



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

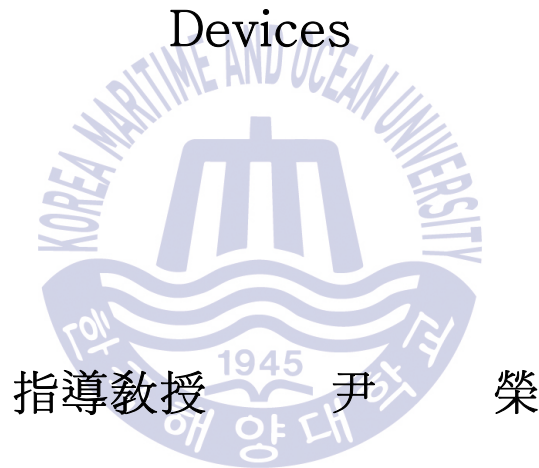
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

반전된 형태의 주기적 용량성 구조를 이용한  
전송선로의 RF 특성에 관한 연구

A Study on RF Characteristics of Transmission Line  
Employing Inverted Periodically Arrayed Capacitive  
Devices



2016 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

金 廷 訓

本論文을 金廷訓의  
工學碩士學位論文으로 認准함.



2015 年 12 月 23 日

韓國海洋大學教 大學院  
電波工學科  
金 廷 訓

# 목 차

Nomenclature	
Abstract .....	2
제 1 장 연구 배경 및 목적 .....	3
제 2 장 IPACD 구조 선로의 기본 특성 .....	5
2.1 마이크로스트립 선로 및 PACD 선로의 기본 구조 .....	
.....	5
2.2 IPACD 선로의 기본 구조 .....	8
2.3 IPACD 구조 전송선로의 단과장·저손실 특성 .....	9
2.4 IPACD 구조 전송선로의 전송특성 .....	12
제 3 장 IPACD 구조 선로의 등가회로 해석 .....	15
제 4 장 IPACD 구조 전송선로의 대역폭 해석 .....	19
제 5 장 결 론 .....	24
참고문헌 .....	26

## 그림 목 차

그림 2.1.1 (a) Conventional microstrip line structure .....	5
그림 2.1.1 (b) A structure of the microstrip line employing PACD. .....	5
그림 2.1.1 (c) A Cross-sectional view according to X-X direction of the microstrip line employing PACD. ....	5
그림 2.2.1 (a) A structure of the microstrip line employing IPACD .....	8
그림 2.2.1 (b) A Cross-sectional view according to X-X direction of the microstrip line employing IPACD. ....	8
그림 2.3.1 Measured wavelengths of IPACD, PACD and conventional microstrip line .....	9
그림 2.3.2 Insertion loss of IPACD, PACD and conventional microstripline.....	10
그림 2.4.1 Effective propagation constant of IPACD , PACD and conventional microstrip line .....	12
그림 2.4.2 Effective permittivity of IPACD, PACD and conventional microstrip line .....	12
그림 3.1 Equivalent circuit of the transmission line employing IPACD .....	15
그림 3.2 Measured and calculated phase S21 of the transmission	

line employing IPACD .....	17
그림 3.3 Measured and calculated insertion loss of the transmission line employing IPACD .....	18
그림 4.1 Equivalent circuit of the IPACD structure with periodically loaded capacitor .....	19
그림 4.2 $k-\beta$ graph of between passband and stopband ..	22



## 표 목 차

Table 4.1.1 Passband and stopband of the transmission line employing IPACD. ....	23
--	----



## Nomenclature

$C_a$	: Capacitance between the line and GND
$C_b$	: Additional Capacitance between PMS and ULM
$Z_0$	: Characteristic impedance
$\lambda_g$	: Guided-wavelength
$\omega$	: Angular frequency
$\mu_0$	: Space magnetic permeability
$\epsilon_0$	: Space permittivity
$d$	: Length of per unit cell
$l_c$	: Length of PMS
$\beta$	: Effective propagation constant
$\epsilon_e$	: Effective dielectric constant
$W$	: Width of the line
$G$	: Width between the line and GND
$l_h$	: Width of PMS
$d_i$	: Thickness of SiN film
$R_g$	: Resistance of PMS
$L_g$	: Inductance of PMS
$R_L$	: Resistance of the line
$L_{ind}$	: Inductance of the line
$L$	: Inductance
$f$	: Frequency



A Study on RF Characteristics of Transmission Line Employing Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices for Application to Highly Miniaturized Wireless Communication system on MMIC

Jeong-Hoon Kim

Department of Radio Communication Engineering  
Graduate School of *Korea Maritime and Ocean University*

Abstract

In this paper, we studied on RF characteristics of the transmission line employing inverted periodically arrayed capacitive devices for application to highly miniaturized wireless communication system on MMIC. According to measured results, the novel transmission line employing IPACD showed short wavelength, which is only 11.85% of conventional one. And it showed effective propagation constant and effective permittivity much higher than conventional transmission line. Insertion loss of IPACD has been improved about 22.6% than PACD(periodically arrayed capacitive devices). In addition, we theoretically analyzed equivalent circuit of IPACD using closed-form equations. The novel transmission line employing IPACD showed wide bandwidth as 1st passband 129.2 GHz.

## 제 1 장 연구 배경 및 목적

인류가 삶을 영위하는데 있어 가장 궁극적인 목적은 좀 더 안락하고 양질의 삶을 사는 것이라 할 수 있다. 21세기에 접어들어 정보 통신 또는 무선 통신은 이러한 인류의 삶의 발전에 맞추어 고도로 진화해왔다. 개인용 혹은 산업용 컴퓨터, 이동식 단말기 등의 장치들은 하나의 기능뿐 아닌 여러 가지 다양한 기능들을 실행하고 있으며, 무선 통신 시스템은 사람과 사람을 뛰어넘어, 해양·항공 등의 다양한 분야로 그 영역을 확장하여왔다. 이러한 시대의 흐름에 따라 각종 무선기기의 소형화는 이루어야할 가장 큰 업적의 하나로 볼 수 있다. 그러나 결합기와 분배기, 필터 등 무선통신기기에 결합되는 대부분의 수동소자는 상대적으로 높은 주파수대를 사용하는 RF 단에서 그 크기가 매우 커져 일반적으로 MMIC 내부에 집적되지 못하고 MMIC 외부의 프린트 기판 상에 설계 및 제작되어 전체적인 시스템의 크기를 키치게 하는 주요 원인이 되고 있다[1-6]. 최근 수동소자의 소형화를 위하여 본 연구그룹에서는 주기적으로 배치된 용량성 소자(PACD, periodically arrayed capacitive devices)를 이용한 단파장 전송선로를 개발하였다[5-7]. 상기 PACD 구조의 전송선로는 지금까지 발표된 전송선로 중 가장 짧은 선로 과장을 보여주었다. 그러나 PACD 선로구조는 다소 높은 삽입손실 특성을 나타낸다.

본 논문에서는 상기의 문제점을 해결하기 위하여 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로 (IPACD, inverted periodically arrayed capacitive devices)를 제안하였다. 기존 PACD 선로구조의 ULM과 LLM의 위치를 반전한 IPACD 선로구조는 추가적인

용량성 성분을 줄여 파장은 줄어들지만, 삽입손실이 줄어들었고, IPACD 선로 구조의 무선 통신 시스템에서의 응용을 위해 선로의 RF 특성을 고찰하였다. 구체적으로는 IPACD 구조 선로의 선로파장, 삽입 손실, 전파상수, 유효유전율, 등가회로 및 대역폭에 대하여 연구하였다.[1]



## 제 2 장 IPACD 구조 선로의 기본 특성

### 2.1 PACD 선로의 기본 구조

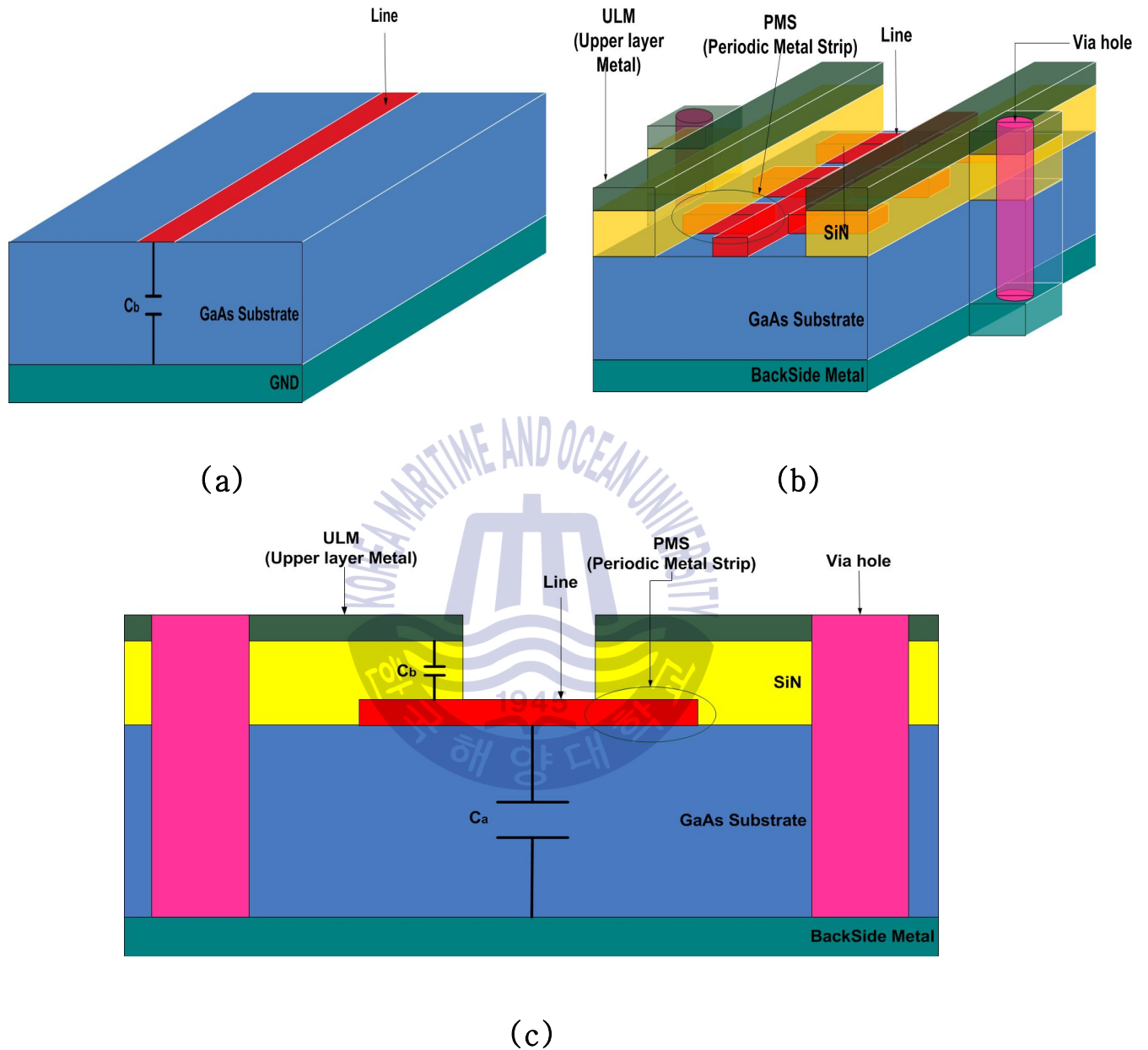


그림 2.1.1(a) Conventional microstrip line structure.

(b) A structure of the microstrip line employing PACD.

(c) A Cross-sectional view according to X-X direction of the microstrip line employing PACD.

그림 2.1.1(a)는 기존의 마이크로스트립 선로 구조를 나타내고 있다. 그림 2.1.1(b)는 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로 (PACD, periodically arrayed capacitive devices)의 구조를 나타내고 있다. 기존의 마이크로스트립 전송선로의 신호선 양쪽에 주기적 금속 스트립(PMS, periodic metal strip)을 접속하고, 그 위에 SiN의 제 2 유전체와 상부 금속층(ULM, upper layer metal)을 설치한 구조이다. 설치된 ULM은 주기적으로 설치된 비아홀(via hole)을 통하여 접지 금속면과 연결되어 접지 전위를 공급받게 된다. 그림 2.1.1(a)에서 알 수 있듯이 기존의 마이크로스트립 선로에는 정전용량  $C_a$ 가 발생하게 된다. 그리고 그림 2.1.1(a)에서 보여진 기존의 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스  $Z_0$ 와 선로 파장  $\lambda_g$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1.1)$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{LC}} = \frac{1}{f \sqrt{LC}} \quad (2.1.2)$$

상기 식에서 인덕턴스  $L$ 은 선로의 단위 길이당 인덕턴스 치에 해당하며,  $f$ 는 동작주파수이다. 식 (2.1.1)과 식 (2.1.2)에서 알 수 있듯이 선로와 접지금속사이의 용량  $C$ 가 증가 할수록 특성임피던스  $Z_0$ 와 선로 파장  $\lambda_g$ 은 감소한다. 이 점에 주목하여 본 연구에서는 반도체 기판 상에 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 선로구조 (PACD: periodically arrayed capacitive devices)를 제안한다.

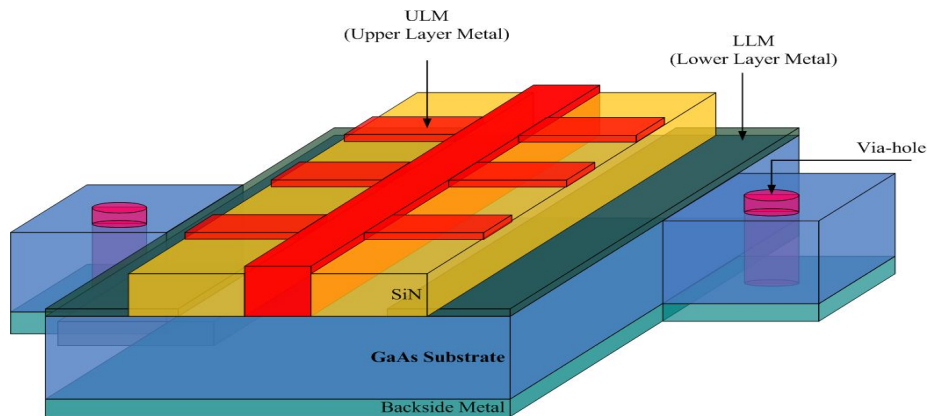
그림 2.1.1(c)는 PACD 구조의 X-X단면을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 ULM과 PMS 사이에서 용량성 성분  $C_b$ 가 발생하게 된다. 그 결과  $\lambda_g$ 는 식 (2.1.2)에서 식 (2.1.4)와 같이 정리된다. 기존의 마이크로스트립 선로에 비해 단파장의 성질을 나타내어 Devices의 소형화에는 유리하지만 다량의 기생 커패시턴스로 인하여 다소 높은 삽입손실 특성을 나타낸다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로 (IPACD, Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices)를 제안한다.[1]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_a + 2C_c}} \quad (2.1.3)$$

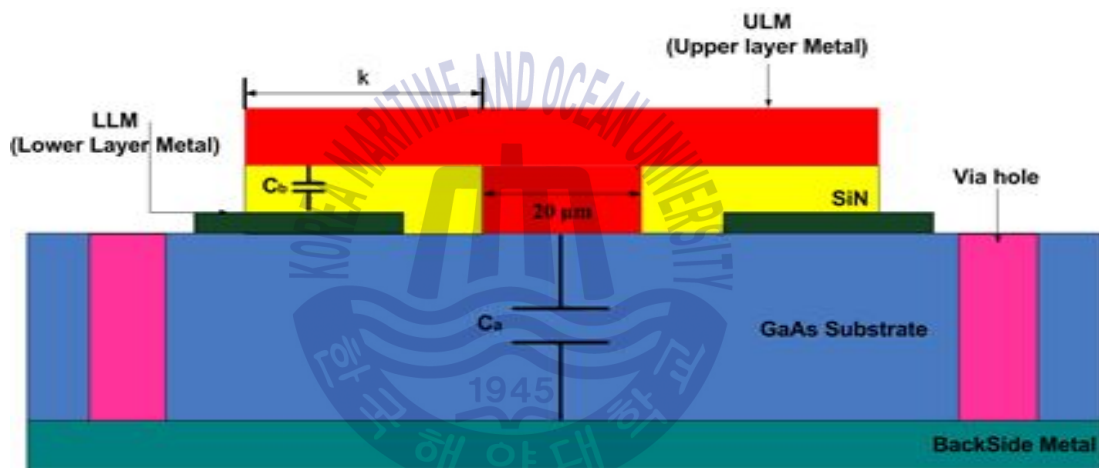
$$\lambda_g = \frac{1}{f \sqrt{L(C_a + 2C_c)}} \quad (2.1.4)$$



## 2.2 IPACD 선로의 기본 구조



(a)



(b)

그림 2.2.1(a) A structure of the microstrip line employing IPACD.

(b) A Cross-sectional view according to X-X direction of the microstrip line employing IPACD.

그림 2.2.1(a)는 본 논문에 제안하는 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로 (IPACD, Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices)의 전체 구조를 나타내고 있고, 그림



2.1.2(b)는 IPACD 구조의 X-X 단면구조를 나타내고 있다. 그림 2.1.1(b)의 ULM과 LLM을 반전하여 나타내어진 구조이다. PACD 구조와 같이 ULM과 LLM 사이에서 추가적인 용량성 성분인 Cb가 나타나게 된다.

### 2.3 IPACD 구조 전송선로의 단파장·저손실 특성

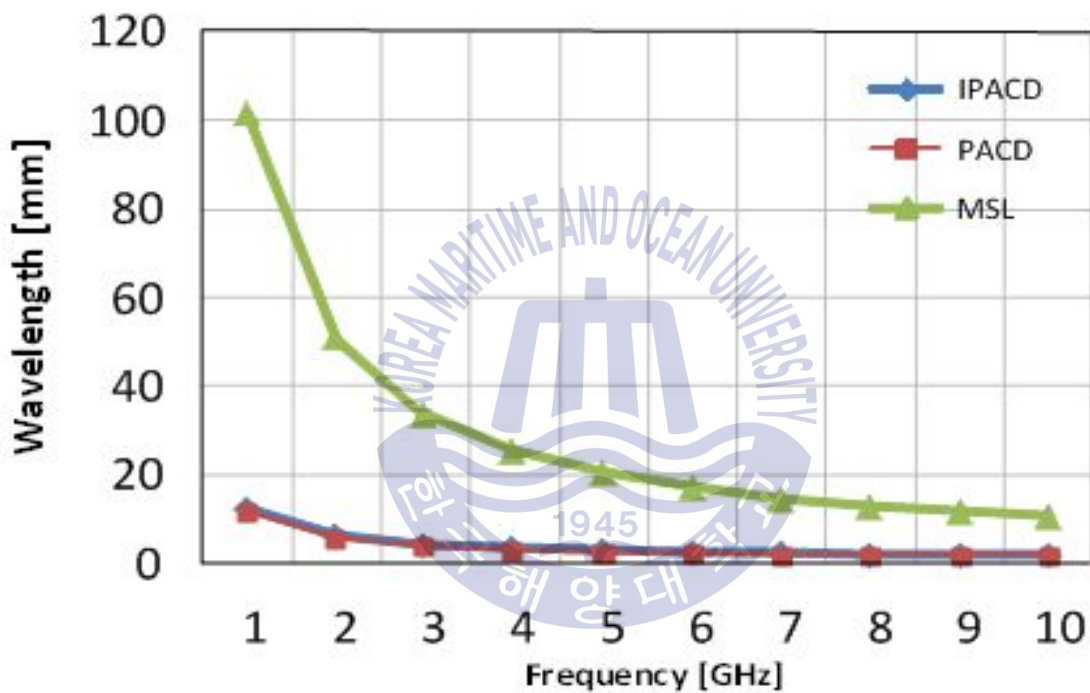


그림 2.3.1. Measured wavelengths of IPACD, PACD and conventional microstrip line.

그림 2.3.1은 기존의 마이크로스트립 선로의 파장과 PACD 구조 및 IPACD 구조의 파장을 비교한 그래프이다. 본 논문에서 측정에 사용된 IPACD 구조의 전송선로의 선로폭과 ULM의 길이는 20  $\mu\text{m}$ 이며,



그림 2.2.1에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제시하는 IPACD 구조의 선로 파장은 추가적인 용량성 성분  $C_b$ 로 인하여 기존의 마이크로스트립 선로의 11.85%로 축소되었음을 알 수 있다[1]. 예를 들어, 주파수 5 GHz에서 기존의 마이크로스트립 선로의 선로파장은 21.12 mm인 반면, PACD 구조의 선로 파장은 1.99 mm, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 선로 파장은 2.504 mm로 나타났다. 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조는 PACD 구조의 선로 파장에 비하여 다소 긴 파장을 보여주지만, 기존의 마이크로스트립 선로에 비해 단파장의 특성을 나타내므로 무선 통신 시스템의 소형화에 응용될 수 있음을 알 수 있다.[1]

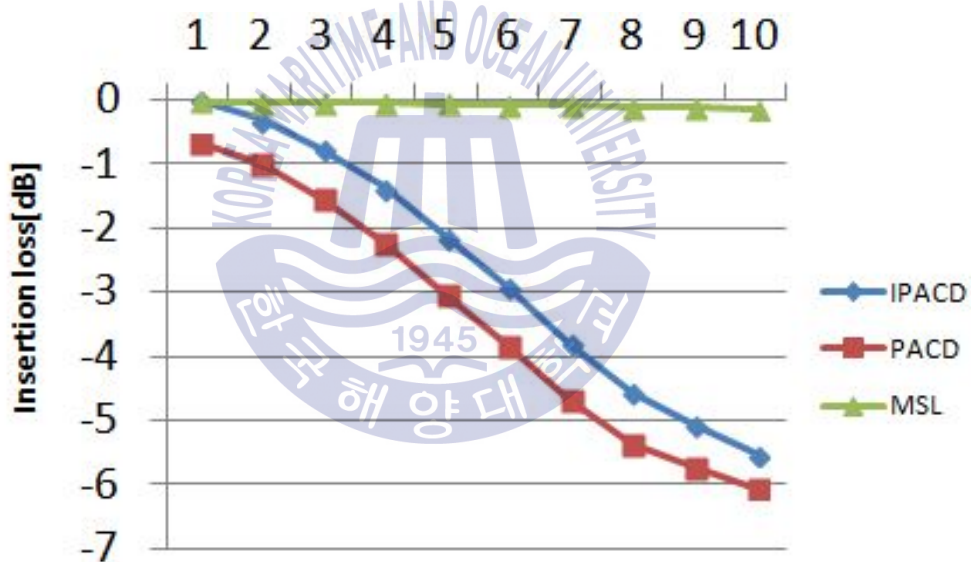


그림 2.3.2 Insertion loss of IPACD, PACD and conventional microstrip line.

그림 2.3.2는 IPACD 선로구조와 PACD 선로 및 기존의 마이크로스트립 선로의 삽입손실을 보여주고 있다. 그림 2.3.1 을 통해 알 수 있

듯이 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로는 기존의 전송선로에 비해 다소 높은 삽입손실 특성을 보인다. 예를 들어, PACD 선로의 삽입손실은 0~10 GHz에서  $-0.673 \sim -6.049$  dB, IPACD 선로의 삽입손실은  $-0.003 \sim -5.528$  dB로 나타났으며, 기존의 마이크로스트립 선로의 경우 동일한 주파수 대역에서  $-0.023 \sim -0.14$  dB로 나타났다. 기존의 PACD의 구조의 경우 IPACD 선로구조에 비해 선로과장의 길이가 짧아 RF기기의 소형화 응용에 유리하지만, 높은 삽입손실로 인해 높은 성능을 보장할 수 없다. 그러나 IPACD 선로의 경우 단과장의 성능은 유지하면서 기존의 PACD 선로에 비해 삽입손실의 성능이 뛰어나 무선통신시스템의 소형화 및 운영에 유리하다. 상기의 결과는 아래와 같이 설명될 수 있다. PACD (Periodically Arrayed Capacitive Devices)의 구조는 기존의 마이크로스트립 선로에 비해 주기적으로 추가적인 용량성분이 발생하여 단과장의 특성을 보이지만, Via hole의 길이가 유전체 층과 반도체 기판 두께 만큼 길어지게 되고, 이로 인해 다량의 기생 인덕턴스가 발생하게 된다. 이러한 경우 기생 인덕턴스는 마이크로파 소자의 고주파 특성을 크게 저해하게 되어 삽입손실이 큰 단점이 생기게 된다. 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 선로는 기존의 PACD 선로와 같이 주기적 구조로 인해 PACD 선로와 용량성분의 차이가 거의 없어 단과장 특성에는 영향을 주지 않는다. 그리고 IPACD 선로의 구조는 기존의 PACD 선로의 구조에 비해 상대적으로 Via hole의 길이가 짧아 기생성분으로 인한 삽입손실이 줄어들게 된다[1].

## 2.4 IPACD 구조 전송선로의 전송특성

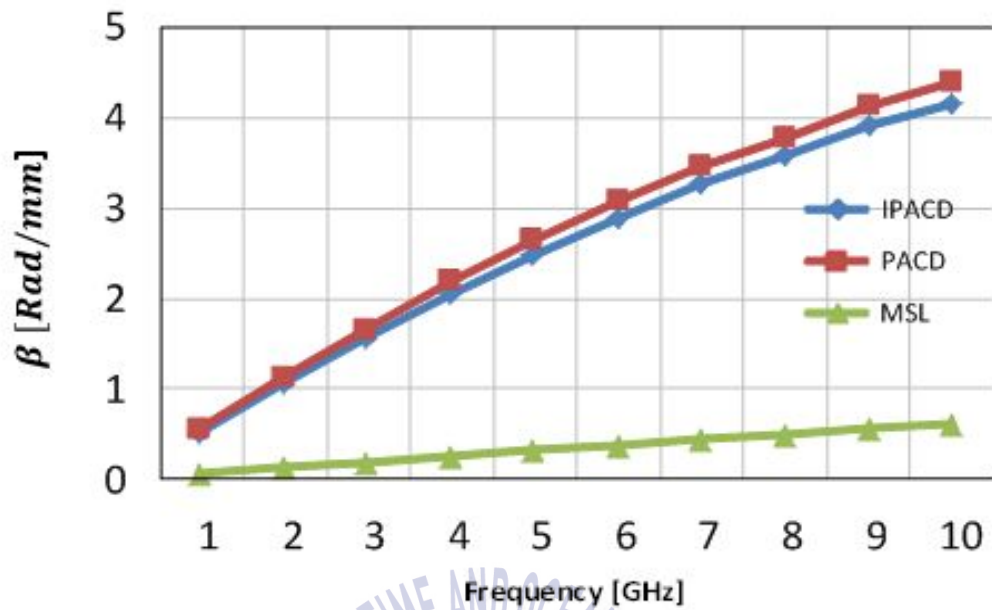


그림 2.4.1 Effective propagation constant of IPACD , PACD and conventional microstrip line.

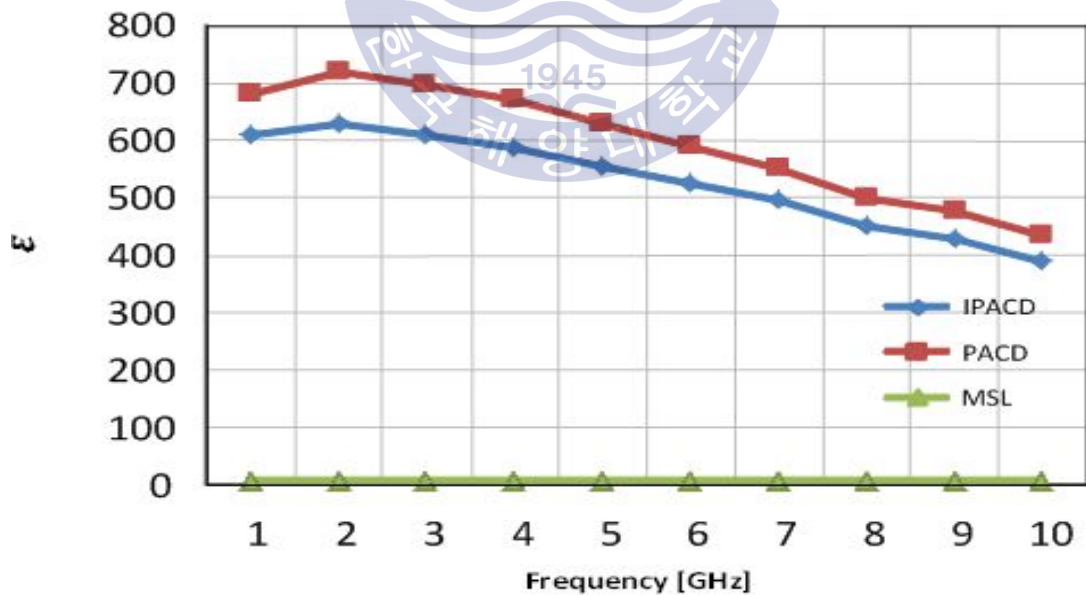


그림 2.4.2 Effective permittivity of IPACD, PACD and conventional microstrip line.

그림 2.4.1은 본 논문에서 제안하는 IPACD 선로구조와 PACD 선로 및 기존의 마이크로스트립 선로의 전파상수( $\beta$ )를 보여주고 있다. 일반적으로, 전파상수는 식 (2.4.1)을 통하여 표현되며, 그림 2.4.1를 통해 알 수 있듯이, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로의 전파상수는 기존의 마이크로스트립 선로의 전파상수에 비해 높은 수치를 나타냄을 알 수 있다. 구체적으로, 기존의 전송선로의 전파상수는 0~10GHz에서 0.062 ~ 0.616 Rad/mm로 나타났고, PACD는 0.56 ~ 4.44 Rad/mm로 나타났으며 본 논문에서 제안하는 IPACD는 0.52 ~ 4.13 Rad/mm를 나타내었다.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.4.1)$$

$$\epsilon_e = \left( \frac{2\pi}{\omega\lambda} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \right)^2 \quad (2.4.2)$$

그림 2.4.2는 IPACD 선로구조와 PACD 선로 및 기존의 마이크로스트립 선로의 유효 유전율( $\epsilon_e$ )을 나타낸 그림이다. 그림 2.4.2를 통해 알 수 있듯이 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로는 기존의 전송선로에 비해 월등히 높은 유효 유전율 특성을 보여준다. 구체적으로 0~10GHz에서 PACD 선로구조는 약 679.1~435.5, 기존의 전송선로의 유효 유전율은 8.8~8.7을 보이고 있으며, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 유효 유전율은 약 609.4~390.2으로 나타났다. 상기의 결과는 다음과 같이 설명된다. 기존의 전송선로는 주기적 구조가 아닌데 반해 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로는 주

기적 구조이므로 상대적으로 전송상수가 큰 slow-wave 특성이 존재하기 때문이다. 그림 2.4.2의 유효 유전율은 파장 측정결과로부터 아래의 식 (2.4.2)을 이용하여 계산되었다[7,10].



### 제 3 장 IPACD 구조 선로의 등가회로 해석

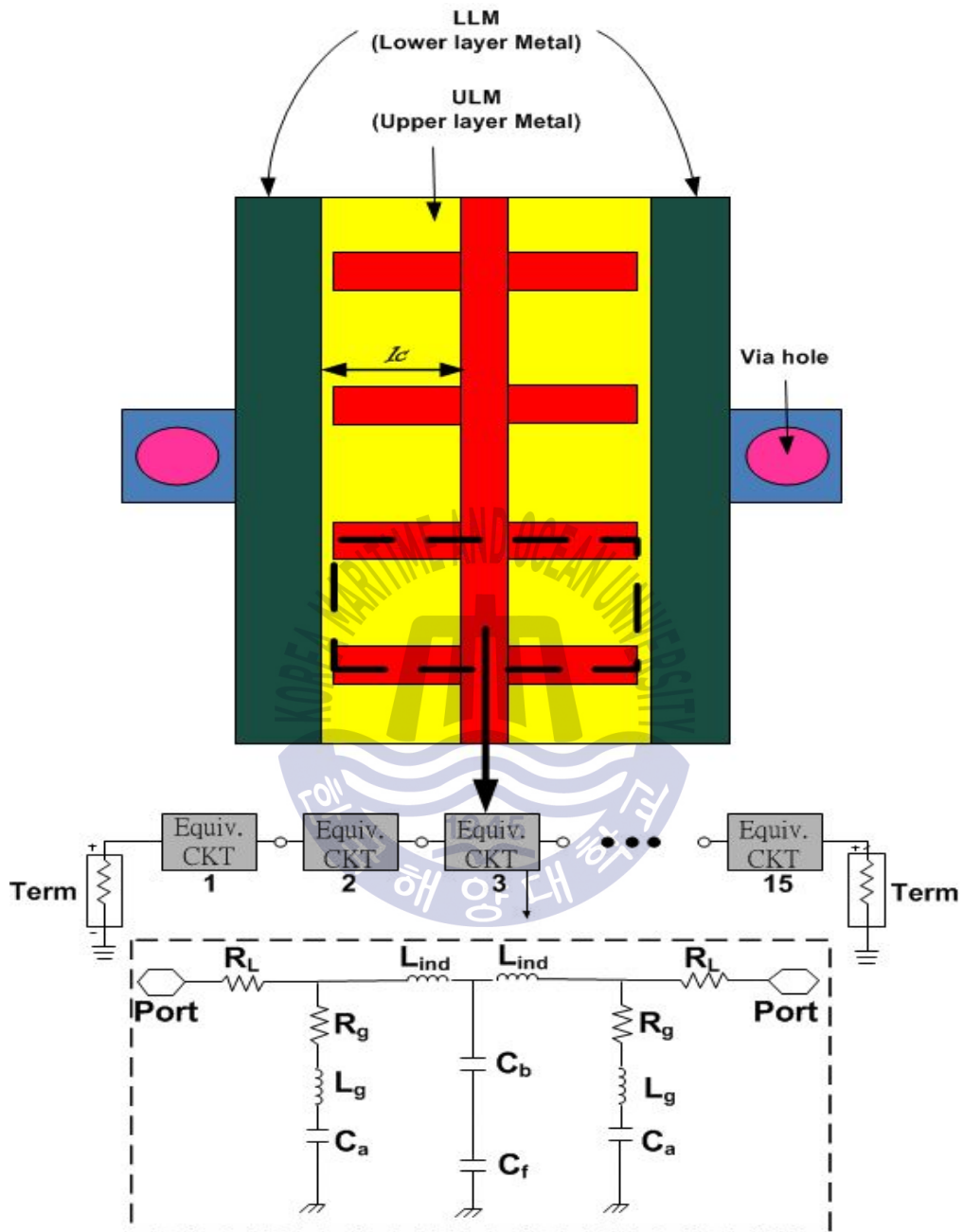


그림 3.1 Equivalent circuit of the transmission line employing IPACD.

그림 3.1은 IPACD 구조 전송선로의 단위셀에 대한 등가회로와 전체의 등가회로를 나타낸 그림이다. 그림 3.1에서 알 수 있듯이 IPACD 구조 전송선로의 등가회로는 N 개의 단위 셀로 이루어져 있다[6,7].  $C_b$ 는 ULM(upper layer metal)과 LLM(lower layer metal) 사이에 추가적으로 발생하는 주기적인 용량성 성분이고,  $C_a$ 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 ULM의 저항성분과 인덕턴스 성분을 나타낸다. 각각의 성분에 대한 closed-form 방정식은 아래와 같이 나타내며, 아래의 식 (3.1) ~ 식 (3.6)은 각각 curve-fitting으로 구하였다.

$$L_{ind} = \left[ 0.1255 + 0.026 \times \left( \frac{l_c}{W} \right) - 0.0415 \times \left( \frac{l_c}{W} \right)^2 \right] (nH) \quad (3.1)$$

$$C_b = \left[ 0.45 - 0.2 \times \left( \frac{l_c}{G} \right) + 0.25 \times \left( \frac{l_c}{G} \right)^2 \right] (pF) \quad (3.2)$$

$$C_a = \left[ 0.01 - 0.77 \times 10^{-2} \times \left( \frac{l_c}{d_i} \right) + 0.3 \times 10^{-5} \times \left( \frac{l_c}{d_i} \right)^2 \right] (pF) \quad (3.3)$$

$$R_L = \left[ -0.58 \times \left( \frac{W}{l_c} \right) + 0.608 \right] (\Omega) \quad (3.4)$$

$$R_g = \left[ 1.87 - 0.38 \times \left( \frac{l_c}{l_h} \right) + 0.608 \times \left( \frac{l_c}{l_h} \right)^2 \right] (\Omega) \quad (3.5)$$

$$L_g = \left[ -0.1 + 30 \times \left( \frac{l_h}{l_c} \right) + 15.1 \times \left( \frac{l_h}{l_c} \right)^2 \right] (nH) \quad (3.6)$$



상기 식 (3.1) ~ (3.5)에서  $l_h, l_c$  는 각각 ULM의 폭과 길이를 나타내고,  $w$ 는 전송선로의 선로폭을 의미하며  $G$ 는 전송선로와 그라운드 사이의 간격을 나타낸다. 또한  $d_i$ 는 SiN 필름의 두께를 의미한다. 식 (3.2)의  $C_b$ 에  $(lc/G)^2$ 이 들어간 이유는 기생 커패시턴스 성분에서 발생하는 비선형성 때문이다[6,7].

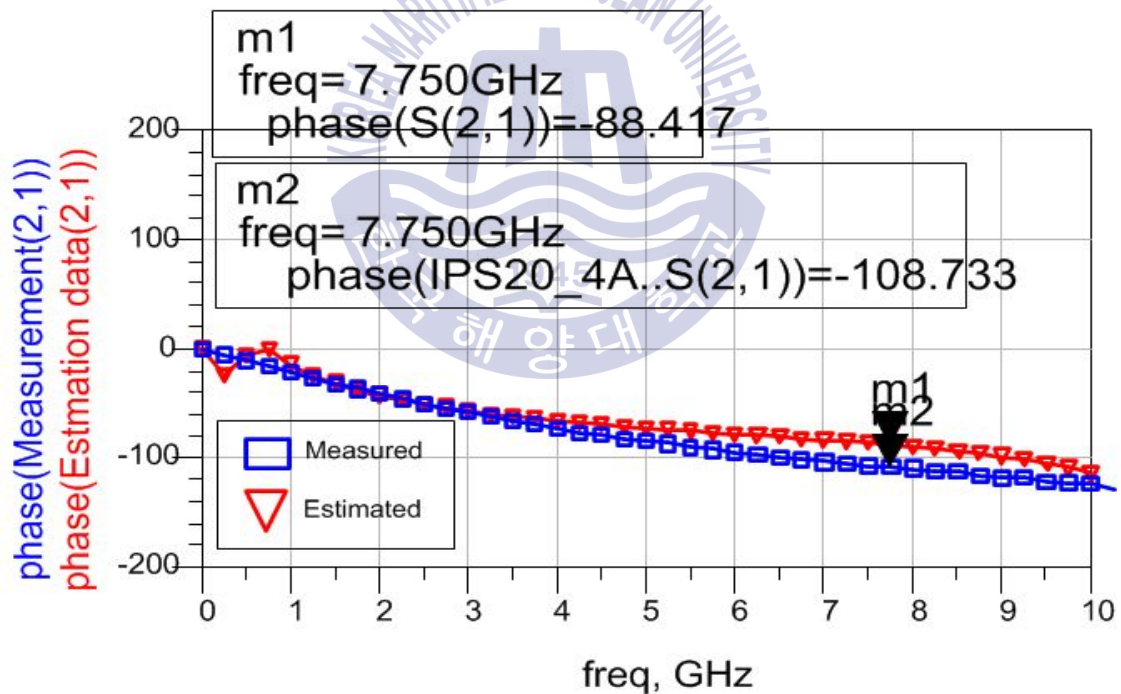


그림 3.2 Measured and calculated phase S21 of the transmission line employing IPACD.



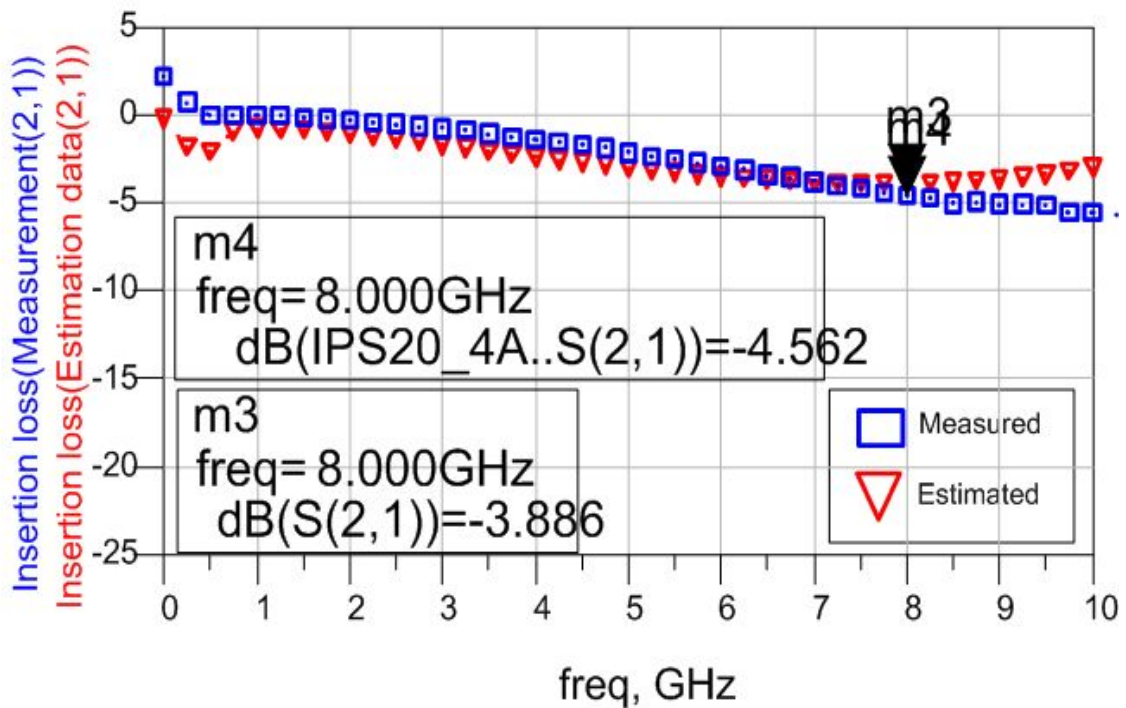


그림 3.3 Measured and calculated insertion loss of the transmission line employing IPACD.

그림 3.2와 그림 3.3은 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 위상차와 삽입 손실의 측정치와 식 (3.1) ~ (3.6)을 이용한 계산치의 비교 결과이다. 그림 3.2에서 알 수 있듯이 주파수 0 ~ 10 GHz 대역에서 IPACD 구조 전송선로의 위상차는 전체적으로 비슷하게 나타났으며, 7 ~ 8 GHz 사이에서 최대 약 20도의 위상 차이를 보였다. 그리고 그림 3.3에서 알 수 있듯이 위상차는 최대 -1.5 dB 정도의 차이를 보이며 양호한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

## 제 4 장 IPACD 구조 전송선로의 대역폭

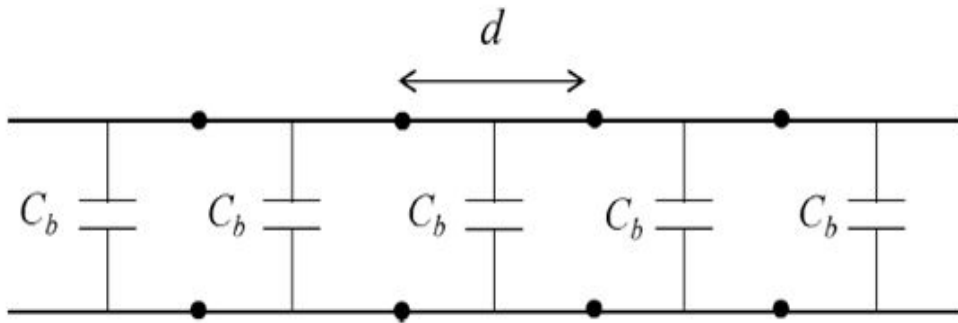


그림 4.1 Equivalent circuit of the IPACD structure  
with periodically loaded capacitor

본 절에서는 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 대역폭에 대하여 고찰하였다. 대역폭 및 임피던스를 계산하기 위해서 IPACD 구조의 전송선로는 그림 4.1과 같이 용량성분  $C_b$  가 종단된 길이  $d$ 인 주기적인 전송선로로 표현되었다[7, 10]. IPACD 선로구조는 용량성 성분  $C_a$ 와  $C_b$ 를 가지지만  $C_a$ 는 마이크로스트립 선로의 선로와 접지사이에 존재하는 용량으로 기존의 주기적인 전송선로에 포함되어 있다.  $C_b$ 는 IPACD 선로구조의 주기적인 세셉턴스  $j_b$ 로 표현되며, 식 (4.1)과 같다.

$$j_b = j\omega C_b / Y_0 = j\omega C_b Z_0 \quad (4.1)$$

$$b = \omega C_b Z_0 \quad (4.2)$$

$$C_b = C'_b + C_f \quad (4.3)$$

$$d = \frac{L}{2} + T + \frac{L}{2} = L + T \quad (4.4)$$

$$C'_b = \epsilon_{\sin} \cdot \frac{S}{d_{\sin}} = \epsilon_{\sin} \cdot \frac{W \times T}{d_{\sin}} \quad (4.5)$$

$$C_f = \epsilon_{\sin} \cdot \frac{\Delta W \times T}{d_{\sin}} \quad (4.6)$$

위의 식에서  $\epsilon_{\sin}$  과  $d_{\sin}$  은 각각 SiN유전체의 두께와 유전율을 나타내며  $W$ ,  $L$ 은 각각 그라운드 폭과 길이이며,  $T$ 는 주기적 구조의 open-stub, 즉 ULM의 간격을 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd) & j(\sin kd + \frac{b}{2} \cos kd) \\ j(\sin kd + \frac{b}{2} \cos kd) & \frac{d}{2} (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd) \end{vmatrix} \quad (4.8)$$

$$kd = w \sqrt{\mu_0 \epsilon_b \epsilon_e} d \quad (4.9)$$

위의 식 (4.7), (4.8)은 주기적 구조의 n번째 단위 셀에 대한 입출력 전류  $I_n$ ,  $I_{n+1}$ 과 입출력 전압  $V_n$ ,  $V_{n+1}$ 에 대한 ABCD 행렬을 나타낸다. 식 (4.9)의  $\omega$ ,  $\mu$ ,  $\epsilon$ ,  $d$ 는 각각 단위 셀을 구성하는 전송선로의 투자율, 유전율, 길이를 나타낸다. 주기적 구조상에서 전송상수를  $\gamma$ 라 가

정하면 아래의 식이 성립한다.

$$V_{n+1} = V_n e^{-\gamma d} \quad (4.10)$$

$$I_{n+1} = I_n e^{-\gamma d} \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{n+1} e^{\gamma d} \\ I_{n+1} e^{\gamma d} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} A - e^{\gamma d} & B \\ C & D - e^{\gamma d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

위의 방정식의 근이 0이 아닌 근을 가지며, 무손실 회로에서  $AD - BC = 1$  이라 적용하여 방정식을 풀이하게 되면 식 (4.14), 식 (4.15) 와 같은 값을 가지게 된다.

$$\frac{e^{-\gamma d} + e^{+\gamma d}}{2} = \cosh \gamma d \quad (4.14)$$

$$\frac{(A + D)}{2} = \left( \cos kd - \frac{b}{2} \sin kd \right) \quad (4.15)$$

선로의 구조가 주기적일 때 전송 상수  $\gamma$ 는 손실성분을 가지므로  $\gamma = \alpha + j\beta$ 가 되므로 식 (4.16)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \cos \gamma d &= \cosh \alpha d \cosh \beta d + j \sin \alpha d \sin \beta d \\ &= \cos kd - \frac{b}{2} \sin kd \end{aligned} \quad (4.16)$$

위의 식 (4.16)에서  $\alpha=0, \beta \neq 0$ 일 때 통과대역 식 (4.17)을 구할 수 있으며  $\alpha \neq 0, \beta=0$ 일 때 저지대역 식 (4.18)을 구할 수 있다.

$$\cosh j\beta d - \cos \beta d = \cos kd - Xkd \sin kd \quad (4.17)$$

$$\cosh \alpha d = |\cos kd - Xkd \sin kd| \geq 1 \quad (4.18)$$

$$X = \left( \frac{C_b Z_0}{2 \sqrt{\epsilon_\epsilon} \sqrt{\mu_0 \epsilon_\epsilon} d} \right) \quad (4.19)$$

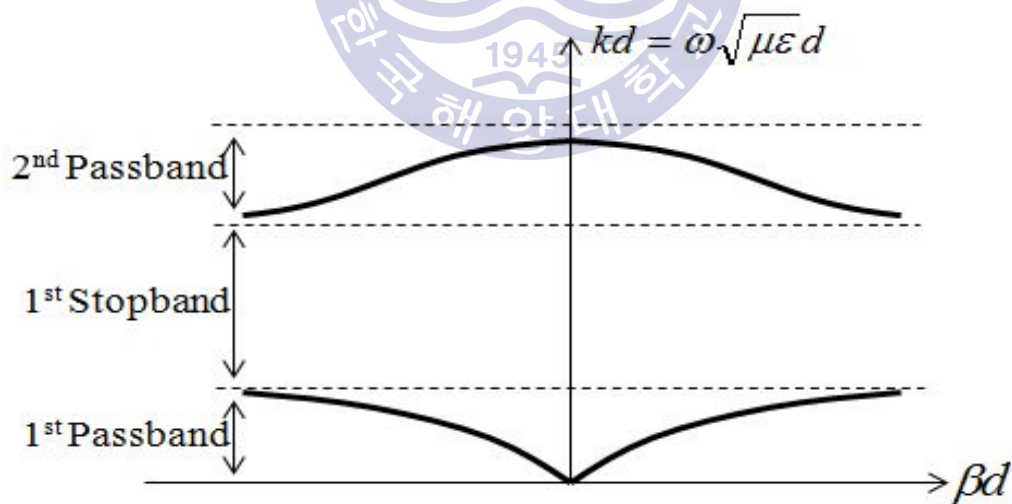


그림 4.2 k- $\beta$  graph of between passband and stopband

그림 4.2는 식 (4.17) ~ 식 (4.19)를 이용하여 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조 전송선로의 통과대역과 저지대역의  $k - \beta$ 의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

Table 4.1 Passband and stopband of the transmission line employing IPACD.

	1st passband (GHz)	1st stopband (GHz)	2st passband (GHz)
IPACD	$f < 129.2$ BW:129.2	129.2 ~ 1312.5 BW:1183.3	1312.5 ~ 1320.8 BW:8.3

Table 1은 식 (4.17) ~ 식 (4.19)와 그림 3.3을 이용하여 구한 IPACD 구조 전송선로의 대역폭 결과이다. RF 대역에서 물리적으로 의미가 있는 대역은 1차 통과대역이며, 본 논문에서 제안하는 IPACD 선로 구조의 1차 통과대역은 129.2 GHz로 광대역 특성을 보여주었다.

상기 결과를 통해, IPACD 선로 구조는 129.2 GHz까지의 광대역에서 무선통신시스템에서 쓰이는 초소형 RF Devices의 개발에 응용 될 수 있을 것이다.

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 초소형 무선 통신 시스템에서의 응용을 위하여 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 구조를 이용한 전송선로(IPACD, Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices)의 RF 특성에 대하여 연구하였다. 측정 결과, 본 논문에서 제안하는 반전된 형태의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로는 기존의 전송선로의 선로파장의 11.85%로 파장이 축소되었다. 예를 들어, IPACD 선로 구조의 파장은 5 GHz에서 2.504 mm 인 반면, 기존의 전송선로는 21.12 mm로 나타났다.

그리고 상기 선로 구조의 유효유전율과 전송상수는 PACD선로에 비해 다소 낮게 나타났지만, 기존 마이크로스트립 선로에 비해서 높게 나타났다. 이는 높은 Slow-wave 특성에 의해 이러한 결과가 나타나는 것이다. 구체적으로 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 유효유전율은 609.4 ~ 390.2, 전파상수( $\beta$ )는 0.52 ~ 4.13 Rad/mm, 로 나타났다. 한편 상기 IPACD 복합구조를 RLC등가회로와 closed-form equation을 통해 이론적으로 해석하였다. 삽입손실과 위상을 비교한 결과 1 ~ 5 GHz에서 비교적 양호한 특성이 나타났으며, 측정결과와 비교적 일치 하는 것을 알 수 있다. 또한 IPACD 선로구조의 경우 기존 PACD 선로구조에 비해 삽입손실이 1~10 GHz에서 개선되었다. 예를 들어 PACD 선로의 경우 -0.998dB ~ -6.049dB로 나타났고, IPACD 선로의 경우 -0.75 dB ~ -5.528 dB로 나타났으며, 이는 IPACD 선로가 PACD 구조에 비해 약 22.6%정도의 삽입손실 성능이 개선 된 것을 보여준다. 또한 본 논문에서는 closed-form 방정식을 통

하여 IPACD 구조 전송선로의 등가회로를 이론적으로 해석하였으며, 실질적인 대역폭의 의미를 가지는 1차 통과대역에서의 차단 주파수는 129.2 GHz로 나타나 광대역의 특성을 보여주었다. 상기의 결과로 미루어 볼 때, 본 논문에서 제안하는 IPACD 구조의 전송선로는 초소형 무선 통신 시스템 개발에 응용이 가능함을 알 수 있다.





## 참 고 문 헌

- [1] 윤영, “저손실·단파장 특성을 가지는 반전된 형태의 주기적 용량성 선로구조와 MMIC상의 초소형 수동소자 개발에의 응용”, 한국마린엔지니어링학회지, vol. 36, No. 1, pp. 149-156, 2012
- [2] A. A. Abidi, “RF-CMOS comes of age”, IEICE Trans. Electron., vol. E87-C, no. 6, pp. 840-853, Jun. 2004.
- [3] J. R. Long, “Passive components for silicon RF and MMIC design”, IEICE Trans. Electron., vol. E86-C, no. 6, pp. 1022-1031, Jun. 2003.
- [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 Trans Microwave Theory Tech, 53, pp.1951-1959, June 2005.
- [5] 정장현, 강석엽, 윤영, “MMIC상에서 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 단파장 전송선로”, 한국마린엔지니어링학회지, vol. 34, No. 6, pp. 840-845, 2010
- [6] J. H. Jeong, Y. Yun, H. S. Kim, N. W. Jang and Y. J. Baek, “A Basic Study on RF Characteristics of Short Wavelength Comb-type Capacitive Transmission Line on MMIC”, Microwave Journal, vol. 55, no. 2, pp. 82-94, 2012.
- [7] 장의훈, 정장현, 최태일, 윤영, “주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 단파장 전송선로의 기본특성 연구와 MMIC용 초소형 수동소자개발에의 응용”, 한국마린엔지니어링학회지, vol. 36, No. 1, pp. 157-165, 2012.
- [8] 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”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 49, pp. 86-93, Jan. 2001.
- [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 Opt. Tech. Lett., vol. 32, no. 5, pp. 340-344, Mar. 2002.
- [10] D. M. Pozar, “Microwave Engineering”, 2nd ed., Chapter 4, Addison-wesley, 1990.
- [11] A. A. Abidi, "RF-CMOS Comes of Age", IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no. 6, pp. 840-853, Jun. 2004.
- [12] Y. Yun, T. Fukuda, T. Kunihiya, and O. Ishikawa, 'A High Performance Downconverter MMIC for DBS Applications,' IEICE Trans. Electron., vol.E84-C, no.11, pp.1679-1688, Nov. 2011.
- [13] Y. Yun, "A Novel Microstrip-Line Structure Employing a Periodically Perforated Ground Metal and Its Application to Highly Miniatureized and Low-Impedance Passive Components Fabricated on GaAs MMIC", IEEE Trans Microwave Theory Tech, 53, pp.1951-1959, June 2005.
- [14] J. Gao, and L. Zhu, "Per-Unit-Length Parameters of 1-D CPW Metamaterials with Simultaneously Series-C and Shunt-L Loading," in Proc.Asia-Pacific Microwave Conf., 2005, China, Dec. 2005, pp. 39-42.
- [15] A. S. Andrenko, Y. Ikeda, and O. Ishida, "Application of PBG microstrip circuits for enhancing the performance of high-density substrate patch antennas," Microwave Opt. Tech. Lett, vol. 32, no. 5, pp. 340-344, Mar. 2002
- [16] 윤영, 김세호 “주기적 접지구조를 이용한 실리콘 RFIC용 초소형 수동소자의 개발, 한국마린엔지니어링학회지 / 第33卷 第4號 / p. 562-568, 2009년 5월

## 감사의 글

끝나지 않을 것 같던 2년여 간의 석사생활도 이제 막바지에 들었습니다. 처음 석사 원서를 내고 연구실에 들어왔을 때에 과연 선배님들처럼 잘 해낼수 있을까 생각도 하였지만, 좋은 분들 때문에 무사히 마칠 수 있었던 것 같습니다. 이에 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 제가 무사히 대학원을 졸업할 수 있도록 최선을 다하여 지도해주신 운영 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 비록 1년 동안 해외에 있으셨지만 항상 책임감을 가지고 지도학생인 저를 위해 해주신 좋은 말씀들은 앞으로의 인생에 많은 도움이 될 것이라 확신합니다. 그리고 학생들의 역량 향상을 위해 항상 노력하시는 조형래 교수님, 강인호 교수님, 정지원 교수님, 김기만 교수님, 김기만 교수님, 민경식 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 석사 기간 동안 MMIC의 리더로써 많은 조언과 도움을 준 장현이형 정말 감사합니다. 그리고 처음 들어왔을 때 연구실 적응에 도움을 준 성조형과 기준이형도 감사합니다. 앞으로 사회에서 종종 볼 수 있으면 좋겠습니다. 다음으로 앞으로 연구실을 이끌어갈 수정이, 내년이 석사 1년차인 현수에게도 많은 도움을 받아 항상 고맙게 생각하고, 교수님을 도와서 앞으로 잘 할 것이라고 믿는다. 대학원 동기 및 대학원 선후배들에게도 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 제가 이 자리에 있기까지 항상 사랑으로 가르치고 길러주신 할머니와 부모님 동생 그리고 고모도 너무 감사하고, 앞으로도 자랑스러운 사람이 되겠습니다.

대학원 과정은 제가 생각했던 것 이상의 무언가를 배울 수 있었고, 많은 경험을 할 수 있었던 좋은 시간이었던 것 같습니다. 여기서 배우고 느꼈던 것들을 밑거름으로 하여 앞으로 사회에 나가서도 멋진 김정훈이 되도록 노력할 것입니다. 감사합니다.