



고해상도 TerraSAR-X 레이더 자료의 PS-InSAR 기법을 이용한 연약지반 지표변위 계측



염민교
성균관대학교
방재안전공학과 박사과정
tomsmith850918@gmail.com

1. 개요

1960년대부터 대한민국은 급속한 경제성장에 따라 주거용지 및 공업용지 등 토지수용을 위해 연약지반 개발을 진행해 왔다. 연약지반은 개발 시 사전에 지반 개발 작업을 수행하지만, 연약지반 자체의 지반강도가 약하고, 다른 지반보다 변형이 크기 때문에 공동화 현상, 액상화 현상 등 다양한 지반침하 현상을 겪고 있다.

연약지반을 개발한지 약 50년이 지난 지금 다양한 지표의 변화 및 인공적인 요인들로 인하여 연약지반 위에 건설된 구조물들의 안정성 문제가 제기되고 있다. 연약지반의 구조물들은 지진 및 토석류 등과 같은 자연재해에 취약하며, 건물 붕괴 또 붕괴로 인한 화재 등 복합재난을 일으켜 막대한 인명 피해와 재산손실을 야기할 수 있다.

연약지반의 대한 문제는 최근 대표적 연약지반인 평야지역에 위치한 호남지역에서 대두되었다. 2018년 1월 호남 고속철도 183km구간 중 16%인 29km 구간에서 최대 5.6cm의 지반침하가 발생되었다는 내용이 보도되었으며, 연약지반이 넓게 분포하는 호남 지역 평야지대 특성상 장기간에 걸쳐 지반이 안정화 될 때까지 조금씩 지반이 낮아지는 현상은 불가피하게 발생되며, 특히 익산·김제·정읍 지역 지하수위 분석결과 가뭄과 현장주변 농지 지하수 사용에 따라 지하수위 변동 등으로 타 지역보다 상대적으로 침하가 많이 발생했다는

한국철도시설공단의 발표가 있었다. 최근에는 상대적으로 단단한 지반이라고 인식되어왔던 영남지역경부고속철도 2단계 토공구간에서 개통 이후 지반침하가 88개소에서 발생하였다. 이와 같이 연약지반의 지반침하 문제는 비단 호남지역에 국한된 문제가 아니기 때문에, 우리나라 전 지역에 걸친 연약지반 조사 및 지표변위 계측이 필요함을 인식해야 한다.

2. InSAR를 이용한 지반침하 사례 조사

지반변위를 계측하는 방법은 지표면 또는 지중에 매설된 침하계를 사용하여 측정하거나, GPS, 정밀 수준측량 등을 통해 이루어진다. 하지만 이들은 관측 데이터의 높은 정밀도를 보장하지만 넓은 지역에 장기간 관측할 경우 많은 시간과 비용이 필요하다는 단점이 있으며, 무엇보다 시계열적 데이터 분석이 용이하지 않다. 따라서 전통적인 방법은 장기간에 걸쳐 광범위한 지역이 침하되는 현상인 지반침하를 계측하기에는 쉽지 않다.

이를 해결하기 위해 선진국들은 두 장 이상의 SAR(Synthetic Aperture Radar)영상을 간섭(Interferometry)하여 광범위한 지역의 지표변위를 분석 할 수 있는 InSAR 기술을 활용하고 있다. SAR에 대한 연구는 1951년 Carl wiley에 의해 처음으로 시작되었고, 1980년대 들어 디지털 영상처리 기술과 레이더 간섭기술의 발전에 의해 연구의 성과가 나타나기 시작했다. 1991년 유럽의 ERS-1 위성 발사를 시작으로 캐나다의 RADARSAT, 이탈리아의 COSMO, 독일의 TerraSAR 등 고해상도 SAR 위성들이 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 우리나라도 다목적 실용위성인 KOMPSAT-5에 SAR 센서를 부착하여 한반도의 SAR 영상을 촬영하고 있으나, 위성영상간의 궤도 오차로 인하여 직접적인 연구에 활용하기 부적합한 상황이다.

레이더를 이용한 SAR 영상은 레이더 주파수의 파장 및 대역에 따라 L-Band, C-Band, X-Band로 세분화 된다. 이러한 각 밴드들은 그들이 갖는 파장과 주파수에 의해 공간해상도가 결정되며 각 밴드들은 영상 활용 목적에 따라 선택된다.

InSAR를 이용한 지표 변화 연구로는 Massonnet et al.(1993)의 지진으로 인한 지표변화 연구, Raymond(1997)의 광산지역 지표변화 연구, Kwok and Fahnestock(1996)의 방화 관측 연구, Liu et al.(2012)의 산사태 지표변화 연구 등이 있으며, 최근까지도 InSAR 기술을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.



3. PS-InSAR 기법

3.1 SAR 영상

Synthetic Aperture Radar(SAR)는 위성에서 전파를 발사하고 그 전파가 지표면에 반사되어 돌아오는 동안의 위성의 이동거리와 반사된 전파를 도플러 편이(Doppler Shift)를 이용하여, 2차원 사진과 같은 영상으로 추출되는 영상을 의미한다. SAR 영상은 가시광선을 이용하는 일반적인 광학센서와는 다르게 전파의 송수신을 이용하기 때문에 송신된 전파의 반사여부와 강도가 SAR 영상의 정확도와 밀접한 관련을 갖는다. 전파의 반사가 우수한 철제구조물, 건물 등이 많은 도심지역은 반사강도가 높게 나타나지만, 산악 및 농경지역, 강과 호수와 같이 물이 있는 지역은 측정되지 않는 단점이 있다.

3.2 InSAR 기법

InSAR란 2장의 이상의 SAR 영상을 상호 정합시켜 두 영상간의 변화를 바탕으로 지표면의 변위를 파악하는 방법이다. 이때, 상호정합의 기준이 되는 영상을 주영상이라 하며, 주영상과 비교에 사용되는 영상을 부영상이라 한다. 주영상과 부영상의 상호정합과 긴밀도를 구하기 위해, 우선적으로 반사강도를 나타내는 반사영상(Reflectivity map)을 추출하게 된다. 이때, 반사영상의 각 픽셀별로 주영상과 부영상의 긴밀도를 구하게 되며, 긴밀도가 높을수록 간섭시 발생하는 노이즈가 적어진다. 또한 두 장 이상의 SAR 영상을 정합할 때 전파의 파장 간섭에 의해 발생하는 전파의 간섭무늬(Fringe)가 발생하게 되며, 이를 해석한 영상을 위상간섭영상(Phase Interferogram)이라 한다. 이후 불구속된 위상성분을 제거하는 과정을 거치게 되며 위상 불구속화를 통해 $-\pi \sim +\pi$ 의 단위를 길이단위로 바꾸게 되는데 이를 토대로 지표의 최종 변위량을 도출하게 된다.

InSAR기법에는 크게 두장의 영상을 상호 정합시켜 지표변위를 관측하는 D-InSAR (Differential InSAR)기법과 15장 이상의 영상을 이용한 PS-InSAR (Persistent Scatter InSAR)기법으로 나뉜다.

3.3 PS-InSAR기법

InSAR기법 중 PS-InSAR란 최소 15장 이상의 SAR 영상을 바탕으로 한 장의 주영상을 선정한 뒤 나머지 부영상들을 정합시켜 지표의 변위를 계측하는 기법이다. PS-InSAR 기법은 D-InSAR기법에 비해 정확도가 높으며, 최소 15장 이상의 영상을 활용하기 때문에 시계열 분석이 용이하다는 장점이 있지만, 분석하기가 어려우며 영상의 해상도 및 영상간의 긴밀도에 따라 데이터의 정확도가 차이가 난다는 단점이 있다.

본 기고에서 언급한 바와 같이 지반침하는 광범위한 지역에서 오랜 시간에 걸쳐 지속적으로 일어나는 현상이기 때문에 PS-InSAR를 이용한 지반침하 계측이 타당할 것으로 판단되며 이를 통해 호남지역의 침하 분석 및 고속철도 구간 침하를 시계역적으로 분석해 보고자 하였다.

4. 실험 및 분석

본 연구의 연구지역은 호남고속철도가 관통하는 전라북도 정읍 지역이다. 이 지역은 국가 지정 연약지반(flimsy ground)으로 분류된 곳으로써 장기간에 걸쳐 지속적인 지반침하가 일어나고 있는 지역이다. 본 연구는 InSAR 기법 중 PS-InSAR기법을 활용하였으며, 2016년8월 3일 영상부터 2017년 12월 11일까지 약 16개월 동안 21장의 영상을 분석하였다.

다음 그림 1은 영상의 제원을 도식한 그림이다.

그림 1.
(a) 위성 간 기선거리
(b) 점군 간 긴밀도
(c)추출된 점군

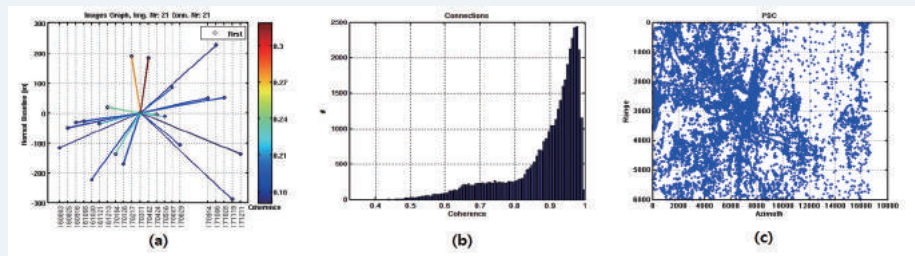


그림 1 (a)은 본 연구에 활용한 위성간의 기선거리를 나타낸 영상이며, 1 (b)는 추출된 점군들의 긴밀도를 나타낸 것이며, 1 (c)는 추출된 점군을 표현한 영상이다. 그림 1(a)에 도식한 바와 같이 기선거리가 상대적으로 가장 짧은 2017년 3월 11일 영상을 주 영상으로 활용하여 시간적 긴밀도를 확보하고자 하였으며, 이에 따라 그림 1 (b)와 같이 대부분의 점군이 높은 긴밀도를 가지게 되었다. 마지막으로 1 (c)에 도식한 바와 같이 점군을 추출하게 된다. 이후 PS-InSAR 기법을 이용해 정읍 주변지역의 지반침하를 분석하였으며 그 내용은 다음 그림 2와 같다.



그림 2.

- (a) 정읍 지역 누적 침하량
- (b) 철도 부근 누적 침하량
- (c) 호남고속철도

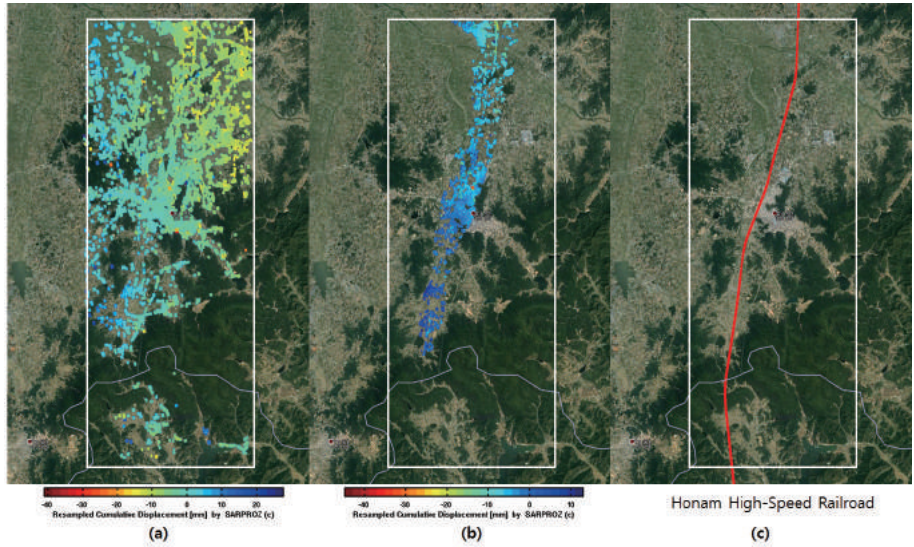
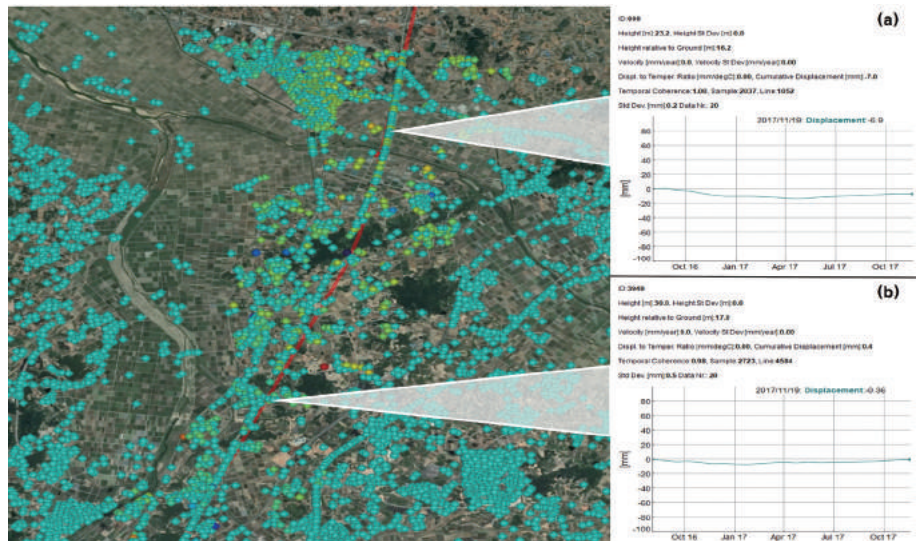


그림 2 (a)는 16개월 동안 누적된 정읍주변지역 침하량을 도식한 그림이다. 위 그림에서 나타낸 바와 같이 영상 북동쪽 지역은 일정부분 침하가 진행됨을 확인할 수 있고 남서쪽 지역으로 이동 할수록 침하량이 감소함을 확인할 수 있다. 또한 대부분의 산악지역은 본 연구에서 활용하고 있는 X-Band 영상으로 파악할 수 없음을 확인할 수 있다. 한편 그림 2 (b)의 경우 정읍지역에서 호남선 고속철도가 관통하는 지역을 나타낸 영상이다. 위 영상에서 도식한 바와 같이 상단의 철도레일에서 누적 침하가 발생했음을 확인할 수 있고, 산악지역으로 갈수록 지반의 변동이 적어짐을 확인할 수 있었다.

다음 그림 3은 철도레일을 따라 도출된 지점의 침하경향을 나타낸 것이다.

그림 3.

- (a) 농경지역의 지표 변위량
- (b) 도심지역의 지표 변위량



위 그림에서 나타난 바와 같이 각 지점 당 시간의 흐름에 따라 침하량의 추이를 분석할 수 있다. 특히 그림 3 (a)의 경우 4월부터 6월까지 최대의 침하량을 보임을 확인할 수 있는데 이는 가뭄 및 농번기 지하수위의 저하로 인하여 침하가 급격히 늘어났기 때문이다. 이는 한국철도시설공단의 발표와 일치하는 부분이며 이를 통해 데이터의 신뢰성을 제고할 수 있다. 또한 그림 3 (b) 같이 침하량이 거의 발생하지 않는 경우도 존재하는데 이는 농사지역이 아닌 도심지를 대상으로 분석했기 때문이다. 도식한 바와 같이 연약지반구간 내에서도 용지용도 및 특성에 따라 침하량 및 추이가 상이함을 확인할 수 있으며, 특히 농경지역은 지반변화의 폭이 타 지역에 비해 높음을 확인할 수 있다.

이와 같이 InSAR를 이용한 지반침하 계측은 단순한 시계열 분석 뿐만 아니라 기상데이터와 결합할 경우 계절별 지표변동 추이, 집중호우, 가뭄 시 지표의 변화량 예측 등 다양한 연약지반 분석에 활용될 수 있다.

다음 그림 4는 16 개월간 철도 레일의 누적 침하량을 프로파일링을 통해 분석한 그림이다.

그림 4.
철도 A-A' 구간의
누적침하량

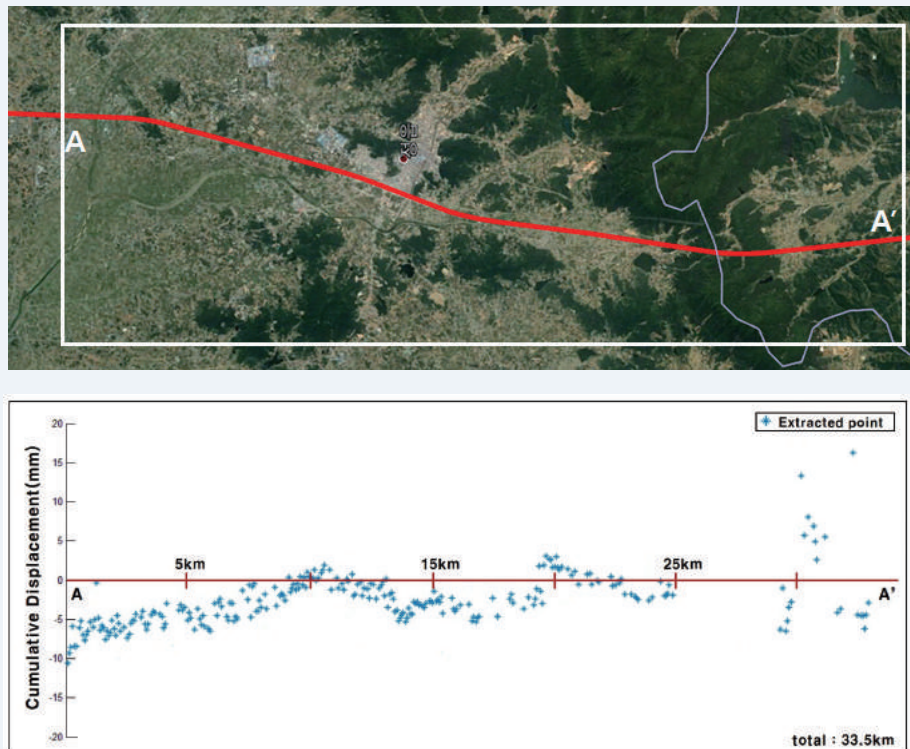


그림4 에 도식한 바와 같이 연구 지역 시작 시점부터 7km 간 침하가 발생했음을 확인할 수 있었으며, 평균 8mm의 침하가 발생한 것으로 분석되었다. 또한 8km~12km,



18~22km구간에서 누적침하량이 거의 없는 것으로 확인할 수 있으며, 이는 터널, 정음역사 등의 전설시 연약지반 개량공법 및 다짐을 실시하였기 때문에 침하가 일어나지 않은 것으로 판단된다. 또한 25km 이후의 구간은 데이터가 없거나 Out-lier가 발생하는 등 데이터의 품질이 저하되었음을 확인할 수 있다. 이는 공백구간 내에 내장산의 줄기가 관통하고 있어 PS-InSAR로 관측되지 않는 지역이기 때문이다. 또한 30km 이후 지역에서 Out-lier가 발생하였는데 이는 주변 산악지역에 의해 긴밀도가 저하되어 데이터의 품질이 떨어지기 때문이다.

5. 결론

본 기고는 InSAR를 이용한 연약지반 계측에 대해 기술하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

1. 고해상도 TerraSAR-X 레이더 자료의 PS-InSAR 기법을 이용하여 지반의 침하 및 융기 등 지반의 변화를 효과적으로 계측할 수 있었으며 SAR 영상의 해상도 및 품질이 높을수록 더욱 정확한 데이터를 얻을 수 있다.
2. 지반침하의 경우 InSAR를 이용하여 누적침하량 및 지표변위의 추이, 최대침하량 등의 유용한 데이터를 도출할 수 있으며, 특히 농경지역, 매립지 등의 연약지반 계측에 효율적인 것이다.
3. SAR 영상의 특성에 따라 도로, 철도, 교량 등 긴밀도가 높은 지역을 데이터의 공백 없이 취득할 수 있으며, 이를 통해 연약지반 분석뿐만 아니라 구조물의 안정성 평가 등에 활용할 수 있다.

그러나 산악지역 및 강가, 호수 등의 수변지역은 SAR 영상의 특성으로 인하여 데이터의 취득이 어려우며, 위 지역을 분석하기 위해서는 주파수가 높은 X-Band보다 L-Band, C-Band 등의 낮은 주파수 영역대를 활용 하는 것이 용이할 것이다. 이와 같이 맞춤형 영역선택방식을 활용하여, 도심 및 농경지역은 고파장 Band, 산악 및 수변지역은 저파장 Band 선택을 통해 국토 전 지역의 지표의 변위 및 안정성을 분석할 수 있다면 안전 대한민국으로 발돋움하는데 일조할 수 있을 것이다.