

45도 선형 편파 발생용 SIW 슬롯 Sub-Array 안테나 설계 및 해석

Design and Analysis of 45°-Inclined Linearly Polarized Substrate Integrated Waveguide(SIW) Slot Sub-Array Antenna for 35 GHz

김 동 연 · 남 상 옥

Dong-yeon Kim · Sangwook Nam

요 약

기판 집적 도파관(Substrate Integrated Waveguide: SIW) 기술을 이용한 Ka 밴드의 35 GHz용 4×4 평면 배열 안테나를 제시한다. 전체 안테나 구조는 3층의 PCB(Printed Circuit Board) 적층 형태로 구성되며, top PCB에는 45도로 기울어진 직렬 방사 슬롯이 평면 배열로 방사부를 이룬다. 또한, 균일한 전력을 전달하고 안테나 전체 단면적을 최소화하기 위해 middle 및 bottom PCB에는 급전 SIW가 위치한다. 전체 안테나 개구면의 면적은 750.76 mm²이며, 유전율 2.2의 RT/Duroid 5880 기판을 적층하여 설계하였다. 각 방사부 및 급전부의 개별적인 전기적 특성은 full-wave 시뮬레이터인 CST MWS를 이용하여 확인하였다. 나아가 제안된 평면 배열 안테나는 대역폭 (490 MHz), 최대 이득(18.02 dBi), 부엽 레벨(-11.0 dB), 교차 편파 레벨(-20.16 dB)의 전기적 특성을 보인다.

Abstract

The 4 by 4 series slot sub-array antenna is proposed using substrate integrated waveguide(SIW) technology for 35 GHz of Ka band application. The proposed antenna is realized with multi-layered structure for compact size and easy integration features. 4 by 4 radiating slots are arrayed on top PCB with equal spacing and the feeding SIWs are arranged on middle and bottom PCBs for uniform power distribution. The multi-layered antenna is realized using RT/Duroid 5880 that has dielectric constant of 2.2 and the total antenna size is 750.76 mm². The individual parts such as radiators and feeding networks are simulated using full-wave simulator CST MWS. Furthermore, the total sub-array antenna also fabricated and measured the electrical performances such as impedance bandwidth under the criteria of -10 dB(490 MHz), maximum gain(18.02 dBi), sidelobe level(SLL)(-11.0 dB), and cross polarization discrimination (XPD)(-20.16 dB).

Key words : 45°-Inclined Linear Polarization, Substrate Integrated Waveguide(SIW), Slot Array Antenna

I. 서 론

45도 선형 편파 발생용 밀리미터파 안테나는 각

종 레이더 시스템의 방사체로써 응용범위가 매우 넓다. 예를 들어 차량용 레이더의 경우, 모든 차량의 안테나가 일괄적으로 45도 선형 편파를 사용하면 반

「본 연구는 방송통신위원회의 방송통신인프라원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음(KCA-2012-(12-911-01-102))

서울대학교 전기·정보공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)

· Manuscript received January, 7, 2013 ; Revised February 15, 2013 ; Accepted February 25, 2013. (ID No. 20130107-009)

· Corresponding Author : Dong-yeon Kim (e-mail : dongyeonkim0818@gmail.com), Sangwook Nam (e-mail : snam@snu.ac.kr)

대편 선로에서 다가오는 차량에서 방사하는 신호와 수직(orthogonal) 관계가 되어 서로의 간섭을 최소화할 수 있기 때문이다. 또한, SAR(Synthetic Aperture Radar)를 비롯한 추적용 레이더 등의 시스템에서는 다양한 환경에서 높은 해상도로 목표물의 이미지를 획득하기 위해 이중 편파가 요구된다. 이러한 시스템에 적합한 방사부로서 45도 선형 편파 안테나를 기본으로 하는 ± 45 도 이중 편파 발생용 밀리미터파 안테나 개발이 가능하다.

한편, 밀리미터파 안테나로서 가장 대표적으로 사용되어온 도파관 슬롯 배열 안테나의 경우 수직 및 수평 편파 발생에 적합한 직렬 및 병렬 슬롯이 주로 사용되어 왔다^{[1],[2]}. 급전부를 포함한 금속 도파관 슬롯 배열 안테나는 3차원 구조체로서 큰 부피를 차지하기 때문에 설치 공간의 확보가 어려울 뿐만 아니라, 높은 제작 비용으로 대량 생산에 무리가 있고, 병렬 및 직렬 슬롯만을 이용하는 기존의 슬롯 배열 안테나로는 임의의 선형 편파를 발생시키기에는 한계가 있다. 마찬가지로 마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 밀리미터파 안테나 개발도 진행되어 왔다. 저비용이며 제작 절차가 단순하여 경량의 패치 배열 안테나 구조로 모노폴스 안테나를 구현한 예시가 있다^{[3],[4]}. 또한, 77 GHz 차량용 레이더로 사용하기 위한 밀리미터파용 직렬 패치 배열 안테나도 제안된 바 있다^[5]. 이러한 패치 형태의 안테나 및 급전부로 구성된 배열 안테나는 평면 형태로 구현이 가능하기 때문에 좁은 공간에 쉽게 집적이 가능하며 경량의 장점을 가진다. 하지만 이러한 마이크로스트립 패치 안테나는 밀리미터파 대역에서 단점이 쉽게 노출된다. 먼저 전송선 전력 손실이 다소 크며, 급전부에 의해 방사 패턴의 왜곡이 일어나기 쉽다. 결국 순도 높은 편파를 발생시키기 힘들어 안테나 효율이 저하된다.

기존의 밀리미터파 안테나의 단점인 고비용, 큰 부피 및 무게, 낮은 효율 및 높은 전력 손실 등을 해결하기 위해 기관 집적 도파관(Substrate Integrated Waveguide: SIW) 기술이 연구되어 왔다^{[6]~[11]}. SIW 전송선로 기술은 유전체가 있는 PCB(Printed Circuit Board)에 금속 비아(metallic via)의 주기적인 배열로 금속 벽을 형성하므로 금속 도파관 전송선로와 동일한 TE₁₀ 모드로 동작이 가능하다. 또한, SIW 기술을 이용하면 PCB 기관의 유전율을 효과적으로 이용할

수 있어 특히 밀리미터파 소자 구현 시 소형화에 용이하다. 나아가 SIW 전송선로를 이용하여 급전부를 구현할 경우, 마이크로스트립 전송선로와 달리 간헐 공간을 따라 전력이 이동하므로 외부로의 간섭 현상을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 안테나의 방사 패턴의 왜곡 또한 최소화할 수 있어 편파의 순도를 극대화할 수 있다^[6]. 이러한 SIW 전송선로를 이용한 슬롯 배열 안테나는 다수의 논문에서 그 성능이 검증되어 왔다^{[7]~[11]}. 특히, Ka^[8] 및 W^[9] 밴드에서 동작하는 SIW 모노폴스 안테나가 제안된 바 있다. 두 경우, 모두 단일 기관에 구현하여 제작 편의는 높으나 급전부가 차지하는 면적이 넓어 전체적인 크기가 매우 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 추적용 소형 레이더에 적용하기 위해 방사부 및 급전부 모두가 SIW 기술로 구현된 적층 형태의 45도 선형 편파 발생용 4x4 슬롯 sub-array 안테나를 제안하였다. 일반적으로 수백 개에 해당하는 슬롯이 배열 안테나를 이룰 때 “long line effect”에 의해 배열 안테나의 임피던스 대역폭뿐만 아니라 이득 대역폭도 매우 좁아지는 단점이 발생한다^[12]. 이러한 협대역 문제는 슬롯 배열 단위를 sub-array로 나누어 재배열하는 기법으로 해결이 가능할 뿐만 아니라, 급전부가 모두 방사부 아래에 집적되므로 안테나의 전체 사이즈를 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 거대한 배열 안테나를 구성하는 sub-array의 구조를 제안하였고, 방사부 및 급전부를 모두 포함한 최종 안테나에 대해 full-wave 시뮬레이터인 CST MWS를 이용하여 분석하고, 제작 및 측정을 통해 검증하였다.

II. 제안한 SIW 슬롯 Sub-Array 안테나 구조

제안한 SIW 모노폴스 안테나는 그림 1과 같이 3층의 PCB 적층 형태로 구현되었다. SIW 전송선로는 기존의 금속 도파관으로 등가화될 수 있으므로 편의상 그림 1에는 단순화하여 도시하였다. 유전율이 2.2인 PCB를 이용하였으며, 방사부 및 급전부 SIW를 비롯한 모든 SIW 전송선로를 구성하는 비아의 지름은 0.4 mm, 각 비아 간의 pitch-to-pitch 거리는 0.75 mm로써 Ka 밴드 내의 동작 중심 주파수인 35 GHz에서 기본 모드인 TE₁₀ 모드로 동작하도록 하였다. 또한, 커플링 슬롯을 통한 전력의 증간 이동에 있어

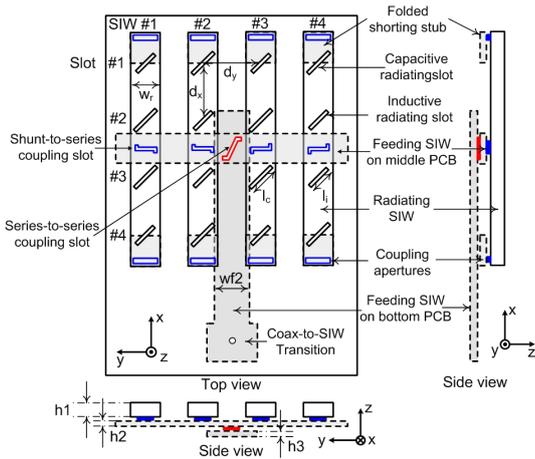


그림 1. 4×4 sub-array 평면 배열 안테나의 구조도(비야로 구성된 SIW 전송 선로는 보편적인 도파관 전송 선로로 대체하여 등가적으로 표시하였다.)

Fig. 1. The configuration of a 4×4 sub-array(SIW transmission lines that are consisted with metallic via arrays are replaced with equivalent conventional rectangular waveguides).

서 반사를 최소화하고 오차 없이 적층될 수 있도록 유전율이 2.35인 Taconic사의 접착 필름(adhesive film)을 이용하여 열 압착하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 Top PCB에는 45도 기울어진 16개의 슬롯이 일정한 간격으로 배열되는데, 4개씩의 방사 슬롯은 각각의 방사 SIW(radiating SIW)의 윗면 도체판에 식각되어 위치한다. 4개의 방사 SIW에 전력을 균일하게 전달하기 위해 바로 아래층인 middle PCB에는 병렬-직렬(shunt-to-series) 및 직렬-직렬(series-to-series) 커플링 슬롯이 존재한다. 가장 아래의 bottom PCB에는 측정을 위해 coax-to-SIW 천이 구조를 이용한 2.92 mm 커넥터가 부착된다. 각 PCB에 대한 구체적인 설계변수와 동작 원리에 대한 설명은 다음 3장에서 자세히 설명한다. 한편, 전체 구조의 각 PCB의 유전체 두께는 $h_1=1.575$ mm, $h_2=h_3=0.787$ mm이다.

Top PCB에 일정한 간격(d_y)으로 위치하고 있는 방사 SIW들은 수직인 방향으로 middle PCB에 있는 급전 SIW(feeding SIW)와 연결되어 있다. 단일의 급전 SIW와 4개의 방사 SIW들은 각각 병렬-직렬 커플링 슬롯을 통해서 각각 180도의 위상 차를 가지고 전력이 공급되는데, 이 커플링 슬롯들은 주어진 공통

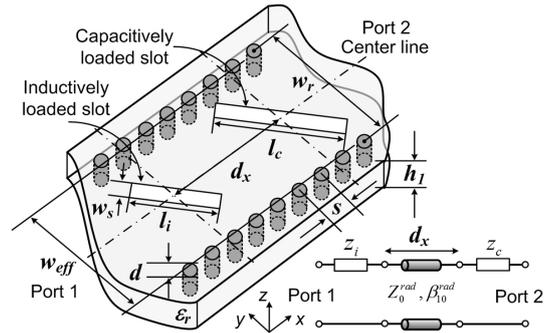


그림 2. 교차 리액턴스 슬롯 쌍 및 등가 회로^[11]

Fig. 2. The structure of an alternating reactance slot pair and its equivalent circuit with design parameters^[11].

면적 내에 위치할 수 있도록 꺾인 형태로 구현되었다. 마지막으로 middle PCB의 급전 SIW는 입력 포트로부터 신호를 전달받기 위해 그림 2와 같이 가장 아래층인 bottom layer의 급전 SIW와 직렬-직렬 커플링 슬롯으로 수직 접합된다. 아래 3-1절에서부터 3-4절까지 방사체의 설계를 비롯하여 커플링 슬롯을 포함한 급전부의 설계 및 동작 원리를 설명한다.

III. 45도 선형 편파 발생을 위한 방사부의 구조 및 동작 원리

3-1 방사 슬롯 및 방사 SIW 설계

교차 리액턴스 슬롯 쌍은 위의 그림 2와 같이 공진 길이를 가지는 슬롯보다 짧고(l_i) 긴(l_c) 길이로 구현되며, 각각 유도성(inductive) 및 용량성(capacitive) 자기 리액턴스가 직렬 연결된 방사체의 기본 단위이다^{[10],[11]}. 두 슬롯은 서로 방사 SIW의 관내 파장(λ_{gr})의 반 파장 간격으로 배치가 가능할 뿐만 아니라, 균일한 크기와 동위상에 가까운 전장을 방사한다. 또한, 임피던스 정합이 쉽고 방사 SIW의 길이 방향(x축)을 따라 배열되는 슬롯 간격에 의해 발생할 수 있는 zx 평면상의 grating lobe를 피할 수 있는 장점이 있다.

방사 SIW는 위의 그림 2와 같이 유전율이 2.2, 두께가 1.575 mm인 top PCB에 금속 배열 비아를 이용하여 구현하였다. 슬롯 간의 간격이 35 GHz에서 $0.8 \cdot \lambda_0$ 가 되도록 방사 SIW 폭(w_r)을 3.425 mm로 설정

하였고, 이에 해당하는 방사 SIW의 관내 파장(λ_{gr})은 13.7 mm로 계산된다. 그리고 교차 리액턴스 슬롯 쌍은 $6.85 \text{ mm}(=d_x=\lambda_{gr}/2)$ 간격으로 위치한다. 나아가 방사 SIW 간의 간격도 3.425 mm로 설정하여 y축으로의 슬롯 간격(d_y)이 d_x 와 일치하도록 하였다. 본 논문에서 사용된 방사 슬롯의 폭(w_s)는 0.4 mm이며, 유도성 및 용량성 리액턴스 슬롯의 길이는 각각 $l_s=2.9 \text{ mm}$, $l_c=3.6 \text{ mm}$ 이며, 모든 슬롯의 모서리는 직각으로 모델링되었다.

3-2 접힌 단락 스텝 구조

그림 1과 같은 여러 sub-array들이 $\pm x$ 방향으로 나열하여 큰 배열 안테나를 형성할 경우 방사 효율 측면에서 모든 방사 슬롯들은 균일한 간격으로 배열될 필요가 있다. 하지만 일반적으로 직렬 슬롯 배열 안테나의 마지막 슬롯(그림 1에서 각 방사 SIW들의 슬롯 #1과 #4)은 그림 3(a)와 같이 관내 파장의 반 파장 전송 선로 길이의 단락 스텝(short-circuited stub)으로 종단(termination)된다. 이때 최외각 방사 슬롯 간의 거리는 $1.6 \cdot \lambda_0$ 가 되어 방사 패턴의 부엽 레벨이 크게 증가하며, 방사 효율의 저하를 초래한다. 이러한 단점을 해결하고 균일한 슬롯 간격을 유지하기 위해 본 논문에서는 아래의 그림 3(b)와 같이 접힌 단락

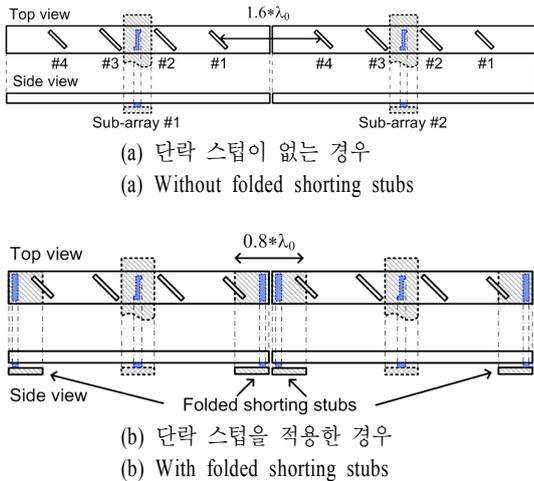


그림 3. 두 개의 sub-array가 나열될 경우, 단락 스텝의 적용 유무에 따른 최외각 슬롯간의 간격 변화
Fig. 3. The configuration of the arrangement for two sub-arrays.

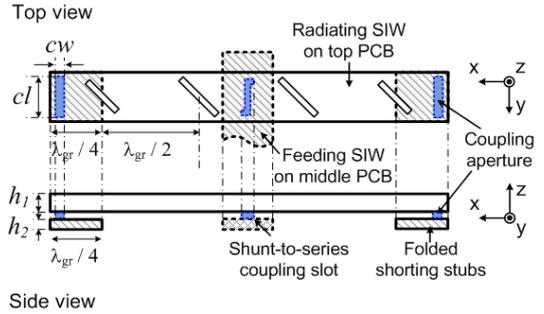


그림 4. 접힌 단락 스텝을 구성하는 커플링 개구면과 병렬-직렬 커플링 슬롯의 정면도 및 측면도
Fig. 4. The top and side view of two shorting stub structures and a shunt-to-series coupling slot that are located between a top PCB of a radiating SIW and a middle PCB of feeding SIW.

스텝 구조를 이용하여 sub-array들이 이웃하여 배열 되더라도 “slot free region”이 형성되지 않도록 하였다. 전기적으로 동일한 임피던스 특성을 가지도록 커플링 개구면을 그림 4와 같이 top PCB와 middle PCB 사이의 금속판에 위치시켰다. 그리고 중심 주파수인 35 GHz에서 최소한의 반사 손실을 가지도록 길이(cl)와 폭(cw), 그리고 슬롯의 위치를 결정한다. 이때 커플링 슬롯 내부에 존재하는 접착 필름의 유전율 2.35를 고려할 때 슬롯의 길이인 2.9 mm는 35 GHz에서 반 파장의 길이에 해당된다.

3-3 병렬-직렬 슬롯을 이용한 접합부 설계

도파관 혹은 SIW 전송 선로를 이용하여 급전부를 설계할 때 수직으로 교차하는 전송 선로의 접합은 주로 커플링 슬롯을 통해 주로 이루어진다. 전송 선로의 중심선을 기준으로 커플링 슬롯의 회전각 및 놓인 위치에 따라 직렬 혹은 병렬 연결된 등가 회로로 표현이 가능하다^[13]. 본 논문에서 제안한 4x4 sub-array는 그림 4에 나타난 바와 같이 middle PCB에 존재하는 급전 SIW로부터 top PCB의 각 방사 SIW로 병렬-직렬 커플링 슬롯을 통해 전력이 분배된다. 급전 SIW에서 커플링 슬롯을 비롯한 방사 SIW는 병렬 연결된 어드미턴스(admittance)로 보이기 때문에 직렬-직렬 커플링 슬롯과는 다르게 그림 5와 같이 개방 회로(open-circuited) 스텝으로 종단된다. 즉, 1/4배의 관내파장($\lambda_{gr}/4$) 길이만 있으면 개방

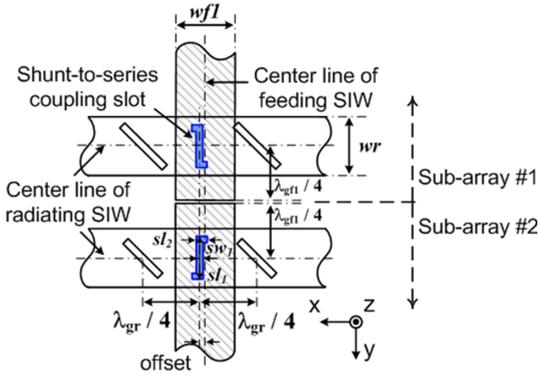


그림 5. 병렬-직렬 커플링 슬롯의 구조 및 설계 변수
Fig. 5. The configuration and design parameters of shunt-to-series coupling slots between a radiating SIW and a feeding SIW.

회로 구현이 가능하여 sub-array가 y축으로 나열될 경우 각 sub-array간의 간격을 λ_0 이내로 줄일 수 있어 sub-array가 이웃해도 개별 방사 슬롯 간의 간격을 일정하게 유지시킬 수 있다.

커플링 되는 양은 그림 5에 제시된 바와 같이 커플링 슬롯이 feeding SIW의 중심선에서부터 떨어진 이격 거리(offset)에 비례하고, 동작 주파수는 커플링 슬롯의 길이(sl_1, sl_2)에 의해 결정된다. 한편, 두 SIW 선로가 교차하는 공통의 사각 면적이 좁아 커플링 슬롯을 꺾어 위치시켰다.

3-4 직렬-직렬 슬롯을 이용한 접합부 설계

직렬-직렬 커플링 슬롯은 middle PCB와 bottom PCB에 있는 급전 SIW 간의 교차 접합 부분에 적용되며, 병렬-직렬 커플링 슬롯과는 다르게 직렬-직렬

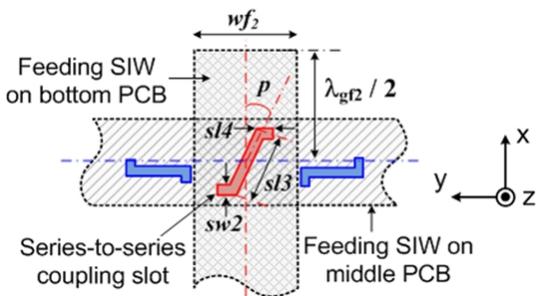


그림 6. 직렬-직렬 커플링 슬롯의 구조 및 설계 변수
Fig. 6. The configuration and design parameters of a series-to-series coupling slot between two feeding SIWs.

표 1. Sub-array의 설계 변수 및 설계 값(단위: mm)
Table 1. The design parameters and optimized values for sub-array antenna(unit: mm).

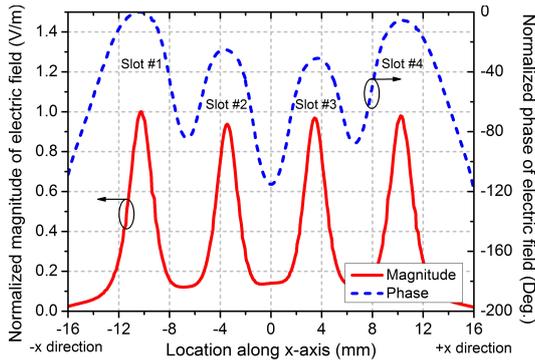
SIW transmission line	d	0.4	s	0.75
Radiating slots and radiating SIW	cl	2.9	cw	0.4
	h_1	1.575	l_i	2.9
	l_c	3.6	λ_g	13.7
	w_r	3.425	w_s	0.4
Coupling slots and feeding SIW	$h_2=h_3$	0.787	λ_{gf1}	13.7
	λ_{gh2}	4	p	25°
	sl_1	2.5	sl_2	0.6
	sl_3	2.8	sl_4	0.7
	sw_1	0.3	sw_2	0.4
	wf_1	3.425	wf_2	4

커플링 슬롯은 각 SIW 선로에 있어 직렬로 연결된 임피던스로 등가화된다. 그러므로 bottom PCB에 있는 급전 SIW는 관내 파장의 반 파장($\lambda_{gf}/2$) 길이 스텝의 단락 회로로 종단하였다. 직렬-직렬 커플링 슬롯의 경우, 커플링 양의 조절은 슬롯의 회전각(p)으로 결정되며, 공진 주파수는 길이 성분(sl_3, sl_4)으로 조절한다^[11]. 표 1에는 제안된 45도 선형 편파 발생용 4x4 sub-array에 대한 설계 변수 및 최적화된 값을 각 부분에 따라 구분하여 정리하였다.

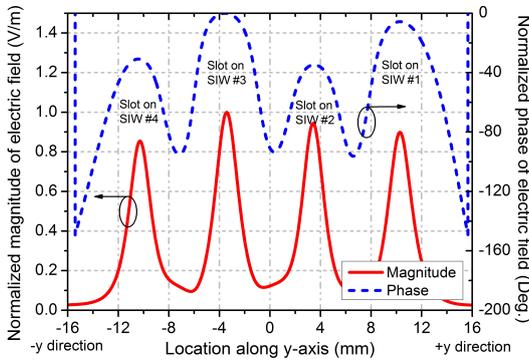
IV. Sub-Array의 시뮬레이션 및 측정 결과

천이 구조에 의한 방사 패턴의 왜곡을 최소화하기 위해 제안된 sub-array는 그림 1과 같이 coax-to-SIW 천이 구조에 의해 급전된다. 천이 구조를 포함한 전체 배열 안테나 구조는 표 1의 최적화된 설계 변수값을 토대로 모델링되었고, CST MWS로 전기적인 특성을 확인하였다^[14].

먼저 4x4 sub-array의 개구면에 균일한 전장분포를 형성하기 위해 결정된 슬롯에서 유도되는 45도 전장의 크기 및 위상을 확인하였다. 방사 SIW의 길이 방향으로의 전장분포는 그림 1의 SIW #2에 존재하는 4개의 슬롯을 통해 확인하였고, 방사 SIW의 수직방향으로 생성된 전장분포는 4개의 방사 SIW 각각의 슬롯 #3을 통해 검증하였다. 그림 7(a)는 방사 SIW의 길이 방향에 대한 전장분포로써 45도 전장의 크기 균일도(최소값/최대값)는 0.95 이상으로 매우 균일한 특성을 보인다. 또한, 유도성 및 용량성 임피



(a) 2번째 방사 SIW의 4개 방사 슬롯에 대한 결과
(a) For the radiating slots on second radiating SIW in Fig. 2



(b) 각 방사 SIW의 3번째 방사 슬롯들에 대한 결과
(b) For the third radiating slots on each radiating SIWs

그림 7. 방사 슬롯에 발생된 45도 전장의 크기 및 위상분포 시뮬레이션 결과
Fig. 7. The 45°-inclined electric field distribution with respect to the magnitude and phase.

던스의 방사 슬롯 간의 위상 차는 최대 30° 차로써 비교적 동위상의 전장이 발생되고 있음을 확인하였다. 비슷한 방법으로 방사 SIW의 방향과 수직인 방향에 대한 전장 분포는 그림 7(b)와 같이 확인된다. 전장의 크기 및 위상으로 확인한 결과, 0.85 이상의 크기 균일도와 34.75° 이내의 전장 위상 편차를 보인다. 위의 결과를 토대로 4×4 sub-array의 개구면은 45도 전장이 균일하게 방사되고 있음을 알 수 있다.

제작된 배열 안테나의 반사계수는 위의 그림 8과 같다. 시뮬레이션 된 안테나의 반사계수는 -10 dB 기준으로 34.74~35.2 GHz로 460 MHz의 대역폭 특성을 보인다. 또한, 그림 9와 같이 제작된 안테나의 측정된 임피던스 대역폭은 34.89~35.38 GHz(490

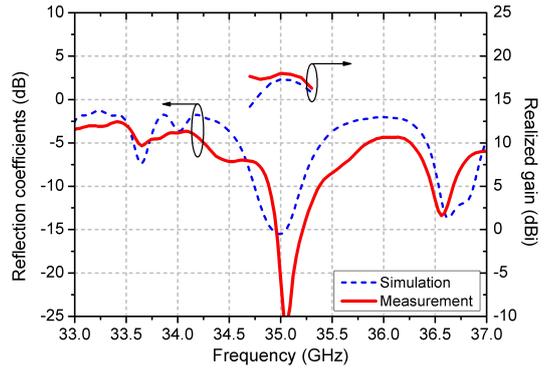


그림 8. 4×4 sub-array의 임피던스 대역폭 및 이득
Fig. 8. The simulated and measured results of the impedance bandwidth and realized gain for a 4 by 4 sub-array antenna.

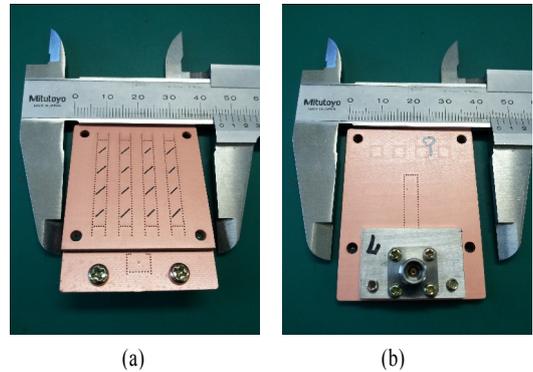


그림 9. 4×4 sub-array의 임피던스 대역폭 및 이득
Fig. 9. The simulated and measured results of the impedance bandwidth and realized gain for a 4 by 4 sub-array antenna.

MHz)로써 시뮬레이션과 잘 부합한다. 한편, 제작된 안테나의 전체 크기는 39.0×50.0 mm²이며, 개구면의 면적은 $(d_x \times N_x) \times (d_y \times N_y) = 750.76 \text{ mm}^2$ 이다. 여기서 d_x 와 d_y 는 각 슬롯의 좌표에 따른 이격 거리이며, N_x 와 N_y 는 좌표에 따른 슬롯의 배열 개수를 의미한다. 안테나의 중심주파수인 35 GHz에서 측정된 안테나의 방사 패턴 결과는 그림 10에 제시되었다. 시뮬레이션 결과와 유사한 패턴 형상을 확인할 수 있었으며, 균일한 45도 전장이 방사되므로 zx 및 yz 평면에서 패턴의 대칭성을 유지하고 있다. 각 평면에서의 측정된 부엽 레벨은 각각 -11.0 dB 및 -10.34 dB로 확인되었다. 한편, bore-sight에서의 동일 편파(co-pol.)와 교차 편파(cross-pol.)의 차는 모두 -18.55 dB, -20.16

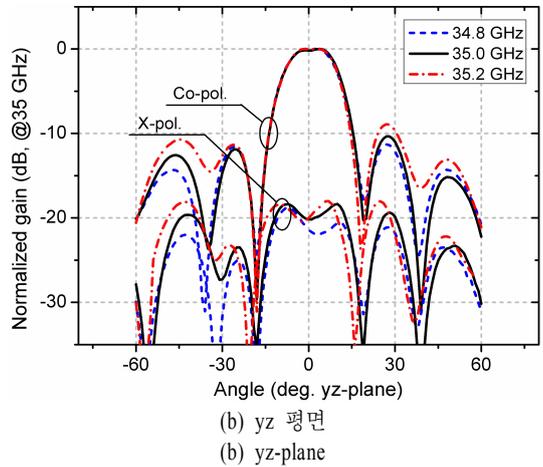
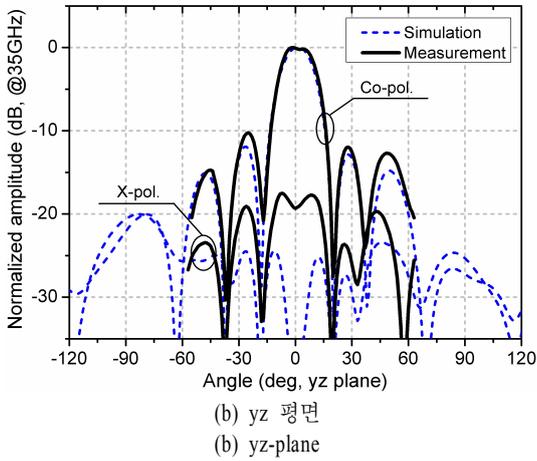
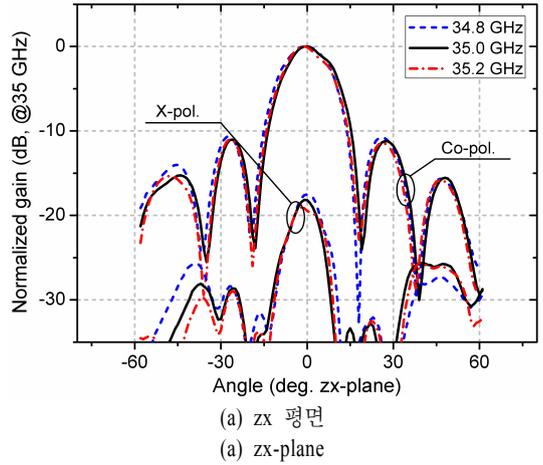
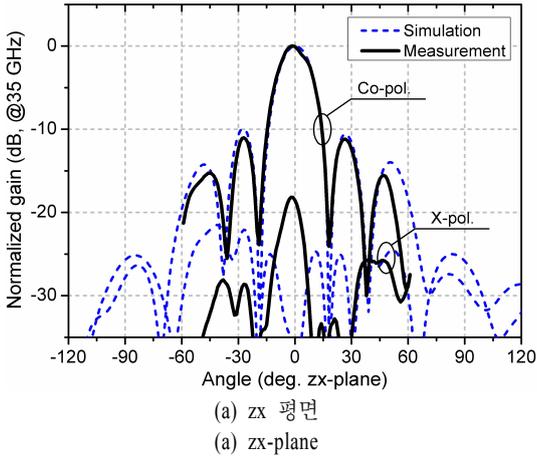


그림 10. 35 GHz에서 발생된 45° 선형 편파에 대한 측정된 방사 패턴
Fig. 10. The measured radiation patterns for 45°-inclined linear polarization.

그림 11. 주파수에 따른 안테나 방사 패턴
Fig. 11. The measured radiation patterns with respect to the frequency.

dB로서 시뮬레이션과 차이를 보인다. 이는 측정 시 안테나 자세 고정을 위해 추가된 금속 구조물 등 주변의 산란에 의한 것으로 추정된다.

하고 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

제안된 sub-array 배열 안테나의 이득은 위의 그림 8에서와 같이 중심 주파수에서 최대 이득인 18.02 dBi가 측정되었다. 마찬가지로 시뮬레이션과 유사한 주파수 특성을 확인하였으며, 이때 sub-array의 면적을 고려한 개구면 효율은 49.35 %로 고효율 특성을 보인다. 한편, 34.8, 35.0, 35.2 GHz의 주파수에 따른 방사 패턴 결과를 그림 11에 제시하였다. 동작 주파수 대역 내에서 제안한 sub-array 배열 안테나는 안정된 방사 패턴으로 순도 높은 45도 선형 편파를 방사

본 논문에서는 Ka 밴드 35 GHz 용 SIW sub-array 배열 안테나를 제안하였다. 45도 선형 편파를 발생시키는 직렬 방사 슬롯의 평면 배열로 방사부가 구성되며, SIW 전송 선로를 이용한 적층 형태의 구조를 구현함으로써 방사부 및 급전부가 동일 면적 내에 집적이 가능한 소형, 경량의 안테나를 구현할 수 있다. 개구면에 유도된 전장 분포를 크기 및 위상에 따라 확인한 결과, 매우 높은 정도의 균일도 및 정확한 위상 분포를 보이고 있었다. 나아가 중심 주파수

에서 최대 18.02 dBi의 이득, 최대 -20.16 dB의 교차 편파 특성으로 순도 높은 45도 선형 편파가 발생하는 패턴의 특성을 얻었다. 해당되는 주파수에서의 안테나 효율은 49.35 %로 높은 효율을 가지며 동작 주파수 대역 내에서 안정된 방사 패턴을 확보할 수 있었다. 본 연구는 광대역 특성을 위한 거대 배열 안테나 설계에의 응용 및 이중 편파 발생용 SIW 모노 펄스 안테나 개발에 응용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. S. Elliott, "An improved design procedure for small arrays of shunt slots", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-31, no. 1, pp. 48-53, Jan. 1983.
- [2] M. Orefice, R. S. Elliott, "Design of waveguide-fed series slot arrays", *IEE Proc.*, vol. 129, pp. 165-169, Aug. 1982, Dt. H.
- [3] H. Wang, D. -G. Fang, and X. G. Chen, "A compact single layer monopulse microstrip antenna array", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 503-509, Feb. 2006.
- [4] Z. -W. Yu, G. -M. Wang, and C. -X. Zhang, "A broadband planar monopulse antenna array of C-band", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1325-1328, 2009.
- [5] Y. Hayashi, K. Sakakibara, M. Nanjo, S. Sugawa, N. Kikuma, and H. Hirayama, "Millimeter-wave microstrip comb-line antenna using reflection-canceling slit structure", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 2, pp. 398-406, Feb. 2011.
- [6] D. Kim, J. W. Lee, T. K. Lee, and C. S. Cho, "Design of SIW cavity-backed circular-polarized antennas using two different feeding transitions", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 4, pp. 1398-1403, Apr. 2011.
- [7] L. Yan, W. Hong, G. Hua, K. Chen, K. Wu, and T. J. Cui, "Simulation and experiment on SIW slot array antennas", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 446-448, 2004.
- [8] B. Liu, W. Hong, Z. Kuai, X. Yin, G. Luo, J. Chen, H. Tang, and K. Wu, "Substrate integrated waveguide(SIW) monopulse slot antenna array", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 1, pp. 275-279, Jan. 2009.
- [9] Y. J. Cheng, W. Hong, and K. Wu, "94 GHz substrate integrated monopulse antenna array", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 1, pp. 121-129, Jan. 2012.
- [10] D. Kim, W. Chung, C. Park, S. Lee, and S. Nam, "Design of a 45°-inclined SIW resonant series slot array antenna for Ka band", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 318-321, 2011.
- [11] D. Kim, W. Chung, C. Park, S. Lee, and S. Nam, "A series slot array antenna for 45°-inclined linear polarization with SIW technology", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 4, pp. 1785-1795, Apr. 2012.
- [12] M. Ando, Y. Tsunemitsu, M. Zhang, J. Hirokawa, and S. Jujii, "Reduction of long line effects in single-layer slotted waveguide arrays with an embedded partially corporate feed", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 7, pp. 2275-2280, Jul. 2010.
- [13] A. F. Stevenson, "Theory of slots in rectangular waveguides", *J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 24-38, Jan. 1948.
- [14] CST Microwave Studio(MWS) CST Corporation, 2012 [Online]. Available: <http://www.cst.com>

김 동 연



2007년 2월: 한국항공대학교 항공
전자공학과 (공학사)
2009년 8월: 한국항공대학교 항공
전자공학과 (공학석사)
2010년 3월~현재: 서울대학교 전
기·컴퓨터공학부 박사과정
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리

미터파 안테나 설계 및 해석

남 상 욱



1981년 2월: 서울대학교 전자공학
과 (공학사)
1983년 2월: 한국과학기술원 전자공
학과 (공학석사)
1989년: Electrical Engineering at the
University of Texas at Austin (공
학박사)

1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수
[주 관심분야] 마이크로파 능동/수동 회로 설계, 안테나
및 전파전파, 전자파 수치 해석 등