

## Geomagnetic Sensor Based on L/R Oscillator with a Solenoid Coil Inductor Containing Cu Core/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> Shell Composite Wire

Seok Soo Yoon\*, Dong Young Kim, and Jae Yeon Choi

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

Sang Hun Lee

Department of Radiological Science, Kaya University, Gimhae 50830, Korea

(Received 3 January 2019, Received in final form 10 January 2019, Accepted 13 January 2019)

In recent, PNI sensor corporation has been released geomagnetic field sensor with high performance. This sensor uses a new principle measuring the period of digital output pulse of L/R oscillator circuit which is connected to the solenoid coil inductor wound on high permeability amorphous wire. In this paper, we design L/R oscillator circuit based on the PNI's principle and connect the circuit to the solenoid coil inductor containing Cu core/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> shell composite wire fabricated by electrodeposition. We investigate applicability of this system to geomagnetic field sensor.

**Keywords** : magnetic sensor, geomagnetic sensor, Cu core/NiFe shell composite wire, magneto inductance, magneto impedance, electrodeposition, L/R oscillator

## Cu 코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 셸 복합와이어를 넣은 솔레노이드 코일 인덕터를 이용하는 L/R 오실레이터 기반 지자기 센서

윤석수\* · 김동영 · 최재연

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

이상훈

가야대학교 방사선학과, 경남 김해시 삼계로 208, 50830

(2019년 1월 3일 받음, 2019년 1월 10일 최종수정본 받음, 2019년 1월 13일 게재확정)

최근에 PNI sensor 사는 고성능을 가진 지구자기장 센서를 출시하였다. 이 센서는 비정질 와이어에 코일을 감은 솔레노이드 인덕터를 L/R 오실레이터 회로에 연결하여 이 회로에서 발생하는 디지털 펄스 신호의 주기를 측정하는 새로운 원리를 적용하고 있다. 본 논문에서는 PNI 사의 새로운 원리를 기초로 L/R 오실레이터 회로를 설계하고, 이 회로에 전기도금으로 제작한 Cu 코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 셸 복합와이어 위에 코일을 감은 솔레노이드 인덕터를 연결하여 디지털 출력 펄스의 발생여부를 확인하며, 이 펄스의 주기가 자기장에 따라 어떻게 변하는지를 측정한다. 이를 바탕으로 Cu 코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 셸 복합와이어를 넣은 솔레노이드 인덕터와 L/R 오실레이터 회로로 구성된 시스템으로 지자기 센서 개발 가능성을 타진한다.

**주제어** : 자기센서, 지자기센서, Cu 코어/NiFe 셸 복합와이어, 자기 인덕턴스, 자기 임피던스, 전기도금, L/R oscillator

### I. 서 론

Hall, AMR, GMR, TMR, GMI 등 다양한 효과를 이용한

자기센서들이 개발되어 널리 이용되고 있다[1-3]. 특히 스마트폰, 태블릿 등 모바일 기기에 지구 자기장을 측정하는 지자기 센서 IC가 기본적으로 탑재됨에 따라 관련 시장규모가 급속히 확대되었다. Hall 효과를 이용한 지자기 센서 IC는 대표적으로 AKM에서, AMR 효과를 이용한 것은 Honeywell사와 MEMSIC사에서, GMR 효과를 이용한 것은 Yamaha

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

\*Corresponding author: Tel: +82-54-820-5450,

Fax: +82-54-823-1628, e-mail: yoon@anu.ac.kr

사와 Alps사에서 TMR 효과를 이용한 것은 freescale사에서, GMI 효과를 이용한 것은 Aichi MI사 등에서 개발을 완료하여 출시하고 있다. 이들 제품은 모두 양산화 단계에 접어들었으며 시장을 확보하기 위해 가격과 성능 면에서 치열한 경쟁을 펼치고 있다. 이러한 가운데 기존의 지자기 센서들과는 다른 새로운 원리를 적용하여 지자기 센서를 개발하고자 하는 연구도 진행되고 있다. PNI Sensor사는 비정질 와이어 코어에 솔레노이드 코일을 감아 인덕터(L)를 만들고 이를 L/R 진동회로에 적용하여 발생하는 펄스 신호의 주기가 지구 자기장에 따라 변하는 효과를 이용한 지자기 센서 IC를 개발하였다[4]. 이 센서는 높은 투자율의 비정질 와이어를 코어로 가진 인덕터의 L 값이 자기장에 따라 민감하게 변하는 성질을 이용한 것이기에 개발한 업체에서 magneto-inductive sensor라고 명명하였다. 다른 지자기 센서는 아날로그 출력 전압을 통해 자기장을 감지하는 반면, 이 센서는 디지털 출력 펄스의 주기를 통해 자기장을 감지한다는 측면에서 흥미를 끈다.

본 논문에서는 PNI sensor가 채택한 원리를 바탕으로 L/R 오실레이터 회로를 설계하고, 이 회로를 전기도금 방법으로 Cu 코어에 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 셀을 형성한 복합 와이어에 연결하여 디지털 출력 펄스의 발생 여부를 확인하며 이 펄스의 주기가 자기장에 따라 어떻게 변하는지를 측정하였다. 이를 바탕으로 Cu 코어/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 셀 복합와이어를 넣은 솔레노이드 인덕터와 L/R 오실레이터 회로로 구성된 시스템으로 지자기 센서를 개발할 가능성이 있는지를 타진하였다.

## II. L/R 오실레이터 기반 Magneto-inductive Sensor의 원리

Fig. 1은 OP Amp IC를 이용한 L/R 오실레이터 회로를 보여준다. 이 회로에서 L로 표시된 부품이 연자성 재료를 코어를 가진 솔레노이드 코일 인덕터이다. 이 회로는 “0”과 “1”을 주기적으로 반복하는 디지털 펄스를 출력신호(V<sub>o</sub>)로 발생한다. Fig. 2는 L/R 오실레이터 회로에서 디지털 펄스가 출력되는 과정을 보여준다. 이 회로에 전원을 가하는 순간 V<sub>o</sub>는 전원전압(V<sub>REF</sub>)으로 포화되어 나오게 된다. 출력전압 V<sub>o</sub> = V<sub>REF</sub>일 때 OP AMP의 + 입력단자의 전압(V<sub>+</sub>)은 저항 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>에 의해 분배되어 아래 식을 따르는 값이 된다.

$$V_{+H} = \frac{R_1(R_1 + R_2)}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3} V_{REF} \quad (1)$$

이때 OP AMP의 가상단락 특성으로 인해 OP AMP의 - 입력단자의 전압 V<sub>-</sub>는 + 입력단자의 전압 V<sub>+</sub>와 같아 지려고 한다. 그러나 L이 급격한 변화를 제한하기 때문에 V<sub>-</sub>

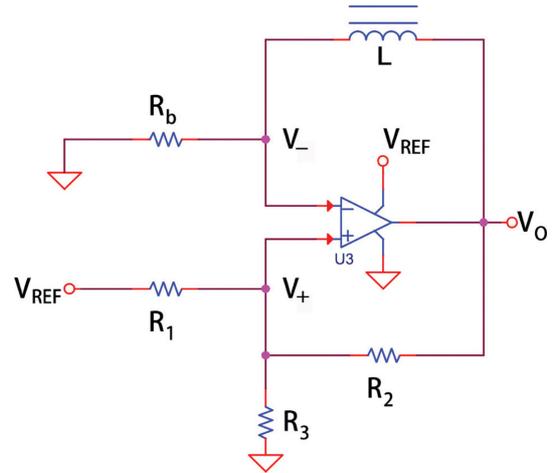


Fig. 1. (Color online) L/R oscillator circuit for magnetic sensor.

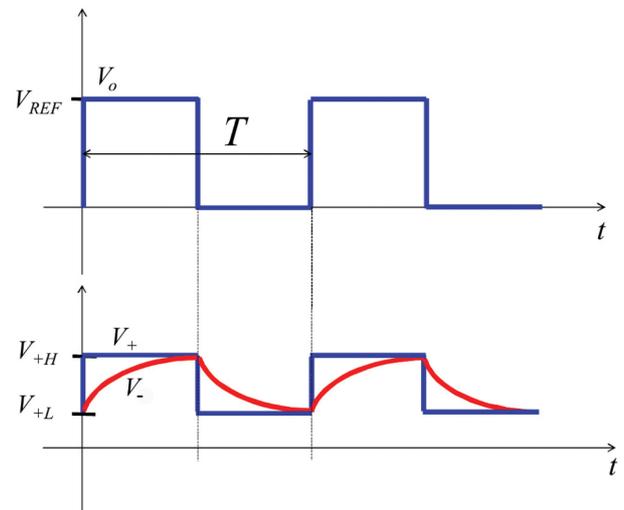


Fig. 2. (Color online) Waveforms of L/R oscillator circuit.

는  $\tau = L/R_b$ 의 시정수를 가지고 시간에 따라 지수적으로 증가하게 된다. 시간에 따라 V<sub>-</sub> 전압이 증가하여 V<sub>+</sub>H보다 커지게 되는 순간 OP AMP의 비교기 기능에 의해 출력신호 V<sub>o</sub>는 0V로 바뀌게 되며 동시에 + 입력단자의 전압도 다음 값으로 낮아지게 된다.

$$V_{+L} = \frac{R_2R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3} V_{REF} \quad (2)$$

이때부터 V<sub>-</sub> 전압은 다시 V<sub>+</sub>L 값과 같아지기 위해  $\tau = L/R_b$ 의 시정수를 가지고 시간에 따라 지수적으로 감소하게 된다. 시간에 따라 V<sub>-</sub> 전압이 감소하여 V<sub>+</sub>L보다 작아지게 되는 순간 OP AMP 출력은 비교기 기능에 의해 다시 V<sub>REF</sub>가 된다. Fig. 2와 같이 이 과정이 반복되면서 디지털 펄스 신호가 출력으로 발생하게 되며 이때 이 펄스의 주기 T는 L/R<sub>b</sub> 값에

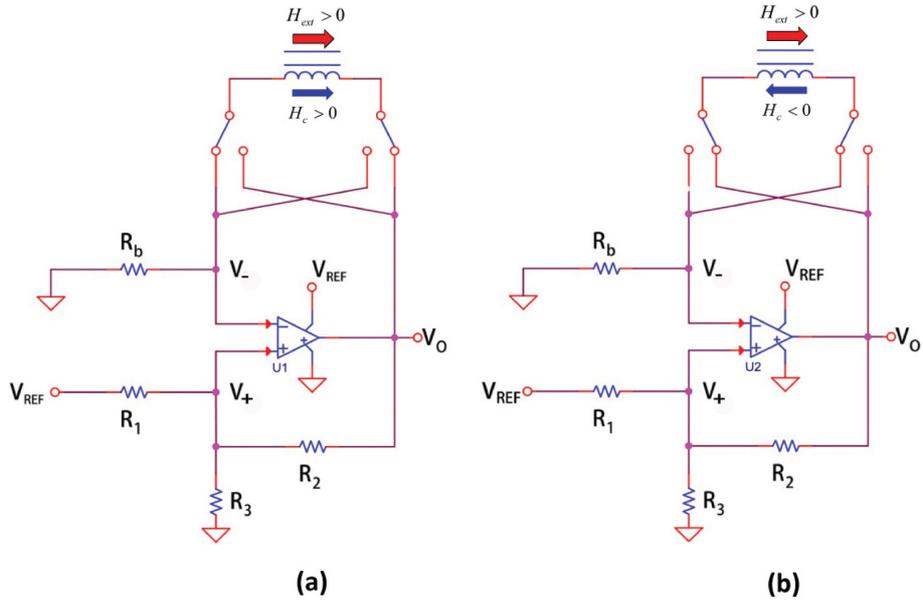


Fig. 3. (Color online) (a) Forward bias and (b) reverse bias connections with solenoid coil inductor.

비례하게 된다. 이 회로에서 솔레노이드 코일 인덕터를 통해 흐르는 전류( $I_c$ )는 OP AMP의 입력저항이 매우 크기 때문에 저항  $R_b$ 를 통해 흐르는 전류와 같으며 따라서 다음 식을 따른다.

$$I_c = V_- / R_b \quad (3)$$

그리고 이 전류가 솔레노이드가 내부에 만드는 자기장은 다음 식을 만족한다.

$$H_c = (N/L)I_c \quad (4)$$

여기서  $N$ 과  $L$ 는 각각 솔레노이드 코일의 감은 횟수와 길이이다. 식(4)와 (3)에서 알 수 있듯이  $V$ 가  $V_{+H}$ 와  $V_{+L}$  사이에서 진동하면 솔레노이드가 내부에 만드는 자기장도 다음 두 값 사이에서  $V$ 와 같은 파형으로 진동하게 된다.

$$H_{cH} = (N/L)(V_{+H}/R_b) \quad (5a)$$

$$H_{cL} = (N/L)(V_{+L}/R_b) \quad (5b)$$

PNI sensor 사에서 개발한 자기센서는  $L/R$  오실레이터 회로에서 출력신호의 주기를 순방향 바이어스 상황과 역방향 바이어스 상황에서 각각 측정하고 그 주기의 차이로부터 지구 자기장을 결정하는 방식을 채택하였다. 여기서 순방향 바이어스라 함은 측정대상인 외부 자기장( $H_{ext}$ )의 + 방향과 같은 방향으로  $H_c$ 가 만들어지도록 인덕터 양단을 회로에 연결하는 것이며 역방향 바이어스라 함은 인덕터 양단을 반대로 연결하여  $H_{ext}$ 의 + 방향과  $H_c$ 의 방향이 반대가 되도록 하는 것이다. Fig. 3(a)와 (b)가 각각 순방향 바이어스 및 역방향 바이

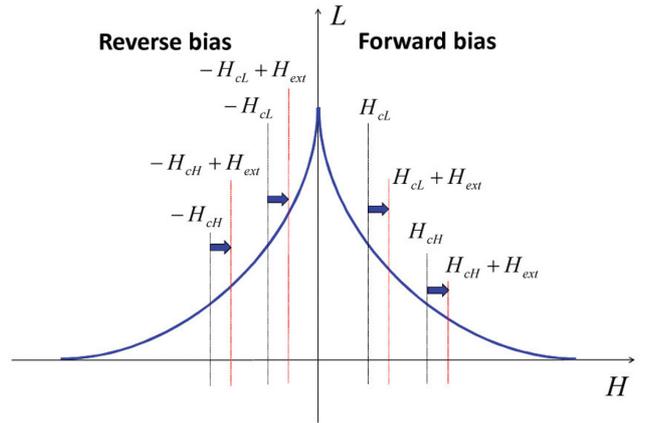


Fig. 4. (Color online) Schematic representation of the change of inductance with external magnetic field at forward and reverse bias connection.

어스 연결 상황을 보여준다. 이렇게 하면 순방향 바이어스의 경우 연자성 코어에 가해지는 유효자기장은  $H_{ext} + H_c$ 가 되는 반면 역방향 바이어스의 경우 유효자기장은  $H_{ext} - H_c$ 가 된다. 비정질 와이어를 코어로 가진 솔레노이드 코일의 인덕턴스 값은 보통 Fig. 4과 같이 자기장 부호에 대해 대칭적인 자기장의존성을 보인다[5]. 이 대칭성으로 인해 외부자기장이 영일 때는 바이어스 방향에 관계없이 솔레노이드 코일의 유효  $L$  값은 같으며 따라서 순방향 바이어스에서 출력 펄스의 주기( $T_F$ )와 역방향 바이어스에서 출력 펄스의 주기( $T_R$ )는 같게 되어 두 주기의 차  $\Delta T = T_R - T_F$ 는 영이 된다. 그런데 만약 + 방향의 작은 외부 자기장  $H_{ext}$ 이 솔레노이드 축 방향으로 가

해지는 경우 Fig. 4에서 보여주듯이 순방향 바이어스 경우 코어에 가해지는 유효 자기장은  $H_c + H_{ext}$ 가 되어  $L$  값은 자기장이 없을 때 값 보다 감소하게 되며 따라서 출력 펄스의 주기도 감소하게 된다. 반면에 역방향 바이어스 경우 유효 자기장은  $-H_c + H_{ext}$ 가 되며  $L$  값은 외부 자기장이 없을 때 값 보다 증가하게 되며 따라서 출력 펄스의 주기는 증가하게 된다. 즉  $H_{ext} > 0$ 의 경우  $\Delta T = T_R - T_F$ 의 부호는 양이 되며 외부 자기장의 크기가 커질수록 그 값은 커지게 된다. 같은 이유로 인해  $H_{ext} < 0$ 의 경우  $\Delta T$ 의 부호는 음이 되며 외부 자기장의 크기가 커질수록 그 절대 값은 커지게 된다. 즉 출력 펄스의 주기를 순방향 바이어스와 역방향 바이어스 상황에서 번갈아 측정한 후 그 차이를 이용하면 자기장의 방향과 크기를 결정할 수 있게 된다.

### III. 실험

Cu 코어/ $Ni_{80}Fe_{20}$  셸 복합와이어는 시판되고 있는 직경 200  $\mu m$ 의 Cu 와이어에 전기도금 하는 방법으로 제조하였다. 전기도금 용액의 조성, 도금 셀의 구조, 전기도금 방식 및 조건 등은 이전에 발표한 논문에서 자세하게 설명되어 있다[6]. 도금된 NiFe 셸의 두께는 광학현미경으로 조성은 Energy Dispersive X-ray 분광기 이용하여 측정하였다.  $L/R$  오실레이터 회로에 연결되는 솔레노이드 인덕터는 외경 2 mm의 유리관 속에 제조된 복합 와이어를 넣고 유리관 외부에  $N = 440$ ,  $l = 1.5$  cm의 코일을 감아 만들었다.  $L/R$  오실레이터 회로의 구조는 기본적으로 Fig. 1과 같으며 OP AMP는 초고속 성능을 지닌 LT1192를 사용하였다. 회로는 브레드 보드에 구성하였으며 회로에 연결된 솔레노이드 인덕터는 Helmholtz coil 속에 넣어 와이어의 길이 방향으로 균일한 외부 자기장을 가할 수 있게 하였다. 회로 출력파형은 오실로스코프로 관찰하였으며 출력 디지털 펄스신호의 주기는 NI-6001 DAQ 하드웨어와 Labview 프로그램을 이용하여 주어진 시간동안 입력된 펄스의 수를 카운트하여 측정하였다. 주어진 외부 자기장 하에서 순방향 및 역방향 바이어스로서의 연결은 수동으로 행하였다. Cu 코어/NiFe 셸 복합 와이어를 담고 있는 솔레노이드의  $L$  값은 HP4192A Impedance Analyzer를 이용하여 측정하였다.

### IV. 결과 및 논의

전기도금으로 제조된 Cu 코어/NiFe 셸 복합와이어에서 도금된 셸은 이전 논문과 같이  $Ni_{80}Fe_{20}$  조성으로 균일한 두께로 형성되었다[6]. 본 실험에서 사용한 복합와이어의  $Ni_{80}Fe_{20}$  셸 두께는 약 20  $\mu m$ 였으며 도금된 총 길이는 5 cm였다. Fig. 5는 Cu 코어/NiFe 셸 복합 와이어를 담고 있는 솔레노

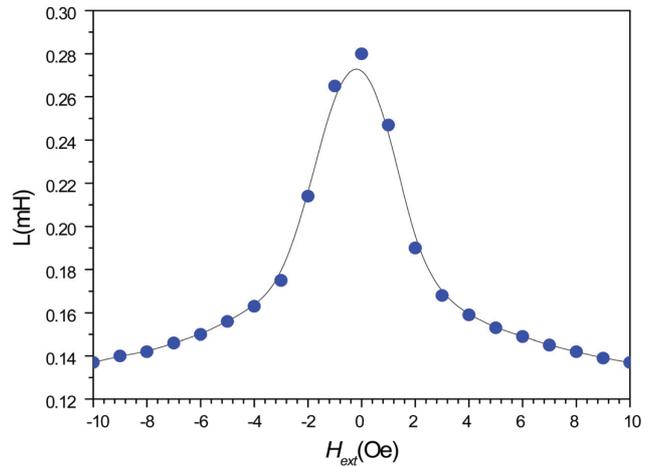


Fig. 5. (Color online) Variation of inductance ( $L$ ) of the solenoid coil inductor wound on Cu core/ $Ni_{80}Fe_{20}$  shell composite wire with external magnetic field ( $H_{ext}$ ).

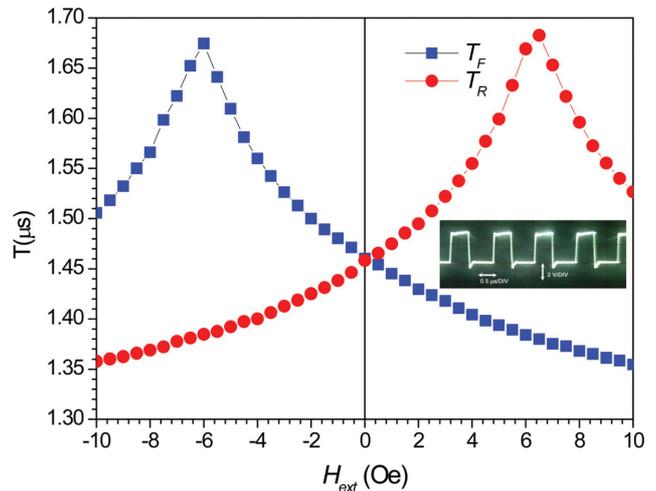
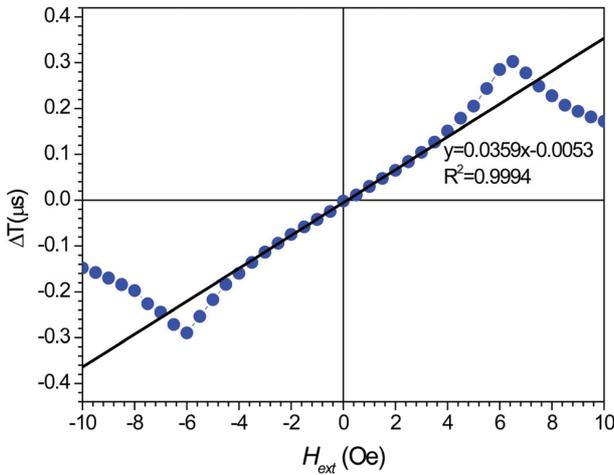


Fig. 6. (Color online) Variation of forward biased and reverse biased periods ( $T_F$  and  $T_R$ ) of digital output pulse with external magnetic field ( $H_{ext}$ ) at the  $L/R$  oscillator circuit connected with the solenoid coil inductor wound on Cu core/ $Ni_{80}Fe_{20}$  shell composite wire. The inset is the waveform of digital output pulse observed by oscilloscope at 2 V/DIV and 0.5  $\mu s$ /DIV.

이드 코일의  $L$  값의 외부 자기장( $H_{ext}$ ) 의존성을 보여준다(외부 자기장 방향은 코일의 길이방향 이었음).  $L$  값은  $H_{ext}$ 가 증가함에 따라 매우 민감하게 감소하며  $H_{ext}$ 의 부호 즉 방향에 대해 대칭적인 프로파일을 보여주며 이는 전형적인 연자성 재료의 특성이다[5]. Fig. 6은 솔레노이드 코일 인덕터를  $L/R$  오실레이터 회로에 순방향 및 역방향 바이어스 방식으로 연결하여 각각 측정한 출력 펄스 신호 주기의  $H_{ext}$  의존성을 보여준다(출력 펄스 신호의 모양은 Fig. 6 속에 넣었음). 이 결과를 보면 역방향 바이어스에서  $T_R(H_{ext})$  프로파일의 모양은 Fig. 5의  $L(H_{ext})$ 에서 그래프를  $+x$  축 방향으로 약 6.5



**Fig. 7.** (Color online) Variation of  $\Delta T$  with external magnetic field ( $H_{ext}$ ) at the  $L/R$  oscillator circuit connected with the solenoid coil inductor wound on Cu core/ $Ni_{80}Fe_{20}$  shell composite wire.

Oe 이동한 것과 유사하며 순방향 바이어스  $T_f(H_{ext})$  프로파일의 모양은 반대로  $-x$  축 방향으로 같은 크기만큼 이동한 모양과 유사하다. 이러한 양상이 나타나는 것은 주기 값이 인덕턴스 값에 비례하며 인덕턴스는 Fig. 4에서 설명했듯이 순방향 바이어스 경우  $H_{ext} + H_c$ , 역방향 바이어스의 경우  $H_{ext} - H_c$ 의 유효자기장에 의존하기 때문이다. 본 실험에서 사용한 저항은  $R_1 = 1.0 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1.6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 500 \Omega$ 이었으며  $V_{REF} = 5 \text{ V}$ 였다. 이때  $H_c$ 는 식(5a), (5b), (1), (2)에 의해  $H_{cL} = 5 \text{ Oe}$ 에서  $H_{cH} = 8 \text{ Oe}$  사이에서 진동하게 되며 평균값은 약 6.5 Oe로 Fig. 6에서 그래프가  $x$  축 방향으로 이동한 크기와 일치한다.

Fig. 7은  $\Delta T = T_R - T_F$ 의  $H_{ext}$  의존성을 보여준다. 이 결과를 보면  $\Delta T$ 는  $\pm 3 \text{ Oe}$  범위에서  $H_{ext}$ 에 대해 뛰어난 선형 의존성을 보여준다.  $\pm$  수 Oe 범위에서 출력이 자기장에 대해 선형 의존성을 보이는 것이 자기장 센서의 가장 기본적인 요구 조건이기 때문에 본 센서 시스템은 지구자기장 센서로 적용가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

전기도금으로 제조된 Cu 코어/ $Ni_{80}Fe_{20}$  셸 복합와이어를 넣

은 솔레노이드 인덕터를 이용하여  $L/R$  오실레이터 회로를 개발하였다. 이 회로는 디지털 펄스 신호를 출력으로 발생하였으며 이 펄스 신호의 주기가 외부자기장에 민감하게 변하였다. 주어진 자기장하에서 순방향 바이어스 및 역방향 바이어스 경우에 대해 측정된 주기의 차이는  $\pm 3 \text{ Oe}$  범위에서 외부자기장에 선형 의존성을 보였으며 이 결과로부터 지구자기장 센서로 응용 가능성이 있다는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과를 바탕으로 Cu 코어/ $Ni_{80}Fe_{20}$  셸 복합와이어의 특성을 최적화하고, 현재의 회로에 순방향 및 역방향 바이어스 연결을 클럭펄스의 주기에 따라 자동으로 스위칭하는 기능과 마이크로프로세서를 추가하여 시직품 수준의 자기장 센서를 PCB로 제작하고자 한다. 이 센서는 출력신호가 디지털 펄스 신호이기 때문에 아날로그 신호에서처럼 증폭회로나 A/D 컨버터 회로를 필요로 하지 않아 가격 경쟁력이 높을 것이며, 전압신호가 아닌 주기를 측정하는 방식이기 때문에 1/f 노이즈로부터 자유로워 자기장 분해능도 뛰어날 것이다. 아울러 순방향과 역방향 바이어스의 차를 이용하기 때문에 온도변화나 히스테리시스로 인한 변동이나 보정도 필요하지 않을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] P. Ripka, IEEE Sens. J. **10**, 1108 (2010).
- [2] S. Tumanski, Prz. Elektrotech. **10**, 1 (2013).
- [3] A. Grosz, M. J. Haji-Sheikh, and S. C. Mukhopadhyay, High Sensitivity Magnetometers, Springer International Publishing (2017).
- [4] A. Leuzinger and A. Taylor, Magneto-Inductive Technology Overview, PNI White Paper, PNI Sensor Corporation (2010).
- [5] X. Lin, J. Li, and M. Tang, IEEE Trans. Magn. **51**, 1 (2015).
- [6] S. E. Cho, T. J. Goo, D. Y. Kim, and S. S. Yoon, J. Korean Magn. Soc. **25**, 129 (2015).