

## 정전용량 형 압력맵핑센서를 위한 록인 증폭기 어레이 개발

김청월\* · 이영태\*\*†

\*\*† 안동대학교 전자공학교육과

### Development of a Lock-In Amplifier Array for Capacitive Type Pressure Mapping Sensor

Cheong-Worl Kim\* and Young-Tae Lee\*\*†

\*\*† Dept. of Electronics Education, Andong National University

#### ABSTRACT

In this study, We developed a simple and low cost capacitive pressure mapping sensor and microcontroller-base lock-in amplifier array. We developed capacitive type pressure mapping sensor by forming the electrode and adhesives on plastic films using only the printing process, and the finishing the process by bonding the two films. Lock-in amplifier array was based on a general purpose microcontroller and had only a charge amplifier as analog circuits. In this study, a 10×10 capacitive type pressure mapping sensor and lock-in amplifier array was fabricated and its characteristics were analyzed.

**Key Words** : Pressure-mapping Sensor, Capacitive Type, Lock-in Amplifier, Microcontroller, Charge Amplifier

#### 1. 서 론

인간되는 압력의 분포를 측정하는 압력맵핑센서는 다양한 분야에서 관심이 높아지고 있다. 침대 위의 인간의 누워있는 자세나 움직임의 측정, 발에 가해지는 압력을 정밀하게 측정하여 맞춤형 신발을 제작하는 등 직접적으로 가해지는 압력을 측정하기 위한 용도로 다양한 분야에서 폭 넓게 응용되어 왔지만, 최근에는 의상 등에 장착하여 자세를 측정하는 웨어러블 소자(wearable device), 인간의 심장에 장착하여 심장박동을 측정하는 의료용 소자 등 그 응용 분야가 빠르게 확장되고 있는 추세이다. 뿐만 아니라 로봇의 손, 팔 및 다리 등의 감각 및 자세 제어를 위한 변형을 측정하는 용도로도 응용되고 있어서 그 수요가 빠르게 증가하고 있는 실정이다. 압력맵핑센서의 측

정 원리로는 압력 변화를 전기저항(resistance) 변화[1]로 측정하는 방법과 정전용량(capacitance) 변화[2]로 측정하는 방법이 주로 사용된다. 정전용량 형 압력맵핑센서가 저항 형에 비해 감도가 높고, 소비전류가 작아서 무선 센서 시스템 개발에 적합하나, 외부 잡음에 취약한 문제점이 있다. 일반적으로 센서의 출력 신호는 수십 Hz 정도의 좁은 대역폭을 사용하기 때문에 동기검파방식을 이용하는 록인 증폭기(lock-in amplifier)를 사용하여 외부잡음을 최소화하는 신호를 획득할 수 있다[3,4].

록인 증폭기는 센서의 신호를 잡음이 작은 주파수대로 변조하고, 위상비교검출기로 복조하여 저역통과필터로 필터링(filtering)하여 잡음의 영향을 최소화한 센서 신호를 획득할 수 있다. 외부 잡음 필터링 기능을 가진 대역통과 필터나 동조증폭기에 비해 록인 증폭기의 특성이 월등히 우수하여 센서와 같이 신호의 크기가 잡음보다 작은 환경에서의 신호 측정에 적합하다[5,6]. 최근에는 복잡한 아

†E-mail: ytlee@anu.ac.kr

날로그나 디지털 회로 대신에 마이크로프로세스 기반 록인 증폭기가 제안되었다[7]. 마이크로프로세스 기반 록인 증폭기는 아날로그 증폭기와 마이크로컨트롤러를 사용하여 록인 증폭기를 구현하였다. 기준신호발생기, 위상검출기 및 저역통과필터 등을 마이크로컨트롤러에 내장된 하드웨어와 펌웨어(firmware)로 구현하여 외부회로를 최소화하였다.

본 논문에서는 이미 개발한 정전용량 형 센서용 마이크로컨트롤러 기반 록인 증폭기[8] 어레이(array)를 이용하여 10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서[2]의 신호처리 시스템을 개발하였다.

### 2. 10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서

10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서는 유전체 양단에 원형 카본 전극을 형성한 커패시터(capacitor) 형태의 압력 센서를 10 × 10개(총100개) 배열하여 압력 분포를 측정할 수 있도록 했다. 커패시터 형태의 압력센서에 압력이 인가되면 유전체 양단의 두 전극의 간격이 감소하여 정전용량(capacitance)가 증가하게 된다. Fig. 1에 정전용량 형 압력센서의 구조(a), 10 × 10 압력맵핑센서의 회로 도(b) 및 사진(c)을 나타냈다[2]. Fig. 1(a)의 압력맵핑센서는 PET 필름 위에 은(silver), 카본(carbon) 및 유전(dielectric) 잉크(ink)를 차례로 인쇄하여 전극을 형성하고, 두 전극의 유전 면을 마주보게 접착하는 방법으로 제작한다[2]. 전극의 지름은 16mm, 두께는 약 100 $\mu$ m이다. 본 압력맵핑센서의 특징은 유전체로 절연된 두 개의 카본 전극을 마주보게 배치하고, 이 전극들을 두 장의 PET 필름이 보호하는 샌드위치 구조로 되어 있다. 커패시터를 형성하는 유전체로 보호된 두 전극이 매우 얇은 공기 층을 사이에 두고 마주보고 있어서 감도가 매우 우수하고, 두 장의 PET 필름이 이 전극들을 보호하고 있어서 기생용량에 의한 영향이 비교적 작은 것이 특징이다[2].

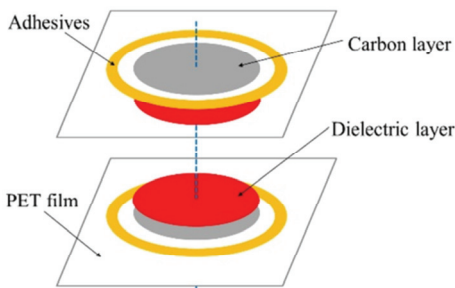


Fig. 1(a). Capacitive type pressure mapping sensor.

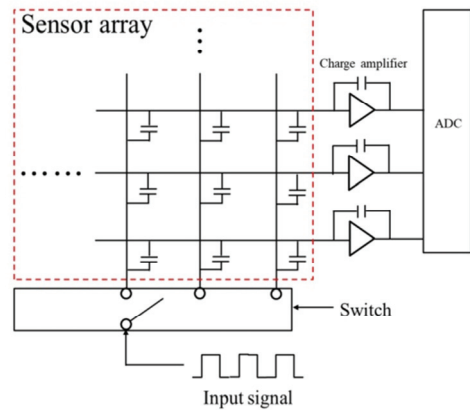


Fig. 1(b). Circuit of the pressure mapping sensor.

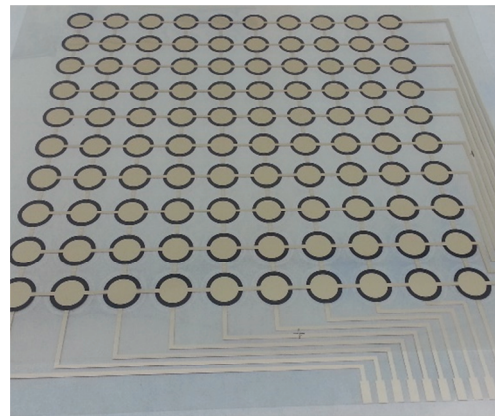


Fig. 1(c). 10 × 10 pressure mapping sensor [2].

## 3. 록인 증폭기 어레이 설계

### 3.1 록인 증폭기

록인 증폭기는 Fig 2에 나타난 것과 같이 구동 신호  $V_s(t)$ , 센서  $H(x)$ , 증폭기 Amp, 위상 검출기 PSD 및 저역통과필터 LPF를 구성된다[3].

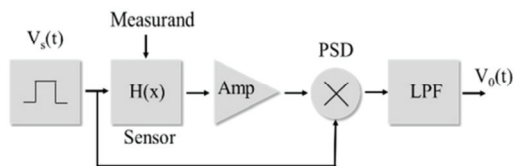


Fig. 2. Block diagram of lock-in amplifier for capacitive type sensor.

센서의 신호를 잡음이 작은 주파수 대에서 변조하기 위하여 구동 신호로 정현파가 주로 사용된다. 변조된 센서 신호는 PSD에 의하여 복조되고 LPF에 의하여 센서 신호 이외의 신호를 제거된다. 구동 신호를 정현파를 사용할 경우 소프트웨어 적으로 진폭의 최대 점을 정확하게 샘플링하기 힘들기 때문에 최대값 검출기 회로를 사용되나, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 구형파를 사용하면 해결할 수 있다[8]. 센서 구동 신호로 구형파를 사용하고, 변조된 센서 신호를 구동 신호 주파수의 두 배로 샘플링함으로써 전하 증폭기를 제외한 록인 증폭기의 모든 기능을 마이크로컨트롤러만으로 구현할 수 있다[8].

전하 증폭기는 정전용량 형 센서의 정전용량 변화를 전기 신호로의 변환에 사용된다. 정전용량 형 센서에서는 입력 신호가 없어도 존재하는 기본 정전용량 신호는 오프셋 신호로 나타나기 때문에 전하 증폭기의 출력 신호의 출력 span을 줄이는 요인이 될 수 있다. 본 논문에서는 록인 증폭기의 구동 신호와 위상이 반전된 구동 신호를 추가로 사용하여 전하 증폭기 내에서 센서의 기본 정전용량의 영향을 상쇄시켰다[8].

### 3.2 록인 증폭기 어레이 설계

Fig 3에 10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서의 신호 처리를 위한 록인 증폭기 어레이 회로를 나타냈다.

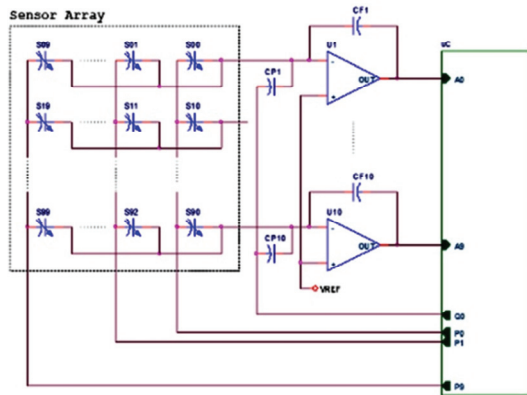


Fig. 3. Lock-in amplifier with 10 × 10 capacitive type pressure mapping sensor.

Fig 3에서 전하증폭기를 구성하는 연산 증폭기 U1은 Microchip사의 MCP6022(dual op-amp)를 사용하였다. MCP6022는 레일-투-레일 입출력 특성을 가지는 저 잡음 CMOS 연산증폭기로서 최저동작 전원전압은 2.5V, 이득대역은 10MHz, 슬루율 7V/S이다. Fig 3에서 마이크로컨트롤러 U2는 Microchip사의 PIC16F884를 사용하였다. PIC16F884는 범

용 8비트 마이크로컨트롤러로 최저 동작 전원전압이 2V 이고, 14채널, 10비트 A/D 변환기, 타이머, 인터럽트 발생기, 클럭 발생회로 및 펄스 폭 변조회로 등을 내장하고 있다. 마이크로컨트롤러에 내장된 발진회로에서 발생하는 8MHz 클럭신호를 타이머로 분주하여 20KHz 구형파로 형성하고 이를 이용하여 센서를 구동하는 신호와 센서의 기본 정전용량을 제거하기 위한 위상 반전된 구형파를 형성하였다. Fig 3의 회로도에서 A0-A9은 A/D 변환기 입력을 P0-P9은 구형파 출력 포트이며, P0에서 P9 중에서 센싱 위치에 따라 한 개의 포트만 구형파가 출력되고 나머지 포트는 LOW 상태를 유지한다. Q0는 P0-P9의 파형과 위상이 180도 차이가 나는 구형파이다. Pn(n=0-9)와 Q0 신호의 최저 값과 최고 값이 각각 0V와 전원전압 값인 VCC인 구형파이며, 연산증폭기 Un(n=0-9)은 레일-투-레일 입출력 특성과 슬루율이 큰 연산 증폭기이다. Fig 3에서 CFn(n=0-9)은 센서 정전용량 최대 변화 량을 나타내는 콘덴서이며, Cpn(n=0-9)은 센서의 기본 정전용량, 즉 압력이 인가되지 않았을 때 센서에 나타나는 정전용량의 크기로, Q0의 구형파 신호와 함께 기본 정전용량을 상쇄하기 위하여 사용한다. 예를 들어 센서 S00을 측정하는 경우 마이크로컨트롤러의 A0에 나타나는 신호는

$$V_o = \frac{CS_0 + \Delta C}{CF_1} P_0 + \frac{CP_1}{CF_1} Q_0 + VREF \quad (1)$$

로 주어진다. Q0 신호가 P0 신호와 크기는 같고 위상 차가 180도 차이가 나므로 CS0(S00의 기본 정전용량)이 CP1이면 베이스 정전용량은 상쇄되고 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{\Delta C}{CF_1} P_0 + VREF \quad (2)$$

이를 peak-to-peak로 나타내면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{o,p-p} = \frac{\Delta C}{CF_1} V_{cc} \quad (3)$$

여기 Vcc는 전원전압의 크기를 나타내며, ΔC가 0이면 V<sub>o,p-p</sub>가 0[V], ΔC가 CF1, 즉 최대 변화량에 도달하면 V<sub>o,p-p</sub>는 Vcc[V]가 된다. Peak-to-peak A/D 변환하면 센서의 변화량에 비례하는 출력신호를 얻을 수 있다. 마이크로컨트롤러의 펌웨어 동작은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- ① P0는 구형파(0-VCC), Q0는 P0의 위상차가 180도인 구형파 출력, 나머지 P1-P9는 low[0V]유지
- ② U1의 출력부터 U10의 출력까지 순차적으로 A/D 변

- 환하고 결과 저장 및 외부 전송
- ③ P1는 구형파(0-VCC), Q0는 P0의 위상차가 180도인 구형파 출력, 나머지 P0, P2~P9는 low[0V]유지.
  - ④ U1의 출력부터 U10의 출력까지 순차적으로 A/D 변환하고 결과 저장 및 외부 전송
  - ⑤ 위와 같은 과정을 반복

제작된 10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서를 위한 록인 증폭기 사진을 Fig 4에 나타냈다.

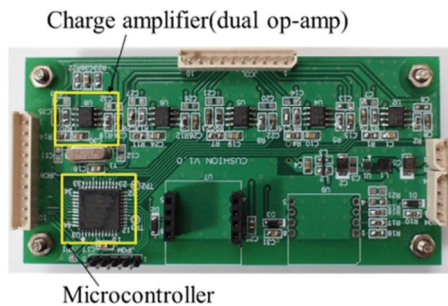
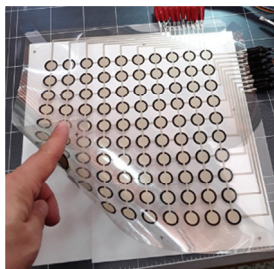


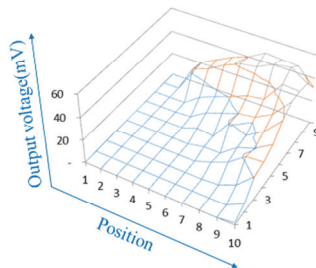
Fig. 4. Lock-in amplifier.

#### 4. 결과 및 고찰

개발된 10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서와 록인 증폭기 어레이를 연결하여 압력분포를 측정하였다.



(a)



(b)

Fig. 5. Output characteristics of the lock-in amplifier.

Fig 5에 압력맵핑센서를 변형하는 형식으로 압력이 인가되었을 때 출력되는 전압 분포를 나타냈다. Fig 5(a)에 나타낸 것과 같이 압력맵핑센서를 변형하면 변형 정도에 따라 압력 분포가 달라진다. Fig 5(b)와 같이 압력맵핑센서의 변형 형태를 정확하게 압력 분포로 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 압력맵핑센서의 특정 위치를 센서에 압력을 인가하였을 때 정확하게 압력이 인가된 압력센서의 출력을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 PET 필름 위에 은/카본/유전체 및 접착제 패턴 등 4도 스크린 인쇄 공정으로 제작이 가능한 10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서[2]의 효과적인 신호처리를 위한 록인 증폭기 어레이를 개발하였다. 기존의 복잡한 록인 증폭기 회로에서 외부 회로는 전하 증폭기로 최소화하고 나머지 기능을 모두 마이크로컨트롤러의 내부 하드웨어를 사용하는 매우 단순한 구조의 록인 증폭기 어레이를 개발하였다. 10 × 10 정전용량형 압력맵핑센서의 신호를 외부 잡음의 영향을 최소화하면서 안정적으로 획득이 가능할 뿐 아니라 외부 회로를 최소화한 신호처리 보드 개발이 가능하기 때문에 저가형의 압력맵핑센서의 상품화 개발이 기대된다. 본 논문에서 개발된 록인 증폭기는 압력맵핑센서 뿐 아니라 정전용량 형 센서 종류에는 폭넓게 응용이 가능하여 다양한 센서 시스템 개발을 기대할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 PET필름 위에 단순한 4도 인쇄 공정을 통하여 제작이 가능한 10 × 10 정전용량 형 압력맵핑센서의 신호처리를 위한 마이크로컨트롤러 기반 록인 증폭기 어레이를 개발하였다. 기존의 록인 증폭기에 비해 외부 회로를 전하 증폭기로 최소화하는 매우 단순한 구조로 개발이 가능했다. 개발된 록인 증폭기 어레이는 연산증폭기와 마이크로컨트롤러의 업그레이드 및 소프트웨어 변경으로 록인 증폭기의 특성을 쉽게 조정할 수 있어서 다른 종류의 정전용량 형 어레이 센서에 쉽게 응용이 가능하다.

개발된 정전용량 센서 및 록인 증폭기 어레이 모두 외부 잡음에 영향이 매우 작도록 설계되었기 때문에 외부 잡음에 강한 고감도의 압력맵핑센서 개발이 가능했다.

#### 참고문헌

1. <http://www.tekscan.com/>
2. Young-Tae Lee, "Development of Capacitive Type Pressure Mapping Sensor using Printing Technology," J.

- of Sensor Society and Technology, Vol. 26, pp. 24-27, (2017).
3. G.de Graaf and R. F. Wolffenbuttel, "Lock-in Amplifier Technology for Low-frequency Modulated Sensor Application", IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conf., pp.1745-1749, (2012).
  4. J. Aguirrem, N. Medrano, B. Calvo, and S. Celma, "Lock-in Amplifier for Portable Sensing System", Electron. Lett., Vol. 47, No. 21, pp. 1172-1173, (2011).
  5. PerkinElmer Instruments, "What is a Lock-in Amplifier", Technical Note TN 1000, USA.
  6. J. L. Scott, "Introduction to Lock-in Amplifiers", DL Instruments Technical Note IAN 47, (2002).
  7. 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).
  8. Cheong-Worl Kim, "A Microcontroller-base Lock-in Amplifier for Capacitive Sensors", J. of Sensor Society and Technology, Vol. 23, pp. 24-28, (2014).
- 
- 접수일: 2017년 12월 11일, 심사일: 2017년 12월 26일,  
게재확정일: 2017년 12월 26일