실측자료 기반 합정 RCS 측정 및 산란점 분석 연구

정희인^{*1)} · 박상홍²⁾ · 최재호³⁾ · 김경태³⁾

¹⁾ 국방과학연구소 해양기술연구원

²⁾ 부경대학교 전자공학과

³⁾ 포항공과대학교 전자전기공학과

A Study on RCS and Scattering Point Analysis Based on Measured Data for Maritime Ship

Hoi-In Jung^{*1)} · Sang-Hong Park²⁾ · Jae-Ho Choi³⁾ · Kyung-Tae Kim³⁾

¹⁾ Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Department of Electronic Engineering, Pukyong National Univ., Korea

³⁾ Department of Electrical Engineering, POSTECH, Korea

(Received 6 February 2020 / Revised 13 March 2020 / Accepted 20 March 2020)

Abstract

In order to set up radar cross section(RCS) reduction factors for a target, the scattering point position of the target should be identified through inverse synthetic aperture radar(ISAR) image analysis. For this purpose, ISAR image focusing is important. Maritime ship is non-linear maneuvering in the sea, however, which blur the ISAR image. To solve this problem, translational and rotational motion compensation are essential to form focused ISAR image. In this paper, hourglass and ISAR image analysis are performed on the collected data in the sea instead of using the prediction software tool, which takes much time and cost to make computer-aided design(CAD) model of the ship.

Key Words : Radar Cross Section(레이더반사단면적), Scatterer(산란점), High Resolution Range Profile(고해상도 거리측면도), Hourglass(모래시계), Inverse Synthetic Aperture Radar(역합성개구레이더)

1. 서론

레이더를 이용한 표적추적 방식의 대유도탄전에서 표적탐지거리와 밀접하게 관련되어있는 레이더반사단

면적(Radar Cross Section, RCS)의 신호수준은 특히 해상전장환경에서 플랫폼의 생존성과 밀접하게 관련되어 있다. 신조함정의 경우, 개념설계 단계에서 RCS 기준치(성능지향수준)를 설정하고 디지털도면(Computer-Aided Design, CAD) 형상 정보를 이용하여 기준치의 만족여부를 RCS 해석 소프트웨어를 통해 확인한다. 해석값이 기준치를 초과할 경우 ISAR(Inverse Synthetic

* Corresponding author, E-mail: hijung@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

Aperture Radar) 영상해석을 통해 함정내 산란점의 위치와 구조를 식별한 후 작전적으로 허용가능한 범위에서 RCS 저감구조로 개선방안을 마련하여 함정 설계에 반영한다. 함정의 상세설계와 건조과정 동안, CAD 도면과 RCS 해석 소프트웨어를 활용하여 기준치 만족여부에 대한 RCS의 신호수준은 지속적으로 관리된다. 함정 건조 후 해군에 인도 전에 RCS 기준치는 함정 인수시험 항목으로 설정되어 해상에서 함정 기동을 통하여 RCS의 신호수준을 측정하고 기준치에 대한 만족여부를 평가한다. 만일 RCS 기준치를 초과할 경우 함정은 인수되지 못하고 RCS 저감개선 과정을 거쳐 기준치 만족여부를 재 평가한다.

현재 함정 RCS 측정은 운용함정에 대한 RCS 신호수준을 측정하여 전술적으로 활용할 수 있도록 방위별 RCS 패턴을 분석한다. 함정의 RCS 방위별 분석결과, 특정 방위의 RCS가 높게 나타날 경우 그 방향에서 산란점 위치식별을 통한 RCS 저감대책 마련이 필요하다. 산란점 위치식별 방법으로 3차원 레이저 정밀스캔작업을 통한 CAD 모델을 제작하고 RCS 해석 소프트웨어를 이용하여 산란점 위치를 식별할 수 있다. 이 방법은 CAD 제작을 위해 많은 시간과 비용이 소요된다.

본 논문에서는 CAD 제작에 소요되는 시간과 비용을 절약하고 보다 더 실질적인 산란점 식별을 위해 해상환경에서 획득한 측정데이터에 대해 hourglass 및 ISAR 영상분석을 수행하였다. 또한, RCS 해석 소프트웨어를 이용하여 hourglass 및 ISAR 영상분석을 수행하고 실측데이터로부터 얻어진 결과와 비교 및 분석을 수행하였다. 산란점이 식별된 함정내 구조에 대하여 작전적으로나 비용적으로 허용하는 범위에서 RCS 저감요소를 마련하여 구조개선에 반영할 수 있다.

2장에서 ISAR 처리기법을 소개하고 3장에서 실측데이터 분석결과와 RCS 해석 소프트웨어의 분석결과를 비교하였고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 함정 산란점 측정 및 분석 방안

2.1 ISAR 측정 및 분석 절차

함정 RCS 분석을 통하여 아군 함정이 적 레이더에 쉽게 식별되지 않도록 RCS 저감설계 방안을 마련할 수 있다. 함정의 산란점 특성 분석을 위하여 표적의 ISAR 영상생성에 사용되는 대표적인 파형의 종류로

chirp pulse 및 SFW(Stepped-Frequency Waveform)가 있다^[1]. SFW의 경우 Fig. 1과 같이 총 N개의 펄스를 일정한 주파수 간격으로 증가시키며 신호를 송신한 후 표적으로부터 반사되어 수신한 N개 신호의 I/Q 데이터에 대해 푸리에 역변환을 수행하면 고해상도 거리측면도(High Resolution Range Profile, HRRP)를 얻는다. SFW파형은 chirp 신호에 비해 비교적 저비용으로 하드웨어를 구성하여 운용이 가능하지만 N개의 서로 다른 주파수로 이루어진 펄스 신호들을 송수신하여 하나의 burst를 형성한 후 HRRP를 획득하므로 이 과정에서 표적의 이동 또는 요동이 발생하면 HRRP 형성시 왜곡이 발생한다. 따라서 HRRP를 형성하는 동안 동일한 BW(Bandwidth)와 관측시간동안 펄스간격이 짧을수록 표적의 요동변화가 상대적으로 줄어들어 HRRP의 왜곡을 최소화 할 수 있다.

Frequency

Fig. 1. SFW signal in time-frequency plane

ISAR 영상형성을 위해 Fig. 2와 같이 회전하는 표적상의 산란원 $P(x_0, y_0)$ 의 레이더반사신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 2. Geometry for a moving target with respect to radar

$$E^s(k, \theta) = A_0 \exp(-j2\vec{k} \cdot \vec{r}(t)) \quad (1)$$

$$\cong A_0 \exp\{-j2\vec{k} \cdot (R(t) + x_0 \cos \theta(t) + y_0 \sin \theta(t))\}$$

여기서, $\vec{k}$ 는 파수(wavenumber), A_0 는 산란점 $P(x_0, y_0)$

의 레이더 반사신호 크기를 말한다.

회전기동시 관측각도의 변화량이 작고 레이더가 선 RLOS(Radar Line Of Sight) 방향으로 표적의 병진 운동(Translational motion)에 대해 거리보상을 수행하면 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E^s(k, \theta) = A_o \exp(-j2kx_0) \exp(-j2k\theta y_0) \\ = A_o \exp\left\{-j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x_0\right\} \exp\left\{-j2\pi\left(\frac{k\theta}{\pi}\right)y_0\right\} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\frac{2f}{c}$ 와 x , $\frac{k\theta}{\pi}$ 와 y 는 상호 푸리에 관계를 이루므로 2차원 푸리에 역변환(IFT)을 수행하면 다음과 같이 표적의 산란점 분포를 알 수 있는 2차원 ISAR 영상을 획득할 수 있다^[2].

$$F_2^{-1}\{E^s(k, \theta)\} \\ = A_o F_1^{-1}\left\{\exp(-j2\pi(\frac{2f}{c})x_0)\right\} F_1^{-1}\left\{\exp(-j2\pi(\frac{k\theta}{\pi})y_0)\right\} \\ E^s(x, y) = A_o \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x_0\right\} \exp\left\{j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x_0\right\} d\left(\frac{2f}{c}\right) \right] \\ \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-j2\pi\left(\frac{k\theta}{\pi}\right)y_0\right\} \exp\left\{j2\pi\left(\frac{k\theta}{\pi}\right)y_0\right\} d\left(\frac{k\theta}{\pi}\right) \right] \\ = A_o \delta(x - x_0)(y - y_0) \quad (3)$$

여기서, F^{-1} 은 푸리에 역변환을 말한다.

Fig. 3. Procedure for ISAR image formation

실측데이터를 활용한 ISAR 영상형성과정을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 표준표적(Fig. 8 참고)을 측정하여 레이더 보정값을 산출한다. RCS 교정은 레이더방정식에서 현실적으로 측정이 어렵거나 불가능한 개별 변수에 대한 직접적인 측정 및 계산과정을 생략하고 RCS가 알려진 정교한 표적을 사용하여 레이더 시스템 변수를 일괄 보정하는 과정이다. 보정값 산출 후 Fig. 1과 같이 SFW 신호에 대한 합정의 레이더 반사신호를 수집하고 수집된 신호에 대하여 푸리에 역변환하여 HRRP를 얻는다.

해상에서 기동하는 표적의 레이더 반사신호에는 수집된 거리게이트내에 표적신호 뿐만아니라 해상상태에 따른 해면 클러터 성분도 존재하며 이는 합정의 RCS 계산과 ISAR 영상형성의 오차요소로 작용한다. 일반적으로 클러터는 표적에 비하여 시간에 따른 변화가 적어 저주파수 특성을 가진다. 해당 특성을 이용하여 본 논문에서는 윈도우 평균 차분 기법(Window Mean Subtraction, WMS)을 적용하여 클러터성분을 제거하였다. 식 (4)는 WMS 기법을 나타내며 $s_t(R)$ 는 HRRP 신호, W 는 윈도우 크기를 나타낸다.

$$q_t(R) = s_t(R) - \frac{1}{W} \sum_{l=t-\lfloor W/2 \rfloor}^{l=t+\lfloor W/2 \rfloor} s_l(R) \quad (4)$$

Fig. 4. HRRP (a) before (b) after WMA

Fig. 4는 WMA 전, 후의 HRRP를 나타내며 클러터 성분이 어느정도 제거되었음을 보여준다. 클러터 제거 후 표준표적을 통해 구한 레이더 보정값과 합정의 자세측정장비로부터 획득한 표적의 위치자료를 활용해 실효적의 RCS를 구한다. ISAR 영상형성을 위해서는 표적의 병진운동성분이 보상되고 표적의 회전성분이 선형적으로 변환되어야 한다. ISAR 영상의 초점이

호려지는 원인은 cross-range에서 표적의 시간에 따른 비선형적 회전과 down range에서 표적의 이동변화이다. 영상의 초점형성을 위해서는 표적 산란점의 도플러변이가 cross-range의 해상도보다 작아야되고 표적의 병진이동 변화가 down-range 해상도보다 작아지도록 병진운동보상(Translational Motion Compensation, TMC)과 회전운동보상(Rotational Motion Compensation, RMC)이 이루어져야 한다.

2.2 병진이동 보상

병진이동보상(Coarse TMC)을 위한 거리정렬방법으로 본 논문에서는 엔트로피 최소화 방식을 적용하였다^[3]. 엔트로피 최소화 방식은 ISAR 영상형성의 전역 지표로 사용되는 average range profile(ARP)의 엔트로피를 최소화하도록 HRRP를 정렬시키는 방법이다.

먼저 down range 인덱스 n , cross range 인덱스 m 에 대해 $p(n, m)$ 를 레이더수신신호의 HRRP의 크기라고 할 때, ARP는 다음과 같이 정의한다.

$$p_{ave}(n, \vec{\Delta}_n) = \sum_{m=0}^{M-1} p(n + \Delta_n(m), m) \quad (5)$$

여기서 $\vec{\Delta}_n = [\Delta_n(0), \Delta_n(1), \dots, \Delta_n(M-1)]$, $\Delta_n(m)$ 는 m 번째 HRRP에 대해 이동해야할 range bin 개수, M 은 총 burst 개수이다. ARP의 엔트로피는 다음과 같이 정의한다.

$$E(\vec{\Delta}_n) = - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{p_{ave}(n, \vec{\Delta}_n)}{S} \cdot \ln \frac{p_{ave}(n, \vec{\Delta}_n)}{S} \quad (6)$$

여기서 $S = \sum_{n=0}^{N-1} p_{ave}(n, \vec{\Delta}_n)$, N 은 총 range bin 수이다.

ARP의 엔트로피를 최소화하는 방향으로 이동량을 다음 조건에 맞도록 연속적으로 이동시켜 최적의 $\Delta_n(m)$ 를 찾는다.

$$\Delta_r^{(l)}(m) = \Delta_r^{(l-1)}(m) + \arg \left\{ \max_r \left[p(r + \Delta_r^{(l-1)}(m), m) \otimes \tilde{p}_{ave}^{(l-1)}(-r) \right] \right\} \quad (7)$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1$$

여기서 $\tilde{p}_{ave}(r) = \ln(p_{ave}(r))$ 이고, l 은 엔트로피 업데이트 연산을 위한 반복 계산수이다.

Fig. 5. Flow chart of range alignment

거리정렬을 위한 엔트로피 최소화 계산과정은 Fig. 5와 같으며 계산을 반복하다가 엔트로피가 더 이상 감소하지 않을 때 거리정렬이 최적화되었다고 볼 수 있다.

2.3 회전이동 보상

ISAR 2차원 영상형성은 동일 산란점에 대하여 down-range와 cross-range 방향으로 표적의 반사신호를 맵핑하는 과정으로 레이더에 대한 표적의 관측각도 변화 즉 회전기동이 필수적이다. 여기서 문제는 표적이 비선형적으로 회전운동이 발생할 경우 cross-range 방향에서 동일한 산란점에 대하여 HRRP간 서로 다른 도플러변이가 발생하고 이에 따른 위상오차가 발생한다. 회전운동보상(RMC)은 병진운동과 결합된 비선형적 회전기동에 따라 발생한 HRRP간의 위상오차를 추정하여 보상하는 과정이다. 본 논문에서는 표적의 회전성분을 속도와 가속도 성분으로 모델링하고 다항함수로 근사화하여 위상성분을 추정하는 parametric 방식을 적용하였다. parametric 기법은 m 번째 HRRP의 각 산란점의 위상성분에 대한 속도 및 가속도 성분이 PRI (Pulse Repetition Interval)에 따라 일정하게 변화함에 기인하여 속도와 가속도 성분을 추정한 후 위상보정을 수행한다. 본 논문에서는 대표적인 parametric 기법으로 PPP(Prominent Point Processing)^[4] 기법을 적용하였다.

PPP 기법은 식 (8)과 같이 거리정렬 후의 레이더 표적 반사신호의 위상성분을 속도(v)와 가속도(v') 성분으로 나타내고 표적내에 여러 산란원 중 독립적인 산란원을 선별하여 위상성분을 다항식으로 모델링한다^[5].

$$s(n, t) = \sum_{l=1}^{N_s} A_l \exp \left(-j \frac{4\pi f_0}{c} \left(v_l t + \frac{1}{2} v'_l t^2 \right) \right) \quad (8)$$

여기서 n 은 range bin, t 는 slow time 인덱스, N_s 는 range bin내 산란점 개수를 말한다. 표적내 독립적인 산란원을 선별하기 위하여 식 (9)와 같이 크기-정규화 (Amplitude Normalized Variance, ANV) 분산을 사용한다^[6,7].

$$\sigma_n = 1 - \frac{E(|s(n,t)|)^2}{E(|s(n,t)|^2)} \quad (9)$$

위식에서 $E(\cdot)$ 는 slow time t 에 대한 평균연산자를 의미한다. σ_n 의 값이 작을수록 해당 range bin에서 산란원이 하나만 존재할 확률이 높다^[8]. 따라서 모든 range bin에서 식 (9)를 이용하여 크기-정규화 분산을 구한 뒤, 가장 작은 값을 갖는 range bin의 위치 n_0 을 선택한다. 선택된 위치에서 slow-time에 따른 레이더 신호의 위상을 식 (8)의 형태로 커브피팅하여 1, 2차 다항식의 계수를 추정할 수 있다. 첫 번째 산란원에 대해 추정된 위상으로 HRRP의 위상에 대해 보정해준 다음, 두 번째 산란원을 이용하여 동일하게 다항식으로 모델링 한 후, 모델링된 위상값의 첫 번째와 마지막값을 이용하여 위상값을 선형화한다. 선형화된 위상값에 대하여 역함수형태로 slow-time을 추정하고 추정된 slow-time으로 HRRP를 선형 보간한다. 보간된 위상값으로 관측각도의 변화율이 일정한 데이터를 얻을 수 있다. Fig. 6은 다항식 모델로 추정된 위상값을 선형 보간하는 절차를 나타낸다^[7].

Fig. 6. Flow chart of RMC

2.4 잔여 병진이동 보상

병진운동보상(Coarse TMC)과 회전운동보상(RMC) 수행 후, HRRP의 각 range bin 내에 병진운동 결과 남

아있는 잔여 위상오차를 한번 더 보정하는 과정을 거치는데 이를 fine TMC라 한다. Fine TMC는 병진운동에 따른 잔여 도플러 위상오차를 제거하여 산란점의 도플러 주파수를 일정하게 만들어준다. 본 논문에서는 Coarse TMC 과정에서 사용된 기법과 비슷한 MEPA (Minimum Entropy Phase Adjustment) 기법을 통해 Fine TMC를 수행하였다^[9].

MEPA 기법은 2차원 엔트로피의 최소화를 만족하는 위상값을 추정하고 그 값을 HRRP에 보정하는 방법이다. 먼저, 거리정렬 및 위상이 보정된 ISAR 영상을 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ISAR(l,n) = \sum_{m=1}^M s(t_m,n) \exp(j\varphi(t_m)) \exp(-j\frac{2\pi}{M}lt_m) \quad (12)$$

여기서 m, n ,과 l 은 각각 slow-time, range bin과 도플러 주파수 인덱스이다. $s(t_m,n)$ 는 HRRP, $\varphi(t_m)$ 은 보정된 위상값이다. HRRP에 보정된 위상을 곱하고 푸리에 변환을 수행하면 최종 ISAR 영상이 생성된다. 우선, 위상값 $\varphi(t_m)$ 을 추정하기 위해 2차원 엔트로피값을 식 (13)과 같이 정의한다.

$$E_{2D} = \sum_{l=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{|ISAR(l,n)|^2}{S} \ln \left(\frac{S}{|ISAR(l,n)|^2} \right) \quad (13)$$

$$S = \sum_{l=1}^M \sum_{n=1}^N |ISAR(l,n)|^2$$

엔트로피는 분포함수에서 평탄도를 표현하는데 사용되며, 식 (13)과 같은 경우, 엔트로피가 낮을수록 ISAR 영상의 초점이 뚜렷해진다. 식 (13)을 최소화하는 $\varphi(t_m)$ 에 대해 fix-point iteration을 수행하고 $\varphi(t_m)$ 의 iteration 전, 후의 값 변화가 임의의 임계값 이하로 수렴되면 엔트로피가 전역적으로 최소화되었다고 보고 그때의 $\varphi(t_m)$ 에 대해 식 (12)를 계산하여 최종 ISAR 영상을 얻는다.

3. 해석 및 측정 결과

3.1 측정자료 수집

합성 산란점 측정에 사용된 국과연 시험선인 청해호의 형상 및 대략적 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Test ship Cheong-Hae Ho

시험선(청해호)

<ul style="list-style-type: none"> • 단동선형(전장×폭×흘수 : 65.4×12.4×4.5 m) • 총톤수 : 1,299톤(배수톤수: 1,930톤) • 선체 재질 : 강선

청해호는 단동선형으로 선체 재질은 강선이며 선미 갑판에 다양한 무기체계의 시험지원을 위해 여러 구조물이 있고 함교 위에 위성안테나와 마스트상에 항해레이더가 위치하고 연돌이 돌출되어 있어 다양한 레이더 반사구조를 가지고 있다.

Table 2는 측정에 사용한 레이더 장비 및 레이더 변수를 나타낸다.

Table 2. RCS measurement radar and test parameters

RCS 측정장비

Hourglass 측정	SFW 주파수 : 15.0~15.299 GHz
	펄스반복률(PRF) / 편파 : 5 kHz / VV
	측정거리 : 9.0 km
ISAR 측정	SFW 주파수 : 12.3~12.599 GHz
	펄스반복률(PRF) / 편파 : 20 kHz / VV
	측정거리 : 6.0 km

Hourglass 측정의 경우 360° 선회기동에 대해 HRRP 영상분석이 이루어져야 하므로 선회반경에 따라 비교적 긴시간을 측정해야하고 주변 항해 선박의 방해로 덜 받는 조건을 고려하여 측정거리를 9.0 km, 펄스반

복률(Pulse Repetition Frequency, PRF)을 5 kHz로 설정하였다. ISAR 측정은 SFW파형에 대해 PRF가 클수록 영상의 초점형성이 유리하여 PRF를 20 kHz로 설정하였고 해당 PRI의 측정거리를 고려해서 비교적 근거리에서 측정하였다. Fig. 7은 hourglass 및 ISAR 측정을 위한 함 기동궤적을 나타낸다.

Fig. 7. Ship trajectory (a) hourglass, (b) ISAR

Hourglass 및 ISAR 측정을 위해 먼저 Fig. 1의 첫 번째 단계인 표준표적의 RCS 측정을 수행하여 보정값을 산출한다. Fig. 8은 현재 가용한 표준표적의 종류를 나타낸다. 헬리কা이트에 연결된 알루미늄 구의 경우 배경반사 측면에서 유리하지만 기상(풍속)의 영향을 많이 받아 운용에 애로사항이 있어 본 논문에서는 코너반사기를 이용하여 RCS 교정을 수행하였다.

Fig. 8. RCS calibration target

3.2 RCS 해석 소프트웨어

실측데이터에 대한 함정의 산란점 분석결과와 비교를 위하여 현재 신조함정 RCS 설계분야에 활발하게

사용되고 있는 RCS 해석 소프트웨어인 코너스톤 (ConerStone™)을 이용하여 해석을 수행하였다. 코너스톤은 고주파 해석기법의 하나인 SBR(Shooting and Bouncing Rays) 기법을 사용하는데 SBR기법은 전파입사 방향으로 균일한 면적을 갖는 광선을 투영하고 표적의 격자 면에 각 광선의 충돌여부를 확인한 후 충돌시에 거울반사(Specular) 방향으로 광선을 진행한다. 충돌격자면이 존재하지 않을 때까지 광선추적을 진행하고 광선추적을 통해 전파경로와 각 반사면의 특성을 분석하여 산란되는 전자기파를 구한다.

해석을 위한 RCS 해석 변수를 Table 3에 나타내었고 시험선의 CAD모델과 격자(Mesh) 모델을 Fig. 9에 나타내었다.

Table 3. Prediction parameters for Cheong-Hae Ho

해석파라미터	값
크기 (전장×폭×높이)	65.4×12.4×21.6 m
주파수범위 (밴드폭)	12.3~12.599 GHz / 300 MHz
해석격자개수	816,490개
해석기법	SBR
다중반사 횟수	3회
HourGlass 해석각도	방위각범위/간격 : 0°~360°/0.5°
ISAR 해석각도	방위각범위/간격 : 79.5°~80.5°/0.001°

Fig. 9. CAD(a), mesh(b) model for Cheong-Hae Ho

3.3 측정 및 해석 결과 비교

시험선의 측정데이터에 대하여 레이더 반사신호와 HRRP를 누적하여 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10. Target reflection (a) pulse and (b) HRRP

Hourglass 영상은 레이더 입사각 0°~360° 전방위에 대해 HRRP를 전시한 그림으로 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11. Hourglass - measurement

Hourglass 세부분석을 위하여 입사각 180°영역에 대해 함정 형상을 투영하면 함정구조물의 레이더 산란점 위치를 추정할 수 있다. Fig. 12에서 시험선의 함교와 연돌 그리고 마스트부분에 레이더신호에 대해 강한 산란원이 존재함을 확인할 수 있다.

Fig. 12. Ship projection on hourglass

Fig. 13은 코너스톤으로 해석한 hourglass 영상으로 측정값과 비슷한 위치에 대해 산란원이 존재함을 확인하였다.

Fig. 13. Hourglass – prediction

Fig. 14는 시험선에 대하여 레이더반사신호에 대한 TMC 및 RMC 처리 전의 ISAR 영상과 처리 후의 ISAR 영상을 나타내었다.

Fig. 14. ISAR-image (a) before (b) after compensation

Fig. 15는 보상 후의 ISAR 영상에 대해 위치 및 크기 조정 후 시험선의 형상을 투영한 그림이다. Fig. 16은 동일한 각도에서 코너스톤으로 해석한 결과이다.

Fig. 15의 ISAR 측정영상에서 함교 위 구조물과 연돌 및 그 측면에서 산란원이 강하게 나타나고 Fig. 16의 해석결과는 함교 위의 구조물과 항해레이더가 설치된 마스트에 산란원이 강하게 나타남을 알 수 있다. 산란원의 위치의 차이는 여러 원인을 추정할 수 있는

데 먼저 시험소의 레이더 고도는 130 m로 입사각각의 차이, 함 heading정보의 오차에 따른 레이더 입사각의 차이가 있을 수 있다.

Fig. 15. ISAR image – measurement

Fig. 16. ISAR image – prediction

4. 결 론

해군 함정에 대한 RCS 저감노력은 대유도탄전 또는 적 해안감시 레이더로부터 탐지거리 차이에 직접적인 영향을 줄 수 있는 요소로 함정 생존성에 밀접한 관련이 있다. 신조함정의 경우 RCS 저감설계를 적

용하여 건조하더라도 운용기간 동안 전술적으로나 작전적으로 필요한 장비와 무기체계를 추가적으로 장착하는 경우가 많아 초기에 설계 목표한 RCS 기준치를 초과할 수 있다. 이 때문에 RCS 측정을 통하여 그 수준을 분석하고 초과하는 함정에 대해서 함정 방위별 RCS 패턴분석을 수행한 후 RCS가 상대적으로 높은 방위를 식별하고 본 논문에서 제안한 hourglass 및 ISAR 영상분석기법을 수행하여 그 방위에서 함정 구조물의 산란원을 식별하고 적절한 저감대책을 수립할 수 있다.

본 논문에서는 국과연 시험선에 대해 해상환경에서 수집한 실측 데이터를 이용하여 hourglass 및 ISAR 분석을 수행하였으며, 이를 통해 함정 구조물에서 산란원의 위치를 식별할 수 있었다. 아울러 신조함정 RCS 저감설계에 꾸준히 사용되고 있는 RCS 해석 소프트웨어를 활용하여 hourglass 및 ISAR 영상분석을 수행하고 측정결과와 비교하였다. ISAR 영상분석을 위해 해면클러터를 효과적으로 제거하기 위한 평균 윈도우 차분기법을 적용하였고 병진운동보상기법으로 ARP의 엔트로피를 최소화하는 방법, 회전운동보상으로 표적내 산란원을 선별하여 속도와 가속도의 다항함수로 모델링하여 위상보상을 수행하는 PPP기법 그리고 잔여 위상오차보상을 위하여 ISAR 영상의 엔트로피를 최소화하는 위상값을 추정하는 MEPA 기법을 적용하였다. 클러터제거 기법의 유효성을 HRRP 영상을 통해 확인하였으며 병진이동 및 회전이동 보상기법의 적용전과 적용후의 ISAR 영상을 비교하였다.

향후 해상상태에서 적용가능한 다양한 보상기법을 연구하여 보다 신뢰성있는 함정 산란점 분석을 수행할 예정이다.

References

- [1] N. Levanon and E. Mozeson, "Radar Signals," John Wiley & Sons, Inc., Chapter 2-3, pp. 20-52, Jun. 2004.
- [2] C. Ozdemir, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms," John Wiley & Sons, pp. 133-139, pp. 300-302, 2012.
- [3] D. Zhu, L. Wang, Y. Yu, Q. Tao, and Z. Zhu, "Robust ISAR Range Alignment via Minimizing the Entropy of the Average Range Profile," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 6, No. 2, pp. 204-208, Apr. 2009.
- [4] T. Thayaparan, G. Lamproppoulos, S. K. Wong and E. Riseborough, "Application of Adaptive Joint Time-frequency Algorithm for Focusing Distorted ISAR Images from Simulated and Measured Radar Data," IEE Proc.-Radar Sonar Navigt., Vol. 150, No. 4, Aug. 2003.
- [5] Ling, H., Wang, Y., and Chen, V. C., "ISAR Image Formation and Feature Extraction Using Adaptive Joint Time-frequency Processing," Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng., 3708, pp. 424-432, 1997.
- [6] W. Brinkman, T. Thayaparan, "Focusing Inverse Synthetic Aperture Radar Images with Higher-order Motion Error Using the Adaptive Joint-time-frequency Algorithm Optimized with the Genetic Algorithm and the Particle Swarm Optimization Algorithm Comparison and Results," Proc. IET Signal Process., Vol. 3, No. 4, pp. 329-342, Jul. 2009.
- [7] B. S. Kang, J. H. Bae, S. E. Chung, C. H. Kim, K. T. Kim, "A Study on the Rotational Motion Compensation Method for ISAR Imaging," KJKIEES, 27(1), pp. 69-75, Jan. 2016.
- [8] L. Liu, F. Zhou, M.-L. Tao, B. Zhao, and Z. -J. Zhang, "Cross-range Scaling Method of Inverse Synthetic Aperture Radar Image based on Discrete Polynomial-phase Transform," Proc. Radar Sonar Navigt., Vol. 9, No. 3, pp. 333-341, Mar. 2015.
- [9] J. Wang, X. Liu and Z. Zhou, "Minimum-entropy Phase Adjustment for ISAR," IEE Proc.-Radar Sonar Navigt., Vol. 151, No. 4, Aug. 2004.