주 의
(편집순서 8)

↑
(15 포인트
고딕계열)
↑
6cm
↓

2007168 고해상도 SAR 영상을 이용한 주제도 제작기술 개발 한국항공우주연구원

2007168

다목적실용위성 5호 시스템종합 개발사업

고해상도 SAR 영상을 이용한 주제도 제작기술 개발

Development of Thematic Mapping Techniques Using High-resolution SAR Data

강원대학교

한국항공우주연구원

2007168

다목적실용위성 5호 시스템종합 개발사업

고해상도 SAR 영상을 이용한 주제도 제작기술 개발

Development of Thematic Mapping Techniques Using High-resolution SAR Data

강원대학교

한국항공우주연구원

제 출 문

한국항공우주연구원장 귀하

본 보고서를 “다목적실용위성 5호 시스템종합개발사업”과제 (세부과제 “고해상도 SAR 영상자료를 이용한 주제도 제작기술 개발”) 의 보고서로 제출합니다.

2008. 1.

위탁연구기관명 : 강원대학교

위탁연구책임자 : 이 훈 열

연 구 원 : 김 상 완

〃 : 한 향 선

〃 : 정 형 섭

〃 : 김 계 림

보고서 초록

과제관리번호	2007168	해당단계 연구기간	2007. 3. 1.- 2008. 1. 31.	단계 구분	1 / 2
연구과제명	주관과제명	다목적실용위성 5호 시스템종합 개발사업			
	위탁과제명	고해상도 SAR 영상자료를 이용한 주제도 제작기술 개발			
연구책임자	이 상 률	해당단계 참여연구원수	총 : 5 명 내부 : 1 명 외부 : 4 명	해당단계 연구비	정부: 46,000 천원 기업: 천원 계: 46,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국항공우주연구원		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 : 강원대학교 지구물리학과		연구책임자 : 이 훈 열		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)	보고서 면수	75

○ KOMPSAT-5 COSI에 대하여 Radargrammetry에 적합한 궤도와 영상획득 조건 제시

○ SAR 자료를 이용한 지표 현황 주제도 작성과 관련하여, 다양한 시기/모드/편파/입사각을 가지는 SAR 자료로부터 추출한 특징과 대표적인 토지 피복 항목과의 연관성 분석

○ SAR 위상간섭기법을 이용하여 광산지역에서 발생하는 지반침하를 효과적으로 관측

○ SAR 영상자료의 활용분야 워크샵 개최 및 해외 위성 활용연구 협의

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	고해상도, SAR, 주제도, SAR 위상간섭기법, 고정산란체
	영 어	high-resolution, SAR, thematic map, SAR interferometry, permanent scatterer

요 약 문

Ⅰ. 제 목

고해상도 SAR 영상자료를 이용한 주제도 제작기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 개발 중에 있는 다목적실용위성 5호에는 기상상태의 제약 없이 고해상도의 영상을 획득할 수 있는 SAR 시스템이 탑재될 예정이다. SAR 영상은 국가의 재난 및 재해 관측과 지형 관측, 주제도 제작 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 본 연구에서는 다목적실용위성 5호의 SAR 영상이 활용될 수 있는 기술개발에 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

다목적실용위성 5호의 궤도와 한반도의 지형 조건에 맞는 radargrammetry 기법 개발과 다양한 SAR 영상을 활용한 주제도 제작 및 위상간섭기법을 이용한 재난/재해 탐지기술을 개발을 위한 모델을 정립하고, SAR 활용연구간 연계 방안을 연구한다.

Ⅳ. 연구개발결과

위성의 궤도와 한반도의 지형에 맞는 radargrammetry 방안을 제시하였고, 지표 현황 주제도를 작성하기 위한 SAR 영상자료의 지표 특징을 추출 및 분석하였다. 재난/재해 탐지를 위해 다중 시기 SAR 영상의 위상정보로부터 지표의 변화 정보를 추출할 수 있는 기술을 개발하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

다목적실용위성 5호의 궤도와 한반도 특성에 맞는 radargrammetry 기법, 지표의 주제도 제작 기술, 그리고 재난/재해 탐지기술의 개발 가능성 및 타당성을 검토함으로써 향후 다목적실용위성 5호 SAR 영상의 활용 가능성을 높인다.

SUMMARY

Ⅰ. Title

Development of Thematic Mapping Techniques Using High-resolution SAR Data

Ⅱ. Research Purpose and Necessity

The major payload of KOMPSAT-5 under development is the COSI, a SAR system capable of imaging the earth surface at high resolution regardless of weather condition. SAR images can be utilized in various application filed such as disaster monitoring, land-use observation and thematic mapping. The purpose of this research is to develop various thematic mapping techniques that utilize KOMPSAT-5 SAR images.

Ⅲ. Contents and Scope of Research

The research scope and contents includes 1) the development of radargrammetric techniques suitable for KOMPSAT-5 and topographic characteristics of Korean peninsula, 2) the development of thematic mapping techniques using various SAR images, 3) the development of disaster monitoring technique by using SAR interferometry, and 4) the promotion of research activities among various inter-discipline SAR applications fields.

Ⅳ. Results of Research

This research proposed the radargrammetric configurations suitable to KOMPSAT-5 orbits and topographic condition of Korean peninsula and analyzed the extraction of features from SAR images for thematic mapping. The results also includes the develpment of techniques for surface change detection by using SAR interferometry, which can be used for disaster monitoring.

Ⅴ. Plans for Utilization of Results

The results from this research can be used to increase the practical application of KOMPSAT-5 SAR images in various research fields such as radargrammetry, thematic mapping and disaster monitoring.

CONTENTS

Chapter 1. Abstract ····· 10
Section 1. Purpose of research ····· 10
Section 2. Necessity of research ····· 11
Section 3. Scope of Research ····· 12

Chapter 2. Status of Technology Development ····· 14
Section 1. Status of SAR System Development ····· 14
Seciton 2. Status of SAR Application Development ····· 14

Chapter 3. Contents and Results ····· 17
Seciton 1. Radargrammetry ····· 17
1.1 Introduction ····· 17
1.2 KOMPSAT-5 System ····· 17
a. Orbit and Imaging Modes ····· 17
b. Incidence Angles ····· 19
1.3 Height Sensitivity of Radargrammetry ····· 23
1.4 Results ····· 26
Section 2. Landuse Thematic Map ····· 27
2.1 Introduction ····· 27
2.2 Feature Extraction from Multi-temporal SAR Data ····· 30
가. Coherence ····· 30
나. Temporal Variability ····· 34
다. Coherence and Temporal Variability ····· 39
라. Principle Component Transformation ····· 41
2.3 Feature Extraction from Multi-mode SAR Data ····· 46
a. Polarization Ratio ····· 46

b. Multi-channel Variability and PCT ····· 47
2.4 Results ····· 51
Section 3. Development of Disaster Monitoring by SAR Interferometry ····· 53
3.1 Introduction ····· 53
3.2 Study Method ····· 53
3.2 Change Detection from Multi-temporal SAR data ····· 57
3.3 Results ····· 62

Chapter 4. Achievement and Contribution of Research ····· 64
Section 1. Achievement of Research ····· 64
Section 2. Evaluation of Research Object and Achievement ····· 64
Section 3. Contribution of Research ····· 65

Chapter 5. Plans for Utilization of Results ····· 67

Chapter 6. Overseas Research Information ····· 68

Chapter 7. References ····· 73

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 10
제 1 절 연구개발의 목적 ····· 10
제 2 절 연구개발의 필요성 ····· 11
제 3 절 연구개발의 범위 ····· 12

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 14
제 1 절 SAR 시스템의 개발현황 ····· 14
제 2 절 국내외 SAR 활용기술 개발현황 ····· 14

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 17
제 1 절 Radargrammetry 기술 개발 I ····· 17
1.1 연구 수행 개요 ····· 17
1.2 KOMPSAT-5 소개 ····· 17
가. 궤도와 영상모드 ····· 17
나. 입사각 ····· 19
1.3 고도 민감도 ····· 23
1.4 연구 결과 ····· 26
제 2 절 지표 현황 주제도 제작 I ····· 27
2.1 연구 수행 개요 ····· 27
2.2 다중 시기 SAR 자료에서의 특징 추출 ····· 30
가. 긴밀도 ····· 30
나. 시간적 변이도 ····· 34
다. 긴밀도와 시간적 변이도의 연관성 ····· 39
라. 주성분 변환 ····· 41
2.3 다중 모드 SAR 자료로부터의 특징 추출 ····· 46
가. 편파비 ····· 46

나. 다중 채널 변이도와 주성분 변환 ····· 47
2.4 연구 결과 ····· 51
제 3 절 위상간섭기법을 이용한 재난/재해 탐지기술 개발 ····· 53
3.1 연구 수행 개요 ····· 53
3.2 연구 방법 ····· 53
3.3 다중 시기 SAR 자료를 이용한 변화 정보 추출 ····· 57
3.4 연구 결과 ····· 62

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 64
제 1 절 연구개발목표의 달성도 ····· 64
제 2 절 평가 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가 ····· 64
제 3 절 관련분야의 기술 발전에의 기여도 ····· 65

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 67

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 68

제 7 장 참고문헌 ····· 73

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 구름이나 강우 등과 같은 기상 상태와 태양의 고도에 제약을 받지 않고 고해상도의 영상을 획득할 수 있는 전천후 영상레이더로서, 1951년 SAR의 원리가 정립된 이후 다양한 분야에 적용되면서 발전을 거듭하고 있다(Curlander and McDonough, 1991). 현재 SAR는 인공위성과 항공기, 자동차 등의 탑재체에 탑재되어 운용되고 있으며, 육지, 해양, 극지, 대기 등 다양한 분야에서 고부가가치의 영상자료를 제공하고 있다.

최초의 인공위성 SAR 시스템은 1978년 발사된 Seasat-A에 탑재되어 운용되었으며, 이후 유럽의 ERS-1(1991-2000)과 일본의 JERS-1(1992-1998)이 대표적인 SAR 시스템으로 활용되었다. 현재 유럽의 ERS-2(1995-현재), ENVISAT(2002-현재), TerraSAR-X(2007-현재), 캐나다의 Radarsat-1(1995-현재), 일본의 ALOS(2006-현재) 등에 탑재되어 본격적으로 지구를 관측하고 있으며 고품질의 영상자료를 제공해주고 있다(이훈열, 2006). 우리나라에서도 인공위성 SAR 시스템을 개발하고 있으며, 이는 앞으로 발사될 다목적실용위성 5호(KOrea Multi-Purpose SATellite-5, KOMPSAT-5)에 탑재될 예정이다. 국제적인 수준의 SAR 시스템 개발에 맞추어 나가기 위해 다목적실용위성 5호 SAR 시스템을 통한 영상자료의 활용기술 개발 연구는 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

본 연구에서는 SAR 시스템을 탑재할 다목적실용위성 5호의 개발과 관련하여 위성의 궤도와 한반도의 지형 특성을 고려한 radargrammetry 기법을 개발 및 검증하고자 한다. 그리고 다중 시기에 획득된 다양한 SAR 영상 자료를 이용한 지표 현황 주제도 작성과 관련하여 토지 피복의 구분력을 향상시킬 수 있는 특징들을 추출하는 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 가용할 수 있는 SAR 자료의 현황에 맞춰 다중 시기, 단일 모드의 SAR 자료로부터 추출한 특징과 비슷한 시기에 다양한 편파 및 입사각을 이용한 다중 모드 SAR 자료로부터 추출한 특징으로 구분하여 대표적인 토지 피복 항목과의 연관성을 분석한다. 또한 다목적실용위성 5호의 SAR 영상을 이용한 재난/재해 관측기술 개발함으로써 효과적인 국가 방재 시스템 수립에 기여하고자 한다. 다중 시기 SAR 자료나 SAR 간섭기술의 부산물인 긴밀도 등을 이용한 토지피복도와 같은 주제도 작성 연구는 국내에

서 많이 활성화되어 있지 않은 상황이다. 이에 따라 SAR 위상간섭기법을 이용한 다양한 재난/재해 관측 기술 개발이 필요하며 또한 고정산란체를 이용한 SAR 위상간섭기법을 이용한 정밀 지형변화 매핑 기술 개발이 필요하다. 신속하고 효과적인 재해 관측기술 개발로 재해가 발생하였을 경우 피해 규모를 최소화할 수 있는 방재체제와 시스템을 개발하는데 기여하여 사회 시설의 재해 위험성을 감소하는데 기여할 수 있으며, 재해발생 혹은 예상되는 지역에 대한 정밀 지형변화 관측을 통해 자연재해를 사전에 예방함으로써 국민복지 향상에 큰 도움을 주고자 한다.

제 2 절 연구개발의 필요성

현재 우리나라에서 발생하는 자연재해는 대부분 여름철 집중호우 및 태풍 내습에 의해 발생하고 있는데, 이로 인해 하천의 범람, 산사태 발생으로 많은 인명, 재산 피해를 입고 있으며 복구에 많은 시간과 인력을 투입하고 있다. 그러나 SAR 시스템을 이용할 경우 기상상태 및 태양고도에 관계없이 고품질의 자료획득이 가능하기 때문에 SAR 자료를 재해 분석에 이용할 경우 피해지역 산출 등에 효율적이며 장기적인 재해발생의 원인 규명 및 방재를 위한 기초의사결정 보조 자료를 제공할 수 있다. 또한 이로부터 단/장기적인 재해 피해 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 국가방재 시스템 수립에 크게 기여할 것으로 전망된다.

SAR 영상자료는 전천후의 특성을 가지고 있기 때문에 지형 매핑에 매우 효과적이며, 다양한 분야에 적용 가능하여 국내·외 위성 영상자료의 활용성을 증대시킬 수 있다. 위성영상의 활용성 증대는 위성영상의 국내외 수요에 절대적으로 기여할 수 있다. 또한 다목적실용위성 5호의 SAR 영상을 이용하여 지형도를 제작하면 위성의 실용화를 실현할 수 있으며 대국민 홍보 효과가 매우 클 것으로 예상된다. Radargrammetry 기법은 심한 기하왜곡을 수반하므로 photogrammetry 기법에 비해 산악지형이 많은 우리나라와 같은 경우 부적합한 면이 존재하기도 하며, InSAR DEM보다 해상도가 취약한 단점이 있지만 광학영상은 지형영상 획득률이 저조하고 repeat-pass InSAR DEM은 temporal decorrelation 문제로 더욱 실용적이지 못하다. 우리나라의 다목적실용위성 5호는 radargrammetry가 가능한 과학기술용 1m급 SAR 영상을 제공함으로써 위성 발사 후 전 세계적 유일성이 수년간은 지속될 수 있다. 이에 따라 다목적실용위성 5호의 궤도 및 한반도 지형특성, 그리고 고해상도 SAR 영상 특성에 맞는 radargrammetry 기법의 개발이 필요하다.

또한 기존 광학위성자료에 비해 기상상태의 제약을 덜 받고 위상정보를 이용할 수 있는 SAR 자료는 활용분야가 다양하지만, 복잡한 자료처리 과정을 필요로 하기 때문에 이를 위한 전처리 및 후처리 기술 기반이 갖추어져야 함은 물론이다. 다중 시기 SAR 자료나 SAR 간섭기술의 부산물인 긴밀도 등을 이용한 토지피복도와 같은 주제도 작성 연구는 국내에서 많이 활성화되어 있지 않은 상황이다. SAR 위상간섭기법을 이용한 다양한 재난/재해 관측 기술 개발이 필요하며 또한 고정 산란체를 이용한 SAR 위상간섭기법을 이용한 정밀 지형변화 매핑 기술 개발이 필요하다. 특히, 재해 분야와 관련된 SAR 자료의 활용은 다양한 분야에서 일반이나 관련 공공기관, 지자체에 새로운 정보 또는 정보원으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

제 3 절 연구개발의 범위

본 연구에서는 다목적실용위성 5호의 예상 궤도 및 영상 모드에 따라 radargrammetry 기법 및 조건을 계산하여 최적의 궤도 및 영상모드 도출하고자 한다. 이를 위해 다목적실용위성 5호의 예상 궤도를 도시하고 궤도와 지상점 사이의 입사각을 계산한다. 그리고 지상점에서 radargrammetry 기법의 고도민감도(height sensitivity) 및 수평해상도(horizontal resolution)를 계산한다. 이를 통하여 다목적실용위성 5호의 SAR 영상을 활용한 radargrammetry의 최적 영상 획득 조건을 제시한다.

향후 SAR 영상 자료를 이용한 토지 지표 현황을 나타내는 주제도를 작성하기 위하여 후방산란계수 이외의 지표 특징들과 토지 피복 항목들 사이의 연관성을 분석하여야 한다. SAR 자료로부터 추출 가능한 특징들은 먼저 다중 시기에 단일 모드의 SAR 자료로부터 추출될 수 있고 두 번째로 비슷한 시기에 다양한 편파 및 입사각을 이용한 다중 모드 SAR 자료로부터 추출할 수 있다. 본 연구에서는 사례연구를 위하여 일반적 토지 피복 항목이 포함되어 있는 충청남도 당진 지역을 사례연구지역으로 선정하였다. 당진 지역의 ERS-1/2, JERS-1, Radarsat-1, ENVISAT ASAR 자료를 구축하고 광학 위성자료, 현지 조사자료, 환경부 토지피복도로부터 추출한 지표 참조집단을 SAR 자료로부터 추출한 특징들로부터 가우시안 커널 기반의 확률밀도 함수를 계산하여 연관성을 분석한다.

SAR 영상의 위상간섭기법을 이용하면 광산지역에서 발생되는 지반침하 관측의 타당성을 연구할 수 있다. 이를 위해 강원도 탄광지대에서 예상되는 지표변위를 관측하고자 하였으며, 관측을 위해 지속적인 지표변위 관측에 적합한 2-pass 차분간섭기법을 사용하였다. 1992-1998년 동안 획득된

23개의 JERS-1 SAR 자료와 90 m 해상도의 SRTM-3 DEM을 이용하였으며, SAR 자료의 위상간섭기법 처리를 위해 차분간섭도를 생성하였다. 그리고 지질도와 갱도분포도를 이용하여 SAR 차분간섭도로부터 관측된 지표의 변위를 해석하였다.

본 연구에는 SAR 영상의 활용 연계도 포함되어 있다. 이를 위해 워크숍과 연구 협의를 통해 인공위성 SAR 영상자료 및 기술의 연계 활용방안을 연구한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 SAR 시스템의 개발현황

1957년에 군사적 목적을 위하여 최초의 SAR 시스템이 실험되었으며 1960년대 초부터는 전파망원경을 이용한 행성 표면의 관찰이 시작되었다. 인공위성 SAR 시스템은 1978년 발사되어 100여 일 동안 작동한 SEASAT-A를 시작으로 1990년대에 발사된 유럽의 ERS-1과 ERS-2, 일본의 JERS-1, 캐나다의 Radarsat-1을 통해 본격적인 인공위성 SAR 시스템이 도입되었다. 이들 센서의 특징은 단일 파장, 단일 편광, 단일 모드로 설명할 수 있으며, 캐나다의 Radarsat-1은 제한적이나마 다양한 모드의 영상을 얻을 수 있었다. 1981, 1984, 1994, 2000년에 우주왕복선에 탑재된 SAR는 며칠 동안의 짧은 임무 수행 기간에 다편광, 다파장, 다중 안테나를 이용하여 고품질의 자료를 얻기도 했다.

지난 2002년 유럽의 Envisat을 시작으로 현재 발사 예정에 있는 캐나다의 Radarsat-2, 일본의 JERS-2의 PALSAR의 특징은 다편광, 다파장, 복합 모드로서 보다 발전된 SAR 시스템이라 할 수 있다. 이는 인공위성 SAR의 제 2세대라고 할 수 있다. 전 세계적으로 SAR 시스템의 경량화 노력이 결실을 맺게 될 가까운 미래에는 전천후 SAR 시스템이 GPS위성처럼 하나의 위성군을 이루어 실시간 지구환경감시가 가능해 질 전망이다.

향후 수년 안에 다양한 파장, 편광, 모드를 이용한 인공위성 SAR 시스템이 등장할 것이다. 광대한 SAR 자료를 이용한 과학적, 상업적, 군사적 혜택을 받을 것이며 이를 갖추지 못한 나라는 모든 분야의 정보 선점에 있어서 불리한 결과를 낳을 수 있다. 국제적으로도 기술 정립단계에 있는 인공위성 SAR의 개발 및 활용 연구에 우리나라가 참여하는데 적기라 할 수 있다. SAR는 향후 선진국들의 인공위성을 이용한 과학적, 군사적, 경제적 정보 선점의 대열에 참여하기 위하여 반드시 필요한 기술이다.

제 2 절 국내외 SAR 활용기술 개발 현황

고해상도 Radargrammetry 기술과 관련하여 현재 고해상도의 인공위성 SAR 영상이 부족하여 기술의 개발이 국내외적으로 모두 미비한 상태이다. 또한 위성자료 활용을 위한

자료처리 기술 개발은 국제적으로 광범위하게 이루어지고 있으나 특정지역에 대해 제한적으로 수행되고 있기 때문에 한반도에 대한 자연환경이나 지역적 특성이 외국과는 달라 외국 모델 및 활용기술을 직접적으로 적용하기에는 많은 문제점이 따른다.

현재까지 인공위성 SAR의 대부분을 차지하는 자료의 형태인 단일 주파수, 단일 편파를 이용하여 단일 시기에 촬영된 SAR 자료의 후방 산란계수만을 토지 피복 분류에 이용할 경우 다중분광 채널을 가지고 있는 광학영상을 이용한 결과에 비해 좋지 않은 결과를 나타낸다. 그러나 단일 주파수, 단일 편파로 시간에 따라 연속적으로 얻어진 다중 시기 SAR 영상을 이용하여 후방 산란계수의 시계열적 변화를 분석하고 이를 분류에 직접적으로 사용하는 기술이 개발되었다(박노욱 외, 2005, Dammert *et al.*, 1999, Engdahl and Hyypä, 2003, Strozzi *et al.*, 2000, Quegan *et al.*, 2000). 이러한 다중시기 SAR 영상을 이용할 경우 시간적인 변이도와 긴밀도를 등과 같은 다양한 특징 추출이 가능하여 분류의 정확성을 높일 수 있다(Bruzzone *et al.*, 2004). SAR를 이용한 토지 피복 분류를 위해 다파장, 다편광의 영상으로부터 가능한 한 많은 특징들을 추출하여야 한다. 앞으로는 다양한 인공위성 SAR 시스템을 사용하여 기존에 비해 향상된 SAR 영상의 토지 피복 분류 정확도를 획득할 수 있으리라 기대된다.

SAR 위상간섭기법을 이용한 재난/재해 탐지 기술(DInSAR)은 지난 이십여 년 동안 지진으로 인한 지진 변위 측정, 화산활동 감시, 빙하 관측, 지반 침하 관측, 홍수지역 관측, 범람원 지역에서 수면고도 변화와 관련된 간섭 위상 관측 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 간섭기술이 개발되어 도심지역 및 광산지역 등에서의 침하현상 관측 및 지구조운동 변위관측 등의 다양한 분야에 폭 넓게 적용되고 있다. 또한 JERS-1 인공위성의 SAR 영상을 이용하여 금광에서의 채굴에 의한 지표변화 관측에 관한 연구(Almeida-Filho and Shimabukuro, 2000)와 캐나다의 Cold Lake 오일샌드 추출지역에서 CSS(Cyclic Steam Stimulation)기법의 수행에 따른 지표변위량 측정(Stancliffe and Kooji, 2001)과 같이 탄광지역뿐만 아니라 금속광산이나 오일샌드 지역에서의 지표변위를 관측한 연구도 수행되었다. Kim and Won(2003)은 일본의 JERS-1 SAR 영상을 이용하여 연약지반 개량 공사동안 매립지에서 발생한 지반침하량을 계산하였으며, 이를 현장에 설치된 지중침하계 자료와 비교하여 자연재해뿐만 아니라 지반공학적인 측면에서도 위성간섭이 매우 유용함을 밝힌 바 있다. 정한철 등(2004)은 L-밴드 JERS-1 SAR 영상을 이용한 PSInSAR 기술을 적용하여, 폐광산 지역에서 발생하는 매우

느린 침하를 관측하기도 하였으며, 김상완(2004)은 충적 연약지반인 부산시 지역에서의 침하를 관측하기도 하였다. 최근 많은 사람들의 관심 대상이 되고 있는 백두산의 화산활동 재계 여부를 감시하기 위한 연구가 수행되기도 하였다(김상완, 2004).

위상간섭기법을 이용한 지표변위 연구는 국외에서 매우 높은 비중을 가지고 집중적으로 연구되고 있는 반면, 국내에서는 제한된 몇몇 연구실에서만 수행되고 있으나, 현재 세계적인 선도 연구그룹 대비 약 80%-100% 의 기술력을 보유하고 있어, 국내외 기술격차는 크지 않다. 위상간섭 기법을 이용한 지형 변화 매핑 분야에서 세계적인 경향은 좀 더 정량적이고 미약한 지표변위를 관측하기 위한 연구가 진행 중인데, 이러한 연구에서 핵심사항은 레이더 간섭도에 나타나는 대기에 의한 효과를 제거하는 것으로, 다중 시기에 얻어진 자료를 활용한 연구가 활발히 진행 중이다. 기본적으로 파장이 짧은 위성일수록 좀 더 미세한 지표변위를 관측할 수 있지만, 간섭영상으로부터 대기에 의한 위상변화를 제거하는데 더욱 어렵게 되는데, 지금까지 국외에서 수행된 많은 연구들은 주로 유럽공동체의 ERS-1/2, ENVISAT C-밴드 위성자료, 캐나다의 RADARSAT-1 C-밴드 자료 및 JERS-1 L-밴드 자료를 이용한 연구로 X-밴드 위성 영상에서의 경험이 축적되어 있지 않은 실정이다. SAR 자료를 이용한 광산지역 침하 관측은 위상간섭기법 활용 분야에서도 매우 높은 기술력을 요구하는 부분으로, 특히 SBAS를 적용한 연구는 국내·외에서도 몇몇 연구실에 한정되어 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 기술은 세계 선진 연구그룹의 기술력과 대등한 것으로 판단된다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 Radargrammetry 기술 개발 I

1.1 연구 수행 개요

다목적실용위성 5호의 예상 궤도 및 영상의 획득 모드에 따라 radargrammetry 기법 및 각종 조건을 계산하여 최적의 궤도 및 영상 모드를 도출한다. 즉, 다목적실용위성 5호의 예상 궤도를 도시하고, 궤도와 지상점 사이의 입사각을 계산하며, 선정된 지상점에서의 radargrammetry height sensitivity 및 고도 resolution을 계산한다. 이로부터 다목적실용위성 5호의 SAR 영상을 이용한 radargrammetry의 최적 조건을 제시한다.

1.2 KOMPSAT-5 소개

다목적실용위성 5호(KOMPSAT-5)는 SAR 시스템을 탑재하여 2010년 5월에 발사를 목표로 하고 있는 국내 개발의 지구 관측 인공위성이다(KARI, 2007). 다목적실용위성 5호의 SAR 시스템은 기존의 다목적실용위성 1호, 2호, 그리고 현재 개발 중인 3호의 광학 센서와는 달리 기상상태 및 태양고도에 제약이 없이 다양한 모드의 영상을 제공하게 된다. 다목적실용위성 5호의 SAR 시스템은 X-band의 파장 대역을 사용하여 공간해상도 1 m의 고해상도 영상을 제공한다. 본 연구에서는 다목적실용위성 5호의 위성 궤도와 SAR 영상의 모드를 고려하여 국내 실정에 맞는 radargrammetry에 적용 가능한 최적화 모델을 제시하고 DEM을 구축하기 위한 이론적 접근을 시도한다.

가. 궤도와 영상모드

다목적실용위성 5호의 inclination은 97.6°이고, dawn-dusk 궤도를 가지며, mean local time of ascending node는 오전 6시이다. 위성의 재방문주기는 28일이며, 연속하는 궤도 거리는 2665 km, 인접한 pass의 거리는 적도에서 95 km이다. 인접한 pass의 거리는 고위도일수록 좁아져 극지방에서는 서로 교차되는 형태의 궤도가 형성된다(Table 1). 다목적실용위성 5호는 본래 2009년 6월에 발사될 예정이었기 때문에 그 시간에 맞춰 평균 궤도의 제원을 Table 1에서와 같이 나타내었으나, 발사 예정일이 2010년 5월로 늦춰졌기 때문에 제원이 달라질 수 있다.

Table 1. Orbit elements of KOMPSAT-5.

Epoch: 2009JUN01 00:00:00 UTC	Mean Orbit (J2000)	Osculating Orbit (J2000)
Semi-Major Axis (km)	6928.11434	6937.46791
Eccentricity	0.001068966	0.001201637
Inclination (deg)	97.597531	97.595674
R.A. of Ascending Node (deg)	339.734883	339.735375
Argument of Perigee (deg)	90.0	67.308762
Mean Anomaly (deg)	270.0	292.740966

다목적실용위성 5호의 SAR 영상은 spot mode, stripmap mode, scanSAR mode 등 다양한 모드에서 획득된다(Fig. 1). Spot 모드는 5 km 폭으로 1 m의 공간해상도를 가지는 영상을 궤도 당 적어도 22장 촬영하며, 영상은 3초마다 획득할 수 있다. Stripmap 모드는 30 km 폭, 공간해상도 3 m의 이미지를 획득하고, scanSAR 모드는 100 km 폭, 20 m 해상도의 이미지를 획득한다. Stripmap 모드와 scanSAR 모드는 2분 동안 하나의 궤도에 해당하는 이미지를 획득할 수 있다. 또한 다목적실용위성 5호는 빔의 look angle을 조정할 수 있다. Nominal mode의 입사각은 20-45°이며, extended mode는 45-55°로서, 총 20-55°의 입사각을 가진다. Nominal mode일 때 영상 획득이 가능한 지점은 nadir에서부터 185-490 km의 지상영역(ground coverage)를 가지며, 영상 영역(image coverage)은 305 km에 해당한다. Extended mode일 때는 nadir에서부터 490-675 km의 지상영역을 가지며, 이 때 영상 영역은 185 km이다.

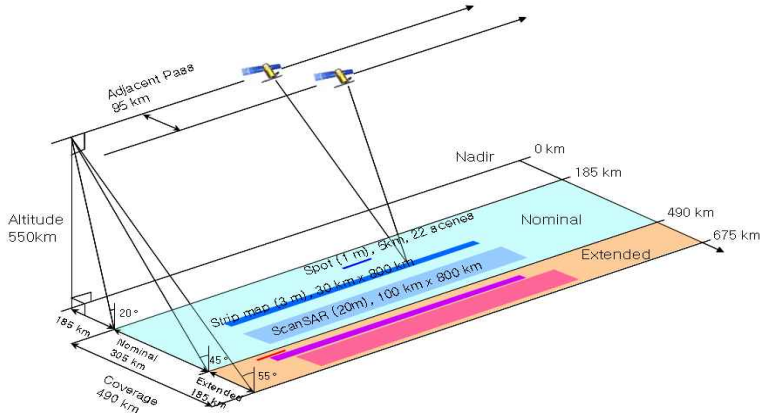


Figure 1. KOMPSAT-5 COSI imaging modes.

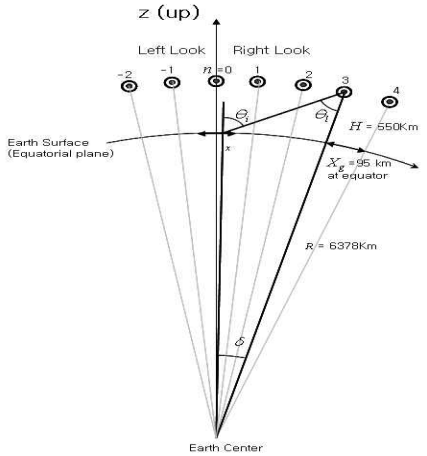


Figure 2. Geometry of a satellite, a target, and the earth.

나. 입사각

다목적실용위성 5호의 궤도를 radargrammetry 기법의 적용을 위해 분석하였다. 하나의 궤도에서 최대 490 km까지의 지상영역을 촬영할 수 있기 때문에, 단일 지상점에 대하여 다양한 incidence angle 조건으로 촬영이 가능하다. 이는 radargrammetry 기법을 적용하기 위하여 필수적인 촬영조건으로 요구되는 항목이다. 지구 중심을 기준으로 z축이 있을 때 z축에 가장 가까운 nadir(n=0)를 시작으로 pass number가 증가한다. n=0에 가장 가까운 x 점에서, incidence angle은 [-47.5 km, 47.5 km]의 지상 범위를 주기적으로 갖게 되며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 계산된다. 이는 적도상에 있는 지점에서 95km의 pass간 거리를 가정하였을 때이며, 위도에 따라 다른 값을 가진다.

$$
\begin{aligned}
R_g &= nX_g - x \\
\delta &= (nX_g - x)/R \\
R_s &= \sqrt{R^2 + (R+H)^2 - 2R(R+H)\cos\delta} \\
\theta_l &= \sin^{-1}(R\sin\delta / R_s) \\
\theta_i &= \delta + \theta_l
\end{aligned}
\tag{1}
$$

R: Earth radius

H: Altitude of satellite

X_g: Ground distance of adjacent pass

n: Pass number from nadir

x: Image location from nadir to east

$|x| < X_g/2$

Θ_i: Incidence angle

Nominal: $20° < \Theta_i < 45°$

Extended: $45° < \Theta_i < 55°$

Θ_l : Look angle

R_g: Ground range

Nominal: 185 km $< R_g <$ 490 km

Extended: 590 km $< R_g <$ 675 km

R_s: Ground range

Fig. 3은 [-47.5 km, 47.5 km]의 범위를 가지는 pass를 radar beam의 입사각에 따라 나타낸 것으로 입사각이 20-45일 때 pass number 2, 3, 4, 5는 각각 nominal mode에 속하며, incidence angle이 45-55일 때 pass number 6, 7은 extended mode에 속하게 된다.

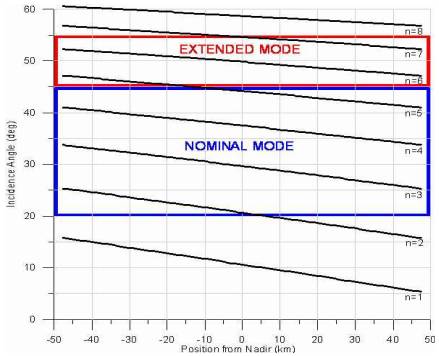
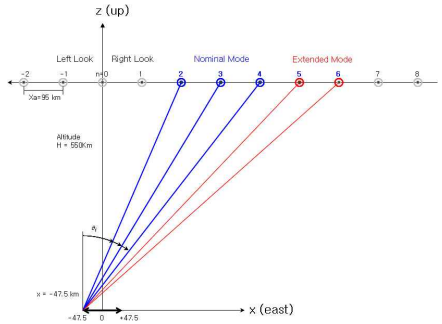
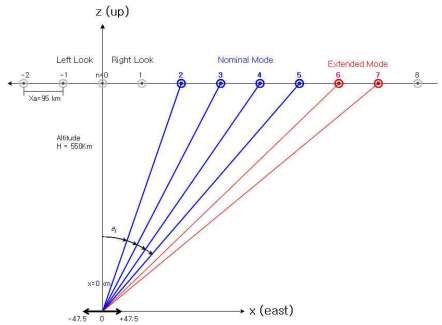


Figure 3. Incidence angles as a function of the distance x from the nearest nadir. n is the pass number counted from the nearest nadir pass of a ground point.

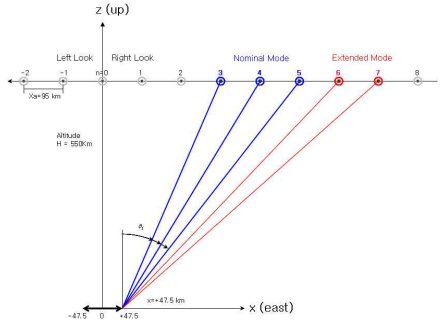
Fig. 3과 4에 의하면 nadir에서부터의 지상 거리가 달라짐에 따라, nominal mode와 extended mode의 pass number가 달라진다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 x = -47.5 km일 때 pass number 2, 3, 4는 nominal mode에서 이용되고, pass number 5, 6은 extended mode에서 이용될 수 있다. Fig. 4(b)에서와 같이 x = 0 km일 때는 pass number 2, 3, 4, 5가 nominal mode, pass number 6, 7이 extended mode이며, Fig. 4(c)에서와 같이 x = 47.5 km일 때는 pass number 3, 4, 5가 nominal mode, pass number 6, 7이 extended mode에서 이용될 수 있다. 이는 지상 범위가 달라지면 입사각의 범위도 달라지기 때문에 pass number가 작용하는 mode도 달라지는 것이다. 한편, extended mode는 pulse repetition frequency의 감소에 따른 azimuth 해상도의 감소, 그리고 과도한 입사각으로 인한 지형 왜곡이나 그림자 현상이 발생할 수 있다. 따라서 extended mode에서 SAR 영상의 획득은 응급 상황 시에만 사용되고, 일반적으로 SAR 영상을 획득하는데 nominal mode가 사용된다. Nominal mode만 고려했을 때, pass number 3, 4는 전체 지상 범위를 커버하는 반면, pass number 2는 x=-47.5 km부터 5 km까지 커버하고, pass number 5는 -10 km부터 47.5 km까지를 커버한다.



(a) x= -47.5 km



(b) x= 0 km

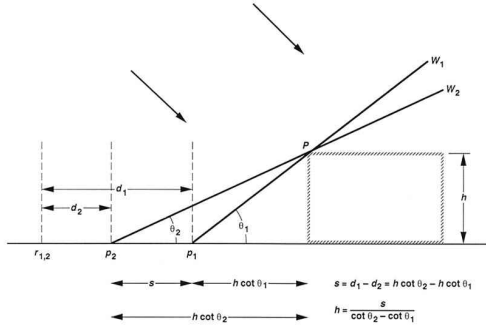


(c) x= 47.5 km

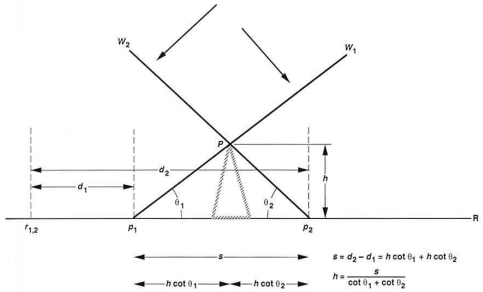
Figure 4. Radargrammetric geometry.

1.3 고도 민감도

Radargrammetry 기법은 쌍을 이루는 두 영상의 위치에 따라, 그 위치가 서로 같은 same-side (Fig. 5a) 혹은 서로 다른 opposite-side(Fig. 5b)에 의해 획득할 수 있다. Opposite-Side Radargrammetry (OSR)는 Same-Side Radargrammetry (SSR)보다 더 높은 height sensitivity를 가지나, 심한 지형 왜곡과 단지 평탄한 지역에서만 사용할 수 있기 때문에 비실용적이다(Toutin, 1996). Height sensitivity와 height resolution은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) Same-Side Radargrammetry(SSR)



(b) Opposite-Side Radargrammetry(OSR)

Figure 5. Geometries of radargrammetry of (a) same-side and (b) opposite-side (Ford *et al.*, 1993).

Parallax :

$$s = h\cot\theta_2 - h\cot\theta_1$$

Height :

$$h = \frac{s}{\cot\theta_2 - \cot\theta_1}$$

Height sensitivity of parallax :

$$\frac{\partial s}{\partial h} = \cot\theta_2 - \cot\theta_1 = \frac{2\sin\triangle}{\cos\triangle - \cos 2\triangle} \qquad (2)$$

$$where \quad \theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad \triangle = \theta_2 - \theta_1$$

Nominal : $0 < \triangle < 25^\circ$

$$20^\circ + \frac{\triangle}{2} < \theta < 45^\circ - \frac{\triangle}{2}$$

Extended : $0 < \triangle < 35^\circ$

$$20^\circ + \frac{\triangle}{2} < \theta < 55^\circ - \frac{\triangle}{2}$$

Height resolution :

$$\triangle h = \frac{\partial h}{\partial s}\triangle s$$

Fig. 6은 평균 입사각의 함수에서 parallax의 height sensitivity와 height resolution을 나타낸다. Sensitivity는 입사각이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고, 입사각의 차이에 비례하는 경향을 보인다. 따라서 입사각과 입사각의 큰 차이는 DEM의 정확도를 높이는데 우선시 된다. 그러나 실제적으로는 foreshortening, layover, shadow와 같은 지형 왜곡에 의한 한계가 존재하고 correlation 과정 동안 이미지 해상도의 한계도 존재한다. 그러므로 일반적으로 산악지형에서 height sensitivity의 범위는 0.1-1까지만 적용된다.

Fig. 7은 가장 가까운 nadir에서부터 지상 범위 x의 함수에서 parallax의 height sensitivity와 height resolution을 나타낸 그래프이다. Radargrammetric pair 3-2와 5-3은 하루 혹은 이틀 동안 0.6-0.9까지의 height sensitivity 범위를 가지며, 이 두 pair를 이용하면 전체 지상 범위를 커버할 수 있다. 이 radargrammetric pair는 지상을 완벽히 커버하는 데에 목적을 가진 장기간의 mission을 수행하는데 권유된다. 하지만 영상 획득의 시간이 가장 중요시 되는 응급 상황에서는 Fig. 7에서 제시되는 다양한 radargrammetric pair를 선택할 수 있다.

지금까지 계산된 값들은 모두 적도에서만 일치한다. 제시되는 파라미터와 조건들에서 계산되는 값들은 다른 위도에서는 상당히 변화하게 된다. 따라서 위도에 따라 인접한 pass의 거리와 조합 가능한 궤도, 그리고 height sensitivity도 다르게 계산된다.

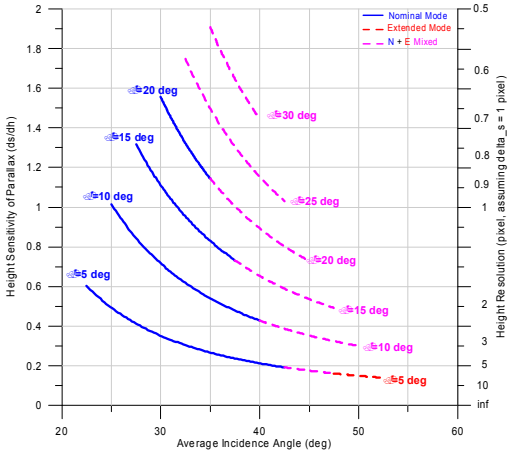


Figure 6. Height sensitivity of parallax as a function of average incidence angle (at equator).

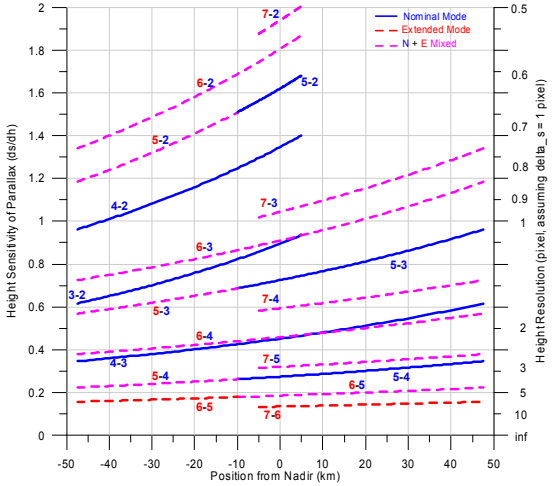


Figure 7. Height sensitivity of parallax as a function of position from nadir (at equator).

1.4 연구 결과

다목적실용위성 5호의 궤도 특징과 SAR 영상의 모드를 radargrammetry 기법의 적용 관점에서 분석하였다. 궤도의 pass는 지상점의 가장 가까운 nadir로부터 그 수가 증가하며, pass number 3-2와 5-3을 갖는 radargrammetry pair로부터 제공된다. 또한 radargrammetry를 통해 지상을 완벽히 커버하는 목적에 의해 미래의 mission에 사용할 수 있다. 이 radargrammetry 기법을 적용한 지형은 0.6부터 0.9까지 parallax의 height sensitivity와 1-2 pixel에 상응하는 height resolution으로부터 DEM를 산출할 수 있다. Nominal과 extended mode로부터 radargrmmetric image pair의 폭 넓은 선택이 이론상으로 DEM의 질을 통해 주어진 조사로부터는 height sensitivity와 image correlation 과정에 보다 덜 유리할지 모른다. 게다가 ascending/descending과 left/right-looking 이미지 모드의 조합은 radargrammetry 기술 개발을 위해 좀 더 나은 기회를 제공할지도 모른다. 이 paper에서 모든 계산은 적도에서 가능하고 parameter가 위도에 매우 의존하는 것은 나쁘지 않다. Radargrammetry 기법을 이용한 지형의 분석을 극지방을 포함한 전 지구적인 범위로 확대되어 계속적으로 연구될 필요성이 있다.

제 2 절 지표 현황 주제도 작성 I

2.1 연구 수행 개요

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 따라 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(박노욱 외, 2005, Dammert *et al.*, 1999, Engdahl and Hyypä, 2003, Quegan *et al.*, 2000, Strozzi *et al.*, 2000). 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 연구에서는 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 연구에서는 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 연구의 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.

Table 2. 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	

2.2 다중 시기 SAR 자료에서의 특징 추출

단일 편파, 단일 입사각, 및 단일 주파수를 가지는 단일 모드의 SAR 자료인 경우에 두 개 이상의 다중 시기 자료를 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 2는 단일 모드/다중 시기 SAR 자료로부터 추출할 수 있는 특성의 예시를 위해 사용된 충청남도 당진 지역의 SAR 자료의 목록을 나타내고 있다.

가. 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, 스페클 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 연구에서는 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 자료로부터 추출된 긴밀도의 공간적 분포와 이 지역의 대표적인 토지 피복간의 히스토그램 분석을 수행하였다(Fig. 8). Tandem 긴밀도의 경우(Fig. 8 (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. 8 (b))와 ENVISAT ASAR (Fig. 8 (c)) 자료의 경우에는 2005년에 걸쳐 촬영된 자료 중에서 적절한 수직 기선을 유지하는 각각 6개의 간섭쌍으로부터 긴밀도를 구한 다음에 평균하여 최종적인 긴밀도를 얻었다. 이 경우 도심지의 긴밀도만이 상대적으로 높은 값을 나타냈으며, 수계 영역을 비롯한 여러 항목이 중첩되면서 낮은 값을 보였다. 논의 경우에는 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 재배지역의 구분이 가능하나, 장기간 긴밀도로부터는 도심 지역의 추출만이 용이할 것으로 판단된다.

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. 8 (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 값의 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.

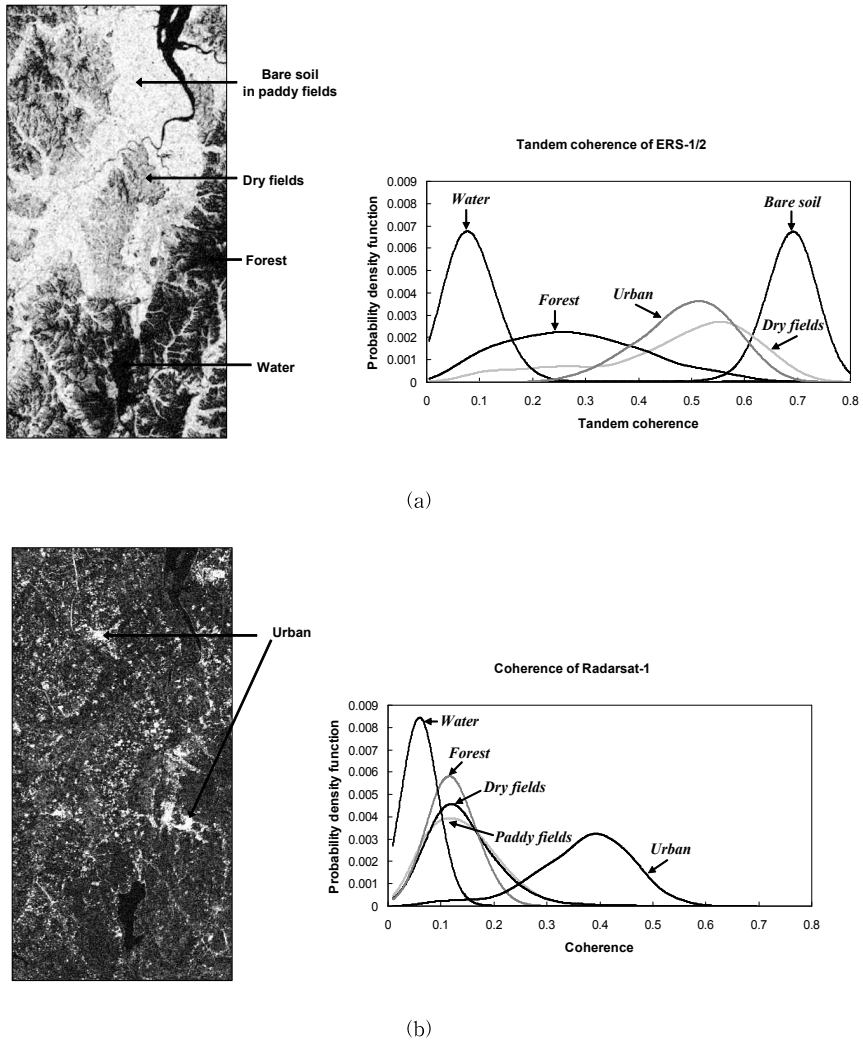
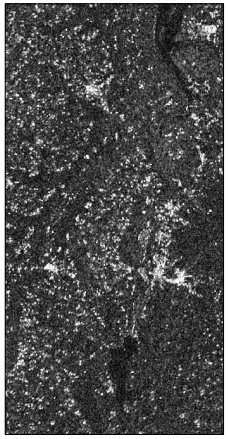
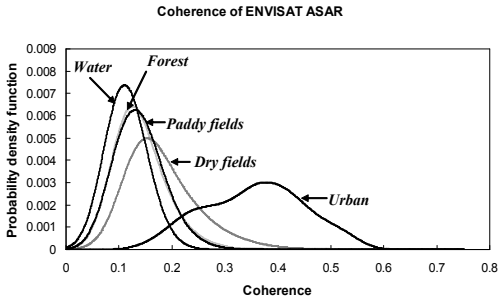
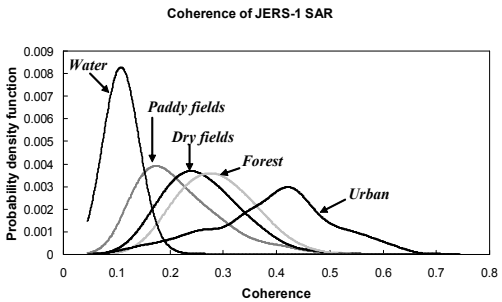


Figure 8. Coherence images and their histogram distributions with respect to five land-cover classes, (a) ERS-1/2 Tandem pair, (b) Radarsat-1, (c) ENVISAT ASAR, and (d) JERS-1. Typical land-cover areas are expressed with arrows and captions.





(c)



(d)

Figure 8. Continued.

나. 시간적 변이도

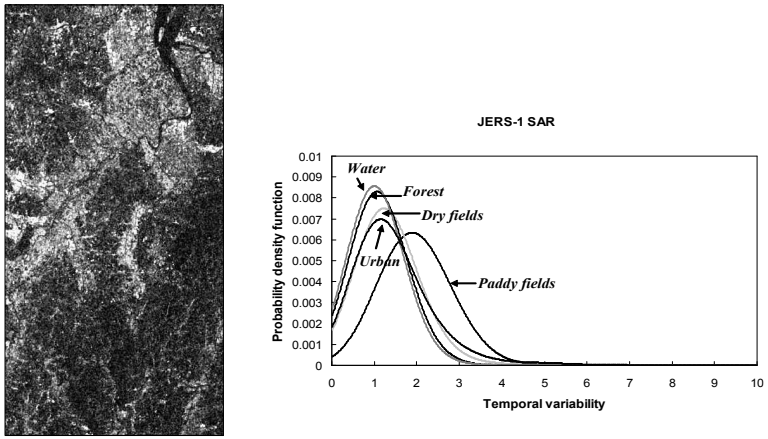
시간적 변이도는 후방 산란 계수의 시간적 특성을 분석하는 다중 시기 SAR 자료를 이용하는 경우 추출될 수 있는 가장 대표적인 특징에 해당된다(박노욱 외, 2005, Bruzzone *et al.*, 2004, Quegan *et al.*, 2000).

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

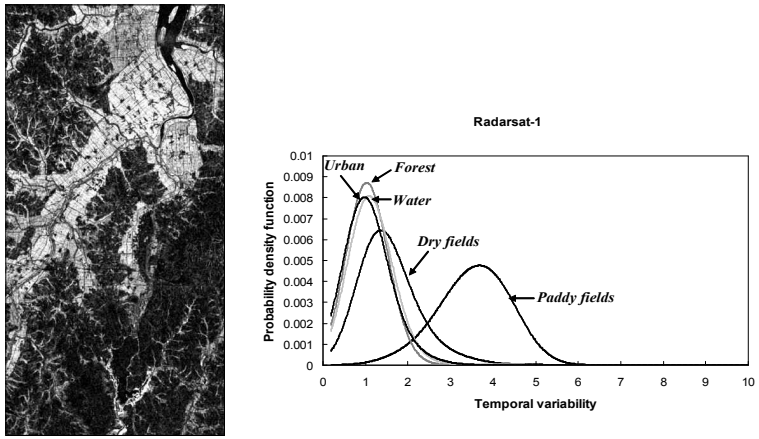
단일 모드로 얻어진 다중 시기 SAR 영상을 이용하여 시간적 변이도와 토지 피복 항목간의 연관성을 예시하기 위해 Table 1의 JERS-1 SAR, ENVISAT ASAR, Radarsat-1 자료를 비교 분석하였다. 여기서는 특히 농업 활동과 관련된 시기를 비교 분석하기 위하여 Table 1의 자료 중에서 JERS-1 SAR 자료는 1998년 4월부터 1998년 10월까지의 5개 자료를, Radarsat-1 자료는 2005년 4월부터 10월까지의 9개 자료를 모두 이용하였으며, ENVISAT ASAR 자료는 2005년 4월부터 2005년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

Fig. 9는 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 9(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. 9(c)), 수계와 논 항목에서

의 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.

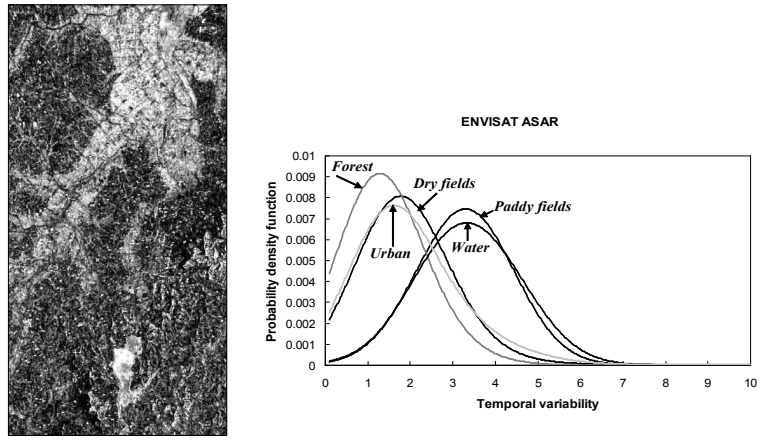


(a)



(b)

Figure 9. Temporal variability images and their histogram distributions with respect to five land-cover classes, (a) JERS-1, (b) Radarsat-1, and (c) ENVISAT ASAR.



(c)

Figure 9. Continued.

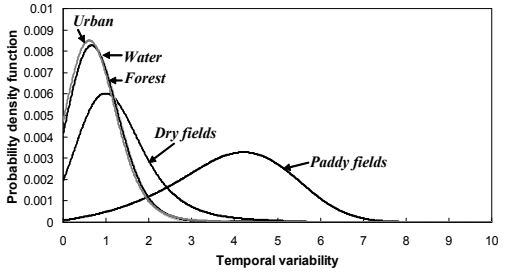
이러한 결과를 종합하면, 토지 피복 항목별 후방 산란 계수의 강도와 변화에 직접적으로 영향을 미치는 SAR 센서의 파장, 편광상태와 입사각 등에 시간적 변이도가 의존적이라는 것을 확인할 수 있다. 다중 시기 ENVISAT ASAR 자료를 이용할 경우, 논과 수계 항목 사이의 혼재는 결국 이 두 항목의 차이를 부각시킬 수 있는 다른 특징이 추가되어야 함을 지시한다. 각 시기별 후방 산란 계수의 평균값을 취할 경우, 수계 지역의 낮은 후방 산란 계수값의 분포로 이 두 항목의 차이는 분리가 될 수 있다.

외국의 다중 시기 ERS-1/2 자료를 이용한 사례 연구(Bruzzone *et al.*, 2004, Strozzi *et al.*, 2000)에서는 유럽이라는 지역의 특성상 농경지가 우리나라의 논과 같은 특성을 나타내지 않기 때문에 수계 영역에 비해 상대적으로 작은 시간적 변이도를 나타내었다. 그러나 우리 나라의 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 것은, 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 도심지나 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

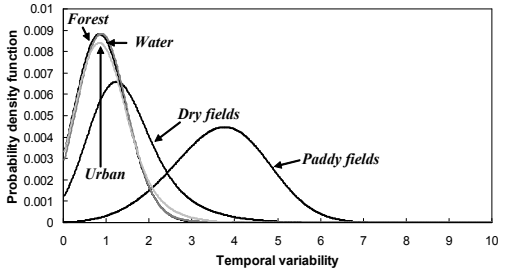
걸친 다양한 밭작물을 재배하는 특성이 반영된 결과이다. 이는 결과적으로 밭작물의 분류 정확도가 상대적으로 낮게 나타날 것으로 예상할 수 있으며, 밭작물의 구분을 위한 새로운 특징이 필요함을 지시한다.

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 유수형성기 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.

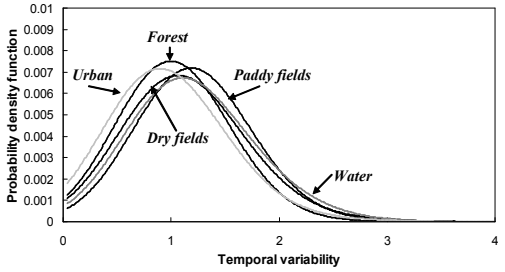
Fig. 10은 여러 시기 Radarsat-1 SAR 자료의 다양한 결합에 의한 시간적 변이도의 변화를 나타내고 있다. 논 지역의 물리적인 표면상태의 변화를 가장 잘 표현할 수 있는 4월말, 5월 중순, 7월초 3개의 자료를 이용하여 계산된 시간적 변이도는 4월초부터 5월 중순, 6월 중순, 7월 초의 4개 자료를 이용한 결과와 유사한 양상을 나타내고 있다. 4월초와 4월 말 사이의 경우 논의 표면 상태가 모내기를 준비하는 단계로 변화가 있지만 큰 변화를 나타내지는 않으며, 6월 중순의 자료는 물이 찬 논에서 벼가 성장하는 단계이기 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.



(a)



(b)



(c)

Figure 10. 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.

다. 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. 11). 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 구분이 될 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 낮게 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 이종 SAR 센서 자료로부터 추출한 특징들을 융합할 경우, 이러한 혼재 효과를 감소시킬 가능성이 있다.

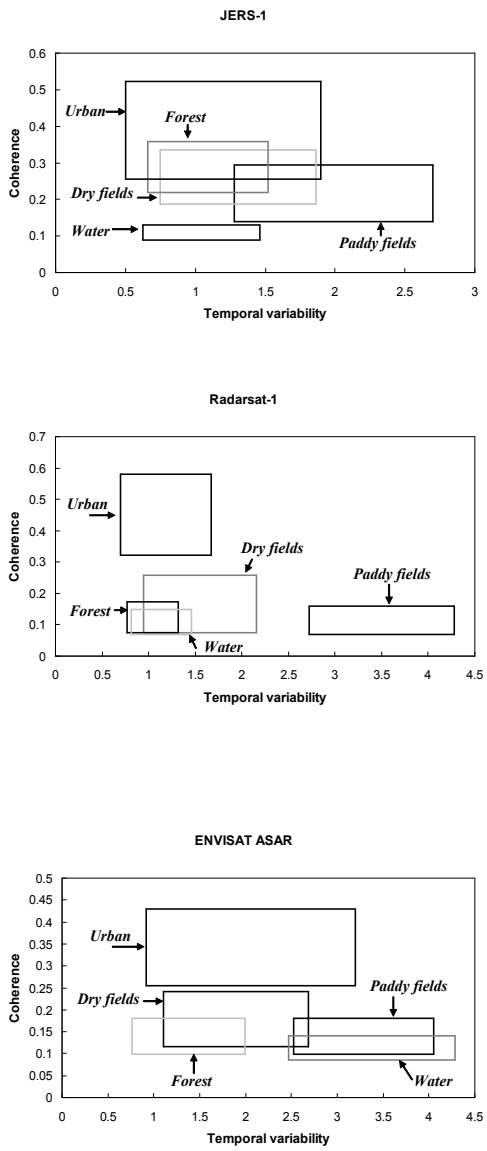


Figure 11. Qualitative relationships between temporal variability and coherence for land-cover classes.

라. 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.

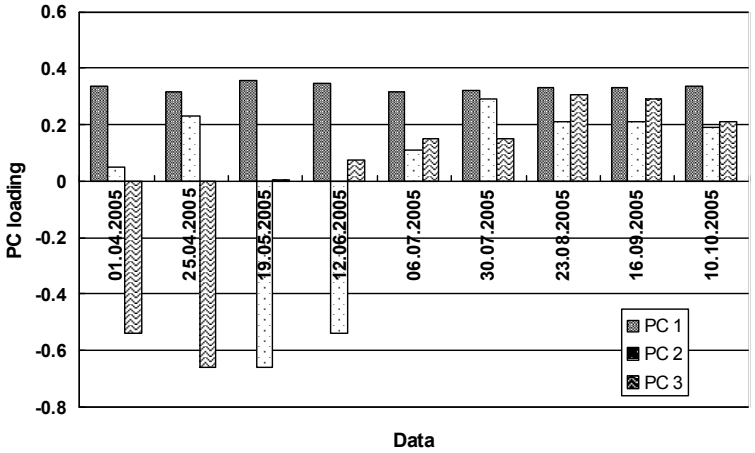
다중 시기 후방 산란 계수와 서로 다른 시간 간격의 긴밀도들에 대해 주성분 변환을 수행하게 되면, 일반적으로 첫 번째 주성분은 평균값을 나타내며, 두 번째 주성분부터는 변화 정보를 나타내게 된다. 그러나 주성분 변환이 사용 자료와 대상 토지 피복의 특성에 의존적이기 때문에, 변환된 주성분의 해석을 위해서는 각 주성분에 대한 입력 자료의 기여도를 지시하는 주성분 적재량 분석이 필수적이다. 주성분 변환의 경우 대개 첫 번째와 두 번째 주성분에서 대부분의 정보를 포함하게 되지만, 사용 자료에 따라 높은 차원의 주성분에서도 토지 피복과 관련된 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. 12 (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 논에 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. 12 (b)), 첫 번째 주성분에서는 수

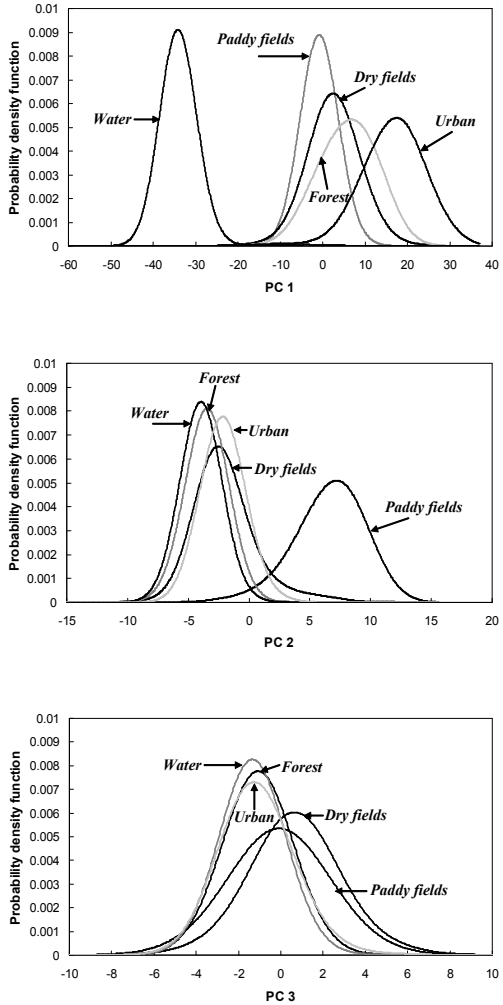
계와 도심지의 구분이 상대적으로 용이한 것으로 나타나고 있으며 두 번째 주성분에서는 논의 구분이 명확한 것으로 나타났다. 이는 평균 후방 산란 계수와 시간적 변이도에서 구분 가능한 토지 피복 항목과 일치한다. 세 번째 주성분에서는 히스토그램이 상당히 중첩되어 있으나, 밭 항목에서의 값이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이 지역에서는 산림과 밭 항목의 분포가 첫 번째와 두 번째 주성분에서 상당히 중첩되어 분류가 어려운 것으로 나타나고 있다. 비록 값들의 중첩이 나타나고는 있지만, 밭 항목의 히스토그램의 하위 25%값이 산림 항목의 상위 75% 값과 구별이 되는 것으로 나타나 세 번째 주성분에서 밭 항목의 구분에 대한 유의미한 정보를 제공하는 것으로 나타났다. 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 밭 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. 13). 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 움직임이 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.



(a)

Figure 12. (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.



(b)

Figure 12. Continued.

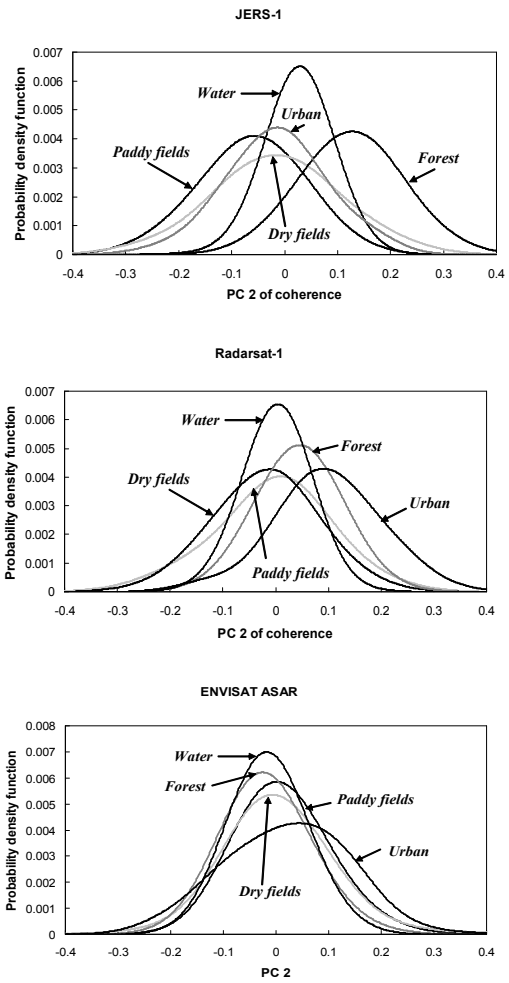


Figure 13. The second principal component values of multiple coherence images extracted from multitemporal JERS-1, Radarsat-1 and ENVISAT ASAR data sets, and their histogram distributions with respect to five land-cover classes.

2.3 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.

가. 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 가능하다. 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. 14 (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. 14 (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.

나. 다중 채널 변이도와 주성분 변환

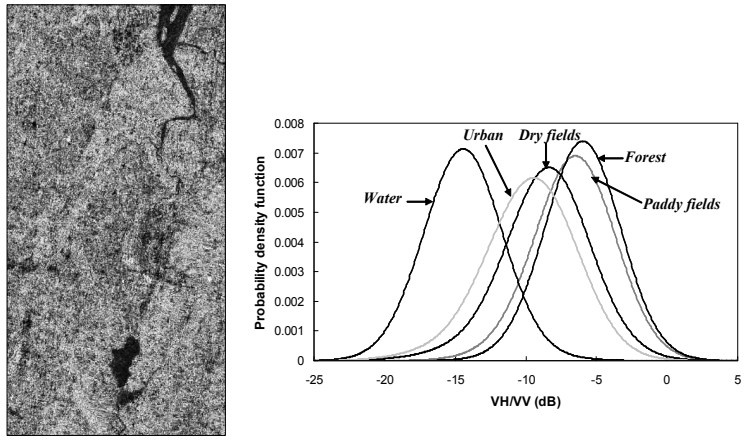
앞서 논의하였던 시간적 변이도는 다중 센서, 다중 편파 및 입사각으로 촬영된 다중 모드의 SAR 자료로의 확장이 가능하다. 이 연구에서는 Wiesmann *et al.*(2003)에 의해 제안된 다중 채널 변이도를 기초로 하여, 현재 이용이 가능한 다중 센서, 편파, 입사각에 촬영된 SAR 자료를 대상으로 적용이 가능하도록 특정 토지 피복에 대한 상대적 유사도를 표시하기 위한 표준 변환의 적용을 제안하였다. 단일 편파 및 입사각 SAR 자료로부터 추출될 수 있는 시간적 변이도와 달리 다중 채널 변이도에는 후방 산란 계수의 시간적 변화와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

N개의 채널로 이루어진 다중 센서, 편파, 입사각 및 시기에 촬영된 SAR 자료 S_i (i=1,…,N)가 있을 때, 훈련 집단으로부터 개별 SAR 자료 S_i에서의 특정 토지 피복 ω_k의 통계치로 평균(m_{ik})과 표준편차(σ_{ik})를 계산한다. ω_k의 후방 산란 특성에 대한 상대적인 유사도를 얻기 위해 S_i에 대해서 m_{ik}와 σ_{ik}를 이용하여 표준 변환된 후방산란계수 $\overline{S_i}$의 계산한다.

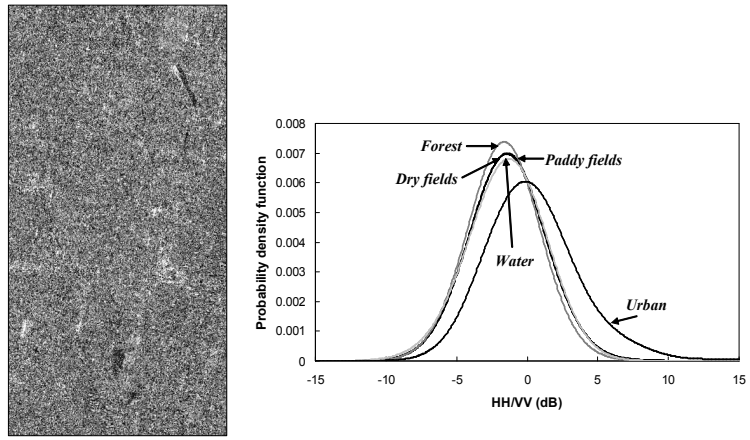
$$\overline{S_i} = \frac{S_i - m_{ik}}{\sigma_{ik}} \tag{3}$$

만약 후방 산란 특성이 특정 토지 피복 항목 ω_k와 유사한 토지 피복 항목들은 작은 값의 $\overline{S_i}$를 가진다. 이렇게 구한 N개의 $\overline{S_i}$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 5월말부터 6월 중순까지 다중 편파, 다중 입사각으로 촬영된 Radarsat-1과 ENVISAT ASAR 자료의 총 여섯 개 채널을 이용하였다(Table 3). 또한 변환된 후방산란계수에 대해서 평균값과 주성분 변환을 별도로 수행하였다.



(a)



(b)

Figure 14. (a) VH/VV 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.

Table 3. 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 ASAR	C/23°/IS2/HH&VV	2005/05/29
	C/19°/IS1/VH&VV	2005/06/17
Radarsat-1	C/40°/F2/HH	2005/06/12
	C/34°/S3/HH	2005/06/19

Fig. 15은 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 혹은 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 적재량 값은 두 번째 주성분에 많은 기여를 하고 있음을 나타내므로, 6월 12일과 19일 사이의 벼의 생육에 따른 논의 변화가 반영되어 논 항목의 다중 채널 변이도에 비해 증가한 값을 보이고 있다.

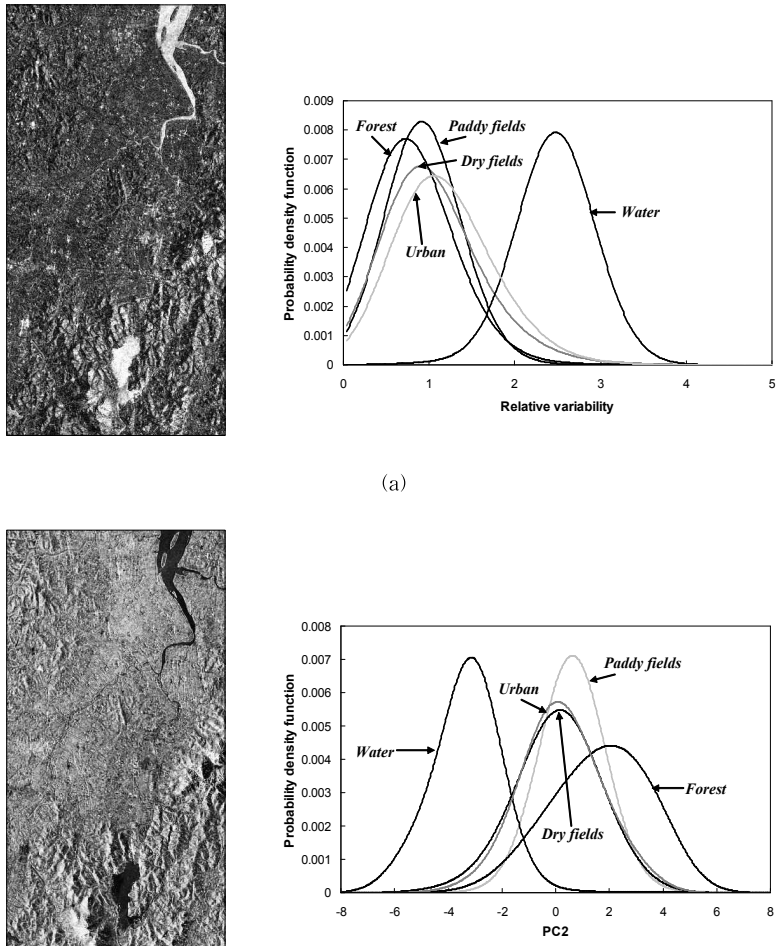


Figure 15. (a) multi-channel relative variability and histogram distributions with respect to five land-cover classes, (b) the second principal component computed from six relative backscattering coefficient images and histogram distributions with respect to five land-cover classes.

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.

2.4 연구 결과

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 연구에서는 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 제한적이다. 장기간 긴밀도에서는 도심지의 구분이 뚜렷하였으며, 시간적 변이도에서는 생장기 논의 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 제공하기 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 연구에서 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.

제 3 절 위상간섭기법을 이용한 재난/재해 탐지기술 개발

3.1 연구 수행 개요

SAR 위상간섭기법을 이용한 광산지역에서 침하관측 타당성 분석을 위해 탄광지대인 강원도 일대를 촬영한 JERS-1 SAR 영상을 획득하였다. 강원도 탄광지대에서 예상되는 지표변위의 관측을 위해 지속적인 지표변위 관측에 적합한 2-pass 차분간섭기법을 사용하였다. 2-pass 차분간섭기법을 수행하기 위해서는 연구 지역에 대한 SAR 영상과 정확한 수치고도모델이 필요하며 이를 위해 1992년 9월 21일부터 1998년 9월 30일에 걸쳐 획득된 총 23개의 JERS-1 SAR 영상과 약 90m 해상도의 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)-3 DEM (Farr and Kobrick, 2000) 을 수집하였다. Fig. 16은 연구지역에서 획득된 JERS-1 SAR 영상과 주요 연구지역을 표시하고 있다.

3.2 연구방법

JERS-1 SAR 영상은 일본의 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)로부터 영상화되지 않은 복소수 신호 (Level0) 형태로 획득하였으며 Gamma 소프트웨어의 MSP(Modular SAR Processor)를 이용하여 SLC(single look complex)영상으로 변환하였다. 사용된 DEM은 SRTM-3 DEM으로써 우주왕복선 엔더버호에 장착된 두 개의 SAR 안테나로부터 획득된 자료를 이용하여 제작된 3초 간격의 수치고도모델이며, USGS 웹사이트 (http://seamless.usgs.gov/website/Seamless)로부터 연구지역에 대한 수치고도모델을 수집하였다.

위와 같이 획득된 JERS-1 SAR 영상과 SRTM-3 DEM으로부터 ROI_PAC 프로그램을 이용하여 총 41개의 차분간섭도를 생성하였으며 Matlab® 프로그램을 이용하여 본 연구에서 작성된 SBAS 기법을 적용하였다.

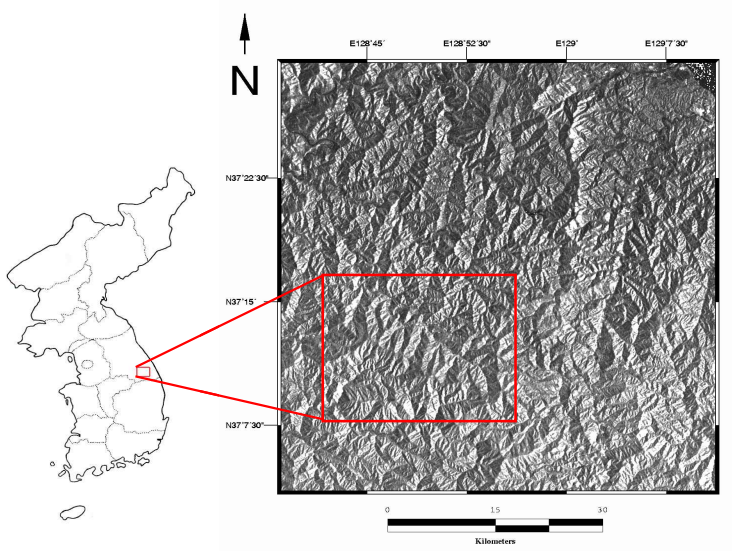


Figure 16. JERS-1 SAR Image of the study area (red box).

전체 지역에 걸친 시계열 분석을 위한 차분간섭도의 새로운 접근방법인 SBAS 기법은 기선거리가 가까운 영상들을 SB subset으로 구성하여 기선과 DEM의 오차에 따른 긴밀도 저하현상을 최소화하고자 한 방법이 제안되었으며, 이를 이용하여 각 SB subset에서의 변위양상을 밝힌 연구가 진행되었다(Lundgren *et al.*, 2001). 이후 특이값분해(Singular Value Decomposition, SVD)방법을 이용하여 각각의 SB subset을 연결하는 SBAS 기법이 이탈리아의 IREA 연구소에서 제안되었다(Berardino *et al.*, 2002; Berardino and Casu, 2004; Lanari *et al.*, 2004). 위에서 언급된 SB subset은 각 영상간의 수직기선거리가 가깝고 시간적으로 연결되어 있는 영상들의 그룹으로 정의된다. SBAS 기법은 서로 다른 SB subset의 간섭도를 시간적으로 연결하기 때문에 연구지역에 대한 연속적이고 장기적인 변위 관측을 가능하게 한다(Lanari *et al.*, 2007; Tizzani *et al.*, 2007).

SBAS 기법은 Fig. 17과 같은 흐름에 따라 수행되며 Berardino et al.(2002)에 의해 제안된 방법이다. 이는 차분간섭도에 포함된 각각의 위상 성분을 분리하여 변위에 의한 위상만을 추출하는 방식으로 정확한 변위량을 산정하는 과정을 기반으로 진행된다.

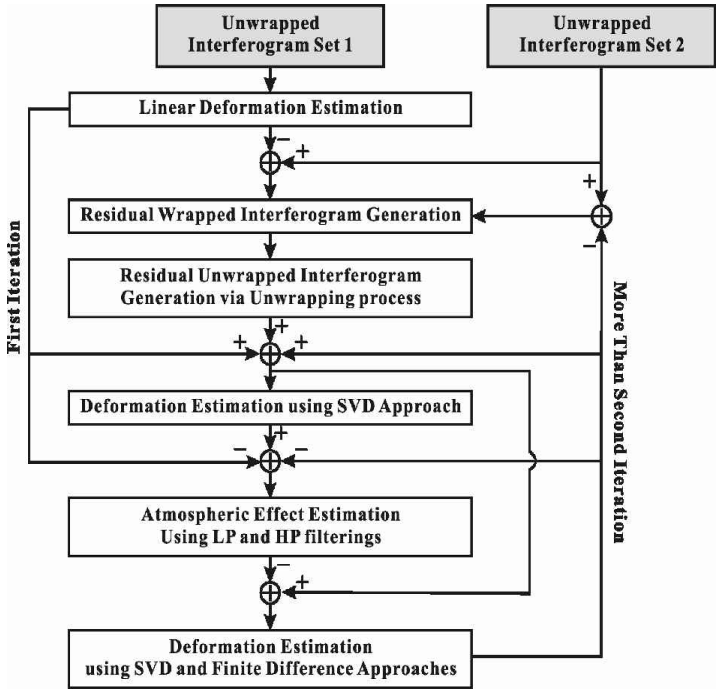


Figure 17. Block diagram of the SBAS algorithm (modified from Berardino *et al.*(2002)로부터 수정).

Table 4. Generated interferograms with time span and perpendicular baseline.

No.	Master	Slave	Time span(yr)	Perpendicular Baseline (m)
1	19920921	19971013	5.06143052703628	-121
2		19980407	5.54500342231348	-203
3	19921104	19921218	0.121663244353183	375
4		19930316	0.366187542778919	-768
5		19930908	0.844284736481862	-20
6		19931022	0.965947980835044	-437
7	19921218	19930908	0.722621492128679	-394
8		19931205	0.964407939767283	683
9	19930131	19930429	0.244524298425736	-906
10	19930316	19930612	0.239048596851472	-1159
11		19931022	0.599760438056126	335
12	19930612	19931022	0.360711841204654	1497
13		19960730	3.13261464750171	668
14		19961026	3.37166324435318	505
15	19930908	19931022	0.121663244353183	-419
16		19931205	0.241786447638604	1091
17	19931022	19960730	2.77190280629706	-827
18		19970122	3.25	-310
19	19960730	19961026	0.239048596851472	-167
20		19970122	0.478097193702943	517
21	19961026	19980109	1.20345653661875	-1626
22		19980521	1.56964407939767	316
23	19970122	19980521	1.3305954825462	-366
24	19970830	19971013	0.120123203285421	997
25		19980407	0.603696098562628	919
26	19971013	19971126	0.118925393566051	1281
27		19980407	0.483572895277207	-83
28		19980704	0.725359342915811	676
29	19971126	19980109	0.120123203285421	494
30		19980222	0.239048596851472	29
31		19980704	0.60643394934976	-604
32	19980109	19980222	0.118925393566051	-459
33		19980521	0.366187542778919	1945
34		19980817	0.60523613963039	91
35	19980222	19980704	0.367385352498289	-636
36		19980817	0.486310746064339	549
37		19980930	0.60523613963039	-5
38	19980407	19980704	0.241786447638604	759
39	19980521	19980817	0.239048596851472	-1857
40	19980704	19980930	0.237850787132101	632
41	19980817	19980930	0.118925393566051	-559

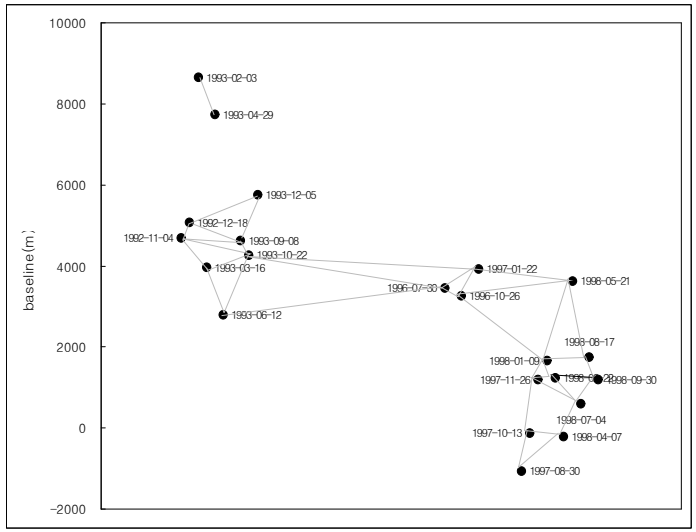


Figure 18. Relative perpendicular baseline of JERS-1 SAR data set(dot) and generated interferometric pair(gray line) with respect to the reference data(1992/09/21).

3.2 다중 시기 SAR 자료를 이용한 변화 정보 추출

Fig. 18은 다중시기에 얻어진 강원도 일대를 촬영한 23개의 SAR을 첫 번째로 획득된 SAR 영상을 기준으로 구한 상대적 기선거리와 획득 날짜를 이용하여 도시화한 것이다. 이들 23개의 SAR 자료로부터 기선거리에 따른 decorrelation과 시간간격에 따른 decorrelation을 줄이기 위해 상대 기선거리 및 시간간격을 고려하여 41개의 간섭쌍을 선택 생성하였다(Table 4). JERS-1 위성의 부정확한 궤도에 의한 range 방향의 선형 성분을 제거하기 위한 궤도 초차 보정을 수행하고 나서 최종적으로 변위와 대기효과, DEM 오차 및 노이즈에 관한 위상만 남은 차분간섭도를 획득하였다.

Fig. 19는 생성된 41개의 차분간섭도 중 연구 대상지역의 지표변위를 잘 보여주는 대표적인 15개의 간섭도로, 여기서 초록-파랑-빨강-노랑-초록의 한 프린지는 약 15.8cm의 수직변위를 나타낸다. 차분간섭도로부터 1992년 후반부터 1993년 후반까지 함백산 사면에 집중적으로 침하가 발행하였음을 확인하였으며, 비록 침하속도는 둔화되었지만 1997년

까지 지속적으로 침하가 발생하였으며 1998년 이후로는 침하가 관측되지 않는 것으로 해석되므로, 본 연구지역에서 발생한 지반침하는 시간이 흐를수록 둔화되는 특성을 가지고 있음을 보여준다.

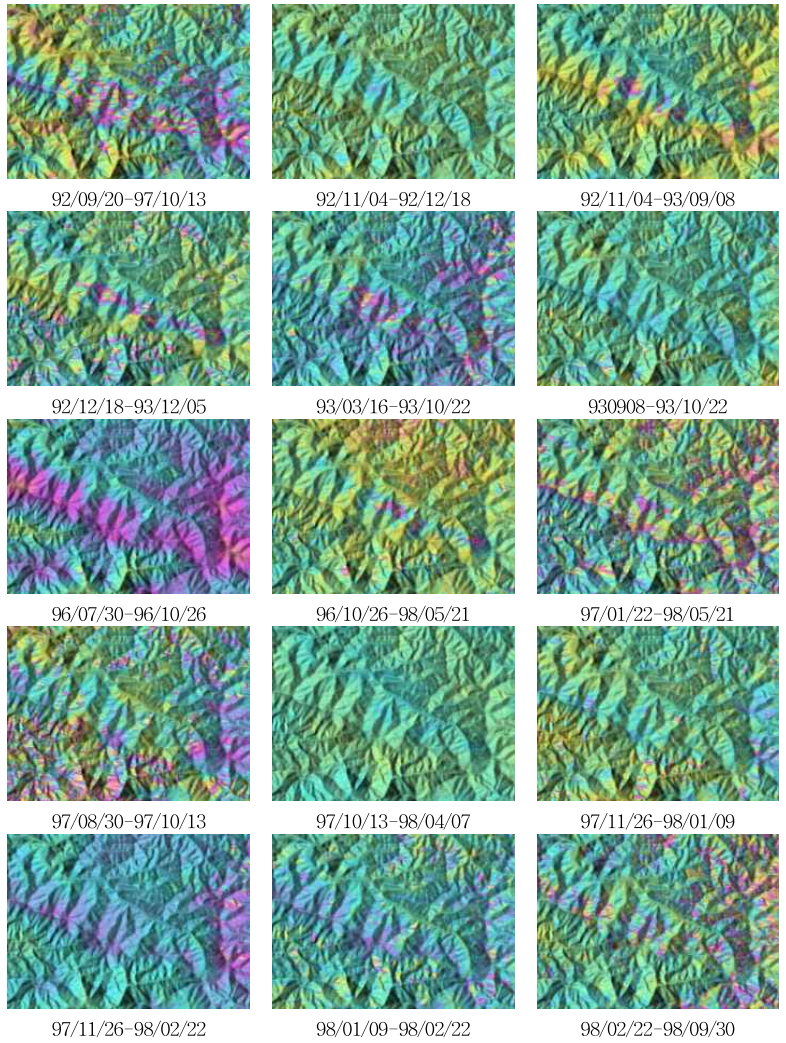


Figure 19. Representative unwrapped differential interferograms including surface deformation as well as unfavorable effects due to atmospheric effect, DEM error and noise.

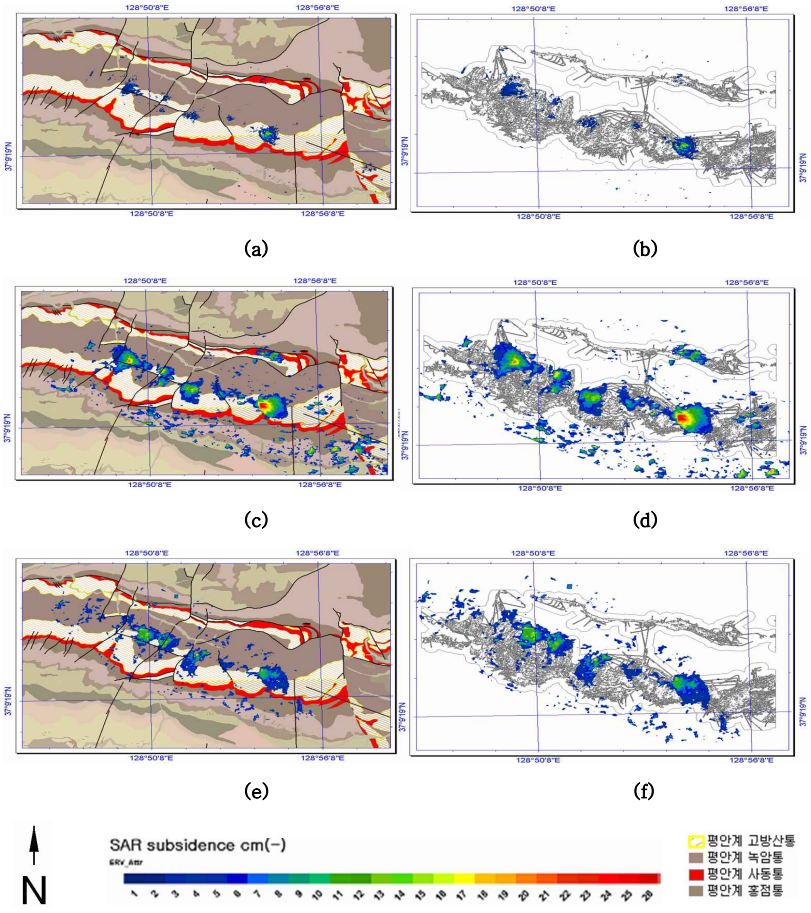


Figure 20. Ground subsidence superimposed on (left) the geological map and (right) the underground pit maps, estimated from 1992/11/04-1993/01/31 pair for (a) and (b), 1992/12/18-1993/12/05 pair for (c) and (d), and 1996/10/26-1998/05/21 pair for (e) and (f).

한국지질자원연구소와 광해방지사업단에서 발간된 1:50,000의 수치지질도와 2차원의 갱도분포도를 이용하여 관측된 침하와 지질 및 광산분포와의 관계를 비교 분석 하였다. Fig. 20에서 보는 바와 같이 관측침하도를 지질도와의 중첩을 시도한 결과 동서를 축으로 향사를 이루고 있는 지층을 따라 침하가 발생하였으며 이들 지층 중에는 평안계에 생성된 무연탄층이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이로써 무연탄층의 채굴에 의한 응력의 변화에 의해 주요 침하가 발생하였다고 판단된다. 또한 갱도분포도는 함탄층인 사동통과 고방산통을 따라 분포되어 있으며 침하 역시 이를 따라 발생한 것을 보여준다. 평면적으로 사동통을 경계로 하는 함탄층 내부를 따라 지하갱도가 형성되어 있으며 갱도 깊이는 알 수 없으나 향사부의 경사를 따라 중앙으로 갈수록 심도가 깊어질 것으로 예상된다.

보다 정확한 침하분석을 위해서는 앞서 언급되었던 DEM 오차, 대기에 의한 영향 및 노이즈가 제거되어야만 하며 최근 이러한 작업을 수행하기 위한 여러 알고리즘들이 제안되고 있다. 그중 시간적으로 가깝고 짧은 수직기선거리를 갖는 간섭쌍을 고려하여 각 영상이 획득될 당시의 변위를 구하는 기법인 SBAS 알고리즘을 이용하여 본 연구지역에서 관측된 지반침하 양상 및 최종 침하량을 산정하였다(Fig. 21). SBAS 알고리즘 적용의 결과는 각 SAR 영상 관측시기별 지표변위값을 산정 가능케 하며, 또한 연구기간동안 발생 최종 침하값의 보다 정량적인 계산을 가능케 한다. Fig. 21은 SBAS 알고리즘을 이용하여 구한 1992년 11월부터 1998년 4월까지 약 5년 반 동안 발생한 침하값을 보여준다. 구해진 누적 침하량을 표현하기 이전에 신뢰성 있는 픽셀만을 추출하기 위해 긴밀도가 0.12 이하인 픽셀의 값은 무시하였으며, 그 결과 연구지역에서 약 6년간 최대 22cm 정도의 침하가 발생하였음을 알 수 있다. 또한 SBAS 기법을 수행함으로 인해 제거된 DEM 오차, 위상불구속화에 따른 오차, 대기에 의한 효과와 잡음에 의한 오차의 총 량을 계산하기 위해 SBAS 기법 적용을 위해 사용된 25개의 간섭도와 SBAS의 결과물로써 생성된 최적 침하 모델간의 차이를 계산하였다. 이는 생성된 간섭도와 최적 침하 모델간의 RMSE(Root Mean Square Error)를 의미하며 그 결과 평균 2.0cm에 해당하는 위상이 관측되었다(Fig. 22). 1992년 9월 21일부터 1998년 9월 30일까지 발생한 침하는 크게 3개 구역으로 나누어 볼 수 있다. 최종 시기에서의 침하 형태를 쉽게 파악하기 위해 각 구역에서의 동-서, 남-북 방향으로의 침하 단면을 도시하였다(Fig. 23).

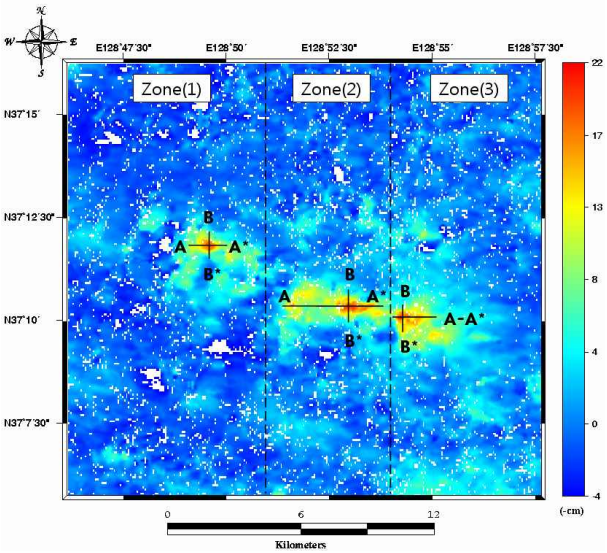


Figure 21. Ground subsidence over whole time span (1992/11-1998/04) after removing pixel with coherence value less than 0.12.

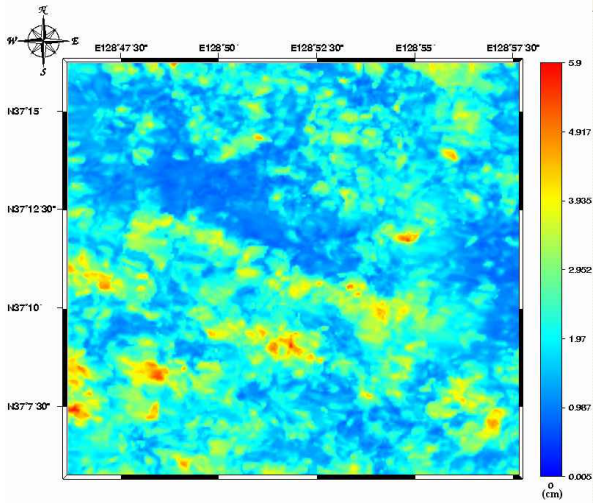


Figure 22. RMSE between an original interferograms and a optimal subsidence degree which means the phase caused by DEM error, atmospheric effect, phase unwrap error and noise.

3.4 연구 결과

해당 지역은 전형적인 산림지대로 접근이 용이하지 않고 과거 현장 계측 자료나 GPS 자료가 존재하지 않으므로 지반 변위측정을 위해 레이더간섭기법과 같은 원격탐사가 효율적으로 수행될 수 있는 지역이다. 현재 이 지역에는 레저시설 및 사회기반시설이 건립되어 있는 상태이므로 발생 가능한 재해를 효과적으로 관측하기 위해서는 이와 같은 원격탐사 기법의 적용이 매우 효율적인 수단이다. 산림지대에서 식생에 의한 decorrelation의 영향을 적게 받는 L-band를 이용한 탐사가 적절하나, X-band도 짧은 기간에 획득된 고해상도 SAR 영상을 이용한다면 위상간섭기법을 적용하여 산사태, 지반침하와 같은 재해의 광역적 관측에 효과적으로 사용될 가능성이 있다.

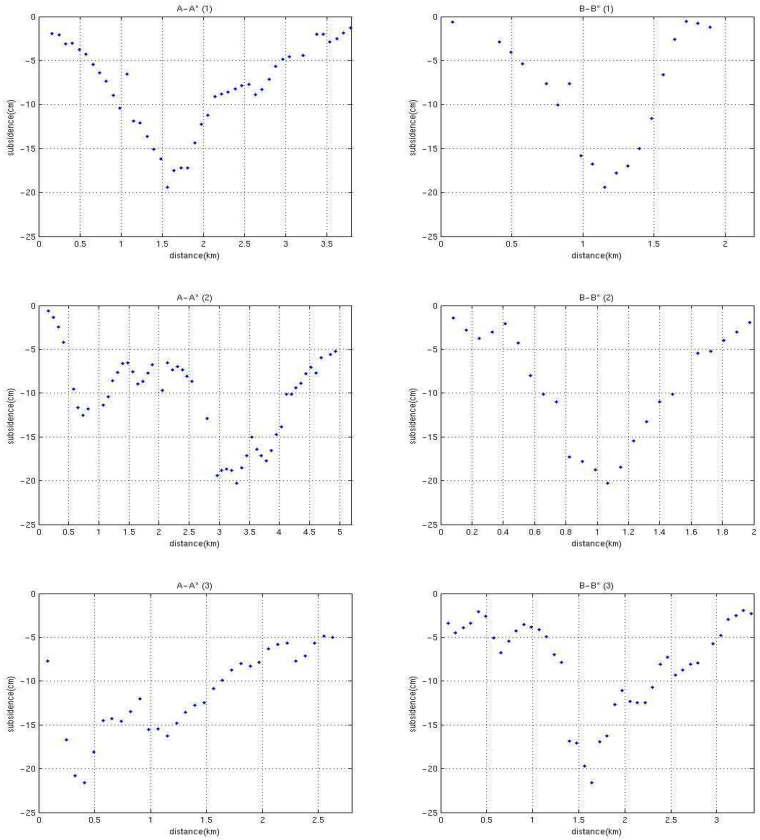


Figure 23. Plot of horizontal (A-A*) and vertical (B-B*) cross sectional subsidence shape at the zone (1), (2) and (3) marked in Fig. 22.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

Radargrammetry 기술개발은 KOMPSAT-5 위성 궤도 및 영상 모드에 맞는 radargrammetry 조건을 제시하였다. 지표 현황 주제도 작성은 단일 모드로 다중 시기에 얻어진 SAR 자료로부터 긴밀도, 시간적 변이도, 주성분 변환에 의한 특징들을 추출하여 분석함으로써 개별 특징들로부터 구별력이 높은 토지 피복 항목을 제시하였을 때, Tandem 긴밀도는 대체적으로 토지 피복 항목간 구별력이 가장 좋게 나타났고, 시계열 후방 산란 계수와 긴밀도의 주성분 변환에 기반한 특징들에서는 토지 피복과 관련된 부가 정보 추출이 가능하였다. 또한 다중 모드(편파, 입사각)로 비슷한 시기에 얻어진 SAR 자료로부터 편파비와 다중 채널 변이도를 주요 특징으로 추출하여 분석한 결과, VH/VV 편파비로부터 산림과 밭 항목의 구분력이 향상되는 것으로 나타났다. 위상간섭기법을 이용한 재난/재해 탐지기술 개발은 SAR 위상간섭기법을 이용하여 광산지역의 침하를 효과적으로 관측할 수 있음을 입증하였고, 각 차분간섭도로부터 관측된 변위 값으로부터 대기오차, DEM 에러, 노이즈에 의한 영향을 효과적으로 줄이고 시계열 변위 자료를 구하기 위한 SBAS 알고리즘을 구현하였다. SBAS 알고리즘을 이용하여 각 SAR 관측 시기에서의 침하 값을 구할 수 있었으며, 이러한 결과는 시간에 따른 변위 양상을 해석하는데 매우 긴요한 자료로 사용된다. 활용분야 연계는 활용분야 워크샵 개최(2007년 5월 29일, 제주 해비치 리조트)와 해외 위성 활용연구 협의(Cosmo-SkyMED AO 추진)가 있다.

제 2 절 평가 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

Radargrammetry 기술 개발은 radargrammetry 기술 개발 및 검증에 평가의 착안점을 두고 있으며, KOMPSAT-5 위성 궤도 및 영상 모드에 맞는 radargrammetry 조건을 제시하였고, 이를 RPtks적으로 입증하여, 향후 위성 운용에 크게 이바지 할 것으로 기대된다. 지표 현황 주제도 작성은 기존 기술 대비 향상된 기술 개발 여부 및 적용 가능성 제시 유무에 평가의 착안점을 두었으며, 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 중

요한 의미를 가진다. 또한 단일 시기에 촬영된 단일 파장 및 편파 SAR 자료의 낮은 구분력을 향상시키기 위해서는 다중 시기/편파/주파수 자료의 이용이 필수적인 상황에서, 이 연구에서는 토지 피복 구분을 위해 과거와 현재 이용 가능한 SAR 자료의 특성을 고려하여 추출 가능한 특징들에 대해서 논의하고 토지 피복과의 연관성을 실제 자료에의 적용을 통해 예시 하였으며, 이러한 분석 결과는 개선된 분류 방법론과 결합된다면 SAR 자료를 토지 피복 항목 분류의 구별력이 크게 향상될 것으로 기대된다. 위성간섭기법을 이용한 재난/재해 탐지기술 개발은 차분간섭기법도 및 긴밀도 영상의 정밀도 및 시험지역 적용 결과의 타당성에 평가의 착안점을 두었다. 이는 SAR 자료를 이용한 차분간섭기법도 기법은 지반침하 발생지역의 광역적인 감시에 매우 효과적인 수단임을 예시하였고, 주기적으로 획득된 SAR 영상은 재해 발생 예상 지역의 감시뿐만 아니라, 발생된 재해의 시간별 추이를 장기적 관측하는데 매우 효율적임을 보였다. 이러한 관측자료를 현장 관측자료와 융합을 통해 보다 정밀한 재난/재해 원인 해석 및 양상 규명에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 SAR 위상간섭기법을 이용하여 전 국토의 차분간섭도 및 긴밀도 영상을 준 실시간으로 주기적으로 제작함으로써, KOMPSAT-5 위성을 이용한 전 국토의 효율적인 재난/재해 감시 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다. 활용분야 연계는 워크숍 및 회의 개최 여부에 평가의 착안점을 두고 있으며, 활용분야 워크숍을 개최하고 Cosmo-SkyMED AO에 참여를 협의하는 등, 다양한 연구협력을 도출해 내었다.

제 3 절 관련분야의 기술 발전에의 기여도

국내 환경에 적합한 radargrammetry 기법의 개발을 통해 지형 매핑의 기술력을 확보할 수 있으며, SAR 자료로부터 고품질 주제도 자성 관련 알고리즘이나 기술을 개발하여 과학적 근거를 제시할 수 있다. 본 연구 과제를 통해 SAR 자료의 처리 기술 개발을 유도하며, 다목적실용위성 5호의 지상 활용에 대한 사전 정보를 구축함으로써 차후 발사될 다목적 실용위성 5호의 활용성 증대에 크게 기여할 것으로 판단된다.

SAR 자료의 위상간섭기법을 이용하여 자연재해 지역 탐지 및 정량적 지표변위의 이차원 관측이 가능해지며, 시간에 따른 정밀 지표변위 관측으로 자연재해 예측과 방재를 위한 기술력의 축적이 이루어진다. SBAS 알고리즘을 이용하여 각 SAR 관측 시기에서의 침하값을 구할 수 있었으며, 이러한 결과는 시간에 따른 변위 양상을 해석하는데 매우 긴요한 자료로 사용되었다. SAR 자료를 이용한 차분간섭기법도 기법은 지반침하 발생지역의 광역적인 감시에 매우 효과적인 수단임을 예

시하였고, 주기적으로 획득된 SAR 영상은 재해 발생 예상 지역의 감시뿐만 아니라, 발생된 재해의 시간별 추이를 장기적 관측하는데 매우 효율적임을 보였다. 이러한 관측자료는 현장관측자료와 융합을 통해 보다 정밀한 재난/재해 원인 해석 및 양상 규명에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, SAR 위상간섭기법을 이용하여 전 국토의 차분간섭도 및 긴밀도 영상을 준 실시간으로 주기적으로 제작함으로써, KOMPSAT-5 위성을 이용한 전 국토의 효율적인 재난/재해 감시 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 다목적실용위성 5호의 SAR 영상을 이용한 지형 매핑을 통해 고부가가치 창출할 수 있으며, 관련 개발 기술을 원격탐사 및 GIS 기반 모듈로 개발할 경우 관련 산업계에 파급효과를 줄 수 있다. 그리고 위성 원격탐사 기술을 이용한 산사태, 지진, 화산 등의 광역재해 감시와 예측기술 향상으로 재해관리에 크게 기여할 것으로 사료된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

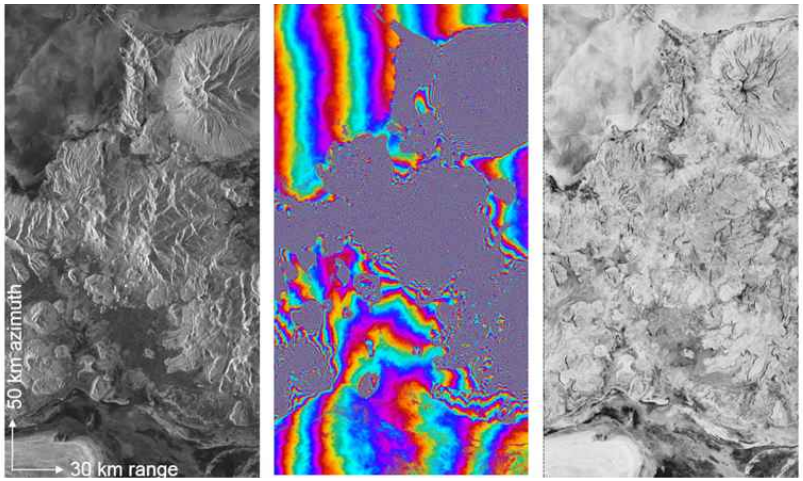
본 연구 과제의 기술개발 결과를 통해 향후 인공위성 영상자료의 지형도 작성 및 지형 분석, 지표 피복 분류, 재난 및 재해 탐측 등 다양한 분야에 활용이 가능하다. 재해 관련 업무 분야에서 재해 방지 정책 의사결정에 기초 및 보조 자료로써 활용가치가 높다. 또한 연구개발 결과를 통해 산출된 SAR 자료 처리 기술은 SAR 자료를 이용하는 모든 활용분야에 기본적으로 응용이 가능하며, 변화탐지 기술은 농업, 임업, 도심지 등의 분석에도 직접적인 활용이 가능하다.

X-band SAR 자료를 사용한 위상간섭기법은 센서의 짧은 파장으로 인해 C-band와 L-band에 비해 두 개의 SAR 자료 획득 시간간격의 증가에 따라 긴밀도가 급격히 낮아진다. 따라서 보다 지표변위에 대한 정보를 효율적으로 추출하기 위해서는 고정산란체를 이용한 PSInSAR 또는 초기 SBAS 기법으로부터 진보된 최대 해상도 SBAS 기법을 적용하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서 개발된 위상간섭기법과 SBAS 기법을 기반으로 X-band SAR 자료에 시험 적용하여 개발된 기술의 타당성을 검토하고, 고정산란체를 이용한 PSInSAR, 최대 해상도 SBAS 기법을 개발하는데 크게 활용될 수 있다. SAR 위상간섭기법을 이용하여 광산지역에서 나타나는 지반침하 재해 감시 체계를 구축하여 인공위성을 활용한 국가적 재난/재해 저감에 기여할 수 있다. 국내 SAR 위성 보유를 통해 주기적으로 획득된 자료를 이용한 전 국토의 주기적 감시체계 구축은 국내 인공위성을 이용한 국민의 복지 생활 향상에 기여할 것으로 판단된다. 위상간섭기법을 이용한 자료처리와 해석은 아직까지 전문가에 의해 전문적인 자료 처리를 수행해야 하며, 재해 및 환경 관리 등 공공분야 활용에는 기술적/비용적인 면에서 기업화보다는 국가 주도의 시스템 구축이 요구된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

ESA 주관의 Fringe 2007 workshop에서 2007년 6월 15일에 발사된 X-band SAR 위성인 TerraSAR-X를 이용한 InSAR (Interferometic SAR), PolSAR (Polarimetric SAR) 및 Pol-InSAR (Polarimetric Interferometric SAR)의 적용 결과가 독일의 DLR 연구자들에 의해 발표되었다. 본 연구과제와 관련 있는 내용들 중 흥미로운 결과들을 소개하고자 한다. Fig. 24는 볼리비아 지역의 TerrSAR-X 영상으로 SAR 진폭영상과 간섭도 그리고 긴밀도 영상을 보여주고 있다. 획득기간, 수직기선거리 등에 대한 정보는 없지만 X-band 간섭도 임을 감안할 때 간섭도와 매우 높은 긴밀도 영상은 매우 놀라운 결과임에 틀림없다. 비록 국내 지역과 같이 대부분 산림으로 덮여 있는 지역에서 X-band SAR interferometry를 통해 획득 가능한 긴밀도가 어느 정도인지에 대한 보고는 아직 없지만, X-band InSAR를 이용한 다양한 활용성을 기대해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

TerraSAR-X는 1-4 m의 높은 공간해상도를 갖는 SAR 영상으로 기존의 JERS-1, ERS-1/2, ENVISAT과 달리 두 SAR 영상간의 coregistration을 위해서 지형에 의한 영향을 고려하여야 한다. ERS의 경우 단순한 affine 또는 고차다항식으로 coregistration을 수행하여도 지형고도에 의한 coregistrtion 오차가 약 0.1 pixel 이내 이기 때문에 부영상을 재배열하는 과정에 크게 문제가 없으나, Fig. 25와 같이 TerraSAR-X coregistration의 경우 보상되지 않은 지형에 의한 coregistration 오차는 1 pixel에 이른다. Fig. 26은 기존 coregistration 알고리즘 및 지형고도에 의한 shift를 고려한 알고리즘을 적용하여 구한 긴밀도를 보여주고 있다. 고도가 높은 지역에서의 두 알고리즘간의 긴밀도 차가 뚜렷함을 알 수 있다. 따라서 TerraSAR-X InSAR를 위해서 이러한 영향을 보완한 coregistration 알고리즘을 개발하여야 한다.



(a) (b) (c)

Figure 24. Stripmap mode TerrSAR-X image around Bolivia: (a) SAR amplitude image, (b) interferogram, (c) coherence map (Eineder and Adam, 2007).

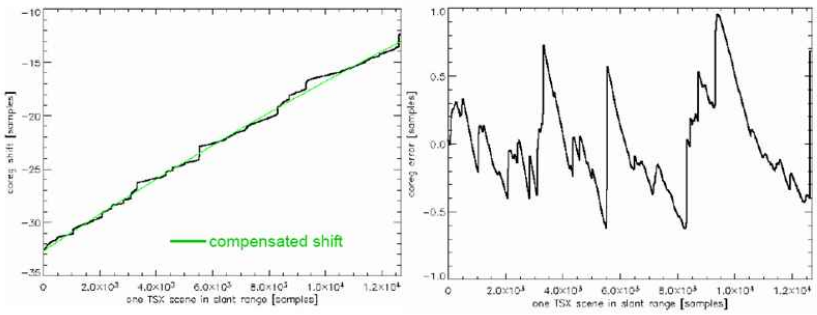


Figure 25. Coregistration error of 2-D polynomial transform (Eineder and Adam, 2007).

(a) (b) (c)

Figure 26. Interferogram (a), coherence map (b) and (c), calculated from coregistration using 2-d polynomial and geometric information (Eineder and Adam, 2007).

Fig. 27은 11일간의 시간간격 그리고 약 300m의 기선거리를 갖는 최초의 TerraSAR-X spotlight mode 간섭도로이다. 공간해상도는 azimuth 방향으로 2m, 그리고 range 방향으로 1m이다. 이러한 고해상도의 간섭도는 충분히 군사적 활용성이 높은 정보를 제공할 수 있을 것이다. TerraSAR-X는 다중편파 자료를 취득할 수 있는 시스템으로 이를 이용한 PolSAR와 polarimetric 자료를 이용한 InSAR 기술을 적용한 연구가 수행중이다. PolSAR는 지표거칠기, 수분함량, 지표 분류, 지상 타겟 관측 분야에 크게 활용될 뿐만 아니라 지형고도, 지표변위, 지표변화를 관측할 수 있는 InSAR 분야에서도 이러한 다중편파 자료를 이용한 다양한 활용성이 연구되고 있다. Fig. 28은 HH, VV 편파 자료로부터 추출된 coherent scatterer(CS)의 분포를 보여주고 있다. 다중 편파 자료로부터 추출된 CS를 활용한 지표 변위 연구는 앞으로 많은 발전 가능성을 가지고 있는 분야이다. Fig. 29는 라스베가스 지역에서의 TerraSAR-X 자료를 이용하여 구한 변위도이다. 건물 지붕에서 발생한 변위가 매우 정밀하게 측정됨을 보여주고 있다.

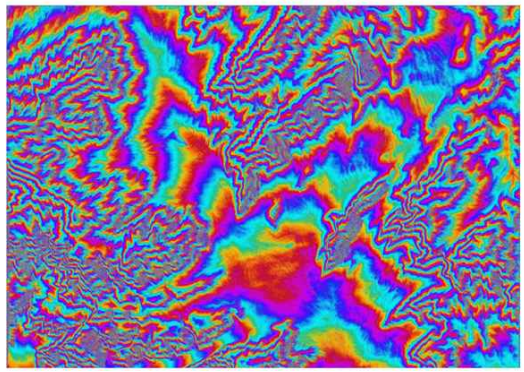


Figure 27. First interferogram derived from TerraSAR-X spotlight mode (Eineder and Adam, 2007).

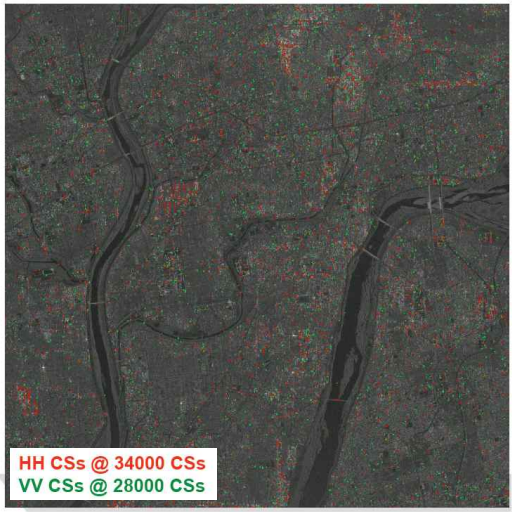


Figure 28. Distribution of coherent scatterer(CS) extracted from HH- and VV-polarized SAR data (Hajnsek and Papathanassiou, 2007)

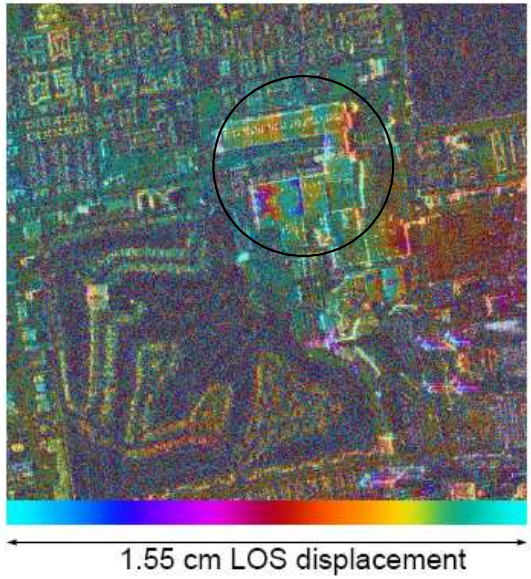


Figure 29. Deformation measurement using TerraSAR-X SAR data (Eineder and Adam, 2007).

TerraSAR-X와 같은 짧은 파장 (X-band) 그리고 고해상도의 SAR 영상은 위상간섭기법을 이용한 재난/재해 탐지기술 분야에 있어서 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 높은 밀도의 고정산란체,
- 변위에 대한 높은 민감도
- 도로, 빌딩과 같은 물체도 높은 거칠기를 갖는 coherent 표면으로 인식

또한 11일의 짧은 재방문 주기는 다음과 같은 장점이 있다.

- 빠른 시계열 자료 구축,
- phase unwrapping 문제의 완화

국내의 다목적실용위성 5호 역시 TerraSAR-X와 같이 X-band 시스템이며 고해상도의 영상을 획득할 수 있기 때문에 TerraSAR-X와 마찬가지로 위에서 언급한 장점들을 제공할 것으로 판단된다. 독일의 TerraSAR-X와 이탈리아의 Cosmo-Skymed 자료를 이용한 직접적인 연구 수행뿐만 아니라 이들 자료를 이용한 국제적인 연구 결과 발표물은 국내 다목적실용위성 5호를 이용한 기술개발에 크게 도움이 될 것이다.

제 7 장 참고문헌

김상완, 2004, L-밴드 영상레이더 위상간섭기법을 이용한 백두산 및 부산지역의 지표면 변위 관측. 연세대학교 박사학위 논문, pp. 1-20, 26-43, 53-87.

이훈열, 2006. SAR 관련 논문 통계 분석에 의한 SAR 시스템, 기술, 활용분야 고찰. 대한원격탐사학회지, 22(2): 153-174.

정한철, 김상완, 김복철, 민경덕, 2004, JERS-1 SAR를 이용한 가은 폐탄광 지역 지반침하 관측. 자원환경지질학회지, 37(5): 509-519.

박노욱, 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 레이다 산란계를 이용한 벼 군락의 후방산란계수 측정, 대한원격탐사학회지, 23(2): 145-152.

Almeida-Filho, R., and Shimabukuro, Y.E., 2000. Detecting areas disturbed by gold mining activities through JERS-1 SAR images, Roraima state, Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 3357-3362.

Berardino, P., Lanari, R., and Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 2375-2383.

Berardino, P., and Casu, F., 2004. A quantitative analysis of the SBAS algorithm performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 5: 3321-3324.

Burgmann, R., Rosen, P.A. and Fielding E.J., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and its Deformation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 169-209.

Bruzzone, L., M. Marconcini, U. Wegmuller, 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.

Chang, H.C, Ge, L., and Rizos, C, 2005, DInSAR for mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images. IGARSS 2005, Seoul, Korea, p.25-29

Curlander, J. C. and R. N. McDonough, 1991. *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons Inc., New York.

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.

Eineder M, Adam N, and Yague-Martinez N., 2007, First TerraSAR-X Interferometry Evaluation, Fringe 2007 Workshop, Frascati, Italy

Engdahl, M. E. and J. M. Hyypa, 2003. Land-cover classification using multitemporal ERS-1/2 InSAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7): 1620-1628.

Farr, T.G, Kobrick, M., Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data, *Amer. Geophys. Union Eos*, 81: 583-585.

Ford, J. P., J. J. Plaut, C. M. Weitz, T. G. Farr, D. A. Senske, E. R. Stofan, G. Michaels, and T. J. Parker, 1993. *Guide to Magellan Image Interpretation*, NASA, JPL.

Gens, R. and J.L. van Genderen, 1996. SAR interferometry - issues, techniques, applications, *International Journal of Remote Sensing*, 17: 1803-1835.

Hajnsek I. and Papathanassiou K., 2007, TerraSAR-X: Exploration of Multitemporal PolSAR and Pol-InSAR Data, Fringe 2007 Workshop, Frascati, Italy

KARI, 2007. Summary of Mission and Concept of Operations, KOMPSAT-5 SAR User Group Workshop, Jeju, 29 May 2007.

Kim S.W. and J.S. Won, 2003, Measurements of Soil Compaction Rate by Using JERS-1 SAR and a Prediction Model, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(11): 2683-2686.

Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., and Sansosti, E., 2004, A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Tracsactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1377-1386.

Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., and Lundgren, P., 2007, Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep; a case study of the Hayward fault, California. *Remote Sensing of Environment*, 109: 20-28.

Lundgren, P., Usai, S., Sansosti, E., Lanari, R., Tesauro, M., Fornaro, G., and Franceschetti, G., 2001, Modelling surface deformation observed with SAR interferometry at Camp Flegre Caldera. *Geophys., Res. Letters*, 106: 19355-19367.

Massonnet, D. and Feigl, K.L. 1998, Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Review of Geophysics*, 36: 441-500.

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.

Stancliffe, R.P.W., and Kooji, M.W.A., 2001, The use of satellite-based radar interferometry to monitor production activity at the Cold Lake heavy oil filed, Alberta, Canada. *AAPG Bulletin*, 85: 781-793.

Strozzi, T., P. B. G. Dammert, U. Wegmuller, 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.

Strozzi, T. and U. Wegmuller, 1998. Delimitation of urban areas with SAR interfermetry, *Proc. of IGARSS 1998*, Seattle, WA, pp.1632-1634.

Tizzani, P., Berardino, P., Casu, F., Euillades, P., Manzo M., Ricciardi, G.P., Zeni, G., and Lanari, R., 2007, Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California investigated with the SBAS-InSAR approach. *Remote Sensing of Environment*, 108: 277-289.

Toutin, T., 1996. Opposite-side ERS-1 SAR Stereo Mapping Over Rolling Topography, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2): 543-549.

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.

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.