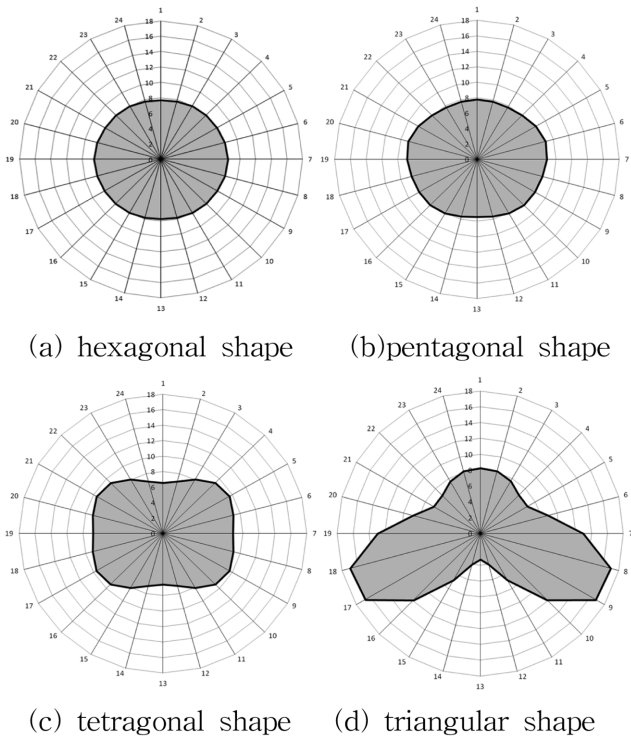


Fig. 7. A shape presumed by change of magnetic field.

한 1차 추정 형상을 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

3. 형상 보정계수를 적용한 신호보정

1차 형상 추정 결과, 사각형의 경우, 예측했던 바와 같이 자기장 변화량의 최대치가 사각형의 모서리 개수와 같이 네 개로 사각물체임을 판단할 수 있다.

그러나 삼각형 형상의 경우 형상의 왜곡이 발생하고, 육각형과 오각형 형상의 경우 원주 방향에서의 각의 변화가 적어 자기장 변화가 원의 신호와 유사한 패턴을 보이는데, 이는 비접촉식 전자기 측정 시스템에서 자성체의 유무에 따른 자계 왜곡을 충분히 보정해 주지 않기 때문이다.

자계왜곡의 보정방법은 두 가지 과정을 거치게 되는데 먼저 신호보정계수 α 를 이용하여 탐지물체와 등가 원의 수치적 차이 그래프와 자기장 변화 신호의 패턴을 일치시키고, 형상 보정계수 β 를 이용한 보정과정을 거쳐 형상을 판정한다.

신호보정계수 α 는 충분히 보정되지 않은 자계의 왜곡된 신호를 수치적으로 계산한 패턴과 일치시키는 계수이다. 형상보정계수 β 는 자기장 변화량[G]을 길이 단위[mm]로 환산시키기 위한 파라미터로 신호보정과정을 거친 뒤 형상보정계수 β 를 곱하여 형상을 추정할 수 있게 된다.

3.1. 신호보정계수를 사용한 신호패턴 보정

형상 신호 패턴 보정을 위해 다음과 같은 과정의 신호처리 단계를 거쳐야 한다. 우선 등가 원형의 물체로부터 자기장 변화의 최대값을 측정한다. 그리고 원형물체의 자기장 최대 변화값이 나타난 최대 센서위치에서 각 물체 측정값과 비율이 같게 조정하여 각 물체의 자기장 변화값으로부터 비율조정을 한 원형물체의 자기장 변화값의 차를 고려하면 신호보정된 자기장의 변화는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta B_x^{object} = (B_x^{object} - B_x^O) - \alpha(B_x^O - B_x^*) \tag{15}$$

- B_x^{object} : 시스템 내 탐지물체가 있을 때 측정자기장
- B_x^O : 탐지물체와 등가인 원형물체의 측정자기장
- B_x^* : 탐지물체가 없을 때 측정되는 자기장

이 때 상수 α 는 앞서 설명한 원의 신호를 탐지물체의 신호에 맞게 비율을 조정할 수 있는 상수로써 원형 물체의 자기장 변화 최대값과 그 위치에서의 자기장 변화 최대값을 측정함으로써 구할 수 있다.

신호보정계수를 사용하여 자기장 신호를 보정하게 되면 Fig. 8과 같이 사각형의 경우 모서리의 네 부분에서 등가 면적의 원과의 길이 차와 유사한 형태로 자기장의 최대값 또한 4개임을 확인할 수 있었다. 자기장 변화로 나타나는 신호가 이 신호패턴과 유사하게 될 때 정확한 형상 보정을 할 수 있

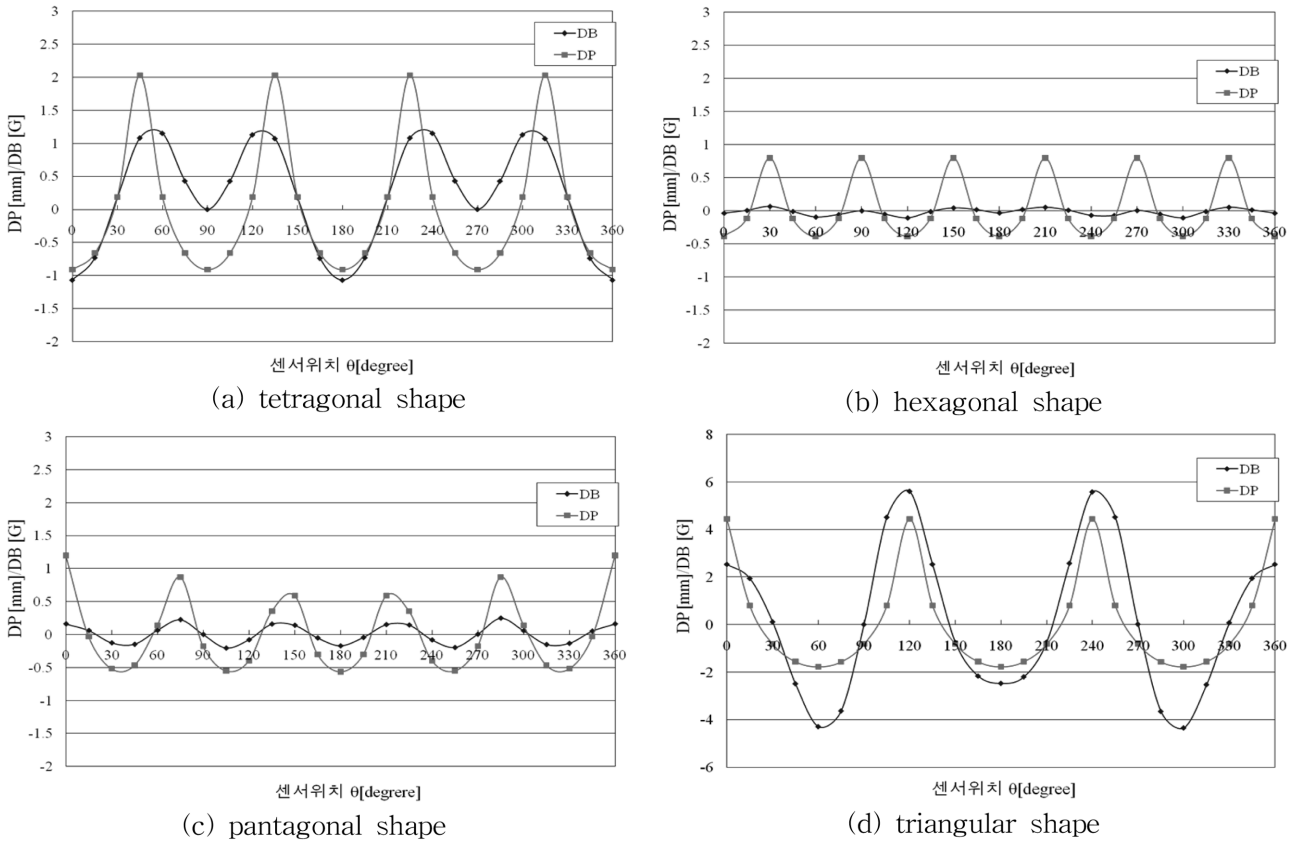


Fig. 8. Comparison between length and magnetic field in detection object and equivalent circle.

음을 예측할 수 있으며, α 계수를 이용하여 자기장 변화 신호를 보정함으로써 최대값이 4개인 자기장 변화신호를 얻을 수 있다.

등가로 모델링 된 원의 최대 자기장 변화값이 센서위치 90°, 270°에서 약 18.422[G]이며, 사각물체의 최대 자기장 변화값이 같은 센서위치에서 약 0.773[G]이므로 원의 자기장 변화 신호를 사각물체의 신호에 맞게 비율 조정을 하면 α 는 1/23.834이 된다. 신호보정과정을 통해 등가 면적의 원과의 길이 차로 나타낸 그래프와 유사한 패턴의 자기장 변화 신호 그래프로 표현할 수 있지만 이를 물체의 방사형태로 나타내게 되면 정확한 형상추정이 어려우므로 적절한 형상보정과정을 거쳐야 한다.

3.2. 형상보정계수를 사용한 형상보정

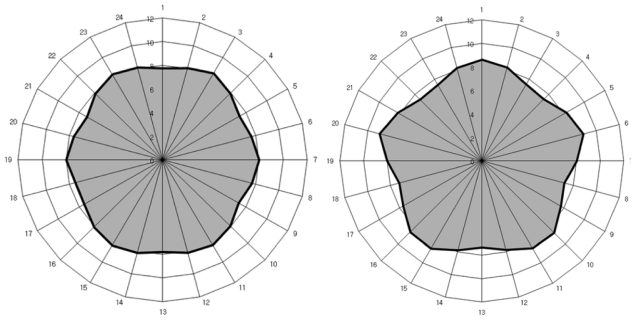
등가 원과 탐지물체의 센서위치별 길이 차와 자기장 변화량의 신호패턴이 같더라도 물체의 정확한 형상보정을 위해서는 적절한 보정과정을 거쳐야 한다. 이는 자기장의 단위[G]를 길이의 단위[mm]로 환산하기 위해서는 적절한 파라미터를 신호보정과정을 거친 자기장의 변화, 즉 ΔB_{i}^{object} 에 곱해줌으로써 형상보정을 할 수 있다. 하지만 각각의 형태의 물체

에 따른 자기장 변화 신호는 물체의 형태에 따라 최대값과 최소값의 차이가 각각 다르므로 적절한 계수 β 를 찾아야 한다. 각 센서위치에서의 보정된 자기장의 변화값을 수식으로 나타내면

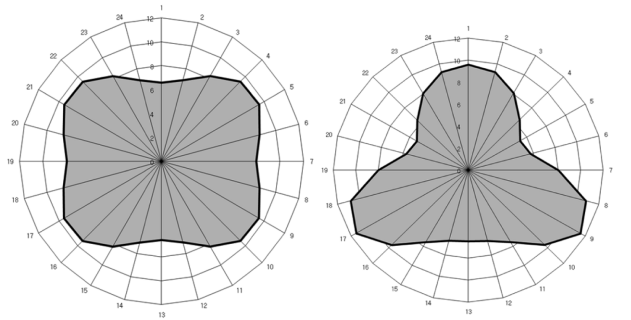
$$r_i = r_0 + \beta \cdot (\Delta B_{i}^{object})_i \quad (16)$$

로 표현될 수 있다. 보정계수 β 는 측정된 자기장 변화값의 최대값과 최소값으로부터 구할 수 있다. 등가의 원과 각 형태의 물체의 길이 차를 측정된 자기장 변화값의 Peak to Peak 신호로 나누어서 각 형태에 대한 보정계수 β 를 구할 수 있다.

사각형의 경우 네 개의 꼭지점을 가지므로 꼭지점 부분에 자기장의 변화가 많이 나타난다. 사각형의 자기장 최대 변화폭을 이용한 보정계수 β 는 2.07이 되고 이를 이용하여 사각형과 면적이 같은 등가 원의 반지름 r_0 를 기준으로 $\beta \cdot (\Delta B_{i}^{object})_i (= \Delta P_i^*)$ 를 센서위치별로 더하게 되면 보정된 사각형의 형상을 추정할 수 있다. 형상보정 알고리즘을 사용한 센서위치별 ΔP_i^* [mm]의 그래프에서 최대치가 네 개인 것을 확인할 수 있다. 최대치가 네 개이므로 네 개의 모서리를 가지는 사각형 형태라는 것을 판정할 수 있고 이를 사각형과 등



(a) hexagonal shape (b) pentagonal shape



(c) tetragonal shape (d) triangular shape

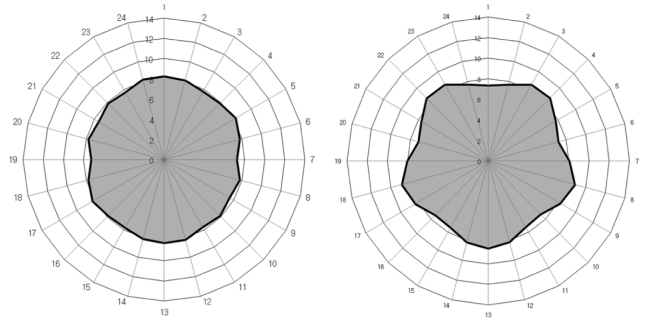
Fig. 9. Shape detection by algorithm.

가로 모델링 된 원의 반경 r_0 에 ΔP_i^* 를 더하여 방사형 그래프로 탐지물체를 추정하면 Fig. 9(c)와 같다. Fig. 9(a)는 형상보정계수 β 를 사용하여 그려진 육각형태의 추정형상이며, 여기서 β 는 6.765로 계산되어 진다. 형상보정 알고리즘을 사용한 센서위치별 ΔP^* 의 그래프에서 최대치가 6개이므로 6개의 모서리를 가지는 육각형태라고 판단할 수 있다. 오각형의 경우 육각형과 마찬가지로 Fig. 9(b)와 (d)에서 보는 바와 같이 오각형과 삼각형의 경우에도 육각형과 마찬가지로 자기장 변화의 최대치가 각각의 모서리의 개수와 일치하며 방사형 그래프로 확인할 수 있듯이 각각의 형태에 대해 판정할 수 있다. 오각형은 실제 모델과 가장 유사하게 형상 추정이 되었다. 오각형의 형상보정상수 β 는 3.897이다.

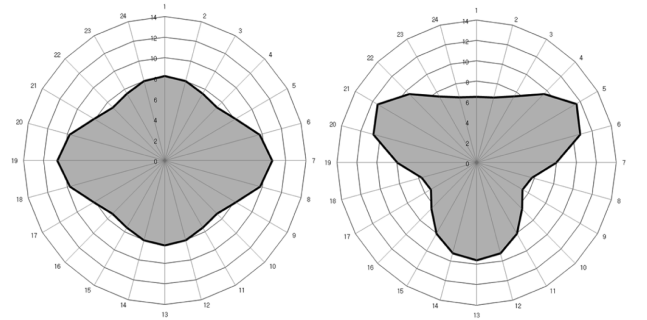
4. 탐지물체의 자세변화에 따른 형상추정

탐지물체의 자세변화에 따라 형상 추정이 가능한지 검토해 보았다. 물체의 최대 자세 변화 각도인 회전 물체의 중심에서 꼭지점까지의 각도의 절반을 회전시킨 형태로써, 육각형의 경우 30°, 오각형은 36°, 사각형 45°, 삼각형은 60°로 물체를 회전시켜 형상추정 알고리즘을 적용하였다.

육각형의 경우, Fig. 10(a)와 같이 센서위치 별로 자기장 변화 그래프를 그려볼 때 최대치가 6개 이상으로 나오며 불명확하여 꼭지점의 위치를 찾기 힘들다. 추정 형상은 육각형과 유사하지만 타원에 가까운 형태로 정확히 육각형이라는 형



(a) hexagonal shape (b) pentagonal shape



(c) tetragonal shape (d) triangular shape

Fig. 10. Revised shape by position variation.

상판정이 힘들다.

오각형은 정위치에 있을 때와 마찬가지로 명확히 그 형상을 추정할 수 있다. 탐지물체가 시계방향으로 36° 회전되어 시스템 내 투입된 경우 자기장 변화량으로 형상추정 알고리즘을 사용하면 센서위치별 ΔP^* 의 그래프는 최대치가 5개가 되어 오각형임을 판정할 수 있다. 형상추정 알고리즘을 통해 구해진 오각형의 센서위치별 ΔP^* 를 사용하여 회전된 오각형을 방사형 그래프로 나타내면 Fig. 10(b)와 같이 나타난다. 사각형과 삼각형 또한 ΔP^* 의 최대치가 각각 네 개, 세 개가 되므로 각각 모서리가 네 개, 세 개인 사각형, 삼각형으로 판단할 수 있다. 이를 이용하여 방사형 그래프를 그리면 Fig. 10의 (c), (d)와 같다.

IV. 결 론

최근 산업체에서나 의학계에서 다양한 원리를 이용한 비파괴 검사방법이 사용되고 있다. 초음파를 이용한 C.T나 자기공명현상을 이용한 M.R.I는 인체 내 단면을 관찰할 수 있는 시스템으로 현재 의학계에서 널리 이용되고 있다.

하지만 산업체에서는 많은 물리적 제약으로 인하여 탐지대상 위치, 무게 등은 판별 가능하지만 형상을 추정하기는 어렵다. 이에 본 논문에서는 비접촉식 전자기 측정 시스템을 구성하여 자성물체의 단위 길이당 Volume 및 형상을 판정하는

연구를 진행하였다. 비접촉식 전자기 측정 시스템은 기존의 고가의 센서장비가 아닌 상용 센서들로 구성되기 때문에 각종 산업용 배관 내부의 탐지물체 상태 검사에서부터 의료용 CT(Computer Tomography) 대체기기에 이르기까지 폭넓게 활용가능 할 것으로 기대할 수 있다. 시스템 내에 탐지물체가 투입되면 물체의 비투자율에 따라 변화하는 자기장을 15° 마다 배열되어 있는 24개의 홀센서로 검출하여 탐지물체의 Volume 및 형상을 판정할 수 있다. 본 연구에 따르면, 물체로 인한 자기장의 변화 값인 의 적분을 통해 자속 변화량을 알 수 있고 물체의 Volume에 따라 선형적으로 변하는 자속 변화량으로 자기장의 변화를 이용하여 물체의 Volume을 추정한다. 자기장 변화신호를 이용하여 자성물체의 형상판정도 가능하다. 물체의 형상에 따라 변하는 자기장 변화로 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통해 육각형, 오각형, 사각형, 삼각형의 형상 추정 기법을 통해 형상판정이 가능하다. 차후 시스템의 인가자기장을 늘리고 센싱 감도를 높여 보다 정밀하게 미지의 물체의 단면을 측정 가능한 비접촉식 전자기 측정 시스템을 간편하게 구현할 수 있을 것이다.

감사의 글

“이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.”

참고문헌

- [1] G. S. Park, S. Y. Hahn, K. S. Lee, and H. K. Jung, IEEE Trans. Magn. **29**(2), 1542 (1993).
- [2] D. C. Barber and B. H. Barber, J. Phys. E, Sci. Instrum. **17**(9), 723 (1984).
- [3] Y. S. Cho, NDT & E International **36**, 229 (2003).
- [4] K. Y. Kim, B. S. Kim, M. C. Kim, S. Kim, Y. J. Lee, H. J. Jeon, B. Y. Choi, and M. Vauhkonen, IEEE Trans. Magn. **40**(2), 1124 (2004).
- [5] G. S. Park and K. Seo, The 15th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields **3**(99), 26 (2005).
- [6] G. S. Park and K. Seo, IEEE Trans. Magn. **41**(5), (2005).

A Study on the Shape Evaluation using Non-contact Electromagnetic Measurement System

Jae Min Kim

LS Industrial Systems Co., Ltd., Cheongju 306-720, Korea

Seung Ho Yun, Hyuk Won, and Gwan Soo Park*

Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received 22 March 2010, Received in final form 6 April 2010, Accepted 6 April 2010)

We suggest the algorithm that it detects volume and shape according with a variation of magnetic field in non-contact electromagnetic measurement system. It is possible to assess an object shape through a variation of magnetic field. The basic idea is compared a length difference with a variation of magnetic field in a detected object and a circle which modeled equivalent area. And the shape is detected to many calibration process that it is similar to signal pattern between a length difference and a variation of magnetic field in object and equivalent circle. This is the shape detection algorithm that use only the variation of magnetic field. In this paper, it has application to the shape detection algorithm about the object as hexagon, pentagon, rectangle, trigon. we can detect the object shape easily because the shape detection algorithm is only used to the variation of magnetic field.

Keywords : non-destructive test, finite element method (F.E.M), shape detection