

고정밀 고속 하이브리드 온 칩 온도센서

김태우¹ · 윤진국² · 우기찬¹ · 황선광¹ · 양병도^{3*}

A High Accuracy and Fast Hybrid On-Chip Temperature Sensor

Tae-Woo Kim¹ · Jin-Guk Yun² · Ki-Chan Woo¹ · Seon-Kwang Hwang¹ · Byung-Do Yang^{3*}¹School of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Chungbuk National University, Cheongju, Korea²Silliconworks, Daejeon, 34027, Korea^{3*}Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

요 약

본 논문에서는 고정밀 하이브리드 온 칩 온도센서를 제안하였다. 제안된 온도센서에서는 SAR 타입 온도센서와 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서를 혼합하였다. SAR 타입 온도센서는 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서 보다 온도를 찾아가는 속도가 빠르지만 오차가 발생할 확률이 높은 단점이 있고, $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서는 SAR 타입 온도센서 보다 정확하지만 속도가 느린 단점이 있다. 제안된 온도 센서는 두개의 온도 측정방법을 혼합하여 고정밀 고속 온도측정이 가능하다. 또한, 칩 제작 후 온도 오차 값을 메모리회로에 저장하여 온도 오차를 보상하는 회로를 포함하여 온도센서를 구현하였다. 제안된 온도센서는 0.35 μm CMOS 공정으로 제작되었다. 온도 정확도, 소비 전력, 칩 면적은 각각 0.15 $^{\circ}\text{C}$, 540 μW , 1.2 mm^2 였다.

ABSTRACT

This paper presents a high accuracy and fast hybrid on-chip temperature sensor. The proposed temperature sensor combines a SAR type temperature sensor with a $\Sigma\Delta$ type temperature sensor. The SAR type temperature sensor has fast temperature searching time but it has more error than the $\Sigma\Delta$ type temperature sensor. The $\Sigma\Delta$ type temperature sensor is accurate but it is slower than the SAR type temperature sensor. The proposed temperature sensor uses both the SAR and $\Sigma\Delta$ type temperature sensors, so that the proposed temperature sensor has high accuracy and fast temperature searching. Also, the proposed temperature sensor includes a temperature error compensating circuit by storing the temperature errors in a memory circuit after chip fabrication. The proposed temperature sensor was fabricated in 3.3V CMOS 0.35 μm process. Its temperature resolution, power consumption, and area are 0.15 $^{\circ}\text{C}$, 540 μW , and 1.2 mm^2 , respectively.

키워드 : 온도센서, 혼합형, SAR, $\Sigma\Delta$ **Key word** : Temperature sensor, Hybrid, SAR, $\Sigma\Delta$

Received 25 July 2016, Revised 26 July 2016, Accepted 04 August 2016

* Corresponding Author Byung-Do Yang(E-mail:bdyang@chungbuk.ac.kr, Tel:+82-43-261-3583)
Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.9.1747>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

온도센서는 가전제품, 온도측정 기구, VLSI 칩 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 특히, 최근에 연구되고 있는 칩 내장형 CMOS 온도센서[1-5]들은 낮은 제조비용, 기기에서의 면적 감소, 저전력 등의 장점을 가지고 있다. 그러나, 내장형 CMOS 온도센서는 측정온도의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 온도 정확도가 낮은 단점때문에 내장형 CMOS 온도센서는 정밀한 정확도를 요구하는 어플리케이션에서는 사용을 하지 않았다. 온도측정 정확도를 높이기 위해서 $\Sigma\Delta$ 타입의 ADC (Analog-Digital Converter)를 기반으로 한 온도센서들이 연구 되었다[6]. $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서는 온도를 정밀하게 측정할 수 있지만 온도측정 시간이 느린 단점이 있다. 또한, 내장형 CMOS 온도센서에 온도측정 시간을 줄이기 위하여 SAR(Successive Approximation Register) ADC기반으로 한 온도센서가 연구 되었다[7]. SAR 타입 온도센서는 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서보다 빠른 온도 측정 시간과 적은 전력 소비에 장점을 갖고 있지만 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서 보다 큰 오차를 갖는 단점이 있다.

본 논문에서 제안한 온도센서는 $\Sigma\Delta$ 타입과 SAR 타입 온도센서를 혼합하여, 높은 정확성 뿐만 아니라 빠른 온도 측정 시간을 갖는 온도센서를 제안하였다.

II. 본 론

2.1. 온도 측정 원리

그림 1은 본 논문에서 제안한 온도센서의 구조이다. 제안된 온도센서는 비례전류(PTAT: Proportional To Absolute Temperature, 이하 I_{PTAT})와 상보전류(CTAT: Complementary To Absolute Temperature, 이하 I_{CTAT})를 만들어 주는 PTAT-CTAT 발생기, 온도에 따라서 상보전류의 양을 결정하는 전류원 타입의 DAC 회로 (Current Source Digital-Analog Converter Circuit), 상보전류의 비례전류와 상보전류의 크기를 비교하는 비교기(Comparator), 비교기 회로에서 출력 값을 받아서 온도를 디지털로 출력해주는 회로로 구성되어 있다.

온도센서의 측정 원리는 온도가 증가할수록 전류의 크기가 감소하는 특성을 가진 절대온도 상보전류와 온도가 증가할수록 전류의 크기가 증가하는 특성을 가진

절대온도 비례전류를 이용한다. PTAT 전류와 CTAT 전류는 그림 1에서 나타낸 PTAT-CTAT 발생기에서 생성된다. 생성원리는 다음과 같다.

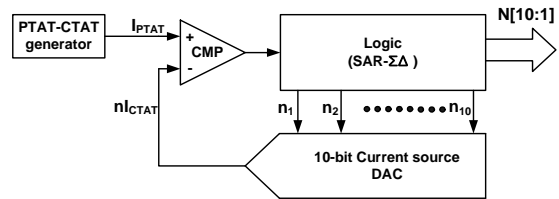


Fig. 1 Proposed temperature sensor

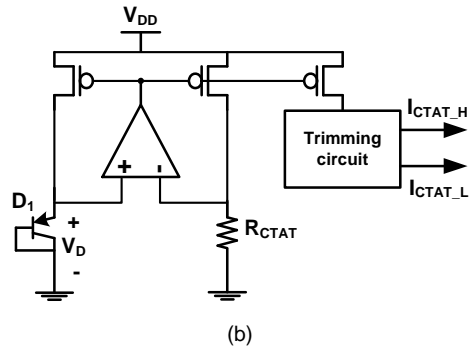
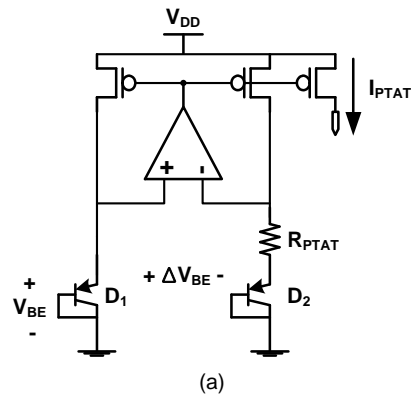


Fig. 2 (a) PTAT generator (b) CTAT generator

그림 2 (a),(b)는 각각 PTAT, CTAT 전류 발생기 회로이다. 발생 원리는 [1]로 대체한다.

온도측정 원리는 그림 3에서 볼 수 있듯이 PTAT-CTAT 발생기에서 생성된 I_{PTAT} 와 I_{CTAT} 두 전류를 비교해서 그 값에 의한 온도를 측정 하는 방식이다. 두 전류가 만나는 지점의 기준 온도보다 낮은 온도에서는 I_{CTAT} 가 I_{PTAT}

보다 크므로 비교기의 (-)입력 전압이 $V_{DD}/2$ 보다 낮아져서 온도 센서의 비교기는 '1'을 출력하고, 두 전류가 만나는 지점의 온도 보다 높은 온도에서는 I_{PTAT} 가 I_{CTAT} 보다 크므로 비교기는 '0'을 출력한다. 이와 같은 점을 이용해서 CTAT 전류의 값을 변경하면서 CTAT 전류와 PTAT 전류가 만나는 교점을 찾으면 그 지점이 현재의 온도 값이 된다. 그림 4에서와 같이 CTAT 전류를 이진 가중치 전류미러회로(Binary weighted current mirror circuit)로 구성해서, 비교기 출력값 '1'과 '0' 값에 따라 $1/2, 1/4, \dots, 1/2^N$ 이 되는 전류를 생성한다. 전류미러를 통해 만들어진 CTAT 전류를 PTAT 전류와 비교해서 PTAT 전류가 CTAT 전류보다 커지는 CTAT 전류를 찾게 된다. 이 과정에서 이진 가중치 전류미러의 코드 값이 정해지게 되고, 이 값이 현재 온도를 나타내는 디지털 온도 값이 된다. 그림 5는 전류미러를 통해 만들어진 CTAT 전류를 조절하면서 PTAT 전류를 찾아가는 과정을 나타내고 있다. PTAT 전류를 쫓아가는 방법은 SAR 타입의 ADC 동작과 같다.

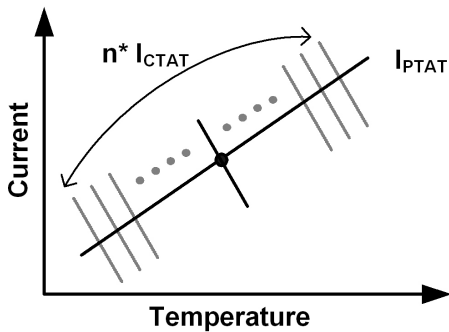


Fig. 3 Temperature searching method

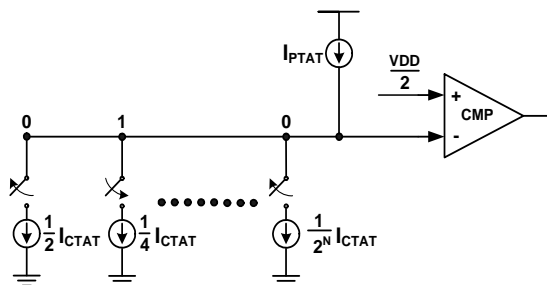


Fig. 4 Temperature searching of SAR type temperature sensor

CTAT 전류의 크기를 변경 시켜서 PTAT 전류와 비교하게 된다. PTAT 전류의 값이 CTAT 전류의 값보다 커지기 시작하는 CTAT 전류를 찾게 된다.

SAR 타입 온도센서의 온도 값을 찾아가는 방식은 간단하고 최근 제안된 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서보다 온도 측정 시간이 빠른 장점이 있고 작은 전력소비가 장점이다. 그러나, SAR 타입 온도센서는 온도 값을 찾는 과정에서 오류가 발생하는 문제점이 있다. 그림 6은 SAR 타입 온도센서에서 오류가 발생하는 과정이다. 그림 6처럼 PTAT 전류와 CTAT 전류의 차이가 적은 부분에서 비교 시간 내에 비교기의 전압이 기준치($=V_{DD}/2$) 이상 또는 이하를 얻지 못하여서 잘못된 전압 값으로 비교가 되어서 오류가 발생한다.

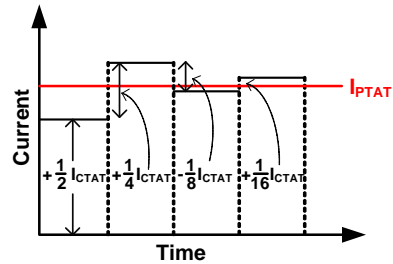


Fig. 5 PTAT current searching by changing the weighted of the CTAT current

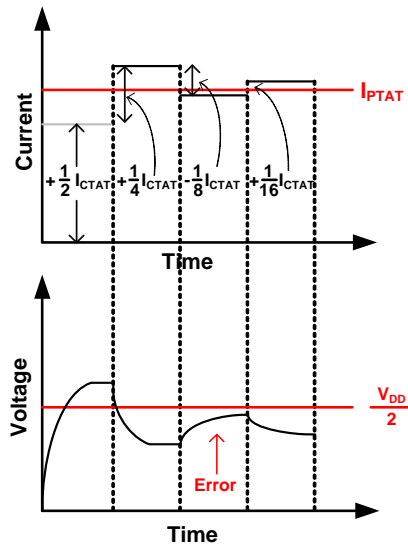


Fig. 6 Error occurrence case in the SAR type temperature sensor

2.2. 제안된 온도 측정 방법

$\Sigma\Delta$ 타입 온도센서는 그림 6과 같은 문제점은 나타나지 않지만 온도 측정 시간이 느려지는 단점이 있다. 온도 코드의 오차를 줄이고 온도 측정 시간을 빠르게 하기 위해서, 본 논문에서는 SAR 타입과 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서를 혼합한 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 처음에는 SAR 타입 온도센서의 방식으로 온도 코드값을 찾는다. SAR 타입 온도센서에서의 오류 발생을 줄이기 위해 SAR 타입 온도센서에서 찾은 전류값에서 일정한 값을 빼서 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서의 방식으로 이용하여 LSB (Least Significant Bit) 단위로 디지털 값을 더하면서 PTAT 전류 값을 찾아 간다. 제안된 방법을 사용하면 전류차가 작은 부분이 마지막 비트가 된다. 반면에 SAR 타입 온도센서는 더 상위 비트에서 오류가 날 수 있으므로 SAR 타입 온도센서 보다 온도 정확도가 높다. 그림 7은 본 논문에서 제안한 방식이다. 제안된 방식은 기존의 SAR 타입 온도센서보다 정확한 디지털 값을 얻을 수 있는 장점이 있고, $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서 사용을 최소화해서 온도 측정 시간도 기존 SAR 타입 온도센서에 근접한다.

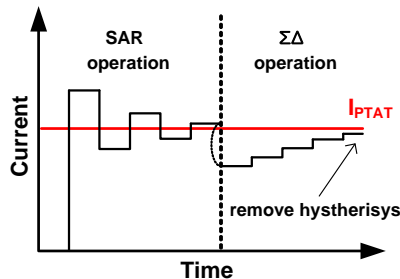


Fig. 7 Proposed digital code principle

그림 8(a)는 SAR 타입 온도센서 방식으로만 온도 값을 나타낸 그래프이고 그림 8(b)는 제안된 방식으로 온도 값을 나타낸 그래프이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이, 제안된 방법으로 온도 값을 찾는 것이 오류를 크게 줄일 수 있다.

2.3. 온도 측정 범위 결정

CTAT 전류를 미세조절 회로(Trimming circuit)를 이용해 I_{CTAT_H} 와 I_{CTAT_L} 를 결정하여 온도 측정 범위를 정하게 된다. 온도 측정 범위를 정할 때 오차가 발생하게 되면 전체적으로 온도에 따른 디지털 코드 값에 오차가 발생하여 정확성이 떨어지게 된다. [7]에서 언급되었던 방법은 저항의 크기를 조절하여 온도 측정 범위를 결정했다. 하지만 이 방법의 단점은 저항이 공정상의 오차를 가지고 있기 때문에, 정확한 측정이 어려운 문제점이 있다. 또한, 저항 자체도 온도에 따라 변하는 소자이기 때문에 저항열을 이용하여 온도 측정 범위를 정하는 것은 부정확하다. 본 논문에서는 이진 가중치 전류 미러 회로를 사용하였다.

그림 9는 본 논문에서 사용된 미세조절 회로이다. 미세조절 회로는 CTAT 회로에서 I_{CTAT_bias} 전류를 받아 들어 전류미러를 이용한 이진 가중치 회로에 인가한다. n개의 스위치는 온도 측정 범위를 결정해주는 역할이며, I_{CTAT_H} 의 크기나 I_{CTAT_L} 의 크기에 따라서 스위치의 입력 값이 정해지게 된다. 그림 10은 미세조절 회로에 의해서 온도 측정 범위를 정하는 모습이다. 필요에 의해서 스위치의 입력을 바꾸어 손쉽게 온도 측정 범위를 바꾸어 측정할 수 있다.

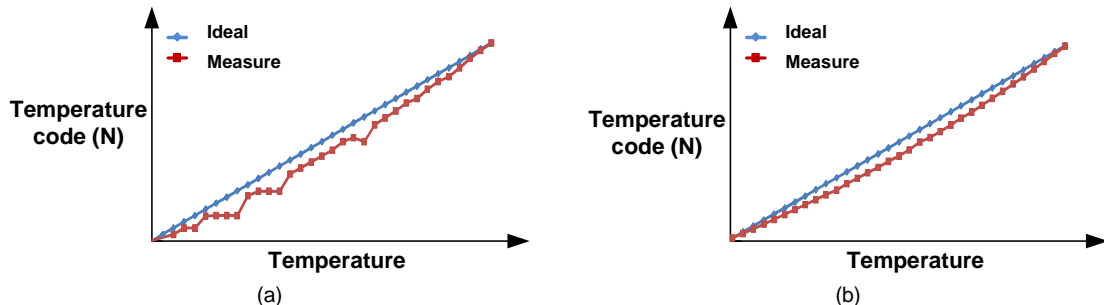


Fig. 8 Temperature code (a) SAR type temperature sensor (b) Proposed temperature sensor

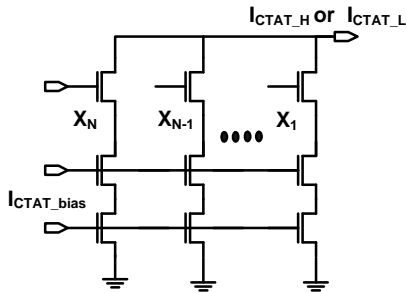


Fig. 9 Trimming circuit

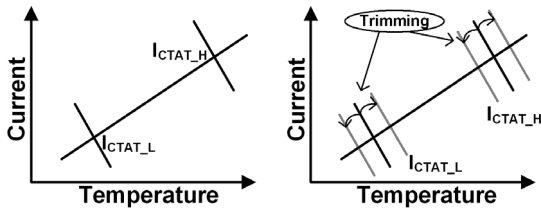


Fig. 10 Temperature searching range using trimming circuit

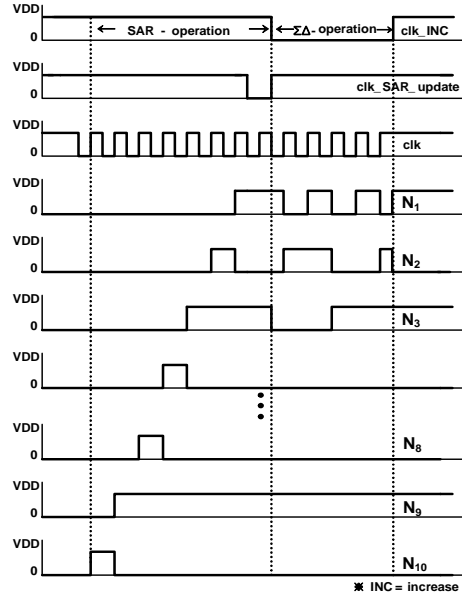


Fig. 12 Control circuit simulation

2.4. 컨트롤 회로

컨트롤 회로는 일반적인 SAR-ADC의 회로와 동일하다. 그림 11 (a) 전체 컨트롤 회로이고 그림 11 (b)는 SAR_1bit에 컨트롤 회로이다. 비교기에서 처음 얻은 출력 값은 첫 번째 SAR_1bit 회로에 저장되어 있다가 n-bit 동작을 할 때까지 차례차례 이동되어 맨 마지막 SAR_1bit 회로에 저장되어 진다. 모든 n-bit 동작을 완료했을 때, 업데이트 신호가 발생하게 되는데, 이때 그동안 비교기에서 입력되어 저장되었던 디지털 값들이 모두 출력 되면서 온도에 따른 디지털 값을 출력한다.

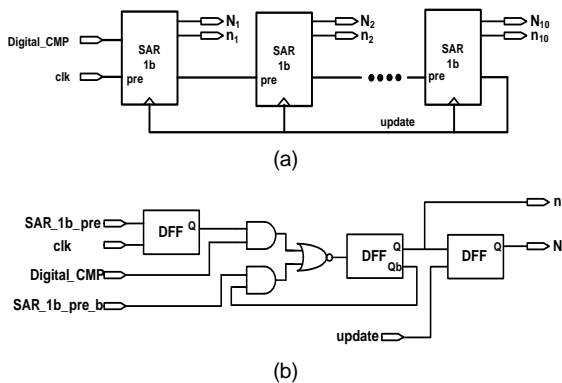


Fig. 11 (a) Control circuit, (b) SAR_1bit circuit

그림 12는 온도센서 회로의 컨트롤 부분 시뮬레이션 결과이다. N값은 최종적으로 나오게 되는 온도코드 값이다. SAR 타입 온도센서로 찾은 온도코드를 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서로 다시 정밀한 온도를 찾는다. SAR 타입 온도센서 동작이 끝나는 신호는 clk_SAR_update를 이용하게 되고, clk_INC 값이 '1'이 되면서 모든 동작을 끝마치게 된다.

2.5. 온도 보정기능

제시한 온도센서는 BJT와 칩 내부의 저항을 이용한 PTAT 전류와 CTAT 전류를 이용하기 때문에, 실제 온도보다 측정된 온도가 차이가 발생하게 된다. 그 차이가 온도 측정 에러가 되고, 그 에러를 보상하기 위해서, 메모리 소자를 이용하였다. 온도 보상신호가 들어오면 외부에서 실제온도를 데이터로 받아서, 온도센서에서 측정된 온도와 실제 온도를 비교한 그 차이 값(오차)를 메모리 소자에 저장시킨다. 그리고 온도 측정 신호가 들어 오면, 온도센서를 통해 온도를 측정하고, 메모리 소자로 부터 측정된 온도에 대한 오차 값을 읽어서 합쳐서 계산한 이후 보정된 온도 측정값을 출력 하게 된다. 그림 13은 온도 보정 회로의 블록 다이어그램이다. 그림 14은 온도 오차를 보정한 실제 측정 그래프로 높은 선형성을 가지는 것을 알 수 있다.

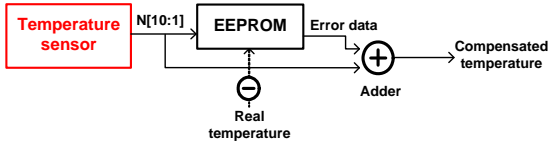


Fig. 13 Block diagram of temperature error compensation

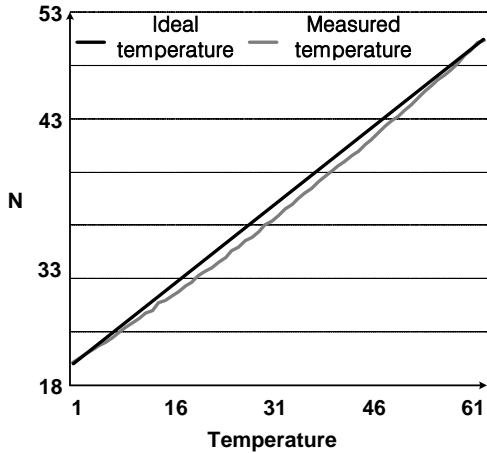


Fig. 14 test waveform

III. 결과

모의실험을 통해 온도 센서가 -64°C 에서 128°C 까지 온도 출력 범위에서 정상적으로 온도 값을 출력 하는 것을 검증한 후 칩 제작을 위해 $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS 공정을 이용하여 레이아웃을 진행하였다. 그림 15는 온도센서 칩 사진이다. 메모리는 SRAM($500\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$)으로 구현하였다.

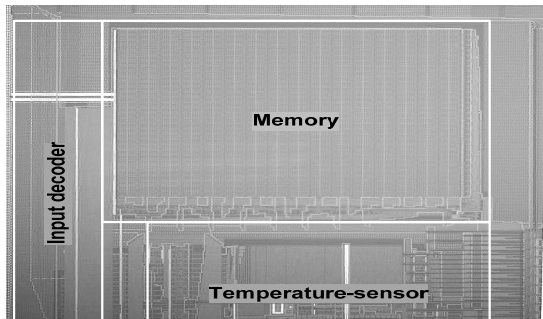


Fig. 15 temperature chip

표 1 제안된 온도센서의 특성 표이다. 레이아웃된 온도 센서의 크기는 메모리 소자포함 패드를 제외하고 $1020\ \mu\text{m} \times 1160\ \mu\text{m}$ 이다. 온도 측정 시간은 $200\ \mu\text{s}$ 이고 온도 측정 정확도는 온도 보정 후 0.15°C 이다.

Table. 1 Features of the proposed temperature sensor chip

Process	0.35 μm CMOS
Supply voltage	3.3V
Temperature range	$-60^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$
Temperature resolution	0.15°C
Power consumption	$540\ \mu\text{W}$
Temperature searching time	$200\ \mu\text{sec}$
Chip Area	1.20mm^2

IV. 결론

본 논문에서는 고정밀 하이브리드 온 칩 온도센서를 제안하였다. 제안된 온도센서에서는 SAR 타입 온도센서와 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서를 혼합하였다. SAR 타입 온도센서는 $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서 보다 온도를 찾아가는 속도가 빠르지만 오차가 발생할 확률이 높은 단점이 있고, $\Sigma\Delta$ 타입 온도센서는 SAR 타입 온도센서 보다 정확하지만 속도가 느린 단점이 있다. 제안된 온도 센서는 두개의 온도 측정방법을 혼합하여 고정밀 고속 온도측정이 가능하다. 또한, 칩 제작 후 온도 오차 값을 메모리회로에 저장하여 온도 오차를 보상하는 회로를 포함하여 온도센서를 구현하였다. 온도센서는 여러 응용분야에서 사용되고 있는데 그 중 칩 내장형 CMOS 온도센서는 제안된 온도센서는 낮은 제조비용, 기기에서의 면적 감소, 저전력 등의 장점을 정확성이 떨어지기 때문에 사용이 되지 않고 있다. 최근에 칩 내장형 CMOS 온도센서[8]는 RFID tag등에 사용이 되어 매우 적은 파워소비를 가지게 연구가 되고 있다. 하지만 정확성문제로 인해 음식관리 하는 응용분야등 온도 정확도가 민감하지 않은 부분에만 국한되어 사용이 되고 있다. 제안된 온도센서는 온도 정확도를 높이고 속도 또한 기존에 온도센서와 비슷하게 측정이 가능한 방법을 제안했다. 제안된 온도센서는 $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS 공정으로 제작되었다. 온도 정확도, 소비 전력, 칩 면적은 각각 0.15°C , $540\ \mu\text{W}$, 1.2mm^2 였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology(2015R1D1A3A01017756).

Production of the chip has been supported by the IDEC (IC Design Education Center).

REFERENCES

- [1] R. JACOB Baker, *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation*, 3th ed. New York, NY: WILEY, 2010.
- [2] A. Bakker, "CMOS smart temperature sensor an overview," in *Proceeding of the IEEE Sensors*, vol. 2, pp. 1423 - 1427, 2002.
- [3] A. Bakker and J. H. Huijsing, "A low-cost high-accuracy CMOS smart temperature sensor," in *Proceeding of the 25th European Solid-State Circuits Conference*, Duisburg, pp. 302 - 305, 1999.
- [4] M. A. P. Pertijs, A. Bakker, and J. H. Huijsing, "A high-accuracy temperature sensor with second-order curvature correction and digital bus interface," in *Proceeding of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Sydney, pp. 368 - 371, 2001.
- [5] W. M. Sansen, F. Op't Eynde, and M. Steyaert, "A CMOS Temperature Compensated Current Reference," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 23, no. 3, pp. 821-824, Jun. 1988.
- [6] F. Fiori and P. S. Crovetto, "A New Compact Temperature-Compensated CMOS Current Reference," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol.52, no. 11, pp. 724-728, Nov. 2005.
- [7] Andre L. Aita and Kofi A. A. Makinwa, "Low-power and accurate operation of a CMOS smart temperature sensor based on bipolar devices and Σ A/D converter," in *Proceeding of Research in Microelectronics and Electronics Conference*, Bordeaux, pp. 133 - 136, 2007.
- [8] Chun-Kuan Wu, Wei-Shan chan and Tsung-Hsien Lin, "A 80 kS/s 36 W resistor-based temperature sensor using BGR-free SAR ADC with a unevenly-weighted resistor string in 0.18 μ m CMOS," in *Proceeding of the VLSI Circuits(VLSIC)*, Honolulu, pp. 222-223, 2011.
- [9] Man Kay Law, Amine Bermark, and Howard C. Luong, "A Sub- μ W Embedded CMOS Temperature Sensor for RFID Food Monitoring Application," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 6, pp. 1246-1255, Jun. 2010.



김태우(Tae-Woo Kim)

2016년 충북대학교 전자공학부 학사 졸업
 2016년 ~ 현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 반도체공학전공 석사 과정
 ※관심분야 : 아날로그 IC 설계, 아날로그 디지털 변환기 설계



윤진국(Jin-Guk Yun)

2007년 충북대학교 전자공학부 학사 졸업
 2009년 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 반도체공학전공 졸업
 2009년 ~ 현재 실리콘웍스 연구원
 ※관심분야 : 아날로그 IC 설계, 전력변환 IC 설계



우기찬(Ki-Chan Woo)

2014년 충북대학교 전자공학부 학사 졸업
2014년 ~ 현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 반도체공학전공 석·박사 통합 과정
※관심분야 : 전력변환 IC 설계, 아날로그 디지털 변환기 설계



황선광(Seon-Kwang Hwang)

2016년 충북대학교 전자공학부 학사 졸업
2016년 ~ 현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 반도체공학전공 석사 과정
※관심분야 : 아날로그 IC 설계, 전력변환 IC 설계



양병도(Byung-Do Yang)

1999년 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공 학사 졸업
2001년 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공 석사 졸업
2005년 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공 박사 졸업
2005년 ~ 2006년 삼성전자 반도체 사업부 책임 연구원
2006년 ~ 2007년 충북대학교 전자공학부 전임강사
2008년 ~ 2011년 충북대학교 전자공학부 조교수
2012년 ~ 2015년 충북대학교 전자공학부 부교수
2016년 ~ 현재 충북대학교 전자공학부 정교수
※관심분야 : 아날로그 IC 설계, 전력변환 IC 설계, 메모리 설계