

https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.5.209

IIBC 2017-5-29

## 십자형 모노펄스 축을 적용한 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나 조립체 연구

### Waveguide Broad-wall Slot Array Antenna Study for Millimeter-Wave Seeker Using Cross Monopulse Axes

정채현\*, 백종균\*\*, 이국주\*\*, 박창현\*\*, 권준범\*\*

Chae-Hyun Jung\*, Jong-Gyun Baek\*\*, Kook-Joo Lee\*\*,  
Chang-Hyun Park\*\*, Jun-Beom Kwon\*\*

**요약** 본 논문에서는 2축 십자형 모노펄스 축을 가지는 Ka 대역 밀리미터파 탐색기용 안테나를 설계하였고, 진공 브레이징 기법으로 제작 후 측정을 통해 성능을 검증하였다. 또한, Ka 대역 도파관 순환기 설계 및 제작하여 순환기가 포함된 안테나 조립체 단위에서도 성능을 확인하였다. 안테나의 복사부는 Elliot 설계방법에 최적화 알고리즘을 적용하여 최적의 슬롯 길이 및 오프셋 값을 설계하였으며, 급전부는 십자형 모노펄스 축을 구현하기 위해 접힌 구조의 도파관을 적용하여 S-parameter 특성을 최적화 하였다. 설계된 안테나 조립체는 제작 및 전자과측정을 통해 33.3 dBi 이득,  $3.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$  빔폭, -23 dB 이하 부엽준위 특성을 확인하였으며, 본 결과는 설계 결과와 유사함을 확인하였다.

**Abstract** In this paper, an antenna having 2-axes cross monopulse for Ka band millimeter-wave seeker is designed and antenna performance is verified through vacuum-brazing method for fabrication and measurement. Also, by designing and manufacturing a waveguide circulator the antenna including the circulator is measured. Radiating part of the antenna takes optimized slot lengths and offsets from Elliot's array synthesis procedure using the generic algorithm and feeding part for cross monopulse axes uses the folded waveguide to optimize the S-parameter result. Based on this method, the antenna has 33.3 dBi gain,  $3.5^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$  beamwidth, below -23 dB SLL through fabricating and measuring. It is found that antenna characteristics is similar to design results.

**Key Words** : slot array antenna, monopulse, waveguide circulator, vacuum-brazing

## 1. 서론

도파관 광벽 슬롯 배열 안테나는 고효율의 평면형 배열 안테나이며, 금속 재질로 제작되어 고출력 송신에 유리하며 구조적으로 견고하기 때문에 항공기 및 레이더, 미사일용 탐색기 등에 많이 사용되고 있다. 도파관 슬롯

배열 안테나 설계 기술은 예전부터 많이 연구되어 오고 있다.<sup>[1][7]</sup>

일반적으로 유도무기용 탐색기에 사용되는 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나 조립체는 공간 효율을 위해 하나의 안테나를 이용하여 송수신을 할 수 있도록 하기 위해 도파관 순환기가 조립된 구조이다. 실질적으로 탐색기 적

\*정회원, LIG 넥스원(주)

\*\*임시회원, LIG 넥스원(주)

접수일자: 2017년 9월 12일, 수정완료: 2017년 10월 5일

게재확정일자: 2017년 10월 13일

Received: 12 September, 2017 / Revised: 5 October, 2017 /

Accepted: 13 October, 2017

\*Corresponding Author: chaehyun.jung@lignex1.com

Dept. of Seeker R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

용성을 검증하기 위해서는 순환기가 포함된 안테나 성능을 검증하여야 한다.

도파관 광벽 슬롯 배열 안테나의 설계는 크게 부엽준위, 빔폭, 고효율 위한 복사 슬롯 분포 설계, 각 복사 소자의 길이와 오프셋 값을 조절하여 설계된 복사 슬롯 분포에 따른 모든 복사 소자가 공진 상태가 되게 하는 안테나 배열 설계, 여러 개의 복사 도파관으로 파워를 분배하는 급전구조와 모노펄스 기능을 구현하기 위한 모노펄스 비교기 설계로 나눌 수 있다. 순환기는 안테나 입력 포트에 조립되도록 인터페이스 및 형상 설계와 함께 송신 시 높은 입력 전력에서 충분한 분리도 및 반사손실 특성을 가지도록 설계한다. 탐색기용 안테나는 신호원의 각도 위치를 정밀하게 추정하기 위해 대칭적인 두 개의 안테나 빔을 비교 이용하여 안테나의 각도 분해능을 높이는 모노펄스 방법을 사용한다.<sup>[8]</sup> 이때 2축 모노펄스의 경우 일반적으로 X-형 모노펄스 축 구조를 가지는 안테나가 연구되어 왔다.<sup>[9]</sup>

본 논문에서는 십자형 모노펄스 축을 가지며 Ka 대역의 도파관 순환기가 포함된 도파관 슬롯 배열 안테나 설계에 중점을 두었으며, 탐색기 시스템에서 요구하는 탐지 거리, 정밀 각도 분해능 등의 성능을 만족하기 위해 요구되는 이득, 빔폭, 부엽준위, 널 깊이 성능을 가지도록 설계하였다. 안테나 복사면 배열 합성 설계는 Talyor 분포를 적용하여 각 슬롯의 가중치 값을 결정하였다. 슬롯의 가중치 값을 물리적으로 구현하기 위한 슬롯의 길이 및 오프셋 값은 다양한 방면에서 사용되는 유전 알고리즘(Generic Algorithm)을 적용하여 획득하였다.<sup>[10][12]</sup> 십자형 모노펄스 구현 시 복사 슬롯으로 파워를 전달해 주는 분배 도파관은 반사손실 특성 최적화를 위해 구조 상 접합 구조의 도파관<sup>[13]</sup> 적용과 동시에 프로브 급전 방식을 적용하였다.<sup>[14]</sup> 복사부의 수신된 신호로부터 합/차 신호를 생성하는 모노펄스 비교기는 4개의 Magic-T를 최적 배치하여 설계하였다. 이렇게 설계된 안테나는 제작을 위해 다층 구조로 설계하였으며 진공 브레이징 금속 접합 기법을 활용하여 제작하였다. 최종적으로 제작된 안테나 측정을 통해 설계의 정확성과 진공 브레이징 제작법의 실효성을 확인 하였다.

## II. 본론

### 1. 안테나 조립체 구조

본 논문의 안테나 조립체는 크게 복사부, 급전부, 모노펄스 비교기, 도파관 순환기로 구성되어 있다.

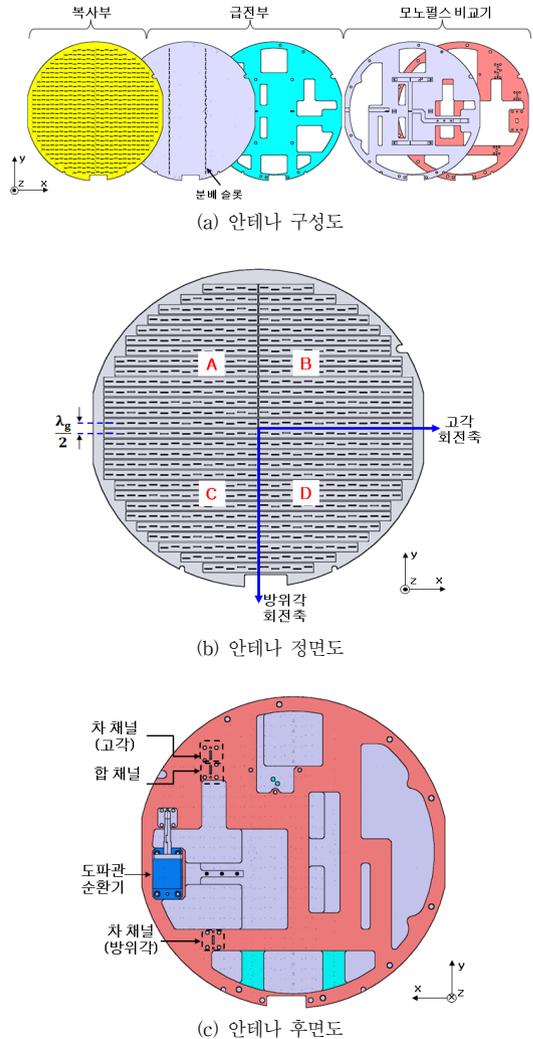


그림 1. 안테나 조립체 구조  
Fig. 1. The structure of antenna

그림 1 (a)의 복사부는 각 슬롯이 관내 반파장( $\lambda_g/2$ ) 간격으로 648개로 구성되어 있다. 복사부에는 급전부의 분배 슬롯에 의해 설계된 파워량이 분배되며, 분배 슬롯에 신호 인가는 VSWR 특성에 유리한 프로브 급전 방식을 적용하였다.<sup>[14]</sup> 그림1 (b)와 같이 2축 모노펄스를 구현하기 위하여 전기적으로 A, B, C, D 4분면이 나누어지도록 설계를 하는데, 십자형의 방위각, 고각 모노펄스 축을 기준으로 설계하였다. 안테나 조립체는 그림1 (c)와 같이

안테나 후면에 도파관 순환기가 조립되며, 하나의 합 채널(Sum port)과 두 개의 차 채널(Del Az/El port)로 구성되어 방위각 및 고각 방향에서 동시에 정밀 추적하는 시스템에 사용 할 수 있도록 하였다.

배열 안테나의 빔을 합성하기 위해서는 그림 1 (b)에서 복사 슬롯 도파관 중심점 간의 거리를  $\lambda_g/2$ 를 유지하도록 설계하여야 한다. 이를 위해서는 수식 (1)을 만족하는 도파관 폭(a)과 도파관 벽 두께(t)를 구하여 적용한다.

$$a + t = \frac{\lambda_g}{2} \quad (1)$$

도파관의 크기는 운용 주파수에서 TE<sub>10</sub> dominant 모드가 생성되도록 폭  $0.66\lambda_0$ , 높이  $0.16\lambda_0$  로 설계하였으며, 도파관 벽 두께는 수식 (1)을 통해  $0.09\lambda_0$ 로 설계하였다.

## 2. 도파관 순환기 설계

본 논문에 적용되는 순환기는 3-port 도파관 타입으로 송신시 입력된 파워를 안테나로 전달하여 방사하도록 하며, 수신시에는 수신 단으로 신호를 전달해 주는 역할을 한다. 순환기 설계 시 중점 사항은 수신 경우 보다 높은 파워가 입력되는 송신 시 수신 단으로 흘러 들어가는 파워를 최대한 억제하여 수신단 하부 시스템을 보호하도록 해야 한다. 이를 위해서는 순환기의 분리도 특성을 최대한 확보하도록 설계하여야 하는데, 이는 순환기 구성품인 페라이트, 영구자석, 튜닝 물질을 최적화함으로써 가능하다.<sup>[15]</sup> 그림 2는 순환기 설계 형상이며, 그림 3은 송신 경우인 포트 1 신호 입력 시 포트 1의 반사손실과 포트 3과의 분리도 특성을 나타내었다.

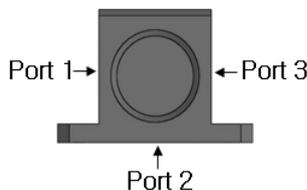


그림 2. 도파관 순환기 구조  
 Fig. 2. The structure of waveguide circulator

포트 1의 반사손실은 -20dB 이하 기준 3 GHz 대역폭, 포트 1 과 포트 3의 분리도는 -25dB 이하 기준 2 GHz 대역폭을 가지는 순환기를 설계 하였다.

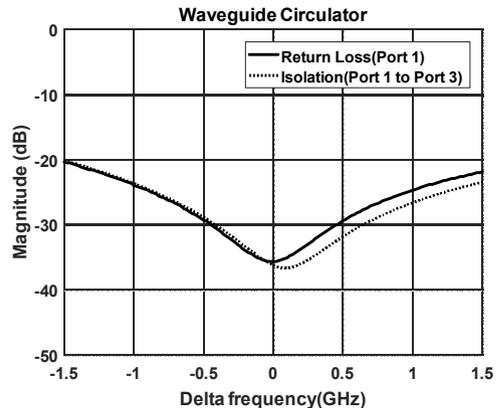


그림 3. 순환기 시뮬레이션 결과(Port 1 신호 입력)  
 Fig. 3. Simulation result of circulator(Port 1 signal input)

## 3. 복사부 및 모노펄스 비교기 설계

Ka 대역에서 안테나 이득 33 dB 이상을 얻기 위해 시뮬레이션을 통하여 안테나 직경  $\Phi 23.3\lambda_0$ 로 설계하였으며, 부엽준위 -23 dB 이하, 3 dB 빔폭  $3.5^\circ \pm 0.5^\circ$  이내 특성을 확보하기 위해 648개의 복사 슬롯 가중치 값을 Taylor 분포를 활용하여 설계하였다. 설계한 가중치 값을 물리적으로 구현하기 위해 슬롯의 길이 및 오프셋 값을 참고문헌<sup>[14]</sup>의 설계 절차와 동일한 과정을 통해 추출하였다. 추출된 값을 상용 전자파 해석 도구인 CST MWS 시뮬레이터에 적용하여 안테나의 전기적 성능을 확인 하였다.

모노펄스 비교기는 그림 4와 같이 두 신호를 받아 합/차 신호를 생성하는 Magic-T 4개의 조합으로 설계하며, 그림 1(b)의 A, B, C, D 분면을 통해 입력되는 신호를 전달 받는다. 이때 이론적으로 안테나 빔 합성을 위해서는 각 Magic-T 양 포트에 동일 크기 및 동일 위상이 입력되도록 도파관 길이를 동일하게 설계하여야 한다. 실질적으로 탐색기용 안테나에는 시스템 단위에서의 점검을 위해 점검신호부 구조가 적용된다. 그래서 본 논문에서는 점검신호부 적용을 고려하여 그림 4의 중앙 3개의 Magic-T를 한쪽 방향으로 움직여  $l_2 - l_1$  값이  $\lambda_g/2$  만큼 차이가 나도록 이론과 다르게 Magic-T 양 도파관 길이를 비대칭적으로 설계 하였다. 이렇게 설계한 모노펄스 비교기를 복사부에 적용하여 시뮬레이션을 통해 안테나 빔 패턴 합성에 문제가 없음을 확인하였다.<sup>[16]</sup>

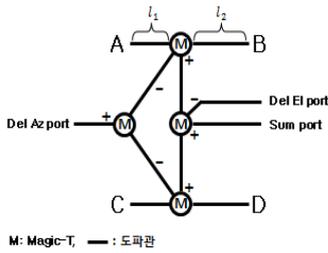
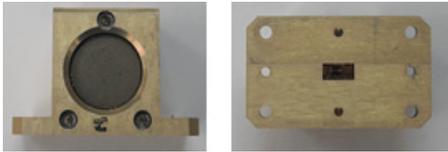


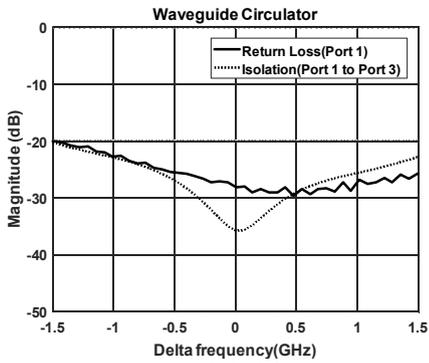
그림 4. 모노펄스 비교기 개념도  
Fig. 4. The concept of monopulse comparator

### III. 제작 및 측정

그림 5와 같이 설계 내용을 바탕으로 도파관 순환기를 제작하였으며, 측정을 통해 포트에 신호 인가 시 반사손실은  $-20\text{dB}$  이하 기준 대역폭  $3\text{GHz}$ , 포트 1 과 포트 3의 분리도는  $-25\text{dB}$  이하 기준 대역폭  $1.7\text{GHz}$ 의 광대역 특성을 가지는 순환기를 개발하였다.



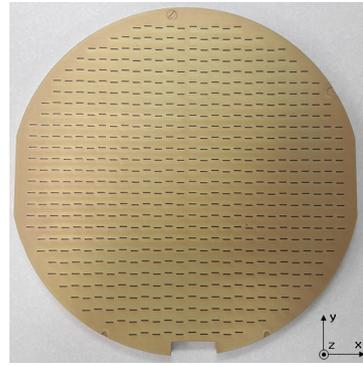
(a) 제작된 도파관 순환기



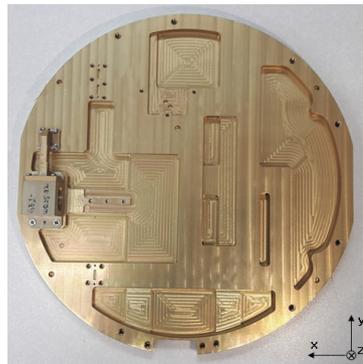
(b) 측정 결과

그림 5. 도파관 순환기 제작 및 측정  
Fig. 5. Fabrication and measurement of waveguide circulator

진공 브레이징 제작 기법을 활용하여 제작된 안테나에 도파관 순환기를 그림 6과 같이 조립하여 전기적 성능 시험을 진행 하였다.



(a) 안테나 정면도



(a) 안테나 후면도

그림 6. 제작된 안테나(도파관 순환기 포함)  
Fig. 6. Fabricated antenna with waveguide circulator

운용 중심 주파수를 기준으로  $\pm 1000\text{MHz}$ 에서 합 채널의 반사 손실을 측정 하였으며,  $-20\text{dB}$  이하 기준  $1\text{GHz}$ 의 대역폭을 가짐을 그림 7을 통해 확인 할 수 있다. 안테나 패턴 성능 시험은 전자파 무반향실에서 측정하였으며 그림 8, 9, 10, 11에서 방위각, 고각,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ 에 대한 안테나 방사 패턴 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교 분석 하였다. 그림 12, 13은 각각 방위각, 고각 방향에서의 합/차 패턴을 나타내었으며 모노펄스 기법을 사용할 수 있을 만큼 충분한 널 깊이가 나타남을 확인 하였다. 그리고 안테나의 이득은 표준 혼 안테나와 측정 안테나의 수신 레벨을 비교하여 측정하였으며  $33.3\text{dBi}$  임을 확인하였다.

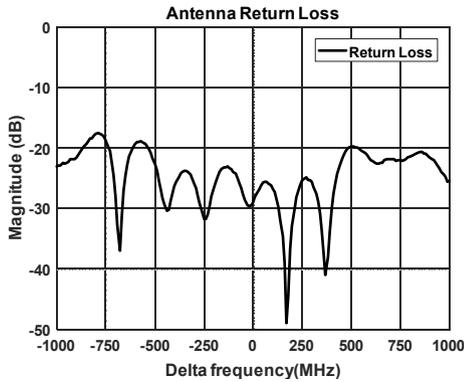


그림 7. 안테나 반사손실(도파관 순환기 포함)  
 Fig. 7. Return loss of antenna with waveguide circulator

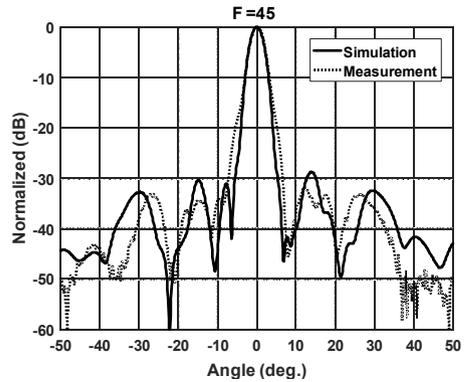


그림 10. 안테나 복사패턴( $\Phi=45^\circ$ )  
 Fig. 10. Radiation pattern of antenna( $\Phi=45^\circ$ )

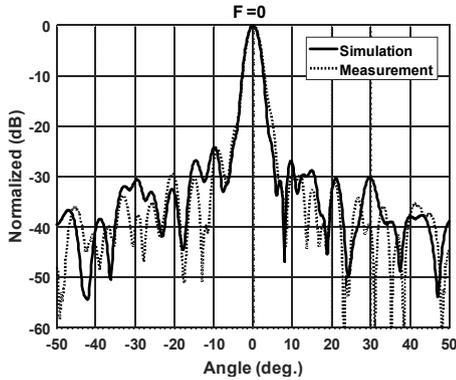


그림 8. 안테나 복사패턴( $\Phi=0^\circ$ )  
 Fig. 8. Radiation pattern of antenna( $\Phi=0^\circ$ )

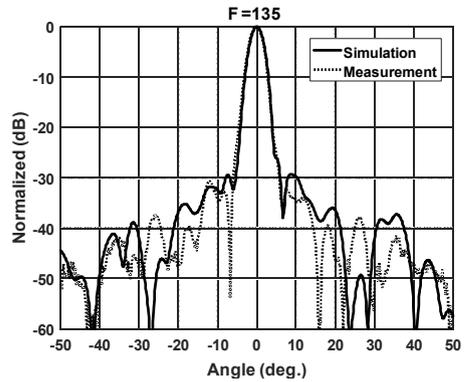


그림 11. 안테나 복사패턴( $\Phi=135^\circ$ )  
 Fig. 11. Radiation pattern of antenna( $\Phi=135^\circ$ )

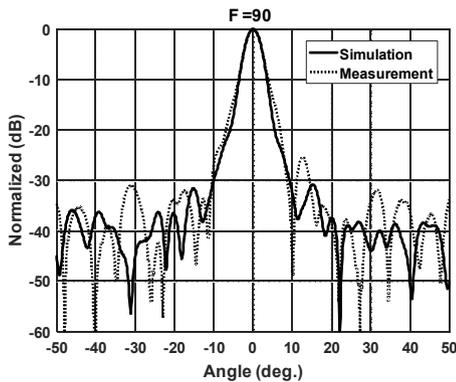


그림 9. 안테나 복사패턴( $\Phi=90^\circ$ )  
 Fig. 9. Radiation pattern of antenna( $\Phi=90^\circ$ )

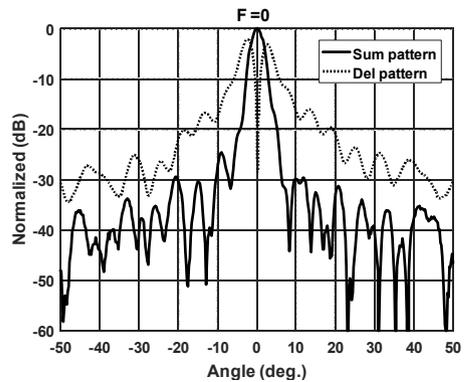


그림 12. 안테나 합/차 복사패턴( $\Phi=0^\circ$ )  
 Fig. 12. Sum/Del radiation pattern of antenna( $\Phi=0^\circ$ )

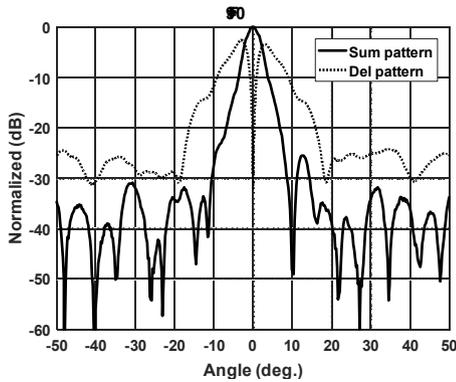


그림 13. 안테나 합/차 복사패턴( $\Phi=90^\circ$ )  
 Fig. 13. Sum/Del radiation pattern of antenna( $\Phi=90^\circ$ )

3 dB 빔폭과 부엽 준위 측정 결과는 표 1 에 정리하였으며 안테나 요구 성능 부엽준위 -23 dB 이하, 3 dB 빔폭  $3.5^\circ \pm 0.5^\circ$  이내에 부합함을 확인 하였다.

표 1. 3 dB 빔폭 및 부엽준위 측정결과  
 Table 1. Measurement of 3 dB beamwidth and side lobe level

	방위각( $0^\circ$ )	고각( $90^\circ$ )	$45^\circ$	$135^\circ$
3dB 빔폭( $^\circ$ )	3.17	3.84	3.47	3.40
부엽준위 (dB)	-24.6	-25.4	-31.8	-30.5

#### IV. 결론

본 논문에서는 2축 십자형 모노펄스 축을 가지는 Ka 대역 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나 및 도파관 순환기를 설계하였다. 안테나는 진공 브레이징 제작 기법을 활용하여 제작하였으며, 순환기는 포트1에 신호 인가 시 반사손실은 -20dB 이하 기준 3 GHz 대역폭, 포트 1 과 포트 3의 분리도는 -25dB 이하 기준 1.7 GHz 대역폭으로 광대역 특성을 가지도록 개발하였다. 순환기를 적용한 안테나 조립체 단위에서 이득 33.3 dBi, 부엽준위 -23 dB 이하, 3 dB 빔폭  $3.5^\circ \pm 0.5^\circ$  이내의 전기적 성능을 가지며, 설계된 안테나는 모노펄스 탐색기에 적용 가능함을 확인하였다.

#### References

- [1] R. S. Elliott, Antenna Theory and Design, Prentice-Hall, 1981.
- [2] Lars G. Josefsson, "Analysis of longitudinal slots in rectangular waveguides", IEEE Trans. on AP, vol. AP-35, pp. 1351-1357, Dec. 1987.
- [3] G. J. Stern and R. S. Elliott, "Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation : theory and experiment", IEEE Trans. on AP, vol. AP-33, pp. 1264-1271, Nov. 1985.
- [4] R. S. Elliott and L. A. Kurtz, "The design of small arrays", IEEE Trans. on AP, vol. AP-26, pp. 214-219, March. 1978.
- [5] R. S. Elliott, "An improved design procedure for small arrays of shunt slots", IEEE Trans. on AP, vol. AP-31, pp. 48-53, Jan. 1983.
- [6] Hyung-Gi Na, Kong-Mahn Park, Ik-Kyu Lee, Kwang-Hee Kang, "A Development of Waveguide Broad-wall Slot Array Monopulse Antennas", IEIE, pp. 301-304, May. 1998.
- [7] Rashid Ahmad Bhatti, Byeong-Yong Park, Yun-Taek Im, Seong-Ook Park, "Design of a Planar Slotted Waveguide Array Antenna for X-band Radar Applications", KIEES, pp. 97-104, June. 2011.
- [8] S. M. Sherman, Monopulse Principles and Techniques, Artech House, 1984.
- [9] Hyung-Gi Na, Chang-Hyun Park, "Design of a Waveguide Broad-wall Longitudinal Slot Array Antenna of X-type Monopulse Axes", KIEES, pp. 208-216, Feb. 2002.
- [10] Cheol-Min Seong, Jae-Duk Lee, In-Hee Han, Hong-Kyun Ryu, Kyu-Song Lee, Dong-Chul Park, "Study on Pattern Synthesis of Conformal Array Antenna Using Enhanced Adaptive Genetic Algorithm", KIEES, pp. 592-600, May. 2014.
- [11] Young-Dae Lee, Jeong-Jin Kang, "Performance Enhancement of CDMA Cellular System Using Genetic Algorithm", JIIBC, pp. 197-203, Oct. 2014.

- [12] Byung-Jin Lee, Yong-Won Kim, Kyung-Seok Kim, "Received Power Optimization applying Adaptive Genetic Algorithm in Visible light communication", JIIBC, pp. 147-154, Dec. 2013.  
 DOI:http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.6.147
- [13] Phillip N Richardson, Hung Yuet Yee, "Design and analysis of slotted waveguide antenna arrays", Microwave Journal, pp. 112-113, June. 1988.
- [14] Jong-Gyun Baek, Chae-Hyun Jung, Kook-Joo Lee, Chang-Hyun Park, "Waveguide Broad-wall Slot Array Monopulse Antenna for Millimeter-Wave Seeker Using Dip Brazing Method", KIEES, pp. 1020-1026, Nov. 2015.
- [15] Sung-Min Han, Dea-Soo Im, Kuang-Soo Jung, Chae-Hyun Jung, Chang-Hyun Park, "Development of the high-power waveguide circulator for small Radar", KIMST, pp. 901-902, Nov. 2015.
- [16] Chae-Hyun Jung, Kook-Joo Lee, Jong-Gyun Baek, Chang-Hyun Park, "Monopulse Comparator Design Method for an Effective Placement of the Pilot in Radar Antenna", KIMST, pp. 335-336, June. 2017.

저자 소개

정 채 현(정회원)



- 2008년 2월: 충남대학교 전기정보통신 공학과 (공학사)
  - 2010년 2월: 한국과학기술원 전자전기 공학과 (공학석사)
  - 2010년 1월~현재: LIG넥스원 선임 연구원
- <주 관심분야 : 안테나 설계 및 수치해석>

백 중 균(임시회원)



- 2011년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
  - 2013년 8월: 동국대학교 전자전기공학과 (공학석사)
  - 2013년 4월~현재: LIG넥스원 선임 연구원
- <주 관심분야 : 안테나 설계 및 수치해석>

이 국 주(임시회원)



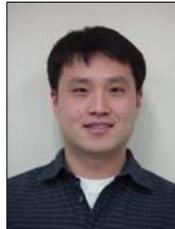
- 2005년 2월: 고려대학교 전기전자전파 공학과 (공학사)
  - 2008년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
  - 2012년 2월: 고려대학교 전자전기공학과 (공학박사)
  - 2013년 3월: 고려대학교 전기전자전파 공학과 박사후과정
  - 2013년 4월~현재: LIG넥스원 수석 연구원
- <주 관심분야 : 안테나 설계 및 수치해석>

박 창 현(임시회원)



- 1997년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
  - 1999년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
  - 1999년 3월~현재: LIG넥스원 수석 연구원
- <주 관심분야 : 안테나 설계 및 수치해석, RF 탐색기 시스템>

권 준 범(임시회원)



- 1997년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
  - 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기 공학과 (공학석사)
  - 1999년 2월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
- <주 관심분야 : 마이크로파 신호처리, 마이크로파 탐색기 등>