

# 3D 해상 표적에 대한 ISAR 시뮬레이션 및 분석

윤상호\*<sup>1</sup>, 손인혜\*<sup>2</sup>, 김기완\*<sup>3</sup>

## ISAR Simulation and Analysis for 3D Maritime Targets

Sang-Ho Yoon\*<sup>1</sup>, In-Hye Son\*<sup>2</sup>, and Ki-Wan Kim\*<sup>3</sup>

---

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(912938101)

---

### 요약

ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)는 선박과 같은 해상 표적을 식별하는 목적으로 널리 사용되고 있으며 2차원의 영상으로 정보를 제공하기 때문에 1차원의 레이다 프로파일을 이용하는 방식보다 더 정확하게 표적 식별이 가능하다. 다만 ISAR는 직하 방향에서 바라보는 형태로 영상에서 표적이 나타나는 SAR(Synthetic Aperture Radar)와 달리 표적의 회전 운동 종류와 레이다의 시선 방향에 따라 표적을 바라보는 방향이 달라져서 영상으로 나타난다. 선박과 같은 해상 표적은 파도의 출렁임으로 인한 표적의 롤 모션과 피치 모션으로 ISAR 영상이 만들어지므로 해상 상황과 레이다 시선 방향 등에 따라 ISAR 영상이 완전히 달라진다. 본 논문에서는 선박 캐드(CAD) 모델을 활용하여 다양한 조건에서 선박에 대한 ISAR 시뮬레이션을 수행하였고 해당 ISAR 영상 특성을 분석하였다.

### Abstract

Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) has been widely employed for the identification of maritime targets such as ships. Owing to its capability of providing two-dimensional imagery, ISAR enables more accurate target classification compared to approaches that rely on one-dimensional radar profile. Unlike Synthetic Aperture Radar (SAR), in which the target appears in image as observed from a nadir-looking geometry, ISAR produces images in which the target perspective varies depending on the type of rotational motion of the target and the line of sight of the radar. For maritime targets such as ships, ISAR images are formed by the roll and pitch motions induced by wave oscillations. Consequently, the resulting ISAR imagery can vary significantly depending on the sea state and the radar line of sight. In this paper, ISAR simulations of ship were conducted under various conditions using ship CAD model, and the characteristics of the resulting ISAR images were analyzed.

### Keywords

ISAR, maritime targets, ship, simulation

---

\* 국방과학연구소 제3기술연구원 4부(\*<sup>3</sup> 교신저자)  
- ORCID<sup>1</sup>: <http://orcid.org/0000-0001-5557-6582>  
- ORCID<sup>2</sup>: <http://orcid.org/0000-0002-7451-6398>  
- ORCID<sup>3</sup>: <http://orcid.org/0000-0002-7918-8098>

· Received: Oct. 31, 2025, Revised: Dec. 08, 2025, Accepted: Dec. 11, 2025  
· Corresponding Author: Ki-Wan Kim  
3<sup>rd</sup> R&D Institute 4<sup>th</sup> Directorate, ADD, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon, Korea  
Tel.: +82-42-821-4894, Email: [kiwankim@add.re.kr](mailto:kiwankim@add.re.kr)

## 1. 서 론

ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)는 SAR(Synthetic Aperture Radar)의 역(Inverse) 개념으로 표적에 대한 2차원 영상을 생성할 수 있다. SAR는 고정된 표적에 대해서 레이다가 움직이며 수신한 데이터의 공간 주파수 변화를 이용하여 영상을 만들지만[1][2] ISAR는 표적의 움직임으로 발생하는 도플러를 이용하여 영상을 만든다[3][4]. 레이다의 이동 경로는 운용자가 결정할 수 있지만 표적의 움직임은 운용자가 조정할 수 있는 부분이 아니다. 그래서 SAR는 같은 기하 조건에서는 SAR 영상을 찍을 때마다 거의 같은 영상을 얻지만 ISAR는 같은 기하 조건이라고 해도 ISAR 영상을 찍을 때마다 표적의 움직임에 따라 영상이 달라진다.

선박과 같은 해상 표적의 경우에는 파도에 의한 선박의 모션이 ISAR 영상 형성에 필요한 도플러를 생성하게 된다. 기존 연구에서 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw)와 같은 선박의 모션이 ISAR 영상에 미치는 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션과 실제 시험이 수행된 바 있다[5]-[7]. 또한 선박 식별에서 길이가 중요한 정보로 사용되므로 ISAR 영상에서 선박의 측면이 잘 나타나도록 하는 방안에 대한 연구[8][9]와 파도의 출렁임으로 CPI(Coherent Processing Interval) 구간에 따라 ISAR 영상 성능이 달라지므로 최적 CPI 구간을 선택하는 방안에 대한 연구[10]도 수행되었다. 기존의 이러한 연구들은 선박의 모션이 ISAR 영상에 어떤 영향을 주는지 일부 상황에 대해서 분석하였지만 체계적으로 여러 가지 경우에 대하여 분석이 이루어지지 못하는 못하였다. 본 논문에서는 선박 heading과 정현파 모션 시작점을 기준으로 이 2가지 요소가 ISAR 영상에 미치는 영향에 관해서 다양한 경우로 시뮬레이션을 수행하였고 영상의 변화 이유와 추이에 대해서 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 ISAR 영상 형성 원리를 SAR와 비교하여 설명하였다. 3장은 3D 해상 표적에 대한 ISAR 시뮬레이션에 대해서 기술하였다. 본 장에서는 시뮬레이션 변수 및 알고리즘, 3차원 선박의 산란점 추출, 선박 heading 및 모션에 따른 ISAR 영상 분석 등을 기술하였다. 마지막으로 4장에서는 ISAR 시뮬레이션의 결론에 대해

정리하고 본 연구의 의미에 대해서 기술하였다.

## II. ISAR 영상 형성 원리

### 2.1 SAR와 ISAR의 해상도 비교

SAR의 방위해상도는 식 (1)과 같이 정해지며[11], ISAR의 방위해상도는 식 (2)와 같이 정해진다.

$$\rho_{a\_SAR} = 0.886 \frac{\lambda_c}{2\theta_{syn}} \quad (1)$$

$$\rho_{a\_ISAR} = 0.886 \frac{\lambda_c}{2\Omega} \quad (2)$$

그림 1은 SAR 해상도 관련 기하를 나타낸 것이며 그림 2는 ISAR 해상도 관련 기하를 나타낸 것이다. 그림 1에서의  $\theta_{syn}$ 은 SAL(Synthetic Aperture Length)의 시작점과 표적을 이은 선과 SAL 종료점과 표적을 이은 선이 이루는 각을 의미하며 그림 2에서의  $\Omega$ 는 CPI 동안 표적이 회전한 각을 의미한다. 그림 1에서의  $\theta_{syn}$ 과 그림 2에서의  $\Omega$ 는 90도로 같은 값이기 때문에 식 (1)과 식 (2)에 의해 같은 해상도의 SAR 영상과 ISAR 영상을 얻을 수 있다. 그림 1에서는 비행기가 직선 운동을 한다고 가정하였고 그림 2에서는 병진운동(Translation motion)이 보상된 것으로 가정하여 비행기와 표적 간의 거리는 일정하게 유지된다.

그림 1에서 발생하는 range curvature는 SAR 신호 처리 과정에서 보상되며 range curvature가 보상된 점 표적(Point target)의 신호는 하나의 레인지 빈(Range bin)에 정렬되어 방위 방향으로 칩(Chirp) 신호가 된다. 방위 방향으로 칩 신호가 되는 이유는 하나의 레인지 빈에 정렬되었다고 하더라도 range curvature에 의해 발생한 2차 형태의 위상이 방위 방향으로 남아있고 이를 미분한 주파수에서는 1차 형태가 되기 때문이다. 방위 칩 신호를 압축하는 방법은 2가지가 있는데 시간 도메인(Time domain)에서 de-chirp하여 FFT(Fast Fourier Transform)하는 방법이 있고 주파수 도메인(Frequency domain)에서 기준신호(Reference)를 FFT하여 conjugate를 취한 것을 곱하여 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)하는 방법이 있다.

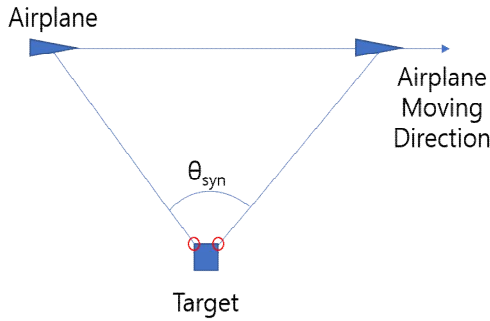


그림 1. SAR 해상도 관련 기하  
Fig. 1. Geometry for SAR resolution

그림 2에서 발생하는 range walk는 그림 1의 range curvature와는 달리 2차 형태일 필요가 없으므로 ISAR에서는 항공기가 반드시 직선으로 움직일 필요는 없다. ISAR에서는 거리 방향으로 시간 도메인에서 range walk를 보상하게 되며 이 과정을 병진운동보상(Translation motion compensation)이라고 부른다. 병진운동보상 과정에서 주요 산란점(Prominent point scatterer)에 대하여 거리 정렬(Range align)이 가능하지만 해당 산란점(Point scatterer)과 떨어진 산란점일수록 거리 정렬에 오차가 커지게 된다. 이는 방위 해상도 저하로 이어지며 이러한 문제 때문에 ISAR는 영상폭이 SAR 대비 훨씬 작다는 한계가 있다. ISAR 신호처리 과정에서 range walk가 보상되면 산란점의 신호는 레인지 빈에 정렬되며 방위 방향으로 de-chirp된 상태이므로 FFT하여 방위 압축이 가능하다.

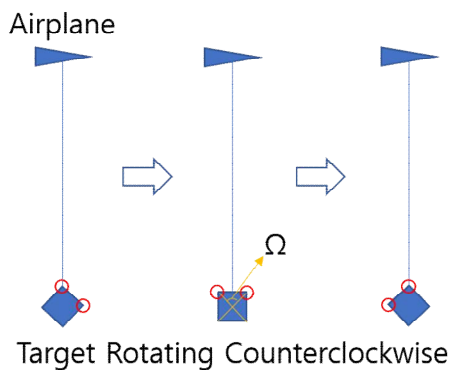


그림 2. ISAR 해상도 관련 기하  
Fig. 2. Geometry for ISAR resolution

## 2.2 ISAR 영상형성 평면

SAR는 영상이 형성되는 평면이 경사거리 평면이

된다. 항공기 플랫폼과 같이 레이더의 고도가 높지 않다면 경사거리 평면은 지표면과 거의 일치하므로 SAR 영상은 표적을 위에서 직하 방향으로 내려다보는 형태로 나타난다. 만약 위성 플랫폼과 같이 레이더의 고도가 높다면 경사거리 평면은 지표면과 차이가 발생하게 되며 이때는 따로 신호처리 과정을 거쳐서 경사거리 평면을 지표면으로 프로젝션하게 된다.

ISAR는 표적의 회전운동으로 영상을 형성하므로 표적의 회전이 일어나는 평면을 기준으로 영상이 생성된다. 선박과 같은 해상 표적은 파도에 의한 선박의 롤 또는 피치 모션으로 ISAR 영상이 만들어진다. 그림 3은 선박의 헤딩 방향을 x축으로 정했을 때 롤 모션과 피치 모션의 회전 방향을 나타낸 것이다. 만약 롤 모션만 발생하면 ISAR 영상은 YZ 평면에서 형성되고 피치 모션만 발생하면 ISAR 영상은 XZ 평면에서 형성된다. 통상적인 경우에는 롤 모션과 피치 모션이 동시에 발생하는데 이런 경우에는 YZ 평면과 XZ 평면이 합성된 어떤 평면을 기준으로 ISAR 영상이 형성된다. 해상 환경의 선박에서는 주로 롤 모션과 피치 모션이 발생하지만 만약 요 모션만 있다고 가정하면 이때는 SAR와 동일하게 직하 방향에서 보았을 때의 선박 모양으로 ISAR 영상이 형성된다.

SAR는 항상 직하에서 표적을 보았을 때의 표적 형태가 유지되지만 ISAR는 표적이 어떤 회전 운동을 하고 있느냐에 따라 표적의 형태가 완전히 달라지므로 SAR에 비해 표적 영상의 경우의 수가 많고 예측이 어렵다. ISAR 시스템으로 실제 획득한 선박의 ISAR 영상을 이용해 표적 식별을 하려면 이러한 ISAR 영상의 특성을 잘 이해하고 선박 헤딩과 레이더 시선방향, 파도 상황에 따라서 어떠한 ISAR 영상이 나올 수 있는지 미리 파악하고 있을 필요가 있다.

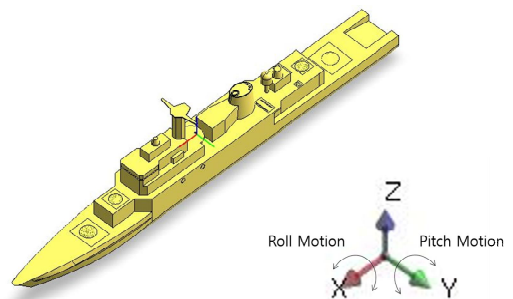


그림 3. 선박의 롤 모션과 피치 모션  
Fig. 3. Roll motion and pitch motion of ship

### III. 3D 해상 표적에 대한 ISAR 시뮬레이션

#### 3.1 시뮬레이션 변수 및 알고리즘

MATLAB 환경에서 자체 개발한 코드를 사용하여 ISAR 시뮬레이션을 수행하였으며 주요 시뮬레이션 변수는 표 1과 같다. 표적과 플랫폼 간의 거리는 병진운동보상 과정을 거치며 일정하게 유지되므로 표적의 이동 여부는 ISAR 영상에 영향을 주지 않는다.

표 1. ISAR 시뮬레이션 변수  
Table 1. ISAR simulation parameters

Simulation parameters	Value
Center frequency	10GHz
Sampling frequency	360MHz
PRF(Pulse Repetition Frequency)	3.7KHz
CPI(Coherent Processing Interval)	0.4245sec
Radar platform altitude	10Km
Radar platform velocity	200m/s
Radar platform heading	90°
Slant range	100Km
Target heading	0°~90°
Target velocity	0m/s

ISAR 시뮬레이션을 위한 알고리즘 블록도는 그림 4와 같다. 그림 4의 왼쪽은 ISAR 원시신호 생성을 위한 블록도이며 그림 4의 오른쪽은 ISAR 신호처리를 위한 블록도이다.

원시신호 생성은 파형 계산(Waveform calculation), 타이밍 생성(Timing generation), 빔 제어 명령 생성(Beam control order generation), 표적 신호 생성(Target signal generation), 잡음 신호 생성(Noise signal generation)의 순서로 이루어진다. 파형 계산은 칩 신호를 설정된 파라미터에 맞춰서 만드는 과정이다. 타이밍 생성은 칩 신호를 송수신하는 타이밍을 계산하는 과정이다. 빔 제어 명령 생성은 안테나 빔을 조사하는 방향을 설정하는 과정이다. 표적 신호 모의는 모든 점표적에서 반사된 칩신호를 선형적으로 합하여 레이더로 들어오는 반사파를 생성하는 과정이다. 잡음 신호 모의는 실제 레이더에서 발생하는 노이즈를 모의하여 생성하는 과정이다.

ISAR 시뮬레이션의 원시신호 생성은 일반 레이더 시뮬레이션의 원시신호 생성과 유사하나 표적의 모션을 반영한다는 점에서 다르다. 펄스마다 모션에 의한 점표적의 위치를 계산하여 반영하면 이 미세한 위치 차이가 도플러를 발생시키게 되므로 거리와 도플러의 2차원 영상 생성이 가능해진다.

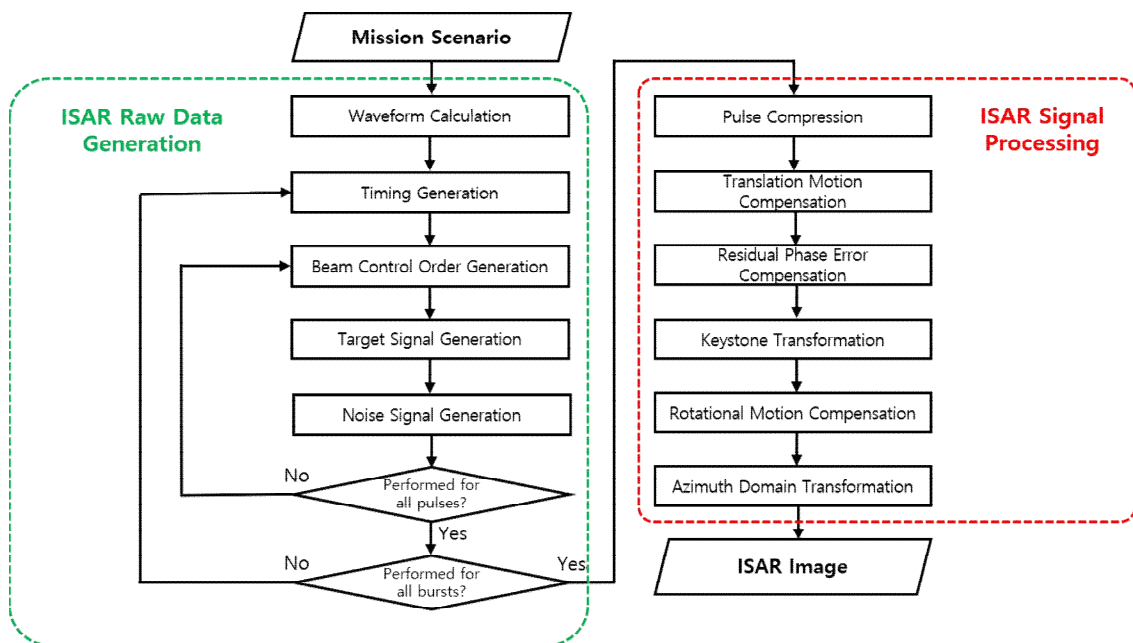


그림 4. ISAR 원시신호 생성 및 ISAR 신호처리 블록 다이어그램  
Fig. 4. Block diagram of ISAR raw signal generation and ISAR signal processing

신호처리는 펄스 압축(Pulse compression), 병진운동 보상(Translation motion compensation), 잔여 위상 오차 보상(Residual phase error compensation), 키스톤 변환(Keystone transformation), 회전운동 보상(Rotational motion compensation), 방위 도메인 변환(Azimuth domain transformation)의 순서로 이루어진다[12]. 펄스 압축은 송신한 기준 신호를 이용하여 거리 방향으로 압축을 수행하는 과정이다. 병진운동 보상은 레이더와 표적 간의 거리가 모든 펄스에 대해서 일정하게 되도록 엔트로피 최소화 방법을 통해 보정하는 과정이다[13]. 잔여 위상오차 보상은 병진운동 보상 이후 남아있는 위상의 잔여 오차를 보정하는 과정이다[14]. 키스톤 변환은 자가 회전운동을 하는 표적에서 발생하는 RCM(Range Cell Migration) 현상을 보정하는 과정이다[15]. 회전운동 보상은 비균일 회전운동을 겪는 신호를 균일 회전운동을 겪는 신호로 변환해주는 과정이다. 방위 도메인 변환은 도플러 방향으로 FFT를 수행하여 시간 도메인에서 주파수 도메인으로 변환하는 과정이다.

### 3.2 3차원 선박의 산란점 추출

ISAR 시뮬레이션에서는 점표적을 여러 개 배치하여 점표적의 조합으로 표적을 표현한다. 이 방식은 3차원의 표적 모양을 반영할 수 있지만 표적의 앞부분이 전자파에 노출되면 뒷부분은 전자파가 가려지는 섀도우 현상을 반영하지 못하는 단점이 있

다. 본 논문에서는 그림 3의 선박 캐드 모델에서 산란점을 추출하여 ISAR 시뮬레이션의 점표적으로 이용하였다. 산란점을 추출할 때는 실제 전자파 산란이 많이 일어나는 모서리 부분을 위주로 선택했다. 그림 5는 3차원에 배치된 점표적을 측면에서 보았을 때를 나타낸 것이고 그림 6은 정면에서 보았을 때를 나타낸 것이다.

### 3.3 선박 헤딩에 따른 ISAR 특성 분석

ISAR 영상의 원시데이터 획득 기하를 그림으로 나타내면 그림 7과 같다. 선박의 헤딩이 0도인 경우에는 피치 모션이 ISAR 영상을 형성하고 선박의 헤딩이 90도인 경우에는 롤 모션이 ISAR 영상을 형성한다. 이것은 레이더 시선방향과 일치하는 회전면에서 ISAR 영상이 형성되기 때문이다. 만약 선박 헤딩이 0도인 상황에서 선박에 롤 모션만 있다면 이때는 롤 모션의 회전면 법선 방향이 레이더 시선 방향이 되므로 ISAR 영상이 전혀 형성되지 않는다. 이때는 피치 모션이 있어야 ISAR 영상 형성이 가능하다.

그림 8은 이 경우에 해당하는 ISAR 영상으로 XZ 평면에 5m 간격으로 9개 점표적을 배치하고 피치 모션을 가했을 때의 시뮬레이션 결과이다. 점표적 배치가 비스듬하게 사각형 형태가 되는 이유는 레이더 플랫폼에 고도를 반영했기 때문이다.

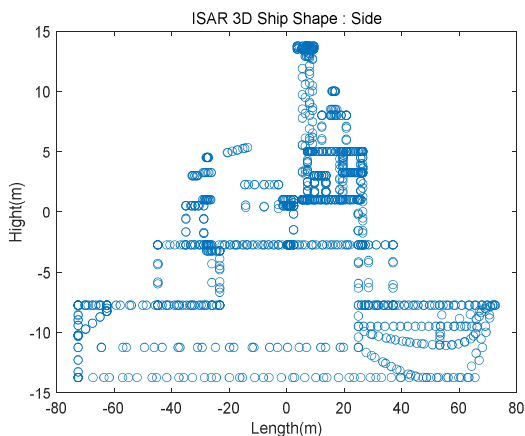


그림 5. 선박 측면에서의 점표적 분포  
Fig. 5. Point target distribution for side of ship

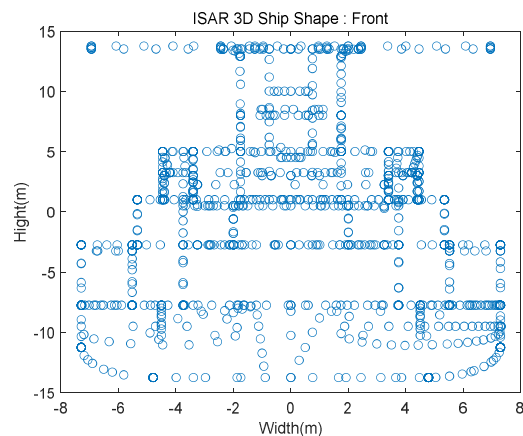


그림 6. 선박 정면에서의 점표적 분포  
Fig. 6. Point target distribution for front of ship

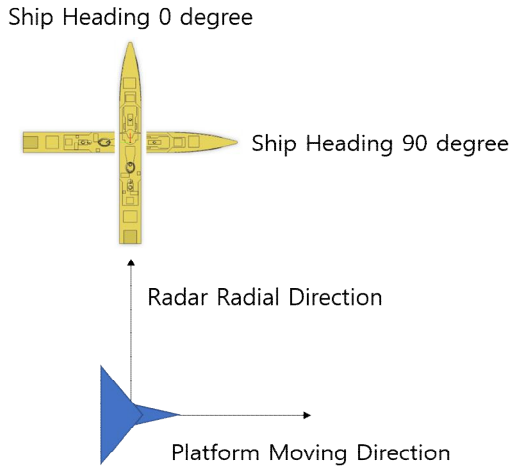


그림 7. ISAR 원시데이터 획득 기하  
Fig. 7. ISAR raw data acquisition geometry

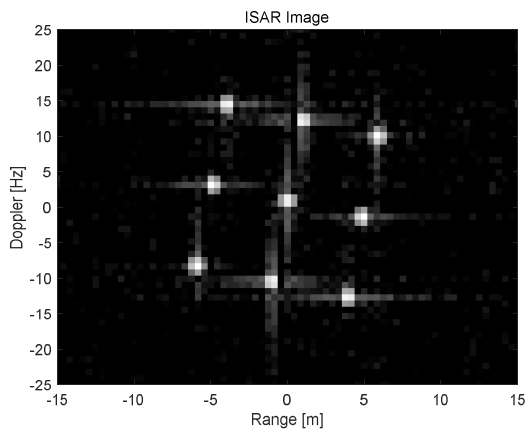


그림 8. 피치 모션이 있을 때 XZ 평면의 9개 점표적에 대한 ISAR 영상  
Fig. 8. ISAR image of 9 point targets on XZ plane in case of pitch motion

그리고 만약 선박 heading이 90도인 상황에서 선박에 피치 모션만 있다면 이때는 피치 모션의 회전면 법선 방향이 레이다 시선 방향이 되므로 ISAR 영상이 전혀 형성되지 않는다. 이때는 롤 모션이 있어야 ISAR 영상 형성이 가능하다. 그림 9는 이 경우에 해당하는 ISAR 영상으로 YZ 평면에 5m 간격으로 9개 점표적을 배치하고 롤 모션을 가했을 때의 시뮬레이션 결과이다.

ISAR의 특성을 이해하지 못하면 레이다가 바라보는 방향의 선박 모양으로 ISAR 영상이 생성될 것으로 생각할 수 있는데 실제로는 이와 반대이다. 즉 선박 heading 0도인 경우에는 레이다가 선박의 후면을 바라보고 있지만 선박 후면이 아니라 선박 측

면이 ISAR 영상으로 생성된다. 선박 heading 90도인 경우에는 레이다가 선박의 측면을 바라보고 있지만 선박 측면이 아니라 선박 정면 또는 후면이 ISAR 영상으로 생성된다. 선박 heading이 45도이면 롤과 피치 회전면이 레이다 시선방향과 일치하는 회전면으로 투사되어 ISAR 영상이 형성된다.

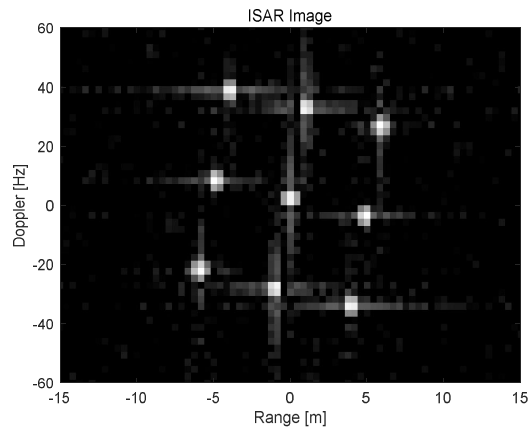


그림 9. 롤 모션이 있을 때 YZ 평면의 9개 점표적에 대한 ISAR 영상  
Fig. 9. ISAR image of 9 point targets on YZ plane in case of roll motion

그림 10~13은 선박 heading이 0도~90도인 경우의 ISAR 영상이다. 선박의 롤 모션과 피치 모션은 정현파로 모델링하였으며 롤 모션 정현파의 크기는 13m, 주기는 14.8초로 그리고 피치 모션 정현파의 크기는 6m, 주기는 18초로 설정하였다. 정현파의 시작점은 롤과 피치 모두 0으로 설정하였다. 그림 10은 선박의 측면이 나타나고 그림 11~12에서는 선박이 점점 돌아가다가 그림 13에서는 완전히 선박의 정면/후면이 나타나게 된다. 그림 10에서 그림 12로 갈수록 선박의 높이가 영상에서 점점 높아지는데 이것은 롤 모션의 정현파가 피치 모션의 정현파에 비해 크기는 크고 주기는 짧기 때문이다. 즉 CPI 동안에 롤 모션이 피치 모션보다 더 도플러를 많이 발생시키고 그림 10에서 그림 12로 갈수록 롤 모션의 영향이 커지기 때문에 이런 현상이 발생한다. 이러한 특성은 모션의 크기와 주기에 따라 달라질 수 있다.

ISAR 영상은 가로축은 거리로 세로축은 도플러로 맵핑하는 것이 일반적이다. SAR와 달리 ISAR의 세로축 단위가 m가 아닌 hz가 되는 이유는 ISAR

영상의 세로축 Hz를 m로 변환하기 위해서는 표적의 모션 정보를 정확히 알아야 하기 때문이다. 예를 들어 회전운동을 하는 표적에 대해서 CPI 동안의 회전각이  $\Omega$ 라고 가정하면 식 (2)에 의해서 세로축 한 픽셀의 길이를 m로 변환할 수 있다. 하지만 이 변환 과정에서는 표적이 완전한 회전운동을 해야 하며 회전면이 레이다 시선방향과 일치해야 한다는 가정이 필요하다. 실제 선박의 모션은 완전한 회전운동도 아니고 그 회전운동 성분도 여러 가지이다. 더구나 실제 ISAR 시스템에서는 이런 선박 모션의 정보를 알 수가 없다. 그래서 ISAR 영상으로 표적을 식별할 때는 거리 방향으로만 길이 정보를 이용할 수 있고 도플러 방향으로는 길이 정보를 이용할 수 없다. 다만 도플러 방향의 영상 정보는 선박 폴의 개수 등과 같은 선박의 개략적인 형태를 파악하는 용도에 사용된다.

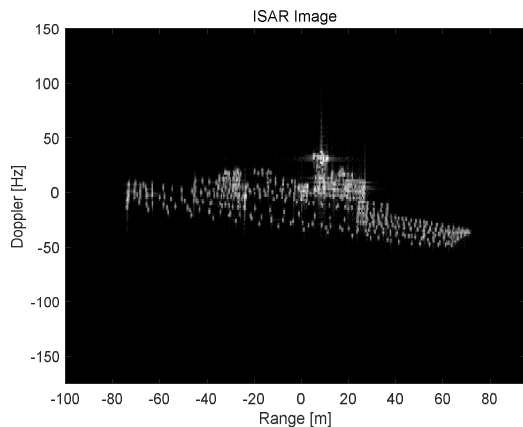


그림 10. 선박 헤딩이 0도일 때의 ISAR 영상  
Fig. 10. ISAR image in case of ship heading 0°

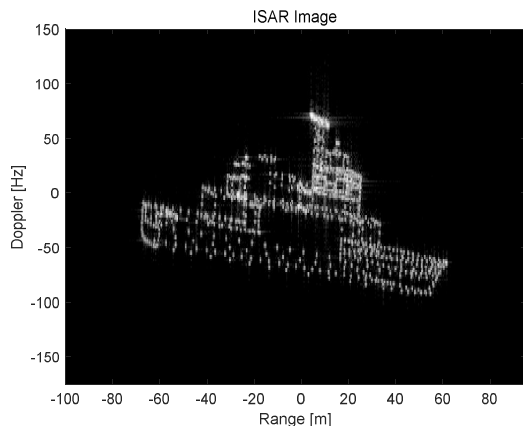


그림 11. 선박 헤딩이 30도일 때의 ISAR 영상  
Fig. 11. ISAR image in case of ship heading 30°

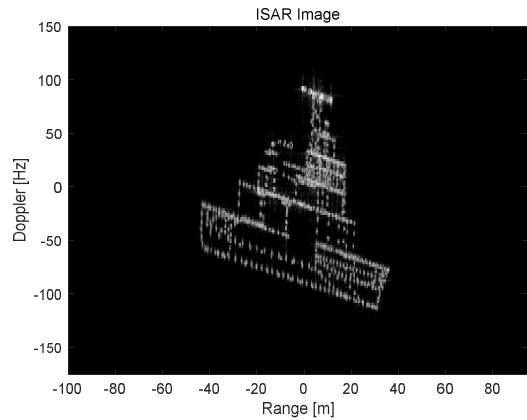


그림 12. 선박 헤딩이 60도일 때의 ISAR 영상  
Fig. 12. ISAR image in case of ship heading 60°

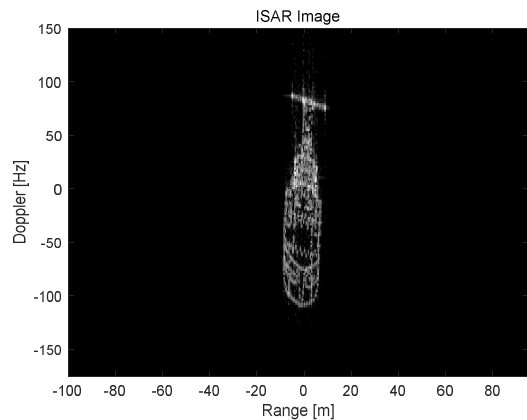


그림 13. 선박 헤딩이 90도일 때의 ISAR 영상  
Fig. 13. ISAR image in case of ship heading 90°

### 3.4 선박 모션에 따른 ISAR 특성 분석

ISAR 영상이 깨끗하게 형성되려면 표적 회전에 의한 각 점표적의 거리 변화가 선형이어야 한다. 즉 점표적에 대한 수신신호의 펄스 간 위상이 선형이 되어야 한다는 것이고 이것은 결과적으로 도플러 성분이 하나의 값으로 맵핑되어 도플러 방향의 해상도가 좋아지게 한다. 따라서 파도에 의한 선박 모션을 정현파로 모델링하면 정현파의 어디 부분에서 ISAR 영상을 형성하느냐에 따라서 ISAR 영상의 성능이 크게 달라진다.

그림 14~18은 ISAR 원시데이터 수집 시간 동안에 롤/피치 모션 그리고 해당 모션으로 생성한 ISAR 영상을 나타낸다. 해당 시뮬레이션에서 선박 헤딩은 45도로 설정하여 롤과 피치 모션이 모두 영상에 반영되게 하였다. 그림 14는 정현파 시작점을

0으로 설정했을 때의 롤/피치 모션과 해당 모션으로 생성한 ISAR 영상이다. 보통  $\sin(x)$  함수의  $x$ 값이 작을수록  $\sin(x)$  값은 선형으로 근사할 수 있기 때문에 정현파 시작점이 0인 이 경우에는 모션의 진폭이 크고 또한 거의 선형으로 변하고 있다. 따라서 이때 ISAR 영상이 가장 이상적으로 생성된다. 그림 15는 정현파 시작점을  $\pi/4$ 로 설정한 경우이며 그림 14 대비 모션의 진폭이 작고 또한 선형성도 떨어진다. 그 결과 ISAR 영상은 그림 14 대비 선박의 높이가 작아지고 도플러 방향 해상도가 저하되었다. 그림 16은 정현파 시작점을  $\pi/2$ 로 설정한 경우이며 모션의 각도가 최고점에서 감소하는 상황이다. 이때는 도플러의 부호가 반전되므로 선박의 모양이 도플러 방향으로 뒤집어져서 나타났다. 또한 모션의 진폭이 가장 작고 선형성도 가장 떨어지므로 그림 16에서 선박의 높이가 가장 작고 도플러

방향 해상도가 가장 저하되었다. 그림 17은 정현파 시작점이  $3\pi/4$ 인 경우이고 그림 18은 정현파 시작점이  $\pi$ 인 경우이다. 그림 17에서 그림 18로 진행될수록 모션의 진폭이 커지고 선형성도 좋아지므로 ISAR 영상은 선박의 모양이 도플러 방향으로 뒤집어져 있는 상태에서 선박의 높이가 커지고 도플러 방향 해상도가 향상되었다.

선박의 모션이 정현파일 때 ISAR 영상을 연속해서 계속 만들어내면 ISAR 영상의 선박은 높이가 점점 작아지다가 나중에는 뒤집어져서 높이가 점점 커지게 될 것이다. 그리고 정점을 지나면 다시 높이가 작아졌다가 또 뒤집어져서 정상 상태가 된 다음 높이가 점점 커지게 될 것이다. 이 과정을 계속 반복하며 ISAR 영상이 만들어지게 될 것이며 ISAR 영상의 도플러 방향 해상도는 선박의 높이가 클수록 더 향상된다.

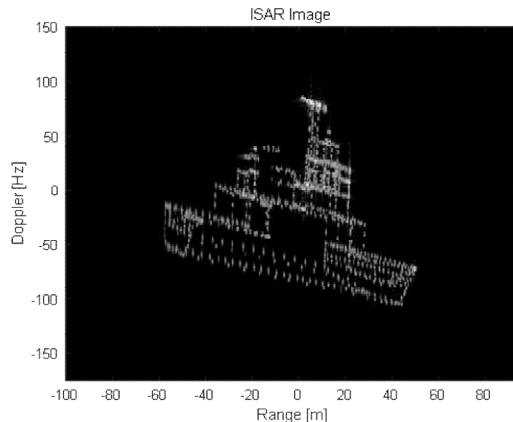
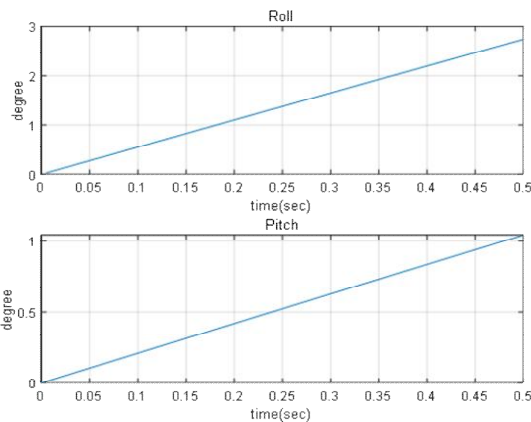


그림 14. 정현파 시작점이 0일 때 롤/피치 모션 및 해당 ISAR 영상  
Fig. 14. Roll/Pitch motion for sinusoidal start point 0 and corresponding ISAR image

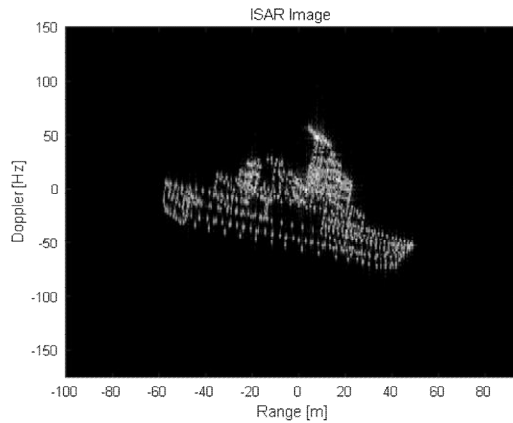
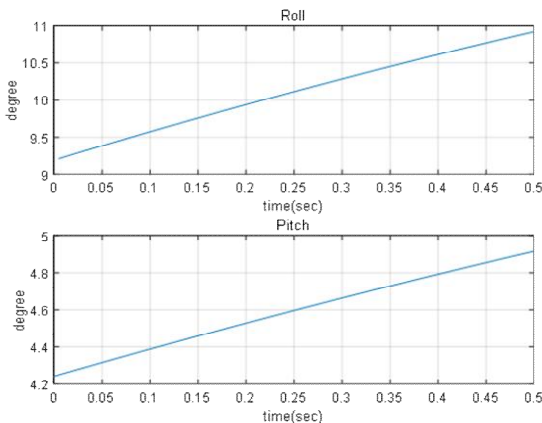


그림 15. 정현파 시작점이  $\pi/4$ 일 때 롤/피치 모션 및 해당 ISAR 영상  
Fig. 15. Roll/Pitch motion for sinusoidal start point  $\pi/4$  and corresponding ISAR image

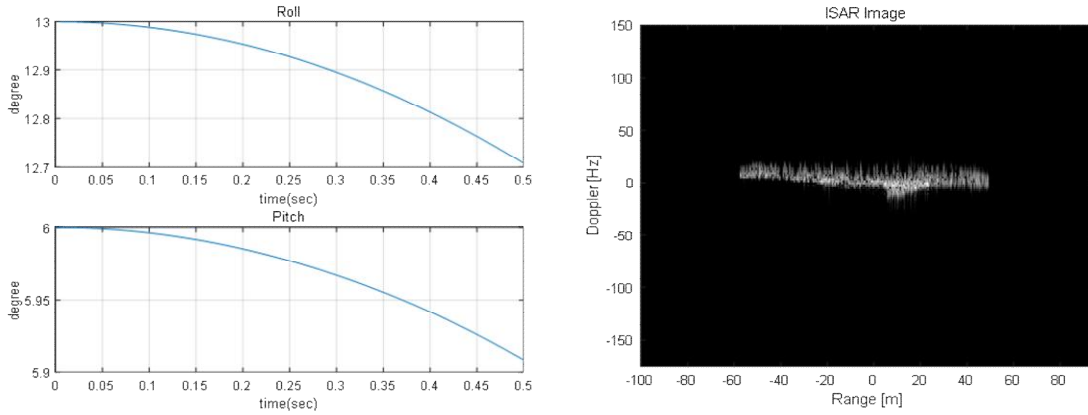


그림 16. 정현파 시작점이  $\pi/2$ 일 때 롤/피치 모션 및 해당 ISAR 영상  
 Fig. 16. Roll/Pitch motion for sinusoidal start point  $\pi/2$  and corresponding ISAR image

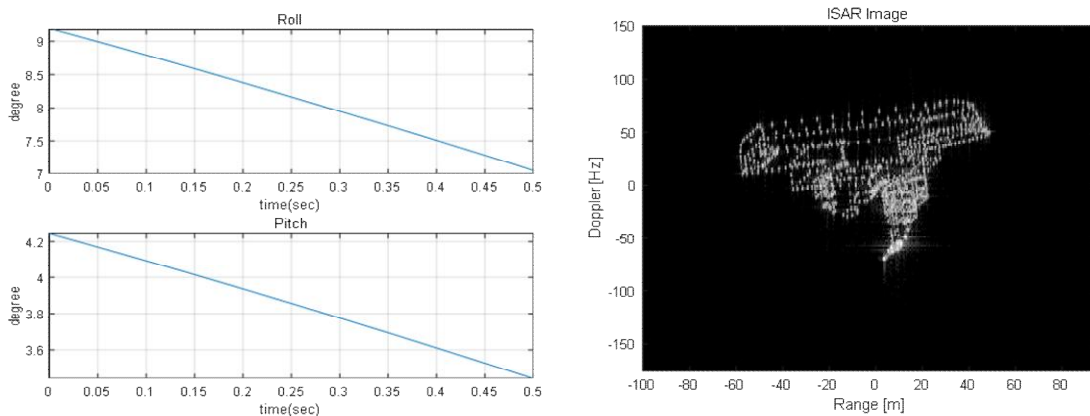


그림 17. 정현파 시작점이  $3\pi/4$ 일 때 롤/피치 모션 및 해당 ISAR 영상  
 Fig. 17. Roll/Pitch motion for sinusoidal start point  $3\pi/4$  and corresponding ISAR image

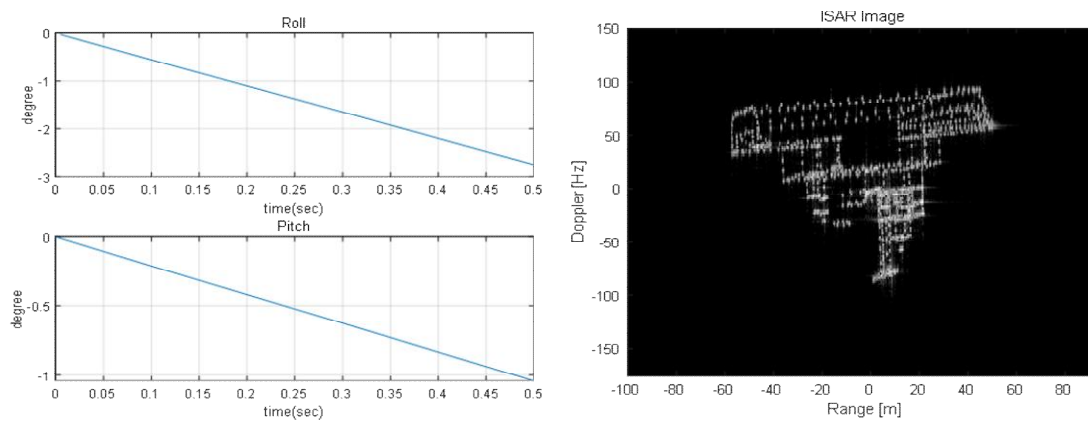


그림 18. 정현파 시작점이  $\pi$ 일 때 롤/피치 모션 및 해당 ISAR 영상  
 Fig. 18. Roll/Pitch motion for sinusoidal start point  $\pi$  and corresponding ISAR image

#### IV. 결 론

ISAR는 표적의 움직임으로 발생하는 도플러를 이용하여 2차원 영상을 형성하므로 표적의 움직임

에 따라 영상이 완전히 달라진다. 표적의 움직임은 레이다를 운용하는 입장에서는 알 수 없는 정보이므로 ISAR 영상은 예측이 어렵다. 이것은 레이다 플랫폼의 기동이 표적과 만들어내는 공간 주파수의

변화를 이용하여 방위 압축을 수행하는 SAR와 가장 다른 특징이다. ISAR에서는 레이더 플랫폼이 표적과 만들어내는 병진운동을 신호처리 과정에서 보상하여 상쇄한다.

ISAR를 많이 활용하는 해상 표적의 경우에는 선박이 파도에 따라 출렁거리는 모션에 의해 ISAR 영상이 형성된다. 선박의 롤 모션과 피치 모션이 어떻게 조합되느냐에 따라 선박의 정/후면, 측면 또는 대각선면 등이 영상으로 나타난다. 그리고 정현파 모션의 오르내림에 따라 영상의 선박 높이가 변하며 반대로 뒤집어지는 현상이 발생하기도 한다.

본 논문에서는 선박의 캐드 모델을 이용하여 3차원 산란점을 추출하고 이를 이용하여 ISAR 시뮬레이션을 수행하였다. 해당 시뮬레이션을 통해 레이더 시선방향 및 선박의 헤딩 그리고 모션의 종류에 따른 ISAR 영상 특성을 분석하였고 또한 모션의 어느 구간에서 ISAR 영상을 형성하느냐에 따라 ISAR 영상 성능을 분석하였다. 결론적으로 표적 식별 효율성을 위해 선박 측면을 영상화하려면 선박이 피치 모션을 가질 때 헤딩 0도 또는 180도의 조건에서 ISAR 영상을 찍어야 한다. ISAR 시스템을 운용하면서 영상에서 선박 정면 또는 후면이 나타나는 경우에는 플랫폼을 이동시켜 선박 헤딩 각도를 바꾸면 선박 측면에 가까운 영상을 얻을 수 있을 것이다. 또한 정현파 모션의 시작점 0이나  $\pi$ 에서 ISAR 영상을 형성하면 도플러 방향으로 가장 큰 영상을 얻을 수 있으므로 표적 식별에 유리하다.

## References

- [1] J. C. Curlander and R. N. McDonough, "Synthetic Aperture Radar Systems & Signal Processing", John Wiley & Sons, 1991.
- [2] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms", Artech House, 1995.
- [3] G. Hajduch, J. M. L. Caillec, and R. Garello, "Airborne High-Resolution ISAR Imaging of Ship Targets at Sea", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 1, pp. 378-384, Jan. 2004. <https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1292177>.
- [4] A. W. Doerry, "Performance Limits for Maritime Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)", Sandia National Laboratories, Nov. 2013. <https://doi.org/10.2172/1121940>.
- [5] Z. Wang, D. Zhu, and Z. Zhu, "Study on Airborne ISAR Imaging of Ship Targets", 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, pp. 3934-3937, Sep. 2004. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1369987>.
- [6] V. C. Chen and R. Lipps, "ISAR Imaging of Small Craft With Roll, Pitch and Yaw Analysis", IEEE 2000 International Radar Conference, Alexandria, VA, USA, pp. 493-498, May 2000. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2000.851883>.
- [7] D. Pastina, A. Montanari, and A. Aprile, "Motion Estimation and Optimum Time Selection for Ship ISAR Imaging", Proc. of the 2003 IEEE Radar Conference, Huntsville, AL, USA, pp. 7-14, May 2003. <https://doi.org/10.1109/NRC.2003.1203371>.
- [8] L. Wang, X. Ye, D. Zhu, and Z. Zhu, "Novel Side-View Imaging of Ships at Sea for Airborne ISAR", 2010 IEEE Radar Conference, Arlington, VA, USA, pp. 767-772, May 2010. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2010.5494517>.
- [9] X. Ye, D. Zhu, L. Wang, and Z. Zhu, "Airborne ISAR Imaging of Ship Side View", 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, pp. 41-44, Nov. 2007. <https://doi.org/10.1109/APSAR.2007.4418550>.
- [10] Z. Long and H. X. Hui, "Optimum Time Interval Selection of ISAR Imaging of Ship Target", 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Wuhan, China, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1109/wicom.2011.6039970>.
- [11] I. G. Cumming, and F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data", Artech House, 2005.
- [12] I.-H. Son, S.-H. Yoon, and K.-W. Kim, "A ISAR

Waveform Design and Simulator Operation in an LPI/ECCM Environment", Journal of KIIT, Vol. 23, No. 1, pp. 157-167, Jan. 2025. <https://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2025.23.1.157>.

- [13] 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 Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 6, No. 2, pp. 204-208, Apr. 2009. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.2010562>.
- [14] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-Entropy Phase Adjustment for ISAR", IEE Proceedings - Radar Sonar and Navigation, Vol. 151, No. 4, pp. 203-209, Aug. 2004. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-rsn:20040692>.
- [15] M. A. Richards, "The Keystone Transformation for Correcting Range Migration in Range-Doppler Processing", Georgia Institute of Technology, Mar. 2014.

김기완 (Ki-Wan Kim)



2000년 2월 : 전북대학교  
항공우주공학(공학사)  
2002년 2월 : 전북대학교  
항공우주공학(공학석사)  
2006년 2월 : 한국과학기술원  
항공우주공학(공학박사)  
2006년 1월 ~ 현재 :

국방과학연구소 연구원  
관심분야 : 항공기 탑재 레이더, SAR 시스템

## 저자소개

윤상호 (Sang-Ho Yoon)



1999년 2월 : 포항공과대학교  
전자전기공학과(공학사)  
2001년 2월 : 포항공과대학교  
전자전기공학과(공학석사)  
2004년 2월 : 포항공과대학교  
전자전기공학과(공학박사)  
2004년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 연구원  
관심분야 : 레이더 시스템, SAR 시스템

손인혜 (In-Hye Son)



2011년 2월 : 경북대학교  
전기전자공학과(공학사)  
2013년 2월 : 한국과학기술원  
전기전자공학과(공학석사)  
2013년 2월 ~ 현재 :  
국방과학연구소 연구원  
관심분야 : ISAR, SAR, 신호처리,

레이더