
CMOS 공정을 이용한 온도 센서 회로의 설계

최진호*

A Design of Temperature Sensor Circuit Using CMOS Process

Jin Ho Choi*

요약

본 논문에서는 온도 센서 및 온도 측정을 위한 제어회로를 설계하였다. 설계된 회로는 기존의 방법들과는 달리 일반적인 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 공정에서 추가 공정없이 제작 가능하도록 설계하였으며, 온도는 디지털 값으로 출력 되도록 구성하였다. 설계되어진 회로는 5volts 공급전압을 사용하였으며, 0.5 μ m CMOS 공정을 사용하였다. 온도 측정을 위한 회로는 PWM(Pulse Width Modulation) 제어회로, VCO(Voltage controlled oscillator), 카운터 그리고 레지스터로 구성되어 있다. PWM 제어회로의 동작 주파수는 23kHz 이며, VCO의 동작 주파수는 416kHz, 1MHz, 2MHz를 사용하였다. 회로의 동작은 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)를 사용하여 확인 하였다.

ABSTRACT

In this work, temperature sensor and control circuit for measuring temperature are proposed. The proposed circuit can be fabricated without additional CMOS fabrication process and the output of proposed circuit is digital value. The supply voltage is 5volts and the circuit is designed by using 0.5 μ m CMOS process. The circuit for measuring temperature consists of PWM control circuit, VCO, counter and register. consisted The frequency of PWM control circuit is 23kHz and the frequency of VCO is 416kHz, 1MHz and 2MHz, respectively. The circuit operation is analyzed by using SPICE.

키워드

Temperature sensor, pulse width modulation, voltage controlled oscillator

I. 서론

전자부품이 점점 고집적화됨에 따라 IC(Integrated Circuit) 내에서 위치에 따라 전류의 크기가 변화하고, 이로 인해 칩 내부의 온도 분포가 변화하게 된다. 일반적으로 온도가 증가하면 MOS의 경우는 문턱전압이 감소하고, 이동도가 감소하여 전기적인 특성이 저하된다. 그러므로 칩 내부에서 위치에 따라 온도 차이가 큰 경우에는 위치에 따른 회로의 전기적인 특성 변화 및 신뢰도에 영향을 미칠 수 있다.

위치에 따른 칩의 온도 분포를 분석하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었고 연구가 진행되고 있다[1, 2, 3]. 기존의 방법들을 살펴보면, 레이저와 같은 장치를 이용하거나 혹은 온도 센서를 칩 내에 추가하여 위치에 따른 온도를 분석하는 것이다. 온도 분석에 있어 외부의 영향을 최소화 할 수 있는 방법은 온도 센서를 칩 내의 여러 곳에 제작하여 측정하는 것이다. 그러나 기존의 연구결과를 살펴보면, 온도 센서 제작을 위해 BiCMOS 공정을 이용하여 온도 센서를 제작하였다.

이는 일반적인 CMOS 제작 공정에 바이폴라 제작 공정이 추가되어야 하므로 칩의 단가가 증가하는 문제가 있다. 표준 CMOS 공정에서 추가 공정 없이 parasitic 수평 혹은 수직 바이폴라 트랜지스터를 사용한 경우도 있으나, 이 경우 레이아웃 면적의 증가로 인하여 전체 칩 면적이 증가하는 문제가 있다.[4, 5] CMOS 공정을 이용하지만, 온도 센서 제작을 위해 산화막의 두께를 아주 얇게 형성하여 온도 센서를 제작하는 경우 또한 회로를 구성하기 위한 CMOS 공정에 온도 센서를 위한 공정이 추가되어야 하는 문제가 있다.

본 논문에서는 표준 CMOS 공정을 이용하고 간단한 바이어스 회로를 이용하여 온도 변화를 측정하고, 이를 디지털 값으로 변환하는 제어회로를 제안하고자 한다. 논문의 구성은 II-1절에서 온도 센서의 구조와 온도 변화에 따른 특성 변화를 시뮬레이션을 통하여 살펴보고, II-2절에서는 측정회로의 구성 및 개념을 소개한다. 그리고 III절에서는 온도센서와 측정회로의 출력을 분석하고 마지막으로 IV절에서 결론을 맺는다.

II. 온도센서 및 측정회로

고집적화된 칩의 경우 트랜지스터의 배치에 따라 특정 위치에서 회로가 동작할 때 전류가 양이 과도하게 증가할 수 있다. 그림 1에서 보듯이 칩 내부의 A 영역에서 과도한 전류가 흐르게 되면 A 영역의 온도는 증가하게 될 것이며, 칩의 위치에 따라 온도 차이가 발생하게 된다. 이는 위치에 따른 트랜지스터의 특성을 변화시키게 되어 회로의 동작 및 신뢰성 특성에 영향을 미치게 될 것이다.

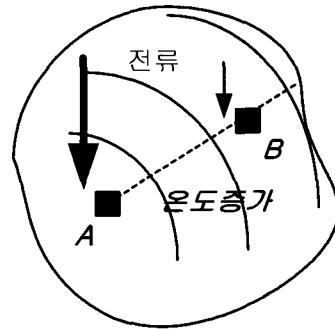


그림 1. 전류의 크기에 따른 온도 변화
Fig. 1. Temperature variation with current

칩 내부의 온도는 그림 1의 A와 B 영역 등에 온도 센서를 제작하여 측정함으로써 분석할 수 있다. 이를 위해서는 온도 센서를 구성하는 회로는 전체 칩 면적에 영향을 미치지 않도록 되도록 작은 크기여야 하며, 또한 일반적인 CMOS 공정으로 제작할 수 있어야 한다.

2-1. 온도 측정을 위한 바이어스 회로

그림 2는 일반적인 CMOS 바이어스 회로이다. 본 논문에서는 기본적인 바이어스 회로를 이용하여 온도 센서로 구동하고자 한다. 그림 2에서 R1의 값이 충분히 크고, MP1과 MP2의 채널 폭의 비가 n이라면 I1과 I2의 전류는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$n \cdot I_0 \exp\left(-\frac{V_{gs1}}{V_t}\right) = I_0 \exp\left(-\frac{V_{gs2}}{V_t}\right) \quad (1)$$

여기서 V_t 는 열전압($=kT/q$)이며, V_{gs1} 과 V_{gs2} 는 MP1과 MP2의 게이트와 소스 간의 전압이다. 식 (1)을 정리하여 다시 표현하면 식 (2)와 같다.

$$V_t \cdot \ln(n) = V_{gs1} - V_{gs2} \quad (2)$$

그리고 MP1과 MP2의 게이트와 소스 사이의 전압은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$V_{gs2} = V_{gs1} - R_1 I_1 \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 이용하여 전류 I_1 를 표현하면 식 (4)와 같이 표현되며, 전류 I_1 과 전류 I_2 의 크기는 동일하다.

$$I_1 = I_2 = (V_t \cdot \ln(n))/R_1 \quad (4)$$

식 (4)에서 저항 R_1 , MP1과 MP2의 채널 폭 n 은 온도와는 무관한 상수이며, V_t 는 온도 증가에 따라 증가하는 값이다. 그러므로 R_1 과 n 을 조절하면 온도에 따른 I_1 의 변화량을 조절할 수 있다.

MP2와 MP4를 통해 흐르는 전류는 MP2와 MP4의 채널 폭 비에 따라 결정된다. 설계된 회로에서는 온도 변화에 따른 출력 전압 폭을 증가시키기 위해 MP4의 채널 폭을 MP2에 비해 180배 증가시켰다.

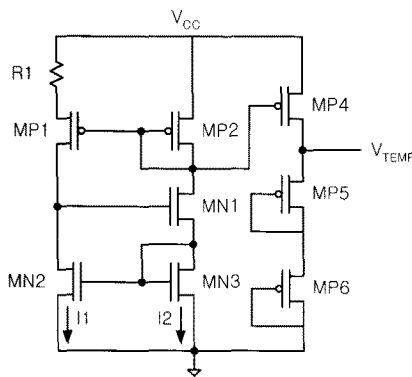


그림 2. 바이어스 회로
Fig. 2. Bias circuit

그림 3은 그림 2의 회로를 온도에 따라 시뮬레이션 한 결과이다[6]. 온도가 -25°C 에서 85°C 로 변화할 때 출력

전압 V_{TEMP} 의 변화는 약 1volt였다. 그림 4는 0°C 와 25°C 를 기준으로 온도 변화에 따른 온도 센서의 출력 값을 계산한 것이다. HSPICE를 이용하여 시뮬레이션한 값과 이론적인 계산 값으로부터 에러를 계산하여 보면, 온도가 0°C 이하로 감소하거나 혹은 25°C 이상으로 증가하면 에러가 증가하나 에러는 1% 이내였다.

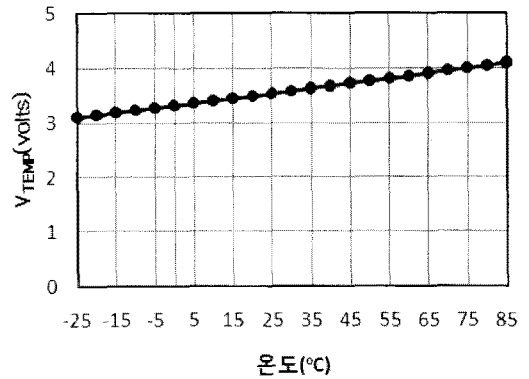


그림 3. 온도변화에 따른 온도센서 출력
Fig. 3. Temperature sensor output with temperature

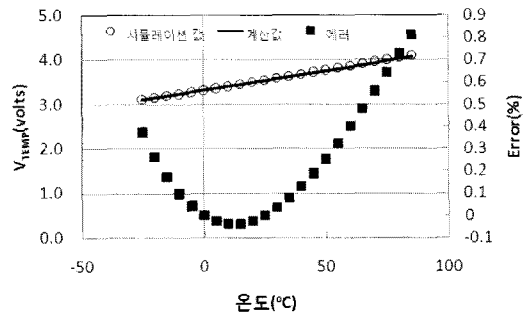


그림 4. 온도변화에 따른 온도센서 에러
Fig. 4. Error of temperature sensor output with temperature

2-2. 온도 센서 제어회로

그림 5는 온도 센서의 출력을 측정하기 위한 회로의 개략도이다. 일반적으로 아날로그 신호를 디지털로 변환하는 ADC(Analog to Digital Converter)를 사용하여 온도 센서의 출력을 디지털로 변환한다. 그러나 이 경우 분해도를 증가시키기 위해서는 아날로그-디지털 변환회로를 디지털 비트에 따라 추가하여야 한다. 그러나 그림

5와 같이 구성하는 경우 ADC를 사용하는 경우에 비해 간단하게 회로를 구성할 수 있으며, 분해능의 증가를 위한 회로의 복잡도 증가도 줄일 수 있다. 그림 5 회로의 동작을 살펴보면 온도 센서의 출력 전압은 삼각파 발생기의 삼각파와 비교되어 온도 변화에 따른 PWM(Pulse Width Modulation) 신호 V_{PWM} 을 생성한다. 즉, 온도가 증가하면 펄스의 폭은 좁아지고, 온도가 낮아지면 펄스 폭은 넓어진다.

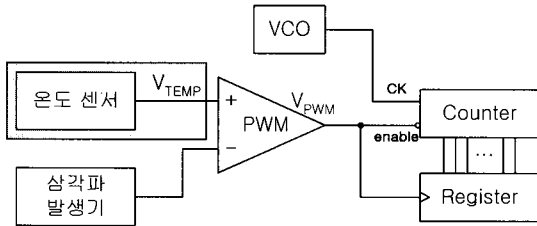


그림 5. 온도 센서 시스템의 개략도
Fig. 5. Block diagram of Temperature sensor system

PWM 회로의 출력신호 V_{PWM} 은 카운터 회로의 인에이블 단자에 인가되고, 클럭 단자에는 VCO의 출력 신호가 인가된다. 그러므로 카운터는 V_{PWM} 신호가 low인 시간동안 VCO의 출력 펄스를 헤아린다. 그리고 V_{PWM} 신호가 low에서 high로 변화하는 상승에지에서 카운터의 출력은 레지스터에 입력된다.

그림 6은 PWM 신호 발생을 위한 제어회로이다. R2, R3, R4의 저항, PMOS MP6에서 MP14, 그리고 NMOS MN4에서 MN11까지의 회로는 삼각파 발생을 위한 회로이다. 삼각파 발생기의 출력 피크 전압은 온도센서의 출력전압이 온도에 따라 약 3volts에서 4volts로 변화하므로 2.8volts에서 4.2volts가 되도록 설계하였다. 그리고 R5, MP15, MP16, MN12는 바이어스 회로이며, 마지막 출력단의 회로는 온도센서의 출력과 삼각파의 신호를 비교하여 PWM 펄스 신호 발생을 위한 비교회로이다.

표 1은 그림 6의 PWM 제어회로에 사용된 소자 별 채널 폭과 길이 값이다. 회로 설계시 0.5 μ m CMOS 공정을 이용하였으므로, CMOS의 채널 길이는 0.5 μ m로 고정하였고 전류 값에 따라 채널 폭을 조절하였다.

그림 5의 개략도에서 VCO 회로는 그림 6의 PWM 제어 회로에서 R2, R3, R4의 저항, MP6에서 MP14, 그리고 NMOS MN4에서 MN11로 이루어진 삼각파 발생기와 동일한 구조이다. 단지, VCO의 출력은 MP12와 MN9의 드

레인 단자가 출력단자이다. 즉, 커패시터를 충·방전하기 위한 스위치 신호가 출력신호이다.

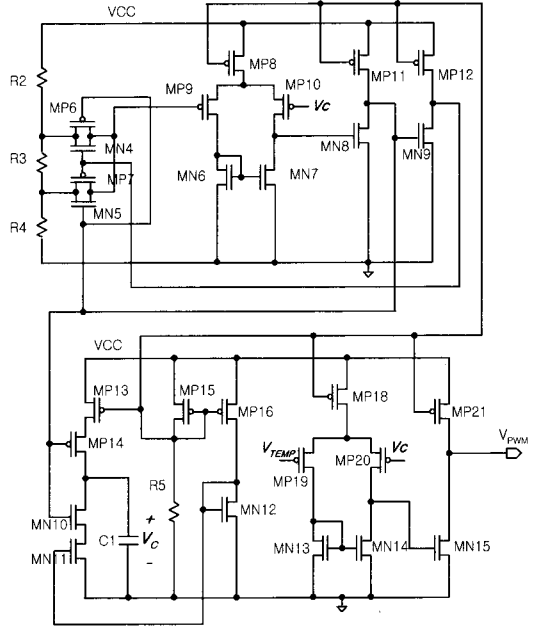


그림 6. PWM 제어회로
Fig. 6. PWM control circuit

표 1. 소자 별 채널 폭과 길이
Table 1. Channel width and length with device

소자	W(μ m)/L(μ m)	소자	W(μ m)/L(μ m)
MP6	1/0.5	MN4	1/0.5
MP7	1/0.5	MN5	1/0.5
MP8	2/0.5	MN6	2/0.5
MP9	4/0.5	MN7	2/0.5
MP10	4/0.5	MN8	2/0.5
MP11	2/0.5	MN9	2/0.5
MP12	2/0.5	MN10	4/0.5
MP13	5/0.5	MN11	5/0.5
MP14	4/0.5	MN12	2/0.5
MP15	2/0.5	MN13	2/0.5
MP16	2/0.5	MN14	2/0.5
MP18	2/0.5	MN15	2/0.5
MP19	4/0.5	MP21	2/0.5
MP20	4/0.5	R5	100k Ω

카운터 회로는 JK 플립플롭을 이용하여 구성하였다 [7]. 카운터 회로에서 PWM 제어회로의 출력 신호를 카운터의 enable 신호로 사용하였으며, VCO의 출력 신호는 카운터의 클럭 신호로 사용하였다. 카운터의 출력은 V_{PWM} 의 값이 low 일 때 VCO의 출력 펄스를 카운터 하다가, V_{PWM} 신호가 high가 되면 카운터의 동작은 정지된다. 카운터의 출력을 저장할 레지스터는 D 플립플롭을 이용하여 구성하였다[7]. V_{PWM} 신호가 low에서 high로 변화할 때 카운터의 출력 값을 저장한다.

III. 온도센서 회로의 특성 및 분석

그림 9는 PWM 신호 발생 회로의 시뮬레이션 결과이다. 온도 센서의 출력 전압 V_{TEMP} 와 삼각파 발생기의 출력 신호인 V_c 의 값을 비교하여 V_{TEMP} 의 전압이 V_c 의 전압에 비해 크면 출력은 low가 되고, 작으면 출력은 high가 된다.

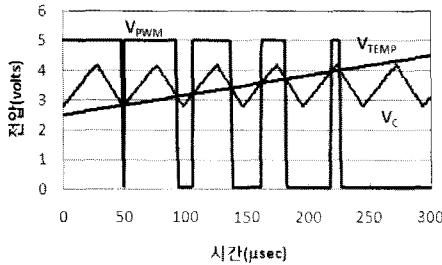


그림 7. PWM 제어회로 출력 특성
Fig. 7. Output signal of PWM control circuit

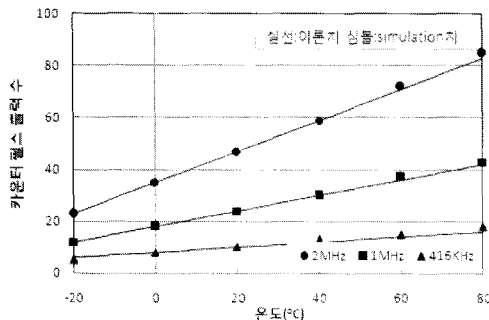


그림 8. 온도 센서 시스템의 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation result of temperature sensor system

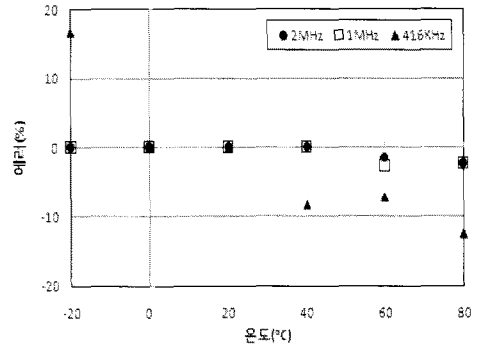


그림 9. 온도변화에 따른 온도 센서 시스템의 에러
Fig. 9. Error of temperature sensor system with temperature

그림 7은 전체 회로의 동작을 시뮬레이션한 것이며, 그림 8은 이론적인 계산 값과 시뮬레이션 값을 비교한 것이다. PWM 제어회로의 주파수는 23kHz가 되도록 설계하였으며, VCO의 주파수는 2MHz, 1MHz 그리고 416kHz가 되도록 설계하여 시뮬레이션 하였다. 이론적인 계산 값의 경우 20°C를 기준으로 계산하였다. 그림 8로부터 VCO의 주파수가 증가함에 따라 출력 값도 증가함을 알 수 있으며, 분해능도 증가함을 알 수 있다. 그림 9는 그림 8로부터 계산 값과 시뮬레이션 값과의 차이를 나타낸 것이다. VCO의 주파수가 416kHz일 때 -20°C에서 에러는 16.7%였다. 그러나 주파수가 1MHz와 2MHz로 증가함에 따라 에러의 최대값은 2.7%와 2.3%로 각각 감소하였다.

본 논문에서 제안한 회로의 경우 온도 변화에 따른 분해능 향상을 위해서는 VCO의 주파수를 증가시키면 되는데, VCO 회로의 주파수는 커패시터의 충·방전과 관계한다. 커패시터의 충·방전은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$Q = CV = IT \tag{5}$$

여기서 C는 충·방전 커패시터, V는 충·방전 피크 전압 차, I는 충·방전 전류, T는 충·시간이다.

식 (5)를 주파수에 대해 표현하면 식 (6)과 같다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{CV}{I} \tag{6}$$

식 (6)에서 동작 주파수는 총 · 방전 커패시터의 크기 감소, 총 · 방전 전류 증가 혹은 총 · 방전 피크 전압 감소 등의 방법으로 증가시킬 수 있다. 그러므로 측정되는 온도 값의 분해능은 위의 방법에 의해 쉽게 향상시킬 수 있다.

그리고 제안한 회로에서 삼각파 발생기 및 PWM 제어 회로를 동작온도에 무관하도록 설계한다면, 온도 센서 및 측정회로를 하나의 칩으로 제작하여 다른 분야에서 응용 또한 가능할 것이다[8, 9].

V. 결 론

CMOS를 이용한 온도 센서 및 측정된 온도 값을 디지털 값으로 출력하기 위한 회로를 제안하였다. 온도 센서의 출력 전압은 회로의 동작온도가 -25℃에서 85℃까지 변화할 때 에러는 1% 이내였다. 온도 센서의 출력을 디지털 값으로 변환하였을 때 VCO의 주파수에 따라 에러는 16.7%에서 2.3%로 감소시킬 수 있었다. 본 논문에서 제안한 회로에서 측정된 온도 값의 분해능은 회로의 동작 주파수를 조절함으로써 쉽게 조절 가능하다. 그리고 추후 온도 센서의 출력 값을 측정하는 회로인 PWM 제어 회로, VCO 회로를 동작온도에 무관하도록 설계하여 온도 센서 및 측정회로를 하나의 칩으로 제작 가능하도록 설계하여 타 응용 분야에서도 사용 가능할 것이다.

참고문헌

[1] J. Altet, A. Rubio, S. Dihair, E. Schaub and W. Claeys, "BiCMOS Thermal Sensor Circuit for Built-in Test Purposes," *Electronics Letters*, vol.34, no.13, pp.1307-1309, 1998.

[2] Cleys, W, et al, "Lasr probing of thermal behaviour of electronic components and its application in quality and reliability testing," *Microelectron Eng.*, pp.441-420, 1994.

[3] Altet, J., Rubio, A and Tamamoto, H., "Analysis of the feasibility of dynamic thermal testing in digital circuits," *Proc. 6th. Asian Test Symp.*, pp.149-154, 1997.

[4] M. Tuthill, "A Switched Crrrent, Switched Capacitor

Temperature Sensor in 0.6 μ m CMOS," *IEEE J. Spolid_State Circuits*, vol. 33, no. 7, July 1996.

[5] M. A. P. Pertijs, A. Niederkorn, X. Ma, B. McKillop, et al, "A CMOS Smart Temperature Sensor with a 3 σ Inaccuracy of $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ from -50°C to 120°C ," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 2, Feb. 2005.

[6] *SPICE user's manual*.

[7] 김수원, 이혁재 공역, "디지털 디자인," *사이텍미디어*, 2002.

[8] 최 진호, "밴드갭 기준 전압을 이용한 CMOS 전압 제어 발전기의 설계," *대한전기학회*, 52권 10호, pp.425-430, 2003.

[9] I. M. Filanovsky and Sean Sidong Cai., "Temperature stable BiCMOS voltage - to - frequency converter," *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and System, ISCA96, Atlanta*, pp.349-352, May, 1996.

저자소개

최 진 호 (Jin Ho Choi)



1985 부산대학교 전자공학과 공학사

1987 KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사

1992 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사

1996 ~ 부산외국어대학교 근무

※관심분야: VLSI 설계