

환형 인덕티브 센서의 설계 및 압력센서로의 적용

노명규^{*†} · 김선영^{**} · 백성기^{*} · 박영우^{*}

* 충남대학교 메카트로닉스공학과, ** 삼성전기 기판사업부

Ring-Shaped Inductive Sensor Design and Application to Pressure Sensing

Myounggyu Noh^{*†}, Sunyoung Kim^{**}, Seongki Baek^{*} and Young-Woo Park^{*}

* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

** Samsung Electro-Mechanics

(Received May 2, 2015 ; Revised July 22, 2015 ; Accepted August 10, 2015)

Key Words: Inductive Sensing(유도식 측정), Non-Invasive Sensing(비침습적 측정), Pressure Sensing(압력 측정)

초록: 자기유도(inductive) 센서는 원리가 간단하고 경제적이어서 변위, 힘, 압력 등 다양한 물리량 측정에 사용된다. 본 논문에서는 고리 모양의 강판과 코일로 이루어진 간단한 구조의 자기유도 센서를 제안하였다. 센서의 인덕턴스를 자기회로 방법을 이용하여 추정하고 유한요소 해석을 통해 검증하였다. 고리의 고유 진동수를 Castigliano 정리와 등가 질량 방법을 이용하여 추정하고 실험 및 유한요소 해석을 통해 검증하였다. 기계적 진동에 영향을 주지 않도록 센서의 가진 주파수를 결정하였으며, 구동 및 신호처리 회로를 설계하여 센서를 제작하였다. 제작된 자기유도 센서를 유연관 내부의 유체 압력을 비침습적으로 측정하는데 활용하였다. 압력과 센서 출력 간의 관계를 이차식 형태로 표현하면 2% 이내의 정확도로 압력을 측정할 수 있어 압력 센서로서의 가능성을 확인하였다.

Abstract: Inductive sensors are versatile and economical devices that are widely used to measure a wide variety of physical variables, such as displacement, force, and pressure. In this paper, we propose a simple inductive sensor consisting of a thin partial ring and a coil set. The self-inductance of the sensor was estimated using magnetic circuit analysis and validated through finite element analysis (FEA). The natural frequency of the ring was estimated using Castigliano's theorem and the method of equivalent mass. The estimation was validated through experiments and FEA. A prototype sensor with a signal processing circuit is built and applied to noninvasively sense the pressure inside a flexible tube. The obtained sensor outputs show quadratic behavior with respect to the pressure. When fitted to a quadratic equation, the least-square measurement error was less than 2%. The results confirm the feasibility of pressure sensing using the proposed inductive sensor.

- 기호설명 -

L : 인덕턴스

V : 전압

i : 전류

ω_{ext} : 가진주파수

ω_n : 고유진동수

P : 퍼미언스(permeance)

μ_0 : 공기의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

ρ : 밀도

t : 센서 강판 두께

w_z : 센서 축방향 길이

R : 센서 반지름

E : 영의 계수(Young's modulus)

I : 면적 관성 모멘트

U : 변형 에너지(strain energy)

K : 운동 에너지

p : 압력

1. 서론

자기유도(inductive) 센서는 코일과 대상체 간의 간격에 따라 인덕턴스가 변하는 원리에 기초하여

† Corresponding Author, mnoh@cnu.ac.kr

전류와 전압 간의 관계를 통해 거리 등의 물리량을 측정한다. 비접촉 측정이 가능하며, 와전류 방식에 비해 신호처리 회로가 단순하고, 작동 환경에 강건한 특성을 가지고 있어 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다.⁽¹⁾

변위에 따라 인덕턴스가 변하는 원리를 이용하면 자기유도 센서를 압력센서로 활용할 수 있다. 즉 압력에 의해 센서의 구조가 변하여 자기장이 변하도록 하면 압력과 전기 신호 간의 관계를 끌어 낼 수 있다. 이러한 방식의 압력센서는 압력을 측정하고자 하는 유체와 직접 접촉하지 않은 상태에서 측정이 가능하다.

유체의 압력을 측정하는 압력센서는 일반적으로 압전저항(piezoresistive) 혹은 정전용량(capacitive) 소자로 구현되며 유체와의 접촉을 통해 측정이 이루어진다.^(2,3) 제약분야나 의학분야에서 작동 유체의 무균성이 요구되는 경우 이러한 접촉식 압력센서는 밀봉성을 보장하기 어려우며 실리콘과 같은 가로막을 거쳐 압력 신호를 전달하여야 한다.

본 논문에서는 틸새를 가진 고리 모양의 강관에 코일을 감아 자기유도 센서로 만들고 이를 유연관 내에 흐르는 유체의 압력 측정에 활용한 결과를 기술하고자 한다. 자기유도 센서의 설계에 있어 전기적 가진 주파수와 기계적 공진 주파수의 분리가 매우 중요하다. 전기적 가진 주파수가 기계적 공진 주파수에 근접하면 전기적 가진에 의해 기계적 진동이 발생하고 이로 인해 인덕턴스 측정이 영향을 받게 된다. 본 논문에서는 제안된 센서의 기계적 공진 주파수를 추정하는 모델을 제시 하고 이를 센서 설계에 활용하고자 한다.

2. 측정 원리

본 논문에서 제안하는 자기유도 센서의 개략도가 Fig. 1(a)에 나타나 있다. 센서는 얇은 강관을

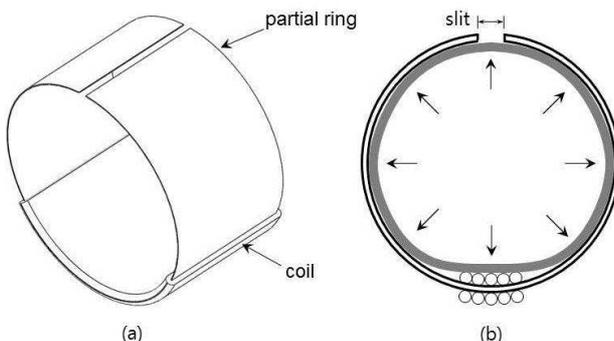


Fig. 1 (a) Isometric sketch of the proposed inductive sensor. (b) Application of the inductive sensor for pressure sensing

좁은 틸새 slit)을 가진 고리 모양으로 만들고 여기에 코일을 감아 제작된다. 고리를 감싸는 코일의 인덕턴스는 틸새의 크기에 따른 함수이므로 인덕턴스의 변화를 통하여 틸새의 크기를 변화게 하는 물리량을 측정할 수 있다. 예를 들어 고리가 유연한 재료로 만들어진 관을 감싸고 있는 경우 관 내부의 압력변화에 따라 고리 틸새가 변하게 되며, 이를 이용하여 관 내부의 압력을 측정할 수 있다.

코일에 인가된 전압과 출력되는 전류의 관계는 식 (1)과 같다.

$$V = L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

정현파 전압 $V = V_0 \sin \omega_{ext} t$ 이 코일에 인가되면 코일의 전류는 $i = I_0 \sin(\omega_{ext} t + \phi)$ 형태가 되며, 전류의 크기는

$$I_0 = \frac{V_0}{L\omega_{ext}} \tag{2}$$

로부터 얻을 수 있다. 따라서 전압과 전류의 측정으로 인덕턴스를 구할 수 있다.

센서 및 신호처리 회로를 설계하기 위해 코일의 인덕턴스와 센서 파라미터 간의 관계를 아는 것이 매우 중요하다. 센서의 크기 및 권선 수에 따른 인덕턴스 모델은 센서 설계의 첫 단계라 할 수 있다. 본 논문에서는 전동기 모델링에 사용된 누설 자속 근사화 방법을 적용하여 센서의 인덕턴스 모델을 수립하고자 한다.

3. 센서 설계

3.1 코일 인덕턴스 모델

센서 코일의 인덕턴스는 틸새 거리, 강관의 두께, 센서의 축 방향 길이 등에 의해 결정된다. 본 논문에서는 이러한 설계 변수와 인덕턴스의 관계를 자기회로에 근거하여 도출하고자 한다. 틸새에서의 자기장 분포를 개략적으로 도시한 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 강관의 두께에 비해 틸새가 큰 경우 누설 자속(leakage magnetic flux)이 전체 자속의 대부분을 차지한다. 퍼미언스(permeance)는 자속과 총 입력 전류의 비로 정의된다. 틸새의 퍼미언스를 \mathcal{P}_g , 틸새 위 아래의 누설 자속이 동일하다는 가정 하에 누설자속에 해당하는 퍼미언스를 \mathcal{P}_l 로 표기하면, 총 퍼미언스는

$$\mathcal{P} = \mathcal{P}_g + 2\mathcal{P}_l \tag{3}$$

와 같이 구할 수 있으며, 코일의 인덕턴스는

$$L = N^2 \mathcal{P} \tag{4}$$

이다.

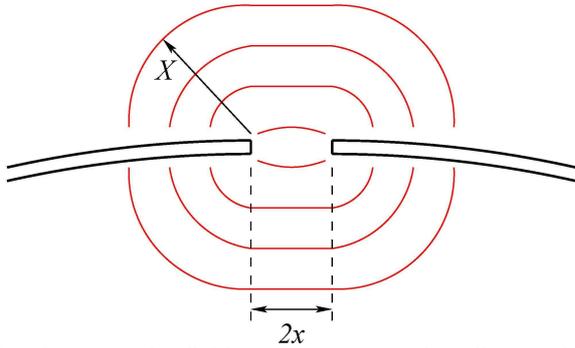


Fig. 2 Magnetic field pattern across the slit opening. Most of the field takes the leakage path

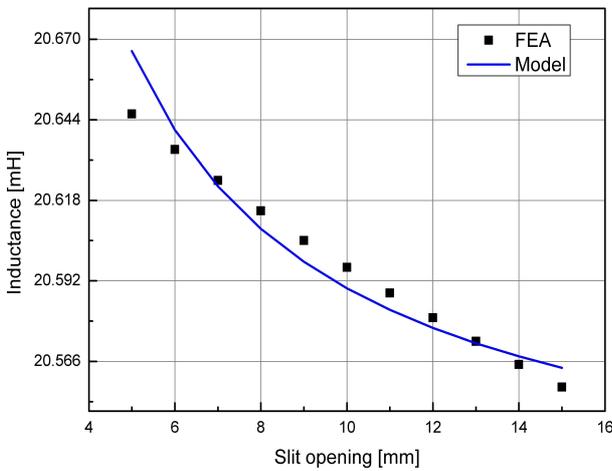


Fig. 3 Comparison between the results from finite element analysis (FEA) and from the inductance model given by (7)

틈새의 퍼미언스는 퍼미언스의 정의로부터

$$P_g = \frac{\mu_0 w_z t}{2x} \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 누설 퍼미언스는 누설자속의 경로가 원형이며 틈새에서 멀어질수록 반비례하여 줄어든다는 가정으로⁽⁴⁾

$$P_f = \int_0^x \frac{\mu_0 w_z}{2x + \pi\xi} d\xi \quad (6)$$

와 같이 근사화할 수 있다. 식 (6)에서 X 는 누설 자속이 차지하는 영역의 크기를 나타내는 특성 반경이다. 식 (6)의 적분 결과와 식 (5)를 이용하면 식 (4)의 코일 인덕턴스를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$L = \mu_0 N^2 w_z \left[\frac{t}{2x} + \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi X}{2x} \right) \right] \quad (7)$$

인덕턴스 모델의 유효성은 유한요소해석을 통해 검증한다. 권선수 $N=300$, 축방향 길이 $w_z=30$ mm, 강판의 두께 $t=0.2$ mm 대해 식 (7)의 결과와 유

한요소해석 결과를 비교하여, Fig. 3 에 나타내었다. 틈새의 크기에 따라 인덕턴스 모델이 제시하는 결과는 유한요소해석 결과와 유사한 범위에 있으며 변화 경향 또한 일치한다.

3.2 고유진동수 추정

센서 설계의 가장 중요한 변수는 가진(excitation) 주파수이다. 일정한 주파수의 전압으로 센서 코일을 가진 하면 동일한 주파수의 전류가 코일에 발생하고 식 (2)를 통해 인덕턴스를 측정할 수 있다. 센서의 가진 주파수는 기계적 진동을 유발하지 않아야 한다. 자기장에 의해 발생하는 자기력이 기계적 진동의 요인이 될 수 있으므로 가진 주파수가 기계적 고유진동수보다 충분히 커서 전기적 가진과 기계적 진동이 상호 영향을 미치지 않아야 한다.

센서의 틈새 방향 고유 진동수는 고리의 강성 계수 k 와 등가 질량 m_e 을 이용하여

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_e}} \quad (8)$$

를 통해 구할 수 있다. 본 논문에서는 Castigliano의 정리와 운동에너지를 통해 강성계수와 등가 질량을 각각 구한다.

Fig. 4(a)와 같이 외력에 의해 고리가 팽창하여 틈새가 커지게 될 때, Fig. 4(b)에 도시된 바와 같이 전단면에서의 전단력과 모멘트는 힘의 평형을 통해 $F \cos \theta$ 와 $FR(1 + \cos \theta)$ 로 각각 구할 수 있다. 이를 이용하여 고리의 변형 에너지(strain energy)를 구할 수 있으며

$$U = \int_0^\pi \frac{F^2 \cos^2 \theta}{2Ew_z t} \cdot R d\theta + \int_0^\pi \frac{F^2 R^2 (1 + \cos \theta)^2}{2EI} \cdot R d\theta \quad (9)$$

와 같이 표현된다. 식 (9)에서 전단력에 의한 변형 에너지는 굽힘 모멘트에 의한 변형 에너지에 비해 매우 작아 무시할 수 있으며, 적분을 수행하면 변형 에너지의 근사식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U \approx \frac{3\pi F^2 R^3}{4EI} \quad (10)$$

Castigliano 정리를 이용하여 힘에 의한 변위를 구하면⁽⁵⁾

$$x = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{3\pi FR^3}{2EI} \quad (11)$$

와 같다. 강성 계수의 정의에 따라 식 (11)로부터

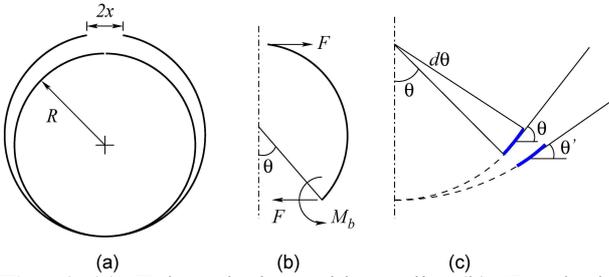


Fig. 4 (a) Enlarged ring with a slit. (b) Free-body diagram of a ring section showing the internal force and bending moment. (c) An infinitesimal section of the ring rotates from θ to θ' , when the ring expands

$$k = \frac{F}{x} = \frac{2EI}{3\pi R^3} = \frac{Ew_z t^3}{18\pi R^3} \quad (12)$$

와 같이 강성 계수를 구할 있다.

고리의 지름이 50 mm, 축 길이가 30 mm, 두께가 0.2 mm 이고 영계수가 200 GPa 일 때, 식 (12)에 의한 강성 계수는 54 N/m 이다. 분동을 이용한 변형 실험을 통해 측정된 강성 계수는 57 N/m 로서 계산 값과 5% 정도의 차이가 있다.

고리의 등가 질량은 틸새의 벌어짐에 따른 운동 에너지를 통해 구할 수 있다.⁽⁶⁾ Fig. 4(c)에 도시된 바와 같이 틸새가 벌어짐에 따라 미소 부분 $Rd\theta$ 의 접선 방향은 θ 에서 θ' 로 변하며 틸새 $2x$ 가 작을 경우 기구학적 관계에 의해

$$\theta' = \theta \left(1 - \frac{x}{\pi R} \right) \quad (13)$$

임을 알 수 있다. 식 (13)을 미분하면 각속도를 구할 수 있다.

$$\Omega = \frac{\partial \theta'}{\partial t} = -\frac{\theta}{\pi R} \dot{x} \quad (14)$$

미소 부분의 각속도를 이용하여 틸새 변화 \dot{x} 에 의한 운동에너지를 구하면

$$K = \frac{1}{2} \int_0^\pi \Omega^2 R^2 (\rho w_z t) R d\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \rho R w_z t}{3} \right) \dot{x}^2 \quad (15)$$

와 같다. 식 (15)를 통해 고리의 등가 질량은

$$m_e = \frac{\pi \rho R w_z t}{3} \quad (16)$$

으로 추정할 수 있다.

식 (12)와 (16)을 이용하면 고리의 틸새 방향 고유 진동수를 구할 수 있으며

$$\omega_n = \frac{t}{\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{6\rho}} \quad (17)$$

와 같이 표현된다. 앞서 강성 계수의 검증에서 사용한 고리의 형상과 물성치를 이용하여 고유 진동수를 계산하면 210 rad/s (33 Hz)이다. 유한요소해석

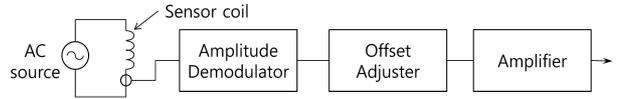


Fig. 5 Block diagram of the signal processing circuit

을 통해 계산한 고유 진동수는 34 Hz 로서 식 (17)의 추정 결과와 3% 이내로 일치한다.

3.3 신호처리 회로

센서의 회로는 크게 가진부와 추출부로 나뉜다. 가진부는 원하는 주파수의 정현파 전압을 코일에 인가하는 회로이며, 추출부는 전압과 전류의 측정을 통해 인덕턴스를 추출하는 회로이다.

본 논문에서는 상용 오디오 증폭기를 이용하여 1.7 kHz의 정현파 전압을 생성하고 이를 코일에 인가하였다. 가진 주파수는 고유 진동수의 50 배로서 전기적 가진에 의한 기계적 진동은 미미할 것으로 예상된다.

코일의 전류는 전류 센서(LA25NP, LEM, 스위스)를 통해 측정한다. 식 (2)와 같이 전류의 진폭을 통해 인덕턴스를 측정하므로, 전류의 진폭을 복조 회로를 통해 추출한다. 진폭 복조 회로는 전파 정류기와 저역통과 필터로 구성되어 있다. 본 논문에서는 차단 주파수 10 Hz를 가진 Sallen-Key 형태의 2차 저역통과 필터를 사용하였다. 신호의 증폭을 위해 100 배의 이득을 갖는 계측 증폭기 (INA101, Burr-Brown, 미국)를 사용하였으며, 직류 성분이 증폭되지 않도록 오프셋 조절기를 증폭기 앞단에 사용하였다. Fig. 5는 신호처리 회로의 구성 및 연결을 블록도 형태로 보여준다.

4. 결과 및 토론

앞서 기술한 설계 과정에 근거하여 센서를 설계하고 시작품을 제작하였다. 폭 30mm, 두께 0.2 mm의 규소 강판을 이용하여 직경 50mm의 고리를 만들고, 코일을 300번 감아 센서를 제작하였다. 제작된 센서의 형태는 Fig. 6(a)에 나타나 있다.

Fig. 6(b)와 같이 센서가 고무 튜브를 감싸고 고무 튜브 내의 압력을 펌프를 이용하여 변화시키며 센서의 출력을 측정하였다. 센서 측정 결과의 검증 위해 반도체 압력센서(SSC Series, Honeywell, 미국)를 이용하여 튜브 내의 압력을 측정하였다.

Fig. 7은 튜브 내의 압력을 5.4 psi (37 kPa)에서 6.3 psi (43 kPa)까지 변화시키며 측정된 결과이다. 센서의 출력은 6.9 V에서 8.6 V로 변화하였다. 압력

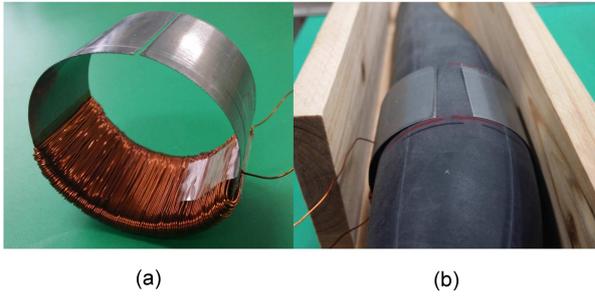


Fig. 6 (a) Picture of the prototype sensor, (b) Experimental setup

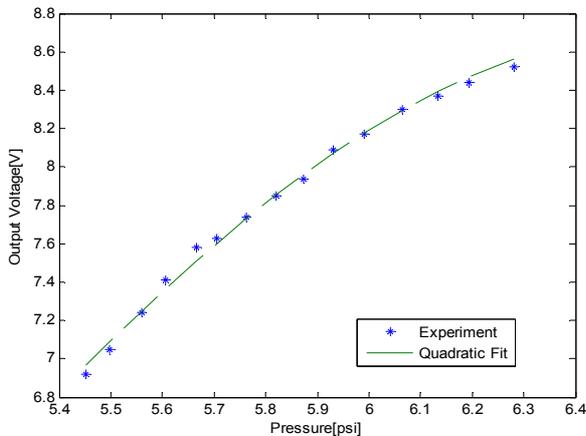


Fig. 7 Experimental results obtained from the test rig. The output of the proposed sensor is compared with the reference sensor

과 측정된 출력 전압 사이의 관계는 비록 선형적으로 보기 어려우나, 이차식을 이용하면 비교적 정확한 관계식을 얻을 수 있다. 즉, 출력전압을

$$V = a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \quad (18)$$

와 같이 표현하고 최소자승법에 의해 계수를 구하면 최대 오차가 2% 이내이다. Fig. 7의 점선은 식 (18)의 식을 이용하여 얻은 결과이다. 여기서 사용한 계수값은 $a_0 = -43.61 \text{ V}$, $a_1 = 15.64 \text{ V/psi}$, $a_2 = -1.168 \text{ V/psi}^2$ 이다.

센서의 선형성을 개선하기 위해 다음의 몇 가지가 시도될 수 있을 것이다. 우선 센서 형상의 최적화를 통해 선형성을 개선할 수 있다. 적절한 틈새 거리나 고리의 두께가 누설 자속에 큰 영향을

미치므로, 압력 측정 범위에 따라 센서의 형상이 최적화되고 가진 주파수가 결정되면 누설 자속에 의한 비선형성을 크게 줄일 수 있을 것이다. 센서의 비선형성에 영향을 미치는 또 다른 인자는 고리와 고리가 감싸는 튜브 간의 마찰력으로서 마찰의 특성 상 선형성을 저하시킨다. 마찰계수가 작은 재질의 튜브를 사용하여 마찰력의 영향을 줄일 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 간단한 구조의 자기유도(inductive) 센서를 제안하고, 센서 설계 과정을 기술하였다. 또한, 자기유도 센서를 압력 측정에 적용하여 비접촉 압력 측정의 가능성을 확인하였다. 압력 측정의 정확도를 향상하려면 센서의 구조를 최적화하는 추가 연구가 필요할 것이다.

후기

이 연구는 충남대학교 CNU 학술연구비에 의해 지원되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Fericean, S. and Droxler, R., 2007, "New Noncontacting Inductive Analog Proximity and Inductive Linear Displacement Sensors for Industrial Automation," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No. 11, pp. 1538~1545.
- (2) Webster, J. G., ed., 1999, *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- (3) Park, C., Kang, B. and Lee, D., 2007, "Fabrication and Characterization of a Pressure Sensor Using a Pitch-based Carbon Fiber," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 4, pp. 417~424.
- (4) Hanselman, D., 1994, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw-Hill, New York, pp. 20~22.
- (5) Crandall, S. H., Dahl, N. C., and Lardner, T. J., 1978, *An Introduction to the Mechanics of Solids*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 545~547.
- (6) Palm, W. J., 2007, *Mechanical Vibration*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, p. 87.