

SAR 관련 논문 통계 분석에 의한 SAR 시스템, 기술, 활용분야 고찰

이 훈 열†

강원대학교 지구물리학과

Investigation of SAR Systems, Technologies and Application Fields by a Statistical Analysis of SAR-related Journal Papers

Hoonyol Lee†

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : The purpose of this paper is to establish the category of SAR(Synthetic Aperture Radar) systems, technologies and application fields, thus to provide the world-wide trend in SAR research and development activities by analysing SAR-related journal papers. This paper presents an analysis result of SAR-related journal papers published from the late 1960s to early 2005. Abstracts and indices of 2665 peer-reviewed, English journal papers published in 243 journals were collected from the Cambridge Scientific Abstracts and classified into the categories according to the system, technique, and application field. Statistics on each category were provided so that one can understand the historical and on-going development in SAR systems, techniques, and a variety of application fields such as land, ocean, cryosphere and atmosphere. This statistical analysis data would be a valuable guideline to establish a future SAR system application and satellite manoeuvring policy in Korea.

Key Words : SAR, system, technique, application.

요약 : 이 논문의 목적은 SAR(Synthetic Aperture Radar) 자료를 이용한 연구의 결과인 논문들을 분석함으로써, SAR의 시스템, 기술 및 활용 연구 분야를 체계적으로 정립하고, 세계적인 SAR의 발전 방향을 제시하는데 있다. 이를 위하여 1960년대 후반에서 2005년도 초반까지 출간된 SAR와 관련된 논문을 분류하고 통계적으로 분석하였다. 총 243개 영어 저널에 실린 2665편의 심사를 거친 논문의 초록과 서지를 Cambridge Scientific Abstracts사에서 수집하여, 각 논문에 사용된 SAR의 시스템, 기술, 활용 분야에 따라 분류하였다. 각 분류 체계에 대한 통계 분석을 제시하였으며, 이를 통해 SAR 시스템, 기술, 그리고 육지, 해양, 극지, 대기 분야별 활용의 추세를 살펴보았다. 이 통계적 논문 분석 자료가 향후 우리나라에서 SAR 시스템을 개발하고 운용하며 활용하는데 기초적 자료로 사용될 수 있기를 기대한다.

1. 서론

SAR (Synthetic Aperture Radar)는 구름이나 비와 같은 기상 조건이나 태양 고도의 제약을 받지 않는 전천후 고해상도 영상레이더로서, 1951년 Goodyear Aircraft Corporation의 Carl Wiley에 의해 SAR 원리가 정립된 이래로 현재까지 다양한 시스템 및 활용 분야에 걸쳐 비약적인 발전을 이루었다(Curlander and McDonough, 1991). SAR는 항공기, 인공위성 및 우주선에 탑재되어 육지, 해양, 극지, 대기, 그리고 행성 원격탐사에 있어서 중요한 자료 공급원이 되어왔으며 그동안 수많은 연구 논문의 원천 자료가 되어 왔다.

1957년 최초로 군사적 목적의 SAR 시스템이 미사일과 비행기에 탑재되어 실험되었으며 1960년대 초부터는 전파망원경을 이용한 행성 표면의 관찰이 실시되기 시작했다. 인공위성 SAR 시스템은 1978년 발사되어 100여 일 동안 작동한 미국의 Seasat-A를 시작으로 1990년대에 발사된 유럽의 ERS-1 (1991-2000)과 ERS-2 (1995-현재), 일본의 JERS-1 (1992-1998), 캐나다의 Radarsat-1 (1995-현재)을 통해 본격적으로 지구 관측 자료를 전 세계 과학자들에게 공급하게 되었다. 제 1세대 인공위성 SAR 시스템이라고 할 수 있는 이들 센서의 특징은 단일 파장, 단일 편광, 단일 모드로 대표된다. 단, 캐나다의 Radarsat-1은 제한적이거나 다양한 모드의 영상을 얻을 수 있으며(Ahmed *et al.*, 1990), 우주왕복선에 탑재된 SAR는 1981, 1984, 1994, 2000년에 단 며칠 동안의 짧은 임무 수행 기간에 다편광, 다파장, 다중 안테나를 이용하여 고품질의 자료를 얻기도 했다. 지난 2002년 유럽의 Envisat을 시작으로 2006년 1월에 발사된 일본 ALOS 위성에 탑재된 PALSAR, 그리고 2006년 후반기에 발사될 예정인 캐나다의 Radarsat-2와 독일의 TerraSAR-X 등은 다편광, 다파장, 복합 모드로서 제 2세대 인공위성 SAR 시스템들이라 할 수 있다. 전 세계적으로 SAR 시스템의 경량화 노력이 결실을 맺게 될 가까운 미래에는 전천후 SAR 시스템들이 위성군을 이루어 실시간 지구환경감시가 가능해 질 전망이다.

이러한 SAR의 개발에 있어서 항공기 탑재 SAR가 기술 발전의 근간을 이루고 있다. 모든 인공위성 SAR 시스템은 항공기 탑재 SAR를 통하여 첨단 기술이 시험

되고 개발되고 있다. TOPSAR, IFSARE (USA), C/X-SAR (Canada), EMISAR (Denmark), Ramses (France), ESR (UK), DO-SAR, E-SAR, AeS-1, AER-II (Germany) 등 다수의 항공기 SAR가 존재한다. 또한 1990년에서 1994까지 금성을 탐사한 Magellan SAR, 2004년에 토성 시스템에 도착하여 토성의 달 타이탄(Titan)의 지표면을 지속적으로 촬영하고 있는 Cassini SAR (Elachi *et al.*, 1991) 등, SAR 시스템은 행성 탐사에 있어서도 중요한 탑재체가 되어왔다.

지금까지의 SAR의 발전 경과로 볼 때 향후 수년 안에 다양한 파장, 편광, 모드를 이용한 인공위성 SAR 시스템이 다수 등장하여 여러 분야에 실용화 될 것으로 예상된다. 광범위한 고품질 SAR 자료를 이용한 과학적, 상업적, 군사적 실용화를 앞두고 국제적으로도 기술 완성 단계에 있는 인공위성 SAR의 개발 및 활용 연구에 우리나라가 뒤늦게나마 참여하는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다. SAR는 선진국들의 우주 개발 및 인공위성을 이용한 과학적, 군사적, 경제적 위치 선점의 대열에 참여하기 위하여 반드시 필요한 기술이다. 우리나라에서도 앞으로 2008년 발사를 목표로 인공위성 SAR 개발이 추진되고 있으며 항공기 SAR 센서를 개발 중에 있다. 국제적으로 다편광, 다파장, 다모드의 제 2세대 인공위성 SAR 시스템 시대를 맞이하고 있고 이에 버금가는 우리나라 독자 인공위성 SAR 시스템을 구축하려는 노력이 진행 중인 현 시점에서, 인공위성 SAR의 시스템과 기술 및 활용 분야를 정리하여 소개하는 것은 향후 SAR 개발 방향을 제시하는 매우 중요한 기초 연구라 할 수 있다.

SAR의 연구 동향 및 기술 정보를 전달하는 총설 (review) 논문들은 Gens and Genderen (1996), Bamler and Hartl (1998) 등 기존에도 많이 있어왔다. 그러나 대부분의 총설 논문들은 각 연구 분야의 대표적 논문들의 내용을 요약 정리하여 소개하는 방식인데 반하여, 이 논문의 연구 방법은 SAR와 관련되어 수집 가능한 거의 모든 논문들을 분석의 대상으로 삼고 통계적 분류를 하여 보다 객관적인 SAR 연구의 추세를 살피고자 하였다.

이 논문은 SAR의 시스템, 기술 및 활용 연구 분야를 정립하고 통계적으로 분석하여 SAR의 향후 연구 방향을 알아보고, 나아가 우리나라 인공위성 SAR 시스템을 개발하고 운용하는데 있어서 지표가 될 수 있는 기초 자료

를 제공하고자 한다. 이를 위하여 전 세계에서 SAR와 관련된 영어 심사를 거쳐 영어로 출간된 2700여 저널 논문의 서지와 초록을 수집하고 통계적으로 분석하였다. SAR 자료를 이용한 연구의 결과인 논문을 분석함으로써, 어떠한 SAR 시스템, 기술, 활용 분야가 이루어져 왔는지를 알아보고자 하였다. 이로서 SAR의 발전 방향에 대한 세계적인 추세를 분석하여 향후 SAR 시스템을 개발하고 운용하며 활용하는 정책을 수립하는데 도움이 되고자 한다.

2. 분석 절차

SAR와 관련된 논문의 서지와 초록은 전 세계 모든 학문 분야에 걸쳐 발행된 논문에 대한 정보를 제공하는 CSA (Cambridge Scientific Abstracts)를 통해서 수집되었다. 30년의 역사를 가진 CSA사는 자연과학, 기술공학, 사회과학 분야의 주요저널, 특허문헌, 기술 보고서, 회의록 등에 대한 초록을 포함한 논문단위 서지정보를 제공하는 출판회사로서, 2005년부터 ILLUMINA라는 데이터베이스 서비스를 온라인상에서 제공하고 있다(<http://www.consortia.co.kr/csa>, 강원대학교 라이선스). 논문 검색은 ILLUMINA에서 'Synthetic Aperture Radar'를 검색어로 사용하였다. 검색의 부가적 조건으로

는 다른 연구자의 심사과정을 거친(peer-reviewed) 영어(English only)로 출판된 논문에 국한하였다. 따라서 제 3자에 의한 논문의 검토 과정이 없는 학술대회 논문집이나 연구 보고서 등은 검색에서 제외되었다. 검색 결과 1960년대에서 2005년 3월까지 출판된 총 2839개의 논문이 1차로 선정되었다. 이 논문들의 서지와 초록은 인터넷 서지 관리 프로그램인 RefWorks (<http://www.refworks.com>, 강원대학교 라이선스)로 옮겨졌다. RefWorks에서 제공되는 중복자료 제거 기능을 이용한 결과 총 2733개 논문으로 정리되었다. 보다 구체적인 논문 검색 절차는 Fig. 1과 같다.

논문의 분석을 위해 각 논문들의 제목과 초록의 내용을 읽고 분류하는 작업을 수행하였다. 논문 분류 작업은 자동 검색 및 분류 방법과 전문가에 의한 분류작업이 있을 수 있다. 검색된 논문의 분량이 방대하여 연구 초기에는 RefWorks에서 제공되는 분류 및 검색 기능을 이용하여 논문의 자동 분류를 시도해 보았으나 좋은 결과가 나오지 못했다. 그 이유는 대부분 논문의 초록에는 SAR의 주요 키워드들이 논문의 핵심 내용과 상관없이 삽입되어 있는 경우가 많기 때문에, 한 논문의 주요 요지를 정확하게 찾아낼 수 없었다. 예를 들어, 해양 활용 분야의 내부파(internal wave)를 연구했던 한 논문의 초록을 살펴보면, SAR의 전반적인 내용을 포괄하는 키

1. CSA ILLUMINA(<http://www.consortia.co.kr/csa>)에 로그인 (강원대학교 license)
2. [Power Search] [Advanced Search]
 - 검색필드(한 칸에 입력): synthetic aperture radar
 - Specific Databases: AGRICOLA, Aqualine, ASFA, CSA Technology, Environmental Sciences, Meteorological, Oceanic Abstracts 선택 후 Continue to Search 누름.
 - Data Range: Earliest to 2005
 - Limited to: Journal Articles Only, English Only 체크
 → [Search]
3. [Peer-Reviewed Journals] 선택(약 4145편 논문, 경우에 따라 이 숫자는 조금씩 변함)
4. Record # 4145 → [Go] 선택하여, 중복 안 되는 record 개수 알아냄 (2839편).
5. [Save_Print_Email] 버튼 눌러 [Export to RefWorks]를 실행.
6. 자료량이 많아 한꺼번에 RefWorks로 옮길 수 없으므로, 1-500, 501-1000, 1001-1500, 1501-2000, 2001-2500, 2501-3000을 선택하여 차례로 옮김. 한번 옮기는데 2-3분 소요. 마지막은 2839에서 자동으로 끝남.
7. RefWorks에서 중복(exact와 close)된 자료를 지우는 기능을 사용한 후 2733편이 선정됨.

Fig. 1. Journal paper collection procedure in CSA ILLUMINA.

Table 1. Analysis Procedure and work plan.

논문 검색	2005년 3월 23일자 CSA ILLUMINA 검색	
1차 분석	기간	2005년 5월 13일 - 6월 20일
	내용	논문 2733편 1차 기초 분류
	인원	서울대학교: 김덕진(700편), 박상은(700편), 홍사현(600편) 강원대학교: 채희삼(633편), 이훈열(100편)
2차 분석	기간	2005년 6월 21일 - 8월 21일
	내용	논문 2665편 2차 재분류 및 통계
	인원	이훈열

워드들이 초록의 첫 부분에 삽입되어 있고, 연구의 핵심 활용 부분이 아닌 wave, wind, current 등의 키워드도 빈번하게 사용되고 있기 때문이다. 따라서 자동 분류 방법에 의한 논문 분석으로는 각 논문의 주된 특징을 정의할 수 없으며, 반드시 SAR 분야의 전문가가 일일이 논문의 제목과 초록을 읽어서 분류해야 정확한 결과가 나올 수 있었다.

전문가에 의한 논문 분류를 위하여 Refworks에 있던 자료를 Microsoft Excel 포맷으로 변환하여 저자 이름순으로 배열하였다. 이를 적당한 분량으로 SAR 전문가들에게 나누어 1차 논문 분석을 의뢰하였다(Table 1). 먼저 분석자들과의 회의를 통해 기본적인 분류 체계를 수립하였고, 분석자간 분석 품질의 균질성과 통일성을 위해 원활한 의견 개진에 노력하였다. 또한 분석자 개인의 다양한 의견과 아이디어를 반영하기 위하여 분석 과정에서 필요에 따라 분석자가 분류 체계를 삽입, 병합, 분리 및 삭제할 수 있는 여지를 남겨놓았다. 1차 논문 분류 결과 SAR와 관련 없는 논문이 제거된 후 총 2665편의 논문이 2차 분석 및 통계에 사용되었다. 2차 분석에서는 1차 분석 전문가들의 인식 및 기준에 따른 차이점을 보완하기 위하여 분석 대상에 되는 논문의 서지를 논문별 및 분류 체계별로 종합하여 여러 차례 검토하였다. 특히 분류 기준이 불명확하거나 모호한 부분에는 많은 수정이 가해져야 했기 때문에 의외로 많은 시간이 소요되었다.

3. 논문 분포

분석에 사용된 논문들의 저널별, 연도별 출간 편수의

분포는 다음과 같다.

1) 저널별 논문 분포

먼저 저널별 논문 분포를 살펴보면, 총 2665편의 논문이 243개 저널에 분포되어 있었다(Fig. 2). SAR 관련 논문이 가장 많이 실린 저널은 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing으로서 685편이 실려 전체 2665편의 25.7%를 차지하고 있다. International Journal of Remote Sensing에는 280편이 실렸으며, 이는 전체의 10.5%에 해당한다. 이 밖에도 Journal of Geophysical Research에 237편(8.9%), IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems에 158편(5.9%), Remote Sensing of Environment에 126편(4.7%)이 실렸다. 위와 같이 상위 다섯 개 대표적인 저널에 1486편이 실려 있어 전체 논문 중 57%의 논문이 집중되어 있음을 알 수 있다. 앞으로 SAR 기술이 보편화되고 여러 학문 분야에 두루 적용된다면 기타 저널에 고루 퍼지는 현상이 나타날 수 있으나, 당분간은 이러한 논문 집중 현상이 유지될 것으로 추측된다.

전체 SAR 관련 논문 중에서 2.5% 이하, 1%이상의 논문 편수를 가지는 저널은 Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (66편 2.5%), IEEE Transactions on Antennas and Propagation (56편, 2.1%), Johns Hopkins APL Technical Digest (49편, 1.8%), Geophysical Research Letters (48편, 1.8%), Advances in Space Research (45편, 1.7%), IEEE Transactions on Image Processing (41편, 1.5%), IEEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation (38편 1.4%), IEEE Journal of Oceanic Engineering (35편, 1.3%), Journal of Glaciology (35편, 1.3%), Annals of Glaciology (32편, 1.2%)로 조사되었다.

이 밖에 1% 이하의 편수를 가지는 저널은 Optical Engineering (25편, 0.9%), Electronics Letters (23편, 0.9%), IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine (21편, 0.8%), Atmosphere-Ocean (20편, 0.8%), Water Resources Research (17편, 0.6%), Science (15편, 0.6%), Radio Science (14편, 0.5%), Acta Astronautica (12편, 0.5%), Bulletin of the Seismological Society of America (12편, 0.5%), ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote

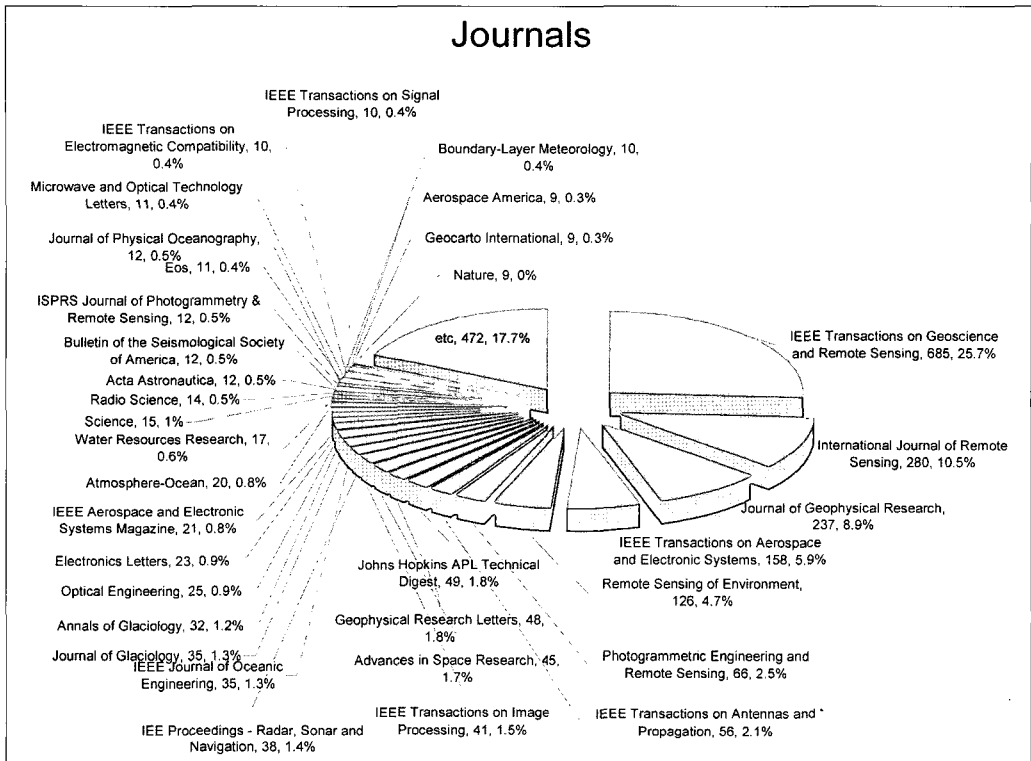


Fig. 2. Distribution of SAR-related journal papers.

Sensing (12편, 0.5%), Journal of Physical Oceanography (12편, 0.5%), Eos (11편, 0.4%), Microwave and Optical Technology Letters(11편, 0.4%), Boundary-Layer Meteorology (10편, 0.4%), IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (10편, 0.4%), IEEE Transactions on Signal Processing (10편, 0.4%), Aerospace America (9편, 0.3%), Geocarto International (9편, 0.3%), Nature (9편, 0.3%) 등이 있다. 기타 427편의 논문들은 8편씩 5개 저널, 7편이 실린 1개 저널, 6편씩 6개 저널, 5편씩 9개 저널, 4편씩 11개 저널, 3편씩 18개 저널, 2편씩 35개 저널, 1편씩 124개 저널에 분포되어 실려 있는 것으로 조사되었다.

2) 연도별 논문 분포

연도별 논문 출간 편수를 살펴보면 Fig. 3과 같다. 이번 조사에 의하면, 1967년에 1건(Brown, 1967)을 시작으로 1970년대 초부터 SAR 관련 논문이 본격적으로 발표되기 시작하였으며, 1978년 최초로 과학용 SAR 센서

를 탑재한 Seasat-A 인공위성이 발사된 이래로 논문 수가 급격히 증가하였다. 이러한 SAR 논문 편수의 급격한 증가 추세는 여러 차례의 우주왕복선 임무 (1981, 1984, 1994, 2000)와 유럽의 ERS-1(1991), 일본의 JERS-1(1992), 유럽의 ERS-2(1995), 캐나다의 Radarsat-1(1995), 그리고 유럽의 Envisat(2002)의 발사로 지속적으로 유지된 것으로 보인다. 이는 전 세계적으로 SAR 위성이 지속적으로 발사되고 자료가 풍부해지면서 과학적인 성과물이 많아졌다는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 3에서 2004년과 2005년의 논문 편수는 오히려 감소한 것으로 나타나는데, 이는 이 연구에서 분석 대상인 논문을 선정한 것이 2005년 3월일을 감안할 때 CSA에 논문 자료가 아직 정리되지 않았기 때문일 것으로 추정된다. 그러나 2001년에서 2003년도의 논문 출판 수 감소 추세는 주목받을 만한 현상이다. 이러한 이상 현상이 Envisat, ALOS, Radarsat-2 등과 같은 새로운 SAR 센서를 탑재한 인공위성의 발사가 근래에 여러 가지 원인으로 수년간 지연된 것 때문에 과학적인 연구가 위축되고 있는 것이 아닌지 우려를 낳게 하지만,

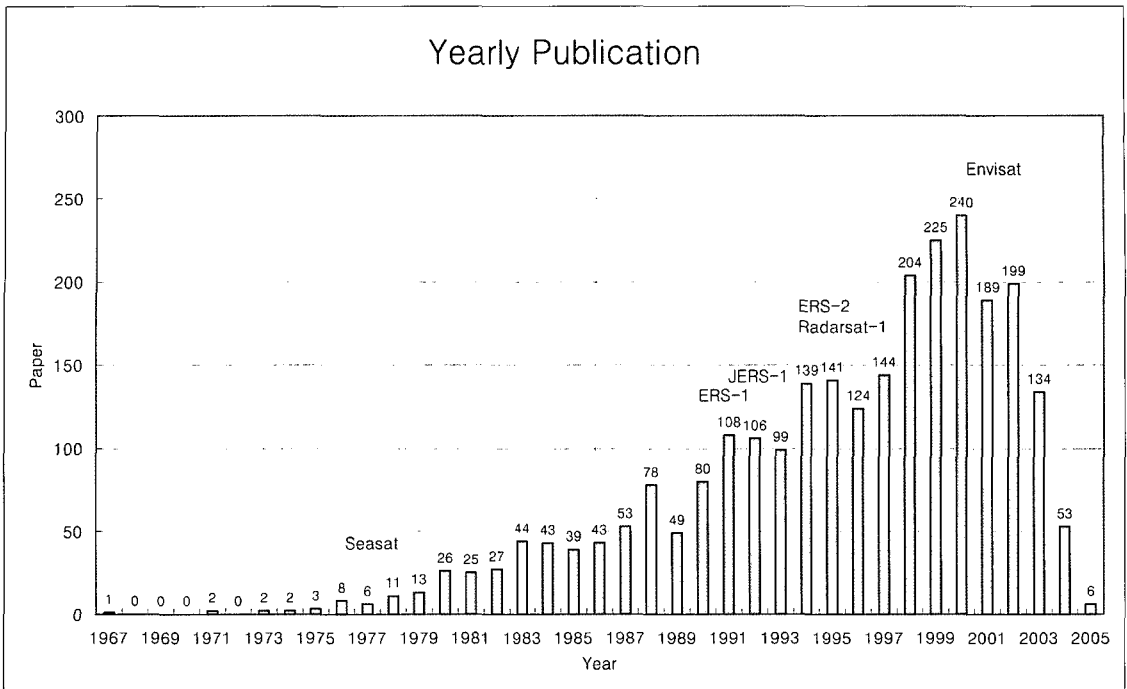


Fig. 3. Yearly publication of SAR-related journal papers.

이 연구에서는 이를 뒷받침 할 자료가 충분하지 않아 추측할 따름이다.

4. 논문 분류 체계

분석 대상인 논문들은 각 연구에 사용된 SAR 시스템(System), 기술(Technology) 및 활용 분야(Application Field)에 따라 대분류되었으며, 각 분류 기준 별로 소분류를 하였다. 이와 함께 각 분야별 대표적 논문이거나 기존의 연구들을 정리한 리뷰 논문(Representative or Review)인 경우를 따로 분류하였다. 이상 네 가지를 기준으로, 소위 STAR 체계를 만들었으며 이를 다시 세부 분야로 나누었다(Table 2). 즉, 논문의 제목과 초록을 바탕으로 하여 어떤 한 논문에서 사용된 시스템, 기술, 활용 분야, 그리고 이 논문이 총설에 해당하거나 추천할 만한 대표 논문인지 여부를 조사하였다. 다음은 각 분류 기준별 세부 사항이다.

1) 시스템(System) 분류 체계

SAR 시스템은 기능에 따른 분류 방법과 탑재체에 따

른 분류 방법이 있을 수 있다. 이 논문에서 시스템 분류 체계는 편의상 대표적인 SAR 탑재체를 위주로 분류하는 방법을 택하였으나, SAR 시스템에 대한 전반적인 이해를 돕기 위하여 SAR 기능에 따른 분류 방법을 먼저 소개한 후 SAR 탑재체에 의한 분류 체계를 기술하였다.

(1) SAR 기능에 따른 분류

SAR 시스템의 유형은 센서가 지향하는 목표, 비행체의 종류, 안테나 개수, 마이크로파 중심 진동수, 편광 및 영상 촬영 방식에 따라 여러 가지 형태로 나뉜다(Table 3).

SAR 센서가 지향하는 목표물은 크게 지구(Earth)이거나 태양계 행성(planets)으로 나뉠 수 있다. SAR 센서를 탑재하는 비행체(Vehicle)의 특성에 따라 정지형(stationary), 항공기(airborne), 인공위성(satellite), 왕복선(shuttle) 이나 우주선(spaceship)이 있을 수 있다. 정지형 SAR 시스템은 센서는 일정 장소에 고정되어 있으면서 물체의 움직임을 통하여 SAR의 해상도를 구현하는 것으로서, Inverse SAR(ISAR) 시스템이나 Arecibo 전파 망원경을 이용한 행성 탐사용 SAR 등이 좋은 예가 될 수 있다. 센서와 물체간의 상호 움직임을 통하여 고해상도를 얻는 SAR 센서는 개발 초기부터 비

Table 2. Classification Scheme (STAR).

STAR	Class	Sub-class	Description
System	Unrepairable	SEASAT-A	1978(100days), USA, L-HH
		ERS-1/2	1991-2000(ERS-1), 1995-(ERS-2), EU, C, VV
		Radarsat-1	1995-, Canada, C, HH
		JERS-1	1992-1998, Japan, L, HH
		Envisat	2002-, EU, C, dual pol.
	Repairable	Planetary Sensors	radio telescope, Magellan, Cassini
		Shuttle	SIR-A, SIR-B, SIR-C/X-SAR, SRTM
		Airborne Sensors	onboard airplane
		Ground/ISAR	GB-SAR, ISAR
	ETC	ETC	Scatterometer, Radiometer, Altimeter, Almaz, Receiving System, etc
Technology	Basic	SAR General	visual interpretation
		SAR Algorithm	modelling, parameter extraction
		SAR System/Processor	focusing, filter, new system
		SAR Classification	Thematic Mapping
	Advanced	Radarclinometry	Shape-from-shading
		Radargrammetry	Stereo SAR
		InSAR DEM	Interferometry, Phase unwrapping
		InSAR Coherence	change detection, decorrelation
		DInSAR	Differential InSAR, surface deformation
		PSInSAR	Permanent Scatterer InSAR
		PolSAR	Polarimetry
		Pol-InSAR	Polarimetric and Interferometric SAR
		Tomography	3D modelling
ATI	Along Track Interferometry		
Application	Land	Agriculture	agricultural crop, vegetation, trees, but agricultural soil goes to Soil.
		Archeology/Subsurface	subsurface penetration, paleo-channel, landmine detection.
		Topography	DEM from InSAR, radargrammetry, and radarclinometry. Slope angle from PolSAR.
		Forestry	forest, biomass, vegetation. forest fire, deforestation, but crop goes to agriculture
		Geology	lithology, structural mapping, geomorphology, mineral exploration, lineament.
		Geotectonics	tectonic motion, subsidence, land slide, tectonic strain
		Hydrology	rivers. lakes, limnology, flood, snow, ice (non-polar)
		Seismology	earthquake displacement
		Soil	soil moisture, soil type (natural or agricultural)
		Volcanology	volcanic morphology, swell, subsidence, lava flow, eruption
		Urban/Manmade	urban area mapping. Target, building, power line, foliage/snow penetrating target detection.
		Thematic Mapping	land cover map. Classification of various surface type.

Table 2. Continued.

STAR	Class	Sub-class	Description
Application	Ocean	Wind	wind speed and direction measurement from capillary or gravity wave by backscattering coefficient. comparison with scatterometer
		Surface Wave	wave caused by wind, bathymetry, tide, etc. wave spectra. waves visible in SAR resolution.
		Internal Wave	surface imprint of internal wave
		Current	eddies, upwelling, current, frontal system
		Bathymetry	subwater topography from wind/wave/tide pattern
		Slick	oil slick, biological film
		Ship	ship detection, ship wake
	Cryosphere	Intertidal/Coastal	intertidal zone, coastal zone.
		Glaciers	glacier motion, Glacier snow cover, glacier retreat/expansion
		Sea Ice	sea ice type, first year ice, multi-year ice, pressure ridge, lead, polynya, floe, Iceberg, sea ice snow cover.
	Atmosphere	Ice Sheet/Ice Shelf	continental ice cap, ice stream, ice sheet motion, topography, hinge-line of ice shelf, snow on ice sheet/ice shelf
amplitude		weather systems imprinted on ocean surface. Storm, rain, wind, weather front, atmospheric lee wave, marine atmospheric boundary layer, vortex, solitons, atmospheric gravity wave.	
	phase	atmospheric delay or refraction of radar signal by water vapor, ionosphere, etc.	
Representative or Review paper			representative, exemplary paper recommended for vital reading or review paper

Table 3. SAR Systems (Mode-based).

Specification	Type
Target	Earth or planets
Vehicle	stationary, airborne, satellite, shuttle or spaceship
Antenna	monostatic or bistatic
Carrier frequency	X, C, S, L, or P bands
Polarization	single-, dual-, full-polarization (HH, HV, VH, VV)
Imaging mode	strip, scan, spot, etc

Examples:

- SIR-C/X-SAR: Earth, shuttle, monostatic, L/C/X, full-pol, strip.
- ERS-1/2: Earth, satellite, monostatic, C, VV, strip
- SRTM: Earth, shuttle, bistatic, C/X, HH/VV, strip
- Arecibo Antenna: planet, stationary, monostatic, multi-bands, multi-pol, strip/spot
- Magellan, Cassini SAR: planet, spaceship, monostatic, S, HH, strip
- AIRSAR/TOPSAR: earth, airborne, mono/bi, L/C/P, full-pol, strip

행기에 탑재되어 기술 발전을 이루어왔다. 최근에도 거의 모든 첨단 SAR 장비는 비행기에 장착되어 시험되고 있으며, 인공위성 SAR 센서의 보정에도 항공기 SAR 시스템에 광범위하게 사용되고 있다. SAR 연구에 있어서 인공위성의 장점은 개발 초기에는 막대한 비용이 들지만 안정적인 궤도에서 고품질의 자료를 지속적으로 얻을 수 있다는 인공위성 센서의 장점과 함께 발전해왔다. 또한 행성 탐사에 있어서 대기보다 가깝고 있어서 가시광선이나 적외선 영상에서는 행성의 표면을 관찰할 수 없는 금성이나 토성의 달 타이탄 탐사에 활용되고 있다. 한편 지상(Ground-based) SAR는 지상에서 레일이나 케이블을 이용하여 레이더의 움직임을 얻어 SAR 영상으로 합성하여 장기간 관측하기도 한다.

SAR는 하나의 안테나에서 송수신을 모두 하는 monostatic 방식이거나, 두 개의 안테나를 이용하여 하나는 송수신을 하고 다른 하나는 수신만을 하는 bistatic 형태로 운용되고 있다. 현재까지 대부분의 인공위성 탑재 혹은 행성탐사용 SAR는 모두 monostatic 방식을 취

하고 있다. 그러나 비행기 탑재용 SAR의 대부분과 우주 왕복선에서는 bistatic 방식으로 운용되어 수치지형도를 얻거나 목표물의 움직임을 interferometry 기법으로 얻고 있다.

SAR는 전자기파의 중심 진동수에 따라 X, C, S, L, P 밴드 등으로 나뉜다. 항공기나 우주왕복선 탑재 SAR에서는 여러 가지 안테나를 이용하여 두 가지 이상의 중심 진동수를 가지는 SAR 센서가 존재하지만, 아직까지 인공위성 센서에서는 단일 중심 진동수만을 이용하고 있다.

마이크로파의 편광은 입사하는 편광과 후방 산란하는 편광의 종류에 따라서 HH, HV, VH, VV의 네 가지가 있을 수 있다. 대부분의 인공위성 SAR 센서는 단일 편광만을 사용하고 있으나 최근에는 두 가지 편광을 선택하여 얻을 수 있는 인공위성 센서들이 발사되어 운용 중이거나(Envisat, ALOS) 발사를 기다리고 있다(Radarsat-2, TerraSAR-X).

영상을 촬영하는 방식에 있어서도 고정된 빔 패턴을 유지하면서 연속적으로 자료를 얻는 strip모드, 안테나 빔의 지향각을 교차 변화시켜서 한 궤도에서 비교적 넓은 지역을 낮은 해상도로 촬영하는 방식인 scan 모드, 좁은 지역에 빔을 집중시켜 공간해상도를 높이는 spot 모드(Carrara *et al.*, 1995) 등이 있다. 기존의 인공위성 SAR는 strip 모드로 고정되었으나, Radarsat-1과

Envisat 이후의 인공위성 센서에는 여러 모드로 촬영할 수 있는 능력을 갖추고 있다.

(2) SAR 탑재체에 따른 분류

SAR 시스템을 논문에서 자주 인용되는 탑재체(Vehicle) 및 고유 명칭에 따라 분류하는 것이 논문 분석에 용이하다. SAR 시스템들은 크게 수리가 불가능한(unreparable) 것과 가능한(repairable) 것으로 나누어 볼 수 있으며, 인공위성 및 무인우주선에 탑재된 시스템은 전자에 해당되고 항공기 및 우주왕복선 탑재 센서는 후자에 해당한다(Table 4).

먼저 수리가 불가능한 인공위성 및 무인우주선 탑재용 SAR 시스템은 편의상 1세대, 2세대, 차세대로 나누었다. 여기서 1세대 인공위성 SAR 시스템은 1978년 Seasat-A를 시작으로 하여 1990년대에 발사된 ERS-1/2, JERS-1, Radarsat-1이 이에 해당한다. 이들의 특징은 단일 파장, 단일 편광 및 단일 촬영 방식(Radarsat-1 제외)에 국한되어 있다(Table 5). 이러한 시스템은 지구 전체를 미리 세우둔 계획에 의하여 균질한 사양의 자료를 지속적으로 촬영하는데 적합하다. 특히 매우 비슷한 조건으로 시기적으로 다른 영상들을 얻을 수 있기 때문에, SAR Interferometry 기술의 발전에 큰 공헌을 하였다. 제 2세대 인공위성의 대표적인 특징은 이중 혹은 다중 편광을 활용한다는 것이며 또한 다양한 촬영 방식을 제공

Table 4. SAR Systems (Vehicle-based).

Class	Sub-Class	SAR Systems	Characteristics
Unreparable SAR (Satellite and Spaceship)	1st Generation	SEASAT-A (USA, 1978), ALMAZ-1 (Russia, 1991-1993), Magellan SAR (US, 1990-1994, Venus), Cassini SAR (US, 1997-2004-, Titan), ERS-1 (EU, 1991-2000), ERS-2 (EU, 1995-), JERS-1 (Japan, 1992-1998), Radarsat-1 (Canada, 1995-)	single frequency, single polarization, single mode (except Radarsat-1)
	2nd Generation	ENVISAT (EU, 2002), RADARSAT-2 (Canada, 2006s), PALSAR (Japan, 2006s), TerraSAR-X(EU, 2006s), TanDEM-X (EU, 2008s)	single freq., dual-pol, multi-mode (s: scheduled)
	Next Generation	LightSAR (US), MicroSAR(EU), Military SAR systems	light, constellation, real time
Repairable SAR (Shuttle, Airborne, Ground Systems)	Shuttle	SIR-A (USA, 1981), SIR-B (USA, 1984), SIR-C/X-SAR (USA, Germany, Italy, 1994), SRTM (USA/Germany, 2000)	multi-frequency, full-polarization, multi-mode, bistatic (SRTM)
	Airborne	TOPSAR (JPL, USA), IFSARE (ERIM/Intermap, USA), DO-SAR (Donier, Germany), E-SAR (DLR, Germany), AeS-1 (Aerosensing, Germany), AER-II (FGAN, Germany), C/X-SAR (CCRS, Canada), EMISAR (Denmark), Ramses (ONERA, France), ESR (DERA, UK), etc.	fairly versatile

Table 5. SAR System Specifications.

Sensor	Country	Mission period	Band	polarization	Look angle (degree)	Antenna size (azimuth × range, m)	Alt. (km)	Swath (km)	Peak Power (kW)	Resolution(m)	Data rate (Mbps)
SEASAT-A	USA	6/1978-, 105 days	L	HH	20	10.8 × 2.2	795	100	1	25	110 (5 bps)
SIR-A	USA	11/1981, 2.5 days	L	HH	47	9.4 × 2.2	260	50	1	25	Optical
SIR-B	USA	10/1984, 8.3 days	L	HH	15-60	10.8 × 2.2	224, 257, 360	20-40	1.1	25	30.4 (3-6 bps)
SIR-C/ X-SAR	USA/ Germany, Italy	4/1994, 11 days	L/C/X	full	20-55	12 × 2.9/ 12 × 0.7/ 12 × 0.4	225	15-90, 225	4.4/1.2/ 1.4	25	90 (4-8 bps) /45(4-6 bps)
ALMAZ-1	Russia	3/1991-, 2.5 yrs	S	HH	20-65	12 × 1.5	300 -70	30-45	250	15	87.5 (5 bps, I/Q)
ERS-1	EU	7/1991-2/ 2000	C	VV	20	10 × 1	780	100	4.8	25	105 (5 bps, I/Q)
ERS-2	EU	4/1995-present	C	VV	20	10 × 1	780	100	4.8	25	105 (5 bps, I/Q)
JERS-1	Japan	2/1992-10 /1998	L	HH	38	12 × 2.4	570	75	1.3	25	60 (3 bps, I/Q)
Radarsat-1	Canada	11/1995-present	C	HH	20-60	15 × 1.5	790 -820	50-500	5	10-100	85, 105 (4 bps, I/Q)
SRTM	USA/ Germany	2/2000, 11 days	C, X	HH/ VV	20-60	12 × 0.7/ 12 × 0.4	233	56-225	1.2/1.4	25	180 (C), 90 (X)
Envisat	EU	2002	C	dual	15-45	10 × 1	800	57-400	0.6-1.3	25	100
Radarsat-2	Canada	ca. 2006	C	full	variable	15 × 1.5	790-820	20-500	-	3-100	-
ALOS (PALSAR)	Japan	1/2006	L	dual	8-60	8.9 × 2.9	692	30-350		10-100	120, 240
TerraSAR-X	Germany	ca. 2006	X	dual	20-45	4.8 × 0.7	515	10-100	2	1-16	300
TanDEM-X	Germany	ca. 2008	X	dual	20-45	4.8 × 0.7	515	10-100	2	1-16	300
LightSAR (US SAR)	USA	-	L, C, or X	full	variable	-	-	-	-	-	-
COSMO-Sky Med	Italy	-	X	-	-	-	600	-	-	-	-
SMART SAR	Germany	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

한다는 것이다. 공간해상도 또한 10미터 이하 혹은 1미터 까지 개발되고 있다. 지난 2002년 발사된 유럽의 Envisat, 2006년 1월 발사된 일본의 ALOS PALSAR, 앞으로 발사 예정인 RADARSAT-2 (Canada, 2006년 예정), TerraSAR-X (EU, 2006년 예정), TanDEM-X (EU, 2008년 예정) 등은 제 1세대 인공위성 보다 훨씬 다양한 영상들을 제공할 것으로 기대를 모으고 있다. 차세

대 인공위성 SAR 시스템의 특징은 보다 진보된 기술을 이용한 시스템의 경량화에 초점이 맞추어 지고 있다. 또한 위성군을 이루어 실시간으로 영상을 촬영할 수 있는 기술에 집중되고 있다. 또한 지구 정지 궤도나 중궤도에 있는 방송용 위성의 신호를 재사용 하는 방식으로 전지구적 관찰을 하는 시스템의 구상을 비롯하여 매우 다양한 개념의 센서가 개발되고 있다.

수리가 가능한 우주왕복선, 항공기 및 지상 SAR 시스템은 새로운 기술 개발에 맞추어 확장하거나 신 개념의 SAR 시스템을 시험해 볼 수 있기 때문에 첨단 기술들이 집약되어 있다. 우주왕복선에 SAR 센서를 실어 영상을 얻었던 SIR-A (USA, 1981), SIR-B (USA, 1984), SIR-C/X-SAR (USA, Germany, Italy, 1994)는 다파장, 다편광, 다양한 촬영 모드를 이용하여 고품질의 자료를 얻었고, 특히 SRTM (USA/Germany, 2000)은 서로 60m 떨어진 두 안테나에서 C-band와 X-band를 이용하여 남위 60도에서 북위 60도까지 전세계 30m DEM (Digital Elevation Model)을 구축할 자료를 단 11일 만에 얻기도 했다. 비행기에 탑재된 센서들 역시 매우 다양한 첨단 기술들의 시험장이 되고 있으며 연구 단계를 지나 상업화되기도 한다. 비행기 탑재 SAR로는 TOPSAR (JPL, USA), IFSARE (ERIM/Intermap, USA), DO-SAR (Donier, Germany), E-SAR (DLR, Germany), AeS-1 (Aerosensing, Germany), AER-II (FGAN, Germany), C/X-SAR (CCRS, Canada), EMISAR (Denmark), Ramses (ONERA, France), ESR (DERA, UK) 등이 대표적이다.

2) 기술(Technology) 분류 체계

SAR 기술은 크게 기초 기술(Basic Technology)과 진보 기술(Advanced Technology)의 두 가지로 세분화였다. 기초 기술은 주로 SAR의 밝기 영상을 이용하거나 SAR 시스템과 관련된 기술을 총칭하며, 이는 다시 SAR General, SAR Algorithm, SAR System/ Processor, SAR Classification으로 세분된다. 진보 기술은 SAR의 다시기 및 다양한 종류의 밝기 영상을 이용하거나 두 장 이상의 SAR 자료의 위상차(phase difference)를 이용한 기술을 뜻한다. 진보 기술에는 Radarclinometry, Radargrammetry, InSAR DEM, InSAR Coherence, DInSAR, PSInSAR, PolSAR, Pol-InSAR, Tomography, ATI 기술이 포함된다. SAR 기술의 구체적인 분류 기준 및 기술 소개는 다음과 같다.

(1) Basic Technologies

SAR General은 주로 SAR 밝기 영상을 통해 목표가 되는 사물의 형태나 구조 및 물리적 특성을 해석하는 일반적 기술을 총칭한다. SAR Algorithm은 SAR 영상에

서 보이는 물체의 산란 특성을 모델화 하여 시뮬레이션 한다거나 필요한 물리적 인자를 추출하는 알고리즘을 개발하는 기술을 포함한다. SAR System/Processor는 SAR focusing, 필터링(filtering), 또는 새로운 개념의 SAR 시스템을 구성하기 위한 기술을 뜻한다. SAR Classification은 SAR 영상을 이용하여 목표물의 종류를 구별하여 주제도(Thematic Map)를 작성하는 것을 목표로 하는 판독 기법을 총칭한다.

(2) Radarclinometry

Radarclinometry는 SAR 단일 영상의 밝기 값이 지표면의 경사각과 밀접한 관계가 있음을 근거로 이를 역산하여, 영상의 밝기 값에서 지표면의 DEM을 얻고자하는 기술로서, Shape-from-Shading이라고도 한다. 이 기술의 장점은 단일 영상 혹은 때로는 두 장 이상의 영상의 밝기 값만을 이용하여 DEM을 얻을 수 있기 때문에, 매우 제한된 자료만이 존재하는 행성 탐사의 경우에 이용될 수 있다. 그러나 영상의 밝기 값과 지표 경사각의 관계식이 매우 정확하게 알려져 있어야 하며 경사각을 DEM으로 바꾸는 적분 과정에서 초기 오차가 계속 누적되는 문제점이 있다. 이를 보완하는 여러 가지 알고리즘이 개발되기도 하였으나, 불균질한(inhomogeneous) 피복을 보이는 지표에서는 그 사용이 극히 제한적이다.

(3) Radargrammetry

Radargrammetry는 서로 다른 각도에서 촬영한 두 장의 SAR 영상을 이용하여 입체시 효과를 보는 것으로서 광학의 photogrammetry에 해당한다. 이 기술은 보통 스테레오 기법이라고도 불리며, 두 영상의 촬영 방향에 따라 촬영 방향이 같은 same-side stereo와 opposite-side stereo로 나뉜다. 극궤도 위성인 경우 same-side stereo는 주로 목표물을 향하여 레이다 펄스가 같은 쪽(동쪽 혹은 서쪽)에서 바라보도록 하되 두 영상의 입사각을 보통 10-40도 이상 크게 달리하여 촬영한 경우에 얻어진다. 보통은 위성의 진행 방향을 향하고 보았을 때 안테나가 한쪽(오른쪽 혹은 왼쪽)으로 향하도록 고정된 상태에서 ascending(혹은 descending) 하는 두 궤도에서 촬영된다.

두 영상을 해석 도화기나 컴퓨터를 이용하여 지상의 각 지점마다 시차(parallax)를 계산하고, 이를 그 지점

의 지상 고도로 계산하여 DEM을 얻는다. 이 보다 나중에 개발된 InSAR 기술은 위상차를 이용하기 때문에 위성 궤도 운용의 정확성을 수십 미터 이하로 유지해야 하고 궤도 정보를 때로는 수 센티미터 단위로 측정해 내어야 하는데 반하여, radargrammetry는 궤도의 정확성을 수 킬로미터 내로 유지하면 된다는 편리성이 있다. 따라서 InSAR 기술이 발달하기 훨씬 전부터 광학 영상을 쉽게 얻을 수 없는 지역의 DEM을 추출하는 방법으로 사용되어 왔다. 그러나 이 기술은 레이더 펄스의 입사각의 차이가 클수록 지표의 높이 해상도는 높아지는 대신에 지형에 따른 기하 왜곡(geometric distortion)이 커져서 영상 간 상호 정합이 어렵게 되는 결점이 있다. 특히 Opposite-side stereo SAR는 same-side보다 지표 높이의 분해능은 이론적으로 높지만 SAR의 기하 왜곡이 매우 심하여 평탄한 지역에서만 제한된 결과를 얻을 수 있다. 또한 각 픽셀의 시차를 구하여 고도를 구하기 위해서는 최소한 한 번이 수 십 픽셀 크기의 영상 조각을 사용하여야 하기 때문에 DEM의 수평해상도가 SAR 해상도에 비하여 수십 분의 1로 감소하는 단점이 있다.

(4) InSAR DEM

InSAR DEM은 두 장 이상의 복소수 형태의 SAR 자료에서 위상차 정보를 이용하는 Interferometric SAR (InSAR) 기술 중에서 고해상도 DEM을 얻어내는 기술이다. 두 장의 SAR를 얻는 방법으로, 두 개의 안테나를 동시에 비행체에 탑재하여 한 안테나는 송수신을, 다른 하나는 수신만을 담당하는 형태로 운영(single-pass interferometry)될 수 있으며, 이는 대부분의 항공기 시스템과 우주왕복선을 이용한 SRTM 임무에서 사용된다. 또 다른 형태의 InSAR DEM은 하나의 시스템으로 시간적인 차이를 두고 매우 비슷한 비행 궤도를 재현하여 두 장의 SAR를 얻는 방법으로서(repeat-pass interferometry), 주로 인공위성 탑재 SAR에서 이루어진다. 이 때 궤도의 재현성이 매우 정확해야 하기 때문에 항공기 시스템에 이 방법을 적용하는 것은 매우 어렵다(Gens and Genderen 1996).

이와 같이 시간적 혹은 공간적으로 서로 떨어져 있는 두 안테나는 SAR를 탑재한 비행체의 진행 방향에 수직인 평면상에 정렬되기 때문에 Cross-Track

Interferometry (XTI)라 하며, 레이더 펄스의 입사 방향에 수직으로 정렬되어야 지형 고도에 대한 분해능을 얻을 수 있다. InSAR DEM 기술로 얻을 수 있는 고도 정밀도는 두 안테나간의 거리(baseline) 중에서 레이더 펄스의 진행 방향에 수직인 성분(baseline perpendicular, Bp)이 클수록, 그리고 마이크로파의 파장이 작을수록 정밀도가 높아진다(Bamler and Hartl, 1998). 하지만 Bp가 너무 커지면 간섭위상을 일으키지 못하는 현상이 발생하여 Critical Baseline(Bc)이라는 값에 의해 제한된다. Bc는 마이크로파의 파장과 SAR 펄스의 밴드 폭(혹은 range 해상도의 역)에 비례한다. 보통의 경우 절대 고도 정확도는 수 십 미터 내외가 되며, 상대 고도 정확도는 수 미터에서 수 센티미터 정도이다.

InSAR DEM은 SAR의 각 픽셀에 높이에 관한 정보가 위상의 형태로 담겨져 있기 때문에 SAR의 수평해상도가 거의 그대로 유지되며, 이것은 radargrammetry 기술에 비하여 커다란 장점으로 부각된다. 그러나 기술적인 면에서 볼 때 인공위성 두 궤도의 정확한 위치를 1 미터 이하의 정확도로 알아내야 하고, phase unwrapping과 같은 과정에서 계산 시간이 많이 소요되기 때문에 기술적으로 고난도에 속한다.

InSAR DEM 기술의 시작은 1978년 Seasat-A의 자료의 위상을 이용하여 활기차게 추진되었다. 그러나 두 장의 영상이 적게는 수일에서 수십일 혹은 몇 달의 시간차가 존재하는 관계로 지표면이 식생이나 수분 변화가 심한 중위도 몬순 지역에서는 위상이 무작위로 급변하기 때문에 InSAR DEM 기술을 적용하기 매우 어렵다. 따라서 단일 안테나를 사용하는 repeat-pass interferometry를 이용한 InSAR DEM은 인공위성의 재촬영 간격이 줄어들지 않는 이상 지표의 무작위적 변화가 거의 없는 건조기후 혹은 극한 지역을 제외하고는 연구 단계에 머물고 있다.

이에 반하여 두 안테나를 동시에 탑재한 항공기 SAR에서는 실용화 및 상용화가 이루어지고 있는 추세이며, 지난 2000년 우주왕복선을 이용한 SRTM 임무는 두 대 안테나의 거리를 60m로 유지하면서 11일 동안 남위 60도에서 북위 60도까지 전 세계 DEM을 30미터 수평해상도로 얻었으며, 2004년도에 전 세계 90미터 해상도, 미국은 30미터 해상도로 인터넷에 공개하고 있다. 인공위성을 이용한 InSAR DEM은 보통 기선 길이를 수십

미터에서 수백 미터로 유지시키는 것이 필요하다. 여러 극궤도 위성이 위성군을 이루어 InSAR DEM기술이 발전된다면 SRTM에서 얻지 못한 극지방을 포함하여 전 지구적인 DEM이 매우 정확한 정밀도로 얻어질 것으로 기대된다.

(5) InSAR Coherence

InSAR Coherence는 InSAR의 간섭 위상의 긴밀도 혹은 신호의 안정성의 척도로서 지표의 무작위적인 변화(random surface change)를 검출해 낸다. 움직임이 없고 표면 산란만을 일으키는 표면에서는 매우 높은 coherence 값을 가지게 되는 반면 움직임이 많고 체적 산란을 일으키는 물체는 낮은 coherence를 갖게 된다.

물리적으로 coherence는 어떤 물리적 현상이 시간에 따라 얼마나 안정적인가를 보는 것으로서, 복소수 형태의 두 장의 SAR 자료에 대한 공분산 계수(correlation coefficient)를 시간적인 평균을 통해 구한다. 그러나 두 SAR 자료는 각각 단 한 번의 측정만이 이루어지기 때문에, SAR 자료의 공간적인 평균으로 시간적인 평균을 대신한다. 이론적으로는 공간적 평균을 구하는 영역이 넓을수록 정확한 coherence 값을 구할 수 있으나, 이 영역 내에서 산란체가 균질(homogeneous)해야 한다는 조건 때문에 영역의 크기에 제한이 있게 되며, 이에 따라 coherence 값의 추정에 오차가 들어가게 된다. 이 오차는 특히 coherence가 낮은 곳에서 심하게 발생하며, 실제 coherence 값을 과대평가하는 경향이 생긴다.

InSAR DEM이나 DInSAR에서는 높은 coherence를 가지는 영역, 즉 픽셀 내부의 산란체들이 무작위적으로 변화하지 않는 산란체에 대해서만 의미 있는 정보를 추출한다. 즉, 산란체들은 정지해 있는 상태에서 여러 픽셀에 걸쳐 있는 지역의 지반의 위치가 점진적으로 변화할 때 발생하는 안정적이고도 규칙적인 변화(systematic surface change)를 위상차로 감지하여 지표의 고도나 변위를 구하는 기술인데 반하여, coherence는 픽셀 내부의 산란체들의 분포가 무작위로, 혹은 파쇄적으로 변화하여 위상차가 매우 불규칙한 곳을 정보화 하여 무작위적 표면 변화를 검출해 내는 것이 특징이다.

SAR의 위상은 센서와 목표물의 왕복 거리를 중심 좌장으로 나눈 거리가 360도에 해당하며, SAR의 한 픽셀 내에 포함된 수많은 산란체의 움직임의 벡터 합이

coherence와 직결된다. 이 때 산란체들의 움직임이 무작위적인 경우에는 벡터 합이 영(zero)에 가까이 되어 coherence를 완전히 잃게 된다. 보통 시간적인 차이를 두고 얻어지는 repeat-pass interferometry의 경우, 표면의 움직임이 거의 없는 건조 지역에서는 수 년 간에 걸쳐 얻어진 InSAR coherence 영상에서 지표의 무작위적 변화가 뚜렷이 보이곤 한다. 특히 비교적 짧은 시기에 산란체가 흐트러져 무작위적 변화가 일어나지만 광학 영역의 밝기나 마이크로파에서의 수분함량 및 거칠기의 변화가 없는 경우에는 광학 영상이나 SAR 밝기 영상에서는 전혀 변화를 관측할 수 없음에도 coherence 영상에는 매우 뚜렷한 변화로 인지된다.

산림이 우거진 중위도 몬순지역이나 열대 우림지역의 경우에는 나뭇잎의 순간적인 움직임이 무작위로 일어나고 체적 산란을 일으키기 때문에 coherence가 매우 낮아진다. 그러나 도심지의 빌딩, 아스팔트와 같은 인공구조물의 경우에는 표면 산란이 우세하고 시간에 따른 변화가 거의 없어서 수 년 동안 coherence가 높게 유지되는 경우를 흔히 볼 수 있다.

(6) DInSAR

Differential InSAR (DInSAR)는 지표의 변위를 센티미터 혹은 밀리미터의 정확도로 알아낼 수 있는 기술로서, 픽셀 내 산란체들의 상대적 위치는 고정되어 있는 높은 coherence가 유지되는 곳에서 전체 산란체가 변위를 일으키는 경우 이를 위상차를 통해 얻어낼 수 있는 기술이다. 대표적인 예로서 지진에 의한 지표의 변위 지도를 구하거나, 빙하의 흐름 벡터를 포착하고, 마그마의 이동에 의한 화산의 지표 변위를 알아내며, 건조 기후에서 지하수 과다 사용으로 인한 지반침하, 강이나 호수의 수면 위에 나무와 같은 이중 반사하는 산란체가 존재할 때 수위 변동을 측정할 사례도 있다.

보통 InSAR에서 얻어지는 위상차에는 기하학적인 위상, 지표고도에 의한 위상, 지표 변위, 대기 중 전자기파 굴절 및 지연 효과 등이 모두 섞여 있다. DInSAR 기술에서 지표 변위를 알아내기 위해서는 기하학적 위상과 지표고도에 의한 위상, 그리고 대기효과를 제거해야 한다. 기하학적 위상을 없애기 위해서는 위성의 정확한 궤도 정보가 필요하며, 이 정보가 없을 경우 간섭 위상에서 선형 성분을 추출하여 역산하기도 한다. 지형 고도

에 따른 위상을 제거하는 방법으로는 매우 비슷한 궤도에서 촬영된 세 장의 SAR, 혹은 두 장의 SAR와 외부에서 제공된 DEM이 필요하다. InSAR에서 기선이 0인 경우에는 DEM에 의한 위상이 전혀 생기지 않기 때문에 단 두 장의 SAR 영상만으로도 DInSAR에 의한 지표 변위를 얻을 수 있지만 인공위성의 경우 이러한 경우는 흔치 않기 때문에 통상적으로 외부에서 DEM을 얻거나 혹은 InSAR DEM을 위하여 한 장이 더 필요하다. 이러한 InSAR 신호에서 SAR의 기하학적, 지표고도에 의한 위상을 없애고 지표 변위를 정량화하기 위해서는 인공위성의 궤도를 센티미터 오차로 알아내야 하기 때문에 매우 정교한 기술을 필요로 한다. 실제 ERS-1/2와 Envisat의 경우 전 세계 DORIS 시스템을 이용하여 인공위성의 위치를 추적하고 있으며 Delft 공대에서 후처리 방식으로 5cm 정확도의 위성 위치 정보를 제공하고 있다. 그러나 JERS-1이나 Radarsat-1은 이러한 궤도 정보의 정확성을 얻을 수 없어서 정성적인 해석에 머물거나 상대적 값만이 얻어질 뿐이다.

시간에 따른 지표의 변위를 알아내는 것을 목적으로 하는 DInSAR 기술은, 마찬가지로 시간적으로 변화하는 대기의 효과에서 자유로울 수 없다. 대기에 의한 효과는 지상 고도에 따라 대기 밀도, 수분, 전리층의 변화 등의 영향을 고려해야 한다. L-band에서 사용되는 GPS 시스템에서는 전리층의 변화를 알기 위해 두 가지 이상의 중심 파장을 가지는 전자기파를 동시에 사용하여 이를 보정하고 있으며, 지상 GPS 상시 관측소에서는 지속적인 관측을 통하여 전리층의 변화를 모니터링하고 있으나, 현재까지는 SAR 자료 보정에 필요한 해상도의 전리층 관측 정보는 존재하지 않는다. 만약 SAR 시스템이 서로 비슷한 두 마이크로파를 사용하는 multi-frequency 시스템으로 발전한다면 대기 효과의 보정이 가능할 수 있겠으나, 아직까지 이러한 시스템은 존재하지 않는다.

지형에 따른 대기 효과의 공간적 변화가 크지 않은 것으로 예상되는 평탄한 지역이나 사막과 같은 건조 기후에서는 대기 효과가 SAR 위상에 크게 기여하지 않을 수 있다. 따라서 DInSAR 기술은 지표의 변위가 서로 다른 독립적인 관측에 의해 명백히 밝혀진 경우이거나, 지표 변위가 대기 두께의 변화를 일으키는 지형 고도와는 연관성 없이 발생하는 경우, 그리고 지표 변위의 공

간적 분포가 전리층이나 대기 중 수분 효과에 의한 것으로 생각되기 어려울 정도로 좁은 범위에서 급격하게 발생하는 경우에만 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다. 아직까지는 InSAR DEM과 마찬가지로 산란체의 무작위적 움직임이 없이 높은 coherence를 가지는 곳에서만 적용이 가능한 기술이기 때문에 주로 산림이 많지 않고 강수량이 적은 건조한 지역이나 건조한 극지에서만 좋은 결과를 얻을 수 있다.

(7) PSInSAR

PSInSAR (Permanent Scatterer InSAR) 기술은 시간적으로 비교적 안정된 고정 산란체만을 영상에서 추출하여 이들의 위상 변화를 통계적으로 추적해 나감으로서 지표 변위를 얻는 기술이다. 고정 산란체는 주로 도심지의 인공 구조물, 산악지역에서는 지표에 노출된 암석이나 송전탑과 같이 표면에서만 산란이 일어나고 움직이지 않는 물체가 주를 이룬다. 이는 강수량이 많은 중위도 몬순 지역이나 열대 우림 지역에서는 산란체의 무작위적 움직임이 많아 coherence가 낮기 때문에 InSAR나 DInSAR 기술이 적용될 수 없는 한계성을 극복하기 위해 나온 비교적 최근의 기술이다. PSInSAR는 여러 InSAR 위상으로부터 통계적으로 계산하기 때문에 보통 수십 여장의 SAR 자료가 필요하다. 이 기술은 DInSAR 정도의 정확한 궤도 정보가 요구되며, 궤도 정보가 없는 경우 통계적으로 선형의 위상차를 이용하여 궤도를 계산한다. 또한 대기 효과는 비선형적이거나 공간적으로 긴 파장으로 나타남을 이용하여 시간적으로 선형으로 변화하는 지표 변위만을 가정하여 이와 분리해 내기도 한다. 최근에는 제한적인 공간적 파장에서 비선형으로 변화하는 지표 변위를 추출하는 기술로 발전하고 있으나, 양질의 자료 축적이 선행되어야 한다.

(8) PolSAR

Polarimetric SAR (PolSAR)는 전자기파의 편광 현상을 이용하여 산란체의 특성을 보다 자세하게 알아내고 분류해 내는 기술이다(Ulaby and Elachi, 1990). 편광은 전자기파의 입사 방향에 수직인 평면상에서 선형, 원형, 타원형의 편광으로 정의되는데, 대부분의 SAR는 선형 편광을 이용한다. 선형 편광은 지표면에 수직 (Vertical) 성분과 수평(Horizontal) 성분으로 나뉘게

되며, 입사 방향, V, H가 서로 직교하도록 정의된다. 입사하는 파의 편광과 후방 산란하여 SAR에서 기록되는 편광의 순서에 따라 HH, HV, VH, VV의 네 가지 편광 모드로 표현된다. 예를 들어 HV는 수평(H) 편광을 송신하여 돌아오는 파동 중에서 수직(V) 편광만을 기록하는 것이다. 기존의 제 1세대 인공위성 SAR 센서는 HH 혹은 VV 중에서 한 가지 편광(single polarization)으로 고정되어 있었다. 그러나 Envisat을 비롯하여 제 2세대 인공위성 SAR 센서는 네 가지 편광 모드 중에서 두 개를 선택할 수 있는 dual-polarization 혹은 전체를 모두 얻는 quadrature-polarization (혹은 full-polarization)의 형태로 발전하고 있다.

전자기파의 편광 상태는 입사방향과 표면에 수직인 벡터가 이루는 입사 평면에 평행(parallel)한 전기장과 직교(perpendicular)하는 전기장의 세기, 타원율, 타원의 각도의 네 가지 성분으로 나타낼 수 있으며, 이의 변형으로서 Stokes Vector로 나타내기도 한다. 이러한 편광이 물체에서 산란되는 정도는 복소수 형태의 4x4 행렬인 산란 행렬(scattering matrix)에 의해 정의되며, 주어진 파장과 입사각에서의 산란 계수를 알면 어떠한 편광상태의 파가 입사하여도 산란되는 정도를 알 수 있다. 이 때, 편광의 타원율과 경사각의 상태에 따라 물체에서 후방 산란하는 전기장을 나타내는 polarization signature를 구하여 물체의 산란 특성을 연구한다. 이러한 산란 행렬은 사용 목적에 따라 Covariance Matrix, Coherency Matrix, Stokes Matrix, Mueller Matrix, Kennaugh Matrix라는 서로 다른 형태로 정의되기도 한다.

Polarimetry에서 주로 사용되는 물리적 변수로는 다음과 같다. 네 가지 산란 행렬 계수의 절대값을 제공하여 합한 Total Power는 전체적인 산란 세기를 알려준다. Co-polarization correlation coefficient는 HH와 VV 산란 계수의 correlation coefficient로서, 산란하는 파의 편광의 완전성 혹은 시스템의 잡음 정도를 나타내 준다. Co-polarization phase difference는 보통 HH와 VV의 위상차로 표시되는데, 구형이나 trihedral corner reflector와 같이 홀수 번의 반사(odd-bounce)를 하는 이상적인 산란체에서는 위상차가 180도가 되는 반면에, dihedral corner reflector와 같이 짝수 번의 반사를 하는 이상적인 산란체는 0도가 된다. 자연 상태

의 산란체에서 약간의 표면 거칠기를 가져서 여러 차례 반사가 일어나지 않을 만한 표면에서는 single-bounce 현상이 주도적으로 일어나 180도의 위상차를 보이며, 건물과 같이 수직 구조를 가져 double-bounce를 일으키는 물체의 위상차는 0도에 가깝다. 농작물의 경우 수직적인 줄기가 발달한 종은 그렇지 않은 종보다 double-bounce의 특징을 나타내어 매우 작은 위상차를 보이게 되는 특징이 있으며 복잡한 산란체의 경우 diffuse로 표현된다.

또한 산란 행렬의 eigenvalue와 eigenvector로부터 polarimetric entropy (H), polarimetric anisotropy (A), alpha를 계산하기도 한다. Entropy (H)는 산란체의 무작위성(randomness)을 나타내는데, H=0일 경우에는 단순한 산란, H=1인 경우에는 무작위성 산란, 즉 무편광 산란이 일어남을 의미한다. Anisotropy는 eigenvalue들의 비로서 구해지며, 산란체의 개수를 의미한다. Eigenvector들에서 얻어지는 Alpha값이 0인 경우에는 표면 산란, 45도인 경우에는 다이폴이나 체적 산란, 90도인 경우에는 dihedral reflector 혹은 여러 번의 산란을 의미한다. 이러한 전환된 산란 계수들은 영상을 분류하는데 매우 유용하게 쓰이고 있으며 아직도 기술적 발전이 이루어지고 있다.

PolSAR는 향후 SAR 시스템의 발전 흐름과 더불어 핵심적인 사항으로서 수많은 기술적인 발전이 활발하게 이루어지고 있으며, SAR 활용 분야 전반에 걸쳐 앞으로 많은 응용이 있을 것으로 전망된다.

(9) Pol-InSAR

Polarimetric-Interferometric SAR 기술은 full-polarization을 가지는 두 영상이 InSAR가 가능한 기선과 시간차를 두고 얻어졌을 경우 각 영상의 산란 행렬 및 두 영상의 산란 벡터의 공분산 행렬 등을 이용하여 적절한 연산을 통해 최적의 물리적 변수를 추출해내는 기술이다(Cloude and Papathanassiou, 1998). 예를 들어 산림의 경우 나무의 높이, 지표의 고도, 식생의 밀도에 따른 체적 산란의 정도, 또한 각 편광별로 표면산란과 체적산란의 비율 등을 구할 수 있으며, 이를 물리적 역산을 통해 얻어낼 수 있다.

Pol-InSAR는 현재 개발 초기에 있는 최신 기술이며 앞으로 작물 모니터링, 산림 훼손 감시, 지표 피복 분류,

토양 수분, 해빙, 유류 오염 등 SAR 활용 전반에 걸쳐 이용될 것이다.

(10) Tomography

SAR Tomography는 여러 장의 SAR를 이용하여 체적 산란을 일으키는 물체의 입체적 단면을 얻어내고자 하는 기술이다. SAR의 밝기와 위상을 포함하는 산란 모델을 수립하고 산란체의 3차원적 특성을 역산을 통해 밝혀내는 tomography적 개념이 포함된 기술로서, 아직은 시험 단계에 머물고 있다.

(11) ATI

Along-Track Interferometry는 두 안테나를 비행체가 진행하는 방향과 일치되도록 나란히 배열하여 하나는 송수신을, 다른 하나는 수신을 한다. 어느 한 지역을 비행체의 속도에 따라 시간차를 달리하여 두 영상을 얻고, 위상차를 이용하여 물체의 속도를 구한다. 만약 산란체가 이 시간차 동안 정지해 있다면 두 영상의 위상차는 0이 될 것이지만, 산란체가 마이크로파의 진행 방향으로 움직인다면 산란체와 안테나 사이의 거리가 달라져 도플러 효과에 의한 위상차로 나타난다. ATI는 주로 해류의 속도 백터를 구하거나 지상의 교통 흐름을 감지할 수 있으며, 군사적인 목적으로 사용되는 Moving Target Indication (MTI)과 밀접한 관계가 있다. 아직까지 비행기에서만 시도되었으나 향후 TanDEM-X(DLR) 인공위성에서 시도될 예정이다.

3) 활용 분야(Application Field) 분류 체계

SAR의 활용 분야(Application Field)는 연구의 대상물에 따라 육지(Land), 해양(Ocean), 극지(Cryosphere) 및 대기(Atmosphere)로 분류하였다.

육지는 다시 응용 분야에 따라 Agriculture(농업), Archeology/Subsurface(고고학/지하구조), Topography(지형고도), Forestry(산림), Geology(지질), Geotectonic(지구조), Hydrology(수문), Seismology(지진), Soil(토양), Volcanology(화산학), Urban/ Manmade(도시/인공구조), Thematic Mapping(지도) 등으로 나누었다.

해양은 관측하고자 하는 자연 현상에 따라 Wind(해풍), Surface Wave(표면파), Internal Wave(내부파), Current(해류), Bathymetry(해저지형), Slick(유류/생

물막), Ship(선박), Intertidal/Coastal(조간대/연안)로 세분하였다.

광량이 충분하지 않고 눈과 얼음으로 뒤덮여 있는 극지의 경우, 남극은 대륙과 해양을 동시에 포함하고 있으며 북극은 해양 분야에 포함될 수도 있으나, 날씨가 태양광이 영향을 받지 않는 SAR의 역할이 기타 광학 센서에 비하여 두드러져 특별한 의미를 주기 때문에 이를 따로 분류하였다. 극지는 다시 관측 대상에 따라 Glacier(빙하), Sea Ice(해빙), Ice Sheet/Ice Shelf(빙상/빙붕)로 세분하였다.

SAR의 대표적 특징이자 장점으로 여겨지는 것 중 하나는 대기 중 수증기나 구름의 영향을 받지 않고 지상의 영상을 얻을 수 있다는 것이다. 역으로 말하자면 SAR를 통하여 대기를 연구하는 경우는 매우 드물다는 것을 의미한다. 대기 효과가 해양이나 육지에 나타나는 경우를 연구하는 것을 대기 활용 분야로 분류하였으며, 이를 다시 SAR 밝기를 이용한 연구와 SAR 위상과 관련된 연구의 두 가지로 나누었다. 보다 구체적인 활용 분야의 분류 체계는 다음과 같다.

(1) Land - Agriculture

SAR 영상은 작물의 종류, 발육 상태, 토양 수분 등을 모니터링하고 경작지 면적 등을 추출하는데 사용된다. 작물의 성장에 따라 SAR의 밝기가 변하는데, 벼의 경우 모내기 직후에는 논의 물이 전반사를 일으켜 SAR 영상에서는 어둡게 보이다가 벼가 점점 자라면서 줄기 및 잎으로부터의 후방 산란이 점점 커지게 되는 원리를 이용하여 벼의 성장을 관측한다. 이 때 마이크로파의 파장이 짧은 경우 벼 성장의 초기 단계에서 후방 산란이 충분히 커지는 포화현상이 발생하여 더 이상의 관측을 할 수 없기 때문에, 산란의 증가가 더디게 일어나 벼의 성장을 오랜 기간 모니터링 할 수 있는 긴 파장의 SAR 영상이 선호된다. 보통 C-밴드에서는 벼의 성장 초기에 이러한 포화 현상이 일어나 적절하지 않으며, L-밴드에서는 벼의 성장을 보다 오랜 기간 관찰할 수 있다. PolSAR 기술을 이용하면 편광 산란의 형태에 따라 작물의 종류를 알아 낼 수 있다.

(2) Land - Archeology/Subsurface

SAR에서 사용하는 마이크로파는 토양 수분이 높은

중위도 몬순 지역과 같은 곳에서는 거의 투과를 일으키지 않지만, 건조한 사막에서와 같이 수분이 없는 토양이나 모래에서는 수 미터에서 수 십 미터를 투과할 수 있다. 예를 들어, 마이크로파가 사막의 모래 속을 수 미터 투과하여 지하에 묻혀 있는 고대 유적이거나 지하수에서 반사를 일으켜 영상화 될 경우 고고학적 응용 혹은 고수로에 대한 정보를 주기도 한다. 즉, 수분이 거의 없는 모래 지역에서는 훨씬 큰 파장을 사용하는 GPR (Ground Penetrating Radar)과 비슷한 원리로 인공위성에서 마이크로파를 통해 광범위한 영역의 지하 구조를 얻을 수도 있다.

(3) Land - Topography

SAR를 이용하여 DEM을 얻는 방법은 앞서 Technology에서 설명한 바와 같이 Radarclinometry, Radargrammetry, InSAR DEM 방법이 있다. 또한 최근에는 Pol-InSAR 방법에서 위상차를 이용하여 경사면의 방위각을 얻어내는 방법이 개발되기도 하였다.

(4) Land - Forestry

산림 분야에서 SAR는 산불감시, 산림 벌채, 나무의 산란 특성, 수분 측정 등에 용이하게 쓰인다. InSAR 기술을 통해 나무의 높이를 측정하는 기술이 개발되고 있으며, PolSAR를 이용하여 나무 종류에 따른 편광 특성을 연구하기도 한다.

(5) Land - Geology

SAR는 비행체의 진행 방향에 수직인 평면에서 옆을 바라보며 거리를 측정하기 때문에 지형이나 지질학적인 구조가 강조되어 보인다. 또한 L-밴드나 P-밴드와 같이 파장이 긴 마이크로파를 이용하면 숲이 우거진 열대 우림지역의 지질학적 구조가 더 잘 보일 수 있다. 이를 이용하여 지질 구조 매핑, 지질 지형, 선구조 추출 등에 활용된다. 또한 암석의 특성에 따른 거칠기가 SAR의 밝기 영상에 표현되기도 한다.

(6) Land - Geotectonics

DInSAR, PSInSAR와 같은 기술을 이용해 지반의 응력과 변위를 분석해 내는 활용 분야로서, 댐건설, 대형 시설물 축조, 지하수 과다 추출 등으로 인한 지반의 침하, 산사태의 가능성 및 안정성 등을 알아내는데 활용된다.

(7) Land - Hydrology

강이나 호수는 바람이 없는 날 반반한 호수 면이 specular 반사를 일으켜 후방 산란 신호가 매우 약하게 되어 SAR 영상에서 주위보다 어두운 색으로 두드러지게 보인다. 이를 이용하여 수계 및 수위 변화를 모니터링 할 수 있고, 특히 홍수가 발생하여 물에 잠긴 지역을 추출하는데 탁월하다. 또한 지표물 덮고 있는 눈과 얼음의 수분 함량에 따라서 SAR의 밝기가 매우 크게 변하기 때문에 이를 이용하여 눈과 얼음의 분포와 특성을 분석해 내기도 한다. 단, 극지방의 눈과 얼음에 대한 활용 연구는 Cryosphere로 따로 분류하였다.

(8) Land - Seismology

지진에 의한 지표의 움직임 벡터를 DInSAR 및 PSInSAR로 밝혀내고 이를 지진 발생의 메커니즘과 비교 연구한다. 그러나 지진 파쇄대나 나무가 울창하여 지표 피복이 많은 곳에서는 응용에 한계가 있기 때문에 아직까지는 미국 서부나 중동 지역과 같이 건조기후에서 좋은 연구 사례들이 국한되어 보고되고 있다.

(9) Land - Soil

SAR의 밝기는 토양의 수분 함량 및 표면 구조와 매우 밀접한 관계를 가진다. 이를 통해 토양의 수분을 알아내고 토양의 성분을 분석하는데 이용되고 있다. 여기서는 자연 상태의 토양은 물론 농업 분야와 관련된 토양 연구까지를 이 범주 안에 넣었다.

(10) Land - Volcanology

용암의 종류에 따라 거칠기가 다르기 때문에 SAR 밝기나 다양한 편광을 이용하여 용암의 종류를 알아낼 수 있다. 또한 DInSAR 기술을 이용하여 마그마의 활동으로 인한 화산 표면의 상승이나 침하 현상을 밝히는데 이용된다. 이를 통해 화산 폭발의 징후를 감지해 내거나 마그마의 위치와 유동 특성을 알아낼 수 있고, 사화산으로 알려졌던 몇몇 화산이 활화산인 것으로 새롭게 밝혀지기도 한다.

(11) Land - Urban/Manmade

SAR는 도심지의 각종 인공 구조물을 지도화 하는데 사용될 수 있으며, 군사적으로 나무나 눈으로 은폐된 목표물 탐지, 목표물 설정, 움직이는 목표물 감지 등에 응용된다.

(12) Land - Thematic Mapping

마이크로파의 파장과 편광에 따른 SAR 영상의 특징을 이용하여 지표 피복을 분류하여 주제도를 작성하는데 이용된다.

(13) Ocean - Wind

해파에 의해 표현된 풍속을 구하는 응용 분야이다. 바다 표면에서 capillary wave나 gravity wave에 의한 Bragg 산란 모델로 SAR의 밝기 정도에 따라 풍속을 결정하는 방법이다. 주로 위성 산란계(scatterometer)와 비슷한 방식이지만 산란계보다는 훨씬 고해상도로 풍속을 구한다.

(14) Ocean - Surface Wave

바람, 해저 지형, 조류에 의해 일어나는 표면 해파를 연구한다. 위의 Wind 분야와 혼동되기 쉬우나, 여기서는 보통 파랑의 반파장이 SAR의 해상도보다 더 커서 파랑의 형태가 SAR 영상에 나타나는 비교적 큰 해파에 대한 연구를 뜻한다. 주로 SAR 밝기 영상을 Fourier 영역에서 분석하여 해파의 파장이나 진행방향 및 바람의 방향을 연구한다. 또한 Airborne ATI 기술을 이용하여 해파의 안테나 방향으로의 순간적인 속도를 구하기도 한다.

(15) Ocean - Internal Wave

내부파(Internal Wave)는 밀도가 비슷한 두 해수가 만나서 층을 이루는 곳에 외부 에너지가 가해졌을 때, 두 층의 경계면을 따라 형성되는 파장이 매우 긴 해파로서, 내부파의 영향으로 인한 해수의 상승 및 하강 때문에 해수 표면에서 발산 및 수렴이 생성된다. 이 때 발산하는 곳은 어둡게, 수렴하는 곳은 부유물 및 capillary wave의 영향으로 밝게 나타나기 때문에 SAR 영상에서 매우 뚜렷이 나타난다. 내부파는 해류, 해저 지형 등의 영향에 따라 파가 진행되기 때문에 매우 흥미로운 해양학적 연구 주제가 되어 왔다.

(16) Ocean - Current

SAR 영상을 이용하여 Current eddies, upwelling, current, frontal system을 연구하는 학문 분야이다. 주로 SAR 영상의 밝기를 이용한다.

(17) Ocean - Bathymetry

조류나 해류가 해저 지형과 상호작용을 하여 SAR의

해양 표면에 해저 지형과 유사한 패턴이 나타나는데, 이를 연구하여 해저 지형의 대략적 분포와 해수의 유동 특성을 연구한다.

(18) Ocean - Slick

바다에 기름이 유출되거나 생물학적 필름이 형성되면 해수 표면을 잔잔하게 하는 특성이 있기 때문에, SAR 영상에서 전체 바다가 적당한 밝기를 가지는 지역에서 이러한 slick은 어두운 색으로 잘 관측이 된다. 그러나 영상 전체에 걸쳐 해파가 잔잔할 때에는 slick과 주변 바다가 모두 어둡게 나와서 잘 구별이 되지 않는다. 그러나 대부분의 해양 사고에 의한 기름 유출의 경우에는 악천후에 발생하기 때문에 SAR의 응용성이 매우 높은 활용 분야이다.

(19) Ocean - Ship

바다에 떠있는 배는 강한 다중 산란을 일으키기 때문에 SAR 영상에서 매우 강한 밝기로 두드러지게 나타난다. 이를 이용하여 선박의 움직임 감시하고 산란 특성에 따른 선박의 구조 및 종류를 구별하는 기술로 발전하고 있다. 항해하는 선박의 ship wake를 연구하기도 한다.

(20) Ocean - Intertidal/Coastal

조간대 혹은 해안 지역의 산란 특성을 연구한다. 조간대나 해안 지역의 정확한 boundary를 정의하고, 조간대 갯벌이나 토양에 대한 수분 함량, 생물 교란 등 환경학적인 연구가 진행된다.

(21) Cryosphere - Glacier

SAR 및 DInSAR를 이용하여 빙하의 움직임, 빙하를 덮고 있는 눈의 연구, 빙하의 후퇴나 확장을 연구한다.

(22) Cryosphere - Sea Ice

해빙의 종류에 따른 산란 특성을 연구하고 해빙 분포의 변화를 연구한다. First-year ice, multi-year ice, pressure ridge, lead, polynya, floe, iceberg, 해빙을 덮은 눈에 대한 연구를 포함한다.

(23) Cryosphere - Ice Sheet/Ice Shelf

남극 대륙이나 아이슬란드와 같은 대륙을 덮고 있는 빙상(Ice Sheet)과 이것이 해수와 만나는 부분에 걸쳐있는 빙붕(Ice Shelf)에 대한 연구이다. 빙상, 빙붕의 변화

나 흐름 벡터, 지형, 빙봉의 hinge-line, 그리고 빙봉과 빙상에 덮인 눈의 특성을 연구한다.

(24) Atmosphere - Amplitude

주로 대기 현상으로 인해 해수 표면에 나타나는 SAR 밝기 영상을 통해 연구한다. 폭풍우, 비, 바람, 기상 전선, 대기의 lee wave, 해수와 대기의 경계부에 대한 연구, vortex, soliton, 대기에서의 gravity wave 등이 연구의 대상이 될 수 있다.

(25) Atmosphere - Phase

주로 육상에서 DInSAR나 PSInSAR 기술을 적용할 때 나타나는 대기의 수증기나 전리층에 의한 마이크로 파의 속도 감소 혹은 굴절 현상을 통해 대기를 연구하는 분야이다.

4) Representative or Review Papers

각 분야별로 대표적인(representative) 논문이나 총설(review)에 해당하는 논문을 따로 표시하였다. 논문 분석 시에 각 분석자들의 주관에 따라서 representative 혹은 recommended 논문을 표시하였기 때문에 분석자들의 주관에 의해 좌우되기도 하지만, 대부분 다른 논문에서 자주 인용되는 대표적 논문들이다. Review 논문은 광범위한 범위의 연구 분야에 대하여 정리하여 소개하는 논문으로서, 이들은 STAR 분류 방법에 있어서 여러 중 복된 System, Technology, Application을 포함하는 경우가 많아 이를 특정한 STA 분류 체계로 분류하는 것은 의미가 없기 때문에 R로 분류하였다.

5. 논문 분석 결과

1) 시스템(System)

논문들에 주로 사용된 SAR 시스템은 ERS-1/2(551편, 24%), 항공기 탑재 SAR(539편, 24%), Shuttle(201편, 9%), Seasat(150편, 7%), Simulated SAR(220편, 10%), Radarsat-1(144편, 7%) 등이다(Fig. 4). Seasat은 불과 100여일 밖에 작동하지 않아 자료의 양이 많지 않음에도 불구하고 최초의 인공위성 SAR 시스템이기 때문에 비교적 많은 수의 논문(7%)에서 사용되었다.

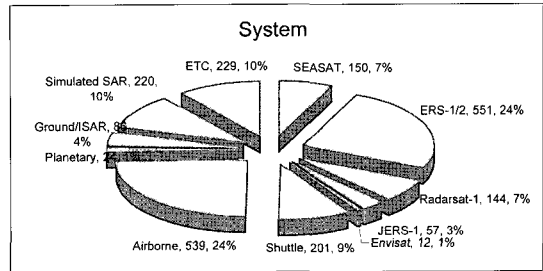


Fig. 4. Distribution of journal papers related to the SAR Systems.

1990년대에 발사되었던 ERS-1/2와 Radarsat-1, JERS-1을 상호 비교하여 보면, ERS-1/2가 24%로서 가장 많이 사용되었다. ERS-1/2는 DORIS 시스템을 이용하여 위성의 궤도 운용이 매우 정확하여 양질의 InSAR 자료를 생산해 내었다. 특히 ERS-1과 ERS-2는 하루 차이로 같은 지역을 동일한 조건에서 촬영할 수 있는 Tandem Mode로서 지표면의 변화가 심한 중위도 문순지역에서도 양질의 InSAR 자료가 취득되었다. 또한, 다양한 국제 협력 및 AO (Announcement of Opportunity)를 통하여 전 세계 과학자들이 연구 계획서를 제출하면 자료 처리 비용만으로도 좋은 자료를 제공하여 전 세계 SAR 연구를 활성화하는 노력의 결과라 하겠다.

Radarsat-1은 Fine, Standard, Wide Mode 등 여러 가지 방식으로 촬영 각도를 조절할 수 있었으나, 처음부터 상업적인 목적으로 계획되었고 다양한 모드를 선택함으로써 오히려 동일 조건으로 촬영되어야 하는 InSAR에 적합한 자료가 부족하였으며 궤도 정보가 정확하지 않았다. InSAR를 위해서는 궤도 정보가 매우 중요한데, 이는 JERS-1의 경우에도 정확한 궤도 정보가 제공되지 않았으며 특히 JERS-1은 신호대 잡음비가 좋지 않았고 궤도 정보가 정확하지 않아 논문에서의 사용 빈도가 높지 않은 것으로 추정된다.

항공기에 탑재된 여러 가지 SAR 시스템(539편, 24%)은 다양한 파장, 편광, 모드를 지원하기 때문에 가장 활발한 자료원이 되어 왔다. 또한 1981, 1984, 1994, 2000년에 이루어진 우주왕복선에 의한 임무에서도 비록 짧은 기간 동안 많지 않은 자료가 얻어졌음에도 불구하고 다양한 기능을 가진 SAR 영상이 얻어져 많은 연구 논문에서 사용되었다(201편 9%). 이 외에도 지상용 및 Inverse SAR (86편, 4%), 행성 탐사용 SAR (24편,

1%) 자료 등도 연구 논문에 사용되었다.

2) 기술(Technology)

전체 논문 중 총 2493편은 기술 분류가 가능하였으며, 이 중에서 77% (1907편)는 기초기술을 사용하였고 나머지 23% (586편)는 진보기술을 사용하였다(Fig. 5). 기초기술을 세분하면 SAR General은 25% (635편), SAR Algorithm은 24% (589편), SAR System/Processor는 21% (514편), SAR Classification은 7% (169편)를 차지하고 있다. 진보기술의 경우에는 PolSAR 기술이 7% (179편), InSAR DEM이 6% (145편), DInSAR가 4% (103편), InSAR Coherence 2% (46편), Radargrammetry 2% (39편), PSInSAR 1% (37편), ATI 1% (18편), 그리고 1% 이하로서 PolInSAR (7편), Tomography (6편), Radarclinometry (6편)인 것으로 나타났다.

SAR 기술 중에서 진보기술은 향후 SAR 시스템 발전의 근간을 이루는 중요한 요소가 되기 때문에, Fig. 6에서는 진보기술의 분포를 따로 도시하여 분석하였다. 진보기술로 분류된 논문을 100%로 놓았을 때, SAR의 밝기 영상

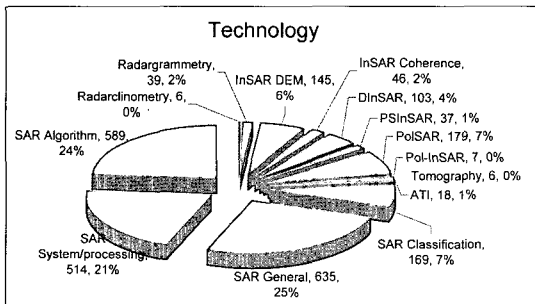


Fig. 5. Distribution of journal papers related to the SAR Technologies.

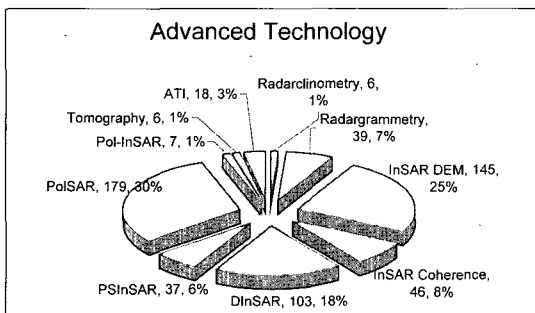


Fig. 6. Distribution of journal papers related to the SAR Advanced Technologies.

만을 이용하는 Radarclinometry와 Radargrammetry의 비중은 8% 이하에 지나지 않았고, 진보기술의 대부분은 다시기 및 동시에 얻어진 두 장 이상의 SAR 영상간의 위상차를 이용한 SAR interferometry 기술에 해당되었다. 진보기술을 이용한 논문 중에서 30%는 PolSAR, 25%는 InSAR DEM, 18%는 DInSAR, 그리고 8%는 InSAR Coherence에 관련된 논문들로 조사되었다. 또한 PSInSAR 6%, ATI 3%, PolInSAR와 Tomography도 각각 1%를 차지하고 있다.

3) 활용 분야(Application Field)

조사 대상인 2665편의 논문 중에서 활용 분야를 정의할 수 있는 논문은 1751편이었으며, 나머지는 활용 이전의 SAR 원천기술에 해당하는 논문이었다. 활용 분야는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 크게 Land 801편 (45%), Ocean 556편 (32%), Cryosphere 326편 (19%), 그리고 Atmosphere 68편 (4%)로 분류되었다. SAR는 육상 및 해양 활용 분야에 있어서 비교적 고르게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 SAR가 날씨와 태양의 영향을 받지 않기 때문에 다른 광학 센서와는 다르게 극지 연구에 매우 높은 활용도를 보이는 것은 특징적이다.

육상(Land) 연구 논문 801편 중에서 Forestry 분야의 연구 논문이 총 194편 (24%)으로서 가장 많았다(Fig. 8). 또한 Hydrology 분야가 110편 (14%), Soil 77편 (10%), Urban/Manmade 66편 (8%), Agriculture 65편(8%), Topography 64편 (8%), Geology 62편 (8%)을 차지하였다. 그리고 Geotectonics 48편 (6%), Seismology 43편 (5%), Thematic Mapping 33편 (4%), Volcanology 26편 (3%), Archeology/Subsurface 13편 (2%)으로 분포되었다.

해양 분야는 총 556편의 논문 중 Surface Wave가

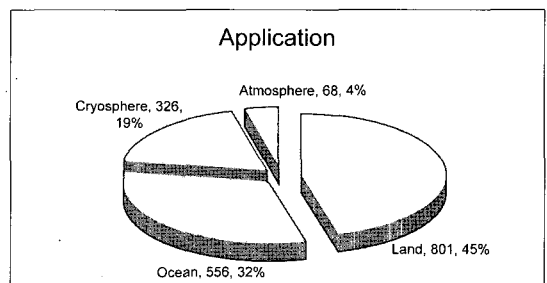


Fig. 7. Distribution of journal papers related to the SAR Applications.

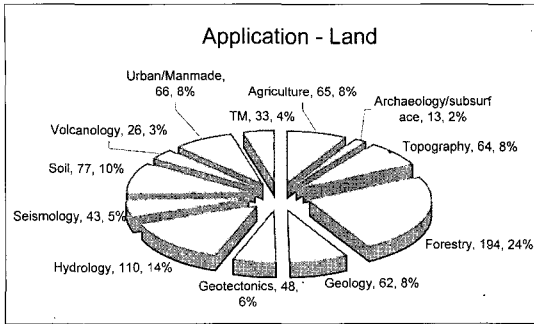


Fig. 8. Distribution of journal papers related to the SAR Application - Land.

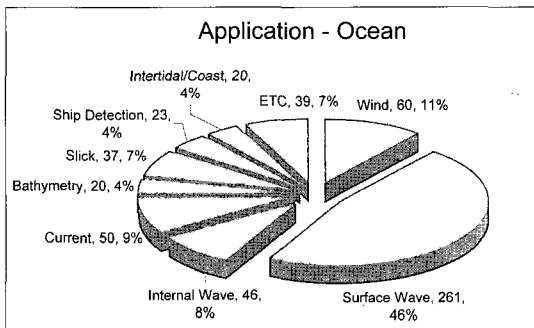


Fig. 9. Distribution of journal papers related to the SAR Application - Ocean.

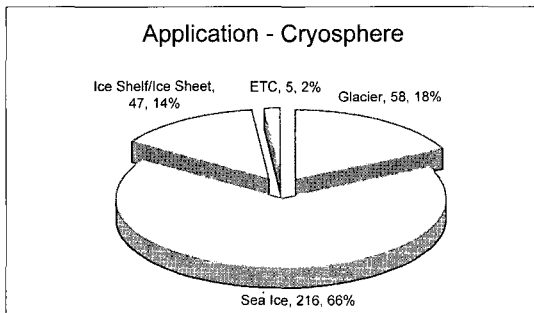


Fig. 10. Distribution of journal papers related to the SAR Application - Cryosphere.

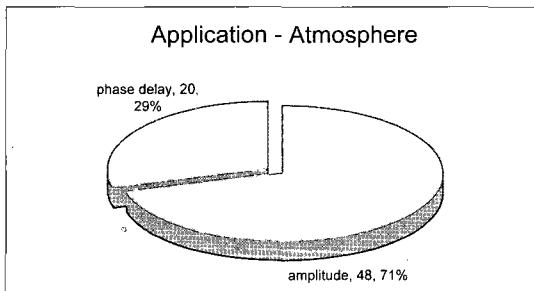


Fig. 11. Distribution of journal papers related to the SAR Application - Atmosphere.

261편 (46%)을 차지하여 SAR를 이용한 해양 연구 분야 중 가장 많은 논문이 분포하였다(Fig. 9). 또한 Wind는 60편 (11%), Current 50편 (9%), Internal Wave 46편 (8%), Slick 37편 (7%), Ship Detection 23편 (4%), Intertidal/Coast 20편 (4%), Bathymetry 20편 (4%)이며 기타 논문이 39편 (7%)이다.

극지 분야의 326편 논문 중에서 216편 (66%)이 Sea Ice 분야에 집중적인 연구가 이루어졌다(Fig. 10). 또한 Glacier 58편 (18%), Ice Shelf/Ice Sheet 47편 (14%)이 발표되었으며, 기타 5편 (2%)이 있다.

대기분야에서는 68편의 논문 중에서 SAR 밝기 (amplitude)만을 이용한 논문은 48편 (71%)이었고, SAR 위상(phase)을 이용한 논문은 20편 (29%)이었다 (Fig. 11).

6. 결론

1960년대 이후 SAR와 관련된 영어로 작성된 논문 중에서 심사를 거친 2665편의 논문의 초록을 분석한 결과, SAR의 발달 과정에서 매우 다양한 종류의 시스템과 기술이 다양한 활용 분야에 적용되고 있음을 알 수 있었다. SAR 시스템은 초기의 단순한 기능에서 다양한 파장, 편광, 해상도, 촬영 모드로 발전하고 있으며, 기술 역시 단순한 밝기 영상의 해석 차원을 넘어 시스템의 다양한 가능성을 개발하고 이를 보다 발전된 시스템으로 구현하는 견인차 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. 이 연구는 SAR 관련 논문을 수집하고 분석하여 SAR의 시스템, 기술, 활용 분야에 대한 기초적인 통계 자료를 제시하는데 의의가 있다. 다만, 논문 자료의 수집에 있어서 보다 포괄적인 검색을 할 필요가 있었고 논문의 분석에 있어서도 보다 더 많은 인적 자원과 시간을 투자하여 정확성을 높였어야 하는 점이 아쉬움으로 남는다. 앞으로 이 자료가 미약하나마 SAR의 각 분야에서 연구하고 정책을 수립하는데 기초 자료로서 활용되기를 기대한다.

SAR의 시스템, 기술 및 활용 분야의 발전은 단순히 위성이나 항공기 시스템을 도입하고 운용하는 것으로만 완성될 수 없다. 역동적으로 변화하는 첨단 기술의 SAR 개발을 국제적으로 주도하기 위해서는 산학연 전반에 걸친 기술, 자본, 인적 자원을 토대로 활발한 응용이 있어야

만 가능하다는 것은 자명하다. 앞으로 SAR의 개발과 운용 및 자료의 취득과 배포에 있어서도 과학적 성과를 이끌어 내기 위하여 노력하여야 하며, 다양한 활용 분야의 전문가들에게 원활한 자료 제공이 이루어져야 한다. 특히 과학자들로 하여금 자료 취득의 과학적 목표를 제시하도록 유도하고 위성 운용에 직간접적으로 참여시켜 그 활용성을 높여야 한다. 또한 SAR의 첨단 기술 및 활용성은 SAR 시스템의 발전과 유기적으로 병행되어야 한다. 위성 및 항공기 탑재 SAR와 지상에서의 검보정을 통해 기술력을 확보하여 새로운 SAR 시스템 발전으로 이어져야하며, 과학적 자료의 원활한 공급을 통해 전문가 집단을 활성화하여 활용 분야를 꾸준히 개척해 나아가 갈 필요성이 있다.

사 사

이 연구는 2005년도 공공기술연구회 일반사업으로서 한국항공우주연구원에서 주관한 “위성자료공공활용 연구” 사업의 지원을 받았습니다. 자료 분류를 도와준 서울대 김덕진 박사, 박상은, 홍사현, 그리고 강원대 채희삼 학생에게 감사드립니다. 귀중한 시간을 할애하여 세심한 지적을 해 주신 두 분의 논문 심사자에게도 감사를 표합니다.

참고문헌

- Ahmed, S., H. R. Warren, D. Symonds, and R. P. Cox, 1990. The Radarsat System, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4): 598-602.
- Bamler, R. and P. Hartl, 1998. Topical review synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14: R1 - R54.
- Brown, W. M., 1967. Synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-3(2): 217-229.
- Carrara, W. G., R. S. Goodman, and R. M. Majewski, 1995. *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Artech House, Boston, MA.
- Cloude, S. R. and K. P. Papathanassiou, 1998. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5): 1551-1565.
- Curlander, J. C. and R. N. McDonough, 1991. *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Elachi, C., E. Im, L. E. Roth, and C. L. Werner, 1991. Cassini Titan Radar Mapper. *Proceedings of the IEEE*, 79: 867-???
- Gens, R. and J. L. Genderen, 1996. SAR interferometry - issues, techniques, applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10): 1803-1835.
- Ulab, F. T. and C. Elachi, 1990. *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House.