

구형 빔 패턴 형성을 위한 다층 원형 도체 배열 구조의 최적화 연구

A Study on Optimization of a Multi-Layered Metallic Disk Array Structure for Shaping of Flat-Topped Element Patterns

엄 순 영 · 박 한 규*

Soon-Young Eom · Han-Kyu Park*

요 약

본 논문에서는 $\pm 20^\circ$ 의 구형 빔 패턴 형성을 위한 삼차원 다층 원형 도체 배열 구조의 최적화 설계 변수들에 대하여 연구하였다. 원형 도파관 여기에 의한 다층 원형 도체 배열 구조의 각 방사 소자는 입력 원형 도파관, 임피던스 정합용 원형 도파관, 방사 원형 도파관 그리고 그 위에 적층된 유한개의 원형 도체 배열층들로 구성되며, 각 방사 소자들은 원추형 빔 스캐닝에 적합한 정육각형 격자 배열 구조를 이룬다. 본 논문에서는 다층 원형 도체 배열 구조에 대한 해석 알고리즘을 제시하고, 이것을 프로그램 코드화하여 최적화 설계 변수 추출을 위한 다양한 설계 변수 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 다층 원형 도체 배열 구조의 구형 빔 패턴 및 반사 계수에 대한 대역폭 특성을 살펴 보았으며, 그 결과 다층 원형 도체 배열 구조는 최소한 5.6%의 주파수 대역폭내에서 $\pm 20^\circ$ 의 양호한 구형 빔 패턴을 형성함을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, a study on optimization of three dimensional multi-layered metallic disk array structure(MDAS) excited by circular waveguides was performed to shape efficient flat-topped element patterns(FTEP) of $\pm 20^\circ$ beam width. Each radiating element of the MDAS is composed of input, transition and radiation circular waveguides and finite metal disks stacked on radiation circular waveguide. It has an array structure of a hexagonal lattice appropriate for the conical beam scanning. The analytic algorithm for the MDAS was proposed and the code was also programmed using it. Optimal design parameters of the MDAS were determined through the optimal simulation process to obtain $\pm 20^\circ$ FTEP. Also, bandwidth characteristics for FTEP and reflection coefficients of the MDAS were investigated and, as the results, it was shown that the MDAS could shape good FTEPs of $\pm 20^\circ$ beam width in main planes at least within a 5.6 % frequency band.

Key words : Array Antenna, Flat-Topped Element Pattern, Multi-Layered Disk Array Structure

I. 서 론

위상 배열 안테나 시스템 개발에 있어서 안테나 이득 및 빔 스캐닝 범위는 안테나 개발 및 상용화가 격과 직접적인 관계를 가지므로 빔 스캐닝 범위 내

에서 최대 배열 이득과 최소 위상 제어 소자수를 얻기 위해서는 빔 스캐닝 범위에 해당하는 구형 빔 패턴(Flat-Topped Element Pattern: FTEP)이 필수적으로 요구된다^{[1],[2]}. 비교적 좁은 빔 스캐닝 범위에 응용되는 FTEP 형성 방법들은 일반적인 위상 배열 방법과

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

*연세대학교 전기전자공학과(School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· 논문 번호 : 20030320-043

· 수정완료일자 : 2003년 7월 25일

는 달리 그레이팅 로브 위치가 가시 영역안에 존재하도록 최대 배열 간격을 선택하는데 그 이유는 빔 스캐닝 범위 밖에서는 FTEP의 급격한 패턴 기울기 특성에 의하여 그레이팅 로브들을 억압할 수 있기 때문이다. 그러므로, 배열 소자간 간격이 상대적으로 증가하여 위상 제어 소자 수를 줄일 수 있다.

FTEP를 형성하기 위한 종래의 방법들^[2]로는 수동 다단자 망을 이용한 배열 구조, 결합 이중 모드 도파관을 이용한 배열 구조, 수동 반동 부하 소자 배열 구조, 유사 광학망을 이용한 배열 구조 등이 있으나 주로 일차원 빔 스캐닝에 응용되었으며, 이차원 빔 스캐닝을 위해선 급전 회로망 설계 및 구현이 거의 불가능한 단점이 있다. 종래의 방법들 중에서 예외적으로 돌출 유전체 막대 배열 구조는 방사 원형도 파관내에 유전체를 삽입하고 밖으로 일정 부분 돌출하여 자유 공간상에서 방사 소자간의 상호 결합 특성을 이용하여 겹쳐진 부배열(overlapped sub-array) 특성을 얻는 구조로서 원추형 빔 스캐닝이 가능하다. 그러나, 이 배열 구조 또한 유전체간의 온도 변화에 따른 전기적인 특성에 민감하여 높은 주파수 대역 응용이 어려우며, L, S 대역과 같이 비교적 낮은 주파수 대역 응용에서는 배열 구조의 무게가 상대적으로 무겁고, 유전체 재질이 비싼 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복할 수 있는 배열 구조로 최근에 발표되고 있는 다층 원형 도체 배열 구조(Multi-layered metallic Disk Array Structure: MDAS)^{[3]-[5]}가 있다. 본 논문에서는 MDAS에 대한 효율적인 해석 알고리즘을 개발하여 코드화하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 $\pm 20^\circ$ 구형 빔 패턴 형성을 위한 설계 변수들이 패턴 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 또한 MDAS의 대역폭 특성에 대하여 연구하였다.

II. 다층 원형 도체 배열 구조의 해석 알고리즘

그림 1에서와 같이 MDAS는 x, y, z 직각 좌표 시스템(rectangular co-ordinate system)으로 표현된다. 배열은 무한 주기 배열 구조로서 행렬간 간격은 d_x, d_y 이며, 이웃하는 행은 x 축을 따라 $d_x/2$ 만큼 이동되어 정육각형 격자(hexagonal lattice) 배열 구조를 이룬다.

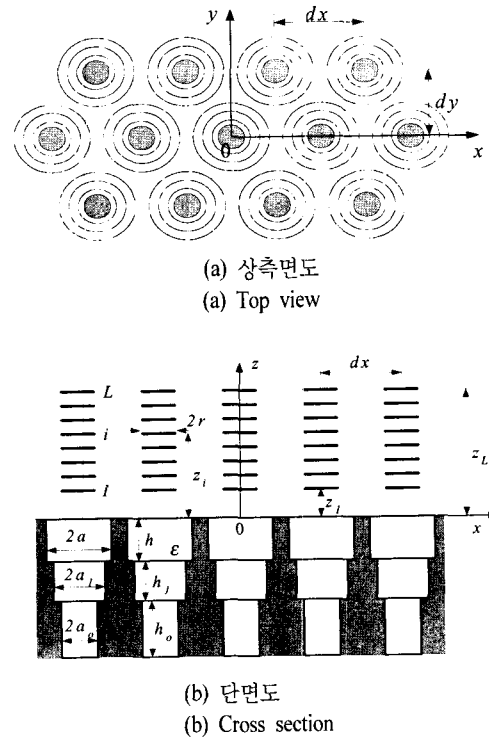


그림 1. 원형 도파관 여기에 의한 MDAS
Fig. 1. MDAS excited by circular waveguides.

FTEP를 갖는 정육각형 격자배열 구조의 소자 간격(element spacing)은 동일한 빔 스캐닝 조건에서 정사각형 격자 구조에 비하여 $2/\sqrt{3}$ 배 만큼 증가한다. 이것은 평면 위상 배열 안테나 설계시에 위상 제어 소자인 위상 천이기의 수를 1.15 배 만큼 줄일 수 있는 장점이 된다. 또한, 정육각형 격자 배열 구조는 정사각형 격자 배열 구조에 비하여 원추형 빔 스캐닝에 더 적합하며, 상대적으로 그레이팅 로브 레벨이 작고, 주어진 소자 간격에서 최대 소자 이득을 얻을 수 있다. 그리고, 원형 편파 사용시에 교차 편파 특성이 우수하며, 안테나 개구면을 원형으로 제작하기 편리한 장점이 있다.

본 논문의 원형 도파관 여기(excitation)에 의한 MDAS는 직경이 $2a_0$ 이고 임의의 길이를 갖는 기본 모드(fundamental or single mode) 입력 원형 도파관과 직경이 $2a_1$ 이고 길이가 h_1 인 중간 임피던스 정합용 전이(transition) 원형 도파관 그리고 직경이 $2a_i$ 고 길이가 h_i 인 다중 모드(multi-mode) 방사 원형 도파관들이 z -축을 공통으로 연결된다. 방사 원형 도

파관 배열 위에는 다층으로 원형 도체들이 적층되는데 그것들의 설계 변수들은 높이 z_l ($1 \leq l \leq L$), 직경 $2r$ 로 표시하며, 단순화를 위해 원형 도체들의 직경 및 각 층간의 간격은 모두 동일한 것으로 가정한다. 또한, 모든 도파관, 플랜지 및 원형 도체들은 완전 도체라고 가정한다. MDAS에 대한 해석은 무한 주기 배열 구조를 가정하므로 플로켓 이론(Floquet theory)을 사용할 수 있다^[6]. 이차원 대칭성을 고려하면 한 개의 입력 원형 도파관, 전이 원형 도파관, 방사 원형 도파관 그리고 그 위에 다층으로 적층된 원형 도체층(L 층)만 해석에 이용된다. 정 방향으로 적층된 원형 도체들은 한 개의 방사 소자를 구성하며, 전자파가 정 방향으로 진행할 때 자유 공간 내에서 인접한 방사 소자들간의 자연스런 상호 결합 특성을 이용하여 FTEP에 필요한 안테나 개구면에서의 겹쳐진 등가 전류 분포를 형성하므로 해석 결과는 인접한 모든 방사 소자들의 상호 영향을 고려한 단위 방사 소자의 전기적인 특성을 얻는 것이다. 그러므로, 각 단위 방사 소자에 의한 FTEP을 얻기 위해서는 그림 1에서 보는 바와 같이 해당하는 방사 소자와 연결된 입력 원형 도파관의 기본 모드인 TE_{11} 모드 여기에 의해서 형성된다. 나머지 인접하는 모든 입력 원형 도파관들은 정합 부하를 사용하여 중단된다. 배열 안테나의 빔 스캐닝 특성을 얻기 위해선 모든 입력 원형 도파관들이 동일 진폭의 기본 모드들에 의해 급전되며, 이때의 각 입력 단에서의 위상은 원하는 주 빔 방향에 해당하는 선형적인 위상 간격으로 주 빔 축을 따라 변하게 하여야 한다^[7].

MDAS의 해석 알고리즘은 그림 2와 같으며, 다음과 같이 요약하여 설명할 수 있다.

- (1) 배열 구조와 여기 : 정육각형 격자 배열 구조를 가지며, 원형 도파관에 TE_{11} 기본 모드로 여기됨.
- (2) 각 영역에서의 횡방향 전자장과 원형 도체상에서의 전류 표현.
 - (a) 직경 $2a$ 인 원형 도파관의 $\rho=a$ 에서의 경계 조건을 만족하는 TE, TM 모드들에 대한 직교 정규화된 원형 도파관 모드 함수 $\bar{\Phi}_{imn}(\rho, \varphi)$ 를 구한 후 원형 도파관에서의 횡방향 전자장에 대하여 표현.
 - (b) $z>0$ 인 플로켓 공간에서 배열 주기 조건을 만족하는 TE, TM 모드들에 대한 직교 정규화된

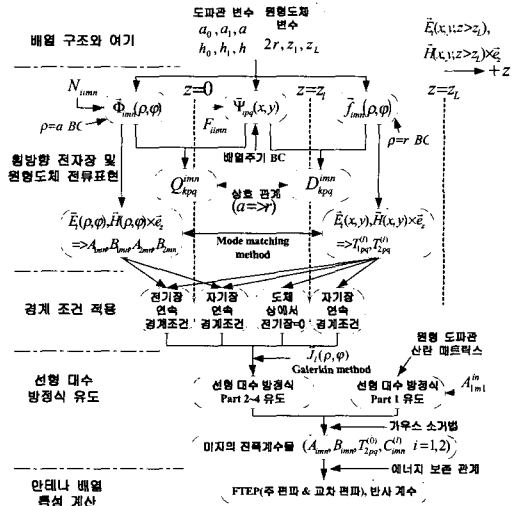


그림 2. 원형 도파관 여기에 의한 MDAS에 대한 해석 알고리즘

Fig. 2. Analytic algorithm for MDAS excited by circular waveguides.

횡방향 플로켓 모드 함수 $\bar{\Psi}_{ipq}(x, y)$ 와 횡방향 원형 도체 모드 함수 $\bar{f}_{imn}(\rho, \varphi)$ 를 구한 후 플로켓 영역에서의 횡방향 전자장에 대하여 표현.

- (c) $z=0$ 에서 도파관 모드 함수와 플로켓 모드 함수와의 상호 모드 결합계수 Q_{kpq}^{imn} 를 구함.
- (d) $z=z_l$ 에서 원형 도체 모드 함수와 플로켓 모드 함수와의 상호 모드 결합계수 D_{ipq}^{imn} 를 구함.
- (3) 각 영역에서의 경계 조건을 적용(모드 정합 방법)
 - (a) 방사 원형 도파관 개구면 $z=0$ 에서의 전기장, 자기장 연속 경계 조건.
 - (b) $z=z_l$ 에서의 자기장 연속 경계 조건과 원형 도체상에서의 전기장=0 조건.
- (4) 선형 대수 방정식 유도
 - (a) 첫번째 부분 : 계단형 원형 도파관 구조에서 산란 매트릭스^{[8],[9]} 구함.
 - (b) 두번째~네번째 부분 : 경계 조건들 양변에 $\bar{\Phi}_{imn}^*$ 와 $\bar{\Psi}_{kpq}^*$ 를 내적하고 적분한 후 정리 그리고 Galerkin 방법과 도체상에서의 전류 표현식을 사용하여 구함.
 - (c) 가우스 소거법을 사용하여 미지의 진폭 모드 계수들을 구함.

(5) FTEP 및 반사 계수 특성 계산

- (a) $E_\theta \sim L_\theta + \eta_o N_\theta$, $E_\phi \sim L_\phi - \eta_o N_\phi$ 로 주어지는 원거리에서의 방사 패턴 관계^[10] 사용하며, 구조표계와 직각 좌표계의 좌표 변환 관계를 고려.
- (b) 원거리 단위 방사 패턴 E_θ , E_ϕ 성분(또는 F_θ , F_ϕ 성분)들을 유도.
- (c) 에너지 보존(energy conservation) 원리에 의해 입사 전력은 전송 전력과 반사 전력의 합과 동일.
- (d) 입력 원형 도파관에서 반사되는 반사 계수는 TE₁₁ 기본 입사 모드에 대하여 주 편파 및 교차 편파 반사 계수들을 포함.

그림 2의 해석 알고리즘은 포트란 프로그램으로 구현하였으며, 아래 다섯 가지 검증 방법^[6]을 사용하여 코드 동작 시험을 수행하였다.

- 배열 구조의 대칭성 : 그레이팅 로브들 위치의 대칭성 및 정육각형 격자 배열 구조의 대칭성에 의해 각각 ($\varphi=0$, $\varphi=\pi/3$), ($\varphi=\pi/6$, $\varphi=\pi/2$) 평면에서의 각 배열 특성은 동일
- 반사파와 방사파의 합이 입사파와 일치하는 에너지 보존 관계
- 도파관 및 플로켓 모드 수 증가에 따른 수치 해석 결과의 수렴성
- 수치해석 결과들과 참고문헌 [6]에 기술된 검증 방법에 의한 결과들과 비교
- 수치해석 결과들과 실험 시제품의 측정 결과들과 비교

수치 계산의 정확성을 위해 고려되어야 할 모드 수에 관해 참고문헌 [6]에 명시된 것처럼 도파관 모드수는 플로켓 모드수에 비해 상대적으로 적게 설정되며, 모든 전파 가능 모드들과 모드 정합 조건을 만족하기 위하여 몇 개의 감쇄 모드들이 포함되도록 한다. 방위 방향 지수를 갖는 도파관 모드들은 $-3 \leq m \leq 3$ 범위 내에서 결정되며, 또한 각 방위 방향 지수에 대한 모드 수 N 은 방사 원형 도파관 직경에 따라 결정된다. 그러나, 선형 대수 방정식 시스템의 첫 번째 부분을 구성하는 임피던스 정합용 전이 원형 도파관에 대한 일반화된 산란 행렬의 계산에서는 방사 원형 도파관 모드 수보다 몇 배 더 많은 도파관 모드 수가 사용된다. 또한, 계산에 사용된 플로켓 모

표 1. 플로켓 모드 수에 따른 배열 반사 계수의 수렴 특성

Table 1. Convergence of array reflection coefficient by Floquet mode numbers.

N_f	w_{max}/k	원형도체 있는 경우		원형도체 없는 경우	
		Re{ R_{111} }	Im{ R_{111} }	Re{ R_{111} }	Im{ R_{111} }
121	6.3	+0.6024	-0.4527	0.0607	0.1405
169	7.3	-0.0196	-0.3188	0.0610	0.1407
235	8.3	-0.0816	-0.1683	0.0610	0.1409
295	9.3	-0.0858	-0.1363	0.0609	0.1410
361	10.3	-0.0842	-0.1230		
433	11.3	-0.0738	-0.1087		
511	12.3	-0.0596	-0.0926		
595	13.3	-0.0521	-0.0839		
703	14.3	-0.0537	-0.0854		

드의 수 N 는 조건 $w_{pq} \leq w_{max}$ 로부터 결정된다. 여기서, w_{max}/k 는 방향 코사인 u, v 공간에서 설정된 정규화된 반경이다. 다음 표 1은 정육각형 격자 배열 구조의 다중 원형 도체가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 플로켓 모드의 수에 따른 배열 반사 계수의 수렴성을 보여준다.

이 때, 사용된 배열의 기하학적 구조는 $a_0=0.36\lambda$, $a=a_1=0.5\lambda$, $h_1=0$, $h=2.0\lambda$, $d_x=1.14\lambda$, $r=0.15\lambda$, $L=8$, $z=0.3\lambda+0.1(l-1)\lambda(1 \leq l \leq L)$ 와 같다. 표 1은 정방향 주 빔에 대한 플로켓 모드 수에 따른 배열 반사 계수의 의존성을 나타내며, 원형 도체가 없는 경우가 원형 도체가 있는 경우에 비하여 상대적으로 적은 플로켓 모드 수에서 배열 안정화 또는 수렴 특성을 보여준다. 원형 도체가 있는 경우에 상대적으로 많은 플로켓 모드 수를 고려해야 할 필요성은 같은 층에 존재하는 원형 도체들간의 상호 작용에 해당하는 행렬 성분 계산에서의 정확성에 대한 요구 조건 때문이다. 원형 도체가 없는 경우에 대하여, 개발된 프로그램 코드를 사용하여 얻은 배열 특성 결과들은 적분 방정식 방법에 의해 얻은 배열 특성 결과들과 완전히 일치함을 보여주었다.

III. MDAS의 설계 변수 최적화

3-1 구형 빔 패턴 정의 및 규격

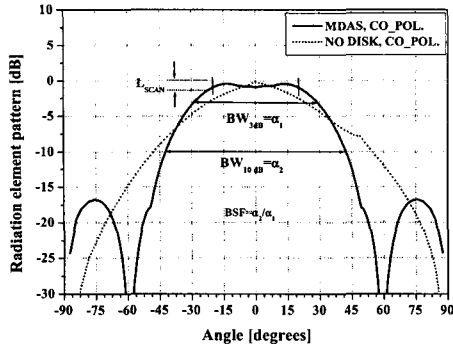


그림 3. FTEP의 정의
Fig. 3. Definition of FTEP.

원형 도파관 여기에 의한 MDAS의 FTEP 설계 규격은 그림 3과 같이 요구 구형 빔 폭과 빔 폭 내에서의 리플 특성, 최대 스캔 손실(MSL) 그리고 FTEP 특성을 보여주는 beam shaping factor(BSF)로 정의하였다. FTEP 특성에 대하여 정의된 문헌은 아직까지 없으므로 본 논문에서는 처음으로 FTEP에 대한 BSF 개념을 도입하고, BSF를 각각 3 dB(α_1) 및 10 dB(α_2) 빔폭비(beam width ratio)로 정의하였다.

그림 3에서 접선은 MDAS가 없는 경우의 주 편파 패턴을, 그리고 실선은 MDAS가 있는 경우의 패턴을 보여준다. MDAS의 FTEP 설계 규격은 표 2에 요약 정리하였다. 구형 빔 패턴 폭은 $\pm 20^\circ$ 로 가정하였으며, $\pm 20^\circ$ 빔 스캔시 최대 손실 L_{SCAN} 은 MDAS가 없는 경우의 약 1/2 값인 -1.3 dB로, 그리고 BSF 값은 1.5 이하로 가정하였다. 이러한 규격들은 근사적으로 중심 능동 소자로부터 여기된 신호가 가장 인접한 수동 링 소자들에 효율적으로 영향을 주었을 경우, 형성될 수 있는 겹쳐진 부배열 전류 분포에 의한 구형 빔 패턴 특성에 해당된다.

$\pm 20^\circ$ 의 양호한 FTEP를 얻기 위한 원형 도파관

표 2. FTEP의 설계 규격
Table 2. Design specification of FTEP.

No.	항 목	설계 규격	
		MDAS	NO DISK
1	구형 빔 패턴 폭	$\pm 20^\circ$	-
2	L_{SCAN} @ $\pm 20^\circ$	-1.3 dB 이하	-2.7 dB 이하
3	패턴 리플	± 0.65 dB 이하	-
4	BSF	1.50 이하	2.40 이하

여기에 의한 MDAS의 일부 설계 변수들은 기구 제작 제한 조건, 유사 구조에 대한 설계 경험과 실험 데이터 그리고 MDAS가 저속과 진행 소자 역할을 하기 위한 기본 조건들 $z_{i+1} - z_i < 0.5 \lambda$, $2r < 0.5 \lambda$ 을 반영하였으며, 나머지 설계 변수의 최적화 값들은 다음 절의 설계 변수 변화에 따른 배열 특성 시뮬레이션 과정으로부터 결정할 수 있다. 각 설계 변수들의 변화에 따른 배열 특성(여기서는 주 편파 및 교차 편파의 패턴 특성만 고려함) 변화 시뮬레이션은 편의상 수평 평면에 대해서만 수행하였다.

3-2 설계 변수 변화에 따른 배열 특성

그림 4는 방사 원형 도파관 직경 변화에 따른 배열 특성들을 보여준다. 방사 원형 도파관 직경은 소자 간격 및 기구 제작 제한 조건에 의해 제한을 받으며, 직경의 크기는 전파할 수 있는 도파관 모드 수를 결정한다. 기본적으로 양호한 구형 빔 패턴을 얻기 위해서는 기본 모드를 포함한 3개의 모드들이 전파할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

그림 4의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 직경이 0.8λ , 0.9λ 일 때는 TE_{11} , TM_{01} 모드만 전파할 수 있는 반면에 직경이 1.0λ 일 때는 TE_{11} , TM_{01} , TE_{21} 의 세 가지 모드가 전파할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 방사 원형 도파관 직경이 1.0λ 일 때 더욱 우수한 특성을 보여준다. 만약에 넓은 FTEP를 얻기 위하여 소자 간격 d_s 가 줄어들 경우에는 방사 원형 도파관 직경도 더불어 줄어들어야 한다. 이러한 경우에 전파 모드 수는 거의 단일 모드로 제한되므로 도파관내에

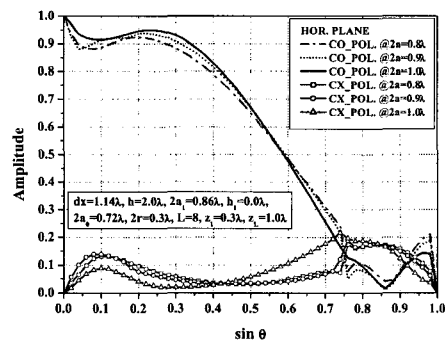


그림 4. 방사 원형 도파관 직경 변화에 따른 패턴 특성
Fig. 4. Pattern characteristics by diameter variations of radiation circular waveguide.

상대 유전율이 1.5~2.5값을 갖는 유전체를 삽입하여 다중 모드 환경을 만들어 주어야 한다. 그림 5는 방사 원형 도파관 길이 변화에 따른 배열 특성을 보여준다. 양호한 FTEP를 얻기 위해선 방사 원형 도파관 개구면($z=0$)으로부터 반사되는 전력을 개구면쪽으로 재반사시켜 주어야 한다. 이것은 방사 원형 도파관 길이를 적절히 선택함으로써 가능하다. 시뮬레이션 결과로부터 방사 원형 도파관 길이는 1.5~2.5 λ 가 적합함을 알 수 있다.

전이 원형 도파관 길이 변화에 따른 배열 특성은 그림 6에 제시한다. 이때, 전이 원형 도파관 직경은 입력 원형 도파관 직경과 방사 원형 도파관 직경의 평균값을 사용한다. 시뮬레이션 결과로부터 패턴 특성이 전이 원형 도파관 길이 변화에 크게 영향을 받

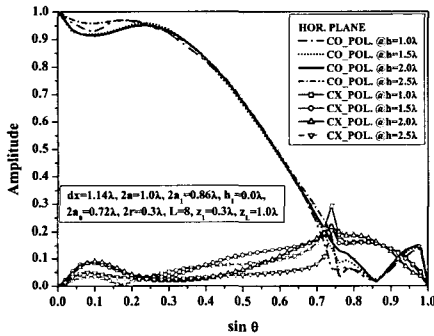


그림 5. 방사 원형 도파관 길이 변화에 따른 패턴 특성

Fig. 5. Pattern characteristics by length variations of radiation circular waveguide.

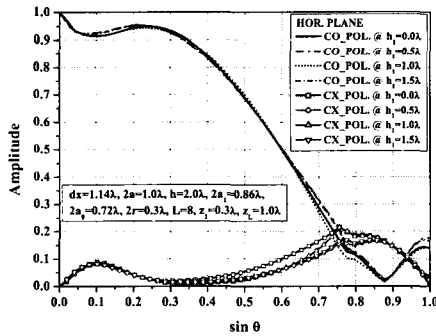


그림 6. 전이 원형 도파관 길이 변화에 따른 패턴 특성

Fig. 6. Pattern characteristics by length variations of transition circular waveguide.

지 않음을 알 수 있다. 이것은 입력 원형 도파관과 방사 원형 도파관이 그 자체로서 이미 임피던스 정합되었음을 보여준다.

MDAS의 구조 변화에 따른 배열 특성 시뮬레이션은 초기 위치 z_1 변화, 원형 도체 직경 $2r$ 변화, 도체 층 수 L 변화(ds 고정, z_1 고정), 층간 간격 ds 변화에 대하여 수행된다. 그림 7은 도체의 초기 위치 변화에 따른 패턴 특성을 보여준다.

시뮬레이션 결과는 원형 도체의 초기 위치가 0.3 λ 일 때 주어진 설계 변수들과의 조합에서 가장 적합함을 보여준다. 만약에, 원형 도체의 초기 위치를 0.4 λ , 방사 원형 도파관의 길이를 2.5 λ 로 설정하고 나머지 설계 변수들은 그대로 사용하면 $\pm 20^\circ$ 보다 약간 넓은 구형 빔 패턴을 얻을 수 있을 것이다.

그림 8은 원형 도체 직경 변화에 따른 패턴 특성

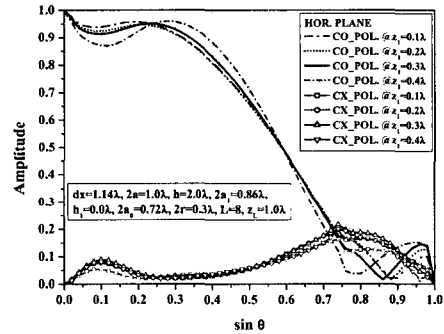


그림 7. 원형 도체의 초기 위치 변화에 따른 패턴 특성

Fig. 7. Pattern characteristics by initial position variations of metal disk.

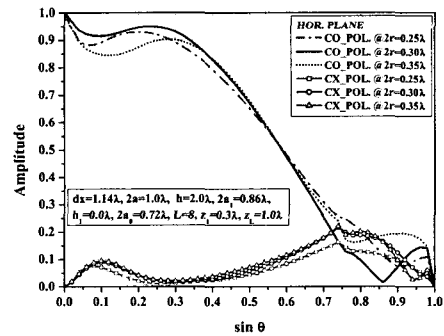
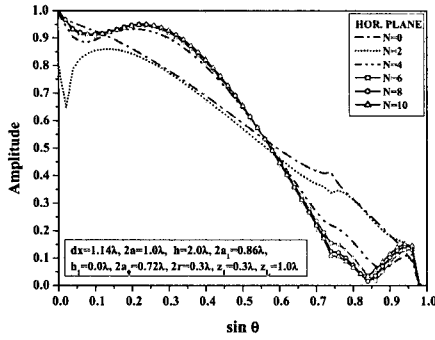
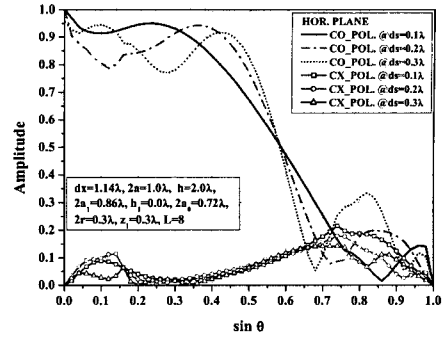


그림 8. 원형 도체의 직경 변화에 따른 패턴 특성

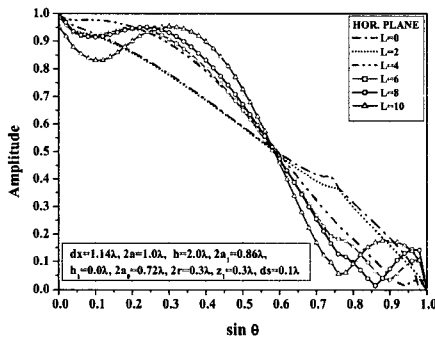
Fig. 8. Pattern characteristics by diameter variations of metal disk.



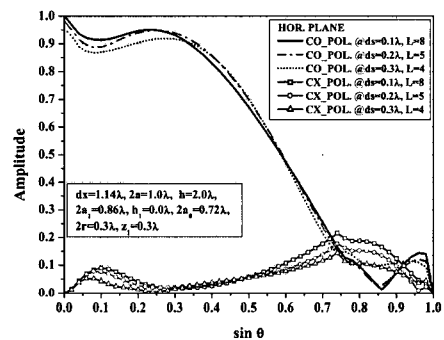
(a) 도체 층간 간격 $ds=0.1 \lambda$ 로 고정
(a) Disk spacing, $ds=0.1 \lambda$ (fixed)



(a) 도체 층수 고정, 층간 간격 변화
(a) Variation of disk spacing (fixed disk layers)



(b) 최종 도체 위치 $z_L=1.0 \lambda$ 로 고정
(b) Final disk position, $z_L=1.0 \lambda$ (fixed)



(b) 도체 층수 및 층간 간격 변화
(b) Variation of disk layers and spacing

그림 9. 원형 도체 층수 변화에 따른 패턴 특성
Fig. 9. Pattern characteristics by number variations of metal disk layer.

그림 10. 도체 층간 간격 변화에 따른 패턴 특성
Fig. 10. Pattern characteristics by spacing variations between metal disk layers.

을 보여준다. 원형 도체 직경은 다른 변수들과는 달리 패턴 특성에 아주 민감하게 작용하며, 시뮬레이션 결과는 원형 도체 직경이 0.3λ 일 때 패턴 특성이 가장 우수함을 보여준다.

원형 도체 층수 변화에 따른 구형 빔 패턴 특성은 그림 9에 보여준다. 그림 9(a)는 도체 층간 간격 $ds=0.1 \lambda$ 로 고정하고 도체 층수를 변화시킨 것이며, 그림 9(b)는 최종 도체 위치 $z_L=1.0 \lambda$ 로 고정하고 도체 층수를 변화시킨 것이다.

그림 10은 도체 층간 간격 변화에 따른 패턴 특성을 보여준다. 그림 10(a)는 도체 층수 $L=8$ 로 고정하고 층간 간격을 변화시킨 것이며, 그림 10(b)는 도체 층수 및 층간 간격을 변화시킨 것이다.

그림 9와 그림 10의 시뮬레이션 결과들로부터, 원형 도체 배열 적층시 도체 층수 및 도체 층간 간격이 중요하기 보다는 원형 도체 전체 적층 높이 z_L 값

이 보다 중요한 변수임을 알 수 있다.

MDAS의 설계 변수들을 최적적으로 설정하기 위한 방안을 종합적으로 살펴보면, 우선 주어진 구형 빔 패턴 규격으로부터 소자 간격 d_s 를 결정한다. 이때, 소자 간격은 설계 마진 및 이산적인 전류 분포 특성을 고려하여 임계 간격보다 더 작은 값을 선택하여야 한다. 방사 원형 도파관 직경 $2a$ 는 소자 간격 및 기구물 제작 제한 조건을 고려하되 기본 모드를 포함한 3개 모드가 전파할 수 있도록 직경을 설정하거나 도파관내 유전체를 삽입하여 이러한 환경을 만들어 준다. 이 때, 방사 원형 도파관 길이 h 는 원형 도체 배열 구조 변화에 따라 FTEP 대역내 리플 현상이 없도록 전기적 길이를 결정한다. 입력 원형 도파관 직경 $2a_0$ 는 기본 모드만 여기할 수 있도록 크기를 결정하며, 임피던스 정합용 전이 원형 도파관의 직경 $2a_1$ 은 입력 및 방사 원형 도파관의 직경들의 평

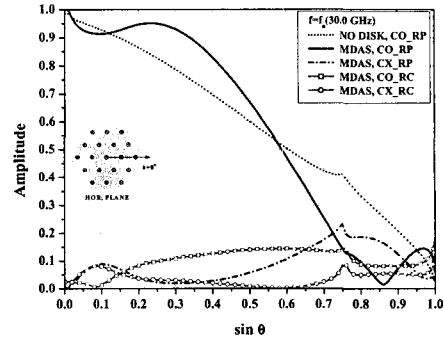
균값을 사용하되 전기적 길이 h_1 값은 시뮬레이션을 통해 결정한다. MDAS 설계에서 원형 도체 직경 $2r$ 은 패턴 특성에 아주 민감하게 작용하는 중요 변수로서 $0.25\lambda \sim 0.35\lambda$ 범위 값이 적절하며, 원하는 구형 빔 패턴 폭을 얻기 위해선 $0.8 \sim 1.2\lambda$ 정도로 원형 도체들을 적층하여야 한다. 이때, 도체 층 수 및 간격은 주어진 전체 높이에서 적절히 결정되는 것이 바람직하다. 무한 주기 배열 구조를 갖는 원형 도파관 여기에 의한 MDAS에 대한 시뮬레이션을 수행할 때 표면파 공진 현상이 쉽게 나타나므로 설계시 주의가 요구되며, 이러한 패턴에서의 표면파 공진 현상을 없애기 위해서는 설계 변수들을 조정하면 된다.

3-3 최적화 구형 빔 패턴 특성

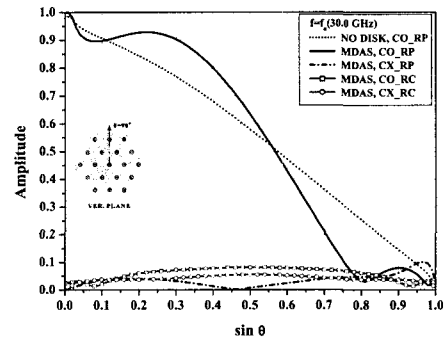
제 3-2절의 설계 변수 변화에 따른 배열 특성들로부터 얻은 최적화 설계 변수 값들을 표 3에 요약 정리하였으며, 다양한 주파수 대역 응용을 위하여 각 설계 변수 값들은 주파수와 무관하게 파장 단위로 나타내었다. 주파수 $f=f_0$ 에서의 시뮬레이션 결과들을 그림 11에 나타내었다. 여기에는 원형 도체들이 없는 동일한 배열에 대한 시뮬레이션 결과들을 비교

표 3. MDAS 최적화 설계 변수 값
Table 3. Optimal design parameter values of MDAS.

항 목	변 수 명	최적화 설계 변수값			
		$0.9833 f_0$	$1.000 f_0$	$1.0167 f_0$	
x-축 방향 소자 간격	d_x	1.121λ	1.14λ	1.159λ	
	방사원형 도파관	직경 $2a$	0.984λ	1.0λ	1.016λ
		길이 h	1.967λ	2.0λ	2.033λ
	유전율 ϵ_r	1.0	1.0	1.0	
전이원형 도파관	직경 $2a_1$	길이 h_1	0.846λ	0.86λ	0.874λ
		유전율 ϵ_{r1}	1.0	1.0	1.0
	입력원형 도파관	직경 $2a_0$	0.708λ	0.72λ	0.732λ
유전율 ϵ_m		1.0	1.0	1.0	
다층원형 도체배열 구조	직경 $2r$	0.295λ	0.3λ	0.305λ	
	층 수 L	8	8	8	
	초기위치 z_1	0.295λ	0.3λ	0.305λ	
	최종위치 z_L	0.983λ	1.0λ	1.017λ	
	층간간격 ds	0.0983λ	0.1λ	0.1017λ	



(a) 수평 평면
(a) Horizontal plane



(b) 수직 평면
(b) Vertical plane

그림 11. $f=f_0$ 에서의 FTEP 특성
Fig. 11. FTEP characteristics at $f=f_0$.

목적으로 함께 제시하였다.

그림 11의 중심 주파수에서의 시뮬레이션 결과는 각각의 수평, 수직 평면에 대하여 주 빔이 정 방향으로부터 20° 만큼 편향될 때, 원형 도체 배열 구조에 의하여 배열 이득이 각각 원형 도체 배열이 없는 경우 보다 1.16 dB 와 1.18 dB 증가함을 알 수 있다. 또한, 수치 해석 결과는 각 평면과 빔 스캔 범위 내에서 배열 반사 계수는 각각 $0.1067(VSWR < 1.24)$ 와 $0.073(VSWR < 1.16)$ 을 넘지 않는다. 결론적으로, 위에 제시된 시뮬레이션 결과들을 분석하여 보면, 원형 도파관 배열 위에 다층 원형 도체를 배열함으로써 필요로 하는 양호한 구형 빔 패턴을 형성할 수 있음을 알 수 있다.

IV. MDAS의 대역폭 특성

표 3의 최적화 설계 변수 값들로 구성된 MDAS의

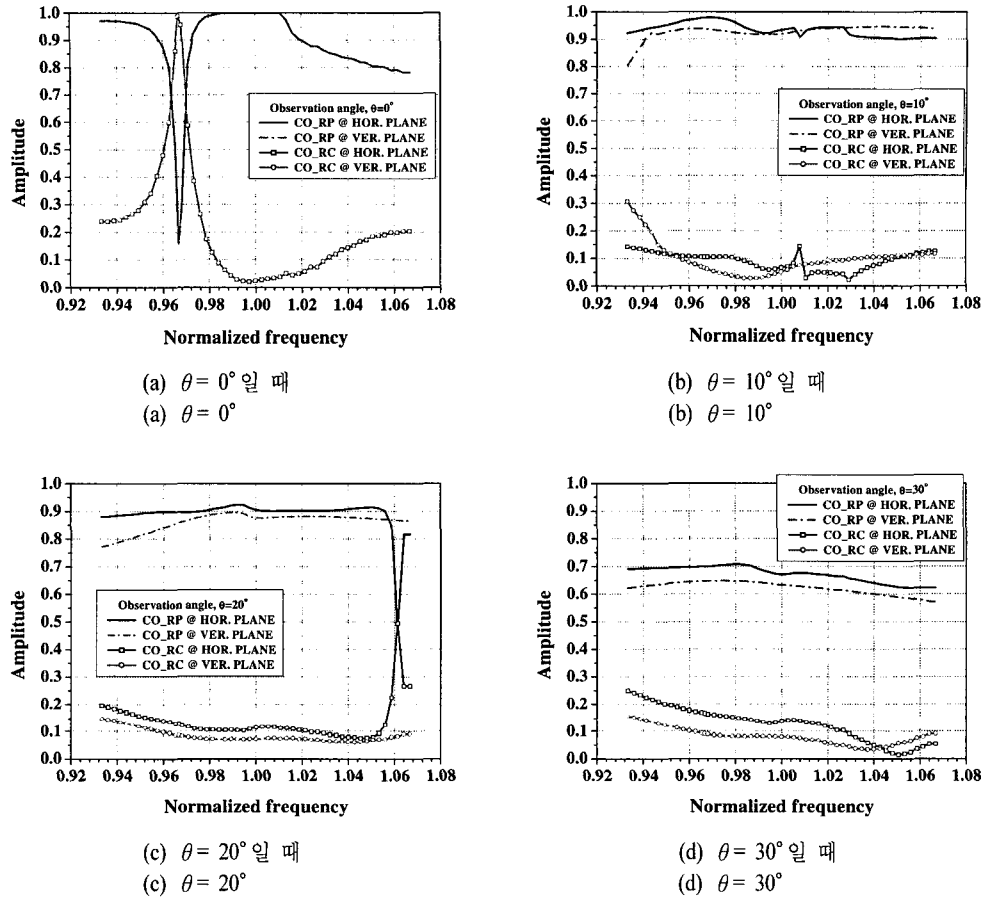


그림 12. 구형 빔 패턴 및 반사 계수의 주파수 응답 특성
 Fig. 12. Frequency response characteristics of FTEP and reflection coefficient.

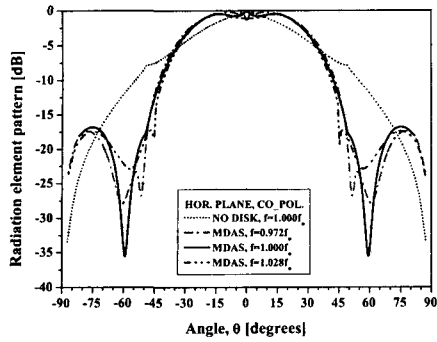
FTEP 및 반사 계수의 대역폭 특성을 알아보기 위하여 주파수 변화에 따라 해당 설계 변수들을 축척 (scale) 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 관측각 $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 일 때, 13.33 % 대역폭 ($0.972f_0 \sim 1.028f_0$)에서의 FTEP 및 반사 계수의 주파수 응답 특성 시뮬레이션 결과들은 그림 12에 보여진다.

그림 12(a)의 $\theta = 0^\circ$ 일 때, $f = 0.9667f_0$ 에서 정방향쪽으로 강한 표면파 공진 현상이 발생함을 알 수 있으며, 또한 그림 12(c)의 $f = 1.0613f_0$ 에서도 세기는 상대적으로 다소 약하지만 비슷한 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 MDAS에서 원형 도체 배열 구조가 참고문헌 [6]에 상세히 기술된 유전체 덮개층과 비슷한 역할을 하기 때문이다. 표면파 공진 현상을 제외하면 13.33 % 대역과 $\pm 20^\circ$ 빔 폭 내에서 최대 상

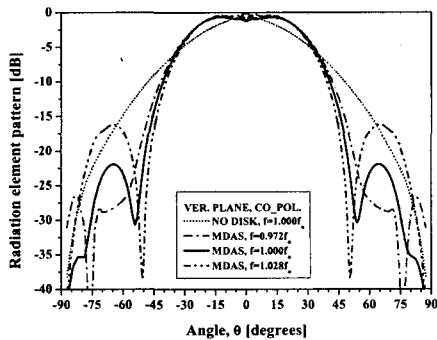
대 이득 손실 -2.2 dB 그리고 입력 VSWR 1.89 이하의 특성 값을 얻을 수 있으며, 더 좁은 대역폭 내에서는 패턴 및 입력 VSWR 특성이 향상될 것이다.

그림 13은 표면파 공진 현상이 없는 5.6 % 대역폭에서의 FTEP 특성을 보여준다.

시뮬레이션 결과는 MDAS가 원형 도체 배열이 없는 구조에 비하여 수평 평면에서는 $\pm 34^\circ$ 의 범위 내에서 그리고 수직 평면에서는 $\pm 32^\circ$ 의 범위 내에서 패턴 성능 향상을 가져옴을 알 수 있다. 수평 평면에서의 방사 패턴은 수직 평면에서의 방사 패턴과 비교하여 패턴 폭이 상대적으로 넓으므로 동일 관측각에서 볼 때 더 높은 레벨을 가지나 수평 평면에서의 그레이팅 로브들은 최대 빔 스캔시에도 가시 영역 내로 들어오지 않으므로 문제가 되지 않는다. 또한, 수직 평면에서의 사이드 로브 특성은 $f = 0.972f_0$ 에서



(a) 수평 평면
(a) Horizontal plane



(b) 수직 평면
(b) Vertical plane

그림 13. 5.6 % 대역폭에서의 FTEP 특성
Fig. 13. FTEP characteristics over 5.6 % bandwidth.

는 낮아지는 반면에 $f=1.028f_0$ 에서는 오히려 높아지는 특징을 보이는데 이것은 $f=1.028f_0$ 에서 빔 폭이 다소 좁아진 이유 때문이다.

제 3장의 최적화 시뮬레이션 과정을 통하여 얻어진 결과들을 표 2의 구형 빔 패턴 정의에 따라 정리하면 표 4와 같다.

표 4. FTEP의 시뮬레이션 결과
Table 4. Simulation results of FTEP.

정규화 주파수	L_{SCAN} [dB]		Ripple [dB]	BSF	
	$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$		$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$
$0.972 f_0$	-1.00	-1.28	± 0.61	1.446	1.513
$0.983 f_0$	-0.88	-1.08	± 0.54	1.382	1.443
$1.000 f_0$	-0.95	-1.23	± 0.62	1.476	1.487
$1.017 f_0$	-0.97	-1.19	± 0.34	1.448	1.465
$1.028 f_0$	-0.99	-1.20	± 0.42	1.454	1.461

표 4에 의하면, $0.972 f_0$ 수직 평면($\phi=90^\circ$)에서의 BSF 특성을 제외한 모든 결과들은 표 2의 규격을 만족한다. 그러므로, 표 3의 최적화 설계 변수들을 갖는 MDAS는 최소 5.6 %의 주파수 대역 내에서 $\pm 20^\circ$ 의 원추형 빔 스캔 범위에 필요한 구형 빔 패턴을 제공할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 $\pm 20^\circ$ 의 FTEP 형성을 위하여 원형 도파관 여기에 의한 MDAS 설계 변수의 최적화에 대하여 연구하였다. 최적화 시뮬레이션 과정은 개발된 알고리즘을 바탕으로 작성된 프로그램을 사용하여 수행하였으며, 코드는 다섯 가지 검증 방법을 사용하여 검증하였다. 또한, MDAS의 FTEP 및 반사 계수에 대한 대역폭 특성에 대하여 고찰하였으며, 그 결과 다층 원형 도체 배열 구조는 최소한 5.6 %의 주파수 대역폭내에서 $\pm 20^\circ$ 의 양호한 구형 빔 패턴을 형성함을 알 수 있었다.

개발된 알고리즘 및 프로그램을 활용하면 MDAS는 주파수 대역에 관계없이 즉, 낮은 주파수 대역은 물론 Ka 대역, 밀리미터파 대역까지 응용 설계가 가능하다. 또한, MDAS는 자유 공간상에서 각 방사 소자들간의 상호 결합 특성을 이용하여 원하는 겹쳐진 전류 분포를 얻으므로 방사 효율이 높으며, 원형 도체 배열들은 얇은 유전체 필름이나 도체 필름을 이용하여 구현할 수 있으므로 가볍고, 재질이 저렴하며, 외부 온도 특성에 거의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 그러므로, 삼차원 MDAS는 원추형 구형 빔 패턴 형성을 요구하는 저가의 통신/방송용, 레이더용 능동 위상 배열 안테나 시스템에 향후 널리 응용될 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, 1993.
 [2] S. P. Skobelev, "Methods of Constructing Optimum Phased-Array Antennas for Limited Field of View", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 39-50, Apr. 1998.
 [3] S. P. Skobelev, "Some Features of Shaping the

- Flat-Topped Patterns by Disc and Strip Slow-Wave Antenna Elements in Arrays for Limited Field of View", *Millenium Conference on Antennas & Propagation(AP2000)*, vol. 1, pp. 332-335, Apr. 9-14, 2000.
- [4] S. Y. Eom, et al., "Multi-disk radiating structure with a flat-topped element pattern for a planar array antenna", *IEE Electronics Letters*, vol. 38, no. 2, Jan. 17 2002.
- [5] 엄순영 외 4인, "구형 빔 패턴 형성을 위한 다층 이차원 원형 도체 배열을 갖는 새로운 방사 구조에 대한 연구", *한국전자과학회논문지*, 13(7), pp. 667-678, 2002년 8월.
- [6] N. Amitay, V. Galindo and C. P. Wu, *Theory and Analysis of Phased Array Antennas*, New York: Wiley, 1972.
- [7] R. Mittra, S. W. Lee, *Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves*, New York: Macmillan, 1971.
- [8] P. J. B. Clarricoats, K. R. Slinn, "Numerical solution of waveguide-discontinuity problems", in *Proc. IEE*, vol. 114, no. 7, pp. 878-886, Jul. 1967.
- [9] G. L. James, "Analysis and design of TE₁₁-to-HE₁₁ corrugated cylindrical waveguide mode converters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-29, pp. 1059-1066, Oct. 1981.
- [10] C. A. Balanis, *ANTENNA THEORY : Analysis and design*, John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, pp. 582-584, 1997.

엄 순 영



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 연세대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사)

1991년 8월 ~ 1993년 7월: 이탈리아 Alenia Spazio사와 VSAT(DAMA-SCPC) 국제 공동개발 (과견)

1990년 2월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
 [주 관심분야] 초고주파 수동/능동 부품 설계, 위성통신 RF 시스템 설계, 위상 배열 안테나 시스템 설계 등

박 한 규



1964년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1968년 2월: 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
 1975년 2월: 불란서 파리 6대학(공학박사)

1979년 ~ 1980년: 스탠포드 대학교 전자공학과 교환교수

1989년 ~ 1994년: 대통령 자문 21세기 위원회 위원
 1995년 ~ 1997년: 정보통신부 전파위원회 위원장
 1976년 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학부 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 소자, 스마트 안테나, 전파전파 등