함정 RCS 저감 설계를 위한 최신 분석기법 연구

A Study on the Recent Analysis Method for the RCS Reduction for Naval Ships

안 병 준

Byung-Jun Ahn

요 약

본 논문에서는 최근 신조 함정에 적용되고 있는 함정 RCS 분석 방법과 RCS 감소 방안 기법을 소개하고, 특징 및 장·단점을 분석하였다. 함정 RCS 분석은 RCS 예측 소프트웨어를 활용하여 함정 RCS를 해석하고, 영상 레이더 시뮬레이션을 활용하여 문제 위치를 분석, 식별하는 과정을 설명하였으며, 그에 대한 문제를 해결 할 수 있는 RCS 감소 방안을함께 제시하였다.

Abstract

In this paper, we researched the recent analysis method of RCS prediction for the naval ship and compared the new method with conventional one in respect of the effectiveness to improve a naval ship with low RCS. This paper included the process of analyzing RCS characteristics for naval ship using the numerical method and finding the hotspot by hourglass plot, ISAR image and etc.. Also we introduced the various design methods in order to reduce RCS.

Key words: RCS, Stealth, Hourglass, ISAR

Ⅰ. 서 론

함정 스텔스 성능은 함정 작전 운용 성능 측면에서 피격성을 감소시키기 위한 핵심 대책이다. 스텔스 성능을 고도화할 경우, 상대 함정에 탐지되는 확률을 감소시킬수 있을 뿐만 아니라, 이를 토대로 상대 함정을 먼저 탐지하여 선제공격의 성공률을 높일 수 있다^[1]. 이러한 이유로 선진 해군에서는 자국 함정의 스텔스 성능을 고도화하고 있다. 스텔스 성능을 나타내는 지표 중, 레이다에 의한 피탐지 성능은 가장 기본이 되는 항목이다. 레이더는 항공기, 함정, 지상 장비, 위성, 유도탄 등 다양한 종류의

플랫폼에 탑재되어 운용된다. 이러한 레이더의 광범위한 활용으로 인하여 함정 설계시 레이더에 대비한 스텔스 성능을 우선적으로 고려해야 한다. 레이더 스텔스에서 레이더 반사 단면적(이하 RCS: Radar Cross Section)은 가장 기본이 되는 수치이고, 함정 설계시 RCS 목표값은 주요임무, 작전 운용 개념, 적의 위협 수준 분석 등을 바탕으로 정비 운용성 및 경제성을 고려하여 결정되어야 한다.이를 위해서는 함정 설계 단계부터 함정 RCS를 정확하게예측하고, 문제 위치를 빠르게 식별할 수 있는 프로그램을 이용하는 것이 필수적이다^[2]. 본 연구에서는 RCS 목표값 설정과 분석 범위, 그리고 소프트웨어를 활용한 RCS

해군 전력분석시험평가단(Naval Force Analysis, Test and Evaluation Group)

[·] Manuscript received December 6, 2013; Revised January 28, 2014; Accepted February 12, 2014. (ID No. 20131206-01S)

[·] Corresponding Author: Byung-Jun Ahn (e-mail: navy0626@naver.com)

감소 설계 과정을 기술하였다. 또한, 함정 RCS 감소 기법 를 위해 앞으로 나아갈 방향을 함께 제시하였다.

II. RCS

2-1 RCS 정의

RCS는 표적의 전자파 반사 강도를 나타내는 수치이며, 단위는 제곱미터(m²)이다. 데시벨로는 dBsm으로 표시한 다. RCS는 레이더의 주파수, 편파, 관측 각도의 함수이며, 표적의 크기와 형상, 그리고 표적의 물질에 따라 달라진 다. RCS를 나타내는 수식은 다음과 같다.

$$\sigma(RCS) = \lim_{r \to \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \tag{1}$$

이때 E_s 는 반사파의 전계강도이고, E_i 는 입사파의 전계 강도이다 $^{(3)}$.

2-2 함정 RCS 계산 방법

2-2-1 RCS 선형 평균과 dB 평균

함정의 RCS 평균값은 특정 주파수, 고각, 편파에 대해서 360° 전방위각에 대한 Mono-static RCS 값에 대한 평균을 사용한다. 이때 평균을 산출하는 방법으로 산술 평균 (Arithmetic Mean)과 기하 평균(Geometric Mean)을 사용한다. 특정 주파수(f), 고각(θ), 방위각(ϕ), 송수신 신호의편파 종류(p=VV,HV,VH or HH)에 대한 RCS를 S (f,θ,ϕ,p)라 할 때, 360° 전방위각에 대한 dB 단위의 산술 평균 RCS와 기하 평균 RCS는 다음 식과 같이 나타낼수 있다.

산술 평균:

$$10\log_{10}\left(\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}S(f,\theta,\phi_{k},p)\right) \quad \text{dBsm} \tag{2}$$

기하 평균 :

$$\begin{aligned} &10\log_{10}\left(\sqrt[N]{S_{1}S_{2}\cdots S_{N}}\right) \\ &= \frac{1}{N}\left(10\log_{10}S_{1} + 10\log_{10}S_{2} + \cdots \ 10\log_{10}S_{N}\right) \\ &= \frac{1}{N}\left(\sum_{k=1}^{N}S_{dB}(f,\theta,\phi_{k},p)\right) \end{aligned}$$

$$S_{dB}(f,\theta,\phi_k,p) = 10\log_{10}S(f,\theta,\phi_k,p) \quad \text{dBsm}$$
 (3)

여기서, ϕ_k 는 360° 방위각을 N개로 나눴을 때 k번째 방 위각을 의미한다. 식을 보면 기하 평균의 경우, dB 단위 RCS를 산술 평균한 것과 같다. 따라서. dB 단위의 기하 평균을 편의상 dB 평균(dB mean)이라 명칭하고, 이와 대 비하기 위해서 산술 평균 RCS를 선형 평균(linear mean) 이라 부르고 있다. dB 평균의 경우, 작은 크기의 RCS 값 의 영향이 상대적으로 더 강화되는 결과를 초래하므로 선형 평균보다 상대적으로 작게 나타나게 된다. 반면에, 선형 평균의 경우, 큰 값의 RCS 성분이 더 가중치가 부여 되는 특성이 있어서 dB 평균보다 크게 나오는 성질이 있 다. 그러므로 선형 평균과 dB 평균값이 큰 차이가 있다면, 일부 구간에서 RCS가 크게 발생한다고 판단할 수 있다. RCS 감소 설계 측면에서 봤을 때, 전 방위각에 대하여 RCS 값이 모두 동일한 작은 값을 가지게 하는 것이 목표 이므로, 선형 평균과 dB 평균을 동시에 분석하여 평균값 의 차이를 줄이는 것이라고 할 수 있기 때문에, 둘 중 하 나를 기준으로 하는 것보다는 동시에 표시하는 것이 바 람직하다고 할 수 있다.

2-2-2 위협 고각과 희생각 영역 설정

함정 RCS 평가시 고각 및 방위각에 대한 고려 범위는 기동 특성 및 특정 무기 체계를 고려해서 설정한다. 함정 의 주 위협 세력은 그림 1과 같이 함정, 항공기, 지상 등에서 운영하는 포 및 유도탄이다. 이때, 유도탄은 발사 후,



그림 1. 대함 유도탄의 함정 접근 경로 Fig. 1. Route of anti-guided missile.

high-dive 방식으로 높은 고도에 도달한 후 목표물을 확인 하면서 고도를 낮춰 해수면과 가까운 고도를 유지하며, sea-skimming 방식으로 함정에 접근한다. 최종 타격 시 상승을 하는 팝업(pop-up) 기동을 통해 상승 함정을 타격하는 방식과 팝업 기동 없이 곧바로 타격하는 두 가지 경로가 있다. 이러한 유도탄의 특성을 고려하여, 위협 고각은 유도탄의 기동 특성에 따라 0~10° 범위이고, 위협 방위 각은 전 방위를 설정한다. 한편, 함정과 같은 대형 복합구조물의 경우, 위협 각도인 전 방위에서 RCS를 적절한수준으로 감소시키는 데에는 많은 어려움이 있기 때문에, 좁은 각도 범위(희생각)에 한해서 함정에 의한 전파 에너지를 집중시켜서 넓은 방위각 영역에서는 낮은 RCS를 유지시키는 방법을 사용한다. 따라서 RCS 평균치는 희생각을 지정해서 희생각 부근의 값을 계산에서 제외하는 방법을 사용한다.

희생각은 주로 0°에서부터 90° 간격의 기본 방위(Cardinal point)로 설정된다. 희생각 범위를 결정하는 규정은 없으며, 형상설계의 기술적 한계를 고려하여 경험적인 방법에 의해 정의하는 경우가 많다. 희생각을 10% 설정할경우, 그림 2에 희색으로 표시한 것과 같이 0°, 90°, 180°, 270° 중심으로 각각 -4.5°~+4.5°, 85.5°~94.5°, 175.5°~184.5°, 265.5°~274.5°, 총 10 %인 36° 구간을 제외하도록한다. Mono-static RCS 기준의 함정 RCS 감소 설계는 위와 같은 위협각 및 희생각을 고려해서, 전파 에너지가 위

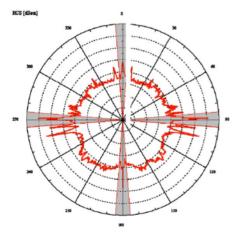


그림 2. RCS polar 그래프와 희생각 표시(회색 부분) Fig. 2. Cardinal point and RCS polar graph.

험 고각 이외 영역과 희생각 내 영역으로 분산되도록 함 정을 설계한다.

Ⅲ. RCS 감소 설계 분석 기법

3-1 RCS 감소 설계 절차

수치해석적 RCS 예측은 함정의 설계단계에서 CAD 전 산모델을 이용하여 수행된다. RCS 예측기법에는 여러 종류가 있으나, 함정에 사용되는 주파수 대역이 I와 J 대역 (8~20 GHz)이므로 함정 RCS 예측에는 고주파 해석 기법을 이용한 RCS 예측 기법이 사용된다. 함정 설계단계에서의 RCS 예측은 상용화된 RCS 예측/분석 소프트웨어가활용된다^[2]. 소프트웨어를 활용한 RCS 감소 설계 프로젝트는 그림 3에 표시된 과정과 같이 진행된다. 그림과 같이 RCS 감소 설계는 먼저 함정 설계 CAD 모델의 RCS를해석하고, 각 주파수/고각별 방위각에 대한 RCS 해석 결과를 분석한 후 RCS를 증가시키는 위치를 식별한다. CAD모델 상에서 산란점 또는 높은 RCS을 발생시키는 구조물을 확인 후,모델 변경 같은 RCS 감소 대책 적용을 통해 RCS 감소 설계를 수행한다. 상기 과정을 반복하면서 RCS목표치에 도달했을 경우 감소 설계를 완료한다.

3-2 함정 RCS 분석 기법 절차

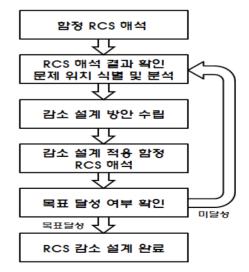


그림 3. RCS 감소 설계 과정

Fig. 3. Process of RCS reduction.

함정의 RCS를 감소시키기 위해서는 최우선적으로 정확한 RCS 평가가 필요하고, 2차적으로는 높은 RCS를 발생시키는 문제 부위를 식별하기 위한 다양한 방식의 RCS 정보가 평가자에게 제공되어야 한다. 이를 바탕으로 함정의 운용/전투 요구 기능을 고려한 설계 및 장비 변경을통해 종합적 RCS 저감 대책을 수립한다. 문제 부위의 해당 구조물 또는 장비는 함정의 요구 기능에 의해서 제거 또는 차폐할 수 없는 경우가 대다수기이기 때문에, 이에 대한 대책을 수립하기 위해서는 단순히 특정 주파수/각도에서의 RCS 저감 대책에 머무르지 않고, 진단 부위의 종합적 평가, 즉 넓은 주파수 대역과 넓은 범위에 대한 진단부위의 전자파 영향에 대한 분석이 우선되어야 한다. 또한, 완벽한 흡수체란 존재하지 않기 때문에, 전자기파 에너지를 위협 고각 외 고각 범위와 희생각 범위 내의 방위각으로 최대한 에너지를 분산시키는 방법이 필요하다.

기존 함정 설계시에는 고위험 RCS 부위 진단 방법으로 두 가지 방법을 사용하였다. 각도별 Mono-static RCS 분석 후 높은 RCS 발생 각도에서 Ray-tracing 방법을 이용한 직접적 Hotspot 표시 방법이었다. 이 방법을 이용하면, 특정 각도에서 고위험 RCS 발생 요인을 평가자가 신속히진단할 수 있는 장점이 있다. 반면에, Ray-tracing에 의한직접 Hotspot 표시 방법은 수치 해석적으로 격자 크기에따른 전파에너지 표시 방법의 차이가 발생해, 문제 부위식별이 불분명할 수 있는 문제점과 진단 부위의 영향 범위 파악이 쉽지 않다는 점이 특징이다.

이에 따라서, 최근 함정 건조시에는 RCS 분석시 기존 방법을 보강해서 그림 4와 같은 절차로 문제 부위를 진단 한다. 기존 방법과 가장 큰 차이는 Hourglass plot을 기본 분석 자료로 활용하는 것이다. Hourglass plot은 전 방위각

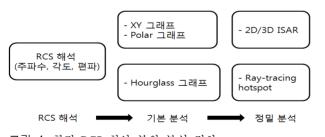


그림 4. 함정 RCS 취약 부위 분석 절차 Fig. 4. Process of hotspot analysis.

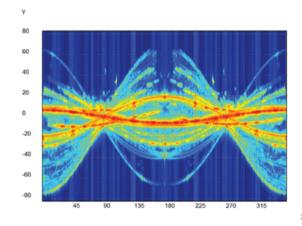


그림 5. Hourglass 그래프 Fig. 5. Hourglass graph.

에 대한 고 해상도 거리 프로파일 (HRRP: High Resolution Range Profile)을 나타낸 것으로 그림 5^[5]와 같이 함정의 RCS를 2차원 좌표계(X축 방위각, Y축 거리)에 RCS의 정량을 색으로 표현한다. 그래프의 특성상, 붉은 선으로 나타나는 성분들은 함정의 개별 부위에서 발생하는 산란점을 의미한다.

Hourglass 그래프를 이용할 경우, 연속적인 각도 변화에 따른 고위험 RCS 발생 부위를 쉽게 진단할 수 있고, 진단 위험 부위가 미치는 방위 각도 범위를 쉽게 파악할수 있어서, 최근 함정 RCS 감소 설계시, Hourglass 그래프를 종합적 RCS 분석을 위한 기본 데이터로 사용하고 있다. 한편, Hourglass 그래프는 레이더가 바라보는 종방향(거리 방향)에 대한 RCS 값만 표현해 주기 때문에 함정의고 RCS 발생 부위의 정확한 위치 판별을 위해 횡방향과 높이(또는 수직) 방향에 대한 위치 정보를 획득해야 한다. 함정 RCS의 횡방향과 높이방향에 대한 시각화는 특정 주파수와 방위각에 대한 함정의 2D/3D ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상을 이용해서 함정에서 발생하는 산란점 위치를 찾을 수 있다.

2D ISAR 영상은 Mono-static RCS 데이터를 요구 조건 (영상 해상도, 표적 크기)에 맞춰서 주파수와 방위 방향에 관한 해석 결과를 생성하여, FFT(Fast Fourier Transform) 또는 MP(Matrix Pencil)^[4] 방법을 이용해, 종방향과 횡방향로 RCS 데이터를 재배치하는 것이다. 마찬가지로 3D

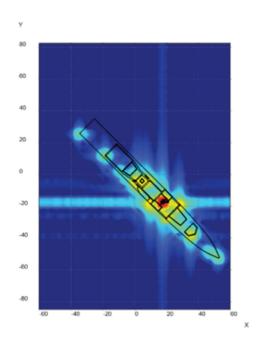


그림 6. 2D ISAR 영상 Fig. 6. 2D ISAR image.

ISAR는 2D ISAR 영상에 높이 방향 정보를 추가한 것으로, 고각 변화에 따른 RCS 데이터를 FFT 또는 MP 방법을 적용해 높이/수직 방향의 RCS 데이터를 재배치하는 것이다. 그림 6은 소프트웨어 상에서 2D ISAR 영상^[5] 위에 함정 CAD 모델 실루엣을 겹쳐 표현한 것으로 RCS의 정량은 색으로 표현하였다.

그림 7은 3D ISAR 영상^[5]을 표시하였다. 3차원 ISAR 영상을 통해 높이에 대한 위치 정보까지 확인할 수 있어서, 최종 문제 부위를 식별할 수 있다. 3D ISAR 방법은 2D ISAR 방법보다 산란점의 높이 정보까지 획득할 수 있지만, 추가적인 각도별 RCS 해석 결과가 요구되고, 후처리 작업에서 2D ISAR에 비해서 더욱 많은 처리 시간이소요되기 때문에, RCS 분석 및 감소 방안 제시를 위해서는 그림 4와 같은 과정을 이용하는 것이 효율적이라 판단된다. 그리고 그림 8은 Ray-tracing 방법을 이용한 Hotspot 진단으로^[6], Hourglass, 2, 3차원 ISAR 방법은 직접적인 다중 반사에 의한 경로 확인이 어렵기 때문에, 필요시 이 방법을 이용한다. Ray-tracing을 이용해서 송신 레이더에 의한 입사파의 다중 반사 경로를 추적할 수 있어서 직관적인 판단에 도움을 주기 때문에, 형상 변경을 통한 RCS 감

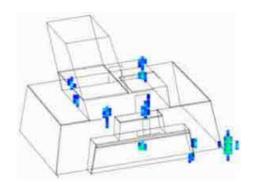


그림 7 3D ISAR 영상 Fig. 7. 3D ISAR image.

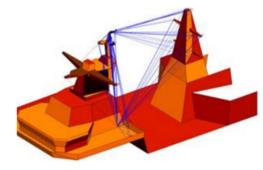


그림 8. Ray-tracing에 의한 전파분석 Fig. 8. RCS analysis by the ray-tracing method.

소 대책 적용시, 매우 유용한 기법이다.

Ⅳ. 함정 RCS 감소 방안

함정의 RCS를 증가시키는 주요 요인은 큰 면적을 가지는 평판 구조에 의한 직접 반사 요소이고, 두 번째는 양면 또는 삼면을 갖는 코너 반사기 형태에 의한 다중 반사이다. 표 1과 같이 함정 RCS 감소 기술은 이러한 구조물에 함정 형상 제어와 전자파 흡수체를 적용 방식이 있다.

함정 형상 제어는 선체 외판의 면을 경사지게 설계하거나 경사진 스크린을 설치하는 것이다. 형상 제어에 의한 방법이 효과를 발휘하기 위해서는 경사면의 크기가레이더 주파수의 파장보다 충분히 커야 하고, 반사 방향의 제어를 해수면 방향뿐만 아니라, 공간상의 일정 구역을 희생각으로 설정해야 한다. 이러한 설계기법에 따라함정 외벽은 5°에서 10° 범위로 기울고, 경사면의 방위각

표 1. 감소 설계 방법 비교

Table 1. The comparison of methods for RCS reduction.

구분	함정 형상 제어	전자파 흡수체 적용
감소 설계 방법	레이더 에너지의 반사방향을 레이더 수신기로부터 먼 방향으로 유도하는 방법	레이더 에너지를 흡수하는 물질을 적용하여 반사 에너지를 최소화하는 방법
장점	선체 기울기(각도) 변경으로 RCS 감소 효과 가능	상대적으로 좁은 부위에서 발생하는 큰 반사에너지를 감소시키는데 효과적
단점	선체 무게 증가, 운용 제한 및 탑재 장비 탑재 공간 협소	시공, 운용유지 제한 및 효과를 얻을 수 있는 주파수 대역폭 협소

방향은 전후 좌우 네 방향의 좁은 각도 범위 내로 정렬된다. 전자파 흡수체에 의한 RCS 감소방법은 형상 제어에의한 RCS 감소가 곤란할 경우, 국부적으로 사용하는 방법이다. 보통 파장의 1/4 두께를 갖는 공진형 흡수체는 유전율과 투자율을 제어하여 얇게 만들 수 있기 때문에, RCS 감소 목적으로 많이 사용된다. 전자파 흡수체를 적용하는 것이 함정 형상보다 효과적일 수 있으나, 흡수체적용은 시공이 쉽지 않을 뿐만 아니라, 원하는 흡수 성능을 얻기 위해서는 0.1 mm 단위의 두께 제어가 필요하므로, 엄격한 제작 공정 관리와 사후 관리가 필요하기 때문에 운용 및 유지가 매우 어렵다".

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 소프트웨어를 활용한 함정 RCS 감소

설계 과정 및 감소 방안을 제시하였다. 하지만, 함정 RCS를 줄이기 위해서는 정밀 계측 레이더를 이용하여 실제 운용상태의 함정 RCS를 계측한 결과를 토대로 함정의 주요 산란점들을 파악하고, 함정 전체에 대한 RCS 값을 정확히 파악하는 것이 필요하지만, 이 분야에 대한 경험과 실적이 부족한 실정이다. 따라서 이를 충족시키기 위해서는 함정의 주변환경과 함정의 운동을 가능한 실제와 유사하게 모사하여 계산에 반영할 수 있는 RCS 해석 전용소프트웨어의 개발이 필수적이며, 시뮬레이션을 통한 RCS 해석과 측정을 통하여 개발 단계부터 생산 및 운용 단계에서도 정기적으로 함정의 RCS를 확인하는 것이 필요하다고 판단된다.

References

- [1] 대한조선학회 편찬/ 집필위원회, "함정", 텍스트북스, pp. 386-398, 2012년 6월.
- [2] 김근홍, 최희영, 권구형, "RCS 특성평가 기술현황", 금속재료학회논문지, 19(6), pp. 34-41, 2006년 12월.
- [3] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, *Radar Cross Section, Second Edition*, Artech House, Boston, 1993.
- [4] 유지희, 권경일, 이용희, "Matrix Pencil 방법에 의한 비행기 모형의 ISAR 영상화", 한국전자파학회논문지, 12(2), pp. 299-307, 2001년 2월.
- [5] https://www.idscorporation.com/naval/our-solutions-servic es/rcs-prediction-measurement/products/item/21-ship-edf-r cs
- [6] http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/l pd-17.htm

안 병 준



2001년 3월: 서울대학교 조선해양공학과 (공학사)

2005년 5월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년 3월~현재: 해군 전평단 함정기술

2011년 8월~현재: 한남대학교 정치학과

(국방획득정책) 박사과정 [주 관심분야] RCS, EMI/EMC/EMP