

함정의 스텔스 설계를 위한 광대역 메타물질 적용 연구

황준태^{1,2} · 홍석윤^{1,2} · 권현웅³ · 송지훈^{4*}

Analysis of stealth design for naval vessels with wide band metamaterials

Joon-Tae Hwang^{1,2} · Suk-Yoon Hong^{1,2} · Hyun-Wung Kwon³ · Jee-Hun Song^{4*}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

³Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Koje College, Geoje 53325, Korea

^{4*}Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요 약

현대 해상전에서 함정의 피탐지율은 생존성에 직접적인 요소이며, 레이더 반사면적(RCS; Radar Cross Section)은 피탐지율에 있어서 주요 변수 중 하나이다. 본 논문에서는 RCS 감소기법 중 하나인 레이더 신호를 흡수하는 특수 재질을 통한 RCS 감소 기법인 RAM(Radar Absorbing Materials) 방법을 이용하여 위협 주파수 대역의 RCS 해석을 수행하였다. 해석 모델은 모형선 모델을 이용하였고, RAM 기법에 적용될 전파흡수체는 최신 전파흡수체 기술인 광대역 메타물질을 적용하였다. 광대역 메타물질은 광대역에서 공진주파수를 갖는 MIK 공진구조와 유연성 기관을 이용하여 모델링을 수행하였고, 광대역 메타물질의 성능 분석을 위하여 전자기파의 흡수율과 반사율에 대한 모의실험을 수행하였다. 또한, 광대역 메타물질 적용에 따른 레이더 반사면적 감소효과를 분석하기 위하여 기존 전파흡수체와의 비교를 통하여 RCS 감소 효과를 분석하였다.

ABSTRACT

When it comes to naval surface warfare, the probability of detection is an important factor in survivability and the Radar Cross Section(RCS) is a major parameter. In this paper, the RCS reduction technology of the Radar Absorbing Material(RAM) method is carried out for the general frequency range for naval warfare. We set the analysis model with the simplified ship model and the wide band metamaterial which is high-tech radar absorbing materials is selected for the RAM method. The modeling of the wide band metamaterial composed of an MIK surface which has the wide band resonant properties and flexible substance and the electromagnetic absorptions and reflections of the wide band metamaterial has been simulated to explore the performance. Also, the wide band metamaterial is compared with the paint absorber to analyze RCS reduction in terms of RCS values.

키워드 : 레이더 반사면적, 스텔스 설계, 해군 함정, 전파흡수체, 광대역 메타물질

Key word : Radar cross section, Stealth design, Naval Vessels, Radar absorbing materials, Wide band Metamaterials

Received 18 August 2017, Revised 10 October 2017, Accepted 21 October 2017

* Corresponding Author Jee-Hun Song(E-mail:jhs@jnu.ac.kr, Tel:+82-61-659-7156)

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

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.11.2206>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

현대 해상전에서 해군력의 중요성에 대한 인식이 증대되면서 해군력의 주축을 이루는 수상함 및 수중함의 성능향상에 대한 관심과 요구 또한 증폭되고 있다. 또한 최근 북한의 무기체계가 고도화, 정밀화 되면서 함정의 스텔스화는 해군 함정의 핵심 설계개념으로 요구되고 있다. 따라서 적의 탐지 장비에 감지될 확률을 감소시키고 함정의 생존성을 향상시킬 수 있는 스텔스 기술의 연구는 필수적이고, 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

스텔스 기술은 상대의 레이더, 음향탐지기, 적외선 탐지기 등 모든 탐지 장비에 대항하는 은폐 기술이다. 대표적인 탐지 시스템인 레이더는 표적에 반사된 전자파가 되돌아오는 신호를 탐지하여 표적에 관한 정보를 얻는데 이를 레이더 반사면적(RCS; radar cross section)이라고 한다.

대표적인 RCS 감소기술은 스텔스 형상설계 등의 RAS(Radar Absorbing Structures)방법 및 RCS 기여도 분석을 통한 전파흡수체 도장 등의 RAM(Radar Absorbing Materials)방법이 있다. RAS 방법은 RCS 감소에 가장 효과적인 방법으로 함정의 외부형상이 전자파의 입사방향 이외의 방향으로 반사 또는 산란이 발생할 수 있도록 설계한다. 과거에 RCS 기법이 적용되지 않은 함정은 크기가 커지면 RCS 또한 증가하였지만, 최근에 건조되는 함정은 설계 단계에서 RCS 감소 기법을 고려하기 때문에 크기에 비례해서 RCS가 증가하는 것은 아니다[1].

함정의 RCS는 스텔스 형상설계로 가장 효율적으로 감소시킬 수 있지만 이는 설계 초기단계에서만 적용할 수 있다. 따라서 형상설계 이후에는 RAM 기법을 이용하여 RCS를 감소시킬 수 있다. RAM 기법에 사용되는 전파흡수체의 다층면과 입사하는 전자파의 상호관계는 프레넬 반사계수를 이용하여 나타낼 수 있다. 전파흡수체의 흡수성능에 영향을 미치는 주요 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 유전

자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 최적설계 기법들이 적용되고 있다[2-4].

최근 주목받고 있는 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 증명이 되었다[5].

메타물질은 매질의 손실 성분을 나타내는 복소 유전율과 복소 투자율의 허수부를 최소화되도록 연구되어 왔다. 하지만 최근에는 손실성분을 인위적으로 크게 만들어 메타물질 흡수체에 대한 연구가 진행되고 있다. 메타물질 흡수체는 공진기 구조, 매립소자, 저항시트 등을 이용하여 특정 주파수 대역에서 90% 이상의 흡수율을 나타낼 수 있다[6-8].

본 논문에서는 RCS 감소기술인 RAM 기법을 이용하여 RCS의 감소 효과를 분석하였다. RAM 기법으로 사용된 전파흡수체는 최근 주목받고 있는 광대역 메타물질을 이용하였고 모의실험을 통하여 전파 흡수율을 분석하였다. 또한 광대역 메타물질 적용에 따른 RCS 감소효과를 분석하기 위하여 기존 전파흡수체인 Vinoy's 전파흡수체를 모형선 모델에 적용하여 비교하였다.

II. 배경이론

2.1. 레이더 반사면적(RCS; Radar Cross Section)

레이더 반사면적은 레이더에서 방사된 전자파가 물체에서 반사되어 되돌아온 크기를 면적의 단위로 나타낸 값이다. RCS는 대상 물체와 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[9].

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

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

리를 의미한다.

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

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

2.2. 메타물질(Metamaterials)

메타물질은 자연계에 존재하지 않는 물질로 전자기적 특성을 가진 주기적인 유효매질로 정의된다. 유효매질은 유효 균질 조건(effective-homogeneity condition) 또는 유효 균질 한계(effective-homogeneity limit)라 불리는 단위 셀의 격자주기 조건의 메타원자 격자 크기가 1/4 파장이하인 경우 메타물질로 작동한다는 것을 의미한다.

메타물질의 원리는 공간상에 놓인 두께 d인 메타물질의 평면파의 산란 개념을 통해 설명할 수 있다. 두께가 d인 메타물질 구조에 입사되어진 평면파는 메타물질 구조의 경계면에서 다음과 같이 입사파는 반사파 R과 투과파로 T로 나뉘게 된다. 하지만 메타물질의 경우에는 손실을 크게 만들어 입사파가 반사되거나 투과되지 않고 물질 구조 내에 흡수되어 사라지게 하였다. 물질의 경계면에서 흡수율 A는 다음과 같이 구할 수 있다[10].

$$A(\omega) = 1 - T - R \quad (3)$$

여기서, T는 투과율을 나타내고, R은 반사율을 나타낸다. 흡수율을 높이기 위해서는 R과 T 모두 0에 근접하여야 한다. R을 0으로 만들기 위해서는 메타 물질을 자유공간상과 임피던스 매칭을 시켜야하는데 매질에서의 특성 임피던스는 다음과 같이 계산된다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (4)$$

여기서, ϵ_0 와 μ_0 는 공기층의 유전율과 투자율을 나타내며, ϵ_r 과 μ_r 는 물질의 비유전율과 비투자율을 나타낸다. 자유공간 상의 임피던스 매칭을 시키기 위해서는

$\epsilon_r = \mu_r$ 로 설계하면 매칭이 가능하게 되고, 도체 접지면을 사용하게 되면 T가 0이 가능하다.

III. 광대역 메타물질을 적용한 RCS 해석

함정의 위협 주파수 대역은 위협이 되는 탐색/추적 레이더와 유도탄에 탑재된 초고주파 탐색기의 운용 주파수에 의하여 결정된다. RCS의 계산을 위한 적용 주파수를 분석하기 위해서는 레이더 주파수 대역별 특성 뿐만 아니라 주변국의 운용 주파수 특성을 확인하여야 한다. 한반도 주변해역 에서 운영되는 레이더 호밍방식의 대함 유도탄은 우리 해군의 해성을 포함하여 Exocet, Harpoon, Styx, Silkworm 등이 있다. 레이더 및 탐색기에 일반적으로 사용되는 주파수에 대한 용도와 주요 함대함 유도탄의 주파수 대역을 표 1에 나타내었다[1]. 표 1에 나와있는 것처럼 수상함 탐지에 고려되어야 할 주파수 대역은 2 ~ 18 GHz로 함정의 RCS 분석을 진행할 때 고려되어야 한다.

Table. 1 The radar frequency band

IEEE band designation	NATO band designation	Frequency Range	
S	E/F	2 ~ 4 GHz	mid range detection, Air search radar
C	G/H	4 ~ 8 GHz	long range detection/homing, sea search radar
X	I	8 ~ 12 GHz	short range detection, shore radar
Ku	J	12 ~ 18 GHz	missile base, missile seeker
K	K	18 ~ 27 GHz	atmosphere attenuation

3.1. 광대역 메타물질(Wide band Metamaterials)

표 1에 나와 있는 주파수 대역을 만족하는 메타물질을 모델링 하기 위해서 광대역에서 공진주파수를 갖는 MIK(Minkowski fractal loop) 공진구조와 유전체, 저항 시트와 고무를 이용하여 모델링을 수행하였다[8]. 또한 일반적인 유전체 기판은 유연성을 갖지 않기 때문에 함

정의 곡면 등과 같은 곳에 적용이 제한적이다. 따라서 기존의 유전체를 대신하여 유연성 유전체인 Polyimide를 이용하였다. 그림 1에 나타내 유연성을 갖는 MIK 광대역 메타물질의 제원은 다음과 같다. $p = 20, l = 18, l_1 = 6, S_0 = S_1 = S_3 = S_5 = 2.15, S_2 = S_4 = 1.5, w_1 = 0.3$ (mm) 이고, MIK 구조는 도전율 5.8×10^7 S/m이고 두께 $t_1 = 0.02$ mm이다. 유전체는 비유전율이 3.5이고 두께는 $t_2 = 125 \mu\text{m}$ 이다. 저항 시트의 두께 $t_3 = 0.03$ mm 이고 저항은 $475 \Omega/sq$ 이다. 고무의 비유전율은 2.7이고, 탄젠트 손실은 1.5, 두께 $t_4 = 1$ mm 이다. 메타물질의 적용에 따른 RCS 감소효과를 분석하기 위하여 유한적분법(FIM; Finite Integration Method)이 적용된 CST 사의 MWS 시뮬레이션 툴을 이용하여 모의실험을 수행하였다.

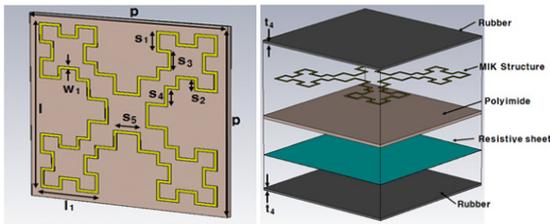


Fig. 1 The MIK metamaterial structures with polyimide and rubber

그림 2는 MIK 구조의 흡수율과 반사율을 나타낸다. 함정의 주요 탐지 주파수 대역인 2 ~ 18 GHz 까지 약 90% 전후로 높은 흡수율을 나타내는 것을 볼 수 있고 임피던스가 자유공간상의 임피던스인 377Ω 에 근접해 임피던스 매칭으로 흡수체로 동작하는 것을 알 수 있다.

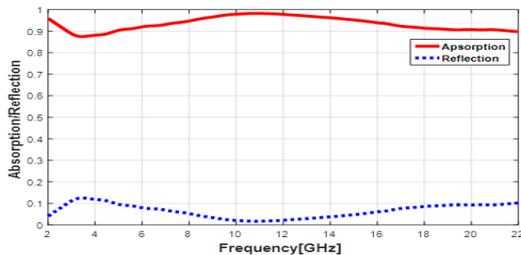


Fig. 2 Absorption and reflection of the wide-band metamaterial

3.2. 광대역 메타물질을 적용한 모형선 RCS 해석

광대역 메타물질을 적용한 RCS 해석을 수행하기 위하여 모형선 모델을 이용하여 RCS 해석을 수행하였다 [11]. 모델의 제원과 레이더의 위치는 그림 3과 같다.

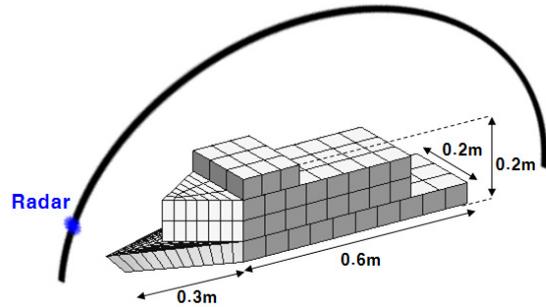


Fig. 3 Geometry of simplified ship model

그림 4 (a)와 같이 모형선의 기여도 분석을 통하여 RCS 기여도가 높게 나타나는 부분에 광대역 메타물질을 그림 4 (b)와 같이 적용하였다[12]. 광대역 메타물질의 RCS 감소효과를 분석하기 위하여 해석 주파수는 위협 주파수 대역인 4 GHz, 8 GHz, 12 GHz, 18 GHz로 수행하였다. 광대역 메타물질 RCS 감소효과를 비교하기 위하여 기존 전파흡수체인 Vinoy's 전파흡수체와 결과를 비교하였다[4].

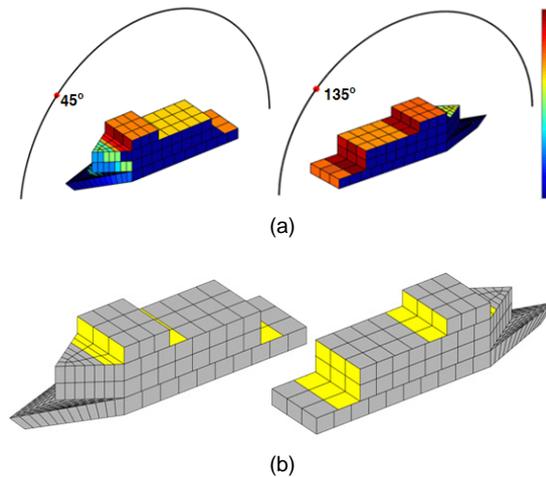


Fig. 4 (a) Contributions of the incident angle at 45° and 135° (b) Simplified ship model with applying the Metamaterial

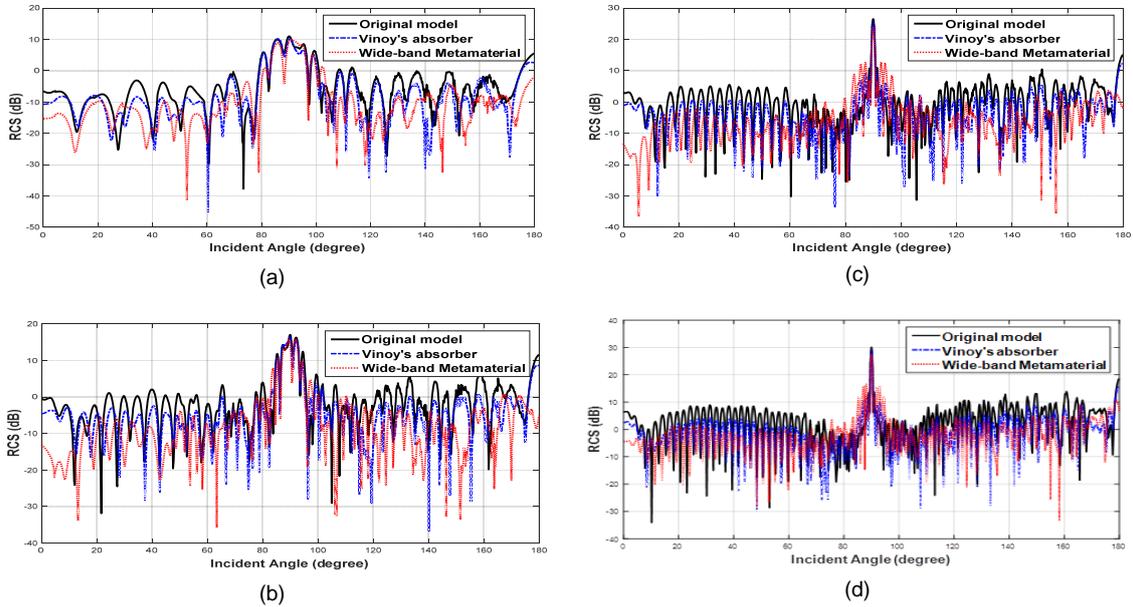


Fig. 5 RCS analysis results of the simplified ship model without absorber, the Vinoy's absorber and the flexible MIK metamaterial virtually attached (a) 4GHz, (b) 8GHz, (c) 12GHz, and (d) 18GHz.

그림 5는 레이더의 고도각 0도부터 180도까지 0.2도 간격으로 4GHz, 8GHz, 12GHz, 18GHz에 대하여 기본 모델, Vinoy's 전파흡수체, 광대역 메타물질 적용에 따른 RCS 해석결과이다. 그림 5에 나타난 것처럼 메타물질 및 전파흡수체의 영향이 크지 않은 고도각 70도에서 110도 사이를 제외하고 해석을 수행한 전체 주파수대역에서 광대역 메타물질이 Vinoy's 전파흡수체의 감소 효과의 약 2배인 10dB 이상 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 함정의 RCS 기여도 분석을 통하여 기여도가 높은 요소에 광대역 메타물질을 적용하면 위협주파수 대역에서 기존 전파흡수체보다 RCS 감소에 효과적일 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 함정의 형상 설계 이후에 활용 될 수 있는 RCS 감소기술인 RAM 기법을 이용하여 RCS의 감소 효과를 분석하였다. RAM 기법으로 사용된 전파흡수체는 최근 주목받고 있는 광대역 메타물질을 이용

하였다. 광대역 메타물질은 광대역에서 공진주파수를 갖는 MIK 공진구조와 유연성 유전체 Polyimide와 고무를 이용하여 유연성을 갖은 광대역 메타물질을 모델링하고 모의실험을 수행하였다. 광대역 메타물질은 위협 주파수 대역인 2~18 GHz에서 90% 전후의 높은 흡수율을 나타내었다. 광대역 메타물질 적용에 따른 RCS 감소효과를 분석하기 위하여 기존 전파흡수체인 Vinoy's 전파흡수체를 모형선 모델에 적용하여 RCS 감소효과를 비교하였다. 해석 주파수는 위협 주파수 대역의 주파수 4 GHz, 8 GHz, 12 GHz, 18 GHz에 대하여 RCS 해석을 수행하였다.

메타물질 및 전파흡수체의 영향이 크지 않은 고도각 70도에서 110도 사이를 제외하고 광대역 메타물질을 적용한 경우 해석을 수행한 주파수 대역에서 기존 전파흡수체의 2배인 약 10 dB의 RCS 감소효과를 나타내는 것을 확인 하였다.

향후에는 메타물질을 이용한 RCS 감소효과에 대한 실측 자료에 대한 비교 연구와 실제 함정에 적용 및 검증 수행이 요구된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Advanced Naval Vessels Research Laboratory, Research Institute of Marine Systems Engineering and Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Education, Science and Technology (2016R1D11 A1A09 918294, 2015R1D1A1A01060387).

REFERENCES

- [1] J. T. Hwang, "Development of Stealth Design Systems for Naval Ship," MS. dissertation, Seoul National Univ. pp.61-64, 2016.
- [2] E. Michielssen, S. M. Sajer, S. Ranjithan and R. Mittra, "Design of lightweight, broad band microwave absorbers using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 6/7, pp. 1024-1031, Jun/Jul. 1993.
- [3] D. S. Weile, E. Michielssen and D. E. Goldberg, "Genetic algorithm design of pareto optimal broadband microwave absorbers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 3, pp. 518-525, Aug. 1995.
- [4] K. J. Vinoy and R. M. Jha, *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Boston, USA, 1996.
- [5] R. Shelby, D. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science* 06 Apr 2001, vol. 292, no. 5514, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [6] H. Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrekenhamer, N. I. Landy, K. Fan, X. Zhang, W. J. Padilla, and R. D. Averitt, "Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber : Design, fabrication and Characterization," *Physical Review B*, vol.78, 241103, Dec. 2008.
- [7] Z. C. Yong, W. Ying, N.Yan, Z. G.Rong, X. Xuan, and W. Xian, "Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements," *Journal of applied physics*, vol. 111, no. 4, 044902, Feb. 2012.
- [8] Y. N. Fan, Y. Z. Cheng, Y. M. Deng, and R. Z. Gong, "Absorbing Performance of Ultrathin Wide-Band Planar Metamaterial Absorber," *IEEE Antennas, Propagation and EM Theory*, pp 672-676, Oct. 2012.
- [9] H. W. Kwon, S. Y. Hong, and J. H. Song, "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, Aug. 2014.
- [10] D. H. Lee, and W. S. Park, "Extraction of Material Parameters for Metamaterials Using a Full-Wave Simulator," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 202-211, Oct. 2013.
- [11] S. H. Suk, "RCS Prediction of complex targets," MS. Dissertation, POSTECH, pp. 69-70, 2001.
- [12] J. T. Hwang, S. Y. Hong, H. W. Kwon, J. C. Kim, and J. H. Song, "Analysis of Radar Cross Section for Naval Vessels with Metamaterials and Radar Absorbing Materials," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, vol. 21, no. 6, pp. 737-743, Dec. 2015.



황준태(Joon-Tae Hwang)

2016년 서울대학교 조선해양공학과 (공학석사)
 ※관심분야 : 조선해양, 레이더 반사면적, 스텔스 기술



홍석윤(Suk-Yoon Hong)

1992년 펜실베이니아주립대학교 음향공학과 (공학박사)
※관심분야 : 조선해양, 레이다 반사면적, 함정 설계



권현웅(Hyun-Wung Kwon)

2009년 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
※관심분야 : 조선해양, 레이다 반사면적, 스텔스 기술



송지훈(Jee-Hun Song)

2007년 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
※관심분야 : 조선해양, 레이다 반사면적, 함정 설계