

# 광대역 격리 특성을 갖는 기판 집적 도파관 전력 분배기

## Broad-Band Substrate Integrated Waveguide Power Divider with Excellent Isolation Performance

김경민 · 변진도 · 정경영 · 이해영

Kyeongmin Kim · Jindo Byun · Kyung-Young Jung · Hai-Young Lee

### 요 약

본 논문에서는 광대역 격리 특성을 갖는 개선된 기판 집적 도파관(substrate integrated waveguide) 전력 분배기를 제안한다. 제안된 전력 분배기는 2단 윌킨슨 전력 분배기의 구조를 기판 집적 도파관에 적용함으로써 우수한 입출력 정합 특성과 광대역 격리 특성을 갖는다. 측정 결과, 13.12~16.14 GHz의 주파수 대역에서 삽입 손실은  $4\pm 0.5$  dB, 입력 반사 손실은 10 dB 이상으로 나타났다. 또한, 10.37~17.64 GHz의 주파수 대역에서 출력 반사 손실과 격리 특성은 10 dB 이상을 나타냈다.

### Abstract

In this paper, we propose a substrate integrated waveguide(SIW) power divider to yield excellent broadband isolation performance. In order to achieve high broadband isolation, a two stage Wilkinson power divider is employed in SIW. The measurement results show the insertion loss( $S_{21}$ ,  $S_{31}$  to be  $4.0\pm 0.5$  dB) and input return loss( $S_{11}$  of 10 dB) from 13.12 GHz to 16.14 GHz. Moreover, the results show that the output return loss and isolation between output ports are larger than 10 dB between 10.37 GHz and 17.64 GHz.

Key words : Substrate Integrated Waveguide(SIW), Wilkinson Power Divider

### I. 서 론

구형 도파관(rectangular waveguide)은 낮은 삽입 손실과 높은 전력 전달 특성을 위한 전송 선로로써 마이크로파 및 밀리미터파 시스템에서 광범위하게 사용된다. 그러나 구형 도파관은 그 크기가 크고 무거울 뿐만 아니라 고가의 공정 비용을 요구하는 문제점을 갖고 있다.

최근에는 이러한 구형 도파관의 장점을 활용하고, 단점을 보완하기 위해 일반적인 인쇄 회로 기판(printed circuit board)에 평행한 두 열의 메탈릭 비아 홀을 주기적으로 배열하여 구현한 기판 집적 도파관(substrate integrated waveguide)에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 일반적으로, 기판 집적 도파관은 그림 1과 같이 구형

도파관의 세로측 벽면을 주기적인 비아 홀로 대체함으로써 근사적으로 구현한 도파관이다. 세로측 벽면이 비아 홀로 구성되어 있기 때문에 표면 전류가 진행 방향으로 흐르지 않는다. 따라서 기판 집적 도파관 내에는  $TE_{m0}$  만 존재하고, 기본 전파 모드는  $TE_{10}$  모드가 된다<sup>[2]</sup>. 기본 전파 모드만 고려한다면 기판 집적 도파관의 기본 특성은 도파관 구조와 동일하므로 각 모드와 기본 모드의 차단 주파수 특성은 다음 식을 따른다.

$$f_{Cmn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

$$f_{C10} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

「본 연구는 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다(2009-0092128).」

아주대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20090529-02S

· 수정완료일자 : 2009년 8월 12일

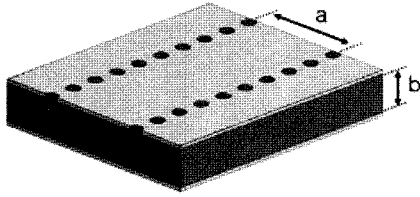


그림 1. 기판 집적 도파관 구조  
Fig. 1. Structure of the substrate integrated waveguide.

앞의 식에서  $a, b$ 는 각각 기판 집적 도파관의 가로, 세로 길이를 나타내며,  $\mu, \epsilon$ 은 각각 투자율과 유전율을 나타낸다.

따라서 기판 집적 도파관은 제작이 용이하며 낮은 비용으로 쉽게 구현이 가능하고 평면회로와 쉽게 집적화가 가능한 장점을 가진다. 이러한 기판 집적 도파관의 장점을 이용하여 전이구조, 여파기, 커플러 안테나, 전력 분배기와 같은 응용 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[3]~[7]</sup>.

보고된 연구 중에서 기판 집적 도파관 전력 분배기는 위상 천이기, 위상 배열 안테나의 급전부 구현을 위한 핵심 장치로 그 역할이 중요하다. 그러나 기존에 연구된 기판 집적 도파관 전력 분배기는 출력 단자 사이의 격리도가 떨어지며, 입출력 단자의 임피던스 정합이 되지 않는 문제점을 갖고 있다<sup>[6],[7]</sup>. 이와 같은 특성을 갖는 전력 분배기가 위상 배열 안테나의 급전단에 연결이 되면 안테나들 사이에 간섭이 발생하여 시스템 전체에 악영향을 주게 된다. 따라서 기판 집적 도파관 전력 분배기의 격리도와 입출력단의 정합 특성의 개선이 필요하다.

기존 기판 집적 도파관 전력 분배기의 문제점을 해결하는 방법으로 입출력단의 정합 특성이 우수하고 출력단자간 높은 격리도를 가지는 윌킨슨 전력 분배기 이론 바탕으로 구현한 기판 집적 도파관 전력 분배기가 발표되었다<sup>[8],[9]</sup>. 그러나 개선된 격리 특성을 갖는 기판 집적 도파관 전력 분배기는  $\lambda/4$  임피던스 정합기를 사용하기 때문에 협대역 주파수 특성을 갖는 단점이 있다.

본 논문에서는 2 단의 윌킨슨 전력 분배기의 구조<sup>[10]</sup>를 기판 집적 도파관에 적용하여 넓은 대역에서 높은 격리 특성을 갖는 기판 집적 도파관 전력 분배기를 설계하였다. 그 결과, 가용 주파수 대역(13.12~

16.14 GHz)에서 높은 격리도를 나타냈다. 따라서 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기는 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 동작하는 회로의 집적화 및 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

## II. 구조

### 2-1 기판 집적 도파관 전력 분배기 구조

그림 2는 기존에 발표된 기판 집적 도파관 전력 분배기의 구조를 나타낸다<sup>[6]</sup>. 기존의 기판 집적 도파관 전력 분배기는 그림에서 보는 것과 같이 단자 1로 인가된 신호가 같은 폭을 가지는 단자 2, 3로 균등하게 전력이 분배되는 구조이다. 격리 특성을 확인하기 위해 단자 2에 전원을 인가하였을 때 중심 주파수(15 GHz)에서 기판 집적 도파관 전력 분배기의 electrical-field 분포를 그림 3에 나타냈다. 높은 격리 특성을 가지는 전력 분배기는 단자 2로 전원을 인가하면 단자 3로 전달되는 electrical-field의 양이 거의 없어야 하나, 기존 기판 집적 도파관 전력 분배기는 그림에서 보는 것과 같이 단자 3로 전달되는 electrical-field가 존재함으로써 낮은 격리도를 가짐을 확인할 수 있다.

### 2-2 제안된 전력 분배기 구조

기존의 기판 집적 도파관 전력 분배기의 단점인 낮은 격리도와 입출력단 정합 특성을 개선하기 위해 선행 연구가 진행되었다. 선행된 연구에서는 입출력

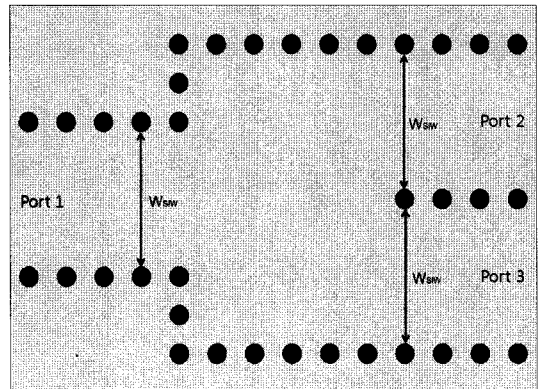


그림 2. 기존 기판 집적 도파관 전력 분배기  
Fig. 2. Conventional SIW power divider.

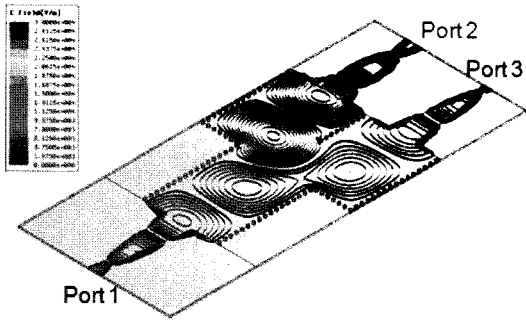


그림 3. 기존 기판 집적 도파관 전력 분배기의 electrical-field 분포  
 Fig. 3. Electrical-field distribution of the conventional SIW power divider.

정합 특성이 우수하고 높은 격리 특성을 갖는 윌킨슨 전력 분배기의 이론을 기판 집적 도파관에 적용하여 단점을 개선하였다. 그러나 선행 연구된 기판 집적 도파관 전력 분배기는 전이 구조에 저항을 연결하여 다른 기판 집적 도파관 소자와의 연결시 추가적인 전이 구조가 필요하고<sup>[8]</sup>,  $\lambda/4$  임피던스 정합기를 사용하기 때문에 협대역 격리 특성을 가지게 된다<sup>[9]</sup>. 따라서 본 논문에서는 추가적인 전이 구조를 사용하지 않고 기판 집적 도파관 내부에 저항을 연결하여 넓은 대역에서 높은 격리 특성을 갖는 기판 집적 도파관 전력 분배기를 2단의 윌킨슨 전력 분배기 구조를 사용하여 설계하였다.

그림 4는 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기의 등가회로를 나타냈다. 2단의 윌킨슨 전력 분배기 구조를 사용할 경우, 2개의 주파수에서 극점이 생기고, 이 2개 극점의 주파수 비가 정해지면 선로의 길이 ( $\ell$ )을 제외한 전송선로의 임피던스( $Z_1, Z_2$ ) 값, 격리 저항의 값( $R_1, R_2$ )은 전송선로의 특성 임피던스( $Z_0$ )값에 의해 결정된다<sup>[10]</sup>. 선로의 길이( $\ell$ )은 관내 파장 ( $\lambda_g$ )에 의해 구해지며, 기판 집적 도파관의 관내 파장은 다음의 식을 따른다.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \quad (3)$$

본 논문에서는 극점 주파수 비를 1.5로 설계하였고, 그에 해당하는 값을 표 1에 정리하였다. 그림 5는 본 논문에서 제안한 기판 집적 도파관 전력 분배기의 구조이다. 제안된 구조의 등가회로 해석을 통

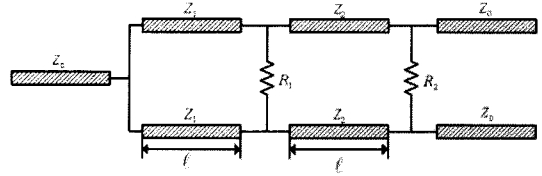


그림 4. 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기의 등가회로  
 Fig. 4. Equivalent circuit of the proposed SIW power divider.

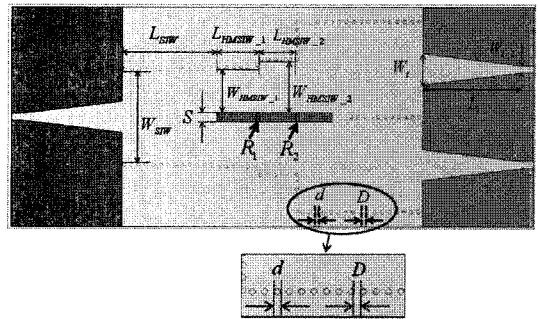


그림 5. 제안된 전력 분배기의 구조  
 Fig. 5. Structure of the proposed power divider.

표 1. 등가회로의 설계 변수  
 Table 1. Parameters of equivalent circuit.

$Z_1$	$1.6670Z_0$
$Z_2$	$1.1998Z_0$
$R_1$	$1.8643Z_0$
$R_2$	$5.3163Z_0$
$\ell$	$0.192 \lambda_g$

하여 얻은 값을 기판 집적 도파관에 적용하기 위해 도파관의 특성 임피던스를 결정해야 한다. 기판의 높이와 유전 상수가 정해져 있다고 가정할 때, 기판 집적 도파관의 특성 임피던스는 비아 홀 사이의 거리에 의해 결정된다. 앞서 언급한 것과 같이 기판 집적 도파관은 구형 도파관과 기본 전파 모드가 동일하므로 구형 도파관의 특성 임피던스 식을 적용할 수 있으며, 3-D FEM 시뮬레이터로 최적화한 결과 기판 집적 도파관의 특성 임피던스는 중심 주파수가 15 GHz일 때, 15  $\Omega$ 의 값을 얻었다.

본 논문에서는 격리 저항을 연결하기 위해 하프

표 2. 최적화된 설계 변수

Table 2. Parameter of optimized structure.

$W_{SIW}$	$W_{HMSIW\_1}$	$W_{HMSIW\_2}$
10 mm	4.7 mm	5.6 mm
$L_{SIW}$	$L_{HMSIW\_1}$	$L_{HMSIW\_2}$
10.5 mm	4.3 mm	4.3 mm
$W_t$	$W_{t\_1}$	$L_t$
3.4 mm	0.76 mm	11 mm
$S$	$D$	$d$
1 mm	0.4 mm	0.4 mm

모드 기판 집적 도파관(half mode substrate integrated waveguide)<sup>[11]</sup>을 이용하였다. 하프 모드 기판 집적 도파관에서는 슬롯의 간격( $S$ )에 의해 cross-coupling 이 발생할 수 있기 때문에 cross-coupling이 발생하지 않는 슬롯의 간격을 선택할 필요가 있다.

측정을 위한 급전 선로는 마이크로스트립 전이 구조를 이용하였다. 표 2에 3-D FEM 시뮬레이터(HFSS v.11)를 이용하여 최적화된 설계 변수를 정리하였다.

### III. 해석 및 측정 결과

#### 3-1 시뮬레이션

설계된 기판 집적 도파관 전력 분배기는 Ansoft사의 HFSS v.11을 사용하여 해석하였다. 그림 6은 중심주파수(15 GHz)에서 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기의 electrical-field 분포를 나타낸 것이다. 그림 3과 비교하여 단자 2에서 신호가 인가되었을 때에 단자 3로 전달되는 electrical-field의 양이 감소했으며, 따라서 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기가 높은 격리 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 7은 기판 집적 도파관 전력 분배기의 삽입 손실과 입력 반사 손실을, 그림 8은 출력 반사 손실과 격리도를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과, 입출력 반사 손실( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$ )이 10 dB 이상인 부분을 가용 주파수 대역으로 정의하였을 경우, 대역폭은 5.10 GHz (12.30~17.40 GHz)으로 나타났으며, 삽입 손실( $S_{21}$ ,  $S_{31}$ )은  $3.2 \pm 0.5$  dB, 출력단간 격리 특성( $S_{23}$ ,  $S_{32}$ )은 10 dB 이상으로 나타났다. 이처럼 제안된 기판 집적 도파

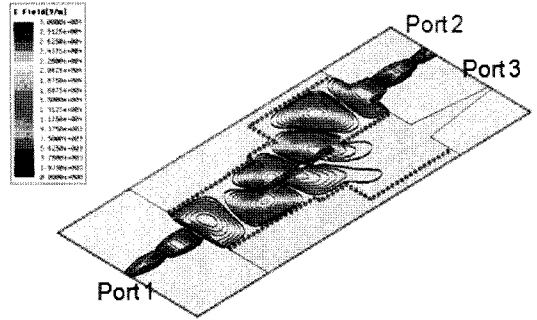


그림 6. 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기의 electrical-field 분포

Fig. 6. Electrical-field of the proposed SIW power divider.

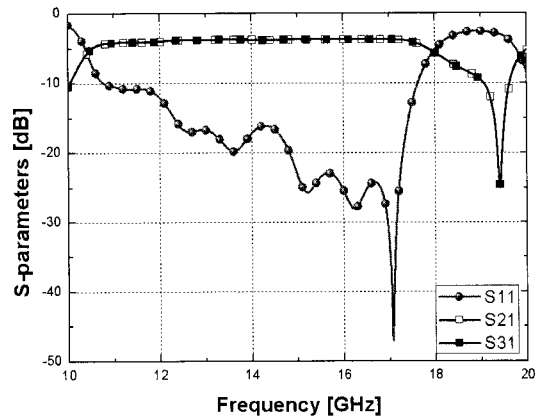


그림 7. 삽입 손실과 입력 반사 손실

Fig. 7. Insertion loss and input return loss.

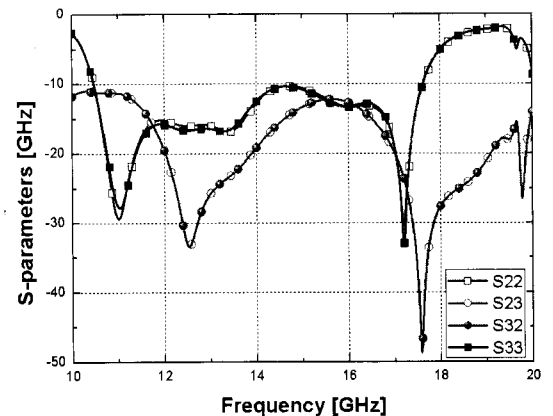


그림 8. 출력 반사 손실과 격리도

Fig. 8. Output return loss and isolation.

관 전력 분배기는 2단의 윌킨슨 전력 분배기 구조를 사용하여 추가적인 극점을 형성함으로써 광대역 격리 특성을 갖는다.

### 3-2 제작 및 측정

그림 9는 본 논문에서 제안된 설계 방법에 의해 제작된 기판 집적 도파관 전력 분배기이다. 제작에 사용된 유전체 기판은 높이가 0.254 mm이고,  $\epsilon_r=2.33$  인 Taconic사의 기판을 사용하였고, 측정은 Agilent사의 vector network analyzer를 이용하였다. 시뮬레이션결과 측정된 삽입 손실과 입력 반사 손실을 그림 10에 나타냈다. 측정 결과, 입력 반사 손실( $S_{11}$ ) 10 dB 이상, 삽입 손실( $S_{21}$ ,  $S_{31}$ )은  $4.0\pm 0.5$  dB을 기준으로 13.12~16.14 GHz 대역에서 우수한 특성을 나타냈다. 측정된 삽입 손실은 시뮬레이션 결과와 비교하여 조금 크게 나타났는데, 이는 불완전한 마이크로 스트립-기판 집적 도파관 전이 구조와 SMA 커넥터로 인한 손실에 기인한 것으로 사료된다. 또한, 출력 반사 손실과 격리도의 측정 결과는 그림 11과 12에 나타냈으며, 가용 주파수 대역 (13.12~16.14 GHz)에서 10 dB 이상의 우수한 특성을 나타냈다. 이로써 본 논문에서 제안한 기판 집적 도파관 전력 분배기는 실제로 제작 및 응용이 가능하다는 것을 확인하였다.

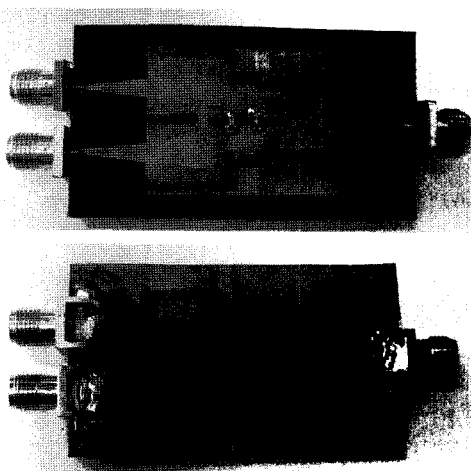


그림 9. 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기의 윗, 아랫면 제작 사진  
 Fig. 9. Upper and lower plane of the fabricated SIW power divider.

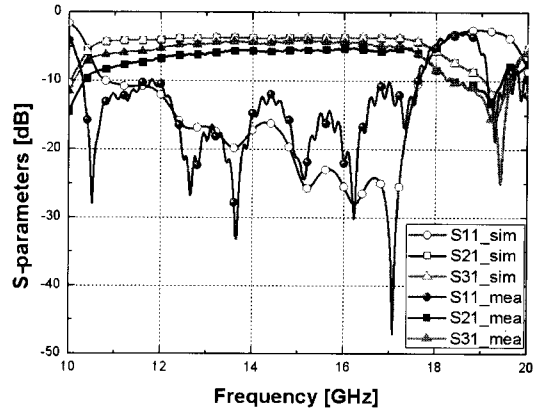


그림 10. 시뮬레이션과 측정된 삽입 손실 및 입력 반사 손실  
 Fig. 10. Simulated and measured insertion loss and input return loss.

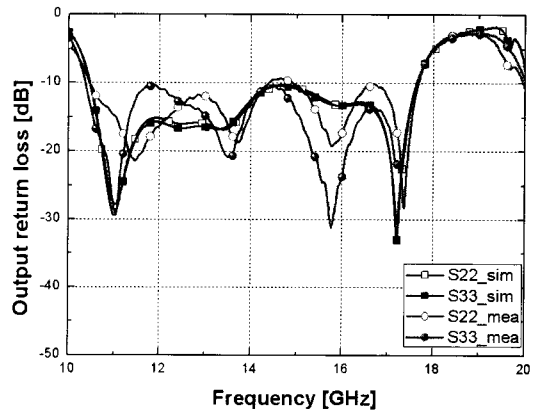


그림 11. 시뮬레이션과 측정된 출력 단자의 반사 손실  
 Fig. 11. Simulated and measured output return loss.

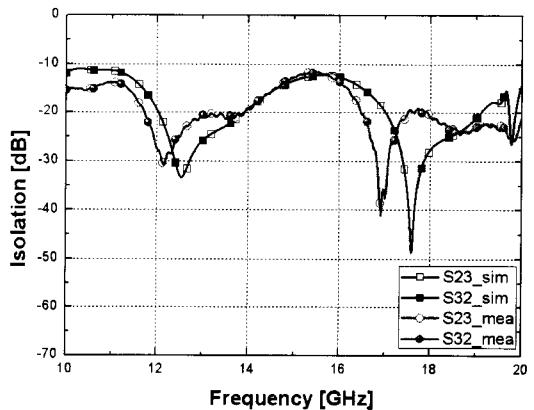


그림 12. 시뮬레이션과 측정된 출력 단자의 격리 특성  
 Fig. 12. Simulated and measured isolation between output ports.

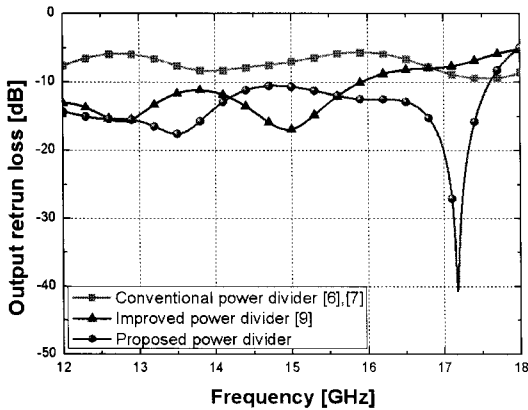


그림 13. 출력 반사 손실의 비교  
Fig. 13. Comparison of output return loss.

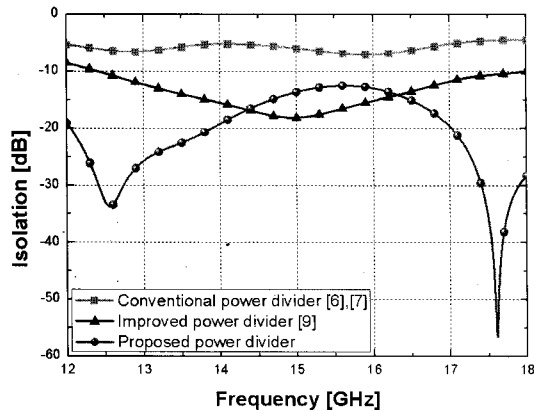


그림 14. 출력 단자의 격리 특성 비교  
Fig. 14. Comparison of isolation between output ports.

### 3-3 선행 연구된 결과와 비교

그림 13과 14는 선행 연구된 기판 집적 도파관 전력 분배기<sup>[6],[7]</sup>, 개선된 격리 특성을 갖는 전력 분배기<sup>[9]</sup>와 본 논문에서 제안하는 기판 집적 도파관 전력 분배기의 출력 반사 손실과 격리 특성의 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타냈다. 그림에서 보는 것과 같이 선행 연구된 기판 집적 도파관 전력 분배기의 출력 반사 손실( $S_{22}$ ,  $S_{33}$ )과 격리 특성( $S_{23}$ ,  $S_{32}$ )은  $7 \pm 1.5$  dB로써 출력단이 부정합 상태이고, 낮은 격리 특성을 갖는다. 개선된 격리 특성을 갖는 기판 집적 도파관 전력 분배기는 기존의 전력 분배기에 비해 출력 단간 정합 특성이 우수하고 높은 격리도를 갖지만, 윌킨슨 전력 분배기의 이론을 바탕으로 설계되어 협

대역의 주파수 특성을 갖는다. 반면, 본 논문에서 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기는 2단의 윌킨슨 전력 분배기 구조를 사용하여 보다 넓은 대역에서 우수한 출력 정합 특성과 높은 격리 특성을 가짐을 확인할 수 있었다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 광대역 격리 특성을 갖는 기판 집적 도파관 전력 분배기를 제안하였다. 제안된 기판 집적 도파관 전력 분배기는 2단의 윌킨슨 전력 분배기 구조를 바탕으로 설계하여 우수한 입출력 정합 특성과 높은 격리 특성을 나타냈다. 측정 결과 입출력 반사 손실( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$ )이 10 dB 이상인 부분을 가용 주파수 대역으로 정의하였을 경우, 대역폭은 3.02 GHz(13.12~16.14 GHz)으로 나타났으며, 삽입 손실( $S_{21}$ ,  $S_{31}$ )은  $4 \pm 0.5$  dB, 출력단간 격리 특성( $S_{23}$ ,  $S_{32}$ )은 10 dB 이상으로 나타났다. 이처럼 본 논문에서 제안한 설계 방법에 의해 설계된 전력 분배기는 시뮬레이션을 통해 우수한 입출력 정합 특성과 격리 특성을 가지는 것을 확인하였고, 제작을 통해 타당성을 검증하였다. 또한, 기존의 기판 집적 도파관 전력 분배기의 문제점들을 개선해 줄 수 있는 방법을 제시하였다. 따라서 배열 안테나의 급전 선로에 적용될 가능성이 높고, 기판 집적 도파관을 이용한 마이크로파 및 밀리미터파 시스템의 집적화 및 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] K. Wu, D. Deslandes, and Cassivi, "The substrate integrated circuits - A new concept for high-frequency electronics and opto-electronics", in *Proc. 6th Int. Conf. Telecommun. Modern Sat, Cable Broadcasting Service(TELSIKS)*, pp. PIII-PX, 2003.
- [2] F. Xu, K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 66-73, Jan. 2005.
- [3] S. Lee, S. Jung, and H. Y. Lee, "Ultra-wideband CPW-to-substrate integrated waveguide transition using and elevated-CPW section", *IEEE Microw.*

- Wireless Compon Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 746-748, Nov. 2008.
- [4] Z. C. Hao, W. Hong, X. P. Chen, K. Wu, and T. J. Cui, "Multilayered substrate integrated waveguide (MSIW) elliptic filter", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 95-97, Feb. 2005.
- [5] B. Liu, W. Hong, Z. C. Hao, and K. Wu, "Substrate integrated waveguide 180-degree narrow wall directional coupler", in *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC'05)*, Suzhou, vol. 1, pp. 559-561, Dec. 2005.
- [6] S. Germain, D. Deslandes, and K. Wu, "Development of substrate integrated waveguide power dividers," in *Proc. IEEE Canadian Conf. Elect. Comput. Eng.*, pp. 1921-1924, 2003.
- [7] Z. C. Hao, W. Hong, and K. Wu, "Multi-way broad-band substrate integrated waveguide(SIW) power divider", in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propagationm*, Washington, DC, pp. 639-642, Jul. 2005.
- [8] Z. Y. Zhang, K. Wu, "Broadband half-mode substrate integrated waveguide(HMSIW) Wilkinson power divider", in *IEEE MTT-S Symp. Dig.*, pp. 879-882, 2008.
- [9] 김경민, 엄동식, 김동엽, 이해영, "Isolation이 개선된 Substrate Integrated Waveguide 전력 분배기", 한국전자과학기술회 종합학술발표회, 18(1), p. 70, 2008년 11월.
- [10] S. B. Cohn, "A class of broadband three port TEM-mode hybrids", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-16, no. 2, pp. 110-116, Feb, 1968.
- [11] W. Hong, B. Liu, Y. Q. Wang, Q. H. Lai, and K. Wu, "Half mode substrate integrated waveguide: a new guide wave structure for microwave and millimeter wave application", in *Proc. Joint 31st, Int. Conf. Infrared Millim, Wave 14th Int. Conf. Terahertz Electron*, Shanghai, p. 219, Sep. 2006.

김 경 민



2009년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)  
 2009년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 초고주파 수동 소자 개발 및 회로 설계

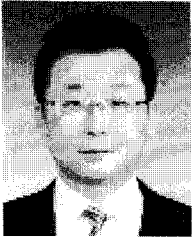
변 진 도



2006년 8월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)  
 2008년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2008년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계,

SI/EMC

### 정 경 영



1996년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
1998년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)  
1998년 1월~2001년 4월: 현대전자 전임연구원  
2001년 5월~2004년 5월: 팬택 & 큐

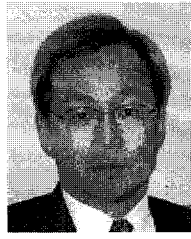
리텔 선임연구원

2008년 8월: The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

2008년 8월~2009년 2월: The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 전기 및 컴퓨터공학과 Post-Doctoral Researcher

2009년 3월~현재: 아주대학교 전자공학부 전임강사  
[주 관심분야] Metamaterials, Plasmonics, 전자파 수치해석, 초고주파공학

### 이 해 영



1980년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
1982년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1982년~1986년: 국방부 연구사무관  
1989년 12월: The University of Texas at Austin (공학박사)

1990년~1992년: LG기술원 기초1실장

1992년~현재: 아주대학교 전자공학부 정교수

[주 관심분야] 고속/고밀도 System in Package, RF 소자 및 광전소자의 설계/측정, 고속반도체테스트기술