

주기적인 금속 스트립 패턴을 갖는 유전체 층이 놓인 평행판 도파관내에서의 전파 특성

Propagation Characteristic in Parallel Plate Waveguide with Dielectric Layer Having Periodic Metal Strip Pattern

조정래 · 김동석* · 이기오** · 류상철** · 박동철

Jung-Rae Cho · Dong-Seok Kim* · Kee-Oh Lee** · Sang-Chul Ryu** · Dong-Chul Park

요 약

본 논문에서는 주기적인 금속 스트립 패턴을 갖는 유전체 층이 놓인 평행판 도파관내에서의 전파 특성에 대하여 기술하였다. CST사의 MWS(Microwave Studio)를 이용하여 금속 스트립 사이에 연결된 PIN 다이오드의 ON/OFF 상태를 금속 스트립의 단락/개방 상태로 각각 시뮬레이션을 하였고, X-대역 4-bit radant lens 위상변위기에 사용될 수 있는 11.25°, 22.5°, 45° 유전체 층을 설계하였다. 설계된 각 유전체 층의 위상차 시뮬레이션 결과는 11.28°, 23.2°, 46.22°이었다. 또한, Agilent사의 ADS(Advanced Design System)를 이용하여 각 유전체 층에 대한 동작대역에서의 등가회로를 구현 및 시뮬레이션하였고, MWS 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 최종적으로 11.25°, 22.5°, 45° 유전체 층을 제작하여 중심주파수에서 각각 9.6°, 22.4°, 43°의 측정된 위상차를 얻었다.

Abstract

The propagation characteristics in parallel plate waveguide with dielectric layer having periodic metal strip pattern are investigated. PIN diode ON/OFF states are regarded as the short and open circuit, respectively, in the simulation using CST's MWS. The 11.25°, 22.5°, and 45° layers which can be used for X-band 4-bit Radant lens phase shifter, are designed. The simulated results for each dielectric layer are 11.28°, 23.2°, and 46.22°, respectively. Also, the equivalent circuit of each layer at the operating band is realized and simulated using Agilent's ADS. The ADS simulated results are compared with the MWS simulated ones. Measured differential phase shifts at the center frequency are 9.6°, 22.4°, and 43°, respectively.

Key words : Radant Lens Phase Shifter, Periodic Metal Strip

I. 서 론

위상 배열 안테나에서 가격을 결정짓는 주된 하드웨어로 위상변위기, T/R 모듈 그리고 빔 조향회로 등이 있다. 그 중에서도 저가의 위상 배열 안테나를

구현하기 위해 위상변위기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 여러 위상변위기들 중 아직 국내에서는 개발되지 않았지만 미국, 프랑스에서 연구된 Radant lens는 손실이 적고 저가로 구현 가능하며, 구동회로 구현이 간단하다^{[1],[2]}. 또한, 이 기술은 X-대

「본 논문은 한국과학기술원 전파탐지특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.」
충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

*MTG(주)(Microwave Technologies Group)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20081008-125

· 수정완료일자 : 2008년 12월 22일

역의 탐색 레이더 개발에도 적용이 가능하므로 국내에서도 이에 대한 연구 개발이 필요하다.

Radant lens는 여러 평행판 도파관으로 배열되어 있다. 배열된 방향으로의 빔 조향을 위하여 각 평행판 사이에 주기적인 금속 스트립 패턴이 있는 유전체 층이 나열되어 있고, 한 유전체 층에서 대칭구조의 두 금속 스트립은 다이오드로 연결되어 있다. 유전체 층은 단지 금속 스트립을 지지하는 역할을 한다. 이와 같은 구조에 수직 입사된 전자파는 다이오드가 ON된 경우와 OFF된 경우 위상 지연이 다르게 되어 위상차가 발생되게 된다. 이 위상차의 크기는 금속 스트립의 구조를 변화시켜 가변시킬 수 있다. 4-bit Radant lens의 경우 4개의 bit, 즉, 22.5°, 45°, 90°, 180° bit로 구현될 수 있고, 각 bit는 세 가지 유형의 유전체 층, 즉, 11.25°, 22.5° 그리고 45°의 위상차를 갖는 층으로 구현될 수 있다^[3].

본 연구에서는 CST사의 MWS를 이용하여 다이오드가 ON/OFF된 경우를 각각 금속 스트립이 단락/개방된 것으로 가정하고, 11.25°, 22.5° 그리고 45°의 위상차를 갖는 층을 설계하였다. 또한, Agilent사의 ADS를 이용하여 각각의 경우에 대한 동작 대역에서의 등가회로를 추출함으로써 radant lens의 동작원리를 규명하였다. 추출된 등가회로는 향후 radant lens 위상변위기의 multi-layer 임피던스 매칭 연구에 아주 유용하게 사용될 것이다. 최종적으로 세 가지 유형의 유전체 층을 제작 및 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 설계된 유전체 층이 놓인 평행판 도파관내에서의 전파 특성을 검증하였다.

II. 유전체 층의 구조 및 동작원리

2-1 유전체 층의 단위 셀 구조

그림 1은 radant lens의 구조를 바탕으로 구현된 평행판 도파관 내의 유전체 층의 단위 셀이다. 그림 1(a)와 (b)는 각각 다이오드의 ON/OFF된 경우를 금속 스트립으로 단락/개방시킨 단위 셀 그림이고, 각 단위 셀 xz -면은 그림 1(c)와 같다. 이러한 단위 셀의 S 파라미터를 해석하기 위하여 CST사의 MWS를 이용하였고, 주기적인 구조의 해석을 위하여 단위 셀의 좌우 경계를 magnetic wall로 설정하였다.

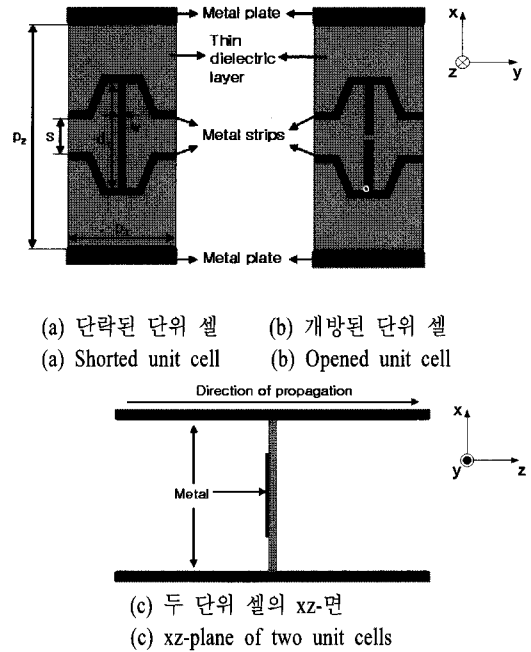


그림 1. 평행판 사이에 놓인 유전체 층의 단위 셀
Fig. 1. Unit cell of dielectric layer between parallel plates.

2-2 유전체 층의 동작원리

그림 2는 단락된 단위 셀과 개방된 단위 셀의 등가회로를 나타내며, 그림 3은 MWS로 시뮬레이션된 삽입 손실과 반사 손실 특성을 나타낸다. 그림 1(a)와 같은 단락된 단위 셀에서 x 방향으로 편파된 전자파가 z 방향으로 진행할 때, x 방향의 전계와 평행한 금속 스트립은 그림 2(a)의 L_1 으로 등가화 될 수 있고,

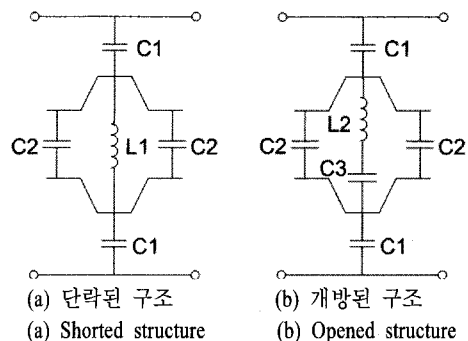
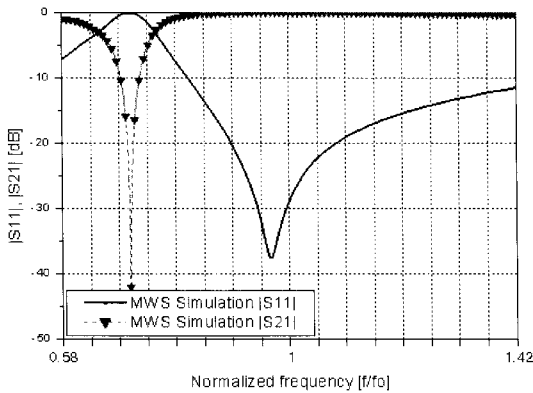


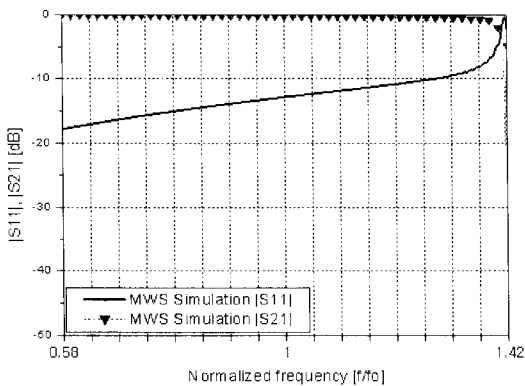
그림 2. 유전체 층의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of dielectric layer.

평행판과 근접한 스트립은 평행판과의 전계에 의해 C_1 로 증가화 될 수 있으며, 이 L_1 과 C_1 은 직렬 공진을 일으킨다^{[4],[5]}. 동시에 좁은 간격의 금속 스트립은 그 간격에서 생기는 전계에 의한 C_2 로 증가화 되며, 이는 다시 L_1 과 병렬공진을 일으킨다. 이에 따라 그림 2(a)와 같이 증가회로를 나타낼 수 있고, 그림 3(a)와 같은 S-파라미터 특성을 갖는다.

그림 1(b)와 같은 개방된 단위 셀에서는 전계와 평행한 금속 스트립에 있는 갭이 그림 2(b)에서의 C_3 로 증가화 된다. 또한, 이 갭에 의해 전계와 평행한 금속 스트립은 단락된 단위 셀의 L_1 과 다른 L_2 로 증가화 된다. 그러므로 그림 2(b)와 같은 증가회로로 표현될 수 있고, 그림 3(b)와 같은 S-파라미터 특성을 갖는다. 개방된 단위 셀에서도 직렬 공진이 일어나지



(a) 단락된 구조
(a) Shorted structure



(b) 개방된 구조
(b) Opened structure

그림 3. MWS로 시뮬레이션된 S-파라미터 특성
Fig. 3. MWS-simulated S-parameters.

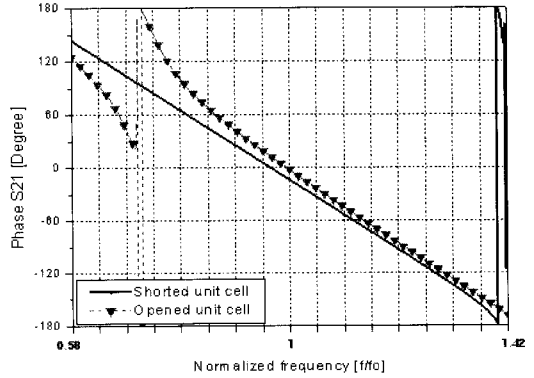


그림 4. MWS로 시뮬레이션된 위상 특성
Fig. 4. MWS-simulated phase characteristic.

만 C_3 의 값이 아주 작으므로 동작 대역보다 더 높은 주파수에서 일어나고 이것은 무시할 수 있다.

이와 같이 단락된 단위 셀과 개방된 단위 셀의 증가회로가 다르므로 위상 특성도 다르게 나타나며, 그림 4와 같이 두 구조간의 위상차가 발생한다.

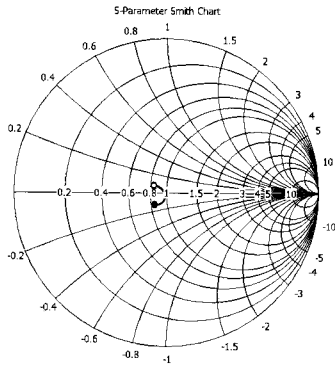
III. 11.25°, 22.5°, 45° 유전체 층과 증가회로

앞에서 언급했듯이 4-bit Radant lens는 세 가지 유형의 유전체 층 즉, 11.25°, 22.5° 그리고 45°의 위상차를 갖는 층의 적절한 조합을 통해 구현될 수 있다^[3]. 평행판 도파관내에 위치한 유전체 층에서 금속 스트립의 너비(w)와 간격(s) 등 주요 파라미터를 조절함으로써 증가회로의 L 값과 C 값이 변화하고, 이에 따라 원하는 위상차를 얻을 수 있다.

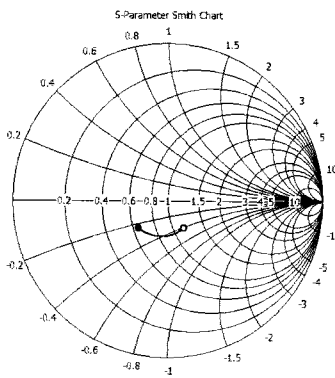
그림 5는 설계된 11.25° 유전체 층의 S_{11} 특성을 동작대역에서 MWS를 이용하여 스미스차트에 도시화한 것이다. 그리고 그림 6에 동작대역에서의 증가회로를 나타내었다.

증가회로의 L 과 C 값을 추출하기 위하여 단락된 구조의 경우, 스미스차트를 이용하여 공진주파수 부근의 두 점에서 입력 임피던스를 추출하고, 각각의 서셉턴스로 식 (1)에 나타난 slope parameter를 구할 수 있다^[6]. 이를 이용하여 식 (2)에서 그림 6(a)에 나타난 증가회로의 L_1 과 C_2 의 근사값을 추출할 수 있다. 또한, 저주파에서 일어나는 공진주파수와 식 (3)을 이용하여 C_1 의 근사값을 추출할 수 있다.

$$b = -\frac{\omega_0}{2} \left. \frac{dB}{d\omega} \right|_{\omega_0} \quad (1)$$

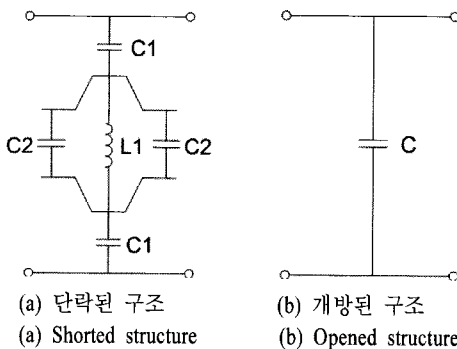


(a) 단락된 구조
(a) Shorted structure



(b) 개방된 구조
(b) Opened structure

그림 5. MWS로 시뮬레이션된 S_{11} 특성
Fig. 5. MWS-simulated S_{11} .



(a) 단락된 구조
(a) Shorted structure
(b) 개방된 구조
(b) Opened structure

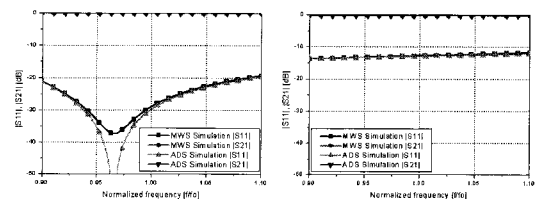
그림 6. 유전체 층의 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit of dielectric layer.

$$B = \omega_0 C = 1/(\omega_0 L) \quad (2)$$

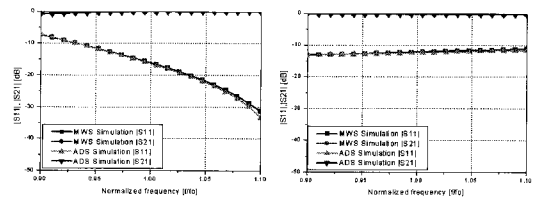
$$B_C = \omega_0 C \quad (3)$$

개방된 구조의 경우, 스미스차트에서 볼 수 있듯이 입력 임피던스의 허수부가 음의 값으로만 존재하므로 그림 6(b)와 같이 비대역폭이 6 %인 동작대역에서 단순한 캐패시턴스로 등가화될 수 있다. 이 등가회로에서의 C값은 스미스차트에서 허수부의 값을 추출하여 식 (3)을 통해 추출할 수 있다.

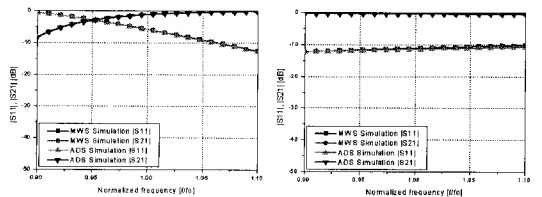
이와 같은 방법으로 22.5°와 45° 유전체 층에 대해서도 등가회로의 근사화된 각 소자값을 추출하였고, 이를 ADS 시뮬레이션을 통하여 MWS 시뮬레이션 결과와 잘 일치되도록 튜닝하였다. 그리고 그림 7에 MWS 시뮬레이션 결과와 ADS 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내었다. ADS 시뮬레이션시 근사화된 등가회로 및 소자값으로 인해 전자장 시뮬레이터인 MWS 결과와 완전 일치하고 있지는 않으나 두 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8에 위상차 특성을 나타내었고, 중심주파수에서의



(a) Shorted structure (11.25° layer)
(b) Opened structure (11.25° layer)



(c) Shorted structure (22.5° layer)
(d) Opened structure (22.5° layer)



(e) Shorted structure (45° layer)
(f) Opened structure (45° layer)

그림 7. 각 유전체 층과 등가회로의 S-파라미터 특성
Fig. 7. S-parameter characteristics of each dielectric layer and equivalent circuit.

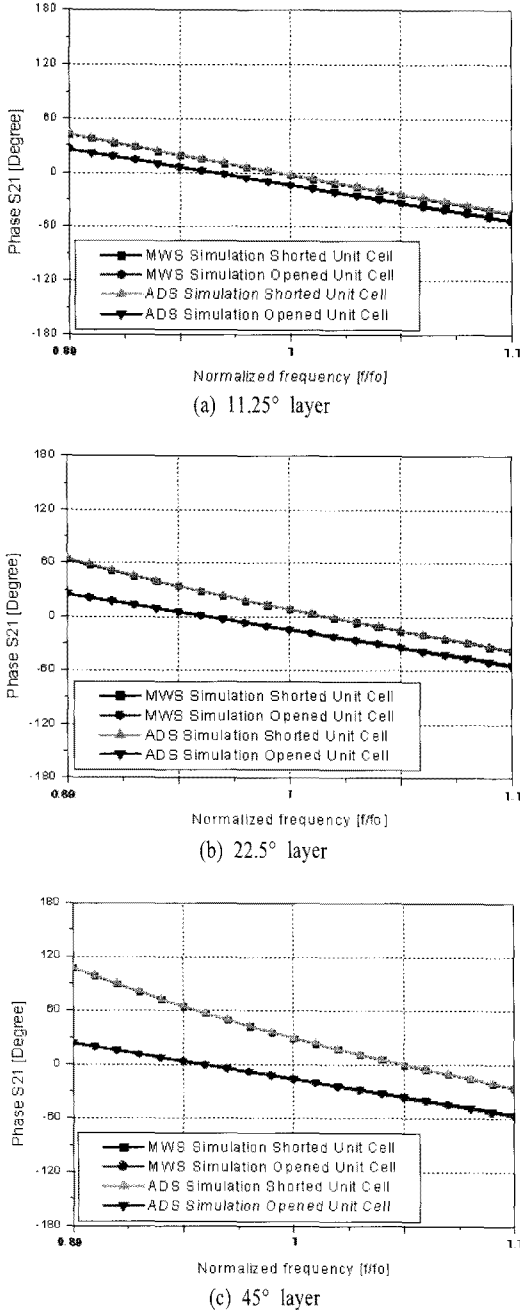


그림 8. 각 유전체 층과 등가회로의 위상차 특성
 Fig. 8. Differential phase shift of each dielectric layer and equivalent circuit.

위상차를 표 1에 표기하였다.

IV. 제작 및 측정

그림 9(a)는 제작된 22.5° 유전체 층의 사진이다.

표 1. 시뮬레이션된 중심주파수에서의 위상차
 Table 1. Simulated differential phase shift at the center frequency.

	ADS-simulated	MWS-simulated
11.25° layer	11.1°	11.28°
22.5° layer	22.6°	23.2°
45° layer	45.55°	46.22°

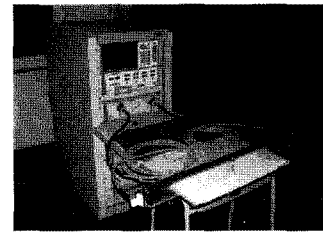
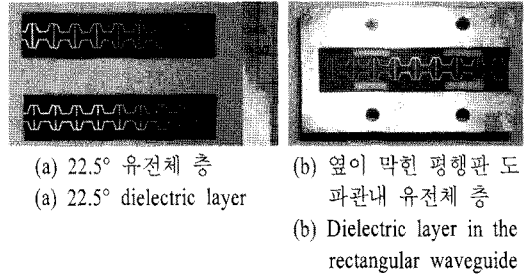


그림 9. 제작된 유전체 층과 측정 장치
 Fig. 9. Fabricated dielectric layer and measurement set-up.

그림 9(b)와 같이 유전체 층을 평행판 사이에 고정시키기 위해 스티로폼을 이용하였다. Magnetic wall을 대신해 9번의 주기를 갖는 구조로 제작하였고, 전자파가 새어나가는 것을 방지하기 위하여 도체로 측면

표 2. 측정 및 시뮬레이션된 중심주파수에서의 위상차
 Table 2. Measured and simulated differential phase shift at the center frequency.

	Measured	MWS-simulated
11.25° layer	9.6°	11.28°
22.5° layer	22.4°	23.2°
45° layer	43°	46.22°

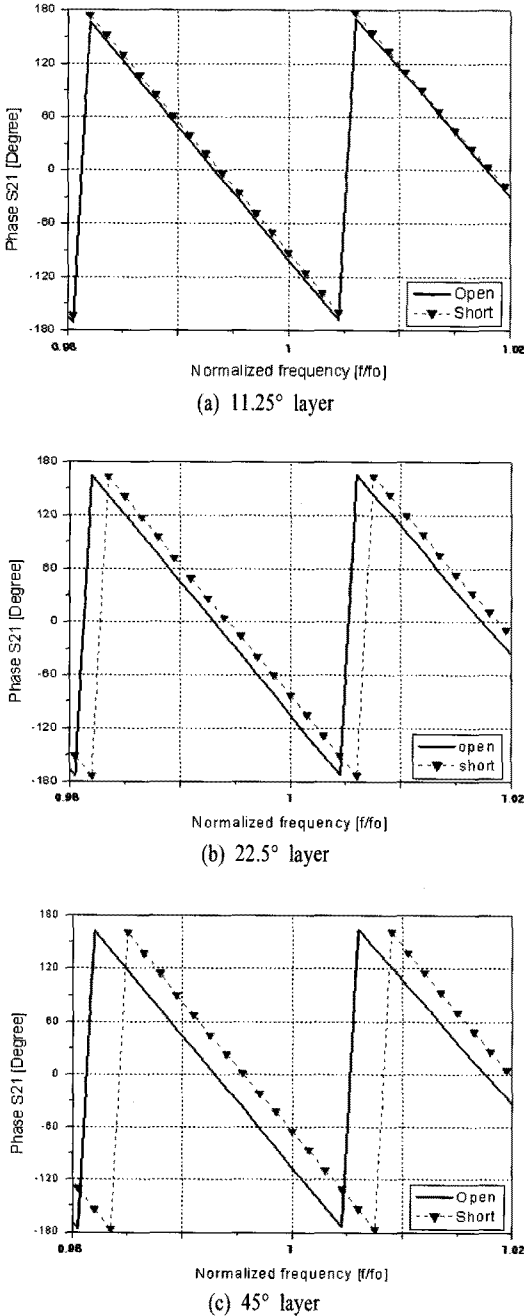


그림 10. 측정된 각 유전체 층의 위상차 특성
 Fig. 10. Measured differential phase shift of each dielectric layer.

을 막고 측정하였다. 그림 9(c)는 WR-90 도파관 어댑터와 테이퍼된 도파관을 연결시킨 측정 장치를 보여주고 있다.

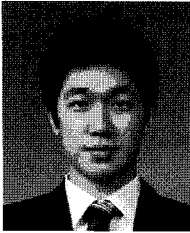
V. 결 론

본 연구에서는 radant lens 위상변위기내의 유전체 층에 대한 동작 원리 및 전파 특성을 연구하였고, 4-bit radant lens 위상변위기에 적용될 세가지 유형의 층을 설계하였다. 그리고 제작 및 측정을 통하여 각 유전체 층의 성능을 검증하였다. 또한, 각 유전체 층에 대한 등가회로를 추출함으로써 향후 다수의 유전체 층을 나열하기 위한 임피던스 매칭 연구에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 앞으로 이 연구를 4-bit radant lens의 설계 및 측정에 대한 연구로 발전시켜야 할 것이다.

참 고 문 헌

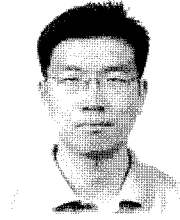
- [1] J. B. L. Rao, G. V. Trunk, and D. P. Patel, "Two low-cost phase arrays", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 12, issue 6, pp. 39-44, 1997.
- [2] J. B. Rao, P K. Hughes II, G. V. Trunk, and J. C. Sureau, "Affordable phased array for ship self-defense engagement radar", *IEEE National Radar Conference*, Ann arbor, Michigan, May 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, Sep. 1999.
- [4] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Institution of Electrical Engineers; New Ed., pp. 280-285, 1986.
- [5] J. A. Arnaud, F. A. Pelow, "Resonant-grid quasi-optical diplexers", *Bell System Technical Journal*, vol. 54, no. 2, Feb. 1975.
- [6] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, pp. 427-434, 1980.

조 정 래



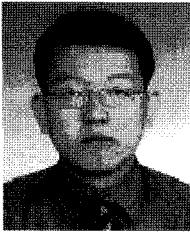
2007년 2월: 충남대학교 전자전파
정 보통신공학과 (공학사)
2007년 3월~현재: 충남대학교 전
자전파정보통신 전파공학 석사
과정
[주 관심분야] 위성 배열 안테나,
레이더, 전자전 안테나

류 상 철



1994년 2월: 순천대학교 정보통
신공학과 (공학사)
1996년 2월: 순천대학교 정보통
신공학과 (공학석사)
1996년~현재: 국방과학연구소 선
임 연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템 설계/
분석, 위성 배열 안테나 설계 분석, 안테나 측정, 전자장
수치해석

김 동 석



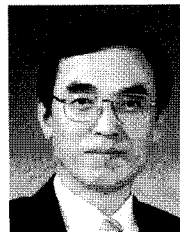
1989년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학사)
1991년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학석사)
1991년 2월~1996년 5월: 국방과학
연구소 연구원
1996년 5월~2001년 12월: (주)극동

통신 연구소장

2002년 1월~현재: (주)엠티지 대표이사

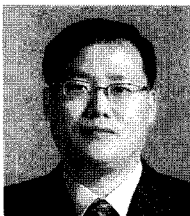
[주 관심분야] 안테나, 레이더, 안테나 측정 시스템

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학
과 (공학사)
1976년 2월: 한국과학기술원 전기
전자공학과 (공학석사)
1984년 12월: Univ. of California,
Santa Barbara (공학박사)
1977년~1978년: Ruhr University,
Bochum, Germany 방문교수
1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson
1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson
2000년~2001년: 한국전자파학회 회장
2005년~2007년: 대덕 Wireless 포럼 회장
1976년~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
[주 관심분야] Microwave and Millimeterwave Passive Com-
ponents, Antennas, EMI/EMC

이 기 오



1994년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학사)
1996년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학석사)
1996년 1월~현재: 국방과학연구소
선임연구원
2004년 3월~현재: 충남대학교 전

파공학과 박사과정

[주 관심분야] 광대역 위성 배열 안테나, RF 시스템 설계