

비접촉식 정밀 변위 측정용 자기센서 모델링

신우철*, 홍준희#, 이기석*

Modeling of a Non-contact Type Precision Magnetic Displacement Sensor

Woo Cheol Shin *, Jun Hee Hong#, Kee Seok Lee*

ABSTRACT

Our purpose is to develop a precision magnetic displacement sensor that has sub-micron resolution and small size probe. To achieve this, we first have tried to establish mathematical models of a magnetic sensor in this paper. The inductance model that presents basic measuring principle of a magnetic sensor is based on equivalent magnetic circuit method. Especially we have concentrated on modeling of magnetic flux leakage and magnetic flux fringing. The induced model is verified by experimental results. The model, including the magnetic flux leakage and flux fringing effects, is in good agreement with the experimental data. Subsequently, based on the augmented model, we will design magnetic sensor probe in order to obtain high performances and to scale down the probe.

Key Words : Magnetic Displacement Sensor (변위 측정용 자기 센서), Magnetic Flux Leakage (자기장 누설), Magnetic Flux Fringing (자기장 프링징), Equivalent Magnetic Circuit Method (등가 자기회로법), Permeance (퍼미언스).

기호설명

Φ = magnetic flux
 g = length of air gap
 i = coil current
 v = alternating voltage
 R_e = coil resistance
 L = inductance
 ω_s = radial frequency of alternating voltage
 n = coil turns

R_s = total reluctance of magnetic circuit
 l = length of flux path
 μ = permeability
 μ_0 = permeability of free space
 A = cross-sectional area of core face
 A_e = equivalent cross-sectional area of core face considering flux fringing
 P_{L1} = permeance of leakage flux model I
 P_{L2} = permeance of leakage flux model II
 P_{gap} = permeance of air gap

접수일: 2004년 12월 31일; 게재승인일: 2005년 5월 13일

* 충남대학교 기계공학과 대학원

교신저자: 충남대학교 기계공학과

E-mail hongjh@cnu.ac.kr Tel. (042) 821-5642

1. 서론

일반적으로 변위 측정용 자기센서는 가격대 성능비가 좋고 주변환경에 대한 강건한 특성 때문에 자동시스템 구성에 주로 적용되는 센서 중 하나이다. 대표적인 적용 예로서 물체의 위치감지, 두께, 진동 측정을 비롯해 회전체의 rpm 및 회전오차 모니터링을 들 수 있다. 유사한 기능의 갭센서(gap sensor) 형태로는 정전용량형 센서와 광학형 센서가 있다. 정전용량형 센서는 일반적으로 분해능이 우수하나 선형 측정 구간이 짧고 주위환경 변화에 민감한 단점이 있다.¹ 광학형 센서는 응답성이 우수하고 전자기 노이즈가 심한 환경에도 계측이 가능한 특성을 지녔으나 측정면의 표면 거칠기 상태나 반사율 변화에 의해 신호가 왜곡되거나 감도가 변하는 단점이 있다.² 이에 비해 자기센서는 기본구조가 간단하고 적용성이 뛰어나지만 상대적으로 정밀도가 낮고 주파수 대역폭도 제한적이다. 현재 시판중인 유도형 자기센서는 다양한 프로브 형태와 성능으로 개발되어 왔으나 물체의 유무를 감지하는 근접센서가 대부분이고 변위 측정용 경우도 분해능이 수 백에서 수 마이크로 수준에 있다.

본 논문은 변위 측정용 자기센서의 측정 정밀도 향상과 프로브(probe) 소형화 설계에 필요한 핵심 기술들을 체계화 하고자 센서 프로브 외형 치수와 코일 감은수에 관련된 인덕턴스 모델을 유도하였다. 특히 자기장 누설과 프링징 현상을 고려하는데 초점을 맞추었다. 유도된 모델의 실험적 검증은 코일 감은수 변화와 프로브 형상 변화 경우에 대해 각각 이루어졌다. 검증 결과를 통해 유도된 모델식의 타당성과 함께 자기장 누설과 프링징이 모델식에 차지하는 비중을 확인하였다. 더불어 유도된 모델식을 통해 성능향상 가능성을 검토하고 프로브 설계를 위한 연구방향을 제시하고 있다.

2. 측정 시스템 구조

2.1 기본 구성

비접촉식 변위 측정용 유도형 자기센서(이하 자기센서)의 기본 구성은 전자석 프로브와 신호검출회로(signal detection circuit)로 크게 구분할 수 있으며 Fig.1 에 그 개략도를 보이고 있다. 프로브는 자기장을 통해 측정대상(target)의 상대변위정보를

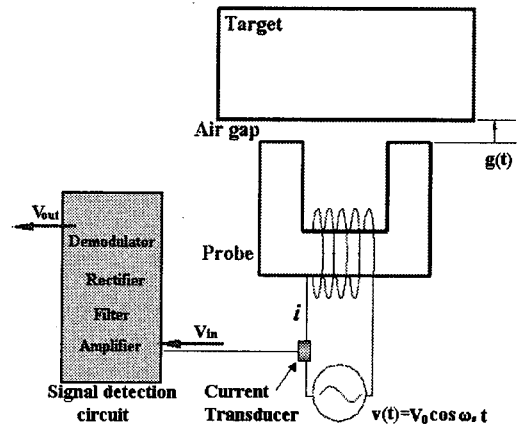


Fig. 1 Configuration of a magnetic displacement sensor

코일에 흐르는 교류 전류의 진폭변화 신호로 나타내는 역할을 한다. 이 프로브의 전류신호는 전류 변환기(current transducer)를 통해 전압 신호로 변환되어 신호검출회로로 전송된다. 신호검출회로는 복조(demodulation)과정을 통해 프로브 신호에서 원하는 변위 신호만을 검출하여 적당한 크기의 센서신호로 출력하는 기능을 한다.

2.2 기본 원리

자기센서의 전자석 프로브에서 발생하는 자기장은 측정대상을 경유하여 Fig. 2 와 같은 주 자기장 경로(main magnetic flux path)를 형성한다. 이때 코일에 인가되는 전압과 전류의 관계는 패러데이 유도법칙(Faraday's law of induction)에 의해 다음식으로 정리된다.

$$v = i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt} + R_e i \quad (1)$$

식(1)의 우변 첫째 항은 측정 대상의 움직임에 따른 역기전력(back-emf), 둘째 항은 전류 변화에 의한 유도 기전력, 셋째 항은 코일 고유 저항의 전압강하를 의미한다. 일반적으로 코일에 인가하는 전류의 주파수가 변위의 시간변화율을 보다 상대적으로 크게 설계하기 때문에 둘째 항에 비해 첫째 항과 셋째 항은 무시할 수 있으므로 식(1)은 다음식과 같이 간소화될 수 있다.

$$i = \frac{1}{L} \int v dt \quad (2)$$

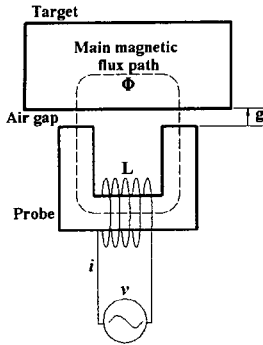


Fig. 2 Schematic principle of a magnetic displacement sensor

이때 인가되는 전압을 다음식으로 정의하면

$$v = V_o \cos(\omega_s t) \quad (3)$$

식(2)에 의해 코일전류 진폭 I 는 다음과 같다.

$$I = \frac{V_o}{\omega_s L} \quad (4)$$

여기서 인가되는 전압의 크기와 주파수는 항상 일정한 반면에 인덕턴스의 크기는 자기장 경로에 의해 변한다. 특히 공극의 길이는 인덕턴스를 변화시키는 주된 인자가 된다. 자기센서 프로브에서 이루어지는 변위 검출 과정을 정리하면 측정대상의 변위는 공극의 길이 변화로서 인덕턴스 크기 변화를 가져오고 식(4)에 의해 전자석 코일에 흐르는 교류 전류의 진폭변화로 나타나게 된다.

3. 모델링

3.1 인덕턴스

공극 길이에 따른 인덕턴스 변화 관계는 자기 센서의 기본 측정원리를 나타내므로 그 특성은 센서 성능을 결정하는 중요한 의미를 지니고 있다. 본 논문은 변위와 인덕턴스의 관계식을 유도하기 위해 등가 자기회로 해석방법을 적용하였다.³ 전자석 프로브에서 발생하는 자기장은 암페어 법칙(Ampere's law)에 의해 다음식으로 정리할 수 있다.

$$\Phi = \frac{ni}{R_s} \quad (5)$$

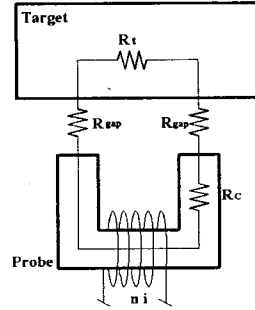


Fig. 3 Schematic of equivalent magnetic circuit model for main magnetic path

여기서 R_s 는 형성된 자기장 경로의 전체 자기저항(reluctance)으로서 기본식은 다음과 같다.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (6)$$

인덕턴스는 쇠교자속(magnetic linkage) $n\Phi$ 와 전류 i 의 비례상수로 정의되므로 식(5)에 의해 다음식으로 정리할 수 있다.

$$L = \frac{n^2}{R_s} \quad (7)$$

3.2 자기장 누설과 프린징을 고려하지 않은 기본 모델

자기장 누설과 프린징 현상을 배제한 주 자기장 경로에 대한 등가 자기회로 표현은 Fig.3 과 같다. 여기서 R_t , R_{gap} , R_c 는 각각 측정대상, 공극, 전자석 코어의 자기저항을 의미한다. 따라서 등가 자기회로 해석방법에 따라 인덕턴스 모델은 다음식으로 정리할 수 있다.

$$L = \frac{n^2}{R_t + 2R_{gap} + R_c} \quad (8)$$

여기서 공극 자기저항 모델은 식(6)에 의거하여 다음식과 같다.

$$R_{gap} = \frac{g}{\mu_0 A_{gap}} \quad (9)$$

측정대상과 전자석 코어의 재료는 강자성체로서 각각의 자기저항은 공극 자기저항의 1/1000 이하로 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 식(8)은 다음식으로 정리된다.

$$L = \frac{\mu_0 n^2 A_{gap}}{2g} \quad (10)$$

식(10)은 단지 주 자기장 경로만 고려한 기본 인덕턴스 모델식이 된다.

3.3 자기장 누설과 프린징을 고려한 모델

Fig.4 는 자기장 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 프로브와 측정대상 사이에 형성되는 자기장 분포도를 나타내고 있다. 해석 결과를 통해 주 자기장 경로 이외 부분에 자기장 누설(flux leakage)과 자기장 프린징(flux fringing) 현상이 발생함을 예측할 수 있다. 이 자기장 분포를 근거로 등가 자기회로를 구성하면 Fig.5 와 같이 나타낼 수 있다. R_f , $R_{L1,2}$ 은 각각 프린징 자기장 발생 경로의 자기저항과 누설 자기장 발생 경로의 자기저항을 나타낸다.

누설 자기장은 자기회로 상 공극을 통과하는 자기장을 제외한 경로의 자기장을 의미한다. 실제 모든 자기 디바이스에는 누설 자기장이 존재하며 완전한 차폐는 거의 불가능하다. 본 논문에서 유한요소법에 의한 자기장 분포 해석결과(Fig.4)를 바탕으로 프로브와 측정대상에 예상되는 대표적인 누설 자기장 경로를 Fig.6 과 같이 정하였다. 프로브의 4 각주 코어의 각 측면과 측정대상 사이의 누설 자기장의 형상을 원호로 가정한 모델 I 과 코어의 두 폴(pole) 사이의 직사각형 누설 자기장 모델 II로 구분하였다. 여러 갈래의 병렬구조의 자기회로를 수학적으로 용이하게 표현하기 위해 자기저항의 역수로 정의되는 퍼미언스(permeance)를 통해 표현하였다.

누설 자기장 모델 I 에 대한 퍼미언스 식을 유도 하기 위해 미소 퍼미언스를 다음과 같이 정의한 후

$$dP = \frac{\mu \times dA}{dl} \quad (11)$$

Fig.7 과 같이 도식화된 누설 자기장 발생 구간에 대해 적분하면 다음과 같은 일반화된 퍼미언스 식을 얻을 수 있다.

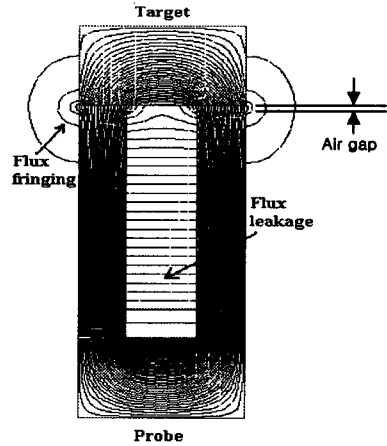


Fig. 4 Magnetic flux distribution by FEM analysis

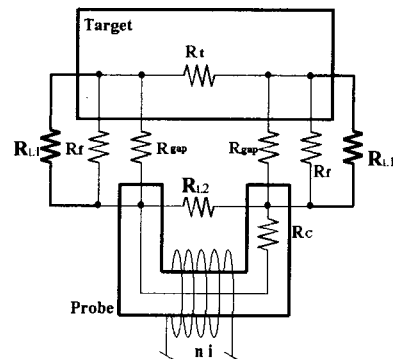


Fig. 5 Schematic of equivalent magnetic circuit model considering magnetic flux leakage and fringing

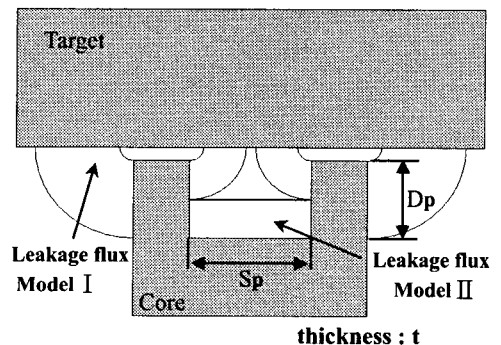


Fig. 6 Magnetic flux leakage models

$$P = \frac{2\mu_0 t}{\pi} \int_g^{r+s} \frac{dr}{r} = \frac{2\mu_0 t}{\pi} \ln\left(1 + \frac{s}{g}\right) \quad (12)$$

위식을 4 각주 코어 한 폴의 네 측면에서 발생하는 누설 자기장 모델 I 에 적용하면 그 퍼미언스 식은 다음과 같이 정리된다.

$$P_{L1} = \frac{6\mu_0 t}{\pi} \ln\left(1 + \frac{D_p}{g}\right) + \frac{2\mu_0 t}{\pi} \ln\left(\frac{S_p}{2g}\right) \quad (13)$$

또한 누설 자기장 모델 II 에 해당하는 퍼미언스 식은 다음과 같다.

$$P_{L2} = \frac{\mu_0 t}{S_p} \left(D_p + g - \frac{S_p}{2}\right) \quad (14)$$

자기장 프린징 현상은 자기장 경로상에 강자성체 코어와 공기의 급격한 투자율 변화로 인해 발생한다. Fig.8 에 나타나 있는 것처럼 공극을 통과하는 자기장 흐름은 강자성체 단면에 수직인 방향으로 공극을 통과하는 주 경로의 자기장 이외에 단면 모서리 둘레를 따라 바깥쪽으로 퍼져나가는 자기장이 발생한다. 이 자기장을 프린징 자기장이라 한다. 일반적으로 프린징 현상의 영향은 공극부 코어의 실제 단면보다 더 큰 단면 효과를 가져온다. 그리고 그 영향은 공극의 길이가 길어질수록 증가하는 경향을 갖는다.⁴ 평행하게 마주대한 직사각형 코어 단면에서 공극의 길이가 단면적 치수에 비해 짧은 경우 다음과 같은 공극 단면적 보정식을 적용하여 자기장 프린징 영향을 수식화 할 수 있다.⁵

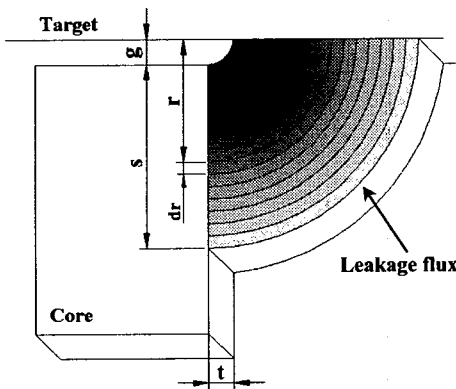


Fig. 7 General scheme of magnetic leakage flux model I

$$A_e = (a+3g)(t+3g) \quad (15)$$

따라서 프린징 영향을 고려한 공극의 퍼미언스는 다음식으로 정리된다.

$$P_{gap} = \frac{\mu_0 A_e}{g} \quad (16)$$

결국 누설 자기장과 프린징 자기장을 고려해 개선된 인덕턴스 모델식은 다음과 같다.

$$L = n^2 \left(\frac{P_{gap} + P_{L1}}{2} + P_{L2} \right) \quad (17)$$

4. 실험에 의한 모델링 검증 및 결과 고찰

유도된 인덕턴스 모델식을 검증하기 위해 프로브를 제작하여 인덕턴스 측정 실험결과와 비교하였다. 본 논문의 모델식은 와전류 영향을 고려하지 않았으므로 실험상에서도 와전류 영향을 최소화 하기위해 0.1mm 두께의 규소강판을 적층하여 프로브 코어를 제작하였다.⁶ 측정실험장치는 Fig.9 와 같이 인덕턴스 측정기인 LCR 미터(EDC-1630, ED Co., Ltd.)와 프로브 고정장치 그리고 타겟 장착 광학 스테이지로 구성하였다. 실험방법은 센서 프로브를 타겟에 수직인 방향으로 고정하고 갭 게이지를 이용하여 초기 공극 셋팅을 한 뒤 측정 구간 0.1~1.0mm 에 대해 0.05mm 만큼 일정하게 공

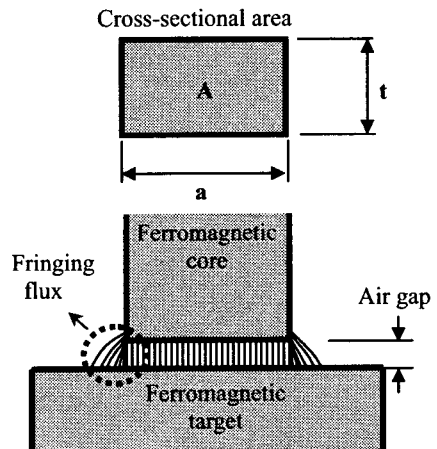


Fig. 8 Magnetic flux fringing at an air gap

극 길이를 증가시켰다. 이 때 정확하게 공극을 조정 입력하기 위해 마이크로미터가 달린 광학 스테이지를 이용하여 타겟을 이송시켰다. 모델식은 주 자기장 경로만 고려한 기본 인덕턴스 모델과 자기장 누설과 프린징을 고려한 개선된 인덕턴스 모델로 구분하고 측정실험과 동일한 공극범위와 위치에 대한 인덕턴스 곡선으로 나타내어 비교하였다.

첫번째 검증실험은 동일 코어 형상(Table 1)에 코일 감은수(n)가 다른 프로브들에 대해 공극 길이에 따른 인덕턴스 이론값들과 측정값을 비교하였다. 결과 그래프는 Fig.10 과 같다. 동일한 공극 구간에 대해서 인덕턴스 변화 영역은 코일 감은수에 따라 차이가 있으나 공극크기에 따른 인덕턴스 경향은 유사함을 볼 수 있다. 단지 이론값들과 실험값 사이에 오차가 존재함을 관찰할 수 있는데 이 크기는 개선된 모델이 기본 모델에 비해 작게 나타남을 모든 실험결과에서 볼 수 있다. 이것은 자기장 누설과 프린징을 고려함으로써 보다 현실에 가까운 모델식이 유도됨을 의미한다. 코일 감은수에 따라 개선된 모델의 정량적 오차크기와 기본 모델 오차에 대한 개선된 모델의 오차 비율 Table 2 에 정리하였다. 기본 모델과 측정값의 오차는 자기장 누설과 프린징 존재에 의한 것으로서 이와 개선된 모델식의 오차 비율은 자기장 누설과 프린징 부분에 대한 모델식 유도의 적합성을 의미한다. 그 결과 코일 감은수가 작을수록 기본 모델에 비해 개선된 모델의 오차 비율이 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 원인은 코일 감은수가 작을수록 자속밀도가 낮아짐에 따라 국부 포화영역이 줄어들어 누설 자기장 발생 영역이 모델링된 기본 영역에 근접해지기 때문이라 사료된다.

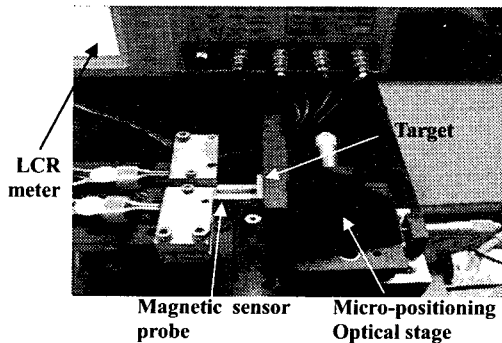
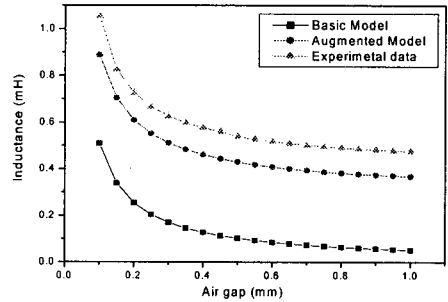
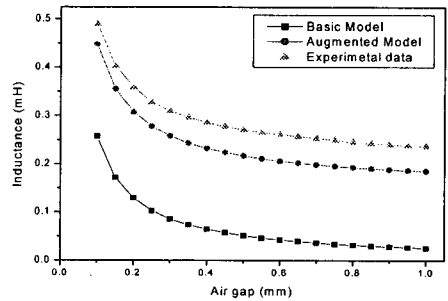


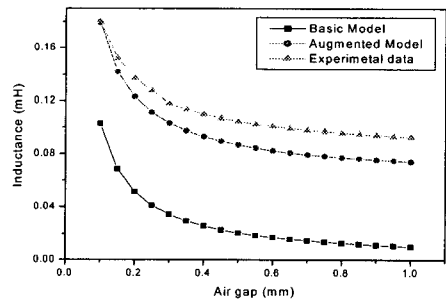
Fig. 9 Experimental setup



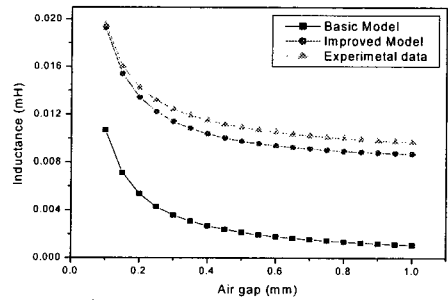
(a) $n = 70$



(b) $n = 50$



(c) $n = 30$



(d) $n = 10$

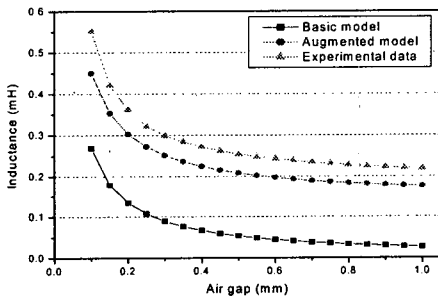
Fig. 10 Inductance versus air gap according to coil turns

Table 1 Probe's parameters (unit : mm)

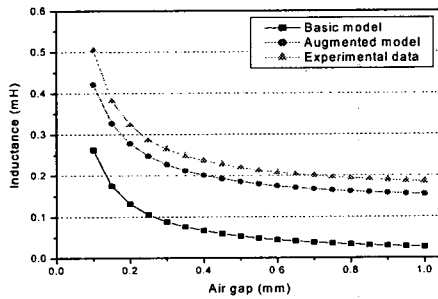
Parameter	Value	Parameter	Value
Sp	4.75	a	3.18
Dp	18.24	t	5.36

Table 2 Verification results of augmented model according to coil turns

Coil turns (n)	Error (%)	Error of augmented model
		Error of basic model
70	21.0	0.344
50	19.9	0.313
30	15.5	0.247
10	9.50	0.130



(a) $D_p = 14.07$ mm



(b) $D_p = 10.20$ mm

Fig. 11 Inductance versus air gap according to pole length of core

두 번째 검증실험은 동일한 코일 감은수 50 회에 코어의 폴 길이(Dp)가 다른 프로브들에 대해 공극크기에 따른 인덕턴스값들의 경향을 비교하였다.

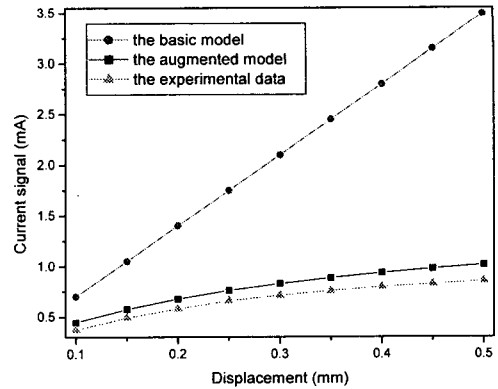


Fig. 12 Simulation results of current signal versus displacement

결과 그래프를 Fig.11 에 보이고 있다. 공극에 따른 인덕턴스 변화 거동은 모두 유사했으며 그 크기는 개선된 모델식이 기본 모델식에 비해 측정값에 근접함을 볼 수 있다. 이 두 프로브는 동일한 코일 감은수와 코어 단면적을 갖으므로 기본 모델식에서는 동일 프로브로 간주된다. 하지만 코어 폴의 길이에 따라 누설 자기장 발생 영역이 달라짐으로 실제로 서로 다른 인덕턴스 곡선을 갖는 것을 측정값을 통해 볼 수 있다. 개선된 모델식은 이런 실험결과를 추종하고 있다.

Fig.12 은 Fig.11(b)의 기본 모델과 개선된 모델 그리고 측정 실험에 의한 인덕턴스 데이터를 식 (4)에 각각 대입하여 변위에 따른 센서의 전류신호 관계를 고찰하였다. 이 때 적용한 전압 진폭 V_0 는 15V, 주파수 ω_s 는 20kHz 이다. 그 결과 프로브에 누설 자기장과 자기장 프린징 현상이 전혀 없는 이상적인 경우에 해당하는 기본 모델식에 의한 센서신호는 완벽한 선형성과 감도를 지니는 반면에 프로브의 누설 자기장과 자기장 프린징 존재하는 실험 데이터와 개선된 모델식에 의한 센서신호는 감도가 약 5 배 정도 감소되고 선형성도 약 5%로 낮아졌다. 이것은 자기장 누설과 프린징이 센서 감도, 선형성에 악영향을 미침을 보여주는 것이다. 프로브의 소형화 연구에 있어서도 코어 단면적이 작아질수록 자속밀도가 상대적으로 커지게 되므로 누설 자기장 영향에 의한 감도 및 선형성 문제가 더욱 부각 될 것으로 사료된다. 결국 누설 자기장과 자기장 프린징 현상을 줄이는 프로

브 형상 설계와 더 나아가 자기장 차폐기술이 자기장 센서의 감도 및 선형성 향상과 소형화 설계의 중요한 요소가 될 것으로 예상된다.

5. 결론

본 논문은 센서 프로브 외형 치수와 관련된 자기센서의 특성을 정립하기 위해 인덕턴스 모델식을 유도하였다. 등가 자기저항 해석방법을 적용하여 프로브의 형상에 관계된 자기저항식을 통해 인덕턴스를 표현하였다. 특히 자기장 누설과 프린징 현상을 고려하여 보다 현실에 가까운 인덕턴스 모델식을 제시하였다. 실험을 통해 모델식을 검증하고 자기장 누설과 프린징이 자기센서 모델식에 차지하는 비중이 크음을 확인하였다. 더불어 이 자기장 누설과 프린징이 센서의 감도 및 선형성에 큰 영향을 미침을 실험결과와 유도된 모델식을 적용한 시뮬레이션 결과를 통해 고찰하였다. 향후 연구 과제로서 유도된 모델식을 토대로 자기장 누설과 프린징을 고려한 자기 센서의 감도, 선형성 향상 연구와 소형화 설계 연구를 수행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2003 년도 충남대학교 자체연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Li, X., Meijer, G. C. M., "Elimination of Shunting Conductance Effects in a Low-Cost Capacitive-Sensor Interface," IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, Vol.49, No.3, pp.531-534, June 2000.
2. Kim, B. J., Kim, S. H., Lee, Y. W., Philippe Sainsot, Louis Flamand, Kwak, Y. K., "Development of Optical Fiber Coupled Displacement Probe Sensor with a New Compensation Method," Journal of KSPE, Vol.19, No.12, pp.27-32, 2002.
3. Kim, S. H., Rim, C. T., Choi, D. J., "Modeling of an Inductive Position Sensing System based on a Magnetic Circuit and its Analysis," Journal of KSPE, Vol. 18, No.6, pp.93-101, 2001.
4. Sarma, M. S., "Electric Machines," Brooks/ Cole, pp.47-49, 1994.
5. Lipo, T. A., "Introduction to AC Machine Design Vol.1," University of Wisconsin-Madison, pp.40-42, 1996.
6. Noh, M., "A Model of Magnetic Bearings Considering Eddy Currents and Hysteresis," International Journal of KSPE, Vol.4, No.3, pp.5-11, May 2003.