

합성개구레이더용 전방향 반사기의 설계

장지성* · 양찬수**† · 오이석*

*홍익대학교 전자전기공학부, **한국해양연구원 해양위성연구단

Design of Omni-directional Reflector for Synthetic Aperture Radar

Geba Chang*, Chan-Su Yang**†, and Yisok Oh*

*Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

**Ocean Satellite Research Group, Korea Ocean Research and Development Institute

Abstract : Basic research is conducted to identify a target using corner reflectors which are commonly used in calibration of synthetic aperture radar (SAR) systems. At first, an omni-directional reflector is fabricated by combining four 15-cm rectangular trihedral corner reflectors. Then, its radar cross section (RCS) characteristics are measured at C-band (5.3 GHz) for vv-, hh-, hv-, and vh-polarizations at a range of horizontal angle, $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$. The measured RCS angular variation of the omni-directional reflector is much smaller for vv-polarization than other polarizations, and the difference between the maximum and minimum RCSs for vv-polarization is about 8 dB. Peak RCS values are shown at 0° (normal to plates) and 45° (direction of bore sight). It is shown that the measurements agree quite well with numerical simulation and theoretical computation results.

Key Words : Omni-directional reflector, radar cross section, rectangular trihedral corner reflector, synthetic aperture radar.

요약 : 본 연구에서는 합성개구레이더(synthetic aperture radar, SAR) 영상의 보정에 사용되고 있는 반사기(corner reflector, CR)를 이용하여 목표물의 식별과 인식을 위한 기초적인 연구를 실시하였다. 사각형 삼면 전파반사기를 기반으로 전방향(omni-directional) 반사기를 제작하였다. 여기서는 한 변의 길이가 15cm인 4-배열 사각형 삼면 전파반사기를 사용하여 C-밴드(주파수: 5.3 GHz)의 편파별(VV, HH, VH, HV) RCS(radar cross section)특성을 해석하였다. 전파반사기는 대칭형이므로 방위각 180도 범위에 대해서 레이더 산란단면적 패턴을 측정하였다. VV편파의 경우, 방위각에 따른 RCS값의 차이가 8dB정도로 다른 편파보다 전방향 특성이 더 좋은 것으로 확인되었고, 방위각이 0° (단면과 동일 방향)와 45° (이웃하는 단면들의 중앙) 일 때, 가장 높은 RCS값을 보였다. 또한, 실험에서 얻어진 RCS값을 수치 해석 시뮬레이션과 이론적 계산과 비교를 실시한 결과, 서로 잘 일치하는 것으로 나왔다.

2007년 8월 23일 접수 ; 2007년 9월 14일 수리.

† 교신저자: 양찬수(yangcs@kordi.re.kr)

1. 서론

근년, 국제적으로 관심이 증대하고 있는 해상보안 및 영해의 확보와 관리를 위하여 인공위성의 원격탐사를 이용하려는 노력이 계속되고 있다. 특히, 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)를 이용하여 선박을 모니터링 하고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 특정 선박을 식별하기 위해서는, 선박이 가지고 있는 레이더 산란면적(Radar cross section, RCS)를 이용하는 방법과 반사기를 통해 임의의 RCS를 부여하는 방법이 있다. 인위적인 반사기들에는 Luneberg 렌즈 반사기, 삼면 전파 반사기(trihedral corner reflector, TCR), 양면 전파 반사기(dihedral corner reflector, DCR), 능동 반사기(active transponder) 등이 있다 (Ruck *et al.*, 1970). Luneberg 렌즈 반사기는 전방향(omni-directional)에서 전파를 입사방향으로 균일하게 반사하는 장점이 있으나 가격이 비싸고, 무게가 많이 나가는 단점이 있다. 만일 편파와 입사각도가 결정된 경우에는 증폭기를 이용한 능동 전파 반사기를 이용하면 작고 가벼운 구조로도 큰 RCS 값을 얻을 수 있으나, 움직이는 선박의 경우에는 편파별 입사각도별로 여러 대를 설치해야 하는 단점이 있다. 전파 반사기는 Luneberg 렌즈 반사기에 비교해서 전방향 반사 특성이 좋지는 않지만 제작이 간편하고, 가격이 저렴하며, 설치가 용이한 장점이 있다. 또한, 능동 반사기에 비해서는 여러 주파수에서 사용가능하고, 제작과 설치가 간편한 장점이 있다. 본 연구에서는, 사각형 삼면 전파반사기(Square-plate Trihedral Corner Reflector, STCR) 네 개를 배열하여 연결한 형태의 4-배열 사각형 삼면 전파 반사기(Quadruple Square-plate Trihedral Corner Reflector, QSTCR)를 설계하여 전방향에서 전파를 입사방향으로 반사하도록 하였다(Levanon, 1988). 이 전파 반사기의 RCS패턴을 측정하였고, 이 측정값을 수치 해석 시뮬레이션과 이론적 계산으로 비교하였다. 이를 통해 선박의 위치 추적에 사용되기에 적절한 전파반사기를 제시하였다.

2. 측정 및 측정 결과

제안된 4-배열 사각형 삼면 전파 반사기는 Fig. 1과 같은 형태이며, θ 방향은 수직 방향 각도를 의미 하며, ϕ 는 수평방위각을 의미 한다.

측정에 사용된 C-밴드 (5.3 GHz) scatterometer는 Fig. 2와 같이 구성된다. 송수신기로 회로망 분석기를 사용하고, OMT(orthogonal mode transducer)가 부착된 안테나시스템을 갖고 있어서 VV-, VH-, HV-, VV-편파 특성을 측정할 수 있는 완전편파용 scatterometer이다(홍진영, 오이석, 2006). 회로망 분석기의 시간 영역 변환 기능을 사용하여 마치 무반향실에서의 측정처럼 전파 잡음을 제거할 수 있으며, 턴테이블을 이용하여 수평방위각 0°도부터 360°도까지 정확하게 RCS 패턴을 측정할 수 있다. 또한 회로망 분석기에 노트북을 GPIB 케이블로 연결하여 프로그래밍을 통해 자동으로 데이터를 수집할 수 있다. QSTCR의 중심축선(bore-sight),

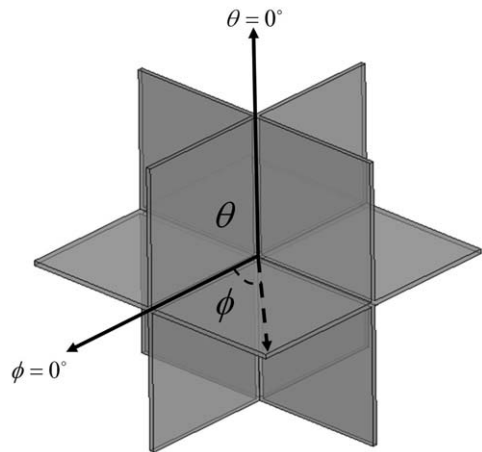


Fig. 1. A quadruple square-plate trihedral corner reflector (QSTCR).

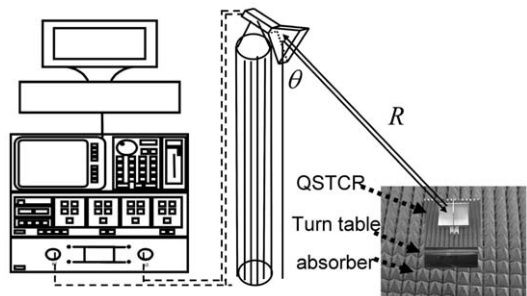


Fig. 2. Measurement System.

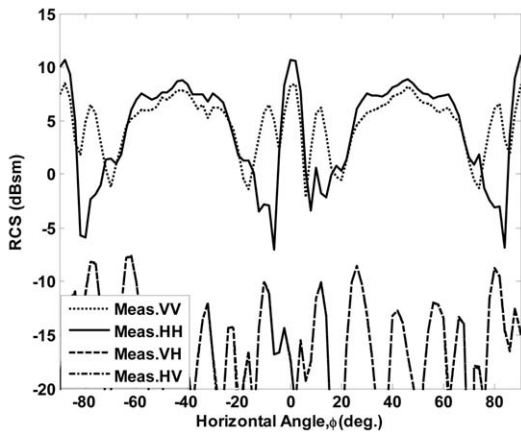


Fig. 3. Measured RCS values of the quadruple square-plate trihedral corner reflector.

$\theta=54.74^\circ$)를 안테나가 정확히 바라보게 하고, 방위각 (-90° 에서 90° 까지)방향으로 전파반사기의 RCS 패턴 측정된 결과를 분석한다. 방위각 90° 간격마다 같은 패턴이 반복되고, 이 때 안테나와 반사기까지의 거리는 2.7 m이다.

측정 결과는 Fig. 3과 같다. 반쪽 변의 길이가 0.15 m인 QSTCR의 RCS를 VV-, HH-, VH-와 HV-편파에서 측정된 결과를 보인다. 이론적으로는 교차 편파의 값이 없어야 하나, 실제 QSTCR에서는 변과 모서리의 영향으로 교차편파가 측정되며, 가역정리를 만족시키므로 측정된 VH-편파 RCS는 HV-편파의 값과 같다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 방위각 $\pm 45^\circ$ 주변에서는 RCS패턴이 STCR의 RCS 형태이며, 방위각 0° (정면) 주변에서는 DCR의 RCS 특성을 보인다(Ruck *et al.*, 1970). VV-편파는 비교적 각도별 RCS의 변화가 적어 최고와 최저값의 차이가 10 dB이내이지만, HH-편파의 경우에는 15 dB의 고저차를 보이는데, 이것은 $-20^\circ \leq \phi \leq 20^\circ$ 에서 DCR의 영향이 HH-편파에서 더 크게 나타나기 때문인 것으로 보인다.

3. 모멘트 법

수치해석 기법 중 하나인 모멘트 법(Method of moment, MoM)은 전기 적분 방정식(electric field integral equation: EFIE) 또는 자기 적분 방정식(magnetic field integral equation: MFIE)을 통해

계산된다. 일반적인 EFIE식은 다음과 같다(Balanis, 1989).

$$j\frac{\eta}{\beta} \left[\beta \iint_S J_s(r') G(r_s, r') ds' + \nabla \iint_S \nabla' \cdot J_s(r') G(r_s, r') ds' \right] = E_i^i(r=r_s) \quad (1)$$

여기서 $G(r_s, r')$ 은 그린함수를 나타내고, ∇ 과 ∇' 은 각각 관측과 전원위치에서의 스칼라의 기울기(gradient)를 의미 한다. 식(1)에서 표면 전류(J_s)를 구한 후 RCS를 계산하게 된다. 모멘트 법 계산시 전파 QSTCR의 두께는 고려하지 않았으며, 2700개의 미소 면적으로 나눈 후 각각에서 계산 하였다. 모멘트 법 수치해석 계산시 가장 중요한 대각행렬 요소인 selfcell을 적분 할 때에는 각 selfcell의 중심부근에서 작은 원을 제거하였다. 이때에 작은 원의 반지름이 $\lambda/400$ 이하에서 적분 값이 수렴되는 것을 확인 한 후 원을 제거하였으며, 가우시안 수치 적분법(Gaussian Quadrature)을 사용하였다 (Burden and Faires, 2005). Fig. 4는 HH편파에서 모멘트 법으로 계산한 QSTCR의 HH편파 RCS값과 측정된 HH편파의 RCS값을 비교한 그림이다. 주요 해석 영역부근인 방위각 $\pm 45^\circ$ 주변에서는 비교 값들 사이에 2 dB이하의 오차를 보였으며, 방위각 0° 에서는 3dB이하의 차이를 보였다. Fig. 5는 모멘트 법으로 계산한 QSTCR의 VV편파와 측정된 VV편파의 RCS값을 비교한 그림이다. 주요 해석 영역부근인 방위각 $\pm 45^\circ$ 주변에서는 비교 값들 사이에 2 dB이하의 오차를 보였으며, 방위각 0° 에서는 1dB이하의 차이를 보였다.

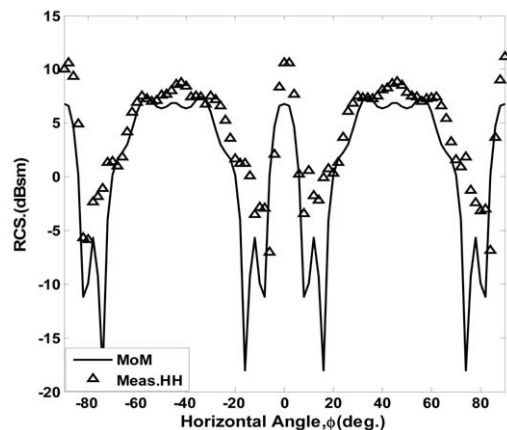


Fig. 4. Comparison between the MoM simulation and measurement for the HH-polarized RCS.

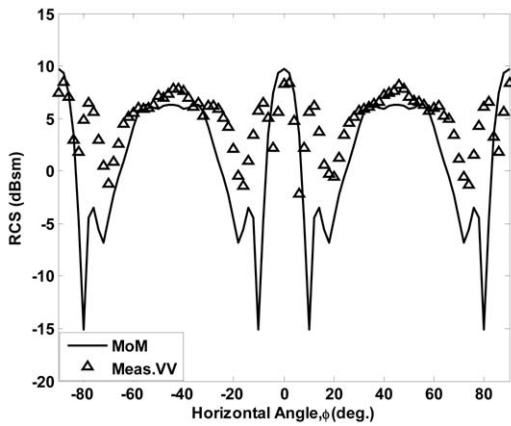


Fig. 5. Comparison between the MoM simulation and measurement for the VV-polarized RCS.

4. 이론식 및 시뮬레이션

전파반사기에 대해서는 많은 연구를 통하여 측정 및 이론식들이 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 QSTCR에 대한 RCS를 정확하게 계산하는 이론식은 얻을 수 없으므로, 방위각 0°와 방위각 ±90° 근방의 각도에서는 양면 전파 반사기(DCR)의 특성을 적용하고, 이 외의 각도에서는 사각형 삼면 전파반사기(STCR)의 특성을 적용하여 이론식을 제안 하였다. 만약 $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 범위를 고려한다면, $-90^\circ \leq \phi \leq -80^\circ$, $-10^\circ \leq \phi \leq 10^\circ$, $80^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 의 범위는 DCR의 RCS 계산식인 식(2)을 사용하고, 그 밖의 각도에서는 STCR의 RCS 계산식인 식(3)를 사용하였다(Ruck *et al.*, 1970).

$$\sigma_{DCR} = \frac{16\pi l^4 \sin^4\left(\frac{\pi}{4} + 35.26 \frac{\pi}{180}\right)}{\lambda_0^2} \left[\frac{\sin(\beta l \sin(\phi))}{\beta l \sin(\phi)} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{STCR} = \frac{4\pi l^4}{\lambda_0^2} \cos^2\left(54.74 \frac{\pi}{180}\right) (4 - \cos(\phi))^2 \quad (3)$$

Fig. 6은 STCR과 DCR의 이론식 RCS를 보여주고 있으며, STCR과 DCR 두 그래프를 더하면 QSTCR의 이론적 RCS를 얻어 낼 수 있다.

더욱 정확한 비교를 위해 High Frequency Structure Simulator (HFSS) 상용 소프트웨어를 사용하여 QSTCR의 RCS 특성을 분석 하였다. HFSS 를 사용하여 단일 DCR과 단일 STCR의 특성을 분석하여 두 특성의 우세 영역을 구분하였고, 이를 통해 이론식을 보

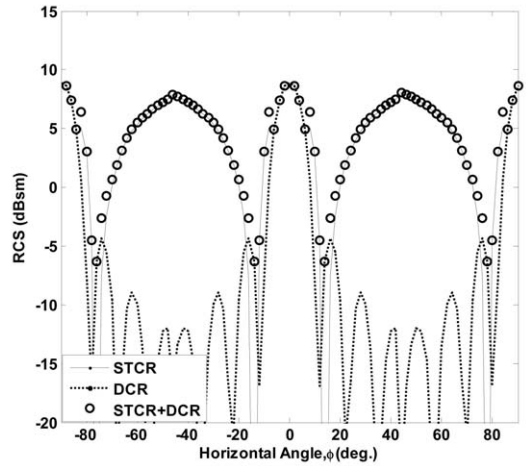


Fig. 6. Theoretical RCS values of STCR and DCR.

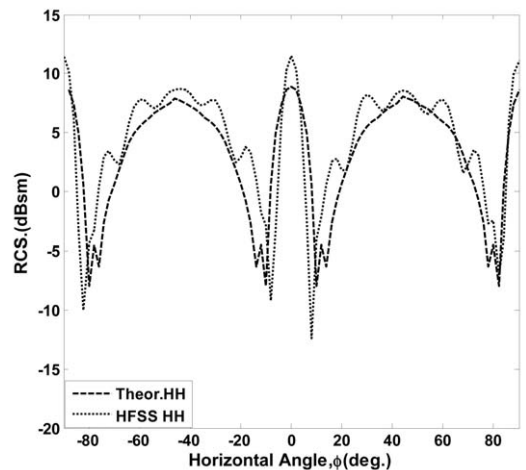


Fig. 7. Comparison between the theoretical values and HFSS simulation for the HH-polarized RCS.

완 하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 HH편파와 VV편파에서의 RCS에 대한 이론 값과 HFSS 계산 값을 비교한 그림이다. 방위각 ±12° 부근의 부돌출부들은 QSTCR의 세로 방향의 모서리에 의해 DCR특성이 우세하게 나타나는 영역에서 STCR의 영향이 함께 나타난 것이다. 모서리의 두께가 작아진다면 부돌출부의 크기가 작아지며, 폭도 좁아지는 것을 HFSS 계산에서 확인하였다. 특히, HH편파에 비해 VV편파에서 부돌출부가 크게 나타나는데 두께가 작아지면 HH편파와 VV편파의 부돌출부 차이는 작아진다. 그러나 QSTCR의 구조적 특성에 의해서 VV편파의 부돌출부가 HH편파보다 항상 크게 나타난다.

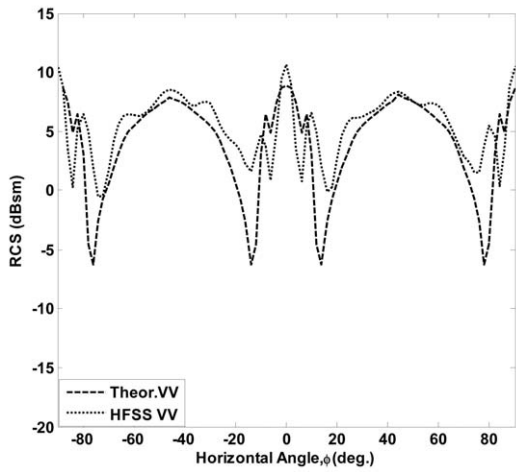


Fig. 8. Comparison between the theoretical values and HFSS simulation for the VV-polarized RCS.

5. RCS값 비교 및 분석

앞에서 살펴 본 측정값, 모멘트 법 수치 계산 값, 이론 값 그리고 HFSS 계산 값을 비교 하여 QSTCR의 RCS 패턴 특성을 정확히 분석 하게 된다. Fig. 9는 HH 편파에서 측정값과 비교 값들을 보여 준다. 주요 해석 영역 부근 인 방위각 $\pm 45^\circ$ 주변 에서는 비교 값들 사이에 2 dB이하의 오차를 보였으며, 방위각 0° 에서는 3dB 이하의 차이를 보였다. Fig. 10은 VV편파에서 측정값과 비교 값들을 보여 준다. 주요 해석 영역 부근 인 방위각 $\pm 45^\circ$ 주변에서는 비교 값들 사이에 2 dB이하의 오차를

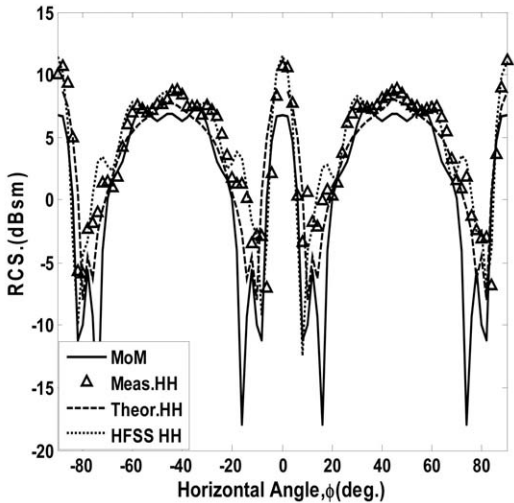


Fig. 9. Comparison of RCS values for the HH-polarized RCS.

보였으며, 방위각 0° 에서는 1dB이하의 차이를 보였다. 방위각 $\pm 12^\circ$ 부근의 부들출부 에서 HH편파와 VV편파의 차이가 나타났으며, 이 부근에서는 두께가 고려된 HFSS의 결과값이 다른 비교 값들과 비교해서 측정값과 잘 맞는 것을 확인 하였다. 전방향 반사 특성의 관점에서 볼 때, $-20^\circ \le \phi \le 20^\circ$ 구간에서 VV편파가 HH편파보다 더 좋은 것을 볼 수 있다. 즉, 선박 위치 추적에 QSTCR를 사용한다면 VV편파가 HH편파보다 더 유용할 것으로 보인다.

이론식의 경우 계산시간이 상당히 짧으면서 측정값과 오차가 적으므로 유용하게 사용 되어질수 있다. 이론식에 사용된 QSTCR의 중심축선 ($\theta=54.74^\circ, \phi=45^\circ$)에서의 RCS는 식(4)와 같다(Ruck *et al.*, 1970).

$$\sigma_{STCR} = \frac{12\pi l^4}{\lambda_0^2} (m^2) \quad (4)$$

이 식을 이용하면 주파수별 반사기 크기별로 중심축선에서의 RCS를 계산할 수 있고, 수평각에 따른 RCS 패턴은 Fig. 9와 Fig. 10에서 보인 패턴과 유사할 것이다. Fig. 11은 L-, C-, X-밴드에서의 크기별 계산된 RCS 값을 보여 준다. 반사기의 크기가 0.15 m일 때에 C-밴드(5.3 GHz)에서의 RCS 값은 대략 7.8 dBsm이며, 이 값은 Fig. 9와 Fig. 10의 방위각 $\pm 45^\circ$ 일 때의 값과 같다. 예를 들어, 반사기의 크기가 1 m일 경우에는 RCS값이 40.7 dBsm으로 크게 증가한다. 따라서 RCS가 작은 선박의 경우에는 QSTCR를 설치하여 선박 탐지에 도움을 줄 수 있게 된다. 선박은 크기, 재질과 구조에 따라 판이하게 다른 RCS 값을 주며, 선박에서의 전파 반사는

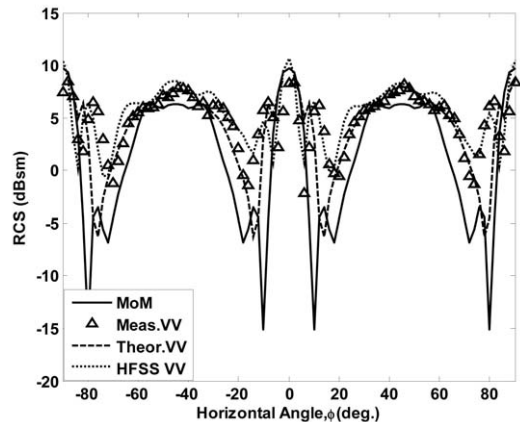


Fig. 10. Comparison of RCS values for the VV-polarized RCS.

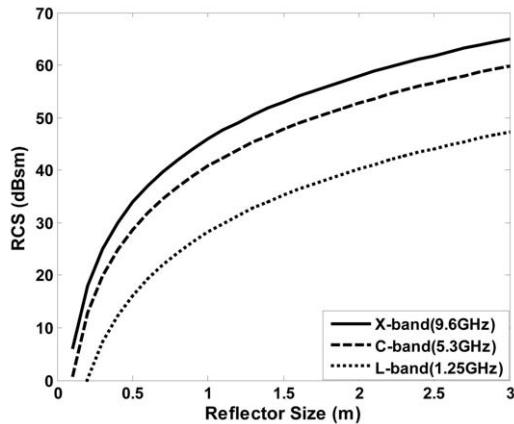


Fig. 11. RCS values of the reflector each sizes on L-, C-, X-band.

금속면이 양면(dihedral) 구조를 가질 경우 정면에서 크게 작용하며, 선박과 바다표면이 이루는 양면 구조도 큰 반사를 일으킬 수 있을 것이다. 이 경우에는 풍향과 풍속에 따른 바다표면 거칠기의 영향을 받을 것으로 보인다.

6. 결론

위성 SAR 영상 분석을 이용하여 선박의 위치를 추적할 필요에 의해 제안된 견본(prototype)의 4-배열 사각형 삼면 전파 반사기(Quadruple Square-plate Trihedral Corner Reflector, QSTCR)를 제작 하였고, 이 반사기의 RCS 패턴을 C-밴드 (5.3 GHz) scatterometer 시스템으로 측정하였다. 또한, 측정값을 모멘트 법과 이론식 및 HFSS 시뮬레이션값과 비교하여 적절성을 분석해 보았다. 주요 해석 부근인 방위각 $\pm 45^\circ$ 에서 측정값과 비교값의 차이는 HH-편파와 VV-편파 모두에서 2 dB이하

를 보였으며, 방위각 0° 에서는 비교 값과 HH-편파는 3 dB이하, VV-편파는 1dB이하의 차이를 보였다. 본 연구에서 측정하고 계산한 0.15 m의 견본 반사기의 RCS는 중심축선에서 7.8 dBsm이지만 이 크기가 1 m가 되면 40.7 dBsm으로 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 수직방향 각도 별로 방위각 방향 RCS패턴을 연구하여 2차원 RCS 특성을 분석 한다면 보다 정확한 RCS 해석 및 응용을 할 수 있으므로 이에 대한 연구가 더 필요하다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 기본연구사업 “하구역의 관리 및 기능회복 기술 개발”의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 홍진영, 오이석, 2006. 식물층에서의 편파별 후방 산란 측정과 산란 모델의 비교, 한국전자과학회논문지, 17호: 804-810.
- Balanis C. A., 1989. Advanced Engineering Electromagnetic, John Wiley.
- Burden R. L. and J. D. Faires, 2005, Numerical Analysis, Thomson.
- Levanon N., 1988, Radar Principles, John Wiley.
- Ruck G. T., D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, 1970, Radar Cross Section Handbook vol. 2, Plenum Press.