

Multi-temporal Interferometric SAR 시계열 변위 분석을 통한 산불 피해지역 모니터링 적용 가능성 평가



세종대학교
SEJONG UNIVERSITY

임태석¹, 이보람², 김상완^{2*}

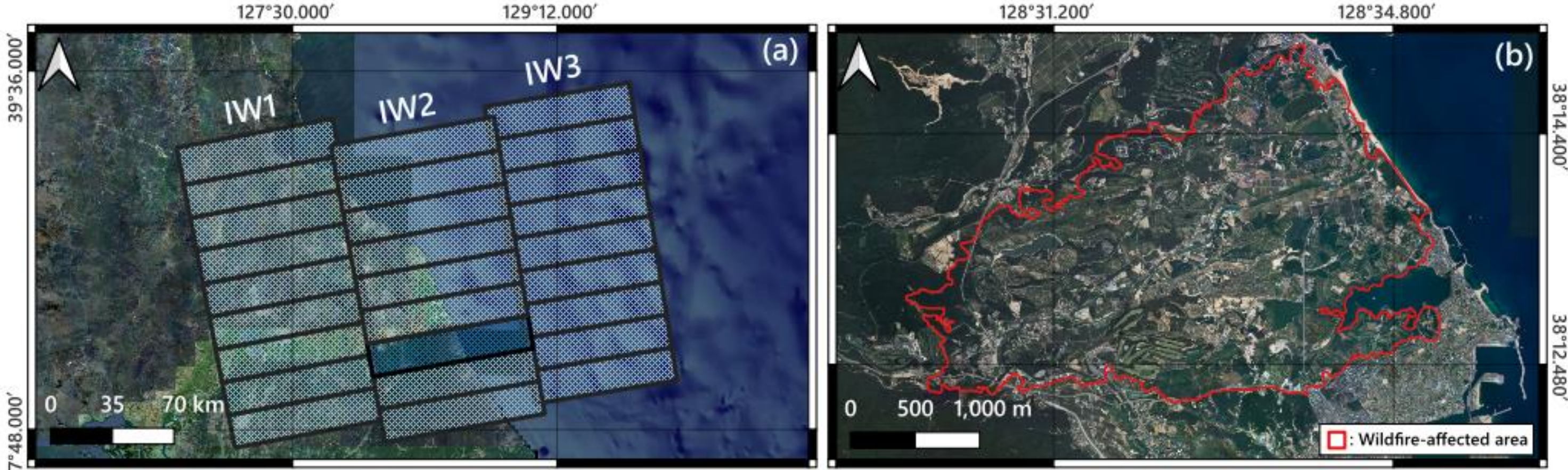
¹ 세종대학교 에너지자원공학과

² 세종대학교 지구자원시스템공학과 (e-mail: swkim@sejong.edu)

Introduction

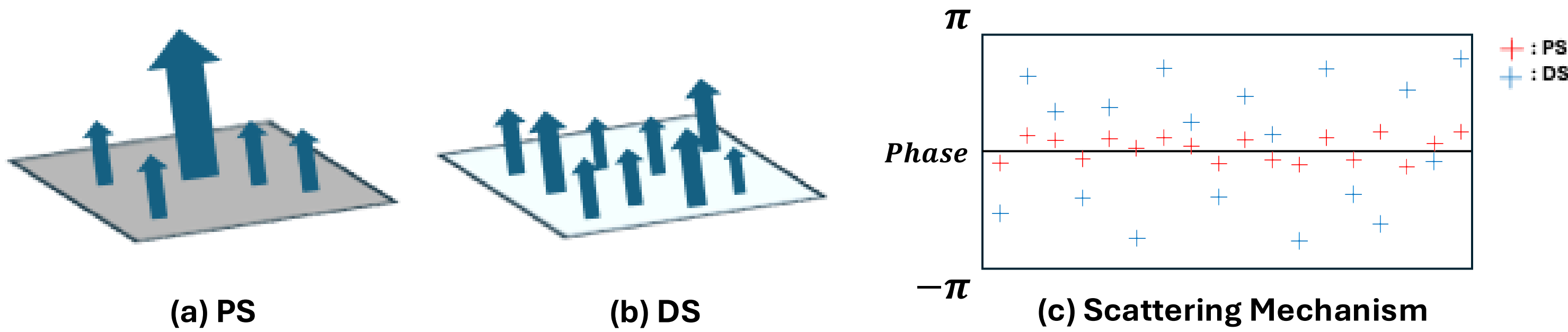
한반도는 봄.가을 건조기에 대규모 산불이 반복적으로 발생하며, 이로 인해 토양 침식의 가속화와 산불 이후 산사태 같은 2차적 재해가 발생한다. 따라서 산불 이후 장기적인 모니터링 프레임워크가 필수적이다. 광학 영상을 통한 모니터링 기법은 구름과 강수, 태양 일사 조건의 제약을 받아 데이터 연속성이 제한된다. 반면 Synthetic Aperture Radar (SAR)은 전천후 주야간 관측이 가능하다. 무료로 활용 가능한 Sentinel-1은 약 250 km swath와 6-12일 재방문 주기를 제공하여, 대규모 지역 모니터링을 위한 최적의 조건을 제공한다. 높은 Time resolution과 넓은 촬영 범위를 활용함으로써, SAR은 Optical 데이터 확보가 어려운 지역에서도 미세한 지표 변형을 탐지할 수 있다. 본 연구에서는 Sentinel-1 영상을 활용하여 2019년 4월 고성 산불 피해 지역을 대상으로, 2019년 5월부터 2024년 12월까지 Differential Interferometric SAR (DInSAR) 시계열 분석을 수행하였다.

1. Data & Study Area



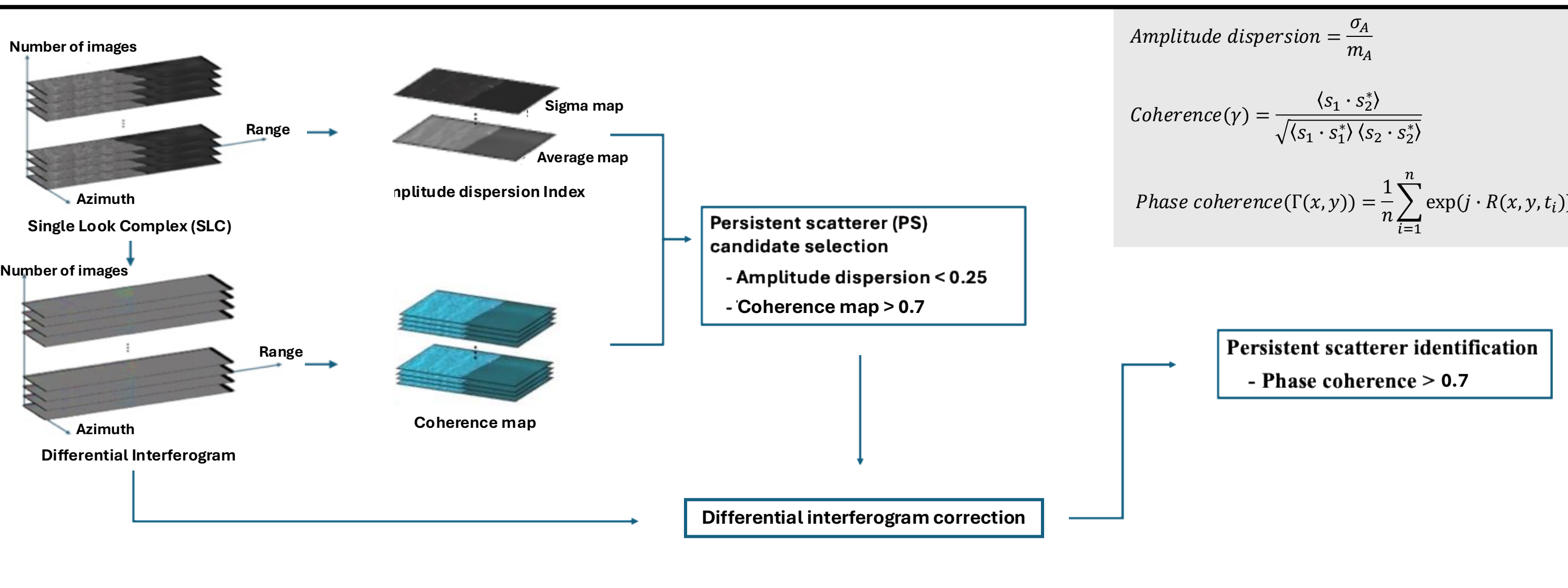
- 2019년 5월부터 2024년 12월 사이에 취득된 총 88개의 Sentinel-1 IW single-look complex (SLC) 장면을 GAMMA software로 전처리하였다.
- Area of interest (AOI)은 2019년 4월 Goseong-Sokcho wildfire scar 전체를 포함하도록 정의하였으며, off-site impacts를 분석하기 위해 추가 buffer zone을 설정하였다.
- (a)에 제시된 세 개의 Interferometric Wide swaths (IW1-IW3) 중 산불 피해 지역을 가장 완전하게 포괄하는 IW2를 선택하였으며, (b)에서는 wildfire-affected area의 경계를 red polygon으로 표시하였다.

2. Types of Scatterers



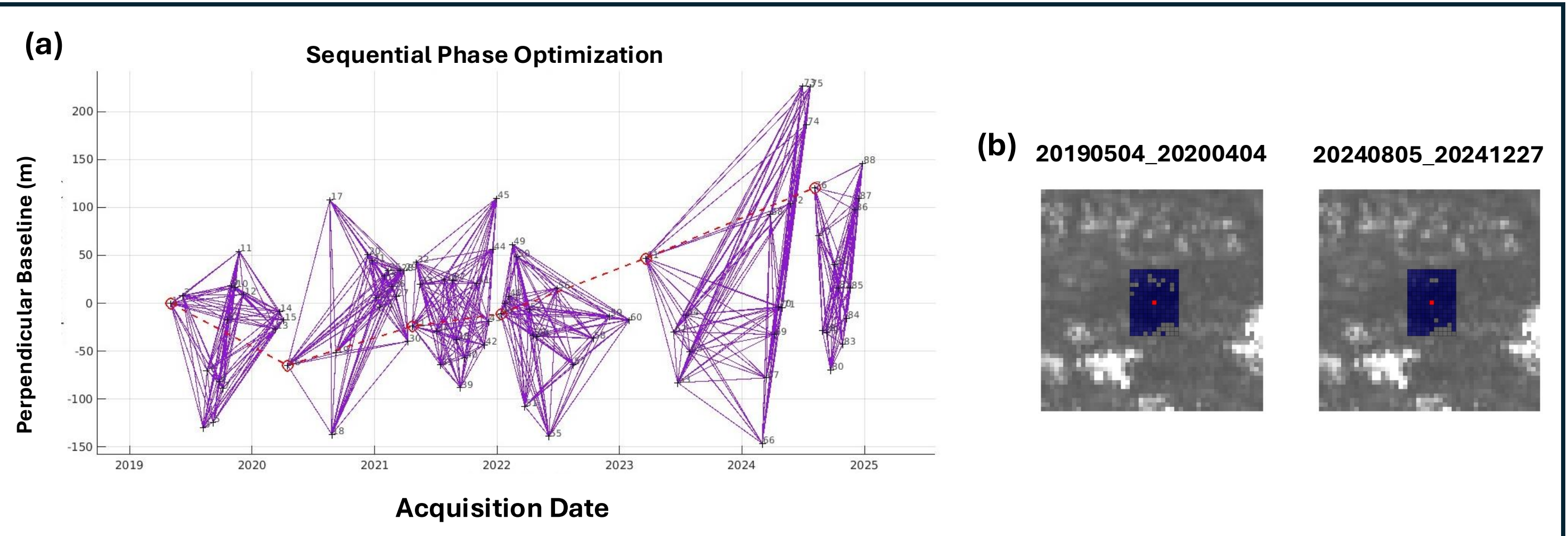
- Phase는 scatterers에 의해 반사된 벡터들의 합으로 표현되며, 구조적 특성에 따라 Persistent Scatterers (PS)와 Distributed Scatterers (DS)로 분류된다. PS는 건물이나 암반과 같은 지배적 타겟에서 안정적인 산란을 보이는 반면, DS는 주로 식생 지역이나 사막 지역에서 관찰되며 불안정한 산란을 나타낸다.

3. PSInSAR



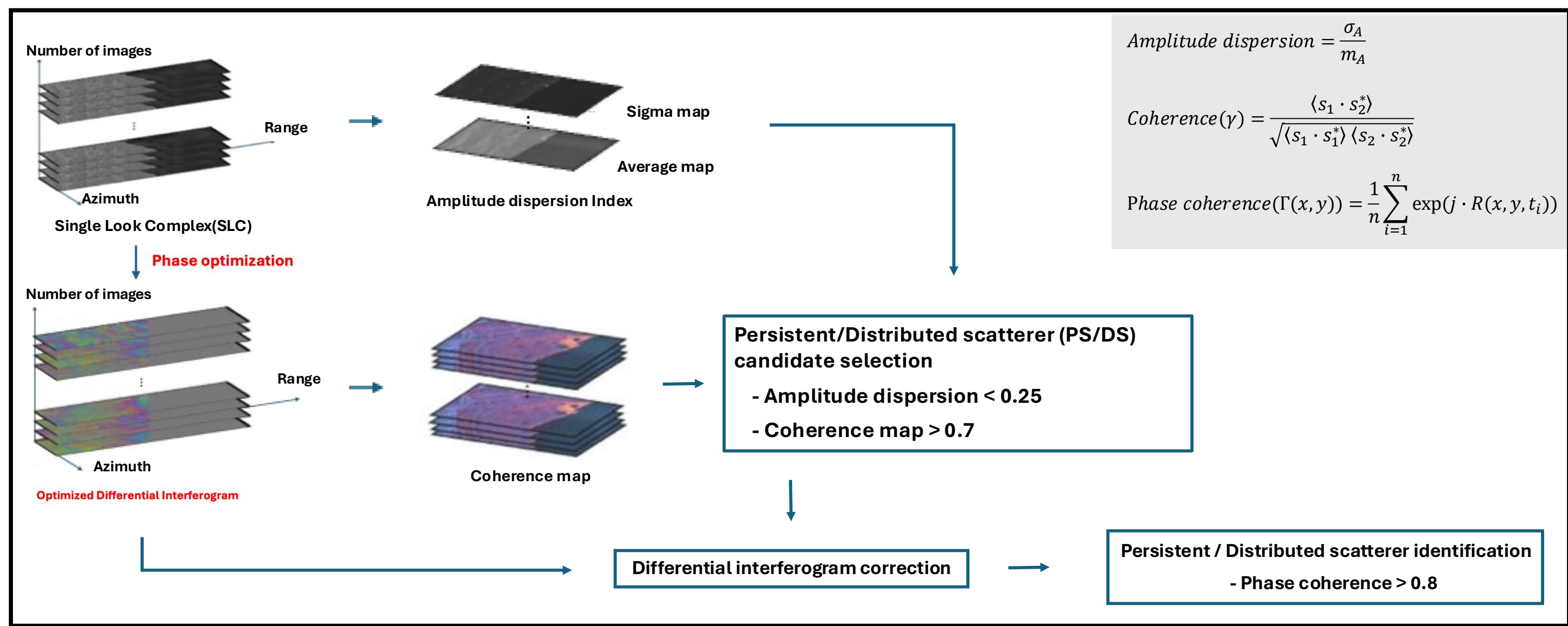
- PSInSAR 처리는 Co-registered SLC 영상에서 Amplitude Dispersion index ≤ 0.25 또는 Coherence ≥ 0.7 기준에 따라 Persistent Scatterer Candidates (PSC)를 추출하는 것으로 시작한다. 이렇게 얻은 PSC는 위상 성분을 보정하고 높이 오차와 Line-of-Sight (LOS) 변위를 추정하는 데 활용된다. PSC의 Time-Series Phase 정보를 사용하면 더 정밀한 위상 보정이 가능하며, least-squares estimation을 적용하여 대기 및 궤도 영향으로 인한 상수·선형·비선형 위상 항을 제거하고 LOS 변위, 높이 오차, 잔여 노이즈만 남긴다.
- 마지막으로 Residual Phase Noise가 낮은 점을 PS로 선정한다.
- 본 연구에서는 최종 PS로 temporal coherence ≥ 0.7 을 만족하는 Scatterer를 선택하였으며, 이는 초기 PSC 선별에 사용된 spatial coherence와는 구분된다.

4. Phase Optimization



- DS를 분석에 포함하기 위해, phase optimization은 DS 위상을 PS와 유사한 산란 거동을 따르도록 보정한다.
- 이 과정은 Statistically Homogeneous Pixels (SHP)의 Sample Covariance Matrix (SCM)에 의존하며, 위상 벡터 추정 과정에서 발생하는 연산량과 temporal decorrelation 문제에 직면한다.
- Sequential Phase Optimization은 데이터를 여러 stack으로 분할하고, 각 stack에서 SHP를 독립적으로 추출하며, 최적화된 위상을 순차적으로 전달한 뒤 마지막으로 Datum connection 단계에서 정렬함으로써 이러한 문제를 완화한다.

5. PSDSInSAR

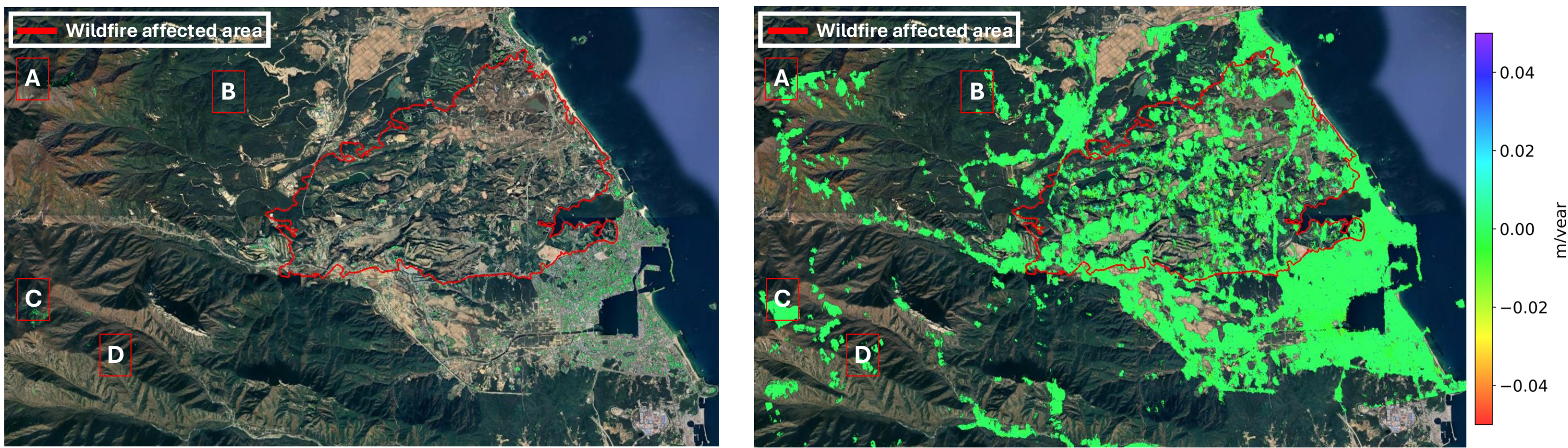


- PSDSInSAR은 DS를 추가적으로 활용함으로써 위상 보정의 정밀도를 향상시키고, 후보 점들에서 대기과 같은 불필요한 위상 성분을 보다 정교하게 제거할 수 있도록 한다.
- 이러한 DS를 포함하기 위해 위상 최적화 과정이 수행된다. 이 과정은 본질적으로 불안정한 DS의 위상을, 시간에 따라 안정적인 위상 특성을 유지하는 PS와 유사한 Scattering mechanism을 따르도록 조정한다.
- phase optimization 이후의 후속 처리 단계는 기존 PSInSAR과 동일하다. 최종 PS/DS scatterers는 phase coherence를 기준으로 선별하였으며, phase coherence가 0.8보다 높은 scatterer만을 고려하였다.

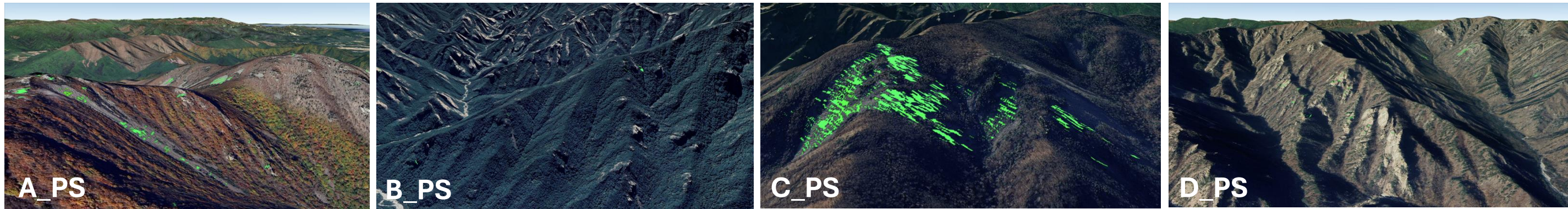
6. Results & discussion

Number of PS points: 62527

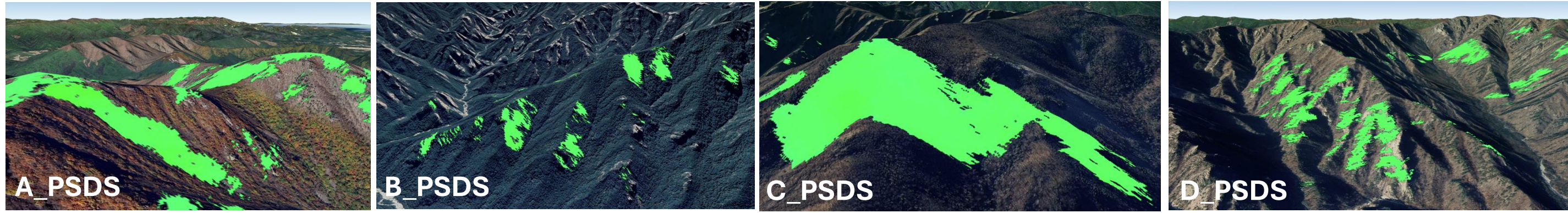
Number of PSDS points: 708577



PSInSAR



PSDSInSAR



- 강원도 고성-속초에서 발생한 산불 피해지역과 그 인근 지역에 대한 PSInSAR과 PSDSInSAR 결과를 비교한다. Coherent Scatterers 수는 62,527개(PS)에서 708,577개(PSDS)로 급증했으며, 이는 분석 가능한 pixels가 약 1,033% 증가한 것에 해당한다.
- PSInSAR 결과(좌)는 Coherent points가 주로 도심지 및 노두에 집중되어 나타나는 반면, PSDSInSAR 결과(우)는 이전에 탐지되지 않았던 식생지역 및 산악지역에 전반으로 공간적 coverage가 크게 확대되었음을 보여준다.
- 이러한 개선은 SHP (Statistically Homogeneous Pixel) modeling을 통한 Distributed scatterers의 Statistical stabilization에 기인한다.
- 하단 A-D 지역은 PSInSAR로는 포착되지 않던 식생지에서 PSDSInSAR가 Coherent points의 밀도를 성공적으로 포착함을 강조한다. 이러한 지역은 산불 이후 debris flow, erosion, shallow landslides에 취약한 사면과 대응된다.
- 더 나아가, Sequential Phase Optimization은 mini-stack framework를 도입하여 계산 부하를 감소시키고 장기적 temporal decorrelation을 완화하였다. 이는 전체 관측 기간(2019년 5월-2024년 12월)에 걸친 변형 신호의 전반적인 phase stability와 연속성을 향상시켰다.
- 해당 기간 동안 산불 피해 지역에서 유의미한 변형은 관측되지 않았으며, 이는 화재 직후 시행된 복구 조치의 효과와 구조적 안정성에 따른 결과로 판단된다.

7. Conclusion

- Persistent 및 Distributed Scatterers를 활용한 PSDSInSAR의 적용은 기존 PSInSAR 대비 Coherent points의 밀도와 Spatial Coherence를 크게 향상시켰다.
- 이러한 개선은 일반적으로 PS를 기반으로한 분석에서 산악지형 및 식생지역에서도 신뢰도 높은 time-series deformation monitoring을 가능하게 한다.
- 이러한 Coherent scatterers의 증가는, 본 연구에서 적용된 PSDSInSAR framework가 산불 피해지역 뿐만 아니라 자연재해 피해 지역에 대한 장기 모니터링 실효성을 보여준다.
- 향후 연구를 통해 변위 발생 지역으로의 확장 적용과 해당 지역에서의 효과성에 대한 엄밀한 검증 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)와 정보통신기획평가원(IITP)의 Global Research Support Program in the Digital Field(과제번호 RS-2024-0042522320682075910002) 지원을 받았으며, 기상청(Korea Meteorological Administration)의 “Extension Interpretation of Faults in the Gangwon Region to the Seoul Metropolitan and Yeongnam Regions (including the Southern East Sea)” 사업(KMI2022-00710)의 지원을 받았습니다. 이에 감사합니다.