J. Korean Fish. Soc. 35(3), 273~281 한수지, 35(3), 273~281, 2002

측심기의 음향반사 특성을 이용한 해저퇴적물의 원격분류: 부산 수영만의 예비결과

김길영⁺ · 김대철* · 김양은* · 이광훈** · 박수철*** · 박종원**** · 서영교*****
미해군연구소 해양지질과학부, *부경대학교 환경탐사공학과, **군산대학교 해양정보학과
***충남대학교 해양학과, ****충남대학교 정보통신공학과, *****부경대학교 응용지질학과

Remote Seabed Classification Based on the Characteristics of the Acoustic Response of Echo Sounder: Preliminary Result of the Suyoung Bay, Busan

Gil Young KIM⁺, Dae Choul KIM*, Yang Eun KIM*, Kwang Hoon LEE**
Soo Chul PARK*, Jong Won PARK**** and Young Kyo SEO*****
Marine Geosciences Division, Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS 39529, USA
**Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*
***Department of Ocean Information Science, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*
****Department of Oceanography, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*
*****Department of Information and Communications Engineering, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*
******Department of Applied Geology, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

Determination of sediment type is generally based on ground truthing. This method, however, provides information only for the limited sites. Recent developments of remote classification of seafloor sediments made it possible to obtain continuous profiles of sediment types. QTC View system, which is an acoustic instrument providing digital real-time seabed classification, was used to classify seafloor sediment types in the Suyoung Bay, Pusan. QTC View was connected to 50 kHz echo sounder. All parameters of QTC View and echo sounder are uniformly kept during survey. By ground truthing, the sediments are classified into seven types, such as slightly gravelly sand, slightly gravelly sandy mud, gravelly muddy sand, clayey sand, sandy mud, slightly gravelly muddy sand, and rocky bottom. By the first remote classification using QTC View, four sediment types are clearly identified, such as slightly gravelly sand, gravelly mud, slightly gravelly muddy sand, and rocky bottom. These are similar to the result of the second survey. Also the result of remote classification matches well with that of ground truthing, but for sediment type determined by minor component. Therefore, QTC View can effectively be used for remote classification of seafloor sediments.

Key words: QTC View, Echo sounder, Remote seabed classification, Suyoung Bay

서 론

해저면에 분포하고 있는 퇴적물의 종류를 정확하고 신속하게 분류할 수 있는 기술은 해양생물, 해양지질, 지질공학, 해양공학 및 환경연구 뿐만 아니라 수산 및 양식분야와 군사적인 목적으로도 그 활용가치가 높다. 그러나 지금까지 해저 표층퇴적물에 대한 물리적 성질 및 음향학적 자료를 얻기 위해 가장 보편적으로 이용된 것은 소위 ground truthing에 의한 방법이다. 이 방법은 시추기(corer)나 채니기 (grab)를 이용하여 직접 해저에서 시료를 채취하여 실험실에서 분석하는 방법과 다이버, 수중 비디오 및 카메라 등을 이용하여 직접 해저를 조사하거나 촬영하여 해저퇴적물을 밝혀내는 것으로 이들은 모두 연구지역에 선정된 시료채취 정점의 결과만을 알 수 있는 단편적인 자료라는 제한성이 있으며 보다 자세하고 연속적인 퇴적물 분포를 알기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다. 따라서 퇴적물 시료의 직접적인 채취와 분석을 최소화할 수 있는 퇴적물 원격분류기술의 필요성이 대두되었고 이 기술만 완벽하게 개발된다면 기 언급한 다양한 분야에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

해저의 지질구조나 해양층서 및 퇴적환경 등의 연구에 널리 사용되고 있는 고해상도 탄성파탐사 장비도 주로 해저퇴적층을 원격연구하는 방법으로 널리 이용되고 있으며, 80년대에 접어들면서 자료처리 기술의 발달로 해저층에서 반사된 신호의 반사도를 비교적 정확하게 추정할 수 있게 되어 자료의 신뢰도가 더욱 높아졌다 (Collins, 1996; Collins et al., 1996).

광역대 주파수변조 (wide-band FM) 신호를 음원으로 사용하는 chirp sonar는 해양 표층퇴적물을 조사하는데 이용하고 있다 (Schock and LeBlanc, 1990). Chirp sonar를 이용해 획득한 자료는 해양퇴적물의 음향반사가 퇴적환경과 관계있다는 사실을 근거로 해양퇴적물의 물리적 특성들, 즉 입자밀도, 강성율, 공극률 등을 예측할 수 있는 중요한 정보로 이용하고 있다 (Kim et al., 1990; Schock et al., 1989). 또한 이러한 자료를 이용하여 유도한 해저퇴적물의 감쇠계수와 음향임피던스로 해저면 퇴적물 분류모델을 제시하기도 하였다 (LeBlanc et al., 1991; Schock and LeBlanc, 1992; Panda et al., 1994).

국내의 경우 고해상도 (3.5 kHz) 물리탐사 기록을 이용해 한반도 남서해역의 표층퇴적물을 음향학적 특징에 따라 음향학적 퇴적상으로

⁺Corresponding author: gkim@nrlssc.navy.mil

분류하여 시추시료의 분석결과와 비교한 바 있으며 (Bahng and Oh, 1993), Kim et al. (1987)은 side-scan sonar에 자기테이프기록계를 연결한 해저면 탐사자료를 수치적으로 처리하는 시스템을 개발하여 후방산란 (back scatter) 음파자료를 통계 처리하여 4가지 색상의 영상도면을 제작하였으며 이 결과는 연구지역 퇴적물의 평균입도와 분급도에 잘 대비됨을 확인하였다. 또한 Chang et al. (1998) 및 Kim et al. (2002)은 광역주파수 음향반사자료 (chirp sonar data)를 K-L 변환을 이용한 통계처리 결과 실제 해저면의 퇴적상과 유사한 결론을 얻은 바 있다. 그러나 이러한 모든 방법들은 현장에서 직접 원하는 자료를 실시간으로 획득할 수 있는 방법이 아니라 실험실에서 후프로세싱을 통하여 밝혀낼 수 있다는 것이다. 최근에는 다른 물리탐사장비보다 경제적이며 소형선박을 이용한 연안조사에도 효율적으로 이용할 수 있는 음향측심기를 이용하여 반사된 음향신호를 간단한 하드웨어 및 소프트웨어를 이용 처리함으로써 천해지역의 표층퇴적물을 실시간으로 분류하는 시도가 캐나다 및 유럽 등에서 시도되고 있고 (Hamilton et al., 1999; Morrison et al., 2001), 미국에서는 퇴적물의 조직은 물론 음향 및 물성까지도 유추할 수 있는 시스템을 갖추고 주파수별로 퇴적물의 특성을 구분하는 연구를 활발하게 수행하고 있다 (Lambert et al., 2002; Walter et al., 2002)

본 연구는 이러한 장비중 하나인 캐나다 Quester Tangent사의 QTC View를 이용 표층퇴적물의 원격분류 자료를 획득하여 이들 결과와 기존의 ground truthing에 의해 밝혀진 표층퇴적물의 조직자료를 비교함으로써 그 신뢰도를 검증하여 원격분류의 가능성을 조사하는 것이며, 또한 이러한 장비를 사용할 경우 요구되는 여러 가지 필요한 정보를 제시함으로써 향후 사용자들이 효율적이고 효과적으로 사용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

자료 및 방법

연구지역

연구지역으로 선정된 부산 수영만은 한반도 남동쪽 끝에 위치하며 동해와 남해의 접경부인 대한해협방향으로 개방되어 있다 (김 등, 1996). 서쪽으로는 부산시 수영구와 남구, 동쪽으로는 해운대구를 연결하며 대략 20 km²의 유역면적을 가지고 있다. 조류는 대조차는 약 1.2 m, 소조차는 0.9 m 내외로 주로 북서-남동 방향으로 흐르며 최대 2노트 정도의 속력을 보인다 (Hwang, 1993). 수영만은 이등변삼각형모양의 개방형으로 만의 중심에서의 수심은 10~20 m 정도이며, 해안에서 남동쪽으로 멀어질수록 급격한 수심 증가를 보인다 (Fig. 1) (Choe, 1994). 또한 평탄한 해저면상에는 부분적으로 암반들이 돌출하여 분포하고 있어 약간의 지형 기복을 형성하고 있다 (김 등, 1996). Choe (1994)의 연구결과에 따르면 수영만의 표층퇴적물은 광안리 해수욕장, 용호천 및 대연천 하구 근처의 수심이 얕은 곳에서 실트질 모래가 우세하며, 역질 퇴적물이 소규모의 팻취상으로 발달하며 실트가 국부적으로 분포하고 있다. Hwang (1993)은 수영만 주변에서 4개의 주요 하천이 수영만에 미치는 영향에 대한 수치적 시뮬레이션에서 내만의 대부분이

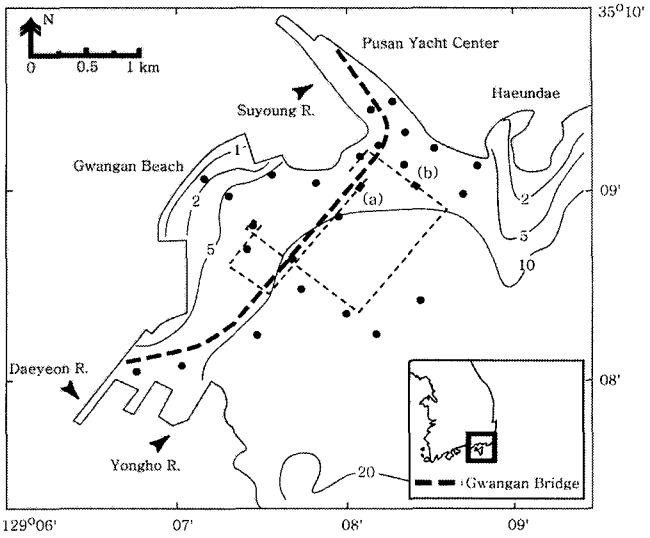

Fig. 1. Map showing side-scan sonar track-lines (dashed), sampling sites (solid dot) and bathymetery of the study area (unit in meter). The heavy dashed line indicates the Gwangan Bridge which is under construction.

수영천의 흐름에 지배를 받지만, 국부적으로 만의 서쪽이 대연천과 용호천으로부터 유입되는 하천수의 영향을 받는다고 보고한 바가 있다. 그러나 최근에는 광안대로의 공사로 인하여 저층퇴적물의 분포특성이 많이 달라졌을 것으로 예상되나 점토, 실트, 모래, 노출암반 등 다양한 해저면 특성을 보이는 것으로 나타나 본 연구 목적 달성에 적합한 지역으로 판단되어 연구지역으로 선정하였다.

Ground truthing 및 해저면 정밀 조사

QTC View를 이용한 해저퇴적물 원격분류를 위한 기초조사의 일환으로 표층퇴적물의 채취를 통하여 해저퇴적물의 평균입도 및 퇴적물형을 구분하는 ground truthing 방법과 해저면의 거칠기에 따라 반사되는 음파의 특성이 달라진다는 점을 감안하여 측면주사음향탐지기 (side scan sonar)를 이용 해저 지형에 대한 정밀조사를 수행하였다.

Ground truthing에 의한 방법으로 총 24개의 정점 (Fig. 1)을 선정하여 채취한 퇴적물 시료는 실험실에서 입도분석을 실시하였으며 분석시 음향반사자료가 표층의 퇴적물 내의 패각편 (shell fragments)의 함량에도 영향을 받는다는 사실을 고려하여 일반적으로 입도분석에서 실시하는 탄산염은 제거하지 않았다. 분석은 채취한 시료 중 약 40 g을 취해 6%의 과산화수소수 (H_2O_2)로 유기물을 제거한 후 증류수로 3~4회 세척하여 용해성 염분을 제거하였다. 이를 4Φ (0.0625 mm) 체로 습식 체질하여 4Φ 이상의 조립질 부분은 건조 후 로텝요동기 (Ro-tap sieve shaker)를 사용하여 1Φ 간격으로 입도별 중량백분율을 구하였다. 세립질 부분은 확산제인 칼곤 (Sodium Hexametaphoshate, $NaPO_3$)을 2%로 희석하여 50 cc를 첨가한 후 확산된 시료를 취하여 자동입도 분석기

(Micromeritics: Sedigraph 5100)로 분석하였다. 분석결과는 Folk and Ward (1957) 및 Folk (1968)의 모멘트 방법으로 통계 처리하여 조직표준치 (평균입도, 분급도) 및 퇴적물의 형 (type)을 구분하였다.

해저면의 지형적인 형태 및 저질의 분포특성을 관찰하기 위해 측면주사음향탐지기 (Side-scan sonar; Ultra Electronics: Model 3050E Widescan)를 사용해 약 5 km의 track-line에 대한 해저지형조사를 실시하였다 (Fig. 1). 조사시 선박의 속도는 약 3노트 정도로 일정하게 유지하였으며 자료의 선명도를 높이기 위해서 기본적인 후프로세싱을 수행할 수 있는 side-scan sonar 영상자료 처리시스템 (CODA Technologies: Model DA50)을 병행하여 획득하였다.

QTC View의 원리, 원격분류 방법 및 조사전략 (survey strategies)

QTC View는 음향측심기의 신호가 해저면에서 반사되어 돌아온 첫 번째 반사파의 형태 (echo trace 혹은 echo shape)를 디지탈화하여 그 자료를 처리하여 표층을 식별해내는 분류체계로 되어 있으며 표층퇴적물의 물리적 특성에 근거하여 첫 번째 신호들을 유사한 파형들로 구분하게 된다. 해저에서 반사되어 돌아오는 파형은 해저면의 특성에 따라 다양한 파형의 특징을 보여준다. 그 중 물성 및 퇴적물의 조직 (입도)이 가장 큰 영향을 끼치며, 저층형태 (bedform), 자갈크기 이상의 퇴적물, 식물군 (flora) 및 동물군 (fauna)과 지형의 기복 등 다양한 요소들이 반사되는 파형에 영향을 준다 (Fig. 2).

QTC View의 신호처리 과정은 음향측심기의 신호가 해저면에 반사되어 돌아온 아나로그 신호를 디지털 신호로 전환하여 전처리과정을 통하여 잡음을 제거한 후 여러가지 신호처리 알고리즘을 적용하여 166개의 digital string을 구성하게 되는데 이것이 Full Feature Vectors (FFVs)로서 echo shape를 설명하는 shape descriptor로써 반사신호의 형태를 분류하는 기본이 된다. 166개의 FFVs는 display하거나 시각화하기 어렵기 때문에 array processing, 특히 principal component analysis 등을 이용하여 echo shape의 스펙트럼 및 energy 특성을 분석하여 166×3의 reduction matrix를 작성하여 FFVs와 연산을 통해 3개의 Q-value를 작성한다. Q1, Q2, Q3의 ratio는 해저 퇴적물의 형태와 유사하므로 하나의 seabed type의 Q-value는 좌표상에서 하나의 cluster를 이루게 되며 이 cluster는 수학적으로 정의되고 하나의 class로 할당하게 되는 cluster analysis를 수행한다. 만약 퇴적물의 조직이 다를 경우는 수신된 반사신호의 형태가 다르므로 Q-value는 각기 다른 값을 가지게 된다. 이후 ground truthing에 의해 이미 알고 있는 해저퇴적물에서 작성된 catalogue와의 mapping을 통해 해저면 퇴적물의 분류를 수행하게 된다 (QTC View manual, 1997; Fig. 3).

QTC View를 이용한 실제적인 분류방법은 우선 Fig. 4와 같이 음향측심기에서 반사된 음향자료들의 특징들을 구분하여 FFVs 자료를 만드는 CAPS (Calibration and Processing Software)와 CAPS의 자료를 이용해 실시간으로 퇴적물을 직접 분류하는 DACS (Data Acquisition Control Software)로 나누어진다 (QTC View manual, 1997). CAPS는 Q-value로 정의되는 FFVs 자료와 1개 이상의 FFVs로 구성된 catalogue를 작성하는 과정으로 각각의 파일 (xxx.FFV와 xxx.CAT)로 저장된다. 만약 ground truthing에

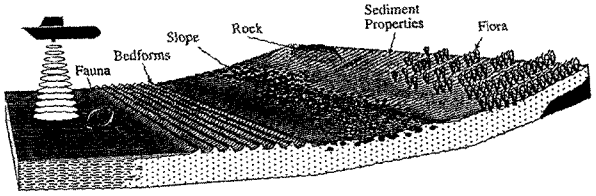

Fig. 2. Features of a typical seabed influencing the acoustic response.

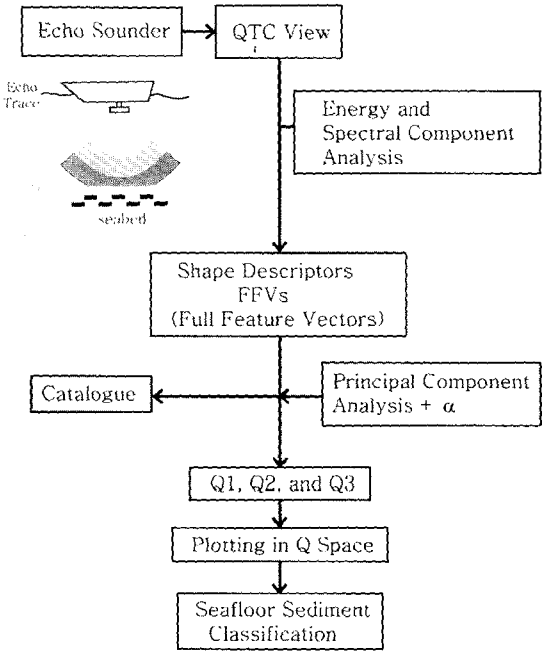

Fig. 3. Configuration of the QTC View system (modified after QTC View manual (1997).

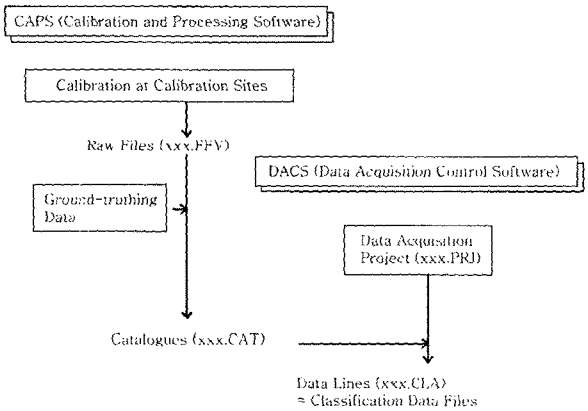

Fig. 4. Configuration and operation of QTC View softwares (CAPS and DACS) (modified after QTC View manual (1997).

의해 4개의 퇴적물 형 (type)이 조사되었다면 각각의 퇴적물 형에 따른 4개의 FFVs를 형성하게 되고 이 4개의 FFVs는 하나의 catalogue로 구성되게 된다. DACS는 CAPS에서 얻은 catalogue를 이용하여 실제 현장에서 실시간 원격분류를 실시하는 과정이며 그 결과 (xxx.CLA)와 연구지역 전체의 분류결과 (xxx.PRJ)는 각각의 고유한 화일명을 가지며 DACS에 저장되고 향후 처리도 가능하다.

본 연구에서는 CAPS를 실행하기 위해 ground truthing에 의해 분석된 표층퇴적물 시료의 입도분석 결과를 바탕으로 각기 다른 표층퇴적물이 분포하는 7개의 지점을 선정 CAPS를 실행하여 하나의 catalogue를 작성하였다. 이 catalogue를 이용해 약 10 km에 이르는 실시간 원격분류 (1차 DACS 실행)가 수행되었다 (Fig. 5). 또한 DACS 결과를 바탕으로 뚜렷하게 구분되는 FFVs를 이용해 CAPS 지점을 4개로 축소하여 새로운 catalogue를 작성하여 약 8 km에 해당하는 2차 DACS 자료를 획득하였다 (Fig. 5). 음향반사자료의 획득을 위해 50 kHz의 음향측심기 (Ocean Data Equipment: Model BATHY-500MF)를 사용하였으며, 반사자료에 영향을 미치는 QTC View의 parameter 및 음향측심기의 환경설정은 Table 1과 같은 동일한 조건에서 수행되었다.

QTC View를 이용하여 해저면을 분류하는 작업은 선박을 이용하여 음향반사자료를 획득하는 것이기 때문에 조사장비가 가질 수 있는 최상의 기계적인 조건 및 환경설정 뿐만 아니라 주위의 해양환경, 선박의 운항능력 등 조사전략이 잘 이루어져야 좋은 자료를 획득할 수 있다. 즉, 조사전략은 ground truthing을 위한 위치선정 및 정밀분석, calibration site의 선정, 선박의 운항능력 (속도 및 항로 유지), 조사 지역의 수심, 조사시의 바다상태 (sea state), 정확한 위치선정 (positioning), 양질의 자료 획득 (quality control) 등을 의미한다. 이러한 조건을 가장 적절하게 선정함으로써 가장 정확한 자료를 획득할 수 있게 된다. 본 연구에서의 calibration site의 선정은 ground thruthing에 의한 자료를 바탕으로 결정하였고 ground truthing은 기존 발표된 자료들을 이용하여 선정하였다. 배의 속도는 2노트 정도로 일정하게 유지하였다. 조사지역 수심은 10 m 내외로 저층의 형태는 비교적 완만하며 해양의 상태도 파도가 없는 좋은 조건이었다. 선박의 위치는 GPS (Global positioning system, 모델명: GPS 12XL, Garmin)를 이용하였다.

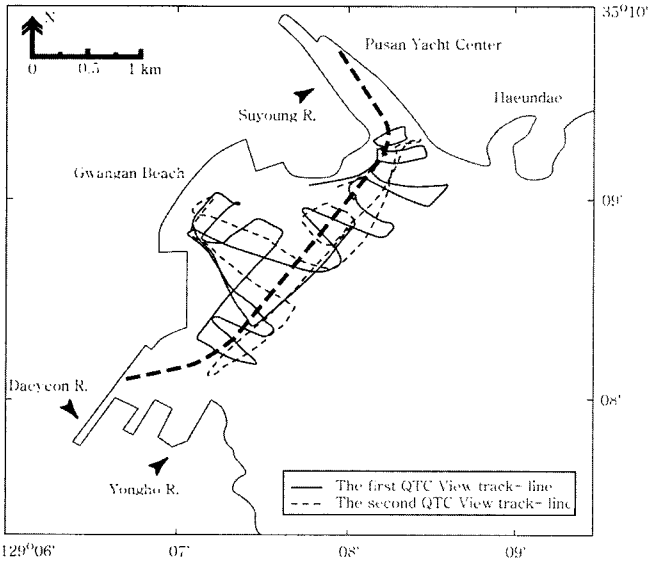

Fig. 5. Map showing the track-lines of DACS (Solid line shows track-line of the first survey, dotted line shows track-line of the second survey).

Table 1. Parameters of QTC View and echo sounder used for remote seabed classification survey

QTC View		Echo sounder	
Record Number	70~80	Pulse duration	0.5 ms
Reference depth	15 m	Transmitter power	600 watts
Base gain	20 dB	Beam width	14°
Sound velocity	1,500 m/s	Frequency	50 kHz

결과 및 고찰

표층퇴적물 및 해저면 지형 특성

Ground truthing 방법에 의해 분석한 연구지역의 표층퇴적물은 총 7개의 퇴적물형 (sediment type)으로 분류되었다. 분류된 퇴적물은 cS (clayey sand), (g)S (slightly gravelly sand), sM (sandy mud), gmS (gravelly muddy sand), (g)sM (slightly gravelly sandy mud), (g)mS (slightly gravelly muddy sand) 등으로 구성되어 있으며 (Fig. 6), rocky bottom은 연구지역의 일부에 국한되어 분포하고 있는 것으로 나타났다. 분포양상은 비교적 에너지가 강한 광안리 해수욕장 주변에는 (g)S가 주로 분포하고 있으며 수영천이 유입되는 하구 주변에서 (g)sM와 sM가 우세하였다. 이들

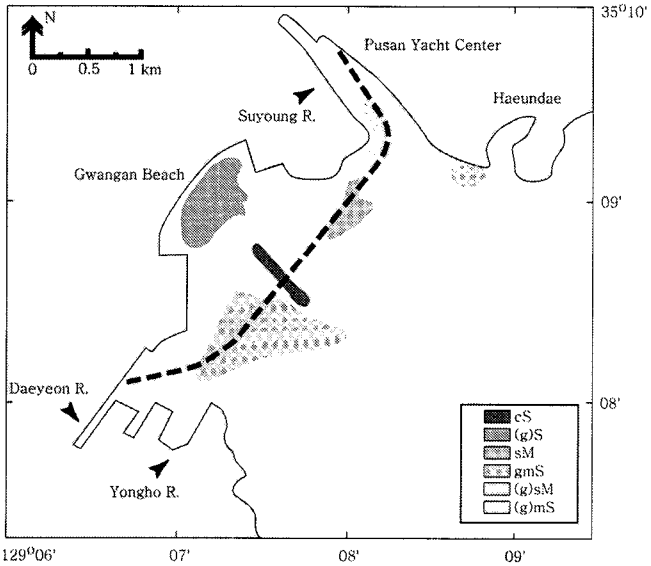

Fig. 6. Distribution of sediment types in the study area (cS: clayey sand, (g)S: slightly gravelly sand, sM: sandy mud, gmS: gravelly muddy sand, (g)sM: slightly gravelly sandy mud, (g)mS: slightly gravelly muddy sand).

분포는 하천의 유입 및 지형적 조건에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 분급도의 경우 1.07~3.37Φ로 불량 (poorly sorted)과 매우 불량 (very poorly sorted)하게 나타났으며 분급도와 퇴적상과의 상관관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 연구지역 퇴적물의 분급도가 전반적으로 불량한 것으로 나타나 음향반사자료의 echo trace에는 적지 않은 영향을 줄 것으로 생각되나 분급도와 echo trace의 변화에 따른 정량적인 자료가 없어 구체적으로 제시할 수는 없다. 전반적으로 분포하고 있는 퇴적상은 개방형 만이라는 지형적인 특성으로 인해 주로 수심의 변화와 관계 있는 것으로 보인다. 그러나 앞으로는 광안대로 건설로 인한 구조물의 설치와 특정지역에 대한 매립 등으로 인해 지금까지 형성된 퇴적물의 분포 특성과는 다른 형태를 보여줄 것으로 생각된다.

측면주사음탐기 (Side scan sonar)를 이용한 해저면 상태 조사는 음향반사자료를 이용한 해저면 분류에 앞서 선행될 경우 자료의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 해저면의 상태는 지역에 따라 매우 다양한 형태를 보이는 경우가 많다. 즉 해저면의 크고 작은 경사, 작은 규모의 침강, 함몰공, 혹은 해저구조변화에 기인한 퇴적물의 변화는 물론 서로 다른 퇴적물로 구성되어 있는 경우와 비교적 균질한 퇴적물로 구성되어 있는 경우 등 다양하다. 연구지역에서 실시한 해저면 조사자료는 대부분의 지역에서 비교적 완만한 해저면을 보여주고 있다. 단 광안대로 공사장 부근에서는 구조물로 인해 교란된 저층의 형태를 보여주는 곳이 발견되었다. 조사자료 중 대표적인 형태는 Fig. 7과 같다. 여기서 제시한 자료는 전체 side-scan sonar 자료 중 니질과 사질의 특성을 잘 보여주는 자료를 선택하였으며 이미지의 중앙부분은 해수면의 교란에 의해서 발생하는 잡음으로 실제 이미지가 아니다. Fig. 7a는 광안대로 건설공사 부근에 위치하는 곳으로 공사주변 지역의 폐기된 구조물 잔해 등에 의한 것으로 사료되는 지형의 교란이나 표층퇴적물의 긁힌 흔적이 확인되었다. 이외의 Fig. 7a의 일반적인 특징은 본 연구지역에서 표층퇴적물이 니질로 구성되어 있는 지역에서 잘 관찰되는 이미지이며, Fig. 7b와 같이 사질이 우세하게 분포하고 있는 지역에서는 일정한 방향성을 뚜렷하게 보여주는 연흔 (ripple) 구조가 잘 관찰되었다. 전반적인 해저면 자료로 미루어보아 해저면의 상태가 비교적 완만하며 큰 구조적인 변화가 없는 것으로 나타나 음향측심기의 반사자료는 양호하게 획득될 수 있었던 것으로 보인다. 따라서 정밀 해저면 상태조사 결과를 표층퇴적물의 원격분류결과와 병행하여 이용할 경우 QTC View의 자료를 이용 해저퇴적물의 분포양상을 도면화 (mapping)하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 확신한다.

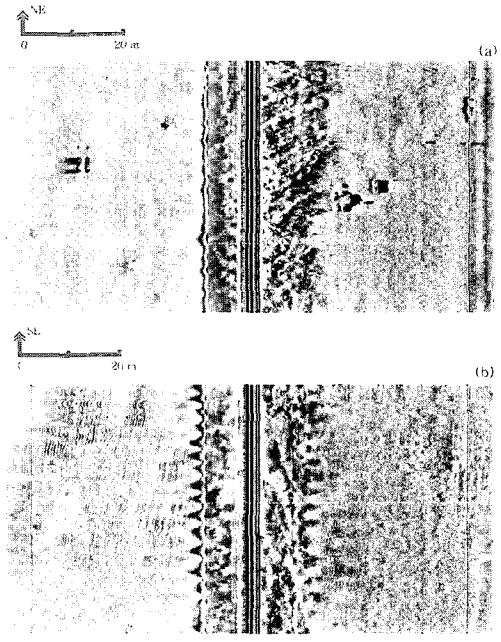

Fig. 7. Side-scan sonar image of muddy (a) and sandy (b) seafloor in the study area. Locations of (a) and (b) are represented in Fig. 1. Note that distinct ripples are clearly displayed at the left side image of Fig. 7(b).

QTC View를 이용한 원격분류결과

1차 실시간 원격분류결과

Ground truthing에 의해 나타난 7개의 퇴적물형에 대하여 각각 calibration을 실시하여 하나의 catalogue를 완성하였고 그 중에서 4종류의 퇴적물형에 대한 음향반사신호 (echo pulse)는 Fig. 8과 같다. 음향반사신호는 해저면의 특성 (특히, 저층퇴적물 종류 및 거칠기)에 따라 다른 형태를 나타내는데 해저층에서 도달한 음파는 해저면의 물성에 의해 반사되거나 산란되며 돌아오는 echo pulse에는 직접 반사된 송신 pulse와 후방산란신호가 함께 포함된다. 후방산란신호 역시 해저면의 특징에 따라 달라지며 이는 echo pulse에서 나타나는 peak의 넓이와 tail의 형태에도 영향을 준다. 본 연구에서 획득된 신호의 경우 모래나 암반으로 구성되어 있는 지역 (Fig. 8a, c 및 d)에서보다 mud (Fig. 8b)로 구성되어 있는 반사면에서 더욱 높은 진폭값을 보여주었다. 반사된 echo pulse에서 잡음 (noise)이 많이 나타나는 경우는 모래층이며 암반의 경우는 peak가 넓게 나타나는 특징을 보여 준다. 이러한 echo pulse의 형태는 앞서 설명한 여러 종류의 원인에 의해 다르게 나타나는 것으로 보인다.

1차 Calibration을 통해 완성한 catalogue를 이용해 퇴적상의 변화가 있을 것으로 예상되는 track line을 정하여 해저퇴적물의 원격분류를 실시하였고 그 분류결과는 Fig. 9와 같다. 분류결과 연구지역에서 가장 많은 부분을 차지하는 퇴적상은 (g)mS로 60% 이상을 보였고 그 다음으로 (g)S가 20% 정도로 나타났다. 광안리 해변의 주변지역과 광안대로의 북동쪽 지역은 (g)S가 상대적으로 우세함을 보이며 연구지역의 광안대로 내곽 상부지역에서 sM이 매우 국부적으로 나타나고 있다. 이는 연구지역에서 채취한 시료 분석 결과에서 sM이 분포하는 지역과 거의 일치한다. 또한 지역적으로는 rocky bottom의 분포도 관찰되었으며 gmS, cS 및 (g)sM은 1% 미만으로 거의 나타나지 않았다. 이런 결과로 보아 특정한 퇴적물형이 불규칙적인 양상으로 소량 존재하는 경우는 그 경계가 뚜렷하게 확인되지 않는 것으로 보인다. 결과적으로 원격분류결과 연구지역에서 비교적 넓게 분포하는 퇴적상의 경우는 ground truthing에 의한 결과와 잘 일치하는 양상을 보였으나 입

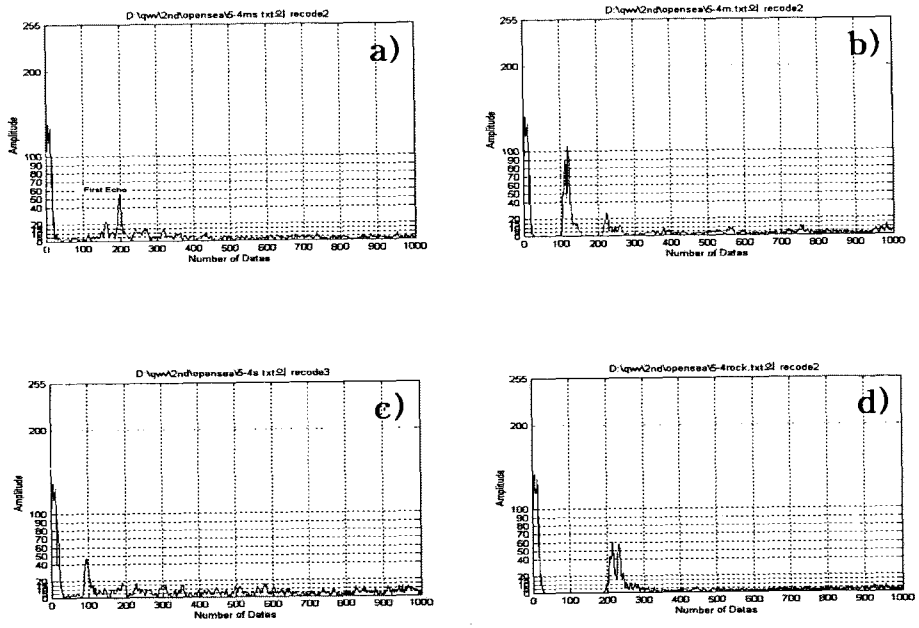

Fig. 8. Examples of echo pulses reflected from four sediment types (muddy sand, mud, sand, and rock). Note that the amplitude reflected from mud is higher than the others.

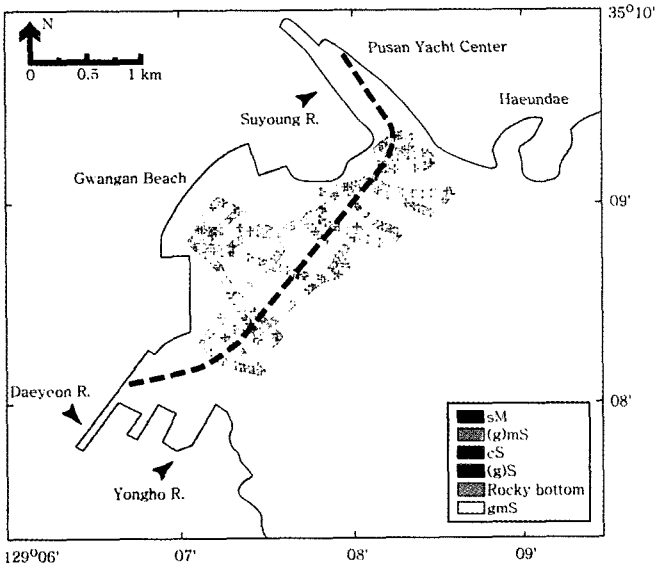

Fig. 9. The first remote seabed classification by DACS. Six sediment types are identified.

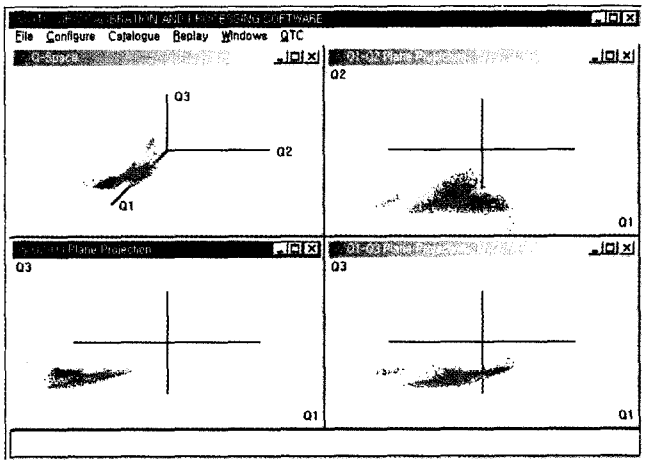

Fig. 10. Q-values of the first DACS data.

도분석 결과를 이용하여 퇴적물형을 결정할 때 그 성분의 차이가 미미할 경우 이들을 명확하게 구분하는 것은 쉽지 않은 것으로 나타났다.

1차 실시간 자료의 후처리 (post-processing) 결과

1차 실시간 원격조사 결과 7가지 퇴적물 중 3가지 (gmS, cS, (g)sM)는 매우 소량 나타나고 있어 이들의 Q-value를 확인하였다 (Fig. 10). Fig. 10에서 각각의 색은 각기 다른 퇴적물 유형을 나타내며 왼쪽 상단은 Q1, Q2, Q3의 3차원 도시결과이며 나머지는 각각의 Q-value에 대한 2차원 도시결과이다. Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 네 개의 창 모두에서 각각의 색의 경계가 뚜렷하게 구분되지 않고 있다. 즉 각각의 퇴적물의 고유한 값인 Q1, Q2, Q3의 차별성이 매우 낮다는 것을 의미한다. 따라서 이들 자료의 신뢰도를 향상시키기 위해 일부 자료를 후처리하였다. Ground truthing에 의한 결과 (g)sM와 sM는 모두 1% 이하로 소량이며 이들 퇴적물형의 경계는 자갈의 함량이 0.01%로 아주 소량인 것을 감안하여 동일한 퇴적물로 간주하여 sM으로 하였다. 또한 소량일 뿐만 아니라 그 분포양상에 있어서도 매우 불규칙적인 gmS 및 cS를 사질의 함량이 50~90%로 동일한 (g)mS로 수정하였다. 결과적으로 기존의 7개의 퇴적물형을 가진 catalogue를 4개의 퇴적물형으로 축소하여 재구성하였다. 4개의 퇴적물형으로 구성된 catalogue

를 이용하여 컴퓨터상에서 후처리를 통해 재분류한 결과 퇴적상의 경계가 비교적 뚜렷하게 나타났다 (Fig. 11).

2차 실시간 원격분류결과

실시간 자료의 후처리 (post-processing)를 거쳐 확인된 catalogue (4개의 퇴적물형으로 구성)를 이용해 현장에서 DACS를 실행하였다. 2차 현장 DACS 실행결과 1차 결과와 마찬가지로 연구지역은 (g)mS가 약 70%, (g)S가 약 10%로 사질이 우세하게 나타났다 (Fig. 12). 또한 1차 현장결과와 같이 광안리 해변 주변지역에서 (g)S가 우세하였다. 원격분류결과 sM은 ground truthing에서 sM이 분포한 지역과 (g)sM으로 확인되었던 수영천 하구주변에서도 일부 나타났다. 2차 DACS에 의해 분류한 결과는 1차 분류결과와 비교해 그 분포 양상은 명확히 확인할 수 있었으며 Q-value를 확인한 결과도 4개의 창 모두에서 각각의 퇴적물을 지시하는 색의 분포 경계가 보다 분명하게 구분되어 나타났다 (Fig. 13). 따라서 ground truthing에 의해 밝혀진 서로 다른 퇴적물형에서 FFVs를 이용한 catalogue 작성시 소량의 구성성분에 의해 퇴적물형이 다르게 나타날 경우는 퇴적물형의 수정작업을 통하여 후처리한 후 새로운 catalogue를 구성함으로서 자료의 신뢰도가 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

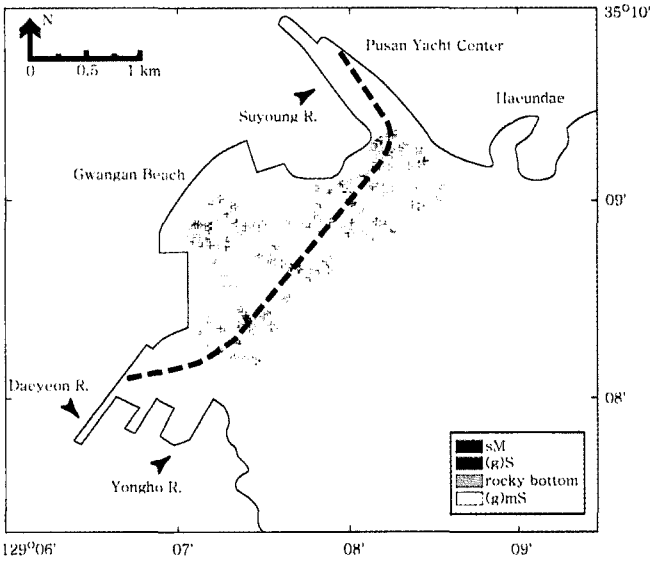

Fig. 11. Map showing seabed reclassification by post-processing. Four sediment types are dominated.

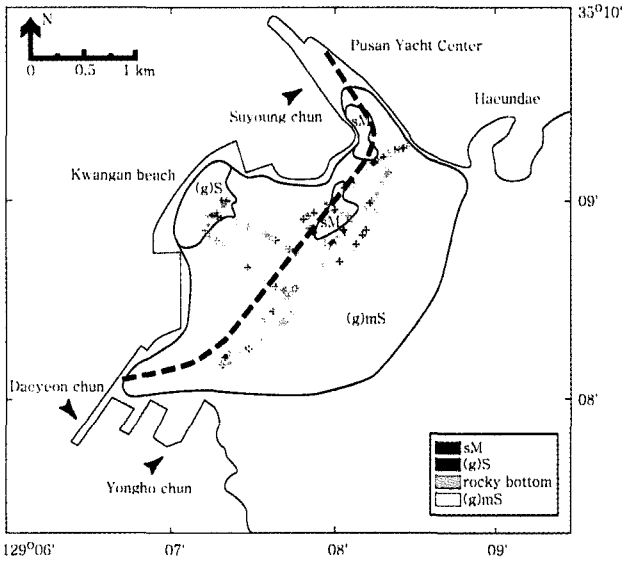

Fig. 12. The second remote seabed classification by DACS.

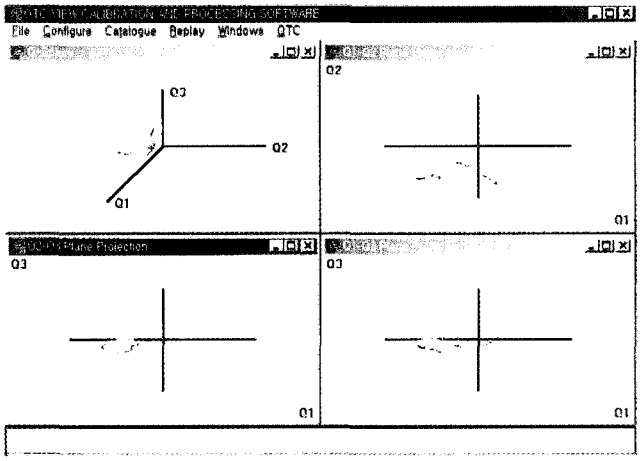

Fig. 13. Q-values of the second DACS data. Note that Q-values are clearly grouped.

원격분류결과의 신뢰도 및 분류시스템의 적용 가능성

본 연구에서 실시한 원격분류 자료는 몇 가지 점을 고려해 볼 때 그 신뢰도는 인정된다고 사료된다. 즉, 최상의 조건을 갖춘 측정장비, 조사시 해양의 상태, 선박의 운항능력, side scan sonar를 이용한 해저면의 정밀조사 (Fig. 7), 획득된 음향반사신호의 echo pulse의 상태 (Fig. 8) 등을 들 수 있으며 무엇보다도 중요한 것은 ground truthing에 의한 결과와 비교하여 유사한 결과를 얻었다는 것이다 (Fig. 12). 원격분류결과 (g)mS는 대부분의 연구지역에서 우세하며 ground truthing에 의한 결과와 원격분류결과가 동일하게 나타났다. 광안리 해변에서는 (g)S가 약 60%, (g)mS가 약 25%를 차지하여 ground truthing에 의한 결과 (Fig. 6)와 잘 일치하나 이들외의 지역에서는 (g)mS가 약 80%로 거의 대부분을 차지한다 (Fig. 12). 또한 니질이 분포하는 것으로 나타난 연구지역 중앙의 sM 분포양상과 원격분류자료 결과를 비교해보면 역시 유사한 분포형태를 보여주고 있는 것으로 나타났다 (Figs. 6 및 12).

그러나 퇴적물 성분차에 따른 음향반사자료의 구분력을 평가한 결과 총 7가지 중 4개만이 구분되는 것은 퇴적상을 결정하는 성분차가 미미한 경우 따른 반사자료의 차별성이 낮기 때문으로 보인다. 역질을 함유한 (g)S와 (g)mS 및 gmS의 경우 0.01~5%의 역질함량을 가지는 (g)S와 (g)mS 분포가 QTC View 자료에서 구분된 것은 음향반사자료가 소량 함유하고 있는 역질보다는 사질이나 니질함량에 더 영향을 받는 것으로 보인다. 연구지역 남서

쪽에 비교적 넓게 분포하며 니질함량이 50% 이상인 (g)sM (Fig. 6)는 음향반사자료에서는 sM과 (g)mS로 나타났다 (Fig. 12). 이것은 역질함량의 차이가 근소한 sM과 구분되지 않았음을 보여주며, (g)mS의 경우 ground truthing에 의한 결과보다 조밀하게 이루어진 실시간 원격분류로 인해 (g)mS의 분포가 다소 드러난 것으로 사료된다. 마찬가지로 역질성분이 없는 cS의 경우 50~90%의 사질함량으로 인해 (g)mS로 구분된 것으로 보인다. 이런 결과는 역질함량이 소량일 경우 음향반사자료에 거의 영향을 미치지 못하며 니질보다는 사질함량이 음향반사자료에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

지금까지 QTC View를 이용한 원격분류결과는 많지 않으나, Galloway and Collins (1998)는 QTC View를 이용해 캐나다 밴쿠버섬의 연안저서환경을 조사하였으며 동시에 저주파 (38 kHz)와 고주파 (200 kHz)로 획득한 QTC View 자료를 비교한 결과 잘 일치하는 결과를 얻었다. Tsemahman and Collins (1997)는 같은 장비를 이용해 동일 해역에서 해저면 퇴적물을 4가지 유형으로 구분하여 조사한 결과가 ground truthing 자료와 잘 일치한다는 것을 제시하였다. 또한 Collins and McConnaughey (1998)도 역시 같은 방법으로 해양 저서생물의 적합한 서식환경 조사를 위한 베링해 (Bering Sea) 서부의 연안을 조사하여 유사한 결과를 얻었다. 이와 같이 QTC View를 이용하여 발표된 연구결과는 아주 제한적이지만 기존 연구결과 및 본 연구결과에서 비교적 잘 일치하는 것으로 미루어 볼 때 원격분류결과의 신뢰성은 인정된다고 생각된다.

그러나 보다 정확한 원격분류 자료를 획득하기 위해서는 상기에서 설명한 바와 같이 ground truthing에 의한 정밀한 퇴적물분석, 정확한 FFVs의 제작 및 catalogue 작성, 탐사장비의 최상의 조건과 균일한 환경설정, 숙달된 장비의 운영, 해양상태 등 조사전략이 면밀하게 계획되어야 한다. 또한 side scan sonar 등을 이용한 해저면의 조사를 병행한다면 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 본다. 결과적으로 QTC View를 이용한 해저퇴적물의 원격분류 방법은 경제적 및 시간적 효율성은 충분하다고 판단되며 차후에 더 많은 자료가 보강된다면 보다 정확한 퇴적물 분류가 가능하리라 확신한다.

결 론

QTC View를 이용한 부산 수영만의 해저 표층퇴적물의 원격분류결과와 ground truthing에 의한 표층 퇴적물 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ground truthing에 의한 연구지역의 표층퇴적물은 (g)mS, (g)S, (g)sM, gmS, cS, sM 그리고 rocky bottom의 총 7개의 퇴적물형으로 구분되었다. 퇴적물 분포양상은 (g)S가 넓은 지역에 걸쳐 우세하게 분포하고 있으며 그 다음으로 (g)mS가 분포하고 그외의 퇴적상은 국부적으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 전반적인 퇴적물 분포양상은 수심의 변화와 관계 있는 것으로 나타났다.

2. Side-scan sonar를 이용한 연구지역의 해저면탐사 결과 사질퇴적물에서는 연흔구조가 잘 발달하고 있으며, 특히 광안대로 공사 부근에 분포하고 있는 니질 퇴적물의 경우는 구조물에 의한 영향으로 표층의 긁힌 흔적이나 퇴적물의 교란현상이 확인되었다. 그러나 전반적으로는 해저면의 상태가 완만하며 큰 구조에 의한 지형 변화가 적어 음향측심기에 의한 음향반사자료의 획득에는 좋은 조건이라고 판단된다. 따라서 side-scan sonar 자료를 이용한 퇴적물 유형의 정밀한 구분은 어려우나 퇴적물에 따라 나타나는 특징적 구조와 해저면의 상태를 파악함으로서 QTC View를 이용한 원격탐사 결과와 병행할 경우 해저퇴적물 분포를 도면화하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

3. 음향반사자료를 이용한 수영만의 원격분류결과 중 후처리과정을 거쳐 4개의 퇴적물형으로 재수정한 catalogue를 이용하여 조사한 결과가 7개의 퇴적물형으로 조사한 1차 결과보다는 (g)S, (g)mS, sM 및 rocky bottom이 뚜렷하게 구분되며 ground truthing 자료와도 잘 일치하는 결과를 보여 주었다.

4. QTC View를 이용한 해양 표층퇴적물의 원격분류는 가능하나 소량의 함량차이로 퇴적물형이 구분되는 경우 퇴적물형을 뚜렷하게 분류하기는 쉽지 않았다. 따라서 ground truthing 자료를 이용 catalogue 작성시 퇴적물형을 분류하는데 보다 신중하게 고려되어야 할 것으로 본다.

5. QTC View를 이용한 원격분류작업시 양질의 음향반사자료를 획득하기 위해서는 QTC View의 최상의 조건, 음향측심기의 환경설정, 선박의 운항 상태, 장비의 운용능력, 그리고 현장의 해양학적 조건 등 조사전략을 면밀히 세워야 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

해양의 표층퇴적물을 분류하는 일반적인 방법은 ground truthing에 의한 것으로 시료채취 정점에 국한된 자료라는 한계성을 가지고 있다. 최근에는 원격분류방법의 개발로 인하여 이러한 한계성을 극복한 연속적인 자료를 얻을 수 있도록 가능하게 되었다. 본 연구에서는 해저면의 원격분류결과를 실시간 수치화된 자료로 얻을 수 있는 음향장비인 QTC View라는 기기를 이용해 부산 수영만의 표층 퇴적물을 원격분류 하였다. QTC View는 50 kHz의 음향측심기와 연결하였고 측정장비의 설정환경은 조사동안 일정하게 유지하였다. Ground truthing에 의한 시료 분석결과 수영만은 slightly gravelly sand, slightly gravelly sandy mud, gravelly muddy sand, clayey sand, sandy mud, slightly gravelly muddy sand 그리고 rocky bottom의 총 7개의 퇴적물형으로 분류되었다. QTC View를 이용한 1차 원격분류결과 이들 7개 중 slightly gravelly sand, gravelly muddy sand, sandy mud 및 rocky bottom 등 4개의 퇴적물형이 구분되었으며 이는 2차 원격분류결과에서도 유사하게 분포하는 것으로 확인되었다. Ground truthing에 의한 분류자료와 원격분류 자료를 비교한 결과 퇴적물형을 구분할 때 소량성분에 의해 서로 다르게 구분된 경우는 다소 차이가 있으나 연구지역 전반에 걸친 퇴적물의 분포양상은 잘 일치하는 것으로

나타났다. 따라서 QTC View는 해저퇴적물을 원격분류하는데 유효하게 이용될 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었으며, 일부는 서울대학교 수중음향특화연구센터의 연구지원에 의한 것임을 밝힙니다. 또한 논문의 질적인 향상을 위해 조언을 해준 미해군연구소 (Naval Research Laboratory)의 Michael D. Richardson 박사와 심사과정에서 세심한 비평과 건설적인 의견을 제시해 주신 심사위원님들께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Bahng, H.K. and J.K. Oh. 1993. Acoustic facies in the western South Sea, Korea. J. Korean Soc. Oceanogr., Korea, 28, 313~322.

Chang, J.K., H.J. Kim, H.T. Jou, B.C. Suk, G.T. Park, H.S. Yoo and S.J. Yang. 1998. Seabed classification using the K-L (Karhunen-Loeve) transform of chirp profiling data: An effective approach to geoacoustic modeling. J. Korean. Soc. Oceanogr., 3, 158~164 (in Korean).

Choe, K.Y. 1994. Geochemical characteristics of surface sediments in Suyoung Bay, Pusan, Korea. M.S. thesis, Pusan National University. 87pp (in Korean).

Collins, W.T. 1996. Echo sounder used for seabed classification. International dredging review, 10~11.

Collins, W.T., R. Gregory and J. Anderson. 1996. A digital approach to seabed classification. Sea Technolgy. 37, 83~87.

Collins, W.T. and R.A. McConnaughey. 1998. Acoustic classification of the sea floor to address essential fish habitat and marine protected area requirements. Proceedings of Canadian Hydrographic Conference, 9pp.

Folk, R.L. and W.C. Ward. 1957. Brazos River. A study in the significance of grain-size parameters. J. Sed. Petrol., 27, 3~27.

Folk, R.L. 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Hampill's Austin, Taxas, 170pp.

Galloway, J.L. and W.T. Collins. 1998. Dual frequency acoustic classification of seafloor habitat using the QTC View. Quester tangent corporation, 5pp.

Hamilton, L.J., P.J. Mulhearn and R. Poeckert. 1999. Comparison of RoxAnn and QTC-View acoustic bottom classification system performance for the Cairns area, Great Barrier Reef, Australia. Cont., Shelf Res., 19, 1577~1597.

Hwang, J.D. 1993. Dispersion of pollutant flowing into Suyoung Bay, M.S. thesis, National Fisheries University of Pusan, 44pp (in Korean).

Kim, S.L., H.R. Yoo, K.T. Park, Y.K. Lee and C.H. An. 1987. Processing and acoustic backscattering characteristics on the seafloor image by side scan sonar. J. Korean Soc. Oceanogr., 22, 143~152 (in Korean).

Kim, H.J., B.C. Suk, S.L. Kim and S.J. Han. 1990. Attenuation coeffi-cients and biogenic gas content in the offshore surficial sedi-ments around the Korean Peninsula, J. Korean Soc. Oceanogr., 25, 26~35 (in Korean).

Kim, H.J., J.K. Chang, H.T. Jou and G.T. Park. 2002. Seabed classification from acoustic profiling data using the similarity index. J.Acoust. Soc. Am., 111, 794~799.

Lambert, D.N., M.T. Kalcic and R.W. Faas. 2002. Variability in the acoustic response of shallow-water marine sediments determined by normal-incident 30 kHz and 50 kHz sound. Mar. Geol., 182, 179~208.

LeBlanc, L.R., L. Mayer, M. Rufino, S.G. Schock and J. King. 1991. Marine sediment classification using the Chirp sonar. J. Acoust. Soc. Am., 91, 107~115.

Morrison, M.A., M.A. Thrush and R. Budd. 2001. Detection of acoustic class boundaries in soft sediment systems using the seafloor acoustic discrimination system QTC View. J. Sea Res., 46, 233~243.

Panda, S., L.R. LeBlanc and S.G. Schock. 1994. Sediment classification based on impedance and attenuation estimation. J. Acoust. Soc. Am., 96, 3002~3035.

QTC View manual. 1997. 91pp.

Schock, S.G. and L.R. LeBlanc. 1990. Chirp sonar: new technology for sub-bottom profiling. Sea technology, 31, 35~43.

Schock, S.G., L.R. LeBlanc and L.A. Mayer. 1989. Chirp subbottom profiler for quantitative sediment analysis. Geophysics, 54, 445~450.

Schock, S.G. and L.R. LeBlanc. 1992. Sediment classification using the Chirp sonar. OTC, Houston Texas, 6851, 363~368.

Tsemahman, A.S. and W.T. Collins. 1997. Acoustic seabed classification correlation analysis of sediment properties by QTC View. OCEANS '97, 8pp.

Walter, D.J., D.N. Lambert and D.C. Young. 2002. Sediment facies determination using acoustic techniques in a shallow-water carbonate environment, Dry Tortugas, Florida. Mar. Geol., 182, 161~177.

김원식, 박관순, 한현철, 진재화, 김정기, 김상우, 박기화, 이봉주, 이사로. 1996. 광안대로 건설을 위한 해양 지구물리 탐사 최종 보고서. 한국자원연구소, 82pp.

2002년 2월 18일 접수
2002년 5월 10일 수리