

X-대역 다기능 투과배열 안테나 모듈화 설계

Modular Design of Multi-Functional Transmit-Array Antenna for X-Band

이인곤 · 노진성 · 박철수* · 육종관**

In-Gon Lee · Jin-Seong Roh · Cheol-Su Park* · Jong-Gwan Yook**

요 약

본 연구에서는 빔조향과 선형 편파변환이 가능하며, 시스템 요구사항에 따라 축소, 확장 설계가 용이하고, 유지보수 측면에서 장점이 있는 X 대역 모듈형 다기능 투과배열 안테나를 설계하고 검증하였다. 제안된 구조는 수신부, 능동회로부, 제어신호분배부 그리고 송신부로 구성되어 있으며, 전자적 제어를 통해 방위각, 고각 방향에 대하여 $\pm 45^\circ$ 범위 내 2D 빔 스캐닝이 가능하고, 동시에 수직 또는 수평 편파로 편파변환이 가능하다. 제안된 구조의 성능을 검증하기 위해 단위 셀이 16×16 배열된 투과배열 안테나를 제작하였으며, 근접전계 측정시스템을 통해 안테나 성능을 평가하였다. 측정 결과로부터 최대 이득은 23.7 dBi, 부엽준위 14 dBc, 1 dB 이하의 편파변환 손실과 10 dB 이상의 편파격리도 성능을 확인하였으며, 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a multifunctional transmit-array antenna with beam steering and polarization conversion capabilities for the X-band is presented. The proposed design offers advantages in terms of scalability, faster development and deployment, and ease of maintenance owing to its modular design, which is configured by a receiver, an active circuit, a DC bias control line, and a transmitter. The proposed design is capable of 2D beam scanning of up to $\pm 45^\circ$ for azimuth and elevation while converting vertical or horizontal polarization by electronic control. To verify its performance, a 16×16 array transmit-array antenna is fabricated and tested using a near-field measurement system. It exhibits a maximum gain of 23.7 dBi, the sidelobe level of 14 dBc, the polarization conversion loss of below 1 dB, and the polarization isolation of above 10 dB. The measurement results agree well with the simulation.

Key words: Multi-Functional Transmit-Array, Scalable Transmit-Array, Beam-Steering, Polarization Conversion

I. 서 론

최근 다수의 목표물을 고속으로 탐지하고, 추적이 가능한 전자 주사식 배열(ESA, electronically scanned array) 레이더의 기능적 장점을 유지하면서, 소형·경량의 안테나

를 설계하기 위한 다양한 노력이 시도되고 있다. 특히, 전기적 제어를 통해 주파수 응답특성의 재구성성이 가능한 투과배열형 안테나(reconfigurable transmit-array)의 설계 기술은 고정된 빔 특성을 갖는 수동형 안테나 전면에 위치하여, 급전 안테나로부터 방사된 전자기파를 집중

「본 연구는 2019년 국방과학기술연구소 미래도전국방기술 연구개발사업(9127786)의 지원을 받았음.」

한화시스템 특수레이다팀(Special Radar Team, Hanwha Systems)

*뮤트로닉스(Mutronics)

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

· Manuscript received April 2, 2024 ; Revised May 9, 2024 ; Accepted June 18, 2024. (ID No. 20240402-034)

· Corresponding Author: In-Gon Lee (e-mail: ig.lee@hanwha.com)

(focusing), 분할(splitting or multi-beam generation)하거나 또는 편파(선형 또는 원형)를 제어하는 등의 다양한 기능 복잡한 회로 없이 구현할 수 있다는 장점으로 활발히 연구되고 있다^[1].

전자기적 특성의 재구성이 가능한 투과배열 안테나는 특정 주파수 대역에 대하여 주파수 선택적 투과, 반사, 위상 지연 또는 편파변환 등의 전자기적 특성을 갖는 주기 구조(periodic structure)에 전기적으로 제어가 가능한 능동 소자를 함께 구성하여 설계함으로써, 주파수 응답특성을 재구성하는 방식으로 구현된다. 대표적으로 사용되는 능동 소자로는 ON/OFF의 1 bit 제어가 가능한 핀 다이오드, 커패시터의 아날로그 제어가 가능한 버랙터 다이오드 그리고 저손실의 높은 허용 전력을 갖는 기계적 스위치 소자인 MEMS(micro-electromechanical systems) 등이 있으며, 이러한 능동소자의 전자기적 특성을 기반으로 재구성 주파수 선택적 표면구조(frequency selective surface)^{[2]~[4]}와 재구성 메타물질(metamaterials)^{[5]~[8]} 그리고 R-T(receive-retransmit) 방식의 투과배열 안테나 등이 연구되고 있다^{[9]~[16]}.

선행 연구 대부분은 다중 기능 구현 및 성능 개선에 초점을 두어 대면적 PCB 제작을 기반으로 다층으로 구현되고 있으며^{[4],[9],[11]~[16]}, 이와 같은 방식은 능동소자 조립 측면에서 유리하나, 대면적 제작에 취약한 PCB 제작 공정상의 한계로 높은 제작 난이도와 그에 따른 낮은 수율 문제가 있을 뿐만 아니라, 운용 중 고장 발생 시 전체를 분해하여 수리해야 한다는 문제가 있다. 또한, 다양한 시스템에 적용을 위한 축소, 확장 설계가 어렵고, 임의의 크기(또는 배열 개수)를 갖는 안테나의 성능 예측에 많은 시간과 계산 자원이 필요하다는 문제로 연구 결과의 활용성이 낮다는 한계가 있다.

본 연구에서는 이와 같은 한계를 개선하기 위해, 전자적 제어를 통해 빔조향 및 선형 편파변환이 가능한 다기능 투과배열 안테나의 모듈화된 단위 셀을 설계하였다. 제안된 구조의 단위 셀은 급전 안테나로부터 전자기파를 수신하기 위한 수신부, 능동회로부, 제어신호분배부, 송신부로 구성되어 있으며, 각 부의 단품 단위 성능을 기반으로 다기능 투과배열 안테나의 성능 예측하였으며, 실제 제작 및 측정을 통해 그 결과를 비교 검증하였다.

II. 다기능 투과배열 안테나 모듈화 설계

제안된 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이, 고정 빔 특성을 갖는 급전 안테나로부터 방사된 전자기파를 투과배열 안테나의 수신부에 유기시켜 능동회로부로 전달하며, 반사형 위상천이기(reflection-type phase shifter)와 편파변환을 위한 스위칭 회로로 구성된 능동회로부를 거쳐 송신부 안테나를 통해 외부로 재방사한다. 이 때 능동회로부에 포함된 버랙터 다이오드의 전압 제어를 통해 커패시터를 조정함으로써 위상을 $0\sim310$ 도까지 가변시킬 수 있으며, 이중 편파 동작이 가능한 송신부로 연결되는 입력단에 구성된 핀 다이오드의 ON/OFF 제어를 통해 편파 스위칭이 가능하다.

단위 셀의 크기는 빔조향 범위 방위각, 고각에 대하여 ± 45 도에서 그레이팅 미발생 조건으로 설정하였으며, 각 부 층 구성 및 물질 제원은 그림 2에 나타내었다.

2-1 수신부 안테나 설계

수신부 안테나는 고정 빔 특성의 급전 안테나로부터 방사된 전자기파를 안정적으로 수신하고, 유기된 RF 신호를 저손실로 능동회로에 전달하는 역할을 한다. 이를 위해선 안테나의 좁은 배열 간격 내 상호 커플링을 억제 한 배열 안테나 설계가 요구되며, 조립성, 수리 접근성을 고려한 설계 기술이 적용되어야 한다.

제안된 수신부 안테나는 능동회로부로부터 일정 거리의 이격거리를 갖도록 air-gap 타입의 패치 안테나 설계를

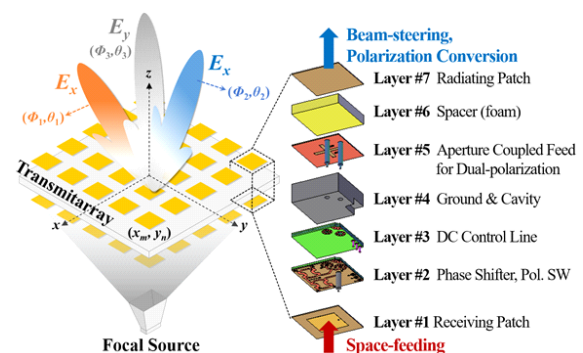


그림 1. 제안된 다기능 투과배열 안테나와 모듈화 설계
Fig. 1. Schematic of the proposed multi-functional transmit-array and modular design.

Layer #1		Layer #3	
Receiving Patch	Copper	Ground	
Substrate	$\epsilon_r=3.5, \tan\delta=0.0018$ (h=0.25 mm)	Substrate	$\epsilon_r=4.3, \tan\delta=0.025$ (h=0.25 mm)
Air-Gap (h=2.80 mm)		DC Control Line (Pol. Switch)	Copper
		Bonding	$\epsilon_r=3.8, \tan\delta=0.0246$ (h=0.05 mm)
		Ground	
Layer #2		Substrate	$\epsilon_r=4.3, \tan\delta=0.025$ (h=0.25 mm)
Phase Shifter, Pol. Switch	Copper	DC Control Line (Phase Shifter)	Copper
Substrate	$\epsilon_r=3.5, \tan\delta=0.0018$ (h=0.25 mm)	Bonding	$\epsilon_r=3.8, \tan\delta=0.0246$ (h=0.05 mm)
Ground		Ground	
Bonding	$\epsilon_r=3.8, \tan\delta=0.0246$ (h=0.05 mm)	Substrate	$\epsilon_r=4.3, \tan\delta=0.025$ (h=0.25 mm)
DC Control Line with Radial Stub	Copper	Ground	
Substrate	$\epsilon_r=3.5, \tan\delta=0.0018$ (h=0.25 mm)		
Ground			
Layer #4		Layer #6	
Metal	(h=5.0 mm)	Foam	(h=3.0 mm)
Layer #5		Layer #7	
Aperture	Copper	Radiating Patch	Copper
Substrate	$\epsilon_r=3.5, \tan\delta=0.0018$ (h=0.25 mm)	Substrate	$\epsilon_r=3.5, \tan\delta=0.0018$ (h=0.25 mm)
Feeder	Copper		

그림 2. 제안된 구조의 층 구성

Fig. 2. Layer configuration of proposed design.

통해 복사소자 크기를 축소하여 상호 커플링을 억제하고자 하였으며, 이격거리는 임의의 혼 안테나를 모델링 하고, 수신 안테나로부터 능동회로부에 전달되는 신호의 크기가 최대가 될 때의 거리로 설계 변수를 설정하였다.

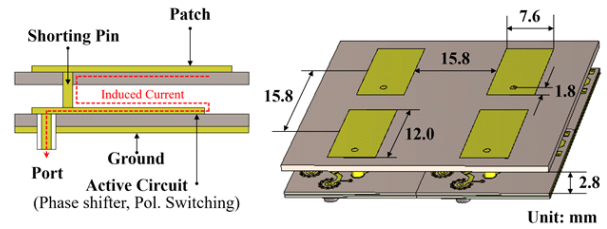
안테나의 성능을 분석하기 위해 2×2 배열된 안테나를 모델링하였으며, 3차원 전자기장 해석 S/W인 CST MW를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

수신부 안테나의 외형은 그림 3(a)와 같으며, 반사손실, 빔 패턴 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 3(b) 및 그림 3(c)에 각각 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 목표 동작 주파수 대역에 대하여 -10 dB 이하의 반사손실 특성을 확인하였으며, 7.1 dBi의 이득, 반치전력 빔폭은 E-plane 58도, H-plane 88도를 가짐을 확인하였다.

2-2 능동회로부 설계

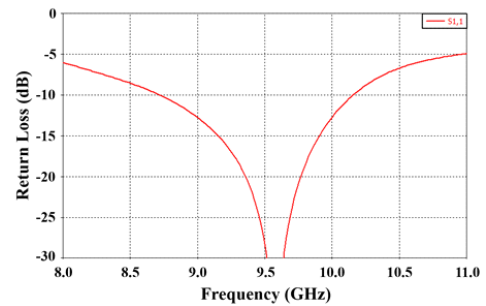
능동회로부는 급전 안테나로부터 전파연동을 통해 수신된 RF 신호의 위상을 지연시키거나, 편파를 스위칭하는 역할을 한다. 위상제어를 위한 위상천이기는 4개의 버랙터 다이오드(MACOM사 MAVR-000120-14110P)로 구성되어 있으며, 동일한 DC bias 전압을 통해 커패시턴스가 동시에 조정되도록 구현하였다.

편파변환 스위칭 회로는 2개의 편 다이오드(MACOM사 MA4AGP907)를 Anti-parallel로 구성하였으며, 바이어



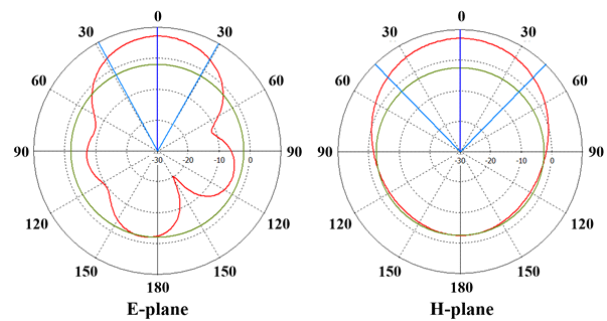
(a) 역 L자 안테나(수신부)

(a) Inverted-L antenna (receive part)



(b) 반사손실 특성

(b) Return loss



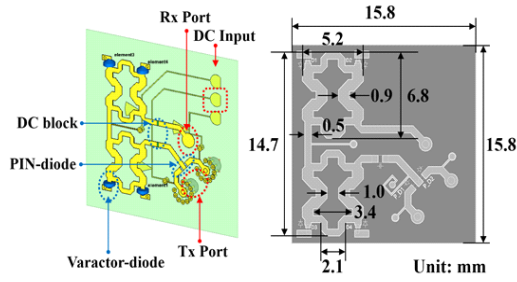
(c) 방사패턴

(c) Radiation pattern

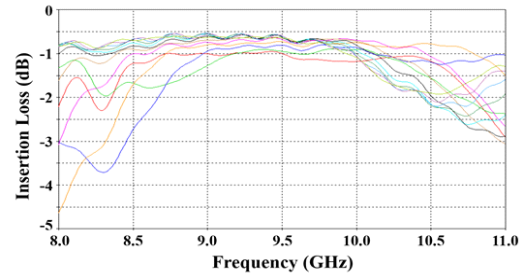
그림 3. 제안된 수신부 안테나 구조 및 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Geometry of proposed receive antenna and simulation result.

스 방향에 따라 이중편파 송신 안테나의 급전부에 전달되는 RF 신호의 방향을 제어하도록 구현하였다.

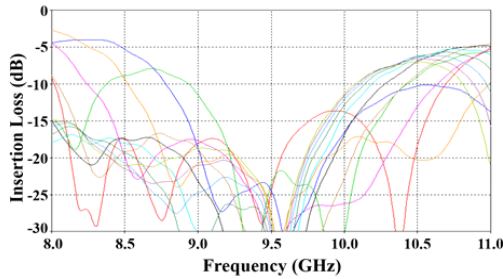
위상천이기와 편파변환 스위칭 회로를 포함하는 능동회로의 외형과 설계 변수는 그림 4(a)에 나타내었다. 위상천이기에 포함된 버랙터 다이오드의 커패시턴스 변화에 따른 삽입/반사손실 및 위상특성을 시뮬레이션하였으며, 그 결과를 그림 4(b)~그림 4(d)에 각각 나타내었다. 시뮬레이



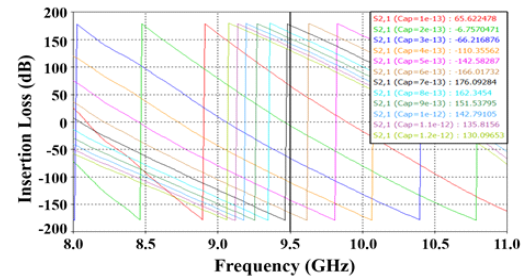
(a) 능동회로부
(a) Active circuit part



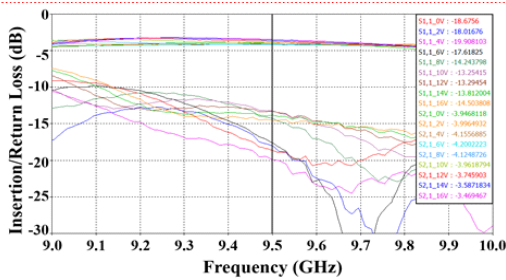
(b) 위상천이기 삽입손실 특성 시뮬레이션 결과
(b) Simulated results for insertion loss of phase shifter



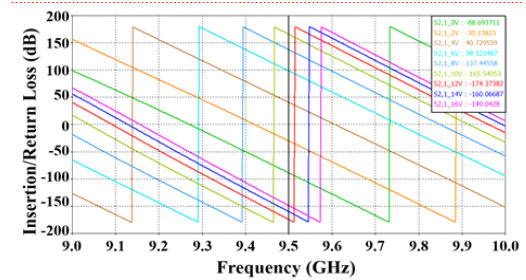
(c) 위상천이기 반사손실 특성 시뮬레이션 결과
(c) Simulated results for return loss of phase shifter



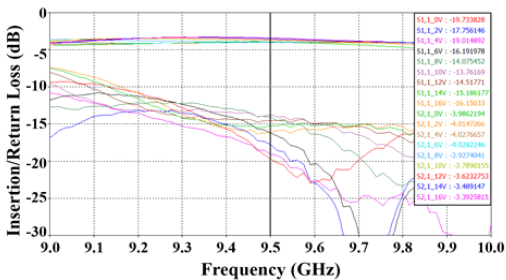
(d) 위상천이기 위상특성 시뮬레이션 결과
(d) Simulated results for phase characteristics of phase shifter



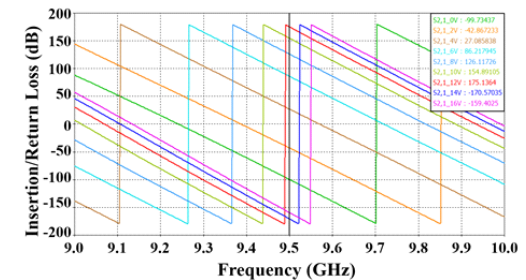
(e) 수직 편파조건 삽입/반사 손실특성 측정결과
(e) Measured results for insertion/return loss in V-polarization



(f) 수직 편파조건 위상특성 측정결과
(f) Measured results for phase characteristics in V-polarization



(g) 수평 편파조건 삽입/반사 손실특성 측정결과
(g) Measured results for insertion/return loss in H-polarization



(h) 수평 편파조건 위상특성 측정결과
(h) Measured results for phase characteristics in H-polarization

그림 4. 능동회로부 구조 및 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Geometry and simulation result of active circuit part.

선 결과로부터, 커패시턴스가 $0.1 \text{ pF} \sim 1.2 \text{ pF}$ 로 변화함에 따라 삽입손실은 운용주파수 대역 내에서 $-0.55 \text{ dB} \sim -1.27 \text{ dB}$ 로 변화하며, 반사손실은 -10 dB 이하를 충족하고, 295° 이상의 위상제어 범위를 가짐을 확인하였다.

시뮬레이션 결과를 바탕으로, 능동회로부 샘플을 제작하여 성능을 측정하였으며, 그 결과를 그림 4(e)~그림 4(h)에 나타내었다. 능동회로부의 편파변환 스위칭 및 위상천이기의 위상이 변화함에 따라, 운용주파수 대역에 대하여 삽입손실은 평균 -1.32 dB (전용 시험보드 손실 보정 전: $-3.39 \text{ dB} \sim -4.20 \text{ dB}$), 반사손실은 -10 dB 이하를 충족하였으며, 310° 이상의 위상제어 범위를 가짐을 확인하였다.

2.3 송신부 안테나 설계

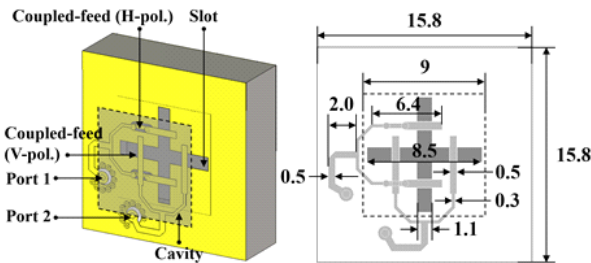
송신 안테나는 능동회로부로부터 전달받은 RF신호를 대기 중으로 방사하는 역할을 하며, 능동회로부 편 다이오드의 ON/OFF 제어에 따라 수직 또는 수평 편파특성을 갖도록 이중편파 안테나를 설계하였다. 제안된 구조는 편

파 간 격리도 확보를 위해 slot-coupled 방식의 급전을 사용하여 두 개의 직교 공진모드를 갖도록 설계하였으며, 지향성 향상을 위해 기생 패치(parasitic patch)와 함께 캐비티 백(cavity-backed) 안테나 형태로 구현하였다.

제안된 캐비티 백 이중편파 안테나의 외형은 그림 5(a)에 내었으며, 편파에 따른 반사손실, 격리도 특성을 그림 5(b)에, 수직 및 수평편파에 대한 방사패턴을 그림 5(c) 및 그림 5(d)에 각각 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터, 중심주파수 수직 편파기준 이득은 7.34 dBi , 편파 분리도는 25.6 dBc , 수평 편파기준 이득은 7.44 dBi , 편파 분리도는 25.3 dBc 를 가짐을 확인하였다.

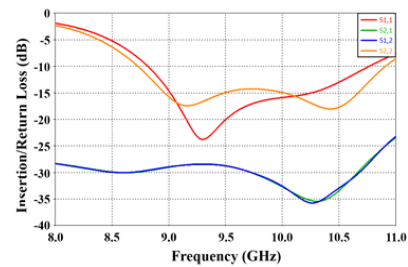
2.4 전송선로, 제어신호분배부 설계

급전 안테나로부터 수신된 RF 신호를 각 부에 안정적으로 전달하기 위해선, 능동소자 제어용 DC 바이어스 선로와 RF 전송선로 간 상호 간섭을 억제하고 격리도를 확보하기 위해 디커플링 스타브(decoupling stub) 구조의 도입이 필수적이다. 또한, 단위셀 내 층 간 RF 신호 전달을



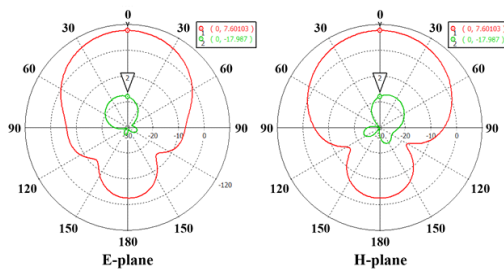
(a) 개구 결합형 급전구조(송신부)

(a) Geometry of aperture coupled-feed (transmit part)



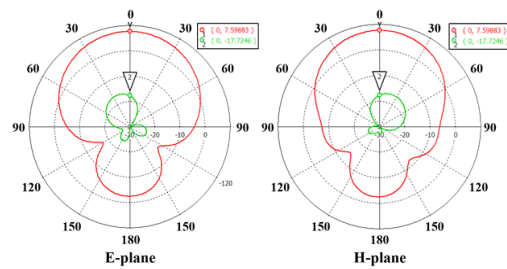
(b) 수평, 수직 편파제어 조건 삽입/반사 손실

(b) Insertion/return loss in vertical, horizontal polarization control



(c) 수평 편파제어 조건 방사패턴

(c) Radiation pattern in horizontal polarization



(d) 수직 편파제어 조건 방사패턴

(d) Radiation pattern in vertical polarization

그림 5. 제안된 송신부 안테나 및 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Proposed transmitting antenna and simulation result.

위해 마이크로스트립 선로에서 동축 선로로 저손실 모드 변환(mode transition)을 위한 전송선로의 최적 설계가 필요하다.

디커플링 스텐브 구조는 부채꼴의 반지름과 호의 길이 그리고 스텐브의 위치를 변화시키면서 삽입/반사손실을 분석하였으며, 스텐브 구조에 의한 성능 영향이 최소가 되도록 낮은 삽입손실을 갖는 조건의 설계 변수로 설정하였다^[17].

층 간 RF 신호 전달을 위한 모드 변환 구조는 비하홀을 기반으로 동축선로를 모사된 구조로 PCB 상에 직접 구현하였으며, 무도금 홀(NPTH, non plating through hole)의 크기, 비하홀(PTH, plating through hole)의 배치 간격을 변화시키면서 선로 임피던스가 50 Ω이 되도록 설계 변수를 설정하였다^[18].

디커플링 스텐브 구조를 포함하는 전송선로와 모드 변환구조의 형상과 삽입/반사손실 시뮬레이션 결과를 그림

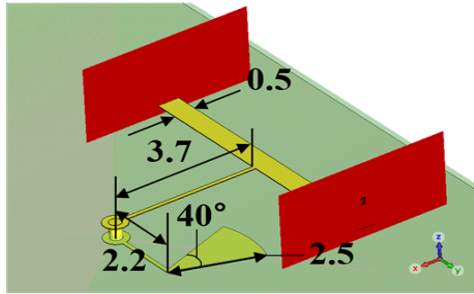
6(a)~그림 6(d)에 각각 나타내었다.

제어신호분배부는 16×16 배열된 단위셀 256개에 각각 제어, 전원 신호를 분배하는 역할을 하며, 제어신호분배부의 레이아웃은 그림 7과 같다. 양 측면에 위치한 제어 보드로부터 수직방향으로 구성된 선로를 통해 편파변환을 위한 스위칭 제어 신호가 인가되며, 수평방향으로 구성된 선로를 통해 위상제어를 위한 전압신호가 인가되도록 배치하였다.

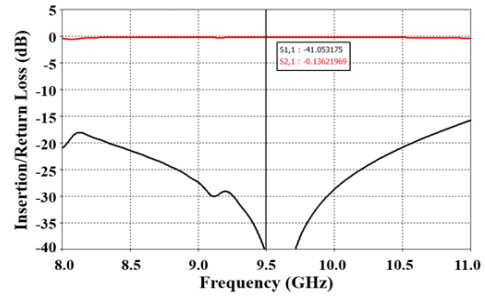
III. 다기능 투과배열 안테나 성능 예측

다기능 투과배열 안테나의 대표적 성능 지표인 안테나 효율은 식 (1) 및 식 (2)와 같이 각 부의 손실 합으로 결정된다.

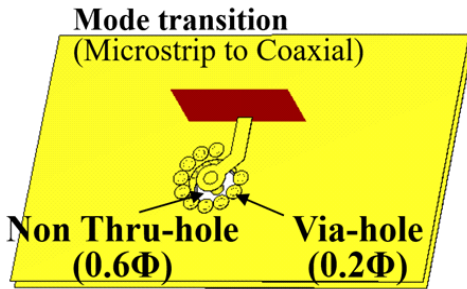
$$L_{total} = L_{Rx} + L_{PS} + L_{Tx} + L_{SW} + L_{path} + L_{SF} \quad (1)$$



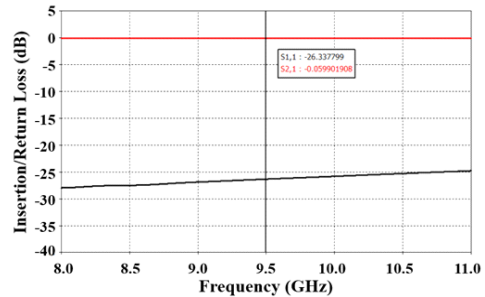
(a) 방사형 스텐브 구조의 외형
(a) Geometry of radial stub



(b) 방사형 스텐브 구조의 삽입/반사 손실
(b) Insertion/return loss of radial stub



(c) 모드 변환 전송선로의 외형(마이크로스트립-동축)
(c) Geometry of mode transition line (microstrip to coaxial)



(d) 모드 변환 전송선로의 삽입/반사 손실
(d) Insertion/return loss of mode transition line

그림 6. 전송선로 설계 및 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Transmission line design and simulation result.

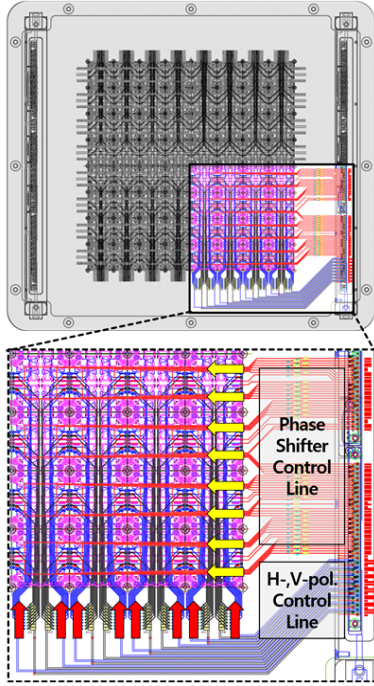


그림 7. 능동회로부 제어선로
Fig. 7. DC control line for active circuit part.

$$\eta_{total} = D_{ideal} - L_{total} \quad (2)$$

여기서 L_{Rx} 는 수신부 안테나 손실, L_{PS} 위상천이부 손실, L_{Tx} 는 송신부 안테나 손실, L_{SW} 는 능동소자 스위칭 손실, L_{path} 전송선로 손실, L_{SF} 는 전파연동 손실(spillover loss+illumination loss)을 의미한다. EM 시뮬레이션을 통해 얻은 각 부의 손실의 합과 이상적인 안테나 이득(D_{ideal})을 통해 안테나의 효율을 계산하면 표 1과 같으며, 안테나 이득은 단위셀 배열 간격은 15.5 mm(0.5λ)로 가정하여 16×16 배열을 기준으로 계산하였다.

안테나의 빔조향 성능을 분석하기 위해 급전 안테나로 혼 안테나를 가정하였으며, 식 (3)으로부터 전파연동 조건에서의 빔 조향각 제어를 위한 단위셀 별 위상값을 계산하였다.

$$\psi_{mn}^{tr} = k(R_{mn} - \vec{r}_{mn} \cdot \hat{r}_o) + \psi_{mn}^{inc} + \psi_s \quad (3)$$

급전 혼 안테나로부터 전달된 전자기파가 투과배열 안테나에 도달했을 때의 위상 ψ_{mn}^{tr} 과 급전의 위상 ψ_s , 그리고 조향하고자 하는 빔의 방향(\hat{r}_o)의 관계로부터 도출된

표 1. 모듈화 설계 기반 다기능 투과배열 안테나의 성능 분석

Table 1. Performance analysis of multi-functional transmit-array antenna based on modular design.

Parameter	Value
Ideal directivity (D_{ideal})	29.1 dBi
Rx antenna loss (L_{Rx})	0.5 dB
Phase shifter loss (L_{PS})	1.3 dB
Tx antenna loss (L_{Tx})	0.3 dB
Switching loss (L_{SW})	0.8 dB
RF path loss (L_{path})	0.2 dB
Space feeding loss (L_{SF})	2.5 dB
Total loss (L_{total})	5.6 dB
Total efficiency (η_{total})	27.6 %

각 단위셀의 위치(\vec{r}_{mn})에서의 위상값 ψ_{mn}^{tr} 을 계산할 수 있으며, 여기서 k , R_{mn} 은 각각 전파상수와 급전으로부터 떨어진 거리를 의미한다.

임의의 방향으로 빔을 조향하기 위해 계산된 위상값의 분포 ψ_{mn}^{tr} 을 식 (4)에 대입하여 방사패턴을 계산할 수 있으며, 여기서 q_e 는 단일소자 패턴 지수, q_f 는 급전혼의 반치전력 빔폭을 설정하는 지수를 의미한다. θ_f 는 급전 안테나가 단위셀을 바라보는 각도이며, T_{mn} 는 단위셀의 손실을 의미한다.

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \cos^{q_e}(\theta) \frac{\cos^{q_f}(\theta_f(m, n))}{|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f|} \cdot e^{-jk(|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f| - \vec{r}_{mn} \cdot \hat{u})} \cdot T_{mn} e^{j\psi_{mn}^{tr}} \quad (4)$$

급전 거리는 급전 안테나와 투과배열 안테나 간 거리 변화에 따른 전파연동 효율 분석을 통해 설정하였다. 전파연동 효율은 스페일오버(spillover) 효율과 일루미네이션(illumination) 효율의 곱으로 정의되며, 스페일오버 효율은 급전의 송신전력 대비 투과배열 안테나에 도달한 수신 전력비의 일루미네이션 효율은 투과배열 안테나에 도달하는 전력 및 위상의 균일도를 의미한다.

스페일오버 효율은 코사인 함수로 묘사된 급전 소스의 송신전력 대비, 급전 소스로부터 특정 거리(H) 만큼 떨어져 위치한 투과배열 안테나 단위셀에 도달한 수신전력의 비로 식 (6)과 같이 표현할 수 있으며, 여기서 r 는 급전 소

스와 투과배열 안테나 단위셀 간 거리를 의미한다^[19].

$$\eta_{total} = \eta_{spill} \times \eta_{ill} \quad (5)$$

$$\eta_{spill} = \frac{2q_f + 1}{2\pi} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{H \cos^{2q_f}(\theta_f)}{r^3} \Delta x \Delta y \quad (6)$$

일루미네이션 효율은 급전 소스로부터 투과배열 안테나에 도달한 전력의 크기의 균일도와 위상의 왜곡 정도를 의미하며, 식 (7)과 같이 투과배열 안테나의 표면전류 I_{mn} 으로부터 식 (8)을 통해 계산할 수 있다^[19].

$$I_{mn} = \cos^{q_f}(\theta) \frac{\cos^{q_f}(\theta_f(m,n))}{|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f|} e^{-jk(|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f| - \vec{r}_{mn} \cdot \hat{u})} |T_{mn}| e^{j\phi_{mn}} \quad (7)$$

$$\eta_{ill} = \frac{1}{A_p} \frac{\left[\int_S I_{mn} dS \right]^2}{\left[\int_S |I_{mn}| dS \right]^2} = \frac{1}{A_o} \frac{\left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} \Delta x \Delta y \right|^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I_{mn}| \Delta x \Delta y} \quad (8)$$

급전 거리 변화에 따라 계산된 전파연동 효율(η_{total})을 그림 8에 나타내었으며, 계산 결과로부터 163 mm(focal distance ratio, 0.67)의 급전 거리를 가질 때 최대 연동 효율(약 77.3 %)을 가짐을 확인할 수 있다.

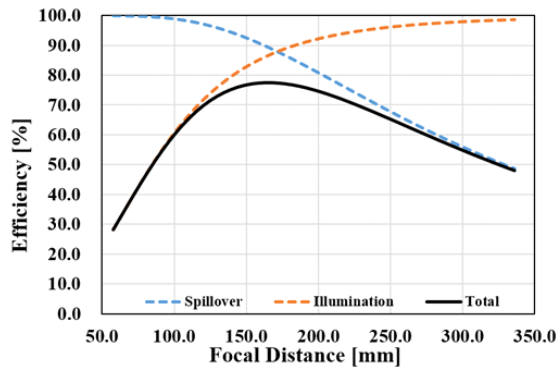
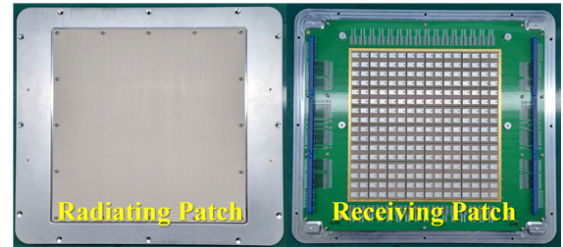


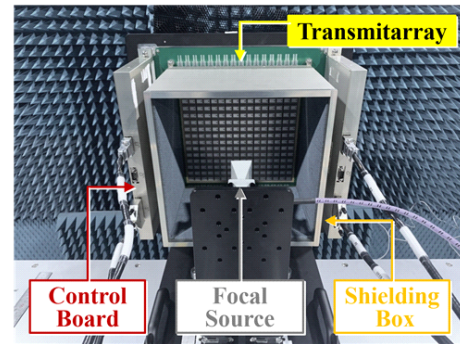
그림 8. 급전거리에 따른 전파연동 효율 계산 결과
Fig. 8. Calculation of space feeding efficiency in variation of focal distance.

IV. 제작 및 측정

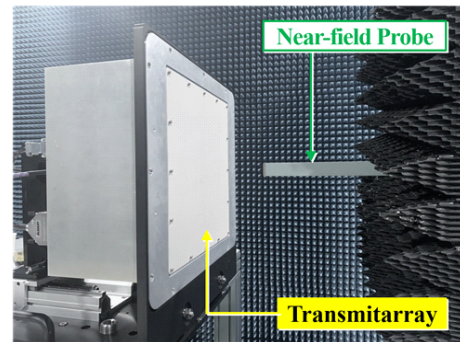
앞서 설계한 결과를 바탕으로 성능을 검증하기 위해 다기능 투과배열 안테나를 제작하였으며, 제작된 형상을 그림 9(a) 및 그림 9(b)에 안테나 성능 측정을 위한 근접전



(a) 제작된 다기능 투과배열 안테나
(a) Fabricated multi-functional transmit-array



(b) 다기능 투과배열 안테나 후면
(b) Back-side view of multi-functional transmit-array



(c) 근접전계 측정시스템 시험환경
(c) Test environment of near-field measurement system

그림 9. 제작된 다기능 투과배열 안테나 및 근접전계 측정환경
Fig. 9. Fabricated multi-functional transmit-array antenna and near-field measurement system.

계 시험환경을 그림 9(c)에 나타내었다.

제작된 안테나의 개구면 크기는 $253\text{ mm} \times 253\text{ mm}$ 이며, 프레임이 포함된 최외곽 크기는 $450\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 이다.

프레임 양쪽 측면에 능동회로부(위상천이 및 편파변환 회로)를 제어하기 위한 제어보드가 각각 결합되며, 외부로부터 간섭 및 내부 다중반사 효과에 의한 성능 열화를 최소화하기 위해 흡수체가 부착된 차폐함을 함께 구성하였다.

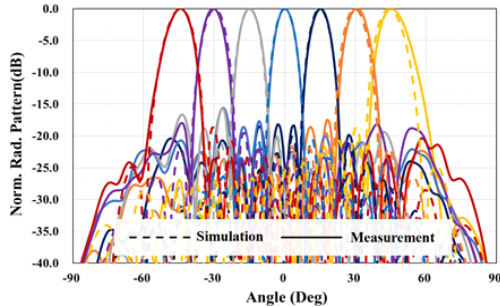
그림 10(a) 및 그림 10(b)에는 중심주파수에 대하여 수평편파 제어 조건에서 방위각, 고각 방향에 대한 빔조향 성능을 나타내었으며, 그림 10(c) 및 그림 10(d)에는 수직편파 제어 조건에서 방위각, 고각 방향에 대한 빔조향 성능을 각각 나타내었다.

측정결과로부터, 중심주파수 기준 수직 편파에 대하여 최대이득은 23.5 dBi , 수평 편파에 대하여 최대이득은 23.7 dBi 이며, 반치전력 빔폭은 7° , 부엽준위는 -14.7

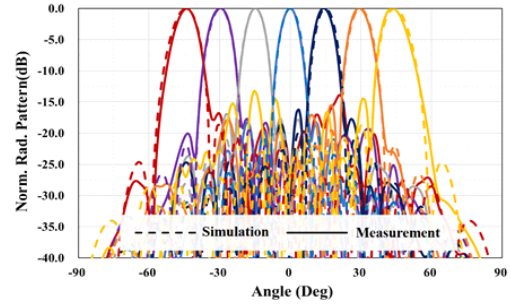
dBc 이하를 가짐을 확인하였다. 빔 조향에 따른 scan loss는 최대 이득을 기준으로 수평편파 조건에서 방위각 조향 시 2.54 dB , 고각 조향 시 6.46 dB , 수직편파 조건에서 방위각 조향 시 5.18 dB , 고각 조향 시 2.20 dB 이며, 개구면 효율은 27.8% 이상으로, 앞서 예측한 결과 27.6% 와 잘 일치함을 확인하였다.

V. 결 론

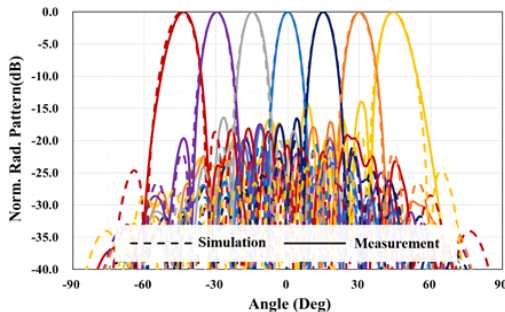
본 논문에서는 빔조향 및 선형 편파변화가 가능하며, 시스템의 요구사항에 따라 축소, 확장설계가 용인한 모듈형 투과배열형 안테나를 제안하였다. 제안된 구조는 전파연동을 위한 수신부, 능동회로부, 제어신호분배부, 송신부로 구성되어 있으며, 단위셀에 포함된 능동소자의 단순 전압 제어만으로 다기능 구현이 가능함을 확인하였다. 제안된 구조의 성능 검증을 위해 단위셀이 16×16 배열된 축



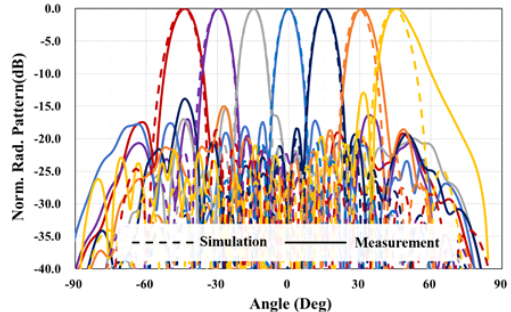
(a) 방위각 빔조향(수평편파)
(a) Beam steering in azimuth direction (H-pol.)



(b) 고각 빔조향(수평편파)
(b) Beam steering in elevation direction (H-pol.)



(c) 방위각 빔조향(수직편파)
(c) Beam steering in azimuth direction (V-pol.)



(d) 고각 빔조향(수직편파)
(d) Beam steering in elevation direction (V-pol.)

그림 10. 방사패턴 측정결과

Fig. 10. Measurement results of radiation pattern.

소형 시제를 제작하였으며, 근접전계 측정시스템을 통해 빔조향 및 편파변환 기능/성능을 검증하였다. 측정결과로부터, 중심주파수 기준 최대 이득은 23.7 dBi, 부엽준위는 -14 dBc 이하, 개구면 효율은 27.8 %의 성능을 확인하였으며, 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

제안된 구조는 방위각, 고각에 대해 $\pm 45^\circ$ 범위 내에서 빔조향과 동시에 선형 편파변환이 가능하고, 낮은 설계 복잡도를 갖는다는 장점을 바탕으로 공중 또는 지상 감시체계, UAV(unmanned aerial vehicles)용 Low SWaP-C (size, weight, power and cost) 레이더 설계 기술로 활용 가능하다.

References

- [1] J. R. Reis, M. Vala, and R. F. S. Caldeirinha, "Review paper on transmitarray antennas," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94171-94188, Jun. 2019.
- [2] W. Pan, C. Huang, P. Chen, P. Pu, M. Xiaoliang, and X. Luo, "A beam steering horn antenna using active frequency selective surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6218-6223, Dec. 2013.
- [3] J. R. Reis, C. Nigel, H. Akram, Z. M. E. Al-Daher, R. F. S. Caldeirinha, and T. R. Fernandes, et al., "FSS-inspired transmitarray for two-dimensional antenna beamsteering," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2197-2206, Jun. 2016.
- [4] B. D. Nguyen, C. Pichot, "Unit-cell loaded with PIN diodes for 1-bit linearly polarized reconfigurable transmitarrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 98-102, Nov. 2018.
- [5] T. Jiang, Z. Wang, D. Li, J. Pan, B. Zhang, and J. Huangfu, et al., "Low-DC voltage-controlled steering-antenna radome utilizing tunable active metamaterial," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 1, pp. 170-178, Nov. 2011.
- [6] J. P. Turpin, D. H. Werner, and D. E. Wolfe, "Design considerations for spatially reconfigurable metamaterials," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3513-3521, Aug. 2015.
- [7] C. Huang, C. Zhang, J. Yang, B. Sun, B. Zhao, and X. Luo, "Reconfigurable metasurface for multifunctional control of electromagnetic waves," *Advanced Optical Materials*, vol. 5, no. 22, p. 1700485, Sep. 2017.
- [8] Y. Li, Q. Cao, and Y. Wang, "A wideband multifunctional multilayer switchable linear polarization metasurface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 1314-1318, Jul. 2018.
- [9] L. Di Palma, A. Clemente, L. Dussopt, R. Souleau, P. Potier, and P. Pouliguen, "Circularly-polarized reconfigurable transmitarray in Ka-band with beam scanning and polarization switching capabilities," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 2, pp. 529-540, Feb. 2017.
- [10] T. K. Pham, L. Guang, D. González-Ovejero, and R. Sauleau, "Dual-band transmitarray with low scan loss for satcom applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 3, pp. 1775-1780, Mar. 2021.
- [11] C. Huang, W. Pan, X. Ma, and X. Luo, "1-Bit reconfigurable circularly polarized transmitarray in X-band," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 448-451, Jul. 2015.
- [12] C. Huang, W. Pan, X. Ma, B. Zhao, J. Cui, and X. Luo, "Using reconfigurable transmitarray to achieve beam-steering and polarization manipulation applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4801-4810, Nov. 2015.
- [13] I. G. Lee, J. Y. Kim, and I. P. Hong, "Design of multifunctional transmitarray with active linear polarization conversion and beam steering capabilities," *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 9, p. 4319, Apr. 2022.
- [14] M. Wang, S. Xu, F. Yang, and M. Li, "Design and measurement of a 1-bit reconfigurable transmitarray with subwavelength H-shaped coupling slot elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.

- 67, no. 5, pp. 3500-3504, Mar. 2019.
- [15] F. Diaby, A. Clemente, R. Sauleau, K. T. Pham, and L. Dussopt, "2 Bit reconfigurable unit-cell and electronically steerable transmitarray at Ka-band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 5003-5008, Dec. 2019.
- [16] H. Li, Y. B. Li, C. Y. Gong, S. Y. Dong, S. Y. Wang, and H. P. Wang, et al., "Design of programmable transmitarray antenna with independent controls of transmission amplitude and phase," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 9, pp. 8086-8099, Apr. 2022.

이 인 곤 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3974-4766>



2013년 2월: 공주대학교 정보통신공학부
전파공학과 (공학사)
2015년 8월: 공주대학교 정보통신공학과
(공학석사)
2020년 2월: 공주대학교 정보통신공학과
(공학박사)
2021년 10월: 공주대학교 스마트자연공간

연구센터 박사후연구원

2021년 11월~현재: 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 투과배열 안테나, 위상배열 안테나, 레이더 시스템 등

노 진 성 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3881-6385>



2020년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
2023년 2월: 충남대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2023년 1월~현재: 한화시스템 연구원
[주 관심분야] RF 송수신 모듈, 레이더 시스템 등

- [17] F. Giannini, R. Sorrentino, and J. Vrba, "Planar circuit analysis of microstrip radial stub (short paper)," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 12, pp. 1652-1655, Dec. 1984.
- [18] T. Kushta, K. Narita, T. Kaneko, T. Saeki, and H. Tohya, "Resonance stub effect in a transition from a through via hole to a stripline in multilayer PCBs," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 169-171, May 2003.
- [19] A. H. Abdelrahman, F. Yang, A. Z. Elsherbeni, and P. Nayeri, *Analysis and Design of Transmitarray Antennas*, San Francisco, CA, Morgan & Claypool, 2017.

박 철 수 [뮤트로닉스/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-2227-7854>



2015년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)
2017년 2월: 충북대학교 전자통신공학전공 (공학석사)
2016년 10월~현재: (주)뮤트로닉스 선임연구원
[주 관심분야] 안테나, 능동 배열안테나, 위상배열안테나, 초고주파 회로 설계 등

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 12월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
1997년 1월~1998년 9월 : University of Michigan Research Fellow

1998년 10월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer

1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 교수

2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)

[주 관심분야] 마이크로파 시스템 해석 및 설계, 안테나 시스템, RF MEMS, Bio-Radar and Sensors, Computational Electromagnetics, EMI/EMC, HEMP, TEMPEST