

SAR 자료에서 추출한 특징들과 토지 피복 항목 사이의 연관성 분석

박노옥* · 이훈열**† · 지광훈*

*한국지질자원연구원 지질자원정보센터, **강원대학교 지구물리학과

Analysis of Relationships between Features Extracted from SAR Data and Land-cover Classes

No-Wook Park*, Hoonyol Lee**†, and Kwang-Hoon Chi*

*Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

**Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : This paper analyzed relationships between various features from SAR data with multiple acquisition dates and mode (frequency, polarization and incidence angles), and land-cover classes. Two typical types of features were extracted by considering acquisition conditions of currently available SAR data. First, coherence, temporal variability and principal component transform-based features were extracted from multi-temporal and single mode SAR data. C-band ERS-1/2, ENVISAT ASAR and Radarsat-1, and L-band JERS-1 SAR data were used for those features and different characteristics of different SAR sensor data were discussed in terms of land-cover discrimination capability. Overall, tandem coherence showed the best discrimination capability among various features. Long-term coherence from C-band SAR data provided a useful information on the discrimination of urban areas from other classes. Paddy fields showed the highest temporal variability values in all SAR sensor data. Features from principal component transform contained particular information relevant to specific land-cover class. As features for multiple mode SAR data acquired at similar dates, polarization ratio and multi-channel variability were also considered. VH/VV polarization ratio was a useful feature for the discrimination of forest and dry fields in which the distributions of coherence and temporal variability were significantly overlapped. It would be expected that the case study results could be useful information on improvement of classification accuracy in land-cover classification with SAR data, provided that the main findings of this paper would be confirmed by extensive case studies based on multi-temporal SAR data with various modes and ground-based SAR experiments.

Key Words : Land-cover classification, Polarization, Coherence, Temporal variability.

요약 : 이 논문에서는 촬영 시기 및 촬영 모드(주파수, 편파, 입사각)에 있어서 여러 가지 조건을 가지는 다양한 SAR 자료로부터 특징을 추출하여 토지 피복 항목과의 상호 연관성을 분석하였다. 현재까지 가용한 인공위성 SAR 영상의 촬영 조건을 고려하여 다음의 두 가지 경우로 구분하여 특징을 추출하였다. 첫째, 단일 모드로 다중 시기에 얻어진 SAR 자료로부터 긴밀도, 시간적 변이도, 주성분 변환에 의한 특징들을 추출

하였다. C-밴드인 ERS-1/2, ENVISAT SAR, Radarsat-1 자료와 L-밴드인 JERS-1 SAR 자료를 대상으로 이러한 특징들을 각각 추출하였으며, 일반적인 토지 피복 항목과의 연관성 분석을 통해 다중 센서의 특성 차이를 비교 분석하였다. 여러 특징들 중에서 Tandem 긴밀도는 대체적으로 토지 피복 항목간 구별력이 가장 좋게 나타났다. C-밴드 SAR 자료의 장기간 긴밀도에서는 도심 지역의 구분이 용이하였으며, 시간적 변이도에서는 모든 센서 자료에서 논 지역이 가장 높은 값을 나타내었다. 또한 시계열 후방 산란 계수와 긴밀도의 주성분 변환에 기반한 특징들에서는 토지 피복과 관련된 부가 정보 추출이 가능하였다. 둘째, 다중 모드(편파, 입사각)로 비슷한 시기에 얻어진 SAR 자료로부터 편파비와 다중 채널 변이도를 주요 특징으로 추출하여 토지 피복 항목별로 비교하였다. 그 결과, VH/VV 편파비로부터 산림과 밭 항목의 구별력이 향상되는 것으로 나타났다. 이 연구의 분석 결과는 향후 다양한 모드의 시계열적 SAR 자료 및 지상 산란계 실험을 통한 다양한 사례 연구 결과와 결합된다면, SAR 자료를 이용한 토지 피복 분류의 정확도 향상을 위한 기초 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

원격탐사 자료의 분류에 의해 작성되는 토지 피복도는 산사태 취약성 분석, 홍수 피해 지역의 면적 산출, 토양 유실 분석 등의 재해 분석에 직접적으로 사용될 수 있는 주제도의 일종이다. 기존 연구에서는 토지 피복 분류를 위해 광학 위성 자료를 많이 이용하여 왔으나, 아시아 몬순지대에 위치한 우리나라에서는 여름철에 집중되는 강우와 저기압대로 인해 광학 위성 자료의 획득이 어려운 상황에서, 기상 상태의 제약 없이 자료 획득이 가능한 SAR 자료는 원하는 시기의 토지 피복 분류를 가능하게 해 주는 좋은 대안이 될 수 있다.

현재까지 인공위성 SAR의 대부분을 차지하는 자료의 형태인 단일 주파수, 단일 편파를 이용하여 단일 시기에 촬영된 SAR 자료의 후방 산란 계수만을 분류에 이용할 경우, 다중 분광 채널을 가지는 광학 위성 자료에 비해 만족스러운 분류 정확도를 얻기가 쉽지 않다. 이는 SAR 자료의 speckle 잡음이나 기하학적 왜곡 등에서도 기인하지만, 일반적인 토지 피복 항목간의 물리적인 특성들의 차이가 단일 채널의 SAR 자료만으로는 두드러지지 않기 때문이다.

SAR 자료를 분류에 이용할 때 가장 기본적인 입력 특징은 후방 산란 계수이다. 일반적으로 수계는 상대적으로 낮은 값을 보이지만, 표면 거칠기에 따라 큰 폭의 값을 가진다. 건물이나 구조물에 의한 이중 산란이 우세하게 나타나는 도심지에서는 대체적으로 높은 값을 나타내지만, 입사각과 편파에 따라 크게 변할 수 있다. 식생지역에서는 농작물의 생육 상태 및 식생의 연중 변화에 따

라 달라지지만, 일반적으로 생육 상태가 가장 왕성한 시기에 촬영된 SAR 자료에서 농경지와 산림의 구분은 쉽지 않다(Ulaby and Dobson, 1989). 따라서 특정 시기에 촬영된 단일 채널의 SAR 자료만으로 실용적인 토지 피복 분류를 하기에는 매우 제한적이라 할 수 있으며, 이 경우 대상 지역 토지 피복 항목간의 후방산란계수의 차이가 두드러지는 시기의 자료 선택이 매우 중요하다.

한편, 단일 주파수 및 단일 편파로 시간에 따라 연속적으로 얻어진 다중 시기 SAR 영상을 이용하여 후방 산란계수의 시계열적 변화를 분류에 직접적으로 사용할 수 있다(Dammert *et al.*, 1999; Quegan *et al.*, 2000; Strozzi *et al.*, 2000; Engdahl and Hyypä, 2003; 박노옥 외, 2005). 이러한 다중 시기 SAR 자료를 이용할 경우에 시간적 변이도(temporal variability), 긴밀도(coherence) 등과 같은 여러 특징들을 추출하여 분류에 이용할 경우 단순한 후방산란계수의 시계열적 변화보다도 더 높은 분류 정확도를 얻을 수 있다고 보고되었다(Bruzzone *et al.*, 2004).

SAR를 이용한 토지 피복 분류를 실용화하기 위해서는 다양한 주파수와 여러 편파의 다채널 SAR 자료로부터 추출 가능한 특징들을 이용해야 한다. 현재 운용 중인 C-밴드의 ENVISAT ASAR와 2007년 6월 발사에 성공한 X-밴드의 TerraSAR-X는 이중 편파 자료를, L-밴드 ALOS PALSAR와 발사 예정인 C-밴드 Radarsat-2는 다중 편파 자료를 제공할 수 있기 때문에, 앞으로는 다양한 주파수와 편파를 가지는 SAR 자료들의 융합을 통해 기존에 비해 향상된 분류 정확도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

현재까지 SAR 자료를 이용한 분류 연구가 많이 진행되었으나, 좁은 지역에 복잡한 여러 토지 피복이 혼재하는 우리나라의 토지 피복 현황과 지형 조건을 고려할 때 특정 SAR 자료, 특정지역에 대한 사례 연구나 방법론 개발과 관련된 기존 연구 결과를 직접적으로 적용할 수 없다. 일반적으로 후방 산란 계수는 동일한 토지 피복 항목에서도 주파수, 입사각, 편파 상태에 의존적이다. 따라서 SAR 자료로부터 추출 가능한 특징들의 토지 피복 구분력과 관련된 특성을 분석하는 것은 차후 토지 피복 분류를 위한 SAR 자료의 주파수, 편파, 촬영 모드 및 시기 등의 선택과 관련하여 매우 중요한 의미를 가진다.

이 논문에서는 후방 산란 계수의 직접적인 비교를 제외하고 SAR 자료로부터 토지 피복 구분에 이용 가능한 특징들과 대표적인 토지 피복 항목간의 연관성에 대해 논의하고자 한다. SAR 자료로부터 추출 가능한 특징들은 개별 자료로부터 추출이 가능한 것과 여러 시기 자료나 다중 편파 자료로부터 추출이 가능한 것 등 다양한데, 이 논문에서는 과거나 현재 이용 가능한 SAR 센서의 특성을 고려하여 1) 다중 시기에 단일 모드의 SAR 자료로부터 추출한 특징, 2) 비슷한 시기에 다양한 편파 및 입사각을 이용한 다중 모드 SAR 자료로부터 추출한 특징의 두 가지로 크게 구분하여 실제 SAR 자료에 적용한 사례 연구를 통해 예시 및 논의하고자 한다. 이 논문의 주된 목적은 SAR 자료로부터 추출한 특징에서 나타내는 토지 피복 구분력에 대한 논의에 있으며, 이는 향후 피복 분류의 정확도를 향상시키는데 기본적 정보를 제공할 것이다. 일반적인 토지 피복 항목인 수계, 도심, 농경지(논, 밭), 산림 지역을 포함하는 충청남도 당진 지역에서 촬영된 다중 시기 ERS-1/2, JERS-1, Radarsat-1, ENVISAT ASAR 자료를 이용하였다. SAR 자료에서 추출한 특징과 토지 피복 항목과의 연관성 분석을 위하여 광학 위성 자료, 현지 조사 자료, 환경부 토지피복도로부터 훈련 집단을 추출하고 가우시안 커널 기반의 확률밀도 함수를 히스토그램 분석에 이용하였다.

2. 다중 시기 SAR 자료에서의 특징 추출

단일 편파, 단일 입사각, 및 단일 주파수를 가지는 단일 모드의 SAR 자료인 경우에 두 개 이상의 다중 시기 자료

를 이용하여 긴밀도, 시간적 변이도 등을 추출할 수 있다. 또한 시계열 자료를 이용하기 때문에 주성분 변환과 같은 자료 변환 기반 특징의 추출도 가능하다. 이러한 특징들은 C-밴드 VV 편파로 고정입사각으로 촬영된 ERS-1/2 혹은 단일 입사각으로 촬영된 ENVISAT ASAR, C-밴드 HH 편파로 단일 입사각으로 촬영된 Radarsat-1, L-밴드 HH 편파로 촬영된 고정입사각의 JERS-1 SAR 및 단일 입사각의 ALOS PALSAR 등의 자료로부터 얻어진다. Table 1은 단일 모드/다중 시기 SAR 자료로부터 추출할 수 있는 특성의 예시를 위해 사용된 충청남도 당진 지역의 SAR 자료의 목록을 나타내고 있다.

1) 긴밀도

SAR 간섭 기법(SAR Interferometry)에서, 서로 다른 위치에서 얻어진 두 SAR 자료간의 간섭 위상의 질은 긴밀도로 표현된다. 긴밀도는 위성의 기선, 시간적 변이, 신호대 잡음비, 스펙클 노이즈, 영상의 기하학적 비정합 등의 영향을 받는데(Gens and van Genderen, 1996), 일반적으로 체적 산란(volume scattering)과 산란체의 무작위적 움직임과 같은 시간적 변화는 긴밀도를 감소시키게 된다. 따라서 긴밀도는 지표면의 시간적 안정성을 측정하는 척도로 관측 기간 동안의 식생의 변화, 지표면의 자연적, 인공적 변화를 반영한다.

이 논문에서는 이용 가능한 자료의 형태에 따라 Tandem 긴밀도와 장기간 긴밀도(long-term coherence)로 구분하여 논의하고자 한다. Tandem 긴밀도는 하루의 시간적 간격을 가지는 ERS-1/2 Tandem pair로부터 추출이 가능한 특징으로 2000년 초까지 촬영된 과거 자료에 대해서 추출할 수 있다. 그러나 우리나라에서는 상대적으로 가용할 수 있는 자료의 수가 극히 제한적이며 대부분 겨울이나 초봄에 촬영되었다. Strozzi and Wegmüller (1998)에서 논의한 것처럼 하루 간격이 아닌 상대적으로 긴 시간 간격을 가진 C-밴드 간섭쌍으로부터 얻어진 장기간 긴밀도에서는 상대적으로 안정적인 고정 산란체(permanent scatterer)로 이루어진 도심지와 다른 피복간의 구분이 가능하다. 따라서 ERS-1/2 Tandem 간섭쌍의 최근 자료의 이용이 불가능한 상황에서 장기간 긴밀도는 도심지의 구분에 효과적으로 이용될 수 있다.

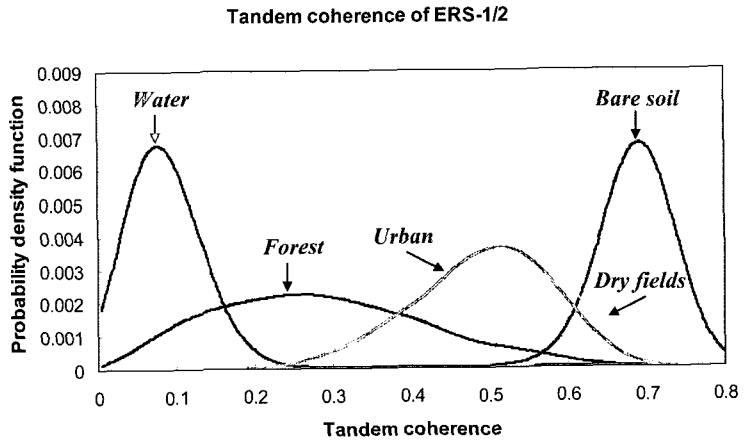
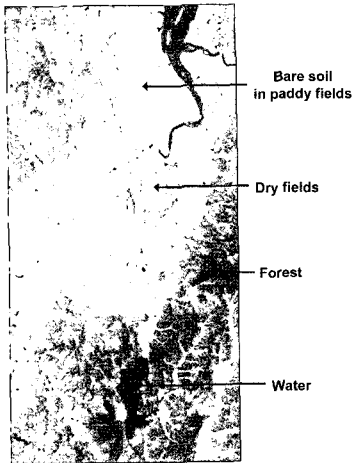
긴밀도와 토지 피복간의 관련성 분석을 위해 충청남도 당진 지역에서 촬영된 다양한 인공위성 SAR 자료로

Table 1. Multiple SAR sensor data used for illustrating main characteristics of features from single polarization/multi-temporal SAR data. Interferometric pairs and perpendicular baseline distance for coherence are listed in parentheses.

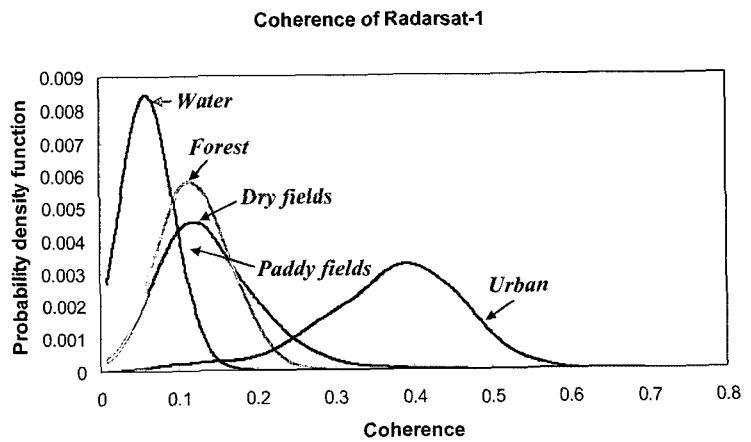
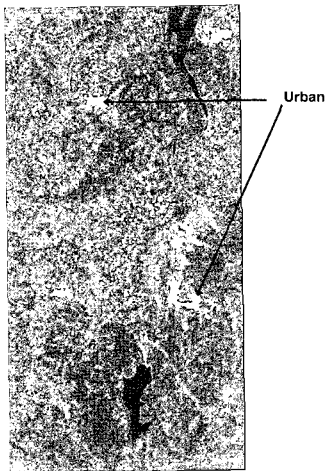
Sensor	Wavelength/Incidence angle/Polarization	Acquisition date (year/month/day)		Extracted features
JERS-1 SAR	L band (23.5cm)/35°/HH	1	1997/11/30	coherence (12: 969m, 13: 973m, 14: 403m, 23: 1931m, 24: 1372m, 34: 587m, 78: 566m), temporal variability, principal components
		2	1998/01/13	
		3	1998/02/26	
		4	1998/04/11	
		5	1998/05/25	
		6	1998/07/08	
		7	1998/08/21	
		8	1998/10/04	
ERS-1/2 Tandem	C band (5.7cm)/23°/VV	1	1995/12/21	Tandem coherence (12: 248m)
		2	1995/12/22	
ENVISAT ASAR	C band (5.7cm)/23°/VV	1	2005/01/09	coherence (12: 696m, 23: 538m, 46: 275m, 78: 186m, 79: 115m, 89: 71m), temporal variability, principal components
		2	2005/02/13	
		3	2005/03/20	
		4	2005/04/24	
		5	2005/05/29	
		6	2005/07/03	
		7	2005/08/07	
		8	2005/09/11	
		9	2005/10/16	
Radarsat-1	C band (5.7cm)/40°/HH	1	2005/04/01	coherence (12: 848m, 24: 130m, 35: 142m, 46: 73m, 78: 739m, 89: 98m), temporal variability, principal components
		2	2005/04/25	
		3	2005/05/19	
		4	2005/06/12	
		5	2005/07/06	
		6	2005/07/30	
		7	2005/08/23	
		8	2005/09/16	
		9	2005/10/10	

부터 추출된 긴밀도의 공간적 분포와 이 지역의 대표적인 토지 피복간의 히스토그램 분석을 수행하였다(Fig. 1). Tandem 긴밀도의 경우(Fig. 1 (a)), 도심 지역을 제외하고 전반적으로 토지 피복 항목에 따른 구분이 확실하게 나타났다. 수계 영역이 가장 낮은 값을 나타내고 있으며, 산림 지역도 대체적으로 낮은 값을 보이고 있다. 수확이 끝난 12월의 논 지역에 노출된 토양은 가장 높은 긴밀도를 나타내고 있다. 토양 지역은 도심지보다도 더 높은 긴밀도를 나타내고 있는데, 이는 토양 지역의 구조적 단순성에 기인한다. Radarsat-1 자료(Fig. 1 (b))와 ENVISAT ASAR (Fig. 1 (c)) 자료의 경우에는 2005년에 걸쳐 촬영된 자료 중에서 적절한 수직 기선을

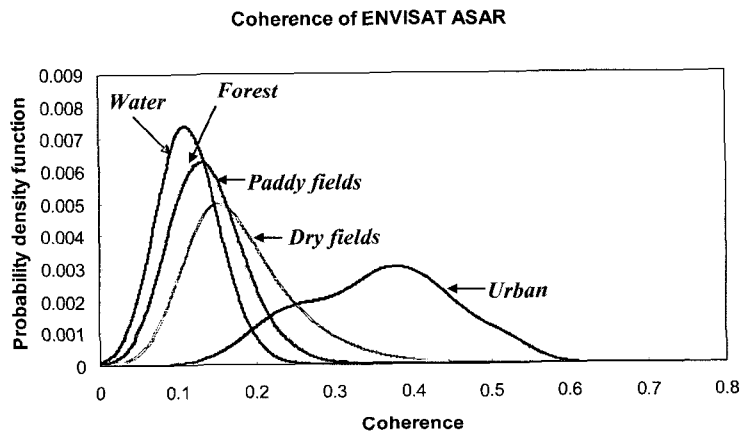
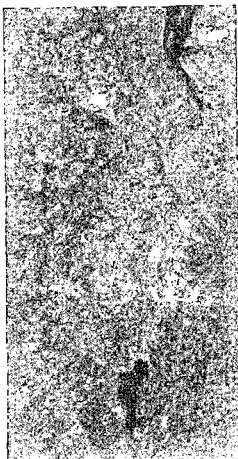
유지하는 각각 6개의 간섭쌍으로부터 긴밀도를 구한 다음에 평균하여 최종적인 긴밀도를 얻었다. 이 경우 도시 지역의 긴밀도만이 상대적으로 높은 값을 나타냈으며, 수계 영역을 비롯한 여러 항목이 중첩되면서 낮은 값을 보였다. 논 지역에는 작물의 성장과 농업 활동의 영향으로 긴밀도가 매우 낮게 나타나고 있으며, 밭작물의 경우에는 토양과 작물의 영향이 중첩되어 논 보다는 약간 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 일반적으로 C-밴드 SAR를 이용한 토지 피복 구분과 관련하여 겨울철에 획득된 Tandem 긴밀도로부터 토양과 산림 및 작물 재배 지역의 구분이 가능하나, 장기간 긴밀도로부터는 도심 지역의 추출만이 용이할 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Coherence images and their histogram distributions with respect to five land-cover classes, (a) ERS-1/2 Tandem pair, (b) Radarsat-1, (c) ENVISAT ASAR, and (d) JERS-1. Typical land-cover areas are expressed with arrows and captions.

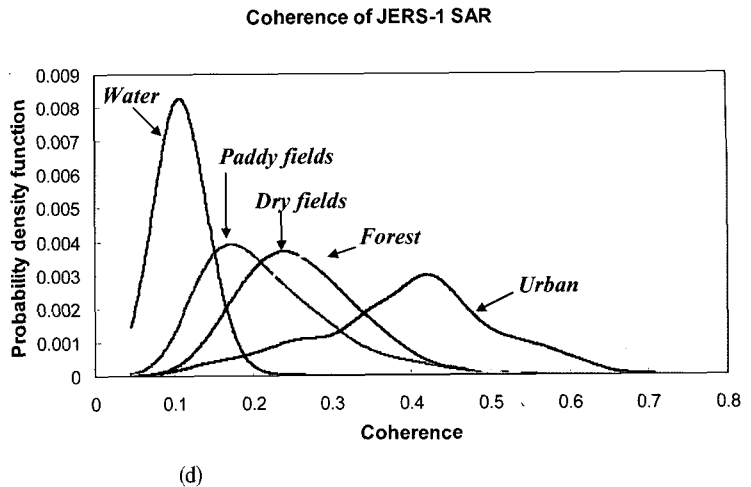


Fig. 1. Continue

주파수에 따른 긴밀도의 변화를 살펴보기 위하여, 같은 연구지역에서 1997년 11월부터 1998년 10월까지 얻어진 L-밴드 JERS-1 SAR 자료 중에서, 44일 혹은 88일 시간 간격으로 얻어진 수직기선 2000미터 미만의 간섭쌍으로부터 7개의 긴밀도를 구한 후 평균 긴밀도를 계산하였다(Fig. 1 (d)). C-밴드보다 파장이 긴 L-밴드의 긴밀도가 자연 피복물에 대해서는 수계를 제외하고는 상대적으로 긴 시간 간격에도 불구하고 상대적으로 높은 긴밀도를 유지하는 것으로 나타나고 있다. 산림 지역의 긴밀도가 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 도심 지역의 긴밀도가 낮은 값부터 높은 값까지 넓은 범위의 분포 범위를 나타내고 있다. 그러나 밭 항목과 산림의 혼재가 두드러지게 나타나고 있다. C-밴드보다 수직 기선과 시간 간격의 제한이 덜한 L-밴드 자료로부터 추출한 긴밀도는 자료 이용 측면에서 활용성이 크다고 간주할 수 있다. 그러나 긴밀도의 저하를 초래하는 시공간적 요소에 대한 토지 피복 특성별 모델링이 수행되어야 보다 정량적인 비교가 논의될 수 있을 것이다.

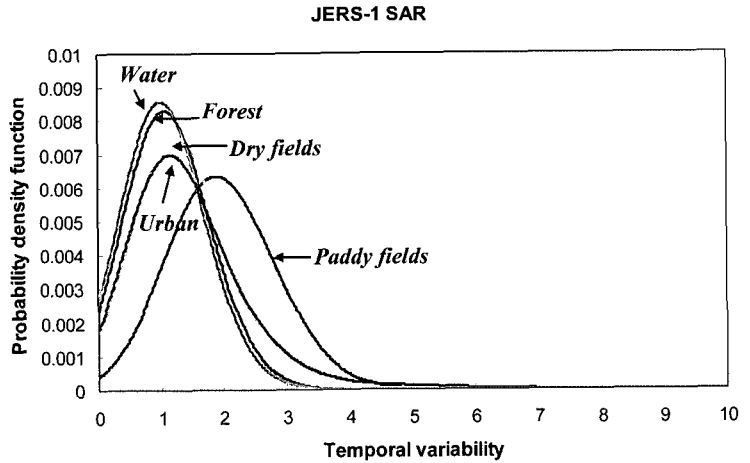
2) 시간적 변이도

시간적 변이도는 후방 산란 계수의 시간적 특성을 분석하는 다중 시기 SAR 자료를 이용하는 경우 추출될 수 있는 가장 대표적인 특징에 해당된다(Quegan *et al.*, 2000; Bruzzone *et al.*, 2004; 박노옥 외, 2005).

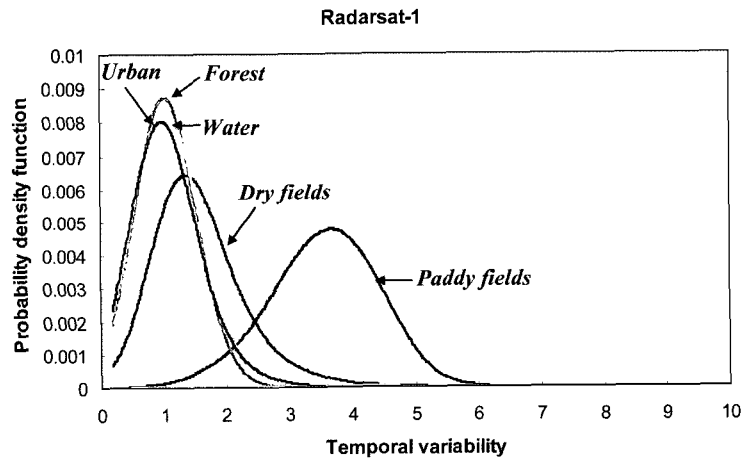
일반적으로 수계의 경우 바람과 기상 상태 등에 따라 bragg scattering에 의해 수 분 혹은 수 일 단위로 시간

적 변화가 극히 심한 편이다. 이러한 양상은 특히 작은 입사각과 VV 편파 상태를 가지는 경우(ERS-1/2와 ENVISAT ASAR)에 상대적으로 두드러지게 나타난다. 농작물의 경우는 작물의 성장 기간이나 농업 활동 및 기상 상태에 따른 토양 수분의 변화로 수 일에서 수 개월에 걸쳐 시간적 변이도가 크게 나타난다. 특히 우리나라의 대표적인 농작물인 벼의 경우, 관개 및 생육 상태의 변화에 따라 5월부터 초여름까지 변화가 심한 편이며(홍석영 외, 2007), 밭작물에서도 시간적 변이도가 크게 나타날 수 있다. 이에 비해 산림은 활엽/상록수와 같은 식생의 종류에 따라, 그리고 도심의 경우 도시의 발달 과정에 따라 시간적 변이도가 수 개월 혹은 수 년에 걸쳐 느리게 나타난다. 따라서 시간적 변이도로부터 수계, 농경지, 산림 및 도심지의 구분이 가능할 수 있다.

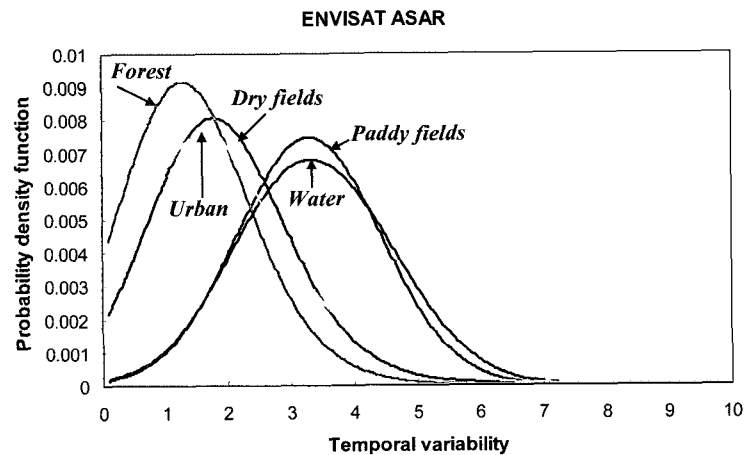
단일 모드로 얻어진 다중 시기 SAR 영상을 이용하여 시간적 변이도와 토지 피복 항목간의 연관성을 예시하기 위해 Table 1의 JERS-1 SAR, ENVISAT ASAR, Radarsat-1 자료를 비교 분석하였다. 여기서는 특히 농업 활동과 관련된 시기를 비교 분석하기 위하여 Table 1의 자료 중에서 JERS-1 SAR 자료는 1998년 4월부터 1998년 10월까지의 5개 자료를, Radarsat-1 자료는 2005년 4월부터 10월까지의 9개 자료를 모두 이용하였으며, ENVISAT ASAR 자료는 2005년 4월부터 2005년 10월 16일까지 35일 주기로 촬영된 6개 자료를 시간적 변이도 추출에 사용하였다. 시간적 변이도의 정량적 척도로 이 논문에서는 시계열 후방 산란 계수의 표



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Temporal variability images and their histogram distributions with respect to five land-cover classes, (a) JERS-1, (b) Radarsat-1, and (c) ENVISAT ASAR.

준편차를 이용하였다.

Fig. 2는 세 가지 다른 센서 자료의 시간적 변이도의 공간적 분포와 논, 밭, 산림, 수계 및 도심 등 연구지역의 5가지 대표 토지 피복 항목으로부터 계산된 히스토그램을 나타내고 있다. 공간적 분포상 연구 지역의 중앙에서 넓은 영역을 차지하는 논 항목의 값이 크게 나타나고 있다. Fig. 2(a)의 JERS-1 SAR 자료의 경우, Radarsat-1과 ENVISAT ASAR 자료에 비해 시간적 변이도의 값이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이는 상대적으로 긴 파장대인 L-밴드의 후방 산란 계수가 C-밴드에 비해 지표 피복의 변화에 덜 민감하게 반응하기 때문이다. 토지 피복 항목간의 구분력을 살펴보면, HH 편파 상태 자료인 JERS-1과 Radarsat-1의 경우에는 논 항목에서 가장 큰 시간적 변이도를 나타내고 있으며, 나머지 항목에서는 혼재된 양상을 나타내고 있다. 반면 VV 편파 상태 자료이면서 입사각이 상대적으로 제일 작은 ENVISAT ASAR 자료의 경우(Fig. 2 (c)), 수계와 논 항목에서의 시간적 변이도가 가장 크게 나타나지만 이 두 항목간의 값의 중첩 정도가 강하게 나타나고 있다. 즉 기상 상태의 변화에 따른 수계에서의 변화 정도와 벼의 성장과 농업 활동에 따른 논 항목에서의 변화 정도가 혼재되어 나타나고 있다.

이러한 결과를 종합하면, 토지 피복 항목별 후방 산란 계수의 강도와 변화에 직접적으로 영향을 미치는 SAR 센서의 파장, 편광상태와 입사각 등에 시간적 변이도가 의존적이라는 것을 확인할 수 있다. 다중 시기 ENVISAT ASAR 자료를 이용할 경우, 논과 수계 항목 사이의 혼재는 결국 이 두 항목의 차이를 부각시킬 수 있는 다른 특징이 추가되어야 함을 지시한다. 각 시기별 후방 산란 계수의 평균값을 취할 경우, 수계 지역의 낮은 후방 산란 계수 값의 분포로 이 두 항목의 차이는 분리가 될 수 있다.

외국의 다중 시기 ERS-1/2 자료를 이용한 사례 연구 (Strozzi *et al.*, 2000; Bruzzone *et al.*, 2004)에서는 유럽이라는 지역의 특성상 농경지가 우리나라의 논과 같은 특성을 나타내지 않기 때문에 수계 영역에 비해 상대적으로 작은 시간적 변이도를 나타내었다. 그러나 우리나라의 경우와 같은 경우에는 논과 밭 작물의 재배 방식의 차이에 따라 지표 환경의 변화 특성이 상이하기 때문에 외국의 작은 입사각의 VV 편파의 C 밴드 자료의 특성을 그대로 적용할 수는 없다. 또한 여기서 주목할 것

은, 밭 작물의 경우, 작물의 성장 및 수확, 또 다른 작물의 재배를 위한 나지 상태로의 변화 등 다양한 피복 상태로의 변화로 인해 수계나 논 항목보다는 시간적 변이도가 작더라도 도심이나 산림보다 클 것으로 예상되지만, 이러한 양상이 그대로 반영되지 않고 있다는 점이다. 이러한 양상은 대규모 지역에서 밭작물을 재배하는 외국의 경우와 달리 우리나라에서는 소규모 영역에서 여러 시기에 걸친 다양한 밭작물을 재배하는 특성이 반영된 결과이다. 이는 결과적으로 밭작물의 분류 정확도가 상대적으로 낮게 나타날 것으로 예상할 수 있으며, 밭작물의 구분을 위한 새로운 특징이 필요함을 지시한다.

다중 시기 SAR 자료의 실제 적용에서는 자료처리 시간과 비용 차원에서 최적의 자료를 선택하는 것은 중요한 문제이다. 특히 상대적으로 구분이 어려운 논과 밭 항목의 특성을 고려하여 자료를 선택해야 한다. 홍석영 외(2007)에서 논의된 것처럼, 논 항목의 경우 우수형성기 또는 출수기 등 벼 생육의 양적인 변화를 보이는 시기인 5월부터 7월초까지 촬영된 최적의 자료를 이용하는 것이 시간적 변이도를 잘 설명할 수 있을 것으로 판단된다. 마찬가지로 밭작물도 작물 재배의 이력을 고려한 자료 선택이 필수적이다. 그러나 현재의 저해상도 SAR는 소규모 지역에서 이루어지는 밭작물의 구분력을 떨어뜨리는 요소이다.

Fig. 3은 여러 시기 Radarsat-1 SAR 자료의 다양한 결합에 의한 시간적 변이도의 변화를 나타내고 있다. 논 지역의 물리적인 표면상태의 변화를 가장 잘 표현할 수 있는 4월말, 5월 중순, 7월 초 3개의 자료를 이용하여 계산된 시간적 변이도는 4월초부터 5월 중순, 6월 중순, 7월 초의 4개 자료를 이용한 결과와 유사한 양상을 나타내고 있다. 4월초와 4월 말 사이의 경우 논 표면 상태가 모내기 준비하는 단계로 변화가 있지만 큰 변화를 나타내지는 않으며, 6월 중순의 자료는 물이 찬 논에서 벼가 성장하는 단계이기 때문에 3개의 자료만을 이용한 경우에 비해 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 반면 7월 이후의 자료의 경우에는 모든 토지 피복 항목간의 변화가 거의 차이가 없기 때문에, 4월부터 10월까지 전체 자료를 이용하기 보다는 관개로 인해 논에 물이 차있거나 모내기 직후의 시기를 기준으로 이 시기 전 후의 자료를 포함하는 자료들이 토지 피복 항목의 표면 상태 변화를 가장 잘 표현할 수 있고 비용면에서 효율적이다.

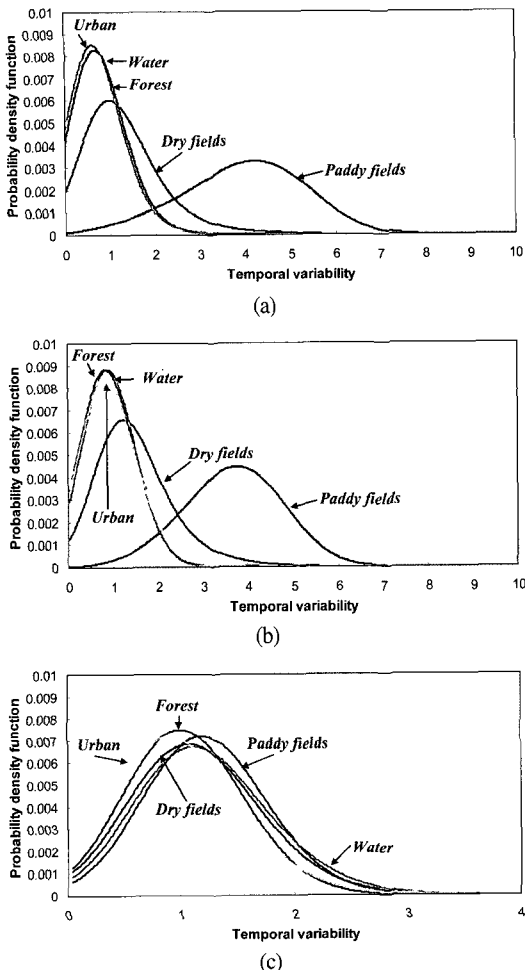


Fig. 3. Temporal variability values for various multi-temporal data combinations. (a) combination of April, May and July data, (b) combination of April, May, June and July data, and (c) combination of June, August, September and October data.

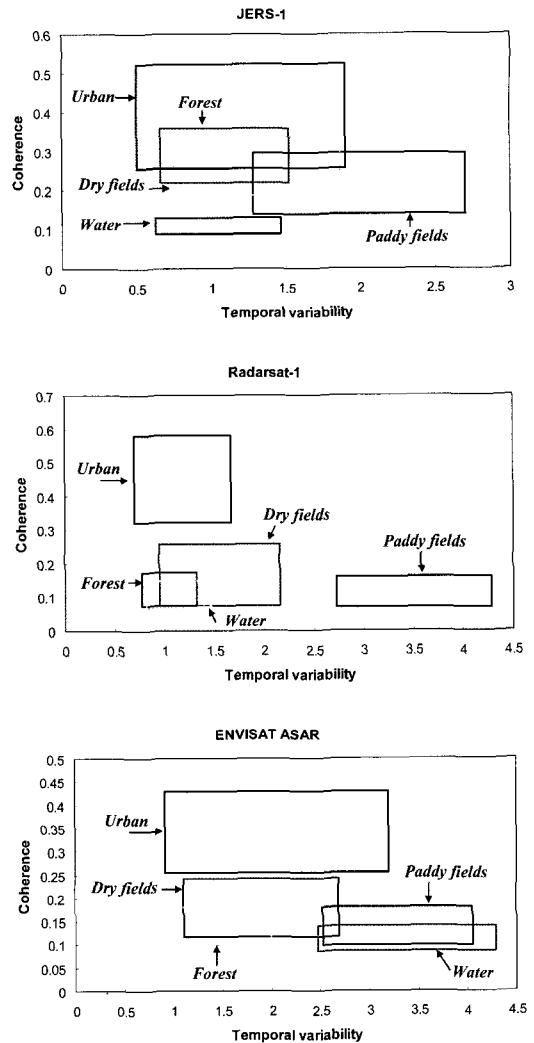


Fig. 4. Qualitative relationships between temporal variability and coherence for land-cover classes.

3) 긴밀도와 시간적 변이도의 연관성

긴밀도와 시간적 변이도가 토지 피복에 대한 상호보완적인 정보를 제공할 수 있는지를 살펴보기 위해 두 특징 사이의 연관성을 정성적으로 분석하였다. 각 토지 피복별 훈련집단에서의 평균값과 표준편차값을 계산한 후에, 실험적으로 각 특징별 평균 표준편차로 구성된 사각형을 2차원에 도시하였다(Fig. 4). JERS-1 SAR 자료의 경우, 시간적 변이도에서 일정 부분 중첩이 발생하는 논과 도심지는 도심지의 상대적으로 높은 긴밀도로 인해 구분이 가능하다. 수계 역시 밭과 산림 항목과의 시간적 변이도에서의 중첩이 긴밀도로 인해 명확하게 구

분될 수 있다. 그러나 밭과 산림 항목에 대해서는 밭 항목의 약간 큰 시간적 변이도를 제외하고는 두 특징들이 상호보완적인 정보를 제공하지는 않고 있다. JERS-1 자료의 낮은 SNR이 긴 파장의 후방 산란 특성과 결합되어 나타난 것으로 판단되며, 향후 ALOS PALSAR 자료를 이용한 L-밴드 연구가 필요하다.

Radarsat-1의 경우, 두 특징의 상호 보완적 특성이 명확하게 나타나고 있다. 긴밀도가 유사한 논과 밭은 시간적 변이도를 통해 구분이 가능하며, 시간적 변이도의 중첩이 나타나는 밭과 도심은 긴밀도를 통해 구분이 가능하다. 산림과 수계의 경우에는 시간적 변이도와 긴밀도가 모두 낮

계 유사한 것으로 나타나고 있다. 그러나 이 두 항목은 수계의 상대적으로 낮은 평균 후방 산란 계수를 통해 구분이 가능하다. 두 특징과 후방 산란 계수를 모두 고려하더라도 산림과 밭 항목의 혼재는 크게 나타나고 있다.

ENVISAT ASAR의 경우, 시간적 변이도에서 도심이 밭과 산림 두 항목과 혼재가 나타나지만, 긴밀도를 통해 도심의 구분이 가능하다. 수계 지역의 경우 논과 시간적 변이도가 중첩되지만, 평균 후방 산란 계수를 이용할 경우 구분이 가능할 것으로 판단된다. 산림과 밭 항목은 다른 센서와 마찬가지로 혼재가 두드러지고 있다.

평균 후방 산란 계수를 시간적 변이도와 긴밀도와 함께 이용하더라도, 밭과 산림의 혼재는 세 센서 모두에서 나타나고 있는데, 구별력에 있어서 어느 특정 센서가 우수하다는 결론을 내릴 수는 없었다. 다만 이 두 항목의 혼재되는 정도가 각 센서별로 차이가 있기 때문에 이중 SAR 센서 자료로부터 추출한 특징들을 융합할 경우, 이러한 혼재 효과를 감소시킬 가능성이 있다.

4) 주성분 변환

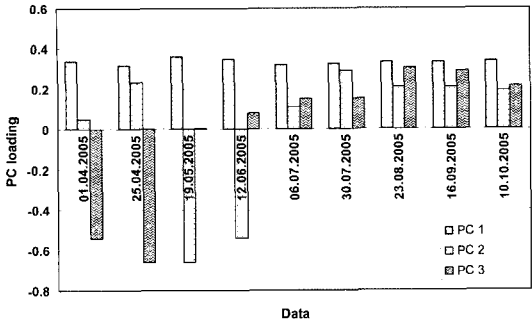
긴밀도와 시간적 변이도는 SAR 자료를 시간적으로 분석하여 얻을 수 있는 특징에 해당되는데, 이와 더불어 화상 처리에 사용되어온 자료 변환도 특징 추출에 이용이 가능하다. 특히 여러 시기의 SAR 자료를 사용하는 경우 자료 압축과 잡음 제거의 효과가 있는 자료 변환 기법의 적용이 유리하다. 대표적인 자료 변환 기법으로는 주성분 변환과 Minimum Noise Fraction (MNF) 변환을 들 수 있으며, 여기서는 주성분 변환을 중심으로 논의하였다. 전술한 긴밀도와 시간적 변이도의 경우, 다중 시기 자료로부터 평균값이나 표준편차와 같은 특정 통계값을 이용하기 때문에 특정 시기 자료의 값의 영향을 고려하는데 한계가 있다. 반면 주성분 변환과 같은 자료 변환을 수행하게 되면, 전체 자료가 주요 성분들을 포함하는 몇 개의 성분으로 변환이 되어 분석에 사용할 수 있다.

다중 시기 후방 산란 계수와 서로 다른 시간 간격의 긴밀도들에 대해 주성분 변환을 수행하게 되면, 일반적으로 첫 번째 주성분은 평균값을 나타내며, 두 번째 주성분부터는 변화 정보를 나타내게 된다. 그러나 주성분 변환이 사용 자료와 대상 토지 피복의 특성에 의존적이기 때문에, 변환된 주성분의 해석을 위해서는 각 주성분에 대한 입력 자료의 기여도를 지시하는 주성분 적재량

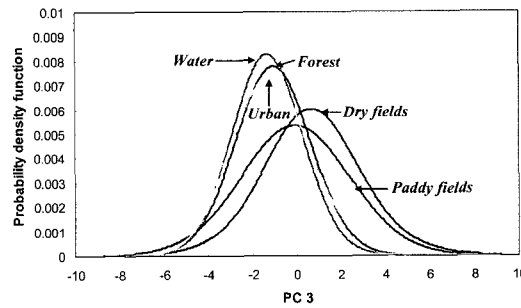
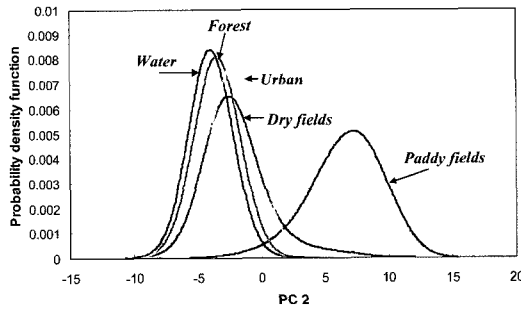
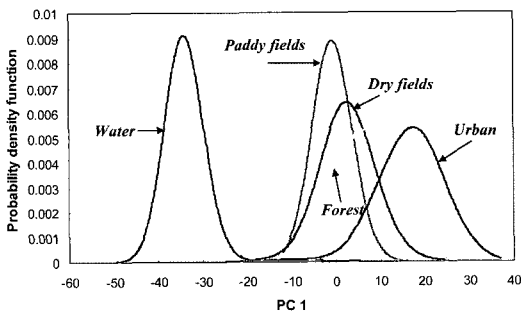
분석이 필수적이다. 주성분 변환의 경우 대개 첫 번째와 두 번째 주성분에서 대부분의 정보를 포함하게 되지만, 사용 자료에 따라 높은 차원의 주성분에서도 토지 피복과 관련된 유의미한 정보 추출이 가능할 수도 있다.

앞에서 시간적 변이도의 예시를 위해 사용된 2005년 4월부터 10월까지 촬영된 9개 Radarsat-1 자료에 주성분 변환을 적용한 후에 주성분 적재량 분석을 수행하였다. 처음 세 번째까지 주성분들에 대한 적재량을 분석한 결과(Fig. 5(a)), 첫 번째 주성분에는 모든 시기의 자료들이 같은 부호의 유사한 크기를 보이고 있다(Park and Chi, 2007). 이는 첫 번째 주성분이 전체 자료의 평균값과 유사하다는 것을 간접적으로 지시한다. 두 번째 주성분의 적재량에서는 5월과 6월에 촬영된 자료에서 상대적으로 큰 적재량 크기 값을 나타내고 있는데, 이는 이 두 시기의 자료가 두 번째 주성분에 크게 기여하고 있다는 것을 의미한다. 또한 다른 시기 자료와의 다른 부호는 이 두 시기의 자료와 나머지 자료와의 차이에 대한 정보를 포함하고 있다는 것을 의미한다. 이 시기는 관개로 인해 눈에 물이 차 있으며 모내기가 진행된 초기 상태로서 전체 자료 중에서 연구 지역의 물리적 상태의 변화가 가장 큰 시기를 나타내므로, 개략적으로 시간적 변이도의 정보와 유사하게 나타나게 된다. 반면 세 번째 주성분에서는 4월말까지 음의 부호로 큰 값을 보이다가, 이후 시기부터는 양의 부호로 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 4월말과 이후의 자료들의 특성에 변화가 있다는 것을 의미한다.

연구 지역의 토지 피복과의 연관성 분석 결과를 살펴보면(Fig. 5 (b)), 첫 번째 주성분에서는 수계와 도심의 구분이 상대적으로 용이한 것으로 나타나고 있으며 두 번째 주성분에서는 논이 구분이 명확한 것으로 나타났다. 이는 평균 후방 산란 계수와 시간적 변이도에서 구분 가능한 토지 피복 항목과 일치한다. 세 번째 주성분에서는 히스토그램이 상당히 중첩되어 있으나, 밭 항목에서의 값이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이 지역에서는 산림과 밭 항목의 분포가 첫 번째와 두 번째 주성분에서 상당히 중첩되어 분류가 어려운 것으로 나타나고 있다. 비록 값들의 중첩이 나타나고는 있지만, 밭 항목의 히스토그램의 하위 25%값이 산림 항목의 상위 75% 값과 구별이 되는 것으로 나타나 세 번째 주성분에서 밭 항목의 구분에 대한 유의미한 정보를 제공하는 것으로 나타났



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Principal component loadings of the first three principal components from 9 Radarsat-1 data sets (from Park and Chi, 2007), (b) their histogram distributions with respect to five land-cover classes.

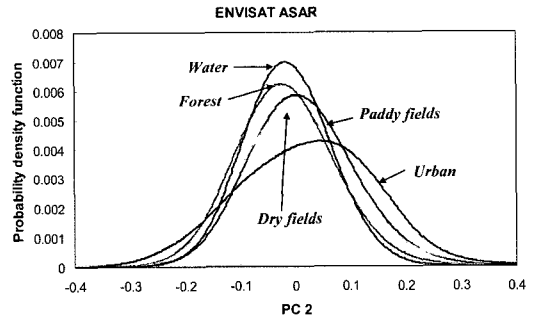
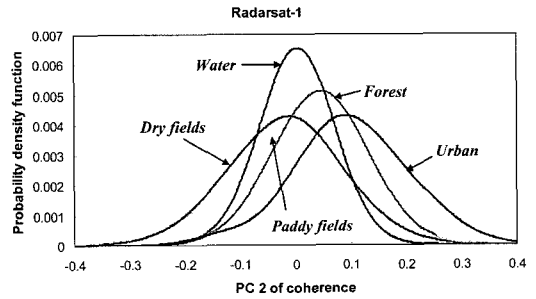
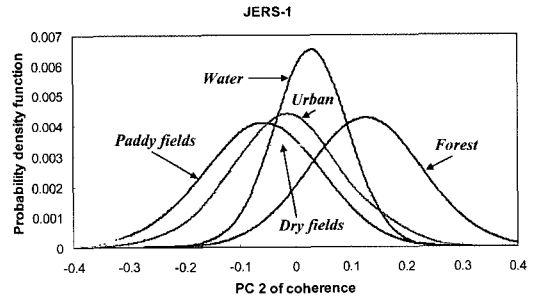


Fig. 6. The second principal component values of multiple coherence images extracted from multitemporal JERS-1, Radarsat-1 and ENVISAT ASAR data sets, and their histogram distributions with respect to five land-cover classes.

다. 이러한 결과는 평균이나 값의 차이만을 나타내는 특징에 비해 자료 변환을 통해 얻어지는 특징으로부터 토지 피복에 대한 유의미한 정보 추출이 가능함을 의미한다. 그러나 ENVISAT ASAR의 경우에는 세 번째 주성분의 발 항목에 대한 유의미한 정보가 나타나지 않았기 때문에, 보다 많은 사례연구를 통해 주성분들과 토지 피복 항목간의 연관성 분석이 수행되어야 한다.

앞서 추출된 긴밀도에 대한 주성분 분석을 위하여 JERS-1 SAR 자료로부터 추출한 7개의 긴밀도와 Radarsat-1 긴밀도 6개, ENVISAT ASAR 긴밀도 6개에 대해서 각각 주성분 변환을 적용하였다(Fig. 6). 모든

경우 세 번째 주성분부터는 토지 피복과의 연관성이 적은 것으로 나타나 분석에서 제외하였다. 첫 번째 주성분은 모두 센서에 대하여 긴밀도의 평균값과 유사한 양상을 나타내었으며, 두 번째 주성분에서 L-밴드 JERS-1의 경우에 산림과 다른 토지 피복 항목과의 구분이 두드러지게 나타났다. 이는 파장이 길어 나무의 수관을 통과한 L-밴드가 움푹임이 적은 나무의 기둥(수간)으로부터의 산란이 많이 일어나 비교적 높은 긴밀도가 유지되고 있는 것으로 보인다. Radarsat-1의 경우에는 산림과 밭 항목의 차이가 어느 정도 나타나고 있으나, JERS-1의 경우보다 구분력은 떨어지며, 도심 지역과 중첩된 부분이 많이 나타났다. ENVISAT ASAR의 경우에는 도심 지역을 제외하고는 토지 피복간 중첩이 많이 나타나고 있다. 자연 피복물 중에서 후방 산란 계수나 시간적 변이도에서 혼재가 많이 되는 밭 항목과 산림 항목의 구분을 위해서는 비록 촬영 시기와 장소에 크게 의존적이기는 하지만 C-밴드보다는 L-밴드 긴밀도의 주성분 변환이 더 효율적인 것으로 판단된다.

3. 다중 모드 SAR 자료로부터의 특징 추출

이 장에서는 다중 편파와 다양한 입사각에 의한 다중 모드를 이용하여 단일 시기 및 비슷한 시기에 촬영된 SAR 자료로부터 편파비(polarization ratio)와 다중 채널 변이도(multi-channel variability)를 추출하고 이를 토지 피복 항목별로 비교하고자 한다. 이러한 특징들은 현재 ENVISAT ASAR의 이중 편파, 다중 입사각 자료나 Radarsat-1의 다중 입사각 자료에 적용이 가능하다. 현재 한반도를 촬영한 SAR 영상에서 모든 편파(full polarization) 자료가 시계열로 촬영된 경우가 없기 때문에 일반적인 SAR 편파 기법(polarimetry)에 대한 기술은 논외로 한다.

1) 편파비

편파 상태에 따른 토지 피복의 의존 정도를 특징으로 추출하기 위해 단일 시기 혹은 비슷한 시기에 얻어진 후방산란계수의 편파비를 살펴보았다. 현재 ENVISAT ASAR 자료의 이중 편파 모드에서는 HH/VV, VH/VV, HV/HH 등의 두 개의 편파 자료가 동시에 획득이 가능

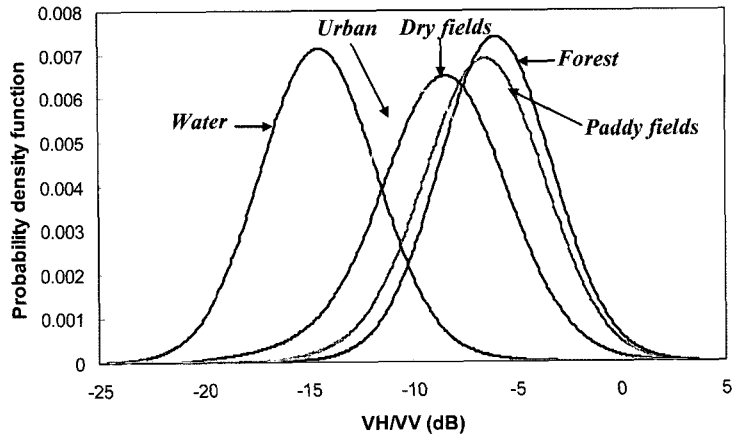
하다. 교차 편파비인 VH/VV는 이론적인 모델과 지표 실험에 따르면 자연 피복물에서 표면 거칠기가 증가하거나 식생의 피복 정도가 강해질수록 커지는 것으로 보고되고 있으며(Ulaby and Dobson, 1989), 일반적으로 수계에서는 작은 값을, 농경지에서는 중간정도의 값을 그리고 산림에서는 높은 값을 나타낸다(Wegmüller *et al.*, 2003).

이러한 특성을 예시하기 위해 당진 지역에서 2005년 6월 17일 이중 편파 모드로 촬영된 ENVISAT ASAR 자료의 VH/VV를 사용하여 토지 피복 항목과의 상관성을 살펴본 결과(Fig. 7(a)) 수계에서 가장 낮은 값의 분포를 보이고 있으며, 논 항목과 중첩이 있으나 산림에서 가장 큰 값을 보이고 있다. 논 항목은 촬영 시기상 벼의 성장으로 높은 값을 보이고 있다. 위의 다른 특징들에서 혼재가 두드러졌던 밭과 산림의 경우, 산림 항목의 하위 25%와 밭 항목의 상위 75% 이상을 제외하고는 명확하게 구분이 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 기존의 단일 모드 자료에서 혼재가 두드러졌던 이 두 항목의 구분을 위해서는 교차 편파비를 이용하는 것이 효율적임을 확인할 수 있다.

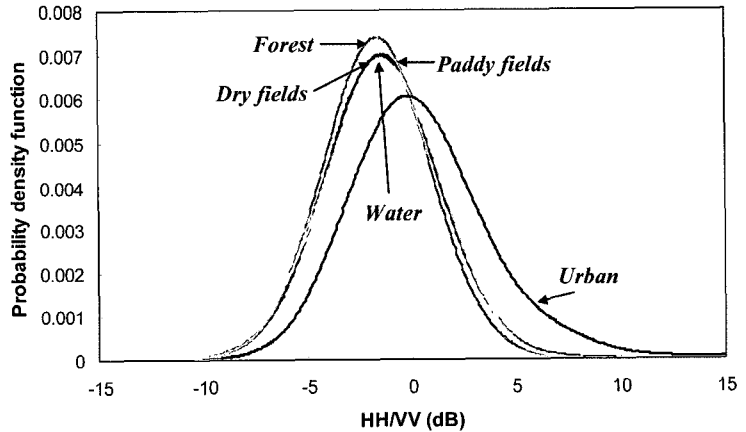
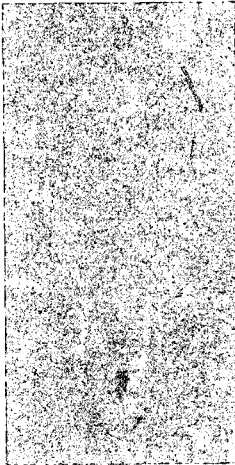
또한, HH/VV 편파비의 특징을 살펴보기 위해 당진 지역에서 2005년 5월 29일 이중 편파 모드로 촬영된 ENVISAT ASAR 자료를 분석에 이용하였다. 일반적으로 HH 편파의 후방산란은 표면의 거칠기와 식생의 피복이 커질수록 강해져 VV 편파의 값에 근접하여 HH/VV 편파비는 1에 근접한다(Wegmüller *et al.*, 2003). Fig. 7(b)를 살펴보면, 공간적 분포에서 VH/VV 편파비와 달리 특정 토지 피복 양상의 구분이 시각적으로 명확하지 않다. 또한 히스토그램 분석 결과, 도심 지역의 상대적으로 높은 양상을 제외하고는 나머지 토지 피복 항목에서는 혼재 양상이 두드러지게 나타나고 있다. 그러나 이 결과는 특정 시기에 촬영된 자료로부터의 얻었기 때문에 HH/VV가 VH/VV에 비해 토지 피복과 관련한 유의미한 정보를 제공하지 않는다는 것으로 일반화 할 수는 없다.

2) 다중 채널 변이도와 주성분 변환

2장에서 논의하였던 시간적 변이도는 다중 센서, 다중 편파 및 입사각으로 촬영된 다중 모드의 SAR 자료로의 확장이 가능하다. 이 논문에서는 Wiesmann *et*



(a)



(b)

Fig. 7. (a) VHV/V polarization ratio and histogram distributions with respect to five land-cover classes, (b) HH/VV polarization ratio and histogram distributions with respect to five land-cover classes.

al.(2003)에 의해 제안된 다중 채널 변이도를 기초로 하여, 현재 이용이 가능한 다중 센서, 편파, 입사각에 촬영된 SAR 자료를 대상으로 적용이 가능하도록 특정 토지 피복에 대한 상대적 유사도를 표시하기 위한 표준 변환의 적용을 제안하였다. 단일 편파 및 입사각 SAR 자료로부터 추출될 수 있는 시간적 변이도와 달리 다중 채널 변이도에는 후방 산란 계수의 시간적 변화와 더불어 토지 피복의 편파 및 입사각에 대한 의존성의 차이가 결합되어 나타나기 때문에 해석상의 복잡성이 따른다.

N 개의 채널로 이루어진 다중 센서, 편파, 입사각 및 시기에 촬영된 SAR 자료 S_i ($i = 1, \dots, N$)가 있을 때, 혼련 집단으로부터 개별 SAR 자료 S_i 에서의 특정 토지 피

복 ω_k 의 통계치로 평균(m_{ik})과 표준편차(σ_{ik})를 계산한다. ω_k 의 후방 산란 특성에 대한 상대적인 유사도를 얻기 위해 S_i 에 대해서 m_{ik} 와 σ_{ik} 를 이용하여 표준 변환된 후방산란계수 \bar{S}_i 를 계산한다.

$$\bar{S}_i = \frac{S_i - m_{ik}}{\sigma_{ik}} \quad (1)$$

만약 후방 산란 특성이 특정 토지 피복 항목 ω_k 와 유사한 토지 피복 항목들은 작은 값의 \bar{S}_i 를 가진다. 이렇게 구한 N 개의 \bar{S}_i 로부터 표준 편차를 구하면, 특정 토지 피복에 대한 상대적인 시기, 편파 및 입사각이 종합적으로 반영된 다중 채널 변이도를 얻게 된다.

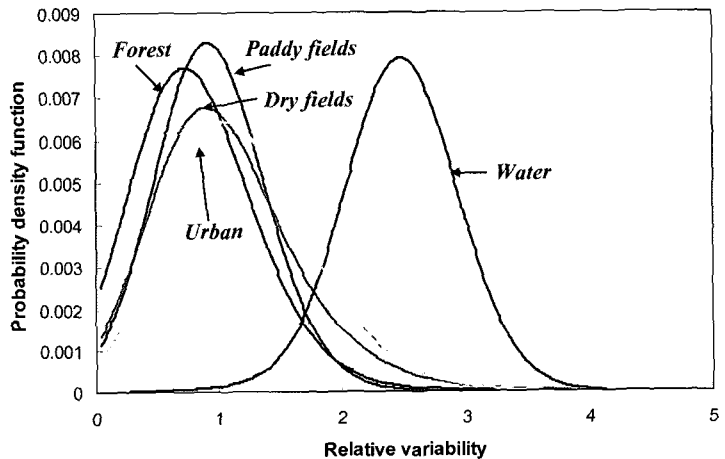
다중 채널 변이도의 예시를 위해 당진 지역에서 5월

Table 2. Multi-mode SAR data used for extracting dual-polarization ratio and multiple relative variability.

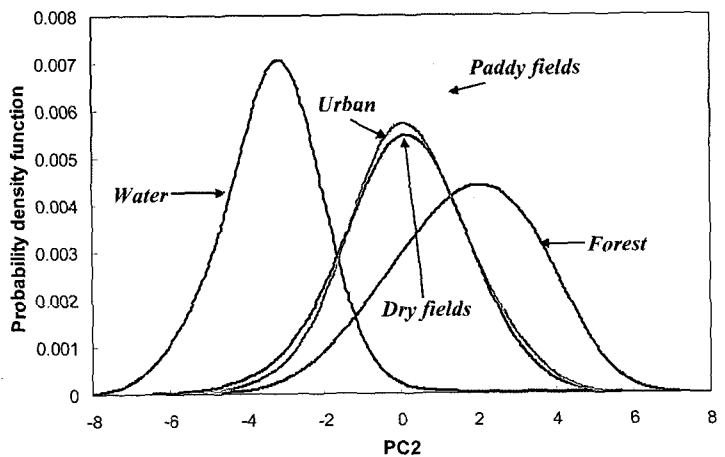
Sensor	Band/Incidence angle/ Mode/Polarization	Acquisition date (year/month/day)
ENVISAT	C/23°/IS2/HH&VV	2005/05/29
ASAR	C/19°/IS1/VH&VV	2005/06/17
Radarsat-1	C/40°/F2/HH	2005/06/12
	C/34°/S3/HH	2005/06/19

말부터 6월 중순까지 다중 편파, 다중 입사각으로 촬영된 Radarsat-1과 ENVISAT ASAR 자료의 총 여섯 개 채널을 이용하였다(Table 2). 또한 변환된 후방산란계수에 대해서 평균값과 주성분 변환을 별도로 수행하였다.

Fig. 8은 다중 채널 변이도 (a)와 표준 변환된 후방산란계수에 대한 두 번째 주성분(b)의 공간적 분포와 히스토그램이다. 다중 채널 변이도의 토지 피복별 양상을 살펴보면, 수계에서의 변화가 가장 두드러지고 있으며, 나머지 항목들은 산림에 비해 다소 큰 변화 양상을 보이고 있다. 수계의 경우, 작은 입사각으로 VV 편파 상태로 촬영된 ENVISAT ASAR 자료의 영향에 의해 변화가 크게 나타나고 있다. 비교적 안정적인 산란체로 구성된 도심지가 산림에 비해 상대적으로 큰 변이도 값을 보이는데, 이는 도심지 구조물의 복잡성으로 인하여 편파와 입사각에 의한 후방 산란의 차이가 크기 때문이다. 논과 밭 항목의 경우 벼의 생육의 진행과 밭 작물의 성장



(a)



(b)

Fig. 8. (a) multi-channel relative variability and histogram distributions with respect to five land-cover classes, (b) the second principal component computed from six relative backscattering coefficient images and histogram distributions with respect to five land-cover classes.

은 수확 이후의 나지 상태로의 전환 등이 변이도에 기여한 것으로 판단된다. 한편, 서로 다른 입사각에 따른 기하학적 왜곡으로 연구지역 우측 하단의 산림 지역에서 변이도의 분포 양상이 다소 높게 나타나고 있다. 반면, 표준 변환된 후방 산란 계수에 대한 두 번째 주성분에서는 다중 채널 변이도의 양상과 비교하였을 때 반대의 부호를 가지며, 산림 항목과의 차이가 상대적으로 커진 것을 확인할 수 있다. 즉 산림과 수계를 제외한 나머지 항목과의 차이가 좀 더 부각된 것이다. 주성분 적재량의 분석 결과, 두 번째 주성분에서는 ENVISAT ASAR 자료의 네 채널에 비해 Radarsat-1의 두 채널의 주성분 적재량이 상대적으로 크면서 반대 부호로 나타났다. 이러한 양상은 ENVISAT ASAR 자료와 Radarsat-1 자료 사이의 후방 산란 특성의 차이를 반영하고 있다고 할 수 있다. 또한 Radarsat-1 두 채널의 상대적으로 큰 적재량값은 두 번째 주성분에 많은 기여를 하고 있음을 나타내므로, 6월 12일과 19일 사이의 벼의 생육에 따른 논 변화가 반영되어 논 항목의 다중 채널 변이도에 비해 증가한 값을 보이고 있다.

토지 피복간의 구분력의 관점에서 주성분 변환이 다중 채널 변이도에 비해 본 연구 지역에서는 더 효율적인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 다중 채널 변이도의 일반적으로 낮은 구분력을 지시한다기 보다는, 시간적 변이도와 마찬가지로 평균이나 표준편차와 같은 하나의 통계값을 이용하기 보다는 여러 부가 정보를 제공할 수 있는 주성분 변환의 장점에 기인한 것이다.

4. 결론

SAR 자료를 이용한 토지 피복 구분에서 단일 시기에 촬영된 단일 파장 및 편파 SAR 자료의 낮은 구분력을 향상시키기 위해서는 다중 시기/편파/주파수 자료의 이용이 필수적이다. 이 논문에서는 토지 피복 구분을 위해 과거와 현재 이용 가능한 SAR 자료의 특성을 고려하여 추출 가능한 특징들에 대해서 논의하고 토지 피복과의 연관성을 실제 자료에의 적용을 통해 예시하였다.

다중 시기, 단일 모드로 얻어진 SAR 자료의 경우 Tandem 긴밀도의 토지 피복 항목간 구별력이 가장 두드러졌지만, 현재 가용한 자료가 많지 않아 실용화에 제

한적이다. 장기간 긴밀도에서는 도심지의 구분이 뚜렷하였으며, 시간적 변이도에서는 생장기 논이 구분이 가장 명확하게 나타났다. 주성분 변환과 같은 자료 변환 기반 특징들은 시계열 후방 산란 계수와 긴밀도의 평균과 변화 등의 정보를 포함하면서 보다 많은 정보의 이용이 가능하였다. 따라서 다중 시기 자료를 이용할 경우 주성분 변환이 기존 SAR 시그널 기반 변환에 비해 효율적인 것으로 나타났다. 주성분 적재량과 같은 개별 자료의 기여도에 대한 분석은 개별 주성분의 특성에 대한 해석에 매우 유효하였다.

다중 모드 SAR 자료 기반 특징으로서, 이중 편파자료로부터 추출 가능한 교차 편파비는 Tandem 긴밀도를 제외한 다중 시기 자료에서 혼재가 두드러진 산림과 밭 항목의 구분에 대한 유용한 정보를 제공하는 것으로 나타났다. 다중 센서/편파/입사각 자료의 이용이 가능할 경우, 다중 채널 변이도는 특정 토지 피복 항목에 대한 상대적인 변화를 반영할 수 있으며, 또한 표준 변환된 후방 산란 계수에 대한 주성분 변환으로부터 특정 토지 피복의 구분과 관련된 유효한 정보 추출이 가능하였다.

결론적으로 SAR 자료로부터 추출한 특징들은 고려하고 있는 모든 토지 피복 항목들에 대한 유효한 정보를 제공한다기 보다는 상호 보완적인 정보를 제공하였다. 일반적인 분류 과정이 자료 선택, 특징 추출과 선택, 분류 방법론 적용 등의 단계별로 수행되는 것을 고려할 때, 다양한 주파수/편파/입사각의 SAR 자료의 이용이 앞으로 계속 가능할 것으로 예상되기 때문에 이 논문에서 크게 두 가지로 구분하여 논의한 특징들을 상호 결합함으로써 보다 많은 정보 추출이 가능할 것으로 예상된다. 향후 Tandem 긴밀도와 같이 짧은 시간적 간격으로 촬영한 SAR 간섭쌍 자료 및 다양한 주파수, 편파, 입사각의 자료가 시계열적으로 얻어진다면, SAR를 이용한 토지 피복 항목 분류의 구별력이 크게 향상될 것으로 전망한다.

사사

이 연구는 위성자료 공공활용연구와 한국지질자원연구원 자체연구개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이훈열 교수의 참여는 다목적실용위성 5호 시

스텝종합개발사업의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- 박노옥, 이훈열, 지광훈, 2005. 다중 시기 SAR 자료를 이용한 토지 피복 구분을 위한 특징 추출과 융합, *대한원격탐사학회지*, 21(2): 145-162.
- 홍석영, 홍진영, 김이현, 오이석, 2007. 지상관측 레이더 산란계를 이용한 벼 군락의 후방산란계수 측정, *대한원격탐사학회지*, 23(2): 145-152.
- Bruzzone, L., M. Marconcini, U. Wegmüller, and A. Wiesmann, 2004. An advanced system for the automatic classification of multitemporal SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6): 1321-1334.
- Dammert, P. B. G., J. Askne, and S. K. hlmann, 1999. Unsupervised segmentation of multitemporal interferometric SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2259-2271.
- Engdahl, M. E. and J. M. Hyypä, 2003. Land-cover classification using multitemporal ERS-1/2 InSAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7): 1620-1628.
- Gens, R. and J. L. van Genderen, 1996. SAR interferometry - issues, techniques, applications, *International Journal of Remote Sensing*, 17: 1803-1835.
- Park, N.-W. and K.-H. Chi, 2007. Integration of multi-temporal/polarization C-band SAR data sets for land-cover classification, *International Journal of Remote Sensing*, accepted.
- Quegan, S., T. L. Toan, J. J. Yu, F. Ribbes, and N. Floury, 2000. Multitemporal ERS SAR analysis applied to forest mapping, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 741-753.
- Strozzi, T. and U. Wegmüller, 1998. Delimitation of urban areas with SAR interferometry, *Proc. of IGARSS 1998*, Seattle, WA, pp.1632-1634.
- Strozzi, T., P. B. G. Dammert, U. Wegmüller, J. M. Martinez, A. Beaudoin, J. Askne, and M. Hallikainen, 2000. Landuse mapping with ERS SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 766-775.
- Ulaby, F. T. and M. C. Dobson, 1989. *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*, Artech House. Norwood, MA.
- Wegmüller, U., T. Strozzi, A. Wiesmann, and C. Werner, 2003. ENVISAT ASAR for land cover information, *Proc. of IGARSS 2003*, Toulouse, France, DVD publication.
- Wiesmann, A., U. Wegmüller, C. Werner, and T. Strozzi, 2003. ASAR multi-swath techniques, *Proc. of IGARSS 2003*, Toulouse, France, DVD publication.