한국해양공학회지 제23권 제6호, pp 77-81, 2009년 12월 (ISSN 1225-0767)

수상함의 동적 레이더 반사면적 해석 기법 연구

김국현* · 김진형** · 최태묵** · 김윤환*** · 조대승***
*동명대학교 조선공학과
**(주)크리에이텍
***부산대학교 조선해양공학과

A Study on a Dynamic Radar Cross Section Analysis Technique for a Surface Warship

Kookhyun Kim*, Jin-Hyeong Kim**, Tae-Muk Choi**, Yun-Hwan Kim*** and Dae-Seung Cho***
*Dept. of Naval Architecture, Tongmyong University, Busan, Korea
**Createch Co. Ltd., Busan, Korea
***Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Dynamic radar cross section 동적 레이더 반사면적, Ship motion 선체 운동, Quasi-stationary method 준 정적 방법

ABSTRACT: *The radar cross section (RCS) of a warship is one of the most important design features in terms of her survivability in hostile environments. Ocean waves continuously changes the attitude of an objective warship to hostile radar and distorts the RCS as a result. This paper presents a dynamic RCS analysis technique and procedure that considers temporal ship motion. First, data sets are prepared for ship motions in 6 degrees of freedom, which are numerically simulated for an objective warship via frequency to time domain conversion with response amplitude operators and specified ocean wave spectra. Second, a series of RCS analysis models are transformed geometrically by referring to ship motion data sets. Finally, temporal RCS analyses are carried out with the RCS simulation code, SYSCOS. As an example, RCS analysis results are given for a virtual warship, which show that ship motions temporally change RCS values and cause RCS reduction compared with static value in terms of mean values.*

1. 서 론

수상함의 레이더 반사면적(Radar cross section; RCS)은 수상함의 생존성 향상에 있어서 가장 중요한 설계인자 중 하나이다. 따라서 수상함의 개념설계 단계에서부터 형상화(Shaping), 차폐(Shielding), 전파흡수재(Radar absorbing material) 적용 등 다양한 RCS 감소기술이 적용되고 있다. 또한, 설계 단계별로 RCS 감소기술 적용에 따른 효과분석을 위해 수치해석을 통한 정량적인 평가가 이루어지고 있다. 기존의 RCS 해석은 수치해석 대상 모델은 정지해 있으며, 해수면은 없다고 가정하여 파랑 중 선체 운동 특성과 해수면에 의한 다중경로 효과를 고려하지 않는 것이 일반적이다(RIMSE, 2009).

그러나 수상함이 실제 해양환경 하에서 운항하는 경우, 파랑에 의해 선체 운동이 발생하게 되며, 이는 레이더 위치에 대한 수상함의 상대적인 자세(Attitude) 변화로 RCS의 시계열 변화를 유발한다(Upson et al., 2001; RIMSE, 2009). 이로 인해, 함 건조 후 실시되는 실해역 RCS 측정 시험에서는 선체 운동 측정 센서를 함상에 장착하여 측정한 자료를 실시간으로 레이더 측정 장소에 전송하게 함으로써 파랑 중 선체 운동에 따른 RCS 변화특성을 보정하고 있다(Tice, 1990). 또한, 미사일의 수상 표적 탐지 확률 개선을 위해서 미사일에 장착되는 탐지 레이더의 경우 선체 운동을 고려한 신호처리 알고리즘 개선 노력이 계속되고 있다. 이와 같이 시간에 따른 수상함 RCS 변화특성은 레이더 탐지를 위한 신호처리 알고리즘 개발에 중요한 인자로서, 이를 고려하기 위한 효과적인 수치해석기법 개발과 절차 정립에 대한 연구가 필요하다.

선체 운동을 고려한 동적 RCS와 관련된 기존 연구로서 Ojeda et al.(2006)은 실선계측 결과를 바탕으로 선체 운동에 의한 도플러 효과를 분석하여 수상함의 횡동요 운동이 RCS에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, Jamil and Burkholder(2006)는 2차원 GFB 방법(2-D generalized forward-backward method)을 이용한 선체 운동에 따른 동적 RCS 해석에 관한 연구를 수행한 바 있다. 특히, Jamil and Burkholder(2006)의 연구는 수치해석 방법을 이용해 동적 RCS 변화량에 대한 정량적 평가를 처음으로 시도했다는 것에 의의가 있다. 그러나 이들의 연구는 2차원 문제에 국한되고, 선체 운동 성분 중에서 횡동요 운동만을 고려하

교신저자 조대승: 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지, 051-510-2482, daecho@pusan.ac.kr
본 연구는 2009년 부산에서 개최된 함정기술세미나에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

여 표적이 중심 위치에서의 횡동요 운동각이 해당 위치에서의 해수면 기울기와 같다고 가정함으로써 수상함의 실제 선체 운동 특성을 완전하게 반영하지는 못하였다.

본 연구에서는 보다 실제에 가까운 선체 운동 특성을 반영할 수 있는 수상함의 동적 RCS 해석기법을 제안한다. 제시된 해석기법에서는 수상함의 6 자유도(6 Degree of freedom, 6 DOF) 전달함수 또는 RAO(Response amplitude operator, Lewis 1988)에 해양파 스펙트럼을 곱하고, 이를 시간영역으로 변환하여 시계열 선체 운동 자료를 도출한다. 또한, 그 결과를 바탕으로 해당 시간별 RCS 수치해석 모델을 생성하고, RCS 전용 해석 코드를 이용하여 동적 RCS를 해석한다. 상기 제시된 방법의 타당성을 검토하기 위하여 가상의 수상함에 대한 동적 RCS 해석을 수행한 결과를 제시하고, 함 운동이 RCS에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 선체 운동을 고려한 시간영역 RCS 해석

선체운동을 고려한 시간영역 RCS 해석은 해양파의 입사각에 따른 대상 함정의 선체 운동 해석을 통한 6 자유도 전달함수(또는 RAO)가 요구된다. 이 때, 전달함수(또는 RAO)는 수치해석, 모형시험, 실선 시험 등 다양한 방법을 통해 획득이 가능하며, 이를 해양파 스펙트럼과 곱하고 시간영역으로 변환하면, 시간영역 선체 운동 데이터를 구할 수 있다.

한편, 대상 함정의 동적 해석을 위한 RCS 해석 모델은 우선 정수 중 상태의 기준 모델(Reference model)을 생성한 후 시간영역 선체 운동 데이터를 이용해서 각각의 시각에 해당하는 RCS 해석 모델들을 생성할 수 있다. 이를 통해 확보된 각 시간별 해석모델들을 이용하여 RCS 전용 해석 코드를 이용한 수상함의 동적 RCS 해석이 가능하다. 본 연구에서 적용한 상기 수상함의 동적 RCS 해석 절차는 Fig. 1에 나타내었다.

본 연구에서는 선체 운동을 고려한 동적 RCS 해석에 필요한 시간영역 선체 운동 자료는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Strip 이론을 이용하여 구한 대상 함정의 주파수 영역 선체 운동 전달함수(또는 RAO)와 해양파 스펙트럼을 서로 곱한 후 시간영역으로 변환하여 마련하였다. 이때, 시간영역 6 자유도 운동은 Fig. 3에 정의한 바와 같이 수상함의 운동중심을 원점으로 하는 국부좌표계(Local coordinate system)를 적용하여 식 (1)과 같이 계산하였다(Pérez and Blanke, 2002). 또한, 시간영역 RCS 해석을 위한 수치 모델은 정지상태의 기준 모델(Reference model)의 각 노드를 좌표 변환하여 생성하였다.

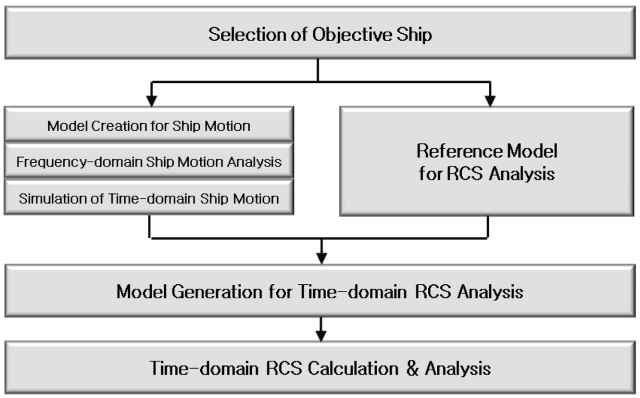

Fig. 1 Time-domain radar cross section analysis procedure

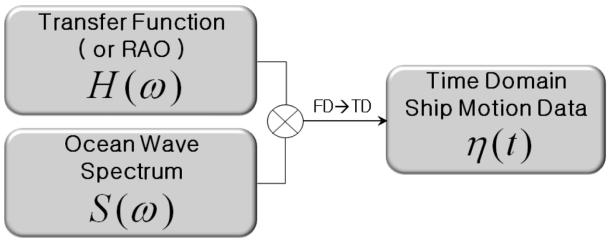

Fig. 2 Procedure of frequency to time domain transformation of ship motion data set

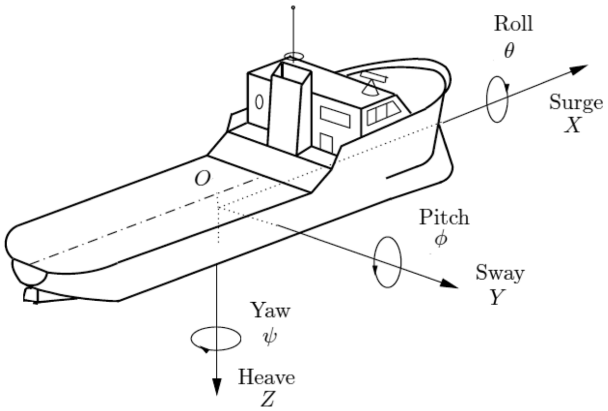

Fig. 3 Coordinates of 6 DOF ship motion (modified from Pérez and Blanke, 2002)

$$\eta_i(t) = \sum_{k=1}^{K} \left[\left(|H_i(\omega_{e,k})| \overline{\zeta_k} \right) \cos\left\{ \omega_{e,k} t + \gamma_k + \angle H_i(\omega_{e,k}) \right\} \right] \quad (1)$$

여기서, $\eta_i(t)$: i-번째 자유도에 대한 선체 운동응답($\eta_1 = X$, $\eta_2 = Y$, $\eta_3 = Z$, $\eta_4 = \theta$, $\eta_5 = \phi$, $\eta_6 = \psi$)

t: 시간

$\omega_{e,k}$: 해양파 조우 주파수(Encounter frequency, $= |\omega_k - (V\omega_k/g)\cos\mu|$)

$H_i(\omega_{e,k})$: i-번째 자유도에 대한 선체 운동 전달함수 (Transfer function, $= |H_i(\omega_{e,k})| e^{\angle H_i(\omega_{e,k})}$)

$\overline{\zeta_k}$: k-번째 주파수에 대한 해양파 진폭(Ocean wave amplitude, $= \sqrt{2 \int_{\omega_k - \Delta\omega_k}^{\omega_k + \Delta\omega_k} S(\omega) d\omega}$)

$S(\omega)$: 해양파 스펙트럼 밀도(Ocean wave spectral density)

ω: 해양파의 각주파수(Ocean wave angular frequency)

ω_k, $\Delta\omega_k$: k-번째 주파수 및 미소 주파수 폭

V: 선속

g: 중력가속도
μ: 해양파 입사각도($\mu = 0^o$: heading sea, $\mu = 180^o$: Following sea)
γ_k: k-번째 주파수에 대한 랜덤 위상(Random phase)

한편, 선체 운동을 고려한 동적 RCS 해석에 있어서 수상함의 운동에 의해 발생하는 국부속도는 레이더파 전달속도에 비해 상당히 낮으므로 레이더파가 표적에 도달하는 순간에는 표적이 정지해 있는 것으로 간주하고 해석하는 준 정적 방법(Quasi-stationary method)을 적용하였으며, 이의 유용성은 김국현 등(2007; 2009)에 의해 검증된 바 있다.

준 정적 방법에 의거한 동적 RCS 해석에 있어서 레이더파가 방사되는 매 순간에 대한 RCS 해석은 물리광학/기하광학 혼합 방법을 기본 이론으로 개발된 전용 RCS 해석 코드 SYSCOS(조대승, 2004)를 사용하되, 매 시간마다 대상함의 자세를 반영한 RCS 모델들을 일괄 생성한 후 SYSCOS 코드에 내장된 Batch 기능을 이용해 동적 RCS 해석을 수행하였다.

3. 수치해석 예

본 연구에서 제안한 수상함의 동적 RCS 해석기법의 타당성 검토와 동적 RCS에 가장 큰 영향을 미치는 선체 운동 성분을 고찰하고자 60m급 가상 함정에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 대상함의 크기는 길이, 폭 및 수면으로부터의 최대높이가 각각 63m, 9m, 15m이며, 선체 운동 및 RCS 해석에 있어서 적용된 주요 수치해석조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Numerical analysis conditions of ship motion and RCS

Ship motion conditions	Wave spectrum		JONSWAP
	Significant wave height		0.88 m
	Modal wave period		7.5 sec
	Wave incidence angle		45° from heading
Radar operating conditions	Radar frequency		10 GHz
	Polarization		VV, HH
	Incidence angle	Azimuth	45°
		Elevation	0°
Data period			100~130 sec

수치해석에 있어서 대상함은 정지한 상태($V = 0$m/s)이고, 유의파고가 0.88m인 해양파가 선수를 기준으로 우현 45° 방향으로 입사한다고 가정하였다. 또한, 레이더파는 운용주파수가 X-band에 해당하는 10GHz를 적용하였으며, 이의 입사 위치는 선수를 기준으로 우현 45° 방향으로 설정하였다. 또한, RCS 해석은 시간 영역 함 운동이 안정화 되었다고 판단되는 100sec부터 130sec까지 0.02sec 간격으로 수행하여 총 1,501회 수행하였다.

Fig. 4에는 수치해석에 사용된 대상함의 선체 운동 해석 모델(Strip sections)과 해양파 스펙트럼 및 이로부터 계산된 선체 운동 RAO를 기준 모델 형상과 함께 나타내었다. 선체 운동 RAO는 MOTNHW(MOERI, 2002)를 이용해 계산하였으며, 이때 사용된 대상함의 Strip section은 25개이다. 또한, RCS 해석용 기준모델은 29,271개의 절점(Node)과 39,356개의 삼각형요소(Triangular element)로 구성되어 있다.

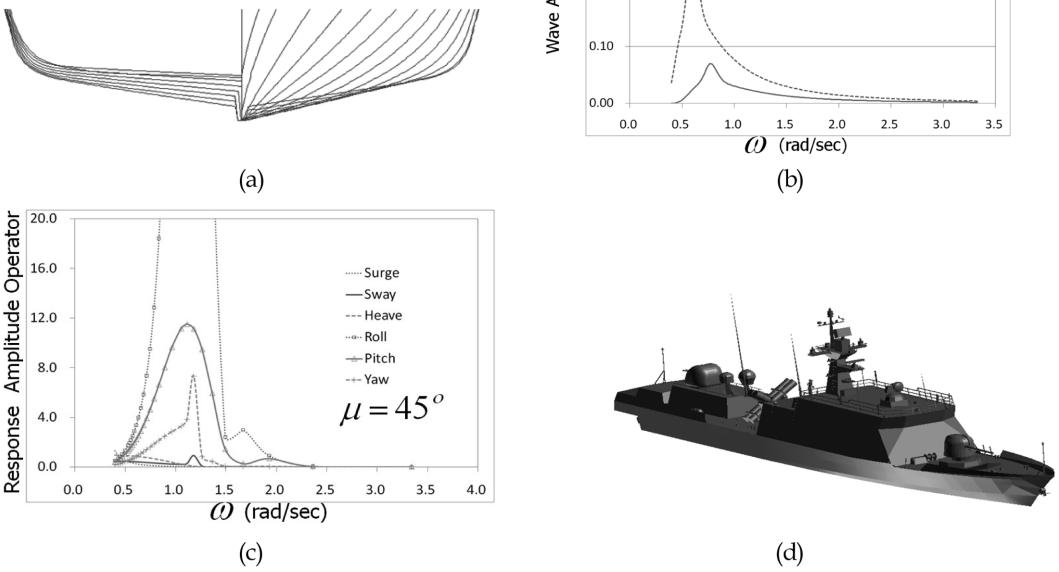

Fig. 4 Numerical models: (a) strip sections, (b) spectral density function (JONSWAP), (c) response amplitude operator (RAO), and (d) reference model for RCS analysis

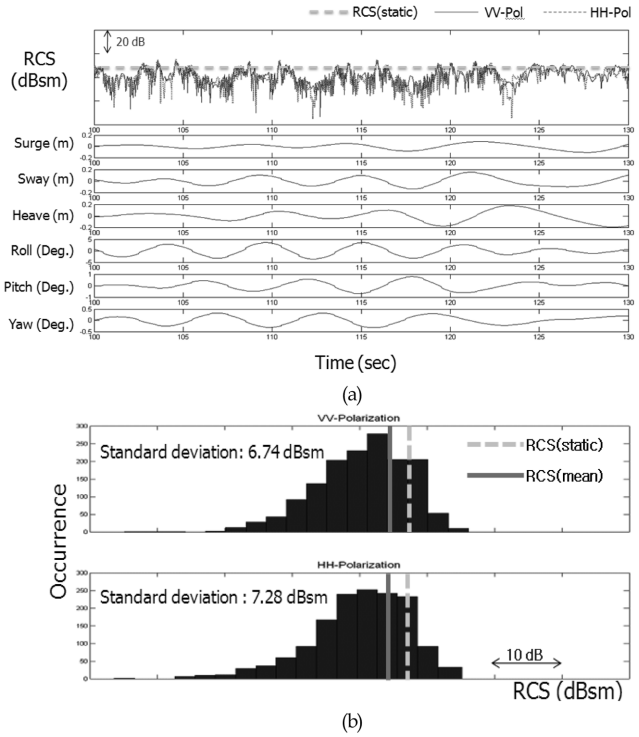

Fig. 5 RCS analysis result and its statistics: (a) time-domain RCS with ship motion and (b) RCS value occurrence histogram

Fig. 5에는 대상함의 동적 RCS 해석결과를 정수중 RCS값과 6 자유도 선체 운동 데이터와 함께 도시한 것이다. 이로부터 선체 운동에 따라 시간별 RCS 값이 변동함을 확인할 수 있다. 또한, 선체 운동 시 동적 RCS 평균값은 VV- 및 HH-편파에 대해 정수 중(Static) RCS값보다 각각 3.45dB와 3.31dB 낮고, 동적 RCS 값의 표준편차는 6.74dB와 7.28dB로 평가되었다.

한편, 동적 RCS에 가장 큰 영향을 미치는 선체 운동 성분을 살펴보기 위해 1-자유도 선체 운동 성분만을 고려한 동적 RCS 해석을 추가적으로 수행한 결과로부터 병진운동(Surge, Sway, heave)의 경우 회전운동(Roll, Pitch, Yaw)과는 달리 동적 RCS에 미치는 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 병진운동이 레이더파의 위상차 변화는 일으키는 반면, 진폭에는 영향을 주지 못하기 때문인 것으로 판단한다.

동적 RCS값에 대한 회전운동 성분별 상관관계(Correlation)을 고찰하기 위하여 1-자유도 회전운동 크기에 따른 RCS 값을 Fig. 6에 나타내었다. 이에는 횡동요 운동 각도 기준 6 자유도 운동을 모두 고려한 경우의 RCS값도 함께 나타내었다. 상기의 선체 회전 운동 성분별 해석결과로부터 선체 회전 운동과 RCS 변화량은 상관관계가 매우 높음을 확인할 수 있다. 또한, 선체 운동시 RCS값의 동적 변화량은 횡동요 운동의 영향이 가장 크며, 선체 운동 전체를 고려한 RCS 해석결과 역시 횡동요 운동만을 고려한 해석결과와 가장 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 종동요 운동(Pitch) 및 선수동요 운동(Yaw) 대비 횡동요 운동에 의한 선체 운동이 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단한다.

4. 결 론

본 연구에서는 파랑 중에 운동하는 수상함의 동적 RCS 해석을 위하여 대상함의 선체 운동 전달함수(또는 RAO)와 해양파 스펙트럼을 이용해 시간영역 선체 운동 데이터를 구하고, 이를 이용한 RCS 해석용 기준모델의 좌표변환을 통해 동적 RCS 해석 모델을 생성하여 RCS 해석을 수행하는 기법을 제시하였다.

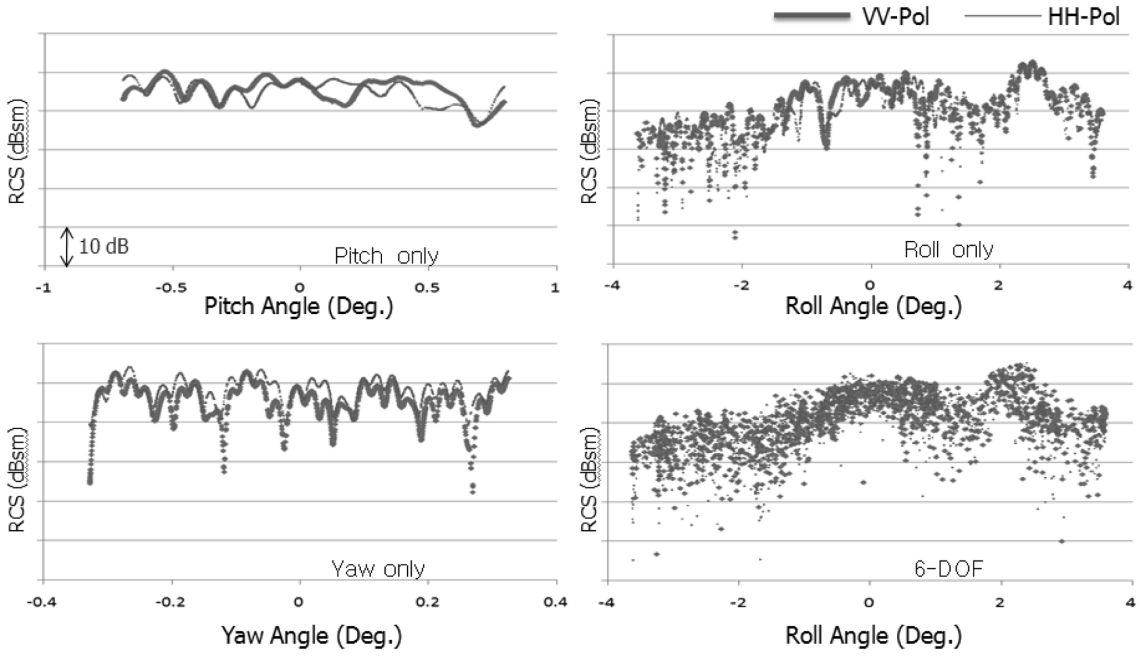

Fig. 6 Correlations between RCS data when considering 1-DOF ship motion and 6 DOF ship motions coherently

또한, 60m급 가상 함정에 대한 수치해석을 통해 본 연구에서 제안한 동적 RCS 해석 방법이 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다. 아울러, 수치해석 결과로부터 수상함의 선체 운동은 RCS 값을 크게 변화시키며, 수상함의 6 자유도 운동 성분 중 횡동요 운동이 동적 RCS값에 가장 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제시된 방법을 이용하여 다양한 해상상태와 선종에 대한 동적 RCS 해석을 수행하면 선체 운동으로 인한 RCS 보정치 마련이 가능할 것으로 기대한다. 다만, 본 연구에서는 수상함의 동적 RCS 해석 시 선체 운동만을 고려하고 해수면의 반사 효과를 고려하고 있지 않으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 대한민국 해군과 한국과학재단 지정 첨단조선공학 연구센터의 지원으로 수행되었으며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김국현, 조대승, 김진형 (2007). “회전 표적의 고주파수 후방산란반사면적 해석”, 한국군사과학기술학회지, 제10권, 제3호, pp 16-24.

김국현, 조대승, 최길환 (2009). “해상 풍력발전기의 전자기파 산란에 관한 수치 시뮬레이션”, 대한조선학회 논문집, 제46권, 제5호, pp 536-544.

조대승 (2004). 기하광학/물리광학 혼합방법을 이용한 수상함의 RCS 해석코드 개발, ASERC Report no. 2004-05-10.

Jamil, K. and Burkholder, R.J. (2006). “Radar Scattering from a Rolling Target Floating on a Time-evolving Rough Sea Surface”, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol 44, No 11, pp 3330-3337.

Lewis, E.V. (1988). Principles of Naval Architecture vol III: Motions in Waves and Controllability. 3rd ed. Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York.

MOERI (2002). 선박내항성능 해석 프로그램(MOTNHW) 사용자 지침서 ver. 2.0, KORDI.

Ojeda, J.F., Rodríguez, J.L., García-Tuñón, I. and Obelleiro, F. (2006). “Experimental Verification of the Relation between the Radar Cross Section and the List Angle of Surface Vessels”, Microwave and Optical Technology Letters, Vol 48, Issue 11, pp 2237-2241.

Pèrez, T. and Blanke, M. (2002). Simulation of ship motion in seaway, Technical Report EE2037, University of Newcastle.

RIMSE (2009). 함정설계 특별강좌: 특수성능분야(RCS 감소설계), 서울대학교 해양시스템공학 연구소.

Tice, T.E. (1990). “An Overview of Radar Cross Section Measurement“, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol 39, No I, pp 205-207.

Upson, C., McKenna, I. and Figg, K. (2001). Test plan for full-scale radar signature measurements, BAE SYSTEMS, YD1484/RCS/TR.B10/v1.

2009년 11월 6일 원고 접수
2009년 11월 12일 심사 완료
2009년 12월 21일 게재 확정