

위성 영상 레이다(SAR) 기술 동향

곽 영 길

한국항공대학교

요 약

영상 레이다(Synthetic Aperture Radar: SAR)는 기상 조건이나 주야에 관계없이 전천후로 광범위한 지역의 영상을 고해상도로 얻을 수 있는 능동형 전자파 레이다 센서이다. 최근 세계적으로 위성 SAR는 2010년을 기점으로 최근 3~4년 사이에 유사 이래 가장 많은 13개 이상의 저궤도 소형 SAR 위성들을 발사함에 따라 비로소 “저궤도 위성 SAR 전성기”로 진입하게 되었다. 우리나라에서도 아리랑위성 5호(KOMPSAT-5)에 SAR를 탑재하는 최초의 레이다 위성을 올해 2011년에 발사할 계획을 가지고 있으나 아직 발사가 지연되고 있다. 본 기고에서는 2011년 9월 27~30일 서울에서 개최된 국제 영상 레이다 학술 대회 APSAR 2011(Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar)의 성공을 기념하여 마련된 SAR 기술 특집호에 최신 위성 SAR 개발 동향을 중심으로 기술 발전 추세와 전망에 대하여 소개한다.

I. 개 요

최근 지구 온난화와 세계적인 기상 이변으로 인하여 지구가 몸살을 앓고 있다. 지구환경의 변화에 대한 관심이 높아지면서 기후변화에 무관하게 원하는 관심 지역을 전천후로 관측할 수 있는 영상 레이다의 중요성이 매우 높아지고 있다. 특히 SAR는 인공위성이나 항공기 및 무인기 등의 다양한 플랫폼에 탑재하여 원하는 관심 지역을 전천후로 상시 관측 및 정찰을 할 수 있는 특징이 있기 때문에, 정밀 전자 눈(Electronic Eye)으로서의 활용 분야가 확대되고 있다. 영상 레

이다는 전자파를 이용하는 능동 센서로 비, 구름, 안개 등 기상 조건이나 주야간, 역광 등 일조현상에 관계없이 전천후로 광범위한 지역의 영상 획득이 가능하다. 또한 일반 레이다(Real Aperture Radar: RAR)의 방위 해상도는 주어진 안테나 크기에 제약을 받지만 영상 레이다(Synthetic Aperture Radar)는 합성 빔 원리를 이용하여 탐지거리에 무관하게 고해상도로 영상을 얻을 수 있는 특징이 있다. 따라서 SAR 영상은 최근 지구 온난화와 기상 이변으로 인한 극지방 빙하, 홍수, 가뭄, 산불 지역 관측은 물론 화산 폭발, 지진 피해, 기름 유출 등과 같은 자연재해 및 환경 감시 분야에 필수적인 관측 수단이 되고 있다. 특히 최근 초고해상도의 표적 영상 형성과 표적 식별 기술이 발전함에 따라 군사 목적으로 국경 감시나 군사 시설 및 테러 위협에 대한 필수적인 감시 정찰 수단으로 활용도가 높아지고 있다.

SAR는 지구 온난화 현상으로 더욱 불규칙해지는 기상 변화에 무관하게 지속적으로 영상을 획득할 수 있는 장점이 있고, 특히 SAR의 해상도가 광학 영상에 버금가는 수준으로 높아짐에 따라 광학 영상에 비해 기상 영향에 무관하게 영상 획득률을 매우 높은 SAR 영상의 활용이 더욱 증대될 추세이다. 특히, 한반도는 입지적으로 삼면이 바다로 둘러싸인 반도 국가로서, 기상 변화가 많고 강우 및 구름 낄 확률이 연평균 50% 이상이므로 고해상도 영상 정보 획득 효율면에서 SAR 위성의 역할은 광학 카메라 위성에 비해 더욱 중요해질 전망이다. 특히 남북한이 대치하고 있는 한반도에서 최근 북 핵 및 장거리 미사일 발사에 이어서, 2010년에 발생한 천안함 사태와 연평도 도발 징후에 대한 감시 정찰 및 피해 확인 등을 원격으로 정밀 관측하는데 필수적인 영상 정보 수단

으로 활용될 수 있다.

SAR 기술은 1951년 Carl Wiley가 DBS(Doppler Beam Sharpening)라는 초기 SAR 개념의 방위 해상도 향상 원리를 발명한 이래 50년여 동안 많은 기술 발전을 가져왔다. 1978년 미국 최초의 SAR 위성인 SEASAT을 시작으로, NASA의 우주왕복선 SIR-A/B/C/X와 2000년 SRTM(Shuttle Radar Tomography Mission)에 이르기까지 많은 위성 SAR 영상을 획득하였다. 유럽 우주국(ESA)의 ERS-1/2, ENVISAT, 캐나다 우주국(CSA)의 RADARSAT-1, 일본 우주국(JAXA)의 JERS-1 등은 1990년대의 대표적인 SAR 과학 및 환경 탐사 위성이다. 특히 2000년대 들어서 유럽 여러 국가에서는 독일의 TerraSAR-X, SAR-Lupe, 이스라엘의 TecSAR, 이탈리아의 Cosmo Skymed 등 소형 경량의 군용 및 민수용의 저궤도, 고해상도 원격 탐사 위성을 경쟁적으로 개발하였다. 현재 2010년을 정점으로 이들 대부분의 위성들을 현재 발사 완료되어 유사 이래 가장 많은 저궤도 SAR 위성들의 경쟁으로 인하여 비로소 “저궤도 위성 SAR 경쟁시대”로 진입하게 되었다. 우리나라에서도 다목적 실용위성에 SAR를 탑재하는 영상 레이다 기술 개발을 1996년대 중반부터 착수하였으나 IMF의 위기를 맞아 수년 동안 지연되다가 2000년대 중반에 비로소 개발이 본격적으로 진행되어, 국내에서는 최초로 인공위성에 레이다를 탑재하는 위성탑재 영상 레이다를 2011년 중반에 발사할 예정이었지만 러시아 발사체 문제로 아직 발사가 지연되고 있다.

본 기고에서는 영상 레이다의 기본 원리를 소개하고, 최근 위성 SAR 개발 동향을 중심으로 대표적인 해외의 저궤도 위성 SAR 및 우리나라의 KOMPSAT-5 위성에 대한 기술 특징을 소개하고, 활용 기술과 향후 기술 발전 추세를 살펴본다.

II. 위성 영상 레이다(SAR) 기술

영상 레이다의 해상도는 거리 방향 해상도와 방

위 방향 해상도로 구분되며, 광학 영상의 2차원적인 영상과 동일한 화소 의미를 가진다. 공간상의 SAR 영상 해상도는 안테나의 빔 폭이 좁을수록 비례적으로 좋아지므로, 실제 개구면을 사용하는 일반 레이다 RAR(Real Aperture Radar)의 경우 해상도를 증가시키기 위해서는 실제 안테나의 개구면을 매우 크게 만들어 주어야 한다. 그러나 물리적으로 안테나를 수 km 길이로 만들 수 없으므로 영상 레이다(Synthetic Aperture Radar)에서는 위성이나 항공기 등의 비행체를 이용하여 일정 비행 이동거리 동안 빔을 합성하여 안테나의 방위 방향 길이를 매우 길게 만들어 주는 효과를 이용함으로써 방위각 해상도를 증가시킨다. 일반 레이다의 방위각 해상도는 안테나의 방위 길이에 비례하고 탐지거리에 반비례한다. 그러나 SAR의 경우 합성 안테나 길이는 표적과의 거리에 비례하여 길어지므로 거리에 관계없이 일정한 방위각 해상도를 유지할 수 있다. 거리 방향 해상도는 송신 펄스의 대역폭과 입사각에 비례하여 좋아진다. 레이다에서 거리 방향 해상도는 송수신 파형의 펄스폭에 따라 결정되며, 레이다 신호의 대역폭을 넓게 생성함으로써 거리 해상도를 향상시킬 수 있다. SAR 영상 형성은 레이다가 탑재된 비행체가 이동하면서 지속적으로 관심지역에 Chirp 신호를 송수신하여 한 지점에 대한 거리와 방위각 방향의 2차원 SAR 원시 데이터를 획득한다. SAR가 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 송수신하는 동안 플랫폼의 이동으로 인해 표적에 대한 위치 변화가 발생하며, 이는 LFM 신호와 유사한 형태의 도플러 변위로 나타난다. 그러므로 SAR에서는 펄스 압축 기법을 통하여 거리방향의 해상도를 얻고, 플랫폼의 이동에 의한 도플러 주파수의 상대적인 변위 값을 처리하여 방위 방향의 고해상도 영상을 얻는다^{[1]~[3]}.

위성 SAR 시스템은 크게 위성체, 발사체, 지상체로 나눌 수 있다. 위성체는 위성 본체와 탑재체, SAR 안테나, 태양 전지판 등으로 구성된다^{[4],[5]}. 발사체는

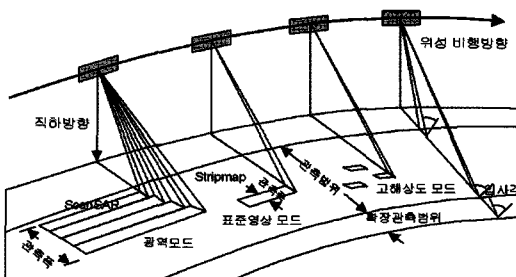
위성을 우주 궤도에 진입시키는 로켓으로 추진체와 탑재체로 구성되어 있다. 위성 SAR 시스템은 위성이 궤도를 따라 운행하면서 임무 관제소의 명령을 받아 영상을 획득하고, SAR 수신 처리소로 자료를 전송한다. 이는 사용자의 운용 개념에 따라 긴급, 우선, 평시 임무로 나뉘어, 긴급도에 따라 영상을 직접 사용자에게 영상을 제공하거나 지상 수신 처리 장치에서 저장한다. 영상 획득 모드는 [그림 1]과 같이 중해상도의 표준 영상을 위한 strip 모드, 저해상도의 광역 관측을 위한 scan 모드, 그리고 좁은 지역이지만 고해상도의 영상을 획득하는 spotlight 모드 등으로 구분한다.

SAR 탑재체는 탑재 레이다 부분과 데이터 링크 부로 나눌 수 있으며, SAR 레이다 부분은 안테나 부, 초고주파 송수신부, 중앙 전자부로 구성된다. 안테나 부는 위상 배열 방식기, 급전기로 세분화할 수 있으며, 초고주파 송수신부는 송신기, 수신기, 그리고 주파수 발생기와 합성기로 이루어진다. 중앙전자부에서는 탑재체를 제어하고 송신 신호를 생성하며, 데이터 송신에 필요한 데이터의 압축을 수행한다. 데이터 링크부에서는 데이터를 저장하고, 지상국으로 데이터를 송신하기 위한 변조와 증폭의 과정이 수행되며, 최종적으로 데이터 링크 안테나를 통해 데이터를 송신한다. 지상체는 수신 처리소와 임무 관제소로 구성되며, 수신 처리소는 지상 수신 안테나부, 데이터 수집 및 전처리부, SAR 영상 형성부 및 영상 응용

부로 구성된다. 영상 형성부에서 SAR 원시 데이터의 진폭과 위상 정보를 이용하여 신호를 압축함으로써 레벨 1의 기본 영상을 형성하게 된다. 이 기본 영상은 전파 경로상의 보정이나 지구 기하적인 보정을 거친 다음, 스테레오 영상, 3차원 간섭 영상, 모자이크 영상 등의 활용 목적에 따라 다양한 정보를 추출할 수 있게 된다. SAR 반사 신호의 진폭 크기 정보를 이용하면 표적 인식, 변화 감지, 스테레오 지도 등을 만들 수 있고, 인터페로메트리를 이용한 위상 정보를 이용하면 DEM(Digital Elevation Map) 정밀 고도 정보 추출은 물론 더욱 정밀한 변화 탐지, 분류 등에 이용할 수 있다.

III. 위성탑재 SAR 시스템 현황

레이다가 최초로 독일에서 1904년에 Christian Hulsmeyr에 의해 개발된지 한 세기 역사를 넘고 있다^[6]. SAR는 레이다가 개발된지 50년이 지나서 1951년 미국의 Carl Wiley가 DBS(Doppler Beam Sharpening)이라는 초기 SAR 개념의 방위 해상도 향상 원리를 발명한 이래 50여년 동안 많은 기술 발전을 가져왔다. 미국은 1978년에 세계 최초로 고도 800 km, 해상도 25 m, 관측폭 100 km의 특성을 갖는 SEASAT을 개발하였다. 이후 1981년과 1984년에 개발된 SIR-A/B를 우주 왕복선에 탑재하여 기술을 검증하였으며, C-밴드의 SAR(미국개발)와 X-밴드의 SAR(유럽개발)를 동시에 탑재한 SIR-C/XSAR를 개발하여 1994년에 우주왕복선에 탑재 운용하였다. SIR-C/X는 전자 빔 조향에 의한 넓은 입사각 범위를 가지고 있으며, 다중 편파 기술을 적용하였다. 2000년에는 독일과 공동으로 인터페로메트릭 SAR를 사용하는 SRTM을 개발하여 남위 60도에서 북위 60도까지 지구 주요 지역의 디지털 고도 지도(DEM)를 구축하였다. 또한 군사 위성으로 1988년 정찰용 LACROSSE-1을 시작으로 1991년에 LACROSSE-2, 1997년에 LACROSSE-3, 2000년에 LA



[그림 1] SAR 영상 획득 모드

<표 1> 최근 저궤도 위성 SAR 현황

개발국	SAR 위성	발사시기	주파수	해상도 (m)	관측폭 (km)	편파	고도 (km)
EUROPE	ERS-1	1991. 7	C band	30	5~100	VV	785
	ERS-2	1995. 4	C band	30	5~100	VV	785
	ENVISAT	2002. 3	C band	30~1000	100~400	Full	800
JAPAN	JERS-1	1992. 2	L band	18	75	HH	568
	ALOS	2006. 1	L band	7~100	20~350	Full	692
CANADA	Radarsat-1	1995. 11	C band	8~100	50~500	HH	798
	Radarsat-2	2007. 12	C band	3~100	20~500	Full	798
GERMANY	SAR-Lupe	2006. 12 (1st)	X band	0.5, 1	5.5, 8	Single	500
		2007. 7 (2nd)					
2007. 11 (3rd)							
2008. 3 (4th)							
2008. 7. 22 (5th)							
TerraSAR-X Tandem-X	2007. 6 (1st)	X band	1, 3, 16	5~150	Full	514	
	2010.6. 21 (2nd)						
ITALY	Cosmo SkyMed	2007. 6 (1st)	X band	1, 3, ~100	10~200	Full	619
		2007. 12 (2nd)					
		2008. 10 (3rd)					
		2010. 11. 6(4th)					
ISRAEL	TecSAR	2008. 1	X band	1, ≤3, 8	5~51	HH,VV, HV,VH	550
INDIA	RISAT	2009	C band	3 m~50 m	30~240	Dual	608

CROSSE-4, 2005년에 LACROSSE-5, 2009년에 LACROSSE-6를 개발 중에 있다. 최근 각국의 대표적인 저궤도 위성 SAR의 현황을 <표 1>에서 보는 바와 같이 1991년에 유럽에서는 유럽우주국(ESA)이 주축이 되어 ERS-1 위성을 처음으로 개발하였다. 이 위성에는 C-밴드 SAR 센서인 AMI(Active Microwave Instrument)가 탑재되었으며, 수평 편파 기술을 적용하였다. ERS-1의 후속 위성으로 거의 동일한 기능, 성능 및 궤도 특성을 갖는 ERS-2를 1995년에 발사하였으며, 지구 환경 탐사 목적의 대형 ENVISAT 위성에 ASAR를 탑재하여 2002년에 발사하여 현재 운용 중이다. ENVISAT 위성은 T/R 모듈 및 능동형 안테나를 채택하여 다중 모드, 다중 편파 영상 및 광대역 관측이 가

능하다. 유럽 국가 중에서 독일은 과거 SIR-series 기술 개발 경험을 토대로 군사위성 SAR-Lupe와 상용 위성 TerraSAR-X를 동시에 개발 운용하고 있다. SAR Lupe는 독일 국방부에서 주도하여 1 m 이하의 초고 해상도의 목표물 식별 목적으로 5개의 소형 SAR 위성을 위성군 형태로 운용하므로 짧은 재방문 주기 특성을 가지고 있다. 현재까지 SAR-Lupe 시리즈의 첫 번째 위성이 2006년 12월에 발사되었으며, 그 후에 2호기는 2007년 7월, 3호기는 2007년 11월, 4호기는 2008년 3월, 마지막 5호기는 2008년 7월 22일 발사함으로써 모두 5개의 소형 SAR 위성을 궤도에 올려성단운을 하고 있다. 또한 독일은 2007년 6월 15일에 최초의 고해상도 상용위성인 Terra SAR-X를 발사하

여 SAR 기술의 선두 주자로서 면모를 갖추게 되었으며, 전자 빔 조향 기능을 보유하여 넓은 관측 영역과 빠른 전자 빔 조향이 가능하고, 다중 편파, GMTI 기능 등을 시험모드로써 보유하고 있다. 이와 연계하여 2001년 6월 21일 성공적으로 발사한 TanDEM-X는 TerraSAR-X의 후속 모델로 인터페로메트릭 SAR를 사용하여 정밀 입체 고도 정보, DEM 정보를 제공하고 있다. 이탈리아에서는 이탈리아 우주국과 국방부가 주관하여 COSMO SkyMed 위성 4개를 개발하였으며, 2007년 6월 7일에 첫 번째 시리즈를 발사하였고, 2호기는 2007년 12월, 3호기는 2008년 10월, 마지막 4호기는 최근 2010년 11월 6일에 각각 발사되어 운용하고 있다. 이탈리아 최초의 고해상도 군사 위성으로 능동배열 안테나를 적용한 다중편파 레이더로서 1 m급의 고해상도의 영상을 획득할 수 있다. 이스라엘은 2000년 중반부터 SAR 위성인 TecSAR를 개발하여 2008년 1월에 발사 성공하였다. TecSAR는 1 m 이하의 고해상도 영상을 제공하며, 소형 경량 목적으로 우산 형태의 반사경 안테나를 사용하며, 위상 배열 안테나를 사용하는 다른 위성과 달리 제한된 빔 조향 범위를 갖고 있다.

러시아에서는 1991년에 Almaz-1을 발사하였으며, 이는 우주정거장 MIR와 비슷한 고도인 275 km에서 태양 비동기 궤도로 운용되었다. 전자 빔 조향 방식을 이용하여 입사각 범위를 가변할 수 있다. 현재는 S-밴드로 1~2 m급 해상도를 갖는 KONDOR 위성을 개발하고 있으며, 2개의 SAR 탑재 위성과 2개의 광학 센서 탑재 위성을 위성군으로 운용 계획 중인 SMOTR 사업을 추진 중이다. 2009년에서 2010년 사이에 발사 예정인 SMOTR은 X-밴드와 C-밴드에서 멀티모드로 동작하며, 해상도는 1~15 m 정도이다.

캐나다는 자국의 SAR 영상 수요와 해외 판매를 목적으로 최초의 상용 SAR 위성인 RADAR SAT-1을 1995년에 발사하여 운용하고 있다. RADARSAT-1은 10 m급 해상도, 500 km까지의 넓은 관측폭, 17~50°

의 넓은 입사각 범위 등 우수한 성능을 보유하고 있다. 또한 후속 모델인 RADARSAT-2는 RADARSAT-1의 수명 기간이 끝나던 1998년 이후부터 개발을 시작하였으나, 개발 과정에서 미국과의 역할 분담 및 사업자 변경 등으로 인하여 무려 10여년 가까이 지연되었으나, 2007년 12월에 성공적으로 발사되었다. 이 위성은 대표적인 상용 SAR 위성으로서 3 m급 영상해상도와 완전 다중 편파 기능을 제공하며, 스캔 방식의 광역 관측 기능을 가지고 있다.

일본은 1992년 단일 플랫폼에 SAR와 전자광학 센서를 탑재한 JERS-1을 개발하였으며, 2006년 1월 ALOS 위성을 발사하여 운용 중이다. ALOS의 SAR 탑재체인 PALSAR는 L-밴드로써 다중 편파를 적용하였으며, 광역 감시 모드일 경우 350 km의 관측폭을 가지며, 최대 해상도는 7 m이다.

그 밖에 인도 우주국에서는 다중 모드 SAR 위성인 RISAT을 개발하여 2009년 4월에 발사 운용중이다. C-밴드 주파수로 다중 편파를 적용하였으며, 스폿라이트 모드일 경우 2 m 이내의 해상도를 제공한다. 그리고 중국에서는 첫 번째 위성 SAR인 RRS-1을 2006년에 개발하였으며, 현재 2006년부터 2010까지 중국 5년 계획에 따라 2번째 SAR 위성을 개발 중이다.

국내에서는 90년대 중반부터 한국항공우주연구원이 주관하여 주로 광학 카메라 탑재체를 다목적 실용 위성에 탑재하는 아리랑 위성 1, 2, 3호 시리즈를 개발하여 왔으나, SAR 탑재체는 국가적인 SAR 위성 개발 필요성이 대두되어 90년대 중반부터 국방과학연구소에서 처음으로 본 필자가 위성 SAR 프로젝트를 창시하여 연구 개발을 착수하였으며, 영국 마르코니스페이스 등과 해외 기술 협력을 통하여 상당한 수준의 위성 SAR 시스템을 설계하였다⁴⁾. 그 후 국가적인 IMF 등의 영향으로 지연되다가 2000년대 중반부터 한국항공우주연구원을 주관 기관으로 해외 협력을 통하여 개발을 추진하여 왔으며, 2011년 중순에 발사를 목표로 준비하여 왔다. 이상에서 보는 바와 같이 2007년

을 기점으로 2010년까지 세계 각국에서 경쟁적으로 저궤도 위성 SAR의 개발이 추진되어 현재 13개의 위성이 운용되고 있다. 각국에서 최근 개발되었거나 개발 중인 주요 위성들을 간략히 소개하면 다음과 같다.

3-1 RADARSAT- II

캐나다 우주국에서는 2007년에 MDA(Macdonald, Detteler and Associates Ltd)와 공동으로 개발한 RADARSAT-2는 설계 수명이 7년이며, 중량이 2,200 kg이다^[7]. C-밴드 5.405 GHz를 사용하며, 고해상도(fine), 3중 고해상도(triple fine), 초고해상도(ultra-fine), 표준(standard), 광범위(extended), 광대역(wideswath), 스캔(scan) SAR 모드로 운용된다. 초고해상도 모드는 3 m의 해상도를 제공한다. RADARSAT-1은 HH 편파만을 사용하였지만, RADARSAT-2는 VV 편파, 교차편파(HV 또는 VH), 이중편파(HH+HV 또는 VV+VH), 직교편파(HH+VV+HV+VH)의 사용이 가능하다. 또한 RADARSAT-1은 단일 방향 영상 획득만 가능하므로 재방문 주기가 긴 단점이 있으므로 RADARSAT-2에서는 왼쪽/오른쪽 관측(left/right-looking) 모드를 적용하여 재방문 주기를 반으로 줄이도록 운용한다.

3-2 ALOS-PALSAR

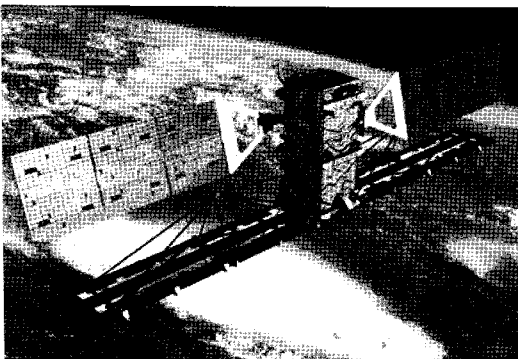
ALOS(Advanced Land Observing Satellite)는 일본

우주국에서 개발한 SAR 위성으로 2006년 1월 24일 성공적으로 궤도에 올랐다. 일본의 JERS(Japanese Earth Resource Satellite)-1과 ADEOS(Advanced Earth Observation Satellite) 위성을 향상시킨 ALOS는 [그림 3]과 같이 PALSAR(Phased Array L-Band Synthetic Aperture Radar)를 탑재하여 지도, 지역별 관측, 자연 재해 감시, 천연 자원의 개발을 목적으로 운용되고 있다^[8].

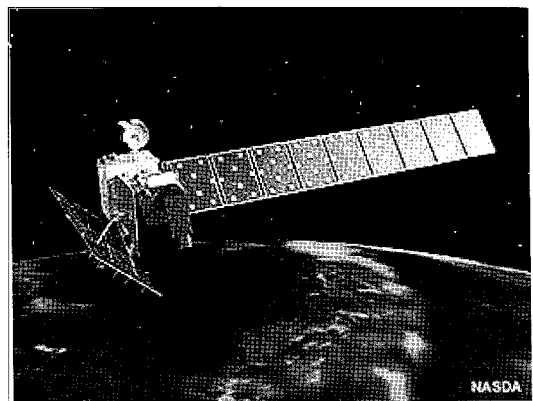
ALOS는 적도면에서 고도 691.65 km로 태양 동기 부귀환(subreccurent) 궤도를 가지며 운용된다. 중량은 약 4,000 kg, 전력은 2 kW이며, 위성의 형상은 [그림 3]과 같다. 일본의 2번째 위성용 SAR인 PALSAR는 L-밴드인 1.27 GHz의 주파수에서 다중 편파를 이용하여 다중모드의 SAR 영상을 지원한다. 고해상도(fine resolution)모드는 170 km의 관측폭을 가지며, 해상도는 약 10 m이다. 스캔(scan) SAR 모드는 250~350 km의 관측폭을 가지고 있으며, 편파(polarimetric) 모드는 30 km의 관측폭을 가지는 빔을 사용한다.

3-3 TerraSAR-X/TanDEM-X

독일 항공우주연구소 DLR과 EADS가 공동으로 개발하여 TerraSAR-X를 2007년 6월 15일 발사하였다. TerraSAR-X는 [그림 4]와 같이 X-밴드에서 다양한 모드별 해상도와 편파를 가지며, 위상 배열 안테나를



[그림 2] RADARSAT-2(캐나다)

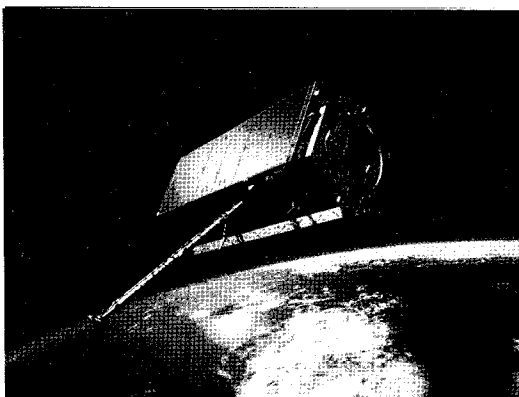


[그림 3] ALOS-PALSAR(일본)

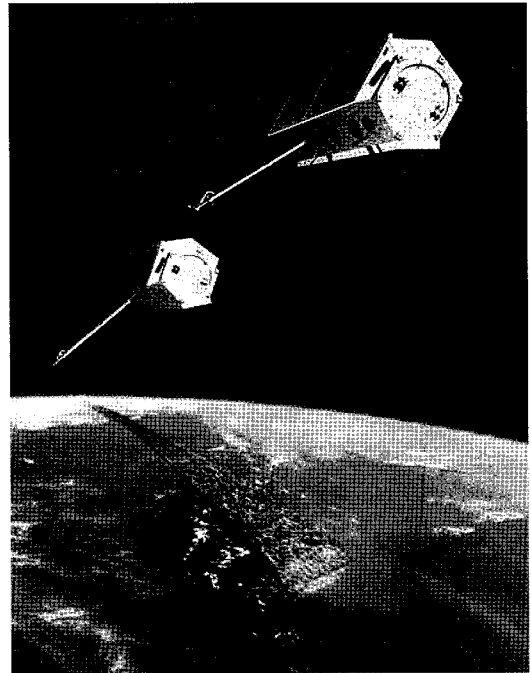
탑재하여 인터페로메트리와 GMTI 기능을 갖는다. 태양 동기 방식의 TerraSAR-X는 11일을 주기로 운용하며, 고도 514 km, 97.44°의 경사를 가지고 수명 5년으로 운용된다. 영상 모드는 스트립 맵(stripmap), 스캔(scan) SAR, 스폿 라이트(spot light)의 3가지 운용 모드를 가진다. 스트립 맵 모드는 30 km의 관측폭을 가지며, 편파의 종류에 따라 최대 3 m 해상도의 영상을 제공한다⁹⁾. 스캔 SAR 모드는 광범위한 탐색을 위한 모드로 100 km의 넓은 관측폭을 가지며, 해상도는 16 m이다. 스폿 라이트 모드는 최대 1 m의 고해상도 모드로써 10 km의 관측폭을 가진다. TerraSAR-X는 러시아-우크라이나의 DNEPR-1 발사체를 통해 2007년 6월 15일 발사되었으며, 검보정 기간을 거쳐 현재 1 m급의 고해상도 영상을 제공하고 있다. Terra-X의 후속 모델로 2010년 6월21일 TANDEM-X가 [그림 5]와 같이 발사되어 듀얼 위성 인터페로메트리를 이용한 입체 영상을 실시간으로 얻을 수 있는 최초의 위성 SAR를 개발하여, 고해상도의 지형 고도 정보 자료를 얻을 수 있도록 운용하고 있다.

3-4 COSMO Skymed

이탈리아 우주국과 국방부가 공동 주관하여 군사 위성 COSMO Skymed를 4기 개발하였다. 5년 수명으

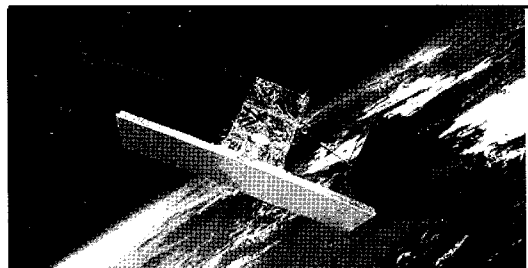


[그림 4] TerraSAR-X(독일)



[그림 5] TANDEM-X(독일)

로 Delta II 7420-10C의 발사체를 통해 2007년 6월 8일 1호가 발사되었고, 2호가 2007년 12월 9일, 3호는 2008년 10월 25일, 마지막 4호는 2010년 11월 6일 각각 발사되었다. 최신 능동 위상 배열 안테나를 사용한 X-밴드 SAR 센서를 탑재하고 있으며, 질량은 1,700 kg의 위성으로 최고 송신 전력이 5 kW이다. COSMO Skymed는 [그림 6]과 같고, HH, VV, HV 또는 VH 편파를 이용하여 단일 편파와 이중 편파 모드를 제공

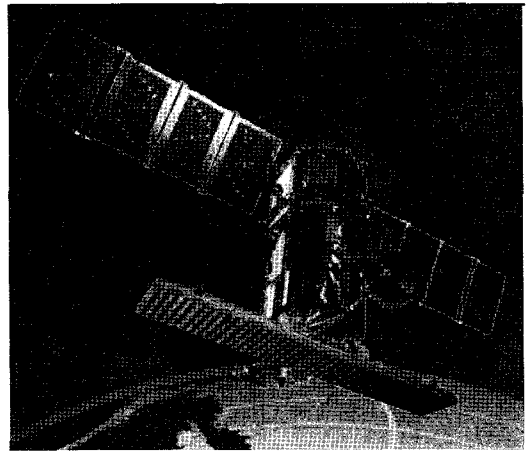


[그림 6] COSMO-Skymed(이태리)

한다^[10]. 단일 편파에서는 spotlight 모드, strip map 모드, 광대역 ScanSAR 모드, 초광대역 ScanSAR 모드로 다양하게 운용할 수 있고, 이중 편파에서는 ping pong 또는 strip map 모드만 가능하며, 30 km 관측폭에 15 m의 해상도를 제공한다. Spotlight 모드는 10 km의 관측폭에 1 m의 고해상도를 지원하며, 스트립 모드는 40 km의 관측폭에 3~15 m의 해상도를 지원한다. 광대역 모드는 100 km 관측폭에 30 m의 해상도를 가지며, 초광대역 모드는 200 km, 관측폭에 100 m의 해상도를 가진다.

3-5 KOMPSAT-5

한국은 국가 우주 개발 중장기 계획에 의하여 추진되는 다목적 실용위성 5호(KOMPSAT-5)는 SAR를 탑재한 최초의 영상 레이다 위성이다. 한국항공우주연구원(KARI)이 주관하여 한반도의 지상 및 해양 관측을 위한 저궤도 소형 실용 SAR 위성으로써, 국가적으로 중요한 국경 관리, 재난, 지리 및 해양 관리, 지구 환경 탐사 및 자연 재해 관측 등 정부 각 부처가 참여하는 국가적 수요에 의하여 개발하고 있다. 본 사업에 앞서 2004년 말부터 4개월 간 정부 주도로 기획연구를 수행한 다음 2005년 6월부터 착수하여 2010년 12월 발사를 목표로 추진하였으나, 사업이 지연되어 현재 2011년 중반에 발사할 예정으로 조립이 완료되었으나 발사체 관련으로 지연되고 있다. 고해상도의 SAR 탑재체 개발은 이태리의 Tales Alenia Space Italy(TASI)의 COSMO-Skymed의 기본 모델을 기반으로 해외의 기술 협력을 통하여 수행되었다^[11]. KOMPSAT-5 형상은 [그림 7]과 같으며, 수명 5년, 고도 550 km, 총 중량 최대 1,400 kg, 지름 2.6 m, 높이 4.0 m, 탑재체 질량 880 kg의 저궤도 위성으로 태양 동기 궤도의 반복주기는 28일이다. SAR 탑재체는 X 밴드의 다중 편파의 위상 배열 안테나를 이용하여 다중 영상 모드 기능을 가지고 있으며, 스폿라이트 모드의 m 급 고해상도에서부터 스캔 모드의 수십 m 급의 광



[그림 7] KOMPSAT-5(한국)

역 영상 모드로 운용이 가능하며, 다양한 활용 분야에 따라 관측폭과 해상도를 가변할 수 있다.

IV. 위성 SAR 활용 기술

SAR는 구름이나 비와 같은 기상 조건이나 일조현상에 관계없이 전천후로 고해상도 영상을 제공하므로 다양하게 위성, 항공기 및 무인기에 탑재하여 응용 분야에 따라 광범위하게 활용되고 있다. 활용분야는 크게 과학, 민수 및 군사 응용 분야로 나누어지며, 과학 분야에서는 지표면 탐사, 지도 제작, 생태계 연구, 산림 황폐화 연구, 해양 연구 등으로 활용되며, 민수용으로는 지진, 화산, 산불, 홍수 등 자연재해 감시와 기름 유출, 공해 감시, 자원 관리, 농업, 산림 분포 등에 많이 활용된다. 특히, 군사 응용 분야는 국경 감시, 군사시설 탐지, 군사 표적물 이동, 군함 탐지, 표적 식별, 작전 입체 지도 작성, 공격 성과 분석 등에 활용된다. SAR 영상은 사용 목적에 따라 환경 감시, 입체 영상 지도 제작, 숲 및 지표면 투과 탐지, 변화 탐지, 적 탐지 식별, 적 동태 및 침투 감시, 항법 및 유도 등의 응용 분야에 주로 활용된다.

환경 감시 분야에서 SAR 영상은 산림 벌목, 훼손

및 산불 피해 조사, 해양 기름 유출 탐지, 자연 재해 감시, 해류 흐름 관측, 빙하 지역의 눈, 얼음 분포와 특성 분석, 농작물의 종류, 발육 상태, 토양 수분 및 재배 면적 탐지 등에 사용되고 있다.

고해상도 위성 영상을 이용한 수치 지도 제작 및 갱신은 종래의 지상 측량 및 항공 사진 측량에 비해 광역지역을 빠른 시간에 효과적으로 처리할 수 있으며, 그래픽 시뮬레이션을 수행을 통해 임의 방향의 3차원 조감도를 제작할 수 있다. 이를 바탕으로 도심지 각종 인공 구조물 지도화, 인터페로메트리를 이용한 3차원 입체 영상, 지도 제작 등에 사용되고 있다. 또한 숲 또는 지표면에 대한 투과 탐사를 통해 지하 고대 유적 및 지하수 매장 탐지, 위장 또는 은폐되어 있는 표적 탐지, 지하 매설 전기선 등에서도 영상의 활용이 가능하다. 이밖에도 트럭, 탱크, 미사일 등 표적 이동 탐지와 고정 표적 변화 및 군 부대 이동 변화를 탐지 등에 활용되는 변화 탐지 분야와 특수 표적물 탐지, 분류, 식별, 작전 지역의 공격 성과도 판별, 자연 지형과 군사적인 인공 구조물 식별 등에 활용되는 표적 탐지, 식별 분야, 그리고 국제 규범에 위반하는 밀수 선박 감시, 국경 및 해안선 항구 감시, 적의 핵무기 및 생화학 무기 동태 감시 등에 활용될 수 있다.

4-1 고도 정보 추출 기술(Interferometry)

SAR 활용을 위한 최신 기술로서 정밀 고도 정보를 얻을 수 있는 인터페로메트리 기술이 있다. Interferometric SAR 기술은 두 장 이상의 복소수 SAR 자료에서 위상차 정보를 이용하는 기술로서, 고해상도의 고도 정보를 추출할 수 있으며, 지표면의 지각 변동, 해수면 및 빙하의 이동 검출, 선박 및 지표면 이동 표적의 속도 정보를 추출할 수 있다. 이를 위해서는 두 개의 SAR 센서를 운용하여 두 장의 SAR 영상 자료를 획득해야 하며, 두 개의 안테나를 동시에 비행체에 탑재하여 한 안테나는 송수신을, 다른 하나

는 수신만을 담당하는 형태로 운영할 수 있으며, 하나의 시스템을 시간적인 차이를 두고 비슷한 비행 궤도를 재현하여 두 장의 SAR 영상 자료를 획득할 수 있는 방법 등이 있다^[12]. 표고 모델 DEM(Digital Elevation Model)을 생성할 수 있으며, SRTM에서 획득한 지구 주요 지역의 고도 자료는 미국에서 2000년도에 우주 왕복선을 이용하여 수행하였다.

4-2 이동 표적 탐지 기술(GMTI)

GMTI(Ground Moving Target Indicator) 기술은 위성에서 지상의 이동 물체를 탐지하는 기술로서, 일반적인 SAR 영상은 고정된 지형 형상을 영상화하지만, GMTI는 도로상의 이동물체나 해상의 선박과 같이 이동하는 물체를 탐지하여 식별하는데 매우 유용하다. 어느 한 지역을 비행체의 속도에 따라 시간차를 달리 하여 SAR 자료를 얻고, 위상차를 이용하여 물체의 속도를 구할 수 있다. ATI(Along Track Interferometry) 기술은 주로 해류의 속도 벡터를 구하거나 지상의 이동 표적을 탐지하는 GMTI(Ground Moving Target Indicator) 기술에 적용되고 있다^[13]. 이동 표적 탐지를 위한 GMTI 기술은 위성 SAR의 플랫폼 이동으로 인해 고정 클러터가 도플러 변위를 가지므로 저속의 이동 표적을 탐지할 경우 제한적일 수 있다.

4-3 다중 편파 식별 기술(Polarimetry)

다중 편파 기법은 전자파의 편파에 따른 산란 특성을 이용하여 입사파의 편파와 산란되어 수신되는 편파의 순서에 따라 HH, HV, VH, VV의 네가지 편파 모드로 표현된다. 기존의 위성 SAR들은 HH 또는 VV 중에서 한 가지 편파로 고정되었으나, ENVISAT을 비롯한 RADARSAT-2, PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed와 같이 최신 위성에서는 대부분 편파 특성을 가지는 영상을 획득할 수 있는 기능이 있다. 4가지 편파 모드 중에서 HH, VV 두 개를 선택할 수 있는 이중 편파(Dual Polarization) 또는 모든 크로스 편파를

얻을 수 있는 Quadrature-Polarization 기술을 적용하고 있다. 지표면의 매질에 따라 전파에 의한 산란 특성이 다르기 때문에 다중 편파 SAR 기술은 주로 지표 분류 기술에 많이 응용되고 있다. 또한 다중 편파 SAR 영상은 각 편파 밴드에 따라 색상을 할당하여 단조로운 그레이 레벨의 SAR 영상에서 광학 영상과 같은 컬러 정보를 제공할 수 있다.

4.4 저 피탐 영상 기술(Bistatic SAR)

바이스테틱 레이다는 수신용 레이다를 분리하여 서로 다른 지역에서 송·수신을 하게 함으로써 모노스테틱에서 확보하지 못하는 정보를 획득하거나 송신기의 위치를 공격하는 전자파 방해에 대한 저 피탐 회피 기술로서 관심을 끌고 있다. 그러나 기술적으로 바이스테틱 레이다는 다양한 각도의 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면에 레이다 시스템의 동기화 문제가 발생할 수 있으며, SAR 영상 형성 처리를 위하여 송신 레이다의 움직임과 수신 레이다의 움직임을 따로따로 기록한 후 영상 처리해야 하므로 정밀한 SAR 영상 형성 과정이 필요하다. 여러 가지 해결해야 할 운용 요소들이 많기 때문에 현재 실험적인 연구 개발이 진행되고 있다.

V. SAR 기술 발전 전망

최근 개발되고 있는 위성 SAR에 적용하고 있는 기술 추세는 능동 위상 배열 안테나를 이용한 다중 영상 모드와 정밀 표적 식별 및 이동 표적 탐지 등의 새로운 기술을 적용하는 추세이다. 주요 기술은 크게 정밀 표적 식별을 위한 초고해상도 기술과 이동 표적 탐지 기술, 다양한 주파수와 편파를 이용한 표적 분류 기술, 입체 영상 제작과 정밀 고도 정보를 위한 인터페로메트리 기술, 짧은 재방문 주기를 위한 다수 위성의 성단 운영 기술, Bi-Static or Multi-Static SAR 기술 등으로 발전하고 있다. 시스템 개발 측면에서는

저가의 소형 위성을 단기간에 개발하는 저궤도 위성 방향으로 추진하고 있다.

다중 모드 기법은 원하는 지역 및 표적의 영상을 빔 조향 안테나를 이용하여 표준 영상 모드, 광역 감시 모드 및 고해상도 모드 등의 다양한 모드별 영상을 획득할 수 있는 기술이다. 전자광학 센서의 경우 고해상도의 영상은 획득할 수 있지만, 광역 감시 및 고해상도 모드를 동시에 운용하기 어렵다. 그러나 SAR 센서는 전자적으로 빔을 조향하고 송수신 파형을 적절하게 변형시켜줌으로써 응용 목적에 적합하도록 해상도와 관측폭을 조정할 수 있기 때문에 활용 분야의 다양성을 제공할 수 있게 되어 영상 수요 및 활용이 더욱 증가될 것이다.

다중 편파 기법은 전자파의 편파에 따른 산란 특성을 이용하여 입사파의 편파와 산란되어 수신되는 편파를 HH, HV, VH, VV의 4가지의 Quadrature-Polarization 기술을 적용하는 추세이다.

인터페로메트리 SAR 기술로서 최근 발사된 TanDEM-X는 듀얼 위성으로 인터페로메트리 영상을 얻을 수 있다. 또한 탑재체의 진행 방향에 수직으로 두 개의 안테나를 동시에 탑재하여 XTII(Across-Track Interferometry) 기술과 진행 방향에 따라 ATI(Along-Track Interferometry)를 이용한 이동 표적의 속도 측정 기술은 최근에 개발되어 시험적으로 적용하고 있다. 지상의 이동 표적을 탐지하는 GMTI(Ground Moving Target Indicator) 기술은 최근에 위성 SAR에서 중요한 기술이며, 상용으로 광범위한 지역의 고속도로 교통량을 감시에 활용할 수 있다. 최근에는 다중 채널 안테나를 통해 시간과 공간적인 처리를 동시에 수행하여 표적의 탐지 확률을 향상시킬 수 있는 STAP(Space-Time Adaptive Processing) SAR 기법은 디지털 배열 안테나 기술과 함께 발전하고 있다.

최근 지구 기후 변화로 인한 기상 이변이 전 세계적으로 나타나고 있으므로 관심 지역에 대하여 빠르고 고 정밀의 SAR 영상 정보 획득이 매우 중요해지

고 있다. 재방문 주기를 짧게 하기 위하여 다수의 위성을 운용하면 관심 지역을 자주 관측할 수 있다. 최근 이탈리아의 COSMO Skymed와 독일의 SAR-Lupe는 다수의 위성을 위성군으로 성단 운용하고 있으므로 국가간 상호협력을 통해 특정 지역 정보를 공유한다면 세계적인 지구 재해를 관측하거나 특정 국가 안보 같은 긴급한 관측이 요구되는 군사 분야에도 매우 정밀한 정보를 실시간으로 제공하는데 활용도가 높아질 것으로 기대된다.

VI. 결 론

SAR 기술 역사 50년을 뒤 돌아 보면 최근 10여년 사이에 최신 영상 레이다(SAR) 기술이 급속히 발전함에 따라 인공위성, 항공기 및 무인항공기에서 전천후 정보 획득 센서로서 중요성과 활용범위가 높아지고 있다. 군사용으로는 전천후로 10 cm 급의 초고해상도의 표적 탐지 및 식별이 가능해짐에 따라 정밀 감시 정찰에 획기적인 발전은 물론, 최근 지구 기후 변화와 기상 이변에 따른 자연 재해로 인한 날씨에 관계없이 관측할 수 있기 때문에 과학 및 민수용으로도 활용 범위가 매우 넓어지고 있다. 90년대의 위성 SAR 개발 추세는 대부분 대형 단일 위성으로서 다중 임무를 수행하는 목적으로 여러 가지 센서를 동시에 탑재하여 고가격, 고중량, 장기간의 개발기간 등이 요구되었지만, 최근 2000년대에는 기술의 발전으로 SAR 위성은 임무를 단일화하여 소형 경량의 고해상도 위성을 단기간에 낮은 개발 비용으로 개발하는 추세이다. 특히 2007년과 2010년 사이에 유럽 여러 국가에서는 군용 및 민수용으로 X 대역의 매우 유사한 고성능의 저궤도의 고해상도 SAR 위성을 경쟁적으로 개발하여 궤도에 집입시켰다. 현재 2010년을 정점으로 3~4년의 매우 짧은 기간에 유사 이래 최고 많은 13개의 SAR 위성들을 시리즈로 발사하여 비로소 “저궤도 위성 SAR 황금 시대”로 들어서게 되었다. 국내에

서도 다목적 실용 위성 시리즈로 SAR 레이다를 탑재한 최초의 레이다 관측 위성 KOMPSAT-5이 2011년 중반에 발사될 예정이지만 아직까지 발사가 지연되고 있다. 최근 기술 추세는 능동 위상 배열 안테나를 이용하여 편파 특성의 다중 영상 모드와 이동 표적 탐지 등의 새로운 기술을 적용하는 추세이다. 복합적인 센서와의 상호 보완적 운용을 통하여 SAR 영상뿐만 아니라 전자광학과 적외선 영상 정보와의 데이터 융합 기술이 중요해지고 있다. 우리나라는 아직 상대적으로 선진국에 비하여 국내 SAR 기술기반이 취약하지만, 다목적 실용위성 5호 SAR 위성의 성공적인 발사와 후속으로 6호 SAR 위성의 연속 개발을 통하여 국내의 SAR 개발 기술 기반을 지속적으로 구축하고, 범 부처적인 활용 기술 범위를 넓혀나가야 할 것이다. 그 동안 SAR 기술은 정부 주도의 안보 목적으로 추진되어 왔지만, 국내 독자적인 SAR 산업 기술 기반 구축과 지구 환경 탐사 등의 국제 프로그램을 리드하기 위해서는 안보 목적의 국가 수요 사업에만 국한하지 말고, 이제는 국가적으로 중급 해상도의 과학 및 상용 목적의 별도의 광역 관측 SAR 위성 및 항공기 SAR 프로그램을 만들어야 할 시기라고 본다. SAR 기술은 항공기, 무인기, 위성 등에 공통으로 적용할 수 있는 전략 기술이므로 전파강국을 위한 국가적인 무인기, 항공기 및 위성 SAR 탑재체 개발을 위한 연구를 활성화하고 SAR 전문 인력을 양성하여, 세계적인 SAR 첨단 기술을 선도할 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 광영길, "위성탐재 영상 레이다 기술", 대한전자 공학회지, 특집호, 34(11), pp. 1276-1290, 2007년 11월.
- [2] 광영길, "Synthetic Aperture Radar: Systems, Technology, and Applications", 2005 레이다 SAR Work-

- shop 발표집, 한국전자과학회(레이다연구회), pp. 9-31, 2005년 7월.
- [3] Ian G. Cumming, Frank H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar*, Artech House, 2005.
- [4] 박영길 외, "위성탐재 영상레이다(ROKSAR) 체계설계", 국방과학연구소, Report No. KTRC-517-991607, 1999년 12월.
- [5] 박영길, "X 밴드 고해상도 소형 위성탐재 SAR 체계설계와 성능특징", 한국전자과학회 논문지, 11(7), pp. 1258-1270, 2000년 10월.
- [6] 박영길, "레이다 역사 100년", 한국전자과학회지 전자파기술, 16(1), pp. 54-64, 2005년 1월.
- [7] S. Riegger, C. Livingston, "Space based SAR missions, RADARSAT-2", *Proceeding CD of EUSAR 2010, Session 1.4*, Aachen, Germany, Jun. 2010.
- [8] M. Shimada, P. Lombardo, "ALSO-L-band SAR system for earth remote sensing", *Proceeding CD of EUSAR 2010, Session 6.4*, Aachen, Germany, Jun. 2010.
- [9] M. Zink, M. Bartusch, "TerraSAR-X/TanDEM-X", *Proceeding CD of EUSAR 2010, Session 2.4*, Aachen, Germany, Jun. 2010.
- [10] F. Dell Acqua, P. Gamba, and R. Battaglia, "Applications and design of a multi-polarization 2nd generation SAR for the COSMO/SKYMED constellation", *Applications of polarimetry and polarimetric interferometry, POLINSAR2005*, pp. 41-45, 2005.
- [11] 한국항공우주연구원 <http://www.kari.re.kr> 연구사업/위성/ 다목적실용위성 5호/
- [12] N. F. Stevens, G. Wadge, "Towards operational repeat-pass SAR interferometry at active volcanoes", *Natural Hazards*, vol. 33, no. 1, pp. 47-76, 2004.
- [13] S. Suchandt, M. Eineder, R. Müller, F. Meyer and G. Palubinska, "Development of a GMTI processing system for the extraction of traffic information from TerraSAR-X data", *EUSAR 2006-6th European Conference on Synthetic Aperture Radar Dresden*, Germany, 2006.

≡ 필자소개 ≡

곽 영 길



1976년 2월: 한국항공대학교 항공통신공학과 (공학사)

1981년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)

1987년 6월: 미국오하이오 대학교 전기전자공학과 (공학박사)

1976년 3월~2001년 3월: 국방과학연구소

책임연구원, 레이다 신호처리 및 SAR 연구실장

1997년 2월~1999년 2월: 영국 Matra Marconi Space 위성 SAR 개발 프로젝트 책임자

2001년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수 및 대학부설 항공전자연구소 역임/현재 레이다 연구소 소장

2002년 4월~2008년 12월: 한국전자과학회 레이다연구회 위원장

2006년 7월~현재: 항공우주학회 항공전자부문 위원장

2000년~현재: IEEE Senior Member, IEEE International Radar Society 및 EUSAR/APSAR Committee 위원

2007년 9월~2008년 8월: 영국 옥스퍼드대학교 방문연구교수

2009년 11월~현재: General Chair of APSAR 2011, 대회장

2009년 1월~현재: 국회 한국과학기술정책연구회 회장

2010년 1월~현재: IEEE AESS Korea Chapter Chair

[주 관심분야] Radar system design, radar signal processing, synthetic aperture radar processing, collision avoidance for UAV and automotive radar, avionics, adaptive interference rejection, spectrum management DSP based sensor signal processing