

자계를 이용한 배관 내의 자성체 이동량 측정 기술

김덕건, 김재민, 서강, 박관수
 부산대학교 전자전기공학과

Measurement technique of Magnetic Substance for using Magnetic field

Dug Gun Kim, Kang Seo, Gwan Soo Park
 Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract -본 논문은 전자기원리를 이용하여 배관 내 자성체 이동량을 측정 가능한 자계 인가 시스템을 설계하고자 한다. Single 코일 타입, Helm-Holtz 코일타입, 수직자계, 반도체 소자 이용한 타입의 4가지 형태에 대해 전류 Source, 주파수, 배관 재질을 달리하여 설계 및 해석하였다. 전원이 AC일 경우 주파수가 높을수록, 배관의 도전율이 높을수록 자성체의 측정 정밀도를 감소시키며 DC 전원일 때 수직자계에서 반도체 소자를 이용하여 측정정밀도를 높인다.

기 벡터 포텐셜이다. 히스테리시스 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율 χ 로서

$$M = \chi H \tag{4}$$

와 같이 표현되지만 해석 영역 내에 히스테리시스 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량 M' 은 외부의 자계가 제거되면 사라지는 가역항(reversible component : χH)과 외부의 자계가 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비 가역항(irreversible component : M)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$M = \chi H + M \tag{5}$$

식(5)를 식(2)에 대입하면

$$H = \nu B - M \tag{6}$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $\nu = 1/\mu$, $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 이다. 이것을 식 (1)에 대입하면 식 (6)의 관계로부터

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J + \nabla \times M \tag{7}$$

회전에 의한 벡터 관계식과 coulomb 게이지로부터 식 (8)과 같은 지배방정식을 얻는다.

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla) A = J + \nabla \times M \tag{8}$$

1. 서 론

최근 철광석, 유연탄 등 원재료비 상승으로 인한 전세계적인 자원 전쟁이 가속화되고 있다. 원료 확보 및 기술 개발, 원가 절감 등을 통해 글로벌 경쟁력을 갖추어 나아가야 한다. 특히 극한의 원가 절감을 위해서는 원재료의 배합비 최적화가 중요하다. 강자성체의 대표적인 철의 생산에 있어 배관 내의 자성체 이동량을 정밀 측정하는 기술의 필요성이 증가하고 있다.

기존 측정 기술에는 방사선 투과법, 초음파 탐상법, EIT(Electric Impedance Tomography), MT(Magnetic Tomography) 등이 있다. 방사선 투과법은 모든 재료에 적용 가능하다는 장점이 있지만 높은 방사선 안전관리가 요구되며, 초음파 탐상법은 높은 투과력을 가졌지만 측정되지 않는 dead zone이 존재한다는 단점이 있다. EIT는 시스템이 소형이고 응답시간이 충분히 짧다는 장점이 있지만 접촉 저항에 따른 오차가 있으며 폭발위험 및 누수 위험영역에 사용이 불가능하다.

본 논문에서는 전자기원리를 이용하여 배관 내 자성체 이동량을 측정 가능한 자계 인가 시스템을 설계하고자 한다. Single 코일 타입, Helm-Holtz 코일타입, 수직자계, 반도체 소자를 이용한 타입 등 크게 4가지 형태에 대해 전류 Source, 주파수, 배관 재질을 달리하여 기초 설계 및 해석을 하였다. 결과를 비교, 분석을 통해 자성체의 이동량 측정 시스템의 적합성 여부를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

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

$$B = \mu_0 (H + M') \tag{2}$$

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

여기서 μ_0 는 진공에서의 투자율(permeability), A는 자

2.2 자계 인가 시스템 설계

자기장 안에 자화되는 특성을 가진 자성체를 측정하는 시스템은 외부에서 인가되는 자기장의 크기와 형태에 따라 센싱 능력이 결정된다. 투자율이 일정한 자성체에서 배관 내에 자성체 양의 변화는 인가되는 자기장의 변화에 영향을 미친다. 따라서 자성체 양의 변화에 따른 자기장 변화 측정 능력을 최대화하기 위한 시스템 설계는 몇 가지를 고려사항이 있다.

먼저 외부에서 자기장을 인가하는 방식에는 일정한 자기장을 발생시키는 DC 형태와 교번 자계를 발생시키는 AC 타입으로 구분할 수 있다. DC 형태의 정자계 타입은 자성체의 크기와 형태에 따라 인덕턴스가 다르므로 변화되는 자기장을 이용하여 자성체의 크기와 형태를 추정한다. AC 형태의 교번자계 타입은 자성체에 와전류가 유기되며, 와전류에 의한 자기장 변화를 측정한다.

두 번째는 Single turn 코일의 형태와 Helm-Holtz 코일의 형태로 자기장을 발생시키는 방법으로 Helm-Holtz

표 1. 실험조건

	Source	주파수(Hz)	배관재질
Case 1	DC	0	SUS
Case 2	AC	60	비자성·비도전체
Case 3	AC	1k	비자성·비도전체
Case 4	AC	60	SUS
Case 5	AC	1k	SUS

코일의 경우가 Single turn 코일의 형태보다 구조나 설계가 조금 복잡하지만 자기장의 크기와 균일도 면에서 더 좋다.

세 번째는 자기장 인가 방향으로 자성체가 이동하는 축으로 발생하는 방법과 이동하는 방향의 수직으로 발생하는 방법이 있다.

마지막으로 자기장을 측정하는 센서의 종류에 따라 센싱 코일을 이용하는 방법과 반도체 소자를 이용하는 방법이 있다.

그 외 배관의 재질에 따른 신호의 변화를 고려하였다. 배관은 총 3개로 구성되며 각각 내관의 지름은 $\phi 400$, $\phi 530$, $\phi 686$ 으로 최외각 배관에 코일을 감는다. 코일은 직경 3[mm], 턴수는 1369[Turn], 전류는 10A를 흘린다. 코일 저항은 20 C에서 6.76[Ω]이다. 자성체의 비투자율은 100으로 하였다. 실험 조건은 <표 1>과 같다.

2.2.1 Single Turn 코일을 이용한 계측

Single Turn 코일을 이용한 계측은 구조나 설계가 가장 간단한 타입으로 <그림 1>과 같이 배관 외부에 한 권선이 직류 또는 교류전원에 연결되고 검출 코일로부터 유기 전압을 측정하는 형태이다.

<그림 2>는 배관 내에 자성체가 있을 경우 2차원 축대칭 모델로 해석한 그림이다. (a)는 직류전원이 13690[A·Turn]일 때 자기장 분포이며, 자속이 배관 내의 자성체에 집중됨을 알 수 있다. 자성체의 최대 자속 밀도는 700[G]이다. (b)는 교류전원 13690[A·Turn]이며 위상 90도일 때 자기장 분포이다. 배관 재질은 도전율이 20.3~27.0%인 SUS이며, 자속의 시간 변화에 따른 와전류의 영향으로 자속이 배관 내에 거의 도달하지 못한다.

2.2.2 Helm- holtz 코일을 이용한 계측

Helm- holtz 코일을 이용한 계측은 두 코일의 정중앙에 매우 균일한 자기장을 만들 수 있는 구조로써 <그림 3>과 같이 배관 외부에 두 권선이 직류 또는 교류전원에 연결되고 중앙 위치의 검출 코일로부터 유기 전압을 측정하는 형태이다. 인가된 자계 방향은 배관의 축 방향이다.

<그림 4>은 <그림 3>과 같이 직류전원(a)일 때, 자속이 배관 내의 자성체에 집중되며, (b)의 교류전원에서 와전류의 영향으로 자속이 배관내에 거의 도달하지 못함을 알 수 있다.

2.2.3 수직 자계를 이용한 계측

수직 자계를 인가한 계측은 <그림 5>와 같이 Helm- holtz 코일을 이용하여 자계 방향을 배관 축 방향과 수직으로 인가한 구조이다.

<그림 6>는 배관 축 방향으로 2차원 모델로 해석한 그림이다. (a)는 직류전원이 13690[A·Turn]일 때 자기장 분포이며, 자속이 배관 내의 자성체에 집중됨을 알 수 있다. 자성체의 최대 자속 밀도는 100[G]이다. (b)는 교류전원 13690[A·Turn]이며 위상 90도일 때 자기장 분포이다. 배관의 와전류 영향으로 자성체 내부에는 자기장이 거의 들어가지 못하며 외부에만 영향을 준다.

2.2.4 반도체 소자를 이용한 계측

<그림 7>은 반도체 소자를 인가 자계 방향으로 배관 주위에 배열하여 자속 밀도를 측정하는 방법이다. 수직 자계를 이용한 계측구조와 동일하며 검출코일 대신에 반

도체 소자를 이용한다. 자성체 양의 변화에 대한 자속 밀도를 직접 측정하는 것이므로 직류전원일 때 시간에 따른 자속 양의 변화가 없을 때도 그 검출 값을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 즉 센싱 코일은 시간에 따른 자속

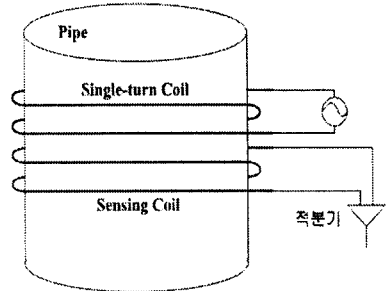
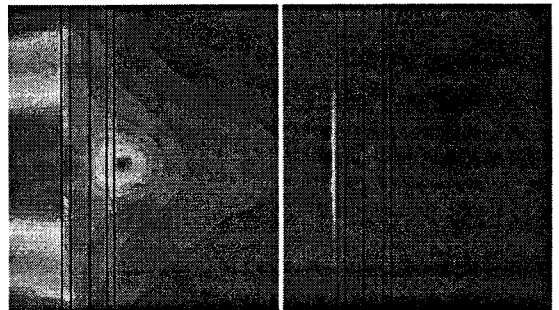


그림 1. Single Turn코일 계측 개념도



(a)Case 1일 때

(b)Case 4일 때

그림 2. Single Turn 코일 시뮬레이션

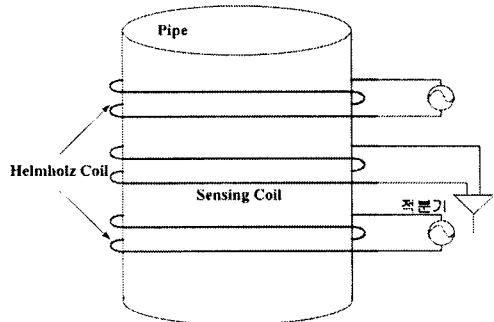
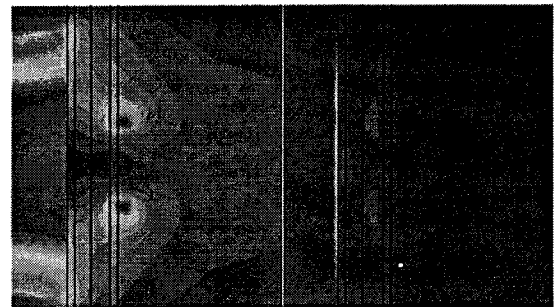


그림 3. Helm- holtz 코일 계측 개념도



(a)Case 1일 때

(b)Case 4일 때

그림 4. Helm- holtz 코일 시뮬레이션

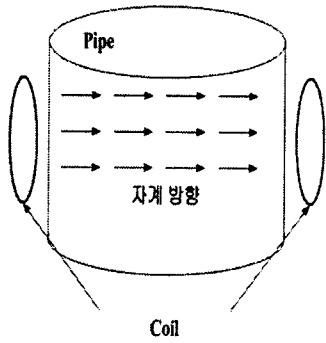
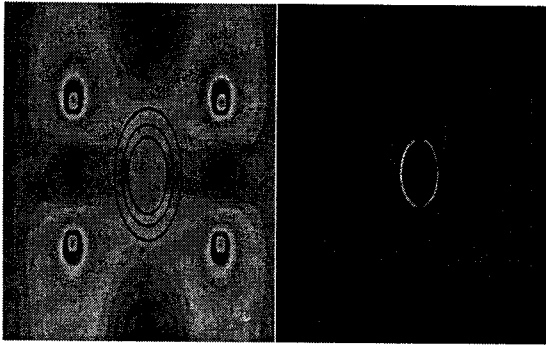


그림 5. 수직자계를 이용한 계측



(a)Case 1일 때 (b)Case 4일 때
그림 6. 수직 자계를 이용한 계측

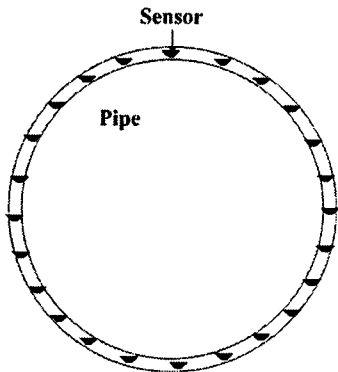


그림 7. 반도체소자 이용한 계측

표 3. 각 Case 별 Ratio [Ratio 1/Ratio 2]

	Single 코일	Helm-Holtz	수직자계	반도체소자
case1	1.12E-02/ 1.01E+00	1.60E-02/ 2.26E+00	4.98E-04/ 9.99E-02	1.28E-03/ 3.04E-01
case2	5.25E-03/ 2.00E+00	5.07E-03/ 2.16E+00	7.51E-02/ -7.23E-01	1.99E-03/ -1.93E-01
case3	-3.79E-04/ 1.62E+00	-2.62E-04/ 1.52E+00	1.79E-04/ -5.40E-01	-4.83E-05/ -3.06E-01
case4	4.80E-04/ 5.04E-01	-2.89E-03/ 1.11E+00	2.29E-03/ -9.74E-02	-1.80E-03/ -6.45E-02
case5	-3.28E-05/ -4.14E-02	5.13E-06/ -1.83E-01	3.84E-07/ 3.97E-05	2.11E-07/ -6.02E-04

변화량만 측정 가능하므로 자속의 변화가 없을 때는 자성체가 있어도 0의 검출 값이 나오지만 반도체 소자는 자속 밀도의 값을 검출 하므로 유지되는 것이다.

2.3 해석결과

<표3>은 Single 코일 타입, Helm-Holtz 코일타입, 수직자계, 반도체 소자를 이용한 타입의 4가지 형태에 대해 각 Case 별 Ratio를 정리한 표이다. Ratio1은 배관의 면적 대비 자성체의 45% 유기전압에서 자성체 40% 유기전압을 뺀 값을 자성체 40%유기전압을 나눈 값이다. 즉 자성체 이동 변화량의 측정값의 비율이다. Ratio2는 배관의 면적 대비 자성체의 40% 유기전압에서 자성체가 없을 때 유기전압을 뺀 값을 자성체가 없을 때 유기전압을 나눈 값이다. 즉 자성체가 있을 때와 없을 때 신호 차이 비율이다. 여기서 반도체 소자의 경우 출력값이 자속밀도이므로 유기전압 e 대신 자속밀도 B값으로 대체한다.

$$Ratio1 = \frac{e_{45} - e_{40}}{e_{40}}, Ratio2 = \frac{e_{40} - e_0}{e_0}$$

Case 1 경우, 즉 DC 전원일 경우 Single 코일과 Helm-Holtz의 Ratio1, Ratio 2의 값이 높지만 유기전압은 시간에 대한 자속의 변화량이 없을 때 '0'의 값이 출력되어 자성체의 양을 알 수 없는 단점이 있다. 그러므로 DC전원일 경우 반도체 소자를 이용하여 자속의 변화량이 없더라도 현재 자속밀도를 측정하여 자성체의 양을 알 수 있는 장점이 있다.

Case 2의 경우, 즉 AC 전원, 60Hz, 비자성.비도전체의 배관 재질일 경우 5% 이동 변화량 비율, 즉 Ratio 1이 비율이 10배 정도 좋지만 자성체가 없을 때의 유기전압이 자성체가 40%있을 때 유기전압보다 크므로 계측시스템으로 적절하지 않다. Single 코일과 Helm-holtz의 경우 Ratio가 좋지만 현실적으로 비자성.비도전체의 배관을 사용하기 어렵다.

Case 3의 경우 즉 AC 전원, 1kHz, 비자성.비도전체의 배관 재질일 경우 Ratio 값이 Case2에 비해 10배 이상 낮거나 또는 자성체의 양이 증가 할수록 유기전압이 감소한다.

Case 4,5의 경우 배관의 재질이 도전을 20.3-27.0%인 SUS로써 배관의 와전류로 인해 자속이 거의 영향을 주지 못하여 Ratio 값이 매우 낮거나 또는 자성체의 양이 증가할수록 유기전압이 감소한다.

3. 결 론

본 논문에서는 전자기원리를 이용하여 배관 내 자성체 이동량을 측정 가능한 자계 인가 시스템을 설계하였다. Single 코일 타입, Helm-Holtz 코일타입, 수직자계, 반도체 소자를 이용한 타입의 4가지 형태에 대해 전류 Source, 주파수, 배관 재질을 달리하여 기초 설계 및 해석을 하였다.

전원이 AC일 경우 주파수가 높을수록, 배관의 도전을 이 높을수록 자성체의 측정 정밀도를 감소시킨다. DC 전원일 경우 수직 자계에서 반도체 소자를 이용하여 높은 측정정밀도를 가진다. 앞으로 자기인가시스템의 측정 정밀도를 높이기 위해서는 자기 코어를 이용하여 자기 저항을 줄여 자속량을 늘리고, 시스템의 형상을 변화하여 자기장의 크기와 균일도를 높이는 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] G.S.Park and D.S.Kim, "Development of a Magnetic Inductance Tomography System", IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 5, pp. 1932-1935, May 2005.
- [2] K.Y.Kim, et. al., "Electrical impedance imaging of two-phase field with an adaptive mesh grouping scheme", IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 2, pp. 1124-1127, March 2004.