

## 신두리 해안 Side Scan Sonar 해저면 음향영상과 해저퇴적물

김성렬\* · 우한준 · 이용국 · 정갑식 · 재종길 · 박건태 · 정백훈 · 조진형

한국해양연구원, 425-744 경기도 안산시 사동 1270

### Sea-bottom Sediments and Seafloor Acoustic Image by Side Scan Sonar on Sindu-ri Offshore

Seong-Ryul Kim\* · Han-Jun Woo · Yong-Kuk Lee · Kap-Sik Jeong  
Jong-Geel Je · Gun-Tae Park · Baek-Hun Jung · Jin-Hyung Cho

Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan 425-744, Korea

**Abstract :** Seafloor acoustic image data using the side scan sonar system were gathered on the Sindu-ri offshore near the Taean peninsula, middle western Korea. The relationship between the back-scattering acoustic intensity and the sea-bottom sediment properties was studied. And these two data sets were compared and interpreted with the water depth, respectively. Most of sediment properties were correlated well to the acoustic intensity, however the distribution patterns of the sea-bottom sediment and the seafloor acoustic image were not similar to each other except the rocky bottom area. The water depth was not only influential on the distribution pattern of seafloor acoustic image but also showed a linear relation with the sediment properties distribution.

**Keywords :** side scan sonar, seafloor acoustic image, back-scattering, sea-bottom sediment

**요약 :** 사이드 스캔 소나 시스템을 이용하여 태안반도 부근 신두리 해역에서 해저면 음향영상 자료를 획득하였다. 후방산란 음향강도와 해저퇴적물의 물성에 대한 상호관계를 연구하였다. 그리고 위의 두 자료 모두 해저수심과 각각 비교 해석 하였다. 해저퇴적물의 물성 대부분은 음향강도와 좋은 상관관계를 보이고 있지만, 퇴적물의 분포양상은 암반노출 지역을 제외하고는 해저면 음향영상과 정확하게 일치하지는 않았다. 해저수심은 해저면 음향영상의 분포형태에 영향을 미치고 있었을 뿐만 아니라, 해저퇴적물의 물성 분포에서도 선형적인 관계를 보이고 있었다.

**주요어 :** 사이드 스캔 소나, 해저면 음향영상, 후방산란, 해저퇴적물

## 서론

신두리 해안은 충청남도 태안군 원북면에 위치하고 있으며, 육지 쪽은 비교적 규모가 크고 보존 상태가 양호한 해안사구와 인접해 있다. 만의 형태인 해안은 길이가 약 4km이고 폭이 약 1km이며, 남쪽과 북쪽 끝은 방조제가 건설되어 있다. 인접해역은 대체로 모래가 우세하며, 간조 때에는 넓은 모래 갯벌과 해빈이 노출되어 해안사구가 형성되기에 좋은 조건을 가진 지역이다.

신두리 해안사구는 생태적으로 보전할 가치가 높고 자연성이 우수하다는 것이 알려지면서 환경부, 해양

수산부, 문화재청, 학계, 환경 및 언론단체 등에서 이의 보전대책이 활발히 논의되었다. 해양수산부에서는 2000년 8월에 연안관리법에 의한 연안통합관리계획에 신두리 지역을 생태계보전대상지역으로 지정토록 계획을 수립하여 고시하였으며, 환경부에서는 2000년 12월에 해안사구 보전추진계획을 수립하였다. 문화재청에서는 2001년 8월에 사구 원형이 잘 보전되어 있는 신두리 사구 중앙부와 북쪽지역을 천연기념물(가)지정 하였으며, 2001년 12월에 원북면 신두리 산 305-1번지 일대 약 30만평을 국가지정문화재(천연기념물)로 지정·고시하였다.

이에 따라 해안사구 보전을 위하여 해양수산부에서 해안생태계 보호지역지정을 추진하고 있는 신두리 해역에서 퇴적환경 파악을 위한 현장조사가 수행되었다.

\*Corresponding author: srkim@kordi.re.kr

주요 조사항목은 해저퇴적물의 물성과 분포형태, side scan sonar에 의한 해저면 음향영상, 그리고 해저지형 파악을 위한 수심측량 등이었다. 이 연구는 해저퇴적물의 분석결과와 해저면 영상자료를 비교하여 연구해역의 퇴적환경을 논하고, 해저환경과 수심분포와의 공간적인 상관성을 정량적으로 해석하는 것이 목적이다. 해저퇴적물 분포환경을 음파를 이용하여 퇴적학적인 퇴적상의 분류를 시도한다는 것은, 연속적인 관찰이라는 측면에서 광역적으로 해저면의 형태와 퇴적물 분포양상을 조사하는 또 하나의 연구방법이 될 수 있다.

## 연구자료

연구해역의 해저퇴적물 분포특성을 파악하기 위하여 2002년 7월에 만조시 선박을 이용하여 Grab sampler로 27정점에서 표층퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 해저면 음향영상 현장조사는 미국 EG&G 사의 모델 SMS 260인 Side Scan Sonar 시스템을 사용하여, 2002년 7월 9일부터 7월 13일까지 50m 간격으로 15개의 주탐사측선과 5개의 보조탐사측선이 수행되었다(Fig. 1). 그 밖에 추가적으로 정확한 탐사위치를 위한 DGPS 시스템(Trimble, USA)과 고해상의 정밀음향측심기(DE719D MK2, Raytheon, USA)가 사용되었다. 탐사선은 현지에서 임차한 선박(5톤급)을 사용하였으며, 항해속도는 3knot를 유지하면서 해안선과 평행하게 북북동-남남서 방향으로 현장자료를 획득하였다.

해저면 탐사시 음파의 주사범위(scan range)는 조사측선 간의 해저면 음향영상이 충분히 겹치도록 좌현과 우현 각각 75m 폭으로 운영되었다. 수중예인체(tow-fish)는 탐사선 후미에서 예인하는 것이 일반적이나 수심이 낮은 관계로 선수에서 예인하였다. 이러한 변칙적인 운영방법은 선박이 진입할 수 있는 수심범위 내에서는 언제나 현장자료 획득이 가능하다는 장점은 있으나, 예인케이블의 방출길이가 짧기 때문에 파도에 의한 선박의 움직임이 수중예인체에 그대로 전달되므로 안정성 문제 때문에, 자료후처리 과정에서 경사거리 보정에 각별한 주의가 필요하다.

## 자료처리

### 해저퇴적물

현장에서 채취된 시료는 실험실로 옮겨진 후 약

5g을 1,000ml 비이커에 담아 조개껍질 등의 탄산염 성분 물질에 의한 오차를 없애기 위해 0.1N 염산(HCl)으로 반응시켜 탄산염을 제거하였다. 그리고 유기물을 제거하기 위하여 10% 과산화수소수(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)로 24시간 이상 반응시켰다. 입도 분석이 준비된 시료는 4φ체를 이용하여 습식체질(wet sieving)에 의해 조립질과 세립질 퇴적물로 분리하였다. 4φ 이하의 사질 시료는 0.5φ 간격으로 Gradex 2000 입도분석기로 약 10분간 체질한 후 입도 등급별로 무게 백분율을 구하였다. 4φ 이상의 니질 시료는 전체를 대표할 수 있는 시료 2g을 취해 0.1% calgon 용액을 80ml 넣고 초음파 분쇄기와 자기진동기로 시료를 균일하게 분산시킨 후, X-선 자동 입도분석기(Sedigaph 5100)를 사용하여 입도무게 백분율을 구하였다. 입도별 무게 백분율은 Folk and Ward(1957)의 Inclusive Graphic Method에 의하여 평균입도, 분급도, 왜도, 첨도 등의 통계변수들을 구하였다.

### 해저면 음향영상

자기테이프기록계(magnetic tape recorder, DR-111T/TEAC, USA)에 수록된 아날로그 현장자료는 샘플링 간격 10 kHz로, 좌·우현 각각 1,024 개씩 구성되도록 디지털 자료로 변환하였다. 따라서 자료군의 경사거리는  $((1,024/10,000\text{Hz}) \times 1,500\text{m/s})/2 = [76.8\text{m}]$ 가 되며 현장조사시 탐사 폭 75m를 만족한다. 이번 조사에서 디지털로 변환된 자료의 양은 약 207 MByte 정도이었다.

수중예인체는 본체와 예인케이블로 연결되며 탐사선 후미에서 예인되므로 영상기록과 탐사선의 위치의 차이가 있다. Fig. 1에서 제시된 조사항목은, 기존의 연구결과(과학기술처, 1993; 김성렬 외, 1993, 1997; 김성렬, 2000)를 적용하여, 탐사선의 위치자료로부터 수중예인체의 위치자료로 변환된 좌표이다. 이 위치자료는 해저면 음향영상 모자이크 도면처리에 직접 사용된다.

Side scan sonar 음파형태는 수중예인체의 진행방향에 대하여 직각으로 부채꼴 모양이며 빔폭(beam width)은 1.2°로 얇은 두께를 갖는다. 따라서 음파가 양쪽 측면으로 해저면을 훑어(scanning) 나가는 얇은 띠 모양의 음향조사면(音響照射面, insonified area)은 여러 개의 단위조사역(單位照射域, foot-print area)으로 구성된다. 이들의 모양과 크기는 Malinverno et al.(1990)이 제안한 방법으로 계산한 다음, 실제의 지

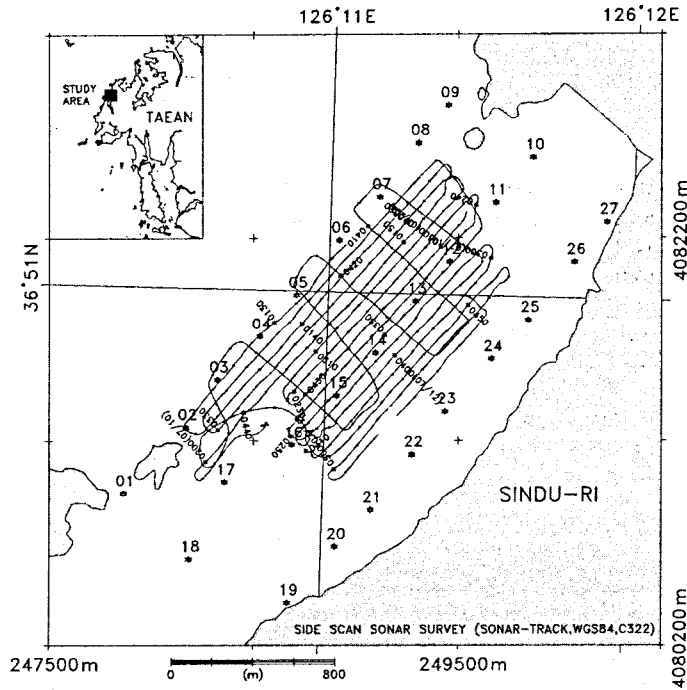


Fig. 1. Side scan sonar survey track and sea-bottom surface sediment sampling location.

형적 위치에 그 음향강도 값을 투영함으로써 해저면 음향영상자료를 도면화 하였다. 각각의 단위조사역의 위치가 계산되었다고 하더라도 이들이 등 간격으로 분포하지 않기 때문에 컴퓨터의 최소분해력(最小分解域)에 해당되는 단위격자(pixel) 안에는 여러 개의 단위조사역 자료가 반복해서 투영된다. 따라서 최종적으로 투영된 자료가 단위격자의 대표값으로 표현되는 모순된 결과가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 한 개의 격자자료(grid data) 안에 포함되는 여러 개의 단위조사역 자료는 통계치리하여 격자 대표값을 사용하였다(김성렬 외, 1994).

결과도면은 세계측지계(World Geodetic System, WGS-84) 좌표로 작성하였다. 경위도 좌표계를 사용하면 격자간격이 일정하지 않기 때문에 WGS-84 좌표계를 UTM 직각좌표계로 환산하여 사용하였다.

## 분석결과

### 퇴적물의 분포특성

연구해역의 남쪽은 자갈 또는 노출암반이 분포하는 지역이어서 정점 01, 02, 18에서는 해저퇴적물 시료를 채취하지 못하였다(Table 1). 해저퇴적물의 지역적

인 분포특성을 분석하기 위하여, 해저퇴적물의 퇴적상(A)과 퇴적물을 구성하는 모래(B), 실트(C), 펄(D)의 함량, 평균입도(E), 분급도(F), 왜도(G), 그리고 첨도(H)를 등치선으로 각각 도시하였다(Fig. 2).

해저퇴적물의 퇴적상(sedimentary facies)은 모래(sand), 모래펄(sandy mud), 자갈이 약간 함유된 모래( slightly gravelly sand), 펄모래(muddy sand) 등 4개로 구분되었다. 모래 퇴적상은 해안선에 인접한 지역에서 해안선과 평행하게 일정한 폭으로 발달되어 있다. 그리고 북쪽 방파제 앞에서 외해쪽으로 확장하다가 지형적 영향으로 단절되고 있으나, 남쪽은 수로까지 확장되면서 외해로 연결되고 있다. 모래펄 퇴적상은 연구지역 외해의 중앙부와 북부에 일부 분포한다. 자갈이 약간 함유된 모래 퇴적상은 해안 중앙부 인근에서 비교적 작은 범위로 분포한다. 펄모래 퇴적상은 연구지역의 중앙해역에서부터 외해 쪽으로 그 범위가 확장되면서 상대적으로 넓게 분포한다(Fig. 2(A)).

해저퇴적물을 구성하고 있는 모래와 실트 그리고 펄의 함량에 대한 분포특성은 모두 비슷한 형태를 보이고 있다. 실트와 펄의 경우 연구해역의 중앙부에서 대체로 높은 함량을 보이고 있는 반면, 모래의 경

Table 1. Sea-bottom surface sediment properties.

Sample No.	Composition (%)				Sediment Type by Folk	Statistical Parameters			
	Gra.	Sand	Silt	Clay		Mz	$\sigma_1$	Sk <sub>k</sub>	K <sub>G</sub>
01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03		98.01	1.99		S	1.55	0.52	2.89	15.89
04		66.75	16.39	16.87	mS	4.14	3.34	1.25	3.15
05		14.49	48.76	36.75	sM	7.23	2.96	0.15	2.04
06		53.46	25.09	21.45	mS	4.96	3.30	0.80	2.34
07		41.30	32.95	25.75	sM	5.67	3.43	0.52	2.04
08		90.36	6.30	3.34	S	2.79	1.78	3.32	15.16
09		86.74	7.71	5.55	mS	3.07	2.15	2.85	10.92
10		93.08	6.92		S	2.06	0.72	1.72	6.32
11		88.19	7.94	3.87	mS	2.68	1.89	3.03	12.54
12		67.90	17.46	14.64	mS	4.20	3.12	1.37	3.60
13		79.69	12.43	7.88	mS	3.40	2.49	2.07	6.61
14		63.79	22.33	13.88	mS	4.41	2.85	1.29	3.66
15		88.17	6.36	5.46	mS	3.38	2.02	2.99	11.83
16		81.33	9.70	8.97	mS	3.72	2.40	2.16	6.75
17		63.72	18.78	17.50	mS	4.64	3.08	1.17	3.04
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19		94.81	5.19		S	1.83	0.67	2.24	9.58
20		97.04	2.96		S	2.05	0.55	1.96	8.89
21		99.91	0.09		S	2.27	0.41	-1.99	16.28
22		99.14	0.86		S	1.91	0.47	1.04	8.88
23		98.98	1.02		S	2.28	0.46	-0.40	11.25
24	0.21	99.74	0.05		(g)S	1.96	0.53	-1.73	10.98
25		99.96	0.04		S	2.06	0.41	-0.66	7.83
26		95.04	4.96		S	1.77	0.68	2.31	9.60
27		97.65	2.35		S	1.61	0.55	2.50	13.22

Mz: mean grain size ( $\phi$ ),  $\sigma_1$ : sorting ( $\phi$ ), Sk<sub>k</sub>: skewness, K<sub>G</sub>: kurtosis

우에서는 반대로 나타나고 있다. 이러한 현상은 거울상(mirror image) 효과로서 구성퇴적물의 함량비가 상호보완적인 관계에 있다는 것을 단적으로 설명하고 있다. 신두리 연안에 모래사구가 잘 발달되어 있다는 점에 초점을 둔다면 점차적으로 외해로 향하면서 모래의 함량은 감소하지만 상대적으로 실트와 펄의 함량은 증가하는 것이 이 연구해역의 퇴적물 분포특성이라고 볼 수 있다(Fig. 2(B)~(D)).

해저퇴적물의 평균입도(mean grain size)는 1.55~7.23 $\phi$  범위로 나타나지만 대부분이 5.00 $\phi$  이하의 모래와 펄모래 퇴적물이다. 연구해역 외해의 중앙부인 정점 5는 7.23 $\phi$ 로 가장 세립하며 외해의 남부인 정점 3은 1.55 $\phi$ 로 가장 조립하다. 퇴적물의 평균입도는 일반적으로 해안선에서부터 외해로 세립화되는 경향을 보인다. 해안선에서 연구해역 중앙부까지는 2.0~3.5 $\phi$  범위로 해안선과 거의 평행하게 외해쪽으로

세립화되고 있다. 또한 연구해역의 남쪽인 수로해역에서는 내륙을 향하면서 조립화되는 경향을 보이고 있다(Fig. 2 (E)).

해저퇴적물의 분급도(sorting)는 해안선에서 외해로 불량해지는 경향을 보인다. 분급도가 양호(1.0 $\phi$  이하)한 지역은 해안선에 가까운 지역이며 2.0 $\phi$ 까지는 해안선과 거의 평행하게 나타나고 있다. 연구해역 중앙부에서 외해 쪽으로는 불량(1.0 $\phi$  이상) 또는 매우 불량(3.0 $\phi$  이상)한 분급도로 넓게 분포하고 있다. 남서쪽의 자갈 또는 노출암반이 분포하는 해역에서는 0.5 $\phi$ 까지 분급도가 급하게 양호해지고 있으나, 남쪽의 내륙과 연결되는 수로입구 지역에서는 다시 3.0 $\phi$  이상의 불량한 분급도가 나타나고 있다(Fig. 2(F)).

왜도(skewness)란 어떤 분포자료의 비대칭성을 측정하는 값이며, 첨도(kurtosis)는 자료의 분포형태가 얼마나 뾰족한가를 측정하는 값이다(조성권 외, 1995). 연

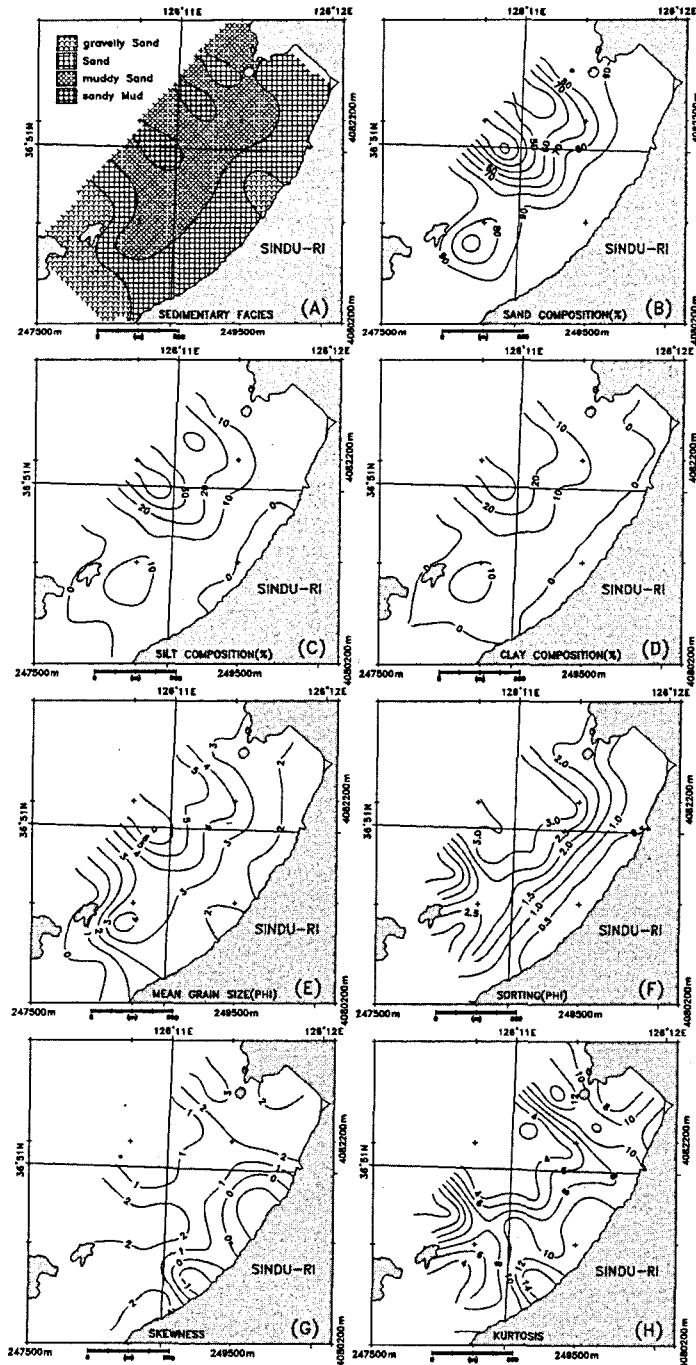


Fig. 2. Distribution patterns of sea-bottom surface sediment properties; sedimentary facies (A), composition of sand (B), silt (C), and clay (D), mean grain size (E), sorting (F), skewness (G), and kurtosis (H).

구해역에서 왜도의 경우 연안에 국한하여 극히 일부 지역에서만 음의 값이며 연구해역 대부분이 양의 값을 보인다. 그러나 지역적인 특성으로 설명할 수 있

는 분포형태는 나타나지 않는다(Fig. 2(G)).

침도의 경우 연구해역의 중앙부와 남쪽 수로해역에서 분급도와 유사한 형태의 분포범위를 보인다. 분급

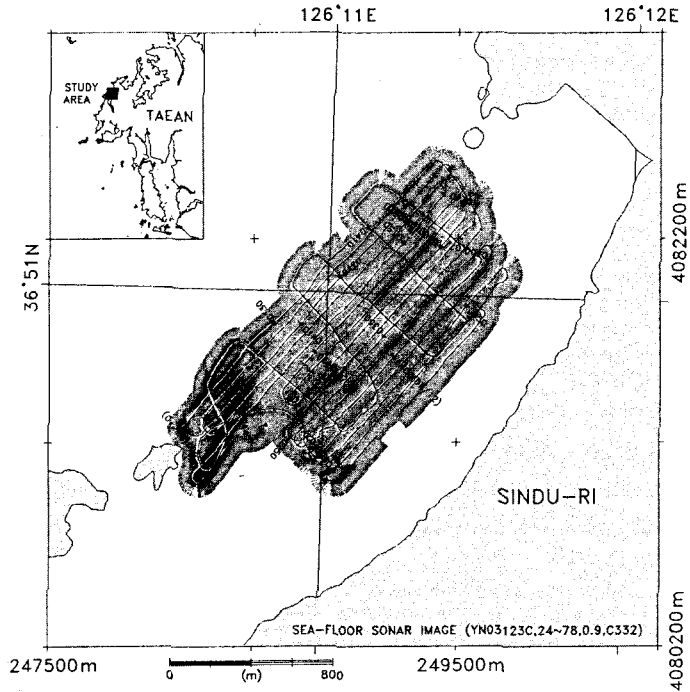


Fig. 3. Seafloor side scan sonar mosaic image map. Track line is tow-fish position recalculated by using sonar data and boat navigation.

도가 3.0φ 이상으로 불량한 해역에서 침도는 낮게 나타나고 있으며, 반면에 분급도가 약 0.5φ 정도로 양호한 자갈 또는 암반노출 지역으로 추정되는 해역과 해안선 주변해역에서는 높은 침도를 보이고 있다. 따라서 분급이 양호한 퇴적물일수록 침도가 높게 나타난다는 관계는 이 연구해역에서 해저퇴적물의 분포특성과 물성관계를 이해하는 하나의 척도가 될 수 있음을 시사한다(Fig. 2(H)).

### 해저면 음향영상

음향영상 모자이크 결과도면(Fig. 3)은 신두리 연안 해역에서 몇 가지 해저면의 특징을 단적으로 잘 나타내고 있다. 그림에서 가장 검게 나타나는 부분은 모래로 피복된 노출암반이 분포하는 지역이다. 중간 정도의 짙은 부분은 소량의 펄이 함유된 모래가 분포하는 지역이며, 가장 얇게 나타나는 부분은 좀더 많은 양의 펄을 포함하고 있는 모래 분포지역이다. 특히 모래로 피복된 암반 분포지역은 인근의 육상(섬)의 뿌리가 바다 쪽으로 연장되고 있는 것으로 해석된다.

전반적으로 어두운 영상을 보이는 이유는 조사지역

의 대부분이 모래질 퇴적물로 구성되어 있기 때문이다. 특히 수중예인체의 직하부(항적 부분)에서 나타나는 미약한 반사신호가 전체적인 모자이크 영상에 상당한 영향을 주고 있다. 일반적으로 side scan sonar 영상기록에서는 항상 가운데 부분의 기록이 부족하며 연결성이 결여되는 특징이 있기 때문에, 경우에 따라서는 이 부분을 강제적으로 조정하는 경우도 있다. 그러나 신두리 해역은 대부분이 모래질 퇴적상이므로 영상기록을 임의로 조정할 경우 중요한 해저면 정보를 놓칠 가능성이 있다. 따라서 있는 그대로 놓고 전체적인 경향을 분석하는 것이 효과적이다.

### 해저지형

해저면 음향영상 탐사시 함께 획득된 수심측량 자료의 분석결과는 Fig. 4와 같다. 조석계를 설치하여 정확한 조석보정을 실시한 결과는 아니지만, 최간조 때에 획득된 측심자료를 기준으로 검측선(cross check line)의 수심변화 차이를 이용하여 시간별 보정치를 적용하여 측심자료를 보정하였다. 따라서 조사해역의 해저지형에 대한 특징을 해석하기에는 충분하다.

연구해역의 전체적인 수심분포 범위는 주로 2~5m

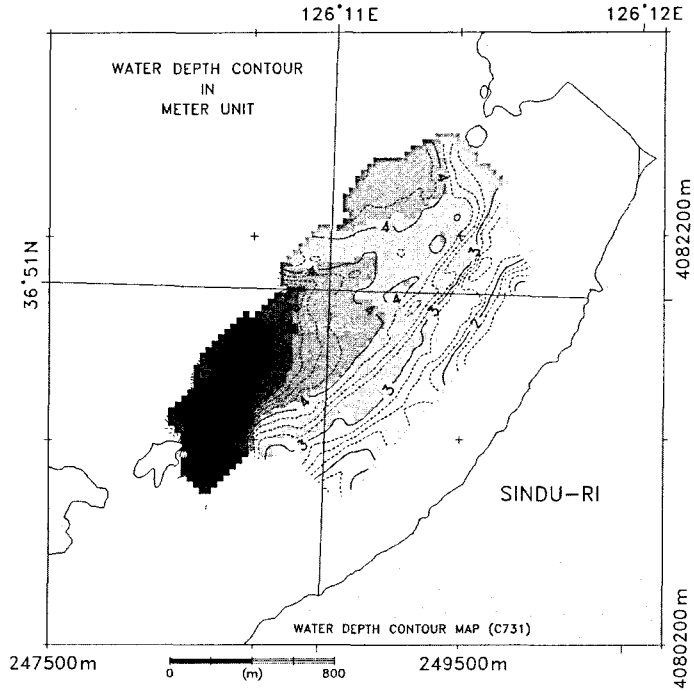


Fig. 4. Water depth contour map.

정도이며 남서부 해역에 국한하여 약 10m까지 급격하게 깊어진다. 수심 약 3m까지는 해안선과 평행한 지형변화를 보이며 그 이후 외해 쪽으로는 완만하고 평탄한 구조를 보이고 있다. 수심 10m까지 깊어지는 지역은 지형적인 연결성 없이 독립적으로 움푹 패인 형태를 보이고 있다. 이러한 형태는 퇴적물이 쌓여 있는 지역은 아니며 수로 역할을 하는 암반 노출지형으로서 바로 옆의 육상(섬)으로 연결되는 기반암의 연장부이다. 그리고 조사해역의 서쪽 중앙부에 북동 방향으로 미약하지만 해저골 형태의 지형이 발달되어 있다.

해저지형으로 조사해역의 특징을 구분한다면, 연안선에 나란한 등수심 구역, 조사해역의 중앙을 동서로 나누었을 때 비교적 평탄한 북쪽과 경사지형인 남쪽 등 세 구역으로 나눌 수 있다. 특히 북쪽 구역은 전체적으로는 평탄한 지형이지만 국부적으로 기복(relief)이 있는 특징을 보이고 있다.

## 토 의

### 음향퇴적상

후방산란 음향강도를 기준으로 음향퇴적상을 분류

한 결과는 Fig. 5와 같다. 연구해역의 특징(Fig. 3)이 확인되듯이 음향퇴적상은 3가지로 구분이 가능하다. 전체적인 음향강도 분포는 24dB에서 78dB까지의 범위를 보이고 있다. 물론 이 값은 상대적인 값이다. 비교적 강하게 나타나는 63dB 이상을 갈색 구역으로 표현하였고, 약하게 나타나는 47dB 이하를 노란색으로 그리고 가운데인 48~62dB 구간은 청색으로 각각 표현하였다. 탐사선의 탐사측선을 따라서 백색으로 표현되는 부분은 수중예인체의 직하부로서 자료가 연결되지 않는 부분이다. 특히 중간 세기의 음향강도 구간은 전체자료의 60% 이상을 차지하지만 지역적인 분포특성과 퇴적물 분석결과를 고려했을 때 더 이상의 구분은 불가능하다.

후방산란 음향강도의 분포형태를 히스토그램과 누적분포곡선으로 통계처리한 결과 대부분의 자료는 48~49dB를 전후하여 집중적으로 분포하고 있으며, 그 외 범위에 분포하는 자료는 많지 않다(Fig. 6). 연구해역의 퇴적물이 대부분 모래질 퇴적물로 구성되어 있기 때문이다. 그 결과 앞에서도 언급되었지만 해저면 음향영상 결과도면(Fig. 3)에서 음영의 구분이 뚜렷하지 않고 전반적으로 어둡고 진한 색상으로 표현된다. 위에서 47dB를 하한선 경계값으로 음향퇴적상

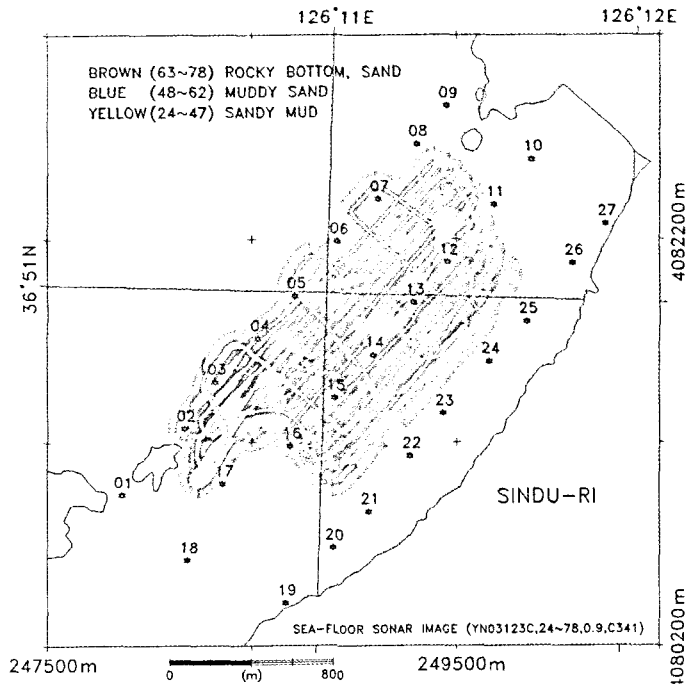


Fig. 5. Seafloor side scan sonar mosaic image. Depending on back-scattering intensity, distribution pattern of sea-bottom surface sediment is acoustically divided to gray scaled 3-colors. Numbers with symbol are sediment sampling locations.

을 분류한 이유는 히스토그램과 누적분포곡선에서 47dB를 경계로 분포곡선의 기울기가 급격하게 바뀌고 있기 때문이다. 그러나 상한선 경계값인 63dB 부근에서는 뚜렷한 경계조건을 찾을 수 없다. 이 값은 제일 강한 78dB에서부터 차례차례 음향강도의 범위를 넓히기면서 갈색부분이 연구해역의 특징을 가장 적절히 표현하는 경계값을 찾아낸 결과이며, 63dB가 명확한 경계값이 되는 것은 아니다. 63dB 부근의 다른 값을 선택하더라도 자료의 양이 많지 않기 때문에 해저면 음향영상 결과도면에서 차지하는 분포영역은 비슷하게 표현된다.

음향퇴적상의 입장에서 갈색은 암반 또는 모래로 피복된 노출암반 구역에 해당되며, 노란색은 펄을 일부 함유하는 구역에, 그리고 청색은 펄의 함량은 적지만 그 함량이 다양할 것으로 판단되는 나머지 대부분의 구역에 각각 해당된다. 이 결과를 해저퇴적물의 퇴적상과 대비해 본다면, 갈색구역은 자갈모래에, 노란색구역은 모래펄에, 그리고 청색구역은 모래 또는 펄모래 퇴적상에 각각 해당되지만 해저면 음향영상의 분포형태와 정확하게 일치하지는 않는다. 해저

퇴적물의 채취시료 정점수가 절대적으로 부족했다는 것이 일차적인 원인이라고 판단된다. 더구나 상당수의 시료채취 위치가 영상자료와 일치하지 않으며, 퇴적상을 분류하는 방법에 있어서 근본적인 차이가 있기 때문이다. 해저퇴적상은 퇴적물을 채취하여 실내 분석방법으로 구성퇴적물의 함량비에 따라 구분하는 것이 일반적이다. 그러나 공간적인 분포가 균등하도록 퇴적물을 채취한다고 하더라도 자료의 연속성에 한계가 있으며, 특정한 퇴적물이 비정상적으로 분포하는 경우도 얼마든지 있다. 이의 보완책으로 연속적인 탐사방법 중 하나로서 해저면 음향영상 탐사를 수행하게 된다. 그러나 음파탐사의 경우 반사음향의 강도를 가지고 “어디까지가 모래퇴적물이고 어디부터는 펄퇴적물이다.”라는 구분이 다소 모호하다. 즉 퇴적학적 입장에서 함량비와 도표(또는 그래프)로 퇴적상의 구분이 가능하지만, 음향영상만 가지고는 퇴적상을 구분하는 특별한 기준이 없기 때문이다. 따라서 해저퇴적상이 해저영상과 완전히 일치하는 결과를 얻기는 쉽지 않다. 비슷한 경향을 가지고 부분적으로 일치하는 경향을 보이는 것이 일반적이다.



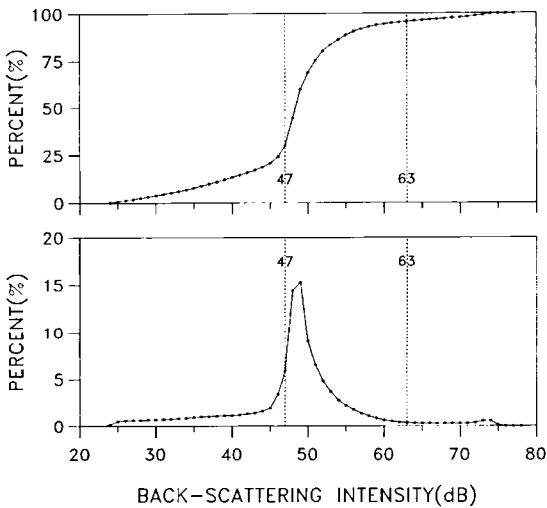


Fig. 6. Statistical distribution patterns of back-scattering intensity.

**후방산란과 해저퇴적물**

해저퇴적물의 퇴적상이 지역적인 분포형태로는 음향퇴적상과 잘 일치하지 않는 이유를 확인하기 위하여, 해저면 음향영상자료와 해저퇴적물 채취위치가 일치하는 12개의 정점(Fig. 5)을 대상으로 퇴적물성과 음향영상의 기초자료가 되는 후방산란 음향강도와 의 관계를 검토해 보았다(Fig. 7). 퇴적물성에 대비되는 음향강도는 46~63dB의 분포범위를 보이지만 자료의 대부분이 48dB를 전후하여 집중되어 있어서 일반적인 상관관계를 판단하기에 다소 어려움이 있다.

퇴적물시료가 좀더 많아진다 하더라도 Fig. 6에서도 알 수 있듯이 그 결과는 크게 달라지지는 않을 것으로 판단된다. 그러나 이들의 상호관계는 전반적으로 어떤 경향성을 보이고 있다. 후방산란 음향강도는 모래의 함량, 왜도, 침도와는 서로 비례하는 관계를 보이고 있으며, 실트, 펄, 평균입도, 분급도와는 반비례하는 관계를 보이고 있다. 실트의 경우 모래와는 거울상(대칭관계)으로 나타나는 것이 일반적이다. 따라서 음향강도와 모래함량의 관계가 확인되면 실트함량은 음향강도와는 역상관 관계에 있는 것으로 간주하게 된다.

해저환경이 이번 연구해역과 비슷하게 노출암반과 모래퇴적물로 구성되어 있는 성산포 해역 연구결과(김성렬 외, 1987)에서는 분급도와 가장 양호한 관계가 있다고 제시하고 있다. Side scan sonar 해저영상의 경우 해저면의 거침도(roughness)에 따라 후방산란 음향강도가 결정되며, 거침도는 평균입도와 분급도에 직접적인 관계가 있다(Clay *et al.*, 1964; Mckinney and Anderson, 1964). 모래나 자갈 등과 같이 조립질 일수록 반사되는 음향강도는 높게 나타나며 그 결과 짙은 영상으로 표현된다. 따라서 해저퇴적물의 분포환경이 모래질 퇴적물로만 구성될 경우 음향강도는 비교적 좁은 폭으로 밀집된 형태의 분포범위를 갖는다(Fig. 6).

후방산란 음향강도와 퇴적물성의 공간적인 분포관계를 검토해 보면, 해저퇴적물의 퇴적상(Fig. 8(A))은 자갈모래상(gravelly Sand)인 갈색부분과 모래필상

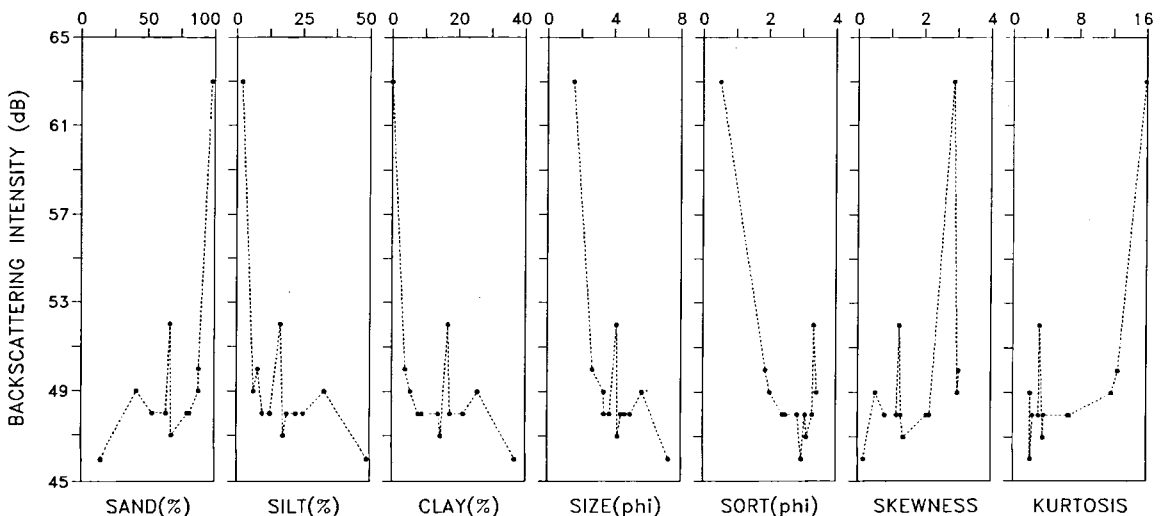


Fig. 7. Relationship between back-scattering intensity and sea-bottom surface sediment properties.

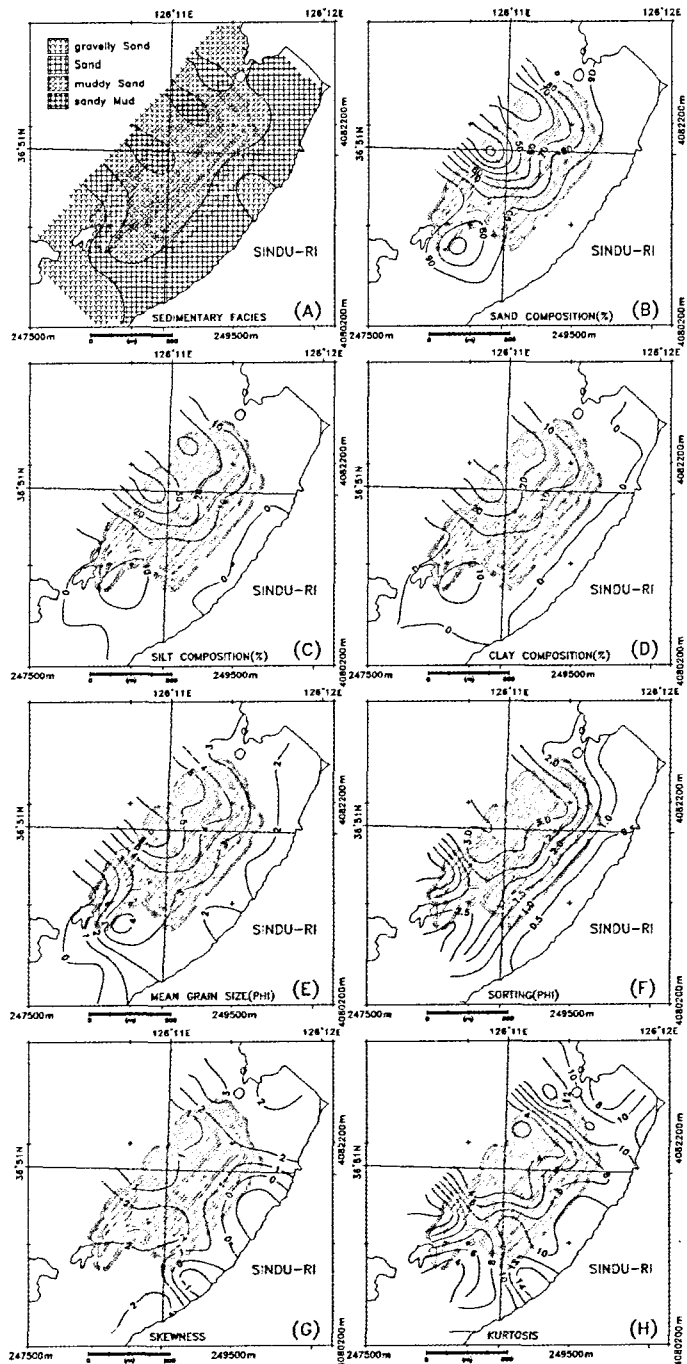


Fig. 8. Distribution patterns of sea-bottom surface sediment properties compared with seafloor sonar image; sedimentary facies (A), composition of sand (B), silt (C), and clay (D), mean grain size (E), sorting (F), skewness (G), and kurtosis (H).

(sandy Mud)의 일부에서 노란색부분과 일치하고 있으나, 나머지 대부분의 필모래상(muddy Sand)으로 구분되는 지역에서는 청색과 노란색이 혼재하고 있다.

모래(Fig. 8(B)), 실트(Fig. 8(C)) 그리고 펄(Fig. 8(D))의 함량관계에서는 갈색부분과 연구해역의 외해 중앙부인 노란색부분에서 비교적 잘 일치하고 있다.

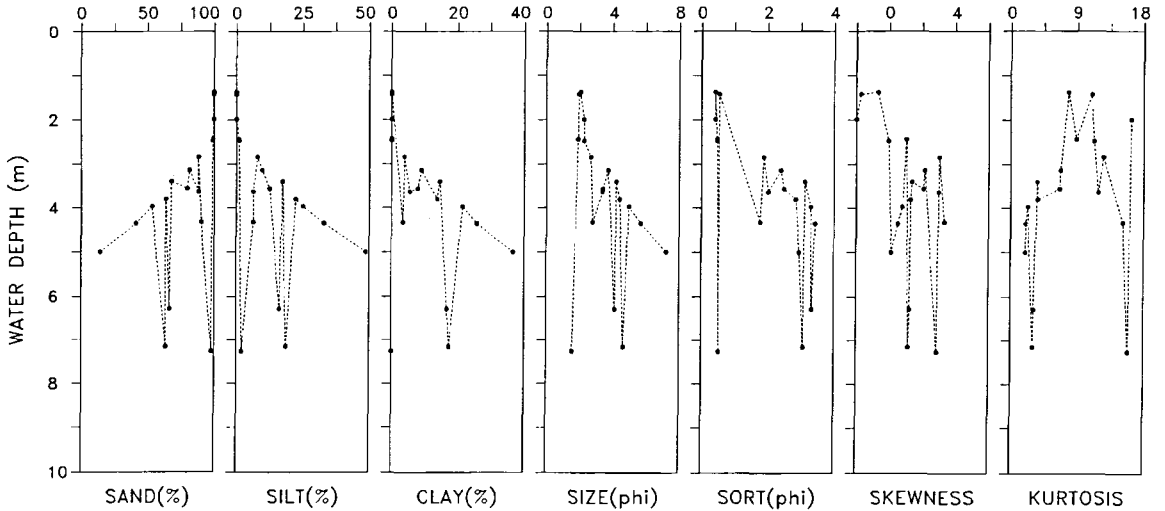


Fig. 9. Relationship between water depth and sea-bottom surface sediment properties.

평균입도(Fig. 8 (E))의 경우  $3\phi$  이하인 갈색부분에서 정확히 일치하고 있으며 노란색이 집중적으로 분포하는 연구해역 중앙부에서 세립화되고 있다. 분급도(Fig. 8(F))는 갈색부분에서 비교적 급한 변화를 보이면서 공간적인 일치를 보이고 있다. 그러나 그 밖의 지역에서는 외해로 향하면서 분급도는 점차 불량해지고 있으나 해저영상 분포양상과는 무관하다. 왜도(Fig. 8(G))에서는 뚜렷한 연관성을 찾을 수 없다. 첨도(Fig. 8(H)) 역시 갈색부분에서 일치하고 있다. 첨도의 의미를 퇴적물 입자크기가 아니라 입자형태이라는 관점에서 해석한다면, 청색과 노란색부분에 비하여 갈색부분에 분포하는 퇴적물이 좀더 비슷비슷한 모양의 퇴적물들로 구성되어 있다고 판단된다. 즉 갈색부분을 제외하면 해안선 주변해역 보다 외해로 향할수록 퇴적물의 모양은 점차적으로 다양해지고 있음을 암시한다.

해저영상과 퇴적물성의 공간적인 분포관계에서 특징적으로 나타나는 경향은, 갈색부분이 비교적 잘 일치하고 있다는 것과 퇴적상(Fig. 8(A))과 왜도(Fig. 8(G))를 제외하고는 모든 물성분포 등치선들이 북동-남서 방향으로 연구해역의 중앙을 가로지르는 파동형태를 보인다는 점이다. 이 등치선들은 대체적으로 해저영상의 노란색부분과 일치하고 있다. 만약에 퇴적물시료 채취정점(Fig. 5)이 해저영상자료에 좀더 많이 포함될 수 있었다면 파동형태의 등치선들은 노란색의 해저영상 분포범위와 일치하는 결과를 보였을 것으로 판단된다. 또한 특이하게 비교되는 결과는 퇴적물시

료 [07]과 [05] 정점이다(Fig. 5). 퇴적물성 분석결과(Table 1)에서 모래함량의 경우 [07]은 41.30%이고 [05]는 14.49%이다. 퇴적학적인 분류로는 모두 모래펄 퇴적상(Fig. 8(A))에 포함되지만 해저영상에서는 [07]은 청색으로 [05]는 노란색으로 구분되고 있다. 이것은 단적으로 해저퇴적상과 음향영상이 부분적으로 일치하지 않을 수도 있다는 근거가 된다. 후방산란 음향강도는 해저면의 거침도에 절대적으로 영향을 받으며, 거침도는 조립질 퇴적물(예: 모래)의 함량에 따라 비례하기 때문이다(Wong and Chesterman, 1968).

#### 해저퇴적물과 해저지형

해저지형 변화에 따른 해저퇴적물의 지역적인 분포 특성을 고려하기에 앞서, 단순히 퇴적물성과 해저수심과는 어떤 관계를 보이는지 검토해 보았다(Fig. 9). 모래함량과 수심에서는 뚜렷한 반비례관계를 보여서 수심이 낮을수록 모래함량은 높게 나타난다. 그러나 실트와 펄은 수심이 깊어질수록 그 함량도 증가하는 비례관계를 보이고 있다. 해안선 부근에서는 대부분이 모래퇴적물이 분포하지만 외해로 향할수록 실트와 펄이 비슷한 함량으로 점차 섞이고 있다는 것을 알 수 있다. 앞서서도 논의되었지만(Fig. 7) 퇴적물성과 해저지형 관계에 있어서도 역시 실트는 모래와 거울상(대칭관계)으로 나타나고 있다. 평균입도와 분급도 역시 수심과 비례관계를 보인다. 연구해역의 수심 분포(Fig. 4)를 보면 대부분이 수심 5m 미만이고 남서쪽 섬 주변에서만 10m까지 깊어지는 단순한 해저

지형이다. 특히 해안선에서 외해역까지 거리는 약 1.2km이지만, 불과 3m 정도밖에 수심차이가 없는 비교적 평탄한 해저지형임에도 불구하고 평균입도는 약 8 $\phi$ 까지, 분급도는 약 4 $\phi$ 까지 급하게 변하고 있다. 이러한 해저환경이 신두리 해안에 모래사구를 생성시키는 원인으로 작용하고 있다고 판단된다. 왜도와 침도는 현재의 자료만으로는 수심변화와 관계를 언급하기 어렵다. 그러나 침도의 경우 분포값 범위 내에서 수심과는 종모양(bell shape)의 상관성을 보이고 있다.

일부의 이상치 자료도 있지만 퇴적물성과 지형변화는 비교적 양호한 상관관계를 보이고 있다. 이러한 결과는 해안사구가 발달된 신두리 해역에 국한된 경우에만 적용되는 현상인지, 아니면 모래가 주된 해저 퇴적물로 구성된 해안지역의 전반적인 경향인지는 이번 연구결과만 가지고는 판단하기 어렵다. 앞으로 이와 유사한 해역에서 좀더 많은 양의 자료축적과 분석이 필요하다. 그러나 해안선을 따라서 해안사구가 발달되어 있다는 점을 감안할 때 이 연구해역은 해저퇴적물의 유동량이 상당히 크다고 판단된다. 이번 현장조사는 여름철에 수행된 결과이지만 봄철에 같은 지역에서 관측된 연구결과(환경부, 2001)와 해저퇴적상을 비교해 보면, 필모래 퇴적상이 여름철(이번 연구결과)에 상대적으로 넓게 분포하고 있다. 이것은 여름철에 세립한 퇴적물의 유입으로 필과 모래가 혼합되는 지역이 넓어지기 때문이다.

기존의 연구에 의하면 필이 우세한 갯벌은 부유퇴적물 유입과 조류, 파랑의 세기에 의하여 개방형 해만에서는 겨울에 침식되고 여름에는 퇴적되지만(Chun *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 1999), 폐쇄성 해만에서는 반대로 겨울에 퇴적되고 여름에는 침식되는(장진호와 최진용, 1998; 류상욱 외, 1999; 추용식 외, 2000) 양상을 보이는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이번 연구해역과 비슷하게 해안사구가 발달되어 있는 승봉도 모래 갯벌에서는 봄에서 가을까지 침식되며 겨울에 퇴적되고 있다(Woo *et al.*, 2002). 신두리 해안은 모래 갯벌 지역으로 여름에는 침식되며, 겨울철에 외해로부터 모래의 유입이 늘어나며 간조시 북서풍의 영향으로 모래가 갯벌에서 해안사구로 이동되고 있는 것으로 판단된다.

해저퇴적물의 물성을 공간적인 분포의 입장에서 해저지형과의 관계를 검토해 보면, 퇴적상(Fig. 10(A))에서는 노출암반으로 해석되는 지역에서 자갈모래 퇴적상과 일치해 보이거나 그 밖의 해역에서는 무관하게

나타나고 있다. 모래(Fig. 10(B)), 실트(Fig. 10(C)) 및 필(Fig. 10(D))의 분포관계에서는 외해로 향하여 수심이 깊어지면서 점차적으로 함량이 비슷한 형태로 변하고 있으며, 수심이 깊은 남서쪽 지역에서는 주로 모래만 우세하게 분포하고 있다. 평균입도(Fig. 10(E))는 깊은 수심과 연안선 부근 해역에서만 3 $\phi$  이하로, 그 외 지역에서는 외해로 향하면서 수심분포와 비슷한 양상으로 세립화 되고 있다. 분급도(Fig. 10(F)) 역시 깊은 수심에서만 급한 변화를 보이고 대체적으로 해안선과 평행하게 외해로 향하면서 불량해지고 있다. 연구해역의 중앙부인 수심 4m 정도의 해역에서는 대부분이 3 $\phi$  이상으로 분급상태는 불량한 편이고 그 범위 또한 광범위하게 분포하고 있다. 왜도(Fig. 10(G))는 수심분포와 공간적으로 뚜렷한 연관성은 없으나 수심 2m 이하의 연안선 부근에서만 낮은 값을 보이고 있다. 침도(Fig. 10(H))의 지역적 분포에서는 깊은 수심지역과 비교적 일치하고 있으며 연구해역의 중앙부로 향하면서 점차적으로 그 값은 낮아지고 있다.

따라서 퇴적물성과 수심과의 공간적인 분포관계는, 암반노출 지역으로 해석되는 수심 5m 이상의 깊은 지역과 그 밖의 지역으로 구분하여 관련성을 종합해 볼 수 있다. 전자의 경우 평균입도, 분급도 및 침도와 양호한 상관관계를 보이는 반면, 후자에서는 퇴적상과 왜도를 제외한 모든 퇴적물성이 수심변화와 비슷한 경향으로 점진적인 변화를 보이고 있다. 연구해역의 중앙부는 수심이 4m 정도로서(Fig. 4) 거의 평탄한 해저지형이다. 이 수심에서 왜도는 분포값의 변화가 거의 없으며 분급도는 3 $\phi$  이상이다. 또한 침도 역시 낮은 값이다. 그리고 이들 모두 등치선의 분포가 조밀하지 않다. 이것은 분포퇴적물의 물성이 외해 쪽을 향하여 점차적으로 변하고는 있지만 연구해역의 중앙부에서는 다양하게 복합적으로 섞여 있음을 의미한다. 이러한 분포양상이 해저면 음향영상에서 음압강도에 의한 음향퇴적상의 분류를 어렵게 만드는 요인으로 작용하고 있다.

### 해저지형과 음향영상

해저에 분포하는 퇴적물의 퇴적상과 분포특성은 일반적으로 해류와 해저지형에 절대적인 영향을 받는다. 이러한 관점에서 해저면 음향영상 모자이크 결과도면과 해저지형을 함께 비교해봄으로서 퇴적물의 분포퇴적상을 좀더 객관적으로 해석할 수 있다. 음향영상

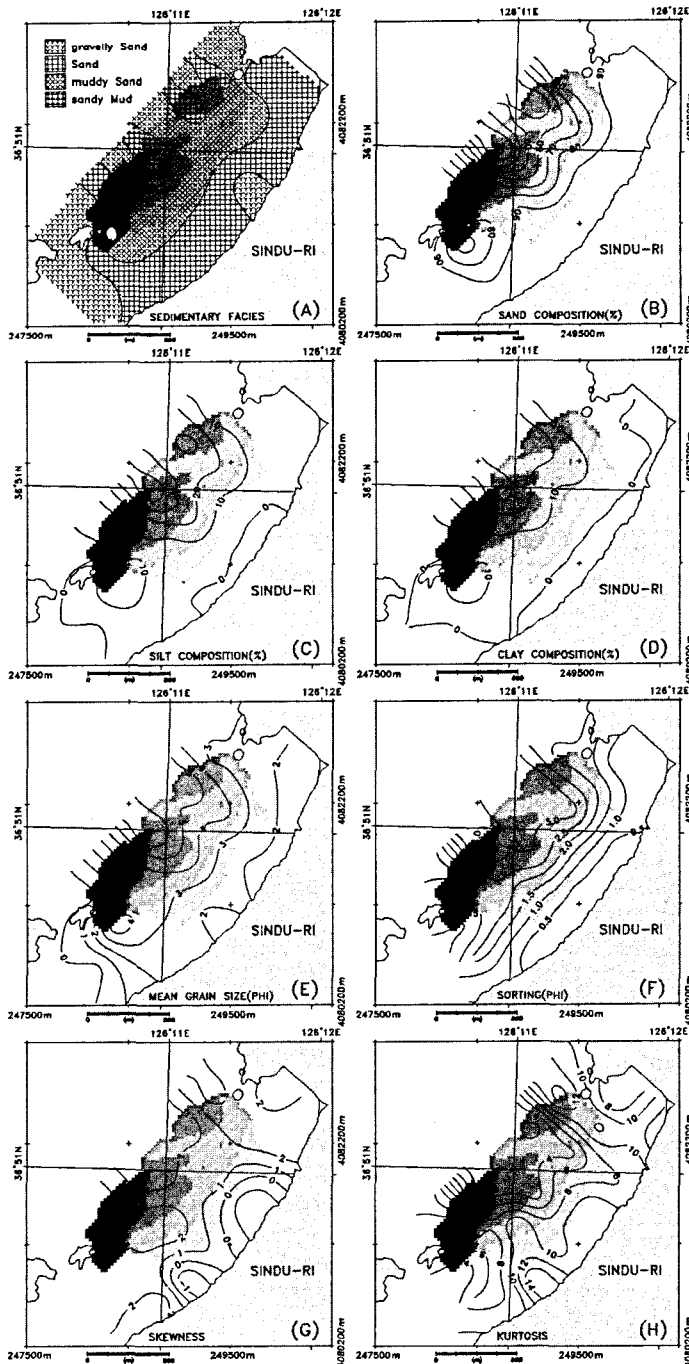


Fig. 10. Distribution patterns of sea-bottom surface sediment properties compared with water depth; sedimentary facies (A), composition of sand (B), silt (C), and clay (D), mean grain size (E), sorting (F), skewness (G), and kurtosis (H).

기록 위에 해저지형 등수심 자료를 겹쳐 놓은 결과 (Fig. 11)에서 보면, 음향강도가 가장 강한 지역(갈색)은 해저지형과 잘 일치하고 있다. 노출된 암반 위에

일부는 모래퇴적물이 덮여 있거나, 해류에 의하여 마모된 부분으로 해석된다. 그리고 음파특성상 후방산란에 의한 영향 이외에 지형경사 때문에 반사파 영

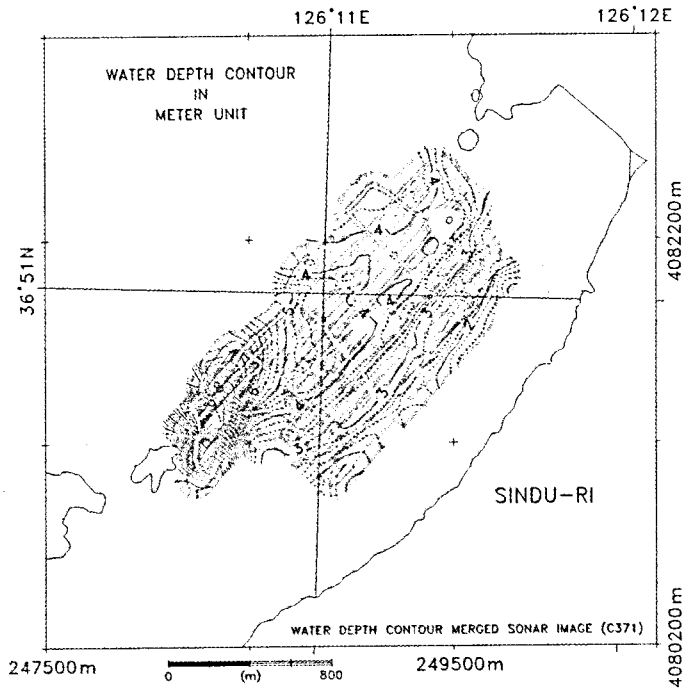


Fig. 11. Seafloor side scan sonar mosaic image compared with water depth contours.

향도 무시할 수 없을 것으로 판단된다.

음향강도가 가장 낮게 나타나는 지역(노란색)의 지형을 살펴보면 다소 경사진 지역, 평탄하지만 지형요철이 있는 지역, 또는 등수심선의 간격이 비교적 조밀한 지역에서 대부분 일치하고 있다. 연구해역 북쪽 일부에 분포하는 노란색 지역 역시 4m 등수심선이 독립적으로 산재하는 지역이다. 특히 북북서 방향으로 발달된 해저골 형태의 지형에서는 노란색의 음향 퇴적상이 정확하게 일치하고 있다. 지형의 기복이나 경사가 다소 있는데도 음향강도가 낮게 나타난다는 것은, 거침도가 작은 세립질의 퇴적물이 국부적으로 분포한다고 해석된다.

음향강도가 중간 정도인 청색의 경우 연구해역의 대부분을 차지하고 있지만 등수심선의 분포형태를 보면 비교적 간격이 넓고 평탄한 지역임을 알 수 있다. 또한 해안선에 평행하게 분포하는 등수심선 구역에서도 등심선 간격이 넓은 곳에서 청색지역이 해안선과 나란하게 대상구조로 분포하고 있다. 이 구역은 음향 퇴적상의 입장에서 연구해역을 내해와 외해로 구분하는 경계역 역할을 하고 있는 것으로 판단된다. 육지 쪽으로는 음향강도의 분포가 비교적 단순하지만, 외해 쪽에서는 약하고(노란색), 강한(갈색) 음향강도 영

상기록이 혼재하는 복잡한 분포를 보이기 때문이다. 해저의 지형변화 역시 음향영상 분포특성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

## 결론

신두리 해안지역에서 획득된 해저면 음향영상 자료를 처리하고 해저퇴적물의 물성을 분석하여 해저지형 분포특성과 연계시켜 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 해저퇴적상은 모래, 모래펄, 자갈모래, 펄모래 등 4개로 구분되지만, 해저면 음향영상 입장에서 음향퇴적상은 자갈 또는 모래로 피복된 노출암반 지역, 펄을 일부 함유하는 모래펄 지역, 함량은 적지만 다양하게 펄을 함유하는 펄모래 지역 등 3가지 유형이다.
2. 후방산란 음향강도는 모래함량, 왜도, 침도와는 서로 비례하는 관계를 보이고 있으며, 실트, 펄, 평균입도, 분급도와는 반비례하고 있다.
3. 수심이 깊어질수록 모래함량은 감소하며 실트와 펄의 함량은 증가한다. 평균입도와 분급도 역시 수심에 비례하고 있다. 왜도와 침도는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다.

4. 노출암반 지역을 제외하면 연구해역의 수심은 대부분이 4m 정도로 평탄한 해저지형이 외해까지 이어진다. 지형요철이 있거나 등수심선의 간격이 조밀한 지역과 해저골 형태의 해저지형에서 다소 약한 음향강도를 보이고 있다. 지형의 기복이나 경사가 있는데도 음향강도가 약한 것은, 거침도가 작은 세립질의 퇴적물이 국부적으로 분포한다고 판단된다.

5. 해저면 음향영상과 해저퇴적물의 분포특성에 대한 연관성을 상호보완적으로 연구하기 위해서는, 해저면 음향탐사 이후에 퇴적물 채취정점을 결정하는 것이 보다 효과적이다.

## 사 사

이 연구는 한국해양연구원에서 현재 수행중인 해양수산부 연구개발과제 “갯벌의 생태계조사 및 지속 가능한 이용 방안 연구”에서 내용의 일부를 정리한 결과이다. 현장조사와 퇴적물 시료분석에 도움을 주신 장남도, 박성민, 안동식, 최재웅 연구원께 감사드린다.

## 참고문헌

- 과학기술처, 1993, 해양지구물리 탐사기술개발 연구(III), BSPN 00182-602-5, 378 p.
- 김성렬, 유홍룡, 박건태, 이용국, 안충현, 1987, Side Scan Sonar 탐사자료의 영상처리와 해저면 backscattering 음향특성. 해양학회지, 22(3), 143-152.
- 김성렬, 박건태, 이용국, 1993, Side Scan Sonar 탐사시 Tow-Fish의 정밀위치보정. 한국해양학회지, 28(4), 366-367.
- 김성렬, 박건태, 이용국, 1994, 천해용 105kHz 해저면 탐사 장비 송신 및 수신신호 제어에 관한 연구. 한국해양연구원, BSPE 00416-700-5, 75 p.
- 김성렬, 박건태, 이용국, 석봉출, 최동립, 한상준, 유혜수, 1997, Side Scan Sonar 해저면탐사 자료로부터 수심계산 및 Tow-Fish 위치보정의 검증. 해양연구, 19(2), 91-104.
- 김성렬, 2000, Side Scan Sonar를 이용한 해저면탐사: 영상처리에서의 예인센서의 절대위치 보정. 제1회 ITRC-SILC 학술발표회, 고해상 천부 영상화 기술, 137-150.
- 류상욱, 유환수, 이종덕, 1999, 함평만 조간대의 표층퇴적물과 집적물의 계절변화. 한국해양학회지 바다, 4, 127-135.
- 장진호, 최진용, 1998, 조간대 퇴적물의 계절적 집적양상과 보존: 한국 서해안의 곰소만. 한국해양학회지 바다, 3, 149-157.
- 조성권, 이철우, 손영관, 황인걸, 1995, 지구과학총서 퇴적학. 도서출판 祐成, 서울, 512 p.
- 추용식, 이희준, 박은순, 이연규, 정갑식, 2000, 만입구에서 부유퇴적물 거동과 플럭스: 한반도 서해남부 함평만의 여름철 특성. 한국해양학회지 바다, 5, 105-118.
- 환경부, 2001, 우리나라 사구 실태파악과 보전·관리 방안에 대한 연구. 263 p.
- Chun, S.S., Lee, H.J., Ryu, S.O., and Yang, B.C., 1998, Seasonal and local variation of sedimentation on the wave-dominated tidal flats, southwestern coast of Korea: comparison between inner-bay and open tidal flats. 15th Intern'l Sedimentological Congress, Alicante, Spain, (Abs.), 257 p.
- Clay, C.S., Ess, J., and Weisman, I., 1964, Lateral echo sounding of the ocean bottom on the continental rise. Journal of Geophysical Research, 69, 3823-3833.
- Folk, R.L. and Ward, W., 1957, Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.
- Lee, H.J., Chu, Y.S., and Park, Y.A., 1999, Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macrotidal flat-near-shore area, northern west coast of Korea. Marine Geology, 157, 171-184.
- Malinverno, A., Edwards, M.H., and Ryan, W.B.F., 1990, Processing of SeaMARC swath sonar data. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 15(1), 14-23.
- Mckinney, C.M. and Anderson, C.D., 1964, Measurements of backscattering of sound from the ocean bottom. Journal of Acoustical Society America, 36, 158-169.
- Wong, H.K. and Cesterman, W.D., 1968, Bottom backscattering near grazing incidence in shallow water. Journal of Acoustical Society America, 44, 1713-1733.
- Woo, H.J., Seo, J.C., Kweon, S.J., and Je, J.G., 2002, Seasonal patterns of sediment supply to coastal foredune of Seungbong Island, Korea. Ocean and Polar Research, 24, 39-45.

2002년 10월 14일 원고 접수  
 2002년 11월 20일 수정원고 접수  
 2002년 11월 23일 원고 채택