



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사학위논문

PSInSAR 기법을 이용한 2017년 포항지진 변위
및 지속적 지반침하 분석

정 다 운

강원대학교대학원

지구물리학과

2023년 8월

이 훈 열 교수 지도

이학석사학위논문

PSInSAR 기법을 이용한 2017년 포항지진 변위 및
지속적 지반침하 분석

Analysis of co-seismic displacement of the 2017 Pohang
earthquake and continuous subsidence using the PSInSAR
technique

강원대학교대학원

지구물리학과

정 다 운

정다운의 석사 학위논문을
합격으로 판정함

2023년 6월

심사위원장 장 성 준 인

위 원 이 훈 열 인

위 원 한 향 선 인

PSInSAR 기법을 이용한 2017년 포항지진 변위 및 지속적 지반침하 분석

정 다 운

강원대학교 대학원 지구물리학과

국내 계기지진 관측이 시작된 1978년 이후 두번째로 큰 모멘트 규모(M_w) 5.4의 지진이 한반도 동남부에 위치한 포항에서 발생했다. 진원 깊이가 약 4 km로 매우 얇아 다양한 지표 변위 관측이 이루어 졌다. 인공위성 원격탐사의 경우, SAR 간섭기법(Interferometric SAR; InSAR)을 이용하면 두 SAR 영상 간 발생된 변위의 측정이 가능하다. SAR 간섭기법을 이용해 생성되는 간섭도에서의 위상차는 지표 변위뿐 아니라 다양한 원인에 의한 위상과 에러를 포함하고 있다. 본 연구에서는 시계열 InSAR 기법 중 하나인 PSInSAR 기법을 이용해 긴 기간에 걸쳐 획득된 SAR 영상을 이용해 보정된 시계열 변위를 분석하고자 했다. 또한, 지반탐사를 통해 포항지역에서 지반 침하가 관측되었고 이는 지진 이전부터 이어져 온 현상임이 확인된 바 있다. 하지만 이에 대한 원인에 대해서는 아직 모호한 상태이다. 본 연구에서 사용된 PSInSAR 기법을 통한 일련의 시계열 변위를 분석하면 지진과 같은 지표의 급격한 변화와 지속적 지반 침하와 같은 점진적인 변화를 모두 감지할 수 있다.

12일 간격의 획득 주기를 갖는 Sentinel-1 영상으로 지진 전후 기간인 2016년 3월부터 2019년 11월에 대해 시계열 분석하고 관측된 변위를 수평성분과 수직성분으로 나누어 방향성 또한 알아보하고자 하였다. 이때, 지진에 의해 나타난 급

격한 지표 변위의 경우와 지반 침하에 의한 점진적인 변화에 대해서 서로 다른 자료 기간으로 나누어 진행하였다. 또한, 지진에 의한 지표 변위의 시계열분석결과와 검증으로 지진이 포착된 GNSS 자료와의 비교도 함께 진행하였다. 본 연구를 통해 얕은 깊이에서 발생한 중규모 지진과 지진이전부터 이어져 온 지반 침하로 인한 지표 변위의 방향성을 확인할 수 있었다. 이러한 연구방법은 지진 변위뿐만 아니라 일정한 방향성을 갖는 지표 변위에 대해 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심주제어

SAR, Sentinel-1, PSInSAR, 포항지진, 지진 변위, 지반침하

감사의 말

이 논문은 행정안전부의 방재안전분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었습니다.

목 차

I. 서론.....	1
II. 연구지역.....	3
III. 연구자료.....	5
1. Sentinel-1	5
2. Copernicus DEM.....	9
3. POHG GNSS 관측소 일간 자료.....	10
IV. 연구방법.....	12
1. DInSAR.....	12
2. PSInSAR.....	13
3. SNAP 소프트웨어와 StaMPS 패키지를 이용한 자료처리.....	14
4. 상향 및 하향 궤도 PSInSAR 결과를 이용한 변위의 수평 및 수직 성분 분석.....	17
5. GNSS 자료를 이용한 PSInSAR 결과 비교	19
V. 연구결과.....	22
1. CASE 1: 지진 이벤트가 포함된 2년 기간의 지표 변위 관측	22
1) PSInSAR 결과.....	23
2) GNSS 자료를 이용한 PSInSAR 결과 비교.....	31
2. CASE 2: 포항지진 이전 기간에 발생한 지표 변위 관측	35
VI. 결론.....	42
□ 참고문헌.....	44
□ Abstract	47

표 목 차

Table 1. Parameters used in StaMPS processing	16
Table 2. LOS vectors from ascending and descending pass	20

그림 목 차

Fig. 1. An overview of the Study area.....	4
Fig. 2. Geological map of the SE part of Korean peninsula (modify from Choi <i>et al.</i> , 2019)	4
Fig. 3. Four acquisition modes and its coverage area of Sentinel-1 satellite (ESA)	6
Fig. 4. Sentinel-1A mission coverage and repeat cycle (ESA)	7
Fig. 5. Sentinel-1 data used in this study.....	7
Fig. 6. The TerraSAR-X and Tandem-X satellites are the twin satellites that fly in formation (ESA)	9
Fig. 7. (a)GNSS Data Integration Center homepage, and (b)the locations of available national observatories.	11
Fig. 8. Data processing flowchart	14
Fig. 9. POHG station GNSS data provided by KIGAM	20
Fig. 10. (a)Northward, (b)eastward position with horizontal linear trend removed.....	21
Fig. 11. GNSS final post-processed data converted to (a)descending and (b)ascending LOS directions.....	21
Fig. 12. Sentinel-1 (a)descending and (b)ascending data used in CASE 1	23
Fig. 13. (a)Descending, (b)ascending PSInSAR result from CASE 1, (c)descending and (d)ascending DInSAR result from Song and Lee (2018)	24
Fig. 14. CASE 1 PSInSAR results in (a)descending and (b)ascending	25
Fig. 15. PS time-series graph near the epicenter where upward displacement appeared	27
Fig. 16. PS time-series graph in Yangdeok-dong where downward displacement appeared	29

Fig. 17. Horizontal and vertical analysis result from CASE 1, the translucent polygon represents the buffer of PSs	30
Fig. 18. Peripheral view of the POHG observatory	31
Fig. 19. Comparison between descending PSInSAR results and GNSS data.....	33
Fig. 20. Comparison between ascending PSInSAR results and GNSS data.....	34
Fig. 21. Sentinel-1 (a)descending and (b)ascending data used in CASE 2	35
Fig. 22. (a)Descending and (b)ascending PSInSAR result from CASE 2	36
Fig. 23. CASE 2 PSInSAR results expanded to Yangdeok-dong	38
Fig. 24. PS time-series graph in Yangdeok-dong	39
Fig. 25. Horizontal and vertical analysis result from CASE2, the translucent polygon represents the buffer of PSs.....	40
Fig. 26. (a)Past optical image, (b)recent optical image, (c)descending and (d)ascending PSInSAR results for Yangdeok-dong	41

I. 서 론

모멘트 규모(Mw) 5.4의 포항지진은 2017년 11월 15일 한반도 동남부에 위치한 포항시 북쪽 방향에 위치한 흥해읍에서 발생했다. 이는 한국의 계기지진 관측 이래 두번째로 큰 규모의 지진으로, 관측 이래 최대 규모(Mw 5.8)의 2016년 경주지진 발생 이후 약 1년만에 발생했다(기상청, 2018). 또한, 2016년 경주지진의 진원깊이는 약 14 km 였던 반면, 포항지진의 진원깊이는 약 4 km로 상대적으로 얕아 한국 지진의 첫 사례로 액상화현상이 관측되기도 하였다(Kim *et al.*, 2018; Lee and Chang, 2019; Choi *et al.*, 2018, Baek *et al.*, 2018).

진원깊이가 얕아 한국의 다른 지진들보다 상대적으로 지표변위가 잘 나타나는 만큼 현재까지 포항지진에 관련한 다양한 현상학적인 연구들이 이루어졌다. 대표적으로 Choi *et al.*(2019)에서는 지진에 의해 발생한 다양한 지표 변형을 관측하였고, Song and Lee (2019)는 차분간섭기법(Differential Interferometric SAR; DInSAR)을 이용하여 국내지진으로는 처음 관측된 지진 전후의 지표변위를 이용하여 선형모델링을 수행하고 단층정보를 추정하였다. 또한, 기상청의 포항지진분석보고서(2018)에 따르면 지진발생당시 운영중이었던 GNSS(Global Navigation Satellite System) 상시기준국 중 진앙으로부터 최소 35 km 거리의 4개의 관측소(TODK, CHSG, BHAO, TEGN)를 선정해 자료처리하였고, 그 결과 모든 관측소가 지진발생 당일 오차범위 내에 분포해 최소 35 km 이상 떨어진 4개의 관측소들에는 영향을 주지 않았음이 확인되었다. 당시 상시관측소는 아니었지만 2016년 3월 개소한 한국지질자원연구원 포항지질자원실증연구센터에 위치한 POHG 관측소의 자료를 이용한 Ji *et al.*(2018)의 연구에서 포항지진의 상반과 하반에 위치한 두개의 GNSS 관측소에서 각각 약 1 cm의 지진에 의한 지표의 상승 및 하강을 국내 지진 첫 사례로 관측했다.

포항지진 이후 안전에 대한 경각심이 고조된 상황에서 포항지역에서 지반침하로 인한 균열들이 다수 보고되었고, 이로 인해 2021년 초 포항지역에 대한 지반탐사가 실시되었다(연합뉴스, 2021; <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210428067000053>). 그 결과 포항지역에서 다수의 공동 및 지반침하 현상이 관측되었으며, 그 중 일부는 지진으로 인한 지반 변형으로 매설된 상수도관이 파열되어 토양이 유실된 것이 원인으로

로 확인되었다. 이에 대해, Vadivel and Kim (2022)에서는 시계열 InSAR 기법 중 하나인 Small Baseline Subset(SBAS) 기법을 이용해 2015년부터 2021년까지 포항지역의 여러 지점에서 발생한 지반침하 현상을 관측했고, 지반침하 현상이 포항 지진 발생 이전부터 지속되어온 것이 확인되었다. 지반침하의 원인으로서는 과거 매립지 여부, 지진에 의한 침하, 과거 지형에 의한 침하 등이 거론되었으나 현재까지 명확한 원인이 확인되지 않았다.

Interferometric SAR(InSAR) 기법을 이용한 변위 관측은 지진, 화산, 빙하와 같은 다양한 분야의 연구에서 이용되고 있고, 그 중 다중 DInSAR영상을 이용하여 밀리미터 단위의 작은 변위도 관측할 수 있는 시계열 InSAR 기법의 일종인 PSInSAR 기법은 장기간에 걸친 지표 변위 관측에 널리 이용되고 있다(Liu *et al.*, 2021; Hooper *et al.*, 2004; Moon *et al.*, 2022; Han and Lee, 2011).

따라서 본 연구에서는, 포항 지진 발생 전후의 약 3년의 기간동안 포항지역에서 발생한 지표 변위에 대해 PSInSAR 기법을 이용해 시계열분석을 수행하고자 하였다. 포항지진 정부합동조사단 보고서(2017)에 따르면, 지진 전후의 포항지역에서 나타난 지표변위를 PSInSAR를 이용하여 관측하고자 했지만, 포항지진에 대한 PSInSAR 결과 진원 부근에 고정산란체(Persistent Scatterer; PS)가 존재하지 않는 것으로 나타났다. 이는 PSInSAR 기법에서 고정산란체 선정의 기준이 되는 임계값에 기인한 것으로 판단되고, 본 연구에서는 임계값을 조정하는데 따른 영향을 고려해 그 값을 낮춰 연구를 진행하였다.

본 논문의 2장에서는 연구 지역에 대해 소개하고, 3장과 4장에서는 각각 연구에 이용된 자료와 방법을 소개한다. 5장의 연구 결과에서는 일시적인 변위와 지속적인 변위를 나누어 두 가지의 자료 기간에 대한 분석결과를 나타내었다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론과 활용가능성에 대해 논의한다.

II. 연구지역

한반도는 유라시아판 내부에 위치해 판의 경계부에 비해 상대적으로 지진발생 빈도가 낮고 그 크기 또한 작다(Jun and Jeon, 2010). 1978년 한국의 계기지진 관측 이래 2016년 경주 지진 이전까지 연평균 약 35회의 지진이 발생했으며, 포항을 비롯한 한반도 동남부 지역의 구조변형은 주로 양산단층과 울산단층의 영향을 받고있다(기상청, 2018; Choi *et al.*, 2019). 그림 1은 한반도 남동부에 위치한 포항지진의 진앙 위치를 나타내고, 그림 2는 한반도 동남부의 지질도 및 단층을 나타낸다.

2017년 포항 지진은 양산단층에서 발생한 것이 아닌 조금 떨어진 지류의 단층에서 발생한 것으로 추정되었는데, 고지진학 연구에 따르면 일반적으로 양산단층을 따라 발생하는 지진은 일반적으로 주향이동 단층의 형태를 보이는 반면, 울산단층과 동쪽의 보조 단층을 따라 발생하는 지진은 역단층의 형태를 보였다(Choi *et al.*, 2019). 포항지진은 대표적인 두 단층의 특성을 모두 보여주는 주향이동성 역단층의 형태로 발생했다. 매우 얇은 깊이에서 발생한 중규모의 지진임에도 방출된 지진 에너지로 인한 단층 파열이 지표에까지 전파되지 못하는 숨은 단층(Hidden fault)의 형태를 보였고, Choi *et al.* (2019)에 의해 관측된 지표 균열의 일부가 추정된 숨은 단층의 영역과 일치하는 것을 확인되었다.

포항지역은 전형적인 마이오세 중기의 퇴적분지인 한반도 남동부의 포항분지에 위치하고 있다. 포항분지는 NE-SW 방향의 우수향 주향이동 단층인 양산단층의 동쪽에서 에오세 시기부터 발생되기 시작했고, 현재는 자갈과 모래로 이루어진 제 4기의 충적층으로 덮혀있다(Hwang *et al.*, 1995 / Ahn *et al.*, 2015).

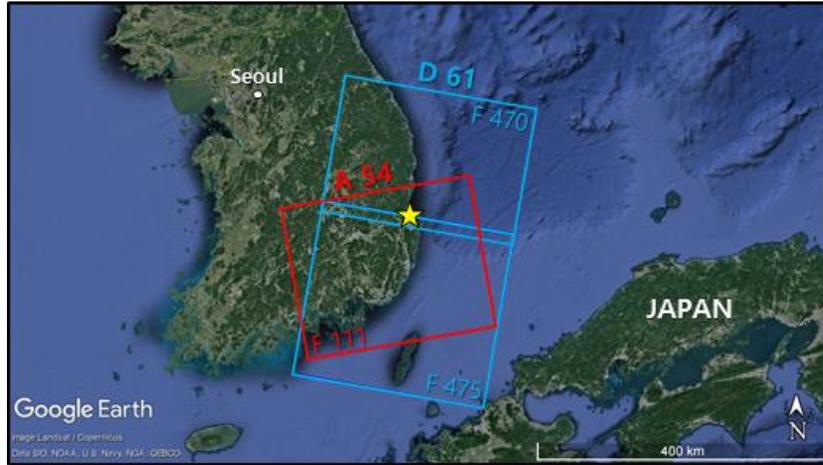


Fig. 1. An overview of the Study area

The blue(descending) and red(ascending) square indicate image frame of used Sentinel-1 satellite data. Yellow star indicates location of the 2017 Pohang earthquake.

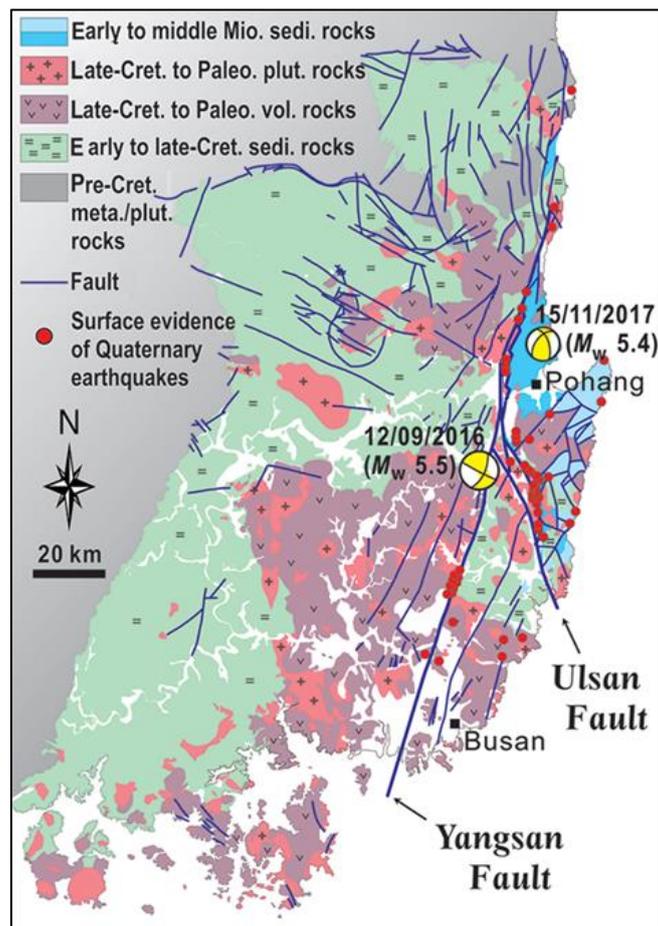


Fig. 2. Geological map of the SE part of Korean peninsula (modify from Choi *et al.*, 2019)

III. 연구자료

본 연구에서는, 포항지역에 나타난 지표변위를 시계열관측하기 위해 2016년 3월부터 2018년 11월까지의 C-band SAR 위성인 Sentinel-1의 상향(Ascending) 및 하향(Descending) 궤도 자료와 Copernicus 30 m DEM, POHG 관측소 GNSS 자료를 이용하였다.

1. Sentinel-1

유럽연합(European Union; UN)의 지구관측 프로젝트의 일환인 Copernicus 프로그램은 인공위성을 이용한 지구관측 자료와 현장 자료를 활용한 정보 서비스를 제공하고 있다. 유럽 연합의 기관 및 회원국, 유럽우주국(European Space Agency; ESA), 유럽 기상위성개발기구(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites; EUMETSAT), 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF), Mercator Océan 등이 협력하여 수집한 방대한 양의 인공위성, 지상, 공중 및 해상 데이터가 무료로 제공되고 있다 (<https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>).

Copernicus 프로그램의 일환으로 Sentinel-1 임무는 지구관측을 목적으로 중심주파수 5.405 GHz의 C-band SAR 시스템이 탑재된 총 4대의 위성(Sentinel-1A/B/C/D)으로 구성되어 있으며, 현재까지 Sentinel-1A 위성과 Sentinel-1B 위성이 각각 2014년과 2016년에 발사되어 운영되어왔다(Torres et al., 2012). Sentinel-1B 위성은 기술적인 이상으로 인해 2021년 12월 임무가 종료되었고, Sentinel-1A 위성은 이미 7년의 설계 수명을 초과했지만 성능에 문제가 없어 임무 기간이 연장되어 현재까지 관측 임무를 수행하고있다(Lang and Praks, 2022). 앞으로 Sentinel-1C 위성 발사가 2023년에 예정되어 있으며 Sentinel-1D 위성 역시 2024년에 발사하여 운영될 예정이다.

지상 약 700 km 위의 태양동기궤도상의 Sentinel-1 위성은 12일의 반복 주기(Repeat cycle)를 갖고 있으며 높은 궤도정확성과 약 250 km의 넓은 공간 영역에 대

한 관측으로 지속적인 지표 관측에 유리하다는 장점을 갖는다(Geudtner and Torres, 2012). 그림 3은 Sentinel-1 위성의 4가지 측정 모드에 대한 설명과 모드에 따른 관측 영역을 나타내고, 그림 4는 Sentinel-1 위성의 관측 영역과 방문 주기를 나타낸다.

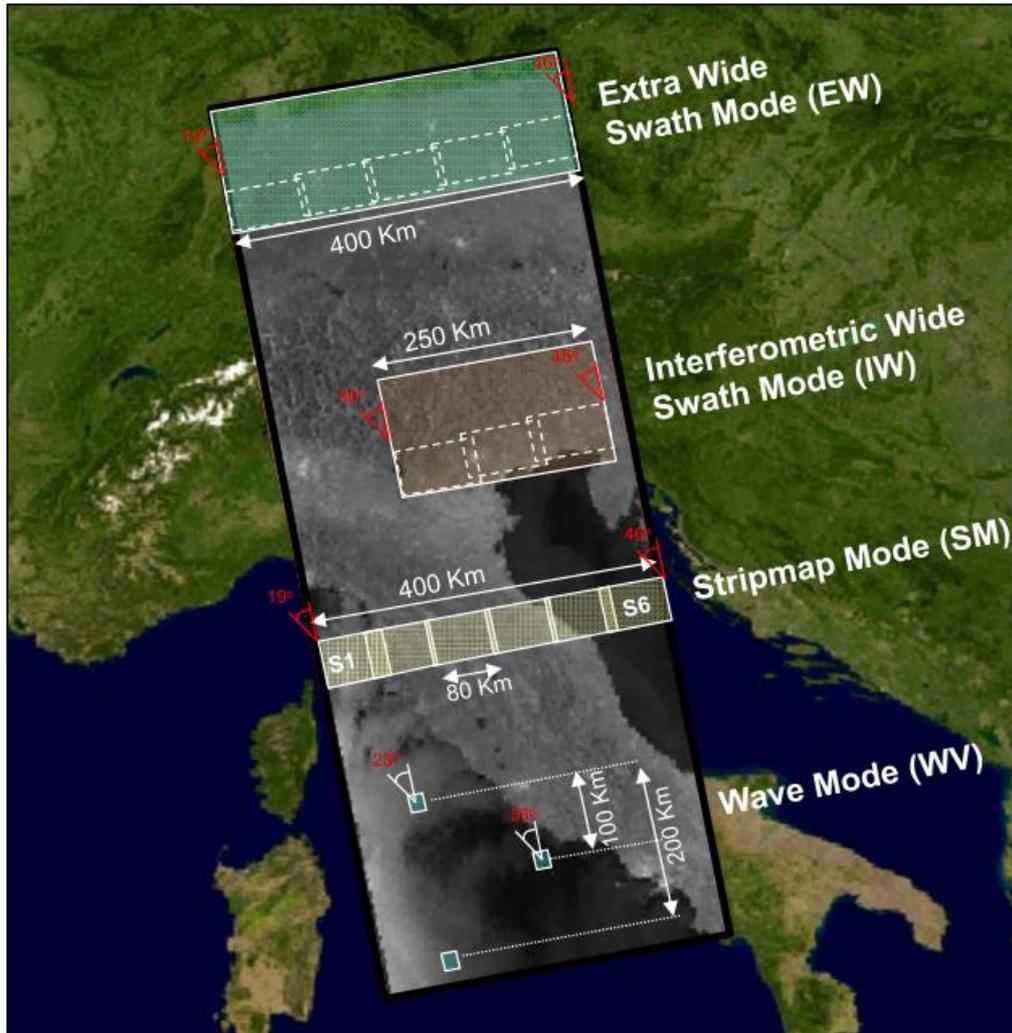


Fig. 3. Four acquisition modes and its coverage area of Sentinel-1 satellite (ESA)

Sentinel-1A Mission Observation Scenario: Repeat & Coverage Frequency



Note: Seasonal campaigns not represented

Note: Wave mode systematically operated over open oceans not represented

validity start: 09/2022

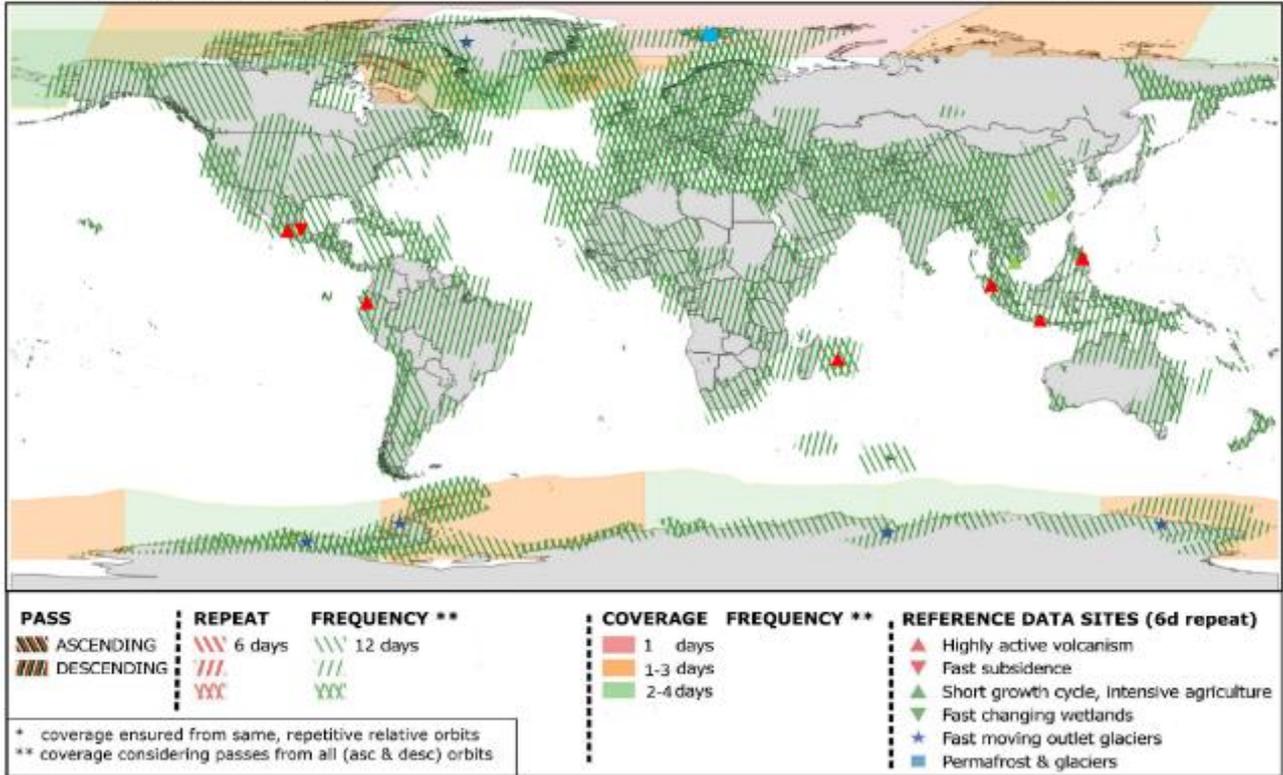


Fig. 4. Sentinel-1A mission coverage and repeat cycle (ESA)

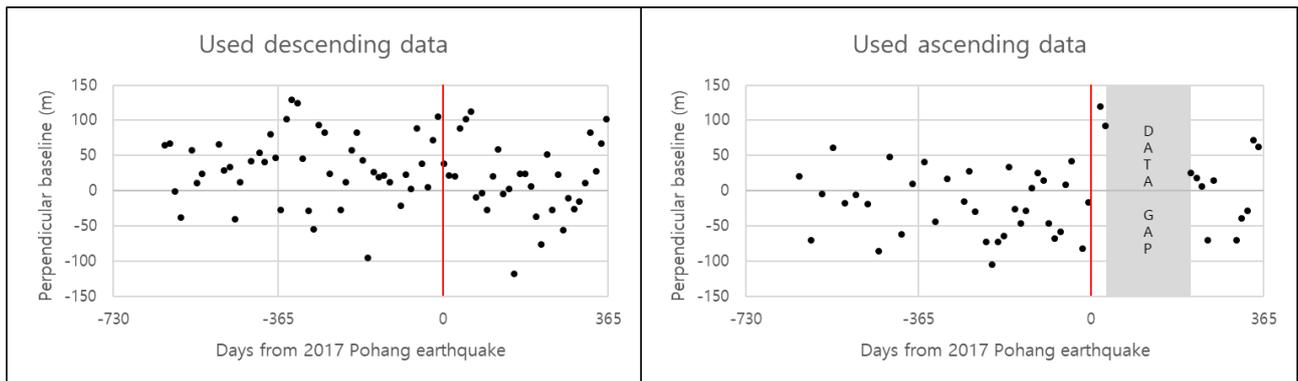


Fig. 5. Sentinel-1 data used in this study

본 연구에서는, 포항지역에 나타난 지표 변위를 시계열관측하기 위해 2016 년 3 월부터 2018 년 11 월까지에 대한 Sentinel-1 위성의 IW(Interferometric Wide-swath)모드로 획득된 상향 궤도 자료 47 장과 하향 궤도 자료 152 장(76*2)이 사용되었다(그림 5). 이때, 하향 궤도 영상의 경우 포항 지진의 진앙이 영상 프레임의 가장자리에 위치하기 때문에 연속된 두 프레임의 영상을 모두 사용했다. 연구에 사용된 약 33 개월의 위성자료들은 관측 목적에 따라 지진발생 이전까지의 약 21 개월의 기간과 지진 발생 전후 각 12 개월의 총 24 개월의 기간으로 나누어 처리하였다. 이는 이 지역의 상향 궤도 영상이 지진 직후 상당한 기간 동안 부재하기 때문으로 자료가 부재한 기간 동안 일정 크기 이상의 지속적인 변위가 발생하는 경우, PSInSAR 결과에서 자료가 부재한 기간 동안 변위가 일정 크기 이상 발생하지 않는 것으로 간주되어 전체 자료기간동안의 평균 변위 속도에 영향을 미치지 때문이다. 자료 부재기간동안 변위가 나타나지 않는 안정한 지역에서는 무리없이 사용이 가능했다. 따라서, 지진 이벤트가 포함된 24 개월의 기간에 대한 PSInSAR 결과는 지진에 의해 발생한 변위를, 지진발생 이전까지의 21 개월의 기간에 대한 PSInSAR 결과는 지속적인 침하가 발생하는 지역에서의 변위를 관측하고자 하였다.

2. Copernicus DEM

Copernicus DEM(Digital Elevation Model)은 건물 및 구조물, 식생 등을 포함한 지구 표면을 나타낸 Digital Surface Model(DSM)으로 TerraSAR-X와 Tandem-X(TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) 위성으로 획득한 2010년부터 2015년 까지의 데이터를 기반으로 제작되었다. 독일 항공우주센터(DLR)의 SAR 위성인 TerraSAR-X와 TanDEM-X 위성은 높은 기하학적 정확도의 SAR 데이터를 수집하기 위한 쌍둥이 위성으로 각각 2010년 6월 21일, 2007년 6월 15일 발사되어 약 300 ~ 500 m의 기선의 간격을 두고 편대비행 하며 데이터를 수집했다. 두 위성에 탑재된 중심 주파수 9.6 GHz의 X-band SAR 시스템을 이용하여 하나의 위성에서 마이크로파를 송신하고, 후방 산란된 신호를 두 위성에서 수신하는 바이스태틱(Bistatic) 레이더로 획득되었다(Krieger *et al.*, 2013). 이렇게 얻어진 정보는 시간 역상관과 대기 효과로 인한 영향없이 매우 정확한 고도 정보에 대한 간접도 획득이 가능하다. 2019년 12월 유럽우주국(ESA)이 30 m의 공간 해상도의 Copernicus 30 m DEM을 공개해 무료로 이용 가능하다.

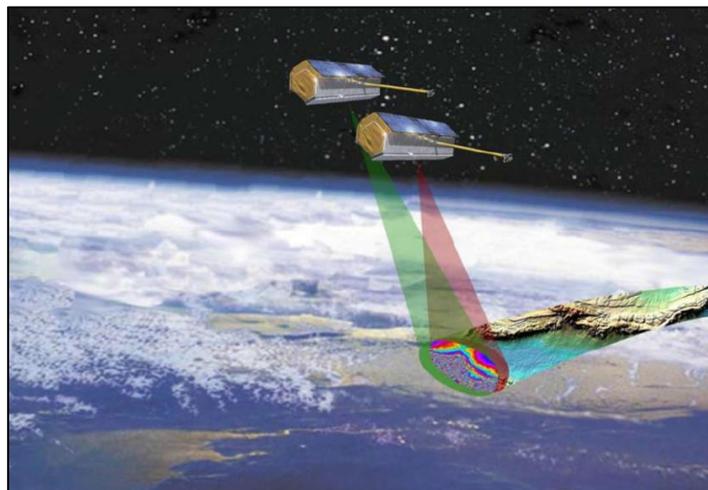


Fig. 6. The TerraSAR-X and Tandem-X satellites are the twin satellites that fly in formation (ESA)

3. POHG GNSS 관측소 일간 자료

GNSS(Global Navigation Satellite System)는 위성으로부터 송신된 신호를 지상의 수신기에서 수신하여 위치정보를 결정하는 시스템으로, 시간에 따른 수신기의 위치정보를 이용해 관측점의 이동 방향과 속도 등을 계산할 수 있다. 현재 국내 GNSS 관측소 자료는 활용 효율성을 높이기 위해 국내 8개 기관(국토지리정보원, 국립해양측위정보원, 한국천문연구원, 서울특별시, 한국지질자원연구원, LX 공간정보연구원, 국가기상위성센터, 우주전파센터)이 업무 협약을 맺고 GNSS 데이터 통합체계 구축사업을 통해 GNSS 데이터를 통합하여 제공하는 시스템을 구축하고 있다(그림 7). GNSS 데이터 통합센터(<https://www.gnssdata.or.kr/>)에서 제공되고 있는 서비스로는 주로 8개 기관 상시관측소의 위치정보와 설치 년도, 수신기 종류 등의 상시관측소 안내와 더불어 GNSS 실시간 데이터(RTCM) 및 후처리 데이터(RINEX), 데이터 품질 정보 등이 있다.

본 연구에서는 한국지질자원연구원 포항지질자원실증연구센터 내부에 위치한 POHG 관측소 2016년 12월 19일부터 2019년 8월 13일까지의 GNSS 일간 자료를 사용했으며, 해당 자료는 상시관측소 이전의 자료로 공식적으로 제공되지 않아 별도의 요청으로 한국지질자원연구원으로부터 자료를 제공받아 연구에 활용하였다.

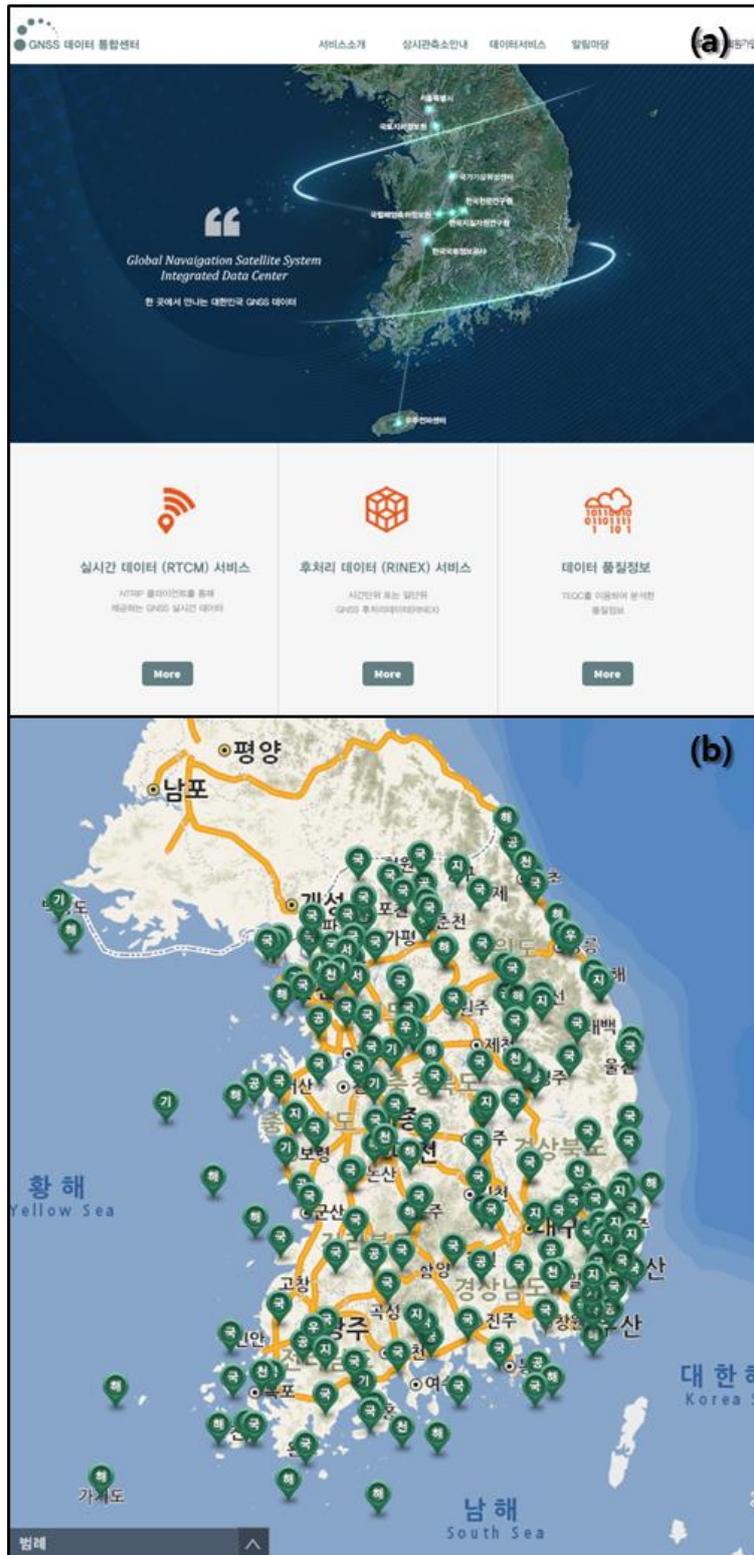


Fig. 7. (a)GNSS Data Integration Center homepage, and (b)the locations of available national observatories.

IV. 연구방법

1. DInSAR

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 지상의 타겟으로 쏜 마이크로파가 반사되어 돌아오는 신호를 이용해 지표정보를 획득하는 기법으로, 능동형 센서와 마이크로파를 사용하기 때문에 기상조건이나 밤낮 상관없이 일관된 영상획득이 가능한 장점을 갖는다(Ferretti *et al.*, 2007). SAR 간섭기법(Interferometric SAR; InSAR)은 이러한 두 SAR 영상간의 복소상관계수(complex correlation coefficient)를 이용하는 방법이다(Lee, 2001). SAR 간섭기법을 통해 생성되는 간섭도(interferogram)에서 위상(phase) 정보를 이용하면 지형 정보 또는 두 영상 간에 발생한 변위의 측정이 가능하다.

그 중, 지형으로 인한 위상은 간섭도로부터 수치지형모델(Digital Elevation Model; DEM) 혹은 고도에 의한 위상이 잘 나타나는 또 다른 간섭도를 차분하는 차분간섭기법(Differential InSAR; DInSAR)을 통해 제거해 지표의 변위만을 추출이 가능하다(Han and Lee, 2011). SAR 간섭기법을 이용했을 때 생성되는 간섭도에서의 위상차($\Delta\phi$)는 두 영상기간 사이에 발생한 위상 변화(ϕ_{def})뿐 아니라 대기 효과에 의한 지연으로 인한 위상(ϕ_{α}), 부정확한 궤도에 의

한 위상(ϕ_{orb}), 지형 혹은 DEM의 오류로 인한 위상(ϕ_{ϵ}), 그 외에 여러 에러(n)를 포함하고 있다(식 1).

$$\Delta\phi = \phi_{def} + \phi_{\alpha} + \phi_{orb} + \phi_{\epsilon} + n \quad (1)$$

2. PSInSAR

시계열 변위 모니터링에서는 수개월 또는 수년의 기간에 걸친 일련의 SAR 이미지를 수집하고 처리하여 간섭도를 생성하고, 이를 이용해 시간에 따른 지상과 위성 사이의 거리 변화를 측정하여 지표 변형을 감지 및 모니터링하는데 사용한다. 일련의 간섭도를 분석하면 지표 변형의 점진적인 변화와 급격한 변화를 모두 감지할 수 있어 시계열 변위 모니터링은 잠재적 위험을 식별하는데 중요한 도구가 될 수 있다.

시계열 InSAR 기법 중 하나인 PSInSAR(Persistent Scatterer InSAR) 기법은 여러 SAR 이미지를 사용하여 하나의 마스터 영상을 기준으로 하는 시계열 간섭도를 생성하고, 시간이 지나도 꾸준히 레이더 반사율이 높고 안정적인 지구 표면의 물체인 고정산란체(Persistent Scatterer; PS)의 시간에 따른 지표 변위를 측정하는 기법이다. Ferretti *et al.*(2001)에 의해 처음 제안된 PSInSAR 기법의 고정산란체는 주로 건물이나 교량과 같은 인공구조물이나 암석에 형성되기 때문에 이러한 고정산란체의 밀도가 높은 지역의 변위 분석에 대해 유용하다.

PSInSAR 기법은 시간에 따라 일관적으로 안정한 PS 선정을 위해 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio; SNR)의 개념을 도입하였다. 높은 SNR(>10)의 경우 진폭 분산(Amplitude dispersion)은 위상의 표준편차와의 관계가 어느정도 일치해 PS를 선정하는데 있어 성공률이 높았던 반면, 낮은 SNR의 경우에는 진폭 분산과 위상 안정성(Phase stability) 사이의 관계가 깨져 효과적이지 않는 것이 확인되었다. 따라서, 진폭들의 편차를 진폭의 평균값으로 나눈 진폭분산지수(Amplitude Dispersion Index)를 고정산란체의 선정기준으로 설정해 시간에 따른 픽셀의 안정성에 대한 임계값(Threshold)으로 사용하였다. 이후, Hooper *et al.*(2004)에서는 추가적으로 초기에 선정된 PS들 사이의 통계적 분석을 사용하여 지표 안정성에 대한 일관성이 높은 픽셀을 식별하고, 다양한 시공간적 필터링 및 처리 단계를 적용하여 기존의 DInSAR 기법에서 발생하는 노이즈 및 대기 효과로 인한 위상, 부정확한 DEM으로 발생하는 지형으로 인한 위상 등을 대부분 제거함으로써 변위 관측의 정확도 및 정밀도를 향상시켰다.

본 연구에서는 포항지역의 시계열 지표변위를 관측하기 위해 Hooper에 의해 개발된 StaMPS 패키지를 이용하여 PSInSAR 기법을 수행하였다.

3. SNAP 소프트웨어와 StaMPS 패키지를 이용한 자료처리

본 연구에서는 지표변위분석을 위해 사용된 PSInSAR 기법을 구현하기 위해서 유럽 우주국(European Space Agency; ESA)에서 제공하는 SNAP(SentiNel Application Platform) 소프트웨어와 StaMPS(Stanford Method for Persistent Scatterers) 패키지를 사용하였다.

SNAP 소프트웨어를 이용해 여러 장의 SAR 영상들을 하나의 Master date를 갖는 여러장의 DInSAR 영상이 중첩된 형태의 자료로 전처리하고, Linux 환경에서 구현되는 StaMPS 패키지를 활용해 최종적으로 포항지역에 대한 시계열 변위를 도출하였다 (그림 8).

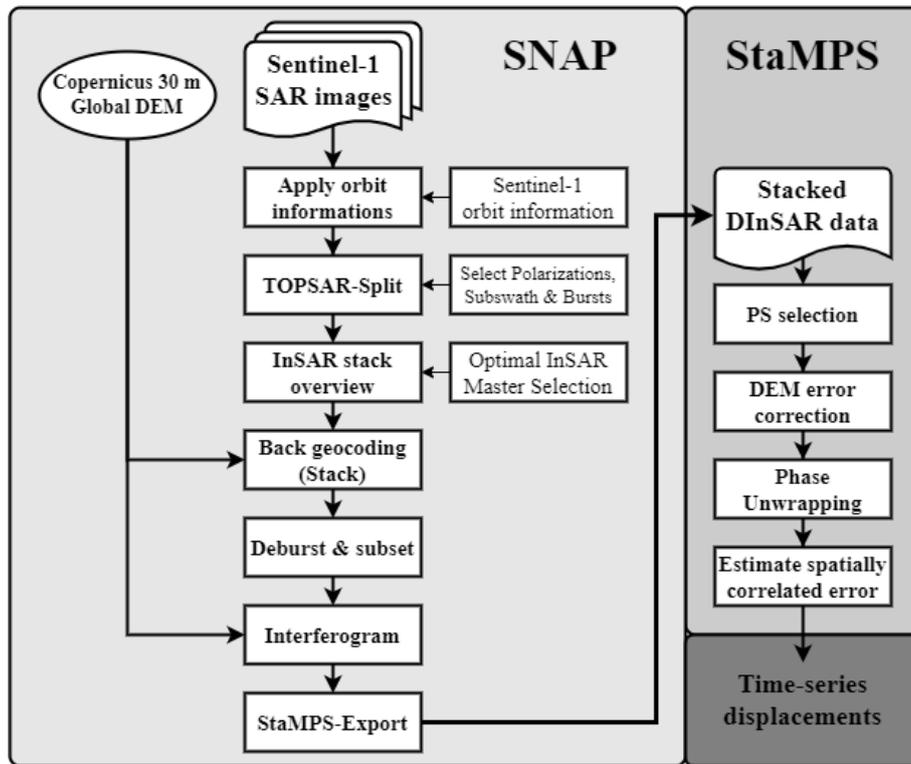


Fig. 8. Data processing flowchart

먼저, 전처리 과정으로 SNAP 소프트웨어의 Apply-orbit-file operator로 연구에 사용되는 각각의 Sentinel-1 SLC(Single Look Complex) 영상들에 대해 위성 궤도정보를 sentinel precise orbit으로 업데이트하여 궤도 상태 벡터의 정확성을 높였다.

이후, TOPSAR-split operator로 연구지역에 해당하는 sub-swath와 burst, 후방산란이 더 강하게 얻어지는 VV편광만을 추출해 자료처리 시간을 단축하고, InSAR stack overview operator로 전체 영상들의 Temporal baseline과 Perpendicular baseline을 고려해 PSInSAR 기법에 적용될 전체자료에 대한 Master data를 선정했다.

Back-geocoding operator로 전체자료에서 선정된 Master data를 중심으로 나머지 Slave data들과 정합(Co-registration)하고, TOPSAR-deburst operator로 burst의 간격 제거 및 중복된 영역을 통합했다. 또한, Spatial subset operator로 연구지역을 제외한 불필요한 영역을 제거했다.

마지막으로 interferogram operator를 이용해 지구타원체에 의한 위상(flat-earth phase) 및 지형에 의한 위상(topographic phase)을 제거하여 간섭도를 생성하였다. 지형에 의한 위상을 제거하기 위한 DEM으로 Copernicus 30 m DEM을 사용하였다. 유럽항공우주국(ESA)에서 제공하는 Copernicus 30 m DEM은 SNAP에서 자동 다운로드 사용할 수 있다. 이후, StaMPS-export operator로 추출해 StaMPS에 필요한 전처리 과정을 완료했다.

전처리가 완료된 데이터는 Ubuntu 환경에서 StaMPS 패키지를 이용해 처리했다. StaMPS 패키지의 자료처리 과정은 크게 PS선택, 위상 보정, 위상 언래핑, 공간 상관 보정 등의 네 단계를 거쳐 각각의 PS에 대한 LOS 방향으로의 변위 속도를 산출하였다.

또한, StaMPS 패키지의 초기 PS 선택 과정에서 임계값으로 사용되는 진폭분산지수는 0.4를 사용했다. 아래의 표 1은 StaMPS 패키지를 이용한 처리과정에서 기본값을 사용하지 않은 파라미터의 종류와 변경한 값을 나타내고, 변경한 값들은 산사태 연구에 PSInSAR 기법을 적용한 Höser (2018)의 연구를 참고하였다.

‘scla_deramp’를 ‘y’로 설정하면 각 간섭도에 대한 위상 램프를 추정하고 위상 언랩핑 단계 전 예상된 위상 램프를 빼주어 지역적인 신호를 관측하는데 유리하다. ‘unwrap_gold_n_win’은 Goldstein 필터 창(window)의 크기, ‘unwrap_grid_size’는 리샘플링(Resampling)되는 그리드의 간격을 의미하고, ‘unwrap_time_win’는 자료의 각 인접 픽셀의 쌍(pair)에 대한 위상 잡음 분포를 추정하기 위한 스무딩(smoothing) 창의 일 단위 시간간격을 나타낸다.

Table 1. Changed parameters in StaMPS processing

Parameter	Default	This study
‘scla_deramp’	‘n’	‘y’
‘unwrap_gold_n_win’	32	8
‘unwrap_grid_size’	200	10
‘unwrap_time_win’	730	24
‘scn_time_win’	365	50

4. 상향 및 하향 궤도 PSInSAR 결과를 이용한 변위의 수평 및 수직 성분 분석

상향 및 하향궤도 PSInSAR 결과에서 최대 변위를 갖는 지점이 서로 다를 경우 수평 방향으로의 움직임이 있다고 판단할 수 있고, 이때의 지표 변위를 수평 및 수직 성분으로 나누어 방향성과 그 크기에 대해 자세하게 분석할 수 있다. 특정 지점의 변위를 수평 및 수직 성분 요소로 나눌 때, 두 궤도에서의 PS 위치가 정확하게 일치하지 않기 때문에 각 PS로부터 일정거리 이내의 영역에 대해서 보간법의 일종인 역거리 가중법(Inverse Distance Weighting; IDW)을 통해 도출하였다. 이때, 최종 결과물의 정확도를 높이기 위해 상향 및 하향궤도 결과의 각 PS 포인트로부터 일정거리 이내의 buffer 를 설정하고, 상향 및 하향궤도 결과의 buffer 영역이 서로 교차되는 부분에 대해서만 도출하였다.

지표에서 위성을 바라보는 LOS 방향의 방향벡터 \hat{l} 은 다음의 수식 2 과 같이 정의된다.

$$\hat{l} = (\sin \theta \cos \varphi, -\sin \theta \sin \varphi, -\cos \theta) \quad (2)$$

θ 는 변위의 방향성분을 실제 지표의 3D 방향으로 나타내기 위해 사용된 ‘Local incidence angle from the ellipsoid’를 의미하고, φ 는 위성 진행방향의 방위각을 나타낸다.

따라서, 지표에서 위성방향으로의 와 상향 및 하향 궤도의 경우를 고려했을 때 아래의 수식 3 을 도출할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} D_{asc} \\ D_{des} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_{asc} \cos \varphi_{asc} & -\sin \theta_{asc} \sin \varphi_{asc} & -\cos \theta_{asc} \\ \sin \theta_{des} \cos \varphi_{des} & -\sin \theta_{des} \sin \varphi_{des} & -\cos \theta_{des} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

$D_{a/d}$ 는 위성자료로 관측된 지표변위 (a: ascending orbit / d: descending), $d_{x/y/z}$ 는 실제 변위의 방향 벡터 성분(x: East-west / y: North-south / z: Up-down)이다.

수식 3 의 경우, 변위의 세 방향성분을 알기 위해 3 개의 서로 다른 궤도자료가 필요하다. 하지만 본 연구에서 사용된 Sentinel-1 상향 및 하향궤도 자료만 사용되었다. Sentinel-1 위성의 진행방향은 북쪽방향으로부터 약 10도 이내(189, 350)를 갖기 때문에 변위의 남북방향 성분에 대해 민감도가 낮고, 이를 제외한 다른 두 방향(EW/UD)으로의 민감도가 높다. 예를 들어, 상향궤도와 하향궤도의 위성 진행방향의 방위각이 각각 350, 189도 일 때 다음의 수식 4 과 같다.

$$If \begin{cases} \varphi_{asc} = 350^\circ \\ \varphi_{des} = 189^\circ \end{cases}, then \begin{cases} \sin\varphi_{asc} \approx -0.1736 \\ \sin\varphi_{des} \approx -0.1564 \end{cases} \quad (4)$$

수식 4 을 통해 남북방향 성분을 0 으로 소거시키면, 수식 2 의 D_a 와 D_d 는 다음의 수식 5 와 같이 근사된다.

$$\begin{pmatrix} D_{asc} \\ D_{des} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \sin\theta_{asc} \cos\varphi_{asc} & -\cos\theta_{asc} \\ \sin\theta_{des} \cos\varphi_{des} & -\cos\theta_{des} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_x \\ d_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

따라서, 최종적으로 위성의 상향 및 하향궤도의 LOS 변위를 이용해 동서방향의 수평방향성분(EW)와 수직방향성분(UD)으로 도출할 수 있다(수식 6). 이때, 도출된 동서방향의 수평방향성분(EW)은 남북방향의 수평방향성분(NS)을 0 으로 소거함에 따라 발생된 불확실성을 포함한다.

$$\therefore \begin{pmatrix} d_x \\ d_z \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \sin\theta_{asc} \cos\varphi_{asc} & -\cos\theta_{asc} \\ \sin\theta_{des} \cos\varphi_{des} & -\cos\theta_{des} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} D_{asc} \\ D_{des} \end{pmatrix} \quad (6)$$

5. GNSS 자료를 이용한 PSInSAR 결과 비교

본 연구에서 수행한 PSInSAR 결과에 대한 검증으로 지진에 의한 지표의 움직임이 포착된 한국지질자원연구원 POHG 관측소 GNSS 자료와 지진 이벤트가 포함된 기간에 대한 상향 및 하향궤도 PSInSAR 결과를 비교했다. 두 자료를 비교하기 위해서 GNSS 자료를 PSInSAR 결과의 벡터 방향인 LOS 방향으로 변환해 비교하는 방법을 선택했다.

PSInSAR 결과에서는 PS의 절대적인 위치의 변화가 나타나지 않았던 반면, GNSS 자료에서는 수직방향으로의 움직임뿐만 아니라 판의 움직임과 같은 절대적위치의 수평방향의 위치 변화가 나타났다. 이는 PSInSAR 자료처리 과정 중 일부분인 Orbital ramp phase removal에 의해 Linear한 trend가 제거되는 것으로 판단했다. 이를 고려해 두 자료를 비교하기 위해서 GNSS자료 결과의 수평방향에서 나타나는 선형 트렌드를 제거하는 과정이 반드시 필요했고, 이는 GNSS를 이용한 지진연구에서도 지진에 의한 변위를 잘 포착하기 위해 선형 트렌드를 뺀 잔차를 표시하는 것이 확인되었다. 각 방향에서 나타나는 선형 트렌드로부터의 잔차를 상향 및 하향궤도 LOS 방향으로 변환시켜 비교하였다.

지표로부터 위성방향으로의 LOS 벡터는 수식 2과 같이 정의된다. 표 2는 연구에 사용된 GNSS와 비교할 상향 및 하향궤도 PSInSAR 결과에서의 입사각과, 위성 진행방향, 그리고 이로 도출된 LOS 방향벡터이다.

도출된 상향 및 하향궤도의 LOS 방향벡터를 이용해 선형 트렌드가 제거된 GNSS 자료 각 LOS 방향으로의 변위성분을 LOS 방향의 변위로 변환시키는 수식 7은 LOS 방향벡터와 잔차가 제거된 GNSS 자료의 각 방향으로의 성분과의 내적을 통해 도출할 수 있다. GNSS 자료는 그림 9, 10, 11 과 같은 과정을 통해 상향 및 하향궤도 LOS 방향으로 변환되었다. LOS 방향으로 변환된 GNSS 자료는 PSInSAR 결과의 기간에 대해 추출해 비교했다.

$$D_{LOS} = (\sin \theta \cos \varphi, -\sin \theta \sin \varphi, -\cos \theta) \cdot \begin{pmatrix} dE \\ dN \\ dU \end{pmatrix} \quad (7)$$

Table 2. LOS vectors from ascending and descending pass

	θ	φ	LOS (x, y, z)
Ascending	41.051556	350.1908	(0.64713672453, 0.11188693589, -0.75411893845)
Descending	39.907497	190.4189	(-0.63097204763, 0.11602020231, -0.76708121327)

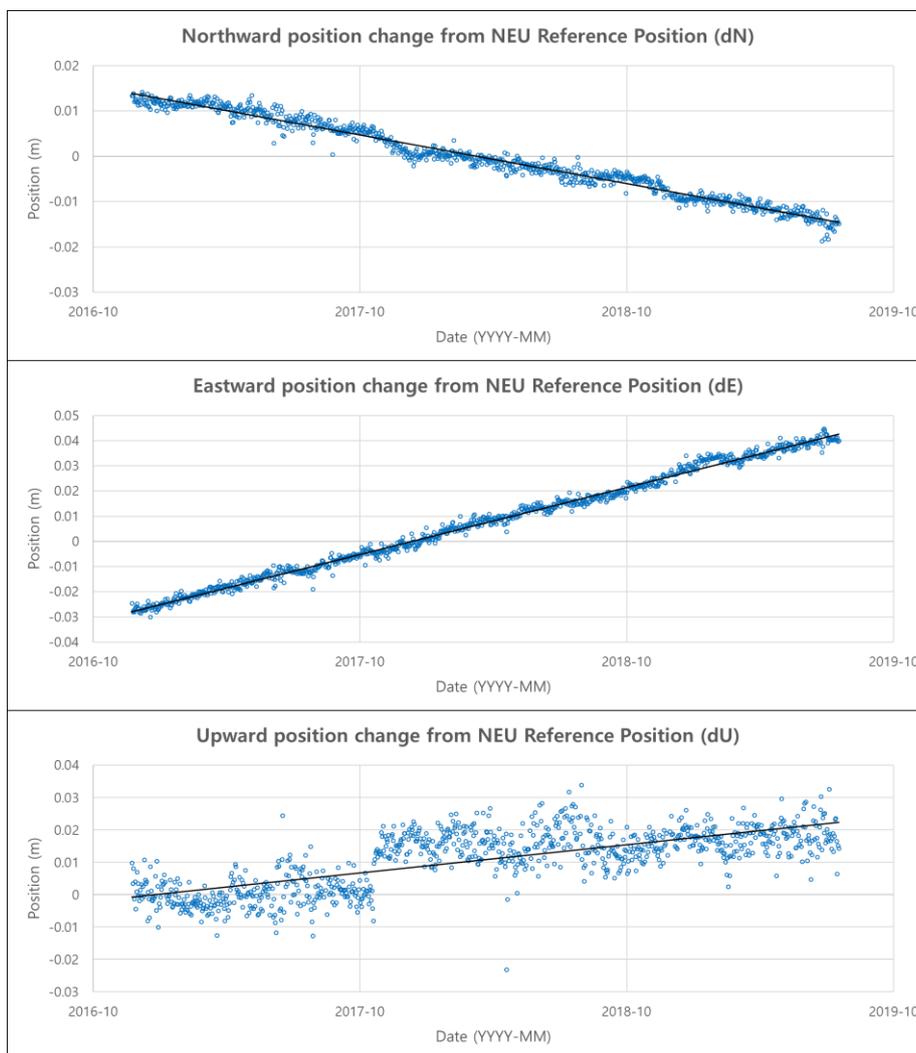


Fig. 9. POHG station GNSS data provided by KIGAM

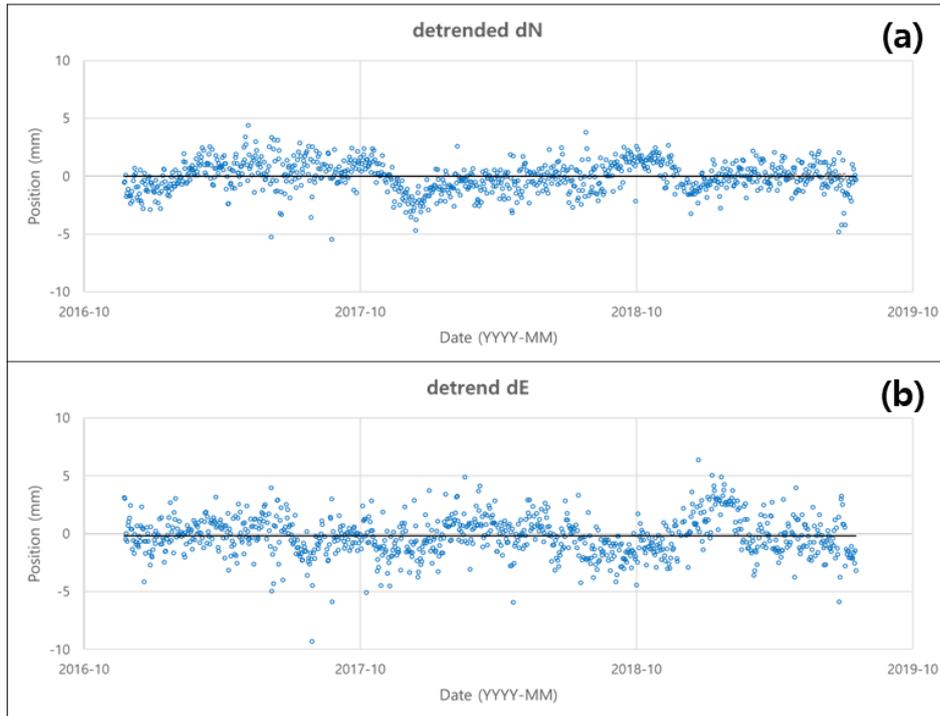


Fig. 10. (a)Northward, (b) eastward position with horizontal linear trend removed

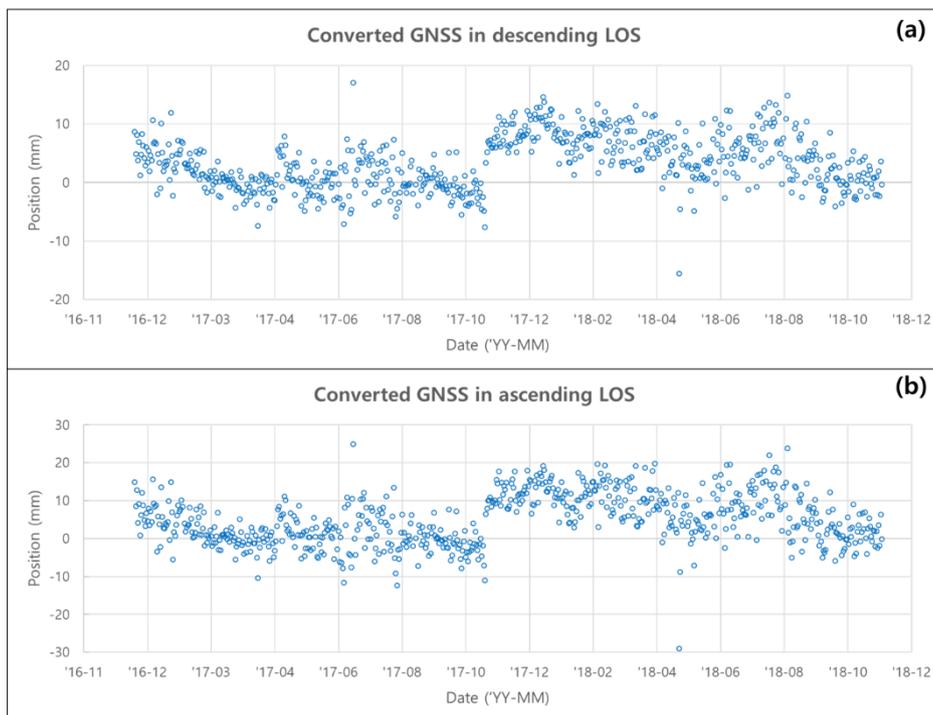


Fig. 11. GNSS final post-processed data converted to (a)descending and (b)ascending LOS directions

V. 연구결과

본 연구에서 사용한 2016년 03월부터 2018년 11월까지의 연구 자료는 서로 다른 2개의 기간으로 나누어 진행했다. 포항지진 발생일을 포함하는 기간에 대하여 진앙 부근의 변위에 대해 분석하는 CASE 1과, 지진발생 이전의 자료기간으로 특정지역에서의 나타나는 지속적 침하현상을 분석한 CASE 2로 나누었다. 그 중 지진에 의한 변위를 분석하는 CASE 1의 경우, 지진에 의한 지표의 움직임이 포착된 POHG GNSS 관측소 자료를 이용해 PSInSAR 결과와 비교한 결과를 추가하였다.

1. CASE 1: 지진 이벤트가 포함된 2년 기간의 지표 변위 관측

CASE 1 는 포항지진 발생일을 포함하는 약 2년 기간의 자료로 주로 진앙 부근의 상승변위를 분석하였다. 사용된 자료는 2016년 11월 21일부터 2018년 11월 11일까지의 하향궤도자료 118(59*2)장, 2016년 11월 3일부터 2018년 11월 5일까지의 상향궤도자료 36 장이 사용되었다. 그림 12 는 CASE 1 에 사용된 위성영상을 각 세트의 마스터 자료(Master data)를 중심으로 수직기선거리(Perpendicular baseline)와 시간기선거리(Temporal baseline)를 나타낸다. 마스터 자료의 날짜는 사용된 전체 자료에 대한 시공간적 기선거리(Baseline)를 고려해 선정되기 때문에 상향궤도의 경우에서 공백으로 인해 앞쪽으로 치우친 것을 확인할 수 있다.

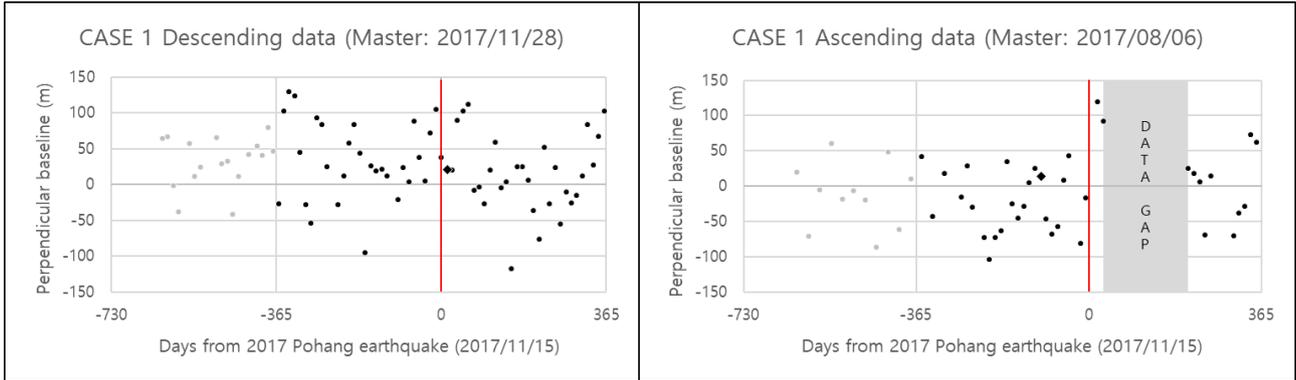


Fig. 12. Sentinel-1 (a)descending and (b)ascending SAR data used in CASE 1. The black dots and diamonds indicate each used data in CASE 1 and its master data, redlines indicate the date of the Pohang earthquake

1) PSInSAR 결과

그림 13-(a), (b)는 CASE 1의 PSInSAR 결과로 2년 동안의 발생된 지표 변위에 대한 평균침하속도를 나타낸다. 지진의 상반에 해당하는 흥해읍에 위치한 진앙 부근에서 상승 변위가 나타난 것을 확인했고, 반면 지진의 하반에 해당하는 양덕동 일대에서 특정 지역에서 최대 100 mm/yr의 속도로 하강 변위가 발생한 것을 확인할 수 있다. 양덕동의 특정지역에서 발생하는 하강 변위 제외한, 진앙 부근의 지진에 의한 상승 변위가 나타난 영역은 그림 13-(c), (d)의 Song and Lee(2018)에서 수행한 차분간섭 기법(DInSAR)결과에서 지진에 의한 변위가 나타난 영역과 유사하게 나타났다. 또한, 상향 및 하향궤도에 대한 각 PSInSAR 결과를 살펴보았을 때, 지진으로 인한 상승 변위의 최대값을 나타내는 지점이 서로 다르게 나타났고, 최대 변위 크기는 하향궤도에서 더 크게 나타났다.

흥해읍의 진앙 부근과 양덕동의 특정 지역에서의 PS를 선정해 시계열 변위 그래프를 확인하고, 변위에 대한 수평 및 수직성분 분석법을 수행해 더 자세하게 분석했다.

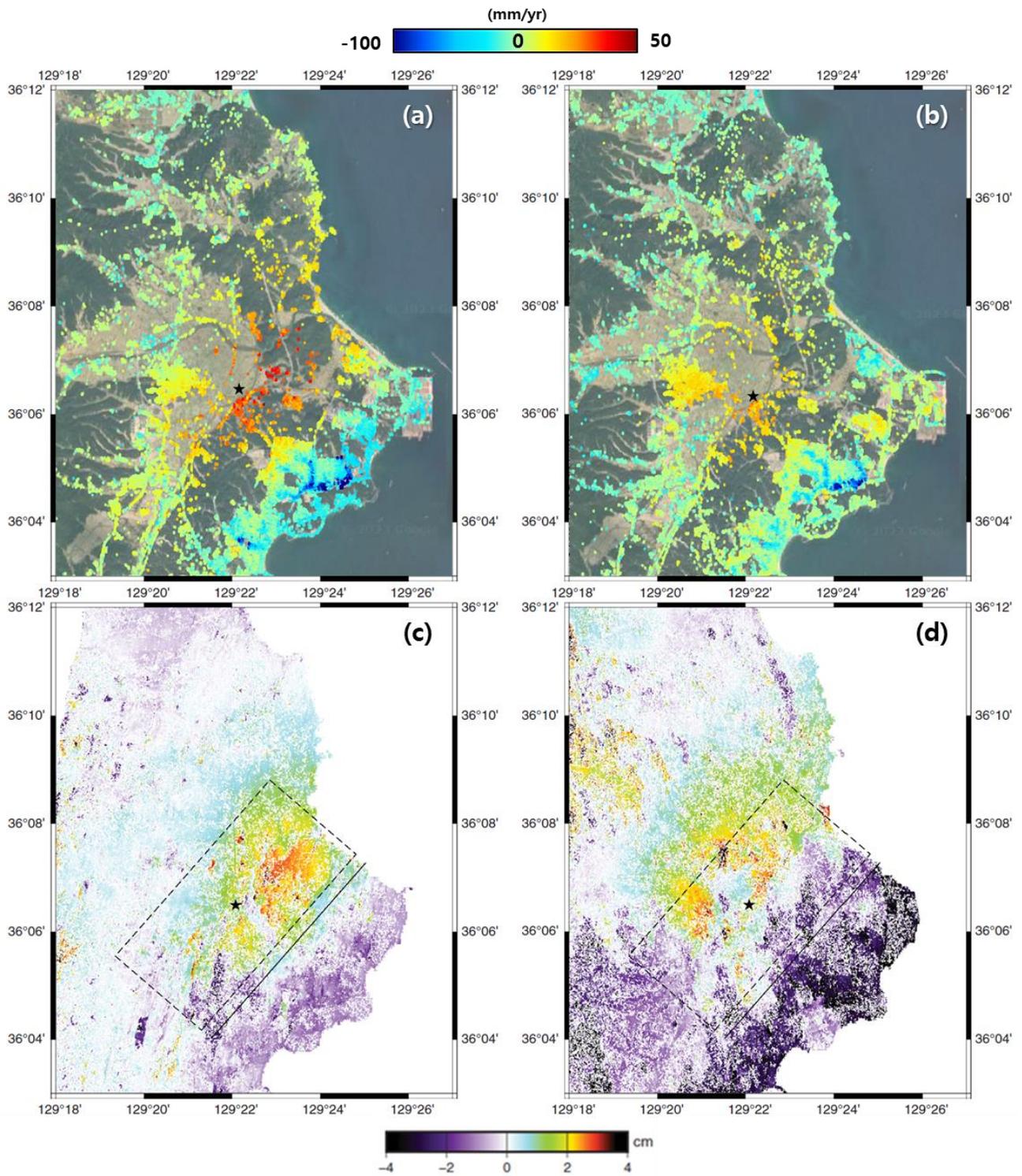


Fig. 13. (a) Descending and (b) ascending PSInSAR result from CASE 1, (c) descending and (d) ascending DInSAR result from Song and Lee (2018)

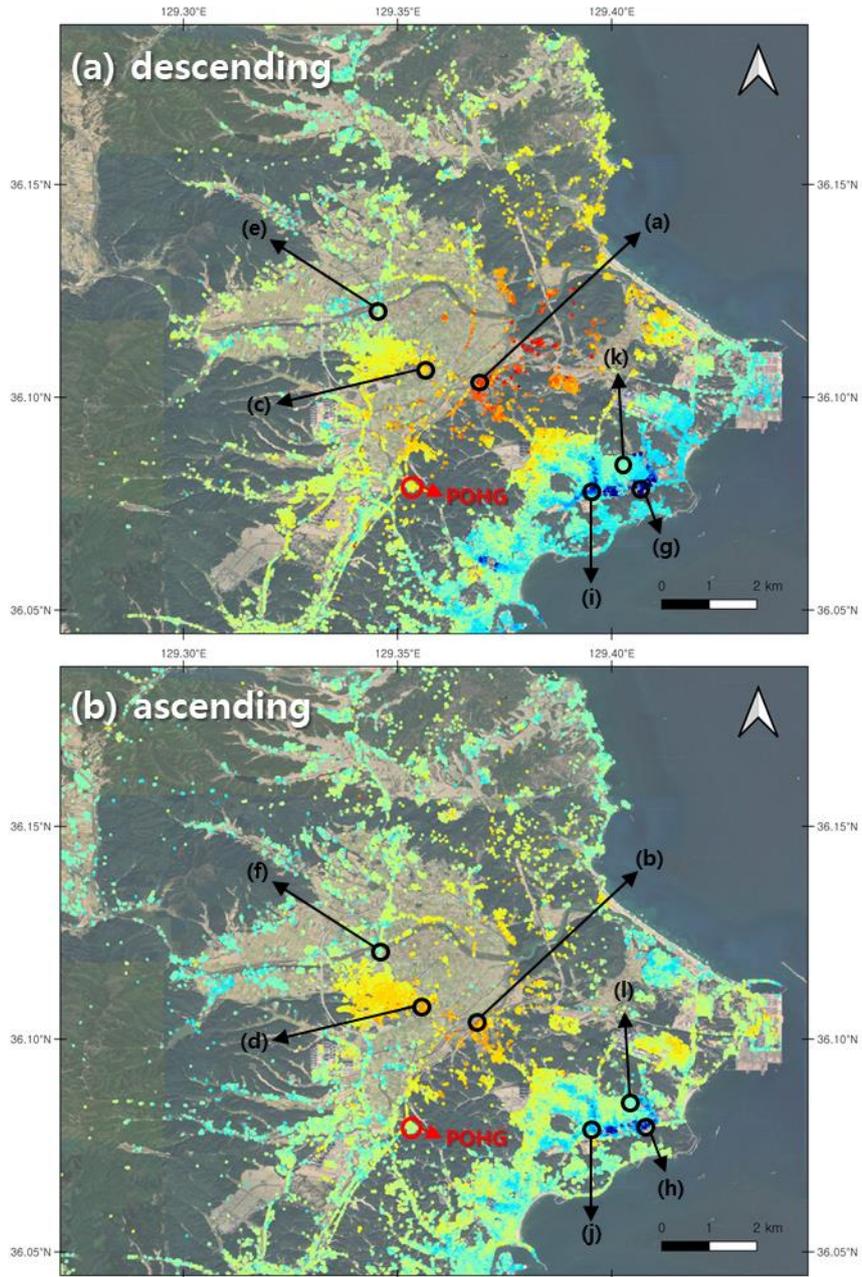


Fig. 14. CASE 1 PSInSAR results in (a) descending and (b) ascending

그림 15 는 CASE 1 의 PSInSAR 결과에서 지진에 의한 상승 변위가 나타난 진양 부근의 PS 에 대한 시계열 변위 그래프를 나타낸다. 진양 부근의 PS 의 시계열 변위 그래프에서는 지진 직후 발생한 상승 변위 만 발생하고 지진 전후기간으로 대체로 안정해 계단 형태(안정-상승 변위로 인한 점프-안정)를 나타냈다.

진양과 가까운 PS의 경우 지진 직후 하향궤도에서 약 50 mm, 하향 궤도에서 약 40 mm의 상승 변위가 나타나 하향궤도에서의 변위가 약 10 mm 우세하게 나타났고, 진양으로부터 서쪽으로 약 1 km 떨어진 주거지의 경우 하향궤도에서 약 15 mm, 상향궤도에서 약 25 mm로 상향궤도에서의 변위가 약 10 mm 우세하게 나타났다. PS 위치에 따라 상향궤도자료 혹은 하향궤도자료 결과에서 변위가 더 우세하게 나타난 원인은 변위의 수평적인 움직임의 방향이 다를 때 관측 방향이 다른 두 자료에 대해서 다르게 나타난 것으로 판단하고, 이후에 소개할 수평 및 수직성분 분석을 통해 이러한 상승 변위에 대한 방향성을 분석했다. 계단 형태의 시계열 변위 그래프를 갖는 진양 부근 PS에서의 지진에 의한 변위 크기는 변위 속도의 형태로 도출되는 PSInSAR의 결과에 대해 전체 자료 시간 길이를 이용해 계산할 수 있다.

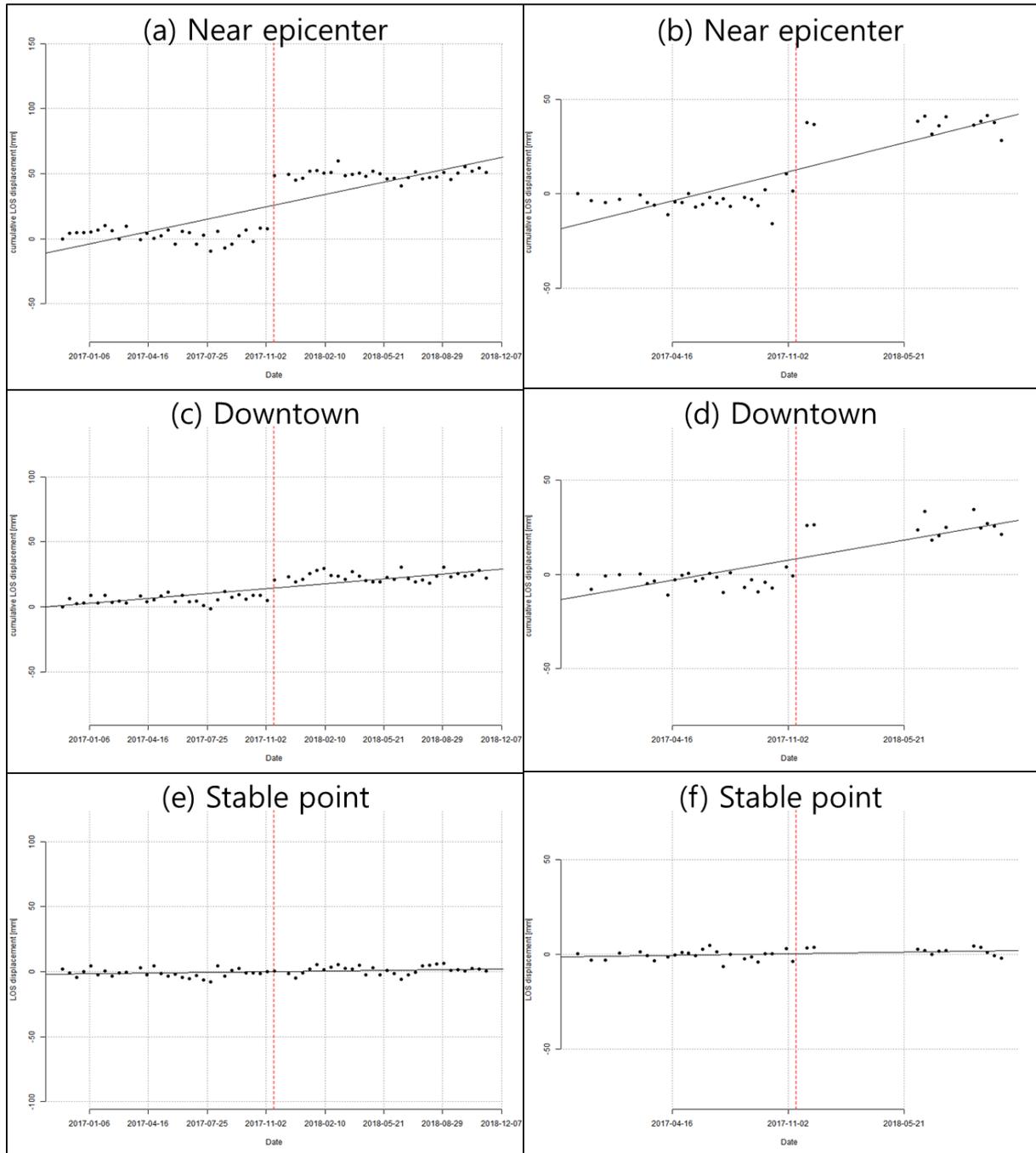


Fig. 15. PS time-series graph near the epicenter where upward displacement appeared

그림 16은 특정 지역에서 하강 변위가 발생한 양덕동에 위치한 PS들의 시계열 변위 그래프를 나타낸다. 지진으로 인한 계단 형태의 시계열 변위 그래프는 나타나지 않았고, 특정지역에서 발생한 하강 변위는 지진 이전부터 발생되어 전체 자료기간동안 지속적으로 하강하는 추세를 보였다. 이러한 지표의 지속적인 하강 변위를 침하라고 하면, 가장 큰 침하가 발생한 지점은 양덕체육관으로 하향궤도에서 약 100 mm/yr, 상향궤도에서 약 60 mm/yr의 침하 속도를 나타냈다. 이러한 관측 결과는 관측 방향에 따른 차이보다는 사용된 자료에 의한 차이로 확인됐다. 상향궤도자료 PSInSAR 결과에서 지진 이후 약 5개월 동안의 자료 공백기간동안 변위가 발생하지 않은 것으로 나타났고, 이는 언래핑(Unwrapping)단계에서 발생한 오류로 이로 인해 침하의 추세(Trend)가 이어지지 않아 기울기가 완만해진 것으로 판단된다.

지진 발생 전후로 대체로 안정한 진앙 부근의 경우, 상향궤도자료의 공백이 변위 속도에 영향을 거의 미치지 않았지만, 연속적인 침하가 발생하는 양덕동의 경우에는 자료의 공백으로 인해 CASE 1의 자료가 적합하지 않는다고 판단했다. 이를 위해 자료의 공백이 없는 지진 이전 기간에 대해 이후의 CASE 2에서 다시 분석했다.

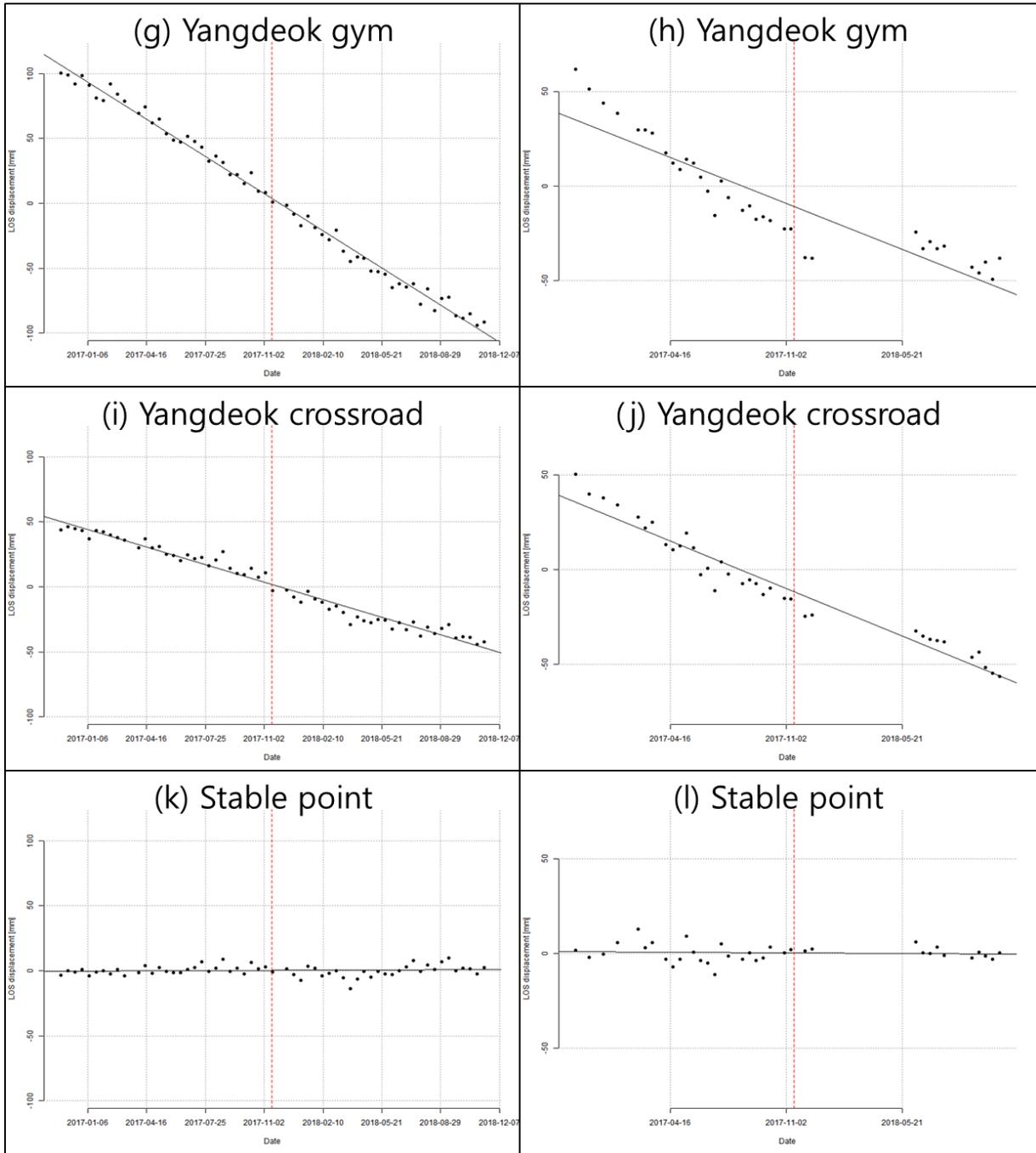


Fig. 16. PS time-series graph in Yangdeok-dong where downward displacement appeared

그림 17은 상향 및 하향궤도 PSInSAR 결과를 이용하여 도출된 지표 변위의 수평 및 수직성분을 나타낸다. 진앙 부근의 지진에 의한 상승 변위가 나타난 영역은 상승함과 동시에 진앙과 가까운 지점은 수직방향으로 상승, 진앙을 기준으로 우측 영역은 상승과 동시에 수평적으로 동쪽 성분을 갖고 진앙을 기준으로 서쪽 영역은 상승과 동시에 서쪽 성분을 갖는 것이 확인됐다.

반면, 연속적인 침하를 보인 양덕동의 경우 특정 지역에서 나타나는 침하의 방향이 대체적으로 서쪽으로 치우친 것을 확인할 수 있었고, 이는 앞서 확인한 양덕동의 시계열 변위 그래프에서 나타난 것과 같이 상향 궤도 자료의 공백기 동안 발생한 오류에 기인한 것으로 판단했다.

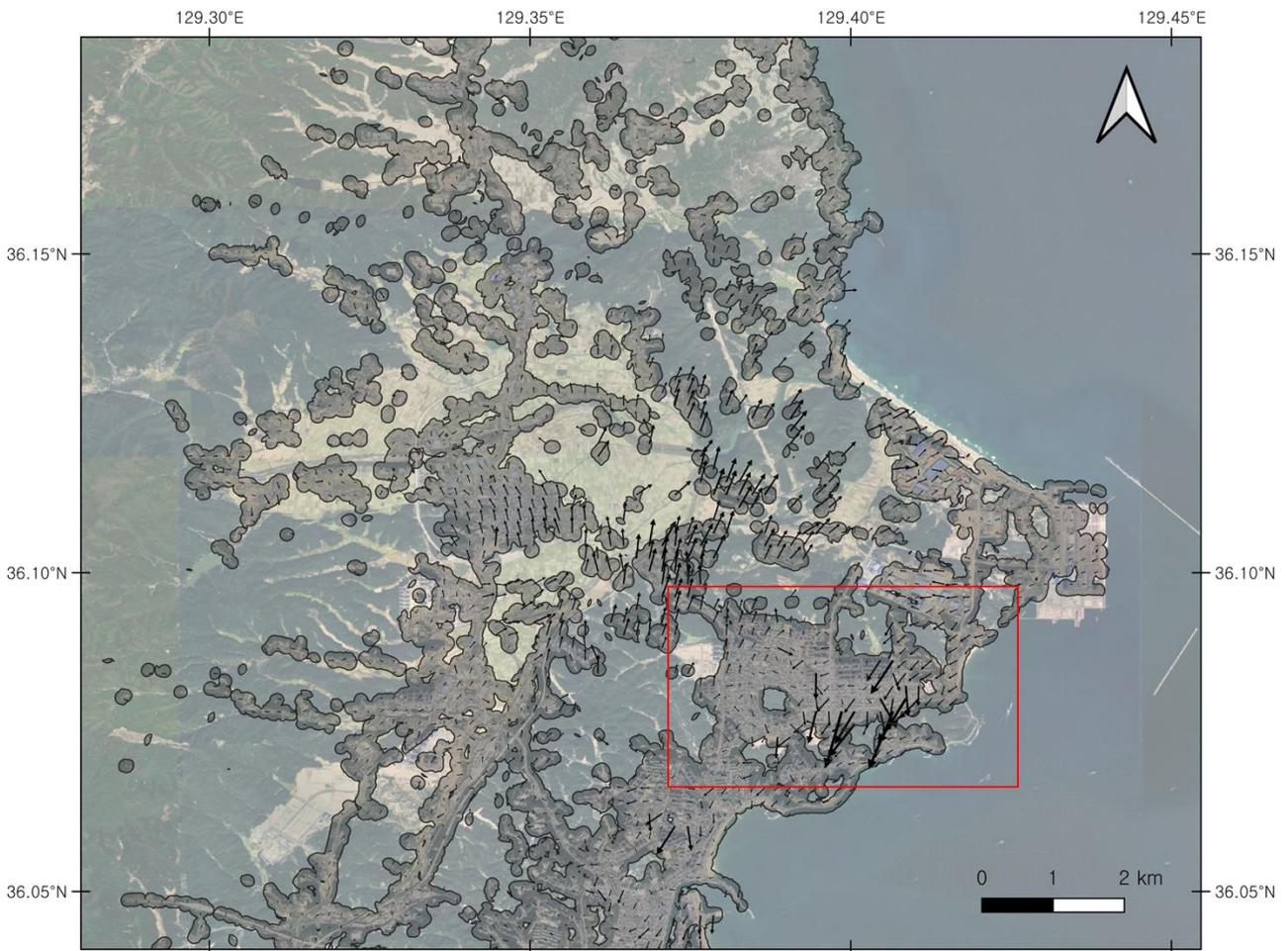


Fig. 17. Horizontal and vertical analysis result from CASE 1, the translucent polygon represents the buffer of PSs

2) GNSS 자료를 이용한 PSInSAR 결과 비교

지진 이벤트가 포함된 상향 및 하향 궤도 PSInSAR 결과와 각 궤도의 LOS 방향으로 변환시킨 GNSS 자료를 서로 비교하였다. POHG 관측소의 위치는 그림 14에 표시되어 있고, 그림 18은 관측소가 위치한 포항지질자원실증연구센터와 그 주변부에 위치한 PS들에 대한 예시로 하향 궤도 PSInSAR 결과를 나타낸다.



Fig. 18. Peripheral view of the POHG observatory. ① Nearest point from POHG observatory, Area from the POHG station with a radius of ② 250 and ③ 500 meters

본 연구에서는 관측소 위치의 1개의 PS만이 GNSS 자료에서 보이는 결과를 대변하지 않는다고 판단해 관측소를 중심으로 일정한 기준의 범위를 설정하고 내부의 평균값을 이용해 범위에 따라 결과에 어떤 변화가 있는지 알아보려고 했다. 이때, 사용한 비교 방법은 다음의 세 가지와 같다(그림 18).

- ① 관측소 지점에 위치한 1개의 PS에 대한 시계열 그래프와 비교
- ② 관측소를 중심으로 반경 250 m 이내 PS들의 평균 시계열 그래프와 비교
- ③ 관측소를 중심으로 반경 500 m 이내 PS들의 평균 시계열 그래프와 비교

그림 19와 20은 각각 3가지 관측 범위에 대한 하향 및 상향 궤도 LOS 방향의 비교 결과를 나타낸다. PSInSAR 결과와 GNSS 자료에서 모두 존재하는 날짜 중 지진 발생 이전으로 가장 가까운 날짜에서의 위치를 0 mm로 설정하고, 관측소로부터 일정 범위 내에 위치한 여러 PS를 사용해 평균한 경우 평균에 따른 표준편차를 오차 막대로 설정했다.

하향 궤도의 경우, 1개의 PS와 비교했을 때 잘 일치하지 않았지만 관측 범위의 반경이 커질수록 GNSS 결과와 유사해지는 것을 확인할 수 있었다. 세 가지 방법 중 가장 큰 범위의 반경 500 m에 대한 비교 결과에서 가장 유사한 것이 확인됐다. 상향 궤도의 경우에는 그 차이가 두드러지게 나타나지 않았다.

결과적으로, 상향 및 하향궤도 PSInSAR 모두 LOS방향으로 변환된 GNSS 자료와 유사한 것을 확인했다. 또한, 하향궤도의 경우를 고려했을 때 결과적으로 1개의 PS에 대한 시계열 그래프와 비교하는 것 보다 주변부에 위치한 PS들과의 평균값을 이용해 비교하면 스무딩(Smoothing)의 효과로 조금 더 정확한 비교가 가능한 것을 확인할 수 있었다.

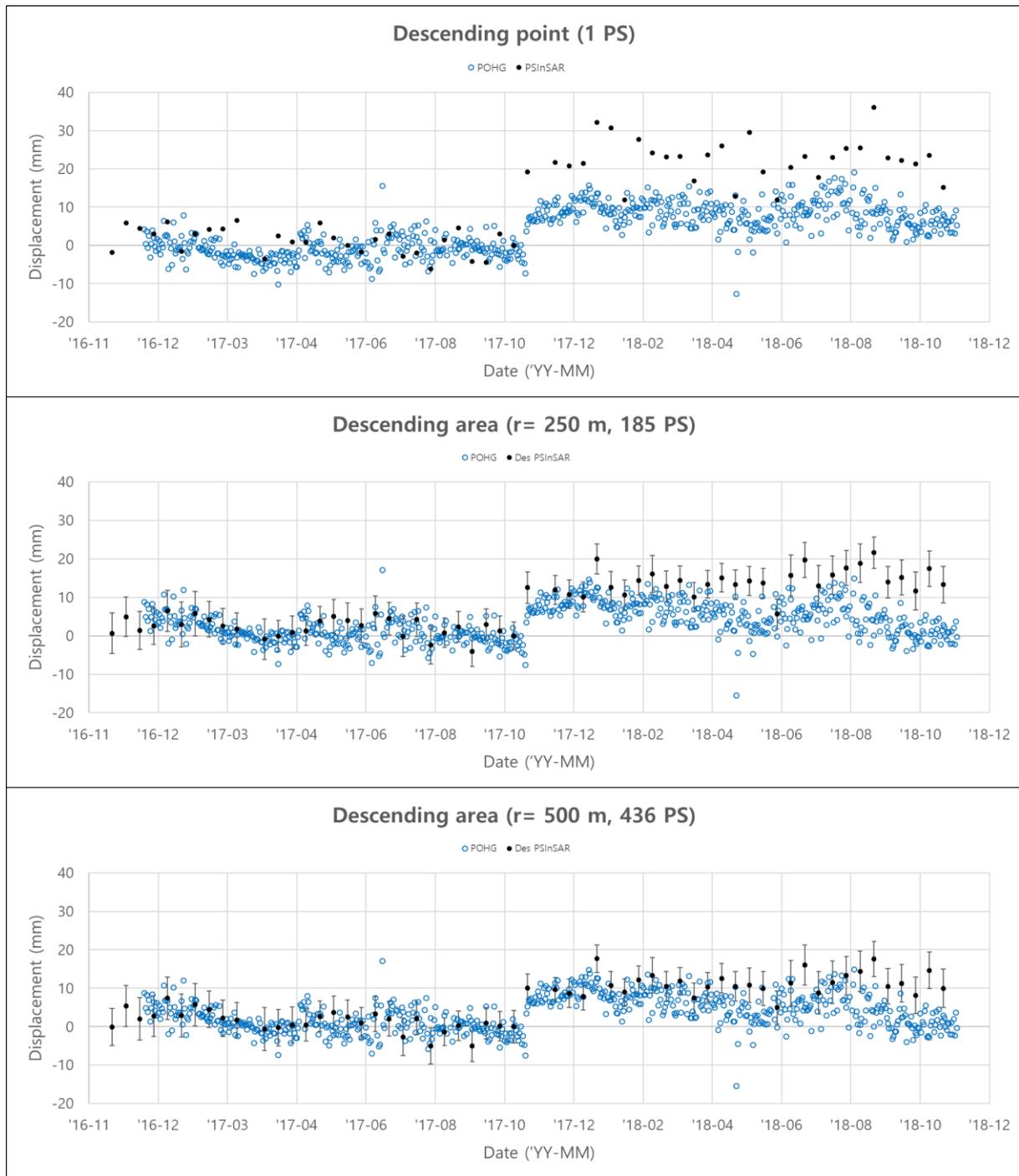


Fig. 19. Comparison between descending PSInSAR results and GNSS data

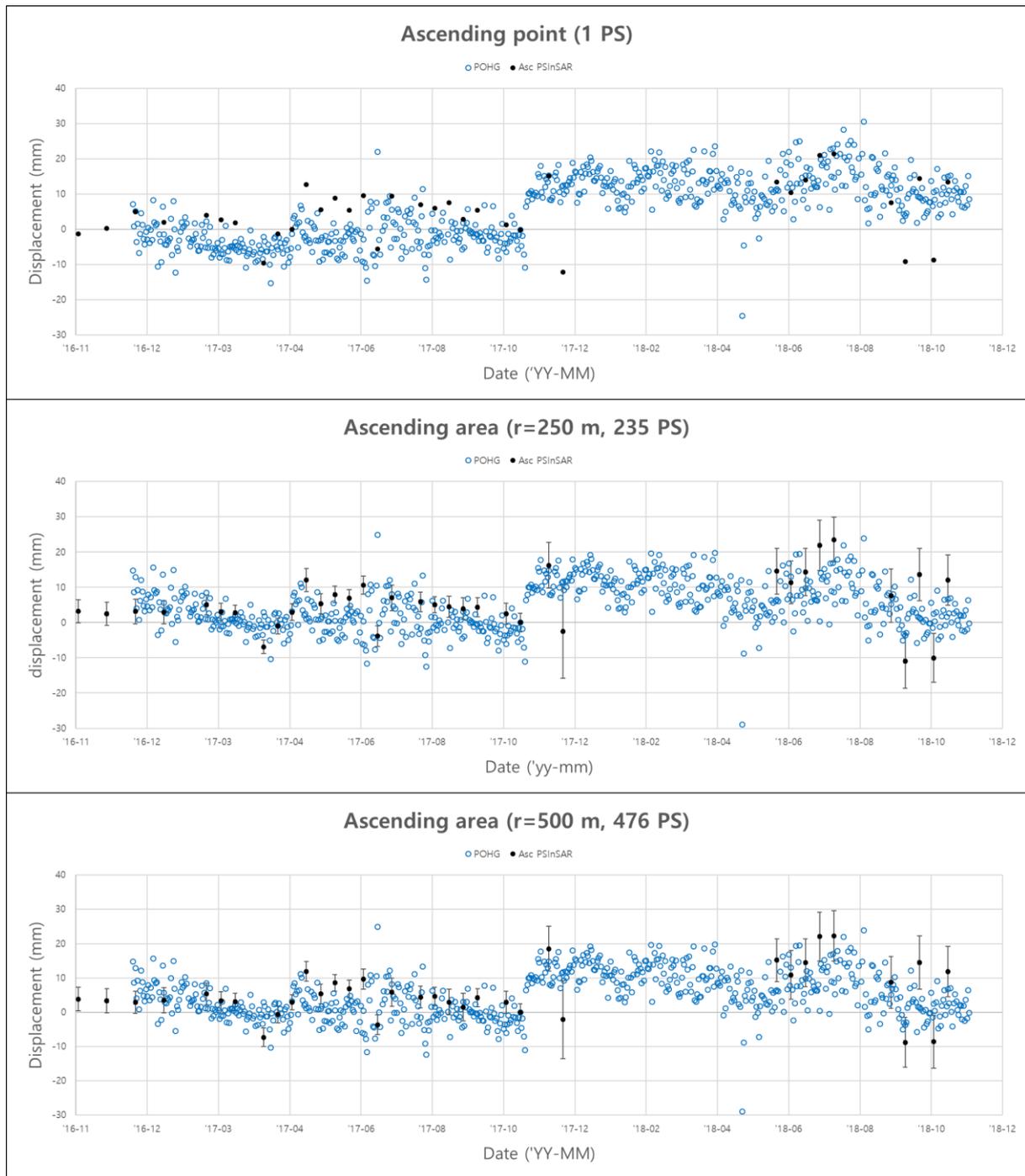


Fig. 20. Comparison between ascending PSInSAR results and GNSS data

2. CASE 2: 포항지진 이전기간에 발생한 지표 변위 관측

CASE 2 는 포항지진 이전 약 21 개월의 자료로 주로 CASE 1 의 상향궤도자료에서 지진이후 발생한 공백으로 정확한 분석이 어려웠던 양덕동의 지속적 침하현상에 대해 분석하였다. 사용된 자료는 2016 년 3 월 8 일부터 2016 년 11 월 4 일까지의 하향궤도자료 90(45*2)장, 2016 년 3 월 8 일부터 2017 년 11 월 10 일까지의 상향궤도자료 35 장이 사용되었다. 그림 21 은는 CASE 2 에 사용된 위성영상을 각 세트의 마스터 자료(Master data)를 중심으로 수직기선거리(Perpendicular baseline)와 시간기선거리(Temporal baseline)를 나타낸다.

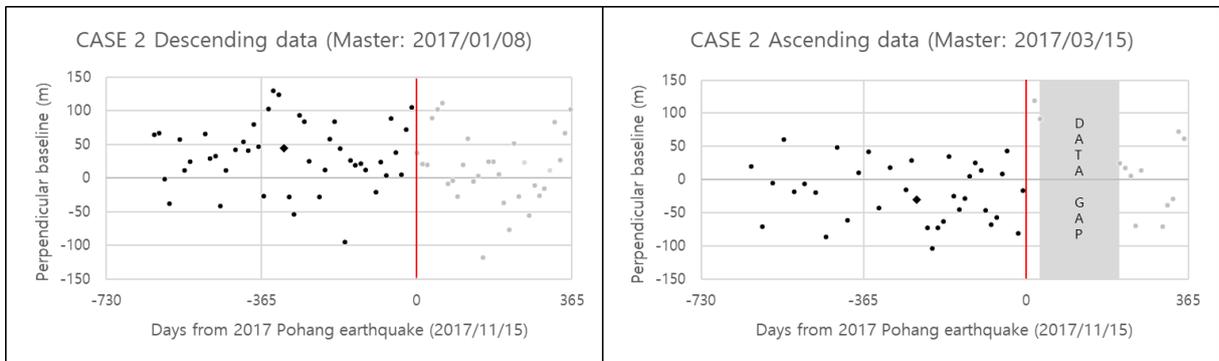


Fig. 21. Sentinel-1 (a)descending and (b)ascending SAR data used in CASE 2.

The black dots and diamonds indicate each used data in CASE 2 and its master data, redlines indicate the date of the Pohang earthquake

그림 22 는 포항지진 이벤트가 포함된 기간의 상향궤도 PSInSAR 결과에서 언래핑 오류로 인해 별도로 수행한 자료의 공백이 없는 지진 이전 21 개월 동안 포항지역에서 발생한 시계열 상향 및 하향궤도 PSInSAR 결과를 나타낸다. 흥해읍에 위치한 진양부근의 PS 들은 전체자료기간동안 변위가 발생되지 않고 안정한 것을 확인했다. 지속적 침하현상이 발생한 양덕동의 특정지역에서는 침하가 확인됐다.

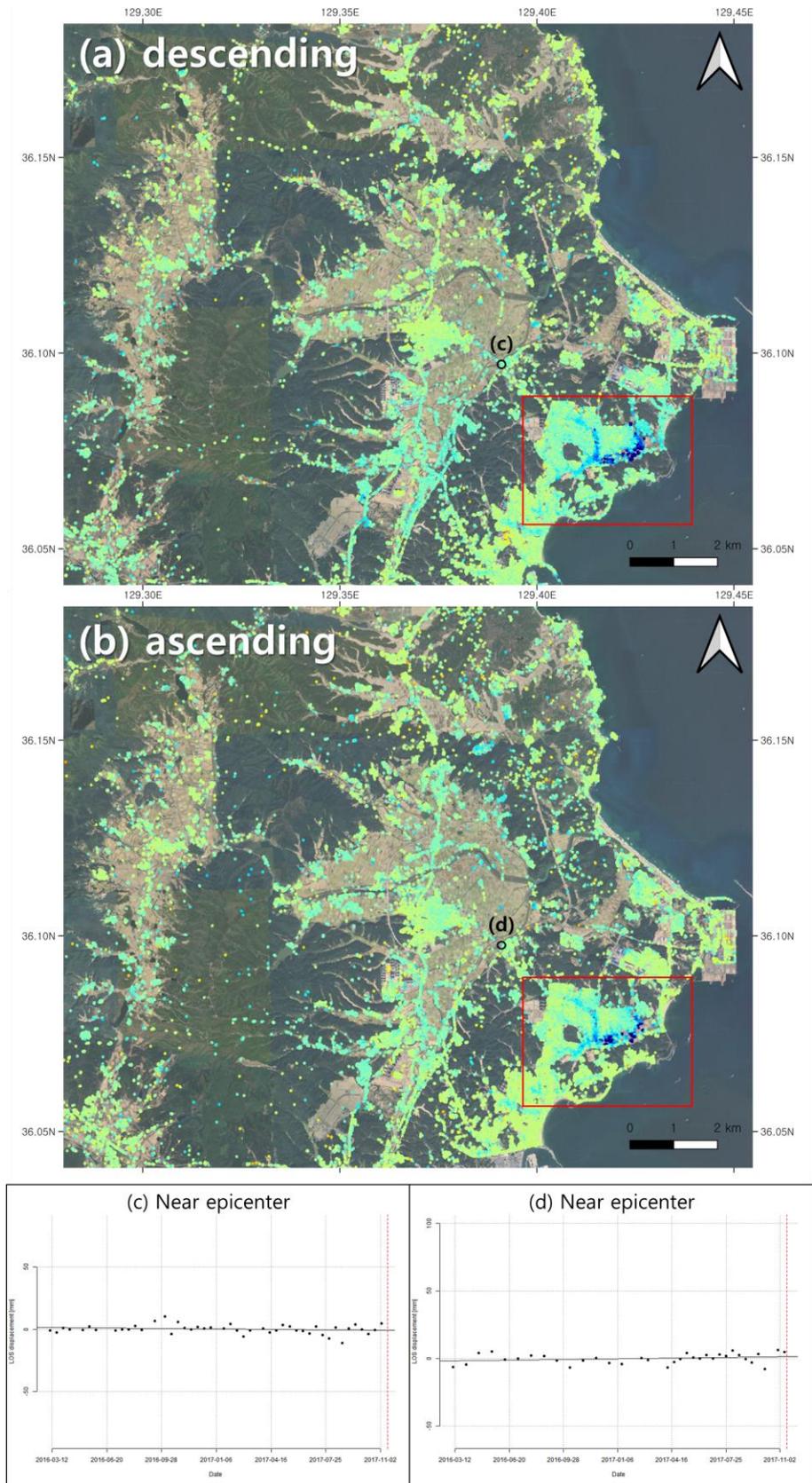


Fig. 22. (a)Descending and (b)ascending PSInSAR result from CASE 2

그림 23 과 그림 24 는 각각 지진 이전기간의 PSInSAR 결과에서 양덕동일대를 확대한 결과와 PS 들의 시계열 변위 그래프를 나타낸다. 공백으로 인해 평균변위속도가 완화된 CASE 1 의 결과와 다르게 상향궤도에서 최대 침하 속도가 약 100 mm/yr, 하향궤도에서 약 100 mm/yr 로 두 궤도에서 유사하게 나타난 것을 확인했다. 또한, 침하가 발생하는 영역이 일정한 패턴을 갖고 있었고, 침하현상으로 인해 발생된 변위의 수평 및 수직 성분을 구해 도시하였다.

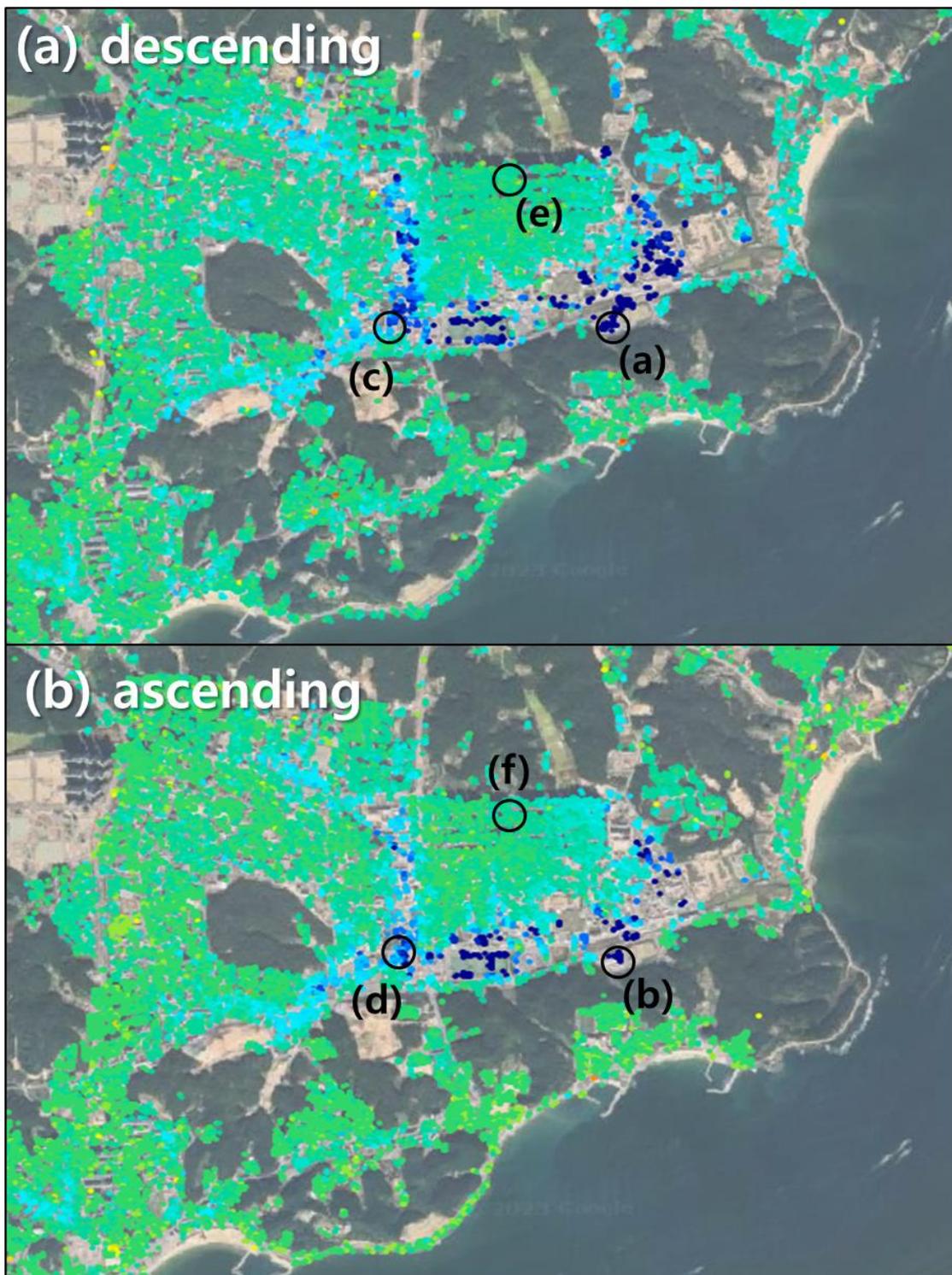


Fig. 23. CASE 2 PSInSAR results expanded to Yangdeok-dong

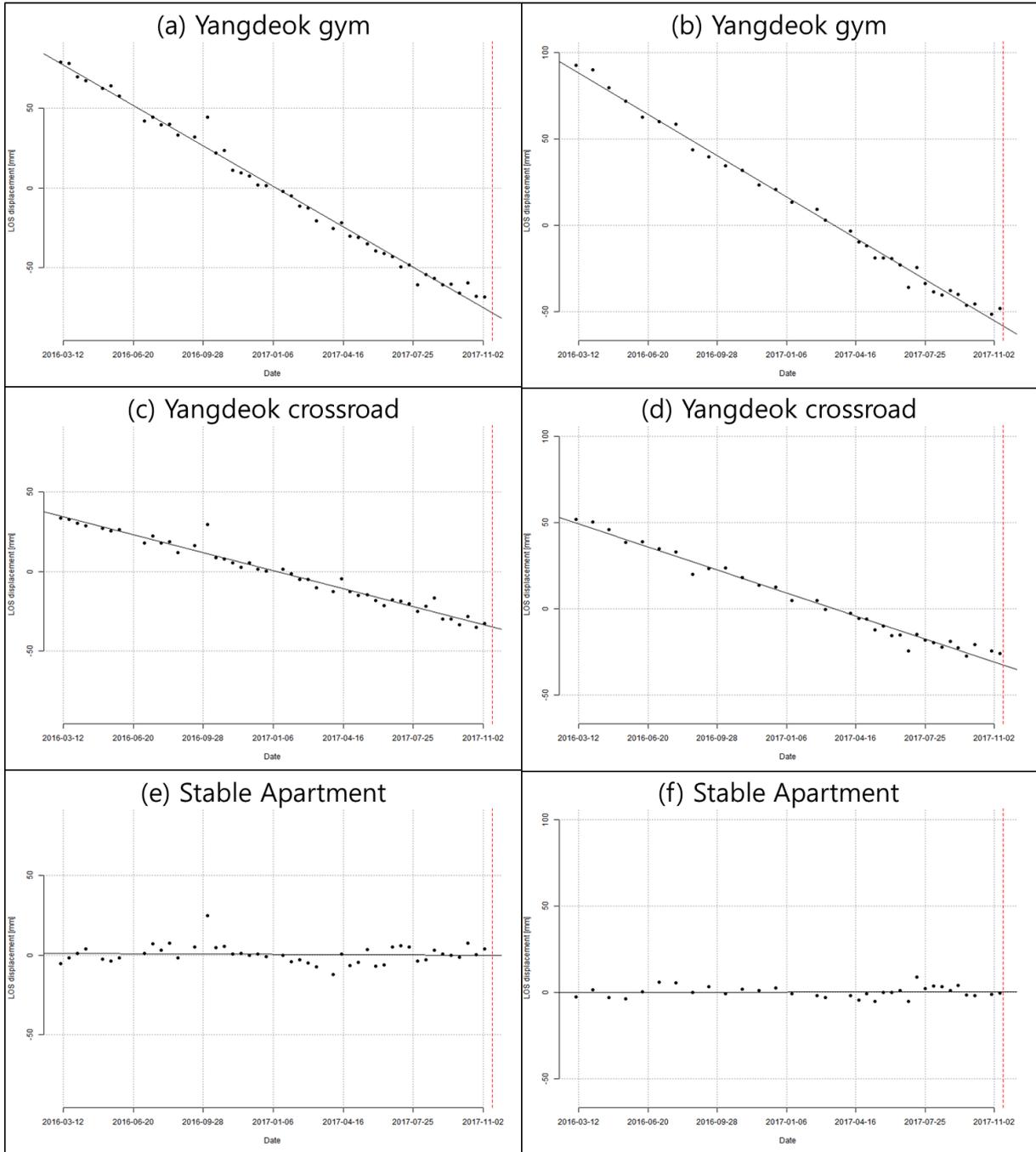


Fig. 24. PS time-series graph in Yangdeok-dong

그림 25 는 상향 및 하향 궤도 PSInSAR 결과를 이용하여 도출된 지표 변위의 수평 및 수직 성분을 나타낸다. CASE 1 에서 진앙 부근의 지진에 의한 상승 변위가 나타난 영역은 CASE 2 에서 안정해 변위가 나타나지 않았다. 연속적인 침하를 보인 양덕동의 경우, CASE 1 에서는 특정 지역에서 나타나는 침하의 방향이 대체적으로 서쪽으로 치우쳤던 반면, CASE 2 에서는 수평적인 방향성이 거의 없이 중력 방향으로의 방향성을 나타냈다. CASE 2 의 상향궤도자료의 연속성으로 침하방향성이 개선됐다고 판단했다. 특정한 영역에서만 발생하는 원인을 찾기 위해 과거의 고해상도 광학 영상과 비교해보았다.

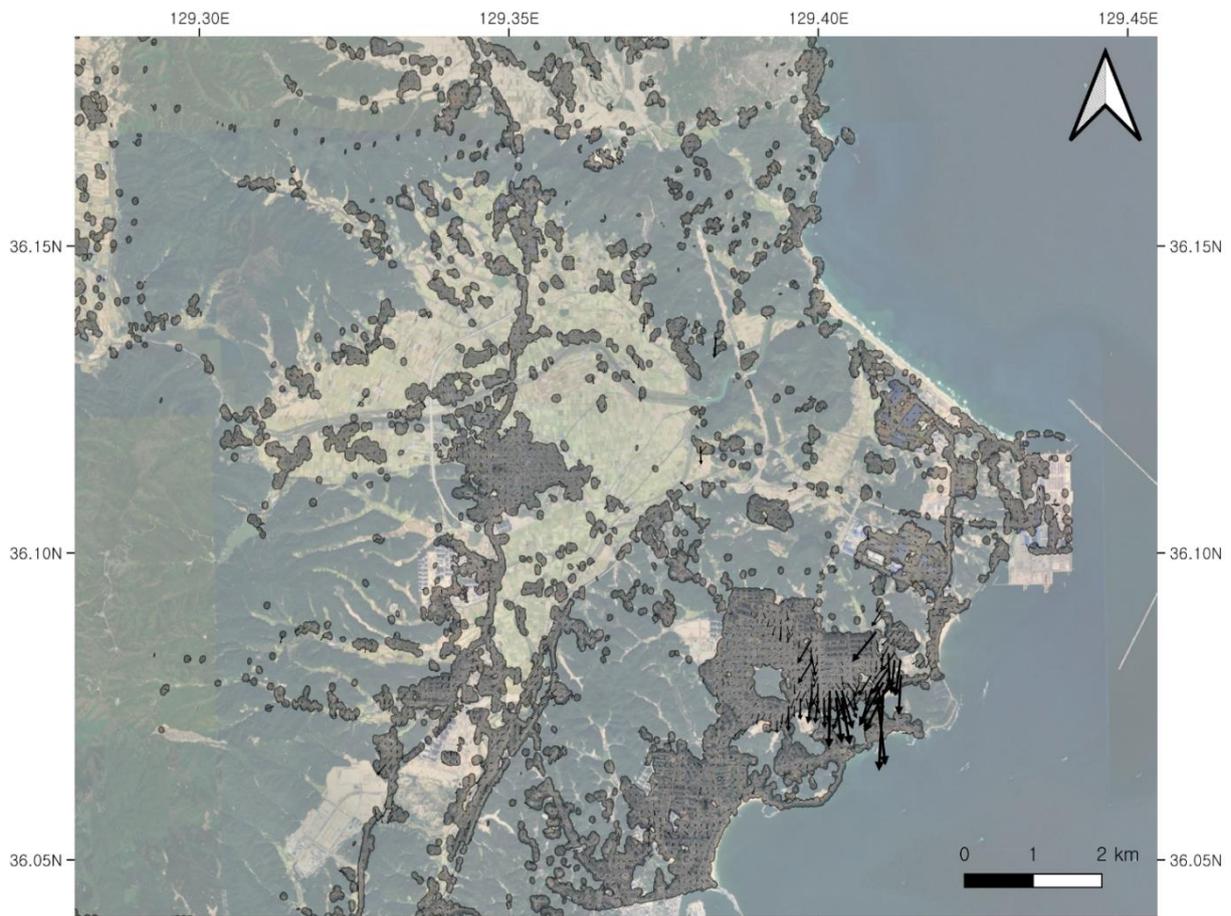


Fig. 25. Horizontal and vertical analysis result from CASE 2, the translucent polygon represents the buffer of PSs

그림 26 은 양덕동에서 발생하는 지속적 침하 현상의 원인을 찾기 위해 Google Earth 에서 제공하는 과거의 고해상도 광학 위성 영상과 비교한 결과이다. 광학 영상과 대조 결과, 지속적 침하 현상이 발생하는 특정 영역이 과거 하천 지형과 일치하는 것을 확인하였다. 양덕동 일대는 과거 산악 지형과 하천 지형으로 이루어져 있었고, 이후 개발을 통해 주거지가 조성된 것을 확인할 수 있다. 지속적 침하 현상이 발생하는 특정 지역은 과거 산악 지형이 아닌 과거 하천 지형과 일치했으며, 이로 인해 침하의 원인이 과거 하천 지형의 매립으로 형성된 연약지반위에 지어진 건물 및 구조물의 하중에 의해 발생하는 압밀 침하에 의한 것이라고 판단하였다.



Fig. 26. (a)Past optical image, (b)recent optical image, (c)descending and (d)ascending PSInSAR results for Yangdeok-dong

VI. 결 론

본 연구에서는 2016 년 3 월부터 2018 년 11 월까지 획득된 Sentinel-1 상향 및 하향 궤도 영상과 PSInSAR 기법을 이용해 2017 년 11 월 15 일에 발생한 포항지진 전후 약 3 년기간 동안 포항지역에서 발생한 지표 변위를 시계열 분석하였다. 연구에 사용된 약 33 개월의 위성자료들은 상향 궤도의 지진 직후 5 개월간의 자료의 부재로 관측 목적에 따라 지진발생 이전까지의 21 개월 세트와 지진 이벤트가 포함된 24 개월 세트로 나눠 진행하였다. 먼저, 지진 이벤트가 포함된 지진 전후 2 년 기간의 CASE 1 PSInSAR 결과에서는 진앙 근처의 흥해읍에서의 Coseismic 변위가 상승함과 동시에 수평적으로는 동-서 방향을 향해 갈라지는 형태로 발생한 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 같은 기간에 대하여 GNSS 자료를 이용해 PSInSAR 결과와 비교하였고, PSInSAR 결과의 LOS 방향으로 변환된 GNSS 자료와의 유사성을 확인한 것과 동시에 한 지점과의 비교보다는 넓은 영역에서의 공간평균값과 비교했을 때 더 잘 일치하는 것을 확인했다. 마지막으로, 포항지진 이전 기간에 대한 CASE 2 의 PSInSAR 결과에서는 양덕동의 특정 지역에서 나타나는 지속적 침하 현상은 상향 및 하향궤도에서 모두 최대 약 -100 mm/yr 의 침하 속도를 나타냈고, 변위의 수평 성분과 수직성분으로 나누어 본 결과 침하의 방향이 수평적인 방향성이 거의 없이 중력 방향과 유사하게 침하하고 있는 것을 확인했다. 지속적인 침하 현상의 원인을 알아보기 위해 과거 광학 영상과 비교하였으며 지속적 침하가 발생하는 영역이 과거 하천 지형과 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 과거 하천 지형의 매립으로 인한 연약지반 침하라고 판단하였다.

본 연구를 통해 포항지진으로 발생한 지표 변위를 관측하였고, 변위의 방향성을 파악할 수 있었다. 또한, 지진 이전부터 현재까지 이어지고 있는 양덕동의 지속적 침하현상으로 발생한 변위의 방향성을 파악하고 과거 광학 영상과 대조하여 과거 지형에 의한 중력방향으로의 침하라고 판단할 수 있었다.

PSInSAR 기법을 이용한 지진 변위 연구는 시간이 지나도 꾸준히 레이더 반사율이 높고 안정적인 지구 표면의 물체인 고정산란체에 대한 변위 관측을 통해

차분간섭기법(DInSAR)을 이용했을 때보다 대기 효과와 DEM 오류로 인한 오차가 더 제거되었다. 지진에 의한 변위뿐만 아니라 지반침하현상과 같은 다양한 현상에 대한 관측이 가능했다.

본 연구는 PSInSAR 를 이용한 지진 변위 관측 결과와 GNSS 자료의 연계 분석을 수행했으며, 지진 이전부터 이어져온 지속적인 침하 현상도 관측했다. 관측된 변위는 수평 성분과 수직 성분을 도출해 방향성이 확인되었다. 한편, 본 연구에서는 지진 이후의 자료 공백으로 인해 양덕동의 지반 침하와 같이 지속적인 변위가 발생하고 변위 속도가 일정 크기 이상으로 나타난 영역에 대한 관측에 한계가 존재했다. 따라서 지속적인 침하 현상 관측에 집중해 더 발전시키고자 한다면 더욱 긴 기간에 대한 분석으로 지진 전후 변위 속도의 변화가 존재하는지 확인할 수 있을 것으로 생각한다. 추후 연구 방법을 발전시켜 중규모 지진 변위의 지표 움직임 방향성 분석 기술로 활용하고자 한다.

참 고 문 헌

- 전명순, and 전정수. "한반도 및 주변의 지진 메카니즘 특성." *지구물리와 물리탐사* 13.3 (2010): 198–202.
- 포항지진 정부조사연구단. (2019, April) 포항지진과 지열발전의 연관성에 관한 정부조사연구단 최종보고서.
- Baek, W. H., Choi, J. S., & Ahn, J. K. (2018). Liquefaction hazard map based on in Pohang under based on earthquake scenarios. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 22(3), 219–224.
- Choi, J. H., Ko, K., Gihm, Y. S., Cho, C. S., Lee, H., Song, S. G., ... & Lee, S. R. (2019). Surface Deformations and Rupture Processes Associated with the 2017 Mw 5.4 Pohang, Korea, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2), 756–769.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8–20.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). InSAR principles—guidelines for SAR interferometry processing and interpretation (Vol. 19).
- Geudtner, D., & Torres, R. (2012, July). Sentinel-1 system overview and performance. In 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 1719–1721). IEEE.

Han, H. S., & Lee, H. Y. (2011). Analysis of surface displacement of glaciers and sea ice around Canisteo Peninsula, West Antarctica, by using 4-pass DInSAR technique. *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(5), 535–542.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 31(23).

Höser, T., 2018. Analysing the capabilities and limitations of InSAR using Sentinel-1 data for landslide detection and monitoring, University of Bonn, Bonn, Germany

Ji, K. H., Song, S. G., & Cho, C. (2018, December). Geodetic observations of surface deformation due to the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake, Korea. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2018, pp. G23B–0589).

Kim, K. H., Ree, J. H., Kim, Y., Kim, S., Kang, S. Y., & Seo, W. (2018). Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360(6392), 1007–1009.

Korea Meteorological Administration(KMA). (2018) *Pohang Earthquake Analysis Report*. https://www.kma.go.kr/w/download/earthquake_pohang.pdf , Accessed on Jun. 05, 2023.

Krieger, G., Zink, M., Bachmann, M., Bräutigam, B., Schulze, D., Martone, M., ... & Moreira, A. (2013). TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites. *Acta Astronautica*, 89, 83–98.

Lang, M., & Praks, J. (2022). The influence of Sentinel-1 SAR sub-swath on the recorded backscatter time-series over managed hemiboreal forests. *Forestry Studies*, 77(1), 90–96.

Lee S. M., & Chang S. J., (2019). A study on the dependence of focal depth of the 2017 Pohang earthquake on crustal velocity models using moment tensor inversion. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 55, no. 6, p. 649–662

Lee, H. (2001). Interferometric synthetic aperture radar coherence imagery for land surface change detection (Doctoral dissertation, Huxley School, Imperial College, London).

Liu, F., Elliott, J. R., Craig, T. J., Hooper, A., & Wright, T. J. (2021). Improving the resolving power of InSAR for earthquakes using time series: A case study in Iran. *Geophysical Research Letters*, 48(14), e2021GL093043.

Moon, J., Lee, H., & Lee, H. (2022). Elevation Change of Cooke2 Subglacial Lake in East Antarctica Observed by DInSAR and Time-Segmented PSInSAR. *Remote Sensing*, 14(18), 4616.

Song, S. G., & Lee, H. (2019). Static slip model of the 2017 M w 5.4 Pohang, South Korea, earthquake constrained by the InSAR data. *Seismological Research Letters*, 90(1), 140–148.

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote sensing of environment*, 120, 9–24..

Vadivel, S. K. P., & Kim, D. J. (2022, October). Urban Subsidence monitoring in Pohang city using time-series InSAR technique. In *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (pp. 913–916). IEEE.

Yonhap News, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210428067000053>, Accessed on Jun. 05, 2023.

Analysis of co-seismic displacement of the 2017 Pohang earthquake and continuous subsidence using the PSInSAR technique

Da-woon Jung

Department of Geophysics

Graduate School, Kangwon National University

Abstract

The second largest earthquake, since 1978 when observations of domestic instrumented earthquakes began, with a moment magnitude (M_w) of 5.4 occurred in Pohang, located in the southeastern part of the Korean Peninsula. The epicenter depth was very shallow, about 4 kilometers, resulting in a variety of ground displacement observations. For satellite remote sensing, SAR interferometry can be used to measure the displacement between two SAR images. The phase difference in the interferogram generated by SAR interferometry includes not only the ground displacement but also the phase and errors caused by various sources. In this study, we used the PSInSAR technique, one of the time-series InSAR techniques, to analyze the corrected time-series displacement using SAR images acquired over a long period of time. In addition, ground subsidence has been observed in the Pohang area through ground exploration, and it has been confirmed that this phenomenon has been occurring since before the earthquake. However, the cause of this phenomenon is still ambiguous. By analyzing a series of time-

series displacements through the PSInSAR technique used in this study, it is possible to detect both abrupt changes such as earthquakes, and gradual changes such as continuous ground subsidence.

Using Sentinel-1 imagery with an acquisition interval of 12 days, the time series were analyzed for the period before and after the earthquake, from March 2016 to November 2019, and the observed displacements were divided into horizontal and vertical components to determine their directionality. In this case, the sudden ground displacement caused by the earthquake and the gradual change caused by ground subsidence were divided into two different data periods. In addition, as a verification of the results of the time-series analysis of the ground displacement caused by the earthquake, a comparison with the GNSS data captured by the earthquake was conducted. As a result, this study was able to confirm the direction of ground displacement caused by a medium-scale earthquake at a shallow depth, and it was possible to analyze the comparative analysis with GNSS. It is expected that this research method can be applied not only to earthquake displacement but also to surface displacement with a direction.

keywords

SAR, Sentinel-1, PSInSAR, Pohang earthquake, co-seismic displacement, subsidence