

평행판도파관내에서의 다이오드 위상변위기 특성에 관한 연구

A Characteristic Study on a Diode Phase Shifter in a Parallel Plate Waveguide

이 기 오* 박 동 철**

Kee-Oh Lee Dong-Chul Park

Abstract

In this paper, the design results of a 22.5° diode phase shifter for the RADANT lens and two 11.25°, 22.5° dielectric phase shift layers for the diode phase shifter are presented. The amount of phase shift introduced by each dielectric layer depends on the thickness and the shape of the metal strip and the electrical property of the diode. The equivalent circuit model is employed to represent the dielectric phase shift layer, and the simulated result of the equivalent circuit model is compared with the result of the field simulation. The measured data of the fabricated 11.25°, 22.5° dielectric phase shift layer shows about 2° phase shift error.

Keywords : RADANT Lens(RADANT 렌즈), PIN Diode(PIN 다이오드), Phase Shifter(위상변위기)

1. 서론

전자적으로 전자파의 빔을 조향하기 위한 위상배열 안테나시스템에 위상변위기의 사용은 필수적이나, X-대역에서 주로 사용되는 페라이트 위상변위기는 고가이며, 2차원 빔조향을 위해서는 복잡한 위상 명령이 필요하다^[1]. 그러므로, X-대역에서 동작하고, 단순하게 2차원 빔조향이 가능한 저가형 위상변위기가 요구된다.

RADANT(RADar ANTenna) 렌즈는 평행판도파관내에 전파의 진행방향에 수직으로 여러개의 유전체 위상변위 레이어를 삽입하여 이를 위상변위기로 동작시킨다. 이는 복사소자와 위상변위기를 도파관으로 제작함으로써 렌즈 형태로 활용이 가능할뿐만 아니라, 기존 위상배열안테나시스템에 비해 부피와 무게 뿐만 아니라 손실을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 평행판도파관내에 위상변위를 일으키는 유전체 레이어는 금속 패턴과 다이오드를 포함하며, 이러한 평행판도파관을 여러개 적층하여 각 평행판도파관에서의 위상을 조절함으로써 전파의 1차원 빔조향을 구현하게 된다. 이러한 RADANT 렌즈는 2개의 RADANT 렌즈와 그 사이에 편파 변환기를 함께 사용하는 형태^[2] 뿐만 아니라 페라이트 위상변위기를 포함하는 1차원 슬롯도파관 배

† 2009년 5월 22일 접수~2009년 8월 31일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

책임저자 : 박동철(dcpark@cnu.ac.kr)

열안테나에 RADANT 렌즈를 결합하는 하이브리드 형태^[3]로 구현되어 2차원 빔 조향을 가능케 한다. 이러한 하이브리드 형태로 2차원 위상배열안테나가 구현될 경우, 기존의 페라이트 위상변위기로 구현된 2차원 위상배열안테나보다 가격이 1/3 정도로 저렴할 뿐만 아니라, 2차원 빔 조향을 위한 위상커맨드도 $N(\text{row}) \times M(\text{column})$ 에서 $N+M$ 으로 감소하여 매우 단순하게 시스템을 구현할 수 있다는 장점이 있다^[3].

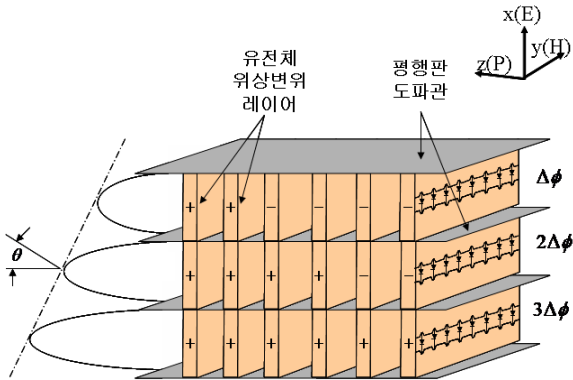


Fig. 1. E-평면 빔조향 RADANT 렌즈 구조

Fig. 1은 E-평면 빔 조향 RADANT 렌즈를 구현하기 위한 구조를 도시한 것이며, 각각의 평행판도파관내에는 주기적인 금속패턴과 다이오드를 포함하는 유전체 레이어들이 전파의 진행방향(P)에 수직으로 배열되어 있다. 다이오드를 포함하는 유전체 레이어는 매칭을 고려하여 쌍으로 동작하고, “+,”-부호는 각각 다이오드의 순방향 또는 역방향 바이어스 상태를 나타낸다. 이때, RADANT 렌즈에 의한 빔 조향각(θ)은 식 (1)에 의하여 구할 수 있으며, 여기서, d 는 평행판도파관의 높이로써 배열안테나 구조에서 Grating Lobe를 최소화하기 위하여 $\lambda/2$ 근처에서 결정되며, $\Delta\phi$ 는 각각의 평행판도파관내에서의 위상변위이고, $0^\circ \sim 360^\circ$ 의 위상 범위를 갖으며, λ 는 운용주파수의 파장을 나타낸다.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{2\pi d} \right) \quad (1)$$

동일한 구조에서 다이오드의 ON, OFF에 의한 유전체 위상변위 레이어의 특성 변화가 서셉턴스의 차이를 유발시키고, 이는 진행되는 전자파의 위상변위에 비례

하게 된다. 각 유전체 레이어에서의 위상변위량은 금속 패턴의 양과 다이오드의 특성에 의존한다^[4].

본 논문에서는 RADANT 렌즈를 위한 22.5° 다이오드 위상변위기 설계와 다이오드 위상변위기를 구성하는 $11.25^\circ, 22.5^\circ$ 유전체 위상변위 레이어의 설계를 상용소프트웨어인 CST사의 MWS를 이용하였다. 또한, Agilent사의 ADS를 통하여 금속패턴과 다이오드에 대한 등가 회로를 제시하고, 두 가지 시뮬레이션 결과를 비교한다. 다이오드가 포함된 $11.25^\circ, 22.5^\circ$ 위상변위 레이어에 대한 측정결과를 제시함으로써, RADANT 렌즈를 위한 다이오드 위상변위기의 설계 및 모델에 관한 타당성을 입증한다.

2. 다이오드 위상변위기 설계

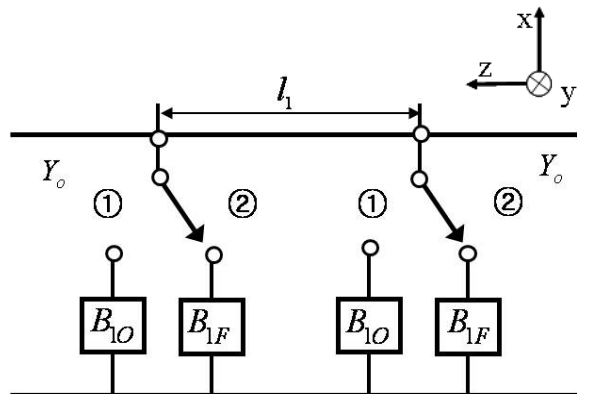


Fig. 2. 다이오드 위상변위기 모델

RADANT 렌즈에 사용되는 다이오드 위상변위기의 기본모델을 Fig. 2에 나타내었다. 진행되는 전자파의 위상변위는 식 (2)와 같이 다이오드의 순방향 또는 역방향 바이어스 상태의 서셉턴스 값(B_{1O}, B_{1F})의 차에 비례한다^[1,5].

$$\Delta\phi \approx \tan^{-1} \left(\frac{2|B_{1O} - B_{1F}|}{2Y_o} \right) \quad (2)$$

위상변위를 일으키는 유전체 레이어는 유전체 위에 인덕턴스(L)와 커패시턴스(C)를 갖는 금속 패턴으로 구현된다. 이때, 다이오드의 순방향 바이어스 상태 (B_{1O})에서는 매칭을 위하여 유전체 레이어 자체가 식

(3)과 같이 통과대역 근처에서 공진이 발생되도록 하며, 다이오드의 역방향 바이어스 상태(B_{1F})에서는 식 (4)과 같이 유전체 레이어의 이격거리(l)를 통하여 매칭을 구현한다^[5].

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

$$l_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2}{B_{1F}} \right) \quad (4)$$

Fig. 3(a)는 평행판도파관의 유전체 위상변위 레이어상에 위상변위를 위한 주기적인 금속패턴 및 다이오드를 도시한 것이다.

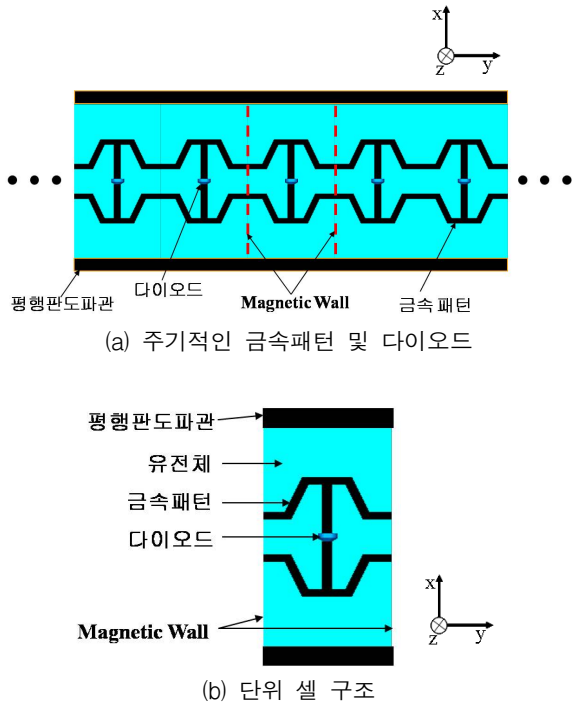


Fig. 3. 유전체 위상변위 레이어

전자파의 진행방향은 z 방향이고, 전계는 x 방향이며, y 축을 기준으로 마주보는 동일한 금속 패턴은 다이오드에 ON, OFF 전압을 인가하기 위하여 평행판도파관으로부터 이격된다. 다이오드의 순방향 바이어스 상태에서 자체 공진을 위하여 다이오드를 포함하는 x 축 방향과 평행한 금속 패턴에서 인덕턴스 값을 제공

하며, y 축 방향과 평행한 금속패턴에서는 커패시턴스 값을 제공하기 위하여 주름진 형태로 모델링 되었다. 이 기본적인 모델링을 통하여 금속 패턴에 대한 설계 변수를 설정하고, 설계 변수 변화에 따른 시뮬레이션을 통하여 위상변위 레이어의 금속 패턴에 대한 최적화를 수행하였다. 다이오드의 역방향 바이어스 상태에서 다이오드의 순방향 바이어스 상태와의 서셉턴스 차이는 다이오드의 역방향 바이어스에 의한 커패시턴스 값의 증가와 금속 패턴의 단락으로 인한 인덕턴스 값의 감소에 기인하게 된다.

Fig. 3(a)와 같은 주기적 형태의 무한 구조는 점선과 같이 Magnetic Wall을 이용해 Fig. 3(b)와 같이 단위셀로 해석할 수 있다. 이러한 단위셀 구조를 해석하기 위하여 CST사의 MWS(Microwave Studio)를 이용하며, 단위셀 구조로의 필드 시뮬레이션은 많은 시간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 4는 M/A-COM사에서 제공하는 MA4F CP300 PIN 다이오드의 모델로써, L_d 는 다이오드의 인덕턴스로써 0.6nH이고, R_d 는 접합(Junction) 저항 등을 포함하는 다이오드 저항으로 2.6Ω이다. C_d 는 접합 커패시턴스 및 기생 커패시턴스 등을 포함하여 25fF이다^[6]. 다이오드 모델은 유전체 위상변위 레이어의 금속패턴 모델과 함께 사용될 것이다.

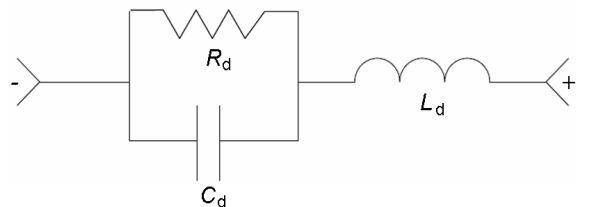


Fig. 4. 다이오드 모델

Fig. 5는 다이오드가 포함된 유전체 위상변위 레이어의 모델을 나타낸다.

다이오드가 ON 상태의 경우, Fig. 5(a)와 같이 다이오드는 L_d 와 R_d 의 직렬연결로 모델링되며 x 방향의 전계와 평행한 금속패턴은 L_1 으로 등가화 될 수 있다^[4,7]. 평행판도파관과 근접한 금속패턴은 평행판도파관의 전계에 의해 C_1 으로 등가화 되고, L_1 및 다이오드와 직렬로 연결되며, 이들은 직렬공진을 일으켜 운용주파수의 하향 주파수 대역에서 저지대역 특성을 나타낸다. 평행한 두 개의 금속패턴은 그 사이에서 생

기는 전계에 의해 C_2 로 증가화 되고, L_1 및 다이오드와 병렬공진을 일으키며 운용주파수 대역 근처에서 통과대역 특성을 나타낸다. 다이오드의 R_d 값은 직렬공진 및 병렬공진의 Q 값에 영향을 미치며, R_d 값이 작을수록 공진기의 Q 값이 커지게 된다.

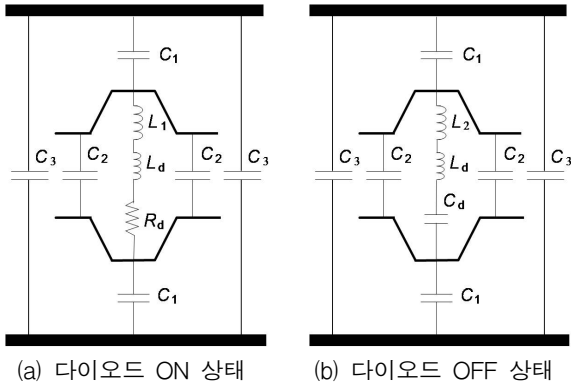


Fig. 5. 유전체 위상변위 레이어 모델

다이오드가 OFF 상태의 경우, Fig. 5(b)와 같이 다이오드는 L_d 와 C_d 의 직렬연결로 모델링 되며, 다이오드에 의해 단락되고 x 방향의 전계와 평행한 금속패턴은 L_2 로 증가화 될 수 있다. C_1 및 역바이어스된 다이오드와 직렬로 연결되며, 이들은 직렬공진을 일으키고 운용주파수의 상향 주파수 대역에서 저지대역 특성을 나타낸다. 또한, 커패시턴스 C_2 는 인덕턴스 L_2 및 다이오드와 병렬공진을 일으키며, 운용주파수의 상향 주파수 대역에서 통과대역 특성을 나타낸다^[4].

C_3 는 평행판도파관에 의하여 발생하는 커패시턴스를 나타내며, 이렇게 추출된 등가회로모델은 위상변위기 설계시 CST사의 MWS를 이용한 필드 시뮬레이션보다 많은 시간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있다.

3. 시뮬레이션 결과

유전체 위상변위 레이어 및 다이오드 위상변위 시뮬레이션을 위하여 상용 소프트웨어 툴을 이용하였다. CST사의 MWS를 이용하여 Fig. 3의 설계에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, Agilent사의 ADS를 이용하여 Fig. 5의 회로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6과 7은

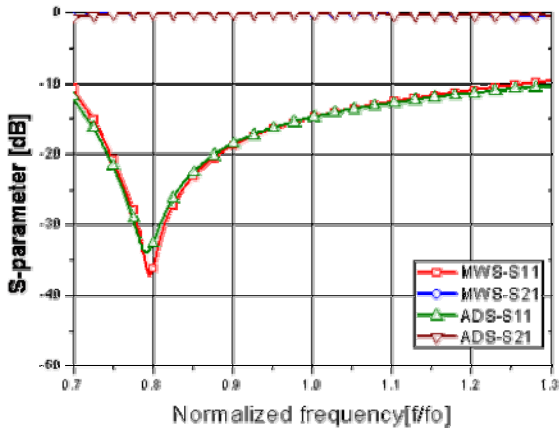
11.25° 및 22.5° 유전체 위상변위 레이어에 대한 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다.

Fig. 6(a)와 7(a)는 다이오드 ON 상태에서의 11.25° 및 22.5° 각각의 위상변위 레이어 시뮬레이션 결과로써, Fig. 6(a)는 중심주파수로부터 멀리 떨어진 주파수에서 병렬공진이 발생하여 약 -15dB의 반사손실을 보이며, Fig. 7(a)는 중심주파수 근처에서 병렬공진이 발생하여 약 -20dB 이하의 반사손실을 보인다. Fig. 6(b)와 7(b)는 다이오드 OFF 상태에서의 시뮬레이션 결과로써 중심주파수에서 약 -10dB의 반사손실을 보인다. Fig. 6(c), 7(c) 및 Table 1은 11.25° 및 22.5° 각각의 유전체 위상변위 레이어의 위상변위를 나타낸 것이다.

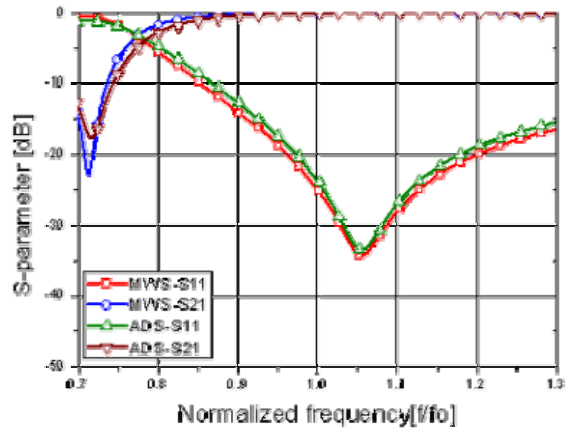
Table 1. 시뮬레이션된 중심주파수에서의 위상변위

분류	ADS [deg.]	MWS [deg.]
11.25° 위상변위 레이어	10.7	11.2
22.5° 위상변위 레이어	21.8	22.5

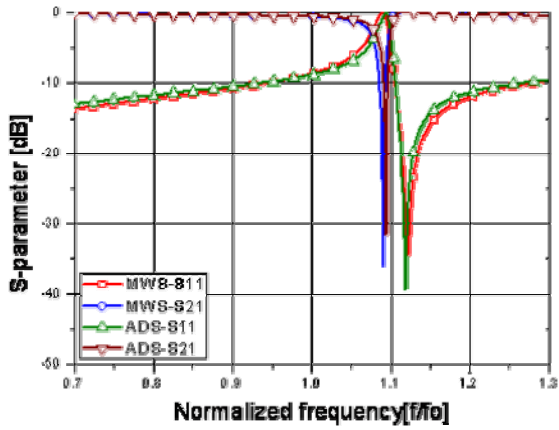
Fig. 8은 11.25° 유전체 위상변위 레이어 2개로 구성된 22.5° 위상변위기에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)와 같이 평행판도파관내에 11.25° 유전체 위상변위 레이어 2개가 배치되었으며, 다이오드 OFF 상태에서의 매칭을 위하여 식 (4)를 이용하여 레이어간의 간격을 조절한다. 다이오드 ON 상태에서는 Fig. 8(b)와 같이 2개의 공진이 발생하는 데, 저주파에서의 공진은 Fig. 6(a)에서 제시된 것처럼 11.25° 유전체 위상변위 레이어의 자체공진에 의한 것이며, 고주파에서의 공진은 11.25° 유전체 레이어 사이의 간격이 $\lambda/4$ 가 되는 주파수에서 발생한 것이다. 2개의 공진으로 인하여 중심주파수에서 5dB 이상의 반사손실이 개선되어 -20dB 이하의 반사손실을 얻을 수 있었다. 고주파에서의 공진은 MWS와 ADS의 시뮬레이션 결과가 상이하다. 이는 ADS의 회로 시뮬레이션은 중심주파수에서 추출된 고정된 서셉턴스가 11.25° 유전체 레이어 사이의 간격이 $\lambda/4$ 가 되는 주파수에서도 사용되기 때문이다. Fig. 8(c)는 다이오드 OFF 상태의 반사손실을 나타낸 것으로 2개의 11.25° 유전체 위상변위 레이어가 중심주파수에서 매칭이 이루어지므로 -40dB 이하의 반사손실을 보인다. 이때,



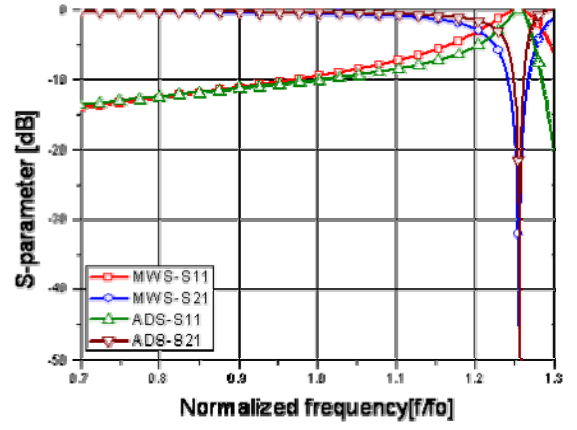
(a) 다이오드 ON 상태



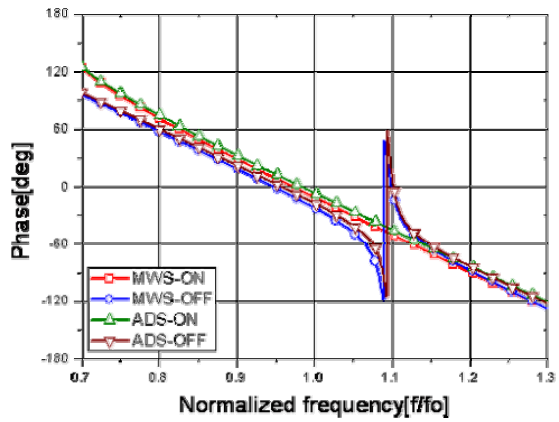
(a) 다이오드 ON 상태



(b) 다이오드 OFF 상태

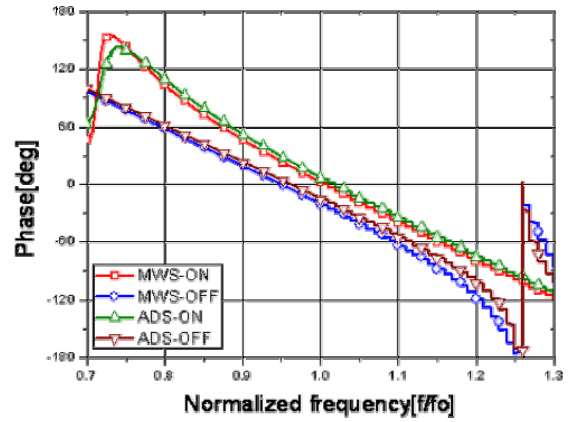


(b) 다이오드 OFF 상태



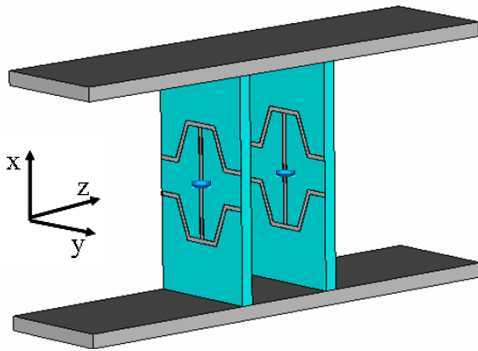
(c) 위상변위

Fig. 6. 11.25° 유전체 위상변위 레이어

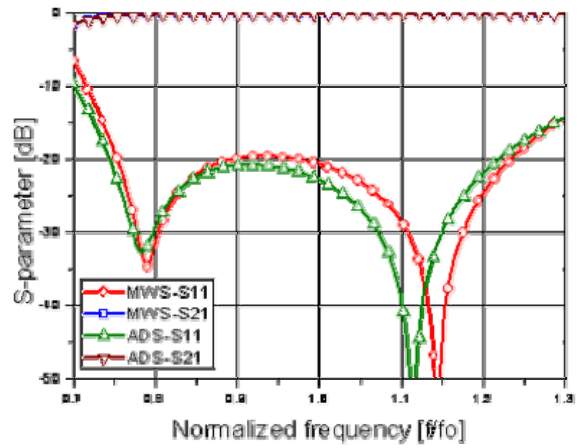


(c) 위상변위

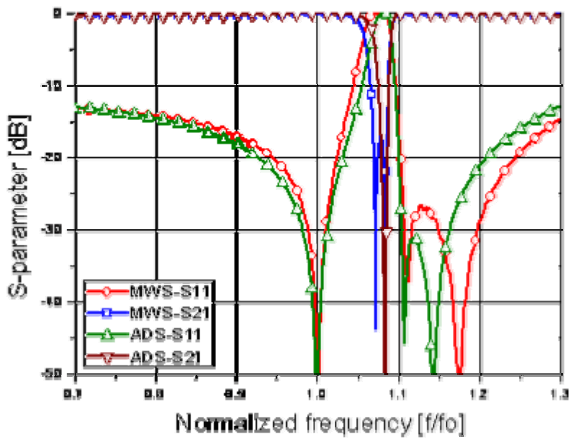
Fig. 7. 22.5° 유전체 위상변위 레이어



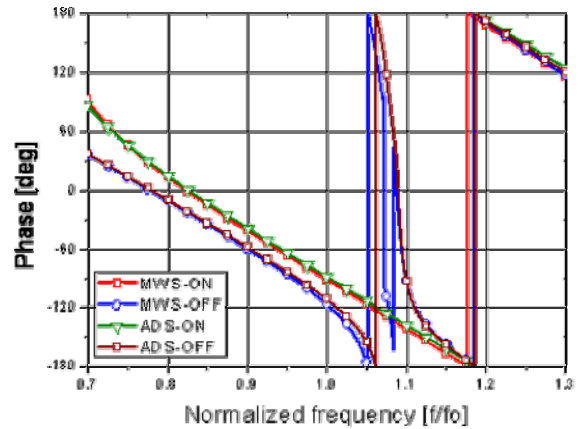
(a) 22.5° 위상변위기 구조



(b) 다이오드 ON 상태



(c) 다이오드 OFF 상태



(d) 위상변위

Fig. 8. 22.5° 위상변위기 시뮬레이션

유전체 위상변위 레이어 사이의 간격은 $\lambda/4$ 보다 짧은 곳에서 이루어진다. Fig. 8(d)는 22.5° 위상변위기의 위상변위를 나타낸 것으로, 중심주파수를 중심으로 사용대역내에서 약 1°의 위상오차가 발생하였다. 하지만, 사용대역의 상향 주파수에서 위상특성이 급격히 나빠지므로 안정적인 위상특성 확보를 위한 개선이 요구된다.

4. 제작 및 측정

Fig. 9는 제작된 유전체 위상변위 레이어와 측정 셋

업을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 제작된 11.25°, 22.5° 유전체 위상변위 레이어의 사진이며, 다이오드를 포함하여 20번의 주기를 갖는 금속패턴으로 제작되었다. 제작된 22.5°의 유전체 레이어는 7개의 배열로 구성된 평행판도파관내에 Fig. 9(b)와 같이 장착하였다. Fig. 9(c)는 위상변위를 측정하기 위한 측정 셋업으로써, 중앙에 위상변위 레이어가 장착된 평행판도파관과 좌·우에 송·수신 안테나, 그리고, 다이오드의 ON/OFF 상태제어를 위한 전원공급장치로 이루어진다.

Fig. 10은 11.25° 및 22.5° 위상변위 레이어에 대한 위상변위 측정결과이며, Table 2는 시뮬레이션 결과와 측정결과를 중심주파수에서 비교한 것이다.

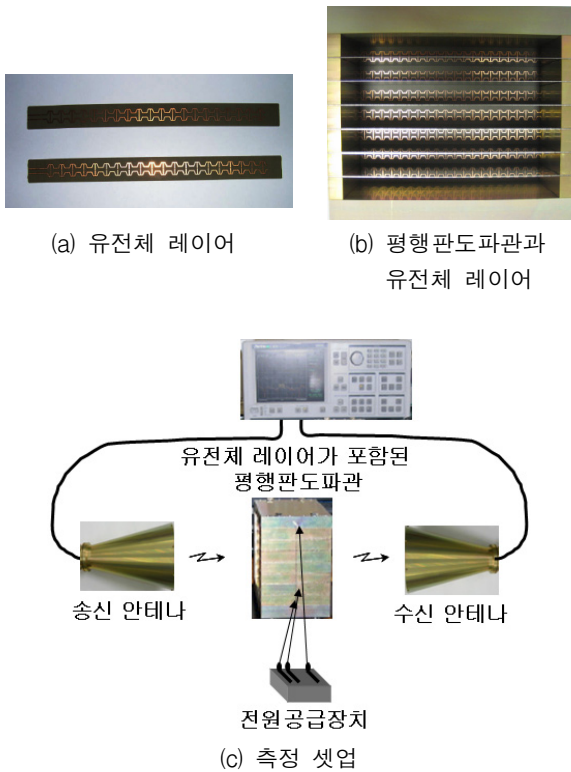


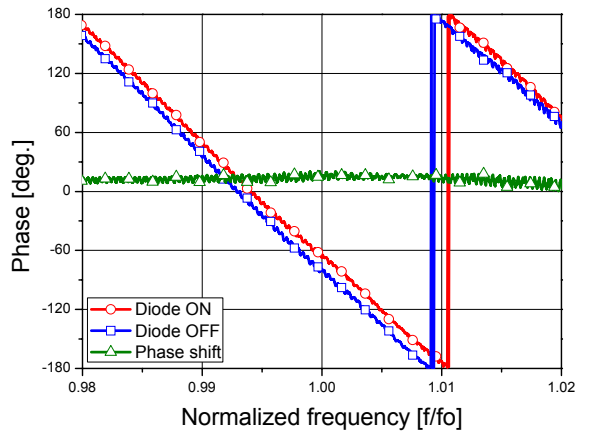
Fig. 9. 제작된 유전체 위상변위 레이어와 측정 셋업

Table 2. 측정 및 시뮬레이션된 중심주파수에서의 위상변위

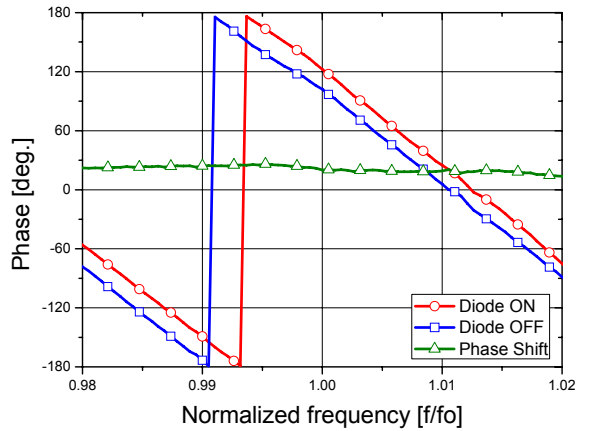
분 류	ADS [deg.]	MWS [deg.]	측정 [deg.]
11.25° 위상변위 레이어	10.7	11.2	10.7
22.5° 위상변위 레이어	21.8	22.5	20.5

5. 결론

본 논문에서는 평행판도파관내에서의 다이오드 위상변위기 및 위상변위기를 구성하는 유전체 위상변위 레이어 설계 및 모델에 관한 연구를 수행하였다. 제작된 11.25°, 22.5° 유전체 위상변위 레이어의 측정결과가 시뮬레이션 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 연구 결과를 토대로 360° 위상변위기 설계 및 제작을 진행할 예정이며, 또한, 입력단 정합 및 손실 등을 측정하기 위한 방법을 모색할 예정이다.



(a) 11.25° 위상변위 레이어



(b) 22.5° 위상변위 레이어

Fig. 10. 유전체 위상변위 레이어 측정 결과

Reference

- [1] Shiban K. Koul and Bharathi Bhat, Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters, Artech House, 1991.
- [2] J. Colin, "Phased Array Radars in France : Present and Future", IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, MA, pp. 458~462, Oct. 1996.
- [3] J. B. L. Rao, J. B. Evins, S. M. Brockett, M. Parent, J. Valenzi and D. Wilson, "An Affordable Scanning Array Using a Radant Lens", Proc. 1999 Antenna Symposium, Amherst, MA, pp. 331~348,

Sep. 1996.

- [4] 조정래, 이기오외 2명, “주기적인 금속 스트립 패턴을 갖는 유전체층이 놓인 평행판 도파관내에서의 전파특성”, 한국전자과학회논문지, 제20권 제1호, pp. 45~51, 2009. 1.
- [5] 이기오, 박동철, “RADANT 렌즈의 이론적 설계에 관한 연구”, 한국군사과학기술학회지, 제12권 제3호, pp. 360~367, 2009. 6.
- [6] M/A-COM Silicon Flip Chip PIN Diode, Model MA4FCP300, <http://www.macom.com>
- [7] Bright H. Chu and Kai Chang, “Analysis of Wide Transverse Inductive Metal Strips in a Rectangular Waveguide”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-37, No. 7, pp. 1138~1141, July 1989.