

## 다구치 방법을 이용한 함정 RCS 형상최적화에 관한 연구

박철수<sup>†\*</sup>, 조용진\*, 박동훈\*, 안종우\*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*

### A Study on Ship Shape Design Optimization for RCS Reduction Using Taguchi Method

Cheolsoo Park<sup>†\*</sup>, Yongjin Cho\*, Donghoon Park\* and Jongwoo Ahn\*

Korea Ocean Research & Development Institute\*

#### Abstract

This paper proposes a design optimization technique for ship RCS signature reductions using Taguchi method. The proposed technique comprises of i)evaluating initial RCS signatures, ii)defining critical areas which should be modified as design parameters, and threat factors which can't be controlled artificially as noise parameters, and finally iv)finding optimum parameters via analyzing signal to noise ratios for designated characteristics. We applied the technique to a model ship and found that it is suitable for radar stealth designs. In addition, the proposed technique is applicable to submarine designs against sonar threats.

※Keywords: RCS, Stealth design(스텔스 설계), Design optimization(형상최적화), Taguchi method(다구치 방법)

#### 1. 서론

최근 함정의 스텔스성능은 함의 생존성과 직결된다는 측면에서 전통적인 유체 및 구조적인 기본 성능과 더불어 지대한 관심의 대상이 되고 있다. 함정 스텔스 성능은 크게 레이더 반사성능(RCS, Radar Cross Section), 적외선 방사성능(IR, InfraRed), 수중방사소음성능(URN, Underwater Radiated Noise)으로 나눌 수 있으며, 그 중 RCS

성능은 적 레이더에 의한 피탐지 성능을 의미한다. 따라서 RCS와 관련된 함정 스텔스 설계는 함정 자체의 RCS를 저감하여 적 레이더에 탐지될 확률을 줄이는 것을 목적으로 한다.

함정과 같이 복잡한 형상으로 구성된 복합구조물에 적용될 수 있는 RCS 저감 기법으로는 형상화(shaping), 레이더 흡수물질(RAM, RAP 등) 적용, 능/수동 레이더 신호 상쇄(cancellation) 기법 등을 들 수 있다(Knott et al. 1990). 이 중 형상화를 제외한 다른 기법은 적용하는 데 비용이 많이 들고 선체 중량의 증가 등으로 인해 작전범위가 제한되거나 유지 보수의 어려움 등의 부작용이

접수일: 2006년 9월 20일, 승인일: 2006년 11월 6일

† 교신저자: parkcs@moeri.re.kr, 042-868-7687

초래될 수 있으므로 형상화가 현재 적용 가능한 가장 효율적이고 경제적인 신호저감 기법으로 평가받고 있다.

형상화는 설계 과정에서 경험적으로 적용되거나, 혹은 설계 후 RCS 해석 결과를 바탕으로 발생한 문제를 해결하기 위해 적용된다. 그런데 항정 형상의 복잡성으로 인해 설계 단계에서 발생할 수 있는 모든 문제점을 예측하여 설계에 반영하는 것은 쉽지 않고, 설계 후 RCS 해석 결과에 대해 설계자의 경험을 바탕으로 시행착오적으로 문제를 해결하는 것이 일반적이었다.

그러나 RCS 저감을 위한 형상화는 최적화의 관점에서 체계적으로 수행될 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 RCS 해석과 품질공학에서 널리 이용되고 있는 다구치 방법(영봉진 등 1990, Phadke 1989)을 결합한 RCS 형상최적화 기법을 제시하고자 한다.

## 2. 항정 RCS 형상최적화 기법

다구치 방법은 품질향상을 위한 실험계획 및 분석 등의 목적으로 품질공학에서 널리 활용되고 있는 방법론 중의 하나이다. 또한 다구치 방법은 분석과정에서 각 인자가 성능에 미치는 영향을 정량화 할 수 있으므로, 인자의 민감도 분석에 활용되기도 하였다 (조용진과 유재문 2005). 다구치 방법의 주요 목표는 인위적으로 조절할 수 없는 잡음(noise) 하에서도 성능의 산포가 심하지 않은 최적 인자를 찾는 것이다. 다구치는 이를 위해 직교표(Orthogonal Table)를 이용한 실험계획을 수립하여 데이터를 수집한 후, 그 데이터로부터 유도된 SN비(신호 대 잡음비, Signal to Noise Ratio)를 분석하여 제품이나 공정의 최적조건을 결정할 것을 제안하였다.

RCS 스텔스 설계는 예상되는 모든 적의 공격 및 환경조건 하에서도 낮은 RCS값을 주는 항의 설계 및 제작을 의미한다. 그런데 위협 및 환경조건은 우리가 인위적으로 조절할 수 없으므로 잡음 조건에 해당하며, 이러한 잡음 조건하에서 최적의 설계를 해야 한다는 점에서 RCS 형상 최적설계는 다구치 방법의 철학과 부합한다고 판단된다.

다구치 방법을 여러 문제에 적용함에 있어 핵심은 성능 특성치, 잡음인자, 그리고 성능에 영향을 미치는 설계변수의 정의에 있다.

RCS 형상최적화 문제에서 특성치는 다양하게 정의될 수 있으나, 반드시 RCS와 관련이 있는 값이어야 한다. RCS는 개념적으로 '원거리에서 임의의 방향과 크기로 입사되는 입사 파위에 대해 목표물이 임의의 방향으로 산란하는 파위와 동일한 양의 파위를 산란할 수 있는 도체 구의 투영면적'으로 정의될 수 있으며(Knott et al. 1990), 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\vec{H}_s|^2}{|\vec{H}_i|^2} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\vec{E}$ 와  $\vec{H}$ 는 각각 전기장과 자기장을, 그리고 첨자  $i$ 와  $s$ 는 각각 입사파와 산란파를 의미하며,  $r$ 는 레이더와 목표물과의 거리이다. 위의 개념정의와 식에서 알 수 있듯이 RCS는 거리와는 관계없이 방향에 따라 그 값이 변하는 양이다. 따라서 특정 방향의 RCS 값을 특성치로 정의하기 보다는 모든 위험 방위각(azimuth angle)에 대한 중간값(median), 평균값(mean), 그리고 최대값(maximum) 등 하나의 대표값으로써 특성치를 정의하거나 경우에 따라서는 이들의 가중평균치로 정의하는 것이 적합하다. 현재까지 다양한 RCS 해석법이 개발되어 왔으며(김국현 등 2005a), 본 연구에서는 물리광학법과 기하광학법을 혼합한 해석 소프트웨어인 RAMSES (RAdar Modeling and Signature Evaluation Software, IABG 2002)를 사용하여 RCS를 해석한 후 특성치를 계산하였다.

한편 예상되는 모든 적의 위협 및 환경조건이 잡음에 해당된다고 앞에서 언급한바 있다. 그 중 RCS에 영향을 미치는 대표적인 것으로는 적의 레이더 및 미사일의 종류, 해상상태에 따른 아항의 자세 등을 들 수 있으며, 이는 주파수와 고각(elevation angle)으로써 표현될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 위협 주파수와 위협 고각을 잡음인자로 정의하였다.

스텔스 설계의 목적은 위협영역내의 RCS 값을 일정 기준 이하로 떨어뜨리는 것이다. 만약 초기

모델의 해석결과가 기준을 만족하지 못한다면 문제구역을 식별한 후 이를 개선해야만 한다. 문제구역은 각 주파수와 고각에 대해 방위각의 함수로 표현된 RCS 그래프로부터 일차적으로 파악될 수 있으나, 이것만으로는 함정과 같이 복잡한 형상에서 문제가 발생한 정확한 위치를 찾아내는 것이 쉽지 않다. 이 경우 RCS 그래프로부터 파악된 문제 방위각에 대한 산란중심(scattering center) 해석을 추가로 수행하여 정확한 문제구역을 식별해야 한다(김국현 등 2005b). 본 연구에서는 픽셀단위로 계산된 고해상 레이더 영상이미지 (High Resolution Radar Image, IABG 2002) 분석을 통해 문제가 되는 형상들을 식별한 후, 이를 설계변수로 정의하였다. 일반적으로 주반사(specular reflection)와 다중반사가 RCS에 주로 기여함을 고려할 때, 평판 혹은 곡판의 경사각이 주된 설계변수가 될 것이다(Knott et al. 1990).

이상과 같이 특성치, 잡음인자, 그리고 설계변수를 정의하였으므로, 이에 적합한 직교표를 구성할 수 있다. 직교표의 종류는 설계변수의 개수와 각 설계변수가 취할 수 있는 값의 수준수에 따라 달라지며, 직교표에 의해 필요한 해석조건 및 최적화에 필요한 최소 해석횟수가 결정된다.

RCS 스텔스 설계에서 특성치는 망소특성에 해당하며, 망소특성의 경우 SN비는 다음과 같이 정의된다.

$$SN_i = -10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

식 (2)에서  $y_{ij}$ 는 직교표의  $i$ 번째 해석 조건에서 계산된  $j$ 번째 잡음 조건하의 특성치이고,  $N$ 은 한 해석조건에서의 실험반복수, 즉 전체 잡음조건의 개수이다. 한편 각 설계변수의 수준별 기여량은 특정 수준의 평균 SN비와 모든 수준의 평균 SN비의 차이로 정의되며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{a}_j = \frac{1}{N_{a_j}} \sum_{i \in \{a_j\}} SN_i - \frac{1}{N_a} \sum_{i \in \{a\}} SN_i \quad (3)$$

식 (3)에서  $\hat{a}_j$ 는 수준  $j$ 인 설계변수  $a$ 의 기여량이며,  $\{a_j\}$ 는 직교표에서  $j$ 수준의 설계변수  $a$ 가 포함된 실험번호로 구성된 집합, 그리고  $\{a\}$ 는 수준에 상관없이 설계변수  $a$ 가 포함된 모든 실험번호로 구성된 집합을 의미한다. 이 때 각 집합의 원소 수는 각각  $N_{a_j}$ ,  $N_a$ 와 같다.

설계변수의 최적수준은 기여량이 큰 수준으로 정의되며, 이는 결국 SN비를 최대화 하는 수준을 의미한다. 이 때, 각 설계변수의 최적수준이 직교표에 포함되지 않았다면 최적조건에 대한 확인해석을 수행하여 찾아낸 최적값이 의미가 있는지를 판단해야 할 것이다. 만약 최적수준의 설계변수가 RCS 기준을 만족하지 못한다면 최적화의 과정을 기준이 만족될 때까지 반복하거나, 레이더 흡수물질의 적용 등 다른 방안을 고려해야 할 것이다.

끝으로 이상에서 기술한 함정 RCS 최적화 기법을 도식화하면 Fig. 1과 같다.

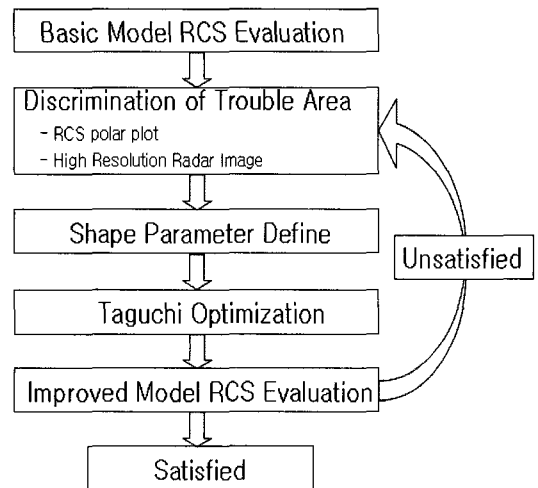


Fig. 1 Optimization flow for RCS reduction

Table 1 Specification of a target ship

Length Over All(LOA)	About 122m
Breadth	About 14.2m
Draft, D.L.W.L	About 4.2m
Displacement	About 3,200ton

### 3. RCS 형상최적화 적용예

항정 RCS 스티스화는 각종 무기체계 등의 탑재장비를 탑재하지 않은 unladen ship의 형상화로 부터 시작하는 것이 효율적이다. 본 논문에서 다루는 대상함은 Table 1에 나타낸 제원을 갖는 가상함정이다. 대상함의 형상은 해양연구원의 3차원 형상모델링 시스템(이춘주 2005)을 활용하여 모델링하였으며 그 결과는 Fig. 2에 나타나 있다. 본 초기모델은 연구목적으로 마련되었으며, 일반적인 스티스 설계지침을 따랐으나 일부 형상은 인위적으로 이중반사를 초래하도록 하였다.

대상함의 해석조건은 주파수 2, 8, 18GHz와 방위각 0~360°(1° 간격), 그리고 고각 0, 5, 10°로 각각 설정하였다. Fig. 3은 본 초기모델의 해석결과 중 주파수 8GHz, 고각 5°의 일부결과를 보여 준다. Fig. 3(a)는 입사파와 산란파의 극성이 일치하는 경우를 보여주며 Fig. 3(b)는 서로 다른 경우이다. Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 입사파와 산란파의 극성이 상이한 경우는 반사만을 고려한 산란해석에서 이중반사의 간접적인 증거가 된다. Fig. 3에 나타낸 해석결과에서 알 수 있듯이 이중반사가 발생하게 되면 넓은 영역에 걸쳐 높은 RCS 값을 초래하므로 반드시 개선되어야 하는 문제가 된다.

그런데 본 자료만으로는 이중반사를 유발하는 정확한 형상과 위치를 알 수 없으므로 문제가 발생한 해당 주파수와 방위각 및 고각에 대하여 고 해상 레이더 영상이미지를 살펴보고, 이 중 일부를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 원안의 형상이 이중반사가 발생한 형상구조이며, 이를 제외한 나머지 영역에서는 밝은 색일수록 단일 반사량이 많은 부분을 의미한다. 분석결과 Fig. 4(a)의 이중반사는 서로 인접한 두 평면의 각이 수직에 가까운 대표적인 이중반사체인 이면체(Dihedral) 형상에 의해 발생되었고, Fig. 4(b)의 이중반사는 서로 떨어져 있는 두 평면이 우연히 수직이 되었기 때문에 발생한 것으로 밝혀졌다. Fig. 4(b)의 예와 같이 이중반사는 반드시 인접한 두 면에 의해서만 발생하는 것은 아니므로, 이 경우 문제형상을 식별하는데 각별한 주의가 요구됨을 알 수

있다.

이중반사를 제거하기 위해서는 문제가 되는 면들의 경사각을 변경하여야 하며, 본 적용예제에서는 이를 설계변수로 파악하였다. 초기 해석결과 발생한 모든 문제영역을 검토한 후 이중반사를 유발하는데 관련한 7가지 형상을 설계변수로 정의하였고, 각 설계변수의 기호와 함께 Fig. 5에 나타내었다. 각 인자의 수준은 Table 2에 나타낸 바와

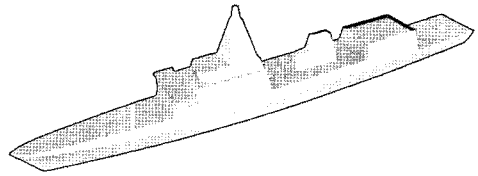


Fig. 2 3D model of a target ship

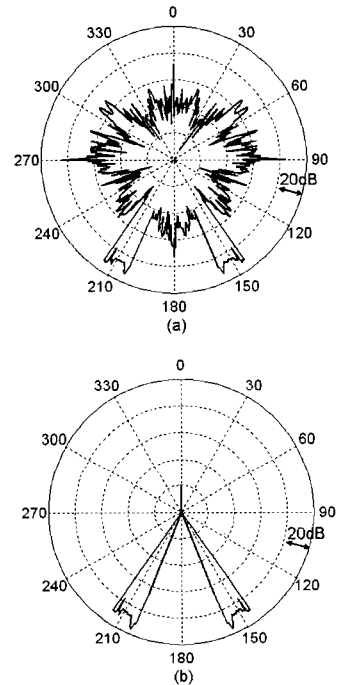


Fig. 3 Examples of RCS for a target ship at 8GHz of frequency and 5° of elevation angle; (a)H-H polarization, (b)H-V polarization

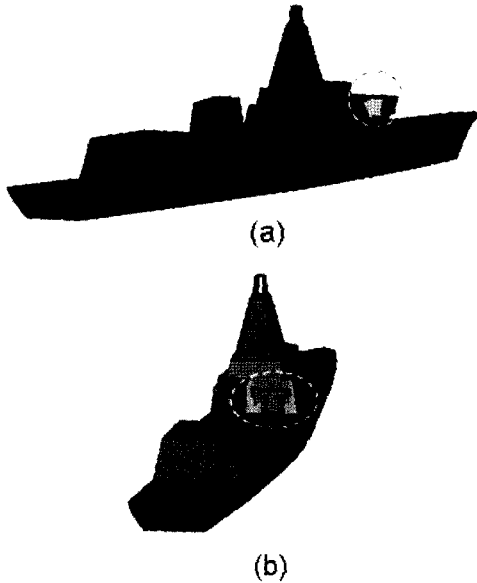


Fig. 4 High resolution radar images at (a) 8GHz, 150°(azimuth), 5°(elevation) and (b) 8GHz, 170°(azimuth), 10°(elevation)

Table 2 Level of each parameter

	A	B	C	D	E	F	G
I	P*	P	P	P	P	P	P
II	P+10	P+10	P+5	P+5	P-5	P+10	P+5
III	P-10	P-10	P-5	P-5	P-10	P-10	P-5

\*P means a present angle of the initial model.

같이 3수준으로 설정하였는데, Table 2의 P는 초기 형상의 경사각이며 +와 - 기호는 각각 Fig. 5에 나타난 두 면이 이루는 각의 증가와 감소를 의미한다. 형상인자의 수준은 이중반사와 더불어 크기가 큰 단일반사를 위험영역에서 제거하거나 제거가 불가능한 경우 가능한 cardinal point (0,90,180,270 ± 5°)로 집중시키려는 목적으로 결정되었다.

본 예제에서 정의된 설계변수에 대해 적용 가능한 직교표는  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  직교표이다. 직교표를 구성함에 있어 인자의 교호작용은 고려하지 않았고 직

교표에서 사용되지 않는 2수준인자는 해석오차 향으로 두었다. 모든 설계변수의 전체 조합 수는  $3^7$  조건이나 직교표를 이용한 실험계획에서는 총 18 조건의 모델링과 해석만으로 최적의 조건을 찾을 수 있으므로, 다구치 방법은 모델링과 해석에 많은 시간이 요하는 RCS 형상최적화에 유용한 방법임을 알 수 있다.

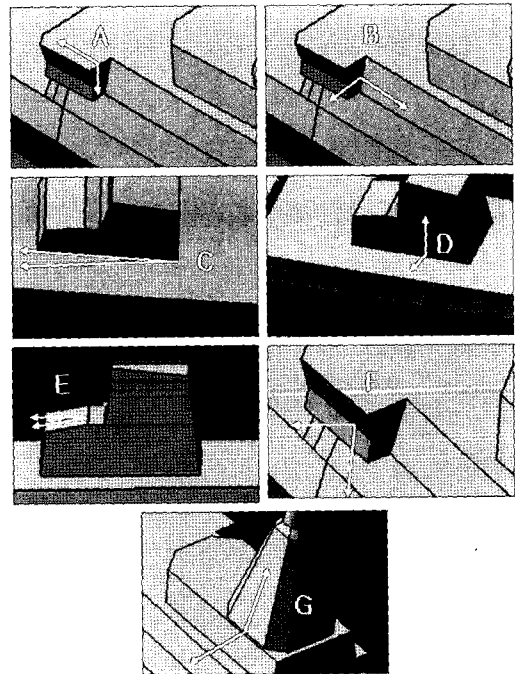


Fig. 5 Design parameters for Taguchi optimization

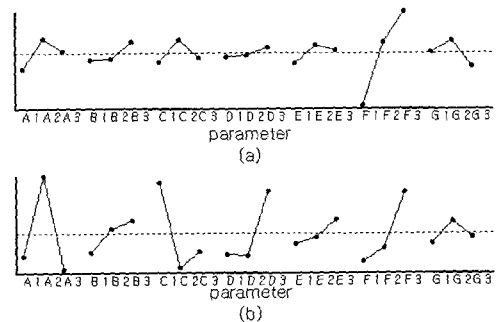


Fig. 6 Relative parameter effectiveness for (a) median and (b) maximum criteria

한편 잡음인자는 해석조건과 동일한 주파수(2, 8, 18 GHz)와 고각(0, 5, 10°)으로 설정하였다. 잡음인자 또한 수준별로 직교표를 활용하여 경우의 수를 줄일 수 있으나 본 예제에서는 9가지 모든 조합의 경우를 잡음향에 포함시켜 SN비를 구하였다.

특성치는 cardinal point를 제외한 전 방위각에 대하여 중간값(median)과 최대값(maximum) 두 가지로 각각 정의하였다. 그런데 망소특성의 정의에 의하면 특성치의 값이 음이 되면 안 되므로 중간값의 경우는 일정 값을 더해야 할 필요가 있다. 두 가지 특성치에 대한 수준별 상대적 기여량 해석결과는 각각 Fig. 6(a), (b)에 나타낸 바와 같다. 중간값 해석에서 RCS 값에 가장 큰 영향을 미치는 설계변수는 수준별 기여량의 차이가 큰 형상인자 F로 판명되었고, 이 인자의 조절만으로도 전체 RCS 값은 줄어 들 수 있음을 의미한다. 반면에 최대값 해석에서는 A,C,D 그리고 F 형상이 크게 기여함을 알 수 있고, 본 인자들은 이중반사와 단일 반사 모두 관여하는 인자이다.

한편 각 인자별 최적의 수준은 기여량이 큰 수준으로 결정되며 이를 Table 3에 정리하였다. Table 3에 의하면 두 특성치에 대해 상이한 결과를 주는 인자들이 존재함을 알 수 있다. 그런데 이 경우 인자의 수준별 기여량의 차이가 크지 않다면 전체 RCS값에 큰 영향을 미치지 않으므로 둘 중에 어느 하나의 값을 채택해도 상관 없을 것이다. 그러나 만약 상이한 결과를 주는 인자의 수준별 기여량의 차이가 공히 크다면 특성치를 중간값과 최대값의 가중평균치로 정의하여 해석을 수행하는 것을 고려할 필요가 있다.

Table 3에 나타낸 최적의 인자에 대한 RCS 해석을 수행한 결과 두 특성치에서 공히 초기모델에 비해 중간값은 약 8 dBsm, 최대값은 약 9 dBsm의 개선이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 또한 중

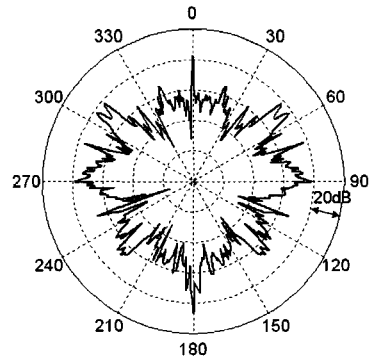


Fig. 7 H-H polarization RCS for a modified ship using Taguchi optimization for median values at 8GHz of frequency and 5° of elevation angle

간값 특성치를 이용한 개선 후의 RCS 결과를 나타낸 Fig. 7에서 알 수 있듯이 Fig. 3의 초기모델 RCS 에서 문제가 되었던 이중반사는 모든 영역에서 완전히 제거되는 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 언

본 논문에서는 다구치 방법을 이용한 체계적인 RCS 형상최적화 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 초기모델에 대한 RCS 해석결과로부터 문제영역을 도출한 후 이를 인자화하여 설계변수로 정의하고, 아항에 대한 위협인자를 잡음인자로 정의한다. 도출된 형상인자에 대해 직교표를 활용한 실험계획을 세운 후 해석을 수행하여 SN비 분석을 통해 모든 위협영역에 강력한 최적 형상인자를 도출한다. 제안된 기법을 가상함정에 적용하여 본 기법이 RCS 스틸스설계에 활용될 수 있음을 확인하였다. 최적화결과 초기모델에 비해 중간값은 약 8dBsm, 최대값은 약 9dBsm의 개선을 이룰 수 있었고, 모든 영역에서 이중반사를 완전히 제거할 수 있었다. 끝으로 본 기법은 함정 RCS 형상최적화 뿐만 아니라 소나를 위협대상으로 하는 잠수함 등 다양한 위협의 형상최적화 기법에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 3 Optimum design parameters

	A	B	C	D	E	F	G
Med.	A2	B3	C2	D3	E2	F3	G2
Max.	A2	B3	C1	D3	E3	F3	G2

후 기

본 논문은 한국해양연구원의 “지능형 항정스텔스 성능평가 기술개발 (PE0114C)”과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김국현, 김진형, 조대승, 2005a, “Object Precision 방법을 이용한 복합구조물의 RCS해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 2호, pp. 159-164.
- 김국현, 김진형, 조대승, 2005b, “복합구조물의 RCS저감을 위한 효율적 산란중심 해석에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 4호, pp. 421-426.
- 염봉진, 고선우, 김성준, 1990, “제품 및 공정설계를 위한 다구치 방법,” 경영과학, 제 7권, pp. 3-21.
- 이춘주, 2005, 차세대 친환경 운송시스템 기반기술 개발 연구보고서, 한국해양연구원.
- 조용진, 유재문, 2005, “한반도 해양환경에 따른 적외선 신호 민감도 해석연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 6호, pp. 679-685.

- IABG, 2002, RAMSES User Manual, IABG, Ottobrunn.
- Knott, E., Shaeffer, J. and Tuley, M., 1990, Radar Cross Section, Artech House, Boston.
- Phadke, M.S., 1989, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, New Jersey.



< 박 철 수 >



< 조 용 진 >



< 박 동 훈 >



< 안 종 우 >