

# 용량형 마이크로 공진기의 주파수 응답 보상 기법

서진덕<sup>1</sup> · 임교묵<sup>2</sup> · 고흥호<sup>1,2,\*</sup>

## Frequency Response Compensation Technique for Capacitive Microresonator

Jindeok Seo<sup>1</sup>, Kyomuk Lim<sup>2</sup>, and Hyoungho Ko<sup>1,2,\*</sup>

### Abstract

This paper presents frequency response compensation technique, and a self-oscillation circuit for capacitive microresonator with the compensation technique using programmable capacitor array, to compensate for the frequency response distorted by parasitic capacitances, and to obtain stable oscillation condition. The parasitic capacitances between the actuation input port and capacitive output port distort the frequency response of the microresonator. The distorted non-ideal frequency response can be compensated using two programmable capacitor arrays, which are connected between anti-phased actuation input port and capacitive output port. The simulation model includes the whole microresonator system, which consists of mechanical structure, transimpedance amplifier with automatic gain control, actuation driver and compensation circuit. The compensation operation and oscillation output of the system is verified with the simulation results.

**Keywords :** Capacitive Microresonator, Frequency Response Compensation, Parasitic Capacitance

### 1. 서론

용량형 마이크로 공진기(microresonator)는 전기기계적 발진기(electromechanical oscillator), 타이밍 및 클럭 신호 발생기, 진동형 센서의 구동부 등 다양한 분야에 적용되고 있다[1]. 일반적으로 용량형 마이크로 공진기는 공진 주파수에서 높은 Q 값을 갖는 기계적 구조물과 자기 발진 유지 회로로 구성된다[2, 3]. 자기 발진 회로는 주로 용량형 피드백 회로를 이용한 전하 증폭기와 페이즈 쉬프터를 결합한 형태, 또는 저항형 피드백 구조를 이용한 트랜스임피던스 증폭기 형태로 구성되며, 자동 이득 회로(AGC, Automatic Gain Control)를 이용하여 루프 이득을 조정한다[4-8].

마이크로 공진기의 기계적 구조물이 공진 주파수에서 공진을 유지하도록 자기 발진 유지 회로가 양의 되먹임(positive feedback)의 형태로 동작한다. 이 때, 마이크로 공진기의 기계적 구조물이 지속적으로 발진하기 위하여 기계적 구조물과 발진 유지 회로 전체의 개루프 이득이 1 이상이며, 개루프 위상차가 180 도인

Barkhausen Criteria 가 만족되어야 한다. 따라서 용량형 마이크로 공진기의 설계를 위하여 기계적 구조물 및 자기 발진 유지 회로를 포함한 시스템 전체의 이득 및 위상을 정밀하게 조정하는 것이 필수적이다.

기존에 발표된 MEMS 공진기의 모델링은 대부분 질량체, 스프링 및 감쇠기로 구성된 2차 시스템을 기반으로 구성되어 있다 [9]. 특히 높은 Q 값을 확보하기 위하여 진공 상태에서 구현된 공진기의 경우 저감쇠(underdamped) 2차 시스템으로 모델링 할 수 있다. MEMS 공진기를 저감쇠 2차 시스템으로 모델링 할 경우 공진점에서 magnitude 는 최대값을 가지며, phase 변화는 -90 도가 된다. 그러나 실제 측정되는 주파수 응답은 이상적인 2차 시스템과는 다른 비이상적 거동을 보인다. 특히 magnitude 응답의 노치(notch) 및 스파이크(spike) 현상과, phase 응답의 지연 왜곡 현상은 실제 측정되는 주파수 응답에서 발생하는 대표적인 비이상적 특성이다. 이와 같은 용량형 마이크로 공진기의 비이상적 주파수 응답 특성은 공진기의 구동 전압 입력부와 용량 신호 출력부 사이에 존재하는 기생 용량으로 설명될 수 있으며, 기존의 2차 시스템 모델에 기생 용량을 추가할 경우 시뮬레이션 상에서도 실제 측정되는 주파수 응답과 유사한 파형을 재현할 수 있다 [10, 11].

본 논문에서는 마이크로 공진기의 기생 용량으로 인한 왜곡된 주파수 특성을 보상하고, 안정적인 발진 조건을 확보하기 위하여, 프로그래머블 용량 어레이를 이용한 주파수 특성 보상 기법을 적용한

<sup>1</sup>충남대학교 전자공학과 (Department of Electronics, Chungnam National University)

<sup>2</sup>충남대학교 차세대기판회로학과 (Graduate School of Advanced Electronic Circuit Substrate Engineering, Chungnam National University)

\*Corresponding author : hhko@cnu.ac.kr

(Received : Apr. 6, 2012, Revised : May 5, 2012, Accepted : May 16, 2012)

자기 발진 회로를 제안하였다. 또한 제안된 회로를 적용할 경우 기생 용량으로 인하여 왜곡된 주파수 응답이 보상됨을 시뮬레이션으로 확인하였다. 제안된 주파수 응답 보상 기법은 마이크로 발진기, 클럭 생성기, 센서 구동 회로 등 다양한 형태의 용량형 마이크로 공진기에 적용될 수 있다.

## 2. 마이크로 공진기의 주파수 응답 보상 기법

### 2.1 마이크로 공진기 모델링

Fig. 1은 본 논문에서 사용된 마이크로 공진기의 기계적 구조물이다[10, 11]. 본 구조물의 부유된 질량체(movable mass)는 4개의 스프링으로 지지되어 있으며, 수평 방향으로 진동할 수 있다. 2개의 구동 전극(actuation electrode)에 입력된 구동 전압은 정전 구동 방식의 콤 드라이브(comb drive)를 통하여 구동력으로 변환되어, 질량체의 수평 방향 변위를 발생시킨다. 2개의 구동 전극에 입력되는 구동 전압( $V_{actp}$  및  $V_{actn}$ )은 각각 서로 반대 위상과 동일한 DC 오프셋을 가진다.  $V_{actp}$  와  $V_{actn}$  에 의하여 발생하는 정전력 ( $F_{actp}$  및  $F_{actn}$ )은 식 (1) 및 (2)과 같이 표현할 수 있으며, 따라서 구동 질량체에 가해지는 알짜 힘( $F_{net}$ )은 식 (3)과 같이 표현된다. 이때  $\epsilon$ 은 유전율,  $n_{act}$ 는 구동 콤의 개수,  $d_{act}$ 는 구동 콤의 간격,  $t$ 는 구조물의 두께,  $V_{DC}$ 는 구동 전압의 DC 오프셋,  $V_{AC}$ 는 구동 전압의 AC 성분을 나타낸다.

$$F_{actp} = \frac{\epsilon n_{act} t (V_{DC} + V_{AC})^2}{2d_{act}} \quad (1)$$

$$F_{actn} = \frac{\epsilon n_{act} t (V_{DC} - V_{AC})^2}{2d_{act}} \quad (2)$$

$$F_{net} = F_{actp} - F_{actn} = \frac{2\epsilon n_{act} t V_{DC} V_{AC}}{d_{act}} \quad (3)$$

본 구조물은 부유된 질량체와 스프링의 강성 및 공기 댐핑 계수를 이용하여 2차 시스템으로 모델링 할 수 있다. 따라서 정전력에 의한 구동부 변위는 식 (4)와 같이 저감쇠 2차 시스템으로 표현할 수 있으며, 이때  $m$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $\omega_0$ ,  $Q$ 는 각각 구동부 질량, 감쇠 계수, 탄성 계수, 공진주파수,  $Q$  값을 나타낸다.

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + bs + k} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (4)$$

이 때, 질량체의 수평 방향 변위는 2개의 구동 감지 전극(actuation sensing electrode)의 차동 용량 변화를 발생시킨다. 구동 감지부의 용량 변화 ( $C_{actsenp}$ ,  $C_{actsenn}$ )는 식 (5) 및 (6)과 같이 표현되며, 이때,  $n_{actsen}$ ,  $d_{actsen}$ ,  $x_0$ ,  $x$ 는 각각 구동 감지 콤 개수,

구동 감지 콤의 간격, 구동 감지 콤의 오버랩 길이, 구동부의 변위를 나타낸다.

$$C_{actsenp} = \frac{\epsilon n_{actsen} t}{d_{actsen}} (x_0 + x) \quad (5)$$

$$C_{actsenn} = \frac{\epsilon n_{actsen} t}{d_{actsen}} (x_0 - x) \quad (6)$$

이를 이용하여 본 마이크로 공진기의 기계적 구조물은 Fig. 2와 같이 모델링할 수 있다. 이 때, 실제 용량형 마이크로 공진기의 주파수 응답에서 측정되는 magnitude 응답의 노치(notch) 및 스파이크(spike) 현상과, phase 응답의 지연 왜곡 현상을 모델링 하기 위하여, 본 모델링에서는 기생 용량인  $C_{p1}$  과  $C_{p2}$  를 구동 전압 인가 단자와 출력 용량 단자 사이에 추가하였다[10, 11]. 기존 연구[10, 11]에서는 기생 용량에 의한 magnitude 응답의 노치(notch) 및 스파이크(spike) 현상과, phase 응답의 지연 왜곡 현상을 모델링하였으며, 본 연구에서는 이를 보상하기 위한 보상 용량인  $C_{C1}$  및  $C_{C2}$  를 추가하여 비이상적 효과를 제거하고자 하였다.

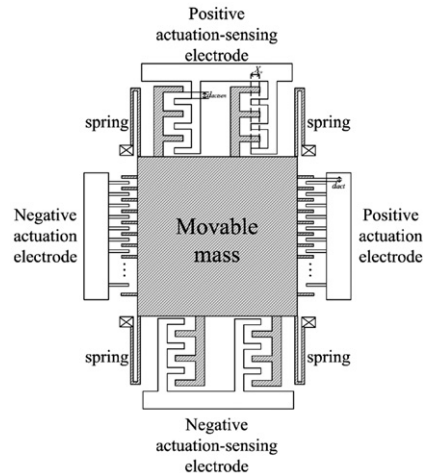


Fig. 1. Mechanical structure of capacitive microresonator.

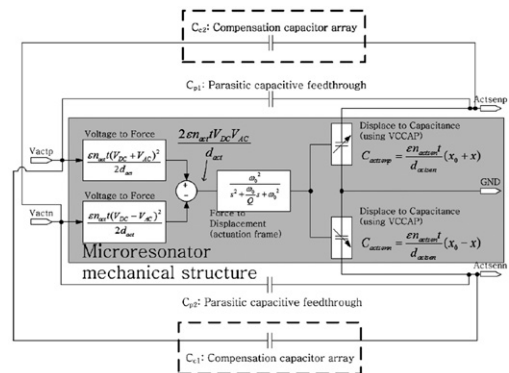


Fig. 2. Modeling of microresonator including parasitic capacitive feedthroughs and compensation capacitor arrays.

2.2 기생 용량에 의한 주파수 응답 왜곡 현상

구동 감지부의 용량 변화를 전압으로 변환하기 위하여 Fig. 3과 같은 형태의 트랜스임피던스 증폭기를 사용할 경우 증폭기의 출력  $V_{OUTP}$  와  $V_{OUTN}$  은 식 (7) 및 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 식 (7) 및 (8)에 나타난 바와 같이, 구동 감지부 용량 변화에 따른 전압 출력 외에 구동 전압 입력 단자( $V_{ACTP}$ ,  $V_{ACTN}$ )과 구동 감지부 용량 출력 단자( $C_{ACTSENP}$ ,  $C_{ACTSENN}$ ) 사이의 기생 용량( $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$ )로 인한 원하지 않는 성분이 발생한다. 이 기생 용량으로 인한 성분은 magnitude 응답의 노치(notch) 및 스파이크(spike) 현상과, phase 응답의 지연 왜곡 현상 등 비이상적인 주파수 응답을 야기하며, 페루프 발진 시 원하는 공진 주파수 이외의 다른 주파수에서 발진을 발생시킬 우려가 있다.

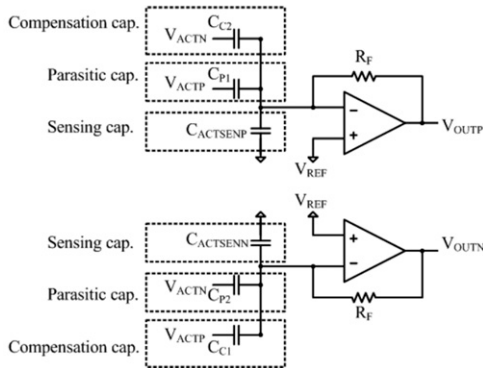


Fig. 3. Transimpedance amplifier for capacitive sensing.

$C_{P1}$  은  $V_{ACTP}$  와  $C_{ACTSENP}$  사이의 기생 용량이며, 이를 보상하기 위하여  $V_{ACTP}$  와 반대 위상으로 구동되는 용량 성분을 추가하면  $C_{P1}$  으로 인한 비이상적인 주파수 응답을 제거할 수 있다. 따라서  $V_{ACTN}$  와 반대 위상의 구동 전압원인  $V_{ACTN}$ 과  $C_{ACTSENP}$  사이에  $C_{P1}$  과 동일한 크기의 보상 용량을 추가할 경우 이상적인 주파수 특성을 획득할 수 있다. 이는  $C_{P2}$  의 경우에도 마찬가지로 적용된다. 따라서,  $V_{ACTP} = V_{REF} + V_{AC}$ ,  $V_{ACTN} = V_{REF} - V_{AC}$  일 경우,  $C_{P1} = C_{C2}$ ,  $C_{P2} = C_{C1}$  이 되도록  $C_{C1}$  및  $C_{C2}$  를 조정하면 원하지 않는 성분을 제거하고, 식 (9) 및 (10)와 같은 형태의 구동 변위에 따른 용량 변화 성분만을 전압 출력으로 얻을 수 있다.

$$V_{OUTP} = V_{REF} + sR_F \left( \underbrace{C_{ACTSENP} V_{REF}}_{\text{Sensing signal}} + \underbrace{C_{P1} (V_{REF} - V_{ACTP})}_{\text{Parasitic signal}} + \underbrace{C_{C2} (V_{REF} - V_{ACTN})}_{\text{Compensation signal}} \right) \quad (7)$$

$$V_{OUTN} = V_{REF} + sR_F \left( \underbrace{C_{ACTSENN} V_{REF}}_{\text{Sensing signal}} + \underbrace{C_{P2} (V_{REF} - V_{ACTN})}_{\text{Parasitic signal}} + \underbrace{C_{C1} (V_{REF} - V_{ACTP})}_{\text{Compensation signal}} \right) \quad (8)$$

$$V_{OUTP} = V_{REF} + sR_F C_{ACTSENP} V_{REF} \quad (9)$$

$$V_{OUTN} = V_{REF} + sR_F C_{ACTSENN} V_{REF} \quad (10)$$

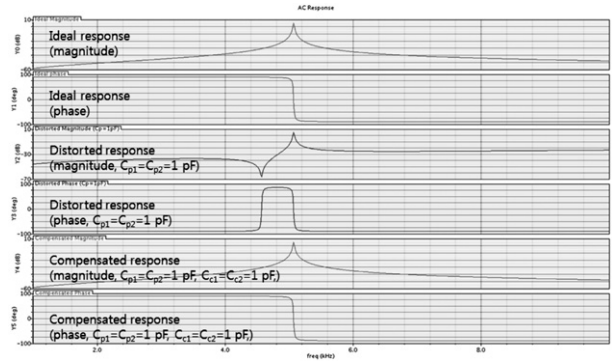


Fig. 4. Magnitude and phase responses: ideal responses, distorted responses with parasitic capacitances, and compensated responses with compensation capacitors.

Fig. 4는 기생 용량에 따른 마이크로 공진기의 주파수 응답에 대한 시뮬레이션 결과이다. 기생 용량이 없을 경우 magnitude 및 phase 응답은 이상적인 2차 시스템의 응답과 일치하나, 기생 용량을 1 pF 으로 할 경우 노치(notch) 및 스파이크(spike) 현상과, phase 응답의 지연 왜곡 현상이 발생한다. 이 때, 기생 용량과 동일한 크기의 보상 용량을 추가할 경우 기생 용량과 보상 용량의 효과가 서로 상쇄되어 마치 기생 용량이 없는 이상적인 2차 시스템의 응답과 동일한 형태의 주파수 응답을 얻을 수 있다.

2.3 프로그래머블 용량 어레이를 이용한 주파수 응답 보상 회로

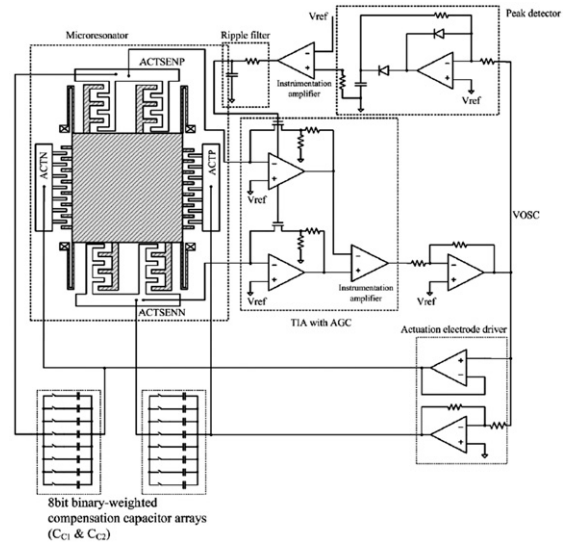


Fig. 5. Block diagram of microresonator system.

Fig. 5는 기계적 구조물과 자가 발진 회로를 포함한 마이크로 공진기 시스템의 블록 다이어그램이다. ACTSENP 및 ACTSENN 의 두 전극을 통하여 구동 변위에 따른 용량 변화가 발생되며, 이는 트랜스임피던스 증폭기(Transimpedance Amplifier, TIA)를 통하여

전압으로 변환된다. 이 전압 신호는 추가 증폭을 거쳐, 구동 전극 (ACTP, ACTN)에 인가되며, 양의 피드백(positive feedback) 루프를 형성하고, 발진 신호가 출력된다. 이 때, 발진 루프의 자동 이득 제어(Automatic Gain Control, AGC) 회로는 다음과 같이 구현된다. 발진 신호의 진폭을 피크 디텍터(peak detector) 및 RC 저역통과 필터를 이용하여 DC 전압으로 변환한 후, 이를 TIA의 피드백 저항으로 사용되는 트랜지스터의 게이트 전압으로 인가한다. 따라서 발진 출력 신호의 진폭이 증가할 경우 피드백 트랜지스터의 온-저항(on-resistance)가 감소하여 발진 신호의 진폭이 감소하게 되며, 전체 루프의 이득이 일정하게 유지된다.

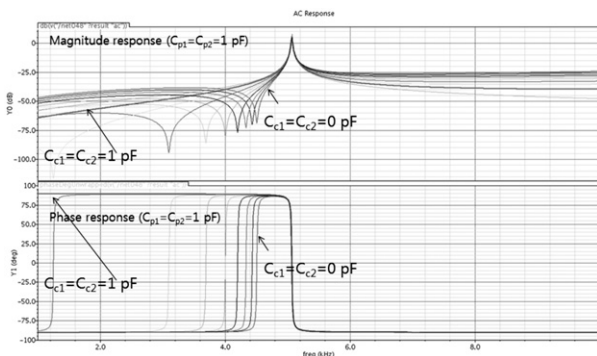


Fig. 6. Frequency response with varying compensation capacitor.

기생 용량으로 인하여 왜곡된 비이상적인 마이크로 공진기의 주파수 응답을 보상하기 위하여, 2개의 8 bit의 이진 가중치형 용량 어레이 ( $C_{C1}$ ,  $C_{C2}$ )를 설계하였다. Fig. 6은  $C_{C1}$  및  $C_{C2}$ 를 가변시킬 경우 마이크로공진기의 주파수 응답을 시뮬레이션 한 결과이며, 기생 용량과 보상 용량이 일치할 경우 비이상적인 주파수 응답 현상이 제거됨을 확인할 수 있다.

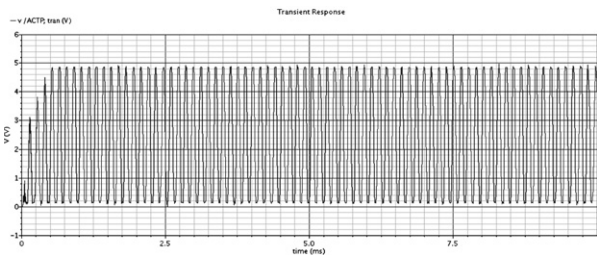


Fig. 7. Oscillation output.

Fig. 7은 주파수 응답을 보정한 마이크로 공진기 시스템의 발진 출력 파형으로, 안정적으로 발진이 유지됨을 확인할 수 있다. 안정적인 발진을 위해서는 개루프 이득이 1 이상이며, 개루프 위상차가 180 도인 Barkhausen Criteria가 만족되어야 하나, 기생 용량을 보상하지 않을 경우 Barkhausen Criteria를 만족하는 복수의 주파수가 존재할 수 있다. 이는 발진 루프의 오동작을 야기할 수 있으

며, 이를 방지하기 위하여 기생 용량으로 인한 비이상적 주파수 응답 효과를 제거하여야 한다.

### 3. 결론

본 논문에서는 마이크로 공진기의 기생 용량으로 인한 왜곡된 주파수 특성을 보상하고, 안정적인 발진 조건을 확보하기 위하여, 프로그래머블 용량 어레이를 이용한 주파수 특성 보상 기법을 적용한 자기 발진 회로를 제안하였다. 구동 전압 포트와 용량 출력 포트 사이의 기생 용량은 비이상적인 주파수 응답을 야기하며, 반대 페이즈의 구동 전압 포트와 연결된 보상 용량을 이용하여 주파수 응답을 보상할 수 있음을 보이고, 시뮬레이션으로 이를 확인하였다. 제안된 주파수 응답 보상 기법은 향후 실제 마이크로 공진기 시스템을 구성하여 실험적으로 검증될 예정이며, 마이크로 발진기, 클럭 생성기, 센서 구동 회로 등 다양한 형태의 용량형 마이크로 공진기에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 2011년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

### REFERENCES

- [1] S. Tabatabaei and A. Partridge, "Silicon MEMS oscillators for high-speed digital systems", *IEEE Micro*, vol. 30, no. 2, pp. 80-89, 2010.
- [2] M. Abdelsalam, M. Wahba, M. Abdelmoneum, D. Duarte, and Y. Ismail, "Supporting circuitry for a fully integrated micro electro mechanical(MEMS) oscillator in 45 nm CMOS technology", *Proc. of IEEE/IFIP VLSI System on Chip Conference (VLSI-SoC)*, Santa Cruz, USA, pp. 259-263, 2010.
- [3] K. Sundaresan, G. K. Ho, S. Pourkamali, and F. Ayazi, "Electronically temperature compensated silicon bulk acoustic resonator reference oscillators", *IEEE J. Solid-St. Circ.*, vol. 42, no. 2, pp. 1425-1434, 2007.
- [4] J. Salvia, P. Lajevardi, M. Hekmat, and B. Murmann, "A 56 MΩ CMOS TIA for MEMS applications", *Proc. of IEEE Custom Integrated Circuits Conference 2009(CICC '09)*, San Jose, USA, pp. 199-202, 2009.
- [5] A. Uranga, J. Teva, J. Verd, J. L. Lopez, F. Torres, J.

- Esteve, G. Abadal, F. Perez-Murano, and N. Barnoil, "Fully CMOS integrated low voltage 100 MHz MEMS resonator", *Elec. Lett.*, vol. 41, no. 24, pp. 1327-1328, 2005.
- [6] S. Lee and C. Nguyen, "Influence of automatic level control on micromechanical resonator oscillator phase noise", *Proc. of IEEE International Frequency Control Symposium*, Florida, USA, pp. 341-349, 2003.
- [7] Y. Lin, S. Lee, S. Li, Y. Xie, Z. Ren, and C. Nguyen, "Series-resonant VHF micromechanical resonator reference oscillators", *IEEE J. Solid-St. Circ.*, vol. 39, no. 12, pp. 2477-2491, 2004.
- [8] H. M. Lavasani, P. Wanling, B. Harrington, R. Abdolvand, and F. Ayazi, "A 76 dBOhm 1.7 GHz 0.18 um CMOS tunable TIA using broadband current pre-amplifier for high frequency lateral MEMS oscillators", *IEEE J. Solid-St. Circ.*, vol. 46, no. 1, pp. 224-235, 2011.
- [9] S. Li and S. Chen, "Optimization, simulation, and fabrication of a microgyroscope", *Proc. SPIE*, pp. 36-42, 2001.
- [10] A. Lee, H. Ko, D. Cho, and G. Hwang, "Non-ideal behavior of a driving resonator loop in a vibratory capacitive microgyroscope", *Microelectr. J.*, vol. 39, no. 1, pp. 1-6, 2008.
- [11] H. Ko, "Modeling of non-ideal frequency response in capacitive MEMS resonator", *Journal of Korean Sensors Society*, vol. 19, no. 3, pp. 191-196, 2010.



서진덕 (Jindeok Seo)

- 2012년 ~ 현재 충남대학교 전자공학과, 석사과정



임교목 (Kyounguk Lim)

- 2012년 ~ 현재 충남대학교 세대전자기 관회로학과, 석사과정



고형호 (Hyoungho Ko)

- 2008년 서울대학교 전기공학부(공학박사)
- 2008년 ~ 2010년 삼성전자 반도체사업부, 책임연구원
- 2010년 ~ 현재 충남대학교 전자공학과, 전임강사