

# 2극 수직자계를 이용한 Magnetic Tomography의 설계와 제작

論 文

52B-2-3

## Design and Development of the Magnetic Tomography System Using Two Poles Perpendicular Magnetic Field

朴 垠 埴\* · 朴 寬 秀\*\*  
(Eun Sik Park · Gwan Soo Park)

**Abstract** - This paper describes a development of magnetic tomography system using two poles perpendicular magnetic field. In the system, the relative permeabilities of the object are detected by Hall sensors located along with tube circumference. The signals according to the size and position of the object could be separated in case the relative permeability of the object are over 10. Moreover, the size and location of the object could be determined in real time.

**Key Words** : Magnetic Tomography, 유한요소법, 비파괴, 비접촉

### 1. 서 론

Tomography는 비파괴 검사나 MRI처럼 보이지 않는 곳을 진단하지 않고도 볼 수 있도록 나타내는 기술로 Tomography의 핵심 기술은 센서내의 탐사체의 재질을 센서로 감지한 후 센서신호를 재구성하여 실시간으로 탐사체 내부의 상태를 검진하는 것이다. Tomography의 종류에는 크게 반사파를 이용한 Reflection Tomography와 전자의 여기를 이용한 Emission Tomography, 또 전자장을 이용한 Magnetic Tomography가 있다[1-4]. 자성체의 탐지용으로 사용할 수 있는 Sensor로는 첫째로 Impedance Type이 있다 [5,6]. 이것은 인가되는 교류자기에 의하여 유기되는 탐지대상 외전류를 측정하는 방법으로 현재 원자력 발전소의 순환배관의 결합검출용으로 주로 사용되고 있다. 탐지대상의 도전율의 변화를 Searching Coil이나 Rotating Coil로서 감지하는 방식이므로 탐지대상이 도전율이 높은 재료에서 유용하나 도전율이 높지 않은 탐사체를 감지하기 어렵다[7]. 둘째로, 탐사체의 투자율 변화를 감지하는 방식으로 Inductance Type이 있다[8,9]. 이 방식은 도전을 대신 투자율을 감지하는 방식으로 근래 들어 감도가 높은 자기센서들이 개발됨에 따라 분해능이 높은 시스템 개발이 가능하게 되었다[10]. 탐지용으로 사용되기 위해서는 MRI나 SQUID와 같은 고가의 장비를 사용하는 것이 비현실적이며 설치에서도 문제가 된다[11-13]. 따라서 간편하게 이동 및 설치가 가능하며 비교적 저렴한 장비가 필요하게 된다. 본 연구에서는 탐사체에 2극 수직자계를 인가하고 Hall sensor를 이용하여 탐사체를 감지하는 Inductance Type의 Magnetic Tomography를 개발하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 개요

Magnetic Tomography system은 탐사체의 투자율 변동을 비 접촉으로 감지하는 시스템으로서 그림 1은 Magnetic Tomography의 개요도 이다. 배관과 같은 원통형 센서 안에 어떠한 탐사체가 있다고 가정했을 때 그 탐사체의 투자율은 공기와는 서로 다르다. 따라서 탐사체가 없을 때, 즉 비 투자율이 1일 때의 자속밀도 B값을 검출한 후 탐사체가 있을 때의 비 투자율 변화에 따른 B값의 차이를 검출한다. 이 자속밀도 변화량  $\Delta B$ 의 값으로 탐사체의 위치 및 크기, 탐사체가 몇 개 있는지를 알아내는 것이 목적이다. 탐사체의 위치를 추적하기 위하여 우선 탐사체의 비 투자율 값과 위치를 임의로 선정하여 유한요소 해석 프로그램을 통하여 디자인 한 후 이에 따른 데이터베이스를 구성한다.

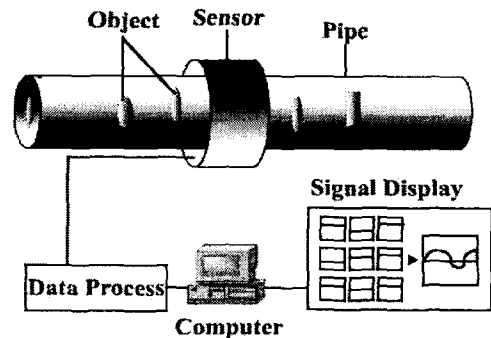


그림 1 시스템 개요도

Fig. 1 Diagram of the system

본 논문에서는 자속밀도 변화량의 값을 검출하기 위하여 2극 Magnetic Tomography를 설계하였다. 우선 3상유도기에

\* 正 會 員 : 韓國海洋大學 電氣電子學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 韓國海洋大學 電氣電子學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2002年 10月 21日

最終完了 : 2003年 1月 3日

한 상만 전류를 인가하여 2극을 만들어 실험하였다. 홀 센서의 위치는 각 코일 당 한 개씩 24개를 사용하였다.

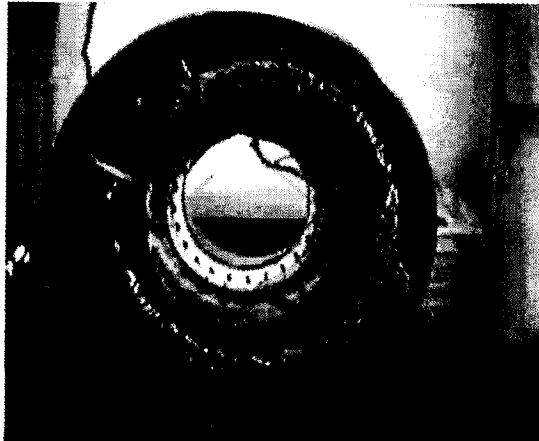


그림 2 2극자계 발생기  
Fig. 2 2 Pole magnetic generator

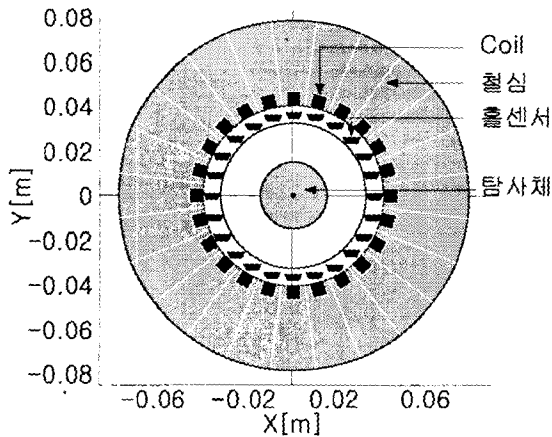


그림 3 2극자계 발생기 설계  
Fig. 3 Design of 2 Pole magnetic generator

그림 2는 유도기를 사용하여 제작한 실험 장치이다. 그림 2에서 외부의 코일부분이 유도기이고, 내부의 검은 점들이 홀 센서(Hall Sensor)이며, 밖으로 나오는 선이 홀 센서의 데이터 선이다. 그림 3은 그림 2의 실험장치의 구조를 유한요소 해석 프로그램으로 디자인 한 것이다. 그림 3에서 보이듯 홀 센서는 수직으로 위치시켜  $B_y$ 값만 검출하였다. 이는 홀 센서가 얼마나 정교하게 삽입되었는지 눈으로 판단하기 어렵기 때문에  $B_n$ 보다는 최대값을 찾기 쉬운  $B_y$ 값을 선택하여 오차를 줄이기 위함이다.

### 2.2 자계 해석

탐지대상 탐사체에 의한 미소 자기장을 검출할 수 있는 시스템을 해석 및 설계하기 위해서는 자성체의 결정자기 이방성(Crystal Anisotropy)과 형상 자기 이방성(Shape Anisotropy) 효과, 기계적 Stress에 의한 전자기적 영향, 자기

Hysteresis에 의한 영향을 해석할 수 있어야 한다. 즉 아래와 같은 Maxwell 방정식의 전개에서

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

식 (2)와 같이 자속밀도  $B$ 와 자계의 세기  $H$ , 그리고 자화량  $M$ 을 독립변수로 주어야 한다. 이것은 자성체의 이방성이나 Hysteresis 현상으로 인하여 자계의 세기  $H$ 와 자속밀도  $B$ 의 선형 함수적인 관계가 더 이상 성립하지 않기 때문이다.

$$H = \nu B - \nu_r M \quad (4)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J + \nu_r \nabla \times M \quad (5)$$

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla) A = J + \nu_r \nabla \times M \quad (6)$$

여기서  $\nu$  는 자화율(Magnetic Susceptibility),  $\nu_r$  은 비투자율의 역수이며, 이 식에서 자화율  $\nu$ 를 Tensor로 처리함으로써 자기 이방성을, 자화량  $M$ 을 변수로 처리함으로써 Hysteresis를 해석할 수 있게 된다[8,9]. 식 (6)으로부터 유한요소법(Finite Element Method)을 적용한다.

### 2.3 배관형 Magnetic Tomography의 설계 및 제작

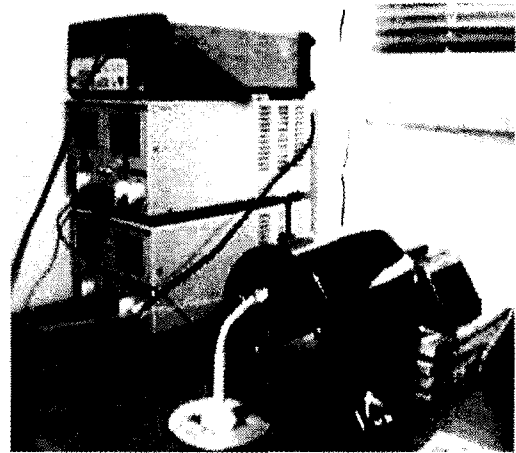


그림 4 실험장치의 전반적인 구조  
Fig. 4 Overview of the system

그림 3에서 중심으로부터 반지름 3.5[cm] 떨어진 지점에 24개의 전류와 홀 센서를 위치시키고, 내부의 탐사체를 1번부터 24번 지점까지  $B_y$ 값을 측정한다. 이때 탐사체의 위치를 변경하며 측정하고, 또 탐사체의 크기를 변화시켜  $\Delta B_y$ 값을 측정한다. 탐사체의 지름은 1.2, 2.5, 3[cm] 세 개를 비교 측정하며, 탐사체의 위치에 따른  $\Delta B_y$ 은 지름 3[cm]를 기준으로 위치를 변경하면서 측정하였다. 코일의 전류는 3.1[A]이며, 한 상에 10[V]의 전압을 인가하였다. 홀 센서의 번호는 그림 5와 같다. 각도로 보면 0도에서부터 반 시계방향으로 1~24번까지 15°마다 하나씩 위치한다. 전류의 방향도 그림 5와 같이

면은 들어가는 전류, 다른 면은 나오는 전류이다.

홀 센서는 병렬로 연결하여 5[V]의 전압을 인가하였다. 홀 센서에서 나오는 신호는 오실로스코프를 통하여 하나씩 측정하였다. 홀 센서의 range는 0~1000[G]까지이며, 2.5[V]의 기본 전압에서 0~5[V]까지의 변화량을 측정하고 자체의 세기로 환산하여 사용하였다.

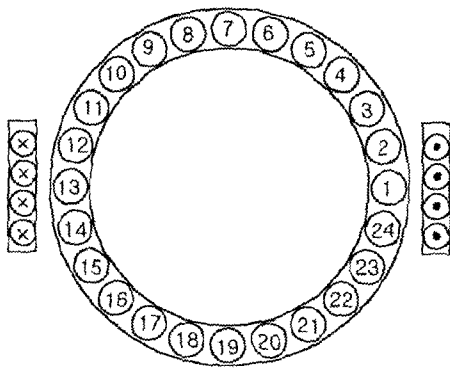


그림 5 홀 센서번호 및 전류방향

Fig. 5 Number of Hall sensor and current direction

그림 3에서 중심으로부터 반지름 3.5[cm] 떨어진 지점에 14개의 전류와 홀 센서를 위치시키고, 내부의 탐사체를 1번부터 24번 지점까지  $B_y$ 값을 측정한다. 이때 탐사체의 위치를 변경하며 측정하고, 또 탐사체의 크기를 변화시켜  $\Delta B_y$ 값을 측정한다. 탐사체의 지름은 1.2, 2.5, 3[cm] 세 개를 비교 측정하며, 탐사체의 위치에 따른  $\Delta B_y$ 은 지름 3[cm]를 기준으로 위치를 변경하면서 측정하였다. 코일의 전류는 3.1[A]이며, 한 상에 10[V]의 전압을 인가하였다. 홀 센서의 번호는 그림 5와 같다. 각도로 보면 0도에서부터 반 시계방향으로 1~24번까지 15°마다 하나씩 위치한다. 전류의 방향도 그림 5와 같이 한 면은 들어가는 전류, 다른 면은 나오는 전류이다.

홀 센서는 병렬로 연결하여 5[V]의 전압을 인가하였다. 홀 센서에서 나오는 신호는 오실로스코프를 통하여 하나씩 측정하였다. 홀 센서의 range는 0~1000[G]까지이며, 2.5[V]의 기본 전압에서 0~5[V]까지의 변화량을 측정하고 자체의 세기로 환산하여 사용하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 탐사체의 비투자율에 따른 Magnetic Tomography 특성

그림 6은 탐사체의 비 투자율이 5, 10, 100 세 가지의 경우 대한  $\Delta B_y$ 이며 비투자율이 5일 경우  $\Delta B_y$ 의 값은 상대적으로 작으나 그림 7에서 보듯이  $\Delta B_y$ 의 차이 즉 변동폭은 100일 때보다 우수한 것을 알 수 있었다. 따라서 정밀하게 측정을 하기 위하여 좀 더 세분화하여 최대치가 되는  $B_y$  측정해 보았다.

그림 7은 탐사체의 비 투자율 변화량에 대한 그래프이다. 비 투자율이 10정도에서도 감지 신호의 차이가 크

며 큼을 알 수 있다. 따라서 비교적 비 투자율이 낮은 것에도 잘 감지됨을 알 수 있다.

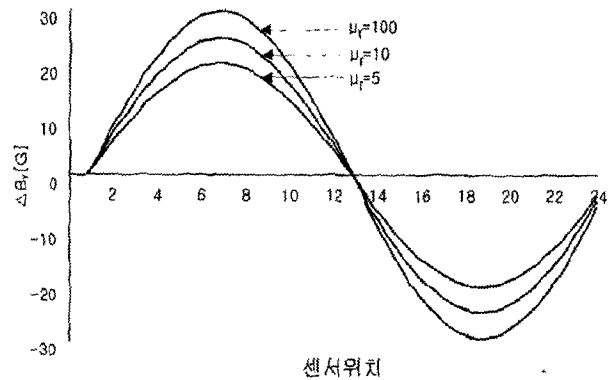


그림 6 물체가 중심에 있을 때  $\Delta B_y$

Fig. 6  $\Delta B_y$  when the location of the object is at center.

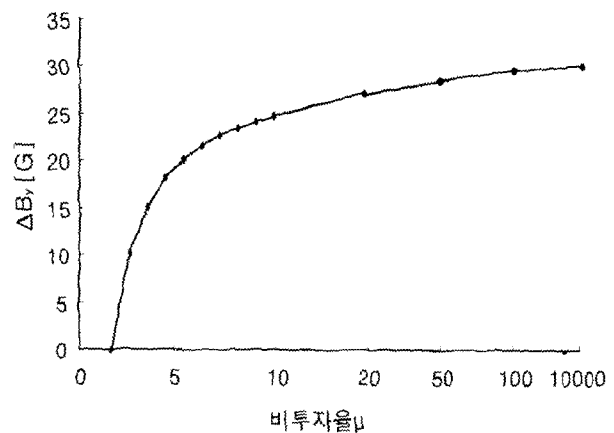


그림 7 탐사체의 비투자율에 따른  $\Delta B_y$

Fig. 7  $\Delta B_y$  according to the object permeability

#### 3.2 탐사체의 크기에 따른 Magnetic Tomography 특성

우선 탐사체가 중심에 있을 때를 기준으로 지름 1.2[cm], 2.5[cm], 3[cm]의 변화량을 살펴보았다.

그림 8은 탐사체가 중심에 있을 경우 탐사체의 크기에 따른  $\Delta B_y$ 의 변화량의 그래프이다. 실험값과 계산 값의 차이는 거의 없었으며, 실험값은 그림 8에서와 같이 약간 좌우대칭이 되지 않았는데 이는 탐사체의 위치를 정확하게 중심에 위치하지 못한 오차로 보인다.

그림 9는 탐사체가 상단에 있을 경우에 대한 실험값을 나타내고 있다. 7번 홀 센서 부근에 탐사체를 위치하였으므로 7번 홀 센서에서 가장 크다. 또한 탐사체의 지름이 크면 클수록  $\Delta B_y$ 값도 커진다는 것을 알 수 있다. 그림 10에서 탐사체가 좌측에 있을 경우에도  $B_y$ 가 최대가 되는 위로 이동하였을 경우보다는 미흡 하지만 탐사체의 크기에 따른 변화량을 알 수 있었다. 따라서 탐사체의 크기에 따른  $\Delta B_y$ 의 검출에 있어서 실험값이 계산 값과 거의 일치하며 탐사체의 크기를 검출할 수 있었다.

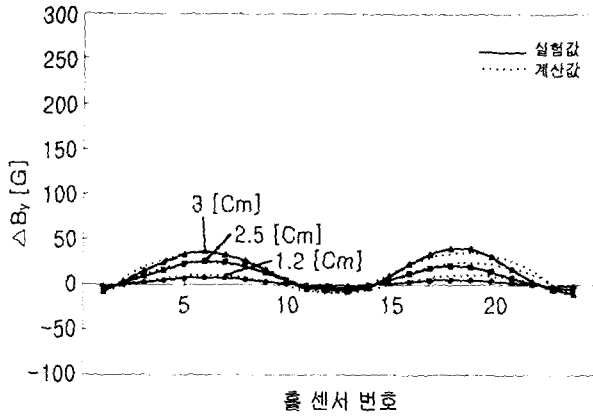


그림 8 탐사체가 중심에 있을 경우 탐사체 크기에 따른 감지신호 변화

Fig. 8  $\Delta B_y$  according to the object size when the location of the object is at center

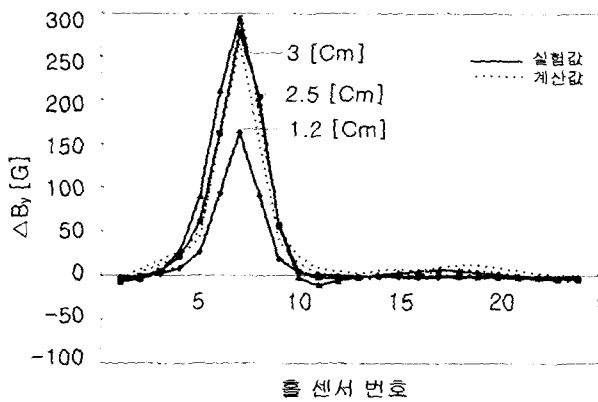


그림 9 탐사체가 상단에 있을 경우 탐사체 크기에 따른 감지신호 변화

Fig. 9  $\Delta B_y$  according to the object size when the location of the object is at upper side.

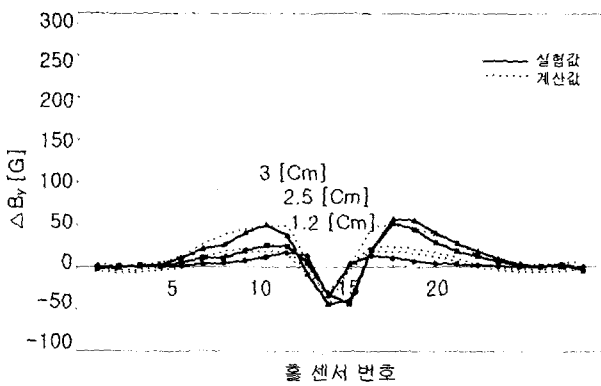


그림 10 탐사체가 좌측에 있을 경우 탐사체 크기에 따른 감지신호 변화

Fig. 10  $\Delta B_y$  according to the object size when the location of the object is at left side.

### 3.3 탐사체의 위치에 따른 Magnetic Tomography 특성

위치에 따른  $\Delta B_y$ 의 변화량 측정은 탐사체를 중심에서 좌로 0.75cm씩 옮겨가며 측정해 보았고, 또 탐사체를 위로 이동시켜 측정도 해보았다. 이 때 탐사체가 위로 이동하였을 경우는  $B_y$ 의 값이 최대가 되는 방향으로 이동하였기 때문에  $\Delta B_y$ 의 값이 최대가 되었다.

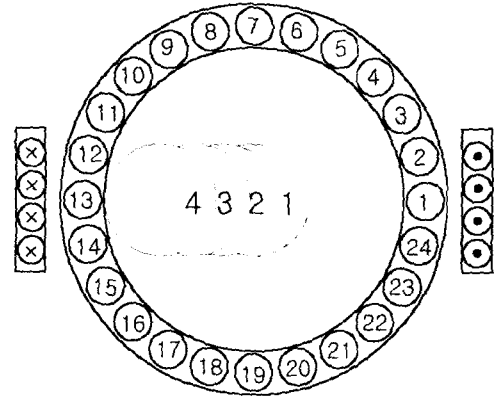


그림 11 탐사체가 좌측으로 이동할 때

Fig. 11 Moving position of the left side.

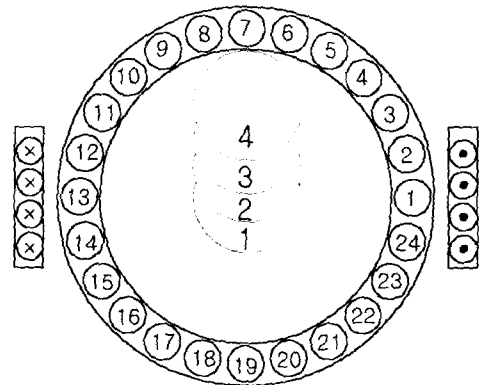


그림 12 탐사체가 상단으로 이동할 때

Fig. 12 Moving position of the upper side.

그림 11, 그림 12는 탐사체의 위치에 따른 경우를 4가지로 표현한 것이다. 그래프에 위치를 나타내기 위해서 편의상 1, 2, 3, 4의 위치로 표현한다. 탐사체가 위로 이동할 경우의 번호도 동일한 순서로 표현한다.

그림 13은 탐사체가 좌측으로 이동할 때의 그래프이다. 탐사체가 좌로 이동할 때는  $B_y$ 의 변화량이 적기 때문에  $\Delta B_y$  값이 크지 않다. 하지만 위치가 변화함에 따라서 그래프의 모양도 다가가는 홀 센서 주변의 값이 커짐을 알 수 있다. 그림 14는  $B_y$ 의 값이 가장 큰, 탐사체가 상단으로 이동하는 그래프이다. 따라서  $\Delta B_y$ 의 값은 가장 크며 이동하는 위치에 따른  $\Delta B_y$ 의 값도 많은 차이를 보였다.

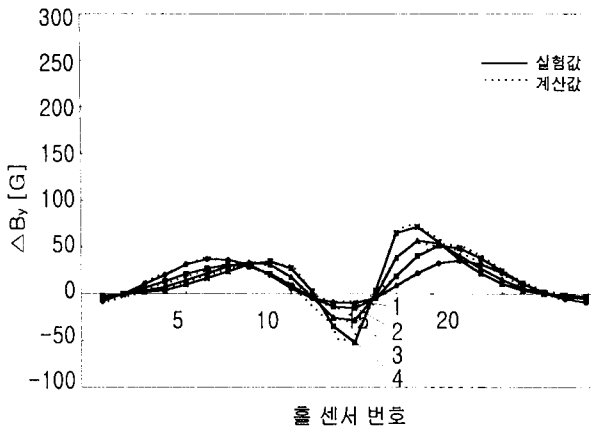


그림 13 탐사체가 좌측으로 이동시 자속밀도의 변화  
Fig. 13  $\Delta B_y$  when the object moves to the left side.

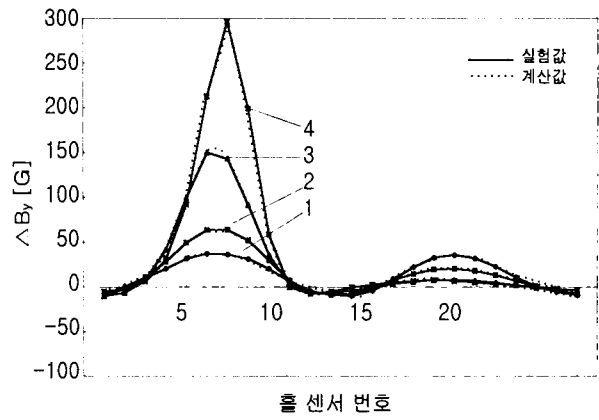
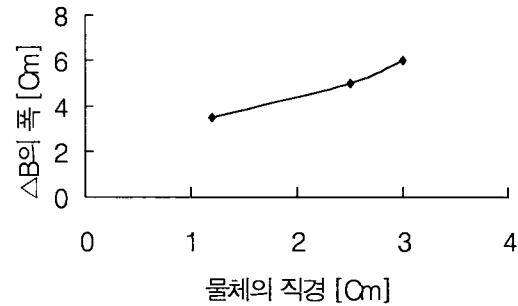
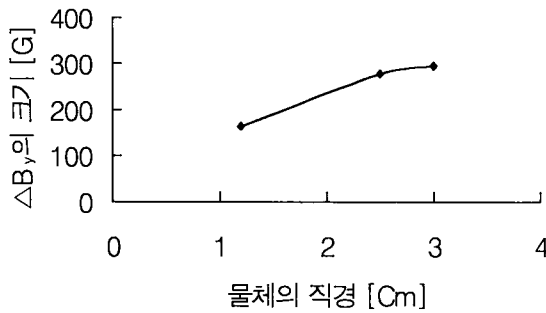
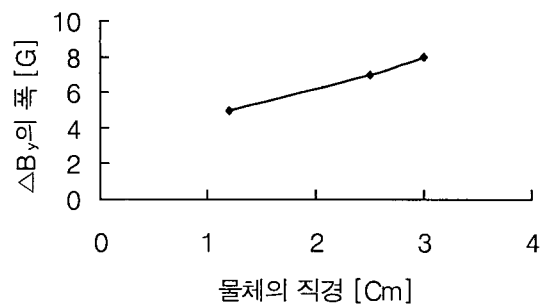
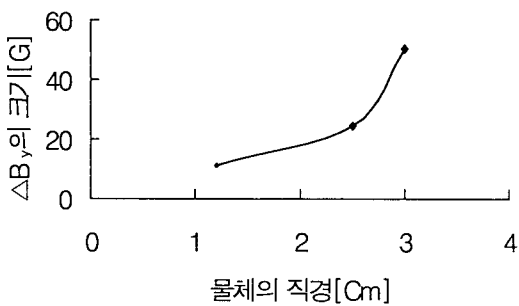


그림 14 탐사체가 상단으로 이동시 자속밀도의 변화  
Fig. 14  $\Delta B_y$  when the object moves to the upper side



(a) 상단 위치



(b) 좌측 위치

그림 15 탐사체의 크기에 따른 자속밀도의 변화  
Fig. 15  $\Delta B_y$  according to the object size.

### 3.4 탐사체의 위치와 크기에 따른 검출신호 비교

위치나 크기에 따른  $\Delta B_y$ 의 변화량 측정에서 보듯이 위치나 크기가 변화하면  $\Delta B_y$ 의 값도 변한다. 따라서 탐사체의 위치가 변하여  $\Delta B_y$ 의 값이 변하였는지 탐사체의 크기가 변하여  $\Delta B_y$ 의 값이 변하였는지 판별할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 이때 주의하여 살펴보아야 할 것은  $\Delta B_y$ 의 값

의 크기뿐만 아니라 폭도 살펴보아야 한다는 것이다.

그림 9와 그림 14를 비교하면, 그림 9는  $\Delta B_y$ 의 값이 커짐과 동시에  $\Delta B_y$ 의 폭도 증가하고 있음을 알 수 있다. 반면 그림 14에서는 탐사체의 거리가 홀 센서에 가까워질수록  $\Delta B_y$ 의 값 크기는 커지나  $\Delta B_y$ 의 폭은 같음을 알 수 있다. 따라서 탐사체의 위치나 크기가 동시에 변경이 된다하여도  $\Delta B_y$ 의 값의 크기와 폭을 고려한다면 충분히 판별 가능하다.

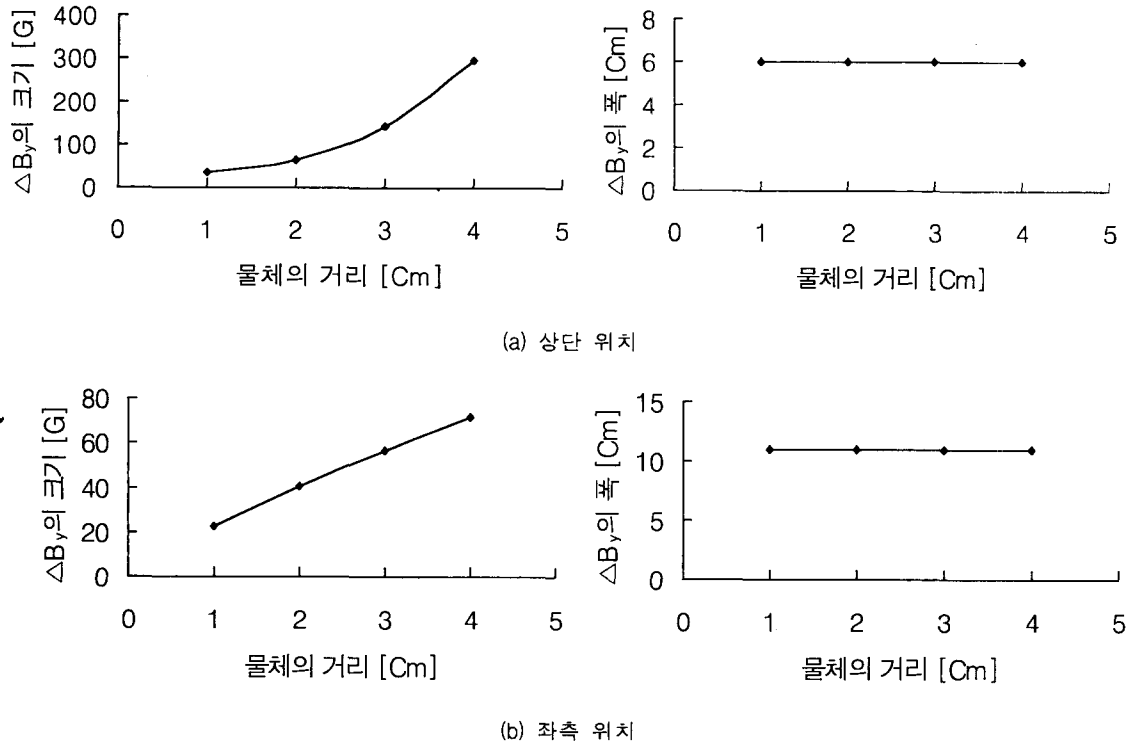


그림 16 탐사체의 위치에 따른 자속밀도의 변화  
 Fig. 16  $\Delta B_y$  according to the object position.

그림 15, 16은 탐사체의 크기에 따른 영향과 위치에 따른 영향을 분석한 도표이다. 탐사체의 크기가 변하였을 때는  $\Delta B_y$ 의 크기와 폭이 모두 변하였지만, 탐사체의 위치가 변하였을 때는  $\Delta B_y$ 의 크기는 변하였지만 폭은 변화하지 않았다. 따라서 탐사체의 크기의 변화와 위치의 변화를  $\Delta B_y$ 의 값으로 판별할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 2극 자계를 이용한 Magnetic Tomography system을 개발하였다. 배관형태의 탐사체에서 배관에 수직 방향으로 자계를 인가한 후 배관 둘레에 설치된 홀 센서로 자계의 변화량을 측정된 값을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 비교적 쉽게 구입할 수 있는 range가  $\pm 100G$  정도의 홀 센서를 사용하여도 비 투자율이 10 정도의 탐사체도 충분히 감지가 가능함을 확인하였다.

둘째, 탐사체의 크기가 증가할 경우 감지신호의 크기와 폭이 함께 증가하였다.

셋째, 탐사체의 위치가 인가 자계방향으로 치우쳐 있을 경우와 인가자계와 수직 방향으로 치우쳐 있을 때 감지 신호의 폭 및 크기가 증가하는 패턴이 달라짐을 알 수 있었다. 즉, 감지 신호의 증가 패턴으로 탐사체의 위치를 추정할 수 있었다.

넷째, 탐사체의 위치가 배관 중심에서 벗어남에 따른 감지 신호의 크기는 증가하였으나 감지 신호의 폭은 변하지 않을 수 있었다. 즉 감지신호의 폭의 변화를 관찰하면 탐사체의 크기에 따른 감지신호와 탐사체의 위치에 따른 감지 신호를 분별할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 2극 자계 Magnetic Tomography는 배관 속을 흐르는 탐사체의 비 투자율의 변화를 감지하여 탐사대상의 크기, 위치를 추정할 수 있는 시스템으로 배관 내부를 흐르는 탐사체를 실시간으로 간편하게 추적할 수 있음을 보였다. 본 연구에서 개발된 시스템은 배관시스템에 설치하여 원거리, 실시간, 비접촉 모니터링에 사용할 수 있으므로, 철을 다루는 배관시스템이나 오, 폐수의 모니터링에 응용 가능할 것으로 생각된다. 탐사체의 크기와 위치뿐만 아니라 모양에 관한 정보도 얻기 위해서는 자기저항센서 (Magneto-Resistance sensor)와 같이 감도가 더욱 높은 센서를 사용하여 100 mG 정도의 측정감도를 갖는 시스템이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원 연구(과제번호: 2000-1-30200-022-2)에 의하여 수행된 연구결과입니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 42, No. 4.1, pp. 469-474. 1997. Translated from Radiotekhnika i Elektronika, Vol. 42, No. 4, pp. 506-512, 1997.
- [2] Natterer, F., The Mathematics of Computerized Tomograph, Chichester: Wiley, 1986. Translated under the title Matematicheskie aspekty komp'yuternoi tomografii, Moscow: Mir, 1990.
- [3] Barber, D.C. and Brown, B.H., J. Phys. E: Sci, Instrum., vol. 17, no, 9, p. 723, 1984.
- [4] Powell, H.M., Barber, D.C., and Freeston, I.L., Clin. Phys. Physiol. Meas., vol. 8, suppl. A, p. 109, 1987.
- [5] D. L. Atherton, "Finite element calculations and computer measurements of magnetic flux leakage patterns for pits", British Journal of NDT, pp.159-162, May 1988
- [6] D. L. Atherton and M.G.Daly, "Magnetic leakage flux testing with probes: physical principles and restrictions for application", NDT International, vol.20, no.2, pp.101-104, April 1987
- [7] B. Brudar, "Magnetic leakage fields calculated by the method of finite differences", NDT International, vol.18, no.6, pp.353-357, December 1985
- [8] D. L. Atherton and D.C.Jiles, "Effects of stress on the magnetization of steel", IEEE Trans. Magn., vol. 19, no. 5, pp. 2021-2023, September 1983
- [9] D. L. Atherton and A.Teitsma, "Detection of anomalous stress in gas pipelines by magnetometer survey(invited)", J.Appl.Phys. 53(11), pp. 8130-8135, November 1982
- [10] D. L. Atherton and M. G. Daly, "Finite Element Calculation of Magnetic Leakage Detector Signals", NDT International, vol. 20, no. 4, pp. 235-238, August 1987.
- [11] Brown, B.H. et al. "Cardiac and respiratory related electrical impedance changes in the human thorax", IEEE Trans. Biomed, Eng. 41(8):729-734, 1994.
- [12] Hong, H.D. & M.D. Fox, "Magnetic back projection imaging of the vascular lumen", IEEE Trans. Biomed, Eng. 42(1): 102-108. 1995.
- [13] Muftuler, L.T. & Y.Z. Ider. "Measuring AC magnetic field distribution using MRI". In Proc. 18th Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc, (Amsterdam). 1996.

## 저 자 소 개

**박은식 (朴垠植)**

1974년 7월 22일생. 2000년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2002년 한국해양대학교 대학원 전기공학과 석사졸업. 현 동 대학원 전기전자공학부 박사과정

Tel : 051-410-4925

E-mail : flash93@bada.hhu.ac.kr

**박관수 (朴寬秀)**

1963년 3월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학). 1997년~1999년 Carnegie Mellon Univ. Visiting scalar. 1994년~현재 한국해양대학교 전기전자공부 교수

Tel : 051-410-4412

E-mail : gspark@hanara.hhu.ac.kr