

# 고속 주축 상태 모니터링용 유도형 변위 센서의 특성 평가

신우철\*(충남대 대학원 기계공학과), 홍준희, 이동주(충남대 기계공학과)

## Characteristics Evaluation of Inductive Position Sensor for the State monitoring of a High Speed Spindle

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

### ABSTRACT

In a high speed spindle system, it is very important to monitor the state of rotating rotor. Particularly in active control spindle system, the position sensor must provide feedback to the control system on the exact position of the rotor. In order to monitor the state of a high speed spindle exactly, High accuracy and wide frequency bandwidth of sensors are important. This paper describes the factors which has an effect on performances of inductive position sensor. We also report the experimental results that characterize the performances of the inductive position sensor.

**Key Words** : High speed spindle system(고속 주축 시스템), the state monitoring(상태 모니터링), Inductive position sensor(유도형 변위 센서)

### 1. 서론

고속 지능형 주축 시스템을 실현하기 위해서는 주축의 상태 모니터링이 요구된다. 이때 적용되는 센서는 특히 분해능과 주파수 응답특성이 매우 우수해야한다. 일반적으로 주축의 회전 정밀도의 10배의 분해능과 회전수 10배의 주파수 응답성을 갖고 있어야 한다.

본 논문은 고속 주축 상태 모니터링을 위해 적용할 수 있는 변위 센서의 여러 형태(정전용량형, 와전류형, 광학형, 유도형) 중에 유도형 변위 센서에 대한 특성 연구를 수행하였다. 유도형 변위 센서의 이론적 해석을 통해 센서 특성에 영향을 미치는 인자를 고찰하였고, 이를 토대로 유도형 센서를 제작하여 실험결과를 통해 센서 특성을 평가해 보았다.

### 2. 유도형 변위 센서

#### 2.1 기본 원리

유도형 변위 센서는 프로브(probe)에서 발생하는 자기장( $\Phi$ )을 매개체로 하여 측정 대상(target)의 변위( $g$ )에 대해 전기적 신호를 나타낸다.

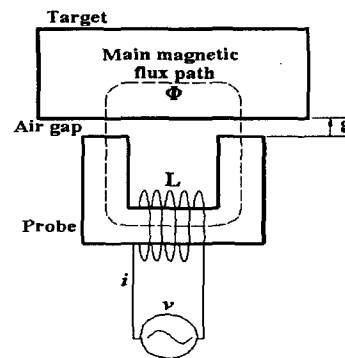


Fig. 1 Schematic of sensing part of an inductive position sensor

프로브와 측정 대상 사이에 Fig.1과 같은 주 자기장 경로(main magnetic flux path)가 형성되며, 이때 코일에 인가되는 전압( $v$ )과 전류( $i$ )의 관계식은 패러데이 유도 법칙에 의해

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

과 같이 나타낼 수 있다. 식(1)에서  $L$ 은 인덕턴스로서 자기장 경로에 의해 변화게된다. 프로브, 측정 대상에서의 자기장 경로는 고정되어 있으므로 결국 인덕턴스는 공극( $g$ )의 함수로 표현된다.

$$L = L(g) \quad (2)$$

공극은 측정 대상의 변위를 나타내므로, 결국 측정 대상의 변위는 인덕턴스 변화를 가져오고 식(1)에 의해 코일에 흐르는 전류의 진폭 변화로 나타나게 된다.

따라서 프로브 출력신호는 진폭 변조(Amplitude Modulation)신호형태를 이룬다. 여기에서 원하는 변위 신호를 추출하기 위해서는 검파(Demodulation)과정이 필요하다.

Fig. 2는 검파 과정을 위해 필요한 전류 변환기(current transducer)와 신호 검출 회로의 구성을 나타내고 있다. 여기서 신호 검출 회로는 증폭기(amplifier), 고역 통과 필터(high-pass filter), 정류기(rectifier), 검파기로 구성되어 있다.

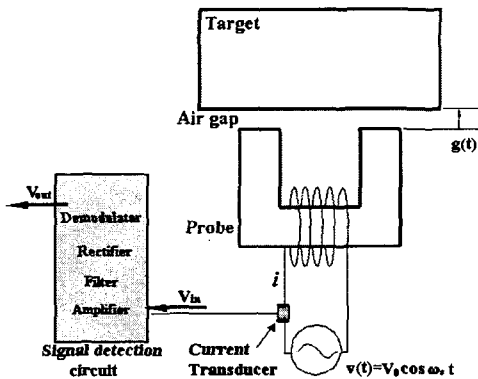


Fig. 2 Schematic of signal detection part of an inductive position sensor

## 2.2 센서의 선형성 및 민감도 해석

변위 센서의 선형성과 민감도에 대해서는 변위와 그에 따른 전기적 출력신호의 관계를 통해 고찰해 볼 수 있다.

Fig. 3은 유도형 변위 센서의 센싱 절차를 나타내는 블록 선도이다. 센싱 절차는 크게 프로브 부분과 전기 회로 부분으로 나누어 생각해 볼 수 있다. 센서의 민감도는 각 블록 사이의 관계를 통해 고찰해 볼 수 있는데 프로브 부분에서는 입력변위와 인덕턴스 관계, 인덕턴스와 코일전류의 관계를 통해서, 회로부분에서는 증폭기의 증폭비로써 민감도를 정할 수 있다. 여기서 증폭기의 증폭비에 의한 민감도 향

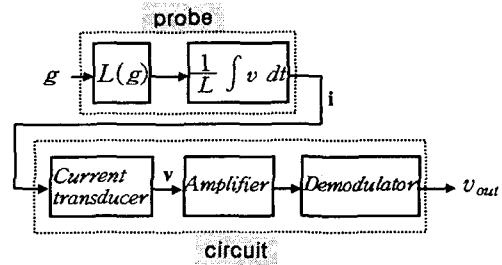


Fig. 3 Block diagram of sensing procedure

상은 부수적으로 전기 잡음 증폭이 수반되므로 센서 성능 향상 측면에서 볼 때 큰 효과가 없다.

변위와 인덕턴스( $L$ )의 관계는 센서의 민감도 뿐만 아니라 선형성을 결정하는 중요한 요인이 된다. 변위에 따른 인덕턴스 변화는 자기장 해석을 통해 고찰해 볼 수 있다.

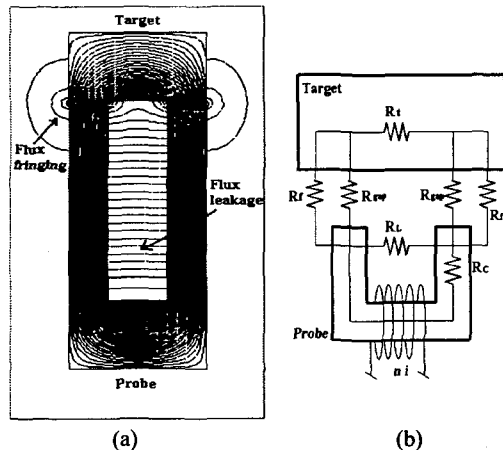


Fig. 4 Shape of magnetic flux and equivalent magnetic circuit for inductive position

Fig. 4 (a)는 상용 자기장 해석 프로그램(Ansys)을 통해 센서 프로브에서 발생한 자기장 형상을 예측한 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 주자로(main magnetic flux path)이외에 누설 자속(magnetic flux leakage)과 자기장 프링징(magnetic flux fringing)을 예측할 수 있다. Fig. 5 (a)의 자기장 형상을 근거로 (b)의 등가 자기 회로도도 나타낼 수 있다. 여기서  $R_{gap}$ ,  $R_c$ ,  $R_p$ ,  $R_L$ ,  $R_p$ 는 각각 공극, 코어, 측정 대상체의 자기저항(reluctance)과 누설자속에 대한 자기저항, 자기장 프링징에 대한 자기저항을 나타낸다. 여기서 코어의 자기저항과 측정 대상체의 자기저항은 상대적으로 작은 값을 가지므로 무시할 수 있다.

누설 자속과 자기장 프링징이 존재하지 않는 경우의 인덕턴스식은 다음과 같다.

$$L = \frac{n^2 \mu_0 A}{2g} \quad (3)$$

여기서,  $n$ ,  $\mu_0$ ,  $A$ 는 각각 코일 감은수, 공기 투자율, 프로브 측정부분 단면적을 나타낸다.

누설 자속과 자기장 프린징이 존재하는 경우의 인덕턴스식은

$$L = n^2 \left( \frac{P_f + P_g}{2} + P_L \right) \quad (4)$$

으로 나타나고, 여기서  $P_g$ ,  $P_L$ ,  $P_f$ 는 각각 공극, 누설자속, 자기장 프린징의 퍼미언스(permeance)로서 이는 각각 자기저항의 역수이다.  $P_L$ ,  $P_f$ 의 수학적 모델은 공극에 대한 복잡한 비선형식으로 나타난다<sup>(3)</sup>

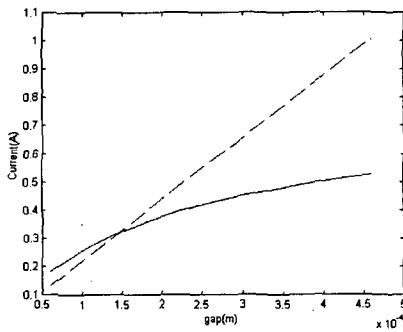


Fig. 5 Effect of flux fringing and leakage

Fig. 5는 공극에 대한 전류신호 그래프로서 이상적으로 누설 자속과 자기장 프린징이 존재하지 않을 때(점선)와 존재할 때(실선)의 그래프를 비교할 수 있다. 비교 결과 누설 자속과 자기장 프린징이 존재할 때 센서의 선형성과 민감도가 크게 떨어짐을 고찰할 수 있다. 이는 반대로 누설 자속과 자기장 프린징을 줄이면 센서의 민감도와 선형성을 향상시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

프로브와 측정 대상체에 존재하는 누설 자속과 자기장 프린징을 줄일 수 있는 방법은 프로브 코어와 측정 대상체의 투자율이 높은 재질을 사용하는 것이다. 또한 누설 자속과 자기장 프린징은 코어 형상에 의해 영향을 받게 되므로 적당한 프로브 형상 설계가 누설 자속과 자기장 프린징을 줄일 수 있다<sup>(3)</sup>. 보다 적극적인 방법으로 누설 자속과 자기장 프린징이 일어나는 부분에 자기장 차폐재료로 실드(shield)하는 방법도 생각해 볼 수 있다.

둘째로, 인덕턴스와 코일전류의 관계식을 통해 민감도에 영향을 미치는 요소를 고찰해 볼 수 있다. 프로브와 측정 대상에서의 자기장 경로 중 대표적으로 주 자로만 고려할 때, 식(1)은

$$i = \frac{2g}{\mu_0 A n^2} \int v dt \quad (5)$$

로 정리할 수 있다. 즉 변위와 전류신호의 비례 관계는 전원 전압의 적분항, 프로브 측정부분 단면적, 코일 감은 수에 따라 결정된다. 이 때 전원 전압의 주파수와 코어의 단면적은 센서의 또 다른 특성과 연관되어 있다. 때문에 다른 특성과 연관성이 적고 비교적 다루기 쉬운 코일 감은수를 통해 민감도를 고찰할 수 있다. 식(5)에 의하면 코일 감은수가 적을수록 민감도는 향상되나 더불어 코일에 과전류가 흐르게 된다. 따라서 어느 한계점에 다다르면 코일 피복재가 타게 되어 프로브가 제 기능을 할 수 없게 된다. Fig. 6은 코일 감은수에 따른 센서의 민감도 변화를 나타내고 있다. 감은수가 적을수록 민감도가 향상되지만 비선형성도 같이 확대됨을 간과해서는 안 된다.

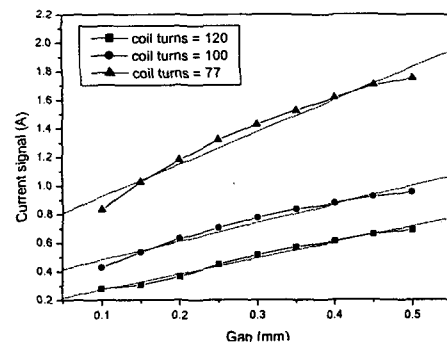


Fig. 6 Sensitivity according to coil turns

### 2.3 주파수 응답성 해석

센서의 주파수 응답성은 시간에 따라 빠르게 변하는 변위를 정확히 계측할 수 있는 센서의 특성을 나타낸다. 유도형 변위 센서의 주파수 응답성은 신호 검출 회로의 검파기에 의해 크게 좌우된다.

본 논문에서는 저역통과 필터(low-pass filter)를 사용하여 검파기를 구성하였다. 저역통과 필터 설계에 따라 센서의 동적 특성과 더불어 출력신호의 잡음 특성이 정해진다. 일반적으로 저역통과 필터의 차단 주파수를 높게 설계하면 주파수 대역은 넓어지나 잡음성분이 크게 남게된다. 따라서 잡음의 크기와 주파수 대역폭의 절충점을 찾아 저역통과 필터를 설계해야 한다.

### 3. 특성 평가

센서의 성능에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 센서를 제작하고 특성 평가 실험을 통해 센서의 성능을 확인해 보았다.

Fig. 7은 변위에 따른 전류신호를 측정하여 선형 회귀(linear regression)를 통해 민감도와 선형성을 평가해 보았다.

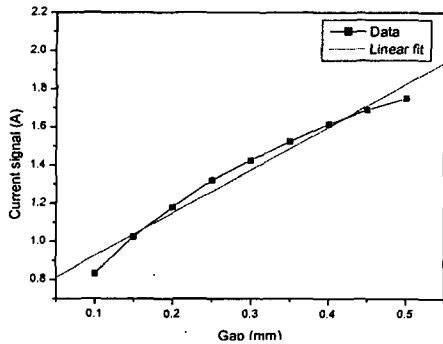


Fig. 7 Sensitivity and linearity

최소자승법에 의한 직선의 회귀 방정식은

$$Y = 0.69833 + 2.25 \times X \quad (6)$$

로서 X는 변위를 Y는 전류신호를 나타낸다. 민감도는 2.25(A/mm)이고, 비선형 오차는 10.14% 이다.

Fig. 8은 시간에 대한 드리프트(drift)특성을 고찰해 보았다. 0.25mm 공극의 측정점에서 60분 동안 출력 신호의 드리프트는 거의 일어나지 않았다.

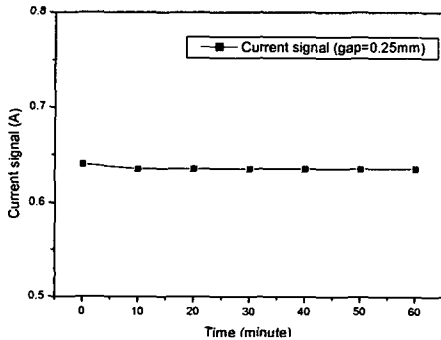


Fig. 8 Time drift

Fig. 9는 측정 범위 내에서의 히스테리시스 특성을 평가해 보았다. 결과를 통해 볼 수 있듯이 히스테리시스 오차는 거의 일어나지 않았다.

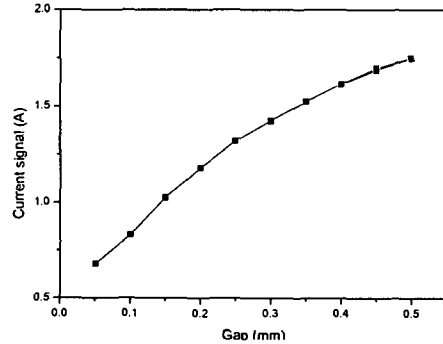


Fig. 9 Hysteresis

### 4. 결론

본 논문은 유도형 변위 센서의 이론적 해석을 통해 성능을 향상시킬 수 있는 요소에 대해 고찰해 보았다. 첫째 민감도를 향상시킬 수 있는 방법에 대해 여러 측면에서 접근해 보았다. 이때, 간과해서는 안 될 것이 민감도 향상 시 바람직하지 못한 성질도 함께 확대될 수 있다는 것이다. 주파수 응답성은 신호 검출 회로의 검파기 성능에 의해 크게 좌우된다. 유도형 변위 센서는 원리상 진폭 변조 신호로 변위에 대한 정보를 얻게 된다. 이것은 스펙트럼의 저주파 회전체 진동이 전기적 신호로 변환되면서 고주파로 주파수 천이가 일어남을 의미한다. 따라서 고주파의 전기적 신호로부터 다시 본래의 변위 신호를 얻는 과정에서 센서의 주파수 특성이 결정된다.

향후 연구에서는 검파기의 설계 및 센서 전반적으로 존재하는 잡음 특성에 대한 연구를 수행할 예정이다.

### 참고문헌

1. Halit Eren, "Inductive Displacement Sensor", THE MEASUREMENT INSTRUMENTATION and SENSOR handbook, pp. 6\_15-6\_20, 1999.
3. 최동준, 임춘택, 김수현, "자기 회로를 이용한 인덕턴스형 변위 측정 시스템의 모델링 및 해석", 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp. 93-101, 2001.
3. 홍준희, 이동주, 신우철, "유도형 변위 센서의 민감도 향상을 위한 형상 최적 설계", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 250-254, 2001.