

SAR영상을 이용한 유류 오염 분포 분석

김태림⁽¹⁾, 이수형⁽²⁾

The Analysis of Oil Spill Spreading Using SAR Images

by

Taerim Kim⁽¹⁾ and Soo Hyung Lee⁽²⁾

요 약

1997년 4월 3일 거제도 남쪽에서 발생한 유류 오염 사고에 대하여 두개의 RADARSAT SAR 영상을 이용하여 분석하였다. 첫 번째 영상은 사고 발생 3일후 획득된 영상으로 extended low beam mode이고 두 번째 영상은 첫 번째 영상으로부터 12시간 후에 획득된 영상으로 standard beam mode이다. 두개의 영상에서는 유류 오염에 의한 활면(slicks) 외에 섬이나 산의 바람 장애에 의하거나, 부분적으로 풍속이 낮은 해역, 그리고 자연막(natural film) 등에 의하여 유류 오염과 유사한 활면(oil spill look-alikes)이 나타났는데 이를 검토하고 분석하였으며, 실제 거제도 주변의 양식장을 중심으로 자연막 형태의 활면이 SAR 영상에서 나타날 수 있는 가능성을 제시하였다. 두 개의 SAR 영상 분석 결과 사고 해역에서 유출된 기름이 남서 방향으로 이동 후 방향을 전환하여 동쪽으로 이동하는 양상이 관측되었으며 이는 현장 관측과도 일치하였다.

Abstract

The oil spill accident near Goeje Island on April 3, 1997 was analyzed using two RADARSAT SAR images. The first scene was acquired 3 days after the accident as an extended low beam mode and the second scene was acquired 12 hours after the first scene as a standard beam mode. The two scenes showed slicks not only by oil spills but also by oil spill look-alikes caused by wind sheltering, low wind, natural film, and etc. These slicks were analyzed and classified, and natural films produced from aquaculture farms around Goeje Island were also suggested as a strong candidate for slicks on SAR images. The study with two SAR images indicated the oil spill patterns which spreaded to the southwest immediately after the accident and switched the direction to the east. The spreading patterns shown in two SAR images also showed good agreement with in-situ observations.

Keywords: oil spill, SAR, RADARSAT, oil spill look-alikes, natural film

(1) 연안·항만공학연구센터

(2) 정회원, 해양화학연구단

1. 서론

해양에서의 유류 오염사고는 해양 자체의 유동성으로 인하여 그 피해가 넓은 범위에 걸쳐서 나타나며 특히 해양 환경에 끼치는 영향은 장기간 지속됨으로써 그 피해는 매우 크다. 우리나라의 경우 연안 지형이 매우 복잡하고 해상 수송로가 연안의 청정 해역과 근접한 경우가 많아 수송 선박의 충돌 및 좌초에 의한 사고는 심각한 환경 피해를 발생 시키며 특히 유조 선박사고에 의하여 청정해역에 많이 분포하고 있는 양식장에 그 오염물질이 확산되면 막대한 경제적 손실을 초래하기도 한다. 1995년에 발생한 씨프린스호 및 유일호 등의 해상 유출 사고로 청정 해역의 오염으로 인한 해양 환경 파괴와 물적 피해가 막대한 실정이며 그 후로도 1997년의 오성호 사고 등 크고 작은 유류 오염 사고가 일어나고 있다. 일단 해상에 유출된 기름은 해류 및 바람의 영향으로 급속하게 확산되는데 이를 초기에 진압하여 확산을 막는 것이 가장 기본적인 방제 작업으로서 이를 위하여 초기의 유류 오염 물질의 확산범위를 산정하기 위한 연구가 시행되어 왔다. 홍과 이[1998]는 해상 누유의 이동 경로 및 풍화와 관련된 여러 물리 현상들의 모델링 기법을 검토하여 해상 누유 확산 예측 모델을 개발하였으며 누유 사고가 빈번한 남해안 일대의 조류 데이터베이스를 구축하고 이를 이용 1997년 오성호 사고를 시뮬레이션함으로써 그 유효성을 검증하였다. 또한 정[1998]은 라그랑지안 입자추적법 (Lagrangian particle-tracking method)을 채택하여 현장 방제용 유출유 확산 모델을 개발하였으며 2차원 조석 수치 모델과 조석예보 모델을 이용하여 실시간 조류 자료를 생산하고 바람 현장관측 자료를 사용하여 1995년 제 1 유일호 기름 유출 사고가 발생하였던 부산 외해 지역에 적용하였다. 이러한 해상 누유 확산 모델들은 전세계적으로 다양하게 여러 모델이 활용되고 있으나 가장 중요한 것은 모델의 입력 조건이자 유류 확산의 중요 요소인 해류, 바람, 기름의 퍼짐 정도를 가늠하는 파라미터 등의 데이터 베이스를 얼마나 충분하고 정확하게 갖추었는가와 실제적으로 모델 결과를 검증할 만한 현장 관측자료이다. 특히 현장 관측 자료는 사고 직후 모델의 초기 입력 조건으로 매우 중요하며 모델 수행중의 중간 결과를 검증함으로써 모델 결과의 잘못을 지적하고 또한 중간에 유류 확산 범위에 대한 새로운 자료를 입력함으로써 자료 동화에 의한 보다 정확한 예보를 할 수 있다. 현재 우리나라의 경우 유류

사고시 현장 관측은 현장 출동 선박을 이용한 목측이나 비행기나 헬리콥터를 이용한 공중 관측에 의존하고 있다. 그러나 이러한 유류 오염 사고가 주로 악기상하에서 발생함으로써 현장 접근이 어려운 경우가 많고 또한 파랑 및 바람, 구름 등으로 인하여 정확한 관측이 어려운 실정이다. 또한 사고 후 시간이 감에 따라 바람 및 해류 등으로 인하여 급속하게 그 확산 범위가 넓어지므로 선박은 물론 항공기의 경우에도 그 전체 누유 확산 범위를 관측하기 어렵다. 특히 육지와는 달리 계속 유동적인 해양 상태를 고려할 때 사고 해역 및 누유 확산 해역을 동시 관측하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 최근에 인공위성을 이용하여 해양에서의 유류 오염 확산의 동시 관측에 활용되고 있는 인공위성의 SAR(Synthetic Aperture Radar) 센서에 대하여 알아보고 1997년 오성호 누유 사고시 촬영된 영상을 분석하고자 한다.

2. SAR와 유류 오염

인공위성을 이용한 해양 관측 연구에 사용되는 센서는 크게 수동적 센서(passive sensor)와 능동적 센서(active sensor)로 나눌 수 있다. 수동적 센서는 NOAA의 AVHRR이나 CZCS 등 지구 표면으로부터 나오는 적외선 및 가시 광선을 감지하는 센서로서 구름이나 광량 등에 영향을 받으며 악기상하에서 해양 현상을 관측하는 경우 많은 제약이 따른다.

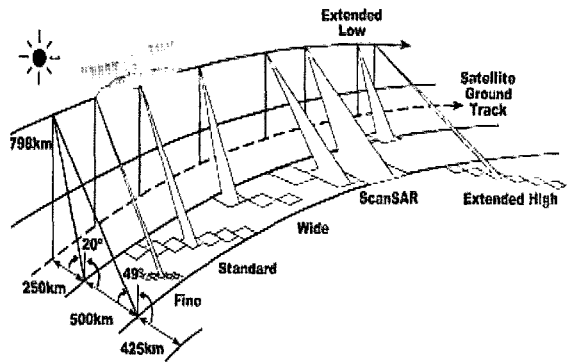


Fig. 1 SAR operating beam modes(courtesy RAD-ARSAT program office/canadian space agency)

능동적 센서는 수동적 센서와는 달리 구름 통과가 가능한 마이크로파를 이용함으로써 모든 기상 환경에서 해양의 상태 촬영이 가능하며 이러한 능

동적 센서의 대표적인 것으로 SAR(Synthetic Aperture Radar)를 들 수 있다. SAR는 레이더를 이용하여 해수 표면의 거칠기(roughness)를 촬영하는 것으로 기울어진 각도에서 촬영된 레이더 영상은 레이더 파장에 상응하는 파장을 갖는 해수 표면의 동요로 인한 브래그 공명(Bragg resonance)형태의 후방 산란(backscattering)에 의한 것이다. SAR는 레이더의 주사 방향으로 펄스 압축을 사용하여 높은 분해능을 얻고 비행방향으로 합성개구(synthetic aperture)처리에 의하여 분해능을 향상시킨다. 즉 위치를 점차로 변화시키면서 수신한 신호를 위상까지 포함해서 기록하고 처리함으로써 실제의 안테나 길이보다 긴 가상의 안테나 길이(합성개구 길이)를 사용해서 관측한 것과 동일한 효과를 얻는 것이다. 현재 SAR 센서를 탑재한 위성으로 많이 활용되는 것으로 ERS -1 위성과 RADARSAT 위성을 들 수 있다. ERS -1 위성의 경우 SAR센서 이외에도 중요 센서로서 풍향, 풍속을 측정할 수 있는 Scatterometer 그리고 지표면의 높이를 측정하는 Altimeter를 탑재하고 있으며 SAR 센서의 경우 5.3 Ghz를 갖는 C 밴드를 사용하고 VV 편파를 사용한다. 지표면에서의 레이더의 주사 거리인 swath는 100 km이고 12.5 m의 공간 분해능력을 갖고 있다. 그러나 ERS-1 SAR의 경우 SAR센서가 고정되어 있으므로 짧은 기간 동안 같은 장소를 계속적으로 촬영하는 것은 매우 어려워 유류 오염 사고 시 즉각적인 영상 자료가 필요한 경우 이를 충족시키기 어렵다. RADARSAT 위성은 SAR센서만을 탑재한 캐나다의 상위위성으로서 보다 다양한 SAR센서의 운용이 가능하다. 이 위성의 SAR 센서는 Table 1에서 보듯이 5.3 Ghz의 C 밴드를 이용하고 있으며 HH 편파를 사용한다. ERS-1, 2의 SAR 센서의 경우 정해진 위성의 위치에서 정해진 곳만을 일정한 모드로 촬영할 수 있는 것에 반해 RADARSAT 위성은 Fig. 1에서 보듯이 다양하게 센서의 방향을 조절하여 여러 가지 형태의 SAR 영상 자료를 얻을 수 있다. ScanSAR wide mode인 경우 100 m의 분해능을 갖고 500 x 500 km의 범위를, ScanSAR narrow mode인 경우 50 m의 분해능을 갖고 300 x 300 km, Extended Low mode인 경우 35 m의 분해능을 갖고 170 x 170 km, Wide mode 인 경우 30 m의 분해능을 갖고 150 x 150 km, Standard mode인 경우 25 m의 분해능을 갖고 100 x 100 km, Extended High mode인 경우 25 m의 분해능을 갖고 75 x 75 km, Fine mode인 경우 8 m의 분해능을 갖고 50 x 50 km의 범위를 포함한다.

Table 1 RADARSAT SAR characteristics

Frequency/ Wavelength	5.3Hz / C-band 5.6cm
Aspect	Right-looking SAR
Maximum Data Rate	85 Mb/s (recorded) 105 Mb/s (R/T)
Antenna Size	15m
Antenna Polarization	HH

유류 오염의 경우 유출된 기름은 해수표면에 얇은 기름막을 형성함으로써 주변 해역에 비해 거칠기 정도가 작아지게 되는데 이때 대상물의 거칠기에 따라 다르게 반응하는 산란 강도에 의하여 정보를 제공하는 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 Crosswell[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 SAR 영상에 나타난 유막이 바람과 밀접한 관계가 있음을 보이기도 하였다.

적외선 센서 혹은 해석 센서와 같이 지표면에서 오는 마이크로파를 그대로 받는 수동센서와는 달리 SAR 센서는 위성 자체내의 에너지를 사용하여 레이더를 지표면에 발사, 그 반사되어 돌아오는 마이크로파를 받는 것이기 때문에 위성의 에너지 소모가 크다. 따라서 위성 보유국의 필요성에 의하여만 영상을 촬영하고 있으며 위성을 보유하지 않은 우리나라에서 그 자료를 구입하려면 상당히 고가를 지불하여야만 한다. 그러나 이러한 자료가 효과적으로 활용될 경우에 그로부터 얻는 혜택은 매우 크다. 일례로 1997년 1월 5일 일본의 서부연안에서 러시아 유조선 Nakhodka호에 의하여 발생한 유류 오염 사고는 일본 역사상 최악의 유류 오염 사고로서 26,000 barrels에 상당하는 기름이 연안은 물론 근처의 원자력 발전소의 냉각수 흡입구 근처로 확산되어 감에 따라 원자력 발전소를 위협하였다. 약 46개의 SAR 영상 자료가 일본의 방재 담당자

에게 제공되었으며 방제사업을 수행하는데 크게 기여하였다. 당시 제공된 총영상의 반정도는 밤 혹은 폭풍등의 악기상 상태에서 획득된 것으로, RADARSAT 위성에서 촬영 후 5시간 이내에 일본 방제팀에게 전달되었다(NASDA[1997]).

3. 유류 오염 관측

1997년 4월 3일 21시경 경남 울산시 온산항에서 B-C유 1700 *kl*를 적재하고 전남 군산항으로 항해 중이던 유조선 오성 3호가 통영시 등가도 암초에 좌초되어 침몰하면서 적재중인 화물유 중 약 229 *kl*가 유출되었다(통영 해양 경찰서[1997]). 유출된 기름은 등가도, 매물도, 좌사리도, 국도 일원 해역에 광범위하게 확산되었으며 등가도 및 매물도 해안 일부도 오염시켰다.

Fig. 2는 1997년 4월 3일 오성3호 기름 유출 사고 발생 후 약 사흘이 경과된 후 RADARSAT 위성에서 SAR 센서를 이용하여 포착하여 처리한 영상이다. Fig.2 (a)는 1997년 4월 6일 18시 13분에 ascending 모드(azimuth 방향이 북쪽)에서 촬영한 SAR extended low 1 beam 영상(12291 x 13572 픽셀)으로 영상의 중심은 북위 34° 22' 동경 128° 18' 이며 픽셀의 간격은 12.5 m 이다. Fig.2 (b)는 1997년 4월 7일 06시 29분에 descending 모드(azimuth 방향이 남쪽)에서 촬영한 SAR standard 3 beam 영상(8251 x 8858 픽셀)으로 영상의 중심은 북위 34° 41' 동경 128° 36' 이며 픽셀의 간격은 12.5 m이다. 그림에 표시된 유류 오염 사고 발생 지점(Oil Spill Source)를 중심으로 살펴보면 사고지점을 중심으로 확산되던 기름이 남서쪽방향으로 상당히 확산되었음을 볼 수 있다.

그러나 Fig. 2에서 보듯이 유류오염에 의한 활면 외에도 그와 유사한 양상의 활면(oil spill look-alikes)이 영상에 많이 나타남으로써 영상 해석에 있어서 많은 어려움을 주고 있다. 연안의 만 내부와 섬 주변에서 유류오염과 비슷한 양상을 보이며 발견되는 활면들은 크게 섬 및 해안 지형의 바람 및 해류에 대한 장애(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 활면 형성한 곳에서 발생하게 되면 현재와 같은 인공위성의 한가지 센서만으로는 그 유출 범위를 정확히 추정할 수 없으며 다른 주변 자료에 의

존하여 최대한 유출 범위를 추정하는 수밖에 없다. 이에 대해서는 다음 장에서 구체적으로 설명하려 한다.

오성 3호 사고 당시 선상 관측 및 항공 감시를 통하여 유출유 확산 범위에 대한 조사가 있었으나 야간 혹은 악기상 등으로 인하여 확산 해역 전체에 대한 동시 관측은 어려웠으며 계속적인 부분 관측을 하였다. Table 2는 사고 발생 시각인 4월 3일 21시부터 4월 10일까지의 유출유 확산 상황을 요약한 것이다(통영 해양 경찰서[1997]). 보고서에 의하면 선박 좌초시 일시에 유출된 기름은 강한 북동풍의 영향으로 해류의 방향인 북동쪽으로 이동하지 못하고 남서 방향으로 이동후 정상 기상으로 호전된 4월 8일부터 쿠로시오 해류를 타

(a)



(b)

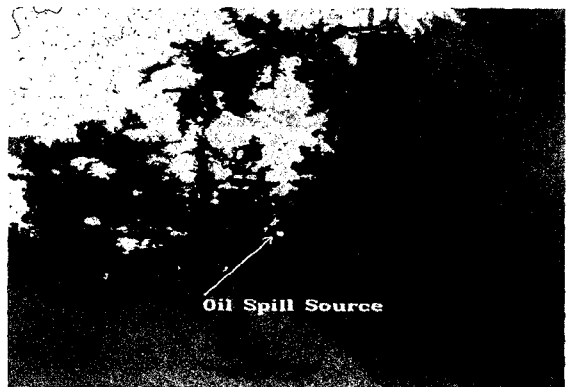


Fig. 2 (a) RADARSAT SAR image of (a) SAR Extended Low 1 by ascending mode at 18:13 of April 6, 1997, (b) SAR standard 3 by descending mode at 06:29 april 7, 1997

Table 2 Summary of oil spilt area on the incident of Osungho No.3 (from Tongyoung marine police(1997))

일 자	오 염 범 위	오 염 상 태	비 고
4. 3	야간으로 파악 불가		21:00 등가도 좌초
4. 4	등가도~국도	폭200~300m 정도의 油群	4. 4, 24:00(사고후 27시간 경과) 유출유의 主群은 등가도 남서방 27~30마일까지 이동했을것으로 추정됨(시간당 1노트 속력으로 남서 방향으로 진행)
4. 5	등가도~국도	깊은 암갈색, 폭 1~2km, 길이 16km	
4. 6	등가도~대구울비도	진한 갈색, 폭 300m, 길이 10km	
4. 7	등가도 중심 5마일권 등가도 남방 22마일 국도 남동방 11마일	1마일권 : 갈색, 2~5마일권 : 연한갈색 및 무지개색	등가도 남방 22마일 폭2m, 길이 5 km의 갈색 기름띠 2개 발견 국도 남동방 11마일 폭100m, 길이 4km의 갈색 기름띠 발견
4. 8	등가도 중심 2마일권 등가도 남방 13마일	갈색 유막	등가도 남방 13마일 반경 1마일권 내 갈색 기름띠 발견
4. 9	등가도 중심 2마일권 홍도 남동방 14마일	무지개색 유막	홍도 남동방 14마일 폭2m, 길이 3m의 갈색 油群 30개발견
4.10	등가도 중심 1마일권	은백색 유막	

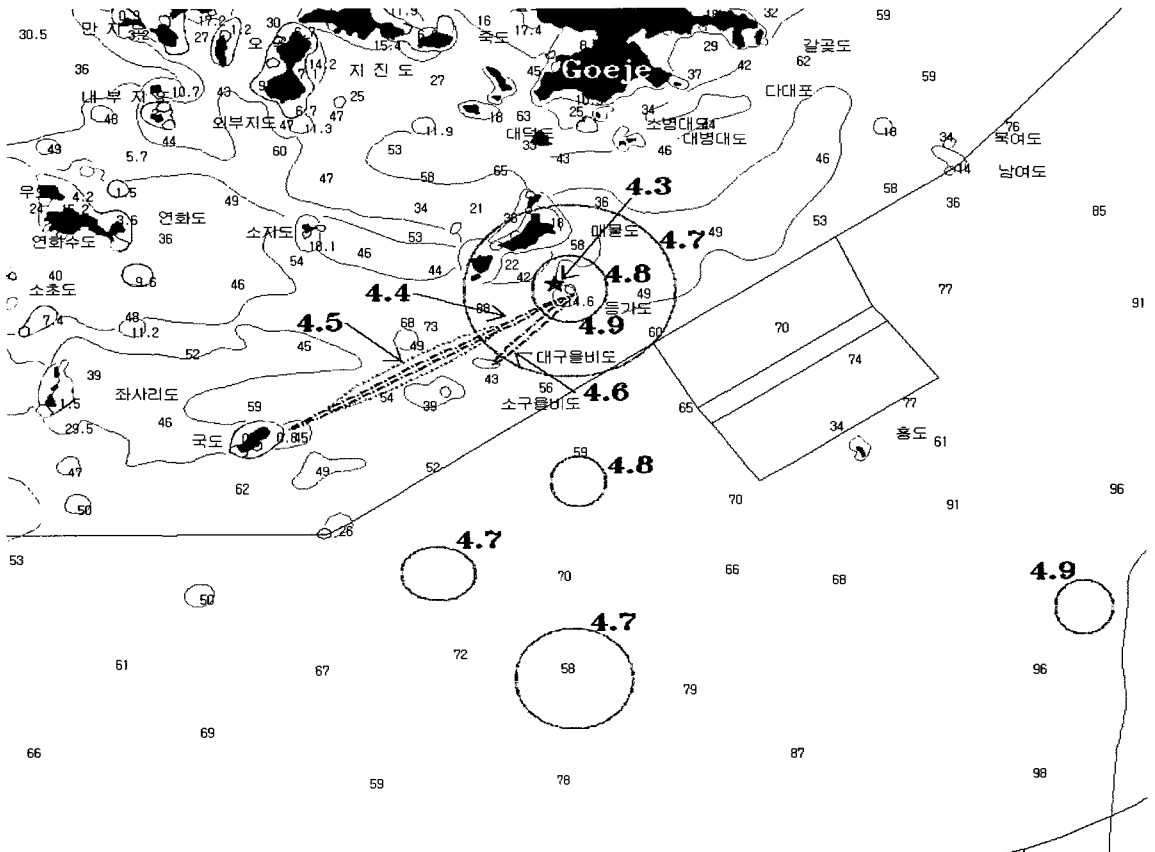


Fig. 3 Location map of observed oil spilt area(The numbers indicate the observation dates)

고 북동 방향으로 이동하여 대한해협을 거쳐 동해로 이동하던 중 일부가 일본 영해 내측으로 이동 대마도 서부 및 북동부 일부 해안에 표착 되었다 (통영 해양 경찰서 [1997]). Table 2를 근거로 해도 상에 그 유류 확산해역을 표시하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 보듯이 전체 확산 해역에 대한 정기적인 관측이 이루어지지 않은 관계로 확산 범위만을 가늠할 뿐 확산 양상이나 정확한 확산 범위를 추정하는 데는 어려움이 많다. 대략적으로 볼 때 4월3일 등가도 부근에서 발생한 유류오염 사고는 약 6일 후 등가도를 중심으로 남서, 남, 남동 방향으로 20 마일에서 30 마일 정도까지 확산되었음을 알 수 있다.

4. SAR 영상에 나타난 oil spill look-alikes

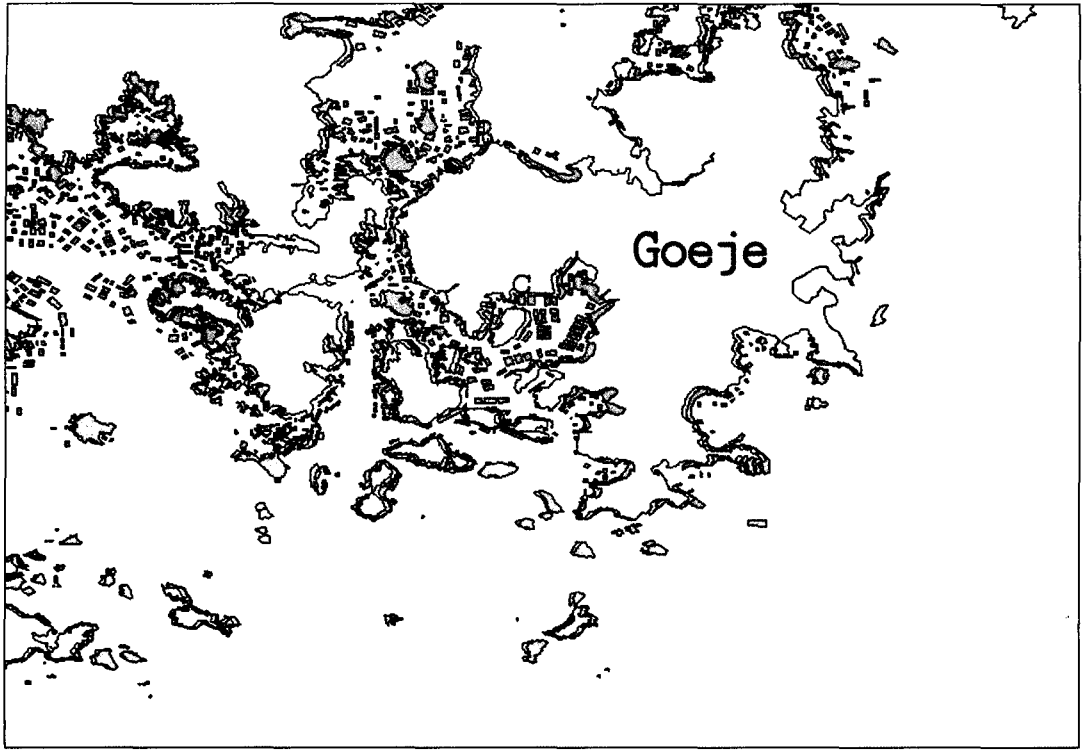
SAR 센서는 레이더로부터 조사된 마이크로파가 대상물의 거칠기에 따라 다르게 반응하는 산란 강도에 대한 정보를 이용한다. 해양에서의 거칠기를 결정하는 주된 요인은 표면 중력파(capillary wave) 혹은 파장이 짧은 중력파(gravity wave)이며 해수 표면의 이러한 짧은 파장들이 감쇄 되면 레이더로부터 발사된 마이크로파의 아주 적은 양만이 반사되어 돌아오고 이 때 SAR 영상에는 검게 나타나게 된다. 이렇게 해수 표면의 거칠기가 주변보다 작아서 SAR 영상에서 검게 나타나는 부분을 활면(slick) 이라고 하며 유류 오염의 경우에도 오염된 해수 표면이 순수 해수 표면보다 표면 장력이 크므로 인해서 거칠기가 작아져 SAR 영상에 검게 나타나는 것이다. 그러나 마이크로파의 산란강도에 영향을 주는 미세한 파랑들을 감쇄시키는 요인은 기류에 의한 유막 형성 외에도 여러 가지가 있으며 이들이 SAR 영상에서 유류 오염에 의한 유막과 유사한 형태(oil spill look-alikes)로 나타나게 되므로 SAR 영상을 해석하는데 있어서 이러한 다른 요인에 대한 주의가 필요하다.

유막 외에 활면을 형성하는 가장 중요한 것으로 바람의 영향을 들 수 있다. 우리나라 해안과 같이 복잡한 해안선과 많은 섬으로 이루어진 경우 이들 섬과 연안의 산들은 바람이 불 때 장막을 형성함으로써 그 후면의 해수표면은 주위보다 잔잔함으로써 SAR 영상에 검게 나타나게 된다(Hovland *et al* [1994]). 이렇게 나타나는 활면은 해안 지형, 바람의 방향, 그리고 바람의 장애물로부터 멀어짐에 따라 그 폭이 좁아지는 활면의 형태를 바탕으

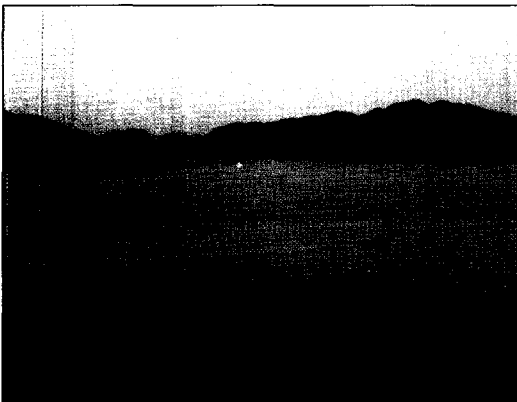
로 구분이 가능하다. 또한 이러한 장애물이 없을 때라도 부분적으로 어떤 해역의 바람의 속도가 후면 산란파(bragg waves)를 발생시킬 수 있는 한계속도인 3 m/sec 이하로 떨어지면 그 해역에 대해서는 넓은 범위에 걸쳐서 SAR 영상에서 검게 나타나기도 한다(Donelan and Pierson[1987], Johannessen *et al.*[1993]). 강우해역에서도 비로 인해 해수 표면의 거칠기가 변하므로 활면 형태로 나타나기도 하고(Fu and Holt[1982]) 내부파(daSilva[1997], Ermakov *et al.*[1998]) 혹은 두 개의 해류가 전선을 형성하는 경우에도 나타난다(Lyzenga[1991], Johannessen *et al.*[1993]). 유막 외에도 해양에서 생산되는 단백질, 지방질과 같은 유기물질이 해수 표면에 얇은 막을 형성함으로써 유막과 같이 해수 표면의 거칠기를 떨어뜨려서 SAR 영상에서 검게 나타나기도 한다. 특히 이러한 현상은 용승해역(upwelling zone)이나 강하구와 같이 생물 활동이 왕성한 곳에서 넓은 해역에 걸쳐서 나타난다(Alpers *et al.*[1991], O Chadlick *et al.*[1992], Johannessen *et al.*[1994]). 이렇게 자연막(natural film)에 의하여 활면이 형성되는 경우 그 형태나 양상이 유막에 의한 활면과 매우 유사하여 그 구분이 매우 어렵다. 바람이 강하여 상대적으로 약한 자연막을 깨뜨리고 유막만이 존재할 경우에는 다행히 구분이 가능하나 그 외의 경우에는 그 구분이 거의 불가능한 경우도 많고 앞으로 이에 대한 많은 연구가 필요한 실정이다. 우리나라와 같이 연안에 많은 양식장이 존재할 경우 이러한 자연막에 의한 영향은 매우 크다. Fig. 4 (a)는 오성3호 유출 사고가 일어난 거제도 해역 부근의 양식장 분포를 나타내는 것으로 녹색으로 표시한 부분은 양식장의 위치를 나타낸다. Fig. 4 (b)와 (c)는 각각 1999년 6월 11일 현장 관측을 통하여 Fig. 4 (a)에 표시된 B와 C 지점에서 촬영한 것으로 이러한 양식장은 주로 굴을 재배하는데 Fig. 4 (c) 사진에 나타난 각 부이에는 해수면 아래로 연결된 줄에 많은 양의 굴이 부착되어 있으므로 주변 해역보다 상대적으로 많은 양의 생물이 분포하고 이들 생물 활동에 의하여 분비되는 유기물질은 해수 표면으로 올라와 얇은 막을 형성하게 된다.

Fig. 4 (b)의 해수표면의 중간 부분은 해수 표면의 거칠기가 주변과 달라 육안으로도 식별이 가능한데 이러한 것은 유기물질에 의한 자연막에 의한 가능성이 크며 이러한 부분이 SAR 영상에서 활면의 형태로 나타나기도 한다. 따라서 유류 오염이 양식장 부근으로 확산 될 경우 SAR 영상에

(a)



(b)



(c)

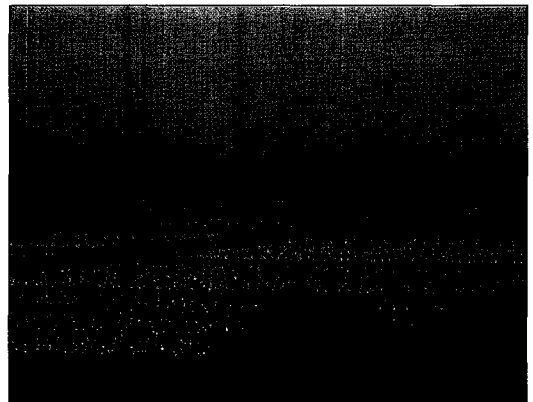
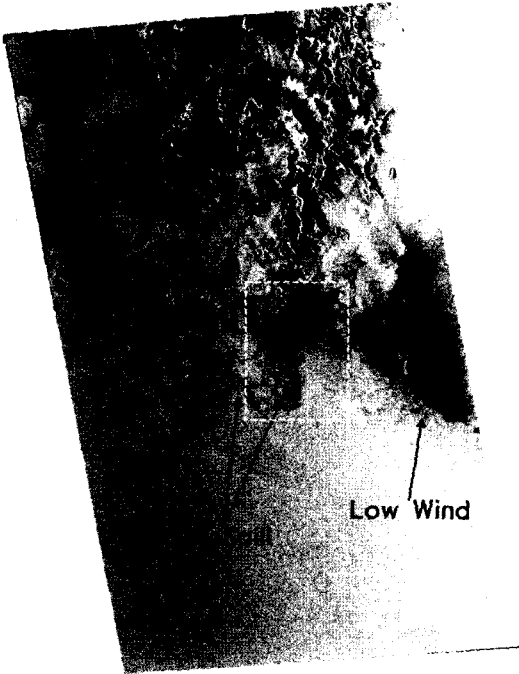
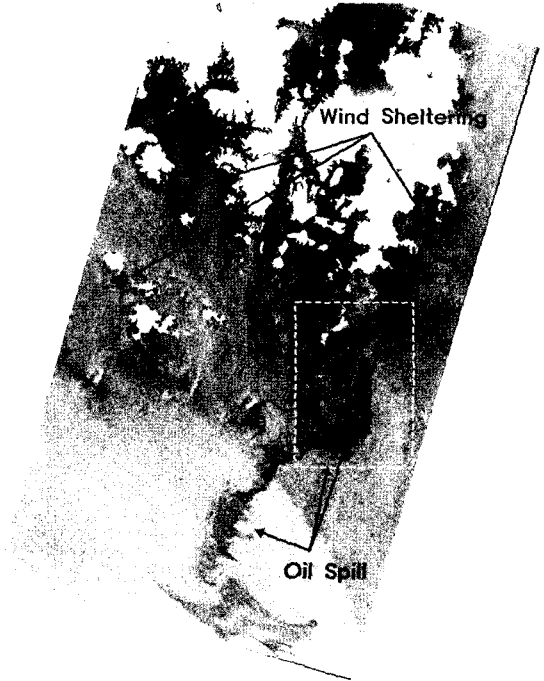


Fig. 4 (a) Location map of aquaculture farms around Goeje island, (b) slicks shown in the picture taken at the point B of Fig. 4 (a), (c) buoys of aquaculture farms taken at the point C of Fig. 4 (a)

(a)



(b)



(c)



(d)



Fig. 5 (a) Geo-corrected SAR image near oil spilt area at 18:13 of April 6,
(b) Geo-corrected SAR image near oil spilt area at 06:29 of April 7,
(c) the enlarged SAR image extracted from rectangular area(dotted) in (a),
(d) the enlarged SAR image extracted from rectangular area(dotted) in (b)

나타난 활면을 해석하는데는 매우 주의를 요하며 또한 그 해석에 있어서 한계가 있다.

5. SAR 영상 분석

유류 오염 사고시 행한 현장 관측자료와 앞장에서 설명한 유류 오염과 유사한 활면에 대한 정보를 바탕으로 사고 후 촬영한 2개의 SAR 영상을 분석하였다. 정확한 분석을 위하여 일단 Fig. 3을 기준으로 위치 보정을 한 후 SAR 영상에 나타난 활면들을 구분하였다. Fig. 5 (a)와 (b)는 각각 Fig. 2 의 (a), (b)영상에서 사고 지점 및 확산 해역을 중심으로 절취한 후 위치 보정을 한 영상이며 Fig. 5의 (c)와 (d)는 각각 Fig. 5 (a) (b)내부의 점선으로 된 직사각형 부분을 확대하여 보여주고 있다. Fig. 5 (a), (b)에서 행한 활면에 대한 구분은 바람의 방향과 해안 지형을 고려하여 행하였으며 또한 현장 관측에서 확인한 오염해역에 나타난 활면은 확실한 유류 오염으로 구분하였다. 특히 12시간 간격으로 획득된 두 영상에서 함께 나타나지 않는 것은 다른 요인으로 인해 나타난 활면일 가능성이 높으므로 제외하였다. 예를 들어 Fig. 5 (a)에 'Low Wind'로 표시된 활면은 Fig. 2 (a)의 전체 영상을 보면 더 넓은 해역에 걸쳐서 나타나고 유류 오염에서 나타나는 활면과 비슷한 형태를 보이거나 현장 관측 보고서에 이 부근의 유막에 대한 보고가 없고 또한 그로부터 12시간 후에 획득한 영상에서도 그와 비슷한 활면이 나타나지 않고 있다. 이러한 활면은 일시적으로 주변보다 바람의 강도가 낮은 해역에서 나타나며 'Low Wind' 해역으로 분류되고 있다. Fig. 5 (a), (b)에서 'Wind Sheltering'으로 표시된 해역은 섬이나 육지에서 바람이 부는 방향의 반대편 해역에 거의 동시에 나타나며 섬이나 육지 등의 바람 장애물로 멀어질수록 점차적으로 활면의 폭이 좁아지는 특징을 보여주고 있다. 유류 오염에 대한 현재의 SAR 영상 분석에 있어서 가장 불확실한 부분은 매물도와 거제도 사이의 해역이다. 이 해역에서 현장 관측에 의한 유류 오염은 보고되지 않았고 또한 Fig. 5 (b)에서는 선명하게 누유와 같은 형태의 유막이 나타나지만 Fig. 5 (a)에서는 거의 나타나지 않아 유류 오염이 아닌 다른 요인에 의한 활면일 가능성이 크다. 특히 4장에서 설명한 바와 같이 거제도 주변에 분포한 많은 양식장에서 비롯한 유기물질에 의한 자연막이 일시적으로 나타났다를 가능성도 있다. 두 영상에서 특기할 점은

사고 해역을 중심으로 남서쪽으로 매우 길게 연장된 띠 형태의 유막이 발견된다는 점이다. Fig. 5 (a)인 경우 Fig. 5 (b)보다는 희미하지만 사고해역에서 일시적으로 남쪽으로 확산된 기름 띠가 국도 주위를 돌아 남서쪽으로 상당부분 이동 후 다시 동쪽으로 이동되고 있는 궤적을 잘 보여주고 있다. Fig. 5 (b)는 Fig. 5 (a) 보다 더 선명하게 남서쪽으로 확산된 기름띠가 동쪽으로 이동되는 모습을 보여주고 있다. 일반적으로 활면의 명암의 차이로 유막 두께의 추정이 가능하지만 아직 정량적인 분석은 불가능하다. 특히 두 영상의 경우 레이다의 입사각도가 다르기 때문에 (a)에서 나타난 유막이 (b)에서 나타난 유막보다 흐리다고 해서 그 유막의 두께를 비교하는 것은 아직 이르다. Fig. 1에서 설명한 바와 같이 Fig. 5 (a)그림은 Low 1 beam mode로 입사각이 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 이고 Fig. 5 (b)는 standard 3 beam mode로 입사각은 $30.4^{\circ} \sim 36.9^{\circ}$ 이다. 입사각이 작을수록 후방산란(back scattering)에 의하여 레이다로 돌아오는 파의 에너지는 작아지므로 동일한 두께의 유막을 형성하더라도 입사각에 따라 SAR 영상에 나타나는 유막의 명암에는 차이가 있을 수 있다. 보고서(통영 해양 경찰서, 1997)에 의하면 유출유는 남서 방향으로 이동 후 4월 8일부터 북동 방향으로 이동 4월 9일부터 일본 영해 내측으로 이동하여 4월 10일부터 대마도 서부 및 북동부 일부 해안에 표착된 것으로 보고하고 있다. Fig. 5 에 나타난 두 영상 역시 남서 방향으로 이동 후 방향을 전환하여 동쪽 방향으로 이동하는 모습을 잘 보여주고 있다.

6. 결론 및 토의

유류 오염 사고 발생 후 즉각적인 방제를 위해서는 유류 오염 확산 범위를 정확히 추정하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위하여 현장 관측 및 수치모델을 이용하여 왔으나 선박 사고 및 유류 오염 사고가 주로 악기상하에서 발생한다는 것을 감안할 때 현장 관측에 많은 어려움이 있었으며 또한 우리나라 연안과 같이 복잡한 해안선으로 인하여 바람의 방향이 일정하지 않고 조류가 강한 해역에서는 정확한 기상 자료 및 해류 자료의 부족으로 수치모델의 적용에 있어서도 많은 어려움이 있었다. 또한 일단 확산되기 시작한 기름은 짧은 시간 안에 바람과 조류에 의하여 넓은 해역으로 퍼지므로 현장 출동에 의한 동시 관측이 불가능하며 더욱이 수치 모델의 경우 누유 지점과 누유 기

간(spill duration)이 입력 조건으로 주어지는데 이때 그 정확도를 높이기 위해서는 초기의 확산 범위와 함께 모델 수행 중간에 누유 확산에 대한 검증 자료가 필요하나 이를 현장 관측만으로 얻기에는 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 구름이나 악기상하에서도 넓은 해역에 걸쳐서 동시 관측이 가능한 SAR 영상을 이용하여 1997년 4월 3일 거제도 남쪽에서 발생한 유류 오염을 관측하고 분석하였다. 분석에 사용된 영상은 두 개의 RADARSAT SAR 영상으로 첫 번째 영상은 사고 발생 3일 후 획득된 영상으로 extended low beam mode이고 두 번째 영상은 첫 번째 영상으로부터 12시간 후에 획득된 영상으로 standard beam mode이다. 구체적인 분석을 위하여 사고 해역 부분을 따로 절취한 후 위치 보정을 하였다. 두 개의 영상에서는 유류 오염에 의한 유막 외에도 섬이나 연안의 산들의 바람 장애로 인한 활면이나 혹은 부분적으로 낮은 풍속 해역에서 나타나는 활면 등 유류 오염과 유사한 활면이 많이 나타났으며 특히 주변에 밀집한 양식장의 분포로 인하여 발생한 자연막으로 인한 활면도 많이 분포할 가능성이 있다. 이를 위하여 거제도 주변의 양식장에 대해 현장 관측을 수행했으며 목측으로도 이러한 자연막에 의한 활면들을 발견할 수 있었다. 두 개의 영상에 나타난 활면의 비교와 바람의 방향 및 연안 지형, 그리고 활면의 형태 등을 이용하여 두 개의 SAR 영상에 나타난 활면들을 분류하였으나 매물도와 거제도 사이에 나타난 활면에 대한 정확한 분석에는 아직 어려움이 있다. 유류 오염 사고가 이렇게 이미 자연막에 의한 활면 형성의 가능성이 큰 곳에서 발생하게 되면 현재와 같은 인공 위성의 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 항공탐재 레이더와 ERS-1 SAR를 이용하여 해양에서의 유류 유출을 연구하였는데 그 결과 복수의 주파수대의 레이더가 해수 표면에서의 여러 종류의 기름막을 분류해내는데 잠재적인 능력이 있음을 보였다. 추후에 방사되는 SAR 위성 센서는 다수의 주파수와 편광을 활용할 수 있도록 설계되어 있으므로 앞으로 좀 더 정확한 활면 분석이 가능하리라고 본다.

두 개의 영상 분석 결과 사고 해역에서 유출된 기름이 남서 방향으로 이동 후 방향을 전환하여 동쪽으로 이동하는 양상이 잘 관측되었으며 이는 현

장 관측과도 잘 일치하였고 특히 기름이 확산되는 양상이나 규모 등을 구체적으로 확인할 수 있었다. 앞으로 이 SAR 자료를 이용하여 좀 더 효과적인 유류오염의 방제 작업이 이루어 질 수 있을 것으로 보이며 특히 선진 외국에서는 이미 유류오염의 방제 외에도 불법으로 선박에서 유출하는 기름의 감시나 혹은 해상에 자동적으로 유출되는 기름을 탐지하여 유전 탐사 등을 하고 있음을 고려하여 볼 때 보다 적극적인 SAR 자료의 연구와 활용이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 해상유출사고 방제지원시스템 개발 및 상용화 기술 개발(PN98376)과 종합 해양 관측 시스템 구축(PM98015) 사업의 일부로 수행되었습니다. 본 논문에 인용된 두 개의 SAR 영상자료는 Canada Centre for Remote Sensing에서 수신 받아 RADARSAT International에서 처리된 것으로 일본의 RESTEC으로부터 제공받았으며 이에 감사 드립니다. 또한 필요한 현장 자료를 제공해 주신 해양 경찰청 여러분과 본 논문을 심사하여 주신 두 분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 정연철, 1998, "실시간 유출유 확산 모델링에 관한 연구", 한국 해양 환경 공학회 1998년도 춘계학술대회 논문집, pp 81~88.
- [2] 통영 해양 경찰서, 1997, 방제 완료(종합) 보고 (침몰 유조선 오성 3호).
- [3] 홍기용, 이문진, 1998, "누유확산 모델의 남해안 적용", 한국해양환경공학회지, Vol.1, No. 1, PP56~65.
- [4] NASDA, 1997, "인공위성·항공기름 이용한 표류 중유의 관측"
- [5] Alpers, W., V. Wismann, R. Theis, H. Hühnerfuss, N. Bartsch, J. Moreira, and J. Lyden, 1991, "The damping of ocean surface waves by monomolecular sea slicks measured by airborne multi-frequency radars during the SAXON-FPN experiment", Proceedings of IGARSS'91, pp. 1987-1990.
- [6] Bern, T. L., 1993, "Norwegian slick study", Volume 1: oil slick study, vol, OCN R-93080, OCEANOR, Trondheim, Norway.

- [7] daSilva, J.C., 1997, "The role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the Iberian shelf", Ph.D. Thesis, Univ. of Southampton, England.
- [8] Donelan, M., and W. Pierson, 1987, "Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with applications to scatterometry", *J. of Geophys. Res.*, 92 (C5), 4971-5029.
- [9] Ermakov, S.A., J.C. daSilva, and I.S. Robinson, 1998, "Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf 2. Internal tidal waves", *J. Geophys. Res.*, 103 (C4), 8083-8043.
- [10] Fu, L.L., and B. Holt, 1982, "Seasat views oceans and sea ice with Synthetic Aperture Radar", JPL publication, 81- 120.
- [11] Hovland, H.A., J.A. Johannessen, and G. Digranes, 1994, "Norwegian Surface Slick Report", Technical Report No. 81, Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway
- [12] Johnson, J. W., and W. F. Croswell, 1982, "Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface", *Radio Sci.*, 17:611-617.
- [13] Johannessen, J.A., R.A. Shuchman, K. Savidson, O. Frette, G. Digranes, and O. Johannessen, 1993, "Coastal ocean studies with ERS-1 SAR during NORCSEX91", First ERS-1 SAR symposium, Cannes, France, ESA-359, 33-34.
- [14] Johannessen, J. A., R.A. Shuckman, and O.M. Johannessen, 1994, "Mesoscale variability studies with SAR on ERS-1", in *Oceanography Application of Remote sensing*, edited by Ikeda, M., and F. Dobson, CRC Press Inc., Boca Raton.
- [15] Krishen, K., 1973, "Detection of oil spills using a 13.3 GHz radar scatterometer", *J. Geophys. Res.*, 78,, 1952-1963.
- [16] Lyzenaga, D.R., 1991, "Interaction of short surface and electromagnetic waves with ocean fronts", *J. Geophys. Res.*, 96, 10765-10772.
- [17] O Chadlick, A., P. Cho, and J. Evans-Morgis, 1992, "SAR observations of currents colocated with slicks", *J. Geophys. Res.*, 97 (C4), 5325-5330.
- [18] 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.
- [19] Weisteen, K., A. Solberg, and R. Solberg, 1993, "Oil Spill detection in SAR imagery-Summary report", Norwegian Computing Center (NR), Oslo, Norway.
- [20] 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.
- [21] Wismann, V., 1994, "Oil spill detection and monitoring with the ERS-1 SAR", proceedings Second ERS-1 Symposium, ESA SP-361.