

# 초소형 무선 통신 시스템에서의 응용을 위한 주기적으로 배열된 다이오드를 이용한 전압제어형 전송선로의 RF 특성에 관한 연구

김수정<sup>1</sup> · 김정훈<sup>2</sup> · 정장현<sup>3</sup> · 윤 영<sup>†</sup>

(Received August 19, 2016 ; Revised August 26, 2016 ; Accepted December 2, 2016)

## Study on RF characteristics of voltage-controlled artificial transmission line employing periodically arrayed diodes for application to highly miniaturized wireless communication systems

Soo-Jeong Kim<sup>1</sup> · Jeong-Hoon Kim<sup>2</sup> · Jang-Hyeon Jeong<sup>3</sup> · Young Yun<sup>†</sup>

**요약:** 본 논문에서는 MMIC (Monolithic microwave integrated circuit) 상에서의 초소형 무선 통신 시스템에의 응용을 위해 주기적으로 배열된 다이오드를 이용한 전압제어형 전송선로(Voltage-controlled Artificial Transmission Line Employing Periodically Arrayed Diodes)의 RF 특성 연구를 진행하였다. 연구 결과, 본 논문에서 제안하는 전압제어형 전송선로는 회로의 용량증가로 인해 기존의 마이크로스트립 선로의 35.2%로 단파장의 성능을 보여주었다. 그리고 유효유전율 및 전파상수는 기존의 마이크로스트립 선로보다 높은 결과를 나타냈으며, 감쇠정수 또한 기존의 전송선로에 비해 전압제어형 선로에서 높게 나타났다. 그리고 전압제어형 전송선로의 등가회로를 closed-form 방정식을 통하여 이론적으로 해석하였다.

**주제어:** MMIC, 무선 통신 시스템, 주기적으로 배열된 다이오드, RF

**Abstract:** In this paper, we studied the RF characteristics of a voltage-controlled artificial transmission line employing periodically arrayed diodes for application to highly miniaturized wireless communication systems on an MMIC (monolithic microwave integrated circuit). According to the results, the novel voltage-controlled artificial transmission line employing periodically arrayed diodes exhibited a short wave length, which was only 35.2% that of the conventional transmission line, owing to increasing capacitance. In addition, its effective permittivity and effective propagation constant exhibited considerably higher values than those of the conventional transmission line. Furthermore, attenuation constant of the voltage-controlled artificial transmission line was far higher than that of the conventional transmission line. Using the closed-form equation, we theoretically analyzed the equivalent circuit of the voltage-controlled artificial transmission line.

**Keywords:** MMIC, wireless communication system, periodically arrayed diodes, RF

### 1. 서론

21세기 현대사회에서 무선통신기기의 역할은 단순히 누군가와 대화를 하는 역할 뿐만 아니라 바쁜 일상에서 실시간으로 정보를 주고, 유용한 어플리케이션으로 삶의 질을 향상시켜 준다. 이같이 무선통신시스템 본연의 개발 뿐만 아니라 다양한 분야의 디바이스와 접목되어서 발전되기 위해서 시스템의 소형화는 매우 중요한 과제로 떠오르고 있는 실정이다[1]-[7].

최근 RF 회로의 소형화와 더불어 RF 회로상의 다양한 임피던스를 가지는 능동 및 수동소자의 임피던스 정합에 응용하기 위한 주기적으로 배치된 다이오드를 이용한 전압제어

형 전송선로(Voltage-controlled Artificial Transmission Line Employing Periodically Arrayed Diodes)가 제안되었다 [1]. 상기 전압제어형 전송선로의 경우, 주기적인 용량에 의해 종래의 전송선로에 비해 선로파장이 대폭 축소되었으며, 인가전압을 조절하여 전송선로의 특성 임피던스를 쉽게 제어할 수 있었다[1]. 그러나, 최근까지 상기 전압제어형 전송선로에 대한 광범위한 RF 특성에 관한 연구가 이루어지지 못하였다.

본 논문에서는 주기적으로 배치된 다이오드를 이용한 전압제어형 전송선로를 이론 및 실험적으로 보다 자세히 해석하였다. 구체적으로 상기 전송선로에 대한 대역폭 및 특성 임피던스를 실험 및 이론적인 방법을 이용하여 추출하였으며, 파장 및 유효유전율, 손실특성 등의 광범위한 물리

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1692-5641>): Department of Radio Communication and Engineering Korea Maritime and Ocean University 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: [yunyoung@kmou.ac.kr](mailto:yunyoung@kmou.ac.kr) Tel:051-410-4426

1 Department of Marine Engineering, Korea Marine Engineering University, E-mail: [crystal@kmou.ac.kr](mailto:crystal@kmou.ac.kr), Tel: 051-410-5057

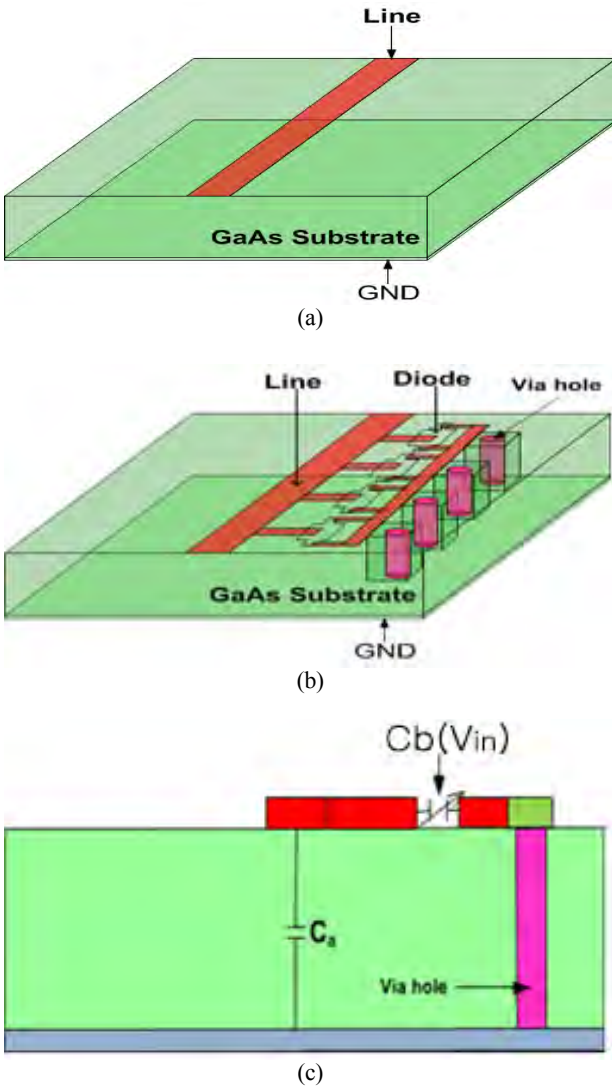
2 Department of Marine Engineering, Korea Marine Engineering University, E-mail: [jh3155@kmou.ac.kr](mailto:jh3155@kmou.ac.kr), Tel: 051-410-5057

3 Department of Marine Engineering, Korea Marine Engineering University, E-mail: [jjh2010@kmou.ac.kr](mailto:jjh2010@kmou.ac.kr), Tel: 051-410-5057

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적 특성에 대해 연구함으로써 무선통신소자로서의 응용가능성을 고찰하였다.

## 2. 주기적으로 배열된 다이오드를 이용한 전압제어형 전송선로의 구조



**Figure 1:** (a) A structure of microstrip line (b) A structure of voltage-controlled artificial conventional transmission line employing periodically arrayed diodes and (c) Its cross-sectional view

**Figure 1 (a)**는 전송선로와 접지 금속면으로 이루어진 기존의 마이크로스트립 구조를 나타내고 있다. 그리고 **Figure 1 (b), (c)**는 본 논문에서 제안하는 주기적 다이오드 배열을 이용한 전압제어형 전송선로 (Artificial Transmission Line Employing Periodically Arrayed Diodes, 이하 PAD)의 전체구조와 X-X단면구조를 나타내고 있다. **Figure 1**에서 볼 수 있듯이, 본 논문의 PAD 구조의 전송선로는 기존의 마이크로스트립 구조의 한쪽 면에 다이오드와 선로의 연결을 위하여 주기적으로 금속 스트립을 설치하고 각각의 금속 스트

립 구조에 다이오드를 설치하였다. 그리고 설치된 각각의 다이오드는 비아홀을 통하여 접지 금속면과 연결되어 접지 전위를 공급받게 된다. **Figure 1 (a), (c)**를 통해서 알 수 있듯이, 기존의 전송선로는 신호선과 접지면 사이에서 발생하는 주기적 용량성분  $C_a$ 를 가지는 반면, 본 논문에서 제안하는 PAD 구조 전송선로의 경우, 다이오드는 등가회로 상에서 가변의 용량성 성분으로 대체될 수 있으므로, 추가적인 용량성 성분  $C_b(V_{in})$ 가 나타나게 된다. 이러한 사실로 미루어 아래의 식 (1), (2)에서 알 수 있듯이 분모항이  $C_a$ 에서  $C_a + C_b(V_{in})$ 로 바뀌어 기존의 마이크로스트립 선로에 비해 단파장과 저 임피던스의 특성을 보여주게 된다[1][6].

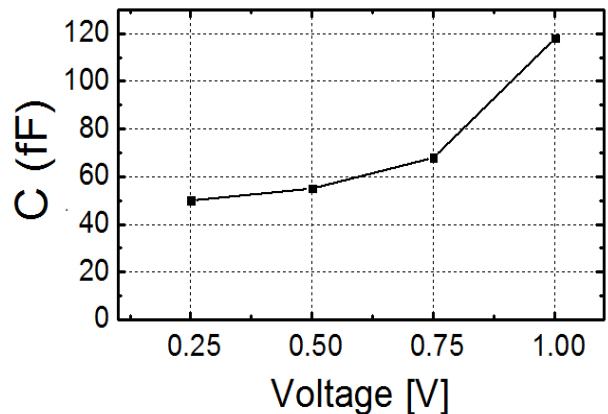
$$\lambda_g = \frac{1}{f\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{L(C_a + C_b(V_{in}))}} \quad (1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L}{C_a + C_b(V_{in})}} \quad (2)$$

이들 식에서 알 수 있는바와 같이, 주기적 다이오드 선로 구조의 경우, 종래의 전송선로 구조에서 존재하는 용량  $C_a$  뿐 아니라 다이오드에 의한 가변용량  $C_b(V_{in})$ 가 추가적으로 존재한다. 따라서, 인가전압을 통해 가변용량  $C_b(V_{in})$ 를 조절함으로써 특성임피던스  $Z_0$ 를 제어할 수 있으며, 가변용량  $C_b(V_{in})$ 가 추가된 만큼 종래의 전송선로보다 파장  $\lambda_g$ 가 감소함을 알 수 있다.

## 3. PAD구조 전송선로의 파장 축소 효과

**Figure 2**는 PAD구조 전송선로의 인가전압의 변화에 따라 발생하는 회로의 용량성 성분을 나타내고 있다. **Figure 2**를 보면 알 수 있듯이 다이오드에 인가되는 전압의 변화에 따라 다르게 나타나게 되는데, 예를 들어 0.25 V 일 때 50 fF로 나타났고, 0.5 V 일 때 55 fF, 0.75 V 일 때 68 fF, 1 V 일 때 118 fF 으로 나타났다. 인가되는 전압의 크기가 클수록 다이오드와 등가적 성분인 용량성 성분도 증가하는 것으로 나타났다[1].



**Figure 2:** capacitance of voltage-controlled artificial transmission line employing PAD

Figure 3은 본 논문에서 PAD구조 전송선로의 인가전압에 따른 선로파장을 나타낸 그래프이다. Figure 3에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안하는 PAD 구조 전송선로의 선로파장은 기존의 전송선로의 선로파장에 비해 35.2%의 단파장의 특성을 나타낸다[1][6]. 예를 들어 주파수 5 GHz에서 기존의 전송선로의 선로파장은 21.12 mm인 반면, 본 논문에서 제안하는 PAD 구조의 전송선로는 7.414 mm의 선로파장을 보인다. 이러한 결과는 아래와 같이 설명될 수 있다. 2절에서 설명되었듯이, 본 논문에서 제안하는 PAD 구조 전송선로는 기존의 전송선로에 비하여 큰 용량성 성분을 가지므로 식 (1)의 분모항이 기존의 전송선로에 비해 월등히 커지기 때문이다. 또한, 다이오드에 인가되는 전압이 커질수록 선로파장이 축소됨을 알 수 있다. 이는 Figure 2에서 볼 수 있듯이, 다이오드에 인가되는 전압이 커질수록 다이오드의 용량성 성분이 증가하기 때문이다.

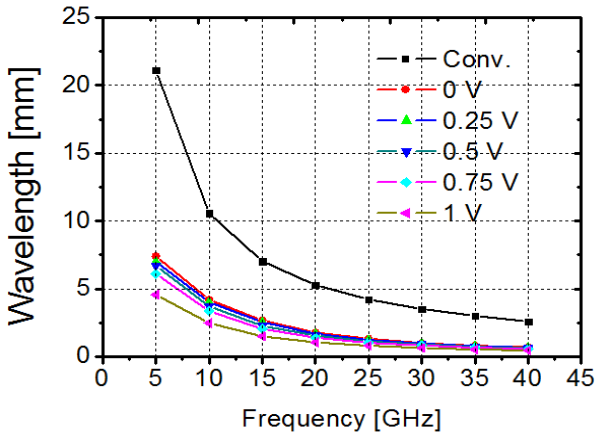


Figure 3: Measured wavelengths of voltage-controlled artificial transmission line employing PAD and conventional one

#### 4. PAD구조 전송선로의 전송, 손실특성

Figure 4는 본 논문에서 제안하는 PAD구조 전송선로 선로의 전파상수( $\beta$ )를 보여주고 있다. 일반적으로 전파상수는 식 (3)과 같이 표현되며[1], Figure 4를 통해 알 수 있듯이 PAD구조 전송선로의 경우 기존의 전송선로의 전파상수에 비해 높게 나타난 것을 알 수 있다. 구체적으로 5 ~ 40 GHz에서 기존의 마이크로스트립 선로의 경우 약 0.297 ~ 2.415 Rad/mm로 나타났으며, 본 논문에서 제안하는 PAD 구조 전송선로는 인가 전압이 1 V 일 때 1.398 ~ 13.262 Rad/mm로 나타났다.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

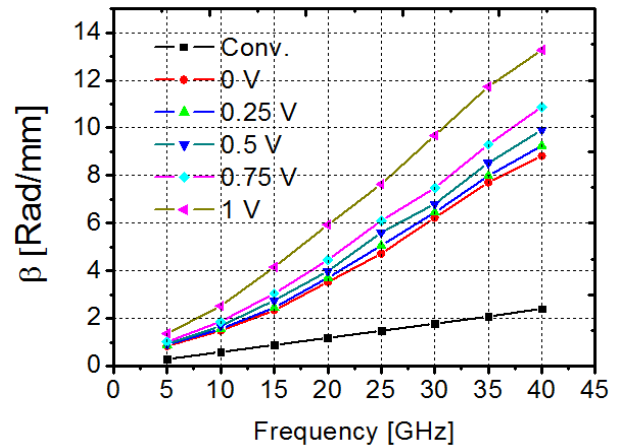


Figure 4: Effective propagation constant of voltage-controlled artificial transmission line employing PAD and conventional one

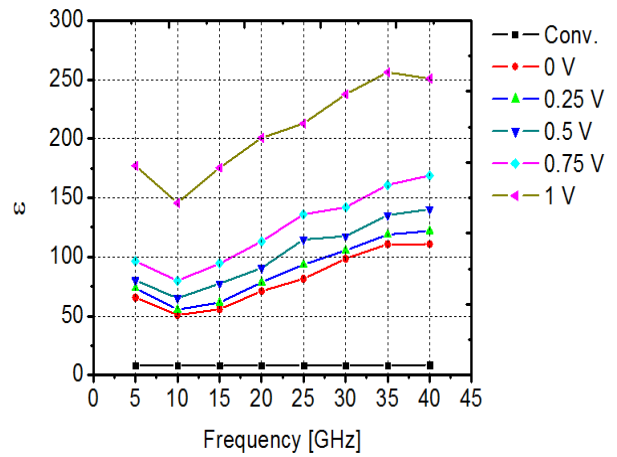


Figure 5: Effective permittivity of voltage-controlled artificial transmission line employing PAD conventional one

Figure 5는 PAD구조 전송선로의 유효 유전율( $\epsilon_e$ )을 나타낸 그림이다. Figure 5를 통해 알 수 있듯이 기존의 전송선로의 유효 유전율은 5 ~ 40 GHz에서 약 8.307 ~ 8.32로 나타났으며, 본 연구에서 제안한 PAD 구조 전송선로의 유효 유전율은 5 ~ 40 GHz에서 인가 전압이 1 V일 때 178.48 ~ 250.86으로 나타났다. Figure 4와 Figure 5의 결과는 아래와 같이 설명될 수 있다. 기존의 전송선로는 주기적 구조가 아닌데 반해, 본 논문에서 제안하는 PAD 구조의 전송선로는 주기적 구조를 가지므로 기존의 전송선로에 비해 높은 slow-wave 특성이 발생하기 때문이다. 일반적으로 전송선로의 유효 유전율은 아래의 식 (4)와 같이 나타내어진다[8][10].

$$\epsilon_e = \left( \frac{2\pi}{\omega\lambda} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \right)^2 \quad (4)$$

Figure 6은 본 논문에서 제안하는 PAD구조 전송선로의 감쇠정수( $\alpha$ ) 특성을 나타내고 있다. Figure 6을 통해 알 수 있듯이 기존의 전송선로의 감쇠 정수는 5 ~ 40 GHz에서 약 0.054 ~ 0.61 Np/mm로 나타났으며, PAD구조 전송선로의 경우 0.5 V에서 약 1.017 ~ 1.447 Np/mm로 가장 높게 나왔으며, 1 V에서 0.11 ~ 0.15 Np/mm로 나타났다. 5 ~ 15 GHz 사이에서는 본 논문에서 제안하는 PAD 구조의 감쇠정수가 높았지만, 15 ~ 40 GHz에서는 기존의 마이크로 스트립 구조의 감쇠정수가 높게 나타났다. 이는 고주파에서 기존의 마이크로 스트립 구조에 비해 PAD 구조에서의 단위 길이 당 감쇠효율이 좋은 것을 알 수 있다. 감쇠정수는 아래의 식 (5)와 같이 나타내어 진다.

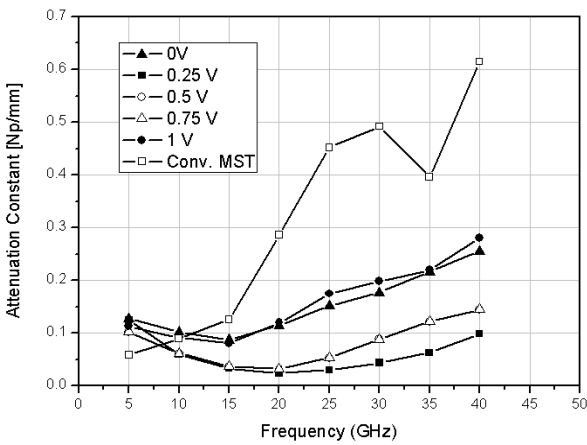


Figure 6: Attenuation constant of voltage-controlled artificial transmission line employing PAD conventional one

$$\alpha = -0.5 \times 0.1 \times S_{21} (dB) \times \ln 10 / l (mm), l < 10 \quad (5)$$

$S_{21}$ 은 전송선로의 투과계수를 의미하며,  $l$ 은 전송선로의 길이를 의미한다. 기존의 전송선로에 비하여 본 논문에서 제안하는 PAD 구조 전송선로의 선로파장이 월등히 짧기 때문에, 공정한 손실의 검토를 위해서는 두 가지 구조 선로의 전기적인 길이가 같아야 한다[8]. 따라서, 기존의 전송선로와 PAD 구조 전송선로가  $\lambda/4$  인 경우의 손실이 비교되어야 하며 이를 Table 1에 나타내었다.

Table 1: Insertion loss of various transmission lines with length of  $\lambda/4$

Frequency (GHz)	Insertion loss with length of $\lambda/4$ (dB)			
	0.25 V	0.75 V	1 V	Conv.
5	-1.899	-1.376	-1.100	-1.926
10	-0.518	-0.452	-0.494	-1.811
20	-0.088	-0.097	-0.272	-3.323
30	-0.092	-0.160	-0.275	-3.735
40	-0.143	-0.182	-0.286	-3.481

위의 Table 1에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 제안하는 PAD 구조 전송선로의 삽입 손실은 파장의 축소에서 기인

하여 기존의 전송선로의 삽입 손실에 비하여 낮은 특성을 보이고 있다. 구체적으로 기존 전송선로의 삽입 손실은 -1.926 ~ -3.481 dB 인 반면, 본 논문에서 제안하는 PAD 구조 전송선로의 삽입 손실은 -0.092 ~ -1.899 dB로 나타났다.

## 5. PAD구조 전송선로의 등가회로

Figure 7은 전압 제어형 전송선로의 단위셀에 대한 등가회로와 전체의 등가회로를 나타낸 그림이다. Figure 7을 보면 알 수 있듯이 전송선로의 등가회로는 N개의 셀로 주기적으로 이어져 있는 구조이다[6][8].  $C_b$ 는 주기적으로 배열된 다이오드에 의해 발생하는 가변 용량성 성분을 나타내고,  $C_a$ 는 선로와 최하단 접지면 사이에 발생하는 주기적인 용량성 성분을 나타낸다.  $R_L$ 과  $L_{ind}$ 는 각각 전송선로의 저항과 인덕턴스 성분을 의미하며,  $R_g$ 와  $L_g$ 는 다이오드와 선로 사이의 Stub의 저항과 인덕턴스 성분을 나타낸다. 각각의 성분들에 대한 closed-form 방정식은 식 (6) ~ (11)으로 나타낸다.  $l_h, l_c$ 는 각각 다이오드와 연결되는 Stub의 폭과 길이를 나타내고,  $W$ 는 전송선로의 선로폭을 의미하며  $G$ 는 전송선로와 그라운드 사이의 간격을 나타낸다. 식 (8)의  $C_b$ 에  $(l_c/G)^2$ 이 들어간 이유는 기생 커패시턴스 성분에서 발생하는 비선형성 때문이다[6].

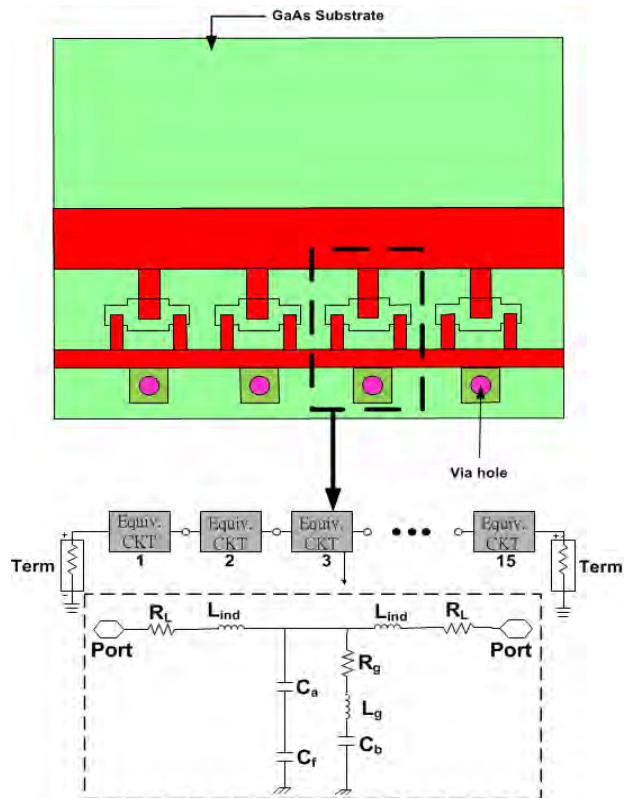


Figure 7: Equivalent circuit of voltage-controlled artificial transmission line employing PAD

$$L_{ind} = \left[ 0.1255 + 0.026 \times \left( \frac{l}{W} \right) - 0.0415 \times \left( \frac{l}{W} \right)^2 \right] (nH) \quad (6)$$

$$R_L = \left[ -0.58 \times \left( \frac{W}{l} \right) + 0.608 \right] (\Omega) \quad (7)$$

$$C_b = \left[ 0.45 - 0.2 \times \left( \frac{l_c}{G} \right) + 0.25 \times \left( \frac{l_c}{G} \right)^2 \right] (pF) \quad (8)$$

$$C_a = \left[ 0.01 - 0.77 \times 10^{-2} \times \left( \frac{l_c}{d_i} \right) + 0.3 \times 10^{-5} \times \left( \frac{l_c}{d_i} \right)^2 \right] (pF) \quad (9)$$

$$R_g = \left[ 1.87 - 0.38 \times \left( \frac{l_c}{l_h} \right) + 0.608 \times \left( \frac{l_c}{l_h} \right)^2 \right] (\Omega) \quad (10)$$

$$L_g = \left[ -0.1 + 30 \times \left( \frac{l_h}{l_c} \right) + 15.1 \times \left( \frac{l_h}{l_c} \right)^2 \right] (nH) \quad (11)$$

Figure 8은 본 논문에서 제안하는 PAD구조 전송선로의 삽입 손실 측정치와 식 (6) ~ (11)을 이용하여 계산한 계산치를 각각 0V, 0.25V, 0.5V, 1V에서 비교 한 결과이다. Figure 8을 통해 알 수 있듯이 각각의 전압에서 삽입손실은 크게 차이나지 않는 것을 알 수 있다.

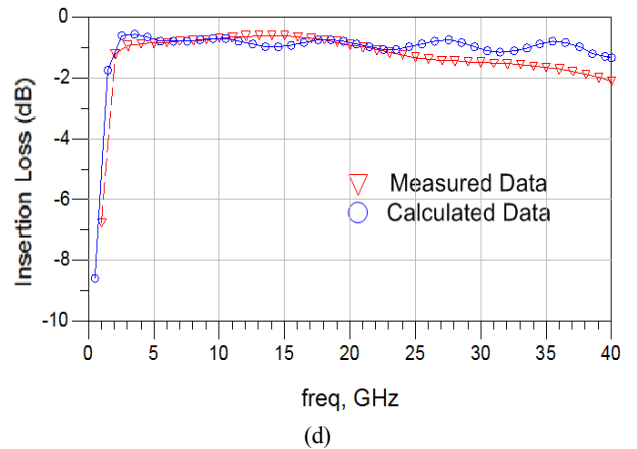
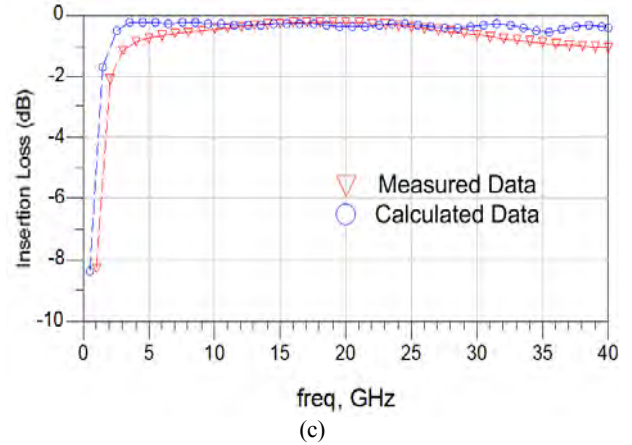
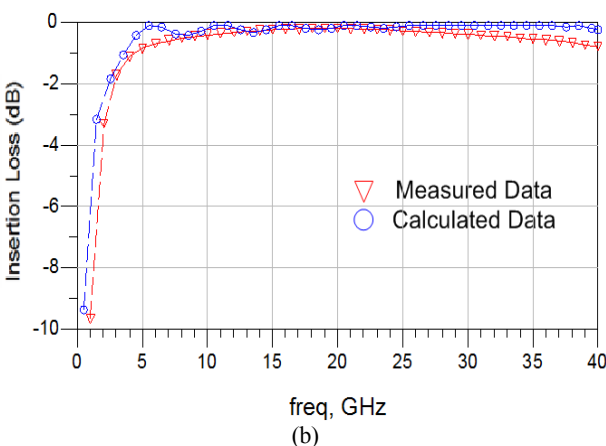
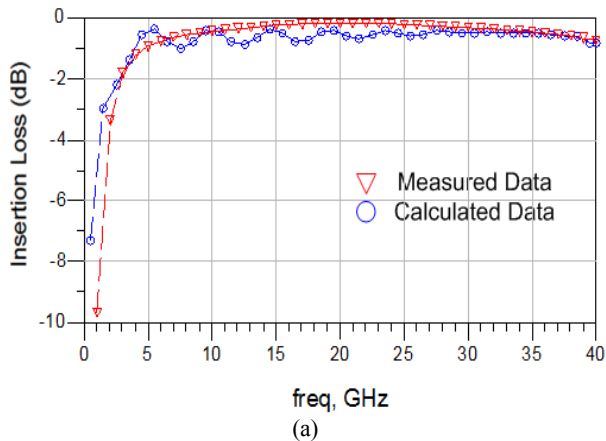


Figure 8: (a) Measured and calculated insertion loss of the transmission line employing PAD at 0.25V (b) at 0.5V (c) at 0.75V (d) at 1V

## 6. 결론

본 논문에서는 초소형 무선 통신 시스템에서의 응용을 위하여 주기적으로 배열된 다이오드를 이용한 PAD구조 전송선로의 RF 특성에 대하여 연구하였다. 연구 결과, 본 논문에서 제안한 PAD구조 전송선로의 용량성 성분은 인가전압이 커질수록 증가하였다. 이러한 용량성 성분의 증가로 인해 본 논문에서 제안하는 PAD구조 전송선로의 선로파장은 기존의 전송선로에 비해 단파장의 성질을 나타내었으며, 이는 기존의 전송선로 파장의 약 35.2%의 단파장 특성을 보여주었다. PAD구조 slow-wave 특성에 의해 전송선로의 전파상수 및 유효유전율은 기존의 전송선로에 비해 높게 나타났다. 그리고 감쇠정수의 측정 결과 또한 기존의 전송선로에 비해 PAD구조 전송선로가 낮게 나타났다. 또한 closed-form 방정식을 이용하여 PAD구조 전송선로의 등가 회로를 이론적으로 해석하였으며, 실제 측정값과 계산값의 이득을 비교하였다. 그 결과 측정값과 계산값 사이의 전압 이득의 차가 크게 나지 않았다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2014R1A2A1A11049844).

## References

- [1] Y. Young, "Voltage-controlled artificial transmission line employing periodically loaded diodes for application to on-chip matching components on MMIC," *Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 19, no. 1, pp. 7-14, 2008 (in Korean).
- [2] J. R. Long, "Passive components for silicon RF and MMIC design," *Institute of Electronics Information and Communication Engineers of Transactions on Electronics*, vol. E86-C, no. 6, pp. 1022-1031, 003.
- [3] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure," *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 1, pp. 86-93, 2001.
- [4] Y. Yun, "A novel microstrip-line structure employing a periodically perforated ground metal and its application to highly miniaturized and low-Impedance Passive Components Fabricated on GaAs MMIC," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 6, pp. 1951-1959, 2005.
- [5] J. H. Jeong, S. Y. Kang, and Y. Yun, "A short wavelength transmission line employing periodically arrayed capacitive devices on MMIC," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 34, no. 6, pp. 840-845, 2010 (in Korean).
- [6] J. H. Kim, J. H. Jeong, and Y. Yun, "A study on RF characteristics of transmission line employing inverted periodically arrayed capacitive devices for application to highly miniaturized wireless communication system on MMIC," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 52-57, 2015 (in Korean).
- [7] A. A. Abidi, "RF-CMOS comes of age", *Institute of Electronics Information and Communication Engineers of Transactions on Electronics*, vol. E87-C, no. 6, pp. 840-853, Jun. 2004.
- [8] E. H. Jang, J. H. Jeong, T. I. Choi, and Y. Yun, "A study on basic characteristics of short wavelength transmission line employing periodically arrayed capacitive devices and its application to highly miniaturized passive components on MMIC," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 157-165, 2012 (in Korean).
- [9] A. S. Andrenko, Y. Ikeda, and O. Ishida, "Application of PBG microstrip circuits for enhancing the performance of high-density substrate patch antennas," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 32, no. 5, pp. 340-344, 2002.
- [10] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., Chapter 4, Addison-wesley, 1990.