

# 다중시기 SAR 영상 간 정합 정도에 따른 변화탐지 성능분석 연구

## A Study on the Performance of SAR Change Detection Depending on Co-Registration Condition

이명준\* · 정남훈 · 최재호 · 이건 · 유보현 · 김경태

Myung-Jun Lee\* · Nam-Hoon Jeong · Jae-Ho Choi · Geon Lee · Bo-Hyun Ryu · Kyung-Tae Kim

### 요 약

합성 개구면 레이더(synthetic aperture radar: SAR) 변화탐지는 동일지역에 대하여 다중시기에 측정된 복수 개의 SAR 영상들을 이용하여, 측정시간 사이의 변화정보를 탐지하는 것을 의미한다. 그러나, 비행 플랫폼의 특성상, 측정된 다중 시기 영상 간의 차이가 존재하고, 영상 정합을 적용함에도 불구하고, 두 영상간 측정플랫폼에 의한 차이가 완벽한 복원은 불가능하다. 본 연구에서는 영상 정합 수준이 열화됨에 따라 기존 변화탐지 기법들의 각 변화 탐지 성능의 저하 정도를 분석하였다. MSTAR 데이터 기반 다중시기 SAR 시뮬레이션 영상에 대하여, 시험 SAR 영상의 화소 위치를 강제로 이동시킴으로써 영상 정합 수준을 임의로 저하시켜 다양한 영상 정합 수준을 설정하였다. 크기 기반 변화탐지 기법과 코히런트 기반 변화탐지 기법들을 이용하여 각 탐지 기법들의 성능을 측정 및 분석하였으며, 특별히 기존 코히런트 변화탐지 기법은 영상 정합 열화 수준에 따라서 급격하게 성능이 저하되는 것을 볼 수 있는 반면, 코히런트 베르거 변화탐지 기법은 영상 정합 수준이 열악한 상황에서도 성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

### Abstract

Multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) images, which are obtained to monitor the ground area at different observation times, are utilized in change detection (CD) to identify changing objects in the observed area. However, even with co-registration processing, it is impossible to achieve perfectly matching multi-temporal SAR images. In this study, we compared the change detection performance of four different CD techniques under various co-registration conditions. We analyzed the change detection performance of these techniques in terms of detection and false alarm rates based on pixel units. The experimental results show that the performance of classical CCD degrades significantly as the degree of co-registration degrades, while Berger-CCD achieves a sufficient change detection performance even under sub-par co-registration conditions.

Key words: Change Detection, Co-Registration, MSTAR, SAR.

### I. 서 론

레이더는 주야 및 날씨에 상관없이, 표적을 탐지할 수 있는 특성을 기반으로 군사 및 민수의 다양한 분야에서

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

\*한국항공우주연구원 국가위성정보 활용지원센터(National Satellite Operation & Application Center, Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received July 22, 2021 ; Revised August 11, 2021 ; Accepted August 23, 2021. (ID No. 20210722-073)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

널리 사용되고 있다. 특별히, 레이더를 이동 플랫폼에 탑재하여 지상의 고정 클러스터 및 표적을 영상화하는 다양한 합성 개구면 레이더(synthetic aperture radar: SAR) 알고리즘들이 개발되었다<sup>[1]</sup>. 해당 알고리즘들을 이용하여 획득한 SAR 영상을 기반으로, 영상 내 관심 표적 탐지 성능을 향상시킬 수 있는 방안에 관한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히, 동일지역에 대하여 다중 시기에 측정된 복수의 영상 가운데, 표적이 전혀 존재하지 않는 참조 영상(reference image)이 포함되어 있다면, 변화 영상(chagne image: CI)을 생성하고, 해당 변화영상에 대하여 탐지를 수행함으로써 단일 SAR 영상기반 표적 탐지와 비교하여 향상된 표적 탐지 성능을 획득할 수 있다. 이러한 탐지 기법 ‘변화탐지’라고 명칭하며, 사용된 변화 영상을 기준으로 변화탐지 알고리즘을 일반적으로 구분한다.

SAR 변화탐지 알고리즘은 일반적으로 크기 변화 탐지(amplitdue change detection: ACD) 알고리즘과 코히런트 변화 탐지(coherent change detection :CCD) 알고리즘으로 나눌 수 있으며, 각 변화탐지 기법은 각자의 변화 영상을 형성하여 탐지를 수행한다. 크기 변화 탐지 기법은 적용 영상 내 화소들의 크기값만을 이용하여 형성된 변화영상을 이용하여 변화탐지기법을 의미하며, 코히런트 변화 탐지는 영상 내 화소의 크기와 위상값을 동시에 이용한 변화 영상 이용한 변화 탐지 기법을 뜻한다. 크기 변화 탐지는 세부적으로 크기 차 비교 변화탐지 기법과 크기 비 비교 변화 탐지 기법이 대표적이며, 코히런트 변화 탐지는 기본 코히런트 변화 탐지 기법과 코히런트-베르거(coherent-Berger) 변화탐지 기법으로 구분된다<sup>[2]</sup>.

특히, 지구 관측용 위성에 탑재된 SAR 시스템의 경우, 위성이 지구를 공전하고 있으므로 주기적으로 동일지역 측정이 용이하며, 해당 위성 SAR 기반의 변화탐지가 다양한 분야에서 사용되고 있다. 수한 변화탐지 성능을 도출하기 위해서는 이상적으로 비변화 클러스터 지역 화소들이 완벽하게 동일해야 한다. 그러나, 현실적으로 측정마다의 위성의 위치 및 클러스터 지형에 대한 관측각도가 완벽히 동일하지 않기 때문에 비변화 클러스터 간의 차이가 존재하게 된다. 뿐만 아니라, 모든 지역이 다중 시기 영상 내 동일 화소로 지정되어야 함에도 불구하고, 완벽하게 동일한 영상을 생성하는 것이 불가능하기에 영상 간 정

합(co-registration)은 필수적으로 수행되어야 하며, SAR 영상 간 정합에 있어서 널리 사용되는 기법에는 상호상관(cross-correlation) 기법<sup>[3]</sup>, 푸리에(Fourier) 기반 기법<sup>[4]</sup>, 스펙트럼 다양성(spectral diversity) 기법<sup>[5]</sup> 등이 있다. 상기 정합에도 불구하고, 짧은 관측 시간차에서 발견되는 변화를 탐지하기 위한 다중 위성 기반 실시간 변화탐지에서는 SAR 영상간 차이가 매우 크기 때문에 영상 정합을 수행함에도 불구하고, 일반적으로 비변화 지역에도 불구하고 영상 간 차이가 존재할 수밖에 없다. 이런 영상 간 차이는 변화탐지성능에 큰 영향을 끼치게 될 것이다.

본 논문에서는 영상 간 정합 수준 차이에 대한 변화탐지기법별 탐지성능 변화에 대한 분석연구를 진행하였다. 미공군에서 측정한 moving and stationary target acquisition and recognition (MSTAR) 데이터<sup>[6]</sup>를 기반으로 생성된 다중시기 SAR 시뮬레이션 영상을 이용하여 영상 간 정합 수준을 조정하면서 크기 변화 탐지의 크기 차 비교 변화탐지, 크기 비 비교 변화탐지, 코히런트 변화 탐지의 기본 코히런트 변화탐지, 및 코히런트-베르거 변화탐지 기법들의 변화탐지 성능을 측정 및 분석하였다.

## II. SAR 변화탐지 알고리즘

### 2-1 크기 변화 탐지(Amplitude Change Detection)

크기 변화 탐지 (ACD) 기법은 코히런트 SAR 영상의 크기 정보만을 이용하여 변화탐지를 수행하는 알고리즘을 의미하며, 일반적으로 크기 변화 탐지 기법 중에 널리 사용되는 알고리즘으로는 크기 차 비교 변화 탐지 기법과 크기 비 비교 변화 탐지 기법으로 나눈다. 특별히, 변화 탐지를 수행하기 위한 크기 차 비교 변화 영상,  $D$ ,은 참조 SAR 영상과 시험 SAR 영상(test SAR image)의 크기 성분간 차이를 통해 형성된 변화 영상을 의미하며, 크기 비 비교 변화영상,  $R$ ,은 두 SAR 영상의 크기를 나눈 후에 대수(log)를 취한 후 얻어지는 영상을 뜻한다. 해당 변화 영상들은 다음의 식을 통해 획득된다.

$$D = |S_{test}| - |S_{ref}| \quad (1)$$

$$R = \log \left[ \frac{|S_{test}|}{|S_{ref}|} \right] \quad (2)$$

$S_{test}$ 는 시험 SAR 영상이고,  $S_{ref}$ 는 비변화의 기준이 되는 참조 SAR 영상을 의미한다.

SAR 영상을 형성하는데 있어서, 열 잡음 등에 의해 스펙클이 존재하는데,  $D$ 는 스펙클 크기 변화에 따른 오차가 생기기 때문에, 화소 크기가 큰 지역에서는 스펙클에 의한 오차가 상대적으로 더 커지게 된다. 반면,  $R$ 은 상대적인 값을 이용하여 변화를 탐지하기 때문에, 스펙클에 의한 오차가 SAR 영상의 크기와 무관하다<sup>[7]</sup>. 이러한 이유로 SAR 영상을 이용한 변화탐지는 일반적으로  $R$ 을 주로 이용한다. 그럼에도 불구하고, 후방산란계수 크기가 작은 지역에서는 스펙클에 의한 오차가  $D$ 에서도 작기 때문에,  $D$ 를 이용한 변화탐지 기법연구도 필요하다.

이상적으로, 비변화 지역에 대해서는  $D=0$  및  $R=0$ 이며, 변화가 있는 지역에 대해서는  $D \neq 0$  및  $R \neq 0$ (혹은  $|D| > 0$  및  $|R| > 0$ )을 갖는다. 특별히, 시간에 따라 생성된 변화를 증가변화라고 명칭할 수 있는데, 일반적으로 클러터보다 표적의 후방산란계수가 크다고 할 때, 변화영상 내 표적 화소에 대하여  $D > 0$  및  $R > 0$ 의 결과를 갖는다. 반대로, 시간에 따라서 표적이 제거되는 감소변화에 대해서는  $D < 0$  및  $R < 0$ 의 값을 갖는다. 그림 1은 변화영상  $D$ 의 예시를 보여주고 있다. 대부분의 지역에서  $D=0$ 의 값을 갖고, 붉은 색을 통해 양의 값이 표현된 지역은 증가변화 지역임이고, 푸른색을 통해 음의 값을 갖는 지역은 감소변화 지역이다.

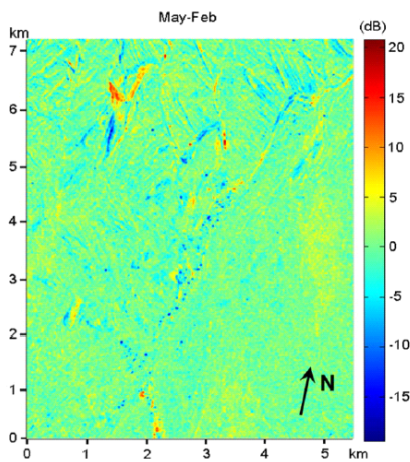


그림 1. 크기 차 비교 변화 영상,  $D$   
Fig. 1. ACD difference change image,  $D$ .

## 2-2 코히런트 변화 탐지(Coherent Change Detection)

다중시기의 복수 SAR 영상의 위상값은 스펙클, 부정확 영상정합 결과 등의 원인으로 사실상 오차가 크게 될 가능성이 높다. 그렇기에 크기기반 변화탐지가 더 일반적으로 널리 사용되지만, 소형 표적의 변화 등의 미세변화를 탐지하기 위해서는 위상을 이용할 때 탐지성능을 극대화할 수 있다. 여기서, 코히런트 변화 탐지 기법은 SAR 영상의 크기뿐 아니라, 위상 성분도 함께 사용하여 변화탐지를 수행하는 알고리즘을 의미하고, 코히런트 변화 탐지 기법은 일반적으로 기본 코히런트 변화 탐지 기법과, 코히런트-베르거 변화 탐지 기법으로 나누어진다. 두 세부 알고리즘은 두 관측 SAR 영상 내 소형 패치마다의 상관 계수를 계산하여 각각의 변화영상을 생성해 내며, 각 상관 계수는 다음과 같다.

$$C^{ij} = \frac{|\sum S_{test}^{ij} (S_{ref}^{ij})^*|}{\sqrt{\sum |S_{test}^{ij}|^2 \sum |S_{ref}^{ij}|^2}} \quad (3)$$

$$CB^{ij} = \frac{2|\sum S_{test}^{ij} (S_{ref}^{ij})^*|}{\sum |S_{test}^{ij}|^2 + \sum |S_{ref}^{ij}|^2} \quad (4)$$

$S_{test}^{ij}$ 와  $S_{ref}^{ij}$ 는  $[i, j]$  위치의 화소를 중심으로 하는 참조 및 시험 SAR 영상 패치를 의미하며,  $C^{ij}$ 는 해당 화소의 기본 코히런트 상관관계수,  $CB^{ij}$ 는 코히런트-베르거 상관관계수이다. 영상 전체에 대하여 동일한 계산을 반복하여 변화 영상인  $C$  및  $CB$ 를 생성할 수 있다. 이상적으로는 변화가 없는 지역의 화소는  $C^{ij}=1$  및  $C_{Berger}^{ij}=1$ 의 값을 지닌다. 반면, 변화가 있는 지역은  $C^{ij} \ll 1$  및  $C_{Berger}^{ij} \ll 1$ 의 값을 갖게 된다. 그림 2는 변화영상  $C$ 의 예시를 보여주고 있으며, 비변화지역은 1과 근사한 값을 가지고 있고, 변화가 있는 지역은 0과 가까운 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 다만, 도심지역과 같이 건물이 많이 포지되어 있는 지역은 거의 1로 완벽하게 비변화를 표현하는 반면, 산림, 농경 등, 자연 지형에 대해서는 나뭇잎 등의 매우 미세한 변화도 큰 변화로 표현되면서, 상관값이 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 이는, 산림 등의 자연지역에서 코히런트 변화 탐지 기법을 사용할 경우, 수많은 오경보가 발생할 것임을 예상해 볼 수 있다.

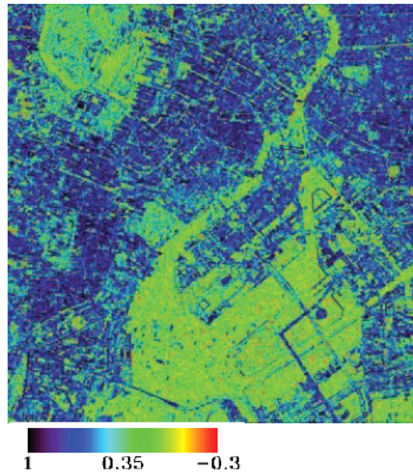


그림 2. 기본 코히런트 변화영상,  $C^{[8]}$   
Fig. 2. Classical coherent change image,  $C^{[8]}$ .

### Ⅲ. 다중 시기 SAR 시뮬레이션

SAR 영상은 비행 플랫폼에 레이더 시스템을 설치 및 측정하여 신호처리를 통해 획득하는 2차원 영상을 의미한다. 이를 위해서는 일반적으로 위성이나 항공기 등의 비행 플랫폼을 이용하는데, 이 경우, 경제적/현실적 문제로 인해 SAR 영상 획득이 쉽지 않다. 뿐만 아니라, 변화탐지 수행을 위한 다중 시기 SAR 영상을 얻기 위해서는 동일 지역에 대하여 측정이 동일한 관측각도, 고도 등의 시스템 변수 하에서 수행되어야 하므로, 학교 및 소형 연구실 수준에서는 실행되기 어렵다. 특히, 변화 탐지 알고리즘 분석을 위해서는 변화 표적에 대한 완벽한 지상 검증 자료(ground truth)가 완비되어야 하지만, 해당 자료획득도 쉽지 않다. 이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 참고문헌 [9]에서 발표되었던 시뮬레이션을 통한 다중시기 SAR 획득방안 기반의 지상검증자료가 포함된 SAR 영상을 획득하고자 한다. 참고문헌 [9]에서는 1995년 미 공군에 의해 측정된 MSTAR 데이터에 포함되어 있는 클러스터 및 표적 SAR 영상들을 합성함으로써 획득하였다.

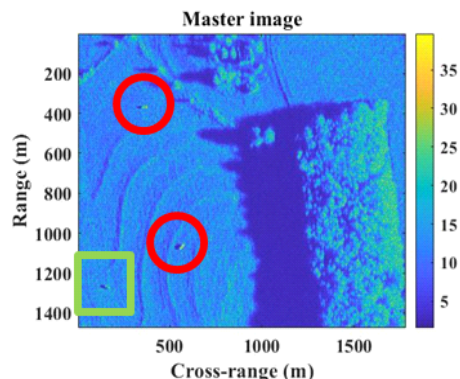
우선, 클러스터 배경 SAR 영상과 표적 SAR 영상의 변수를 통일화한다. 고려되어야 할 변수에는 위성의 관측각도, 관측방위각, 해상도, 화소 크기, 후방산란계수가 포함된다. 참고문헌 [9]에서 보다시피, MSTAR 데이터에 포함되어 있는 클러스터 배경 SAR 영상의 관측 각각(depression

angle)은 15도로 측정되었고, 표적 SAR 영상 중 15도의 관측 각각을 갖는 데이터만을 선정한다.

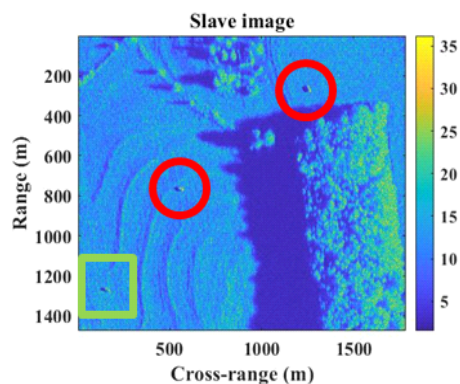
또한, 영상의 관측 방위 방향에 대한 일치화 과정이 필요하며, 송신된 전자기파가 물체 및 클러스터에 입사 및 반사되어 다시 레이더 수신기로 수신된 데이터를 이용하여 SAR 영상을 형성한다. 이 과정에서 관측 방위 방향에 따라서 표적의 산란 정도가 변화하며, 표적에 대한 그림자 방향도 변화하게 된다. 표적 SAR 영상을 회전시켜 클러스터 SAR 영상 및 표적 SAR 영상의 관측 방향을 일치시킨다.

한편, 클러스터 배경 SAR와 표적 SAR내 클러스터 지역의 SAR 영상 내 크기에 대한 일치화가 필요하다. SAR 영상에서의 반사 크기는 사용된 레이더 시스템 및 플랫폼의 비행 고도등의 특성에 따라서 변화하기 때문에, 동일 지역 및 동일 표적임에도 불구하고 SAR 영상에서 다른 크기로 표현된다. 이를 보완하기 위하여 표적 SAR 영상내 클러스터 지역의 평균 크기가 사용되는 클러스터 배경 SAR의 평균 크기를 갖도록 표적 SAR 영상의 크기를 크기변환(scaling)을 수행한다. 반면, 클러스터 배경 및 표적 SAR 영상의 해상도 및 화소 크기는 동일하기 때문에 이에 대한 추가 수행을 진행하지 않는다. 상기 방법에 따라서 클러스터 배경 SAR과 동일 영상 변수를 갖게 된 표적 SAR 영상의 표적 및 그림자 지역에 대해서만 표적 영상에 삽입하여 SAR 영상 합성을 수행한다. 또한, 코히런트 SAR 영상임을 고려하여, 영상 전체에 대하여  $[-\pi \sim \pi]$ 의 위상값을 임의로 지정함으로써, 코히런트 참조 SAR 영상을 생성할 수 있다.

뿐만 아니라, 변화탐지 실험을 위한 다중시기 SAR 영상을 생성해야 하므로, 변화가 포함된 복수의 SAR가 필요하다. 이를 위하여, 상기 방법을 이용하여 다른 지역에 표적을 배치하고, 위상 및 크기 값에 대하여 임의의 변화를 지정함으로써 변화탐지 알고리즘 분석을 적용할 수 있는 시험 SAR 영상을 획득할 수 있다. 다음 그림 3은 상기 방법을 이용하여 획득한 변화탐지 분석용 다중시기 SAR 영상을 보여주고 있으며, 클러스터 배경 SAR에 원 내부의 위치에 각 표적들을 배치함으로써 다중시기 SAR 영상 간의 변화를 지정해 주었다. 이를 통해서 변화표적에 대한 완벽한 검증자료가 포함되어 있는 다중시기 SAR 시뮬레이션 영상을 획득할 수 있다.



(a) 참조 SAR 시뮬레이션 영상,  $S_{ref}$   
(a) Reference SAR simulation image,  $S_{ref}$



(b) 시험 SAR 시뮬레이션 영상,  $S_{test}$   
(b) Test SAR simulation image,  $S_{test}$

그림 3. 다중 시기 SAR 시뮬레이션 영상  
Fig. 3. Mutli-temporal SAR simulation pair.

#### IV. 탐지성능 분석 결과

본 논문에서는 실시간 변화탐지 수행을 위해 획득한 다중시기 SAR 영상들이, 획득한 SAR 영상의 특성으로 정합 수준이 열등할 경우에 변화탐지알고리즘들의 성능 변화를 분석하고자 한다. III장에서 설명된 완벽하게 정합된 상황에 대한 다중시기 SAR 시뮬레이션을 이용하여 임

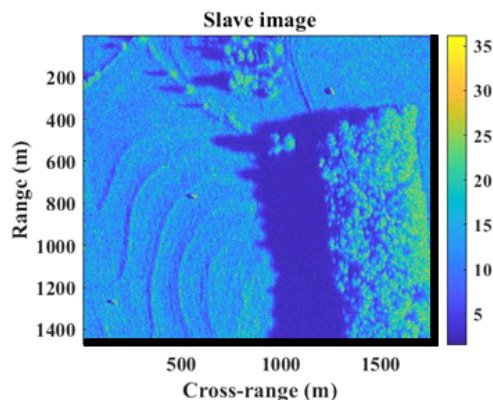


그림 4. 영상정합 열화를 위한 화소 위치 변화  
Fig. 4. Pixel shift for degradation of co-registration.

의로 다중시기 SAR 영상간 정합 수준을 열화시켰다.

정합 성능 열화를 위하여 시험 SAR 영상 내 화소들의 일괄 위치변화(shift)를 수행하였다. 특별히 그림 4와 같이 하단 및 우측의 화소들을 위치변화를 수행하여 영상간 정합 수준을 열화시켰다. 또한, 영상 정합 수준을 수치화 하기 위하여 정규 평균 제곱근 편차(normalized root mean square error: NRMSE)를 이용하였다<sup>[10]</sup>. 정규 평균 제곱근 편차는 식 (5)처럼 계산할 수 있다. 표 1은 정합수준 열화를 위한 시험 SAR 영상의 화소 위치변화 정도에 따라서 변화하는 정규 평균 제곱근 편차를 보여주고 있으며, 어떠한 화소 위치변화도 없는 완벽한 정합 상태에서의 NRMSE=0.0041의 값을 가지고 있으며, 점차 위치 변화가 커짐에 따라서 정규 평균 제곱근 편차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 거리(range) 및 방위방향(cross-range)으로 2 화소 만큼의 위치변화를 조정하였을 때는 영상 간 정규 평균 제곱근 편차가 0.0439까지 증가하며, 영상 간의 정합 수준이 많이 열화된다.

$$\text{NRMSE} = \frac{\sum (|S_{ref}| - |S_{test}|)^2}{\sum (|S_{ref}|)^2} \quad (5)$$

표 1. 시험 SAR 영상 화소 위치변화에 따른 SAR 영상간 NRMSE  
Table 1. NRMSE analysis on the pixel-shift on test SAR image.

Shifted range of pixel [range & cross-range]	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
NRMSE	0.0041	0.0055	0.0082	0.0129	0.0196	0.0233	0.0284	0.0352	0.0439



수신자 조작 특성(receiver operating characteristic: ROC) 커브 기반의 다양한 영상 정합 수준에 따른 탐지 기법별 성능분석을 수행하고자 한다. ROC 커브의 인자는 화소단위의 탐지율과 오경보율을 기반으로 구성되며, 각 인자는 다음과 같이 계산된다.

$$P_D = \frac{N_{dt}}{N_t}, P_{FA} = \frac{N_{dc}}{N_c} \quad (6)$$

$P_D$ 는 화소 단위 탐지율,  $P_{FA}$ 는 화소 단위 오경보율을 의미한다.  $N_t$  및  $N_c$ 는 변화 표적 화소와, 비변화 클러스터 화소의 전체개수를 의미한다.  $N_{dt}$  및  $N_{dc}$ 는 변화탐지 알고리즘을 적용하여 탐지된 표적 화소 개수 및 클러스터 화소 개수를 나타낸다. III 장에서 설명한 다중시기 SAR 시뮬레이션을 통해 완벽한 지상 검증 자료를 획득하였으

로 각 인자를 정확하게 계산할 수 있다.

그림 5에서는 II장에서 설명한 변화탐지기법인  $D$ ,  $R$ ,  $C$  및  $CB$ 별로 영상 정합 열화 수준에 따른 탐지 성능변화를 보여주고 있으며, 해당 시뮬레이션 데이터는 그림 3의  $S_{ref}$ 과  $S_{test}$ 를 이용하였다. 그림 5(a)는 식 (1)을 통해서 획득한 크기 변화 탐지 기반의  $D$ 를 이용하여 변화탐지를 수행한 결과를 보여주고 있으며, 영상 간 정합 수준 열화를 위해 화소 위치 변화 정도를 증가시킴에 따라 ROC 커브가 우측 하단으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 즉, 영상 간 정합 성능이 열화됨에 따라서 변화탐지 성능이 저하되는 것을 수치적으로 확인할 수 있었다. 식 (2)를 통해 형성된 크기 변화 탐지 기반의  $R$ 에 대한 변화탐지 성능변화 그래프는 그림 5(b)에서 확인할 수 있으며,  $D$ 와 마찬가지로 화소 위치 변화 정도가 증가함에 따라 생기

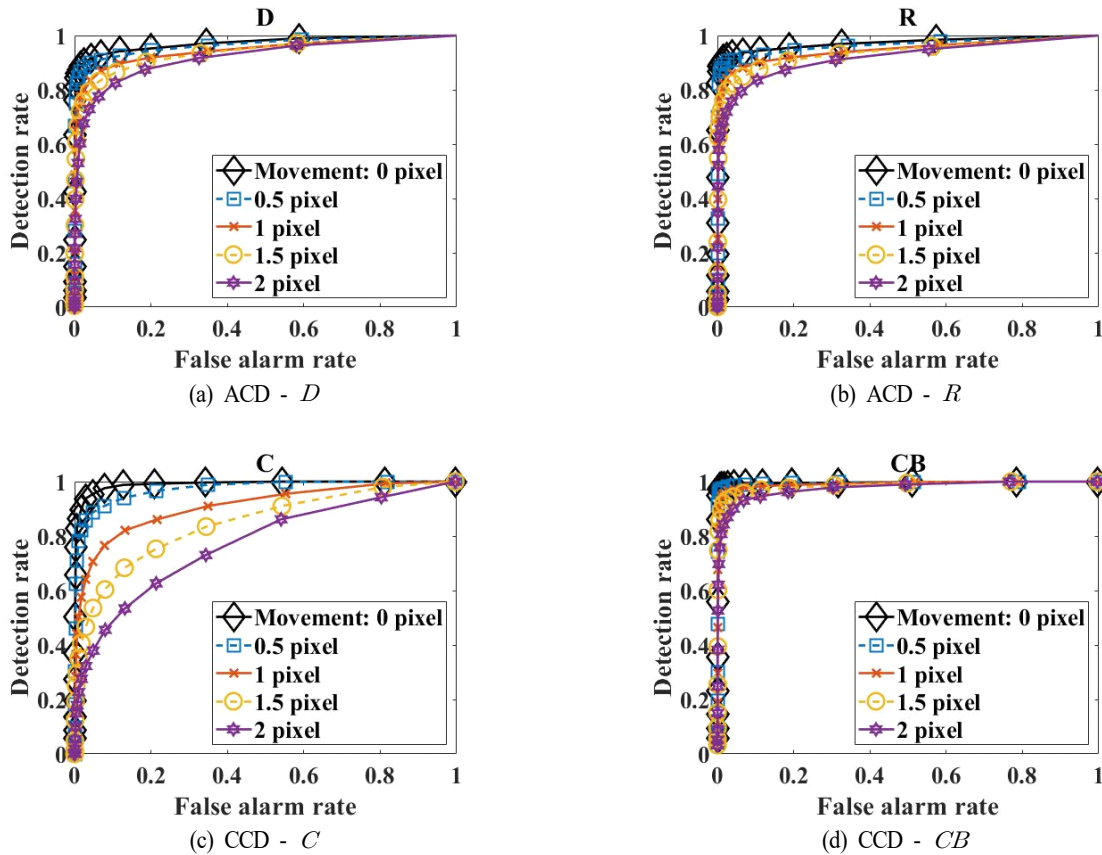


그림 5. 영상 정합 수준에 따른 변화 탐지 기법 별 성능

Fig. 5. Change detection performance of detectors depending on co-registration condition.

는 영상 간 정합 수준이 열화되면서 변화탐지 성능이 저하되고 있는 것을 볼 수 있다. 반면, 그림 5(c)는 코히런트 변화 탐지의  $C$  영상을 식 (3)을 통하여 획득하고, 이에 대해서 변화 지역을 탐지하였을 때를 보여주고 있다.

특별히, 그림 5(a) 및 그림 5(b)의 크기 변화 탐지 기법과 비교하여,  $C$  기법은 화소 위치 변화 정도에 따라서 매우 급격하게 변화탐지 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이 이유는  $C$ 를 수행함에 있어서 위상 정보 특성만을 이용하여 변화 지역을 탐지하는데, 정합이 정확히 이루어지지 않을 경우에 화소 성분이 매우 급격하게 변화되어, 이와 같은 성능 저하를 보인다. 하지만,  $CB$ 의 경우,  $C$ 와 달리 변화탐지 성능 저하 수준이 크기 변화 탐지 기법들보다 완만하여, 화소가 거리 및 방위(range & cross range)방향에 대하여 [2 화소, 2 화소]만큼의 위치변화가 존재한 상황에 대해서도 탐지 성능의 저하수준이 적은 것을 볼 수 있다. 식 (4)에서 보는 것과 같이  $CB$ 를 형성하는데 있어서, 식 (4)의 두 영상간의 크기의 합으로 이루어진 분모와는 달리, 식 (3)의 부모를 이루는 곱보다는 정합 열화 수준에 따른 변화탐지 저하가 완화되어 감지된다.

그림 6의 그림 5에서 분석된 변화탐지 성능 ROC 커브에 대해서, 영상 정합 수준에 따른 각 변화탐지 기법별 성능분석을 비교분석에 용이하도록 취합된 그래프이다. 그림 6(a)는 영상 간 화소 차이가 없는 완벽한 정합 상태에서의 각 변화탐지 기법별 성능을 보여주고 있으며, 모든 탐지 기법이  $P_{FA} = 10^{-1}$ 에서  $P_D = 0.95$  이상의 우수한 탐지성능을 가지는 것을 볼 수 있다. 반면, 그림 6(b)에서와 같이 정합이 불완전하여 화소 간 위치 차이가 존재하게 되면서 각 변화탐지성능이 저하되게 되고, 각 탐지 기법에 따라 탐지 성능의 저하 정도가 서로 다르다. 특별히, 그림 6(c)~그림 6(e)와 같이 영상 간 위치 차이가 커지며, 정합 수준이 열화될수록  $C$  탐지성능과  $CB$ 의 탐지 성능 간 차이가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 특별히 코히런트 변화 탐지의  $CB$  기법은 영상정합 수준의 모든 상황에서 가장 우수한 탐지성능을 가지며, 크기 변화 탐지는 상대적으로 다양한 영상간 정합 수준에 대해서  $D$ 와  $R$ 이 거의 동일한 탐지 성능을 가지며, 각 기법도 우수한 탐지성능을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 영상 간의 2 화소 이상 차이가 존재하는 영상 정합 결과라면 크기 변화 탐

지 기법을 이용하였을 때  $CB$ 보다 상대적으로 많이 저하된 변화탐지성능을 낸다. 한편,  $C$ 는 영상 정합 수준이 우수하다면 해당 기법의 탐지 성능이 매우 우수하지만, 2 화소 이상 차이가 존재하는 SAR 영상에 대해서는 변화탐지로서 그 성능을 발휘하기 어렵다. 따라서  $C$ 는 영상 정합이 완벽한 상황에서만 사용 가능한 특징이 있다.

더불어, 변화탐지를 수행하기 위한 각 탐지 기법의 수행시간에 대한 비교가 필요하다. 코히런트 변화 탐지 기법은 영상 내 패치들에 대하여 패치간 식 (3) 및 식 (4)와 같이 상관계수를 계산함으로써, 변화 영상  $C$  및  $CB$ 를 생성하기에 계산 과정상 긴 수행시간이 필요하다. 반면, 크기 변화 탐지를 위한 식 (1) 및 식 (2)를 통해서 얻어진  $D$ 와  $R$ 은 상대적으로 매우 간단한 계산을 통하여 획득된 변화 영상을 사용하기에 매우 빠르게 수행할 수 있는 장점이 있다. 표 2에서와 같이  $1474 \times 1784$  화소 크기의 SAR 영상에 대하여 변화 영상을 형성하는데,  $D$ 와  $R$ 은 약 0.03초 정도의 매우 짧은 수행시간이 필요한 반면,  $C$ 와  $CB$ 는 약 16초 정도의 상대적으로 긴 수행 시간을 필요로 하였다. 또한, 실제로 SAR 영상의 크기가 더 크기 때문에, 이에 대한 시간 차이는 더욱 극명하게 구분될 것으로 기대되고, 수행시간 측면에서는 크기 변화 탐지 기법이 더욱 유리하다.

따라서, 수행시간 측면과 영상 간 정합 수준을 종합적으로 고려하여 가장 최적의 변화탐지 기법을 설정할 필요가 있으며, 영상 간 정합 수준이 좋다면 크기 변화 탐지 기반의  $D$  및  $R$ 을 이용하여 변화탐지를 수행하는 것이 시간 측면에서 효율적인 변화탐지 구현이 가능할 것이다. 한편, 측정 영상 간 차이가 커서 영상 정합 과정을 수행했음에도 불구하고, 영상 간 정합정도가 열화된 상황이라며 수행시간에도 불구하고, 크기 변화 탐지 기법의 성능이 많이 저하되기 때문에, 이런 경우에 계산량이 많더라도  $CB$ 기법이 우수한 성능을 가짐으로써 효과적인 변화 탐지 구현이 가능할 것임을 예상할 수 있다.

## V. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 다중시기 SAR 영상들을 이용한 변화탐지에 대하여 영상 간 정합 정도에 따른 기존 변화탐지 기

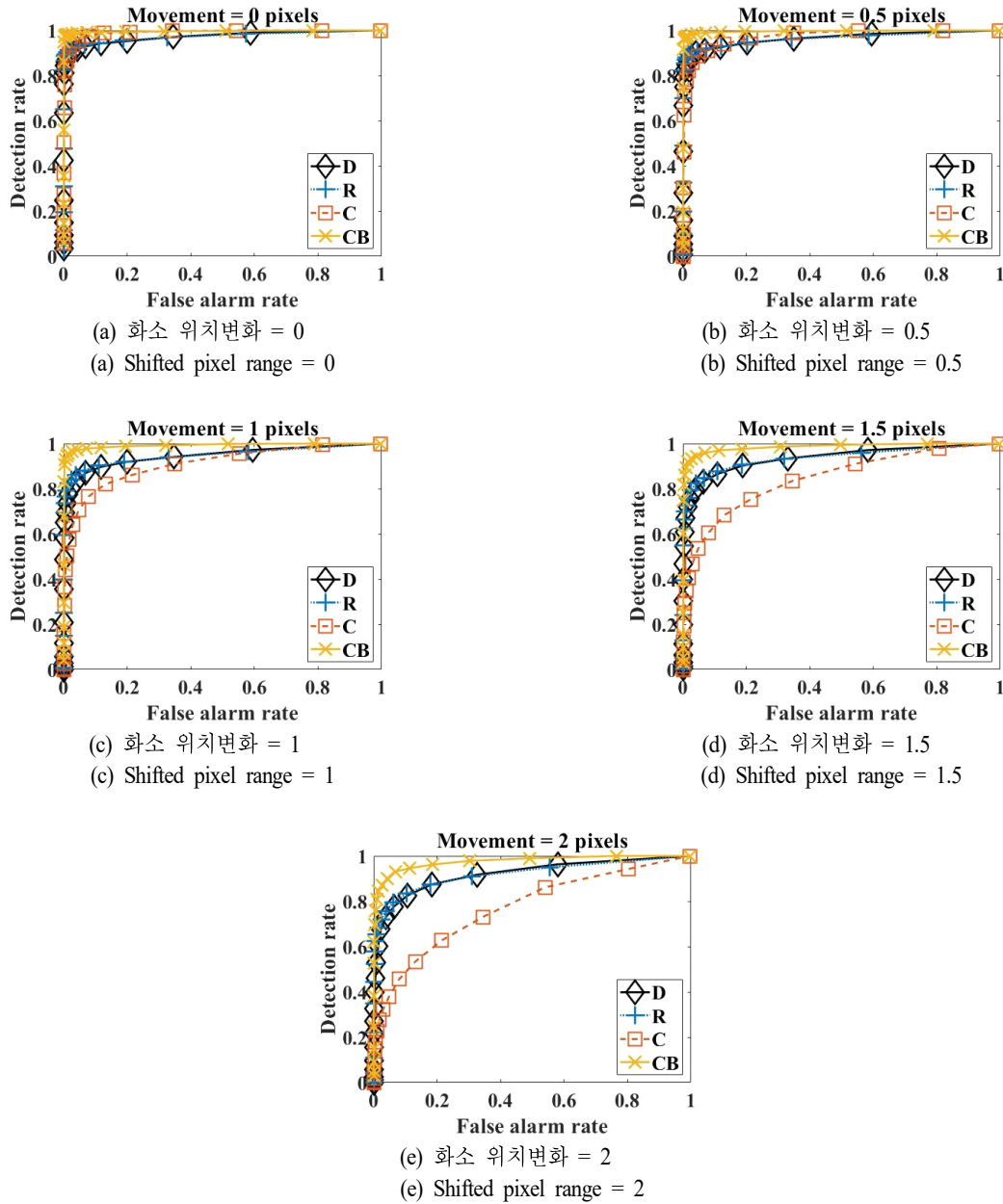


그림 6. 영상 정합 수준에 따른 변화탐지성능 비교

Fig. 6. Change detection performance depending on co-registration condition.

표 2. 변화 탐지 기법에 따른 변화 영상 획득 시간

Table 2. Processing time to obtain change image.

Change image	D	R	C	CB
Time [sec]	0.03	0.03	15.74	16.81

법들의 성능 변화 정도에 대한 분석을 수행하였다. 시물레이션을 위하여 MSTAR 데이터 내의 클러터 및 표적 SAR 영상을 합성하여, 다중시기 SAR 영상을 만들고, 시험 SAR 영상의 화소를 이동시킴으로써 영상 간 정합 정도를 조정하였다. [0 화소~2 화소] 범위에서의 영상 간



위치 차이에 대하여 크기 변화 탐지의  $D$ 와  $R$ , 그리고 코히런트 변화 탐지의  $C$ 와  $CB$ 의 변화탐지 성능을 분석하였다. 영상 정합 수준이 열화됨에 따라  $C$ 는 매우 급격한 성능 저하가 존재하며,  $CB$ 는 성능 저하가 심하지 않아 영상 정합 수준이 열악하더라도 우수한 탐지 성능을 갖는다. 반면,  $D$ 와  $R$ 은 영상 정합 수준에 따라서 탐지 성능이 열악해지지만, 변화 영상을 획득하는데 소요되는 수행 시간이 매우 짧기 때문에, 실시간 변화탐지에는 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 추후 연구로는 실제 SAR 영상간 정합 오차 정도의 변화를 일으키는 다양한 기타 요소들을 고려하여 추가 분석을 수행할 예정이다.

### Acknowledgement

본 연구는 국방과학연구소의 지원 하에 수행되었습니다.

### References

- [1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Boston, MA, Artech House, 2005.
- [2] S. Yu, K. Song, and W. Lee, "A study on the application of high resolution K5 SAR images," *Journal of Satellite Information and Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 6-12, 2017.
- [3] W. K. Pratt, "Correlation techniques of image registration," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, vol. AES-10, no. 3, pp. 353-358, May. 1974.
- [4] B. S. Reddy, B. N. Chatterji, "An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 5, no. 8, pp. 1266-1271, Aug. 1996.
- [5] R. Scheiber, A. Moreira, "Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, pp. 2179-2191, Sep. 2000.
- [6] J. R. Diemunsch, J. Wissinger, "Moving and stationary target acquisition and recognition(MSTAR) model-based automatic target recognition: search technology for a robust ATR," in *Proceedings of the Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery V*, Orlando, FL, Sep. 1997, vol. 3370, pp. 481-492.
- [7] E. J. M. Rignot, J. J. van Zyl, "Change detection techniques for ERS-1 SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, no. 4, pp. 896-906, Jul. 1993.
- [8] W. Liu, F. Yamazaki, "Urban monitoring and change detection of central tokyo using high-resolution X-band SAR images," in *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vancouver, BC, Jul. 2011, pp. 2133-2136.
- [9] M. Lee, N. Jeong, H. Choi, G. Lee, and K. Kim, "A study on the synthesis of MSTAR SAR images for change detection experiments", in *International Symposium on Remote Sensing 2021*, Virtual Conference, May. 2021.
- [10] Z. Li, J. Bethel, "Image coregistration in SAR interferometry," in *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, Jan. 2008, vol. 37, pp. 433-438.

이 명 준 [한국항공우주연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8073-2556>



2014년 8월: 한동대학교 전산전자공학부 (공학사)  
2017년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
2017년 3월~2021년 8월: 포항공과대학교 전자 전기공학과 (공학박사)  
2021년 8월~현재: 한국항공우주연구원

국가위성정보 활용지원센터 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR 표적 탐지, SAR 이동 표적 탐지, SAR 변화 탐지

이 건 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6607-5177>



2019년 8월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)  
2019년 9월~2021년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
2019년 9월~현재: 포항공과대학교 전자 전기공학과 박사과정  
[주 관심분야] 레이더 신호처리

정 남 훈 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1629-2418>



2015년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
2018년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
2018년 3월~현재: 포항공과대학교 전자 전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상,

레이더 자원관리

유 보 현 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1256-3866>



2015년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학사)  
2015년 3월~현재: 포항공과대학교 전기 전자공학과 석박사 통합과정  
[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR/ISAR 이미징

최 재 호 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9484-4869>



2017년 2월: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 (공학사)  
2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
2019년 3월~현재: 포항공과대학교 전자 전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상,

휴먼 탐지, 미세도플러 분석

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장

2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장

2019년 4월~현재: 차세대 영상레이더시스템 연구센터장

2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정