

# 대 면적 기판 집적 PDN의 위상차 문제를 제거하기 위한 유전체 나사를 이용한 가변 기판 집적 도파관

## Tunable SIW Using Dielectric Screw for Eliminating the Phase Imbalance of Large Size Substrate Integrated Power Distribution Network

변진도 · 이해영

Jindo Byun · Hai-Young Lee

### 요약

본 논문에서는 대 면적 기판 집적 도파관 전력 분배 네트워크(Substrate Integrated Waveguide Power Distribution Network: SIW PDN)의 출력 단자 간 위상차를 제거하기 위해 유전체 나사를 적용한 가변 기판 집적 도파관(SIW: Substrate Integrated Waveguide)을 제안한다. 본 제안 구조는 가변 기판 집적 도파관에 비 도금된 비아 홀에 부분적으로 유전체 나사를 삽입하여 S-parameter의 크기에 거의 영향을 주지 않고 위상 천이를 이룬다. 이로써, 유전체 나사가 삽입되지 않은 가변 기판 집적 도파관이 적용된 대 면적 SIW PDN(370 mm×195 mm)의 측정된 ±33.9°의 위상 차이가 본 제안 구조를 통하여 ±4.65°까지 크게 감소되었다. 본 논문에서 제안된 유전체 나사를 이용한 가변 SIW는 향후 초경량, 고성능 기판 집적 위상 배열 시스템 및 대 면적 SIW 회로 응용에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

### Abstract

In this paper, we propose a tunable SIW(Substrate Integrated Waveguide) using dielectric screws for eliminating the phase imbalance of large size power distribution networks(PDN). Alumina screws partially inserted into several through holes of the tunable SIW section effectively change the phase shift without S-parameter degradation. ±33.9° measured phase imbalance of a large conventional 9 GHz SIW-PDN of 370 mm×195 mm size has been greatly reduced to ±4.65°. We expect that the proposed tunable SIW plays an important role for a light-weight, high performance substrate integrated phased array system(Si-PAS) and large size SIW circuit applications.

Key words : Substrate Integrated Waveguide(SIW), Tunable Phase Shifter, Phased Array System, Power Distribution Network

### I. 서론

위상 배열 시스템들은 낮은 교차 편파, 높은 효율 및 높은 이득을 필요로 하는 레이더 및 통신 시스템들에 널리 적용되고 있다. 특히, 항공 및 우주용 합성 개구 레이더(Synthetic Aperture Radar: SAR) 시스템은 상업용 및 군사적 응용들을 위해 매우 유용한 감시 장비로써 활용된다. 그리고 지구 관측 위성으로써 SAR 위성은 광학적 기능을 가진 위성 대비 기후 관측, 이동 물체 추적, 환경 분야 감시 등의 활용에서 기후 조건에 상관없이 또한 지표면의 구성에 따른 제약에 상관없이 활용, 적용될 수 있는 장점을

본 연구는 한국연구재단을 통하여 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL: National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다(2009-0092128).  
아주대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20091127-02S

· 교신저자 : 이해영(e-mail : hylee@ajou.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 2월 11일

가진다<sup>[1],[2]</sup>.

특히 여타 대역에 비해 높은 공간 해상도를 가질 수 있는 X-band SAR 위성에서, 매우 큰 안테나 서버 시스템은 높은 배열 안테나 이득과 높은 공간 해상도를 얻기 위해 필요하다. 또한 상응하는 RF 전력 분배 네트워크(Power Distribution Network: PDN)는 위성 RF 탑재체의 안테나 서버 시스템에 신호를 전달하기 위해서 역시 넓은 크기를 가져야만 한다. 이러한 대 면적 PDN의 경우, 적용되는 기판의 유전율의 비 균일성 때문에 PDN은 전체 위상 배열 시스템의 성능의 저하를 유발하는 출력 단자 간 위상차를 가지게 된다<sup>[3]</sup>.

한편, 기판 집적 도파관(Substrate Integrated Waveguide: SIW) 기술은 도파관의 고유한 낮은 손실과 낮은 제작 단가와 같은 평면형 기판 기술의 장점을 그대로 결합할 수 있어 위성용 RF 탑재체에서 고성능 마이크로파 및 밀리미터파 대역 부품 및 시스템의 설계에 매우 매력적이다. 또한 SIW 기술은 기판에 완전히 집적되어 얇은 두께와 초경량 및 소형 설계가 가능할 뿐만 아니라, 도파관과 같은 구조로써 외부의 전자기파에 영향을 받지 않는 완전 차폐(hermetic solution)의 또 다른 장점을 가진다<sup>[4],[5]</sup>.

위와 같은 여러 장점들을 바탕으로, SIW 전력 분배기/결합기, 위상 천이기, 위상 배열 안테나 및 높은 품질계수를 갖는 대역 통과 여파기 등 항공, 우주용 수동 소자들에 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>[6]-[9]</sup>. 여기서, SIW 전력분배기/결합기를 기반을 둔 매우 큰 다채널 SIW 전력 분배 네트워크가 SAR 위성의 RF 탑재체에 적용된다면, 앞서 언급한 문제와 마찬가지로 적용된 매우 큰 기판의 유전율의 비 균일성으로 인한 출력 단자 간 위상차 문제는 피할 수 없다.

본 논문에서는 대 면적 SIW PDN의 출력 단자별 위상 차 문제를 제거하기 위해 유전체 나사를 이용한 가변 기판 집적 도파관을 제안한다. 알루미늄으로 이루어진 유전체 나사는 가변 SIW 부분의 비 도금된 비아 홀에 부분적으로 삽입되어 전체적인 S-parameter 성능의 악화 없이 효과적으로 위상의 천이를 발생시킨다. 본 논문에서는 천공된 홀이 1, 3, 7개의 경우를 연구하였으며, 이 중 천공된 홀이 7개 및 유전체 나사가 100 %로 삽입된 경우(완전히 비 도금된 비아 홀의 공간을 채웠을 경우), 최대 약 21°의 위상

천이를 가지며 X-band SAR 위성의 관심 주파수인 9.5~10 GHz 대역 내에서 15 dB 이상의 반사 손실을 가진다. 그리고 대 면적 16 way SIW PDN에서 출력 단자간 위상차 측정에서 최대 ±33.9° 값을 가졌으며, 가변 SIW를 적용하였을 경우 ±4.65°의 위상차로 크게 줄어들었다. 본 연구를 통해, 향후 SAR와 같은 위상 배열 시스템에서 SIW 시스템이 적용될 경우, 위상 보정에 유전체 나사를 이용한 가변 SIW는 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

## II. 제안된 가변 기판 집적 도파관의 구성 및 설계

### 2.1 기본 구조 구성 및 설계

제안된 유전체 나사를 이용한 가변 SIW의 기본 구조는 그림 1에 나타나 있다. 적용된 SIW는 X-band에 맞게 설계되어 폭( $W$ )은 15.7 mm이며, 기판은 Taconic TLY-5( $\epsilon_r=2.2\pm 0.02$ ,  $\tan \delta=0.0009$ , thickness=0.79 mm)가 사용되었다. 제안된 구조에서 사용된 SIW는 기존의 via-hole로 이루어진 SIW side-wall과는 달리 구형 도파관과 마찬가지로 castellated wall로 구성되어 있다. 이러한 castellated wall은 기존의 SIW와 같은 특성을 가지면서 동시에 via-hole의 side wall에 의한 누설 전력 및 도전 손실의 감소를 가질 수 있다.

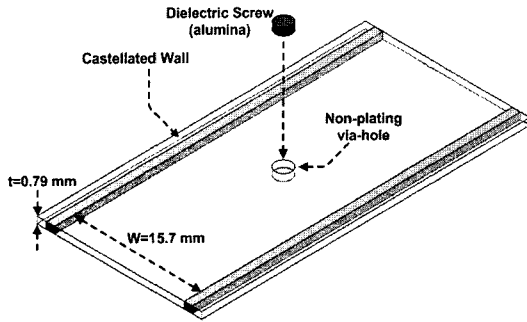
가변 SIW는 그림 1(c)와 같이 기판에 비 도금된 via-hole에 지름 1.7 mm의 수나사 형태 알루미늄( $\epsilon_r=9.4$ ) 유전체 나사를 삽입하는 구조로 구성되어 있다. 이를 통해 알루미늄 유전체 나사의 삽입량에 따라 가변 SIW 부분의 유효 유전율이 변화된다. 그리고 상응하는 전파 상수( $\beta(f)$ )에 비례하여 가변 SIW의 길이( $l$ )에 따라 위상 천이( $\phi(f)$ )가 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\Delta \phi(f) = \Delta \beta(f) \cdot l \quad (1)$$

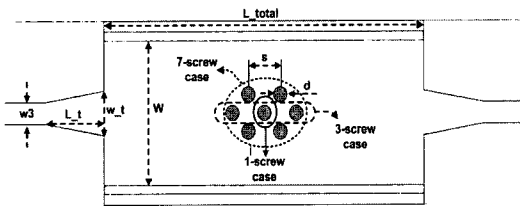
또한 변화된 전파상수는 다음과 같이 간략화될 수 있다<sup>[11]</sup>( $f$ : GHz,  $w$ : mm).

$$\Delta \beta(f) = \sqrt{\left(\frac{2\pi\sqrt{\epsilon_r + \Delta\epsilon_r}}{300}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{w}\right)^2} \quad (2)$$

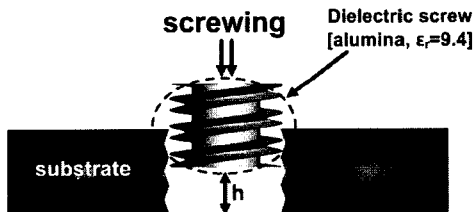
여기서  $f$ 는 주어진 동작 주파수,  $\epsilon_r$ 은 기판의 유효 비유전율,  $w$ 는 가변 SIW 부분의 폭 및  $\Delta\epsilon_r$ 은 유전체 나사에 의해 변화된 유효 비유전율 값이다.



(a) 제안된 가변 SIW의 기본 구조(1-screw)  
 (a) Basic structure of the proposed tunable SIW(1-screw)



(b) 유전체 나사 개수 구성에 따른 가변 SIW 구조(microstrip 대 SIW 전이 구조 포함)  
 (b) Tunable SIW configuration along the number of dielectric screw with microstrip-to-SIW transition

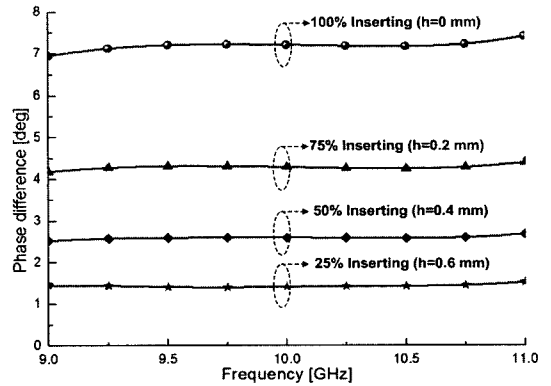


(c) 유전체 나사 삽입 구성  
 (c) Configuration of dielectric screw insertion

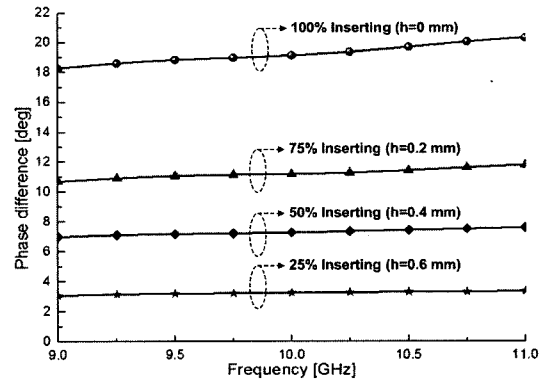
그림 1. 제안된 유전체 나사를 이용한 가변 SIW의 구조 및 구성

Fig. 1. Structure and configuration of the proposed tunable SIW using dielectric screw.

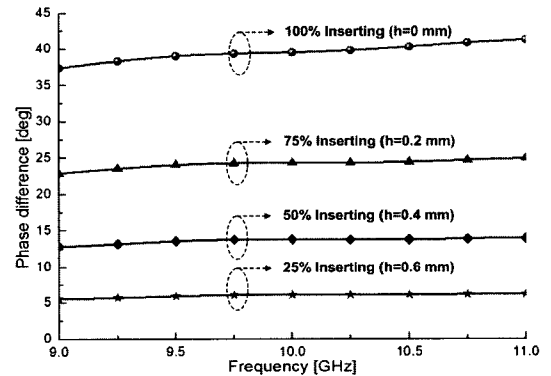
그림 1(b)는 마이크로스트립 대 SIW 전이 구조를 포함한 유전체 나사 개수에 따른 가변 SIW 구조를 나타낸 것이다. 하나의 유전체 나사로 인한 위상 변화는 한계가 있으므로, 유전체 나사를 1, 3, 7개로 증가시켜 좀 더 큰 위상 변화를 가질 수 있도록 하였다. 또한 그림 1(b)에 나타난 구조에서, 가변 SIW의 전체 길이는 40 mm이며, 선형 임피던스 테이퍼링 형태의 마이크로스트립 대 SIW 전이구조의 길이 ( $L_t$ ) 및 폭( $w_t$ )는 각각 7.4 mm와 4.8 mm이다. 적용된 유전체 나사의 지름( $d$ )과 유전체 나사간의 간격



(a) 1-screw 경우의 삽입량에 따른 위상 차이  
 (a) Phase difference of 1 screw case along insertion



(b) 3-screw 경우의 삽입량에 따른 위상 차이  
 (b) Phase difference of 3 screw case along insertion



(c) 3-screw 경우의 삽입량에 따른 위상 차이  
 (c) Phase difference of 7 screw case along insertion

그림 2. 가변 SIW의 유전체 나사 삽입량에 따른 위상 차이량(1, 3, 7 screw)

Fig. 2. Phase difference of tunable SIW along insertion of dielectric screw(1, 3, 7 screw cases).

(s)은 각각 1.7 mm 및 2.6 mm이다. 그림 2는 그림 1(b)에서 보였듯이, 유전체 나사 개수 구성에 따른

위상 천이량을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 SIW에 유전체 나사 1개가 적용된 경우로써, 유전체 나사의 삽입량에 따른 위상 천이량을 유전체 나사가 없는 경우를 기준으로 하여 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 보듯이 삽입량이 증가할수록 가변 SIW의 유효 유전율이 증가함으로 인하여 위상 천이량이 증가함을 볼 수 있다. 최대 100 %의 삽입 경우에 9.65 GHz에서 약 7.2°의 위상 천이값을 보인다. 또한 그림 2(b)와 (c)는 유전체 나사 구성이 각각 3개 및 7개인 경우로써, 적용된 유전체 나사 모두가 삽입량이 각각 25, 50, 75, 100 %일 때의 위상 천이값을 삽입되지 않은 경우를 기준으로 나타낸 것이다. 유전체 나사가 3개 및 7개의 경우 각각 최대 위상 천이량 값은 약 19° 및 39°를 가진다. 적용된 기판의 두께가 0.79 mm이므로, 25 %는 삽입 깊이가 0.2 mm이며, 50 %, 75 %는 각각 0.4 mm, 0.6 mm이다.

## 2-2 유전체 나사를 이용한 가변 기판 집적 도파관의 유효 유전을 추출

앞서 유전체 삽입에 따라 가변 SIW 부분의 유효 유전율이 변함을 예측할 수 있었다. 하지만 정확한 유효 유전율의 변화량의 해석 및 추출이 필요하다. 가변 SIW 부분에 대한 유효 유전을 추출은 먼저 전송 선로 개념을 적용할 수 있는지를 확인해야 한다. 본 논문에서 제안된 유전체를 이용한 가변 SIW는 유전체 나사를 삽입하기 위해 위, 아래 면이 천공되어 있다. 이러한 구조는 경우에 따라서 도파관 누설과 안테나 구조로 적용될 수 있다. 일반적으로 비도금된 비아 홀의 크기가 동작 주파수의 파장에 비해 크고, 그 주기가 많다면 누설과 안테나 구조로 적용이 되지만, 본 논문에서 적용된 비도금된 비아 홀은 직경이 1.7 mm로써 관내 파장에 비교하여 약  $\lambda_g/12$  보다 작고 또한 주기도 3 이하이기 때문에 충분히 폐쇄형 도파관과 같은 전송선로로 간주할 수 있다<sup>[12]</sup>. 즉, 가변 SIW 부분을 전송선로로 간주할 수 있기 때문에 유효 유전율의 추출은 아래와 같은 수식으로 전개된다. 먼저 가변 SIW 부분을 무손실 전송선로로 가정하면, 식 (3)과 같이 ABCD parameter로 표현할 수 있다. 또한 구조가 symmetric인 경우 ABCD-to-S-parameter 변환 공식<sup>[13]</sup>을 통해, 식 (4)와 같이 해석된 S-parameter를 이용하여 ABCD parameter의 A의

값을 알 수 있다. 식 (5)와 같이 추출된 A의 값을 다시 역변환을 통해 전파 상수( $\beta$ )를 구할 수 있고, 이를 구형 도파관의 전파 상수( $\beta$ ) 식<sup>[13]</sup>과 등가화 하여 식 (7)과 같은 유효 유전율 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ jY_0 \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2 \cdot S_{21}} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{l} \cdot \cos^{-1} \text{re}(A) \quad (5)$$

$$= \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \frac{\pi^2}{a^2}} \quad (6)$$

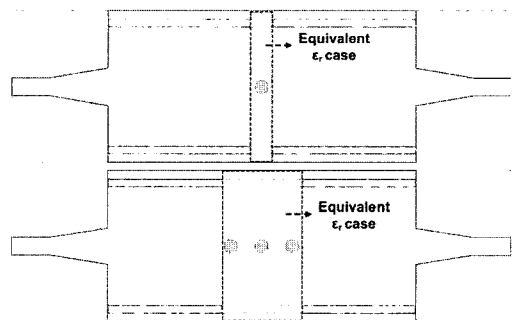
$$\epsilon_r = \left[ \frac{c \cdot \sqrt{\beta^2 + \frac{\pi^2}{a^2}}}{2\pi f} \right]^2 \quad (7)$$

( $l$ : m,  $\beta$  : rad/m,  $f$ :Hz,  $a$ =tunable SIW section width [m])

그림 3(a)는 하나의 유전체 나사가 적용된 경우,

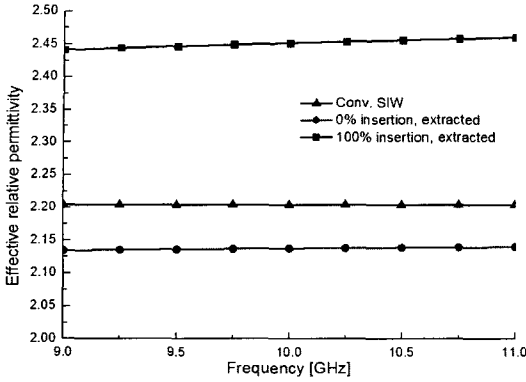


(a) 가변 SIW 부분의 원 구조  
(a) Original tunable SIW

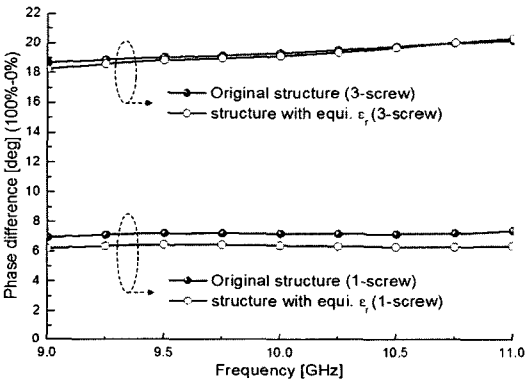


(b) 원 구조 및 등가 유전율 대입 경우의 유전체 나사 삽입 유무에 따른 위상 지연 차이 확인을 위한 구조  
(b) Structures for verifying phase difference between w/ dielectric screw and w/o dielectric screw in the cases of original structure and structure with equivalent  $\epsilon_r$

그림 3. 1, 3 screw를 가지는 가변 SIW 부분의 유효 유전율 추출 및 확인을 위한 구조  
Fig. 3. Structures for extracting and verifying effective  $\epsilon_r$  of tunable SIW section with 1 and 3 screws.



(a) 1-screw의 가변 SIW 부분에서 추출된 유효 유전율(0 %, 100 % 유전체 나사 삽입)  
 (a) Extracted  $\epsilon_r$  of the 1-screw tunable SIW section(0 %, 100 % insertion cases of dielectric screw)



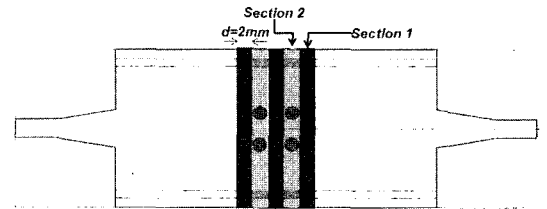
(b) 1, 3 screw의 경우에서 원 구조와 등가 유효 유전율을 대입한 구조 간의 위상차  
 (b) In cases of 1 & 3 dielectric screws, phase difference of the original structure and structure with equivalent  $\epsilon_r$   
 그림 4. 그림 3 구조를 통해 추출된 유효 유전율과 상응하는 위상차 결과

Fig. 4. Extracted effective  $\epsilon_r$  and corresponding phase difference from structures in Fig. 3.

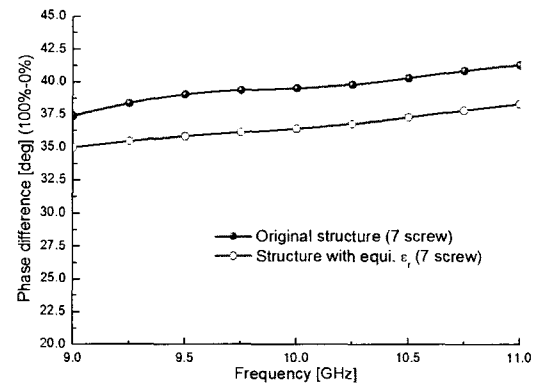
유효 유전율을 추출하기 위한 구조이다. 단위 구조의 길이는 4 mm이며, 이 구조로부터 앞선 수식 전개 과정을 통해 유효 유전율을 구할 수 있다. 추출된 유효 유전율 값은 그림 4(a)에 도시되어 있다. 기판 유전율 2.2를 갖는 일반적인 SIW 전송선과 비교할 때, 유전체 나사가 100 % 삽입된 경우 추출된 유효 유전율은 약 2.45이며, 유전체 나사가 삽입되지 않고 단순히 천공되어 있는 경우(0 % 삽입)의 유효 유전율은 약 2.13이다.

추출된 유효 유전율 값을 검증하기 위해 그림 3(b)

와 같이 1, 3개의 유전체 나사가 적용된 구조와 추출된 유효 유전율을 가변 SIW 부분에 등가화한 구조가 적용되었다. 그림 3(b) 구조에서 유전체 나사가 적용된 원 구조의 유전체 나사의 삽입 유무에 따른 위상차와 추출된 유효 유전율을 이용한 등가 구조의 위상차 해석 결과는 그림 4(b)에 도시되어 있다. 결과에서 보듯이, 등가 구조와 원 구조 간의 결과 값 차이는 미미함을 알 수 있다. 그리고 7개의 유전체 나사가 적용된 가변 SIW 구조의 유효 유전율 추출을 위한 구조는 그림 5(a)에 나타나 있다. 이 구조는 유전체 나사가 1개가 적용된 구간과 2개가 적용된 구간으로 나누어 앞선 과정과 같은 분석을 하였으며, 추출된 유효 유전율 값을 통해 구한 위상차는 그림 5(b)에 도시되어 있다. 해석 주파수 대역인 9~11 GHz에서 원 구조와 등가 구조간의 위상차의 오차는 약 3.2°로써



(a) 유효 유전율 추출을 위한 7 screw를 가지는 가변 SIW  
 (a) Tunable SIW with 7 dielectric screw for extracting effective  $\epsilon_r$ ,



(b) 7 screw의 경우에서 원 구조와 등가 유효 유전율을 대입한 구조 간의 위상차  
 (b) In cases of 7 dielectric screws, phase difference of the original structure and structure with equivalent  $\epsilon_r$ ,

그림 5. 7개의 유전체 나사를 가진 가변 SIW 구조의 유효 유전율 추출을 위한 구조 및 결과

Fig. 5. Results and structure for extracting effective  $\epsilon_r$  of tunable SIW with 7 dielectric screw.

표 1. 원 구조와 등가 유효 유전율 대입 구조의 위상차 결과

Table 1. Results of phase difference between original structure and structure with equivalent  $\epsilon_r$ .

| At 9.65 GHz | Original  | Equi. $\epsilon_r$ | Difference |
|-------------|-----------|--------------------|------------|
| 7 screw     | 39.28 deg | 36.04 deg          | 3.24 deg   |
| 3 screw     | 18.94 deg | 19.1 deg           | 0.16 deg   |
| 1 screw     | 7.228 deg | 6.467 deg          | 0.761 deg  |

다 구간이 적용된 점을 고려하였을 때, 충분히 타당한 결과라고 볼 수 있다. 표 1은 1, 3, 7개의 유전체 나사를 가진 가변 SIW의 원 구조 위상차, 등가 구조의 위상차 및 오차를 정리한 것이다. 9.65 GHz에서 7개 유전체 나사의 경우, 원 구조의 위상차는 39.28°이며, 등가 구조는 36.04°로써 오차는 3.24°이다. 또한 1, 3개의 유전체 나사의 경우 원 구조의 위상차는 각각 18.94° 및 7.228°이며, 등가 구조의 위상차는 각각 19.1° 및 6.467°로써 각 오차는 0.16° 및 0.761°이다.

### 2.3 유전체 나사를 이용한 가변 SIW의 최적화

앞서 해석된 제안된 구조는 급전 SIW 부와 유전체 나사가 적용된 가변 SIW 부분간의 임피던스 정합이 고려되지 않은 구조이다. 즉, 유전체 나사가 적용된 구간은 앞서 언급되었다시피 유효 유전율이 변하기 때문에 SIW 특성 임피던스가 급전 SIW부와 비교하여 달라진다. 좀 더 우수한 반사 손실과 삽입 손실을 얻기 위해서는 두 부분간의 특성 임피던스 정합이 고려되어야 한다. 그림 6은 임피던스 정합이 고려되지 않은 3, 7개의 유전체 나사가 적용된 가변 SIW의 S-parameter 해석 결과이다. 결과에서 보듯이, 유전체 나사가 삽입되지 않은 경우 반사 손실이 최고 약 -12.5 dB까지 상승함을 알 수 있다. 유전체 나사가 삽입된 경우가 더 좋은 반사 손실을 가지는 원인은 기판 유전율( $\epsilon_r=2.2$ )에 비해 높은 알루미늄( $\epsilon_r=9.4$ )가 삽입되어 전계가 집중되는 중심부에서 shunt capacitance가 보상이 됨으로써 유전체 나사가 삽입되지 않은 경우에 비해 임피던스 정합이 이루어지기 때문이다.

가변 SIW가 대 면적 SIW PDN의 출력 단자 간 위상차 제거를 위해 적용된다면, 전체 SIW PDN의 특성을 악화시키지 않아야 한다. 하지만 임피던스 정합이 고려되지 않은 구조가 대 면적 SIW PDN에 결

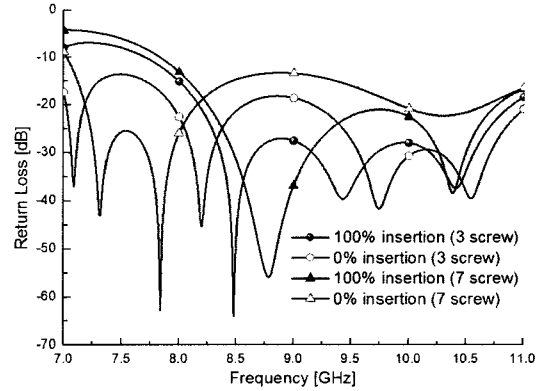


그림 6. 특성 임피던스 정합하지 않은 가변 SIW의 S-parameter

Fig. 6. S-parameter of tunable SIW without characteristics impedance matching.

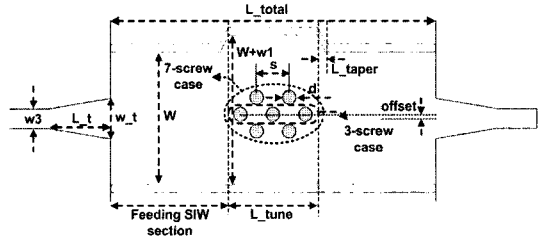


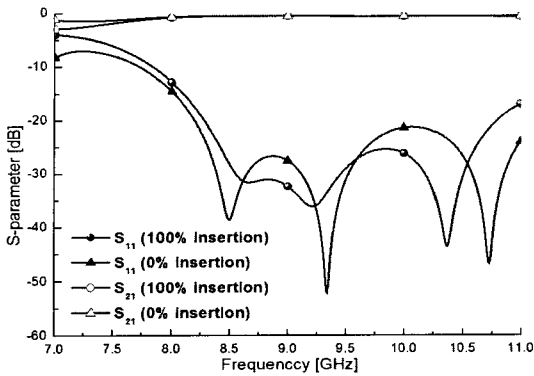
그림 7. 가변 SIW의 최적화를 위한 구조

Fig. 7. Structure for optimization of tunable SIW.

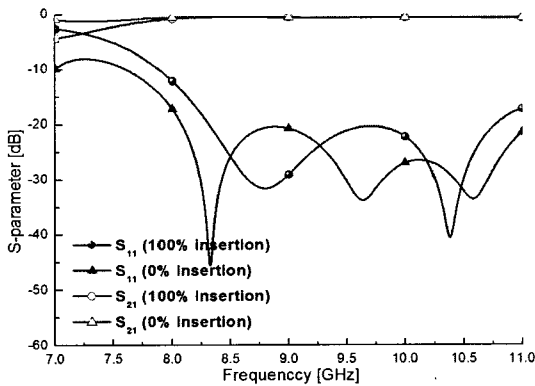
표 2. 최적화된 가변 SIW의 구조 설계 변수(단위: mm)  
Table 2. Design parameter of the optimized tunable SIW structure(unit: mm).

| Case             | $w_1$  | $L_{tune}$ | $L_{taper}$ | Offset |
|------------------|--|------------|-------------|--------|
| 3 screw          | 1.5  | 11         | 1           | 0.5    |
| 7 screw          | 2  | 11         | 1           | 0.5    |
| Common parameter | $s=1.7$ mm, $d=2.3$ mm, $L_{total}=40$ mm<br>$L_t=7.4$ mm, $w_t=4.8$ mm, $w_3=2.42$ mm |            |             |        |

합된다면 전체적인 특성에 악영향을 주게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 그림 7과 같이 가변 SIW 구간에서, 가변 SIW의 폭을 확장하고 SIW 급전 부와의 연결을 선형 테이퍼링을 통해 임피던스 정합을 하였다. 또한 유전체 나사의 삽입 구간의 중심을 오프셋을 적용하였다. 가변 SIW의 폭을 한 쪽으로만 확장한 이유는 대 면적 SIW PDN에 적용을 위함이다. 최적화 과정은 3D FEM 해석 툴인 Ansoft HFSS ver. 12를 이용하여 진행되었다.



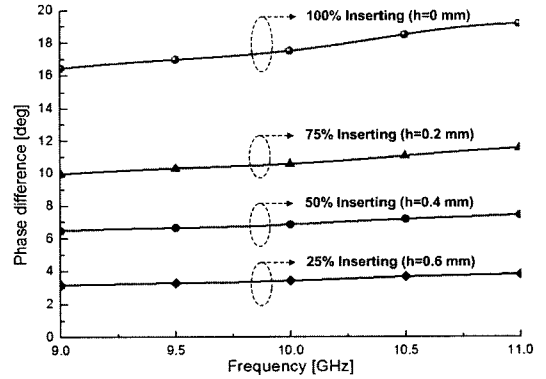
(a) 3개의 유전체 나사가 적용된 가변 SIW S-parameter  
(a) S-parameter of tunable SIW with 3 dielectric screw



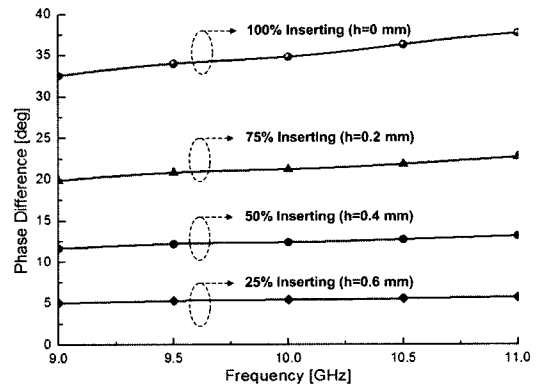
(b) 7개의 유전체 나사가 적용된 가변 SIW S-parameter  
(b) S-parameter of tunable SIW with 7 dielectric screw

그림 8. 특성 임피던스 정합을 통한 가변 SIW의 S-parameter  
Fig. 8. S-parameter of tunable SIW with characteristics impedance matching.

표 2는 최적화 과정을 통해 얻어진 3, 7개의 유전체 나사 가변 SIW 구조의 설계 변수이다. 표 2에 나타난 최적 가변 SIW 구조의 설계 변수를 통해 나타난 S-parameter 결과는 그림 8에 도시되어 있다. 그림 8(a)는 유전체 나사 3개가 적용된 결과이며, 그림 8(b)는 7개의 유전체 나사가 적용된 결과이다. 결과에서 보듯이, 유전체 나사가 100% 삽입된 경우 및 삽입되지 않은 경우 모든 해석 결과상에서 반사 손실이  $-20$  dB 이하의 값을 가짐을 볼 수 있다. 그림 9는 최적화된 가변 SIW에서 3, 7개의 유전체 나사가 적용된 경우의 각각의 위상 천이량을 도시한 것이다. 앞선 그림 2에서 나타난 3, 7개의 유전체 나사가 적용된 구조와 비교해 볼 때, 각각의 위상 천이 결과



(a) 유전체 나사가 3개인 경우의 위상 천이량  
(a) Phase difference in case of 3 dielectric screws

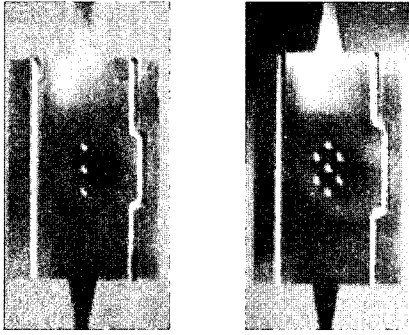


(b) 유전체 나사가 7개인 경우의 위상 천이량  
(b) Phase difference in case of 7 dielectric screws

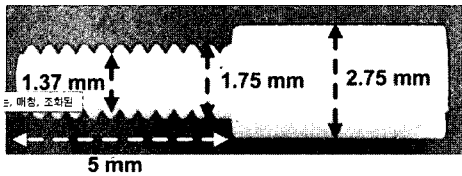
그림 9. 최적화된 가변 SIW의 위상 천이량 해석 결과(3, 7개의 유전체 나사 경우)  
Fig. 9. Simulated results of phase difference on the optimized tunable SIW with 3 & 7 dielectric screws.

가 감소하였음을 알 수 있다. 이는 특성 임피던스 정합을 위해 가변 SIW 부분의 폭을 확장함으로써 유전체 나사의 가변 SIW에서의 비율 감소로 인한 유효 유전을 감소 때문이다. 그림 9(a)는 3개의 유전체 나사가 적용된 경우의 결과로써, 최대 위상 천이량은 9.65 GHz에서 약 17.5°의 값을 가지며 삽입량에 따라 위상 천이값의 변화를 확인할 수 있다. 또한 그림 9(b)는 7개의 유전체 나사가 적용된 경우의 결과로써, 최대 위상 천이량은 9.65 GHz에서 약 34°의 값을 가진다. 즉, 최대 위상 천이값과 가변 SIW의 임피던스 정합과 관계는 상보적인 관계이며, 이러한 관계 속에서 최적화된 구조 및 결과를 찾는 것이 중요하다.

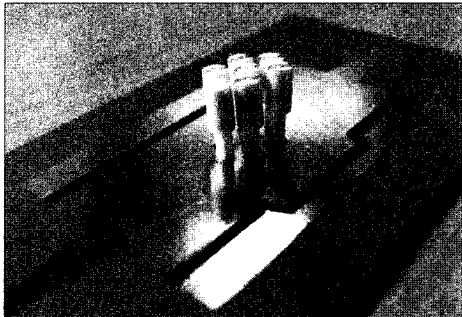
대 면적 기판 집적 PDN의 위상차 문제를 제거하기 위한 유전체 나사를 이용한 가변 기판 집적 도파관



(a) 3, 7개의 유전체 나사 삽입을 위한 제작된 가변 SIW  
(a) Fabricated tunable SIW for inserting 3, 7 dielectric screws



(b) 제작된 알루미나 유전체 나사  
(b) Fabricated alumina dielectric screw



(c) 유전체 나사 삽입도(7개 유전체 나사 경우)  
(c) Photograph of inserted dielectric screws(in case of 7-dielectric screw)

그림 10. 제작된 유전체 나사를 이용한 가변 SIW  
Fig. 10. Fabricated tunable SIW using dielectric SIW.

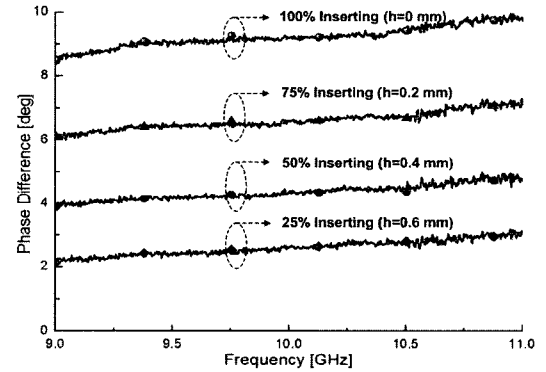
#### 2.4 제안된 구조의 제작 및 측정 결과

제안된 유전체 나사를 이용한 가변 SIW는 그림 10(a)에 나타나 있다. 제작에 사용된 기판은 낮은 손실을 가지기 위해 Taconic사의 TLY-5 기판( $\epsilon_r=2.2\pm 0.02$ ,  $\tan \delta=0.0009$ )이며, 기판 두께는 0.79 mm이다. 적용된 기판의 비유전율은 2, 제작 오차는  $\pm 0.02$ 이며, 이 수치는 제작된 SIW PDN의 출력 단자 간의 위상 오차의 원인을 제공한다.

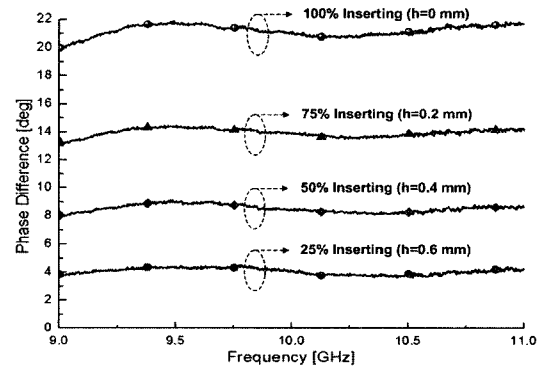
제작된 알루미나 유전체 나사의 구조 및 사진은 그림 10(b)에 나타나 있다. 측정된 내/외각 직경 및

길이는 각각 1.75 mm/1.37 mm 및 5 mm이다. 하지만, 앞서 FEM 해석을 위해 사용된 유전체 나사의 치수는 지름 1.7 mm를 가지는 원통형으로 설계되었다. 이러한 해석과 실제 제작된 알루미나 유전체 나사의 제작 오차는 측정된 위상 천이 결과에 영향을 미친다. 그림 11은 유전체 나사의 삽입량이 각각 25, 50, 75, 100 %인 경우에서의 위상 천이량을 보여준다. 그림 11(a)는 유전체 나사가 3개인 경우로써, 9.65 GHz에서 100 % 삽입일 때 9.04°, 25 % 삽입일 때 2.32°의 위상 천이의 값을 보여준다.

또한 그림 11(b)에서는 유전체 나사가 7개인 경우 결과로써, 9.65 GHz에서 100 % 삽입일 때 21.57°, 25 % 삽입일 때 8.97°의 위상 천이 결과를 보여준다.



(a) 유전체 나사가 3개인 경우의 위상 천이량  
(a) Phase difference in case of 3 dielectric screws

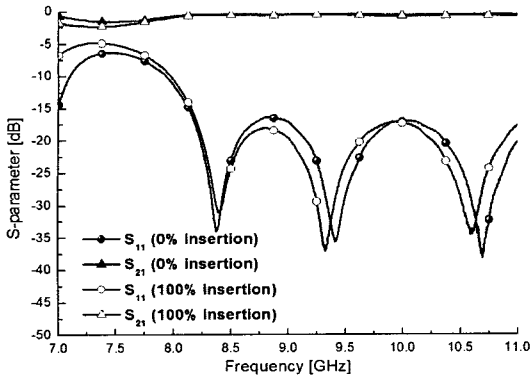


(b) 유전체 나사가 7개인 경우의 위상 천이량  
(b) Phase difference in case of 7 dielectric screws

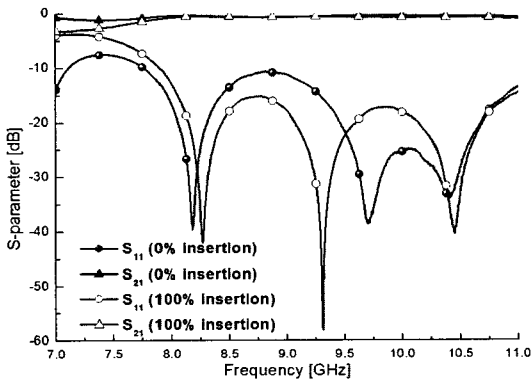
그림 11. 최적화된 가변 SIW의 위상 천이량 측정 결과(3, 7개의 유전체 나사 경우)

Fig. 11. Measured results of phase difference on the optimized tunable SIW with 3 & 7 dielectric screws.





(a) 3개의 유전체 나사를 가지는 가변 SIW의 측정 결과  
(a) Measurement results of the tunable SIW with 3 dielectric screw



(b) 7개의 유전체 나사를 가지는 가변 SIW의 측정 결과  
(b) Measurement results of the tunable SIW with 7 dielectric screw

그림 12. 제작된 가변 SIW의 S-parameter 측정 결과  
Fig. 12. S-parameter measured results of the fabricated tunable SIW.

그림 9에서 나타난 위상 천이 해석 결과와는 차이가 있다. 이는 FEM 해석에 적용된 유전체 나사의 구조는 나사 모양이 아닌, 원 기둥 모양이 적용되었고, 실제 측정된 유전체 나사는 원 기둥보다 적은 부피(약 66%의 부피)를 가짐으로써 측정 시 해석 결과에 비해 적은 위상 천이를 가지게 된다. 또한 알루미늄 가공상의 오차로 인한 실 유전율 차이로 인한 위상 천이량의 감소도 있다고 볼 수 있다.

결론적으로, 측정 및 해석 결과를 바탕으로 유전체 나사가 삽입되면 될수록 가변 SIW의 위상 천이량이 증가함을 확인할 수 있다. 그림 12는 유전체 나사가 3개 및 7개인 경우의 S-parameter 측정 결과를 나타낸 것이다. X-band SAR 위성의 활용 주파수인

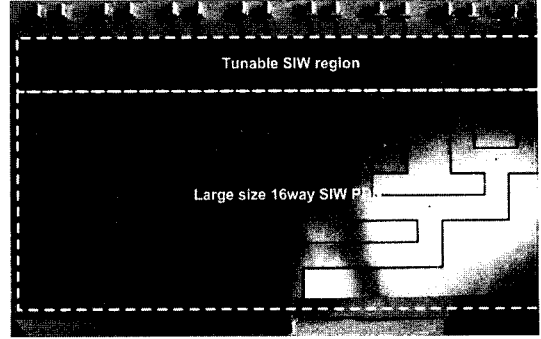


그림 13. 가변 SIW가 적용된 제작된 대 면적 16 way SIW PDN  
Fig. 13. The fabricated large size 16 way SIW PDN with tunable SIW.

9.5~10 GHz 대역을 기준에서, 측정된 반사 손실은 모두 15 dB 이상의 값을 가지며, 삽입 손실 또한 최대 0.5 dB 이하의 값을 가진다. 이러한 결과를 통해, 본 논문에서 제안한 가변 SIW는 대 면적 SIW PDN의 종단에 적용되었을 경우 전체 시스템 특성의 악영향을 주지 않을 것으로 볼 수 있다.

### III. 대 면적을 가지는 SIW-PDN의 위상차 제거

SAR 위성의 RF 탑재체에서 위상 배열 시스템의 대 면적 마이크로스트립 기반 PDN의 출력 단차별 위상 차 문제 및 해결 방안은 참고문헌 [3]을 통해 발표되었다. 대 면적 PDN의 위상 차 문제의 원인은 적용된 기판 내에서 유전율의 국부적인 비균일성에 의해서 나타난다. 즉, SIW 기반의 PDN이 적용된 경우에도 마찬가지로 대 면적 기판에 의한 위상 차 문제는 필수불가결적으로 발생된다. 이러한 대 면적 PDN에서 적용된 기판의 비 균일적인 유전율에 의한 위상 차 문제를 제시하고 해결 방안을 위해 대 면적 16 way SIW 전력 분배기<sup>[14]</sup>의 위상차 문제를 보여줄 것이다. 그리고 대 면적 16 way SIW 전력 분배 출력단자 쪽에 유전체 나사를 이용한 가변 SIW를 적용하여 기판의 비 균일한 유전율로부터 기인한 위상차가 줄어들음을 보여줄 것이다. 그림 13은 16 way SIW PDN의 종단에 가변 SIW들을 결합한 사진이다. 이 제작된 SIW PDN의 크기는 370 mm×195 mm이며, 비 유전율 2.2±0.02, 0.009의 손실 탄젠트, 0.79 mm의 두께를 가지는 Taconic TLY-5 기판을 사용하여 제작되었

대 면적 기판 집적 PDN의 위상차 문제를 제거하기 위한 유전체 나사를 이용한 가변 기판 집적 도파관

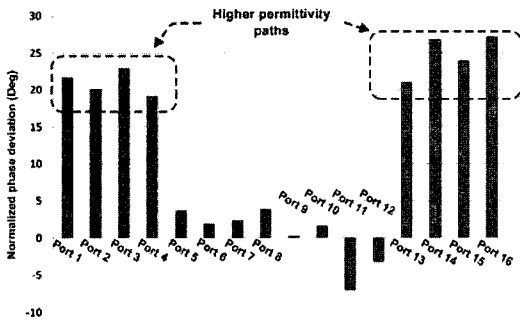


그림 14. 유전체 나사가 없는 가변 SIW 구조가 적용된 SIW PDN에서 총 16 출력 단자별 정규화된 위상 오차 측정 결과

Fig. 14. Measurement result of normalized phase deviation of all 16 ports on SIW PDN with tunable SIW without dielectric screw.

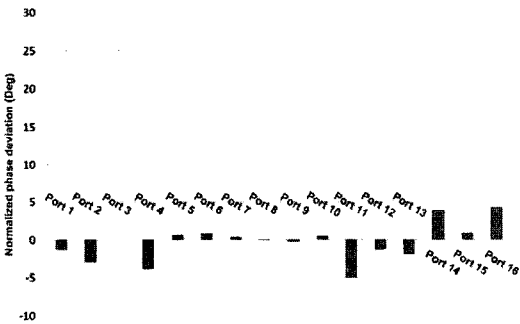


그림 15. 출력 단자 5~12에 유전체 나사를 사용한 가변 SIW 구조가 적용된 SIW PDN에서 총 16 출력 단자별 정규화된 위상 오차 측정 결과

Fig. 15. Measurement result of normalized phase deviation of all 16 ports on SIW PDN with tunable SIW using dielectric screw on port 5 ~12.

다. 16 way SIW PDN의 각 출력 단자별의 선로 길이는 351.9 mm이며, 중심 주파수 9.65 GHz에서 관대 파장( $\lambda_g$ ) 길이가 28.11 mm이므로, 각 선로의 위상 지연은 총 4506°이다. 앞서 언급한 적용된 기판의 유전율 오차는  $\pm 0.02$ 이므로, 이 오차를 적용하면 최대 출력 단자간의 이론상의 최대 위상 오차( $\Delta \phi_{max}$ )는  $\pm 36^\circ$ 이다. 유전체 나사가 삽입되지 않은 가변 SIW가 적용된 SIW PDN의 최대 측정 위상 오차는  $\pm 33.9^\circ$ 이다. 측정된 가변 SIW이 적용된 SIW PDN의 위상 오차 히스토그램(9.65 GHz)은 그림 14에 도시하였다. 단자 1~4, 13~16은 여타 출력 단자에 비해 더 많은

위상 지연을 가지므로 다른 출력 단자보다 높은 유전율을 가지는 기판 영역을 지나감을 알 수 있다. 그러므로 그림 14와 같은 위상 오차를 제거하기 위해서 가변 SIW에 알루미늄 유전체 나사를 삽입하여 필요한 위상만큼 보정해야 한다. 그림 14에서 보듯이, 출력 단자 5~12는 다른 출력 단자보다 낮은 유전율을 가지는 영역을 지나감으로써, 이 출력 단자들에 적용된 가변 SIW에 유전율 9.4를 가지는 알루미늄 유전체 나사를 적용하여 좀 더 높은 유효 유전율을 적용할 수 있고, 이를 통해 위상의 보정을 할 수 있다. 그림 15는 SIW PDN의 출력 단자 5~12에 유전체 나사를 삽입함으로써 나타난 전체 출력 단자간의 위상 오차 히스토그램이다. 그림 15에서 보듯이, 앞선 그림 14 결과에 비해 상당한 수준의 위상 오차 감소가 이루어졌다. 위상 오차 보정 후의 최대 위상 오차는  $\pm 4.65^\circ$ 이다. 결론적으로 약  $\pm 29^\circ$ 의 위상 오차가 보정되었음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

SIW의 비 도금된 비아 홀에 삽입되는 유전체 나사를 이용한 가변 SIW는 대 면적 SIW PDN의 출력 단자 간의 위상차를 제거하기 위해 제안되었다. 7개의 유전체 나사가 삽입되는 경우 9.65 GHz에서 최대 21°의 위상 천이량을 가진다. 또한 삽입 손실은 관심 주파수 대역인 9.5~10 GHz에서 최대 0.5 dB이며, 반사 손실은 15 dB 이상의 값을 가진다. 유전체 나사가 삽입되지 않은 370 mm×195 mm의 대 면적 SIW PDN의 측정된 최대 위상차는 9.65 GHz에서  $\pm 33.9^\circ$ 이지만, 위상 보정을 위해 유전체 나사가 적절히 삽입된 경우 출력단자 간의 위상차는 최대  $\pm 4.65^\circ$ 로 크게 감소하였다. 본 논문에서 제안된 유전체 나사를 이용한 가변 SIW는 향후 초경량, 고성능 기판 집적 위상 배열 시스템 및 대 면적 SIW 회로 응용에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

[1] A. Currie, M. A. Brown, "Wide-swath SAR", *IEEE Proceeding*, vol. 139, pp. 122-135, Apr. 1992.  
 [2] E. F. Stockburger, D. N. Held, "Interferometric moving ground target imaging", *IEEE International Ra-*

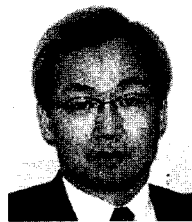
- dar Conference, pp. 438-443, 1995.
- [3] D. Kother, A. Lauer, A. Wien, P. Uhlig, G. Pautz, G. Mollenbeck, and J. Berben, "X-band 1:32 divider network for space application with excellent amplitude and phase balance", *2003 IEEE European Microwave Conference*, Munich, Germany, pp. 899-902, Oct. 2003.
- [4] D. Deslandes, K. Wu, "Design considerations and performance analysis of substrate integrated waveguide components", *2002 IEEE European Microwave Conference*, Milano, Italy, pp. 881-884, Sep. 2002.
- [5] C. H. Tseng, T. H. Chu, "Measurement of frequency-dependent equivalent width of substrate integrated waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 54, no. 4, pp. 1431-1437, Apr. 2006.
- [6] D. Eom, J. Byun, and H. Y. Lee, "Multi-layer substrate integrated waveguide four-way out-of-phase power divider", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 57, no. 12, pp. 3469-3476, Dec. 2009.
- [7] K. Sellal, L. Talbi, T. Denidni, and J. Lebel, "A new substrate integrated waveguide phase shifter", *2006 IEEE European Microwave Conference*, Manchester, UK, pp. 72-75, Sep. 2006.
- [8] J. F. Xu, W. Hong, P. Chen, and K. Wu, "Design and implementation of low sidelobe substrate integrated waveguide longitudinal slot array antennas", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 3, iss. 5, pp. 790-797, 2009.
- [9] S. Lee, S. Jung, and H. Y. Lee, "Ultra-wideband CPW-to-substrate integrated waveguide transition using an elevated-CPW section", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 746-748, Nov. 2008.
- [10] F. Xu, K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristic of substrate integrated waveguide", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* vol. 53, no. 1, pp. 66-73, Jan. 2005.
- [11] Y. J. Cheng, K. Wu, and W. Hong, "Substrate Integrated Waveguide(SIW) broadband compensating phase shifter", *2009 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 845-848, Jun. 2009.
- [12] L. O. Goldstone, A. A. Oliner, "Leaky-wave antenna I: Rectangular waveguides", *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 7, no. 4, pp. 307-319, Oct. 1959.
- [13] David M. Pozar, *Microwave Engineering 3rd Edition*, Wiley, pp. 106-115, 2005.
- [14] Z. C. Hao, W. Hong, and K. Wu, "Multiway broadband Substrate Integrated Waveguide(SIW) power divider", *2005 IEEE AP-S International Symposium*, pp. 639-642, Jul. 2005.

## 변진도



2006년 8월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)  
 2008년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2008년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계, SI/EMC, 위성 배열 시스템, SIW circuit

## 이해영



1980년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 1982년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 1982년~1986년: 국방부연구사무원  
 1989년 12월: The University of Texas at Austin (공학박사)  
 1990년~1992년: LG 기술원기초1실장  
 1992년~현재: 아주대학교 전자공학부 정교수  
 2010년~현재: 한국전자파학회 회장  
 [주 관심분야] 고속/고밀도 System in Package, RF 소자 및 광전 소자의 설계/측정, 위성 배열 시스템, 고속반도체 테스트 기술