

# 열대저기압 마이크로파 원격탐사의 기술 현황

최근철\*\*\* · 양찬수\* · 박한일\*\*

\*한국해양연구원 해양위성연구단, \*\*한국해양대학교 해양공학과

## Technical Status of Microwave Remote Sensing of Tropical Cyclones

Geun-Chul Choi\*\*\*·Chan-Su Yang\*·Han-Il Pack\*\*

\*Ocean Satellite Research Group, Korea Ocean Research & Development Institute

\*\*Department of Ocean Engineering, Korea National Maritime University

**요약** : 본 논문은 열대저기압, 태풍 및 허리케인의 연구와 분석에 사용되는 몇 가지 마이크로파 방식들을 검토하였다. 마이크로파 신호는 폭풍 속 구름과 비에 의해 잘 흡수되지 않는 장점을 가지기 때문에 격렬한 폭풍을 동반하는 열대저기압의 관측에 있어 매우 유용하다. 그에 대한 장비들로 산란계(scatterometers), 마이크로파 복사계(microwave radiometers), 합성개구레이더(synthetic aperture radars; SARs), 강우레이더(rain radar)에 대해 살펴보았다. 이러한 마이크로파 장비들로부터 얻어진 열대저기압내의 바람, 강우, 구름분포와 같은 자료들은 태풍의 진로와 강도예측에 중요한 정보를 제공한다. ERS-1, 2 산란계와 RADARSAT-1 SAR로부터 얻어진 세부적인 바람장, 넓은 관측범위를 가지는 SSM/I로부터 얻은 풍속분포, 높은 해상도를 가지는 TRMM 강우레이더의 강우 강도측정들은 이러한 예를 보여주고 있다. 초기 마이크로파 원격탐사에서 나타났던 해상도, 관측 폭과 같은 한계들은 최근 발사되어 운영되는 위성들의 장비들로 많은 개선이 이루어졌다. 이러한 마이크로파 장비들에 대한 충분한 이해와 활용은 열대저기압의 발생과 강도와 같은 특성들을 규명하는데 큰 역할을 할 것이다.

**핵심용어** : 마이크로파 원격탐사, 열대저기압, 산란계, 합성개구레이더(SAR), 강우레이더

**ABSTRACT** : This article reviews several microwave instruments employed in observation and analysis of tropical cyclones (TCs), typhoon, and hurricanes. Microwave signals are useful for observing tropical cyclones with severe storms since it isn't severely absorbed by the clouds and rain in the storm. The instruments discussed include scatterometers, microwave radiometers, synthetic aperture radars (SARs), and rain radar from space. The data such as winds, rainfall and cloud-distribution in the TCs obtained by microwave instruments provide important informations for forecasting the intensity and path of the typhoon. For example, there're wind-distribution provided by SSM/I which has a wide swath, detailed wind fields from ERS-1, 2 scatterometers and RADARSAT-1 SAR, and TRMM's rain radar providing high resolution. Operational satellite instruments lunched recently have improved upon the problems of low resolution and narrow swath indicated at the beginning microwave remote sensing. Understanding and practical using sufficiently about the microwave instruments will serve for searching the features such as generation and development of the TCs.

**KEY WORDS** : Microwave remote sensing, Tropical cyclones, Scatterometer, synthetic-aperture-radar(SAR), rain radar

### 1. 서론

열대기후시스템의 일반적인 이름은 열대저기압(Tropical cyclones, TCs)이다. 이것은 지역적으로 서태평양에서는 태풍(typhoons), 동태평양과 카리브해와 대서양에서는 허리케인(hurricanes)으로 이름 불려진다.

열대저기압은 전 세계적으로 인류가 겪는 재해 중 가장 큰 피해를 초래하는 자연현상이다. 이는 활발한 대류활동에 동반

하여 대기 중의 수증기로부터 구름 입자가 형성되어질 때 방출되어지는 응결의 잠열을 에너지원으로 한다. 그것의 발생과 발달에는 대량의 수증기 공급이 불가결하기 때문에 안정된 열원이 요구되어진다. 하나의 열대성저기압은 열대성폭풍(Tropical storm; TS)과 태풍(Typhoon; TY)으로 다양한 단계를 거쳐 빠르게 성장될 수 있다. 지난 20년 동안 TC의 성장과 강도의 단계를 추론하는 방법은 내부 핵의 최대 지상풍속 혹은 최저 중심기압을 이용하는 것이었다(Dvorak, 1984). 이것은 원격탐사 자료에 기반을 두고 발전해왔다.

열대저기압은 강도와 규모에서 매우 다양할 수 있다(Katsaros et al., 2002). Fig. 1은 우리나라를 통과하면서 큰 피해

\*최근철, fe5025@nate.com, 051)410-4937

\*\*양찬수, yangcs@kordi.re.kr, 031)400-7678

\*\*\*박한일, hipack@mail.hhu.ac.kr, 051)410-4326

를 주었던 태풍 매미(왼쪽, 2003)와 나비(오른쪽, 2005)의 모습이다. 두 태풍은 모두 중심부근의 풍속이 45m/s 이상이고, 중심기압이 대략 930hPa로써 강한 태풍의 형태를 지니고 있는데 강풍반경은 매미 160km, 나비 650km로 두 배가 넘는 차이를 보이고 있다. 이는 TCs가 같은 강도에서 매우 다른 크기를 가질 수 있다는 것을 설명한다.

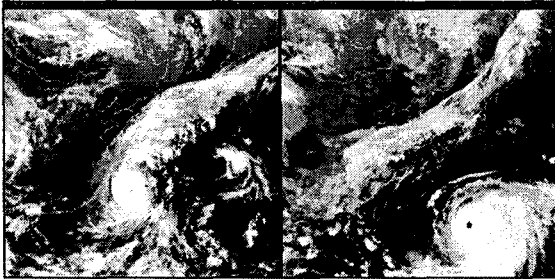


Fig. 1. Two West Pacific Typhoons, Nabi in 2005 and Maemi in 2003, seen from the GOES satellites in infrared images at the same scale.

미국의 해양대기청(NOAA)은 연구용 항공기에 장착된 드랍존데(dropsonde)로 폭풍의 구조를 파악하고, 소모성 이륙 심해자기온도계(AXBTS)로 바닷물을 측정한다. 또한 실시간 지상풍속의 정보를 미국기상청(National Weather Service)소속인 국제허리케인센터에 인도하는 SFMR(Stepped-Frequency Microwave Radiometer)는 많은 발전양상을 거쳐 왔고 현재에도 사용 중이다. 항공측정은 높은 풍속에서 바람관측의 교정과 검증에 위한 유용하고 유일무이한 방법이다(Katsaros et al., 2002).

마이크로파 신호의 큰 장점은 낮은 주파수의 긴 파장(5~14GHz)에서 폭풍 속 구름과 비에 의해 잘 흡수되지 않는다는 것이다. 비교적 높은 주파수(19~37GHz)에서 구름과 비에 의한 흡수는 기상 현상들에 관한 정보를 제공하며 특별히 22GHz에서 대기는 수증기 때문에 약한 흡수라인을 갖기 때문에 대기 중 포함된 총 수증기량 또한 얻을 수 있다(Katsaros et al., 2002). 반면 마이크로파 원격탐사는 큰 안테나가 요구된다는 단점을 가지고 있다.

## 2. 마이크로파 원격탐사

이 장에서는 마이크로파 원격탐사를 위한 여러 장비에 관해 소개한다. 능동 마이크로파 센서인 산란계(scatterometer)와 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR), 수동 마이크로파 센서인 마이크로파 복사계(Microwave radiometer), 그리고 마지막으로 폭풍 속 강우량을 측정하기 위해 사용되는 강우레이더에 관해 살펴보았다.

### 2.1 산란계(scatterometer)

산란계는 지구의 지표면에 마이크로파 파동을 보내고 지표

면 조도로부터 후방산란되는 수신전력을 측정하여 대상의 규격화산란단면적(radar cross-section,  $\sigma^0$ )을 정량적으로 측정하는 센서이다(김 등, 1998). 바다위에서 후방산란은 센티미터 규모의 작은 물결 때문에 해수면의 조도에 좌우되고 또한 바람응력의 크기뿐만 아니라 레이더 빔의 방향과 관계한 풍향에도 영향을 받는다(Attema, 1991). 극궤도 위성에서 작동하는 이러한 우주기반 산란계는 우주선이 지구표면 위를 이동할 때 관측범위 내의 한 화소(pixel)에서 multiple looks를 통해 풍속과 풍향 모두를 제공한다(Katsaros et al., 2002).

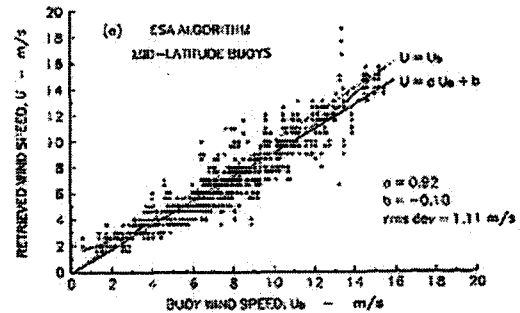


Fig. 2. Comparison of wind speed retrievals using ESA algorithm with buoy wind speed at mid-latitudes (Rufenach, 1998)

유럽우주항공국(ESA)는 AMI(Advanced Microwave Instrument)를 장착하여 ERS-1(1991~2000)과 ERS-2(1995~)를 발사하였다. 현재에도 운영 중인 ERS-2는 레이더 고도계(Radar Altimeter, RA)를 장착하여 해수면 파고와 풍속은 물론 빙하흐름의 정보도 제공한다. 한편 ERS-1은 500km 이상의 관측 폭으로 50km 해상도의 바람벡터를 제공했다. Fig. 2는 ERS-1 데이터로부터 얻은 위성바람과 부이바람이 잘 일치하는 것을 보여준다(Rufenach, 1998). 또한 Fig. 3은 ERS-2의 산란계로부터 얻어진 바람벡터들로 그린 바람장을 보여주고 있다. 이것은 지난 2005년 8월 타이완 동쪽 해상에 위치한 태풍 Matsa의 바람분포로서 이를 통해 태풍 눈의 위치를 가늠할 수 있다. 또한 ESA는 최근 2006년 10월에 발사한 MetOp-A에 ASCAT (Advanced Scatterometer)를 장착하였다. 이 장비는 세 방향(fore/mid/aft)의 dual-swath(2×500)와 50km의 해상도를 가지는 C-band 산란계이다.

미 항공우주국(NASA)은 1978년 6월에 Seasat 위성에 가장 처음 산란계를 장착하여 3달간 운영하였다. 4개의 fan-beam과 Ku-band를 사용하고 이중 분할된 안테나는 50km 해상도로 두 개의 500km 관측 폭을 탐색할 수 있었다(Katsaros et al., 2002). 일본에 의해 1996년에 발사된 ADEOS 위성에 탑재된 NSCAT(NASA Scatterometer)은 고밀도(25km) 해상풍 측정을 위한 최초의 관측기기이다. 6개의 fan-beam 안테나는 우주선 양측으로 600km의 넓은 관측 폭과 50km의 해상도를 가지는데 이로부터 얻어진 자료는 현장측정과 NWP(National Weather Prediction) 모델과의 바람 비교를 통해 볼 때 기대 이상이

있다(Liu et al., 1998; Ebuchi, 1999). 또 다른 산란계로 NASA가 추진한 QuikSCAT 계획의 일환으로 1999년에 발사된 SeaWinds가 있다. 이 장비는 pencil-beam 안테나와 Ku-band를 사용하며 날씨조건에 상관없이 1800km의 관측 폭으로 25km의 해상도의 풍속과 풍향을 제공할 수 있다.

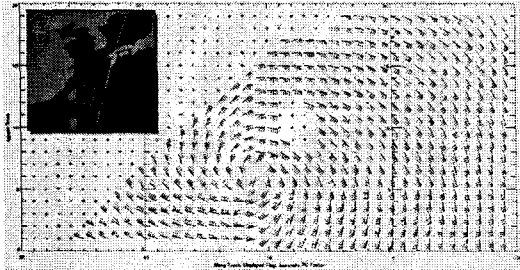


Fig. 3. A map of the wind field at the heart of Typhoon Matsa, using data acquired at 02:09:38 UTC on 17 August 2005 by the C-band scatterometer on board ESA's ERS-2 spacecraft. (Image: <http://www.esa.int>)

본래의 산란계 알고리즘의 경험적인 형태는 높은 풍속 상황에서 측정된 바람의 민감도를 점근적으로 줄이는 것이다(Cavanié and Lecomte, 1987). 부이로부터의 불충분한 비교 측정은 풍속 25m/s 이상의 바람 복구에서 그다지 큰 개선을 보이지 않았다(Katsaros et al., 2002). Quilfen(et al., 1998)은 특정 20개의 궤도에서 얻은 25km 해상도에서의 C-band AMI (Active Microwave instrument) 데이터를 설명하였고 Yueh(et al., 2000)는 Ku-band 산란계가 풍속 35m/s를 웃도는 허리케인 조건 아래의 풍속과 풍향에 모두 민감하다는 걸 보여주었다.

U.S.산란계의 최소요구 사항은 10% 혹은 2m/s의 풍속의 정확성과 강우를 제외한 모든 날씨 조건아래 3~20m/s(NSCAT)와 3~30m/s(QuikSCAT)의 속도범위에서 20°의 방향의 정확성이 요구되어진다(Katsaros et al., 2002). 강우 속에서의 마이크로파의 산란은 예외적인 결과를 가져다 줄 수 있지만 그럼에도 불구하고 산란계 측정은 해양 위에서 풍속을 얻기 위한 가장 정확한 기술로 손꼽힌다(Rees, 2001). 또한 마이크로파 산란계는 마이크로파와 관측표면과의 상호작용에 대한 분석에서 아주 중요한 연구 수단이다. 앞으로의 과제로 보다 정확한 규격화 산란단면적의 산출을 위해 쓰이는 모든 파라미터들에 대한 명확한 정의는 더욱 연구되어야 한다. 이들 중 안테나이득(antenna gain)은 높은 정확도로 산란단면적을 산출하기 위한 파라미터들 중에 가장 어려운 부분이다.(Woodhouse, 2006).

## 2.2 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)

합성개구레이더는 작은 개구면의 상대적인 움직임으로부터 야기되는 도플러 이동을 합성함으로써 매우 큰 개구면으로 합성하는 기술로 현재 1m급 해상도에 이르기까지 초고해상도 이미지가 운영되고 있다.

최초로 지구궤도를 선회하는 민간 합성개구레이더를 장착한 Seasat 위성은 1978년 NASA가 쏘아 올려 단 3달간 운영을 하였다. 지구표면의 첫 고해상도 레이더 이미지를 제공하였으며 이는 해양구조를 밝히는 놀라운 이미지들을 제공하였다(Vesecky and Stewart, 1982). Seasat에 이어서 NASA는 우주 왕복선위에 SIR(Shuttle Imaging Radar)라는 일련의 단기 SAR mission을 수행하였다. 한편 NASDA는 JERS-1위성에, ESA는 ERS-1,2 위성 위에 모두 SAR를 탑재하였다. ERS-1,2 모두 C-band(5.6cm파장)와 VV편광 모드를 사용하는 SAR를 탑재했다. 특별히 현재 ERS-2에 탑재된 SAR 장비는 파고, 평균파장, 파향 등의 해양파에 관련된 중요한 정보를 제공한다. ERS-2는 운영상 시스템으로 의도되지는 않았지만 연구와 전 조작 역할로 모두 매우 성공적임이 증명되었고 GMES(Global Monitoring for Environment and Security) 프로젝트 준비에 중요한 역할을 수행하고 있다. 또한 캐나다우주국(Canadian Space Agency)이 1995년에 발사한 RADARSAT-1은 500km의 관측 폭으로 Cu-band를 사용하는 HH편광 SAR를 장비하고 있다. ScanSAR wide 모드에서는 500km의 관측 폭과 100m의 공간해상도를 갖고 fine beam 모드에서는 50km의 관측 폭과 10m의 공간해상도를 갖는다. 이 장비는 상업상 기반으로 운영되며 수산업 감시와 해빙 모니터링을 위한 선박탐지를 포함한 감시임무로 사용되었다(Vachon, 2000).

ERS에 이은 2002년 3월에 발사된 Envisat 위성의 눈에 띄는 변화는 해석을 측정하는 MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer) 센서를 추가 하였고, SAR에 기존보다 넓은 관측 범위와 커진 입사각과 다중편광 이미지 영상 기능이 부가됐다는 점이다. 또한 다기능 운영 모드를 갖는 ASAR(Advanced SAR)와 업그레이드된 RA-2 그리고 AATSR(Advanced ATSSR)과 같은 관측기를 탑재하여, ERS 위성이 수집해 온 해양 응용 데이터의 연속성을 유지한다. 최근 2006년 1월, 일본의 지구관측위성계획에 의해 발사된 ALOS는 대기, 해양, 육역을 관측하는 임무로 5년간 진행될 예정이다. L-band를 장착한 Phased Array 방식의 PALSAR는 관측범위와 분해능이 가변하여, 용도에 맞게 날씨·밤낮에 관계없이 유연한 관측이 가능하다.

해양의 SAR 이미지들은 해양 대기경계층 내에서 일어나는 많은 물리작용들의 유일한 시각을 제공한다. 한편 레이더 파장의 스케일에서 해수면 조도를 결정짓는 어떠한 물리작용도 이미지화 될 수 있는데 그 중 지구표면의 바람은 가장 중요한 영향이다(Katsaros et al., 2002). 다소 높은 풍속과 대응하는 거친 지역은 밝게 나타나는 반면 다소 낮은 풍속과 대응하는 부드러운 지역은 상대적으로 어둡게 나타난다. 자연적으로 발생하거나 기름유출의 결과로 생긴 해수면 막들은 레이더 파장 스케일에서 조도를 약하게 하고 SAR 이미지에서 어둡게 나타난다(Gade et al., 1998). 이러한 작용들의 모든 이미지들은 애매모호하게 결합되어있어 때론 이미지 해석을 어렵게 만든다(Katsaros et al., 2002).

조정된 SAR 이미지는 해수면 풍속의 정보를 제공한다. 하지

만 해상도면에서는 산란계보다 떨어지며 산란계와 달리 상대적인 풍향의 추정이 한 문제이기 때문에 SAR는 오로지 풍향에 관계하여 한방향의 시야만을 제공한다(Katsaros et al., 2002). 또한 낮은 입사각은 수신전력을 증가시키지만 높은 입사각에 비해 지역 해상도가 좋지 못한 특징을 지니고 있는데 적절한 입사각의 선택은 관측 장비인 센서와, 관측 지역의 특징들과 같은 여러 요인들이 고려되어진다(Woodhouse, 2006).

향후 발사될 고해상도 레이더 해양관측위성으로는 캐나다의 RADARSAT-2이 있다. RADARSAT-2는 C-band를 장착하고 최대 공간해상도는 2m에서 100m까지 조절 가능하다. 또한 관측 폭 역시 관측 모드에 따라서 최소 20km에서 500km까지 다양하다. Left-right looking mode를 포함하여 모든 beam mode를 지원하는 이 위성은 현재 2007년 3월에 발사될 예정이다.

### 2.3 마이크로파 복사계(Microwave radiometer)

복사계의 개발은 산란계보다 더 오랜 역사를 가지고 있다. 주된 장비는 Seasat(1978)과 NASA의 Nimbus 7 위성(1978-1985)에 장착된 SMMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)이었다. 1987년 이래로 19, 22, 37, 85GHz의 주파수에서 이중 편광(수직편광만 가지는 22GHz제외)으로 작동하는 SSM/Is(Special Sensor Microwave/Imagers)의 일련의 발사가 있었다. SSM/Is는 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)중의 극궤도를 선회하는 우주선 위에 있다. 그것은 1987년 7월 이래 지구상 해양 위에서 지속적인 지상풍속 측정을 제공해왔다. SSM/I는 넓은 주사(SCAN)와 그에 따른 좋은 관측범위(1400km)를 가지지만 지상풍향에 대한 정보를 제공하지는 않는다(Katsaros et al., 2002).

SSM/I로 얻은 풍속은 6시간 간격으로  $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  해상도의 바람 벡터장을 산출하기 위해 변분법을 통한 수치모델로부터 얻은 지상풍 데이터와 결합되어왔다(Atlas et al., 1996). Busalacchi et al.(1993)는 열대 태평양위의 이 큰 규모의 바람장들을 수치 예보작성(NWP)과 선박측정에 의해 기입되는 바람장과 구름움직임들의 비교를 통해 평가하여 SSM/I와 다른 바람장들 간에 대규모 유사점을 발견했다.

강우율의 알고리즘들은 주요 상호비교 연구과제로서 여전히 불확실하지만 비의 존재는 정보의 믿을 수 있는 부분이고 때론 두꺼운 권운층이 분명치 않은 허리케인의 적용에 매우 유용하다(Katsaros et al., 2002). 2002년 NASDA가 발사한 ADEOS-2 위성은 두 개의 주요한 센서를 장비하였다. 그 장비는 밤낮에 관계없이 해수의 순환운동과 관한 다양한 물리적 변수의 관측을 수행하는 AMSR(Advanced Microwave Scanning Radiometer)과 높은 정확도로 해양, 육지, 구름 등의 많은 영역을 관측하는 GLI이다. 그리고 최근 발사된 MetOp-A 위성위에 장착된 AMSU-A1/A2 (Advanced Microwave Sounding Unit)는 2000km의 관측 폭을 가지고 앞으로 TC의 온도구조에 관한 새롭고 흥미로운 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

### 2.4 강우레이더(Rain radar)

TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)은 NASA와 일본의 NASDA(National Space Development Agency)간의 제휴에 의해 개발된 공동 위성으로 1997년 11월 발사되었다. 열대지역에서 양질의 기상학적 강우측정을 얻기 위한 연구목적으로 열대 강우 연구와 감시, 그리고 지구 주위의 기후와 날씨를 결정짓는 대기 순환의 힘과 에너지를 연구하고 있는 이 위성은 첨단 센서들을 장착해(PR, TMI) 지상 350km의 저궤도로 지구를 순환 하면서 열대강우를 측정한다. TRMM의 낮은 경사 궤도는 저위도에서 강우모니터링을 위한 최적의 샘플링 비율을 주기위해 설계되었고 subtrack은 위도  $\pm 35^{\circ}$ 의 영역을 포함, 위성은 한 달에 한번 아열대-열대 지대를 관측할 수 있다(Katsaros et al., 2002). Fig. 4는 PR장비로 측정된 태풍 산산(2006)의 강우 강도를 보여주고 있는데 태풍 중심의 오른쪽에 15km 이상의 가장 높은 값을 보여주고 있다. 이는 일반적으로 우측반원의 지역이 폭풍의 강도가 더 강한 태풍의 비대칭성의 경향을 보여주는 한 예이다.



Fig. 4. The image from TRMM was taken on 12 September 2006 at 13:08 UTC as Shanshan was passing through the northern Philippine Sea. This is shows a 3D perspective of the storm courtesy of the TRMM PR(Precipitation Radar). (Image: <http://trmm.gsfc.nasa.gov>)

TMI(TRMM Microwave Imager)는 해양위의 강우, 지상풍속, 합성수증기, 해수면 온도를 포함하여 일련의 파라미터들이 얻어질 수 있도록 10.7GHz ~ 85GHz까지 휘도를 측정한다. 공간 해상도는 주파수에 따라 변하여 최저 해상도는 10GHz일 때 45km이며 85GHz일 때는 5km까지 증가한다. PR(Precipitation Radar)은 레이더 파동을 전송하고 대기로부터 후방산란을 측정하며 수평해상도는 4.3km이다. 이 장비는 지상과 해양 위 모두에서 3차원 강우량 분포를 측정하는 훌륭한 장비이다(Katsaros et al., 2002).

### 3. 열대저기압 마이크로파 관측의 예

#### 3.1 산란계로 얻어진 세부적인 바람장

산란계의 바람장 복구 능력은 ERS-2 바람 산란계로부터 얻어진 그림 3의 태풍 Matsa의 모습에서 알 수가 있었다. 또한 QuickSCAT의 SeaWinds는 날씨조건에 상관없이 1800km의 넓은 관측 폭으로 25km의 해상도의 풍속과 풍향을 제공할 수 있다. 이로부터 얻어진 세부적인 바람장들은 태풍의 구조와 강도를 가능하게 하는데 유용한 정보가 된다. 열대저기압상의 폭우에 의한 간섭에도 불구하고 SeaWind의 지속적인 넓은 관측범위는 특별히 폭풍시스템의 측정에서 굉장한 기술적 진보이다 (Katsaros et al., 2002).

#### 3.2 RADARSAT-1 SAR를 통한 지상풍 구조의 세부

100m 이상의 고해상도에서 지상풍 패턴의 RADARSAT-1 SAR 이미지들은 대류조직과 강우대 안으로 유입의 세부와 그리고 빗속에서 낮은 신호를 보여준다. 이는 아마도 비에 의한 흡수뿐만 아니라 빗방울 충격으로 인해 생기는 해수면위의 표면장력파와 표면중력파의 취송패턴 파괴도 영향을 준 결과일 수도 있다(Atlas and Black, 1994; Katsaros et al., 2000).

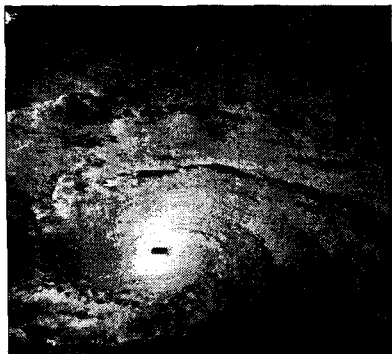


Fig. 5. The image of Hurricane Lili, taken over the Caribbean Sea, October 2, 2002, at 11:46 UTC. The center of a hurricane (the eye) appears darker because the wind speed is lower than in the surrounding area. (Image: Canadian Space Agency, processing by Radarsat International Inc.)

Fig. 5는 카리브해상에 출현한 허리케인 Lili의 이미지로 열대 저기압의 회전소용돌이(roll vortices)의 증거를 보여준다. 1998년과 1999년에 얻어진 대부분의 RADARSAT-1 허리케인 이미지에서 강우대 지역 사이 3-5km의 측풍(cross-wind) 파장과 함께 높고 낮은 풍속의 경도 패턴을 보이는 줄무늬가 보이는 흥미로운 현상을 발견하였다(Katsaros et al., 2000). 최근에는 하나의 열대저기압 안에 또 다른 눈(mesovortice)이 ScanSAR wide mode RADAR-1로 관측되었다. 한편 다음해에 발사되어질 RADARSAT-2 위성은 한층 더 나은 해상도로 그

구조의 세부를 더욱 명확히 보여줄 것으로 기대된다.

#### 3.3 마이크로파 복사계

미국 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)위성에 탑재된 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager) 마이크로파 관측은 대기-해양 순환의 연구뿐만 아니라 해상풍 산출에 매우 효과적으로 쓰이고 있다. SSM/I에 의해 산출된 지상풍속은 대개 경험수치모델로 융화됨으로써 TC 집합체에 이바지한다(Katsaros et al., 2002). 강우를 나타내기 위한 SSM/I의 고주파수 이미지는 실시간으로 U.S.Navy 웹 사이트([http://www.nrlmry.navy.mil/sat-bin/tc\\_home](http://www.nrlmry.navy.mil/sat-bin/tc_home))로부터 사용가능하다. 그것들은 기본적으로 상층운 크기를 나타내는 cold의 집중을 보여주기 위해 85GHz의 휘도온도를 사용한다. 또한 SSM/I는 방사알고리즘에 기초한 강우량지표(PCT)를 제공한다.(Lee et al., 1999; Hawkins et al., 2000)

#### 3.4 열대강우측정임무 (TRMM)

TRMM의 강우레이더는 폭풍의 강도변화를 알게 하는 열대성 강우의 강도에 초점을 맞추고 있다. 그 예로 그림4에서 태풍 산산의 강우분포를 알 수가 있었다. 또한 고해상도의 TRMM 데이터를 사용함으로써 태풍 내부 핵 안의 세부사항을 식별할 수 있다. Rodgers et al.(2000)는 TMI와 SSM/I 데이터를 결합함으로써 내부 핵의 대류성 돌발과 슈퍼태풍 Paka의 강우율을 실험할 수 있었다. 220km의 관측폭을 가지는 강우레이더는 마이크로파 이미지 관측 폭(760km)보다 작은 범위를 가지고 이 좁은 레이더 폭은 TC의 포착을 어렵게 한다(Katsaros et al., 2002). 그림에도 불구하고 Liu et al.(2000)는 QuickSCAT에 의한 지상풍 측정과 PR에 의해 얻어지는 비의 운곽을 결합할 수 있었다. 효과적인 임무수행의 성과로 TRMM은 임무기간을 연장하게 되었다. NASA의 발표에 따르면 TRMM위성은 적어도 이어지는 GPM(Global precipitation Measurement Mission)위성의 발사가 계획된 2010년까지는 계속 운영될 것으로 예상된다.

### 4. 결론 및 토의

열대저기압은 인간 거주지로부터 멀리 떨어진 적도 근처의 해양위에서 생성·발전되기 때문에 위성으로부터의 관측이 특별한 장점들이 있다는 것은 명백한 사실이다. 마이크로파 방식은 폭풍 속 구름과 비를 꿰뚫고 들어가는 큰 장점을 가진다. 하지만 눈 벽(eyewall)주위의 좁은 지역에 부는 지상풍의 크기, 내부 핵의 구조와 규모, 그리고 또 다른 작은 소용돌이(mesovortice)의 존재, 이러한 것들 때문에 기상예보의 평가는 최근 낮은 해상도의 한계에 이르렀다(Willoughby, 1990). 다행히 90년대 후반부터 고해상도 위성을 상용으로 개발하기 시작하면서 고해상도의 문제는 날이 갈수록 해결되어지고 있다. 하지만 고해상도 열대저기압 자료의 효과적인 활용을 위해서는 폭풍의 강도와 발달이 정의되는 파라미터들에 대한 연구가 지

속되어야 한다.

현재 관측위성 개발은 기존의 임무를 연속적으로 수행하면서 동시에 보다 효율적인 임무를 수행하기 위한 탑재체 개발과 위성 본체 개발에 집중되고 있다. 지구 전역 관측을 위하여 공간 해상도를 향상시키면서 이와 동시에 넓은 관측 폭을 갖도록 탑재체 및 영상저장 시스템이 개발되고 있다. 앞으로 위성자료를 효과적으로 활용할 수 있는 자료추출 알고리즘의 개발과 또한 고해상도 영상자료를 활용하기 위한 다양한 자료 전처리와 알고리즘, 정확도 등에 관한 연구가 지속되어야 한다.

원격탐사 노력의 한 국면은 순전히 기술적인 면이다. 하지만 물리적 변수의 원격탐사만큼이나 데이터수집, 파일보관의 매체의 선택, 데이터보급 처리과정과 같은 것들이 중요한 요구조건이 되어왔다(Katsaros et al., 2002). 산란계, 합성개구레이더, 강우레이더 데이터에 있어 여전히 예보를 위한 최적의 사용접근에 더욱 진척이 요구된다. 더불어 지금까지 살펴본 마이크로파 장비들과 그로부터 얻어진 자료에 대한 충분한 이해와 활용은 열대저기압의 이해, 대기/해양 순환 모델의 개선 등에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김영섭, 서예숙, 조명희(1998), 원격탐사개론, 동화기술, pp. 85-112.
- [2] Atlas D. and P. G. Black(1994), The evolution of convective storms from their footprints on the sea as viewed by synthetic aperture radar from space, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 75, pp. 869-882.
- [3] Atlas R. S., R. N. Hoffman, S. C. Bloom, J. C. Jusem and J. Ardizzone(1996), A multiyear global surface wind velocity data set using SSM/I wind observations, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, pp. 869-882.
- [4] Attema E. P. W.(1991), The active microwave instrument on board the ERS-1 satellite. *Proc. IEEE*, 79, pp. 791-799.
- [5] Busalacchi A. J., R. M. Atlas and E. C. Hackert(1993), Comparison of Special Sensor Microwave Imager vector wind stress with model-derived and subjective products for the tropical Pacific, *J. Geophys. Res.*, 98, pp. 6961-6977.
- [6] Cavanié A. and P. Lecomte(1987), Study of a method to dealias winds from ERS-1 data, ESA Final Rept.
- [7] Ebuchi N.(1999), Statistical distribution of wind speeds and directions globally observed by NSCAT, *J. Geophys. Res.*, 104, pp. 11,393-11,403.
- [8] Gade M., W. Allpers, W. Hühnerfuss, H. Masuko and T. Kobayashi(1998), Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR. *J. Geophys. Res.*, 103(C9), pp. 18,851-18,866.
- [9] Hawkins J. D., T. F. Lee, K. Richardson, C. Sampson, F. J. Turk and J. E. Kent(2000), Satellite multi-sensor tropical cyclone structure monitoring, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82(4), pp. 567-578.
- [10] Katsaros K. B., P. W. Vachon, P. G. Black, P. P. Dodge and E. W. Uhlhorn(2000), Wind fields from SAR, Could they improve our understanding of storm dynamics?, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 21, pp. 86-93.
- [11] Katsaros K. B., P. W. Vachon, W. T. Liu and P. G. Black (2002), Microwave Remote Sensing of Tropical Cyclones from Space, *Journal of Oceanography*, Vol.58, pp.137-151.
- [12] Lee T. F., J. D. Hawkins, F. J. Turk, K. Richardson, C. Sampson and J. E. Kent(1999), Tropical cyclone images now can be viewed "live" on the web, *EOS, Trans., AGU*, 50, pp. 612-614.
- [13] Liu W. T., W. Tang and P. S. Polito(1998), NASA scatterometer provides global ocean-surface wind fields with more structures than numerical weather prediction, *Geophys. Res. Lett.*, 25, pp. 761-764.
- [14] Liu W. T., H. Hu and S. H. Yueh(2000), Interplay between wind and rain observed in hurricane Floyd, *EOS, Trans., AGU*, 81, pp. 253, 257.
- [15] Quilfen Y., B. Chapron, T. Elfouhaily, K. B. Katsaros and J. Tournadre(1998), Observations of tropical cyclones by high-resolution scatterometry, *J. Geophys. Res.*, 103, pp. 7767-7786.
- [16] Rees W. G.(2001), Physical Principles of Remote Sensing, Second edition, Cambridge University Press, pp. 217-225.
- [17] Rufenach C(1998), Comparison of Four ERS-1 Scatterometer Wind Retrieval Algorithms with Buoy Measurement, *J. Atmos. and Oceanic Tech.*, 15, pp. 304-313.
- [18] Vachon P. W. and F. W. Dobson(2000), Wind retrieval from RADARSAT SAR images, Selection of a suitable C-band HH polarization wind retrieval model, *Can. J. Rem. Sens.*, 26(4), pp. 306-313.
- [19] Vesecky J. F. and R. H. Stewart(1982), The observation of ocean surface phenomena using imagery from the Seasat synthetic aperture radar, An assessment, *J. Geophys. Res.*, 87(C3), pp. 3397-3430.
- [20] Willoughby H. E.(1990), Temporal changes of the primary circulation in tropical cyclones, *J. Atmos. Sci.*, 47(2), pp. 242-264.

- [21] Woodhouse Iain H.(2006), Introduction to Microwave Remote Sensing, CRC Taylor & Francis Group, pp.221-303.
- [22] Yeuh S. H., R. West, F. Li, W.-Y. Tsai and R. Lay(2000), Dual polarized Ku-band backscatter signatures of hurricane ocean winds, *IEEE, Trans., Geosci. Rem. Sens.*, 38, pp. 73-88.