ALOS PALSAR 영상과 GPS를 이용한 시계열 분석: SBAS 알고리즘을 적용한 목포시 일원의 지반침하 연구

Time Series Analysis with ALOS PALSAR images and GPS data: Detection of Ground Subsidence in the Mokpo Area using the SBAS Algorithm

김소연¹⁾ · 배태석²⁾ · 김상완³⁾

Kim, So-Yeon · Bae, Tae-Suk · Kim, Sang-Wan

Abstract

Most of regions within the city of Mokpo, located on the southwest coast of the Korean Peninsula, are subjected to significant subsidence because about 70% of the city is land reclaimed from the sea (Kim *et al.*, 2005). In this study, we aimed to estimate the rate of subsidence over Mokpo by using PALSAR L-band dataset from 2006 to 2010. Time series analysis was performed as well using GPS surveying data from 2010 to 2012. Results from these two independent datasets are then compared and analyzed over the common period of time. GPS data processing provides the results of seasonal variation on the surface, that is, via repeatedly rising and falling in association with the periodic cycle. Therefore, a time series analysis was performed to calculate the rate of ground subsidence. The deformation rates calculated for the same point are 3.89cm/yr and 2.65cm/yr from the GPS data and SAR data, respectively. SAR and GPS data processing results show a very similar pattern in terms of magnitude of annual subsidence. Thus, if the two datasets are integrated together, new modeling on ground subsidence is feasible. Lastly, subsidence was detected in a landfill area in the city of Mokpo, which has been continuously occurring through 2012.

Keywords : SAR (Synthetic Aperture Radar), GPS (Global Positioning System), Ground subsidence, GPS relative positioning, Time series analysis, Mokpo

초 록

연안 도시인 목포는 시 면적의 약 70%가 바다를 매립하여 이루어진 도시로(Kim *et al.*, 2005) 매립에 의한 지반 침하 현상이 지속적으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 ALOS PALSAR L-band 위성에서 얻어진 영상을 이용하여 2006년부터 2010년까지 목포시 일원에서 발생한 지반침하를 관측하였고, 2010년부터 2012년까지 획득된 GPS 현장 자료의 시계열 분석을 통해 지반침하의 양상을 비교, 분석하였다. GPS 자료처리 결과 일정한 주기를 가지고 지표의 상승과 하강이 반복되는 양상이 나타났다. 따라서 이를 제외한 정확한 지반침하량만을 계산하기 위해서 시계열 분석을 수행하였다. 분석결과 GPS 자료로부터 계산된 지반침하 속도는 3.89cm/yr이고, 같은 지점에서 SAR 영상으로부터 관측된 지반침하 속도는 2.65cm/yr로 관측되었다. SAR와 GPS 자료처리 결과가 매우 유사하게 나타났으며 이를 바탕으로 두 자료를 통합하여 새로운 지반침하 모델링이 가능함을 시사한다. 또한 지반침하가 관측된 곳은 간척지에 해당하며, 2012년까지 지반침하가 지속적으로 발생했음을 확인하였다.

핵심어 : 영상레이더, GPS (Global Positioning System), 지반침하, 상대측위, 시계열 분석, 목포

1) Dept. Geoinformation Engineering, Sejong University(E-mail: flowersy@sejong.ac.kr)

2) Corresponding author · Member · Dept. Geoinformation Engineering, Sejong University(E-mail: baezae@sejong.ac.kr)

3) Dept. Geoinformation Engineering, Sejong University(E-mail: swkim@sejong.edu)

1. 서론

현재까지 지표변위를 관측하기 위한 많은 방법들이 다양한 분야에서 제시되어 왔다(Kim *et al.*, 2002; Rizos *et al.*, 2003; Yoo and Choi, 2004; Kim *et al.*, 2008; Kim, 2010). 마이크로웨이브를 사용하는 인공위성 영상레이더(SAR, Synthetic Aperture Radar) 자료는 능동적인 센서를 가지고 있어 진폭 정보 뿐만 아니라 안테나와 산란체의 거리를 알 수 있는 위상 정보까지 얻을 수 있다. 따라서 SAR 자료를 이용한 차분 레이더 간섭기법은 접근하기 어려운 지역과 광범위한 지역에 걸쳐 수십 미터의 공간해상도로 수 센티미터 내지 수 밀리미터 수준의 측정 민감도로 지표변위량을 측정할 수 있다는 장점이 있다(Kim, 2010). 따라서 인공위성 레이더 자료를 이용한 지표변위 관측에 대한 연구가 국·내외에서 활발히 수행되고 있다. JERS-1 L-band SAR Interferometry를 이용한 연안매립지의 지반침하 관측(Kim *et al.*, 2002)이나, ALOS PALSAR 위성영상을 이용한 강원도 태백시의 광산지역에 대한 지반침하 관측(Cho and Kim, 2012) 등 지반에 대한 침하 관측 이외에도, 화산의 지표변위 관측이나(Kim, 2004) 산사태(Choi *et al.*, 2009) 탐측 등에 관한 연구가 보고된 바 있다.

전라남도에 위치한 목포시는 전체의 2/3 이상이 바다를 매립하여 이루어진 도시로, 여러 지역에서 지반침하가 보고되고 있음에도 불구하고 정량적인 관측이 거의 이루어지지 않고 있다(Kim *et al.*, 2005). 다만, 영상레이더를 이용한 목포 지반침하 관측(Kim *et al.*, 2005)에서 1992년부터 1998년동안 획득된 JERS-1 SAR 위성영상을 사용하여 DInSAR 및 PSInSAR 기법으로 목포시 동명동에서 연간 최대 4cm의 침하량을 관측한 바 있다. 이후 김창오(Kim, 2006)의 연구에서도 같은 시기에 대하여 DInSAR 기법과 PSInSAR 기법으로 지반침하를 관측하였고, 목포시 일원에서 지반침하를 확인하였다. 최대 침하량은 연간 약 4cm로 역시 동명동에서 관측되었다. 김명기(Kim, 2008)는 SBAS (Small Baseline Subset) 알고리즘을 적용하여 목포시의 지반침하를 측정하였다. 변위분포도를 통하여 동명동, 하당동, 원산동 일대에서 지속적인 지반침하를 관측하였고 최대 침하량은 약 4cm/yr로 발표되었다. 이후, 목포시의 지속적인 지반침하를 관측하기 위해 hyperbolic model을 이용하여 2004년부터 2005년까지 지반침하량을 예측 및 검증한 연구가 수행된 바 있다(Kim *et al.*, 2010).

이러한 연구사례를 통해 인공위성 레이더 자료를 이용하면 광역적인 지반침하 지역에 대해 정량적인 지표변위 관측이 가능함이 확인되었다. 그러나 2005년까지의 정량적인 지반침하만을 관측했을 뿐이며, 목포시의 경우 지속적인 침하가 확인

되었음에도 불구하고 이후 연구와 현장 관측자료와의 비교 검증이 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 SAR 데이터와 GPS 실측 데이터를 시계열로 분석하여 목포시 지반침하 발생지역에 대한 통합분석을 수행하고자 한다.

위에서 언급한 바와 같이 위성 레이더 자료는 광역적인 범위에 대해 지표변위를 관측할 수 있으나 상대적인 지표변위 관측만이 가능한 반면, GPS 자료는 국소지역에 대해 지표변위를 측량하지만 절대적인 지표 변위량을 관측할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 두 자료를 활용한다면 각 데이터의 장·단점을 보완할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 국외에서는 이와 같이 SAR 자료와 GPS 자료를 결합한 연구가 활발히 수행되고 있는 추세이다(Rizos *et al.*, 2003; Ng *et al.*, 2011; Osmanoğlu *et al.*, 2011). 따라서 본 연구를 통해 SAR 자료처리 결과와 GPS 실측 데이터의 비교 및 분석 뿐만 아니라, 기존에 발표된 목포시 일원의 지반침하 결과의 연장선으로 지반침하의 진행상태를 확인해 볼 수 있을 것이다.

2. 연구지역 및 자료수집

2.1 연구지역

목포시는 전라남도 서·남단에 위치한 도시로 면적은 479.2km², 지리좌표는 동경 126°24', 북위 34°50'이다. 인구는 약 24만 명으로 전라남도 인구의 약 13%를 차지한다. 본 연구에서의 주요 관심 지역은 목포시 일원의 간척지 위에 세워진 시가지의 지표변위이며, Fig. 1을 통해 전라남도 목포시의 위치와 매립되기 이전의 목포 지형을 확인할 수 있다. 지표피복을 구분하기 위하여 KOMPSAT-2 영상 위에 원지형을 흰색 선으로 표시하였다. 간척 이전의 목포는 대부분 산악지역이었으며, 현재의 주거지는 간척지 위에 주로 형성되었음을 확인할 수 있다. 따라서 목포시의 지반침하는 일반 주민들의 생활에 직접적인 영향을 줄 것으로 사료된다.

Fig. 1. Study area. The white line represents Mokpo area before landfill.

2.2 자료수집

본 연구에서 SAR 자료처리에 사용된 영상은 JAXA (Japan Aerospace eXploration Agency)에서 제공하는 2006년 12월 6일부터 2010년 12월 17일까지 획득된 19개의 위성 영상이며 자세한 특성은 Table 1과 같다. 위성영상은 PALSAR 센서로 총 19개가 수집되었으며, 모두 Ascending 모드로 관측된 영상이다.

우리나라의 GPS 상시관측소는 국토지리정보원에서 46개(2011년 기준), 한국천문연구원에서 9개, 위성항법중앙사무소에서 26개를 관리 및 운영 중에 있다. 본 연구에서는 상대측위 기법을 통한 정밀측위를 수행하였으며 이 때 한국천문연구원에서 운영 중인 목포 상시관측소를 기준국으로 사용하였다. 목포 상시관측소(이하, MKPO)는 연구 지역과 가장 가까운 상시관측소에 해당하며, 수집된 GPS RINEX 파일 정보는 Table 2와 같다.

Table 1. Acquisition date from ALOS PALSAR (L-band, $\lambda=23.6\text{cm}$)

No.	Sensor	Orbit direction	Path/Row	Acquisition Date
1	PALSAR	Ascending	431/680	2006-12-06
2				2007-06-08
3				2007-07-24
4				2007-09-08
5				2007-12-09
6				2008-01-24
7				2008-09-10
8				2008-10-26
9				2008-12-11
10				2009-01-26
11				2009-07-29
12				2009-09-13
13				2009-12-14
14				2010-01-29
15				2010-05-01
16				2010-06-16
17				2010-09-16
18				2010-11-01
19				2010-12-17

GPS 측량을 위해서 해당 관측점마다 최소 두 시간 이상의 정지측량을 실시하였고, 약 두 달을 주기로 재 방문하여 같은 위치를 총 11회 측량하였다. 관측은 하루 중 동일한 시간에 측정된 것은 아니나 시계열로 지반침하를 관측하는 데는 무리가 없을 것으로 판단된다. GPS 관측지점은 ALOS PALSAR 자료

를 이용하여 분석된 2006-2010년 지표변위도를 바탕으로 선택되었다. 최근까지 지속적으로 침하가 발생하고 있는 주요 침하 지역뿐만 아니라 지표변위가 발생하지 않는 지점 일부를 포함하여 총 20개의 관측점을 선정하였으나, 현장조사를 통해 GPS 고도각이 10도 이상 확보되지 않거나, 적합한 관측위치가 없는 6개를 제외하고 최종적으로 14개의 관측점을 선정하였다.

본 연구에서는 주요 침하 지역 중에서도 지반침하가 가장 심한 지점(주요 침하 지점, DM07)과 그 주변부(DM12) 그리고 지반침하가 없는 지점(DM03) 총 세 개 지점에 대해 GPS 자료 처리를 수행하였다. 수집된 데이터는 Trimble 5700 및 R6 수신기로 측량한 것이며, 각 측량지점(DM03, DM07, DM12)과 목포 상시관측소와의 거리는 Fig. 2에 나타내었다. 관측점에 대한 측량정보는 Table 3에 상세히 정리되어 있다. DM03과 DM12 데이터는 주로 TRIMBLE R6 수신기와 TRMR6_GNSS 안테나로 수집되었으며, DM07 데이터는 모두 TRIMBLE 5700 수신기와 TRM41249.00 안테나로 수집되었다.

Table 2. Data list of Mokpo (MKPO) reference station

Point	Date	Receiver	Antenna/Type
MKPO (34°49'00.70"N 126°22'53.10"E)	2010-06-05	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00/ DOME
	2010-08-04~ 2010-12-04	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00/ NONE
	2011-01-26~ 2011-03-26	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00/ DOME
	2011-05-28	TRIMBLE NETRS	TRM59800.00/ SCIS
	2011-07-27~ 2011-07-28	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00/ UNAV
	2011-10-20~ 2012-04-16	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00/ NONE

Fig. 2. The distance between MKPO and measuring points (©Google earth)

Table 3. Data list of measuring points

Point	Date	Receiver	Antenna/Type
DM07 (34°47'23.71"N 126°23'52.98"E)	2010-12-04	TRIMBLE 5700	TRM41249.00/ NONE
	2011-01-27		
	2011-03-26		
	2011-05-28		
	2011-07-27		
	2011-10-20		
	2012-02-09		
	2012-04-16		
DM12 (34°47'15.74"N 126°24'08.67"E)	2010-08-04	TRIMBLE R6	TRMR6 GNSS/ NONE
	2010-10-01	TRIMBLE 5700	TRM41249.00/ NONE
	2010-12-04		
	2011-01-27	TRIMBLE R6	TRMR6 GNSS/ NONE
	2011-03-26		
	2011-05-28		
	2011-07-27		
	2011-10-20		
	2012-02-09		
	2012-04-16		
DM03 (34°48'19.78"N 126°23'46.07"E)	2010-06-05	TRIMBLE R6	TRMR6 GNSS/ NONE
	2010-08-04	TRIMBLE 5700	TRM41249.00/ NONE
	2010-10-01	TRIMBLE R6	TRMR6 GNSS/ NONE
	2010-12-04		
	2011-01-26		
	2011-03-26		
	2011-05-28		
	2011-07-28		
	2011-10-20		
	2012-02-09		
	2012-04-16		

3. 자료처리

3.1 SBAS 기법

목포지역에 대하여 ALOS PALSAR 위성자료를 수집하여 차분간섭(Differential Interferometric SAR, DInSAR) 영상을 생성한 후 시계열 기법인 SBAS 알고리즘을 적용하였다. SBAS 알고리즘은 Berardino(2002)에 의해 제안된 것으로 지표변위 정보뿐만 아니라 사용된 DEM의 고도 오차에 의한 신호, 대기에 의한 지연신호, 잡음 등의 신호가 함께 포함되어 있는 차분간섭도로부터 각각의 위상 성분을 분리하여 변위에 의한 위상만을 추출하는 방식이다(Fig. 3).

전체 19개 SAR 데이터를 이용하여 총 171개의 간섭쌍을 생성할 수 있으나, SBAS 알고리즘 특성상 기선거리가 짧은 것을 사용하는 것이 간섭도의 위상 오차를 줄일 수 있다. 따

라서 수직기선 거리가 1,500m 이하인 간섭쌍만을 선택하여 총 93개가 생성되었고, 자료 처리에는 개선된 ROI PAC 소프트웨어를 사용하였다. ROI PAC은 NASA의 JPL (Jet Propulsion Laboratory)에서 제공하는 오픈 소스로 SAR 데이터 처리를 위해 널리 사용되는 프로그램이다(Julea *et al.*, 2006; Weinberger *et al.*, 2006; Trouvé *et al.*, 2007; Doin *et al.*, 2011). 수치표고모델 자료 구축을 위해서는 90m 공간 해상도를 갖는 SRTM DEM을 이용하였다. Fig. 4는 2006년 12월 6일 영상을 기준으로 19개 위성 자료의 획득시기와 수직기선에 따른 분포도와 사용된 간섭쌍의 네트워크를 보여준다.

Fig. 3. Flow chart of the SBAS algorithm (Berardino *et al.*, 2002)

Fig. 4. Distribution map of ALOS PALSAR acquisition and interferometric pairs

3.2 GPS 자료 처리

본 연구에서는 GPS 자료처리를 위해 Bernese 5.0(이하, Bernese) 소프트웨어를 이용하였다. Bernese는 스위스 베른 대학의 천문연구소에서 개발한 프로그램으로 두 수신기 사이의 직선거리에 대해 1억분의 20의 정밀도로 위치를 결정할 수

있는 것으로 알려져 있다. 많은 양의 GPS 데이터를 자동으로 처리하기 위해 BPE (Bernese Processing Engine)를 제공하고 있으며 본 연구에서도 BPE를 이용하여 2시간 단위의 기선해석을 수행하였다. 자료처리 과정에서 사용한 옵션은 Table 4와 같다. 고정밀 자료처리를 위해 안테나 위상중심 변동(절대모델)을 적용하였으며, JGM-3 중력모델, IAU2000 장동모델, JPL DE200 천체 궤도력이 사용되었다.

Table 4. Options for GPS processing

Antenna PCV	Absolute PCV
Atmosphere model	Saastamoinen
Troposphere model	Dry/Wet Niell
Gravity model	JGM-3
Nutation model	IAU2000
Celestial ephemeris	JPL DE200
Cut-off angle	3°
Priori sigma	0.001m
Reference frame	ITRF2008(IGS08)
ZPD(Zenith Path Delay) mapping function	WET NIELL
Datum definition	All coordinates constrained (0.1 m)
Horizontal gradient estimation model	Tilting

수신한 GPS 위성들의 신호를 이용하여 독립적으로 측점의 위치를 결정하는 절대측위와는 달리, 상대측위는 좌표가 정확히 알려진 측점을 기준으로 다른 측점의 좌표를 결정하는 방법으로 정밀 측위 분야에 활용되고 있다(Kang *et al.*, 2008). GPS 위성으로부터 측점의 수신기까지 신호가 도달하는 동안에 야기되는 전리층 오차, 대류권 오차, 위성시계 오차 등은 기준점과 임의의 측점에서 수신한 신호에 공통적으로 포함되어 있다. 따라서 상대측위는 차분법에 의해 그 양이 동일하다고 가정하여 소거할 수 있는 장점이 있다(ibid.). 따라서 본 연구에서는 기선거리가 가까운 상시관측소를 기준으로 상대측위를 수행하였다.

기준점으로 사용한 지점은 연구지역과 가장 가까운 목포 상시관측소이고, 같은 행정 구역 상에 위치한다. 목포 상시관측소 자료는 지반침하 측량을 실시한 날과 동일한 시각에 측정한 자료를 사용하였다. 이 중 관측지점 DM07의 2010년 6

월, 8월 및 10월은 시행 착오로 인해 적절한 데이터 관측이 이루어지지 못하였고, 2011년 7월 27일 데이터는 수직방향 RMSE (Root Mean Square Error) 값이 약 80mm 정도로 매우 높아 이상점으로 간주하고 제외하였다. DM12의 경우에도 2010년 6월 데이터를 수집하지 못하였고, 2011년 5월 28일 데이터는 수직방향 RMSE 값이 높아 제외하였다. DM03의 2010년 6월과 2012년 4월 데이터는 측량시간이 짧아 기선해석을 수행하지 못하였다.

4. 자료 처리 결과

4.1 SBAS 처리 결과

SBAS 기법은 대기영향, 낮은 긴밀도 등 여러 가지 오차요인을 효과적으로 제거할 수 있고 장기간에 걸쳐 발생하는 지표변위의 시계열 분석이 용이하다는 장점이 있다(Kim, 2010). 따라서 비교적 광역적인 지역에 대하여 지속적으로 침하가 발생하고 있다고 판단되는 목포시 일원의 지반침하를 관측하기 위하여, 2006년 12월부터 2010년 12월까지 약 4년 동안 수집된 ALOS PALSAR 자료에 대해 SBAS 기법을 적용하였고, 그 결과와 RMSE는 각각 Fig. 5과 Fig. 6이다. 지표변위가 시간에 따라 일정한 속도로 발생한다고 가정하여 평균 지표변위 속도에 의한 선형변위 성분을 구한 후, 이 값과 시계열 변위 관측값과의 차이의 제곱평균을 구하여 개략적 관측오차로 사용하였다. 연구지역의 RMSE는 최대 3.9cm로 계산되었으나, 대부분 산악지역에서 나타나는 값들이며 지반침하 관측지점의 평균 RMSE는 $\pm 1\text{cm}$ 이다. 정확한 결과분석을 위해 SBAS 결과 중 긴밀도가 0.7 이상인 지역만 사용하였고, 지표변위도 작성 결과 주요 지반침하 중심부에서 최대 약 2.17cm/yr의 지반침하가 관측되었다.

Fig. 5. Deformation rate estimated by SBAS of ALOS PALSAR images

Fig. 6. RMSE of SBAS results

목포시의 주요 침하지역은 동명동·연동으로 이 외에도 원산동과 하당동에도 침하가 관측되었다. 침하가 관측되는 곳은 Fig. 5의 흰색 선에 의하여 모두 간척지로 확인된다. 동명동·연동의 주요 침하지역 중심부에서는 연간 약 2.17cm 침하속도를 보이며, DM07 지점의 침하속도는 약 2.06cm/yr로 관측되었다(Fig. 7). 침하 중심부는 측량하기에 장소가 부적합하고 제약요인이 많아 적절한 지점을 설정하지 못하였다. 동명동 인근, 삼학동에 위치한 DM12 지점의 침하속도는 연간 약 0.3cm로 관측되므로 지반침하 영향은 미치지 않는 곳으로 파악된다(Fig. 8).

Fig. 7. (a) Deformation rate at DM07, (b) Time series plot of deformation at the point marked in Fig. 7

Fig. 8. Deformation rate at DM12

SAR 자료처리 결과는 위성과 목표물 간의 시선방향(LOS, Line-Of-Sight)에서의 침하량이므로 GPS 자료처리 결과와의 비교를 위해 다음 식(Ng *et al.*, 2011)을 이용하여 시선방향 변위성분(ΔLOS)을 수직방향에서의 변위성분(D_u)으로 변환하였다. 일반적으로 지반침하는 수직방향으로 발생하기 때문에 (Peng, 1986) 수평방향의 변위는 고려하지 않았다(Stow and Wright, 1997; Perski, 1998)

$$\Delta D_u = - \frac{\Delta LOS}{\cos(\theta)} \quad (1)$$

where

θ = incidence angle(38.7°),

ΔD_u = the surface displacement in the vertical direction,
 ΔLOS = the ground displacement in the LOS direction
 between two acquisitions.

위 식을 통하여 변환한 DM07 지점의 수직방향 침하량은 Fig. 9과 같고, 침하속도는 2.65cm/yr로 관측된다.

Fig. 9. Time series plot of deformation at DM07

4.2 GPS 처리결과

GPS 처리결과를 토대로 시간에 따른 지표변위를 반영할 수 있는 모델식을 설정했다. 원자료에 적합하도록 추세선과

주기적인 움직임을 표현하는 항을 설정해 주었으며, 전체적인 모델식은 식(2)와 같다. 파라미터 a 는 바이어스 항, b 는 침하속도를 나타내며, c, d, k 는 각각 주기적 변화를 설명하는 진폭의 크기, 주기성 및 변동주기의 평행이동 성분을 나타낸다. 식(2)는 주기 성분으로 인해 비선형식이므로 최소제곱방법을 이용한 파라미터 추정을 위해 선형화한 Gauss-Markov 모델은 식(3)과 같다(윗첨자 0은 초기값을 나타냄).

$$h = a + bt + c \sin(dt + k) + \varepsilon \quad (2)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} h - c^0 \sin(d^0 t + k^0) \\ y \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & t & \sin(d^0 t + k^0) & c^0 t \cos(d^0 t + k^0) & c^0 \cos(d^0 t + k^0) \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ \delta c \\ \delta d \\ \delta k \end{bmatrix}}_{\xi} + \varepsilon \quad (3)$$

where

t = 관측 일자

h = 관측 표고

$\delta c = c - c^0$

$\delta d = d - d^0$

$\delta k = k - k^0$

목포시 일원의 지반침하를 관측하기 위해 측량된 DM07 지점의 GPS 자료처리 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10은 원자료의 상대적인 변화와 생성한 모델의 계수를 추정하여 적용한 시계열 분석결과를 나타낸다. 선형추세 분석결과 지표변위 속도는 약 -3.89cm/yr, 관측기간 1.3년 동안의 전체 침하량은 약 5.32cm으로 관측되었다. 자료는 약 291일의 주기성을 가지며, 해당 주기 동안 약 2.11cm의 등락을 반복하고 있다고 해석된다. 상승의 최고점은 7월, 하락의 최저점은 2월과 다음해 1월에 나타난다. 즉, 겨울에 하강하고 여름에 상승하는 양상을 가지고 있다.

Fig. 10. Relative deformation and residuals of DM07

Fig. 11. Time series analysis of DM07

DM12 지점의 GPS 자료처리의 결과는 Fig. 12이고, 시계열 분석 결과는 Fig. 13과 같다. 선형추세 분석결과 지표변위 속도는 -6mm/yr로 무시할 만한 수준이며, 지표변위가 없다고 해석할 수 있는 수치로 판단된다. 주기분석 결과, 주기는 약 378일, 진폭은 3cm이다. 이를 해석하면 약 1년을 주기로 하여 3cm의 수준으로 등락을 반복한다고 할 수 있다. 최고점은 11월과 다음해 11월, 최저점은 5월로 관측된다. 주기가 1년에 매우 근사하므로 지표변위의 최고점이 매년 같은 달로 추정된다.

지표변위가 관측되지 않는 DM03 지점의 결과는 Fig. 14, 시계열 분석결과 Fig. 15과 같다. 선형추세 분석결과 연간 약 7mm 정도 상승하고 있다. 이는 GPS 자료처리 오차 수준으로서 해당 지점에서 지반침하가 발생한다고 보기 어렵다. 주기 성분 분석 결과 일정한 연간 변화를 보이고 있는데, 약 280일을 주기로 상승과 하락을 반복하지만 다른 지점에 비해 주기가 짧기 때문에 상승과 하락의 양상이 계절적으로 보이지 않는다. 상승의 최고점은 10월과 다음해 7월이며, 3월과 다음해 11월이 하락의 최저점이다. 약 2cm의 진폭을 가지고 계절변화에 상관없는 주기적인 지표변위 양상을 보이고 있다.

Fig. 12. Relative deformation of DM12

Fig. 13. Time series analysis of DM12

Fig. 14. Relative deformation of DM03

Fig. 15. Time series analysis of DM03

GPS 측량을 실시한 각 지점마다의 SAR 자료와 GPS 자료처리 결과의 지표변위 속도는 Table 6에 나타내었으며, 모

든 지점에서 GPS 지표변위 속도가 더 높게 측정되었다. SAR 자료의 지표변위 속도와 GPS 자료의 지표변위 속도 차이는 DM07에서 1.24cm/yr로 가장 높았으며 DM12, DM03이 각각 0.22cm/yr, 0.70cm/yr로 계산되었다. 상당히 근사한 수치라고 해석할 수 있으며, SAR와 GPS 자료처리 결과 모두에서 지반침하가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 SAR와 GPS 자료 구조가 각각 래스터와 포인트로 비교에 한계에 따른 오차와, 각 데이터의 자료처리 오차에 기인한 것으로 보인다. 연구 지역의 SAR 자료처리 결과 평균 RMSE는 약 1cm로 확인되며(Fig. 6), GPS의 자료처리 결과에 따른 각 측정점마다의 수직방향 평균 RMSE는 Table 5와 같다. RMSE 값은 시계열 분석에 필요한 자료가 충분하지 않아 생길 수 있는 것으로 사료되며, 향후 장기적인 자료 취득을 통해 보다 정확한 시계열 분석이 가능할 것이다.

Table 5. Mean RMSE of UP component

Point	RMS [cm]
DM07	2.31
DM12	2.17
DM03	0.88

Table 6. Comparison of deformation rate between SAR and GPS

Points	SAR deformation rate [cm/yr]	GPS deformation rate [cm/yr]
DM07	-2.65	-3.89
DM12	-0.38	-0.60
DM03	0	0.7

5. 결론

SAR 자료와 현장관측 자료인 GPS 자료를 비교 및 분석하여 목포시 일원의 지반침하 진행상태를 확인해 보았다. 두 자료를 각각 처리한 결과 같은 양상의 지반침하를 관측할 수 있었으며, 매우 유사한 지반침하 속도를 정량적으로 획득할 수 있었다. 또한 지반침하 지역 외에도 지표변위가 없을 것으로 예상되는 지역의 지표안정성도 확인해 볼 수 있었다.

SAR 자료처리 결과, 기존 연구(Kim *et al.*, 2005; Kim,

2006; Kim, 2008) 이후 2010년 12월까지 목포시 간척지 지역 인 동명동·연동, 원산동, 하당동에 지반침하가 지속적으로 발생하고 있음을 확인하였고, 동명동·연동은 수직 방향으로 최대 2.78cm/yr, 원산동은 1.88cm/yr, 하당동은 1.70cm/yr의 지반침하가 관측되었다. 연구 지역에 대하여 Kim *et al.*(2010)의 논문에서는 1992년부터 1998년까지 약 4cm/yr, 2004년부터 2005년까지 약 3cm/yr의 지반침하를 관측하여, 압밀작용에 의한 목포시 일부 지역의 침하량이 감소되고 있음을 밝혔다. 본 논문에서는 2006년부터 2010년까지 약 2.78cm/yr의 지반침하가 관측되었으나, 관측 오차를 고려하였을 때 2005년 이후 지반침하 속도 변화는 크게 없는 것으로 판단된다. 목포시의 지반침하 속도 변화에 대해서는 추후 추가적인 데이터 획득을 통한 분석이 요구된다.

GPS 자료처리 결과 또한 SAR 자료처리와 비슷한 양상과 침하량을 나타내고 있었으나, 지반침하 발생 중심부는 환경적인 제약으로 인해 측량을 할 수 없어 데이터 수집을 하지 못하였다. 따라서 SAR 자료처리 결과와 GPS 자료처리 결과 비교는 GPS 측량 지점을 기준으로 수행하였다. SBAS 결과에서 동명동·연동 내 지반침하 지점(DM07)의 수직 방향 침하속도는 2.65cm/yr로 관측되어, GPS 처리 결과와 비교하여 관측기간인 2012년까지 지속적인 지반침하가 발생하고 있는 것으로 나타났다. 또한 약 9개월의 주기를 가지고 일정량 등락의 지표변위가 발생하는 특징이 있었다. 동명동에 이어 삼학동의 지반침하 양상이 보이는 곳의 끝 부분이라고 할 수 있는 DM12 지점은 지표변위가 없는 것으로 관측되어 지반침하의 경계를 결정지을 수 있는 중요한 지점으로 확인되었다. 지표변위가 없을 것으로 예상되는 DM03 지점에서도 역시 지반침하가 관측되지 않아 자료의 안정성을 확인할 수 있었다. GPS 자료를 이용하여 시계열 분석을 수행함에 따라 지반침하 관측 외에도 주기적인 지표변위를 확인해 볼 수 있었다. 측량한 세 지점에서 모두 1년에 근사한 지표변위의 주기성을 가지고 있었고, 2~3cm로 유사한 등락의 지표 변위량을 보이고 있었다. DM07과 DM03 지점의 위상 변화는 매우 유사했으며 DM12 지점에서는 약 세 달에 해당하는 위상 평행이동이 있었으나 이를 고려하면 매우 근사하다고 할 수 있다. 따라서 광역적인 범위의 지표변위를 경제적으로 관측할 수 있는 위성레이더 자료와 절대적인 지표 변위량을 획득할 수 있는 GPS 자료를 활용하여 새로운 지반침하 모델링이 가능할 것이다. 지점마다 동일하지 않은 지표변위 주기는 간척 이전의 원지형과 간척지의 지반 특성 차이 혹은 내륙과 해안에 위치한 지리적 차이로 발생하는 바다의 영향으로 추측해 볼 수 있으나, 이는 추후 지속적인 관측 및 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 공간정보 전문인력 양성사업과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0090465).

References

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E. (2002), A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 40, No. 11, pp. 2375-2383.
- Cho, M. and Kim, S. (2012), Analysis of ground subsidence using ALOS PALSAR (2006~2010) in Taebaek, Kangwon, *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 45, No. 5, pp. 503-512. (in Korean with English abstract)
- Choi, S., Sohn, H., You, S., and Jung, J. (2009), Monitoring of landslide in Kanwondo area by 2-Pass DInSAR, *2009 Conference of The Korea Society For Geospatial Information System*, 24 April, Seoul, Korea, pp. 254-257.
- Doin, M. P., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Lodge, F., Ducret, G. and Grandin, R. (2011), Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data, *Fringe 2011 Workshop, Eur. Space Agency*, Frascati, Italy, 19 – 23 Sept.
- Julea, A., Vasile, G., Petillot, I., Trouve, E., Gay, M., Nicolas, J.M. and Bolon (2006), Simulation of SAR images and radar coding of georeferenced information for temperate glacier monitoring, proceeding of Optimization of Electrical and Electronic Equipments, *OPTIM '06*, Brasov Roumanie, Vol. 4.
- Kang, J., Lee, Y., Kim, M., and Park, J. (2008), Positional accuracy analysis of permanent GPS sites using precise point positioning, *JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF SURVEY, GEODESY, PHOTOGRAMMETRY, AND CARTOGRAPHY*, Vol. 26 No. 5, pp. 529-536. (in Korean with English abstract)
- Kim, C. (2006), *Ground Subsidence Measurement and DEM Generation from SAR Interferometry*, Master's thesis,

- Sejong University, Seoul, Korea, 80p. (in Korean with English abstract)
- Kim, M. (2008), *Measurement of Surface Displacement of Mokpo Area using Differential SAR Interferometry SAR & SBAS(Small Baseline Subset) Algorithm*, Master's thesis, Yeonsei University, Seoul, Korea, 90p. (in Korean with English abstract)
- Kim, S. (2004), *Measurement of surface displacement of Mt. Baekdu and Busan area using L-band SAR interferometry*, Ph.D. dissertation, Yeonsei University, Seoul, Korea, 157p. (in Korean with English abstract)
- Kim, S. (2010), A Comparison of InSAR techniques for deformation monitoring using multi-temporal SAR, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 2, pp. 143-151. (in Korean with English abstract)
- Kim, C., Chae, Y., and Park, Y. (2008), Prediction of preceding displacement of a soil-tunnel by displacement monitoring using horizontal inclinometer, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 18, No. 5, pp. 355-365. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., Kim, C., Won, J., and Kim, J. (2005), Measurement of ground subsidence in Mokpo area from radar intrerferometry, *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 38, No. 4, pp. 381-394. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., Lee, C., and Won, J. (2002), Ground subsidence estimation in a coastal reclaimed Land using JERS-1 L-band SAR interferometry, *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 35, No. 5, pp. 465-478. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., Wdowinski, S., Dixon, T. H., Amelung, F., Kim, J. W. and Won, J. (2010), Measurements and predictions of subsidence induced by soil consolidation using permanent scatterer InSAR and hyperbolic model, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 37, L05304, doi:10.1029/2009GL041644.
- Ng, Alex Hay-Man, Ge, L., Zhang, K., Chang, H., Li, X., Rizos, C., and Omura, M. (2011), Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR - Southern highland coalfield in New South Wales, Australia, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 32, No. 22, pp. 7227-7256.
- Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Jiang T. (2011), Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-12.
- Peng, S. (1986), *Coal Mine Ground Control*, Department of Mining Engineering, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 750p.
- Perski, Z. (1998), Applicability of ERS-1 and ERS-2 InSAR for land subsidence monitoring in the Silesian coal mining region, Poland, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. 32, pp. 555-558.
- Rizos, C., Ge, L., Chang, H., and Nesbitt, A. (2003), The integration of GPS, satellite radar interferometry, and GIS technologies for ground subsidence monitoring, In *Spatial Science 2003*, Canberra, Australia, Vol. CDROM, pp. 22-26.
- Stow, R. and Wright, P. (1997), Mining subsidence land surveying by SAR interferometry, *The 3rd ERS Symposium*, 14-21 March, Florence, Italy, pp. 525-530.
- Trouvé, E., Vasile, G., Gay, M., Bombrun, L., Grussenmeyer, P., Landes, T., Nicolas, J. M. Bolon, P., Petillot, I., Julea, A., Valet, L., Chanussot, J. and Koehl, M. (2007), Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers: Potentials and limits, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 45, No. 4, pp. 905-924.
- Weinberger R., Lyakhovsky V., Baer G., Gegin, Z. B. (2006), Mechanical modeling and InSAR measurements of Mount Sedom uplift, Dead Sea basin: implications for effective viscosity of rock salt. *Geophys Geochem Geosys*, Vol. 7, No. 5.
- Yoo, C. and Choi, B. (2004), Prediction of deep excavation-induced ground surface movements using artificial neural network, *Journal of the korean geotechnical society*, Vol. 20, No. 4, pp. 53-65. (in Korean with English abstract)