

가변주파수형 금속감지 센서의 특성

최규남*

Characteristics of Metal Sensor using Variable Frequency

Kyoo-Nam Choi*

요약

습기와 먼지가 많은 장소에서도 내환경성을 가지면서 고감도로 미세 금속편 감지가 가능한 전자장 방식 선형가변차동변압기를 이용한 금속감지 방식에 대하여 연구하였다. 초장파에서 장파에 걸친 3개 주파수 대역에서 위상검파 방식을 사용하여 각 주파수별 금속감지 특성을 실험적으로 측정하였다. 주파수가 증가하면 금속 감지 및 금속편이 포함되는 동물성 식품에 대한 감도는 기하급수적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 위상검파 후단의 저역통과필터의 대역폭을 축소하여 감도를 비례하여 증가시킬 수 있었고, 대역통과필터 대역폭과 신호대잡음비를 최적화하여 철 시편에 대한 감지 감도를 향상시킬 수 있었다. 시험용 철 시편을 사용한 감지 감도 한계는 동물성 식품에 대한 변별력이 좋은 50kHz 초장파 대역에서 최저 지름 0.7mm의 철 시편까지 금속감지가 가능함을 보여주었다.

ABSTRACT

This Electromagnetic metal piece detection sensor, having high sensitivity even under high humidity and dust density, using LVDT was investigated. Metal detection characteristics using phase detection method, for 3 frequencies covering ELF and LF band, were experimentally measured. It was found that the sensitivity for metal and animal food, in which metal piece was included, was exponentially increased as frequency increased. Reducing cutoff frequency of LPF after PD was found to be effective to proportionally increase sensitivity. Also the sensitivity of metal piece detection was enhanced by optimizing BPF bandwidth and SNR. Metal piece detection limit using available ferrous test samples was found to be 0.7mm diameter from the experiment using 50kHz, in ELF band, which was known to have better selectivity to animal food. is an example of ABSTRACT format.

키워드

Frequency Characteristics, Metal Detection, Metal Sensor, Phase Sensor
주파수특성, 금속감지, 금속센서, 위상센서

1. 서론

물체를 감지하는 센서는 초음파[1], 광[2], 마이크로웨이브[3], 장파[4] 등의 매체를 사용한다. 특히 금속 감지는 금속의 존재유무는 물론 측정하고자 하는 물

체의 크기를 계량화할 수 있으므로 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 응용분야를 찾을 수 있다. 금속감지 센서는 측정감도 측면에서 금속감지 기술의 진보에 따라 그 응용분야는 넓어지는데, 두드러진 것은 측정 감도와 변별력의 향상으로 식품 내 검출할 수 있는 이물

* 교신저자(corresponding author) : 인천대학교 정보통신공학과(knchoi@incheon.ac.kr)
접수일자 : 2013. 11. 18

심사(수정)일자 : 2013. 12. 23

게재확정일자 : 2014. 02. 11

질의 크기가 더욱 작아지고 금속을 포함하는 동식물 조직에 대한 변별력도 급속하게 높아지고 있다는 점이다. 응용분야중 하나인 식품 내 포함되는 박테리아 및 비금속이물질 및 금속이물질에 대한 검출은 식품 안전상 중요하여 광범위한 연구가 이루어지고 있다. 이중 금속 이물질은 산업계의 수요가 가장 많아 많은 연구가 수행되었으며 최근에는 X선을 이용한 식품 내 이물질 검출까지 이미 적용되고 있다. 가장 보편적으로 사용되는 금속검출기는 전자파를 이용하는 것으로 최근에는 초전도코일을 사용한 검출방법[5]까지 시도된 바 있다. 또한 이러한 방식에 대한 일반적인 이론적 해석[6]과 형상에 따른 감도변화에 대한 해석[7]도 시도되었다. 반면 신호처리 과정을 거쳐 물체인식도를 높이려는 시도[8]도 있었다. 대상 모체에 대한 다양한 시도도 있었으며 특히 분체[9]에 대한 이물질 검출 시도가 있었다. 금속검출기 핵심 부품인 감지코일 구조에 대한 연구[10]도 있었다.

기존의 방식과 다른 초고주파, 광파, 초전도 기술을 이용하여 금속물체를 감지하려는 시도가 있었지만 산업계에서 가장 보편적으로 적용되는 기술은 전자장을 이용한 금속검출 방법이다. 본 연구에서 다루는 전자장을 이용하는 방식은 전천후로 금속감지가 가능하여 다양한 환경에서도 견뎌야 하는 습기와 이물질을 함유하는 식품검사기와 같은 응용분야에 적합하다. 전자장을 이용한 금속감지 방법에 대하여 다양한 연구가 시도된 바 있으나 주파수별 금속감지 특성에 관한 심도 있는 연구는 진행된 바 없었다. 따라서 본 연구에서는 초장파 및 장파대역에 걸친 주파수 대역에서 주파수별 금속감지 특성을 실험적으로 연구하였다.

II. 금속감지방식

본론은 전자유도 원리를 이용한 고감도 금속감지 센서는 선형가변차동변압기를 이용한다. 금속을 감지하는 센서헤드는 그림 1과 같이 한 개의 송신기 안테나와 두 개의 수신기 안테나로 구성되며, 두 개의 수신기 안테나는 수신시 수신신호의 극성이 상호 상쇄 되도록 결선하여 센서가 금속을 감지하지 않는 상태에서는 출력신호가 0이 되도록 한다.

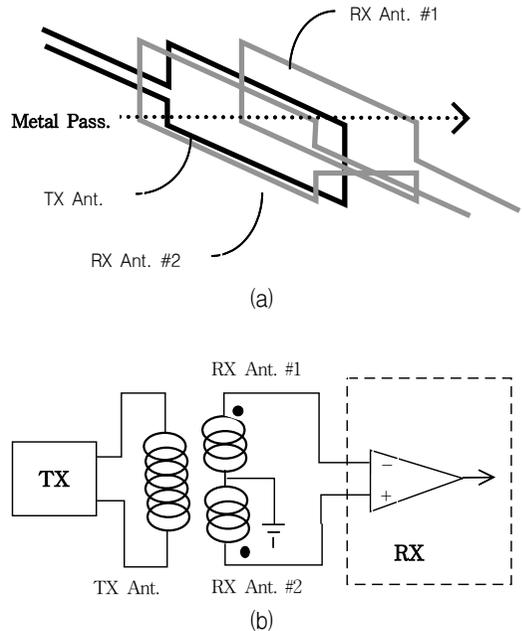


그림 1. 금속감지센서 안테나 ; (a) 구조, (b) 회로
 Fig. 1 Antenna of metal sensor ; (a) arrangement, (b) schematic

이러한 선형가변차동변압기 (LVDT : Linear Variable Inductance Transducer) 구조는 금속과 같은 강자성 물질이 이 안테나 루프 내를 통과하게 되면 송신안테나와 각 수신안테나 간의 자속결합률이 변화되어 결과적으로 두 수신안테나 코일 간의 자속결합률의 변화가 금속을 감지하는 출력 전압으로 변환 되게 된다.

2.1. 금속감지 안테나

금속센서의 송신안테나와 수신안테나의 등가회로를 그림 2와 같이 나타내면, 센서 출력이 무부하일 때 수신안테나에서의 출력전압 V_o 는 식 (1)과 같이 송신안테나와 수신안테나 간의 상호인덕턴스 M_1, M_2 의 차에 비례하여 표현할 수 있으며 송신안테나의 주파수가 높을수록 비례하여 출력전압이 높아짐을 알 수 있다. 송신안테나와 수신안테나 간의 간격이 비교적 긴 금속감지 센서의 경우 $L_p \gg M_1, M_2$ 이므로, 송신기 출력전압이 $V_s = E_s \sin(\omega t + \delta)$ 이면 수신안테나에서의 전류는 식 (2)와 같이 나타내어진다. 여기서 α 는 송신안테나와 수신안테나간의 자기저항에 의한 감쇄

계수이다.

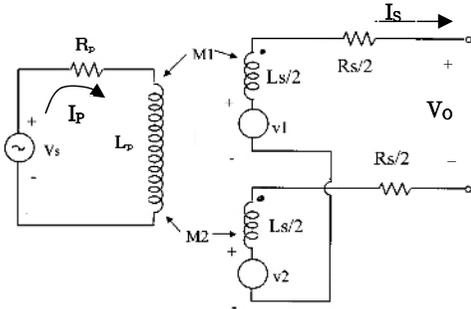


그림 2. 금속감지센서 안테나 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of metal sensor antenna

$$V_o = V_1 - V_2 = -(M_1 - M_2) \frac{dI_s}{dt} \quad (1)$$

$$\approx \alpha \frac{-\omega(M_1 - M_2)E_s}{\sqrt{(\omega L_p)^2 + R_p^2}} \cos(\omega t + \delta)$$

$$I_s \approx \alpha \frac{E_s}{\sqrt{(\omega L_p)^2 + R_p^2}} \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

센서 출력 단자에 부하저항 R_L 을 연결하면 송신안테나측 관계식은 다음 식 (3), 수신안테나측 폐회로에 서의 관계식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = -(M_1 - M_2) \frac{dI_s}{dt} + \left(I_p R_p + L_p \frac{dI_p}{dt} \right) \quad (3)$$

$$(M_1 - M_2) \frac{dI_s}{dt} + L_s \frac{dI_s}{dt} + (R_s + R_L) I_s = 0 \quad (4)$$

여기서 센서의 감도에 영향을 미치는 요인은, 금속 이 센서를 통과할 때 상호인덕턴스 M_1, M_2 의 변화량을 크게 하여야 금속감지 센서의 감도를 높일 수 있게 된다. 상호인덕턴스는 식 (5)와 같이 나타내어지며, 여기서 k_1, k_2 는 송신안테나와 수신안테나 간의 결합 계수를 나타내며 $0 \leq k_1, k_2 \leq 1$ 인 값을 갖게 된다.

$$M_1 = k_1 \sqrt{L_p L_{s/2}}, \quad M_2 = k_2 \sqrt{L_p L_{s/2}} \quad (5)$$

실제 센서는 측정대기상태일 때 $M_1 = M_2$ 인 상태로 조정되므로 출력전압은 $V_o \approx 0$ 이 되고 측정시 $\omega, M_1 - M_2$ 가 클수록 감도가 높아지게 된다. 그리고 이동하는 작은 금속물체를 감지하는 금속감지 센서에서 결합계수를 계산하는 것은 어려우므로 실험적인 방법을 사용하여 검증한다.

2.2. 위상검파

금속감지 안테나에서 출력되는 미약한 신호를 외부 잡음의 영향을 받지 않고 복원하기 위하여 위상검파 방식(PD : Phase Detection)을 사용한다.

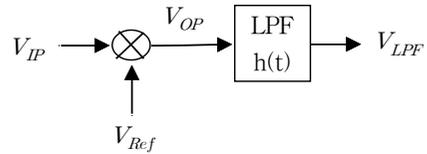


그림 3. 금속감지센서의 위상검파회로

Fig. 3 Phase detection circuit of metal sensor

위상검파기에 입력되는 피측정 신호를 V_{IP} , 송신기로부터 위상검파기에 입력되는 참조신호를 V_{Ref} 라고 하면 위상검파기에서 출력되는 신호 V_{OP} 는 다음 식 (8)과 같이 나타난다. 이 신호를 저역통과필터(LPF)를 통과 시키면 식 (9)와 같은 금속시료 감지에 의한 위상변화신호 V_{LPF} 가 얻어진다.

$$V_{IP} = E_{IP} \sin(\omega t + \alpha) \quad (6)$$

$$V_{Ref} = E_{Ref} \sin(\omega t + \beta) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{OP} &= E_{IP} \sin(\omega t + \alpha) \times E_{Ref} \sin(\omega t + \beta) \\ &= \frac{E_{IP} E_{Ref}}{2} (\cos(\beta - \alpha) - \cos(2\omega t + \alpha + \beta)) \end{aligned} \quad (8)$$

$$V_{LPF} = \frac{E_{IP} E_{Ref}}{2} \cos(\beta - \alpha) \quad (9)$$

그러나 위상차 $\beta - \alpha$ 가 잡음에 의한 위상변동률보다 작은 경우 신호를 복원할 수 없기 때문에 잡음을 아래 식 (10)과 같이 줄여야 한다. 여기서 저역통과필터의 차단주파수 대역폭은 위상변화신호의 주파수대역 $V_{LPF}(f)$ 보다 조금 크면 최대의 신호대잡음비 (SNR)를 얻을 수 있게 된다.

$$S_{V_{LPF}}(f) \gg |H(f)|^2 S_N(f) \quad (10)$$

위 식에서 $S_{V_{LPF}}(f)$ 는 저역통과필터(LPF)를 통과한 후의 주파수대역전력밀도 (Power Spectral Density)를, $|H(f)|$ 는 LPF의 주파수영역 필터 특성을, $S_N(f)$ 는 잡음의 주파수대역전력밀도를 각각 나타낸다.

III. 실험방법

금속감지 센서는 송신기 안테나에서의 송신주파수를 50kHz, 200kHz, 400kHz의 3개 주파수를 선택할 수 있도록 하여 주파수 대역에 대한 금속감지 특성을 연구할 수 있도록 하였다.

3.1. 금속감지부

금속감지부는 그림 1과 같은 송신안테나와 2개의 수신안테나를 수납하며, 외부 잡음의 영향을 줄이기 위하여 금속실드함 내에 수납하여 외함을 접지하는 방법을 사용하였다. 외함의 크기는 폭, 높이, 깊이가 각각 55cm, 29cm, 23cm이며 금속감지용 개구부는 폭, 높이, 깊이가 각각 29cm, 10cm, 23cm 의 크기를 갖도록 하였다.



그림 4. 금속감지부의 외형도

Fig. 4 External view of metal sensing compartment

3.2. 송신부

송신부는 그림 5와 같이 수정발진기로 400kHz를

발생시켜 이를 분주하는 방식으로 50kHz, 200kHz, 400kHz의 3개 주파수를 발생시켰다.

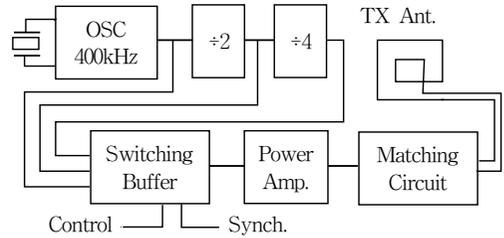


그림 5. 센서 송신기 블록도

Fig. 5 Block diagram of sensor transmitter

3.3. 수신부

수신부는 그림 6과 같이 수신안테나로 부터의 신호를 임피던스정합 시킨 후 증폭하여 위상검파한 후 신호처리 하는 방식을 사용하였다.

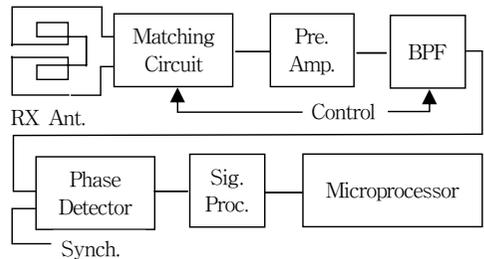


그림 6. 센서 수신기 블록도

Fig. 6 Block diagram of sensor receiver

3.4. 시험용 시료

시험용 시료는 Safeline 사의 시험용 철 시편 지름 $D=0.7\text{mm}$, 0.8mm , 0.9mm 와 제작한 $D=1.0\text{mm}$, 1.2mm , 5.0mm 를 사용하여 시험하였다.



그림 7. 시험용 철 시편

Fig. 7 Ferrous test samples

금속감지부 내에서 철 시편을 $10\sim 20\text{cm/sec}$ 의 속도로 이동시키면, 이는 송수신안테나 사이의 간격을 통과할 때는 약 $5\sim 10\text{Hz}$ 의 신호에 해당한다.

IV. 실험결과

4.1. 주파수별 감도 특성

지름 D=1.2mm 인 시험용 철 시편과 인체에 대하여 동일 입력전압에 대한 금속감지 감도를 50kHz, 200kHz, 400kHz 의 3개 주파수에 대하여 실시하였다. 시험결과는 아래 그림과 같이 주파수가 증가하면 감도는 기하급수적으로 증가함을 알 수 있었다.

표 1. 주파수별 금속감지 감도

Table 1. Metal sensitivity for various frequencies

Frequency	50kHz	200kHz	400kHz
Fe(D=1.2mm)	1.2V	1.8V	16V
Body(Hand)	2.4V	12V	>24V

4.2. 위상검파부 LPF 차단주파수별 감도 특성

지름 D=1.2mm 인 시험용 철 시편에 대한 금속감지 감도를 LPF의 차단주파수를 36Hz와 12Hz로 변화시키면서 50kHz 반송파에 대하여 실시하였다. LPF의 대역폭이 1/3로 감소하면 잡음수준도 비례하여 감소하므로 증폭률을 더 높일 수 있어 약 3배 더 높은 감도가 얻어짐을 알 수 있었다.

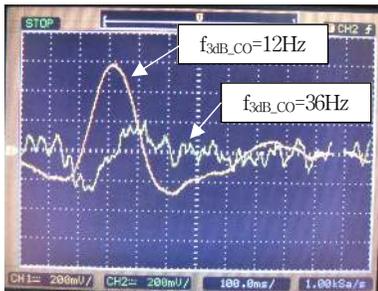


그림 8. 위상검파부 LPF 차단주파수에 따른 감지 감도

Fig. 8 Sensing sensitivity for LPF cutoff frequency of phase detector

4.3. 수신기 신호처리 후 감도 특성

지름 D=0.8mm 시험용 철 시편에 대한 금속감지 감도를 50kHz, 200kHz, 400kHz 의 3개 주파수에 대하여 BPF 주파수대역폭과 SNR을 최적화하는 신호처리 후 감도특성에 대하여 측정하였다.

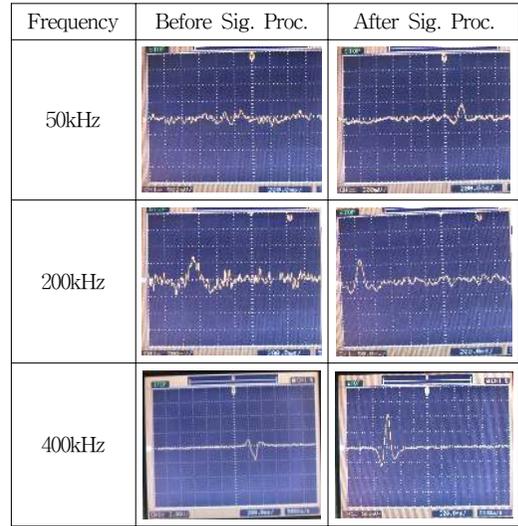


그림 9. D=0.8mm 금속시편의 신호처리후 감지 특성
Fig. 9 Metal sensitivity characteristics before and after signal processing for D=0.8mm ferrous test sample

4.4. 철 시편(D=0.7mm)의 50kHz 감지감도 특성

표 1에 나타난 시험 결과로부터 주파수를 증가시키면 금속에 대한 감도보다 육류에 대한 감도가 더 크게 증가함을 알 수 있었다. 따라서 육류와 같은 물체에 들어있는 철편을 감지하기 위해서는 주파수를 낮추어야 육류에 대한 금속 감지 변별력을 높일 수 있게 된다. 따라서 실험에 사용된 주파수 중 가장 낮은 50kHz를 사용하여 지름 D=0.7mm 시험용 철 시편에 대한 금속감지 감도를 아래 그림과 같이 측정하였다.

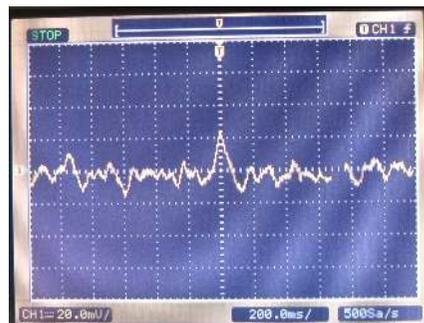


그림 10. D=0.7mm 금속시편의 50kHz에서 감지 특성
Fig. 10 Sensitivity characteristics using 50kHz for D=0.8mm ferrous test sample

V. 결론

고감도로 미세 금속편 감지가 가능한 선형가변차동 변압기를 이용한 전자장 방식에 대하여 연구하였다. 초장파(ELF)에서 장파(LF)에 걸친 50kHz, 200kHz, 400kHz 주파수 대역에서 위상검파 방식을 사용하여 주파수별 금속감지 특성을 실험적으로 측정하였다. 주파수가 증가하면 금속 감지 감도는 기하급수적으로 증가하나 금속편이 포함된 동물조직에 대한 감도도 증가함을 알 수 있었다. 위상검파 후단의 저역통과필터의 대역폭을 축소하면 이에 반비례하여 신호대잡음비를 증가시킬 수 있어 결과적으로 감도를 비례하여 증가시킬 수 있었다. 대역통과필터 대역폭과 신호대잡음비를 최적화하여 3개 주파수 대역에서 지름 0.8mm의 철 시편에 대한 감지 감도를 향상시킬 수 있었다. 제한된 금속감지 센서는 동물조직에 대한 변별력이 좋은 50kHz 초장파 대역에서 최저 지름 0.7mm의 철 시편까지 금속감지가 가능함을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

[1] J. Choe, I. Choy, and W. Cho, "Study on the Development of Multi-Agents Position Tracking System using Ultrasonic Transducers," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 5, 2013, pp. 725-731.

[2] K. Choi, "Line Edge Detection Sensor using Visual Spectral Wavelength," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 2, 2012, pp. 303-308.

[3] T. Kim, Y. Rhee, and S. Kim, "Implementation of a Microwave Doppler Sensor," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 4, no. 2, 2009, pp. 75-81.

[4] K. Choi, "Vehicle Collision Avoidance Sensor with Interference Immunity to Own Transmitted Signal," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 3,

2013, pp. 433-438.

[5] T. Nagaishi, F. Kamitani, H. Ota, K. Nishi, K. Kuwa, H. Fujita, and S. Tanaka, "First Practical High Tc SQUID System for the Detection of Magnetic Contaminants in Commercial Products," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, part 1, 2007, pp. 800-803.

[6] S. Yamazaki, H. Nakane, and A. Tanaka, "Basic analysis of a metal detector," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 4, 2002, pp. 810-814.

[7] P. Silvester and D. Omeragic, "Sensitivity of metal detectors to spheroidal targets," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 6, pp. 1331-1335, 1995.

[8] K. Blay, F. Weiss, D. Clark, G. Groot, M. Bick, and D. Sen, "Signal Processing Techniques for Improved Performance of a SQUID-Based Metal-Detector," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, part 1, 2009, pp. 812-815.

[9] M. Herrmann and K. Sakai, "Objects in powders detected and imaged with THz radiation," *IEEE Conf. on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2000*, 2000.

[10] M. Brighton and M. English, "Calculation of optimum spacing for a three coil axially symmetric metal detector," *Electronics Letters*, vol. 29, no. 10, 1993, pp. 838-839.

저자 소개



최규남(Kyoo-Nam Choi)

1976년 서울대학교 졸업(공학사)
1989년 Texas A&M Univ. 전자공학
학과(공학석사)

1992년 Texas A&M Univ. 전자공
학과(공학박사)

1992년~1994년 LG전자기술원 연구실장
1994년~2010년 인천전문대학 정보통신과 교수
2000년~2002년 미국 CEMDAS연구소 연구원
2010년~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야 : 센서시스템, 광통신시스템