The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 18, No. 5, pp.89-95, Oct. 31, 2018. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.5.89
JIIBC 2018-5-11

항공기 탑재된 광대역 방향 탐지용 안테나 분석 연구

A Study on the Analysis of Broadband Direction finding Antenna on Aircraft

백종균*, 지성환**, 문병귀***, 이경원***, 김동규***, 이왕용***

Jong-Gyun Baek*, Sung-Hwan Ji, Byeonggwi Mun***, Kyung-Won Lee***, Dong-Gyu Kim***, Wang-Yong Lee***

요 약 본 논문에서는 항공기에서 사용되는 방향 탐지용 안테나가 항공기에 장착 될 경우, 항공기 구조, 회절과 반사에 의한 안테나 성능 변화를 분석하였다. 방향 탐지용 안테나는 항공기 전자전 체계(Electronic Warfare System)의 방향 탐지(DF : Direction Finding) 장치에서 레이더 위협 신호를 수신하는 안테나이다. 최근 항공기에 다양한 안테나가 장착되므로 탑재된 안테나 성능 해석 및 안테나 간섭 분석 등의 다양한 해석이 요구되고 있다. 본문에서는 모사된 항공기에 50% 대역폭을 가지는 광대역 방향 탐지용 안테나를 장착하여 전자파 해석을 진행하였고, 안테나의 단일 성능과 항공기에 탑재된 성능을 비교하여 방향 탐지 성능을 분석하였다. 분석된 방향 탐지 정확도는 6.47° RMS를 가지며 항공기 방향 탐지용 안테나로 적합함을 예측하였다.

Abstract In this paper, we analyze the antenna performance changes caused by the aircraft structure, diffraction and reflection, when the direction finding antenna used in the aircraft is mounted on the aircraft. Direction finding antenna is an antenna that receives radar threat signal in the direction finding device of aircraft electronic warfare system. Recently, because various antenna are mounted on an aircraft, various analyzes such as antenna performance and interference analysis are required. Therefore, the electromagnetic analysis was carried out by installing a broadband direction finding antenna with 50% bandwidth on simulated aircraft, and the direction finding performance was analyzed by comparing the single antenna performance with the performance mounted on the aircraft. The analyzed direction finding accuracy was 6.47° RMS and predicted to be suitable as an antenna for aircraft direction finding antenna.

Key Words : Aircraft antenna, Cavity-backed spiral antenna, Broadband, Direction finding antenna

Ⅰ. 서 론

최근 차량, 항공기, 선박 등과 같은 대형 구조체에 다양한 안테나가 장착되고 있으며, 그로 인해 다양한 안테나 성능 해석, 탑재된 안테나 영향성 분석, 안테나 간 상호 영향성 분석이 요구되고 있다.[1]~[5] 대형 구조체에 탑재된 안테나는 구조체의 외부 돌출 구조 및 장착 위치 등으로 인해 회절 또는 반사로 야기되는 전파 특성의 왜곡과 성능 열화를 보일 수 있다.[6] 대형 구조체에 장착된 방향 탐지용 안테나의 전파 특성 왜곡과 성능 열화는 광대

*정회원, LIG 넥스원(주)
**정회원, 모아소프트(주)
***정회원, LIG 넥스원(주)
접수일자 : 2018년 9월 18일, 수정완료 : 2018년 9월 30일
게재확정일자 : 2018년 10월 5일

Received: 18 September, 2018 / Revised: 30 September, 2018 / Accepted: 5 October, 2018
*Corresponding Author: jonggyun.baek@lignex1.com
Dept of KF-X EW Suite Systems, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

역과 360° 전 방위에서 수행되는 전자전 체계의 방향 탐지 성능에 영향을 미칠 수 있다.[7]-[8] 따라서, 항공기와 같은 대형 구조체에 탑재되는 광대역 방향 탐지용 안테나는 설계 단계에서 장착 시의 안테나 성능에 대한 체계적인 사전 분석이 필요하다.

대형 구조체를 포함한 전자파 해석은 기존의 MoM(Method of Moments)이나 FDTD(Finite Difference Time Domain Method)와 같은 해석 기법으로는 리소스 및 해석 시간의 문제로 광대역 해석이 불가능하다. 전기적으로 큰 구조체 해석을 위해서는 MoM 해석 기법을 개량한 MLFMM(Multilevel Fast Multipole Method) 기법과 하이브리드 해석기법(MoM + physical optics) 등을 사용하여야 한다. MLFMM 해석 방식은 MoM 행렬 방정식의 해를 비선형 반복법(nonlinear iterative method)으로 구하고, 필요한 벡터-행렬 곱의 연산을 그룹 간 상호작용을 계층적으로 적용하여 연산량을 줄여서 계산하는 방식이다. 하이브리드 해석기법은 해석의 정확도가 요구되는 안테나 주변은 MoM 기법 또는 MLFMM 기법으로 해석하며 상대적으로 크기가 큰 구조체는 광학기법을 사용해 해석하여 연산에 요구되는 리소스를 줄이는 해석기법이다.

본 논문에서는 모사된 항공기에 광대역 방향 탐지용 안테나를 탑재하여 MLFMM 기법과 하이브리드 해석기법이 구현된 FEKO를 통하여 전자파 해석을 진행하였다.[9] 항공기는 모사된 F-35 항공기를 적용하였으며, 방향 탐지용 안테나로는 광대역 캐비티 백 스파이럴(Cavity-backed spiral) 안테나를 적용하였다. 항공기 주익 끝에 장착되는 방향 탐지용 안테나는 360° 전 방위 방향 탐지 성능 확보를 위하여 4개의 안테나가 적용되었다. 단일 안테나와 항공기 탑재된 안테나 간의 반사손실, 이득, 빔폭, 축비를 비교하여 탑재 영향성을 고찰하였다. 또한 탑재된 안테나 성능의 방향 탐지 정확도를 분석하여 항공기에 장착되는 방향 탐지용 안테나로서의 적합성을 판단하였다.

Ⅱ. 본 론

1. 방향 탐지 기술 분석

본 논문에서는 다양한 방향 탐지 방식 중 진폭 비교 방향 탐지 방식을 사용하였다. 진폭 비교 방향 탐지 방식의 원리는 전 방향으로 배치된 각각의 안테나로 수신되는 신호의 진폭을 비교하여 진폭 차에 해당되는 방위값을 찾아내는 것이다. 즉, 전 방향으로 배치된 안테나는 고유의 빔 패턴을 갖고 있기 때문에, 신호의 입사 방향이 바뀌면 진폭차도 바뀌게 되므로 진폭 차의 측정 및 분석으로 방향 정보를 획득할 수 있다.

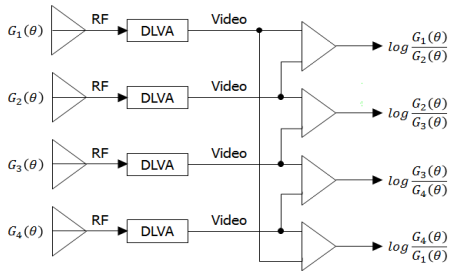


그림 1. 진폭 비교 방향 탐지 방식 구성도
Fig. 1. Block diagram of an amplitude comparison Direction Finding system

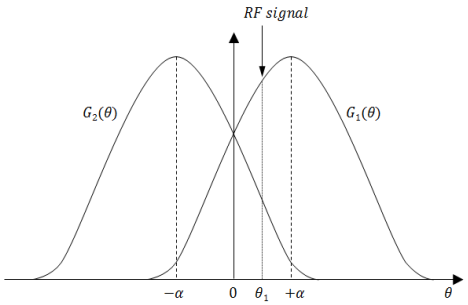


그림 2. 진폭 비교 방향 탐지 방식 원리
Fig. 2. The Principle of an amplitude comparison Direction Finding system

4개의 안테나를 사용하는 전형적인 형태의 진폭비교 방향 탐지 방식의 구성은 그림 1과 같다. 그림 1과 같은 구조에서 신호가 인접한 안테나 1과 2로 수신되는 경우 신호원이 안테나 1과 2로 수신되는 임의의 각도로 가정하면 두 안테나의 수신 패턴은 그림 2와 같은 관계로 나타난다. 이때에서 나타나는 두 안테나간의 진폭 차는 $\log[G_1(\theta_1)/G_2(\theta_2)]$ 값으로 측정되므로 진폭차를 측정하면 입사신호의 방향을 찾을 수 있다. 따라서 진폭 방향 탐지 방식에서 빔 패턴 형상이 중요하기 때문에 항공기 장착되었을 때의 빔 패턴의 변화를 예측하여 그 성능을 분석하여야 한다.

2. 방향 탐지용 광대역 안테나 설계 방안

전자전 체계에서는 광대역 주파수 범위의 위협 신호를 탐지, 식별 및 방해하는 전술이 매우 중요하기 때문에 방향 탐지 장치의 방향 탐지용 안테나는 넓은 주파수 대역에서 안테나 성능이 크게 변하지 않은 스파이럴안테나가 주로 사용된다. 따라서 본 연구에서 50% 대역폭을 가지는 광대역 캐비티 백 스파이럴 안테나를 설계하였다. 설계된 안테나의 형상은 그림 3에 나타 내었으며 방사체(Radiator), 캐비티 백(Cavity-backed), 캐비티 내부 흡수체(Absorber #1, 2)로 구성되어 있다.

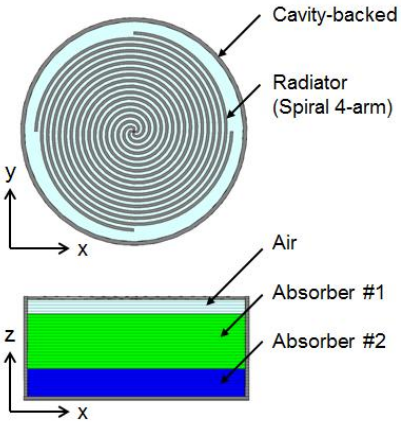


그림 3. 캐비티 백 스파이럴 안테나 구조
Fig. 3. The structure of Cavity-backed spiral antenna

본 연구는 안테나 영향성 분석을 위한 해석이므로 안테나의 급전부 설계는 제외하였다. 안테나의 크기는 지름 55.1 mm, 높이 25.0 mm이며 캐비티 내부 흡수체는 2단 구조로서 유전율 1.1, loss tangent 0.25를 가지는 상층(Absorber #1)과 유전율 2, loss tangent 0.5를 가지는 하층(Absorber #2)으로 된 구조를 사용하여 흡수율을 높였다. 설계된 안테나의 반사손실과 축비는 그림 4를 통해 확인 할 수 있다. 반사손실은 50% 대역폭에서 -20 dB 이하를 만족하고 축비는 3dB 이하를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 복사 패턴은 그림 5에 나타내었으며 주파수 대역의 F_{min}, F_c, F_{max} [GHz]에서 각각 -1.93 dBi, -0.25 dBi, 1.03 dBi의 이득과 86°, 90°, 62.5°의 반 전력 빔폭(Half-Power Beamwidth)을 각각 갖는다.

3. 항공기 탑재된 안테나 분석 방안

설계된 안테나는 그림 6과 같이 모사된 항공기에 장착

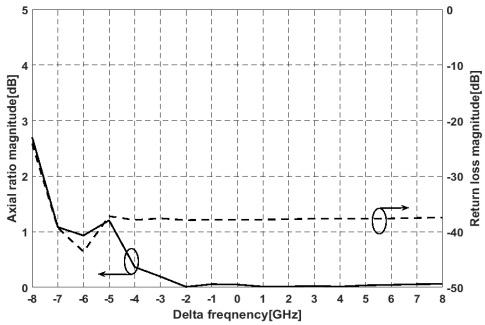


그림 4. 캐비티 백 스파이럴 안테나의 반사손실과 축비
Fig. 4. The return loss and axial ratio of Cavity-backed spiral antenna

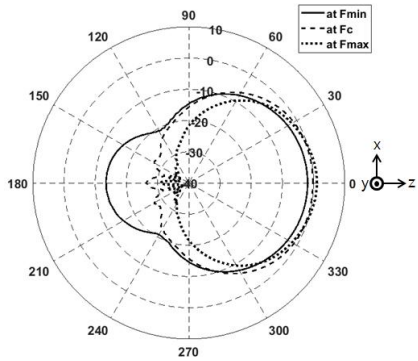


그림 5. 캐비티 백 스파이럴 안테나 x-z평면 패턴
Fig. 5. The x-z plane pattern of Cavity-backed spiral antenna

하여 해석을 진행하였으며, 주익 끝에서 측 방향(항공기 기준)으로 ±45° 기울어져 장착되어 있다. 또한 항공기는 y-z평면을 기준으로 대칭성을 가지므로 전면(FWD)과 후면(AFT)에 장착된 Ant. #1에 대하여 해석을 진행하였다. 본 논문에서 해석 구조체의 전기적 크기는 최저 주파수 대역인 F_{min}에서 100λ × 100λ, 최고 주파수 대역인 F_{max}에서는 900λ × 900λ를 가지며 고주파수 영역에서 기하급수적으로 증가된 리소스를 필요로 한다. 따라서 상대적으로 낮은 주파수 F_{min}은 MLFMM 기법으로 해석하고 F_c, F_{max}는 하이브리드 해석기법으로 해석하였다. MoM 기법을 개량한 MLFMM 기법의 연산 횟수의 개념을 그림 7에 MoM 기법과 비교하여 나타내었다. MoM 기법의 연산 횟수는 N^2로 정의할 수 있으며 2단 MLFMM 기법의 연산 횟수는 $2\times N$으로 나타낼 수 있다. N은 구조체를 해석하기 위해 생성되는 mesh의 숫자와 관련이 있다. 이러한 연산 횟수의 감소는 고전 MoM 기

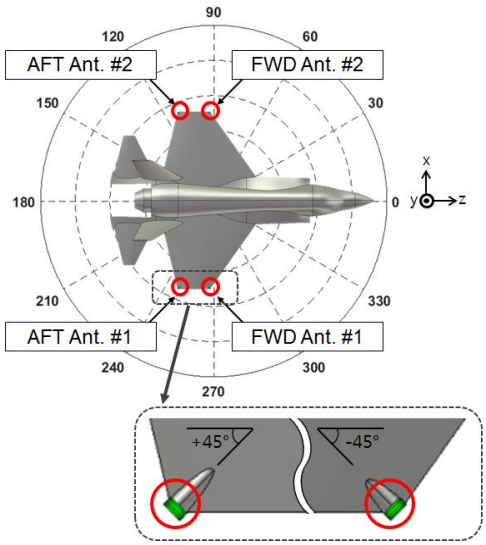


그림 6. 항공기 탑재된 안테나 위치 및 기준 좌표
Fig. 6. Aircraft mounted antenna position and reference coordinates axis

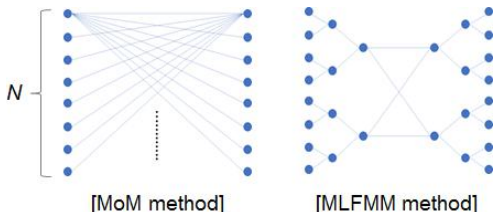


그림 7. MoM과 MLFMM의 연산 횟수 비교
Fig. 7. Comparison operation counts of MoM and MLFMM

법의 가장 큰 문제였던 리소스의 비효율적인 활용을 매우 효과적으로 개선할 수 있다. 하이브리드 해석기법은 다양한 방법이 존재하지만 본 연구에서는 MoM + PO(Physical Optics)를 사용해 해석을 진행하였다. 이 기법은 MLFMM 기법을 사용해 해석이 불가능한 전기적 크기를 가지는 대상을 해석하기 위해 사용하는 방법으로서, 본 연구의 해석대상은 넓은 주파수 범위의 동작 특성을 가지기 때문에 전기적 크기도 주파수에 따라 변화한다. 따라서 150λ × 150λ이상의 전기적 크기를 가지는 주파수 영역부터는 하이브리드 해석기법으로 정확한 전류 분포를 해석해야 하는 안테나는 MLFMM 기법으로 해석하고 안테나를 제외한 주변 구조는 PO를 사용해 해석을 진행하였다.

4. 항공기 탑재된 안테나 분석 결과

표 1은 탑재된 안테나의 반사 손실, 축비, 반 전력 빔폭을 F_{min}, F_c, F_{max}에 대하여 나타내었고 단일 안테나와 탑재된 안테나 간의 성능은 유사함을 확인 하였다. 그림 8 ~ 10은 동작 주파수 대역 내의 F_{min}, F_c, F_{max}에서 방위각 방향의 안테나 패턴을 항공기 좌표 기준으로 단일 안테나 패턴과 탑재된 안테나 패턴을 비교하여 나타내었다. 해석 결과, 항공기 후면 방향 패턴은 탑재 안테나의 ±90°(Boresight 기준) 빔폭 내에서 유사 성능 결과를 확인할 수 있다. 반면, 항공기 전면 방향에 위치한 안테나 패턴은 항공기 기준 좌표 30° ~ 45°, 315° ~ 330° 영역에서 안테나 이득이 최대 18.6 dB가 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 방향 탐지 성능은 방향 탐지 정확도를 산출하여 판단 할 수 있으며, 방향 탐지 정확도는 기준 패턴으로 계산된 신호 도래각과 실제 패턴의 의한 측정값의 오차를 통해 구할 수 있다. 이 오차는 방향 탐지 각도 오차 값을 말하며 이 값들의 제곱을 평균하고 루트를 취한 값을 방향 탐지 정확도라고 한다.

표 1. 단일 탑재된 안테나의 반사손실, 축비, 반 전력 빔폭
Table 1. The return loss, axial ratio and HPBW of mounted antenna

		F_{min}	F_c	F_{max}
FWD Ant. #1	Return loss [dB]	-26.2	-37.3	-37.4
	Axial ratio [dB]	2.9	0.3	0.3
	HPBW [°]	92.5	86.0	65.5
AFT Ant. #1	Return loss [dB]	-26.3	-38.5	-36.8
	Axial ratio [dB]	1.2	0.47	0.3
	HPBW [°]	88.0	90.5	63.0

본문에서는 항공기 탑재된 안테나 패턴으로 방향 탐지 정확도를 산출하여 방향 탐지 성능을 예측하였다. 항공기 기준으로 고각 0도일 때, 방위각의 방향 탐지 오차를 산출하여 그림 11에 제시하였다. 산출 결과, 30° ~ 45°, 315° ~ 330°를 제외한 구간에서는 평균 10° 이하의 각도 오차가 발생하였고, 30° ~ 45°, 315° ~ 330° 구간은 F_{min}에서 30.81°, F_c에서 39.98°, F_{max}에서 36.59° 의 최대 오차가 발생하였다. 이는 항공기 전면 방향의 구조체에 따른 왜곡으로 높은 방향 탐지 정확도를 위해서 탑재 안테나의 영향성 검토 및 최적 위치 검토가 필요함을 나타낸다. 해석 결과를 기반으로, 360° 전 방위에서 방향 탐지 정확도는 6.47° RMS를 가진다. 일반적으로 진폭 방향

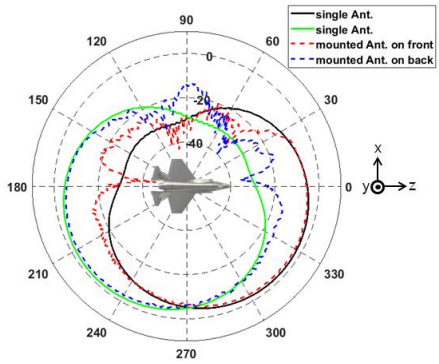


그림 8. F_{min} 안테나 복사패턴 비교
Fig. 8. Radiation pattern of the antenna at F_{min}

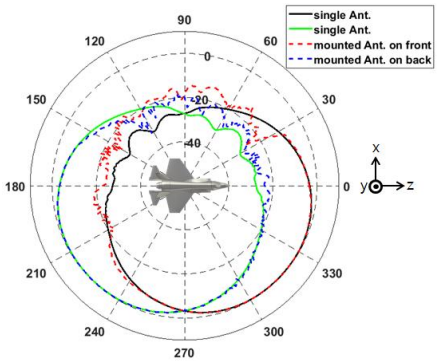


그림 9. F_c 안테나 복사패턴 비교
Fig. 9. Radiation pattern of the antenna at F_c

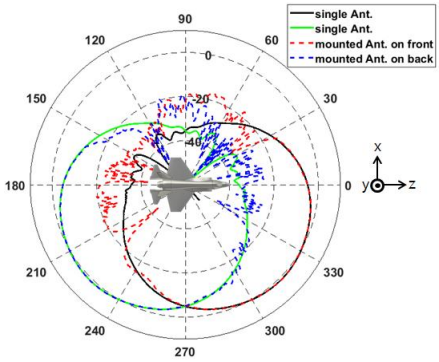


그림 10. F_{max} 안테나 복사패턴 비교
Fig. 10. Radiation pattern of the antenna at F_{max}

탐지 정확도는 15° RMS 이하 값을 적합하다고 판단하므로 분석된 안테나는 방향 탐지용 안테나로 적합하다고 예측 할 수 있다.[10] 하지만 항공기 전면 방향에 위치한 안테나의 많은 성능 변화가 예측되기 때문에 최적의 방향 탐지 성능 확보를 위해, 안테나 최적화 위치 재설정, 소프트웨어를 이용한 패턴보상 알고리즘 구현 등으로 방향 탐지 성능을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

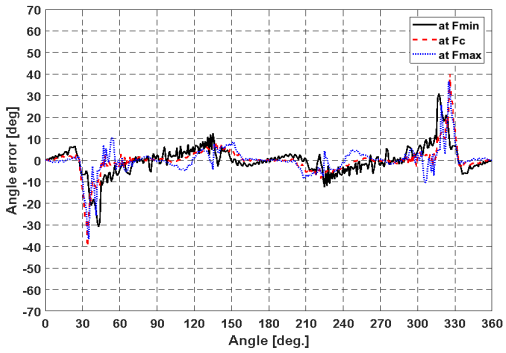


그림 11. 산출된 방향 탐지 각도 오차 값
Fig. 11. The calculated direction finding angle error

Ⅲ. 결 론

본 연구는 항공기에 탑재된 방향 탐지용 안테나 성능 분석하였다. 50% 대역폭의 광대역 캐비티 백 스파이럴 안테나를 설계하여 항공기에 장착 후, 전자파 해석을 진행하였으며 대형 구조체 해석이 가능한 MLFMM과 하이브리드 기법을 적용하여 광대역 해석을 진행하였다. 항공기 탑재된 안테나 해석을 통해 반사손실, 축비, 이득, 빔폭의 변화를 확인하였다. 그 결과를 통해 항공기 장착 시, 방향 탐지 성능이 6.47° RMS 방향 탐지 정확도를 가지는 것을 확인하였으며, 성능에 취약한 부분도 확인 할 수 있었다. 이러한 분석은 항공기 안테나 성능 개선에 활용될 것으로 판단되며, 향후 고각 범위 확장을 포함한 방향 탐지 성능 분석과 방향 탐지 성능 최적화를 위한 항공기 탑재 위치를 분석 할 예정이다.

References

[1] T. Namiki, Y. Murayama, and K. Ito, “Improving radiation-pattern distortion of a patch antenna having a finite ground plane”, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 3, pp. 478-482, Mar. 2003.

DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2003.809838.

[2] O. E. Allen, W. Wasylkiwskyj, “Comparison of mutual coupling of blade antennas with predictions based on minimum-scattering antenna theory”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 42, no. 4, pp. 326-329, Nov. 2000.
DOI: https://doi.org/10.1109/15.902301.

[3] L. Low, R. Langley, R. Breden, and P. Callaghan, “Hidden automotive antenna performance and simulation”, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 54, no. 12, pp. 3707-3712, Dec. 2006.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.2006.886546.

[4] L. Marin, J. P. Castill, and K. S. H. Lee, “Broadband analysis of VLF/LF aircraft wire antennas”, IEEE Trans. Antennas Propag, vol. 26, no. 1, pp. 141-145, Jan. 1978.
DOI: https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141806.

[5] S. M. Man, J. M. Woo, "A Study on Radiation Characteristics of Electrically Small Antenna for Low-VHF Band Direction Finding according to Tank Mounting Position," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 14, No. 2, pp. 127-134, 2013.

[6] T. Ozdemir, M. W. Numberger, J. L. Volakis, R. Kipp and J. Berrie, “A hybridization of finite-element and high-frequency methods for pattern prediction for antenna on aircraft structure”, IEEE Trans. Antennas and Propag, vol. 38, no. 3, pp. 28 - 38, Jun. 1996.
DOI: https://doi.org/10.1109/74.511950.

[7] R. Bunger, F. Demmel, and J. Ritter, “Installed performance analysis of direction finding system board large aircraft platrorm”, In Microwave conference 2003. 33rd European, vol. 2, no. 2, pp. 695-697, Oct. 2003.
DOI: https://doi.org/10.1109/EUMC.2003.177572.

[8] K. Gustafsson, F. McCarthy, and A. Paulraj, “Mitigation of wing flexure induced errors for airborne direction-finding application”, IEEE Trans. Signal Processing, vol. 44, no. 2, pp. 296-304, Feb. 1996.
DOI: https://doi.org/10.1109/78.485925.

[9] http://www.feko.info, EM software & System, “FEKO 2017”

[10] S. E. Lipsky, Microwave Passive Direction Finding, Wiley & sons, 1987.

저자 소개

백 종 균(정회원)

• 2011년 2월 : 동국대학교 전자공학과 (공학사)
• 2013년 8월 : 동국대학교 전자전기공학과 (공학석사)
• 2013년 4월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<주관심분야 : 안테나 설계 및 수치해석>

지 성 환(정회원)

• 2006년 2월 : 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)
• 2011년 2월 : 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
• 2012년 7월 ~ 현재 : (주) 모아소프트 RF/EMC 팀장

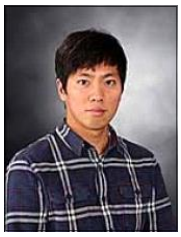
<주관심분야 : 안테나 설계 및 EM M&S, RCS해석>

문 병 귀(정회원)

• 2011년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학사)
• 2017년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
• 2017년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<주관심분야 : 안테나 시스템, 마이크로파 회로설계, 전자전 시스템 설계>

이 경 원(정회원)



• 2003년 2월 : 대진대학교 전자공학과 (공학사)
• 2005년 9월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
• 2012년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
• 2012년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원

<주관심분야 : 마이크로파 해석, 안테나/레이돔, 전자전 시스템>

김 동 규(정회원)

• 1997년 2월 : 명지대학교 전자공학과 (공학사)
• 2012년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
• 1997년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원

<주관심분야 : 초고주파 송/수신기, 전자전 시스템 설계>

이 왕 용(정회원)

• 1995년 2월 : 경북산업대학교 전자공학과 (공학사)
• 2008년 2월 : 아주대학교 정보전자공학과 (공학석사)
• 1995년 8월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원

<주관심분야 : 초고주파 회로설계, 전자전 시스템 설계>