

# 딥 브레이징 제작 기법을 이용한 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 모노펄스 안테나

## Waveguide Broad-Wall Slot Array Monopulse Antenna for Millimeter-Wave Seeker Using Dip Brazing Method

백종균 · 정채현 · 이국주 · 박창현

Jong-Gyun Baek · Chae-Hyun Jung · Kook-Joo Lee · Chang-Hyun Park

### 요 약

본 논문에서는 Ka 대역 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 모노펄스 안테나의 설계 및 딥 브레이징 기법으로 제작하여 측정된 결과에 대해 기술하였다. 제안된 안테나는 Elliott 방법을 사용하여 최적화된 복사면, 반사 손실 대역폭 특성 향상을 위해 프로브 급전 방식이 적용된 급전 도파관 및 모노펄스 비교기로 구성되어 있다. 복사면 배열의 가중치 값은 Taylor 분포를 적용하여 설계하였으며, 상용 전자파 해석 시뮬레이터를 사용하여 단일 슬롯의 특성을 추출하여 Elliott 방법으로 슬롯 배열을 최적화 하였다. 설계한 안테나는 딥 브레이징 제작 기법으로 제작하였고, 측정을 통해 28.4 dBi 이득을 확인하였으며, 안테나 빔폭 및 부엽준위도 설계결과와 유사함을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, the design of longitudinal shunt slot array monopulse antenna in the broad wall of waveguide for Ka band millimeter-wave seeker, Dip-Brazing method for fabrication and experiment results are presented. The proposed antenna consists of radiating slots by using Elliott's array synthesis procedure, probe-exciting feed structure for improving the return loss bandwidth and monopulse comparator. Element weightings in the array have been calculated by continuous Taylor aperture distribution. Also, the simulation tool has been used to characterize the individual isolated slot, which has subsequently been used in Elliott's method to design the slot array efficiently. The designed antenna is fabricated using Dip-Brazing method. The gain of measured antenna is 28.4 dBi. Antenna beamwidth and side lobe levels are similar to the design result we expect.

Key words: Waveguide Slot Antenna, Array Antenna, Monopulse Antenna, Dip Brazing

### I. 서 론

도파관 광벽 슬롯 배열 안테나는 고효율 평면형 배열 안테나이며, 고풍력 송신이 가능하고 구조적으로 견고하기 때문에 항공기 및 레이더, 미사일용 탐색기 등에 많이

적용되고 있다. 도파관 슬롯 배열 안테나 설계 기술에 대한 연구는 국내외적으로 많은 논문들이 발표되었다<sup>[1]~[8]</sup>. 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나의 설계는 크게 빔폭, 부엽준위, 고효율을 위한 복사면 분포 설계, 각 복사 소자의 위치와 길이를 조절하여 설계된 복사면 분포에 따른 모

LIG 넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received September 9, 2015 ; Revised November 12, 2015 ; Accepted November 12, 2015. (ID No. 20150909-068)

· Corresponding Author: Jong-Gyun Baek (e-mail: [jonggyun.baek@lignex1.com](mailto:jonggyun.baek@lignex1.com))

든 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. 일반적으로 탐색기용 안테나는 신호원의 각도 위치를 정밀하게 추정하기 위해 대칭적인 두 개의 안테나 빔을 비교 이용하여 안테나의 각도 분해능을 높이는 모노펄스 방법을 사용한다<sup>[12]</sup>.

본 논문에서는 Ka 대역 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 모노펄스 안테나 설계에 초점을 두었으며, 탐색기 시스템 운영에서 결정되는 탐색기의 탐지 거리, 정밀 각도 분해능, 정밀 각도 추적, 클러터 및 재밍 영향의 최소화 능력에 따라 이득, 빔폭, 부엽준위와 모노펄스 기울기를 결정하여 설계를 진행하였다. 안테나의 복사면 가중치 값으로 Talyor 분포를 적용하여 이득, 빔폭, 부엽준위를 계산하였으며, 슬롯 배열 합성을 위해서는 기존 Elliot의 방법에 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘(Generic Algorithm)을 적용하여 슬롯의 길이 및 오프셋 값을 추출하였다<sup>[9],[10]</sup>. 또한, 모노펄스 비교기를 설계하여 1축 대한 모노펄스 기능을 구현하였고 안테나의 반사손실 대역폭 특성을 개선하기 위해 분배도파관 하부에 연결되는 급전 도파관 구조를 새로운 급전 방법인 프로브 급전구조를 적용하였다<sup>[11]</sup>. 마지막으로 제안된 안테나는 복사 평판, 복사 도파관, 분배 도파관, 급전 도파관, 모노펄스 비교기로 구성된 다층 구조이다. 이런 구조의 안테나를 제작하기 위하여 정밀 가공 후 딥 브레이징 기법으로 접합하였으며, 성능 시험 결과를 통해 딥 브레이징 기법의 실효성에 대해서도 확인하였다.

## II. 본 론

### 2-1 안테나 구조

본 논문의 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나는 크게 복사부와 급전부로 구성되어 있다. 그림 1(a)와 같이, 복사부는 슬롯이 있는 복사 평판과 복사 슬롯 도파관으로 이루어져 있으며, 각 복사 슬롯 도파관은 아래층에 존재하는 분배 도파관에 의해 급전된다. 그림 1(b)의 각 슬롯은 1/2 관 내 파장( $\lambda_g/2$ ) 간격으로 배치되어 있으며, 164개로 구성되어 있다. 제안된 안테나에서는 1축 모노펄스 구조로 구

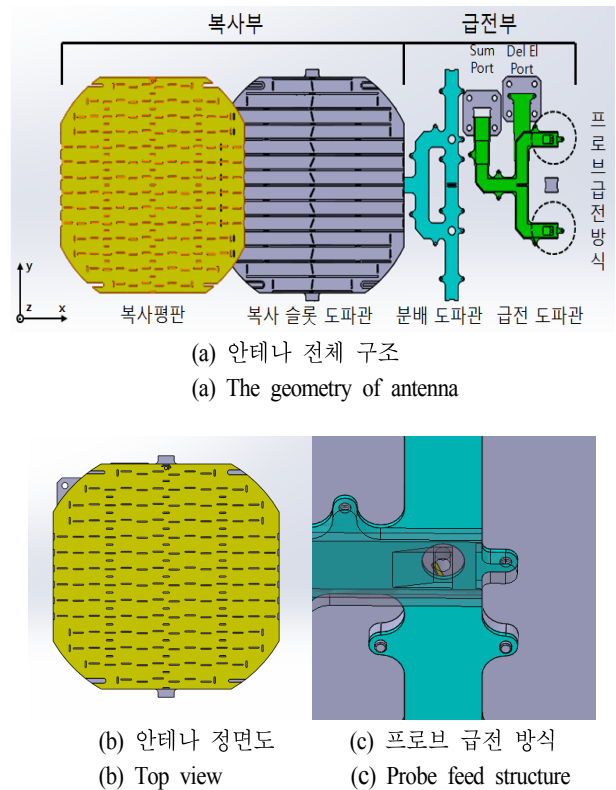


그림 1. 안테나 구조

Fig. 1. The structure of antenna.

현하였으며, 전기적으로 안테나는 2개의 분면으로 나누어진다. 분배 도파관으로 신호를 인가해 주는 급전 도파관은 새로운 급전 방식인 프로브 급전으로 그림 1(c)에서 확인할 수 있다. 프로브 급전은 급전 도파관 내에 프로브가 위치하며, 급전 도파관 상부 층에 뚫린 원형 슬롯을 통해 수직으로 프로브가 위치하는 구조이다. 프로브 급전 방법은 프로브를 통해 동위상의 신호가 양방향으로 분기되기 때문에, 기울어진 슬롯(inclined slot)보다 정재파가 균일하게 생성되어 VSWR 특성을 개선시킨다<sup>[11]</sup>.

모노펄스 비교기는 급전 도파관과 연결되며, 전기적으로 나누어진 2개의 안테나 분면 신호를 활용하여 합 신호와 차 신호를 만드는 기능을 한다. 합 신호와 차 신호의 비( $\Delta/\Sigma$ )를 모노펄스 기울기라고 하며, 모노펄스 기울기는 안테나의 빔폭 내에서 선형적인 값을 가지고 좌우 방향에 따라 위상이 180도 차이를 가진다. 따라서 모노펄스 기능은 모노펄스 기울기 값과 위상에 따라 신호원의 각

도 정보를 정밀하여 추정할 수 있다<sup>[12]</sup>. 제안된 안테나에서는 그림 1(a)과 같이 1개의 도파관 매직터를 사용하여 합/차 2개의 도파관 출력단을 구성하여 모노펄스 기능을 구현하였다.

2-2 안테나 설계

안테나의 복사 슬롯 가중치 값은 Taylor 분포식을 활용하여 Ka 대역에서 지름이  $\Phi$  100 mm 안테나 구조로, 이득 29.4 dBi, 부엽준위 -27 dB, 3 dB 빔폭 6.2°의 패턴 특성이 나오도록 설계하였다.

Elliot의 설계 방법을 적용하기 위해서는 우선 단일 슬롯의 공진 특성을 구하여야 한다. 상용 전자파 해석 시뮬레이터를 이용하여 도파관 폭(a)이  $0.66 \lambda_0$ , 높이(b)가  $0.16 \lambda_0$ 인 단일 슬롯 도파관을 그림 2와 같이 모델링하였다.

단일 슬롯 도파관은 병렬 등가회로로 나타낼 수 있으며, 이로부터 슬롯의 어드미턴스(admittance)는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{Y(x, l)}{G_0} = g(x)h(y) \tag{1}$$

$$h(y) = h_1(y) + jh_2(y) \tag{2}$$

슬롯의 어드미턴스는 정규화된 공진 컨덕턴스(normalized resonant conductance)  $g(x)$ 와 공진 슬롯 길이로 정규화된 슬롯의 길이에 따라 변화하는 어드미턴스  $h(y)$ 로 이루어진다.  $y$ 는  $l/l_r$ 로, 임의의 슬롯 길이( $l$ )을 공진 슬롯 길이( $l_r$ )로 정규화한 값이다. 그림 2 모델링 시뮬레이션 결과로부터 그림 3, 그림 4와 같이  $h(y)$ ,  $g(x)$  그래프를 각각 구할 수 있다.  $y$ 로부터 슬롯길이를 구하기 위해서는 아래와 같은 오프셋과 공진 길이 사이의 관계 식이 더 필요하다. 이 또한, 그림 5처럼 단일 슬롯 모델링 시뮬레

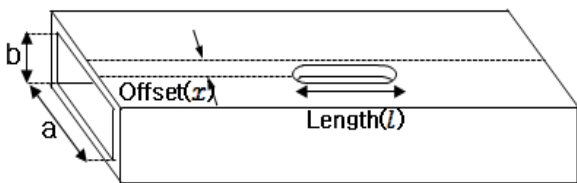


그림 2. 단일 슬롯 모델  
Fig. 2. Single slot model.

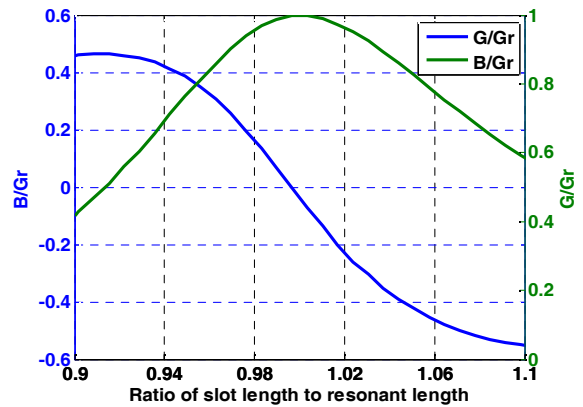


그림 3. 슬롯 길이에 따른 정규화 된 어드미턴스  
Fig. 3. Normalized admittance versus slot length.

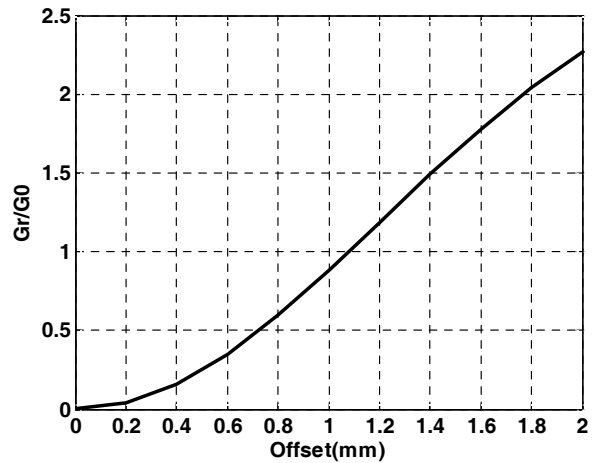


그림 4. Offset에 따른 정규화 된 공진 컨덕턴스  
Fig. 4. Normalized resonant conductance versus offset.

이션 결과로부터 확인이 가능하다.

$$v(x) = kl_r(x) \tag{3}$$

단일 슬롯 공진 특성 함수들은 상호결합 효과를 고려한 다음과 같은 Elliot의 수식에 적용하여 슬롯의 오프셋 및 길이 값을 구한다.

$$\frac{Y_n^a}{G_0} = K_1 f_n \sin kl_n \frac{V_n^s}{V_n} \tag{4}$$

$$\frac{Y_n^a}{G_0} = \frac{K_2 f_n^2}{Z_n^a} \tag{5}$$

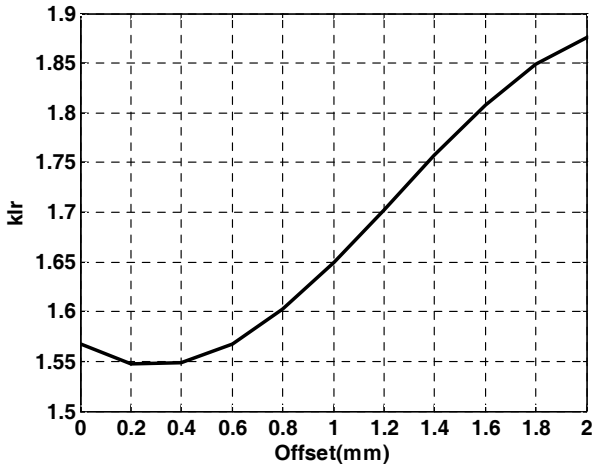


그림 5. Offset에 따른 공진 길이  
Fig. 5. Resonant length versus offset.

$$K_1 = -j \left[ \frac{8}{\pi^2 \eta G_0} \frac{a/b}{\beta/k} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \quad (7)$$

$$f_n = \frac{\cos\beta l_n - \cos k l_n}{\sin k l_n} \sin \frac{\pi x_n}{a} \quad (8)$$

$$Z_n^a = \frac{K_2 f_n^2}{Y_n / G_0} + \sum_{m=1}^N \frac{V_m^s}{V_n^s} \frac{\sin k l_m}{\sin k l_n} Z_{nm} \quad (9)$$

위 수식에서  $\beta$ 는 도파관내 전파상수,  $x_n, l_n$ 은 각각  $n$  번째 슬롯의 오프셋 및 길이를 나타낸다.  $V_n^s$ 은  $n$  번째 슬롯이 있는 도파관의 가중치이며,  $V_n^s$ 은  $n$  번째 슬롯의 전압 값으로 복사슬롯의 가중치 값에 해당한다.  $Z_{nm}$ 은  $n$  번째 슬롯과  $m$  번째 슬롯의 상호결합 임피던스를 나타낸다. Elliot의 수식을 활용하여 최적화된 슬롯 오프셋 및 길이 정보를 추출하는 데는 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 유전 알고리즘에 의해 생성된 슬롯 오프셋 및 길이를 적용하여 최종 수렴 조건이 만족하도록 설계하였다. 분배도파관 급전 슬롯의 설계에 있어서는 기울어진 슬롯을 직렬 저항 등가회로로 모델링하여 슬롯이 기울어진 정도에 따라 특성을 확인하였다. 그리고 각각의 복사슬롯 도파관에서 복사되는 파워 크기 비에 따라 분배되도록

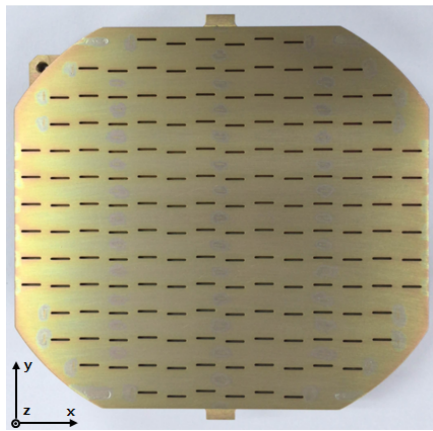
슬롯의 기울기를 조정하여 설계하였다. 이렇게 추출된 슬롯 정보로 상용 전자파 해석 시뮬레이터를 이용하여 최종 안테나 특성을 확인하였다.

### 2.3 딥 브레이징 제작 기법

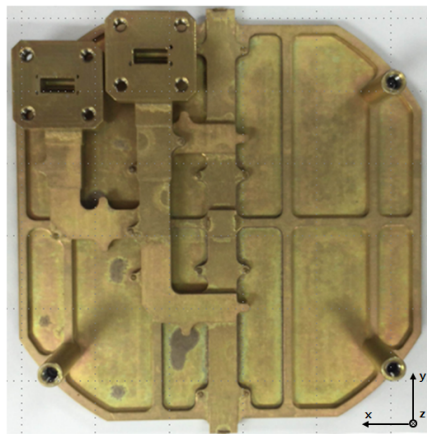
제안된 안테나는 다층 구조이며, 형상이 매우 복잡하기 때문에 제작에 있어서 정밀한 가공과 접합성이 높은 알루미늄 접합 기술이 필요하다. 본 논문에서는 다른 브레이징 방법에 비해 알루미늄 접합성이 높고, 모든 부분이 동시에 균일하게 가열되기 때문에, 복잡한 형상의 제품을 접합할 때 용이한 딥 브레이징 제작 기법을 통해 안테나를 제작하였다. 딥 브레이징 제작 기법은 크게 용재 도포, 예열, 브레이징, 냉각, 후가공 및 검사로 나눌 수 있다. 안테나 접합 부분에 용재를 균일하게 도포한 뒤, dipping할 수 있도록 제작된 지그에 안테나를 가조립한다. 가조립된 안테나는 높은 온도에서 예열을 진행하고, dipping로에 침지되어 flux에 의하여 안테나의 용재가 용융되도록 한다. Flux는 알루미늄을 접합할 때 모재 표면의 산화막이 생성되는 데 이러한 산화막 형성을 방지하는 역할을 한다. 브레이징 작업을 완료한 후, 안테나 내의 flux를 제거하고 서서히 냉각을 진행한다. 냉각이 완료된 안테나는 후가공 처리와 표면처리를 한 다음, 초음파 검사를 통해 접합 부분을 확인한다. 딥 브레이징 제작 기법을 통해 제작된 안테나 그림 6에서 확인할 수 있다.

### 2.4 안테나 측정 결과

본 논문에서는 안테나의 직경이  $\Phi 100$  mm인 Ka 대역의 도파관 광벽 슬롯 배열 모노필스 안테나를 설계하였다. 그림 7은 운용 중심 주파수를 기준으로  $\pm 1,000$  MHz에서의 합/차 채널의 측정된 반사 손실을 나타내었다. 측정 결과, 합 채널의 반사 손실은 관심 주파수 대역에서  $-10$  dB 기준으로 1,500 MHz 대역폭을 가지는 것을 확인하였다. 그림 8~11에서는 각각 방위각, 고각,  $45^\circ$  그리고  $135^\circ$  방향의 안테나 패턴을 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하여 나타내었으며, 그림 12는 고각 방향에서 모노필스 비교기를 통해 2분면으로 나누어진 안테나의 합(sum) 패턴과 차(del) 패턴을 나타내었다. 안테나의 패턴 측정



(a) 앞면  
(a) Top view



(b) 뒷면  
(b) Bottom view

그림 6. 제작된 안테나  
Fig. 6. Fabricated antenna.

은 전자파 무반사실에서 측정하였으며, 안테나 이득은 표준 혼 안테나와 측정 안테나의 수신 세기를 비교하여 측정하였다. 제안된 안테나의 이득은 28.4 dBi로 측정되었으며, 환경적 요인을 고려하지 않은 이론적 복사 슬롯 가중치 설계값보다 1 dB 정도 차이를 보였으나, 이는 환경적인 요인을 고려하면 이론값으로부터 예측할 수 있는 값이다. 3 dB 빔폭은 방위각, 고각, 45° 그리고 135° 방향에서 각각 6.1°, 6.3°, 6.2° 그리고 6.2°로 설계치와 유사한 것을 확인하였다. 측정된 부엽 준위는 22~25 dB 정도의 값을 보였으며, 슬롯간의 상호결합을 감안하면 설계 결과

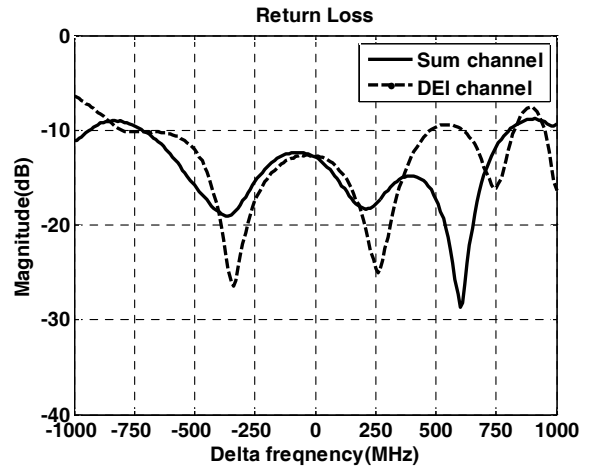


그림 7. 안테나 반사손실  
Fig. 7. Return loss of antenna.

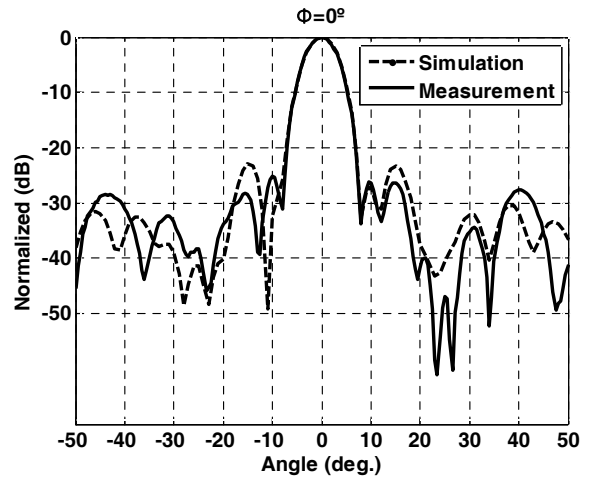


그림 8. 안테나 복사패턴( $\phi=0^\circ$ )  
Fig. 8. Radiation pattern of antenna( $\phi=0^\circ$ ).

와 유사함을 확인하였다. 그리고 -28 dB 이하의 충분한 널 깊이를 가지는 고각 차 패턴을 통해 모노펄스 안테나로서의 특성을 확인하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 딥 브레이징 제작 기법으로 제작된 Ka 대역 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 모노펄스 안테나를 설계하였다. 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘을 적용하여 슬롯의 오프셋 및 길이를 구하여 안테

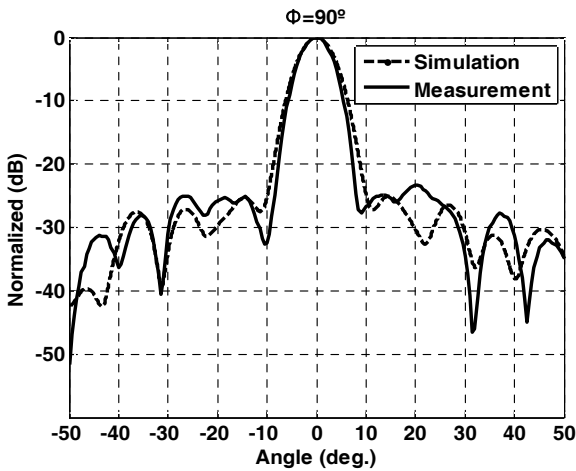


그림 9. 안테나 복사패턴( $\phi=90^\circ$ )  
Fig. 9. Radiation pattern of antenna( $\phi=90^\circ$ ).

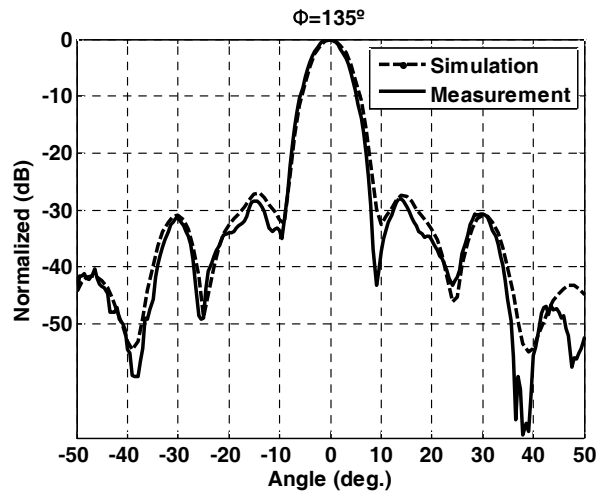


그림 11. 안테나 복사패턴( $\phi=135^\circ$ )  
Fig. 11. Radiation pattern of antenna( $\phi=135^\circ$ ).

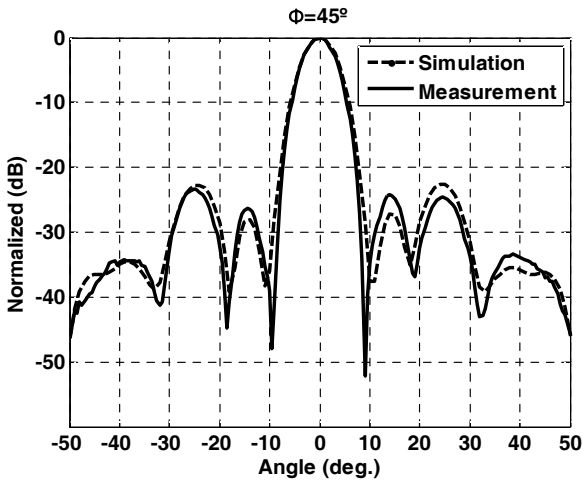


그림 10. 안테나 복사패턴( $\phi=45^\circ$ )  
Fig. 10. Radiation pattern of antenna( $\phi=45^\circ$ )

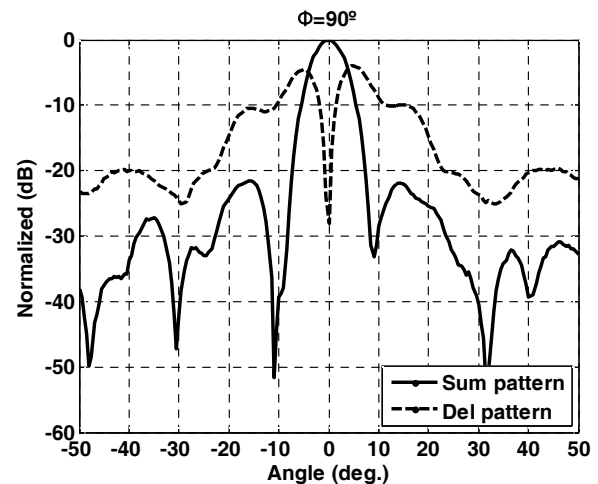


그림 12. 안테나 합/차 복사패턴( $\phi=90^\circ$ )  
Fig. 12. Sum/Del radiation pattern of antenna( $\phi=90^\circ$ ).

나를 설계하였으며, 본 방법을 따라 제작된 안테나는 이득은 28.4 dBi, 3 dB 빔폭은 6.3°, 부엽 준위는 22~25 dB 임을 확인하여 탐색기용 모노필스 안테나로 적용 가능성을 보였다. 또한, 산화막 파괴와 알루미늄 접합성에서 유리한 딥 브레이징 방법을 통해 효율적인 안테나 제작 방법을 제시하였다.

### 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, 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, L. A. Kurtz, "The design of small arrays", *IEEE Trans. on AP*, vol. AP-26, pp. 214-219, Mar. 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] 나형기, 박공만, 이익규, 강광희, "도파관 광벽 슬롯 배열 모노필스 안테나 개발", 한국전자과학회 1998년 춘계 마이크로파 및 전파 학술대회, 서울대학교, pp. 301-304, 1998년 5월.
- [7] 나형기, 박창현, "X-형 모노필스 축구조를 가지는 도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 안테나의 설계", 한국전자과학회논문지, 13(2), pp. 208-216, 2002년 2월.
- [8] R. A. Bhatti, B. Y. Park, Y. T. Im, and S. O. Park, "Design of a planar slotted waveguide array antenna for X-band radar applications", *JKIEES*, vol. 11, no. 2, pp. 97-104, Jun. 2011.
- [9] R. L. Haupt, S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, Wiley-Interscience, 2004.
- [10] 성철민, 이재덕, 한인희, 류홍균, 이규송, 박동철, "향상된 적응형 유전 알고리즘을 이용한 컨포멀 배열 안테나의 빔 합성 연구", 한국전자과학회논문지, 25(5), pp. 592-600, 2014년 5월.
- [11] J. M. Joo, J. K. Park, I. H. Han, J. H. Jeong, and D. W. Lee, "Novel probe-exciting feed structure for improving bandwidth of waveguide broad wall slot array antenna", *iWAT(International Workshop on Antenna Technology)*, Seoul Korea, pp. 288-290, Mar. 2015.
- [12] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, 1984.

백 중 균



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

이 국 주



2005년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학사)  
 2008년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2012년 2월: 고려대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 2013년 3월: 고려대학교 전기전자전파공학과 박사후과정  
 2013년 4월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

정 채 현



2008년 2월: 충남대학교 전기정보통신공학과 (공학사)  
 2010년 2월: 한국과학기술원 전자전기공학과 (공학석사)  
 2010년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

박 창 현



1997년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)  
 1999년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원  
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석, RF 탐색기 시스템