

논문 2007-44SD-7-5

전류-제어 슈미트 트리거를 이용한 전류-제어 톱니파 발생기

(Current-controllable saw-tooth waveform generators using current-tunable Schmitt trigger)

정 원 섭*, 이 명 호*

(Won-Sup Chung and Myung-Ho Lee)

요 약

주파수를 직류 바이어스 전류로 제어할 수 있는 톱니파 발생기를 제안하였다. 제안된 발생기는 연산 트랜스컨덕턴스 증폭기(OTA)를 스위치 소자로 이용하고 있으며, 회로 구성이 간단하면서도 넓은 주파수 스윙 능력을 갖는 특징을 가지고 있다. 발생기 회로를 상용화된 개별 소자들로 구성하여 실험한 결과, 발생기 회로의 전류-대-주파수 전달 특성의 선형성이 우수하고 비교적 낮은 온도 감도를 보인다는 것을 알았다.

Abstract

A saw-tooth waveform generator whose frequency can be controlled with a dc bias current is proposed. The generator utilizes operational transconductance amplifiers (OTA's) as switching element. It features simple and wide sweep capability. The circuit built with commercially available components exhibits good linearity of current-to-frequency transfer characteristics and relatively low temperature sensitivity.

Keywords: Switching circuit, Saw-tooth waveform generator, Schmitt trigger, Integrator, Operational transconductance amplifier,

I. 서 론

톱니파 발생기는 계측 및 통신 시스템에 사용되는 기본 회로이다. 연산 증폭기와 스위칭 트랜지스터로 구성되는 일반적인 톱니파 발생기는, 회로 구성은 간단하지만 발진 주파수를 전기적으로 제어하는 것이 어렵기 때문에 그 응용이 제한적이다^[1~3]. 바이어스 전류로 발진 주파수를 제어할 수 있는 전류-제어 톱니파 발생기는 OTA(operational transconductance amplifier)를 이용한 슈미트 트리거 회로와 적분기로 실현될 수 있다^[4]. 이 전류-제어 톱니파 발생기는 우수한 고주파 특성과 넓은 스위프(sweep) 범위를 보인다는 장점을 가지고 있지만, 발진 주파수가 공급기 전압에 직접적으로 영향 받는다

는 단점과 주파수-대-전류 특성의 선형성이 좋지 않다는 단점도 가지고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 단점들을 극복한 두 가지 형태의 새로운 전류-제어 톱니파 발생기 회로들을 제안한다. 첫 번째 회로는 그것의 출력이 플러스 전압과 마이너스 전압 사이에서 스윙(swing)하고, 다른 회로는 그것의 출력이 플러스 전압과 접지 전압 사이에서 스윙한다. 제안된 회로들을 상용화된 개별 소자들을 사용하여 실험하였고, 실험 결과를 통해 설계 이론의 타당성과 회로 성능을 확인했다.

II. 본 론

1. 출력이 플러스와 마이너스 전압 모두에서 스윙하는 톱니파 발생기

제안된 톱니파 발생기의 회로 구성을 그림 1에 나타내었다. 회로에서, OTA_1 과 R_1 그리고 OTA_2 와 R_2

* 정희원, 청주대학교, 전자정보공학부
(School of Electronics and Information Engineering
Cheongju University)
접수일자: 2006년4월7일, 수정완료일: 2007년6월18일

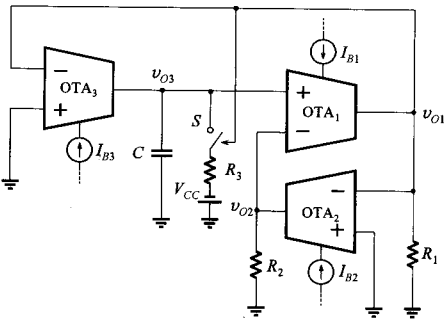


그림 1. 전류-제어 톱니파 발생기의 회로도
Fig. 1. Circuit diagram of a current-controllable saw-tooth waveform generator.

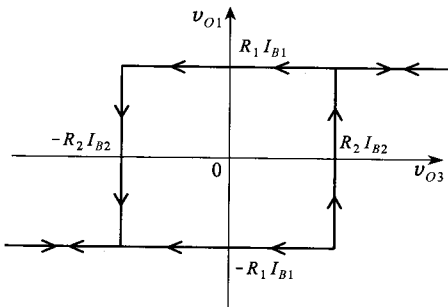


그림 2. 정귀환으로 연결된 두 개의 OTA-R 전압 증폭기로 구성된 슈미트 트리거의 전달 특성
Fig. 2. Transfer characteristic of the Schmitt trigger composed of two OTA-R voltage amplifiers connected in positive-feedback manner.

로 구성된 두 개의 전압 증폭기는 정귀환으로 연결되어 슈미트 트리거를 이루고 있다^[5]. 이 슈미트 트리거의 입·출력 전달 특성을 그림 2에 나타내었다. 슈미트 트리거의 포화 레벨이 OTA₁의 바이어스 전류 I_{B1} 에 정비례하는데 반해, 문턱 레벨이 OTA₂의 바이어스 전류 I_{B2} 에 정비례한다는 점에 주목할 필요가 있다. OTA₃와 타이밍(timing) 커패시터 C 는 바이어스 전류 I_{B3} 에 비례하는 시정수를 갖는 적분기를 구성한다.

톱니파 발생기와 연관된 전압 파형들을 그림 3에 나타내었다. 발생기가 어떻게 동작하는 지 알아보기 위해, 슈미트 트리거가 음의 방향으로 포화되었다고 가정하기로 하자. 즉, 슈미트 트리거의 출력 전압이 $L_- = -R_1 I_{B1}$ 로 포화되어 있다고 가정하면, 이 출력 전압 레벨은 OTA₃를 양의 방향으로 포화시킬 것이고, 포화 전류 I_{B3} 는 커패시터 C 를 통해 접지로 흐를 것이다. 커패시터에 흐르는 전류는, I_{B3}/C 의 기울기로 선형적으로 증가하는 적분기의 출력 전압을 발생시킨다. 이 상태는 적분기의 출력 전압이 슈미트 트리거의 높은 쪽 문턱 전압 레벨 $V_{TH} = R_2 I_{B2}$ 에 도달할 때까지 계속 유

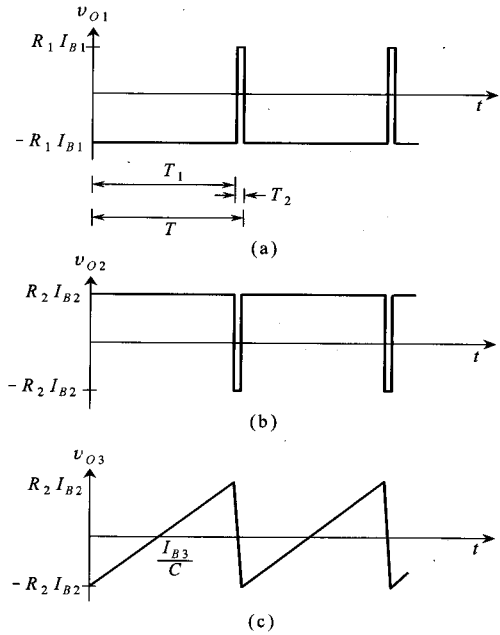


그림 3. 그림 1에 보인 톱니파 발생기의 출력 파형들
Fig. 3. Output waveforms of the saw-tooth waveform generator shown in Fig. 1.

지될 것이다. 적분기 출력이 높은 쪽 문턱 전압 레벨에 도달하는 순간, 슈미트 트리거는 출력 상태를 바꾸어 양의 방향($L_+ = R_1 I_{B1}$)으로 포화될 것이고, 스위치 S 는 도통될 것이다. 따라서 이때부터 커패시터 C 가 저항 R_3 와 $-V_{CC}$ 를 통해 급속하게 방전할 것이고, 이 상태는 적분기의 출력 전압이 슈미트 트리거의 낮은 쪽 문턱 전압 레벨 $V_{TL} = -R_2 I_{B2}$ 에 도달할 때까지 계속될 것이다. 적분기 출력이 낮은 쪽 문턱 전압에 도달하는 순간 슈미트 트리거의 출력 v_{o1} 은 마이너스 전압인 $L_- = -R_1 I_{B1}$ 이 되고, 적분기 출력 전압 v_{o3} 은 선형적으로 증가하면서 새로운 주기를 시작하게 된다.

앞에서 기술한 내용으로부터, 톱니파의 주기를 다음과 같이 구할 수 있다. 그림 3의 동작 파형들로부터, T_1 기간 동안

$$\frac{R_2 I_{B2} - (-R_2 I_{B2})}{T_1} = \frac{I_{B3}}{C} \tag{1}$$

를 얻고, 이 식을 정리하면

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

을 얻는다. 그림 3으로부터 T_2 기간 동안

$$2I_{B2}R_2 = (V_{CC} + I_{B3}R_3)(1 - e^{-T_2/R_3C}) \tag{3}$$

을 얻고, 이 식을 정리하면

$$T_2 = R_3 C \ln \left(\frac{V_{CC} + I_{B3} R_3}{V_{CC} + I_{B3} R_3 - 2I_{B2} R_2} \right) \quad (4)$$

를 얻는다. 식 (2)와 (4)를 결합시키면, 출력 파형의 주기를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = T_1 + T_2 = 2CR_2 \frac{I_{B2}}{I_{B3}} + R_3 C \ln \left(\frac{V_{CC} + I_{B3} R_3}{V_{CC} + I_{B3} R_3 - 2I_{B2} R_2} \right) \quad (5)$$

일반적으로 $T_1 \gg T_2$ 이므로

$$T \approx T_1 = 2CR_2 \frac{I_{B2}}{I_{B3}} \quad (6)$$

로 간단히 표현되고, 발진 주파수 f 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{2CR_2} \frac{I_{B3}}{I_{B2}} \quad (7)$$

이 식으로부터 톱니파의 발진 주파수가 OTA₃의 바이어스 전류 I_{B3} 에 정비례함과 동시에 OTA₂의 바이어스 전류 I_{B2} 에 반비례한다는 것을 알 수 있다.

2. 출력이 플러스 전압에서만 스윙하는 톱니파 발생기

톱니파 발생기를 응용할 때, 경우에 따라서는 출력이 단일 극성으로 스윙하는 것이 요구될 때가 있다. 출력이 플러스 전압에서만 동작하는 톱니파 발생기의 회로를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 회로는 OTA₁과 R₁, OTA₂와 R₂, 그리고 기준 전압 V_R 을 갖는 슈미트

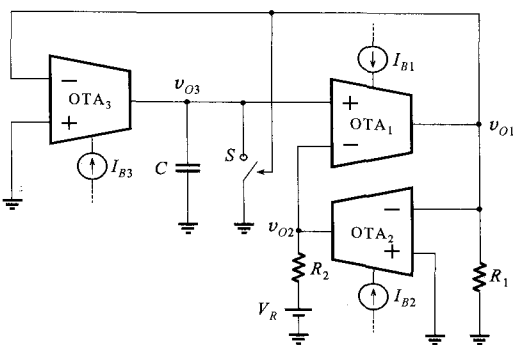


그림 4. 출력이 플러스 전압에서만 스윙하는 톱니파 발생기의 회로도

Fig. 4. Circuit diagram of a current-controllable saw-tooth waveform generator with positive output voltage swing.

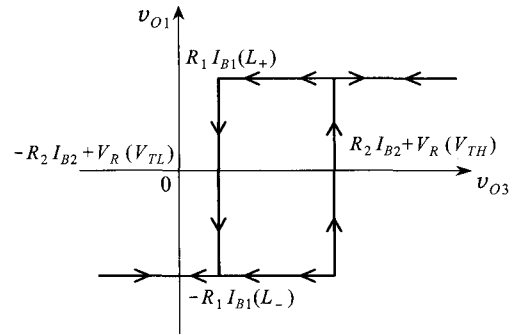


그림 5. 기준 전압 V_R 을 갖는 슈미트 트리거의 전달 특성

Fig. 5. Transfer characteristic of the Schmitt trigger with a positive reference voltage V_R .

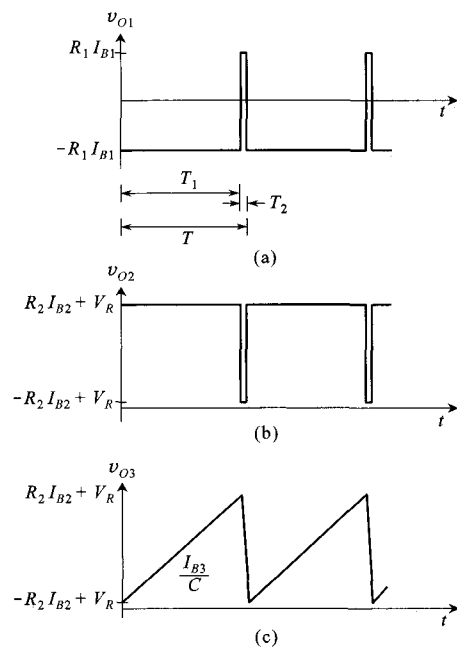


그림 6. 그림 4에 보인 톱니파 발생기의 출력 파형들

Fig. 6. Output waveforms of the saw-tooth waveform generator shown in Fig. 4.

트리거, 그리고 OTA₃와 C로 이루어진 적분기로 구성되어 있다. 기준 전압을 갖는 슈미트 트리거의 입·출력 전달 특성을 그림 5에 나타내었다. 회로는 앞에서 살펴본 톱니파 발생기와 유사하게 동작한다.

파형의 주기를 구하기 위한 식을 세우면, 그림 6의 동작 파형으로부터 T_1 기간 동안

$$\frac{(R_2 I_{B2} + V_R) - (R_2 I_{B2} - V_R)}{T_1} = \frac{I_{B3}}{C} \quad (8)$$

을 얻고, 이 식을 정리하면

$$T_1 \approx 2CR_2 \frac{I_{B2}}{I_{B3}} \quad (9)$$

을 얻는다. 이 경우에도

$T_2 \ll T_1$ 이므로, 파형의 전체 주기 T 는

$$T \approx T_1 = 2CR_2 \frac{I_{B2}}{I_{B3}} \quad (10)$$

로 간단히 표현되고, 발진 주파수 f 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$f = \frac{1}{2CR_2} \frac{I_{B3}}{I_{B2}} \quad (11)$$

식 (11)로부터 톱니파의 발진 주파수가 OTA_3 의 바이어스 전류 I_{B3} 에 정확하게 비례하고 OTA_2 의 바이어스 전류 I_{B2} 에 반비례한다는 것을 알 수 있다.

III. 실험

상용화된 개별 부품들을 이용한 실험을 통하여 그림 1과 4에 보인 톱니파 발생기의 동작 원리와 성능을 확인했다. 실험에 사용된 OTA 는 LM13600, 스위치는 MC14066이었다. 타이밍 커패시터 C 는 1 nF 그리고 저항 R_1 과 R_2 는 각각 50k Ω 을 사용하였고, 모든 실험은 ± 5 V의 공급기 전압에서 실행되었다. 그림 1에 보인 톱니파 발생기의 회로에서 I_{B1} 과 I_{B2} 를 50 μA 로 고정시키고 I_{B3} 를 가변시켰을 때 주파수의 변화를 그림 7에 나타내었다. 이 그림으로부터, 500Hz에서 19kHz까지 범위 내에서, 제안된 발생기의 비선형성은 6.3%보다 작은 특성을 보인다. 이 비선형성은 OTA_3 의 바

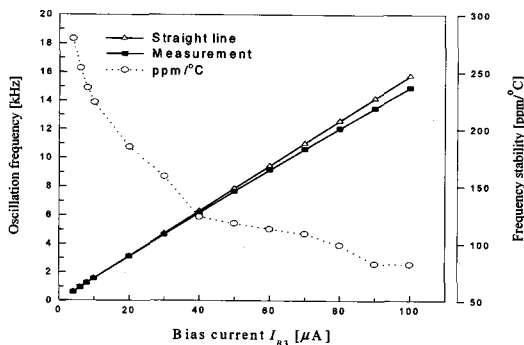


그림 7. 그림 1에 보인 톱니파 발생기의 발진 주파수 대 바이어스 전류 I_{B3} 특성과 주파수 안정성
 Fig. 7. Measured oscillation frequency against bias current I_{B3} and the frequency stability for the generator shown in Fig. 1.

이어스 전류와 출력 전류 사이의 비선형 관계에 의해서 발생하고, 또 OTA_1 과 OTA_2 로 구성된 슈미트 트리거의 스위칭 지연에 의해서 발생한다. 15 $^{\circ}C$ 에서 35 $^{\circ}C$ 까지 온도 변화에 따른 발진 주파수의 온도 안정성을 그림 7에 점선으로 나타내었다. 안정성은 500Hz에서 19kHz까지 걸쳐 280 ppm/ $^{\circ}C$ 이내로 유지된다. I_{B3} 가 50 μA 일 때 오실로스코프로 측정된 파형을 그림 8에 나타내었다.

그림 4에 보인 톱니파 발생기의 회로에서, 기준 전압 V_R 을 1.3 V로 놓고 나머지 조건은 앞에서 실행한 실험과 동일하게 설정한 후 I_{B3} 를 가변시켰을 때 주파수

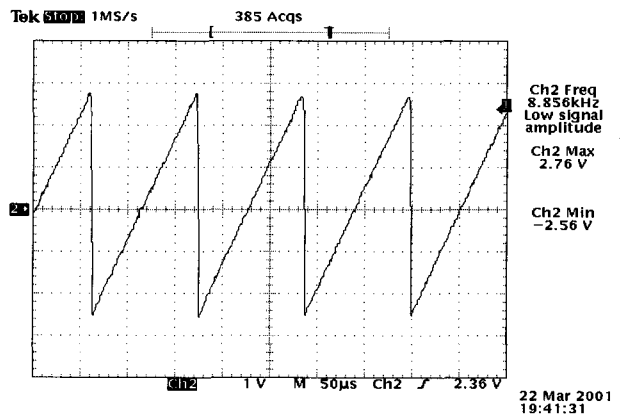


그림 8. 바이어스 전류 I_{B3} 가 50 μA 일 때 실험적으로 관측된 그림 1의 발생기 회로의 톱니파형.
 수직 축: 1 V/div; 수평 축: 50 μs
 Fig. 8. Experimentally observed saw-tooth waveform of the generator shown in Fig.1 when bias current I_{B3} is 50 μA . Vertical: 1 V/div; horizontal: 50 μs .

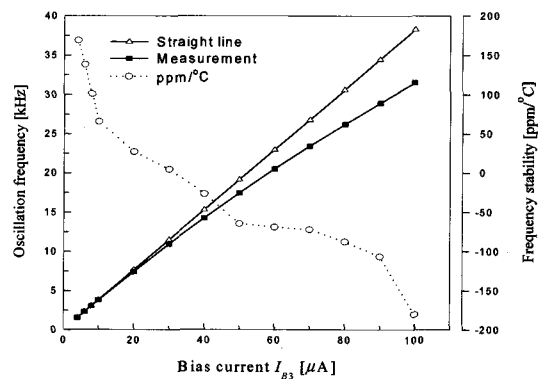


그림 9. 그림 4에 보인 톱니파 발생기의 발진 주파수 대 바이어스 전류 I_{B3} 특성과 주파수 안정성
 Fig. 9. Measured oscillation frequency against bias current I_{B3} and the frequency stability for the generator shown in Fig. 4.

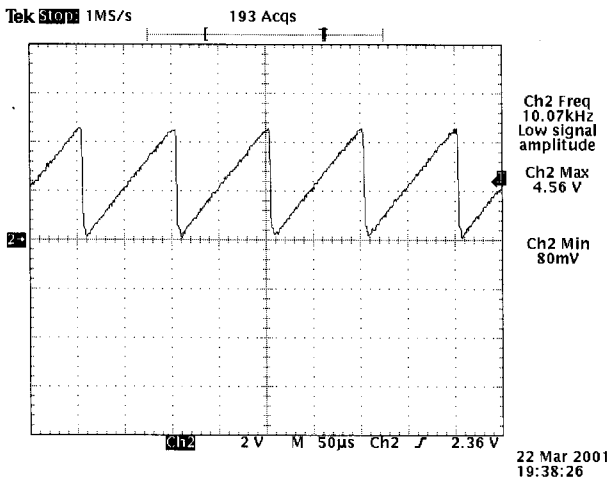


그림 10. 바이어스 전류 I_{B3} 가 $50\mu\text{A}$ 일 때 실험적으로 관측된 그림 4의 발생기 회로의 톱니파형
수직 축: 1 V/div; 수평 축: $50\mu\text{s}$

Fig. 10. Experimentally observed saw-tooth waveform of the generator shown in Fig.4 when bias current I_{B3} is $50\mu\text{A}$. Vertical: 1 V/div; horizontal: $50\mu\text{s}$.

의 변화를 그림 9에 나타내었다. 이 그림으로부터, 1.5kHz에서 23kHz까지 범위 내에서, 발생기는 8%보다 작은 비선형 특성을 보인다. 15°C에서 35°C까지 온도 변화에 따른 발진 주파수의 온도 안정성을 그림 9에 점선으로 나타내었다.

안정성은 1.5kHz에 23kHz까지 걸쳐 170 ppm/°C 이내로 유지된다. I_{B3} 가 $50\mu\text{A}$ 일 때 오실로스코프로 측정된 파형을 그림 10에 나타내었다.

IV. 결 론

OTA를 이용한 슈미트 트리거와 적분기를 이용해 두 가지 형태의 톱니파 발생기를 제안하였고, 브레드보드(breadboard) 실험을 통해 이들의 동작을 확인하였다. 실현된 톱니파 발생기는 비교적 회로 구성이 간단하고, 온도 특성이 양호하다. 또한, 제안된 톱니파 발생기는 그것의 주파수가 OTA의 바이어스 전류에 따라 선형적으로 제어될 수 있기 때문에 각종 계측 시스템이나 통신 시스템 등에 폭넓게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Ashwani Karnal and Krishna Chandra Tripathi, "A novel automatically synchronized Ramp A/D Converter", *IEEE Trans. on Instrum. Meas.*, vol. IM-38, pp. 832-834, June 1989.
- [2] Hiroyuki Torikai and Toshimichi Saito, "A Multiplex Communication System Using Chaotic Pulse-trains with Sawtooth Control", *IEEE International Symposium on Circuit and Systems*, pp. 1065-1068, June 1997.
- [3] H. Kanayama, T. Tsurazawa, N. Mitsumoto, T. Idogaki, and T. Hattori, "Micromanipulator Utilizing A Bending and Expanding Motion Actuator", *Proceeding of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 244-249, 1997.
- [4] "National Operational Amplifiers Databook," National Semiconductor Corporation, Santa Clara, CA, 1995.
- [5] 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.
- [1] Ashwani Karnal and Krishna Chandra Tripathi, "A novel automatically synchronized Ramp A/D Converter", *IEEE Trans. on Instrum.*

저 자 소 개



정 원 섭(정회원)

1977년 한양대학교 전자통신
공학과 학사졸업.

1979년 한양대학교 전자통신
공학과 석사졸업.

1986년 일본 시즈오카대학 전자
과학연구과 박사졸업.

1986년 4월~현재 청주대학교 반도체설계공학과
교수

<주관심분야 : Bipolar 및 CMOS 아날로그 집적
회로, 아날로그 필터, 전류-모드 신호처리회로, 센
서 신호처리회로 설계 등.>



이 명 호(정회원)

1979년 광운공과대학교 전자통신
공학과 학사졸업

1981년 연세대학교대학원 전자공
학과, 공학석사졸업

1984년 연세대학교대학원 전자공
학과, 공학박사졸업

1984년~현재 청주대학교 전자정보공학부 교수
<주관심분야 : 데이터통신 및 보안.>