

RADANT 렌즈의 이론적 설계에 관한 연구

A Theoretical Design of RADANT Lens

이 기 오*

박 동 철**

Kee-Oh Lee

Dong-Chul Park

Abstract

In this paper, the RADANT phase scanning scheme and the transmission-type loaded line phase shifter scheme, which are applicable to the phased array systems, are studied. Using these two schemes, a theoretical method to design an electronic beam steering RADANT lens is introduced. The validity of the presented theoretical method is verified through the simplified circuit simulation results.

본 논문에서는 위상배열시스템에 적용 가능한 RADANT 위상 스캐닝 개념과 전송선 타입의 부하선로 (Loaded Line) 위상변위기 개념에 대하여 고찰하고, 이 두가지 개념을 결합시켜 전자적으로 빔 조향이 가능한 새로운 형태의 RADANT 렌즈를 설계하기 위한 이론적 방법을 제시한다. 제시된 이론적 방법은 간단한 회로 시뮬레이션 결과를 통하여 RADANT 렌즈의 구현 가능성이 확인되었다.

Keywords : RADANT Lens(레이던트 렌즈), PIN Diode(PIN 다이오드), Phased Array Antenna(위상배열안테나), Loaded Line Phase Shifter(부하선로형 위상변위기)

1. 서론

전자적으로 전파의 빔을 조향하여 2차원(방위각, 고 각) 탐색 및 추적을 위한 군수용 위상배열시스템에는 많은 수의 위상변위기와 복잡한 급전 및 빔 조향 회로 등이 사용되고, 이는 위상배열시스템의 가격을 결정짓는 주요 요인이 된다. 그러므로, 이를 해결하기 위하여 저가의 위상배열안테나 구현을 위한 연구가 진행되었

으며, 그 중 RADANT 렌즈가 대두되었다^[1~3].

RADANT 렌즈는 PIN 다이오드를 이용한 RADANT 스캐닝 개념^[4]과 부하선로형 위상변위기 개념^[5,6]을 결합시켜 제작 비용, 무게, 시스템의 복잡도등을 줄인 새로운 형태의 안테나로써, E-평면 또는 H-평면으로의 1차원 빔 조향이 가능하다. 그러므로, 2개의 RADANT 렌즈와 그 사이에 편파 변환기를 함께 사용하는 형태^[1]와 페라이트 위상변위기를 포함하는 1차원 슬롯도파 관 배열안테나에 RADANT 렌즈를 결합하는 하이브리드 형태^[3]로 구현되고 있으며, 이들은 2차원 빔 조향이 가능하다. 하이브리드 형태로 구현된 2차원 위상배열 안테나는 기존의 페라이트 위상변위기로 구현된 2차원 위상배열안테나보다 같은 크기로 제작될 경우, 가격이

† 2009년 5월 6일 접수~2009년 5월 15일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

책임저자 : 박동철(dcpark@cnu.ac.kr)

1/3 정도로 저렴할 뿐만 아니라, 2차원 빔 조향을 위한 위상커맨드도 $N(\text{row}) * M(\text{column})$ 에서 $N+M$ 으로 감소하여 매우 단순하게 시스템을 구현할 수 있다는 장점이 있다^[3]. 프랑스의 라팔 전투기에 장착된 RBE2 위상 배열레이다가 2개의 RADANT 렌즈와 편파 변환기를 이용하여 구현되었으며, 미국은 AN/TPQ-36 대포병 레이더 개량형 전면 RADANT 렌즈를 결합하여 측정된 결과를 발표하였다. 현재 국내에서는 국과연의 특화연구센터를 중심으로 관련 연구를 수행중에 있다^[7]. 하지만, 국내·외적으로 RADANT 렌즈를 설계하기 위한 체계적인 이론적 방법이 발표된 바 없다. 그러므로, 본 논문에서는 RADANT 렌즈를 설계하기 위하여 RADANT 스캐닝 개념에 새롭게 부하선로형 위상변위기 개념을 결합시켰으며, 이를 통하여 RADANT 렌즈의 이론적 설계방법을 정립하였다. 또한, 상용 소프트웨어인 안소프트사의 ADS를 통해 간단한 회로 시뮬레이션 결과를 제시함으로써 이론적 설계방법을 통한 RADANT 렌즈의 구현 가능성이 확인되었다.

2. RADANT 렌즈

Fig. 1과 같이 자유공간 또는 평행판 도파관내에 임의의 금속 와이어 또는 패턴을 포함하는 유전체 레이어(Layer)가 전파의 진행방향(P)에 수직으로 놓여 있을 때, 금속 와이어 및 패턴을 포함하는 유전체 레이어를 Fig. 2와 같이 Z_0 임피던스를 갖는 전송선로 회로에 병렬 어드미턴스 Y 로 표현이 가능하며, 이때, 어드미턴스 $Y = G + jB$ 로 나타낼 수 있다.

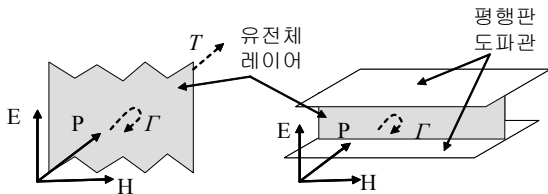


Fig. 1. 기본 구조

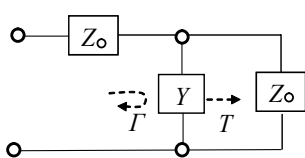


Fig. 2. 등가회로

식을 간단화 하기 위하여 유전체 레이어는 무손실이라고 가정하면, 어드미턴스는 $Y = jB$ 와 같이 간략화될 수 있고, 유전체 레이어에서의 반사계수(Γ)와 투과계수(T)를 구하면 식 (1)과 같다. 여기서 Y_0 는 전송선로 임피던스의 역수이다. 투과파의 위상은 식 (2)와 같이 유전체 레이어상의 임의의 금속 와이어 또는 패턴에 의한 서셉턴스에 비례하게 된다.

$$\Gamma = \frac{-j(B/Y_0)}{2 + j(B/Y_0)}$$

$$T = 1 + \Gamma = \frac{2}{2 + j(B/Y_0)} \quad (1)$$

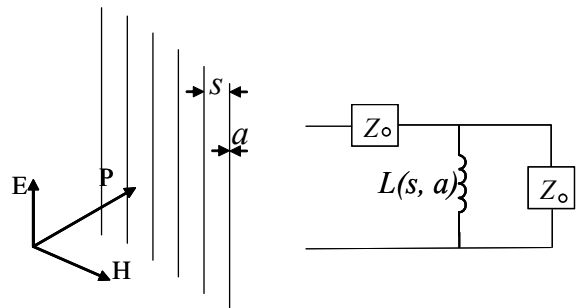
$$= \left| \frac{2}{\sqrt{4 + (B/Y_0)^2}} \right| e^{-j \tan^{-1}(B/2Y_0)}$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{B}{2Y_0}\right) \quad (2)$$

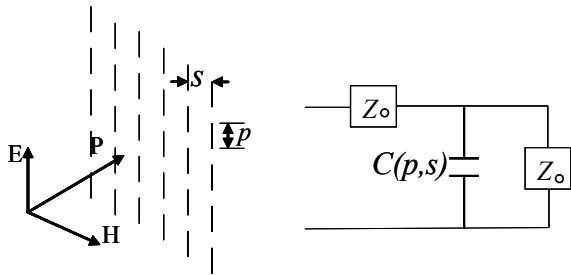
가. RADANT 위상 스캐닝 개념

유전체 레이어상에 Fig. 3(a)와 같이 연속적인 금속 와이어의 길이가 0.5λ 보다 크고 전계방향과 평행할 때, 등가 서셉턴스는 인덕티브 값을 가지며, 그 값은 파장, 와이어 사이의 간격(s) 및 와이어 직경(a)등의 함수이다. 또한, Fig. 3(b)와 같이 단락된 금속 와이어의 길이가 0.5λ 보다 작고 전계방향과 평행할 때, 등가 서셉턴스는 커패시티브 값을 가지며, 그 값은 파장, 와이어 길이(p), 와이어 사이의 간격(s)등이 함수가 된다^[4].

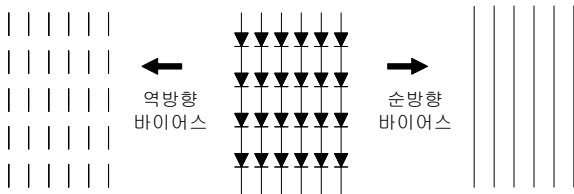
연속적인 금속 와이어의 인덕티브 서셉턴스와 단락된 금속 와이어의 커패시티브 서셉턴스의 차에 의하여 위상변위를 발생시킬 수 있다. 서셉턴스의 변화를 전자적으로 구현하기 위하여 Fig. 3(c)와 같이 PIN 다이오드를 사용하며, 이들을 E-평면 또는 H-평면상에 배열



(a) 연속된 금속 와이어 및 등가회로



(b) 단락된 금속 와이어 및 등가회로



(c) 서셉턴스 변화를 위한 PIN 다이오드

Fig. 3. RADANT 위상 스캐닝 개념

하고 각 평면을 따라 위상을 조절하는 것이 RADANT 위상 스캐닝 개념이다.

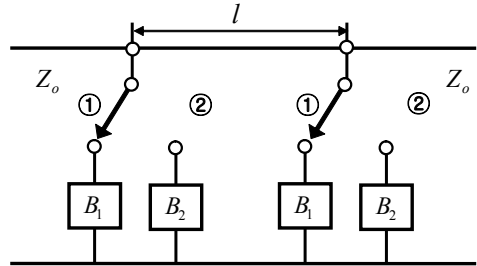
나. 부하선로형(Loaded Line) 위상변위기 개념

식 (1)에서 알 수 있듯이 변화하는 서셉턴스 값에 따라 반사계수가 달라지게 되므로 Fig. 3(c)는 진행하는 전자파에 매칭이 어렵게 된다. 그러므로, Fig. 3(c)는 매칭을 고려한 새로운 구조를 필요로 하게 되며, Fig. 4(a)와 같이 스위치 가능한 병렬 서셉턴스를 갖는 부하선로형 위상변위기 개념을 도입하였다. 여기서, 서셉턴스 B 가 “0”이 아니라면 완전 매칭을 위한 서셉턴스간의 간격은 식 (3)을 이용하여 구할 수 있으며, B_1 또는 B_2 는 다이오드의 역방향 또는 순방향 바이어스 상태의 서셉턴스 값이다. Fig. 4(b)는 부하선로형 위상 변위기 개념을 도입하여 Fig. 3(c)를 확장한 것이며, 거리 l 을 조절함으로써 다이오드가 역방향 또는 순방향으로 바이어스 된 상태의 서셉턴스 중 하나에 대하여 매칭이 가능하다^[4,5].

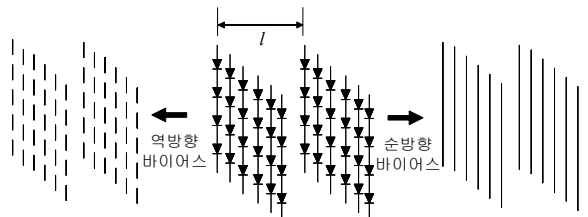
$$l = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2}{B_{1 \text{ or } 2}} \right) \quad (3)$$

Fig. 4(b)에서 다이오드의 두 가지 상태중 한 상태(역방향 바이어스)의 서셉턴스(B_1)에 대하여 매칭이 이루

어졌다고 가정하면, 두 레이어간의 거리 l 은 다이오드 역방향 바이어스 상태의 서셉턴스 값에 의하여 고정된다. 그러므로, 다른 다이오드 상태(순방향 바이어스, B_2)에 대하여도 매칭을 이루기 위하여서는 새로운 설계변수가 필요하게 된다.



(a) 부하선로형 위상변위기 회로도



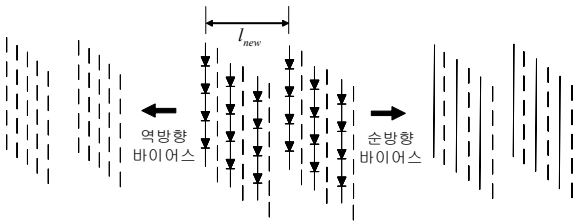
(b) 매칭을 위한 구조

Fig. 4. 부하선로형 위상변위기 개념

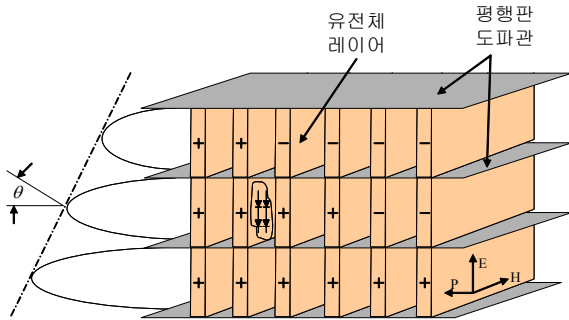
다. RADANT 렌즈

Fig. 4(b)에서 다이오드로 연결된 금속 와이어들 사이에 Fig. 5(a)와 같이 단락된 금속 와이어를 삽입한다. 이때, 다이오드의 순방향 바이어스에 의하여 단락된 금속 와이어와 연속된 금속 와이어 사이에 주어진 주파수에서 병렬 공진($LC\omega^2 = 1$)이 발생하도록 한다. 공진으로 인하여 위상변위 $\Delta\phi_2 = 0$ 이 된다.

다이오드가 역방향 바이어스 상태일 때, Fig. 4(b)에서 두 레이어간의 매칭을 위한 간격 l 이 구하여 졌다. 하지만, Fig. 5(a)와 같이 공진을 위하여 추가된 단락된 금속 와이어로 인하여 다이오드 역방향 바이어스 상태에서의 서셉턴스 값이 변하게 된다. 그러므로, 변경된 서셉턴스 값에 따라 매칭을 위한 두 레이어간의 간격 l_{new} 를 식 (3)을 이용하여 재 설정하며, l_{new} 는 다이오드 순방향 바이어스 상태의 매칭에는 영향을 주지 않는다. 이때, 위상변위는 서셉턴스 값에 비례하는 $\Delta\phi_1$ 이 된다.



(a) 공진을 위한 구조(H-평면 빔조향)



(b) 평행판 도파관형 RADANT 렌즈(E-평면 빔조향)

Fig. 5. RADANT 렌즈

결국, 다이오드의 두 가지 상태에 따른 총 위상변위는 식 (4)와 같으며, 이때, 반사계수는 “0”이 된다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \Delta\phi_1 \quad (4)$$

참고문헌 [4]에서 인덕티브 서셉턴스에 대한 매칭으로 레이어 사이의 간격이 $\lambda/4$ 보다 크게 되는 것과 달리, 다이오드로 연결된 금속 와이어들 사이에 단락된 금속 와이어를 삽입하여 커패시티브 서셉턴스에 대한 매칭을 제공함으로써 레이어 사이의 간격 l_{new} 가 $\lambda/4$ 보다 작게 된다. 이는 전체 위상변위를 제작할 경우, 부피가 감소하는 장점이 있다. Fig. 5(a)는 H-평면 빔조향이 가능한 형태이며, Fig. 5(b)는 E-평면 빔조향이 가능한 형태이다^[3,7]. E-평면 빔 조향 RADANT 렌즈는 평행판 도파관내에 유전체 레이어가 전파의 진행방향에 수직으로 놓여있으며, 각각의 유전체 레이어상에는 다이오드를 포함하는 금속 패턴이 구현되어 있고, 다이오드는 전계방향과 평행하게 놓여 있다. 매칭을 위하여 다이오드를 포함하는 유전체 레이어는 쌍으로 동작하고, “+,”-”부호는 다이오드가 순방향 또는 역방향 바이어스 상태일 때를 나타낸다. 이때, RADANT 렌즈에 의한 빔 조향각(θ)은 식 (5)에 의하여 구할 수 있으며,

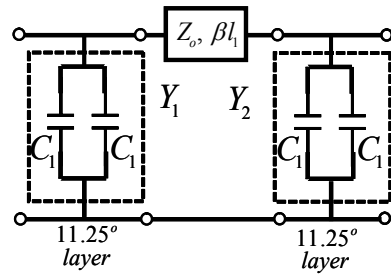
여기서, d 는 평행판 도파관의 높이, $\Delta\phi$ 는 각각의 평행판 도파관내에서의 위상 변위를 나타낸다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} \quad (5)$$

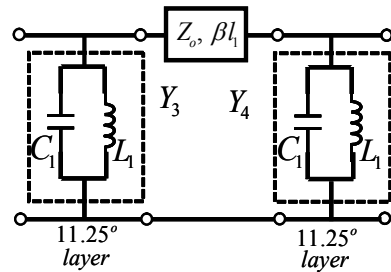
3. 위상변위기의 이론적 설계

E-평면 또는 H-평면 빔조향 RADANT 렌즈 설계 시 적용되는 이론은 동일하므로, 4비트 디지털 위상변위기 구현 시 요구되는 22.5° 위상변위기 및 45° 위상변위기에 대한 간단한 회로시뮬레이션으로 이론적 설계를 뒷받침한다.

가. 22.5° 위상변위기 설계



(a) 위상변위 상태



(b) 기준위상(공진) 상태

Fig. 6. 22.5° 위상변위기 회로도

Fig. 6은 22.5° 위상변위기에 대하여 Fig. 5(a)를 Fig. 3(a) 및 3(b)를 이용하여 회로도화한 것으로, 다이오드의 역방향 바이어스 상태를 위상변위 상태, 다이오드의 순방향 바이어스 상태를 기준위상(공진) 상태를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 Y_1, Y_2 는 11.25° 위상변위 레

이어의 어드미턴스이며, 11.25°의 위상변위를 위하여 요구되는 커패시턴스 값은 $2C_1$ 이다. 물론 Fig. 6(a)의 경우 $Y_1 = Y_2$ 가 된다. l_1 은 두 레이어 사이의 간격을 나타내며, l_1 을 이용하여 두 레이어간의 매칭을 구현한다. Fig. 6(a)의 회로를 ABCD 매트릭스의 곱으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta l_1 & jZ_o \sin\beta l_1 \\ jY_o \sin\beta l_1 & \cos\beta l_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

전체 ABCD 매트릭스를 식 (7)을 이용하여 S 파라미터로 변환한 후, 매칭을 위하여 $S_{11} = 0$ 으로 놓으면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$S_{11} = \frac{A + B/Z_o - CZ_o - D}{A + B/Z_o + CZ_o + D} \quad (7)$$

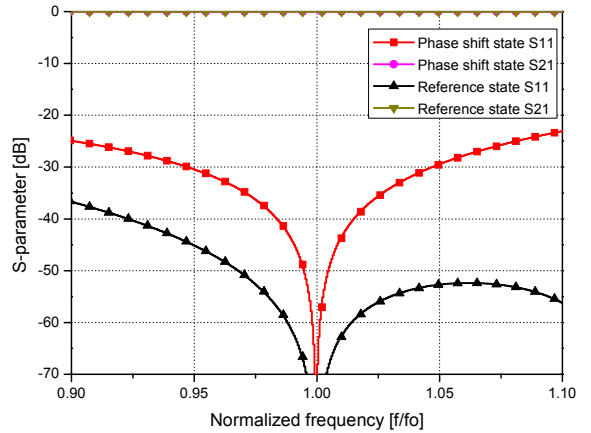
$$\therefore \tan\beta l_1 = \frac{(Y_1 + Y_2)}{j(Y_2 - Y_1 - Y_1 Y_2 Z_o)} \quad (8)$$

앞서와 같이 레이어의 어드미턴스 Y_1, Y_2 는 무손실이고, $Y_2 = Y_1 = jB_1 = j2\omega C_1$ 라고 하면, 두 레이어간의 매칭을 위한 전송선로 거리 l_1 은 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

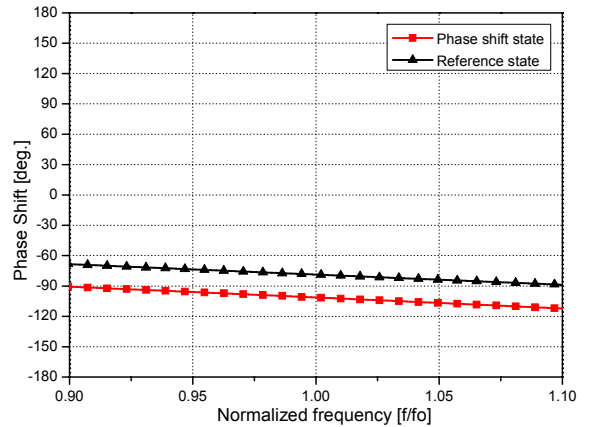
$$\tan\beta l_1 = \frac{2}{-jY_1 Z_o} = \frac{2}{B_1 Z_o} = \frac{2}{2\omega C_1 Z_o},$$

$$\therefore l_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2}{2\omega C_1 Z_o} \right) \quad (9)$$

다음은, 기준위상 상태를 위하여 Fig. 6(b)와 같이 레이어상의 커패시턴스의 일부분을 PIN 다이오드를 이용하여 인덕턴스가 되도록 구현한다. 이때, $\omega^2 L_1 C_1 = 1$ 을 만족하는 인덕턴스(L_1) 값을 설정하기 위하여 와이어 사이의 간격(s) 및 와이어 직경(a)등을 이용하여 자체 공진이 발생하도록 한다. 이 경우, 레이어내에서의 자체 공진으로 인하여 레이어간의 전송선로 거리에 무관하게 매칭이 이루어지므로, 식 (9)에서 구한 간격 l_1 을 그대로 유지시킬 수 있다. 그러므로, 22.5° 위상변위기에서의 위상변위는 Fig. 6(b)의 기준위상 상태를 기준하여 Fig. 6(a)의 커패시턴스 $4C_1$ 에 의한 상대적인 위상변위량(22.5°)이 된다.



(a) S-파라미터



(b) 위상변위

C_1 [pF]	L_1 [nH]	l_1 [mm]	위상변위 @ f_o
0.067	4.19	6.904	22.6°

(c) 사용된 변수 값

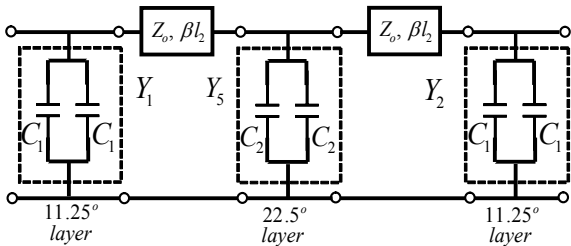
Fig. 7. 22.5° 위상변위기 시뮬레이션

Fig. 7은 22.5° 위상변위기에 대한 간단한 회로 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 위상변위 상태와 기준위상 상태의 S-파라미터 값을 나타낸 것으로 중심주파수에서 모두 매칭이 이루어짐을 알 수 있다. 위상변위 상태에서 $\lambda/4$ 보다 작은 l_1 에서 커패시티브 매칭이 이루어지므로, 기준위상 상태에서는 자체공진 및 2개의 위상변위 레이어 사이의 간격이 $\lambda/4$ 가 되는 주파수에서 공진이 발생하여 높은 주파수에서 기준위

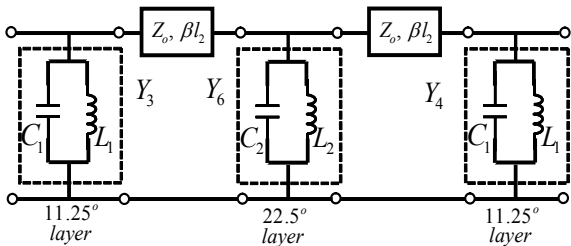
상의 S_{11} 이 위상변위의 S_{11} 보다 20~30dB 낮게 된다. Fig. 7(b)는 이때의 위상변위량을 나타낸 것으로 중심 주파수에서 22.6° 위상변위를 갖으며, Fig. 7(c)는 시물레이션에 사용된 변수값이다.

나. 45° 위상변위기 설계

45° 위상변위기가 단독으로 사용될 경우, 22.5° 레이어 2개로 구현가능하다. 하지만, 45° 위상변위기가 22.5° 위상변위기와 같이 사용될 경우, 이들 사이의 매칭을 고려하여 Fig. 8과 같이 45° 위상변위기를 11.25° 레이어 2개와 그 중앙에 22.5° 레이어로 구성하였다. Fig. 8(a)의 등가회로에 대한 ABCD 매트릭스는 식 (10)과 같이 표현 가능하다.



(a) 위상변위 상태



(b) 기준위상 상태

Fig. 8. 45° 위상변위기 회로도

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta l_2 & jZ_0 \sin \beta l_2 \\ jY_5 \sin \beta l_2 & \cos \beta l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix}$$

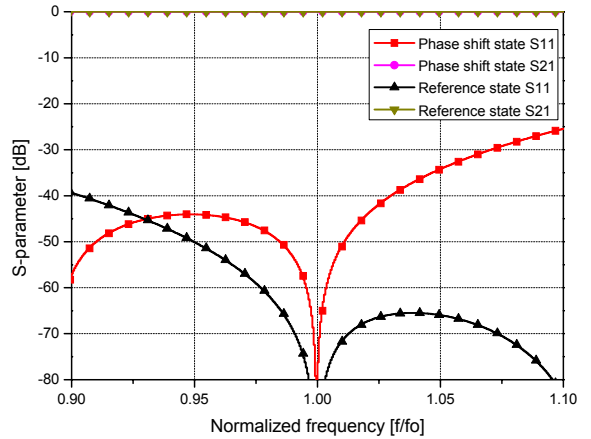
$$\begin{bmatrix} \cos \beta l_2 & jZ_0 \sin \beta l_2 \\ jY_5 \sin \beta l_2 & \cos \beta l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

앞서와 같이 각 레이어의 어드미턴스 Y_1, Y_2, Y_5 은 무순실이고, $Y_5 = 2Y_2 = 2Y_1$ 이라고 하면, 45° 위상변위기에 대한 전체 ABCD 매트릭스를 식 (7)을 이용하여 S 파라미터로 변환한 후, $S_{11} = 0$ 으로 놓으면 식

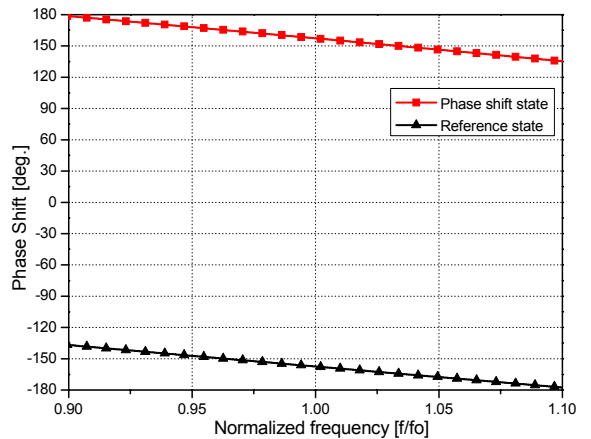
(11)을 얻을 수 있다.

$$Z_0^2 Y_1^2 \tan^2 \beta l_2 - j3 Z_0 Y_1 \tan \beta l_2 - 2 = 0 \quad (11)$$

식 (11)에서 $Y_1 = jB_1 = j2\omega C_1$ 이므로 45° 위상변위기의 두 레이어간의 매칭을 위한 전송선로 간격 l_2 는 식 (12)와 같이 구할 수 있다.



(a) S-파라미터



(b) 위상변위

C_2 [pF]	L_2 [nH]	l_2 [mm]	위상변위 @ f_0
0.134	2.095	6.904	45.2°

(c) 사용된 변수 값

Fig. 9. 45° 위상변위기 시물레이션

$$\begin{aligned} \therefore l_2 &= \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2}{2\omega C_1 Z_o} \right) \quad \text{또는} \\ l_2 &= \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{1}{2\omega C_1 Z_o} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

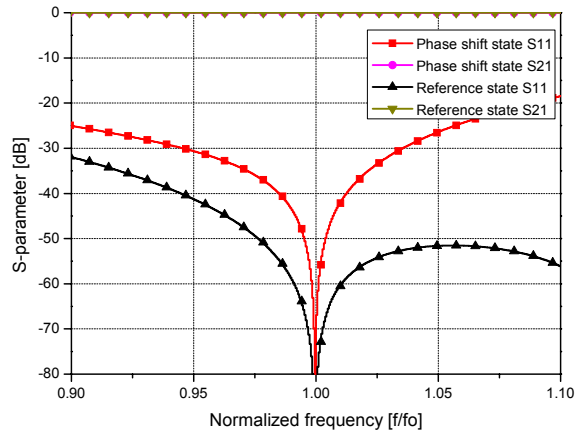
식 (9)와 식 (12)로부터 45° 위상변위기 레이어간의 간격 l_2 와 22.5° 위상변위기 레이어간의 간격 l_1 이 동일한 거리에서 매칭이 발생됨을 알 수 있다. 22.5° 위상변위기와 마찬가지로 $\omega^2 L_2 C_2 = 1$ 을 만족하는 인덕턴스(L_2) 값을 설정하여 자체 공진이 발생하도록 하면, Fig. 8(b)의 기준위상 상태를 기준하여 Fig. 8(a)의 커패시턴스 $8C_1(4C_1 + 2C_2)$ 에 의한 상대적인 위상변위량(45°)이 된다.

Fig. 9는 45° 위상변위기에 대한 회로 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 위상변위 상태와 기준 위상 상태의 S-파라미터 값을 나타낸 것으로 중심주파수에서 모두 매칭이 이루어짐을 알 수 있으며, Fig. 9(b)는 이때의 위상변위량을 나타낸 것으로 중심주파수에서 45.2° 위상변위를 갖으며, Fig. 9(c)는 시뮬레이션에 사용된 변수값이다. 여기서, C_1 , L_1 은 22.5° 위상변위기에서 사용된 값과 동일하며, 22.5° 위상변위기와 45° 위상변위기에서 유전체 레이어간의 간격도 동일함을 알 수 있다.

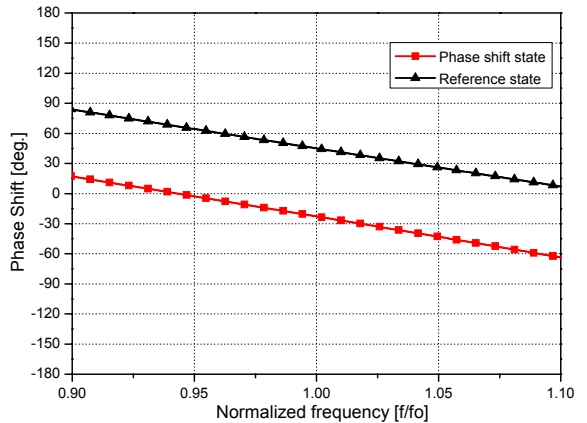
다. 결합된(22.5°+45°)위상변위기 시뮬레이션

Fig. 10은 22.5° 위상변위기와 45° 위상변위기를 결합한 형태에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 22.5°와 45° 위상변위기 사이의 간격 d 를 제외하고는 앞서 설계된 값을 모두 사용한다. 다이오드의 바이어스에 따라 22.5°와 45° 위상변위기는 자체적으로 매칭이 이루어지기 때문에, 이들 사이의 간격에 무관하게 결합된 위상변위기는 매칭이 이루어진다. 22.5°와 45° 위상변위기내의 간격 l_1 과 l_2 가 동일하기 때문에 22.5°와 45° 위상변위기 사이의 간격 $d = l_1 = l_2$ 로 설정한다. 이때 위상변위량은 22.5°와 45° 위상변위기의 합인 67.8°이다.

앞에서 언급한 RADANT 렌즈의 이론적 설계방법을 요약하면 다음과 같다.



(a) S-파라미터



(b) 위상변위

d [mm]	위상변위
6.904	67.8°

(c) 사용된 변수 값

Fig. 10. 22.5° + 45.0° 위상변위기 시뮬레이션

- ① 요구되는 위상변위를 위한 C 값을 선택한다.
- ② 위상변위 레이어 사이의 매칭을 위한 간격 l 을 선택한다.
- ③ 위상변위 레이어에서 자체 공진을 위한 L 값을 선택한다.

4. 결 론

본 논문에서는 RADANT 스캐닝 개념과 부하선로형 위상변위기 개념을 결합하여 RADANT 렌즈의 이론적 설계방법을 제시하였다.

또한, 상용 소프트웨어인 안소프트사의 ADS를 통해 간단한 회로 시뮬레이션 결과를 제시함으로써 이론적 설계방법을 통한 RADANT 렌즈의 구현 가능성이 확인되었으며, 향후, RADANT 렌즈 구현 시 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

Reference

- [1] 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.
- [2] J. B. L. Rao, G. V. Trunk and D. P. Patel, "Two Low-Cost Phase Arrays", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 12, Issue 6, pp. 39~44, 1997.
- [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] C. Chekroun, D. Herrick, Y. Michel, R. Pauchard and P. Vidal, "Radant : New Method of Electronic Scanning", Microwave J., pp. 45~53, Feb. 1981.
- [5] Shibani K. Koul and Bharathi Bhat, Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters, Artech House, 1991.
- [6] H. A. Atwater, "Circuit Design of the Loaded Line Phase Shifter", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-33, pp. 626~634, July 1985.
- [7] 조정래, 이기오 외 2명, "주기적인 금속 스트립 패턴을 갖는 유전체층이 놓인 평행판 도파관내에서의 전파특성," 한국전자과학회논문지, 제20권 제1호, pp. 45~51, 2009. 1.