

## 다이오드를 이용한 가변 감쇠기의 설계 및 제작에 관한 연구

전 중 성†

(원고접수일 : 2007년 7월 2일, 심사완료일 : 2007년 11월 1일)

### A Study on the Fabrication of Variable Attenuator using a Diode

Joong-Sung Jeon†

**Abstract** : This paper has been fabricated the two different type of variable attenuators using a characteristics of a 3 dB directional coupler and pin diodes. One was not analyzed using the conventional even-odd modes but used simple two-port techniques. The resulting scattering parameters described operation characteristics for the general case where the terminating impedances are equal and unequal. After analyzing resistor role of the  $\pi$  type fixed attenuator, this paper used a pin diode instead of a resistor.

The variable attenuators were fabricated using pin diodes for current-controlled attenuation on the coupled ports of a 3 dB branch-line coupler and  $\pi$  type fixed attenuator. The realized variable attenuators have more than 33 dB attenuation ranges at 2.1 GHz, and the input and output reflection coefficients are less than -13 dB. These results could be applied to mobile communication systems. It can be varied gain of the power amplifier according to change a outdoor environmental temperature and improved linearity.

**Key words** : 3 dB branch-line coupler(3 dB 방향성 결합기),  $\pi$  type fixed attenuator( $\pi$ 형 고정 감쇠기), Power amplifier (초고주파 전력증폭기)

### 1. 서 론

현대의 이동통신의 경우 주파수 자원의 효율적인 이용을 위해 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조방식을 사용하게 되었고, 이 변조방식은 기지국 송신단에 매우 높은 선형성이 요구되는 고전력 증폭기(High Power Amplifier: HPA)를 필요하게 되었다<sup>[1]</sup>. 따라서 이동통신 기지국용 전력 증폭기는 비선형 특성을 갖는 증폭기

에 선형성을 보장해주는 선형화기(Linearizer)를 부착하여 구현하는데, 이 선형화기의 주요 제어회로에는 가변 감쇠기(Variable attenuator)와 위상 변환기(Phase shifter)로 구성된다. 결합선로형 방향성 결합기를 이용하여 증폭기의 출력단에서 신호를 추출하여 왜곡된 신호 성분들의 진폭과 위상을 제어하여 증폭기의 입력단으로 되돌림으로써 증폭기의 최종 출력단에는 왜곡 성분들을 억제하여 출력되도록 한다.

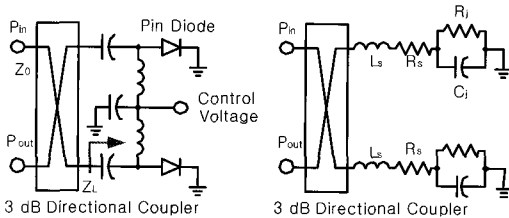
† 교신저자(한국해양대학교 부설 산업기술연구소), E-mail: jsjeon@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4788

한편 감쇠기의 가변소자로는 전류제어 소자인 PIN 다이오드와 전압제어 소자인 GaAs MESFET 가 주로 사용된다<sup>[2], [3]</sup>. MESFET로 감쇠기를 구현할 경우 FET로 T형 또는 Pi형 저항성 Pad를 구현하고 각 FET의 게이트 전압을 조정함으로써 신호의 감쇠 특성을 얻을 수 있다. 그러나 MESFET 감쇠기는 PIN 다이오드 감쇠기보다 더 큰 전력을 인가할 수 있다는 장점이 있으나, 감쇠를 얻기 위한 제어 회로가 복잡해지는 단점도 있다.

따라서 본 연구에서는 가격이 저렴하고 저전력 특성을 갖는 PIN 다이오드를 사용하였다. 감쇠기를 선형화기에 적용할 경우 증폭기의 선형성을 보장하기 위해 감쇠기에 인가되는 전력을 충분히 작게 하므로 PIN 다이오드 감쇠기의 동작 전력은 큰 문제가 되지 않는다. 바이어스 전류의 제어에 의해서 접합 저항(Junction resistance :  $R_j$ )의 값이 달라짐으로써 가변 감쇠기로서의 역할을 하게 된다<sup>[4]</sup>.

## 2. 가변 감쇠기의 구조 및 원리

### 2.1 방향성결합기를 이용한 가변 감쇠기



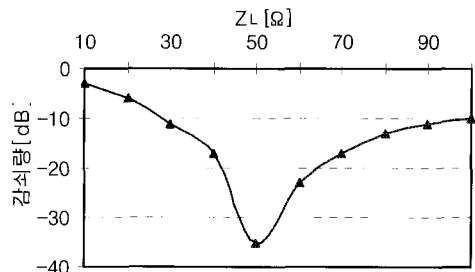
(a) Configuration circuit (b) Equivalent circuit  
**Fig. 1 The circuit of a variable attenuator using a coupler**

감쇠기의 동작원리는 방향성결합기의 결합포트 출력 신호가 90° 위상차가 있으므로 두 다이오드의 특성이 동일할 경우 좋은 입력반사계수( $S_{11}$ )를 나타내며, 또한 대칭적인 구조를 갖고 있기 때문에 출력반사계수( $S_{22}$ )도 동일한 특성을 갖게 된다. 그림 1에서 바이어스가 인가되지 않았을 때, PIN 다이오드는 큰 임피던스 값을 나타내므로 입력 RF

신호는 모두 50 Ω 저항에서 소모되어 본래 격리 포트인 출력 포트에는 RF(Radio Frequency) 신호가 전달되지 않게 된다. 따라서 감쇠량은 최대가 된다. 반대로 충분한 바이어스가 인가되었을 때는 PIN 다이오드는 약 1 Ω의 임피던스 값을 나타내므로 거의 전반사가 일어나 입력 RF 신호는 모두 출력 포트에 전달된다.

그림 2는 초고주파 회로 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 결합 포트 임피던스의 변화에 의해 본래 격리 포트에 출력되는 감쇠 정도를 시뮬레이션한 결과를 나타낸다.  $R_j$ 값이  $C_j$ 와  $L_s$  값에 비해 변화량이 크므로 바이어스에 따른 PIN 다이오드 기생 성분들의 영향을 무시하고 이상적인 저항의 역할을 한다고 가정했을 때의 감쇠량을 나타낸 것이다.

그림 2에서 알 수 있듯이  $Z_L$ 이 50 Ω 부근에서 반사는 최소가 되며, 시스템 전체의 감쇠량은 최대가 된다. 반대로  $Z_L$ 이 0 또는  $2Z_0$ 가 되었을 때 반사는 최대가 되고 감쇠량은 최소가 된다. PIN 다이오드의 임피던스 변화량은 감쇠 특성에 따라 두 구간으로 나눌 수 있다. 하나는 0~50 Ω 부근이고 또 하나는 기울기가 반전되는 50 Ω~ $2Z_0$  구간이다. 자동이득조정(Automatic Gain Control)과 같은 제어 시스템에서 기울기의 반전은 검파 알고리즘 또는 기울기의 부호를 고려하는 어떤 수단도 도입되지 않는 한 제어루프의 불안정성 등과 같은 심각한 문제를 야기시킬 수 있으므로, PIN 다이오드의 임피던스 변화량이 0~50 Ω을 초과하지 않도록 설계하는 것이 바람직하다. 이러한 문제는 그림 3의 회로에서와 같이 하드웨어 내에서 제거할 수 있는데,  $Z_0$ 와 동일한 저항값(50 Ω)을 결합 포트상의 PIN 다이오드에 병렬로 각각 배치하는 것



**Fig. 2 Attenuation values for  $Z_L$  from  $Z_0$  to  $2Z_0$**

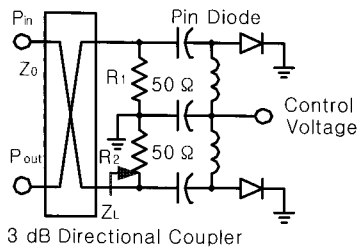


Fig. 3 The configuration of an attenuator with additional parallel resistor 50 Ω

이다. 그러므로 감쇠기는  $Z_L$ 이  $Z_0$ 에 비해 같거나 작은 범위에서 동작하게 된다. 또한 50 Ω ~ 100 Ω 사이의 구간에서 동작하는 감쇠기 회로를 구성할 수도 있는데 이 경우에 있어서는 결합 포트에 50 Ω의 병렬 저항 대신에 50 Ω의 직렬 저항을 배치하면 된다.

2.2 다이오드를 이용한 π형 가변 감쇠기

그림 4는 π형 가변 감쇠기의 회로도들을 나타낸 것이다. 기본적인 동작원리를 살펴보면  $P_{in}$ 을 통해 초고주파 신호는  $Z_1$  선로를 통해 가변 감쇠기에 입력된다.  $Z_1$ 의 선로에 입력된 초고주파 입력 신호는 선로  $Z_1$ 과 접지 사이에 저항  $R_7$ 을 거친 후, 초고주파 전송 선로  $Z_2$ 에 저항  $R_8$ 을 통과하여 전달된다. 초고주파 전송 선로  $Z_2$ 의 신호는 커패시터  $C_9$ 을 거쳐 초고주파 전송 선로  $Z_3$ 으로 전달되는데, 초고주파 전송 선로  $Z_3$ 은 초고주파 전송 선로  $Z_5$ 에 다이오드  $D_{11}$ 을 이용하여 연결된다. 또한, 초고주파 전송 선로  $Z_3$ 은 커패시터  $C_{10}$ 을 이용하여 출력 초고주파 전송 선로  $Z_4$ 에 신호를 공급한다. 초고주파 전송 선로  $Z_5$ 는 인덕터  $L_{12}$ 를 이용하여 외부 공급 전압 단자  $Z_6$ 과 연결되어, 외부 공급 전압을 다이오드  $D_{11}$ 에 공급하는 역할을 한다. 인덕터  $L_{13}$ 은 초고주파 전송 선로  $Z_3$ 과 접지 사이에 연결되어 초고주파 전송 선로  $Z_3$ 을 직류적으로 접지가 되게 한다. 다이오드  $D_{11}$ 은 외부 공급 전압 단자  $Z_6$ 에서 공급된 전압에 의해 저항값의 변화를 가져오게 된다. 고정된 저항  $R_7$ 과 저항  $R_8$ 의 값에 의해 가변 감쇠량의 최저 감쇠량이 결정되고, 다이오드  $D_{11}$ 의 외부 공급 전압의 변화에 따른 저항값의 변화량으

로 감쇠 범위가 결정된다. 초고주파 전송 선로  $Z_5$ 는 외부 공급 전압에 의해 다이오드  $D_{11}$ 의 저항값이 변화하면서 다이오드  $D_{11}$ 에 내재되어 있는 등가적인 커패시턴스와 인덕턴스 값의 변화가 발생하며 초고주파 신호가 가변 감쇠기를 통과하면서 위상 변화가 발생하는 것을 억제시키는 역할을 한다. 그림 5는 π형 고정 감쇠기의 회로도이다.

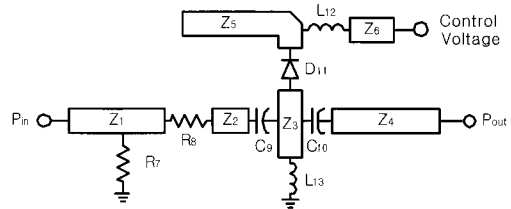


Fig. 4 The circuit of the π type variable attenuator

초고주파 회로에서 안정적인 입력과 출력 반사계수를 가지는 π형 고정 감쇠기의 구조를 기본으로 하여 가변 감쇠기의 출력 단자에 π형 고정 감쇠기의 저항 대신에 다이오드를 사용하였다. 외부 공급 전압의 변화에 따라 다이오드의 저항값의 변화가 감쇠기의 감쇠량의 변화를 발생하게 하였고, 다이오드의 저항값의 변화에 따른 내부 커패시턴스와 인덕턴스의 변화에 따른 감쇠기의 위상 변화량을 초고주파 전송 선로  $Z_5$ 를 이용하여 상쇄시켰다.

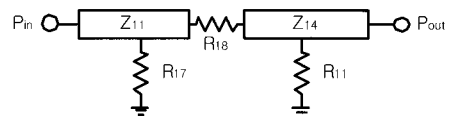


Fig. 5 The circuit of the π type fixed attenuator

3. 가변 감쇠기의 분석

일반적으로 감쇠기를 Even-Odd Mode 이론을 이용하여 해석하지만<sup>[5]</sup>, 여기서는 더 간단하고 직접적인 2-Port 기법으로 분석하였다.

그림 6은 전형적인 3 dB 방향성 결합기를 기초로 한 감쇠기를 2-Port 구조임을 강조하기 위해 변형된 형태로 나타내었다. 각각의 2-Port 요소들

AA~FF로 표기하였으며, GG는 AA~EE의 종속 결합이다. 그러므로 전체 감쇠기 회로의 최종적인 2-Port 표현 관계는 FF와 GG의 병렬 구조임을 알 수 있다.

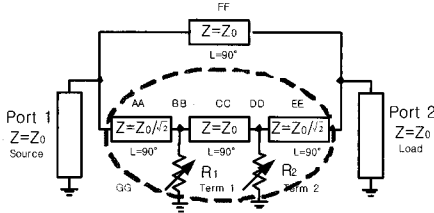


Fig. 6 Coupler-based variable attenuator schematic redrawn to emphasize 2-Port structure

그림 3의 회로망에 대한 산란 파라미터의 결정 순서는 다음과 같다.

1. 2-Port FF의 Y-파라미터 행렬을 구한다.
2. 2-Port AA~EE에 대한 ABCD-파라미터 행렬을 구한다.
3. 행렬 AA, BB, CC, DD, EE를 순서대로 곱하여 ABCD-파라미터 행렬 GG를 구한다.
4. ABCD-파라미터 GG를 Y-파라미터로 변환한다.
5. Y-파라미터 행렬 FF와 GG를 더한다.
6. 5번의 Y-파라미터 행렬을 S-파라미터로 변환한다. 구해진 S-파라미터 행렬은 전체 회로망에 대한 S-파라미터를 나타낸다.

그림 3의 전체 회로망에 대한 산란 파라미터는 다음 식(1)과 같으며, 식(1)의 S-parameter를 이용함으로써 감쇠기의 여러 가지 동작 조건을 평가할 수 있다. 그림 3에서 R<sub>1</sub>과 R<sub>2</sub>를 순수 저항으로 나타내었지만, 실질적으로는 R<sub>1</sub>과 R<sub>2</sub>가 복소 임피던스인 경우를 고려하여야 한다. 식(1)에서 R<sub>1</sub>=R<sub>2</sub>=Z<sub>L</sub>로서 동일하게 종단되었을 경우를 고려하면, S-parameter는 식(2)와 같다.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{Z_0(R_1 - R_2)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} & \frac{j(R_1 R_2 - Z_0^2)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \\ \frac{j(R_1 R_2 - Z_0^2)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} & \frac{Z_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{j(Z_L - Z_0)}{Z_L + Z_0} \\ \frac{j(Z_L - Z_0)}{Z_L + Z_0} & 0 \end{bmatrix}, R_1 = R_2 = Z_L \quad (1)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & j\Gamma_c \\ j\Gamma_c & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $\Gamma_c = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0)$ 는 종단 결합 포트에서의 반사계수이며 이상적인 가변 감쇠기를 나타낸다. S<sub>11</sub>=S<sub>22</sub>=0이기 때문에 입·출력 포트는 감쇠량에 관계없이 완전 정합되며, S<sub>21</sub>과 S<sub>12</sub>의 크기는 반사계수  $\Gamma_c$ 의 크기와 같으므로 임의의 감쇠량에 따른 반사계수의 크기를 식(3)에서 계산할 수 있다. 또한 식(3)은 다음과 같이 Z<sub>L</sub>에 대하여 풀 수 있으며, Z<sub>L</sub>과 Z<sub>0</sub>가 양의 실수이고 Z<sub>L</sub> < Z<sub>0</sub>인 경우에는 식(4)와 같고, Z<sub>L</sub> > Z<sub>0</sub>일 때는 식(5)가 된다.

$$S_{21}[dB] = 20 \text{Log}(|\Gamma_c|) = 20 \text{Log} |(Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0)| \quad (3)$$

$$Z_L = \frac{Z_0 \left(1 - 10^{-\frac{S_{21}}{20}}\right)}{1 + 10^{-\frac{S_{21}}{20}}} \quad (4)$$

여기서, S<sub>21</sub>은 dB 값이다.

$$Z_L = \frac{Z_0 \left(1 + 10^{-\frac{S_{21}}{20}}\right)}{1 + 10^{-\frac{S_{21}}{20}}} \quad (5)$$

식(5)으로부터 1~40 dB의 감쇠 범위에 필요되는 최소 및 최대 종단 임피던스를 결정할 수 있으며, 이론적으로 1~40 dB의 감쇠 범위에 필요되는 종단 임피던스 Z<sub>L</sub>은 약 3~49 Ω이 된다. 따라서 PIN 다이오드는 근사적으로 3~1250 Ω의 RF 저항 값을 나타내어야 한다.

식(1)으로부터 R<sub>1</sub>≠R<sub>2</sub>와 같이 동일하지 않은 결합 포트 종단은 S<sub>11</sub>과 S<sub>22</sub>가 "0"이 아니므로 반사적이게 된다는 것을 알 수 있으며, 입·출력 포트에 대한 반사손실은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R_L &= -S_{11}[dB] = -S_{22}[dB] \\
 &= -20 \text{Log} \left| \frac{Z_0(R_2 - R_1)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \right|
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

입·출력 포트간에 발생하는 감쇠의 크기는 동일한 결합 포트 종단의 경우와 마찬가지로,  $S_{21}$ 의 크기와 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Attenuation}[dB] &= -S_{21}[dB] \\
 &= -20 \text{Log} \left| \frac{(R_1 R_2 - Z_0^2)}{(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \right|
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

식(7)으로부터 반사손실은 결합 포트 종단  $R_1$ 과  $R_2$ 간의 차가 최소일 때 가장 크고,  $R_1$ 과  $R_2$ 간의 차이가 증가함에 따라 줄어든다는 것을 알 수 있다. 그러므로 2-Port 분석의 결과적인 산란 파라미터는 결합 포트의 종단 임피던스가 같은 경우와 같지 않은 경우에 있어서의 감쇠기의 동작을 예상할 수 있게 하였다.

본 논문에서는 방향성 결합기의 결합 포트상에 동일한 PIN 다이오드를 사용하고 바이어스 조건을 똑같이 변화시킴으로써 식(1)의  $R_1=R_2=Z_L$ 로서 동일하게 종단되었을 경우의 산란 파라미터를 이용할 수 있으며, 또한 PIN 다이오드에 병렬로 실재 소자 값인 51 Ω 저항을 부가함으로써 식(4)의  $Z_L < Z_0$ 인 경우를 이용하여 감쇠량에 따른 부하 임피던스의 값을 예측할 수 있다.

#### 4. 가변 감쇠기의 특성 측정 및 평가

그림 7은 두께 0.5 mm, 유전율 3.5인 테프론 기판을 사용하여 제작한 가변 감쇠기의 실물 사진을 나타낸다. 바이어스 회로는 마이크로파 회로가 갖는 RF 특성에 영향을 미치지 않아야만 하는데, 즉 RF 신호가 바이어스 회로에 누설되지 않고 바이어스 회로는 RF 신호의 전송을 방해하지 않아야만 하므로 설계상의 주의가 필요하다. 이상적으로 사용주파수 대역에서 커패시터는 단락회로로서 인덕터는 개방회로로서의 역할을 해야한다. 칩 커패

시터는 DC 전원 차단용으로 칩 인덕터는 RF 신호 차단용으로서 최소 삽입손실을 갖는 RF 초크를 구성하여 바이어스 인가시 원하는 주파수 대역에서 RF 신호가 DC 전원부로 누설되는 것을 방지하도록 설계하였다. 또한 결합 포트에 51 Ω 병렬 저항은 종단  $Z_L$ 이 선로의 특성 임피던스인 50Ω을 초과하지 않는다는 것을 보장한다.

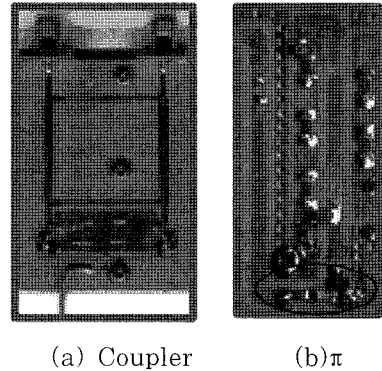


Fig. 7 The photograph of the fabricated variable attenuator

아래의 그림 8은 제어전압의 변화에 따른 감쇠기의 감쇠량을 나타낸 것이다. WCDMA 사용주파수인 2.1 GHz 대역에서 -5 ~ -38 dB로 약 33 dB 이상의 감쇠범위를 얻었으며, 방향성결합기를 이용한 가변 감쇠기보다 π형 가변감쇠기가 선형성이 더욱더 우수함을 나타냄을 알 수 있다.

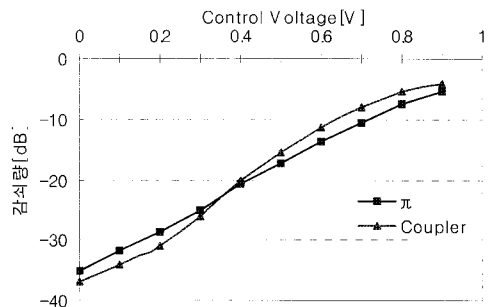


Fig. 8 Attenuation over control voltage

또한 방향성결합기를 이용한 가변 감쇠기의 장점 중의 하나는 입·출력 포트가 감쇠에 관계없이 완

전한 정합 상태를 유지한다는 것이며, 반면  $\pi$ 형 가변감쇠기는 다른 소자와 임피던스 매칭이 필요하지 만 크기가 주파수에 관계없이 10분의 1 정도로 매우 작아 어디든지 설계가 가능하다.

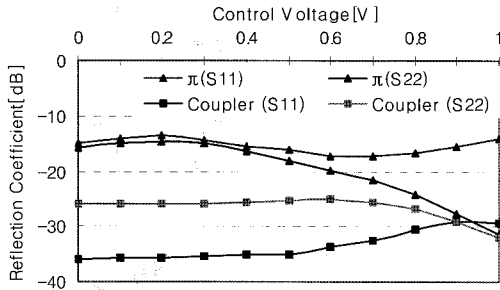


Fig. 9 Input and output reflection coefficients over control voltage

그림 9에서 제어전압의 범위에서 입·출력 반사 계수  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ 가 -13 dB 이하의 특성을 나타내었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 감쇠기의 분석을 위해 기존의 Even-Odd Mode 이론을 사용하지 않고 간단하고 직접적인 2-port 기법을 적용하였다. 따라서 도출된 산란 파라미터는 가변 감쇠기의 동작 특성을 보다 쉽게 이해하고 예측할 수 있게 함으로써 2-port 분석법의 타당성을 입증하였다. 또한, 분석을 토대로 3 dB 방향성 결합기와  $\pi$ 형 가변감쇠기의 입·출력 특성과 격리 특성, 그리고 PIN 다이오드의 전류제어 특성을 이용하여 가변 감쇠기를 구현하고 그 성능을 평가하였다. 기판 두께 0.5mm, 유전율 3.5인 테프론 기판, 가변 중단은 PIN 다이오드를 사용하였다. 제작된 가변 감쇠기는 사용주파수 2.1 GHz에서 감쇠범위 33 dB 이상, 그리고 제어전압 0~1 V에서 입·출력 반사 계수 -13 dB 이하의 특성을 나타내었다.

따라서 본 연구를 통하여 구현된 가변 감쇠기는 전력증폭기의 AGC 회로 내에서 외부적인 요인에 관계없이 전력증폭기의 이득제어를 통해 전력증폭

기의 비선형 특성에 의한 AM/AM 변환 왜곡을 감소시켜 증폭기의 선형성을 향상시킬 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] Behzad Razavi, RF Microelectronics, Prentice Hall PTR, pp. 54-97, 1998.
- [2] Stepan Lucyszyn and Ian D. Robertson, "Optically Induced Measurement Anomalies with Voltage-Tunable Analog-Control MMICs," IEEE Transactions on MTT, Vol. 46, No. 8, August 1998, pp. 1109, section V. "Analog Attenuators" subsection A. "MESFET-Based Attenuator."
- [3] Inder Bahl, Prakash Bhartia, Microwave solid state circuit design, wiley New York, pp. 667-670, 1988.
- [4] Robert E. Collin, Foundation for Microwave Engineering, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 432, 1992.
- [5] Stewart walker, "A low phase shift attenuator", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques vol. 42 No. 2, pp. 182-185, Feb. 1994.
- [6] J. Reed, G. J. Wheeler, "A Method of Analysis of Symmetrical Four-Port Network," IRE Trans. MTT-4, pp. 246~252, Oct., 1956.

### 저 자 소 개

#### 전중성(田重成)

1961년생, 1997년 한국해양대학교 전자통신공학과(석사), 2000년 한국해양대학교 전자통신공학과(공학박사), 2000~2007 한국해양대학교 부설 산 업기술연구소 전임연구원

