

메타물질 및 전파흡수체를 적용한 함정의 레이더 반사면적 해석

황준태* · 홍석윤** · 권현웅*** · 김종철**** · 송지훈*****†

*, ** 서울대학교 조선해양공학과, *** 거제대학교 조선해양공학과, **** 국방과학연구소, ***** 전남대학교 조선해양공학전공

Analysis of Radar Cross Section for Naval Vessels with Metamaterials and Radar Absorbing Materials

Joon-Tae Hwang* · Suk-Yoon Hong** · Hyun-Wung Kwon*** · Jong-Chul Kim**** · Jee-Hun Song*****†

*, ** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

*** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Koje College, Geoje-si 53325, Korea

**** Naval System R&D Institute, Agency for Defense Development, Changwon-si 51678, Korea

***** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요 약 : 본 논문에서는 표적의 레이더 반사면적 기여도 분석을 통한 전파흡수체 적용에 대한 레이더 반사면적 감소 효과와 최신 전파흡수체 기술인 메타물질을 적용한 레이더 반사면적 감소 효과를 고찰하였다. 레이더 반사면적 해석은 모형선 모델로 진행하였고, 레이더 반사면적 기여도 분석을 통하여 전파흡수체와 메타물질의 레이더 반사면적 평균값 감소 효과를 확인하였다.

핵심용어 : 레이더 반사면적, 다중반사 효과, 함정, 전파흡수체, 메타물질

Abstract : This paper are mainly focusing on the facts influencing on RCS reductions, applying radar absorbing materials by using RCS contributions of elements and applying a metamaterials which is high-tech radar absorbing materials. RCS analysis results are given for a simplified ship model, with radar absorbing materials and metamaterials cause RCS reduction in terms of mean values.

Key Words : Radar cross section, Multi-bounce effect, Naval Vessels, Radar absorbing materials, Metamaterials

1. 서 론

해상전에서 함정의 생존성은 피탐지율이 직접적으로 관련된다. 따라서 적의 탐지 장비에 감지될 확률을 감소시키는 스텔스 기술의 연구는 필수적이고, 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 스텔스 기술은 상대의 레이더, 적 외선 탐지기, 음향탐지기 등 모든 탐지 기능에 대항하는 은폐 기술이다. 대표적인 탐지 시스템인 레이더는 표적에 반사된 전자파가 되돌아오는 신호의 크기를 면적의 단위로 나타내는데(Knott et al., 1993) 이를 레이더 반사면적(RCS; radar cross section)이라고 한다. RCS는 레이더가 표적을 탐지하는데 가장 기본적인 변수이고, 함정의 생존성에 직접적인 요소이므로 지속적인 연구와 기술력이 필요하다. 이러한 RCS

의 직접적인 감소방법으로는 스텔스 형상설계(shape design) 및 RCS 기여도 분석을 통한 전파흡수체(RAM; radar absorbing material) 부착하는 방법이 있고, 최근에는 복잡한 상부 구조물의 형상을 통합마스트 적용으로 단순화시킴으로써, RCS를 감소시킬 수 있다. 또한 전자전장비의 탑재, 선택적 주파수 투과 구조의 적용 등 자함에서 방사되는 전자파 양을 최소화하는 간접적인 방법의 적용으로 RCS를 감소시킬 수 있다. 스텔스 형상설계는 RCS 감소에 가장 효과적인 방법으로, 구조물의 외부형상이 전자파의 입사방향으로 반사 또는 산란이 발생할 경우 스텔스 효과가 낮게 나타나므로, 입사 방향 이외의 방향으로 반사 또는 산란이 발생할 수 있도록 설계한다. 과거의 함정은 RCS 감소 기법을 고려하지 않아 함정의 크기가 커지면 RCS 또한 증가하였지만, 최근에는 설계 단계에서 RCS 감소 기법을 고려하기 때문에 크기에 비례해서 RCS가 증가하는 것은 아니다(Park, 2004).

* First Author : jth00@snu.ac.kr, 02-880-7331

† Corresponding Author : jhs@jnu.ac.kr, 061-659-7156

합정의 RCS는 스텔스 형상설계로 가장 효율적으로 감소시킬 수 있지만 이는 설계 초기단계에서만 적용할 수 있다. 따라서, 형상설계 이후에는 전파흡수체의 적용으로 RCS를 감소시킬 수 있다. 입사하는 전자파와 다층면의 전파흡수체의 상호관계는 프레넬 반사계수를 이용하여 나타낼 수 있다 (Suk, 2001). 전파흡수체의 전자파흡수성능에 영향을 미치는 주요한 설계 변수는 흡수층의 전기적 특성을 나타내는 유전율(permittivity)과 자기적 특성을 나타내는 투자율(permeability) 및 두께로 나타낼 수 있다. 다층면 전파흡수체의 유전율과 투자율이 일정한 경우 다층면의 두께에 따라서 흡수율과 주파수 대역이 달라지기 때문에 최근에는 광대역 전파흡수 성능을 나타내는 전파흡수체를 설계하기 위하여 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 최적설계 기법들이 적용되고 있다(Michielsen et al., 1993; Weile et al., 1995; Chambers and Tennant, 1996; Park et al., 2004; Goudos, 2007; Kim et al., 2007).

최근 주목받고 있고 투명망토로 널리 알려진 메타물질은 자연계에는 존재하지 않는 전기적 특성을 가진 인공적인 물질이다. Veselago가 1967년에 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 가지는 물질의 존재를 예상한 이후 Smith 그룹에 의하여 실험적으로 증명되었다(Shelby et al., 2001). 메타물질은 투명망토를 설계하기 위하여 사용된 변환광학(transformation optics)은 좌표변환시에도 맥스웰 방정식이 변하지 않고 적용된다는 원리에 기반하여 빛이 지나가는 공간을 일그러뜨려서 빛이 장애물 주변을 타고 흐르는 것처럼 진행하도록 물질의 분포를 설계한다. 표적의 공간 주변의 전자기적 성질인 유전율(permittivity), 투자율(permeability)을 좌표변환에 따라 변화 시키면, 빛이 통과하지 못하는 장애물이 차지하는 공간이 점으로 압축된 것처럼 빛이 인식하여 표적이 탐지되지 않는 투명망토로 작동하게 된다(Shin, 2011).

본 논문에서는 복합 구조물의 RCS를 해석할 수 있는 프로그램, RACSAN(Kwon et al., 2014a)을 이용하여 RCS 감소에 활용될 수 있는 전파흡수체 설계 방법을 구현하여 표적의 전파흡수체 부착에 대한 RCS의 변화와 최근 주목받고 있는 메타물질을 부착하여 RCS의 변화 영향을 고찰하였다.

2. 이론

2.1 레이더 반사면적(RCS)

레이더에서 방사된 전자파가 물체에 반사되어 되돌아오는 크기를 면적의 단위로 나타낸 값이다. RCS는 대상물과 동일한 크기의 전자파를 반사하는 구(sphere)의 투영면적(projected area)으로 정의되며, 다음과 같이 레이더에서 송신된 전자파가 목표물에 의해 산란되어 되돌아오는 산란파의 전력과 송신 전자파의 전력의 비율로 표현될 수 있다(Kwon et al., 2014b).

$$\sigma(RCS) \equiv \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

여기서, E_i 는 레이더에서 송신한 전자파가 표적에 입사되는 입사파, E_s 는 표적에서 산란되어 레이더 방향으로 되돌아오는 산란파, R 은 레이더와 표적 사이의 거리를 의미한다.

식(1)의 RCS 정의를 이용하여, 복잡한 표적의 RCS 해석은 전체 표적을 기하학적으로 단순한 형태를 갖는 여러 개의 요소로 나누어서 각각의 RCS를 해석한 후 이를 합하여 전체 RCS를 구하며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{\sigma}_{total} \approx \sum \sqrt{\sigma}_{element} \quad (2)$$

2.2 RACSAN

입의의 형상을 갖는 복합 구조물에 대한 RCS를 해석하기 위해서 RACSAN(RADAR Cross Section ANALYSIS program)을 이용하였다(Kwon et al., 2014b). 본 프로그램은 기하광학법(Geometric Optics)을 이용하여 다중 반사 시 경로와 유효면적(effective area)을 계산하고 최종 반사면에서는 물리광학법(Physical Optics)을 이용하여 RCS를 해석한다.

RACSAN의 구성은 입의의 형상을 갖는 복합 구조물의 주요 방위각 및 고각에 대한 내/외부 단반사 및 다중반사 RCS 해석 모듈, RCS 반사신호 시간패턴 해석 모듈, 전파흡수체 반사/투과계수 해석 모듈로 구성되어 있다.

2.3 다층형 전파흡수체 설계

전자파(electromagnetic wave)는 전자기적 특성이 다른 매질(medium)을 만나면 반사와 투과 현상이 발생되며, 이러한 특성은 매질의 전기적, 자기적 특성을 나타내는 유전율과 투자율에 의하여 결정된다. 유전율은 물질이 전기력을 함유할 수 있는 크기(capacity)를 의미하고, 투자율은 매질에 따른 자속(magnetic flux)의 통과하기 쉬운 정도를 의미한다(Cheng, 1993).

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + j\epsilon_r'' \quad (3)$$

$$\mu_r = \mu_r' + j\mu_r'' \quad (4)$$

여기서, ϵ 는 유전율, μ 는 투자율을 나타낸다. 아래 첨자 r 은 공기 중의 유전율 및 투자율과의 비를 나타낸다. 식(3)의 실수항은 전기력을 함유할 수 있는 크기, 허수항은 열로 손실되는 에너지의 크기를 나타낸다. 또한, 식(4)의 실수항은 자기가 물체를 통과할 수 있는 정도, 허수항은 자성손실을 의미한다.

2.4 메타물질(Metamaterials)

메타물질은 자연계에 존재하지 않는 물질로써 전자기적 특성을 가진 주기적인 유효매질로 정의된다. 유효매질은 유효 균질 한계(effective-homogeneity limit) 또는 유효 균질 조건(effective-homogeneity condition)이라 불리는 단위 셀의 격자주기 조건은 메타원자 격자의 크기가 1/4 파장이하인 경우 메타물질로 작동이 가능하다는 것을 의미한다.

유전율과 투자율은 각각 음과 양의 값을 가질 수 있는데 Fig. 1과 같이 4가지 경우가 생긴다.

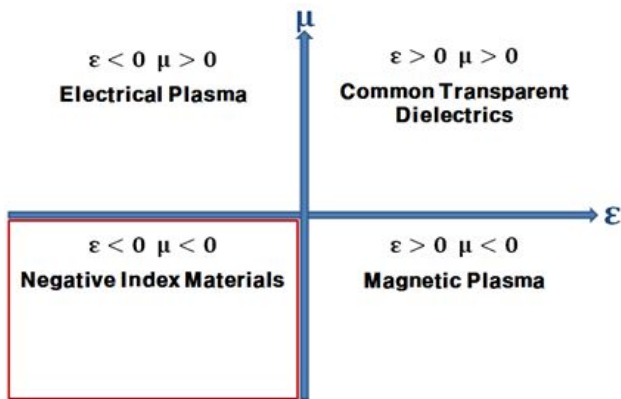


Fig. 1. Material classifications.

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (5)$$

$$E = E_0 e^{\pm i\beta r} e^{i\omega t} \quad (6)$$

굴절률은 유전율과 투자율로 구성되어 있는데 이는 식(5)와 같이 나타낸다. 식(6)은 전자기파의 E-field를 나타낸 식이다. 식(6)에서 β 는 propagation constant로 $\beta = nk_0$ 로 표현되며 k_0 는 free space wavenumber로 $k_0 = \omega/c$ 의 관계를 갖는다(Shin et al., 2011). 굴절률의 값에 따라서 빛이 전파되거나 소멸되는 것을 결정되기 때문에 유전율과 투자율의 값에 따라서 빛이 전파되거나 급격히 소멸된다. 유전율과 투자율이 모두 양수인 경우 굴절률이 실수가 되어 공간탐($e^{\pm i\beta r}$)이 진동하고, 어느 한 쪽이 음수인 경우 굴절률이 허수가 되어 공간탐이 소멸과 형태를 가지게 된다. 마지막으로 유전율과 투자율이 모두 음수가 되는 경우 굴절률은 음의 실수가 되어 전파되는 방향이 반대로 바뀌게 된다. 메타물질은 음의 굴절률을 나타내기 위하여 인위적으로 음의 유전율을 갖는 물질과 음의 투자율을 갖는 물질을 결합하여 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 갖는 새로운 물질을 만든다. 다음과 같이

음굴절률을 가지게 될 경우 도플러 현상이나 Snell의 법칙 등이 반대로 생기게 된다.

3. 모형선 모델 RCS 해석

복합 구조물의 RCS를 해석할 수 있는 프로그램, RACSAN을 이용하여 모형선의 실험결과(Suk, 2001)로 프로그램을 검증하고 특성을 분석하였다. 해석 모델은 Fig. 2(a)에 나타낸 길이 0.9 m, 폭 0.2 m, 높이 0.2 m의 모형선을 334개의 요소로 모델링하여 RCS 해석을 수행하였다.

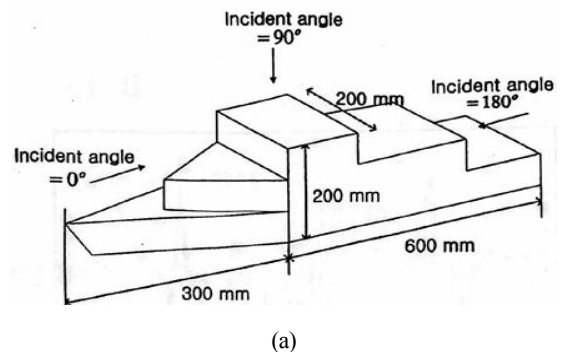
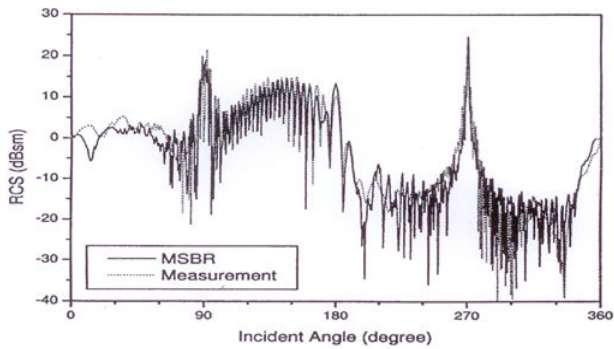


Fig. 2. (a) Geometry of a Simplified Ship Model, (b) Real model of a Simplified Ship Model.

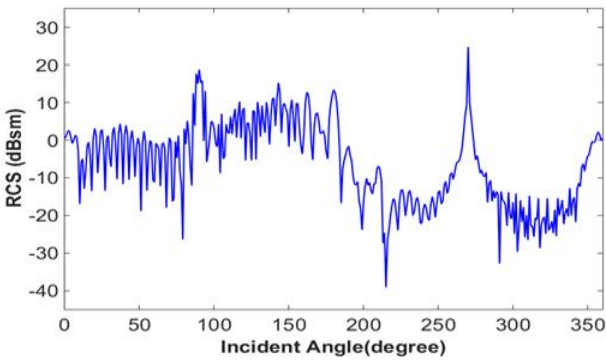
3.1 모형실험 및 RACSAN 해석 결과 비교

프로그램을 검증하기 위하여 Fig. 2의 모형선 모델을 실험과 동일하게 10 GHz의 전자파를 고도각 0도에서 180도까지 1도 간격으로 RCS 해석을 수행하였다.

Fig. 3(a)는 Fig. 2에 나타난 모형선 모델의 RCS 실험 결과를 나타내며, Fig. 3(b)는 모형선 모델의 해석 결과를 나타낸다. Fig. 3에서 보듯이 모형선의 상부에서의 측정값인 90도에서 RCS 값 약 19.5 dB, 선미에서의 측정값인 180도에서 RCS 값 13.5 dB로 두 결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) RCS Measurement results and (b) RCS analysis results of Simplified ship.

3.2 전파흡수체 적용에 따른 RCS 해석

함정의 스텔스 설계에서 가장 기본적이고 중요한 방법은 형상 설계지만, 함정의 형상 설계만으로 충분한 RCS 감소를 만족하기 어려운 경우 전파흡수체의 적용을 고려해 볼 수 있다. 손실이 큰 물질로 되어 있는 전파흡수체는 입사하는 전자파 에너지를 손실에 의한 열 에너지로 변환하는 물질이다. 전파흡수체는 협대역에서 손실을 극대화한 형태와 광대역에서 손실 특성과 주파수 특성을 적절히 조화시킨 형태가 있다. 협대역 전파흡수체는 탐재장비 또는 구조물간에 발생할 수 있는 특정 대역에서 다중반사를 줄이기 위해 사용하거나, 위협 주파수가 특정 주파수에서 알려져 있을 경우 사용할 수 있으며, 광대역 전파흡수체는 불특정 위협 주파수에서 존재하는 RCS를 줄이기 위해 사용한다.

Fig. 2의 모형선에 전파흡수체 적용에 따른 RCS 감소효과를 살펴보기 위하여, Fig. 2의 모형선의 RCS 기여도 분석을 진행하고 기여도가 높은 부분에 협대역 전파흡수체를 적용하고 RCS 해석을 수행하였다. Fig. 4(a)는 Fig. 2 모형선 모델의 고각 45도와 145도에서의 기여도 분석을 나타낸다. 기여도 막대에서 빨간색이 높은 기여도를 나타내고 파란색이 낮은 기

여도를 나타낸다. 기여도 분석결과 다중반사가 발생하는 구역에서 기여도가 높게 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 4(a)의 결과로부터 Fig. 4(b)의 빨간색 부분에 전파흡수체를 적용하고 RCS 해석을 수행하였다. 전파흡수체의 재료특성(Michielsen et al., 1993)은 유전율($\epsilon_r = 15$), 투자율($\mu_r = 0.09 - 1.66j$) 및 두께($t = 1.1mm$)를 적용하였다. 해석각도는 고도각 0도에서 180도까지 1도 간격으로 RCS 해석을 수행하였다.

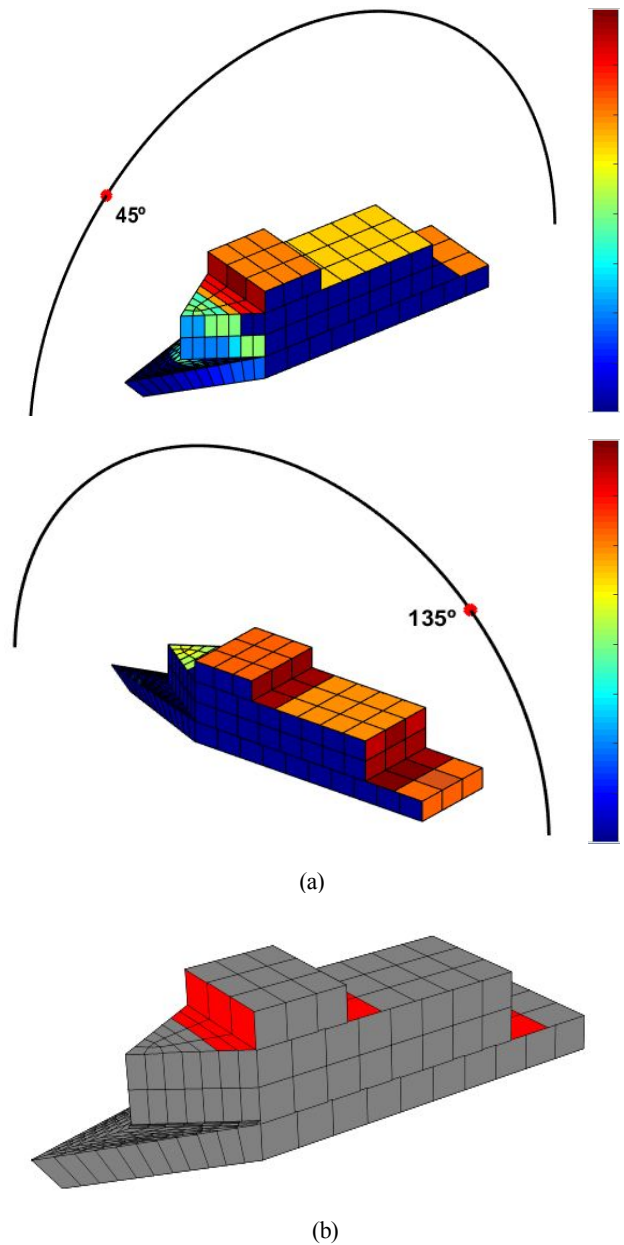


Fig. 4. (a) Contributions of the incident angle at 45° and 135°, (b) Simplified ship model with applying the RAM.

Fig. 5는 Fig. 4(b)에서 보이는 것처럼, RCS 기여도가 높은 부분에 전파흡수체를 적용한 결과이다. Table 1에 나타난 것처럼 모형선 모델에 전파흡수체를 적용전과 부분적용한 후의 결과를 비교하면 평균 2.15 dB 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 함정의 형상실계만으로 RCS 감소를 만족하기 어려운 경우 Fig. 4(a)의 기여도 분석을 통해서 RCS가 크게 나타나는 요소에 전파흡수체를 적용하는 것이 RCS 감소에 효과적인 것으로 판단된다.

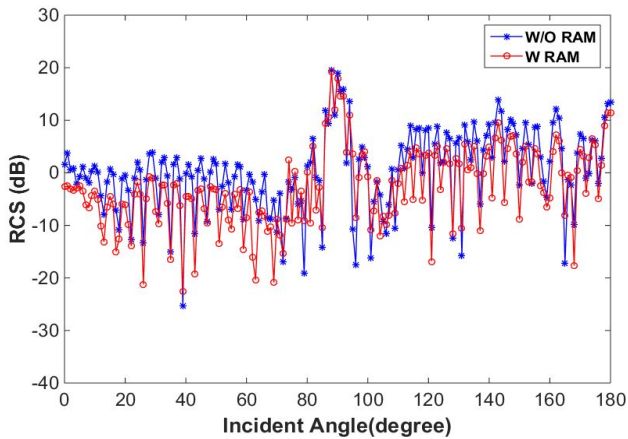


Fig. 5. RCS analysis results of Simplified ship after applying the RAM at 10 GHz.

Table 1. Mean RCS analysis results of Simplified ship and after applying the RAM at 10 GHz.

	Without RAM	With RAM
RCS(dB)	6.18	4.03

3.3 메타물질 적용에 따른 RCS 해석

최근 주목받고 있는 메타물질은 세계적으로 활발한 연구가 행해지고 있다. 메타물질은 넓은 의미로 자연계에 존재하지 않는 전자기적 특성을 가지는 인공적인 물질로 메타원자의 주기가 파장보다 훨씬 작은 경우 유효 매질로 인식한다. 메타물질의 특성은 기본물질의 특성이 아니라 물질의 구조에 의해 생긴다. 적절히 디자인된 메타물질은 전자기파 혹은 소리에 물체가 관측되지 않게 하는 형식으로 간섭할 수 있다. 특정 파장에서 음의 굴절률을 갖는 물질들을 메타물질(metamaterials)이라고 한다.

메타물질의 적용에 따른 RCS 감소효과를 확인하기 위하여 Fig. 6의 메타물질을 CST사의 MWS 시뮬레이션 틀을 이용하여 모의실험을 수행하였다.

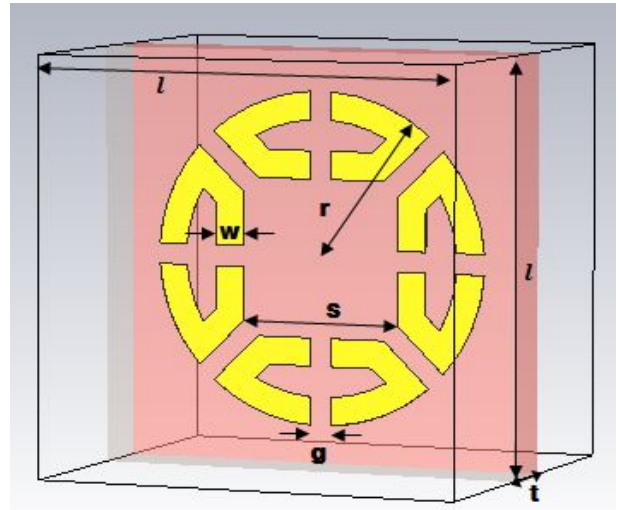
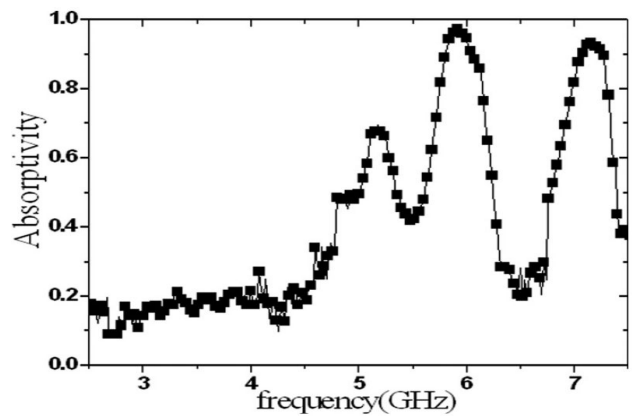
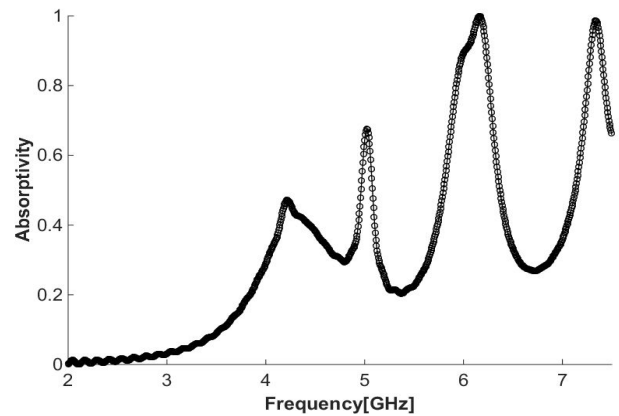


Fig. 6. Unit Cell of Metamaterial : $l = 40$, $r = 16$, $s = 15.2$, $w = 2.7$, $g = 2$, $t = 6$ (mm).



(a)



(b)

Fig. 7. Absorptivity of the Metamaterial : (a) The experiment and (b) simulation results, respectively.

Fig. 7(a)는 Fig. 5 메타물질의 흡수율에 대한 실험결과 (Cheng et al., 2012)이고 Fig. 7(b)는 해석결과이다. Fig. 7(a)의 실험결과에서 약 5.9 GHz와 7.2 GHz에서 최대 흡수율을 갖는 것을 확인하였고, Fig. 7(b)의 해석결과에서 약 6.1 GHz와 7.3 GHz에서 최대 흡수율을 갖는 것을 확인 하였다. 두 결과에서 최대 흡수율을 갖는 주파수 대역이 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 Fig. 7(b) 메타물질의 해석결과로부터 유전율과 투자율을 계산하여 나타내었다. 그래프에서 빨간색 실선과 점선은 유전율의 실수항과 허수항을 나타내고, 파란색 실선과 점선은 투자율의 실수항과 허수항을 나타낸다. 해석결과에서 흡수율이 최대가 되는 주파수대역 중 7.34 GHz에서 메타물질의 유전율과 투자율을 이용하여 Fig. 4(b)와 동일한 부분에 적용하여 RCS 해석을 수행하였고, 동일한 주파수에서 3.2절에서 사용한 전파흡수체를 적용하여 해석을 수행하였다. 7.34 GHz에서 메타물질의 재료특성은 유전율 ($\epsilon_r = -18.81 - 55.16j$), 투자율($\mu_r = -2.12 - 40.12j$) 및 두께($t = 6mm$)이다. 해석 각도는 고도각 0도에서 180도 까지 1도 간격으로 RCS 해석을 수행하였다.

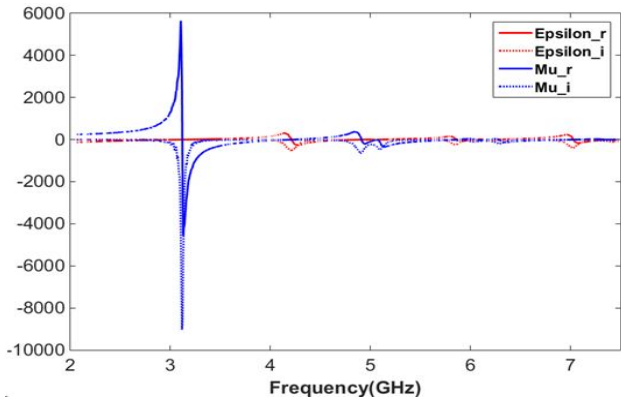
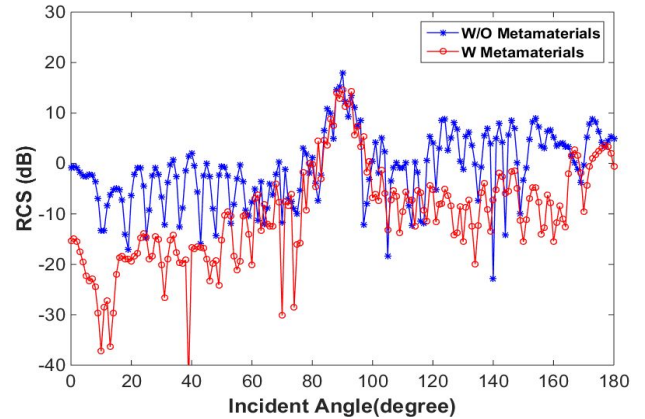
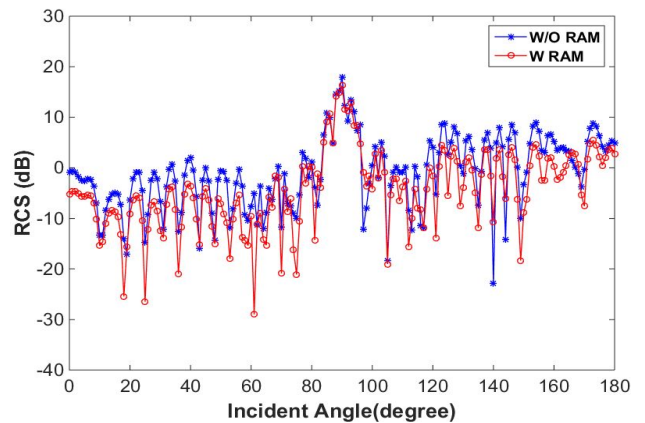


Fig. 8. Extracted effective permittivity and permeability.

Fig. 9(a), (b)는 Fig. 4(b)에서 보이는 것처럼, RCS 기여도가 높은 부분에 전파흡수체와 메타물질을 적용한 결과이다. Table 2에 나타난 것처럼 모형선 모델에 메타물질을 적용하기 전과 부분적용한 후의 결과를 비교하면 평균 3.58 dB 감소하는 것을 확인 할 수 있고, 전파흡수체를 적용한 경우 1.97 dB 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 메타물질을 적용한 경우 메타물질의 영향이 크지 않은 고도각 70도에서 110도 사이를 제외하고는 RCS 값이 약 10 dB 이상 크게 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서, RCS 기여도 분석을 통하여 기여도가 높은 요소에 메타물질을 적용한다면 전파흡수체보다 RCS 감소에 효과적일 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 9. RCS analysis results of Simplified ship after applying, (a) the metamaterials and (b) the RAM at 7.34 GHz.

Table 2. Mean RCS analysis results of Simplified ship and after applying the metamaterials and the RAM at 7.34 GHz

	Without RAM	With Metamaterials	With RAM
RCS(dB)	4.18	0.6	2.21

4. 결 론

본 논문에서는 복합 구조물의 RCS를 해석할 수 있는 프로그램, RACSAN을 이용하여 모형선 모델의 실험결과와의 비교를 통해 RCS 해석을 통해 프로그램을 검증하였다. 특히, 함정의 형상 설계만으로 RCS 감소를 만족하기 어려운 경우에 활용 될 수 있는 전파흡수체 설계 방법을 구현하여 표적의 특수 재질 물성에 대한 RCS의 감소 효과를 분석하였다. 또한 최근 주목받고 있는 메타물질을 모형선 모델에 적용하여 감소효과를 확인하였다.

모형선 모델에 RCS 기여도 분석을 통해서 기여도가 높은 요소에 전파흡수체를 적용한 경우 해석 주파수 10 GHz에서 RCS 평균값이 2.15 dB 감소하는 것을 확인하였고, 메타물질을 적용한 경우 해석 주파수 7.34 GHz에서 평균값이 3.58 dB 감소하는 것을 확인하였다.

향후에는 투명망토로 널리 알려진 메타물질을 이용한 RCS 감소효과에 대한 추가 연구와 실측 자료에 대한 비교 연구 수행이 요구된다.

후 기

본 연구는 차세대합정첨단함형 특화연구실의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Chambers, B. and A. Tennant(1996), Optimized design of Jaumann radar absorbing materials using a genetic algorithm, IEEE proc. radar, sonar, navig., Vol. 143, No. 1, pp. 23-30.
- [2] Cheng, D. K.(1993), Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Addison-Wesley, Massachusetts, pp. 272-330.
- [3] Cheng, Y. Z., Y. Wang, Y. Nie, R. Z. Gong, X. Xiong and X. Wang(2012), Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements, Appl. Phys., Vol. 111, pp. 0449021-04490214.
- [4] Goudos, S. K.(2007), A versatile software tool for microwave planar radar absorbing materials design using global optimization algorithms, Materials and Design, Vol. 28, pp. 2585-2595.
- [5] Kim, K. H., D. S. Cho and J. H. Kim(2007), Broad-band Multi-layered Radar Absorbing Material Design for Radar Cross Section Reduction of Complex Targets Consisting of Multiple Reflection Structures, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 445-450.
- [6] Knott, E. F., J. F. Shaeffer and M. T. Tuley(1993), Radar Cross Section, 2nd Edition, Artech House, Boston-London, pp. 183-224.
- [7] Kwon, H. W., S. Y. Hong, K. K. Lee, J. C. Lee, I. C. Na and J. H. Song(2014a), Analysis of Radar Cross Section for Advanced Naval Vessels, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 5, pp. 593-600.
- [8] Kwon, H. W., S. Y. Hong and J. H. Song(2014b), Development of radar cross section analysis program for complex structures, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 4, pp. 435-442.
- [9] Michielssen, E., S. M. Sajer, S. Ranjithan and R. Mittra(1993), Design of lightweight, broad band microwave absorbers using genetic algorithms, IEEE Trans. Microwave Theory Tech, Vol. 41, No. 6/7, pp. 1024-1031.
- [10] Park, H. S., I. S. Choi, J. K. Bang, S. H. Suk, S. S. Lee and H. T. Kim(2004), Optimization design of radar absorbing materials for complex target, Journal of electromagnetic waves and applications, Vol. 18, pp. 1105-1117.
- [11] Park, T. Y.(2004), A study on RCS prediction code for battleship, MS. Dissertation, POSTECH, pp. 29-61.
- [12] Shelby, R., D. Smith and S. Schultz(2001), Experimental verification of a negative index of refraction, Science, 292(5514): 77.
- [13] Shin, D. H.(2011), Desing of metamaterials using effective medium, MS. Dissertation, Yonsei Univ., pp. 1-12.
- [14] Suk, S. H.(2001), RCS Prediction of complex targets, MS. Dissertation, POSTECH, pp. 69-70.
- [15] Weile, D. S., E. Michielssen and D. E. Goldberg(1995), Genetic algorithm design of pareto optimal broadband microwave absorbers, IEEE Trans. electromagn. compat., Vol. 38, No. 3, pp. 518-525.

Received : 2015. 09. 30.

Revised : 2015. 11. 03.

Accepted : 2015. 12. 28.