

소형 비행체 탑재를 위한 크기 비교용 방향 탐지 안테나 조립체

김재식^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

An Amplitude Comparison Direction-Finding Antenna Assembly for Mounting on a Small Flight Vehicle

Jaesik Kim^{*,1)}

¹⁾ *The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 8 April 2020 / Revised 24 June 2020 / Accepted 30 July 2020)

Abstract

In this paper, a compact antenna assembly for an amplitude comparison direction-finding(DF) method for a small flight vehicle is presented. Designed antenna assembly consists of four antennas and it is mounted on a radius of $1.45 \lambda_c$ where λ_c corresponds to the wavelength of the center frequency. To achieve compactness and robustness of the assembly, the elements are fed by end-launch feeding method and have modified aperture shapes of E- or H-sectoral horns. The feeding part consists of SMA connector, stepped impedance matching structure, and square waveguide of $0.6 \lambda_c \times 0.6 \lambda_c$. To achieve different main beam directions for every antenna which is required condition for amplitude comparison DF method, all apertures of the antennas are inclined and it makes the main beam direction of each antenna to top, bottom, left, and right with respect to the axis of the platform. To verify the validation of DF performance of the presented antenna assembly, amplitude comparison curves using measurement results are presented. The bandwidth of the antennas are above 3.2 % in Ku-band(VSWR \leq 2:1).

Key Words : Direction-Finding(방향 탐지), Amplitude Comparison Method(크기 비교 방식), Antennas(안테나)

1. 서론

무인기 등을 포함한 저가, 소형의 비행 표적을 효율적으로 탐지, 추적하기 위한 비행체 탑재용 레이더 센서의 경우 소형화, 경량화 및 저가화가 필수적이다.

국외의 경우 이와 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 미국 록히드 마틴의 경우 초소형 대공 미사일 MHTK(Miniature Hit-to Kill)를 개발 완료하였다^[1]. 레이더 센서 관점에서의 소형화는 방향 탐지 안테나의 소형화를 의미하며 이로 인해 기존 레이더 센서에 주로 사용되었던 기 안테나 타입을 적용하기엔 공간 및 성능 구현 측면에서 무리가 있다. 또한 저가화 등을 고려하여 김발 등의 구조를 생략할 경우

^{*} Corresponding author, E-mail: jaesikkim@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

기존의 좁은 빔폭을 갖는 안테나와는 달리 상대적으로 넓은 빔폭을 가짐과 동시에 적절한 정면 방향 이득을 갖는 안테나를 사용하는 것이 유리할 수 있다. 다양한 방향 탐지 기법 중 크기 비교를 이용한 방향 탐지의 경우, 타 기법 대비 방향 탐지 거리가 짧다는 단점이 있지만 다른 기법들에 비해 상대적으로 탐지 각이 넓고 급전부가 단순하여 저가화에 유리한 특징을 가진다. 여기서 탐지거리는 송신기의 출력 증가 및 지상 조사기 등을 이용한 반능동형 레이다 운용 방식을 적용함으로써 증가될 수 있다.

본 논문에서는 소형화, 저가화, 진동 및 환경 견고성 등의 측면을 고려한 비행체 탑재용 소형 크기 비교 안테나를 설계하였다. 기존의 대표적인 방향 탐지 안테나로 패치 배열 안테나, 슬롯 배열 안테나, 반사판 안테나 등이 있지만 앞서 언급된 고려 사항을 동시에 만족하기에는 무리가 있다²⁾. 패치 안테나의 경우, 저가화 및 소형화 측면에서는 적용 가능성이 있으나 고온 환경에서의 유전을 변화 발생 가능성이 있으며 급전 손실이 크다는 단점을 가진다. 가장 널리 사용되는 슬롯 배열 안테나의 경우, 슬롯 간의 간격 및 격벽과의 이격 거리로 인해 소형화 측면에서 적용하기 힘들며 반사판 안테나 역시 소형 플랫폼에 적용하기에 적합하지 않은 형상을 가진다.

본 논문에서는 $1.45 \lambda_c$ 의 반경을 갖는 비행체 탑재용 소형 레이다 센서에 적용 가능한 크기 비교용 방향 탐지 안테나를 제시한다(λ_c 는 중심주파수에서의 파장). 본 논문에서 고려하는 크기 내 소형 비행체 탑재용 방향 탐지 안테나와 관련된 연구는 찾아보기 힘든 실정이다. 제시된 안테나는 소형화, 저가화, 견고성이 고려된 도체 타입의 단순화된 변형 소형 도파관형 안테나 형상을 가지며 설계된 안테나는 동체 축을 기준으로 상, 하, 좌, 우에 배치되어 각각 상, 하, 좌, 우로 조향된 빔 방향을 가져 크기 비교 방식에 적합하도록 설계되었다. 한정된 공간을 고려하여 급전 방식 및 안테나 개구면 확장 기법이 결정되었으며 제작된 안테나를 이용하여 크기 비교 성능을 검증하였다.

안테나는 Ku-대역에서 동작하도록 설계되었다.

2. 안테나 조립체 설계

일반 개방중단 도파관 혹은 혼 안테나의 경우, 개구면이 바라보는 방향에 수직인 평면에서 원통형 임피

던스 매칭 구조 등을 급전 핀에 삽입하여 급전하는 것이 일반적이거나³⁻⁵⁾ 다수의 안테나가 소형 직경 내 한 평면에 위치해야 하는 본 연구 특성상 Fig. 1(a)와 같이 안테나의 급전이 개구면이 바라보는 방향과 평행한 방향에서 이루어지는 End-launch 급전 구조를 적용하였다. 급전은 SMA 커넥터를 통해 이루어지며 급전된 신호는 소형 정사각형 도파관으로 인가된 후 개구면에 전달되어 방사하게 된다. 정사각형 도파관 내부에는 단단 매칭 구조가 삽입되었으며 이는 SMA 커넥터와 도파관 사이의 모드 변환 및 임피던스 매칭 역할을 수행한다. 임피던스 매칭 구조는 3단을 이용하였으며 유전 알고리즘을 이용하여 동작주파수 내 VSWR $\leq 1.5:1$ 을 만족할 수 있도록 각단의 높이 및 너비를 최적화 하였다. 최적화시 변수 간소화를 위해 모든 단의 너비는 동일한 값을 갖도록 설정하였으며 단의 너비의 초기 값은 조립 및 견고성을 고려하여 커넥터 내심과 동일하게 선정하였고 단의 높이는 커넥터 외경과 동일하게 선정하였다. Fig. 1(b)는 중심 주파수에서의 급전부 내 전기장 분포를 보여준다.

Fig. 2(a)는 설계된 급전부의 VSWR(Voltage Standing Wave Ratio) 특성을 나타낸다. VSWR 1.5:1 기준 f_i GHz ~ f_h GHz 이상의 대역폭을 구함을 확인할 수 있다(여기서 f_h GHz - f_i GHz = $3.2\% \times f_c$ GHz). Fig.

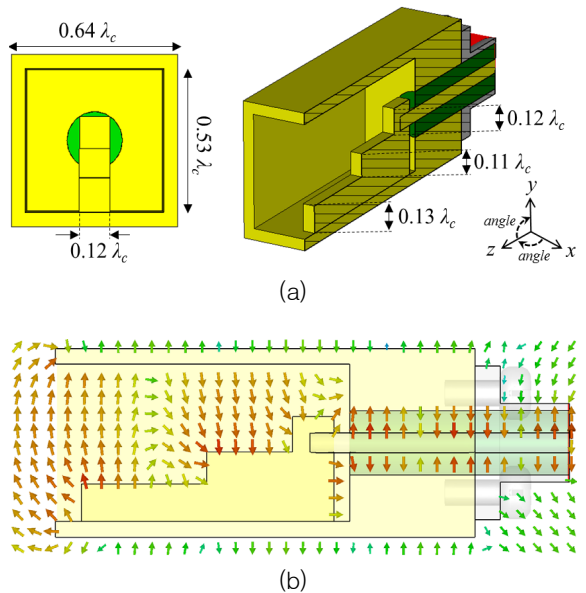


Fig. 1. Designed end-launch feeding part
(a) Configurations (b) E-Field distribution

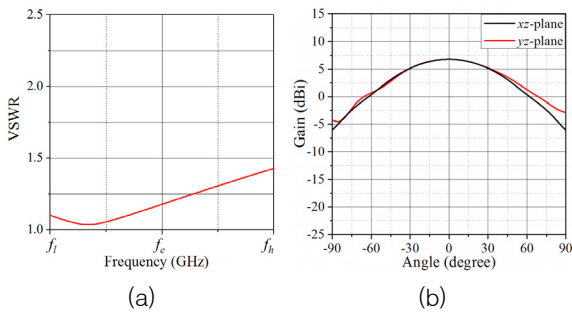


Fig. 2. Simulated end-launch feeding performances
(a) VSWR (b) Radiation patterns

2(b)는 급전부가 방사체로 동작할 때의 중심 주파수에서의 xz -, yz -평면상 방사패턴을 보여준다. 설계된 급전부는 정면 방향에서 6.8 dBi의 이득을 가지며 xz -와 yz -평면에서 각각 81.5°와 82.6°의 빔폭을 가진다. 설계된 급전부 자체를 방사체로 사용하기에는 이득이 낮고 안테나간의 방사패턴 크기 차 기술을 이용하여 방향 탐지를 수행하는 크기 비교 방식에 적합하지 않은 조향되지 않은 주빔 방향을 가지므로 적절한 변형이 필요하다.

Fig. 3은 Fig. 1의 급전부를 이용하여 설계된 두 종류의 안테나 형상을 보여준다. 안테나는 변형된 개구면을 갖는 E-섹터 혼과 H-섹터 혼 형상을 가지며 두 안테나의 편파는 서로 일치하는 수직 편파를 갖도록 설계되었다. 안테나 이득은 적용하고자 하는 소형 플랫폼 내에서 수용 가능한 최대 확장을 통해 상승하도록 하였으며 주빔 방향은 개구면 기움각 변형을 통해 조절될 수 있다. 이와 같은 안테나 설계 파라미터들은 기존 크기 비교용 안테나 대비 큰 형상 변화 없이 주빔 방향, 이득 및 빔폭 설계 자유도 측면에서 유리할 수 있다. Type-1의 경우, 개구면이 변형된 H-섹터 혼의 형상을 가지며 급전부 중심축을 기준으로 상측으로 주빔을 형성하기 위한 개구면 형태를 갖는다. Type-2의 경우 개구면이 변형된 E-섹터 혼의 형상을 가지며 급전부 중심축을 기준으로 우측으로 주빔을 형성하는 개구면 형태를 갖는다. 두 안테나 모두 각각의 경우에 대해 최적화된 단단 임피던스 매칭 구조를 갖도록 변형되었다.

Fig. 3에서 설계된 안테나를 이용하여 Fig. 4와 같은 소형 안테나 조립체를 구성하였다. Fig. 3의 Type-1과 Type-2 안테나가 상측(Ant-T)과 우측(Ant-R) 안테나에 적용되었으며 하측(Ant-B), 좌측(Ant-L) 안테나는 안테

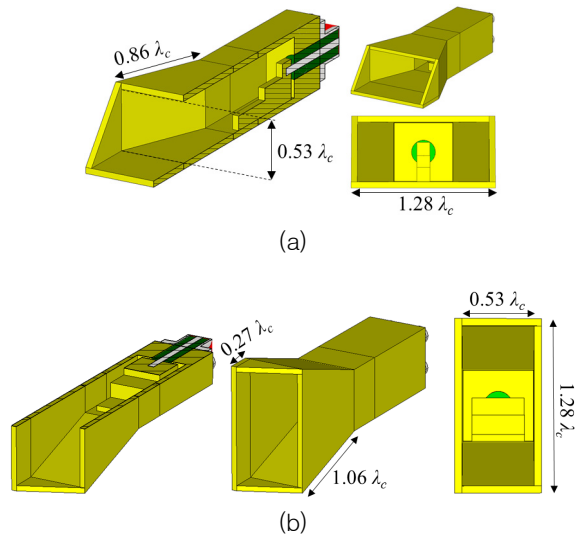


Fig. 3. Designed antenna configurations (a) Type-1 (b) Type-2

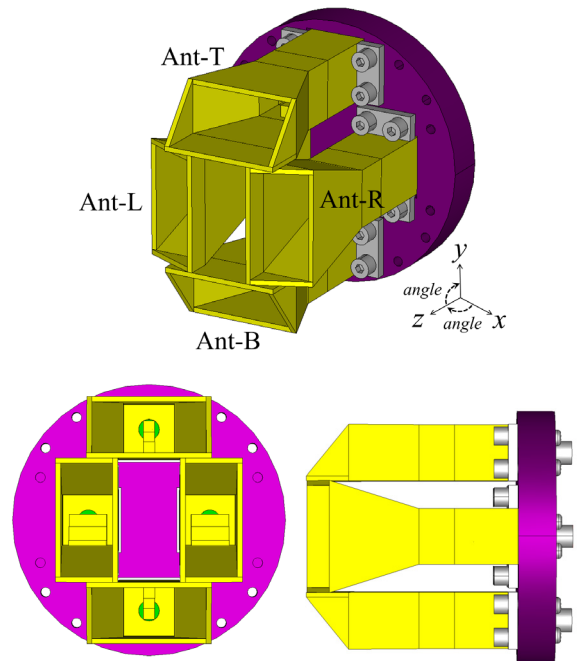


Fig. 4. Configuration of the designed antenna assembly

나 조립체 중심축을 기준으로 상측과 하측 안테나와 대칭인 형상을 갖는다. 즉 각 안테나의 개구면은 Ant-T, Ant-B, Ant-L, Ant-R의 안테나가 각각 상, 하,

좌, 우 방향으로 조향된 주빔 방향을 갖도록 설계되었다. 여기서 상, 하에 위치한 안테나는 yz -평면에서의 방향 탐지를 수행하며 좌, 우에 위치한 안테나는 xz -평면에서의 방향 탐지를 수행한다. 안테나간 간격은 안테나간 커플링 및 크기 비교 기울기를 고려하여 선정되었다. 안테나 지지 및 측정 장치와의 연결을 위해 안테나 조립체 후면에 치구가 위치하며 치구의 재질은 폴리카보네이트 ($\epsilon_r = 3.5$)로 선정하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 설계된 안테나 조립체의 VSWR 및 중심 주파수에서의 3-D 방사패턴 시뮬레이션 결과를

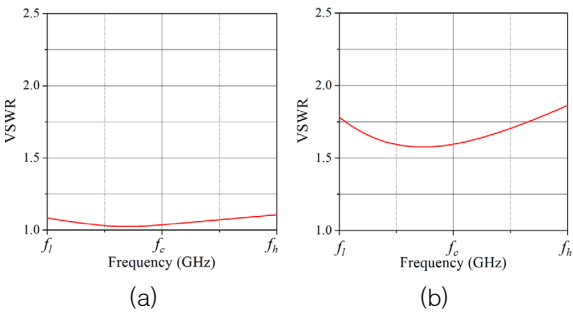


Fig. 5. Simulated VSWR results of each antenna
(a) Ant-T&B (b) Ant-L&R

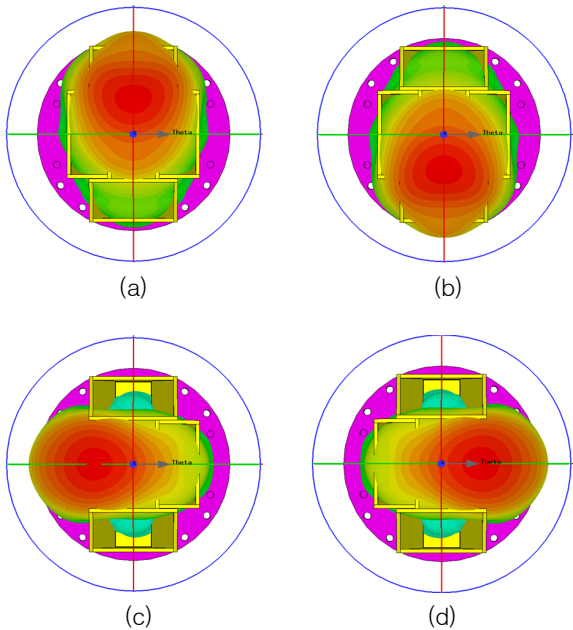


Fig. 6. 3-D radiation patterns of each antenna
(a) Ant-T (b) Ant-B (c) Ant-L (d) Ant-R

를 보여준다. 모든 안테나가 VSWR 2:1 기준으로 Ku-대역에서 3.2 % 이상의 대역폭을 가지며 각각의 위치에서 의도한대로 상, 하, 좌, 우 방향으로 주빔 방향을 형성함을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 설계된 안테나 조립체의 xz -평면과 yz -평면에서의 2-D 방사패턴을 나타낸다. 각 안테나의 자세한 성능은 Table 1에 제시하였다. 안테나는 동작주파수 대역에서 $15.8^\circ \sim 18.8^\circ$ 이내의 주빔 방향을 가지며 주빔 방향에서 약 10 dB의 이득을 가진다. 방향 탐지 각과 관련되는 Half-power Beamwidth(HPBW)의 경우, xz - 및 yz -평면에서 57.8° 이상으로 수동형 또는 반응동형 탐색기 시스템에 적합한 넓은 탐지각을 가짐을 확인할 수 있다. 정면 방향 탐지거리와 관련된 정면 방향 이득은 8.0 ~ 9.0 dB로 계산되었다.

Fig. 8은 설계된 안테나 조립체의 크기 비교 결과 결과를 나타낸다. xz -평면상에서의 기울기는 약 0.31 dB/deg (@ f_l GHz), 0.28 dB/deg (@ f_c GHz), 0.26 dB/deg (@ f_h GHz)이며 yz -평면에서의 기울기는 약

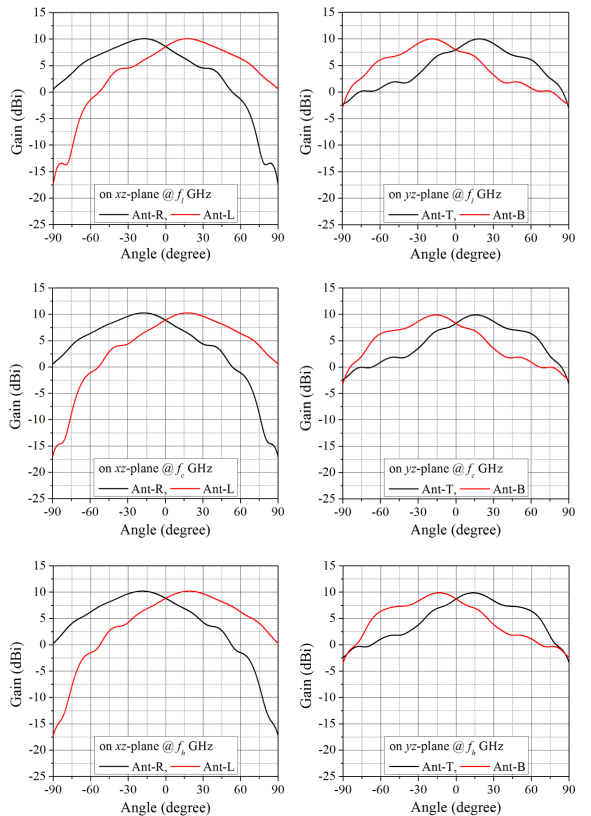


Fig. 7. Radiation patterns of the antenna assembly

Table 1. Details of the simulated radiation pattern results of the antenna assembly

Frequency [GHz]	Ant-T & Ant-B (on yz-plane)			Ant-L & Ant-R (on xz-plane)		
	f_l	f_c	f_h	f_l	f_c	f_h
Main beam direction [°]	±18.8	±15.8	±13.5	±17.3	±17.5	±18.8
Peak gain [dBi]	10.0	9.9	9.9	10.1	10.2	10.2
Boresight gain [dBi]	8.0	8.3	8.7	8.6	9.0	8.9
HPBW [°]	57.8	66.5	71	63.1	64.6	66.5

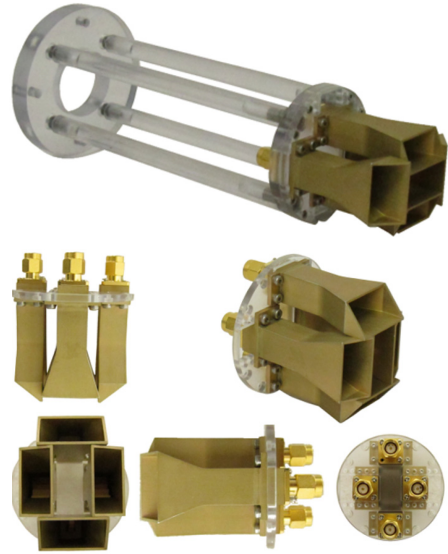


Fig. 9. Fabricated antenna assembly

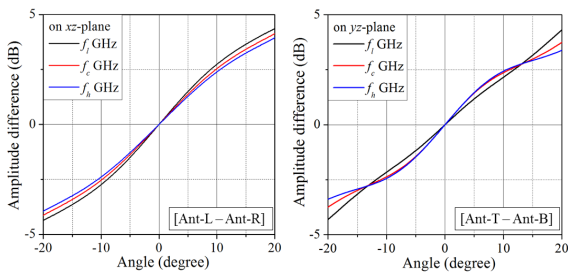


Fig. 8. Simulated amplitude comparison results of the designed antenna assembly

0.25 dB/deg (@ f_l GHz), 0.31 dB/deg (@ f_c GHz), 0.31dB/deg (@ f_h GHz)로 계산되었다. 모든 커브가 정면 방향 근처 (약 $\pm 10^\circ$ 이내)에서 선형적임을 확인할 수 있으며 추출된 커브는 플랫폼 내에 저장되어 탐지, 추적 시 활용된다.

3. 안테나 조립체 제작 및 측정 결과

Fig. 9는 제작된 안테나 조립체 형상을 보여준다. 안테나 재질은 알루미늄이며 치구는 폴리카보네이트 재질로 제작되었다. Fig. 10은 제작된 안테나의 VSWR 측정 결과를 나타낸다. Ku-대역에서 VSWR 2:1 기준으로 3.2 % 이상의 대역폭을 구현함을 확인할 수 있다. Fig. 11은 측정된 안테나 조립체의 f_l GHz, f_c GHz, f_h GHz에서의 시뮬레이션과 측정된 방사패턴의 결과

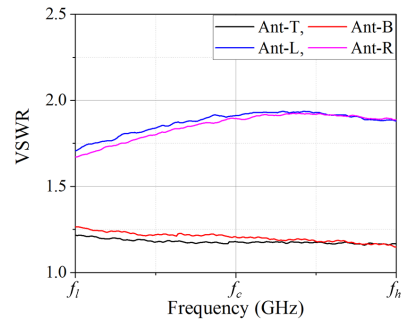
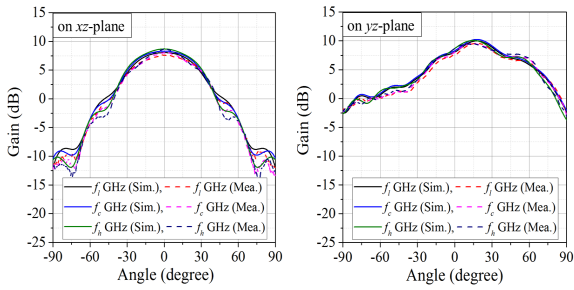
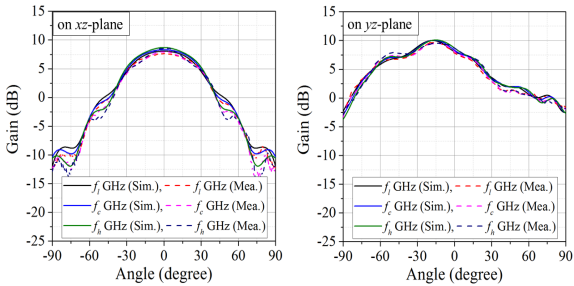


Fig. 10. Measured VSWR results

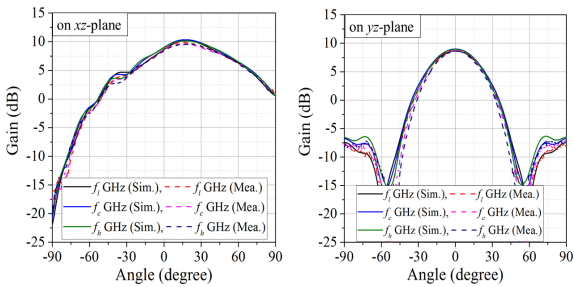
를 비교한 것이다. 시뮬레이션과 측정 결과의 유사성을 확인할 수 있으며 측정된 패턴들을 이용한 각 평면에서의 크기 비교 결과는 Fig. 12에 제시되었다. xz-평면에서의 기울기는 약 0.30 dB/deg (@ f_l GHz), 0.26 dB/deg (@ f_c GHz), 0.27 dB/deg (@ f_h GHz)이며 yz-평면에서의 기울기는 약 0.24 dB/deg (@ f_l GHz), 0.32 dB/deg (@ f_c GHz), 0.25 dB/deg (@ f_h GHz)로 계산되었다. 측정 결과 커브에 약간의 출렁임 현상이 발생됨을 확인할 수 있는데 이는 이상적으로 Ant-T와 Ant-B, 그리고 Ant-L과 Ant-R이 조립체 중심축을 대칭으로 정확히 같은 패턴을 갖는 것이 맞지만 실제 제작 공차 및 측정 케이블 손실 및 위상차로 인해 발생한 것으로 판단된다. 이는 추후 급진 방식 안정화를 통해 개선될 수 있을 것으로 예상된다.



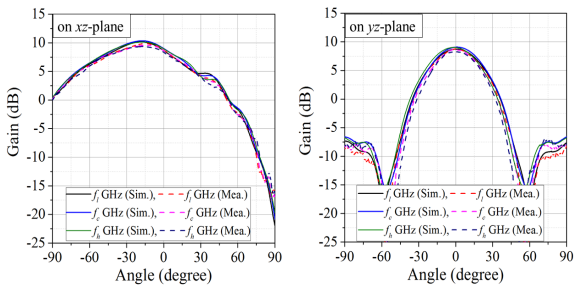
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11. Comparison results of measured and simulated radiation patterns (a) Ant-T (b) Ant-B (c) Ant-L (d) Ant-R

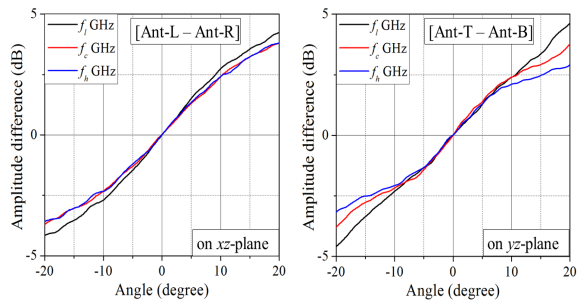


Fig. 12. Measured amplitude comparison results of the fabricated antenna assembly

4. 결론

본 논문에서는 소형 비행체 탑재용 레이더 센서에 적용하기 위한 방향 탐지 안테나를 제시하고 이를 이용한 크기 비교 방향 탐지 안테나 조립체를 구성하여 이의 방향 탐지 성능을 제시하였다. 안테나는 소형화, 저가화 및 환경 내 견고성을 고려하여 End-launch 급전 방식과 변형된 개구면을 갖는 도체형 도파관 안테나로 설계되었다. 설계된 안테나는 VSWR 2:1 기준으로 Ku-대역에서 중심주파수 기준 3.2 % 이상의 대역폭을 가지며 정면 방향에서 8 dBi 이상의 이득을 구현한다. 이 때 모든 안테나의 빔폭은 고각과 방위각 평면에서 57.8° 이상이다. 방향 탐지용 안테나 조립체는 제시된 안테나를 상, 하, 좌, 우로 배치하여 구성하였으며 각각의 안테나는 크기 비교 방향 탐지 기법 적용을 위해 각각의 위치에서 조립체 중심축을 기준으로 상, 하, 좌, 우로 편향된 주빔 방향을 가진다. 제시된 조립체는 측정 결과 기준으로 고각 평면에서 0.24 dB/degree ~ 0.32 dB/degree의 크기 비교 기울기와 방위각 평면에서 0.26 dB/degree ~ 0.30 dB/degree의 기울기를 가진다. 제시된 결과를 보았을 때 제안된 조립체 형상이 소형 비행체 탑재용 방향 탐지 레이더 센서로서 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] H. H. Choi, "Multi-USE Weapons that Expand the Operating Platforms," Defense and Technology, Vol. 455, pp. 34-47, 2017.

- [2] S. M. Sherman and D. K. Barton, "Monopulse Principle and Techniques 2nd ed.," Artech House, pp. 45-70, 2011.
- [3] A. R. Mallahzadeh and A. Imani, "Double-Ridged Antenna for Wideband Applications," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 91, pp. 273-285, 2009.
- [4] C. Bruns, P. Leuchtmann, and R. Vahldieck, "Analysis and Simulation of a 1-18-GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, No. 1, pp. 55-60, 2003.
- [5] T. Fukusako and L. Shafai, "Design of Broadband Circularly Polarized Horn Antenna Using an L-shaped Probe," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 3161-3164, 2006.