

강도 기반 유사도 및 감마 보정을 이용한 SAR 영상 변화탐지

SAR Image Change Detection via Intensity-Based Similarity Measure and Gamma Correction

강 민 석

Min-Seok Kang

요 약

본 논문에서는 범용 화질 지수(UQI: universal quality index)와 감마 보정(GC: gamma correction)에 기반한 합성개구면 레이더(SAR: synthetic aperture radar) 비간섭 변화탐지(NC-CD: non-coherent change detection) 기법을 제안한다. 제안 기법은 두 SAR 강도 영상의 국소 평균, 분산, 공분산을 함께 고려하는 UQI 기반 코히어런스 영상 생성 단계와, negative transformation 이후 GC를 적용하여 잔류 speckle을 억제하는 단계로 구성된다. Bern 데이터셋에서 제안 기법은 FA=0.677 %, $\kappa=0.855$, PCD=99.32 %를 달성하였으며, DI 및 LRD 대비 FA를 각각 87.7 % 및 82.1 % 감소시켰다. Ottawa 데이터셋에서는 FA=4.134 %, DR=86.18 %, $\kappa=0.844$, PCD=95.87 %를 달성하였으며, DI 및 LRD 대비 FA를 각각 27.1 % 및 15.5 % 감소시켰다. 또한 UQI 윈도우 크기와 GC 차수 p 에 대한 민감도 분석 및 ablation study를 통해 제안 기법의 각 구성 요소가 변화 영역 보존과 speckle 억제에 기여함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a synthetic aperture radar (SAR) non-coherent change detection (NC-CD) method based on the universal quality index (UQI) and gamma correction (GC) is proposed. The proposed method consists of two main steps: UQI-based coherence image generation, which jointly considers the local mean, variance, and covariance information between two SAR intensity images; and GC-based filtering after negative transformation to suppress residual speckle noise. On the Bern dataset, the proposed method achieved FA=0.677 %, $\kappa=0.855$, and PCD=99.32 %, reducing FA by 87.7 % and 82.1 % compared with DI and LRD, respectively. On the Ottawa dataset, it achieved FA=4.134 %, DR=86.18 %, $\kappa=0.844$, and PCD=95.87 %, reducing FA by 27.1 % and 15.5 % compared with DI and LRD, respectively. An additional sensitivity analysis of the UQI window size and GC order p , together with an ablation study, verified that the proposed framework effectively balanced changed-region preservation and speckle suppression.

Key words: Change Detection, Coherence Image, Remote Sensing, SAR, Universal Quality Index, Gamma Correction

I. 서 론

변화탐지(CD: change detection) 기법은 주야간 및 거의 모

든 기상 조건에서 관측이 가능한 합성개구면 레이더(SAR)를 이용하여 관측 지역에서 발생한 재난의 모니터링 및 변화 양상 예측에 널리 활용되어 왔다^{[1]-[13]}. 변화탐지 맵

「이 논문은 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R111A3043152).」

국립공주대학교 전기전자제어공학부(Division of Electrical, Electronic & Control Engineering, Kongju National University)

· Manuscript received April 17, 2026 ; Revised April 25, 2026 ; Accepted April 27, 2026. (ID No. 20260417-034)

· Corresponding Author: Min-Seok Kang (e-mail: mskang@kongju.ac.kr)

(CDM: change detection map)은 두 시점의 SAR 영상 간 차이를 나타내는 이진 변화 마스크로서, 장면의 동적 변화를 효과적으로 제공하는 것을 목적으로 한다^{[14]-[28]}. 그러나 SAR 영상은 일반적으로 speckle 잡음의 영향을 크게 받기 때문에 CDM의 탐지 성능이 저하되는 문제가 존재한다^{[29]-[36]}.

가장 널리 사용되는 비간섭 변화탐지(NC-CD) 기법 중 하나인 차영상(DI: difference image)^[26]은 CDM 생성에 많이 사용되지만, speckle 잡음에 매우 민감하다는 한계가 있다. 또한 speckle 영향을 고려한 로그비 차영상(LRD: log-ratio difference) 기법^[37] 역시 잘 알려져 있다. 한편, 간섭 SAR(InSAR) 분석에서는 복소 간섭도를 형성하므로, 코히어런트 변화탐지(CCD: coherent change detection) 기법을 적용할 수 있다^{[38]-[47]}. 이 경우 코히어런스 영상은 복소 간섭도에 대해 작은 슬라이딩 윈도우를 적용한 상호상관(CC: cross-correlation)을 통해 계산되며, 이로부터 얻어지는 위상 정보는 지표 이동과 표면 변화를 높은 공간 해상도로 반영한다. 그러나 baseline decorrelation, temporal decorrelation, rotational decorrelation 등 여러 비상관 요인으로 인해 coherence 저하가 발생하며, 이는 CCD 성능에 큰 영향을 미친다^[44].

본 논문의 주요 기여는 UQI와 GC를 결합한 새로운 NC-CD 기반 CDM 생성 프레임워크를 제안하는 데 있다. 제안 기법은 기존 CC에 비해 두 SAR 영상 간 강도 유사도 변화에 더 민감한 UQI를 사용함으로써 고품질의 코히어런스 영상을 제공할 수 있다^[48]. 또한 코히어런스 영상의 탐지 성능은 GC의 차수 p 에 크게 의존하므로^{[49]-[51]}, 본 논문에서는 영상 향상과 speckle 잡음 감소 관점에서 p 값의 영향을 분석하였다. 실험에서는 다양한 탐지 성능 지표를 이용하여 제안 기법이 생성한 CDM의 성능을 정량적으로 평가하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 제안 기법을 상세히 설명한다. III 장에서는 여러 실험 결과를 통해 제안 기법의 성능을 검증한다. 마지막으로 IV 장에서 결론을 제시한다.

II. 본 론

2-1 비간섭 변화탐지 기법 분석

동일한 지표 영역에 대해 서로 다른 시점에서 두 장의 SAR 영상을 획득한 경우를 고려하자. 먼저 두 SAR 영상

간 기하 왜곡 및 위치 이동을 제거하기 위해 1 pixel 또는 sub-pixel 수준의 정합(registration)이 선행되어야 한다. 이를 통해 각 해상 셀 내 산란체의 상대적 위치는 거의 유지된다고 가정할 수 있다. 또한 산란 계수가 입사각에 따라 크게 달라지는 경우에는 정합된 SAR 영상으로부터 입사각을 고려하여 sigma-nought 영상을 얻을 수 있다. InSAR 구성에서 정제된 간섭 위상을 신뢰성 있게 획득할 수 있다면, master 영상과 정합된 slave 영상 사이의 복소 CC를 작은 윈도우(5×5 또는 10×10)에서 계산하여 CCD를 수행할 수 있다^[46].

그러나 본 논문에서는 보존된 간섭 위상을 이용하지 않고, SAR 영상의 강도 변화만을 이용하는 NC-CD의 동작에 초점을 맞춘다. 영상의 각 화소 강도는 인접 화소와 밀접하게 연관되어 있으며 관측 장면의 변화를 반영하므로, NC-CD는 비교적 단순한 구조로도 우수한 변화탐지 성능을 기대할 수 있다. 크기가 $M \times N$ 인 두 정합된 SAR 영상을 각각

$$I_1 = \{i_1(m, n) | 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N\} \quad (1)$$

$$I_2 = \{i_2(m, n) | 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N\} \quad (2)$$

라 하자. 이때 NC-CD에서 코히어런스 영상은 두 절댓값 영상 ($|i_1(m, n)|$ 과 $|i_2(m, n)|$)에 대해 작은 슬라이딩 윈도우를 적용한 CC로 계산되며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\gamma_C = \frac{\sigma_{\alpha\beta}}{\sigma_\alpha\sigma_\beta} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= \sqrt{\frac{1}{N'M'-1} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^{M'} (|i_1(m, n)| - \bar{\alpha})^2}, \\ \sigma_\beta &= \sqrt{\frac{1}{N'M'-1} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^{M'} (|i_2(m, n)| - \bar{\beta})^2}, \\ \sigma_{\alpha\beta} &= \frac{1}{N'M'-1} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^{M'} (|i_1(m, n)| - \bar{\alpha})(|i_2(m, n)| - \bar{\beta}), \\ \bar{\alpha} &= \frac{1}{N'M'} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^{M'} |i_1(m, n)|, \\ \bar{\beta} &= \frac{1}{N'M'} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^{M'} |i_2(m, n)|, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 M' 는 방위(azimuth) 방향 윈도우 폭, N' 는 사선거

리(slant-range) 방향 윈도우 폭을 의미한다. 한편 γ_C 는 수학적으로 잘 정의되지만, 기존 연구^[48]에 따르면 두 영상 간 강도 변화에 대한 민감도 측면에서 UQI가 γ_C 보다 더 적합한 유사도 척도이다. UQI는 상관 손실, 밝기 왜곡, 대비 왜곡의 세 요소를 모델링하여 구조 왜곡 정도를 측정하도록 설계되었기 때문에, 영상 유사도 측면에서 정보 손실을 평가하는 데 더욱 적합하다. UQI는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\gamma_Q = \frac{4\sigma_{\alpha\beta}\bar{\alpha}\bar{\beta}}{(\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\beta}^2)[(\bar{\alpha})^2 + (\bar{\beta})^2]} \quad (5)$$

여기서 α 와 β 는 각각 두 SAR 영상 I_1 과 I_2 에서 동일한 위치를 중심으로 하는 $M' \times N'$ 국소 윈도우 내 강도 표본을 의미한다. $\bar{\alpha}$ 와 $\bar{\beta}$ 는 각 국소 윈도우의 평균 강도이며, σ_{α}^2 와 σ_{β}^2 는 각 윈도우 내 강도 분산, $\sigma_{\alpha\beta}$ 는 두 윈도우 간 공분산을 나타낸다. 식 (5)의 UQI는 상관 성분, 밝기 성분, 대비 성분의 곱으로 해석될 수 있다. 상관 성분은 두 국소 윈도우 사이의 상관성을, 밝기 성분은 평균 밝기 차이를, 대비 성분은 대비 차이를 반영한다. 따라서 UQI는 단순 CC와 달리 두 SAR 영상 간 국소 강도 구조의 변화, 밝기 변화, 대비 변화를 동시에 고려할 수 있으며, 이는 변화 영역의 경계와 미세한 강도 변화를 보존하는 데 유리하다.

UQI는 두 영상이 동일할 경우 1로 수렴한다. 따라서 UQI 기반 NC-CD는 변화 영역의 경계와 같은 세부 정보를 잘 보존하는 고품질 코히어런스 영상을 생성할 수 있다. 그러나 SAR 영상은 본질적으로 speckle 잡음을 포함하므로, 이러한 불필요한 speckle이 포함된 코히어런스 영상은 신뢰성 있는 CDM 생성에 장애가 될 수 있다. 따라서 speckle 저감 기법이 요구된다.

2-2 감마 보정의 적용

speckle 잡음 감소를 위해 감마 보정(GC)을 적용하기에 앞서, 입력 영상의 밝기 레벨을 반전하여 negative 영상을 생성하는 NT(negative transformation)을 선행 적용하였다. negative 영상 x 는 식 (6)과 같이 표현된다^[49].

$$x = 1 - \gamma_O \quad (6)$$

여기서 $0 \leq x \leq 1$ 이다. NT는 전체 영상에서 고코히어런스 영역(white region)이 우세한 경우, 그 안에 포함된 저코히어런스 변화 영역(dark detail)을 강조하는 데 적합하다. 이후 power-law transformation, 즉 GC는 식 (7)과 같이 정의된다^[51].

$$y = cx^p \quad (7)$$

여기서 x 와 y 는 각각 입력 CDM과 출력 CDM의 화소 강도이며, p 는 임의의 실수, c 는 양의 상수이다. 본 논문에서는 $c=1$ 로 설정하였다.

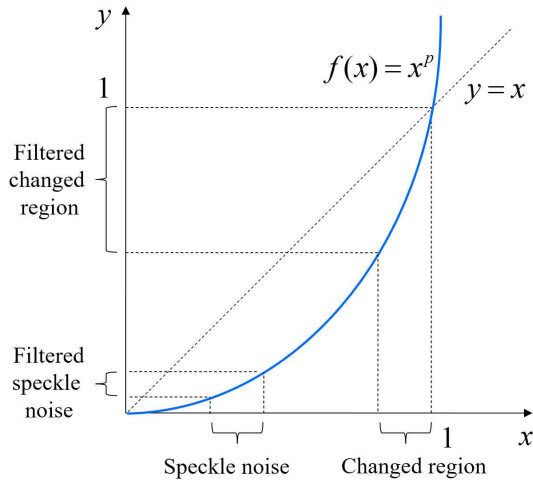
일반적으로 CDM에서 speckle 잡음의 강도는 실제 변화 영역의 강도보다 작기 때문에, GC 필터링은 실제 변화 영역에 대한 정보는 대부분 유지하면서 speckle 잡음을 크게 줄일 수 있다(그림 1(a)). GC는 p 값에 따라 영상 향상과 speckle 저감 성능이 다양하게 변하므로, 적절한 p 를 선택하면 잡음이 거의 없는 CDM에 가까운 결과를 얻을 수 있다(그림 1(b)). GC 성능이 p 에 크게 의존하므로, CDM의 평균 에너지(AE: average energy)를 최적화하여 p 를 준최적으로 선택하는 heuristic approach가 필요하다. AE는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$AE(p) = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y(m,n) \quad (8)$$

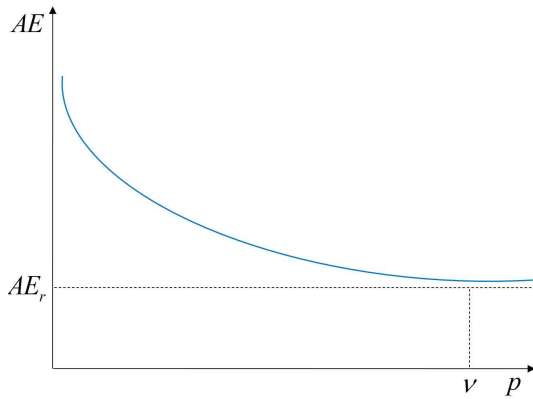
AE는 변화 영역에 해당하는 AE_r 와 speckle 잡음에 해당하는 AE_n 의 두 성분으로 분해할 수 있다. 주목할 점은 어떤 실수 ν 가 존재하여, $p \rightarrow \nu$ 일 때 CDM 내에 분포한 AE_n 이 0으로 수렴하기 시작한다는 것이다. 이는 일반적으로 p 가 증가함에 따라 AE_n 의 감소율이 AE_r 의 감소율보다 크기 때문이다. 따라서 AE는 그림 1(b)와 같이 잡음 없는 CDM에 가까운 AE_r 로 수렴하는 경향을 가지며, 다음 관계가 성립한다.

$$\lim_{p \rightarrow \nu} AE(p) = \lim_{p \rightarrow \nu} AE_r(p) \quad (9)$$

따라서 AE의 수렴이 시작되는 지점, 즉 $p=\nu$ 에서 p 를 선택하는 것은 영상 향상과 speckle 저감 측면에서 전역 최적해에 합리적으로 도달하게 한다. 이에 따라 원하는



(a) GC 필터링 개념도
(a) Illustration of the GC filtering



(b) p 값에 따른 AE 그래프
(b) AE versus value of p

그림 1. GC 필터링 개념도 및 p 값에 따른 AE 그래프
Fig. 1. Illustration of the GC filtering and AE versus value of p .

CDM 복원은 식 (10) 최적화 문제를 풀어 수행할 수 있다.

$$(P): \min p \text{ subject to } \frac{d}{dp} AE(p) \geq \sigma \quad (10)$$

여기서 σ 는 작은 음의 임계값이다. 적응적 임계값 설정을 위한 체계적인 접근이 필요하며, p 파라미터에 대한 exhaustive search 기반의 다양한 시뮬레이션 결과에 따르면, SAR NC-CD 프레임워크 내에서 변화 영역의 형상과 크기, 레이더 파라미터와 무관하게 전역 최적해를 얻기

위해 다음 주변에서 최적화하는 것이 바람직하였다.

$$\sigma = AE'(p)|_{p=1} \times (\log(N')^2 + \log(M')^2)/100 \quad (11)$$

초기 미분 계수 $AE'(p)|_{p=1}$ 는 원본 영상에서 변화 영역이 차지하는 비율을 설명하는 data-driven parameter로 활용된다.

GC 차수 p 는 제안 기법의 speckle 억제 강도를 제어하는 핵심 파라미터이다. p 가 작을 경우 x^p 변환에 의한 저강도 speckle 억제가 충분하지 않아 false alarm이 증가할 수 있다. 반면 p 가 지나치게 클 경우 실제 변화 영역 중 상대적으로 약한 강도 값을 갖는 화소도 함께 억제되어 DR이 감소할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 참조 지도를 사용하지 않고, CDM의 평균 에너지 $AE(p)$ 변화율에 기반하여 p 를 선택하였다.

또한 γ_Q 계산을 위한 윈도우 크기는 변화 영역 경계와 같은 세부 정보를 보존하기 위해 작은 윈도우로서 $M' \leq 4$, $N' \leq 4$ 범위에서 임의로 선택할 수 있다. 추가적으로 제안 기법에서는 CDM 내 잔류 speckle을 줄이기 위해 후처리로 3x3 median filter를 적용할 수 있다. 제안 기법의 전체 흐름도는 그림 2와 같다.

III. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 II장에서 제안한 CDM 복원 기법의 성능을 평가하고, 기존 변화탐지 기법들과 비교한다.

3-1 데이터셋 구성

제안 기법의 CDM 탐지 성능을 검증하기 위해 두 개의 데이터셋(dataset 1, 2)을 사용하였다. Dataset 1(그림 3)은 1999년 4월과 5월에 스위스 Bern 지역에서 ERS-2 위성이 획득한 크기 505x494의 두 SAR 영상으로 구성된다.

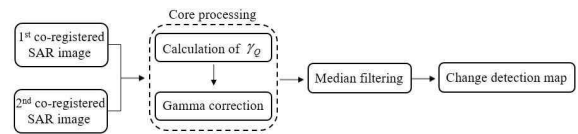
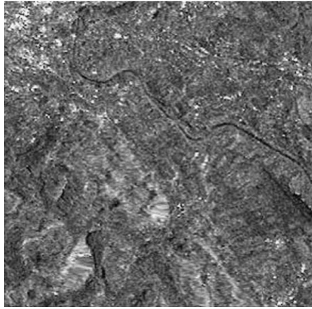
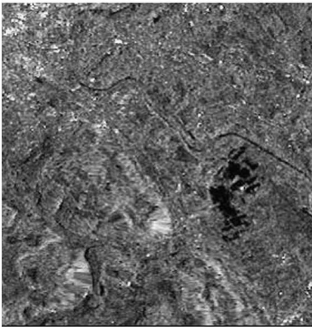


그림 2. 제안한 기법의 흐름도
Fig. 2. Flowchart of the proposed method.



(a) 홍수 전의 SAR 영상
(a) SAR image acquired in April 1999 before the flooding



(b) 홍수 범람 후 SAR 영상
(b) SAR image acquired in May 1999 after flooding



(c) 참조영상
(c) The reference map, called ground truth

그림 3. Bern 도시의 다중시점 SAR 영상
Fig. 3. Multi-temporal SAR images of the city of Bern.

Dataset 2(그림 4)는 1997년 5월과 8월에 캐나다 Ottawa 지역에서 RADARSAT 센서로 획득한 크기 350×290의 두 SAR 영상으로 구성된다. Bern과 Ottawa 모두 두 시점 사이에 특정 영역이 홍수로 침수되었다. 침수 영역 검출을



(a) 홍수 발생 중 SAR 영상
(a) SAR image acquired in May 1997 during the flooding



(b) 홍수 범람 후 SAR 영상
(b) SAR image acquired in August 1997 after flooding



(c) 참조영상
(c) The reference map, called ground truth

그림 4. Ottawa 도시의 다중시점 SAR 영상
Fig. 4. Multi-temporal SAR images of the city of Ottawa.

위한 CDM의 정량적 평가를 위해, 그림 3(c) 및 그림 4(c)에 해당하는 참조 지도(reference map, ground truth)는 사

전 정보와 사진 판독을 결합한 수작업 분석을 통해 생성되었다.

3-2 탐지 성능 지표

탐지 성능 평가는 결과 영상의 각 화소를 참조 지도와 직접 비교하여 FA(false alarm), DR(detection rate), κ (kappa index)를 계산하는 방식으로 수행하였다⁴⁾. 이 지표들은 변화 화소를 정확히 분류하거나 잘못 식별한 화소 수를 기반으로 탐지 성향을 분석하는 데 사용된다. TP(true positive)는 참조 지도와 결과 영상 모두에서 변화 영역으로 검출된 화소 수이며, 그 비율은

$$p_{TP} = TP / (M \times N) \quad (12)$$

이다. TN(true negative)는 참조 지도와 결과 영상 모두에서 비변화 영역으로 검출된 화소 수이며,

$$p_{TN} = TN / (M \times N) \quad (13)$$

으로 계산된다. FP(false positive)는 참조 지도에서는 변화 영역이나 결과 영상에서는 비변화 영역으로 판정된 화소 수가 아니라, 정의에 따라 결과에서는 변화로 검출되었으나 참조에서는 비변화인 화소 수이며 그 비율은

$$p_{FP} = FP / (M \times N) \quad (14)$$

이다. FN(false negative)는 참조 지도에서는 변화이나 결과에서는 비변화로 판정된 화소 수이며, 그 비율은

$$p_{FN} = FN / (M \times N) \quad (15)$$

이다. 또한 오차 행렬과 우연 일치(chance agreement)를 고려한 일치도 지표인 kappa statistic index는 식 (16)과 같이 정의된다¹⁴⁾.

$$\kappa = \frac{A - B}{1 - B} \quad (16)$$

여기서

$$A = 1 - p_{FP} - p_{FN} \quad (17)$$

이고

$$B = (p_{TP} + p_{FP}) \times (p_{TP} + p_{FN}) + (p_{TN} + p_{FN}) \times (p_{TN} + p_{FP}) \quad (18)$$

이다. κ 값이 클수록 탐지 성능이 우수함을 의미한다. 추가로 FA와 DR은 각각

$$(FP + FN) / (M \times N), TP / CR \quad (19)$$

로 정의되며, 여기서 CR은 참조 지도에서 변화 영역으로 지정된 화소 수이다. 최종 정확도는 PCD(proportion of correct detection)로 평가하였으며,

$$(TP + TN) / (TP + FP + FN + TN) \quad (20)$$

으로 계산하였다.

3-3 제안 기법으로 생성된 CDM 분석

상기 실험 환경에서 DI, LRD, 그리고 제안 기법을 적용하여 CDM 탐지 성능을 비교하였다. DI 및 LRD 영상은 생성 후 constant false alarm rate(CFAR) 검출을 적용하여 CDM을 생성하였다. 공정한 비교를 위해 DI와 LRD로부터 생성된 연속형 change intensity map에는 동일한 CFAR 기반 thresholding 절차를 적용하였다. DI map과 LRD map은 각각 식 (21) 및 식 (22)와 같이 정의하였다.

$$D_{DI}(m, n) = |I_2(m, n) - I_1(m, n)| \quad (21)$$

$$D_{LRD}(m, n) = \left| \log \frac{I_2(m, n) + \epsilon}{I_1(m, n) + \epsilon} \right| \quad (22)$$

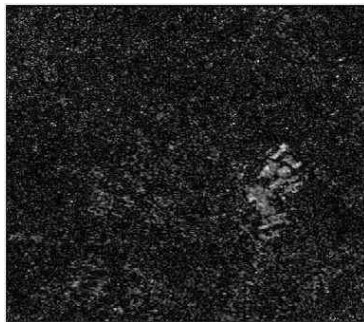
여기서 ϵ 은 로그 연산의 수치적 안정성을 위한 작은 양의 상수이다. 각 map은 [0,1] 범위로 정규화한 후 CFAR 검출기에 입력하였다. CFAR 검출에서는 각 test cell을 중심으로 15×15 크기의 국소 window를 설정하고, 중심부 5×5 guard window를 제외한 200개의 화소를 training cell로 사용하였다. 이후 training cell로부터 지역 배경 평균 μ_b 와 표준편차 σ_b 를 추정하고, threshold를 $T = \mu_b + \lambda \sigma_b$ 로 설정하였다. 본 논문에서는 DI와 LRD 모두에 대해 동일하게 $\lambda=2.5$ 를 사용하였다. 최종적으로 $D(m, n) > T(m, n)$ 인 화소는 변화 영역으로, 그렇지 않은 화소는 비변화 영역으로 판정하였다. 경계 영역에서는 mirror padding을 적용하여 모

든 화소에 대해 동일한 CFAR 연산이 수행되도록 하였다. 참조 지도는 threshold 설정에는 사용하지 않았으며, 최종 FA, DR, κ , PCD 계산에만 사용하였다.

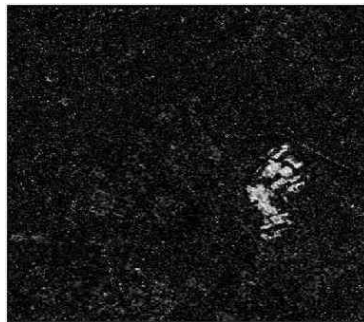
한편, 제안 기법에서는 변화 영역의 경계 정보를 보존하기 위해 γ_Q 계산 윈도우를 $M'=2, N'=2$ 로 설정하였다. 또한 최적화 문제 해결을 위한 σ 값은 dataset 1과 dataset 2에 대해 각각 $-0.003, -0.023$ 으로 설정하였다. 홍수 영역과 같은 주요 변화 영역은 그림 5 및 그림 6에서 잘 추출됨을 확인할 수 있다. 특히 제안 기법으로 얻은 CDM 결과(그림 5(c) 및 그림 6(c))는 시각적으로 참조 지도와

매우 유사하였다.

정량적 평가를 위해 각 기법의 탐지 성능을 표 1 및 표 2에 정리하였다. 제안 기법은 두 데이터셋 모두에서 세 기법 중 가장 작은 FA 값을 나타냈다. 또한 제안 기법의 κ 및 PCD 값은 두 기존 기법보다 현저히 크게 나타났다. 따라서 본 실험에서 제안 기법이 생성한 CDM의 품질은 정량적 성능 지표 측면에서 가장 우수하다고 판단된다. 요약하면, 제안 기법은 CDM에 포함된 불필요한 speckle 잡음을 효과적으로 억제하면서 변화탐지 성능을 유의미하게 향상시켰다.



(a) DI를 통해 획득한 CDM 영상
(a) CDM reconstructed by the DI

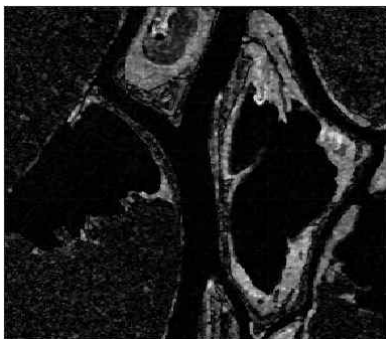


(b) LRD를 통해 획득한 CDM 영상
(b) CDM reconstructed by the LRD



(c) 제안한 기법을 통해 획득한 CDM 영상
(c) CDM reconstructed by the proposed method

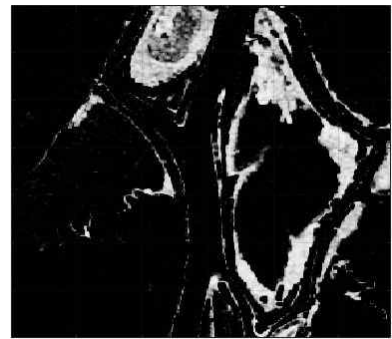
그림 5. 3가지 CD 기법을 통해 형성된 CDM 결과
Fig. 5. CDMs using dataset 1 obtained by three CD algorithms.



(a) DI를 통해 획득한 CDM 영상
(a) CDM reconstructed by the DI



(b) LRD를 통해 획득한 CDM 영상
(b) CDM reconstructed by the LRD



(c) 제안한 기법을 통해 획득한 CDM 영상
(c) CDM reconstructed by the proposed method

그림 6. 3가지 CD 기법을 통해 형성된 CDM 결과
Fig. 6. CDMs using dataset 2 obtained by three CD algorithms.

표 1. Dataset 1을 이용한 변화 탐지 결과의 비교
Table 1. Comparison of change detection using dataset 1.

Method	FP	FN	FA (%)	DR (%)	κ	PCD (%)
DI	748	12,939	5.486	81.10	0.479	94.44
LRD	610	8,845	3.790	76.22	0.526	95.26
Proposed	321	1362	0.677	65.60	0.855	99.32

표 2. Dataset 2을 이용한 변화 탐지 결과의 비교
Table 2. Comparison of change detection using dataset 2.

Method	FP	FN	FA (%)	DR (%)	κ	PCD (%)
DI	2,566	3,192	5.673	80.11	0.784	94.33
LRD	2,212	2,753	4.891	82.34	0.805	94.76
Proposed	1,966	2,204	4.134	86.18	0.844	95.87

3-4 파라미터 민감도 분석

앞 절에서는 제안 기법이 DI 및 LRD 대비 우수한 정량 성능을 보임을 확인하였다. 본 절에서는 제안 기법의 주요 파라미터인 UQI 계산 윈도우 크기와 GC 차수 p 가 성능에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 UQI 윈도우 크기를 2×2, 3×3, 4×4로 변화시키고, AE 기반으로 선택된 p^* 를 기준으로 p/p^* 를 변화시키며 FA, DR, κ , PCD를 비교하였다. 표 3은 UQI 윈도우 크기에 따른 성능 변화를 나타내며, 표 4는 AE 기반으로 선택된 p^* 를 기준으로 p 를 변화시킨 결과를 나타낸다. p^* 는 식 (10)의 AE 변화율 기준에 의해 선택된 GC 차수를 의미한다. 모든 경우에서 UQI 윈도우 크기는 2×2로 고정하였다.

표 3. UQI 윈도우 크기에 따른 변화탐지 성능 비교
Table 3. Change detection performance according to UQI window size.

Dataset	UQI window size	FA (%)	DR (%)	κ	PCD (%)
Dataset 1	2×2	0.677	65.60	0.855	99.32
	3×3	0.721	64.18	0.842	99.27
	4×4	0.846	61.72	0.811	99.15
Dataset 2	2×2	4.134	86.18	0.844	95.87
	3×3	4.256	84.97	0.831	95.74
	4×4	4.582	82.68	0.807	95.42

표 4. 감마 보정 차수 p 에 따른 변화탐지 성능 비교
Table 4. Change detection performance according to the GC order p .

Dataset	p/p^*	FA (%)	DR (%)	κ	PCD (%)
Dataset 1	0.50	1.324	68.42	0.742	98.68
	0.75	0.884	66.91	0.812	99.12
	1.00	0.677	65.60	0.855	99.32
	1.25	0.763	61.92	0.819	99.24
	1.50	0.941	57.80	0.771	99.06
Dataset 2	0.50	5.326	89.41	0.790	94.67
	0.75	4.562	87.76	0.824	95.44
	1.00	4.134	86.18	0.844	95.87
	1.25	4.318	83.54	0.829	95.68
	1.50	4.741	79.62	0.799	95.26

3-5 소거 연구

앞 절의 민감도 분석이 파라미터 설정의 안정성을 검증하기 위한 것이라면, 본 절에서는 제안 기법을 구성하는 UQI, GC, median filtering의 개별 기여도를 확인한다. 이를 위해 기존 CC 기반 NC-CD, UQI-only NC-CD, UQI+GC, 그리고 최종 제안 기법의 성능을 비교하였다. 표 5는 제안 기법의 각 구성 요소가 변화탐지 성능에 미치는 영향을 확인하기 위한 ablation study 결과를 나타낸다. CC는 기존 cross-correlation 기반 NC-CD를 의미하며, UQI는 감마 보정을 적용하지 않은 UQI-only NC-CD를 의미한다. UQI+GC는 UQI 기반 NC-CD에 감마 보정만

표 5. 제안 기법의 ablation study 결과
Table 5. Ablation study of the proposed method.

Dataset	Method	FA (%)	DR (%)	κ	PCD (%)
Dataset 1	CC	7.932	43.28	0.312	92.07
	UQI	1.486	69.74	0.718	98.51
	UQI+GC	0.821	66.92	0.824	99.18
	Proposed	0.677	65.60	0.855	99.32
Dataset 2	CC	7.648	73.85	0.672	92.35
	UQI	5.487	88.61	0.793	94.51
	UQI+GC	4.392	86.94	0.831	95.61
	Proposed	4.134	86.18	0.844	95.87

적용한 경우이며, Proposed는 UQI+GC 이후 3×3 median filtering을 추가한 최종 제안 기법이다. 실험 결과, CC 기반 NC-CD는 두 데이터셋 모두에서 가장 높은 FA와 낮은 κ 를 보였다. UQI를 적용하면 변화 영역의 강도 유사도 변화가 보다 효과적으로 반영되어 κ 와 PCD가 크게 향상되었다. 또한 GC를 추가하면 잔류 speckle이 억제되어 FA가 감소하였으며, 최종적으로 median filtering을 적용한 Proposed 방법에서 가장 높은 κ 와 PCD를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다중시기 SAR 영상에서 효과적인 변화탐지를 위한 새로운 NC-CD 프레임워크를 제안하였다. 제안 기법의 처리 절차는 UQI를 이용한 코히어런스 영상 생성과 GC 기반 필터링으로 구성된다. 제안 기법은 작은 윈도우 내에서 두 SAR 영상 간 미세한 강도 변화를 측정하는 UQI의 특성에 주목하여, 고품질 코히어런스 영상을 안정적으로 생성할 수 있도록 설계되었다. 또한 제안 기법의 탐지 성능은 power-law 함수인 GC의 차수 p 에 의존하며, 본 논문에서는 잡음이 억제된 CDM 생성을 위해 최적의 p 값을 선택하는 방법을 구체적으로 제시하였다. 나아가 InSAR 구성이 충족되는 경우, 제안 기법은 CCD 접근에 준하는 우수한 CDM 생성 성능도 기대할 수 있다. 실험 결과를 통해 제안 기법이 다양한 탐지 성능 지표 측면에서 우수한 변화탐지 성능을 제공함을 확인하였다.

한편, 제안 기법은 몇 가지 한계를 가진다. 첫째, UQI는 국소 윈도우 기반으로 계산되므로 영상 정합 오차가 존재하거나 변화 영역의 경계가 매우 복잡한 경우 성능이 저하될 수 있다. 둘째, GC 차수 p 는 AE 변화율에 기반하여 선택되지만, 이는 여전히 heuristic 성격을 갖기 때문에 다양한 센서, 지형, 계절 조건에 대해 추가적인 검증이 필요하다. 셋째, 본 논문의 실험은 Bern 및 Ottawa 홍수 데이터셋을 중심으로 수행되었으므로, 도시 변화, 산림 변화, 농경지 변화 등 다양한 변화 양상에 대한 일반화 성능 분석이 요구된다. 향후 연구에서는 영상 특성에 따라 UQI 윈도우 크기와 GC 차수 p 를 자동으로 조정하는

adaptive parameter selection 기법을 개발하고, 딥러닝 기반 변화탐지 기법 및 InSAR 기반 CCD 프레임워크와의 결합 가능성을 검토할 예정이다.

References

- [1] J. C. Curlander, R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2012.
- [2] S. H. Lee, I. O. Choi, M. S. Kang, and K. T. Kim, "Efficient sparse representation algorithm for accurate DOA estimation of multiple targets with single measurement vector," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 1, pp. 31-37, Jan. 2018.
- [3] M. Kang, J. Baek, "Efficient and accurate synthesis for array pattern shaping," *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5537, Jul. 2022.
- [4] M. Kang, J. Baek, "SAR image change detection via multiple-window processing with structural similarity," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6645, Oct. 2021.
- [5] M. S. Kang, J. M. Baek, "Effective denoising of InSAR phase images via compressive sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 17772-17779, May 2024.
- [6] M. S. Kang, K. T. Kim, "Automatic SAR image registration via Tsallis entropy and iterative search process," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 14, pp. 7711-7720, Jul. 2020.
- [7] M. S. Kang, Y. J. Won, B. G. Lim, and K. T. Kim, "Efficient synthesis of antenna pattern using improved PSO for spaceborne SAR performance and imaging in presence of element failure," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 16, pp. 6576-6587, Aug. 2018.
- [8] M. S. Kang, "SAR target classification enhancement via synthetic defocused image augmentation using kinematic motion modeling," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 6096-6105, Jan. 2026.
- [9] M. S. Kang, "Enhanced SAR image formation via a modified omega-K algorithm," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 163509-163520, Sep. 2025.

- [10] S. B. Chae, M. S. Kang, "Comparison of spatial- and frequency-domain-based SAR target classification performance," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 5, pp. 528-534, May 2025.
- [11] S. B. Chae, M. S. Kang, "Comparison of spatial- and eigenspace-domain-based deep learning SAR target classification performances," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 6, pp. 585-593, Jun. 2025.
- [12] S. B. Chae, M. S. Kang, "Multidomain-based deep learning for synthetic aperture radar target classification," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 7, pp. 708-715, Jul. 2025.
- [13] M. S. Kang, S. H. Lee, K. T. Kim, and J. H. Bae, "Bistatic ISAR imaging and scaling of highly maneuvering target with complex motion via compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 6, pp. 2809-2826, Dec. 2018.
- [14] S. J. Jeong, B. S. Kang, M. S. Kang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling using radon transform and its projection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 5, pp. 2590-2600, Oct. 2018.
- [15] M. S. Kang, K. T. Kim, "ISAR imaging and cross-range scaling of high-speed manoeuvring target with complex motion via compressive sensing," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, no. 3, pp. 301-311, Mar. 2018.
- [16] M. S. Kang, S. J. Lee, S. H. Lee, and K. T. Kim, "ISAR imaging of high-speed maneuvering target using gapped stepped-frequency waveform and compressive sensing," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 10, pp. 5043-5056, Oct. 2017.
- [17] B. S. Kang, M. S. Kang, I. O. Choi, C. H. Kim, and K. T. Kim, "Efficient autofocus chain for ISAR imaging of non-uniformly rotating target," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 17, pp. 5466-5478, Sep. 2017.
- [18] M. S. Kang, B. S. Kang, S. H. Lee and K. T. Kim, "Bistatic-ISAR distortion correction and range and cross-range scaling," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5068-5078, Aug. 2017.
- [19] B. S. Kang, J. H. Bae, M. S. Kang, E. Yang, and K. T. Kim, "Bistatic-ISAR cross-range scaling," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 4, pp. 1962-1973, Aug. 2017.
- [20] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [21] S. H. Lee, J. H. Bae, M. S. Kang, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus technique using eigenimages," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, pp. 605-616, Feb. 2017.
- [22] M. S. Kang, J. H. Bae, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus via minimization of Tsallis entropy," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 6, pp. 2950-2960, Dec. 2016.
- [23] B. S. Kang, J. H. Bae, M. S. Kang, E. Yang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling via joint estimation of rotation center and velocity," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 4, pp. 2023-2029, Aug. 2016.
- [24] M. S. Kang, J. H. Bae, B. S. Kang and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling using iterative processing via principal component analysis and bisection algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 15, pp. 3909-3918, Aug. 2016.
- [25] M. S. Kang, "Robust ISAR autofocus via Newton-based Tsallis entropy minimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 3505905, Aug. 2025.
- [26] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Norwood, MA, Artech House, 1995.
- [27] M. S. Kang, J. M. Baek, "Robust ISAR autofocus for nonuniformly rotating target," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 4, pp. 8972-8983, Aug. 2025.
- [28] M. S. Kang, K. T. Kim, "Compressive sensing approach for high-resolution ISAR image reconstruction and autofocus," in *IET International Radar Conference*, Nanjing, Oct. 2018, pp. 17-19.

- [29] M. S. Kang, S. H. Lee, S. H. Park, S. Y. Shin, E. Yang, and K. T. Kim, "Inter-pulse motion compensation of an ISAR image generated by stepped chirp waveform using improved particle swarm optimization," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 2, pp. 218-225, Feb. 2015.
- [30] M. S. Kang, "ISAR autofocus using Rényi entropy minimization," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 10, pp. 1003-1009, Oct. 2025.
- [31] M. Gong, Y. Cao, and Q. Wu, "A neighborhood-based ratio approach for change detection in SAR images," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 307-311, Mar. 2012.
- [32] M. S. Kang, J. M. Baek, "Compressive sensing-based omega-K algorithm for SAR focusing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 4003405, Jan. 2025.
- [33] M. S. Kang, J. M. Baek, "SAR image reconstruction via incremental imaging with compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 4, pp. 4450-4463, Aug. 2023.
- [34] M. S. Kang, J. M. Baek, "Efficient SAR imaging integrated with autofocus via compressive sensing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, p. 4514905, Oct. 2022.
- [35] M. S. Kang, K. T. Kim, "Compressive sensing based SAR imaging and autofocus using improved Tikhonov regularization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 14, pp. 5529-5540, Jul. 2019.
- [36] M. S. Kang, K. T. Kim, "Ground moving target imaging based on compressive sensing framework with single-channel SAR," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 1238-1250, Feb. 2020.
- [37] M. N. Sumaiya, R. S. S. Kumari, "Logarithmic mean-based thresholding for SAR image change detection," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 11, pp. 1726-1728, Nov. 2016.
- [38] H. Zhuang, Z. Tan, K. Deng, and G. Yao, "Adaptive generalized likelihood ratio test for change detection in SAR images," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 416-420, Mar. 2020.
- [39] G. Yang, H. C. Li, W. Yang, K. Fu, Y. J. Sun, and W. J. Emery, "Unsupervised change detection of SAR images based on variational multivariate Gaussian mixture model and Shannon entropy," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 826-830, May 2019.
- [40] M. Li, M. Li, P. Zhang, Y. Wu, W. Song, and L. An, "SAR image change detection using PCANet guided by saliency detection," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, no. 3, pp. 402-406, Mar. 2019.
- [41] R. Wang, J. W. Chen, Y. Wang, L. Jiao, and M. Wang, "SAR image change detection via spatial metric learning with an improved Mahalanobis distance," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 77-81, Jan. 2020.
- [42] T. Celik, "Change detection in satellite images using a genetic algorithm approach," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 386-390, Apr. 2010.
- [43] F. Bovolo, L. Bruzzone, "A theoretical framework for unsupervised change detection based on change vector analysis in the polar domain," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 1, pp. 218-236, Jan. 2007.
- [44] 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.
- [45] F. Argenti, L. Alparone, "Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2363-2374, Nov. 2002.
- [46] L. Bruzzone, D. F. Prieto, "Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 3, pp. 1171-1182, May 2000.
- [47] R. F. Hanssen, *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht, Springer, 2001.
- [48] Z. Wang, A. C. Bovik, "A universal image quality index," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 81-84, Mar. 2002.

[49] R. Maimi, H. Aggarwal, "A comprehensive review of image enhancement techniques," *arXiv preprint arXiv:1003.4053*, Mar. 2010.
[50] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*,

2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2002.
[51] S. P. Vimal, P. K. Thiruvikraman, "Automated image enhancement using power law transformations," *Sadhana*, vol. 37, no. 6, pp. 739-745, Jan. 2013.

강 민 석 [국립공주대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7021-6873>



2013년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2015년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2019년 3월~2020년 8월: 국방과학연구소 선임연구원

2020년 9월~2024년 8월: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 조교수

2024년 9월~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 부교수
[주 관심분야] 레이더 신호 및 영상처리, 레이더 영상 활용, 배열 안테나 합성 및 빔 패턴 최적화, 최적화 이론 및 압축센싱 응용, 딥러닝