



한국 주변 해역에서의 SAR 영상 응용에

김 태 림

한국해양연구소 연안·항만 공학 연구 센터

Some Applications of SAR Imagery to the Coastal Waters of Korea

Tae-Rim Kim

Coastal & Port Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute

Abstract : Several physical phenomena on the sea surface are analyzed from SAR images of South Sea areas, Korea. Strong wave patterns propagating in southerly direction are seen in ERS-1 SAR image on October 11, 1994, and a wave directional spectrum is calculated from this image using the SAR modulation transfer function. RADARSAT SAR image of August 15, 1996 reveals internal waves in northern coastal waters of Cheju Island. Analysis indicates that the internal waves may have been generated by the tidal currents travelling over the shallow bottom of the stratified water in the summer during the tidal changeovers from ebb to flood and shows patterns of trains of solitons. RADARSAT SAR image taken 3 days after the oil spill accident near Goeje Island on April 3, 1997 detects distinct oil slicks from the accident area but also shows slicks near the coast caused by wind sheltering of coastal mountains and chemical-biological activities.

Key Words : SAR, Wave Spectrum, Internal Waves, Oil Spill

요약 : 한국 남쪽 해역에서 획득한 SAR 영상들로부터 해양 표면에 나타난 물리 현상 등이 관측되었다. 1994년 10월 11일 제주도 남서쪽 연안에서의 ERS-1 SAR 영상에서는 남쪽으로부터의 너울 형태의 파랑이 관측되었으며 변조 전달함수를 적용하여 영상으로부터 파랑 스펙트럼을 구하였다. 1996년 8월 15일 제주도 북쪽 연안의 RADARSAT SAR 영상에서 관측된 내부파는 여름철의 성층화된 해수에서 조류 전류시 조류가 해저 지형과의 상호 작용에 의하여 발생한 것으로 추측되며 솔리톤의 형태를 띠고 있다. 1997년 4월 3일 거제도 부근에서 발생한 유류오염 사고 3일 후에 획득한 RADARSAT SAR 영상에서는 사고 당시 유출된 기름들이 잘 나타났으나 복잡한 해안 지형과 생화학적 요인에 의한 다른 slicks들도 함께 나타났다.

주요어 : 합성개구레이다, 파랑 스펙트럼, 내부파, 유류오염

I. 서론

최근의 위성센서의 발달과 영상 이미지 처리 기술의 발달로 해양 연구에 있어서 공간적으로 제한된 현장관측의 문제점을 극복하고 광범위한 해역에서의 해양 현상의 공간 구조와 양상을 즉각적이고도 동시관측 형태의 자료로써 보여줄 수 있게 되었다. 현재 선상 관측의 경우 한 해역을 조사하기 위해서 한 두 척의 배를 이용하여 장소를 이동하며 관측한 자료를 동시 관측이라는 가정 하에 사용하고 있으나 시시각각으로 변하는 해양 현상을 고려하여 볼 때 많은 문제점을 안고 있다. 이러한 한계는 아무리 많은 배를 동원하더라도 극복하기 힘든 문제로서 특히 광범위한 해역을 연구하여야 하는 경우 자료의 동시성의 한계는 해양 현상 연구에 있어서 큰 약점이 되어 왔다. 또한 연안에서 관측 기기 등을 설치하여 관측하는 경우에도 기기의 높은 가격으로 인하여 충분한 수의 기기를 설치하지 못하며 더욱이 고장과 유실로 인한 문제 때문에 관측에 있어서 많은 제한이 있어왔다. 위성 자료는 현장 관측에 비하여 표층에 제한된 정보만을 제공하지만 현재 현장 관측의 이러한 단점을 보완하는데 많은 기여를 하고 있다. 특히 그 동안의 여러 해양 물리 현상에 대한 연구와 해석적인 결과는 해수 표층에 대한 원격 탐사 자료의 실효성을 높이는데 큰 도움을 주고 있다. 또한 최근의 원격탐사는 단순히 정성적인 영상사진이 아닌 정량적인 자료를 제공하는 방향으로 가고 있으며 이를 이용하여 여러 현상에 대한 확인과 함께 새로운 이해를 돕고, 동시에 그 동안 현장 관측에서 나타나지 않았던 현상을 보여줌으로써 새로운 연구와 조사를 위한 기반을 제공하고 있다.

지금까지 국내에서의 원격탐사 자료를 이용한 해양연구는 주로 AVHRR 센서나 CZCS 센서 등 지구 표면으로부터 나오는 적외선 및 가시 광선을 감지하는 수동적 센서(passive sensor)에 치중되어 왔다. 그러나 이러한 수동적 센서는 기상 및 태양광의 영향을 많이 받음으로서 그 사용의 연속성에 있어서 한계가 있었다. 구름의 형태에 관심이 있

는 기상학이나, 구름이 없는 상태를 기다려서 영상을 촬영할 수 있는 부동(不動)의 육상인 경우에는 큰 문제가 없지만, 계속적으로 유동적인 해양의 경우 이러한 제약은 특히 해양의 많은 중요 현상들이 악천후시에 발생하고 또한 사람들의 관심이 악기상에서의 해난 재해 방지에 관심이 있다는 것을 고려해 볼 때 위성 자료 이용의 중요 장애요인이었다. 최근에 수동적 센서와는 달리 구름 통과가 가능한 마이크로파를 이용하여 모든 기상 환경에서 해양의 관측이 가능한 능동적 센서(active sensor)인 SAR를 이용한 해양 연구가 시작되었다. 관측 대상에 있어서는 수동센서와 차이가 있지만 기상 및 일조 조건에 관계없이 해양을 관측할 수 있다는 장점이 있다. 해양에서의 SAR의 응용 예로는 파랑 스펙트럼을 통한 파랑 분석과 표면의 거칠기 차이로 나타나는 내부파 및 유류오염 탐지, 해수 표면에 나타난 해양 및 대기의 전선 감지, 해저 지형의 유추 등을 들 수 있으며 최근에는 scatterometer보다 공간 분해능이 좋은 SAR 영상으로부터 바람 자료를 추출하기 위한 연구도 진행되고 있다(Korsbakken *et al.*, 1998).

본 논문에서는 SAR 영상 자료로부터 최근에 관측된 한국 주변 해역에서의 현상 중 파랑, 내부파 그리고 유류 오염 관측 등에 대하여 살펴보고자 한다. 본 연구의 영상 분석은 주로 ENVI를 사용하였으며 파랑 관측에 사용된 계산 과정은 MATLAB을 사용하였다.

II. 파랑 관측

최근에 이르러 SAR를 이용하여 넓은 해역에 걸쳐서 날씨에 관계없이 파랑을 관측하는 것이 가능하게 되었다. 현장에서 부이 등을 이용하여 직접 관측하는 경우 그 파고에 대한 정확도는 높지만 파향에 대한 정보는 파고계 자체의 한계 때문에 정확히 산출하는 것이 어렵다. 또한 이러한 현장관측은 날씨등 기상 조건에 의하여 제한을 당하며 설치시 사고 및 망실의 가능성이 크다.

SAR 센서를 이용하여 해양의 파랑을 연구하고자 하는 이론적인 시도는 Seasat 위성이 발사되기 이전부터 이미 시작되었으며(Larson *et al.*, 1976; Raney and Shucman, 1978; Alpers *et al.*, 1981; Raney, 1981), 이미지 스펙트럼상에서의 정점의 위치와 현장관측 및 수치모델로부터 구한 스펙트럼상의 비교 연구도 함께 이루어졌다(Beal *et al.*, 1983, 1986a,b). 최근에 Hasselmann *et al.*(1991)은 SAR 영상으로부터의 스펙트럼과 파랑 스펙트럼과의 비선형 관계를 제안하였으며 SAR 영상으로부터의 스펙트럼과 3세대 파랑예보모델로부터 계산된 파랑 스펙트럼간의 차이를 최소화하는 방법으로 정확한 파랑스펙트럼 산출방법을 제안하였다.

Fig. 1은 제주도 남서쪽 연안에서 1994년 10월 11일 오전 11시에 획득한 ERS 영상으로서 북위 32.949°, 동경 126.064°를 중심으로 직사각형 형태

의 영상을 보여 주고 있다. 한 선당 픽셀의 수는 7,853이고 선수는 8,190으로 azimuth 방향으로 98 km 그리고 레인지 방향으로 102 km를 커버하고 있다. 당시 파랑 관측 부위가 설치된 마라도 주변 해역에서는 3.01 m의 유의 파고와 12.50 sec의 최대 주파수가 관측되었다. 좌측 하부에 삽입된 사각형 형태의 영상은 마라도 해역을 확대하여 보여 주고 있는데 남쪽에서부터 진행되어 들어오는 파들이 연안 근처 섬 주변에서 회절과 굴절을 하는 것을 잘 볼 수 있다.

이러한 SAR 영상으로부터 파향 스펙트럼을 계산하기 위하여 Fig. 1의 좌측 하부 직사각형내의 마라도 북서쪽 정사각형 부분과 같이 육지가 포함되지 않는 512×512 크기의 영상을 잘라내어 2차원 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 이미 지 강도 스펙트럼을 구한 후 변조 전달 함수를 적

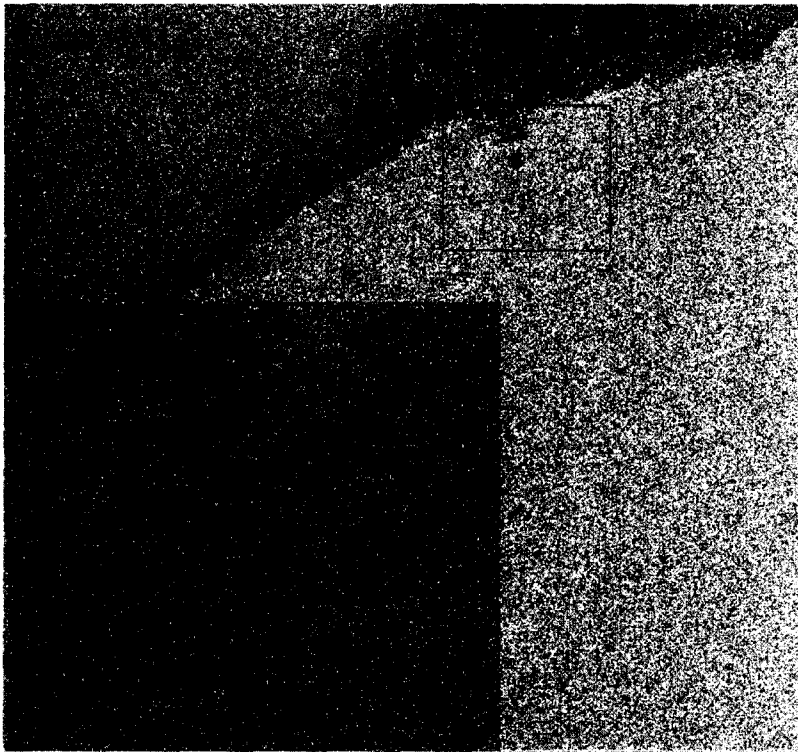


Fig. 1. SAR image acquired by ERS-1 on October 11, 1994 southwest of the Cheju island and the enlarged SAR image near the Marado island.

용하였다. SAR 변조 전달 함수(MTF: Modulation Transfer Function)는 해양 파랑의 스펙트럼이 SAR 이미지 강도 스펙트럼에 어떻게 매핑 되는가를 결정하는 함수로서 경사 변조(Tilt Modulation), 수동역학적 변조(Hydrodynamic Modulation), 수립자의 궤도운동 변조(Orbital-velocity Modulation)와 같이 세 함수의 조합으로 이루어지며 각각의 함수는 식 (1), (2), (3)과 같다.

경사 변조(Macklin *et al.*,1991)

$$R_t = i(4\cot(\theta) - 4\sin(\theta)\cos(\theta) / (1+\sin^2\theta) + \cot(\theta)k\sin(\phi)) \quad (1)$$

수동역학적 변조(Alpers and Hasselmann, 1978)

$$R_h = (n+0.5)k\sin^2(\phi) \quad (n = 4 \text{ for Phillips Spectrum}) \quad (2)$$

궤도운동 변조(Alpers *et al.*, 1981)

$$R_v = R/V\sqrt{gk^3} \cos(\phi) (i\sin(\phi) \sin(\theta) - \cos(\theta)) \quad (3)$$

여기서 θ 는 레이더의 입사각이고 ϕ 는 azimuth 각, k 는 파수, g 는 중력가속도, R/V 는 레인지의 길이와 위성 속도와의 비이다.

SAR 파랑 이미지와 파랑과의 관계를 선형 시스템이라고 가정할 때 파랑 스펙트럼은 식 (4)와 같이 이미지 강도 스펙트럼에 선형 변조 이동 함수(MTF)의 음제곱항을 곱한것과 같은 것으로 나타난다(Monaldo *et al.*, 1986).

$$S_H(k) = S_I(k) \cdot R_{sar}^{-2}(k) \quad (4)$$

이때 전체 변조 이동 함수는 식 (5)와 같이 각각의 변조함수의 합으로 나타내어진다.

$$R_{sar}^2 = (R_t + R_h + R_v)^2 \quad (5)$$

Fig. 2는 Fig. 1의 영상으로부터 구한 파랑 스펙트럼으로서 azimuth 방향에 대해서 10° 정도의 각을 갖고 300 m의 파장으로 진행하는 파랑이 대칭적으로 나타나고 있다. 이때 파장은 중심으로부터

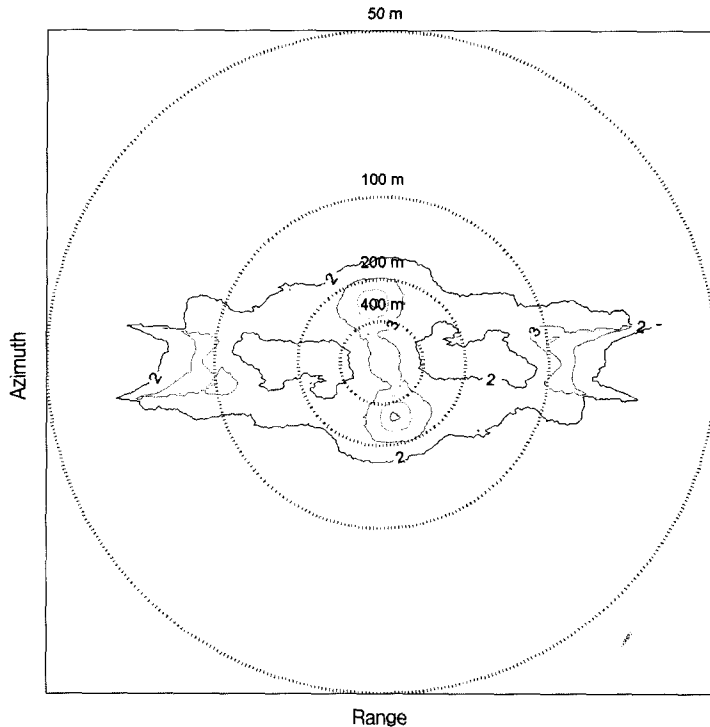


Fig. 2. The wave directional spectrum calculated from Fig. 1 SAR image. Circles 50, 100, 200, 400m indicate wave lengths.

의 길이에 반비례한다. SAR 영상으로부터 구한 파향 스펙트럼은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 항상 파향에 있어서 180° 의 상반된 두 정점을 보여주는데 이는 영상에 적용한 2차원 FFT(Fast Fourier Transform)의 결과이다. 파향에 있어서의 이러한 모호성은 육지의 위치라든지, 바람의 방향 혹은 수치모델 결과 등을 이용하여 결정하여야 한다.

Kim *et al.*(1997)은 SAR 영상 자료로부터 계산한 파향 스펙트럼과 같은 시기에 관측한 마라도부이 자료로부터 최대엔트로피법(Maximum Entropy Method)을 이용하여 구한 파향 스펙트럼을 비교하였으며 두 스펙트럼 모두 남쪽에서 북쪽으로 진행되는 장주기에서의 파랑시스템을 보여 주었다.

III. 내부파 관측

SAR 영상을 통하여 파랑 이외에 해양에서 자주 관측되는 현상중의 하나로 내부파를 들 수 있다(Apel *et al.*, 1976, Elachi and Apel, 1976). 내부파는 밀도차가 큰 두 수층 사이에서 발생하는 파로서 대륙붕의 성층화된 해수에서 자주 나타나며 일반적으로 뚜렷하고 다양한 파장을 갖고 해안으로 전파되어 가는 일련의 파그룹들로 특징 지워지며 해수면에서 반복적으로 나타나는 띠의 형태는 선상에서 육안으로 관측이 가능한 경우도 있다. SEASAT 위성에 탑재한 SAR 센서로 관측한 자료로부터 해수 표면상에 나타난 내부파가 관측된 이래(Shuckman and Kasichke, 1979; Apel, 1981) 세계의 여러 해양에서 많은 내부파들이 SAR 영

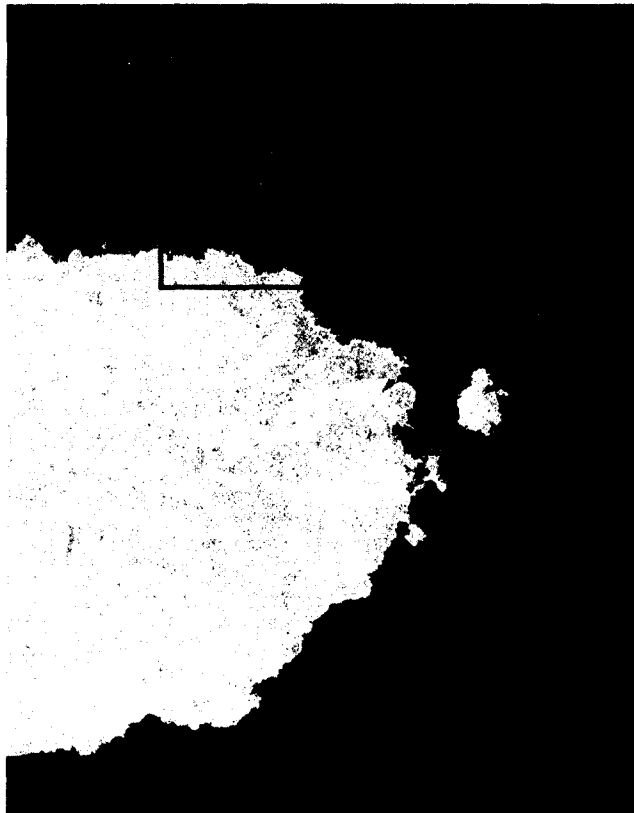


Fig. 3. SAR image acquired by RADARSAT on August 15, 1996 northeast of Cheju Island.

상을 통하여 관측되었다. 특히 최근에 Liu *et al.*(1998)은 동지나해에서 SAR 영상을 통하여 다수의 내부파를 관측하였으며 또한 대륙붕에서의 내부파들의 발달 상태를 수치적으로 설명하였다. 이렇게 SAR 영상 자료에 나타나는 내부파들은 명암 밴드의 묶음(packets) 형태로 나타나며 파랑의 형태를 갖고 있으나 그 간격은 표면파로 보기에는 너무 크고 내부파에 가까운 규모를 갖고 있다. 또한 SAR 영상에서 발견되는 내부파 현상은 통상적으로 내부파가 발생한다는 해역에서 발견됨으로서(Trask and Briscoe, 1983; Hughes and Gower, 1983) SAR 영상에 나타난 파랑 형태가 내부파임을 입증하고 있다.

Fig. 3는 캐나다 위성인 RADARSAT이 1996년 8월 15일 18시 37분 ascending mode(azimuth 방향이 북쪽)로 제주 상공을 지나면서 SAR fine 3 beam 모드(입사각 41.5° - 44.0°)로 촬영한 영상이다. 가로축과 세로축의 길이는 각각 약 39 km, 50 km(12372×16056 픽셀)이고 가로, 세로 각각 3.125

m의 픽셀 크기를 갖고 있다. 희게 보이는 부분은 제주도의 동쪽 절반을 보여주고 있으며 북동쪽 연안의 상자안에서 두 개의 내부파 묶음들(packets)이 보여지고 있다. Fig. 4의 우측 상단 사각형내의 그림은 Fig. 3의 상자 안에 나타난 내부파를 흑백 전환 후 확대하여 보여주고 있는데 흑백의 명암으로 나타난 파들이 뚜렷하며 일련의 4개의 파들이 각각 두 개의 묶음 형태를 이루면서 서쪽으로 이동되는 모습을 볼 수 있다. 묶음내에서는 맨 앞의 파봉이 가장 길며 맨 뒤의 파봉이 가장 짧게 나타나서 부채꼴의 모양을 보여주고 있고 각 파봉들간의 간격은 선두부분에서 가장 짧게 나타나고 주위로 갈수록 넓어지는 경향을 보여 주고 있다. Fig. 4는 또한 제주도 북동쪽 연안의 해안선 및 수심과 위성사진에서 뚜렷하게 나타난 내부파의 파봉들을 함께 보여주고 있다. 제주 북동쪽 외해에서 100 m 이상의 수심을 유지하던 해저 지형은 제주도 근처에서 급격히 수심이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 이는 대부분의 내부파가 대륙붕의 끝과 같

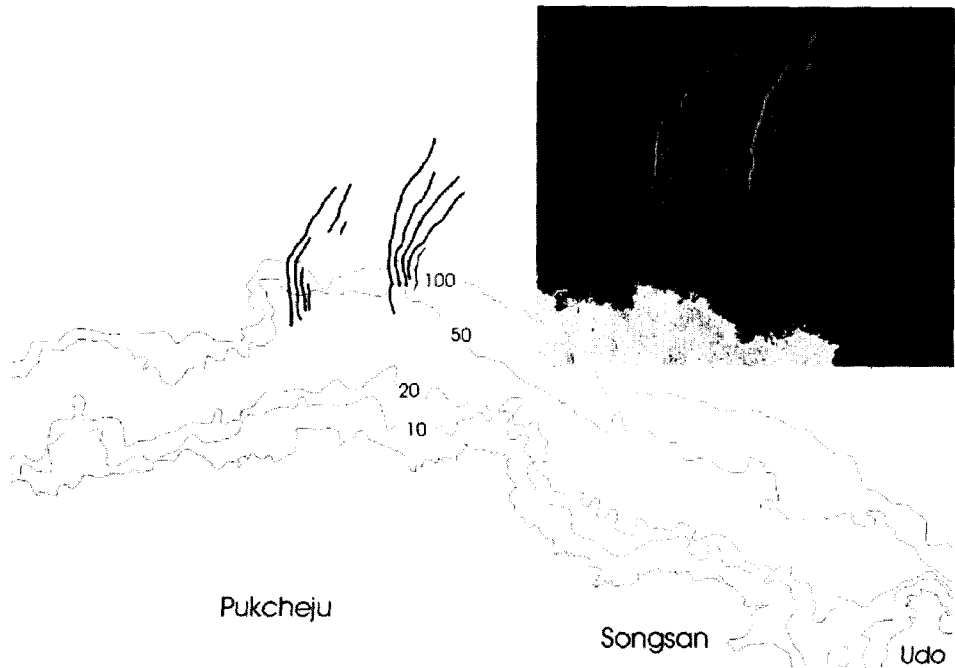


Fig. 4. Depth contours in meters and line-drawing interpretation of packets of internal waves in northeast coastal waters of Cheju Island and the enlarged SAR image extracted from rectangular area in Fig. 3

이 수심이 급격히 줄어드는 곳에서 발생한다는 것을 감안할 때 내부파 발생의 좋은 조건을 제공한다고 볼 수 있다. 또한 활 모양의 파봉 형태들이 100 m 수심 이상에서는 그 형태를 유지하지만 얕은 수심에서는 이미 부숩져서 그 형태를 볼 수 없다. 김과 원(1999)은 조석 관측 자료를 통하여 SAR 영상에서 내부파가 관측되었을 때가 조류가 전류시이고 인접한 기간 및 과거의 같은 시기에 CTD 자료를 통하여 관측한 깊이에 따른 해수 온도 분포 및 AVHRR 자료를 통하여 해수의 성층화가 이루어졌을 강한 가능성을 통하여 여름철의 성층화된 해수에서 조석주기 변환시 조류와 해저 지형과의 상호작용으로 발생한 솔리톤 형태의 내부파일 가능성을 지적하였다. 또한 K-DV 식을 이용하여 영상에 나타난 내부파를 해석하였다.

SAR와 같은 해수 표면 관측 센서가 해수면이 아닌 내부 특히 깊이 10 m에서 200 m 사이의 수온 약층에서 발생하는 역학적 현상을 감지하여 내부파 존재에 대한 뚜렷한 증거를 보여 준다는 것은 SAR의 월등한 성능을 보여주는 좋은 예로서 그동안 현장 관측에서는 불가능하였던 내부파의 파장이나 근원, 진행 방향, 그리고 파의 형태나 파의 규모 등 공간적인 분포에 대한 연구에 많은 도움을 줄 수 있음을 알 수 있다. 이러한 내부파는 군사적으로 중요한 수중 음향학이라는 관점에서 중요한 의미를 갖는데 연속적으로 SAR 영상을 통하여 내부파를 관측함으로써 내부파의 속도를 알아낸다면 역으로 내부파의 해석식을 이용하여 수중음향학에서 매우 중요한 수온 약층의 깊이를 계산해 낼 수 있다. 해양 생물학적으로는 표층의 띠의 형태로 나타나는 수렴대에 영양염류가 집중됨으로써 플랑크톤의 군집을 유도하고 또한 플랑크톤 자체도 물리적 흐름에 의하여 이곳에 모이게 된다. 이 때 어군들이 이 수렴대를 따라서 나타나는 경우도 있고 적조가 내부파와 함께 발생하는 경우 적조 현상이 수렴대를 따라서 긴 띠를 형성하기도 한다. 이러한 내부파 기작은 여름철과 같이 성층화가 이루어져 저층의 영양물질이 상층으로의 이동이 차단되는 경우 그 이동을 만드는 중

요한 역할을 하며 이러한 내부파가 얕은 연안에서 깨어지는 경우 전 수층으로의 영양염류의 이동을 가능하게 한다(Mann and Lazier, 1992). 앞으로 내부파 연구를 위하여 현장관측과 위성 관측을 병행한다면 내부파의 진행 방향과 위치를 정확히 파악함으로써 효율적인 현장 관측이 가능하리라고 본다.

IV. 유류 오염 관측

SAR 센서는 대상물의 거칠기에 따라 다르게 반응하는 산란 강도에 의하여 그 정보를 제공한다. 따라서 유류 오염의 경우 유출된 기름은 해수 표면에 얇은 기름막을 형성함으로써 주변 해역에 비해 거칠기 정도가 작아지므로 SAR 센서에 포착되게 된다. 이렇게 기름막에 의한 해수 표면의 거칠기 감쇄 효과에 대한 연구는 비행기 혹은 배 위에 탑재한 레이더를 이용하여 여러 차례 실시되었다(Krishen, 1973; Johnson and Croswell, 1982). SEASAT 위성이 1978년 발사된 이후에는 바다에서의 기름막이 처음으로 위성에서 관측되기 시작하였으며(Vesecky and Stewart, 1982). 이후 ERS-1&2와 RADARSAT 위성이 계속적으로 발사됨으로써 정기적인 유류오염에 대한 모니터링이 시작되었다(Wismann, 1994). 또한 좀더 정확한 유류오염 관측을 위한 실험으로서 여러 바람 조건에서 실제 기름을 일부러 해양에 방류한 후 위성을 이용하여 관측하기도 하였으며(Bern, 1993) 그 결과 ERS-1 SAR 영상에 나타난 유류 slicks가 바람과 밀접한 관계가 있음을 보였다.

Fig. 5는 1997년 4월 3일 거제도 남쪽 등가도 해역에서 발생한 오성3호 기름 유출사고 발생 후 약 사흘이 경과된 후 Radarsat 위성에서 SAR 센서를 이용하여 포착하여 처리한 영상으로 크기는 8251 × 8858 픽셀이고 가로, 세로 각각 12.5 m의 픽셀 크기를 갖고 있다. 사고 당시에는 조류의 영향으로 좌초해역으로부터 북동쪽으로 기름띠의 이동이 주로 일어나리라고 예상하였으나 강한 북동풍의 영향으로 상당량의 표층 기름이 남서 방향으로

도 퍼져 갔음을 볼 수 있다. 우측 상부의 사각형 내는 사고지점의 유류오염의 분포를 확대하여 보여주는데 oil spills이 락의 형태로 퍼져나가는 것을 볼 수 있다. 이러한 해상 사고가 주로 악천후 상황에서 일어난다는 것을 감안할 때 구름에 관계없이 해양 상태를 관측할 수 있는 SAR는 유류 오염 관측에 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 항공 촬영의 경우에도 악천후 상황에서는 제약조건이 많으며 또한 위성사진과 같이 넓은 해역을 동시에 관측하기에는 한계가 있다. 그러나 우리나라 연안과 같이 복잡한 해안 지형을 갖고 있는 곳에서 SAR 영상을 이용하여 유류 오염을 관측하는데는 현재 많은 문제점이 따른다. Fig. 5에서 보듯이 연안의 만 내부와 섬 주변에서 유류오염과 비슷한 양상을 보이는 slicks가 발견되고 있다. 이들은 크게 섬 및 해안 지형의 바람 및 해류에 대한 sheltering 효과에 의하여 발생하기도 하고 양식장과 같이 해수 표면에 영향을 끼치는 구조물이나

혹은 양식장의 생물군들이 분출하는 자연 기름막 (natural films)에 의하여 생성되기도 한다. 유류 오염 사고가 이렇게 이미 slicks를 형성한 곳에서 발생하게 되면 현재와 같은 인공위성의 한가지 센서만으로는 그 유출 범위를 정확히 추정할 수 없다. 현재 이를 극복하기 위한 많은 연구가 행해지고 있으나(Weisteen *et al.*, 1993) 아직 뚜렷한 해결책은 찾지 못한 형편이다. Wismann(1993)은 여러개의 주파수대를 가진 airborne 레이더와 ERS-1 SAR를 이용하여 해양에서의 유류 유출을 연구하였는데 그 결과 복수의 주파수대의 레이더가 해수 표면에서의 여러 종류의 기름막을 분류해내는데 잠재적인 능력이 있음을 보였다. 현재 ERS-1 SAR나 RADARSAT SAR 와 같이 한 개의 주파수를 가진 센서만을 이용할 경우 slicks를 구분하기 위해서는 유류 오염 이외의 다른 요인에 의한 slicks의 생성 가능성과 그 범위등에 대한 다른 정보들을 필요로 한다.



Fig. 5. SAR image acquired by RADARSAT on April 6, 1997 south of Geoje island and the enlarged SAR image of oil spilled area extracted from rectangular area in the image. S denotes the starting point of oil spill.

V. 결론

위성 영상을 이용한 한국주변해역에 대한 연구는 지금까지 주로 수동센서를 이용하여 이루어져 왔으나 최근에 능동센서인 SAR 영상들로부터 한국 남쪽 해역의 해양 표면으로부터 세 가지의 물리 현상 등이 관측되었다.

1994년 10월 11일 제주도 남서쪽 연안의 ERS-1 SAR 영상에서는 남쪽으로부터의 너울 형태의 파랑이 관측되었다. 이러한 파랑들은 경사 변조, 수동역학적 변조, 궤도 운동 변조 등에 의하여 영상에 나타난 것으로 이미지 스펙트럼에 변조 전달함수를 적용하여 파랑 스펙트럼을 구하였다. SAR 영상에서 구한 파랑 스펙트럼이 정확도면에서는 현장 관측에 비해 떨어지지만 악기상속에서도 광범위한 해역에 걸쳐서 동시에 관측할 수 있다는 큰 장점이 있다. 또한 현장 관측기와 같이 고장 및 망실에 대한 부담이 적고 앞으로 여러 위성의 여러 밴드의 SAR 센서를 동시에 운용한다면 보다 정확한 준실시간 파랑관측이 가능하리라고 본다.

1996년 8월 15일 제주도 북쪽 연안의 RADARSAT SAR 영상에서 내부파가 관측되었으며 이 내부파는 여름철의 성층화된 해수에서 조류 전류시 조류가 해저 지형과의 상호 작용에 의하여 발생한 것으로 추측된다. 최근에 SAR 영상을 통하여 내부파에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며 세계 여러 해양에서 뚜렷한 내부파가 관측되고 있다. 현재까지 우리나라 주변해역에서도 현장 관측을 통하여 여러차례 내부파의 존재가 보고되어 왔으나 현장 관측만을 시행할 경우 내부파 그룹의 선두 파봉 그룹을 정확히 관측하는 것은 매우 힘든 일이며 내부파 존재의 가능성만을 관측할 뿐이었다. 앞으로 SAR 영상을 이용하여 이들의 공간적 규모를 규명하는 일은 매우 중요하며 현장관측을 동시에 병행한다면 많은 연구가 가능할 것이다.

1997년 4월 3일 거제도 부근에서 발생한 유류오염 사고 3일 후에 획득한 RADARSAT SAR 영상에서는 사고 당시 유출된 기름들이 잘 나타나 유류 오염의 확산 범위를 파악할 수 있었다. 그러나

복잡한 해안 지형과 바람 그리고 다른 생화학적 요인에 의한 slicks들도 함께 나타남으로써 유류 오염 감시를 위한 실제 운용에 있어서의 문제점을 드러냈다. 현재와 같이 위성의 한 밴드만의 센서를 사용하는 경우 이러한 한계가 있으며 현장 관측 및 유류 오염 사고 주변 해역에 대한 사전 정보를 통하여 이러한 한계를 어느정도 해결할 수 있다고 본다. 앞으로 해수 표면에 나타난 여러 형태의 slicks를 구분할 수 있도록 여러 밴드의 센서를 운용한다면 좀더 정확한 유류 오염 관측이 가능할 것이다.

아직까지 SAR 영상을 이용한 우리나라 주변해역에 대한 관측은 충분히 이루어지지 않고 있다. 그러나 해양 관측에 있어서의 수동센서들에 대한 SAR 센서의 장점들을 비교하여 볼 때 앞으로 그 효용성이 더욱 클 것이며 또한 과거 SAR 영상 자료 및 앞으로의 관측 자료를 통하여 그 동안 발견하지 못했거나 불확실한 많은 현상들이 밝혀질 것이다. 더욱이 현장 관측과 병행한다면 해양에서 나타난 물리 현상에 대한 많은 연구가 이루어질 것이다.

사 사

본 연구에 사용된 ERS-1 SAR(1997년 10월 11일)영상은 한국해양연구소 종합 해양 관측 시스템 구축(II) 사업으로부터, RADARSAT SAR(1996년 8월15일)은 ADRO #338 연구의 일환으로 연세대 원 중선 교수로부터, RADARSAT SAR(1997년 4월 6일)는 Canada Centre for Remote Sensing에서 수신 받아 RADARSAT International에서 처리된 것으로 일본의 RESTEC으로부터 제공받았으며 이에 감사드립니다. 마지막으로 본 논문을 검토하여 주신 두 분께 감사드립니다

참고문헌

김태림, 원중선, 1999. SAR를 이용한 제주도 북부

- 해양에서의 내부파 관측에, 한국해양학회지, 4(1):18-24.
- Alpers, W. R. and K. Hasselmann, 1978. The two-frequency microwave technique for measuring ocean-wave spectra from an airplane or satellite, *Boundary Layer Meteorology*, 13: 215-230.
- Alpers, W. R., D. B. Ross, and C. L. Rufenach, 1981. On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, 86:6481-6498.
- Antony K.L., Y.S. Chang, M.K. Hsu and N.K. Liang, 1998. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas, *J. Geophys. Res.*, 103:7995-8008.
- Apel, J.R., J.R. Proni, H.M. Byrne and R.L. Sellers, 1976. A study of oceanic internal waves using satellite imagery and ship data, *Remote Sens. Environ.*, 5:125.
- Apel, J.R., 1981. Nonlinear features of internal waves as derived from the Seasat imaging radar. In: *Oceanography from Space*, edited by Gower, J. F. R., Plenum Press, New York and London:525-533.
- Beal, R. C., D. G. Tilley, and F. M. Monaldo, 1983. Large- and small-scale spatial evolution of digitally processed ocean wave spectra from the Seasat synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, 88:1761-1778.
- Beal, R. C., T. W. Gerling, D. E. Irvine, F. M. Monaldo, and D. G. Tilley, 1986a. Spatial variations of ocean wave spectra from the Seasat synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, 91:2433-2449.
- Beal, R. C., F. M. Monaldo, D. G. Tilley, D. E. Irvine, E. J. Walsh, F. C. Jackson, D. W. Hancock, D. E. Hines III, R. N. Swift, F. I. Gonzalez, D. R. Lyzenga, and L. F. Zambresky, 1986b. A comparison of SIR-B directional wave spectra with scanning radar spectra and spectral ocean wave model predictions, *Science*, 232:1531-1535.
- Bern, T. I., 1993. Norwegian slick study, Volume 1: oil slick study, vol, OCN R-93080, OCEANOR, Trondheim, Norway.
- Elachi, C. and J.R. Apel, 1976. Internal wave observations made with an airborne synthetic aperture imaging radar, *Geophys. Res. Lett.*, 3:647-650.
- Hasselmann K. and S. Hasselmann, 1991. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar images spectrum and its inversion, *J. Geophys. Res.*, 96(c6):10, 713-10,729.
- Hughes, B.A. and J.F.R. Gower, 1983. SAR imagery and surface truth measurements of internal waves in Georgia Strait, British Columbia, Canada, *J. Geophys. Res.*, 88:1809-1824.
- Johnson, J. W., and W. F. Crosswell, 1982. Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface, *Radio Sci.*, 17: 611-617.
- Kim T., B.C. Oh, and Y. Sugimori, 1997. Comparison of Directional Wave Spectrum between Buoy data and SAR image data, *Ocean wave Measurement and Analysis*, ASCE:1167- 1181.
- Korsbakken, E., J.A. Johannessen and O.M. Johannessen, 1998. Coastal wind field retrievals from ERS synthetic aperture radar images, *J. Geophys. Res.*, 103: 7857-7874.
- Krishen, K., 1973. Detection of oil spills using a 13.3 GHz radar scatterometer, *J. Geophys. Res.*, 78, 1952-1963.
- Larson, T. T., L. I. Moskowitz, and J. W. Wright, 1976. A note on SAR imagery of the ocean, *IEEE Trans. Antennas Propaga.*

- AP-24:393-394.
- Liu, A.K., M.K. Hsu and N.K. Liang, 1998. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas, *J. Geophys. Res.*, 103: 7995-8008.
- Mann, K.H. and J.R.N. Lazier, 1992. Dynamics of marine ecosystems (Biological- physical interactions in the ocean), Blackwell scientific publication:275-287.
- Mackline J. T., R.A. Cordey, 1991. Seasat SAR observation of ocean waves, *Int. J. Remote Sensing*, 12(8), 1723-1740.
- Monaldo, F. M., and D. R. Lyzenga, 1986. On the estimation of wave slope- and height-variance spectra from SAR imagery, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Ge-24:543-551.
- Raney, R. K., and R. A. Shuchman, 1978. SAR mechanisms for imaging waves, *Proceedings of the 5th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Victoria, B. C., Canada, Aug.
- Raney, R. K., 1981. Wave orbital velocity, fade and sar response to azimuth waves, *J. Oceanic Eng.*, OE-6:140-146.
- Shuckman, R.A. and E. Kasischke, 1979. The detection of oceanic bottom topographic features using SEASAT synthetic aperture radar imagery. In SEASAT SAR Coastal Ocean Wave Analysis, Rep. 136800-2-F, ERIM., Ann Arbor, Michigan:1-16.
- Trask, R.P. and M.G. Briscoe, 1983. Detection of Massachusetts Bay internal waves by the Synthetic Aperture Radar on Seasat, *J. Geophys. Res.*, 88:1789-1799.
- Vesecky, J.F., and R.H. Stewart, 1982. The observation of Ocean Surface using imagery from the SEASAT SAR: An Assessment, *J. Geophys. Res.*, 87(C5):3397-3430.
- Weisteen, K., A. Solberg, and R. Solberg, 1993. Oil Spill detection in SAR imagery- Summary report, Norwegian Computing Center (NR), Oslo, Norway.
- Wismann, V., 1993. Radar signatures of mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency radar and ERS-1 SAR, *Proceedings of IGARSS'93*:940-942.
- Wismann, V., 1994. Oil spill detection and monitoring with the ERS-1 SAR, *proceedings Second ERS-1 Symposium*, ESA SP-361.