

# 선체외판의 변형이 수상함 RCS에 미치는 영향 연구

김국현<sup>1</sup>·조대승<sup>2,†</sup>  
동명대학교 조선공학과<sup>1</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>

## Study on Effect of Shell Plate Deformation to Radar Cross Section of Warship

Kookhyun Kim<sup>1</sup>·Dae-seung Cho<sup>2,†</sup>  
Department of Naval Architecture, Tongmyong University<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>2</sup>

### Abstract

The radar cross section (RCS) of warships is a crucial design factor to improve the survivability in terms of not only low observability of the platform but also efficiency of on-board sensors and jamming devices against enemy threat. In design stage, numerical models are generated in order to quantitatively assess RCS, of which hull surfaces are modeled with the finite number of the flat plate. However, in practice, hull surfaces are permanently deformed by various kinds of loads such as winds and ocean waves faced during operations. In this paper, the effect of these shell plate deformation to RCS is numerically investigated. For this purpose, RCS calculations are carried out for various kinds of numerical models, such as single plates, dihedrals, large-sized undulate plates, and virtual warships, with some extent of permanent deformation. The results are compared with those of corresponding models without permanent deformation. It is concluded that the permanent deformation of hull surface highly influences RCS characteristics of warships, therefore they should be considered in the RCS analysis.

**Keywords** : Radar cross section(레이더반사면적), Shell plate deformation(선체외판 변형), Numerical analysis model(수치해석모델)

## 1. 서론

수상함의 RCS(radar cross section)는 탐지레이더, 레이더 장착 대함미사일 등과 같은 적 위협세력에 대해 생존성을 확보하기 위한 주요 설계인자이다. 따라서 설계단계에서 수상함 RCS에 대한 정량적 평가가 이루어지며, 그 결과를 바탕으로 형상화(shaping), 차폐(shielding), 전파흡수체 적용(applying radar absorbing material) 등의 다양한 대책이 적용되고 있다 (Park, et al., 2006; Kim, et al., 2007).

설계단계에서의 수상함 RCS 평가는 물리광학법, 기하광학법 등의 고주파수 이론을 기반으로 한 수치해석기법 (Kim, et al., 2005)에 의존하고 있다. 이 때, 수치해석모델의 정확도는 RCS 평가결과의 신뢰성을 결정하는 매우 중요한 요소에 해당하므로 대상함의 외형 자료와 배치특성을 참고하여 가능한 한 자세히 수치해석 모델을 작성하고 있다. 그러나 지나치게 자세히 수치해석모델을 작성할 경우, 연산시간이 과도하게 소요될 뿐 아니라 수치오차 누적으로 인해 오히려 해석결과의 신뢰성 저하를 초래할 수 있다. 실제로 엔지니어들은 이와 같은 문제점을 고려해

RCS에 미치는 영향이 상대적으로 작을 것으로 판단되거나 모델링이 용이하지 않은 미소형상(micro-geometry)을 수치해석모델에 포함시키지 않고 있다. 특히, 선체 외판의 영구변형(permanent deformation)과 같은 미소형상에 대해서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 완전한 평면으로 모델링하는 것이 일반적이다.

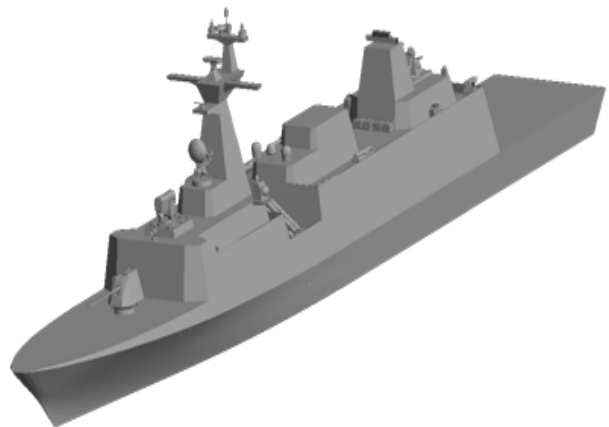


Fig. 1 Example of numerical model for RCS analysis

한편, 선체외판 영구변형은 강 또는 알루미늄을 선체재료로 사용하는 수상함에서 흔히 발생하는 현상으로, 건조 시 발생하는 용접 열, 함 운용 시 발생하는 풍압 및 파랑 하중 등에 기인하며, RCS에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 실례로, 스웨덴 해군에서는 2009년 취역한 75m급 코르벳 함정에 대해 선체외판의 평활도 유지하고 궁극적으로는 대상함의 RCS특성을 개선하기 위해 기존에 사용해 오던 강과 알루미늄 대신 카본강화 섬유(CRP; carbon reinforced plastic)를 선체재료로 채택한 바 있다(Barsoum, 2003). 또한, Asada (2003)는 실적함에 대한 계측을 통해 선체외판의 영구변형량과 그 형태를 분석하고 각각에 대한 RCS 해석을 수행하여 선체외판 변형이 수상함 RCS 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구를 수행한 바 있다. 그러나 보안 문제로 내용은 비공개로 처리되어 있어 세부적인 내용은 확인이 불가능한 상태이다.

본 연구에서는 수상함 선체외판의 영구변형에 따른 RCS 특성을 수치해석을 통해 고찰한다. 이를 위해 실적선 외형사진자료를 바탕으로 선체외판 영구변형의 유형을 분류한다. 또한, 선체외판의 영구변형을 고려한 다양한 형상의 수치해석모델을 작성하고 Kim, et al. (2005a)이 제안한 고주파수 해석기법을 이용해 RCS 해석을 수행한다.

## 2. 선체외판 변형을 고려한 RCS 해석

### 2.1 RCS 해석이론

본 연구에서는 선체외판의 영구변형이 RCS특성에 미치는 영향을 수치해석적으로 검토하기 위해 수상함과 같은 대형 복합구조물의 RCS 해석에 효과적으로 적용되고 있는 기하광학/물리광학 혼합방법 기반의 고주파수 해석이론 (Kim, et al., 2005)을 적용한다.

Fig. 2에 보인 바와 같이 임의의 표적이 xyz-직교좌표계 상에 있고 그 원점으로부터 무한한 거리에 레이더가 위치하고 있는 경우, 대상 표적에 대한 RCS  $\sigma$ 는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다(Knott, et al., 1993).

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[ 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \right] \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 레이더와 표적간의 이격거리를 나타내며,  $\vec{E}_i$ 와  $\vec{E}_s$ 는 입사 및 산란 전기장 벡터를 의미한다.

이 때, 산란 전기장 벡터  $\vec{E}_s$ 는 식 (2)의 간략화된 Stratton-Chu 적분방정식(simplified Stratton-Chu integral equation)을 이용해 구할 수 있다 (Knott, 1993).

$$\vec{E}_s = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi R} \int_S [\hat{\zeta}_s \times \{\hat{n} \times \vec{E} - \eta(\hat{\zeta}_s \times (\hat{n} \times \vec{H}))\}] e^{jkr \cdot (\hat{\zeta}_s - \hat{\zeta}_i)} dS \quad (2)$$

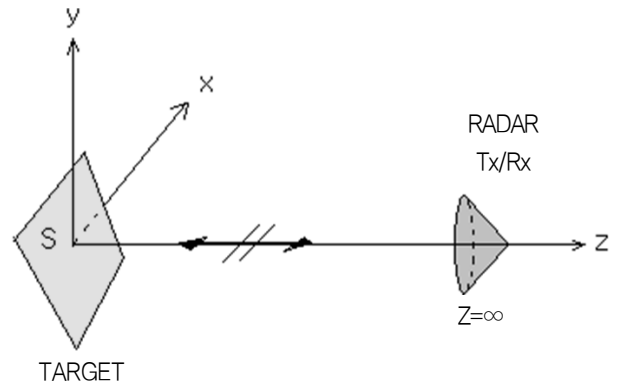


Fig. 2 Target and radar on cartesian coordinate system

여기서,  $j$ 는 단위허수( $=\sqrt{-1}$ ),  $k$ 는 파수(wavenumber,  $=\omega/c$ ,  $\omega$ 는 각주파수,  $c$ 는 전자기파 전파속도)를 각각 나타내며,  $\hat{n}$ 은 표적면  $S$ 에 대한 단위 법선벡터,  $\hat{\zeta}_i$ 와  $\hat{\zeta}_s$ 는 전자기파의 입사 및 산란방향을 나타내는 단위 벡터,  $\vec{E}$ 와  $\vec{H}$ 는 표적면 상에 유겨된 전기장과 자기장 벡터,  $\vec{r}$ 은 표적면상 임의의 점의 위치벡터이다. 또한,  $\eta$ 는 매질 임피던스이다.

표적의 크기가 전자기파의 파장보다 충분히 클 경우, Kirchhoff 근사이론을 식 (2)에 적용하고 식 (1)에 대입하여 정리하면 RCS는 식 (3)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\sigma = \frac{k^2}{\pi} \left| \int_S e^{2jkz'} dx' dy' \right|^2 \quad (3)$$

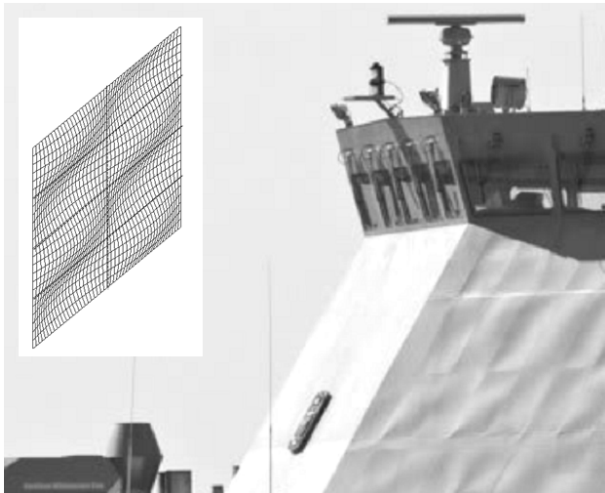
여기서,  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ 는 표적면 임의의 점에 대한 좌표값이다. 이 때, 식 (2)에서 정의한 표적면  $S$ 는 단일반사의 경우 가상면에 해당하며, 다중반사의 경우 전자기파의 전달경로의 길이를 등가위상으로 변환하여 추출한 가상면에 해당한다 (Kim, et al., 2005).

### 2.2 선체외판 영구변형을 고려한 RCS 해석

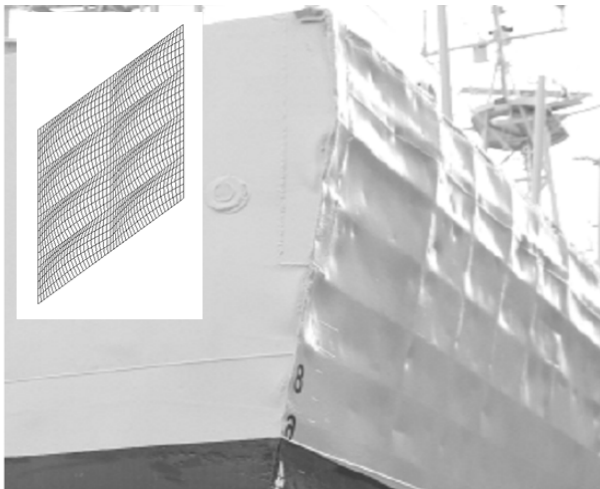
선체외판 영구변형이 수상함 RCS에 미치는 영향을 고찰하기 위해 우선적으로 실적함정 자료를 바탕으로 영구변형의 유형을 분석한다.

Fig. 3은 선체외판에 영구변형이 발생한 실적함의 외형사진을 보인 것이다. Fig. 3(a)는 2007년에 취역된 덴마크 해군의 최신편 전투함 HDMS Absalon 함교부에 발생한 영구변형이며, Fig. 3(b)는 퇴역 이후 창원문성대학 내에 실습용으로 전시되고 있는 참수리급 고속정 228호의 함미부 우현에 발생한 영구변형이다. 취역 또는 퇴역 연도를 고려할 때, 전자의 경우 건조 시 용접 열에 의한 영구변형으로, 후자의 경우 운용 시 풍압 또는 파랑하중, 정박하중에 의한 영구변형으로 사료된다. 선체외판의 영구변형은 선체외판을 지지하는 종보강재와 횡보강재 간격을 기준으로 요형(concave type) 또는 철형(convex type)의 주기적 형상으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 선체외판의 영구변형 형태에 따른 RCS특성을 고찰하기 위해 선체외판이 영구변형 형태를 참고하여 다양한 형태를 갖는 단일판(single plate), 동일 크기의 단일판으로 구성된 이중반사구조(dihedral), 대형굴곡판(large-sized undulate plate), 가상함정 등으로 구분하여 수치해석 모델을 작성하고 RCS해석을 수행한다.



(a) Destroyer(HDMS Absalonon, Danish navy)



(b) Patrol ship(Chamsoori 228, Korean navy)

Fig. 3 Permanent deformation type of the hull plate

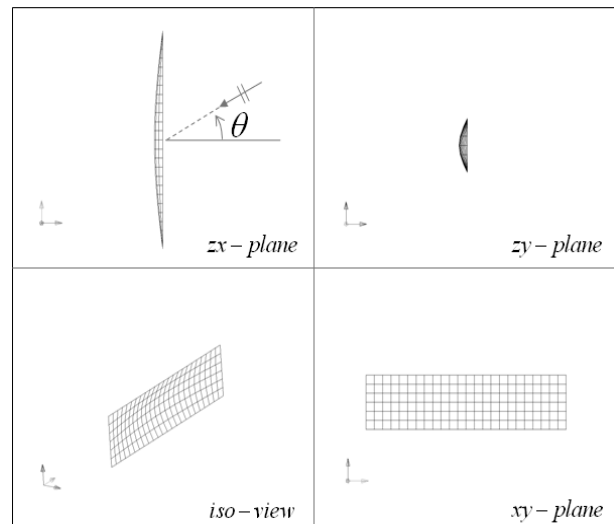
### 3. 수치해석 및 고찰

RCS 해석은 단일판, 이중반사구조, 대형굴곡판, 가상함정 등을 대상으로 수행한다. 수치해석모델을 구성하는 단일판의 크기는 일반적인 선체외판의 횡보강재 및 종보강재 간격을 고려하여 600mm × 2400mm로 설정하고, 그 형상은 4면 단순지지(SSSS) 또는 4면 고정지지(FFFF) 직사각형 평판에 대한 1차 고유진동 모드형상 (Leissa, 1969)을 따르는 것으로 가정하였다.

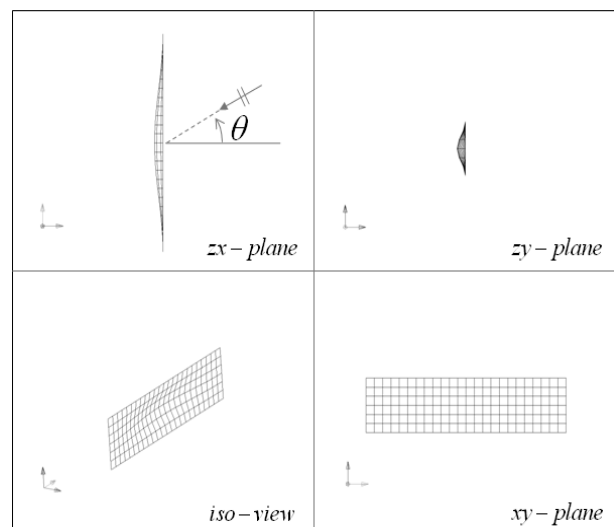
RCS 해석 주파수는 수상함의 주요 위협세력이 운용하는 레이더특성을 고려해 10GHz로 설정하였다.

### 3.1 단일판

단일판에 대한 수치해석은 그 중심에서의 최대변형량, 선체내부방향을 양(+)으로 했을 때, -100mm에서 100mm까지 20mm간격으로 변화하는 경우에 대해 수행하였다. 이 때 방위각은 Fig. 2의 y축을 회전축으로 하는 zx-평면에 대해 -90도에서 90도까지 0.1도 간격이다. Fig. 4는 최대변형량이 100mm인 단일판에 대한 수치해석모델을 예시한 것이며, Fig. 5는 이에 대한 RCS 해석결과를 4면 지지조건(SSSS 또는 FFFF)별로 구분하여변형이 없는 단일평판에 대한 해석결과와 함께 도시한 것이다. SSSS의 경우, 영구변형에 의해 단일평판에 대해 나타나지 않는 피크들이 방위각 약 ±7도에서 발생하며, ±20도 구간 전반에서 RCS 값이 증가한다. 또한, FFFF의 경우, 추가적인 피크들이 발생하지 않지만, SSSS의 경우와 마찬가지로 ±20도 구간 전반에서 RCS 값이 증가한다.

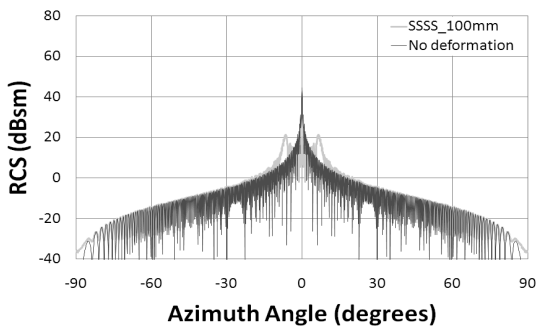


(a) 4-edge simply-supported (SSSS)

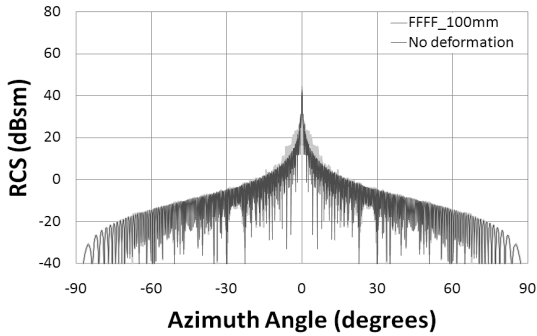


(b) 4-edge fixed (FFFF)

Fig. 4 Numerical models of single plate



(a) 4-edge simply-supported (SSSS)



(b) 4-edge fixed (FFFF)

Fig. 5 RCS patterns of plate model(600mm x 2400mm)

한편, Fig. 6은 단일판의 최대변형량 변화에 따른 평균 RCS의 증가효과를 도시한 것으로, 최대변형량이 증가할수록 평균 RCS 증가 효과는 커짐을 알 수 있다. 또한, 4면 지지조건이 SSSS인 경우가 FFFF인 경우보다 그 효과가 커짐을 알 수 있다. 이는 선체외판의 영구변형량뿐 아니라 변형의 형태에 따라 RCS가 크게 변화될 수 있음을 의미한다.

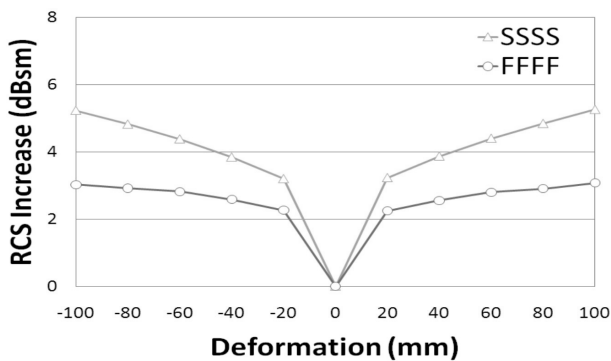


Fig. 6 Increase of averaged RCS compared with no deformed plate model

### 3.2 이중반사구조

이중반사구조에 대한 수치해석모델은 Fig. 7에 보인 바와 같다. 단일판의 최대변형량은 +100mm(concave)와 -100mm(convex)이며, 2개의 단일판들이 이루는 각은 90도(수직이중반사구조; orthodonal dihedral)와 100도(경사이중반사구조;

open dihedral)이다. 이 때 단일판의 4면 지지조건은 SSSS로 가정하였으며, 방위각은 Fig. 2의 y축을 회전축으로 하는  $zx$ -평면에 대해 0도에서 90도까지 0.1도 간격이다.

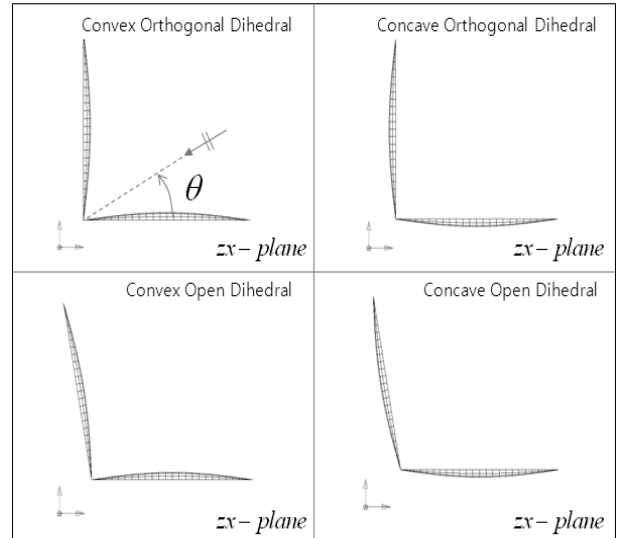
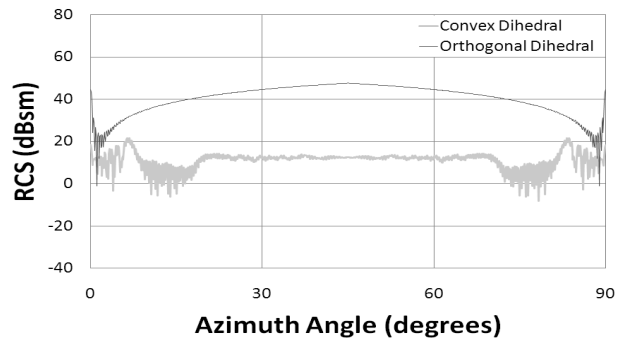
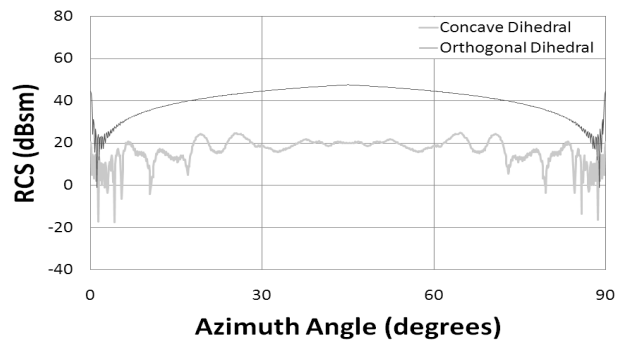


Fig. 7 Deformed dihedral models

Fig. 8과 Fig. 9는 이중반사구조들에 대한 RCS 해석결과(VV-편파)를 변형이 없는 경우에 대한 결과와 함께 도시한 것이다. 수직이중반사구조의 경우 RCS값이 큰 폭으로 감소하는 반면, 경사이중반사구조의 경우 RCS 값이 다소 증가하고 있다.



(a) Convex orthogonal dihedral



(b) Concave orthogonal dihedral

Fig. 8 RCS pattern of deformed dihedral models

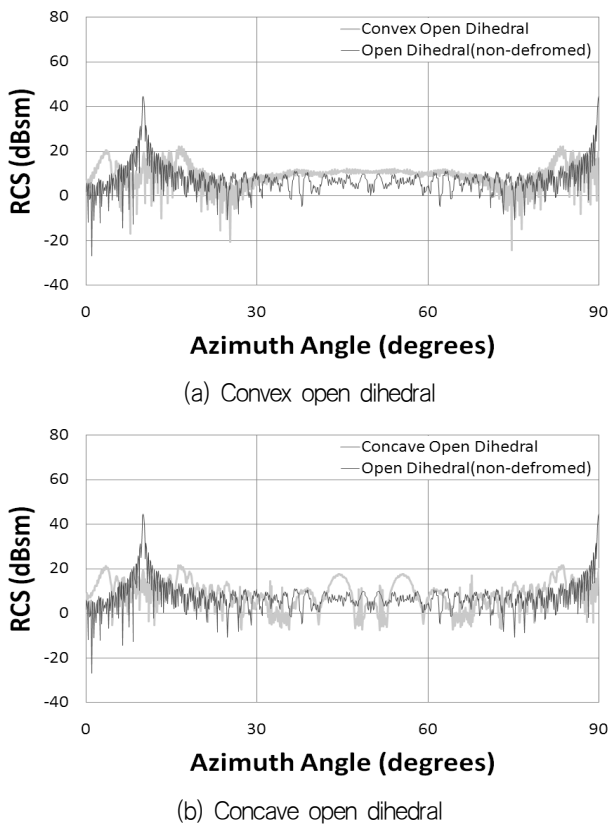


Fig. 9 RCS pattern of deformed open dihedral models

Table 1은 영구변형에 따른 이중반사구조의 RCS 증감효과를 보다 정량적으로 살펴보기 위해 수직이중반사구조와 경사이중반사구조에 대한 RCS 해석결과에 평균을 취하여 정리한 것이다. 수직이중반사구조의 경우 100mm 영구변형에 의한 RCS는 최소 23.00dBsm 에서 최대 28.88dBsm까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 수상함에 있는 수직이중반사구조를 변형 없이 모델링할 경우, 수상함 전체 RCS 값이 과도하게 추정될 수 있음을 의미한다. 반면, 경사이중반사구조의 경우, 100mm 영구변형에 의한 RCS특성 변화는 최소 0.51dBsm 에서 최대 2.43dBsm까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 수상함 RCS 감소를 위해 수직이중반사구조에 일정 경사각을 적용하더라도 그 효과가 감소될 수 있음을 의미한다.

Table 1 Averaged RCS in dBsm of dihedral models

Model Name	Polarization	
	VV	HH
Orthogonal dihedral (non-defromed)	39.93	39.94
Convex orthogonal dihedral	11.05	11.12
Concave orthogonal dihedral	16.67	16.94
Open dihedral (non-defromed)	7.43	7.76
Convex open dihedral	9.21	10.19
Concave open dihedral	7.94	8.29

### 3.3 대형굴곡판

대형굴곡판에 대한 수치해석 모델은 Fig. 10에 보인 바와 같이 단일판을 횡방향으로 2회, 종방향으로 8회 연속적으로 배열시켜 구성하였다. 이 때, 방위각은 Fig. 2의 y축을 회전축으로 하는  $zx$ -평면에 대해  $-90$ 도에서  $90$ 도까지  $0.1$ 도 간격이다. 각각의 단일판에 대한 영구변형 형상은 단순지조건(SSSS)을 가정하였으며, 영구변형량의 부호에 따라 2가지 형식으로 구분하였다. Type 1은 대형굴곡판을 구성하는 모든 단일판의 영구 변형량을  $+100$ mm로 동일하게 설정한 모델인 반면, Type 2는 인접한 단일판의 영구변형량의 부호가 서로 반대가 되도록 설정한 모델이다.

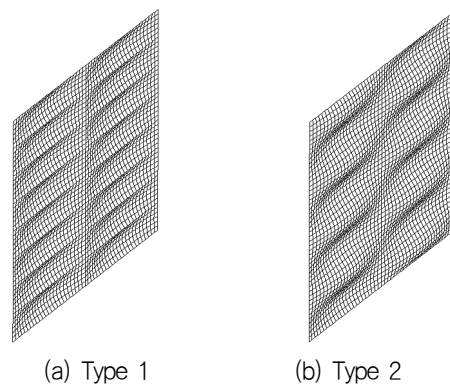


Fig. 10 Numerical models for large-sized undulate plates

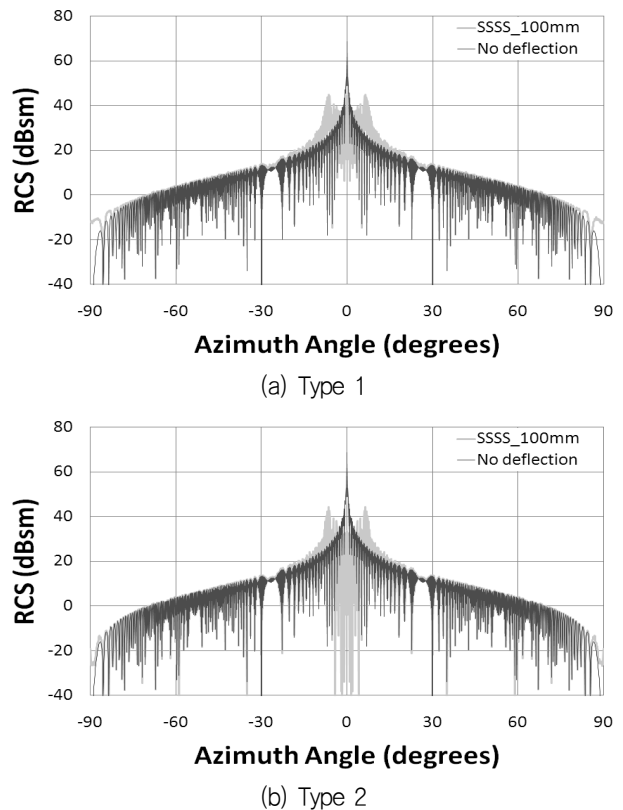


Fig. 11 RCS pattern of large-sized undulate plates

Fig. 11은 Fig. 10에 도시한 대형굴곡판 수치해석모델에 대한 RCS 해석결과를 도시한 것이다. 대형굴곡판에 대한 RCS는 동일한 크기의 대형평판(4800mm x 4800mm)에 대한 RCS 해석결과와 그 값과 패턴에서 큰 차이를 보인다. 굴곡의 반복형식에 따라서는 전반적으로 패턴에서는 방위각 0도 근방을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않았다. 본 논문에 수록하지는 않았으나 대형굴곡판을 구성하는 단일판의 영구변형 형태를 고정지지조건(FFFF)으로 가정한 경우에도 유사한 특성이 나타남을 확인하였다.

이는 선체외판의 영구변형에 의한 RCS 변화는 영구변형량과 형태 뿐 아니라 그 배열 형식에 의해서도 큰 영향을 받을 수 있음을 의미한다.

### 3.4 가상함정

수상함의 선체외판의 영구변형 전후의 RCS 변화특성을 고찰하기 위해 Fig. 12의 가상함정에 대한 수치해석을 수행하였다. 이 때, 대상함의 길이, 폭, 높이는 각각 32m, 9.6m, 5.4m이며, 선체외판은 갑판을 제외한 모든 수직면에 대해 3.1절에 사용된 SSSS 단일판을 연속적으로 분포시키고 그 최대처짐이 0mm인 경우(Fig. 12(a))와 20mm인 경우(Fig. 12(b))에 대해 수치해석모델을 작성하였다. 방위각은 대상함이 좌우현 대칭임을 감안하여 함수방향(0도)으로부터 180도까지 1도 간격으로 설정하였다.

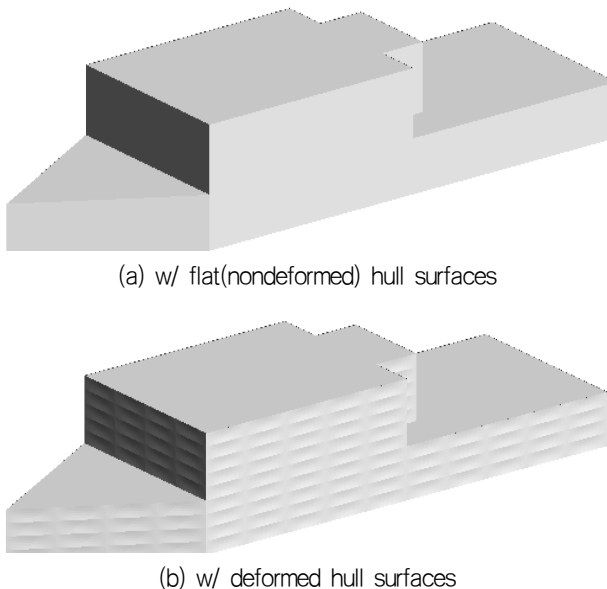


Fig. 12 Numerical model of 30m class virtual warship

Fig. 13은 가상함정의 외판 변형 전후의 RCS 값(W-편파)을 함께 나타낸 것이다. 단일반사 효과가 지배적으로 나타나는 방위각 0도에서 90도 구간에서는 전반적인 RCS 패턴의 변화가 나타나지 않으나, 3.1절의 단일판과 마찬가지로 평판의 수직방향에 해당하는 0도, 60도, 90도 근방에서 RCS 피크값은

작아지고 그 폭이 증가한다. 한편, 이중반사 효과가 지배적으로 나타나는 방위각 90도에서 180도 구간에서는 3.2절의 수직 이중반사구조와 마찬가지로 선체외판의 변형에 의해 그 효과가 뚜렷이 나타나고 있다. 평균 RCS에 있어서도 선체외판 변형을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 16.0dBsm과 35.5dBsm으로 각각 나타났다. 이는 실제 수상함 RCS 해석 모델 작성에 있어서 선체외판 변형을 반드시 고려해야 함을 의미한다.

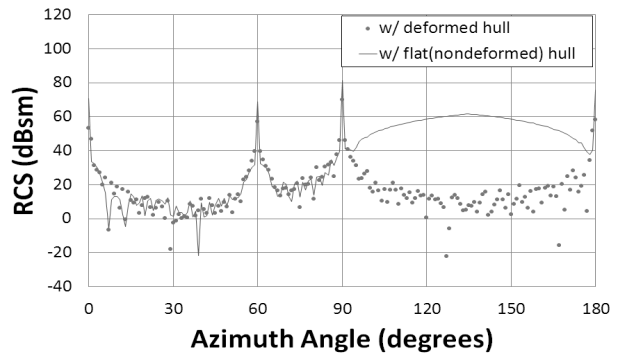


Fig. 13 Comparison of RCS analysis results for 90m class warships with (a) flat and (b) deformed hull surfaces

## 4. 결론

선체외판의 영구변형이 수상함 RCS에 미치는 영향을 수치해석적으로 고찰하였다. 이를 위해 실적함정의 외형사진자료를 바탕으로 영구변형의 유형을 분석하고 그 형상과 배치특성을 고려해 단일판과 이중반사구조, 대형굴곡판, 가상함정 등에 대한 수치해석모델을 작성하였으며, 기하광학/물리광학 혼합방법 기반의 고주파수 해석이론을 이용해 RCS 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 선체외판의 영구변형은 종보강재와 횡보강재를 기준으로 발생한다.
- 선체외판의 영구변형에 따라 RCS는 변화하며, 그 변화량은 영구변형량과 형태, 배열형식에 따라 다르게 나타난다.
- 수직이중반사구조에 변형이 발생하는 경우 RCS는 크게 낮아지는 반면, 경사이중반사구조에 영구변형이 발생하는 경우 RCS는 다소 증가한다. 따라서 수직이중반사구조에 대한 RCS 평가와 형상화를 통한 RCS 감소설계 시 세심한 주의가 필요하다.
- 수상함 RCS 해석을 위한 수치해석모델 작성 시 선체외판의 영구변형특성을 반드시 고려하여야 한다.

본 연구는 실측자료 미비로 선체외판 영구변형의 형태가 직사각형 평면의 1차 고유진동모드를 따른다고 가정하여 수행되었다. 따라서 실적함정 선체외판 영구변형의 실측을 통한 RCS 영향분석이 필요하다. 또한, 그 결과를 바탕으로 실제 수상함의

선체외판 변형이 수상함 전체에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구가 필요하며, 그 결과는 수상함의 건조 중 또는 운용 중 발생하는 선체외판의 영구변형량에 대한 정도관리 기준 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- Asada, N., 2003. *A study of the effect on Radar Cross Section (RCS) due to "Starved horse patterns"*. M.Sc Thesis, Royal Institute of Technology.
- Barsoum, R.G.S., 2003. The Best of Both Worlds: Hybrid Ship Hulls Use Composites & Steel. *Advanced Materials and Processes Technology Information Analysis Center (AMPTIAC) Quarterly*, 7(3), pp.55-61.
- Kim, K. Kim, J.H. & Cho, D.S., 2005. RCS Analysis of Complex Structures Using Object Precision Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.159-164.

- Kim, K. Cho, D.S. & Kim, J.H., 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*, 44(4), pp.445-450.
- Knott, E., 1993. *Radar Cross Section Measurement*. Van Nostrand Reinhold: New York.
- Leissa, A.W., 1969. *Vibration of Plates*. NASA Report No SP-160.
- Park, C. Cho, Y. Park, D. & Ahn, J., 2006. A Study on Ship Shape Design Optimization for RCS Reduction Using Taguchi Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(6), pp.693-699.



김국현

조대승