

## 유도형 변위 센서의 모델링 및 해석

신우철\*(충남대 대학원기계공학과), 홍준희(충남대기계공학과), 이동주(충남대기계공학과)

### Modeling of Inductive Position Sensor and its Analysis

Woo Cheol Shin, Jun Hee Hong, Dong Ju Lee(Mech. Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

The resolution of analog sensor is determined by its sensitivity and amplitude of noise. This paper presents modeling of inductive gap sensor base on equivalent magnetic circuit and analysis of sensitivity. The model of inductive gap sensor is verified by the experimental results. Then we can simulate static characteristic of inductive gap sensor using this model. Computer simulation show that sensor's sensitivity and linearity are affected by magnetic flux's leakage and fringing, and that they are affected by shape of sensor probe.

**Key Words** : Inductive gap sensor (유도형 변위 센서), Equivalent magnetic circuit (등가 자기 회로), Flux leakage(누설 자속), Flux fringing (자속 프런징)

#### 기호설명

- $R_E$  = Electrical resistivity of coil
- $n$  = Coil turns
- $\mu_0$  = Permeability in the vacuum
- $L$  = Inductance
- $l_c$  = Length of flux path in the core
- $l_t$  = Length of flux path in the target
- $\mu_c, \mu_t$  = Specific permeability in the core, tar
- $c_w$  = Width of rectangular core
- $c_t$  = Height of rectangular core
- $R_{gap}$  = Reluctance in the air gap
- $R_c$  = Reluctance in the core
- $R_t$  = Reluctance in the target
- $R_L$  = Reluctance of flux leakage
- $R_f$  = Reluctance of flux fringing

#### 1. 서론

본 논문에서 다루는 유도형 변위 센서는 다른 형태의 센서에 비해 구조가 간단하고 저가이나 성능면에서 떨어져 정밀도가 수 마이크로 수준이다.

본 논문은 유도형 변위 센서의 분해능 향상을 목적으로, 프로브 형상이 센서 민감도에 미치는 영향을 연구하였다. 자기장 해석을 통해 모델링식을 세우고, 실험을 통해 검증하여 프로브의 형상에 의해 결정되는 자기장 분포가 센서의 민감도 미치는 영향을 고찰하였다.

#### 2. 유도형 변위 센서 모델링

##### 2.1 유도형 변위 센서 원리

유도형 센서의 프로브는 전자석 형태를 하고 있다. 코일에 교류 전류가 흐를 때 패러데이 유도 법칙에 의해 유도 기전력( $v$ )이 발생하여 코일에 인가되는 전압과 전류의 관계식은

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

와 같다. 이 때, 코일에 인가하는 전압의 주파수가 높으면 코일 고유 저항에 의한 전압강하는 무시할 수 있고, 식(1)를 전류로 정리하면

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

이 된다. 코일에 인가되는 전압은 일정하지만 유도형 센서의 인덕턴스는 공극의 함수가 된다. Fig.1에서 보면 공극이 곧 측정 대상체의 변위를 나타내므로, 결국 식(2)에 의해 측정 대상체 변위는 인덕턴스 변화를 가져오고 코일에 흐르는 교류 전류의 진폭 변화로 나타나게 된다.

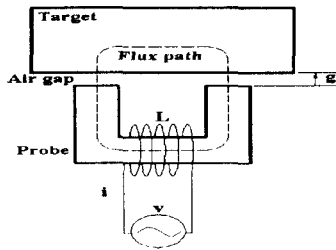


Fig.1 Schematic of inductive sensor

### 2.3 모델링

유도형 변위 센서의 민감도를 해석하기 위해서 공극에 대한 인덕턴스의 모델링이 필요하다. 공극에 대한 인덕턴스 관계는 자기장 해석을 통해 고찰할 수 있다. 본 논문에서는 유한요소법 상용 프로그램을 이용하여 자기장 경로를 확인하고, 이것을 기초로 등가 자기 회로를 구성하여 공극에 대한 인덕턴스 관계를 수학적으로 모델링하였다. 인덕턴스는 쇠교 자속(flux linkage)과 전류 사이의 비례 상수로 식(3)와 같이 코일 감은수와 자기 저항으로 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{n^2}{R} \quad (3)$$

일반적으로 등가 자기 회로에서 자기 저항을 역수 관계인 퍼미언스(permeance)로 표현한다. 공극 주위의 자속 분포는 공간으로 확산되는 형태이므로 식(10)과 같이 미소 퍼미언스를 정의하여 공간에 대해 적분하여 나타낼 수 있다.

$$dP = \frac{\mu \times dA}{dl} \quad (4)$$

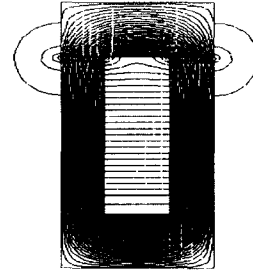


Fig.2 Appearance of flux in probe, air gap and targ

Fig.2는 센서 프로브, 공극, 측정 대상체에서 자기장 분포를 나타내고 있다. 프로브 폴(pole)의 끝에서 반원 형태의 자기장 프린징과 두 폴 사이에 누설 자속을 볼 수 있다. Fig.2의 자기장 분포를 토대로 Fig.3과 같이 등가 자기 회로를 구성할 수 있다. 각부의 자기저항은 Fig.4의 프로브 변수로써 다음과 같은 퍼미언스식으로 나타낼 수 있다.

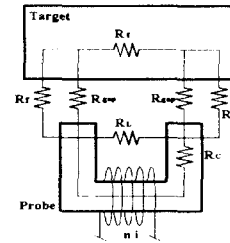


Fig.3 Equivalent circ

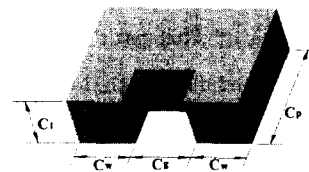


Fig.4 Parameter of probe

· 공극의 퍼미언스

$$P_{gap} = \frac{\mu_0 C_t C_w}{g} \quad (5)$$

· 코어의 퍼미언스

$$P_c = \frac{\mu_c \mu_0 C_t C_w}{l_c} \quad (6)$$

· 측정 대상체의 퍼미언스

$$P_t = \frac{\mu_t \mu_0 C_t C_w}{l_t} \quad (7)$$

· 누설 자속 경로에 대한 퍼미언스

$$P_L = \frac{\mu_0 C_t (C_p - S_1)}{C_g} + 0.528 \mu_0 (C_p - S_1) + 2 \mu_0 \frac{C_p - (S_1 + S_2)/2}{\pi} \log \left( 1 + \frac{2C_w}{C_g} \right) \quad (8)$$

· 자기장 프린징에 대한 퍼미언스

$$P_f =$$

$$\mu_0 \left[ 1.056 (c_w + c_t) + \frac{2(2C_w + C_t)}{\pi} \log \left( 1 + \frac{S_1 + S_2}{g} \right) + \frac{2C_t}{\pi} \log \left( 1 + \frac{2S_1}{g} \right) + 0.616g + \left( \frac{3S_1}{2} + \frac{S_2}{2} \right) \right] \quad (9)$$

등가 자기 회로에서 회로 법칙을 통해 퍼미언스 식을 정리한 후 식(3)에 대입하면

$$L = n^2 \left( \frac{P_f + P_g}{2 + \frac{P_f + P_g}{P_i}} + P_L + \frac{1}{P_c} \right) \quad (10)$$

과 같이 재료의 투자율과, 형상 치수로 이루어진 퍼미언스식과 코일 감은수를 변수로 하는 인덕턴스를 모델링 할 수 있다.

### 3. 실험적 검증 및 해석

프로브1(Fig.5)과 프로브2(Fig.6)를 제작하여 실험을 통해 모델링식을 검증하였다. 프로브1은 두 폴사이의 간격이 좁아 누설 자속이 많이 발생하는 형상고, 프로브2는 두 폴사이의 거리가 넓어 누설 자속이 거의 존재하지 않는 형상이다. Fig.7과 Fig.8 은 두 프로브의 공극에 대한 인덕턴스의 측정값과 이론값 그래프를 각각 나타내고 있다. 실험 결과 두 형상 모두 이론값과 실험에 의한 측정값이 대체적으로 잘 맞는 것을 확인 할 수 있었다.

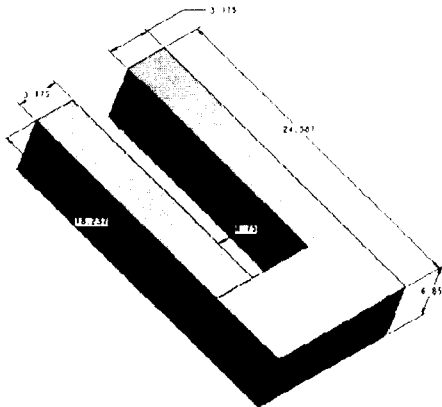


Fig.5 Scheme of probe1

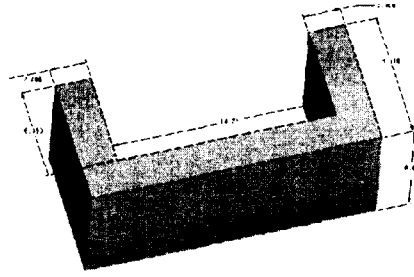


Fig.6 Scheme of probe2

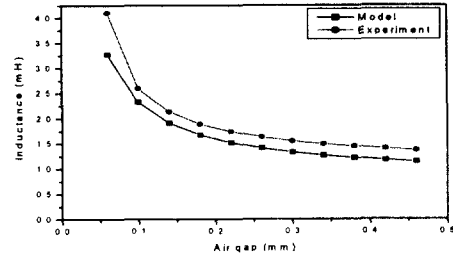


Fig.7 Inductance vs. air gap (probe1)

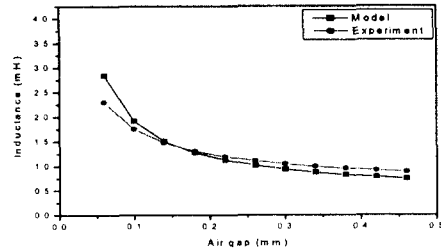


Fig.8 Inductance vs. air gap (probe2)

Fig.9는 두 프로브의 민감도를 비교하는 그래프이다. 프로브2(점선)가 프로브1(실선)에 비해 민감도가 높음을 알 수 있다. 즉 프로브의 형상이 민감도에 영향을 주고, 그 원인이 누설 자속과 자기장 프린징 현상과 관계됨을 유추할 수 있다.

자기장 프린징과 누설 자속의 영향을 모델링식을 이용하여 시뮬레이션을 해보았다. Fig.10는 자기장 프린징과 누설 자속이 있을 때(실선)와 고려하지 않을 때(점선) 프로브1의 민감도 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과는 자기장 프린징과 누설 자속이 센서의 민감도 뿐만아니라 선형성에도 악영향을 미침을 보여주고 있다.

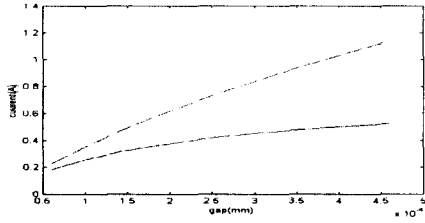


Fig.9 Sensitivity comparison

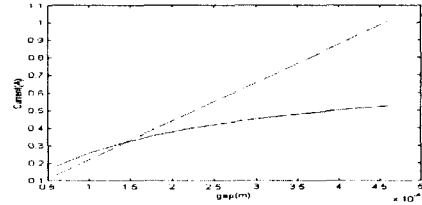


Fig.10 Effect of flux fringing and leak

#### 4. 결론

센서의 민감도는 신호 증폭기를 이용하여 증폭할 수 있지만 증폭기로 입력되는 잡음도 함께 증폭시키기 때문에 분해능은 향상되지 못한다. 따라서 민감도 대한 연구는 센서의 원리를 바탕으로 프로브에서 이루어져야 한다. 본 논문에서는 실험을 통해 프로브의 형상이 센서의 민감도에 영향을 주는 것을 확인하고, 자기장 해석을 통해 유도된

모델링 식을 통해 프로브 형상에 의한 자기장 프링징과 누설 자속이 민감도에 영향을 끼침을 해석할 수 있었다. 따라서 센서 민감도를 향상시키기 위해 누설 자속과 자기장 프링징을 최소화 할 수 있는 프로브 형상을 고려해 볼 수 있다. 차후 연구에서 자기장 프링징과 누설 자속을 최소화 할 수 있는 프로브 형태로 최적설계를 수행할 계획이다.

#### 참고문헌

1. Halit Eren, "Inductive Displacement Sensor", THE MEASUREMENT INSTRUMENTATION and SENSOR handbook, pp. 6\_15-6\_20, 1999.
2. 최동준, 임준택, 김수현, "자기 회로를 이용한 인덕턴스형 변위 측정 시스템의 모델링 및 해석", 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp. 93-101, 2001.
3. 大川光吉 지, 원중수 역, "페라이트 자석 회로기의 설계", 반도 출판사, pp. 27-48, 2001.