

원격지원기용 항공기 플랫폼의 안테나 간섭 분석

Analysis of Antenna Interference on Aircraft Platforms for Remote Support

황규환* · 문병귀** · 이성의** · 박경태** · 박용배*^{***}

Kyuhwan Hwang* · Byeonggi Mun** · Sungui Lee** · Kyung Tae Park** · Yong Bae Park^{***}

요약

본 논문은 HFSS SBR+ 시뮬레이터를 활용하여 원격지원기용 항공기 플랫폼에 탑재된 다수의 안테나 간 전파 간섭을 정량적으로 분석하는 방법을 제안한다. 송신기와 수신기는 모두 모노폴 안테나로 모델링하고, 항공기 형상은 완전도체 물성의 일반적인 항공기를 사용하여 시뮬레이션 환경을 구성한다. 송수신 안테나는 네 가지 배치 조건(Case 1~4)에 따라 배치되며, 동작 주파수는 1 GHz와 10 GHz로 설정한다. 전파 전달 메커니즘으로는 직접파, 산란파, 회절파, 크리핑파를 고려하며, HFSS SBR+의 설정을 통해 회절 및 크리핑 옵션을 각각 활성화 또는 비활성화하여 다양한 조건에서의 수신 전력을 비교 분석한다. 시뮬레이션을 통해 송신 안테나 방사 패턴의 왜곡 현상, 구조물의 형상에 따른 전파 경로의 다양성, 그리고 주파수에 따른 전파 메커니즘의 의존성을 분석하며, 이를 통해 안테나 간 간섭 메커니즘을 해석하고 전파 경로의 기여도를 정량적으로 평가하는 방법론을 제시한다.

Abstract

In this study, we proposed a quantitative analysis method for inter-antenna electromagnetic interference on an aircraft platform for remote support using HFSS SBR+. Both the transmitter and receiver were modeled as monopole antennas, and the aircraft geometry was based on a general aircraft with perfect electric conductor (PEC) properties. The simulation considered four different receiver placement scenarios (Cases 1~4), and the operating frequencies were set to 1 and 10 GHz. The propagation mechanisms included direct, scattering, diffraction, and creeping waves. By enabling or disabling the diffraction and creeping options in the HFSS SBR+ environment, the received power was evaluated under various conditions. The simulation examined the radiation pattern distortion caused by aircraft geometry, variations in the propagation paths owing to structural shapes, and the frequency dependence of propagation mechanisms. Based on these analyses, this paper presents a methodology for decomposing the contribution of each propagation path and quantitatively assessing the inter-antenna coupling in complex aircraft environments.

Key words: Aircraft Platform, Antenna, Interference, Propagation Mechanisms, Simulation

「이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

*아주대학교 AI융합네트워크학과(Department of A.I. Convergence Network, Ajou University)

**LIG넥스원(LIG NEX1)

***아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received June 2, 2025 ; Revised June 10, 2025 ; Accepted July 8, 2025. (ID No. 20250602-054)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

I. 서론

현대 전자전기 전용 전투기 플랫폼의 대표 사례인 미 해군 EA-18G 그라울러(Growler)는 AESA 레이더 AN/APG-79, 광대역 수신기 AN/ALQ-218, 광대역 전술 재밍 포드 AN/ALQ-99, 그리고 INCANS 간섭 제거 시스템 등을 동체에 복합적으로 장착하고 있다^{[1]~[7]}. 이들 안테나 간 전파 간섭이 제대로 제어되지 않으면, 시스템 간 간섭이나 성능 저하로 이어지는 전자기 적합성(EMC, electromagnetic compatibility) 문제를 초래할 수 있다^{[8]~[11]}. 예를 들어, 동체 전면에 장착된 광대역 레이더 경고 수신기가 지상 레이더 신호를 탐지하려 할 때, 꼬리 날개의 저주파 통신 교란 포드가 내보내는 펄스 신호가 동일 영역의 스펙트럼을 가로지르며 수신 감도를 급격히 저하시킬 수 있다. 마찬가지로, 고주파 재밍 포드의 강력한 펄스가 저주파 위협 식별용 수신 안테나의 하모닉 대역을 포화시켜, 적 신호를 오인식하는 심각한 상황이 발생할 수 있다. 따라서 이처럼 다양한 주파수 대역의 송수신 안테나가 복합적으로 운용되는 환경에서는, 단순한 직접 경로뿐만 아니라 구조물에 의한 전파 산란이나 회절 및 크리핑(creeping) 경로까지 정밀하게 고려하여 안테나 간 간섭을 예측하고 제어하는 것이 매우 중요하다. 이는 전자전기 임무 수행 중 적 위협 신호를 정확하게 탐지하고 효과적으로 교란하기 위한 시스템의 신뢰성과 작전 효율성을 확보하는 데 핵심적인 요소이다.

최근 다수의 안테나가 항공기 동체에 부착된 경우 안테나 간 간섭을 분석하고 최적의 배치를 찾는 연구가 활발히 진행되고 있다^{[8]~[11]}. 예를 들어, CMA(characteristic mode analysis)나 pocklington 방정식과 같은 전자기 해석 기법을 적용하여, 항공기 동체 표면을 분석하여 다수 안테나의 배치를 최적화하는 연구^{[8],[9]}, 항공기 동체를 원기둥으로 근사하고 유전 알고리즘을 적용하여 다수 안테나의 배치를 최적화한 연구^[10], 전자기장 시뮬레이터를 이용하여 실제 항공기와 실제 운용 안테나 구성을 바탕으로 다수 안테나 간의 간섭을 분석한 연구^[11]가 수행되었다. 그러나 기존 연구들은 대부분 전체 표면 전류 분포 또는 간섭 지표를 정량적으로 계산하는 수준에 머물렀으며, 전파 전달 경로를 산란파, 회절파, 크리핑파 등으로

분리하여 각 경로의 기여도를 면밀히 분석한 사례는 부족한 실정이다.

실제 운용 환경에서는 안테나 간섭을 최소화하기 위해, 일반적으로 동체나 구조물에 의해 직접 가시선(LOS) 경로가 차단된 비가시선(NLOS) 조건이 고려된다. 이러한 환경에서는 구조물에 의한 산란 및 회절, 그리고 동체 표면을 따라 전파되는 크리핑 경로가 주요 전파 전달 메커니즘으로 작용하므로^{[12],[13]}, 안테나의 위치에 따라 각 전파 경로가 간섭에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 HFSS SBR+ 시뮬레이터를 활용하여, 서로 NLOS 환경에 위치한 송수신 안테나 간의 여러 주파수 대역과 다양한 배치 조건을 고려한 직접파, 반사파, 회절파, 크리핑파를 각각 분리하여 시뮬레이션하고, 각 경로의 기여도를 정량적으로 비교 분석한다.

II. 전파 전달 메커니즘

항공기 플랫폼에 다수의 안테나가 설치되는 환경에서는 구조물의 형상과 상대적 위치에 따라 다양한 전파 전달 메커니즘이 작용하며, 이는 안테나 간 간섭 수준에 결정적인 영향을 미친다. 대표적인 전파 메커니즘으로는 직접파, 산란파, 회절파, 크리핑파 등이 있으며, 각각의 특성을 이해하고 정량적으로 해석하는 것이 필수적이다. 먼저, 직접파는 송신 안테나와 수신 안테나 사이에 장애물이 없는 경우 직선 경로를 따라 도달하는 가장 기본적인 전파 경로이다. 직접파의 수신 전력은 일반적으로 프리스 전송 방정식(Friis transmission equation)을 통해 다음 식 (1)과 같이 표현된다^[13].

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

P_t 는 송신 전력, P_r 는 수신 전력, G_t 는 송신 안테나 이득, G_r 는 수신 안테나 이득, λ 는 파장, R 은 송수신 안테나 간 거리를 나타낸다. 이 방정식은 전파가 자유공간을 따라 진행된다고 가정한 이상적인 모델이지만, 실제 항공기에는 다수의 안테나가 복잡하게 탑재되어 있어 상호 간섭을 최소화하기 위해 LOS 경로가 구조물에 의해 차단되

는 경우가 일반적이다.

산란파는 전파가 동체의 곡면 구조나 기하학적 불연속 점(틈새, 돌출부 등)에 입사하여 여러 방향으로 재방사되는 현상을 의미한다. 특히 항공기처럼 곡면과 복합 구조물이 혼재된 환경에서는 단순한 정반사보다는 표면 곡률, 기하학적 불연속, 경계 조건 등에 의해 복합적인 산란이 발생한다. 이러한 산란파는 고주파 근사 기반 모델을 통해 계산되며, 그 중 하나인 PO(physical optics)에서는 표면 전류 분포에 기반하여 산란 전기장을 다음 식 (2)~식 (4)와 같이 표현한다^[12].

$$\vec{J} \approx 2\hat{n} \times \vec{H}_i \quad (2)$$

$$\vec{A} \propto \int_S \vec{J} e^{-jkr} dS \quad (3)$$

$$\vec{E}_s \approx -j\omega \vec{A} \quad (4)$$

\vec{E}_s 는 산란 전기장, \hat{n} 은 표면 법선 벡터, \vec{H}_i 는 입사 자기장, \vec{A} 는 벡터 포텐셜, k 는 파수이다. 입사 자기장 \vec{H}_i 는 구조물의 표면에서 경계 조건에 따라 표면 전류 \vec{J} 를 유도하며, 이 유도된 전류는 마치 새로운 복사원(등가 안테나)처럼 작용하여 2차 방사(산란)를 발생시킨다. 이러한 산란 메커니즘을 통해 전파는 직접 경로가 차단된 NLOS 영역으로도 전달될 수 있다. 또한, HFSS SBR+과 같은 실제 전자기장 시뮬레이터는 반사 역시 광선 추적법 기반 고주파 근사 기법에 따라 보정된 형태의 산란 현상으로 해석하는 것이 일반적이다.

회절파는 전파가 날카로운 기하학적 경계 지점(edge)에서 꺾이면서 NLOS 영역으로 전달되는 경로를 의미한다. 특히 송신 안테나와 수신 안테나 간 NLOS 환경에서는 핵심적인 전파 전달 메커니즘이 된다. 이때 회절 전기장은 GTD(geometrical theory of diffraction) 및 UTD(uniform theory of diffraction)에 따라 다음 식 (5)와 같이 표현된다^[12].

$$\vec{E}_d(s) = \vec{E}_i(Q_D) \cdot \vec{D}A(\rho_c, s) e^{-j\beta s} \quad (5)$$

$\vec{E}_d(s)$ 는 회절 전기장, s 는 관측점까지의 거리, $\vec{E}_i(Q_D)$

는 회절점 Q_D 에서의 입사 전기장이다. \vec{D} 는 회절 계수로, 회절점 Q_D 에서 입사한 전기장이 회절파로 변환될 때의 효율을 나타내는 계수이다. $A(\rho_c, s)$ 는 공간 감쇠 인자로, 회절파가 회절점 Q_D 에서부터 경로 길이 s 만큼 전파됨에 따라 세기가 감소하는 정도를 뜻한다. $e^{-j\beta s}$ 는 위상 인자로, 전파가 경로 길이 s 만큼 이동할 때 발생하는 위상 지연을 뜻한다. 일반적으로 주파수가 높아질수록(파장이 짧아질수록) 회절 현상은 상대적으로 약해진다는 사실은 잘 알려져 있다. 한편, PTD(physical theory of diffraction)는 GTD/UTD 모델이 단순 회절 계수만으로 처리하기 어려운 복잡한 구조의 산란 현상을 보완하기 위해 도입된 모델로, edge 주변에서 유도되는 표면 전류 및 경계 조건을 물리적으로 고려함으로써 보다 정밀한 전계 분포 계산과 경로 추적이 가능하다.

마지막으로, 크리핑파는 항공기 동체와 같은 곡면 또는 금속 표면을 따라 회절된 형태로 전파되는 전자기파로, 그림자 영역에서도 신호가 도달할 수 있게 해준다. 크리핑파 전기장은 다음 식 (6)과 같이 표현된다^[13].

$$\vec{E}_{cw}(s'') = \vec{E}_i(Q_1) D_s(Q_1) G(s'') e^{-\int \gamma(s'') ds''} \quad (6)$$

\vec{E}_{cw} 는 크리핑파 전기장이고 s'' 는 표면을 따라 측정된 호의 길이이다. $D_s(Q_1)$ 는 점 Q_1 에서의 표면 부착(회절) 계수로, 입사파가 표면에 붙어 크리핑파로 전환될 때의 효율을 나타내는 계수이다. $G(s'')$ 는 경로 s'' 상의 발산 인자로, 표면을 따라 진행하면서 에너지가 얼마나 퍼지거나 모이는지를 나타내는 기하학적 인자이다. $\gamma(s'') = \alpha(s'') + j\beta(s'')$ 는 경로 s'' 상의 복소 전파 상수로, α 는 표면을 따라 진행하면서 에너지가 감쇠함을 뜻하는 감쇠 상수이고, β 는 위상 지연을 뜻하는 위상 상수이다. 크리핑파는 일반적으로 전계 세기가 작고 손실이 크지만, LOS가 차단된 NLOS 환경에서 중요한 전파 경로로 작용한다.

이처럼 전파 전달 메커니즘은 구조물의 형상, 재질, 주파수 대역, 안테나 배치 조건에 따라 상호작용하며 복잡한 간섭 경로를 형성한다. 따라서, 본 논문에서는 각 메커니즘을 개별적으로 분리하고, 시뮬레이션을 통해 그 상대적인 기여도를 정량적으로 비교 분석하고자 한다.

III. 시뮬레이션 설정 및 결과 분석

HFSS SBR+ 시뮬레이터를 활용하여 다수의 안테나가 탑재된 항공기 환경을 단순화하여 모델링하기 위해, 송신기와 수신기는 모두 모노폴(monopole) 안테나로 통일하였으며 항공기 형상은 PEC 물성의 일반적인 항공기 모델을 사용하였다. 이는 항공기 외부 표면에 실제로 부착 가능한 구조를 고려할 때, PEC로 모델링된 모노폴 형태가 현실적인 안테나 형상이기 때문이다. 또한, 모노폴 안테나는 일반적으로 전방향성 특성을 가지므로 산란파(반사파), 회절파, 크리핑파와 같은 전파 전달 메커니즘의 기여도를 분석하는 데 유리하다. 그림 1은 시뮬레이션에 사용된 항공기 모델을 나타낸다. 실제 운용 환경에서는 고고도 상공에는 의미 있는 신호원이 존재하지 않기 때문에, 일반적으로 항공기에 탑재되는 송신 안테나들은 상방 지향을 하지 않는다. 이러한 점을 고려하여, 송신 안테나의 위치는 항공기의 배면에 배치하였다. 그림 2는 항공기 모델에 배치한 송신 안테나 Tx를 나타낸다. 시뮬레이션에

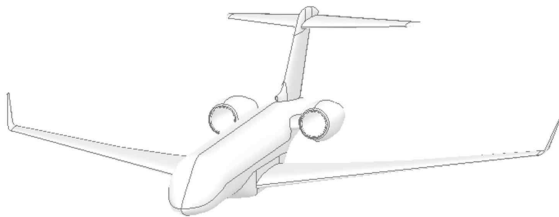


그림 1. 항공기 모델
Fig. 1. Aircraft model.

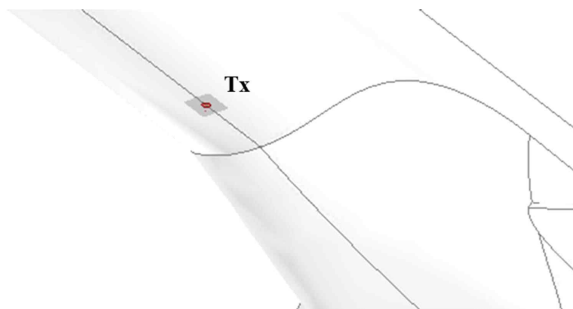


그림 2. 송신 안테나 부착 위치
Fig. 2. Placement of the transmitting antenna.

사용된 안테나 동작 주파수는 1 GHz와 10 GHz로 설정하였다. 1 GHz는 L band에 해당하고 10 GHz는 X band에 해당하며, 두 주파수 대역 모두 레이더 및 전자전기 시스템에서 널리 활용된다. 1 GHz와 10 GHz는 파장이 10배 차이 나므로 산란, 회절 및 크리핑과 같은 NLOS 경로 전파 메커니즘의 주파수 의존적 특성을 비교 분석하기 위해 선택되었다. HFSS SBR+ 시뮬레이션 설정에서 각각의 case와 주파수별로 회절(PTD/UTD)과 크리핑 옵션을 활성화하거나 비활성화함으로써, 수신 안테나에 수신되는 수신 전력에서 회절파에 의한 영향과 크리핑파에 의한 영향을 정량적으로 분석할 수 있다. 두 옵션을 모두 비활성화한 경우, 직접파와 산란파만 전파 전달 메커니즘으로서 동작하게 된다. 옵션 활성화와 무관하게 직접파와 산란파는 항상 전파 전달 메커니즘으로 동작한다. 본 시뮬레이션은 AMD RYZEN 5950X CPU, RTX 3090Ti 24GB GPU, 128GB RAM으로 구성된 하드웨어 환경에서 수행되었다.

수신 안테나 위치에 따른 전파 전달 메커니즘을 분석하기에 앞서, 먼저 송신 안테나의 방사 패턴이 항공기 동체에 의해 어떻게 영향을 받는지를 분석할 필요가 있다. 이상적인 모노폴 안테나와 달리, 항공기 동체에 부착된 모노폴 안테나는 PEC 항공기 동체의 영향을 받아 방사 패턴이 일부 왜곡된다. 그림 3 및 그림 4는 각각 1 GHz와 10 GHz에서의 송신 안테나 방사 패턴을 나타내며, 송신

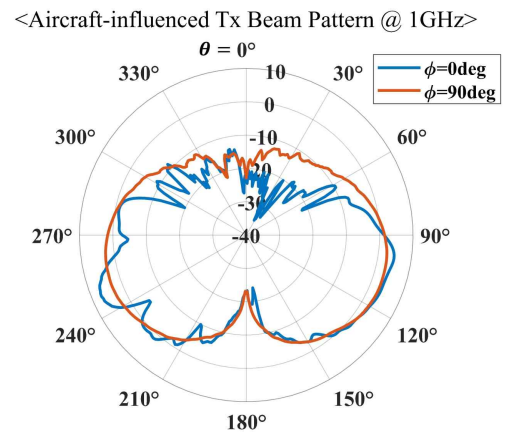


그림 3. 항공기 동체 영향을 반영한 송신 안테나 방사 패턴(1 GHz)
Fig. 3. Aircraft-influenced Tx beam pattern (1 GHz).

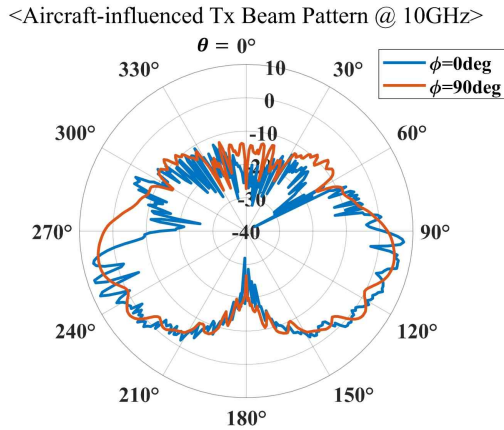
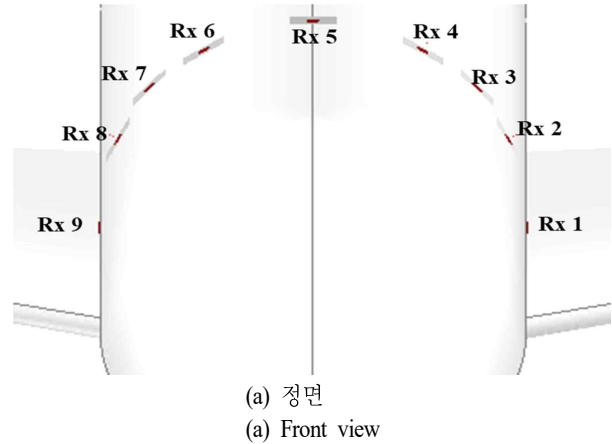


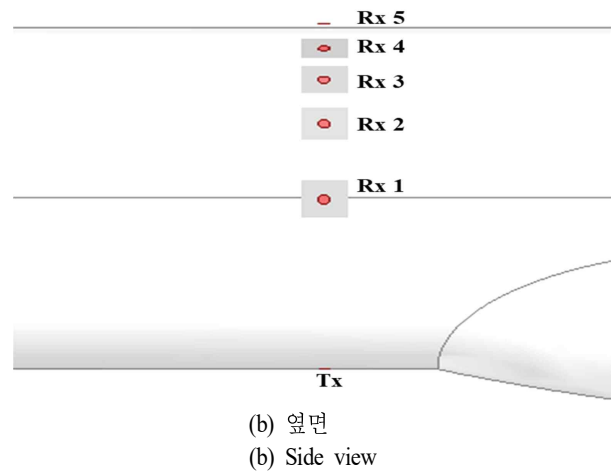
그림 4. 항공기 동체 영향을 반영한 송신 안테나 방사 패턴(10 GHz)

Fig. 4. Aircraft-influenced Tx beam pattern (10 GHz).

안테나의 위치를 원점이라 가정하고, 구면 좌표계 상에서 방사 패턴을 시각화한 것이다. $\phi=0^\circ$ 에서의 방사 패턴은 측방에서 바라본 방사 패턴이며, $\phi=90^\circ$ 에서의 방사 패턴은 전방에서 바라본 방사 패턴이다. 두 주파수 모두에서, 송신 안테나 후방으로의 방사 패턴은 이상적인 전방향성 모노폴 안테나 패턴과 비교해 눈에 띄게 왜곡된다. 따라서, 항공기 동체 영향에 의해 송신 안테나 후방 및 후측방으로는 패턴의 null 영역에 의해 급격히 방사 되는 전자기파 세기가 급감하는 영역이 존재할 것이라고 예상할 수 있다. 수신 안테나는 총 네 가지 case에 따라 서로 다른 위치에 배치하였으며, 각 case마다 Rx 1부터 Rx 9까지 총 9개의 수신 안테나를 사용하였다. 각 case 당 시뮬레이션은 약 1시간 내로 완료되었다. 그림 5는 case 1에서의 수신 안테나 배치를 나타낸다. Case 1에서는 수신 안테나가 항공기 측면과 항공기 윗면에 반시계방향으로 배치되어 있으며, 모든 수신 안테나가 송신 안테나와 NLOS 환경에 위치한다. 그림 6은 case 1의 수신 안테나 배치에 대해서 수신 안테나별로 수신 전력을 그래프로 나타내고, 표 1은 각 그래프 별로 전파 전달 메커니즘을 나타낸다. D는 직접파, S는 산란파, Di는 회절파, C는 크리핑파를 의미한다. 1 GHz에서 직접파, 산란파가 고려된 경우(1번, 파란색)와 1 GHz에서 직접파, 산란파, 회절파가 고려된 경우(2번, 주황색)에 그래프가 서로 겹치고, 1 GHz에서 직접파, 산란파, 크리핑파가 고려된 경우(3번, 노란색)와 1



(a) 정면
(a) Front view

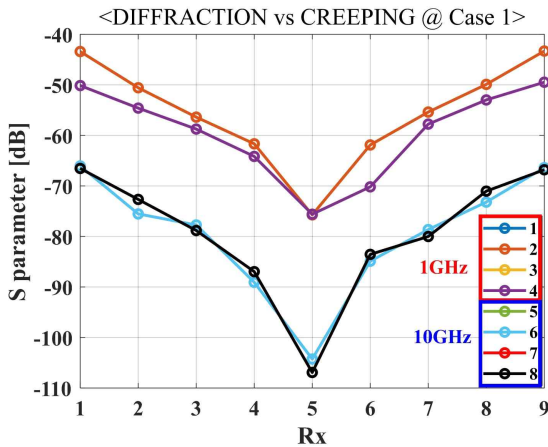


(b) 옆면
(b) Side view

그림 5. Case 1에서의 수신 안테나 배치
Fig. 5. Placement of receiving antennas at case 1.

표 1. 그래프별 전파 전달 메커니즘 비교
Table. 1. Comparison of propagation mechanisms by graph.

Graph	Diffraction option	Creeping option	Mechanisms
1: Blue	X	X	D, S
2: Orange	O	X	D, S, Di
3: Yellow	X	O	D, S, C
4: Purple	O	O	D, S, Di, C
5: Green	X	X	D, S
6: Sky Blue	O	X	D, S, Di
7: Red	X	O	D, S, C
8: Black	O	O	D, S, Di, C



- 1: Diffraction X & Creeping X @ 1 GHz
- 2: Diffraction O & Creeping X @ 1 GHz
- 3: Diffraction X & Creeping O @ 1 GHz
- 4: Diffraction O & Creeping O @ 1 GHz
- 5: Diffraction X & Creeping X @ 10 GHz
- 6: Diffraction O & Creeping X @ 10 GHz
- 7: Diffraction X & Creeping O @ 10 GHz
- 8: Diffraction O & Creeping O @ 10 GHz

그림 6. Case 1에서의 회절 및 크리핑 비교
Fig. 6. Diffraction and creeping comparison at case 1.

GHz에서 직접파, 산란파, 회절파, 크리핑파 모두 고려된 경우(4번, 보라색)에 그래프가 서로 겹친다. 또한, 10 GHz에서 직접파, 산란파가 고려된 경우(5번, 연두색)와 10 GHz에서 직접파, 산란파, 회절파가 고려된 경우(6번, 하늘색)에 그래프가 서로 겹치고, 10 GHz에서 직접파, 산란파, 크리핑파가 고려된 경우(7번, 빨간색)와 10 GHz에서 직접파, 산란파, 회절파가 고려된 경우(8번, 검은색)에 그래프가 서로 겹친다. 이를 통해, case 1에서는 회절은 유의미한 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이는 항공기가 공기역학적으로 유선형으로 설계되어 날카로운 기하학적 경계지점인 edge가 존재하지 않기 때문이다. 1 GHz에서는 크리핑파가 Rx 1과 Rx 9(항공기 동체 측면에 배치된 수신 안테나)에 가장 큰 영향을 미치고, Rx 5(항공기 동체 윗면)로 갈수록 크리핑파의 영향이 점차 감소하는 양상을 보인다. 이는 크리핑파는 곡면을 따라 진행하면서 점진적으로 감쇠되는 특성을 갖기 때문이다. 반면, 10 GHz에서는 1 GHz에 비해 크리핑파의 영향

이 상대적으로 적게 나타난다. case 1은 다른 case와 달리 모든 수신 안테나가 송신 안테나와 동일한 곡면상에 위치하기 때문에, 항공기 동체의 본체 부분을 원기둥으로 근사하여 전기장을 계산한다면, 주파수에 따른 크리핑파의 영향을 분석할 수 있다. 평행 편파에서 원기둥 곡면에 대한 근사 부차(회절)계수 (D_s)²와 감쇠 상수 α 는 다음 식 (7) 및 식 (8)과 같이 표현된다^[13].

$$(D_s)^2 = \frac{\rho_g^{1/3} e^{-j\pi/12}}{\pi^{1/2} 2^{5/6} \beta^{1/6} (Ai'(-q))^2} \tag{7}$$

$$\alpha = \frac{q}{\rho_g} e^{j\pi/6} \left(\frac{\beta \rho_g}{2}\right)^{1/3} \tag{8}$$

ρ_g 는 원기둥 곡면의 측지선 곡률 반경이고, β 는 위상 지연을 뜻하는 위상 상수로, 주파수에 비례한다. $Ai'(-q)$ 는 Airy 함수의 영점에서의 도함수 값이며, 원기둥 표면을 따라 진행하는 크리핑파의 모드 방정식이 Airy 방정식의 해를 기반으로 유도되기 때문에 사용된다. 식 (7) 및 식 (8)에 의해, 크리핑파의 전기장 세기는 주파수 f 에 따라 $f^{1/6} \exp(-f^{1/3})$ 에 비례하여 감쇠하는 것으로 근사된다. 따라서, 10 GHz에서는 1 GHz에 비해 크리핑파가 약 22.05 dB 더 감쇠되는 것으로 계산된다. 1 GHz에서 산란파만 고려된 1번 그래프와 10 GHz에서 산란파만 고려된 5번 그래프가 평균적으로 24.18 dB 차이가 나므로, 10 GHz에서 1 GHz에 비해 산란파 세기가 24.18 dB 감소했다고 판단할 수 있다. 산란파가 감소하는 정도와 크리핑파가 감쇠하는 정도가 비슷하기 때문에, 10 GHz에서도 1 GHz에서와 같이 크리핑파의 영향이 존재할 것이라고 분석할 수 있다. 그러나, 10 GHz에서는 실제 항공기 동체의 복잡한 곡면 형상으로 인해, 이상적인 원기둥에 비해 크리핑파의 감쇠가 더 크게 발생하였고, 이에 따라 1 GHz 대비 크리핑파의 기여도가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다. 결론적으로 송수신 안테나가 항공기 동체의 본체와 같은 동일한 곡면상에 위치하는 case 1에서는 송신 안테나와 멀어질수록 수신전력이 감소하는 경향을 보인다. 모든 전파 전달 메커니즘이 적용된 4번 그래프와 8번 그래프에 따르면, 두 주파수 모두 송신 안테나로부터 가장 멀리 떨어진 Rx 5에서 수신전력이 가장 낮게 나타나 전파 간섭을 최소화할 수 있다.

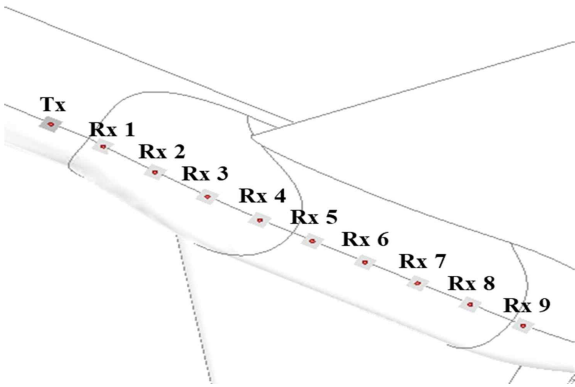
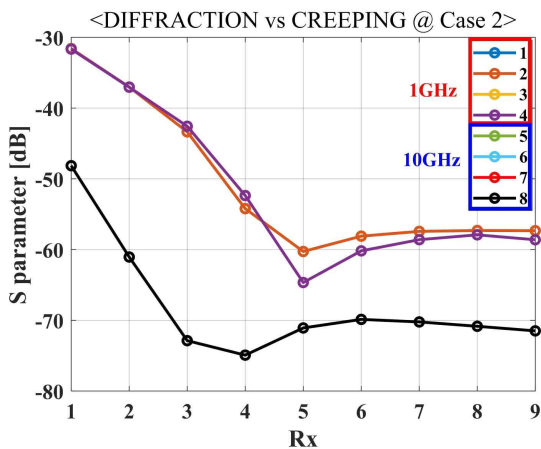


그림 7. Case 2에서의 수신 안테나 배치
Fig. 7. Placement of receiving antennas at case 2.

그림 7은 case 2에서의 수신 안테나 배치를 나타낸다. Case 2에서는 수신 안테나가 송신 안테나 뒤 쪽 항공기 배면에 일렬로 배치되어 있으며, Rx 1부터 Rx 4까지는 송신 안테나와 LOS 환경에 위치하고 Rx 5부터 Rx 9까지는 송신 안테나와 NLOS 환경에 위치한다. 그림 8은 case 2의



- 1: Diffraction X & Creeping X @ 1 GHz
- 2: Diffraction O & Creeping X @ 1 GHz
- 3: Diffraction X & Creeping O @ 1 GHz
- 4: Diffraction O & Creeping O @ 1 GHz
- 5: Diffraction X & Creeping X @ 10 GHz
- 6: Diffraction O & Creeping X @ 10 GHz
- 7: Diffraction X & Creeping O @ 10 GHz
- 8: Diffraction O & Creeping O @ 10 GHz

그림 8. Case 2에서의 회절 및 크리핑 비교
Fig. 8. Diffraction and creeping comparison at case 2.

수신 안테나 배치에 대해서 수신 안테나별로 수신 전력을 그래프로 나타낸 것이다.

Case 1과 마찬가지로 회절은 유의미한 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 1 GHz에서는 Rx 1~4에서 직접파 또는 산란파가 우세하게 작용하므로, 크리핑파의 영향이 미미하다. 그리고, Rx 5~9에서는 산란파의 세기가 약 -58 dB로 크게 감소하므로 크리핑파의 영향이 LOS 환경에 비해 상대적으로 크게 나타난다. 반면, 10 GHz에서는 Case 1과 달리 모든 그래프가 서로 겹친다. 크리핑파가 빠르게 감쇠되어 크리핑파의 영향이 나타나지 않기 때문이다. 결론적으로 송수신 안테나가 서로 다른 곡면상에 위치하는 case 2에서는 대체적으로 송신 안테나와 멀어질수록 수신전력이 감소하는 경향을 보인다. 모든 전파 전달 메커니즘이 적용된 4번 그래프와 8번 그래프에 따르면, 1 GHz에서는 송신 안테나와 약 5 m 떨어져 있는 Rx 5에서 수신전력이 가장 낮게 나타나 전파 간섭을 최소화할 수 있다. 반면, 10 GHz에서는 송신 안테나와 약 4 m 떨어져 있는 Rx 4에서, 수신전력이 가장 낮게 나타나 전파 간섭을 최소화할 수 있다.

그림 9는 case 3에서의 수신 안테나 배치를 나타낸다. Case 3에서는 수신 안테나가 날개 하부 동체와 평행하게 배치되어 있으며, Rx 1부터 Rx 2까지는 송신 안테나와 LOS 환경에 위치하고 Rx 3부터 Rx 9까지는 송신 안테나와 NLOS 환경에 위치한다. 그림 10은 case 3의 수신 안테나 배치에 대해서 수신 안테나별로 수신 전력을 그래프로 나타낸 것이다. 마찬가지로 회절은 유의미한 영향을

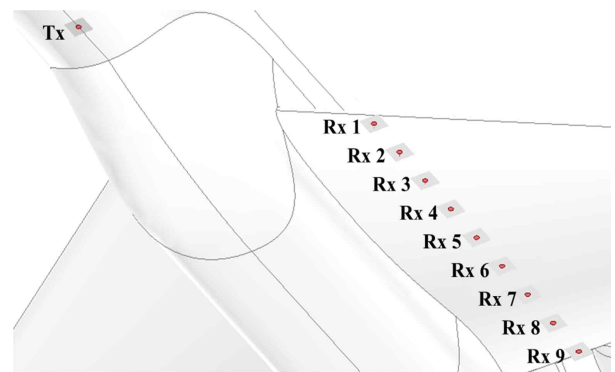
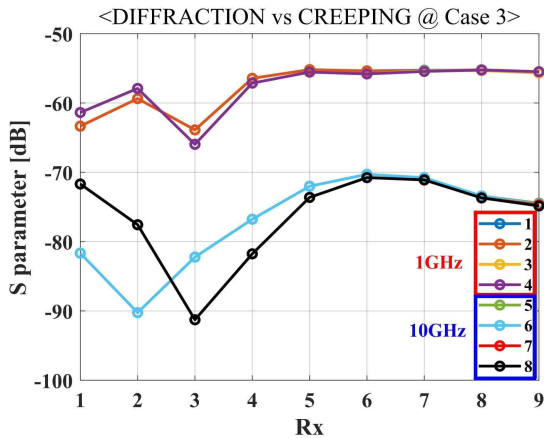


그림 9. Case 3에서의 수신 안테나 배치
Fig. 9. Placement of receiving antennas at case 3.



- 1: Diffraction X & Creeping X @ 1 GHz
- 2: Diffraction O & Creeping X @ 1 GHz
- 3: Diffraction X & Creeping O @ 1 GHz
- 4: Diffraction O & Creeping O @ 1 GHz
- 5: Diffraction X & Creeping X @ 10 GHz
- 6: Diffraction O & Creeping X @ 10 GHz
- 7: Diffraction X & Creeping O @ 10 GHz
- 8: Diffraction O & Creeping O @ 10 GHz

그림 10. Case 3에서의 회절 및 크리핑 비교
Fig. 10. Diffraction and creeping comparison at case 3.

미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 두 주파수 모두, Rx 1~2가 LOS 환경에 위치함에도 불구하고 왜곡된 송신 안테나 방사 패턴의 null 영역과 겹쳐, 오히려 수신 전력이 Rx 4~9에서 보다 낮게 나타난다. 1 GHz에서는 Rx 1~3에서 직접파 또는 산란파의 세기가 약 -60 dB로 낮게 나타나므로, 크리핑파의 영향이 크게 나타난다. Rx 4~9에서는 크리핑파 보다 매우 높은 세기의 산란파로 인하여 크리핑파의 영향이 미미하다. 10 GHz에서도 유사한 경향을 보이며, Rx 1~3에서 직접파 또는 산란파의 세기가 약 -80 dB로 낮게 나타나므로 크리핑파의 영향이 크게 나타난다. 또한, Rx 4~9에서는 크리핑파 보다 높은 세기의 산란파로 인하여 크리핑파의 영향이 미미하다. 결론적으로 송수신 안테나가 서로 다른 곡면상에 위치하는 case 3에서는 송신 안테나의 방사 패턴이 항공기 동체에 의해 왜곡되어 생기는 효과가 주요하게 작용하며, 날개 전면부 근처에 위치할수록 수신전력이 급격히 감소한다. 모든 전파 전달 메커니즘이 적용된 4번 그래프와 8번 그래프에 따르면, 두 주파수 모두 송신 안테나와 약 5.76 m

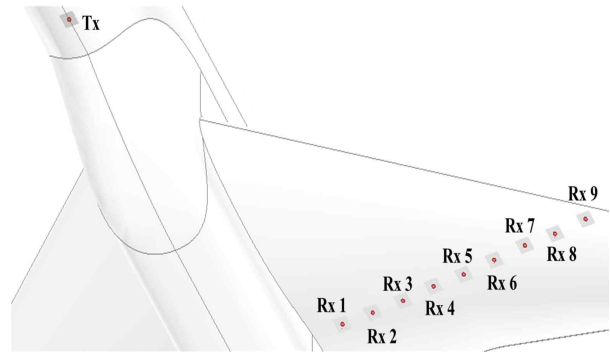


그림 11. Case 4에서의 수신 안테나 배치
Fig. 11. Placement of receiving antennas at case 4.

떨어져 있는 Rx 3에서 수신 전력이 가장 낮게 나타나 전파 간섭을 최소화할 수 있다.

그림 11은 case 4에서의 수신 안테나 배치를 나타낸다. case 4에서는 수신 안테나가 날개 하부 동체와 수직하게 배치되어 있으며, Rx 1부터 Rx 5까지는 송신 안테나와 NLOS 환경에 위치하고 Rx 6부터 Rx 9까지는 송신 안테나와 LOS 환경에 위치한다. 그림 12는 case 4의 수신 안테나 배치에 대해서 수신 안테나별로 수신 전력을 그래프로 나타낸 것이다. 1 GHz에서는, Rx 1~3이 NLOS 환경에 위치함에도 불구하고 산란파가 우세하게 작용하므로, 크리핑파의 영향이 미미하다. Rx 4~9에서는 송신 안테나와 거리가 충분히 멀기 때문에 직접파 또는 산란파의 세기가 약 -60 dB 이하로 크게 감소하여 크리핑파의 영향이 크게 나타난다. 그리고, Rx 9가 위치한 날개 끝에 가까워질수록 회절의 영향 또한 발생함을 확인할 수 있다. 이는 날개 끝일수록 동체 보다 날카로운 모서리 형상을 갖고 있기 때문이다. 마찬가지로, 10 GHz에서는 Rx 1~3에서 산란파가 우세하게 작용하므로 크리핑파의 영향이 미미하다. 또한, Rx 4~9에서는 직접파 또는 산란파의 세기가 약 -80 dB 이하로 크게 감소하여 상대적으로 크리핑파의 영향이 크게 나타난다. 결론적으로 송수신 안테나가 서로 다른 곡면상에 위치하는 Case 4에서는 대체적으로 송신 안테나와 멀어질수록 수신전력이 감소하는 경향을 보인다. 모든 전파 전달 메커니즘이 적용된 4번 그래프와 8번 그래프에 따르면, 1 GHz에서는 송신 안테나로부터 가장 멀리 떨어진 Rx 9에서 수신 전력이 가장 낮게 나타나

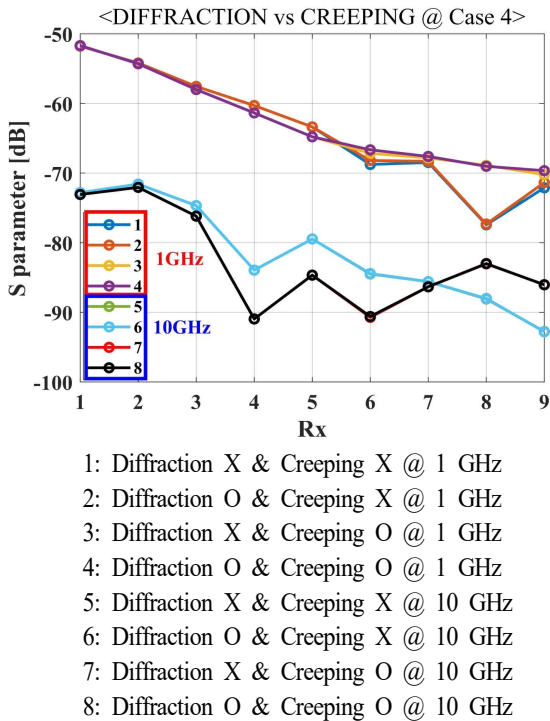


그림 12. Case 4에서의 회절 및 크리핑 비교
Fig. 12. Diffraction and creeping comparison at case 4.

전파 간섭을 최소화할 수 있다. 반면, 10 GHz에서는 송신 안테나와 약 8.79 m 떨어져 있는 Rx 4에서, 수신전력이 가장 낮게 나타나 전파 간섭을 최소화할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 HFSS SBR+을 활용하여 원격지원기용 항공기 플랫폼상에 탑재된 다수의 안테나 간 전파 간섭을 분석하고, 주요 전파 전달 메커니즘의 기여도를 정량적으로 평가하였다. 다수의 안테나가 장착된 항공기 환경을 단순화하여 모델링하고, case 1부터 case 4까지 4가지 수신기 배치 조건과 1 GHz 및 10 GHz의 두 주파수 조건에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 송신 안테나와 수신 안테나 간 수신 전력을 계산하고, 직접파, 산란파, 회절파, 크리핑파의 상대적 기여도를 비교 분석하였다. 분석 결과, 항공기 동체의 곡면 구조 특성으로 인해 회절파의 영향은 제한적인 반면, 직접파 및 산란파의 세기가 감소하는 환경에서는 크리핑파가 수신 전력에 유의

미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 크리핑파는 case 1과 같이 송수신 안테나가 항공기 동체의 본체와 같은 동일한 곡면상에 위치하면 송신 안테나와 거리가 멀어질수록 크리핑파의 영향이 감소하고, 10 GHz에서는 1 GHz에 비해 크리핑파의 영향이 상대적으로 적게 나타나는 경향을 보인다. 그 외의 case와 같이 송수신 안테나가 서로 다른 곡면상에 위치하면, 크리핑파는 1 GHz에서는 직접파 및 산란파의 세기가 약 -60 dB 이하인 경우에 영향을 미치고, 10 GHz에서는 직접파 또는 산란파의 세기가 약 -80 dB 이하인 경우에 영향을 미친다. 이러한 분석을 통해, 전파 전달 메커니즘별 기여도를 정량적으로 평가할 수 있었으며, 복잡한 항공기 구조물 내에서의 전파 경로를 명확히 분해하고 해석하는 데 본 논문에서 제안한 시뮬레이션 기반 분석 방법이 효과적임을 확인하였다. 향후 항공 플랫폼 내 전자전기 장비 간 간섭 최소화, 안테나 최적 배치 설계, 레이더 및 항공전자 시스템 성능 향상 등 다양한 응용 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. H. Lee, I. H. Jeong, "Key power of the future battlefield: Trends in development of electronic warfare equipment" *Journal of Electromagnetic Engineering and Technology*, vol. 32, no. 2, pp. 13-20, Mar. 2021.
- [2] Boeing, "Boeing successfully completes initial flight demonstration of EA-18 airborne electronic attack variant," 2014. Available: <https://boeing.mediaroom.com/2001-11-15-Boeing-Successfully-Completes-Initial-Flight-Demonstration-of-EA-18-Airborne-Electronic-Attack-Variant>
- [3] Boeing, "Navy awards boeing \$9.6 billion in super hornet and EA-18G contracts," 2014. Available: <https://boeing.mediaroom.com/2003-12-29-Navy-Awards-Boeing-9.6-Billion-in-Super-Hornet-and-EA-18G-Contracts>.
- [4] Boeing, "EA-18G airborne electronic attack aircraft," 2011. Available: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2166036/ea-18g-growler-airborne-electronic-attack-aircraft/>
- [5] Boeing, "EA-18G growler overview," 2011. Available:

https://web.archive.org/web/20060318195055/http://www.boeing.com/defense-space/military/ea18g/docs/EA-18G_overview.pdf

- [6] Boeing, "Boeing EA-18G program completes INCANS verification testing, Demonstration," 2005. Available: https://web.archive.org/web/20051125222021/http://www.boeing.com/news/releases/2005/q4/nr_051108m.html
- [7] L. Thompson, "Navy steps up new jammer effort; First new system in 40 years," *Aol Defense*, 2012. Available: <https://web.archive.org/web/20120729084230/http://defense.aol.com/2012/07/26/navy-steps-up-new-jammer-effort-first-new-system-in-40-years>
- [8] D. Su, Z. Yang, and Q. Wu, "Characteristic mode assisted placement of antennas for the isolation enhancement," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 251-254, Feb. 2018.
- [9] A. V. Vishnevsky, V. A. Ivanov, "3D co-site interference modeling between aircraft antennas for the purpose of

their best placement," in *2018 22nd International Microwave and Radar Conference(MIKON)*, Poznan, May. 2018, pp. 151-154.

- [10] E. M. Koper, W. D. Wood, and S. W. Schneider, "Aircraft antenna coupling minimization using genetic algorithms and approximations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 2, pp. 742-751, Apr. 2004.
- [11] J. Choi, J. Kim, "Analysis of optimum antenna placement considering interference between airborne antennas mounted on UAV," *Journal of The Institute of Electromagnetic and Information Engineers*, vol. 52, no. 6, pp. 32-40. Jun. 2015.
- [12] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
- [13] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.

황 규 환 [아주대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-2210-8703>



2024년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2024년 9월~현재: 아주대학교 AI융합네트워킹학과 석사과정

[주 관심분야] 레이더 전파 M&S, AI

문 병 귀 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-7508-6926>



2011년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)

2017년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학박사)

2017년 1월~현재: LIG넥스원 전자기전연구소 수석연구원

[주 관심분야] EW System, RF Jammer

Antenna, Direction Finding Antenna 등

이 성 의 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-8089-9443>



2001년 2월: 명지대학교 전기공학과 (공학사)
2003년 2월: 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
2003년 2월~현재: LIG넥스원 전자기전연구
소 수석연구원
[주 관심분야] EW System, RWR, RF Jammer 등

mer 등

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)
2003년 2월~2006년 8월: KT인프라연구
소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과/AI 융합네트워크학
과 교수

[주 관심분야] 전자파 Propagation 해석, 레이더, 레이돔, AI

박 경 태 [LIG넥스원/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0001-9284-7337>



1999년 2월: 고려대학교 산업공학 (공학
사)
2016년 8월: 아주대학교 IT융합공학과 (공
학석사)
2002년 7월~현재: LIG넥스원 전자기전연
구소 연구소장
[주 관심분야] 소프트웨어 공학, 체계 성
능 분석, 체계 설계

능 분석, 체계 설계