

# Temperature Sensor 기반 $\pm 1\%$ 이내의 주파수 정확도를 가지는 18 MHz Relaxation Oscillator의 설계<sup>†</sup>

(A Design of 18 MHz Relaxation Oscillator with  $\pm 1\%$   
Accuracy Based on Temperature Sensor)

김 상 윤\*, 이 주 리\*\*, 이 동 수\*\*, 박 형 구\*\*, 김 홍 진\*\*, 이 강 윤\*\*\*  
(Sang Yun Kim, Ju ri Lee, Dong Soo Lee, Hyung Gu Park, Hong Jin Kim,  
and Kang-Yoon Lee)

**요 약** 본 논문에서는 BGR과 ADC를 사용하여 Temperature Compensation 기능을 가진 Relaxation Oscillator를 제안한다. Relaxation Oscillator는 전류조절을 통해 주파수를 결정한다. 제안하는 Relaxation Oscillator는 온도에 따른 출력 주파수를 보상하기 위하여 온도에 따른 ADC 및 BGR의 출력 코드를 사용하여 전류를 조절한다. 제안하는 Relaxation Oscillator는 CMOS 0.35  $\mu\text{m}$  공정으로 설계되었으며, 면적은 240  $\mu\text{m}$  x 210  $\mu\text{m}$  이다. 전류 소모는 공급전압인 5 V에서 600  $\mu\text{A}$ 이며, 온도에 대한 출력 주파수는  $\pm 1\%$ 이내의 정확도를 가진다.

**핵심주제어** : Relaxation Oscillator, 온도 보상, 정확도, CMOS

**Abstract** In this paper, a Relaxation Oscillator with temperature compensation using BGR and ADC is presented. The current to determine the frequency of Relaxation Oscillator can be controlled. By adjusting the current according to the temperature using the code that is output from the ADC and BGR, was to compensate the output frequency of the temperature. It is fabricated in a 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS process with an active area of 240  $\mu\text{m}$  x 210  $\mu\text{m}$ . Current consumption is 600  $\mu\text{A}$  from a 5 V and the rate of change of the output frequency with temperature shows about  $\pm 1\%$ .

**Key Words** : Relaxation Oscillator, Temperature Compensation, Accuracy, CMOS

## 1. 서 론

<sup>†</sup> 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음.

(NIPA-2013-(H0301-13-1013))

본 연구는 반도체설계교육센터(IDEC)의 지원을 받아 수행되었음.

\* 성균관대학교 정보통신대학, 제1저자

\*\* 성균관대학교 정보통신대학, 공동저자

\*\*\* 성균관대학교 정보통신대학, 교신저자(klee@skku.edu)

최근 들어, 생체센서, 마이크로컴퓨터, DDR I/F 및 HDMI와 같은 고속 인터페이스 및 SoC등을 포함한 어플리케이션에서 저비용 및 저면적을 위해 온-칩 기준 발생기가 요구되고 있다. 따라서 온-칩 기준 발생기 실현을 위해 relaxation oscillator를 포함하여, RC oscillator가 CMOS 공정으로 개발되었다.[4]

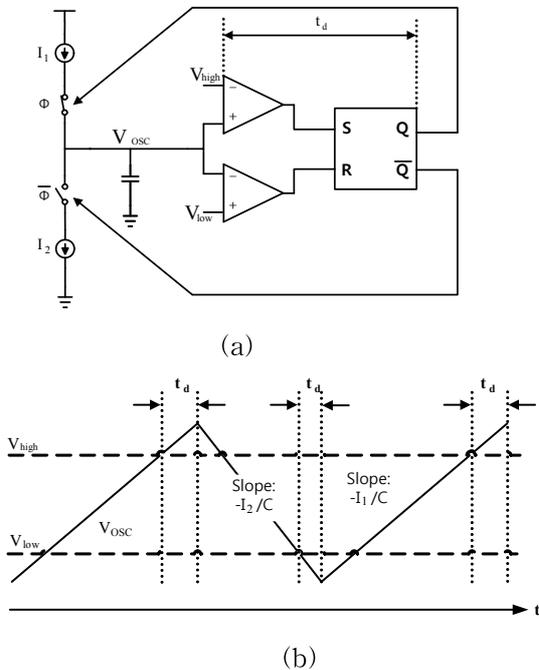
아날로그 회로에 사용되는 oscillator는 크게 LC type의 oscillator와 RC type의 oscillator로 구분할 수

있다. LC oscillator의 경우 고주파수 대역을 필요로 하는 회로에 많이 사용되며, RC oscillator는 비교적 낮은 주파수 대역을 필요로 하는 회로에 많이 사용된다. 저주파수 대역을 사용하는 회로의 경우 Phase Locked Loop(PLL)을 사용하지 않기 때문에 oscillator 자체의 특성이 신뢰성을 가질 수 있어야 한다. 특히 차량용 압력센서 등 온도에 민감한 회로에 사용되는 oscillator의 경우 온도 변화에 대해 일정한 주파수를 생성할 수 있어야 한다.

따라서 본 논문에서는 BGR 및 ADC를 이용하여 온도보상 기법을 적용한 relaxation oscillator 구조를 제안하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 일반적인 Relaxation Oscillator



<그림 1> 일반적인 Relaxation Oscillator

(a) 블록다이아그램 (b) 동작 파형

<Fig. 1> Conventional Relaxation Oscillator

(a) Block Diagram (b) Waveform

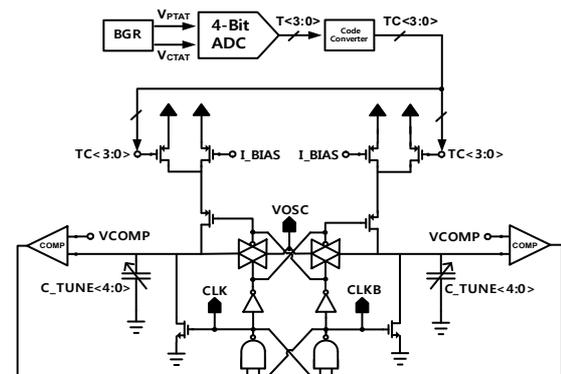
<그림 1>은 일반적인 relaxation oscillator의 기본 구조이다. relaxation oscillator는 커패시터의 충전과

방전의 반복에 의해 동작된다.  $I_1$  전류에 의해 커패시터가 충전이 되면서  $V_{OSC}$  전압이 증가한다.  $V_{OSC}$  전압이  $V_{high}$  전압보다 높아지게 되면 비교기의 출력에 의해 SR-FF가 셋 동작을 하게 되고, oscillator는 커패시터가 방전되는 동작을 한다.  $I_2$  전류에 의해 커패시터가 방전이 되고,  $V_{OSC}$  전압이  $V_{low}$  전압보다 낮아지게 되면 비교기의 출력에 의해 SR-FF는 리셋 동작을 한다. 이 때 다시 oscillator는 커패시터가 충전되는 동작을 한다.

일반적인 relaxation oscillator는 구조가 단순하고, 낮은 주파수 대역에서 낮은 소비 전력을 가지고 동작시킬 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 비교기의 지연 시간(td)가 출력 주파수에 영향을 주기 때문에 고속 동작이 어렵고, 전류에 의해 출력 주파수가 결정되는 구조이므로 온도의 변화가 출력 주파수의 변화에 직접적으로 영향을 준다는 단점을 가지고 있다.

### 2.2 제안하는 Relaxation Oscillator

#### 가. 온도보상기법을 적용한 Relaxation Oscillator



<그림 2> 온도보상기법을 적용한 Relaxation Oscillator

<Fig. 2> Relaxation Oscillator with Temperature Compensation

<그림 2>는 본 논문에서 제안하고 있는 BGR 및 ADC를 이용하여 온도보상기법을 적용한 relaxation oscillator의 구조이다. BGR 및 ADC를 이용한 온도보상기법은 BGR 내부의 PTAT, CTAT 회로의 온도 변화에 따른 출력을 차동입력 ADC를 통해 디지털 코드

로 변환하여 relaxation oscillator의 전류를 조절하는 기법이다. 이 때 relaxation oscillator 전류를 조절하기 위해 ADC에서 받는 코드는 relaxation oscillator의 온도에 따른 전류 변화량을 고려하여 코드 컨버터를 통해 미리 계산되어 있는 코드 값으로 변환되어 온도보상을 하게 된다.

온도가 낮을 경우 <그림 2>의 VOSC 노드와 VOSCB 노드에 흐르는 전류량이 감소하므로 BGR과 ADC를 통해 출력 되는 온도에 따른 출력 코드를 통해 relaxation oscillator의 PMOS를 조절하여 전류가 더 많이 흐를 수 있도록 구성하였다. 온도가 높을 경우에는 <그림 2>의 VOSC 노드와 VOSCB 노드에 흐르는 전류량이 증가하므로 온도보상회로에서 출력 되는 출력 코드를 통해 PMOS의 전류량을 감소시킴으로써 온도에 대한 보상을 할 수 있도록 구성하였다.

### 나. Relaxation Oscillator 구조

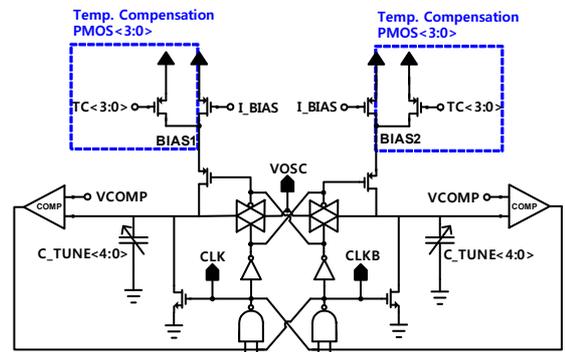
<그림 3>(a)는 본 논문에서 제안하고 있는 relaxation oscillator의 구조이다. Relaxation oscillator의 출력 주파수에 대한 식은 다음과 같다.

$$Q = CV = It \quad (1)$$

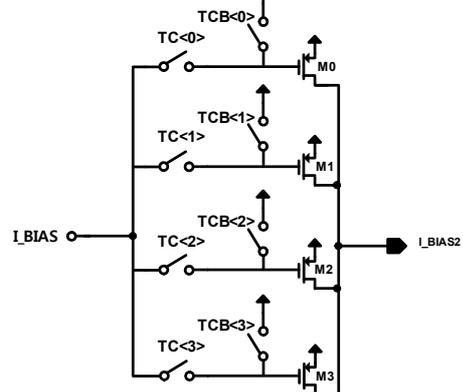
$$t = \frac{CV}{I} (s) \quad (2)$$

$$\therefore f = \frac{1}{t} = \frac{I}{CV} (Hz) \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 알 수 있듯이 전류와 커패시터, 그리고 공급전압에 따라 relaxation oscillator의 주파수가 결정된다. 커패시터와 공급전압은 온도 등 외부요인에 큰 영향을 받지 않지만, 온도 변화에 따른 전류량은 트랜지스터 특성에 의해 변화량을 갖게 된다. 이러한 변화량을 보상해 주기 위해 <그림 3>(b)와 같이 4개의 PMOS를 통해 온도에 따른 전류량을 조절할 수 있도록 설계하였다. 온도가 낮을 경우 VOSC 노드와 VOSCB 노드에 흐르는 전류량이 감소하므로 PMOS를 조절하는 비트를 증가시켜 전류량을 증가시키며, 온도가 높을 경우 VOSC 노드와 VOSCB 노드에 흐르는 전류량이 증가하므로 PMOS를 조절하는 비트를 감소시켜 전류량을 감소시킬 수 있도록 설계하였다.



(a)



(b)

<그림 3> (a) Relaxation Oscillator 구조 (b) 온도보상을 위한 PMOS 구조  
<Fig. 3> (a) Structure of Relaxation Oscillator (b) PMOS Structure for Temperature Compensation

### 다. 온도보상기법

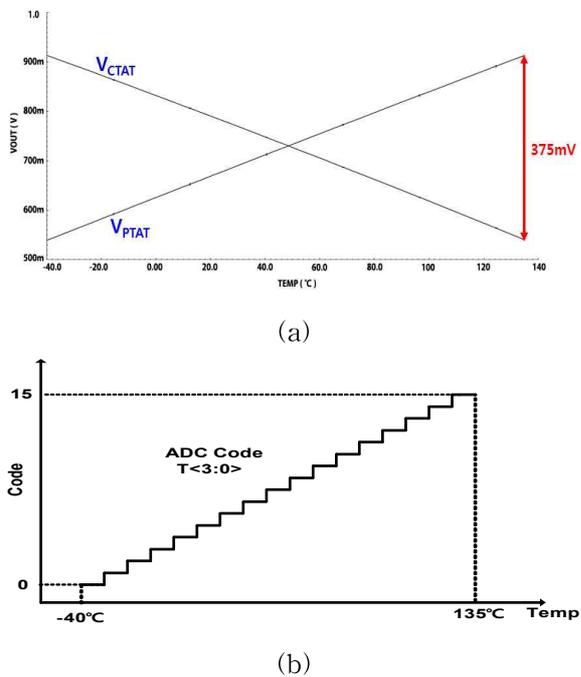


<그림 4> 온도보상 블록다이어그램  
<Fig. 4> Block Diagram of Temperature Compensation

<그림 4>는 온도보상을 위한 BGR과 4-Bit ADC의 블록다이어그램이다. BGR은 내부에 PTAT와 CTAT로 구성되어 있으며, ADC의 출력을 온도코드로 발생시킬 수 있도록 PTAT와 CTAT의 출력이 ADC의 차

동 입력으로 들어가도록 구성하였다.

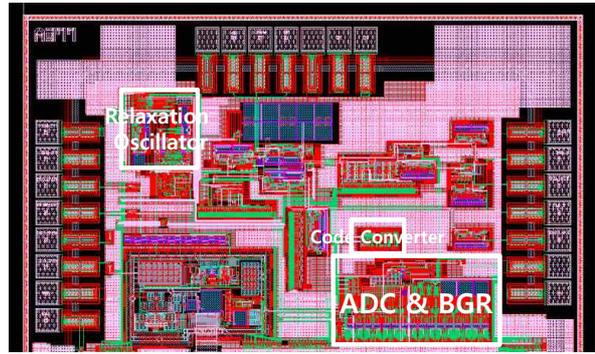
<그림 5>는 온도보상회로의 모의 실험 결과이다. 온도가  $-40^{\circ}\text{C} \sim 135^{\circ}\text{C}$ 로 변함에 따라 BGR의 출력인 PTAT와 CTAT 출력이 선형적으로  $375\text{ mV}$ 가 변화하도록 구성하였다. <그림 5>(b)는 PTAT와 CTAT의 출력을 차동 입력으로 받은 4-Bit ADC의 출력 코드가 온도에 대해 선형적으로 증가하는 것을 확인한 모의 실험 결과이다. relaxation oscillator의 온도에 대한 보상은 BGR의 출력을 차동 입력으로 받은 ADC의 온도에 따른 출력 코드를 이용해 전류를 조절할 수 있도록 구성하였다.



<그림 5> 온도보상회로 모의 실험 결과  
(a) BGR (b) 4-Bit ADC  
<Fig. 5> Simulation Results of Temperature Compensation. (a) BGR (b) 4-Bit ADC

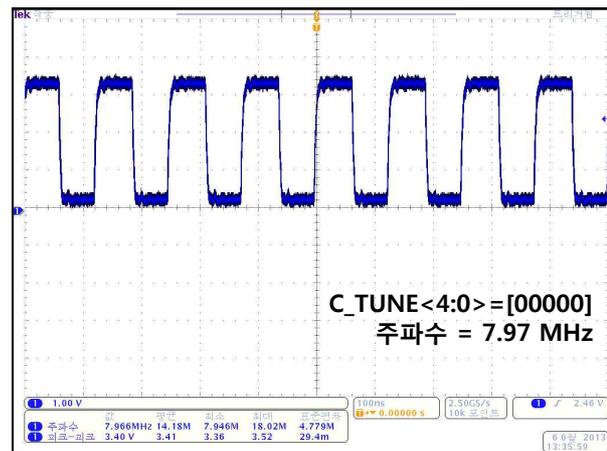
### 3. 실험 결과

<그림 6>은 압력센서의 아날로그 전단부 회로에 본 논문의 온도보상기법을 적용한 relaxation oscillator가 적용된 칩 레이아웃을 나타내며, CMOS  $0.35\ \mu\text{m}$  공정으로 설계되었다. Relaxation oscillator 레이아웃의 면적은  $240\ \mu\text{m} \times 210\ \mu\text{m}$ 이며, 온도보상회로의 레이아웃 면적은  $550\ \mu\text{m} \times 280\ \mu\text{m}$ 이다.

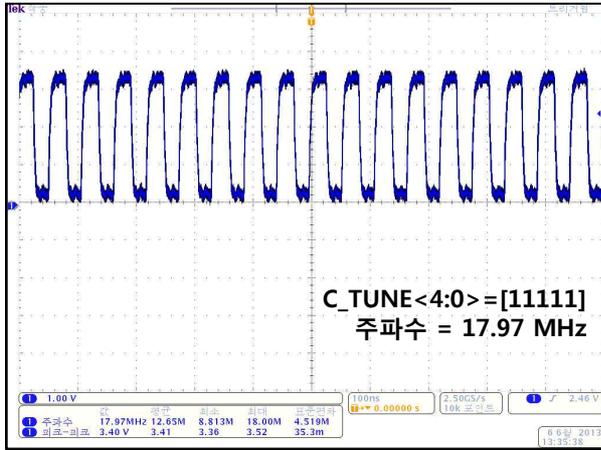


<그림 6> 압력센서의 아날로그 전단부 레이아웃  
<Fig. 6> Layout of Pressure Sensor Analog Front-End.

<그림 7>은 온도보상기법을 적용한 relaxation oscillator의 실험 결과이다. 본 논문에서 제안한 relaxation oscillator는 주파수 조절 커패시터인  $C\_TUNE<4:0>$ 을 통해 주파수 조절이 가능하다.  $C\_TUNE<4:0>$ 의 비트를 증가시킬수록 주파수는 증가하며, 비트를 감소시킬수록 주파수는 감소하도록 설계되었다. <그림 7>(a)의 실험 결과로  $C\_TUNE<4:0> = [00000]$ 일 경우  $7.97\text{ MHz}$ 의 최소 주파수를 출력하며, <그림 7>(b)의 실험 결과로  $C\_TUNE<4:0> = [11111]$ 일 경우  $17.97\text{ MHz}$ 의 최대 주파수를 출력하는 것을 확인할 수 있다.



(a)

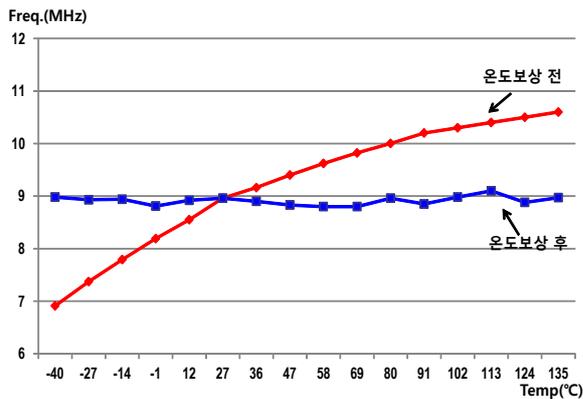


(b)

<그림 7> Relaxation Oscillator 주파수 측정 결과  
(a) 최소 주파수 (b) 최대 주파수

<Fig. 7> The Measured Frequency of Relaxation Oscillator (a) Minimum Frequency (b) Maximum Frequency

<그림 8>은 C\_TUNE<4:0>=[10000]으로 고정하고, 온도보상기법을 적용하기 전과 적용한 후의 실험 결과를 비교한 것이다. 그림의 표기된 부분에서 확인할 수 있듯이 온도보상기법을 적용하기 전에는  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화에 대해 약  $\pm 20\%$ 의 출력 주파수 오차를 발생한다. 이 논문에서 제안하는 온도보상기법인 BGR과 ADC를 이용하여 온도보상기법을 적용하면, <그림 8>의 표기된 부분에서 확인할 수 있듯이



<그림 8> 온도 변화에 따른 출력 주파수 실험 결과  
<Fig. 8> Simulation Results of Output Frequency according to Temperature Variation

$-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화에 대해 약  $\pm 1\%$  정도로 출력 주파수 오차가 감소하게 되는 것을 확인할 수 있다.

<표 1>은 본 논문에서 제안한 relaxation oscillator의 성능과 이전에 게재된 다른 논문의 relaxation oscillator 성능을 비교한 것이다. 제안한 relaxation oscillator는 고속 동작, 온도 보상을 통한 온도에 대한 변화율 감소 등의 이점을 가지고 있어 다양한 응용분야에 사용될 수 있다. 제안하는 relaxation oscillator는  $0.35\text{ }\mu\text{m}$  CMOS 공정으로 설계되었고,  $7.97\text{ MHz} \sim 17.97\text{ MHz}$ 까지의 출력 주파수를 생성시킬 수 있다. 소모 전류는  $600\text{ }\mu\text{A}$ 이며, 온도 보상 기법을 적용하여 온도 변화에 따른 출력 주파수 변화율은  $\pm 1\%$  이내이다. 면적은  $240\text{ }\mu\text{m} \times 210\text{ }\mu\text{m}$ 이다.

<표 1> 성능 요약

<Table 1> Performance Summary

참고 문헌	[1]	[2]	[3]	본 논문
유형	Relaxation	Relaxation	Relaxation	Relaxation
공정	$0.5\text{ }\mu\text{m}$ CMOS	$0.13\text{ }\mu\text{m}$ CMOS	$65\text{ nm}$ CMOS	$0.35\text{ }\mu\text{m}$ CMOS
주파수	$11.6\text{ MHz}$	$3.2\text{ MHz}$	$0.1\text{ MHz}$	$18\text{ MHz}$
공급전압	$3\text{ V}$	$1.5\text{ V}$	$1.2\text{ V}$	$5\text{ V}$
소모 전류	$133\text{ }\mu\text{A}$	$25.6\text{ }\mu\text{A}$	$34\text{ }\mu\text{A}$	$600\text{ }\mu\text{A}$
온도에 대한 변화율	$\pm 2.5\%$	$\pm 0.25\%$	$\pm 1.1\%$	$\pm 1\%$
면적	$0.19\text{ mm}^2$	$0.07\text{ mm}^2$	$0.11\text{ mm}^2$	$0.2\text{ mm}^2$

#### 4. 결론

본 논문은 BGR과 ADC를 이용하여 온도보상기법을 적용한 relaxation oscillator 회로이며, 공정은 CMOS  $0.35\text{ }\mu\text{m}$  2poly 4metal high voltage를 이용하였다. 온도보상기법을 적용한 relaxation oscillator의 온도 변화에 따른 출력 주파수 변화율은  $\pm 1\%$ 이며, 소모 전류는 공급전압인  $5\text{ V}$  전압에  $600\text{ }\mu\text{A}$ 가 소모되었다. 면적은  $240\text{ }\mu\text{m} \times 210\text{ }\mu\text{m}$ 이다.

## References

- [1] A. V. Boas and A. Olmos, "A temperature compensated digitally trimmable on-chip IC oscillator with low voltage inhibit capability," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems (ISCAS), vol. 1, pp. 501-504. Sep. 2004.
- [2] K. Choe, O. D. Bernal, D. Nuttman, and M. He, "A precision relaxation oscillator with a self-clocked offset-cancellation scheme for implantable biomedical SoCs," in IEEE ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 402-403. Feb. 2009.
- [3] F. Sebastiano, L. H. Breems, K. A. A. Makinwa, S. Drago, D. M. W. Leenaerts, and B. Nauta, "A low-voltage mobility-based frequency reference for crystal-less ULP radios," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 44, no. 7, pp. 2002-2009, Jul. 2009.
- [4] Yusuke Tokunaga, Shiro Sakiyama, Akinori Matsumoto, and Shiro Dosho, "An On-Chip CMOS Relaxation Oscillator With Voltage Averaging Feedback", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 45, No. 6, June. 2010.



**이 동 수** (Dong Soo Lee)

- 2012년 건국대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2012년 ~ 현재 성균관대학교 정보통신대학 석사과정

• 관심분야 : RF Transceiver, Pre. Sensor

**박 형 구** (Hyung Gu Park)



- 2010년 건국대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2010년 ~ 현재 성균관대학교 정보통신대학 석박사통합과정

• 관심분야 : RF Transceiver, 무선 충전 시스템, Sigma-Delta ADC



**김 홍 진** (Hong Jin Kim)

- 2010년 충주대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2010년 ~ 현재 성균관대학교 정보통신대학 석박사통합과정

• 관심분야 : RF Transceiver, PMIC

**김 상 윤** (Sang Yun Kim)



- 2013년 건국대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2013년 ~ 현재 성균관대학교 정보통신대학 석박사통합과정

• 관심분야 : RF Transceiver, DigRF

**이 주 리** (Ju ri Lee)



- 2013년 건국대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2013년 ~ 현재 성균관대학교 정보통신대학 석박사통합과정

• 관심분야 : RF Transceiver, VCSEL drivers



**이 강 윤** (Kang-Yoon Lee)

- 2003년 서울대학교 전기공학부 박사 졸업.
- 2003년 ~ 2005년 (주) 지씨티리 씨치 책임 연구원.

• 2005년 ~ 2012년 건국대학교 전자공학부 부교수  
 • 2013년 ~ 현재 성균관대학교 정보통신대학 부교수  
 • 관심분야 : RF 아날로그 집적회로설계, 아날로그/디지털 Mixed Mode 설계

논문 접수 일 : 2013년 09월 13일  
 1차수정완료일 : 2013년 10월 13일  
 게재확정일 : 2013년 10월 14일