

비접촉 진동 검출을 위한 유도성 근접센서모듈 개발

남 시 병*, 윤 군 진**, 임 수 일***

Development of the Inductive Proximity Sensor Module for Detection of Non-contact Vibration

Si-Byung Nam, Gun-Jin Yun**, Su-Il Lim***

요 약

금속물체의 피로도를 측정하기 위하여 고속으로 진동시키면서 비접촉으로 정밀하게 변위를 측정하는 방법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 비접촉 고속 진동 검출센서들은 와류 센서나 레이저 센서들을 주로 사용하고 있지만 매우 고가이다. 최근 저가의 유도성 센서를 고속 진동검출에 적용하려는 연구가 이루어지고 있으나 아직은 초보 단계이다.

본 연구에서는 저가의 유도성 센서를 이용하여 비접촉으로 고속 진동을 검출하는 새로운 근접 센서모듈 설계방법을 제안하였다. 기존의 유도성 센서모듈들은 검파, 적분, 및 증폭과정을 통하여 변위를 검출하기 때문에 아날로그 회로 특성상 잡음에 약하고 적분과정에서 변위 검출속도 저하의 요인이 된다. 제안된 방법은 AD변환기(Analog to Digital converter)를 사용하지 않고 진동 주파수신호를 직접 디지털 신호로 변환하는 새로운 방법으로 아날로그 잡음의 영향을 적게 받으며 고속으로 신호를 처리할 수 있는 장점이 있다. 성능 평가를 위하여 셰이커로 진동 주파수를 30Hz부터 1,100Hz 까지 일정한간격으로 금속편을 진동시키면서 제안된 센서 모듈을 이용하여 비접촉으로 진동 신호를 검출하였다. 실험결과 비접촉 근접 거리 5mm 이내에서 진동 주파수 검출범위는 DC에서 1,100Hz까지 측정할 수 있었으며 진동 폭의 해상도는 20 μ m로 나타났다. 따라서 제안된 유도성 센서모듈은 정밀 비접촉 고속 진동 검출 센서로서 충분한 성능을 가지고 있다고 평가된다.

▶ Keyword : 유도성 근접센서, 비접촉 센서, 고속 진동검출

Abstract

To measure the fatigue of metallic objects at high speed vibration while non-contact precision displacement measurement on how to have a lot of research conducted. Noncontact high-speed vibration detection sensor of the eddy current sensors and laser sensors are used, but it is very expensive. Recently, High-speed vibrations detection using an inexpensive inductive sensor to have

• 제1저자 : 남시병, • 교신저자 : 윤군진

• 투고일 : 2010. 12. 02, 심사일 : 2011. 01. 24, 게재확정일 : 2011. 02. 01

* 강원대학교 전자정보통신공학부(School of Electronics, Information & Communication Engineering)

** 에크론 주립대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering The University of Akron)

*** 강원대학교 전자정보통신공학부(School of Electronics, Information & Communication Engineering)

been studied, but is still a beginner.

In this paper, a new design of an inexpensive inductive proximity sensor has been suggested in order to measure high frequency dynamic displacements of metallic specimens in a noncontact manner. Detection of the existing inductive sensors, detection, integral, and amplified through a process to detect the displacement noise due to weak nature of analog circuits and integral factor in the process of displacement detection is slow. The proposed method could be less affected by noise, the analog receive and high-speed signal processing is a new way, because AD converter (Analog to Digital converter) without using the vibration frequency signals directly into digital signals are converted. In order to evaluate the sensing performance, The proposed sensor module using non-contact vibration signals were detected while shaker vibration frequencies from 30Hz to 1,100 Hz at intervals of vibrating metallic specimens. Experimental results, Vibration frequency detection range of the metallic specimens within close proximity to contactless 5mm could be measured from DC to 1,100Hz and vibration amplitude of the resolution was $20\mu m$. Therefore, the proposed non-contact inductive sensor module for precision vibration detection sensor is estimated to have sufficient performance.

▶ Keyword : inductive proximity sensor, Non-contact sensor, high frequency vibration detection

1. 서 론

현대 산업분야의 공정과정에서 진동하는 금속물체의 변위를 물리적으로 접촉하지 않고 정밀하게 측정하는 방법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 진동을 검출하기 위한 센서들은 접촉식 센서(contact sensor)와 비접촉식 센서(noncontact sensor)로 나누어진다. 접촉식 센서는 진동체에 접촉되어 있기 때문에 진동 신호를 검출하기 쉽다는 장점이 있지만 센서 자체가 진동검출에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 단점이 있다. 비접촉 센서는 진동체와 센서가 물리적으로 떨어져 있기 때문에 진동체에 직접적인 영향을 주지 않는다는 장점이 있지만 신호검출이 어렵다. 대표적인 비접촉 근접센서의 종류는 정전용량 센서(capacitive sensor), 초음파 센서(UV sensor), 홀 센서(hall sensor), 유도성 센서(inductive sensor), 자기형 센서(electromagnetic sensor), 와류 전류 센서(eddy current sensor), 레이저 센서(laser sensor) 등이 있다. 정전용량 센서, 초음파 센서, 홀 센서, 유도성 센서와 같은 근접 센서 종류는 사용방법이 간단하고 저가이지만 고주파 신호검출에는 부적합하며 와류 전류 센서와 레이저 센서는 고주파 신호검출 성능은 양호하지만 고가이고 회로가 복잡하다. 유도성 센서는 일반적으로 가격대 성능비가 양호한 센서로 알려져 있다. 유도기를 이용하여 변위를 측정하는 방법은 변위측정용 자기센서(magnetic displacement sensor), 유도성 근접센서

(inductive proximity sensor)들을 주로 사용한다. 이 센서들은 근접 물체의 유·무 감지 및 on-off 접점 제어에 주로 사용되고 있으며 가격이 저가인 장점이 있음에도 불구하고 고속 진동 및 변위를 검출하는 분야에서 응답 속도의 한계점으로 인하여 고속진동 변위측정용으로는 사용되지 않고 있었다. 그러나 최근 저가인 유도성 센서를 고속 진동검출에 적용하려는 연구가 이루어지고 있으나 아직은 초보 단계이다[1,2,3,4,5].

본 연구에서는 고속으로 진동하는 금속편으로부터 정밀한 진동 주기와 진동 폭을 검출하기 위하여 새로운 저가의 유도성 근접 센서모듈 개발방법을 제안 한다. 금속이 검출코일에 접근하면 코일과 금속의 전자결합에 의해 코일의 임피던스 값이 변하게 된다. LC를 포함하고 있는 발진 회로들은 코일의 임피던스가 변하면 발진주파수가 변하게 되며 변화된 발진주파수로부터 접근거리의 변위를 검출할 수 있다. 기존의 유도성 센서들은 발진회로에서 검출된 신호를 검파, 적분, 및 증폭 과정을 통하여 변위를 검출하기 때문에 복잡한 전자회로들이 필요하며 아날로그 회로 특성상 잡음에 약하고 적분과정에서 변위검출속도의 저하 요인이 된다. 제안된 방법은 발진회로부터 검출된 신호를 정형하여 마이크로프로세서의 input capture로 보내지며 타이머 카운터(timer counter)와 input capture의 가로채기(interrupt)기능을 이용하여 센서로부터 검출된 발진 신호를 실시간적으로 한 개의 주기 단위로 디지털 값으로 변환하게 된다. 변환된 디지털 값은 금속편과 센서 사이의 변위 값이 되며 기존의 방법 보다는 고속으로 진동 신호를

검출할 수 있다. 신호 측정을 위하여 최종적으로 센서모듈의 출력은 아날로그 신호로 변환하여야하며 검출된 디지털 변위 값은 고속 DA 변환기(Digital to Analog converter)를 이용하여 아날로그 변위 값으로 변환한다. 신호처리를 위한 마이크로프로세서는 마이크로칩사의 신호처리 전용 dsPIC33FJ128GP206를 사용하며 DA 변환기는 16비트 고속 AD596를 사용한다. 제안한 시스템의 성능 평가는 검출거리의 해상도(resolution)와 진동 주파수 범위를 기준으로 수행하며 비접촉 고속 진동신호의 검출 거리는 50 μ m에서 5mm까지로 하고 해상도는 약 20 μ m, 유효측정가능 진동 검출주파수 범위는 DC에서 최대 1,100Hz까지를 목표로 한다.

II. 유도성 근접센서

근접 센서(proximity sensor)는 물리적으로 접촉하지 않고 근접한 물체(nearby objects)에 대한 변위신호를 검출하는 센서이다. 대표적인 근접센서의 종류는 유도성 센서(inductive sensor), 자기형 센서(electromagnetic sensor), 정전 용량형 센서(capacitive sensor) 등이 있다. 정전 용량형 센서는 정전용량의 변화를 감지하기 때문에 응답속도가 느리며 일반적으로 변위 감지범위는 10mm, 스위칭 속도는 최대 50Hz 정도로 고속 진동 검출에는 부적합하다[6,7,8]. 반면에 기존에 상용화 되어있는 유도성 센서나 자기형 센서의 진동검출 주파수는 DC에서 800Hz 정도가 되며 3mm에서 최대 20mm까지 검출할 수 있으나 회로가 복잡하고 고가이다. 유도성 근접 센서는 오래 전부터 많이 사용되어 온 자기 센서(magnetic sensor)의 일종으로 접근 금속의 진동변위 검출을 위해 그림 1과 같이 코일 센서, 발진회로, 검파회로, 적분회로, 증폭회로로 구성되어 있다. 유도성 근접 센서의 동작 원리는 검출용 코일에 금속이 접근하면 자속에 의해 접근하는 금속 내에 와류가 발생된다. 발생한 와류는 자속을 변화시켜 검출 센서의 인덕턴스 값을 변화 시킨다. 이때 인덕턴스 값에 의한 발진회로의 주파수 변화에 의해 금속과 코일간의 변위를 측정하게 된다[9,10].

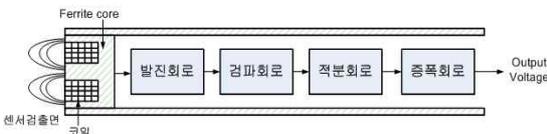


그림 1. 유도성 근접 센서 구성도
Fig. 1. Block diagram of inductive proximity sensor

코일 센서의 신호검출 원리는 코일에 금속이 접근하면 코일과 금속간의 전자결합에 의해 코일의 저항 R과 인덕턴스 L

의 값이 변화하게 되며 코일의 임피던스는 $Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$ 로 표시된다. 유도성 코일의 전달 함수는 $V = f(B)$ 에 의해 구해지며 기본적으로 식(1)의 기전력(Electromotive Force) emf [V]와 같이 Faraday's Law로부터 도출된다.

$$emf = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -NA \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 NA \frac{\Delta H}{\Delta t} \dots\dots(1)$$

여기서 Φ 는 코일을 통과하는 자속(magnetic flux)이며 A는 코일의 단면적, N은 코일의 권선수, μ 는 투자율(permeability), B는 자속밀도(magnetic flux density)이다. 식(1)에서 솔레노이드(solenoid)의 자기장(magnetic field) $B = \mu \frac{N}{\ell} I$ 를 대입하면 코일(long coil)의 emf 는 식(2)와 같이된다. 여기서 인덕턴스 L은 식(3)과 같이 표현된다[2,3].

$$emf = -\frac{\mu N^2 A}{\ell} \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \dots\dots\dots(2)$$

$$L = \frac{\mu N^2 A}{\ell} \dots\dots\dots(3)$$

III. 고속 진동검출을 위한 비접촉 유도성 근접센서모듈

본 연구에서 제안한 유도성 근접 센서 모듈은 그림 2와 같이 유도성 코일센서 발진부와 변위에 반비례하는 주파수의 주기를 디지털 값으로 변환하는 마이크로프로세서부, 최종적으로 디지털 신호를 아날로그 신호 변환하는 DA 변환부로 구성하였다.



그림 2. 진동검출을 위한 유도성 근접 센서 모듈 구성도
Fig. 2. Block diagram of inductive proximity sensor module for vibration detect

기존의 아날로그 방식은 구조적으로 적분회로를 포함하고 있기 때문에 신호검출 시 속도저하의 요인이 되며 아날로그

잡음의 영향을 많이 받는다. 그러나 제안된 방식은 센서 발진 부로부터 발생된 진동신호를 직접 마이크로프로세서의 input capture와 타이머/카운터를 이용하여 디지털신호로 변환함으로써 검출속도를 개선할 수 있으며 아날로그잡음의 영향을 적게 받는다.

유도성 코일 센서 발진부는 그림 3과 같이 트랜지스터 Q를 이용한 발진회로와 유도성 코일 센서로 구성하였다.

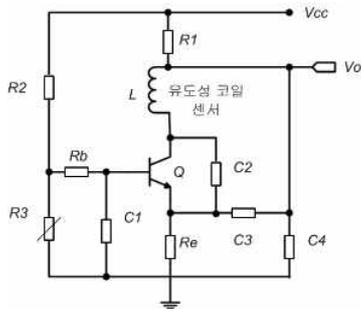


그림 3. 유도성 코일 센서 발진 회로
Fig. 3. Oscillation circuit of inductive coil sensor

그림 4는 본 연구에서 사용된 유도성 코일 센서로서 R=4.5mm, H=3.0mm, D=1.5mm, N=40일 때 $L = (0.8(R^2 \times N^2)) / (6R + 9H + 10D)$ 에 의해 L의 값은 $14.78\mu H$ 가 된다. 그러나 실제로 ED Laboratory사의 디지털 LCR 측정기 EDC-1630으로 측정된 결과 L의 값은 $16.8\mu H$ 가 되었다.

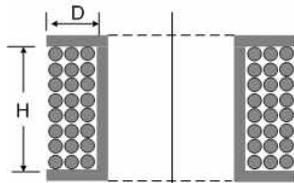


그림 4. 유도성 코일 센서
Fig. 4. Inductive coil sensor

그림 3의 유도성 근접코일센서 발진회로에서 트랜지스터 Q가 on 되었을 때 등가회로는 RLC 병렬회로와 같으며 회로의 특성방정식(characteristic equation)은 식(4)와 같이 표현된다.

$$s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} = s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0 \dots\dots\dots(4)$$

식(4)로부터 자연 주파수(natural frequency)는 식(5)와 같이 표현되며 식(7)의 감쇄 계수(damping factor) ζ값에 의해 과소 감쇄(under damping, ζ < 1), 과도 감쇄(over damping, ζ > 1), 임계 감쇄(critical damping, ζ = 1)로 나누어진다[6,7,8].

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \dots\dots\dots(5)$$

식(5)에서 감쇄 계수 ζ는 식(6)과 같이 2개의 파라미터(parameter)를 가지게 되며 식(7)과 같이 된다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \alpha = \frac{1}{2RC} \dots\dots\dots(6)$$

$$\zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots(7)$$

본 연구에서는 과도 감쇄 조건 ζ > 1인 상태에서 동작하도록 설계하였으며 미분방정식 일반해의 과도 감쇄 응답(over damped response)은 식(8)과 같다.

$$i(t) = A_1 e^{-\omega_0(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})t} + A_2 e^{-\omega_0(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})t} \dots\dots(8)$$

그림 3에서 Q를 중심으로 발진 조건을 보면 콜피츠 발진 회로(Colpitts Oscillator)의 일종으로 L, C값에 의해 발진 주파수가 결정되며 발진 주파수는 식(9)와 같다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot \left(\frac{C_2 \cdot C_4}{C_2 + C_4}\right)}} \dots\dots\dots(9)$$

따라서 식(5)로부터 과도 감쇄 조건에 의해서 인덕턴스 L 값이 변함에 따라서 감쇄 계수 ζ의 값이 변하게 된다. 그림 5의 상측 그림은 트랜지스터 Q의 출력신호 v_c이며 과도 감쇄 된콜피츠 발진 파형이다. 여기서 L=16.8mH, C2=220pF, C3=0.001μF일 때 f0=2.89MHz가 되고 그림 5의 하측 그림과 같이 나타난다.

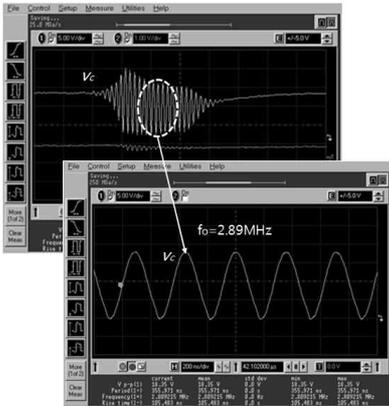


그림 5. Q의 v_c 신호
Fig. 5. v_c signal of Q

그림에서 Q가 on 되었을 때 출력 신호 v_c 는 그림 6과 같이 나타나며 Q가 off 되었을 때 v_c 신호는 "0"이 된다. Q의 베이스(base) 신호를 보면 Q가 on 일 때 C_1 이 방전, Q가 off 일 때 충전되며 v_b 와 v_c 의 신호는 그림 6과 같이 나타난다. 본 회로에서는 시정수(time constant) τ 값이 1ms가 되도록 RC값을 설계하였다.

본 연구에서 제안한 발진회로의 출력신호 v_o 는 커패시터 C_4 에 의해 고주파를 필터링하여 그림 7과 같이 출력된다.

그림 7의 출력신호 v_o 는 위에서 설명한 인덕턴스 L에 의해 감쇄 계수(damping factor)가 변하게 되며 이에 따라 v_o 의 주기가 변하게 된다. 본 논문에서 샘플 금속판과 센서간의 거리에 의한 출력 신호 v_o 와 주파수의 관계는 그림 8과 같이 나타나며 접근거리 1.5mm부터 0mm 사이에서 급격하게 비선형적으로 나타난다. 이는 유도성 코일 센서가 금속에 접근함에 따라 자기량이 비선형적으로 변하면서 감쇄 계수가 비선형적으로 증가하기 때문이다.

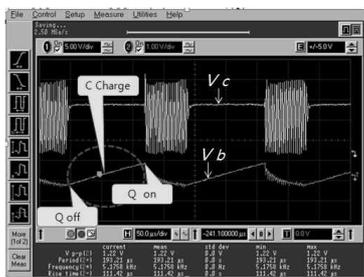


그림 6. v_b 와 v_c 신호 비교
Fig. 6. Compare v_b with v_c



그림 7. 센서 발진회로의 출력 신호 v_o
Fig. 7. Output signal v_o of sensor oscillation circuit

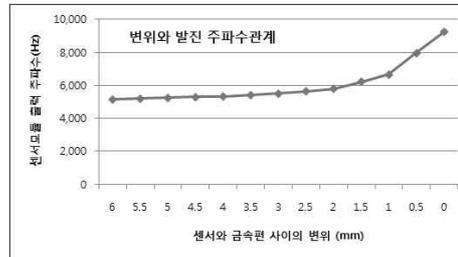


그림 8. 측정 거리와 발진주파수 관계
Fig. 8. Compare displacement with oscillation frequency

본 연구에서 제안한 센서 모듈의 유도성 코일 센서 드라이버 부는 사진 1과 같이 구성하였으며 센서의 발진신호 v_o 는 op amp를 이용하여 그림 9과 같이 정형된 v_s 신호를 만들게 된다. v_s 신호는 microprocessor dsPIC33FJ128GP206의 input capture로 전달되며 input capture에 의해 v_s 신호의 한 개 주기를 디지털 신호로 변환한다.

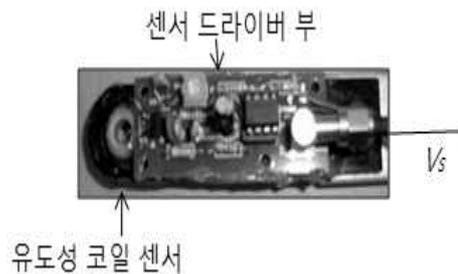


사진 1. 제안한 시스템의 유도성 코일 센서부
Photo. 1. Inductive coil sensor part of proposed system

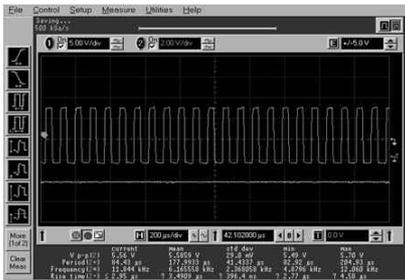


그림 9. 센서 모듈 출력 신호
Fig. 9. Sensor module output signal

사진 2는 신호처리 부로서 센서 모듈로부터 출력되는 신호 v_s 에서 금속편과 센서 사이의 변위에 해당되는 한 개 주기 신호를 검출한다. 이 과정은 dsPIC33FJ128GO206의 input capture와 16bit 타이머/카운터(timer /counter)를 이용하여 주기 신호를 디지털 값으로 직접 변환한다. Input capture 제어 조건은 하강 모서리마다 가로채기를 발생하도록 하였으며 그림 10과 같이 센서 모듈 주기 신호의 하강 모서리마다 input capture 인터럽트가 발생하고 이 때 마다 타이머/카운터의 값을 읽어내어 DA 변환기로 전송 한 후 타이머/카운터 값을 클리어 하게 된다. 여기서 읽혀진 한 개의 주기 값은 금속편과 센서와의 변위에 해당되는 디지털 값이 된다. Input capture에서 디지털 값으로 변환된 신호를 DA 변환기로 출력하는 알고리즘은 프로그램 1과 같이 구성하였다.

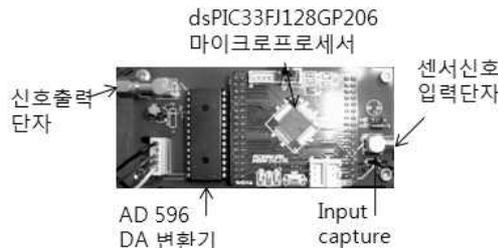


사진 2. 제안한 시스템의 센서 모듈 제어부
Photo. 2. Sensor control module part of proposed system

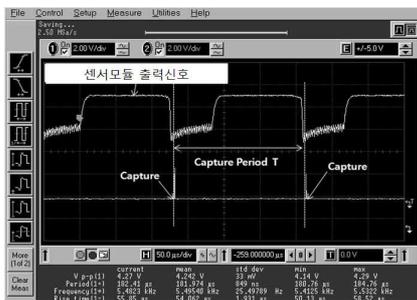


그림 10. microprocessor의 input capture 신호
Fig. 10. Input capture signal of microprocessor

```

/*****
* 센서모듈의 신호가 하강 모서리마다 가로채기 발생
* IC1 input capture interrupt
*****/
void __attribute__((interrupt)) _IC1Interrupt(void)
{
    //가로채기 발생
    IFS0bits.IC1IF=0; //가로채기 상태 레지스터 클리어
    period_t =IC1BUF; //input capture 값을 변수
    period_t //로 읽어온다
    IC1BUF=0; // input capture 클리어
    PORTB=period_t*8; //한주기 카운터 값을 8배 증폭한
    //후 DA변환기로 출력한다
    TMR2=0; //timer counter 값을 클리어 한다.
}
    
```

프로그램 1. 한 개 주기를 검출하여 DA변환기로 전송하는 알고리즘
Prog. 1. The algorithm that transfer from the one period detected to DA converter

그림 11은 마이크로프로세서 input capture의 가로채기 가 한 번 발생할 때 마다 소요되는 시간이며 약 650ns가 되는 것을 보여주고 있으며 고속 센서 신호검출을 위한 성능으로 충분하다.

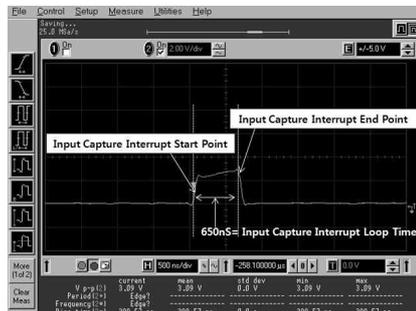


그림 11. Input capture에서 DA변환기로 데이터를 보내는데 걸리는 소요 시간

Fig. 11. The need time that transfer data from input capture to DA converter

그림 12는 센서 모듈로부터 출력된 신호 v_s 와 input capture에서 추출된 디지털 값과의 직선성을 비교한 그림으로 X축은 센서 모듈의 출력신호이며 5.8KHz부터 9.6KHz, Y축은 입력된 주기를 디지털 값으로 변환한 값(0x0000~0xFFFF)으로 입력된 주파수와 input capture 값의 관계는 거의 직선적임을 보여주고 있다.

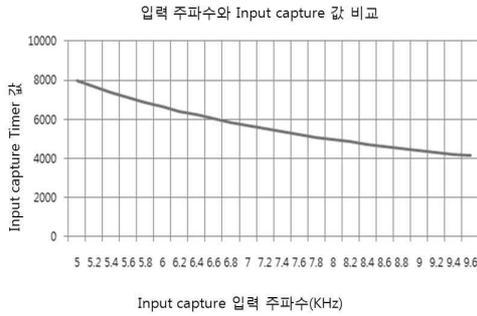


그림 12. input capture 가로채기가 발생하였을 때 입력된 주파수와 input capture 값 비교
 Fig. 12. Compare input frequency with input capture value when happened the interrupt of input capture

input capture에서 변환된 한 개 주기의 디지털 데이터는 DA 변환기로 보내져서 최종적으로 아날로그 신호로 변환된다. DA 변환기는 Analog device사의 16비트 Monotonic Voltage Output D/A converter AD596을 사용하였으며 16비트 데이터를 세팅하는데 약 $3\mu s$ 가 소요되며 최대 약 300KHz까지 변환 가능하다. 그림 13은 본 연구에서 제안한 비접촉 유도성 센서 모듈을 이용하여 검출한 진동신호 파형이다. 먼저 셰이커를 이용하여 금속판을 70Hz로 진동을 시킨 다음 센서 모듈에서 검출된 파형이다. 성능 평가를 위해 사용된 장비는 National Instrument사의 NI USB-6251을 사용하였으며 그림 14는 신호공급기(function generator)에서 셰이커로 공급된 신호(상위)와 제안한 시스템의 센서모듈에서 추출된 신호(하위)를 비교한 그림으로 위상이 180도 반전되었지만 제안한 센서 모듈이 셰이커의 신호에 대해 정확하게 응답하고 있음을 보여주고 있다. 그림 15는 셰이커 신호와 센서 모듈 신호의 주파수 스펙트럼을 비교한 그림으로서 동일하게 70Hz에서 나타났으며 제안된 센서가 정확하게 진동 주파수를 검출하고 있음을 보여 주고 있다.

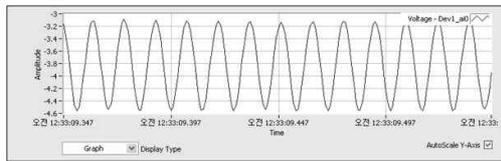


그림 13. 시스템의 출력 신호
 Fig. 13. Output signal of the system

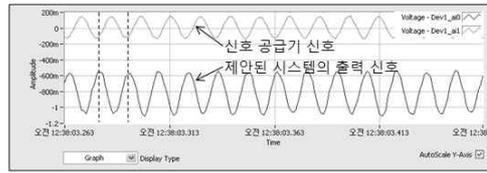


그림 14. 신호공급기(function generator)에서 셰이커(shaker)로 공급된 신호와 제안된 시스템의 출력신호 비교
 Fig. 14. Compare the provide signal from function generator to shaker with the output signal of proposed system

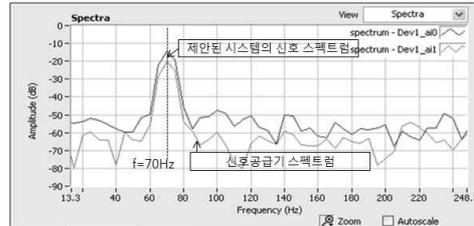


그림 15. $f=70\text{Hz}$ 일 때 셰이커 입력신호 스펙트럼과 제안된 시스템의 출력 주파수 스펙트럼 비교
 Fig. 15. Compare the spectrum of shaker input signal with output signal spectrum of proposed system at $f=70\text{Hz}$

IV. 실험 및 검토

본 연구를 위한 실험 환경은 그림 16과 같이 구성하였다. 신호공급기는 Topword사의 Digital Sweep Function Generator 8150, 셰이커는 DataPhysics V100을 사용하였다. 마이크로프로세서는 Microchip사의 dsPIC33FJ128GP206, DA변환기는 AD596을 사용하였다. 센서모듈의 출력신호를 검증하기 위하여 National instrument사의 NI USB 6251과 HP사의 500MHz급 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 센서의 변위 검출 신호를 검증하기 위해 NI USB 6251은 PC와 USB로 연결하였으며 LabVIEW2009 SignalExpress 프로그램과 연동하여 사용하였다.

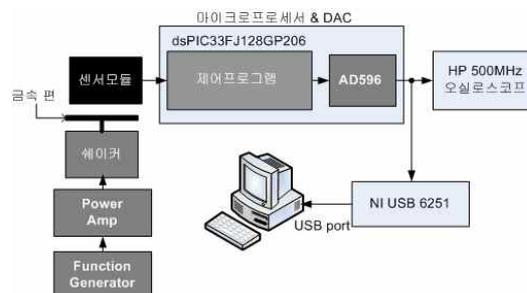


그림 16. 제안한 시스템의 실험 환경
 Fig. 16. Experimental environment of proposed system

진동을 실험하기 위해 사용된 샘플 금속편은 그림 17과 같이 크기가 길이 55mm, 폭이 5mm, 두께가 2.5mm 인 카본 스틸(carbon steel)을 사용하였다.



그림 17. 카본 스틸 샘플 금속편
Fig. 17. Sample specimen of Carbon steel

진동하고 있는 샘플 금속편의 진동 주파수와 진동 거리를 검증하기 위하여 레이저 진동 측정기 Polytec Scanning Vibromter-400-M2-20을 이용하여 진동 폭 d_{pp} 가 각각 2mm부터 20 μ m까지 단계적으로 셰이커에 전력을 공급하면서 실험을 하였다. 그림 18은 셰이커의 입력 주파수 $f=30$ Hz, 진동 폭 d_{pp} 가 2mm 되도록 전력을 공급하였을 때 유도성 코일 센서 모듈에서 검출된 출력 신호 v_{pp} 는 16V로 측정되었다. 그림 19에서는 셰이커의 입력 주파수 $f=30$ Hz, 진동 폭 $d_{pp}=800\mu$ m가 되도록 전력을 공급하였을 때 출력신호 $v_{pp}=6V$ 로 측정되었으며, 그림 20에서는 셰이커 입력 주파수 $f=30$ Hz, 진동 폭 $d_{pp}=50\mu$ m가 되도록 전력을 공급하였을 때 $v_{pp}=0.695404V$ 가 측정된 것을 볼 수 있다. 표 1과 그림 21은 진동 주파수 $f=30$ Hz일 때 진동 폭 d_{pp} 가 2mm부터 20 μ m까지 일정한 간격으로 셰이커를 진동하면서 유도성 코일 센서 모듈에서 검출되는 출력 전압을 측정한 결과이다. 측정 결과는 검출된 진동 거리가 선형적으로 나타남을 볼 수 있었다. 따라서 제안된 유도성 센서 모듈은 검출 거리 해상도가 약 20 μ m 이하까지 검출할 수 있음을 보여준다.

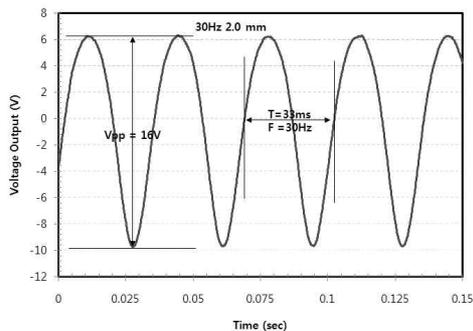


그림 18. $f=30$ Hz, $d_{pp}=2mm$ 일 때 센서 모듈의 출력신호
Fig. 18. Output signal of sensor module at $f=30$ Hz, $d_{pp}=2mm$

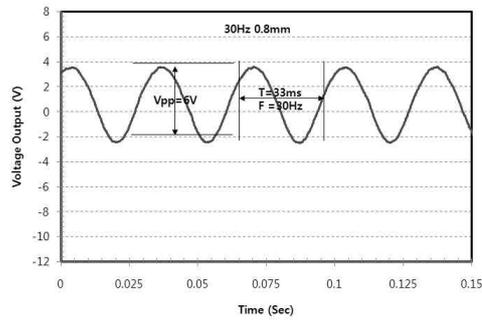


그림 19. $f=30$ Hz, $d_{pp}=0.8mm$ 일 때 센서 모듈의 출력신호
Fig. 19. Output signal of sensor module at $f=30$ Hz, $d_{pp}=0.8mm$

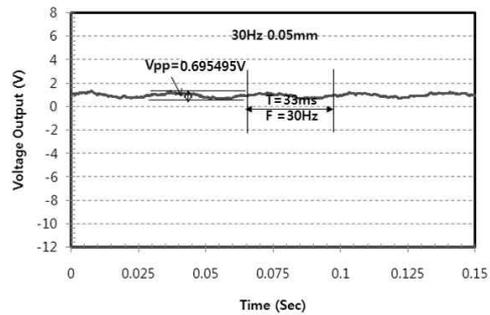


그림 20. $f=30$ Hz, $d_{pp}=0.05mm$ 일 때 센서 모듈의 출력신호
Fig. 19. Output signal of sensor module at $f=30$ Hz, $d_{pp}=0.05mm$

표 1. $f=30$ Hz 일 때 d_{pp} 와 v_{pp}
Table 1. d_{pp} and v_{pp} at $f=30$ Hz

d_{pp} (mm)	v_{pp} (V)	d_{pp} (mm)	v_{pp} (V)
0.02	0.469188	1	7.841171
0.05	0.695404	1.1	8.605855
0.1	1.037628	1.2	9.50878
0.2	1.815849	1.3	10.19387
0.3	2.506676	1.4	11.0288
0.4	3.274329	1.5	11.90014
0.5	4.055127	1.6	12.69124
0.6	4.737962	1.7	13.61447
0.7	5.494591	1.8	14.45423
0.8	6.180649	1.9	15.335
0.9	7.095822	2	16.21431

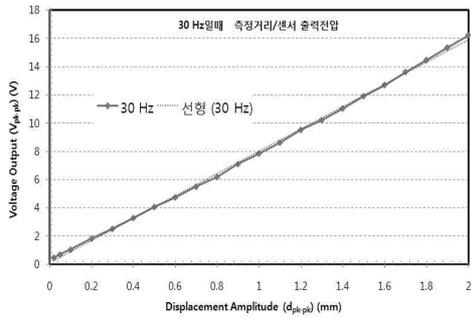


그림 21. 30Hz에서 진동 폭 d_{pp} 을 센서모듈의 출력 전압 v_{pp} 과 비교
 Fig. 21. Compare displacement amplitude d_{pp} with output signal v_{pp} of sensor module at 30Hz

그림 22와 그림 23은 각각 입력 주파수 200Hz, 1,100Hz 일 때 출력 전압을 측정 한 결과이다. 그림 23에서 보듯이 제안한 시스템의 실험 결과는, 1,100Hz 이상에서도 진동 검출 센서로서 기능을 충분히 발휘한다고 본다.

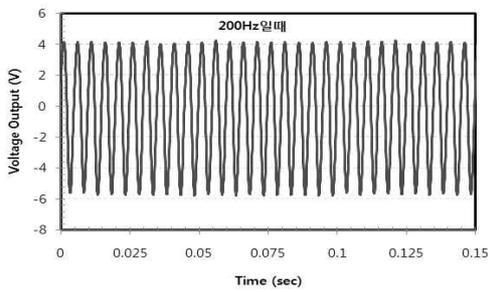


그림 22 $f=200\text{Hz}$ 일 때 출력 신호 v_{pp}
 Fig. 22. Output signal v_{pp} at $f=200\text{Hz}$

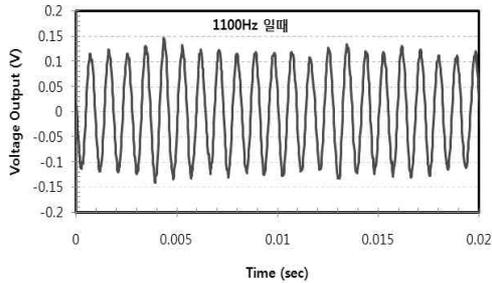


그림 23. $f=1100\text{Hz}$ 일 때 출력 신호 v_{pp}
 Fig. 23. Output signal v_{pp} at $f=1100\text{Hz}$

그림 24와 그림 25는 각각 $f=100\text{Hz}$, $f=600\text{Hz}$ 일 때 셰이커 입력 주파수의 스펙트럼을 유도성 센서 모듈의 출력 신호

의 스펙트럼과 비교한 그림이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 제안한 시스템의 진동 검출 성능은 매우 우수한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제안한 유도성 근접센서 모듈은 금속 물체의 피로도를 측정하기 위한 고속 진동 검출 센서로서의 충분한 성능을 가지고 있다고 본다.

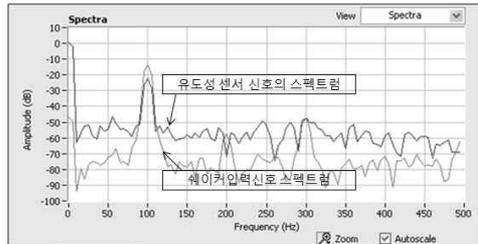


그림 24. $f=100\text{Hz}$ 일 때 입력주파수 스펙트럼을 유도성 센서모듈 출력신호의 스펙트럼과 비교

Fig. 24. Compare the spectrum of input frequency with the spectrum of inductive sensor module output signal at $f=100\text{Hz}$

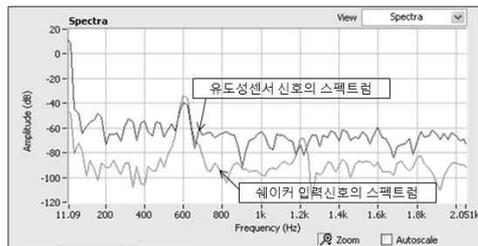


그림 25. $f=600\text{Hz}$ 일 때 입력주파수 스펙트럼을 유도성 센서모듈 출력신호의 스펙트럼과 비교

Fig. 25. Compare the spectrum of input frequency with the spectrum of inductive sensor module output signal at $f=600\text{Hz}$

V. 결론

금속물체의 피로도를 측정하기 위하여 고속으로 금속물체를 진동시키면서 비접촉으로 정밀하게 변위를 측정하는 방법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 지금 까지 고속 진동 검출을 하기 위하여 사용되는 센서들은 와류 센서나 레이저 센서들을 주로 사용하고 있지만 매우 고가이다. 최근 저가인 유도성 센서를 고속 진동검출에 적용하려는 연구가 이루어지고 있으나 아직은 초보 단계이다.

본 논문은 비접촉 고주파 근접 진동 검출을 위해 저가의 새로운 유도성 근접 센서모듈을 개발하는데 목적이 있다. 기존의 유도성 센서들은 발전회로에서 검출된 신호를 검파, 적

분, 및 증폭과정을 통하여 변위를 검출하기 때문에 복잡한 전 회로들이 필요하며 아날로그 회로 특성상 잡음에 약하고 적 분과정에서 변위 검출속도 저하 요인이 된다. 그러나 제안된 방법은 발진회로로부터 검출된 변위 신호를 마이크로프로세 서의 input capture와 타이머 카운터(timer counter)에 의 해 직접 디지털 신호로 변환함으로써 고속으로 변위신호를 검 출할 수 있었으며 아날로그 잡음의 영향을 적게 받는다. 제안 한 유도성 근접 센서 모듈은 $f=2.89MHz$ 인 콜피츠 발진회로 를 과도제동 조건이 되도록 설계한 다음 유도성 근접 센서에 금속편이 접근할 때 유도성 요소인 인덕턴스 L 값이 변함에 따라 감쇄 계수(damping factor) ζ 가 변하게 되며 접근 거리 에 반비례한 발진 주파수를 발생하도록 하였다. 센서로부터 발생된 신호는 dsPIC33FJ128GP206의 input capture와 타이머 카운터를 이용하여 물리적인 변위값을 디지털 신호로 변환하 였다. 변환된 디지털 신호는 소프트웨어적으로 선형화 및 증 폭 과정을 거쳐서 고속 DA변환기로 보내져 최종적으로 샘플 금속편과 센서 사이의 거리를 전압 값으로 변환하였다.

제안한 유도성 코일 센서의 성능 평가를 위하여 진동 주파 수를 30Hz부터 1,100Hz까지 증가시키면서 각각의 주파수 에 대한 샘플 금속편의 진동 폭을 $20\mu m$ 부터 $2mm$ 까지 $20\mu m$ 씩 일정한 간격으로 증가시키면서 출력신호를 측정하였 다. 검증은 national instrument사의 NI USB 6251와 LabVIEW2009 SignalExpress 프로그램을 연동하여 측정하였 으며 측정 결과 유도성 코일센서 모듈의 변위검출 해상도는 약 $20\mu m$ 의 분해도를 가지고 있음을 알 수 있었다. 그리고 진 동 주파수 응답 측정 결과 1,100Hz에서도 충분히 진동을 검 출함을 보여주고 있다. 따라서 제안한 유도성 근접 센서 모듈 은 고주파 비접촉 근접 진동검출센서로 사용하기에 충분하다 고 본다. 그리고 향후 초고속 마이크로프로세서를 사용한다면 더 높은 진동주파수를 검출 할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] M. Jagiella and S. Fericean, "Miniaturized inductive sensors for industrial applications," in Proc. 1st IEEE Conf. Sensors, Orlando, vol. II, pp. 771 - 778, 2002.
- [2] Sorin Fericean, Reinhard Droxler, "New Non

contacting Inductive Analog Proximity and Inductive Linear Displacement Sensors for Industrial Automation", IEEE Sensors Journal, Vol. 7, no. 11, pp.1538-1545, November 2007.

- [3] Pavel Kejik, Christoph Kluser, Roger Bischofberger, Rade S. Popovic, "A Low-cost inductive proximity sensor for industrial applications", Sensor and Actuators A 110, pp:93-97, July 2003.
- [4] Marco Bau, Vittorio Ferrari, Daniele Maridi, Emilio Sardin, Mauro Serpelloni & Andrea Taroni, "Contactless electromagnetic excitation of resonant sensors made of conductive miniaturized structures", Sensor and Actuators A 148, pp.44-50, July 2008.
- [5] Woo Cheol Shin, Jun Hee Hong, Kee Seol Lee, "Modeling of Non-contact Type Precision Magnetic Displacement Sensor", Journal of Korea Society of Precision Engineering, Vol.22, No.8, pp. 42-49, August 2005.
- [6] Slawomir Tumanski, "Inductive coil sensor - a review", Meas. Sci. technol. 18, pp. R31-R46, January 2007.
- [7] David K.Cheng, "Field and Wave Electro magnetics", Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [8] James William Nisson, Susan A. Riedel, "Electric circuit", Person Prentice Hall, pp. 284-309, 2008.
- [9] Data sheet : Proximity sensor SIEA-M12B-UI-S, FESTO
- [10] DAta sheet : All Metal Sensing Inductive Prox, OMRON.

저 자 소 개

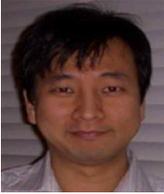


남 시 병

1979: 단국대학교 전자공학과 공학사
 1982: 단국대학교 전자공학과 공학석사
 1994: 단국대학교 전자공학과 공학박사
 현 재: 강원대학교 전자정보통신공학부 교수

관심분야 : 임베디드 시스템, 센서네트 워크, 인터페이스, 패턴인식

Email : sbnam@kangwon.ac.kr



윤 군 진

1994: KAIST 토목공학과 공학사

1996: KAIST 토목공학과 공학석사

2006: University of Illinois,
Urbana-Champaign 토목환경공
학과 공학박사

현 재: University of Akron 조교수

관심분야: Structural health monitoring,
Application of wireless smart
sensors

Email : gy3@uakron.edu



임 수 일

2006: 강원대학교 전자공학과 공학사

2009: 강원대학교 전자공학과 공학석사

현 재: 강원대학교 전자정보통신공학부
연구원

관심분야 ; 센서네트워크, 임베디드시스템,
통신공학

Email : bael715@yahoo.co.kr