# 무선통신 백-홀용 V-밴드 도파관 슬롯 서브-배열 안테나의 설계

노광현<sup>1\*</sup>, 강영진<sup>2</sup> <sup>1</sup>엠.에이치 기술연구소, <sup>2</sup>원광대학교 전자공학과

## Design of V-Band Waveguide Slot Sub-Array Antenna for Wireless Communication Back-haul

## Kwang-Hyun Noh<sup>1\*</sup>, Young-Jin Kang<sup>2</sup> <sup>1</sup>Institute of Technology, M.H, Co. <sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Wonkwang University

**요 약** 본 논문은 고 용량, Gbps급 데이터 전송을 만족하는 무선 백-홀 시스템에 적용하기 위한 도파관 개구 결합 급전 구조 안테나에 관한 내용으로 V-대역인 57GHz~66GHz 주파수 대역에서 사용 할 공동-급전 구조를 갖는 32×32 도파관 슬롯 서브-배열 안테나를 설계, 제작 하였다. 안테나 구성은 적층 형태로 되어있으며, 각각 복사 부(외부 홈과 슬롯, 캐비티), 개구 결합 부, 급전 부로 이루어져 있다. 안테나 설계는 3차원 유한 요소 법(FEM)을 기반으로 하는 HFSS를 이용 하였고, 안테나 제작은 알루미늄 재질로 정밀도 높은 밀링 머신을 사용하여 각 층을 가공 한 후 은(Ag)-도금 과정을 거쳐 조립하였다. 측정을 통해서 안테나의 특성을 분석한 결과 목표했던 적용 주파수 대역에서의 반사 손실은 전반적으로 -12dB이하 손실 특성을 나 타냈으며, VSWR < 2.0기준으로 약 16 %에 달하는 광 대역 주파수 특성을 보였다. 측정된 안테나 복사패턴의 1차 부엽 레벨 은 -12.3 dB미만 이고, 3 dB 빔 폭은 약 1.85° 로 좁은 빔 폭을 갖는다. 또한, 안테나 이득은 평균 38.5 dBi이상, 효율은 약 90% 이상으로 높은 효율을 얻었다.

**Abstract** In this paper, the study of a waveguide aperture-coupled feed-structured antenna has been conducted for the purpose of applying it to a wireless back-haul system sufficient for high-capacity gigabits-per-second data rates. For this study, a 32x32 waveguide slot sub-array antenna with a corporate-feed structure was designed and produced. Also, this antenna is used at 57 GHz to 66 GHz in the V-band. The construction of the antenna is a laminated form with radiating parts (outer groove and slot, cavity), a coupled aperture, and feeds in each. The antenna was designed with HFSS, which is based on 3D-FEM, produced with aluminum processed by a precision-controlled milling machine, and assembled after a silver-plating process. The measurement result from analysis of the characteristics of the antenna shows that return loss is less than -12 dB, VSWR < 2.0, and a wide bandwidth ranges up to 16%. An overall first side lobe level is less than -12.3 dB, and a 3 dB beam width is narrow at about 1.85°. Also, antenna gain is 38.5 dBi, offering high efficiency exceeding 90%.

Keywords : Corporate-feed, High-gain & efficiency, Wide bandwidth, Waveguide slot sub-array antenna, V-band Wireless back-haul.

<sup>\*</sup>Corresponding Author : Kwang-Hyun Noh (M.H, Co.) Tel: +82-31-342-0757 email: khantenna@naver.com

## 1. 서론

모바일 트래픽이 해마다 큰 폭으로 증가하고 있는 가 운데 차세대 5G 시스템은 4G LTE 시스템의 용량 대비 약 1,000배 이상의 용량 증대 및 Gbps급 고속 데이터 전 송속도를 목표로 하고 있다. 또한 5G 시스템은 현재 보 다 더욱 세밀 화 된 셀 분할에 의한 스몰 셀 기지국의 수 가 기하급수적으로 증가할 것으로 예상되는데, 기존 방 식과 같이 이러한 기지국들을 모두 광케이블을 이용한 유선 인터페이스로 연결하는 것은 많은 비용부담과 설치 시간을 야기 시키므로 유선 보다는 무선 백·흘 (Back-haul)망 시스템 구축에 대해 큰 관심을 보이고 있 다.

무선 백-홀 망을 구축할 시에 기존의 고정 형 뿐 아니 라 이동 형 기지국 운용이 가능하기 때문에 급증하는 트 래픽 수요에 더욱 유동적으로 대응이 가능하다.

무선 백-홀 망을 통해 대 용량, 고속의 데이터 정보를 고 품질로 보내기 위해서는 넓은 대역폭을 갖는 주파수 채널이 필요한데, 간섭 및 보안성, 주파수 재사용이 용이 한 밀리미터파 대역(30 GHz~300 GHz) 활용이 효과적 인 방안이 될 수 있다[1,2]. 밀리미터파 대역 중에서 V-밴드에 속한 60 GHz 대역 무선기기를 개발 하려는 시도 들이 급증하고 있는데, 이 주파수 대역이 "미인가 주파 수 대역"으로 할당되어 주파수 사용에 대한 비용 지불이 없다는 것과 대역폭이 무려 57 GHz ~ 66 GHz에 걸쳐 9 GHz로 복잡하고, 고가인 모뎀을 사용하여 데이터를 압축하지 않더라도 간단한 변복조 장치로 Gbps급 데이 터 전송이 가능하다는 장점이 있다[3,4].

다만, 고려해야 될 점은 자유공간에서 산소 및 강우에 의해 발생되는 손실을 극복하기 위해, 보다 높은 이득과 효율성을 갖는 안테나가 필요하다는 점이다[5]. 실제 데 이터 링크 시스템에서 안테나는 높은 이득을 유지하면서 소형, 경량 및 저 비용의 광 대역 안테나를 요구하고 있 으며, 이러한 조건을 만족시키기 위해 현재에도 많은 연 구개발이 이루어지고 있다[6,7].

본 논문에서는 이러한 배경을 기반으로 V-밴드인 60 GHz 대역의 무선 백-홀 시스템에 적용할 공동-급전 (Corporate-feed)방식의 적층 형 도파관 슬롯 서브-배열 안테나를 설계, 제작하여 그 특성을 확인 하였다.

일반적으로 도파관 슬롯 배열 안테나는 기존 마이크 로스트립 급전 망 배열 안테나의 급전선 복사로 인한 손 실 및 안테나의 물리적 크기를 극복하여, 보다 많은 복사 소자를 배치 할 수 있는 크기와 높은 이득 특성을 구현 하는데 유리하다[8]. 그러나 기존 직렬 급전 형태의 도파 관 안테나의 경우 긴 라인-효과(Line-effect)에 의한 협 대역 특성과 배열 크기가 커지는 문제가 발생 된다[9]. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 공동-급전 구조를 적 용 하였고 이 급전 구조는 4개의 서브-배열(Sub-Array) 형태로 분할되면서 긴 라인 급전으로 인한 효과를 분산 시킬 수 있다. 또한 자유공간에서의 파장보다 작은 복사 슬롯을 적용하여 안테나 배열시 슬롯 간 간격을 최적화 시켜 Grating-lobe를 억제시킴과 동시에 외부 홈(Outer Groove)을 이용해 복사 슬롯 간 상호 결합(Mutual-Coupling) 영향을 낮출 수 있도록 하고, 혼 안테나와 같은 역할을 하여 높은 이득을 얻을 수 있도록 하였다.

먼저, 본 논문의 2 장에서는 제안된 안테나 구조에 대 해 살펴보고, 3 장에서는 안테나를 구성하는 각 요소들 에 대한 설명과 함께 제안한 안테나의 설계 Parameter 및 특성을 확인한다. 4 장에서는 57 GHz ~ 66 GHz대 역에 적용할 32×32 도파관 슬롯 서브-배열 안테나의 제 작 및 측정 결과로부터 얻은 안테나 특성에 대해 설명한 다. 5 장은 결론으로써 제안된 안테나의 전반적인 특성 을 서술한다.

## 2. 적층 형 도파관 슬롯 안테나 구성

#### 2.1 도파관 서브-배열 안테나 구조

제안된 안테나의 기본구성은 그림 1과 같이 1개의 결 합 개구 면을 통해 4개의 복사 슬롯을 여기 시키는 서브-배열(Sub-Array) 구조를 갖는다.



Fig. 1. Antenna configuration of 2×2-element array antenna with the outer groove.

외부 홈(Outer Groove)을 포함한 복사 슬롯들은 0.84 λ 간격을 두고 x, y 방향으로 배치되며, 외부 홈은 복사 슬롯 간 상호 결합 효과를 조정하기 위해 적용된다. 이는 각각의 슬롯들이 상호 결합(Mutual Coupling)을 최소화 하면서 복사 특성을 유지 할 수 있도록 해준다.

그림 2의 안테나 구성은 크게 3개 층으로 구분 할 수 있는데, 상층부 앞면은 외부 홈과 복사 슬롯으로 구성되 고, 뒷면은 서브 배열을 위한 캐비티(Cavity)로 구성된 다.



Fig. 2. Exploded perspective view of 2×2-element sub-array with the outer groove.

중간층은 결합 개구 면으로서 상층부 뒷면 캐비티 중 앙에 위치하는데 캐비티에 강한 공진을 발생시키기 위해 서는 하층부의 급전 도파관과 중간층의 결합 개구 면간 의 위치를 최적화하여 배치시켜야 한다. 그리고 중간층 뒷면의 결합 개구 면을 스텝형태로 하여 하층부 급전 도 파관과의 임피던스 매칭이 되도록 하였다. 하층부는 H-평면 급전 도파관으로 구성되어 있으며, 안테나 배열시 H-junction을 갖는 공동 -급전 망을 통해서 각 복사 슬롯 에 동 위상 동일 진폭의 신호가 균일하게 공급되도록 한 다.

#### 2.2 공동-급전(Corporate-feed) 망 구성

그림 3은 32×32 도파관 슬롯 서브-배열 안테나에 적 용한 공동-급전(Corporate-feed) 망을 나타낸 것으로 16×16 way 급전 형태를 갖으며, T-junction과 이를 결합 한 H-junction 으로 구성된다. 그리고 안테나의 원 신호 급전을 위한 WR-15 기준 도파관과 공동-급전 도파관은 E-bend 형태로 연결되며, 감쇄를 최소화 하기위해 코너 절단(Corner-cut)을 하였다.



Fig. 3. 16×16way Full-corporate-feeding network.

## 3. 슬롯 서브-배열 안테나 설계

#### 3.1 급전 망 구성 요소 설계 및 특성

배열 안테나의 낮은 반사손실과 광 대역 특성을 얻기 위해서는 공동-급전 도파관을 구성하는 각 요소들을 별 도로 설계하여 반사 손실 대역이 확장 되도록 해야 한다. T-junction의 매칭 특성을 향상시키기 위해 여러 형태

의 요소들이 삽입될 수 있는데 이중 그림 4와 같이 Septum과 한 쌍의 Iris를 이용한 매칭 방법이 널리 사용 되고 있다[10,11].



Fig. 4. H-Plane T-junction / H-junction (with septum & iris).

전력 분배를 위해 Septum은 중요한 역할을 하는데 Septum의 위치에 따라 균등 혹은 비 균등 전력분배가 가능하다. 본 논문에서는 T-junction 중앙에 위치시켜 균 등 분배 하였으며, Iris는 임피던스 매칭을 원활하게 하 여 동작주파수 내에서 최소 반사 손실 특성을 얻는데 영 향을 미친다. 그림 3에서와 같이 많은 수의 복사 소자에 균등한 전력을 공급하기 위해서 T-junction을 결합한 H-junction 배열을 적용하여 공동-급전 망을 구성하였다.

표 1에는 T-junction 및 H-junction의 설계 매개변수 를 나타내었으며, 시뮬레이션을 통해 최적화 시킨 수치 이다.

Design		Size (mm)	
T -junction	SL	1.2	
	Sw	0.4	
	IL	0.2	
	Iw	0.2	
H -junction	HL	5.7	
	HW	2.9	
	HS	5.1	
Waveguide Height		1.3	

Table 1. Design parameters of T-junction and H-junction.

그림 5는 각 각의 급전 요소들에 대한 반사손실 특성 을 나타내었다. 여기서 전체 공동-급전 망의 반사손실은 넓은 대역에서 -14 dB이하의 손실 특성을 갖으며 Ripple 은 급전 부의 배열 확장 과정에서 반사파의 영향으로 발 생된다.



Fig. 5. Return-loss(S11) at each feeding elements.

#### 3.2 2×2 슬롯 서브-배열 설계 및 특성

2×2 도파관 슬롯 서브-배열은 제안된 안테나의 단일 Unit이다. 그림 6은 급전 도파로의 주파수에 따른 반사 손실을 분석하기 위한 모델로서 무한 2차원 평면 배열에 서의 각 복사 소자 간 상호 결합 효과를 확인하기 위해 주기적인 경계 벽을 설정하였다. 안테나 설계 주파수는 57 GHz~66 GHz 대역을 만족할 수 있도록 중심 주파 수를 62 GHz로 하였으며 외부 홈을 포함한 슬롯 간격은 0.84λ로 고정하였고, 설계 및 시뮬레이션은 3차원 유한 요소법을 기반으로 하는 HFSS를 사용하여 진행하였다. 급전 도파관에서 TE10 모드 자계 필드는 결합 개구 면 에서 y 방향으로 주로 형성되어 캐비티를 통해 각 각의 슬롯에도 균일하게 적용된다. 안테나 설계 매개변수는 그림 6에서와 같이 외부 홈 길이 Lg와 폭 Wg, 복사 슬 롯 길이 Ls와 폭 Ws, 스탭 형태의 결합 개구 면 크기 등 을 나타낸다. 자세한 설계 매개변수는 표 2에 기입 하였 으며, 2×2 단일 Unit에 대한 반사 손실 및 이득 특성은 그림 7에 나타 내었다.



Fig. 6. Analysis model of the 2×2 element sub-array.

 Table 2. Design parameters of waveguide slot antenna with the outer groove.

Design	Size (mm)		
Radiation	Slot (Ws×Ls×Hs)	1.2×3.2×0.5	
elements	Groove (Wg×Lg×Hg)	2.4×3.2×1.5	
Middle cavity	Cavity (W×L×H)	5.2×7.2×1.0	
Coupling	Top (Wa×La×Ha)	1.1×3.1×2.0	
Aperture	Step (Wf×Lf×Hf)	1.1×3.6×1.0	
Slot spacing	4.0		
Width of wall	0.8		
Total antenna	32×32 array (W×L×H)	140×142×9.0	



Fig. 7. Return-loss (S11) & radiation pattern of 2×2 element sub-array antenna.

외부 홈이 있는 단일 Unit은 시뮬레이션 결과 57 GHz ~ 66 GHz 적용 주파수 대역에서 -15.5 dB ~ -23.2 dB의 반사손실을 나타내고, 안테나 이득은 62 GHz에서 14.58 dBi이며 VSWR < 1.5 기준으로 약 14.6 %의 넓은 대역폭 특성을 가진다.

#### 3.3 32×32 슬롯 서브-배열 설계 및 특성

이러한 단일 Unit을 기반으로 하여 그림 8과 같이 32×32 도파관 슬롯 서브-배열 안테나를 최종 설계 하였 으며 균일한 두께를 갖는 3개의 층으로 구성된다.

그림 9는 설계된 32×32 도파관 슬롯 서브-배열 안테 나의 반사손실로 적용 주파수 대역 내에서 -12 dB 이하 의 손실을 보이며 VSWR < 2.0에서 약 17 %의 광 대역 특성을 나타낸다. Ripple은 그림 5에서처럼 32×32 배열 안테나에 적용된 공동-급전 망이 확장 되면서 발생됨을 알 수 있다. 그림 10은 계산된 안테나 이득을 나타내며, 적용 주파수 대역 내에서 평균 39 dBi의 높은 이득을 보 여준다. 이는 외부 홈을 포함한 복사 슬롯 구조를 적용하 여 이득을 향상 시키고자 하는 설계 의도와 일치한다. 그 림 11은 각 56 GHz, 62 GHz, 66 GHz에서의 E-plane, H-plane 안테나 복사패턴을 나타낸다. 62 GHz의 E-plane 패턴에서 3 dB 빔 폭은 약 1.8°로 매우 좁은 빔 폭을 갖으며 1차 부엽 레벨은 각 각 -12.8 dB (E-plane), -13.2 dB (H-plane)로 나타났다.



Fig. 8. Designed of the  $32 \times 32$  element sub-array antenna with the outer groove.



Fig. 9. Calculated reflection of the  $32 \times 32$  element sub-array antenna with the outer groove.



Fig. 10. Calculated gain of the 32×32 element sub-array antenna with the outer groove.



(a) E-plane : 57 GHz/ 62 GHz/ 66 GHz



(b) H-plane : 57 GHz/ 62 GHz/ 66 GHz

Fig. 11. Calculated radiation pattern of the 32×32 element sub-array antenna with the outer groove.

## 4. 안테나 제작 및 측정 결과

#### 4.1 32×32 슬롯 서브-배열 안테나 제작

일반적으로 40 GHz 이상 대역의 다층 구조 도파관 안테나를 밀렁이나 다이케스팅 기술로 제작할 때 가공 오차 및 층간 접합이 완벽하게 이루어지지 않아 낮은 효 율과 협 대역 특성을 보일 수 있다. 이러한 단점을 보안 하기 위해 기존에 발표된 확산접합방식으로 제작한 다층 도파관 안테나들은 얇은 동판에 급전 도파로와 복사 슬 롯을 각 각 에칭하여 수십 겹으로 적층시킨 후 진공 상 태에서 고온, 고압으로 금속 원자를 이동시켜 접합 하는 방법으로 안테나를 제작하였다[12,13]. 이 안테나들은 높은 밀리미터파 대역에서도 광 대역, 고 효율 특성을 갖 지만 에칭 오차와 다수의 동판 층이 쌓이면서 발생하는 층간 오차가 발생할 수 있고, 높은 비용과 함께 제작 공 정이 복잡하여 양산에 어려움이 있다.

본 논문에서는 기존 밀링 제작 방식에서의 단점을 고 려하여 안테나 층 구성을 최소화 하였고, 정밀 윔 기어와 열 변형 보상 알고리즘이 적용된 CNC (Computer Numerical Control) 마이크로 밀링 머신을 사용 하여 가공 오차를 줄일 수 있도록 하였다.

가공 후 안테나 각 층 별로 은(Ag)-도금을 통해 최대 한 삽입손실을 줄이고, 층간 접합은 박막형태의 은-전도 성 에폭시 필름을 사용하였다.

그림 12는 실제 제작된 32×32 도파관 슬롯 서브- 배 열 안테나사진 이며, 재질은 알루미늄 이다.



Fig. 12. Photograph of 32×32 element sub-array antenna.

#### 4.2 32×32 슬롯 서브-배열 안테나 측정

그림 13은 제작된 32×32 도파관 슬롯 서브-배열 안테 나의 반사손실을 보여준다. 전반적으로 적용 주파수 대 역 내에서 약 -12 dB 이하의 손실을 가지며, VSWR < 2.0 에서의 대역폭은 16.3 % (56 GHz ~ 66 GHz)로 계 산된 반사 대역폭과 유사한 광 대역 특성을 가진다.



Fig. 13. Measured reflection of the 32×32 element sub-array antenna with the outer groove.

표준 혼 안테나가 있는 무 반향 챔버 에서 측정된 안 테나 이득은 그림 14에서와 같이 약 38.5 dBi이상의 높 은 이득을 가졌으나 62 GHz 에서의 계산치 39.8 dBi와 비교해서 약 1.3 dBi 정도 낮아지는 것을 알 수 있는데 이는 제작 시 가공오차와 층간 접합 시 오차로 인한 것 으로 예상된다. 슬롯과 급전 망 모서리 반경은 0.5mm로 가공되었고, 오차는 ±0.02mm이다. 하지만 제작된 안테 나는 90 %이상의 높은 효율성을 가지므로 제안된 안테 나가 고 효율 및 고 이득 특성을 갖는 것에 대한 타당성 이 입증된다.



Fig. 14. Measured gain of the 32×32 element sub-array antenna with the outer groove.

그림 15는 제작된 안테나의 E-plane 및 H-plane에서 의 복사 패턴을 나타낸 것으로 56 GHz, 62 GHz. 66 GHz에서 측정 하였고, 각 주파수 별 빔 폭과 1차 부엽레 벨(Side-lobe level)은 표 3에 정리하였다.



(a) E-plane : 57 GHz/ 62 GHz/ 66 GHz



(b) H-plane : 57 GHz / 62 GHz / 66 GHz

Fig. 15. Measured radiation patterns of the  $32\times32$  element sub-array antenna with the outer groove.

 Table 3. Beam width and first side-lobe as function of frequency.

Freq. [GHz]	E-plane 3dB BW [deg.]	H-plane 3dB BW [deg.]	E-plane 1th. SLL [dB]	H-plane 1th. SLL [dB]
57	1.83	1.85	-12.5	-13.5
62	1.80	1.85	-12.5	-13.6
66	1.78	1.82	-12.3	-12.5

중심 주파수인 62 GHz 기준으로 E-plane에서 1차 부 엽 레벨은 -12.5 dB로 계산된 -12.8 dB보다 약간 높고 H-plane에서는 -13.6 dB로 -13.2 dB인 계산치 보다 약 간 낮게 측정 되었으며 안테나의 3 dB 빔 폭은 약 1.80° 로 계산된 값과 유사한 매우 좁은 빔 폭을 갖는다. 또한 39 dBi 이상의 높은 지향성을 갖으며 모든 복사 슬롯들 의 급전이 안테나 중심에서 대칭으로 이루어지므로 주 (Main) 빔의 지향성은 0°에 위치하고 주파수에 따라 변 화 되지 않는다.

## 5. 결론

본 논문에서는 차세대 고 용량, Gbps급 고속 데이터 전송을 지원하는 백-홀 장비에 적용하기 위한 고 이득, 광 대역 특성을 갖는 안테나를 설계 및 제작하였다. 제작 된 32×32 도파관 슬롯 서브-배열 안테나는 V-밴드인 60 GHz 대역에서 동작하도록 설계 되었으며, 복사 슬롯 간 상호결합 영향을 억제하고, 높은 이득특성을 얻기 위해 각 복사 슬롯에 외부 홈(Outer Groove)을 결합 하였다. 또한, 낮은 반사 손실과 광 대역 특성을 위해 급전 손실 이 거의 없는 도파관 형태의 공동-급전 부를 구성하였고, 단일 Unit 기준으로 하나의 개구 면과 캐비티를 통해 4 개의 복사 슬롯이 여기 되도록 하는 서브-배열 구조를 구성하여 복사 소자 간격을 좁혀 개구 효율을 높일 수 있도록 하였다.

그 결과 적용 주파수 대역에서의 안테나 이득은 전반 적으로 약 38.5 dBi이상, 효율은 90 %이상으로 높게 나 타났고, 이득 평탄도 또한 1 dB 이하로 안정적이고, VSWR < 2.0 에서의 반사손실 대역폭은 약 16% (56 GHz ~ 66 GHz)로 광 대역 특성을 보여 만족할 만한 결과를 얻었다.

#### References

- S.E. Hong, I.K.Kim, S.C.Bang,"Trends of Technology Developments for mmWave-based 5G Mobile Comm unications," ETRI Electronics and Telecommunications Trends.,vol. 28, no. 06, pp. 107-116, December. 2013.
- [2] D. Lockie, D. Peck, "High-data-rate millimeter-wave radios," IEEE Microwave Mag.,vol. 10, no. 5, pp. 75-83, Aug. 2009. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/MMM.2009.932834
- [3] K. Maruhashi, M. Itoh, K. Ohata, "A 60GHz band Coplanar - MMIC Chip set for 500 Mbps ASK Trans ceivers", IEEE GaAs Digest, pp. 179-182, 2000. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1109/GAAS.2000.906318</u>
- [4] P.F.M. Smulders, "60GHz Radio prospects and future directions", Proceedings Symposium IEEE Benelux Chapter on Communications & Vehicular Technology, Eindhoven, pp. 1-8, 2003.
- [5] K. Huang and Z.Wang, "Terahertz tera bit wireless communication," IEEE Microwave Mag., vol. 12, no. 4, pp. 108-116, May. 2011. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1109/MMM.201</u>1.940596
- [6] Y. Hayashi, K. Sakakibara, M. Nanjo, "Millimeter- wave Microstrip Comb-Line Antenna Using Reflection Canceling Slit Structure," IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 59, no. 2, pp. 398-406, Feb. 2011.

DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2010.2096180

- [7] T. Sehm, A. Lehto, "A High-Gain 58-GHz Box-Horn Array Antenna with Suppressed Grating Lobes," IEEE Trans. Antenna Propag., vol. 47,no. 7, pp. 1125-1130, Jul. 1999. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/8.785742
- [8] E. Levine, G. Malamud, S. Shtrikman, and D. Treves, "A study of microstrip array antennas with the feed network," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 37, no. 4, pp. 426-434, Apr.1989. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/8.24162
- [9] T. Suzuki, J. Hirokawa, M. Ando, "Iteration-Free Design of Waveguide Slot Array with Cavities ," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 12, pp. 3891-3896, Dec. 2010. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2010.2078435
- [10] J. Joubert, S. R. Rengarajan, "Design of unequal Hplane waveguide power dividers for array application," Microwave Journal, vol. 40, pp. 1636-1639, Feb. 1997.
- [11] J. H. Bang, S. M. Hwang, S. G.Lee, and B.C.Ahn, "Design formulas for the H-plane septum power divider in a rectangular waveguide", Microwave Opt. Tech. Lett., vol. 37, no. 5, pp. 390-393, Jun. 2003. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/mop.10927
- [12] Hirokawa, J., Zhang, M., Miura, Y., Ando, M. "High-eff iciency wide-band double-layer slotted hollow wave guide array antennas by diffusion bonding of laminat ed thin metal plates," ICECom.2010 Conf.Proc. 20 - 23, pp. 1 - 4, Sep. 2010.
- [13] Miura, Y., Hirokawa, J., Zhang, M., Ando , M., "A 45° Linearly Polarized Hollow-Waveguide Corporate-feed Slot array Antenna in the 60GHz Band," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 8, pp. 3640-3646, Aug. 2012.

DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2012.2201094

노광 현(Kwang-Hyun Noh)

[정회원]



- •1997년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학 석사)
- •2000년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (박사 수료)
- 1999년 12월 ~ 2012년 4월 : ㈜썬 웨이브텍 수석 연구원
- 2013년 6월 ~ 현재 : 엠.에이치 연 구 실장

<관심분야> 밀리미터파 안테나 및 소자, RF 시스템, 이동 통신시스템

#### 강 영 진(Young-Jin Kang)

#### [정회원]

- 1989년 2월 : 건국대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1982년 3월 ~ 2015년 2월 : 원광 대학교 전자공학과 교수
- •2015년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 전자공학과 명예교수

<관심분야> 초고주파 및 광통신