

# MEMS 가속도센서를 위한 CMOS Readout 회로

## CMOS ROIC for MEMS Acceleration Sensor

윤은정\*, 박종태\*, 유종근\*\*

Eun-Jung Yoon\*, Jong-Tae Park\*, Chong-Gun Yu\*\*

### Abstract

This paper presents a CMOS readout circuit for MEMS(Micro Electro Mechanical System) acceleration sensors. It consists of a MEMS accelerometer, a capacitance to voltage converter(CVC) and a second-order switched-capacitor  $\Sigma\Delta$  modulator. Correlated-double-sampling(CDS) and chopper-stabilization(CHC) techniques are used in the CVC and  $\Sigma\Delta$  modulator to reduce the low-frequency noise and DC offset. The sensitivity of the designed CVC is 150mV/g and its non-linearity is 0.15%. The duty cycle of the designed  $\Sigma\Delta$  modulator output increases about 10% when the input voltage amplitude increases by 100mV, and the modulator's non-linearity is 0.45%. The total sensitivity is 150mV/g and the power consumption is 5.6mW. The proposed circuit is designed in a 0.35um CMOS process with a supply voltage of 3.3V and a operating frequency of 2MHz. The size of the designed chip including PADs is 0.96mm×0.85mm.

### 요약

본 논문에서는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 가속도센서를 위한 CMOS readout 회로를 설계하였다. 설계된 CMOS readout 회로는 MEMS 가속도 센서, 커패시턴스-전압 변환기(CVC), 그리고 2차 스위치드 커패시터  $\Sigma\Delta$  변조기로 구성된다. 이들 회로에는 저주파 잡음과 오프셋을 감소시키기 위한 correlated-double-sampling(CDS)와 chopper-stabilization(CHC) 기법이 적용되었다. 설계 결과 CVC는 150mV/g의 민감도와 0.15%의 비선형성을 갖는다. 설계된  $\Sigma\Delta$  변조기는 입력전압 진폭이 100mV가 증가할 때, 출력의 듀티 싸이클은 10%씩 증가하며, 0.45%의 비선형성을 갖는다. 전체 회로의 민감도는 150mV/g이며, 전력소모는 5.6mW이다. 제안된 회로는 CMOS 0.35um 공정을 이용하여 설계하였고, 공급 전압은 3.3V이며, 동작 주파수는 2MHz이다. 설계된 칩의 크기는 PAD를 포함하여 0.96mm×0.85mm이다.

*Key words : Accelerometer, Capacitance to Voltage Converter, Sigma-delta Modulator, MEMS, CMOS*

## 1. 서론

MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)는 마이크로미터 크기의 전자적, 기계적 요소들이 결합된 시스템으로 일반적인 반도체 제조기술을 기반으로 한 미세가공 기술을 이용하여 3차원 형태의 구조물들이 반도체 표면에 만들어져 감지, 동작, 조절 등의 다양한 기능을 하게 된다. 이러한 MEMS 공정은 소형화와 집적화 그리고 저 전력화가 가능하다는 장점이 있어 많은 응용분야에 이용되고 있다. 대표적으로 가속도 센서와 압력센서, 잉크젯 프린터 헤드, DMD(Digital Micro mirror Device)이 있으며, 광, RF, 바이오 분야에서도 MEMS가 활용되고 있다.

\* Dept. of Electronics Engineering, Incheon National University (ngkorea@nate.com, 032-835-4770)

★ Corresponding author :032-835-8450  
chong@incheon.ac.kr

※ This work was supported by the Incheon National University Research Grant in 2013

Manuscript received Feb. 10 , 2014; revised Mar. 18, 2014 ; accepted Mar. 18. 2014

이 중 MEMS 공정을 이용한 가속도센서는 가장 많이 응용되고 있는 부분 중의 하나이다. 가속도센서는 에어백 등 자동차 분야에 주로 적용되어 왔으나 2차원, 3차원 가속도센서가 개발되어 휴대폰, 게임기 등으로 확대되었다[1-9].

MEMS를 이용한 가속도센서는 감지 및 측정방식에 따라 용량형[2-8], 압저항형[10-11] 그리고 서보형[12-13]으로 나눌 수 있다. 이 중 용량형 가속도센서는 CMOS 회로와 집적화가 가능하고 낮은 전력 소비, 온도 특성 그리고 DC 특성이 좋다는 장점이 있어 많이 연구되고 응용되고 있다. 그러나 용량형 센서의 경우 기생 커패시터의 영향이 크기 때문에 이에 대한 신호의 왜곡 및 제한을 보상할 수 있는 방법이 필요하다. 기존의 연구에서는 chopper - stabilization (CSH)와 correlated-double-sampling(CDS) 기법을 이용하여 저주파 노이즈 및 DC 오프셋을 제거하였다[7].

본 논문에서는 MEMS 가속도센서를 위한 CMOS readout 회로를 제안한다. CSH와 CDS 기법을 이용하여 저주파 노이즈와 DC 오프셋을 최소화 하였고, 시스템을 개방 루프 형태로 구성함으로써 회로를 간단히 구현하여 전력소모 및 면적을 최소화하였다. 제안된 회로는 0.35 $\mu$ m CMOS 공정을 이용하여 설계하였다.

## II. 회로설계

### 2.1 제안된 가속도센서를 위한 readout 회로의 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MEMS 가속도센서를 위한 readout 회로(ROIC)의 블록도이다. 전체 시스템을 개방 루프 형식으로 전체적인 구성을 간단히 함으로써 전력소모와 면적을 줄였다. 전체 시스템은 용량형 가속도센서, 커패시턴스-전압 변환기, 그리고  $\Sigma\Delta$  변조기로 구성된다.

MEMS 가속도센서를 위한 CMOS readout 회로의 성능을 나타내는 민감도(sensitivity)를 그림 2에 표현하였다. 용량형 가속도센서에 가속도가 가해지면 크기와 방향에 따라 가속도센서의 커패시턴스 크기가 변화한다( $fF/g$ ). 변화된 가속도센서의 커패시턴스를 커패시턴스-전압 변환기(CVC)가 전압으로 변환하고( $mV/fF$ ), CVC까지의 민감도는 가속도에 따른 전압으로( $mV/g$ ) 계산된다. 이를  $\Sigma\Delta$  변조기가 변환된 전압의 크기에 따라 듀티 사이클이 다른 디지털 신호로 출력하고, 이때 듀티 사이클의 크기는 전압의 크기로 표현할 수 있다( $mV/mV$ ). 따라서 최종 민감도는

$mV/g$ 로 표현될 수 있다.

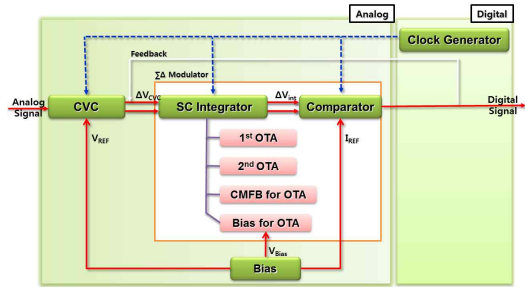


Fig. 1. CMOS ROIC for MEMS acceleration sensor  
그림 1. MEMS 가속도센서를 위한 CMOS ROIC

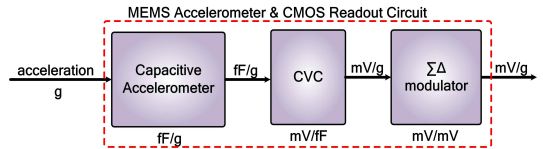


Fig. 2. The sensitivity of the MEMS acceleration sensor and CMOS ROIC

그림 2. MEMS 가속도 센서와 CMOS ROIC의 민감도

### 2.2 용량형 가속도센서(Capacitive Accelerometer Sensor)

본 논문에서는 MEMS 공정으로 제작된 용량성 가속도센서를 이용하여 ROIC를 설계하였다. 용량성 가속도센서는 가해지는 가속도의 크기와 방향에 따라 감지 커패시터의 커패시턴스가 변화하는 센서이다.

그림 3은 용량형 가속도센서의 동작을 나타낸 그림이다. 용량형 가속도센서의 양끝 평판은 고정되어 있고 가운데 평판은 가속도가 가해지면 가속도의 크기와 방향에 따라 움직이게 된다.

초기 정적 평형 상태에서는 가속도센서의 각 평판

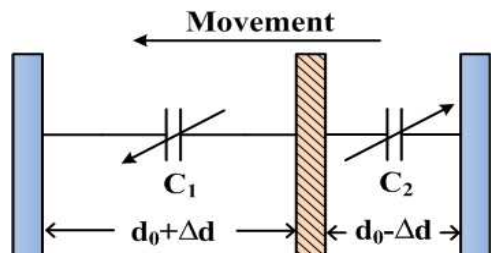


Fig. 3. Operational principle of capacitive sensor  
그림 3. 용량형 센서의 동작원리

간의 길이는  $d_0$ 로 동일하기 때문에  $C_1$ 과  $C_2$ 의 커패시턴스는 동일하다. 그러나 가속도가 발생하게 되면 각 평판 간의 거리에 차이가 발생하여 한쪽 커패시턴스는 증가하고 한쪽 커패시턴스는 감소하게 된다. 이러한 커패시턴스의 변화를 통해 가속도의 방향과 크기를 감지하게 된다[8].

식 (1)은 정적 평형상태에서의  $C_1$ 과  $C_2$ 의 커패시턴스 값이다. 이 상태에서 왼쪽 방향으로 가속도가 가해졌을 때, 가운데 평판이 오른쪽으로 움직이면서  $C_1$ 과  $C_2$ 의 커패시턴스는 식 (2)와 같이 변화한다.

$$C_1 = C_2 = \frac{\epsilon A}{d_0} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d_0 + \Delta d}, C_2 = \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d} \quad (2)$$

$C_1$ 과  $C_2$ 의 커패시턴스 변화량은 식 (3), (4)와 같고 각각의 커패시턴스 변화는 초기 변위에 비해 진폭변화가 매우 적을 때 선형적으로 근사화 될 수 있다.

$$\Delta C_1 = C_1 - C_0 = \frac{\epsilon A}{d_0 + \Delta d} - \frac{\epsilon A}{d_0} \quad (3)$$

$$\Delta C_2 = C_2 - C_0 = \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d} - \frac{\epsilon A}{d_0} \quad (4)$$

그 결과 두 커패시턴스의 변화량의 차이는 식 (5)와 같이 선형적이며, 따라서 용량형 가속도센서는 가속도에 따른 커패시턴스 변화가 선형적이기 때문에 많은 응용분야에 이용된다.

$$\begin{aligned} \Delta C &= \Delta C_2 - \Delta C_1 = \epsilon A \left( \frac{1}{d_0 - \Delta d} - \frac{1}{d_0 + \Delta d} \right) \\ &= \epsilon A \left( \frac{2\Delta d}{d_0^2 - \Delta d^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\epsilon$ 는 커패시터의 유전율[F/m], A는 커패시터의 면적[m<sup>2</sup>],  $d_0$ 는 초기 변위[m] 그리고  $\Delta d$ 는 변위 변화량[m]이다.

본 논문에서는 참고문헌 [7]의 용량형 가속도센서를 이용한다. 참고문헌 [7]의 가속도센서는 SOI 공정에서 11.38mm × 7.55mm의 크기로 제작되었으며, 1.6pF의 초기 커패시턴스와 100fF/g의 민감도(가속도에 따른 커패시턴스 변화)를 갖는다.

### 2.3 커패시턴스-전압 변환기(Capacitance to Voltage Converter)

커패시턴스-전압 변환기(CVC)는 가속도센서의 커패시턴스 변화량을 전압으로 변환하는 역할을 한다. 그림 4는 설계된 CVC의 회로이다. CVC는 차동 입출력 스위치드 캐패시터(switched capacitor) 전하 증폭기로 구성되어 있다[8]. 공통모드 노이즈를 제거하기 위해 차동 증폭기를 이용하였으며, 플리커(flicker) 노이즈, DC 오프셋, 채널 전하 주입 현상(channel charge injection effect)등을 없애기 위해 Correlated-Doubler-Sampling(CDC) 기법을 추가하였다.

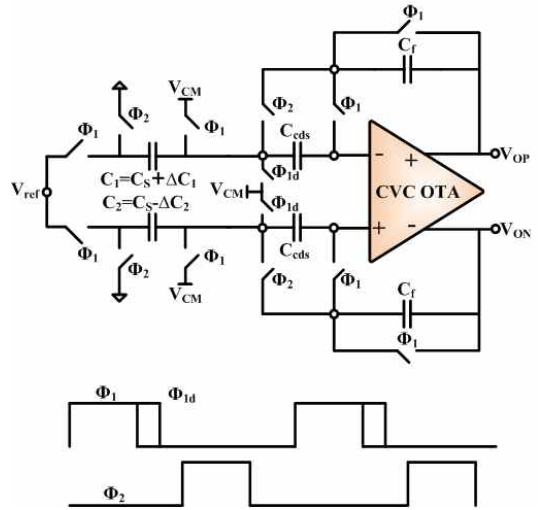


그림 4 Fig. 4. Capacitance to voltage converter  
그림 4. 커패시턴스-전압 변환기

CVC의 동작은 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 감지 동작이다.  $C_1$ 과  $C_2$ 는 가속도센서의 감지(sensing) 커패시터로써  $\Phi_1$ 이 1일 때 감지 커패시터에는  $V_{REF} - V_{CM}$ 의 전압으로 충전된다. 그러나 감지 커패시터에 충전되는 전하는 변화된 커패시턴스에 따라 충전된다. 이때,  $\Phi_{1d}$ 는  $\Phi_1$ 의 약간 지연된 클록으로 채널 전하 주입 현상을 제거하기 위한 클록이다. 감지 동작이 끝나고  $\Phi_2$ 가 1이 되면 증폭 동작을 한다.  $C_1$ 과  $C_2$ 는 낮은 전위(ground)에 연결되고 충전되었던 전하가 커패시터  $C_r$ 로 전달되어 증폭된다. 그 결과 최종 출력전압은 식 (6)과 같다. 플리커 노이즈와 DC 오프셋은  $C_{CDs}$ 에 의해 증폭 동작에서 제거된다.

$$V_{OUT} = (V_{OP} - V_{ON}) = \frac{2\Delta C}{C_f} * V_{ref} \quad (6)$$

그림 5는 CVC에서 사용된 class-AB 출력단을 갖는 폴디드 캐스코드 증폭기의 구조의 CVC OTA 회로이다. CVC OTA 출력에는 CVC의 출력 전압을 샘플링과 홀드하기 위한 스위치와 큰 커패시터가 연결되고 이로 인해 RC 시정수 커져 샘플링 커패시터의 rising/falling 시간이 커지게 된다. 이를 해결하기 위해 class-AB 출력단을 추가하여 큰 커패시터 부하를 빠르게 충전/방전 할 수 있도록 하였다. 또한 출력 전압을  $V_{CM}(1.65V)$ 으로 유지하기 위해 저항과 커패시터를 통해 출력 전압을 감지하여 출력의 공통 모드 전압을 유지하는 공통 모드 피드백 회로(CMFB)를 이용하였다. 모의실험 결과 94.3dB의 이득과 47.5MHz의 단위 이득 주파수(unity gain frequency) 그리고  $80^\circ$ 의 위상 여유(phase margin)을 가졌다. 또한 설계된 OTA는 3.3V의 공급전압에서 1.17mA의 전류를 소모를 하였다.

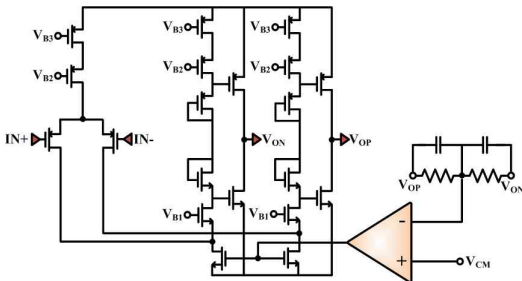


Fig. 5. Fully-differential folded cascode amplifier in CVC with class-AB output stage  
그림 5. CVC의 class-AB 출력단을 갖는 완전 차동 폴디드 캐스코드 증폭기

2.4  $\Sigma\Delta$  변조기 (Modulator)

가속도센서에 의해 감지된 가속도 정보는 CVC에 의해 전압으로 변환되고, 이 전압은  $\Sigma\Delta$  변조기에 의해 디지털 신호로 변환된다. 그림 6은 스위치드 커패시터 적분기(switched capacitor integrator)와 비교기로 구성된  $\Sigma\Delta$  변조기이다[3]. 노이즈 셰이핑(shaping)과 안정도 문제를 해결하기 위해 2차로 설계하였고, Chopper - Stabilization(CHS)를 이용하여 스위치의 온(on) 저항과 기준전압 발생기 등에서 발생하는 플리커 노이즈를 제거하였다.

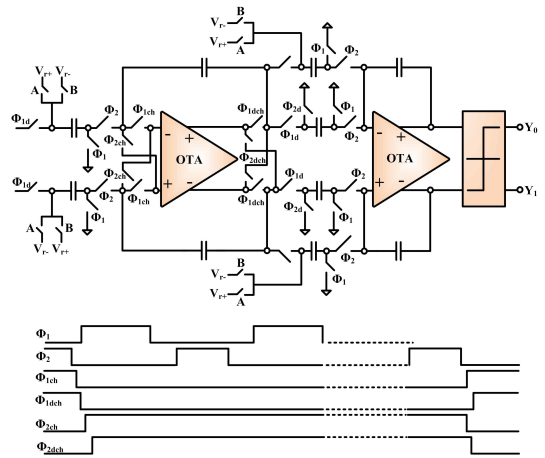


Fig. 6.  $\Sigma\Delta$  변조기  
그림 6.  $\Sigma\Delta$  변조기

$\Sigma\Delta$  변조기의 동작은  $\Phi_1$ 이 1일 때 샘플링 동작을 하고  $\Phi_2$ 가 1일 때 적분 동작을 한다. 채널 전하 주입 현상을 줄이기 위해  $\Phi_1$ 과  $\Phi_2$ 를 지연시킨 클록  $\Phi_{1d}$ 와  $\Phi_{2d}$ 을 이용하고, CHS를 수행하는 클록인  $\Phi_{1ch}$ ,  $\Phi_{1dch}$ ,  $\Phi_{2ch}$  그리고  $\Phi_{2dch}$ 를 통해 플리커 노이즈를 제거한다.

그림 7은  $\Sigma\Delta$  변조기에서 사용된 증폭기 OTA의 회로로서 완전 차동 폴디드 캐스코드 증폭기 구조에 pMOS 입력단을 통해 플리커 노이즈를 감소시켰다. 마찬가지로 공통 모드 피드백(CMFB)회로를 사용하였고 빠르고 선형적인 동작과 적은 전력 소모를 하도록 스위치드 커패시터 구조를 이용하였다.

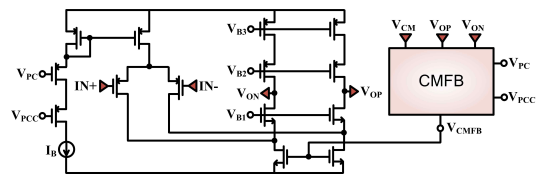


Fig. 7. Fully-differential folded cascode amplifier in  $\Sigma\Delta$  modulator

그림 7.  $\Sigma\Delta$  변조기의 완전 차동 폴디드 캐스코드 증폭기

$\Sigma\Delta$  변조기에서 사용된 OTA의 성능을 표 1에 정리하였다. 설계된 OTA의 이득은 77dB이고 대역폭은 10.4MHz이다. 또한 3.3V의 공급전압일 때 전류소모는 20uA 이하로 저 전류 소모로 설계되었음을 확인하였다.

Table. 1 Performance of the amplifiers in  $\Sigma\Delta$  modulator

표 1.  $\Sigma\Delta$  변조기의 증폭기 성능

Parameter	OTA
Gain(dB)	77
Phase Margin( $^{\circ}$ )	81.55
Band Width(MHz)	10.4
Current Consumption( $\mu$ A)	19.91

비교기는 가속도에 의해 변화된 커패시턴스의 정보를 최종 1-bit의 디지털 출력으로 변환하는 역할을 한다. 그림 8은 설계된 비교기의 회로로 nMOS 입력단과 진치 증폭기를 갖는 CMOS 재생성 래치 그리고 SR 래치로 구성되어 있다. 스위칭 클록에 의한 노이즈 영향을 줄이기 위해 이와 같은 구조를 사용하였다. 설계된 비교기를 모의실험 한 결과 민감도는 30mV이고 전류소모는 3.3V의 전원전압일 때 27 $\mu$ A의 전류를 소모하였다.

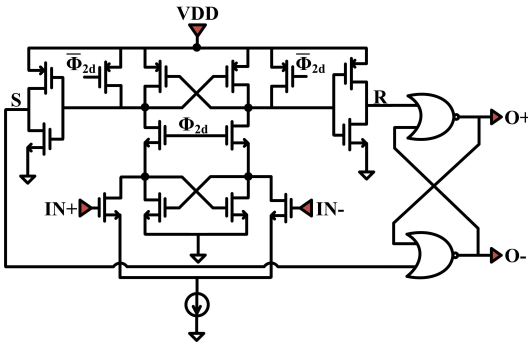


Fig. 8 Comparator schematic  
그림 8. 비교기 회로

### III. 모의실험, IC 제작 및 측정

설계된 MEMS 가속도센서를 위한 CMOS readout 회로는 2MHz의 동작 주파수에서 동작하고 참고문헌 [7]의 가속도센서를 참고하여 초기 커패시턴스는 1.6pF이고 민감도는 100fF/g인 가속도센서를 모델링 하여 모의실험 하였다.

그림 9는 가속도센서의 커패시턴스의 변화량이  $\Delta$  0fF,  $\pm 30$ fF( $\Delta 60$ fF) 그리고  $\pm 50$ fF( $\Delta 100$ fF)일 때, CVC의 출력전압이다. 모의실험 결과 가속도센서의 커패시턴스 변화량이 0fF일 때, 즉 정지 상태일 때 CVC의 출력전압은 0mV로 출력되었고 커패시턴스의 변화량이  $\pm 30$ fF일 때는  $\pm 90.4$ mV를 출력하였으며,  $\pm 50$ fF

가 변할 때는  $\pm 150.8$ mV의 전압을 출력하였다.

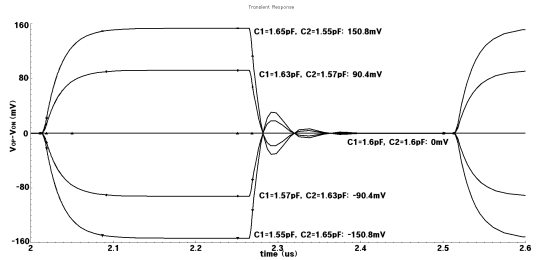


Fig. 9 CVC simulation result(@0fF,  $\pm 30$ fF,  $\pm 50$ fF)

그림 9. CVC 모의실험 결과(@0fF,  $\pm 30$ fF,  $\pm 50$ fF)

그림 10은  $\pm 1$ g가 변화할 때 가속도에 따른 CVC의 출력변화를 정리한 그림이다. 모의실험 결과 설계된 CVC의 민감도(가속도에 따른 전압의 크기)는 150mV/g이고 비선형성은 최대 0.15%를 가졌다.

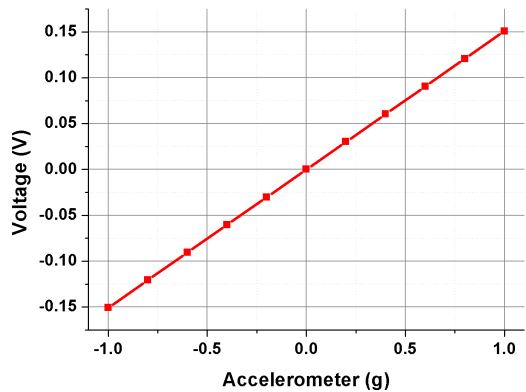


Fig. 10 Static differential output response to acceleration

그림 10. 가속도에 따른 차동 출력 결과

표 2는 입력 신호의 진폭 변화에 따른  $\Sigma\Delta$  변조기

Table. 2  $\Sigma\Delta$  modulator simulation result

표 2.  $\Sigma\Delta$  변조기 모의실험 결과

Parameter	Value						
Vin(mV)	-300	-200	-100	0	+100	+200	+300
Vout							
Duty cycle (%)	19.91	30.03	40.03	50.00	59.97	69.97	80.09
Linearity Error(%)	0.45	0.10	0.07	0.00	0.05	0.04	0.11

출력의 듀티 사이클을 정리한 것이다. 그 결과 입력 진폭이 100mV 변할 때, 대략 10%의 듀티 사이클이 변화하며, 따라서 1mV/mV의 민감도를 갖는다. 선형성에 대한 오차는 0.45% 이하이다.

그림 11은 가속도에 따른 readout 회로의 출력 파형이다. 출력 클록파형은 가속도의 방향과 크기에 따

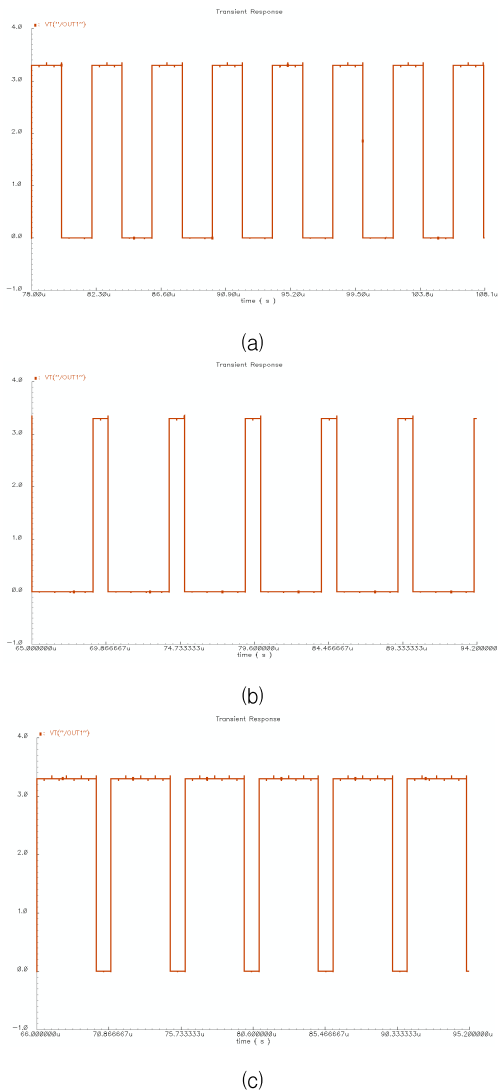


Fig. 11 The ROIC simulation result: (a) zero acceleration(0g) (b) negative acceleration(-1g) (c) positive acceleration(1g)  
 그림 11. ROIC 모의실험 결과: (a) 무가속도(0g) (b) 역방향 가속도(-1g) (c) 정방향 가속도(1g)

라 듀티 사이클이 달라진다. 그림 10의 (a)는 가속도가 없는 정지 상태로(0g) 회로의 최종 출력은 50%의 듀티 사이클을 갖는다. 또한 역방향의 가속도(-1g)를 가질 때는 그림 10의 (b)와 같이 50% 이하의 듀티 사이클을 가지며, 정방향(1g)일 경우 50% 이상의 듀티 사이클을 갖는 것을 그림 8의 (c)에서 확인할 수 있다. 전체 전류소모는 3.3V의 공급전압 일 때 1.7mA의 전류를 소모하였다. 설계된 CMOS ROIC의 전체 민감도는 150mV/g이다.

설계된 MEMS 가속도센서를 위한 CMOS readout 회로는 0.35um CMOS 공정으로 제작 되었다. 그림 12는 설계된 회로의 제작된 칩 사진이며, 면적은 패키지를 포함하여 0.96mm×0.85mm이다.

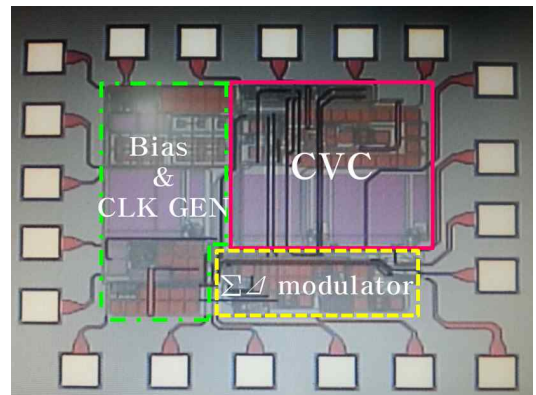


Fig. 12 Photograph of the designed chip  
 그림 12. 제작된 칩 사진

그림 13은 정방향일 때 감지 커패시터의 커패시턴스가 0fF, 30fF, 70fF 그리고 100fF 변할 때, 제작된 ROIC의 출력을 측정한 파형이다. 측정 결과 커패시턴스 변화가 0fF 일 때 49.5%의 듀티 사이클을 출력하였고, 커패시턴스의 변화가 30fF 일 때에는 58.6%, 70fF는 68.2% 그리고 100fF은 77.7%의 듀티 사이클을 출력하였다. 약간의 오차는 있지만 대략 입력 전압이 100mV 씩 증가할 때, 듀티 사이클은 10% 증가하였다.

기존에 발표된 CMOS readout 회로들과 본 논문에서 설계된 회로의 성능을 표 3에 비교하였다. 본 논문에서 설계된 회로는 동작 주파수 대비 적은 전력을 소모하는 것을 확인할 수 있다.

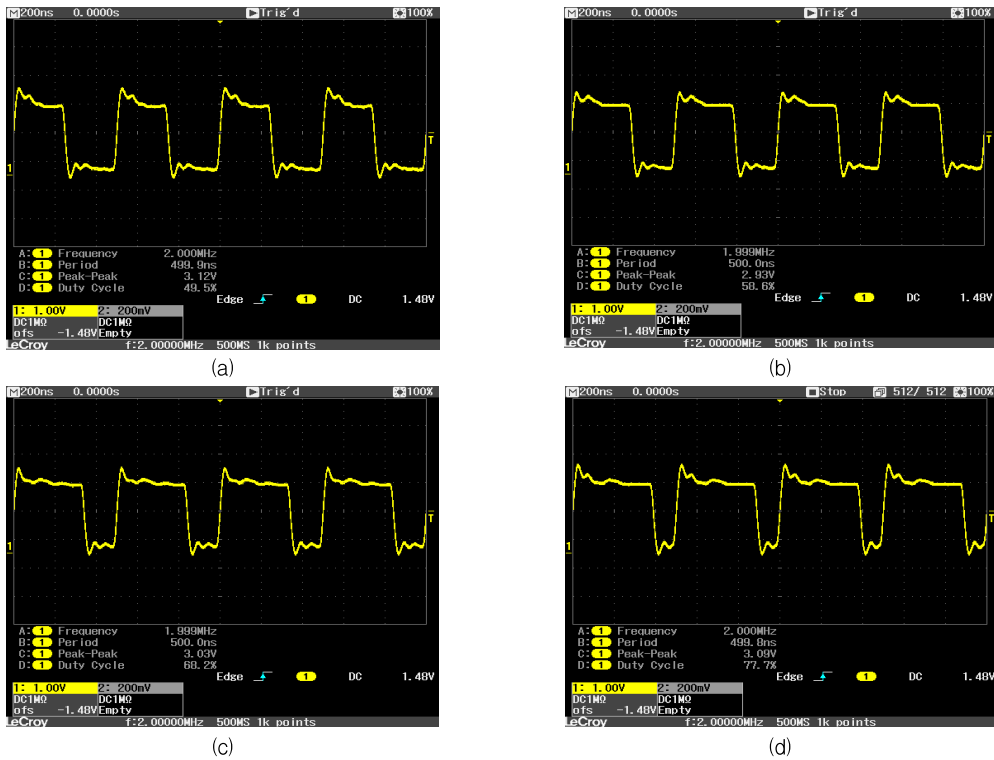


Fig. 13 The measured waveforms of the ROIC: (a)  $\Delta C = 0\text{fF}$  (b)  $\Delta C = 30\text{fF}$  (c)  $\Delta C = 50\text{fF}$  (d)  $\Delta C = 80\text{fF}$   
 그림 13. ROIC 측정파형: (a)  $\Delta C = 0\text{fF}$  (b)  $\Delta C = 30\text{fF}$  (c)  $\Delta C = 50\text{fF}$  (d)  $\Delta C = 80\text{fF}$

Table. 3 Comparison of the readout circuits  
 표 3. Readout 회로 비교

	Yazdi[2]	Xiaofei[3]	Huang[4]	Zhang[5]	Liu[6]	This work
Sensitivity (mV/g)	260-1600	550	6.1	1250	105/127/58	75
Power dissipation (mW)	12 (@5V)	17.8 (@3.3V)	-	-	5.2	5.6 (@3.3V)
Sampling freq. (MHz)	1	5.12	1	0.05	0.5	2
Non-linearity (%)		-	-	-	1/0.5/2.4	0.15
process ( $\mu\text{m}$ )	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Year	2004	2010	2011	2012	2013	2014

## IV 결론

본 논문에서는 MEMS 가속도센서를 위한 CMOS readout 회로를 0.35um CMOS 공정을 이용하여 설계하였다. 잡음을 최소화하기 위하여, correlated-double-sampling과 chopper-stabilization 기법을 이용하여 설계하였다. 제작된 칩을 측정한 결과 입력 진폭이 100mV 증가할 때 10%의 비율로 출력의 듀티 사이클이 증가하였다. 설계된 회로의 전체 민감도는 150mV/g이며, 전력소모는 5.6mW로 기존의 연구와 비교하였을 때 동작 주파수 대비 적은 전력을 소모한다. 설계된 회로는 MEMS 가속도센서와 함께 집적화가 가능하므로 휴대 기기 및 소형기기 등에 적용 가능하며, 저 전력으로 설계되었기 때문에 저전력 소모 특성이 요구되는 초소형 센서노드나 무선 센서노드에 적용이 유리할 것으로 기대된다.

## References

- [1] H.-S. Park, "Technology of an accelerometer for portable electronic devices," National IT Industry Promotion Agency, 2007.
- [2] N. Yazdi, H. Kula, K. Najafi, "Precision readout circuits for capacitive microaccelerometers," *Proceedings of IEEE Sensors*, pp 28 - 31, 2004.
- [3] K. Xiaofei, "A fully-differential Chopper-Stabilized Sigma-Delta Interface for Micro Accelerometer," *ICMET*, pp 726 - 729, 2010.
- [4] C.-P. Huang, R. Chen, "Integration and implementation of CMOS-MEMS accelerometer and capacitive sensing circuits," *2011 IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pp 543 - 546, 2011.
- [5] T.-T. Zhang, H.-J. Li, J.-Q. Huang, M. Zhao, "An offset-compensated switched-capacitor interface circuit for closed-loop MEMS capacitive accelerometer," *2012 IEEE 11th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, pp 1-3, 2012.
- [6] Y.-C. Liu, M.-H. Tsai, S.-S. Li and W. Fang, "A fully-differential, multiplex-sensing interface circuit monolithically integrated with tri-axis pure oxide capacitive CMOS-MEMS accelerometers," *The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems 2013 Transducers & Eurosensors XXVII*, pp 610-613, 2013.
- [7] I. Zeimpekis, I. Sari, M. Kraft, "Characterization of a Mechanical Motion Amplifier Applied to a MEMS Accelerometer," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 21, no. 5, pp 1032-1042, 2012.
- [8] S. Reddy, "Design of Interface Circuit for Differential Capacitance Measurement," *Master of Science (by Research) in VLSI & Embedded Systems*, pp 55-57, Sep. 2011
- [9] N.-G. Cho, "Principle and trend of a MEMS accelerometer," KETI, 2006.
- [10] M. Haris, H. W. Qu, "A CMOS-MEMS piezoresistive accelerometer with large proof mass," *IEEE International Conference on NEMS*, pp 309 - 312, 2010.
- [11] X. Y. Tan, T. Mu, C. C. Zhen, H. R. Li, X. W. Liu, "A zero-offset auto-correction circuit for piezoresistive micromachined accelerometer," *AISOMT*, pp 255 - 258, 2011.
- [12] S. Tanaka, S. Nishifuji, "On-line sensing system of dynamic ship's attitude by use of servo-type accelerometers," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp 339 - 346, 1995.
- [13] H. Saito, T. Yokoyama, S. Uchiyama, "Seafloor Stability Monitoring by Displacements Calculated from Acceleration Waveforms Obtained by a 3-Component Servo-Accelerometer System," *OCEANS*, 2006.

## BIOGRAPHY

### Yoon Eun-Jung (Student Member)



2011 : BS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

2013 : MS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

2013~ : PhD student in Electronics Engineering, Incheon National University.



**Park Jong-Tae** (Member)

1981 : BS degree in Electronics Engineering, Kyungpook National University.

1983 : MS in Electronics Eng., Yonsei University.

1987 : PhD in Electronics Eng., Yonsei University.

1983~1985 : Research Engineer, Gold Star Semiconductor.

1991 : MIT Post Doc.

2000~2001 : UC Davis Visiting scholar

**Yu Chong-Gun** (Member)

1985 : BS degree in Electronics Engineering, Yonsei University.

1987 : MS in Electronics Eng., Yonsei University.

1993 : PhD in Electrical Eng., Iowa State University.

2009~2010 : UC Davis Visiting

scholar