

# OTA를 이용한 전류-제어 톱니파 발생기

임동빈\*, 정 원섭\*\*, 송재훈\*\*\*, 김희준\*\*\*

\*청주대학교 전자공학과, \*\*청주대학교 전자·정보통신·반도체 공학부

\*\*\*한양대학교 전자 전기 제어계측 공학부

\*360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

## Current-controllable saw-tooth waveform generator using OTA's

Dong-Bin Im\*, Won-Sup Chung\*\*, Jae-Hun Song\*\*\*, Hee-Jun Kim\*\*\*

\*Dept. of Electronic Eng., \*\*School of Electronic, Information & Communication, Semiconductor Eng., Chongju Univ.

\*\*\*Dept. of Electrical and Computer Eng, Hanyang Univ.

\*36 Naedok-dong, Sangdang-gu, Chongju-shi, 360-764

Tel : (043) 229-8462, E-mail : circuit@chongju.ac.kr

### Abstract

A saw-tooth waveform generator with current-controllable frequency is described. The generator utilizes operational transconductance amplifiers as switching element. It features simple and wide sweep capability. The circuit built with commercially available components exhibits good linearity of current to frequency and relatively low temperature sensitivity.

### I. 서론

전류-제어가 가능한 톱니파 발생기(saw-tooth generator)는 OTA(operational transconductance amplifier)를 이용한 슈미트 트리거 회로와[1],[2] 적분기 그리고, 하나의 스위치를 통해서 실현될 수 있다[3]. OTA는 내부회로가 간단하기 때문에 우수한 고주파 특성을 보이고 그것의 출력을 넓은 바이어스 범위에 걸쳐 선형적으로 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다. 따라서, OTA를 이용한 톱니파 발생기는 회로 구성이 간단하고 바이어스 전류를 제어하여 넓은 범위에 걸쳐 선형적으로 주파수를 제어할 수 있는 특징을 가진다.

본 논문에서는 OTA를 이용해 회로 구성이 간단하고 OTA의 바이어스 전류에 의해 주파수를 선형적으로 제어할 수 있는 톱니파 발생기의 두가지 형태를 제안한다. 첫 번째 회로는 그것의 출력이 0 V와 양의 전압 사이를 스윙하고, 다른 회로는 그것의 출력이 음의 전압에서 양의 전압 사이를 스윙한다. 제안된 회로

들을 컴퓨터 시뮬레이션(simulation)하여 설계의 타당성을 입증했고, 개별 소자들을 이용한 실험을 통해 회로 성능을 확인했다.

### II. 회로 구성 및 동작 원리

#### 1. 출력이 플러스와 마이너스 전압 모두에서 동작하는 톱니파 발생기

제안된 톱니파 발생기의 회로 구성을 그림 1에 나타내었다. 회로에서, OTA<sub>1</sub>과 R<sub>1</sub> 그리고 OTA<sub>2</sub>와 R<sub>2</sub>로 구성된 두 개의 전압 증폭기는 정극환으로 연결되어 슈미트 트리거를 이루고 있다[4]. 이 슈미트 트리거의 출력 전압 특성을 그림 2에 나타내었다. OTA<sub>3</sub>와 타이밍(timing) 커패시터 C는 바이어스 전류 I<sub>BI</sub>에 비례하는 시정수를 갖는 적분기를 구성한다.

만약 슈미트 트리거가 음의 방향으로 포화되었다고 가정하자. 그러면, 슈미트 트리거의 출력 전압은  $L_- = -R_1 I_{BI}$ 이 될 것이다. 이 출력 전압 레벨은 OTA<sub>3</sub>를 양의 방향으로 포화시킬 것이고, 포화 전류 I<sub>BI</sub>는 커패시터 C를 통해 점지로 흐를 것이다. 커패시터에 흐르는 전류는, I<sub>BI</sub>/C의 기울기로 선형적으로 증가하는 적분기의 출력 전압을 발생시킨다. 이 상태는 적분기의 출력 전압이 슈미트 트리거의 플러스 문턱 전압 레벨  $V_{TH} = R_2 I_{BI}$ 에 도달할 때까지 계속 유지될 것이고, 이 출력이 문턱 전압 레벨에 도달하는 순간, 슈미트 트리거의 상태는 바뀔 것이다. 이때 슈미트 트리거는 양의 방향으로 포화될 것이고, 스위치

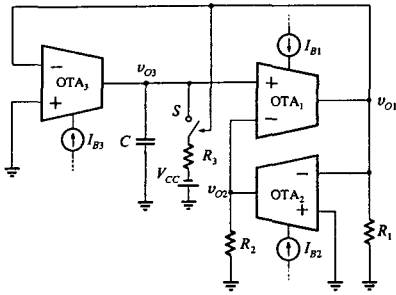


그림 1. 제안된 톱니파 발생기의 회로도

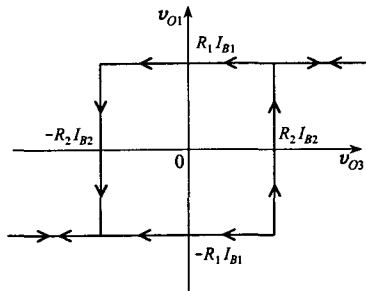


그림 2. 슈미트 트리거의 전달특성

S는 도통될 것이다. 따라서 적분기의 출력은 저항  $R_3$  와  $-V_{CC}$ 에 의해 지속적으로 감소하기 시작할 것이다. 이 상태는 적분기의 출력 전압이 슈미트 트리거의 마이너스 문턱전압 레벨  $V_{TL} = -R_2 I_{B2}$ 에 도달할 때까지 계속 될 것이고, 이 출력이 문턱전압에 도달하는 순간 슈미트 트리거의 출력  $v_{O1}$ 은 마이너스 전압인  $L_- = -R_1 I_{B1}$ 이 되고, 적분기 출력 전압은 선형적으로 증가하면서 새로운 주기를 시작하게 된다. 앞에서 기술한 내용으로부터, 톱니파의 주기를 구하기 위한 식을 유도하면 다음과 같다. 그림 3으로부터,  $T_1$  기간 동안

$$\frac{R_2 I_{B2} - (-R_2 I_{B2})}{T_1} = \frac{I_{B3}}{C}$$

를 얻고, 이 식을 정리하면

$$T_1 = 2CR_2 \frac{I_{B2}}{I_{B3}}$$

을 얻는다. 그림 3으로부터  $T_2$  동안

$$2I_{B2}R_2 = (V_{CC} + I_{B3}R_3)(1 - e^{-T_2/R_3C})$$

을 얻고 이 식을 정리하면

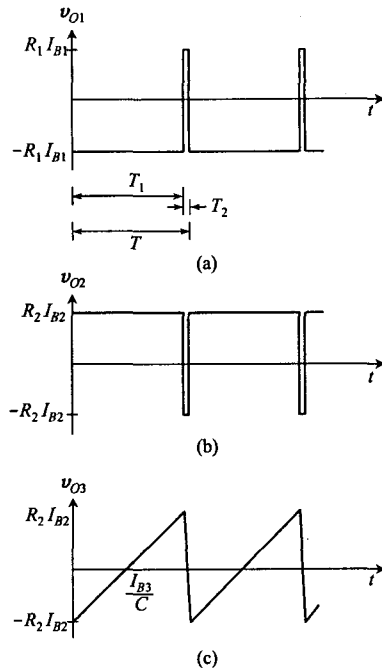


그림 3. 파형 발생기의 출력

$$T_2 = -R_3 C \ln \left( 1 - \frac{2I_{B2}R_2}{V_{CC} + I_{B3}R_3} \right)$$

를 얻는다. 위의 식들로부터 주기

$$T = T_1 + T_2$$

라는 것을 알 수 있다. 일반적으로  $T_1 \gg T_2$ 이므로,

$$T \approx T_1 = 2CR_2 \frac{I_{B2}}{I_{B3}}$$

이 되고 이 식으로부터 발진 주파수  $f$ 를 구하면 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2CR_2} \frac{I_{B3}}{I_{B2}}$$

이 식으로부터 톱니파의 발진 주파수가 OTA<sub>3</sub>의 바이어스 전류  $I_{B3}$ 에 비례한다는 것을 알 수 있다.

## 2. 출력이 플러스 전압에서만 동작하는 톱니파 발생기

출력이 플러스 전압에서만 동작하는 톱니파 발생기

### OTA를 이용한 전류-제어 톱니파 발생기

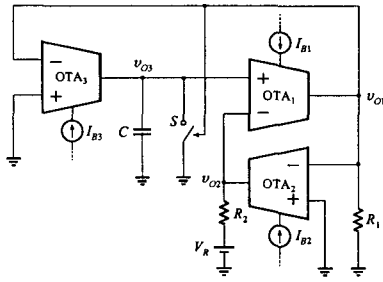


그림 4. 제안된 톱니파 발생기의 회로도

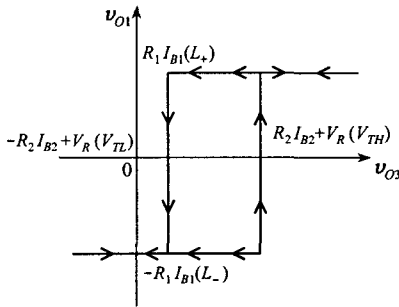


그림 5. 기준 전압  $V_R$ 을 갖는 슈미트 트리거의 전달특성

의 회로도를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 회로는 OTA<sub>1</sub>과 R<sub>1</sub>, OTA<sub>2</sub>와 R<sub>2</sub>, 그리고 기준 전압 V<sub>R</sub>을 갖는 슈미트 트리거, 그리고 OTA<sub>3</sub>와 C로 이루어진 적분기로 구성되어 있다. 기준 전압을 갖는 슈미트 트리거의 입·출력 전달 특성을 그림 5에 나타내었다. 회로는 앞에서 살펴본 톱니파 발생기와 유사하게 동작한다. 주기를 구하기 위한 식을 세우면, 그림 6으로부터 T<sub>1</sub>기간 동안

$$\frac{(R_2 I_{B2} + V_R) - (R_2 I_{B2} - V_R)}{T_1} = \frac{I_{B3}}{C}$$

을 얻고, 이 식을 정리하면 주기

$$T = 2CR_2 \frac{I_{B2}}{I_{B3}}$$

을 얻는다. 위의 식으로부터 주파수 f를 구하면 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{2CR_2} \frac{I_{B3}}{I_{B2}}$$

위의 식으로부터 톱니파의 발진 주파수가 OTA<sub>3</sub>의 바이어스 전류 I<sub>B3</sub>에 정확하게 비례한다는 것을 알 수

있다.

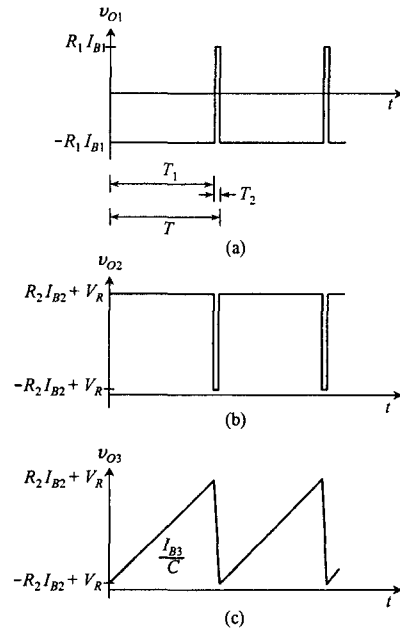


그림 6. 파형 발생기의 출력

### III. 실험 결과 및 고찰

톱니파 발생기를 P-spice를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 동작 원리와 성능을 확인했다. 시뮬레이션에서 사용한 OTA는 LM13600, 스위치는 MC14066이었다. 타이밍 커패시터 C는 1 nF 그리고 저항 R<sub>1</sub>과 R<sub>2</sub>는 각각 50 kΩ을 사용하였고 모든 실험은 ±5 V의 공급기 전압에서 실행되었다. 그림 1에 보인 톱니파 발생기의 회로에서 I<sub>B1</sub>과 I<sub>B2</sub>를 50 μA로 고정시키고 I<sub>B3</sub>를 가변시켰을 때 주파수의 변화를 그림 7에 나타내었다. 이 그림으로부터, 500 Hz에서 19 kHz까지의 범위 내에서, 제안된 발생기의 비선형성은 6.3%보다 작은 특성을 보인다. 이 비선형성은 OTA<sub>3</sub>의 바이어스 전류와 출력 전류 사이의 비선형적인 관계에 의해서 발생하고, 또 OTA<sub>1</sub>과 OTA<sub>2</sub>로 구성된 슈미트 트리거의 스위칭 지연에 의해서 발생한다. 15 °C에서 35 °C까지의 온도 변화에 따른 발진 주파수의 온도 안정성을 그림 7에 점선으로 나타내었다. 안정성은 500 Hz에서 19 kHz까지에 걸쳐 280 ppm/°C 내에서 유지된다. I<sub>B3</sub>가 50 μA일 때에 브레드보드 실험을 하여 측정된 사진을 그림 8에 나타냈다.

그림 4에 보인 톱니파 발생기의 회로에서 기준전압 V<sub>R</sub>을 1.3 V로 놓고 나머지 조건을 앞에서 실행한 시뮬레이션과 동일하게 설정한 후 I<sub>B3</sub>를 가변시켰을 때

주파수의 변화를 그림 9에 나타내었다. 이 그림으로부터

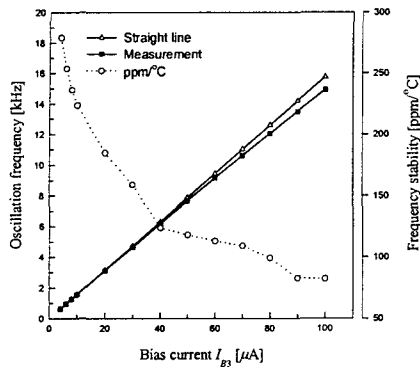


그림 7. 바이어스 전류  $I_{B1}$ 에 대해 측정된 톱니파의 주파수

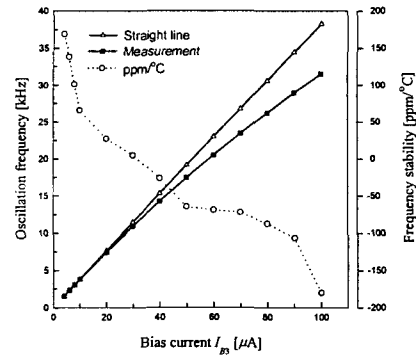


그림 9. 바이어스 전류  $I_{B1}$ 에 대해 측정된 톱니파의 주파수

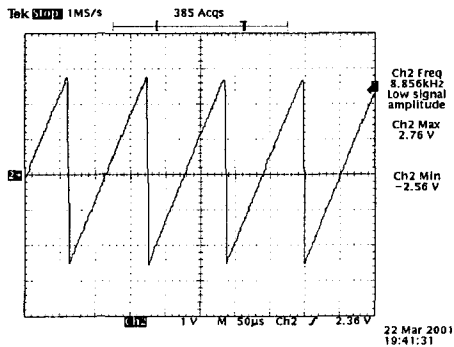


그림 8. 바이어스 전류  $I_{B1}$ 가  $50 \mu A$ 일 때에 측정된 사진

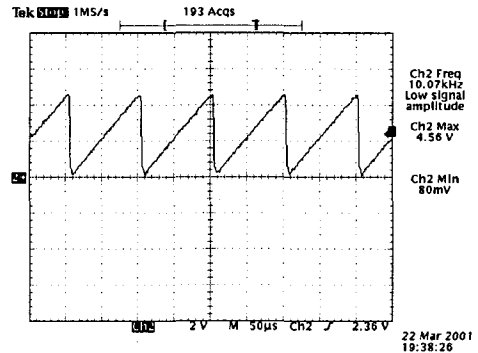


그림 10. 바이어스 전류  $I_{B1}$ 가  $50 \mu A$ 일 때에 측정된 사진

터, 1.5 kHz에서 23 kHz까지의 범위 내에서, 제안된 발생기의 비선형성은 8%보다 작은 특성을 보인다. 15 °C에서 35 °C까지의 온도 변화에 따른 발진 주파수의 온도 안정성을 그림 9에 점선으로 나타내었다. 안정성은 1.5 kHz에 23 kHz까지에 걸쳐 170 ppm/°C내에서 유지된다. 그리고  $I_{B1}$ 가  $50 \mu A$ 일 때 브레드보드 실험을 하여 측정된 사진을 그림 10에 나타냈다.

#### IV. 결론

OTA를 이용한 슈미트트리거와 적분기를 이용해 두 가지형태의 톱니파 발생기를 제안하고, 시뮬레이션과 브레드보드 실험을 통해 이들의 동작을 확인하였다. 실현된 톱니파 발생기는 비교적 회로 구성이 간단하고, 온도 특성이 양호하다. 또한 제안된 톱니파 발생기의 주파수는 OTA의 바이어스 전류에 따라 선형적으로 제어될 수 있기 때문에 각종 계측 시스템이나 통신 시스템등에 폭넓게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

- [1] J. W. Haslett, Current-switching linear VCO, *Electron Lett.*, vol. 25, pp.139-140, Jan. 1989.
- [2] W.-S. Chung, H.-W. Cha, and K.-H. Kim, Temperature-stable VCO based on operational transconductance amplifiers, *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 1900-1901, Oct. 1990.
- [3] *National Operational Amplifiers Databook*, National Semiconductor Corporation, Santa Clara, CA, 1995.
- [4] K. Kim, H.-W. Cha, and W.-S. Chung, OTA-R Schmitt trigger with independently controllable threshold and output voltage levels, *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1103- 1105, June 1997.