

수동형 레이더 리프렉터의 설계조건 결정을 위한 형상분석

임정빈* · 김우숙**

*목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수

Shaping Analysis to Decide the Design Condition of a Passive-type Radar Reflector

Jung-Bin Yim* · Woo-Suk Kim*

*Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 레이더 타겟들에 대한 레이더 유효면적(RCS)을 측정하고, 그들의 성능특성을 분석하였다. 또한, 상용 레이더 리프렉터의 구조적 특징을 검토하였다. 그리고, 수동형 레이더 리프렉터의 최적 설계조건을 선택했다. 연구결과, X-band($\lambda=3.2\text{cm}$)에서 10λ 크기의 원형 평판으로 구성된 옥타헤드랄 형태의 레이더 리프렉터가 최적 성능을 나타냈다. 그러나, 새로 적용될 2000 SOLAS 규정을 수용하기 위해서는 X-band 와 S-band 모두에 적용하기 위해서 더 큰 크기의 원형평판이 필요하다.

핵심용어 : 수동형 레이더 리프렉터, 레이더 유효반사면적(RCS), 레이더 타겟, 타겟 형상 분석, 레이더 유효 단면적 분석

Abstract : Radar Cross Sections (RCS) for the radar targets are measured and their performance characteristics are analyzed through computer simulation. In addition, constructional features for the commercial radar reflectors are investigated. Then, the optimum design condition of a passive-type radar reflector was chosen. The results show that the octahedral-type radar reflector with 10λ size circular plates has best performance in X-band ($\lambda=3.2\text{cm}$). However, to comply with newly adopted 2000 SOLAS regulations, larger sized circular plate is required to provide at both X-band and S-band.

Key words : Passive-type Radar Reflector, Radar Cross Section(RCS), Radar Targets, Target Shaping Analysis, RCS Analysis

1. 서 론

통계청에서 2000년 12월을 기준으로 실시한 「2000 어업총조사」 결과(2002년5월 발간예정)에 따르면 국내 내수면 어가가 사용하는 동력선 어선의 규모는 73.9%가 1톤 미만이며, 2톤 이상의 어선은 9.7% 에 불과한 것으로 나타났다. 그리고, 선박 재질은 강선 3.6%, 목선 14.1%, FRP선 82.3%로 나타났다[1].

이러한 소형 어선은 크기가 작고, 선박 재질이 레이더(Radar) 전파반사강도를 약화시키기 때문에 레이더에 잘 탐지되지 않는다. 때문에 충돌사고, 어망 파손사고 등의 해양안전사고를 유발시키고 있다. 한편, 국내 소형 어선의 경우 선장, 기관장, 부원을 포함한 모든 선원이 어로행위에 종사하기 때문에 견시와 당직소홀로 인하여 많은 해난사고가 발생하는 것으로 발표되고 있다[2]-[4].

따라서, 하나의 적극적인 방어수단으로서 레이더 전자파반사강도를 강화시킬 수 있는 장치의 개발이 필요하다. 레이더 반사능력을 증가시키기 위해서는 선박의 크기를 크게 하거나 선박의 구성 재질을 강철과 같은 도체로 건조하면 되지만, 이 방

법은 현실적인 대안이 될 수 없다. 현실적으로 저렴하면서 간편한 레이더 전파반사능력 증강방안은 레이더 리프렉터(Reflector)를 사용하는 것이다[5].

레이더 리프렉터는 해상에서 소형 선박이나, 소형 부위(buoy) 등에 장착하여 레이더 전자파를 강하게 반사시키는 일종의 항해원조장치로서, 능동식(Active-type)과 수동식(Passive-type)이 있다. 능동식 리프렉터는, 수신한 레이더 전자파를 전기적으로 증폭한 후 반사시키기 때문에 강력한 에너지 전자파를 발생한다. 그러나, 내부 전자회로와 배터리가 필요하여 고가이고, 장치가 크며, 반영구적이고, 설치가 불편해서 소형 어선 및 어업용으로는 적용이 곤란한 문제점이 있다. 반면, 수동식 리프렉터는 전자회로 없이 특수한 전자파 반사물질과 특수 구조로 구성되어 있다. 이러한 수동식 리프렉터는 일반적으로 능동식 리프렉터와 비교하여 반사 에너지가 작아서 탐지능력이 작지만, 리프렉터의 형상과 물질을 최적으로 설계하는 경우, 레이더 전파 반사능력을 증가시킬 수 있다. 한편, 소형어선에 리프렉터를 장착하는 경우, 저가, 소형, 경량 및 편리한 장착 등의 조건이 필요함으로 능동식 보다는 수동식 리프렉터가 유리할 것으로 보여진다[6].

레이더 탐지능력은 전자파의 유효반사면적(m^2)을 나타내는 RCS(Radar Cross Section)로 표시한다. RCS는 레이더 리프

* 종신회원, jbyim@mmu.ac.kr, 019-510-7637
** 종신회원, wskim@mmu.ac.kr, 011-9665-7059

렉터를 사용하는 목적에 따라서 최대화 또는 최소화한다. 군함의 경우, 적의 레이더망으로부터 회피할 목적으로 RCS를 최소화한다. 반면, 소형 어선이나 해상용 부표, 어망 부표 등은 레이더 탐지능력을 증가하기 위해 RCS를 극대화한다.

이러한 RCS 극대화 방법 중, 형상을 이용하는 방법에는 3측면 고깔모양의 코너 리프렉터(Corner Reflector)를 단일 또는 다중 집합한 형태가 일반적으로 사용되고 있다. 물질을 이용하는 방법으로는, 루네버그 렌즈(Luneberg Lens)와 같은 유전체 렌즈(Di-electric Lens)를 이용하는 방법이 연구 개발되고 있다. 이러한 RCS의 증가 또는 저감에 관한 연구는 국방분야와 밀접한 관련이 있기 때문에 선진국에서는 리프렉터 개발 관련 기술을 극비로 하면서 해외 유출을 금지하여 국내 기술도입은 불가능한 실정이다. 예로서, 아르헨티나의 포크랜드(Falkland) 전쟁시 영국은 군함 보호를 위하여 RCS를 극대화시킨 유도물체를 개발해서 엑소세(Exocet) 미사일 회피장치로 사용한 바 있다. 미국, 독일, 일본 등에서도 RCS 관련 연구는 국방 보호 기술로 정하여 극비에 연구되고 있다. 국내의 경우, RCS 관련 연구는, 육·해·공군의 제한된 분야에서 진행되고 있으나, 주로 외국 장치의 도입검토에 머무는 수준이다. 그리고, 연구대상이 해상에서의 레이더 및 리프렉터라는 제한된 분야이기 때문에 소수의 선박관련 전자 및 전파 전문가에 의하여 진행되어 오고 있으나 그 실적이 저조한 실정이다[7]-[14].

한편 법률적인 측면에서는, 2000년 11월에 열린 제73차 MSC회의에서 SOLAS 제5장의 개정안이 채택되게 되었는데, 이 개정안은 목시적 수락절차를 거쳐 2002년 7월 1일 국제적으로 발효할 예정이다. 그 내용 중 하나가 레이더 리프렉터 설치에 관한 것이다. 제5장 제19조는 2002년 7월 1일 이후 건조되는 모든 선박으로서 150톤 미만의 모든 선박은 9GHz 및 3GHZ 대역의 레이더로 탐지가 가능한 레이더 리프렉터를 부착하도록 하고 있다[15].

따라서, 레이더 리프렉터 개발에 관한 연구는 현실적으로나 법률적으로 시급히 개발해야될 내용으로 판단된다. 이 연구에서는 고성능 수동형 레이더 리프렉터 개발을 위한 기초 연구로서, 리프렉터에 사용할 반사체의 형태를 분석하고, 전세계적으로 상용화되고 있는 다양한 리프렉터의 구조를 분석하여 국내 소형 선박에 적합한 최적의 리프렉터 형상을 선정하기 위한 방안을 모색하였다.

2. 리프렉터 설계시 고려사항

2.1 항해용 레이더 특성

항해용 레이더는 X-band 와 S-band 레이더로 구분된다. 원양구역을 항해하는 상선은 두 가지 밴드의 레이더 모두를 SOLAS 규정에 의거하여 장착하고 있다. X-band 레이더는 파장이 3.2cm인 9.4GHz를 이용하고, S-band 레이더는 X-band 레이더 보다 더 긴 10cm 파장의 3.0GHz를 이용한다. 그리고, X-band 레이더는 파장이 S-band 레이더에 비하여 짧기 때문에 분해능이 더 우수하고, 더 작은 물체를 탐지할 수 있는 장점

이 있으나, 비나 해면반사에 의한 간섭의 영향을 많이 받는 단점이 있다. 반면, S-band 레이더는 X-band 레이더보다 긴 거리에 있는 물체를 탐지할 수 있고, 비나 해면반사에 의한 간섭의 영향을 2.5배(-4dB)까지 줄일 수 있는 장점이 있으나, 작은 물체에 대해서는 탐지감도가 떨어지는 단점을 갖는다.

여기서, 레이더 리프렉터의 경우 파장(λ)의 제곱에 비례하여 전파반사능력이 저하된다는 점을 고려하면, S-band 레이더를 이용하여 레이더 리프렉터를 탐지하는 경우에는 주의를 요한다. 이론적으로 S-band 레이더는 파장이 X-band 레이더와 비교하여 3.125배(10cm/3.2cm) 길기 때문에 약 10dB의 성능감소를 가져온다. 따라서, 레이더 리프렉터를 설계하는 경우, X-band 용으로 사용할 것인지 또는, S-band 용으로 사용할 것인지를 분명히 정할 필요가 있다. 현재 일반적으로 상용화된 레이더 리프렉터는 대부분 X-band 레이더에서 최적의 성능을 발휘하도록 설계 제작되고 있다[16].

2.2 리프렉터 성능 기준

(1) 물리적 측면

레이더 리프렉터의 성능은, RCS(m^2)로 나타내며, 측정은 다음 Fig. 1과 같이 그 특성이 명확하게 규명된 금속구(metal sphere)를 기준으로 하며, 리프렉터의 유효면적(m^2)은 레이더에서 출력된 신호와 동일한 양의 신호를 반사시킬 수 있는 금속구의 절단면적이 된다. 또한, 레이더 리프렉터의 성능을 어떠한 기준과 비교한 데시벨(decibel: dB)로 나타내는 경우도 있는데, 일반적으로 1.0 m^2 의 금속구와 비교한다 [17].

정수 중 X-band 레이더를 사용했을 때의 탐지 가능한 RCS는 1 m^2 ~3 m^2 로 알려져 있는데, 유명한 Firdell Blipper 리프렉터를 제작했던 GEC Marconi사는 2.5 m^2 의 RCS를 X-band 레이더에서 탐지 가능한 문턱치(threshold value)로 제안한 바 있다. 이 값은 상용 레이더에서 일반적으로 허용 가능한 범위를 나타낸다. 한편, 레이더 리프렉터에서 성능에 중요한 영향을 미치는 것은 크기(size)인데, 리프렉터의 반사능력은 그 크기의 4승에 비례하기 때문에 리프렉터의 크기를 2배 증가시키는 경우 유효면적은 16배 증가(즉, 12dB)하게 된다. 그러나, 소형선박에 레이더 리프렉터를 장착하는 경우, 설치 장소의 크기와 주변환경을 고려해야하기 때문에 리프렉터의 크기를 증가시키

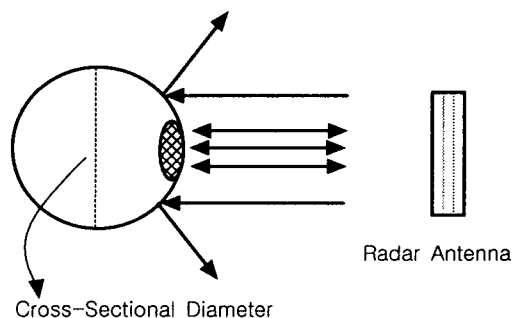


Fig. 1 A metal sphere to indicate Radar Reflector's performance

는 데는 제약이 따르게 된다. 그리고, 리프랙터의 크기가 레이더 신호의 수 파장 이내로 들어올 정도로 작은 리프랙터는 그 기능을 중지하게 된다. 따라서, 사용하는 레이더의 파장 보다 작은 크기의 리프랙터를 설계하는 경우에는 물체의 크기를 대신 할 장치나 물질을 연구해야 한다.

한편, 레이더에서 탐지한 물체를 자동으로 추적하여 물체가 근접하는 경우 경보음을 울리는 ARPA(Automatic Radar Plotting Aids) 시스템의 성능을 증가시켜서 레이더의 물체 탐지능력을 증가시키는 방법도 고려할 수 있다. 그러나, ARPA의 경우, 물체가 레이더 화면상에 나타날 때만이 탐지 가능하다는 점에 주목해야 하며, 연속된 3점이 나타나는 경우에만 유효한 물체로 간주하고 있기 때문에 ARPA를 이용하는 경우라도 우선 탐지할 물체가 강한 반사특성을 나타내야 한다.

(2) 법률적 측면

1973년 IMO(국제해사기구) 제8차 회의부터 2001년 7월 IMO 제47차 항해안전소위원회(NAV)에서 논의된 레이더 리프랙터와 관련된 조항을 분석하면 다음과 같다.

1973년 11월에 개최된 IMO 제8차 회의에서 제시된 Res.A.277(VIII)-Recommendation on Performance Standards for Radar Reflectors-에 의하면, 적용 주파수는 9.3GHz, 대상선박은 100G/T 이하의 모든 선박이며, 성능은 최소한 수면상 4m 높이에 설치되고, 적어도 10m²의 반사면적(echoing area)을 갖거나, 불가능할 시 수면상 2m 높이에 설치하고 최소한 10m²의 반사면적이 되도록 명시하였다. 그리고, 항해용 레이더에 대해서 360도 전체 방위에 응답가능하고, 전체 360도 방위 중 240도는 주엽(main lobes)의 최대 값으로부터 -6dB 이상이고, 10도 이상의 어떠한 단일 각에 대해서도 -6dB 이하로 남아있지 않을 것을 제시하였다[19].

그 후, 1977년 11월에 개최된 IMO 제10차 회의에서는 Res.A.384(X)-Performance Standards for Radar Reflectors-을 발표했는데, 그 세부내용은 1973년의 의결서 A.277(VIII)과 동일하다[20].

2000년 7월에 개최된 IMO 제46차 항해안전소위원회(NAV) 자료 중, Annex 20- Draft Amendments to Chapter 12 of the HSC Code / 13.13. Radar Reflectors-에 레이더 리프랙터 조항을 명시하였다. 이 조항에 의하면, 적용 주파수가 9GHz 및 3GHz 양쪽 모두를 만족해야 하며, 가능하면 150G/T 이하의 선박을 적용대상으로 하고, 레이더 리프랙터 또는 다른 장치를 이용하여 레이더 탐지를 지원 가능할 것으로 명시하였으며, 특성과 설치조항은 명시하지 않았다[21].

2000년 11월 들어 개최된 IMO 제73차 해사안전위원회(MSC)에서는 SOLAS 협약 제5장의 전면개정에 따른 회의를 개최하였으며, 제시한 내용은 2000년 7월의 제46차 NAV 자료와 대동소이하다[22].

최근 2001년 7월에 개최된 IMO 제46차 항해안전소위원회(NAV)에서는 적용 주파수를 9GHz 및 3GHz 양쪽 모두로 제시하고, 가능하면 150G/T 이하의 선박을 대상으로 하였다.

2000 SOLAS V/19.2.7 규칙에서 150톤 미만 선박에 9GHz 및 3GHz의 레이더에 탐지되는 레이더 리프랙터의 설치를 규정함에 따라 레이더 리프랙터의 성능기준인 Res.A.384(X)의 개정이 필요하게 되었으며, MSC 73에서 영국이 리프랙터의 성능기준 예비안(MSC 73/18/4)을 제안하여, NAV 47에서 의제를 검토하게 하였다. NAV 47은 영국과 일본을 포함한 별도 작업반을 구성하여 검토 요청 후, 개정안을 NAV 48에 제출토록 요청하였고, 본 의제는 2003년에 종료예정이다[23].

이와 같이, 1973년 제8차 회의에서 레이더 리프랙터에 관한 구체적인 사양을 제시한 이후 최근까지 구체적인 사양에 대해서는 추후 회의에서 결정할 사항으로 두고 있다. 따라서, 현재까지는 새로 개정될 SOLAS 규정에서 제시할 구체적인 레이더 리프랙터 기준사양은 제시되지 않고 있다. 다만, 세월의 경과에 따라 대상 선박 톤수가 100G/T에서 150G/T로 변경되었다는 것과, 레이더 밴드를 X-band와 S-band 모두에 대해서 레이더 리프랙터가 반응하도록 명시하고 있는 점을 알 수 있다.

향후, 이러한 근본적인 사양은 변하지 않을 것으로 보이지만, 위의 물리적 측면에서 살펴본 바와 같이, X-band와 S-band 모두에 적용하기 위해서는 리프랙터의 크기가 커져야 하는 점을 고려해야 한다. 연안 어업용으로만 리프랙터를 사용하는 경우라면, 레이더 리프랙터를 두 가지 밴드 모두에 적용가능 해야 한다는 2000 SOLAS 개정내용에 대해서 좀더 검토가 필요하다. 이러한 법률적 측면에서의 고찰은 이 분야의 전문가에 의해서 논의되어야 할 사항임으로 이 논문에서는 논의의 대상으로 한다.

3. 리프랙터 형상 분석

3.1 단순한 형상의 분석

RCS(σ) 정의 식은 다음 식(1)과 같이 입사파와 반사파의 비율에 면적을 곱한 형태로 나타난다[24].

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

여기서, R 은 리프랙터와 레이더의 거리, E_s 와 H_s 는 리프랙터에서 산란된 전장과 자장을 나타내고, E_i 와 H_i 는 입사된 전장과 자장을 각각 나타낸다. 이 연구에서는 리프랙터와 레이더의 거리 R 은 일정한 거리에 있는 것으로 가정하여 RCS 이론을 전개한다.

우선, 중·소형 선박에 적합한 최적의 레이더 리프랙터 형상을 결정하기 위한 첫 번째 단계로서, 원형, 사각형, 삼각형 등의 단순한 반사체들의 RCS(σ) 정의 식을 참고하여 정리한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 반사체들의 RCS(σ)를 계산해서 그 특성을 다음과 같이 분석하였다. 이러한 단순한 반사체들에 관한 RCS(σ) 정의 식은 Bassem [25], 김종규[26], 김경태[27]등에 의해 보고된 내용을 참고하였다.

(1) 원형 평판의 RCS

Fig. 2는 원점에 중심이 있고, 반경 r 을 갖는 원형 평판의 좌표계를 나타낸다.

Fig. 2와 같은 원형 평판은, 좌우 대칭(circular symmetry) 특성을 갖기 때문에 후방산란(back scattered)되는 RCS(σ)는 수평각 ϕ 에 관계없이 고각 θ 에 대해서만 영향을 받는다. 따라서, 원형판에 수직으로 전파가 입사될 때, RCS(σ)는 다음 식(2-a)와 같이 나타나고,

$$\sigma = \frac{4\pi^3 r^4}{\lambda^2}, \theta = 0^\circ \quad (2-a)$$

그 외의 방향으로 입사되는 경우, 선형적으로 편광된 입사파에 대해서는 다음과 같은 두 가지 근사 식 (2-b)와 (2-c)로 주어진다.

$$\sigma = \frac{\lambda r}{8\pi \sin\theta (\tan\theta)^2}, \theta \neq 0^\circ \quad (2-b)$$

$$\sigma = \pi k^2 r^4 \left[\frac{2J_1(2kr \sin\theta)}{2kr \sin\theta} \right] (\cos\theta)^2, \theta \neq 0^\circ \quad (2-c)$$

여기서, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $J_1(\beta)$ 는 β 에 대해서 평가한 제1종 원형 베셀함수(Bessel function)이다.

(2) 사각 평판의 RCS

Fig. 3은 $x-y$ 평면에 나타낸 사각 평판의 좌표계이다. 사각 평판의 두 개 면을 각각 $2a$ 와 $2b$ 로 나타냈다.

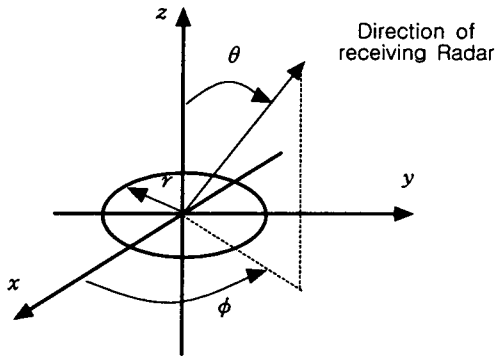


Fig. 2 Coordinates for a circular flat plate

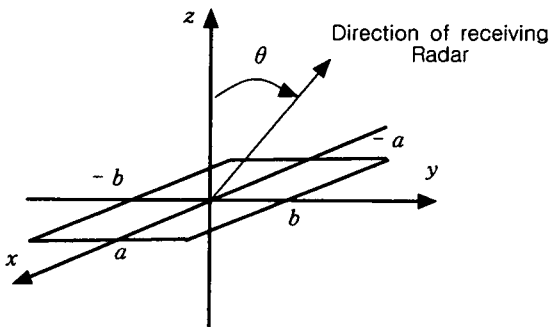


Fig. 3 Coordinates for a rectangular flat plate

$x-y$ 평면에 선형적으로 편광된 입사파에 대해서 수직 후방산란 RCS(σ_V)과, 수평 후방산란 RCS(σ_H)은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\sigma_V = \frac{b^2}{\pi} \left| \sigma_{1V} - \sigma_{2V} \left[\frac{1}{\cos\theta} + \frac{\sigma_{2V}}{4} (\sigma_{3V} + \sigma_{4V}) \right] \sigma_{5V}^{-1} \right|^2 \quad (3-a)$$

$$\sigma_H = \frac{b^2}{\pi} \left| \sigma_{1H} - \sigma_{2H} \left[\frac{1}{\cos\theta} + \frac{\sigma_{2H}}{4} (\sigma_{3H} + \sigma_{4H}) \right] \sigma_{5H}^{-1} \right|^2 \quad (3-b)$$

여기서,

$$\sigma_{1V} = \cos(k a \sin\theta) - j \frac{\sin(k a \sin\theta)}{\sin\theta} \quad (3-c)$$

$$\sigma_{2V} = \frac{e^{j(k a - \pi/4)}}{\sqrt{2\pi} (k a)^{3/2}} \quad (3-d)$$

$$\sigma_{3V} = \frac{(1 + \sin\theta) e^{-j k a \sin\theta}}{(1 - \sin\theta)^2} \quad (3-e)$$

$$\sigma_{4V} = \frac{(1 - \sin\theta) e^{j k a \sin\theta}}{(1 + \sin\theta)^2} \quad (3-f)$$

$$\sigma_{5V} = 1 - \frac{e^{j(2 k a - \pi/2)}}{8\pi (k a)^3} \quad (3-g)$$

$$\sigma_{1H} = \cos(k a \sin\theta) + j \frac{\sin(k a \sin\theta)}{\sin\theta} \quad (3-h)$$

$$\sigma_{2H} = \frac{4e^{j(k a + \pi/4)}}{\sqrt{2\pi} (k a)^{1/2}} \quad (3-i)$$

$$\sigma_{3H} = \frac{e^{-j k a \sin\theta}}{1 - \sin\theta} \quad (3-j)$$

$$\sigma_{4H} = \frac{e^{j k a \sin\theta}}{1 + \sin\theta} \quad (3-k)$$

$$\sigma_{5H} = 1 - \frac{e^{j(2 k a + \pi/2)}}{2\pi (k a)} \quad (3-l)$$

위의 식(3-a)과 식(3-b)을 이용하면 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 에 대해서 정확한 값을 계산할 수 있다. 그리고, 고각 θ 와 수평각 ϕ 방향으로 입사되는 전파에 대해서 이상적으로 얇은 사각 평판에 대한 후방산란 RCS(σ)는 다음 식(3-m)과 같이 근사적으로 주어진다.

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left[\frac{\sin(a k \sin\theta \cos\phi)}{a k \sin\theta \cos\phi} \frac{\sin(b k \sin\theta \sin\phi)}{b k \sin\theta \sin\phi} \right]^2 (\cos\theta)^2 \quad (3-m)$$

위의 식 (3-m)은 편광에 대해서 독립적이며 단, $\theta \leq 20^\circ$ 인 입사각에 대해서만 유효하다.

(3) 삼각 평판의 RCS

Fig. 4는 이등변 삼각 평판의 좌표계를 나타낸다.

Fig. 4에서 30° 이하의 작은 입사각을 고려하는 경우, 후방산란 RCS(σ)는 다음 식 (4-a)의 근사 식으로 주어진다.

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} (\cos\theta)^2 \sigma_0 \quad (4-a)$$

여기서,

$$\sigma_0 = \frac{[(\sin \alpha)^2 - (\sin(\beta/2))^2]^2 + \sigma_{01}}{a^2 - (\beta/2)^2} \quad (4-b)$$

$$\sigma_{01} = 0.25 (\sin \phi)^2 [(2a/b) \cos \phi \sin \beta - \sin \phi \sin 2\alpha]^2 \quad (4-c)$$

그리고,

$$\alpha = k a \sin \theta \cos \phi, \quad \beta = k b \sin \theta \sin \phi, \quad A = ab/2 \quad \text{이다.}$$

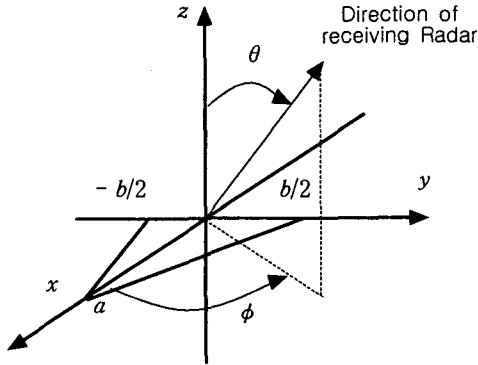


Fig. 4 Coordinates for a isosceles triangular flat plate

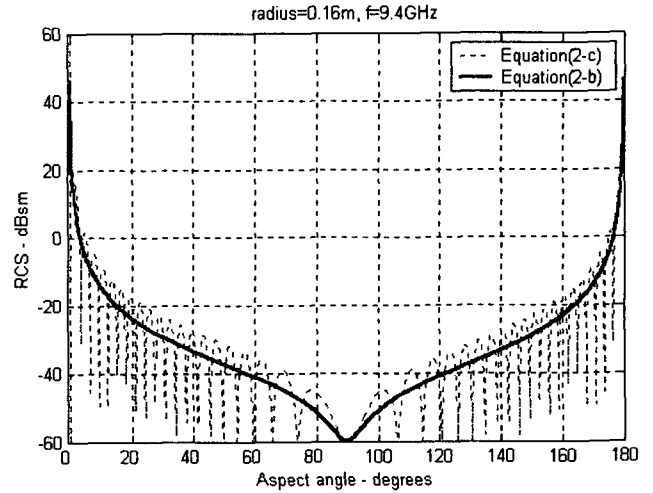
(4) 계산 결과

먼저, 원형 평판에 대한 식 (2-b)와 식 (2-c)를 이용하여 계산한 RCS(σ)를 Fig. 5(a)에 나타냈다. 그리고, 사각형 평판에 대해서 수직 후방산란 σ_V 에 대한 식(3-a)와 수평 후방산란 σ_H 에 대한 식(3-b) 및 고각 θ 와 수평각 ϕ 에 대한 근사식 (3-m)을 이용한 RCS 계산결과를 Fig. 5(b)와 5(c)에 각각 나타냈다. Fig. 5(d)와 5(e)는 이등변 삼각 평판에 대한 식(4-d)와 식(4-e)를 이용하여 계산한 결과로서, Fig. 5(d)는 $\phi=0$ 도일 때의 결과이고, Fig. 5(e)는 $\phi=90$ 도일 때의 결과이다.

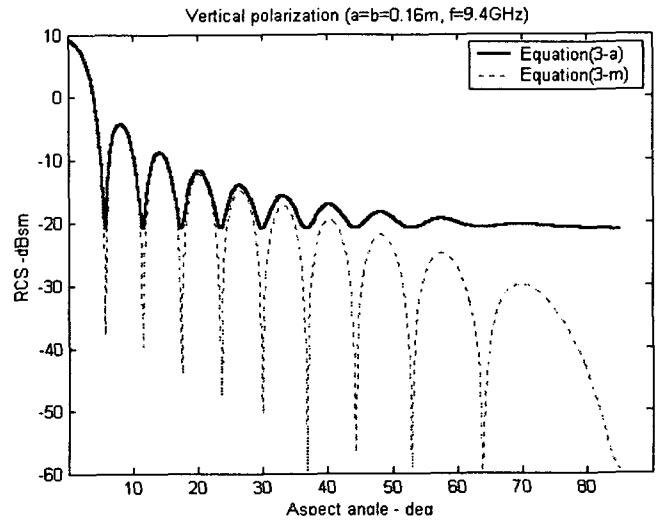
Fig. 5에 나타낸 RCS 계산결과는 3가지 평판이 모두 대칭이기 때문에 수평각 0도부터 180도 또는, 0도부터 90도까지만 나타냈고, MATLAB 6.1을 이용하여 프로그램을 작성한 후 계산하였다. 그리고, Fig. 5를 계산한 조건은, $a=b=16\text{cm}$, $r=16\text{cm}$, $\lambda=3.2\text{cm}(9.4\text{GHz})$ 로 정했는데, 이 값들은 현재 상용 레이더 리플렉터에 일반적으로 적용되고 있는 값이다.

Fig. 5에서, 고각 $\theta=0$ 에서의 RCS 값의 순위는 원형평판 > 사각평판 > 삼각평판 순서로 나타났다. Fig. 5(a)의 원형평판을 보면, 입사각 변화에 따라서 급격한 감쇠를 나타내며, 간격이 좁은 널(null)이 발생하고, Fig. 5(b)와 5(c)의 사각 평판은 수직 후방산란 σ_V 과 수평 후방산란 σ_H 에 대한 RCS가 대등하게 나타나며, 입사각 변화에 따른 감쇠현상이 다른 형태 보다 덜하면서 널의 간격이 넓은 것으로 나타났다. 그리고, Fig. 5(d)의 삼각 평판에서 $\phi=0$ 도로 주어질 때, 급속한 감쇠 특성을 나타내고 있는 반면, $\phi=90$ 도인 Fig. 5(e)의 경우, 감쇠특성은 $\phi=0$ 도일 때와 대등하면서 간격이 좁고 깊은 널이 나타나고 있다.

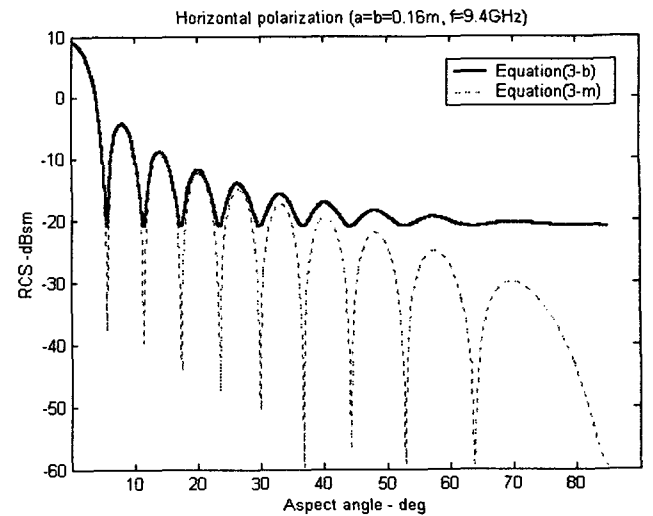
이상의 결과로부터, 평가에 사용한 3가지 종류의 형태 중에서 RCS가 가장 큰 원형평판을 리플렉터로 이용하는 경우에는



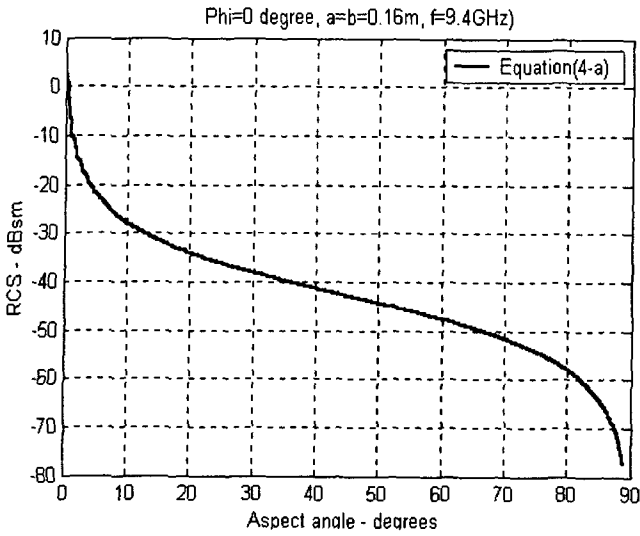
(a) RCS for a circular flat plate with equations (2-b) and (2-c)



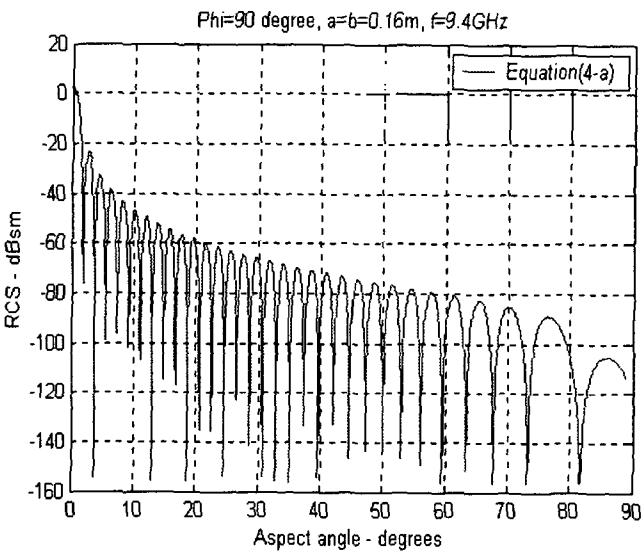
(b) RCS (σ_V) for a rectangular flat plate with equations (3-a) and (3-m)



(c) RCS (σ_H) for a rectangular flat plate with equations (3-b) and (3-m)



(d) RCS for a perfectly conducting triangular flat plate when $\phi=0$



(e) RCS for a perfectly conducting triangular flat plate when $\phi=90$

Fig. 5 RCS calculation results according to the aspect angle θ and elevation angle ϕ

입사각 변동에 따른 급격한 감쇠특성에 주의해야하고, 사각평판을 이용하는 경우에는 간격이 넓은 깊은 널에 주의해야하며, 삼각평판의 경우는 경사각 변동에 따른 감쇠특성에 주의해야함을 알 수 있다.

이러한 계산결과는 단순한 형태의 반사체에 대한 것일 뿐이기 때문에 최적형상 결정을 위한 실험결과로는 부족하다. 그래서, 두 번째 분석단계로서, 다음과 같이 단순한 평판의 3개 면으로 구성된 트리헤데랄(Tri-hederal) 형태의 레이더 반사체에 대한 RCS(σ)를 이용하여 특성 분석을 시도하였다.

3.2 어레이 형상의 분석

Fig. 6은 현재 일반적으로 사용되고 있는 3가지 종류의 레이더 리프랙터를 나타낸다. Fig. 6에 나타난 3가지 형태에 대한 RCS 추정 식은 앞에서 기술한 단순한 형태의 레이더 반사체에 대한 RCS 추정 식을 혼합하는 방대한 전기과정을 요하기 때문에 이 연구에서는 다음과 같이 수평방향각 ϕ 와 고각 θ 의 특정한 범위내에서 최대 RCS(σ_{max})를 나타내는 식으로 간소화하여 분석을 시도하였다.

다음 식(5-a)는 Fig. 6(a), 식(5-b)는 Fig. 6(b), 식(5-c)는 Fig. 6(c) 각각에 대한 RCS(σ_{max})를 나타낸다[28],[29].

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi a^2}{3\lambda^2} = 4.19 \frac{a^2}{\lambda^2} \quad (5-a)$$

$$\sigma_{max} = 15.61 \frac{a^2}{\lambda^2} \quad (5-b)$$

$$\sigma_{max} = \frac{12\pi a^2}{\lambda^2} = 37.67 \frac{a^2}{\lambda^2} \quad (5-c)$$

Fig. 5의 계산에 이용한 변수와 동일한 $a=16\text{cm}$, $\lambda=3.2\text{cm}$ (9.3GHz)를 예로 들어 계산한 결과, 식(5-a)는 40.4dBm, 식(5-b)는 51.6dBm, 식(5-c)는 59.5dBm이다. 최대 RCS(σ_{max}) 순서로 정리하면, 정사각형 트리헤데랄 > 원형 트리헤데랄 > 삼각형 트리헤데랄 이 된다. 이러한 결과를 위의 Fig. 5의 계산 결과인 원형평판 > 사각평판 > 삼각평판 순서와 비교하면, 정사각형이나 원형 평판을 어레이 형태로 구성하여 리프랙터를 제작하는 것이 최적일 것으로 보여진다.

여기서, 어레이 형태의 레이더 리프랙터를 실제 선박에 장착하는 경우를 고려하면, 사각형 리프랙터의 경우는 사각 모서리가 바람에 의한 저항을 유발시켜서 리프랙터가 진동할 우려가 있고, 로프나 다른 줄에 걸릴 수 있으며, 리프랙터의 방식과 부식을 방지하기 위하여 프라스틱 통에 내장하는 경우에는 돌출된 모서리 부분 때문에 문제를 야기할 것으로 추측된다. 따라서, 최대 성능을 발휘할 수 있으면서도 실용상 문제점이 없는 리프랙터 형태를 결정할 필요가 있다.

그래서 다음과 같이 세 번째 분석 단계로서 현재 상용화된 기존 레이더 리프랙터를 구입하여 이들의 장·단점에 대한 분석을 시도하였다.

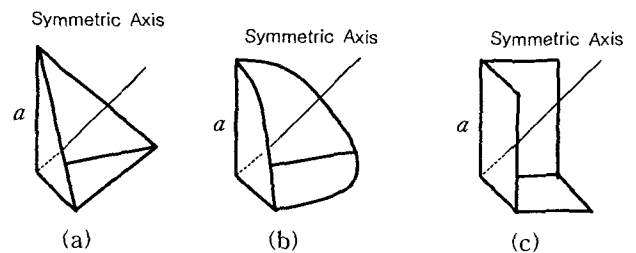


Fig. 6 Three types of Radar Reflector adopting in a commercial ones. (a) Triangular Tri-hederal type, (b) Circular Tri-hederal type, and (c) Rectangular Tri-hederal type

3.3 상용 레이더 리프렉터의 분석

(1) 데이비스 제품

데이비스(Davis)사의 Model-153 Echomaster 리프렉터와 Model-151 Emergency 리프렉터의 외형을 각각 Fig. 8(a)과 8(b)에 나타냈다. Echomaster 리프렉터는 옥타헤데럴 구조로 구성되어 있고, Emergency 리프렉터는 폼(foam) 위에 반사물질을 도포한 형태로 구성되어 있으며, 이 두 가지 제품 모두 3개의 원판 조각으로 구성되어 있기 때문에 분해 조립이 가능하고 보관이 용이하다. 그리고, Echomaster는 직경이 32cm이고, Emergency는 직경이 29cm이다. Davis사에서 제공한 특성에 의하면, Model-153의 경우 X-band 레이더에 대해서 RCS가 11m²이다[30].

(2) 화이어델 브리퍼 제품

Fig. 9와 같은 화이어델 브리퍼(Firedel Blipper) 제품 중에서 Model 210-7과 Model 210-5를 분석하였다. 화이어델 브리퍼 리프렉터는 옥타헤더럴 리프렉터를 사용하지 않고, 트리헤더럴 코너 리프렉터를 채용하고 있다. 옥타헤더럴 리프렉터들이 구(sphere)상에 8개의 코너 리프렉터를 형성하는데 반하여, 이 제품은 10개의 트리헤더럴 코너 리프렉터를 사용하고 있으며, 코너 리프렉터가 서로 약 36° 간격으로 정렬되어 있다. 이 제품은 이론적으로 옥타헤데럴 형태의 리프렉터가 규칙적으로 배열됨에 따라 발생하는 깊은 널(null)을 방지하기 위한 형태로 적당하다. 그러나, 코너 리프렉터를 패키지(package)로 만들기 위해서 각각의 코너 리프렉터 크기를 작게 해야하는 문제점을 갖고 있다. 화이어델 브리퍼사는 Model 210-7 리프렉터에 대해서 수면상 약 2m 높이에 설치하는 경우 3마일까지, 4m 높이에 설치하는 경우 약 5마일까지 레이더에 탐지 가능한 것으로 제시하고 있다[31].

(3) 모브리 제품

모브리(Mobri) 원통형 리프렉터는 직경 10.24cm의 Model S-4와 직경 5.12cm의 Model S-2을 분석하였다. 모브리사에서 제시한 RCS는 Model S-2가 2m², Model S-4는 4m²인데, 직경 5.12cm의 Model S-2의 경우, 각 다이헤데탈 리프렉터가 반경 2.56cm를 갖기 때문에 반사면적이 X-band 레이더에 효과적으로 작용하기에는 너무 작아서 이 회사에서 제시한 RCS

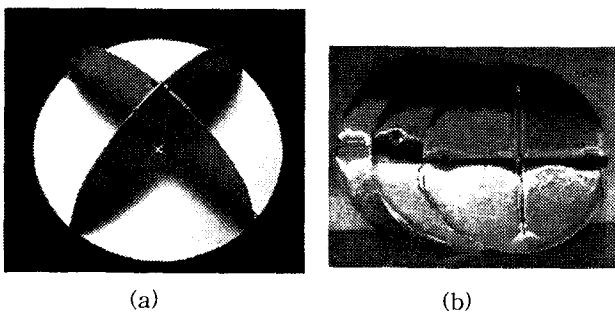


Fig. 7 (a) Davis Echomaster reflector(Model-153) and (b) Emergency reflector(Model-151)

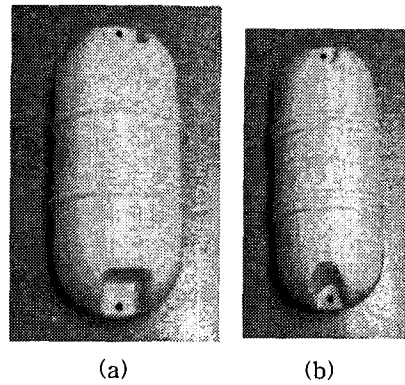


Fig. 8 Firedell Blipper reflector. (a) Model 210-7, (b) Model 210-5

값에 대해서는 신뢰할 수 없는 것으로 고려된다. 또한, 레이더 빔이 정확하게 직각으로 입사되는 경우 이들 제품은 다이헤데탈 리프렉터와 같은 성능을 발휘하지만, 경사각이 조금만 발생하더라도 깊은 널(null)을 만들어서 반사파가 상당히 감쇠되는 단점이 발생할 것으로 보여진다. 따라서, 이들 리프렉터는 주로 소형 세일링 보트용으로 판매하고 있는 실정이다[32].

(4) 시크롭스 제품

시크롭스(Cyclops) 리프렉터는 표준 옥타헤드탈 리프렉터와 전면과 후면부에 설치한 2개의 유전체 렌즈(di-electric lens)를 갖고 있다. 이 렌즈는 영국군사연구편제(British Admiralty Research Establishment)에서 개발한 것으로, 마치 고양이 눈처럼 입력된 에너지를 반사시키는 작용을 한다. 이 렌즈는 영국이 포크랜드 전쟁시 엑소세 미사일을 회피시킬 목적으로 개발한 것으로 루네버그 렌즈(Luneberg Lens)로 불리고 있으며, 전쟁 후 일반 상업용으로 개발한 것이다. 시크롭스 리프렉터는 Fig. 11과 같은 3종류 모델이 있다. 이 리프렉터의 문제점은, 루네버그 렌즈가 효과적으로 전파를 반사할 수 있는 밴드가 정해져 있기 때문에 경사각에 제한이 있다. 약 18° 이상의 경사각에 대해서는, 전파반사가 중지되는 것으로 보고되어 있는데, 루네버그 렌즈의 밴드폭을 더 넓히면 되지만, 가격이 비싸지기 때문에 짐발장치를

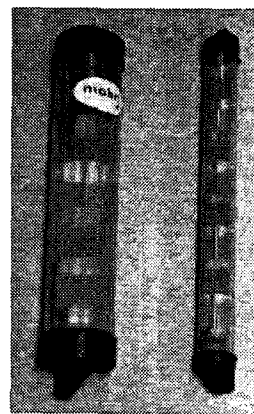


Fig. 9 Cylindrical Mobri reflector. (Left) Model S-4 and (Right) Model S-2

사용하여 경사에 대한 문제점을 해결하는 방법이 대안으로 제시되고 있다. 또 다른 문제점으로는, 루네버그 렌즈가 투과 반사형이므로 해상에 장기간 방치할 경우에 염해에 의한 표면 오염으로 투과성에 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 시크롭스사에서 제공한 자료에 따르면 RCS가 약 4m²이다[33].

(5) 트리렌즈 제품

트리렌즈 (Tri-Lens) 리프렉터 역시 시크롭스 리프렉터와 같이 루네버그 렌즈를 채용하고 있다. 이 트리렌즈 리프렉터는 직경이 13.4cm 인데 31cm의 알루미늄 코너 리프렉터와 대등한 RCS를 갖고 있는 것으로 소개되고 있다. 트리렌즈는 Fig. 12와 같이 Tri-Lens 리프렉터와 Mini Tri-Lens 리프렉터 등 2가지 종류가 있다. Tri-Lens 리프렉터는 2~4m²의 RCS 특성을 갖고, Mini Tri-Lens 리프렉터는 0.6~1.0m²의 RCS 특성을 갖고 있다. 모두 X-band 레이더에 대해서 330도 방위응답 특성을 갖는다. 문제점으로는 시크롭스 리프렉터와 동일하게 작은 경사에 대해서 RCS 감도가 쉽게 저하된다[34].

(6) 레이더 플래그 제품

Fig. 13에 나타낸 레이더 플래그(Radar Flag)은 단지 경사각도가 0도인 경우에만 효과적으로 전파를 반사시킨다. 레이더 플래그는 명칭 그대로 천으로 만들어진 기(flag) 내부에 전파반사 물질을 삽입한 것으로, 플래그가 접혀지거나 레이더 전파방향과 플래그의 면이 일직선으로 놓이게 되는 경우 0.4m² 정도의 아주 약한 전파반사특성을 나타내는 문제점이 있다. 레이더 플래그는 기의 크기에 따라 다양한 종류가 있다. 레이더 플래그는 일반 성조기와 같이 선박 후미의 깃발로서 사용하면서 동시에 레이더 리프렉터 기능을 할 수 있도록 제작한 것으로, 깃발은 나일론 제품이고, 금속천의 무게를 견디도록 박음질이 튼튼하게 되어 있다[35].

3.4 검토

다양한 형태의 레이더 반사체와 어레이 형태의 반사체를 분

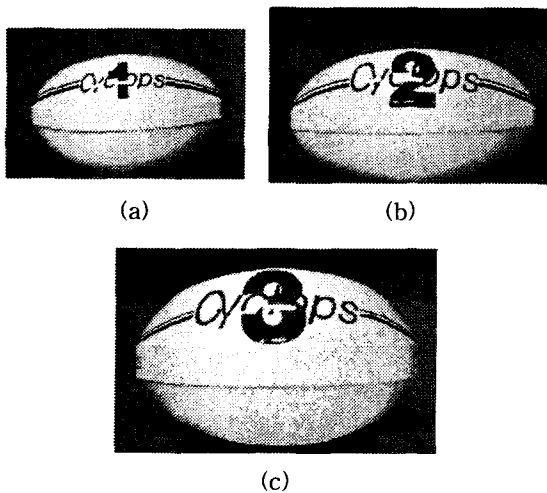


Fig. 10 Three types of Cyclops reflector. (a) Cyclops-1, (b) Cyclops-2, (c) Cyclops-3

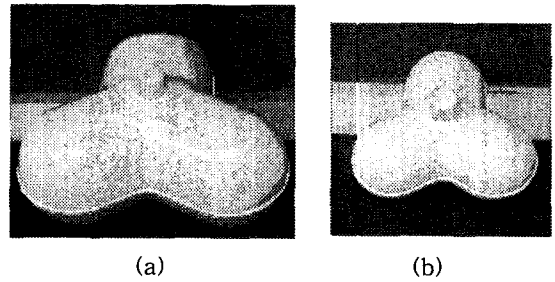


Fig. 11 Two types of Tri-Lens reflector. (a) Tri-Lens reflector, (b) Mini Tri-Lens reflector.

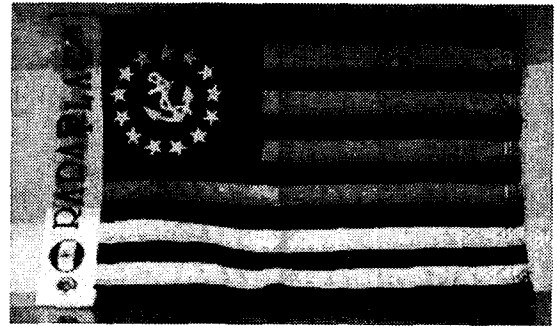


Fig. 12 Radar Flag reflector.

석하고, 상업용 리프렉터의 구조와 이들 회사에서 제시하는 RCS를 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 단순한 형태의 반사체에서, $\theta=0$ 도일 때의 최대 RCS 순위는, 원형평판 > 사각평판 > 삼각평판.
- (2) 어레이 형태 반사체에서, 최대 RCS (σ_{max}) 순위는, 정사각형 트리헤데랄 > 원형 트리헤데랄 > 삼각형 트리헤데랄.
- (3) 상용 리프렉터에서 각 제조회사에서 제시한 자료에 따른 RCS 순위는, Davis Model-153(11m²) > Firedel Blipper Model 210-7(3~5m²), Mobri Model S-4(4m²), Cyclops(4m²), Tri-Lens(2~4m²) > Mini Tri-Lens(0.6~1.0m²) > Radar Flag(1m² 이하).
- (4) 상용 리프렉터 직경 크기순서(Cyclops, Tri-Lens, Radar Flag은 비교 불가능하여 제외), Davis Model-153(32cm) > Firedel Blipper Model 210-7(약 20cm) > Mobri Model S-4(10.24cm) > Model S-2(5.12cm)
- (5) 상용 리프렉터의 가격순서(고가부터), Cyclops(약 300 US\$) > Tri-Lens(약 240US\$) > Firedel Blipper(약 160US\$) > Mini Tri-Lens(약 140US\$) > Mobri Model S-4(약 110US\$) > Davis Model-153(약 40US\$).

이상의 결과로부터, (1) 상업용 레이더 리프렉터의 경우 대부분 원형평판을 어레이로 구성한 옥타헤데랄 방식을 채용하고 있으며, (2) 레이더 리프렉터의 RCS 증가 방법으로 리프렉터의 크기를 대체할 수 있는 물질이나 방식은 없는 것으로 조사되었고, (3) 특히, 최근에 성능이 우수하다고 보고된 루네버그 렌즈를 이용한 Cyclops의 경우 Davis Echomaster Model-153 보다 RCS가 작고 가격도 비싼 것으로 나타났다. 그리고,

(4) 상용 레이더 리프렉터는 현재 대부분 X-band 레이더를 중심으로 개발되고 있음을 알 수 있다.

따라서, 레이더 리프렉터 형상은 원형 평판을 어레이 형태로 구성한 옥타헤드랄 방식을 채택하는 것이 현재까지의 기술로는 최적임을 알 수 있다. 한편, Radar Flag의 경우는 선박에 게양하는 기를 대신하면서 리프렉터 기능을 갖기 때문에 출항시 풍어를 기약하는 의미에서 많은 기를 선박에 설치하는 국내 어업 환경을 고려하면 적극 개발해야할 유형의 리프렉터로 고려된다. 아울러 현재까지 개발된 대부분의 레이더 리프렉터가 경사각에 대해서 RCS가 저하되는 특성을 나타내고 있기 때문에 이를 보상하기 위한 특수한 집발장치의 개발이 요구된다.

4. 결 론

이 연구에서는 소형선박의 항해안전을 확보하기 위한 하나의 대안으로, 레이더 리프렉터를 선박에 장착하기 위한 기술적·법률적 검토를 시도하고, 다양한 형태의 레이더 반사체와 상용 리프렉터를 분석하여 향후 개발할 레이더 리프렉터의 최적 형상을 결정하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 현재까지 연구 개발된 리프렉터는 크기를 대체할 만큼 유용한 형태나 물질이 없기 때문에 리프렉터 크기는 최소한 X-band 레이더 파장 λ 의 10 λ 이상이 되어야한다.
- (2) 리프렉터 형태는 산화금속피막을 증착한 알루미늄 판이나 금속성의 원형 평판을 어레이 형태로 구성한 옥타헤드랄 방식이 현재까지 기술로는 최적임을 알았다.
- (3) 상용 레이더 리프렉터는 대부분 X-band를 목표로 개발되어 있기 때문에 향후 개정될 SOLAS 규정에서 요구하는 X-band 와 S-band 모두에 적용 가능하려면, S-band 용 레이더에 유효하게 탐지될 수 있는 크기로 개발해야함 알았다.
- (4) 그리고, Radar Flag을 하나의 리프렉터로 활용하는 방안도 국내 어업환경에 비추어 볼 때 유효할 것으로 고려된다.

향후 이 연구결과를 기초로 다양한 형태와 다양한 크기의 레이더 리프렉터를 제작한 후, 전파무향실에서 측정실험과 해상에서의 유효성 실험을 시도할 예정이다. 또한, 경사각에 따른 RCS 변동을 줄이기 위한 집발장치도 연구 개발할 예정이다.

후 기

이 논문은 2001년도 해양수산부 수산특정연구과제 지원에 의한 연구결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

[1] 통계청 사회통계국 농수산통계과(2000) : 어업총조사, URL://www.nso.go.kr.
 [2] 동해지방해양안전심판원(2000), 동해안 오징어 채낚기어선

해양사고 예방대책, URL://www.maia.go.kr.
 [3] 해양수산부 오공균(2000), 들어나는 어선해양사고 정부가 나선다, URL://www.maia.go.kr.
 [4] 해양수산부, 2000년도 해양사고 분석 및 평가, URL://www.momaf.go.kr.
 [5] 임정빈 외 7인(2002.3), "형상을 통한 수동형 레이더 리프렉터의 RCS 증대방법 연구," 2002년도 한국항해항만학회 춘계학술대회 논문집, 한국항해학회, pp.161-176.
 [6] 임정빈의 4인(2001.9), 해양수산부 수산특정과제 연구개발 계획서-어업용 레이더 리프렉터 개발.
 [7] 부성운(1998), "합정 RCS 감소와 위협회피 효과," 제2회 해상무기체계 발전 세미나, pp.115-121.
 [8] 허성필(1998), "합정 스틸스화의 경제성분석 방법론," 제4회 해양과학기술 심포지움 논문집, pp.88-104.
 [9] North Sea Navigation Inc., *Lightning Prevention Systems Specifications*, URL://www.northseanavigator.com.
 [10] Smi Fifth Annual Event(2001.8), *RCS Modeling and Analysis*, URL://www.naval-technology.com.
 [11] CSSDENMARK, *Radar Cross Section Simulation Software for Stealth Assessment*, URL://www.naval-technology.com.
 [12] National Institute of Standard Technology, *Metrology for Radar Cross Section Systems*, URL://www.boulder.nist.gov.
 [13] Ohio University, *Current Reaseach: Compact Radar Measurement Range*, URL://esl.eng.ohio-state.edu.
 [14] Ohio University(June, 2001), *Antenna/RCS Measurement Workshop*, URL://esl.eng.ohio-state.edu.
 [15] 한국선급 정부대행검사부, 2000년 SOLAS 개정에 대한 소개, URL://www.krs.kr/sta /kukje.
 [16] Rozendal Associates, *Radar Reflectors*, URL//www.strandnet.com.
 [17] Eugene F. Knott(1993), *Radar Cross Section Measurement*, Van Nostrand Reinhold, pp.1-26.
 [18] Jim Coreman, Chuck Hawley, Dick Honey and Stan Honey, *1995 Radar Reflector Test*, URL://www.us sailing.org.
 [19] IMO 8th Session(1973.11.20), Resolution A.277(VIII), *Recommendation on Performance Standards for Radar Reflectors*.
 [20] IMO 10th Session, Resolution A.384(X)(1977.11.14), *Performance Standards for Radar Reflectors*.
 [21] IMO, Sub-Committee on Safety of Navigation 46th Session(2000.7), *Report to the Maritime Safety Committee, Annex 20: Draft Amendments to Chapter 13 of the HSC Code, 2000*.
 [22] 한국선급 정부대행검사부(2000.2.27), 항해안전에 관한

- SOLAS 협약 제5장의 개정에 대한 소개.
- [23] 해양수산부(2001.7), 국제해사기구 제47차 항해안전소위원회 참가보고서.
- [24] Merrill L. Skolnik(2001), *Introduction to Radar Systems*, McGraw Hill, pp.30-98.
- [25] Bassem R. Mahafza(2000), *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. Champman & Hall/CRC, pp.71-140.
- [26] 김종규 외 3인(1998), “스트립격자 구조를 이용한 RCS 감소 기법 연구,” 제2회 해상무기체계 발전 세미나, pp.375-378.
- [27] 김경태 외 5인(1998), “RCS 증상분석을 위한 ISAR 영상기법에 대한 연구,” 제2회 해상무기체계 발전 세미나, pp.379-384.
- [28] 이준호 2인(1998), “Shaping을 통한 RCS 감소방안 연구,” 제4회 해양과학기술 심포지움 논문집, pp.71-86.
- [29] Asoke K. Bhattacharyya, and D.L. Sengupta(1991), *Radar Cross Section Analysis & Control*, Artech House, pp.1-140.
- [30] Davis, *Davis Echomaster & Emergency*, URL://www.davisnet.com.
- [31] Landfall Navigation, *Firedell Blipper Reflector*, URL://www.landfallnavigation.com.
- [32] Landfall Navigation, *Mobri Cylindrical Radar Reflector*, URL://www.landfallnavigation.com.
- [33] North Sea Navigator, Inc, *Cyclops Models and Specifications*, URL://www.northseanavigator.com.
- [34] Tri-lens Inc., *The Tri-Lens Radar Reflector*, URL://www.tri-lens.com.
- [35] Radar Flag, *Radar Flag*, URL://www.ladarflag.com.

원고접수일 : 2002년 04월 30일
 원고채택일 : 2002년 05월 22일