

VHF-UHF 대역 항공기용 블레이드 안테나 설계

Design of a VHF-UHF Band Blade Antenna for Aircraft Applications

고주석 · 허 준 · 계영철 · 추호성

Jooseoc Go · Jun Hur · Youngchul Kay · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 항공기 안테나로 사용되는 VHF-UHF 대역(500 MHz~3 GHz)용 블레이드 안테나를 설계하였다. 설계된 안테나의 형상은 기존에 보고된 연구의 고유전율의 유전체 사용 및 사각형 형상의 확장 그라운드 삽입과 달리 n차 다항식의 차수 변화에 따라 변화하는 곡률을 가지는 방사부와 확장 그라운드의 형상을 최적화하였다. 최적화된 형상을 바탕으로 안테나의 성능을 평가하기 위해 VHF-UHF 대역(500 MHz~3 GHz)에서의 정합 성능과 이득 성능을 측정하였다. 성능 평가 결과, VHF-UHF(500 MHz~3 GHz) 전 대역 정합 성능이 -6 dB 이하의 성능을 나타냄을 확인하였으며, 이득 성능 또한 VHF-UHF 전 대역에서 -5 dBi 이상의 성능을 나타내었다.

Abstract

In this paper, we designed a blade antenna for VHF-UHF band(500 MHz~3 GHz) to be used as aircraft antennas. Unlike previously reported researches that use high-dielectric materials and insert rectangular extended grounds, the antenna structure was designed by optimizing the curvature of both a radiator and an extended ground whose shape is varied by changing the exponent of an n-th polynomial. Based on the optimized structure, we measured impedance matching and gain performances to evaluate the antenna in the VHF-UHF band(500 MHz~3 GHz). As a result, we confirmed that the antenna shows matching characteristics of less than -6 dB and has average gains of greater than -5 dBi in the entire VHF-UHF band.

Key words : Blade Antenna, VHF-UHF Antenna, Extended Ground

I. 서 론

현재 항공기용 VHF-UHF 대역 안테나는 높은 수신 성능을 만족시키기 위해 $\lambda/4$ 모노폴이나 블레이드 타입과 같은 외부 돌출형 안테나를 사용한다^{[1]~[5]}. 그러나 이러한 폴 형상과 블레이드 형상의 안테나는 차배수 공진이 생겨 특정 주파수에서의 복사 이득 성능의 저감 현상이 생기며, 광대역 매칭 특성을 가지기 어려운 단점을 가진다. 최근 고유전율을 가진 유전체를 사용하여 광대역 매

칭 및 형상을 소형화하는 연구가 활발히 진행되고 있다^{[6]~[9]}. 하지만 고유전율의 유전체를 사용하는 경우, 높은 유전 손실로 인한 복사 이득 저감 및 제작 오차에 대한 성능 민감도가 증가하는 단점을 보인다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 안테나의 그라운드를 확장시켜 방사부에 근접함으로써 광대역 특성을 유도하는 기술이 제안되었다. 하지만 대부분의 발표된 연구에서 사용된 확장 그라운드는 형상이 단순한 사각형에 한정되어 다양한 그라운드 형상에 대한 심도 있는 연구가 미흡한 실정이다. 따라

「본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 연구되었음.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received January 13, 2014 ; Revised May 15, 2014 ; Accepted May 20, 2014. (ID No. 20140113-006)

· Corresponding Author: Hosung Choo (e-mail: hschoo@hongik.ac.kr)

서 본 논문에서는 확장 그라운드의 다양한 형상에 따른 안테나 성능을 관찰하기 위해 안테나의 방사부와 확장 그라운드의 형상을 n차 다항식으로 모델링하여 최적 성능을 도출할 수 있는 방사부와 그라운드의 곡률 형상을 제안하였다. 제안된 안테나는 항공기용 블레이드 레이돔에 장착 되도록 방사부와 확장 그라운드가 평면형 구조를 가지며, 동축선로를 이용하여 급전하였다. 안테나의 반사계수는 VHF와 UHF 대역(500 MHz~3 GHz)에서 -6 dB 이하의 정합 성능을 보이며, 방위각 방향 평균 복사 이득이 전대역에서 -5 dBi 이상으로 항공기용 블레이드 안테나로 사용이 가능함을 확인하였다.

II. 설계된 안테나의 구조 및 형상

그림 1은 제안된 안테나의 형상을 보여준다. 세부 형상은 역 아치형 모양의 방사부(폭 w_1 , 높이 h_3)와 얇은 급전 선로(w_3)로 구성되며, 그라운드로부터 수직으로 확장된 곡선을 가진 확장 그라운드(폭 w_2 , 높이 h_1)가 t_1 과 h_2 의 간격을 가지고 평행 배치된 형상을 갖는다. 급전선로와 확장 그라운드 사이는 유전체가 삽입되지 않은 공기 공간이다. 방사부와 확장 그라운드의 다양한 형상에 따른 안테나의 성능을 파악하기 위해 각각의 형상이 가지는 곡률을 n차 다항식으로 모델링하였으며, 각각의 식을 (1)과 (2)에 나타내었다.

$$z_u = h_1 + h_2 + |y^a|, \left\{ \frac{w_3}{2} < y < \frac{w_1}{2} \right\} \quad (1)$$

$$z_l = h_1 - |y^b|, \left\{ \frac{w_3}{2} < y < \frac{w_2}{2} \right\} \quad (2)$$

모델링된 안테나는 변수 y 의 차수 a 와 b 를 이용하여 방사부와 확장 그라운드의 곡률을 조절할 수 있다. 그림 2는 식 2의 지수 값에 따른 확장 그라운드 형상의 변화를 보여준다. 예를 들어, 차수가 1일 경우 수식은 1차 함수의 형태를 가지므로 각진 형태의 확장 그라운드를 가지며, 차수가 커질수록 높은 곡률의 확장 그라운드 형상을 가진다. 안테나의 성능 평가를 위해 제안된 안테나 형상을 전자파 모델링하였으며, 전자파 모델링은 MOM 해석방식을 사용하는 FEKO EM 시뮬레이터(Suit 6.2)를 사용하

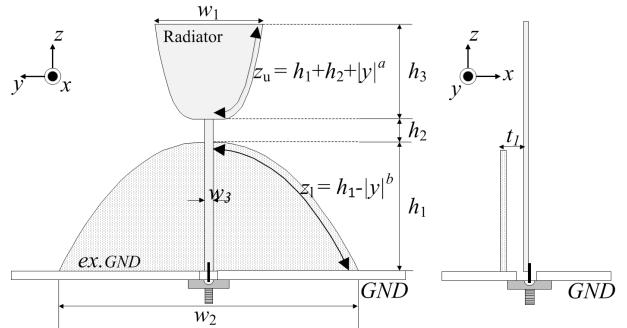


그림 1. 설계된 안테나의 형상

Fig. 1. Geometry of the designed antenna.

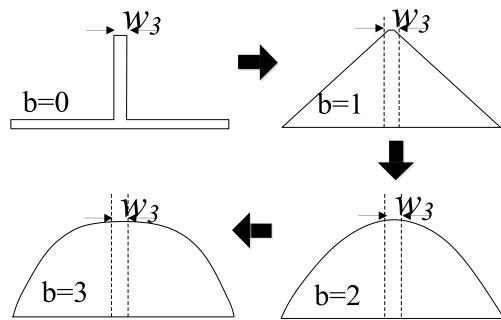


그림 2. 지수에 따른 확장 그라운드 변화

Fig. 2. Geometry of the extended ground according to the exponent.

였다^[10].

제안된 안테나는 동작 대역의 최저 주파수인 500 MHz 대역에서 약 $\lambda/4$ 의 길이를 갖도록 설계하였으며, 안테나 방사부와 확장 그라운드 간의 간격 t_1 은 방사부의 급전부와 확장 그라운드 사이의 coupling과 임피던스 특성을 고려하여 1 mm의 간격을 두고 이격하였다. 확장 그라운드를 사용할 경우, 방사부와 확장 그라운드 사이 간격의 위치에 따른 변화에 의해 대역폭이 변화하는 특성을 이용하여 광대역 정합 성능을 도출하였다. 확장 그라운드와 방사부의 형상은 n차 다항식을 이용하여 모델링한 후 형상을 최적화하였다. 최적 성능을 도출하기 위한 n차 다항식의 지수와 계수는 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화 하였으며, 사용된 비용 평가 함수는 500 MHz와 3 GHz 사이의 방위각 방향 평균 이득으로 정의하였고, 평균 이득이 -5 dBi 이하인 형상은 제외하였다. 표 1은 최적화된

표 1. 설계된 안테나의 변수

Table 1. Designed antenna parameters.

Parameters	w_1	w_2	w_3	t_1	h_1	h_2	h_3	a	b
Values(mm)	57	161	4	1	69	6	54	3.2	2.7

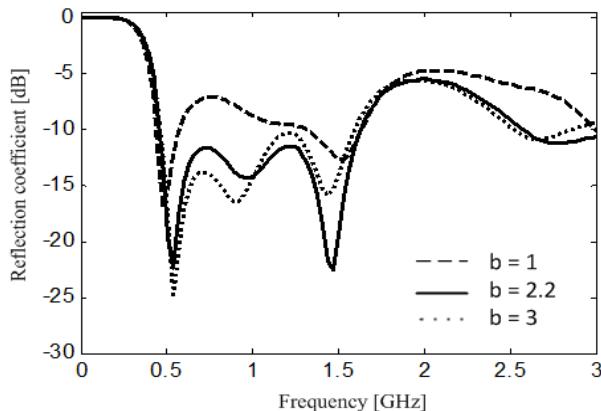


그림 3. 곡률에 따른 안테나의 반사계수

Fig. 3. Reflection coefficient according to the curvature.

안테나의 상세 설계 변수를 보여주며, 그림 3은 설계 파라미터 변화에 따른 성능 변화를 나타낸다.

III. 안테나의 성능 측정

그림 4는 최적화된 안테나의 제작 사진을 나타낸다. 최적화된 곡률을 가진 안테나의 설계변수를 바탕으로 두께 1 mm를 가지는 구리판으로 안테나를 제작하였다. 제작된 안테나는 그림 4와 같이 방사부와 확장 그라운드가 각각 다른 곡률을 가진다.

제작된 안테나의 정합 성능을 평가하기 위하여 500 mm×500 mm 정사각형 그라운드 위에 장착한 후, 정합 성능을 무반사실 챕버에서 측정을 하였으며, 아래 그림 5에 제작된 안테나의 정합 성능 결과를 나타내었다. 성능 분석 결과, VHF-UHF(500 MHz~3 GHz) 전대역에서 -6 dB 이하의 광대역 특성을 보임을 확인하였다.

그림 6은 안테나의 동작 주파수에서 azimuth 방향 이득 측정 성능을 나타내는 그림이다. 성능 확인 결과, 방위각 방향 평균 복사 이득이 전대역에서 -5 dBi 이상임 확인하였으며, 주파수 전대역에서 약 3.5 dBi 이하의 편차를 보임을 확인하였다.

(a) 안테나 전면
(a) Front view of the antenna(b) 안테나 후면
(b) Rear view of the antenna

그림 4. 설계된 안테나 형상

Fig. 4. Geometry of the fabricated antenna.

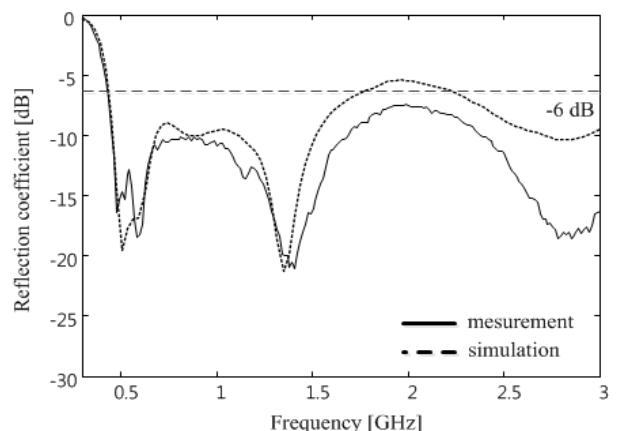


그림 5. 설계된 안테나의 반사계수

Fig. 5. Reflection coefficient of the antenna.

그림 7은 안테나의 동작 주파수인 500 MHz에서의 xz-plane, yz-plane의 복사 패턴을 보여주며, 그림 8과 9는 공

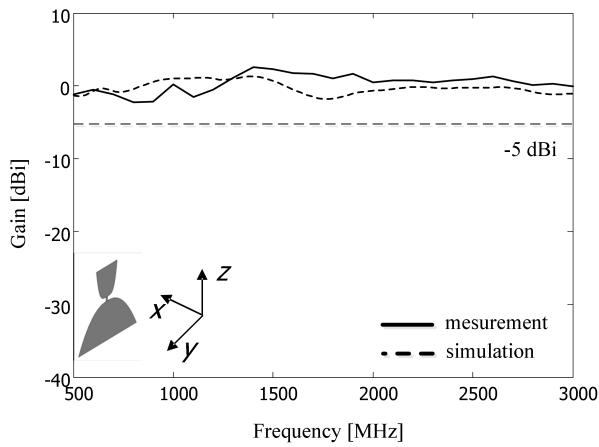
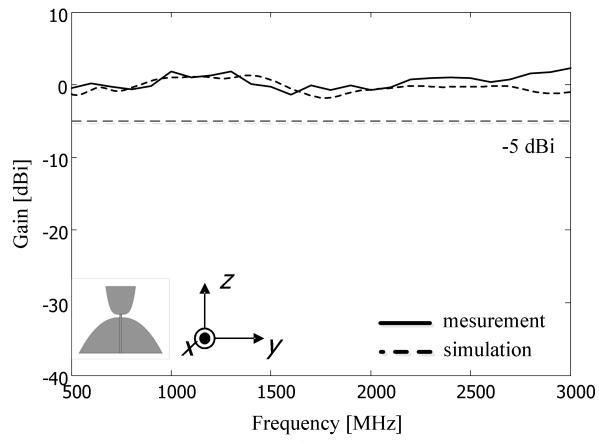
(a) 주파수 별 안테나의 전면 방향($\phi=0^\circ$) 이득 성능
(a) Gain of the antenna at $\phi=0^\circ$ (b) 주파수 별 안테나의 측면 방향($\phi=90^\circ$) 이득 성능
(b) Gain of the antenna at $\phi=90^\circ$

그림 6. 주파수 VHF-UHF대역의 이득 성능

Fig. 6. Radiation gain in the VHF-UHF bands.

진주파수인 1.4 GHz, 2.7 GHz에서의 복사 패턴을 보여준다. 안테나의 이득 성능은 항공 시나리오를 고려하여 $+45^\circ$ 에서 -15° 의 고각의 평균 이득으로 하였다^[9]. 안테나는 약 -5 dBi 이상의 평균 이득을 가지고, 복사 패턴의 형상에 왜곡이 없음을 확인하였으며, 표 2부터 7까지 500 MHz와 1.4 GHz, 2.7 GHz에서 개별 안테나의 최대 이득, 최소이득, 평균이득 및 편차를 나타내었다.

안테나의 항공기 탑재 성능을 분석하기 위해 $18\text{ m} \times 17\text{ m}$ 크기를 가지는 항공기의 배면 중앙부에 안테나를 장착한 후 이득 성능을 EM 시뮬레이션 하였다^{[12],[13]}. 항공기

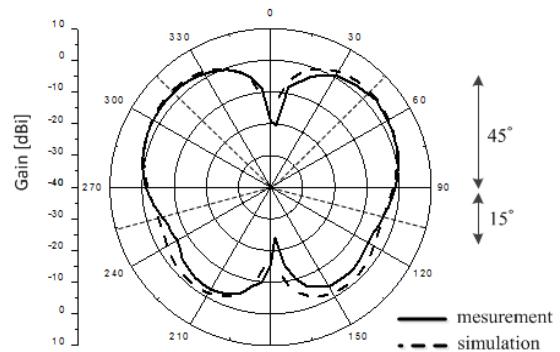
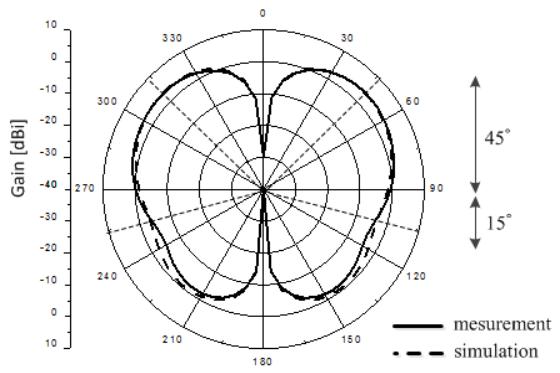
(a) 500 MHz의 xz-plane 복사 이득 패턴
(a) Radiation patterns in xz-plane at 500 MHz(b) 500 MHz의 yz-plane 복사 이득 패턴
(b) Radiation patterns in yz-plane at 500 MHz

그림 7. 500 MHz에서의 개별 안테나 복사 패턴

Fig. 7. Radiation patterns of the antenna at 500 MHz.

표 2. 500 MHz의 xz-plane 복사 이득

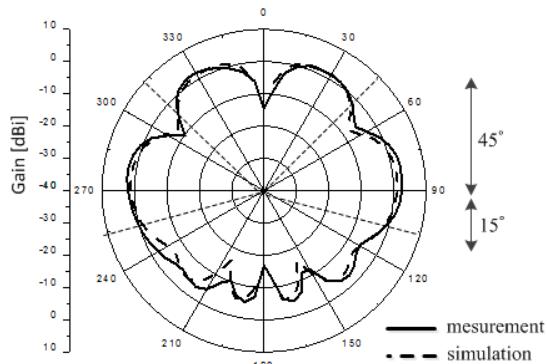
Table 2. Radiation gain in xz-plane at 500 MHz.

	Max. gain (dBi)	Min. gain (dBi)	Avg. gain (dBi)	Dev. (dB)
Meas.	2.88	-3.74	0.28	6.62
Simu.	3.13	-3.75	0.25	6.88

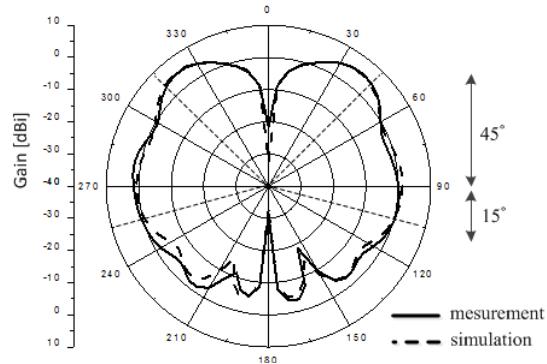
표 3. 500 MHz의 yz-plane 이득

Table 3. Radiation gain in yz-plane at 500 MHz.

	Max. gain (dBi)	Min. gain (dBi)	Avg. gain (dBi)	Dev. (dB)
Meas.	3.72	-3.65	1.16	7.37
Simu.	3.56	-3.26	0.73	6.82



(a) 1.4 GHz의 xz-plane 복사 이득 패턴
(a) Radiation patterns in xz-plane at 1.4 GHz



(b) 1.4 GHz의 yz-plane 복사 이득 패턴
(b) Radiation patterns in yz-plane at 1.4 GHz

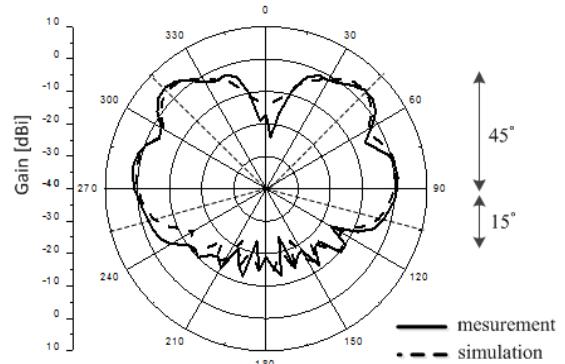
그림 8. 1.4 GHz에서의 개별 안테나 복사 패턴
Fig. 8. Radiation patterns of the antenna at 1.4 GHz.

표 4. 1.4 GHz의 xz-plane 복사 이득
Table 4. Radiation gain in xz-plane at 1.4 GHz.

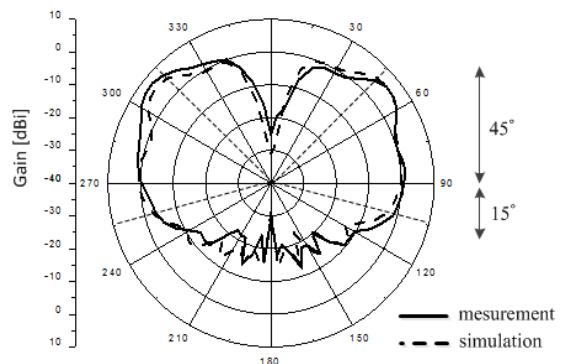
	Max. gain (dBi)	Min. gain (dBi)	Avg. gain (dBi)	Dev. (dB)
Meas.	1.26	-7.61	-1.51	8.86
Simu.	2.72	-10.23	-0.55	12.95

표 5. 1.4 GHz의 yz-plane 이득
Table 5. Radiation gain in yz-plane at 1.4 GHz.

	Max. gain (dBi)	Min. gain (dBi)	Avg. gain (dBi)	Dev. (dB)
Meas.	4.86	-1.02	0.91	5.88
Simu.	4.98	-1.81	0.84	6.79



(a) 2.7 GHz의 xz-plane 복사 이득 패턴
(a) Radiation patterns in xz-plane at 2.7 GHz



(b) 2.7 GHz의 yz-plane 복사 이득 패턴
(b) Radiation patterns in yz-plane at 2.7 GHz

그림 9. 2.7 GHz에서의 개별 안테나 복사 패턴
Fig. 9. Radiation patterns of the antenna at 2.7 GHz.

표 6. 2.7 GHz의 xz-plane 복사 이득
Table 6. Radiation gain in xz-plane at 2.7 GHz.

	Max. gain (dBi)	Min. gain (dBi)	Avg. gain (dBi)	Dev. (dB)
Meas.	3.1	-3.9	-0.57	7
Simu.	4.21	-6.17	-0.04	10.38

표 7. 2.7 GHz의 yz-plane 이득
Table 7. Radiation gain in yz-plane at 2.7 GHz.

	Max. gain (dBi)	Min. gain (dBi)	Avg. gain (dBi)	Dev. (dB)
Meas.	6.17	-3.72	1.32	9.89
Simu.	7.42	-3.62	2.07	11.03

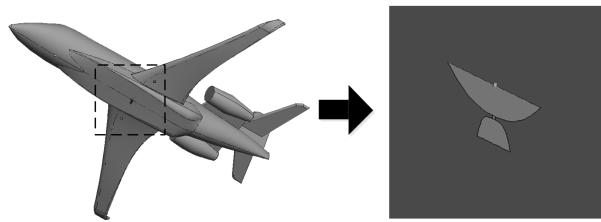


그림 10. 항공에 탑재된 형상

Fig. 10. Geometry of the antenna on aircraft.

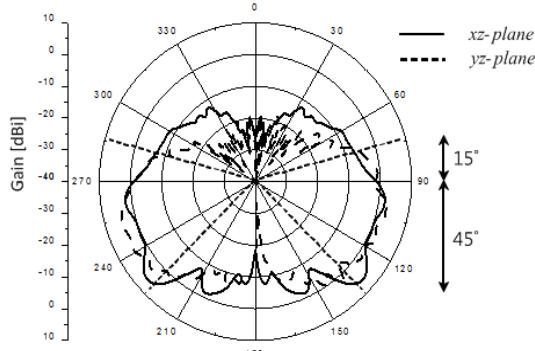


그림 11. 500 MHz에서의 탑재 안테나 복사 패턴 평가

Fig. 11. Radiation patterns of the antenna on aircraft at 500 MHz.

표 8. 항공기 장착 안테나 이득

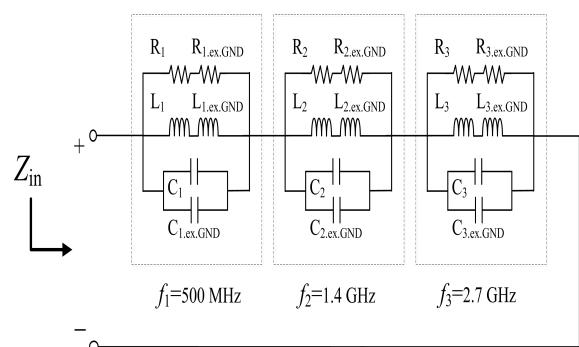
Table 8. Gain of the antenna on aircraft.

	Max. gain (dBi)	Min. gain (dBi)	Avg. gain (dBi)	Dev. (dB)
xz-plane	6.31	-6.79	0.31	13.1
yz-plane	4.52	-9.84	0.49	14.35

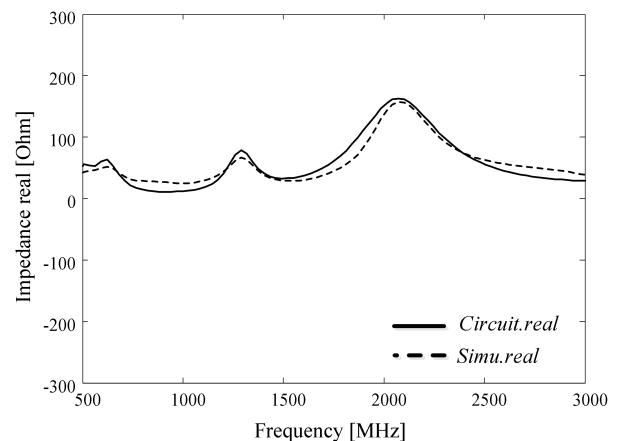
에 장착된 안테나의 형상을 그림 10에 나타내었으며, 그림 11은 500 MHz에서의 안테나 복사 패턴을 보여준다. 안테나는 전면(xz-plane) 및 측면(yz-plane) 방향에서 모두 최고 6 dBi 이상, 최소 -10 dBi 이상의 이득을 가진다(표 8).

IV. 안테나의 동작 원리 분석

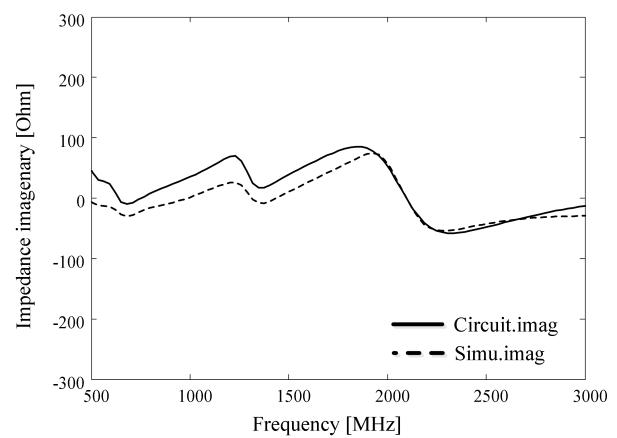
설계된 안테나의 동작 원리를 분석하기 위해서 등가회로 모델을 이용하여 안테나의 임피던스 특성을 도출하였으며, 회로 모델의 소자 값을 산출한 후, 그림 12(a)와 같이 등가회로 모델을 RLC소자를 이용하여 구현하였다. 그



(a) 안테나의 등가회로
(a) The equivalent circuit of the antenna



(b) 입력 저항 임피던스
(b) Input resistance



(c) 입력 리액턴스 임피던스
(c) Input reactance

그림 12. 설계된 안테나의 등가회로 및 임피던스

Fig. 12. Equivalent circuit and impedance of the antenna.

표 9. 등가회로의 RLC 소자 값

Table 9. RLC values of the equivalent circuit.

R_1	R_2	R_3	C_1	C_2	C_3	L_1	L_2	L_3
43.24 Ω	66.79 Ω	157.1 Ω	7 nF	1 nF	3.2 nF	40 pH	50 pH	400 pH

표 10. 확장 그라운드가 없을 경우의 RLC 소자 값

Table 10. RLC values without the extended ground.

$R_{1,\text{ex.GND}}$	$R_{2,\text{ex.GND}}$	$R_{3,\text{ex.GND}}$	$C_{1,\text{ex.GND}}$	$C_{2,\text{ex.GND}}$	$C_{3,\text{ex.GND}}$	$L_{1,\text{ex.GND}}$	$L_{2,\text{ex.GND}}$	$L_{3,\text{ex.GND}}$
740 Ω	130 Ω	197.1 Ω	51 nF	1.5 nF	4 nF	50 pH	100 pH	800 pH

그림 12(b)와 12(c)는 설계된 안테나의 등가회로 모델의 임피던스를 보여준다. 안테나의 중심 주파수 500 MHz, 1.4 GHz, 2.7 GHz에서 입력 저항이 약 50 Ω 의 일정한 값을 가지며, 입력 리액턴스 또한 0 Ω 에 근접한 값을 가져 임피던스 정합이 잘 이루어짐을 확인하였다. 표 9는 안테나의 등가회로의 RLC 소자의 값들을 보여준다.

그림 13은 설계된 블레이드 안테나의 확장 그라운드의 유무에 따른 임피던스의 영향을 나타낸다. 그림 13(a)는 확장 그라운드가 없을 시 등가회로를 나타낸 그림이며, 그림 13(b)와 13(c)는 등가회로 모델의 임피던스를 나타낸다. 분석 결과, 확장 그라운드가 없을 시 RLC 소자의 값이 증가되어 정합 특성이 열화됨을 확인하였으며, 확장 그라운드에 의해 광대역 정합 특성 도출이 가능함을 확인하였다. 표 10은 확장 그라운드가 없을 시 RLC 소자의 값의 변화를 나타낸 표이다.

그림 14는 안테나의 근접 전계 분석을 나타낸다. 그림 14(a)와 같이 확장 그라운드가 없을 경우, 급전지점과 방사부 일부에 전계가 집중된 것을 확인할 수 있다. 그림 14(b)는 확장 그라운드가 있을 시 전계강도를 나타내었으며, 확장 그라운드의 영향으로 전계강도가 안테나 급전선로 및 방사부 전체에 고르게 분포되도록 함으로써 광대역 정합 특성 도출이 가능함을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 VHF-UHF 대역에서 동작하는 항공기용 블레이드 안테나를 제안하였다. 설계된 안테나는 방사부와 확장 그라운드의 형상을 n차 다항식으로 모델링하여

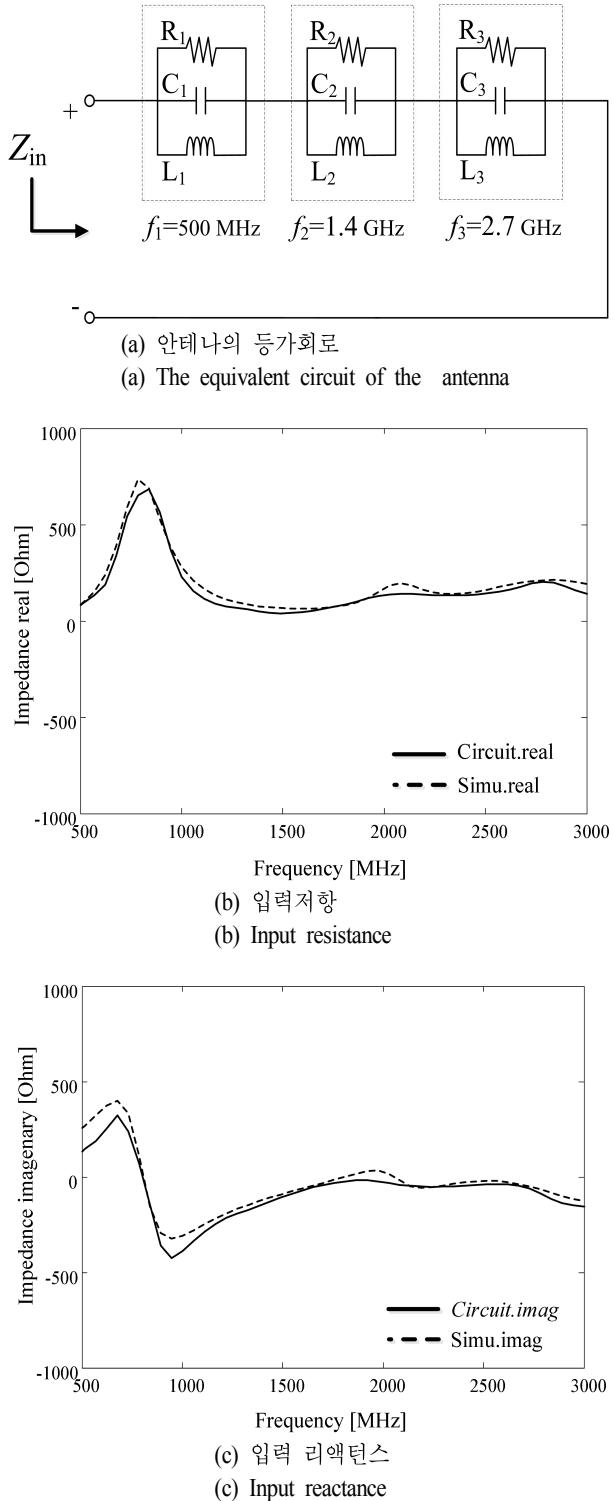
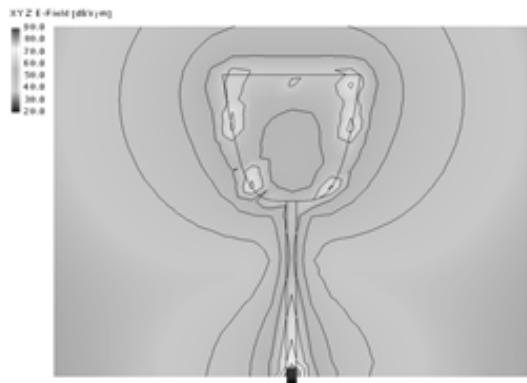
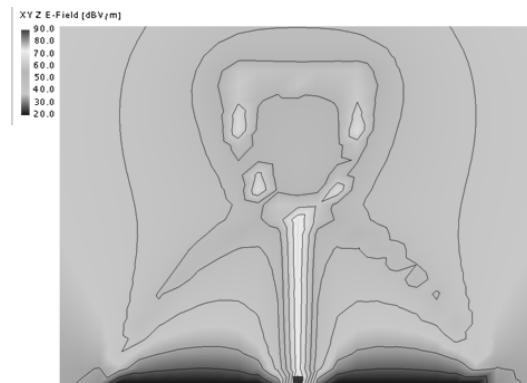


그림 13. 확장 그라운드가 없을 경우의 안테나 임피던스
Fig. 13. Input impedance without the extended ground.



(a) 확장 그라운드가 없을 시의 근접 전계
(a) Near-field distributions without the extended ground



(b) 확장 그라운드가 있을 시의 근접 전계
(b) Near-field distributions with the extended ground

그림 14. 확장 그라운드 유무에 따른 안테나의 near-filed 분석

Fig. 14. Near-field of the antenna with and without the extended ground.

최적 성능을 보이는 곡률 형상을 도출하였다. 측정 결과, 안테나의 반사계수는 VHF와 UHF 대역(500 MHz~3 GHz)에서 -6 dB 이하의 정합 성능을 보이며, 방위각 방향 평균 복사 이득이 전 대역에서 -5 dBi 이상을 보였다. 18 m \times 17 m 크기의 항공기에 안테나를 탑재한 후 복사 성능을 분석하였으며, 전면(xz-plane) 및 측면(yz-plane) 방향에서 최소 -7 dBi 이상의 복사 이득을 가짐을 확인하였다. 설계된 안테나의 동작원리를 분석하기 위해 확장 그라운드의 유무에 따른 안테나의 등가회로도 소자 변화를 확인하였으며, 분석 결과 확장 그라운드가 등가회로의 RLC

소자값들은 감소시켜 광대역 정합이 가능하게 함을 확인하였다. 또한, 확장 그라운드 유무에 따른 근접 전계 변화를 확인하였으며, 방사부와 확장 그라운드 사이에 고르게 근접 전계가 분포하여 광대역 정합 특성이 도출 가능함을 확인하였다.

References

- [1] G. Byun, C. Seo, B-J. Jang, and H. Choo, "Design of aircraft on-glass antennas using a coupled feed structure", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 4, pp. 2088-2093, Apr. 2012.
- [2] W. A. Cumming, "A nonresonant endfire array for VHF and UHF", *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 3, no. 2, pp. 52-58, Apr. 1955.
- [3] L. Rufail, J. Laurin, "Aircraft cavity-backed non protruding wideband antenna", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 1108-1111, 2012.
- [4] 변강일, 한원근, 추호성, "항공기용 양면 인쇄형 클래스 안테나 설계", *한국전자파학회논문지*, 22(2), pp. 131-139, 2011년 2월.
- [5] S. Noghanian, L. Shafai, "Control of microstrip antenna radiation characteristics by ground plane size and shape", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 145, no. 3, pp. 207-212, Jun 1998.
- [6] M. E. Bialkowski, A. M. Abbosh, "Design of UWB planar antenna with improved cut-off at the out of band frequencies", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, no. 10, pp. 408-410, Nov. 2008.
- [7] A. Foudazi, H. R. Hassni, and S. M. A Nezhad, "Small UWB planar monopole antenna with added GPS/GSM/WLAN bands", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 6, pp. 2987-2992, Jun. 2012.
- [8] A. J Kerkhoff, Hao Ling, "Design of a abnd-notched planar monopole antenna using genetic algorithm optimization", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 3, pp. 604-610, Mar. 2007.
- [9] Ahmad Hoofar, Alessandro Perrotta, "An experimental

- study of microstrip antennas on very high permittivity ceramic substrates and very small ground planse", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 5, pp. 838-840, May 2001.
- [10] <http://www.feko.info>, EM Software & Systems, "FEKO Suite 6.2".
- [11] 고주석, 변강일, 김기출, 주중민, 추호성, "VHF-UHF 대역 블레이드 안테나의 성능 평가 및 분석", 한국전

- 자과학회논문지, 24(10), pp. 951-957, 2013년 10월.
- [12] L. Marin, J. P. Castill, and K. S. H. Lee, "Broad-band analysis of VLF/LF aircraft wire antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 26, no. 1, pp. 141-145, Jan. 1978.
- [13] W. Sichak, J. Nail, "UHF omnidirectional antenna systems for large aircraft", *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 2, no. 1, pp. 6-15, Jan. 1954.

고 주 석



2012년 2월: 가천대학교 정보통신학과 (공학사)
 2012년 3월~2014년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 항공기 안테나, GPS 안테나, 차량 안테나

허 준



2014년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)
 2014년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 항공기 안테나

계 영 철



1980년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1991년 5월: University of Southern California, Electrical Engineering (공학박사)
 1991년 8월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] 음성 신호 처리, 인식 알고리즘의 최적화, RFID 용 태그 및 리더 안테나

추 호 성



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
 2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
 2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
 2003년 6월~2003년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (Post Doctor)
 2003년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수
 [주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더안테나