

SAR Interferometry 기술과 동향

김 상 완

세종대학교 지구정보공학과

I. 개 요

SAR (Synthetic Aperture Radar) 자료를 이용한 레이더 간섭 기법(radar interferometry)은 안테나에서 마이크로파 영역의 신호를 송신하여 산란체로부터 반사된 파를 수신하여 얻어지는 복소수 형태의 SAR 영상으로부터 두 SAR 자료간의 위상차를 계산하여 지구 표면의 3차원 정보를 추출하는 기술이다. 참고문헌 [1]은 항공기에 부착된 두 개의 안테나에서 얻어진 자료를 이용하여 레이더 간섭 기술을 적용하여 지형 고도정보를 추출할 수 있음을 보였다. 참고문헌 [2]는 SIR-B에 탑재된 하나의 안테나로부터 두 개의 다른 궤도에서 획득된 자료를 이용한 repeat-pass 간섭 기법이 가능함을 보였다. 참고문헌[3]은 1978년에 발사된 SEASAT (L-밴드 HH-polarization) 위성의 자료를 이용하여 위성용 SAR의 repeat-pass mode InSAR 적용을 통해 지형 정보를 복원하는데 성공하였다. 레이더 간섭 기법을 응용한 차분 간섭 기법(Differential SAR Interferometry: DInSAR)은 12일 간격의 SEASAT 자료를 사용한 참고문헌 [4]에 의해 처음으로 발표되었으며, 이를 이용하여 지표의 미세한 변위량을 측정할 수 있게 되었다.

초기의 실험적인 간섭 기법에 대한 성공적인 연구를 바탕으로, 지형 고도 자료 생성의 정밀도를 높이기 위한 많은 연구가 진행되었다. 참고문헌[5]는 ERS-1/2 tandem 레이더 영상 자료로부터 DEM을 생성하였다. 지상 기준점 없이 위성의 궤도 정보와 정밀도가 낮은 DEM을 사용하여 기존 DEM을 갱신하는 연구^[6]가 수행되기도 하였다. DInSAR의 2-pass 방법은 CNES(Centre National d'Études Spatiales)의 참고

문헌 [7]에 의해 발전되었고, 3-pass와 4-pass 방법은 참고문헌 [4]에서 처음 제안한 후, JPL(Jet Propulsion Laboratory)의 참고문헌[8]에 의해 크게 발전되었다. DInSAR 기술은 지난 1990년대 동안 미국 서부에서 발생한 Landers 지진으로 인한 지진 변위 측정^{[7],[8]}, Etna 화산 분출 후의 변화 감시^[9], 광산 지역의 지반 침하^{[10],[11]}, 빙하 관측^[12], 파리의 지반 침하^[13], 지하수 유출에 의한 지반 침하^[14] 등 많은 분야에 응용되어 왔다. 최근에는 궤도의 기하학적·시간적 조건의 제약을 받는 전통적인 DInSAR 개념에서 벗어나 이탈리아 POLIMI(Politecnico di Milano) SAR 연구소를 중심으로 긴밀도가 높은 고정된 산란체(PS)를 이용한 레이더 간섭 기술이 개발되어 단층대, 산사태 우려 지역 및 도심 지역에 적용되고 있다^{[15],[16]}.

이와 같이 레이더 간섭 기법을 이용한 연구는 기술적인 면에서 뿐만 아니라 활용 분야 측면에서도 날로 증가하고 있으며, SAR 센서를 탑재한 위성이 지속적으로 개발되고 있어, 앞으로 더욱 다양한 분야에서 그 활용성이 증가할 것이다. 본 논문은 간섭 기법에 대한 기본 원리와 기법에 대한 설명(2장~4장), 그리고 최근 개발되고 있는 주요한 InSAR 기술에 대한 동향을 5장에서 소개하고자 한다.

II. InSAR Geometry

SAR 간섭 기술의 자료 취득 방법은 안테나의 관측 방법에 따라 single-pass와 repeat-pass로 나눌 수 있다. 우주왕복선을 이용한 Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)^[17]와 항공기를 이용한 TOPSAR^[18]과 같이 하나의 비행체에 두 개의 안테나가 장착되어 두 개의 자

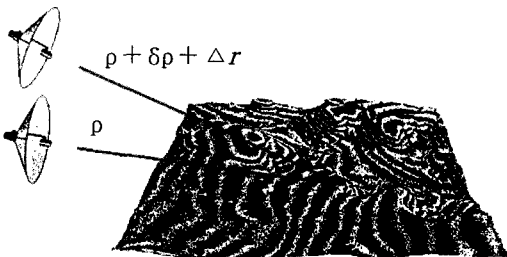
료를 동시에 얻는 것이 single-pass에 해당된다. Repeat-pass는 ERS-1/2, JERS-1, RADARSAT-1 등과 같은 위성에서 주로 쓰는 방식으로, 두 안테나가 서로 다른 비행체 또는 궤도에서 관측한 자료를 이용하는 방법을 repeat-pass SAR interferometry라 한다.

간섭 위상은 동일 산란체에 대한 두 번(또는 두 개)의 SAR 관측에서 발생한 거리 차이와 관련되어 있다. 간섭 위상과 지형, 지구타원체 사이의 관계식은 다음과 같이 관측각(look angle)을 통해 상호 연결된다. 먼저 간섭 위상은 기선 거리(baseline), 관측각과 관련되어 나타나며, 다시 관측각은 지구타원체, 지형 고도와 연관되어진다.

Repeat-pass 안테나의 일반적인 기하학적 구성은 [그림 1]과 같다. 두 안테나에서 지표까지의 거리를 ρ 와 $\rho + \delta\rho + \Delta r$ 로 놓았을 때, 두 안테나의 위상 차이는

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (\delta\rho + \Delta r) \tag{1}$$

이다. 여기서 λ 는 센서의 파장, $\delta\rho$ 는 위성관측 위치에 따른 거리 차이, Δr 는 두 관측 사이에 발생한 지표 변위를 나타낸다. 만일 $\Delta r \ll 0$ 이라면 두 개의 SAR 자료를 이용하여 생성된 간섭도는 주로 지형에 의한 위상차가 가장 크게 나타나므로 지형 간섭도(topographic interferogram)라고 한다.



[그림 1] 레이더 위상간섭 기법(InSAR) 모식도^[19]

III. InSAR 간섭 위상

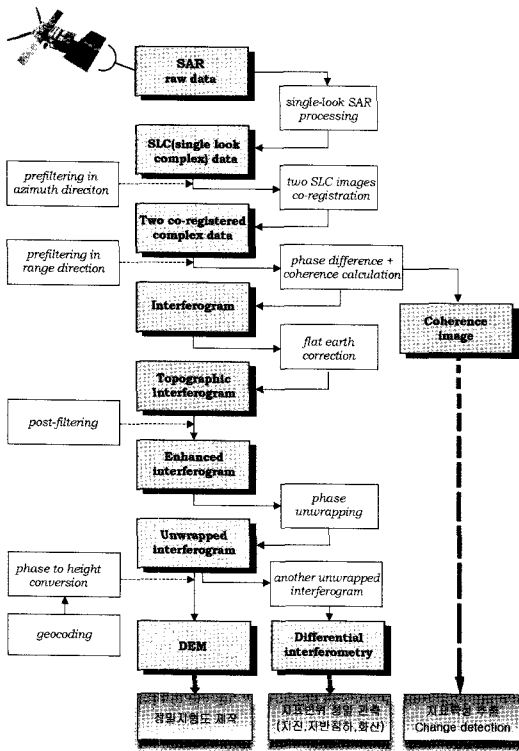
간섭도의 위상 ϕ 는 다음과 같은 성분의 합으로 표현된다.

$$\phi_{x,i} = \phi_{x,i}^{defo} + \phi_{x,i}^{topo} + \phi_{x,i}^{orbit} + \phi_{x,i}^{atm} + \phi_{x,i}^{noise} \tag{2}$$

i 번째 간섭도의 χ 지점에서의 간섭도 위상 $\phi_{x,i}$ 은 지표 변위에 의해 발생하는 위상 성분($\phi_{x,i}^{defo}$), 간섭도로부터 지형에 의한 위상을 제거하기 위하여 사용된 DEM의 오차에 의한 위상($\phi_{x,i}^{topo}$), 위성 궤도 오차에 의한 위상($\phi_{x,i}^{orbit}$), 두 SAR 자료 관측 시기의 대기 성분 차이에 의한 위상($\phi_{x,i}^{atm}$)과 노이즈 성분($\phi_{x,i}^{noise}$)을 포함하고 있다. 따라서 정밀 지표 변위 관측을 위해서는 $\phi_{x,i}^{defo}$ 성분 외의 위상 성분을 제거가 필수적이다. 하나의 간섭쌍으로부터 DEM 오차, 위성 궤도 오차, 대기 성분에 의한 오차 등을 추출하는 것은 매우 제한적이나, 다수의 관측 자료를 이용한 시계열 분석을 통해 대기에 의한 영향(주로 long-wavelength 그러나 short-wavelength도 있음), 궤도 오차에 의한 영향(규칙적인 패턴), DEM 오차에 의한 영향(수직 기선 거리에 비례)을 분해할 수 있다. 레이더 간섭도에 나타나는 대기 효과에 대한 연구^{[20],[21]}에 의해 수행되었으며, 특히 대류권에 의한 대기 효과(Tropospheric effect)중 고도와 밀접하게 관련되어 나타나는 오차에 대한 연구^{[22],[23]}에 의해 수행되었다. 간섭 기법을 통해 관측되는 변위는 기본적으로 위성의 관측 방향(Line-Of-Sight: LOS) 방향의 변위 성분으로, 실제 발생 변위의 3차원 벡터 성분을 추출하기 위해서는 3개 이상의 서로 다른 관측 방향에서의 간섭도가 필요하다.

IV. InSAR 자료 처리 및 관측 기법

SAR 영상으로부터 레이더 간섭 기법을 이용하여



[그림 2] SAR 간섭 기법 자료 처리 흐름도^[24]

수치표고자료(DEM) 및 지표 변위를 추출하기 위한 일련의 자료 처리 과정은 [그림 2]와 같다. 두 개의 SAR 영상간의 정합, 부영상의 재배열, 간섭도 필터링, phase unwrapping, geocoding, 그리고 DInSAR에서 차분 과정 등이 주요한 자료 처리 단계이다.

4.1 차분 레이더 간섭 기법(DInSAR)

두 개의 SAR 자료가 취득되는 사이에 지표 변위가 발생하였다면, 레이더 간섭도에는 지형 기록에 의한 위상과 지표의 변화에 의한 위상이 함께 기록되게 된다. DInSAR의 기본 개념은 간섭도로부터 지형의 위상을 제거함으로써 지형과 변위에 대한 두 가지의 위상 효과를 분리해내는 것이다. DInSAR 기술을 이용하여 지표 변위를 관측하기 위해서는 2-pass^[7], 3-pass 또는 4-pass^{[4],[25]} 방법이 있으나, 현재는 SRTM 미

션을 통해 구축된 30 m 또는 90 m 전지구적 DEM을 이용한 2-pass 방법이 가장 널리 사용되고 있다^[26]. 특히 2-pass 방법은 지진과 같은 순간적으로 발생하는 변위를 포함하여 지표 변위가 지속적으로 발생하는 지역 등 모든 환경에 적용이 가능하다.

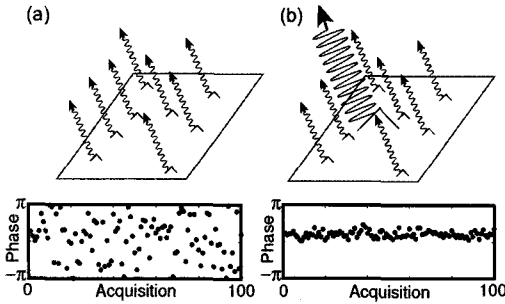
4.2 시계열 변위 관측 기법

다중시기에 획득된 SAR 자료를 이용한 시계열 변위 관측기법은 지표에서 발생하는 변위의 시간에 따른 진행 양상을 관측할 수 있다는 장점뿐만 아니라, 하나의 간섭도로부터 계산된 간섭 위상에 포함되어 있는 여러 오차 성분(대기 영향, 낮은 길밀도 등)을 효과적으로 제거할 수 있는 수단이라는 측면에서도 시계열 분석 기법은 정밀 지표 변위 관측에 있어서 매우 중요한 기술이다.

다중시기 SAR 영상을 이용한 시계열 분석 기법 중 지표의 고정 산란체(permanent scatterer)를 이용한 PS 간섭 기법(Permanent Scatterer Interferometric SAR, PSInSAR)은 1990년대 말 이탈리아 POLITECNICO DI MILANO에서 개발된 알고리즘으로 국제 특허로 등록되어 있다^{[27],[28]}. 또한 Small Baseline Subset을 이용한 SBAS 알고리즘 및 Least Square Database Approach 등이 개발되어 인공위성 SAR 자료를 이용한 지표 변위의 효과적인 관측에 이용되고 있다^{[29]~[32]}.

PSInSAR 기법에서 사용하는 PS란 [그림 3] (b)와 같이 한 화소 내에서 우세한 반사 강도를 제공하는 산란체가 있을 경우 위상관측의 정밀도는 높아지는데, 이러한 화소를 고정 산란체라 한다. 반면, 한 화소 내에 같은 반사 강도를 가지고 있는 다수의 산란체가 존재하는 분포 산란체(distributed scatterer)의 경우 관측 위상의 정밀도가 낮아지게 된다([그림 3] (a)).

PSInSAR에서는 지표 변위에 대한 위상 성분 계산 과정 중에 고도 오차에 대한 위상 성분이 동시에 고려된다. 따라서 DInSAR에서와 같은 높은 정밀도의 DEM이 요구되지 않는다. 수 십 m 정도의 정확도를



[그림 3] Phase simulations for (a) a distributed scatterer pixel and (b) a persistent scatterer pixel^[33]

가진 DEM이면 초기 계산을 수행하는데 충분하며, 계산이 완료된 PS 지점에서는 일반적으로 고도에 대한 오차를 m 이하의 단위까지 측정할 수 있다. 또한 잔여 위상의 시간적·공간적 분포 특성 분석을 통해 대기 성분을 추출할 수 있다. 전통적인 차분 레이다 간섭 기법과 비교해서 연구 지역에서 획득된 거의 모든 SAR 영상을 활용할 수 있으며, 대기에 의한 영향을 효과적으로 제거할 수 있고, 궤도의 기하학적·시간적 제약에 대해 자유롭다^[27].

다수의 주영상을 사용하여 작성된 간섭쌍을 이용한 시계열 분석하는 기법은 least square 방법과 SBAS 기법이 있다. 참고문헌[29]에 의해 제안된 least square 기법은 간섭쌍을 연결한 네트워크가 하나로 연결되어 있을 때 적용 가능한 방법이다. 간섭쌍 생성 시 기선 거리 또는 시간 간격의 제한에 의해 간섭쌍 네트워크가 두 개 이상으로 분리되어 있을 경우 least square

기법 적용이 불가능하다. 참고문헌 [30]에 의해 제안된 SBAS 방법은 기선 거리에 의한 decorrelation을 줄이기 위해 기선 거리가 짧은 간섭쌍들만을 사용하였으며, 변위량이 아니라 변위 속도의 minimum-norm 기준에 근거한 해를 구한 후 속도를 적분해 변위량을 구하는 방법을 사용하였다. 이때 minimum-norm을 구하기 위해 SVD 방법을 사용하였다. 이 방법의 장점은 최대한 많은 자료를 시계열 분석에 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 공간적으로 많은 관측점에서 변위도를 구할 수 있다는 장점이 있다. PS 기법에 비해 매우 넓은 지역의 자료 처리에 효과적이며, 이 기종간의 위성 결과의 결합(예 ERS와 ENVISAT) 분석이 쉽다^[34]. <표 1>은 DInSAR 기법, PSInSAR 기법, SBAS 기법의 특징을 비교한 것이다^[35].

V. 최근 InSAR 기술 동향

InSAR 기술 분야에서 최근 국제적인 주요 연구 분야는 고해상도 X-band SAR 영상을 이용한 정밀 DEM 생성, 다수의 X-band SAR 영상을 이용한 정밀 시계열 변위 연구 및 tomographic SAR 분야이다. 현재 기존 C-밴드 및 L-밴드 SAR 자료 처리를 위해 개발된 기술을 바탕으로 X-밴드 SAR 자료의 장점을 반영하는 새로운 기법들에 대한 연구들이 수행되고 있다. 한편, ESA는 SAR 자료 처리를 위한 툴박스로서 NEST(Next ESA SAR Toolbox)를 개발하여 온라인에서 공개하고 있으며, 앞으로 TU-Delft University에서

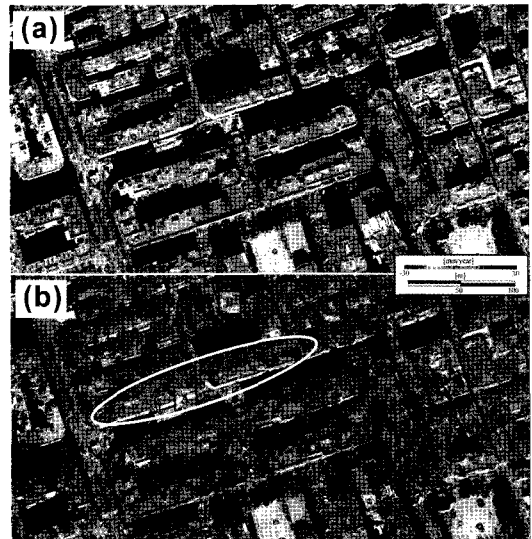
<표 1> DInSAR, PSInSAR, SBAS 기법의 특징 비교

Type	Conventional DInSAR	PS Technique	SBAS
Baseline	very small(<200 meters)	no limits in the ERS database	very small(< 200 meters)
Atmospheric artifacts	no reduction	strongly reduced	well reduced
Coherence	> 0.3 on several adjacent pixels	> 0.7 on a single pixel	> 0.3 on several adjacent pixels
DEM accuracy	baseline dependent	100 meters	100 meters
No. of SAR images		> 20	

개발한 InSAR 및 DInSAR 자료처리 소프트웨어인 DORIS의 기능들을 NEST에 포함하고자 프로젝트가 현재 진행 중이다^{[36],[37]}. 독일 DLR은 TerraSAR-X 위성을 활용한 정밀 지표 변위 관측을 위한 연구와 항공기로 획득된 다중 편파 자료를 이용한 PolSAR, PolinSAR 기법을 이용한 연구, range 주파수 대역 분리를 통한 delta-k 방법을 이용하여 절대 위상을 구하는 방법 등 다양한 분야에서 연구를 수행하고 있다^{[38]~[41]}. 최근 비약적인 기술 발전을 바탕으로 활용 분야 확대되고 있는 InSAR 기술 분야 중에서 가장 주요한 연구 결과를 다음에 소개하고자 한다.

5-1 시계열 분석의 정확도 향상

PSInSAR 기술은 관측된 지표 변형을 단순히 공간적인 지표 변형 관측을 뛰어 넘어 시간과 공간적으로 수 mm/yr 정도의 정밀도로 지표 변형 관측을 가능하게 함으로써, 과학적 연구 목적뿐만 아니라 실용적 측면에서도 SAR 영상의 활용성을 증대시키는데 크게 기여하였다. 이탈리아의 IREA 그룹은 시계열 분석 기법 중 하나인 SBAS 기법을 개발하여 지진, 화산 등 자연재해 분야에서 정밀 시계열 지표 변위 관측을 위한 중요한 기법으로 활용하고 있다^{[42]~[45]}. 이탈리아의 ASI는 TRE와 공동으로 고정 산란체 기법을 이용하여 이탈리아 전국토의 모니터링을 위해 1990년대부터 현재까지 획득된 ERS와 Envisat 자료를 모두 수집하고, 이를 분석하여 전국토의 지표 변화 관측도를 작성하기 위한 대형 과제를 진행하고 있다^[46]. COSMO-SkyMed와 TerraSAR-X로부터 획득된 X-band SAR 영상을 이용한 지표 변위 관측에 대한 연구는 기존의 C-밴드, L-밴드 결과와 비교를 통한 정밀도 검증 등이 수행되고 있다^{[47]~[50]}. [그림 4]는 C-band와 X-band SAR 영상으로부터 추출된 PS의 분포로써, X-band SAR 영상의 공간 해상도가 높아짐에 따라 신뢰성 있는 관측점의 밀도가 매우 향상되며, 이를 통해 국지적인 변위 관측의 신뢰성 또



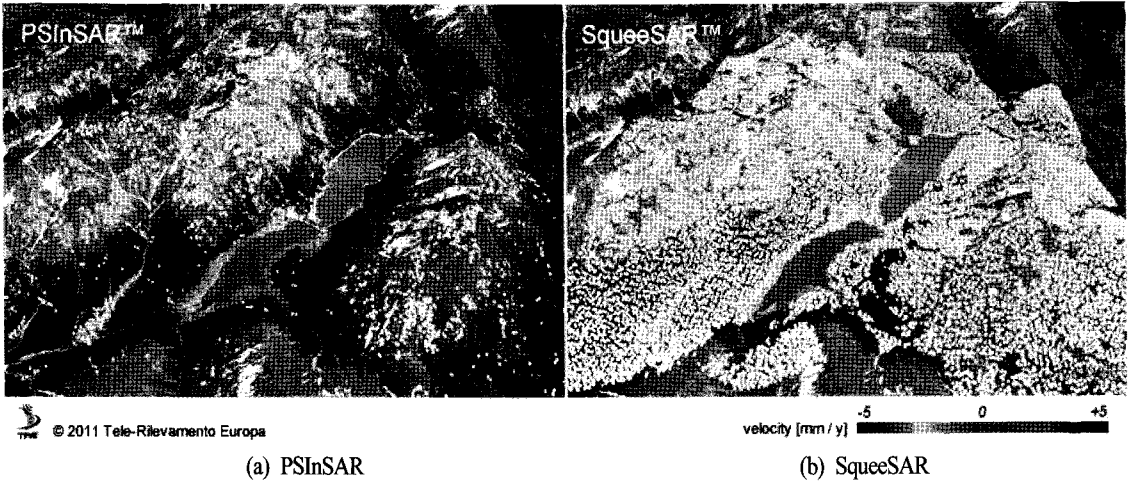
[그림 4] 다수의 ENVISAT C-band ASAR 영상과 TerraSAR-X SAR 영상으로부터 추출된 PS에서의 변위 속도^[51]

한 높아지게 된다.

가장 최근에는 TRE 그룹은 기존의 고정 산란체를 이용한 PSInSAR 기술을 한층 개선하여, 고정 산란체뿐만 아니라 분포 산란체에서도 매우 정확한 지표 변위 정보를 추출하는 새로운 SqueeSAR 기술을 발표하였다^{[52],[53]}. [그림 5]의 예와 같이 SqueeSAR은 기존의 PSInSAR보다 관측점의 밀도가 비약적으로 증가함에 따라 국지적으로 발생하는 변위에 대한 정밀 분석이 가능하게 되었다.

5-2 정밀 DEM 생성

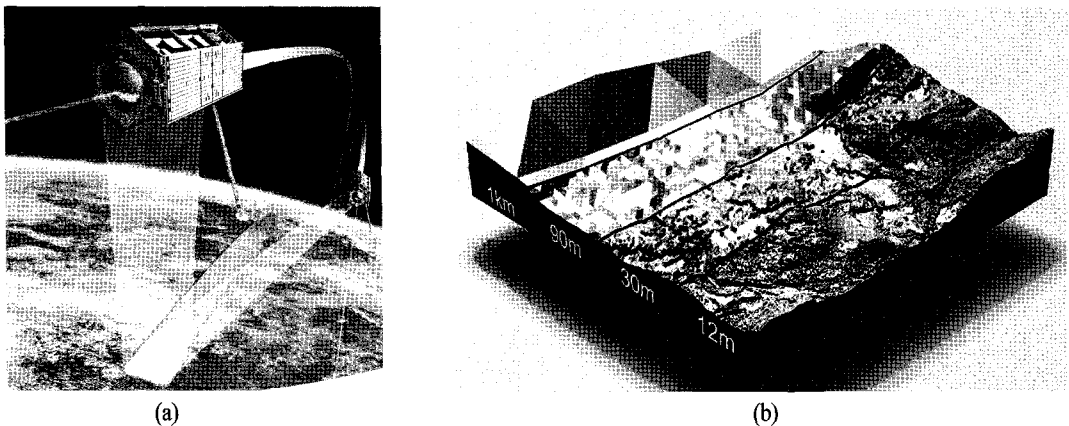
전세계 1초 DEM을 생성하기 위해 수행된 SRTM 프로젝트의 성공적인 결과와 TerraSAR-X 위성의 성공적인 활용에 힘입어 2010년 7월 21일에 TerraSAR-X와 쌍둥이 위성인 TanDEM-X가 발사되었다. 앞으로 2011~2012년 동안 두 X-band SAR 위성으로부터 관측된 영상의 간섭 기법을 이용하여 12 m 급의 전세계 DEM을 구축하는 것이 목표이다. 두 개의 위성으



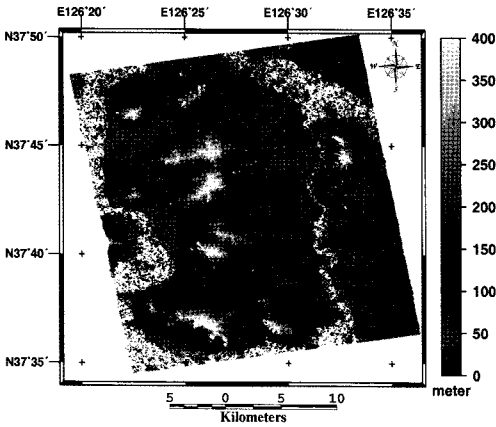
[그림 5] RADARSATf-1 SAR의 PSInSAR와 SqueeSAR 기술에 의해 관측된 지표 변위 [mm/yr]^[53]

로부터 거의 동시에 획득되는 SAR 영상은 X-band SAR 자료의 중요한 단점인 시간에 따른 decorrelation 이 거의 발생하지 않기 때문에 DEM 제작에 매우 적합한 시스템이다(그림 6). 최근 X-band SAR 자료를 이용하여 국내 지역에서 정밀 InSAR DEM이 생성 가능한지에 대한 분석을 수행하였다. 비록 식생으로 피복된 지역은 TerraSAR-X의 11일 재방문 주기 자료로부터 일반적으로 적절한 DEM 생성이 어렵지만, 수목에 의한 영향을 덜 받는 계절의 자료를 사용

하여 높은 공간해상도의 InSAR DEM이 생성 가능하다. [그림 7]은 2008년 11월 12일, 2008년 11월 23일에 획득된 강화도 지역 TerraSAR-X SAR 간섭쌍으로부터 생성된 8 m 간격의 DEM이다. 한편, 고정 산란체를 이용한 변위 분석의 부산물인 DEM 오차 값은 고정 산란체가 많이 분포하는 도심 지역의 DEM을 생성하는데 활용될 수 있다^[54]. 고해상도 X-band SAR 영상을 이용한 고정 산란체의 정밀 geocoding은 도심지 건물의 DSM 생성에도 활용될 수 있다^[55].



[그림 6] (a) TerraSAR-X와 TanDEM-X 위성 관측 모식도, (b) 공간해상도에 DEM 비교 (TanDEM-X brochure)



[그림 7] Geocoded DEM after orbit refinement and calibration using pseudo-GCP from matching between master SAR image and simulated SAR



[그림 8] PSI 분석에 의한 추정된 고정 산란체 고도 분포^[55]

5-3 고해상도 간섭 위상 활용

현재 공간해상도 약 1 m의 고해상도 X-band SAR 위성인 TerraSAR-X(독일), TanDEM-X(독일)와 COSMO-SkyMed(이탈리아)가 성공적으로 발사되어 우수한 성능을 보이고 있다. 국내에서도 최대 공간 해상도 약 1 m의 X-band SAR 위성인 KOMPSAT-5를 향후 발사할 예정이다. 또한 항공기를 이용한 고해상도 SAR 영상도 목적에 따라 다양하게 활용되고 있다. 이러

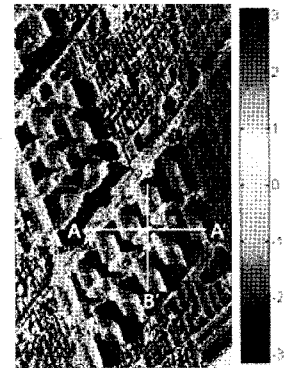
한 고해상도 SAR 영상 활용이 가능해짐에 따라 지금까지의 중·저해상도 영상에서는 관측할 수 없는 새로운 특징 및 현상이 나타나게 되었다. 참고문헌 [56]은 TerraSAR-X 영상이 촬영한 피라미드 전사면에서 보이는 이중 반사(double bounce)에 의한 밝게 나타나는 현상을 연구하였고, 참고문헌 [57]은 항공기 고해상도 SAR를 이용하여 건물의 layover 지역을 중심으로 반사 강도(intensity)와 위상 값을 연구하였다. 참고문헌 [58]은 TerraSAR-X 간섭 영상에서 에펠탑의 고도 추출과 변위 탐지 가능성을 제시하였다([그림 9]).

이와 같이 지금까지는 도심 지역을 대상으로 중·저해상도 영상의 반사 강도와 긴밀도(coherence) 정보를 이용한 넓은 지역의 변화 탐지 및 토지피복분류가 주로 수행되어 왔으나, 고해상도 영상을 이용하면 도심 지역의 건물, 다리 등과 같은 객체에 대한 연구가 가능하다^{[59]~[62]}. 또한 중·저해상도 영상에서는 급경사로 인한 layover 지역에 대해서 무작위한 신호를 수신받기 때문에 마스킹 처리를 하는 것이 일반적이었다. 하지만 고해상도 SAR 자료의 도심 지역에서는 많은 지역이 음영(shadow)이나 layover의 영향을 받지만, 이에 대한 분석을 수행하면 의미 있



[그림 9] TerraSAR-X SAR 영상에서 구조물에 의한 간섭 위상(1 fringe=321 m)^[58]

는 정보를 추출할 수 있다. 즉, 도심 지역 건물 주변의 반사 강도 영상에서는 corner reflection에 의한 다중 산란(multiple scattering) 영향으로 건물 하부에 밝은 선이 존재하며, 이를 이용하여 건물 높이 또는 footprint 추출에 적용할 수 있다. 또한, 고해상도 영상에서만 관찰 가능한 layover 지역의 간섭 위상을 이용하여 정밀한 건물 높이 추출 또는 미세 변위 탐지에 적용 가능하다. 이러한 분석을 수행하기 위해서는 고해상도 SAR 반사 강도와 InSAR 위상에 대한 효과적인 시뮬레이션이 필수적이다. 도심 지역 고해상도 SAR 반사 강도 영상의 시뮬레이션 연구 사례는 ray tracing이나 rasterization 방법 등으로 다양하게 진행이 되고 있으나^[63], InSAR 위상 시뮬레이션 연구 사례는 초기 연구 단계이다^{[64]~[66]}. 도심 지역 내 분포하는 빌딩 구조물에 의한 다중산란을 고려한 고해상도 간섭 위상을 모사하기 위해 Lidar DSM을 이용한 알고리즘이 개발되었다^[67]. [그림 10]은 대전 도심 지역의 DSM을 사용하여 간섭 위상을 모사한 것으로 주거단지 내 아파트 구조물에 의한 간섭 위상이 실제 TerraSAR-X SAR 간섭 영상과 매우 잘 일치한다. 이러한 고해상도 간섭 영상은 차분간섭도 생성에 이용되어 정밀 지표 변위 관측, 변형 탐지 등에 활용될

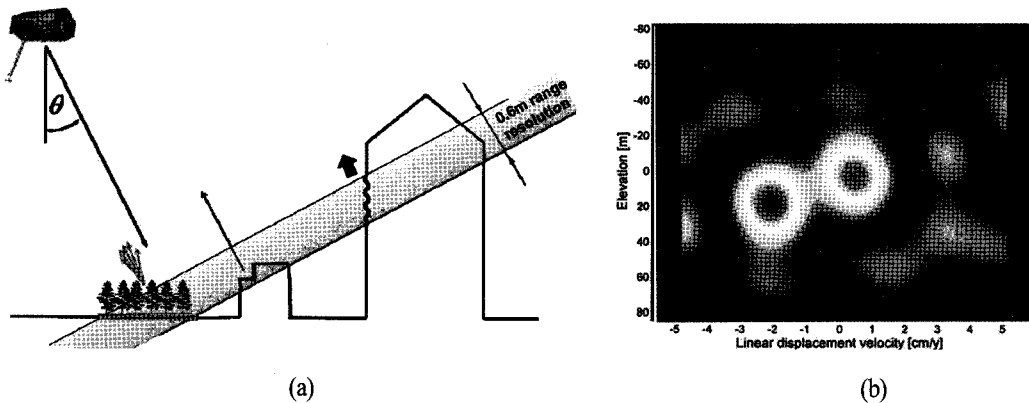


[그림 10] Lidar DSM을 이용한 간섭 위상 모사^[67]

수 있다. 다수의 다른 기선 거리로 획득된 고해상도 SAR 영상을 이용하여 단일 화소 내에 존재하는 다중 산란체의 의한 영향을 분해하여 각 산란체의 고도값 및 변위 성분을 추출하는 TomoSAR 연구가 최근 수행되었다^{[68],[69]} ([그림 11]).

VI. 결 론

SAR Interferometry 기술을 이용한 지형고도정보 추출 및 지표변위 관측에 관한 연구는 최근 다중 시기, 다중 관측각, 다중 기선거리 관측영상을 바탕으



[그림 11] (a) SAR 영상의 단일 화소 내에 존재하는 다중 산란체, (b) TomoSAR를 이용하여 분해된 다중 산란체의 고도 및 변위 속도^[74]

로 지구표면의 위치 정보와 관련하여 나타나는 다양한 현상을 높은 정밀도로 관측하기 위한 방향으로 급속하게 발전하고 있다. 특히 최근 TerraSAR-X, TanDEM-X, 그리고 4개의 동일한 위성시스템을 운영하는 COSMO-SkyMed와 같은 고해상도 X-band SAR 위성의 출현으로, 고해상도 전세계 DEM 구축, 도심지역에서 정밀 변환탐지, 고정밀 변위탐지, 고해상도 DSM 추출, 재해관측 분야 등에서 InSAR 기술의 활용성이 더욱 급증하고 있다. 이러한 InSAR 기술은 2012년 발사될 예정인 KOMPSAT-5의 활용성 증대에도 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] H. A. Zebker, M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations", *J. Geophys. Res.*, vol. 91, pp. 4993-4999, 1986.
- [2] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, "Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B", *Int. J. of Remote Sens.*, vol. 9, no. 5, pp. 857-872, 1988.
- [3] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping", *Radio Science*, vol. 23, no. 4, pp. 713-720, 1988.
- [4] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, "Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry", *J. Geophys. Res.*, vol. 94, pp. 9183-9191, 1989.
- [5] G. Rufino, A. Moccia, and S. Esposito, "DEM generation by means of ERS tandem data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 6, no. 6, pp. 1905-1912, 1998.
- [6] M. S. Seymour, "Refining low-quality digital elevation models using synthetic aperture radar interferometry", Doctoral thesis, the University of British Columbia, 1999.
- [7] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabaute, "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry", *Nature*, vol. 364, pp. 138-142, 1993.
- [8] H. A. Zebker, P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel and C. L. Werner, "On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The landers earthquake", *J. Geophys. Res.*, vol. 99, no. B10, pp. 19617-19634, 1994.
- [9] D. Massonnet, P. Briole and A. Arnaud, "Deflation of mount etna monitored by spaceborne radar interferometry", *Nature*, vol. 375, pp. 567-570, 1995.
- [10] J. Baek, S.-W. Kim, H. J. Park, H. S. Jung, K. D. Kim, and J. W. Kim, "Analysis of ground subsidence in coal mining area using SAR interferometry", *Geosciences Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 277-284, 2008.
- [11] P. Wright, R. Stow. "Detecting mining subsidence from space", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 6, pp. 1183-1188, 1999.
- [12] N. Gourmelen, S. W. Kim, A. Shepherd, J. W. Park, A. V. Sundal, H. Björnsson, and F. Pásson, "Ice velocity determined using conventional and multiple-aperture InSAR", *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 307, Issues 1-2, pp. 156-160, Jul. 2011.
- [13] S. Le Mouelic, D. Raucoules, C. Carnec, C. King, and F. Adragna "A ground uplift in the city of Paris (France) detected by satellite radar interferometry", *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 17, pp. 34-41, 2002.
- [14] J. W. Bell, F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi,

- and F. Novali, "Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge", *Water Resour. Res.*, vol. 44, no. 1-18, 2008.
- [15] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, pp. 2202-2211, 2000.
- [16] C. Colesanti, A. Fettetti, C. Prati, and F. Rocca, "Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique", *Engineering Geology*, vol. 68, pp. 3-14, 2003.
- [17] T. G. Farr, M. Kobrick, "Shuttle radar topography mission reduces a wealth of data", *Amer. Geophys. Union Eos*, vol. 81, pp. 583-585, 2000.
- [18] H. A. Zebker, S. N. Madsen, J. Martin, K. B. Wheeler, T. Miller, Y. Lou, G. Alberti, S. Vetrella, and A. Cucci, "The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 30, pp. 933-940, 1992.
- [19] D. C. Ghiglia, M. D. Pritt, *Two-Dimensional phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*, Wiley-Interscience, 1998.
- [20] H. Rarayre, D. Massonnet, "Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1 interferometry", *Geophysical Research Letters*, vol. 23, no. 9, pp. 989-992, May 1996.
- [21] R. Goldstein, "Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry", *Geophysical Research Letters* vol. 22, no. 18, pp. 2517-2520, 1995.
- [22] C. Delacourt, P. Briole, and J. Achache, "Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography", application to Etna. *Geophysical Research Letters*, vol. 25, no. 15, pp. 2849-2852, 1998.
- [23] F. Beauducel, P. Briole, and J.-L. Froger, "Volcano wide fringes in ERS SAR interferograms of Etna: deformation or tropospheric effect?", *J. Geophys. Res.*, vol. 105, pp. 391-402, 2000.
- [24] 김상완, "L-밴드 영상레이더 위상간섭기법을 이용한 백두산 및 부산지역의 지표면 변위관측", 연세대학교 박사학위논문, 2004.
- [25] H. A. Zebker, T. G. Farr, R. P. Salazar, and T. H. Dixon, "Mapping the world's topography using radar interferometry: The TOPSAR mission", *Proc. IEEE*, vol. 82, no. 12, pp. 1774-1786, 1994b.
- [26] D. Massonnet, K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface", *Review of Geophysics*, vol. 36, pp. 441-500. 1998.
- [27] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in sar interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
- [28] C. Colesanti, A. Fettetti, C. Prati, and F. Rocca, "Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique", *Engineering Geology*, vol. 68, pp. 3-14, 2003.
- [29] S. Usai, A new approach for long term monitoring of deformations by differential SAR interferometry, Ph.D. thesis, Delft Univ. Press, Delft, The Netherlands, 2001.
- [30] P. Berardino, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 2375-2383, 2002.
- [31] P. Berardino, F. Casu, "A quantitative analysis of the SBAS algorithm performance", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 5,

- pp. 3321-3324, 2004.
- [32] R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorquí, P. Berardino, and E. Sansosti, "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 1377-1386, 2004.
- [33] A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker, "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to volcano Alcedo, galapagos", *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763, 2007.
- [34] A. Pepe, E. Sansosti, P. Berardino, and R. Lanari, "On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique", *IEEE Geosci. and Remote Sensing Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 265-269, 2005.
- [35] 김상완, 다중시기 SAR 영상을 이용한 시계열 변위 관측기법 비교 분석", *대한원격탐사학회지*, 26(2), pp. 143-151, 2010.
- [36] A. Minchella, L. Veci, and M. Engdahl, "NEST: the ESA toolbox for scientific exploitation of SAR data", *Fringe 2009 Workshop*, Frascati, Italy, 2009.
- [37] P. Marinkovic, A. Minchella, M. Engdahl, and R. Hanssen, "NEST-DORIS, InSAR extension for NES", *Fringe 2009 Workshop*, Frascati, Italy, 2009.
- [38] S. Gernhardt, N. Adam, M. Eineder, and R. Bamler, "TerraSAR-X high resolution spotlight persistent scatterer interferometry", *Fringe 2009 Workshop*, Frascati, Italy.
- [39] R. Brcic, M. Eineder, and R. Bamler, "Absolute phase estimation from TerraSAR-X acquisitions using wideband interferometry", *CEOS SAR 2008*, 2008.
- [40] R. Bamler, M. Eineder, "The pyramids of Gizeh seen by TerraSAR-X-A prime example for unexpected scattering mechanism in SAR", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, vol. 5, no. 3, pp. 468-470, 2008.
- [41] M. Eineder, N. Adam, and N. Yague-Martinez, "First TerraSAR-X interferometry evaluation", *Fringe 2007 Workshop*, Frascati, Italy, 2007.
- [42] P. Berardino, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 2375-2383, 2002.
- [43] P. Berardino, F. Casu, "A quantitative analysis of the SBAS algorithm performance", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 5, pp. 3321-3324, 2004.
- [44] R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorquí, P. Berardino, and E. Sansosti, "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, pp. 1377-1386, 2004.
- [45] R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, and P. Lundgren, "Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep; a case study of the Hayward fault, California", *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, pp. 20-28, 2007.
- [46] F. Minati, A. Colombo, M. Costantini, A. Ferretti, M. C. Ciminelli, and S. Costabile, "Terrain movements determination on the whole Italian territory from ERS/Envisat data by persistent scatterer interferometry: The Pst-A/2 project", *Fringe 2009 Workshop*, Frascati, Italy, 2009.
- [47] M. Chini, M. Moro, M. Saroli, S. Stramondo, C.

- A. Brunori, and S. Salvi, "Deep-seated Gravitational Slope Deformation (DSGS) triggered by the 2009 LAquila earthquake detected by X-band DInSAR", *Fringe 2009 Workshop*, Frascaty, Italy, 2009.
- [48] R. Nutricato, F. Rana, O. D. Nitti, C. D'Aprile, F. Bovenga, L. Guerriero, G. Ober, and L. Candela, "MORFEO PROJECT: C- and X-band SAR Interferometric analysis over Alpine regions (ITALY)", *Fringe 2009 Workshop*, Frascaty, Italy, 2009.
- [49] J. Dehls., Y. Larsen., T. R. Lauknes, and C. Froese, "Assessment of residual coal mine subsidence and riverbank stability in an urban setting using X-band and C-band PSI", *Fringe 2009 Workshop*, Frascaty, Italy, 2009.
- [50] J. J. Mallorqui, D. Monells, G. Centolanza, S. Duque, P. L. Dekker, R. Tomas, J. M. Lopez-Sanchez, J. Delgado, F. Vicente, G. Herrera, and J. Mulas, "Performance comparison of ERS/ENVISAT versus TERRASAR-X for urban subsidence monitoring: MURCIA case study", *Fringe 2009 Workshop*, Frascaty, Italy, 2009.
- [51] M. Crosetto, O. Monserrat, R. Iglesias, et al., "Persistent scatterer interferometry: potential, limits and initial C-and X-band comparison", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 76, no. 9, pp. 1061-1069, 2010.
- [52] F. Novali, A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Rocca, C. Prati, and A. Rucci, "The second generation PS InSAR approach: SqueeSAR", *Fringe 2009 Workshop*, Frascaty, Italy, 2009.
- [53] A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR", *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 49, no. 9, pp. 3460-3470, Sep. 2011 doi: 10.1109/TGRS.2011.2124465
- [54] D. Perissin, F. Rocca, "High-accuracy urban DEM using permanent scatterers," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 44, no. 11, pp. 3338-3347, Nov. 2006. doi: 10.1109/TGRS.2006.877754
- [55] M. Crosetto, O. Monserrat, R. Iglesias, et al., "Persistent scatterer interferometry: potential, limits and initial C-and X-band comparison", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 76, no. 9, pp. 1061-1069, 2010.
- [56] R. Bamler, M. Eineder, "The pyramids of Gizeh seen by TerraSAR-X - A prime example for unexpected scattering mechanism in SAR", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, vol. 5, no. 3, pp. 468-470, 2008.
- [57] A. Brenner, L. Roessing, "Radar imaging of urban areas by means of very high-resolution SAR and Interferometric SAR", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 2971-2982, 2008.
- [58] M. Eineder, N. Adam, R. Bamler, N. Yague-Martinez, and H. Breit, "Spaceborne spotlight SAR interferometry with TerraSAR-X", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, pp. 1524-1535, 2009.
- [59] S. Auer, S. Hinz, and R. Bamler, "Ray-tracing simulation techniques for understanding high-resolution SAR images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 3, pp. 1445-1456, 2010.
- [60] A. Thiele, E. Cadario, K. Schulz, U. Thoennessen, and U. Soergel, "Building recognition from multi-aspect high-resolution InSAR data in urban areas", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*

- ing, vol. 45, no. 11, pp. 3583-3593, 2007a.
- [61] R. Guida, A. Iodice, D. Riccio, and U. Stilla, "Model-based interpretation of high-resolution SAR images of buildings", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 1, no. 2, pp. 107-119, 2008.
- [62] J. D. Wegner, S. Auer, A. Thiele, and U. Soergel, "Analysis of urban areas combining high-resolution optical and SAR imagery", *29th EARSeL Symposium, Chania, Greece*, Jun. 15-18, 2009. CD.
- [63] U. Soergel, *Radar Remote Sensing of Urban Areas*, Springer, Hannover, Germany, 2010.
- [64] A. Thiele, E. Cadario, K. Schulz, U. Thoennessen, and U. Soergel, "InSAR phase profiles at building locations", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 3/W49A, pp. 203-208, 2007b.
- [65] A. Thiele, E. Cadario, K. Schulz, U. Thoennessen, and U. Soergel, "Building recognition from InSAR data by detail analysis of phase profiles", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, no. B3A, pp. 191-196, 2008.
- [66] A. Thiele, E. Cadario, K. Schulz, and U. Soergel, "Analysis of gable-roofed building signature in multi-aspect InSAR data," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 7, no. 1, pp. 83-87, Jan. 2010. doi: 10.1109/LGRS.2009.2023476
- [67] 윤근원, 김상완, 이용웅, 이동천, 원중선, "도심 지역 DSM을 이용한 고해상도 InSAR 위상 시뮬레이션", *대한원격탐사학회지*, 27(2), pp. 181-190, 2011.
- [68] Xiao Xiang Zhu, R. Bamler, "Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 48, no. 12, pp. 4296-4308, Dec. 2010.
- [69] Xiao Xiang Zhu, R. Bamler, "Tomographic SAR inversion by L1-Norm regularization-the compressive sensing approach", *IEEE TGRS*, vol. 48, no. 10, pp. 3839-3846, 2010.

≡ 필자소개 ≡

김 상 완



1992년 2월: 연세대학교 지질학과 (이학사)

1998년 2월: 연세대학교 지구시스템과 학과 (이학석사)

2004년 6월: 연세대학교 지구시스템과 학과 (이학박사)

2007년 3월~현재: 세종대학교 지구정

보공학과 조교수

[주 관심분야] SAR Interferometry