

# SAR 영상의 활용

이 훈 열

강원대학교 지구물리학과

## Abstract

이 논문에서는 Asia-Pacific International Conference on Synthetic Aperture Radar(AP SAR) 2011의 성공적인 한국 개최를 기념하여 SAR의 다채로운 활용 분야에 대한 동향을 간략하게 소개하고자 한다. SAR의 활용 분야에 따라 육상, 해양, 극지, 대기 분야로 나누었고, 각 분야별로 활용 기술과 주요 쟁점에 대하여 세분하여 개략적인 설명을 덧붙였다. SAR는 향후 새로운 기술과 시스템의 출현으로 그 활용 분야를 지속적으로 넓혀갈 것으로 예상된다. 이 논문을 통해 SAR의 다양한 활용 분야에 대한 이해를 돕고, 향후 국내 SAR 기술개발 및 활용에 있어서 도움이 되었으면 한다.

Keyword: SAR, 활용, 육상, 해양, 극지, 대기

## I. 서 론

영상 레이더(imaging radar)는 구름을 투과하는 마이크로파를 이용하는 능동형 이미징 센서로서 날씨와 태양고도에 상관없이 지상의 영상을 얻을 수 있다는 장점으로 인하여 20세기 중반부터 주로 군사적인 활용이 많이 있어 왔다<sup>[1]</sup>. 그러나 영상 레이더는 탑재체에 실을 수 있는 안테나 크기의 제약에 따른 낮은 해상도로 인하여 주로 항공기에 탑재하여 지상에서 비교적 근거리의 영상을 얻어왔다<sup>[2]</sup>. 이에 반하여 Synthetic Aperture Radar(SAR)는 탑재체의 움직임으로 얻어지는 안테나 위치의 연속적 변화를 이용하여 각 안테나의 위치에서 얻어진 자료들을 조합하여 고해상도의 영상을 합성하는 방식으로서, 공간 해상

도가 안테나와 지상간의 거리나 파장에 관계없이 고 해상도를 얻을 수 있는 기술이다<sup>[3]</sup>. 이로서 1978년 미국의 Seasat-A부터 SAR는 인공위성에 탑재되기 시작하여 유럽의 ERS-1, 2, Envisat, 일본의 JERS-1, ALOS PALSAR, 캐나다의 Radarsat-1, 2, 독일의 Terra SAR-X, TanDEM-X, 이탈리아의 COSMO-SkyMED 등 현재까지 수많은 인공위성 탑재 SAR 시스템이 운용되어 왔으며 군사적, 과학적으로 다양한 관련 기술과 응용 분야를 형성하고 있다<sup>[4],[5]</sup>.

SAR의 기술은 영상화 기법 및 단순 해석 기법 이외에도 스테레오 기법(radargrammetry)<sup>[6]</sup>, 간섭 기법(interferometry) 및 차분 간섭 기법(differential interferometry)<sup>[7],[8]</sup>, 고정 산란체 기법(permanent scatterer interferometry)<sup>[9]</sup>, 다편파 분석법(polarimetry)<sup>[10]</sup>, 토모그래피(tomography)<sup>[11]</sup>, Along-Track Interferometry(ATI)<sup>[12]</sup> 등 매우 다양하며, 이러한 기술적인 진보가 새로운 인공위성 SAR 시스템의 등장을 촉진시키고, 또한 다양한 활용 분야를 만들어내고 있다.

이 논문에서는 SAR의 다채로운 활용 분야에 대한 포괄적인 동향을 소개하고자 한다. 먼저 SAR의 활용 분야를 대상체에 따라 육상, 해양, 극지, 대기로 나누었고<sup>[13],[14]</sup>, 각 분야별로 활용 기술과 주요 쟁점에 대하여 개략적인 설명을 덧붙였다.

## II. 육상 활용 분야

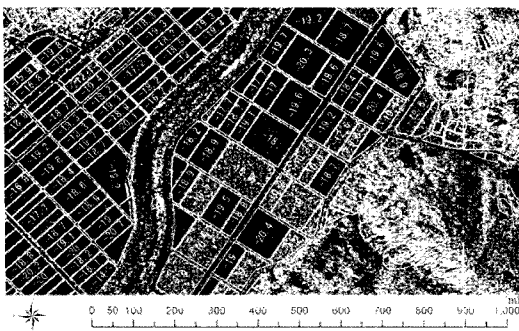
육상 활용 분야는 학문 분야별로 농업, 고고학, 지형고도, 산림, 지질, 지구조, 수문, 지진, 토양, 화산, 도시 및 인공구조, 주제도 등의 분야로 세분될 수 있다.

### 2-1 농업

농업 분야에서는 작물의 종류와 성장에 따른 SAR 영상의 후방 산란 특성 및 변화를 살펴보고, 이를 경작지 면적을 추출하거나 작황을 예측에 활용하는 기술이 연구되고 있다. 후방 산란은 작물의 종류, 생체량, 엽면적 지수, 수분 함량, 배열과 분포에 따라 달라진다. 특히 다편파 영상을 이용하면 표면 반사, 이중반사 및 체적 반사의 정도를 구분하여 작물의 특성을 구별하는데 용이하다. 우리나라에서 많이 재배하는 벼의 경우, 모내기를 전후한 관개 시 물에서 전반사를 일으켜 매우 약한 후방 산란을 보인다. 따라서 관개 전 후의 영상을 비교함으로써 벼의 경작지 면적을 추출하는데 매우 효율적이다([그림 1]). 벼의 성장과 함께 점차 후방 산란이 증가하는데, 벼의 줄기와 잎에서 이중 반사 및 체적 반사 성분도 함께 증가한다. L-밴드와 같이 긴 파장의 마이크로파는 벼의 수관으로의 투과성이 커서 체적 산란을 주로 일으키는데, 이를 통해 생체량이나 엽면적 지수의 변화를 자세히 관찰할 수 있다. X-밴드와 같은 짧은 파장의 경우 주로 벼 수관 상층부나 알곡의 출현에 민감하게 반응하여 작황 예측에 유리하다.

### 2-2 고고학/지하구조

지하 구조를 밝히기 위해 널리 사용되는 지하 투

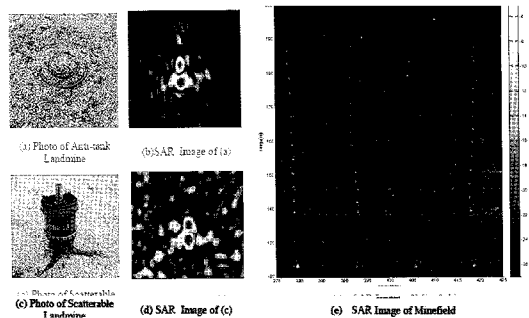


[그림 1] Difference of filled water fields and non-filled water fields<sup>[15]</sup>

과 레이더(GPR)의 경우 수십 MHz에서 수 백 MHz 정도의 주파수를 이용하기 때문에 지하 투과가 비교적 원활하다. 그러나 SAR에 사용되는 GHz 단위의 주파수를 가지는 마이크로파는 지하 투과가 제한적이다. 따라서 우리나라와 같이 토양 수분이 많은 나라에서의 마이크로파 투과 깊이는 수 밀리미터에서 수 센티미터에 불과하기 때문에 사용이 제한적이다. 그러나 매우 건조한 모래나 토양일 경우 그 투과 깊이가 수 미터에서 십 여 미터에 이르기도 한다. 따라서 모래로 덮인 건조한 사막의 경우 지하에 묻혀 있는 유적지의 구조물이나 지하수 및 고하천이 영상화되기도 한다([그림 2]).

### 2-3 지형 측량

SAR 영상을 이용하여 지형 기록을 알아내는 방법으로는, 스테레오 기법을 이용한 *radargrammetry*, 지형 기록에 따른 반사 강도를 역산하는 *radarclinometry* 등이 있고, 최근에는 SAR 간섭 기법을 이용한 정밀 DEM을 얻을 수 있다. *Radargrammetry*는 입사각의 차이가 큰 두 영상을 이용하여 스테레오 영상처리를 통해 지형 고도를 알아내는 방법으로서, 궤도 운용 및 궤도 정보가 비교적 정확하지 않고 위상 긴밀도(*coherence*)가 높지 않은 지표면에서도 지형 고도를 추출할 수 있어 매우 유용하게 사용되어 왔다. 그러나 두



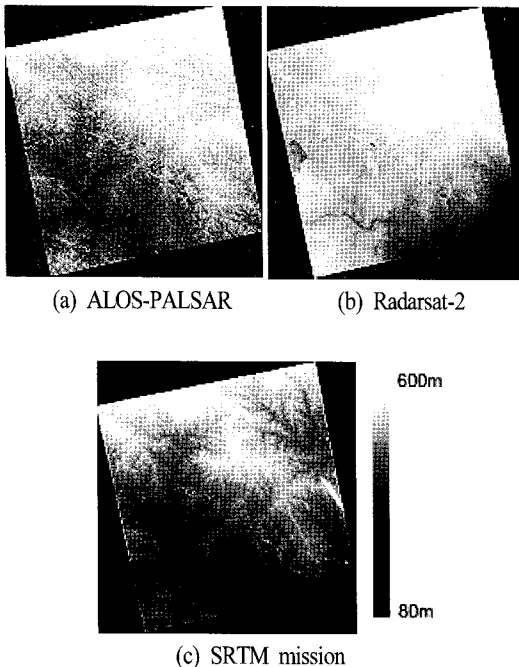
[그림 2] Experimental results of land mine detection from AMUSAR<sup>[16]</sup>

스테레오 영상간 매칭 과정에서 최소한 여러 픽셀이 필요하기 때문에 수평 해상도가 SAR 영상의 수 배 내지는 수 십 배로 커지는 단점이 있다. 두 영상간 입사각의 차이가 클수록 고도 정확도가 높아지지만, 지형에 대한 기하 왜곡이 심해져 영상 정합에 어려워진다. Radarclinometry는 단일 레이더 영상을 이용하여 영상의 밝기가 지형 경사에 따른 함수임을 사용하여 지형을 복원하는 기술이다. 그러나 SAR 영상의 밝기는 지형 경사 뿐만이 아니라 토지 피복, 수분 함량 등 여러 변수가 작용하기 때문에, 그 사용이 매우 제한적이다. 지표 피복이 균일하고 토지 피복이 매우 단순한 사막, 열대우림, 금성과 같은 행성 지형을 복원하는데 다른 방법이 없을 경우에 한하여 매우 제한적으로 사용되고 있다. 한편, 최근에 각광받고 있는 SAR 간섭 기법은 서로 다른 위치에서 얻은 두 개의 SAR 영상의 위상차를 이용하여 정밀 DEM을 얻는 기법이다(그림 3). 이 때 두 궤도간의 거리

차를 기선이라 하며, 기선의 지형 고도 방향으로의 거리를 수직 기선이라 부른다. 이 수직 기선은 고도 정밀도에 비례하기 때문에 충분히 큰 수직 기선이 확보될 필요가 있지만, 그럴 경우 위상의 간섭도 (coherence)가 떨어지기 때문에, X-band나 C-band에서는 대략 수 백미터 내외, L-band에서는 1~2 km 이내의 수직기선 거리가 DEM 생성에 적절하다. 기존에는 하나의 인공위성 SAR의 반복 주기를 이용하여 두 영상을 얻었으나, 이 경우 시간에 따른 위상의 간섭도 저하 문제가 발생하여 실험적으로만 사용되었다. 요즘에는 SRTM이나 TanDEM-X와 같이 동시에 두 안테나를 사용하여 자료를 얻어 매우 질 좋은 DEM을 얻기도 한다. 지난 2000년 미국의 SRTM은 우주왕복선에 실려 발사되어 11일 동안 전세계 북위 60도에서 남위 60도 사이의 지형고도를 수평거리 30미터마다 얻은 바 있으며, 현재 운용이 시작된 독일의 Terra SAR-X와 TanDEM-X 두 위성에 의한 DEM 획득으로는 수평거리 1 m의 자료가 전 세계적으로 얻어질 계획이다. SAR 간섭 기법을 이용한 DEM 제작은 실질적으로 기존의 사진 측량학이나 LIDAR에 의한 방법보다 매우 효율적이고 빠른 시간에 정밀한 DEM을 제작할 수 있어서 점차 실용화 되고 있다.

#### 2.4 산림학

산림의 분포, 나무의 높이 및 생체량을 계산하는데 있어서 SAR polarimetry 및 tomography 기술이 활발히 연구되고 있다. 사용하는 마이크로파의 밴드에 따라서 수관으로의 투과 성능이 다르다. 파장이 비교적 짧은 X-band는 주로 나무의 상층부에서의 표면 반사 성분이 강한 반면에, 파장이 긴 L-band는 수관을 뚫고 지표와 나무 줄기에서의 이중 산란 및 체적 산란이 강하게 나온다. 이러한 표면 반사, 이중 반사, 및 체적 산란은 SAR polarimetry에서 매우 특징적으로 관찰되어 많은 연구가 진행 중에 있다. 산불 지역이나 벌채가 이루어진 곳에서는 특히 파장이 큰 L-

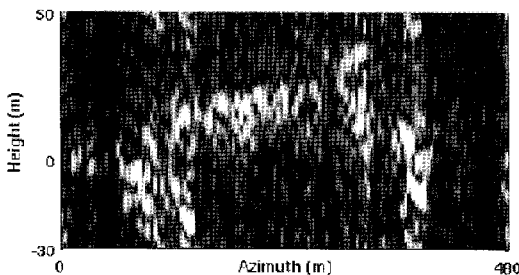


[그림 3] Digital elevation models from in SAR<sup>[17]</sup>

밴드의 전후 영상에서 매우 확연한 변화가 일어나기 때문에 매핑이 가능하다. 인공위성 SAR를 이용한 생체량 및 나무 높이 추정은 SAR 영상만으로는 매우 어려워 나무의 종류와 분포가 균질한 곳에서만 매우 제한적으로 추정이 가능하다. 그러나 최근 연구되고 있는 SAR Tomography를 이용하면 향후 이의 정량적 계측이 가능해질 것으로 보인다. 인공위성을 이용한 SAR Tomography는 서로 근접한 위치에 있는 여러 궤도에서 얻어진 SAR 영상을 이용하여 range, azimuth 이외에 높이 방향으로의 영상을 합성해 내는 기술이다. 이로서 나무의 높이 방향으로의 분해능을 발전시켜 나무의 밑둥, 줄기, 잎사귀 부분의 영상을 각각 획득하여 생체량, 나무 높이, 수관 분포 등을 알아내는 비교적 최근에 개발된 기술이다([그림 4]).

### 2-5 지질학

SAR 영상은 비행체의 옆면을 투시하고 거리를 측정하는 레이더의 성질을 지니고 있어 단일 영상에서도 마치 음영기복도를 보는 것처럼 지형고도가 강조되어 나타나기 때문에 지형 및 지질학적인 해석이 용이하다. 또한 긴 파장의 SAR 영상에서는 숲과 같은 토지피복을 투과하여 지형의 기복을 보여주는 성질이 있어서 지질학 및 구조지질학적 매핑, 선구조 추출 등의 분야에서 활용되어왔다. 또한 용암이나 화산암의 경우 암석의 기원과 조성에 의한 표면 거칠기가 SAR 영상에 매우 특징적으로 나타나기도 한다. 또한



[그림 4] Single-look tomogram of forest<sup>[18]</sup>

퇴적물의 조성, 입도, 수분 함량에 따라 SAR 영상의 밝기가 매우 크게 변화하는 조건대 퇴적 환경의 연구에 있어서도 SAR 영상의 활용이 활발한 추세이다.

### 2-6 지구조/지반 변위

시차를 두고 얻어진 두 SAR 영상의 위상 차이로 만들어지는 간섭도(interferogram)를 분석하면 두 시기에 발생한 지형의 변화의 레이더 방향 성분을 수 센티미터 오차로 알 수 있다. 간섭도에는 지구타원체, 지형 고도, 지형 변화, 대기 변화 및 전기적 잡음과 같은 신호가 혼재되어 있는데, 정확한 궤도와 지형 고도 정보가 주어지면 지구타원체 및 지형고도에 의한 간섭도를 없앨 수 있으며, 이러한 기술을 차분 위상 기법(differential interferometry)이라 한다. 여기서 대기 변화에 의한 신호를 구분해 낼 수 있다면 이를 이용하여 지구조적 변화를 추출해 낼 수 있는데, SAR 시스템의 위상 측정 오차는 보통 수 밀리미터 이하이지만 다양한 오차의 혼재 및 보정 오차로 인하여 지반 변위 측정의 정확도는 보통 수 센티미터 정도로 알려져 있다. 차분 위상 기법은 화산 마그마의 이동에 따른 지반의 침하 및 융기, 지진을 전후로 한 지표면의 변위 매핑, 지하 수위 변동에 따른 지반 침하 및 빙하와 빙봉의 흐름 추출 등에 활발하게 이용되고 있다.

이러한 DInSAR 기법은 지표 변위 중에서 레이더 방향의 성분만이 검출되는데, 극궤도 위성의 특징상 인공위성의 상승(ascending) 및 하강(descending) 궤도를 이용하여 동서 및 상하 변위를 알아내고, 저해상도의 영상 매칭 방법을 통해 남북방향을 알아내어 3차원적인 변위벡터를 추출하는 방법이 연구되어오고 있다. 위성의 궤도면과 적도면이 이루는 각을 inclination이라고 하는데, 대부분의 극궤도 위성은 양극을 지나는 90~100 도 사이의 값을 가지고 있기 때문에 남북 방향 변위의 정밀도가 다소 떨어진다. 향후 다양한 inclination을 가지는 궤도에서 인공위성 SAR

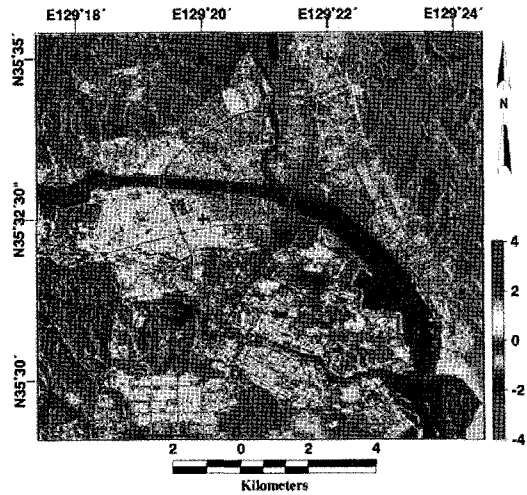
영상이 얻어진다면, 남북 방향의 변위 정밀도를 향상시키는데 매우 유용할 것이다.

차분 위상 기법에서 흔히 나타나는 대기 변화에 의한 오차는 전리층의 변화와 대류층의 변화를 들 수 있다. 전리층의 변화는 주로 GPS 상시 관측을 통하여 자세히 연구되고 있고, 공간적인 변화가 크지 않으며, 또한 최근에는 SAR 영상의 포커싱 자료처리 과정에서 이를 추출하여 보정하는 알고리즘이 개발되어 크게 문제가 되지 않는다. 하지만 대류층의 변화는 지형 및 대기 상태에 따라 매우 복잡한 양상을 띠고, 십여 %의 대기 중 수분 변화만으로도  $2\pi$  이상의 위상차가 발생하기 때문에 이를 보정하기가 쉽지 않다. 최근 MODIS와 같은 광학 영상에서 얻어지는 대기중 수분 함량 지수를 이용하여 SAR의 위상 지연을 보정하는 연구가 활발히 이루어지고 있지만, 이 또한 구름이 많은 경우에는 보정이 힘들고 지형 고도에 따른 왜곡 등이 잔재해 있기 때문에 향후 활발한 연구의 대상이다.

최근에는 매우 오랜 기간 얻어진 수십장의 시계열적 SAR 영상을 이용하여 궤도 오차, 지형 고도 오차, 대기 오차 및 전기적 오차 등을 통계적으로 분석해 내어 장기간에 걸친 지반의 변위를 측정하는 PSInSAR (Permanent Scatterer InSAR) 및 SBAS(Small Baseline Subset)와 같은 방법이 개발되어 있다([그림 5]). 그러나 이러한 방법들도 각 오차들이 일반적으로 정의되는 시공간적 특징에서 벗어나는 경우 통계적 오류를 발생시킬 확률이 있기 때문에 제한적일 수 있어 적용에 주의를 요한다.

### 2-7 호소학 및 수문학

강이나 호수는 바람이 없는 경우 입사된 마이크로파가 매우 강한 전반사를 일으켜 후방 산란이 거의 없는 관계로 SAR 영상에서 매우 어둡게 나타나, 주변과 매우 강한 대비를 나타낸다. 이로서 강이나 호수면의 면적을 추출하는데 매우 효과적이며, 이를 이용하



[그림 5] LOS mean velocity map generated from PSIn SAR<sup>[19]</sup>

면 면적 변화를 통한 수위 변화 및 홍수로 인한 범람원의 추출에 널리 이용되고 있다. 지표나 호수가 눈과 얼음으로 덮여있는 경우에도 눈의 깊이 및 수분함량에 따라 후방 산란이 매우 민감하게 변화하기 때문에 눈의 SWE(snow water equivalent)와 같은 물성을 추출하는 데도 이용되고 있다.

### 2-8 지진학

지진에 의한 지표변위는 지진 전(pre-seismic), 지진 중(co-seismic) 및 지진 후(post-seismic) 변형으로 크게 나뉘어진다. DInSAR로 인한 대규모 지진중의 변화는 그 신호가 매우 커서 지진 모델과 함께 지진의 원인이 되는 단층 운동의 기원 및 기작을 밝히는데 큰 기여를 하고 있다([그림 6]). 대형 지진이 발생한 이후에도 미약하나마 여진으로 인한 지진 후 변화가 관측되어 지진으로 인한 지구구조의 반발 및 복원 기작을 밝히는 연구가 활발하다. 또한 주목할 만한 것은 지진 전 변형을 감지할 수 있다면 현재까지 불가능하다고 여겨지는 지진의 예보가 가능할 수도 있는 매우 중요한 근거를 제시할 수 있다. 하지만 지진 전

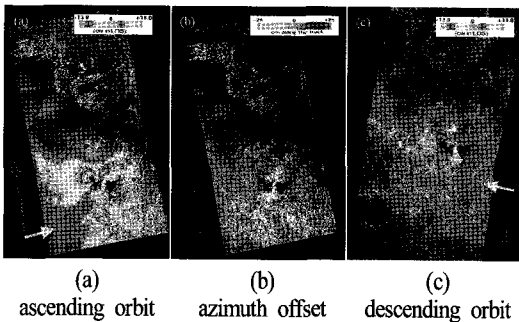
및 지진 후 변위에 의한 위상 신호는 매우 미약하여 대기오차를 줄이는 연구가 선행되어야 하며, 이에 대한 연구가 매우 활발히 진행 중이다.

### 2-9 토양학

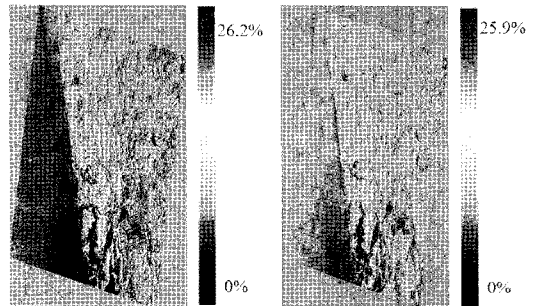
토양 수분 함량은 농업뿐만이 아니라 지구의 증발산량 및 물수지를 계산하는데 있어서 매우 중요한 인자가 된다. 마이크로파는 토양의 수분 함량에 따른 전기적 성질과 표면 거칠기에 매우 민감하게 반응한다. 따라서 SAR 영상을 통하여 토양의 수분을 추출하려는 노력이 매우 오랫동안 있어 왔다. 특히 L-밴드와 같은 긴 파장을 가진 마이크로파가 토양 수분에 특히 민감한 것으로 알려져 왔다. 그리고 토양에 식생과 같은 피복이 있는 경우에도 역산을 통해 토양 수분을 추출하려는 노력이 계속되고 있다([그림 7]).

### 2-10 화산학

지표로 분출되는 화산암은 마그마의 조성과 분출 형태에 따라 거칠기가 결정되며, 이에 따라 SAR 영상에서 밝기가 달라 효율적인 매핑이 가능하다. 최근 DInSAR를 통하여 마그마의 상승/하강 또는 이동에 따른 지형 변화를 감지하고 화산의 폭발 징후를 감지하는 등, 화산학에 있어서 SAR의 역할이 매우 증대되고 있다.



[그림 6] Co-seismic interferograms for the SE Iran earthquake (Mw6.3, December 20, 2010) from ALOS-PALSAR<sup>[20]</sup>



(a) HH/VV July 3 2005 (b) HH/HV August 7, 2005  
[그림 7] Soil moisture maps of Mumbai test site<sup>[21]</sup>

### 2-11 도시학

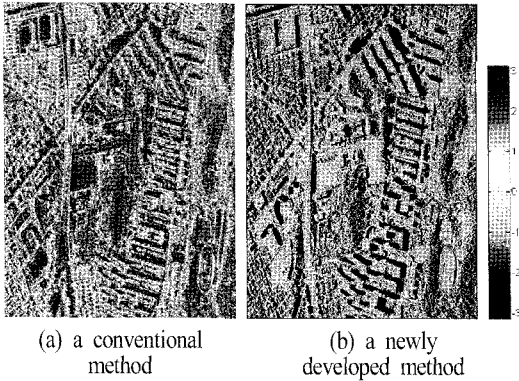
도심지의 수직적인 건축물은 이중 산란을 통하여 매우 강한 후방 산란을 일으켜 SAR 영상에서 매우 밝게 나타난다. 따라서 도심지의 건축물, 도로, 다리, 전력선과 같은 인공 구조물을 지도화하거나 군사적으로 엄폐된 목표물을 찾아내는데 SAR의 역할이 증대되고 있다. 최근에는 1미터급 고해상도 SAR 영상의 발달로 건물의 높이를 InSAR DEM 기법을 통해 알아내거나 매립지에서 건축물의 지반 침하 양상을 규명하고, 또한 도심지 지하 시설에 따르는 지반 유동을 밝히는데도 효율적으로 사용되고 있다([그림 8]).

### 2-12 주제도

주제도 작성에 있어서 SAR는 지표 물체의 구조적, 전기적 특성에 따라서 광학 영상과는 다른 새로운 기반을 제공한다. 또한 단순한 밝기 영상뿐만이 아니라 다편파/다시기 영상을 이용한 복잡한 산란 특성 및 변화, 그리고 간섭 기법에서 사용되는 긴밀도(coherence map)를 통한 지표 피복의 구조적 특성을 알아내는 등 피복 분류에 있어서도 매우 유용하게 사용되고 있다([그림 9]).

## Ⅲ. 해양 활용 분야

지표면의 70% 이상을 차지하는 해양의 모니터링

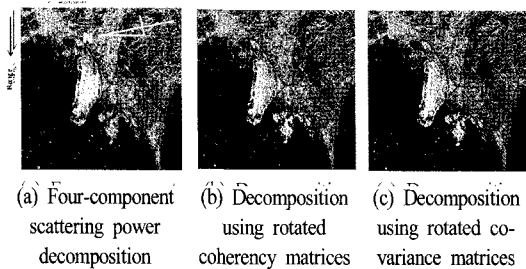


[그림 8] Differential interferograms of urban area<sup>[22]</sup>

을 위하여 SAR의 해양 활용 분야는 매우 다양하다. 연구의 대상에 따라 해풍(wind), 표면파(surface wave), 내부파(internal wave), 해류(current), 해저 지형(bathymetry), 유류/생물막(oil spill/biological film), 선박 탐지, 조간대/연안 분야로 세분될 수 있다.

### 3-1 해풍

SAR 영상은 해수면의 거칠기에 따라서 밝기가 변화하는데, 이용하여 해풍의 풍속과 풍향을 계산하는 연구가 매우 활발하다. 바다 표면에서 표면장력파(capillary wave) 혹은 중력파(gravity wave)에 의한 산란 모델을 통해 SAR 영상의 밝기를 풍속으로 역산하며, 현재 다양한 마이크로파 파장과 편파에 대한 산란 모델이 존재한다. 한편, 미국의 NSCAT, QuikSCAT,



[그림 9] ALOS-PALSAR decomposition of Tokyo Bay, Japan<sup>[23]</sup>

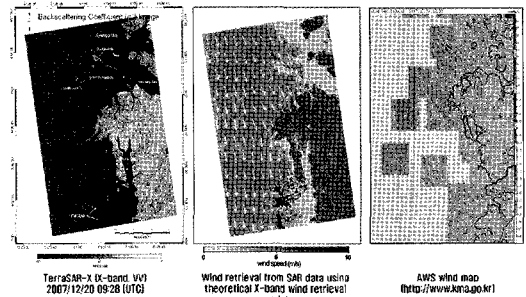
ADEOSII와 같은 인공위성 산란계(scatterometer)를 이용하여 풍속과 풍향을 추출해 왔으나, 그 해상도가 수십 km에 달하기 때문에 고해상도인 SAR를 이용한 해풍 연구가 활발히 진행 중에 있다. SAR를 이용한 풍향의 결정은 바람에 의한 물결의 방향(wind streak)이 확실할 경우 영상에서 추출할 수 있지만, 그렇지 못할 경우 기상 정보나 산란계 자료와 같은 외부 정보가 필요하다([그림 10]).

### 3-2 파랑

해수면에서의 파랑은 바람의 크기와 방향 및 지속 시간, 해저 지형, 해류 및 조류에 따라 성질이 달라진다. SAR 영상에서 선형적인 파랑 정보를 추출하기 위해 주로 푸리에 변환을 거쳐 파랑의 주요 스펙트럼을 추출하고, 이를 통해 파랑의 파장과 진행 방향을 알아낸다([그림 11]). 이 때 파랑의 진행 방향은 180도의 모호성을 지니게 되는데, 이는 SAR 영상화 과정에서 azimuth 스펙트럼 성분을 분할하여 두 개의 영상을 만든 후, 이의 상관성을 보는 inter-look cross-spectra 방법을 사용하면 방향을 결정할 수 있다.

### 3-3 내부파

해양의 SAR 영상에서 간혹 파장이 수 백미터에서 수 킬로미터의 장파가 관찰되는 데, 이는 밀도가 비슷한 두 해수가 만나서 층을 이루는 경계부에서 에너지

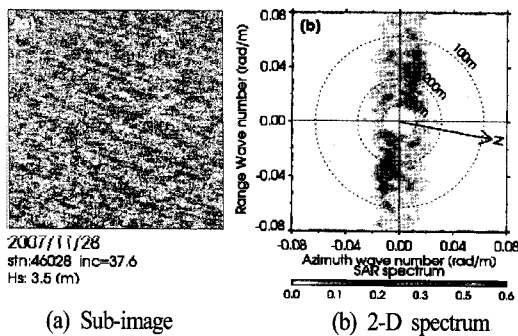


[그림 10] Wind field estimated from TerraSAR-X<sup>[24]</sup>

가 가해졌을 때 발생하는 내부파의 표현이다. 내부파는 해수면 아래 깊은 곳에서 발생하지만, 이로 인해 해수 표면에서 수렴대 및 발산대가 형성되고, 수렴부에서는 부유 물질이 응집되거나 및 해수 표면의 거칠기가 높아져 밝게 표현되고, 발산대에서는 상대적으로 어둡게 나타나는 것으로 알려져 있다. 내부파의 연구는 해류, 해저 지형 및 수온 약층과 같은 해수 온도의 수직 분포 양상과도 관련되어 있으며, 과학적으로나 군사적으로 매우 중요한 연구로 자리잡고 있다.

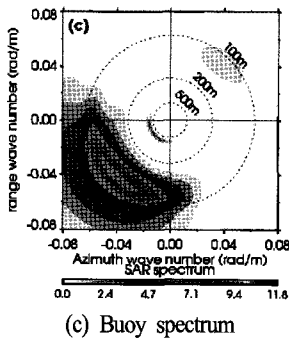
### 3-4 해류

SAR 영상의 도플러를 분석하면 레이더 방향으로의 순간 해류 속도를 구할 수 있다. 또한 비행기의 진행 방향으로 나란한 두 개의 안테나를 장착하여 유속을 관측하는 Along-Track Interferometry(ATI) 기술이 있으며, TerraSAR-X나 Radarsat-2와 같이 비교적 최근에



(a) Sub-image

(b) 2-D spectrum



(c) Buoy spectrum

[그림 11] Wave extraction from PALSAR<sup>[25]</sup>

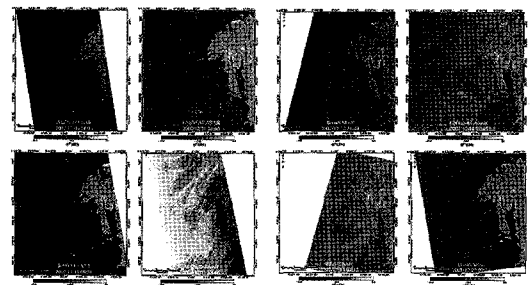
발사된 인공위성 SAR에서는 안테나를 두 개로 분할하여 ATI 기술을 시험하는 단계로 발전하고 있다.

### 3-5 해저 지형

SAR에서 사용되는 마이크로파는 해수 표면을 거의 투과하지 못한다. 그러나 해류나 조류가 해저 지형과 작용하여 해양 표면에 거칠기를 변화시켜 SAR 영상에는 해저 지형과 매우 유사한 패턴이 나타난다. 이를 통하여 해저 지형에 대한 정보를 추출하고, 해수의 유동 특성을 알아낼 수 있다. 특히 조류가 우세한 한반도 서해안의 경우 정류 상태일 때보다는 조류 속도가 강할 때 해저 지형이 두드러지게 나타난다.

### 3-6 유류/생물막

해양 표면이 선박 및 정유 시설에서 흘러나오는 기름으로 오염되거나 대규모의 생물막이 형성되면 표면장력이 변하여 바람에 의한 표면 장력과 생성이 억제된다. 이로 인하여 유류나 생물막이 출현하면 SAR 영상이 주변보다 어둡게 나타나 두드러지게 된다([그림 12]). 그러나 해풍이 매우 잠잠하여 SAR 영상에서 대부분의 바다 표면이 어둡게 보이거나, 섬이나 육지 지형에 의해 바람이 차단되어 해수면이 어둡게 보이는 경우에는 유류/생물막으로 오인될 가능성이 항상 존재한다. 따라서 주변 지형이나 정황을 잘 파



[그림 12] SAR images captured Hebei Spirit oil spill on the west coast of the Korean peninsula in December 2007<sup>[24]</sup>



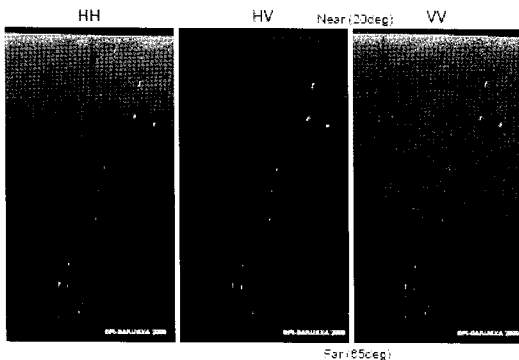
악하고, 시계열적 자료를 이용하여 유류/생물막의 확산 및 변화 패턴을 주시할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 대부분의 해양 기름 유출 사고는 기상 악화시 발생할 가능성이 크기 때문에 광학위성에 비하여 전천후 영상이 얻어지는 SAR의 효용성이 매우 높다고 할 수 있다.

### 3-7 선박 탐지

배는 바다와의 이중 산란이나 배 자체의 구조에 따라 매우 강한 산란을 일으켜 해양 SAR 영상에서 매우 밝게 나타난다. 이러한 다편파 산란 특성과 고해상도 영상의 분석을 통해 배의 종류를 구분하기도 한다(그림 14). 항해 중인 배의 경우 SAR 영상에서 강한반류(ship wake)를 남기며, 이를 통해 항적을 유추할 수 있다. 또한 배의 레이더 방향으로의 속도가 크면 도플러 효과에 의해 azimuth 방향으로 배가 이동되어 보이는데, 반류와의 거리 차이를 통해 배의 속도를 유추하기도 한다.

### 3-8 조간대

조간대는 조석 간만의 차이로 조차가 발생하는 지역으로서, 주로 모래 개펄이나 펄 개펄로 이루어져 있으며, 배수, 증발로 인한 함수량이 시간에 따라

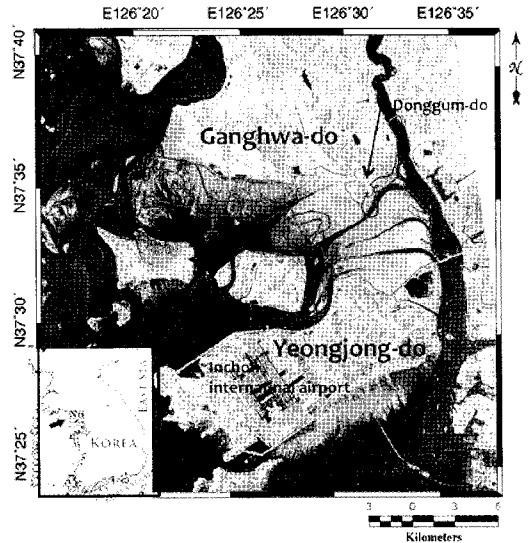


[그림 13] Ship detection from L-band SAR images of Uraga channel, Japan in November 2009<sup>[26]</sup>

크게 변화하는 지역으로, SAR 영상에서도 그 변화 양상이 뚜렷이 나타난다. 이를 통하여 갯벌의 퇴적 환경, 해수 순환, 생물 교란 등을 조사한다(그림 14). SAR는 해안선의 경계부가 뚜렷이 나타나기 때문에 시계열적 자료를 얻어 지형 고도의 추출에 이용되기도 한다. 펄 개펄의 입도와 배수밀도 및 증발 산량에 따라 전기적 성질이 변하는 것이 SAR 영상에서 획득되기도 하고, 모래 개펄에서 발생하는 연흔(ripple mark)은 Bragg 산란으로 SAR 영상에서 매우 강한 신호로 얻어지며, 이것들의 연중 변화는 퇴적 환경을 지시하는 중요한 인자가 된다. 또한 갯벌 표면에 생물체 교란으로 인한 거칠기의 변화나 염생식물의 분포 또한 SAR 영상의 후방 산란을 결정하는 주요한 인자이다.

## IV. 극지 활용 분야

태양 고도가 낮고 기상 조건이 열악하여 비교적



[그림 14] TerraSAR-X HH images of intertidal zone of west coast of Korea obtained on July 3, 2009. Green polygon means mud flats, red sand flats and blue for mixed flats<sup>[27]</sup>

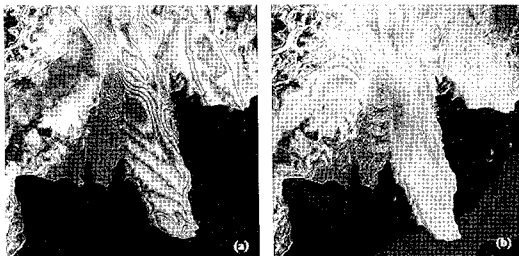
접근이 어려운 북극/남극을 비롯한 극지에서 전천후 영상을 얻을 수 있는 SAR의 활용이 매우 활발하다. 극지 활용 분야는 대상에 따라 빙하, 해빙, 빙상이나 빙봉 분야로 세분할 수 있다.

#### 4.1 빙하 연구

SAR 영상을 이용하여 빙하의 분포와 특성, 빙하 위의 눈의 특성, 빙퇴석의 분포, 빙하의 용융에 따른 산란 특성의 변화를 연구한다. 특히 전천후 SAR 영상을 이용하여 빙하의 급작스러운 변화가 시계열적으로 연구되기도 한다. 그리고 DInSAR와 같은 간섭기법을 이용하여 빙하의 수평적 흐름 속도를 계산하고, 조석에 의한 빙하의 수직적 이동을 분석하기도 한다([그림 15]). 수평적 흐름 속도가 일정함을 가정하여 이중 DInSAR 기법을 이용하여 조석에 의한 빙하의 휨거동을 통해 빙하의 기저면(grounding line)을 추출해 내기도 한다. 이러한 기저면의 영년 변화는 빙하의 후퇴/진출 및 기후 변화 연구와도 연관된다.

#### 4.2 해빙

해빙은 그 초기 생성 조건과 발달 과정에 따라 SAR 영상의 밝기에 큰 영향을 준다. 해빙의 생성 초기에는 특히 바람이 잔잔할 경우 매우 약한 후방 산란을 보이지만, 이후 점차 두꺼워지면서 소금물이 빠지고 서로 겹쳐지는 빙맥(ridge)을 형성하기도 하며, 다년



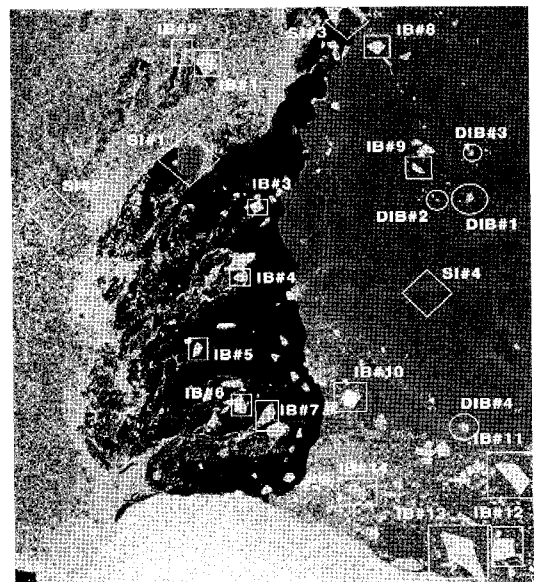
(a) 1-day interferogram (b) 8-day interferogram

[그림 15] Cosmo-SkyMED interferograms of Campbell glacier, Antarctica<sup>[28]</sup>

생 해빙으로 남게 되는 경우 매우 복잡한 표면 산란 및 체적산란의 형태를 띤다. 이 때문에 다편파 SAR 영상에서 해빙의 종류와 상태가 특징적으로 분류되기도 한다. 부분적으로 해빙 사라져 바닷물이 노출되는 폴리나(polynya), 항해에 위험 요소인 빙산 및 해빙을 덮고 있는 눈의 상태 등도 SAR 영상에서 판별될 수 있다. 조석과 해류에 의한 해빙의 미세 거동 및 역학적 단위체들의 정의에는 DInSAR를 이용한 변위 자료가 유용하게 사용된다([그림 16]).

#### 4.3 빙상/빙봉

남극과 그린랜드를 덮고 있는 거대한 빙상(ice sheet)의 분포와 유역 경계, 그리고 빙상이 바다로 연장되어 있는 빙붕(ice shelf)의 분포와 기저면의 경계 등이 SAR 영상 및 간섭 영상을 통해 활발히 연구되고 있다. 특히 기후 변화와 관련되어 빙상의 유동, 체적 균형(mass balance) 및 거대 빙봉의 붕괴의 모니터링에 전천후 SAR 영상이 활용되고 있다.



[그림 16] Freeman-Durden decomposition of iceberg (IB), unclassified iceberg (DIB), and sea ice (SI)<sup>[29]</sup>

## V. 대기 활용 분야

구름과 태양고도에 영향을 거의 받지 않은 SAR의 경우 대기 활용 분야가 넓지는 않지만, 해양 표면에 나타나는 기상 현상에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 주로 해양에서의 기상 현상이 해수 표면에 표현되는 것으로서, 폭풍, 비, 바람, 기상 전선이 SAR 영상에 표현된다. 최근 SAR 간섭 기법을 통하여 지반 침하나 지체 구조 운동 현상을 규명하는 데 있어서 이온층과 대류층에서 마이크로파 전파의 경로 지연 및 굴절이 중요한 요소로 대두되고 있다. 앞서 2-6절의 지구조/지반변위 추출 기법에서 언급하였듯이 GPS를 이용한 이온 밀도 분포나 광학영상을 이용한 대기 습도 추정치와 위상 지연과의 상관 관계를 규명하는 연구가 매우 활발하다.

## VI. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 SAR는 육상, 해양, 극지, 및 대기에 이르기까지 매우 다양한 활용 분야가 있음을 알 수 있다. 향후 새로운 SAR 기술의 발달에 따라 인공위성 SAR의 개발이 확대될 것이고, 그 활용 분야가 더욱 늘어날 전망이다. 우리나라는 X-밴드 SAR를 탑재한 아리랑 5호 위성의 발사를 앞두고 있으며, 향후 차세대 SAR의 개발 및 운용에 대한 방안이 지속적으로 연구되고 있다. 이에 다양한 활용 분야의 응용성을 고려한 적합한 제원을 갖추어 나가기 위해서는 활용 분야에 지속적인 인적, SAR 하드웨어, 소프트웨어, 인적 자원 및 정책적인 투자가 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 특히 지난 9월에 있었던 Asia-Pacific Synthetic Aperture Radar(AP SAR) 2011과 같이 SAR를 전문적으로 논의하는 국제학술회의가 한국에서 개최된 것은 국내의 SAR 기술 개발 및 영상 활용을 촉진하는 중요한 계기가 될 것으로 믿어 의심치 않는다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. C. Curlander, R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- [2] W. M. Brown, "Synthetic aperture radar", *IEEE Trans. Aeros. Electron. Systems*, vol. AES-3, no. 2, pp. 217-229, 1967.
- [3] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Artech House, Boston, MA, 1995.
- [4] S. Ahmed, H. R. Warren, D. Symonds, and R. P. Cox, "The radarsat system", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 28, no. 4, pp. 598-602, 1990.
- [5] C. Oliver, S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, Artech House, 1998.
- [6] T. Toutin, "Opposite-side ERS-1 SAR stereo mapping over rolling topography", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp. 543-549, 1996.
- [7] S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 5, pp. 1551-1565, 1998.
- [8] H. A. Zebker, T. G. Farr, R. P. Salazar, and T. H. Dixon, "Mapping the world's topography using radar interferometry: the TOPSAT mission", *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 12, pp. 1774-1786, 1994.
- [9] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry", *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
- [10] J. A. Kong, "Polarimetric remote sensing", *Progr. Electromagn. Res.*, vol. 3, Elsevier, 1990.

- [11] A. Reigber, A. Moreira, "First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 38, no. 5, pp. 2142-2152, 2000.
- [12] R. Gens, J. L. Genderen, "SAR interferometry - issues, techniques, applications", *Int. J. Remote Sens.*, vol. 17, no. 10, pp. 1803-1835, 1996.
- [13] 이훈열, "SAR 관련 논문 통계 분석에 의한 SAR 시스템, 기술, 활용분야 고찰", *대한원격탐사학회지*, vol. 22, no. 2, pp. 153-174, 2006.
- [14] R. Bamler, P. Hartl, "Topical review - synthetic aperture radar interferometry", *Inverse Problems*, vol. 14, pp. R1-R54, 1998.
- [15] N. Ishitsuka, N. Tomiyama, T. Yamanokuchi, G. Saito, C. Yonezawa, and S. Ogawa, "Project for development of application using satellite image to measure paddy rice planted area in Japan-case of PALSAR", *AP SAR2011*, pp. 471-473, 2011.
- [16] Q. Song, H. Zhang, F. Liang, Y. Li, and Z. Zhou, "Results from an airship-mounted ultra-wideband synthetic aperture radar for penetrating surveillance", *AP SAR2011*, pp. 194-197, 2011.
- [17] N. Parihar, A. Das, M. S. Nathawat, and S. Mohan, "Accuracy assessment of DEMs derived from multi-frequency SAR images", *AP SAR2011*, pp. 602-605, 2011.
- [18] F. Cai, F. Lombardini, D. Pasculli, and F. Viviani, "Tomo and Diff-Tomo SAR methodologies: Recent advances for urban and forest applications", *AP SAR2011*, pp. 564-566, 2011.
- [19] S. -W. Kim, T. H. Dixon, F. Amelung, and S. Wdowinski, "A time-series deformation analysis from TERRASAR-X SAR data over new orleans, USA", *AP SAR2011*, pp. 832-836, 2011.
- [20] S. Sun, N. Serizawa, and Masato Furuya, "Conjugate earthquake rupture associated with two recent intraplate strike-slip earthquakes", *AP SAR2011*, pp. 465-466, 2011.
- [21] G. G. Ponnuram, Y. S. Rao, "Soil moisture mapping using ALOS PALSAR and ENVISAT ASAR data over India", *AP SAR2011*, pp. 606-609, 2011.
- [22] S. -W. Kim, G. -W. Yoon, and J. -S. Won, "Urban monitoring using TERRASAR-X SAR data", *AP SAR2011*, pp. 483-484, 2011.
- [23] M. Sugimoto, K. Ouchi, "Rotation of polarimetric matrices and its effects on classification accuracy of man-made structures by synthetic aperture radar", *AP SAR2011*, pp. 598-601, 2011.
- [24] D. -J. Kim, "Monitoring of coastal wind and oil spill using KOMPSAT-5", *AP SAR2011*, pp. 802-805, 2011.
- [25] O. Isoguchi, M. Shimada, "Extraction of ocean wave parameters by ALOS/PALSAR", *AP SAR2011*, pp. 106-109, 2011.
- [26] M. Arii, "Ship detection from full polarimetric SAR data at different incidence angles", *AP SAR2011*, pp. 558-561, 2011.
- [27] Y. K. Lee, J. -S. Won, "Using X-band synthetic aperture radar data to monitor salt marsh", *AP SAR2011*, pp. 491-494, 2011.
- [28] H. Han, H. Lee, "Motion of campbell glacier, east antarctica, observed by satellite and ground-based interferometric synthetic aperture radar", *AP SAR2011*, pp. 840-843, 2011.
- [29] J. -W. Kim, D. -J. Kim, S. -H. Kim, and B. -J. Hwang, "Iceberg detection using full-polarimetric RADARSAT-2 data in west Antarctica", *AP SAR2011*, pp. 236-239, 2011.

≡ 필자소개 ≡

이 훈 열



1989년 3월~1995년 2월: 서울대학교 지  
질학 (이학사)

1995년 3월~1997년 2월: 서울대학교 지  
구물리학 (이학석사)

1997년 9월~2001년 3월: 런던대(Impe-  
rial College) 원격탐사학 (이학박사)

2001년 1월~2003년 8월: Imperial College

포닥 연구

2003년 9월~2004년 2월: 한국지질자원연구원 선임연구원

2004년 3월~2006년 3월: 강원대학교 지구물리학과 전임강사

2006년 4월~2010년 3월: 강원대학교 지구물리학과 조교수

2010년 4월~현재: 강원대학교 지구물리학과 부교수