용량형 센서를 위한 마이크로컨트롤러에 기반을 둔 록인 증폭기

김청월⁺

A Microcontroller-Based Lock-In Amplifier for Capacitive Sensors

Cheong-worl Kim⁺

Abstract

A lock-in amplifier was proposed for capacitive sensor applications. This amplifier was based on a general-purpose microcontroller and had only a charge amplifier as analog circuits. All the other functions of lock-in amplifier except for the charge amplifier were implemented with firmware and the internal resources of the microcontroller. A rectangular signal, generated by the microcontroller, was used in a sensor-driving signal instead of a conventional sinusoidal signal. This makes it possible that the phase comparison circuit in the lock-in amplifier is made with analog-to-digital converter, a timer and an interrupt controller. Using the oversampling method and the rectangular driving signal, we can make it easy to implement the peak detection function with software and sample the peak-to-peak signal at charge amplifier output. A charge amplifier was proposed to cancel out the base capacitance existing in capacitive sensors structurally. The experimental results show that the lock-in amplifier operating in the supply voltage of 3.0 V cancels out the base capacitance and has good linearity.

Keywords: Lock-in amplifier, Microcontroller, Charge amplifier, Capacitive sensor

1. 서 론

잡음과 외란 신호가 많은 환경하에서 센서를 사용하여 미약한 신호를 검출하기에 많은 어려움이 있다. 특히 고 임피던스 특성을 지닌 용량형 센서는 소비전류가 작아서 이동형 측정장치나 무선 센서망 구축에 적합하지만 외부잡음에는 더 취약하다. 물리량이나 화학적 반응을 검출하는 센서의 출력신호는 보통 수십 Hz대역의 작은 대역폭을 점유함으로써 동기검파방식을 이용하는 록인 증폭기를 사용하면 잡음의 영향이 최소화된 센서의 신호를 획득할 수 있다[1,2].

록인 증폭기는 센서신호를 잡음이 작은 주파수 대역으로 변조하고, 이를 위상비교검출기로 복조하여 저역통과필터로 필터링(filtering)함으로써 잡음의 영향이 최소화된 센서 신호를 획득할 수 있게 한다. 잡음 필터링 기능을 지닌 대역통과필터나 동조증폭기

는 선택도가 50정도인 반면에 록인 증폭기는 선택도가 10^5 정도가 되어 신호대잡음비 특성이 우수하여 신호의 크기가 잡음보다 작은 환경에서도 신호의 크기나 위상차 신호를 측정할 수 있다[3,4].

구현방식에 따라 아날로그 형과 디지털 형으로 구분되는 록인 증폭기는 회로가 복잡하고 구현이 어려운 고가의 장비인 관계로 실험실에서 많이 사용되고 있다[5]. 최근에 복잡한 아날로그 회로나 디지털 프로세서를 사용하는 디지털 회로 대신에 마이크로컨트롤러에 기반을 둔 록인 증폭기가 제안되었다[6,7]. [6]에서는 미약한 광신호를 검출하기 위하여 외장형 에이디이 변환기와 마이크로컨트롤러를 사용하여 록인 증폭기를 구현하였고, [7]에서는 서브-밀리옴(sub-milliohm) 저항을 측정하기 위하여 아날로그 증폭기와 마이크로컨트롤러를 사용하여 록인 증폭기를 구현하였다. 이러한 록인 증폭기에서는 기준신호발생기, 위상검출기 및 저역통과필터를 마이크로컨트롤러에 내장된 하드웨어와 펌웨어(firmware)로 구현하여 외부 회로 사용을 최소화하였다.

마이크로컨트롤러에 기반하여 용량형 센서의 정전용량을 측정하는 다른 방법으로는 콘덴서의 충전과 방전을 이용하는 방법이 제안되었다[8,9]. 충전방전 방식은 외부 저항과 마이크로컨트롤러에 내장된 비교기, 타이머 등을 이용하여 충전과 방전시간을 측정하여 센서의 정전용량을 측정한다. 이러한 방법은 저가의 용량형 센서에 많이 사용된다.

본 논문에서는 동기검파방식을 이용하여 용량형 센서에 적합한 마이크로컨트롤러에 기반을 둔 록인 증폭기를 제안하였다.

안동대학교 정보전자공학교육과 (Department of Information Technology & Electronics Education, Andong National University)
388, Songchon-dong, Andong, 760-749, Korea
⁺Corresponding author: cwkim@andong.ac.kr
(Received: Aug. 13, 2013, Revised: Nov. 20, 2013, Accepted: Nov. 28, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제안된 록인 증폭기에서는 센서를 구동하는 신호를 기존의 정현파 신호 대신에 구형파 신호를 사용함으로써 전하 증폭기를 제외한 록인 증폭기의 모든 기능을 마이크로컨트롤러에 내장된 하드웨어와 펌웨어로 구현할 수 있다. 또한 용량형 센서에서 입력신호가 없어도 구조적으로 존재하는 정전용량(이하 베이스 정전용량)을 상쇄시키기 위해 전하 증폭기 회로와 방법을 제안하여 전하 증폭기의 다이내믹(dynamic) 범위를 향상시켰다.

수위를 측정하는 용량형 센서를 사용하여 제안된 전하 증폭기를 설계하는 방법을 제시하고, 이를 바탕으로 제안된 록인 증폭기의 동작 특성을 실험하였다.

2. 록인 증폭기의 설계

2.1 록인 증폭기의 구조

센서의 신호를 획득에 사용되는 록인 증폭기는 Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 구동신호 $V_s(t)$, 센서 $H(x)$, 증폭기 Amp, 위상 검출기 PSD 및 저역통과필터 LPF로 구성된다[1].

센서 신호를 잡음이 작은 주파수 대역으로 변조하기 위하여 센서를 구동하는 신호로는 정현파 신호가 주로 사용된다. 변조된 센서 신호는 위상검출기에 의하여 복조되고 저역통과필터에 의하여 센서 신호 성분을 제외한 나머지 신호들은 제거된다.

구동신호로 정현파 신호를 사용하는 경우에는 소프트웨어로 진폭이 최대가 되는 정확한 시점에 신호를 샘플링하기에는 어려움이 있어 최고값 검출회로가 사용된다. 이러한 문제점은 정현파 신호 대신에 구형파 신호를 사용하면 해결할 수 있다.

구동신호로 구형파를 사용하면 신호를 샘플링하는 시점에 대한 여유는 많이 생겨나지만 연산 증폭기의 슬루율(slew rate)의 영향으로 신호를 샘플링하는 구간의 폭이 줄어들게 된다. 그러나 슬루율이 높은 연산증폭기를 사용하거나 센서 신호의 점유 대역폭이 작은 경우에는 구동신호의 주파수를 낮출 수 있어서 슬루율에 의한 영향을 줄일 수 있다.

변조된 센서 신호를 구동신호의 주파수에 두 배 이상으로 오버샘플링(oversampling)하면 센서 신호의 진폭과 위상차 신호를 검출할 수 있다[10]. 이러한 오버샘플링 방법을 사용하면 디지털 곱셈회로로 구현되는 위상검출기를 에이디이 변환기와 타이밍 발생회로를 사용하여 구현할 수 있어서 범용 마이크로컨트

Fig. 1. Block diagram of lock-in amplifier for sensor system.

롤러로 위상검출기의 구현이 가능해진다.

본 논문에서는 센서를 구동하는 신호로 구형파 신호를 사용하고 변조된 센서 신호를 구동신호의 주파수에 두 배로 샘플링함으로써 전하 증폭기를 제외한 록인 증폭기의 모든 기능들을 범용 마이크로컨트롤러로 구현하였다

2.2 전하 증폭기의 설계

전하 증폭기는 용량형 센서의 정전용량변화를 전기적 신호로 변환하는 데 사용된다. 용량형 센서에서 입력신호가 없어도 구조적으로 존재하는 베이스 정전용량은 신호 측정에 오프셋 신호로 나타나고, 그 크기가 큰 경우에는 전하 증폭기의 출력신호에서 다이내믹 범위를 줄이는 요인이 된다.

베이스 정전용량의 크기가 작은 경우에는 에이디이 변환 후에 오프셋 신호크기만큼 감산하여 그 영향을 제거할 수 있지만 크기가 큰 경우에는 반드시 하드웨어적으로 제거하여야 신호대 잡음비를 개선할 수 있다. 본 논문에서 록인 증폭기에 구동신호와 위상이 반전된 구동신호를 추가로 사용하여 전하 증폭기 내에서 센서의 베이스 정전용량의 영향을 상쇄시켰다.

Fig. 2에 주어진 회로에서 용량형 센서의 등가회로는 센서의 동작 특성을 나타내는 가변 콘덴서 C_s 와 베이스 정전용량을 나타내는 콘덴서 C_b 로 나타내었다. 콘덴서 C_o 와 위상이 반전된 구동신호 $-V_s(t)$ 는 센서의 베이스 정전 용량 C_b 를 상쇄시키기 위하여 사용된다.

전하 증폭기가 마이크로컨트롤러가 동작하는 단일 전원의 저전압 전원에서 동작할 수 있도록 연산 증폭기 A_p 는 출력신호의 최저값과 최고값이 각각 0 V와 전원전압의 크기 V_{cc} 로 나타나는 레일-투-레일(rail-to-rail) 연산 증폭기를 사용한다.

구동신호 $V_s(t)$ 와 위상 반전된 구동신호 $-V_s(t)$ 는 마이크로컨트롤러 내부에서 만들어지는 구형파를 사용하고, 구형파 신호의 크기는 최저값과 최고값이 각각 0 V와 전원전압의 크기 V_{cc} 이고, 듀티비는 50%이다.

Fig. 2. Charge amplifier to cancel out the base capacitance of capacitive sensor.

연산 증폭기 A_F 의 바이어스 전압을 결정하는 저항 R_1 과 R_2 는 같은 값으로 설계하고, 저항 R_F 의 크기는 구동신호 주파수에서 콘덴서 C_F 의 리액턴스 크기보다 훨씬 큰 값으로 설정하면 전하 증폭기의 출력신호 $V_o(t)$ 는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수가 있다.

$$V_o(t) = -\frac{C_s + C_B - C_o}{C_F} V_s(t) + \frac{V_{CC}}{2} \quad (1)$$

위의 수식에서는 전하 증폭기의 출력신호가 바이어스 전압 $V_{CC}/2$ 을 중심으로 센서의 정전용량 변화에 따라 구동신호의 크기가 변화하는 것을 나타낸다. 콘덴서 C_o 의 크기를 센서의 배이스 정전용량 C_B 와 같은 값으로 설계하고 콘덴서 C_F 의 크기를 센서의 최대 정전용량 변화량 $C_{S,max}$ 로 설정하면 구동신호의 진폭이 전원전압 크기 V_{CC} 이므로 출력신호 $V_o(t)$ 의 피크-피크(peak-to-peak) 값은 다음 수식으로 주어진다.

$$|V_o(t)|_{P-P} = \frac{C_s}{C_{S,max}} V_{CC} \quad (2)$$

위의 수식에서는 전하 증폭기의 출력에 나타나는 신호의 피크-피크 값은 센서의 순수한 정전용량 값의 변화에 비례한다. 따라서 전하 증폭기의 출력단에서 바이어스 전압을 중심으로 나타나는 신호의 최고값과 최저값을 샘플링하여 그 차이 값을 구하면 센서의 정전용량 크기를 측정할 수 있다.

2.3 펌웨어(firmware) 구현

제안된 록인 증폭기에서는 전하 증폭기를 제외한 나머지 기능들은 마이크로컨트롤러에 내장된 하드웨어와 펌웨어로 구현될 수 있다. 이를 위해 마이크로컨트롤러에 내장되어야 하는 최소한의 주변 회로는 에이디이 변환기, 타이머 및 인터럽트 발생기이다. 타이머와 인터럽트 발생기는 구형과 구동신호를 발생시키고, 전하 증폭기의 출력신호를 샘플링하여 에이디이 변환하기 위한 타이밍을 결정하는데 사용된다. 구동신호와 샘플링 타이밍의 관계는 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 2의 전하 증폭기는 반전 증폭기로 동작하여 구동신호를 기준으로 위상이 반전된 신호가 전하 증폭기의 출력에 나타나므로 샘플링 타이밍 A와 B에서 각각 신호의 최소값과 최대값이 샘플링된다. 이와 같이 구동신호 주파수에 2배로 샘플링하여 피크-피크 값을 구하면 센서 신호의 크기를 측정할 수 있다.

제안된 록인 증폭기는 수식 (2)에 나타나 있는 것처럼 출력신호의 최소값은 센서의 최소정전용량 값에 의하여 결정된다. 상대적으로 미세한 정전용량까지 측정이 요구되는 고 분해능 장치에서는 출력신호에 잡음을 제거하기 위해 [6]에 제안된 알고리즘을 사용하여 저역통과필터를 구현하고, 저 분해능 장치에서는 연산이 많이 사용되는 저역통과필터 대신에 구현이 용이한 평균값 계산 소프트웨어를 사용하여 잡음을 제거한다[7].

내장된 에이디이 변환기의 최저 기준값과 최고 기준값을 각

Fig. 3. Timing diagram between the driving signal and the analog-to-digital sampling time; (a) Sensor-driving signal and (b) sampling time signal for AD conversion.

각 0 V와 전원전압의 크기로 설정하면 수식 (2)에 주어진 것처럼 전원전압의 크기가 변화하면 구동신호의 크기도 같은 비율로 변화하여 에이디이 변환된 값은 변하지 않는다.

측정된 센서의 출력값은 시리얼 통신을 사용하여 디지털 값으로 외부로 전송하거나 마이크로컨트롤러에 내장된 펄스폭변조회로를 이용하여 아날로그 신호로 나타낼 수 있다.

3. 실험 및 결과

용량형 수위센서를 사용하여 제안된 록인 증폭기를 Fig. 4와 같이 구성하여 동작 특성을 실험하였다.

Fig. 4에서 전하 증폭기를 구성하는 연산 증폭기 U1은 MAX9936를 사용하였고, 마이크로컨트롤러 U2는 PIC16F616을 사용하였다. MAX9936는 레일-투-레일 입출력 특성을 가지는 저잡음 CMOS 연산증폭기로써 최저동작 전원전압은 2.1 V, 이득대역폭은 1.5 MHz, 슬루율은 0.9 V/ μ S이다[11]. PIC16F616은 범용 8-비트 마이크로컨트롤러로 최저동작전원전압이 2 V이고, 10-비트 에이디이 변환기, 타이머, 인터럽트 발생기, 클럭 발생회로 및 펄스폭 변조회로 등을 내장하고 있다[12].

연산 증폭기 U1의 출력신호는 마이크로컨트롤러의 AN2 핀(pin)을 통하여 내장된 에이디이 변환기에 연결되고, 마이크로컨트롤러 내부에서 발생하는 구형과 신호와 위상 반전된 구형과 신호는 각각 RA4와 RA5 핀을 통하여 센서와 콘덴서 C_o 를 구

Fig. 4. Simplified circuit of the proposed lock-in amplifier.

Fig. 5. Sensor and the printed-circuit board of the proposed lock-in amplifier used in the experiment.

동한다. 펄스폭변조회로의 출력단자인 CCP 핀에 연결된 저항 R_A 와 콘덴서 C_A 는 저역통과필터로써 측정된 디지털 값을 아날로그 신호 $V_A(t)$ 로 나타내기 위해 사용되고, RC4 핀에 연결된 TP 신호는 전하 증폭기의 출력신호를 샘플링하는 타이밍을 측정하는 데 사용된다. RC3 핀과 RC2 핀에 연결된 SDL 신호와 SCK신호는 측정된 디지털 값을 외부로 전송하는 데 사용된다.

실험에 사용된 용량형 수위센서와 제안된 록인 증폭기의 제작된 회로기판은 Fig. 5에 주어져 있다. 제작된 록인 증폭기는 3 V의 전원전압에서 동작을 시켰고 1.05 mA의 전류를 소모하였다.

실험에 사용된 수위 센서는 Fig. 6에 나타나 있는 것처럼 물의 높이에 따라 정전용량 값이 25.9 pF에서 79.3 pF까지 변화하였다. Fig. 5의 전하증폭기에서 콘덴서 C_F 는 최대 정전용량 변화량인 53.4 pF를 사용하였고, 콘덴서 C_0 는 베이스 정전용량인 25.9 pF를 사용하였다. 저항 R_F 는 10 M Ω 을 사용하였고, 연산 증폭기의 양의 단자에 바이어스전압을 인가하기 위해 저항 R_1 과 R_2 는 각각 56 K Ω 으로 설계하였다.

마이크로컨트롤러에 내장된 발전회로에서 발생하는 8 MHz 클럭신호를 타이머로 분주하여 20 kHz구형파 신호를 만들고, 이를 이용하여 센서를 구동하는 신호와 센서의 베이스 정전용량을 제거하기 위한 위상 반전된 구형파 신호를 만들었다. 타이머와 인터럽트 발생기를 사용하여 전하증폭기의 출력신호를 샘플링하여 에이디 변환하는 타이밍 신호를 발생시켰다. 에이디 변환된 값은 256개를 합산하여 평균한 값을 최종 측정값으로 사용하였다.

Fig. 7에는 수위가 50%인 경우에 록인 증폭기의 주요 신호들을 나타낸다. (a)는 센서를 구동하는 신호로 진폭이 3 V로 전원전압의 크기와 같고, (b)는 전하 증폭기의 출력신호로 진폭은 1.5 V로 전원전압의 크기에 50%로 나타났다. 이는 센서의 베이스 정전용량이 제안된 회로와 방법으로 전하증폭기 내부에서 상쇄되었음을 나타낸다. (c)는 에이디 변환을 위한 샘플링 타이밍을 나타내고, (d)는 에이디 변환한 디지털 신호를 내장된 진폭 변조회로를 이용하여 아날로그 신호로 변환한 것이다. 전하 증폭기의 출력신호 (b)에 상승구간과 하강구간에 기울기가 발생하는 것은 연산증폭기의 슬루율에 기인하는 것으로 구동신호의 최

Fig. 6. Sensor characteristics used in the experiment.

Fig. 7. Driving signal vs. sampling timing signal; (a) Sensor-driving signal, (b) the output signal of the charge amplifier, (c) timing signal for AD conversion, and (d) analog output signal at the LPF.

Fig. 8. Output characteristic of the lock-in amplifier.

고 주파수를 제한하는 중요한 요소가 된다.

Fig. 8은 센서에 수위를 변화시키면서 록인 증폭기의 아날로그 출력전압을 측정한 결과를 나타낸다.

주변 온도 변화로 Fig. 4에서 콘덴서 C_0 의 크기를 센서의 베이스의 정전용량 값으로 정확히 설정하기가 어렵다. 이는 측정 신호에서 오프셋 신호로 나타나고 온도에 따라 크기가 변화할 수도 있다. 이러한 문제점은 온도에 따라 변화하는 센서의 베이스 정전용량의 최대값보다 같거나 약간더 큰 값으로 콘덴서 C_0 의 크기를 결정하고, 이 때 발생하는 오프셋 값을 온도 변화에 따라 측정한 후에 실제 측정값에 보정하는 방법으로 해결할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 용량형 센서에 적합한 마이크로컨트롤러에 기반을 둔 록인 증폭기를 제안하였다. 기존의 복잡한 록인 증폭기 회로에서 아날로그 회로 부분은 전하증폭기로 최소화하고 나머지 기능들은 마이크로컨트롤러의 내부 하드웨어와 펌웨어로 구현함으로써 록인 증폭기의 구현을 용이하게 하였다.

제안된 록인 증폭기는 연산 증폭기와 마이크로컨트롤러의 업그레이드 및 소프트웨어 변경으로 록인 증폭기의 특성을 쉽게 변경할 수 있어서 여러 종류의 용량형 센서에 적용할 수 있다.

제안된 록인 증폭기는 전원전압을 변경하더라도 에이디이 변환회로의 최고 기준값을 전원전압으로 설정하는 경우에는 측정되는 디지털 값은 변화하지 않아 건진지로 동작하는 이동형 측정장치에 적합하다.

감사의 글

이 논문은 2011학년도 안동대학교 국제학술교류 보조금에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

[1] G. de Graaf and R. F. Wolffenbuttel, "Lock-in amplifier techniques for low-frequency modulated sensor applica-

tion", *Proc. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, pp. 1745-1749, Graz, Austria, 2012.

- [2] J. Aguirre, N. Medrano, B. Calvo, and S. Celma, "Lock-in amplifier for portable sensing systems", *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 21, pp. 1172-1173, 2011.
- [3] PerkinElmer Instruments, "What is a lock-in amplifier", *Technical Note TN 1000*, USA.
- [4] J. L. Scott, "Introduction to lock-in amplifiers", *DL Instruments Technical Notes IAN 47*, 2002.
- [5] Bhagyajyoti, Immanuel J., L. S. Sudheer, P. Bhaskar, and Parvathi C. S., "Review on lock-in amplifier", *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, vol. 1, Issue 5, 2012.
- [6] A. A. Dorrington and R. Kunemeyer, "A simple microcontroller based digital lock-in amplifier for the detection of low level optical signals", *Proc. Of the First IEEE Inter. Workshop on Electronic Design, Test and Applications*, Christchurch, New Zealand, 2002.
- [7] L. E. Bengtsson, "A microcontroller-based lock-in amplifier for sub-milliohm resistance measurements", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 83, Issue 7, 2012.
- [8] F. Reverter, M. Gasulla, and R. Pallas-Areny, "A low-cost microcontroller interface for low-value capacitive sensors", *Proc. The 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, vol. 3, pp. 1771-1775, Como, Italy, 2004.
- [9] F. Reverter and O. Casas, "A low-cost microcontroller-based interface circuit for capacitive sensors insensitive to shunting conductance effects", *Proc. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, pp. 9-12, Singapore, 2009.
- [10] G. Li, M. Zhou, F. He, and L. Lin, "A novel algorithm combining oversampling and digital lock-in amplifier of high speed and precision", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 82, Issue 9, 2011.
- [11] Maxim, "MAX9936/MAX9937/MAX9938 Datasheet", *Maxim Integrated Product Inc.*, Rev. 2, 2011.
- [12] Microchip, "PIC16F616/PIC16HV616 Datasheet", *Microchip Technology Inc.*, DS41288F, 2009.