

# 비선형 전송선로를 이용한 고조파 발생기 성능 비교

## The Performance Comparison of The Harmonic Generators using Nonlinear Transmission Lines

박순우\* · 김홍준\* · 유형석\*

(Soonwoo Park · Hongjoon Kim · Hyongsuk Yoo)

**Abstract** - In this paper, we compared the performance of the Right Handed Nonlinear Transmission Line (RH-NLTL) and Left Handed Nonlinear Transmission Line (LH-NLTL) as a harmonic generator. For a performance comparison, we fabricated both a RH-NLTL and a LH-NLTL harmonic generator whose operational bandwidth is from 0.5 GHz to 1.5 GHz. Under the each condition for the RH-NLTL and the LH-NLTL to maximize second harmonic, the output power of the second harmonic was 9.33 dB lower than the input power for the RH-NLTL and 12.67 dB lower than the input power for the LH-NLTL. Under the each condition for the RH-NLTL and the LH-NLTL to maximize third harmonic, the output power of the third harmonic was 13.33 dB lower than the input power for the RH-NLTL and 14.83dB lower than the input power for the LH-NLTL. Also, we have observed that, generatly, a RH-NLTL is useful in generating various multiple harmonics and a LH-NLTL is useful in generating a specific order of harmonic by adjusting a proper DC bias, input frequency and input power. These tendencies could be a good guideline to use NLTLs as a frequency multiplier.

**Key Words** : RH-NLTL, LH-NLTL, Harmonic generator, Frequency multiplier

### 1. 서론

정보통신 기술이 발전함에 따라, 기존에 사용되고 있는 주파수 들은 그 활용이 한계에 이르렀으며, 이를 해결하기 위해 좀 더 높은 주파수를 활용하고자 하는 연구들이 진행되고 있다. 따라서 기존에 사용되고 있는 신호원 보다 더 높은 주파수의 신호를 필요로 하게 되었다. 그러나 트랜지스터를 이용한 기존의 발진기는 주파수 생성에 한계가 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 트랜지스터나 다이오드와 같은 비선형 소자를 이용한 주파수 체배기가 사용되고 있다[1-5].

비선형 소자들을 이용한 전송선로 형태의 주파수 체배기에 관한 많은 연구들이 선행되어 왔으며, 이를 비선형 전송선로 (Nonlinear Transmission Line, NLTL)라고 한다. 버렉터 다이오드를 이용한 NLTL에 대신호가 입력되면, 신호의 왜곡이 발생하여 고조파를 발생시킨다. NLTL은 그 구조가 전송선로 형태이기 때문에 삽입손실이 매우 적고, 광대역 특성을 가지고 있어 효율적인 주파수 체배기로서의 활용도가 높다[1].

NLTL은 Right-handed Nonlinear Transmission Line (RH-NLTL)[2]과 Left-handed Nonlinear Transmission Line

(LH-NLTL)[3, 4]으로 분류된다. LH-NLTL은 RH-NLTL과 Dual 관계이며, 1차원 비선형 메타물질의 한 형태이다.

각각의 NLTL에 대한 주파수 체배기로서의 활용에 대한 논문은 출판되었으나[1-5], 이들의 비교 성능과 활용 분야에 대한 논문은 찾기 어려웠다. 본 논문에서는 전송선로 구조의 주파수 체배기인 RH-NLTL과 LH-NLTL의 차이점을 설명하고 제작과 실험을 통해 성능을 비교 및 분석하고, 이들의 활용분야에 대해 방향을 제시하였다.

### 2. 비선형 전송선로의 이론적 배경

#### 2.1 버렉터 다이오드의 이론적 배경

그림 1에서와 같이, 버렉터 다이오드는 인가되는 역전압에 의해 공핍층이 변화하며, 이를 통해 다이오드의 커패시턴스가 가변된다. 버렉터 다이오드는 커패시턴스의 변화를 위해 보통 P-N 반도체접합 중 P영역을 강하게 도핑하며, DC전압을 인가할 경우 P영역은 공핍층의 변화가 거의 없게 되고, N영역만 공핍층 폭의 변화가 생기게 된다. 다이오드의 N영역을  $NX^m$ 의 형태로 도핑하면 버렉터 다이오드의 커패시턴스는 인가된 역전압에 대해 다음과 같이 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$C_d(V) = \frac{C_n}{\left(1 + \frac{V}{V_{bi}}\right)^{\frac{1}{m+2}}} \quad (1)$$

\* Corresponding Author : Dept. of Biomedical Engineering, School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea  
E-mail : hsyoo@ulsan.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea

Received : July 13, 2015; Accepted : July 30, 2015

여기서  $V$ 는 다이오드 인가된 역전압,  $C_{j0}$ 는 인가된 역전압이 0일 때 다이오드 커패시턴스,  $V_{bi}$ 는 다이오드 Built-in voltage,  $C_d(V)$ 는 다이오드 커패시턴스,  $m$ 은 특정 도핑 프로파일을 가지기 위한 상수이다. 이는 다이오드의 커패시턴스가 인가된 역전압에 대해 비선형적임을 의미한다. NLTL에 대신호가 입력되었을 때, 위상 변위 계수는 비선형적으로 변화한다. 이러한 변화는 그림 1과 같이 입력 신호를 왜곡시켜 고조파들을 발생시킨다.

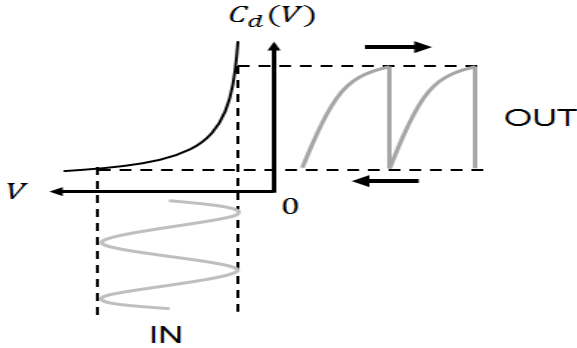


그림 1 버랙터 다이오드 C-V 특성의 비선형성으로 인한 출력 왜곡현상  
**Fig. 1** Output signal distortion due to the non-linearity of varactor diodes' C-V characteristic.

2.2 RH-NLTL 이론적 배경

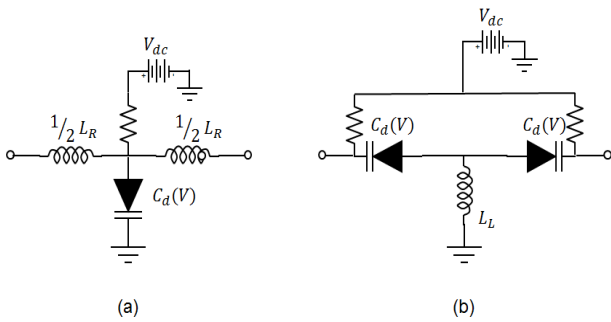


그림 2 합성 RH-NLTL과 LH-NLTL의 구조  
**Fig. 2** Structure of synthetic RH and LH-NLTL  
 (a) RH-NLTL, (b) LH-NLTL

그림 2의 (a)는 합성 RHTL의 단위 셀 구조를 보여준다. 하나의 단위 셀 구조는 두 개의 직렬 인덕터와 하나의 병렬 버랙터 다이오드로 구성되어 있다. 이러한 저역 통과 필터 구조의 단위 셀을 여러 개로 연결할 경우 Bragg 차단 주파수가 생기며 식 (2)로 표현된다.

$$f_{Bragg}^R = \frac{1}{\pi \sqrt{L_R \cdot C_R(V)}} \tag{2}$$

여기서  $L_R$ 은 직렬 인덕터의 인덕턴스,  $C_R$ 은 병렬 버랙터 다이오드의 커패시턴스이다. 이러한 전송선로 구조에서 주파수가 Bragg 차단 주파수 보다 훨씬 낮은 경우, 특성임피던스 ( $Z_{0R}$ )와 위상 변위 계수( $\beta_R$ )는 각각 식 (3)과 식 (4)로 근사될 수 있다 [5].

$$Z_{0R} \approx \sqrt{\frac{L_R}{C_R(V)}} \tag{3}$$

$$\beta_R(V) \approx \omega \sqrt{L_R \cdot C_R(V)} \tag{4}$$

2.3 LH-NLTL과 이론적 배경

그림 2의 (b)는 LH-NLTL의 구조를 보여준다. 단위 셀 구조는 두 개의 직렬 버랙터 다이오드와 하나의 병렬 인덕터로 구성되어 있다. 이 구조는 고역 통과 필터 구조이며, Bragg 차단 주파수와 특성 임피던스( $Z_{0L}$ ), 위상 변위 계수( $\beta_L$ )는 각각 식 (5)-(7)로 근사될 수 있다[5].

$$f_{Bragg}^L = \frac{1}{4\pi \sqrt{L_L \cdot C_L(V)}} \tag{5}$$

$$Z_{0L} \approx \sqrt{\frac{L_L}{C_L(V)}} \tag{6}$$

$$\beta_L(V) \approx \frac{-1}{\omega \sqrt{L_L \cdot C_L(V)}} \tag{7}$$

식 (7)과 같이, LHNL의 위상 변위 계수는 음수로 표현된다. 이는 위상의 전파 방향이 전력의 전파 방향과 반대가 되는 1차원 메타 물질의 한 형태임을 의미한다. LH-NLTL은 고역 통과 필터의 구조이기 때문에, Bragg 차단 주파수보다 높은 주파수 영역에서의 고조파들은 크게 감소되지 않는다. 그리고 위상 변위 계수와 커패시턴스의 관계가 RH-NLTL과는 다르기 때문에 고조파 생성 또한 다르게 나타난다[6].

3. 고조파 발생기 제작 과 측정 결과

그림 3은 비교 실험에 사용된 RH-NLTL과 LH-NLTL이다. 두 NLTL에 사용된 버랙터 다이오드는 SKYWORKS사의 SMV1232-079LF (4.15 pF ~ 0.72 pF)이며, ROGERS사의 RO 3210 기판 (비유전율 10.2, 두께 1.3 mm, loss tangent 0.0027, 등박 두께 17.5 um)으로 제작되었다. RH-NLTL은 Johanson Technology의 칩 인덕터 (2.2 nH, 4.9 nH)를 이용하여 6셀로 제작되었으며, LH-NLTL은 Johanson Technology의 칩 인덕터 (10 nH)를 이용하여 6셀로 제작되었다. 사용된 인덕터의 인덕턴스는 두 NLTL이 공통된 주파수 구간을 비교할 수 있도록 조절 전압 변화에 따른 특성 임피던스와 Bragg 차단 주파수를 고려해서 설정하였고, 버랙터 다이오드에 전압을 인가하기 위해 3 kΩ 칩 저항을 사용하였다.

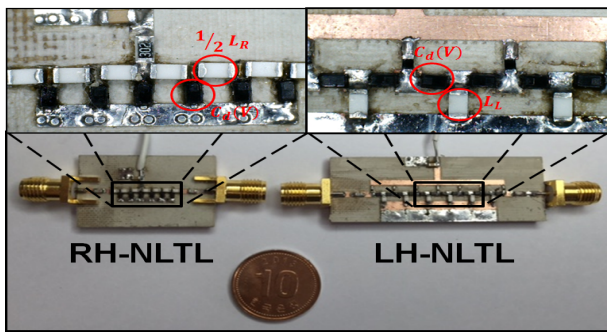


그림 3 제작한 RH-NLTL(좌)와 LH-NLTL(우) 사진

Fig. 3 The picture of fabricated RH-NLTL(left) and LH-NLTL(right)

제작된 두 고조파 발생기의 삽입 손실은 그림 4와 같다. 제작된 RH-NLTL과 LH-NLTL 모두 550 MHz - 1.5 GHz 대역에서 2 dB - 5 dB 사이의 삽입 손실을 유지하였다.

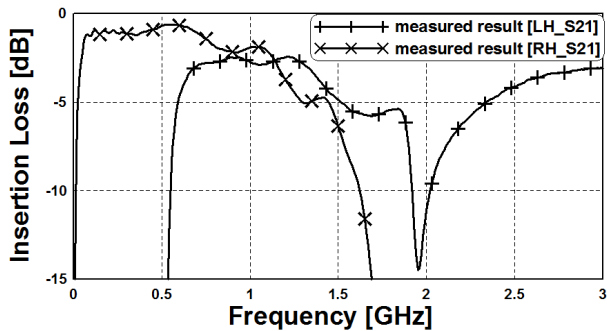


그림 4 제작한 RH-NLTL과 LH-NLTL의 삽입손실

Fig. 4 The insertion loss of the fabricated RH-NLTL and LH-NLTL harmonic generator

RH-NLTL과 LH-NLTL의 고조파 발생 경향을 확인하기 위해 버렉터 다이오드의 인가 전압을 제어하면서 2차 고조파, 3차 고조파가 가장 효과적으로 출력되는 조건을 찾는 실험을 진행하였다. 입력된 신호의 왜곡을 극대화하기 위해서는 버렉터 다이오드의 커패시턴스 범위를 최대한 활용하여야 한다. 이를 위해 버렉터 다이오드에 역전압을 인가함으로써 입력된 신호에 오프셋을 주었다. 실험을 통해 찾은 결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5에서 보는 바와 같이, 3 V의 전압을 버렉터에 인가하고, 1 GHz, 25 dBm의 신호를 RH-NLTL에 입력시켰을 때, 2차 고조파가 15.67 dBm이 출력되었다. 같은 조건에서 760 MHz의 신호를 인가하였을 때, 3차 고조파가 11.67 dBm 출력되었고, 이는 3차 고조파를 가장 효과적으로 출력하는 조건이다. RH-NLTL의 경우 저역 통과 필터 구조이기 때문에 고조파의 차수가 클수록 출력의 감쇠가 심한 것을 알 수 있다.

그림 6는 LH-NLTL의 출력 스펙트럼이다. LH-NLTL의 버렉터 다이오드에 3 V의 전압을 인가하고, 600 MHz, 25 dBm의 정

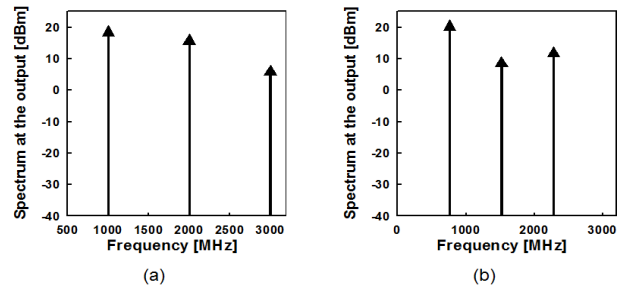


그림 5 RH-NLTL의 주파수 체배특성 (입력신호 : 25 dBm, 인가 전압 : 3 V)

(a) 1 GHz, (b) 760 MHz

Fig. 5 characteristic of frequency multiplication in RH-NLTL (Input signal : 25 dB, bias voltage : 3 V)

(a) 1 GHz, (b) 760 MHz

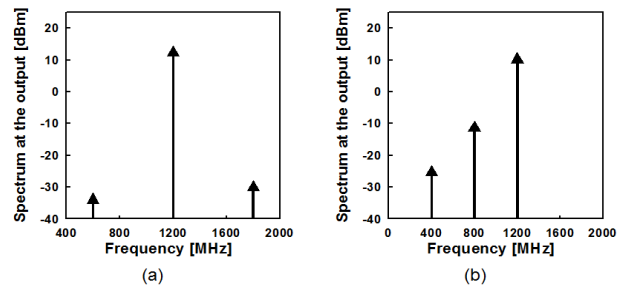


그림 6 LH-NLTL의 주파수 체배특성 (입력신호 : 25 dBm)

(a) 600 MHz, (b) 400 MHz

Fig. 6 characteristic of frequency multiplication in LH-NLTL (Input signal : 25 dB)

(a) 1GHz, bias voltage : 2 V, (b) 760 MHz, bias voltage : 3 V

현과를 입력 신호로 인가하면 가장 효과적으로 2차 고조파가 발생되고 그 출력은 12.33 dBm이다. 그리고 LH-NLTL의 버렉터 다이오드에 2 V의 전압을 인가하고 입력신호로 400 MHz, 25 dBm의 정현과를 인가하였을 때 3차 고조파가 11.67 dBm이 출력되었다. LH-NLTL의 경우, RH-NLTL과 달리 하나의 고조파를 가장 효과적으로 출력할 경우 그 외의 고조파들이 20 dB 이상 낮게 출력 되었다.

실험 결과들을 분석해 보면, 입력 신호의 주파수가 Bragg 차단 주파수에 가까울 때 출력의 2차 고조파의 성분이 효과적으로 발생되었고, 2차 고조파 주파수가 Bragg 차단 주파수에 가까울 때 3차 고조파 성분이 효과적으로 출력됨을 확인할 수 있었는데, 이는 군지연에 의한 왜곡 현상과 관련 있다. 그림 7은 LH-NLTL의 군지연을 ADS 시뮬레이션을 통해 나타낸 그래프이다. 버렉터 다이오드에 2 V의 역전압을 인가하였을 때, 660 MHz에서 군지연이 가장 크게 나타났고, 3 V를 인가하였을 때는 750 MHz에서 군지연이 가장 크게 나타났다. 이 결과와 LH-NLTL의 출력을 분석해 보면, 군지연이 가장 크게 나타나는 주파수의 신호를 n차수

고조파가 되도록 신호를 입력하면, n+1차 고조파의 발생이 가장 효과적으로 나타나는 것을 알 수 있다.

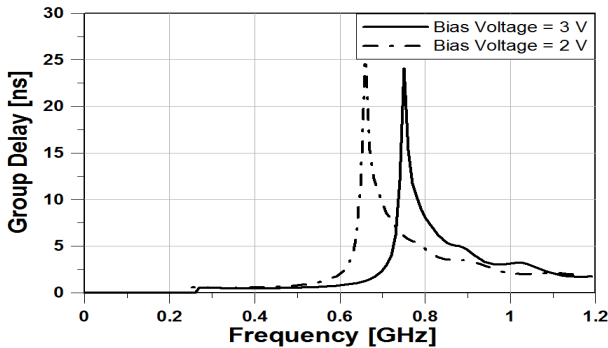


그림 7 LH-NLTL의 인가전압에 따른 군 지연 시뮬레이션 결과  
 Fig. 7 simulated group delay graph with different bias voltage LH-NLTL

#### 4. 결 론

본 논문에서는 버렉터 다이오드를 사용한 고조파 발생기의 한 형태인 RH-NLTL 구조와 LH-NLTL 구조의 고조파 발생기를 제작하고 그 특성을 분석하였다. RH-NLTL의 경우, 저역 필터 구조를 가지기 때문에 고조파의 차수가 커질수록 감쇠가 커지고, 여러 차수의 고조파를 동시에 생성하게 되는데, 이는 주파수 합성기 등에 사용하기에 적합한 것으로 보인다. LH-NLTL의 경우, n차수의 고조파가 Bragg 차단 주파수에 근접할 경우, n+1차수 고조파의 발생이 가장 효과적으로 이루어지고, n+1차수 고조파 이외의 성분들의 감쇠가 아주 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 군지연에 의한 왜곡현상과 관련 있음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었고, 이러한 특성을 가지는 LH-NLTL은 별도의 대역 통과 필터가 요구되지 않는 효율적인 주파수 체배기를 설계하는데 유용할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (NRF-2012R1A1A1041888) and by the Info-Communication & Broadcasting Technology Research Program through the Ministry of Science, ICT and Future Planning (No. 2014-044-047-001).

#### References

[1] Daoud Salameh and David Linron, "Microstrip GaAs Nonlinear Transmission-Line(NLTL) Harmonic and

Pulse Generators, IEEE Trans. Microw. Theory Tech, VOL. 47, NO. 7, JULY 1999.

[2] Mark J. W. Rodwell, Masayuki Kamegawa, Ruai Yu, Michael Case, Eric Carman, Kirk S. Giboney, "GaAs Nonlinear Transmission Lines for Picosecond Pulse Generation and Millimeter-Wave Sampling" IEEE Trans. Microw. Theory Tech. VOL. 39, NO. 7, JULY 1991.

[3] Hongjoon Kim, Alexander B. Kozyrev, Abdolreza Karbassi, Daniel W. van Der Weide, "Compact Left-Handed Transmission Line as a Linear Phase-Voltage Modulator and Efficient Harmonic Generator", IEEE Trans. Microw. Theory Tech. VOL. 55, NO. 3, MARCH 2007.

[4] Inbok Kim, Kangwook Kim, Hyoungsook Yoo, Jongjoo Park, Hongjoon Kim, "An Effective Third Harmonic Generator Using A Left-Handed Nonlinear Transmission Line", Microwave and Optical Technology Letters Vol. 56, No. 3, March 2014.

[5] Hongjoon Kim, Sung-Jin Ho, Min-ki Choi, Alexander B. Kozyrev, and Daniel W. van der Weide, "Combined Left- and Right-Handed Tunable Transmission Lines With Tunable Passband 0° Phase Shift" IEEE Trans. Microw. Theory Tech. vol. 54, no. 12, pp. 4178-4184, Dec. 2006

[6] Alexander B. Kozyrev and Daniel W. van der Weide, "Nonlinear Wave Propagation Phenomena in Left-Handed Transmission-Line Media", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 53, no. 1, pp.238-245, Jan. 2005.

#### 저 자 소 개

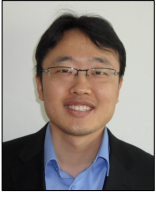


#### 박 순 우 (Soonwoo Park)

1988년 1월 11일생. 2011년 부산대학교 바이오산업기계공학과 졸업(공학 학사). 2015년 경북대학교 전기공학과 졸업(공학 학사). 2015.2~현재 경북대학교 전기공학과 석사과정 재학 중.

Tel : 053-950-5601

E-mail : soonwoo@knu.ac.kr



**김 홍 준 (Hongjoon Kim)**

1972년 10월 4일생. 1997년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 University of Southern California 전기공학과 졸업(공학 석사). 2006년 University of Wisconsin-Madison 전기공학과 졸업(공학 박사). 2006.9~2011.2 미국 City University of New York 조교수. 2011.3~현재 경북대학교 전기공학과 부교수  
Tel : 053-950-5601  
Fax : 053-950-6600  
E-mail : hongjoon@knu.ac.kr



**유 형 석 (Hyongsuk Yoo)**

2003년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2006년~2009년 University of Minnesota 전기공학과 졸업(공학석사, 박사). 2009~2010년 Center for Magnetic Resonance Research (CMRR), University of Minnesota Post-Doctor 연구원. 2010년~2011년 Cardiac Rhythm Disease Management, Medtronic, USA, MRI 연구원. 2011년~현재 울산대학교 전기공학부 조교수.  
Tel : 052-259-1404  
E-mail : hsyoo@ulsan.ac.kr