

함정 구조물에 의한 탐색 레이더 신호 왜곡 현상 분석 및 대책

The Analysis and Counter-Measure for Signal Distortion of the Searching Radar Due to Ship Structures

송 기 환

Ki-Hwan Song

요 약

본 논문에서는 함정에 탑재된 탐색 레이더의 신호 왜곡 현상에 대한 분석 및 대책에 대해 소개한다. ShipEDF 프로그램을 이용하여 탐색 레이더의 주 안테나와 함정 구조물을 전자기학적으로 모델링하고, 광선 추적 기법을 이용하여 탐색 레이더의 자유공간 및 함정 탑재 상태에서의 복사 패턴을 분석한다. 분석된 복사 패턴을 통해 탐색 레이더의 신호 왜곡 현상이 마스트의 전자파 반사로 인한 복사 패턴 왜곡에 의한 것임을 알 수 있었고, 이에 대한 대책 수립을 위해 탐색 레이더에 의한 마스트 표면 전류 분포를 분석한다.

Abstract

In this paper, we introduce the analysis and counter-measure of signal distortion of search radar equipped on the ship. Using ShipEDF program, the search radar's main antenna and ship structures are modeled in the view of electro-magnetism. Ray tracing method is used for analysis of the search radar's radiation patterns in free space and ship condition. From analyzed radiation patterns, we can conclude that the search radar's signal distortion is due to radiation pattern distortion. We also analyze the surface current distribution of the mast to propose the counter-measure to reduce electro-magnetic field reflection of mast.

Key words : ShipEDF(Ship Electromagnetic Design Framework), RAM(Radar Absorbing Material), Ray Tracing Method, Radiation Pattern

I. 서 론

최근 민수 및 군수 분야에서 통신·전자 기술의 비약적인 발전과 더불어 광역 감시, 공격 목표 자동 식별, 정밀 유도, 장거리 목표 탐색, 고 신뢰 대용량 통신 등의 최첨단 성능들이 무기 시스템에 적용되고 있다. 오늘날의 전장(battle field)에서 이러한 성능들이 차지하는 비중은 매우 크기 때문에 통신·전자 기술의 우위를 점하는 것이 전장에서 우위를 점하는 것이라 해도 과언이 아닐 것이다. 하지만 이로 인해 전자파 환경은 열악해질 수 있으며, 무기 시스템 내

탑재 장비 간 전자파 간섭을 더욱 심화시킬 수 있고, 이는 무기 시스템의 전투력 저하를 야기할 수 있다.

무기 시스템 내 다양한 최첨단 통신/전자 기술은 효율적으로 적용하기 위해서는 전자파 환경 최적화를 위한 전자파 적합 설계가 요구된다. 그리고 전자파 적합 설계를 위해서는 대상 무기 시스템의 전자파 환경에 대한 분석이 선행되어야 한다. 전자파 환경 분석은 대상 무기 시스템 내의 무선 및 고주파 장비들을 대상으로 전자파 위해 요소, 장비 간 간섭도, 시스템 탑재 상태에서의 장비 성능 저하 등을 예측 및 분석하는 것으로서 무기 시스템 전자파 환경 최

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20090430-044

· 수정완료일자 : 2009년 7월 2일

적화를 위한 시스템 내 장비 배치의 최적화 및 주파수 대역 통제 등에 활용될 수 있다^[1].

전자파 환경 분석은 해당 시스템 및 탑재 장비들의 특성을 기록한 조달 문서 및 규격서 분석을 통해서도 이루어지나, 오늘날은 다양한 수치 해석 기반의 프로그램 개발과 컴퓨터의 고성능화로 인해 프로그램을 이용한 수치 해석 기법이 선호되고 있다.

본 논문에서는 함정 탑재 시 발생된 탐색 레이더의 오폭적 탐지 현상에 대해 소개하고, ShipEDF 수치 해석 프로그램을 이용한 원인 분석 및 대책 수립 과정에 대해 소개하고자 한다.

II. 탐색 레이더 오폭적 탐지 현상

탐색 레이더는 대공/대함 표적을 탐지하고 추적하는 해군용 단거리 레이더로서, 거리, 고각, 방위각의 3차원 정보를 획득할 수 있다. 방위각 방향은 기계적인 회전을 통해, 고각 방향은 고속 변위기를 이용하여, 거리는 송·수신 시간차를 통하여 정보를 획득한다. 탐색 레이더의 안테나부는 주 안테나, 피아식별 안테나, 부엽 차단 안테나로 구성된다. 주 안테나는 레이더의 정보 획득에 필요한 전자파 송/수신을 담당하고 있고, 고이득의 위상 배열 안테나가 이용된다. 피아식별 안테나는 피아 식별을 위한 빔 발생 및 응답을 수신하는 안테나이다. 부엽 차단 안테나는 주 안테나의 부엽으로부터 수신되는 신호를 차단하기 위해 이용되는 안테나이다.

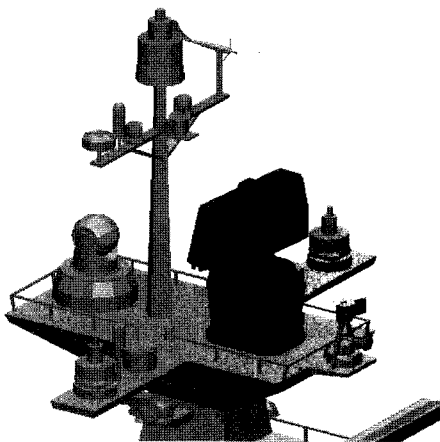


그림 1. 함정에 탑재된 탐색 레이더
Fig. 1. The search radar equipped on the ship.

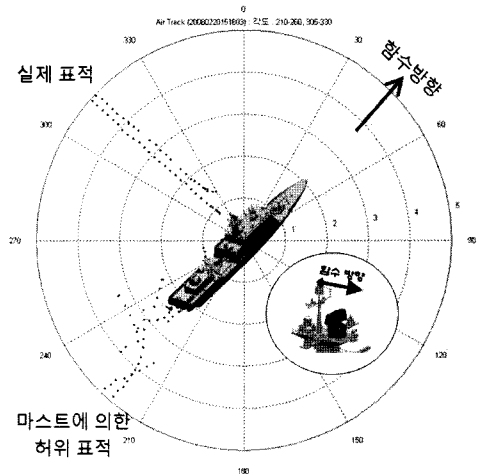


그림 2. 탐색 레이더 오폭적 탐지 현상
Fig. 2. The search radar's wrong target detection.

탐색 레이더의 함정 탑재 위치는 함정의 최상부에 위치하여 넓은 범위를 탐지할 수 있도록 하였다. 하지만, 그림 1에서와 같이 탐색 레이더 근방에 금속성의 마스트가 위치하고 있어, 탐색 레이더와 마스트 간의 간섭이 예상되었고, 이를 막기 위해 탐색 레이더 내부의 신호처리 과정에서 마스트에 의한 단거리 반사 신호는 수신하지 않도록 설계하였다. 하지만, 탐색 레이더의 운용시험 시 그림 2에서와 같은 오폭적 탐지 현상이 발생하였다.

시험 시 함수 방향은 그림 2의 그래프 상에서 45° 방향을 향해 있었고, 실제 표적은 315° 방향으로 이동하고 있었다. 이 때, 탐색 레이더를 통해 탐지된 표적은 315° 방향의 실제 표적만 나타난 것이 아니라 225° 방향의 허위 표적까지 나타나게 되었다. 225° 방향은 탐색 레이더가 함정의 마스트를 바라보는 각도이다. 225° 방향에서 수신된 신호량은 315° 방향의 수신 신호량보다 평균 15 dB 낮은 값이 수신되었다. 앞서 언급한 바와 같이 마스트에 의한 단거리 반사신호는 탐색 레이더에서 인식되지 않도록 설계되었으므로, 이와는 다른 영향이 발생된 것으로 판단된다. 마스트의 형상이 마름모꼴임을 감안할 때 마스트 정면으로 집중되는 전자파가 90° 방향으로 반사되어 이와 같은 현상이 나타날 것으로 예상된다.

본 논문에서는 위 현상에 대한 원인 분석을 위해 이탈리아 IDS사에서 개발한 ShipEDF 프로그램을 이

용하여 탐색 레이더의 신호 왜곡 현상을 전자기적으로 분석하고자 한다. ShipEDF 프로그램은 주파수 영역에서의 합정 및 기동 무기 시스템에 대한 전자파 환경 분석용 수치 해석 프로그램이다.

III. 탐색 레이더 모델링 및 분석

ShipEDF 프로그램에서는 00 GHz에서 운용되는 탐색 레이더의 전자기 특성분석을 위해 ray tracing 기법이라 불리는 고주파 대역(500 MHz 이상) 분석 기법이 적용된다. Ray tracing 기법에서는 송신 안테나를 포인트 소스로 모델링하고, 그 점으로부터 수만 개의 광선을 전방향으로 내보낸다. 각 방향의 광선들은 송신 안테나의 복사 패턴에 따라 최초 세기가 결정되고, 전달거리에 따라 경로 손실과 위상 변화를 가진다.

수신 안테나는 일정한 반지름을 가지는 수신 구(sphere)로 모델링되고, 송신된 광선들이 그림 3과 같이 다양한 경로를 통해 수신 구로 입사될 때 각 방향에 대하여 수신되는 광선의 세기와 위상에 수신 안테나의 복사 패턴이 반영되어 수신량이 결정되고, 이를 통해 안테나 결합량이 계산된다. 자유공간에서의 회절 및 반사를 고려하지 않은 위치별 전계 세기 및 안테나 결합량에 대한 수식은 아래와 같다.

송신 안테나의 송신 전력이 P_T , ray의 송신 방향 이득이 G_T , 송신점부터 수신점까지 ray의 총 진행거리가 d , 수신점에서의 수신 전력이 P_R 일 때, 수신점에서의 전계 강도를 계산하는 식은 다음과 같다.

아래 식에서는 전기장의 편파벡터를 나타낸다. 전계강도 및 phase는 수신점에서의 전자기파가 가지는 poynting vector 세기와 ray가 송신될 때 거리에 따른

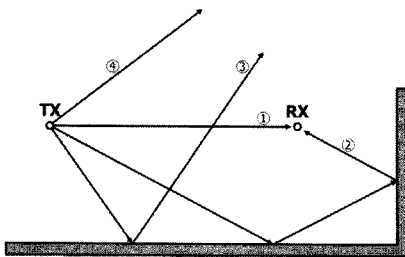


그림 3. 다양한 광선 진행 경로 예
Fig. 3. An example of various ray paths.

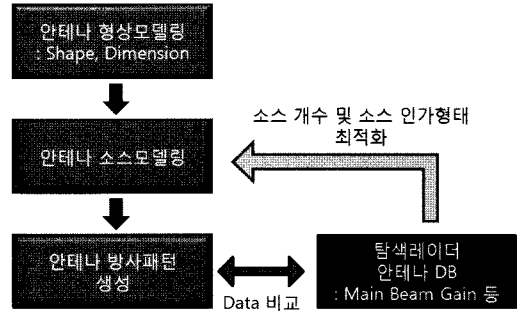


그림 4. 탐색 레이더 모델링
Fig. 4. Modelling of the search radar.

수신 전력의 세기를 이용하여 구해될 수 있다.

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} = |\overline{E} \times \overline{H}| = \frac{|\overline{E}|^2}{\eta}$$

$$|\overline{E}| = \sqrt{\frac{\eta P_T G_T}{4\pi d^2}} = \frac{\sqrt{30 P_T G_T}}{d} \quad (\because \eta = 120 \pi)$$

$$\overline{E} = \hat{a} |\overline{E}| e^{-jkd} = \hat{a} \frac{\sqrt{30 P_T G_T}}{d} e^{-jkd} \quad (1)$$

주파수 f 에서 송신 안테나의 송신 전력이 P_T , ray의 송신 방향 이득이 G_T , 수신 안테나의 수신 방향 이득이 G_R , 송신점부터 수신점까지 ray의 총 진행거리가 d 일 때, 자유 공간에서의 수신 전력을 계산하는 식은 다음과 같다^[2].

$$P_R = W A_e = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (2)$$

본 논문에서 사용한 ShipEDF 프로그램 상의 ray tracing 기법에서는 회절은 1차, 반사는 2차까지 고려가 되었다.

Ray tracing 기법을 이용한 분석을 위해서는 송신 안테나의 복사 패턴에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 탐색 레이더의 주 안테나에 대한 빔 이득, 3 dB 빔 폭 등의 정보를 바탕으로 안테나를 모델링한다. ShipEDF 프로그램에는 배열 안테나에 대한 모델링 Tool이 제공된다. CAD 상의 안테나 형상에 기초하여 가로 및 세로 방향의 소스 개수와 송신 파워 및 위상을 조절하여 원하는 배열 안테나로 모델링할 수 있다. 탐색 레이더 주 안테나의 경우 가로 70개, 세로 40개의 소스를 배열하여 안테나 복사 패턴을 생성한다^[3]. 생성된 안테나 복사 패턴은 그림 6의 점선과 같다. 안테나의 복사 패턴을 형성한 후에는 안테나

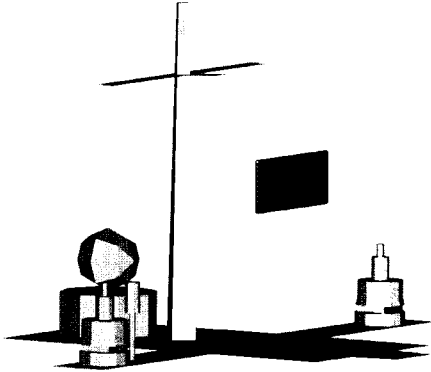


그림 5. 탐색 레이더 탑재 환경 모델링
Fig. 5. Modelling of the search radar's environment.

의 중앙 지점을 송신 지점으로 하고, 이 지점으로부터 전 방향으로 광선을 송출하고 원하는 지점의 수신량을 분석하면 된다. 이 때, 탐색 레이더가 탑재되는 함정의 금속성 구조물 형상을 분석에 반영한다. 탐색 레이더의 매우 좁은 빔폭을 고려할 때 함정 전체에 대한 모델링은 불필요하다고 판단되어 그림 5에서와 같이 광선의 반사 및 회절에 직접적인 영향을 주는 탐색 레이더 주변의 금속성 구조물만을 모델링하여 분석한다. 분석의 복잡도를 줄이기 위해 금속성 구조물은 완전 도체로, 주변은 진공 상태로 설정한다.

분석 시 탐색 레이더의 부엽 차단 안테나는 모델링에서 제외하고, 분석을 통해 관찰된 광선의 입사 방향을 통해 부엽 차단 안테나의 영향을 고려하기로 한다.

IV. 탐색 레이더 주 안테나의 복사 패턴 분석

앞서 모델링한 안테나를 바탕으로, ShipEDF 프로그램을 이용하여, 자유공간에서의 복사 패턴과 함정 탑재 시 탐색 레이더가 마스트를 향할 경우의 복사 패턴을 분석하였다. 복사 패턴은 Elevation 0°에서의 Azimuth cut의 E_{Elevation} 값을 나타낸다. 함수는 Azimuth 0°를 향해 있고, 마스트는 Azimuth 180°에 위치하고, 탐색 레이더는 마스트를 향해 있다. 그림 7에 함정 탑재 상태의 탐색 레이더 안테나로부터 송출되는 두 방향의 ray에 대해 나타나 있다.

표 1에서와 같이 자유공간에서의 안테나 복사 패턴을 고려할 때, 1번 ray는 안테나의 부엽에서 발생

표 1. 탐색 레이더 복사 패턴 비교표
Table 1. Comparison of radiation patterns.

	자유 공간	함정 탑재
주 빔 이득	+37 dB	+34 dB
Azimuth 90°	-34 dB	+17 dB

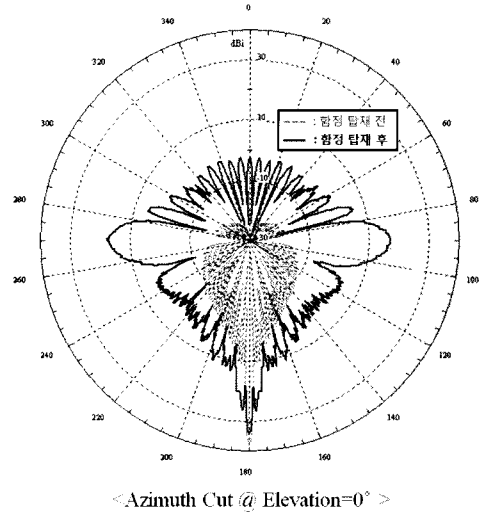


그림 6. 탐색 레이더의 복사 패턴(탑재 전, 후)
Fig. 6. Radiation patterns of the search radar(off the ship, on the ship).

되는 ray로 반사체로 전달되는 세기가 약할 것이다. 2번 ray는 안테나의 주 빔 방향으로 송출되어, 마스트에 반사되어 반사체로 전달된다. 주 빔의 이득을 고려할 때, ray의 세기가 강할 것이고, 이로 인해 그림 6에서와 같이 함정 탑재 시 복사 패턴(원거리)은 자유공간에서의 복사 패턴과는 완전히 다른 형태를 나타내게 된다.

또한, 그림 7에서의 2번 ray의 경우 반사체를 맞고 다시 탐색 레이더로 수신될 경우, 탐색 레이더 주 안테나의 부엽 방향이 아닌 주 빔 방향으로 수신되므로, 탐색 레이더의 부엽 차단 안테나는 이 경우 제거능을 발휘하지 못하고, 마스트에서 90° 방향에 위치한 표적으로부터의 반사 신호를 수신하게 된다.

탐색 레이더의 ray에 대한 수신량은 식 (2)에서 G_R 이 G_T 와 동일한 경우로 계산이 가능하다. 탐색 레이더의 송신 ray가 반사체까지 도달하는 경로와 반사체에서 반사되어 탐색 레이더로 수신되는 경로가 같다고 했을 때, 거리 d 는 $2d$ 가 되고, 수신량은 식 (3)

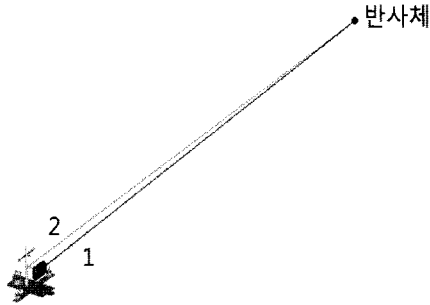


그림 7. 탐색 레이더 송출 Ray의 예
Fig. 7. An example of rays from the search radar.

과 같이 변형될 수 있다.

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2}{(8\pi d)^2} \quad (3)$$

즉, 그림 2에서 지표적 방향으로 탐색 레이더가 향해 있을 때, +37 dB의 주 빔에 의해 표적을 탐지했을 경우보다 탐색 레이더가 마스트를 향해 있을 때 발생하는 +17 dB의 부엽 이득에 의해 표적을 탐지했을 경우, 수식적으로 -40 dB의 이득 손실이 발생되므로 수신 신호 세기가 줄어들게 된다. 하지만, 실제로는 평균 -15 dB 정도의 차이가 발생하였는데, 이는 전체 수신 신호의 세기는 다양한 경로의 ray들의 합으로 계산되기 때문에 식 (3)으로부터 구해지는 각 ray들의 단순한 스칼라 합으로는 정확한 계산이 되지 않기 때문이다⁴⁾.

V. 탐색 레이더 신호 왜곡 현상 대책 및 결과

마스트에 의한 탐색 레이더의 신호 왜곡 현상은 마스트에 의한 탐색 레이더 주 빔 반사로 인해, 원거리에서의 복사 패턴 변형에 의해 발생된다. 결국, 이를 해결하기 위해서는 탐색 레이더의 위치를 변경하거나, 현재 위치에서 마스트의 반사 현상을 최소화하는 방안을 강구해야 한다. 배치된 탐색 레이더의 탑재 위치를 옮기는 것은 거의 불가능하므로, 마스트에 의한 반사 현상을 최소화하는 방안을 강구하기로 한다. 마스트에 의한 반사 현상 최소화를 위해, ShipEDF 프로그램을 이용하여, 탐색 레이더에서 전자파가 방사될 때, 이로 인해 마스트에 유기되는 표면 전류 밀

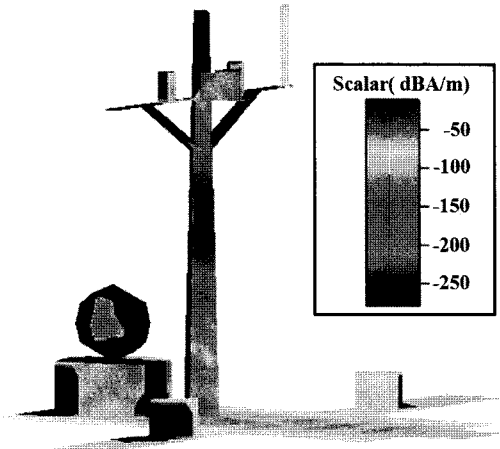


그림 8. 마스트의 표면 전류 분포
Fig. 8. Distribution of surface current on the mast.

도를 분석한다. 표면 전류 밀도에 대한 분석은 마스트 표면에 흐르는 표면 전류의 정확한 양을 예측하고자 하는 것이 아니라, 탐색 레이더의 송신 전자파에 의해 나타나는 마스트의 반응을 시각적으로 분석하고, 이를 바탕으로 대략적인 전자파 밀집 지역을 분석하기 위함이다.

그림 8에 마스트의 표면 전류 분포가 나타나 있다. 붉은 색을 나타낼수록 전류밀도가 높은 곳으로 전자파가 집중되는 곳이다.

이 부분을 중심으로 탐색 레이더 동작 주파수 대역에서 적절한 감쇄율을 가지는 전자파 흡수체(RAM: Radar Absorbing Material)를 부착하게 될 경우, 마스트에 의해 반사되는 반사량과 반사체로부터 반사된 신호가 다시 마스트를 맞고 탐색 레이더로 수신되는



그림 9. RAM이 부착된 마스트
Fig. 9. The mast attaching the RAM.

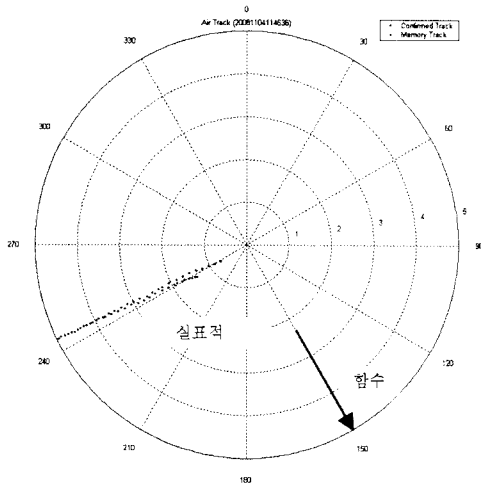


그림 10. 전자파 흡수체 부착 후 탐색 레이더 시험 결과
Fig. 10. The search radar's test result after attaching the RAM on mast.

양을 현저히 감소시켜, 방사 패턴의 왜곡 현상 및 오 표적 탐지 현상을 최소화시킬 수 있을 것이다. 실제로 탐색 레이더의 마스트에 의한 영향 최소화를 위해 마스트에 동작 주파수 대역에서 -15 dB 감쇄율을 가지는 RAM을 부착하였다. 그림 9에 RAM이 부착된 마스트의 모습이 나타나 있다. RAM 부착 위치는 앞서 분석된 마스트의 표면 전류 밀도가 높은 곳이다.

마스트에 RAM을 부착한 후, 탐색 레이더에 대한 운용 시험을 다시 수행한 결과, 그림 10에서와 같이 더 이상 오폭적 탐지 현상이 관찰되지 않았다.

VI. 결 론

본 논문에서는 함정에 탑재된 탐색 레이더의 오폭

적 탐지 현상에 대한 원인 분석 및 대책 방안 수립 과정에 대해 소개하였다. ShipEDF 전자파 수치 해석 분석 프로그램을 이용하여, 탐색 레이더 및 탐색 레이더 주변 구조물을 모델링하고, 고주파 분석 기법인 ray tracing 기법을 적용하여 마스트에 의한 탐색 레이더 신호 왜곡 현상을 분석하였다. 마스트에 의해 탐색 레이더의 주 안테나로부터 송신되는 주 빔이 마스트에 의해 반사되어 탐색 레이더 정면에서 90° 방향으로 전자파가 전달되어 주 안테나의 복사 패턴이 변형되고 이로 인해 오폭적 탐지 현상이 나타나게 되었다. 마스트에 의한 영향을 감소시키기 위해, 마스트의 표면 전류 밀도 분석을 통해 전자기파의 밀집 구역을 도출하고 이곳에 전자파 흡수체를 적용하여 마스트에 의한 영향을 감소시켰고, 그 결과 탐색 레이더의 오폭적 탐지 현상은 사라지게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] J. W. Rockway, Douglas W. Du Brul, "Performance prediction analysis for shipboard antenna system", *Naval Engineers Journal*, 1997.
- [2] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley & Sons, 1989.
- [3] ShipEDF v.5.2-User's Manual, "ShipEDF framework EME section", *Ingegneria Dei Sistemi S.p.A*, 2006.
- [4] Merrill I. Skolnik, *Introduction to RADAR Systems*, McGraw-Hill Higher Education, 2001.

송 기 환



2005년 2월: 고려대학교 전기전자 전파공학부 (공학사)

2007년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)

2007년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC 설계, 전자

파 환경 분석