

# BiCMOS 기준 전압 회로를 이용한 전압-주파수 신호 변환회로

論 文  
52C-3-1

## A Voltage-to-Frequency Converter Using BiCMOS Bandgap Reference Circuit

崔 晉 鎬\*  
(Jin-Ho Choi)

**Abstract** - In this work, a Voltage-to-Frequency Converter(VFC) in which the output frequency is proportional to the input voltage is proposed. To obtain the temperature stable characteristics of the VFC circuit is designed by BiCMOS technology. The output frequency range is 24kHz to 65kHz and the difference between simulated and calculated values is less than about 5% for this range of output frequency. The temperature variation of sample output frequencies is less than  $\pm 0.5\%$  in the temperature range  $-25^{\circ}\text{C}$  to  $75^{\circ}\text{C}$ .

**Key Words** : 전압-주파수 변환기, VFC, 밴드갭 기준 전압, BiCMOS

### 1. 서 론

집적화된 센서의 출력을 신호처리하기 위한 신호 변환회로에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다[1-4]. 그리고 이러한 인터페이스 회로에서 온도에 대한 특성을 향상시키기 위한 연구도 동시에 진행되고 있다. 여러 가지 신호 변환 회로 중에서 기존의 전압-주파수 변환회로는 온도에 따른 특성을 향상시키기 위하여 25개의 MOS 트랜지스터와 37개의 바이폴라 트랜지스터를 이용하여 설계되었다. 그러나 회로의 특성을 살펴보면, 상온에서 출력 주파수는 이론적인 값과 약 5% 정도의 차이를 보였으며, 동작온도가  $-25^{\circ}\text{C}$ 에서  $75^{\circ}\text{C}$ 로 변화할 때 온도 변화에 따른 주파수 변화는  $-1.3\%$ 에서  $+1.7\%$ 이었다. 그리고 입력 전압이 증가함에 따라 출력 주파수의 선형성이 유지되지 않고 특정 입력전압에서 주파수의 특성이 왜곡되는 문제점이 있었다. 또한 온도에 대한 특성을 향상시키기 위해 많은 바이폴라 트랜지스터를 사용함에 따라 칩의 면적이 증가하는 단점이 있었다[3].

본 논문에서는 43개의 MOS 트랜지스터와 7개의 바이폴라 트랜지스터를 사용하여 동작온도에 무관한 전압-주파수 변환회로를 설계하였다. 회로의 전체 칩 면적에 큰 영향을 끼치는 바이폴라 트랜지스터의 개수를 기존의 회로에 비해 현저히 감소시킴에 의해서 칩 면적을 감소시켰으며, 또한 SPICE simulation을 통하여 설계되어진 회로의 특성을 확인한 결과 온도에 따른 전압-주파수 변환 특성도 기존의 회로에 비해 향상되었음을 확인할 수 있었다.

### 2. 본 론

#### 2.1 동작온도에 무관한 전압-주파수 변환기의 구성

그림 1은 본 논문에서 제안하는 전압-주파수 변환회로의 개략도이다.

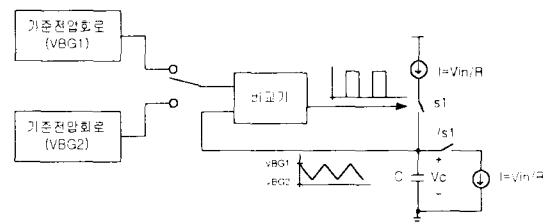


그림 1 제안된 VFC 변환기의 개략도

Fig. 1 Concept of the proposed VFC converter.

BiCMOS를 이용한 두개의 bandgap 기준 전압 회로에서, 한 개의 bandgap 기준 전압은 동작온도에 무관한 전압 ( $V_{BG1}$ )을 가지도록 설계하였으며, 또 한 개의 bandgap 기준 전압은 동작온도에 따라 변화하는 전압( $V_{BG2}$ )을 가지도록 설계하였다. 그리고 입력 전압에 비례하는 전류원 회로를 구성한 다음, 이 전류원으로부터 커패시터를 충·방전시켰다. 커패시터의 충전시 비교전압으로  $V_{BG1}$ 을 사용하였으며, 방전시는  $V_{BG2}$ 를 비교전압으로 사용하였다. 그러므로 커패시터의 전압  $V_C$ 는  $V_{BG1}$ 과  $V_{BG2}$ 의 피크 전압을 가지는 삼각파가 될 것이다. 커패시터에 충전시 걸리는 시간을  $t_f$  이라 하면 충전시간  $t_f$ 은 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$C \cdot V_C = I \cdot t_f \quad (1)$$

\* 正 會 員 : 釜山外國語大學 컴퓨터·電子工學部 副教授·工博  
接受日字 : 2002年 7月 23日  
最終完了 : 2002年 12月 5日

수식 (1)에서  $C$ 는 커패시턴스,  $V_C$ 는 커패시터에 충전되는 전압의 크기 그리고  $I$ 는 커패시터에 충전시 흐르는 전류의 크기이다. 이 때 커패시터 충전 전압은  $V_{BG1}-V_{BG2}$ 이므로 커패시터 충전 시간은 수식 (2)와 같다.

$$t_r = (C \cdot V_C)/I = C \cdot (V_{BG1} - V_{BG2})/I \quad (2)$$

충전시 걸리는 시간  $t_r$ 과 유사하게 방전시 걸리는 시간  $t_f$ 는 수식 (3)과 같이 표현되어진다.

$$t_f = (C \cdot V_C)/I = C \cdot (V_{BG1} - V_{BG2})/I \quad (3)$$

그러므로 충전과 방전시 걸리는 총 시간  $t_{total}$ 는 수식 (4)와 같다.

$$t_{total} = t_r + t_f = 2C(V_{BG1} - V_{BG2})/I \quad (4)$$

커패시터에 충·방전시 걸리는 시간  $t_{total}$ 의 역수를 취하면 커패시터에 충·방전되어지는 신호의 주파수가 되며, 이는 수식(5)와 같이 표현된다.

$$f = I / [2C(V_{BG1} - V_{BG2})] \quad (5)$$

수식 (5)에서 전류  $I$ 는 입력 전압에 비례하는 전류이다. 입력 전압을  $V_{IN}$ 이라 하면 입력 전압에 비례하는 전류는 저항을 이용하여 구성할 수 있으며, 그 값은  $V_{IN}/R$ 이다. 이때 수식 (5)는 수식 (6)과 같이 표현되어진다.

$$f = V_{IN} / (2RC\Delta V) \quad (6)$$

수식 (6)에서  $\Delta V$ 는  $V_{BG1}-V_{BG2}$ 이다. 커패시터에서 출력 신호인 삼각파의 주파수는 커패시터의 충·방전을 위한 스위치 S1과 /S1에 가해지는 펄스 신호의 주파수와 동일하다. 수식 (6)에서 회로의 동작온도가 변화하면 저항 값  $R$ 이 변화하여 출력 주파수는 변화하게 될 것이다. 그리고 저항에 비해서는 온도에 따른 변화율은 아주 작지만, 커패시터도 온도에 따라 변화하게 되므로 삼각파의 주파수는 온도에 따라 변화할 것이다. 이러한 온도의 영향을 배제하기 위해서는 온도의 변화에 따라  $RC\Delta V$ 가 일정한 값이 되도록 하면 된다. 본 논문에서는 온도에 따라  $RC\Delta V$ 가 일정한 값이 되도록  $V_{BG2}$ 를 조절하여, 회로의 동작온도가 변화하더라도  $RC\Delta V$ 가 온도에 따라 일정 값을 유지하도록 설계하였다.

그림 2에서 저항 R1에서 R3, NMOS 트랜지스터 MN1에서 MN10, 바이폴라 트랜지스터 Q1에서 Q7로 구성된 회로는 BiCMOS를 이용한 bandgap 기준 전압 회로이다. Bandgap 기준 전압 회로에서 Q1과 Q2의 에미터 면적이 서로 같고, Q3에서 Q7까지의 에미터 면적에 비해 1/n인 면적을 가진다면 Q2와 Q4에서 전류식은 수식(7)과 같다[5].

$$I_{o,Q1} = n I_{o,Q2} \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 트랜지스터의 에미터 면적비이며,  $I_{o,Q2}$ 와  $I_{o,Q1}$ 는 바이폴라 트랜지스터 Q2와 Q4의 역방향 포화전류이다. 그리고 그림 2에서 MP1에 흐르는 전류를  $I_1$  MP2에 흐르는 전류를  $I_2$ 라고 하면 Q2와 Q4의 베이스-에미터 간의 전압과 흐르는 전류 사이에는 수식 (8)과 (9)가 성립한다.

$$V_{BE2} = V_T \ln(I_1/I_{o,Q2}) \quad (8)$$

$$V_{BE1} = V_T \ln(I_2/I_{o,Q1}) \quad (9)$$

수식 (8)과 (9)에서  $V_T$ 는 thermal voltage( $=kT/q$ )이다. 트랜지스터 MP1과 MP2의 소스 전압이 동일하므로, MP2에 흐르는 전류  $I_2$ 와 Q1, Q2, Q3, Q4 트랜지스터의 베이스-에미터 간의 전압 관계는 수식 (10)과 같이 표현되어진다.

$$(V_{BE1} + V_{BE2}) - (V_{BE3} + V_{BE4}) = I_2 \times R1 \quad (10)$$

Q1과 Q2의 베이스-에미터 간의 전압은 동일하며, 또한 Q3과 Q4의 베이스-에미터 간의 전압도 동일하다. 그리고 MP1과 MP2를 흐르는 전류  $I_1$ 과  $I_2$ 가 동일하므로 수식 (10)에 수식 (7), (8), (9)를 대입하면 수식 (11)과 같이 전류  $I_2$ 가 표현된다.

$$I_2 = (2V_T \ln n) / R1 \quad (11)$$

트랜지스터 MN9와 MN11에 흐르는 전류는 MN6과 MN7에 흐르는 전류와 동일하므로  $V_{BG1}$ 과  $V_{BG2}$ 는 수식 (12)와 (13)처럼 표현되어진다.

$$V_{BG1} = V_{CC} - V_{BE} - (R2/R1)(2V_T \ln n) \quad (12)$$

$$V_{BG2} = V_{CC} - 2V_{BE} - (R3/R1)(2V_T \ln n) \quad (13)$$

여기서  $V_{CC}$ 는 공급 전압이며,  $V_{BE}$ 는 Q5, Q6, Q7의 베이스-에미터 간의 전압이다. Q5, Q6, Q7의 베이스-에미터 간의 전압은 동일하므로  $V_{BE}$ 로 표현하였다.

수식 (12)와 (13)에서 보면,  $V_{BE}$ 는 온도가 증가하면 감소하는 값이고  $V_T$ 는 온도의 증가에 따라 증가하는 값이다. 그러므로 수식 (12)로 부터  $V_{BG1}$ 의 경우 저항 R1과 R2 그리고  $n$ 을 조절하면 동작온도에 무관한 기준 전압을 얻을 수 있다. 그리고 수식 (13)으로부터 저항 R1과 R3 그리고  $n$ 을 조절하면 동작온도에 따라 변화하는 기준 전압을 얻을 수 있다.

그림 2에서 MP11에서 MP19, MN18에서 MN24, C1, R5로 구성된 회로는 입력 전압에 비례하는 전류원을 만드는 회로와 커패시터를 충·방전 시켜 출력 신호를 만들기 위한 회로이다.

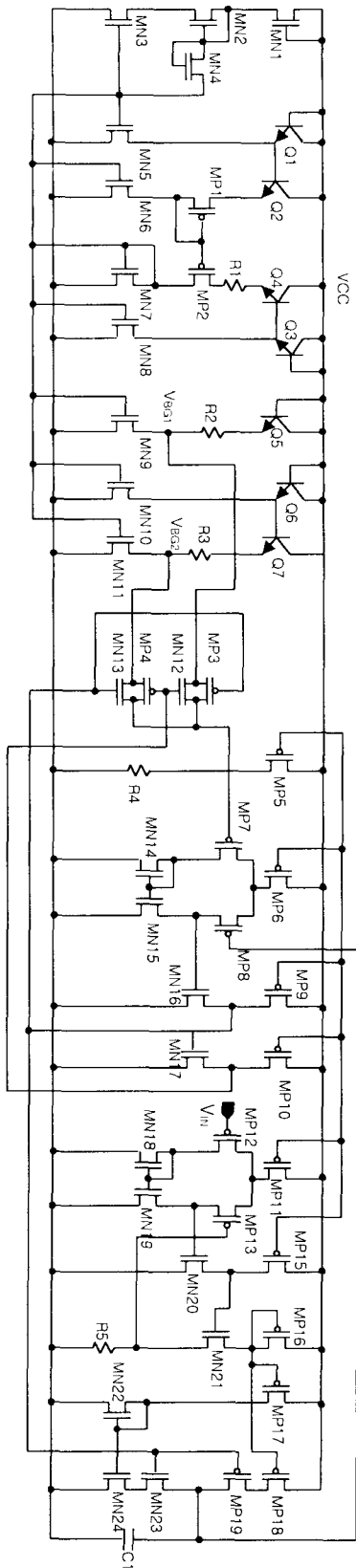
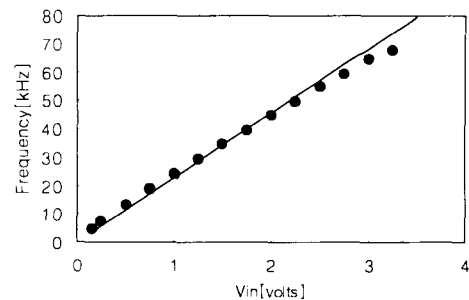


그림 2 VFC 회로  
Fig. 2 VFC circuit.

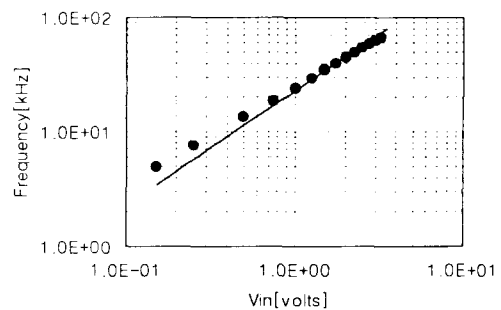
외부에서 인가되는 입력전압은 R5 저항에 인가되고 R5에 흐르는 전류는 입력 전압에 비례하는 전류가 흐르게 된다. 그리고 이 전류와 동일한 크기의 전류가 MP16, MP17, MP18, MN22, MN24를 통해서 흐르게 된다. MP18과 MN24를 통해서 흐르는 전류는 스위치 MP19와 MN23의 on/off에 따라서 C1을 충·방전시킨다. 그리고 C1의 전압은 MP6, MP7, MP8, MN14, MN15로 구성된 비교기에 입력되어  $V_{BG1}$  전압 및  $V_{BG2}$  전압과 비교된다. 그러므로 최종 출력 신호인 비교기의 출력 신호는 R과 C의 온도에 따른 변화량을 고려하여,  $V_{BG2}$ 의 전압 크기를 온도에 따라 조절함으로써 동작온도에 무관한 출력 주파수를 수 있을 것이다.

2.2 전압-주파수 변환회로의 simulation 결과

그림 3은 상온에서 입력전압에 따른 출력 주파수 특성을 SPICE simulation한 결과이다. 그림 3(a)는 linear scale로 출력 특성을 살펴본 것이고 (b)는 log scale로 출력 특성을 살펴본 것이다. 상온에서 입력 전압이 1 volt에서 3 volt 사이를 변화할 때 출력 주파수는 24kHz에서 65kHz 사이를 변화하였다. 그리고 이때 simulation 값과 이론적인 계산 값과의 차이는 5% 이내였다. 이론적인 계산을 위하여 25°C에서 사용된  $V_{BG1}$ 과  $V_{BG2}$ 는 3.48volt와 1.71volt였으며, 이 값은 SPICE simulation으로부터 얻어진 값이다. 입력 전압이 1volt 이하가 되면 이론적인 값과의 오차는 5% 이상으로 다소 증가하였다. 그리고 입력 전압이 3volt 이상이 되면 출력 주파수는 더 이상 증가하지 않았다.



(a)



(b)

그림 3 VFC 회로 특성, (a) 선형 특성 (b) 로그 특성  
Fig. 3 VFC characteristics, (a) linear scale (b) log scale.

그림 4는 동작온도가 -25℃, 50℃ 그리고 75℃일 때, 입력 전압에 따른 출력 주파수의 에러를 SPICE simulation을 통하여 살펴본 것이다.

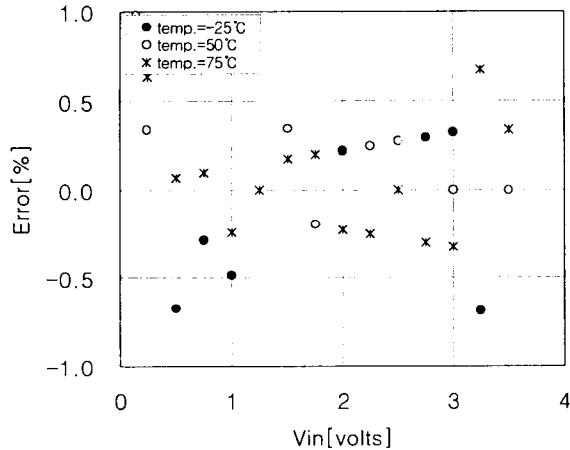


그림 4 온도 변화에 따른 출력주파수 에러 vs. 입력전압  
 Fig. 4 Output frequency error vs. input voltage with temperature.

출력 주파수의 에러의 계산은 수식 (14)를 이용하여 계산하였다.

$$Error[\%] = \frac{f(25^{\circ}C) - f(temp.)}{f(25^{\circ}C)} \times 100 \quad (14)$$

여기서  $f(temp.)$ 는 동작온도가 -25℃, 50℃ 그리고 75℃일 때 출력 주파수의 값이다. 입력 전압이 1volt에서 3volt로 변화할 때 동작 온도의 변화에 따른 출력 주파수 변화는 ± 0.5% 이내였다. 그리고 이때 R5의 온도 민감도  $((\partial R5/\partial T)/R5)$ 는 1000ppm(parts per million)/℃이었다. 그리고 C1과 V<sub>BC2</sub>의 온도 민감도는 각각 35ppm/℃ 그리고 1020ppm/℃ 이었다.

### 3. 결 론

본 논문에서 제안한 전압-주파수 변환 회로는 BiCMOS bandgap 기준 전압 회로, 전압-전류 변환 회로 그리고 충·방전 회로로 구성되어 있다. 설계되어진 회로는 입력 전압이 1volt에서 3volt 사이로 변화할 때 출력 주파수는 24kHz에서 65kHz 이었으며, 이론적인 값과의 차이는 5% 이내였다. 그리고 회로의 동작온도를 -25℃에서 75℃로 변화시킬 때 상온에 대하여 각 온도에서 출력 주파수의 에러는 ±0.5% 이내였다.

### 참 고 문 헌

[1] L.Ristic. : *Sensor technology and devices*, Artech House, Boston, 1994.  
 [2] F.N. Trofimenkoff, Farmarz Sabouri, et al. "A

Squatre-Rooting Voltage-to-Frequency Converter", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 46, no. 5, pp.1208-1211, October, 1997.

[3] I. M. Filanovsky and Sean Sidong Cai., "Temperature Stable BiCMOS Voltage - to - Frequency Converter", in Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and System, ISCAS96, pp.349-352, Atlanta, May, 1996.  
 [4] Elvi Raisanen-Ruotsalainen, Timo Rahkonen and Jutta Kostamovaara, "A low Power CMOS Time-to-Digital Converter", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 30, no. 9, pp. 984-990, September, 1995.  
 [5] 박 홍준 : CMOS 아날로그 집적회로 설계(상), Σ시그마프레스, 1999.

## 저 자 소 개



### 최진호(崔晉鎬)

1963년 2월 19일생. 1985년 부산대학교 전자공학과 졸업. 1985년~1987년 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사 졸업. 1987년~1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업. 1992년~1996년 현대전자 근무. 1996년~1998년 부산외국어대학교 컴퓨터·전자공학부 전임강사. 1998년~2002년 부산외국어대학교 조교수. 2002년~현재 부산외국어대학교 컴퓨터·전자공학부 부교수 근무  
 Tel : 051) 640-3194  
 Fax : 051) 640-3038  
 E-mail : jhchoi@taejo.pufs.ac.kr