

SAR 자료를 이용한 갯벌 퇴적환경 특성 연구

김계림* · 유주형**† · 김상완* · 최종국**

*한국해양연구원 해양위성센터, **세종대학교 지구정보공학과

Application of SAR DATA to the Study on the Characteristics of Sedimentary Environments in a Tidal Flat

Kye-Lim Kim*, Joo-Hyung Ryu**†, Sang-Wan Kim*, and Jong-Kuk Choi**

*Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

**Korea Ocean Satellite Center, Korea Ocean Research & Development Institute

Abstract : In this study, comparisons of the backscattering coefficients and the coherence values which had been extracted from SAR (Synthetic Aperture Radar) images such as JERS-1, ENVISAT and ALOS satellites with surface roughness, surface geometric and soil moisture content were carried out. As the results of analysis using the backscattering coefficient and coherence values from SAR images, the coherence was shown high in the region containing more of mud fraction due to higher viscosity of fine grain-size. A lot of tidal channels were well developed in the Ganghwa tidal flat, affecting the drainage of seawater and subsequent soil moisture content by exposure time of tidal flat. The backscattering coefficient, consequently, appeared to be lower in sand flat and mix flat with decrease of soil moisture. In contrast, most mud flats were distributed at high elevation so that soil moisture was not much influenced by seawater. The backscattering coefficient in mud flat seemed to have a relationship with the density of tidal channel. In addition, lowering backscattering coefficients in the all Ganghwa tidal flat was observed when surface remnant water increased according to the amount of rainfall. The correlation between backscattering coefficient, coherence and sediment environment factors in the Ganghwa tidal flat was investigated. In the future, more quantitative spatial analysis will be helpful to well understand the sedimentary influence of various sediment environment factors.

Key Words : Ganghwa tidal flat, backscattering coefficient, coherence, surface roughness, moisture content.

요약 : 이 연구에서는 토양의 유전상수 (dielectric constant), 표면의 거칠기 (surface roughness)와 지표면의 기하 (geometric) 등과 같은 다양한 물리적 요소들의 정보를 포함하고 있는 SAR (Synthetic Aperture Radar) 자료를 이용하여 강화도 갯벌의 표층 퇴적환경을 분석하였다. JERS-1, ENVISAT과 ALOS 위성의 다양한 SAR 자료로부터 레이더 후방산란계수 (backscattering coefficient)를 추출하여 각 퇴적환경 요소들과의 관계를 파악하고 시간변화에 따른 지표의 변화 정도를 알 수 있는 긴밀도 (coherence)를 추출하여 퇴적상과 비교하였다. SAR 영상으로부터 추출한 후방산란계수와 긴밀도를 이용한 강화도 갯

별 퇴적환경 특성을 분석한 결과 높은 긴밀도를 갖는 지역은 입도가 작은 펄이 많이 포함된 펄 퇴적상이며 긴밀도가 낮을수록 큰 입도가 많이 분포하는 지역임을 알 수 있었다. 강화도 갯벌은 다른 갯벌과는 달리 조류로가 많이 발달하여 썰물 시 수분함유량이 많은 영향을 주어 모래 퇴적상과 혼합 퇴적상은 갯벌의 노출시간이 증가함에 따라 토양 수분함유량이 감소하여 후방산란계수가 점차 감소한다. 그러나 펄 퇴적상에서는 지형 고도가 높아 해수의 많은 영향을 받지 않으며 조류로의 밀도가 높기 때문에 토양 수분함유량이 감소하지만 후방산란계수가 높게 나타났다. 또한 갯벌은 토양 수분함유량뿐만 아니라 표면에 남아있는 잔존수도 많아 강우량이 많은 날은 지표 잔존수가 증가하기 때문에 비교적 후방산란계수가 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이 연구의 결과, 긴밀도, 후방산란계수와 각 퇴적환경 요소들의 상관관계를 알 수 있었으며, 향후 강화도 갯벌 퇴적환경의 공간적 분석을 위해 각각의 요소들이 미치는 영향에 대한 정량적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

1. 서론

강화도 갯벌은 우리나라 서해의 남북한 경계지역에 위치하여 전 세계적으로 잘 알려진 만을 형성한 곳이며 강과 외해에 유입되는 퇴적물이 해수의 순환에 의해 집적되는 곳으로서 다양한 생물의 서식지가 되고, 인근 해역에 영양을 공급한다. 또한 오염물질 정화에 크게 기여하는 곳이어서 경제적, 사회적, 생태적으로 중요한 지역이며 국외의 갯벌과는 달리 펄의 함유량이 높게 나타나고 해수 유출입의 큰 에너지에 의해 조류로 (tidal channel)가 많이 형성되어 있는 특징을 갖는다. 그러나 갯벌의 퇴적물은 생물에 의하여 교란되어 있고, 조석의 영향으로 계절에 따라 퇴적과 침식이 반복되어 변화가 많으며 인천 국제공항 건설로 인한 인위적인 개발에 의하여 훼손가능성이 높다(우한준, 제종길, 2002). 따라서 이러한 변화를 실시간으로 감지하기 위해서 지속적인 모니터링이 필요하다.

최근 지질학과 생물학 등의 다양한 분야에서도 갯벌 퇴적환경 요소들 각각의 시·공간적 분석이 요구되고 있으며, 갯벌의 퇴적환경과 생태환경의 공간적 분석에 대한 연구가 진행되고 있다(Ryu *et al.*, 2004; Van der wal *et al.*, 2005; Gilmore *et al.*, 2008; Goetz *et al.*, 2008; Gade *et al.*, 2008). 갯벌의 퇴적환경을 연구하는 것은 갯벌의 생태계와 관련된 퇴적환경과 주변 변화에 의한 퇴적환경 변화의 양상을 이해하는데 기본이 되며, 이를 위해서는 갯벌의 퇴적환경 요소에 대한 정확한 주제도를 필요로 한다. 갯벌에서의 퇴적상, 지형고도와 이에 따른 노출시간, 토양 수분함유량, 지표 잔존수 등과 같은 요소들은 갯벌 저서생물종과 분포에 직결되며

이러한 모든 자료를 통합하고 분석함으로써 갯벌의 실제적 경제적 가치를 파악할 수 있게 된다.

갯벌은 조석에 의해 만조와 간조가 반복하여 접근성 측면에서 시간적 제약이 따르고 광역적이기 때문에 현장 관측 자료에만 의존한 갯벌 분석에 어려움이 있다. 원격탐사 기술은 쉽고 적은 비용을 들여 시간변화에 따른 갯벌의 공간적 분석을 가능하게 하며, 특히 합성개구레이다 (Synthetic Aperture Radar: SAR)는 마이크로파를 사용하므로 주야간에 상관없이 영상의 취득이 가능하다. 마이크로파는 구름을 투과하므로 기상의 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있어, 바다의 영향에 의해 기상변화가 많은 갯벌 연구에 유용하게 활용될 수 있다. 또한 송신된 마이크로파가 지표에 닿은 후 센서로 되돌아오는 레이더 후방산란 (radar backscattering)은 토양의 유전상수 (dielectric constant), 표면의 거칠기 (surface roughness), 지표면의 기하 (geometric) 등과 같은 다양한 물리적 요소들의 정보를 포함하기 때문에 갯벌의 퇴적환경 특성을 파악하는데 적합하다.

레이더 위성영상으로부터 갯벌의 퇴적특성을 파악하기 위해서는 갯벌의 환경요소들과 레이더 신호와의 상관관계를 이해해야 하며 실제적으로 이러한 연구들이 많이 이루어져 왔으나 갯벌마다 특성이 다르기 때문에 SAR 영상을 통해 추출된 결과가 다르게 나타난다. 이 연구에서는 JERS-1, ENVISAT과 ALOS 등 다양한 SAR 자료로부터 후방산란계수 (backscattering coefficient)와 긴밀도 (coherence)를 추출하고 퇴적특성을 나타내는 요소들과의 비교 분석을 통하여 강화도 갯벌 퇴적환경 특성을 파악하고자 한다. 이를 통해 갯벌의 효율적 관리를 위한 퇴적 환경 관련 주제도 작성의

기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구지역

강화도 갯벌은 경기만 북부에 자리잡고 있으며, 동경 126° 21' ~ 126° 32', 북위 37° 35' ~ 37° 50' 에 위치한다. 전체 면적은 청주사초를 포함하여 최저 조면시 약 105 km²로 매우 넓으며 이 중 남부 갯벌은 최대거리 약 6 km, 면적 90 km²로 전체 강화도 갯벌의 약 86%를 차지한다(한국해양연구원, 1998).

강화도를 중심으로 동쪽에는 약 300 - 1,500 m 폭의 염하수로, 서쪽에는 약 1,200 - 3,800 m 폭의 석모수로 등 비교적 큰 규모의 수로가 존재하며(Fig. 1), 이

들 수로에서 유입되는 담수가 조석에 의한 해수와 혼합되면서 주변에는 다양한 갯벌 환경들이 존재한다. 강화도 서부의 파동도와 석모도, 남서부의 장봉도, 남동부의 동검도와 영종도 및 그 밖에 시도, 신도 등 크고 작은 많은 섬들이 강화도 주변에 위치하고 있다. 연구지역의 평균조차는 6.5 m이고, 연중 25회의 고고조와 저고조의 반복이 뚜렷하다. 표층 퇴적상의 경우는, 동쪽으로는 펄 퇴적상, 서쪽으로는 모래 퇴적상이 주로 분포하고 있으며, 이들 중앙에 혼합 퇴적상 지역이 넓게 분포하고 있다(우한준, 재종길, 2002). 서쪽의 여차리 갯벌에서 동쪽의 동검도 갯벌로 갈수록 지형이 높아지며, 연구지역 전반에 걸쳐 1990년대 말 이후부터 최근까지 지형고도가 높아지는 경향을 보이고 있다(Fig. 2).

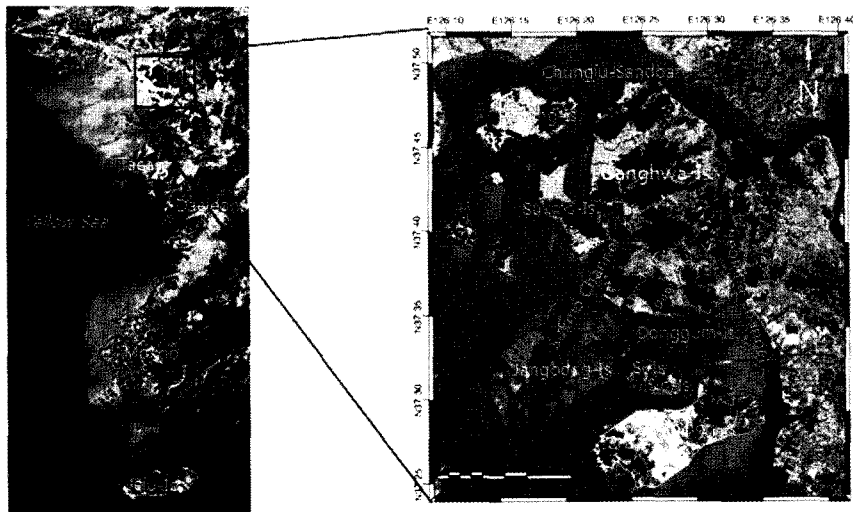


Fig. 1. Location map of the Ganghwa island and Landsat ETM+ image over the study area acquired on Jan. 14, 2002.

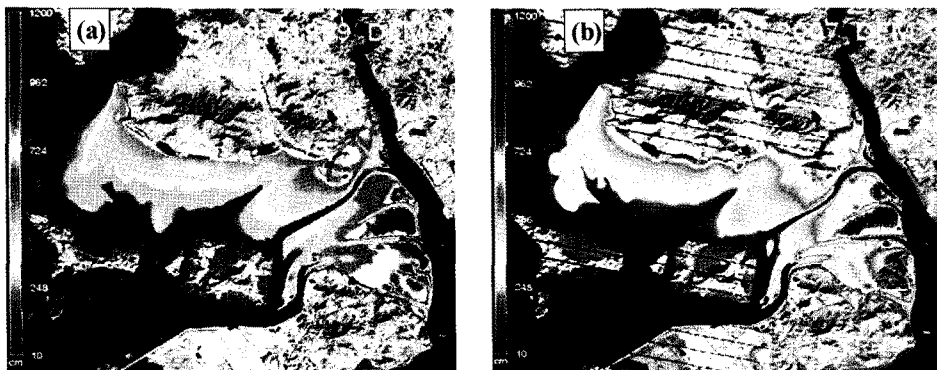


Fig. 2. Digital Elevation Model (DEM) in Ganghwa tidal flat of (a) late 1990s and (b) recent years.

3. 연구방법 및 자료

이 연구에서는 1997년부터 2008년까지 JERS-1, ENVISAT 그리고 ALOS 위성으로부터 관측된 SAR 영상자료를 사용하였다. SAR 영상으로부터 추출한 후방산란계수는 각 영상관측 시기의 퇴적환경에 영향을 많이 받기 때문에 동일 지역에서도 시기별로 다른 특성으로 나타날 수 있다. 따라서 다양한 시기와 다양한 시스템 특성을 가지는 SAR 영상을 사용하였고, 가급적 갯벌이 해수면 위로 많이 노출되어 있는 조위가 가장 낮은 시기의 영상을 선택하여 사용하였다. Table 1은 이번 연구에서 사용된 위성영상들의 시스템적인 특징과 위성영상 관측 당시의 조위를 정리 한 것으로, 조위는 해양조사원 (KHOA)에서 제공한 인천검조소의 측정값을 사용하였다.

SAR 자료의 처리는 스위스 Gamma Remote Sensing사의 SAR 신호 처리 상용 소프트웨어인 GAMMA modular SAR processor를 사용하였다. 원시자료 처리를 통해 총 16개의 SAR 자료를 Single Look Complex (SLC) 영상으로 변환하였는데, 스펙클

노이즈를 줄이기 위해 median 필터를 사용하였고 해상도 12.5×12.5 m의 영상으로 변환하였다. 각 영상은 Landsat ETM+ 위성영상으로부터 지상기준점 (Ground Control Point, GCP)을 추출하고 이를 이용하여 기하보정 (geometric correction)을 실시하였다. 최종적으로, 생성된 각 SLC 영상들로부터 후방산란계수와 긴밀도 정보를 추출하였다. 레이더 후방산란 값을 결정짓는 요소로는 크게 유전상수와 표면의 거칠기 등 물리적 요소들이 있고 이러한 요소들은 퇴적물의 입도 분포와 지형의 고도 및 형태 등에 영향을 받는다. 레이더 후방산란계수에 영향을 줄 수 있는 갯벌 환경요인으로는 토양 수분 함유량 (soil moisture content)과 지표 잔존수 (surface remnant water), 그리고 연흔 (sand ripple) 등이 있다. 그러나 갯벌의 특성상 접근성이 어려워 모든 지역에 대한 토양 수분함유량을 측정할 수 없었고, 지표 잔존수는 불규칙적으로 존재하기 때문에 이것 역시 정량적인 측정이 어렵다. 또한 강화도 갯벌은 다른 갯벌과는 달리 연흔의 발달이 미약할 뿐만 아니라 지형 고도가 낮은 모래 퇴적상에 대부분 존재하여 해수로 덮여 있고, 펄 퇴적상 및 혼합 퇴적상 지역에서는 조류로

Table 1. SAR image list used in the study with the tide information at the acquisition time and sensor characteristics

Date	Tide(cm)	Tide condition	Satellite/Sensor	Polarization	Type
1997-10-18	19	ebb	JERS-1/SAR	HH	L-band(1.25GHz, 24 cm) /θ = 39° /Descending
1997-12-01	22	ebb			
1998-01-14	62	ebb			
1998-02-27	-5	ebb			
1998-04-12	116	ebb			
1998-05-26	81	ebb			
1998-07-09	205	ebb			
1998-08-22	142	ebb			
2004-07-02	166	ebb	ENVISAT/ASAR	VV	C-band(5.3GHz, 5.7 cm) /θ = 22° /Descending
2004-12-24	230	flood-middle			
2005-09-30	298	flood-middle			
2006-01-13	141	ebb			
2007-01-04	203	ebb	ALOS/PALSAR	HH	L-band(1.25GHz, 24 cm) /θ = 34.3° /Ascending
2007-04-13	386	flood-middle		HH, VV	L-band(1.25GHz, 24 cm) /θ = 21.5° /Ascending
2007-10-07	330	flood-middle		HH	L-band(1.25GHz, 24 cm) /θ = 34.3° /Ascending
2008-01-07	197	ebb			

가 더 많이 발달하였다. 따라서 각각의 퇴적환경 요소들과 후방산란계수를 다음과 같은 방법으로 비교·분석하였다.

(1) 갯벌 지형고도에 따라 노출되는 영역과 시간이 다르기 때문에 노출시간에 따른 토양 수분함유량이 변하므로 노출시간에 따른 후방산란계수를 추출하여 분석하였다.

(2) 갯벌의 오목한 지형에는 항상 해수가 존재하기 때문에 이러한 지표 잔존수가 남아있는 상태에서 강우량이 많아지게 되면 토양 수분함유량뿐만 아니라 지표 잔존수도 증가한다고 볼 수 있다. 따라서 각 위성영상 별 강우량이 많은 날과 적은 날의 영상으로부터 퇴적상 별 노출시간에 따른 후방산란계수를 추출하여 비교하였다.

(3) 조류로는 갯벌의 수분함유량과 미세 지형기복 정도에 영향을 주며 퇴적상에 따라 조류로 분포 정도가 다르게 나타난다. 또한 조류로의 특성을 곡류 (meandering)와 분기 (branch)로 나타내며 각각은 조류로의 형태와 복잡성을 나타낸다 (엄진아, 2008). 따라서 조류로의 분포 정도를 미세 지형 기복의 복잡성 정도라고 할 수 있으며 각 퇴적상 별 노출시간이 동일한 조류로들의 복잡성 분포에 따른 후방산란계수 변화를 분석하였다.

4. 연구 결과

1) 긴밀도와 퇴적상의 상관관계

레이더 영상자료로부터 연구지역의 긴밀도 자료를 추출하기 위하여, 영상 간의 수직기선거리 (perpendicular baseline)가 약 1 - 2 km 범위에 속하는 간섭쌍을 추출하였다. 각 간섭쌍 추출에 사용된 영상자료의 획득 시기는 모두 약 44일의 간격을 보였으며, 총 4개의 긴밀도 영상을 추출하였다. Table 2는 추출된 긴밀도 영상의 목록이며, 두 개의 SAR 자료로부터 생성된 간섭쌍의 표기

는, 예를 들면 1997년 10월 18일에 획득된 영상을 주 영상으로 하고 1997년 12월 1일에 획득된 영상을 부 영상으로 하여 생성된 간섭쌍의 경우 '971018-971201'로 표기하였다. 긴밀도를 추출한 영상들 외에 다른 간섭쌍들의 경우 긴밀도를 생성할 수 있는 기선의 거리가 한계 기선거리보다 길거나 현저한 시간적 차이로 인하여 긴밀도 영상을 생성할 수 없었다. Fig. 3은 각 퇴적상 및 노출지역의 특정 지점에서 각 간섭쌍에서 추출한 긴밀도 값을 표현한 것이며, Fig. 4는 긴밀도 영상과 관측 당시의 조위를 나타낸 것이다. 세립의 펄 우세지역 (mud flat)인 동검도와 영종도를 있는 갯벌은 긴밀도가 높게 나타남을 알 수 있고 외해 쪽에 위치한 모래 퇴적상 (sand flat) 방향으로 점차 긴밀도가 낮아짐을 알 수 있다. 일반적으로 입자사이의 점착력은 퇴적물의 입도에 따라서 다르기 때문에 퇴적물의 유동성이 다르다 (Rowan, 2001). 즉, 입도가 작은 퇴적물은 입자 사이의 점착력이 크기 때문에 유동성이 작다. 따라서 조석에 의해서 갯벌에 해수가 드나들 때 입도가 작은 펄 퇴적상은 입자들의 유동성이 작기 때문에 지형변화가 적어 높은 긴밀도를 유지할 수 있다. 또한 영종도 북부와 염하수로 왼쪽에 위치하며 펄 퇴적상에서 가장 높은 긴밀도를 나타내는 영역이 있는데, 이 영역은 지형이 가장 높은 곳으로 간·만조 시 항상 노출되어 해수의 영향을 거의 받지 않는 곳이다. 따라서 지형의 변화가 없기 때문에 긴밀도가 가장 높게 나타나는 것으로 판단된다(Fig. 3과4).

추출된 긴밀도 중 980114-980227과 980709-980822의 긴밀도는 971018-971201과 971201-980114의 긴밀도에 비해 현저하게 낮은 값을 나타냈다. 두 시기 동안 많은 강우량으로 인해 퇴적물의 유동성이 커져 갯벌 전체적으로 많은 변화가 있어 퇴적상별 긴밀도의 차이가 나타나지 않고 낮은 긴밀도를 나타내는 것으로 판단된다. 980114-980227 긴밀도 영상은 980709-980822와 비슷한 조위 상태이나 기선 거리의

Table 2. List of coherence map

Satellite	Pair	Tide (cm)	Time intervals	Bp (m)
JERS-1	971018-971201	19-22	44 days	1087.08
	971201-980114	22-62		921.49
	980114-980227	62-(-)5		2497.15
	980709-980822	205-142		1250.44

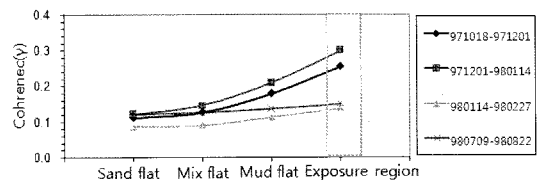


Fig. 3. Coherence values in Ganghwa tidal flat.

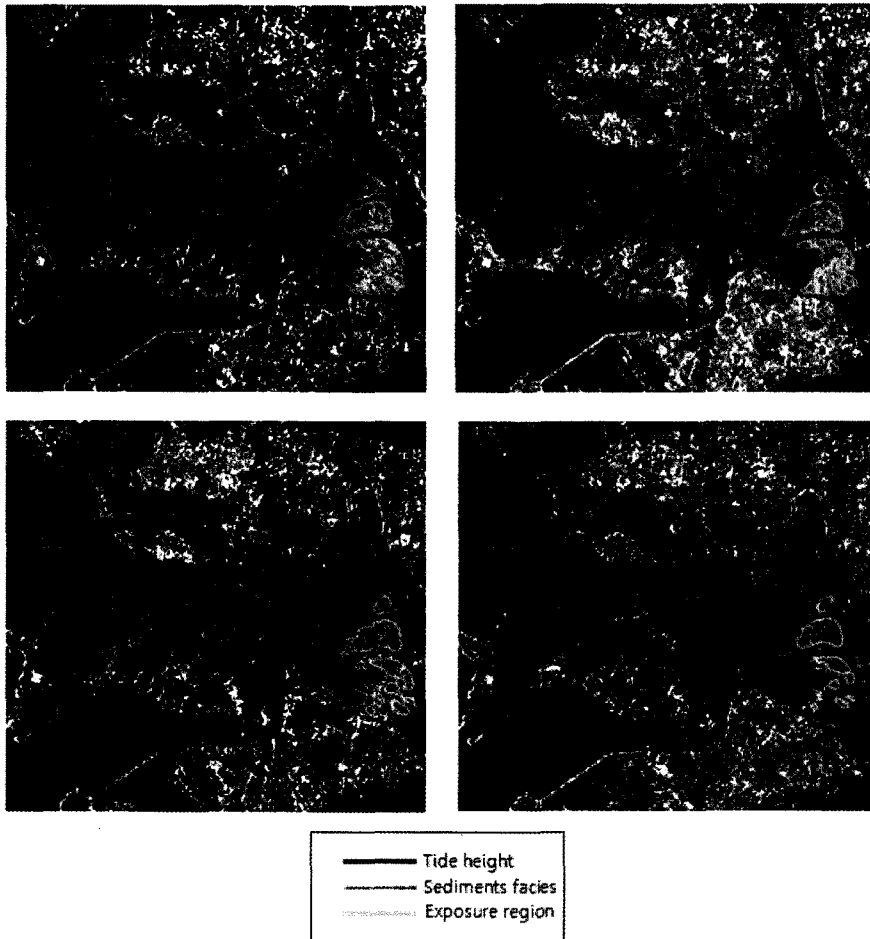


Fig. 4. Coherence map induced by JERS-1 interferometric pairs.

차이가 커 비교적 다른 쌍의 긴밀도보다 낮은 값을 나타낸다.

2) 갯벌 노출시간에 따른 토양 수분함유량 변화와 후방산란계수의 상관관계

SAR 영상으로부터 추출한 후방산란계수 값을 결정 짓는 변수로 유전상수가 있으며, 유전상수는 토양 수분 함유량의 영향을 받는다. 일반적으로 퇴적물의 입도에 따라 투수성 정도가 다르게 나타나며 입도가 작은 펄일 수록 물의 투수성이 나쁘고 입도가 큰 모래는 물의 투수성이 좋다. 그러나 강화도 갯벌의 경우 펄이 많이 함유된 갯벌이지만 조류가 많이 발달하여 썰물 시 조류를 통한 해수의 배수가 많이 일어난다. 따라서 노출시간에 따라 갯벌의 토양 수분함유량이 다르게 나타나게 된다. 갯벌이 조석에 의한 썰물 시에 해수면 위로 노출되

었을 때부터 노출시간이라 하고 노출시간은 시간이 지남에 따라 배수되는 정도를 나타내므로 갯벌의 토양 수분함유량을 나타내는 지표라 할 수 있다(채희삼, 2007). 즉, 갯벌의 노출시간이 길어짐에 따라 수분함유량이 감소하고 썰물 시 고도가 같은 영역은 동일한 시점에서 노출되기 시작하여 동일한 시간 동안 해수면 위로 노출된다고 볼 수 있다. 따라서 각 위성영상별 관측당시 조위와 수치고도모형을 사용하여 갯벌이 노출이 되기 시작한 시점부터 한 시간 단위로 영역을 구분하였고 각 퇴적상별로 동일하게 노출되는 영역을 분류하였다(Fig. 5와 6). 지형고도에 따라서 노출시간에 따른 노출영역을 구분한 결과, 높은 만 안쪽과 동검도 부근 갯벌 및 영종도 북쪽 갯벌에서 먼저 노출되기 시작하여 가장 긴 시간동안 해수위로 노출되어 있음을 알 수 있다. 영종도 북단의 갯벌은 지형고도가 높아 항상 노출되는 곳이 존재하

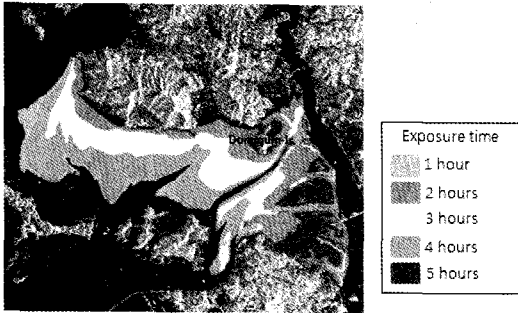


Fig. 5. Classification result according to the exposure time overlaid on the JERS-1 SAR image obtained on Feb. 27, 1998.

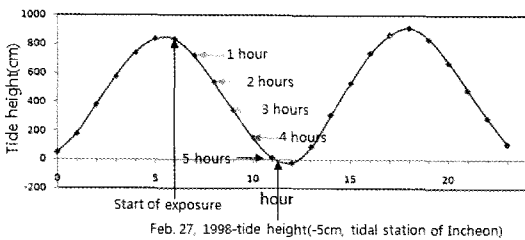


Fig. 6. Tide height variation at the Ganghwa island based on the data from the tidal station of Incheon obtained on Feb. 27, 1998.

며 이곳은 해수의 영향을 거의 받지 않는 영역이다. 따라서 노출 영역 분류에 포함하지 않았다.

노출시간에 따라 구분된 영역을 바탕으로 모래 퇴적상, 혼합 퇴적상, 펄 퇴적상에서 후방산란계수를 추출하였고, 영상에 포함된 스펙클 노이즈를 고려하여 평균값을 취하였다(Fig. 7). 노출시간 변화에 따른 후방산란계수를 추출한 결과, 모래와 혼합 퇴적상의 경우 노출시간 증가에 따라 후방산란계수가 증가하다가 점차 감소하는 복잡한 경향을 나타냈다. 그러나 전반적으로 감소하는 형태를 보였으며, 썰물 시 가장 나중에 노출되어 노출시간이 가장 짧은 외해의 갯벌 영역은 노출되어 있지만 해수가 대부분 얇은 막으로 갯벌 표층을 덮고 있다. 따라서 이 영역에서 후방산란의 전반사가 일어나 비교적 낮은 후방산란계수 값을 나타내는 것으로 보인다. 결과적으로 모래 퇴적상과 혼합 퇴적상은 가장 외해에 위치한 영역의 갯벌을 제외하면, 전반적으로 토양 수분함량이 감소함에 따라 유전상수가 작아져 후방산란계수가 감소되는 일반적인 현상 (Ulaby *et al.*, 1982)과 비슷한 결과를 나타낸다고 볼 수 있다. 실제 갯벌에서의 토양 수분함량에 따라 후방산란계수 변화를 알아보기 위하여 2009년 4월에 현장조사로부터 획득한 토양 수분함량

과 위성영상에서 추출한 후방산란계수를 비교하였다. 이때 갯벌의 입도 분포는 계절의 영향을 많이 받기 때문에 현장조사와 비슷한 계절의 위성영상을 사용하였고 각각은 JERS-1 SAR 위성영상인 1998년 4월 12일과 1998년 5월 26일 영상으로부터 후방산란계수를 추출하였다. Fig. 8은 퇴적상별 현장조사 정점 위치에서 토양 수분함량과 후방산란계수를 비교한 것으로 수분함량이 증가할수록 유전상수가 증가하여 후방산란계수가 증가함을 확인 할 수 있었다. 그러나 펄 퇴적상의 경우 노출시간이 증가함에 따라 후방산란계수가 점진적으로 증가하며 비교적 높은 후방산란계수를 나타낸다. 펄 퇴적상은 강화도 갯벌에서 비교적 지형고도가 높아 해수가 드나들지 않는 영역도 존재하며 조류가 많이 발달하여 썰물 시 배수가 활발하게 이루어진다. 따라서 펄 퇴적상의 경우 노출시간에 따른 토양 수분함량의 변화가 많지 않은 것으로 보인다.

3) 강우량에 따른 후방산란계수 변화

갯벌은 해수의 영향으로 토양 공극에 존재하는 토양 수분함량이 높다. 또한, 연흔사이나 오목한 지형에 존재하는 해수, 갯벌 표면 위에 얇은 막과 같이 존재하는 해수 등 썰물 시 바다로 흘러가지 않고 표면에 남아 있는 갯벌 지표 잔존수가 많다. 이러한 지표 잔존수는 후방산란계수에 많은 영향을 미치는 요소이며 불규칙적으로 갯벌 곳곳에 존재하기 때문에 정량적인 관측이 어렵다. 그러나 갯벌의 오목한 지형에는 항상 해수가 존재하기 때문에 이러한 지표 잔존수가 남아있는 상태에서 강우량이 많아지게 되면 토양 수분함량뿐만 아니라 지표 잔존수도 증가한다고 볼 수 있다. 따라서 각 위성영상 별 강우량이 많은 날과 적은 날의 영상으로부터 퇴적상 별 노출시간에 따른 후방산란계수를 추출하여 비교하였다(Fig. 9와 10). 영상관측시의 강우량정보는 기상청에서 제공하는 기후자료를 사용하였고 하루 동안 내린 비의 양을 나타낸다. Table 3에 선택된 위성 영상의 관측 시 기후를 정리하였다. 추출한 후방산란계수는 같은 조석 상태에서 강우량의 차이가 있는 영상에서 추출한 후 비교한 것으로 강우량이 많은 날이 적은 날에 비해 낮은 후방산란계수를 나타내며 영상에서도 어둡게 나타남을 알 수 있었다.

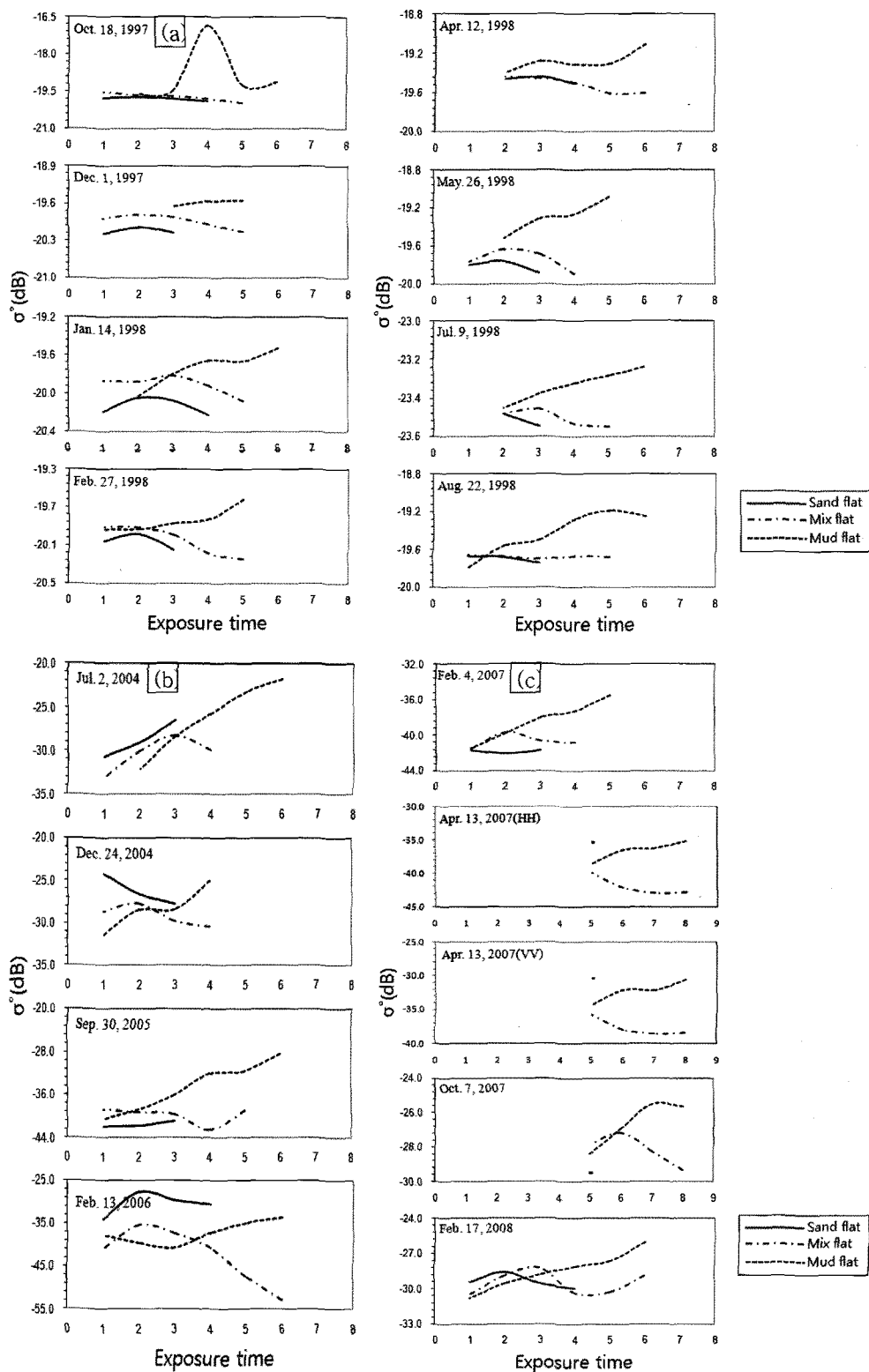


Fig. 7. Relations between backscattering coefficient and exposure time of tidal flat induced by from (a) JERS-1 SAR (b) ENVISAT ASAR and (c) ALOS PALSAR image.

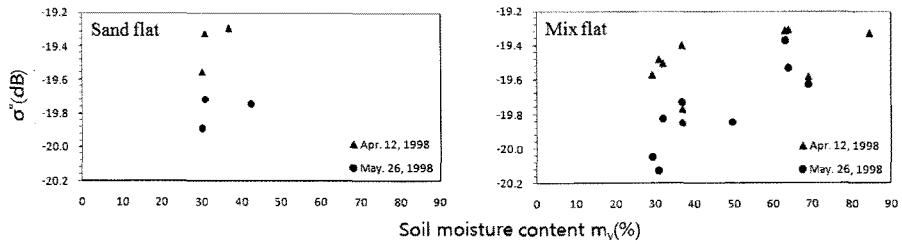


Fig. 8. Relationship analysis between a variation of backscattering coefficients of JERS-1 SAR (Apr. 12, 1998 and May 26, 1998) and volumetric moisture content.

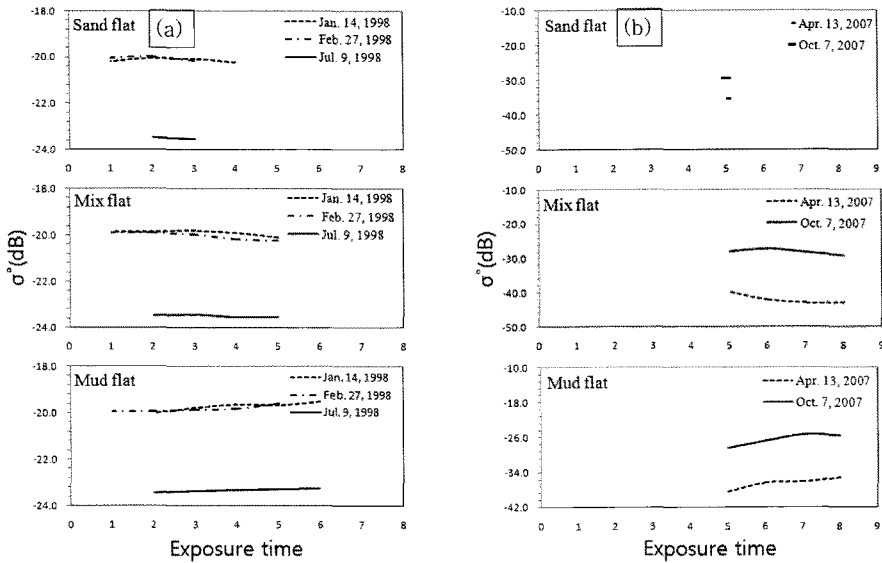


Fig. 9. Relations of backscattering coefficient of (a) JERS-1 SAR image and (b) ALOS PALSAR image with exposure time according to the different rainfall condition.

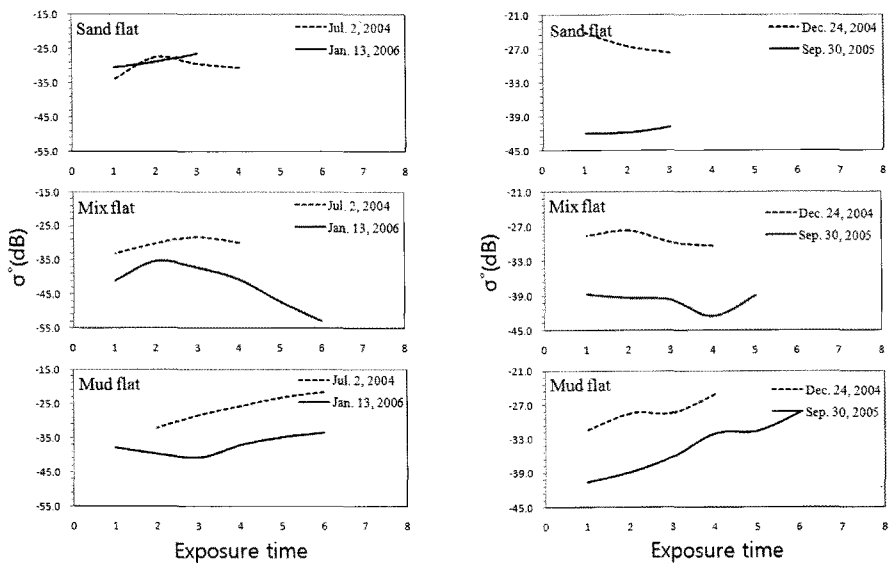


Fig. 10. Backscattering coefficient of ENVISAT ASAR image related with exposure time according to the different rainfall condition.

Table 3. Tide and weather condition at the SAR acquisition date

Tide condition	Date	Tide heigh (cm)	Rainfall (mm)	Wind velocity (m/s)	Weather
JERS-1 SAR					
Ebb	1998-01-14	62	0	3.5	
	1998-02-27	-5	4.5	3.2	rain, fog
	1998-07-09	205	7.0	3.6	rain, fog
ENVISAT ASAR					
Ebb	2004-07-02	166	2.0	2.6	rain, fog
	2006-01-13	141	21.5	2.5	rain, fog
Flood	2004-12-24	230	0	2.3	
	2005-09-30	298	97.5	3.0	rain, fog
ALOS PALSAR					
Flood	2007-04-13	386	2.0	5.7	rain, fog
	2007-10-07	330	0.2	2.7	rain

4) 갯벌 조류로와 후방산란계수의 상관관계

레이더 후방산란계수는 수분함유량뿐만 아니라 표면의 거칠기의 영향을 많이 받는다. 특히 다른 지역의 갯벌과는 달리 강화도 갯벌은 펄이 많이 포함되어 있고, 갯벌을 중심으로 양쪽에 염하수로와 석모수로가 존재하여 해수의 유출입 에너지가 크다. 따라서 조류로가 많이 발달하였고, 실제적으로 모래 기간대를 제외한 대부분 갯벌에 다양한 조류로가 많이 분포한다. 조류로는 갯벌의 수분함유량과 표면 거칠기 정도에 영향을 주며 퇴적상에 따라 조류로 분포 정도가 다르게 나타난다. 조류로의 특성은 곡류(meandering)와 분기(branch)로 나타

내며, 각각 조류로의 발달 형태와 밀도분포를 나타낸다. 강화도 갯벌의 조류로는 비슷한 형태의 곡류 패턴을 가지며 퇴적상에 따라 밀도 분포가 다르게 나타난다(엄진아, 2008). 따라서 조류로의 밀도 분포를 표면 거칠기 정도라고 할 수 있으며 밀도 분포에 따른 퇴적상 별 후방산란계수 변화를 살펴보았다. 여기서 사용된 조류로 밀도 분포는 엄진아(2008)가 2001년 IKONOS 영상으로부터 추출한 조류로 벡터 자료로부터 작성하였고(Fig. 11), 조류로의 밀도 분포에 따른 후방산란계수의 변화를 알아보기 위하여 동일한 퇴적상에서 동일 시간 동안 노출되는 조류로를 선택하였다(Fig. 12). 또한 선

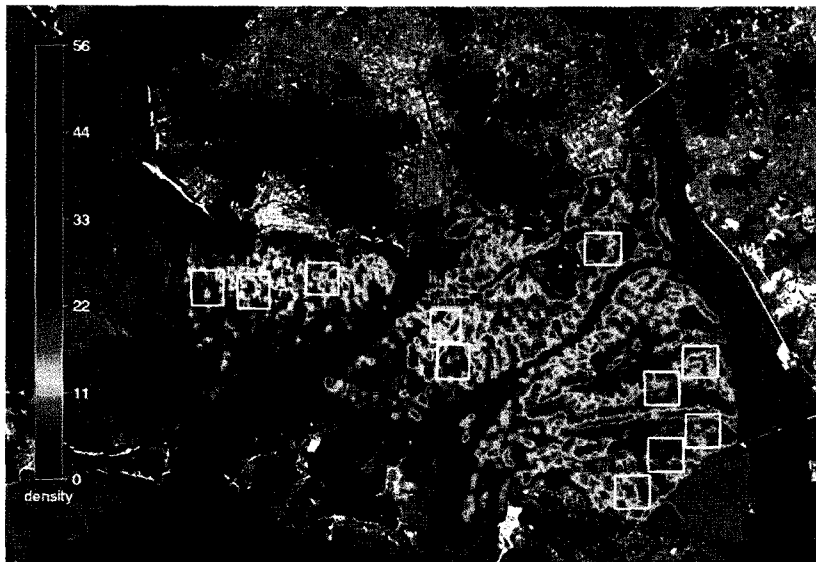


Fig. 11. Map of tidal channel density generated from the vector data of tidal channel.

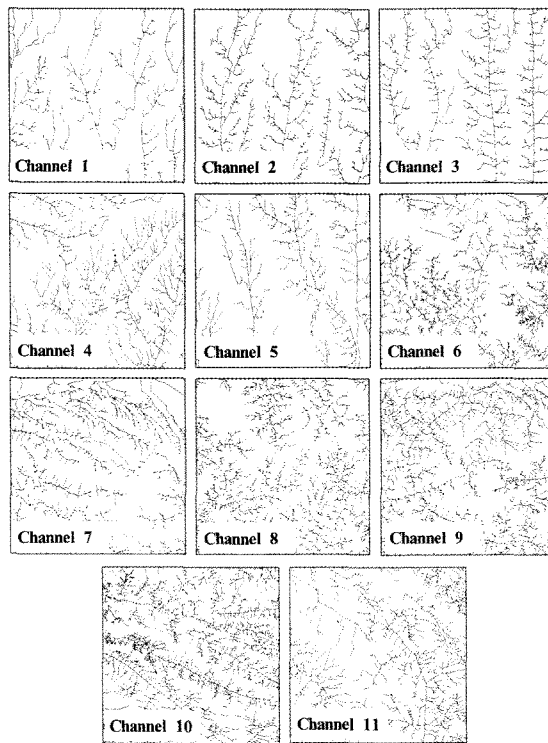


Fig. 12. Tidal channel patterns in mixed flat area (channel 1-5 marked in Fig. 11) and mud flat area (channel 6-11 marked in Fig. 11) (channel area : 1km 1km) (after Eom, 2008).

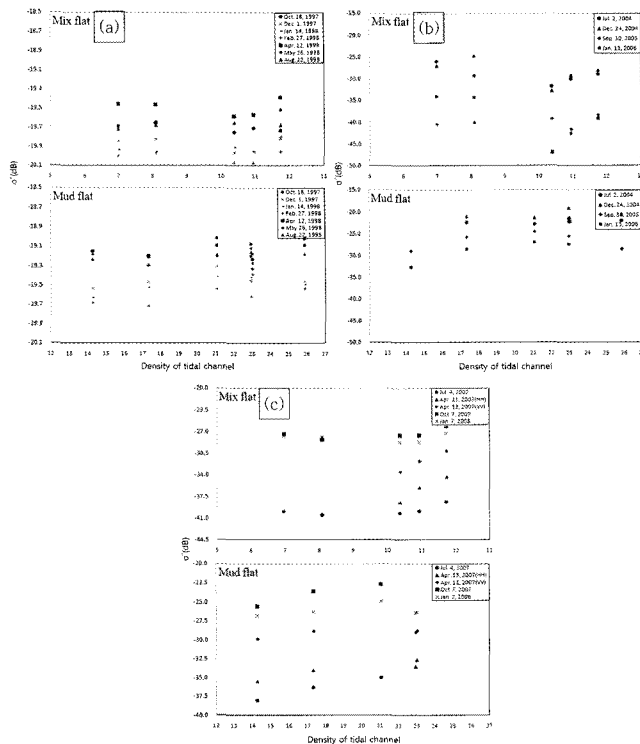


Fig. 13. Relationships between the tidal channel density for each sedimentary facies and backscattering coefficients of (a) JERS-1 SAR, (b) ENVISAT ASAR, and (c) ALOS PALSAR.

택된 조류로 영역에 대한 각 위성 별 후방산란계수의 평균값을 추출하여 비교하였다(Fig. 13). 선택된 조류로에 따라 후방산란계수를 추출한 결과 각 퇴적상에서 조류로의 밀도가 증가할수록 후방산란계수가 다소 증가함을 확인 할 수 있었다. 그러나 일부 밀도가 높은 조류로에서 후방산란계수가 낮게 나타나거나 밀도가 낮은 조류로에서 후방산란계수가 높게 나타나는 경우도 있었다. 이것은 IKONOS 위성영상으로부터 히스토그램을 조절하여 조류로를 추출하는 과정에서, 원래의 조류로 상태와는 다르게 추출된 것이 원인으로 판단된다. 또한 조류로를 추출한 IKONOS 영상과 후방산란계수를 추출한 SAR 영상의 관측 시기가 달라, 이 기간 동안에 발생한 조류로 변화가 반영된 결과로도 판단할 수 있다.

5. 결론 및 토의

이 연구에서는 강화도 갯벌 퇴적환경에 대하여 레이더 자료의 특성과의 상관성을 분석하였다. 레이더 자료인 SAR 영상으로부터 추출한 긴밀도와 후방산란계수는 갯벌 퇴적환경을 나타내는 요소인 표면 거칠기, 유전상수, 지표면의 기하 등의 종합적인 정보를 포함하고 있고 이러한 특성은 갯벌 환경에 따라 다르게 나타난다. 따라서 강화도 갯벌에서 나타나는 각 퇴적환경 요소들과 긴밀도 및 후방산란계수와의 상관관계를 비교·분석하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저, SAR 자료로부터 긴밀도를 추출하여 분석한 결과, 주로 큰 입도의 입자로 구성된 모래 퇴적상에서는 비교적 낮은 긴밀도를 나타냈고 입도가 작은 퇴적물이 많이 함유된 펄 퇴적상에서는 높은 긴밀도를 보였다. 이러한 결과는 입자 사이의 점착력 차이에 의한 것으로, 입도가 작을수록 점착력이 크기 때문에 해수에 의한 퇴적물의 유동성이 작아진다. 따라서 지형 변화가 적어 펄 퇴적상에서 높은 긴밀도를 가짐을 알 수 있다. 특히 펄 퇴적상에서도 고도가 가장 높은 영종도 북부 갯벌은 항상 노출되는 영역이며, 이 지역에서 가장 높은 긴밀도를 나타냄을 알 수 있었다. 이는 조석에 의한 해수의 영향을 거의 받지 않기 때문에 지표 변화가 적어 높은 긴밀도를 나타내는 것으로 보인다. 또한 긴밀도 영상 생성 시 사용된 두 SAR 영상 관측 시기 동안 강우량이 많으

면 낮은 긴밀도를 나타냈는데, 이것은 강우의 영향에 의해서 지표 잔존수가 증가하고 퇴적물의 유동성이 커지므로 지표 변화가 발생하여 낮은 긴밀도를 나타내는 것으로 파악된다. 긴밀도 생성 시 사용된 두 SAR 영상 관측 시 조석상태, 조위 등의 환경상태가 동일한 상태에서 기선거리의 차이가 크면 긴밀도를 저하시켜 낮은 긴밀도를 나타낸다.

SAR 영상으로부터 추출된 후방산란계수와 갯벌 퇴적환경 요소들 간의 관계를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 먼저 노출시간은 시간이 지남에 따라 배수되는 정도를 나타내며 강화도 갯벌의 경우 많은 조류로가 분포하기 때문에 썰물 시 노출시간은 갯벌의 토양 수분함유량에 많은 영향을 준다. 따라서 갯벌 노출시간에 따른 토양 수분함유량변화에 의한 각기 다른 퇴적상의 후방산란계수 변화를 분석한 결과, 모래 퇴적상과 혼합 퇴적상의 경우 노출시간이 증가함에 따라 후방산란계수가 증가 후 감소하였다. 노출시간이 가장 짧으며 바다와 근접한 영역은 해수가 갯벌을 덮고 있어 수분함유량이 높게 나타나지만 전반사로 인하여 낮은 후방산란계수를 보이는 것으로 판단된다. 이 영역을 제외한 갯벌은 노출시간이 증가함에 따라 해수의 배수와 증발에 의해 토양 수분함유량이 감소하기 때문에, 유전상수가 낮아져 후방산란계수가 낮게 나타나는 것으로 보인다. 그러나 펄 퇴적상은 모래 퇴적상, 혼합 퇴적상과는 달리 노출시간이 증가함에 따라 후방산란계수가 점차 증가하였다. 가장 높은 후방산란을 나타내는 영역은, 지형 고도가 높아 대부분 많이 노출되어 있고 노출시간도 길며 한 달에 두 번 정도 조수가 들어오는 영역으로 수분함유량이 적다. 따라서 펄 퇴적상의 후방산란계수는 수분함유량의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다.

갯벌은 토양 수분함유량뿐만 아니라 오목한 지형 사이에 존재하는 해수와 표면을 덮고 있는 해수인 지표잔존수가 많이 존재하여 후방산란계수에 많은 영향을 주지만 정량적인 분석이 어렵기 때문에 강우량 변화에 따른 후방산란계수 변화를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 강우량이 많은 날이 적은 날에 비해 낮은 후방산란계수를 나타내며 영상에서도 어둡게 나타남을 확인하였다. 갯벌 표면에 잔존수가 남아있는 상태에서 강우량이 많아지면 지표 잔존수가 더 많이 증가하게 되고 이로 인해 후방산란의 전반사에 의해 낮은 후방산란계수

가 나타나는 것으로 판단된다.

강화도 갯벌은 조류로가 많이 분포하고 조류로 밀도에 따라 갯벌 표면 거칠기 정도가 다르게 나타나며 후방산란계수에 영향을 미친다. 따라서 같은 퇴적상과 동일하게 노출되는 영역에서 존재하는 조류로를 선택하여 밀도에 따른 후방산란계수를 비교하였고 전반적으로 조류로 밀도가 높을수록 후방산란계수가 높게 나타났다. 조류로 밀도가 증가함에 따라 미세 지형 구조의 복잡성이 증가하여 신호가 표면에서 산란되어 센서로 되돌아오는 양이 증가함에 따라 후방산란계수가 높게 나타난다.

결론적으로 SAR 영상으로부터 추출한 긴밀도와 후방산란계수를 이용한 강화도 갯벌 퇴적환경 특성을 분석한 결과 높은 긴밀도를 갖는 지역은 펄 퇴적상이며 긴밀도가 낮을수록 입도가 큰 입자가 많이 분포하는 지역임을 알 수 있었다. 이는 Rowan (2001)의 결과와도 잘 일치한다. 강화도 갯벌은 다른 갯벌과는 달리 조류로가 많이 발달하여 표층의 특성이 썰물 시 수분함유량의 영향을 많이 받는다. 모래 퇴적상과 혼합 퇴적상은 갯벌의 노출시간이 증가함에 따라 토양 수분함유량이 감소한다. 그러나 펄 퇴적상에서는 지형 고도가 높아 해수의 영향을 많이 받지 않으며 조류로의 분포가 조밀하기 때문에, 토양 수분함유량이 감소함에도 후방산란계수가 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 갯벌은 토양 수분함유량뿐만 아니라 표면에 남아있는 잔존수도 많아 강우량이 많은 날은 지표 잔존수가 증가하기 때문에 비교적 후방산란계수가 낮게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 긴밀도와 후방산란계수의 분석을 통하여 강화도 갯벌 퇴적환경 요소들의 상관관계를 알 수 있었다. 그러나 강화도 갯벌 퇴적환경의 정확한 공간적 분석을 위해서는 추후 각 요소들이 미치는 영향에 대한 정량적인 연구가 필요하다. 이 연구의 결과 각 퇴적요소들의 정량적인 분석을 통하여 각 특성들의 공간적인 주제도를 작성하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 향후 갯벌의 환경 보존 관리 계획 수립과 효율적인 관리 및 사용에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 연구는 공공기술연구회의 “위성자료 공공활용연

구 - 해양분야 위성활용연구 (PG47530)” 사업과 한국해양연구원의 “갯벌 기능성 회복을 위한 퇴적·물리·생태학적 핵심 환경요소 연구 (PE98462)” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 엄진아, 2008. 고해상도 인공위성 영상과 프랙털 분석을 이용한 조건대 수로 특성 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
- 우한준, 제종길, 2002. 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화, *Ocean and Polar Research*, 24: 331-343.
- 채희삼, 2007. 인공위성 SAR 영상과 산란계를 이용한 조건대 갯벌의 후방산란계수 변화 연구, 석사학위논문, 강원대학교.
- 한국해양연구원, 1998. 갯벌의 효율적인 이용과 보존을 위한 연구(2차년도 연차보고서).
- Gade, M., Alpers, W., Melsheimer, C., and Tanck, G., 2008. Classification of sediments on exposed tidal flats in the German Bight using multi-frequency radar data, *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1630-1613.
- Gilmore, M. S., Wilson, E. H., Barrett, N., Civco, D. L., Prisløe, S., Hurd, J. D., and Chadwick, C., 2008. Integrating multi-temporal spectral and structural information to map wetland vegetation in a lower Connecticut River tidal marsh, *Remote Sensing of Environment*, 112: 4048-4060.
- Goetz, S. J., Gardiner, N., and Viers, J. H., 2008. Monitoring freshwater, estuarine and near-shore benthic ecosystems with multi-sensor remote sensing: An introduction to the special issue, *Remote Sensing of Environment*, 112: 3993-3995.
- Nielsen, E. M., Prince, S. D., and Keon, G. T., 2008. Wetland change mapping for U.S. mid-Atlantic region using an outlier detection technique, *Remote Sensing of Environment*,

- 112: 4061-4074.
- Rowan, E. S., 2001. Interferometric Correlation and Intertidal Sediment Properties around the Dornoch Firth, North-east Scotland, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53: 193-204.
- Ryu, J. H., Lee, Y. K., Yoo, H. R., and Park, C. H., 2004. Application of the Landsat TM/ETM+, Kompsat EOC and IKONOS to study the sedimentary environments in the tidal flats of Kanghwa and Hwang islands, Korea, *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing(ISRS)*, Jeju, Korea, October 27-29, pp. 140-143.
- Ryu, J. H., Na, Y. H., Won, J. S., and Doerffer, R., 2004. A critical grain size for Landsat ETM+ investigations into intertidal sediments, A case study of the Gomso tidal flats, Korea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60(3): 480-490.
- Ulaby F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K., 1982. *Microwave remote sensing: Active and passive*, Vol. II, pp. 1062.
- Van der wal, D., Herman, P. M. J., and Wielemaker-Van den dool, A., 2005. Characterisation of surface roughness and sediment texture of intertidal flats using ERS SAR imagery, *Remote sensing of environment*, 98(1): 96-109.