

## 유도형 변위 센서의 민감도 향상을 위한 형상 최적 설계

홍준희\*, 이동주\*, 신우철\*\*

(충남대학교 기계공학과\*, 충남대학교 기계공학과 대학원\*\*)

### Shape Design Optimization of Inductive Position Sensor to Improve Sensitivity

Junhee Hong , Dongju Lee , Woocheol Shin

#### 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. We can simulate static characteristic of inductive gap sensor using this model. Computer simulation show that sensor's sensitivity is affected by magnetic flux's leakage and fringing, and that they are affected by shape of sensor probe. Base on this, we designed shape of inductive position sensor probe.

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

#### 기호설명

- $R_E$  = Electrical resistivity of coil
- $v$  = Alternating voltage
- $i$  = Alternating current
- $n$  = Coil turns
- $g$  = Air gap
- $\mu_0$  = Permeability in the vacuum
- $L$  = Inductance
- $l_c$  = Length of flux path in the core
- $l_t$  = Length of flux path in the target
- $\mu_t$  = Specific permeability in the target

- $\mu_c$  = Specific permeability in the 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

비접촉형 변위 센서는 일반적으로 와전류형, 정전용량형, 유도형, 광학형 등의 형태가 있다. 이 중에서 본 논문에서 다루는 유도형 변위 센서는 다른 형태의 센서에 비해 구조가 간단하여 제작이 용이하고, 가격이 저렴한 장점을 지녔다. 그러나 기존의 연구 결과나 상용화된 제품의 사양을 보면 주파수 대역이 상대적으로 좁고, 정밀도도 수 마이크로미터 수준에 머물러 있다.

본 논문은 프로브 형상이 센서 민감도에 미치는 영향에 대한 선행 연구를 바탕으로 민감도 향상을 위한 프로브 형상의 최적 설계를 수행하였다. 선행된 연구에서 유도된 모델링식을 토대로 민감도에 악영향을 미치는 누설 자기장과 자기장 프린징을 최소로 하는 목적함수를 세우고 프로브 형상 치수를 변수로 두었다. 최적 설계 결과로 얻어진 형상 치수로 직접 프로브를 제작하여 실험을 통해 기존 프로브와의 민감도 차이를 확인할 수 있었다.

## 2. 유도형 변위 센서의 모델

### 2.1 유도형 변위 센서의 원리

유도형 센서의 프로브는 전자석 형태를 하고 있다. 패러데이 유도 법칙에 의해 코일에 교류 전류가 흐르면 유도 기전력이 발생하여 코일에 인가되는 전압과 전류의 관계식은

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

이 된다. 코일에 인가되는 전압의 주파수가 높을 때 코일 고유 저항에 의한 전압강하는 상대적으로 무시할 수 있으므로 식(1)의 두 번째 항을 소거하고 전류항으로 정리하면

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

이 된다. 따라서 코일에 흐르는 전류는 코일에 인가되는 전압과 코일 인덕턴스의 항으로 나타낼 수 있다. 이 때, 코일에 인가되는 전압은 일정하지만 유도형 센서의 인덕턴스는 공극(air gap)의 함수가 된다.

$$L = L(g) \quad (3)$$

Fig.1에서 보면 공극이 곧 측정 대상체(target)의 변위를 나타낸다. 결국 공극은 인덕턴스 변화를 가져오게 되고, 인덕턴스의 변화는 식(2)에 의해 코일에 흐르는 교류 전류의 진폭 변화신호로 변위에 대한 정보를 나타낸다.

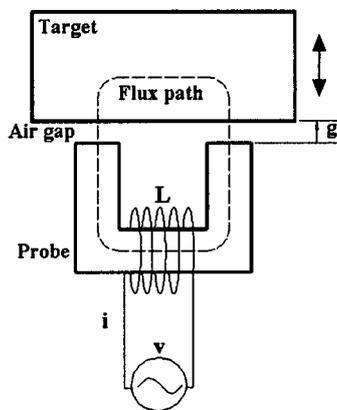


Fig.1 Schematic of inductive sensor

### 2.1.1 변위에 따른 인덕턴스변화

유도형 변위 센서의 민감도 해석을 위해 공극에 대한 인덕턴스의 관계를 자기장 해석을 통해 모델링할 수 있다. 선행 연구에서 Fig.2와 같은 등가 자기 회로를 구성하여 공극에 대한 인덕턴스 관계를 수학적으로 모델링하였다.

각부의 자기저항은 Fig.3의 프로브 코어의 형상 변수와 재료의 투자율(permeability)을 이용하여 다음과 같은 퍼미언스식으로 나타낼 수 있다.

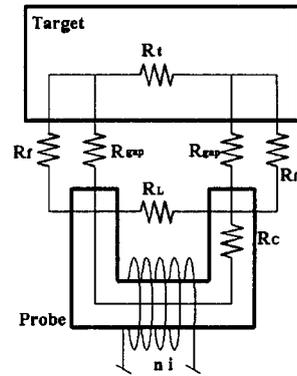


Fig.2 Equivalent circuit

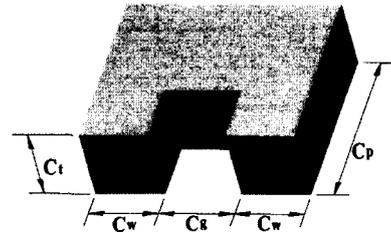


Fig.3 Design parameter of probe core

· 공극의 퍼미언스

$$P_{gap} = \frac{\mu_0 C_t C_w}{g} \quad (4)$$

· 코어의 퍼미언스

$$P_c = \frac{\mu_c \mu_0 C_t C_w}{l_c} \quad (5)$$

· 측정 대상체의 퍼미언스

$$P_t = \frac{\mu_t \mu_0 C_t C_w}{l_t} \quad (6)$$

· 누설 자속에 대한 퍼미언스

$$P_L = \frac{\mu_0 C_t (C_p - S_1)}{C_g} + 0.528 \mu_0 (C_p - S_1) + 2 \mu_0 \frac{C_p - (S_1 + S_2)/2}{\pi} \log \left( 1 + \frac{2C_w}{C_g} \right) \quad (7)$$

· 자기장 프린징에 대한 퍼미언스

$$P_f = \mu_0 \left[ 1.056 (C_w + C_t) + \frac{2(2C_w + C_t)}{\pi} \log \left( 1 + \frac{S_1 + S_2}{g} \right) + \frac{2C_t}{\pi} \log \left( 1 + \frac{2S_1}{g} \right) + 0.616g + \left( \frac{3S_1}{2} + \frac{S_2}{2} \right) \right] \quad (8)$$

여기서  $S_1$ ,  $S_2$ 은 자기장 프린징이 일어난는 길이로서

$$S_1 = \frac{C_g}{2} - g \quad (9)$$

$$S_2 = 2C_w + C_g - g$$

이다.

등가 자기 회로에서 회로 법칙을 통해 퍼미언스식을 정리한 후 인덕턴스식으로 나타내면

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

과 같이 재료의 투자율과, 형상 치수로 이루어진 각 부의 퍼미언스식과 코일 감은수를 변수로 하는 인덕턴스를 모델링 할 수 있다. Fig.4는 비투자율이 5000인 규소강판을 재료로 코어와 측정대상체를 제작했을 때, 모델링 식에서 코어와 측정대상체의 퍼미언스를 고려한 경우(실선)와 고려하지 않은 경우(점선)의 인덕턴스와 전류신호를 각각 비교하여 나타내고 있다.

Fig.4에서 볼 수 있듯이 두 경우의 차이가 크지 않다. 특히 공극에 따른 전류신호 관계를 보면 두 그래프가 일정간격을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 코어와 측정 대상체의 퍼미언스를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 민감도는 거의 변화가 없음을 의미한다.

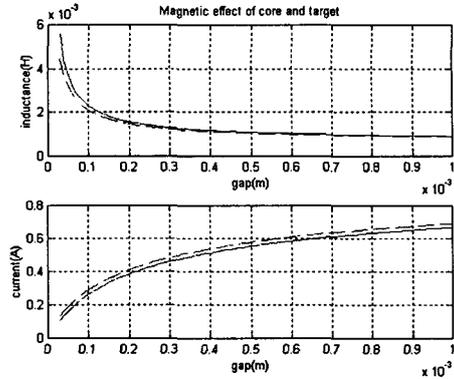


Fig.4 Magnetic effect of core and target

따라서 강자성체 재료의 프로브 코어와 측정대상체의 경우 인덕턴스식(10)은

$$L = n^2 \left( \frac{P_f + P_g}{2} + P_L \right) \quad (11)$$

으로 간략화 할 수 있다.

### 3. 최적 설계

#### 3.1 민감도 해석

유도한 인덕턴스 모델링 식을 통해 센서의 공극(g)에 대한 전류 신호의 관계식은

$$i = \frac{1}{n^2 \left( \frac{P_f(g) + P_g(g)}{2} + P_L(g) \right)} \int v dt \quad (12)$$

과 같이 정리할 수 있다.

식(12)을 보면 코일 감은수(n)와 코일에 인가되는 전압(v)이 일정할 때 전류신호(i)는 공극, 자기장 프린징, 누설 자속의 퍼미언스들에 의해 결정됨을 알 수 있다. 여기서 각각의 퍼미언스식들은 공극(g)의 함수이다. 이 세가지 퍼미언스식들 중에서 공극에 대한 퍼미언스식이 공극에 따른 전류변화의 기본식이 된다. 따라서 자기장 프린징과 누설 자속의 영향을 고찰해 보기 위해 변위에 대한 전류신호의 민감도를 시뮬레이션 해보았다. 시뮬레이션에 사용된 센서는 기존에 제작된 것으로 제원은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Sensor specification

Core material	Silicon Iron	$C_p$	18.237(mm)
Coil turns	100	$C_w$	3.175(mm)
Frequency	20kHz	$C_g$	4.75(mm)
Voltage	48V	$C_t$	6.5(mm)

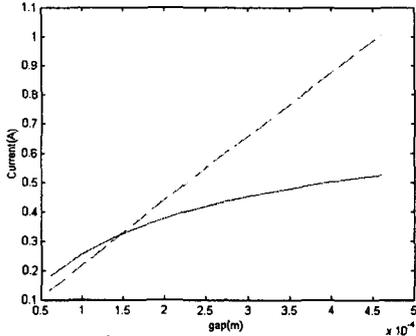


Fig.5 Effect of flux fringing and leakage

Fig.5는 누설 자속과 자기장 프린징의 영향을 알아보기 위한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 실선은 기존 프로브에 존재하는 자기장 프린징과 누설 자속을 고려했을 때의 그래프이고 점선은 자기장 프린징과 누설 자속 영향을 배제한 경우의 그래프이다. 두 그래프의 비교를 통해 알 수 있듯이 누설 자기장과 자기장 프린징이 센서의 민감도에 악영향을 끼침을 고찰할 수 있다.

### 3.2 프로브 형상 최적 설계

해석을 통해 자기장 프린징과 누설 자속이 센서의 민감도를 저하시키는 것을 고찰하였다. 자기장 프린징과 누설 자속의 자기 저항이 프로브 형상에 의해 결정됨을 볼 때 자기장 프린징과 누설 자속을 최소화 하기 위한 프로브 형상 설계가 가능하다.

목적함수

$$\begin{aligned} \min f(x) = & 4\pi \times 10^{-7} \left[ 0.528 \times (x_2 + x_4) + 1.386 \times 10^{-4} + \frac{x_4}{\pi} \left( \log \left( 1 + \frac{2(2x_2 + x_3 - 0.00045)}{0.00045} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \log \left( 1 + \frac{x_3 - 0.0009}{0.00045} \right) \right) + \frac{2 \times x_2}{\pi} \left( \log \left( \frac{2 \times x_2 + x_3}{0.0009} \right) - 1 + \frac{x_3}{2 \times x_2} \log \left( \frac{x_3}{2 \times x_2 + x_3} \right) \right) \right] \\ & + \frac{3x_3}{4} - 0.00045 + x_2 + \frac{x_4(x_1 - \frac{x_3}{2} + 0.00045)}{x_3} + 0.528(x_1 - \frac{x_3}{2} + 0.00045) \end{aligned} \quad (13)$$

본 논문에서는 프로브의 형상 치수를 설계 변수로 정하고 선행 연구에서 유도된 누설 자속(7)과 자기장 프린징(8)의 퍼미언스식을 이용하여 목적함수(13)를 세웠다. 경계 조건(14)은 센서가 장착될 부분의 크기를 고려하여 최소·최대 한계를 정하였고, 프로브에 코일이 감기는 부분의 치수를 고려하여 제약조건을 정하였다. 최적 설계는 Sequential Quadratic Programming method로 Matlab Optimization Toolbox를 이용하여 수행하였다.

$$\begin{aligned} \text{설계 변수 : } C_p &\rightarrow x_1 & C_w &\rightarrow x_2 \\ C_g &\rightarrow x_3 & C_t &\rightarrow x_4 \end{aligned}$$

경계조건

$$\begin{aligned} g_1 : & \frac{16.8 \times 10^{-6}}{x_3} - x_1 \leq 0 \\ g_2 : & 2x_2 + x_3 - 13 \times 10^{-3} \leq 0 \\ g_3 : & x_1 - 20 \times 10^{-3} \leq 0 \\ g_4 : & 4.15 \times 10^{-3} - x_2 \leq 0 \\ g_5 : & 1 \times 10^{-3} - x_3 \leq 0 \\ g_6 : & 1 \times 10^{-3} - x_4 \leq 0 \\ g_7 : & x_4 - 20 \times 10^{-3} \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Fig.6은 최적 설계를 통해 결정된 센서 프로브의 외형 치수를 나타내고 있다.

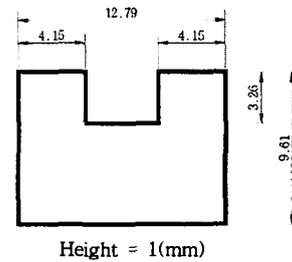


Fig.6 Scheme of optimum design of probe

#### 4. 실험적 검증 및 고찰

Fig.7는 최적설계된 프로브의 공극에 대한 전류 신호 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 나타내고 있다. 또 기존 프로브와의 비교를 통해 최적 설계된 센서 프로브의 민감도가 향상되었음을 확인할 수 있다.

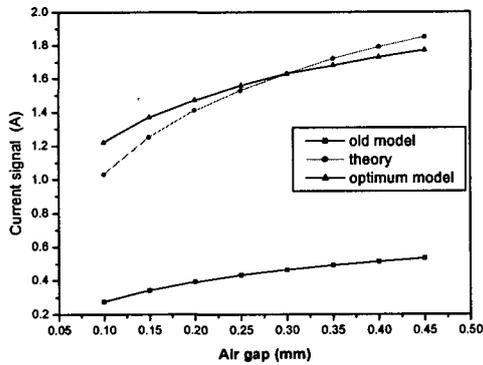


Fig.7 Comparison of sensitivity

#### 5. 결론

아날로그 센서의 분해능은 민감도와 잡음의 크기에 의해서 결정된다. 센서의 민감도는 신호 증폭기를 이용하여 향상시킬 수 있지만 그럴 경우 증폭기로 입력되는 잡음도 함께 증폭되기 때문에 결국 분해능은 향상되지 못하는 결과를 가져온다. 따라서 민감도 대한 연구는 센서의 기본 원리를 바탕으로 프로브에서 이루어져야 한다.

본 논문에서는 프로브 형상에 의해 분포되는 자기장 프린징과 누설 자속이 민감도에 악영향을 미친다는 해석을 통해 누설 자속과 자기장 프린징을 최소화 할 수 있는 프로브 형상을 최적 설계하였다. 설계 결과로 프로브를 제작하여 민감도가 향상됨을 실험을 통해 확인 할 수 있었다.

센서의 분해능을 좋게하기 위해 민감도 향상을 위한 프로브 설계 연구에 이어서 차후에는 잡음을 억제할 수 있는 신호 검출 회로 설계에 대한 연구를 하고자 한다. 유도형 변위 센서는 원리상 진폭 변조를 이용하여 변위의 정보를 나타낸다. 따라서 신호 검출 회로를 통해 진폭 변조 신호를 검파하는 과정이 필요하다. 이 때 검파과정에서 존재하는 잡음과 그밖의 주위 환경에서 전해지는 잡음에 대한 연구를 수행 할 예정이다.

#### 참고문헌

1. S. Moriyama et al, "Inductive Sensing System for Aactive Suspension Control," SENSOR/SELF-SENSING, p.529-537, 1988.
2. K. Mohri, "Magnetic Sensor," CORONA PUB. CO., 1998.
3. M. A. Rozenblat, " Magnetic Sensor : State of the Art and Trends "
4. 大川光吉 저, 원종수 역, "페라이트 자석 회로기의 설계", 반도 출판사, pp. 27-48, 2001.