

## 서해 경기만에서의 고해상도 탄성과 탐사를 이용한 퇴적환경 및 퇴적층서 연구

이광수\*·김대철·서영교<sup>1</sup>·이희일<sup>2</sup>·유신  
부경대학교 에너지자원공학과, <sup>1</sup>지마텍(주), <sup>2</sup>한국해양연구원

## Sedimentary Environment and Sequence Study using High Resolution Seismic Survey in Gyunggi Bay, the Yellow Sea

Gwang Soo Lee\*, Dae Choul Kim, Young Kyo Seo<sup>1</sup>,  
Hi Il Yi<sup>2</sup> and Shin Yoo

*Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University,  
Busan 608-737, Korea*

<sup>1</sup>*Gematek Corporation, Busan 608-020, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Marine Environment Research, Korea Ocean Research &  
Development Institute, Ansan 425-600, Korea*

High-resolution (Chirp and Sparker system) seismic profiles were analyzed to investigate the sedimentary sequence and distribution pattern of the late Holocene deposits in Gyunggi Bay, the Yellow Sea. The bay is located in the western part of Korea, east of the Yellow Sea. The sedimentary sequence divided into three units bounded by erosional bounding surface: (1) acoustically parallel to subparallel reflectors with cross bedding structures (Unit 1); (2) confused inner reflectors and top of unit exposed partially at the seafloor (Unit 2); and (3) approximately parallel reflections and regressive to transgressive incision-fills (Unit 3). On the basis of seafloor morphology, surface bedforms, and subbottom acoustic characters, echo types in the study area were identified following the schemes of Chough et al. (2002); (1) flat seafloor with sharp bottom echoes (echo types 1-1, 1-2 and 1-3; transgressive sediment sheets or relict sands), (2) mounded seafloor with either smooth surface or superposed bedforms (echo types 2-1 and 2-2; tidal ridges), and (3) various-scale eroded seafloor (echo types 3-1 and 3-2; channels). Suspect features of acoustic turbid zones which is related to gas charged sediment are reported.

Key words: Gyunggi Bay, Sedimentary sequence, Sedimentary environment, Echo type, High resolution seismic survey

### 서 론

황해는 후기 플라이스토세의 최후 빙하기 이후부터 홀로세 동안 해수면 변동에 의해 다양한 해저지형과 저해수면 침식곡을 채우는 조석기원 퇴적체 및 해침 퇴적물들에 의해 복잡한 지층 내부구조를 가진 것으로 알려져 있으며 (Jin and Chough, 1998; Park et al., 1994; Jung et al., 1998; Ryang et al., 2001; Park et al., 2000; Chough et al., 2002; Yoo et al., 2002; Chough et al., 2004), 중국의 황하강과 양자강, 한반도의 한강, 영산강과 금강 등으로 부터 공급되는 막대한 양의 육상기원 퇴적물이 강한 조류와 하계연안류 (summer-season coastal currents)에 의해 연안에서는 점토가 우세한 조건대가 분포하고 외해에서는 사주가 넓게 분포하는 특징을 보인다 (Choi, 1991; Bahng et al., 1994; Oh and Kum, 2001). 경기만은 위에 열거한 특징을 포함하는 복잡한 지층 내부구조와 함께 넓은 조건대, 깊은 수로 그리고 북동-남서의 조류 방향과 평행한 조석 사주가 잘 발달된 지역이다 (Fig. 1). Chough et al. (2004)은 경기만

해역을 포함한 황해의 해저지형과 지층내부구조를 밝히기 위해 탄성과 탐사를 실시하였고 코어 시료의 연대측정 자료와 비교하여 황해의 제 4기 퇴적층의 퇴적 과정에 관한 연구를 하였다. Bahng et al. (1994)과 Park and Yoo (1997)는 탄성과 탐사를 통해 경기만 해역의 사질퇴적체를 포함한 현생 퇴적물 이동체계와 역사에 대해 연구하였다. Jin (2001)은 경기만에서 획득한 탄성과 탐사자료와 황해 제 4기 지층 시추 프로그램을 통해 획득한 심부시추코어 (KIGAM, 1997)를 이용해 퇴적층서를 분류하고 퇴적모형을 제시하였다. 국립해양조사원 (NORI, 2004; 2005; 2006) 역시 경기만에서 연안해역 해저정보 조사를 시행하였다.

고해상도 탄성과 탐사 장비를 이용한 해저지층탐사는 해저 지형이나 천부 및 심부의 퇴적구조와 퇴적환경을 연구하는데 큰 기여를 해왔으며, 고해상도 탄성과 단면에 영상화 된 퇴적체의 음향상과 지역적인 분포는 퇴적과 침식과정을 해석하는데 중요한 기초가 된다 (Damuth, 1975, 1980; Damuth and Hayes, 1977). Chough et al. (2002)은 황해 중부에서 동부에 이르는 천부 퇴적체를 탄성과 단면에 나타나는 해저지형과

\*Corresponding author: coolks@pknu.ac.kr

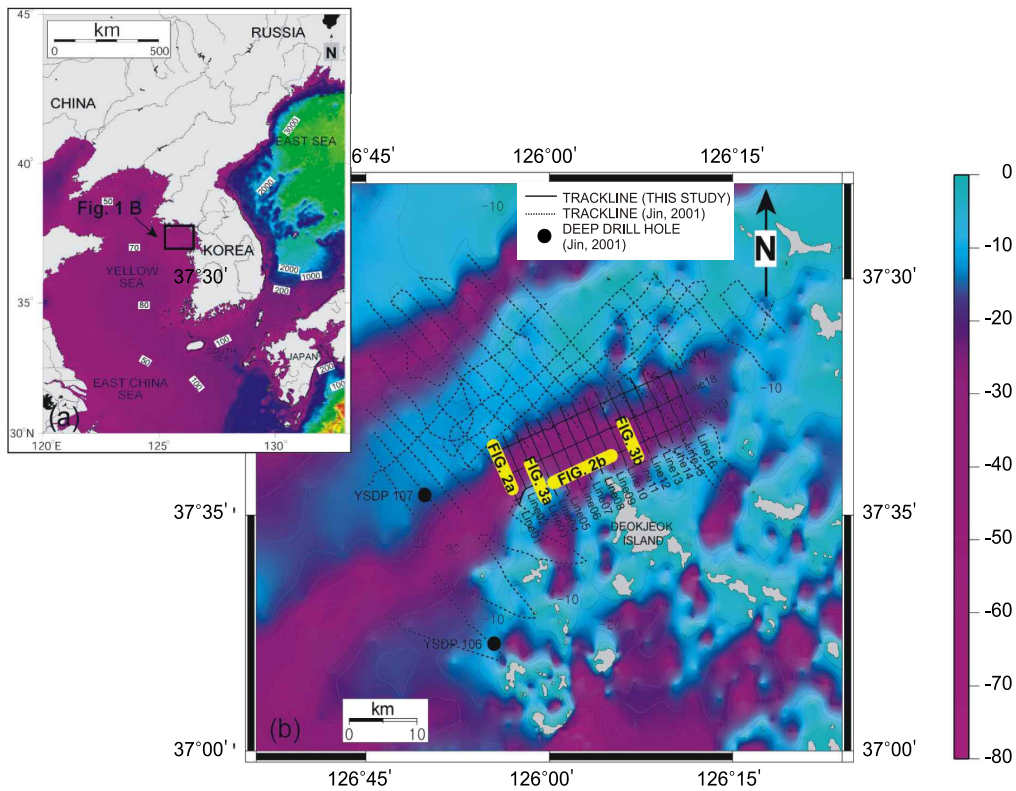


Fig. 1. (a) Location and the study area. (b) Track lines are indicated by solid lines. Contours in meters. Note the lines used for profiles of Figs. 2a·b and 3a·b.

지층내부음향특성을 기준으로 음향상을 분류하고 그 분포도를 도시함으로써 황해 퇴적물의 퇴적과 침식과정을 연구하였다. Park et al. (1994) 역시 황해 중부해역 내대륙붕과 연안해역 퇴적상의 분포와 그에 따른 퇴적과정을 규명하고자 하였다. 이와 같은 퇴적상 분류와 분포도 작성은 천부퇴적체의 분포특성과 퇴적물의 이동현상을 규명하는데 큰 역할을 하며, 탄성과 탐사를 통한 퇴적층서 연구가 함께 이루어 질 때 연구지역의 정확한 퇴적환경을 밝힐 수 있다. 그러나 이러한 시도는 경기만 일대에서는 드물며, 연구 또한 여전히 부족한 상황이다. 특히 경기만에 발달된 조석사주와 사주 사이의 골을 포함한 퇴적물 이동 및 퇴적기작에 대한 연구는 많이 부족하다.

따라서 본 연구에서는 다양한 퇴적환경이 나타나는 경기만의 덕적도 부근 해역에서 고해상도 탄성과 탐사를 통해 연구지역의 홀로세 퇴적체의 층서 구분 및 분포와 Chirp 음향상과 그 분포를 기술하고, 퇴적작용을 고찰함으로써 조석사주가 발달한 경기만의 과거 해저지층 구조와 퇴적환경을 규명하고자 한다.

### 연구해역

경기만은 북쪽의 연평도와 남쪽의 울도로 경계되어 지는 서해 동부 해안의 만으로써, 50여 개의 크고 작은 섬들과 육지로 둘러싸인 복잡한 지형적 특성을 가지며, 넓은 조간대, 깊은 수로, 그리고 북동-남서의 조류 방향과 평행한 사퇴 (sand

ridge)가 특징적이다 (Fig. 1). 경기만의 수심은 0 - 40 m (평균 20 m)의 분포를 보이며, 전반적으로 남서 방향으로 완만하게 깊어지는 가운데, 섬 주위의 주수로 (tidal channel)에서 약 30 m의 깊은 수심을 보인다 (NORI, 2004).

연구해역의 조석은 반일주조류가 우세한 왕복성 조류로 규칙적인 일일 2회의 창조류 및 낙조류가 일어나며 그 조류의 방향은 대체로 조류로의 방향과 평행한 북동-남서 방향이 우세하다. 연구지역에서의 평균조차는 5 m 이며, 대조기와 소조기의 조차는 각각 7 m, 3 m이고, 창조류와 낙조류의 최대 유속은 각각 2.2 m/s와 3.0 m/s이다 (NORI, 2004).

경기만은 북서쪽의 염하수로를 통하여 연간  $1.25 \times 10^6 - 7.5 \times 10^4$  ton의 퇴적물이 한강으로부터 유입되는 것으로 알려져 있지만 (Schubel et al., 1984; Suk, 1989), 계절적 강수량 편차와 댐 건설 등에 의해 변화가 심하다. 한강하구로부터 유입된 부유퇴적물은 높은 조차와 강한 조류에 의하여 대부분이 조간대역에 퇴적되거나 만조와 간조사이에 수괴의 상부층을 통해 경기만 일대 해역으로 확산, 이동된다 (Baek, 1991). 경기만의 강한 조류에 의한 불안정한 표층퇴적환경으로 인해 전반적으로 해안에 가까워질수록 표층퇴적물 입자는 세립해지며 (Lee et al., 1992), 왕복성 조류가 활발한 지역에서 사퇴 퇴적물의 선택적인 집적에 의한 사퇴 (sand ridge)가 조류방향과 평행하게 분포하고 그 사이로 해저 골이 형성되어 있다. 곳에 따라 조류의 유속이 큰 주수로에서는 자갈이나 해저기반암이

노출되어 나타나기도 한다.

재료 및 방법

조석사퇴에서 해저수로까지 연결되는 퇴적층서의 변화와 다양한 퇴적상을 살펴보기 위해 경기만 덕적도 북쪽지역에서 북서-남동 방향을 주탐사축선으로 설정 하여 총 200 km 의 탄성과 자료를 획득하였다 (Fig. 1b). 본 연구에 사용된 탄성과 탐사 장비는 Chirp Acoustic Profiler III (Benthos)와 Sparker System (EG&G)이며 각각 2-7 kHz, 30-2,000 Hz의 주파수 대역을 가진다. Chirp sonar는 시간 증가에 따라 주파수가 증가하는 sweep signal을 음원으로 사용함으로써 적은 에너지로 투과심도를 깊게 할 수 있고, 심도에 관계없이 일정한 분해능을 유지시킬 수 있다. 또한 수신신호의 자료처리 과정을 통하여 신호대 잡음비의 향상과 더불어 인접한 반사 이벤트들을 압축시켜 더욱 정밀한 퇴적층간 구별이 가능한 장점이 있다 (Schock et al., 1989; LeBlanc et al., 1992).

스파커 탄성과 탐사에너지는 1,000 J 의 음원을 사용하였고, 해저 지층으로부터 반사되어 오는 음파를 수신하기 위하여 12 개의 수신자 (element)가 일렬로 연결되어 있는 수중 스트리머 (hydro-streamer)를 이용하였다. 본 연구에서 획득된 자료를 주파수 대역 필터 (band-pass filter)와 AGC (Auto Gain Control) 필터를 거쳐 SU (Seismic Unix)와 KINGDOM Suit (V. 8.1)프로그램을 통해 고해상도탄성과 단면을 구현했다. 현장조사 시 자료의 정확한 위치를 구하기 위해서 조사선박의 선위는 Differential Global Positioning System (DGPS)를 사용하여 결정하였다.

취득된 탄성과 자료를 이용하여 연구지역에 분포하는 퇴적체의 층서 구분과 각각의 분포형태에 대한 해석을 시도하였다. 특히 취득된 각각의 반사파의 음향학적 특성을 해저면과 그 하부의 내부 반사면으로 주로 구분하여 반사파의 명확성, 측면 연속성 및 형태, 해저지형 등 다양한 요소를 고려하여 탄성과 음향상을 구분하고 자료를 해석하였다.

결과 및 고찰

퇴적층서

연구지역은 음향기반암 위로 세 개의 탄성과 퇴적단위 (Unit 1, Unit 2, Unit 3)로 구분되며, 각 퇴적단위는 침식작용에 의한 부정합면으로 경계되어진다 (Figs. 2, 3). 최상위 퇴적층서인 Unit 1은 사층리 반사구조와 준평형 반사층리의 특성을 보이며, 약 0 - 30 m 의 두께를 가진다. 연구지역의 남서쪽의 남쪽과 북쪽의 두 지역에서 나타나며 (Fig. 4), 연구지역의 중심부로 갈수록 Unit 1의 두께가 얇아지며 수심이 깊어지는 방향으로 전진 구축하는 형태를 보인다. 전체적으로 평탄한 불연속 경계면 위의 Unit 1은 북서-남동 방향으로 급격한 경사를 보이는 반면, 북동-남서 방향으로는 완만한 기울기를 가진다. 연구지역의 남서쪽에 위치하는 Unit 1의 가장 윗부분 일부에서는 조류의 강한 왕복운동에 의해 표면에 연흔 형태의 층면구조가 나타난다 (Fig. 3a).

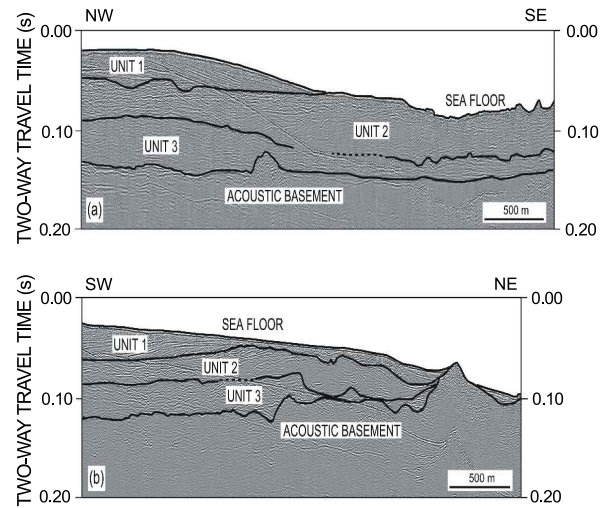


Fig. 2. Sparker seismic profiles and interpretation of study area. The sedimentary sequence includes three units (Unit 1, Unit 2, and Unit 3) bounded by erosional bounding surface. See Fig. 1b for location.

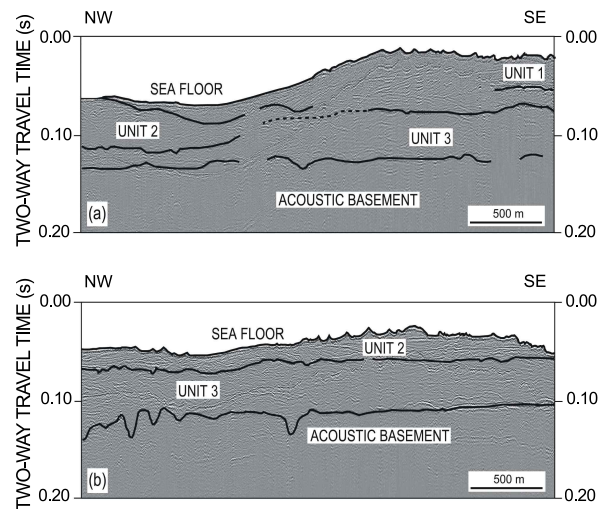


Fig. 3. Sparker seismic profiles and interpretation of study area. Superposed bedforms appear above the surface of Unit 1 (a) and Unit 2 (b) where exposed at the seafloor. Unit 3 includes incision-fills above the acoustic boundary (b). See Fig. 1b for location.

Unit 2는 각각의 경계면이 굴곡이 심하고 복잡한 반사특성을 가지며, 강한 진폭의 내부 층리들이 불규칙적이고 비연속적으로 나타난다 (Figs. 2, 3). 두께는 약 0 - 50 m이며, Unit 1이 상부에 존재하는 연구지역 서쪽 일부와 침식에 의해 Unit 3 또는 음향기반암이 노출된 덕적도 북쪽 지역을 제외한 연구지역 대부분에서 해저면에 노출되어 있다 (Fig. 4). 해수 노출에 의한 상부 침식의 흔적을 보이며, 수심이 깊어지는 연구지역의 덕적도 북쪽 지역과 연구지역 북동쪽에서 두께가 얇아진다 (Fig. 2). Unit 2는 일부 지역에서 내부 또는 표면에서 부분적

으로 convex-upward 한 형태를 보이며 Unit 1과 마찬가지로 강한 조류의 왕복운동으로 일부 해저면에 노출된 지역에서 표면에 연흔이 나타난다 (Figs. 2a, 3b). Unit 2와 Unit 3를 구분 짓는 불연속 경계면은 전체적으로 평탄하지만 부분적으로 침식에 의해 굴곡이 큰 특징을 가진다.

Unit 3는 비교적 평행한 강한 진폭의 내부반사면과 수로충진 구조의 특성을 가지며 일부지역에서는 침식에 의한 매우 불규칙한 퇴적양상이 나타난다 (Figs. 2, 3). Unit 3의 두께는 약 0 - 70 m 이며, 매우 불규칙하고 울퉁불퉁한 음향 기반암 위에 놓여 지역에 따라 두께의 변화가 크게 나타난다. 덕적도 인근지역에서 수심이 깊어짐에 따라 Unit 3의 두께가 점점 얇아지며 상부 층서인 Unit 2가 나타나지 않으면서 Unit 3가 일부 해저에 직접 노출되기도 한다 (Figs. 2b, 4). 덕적도 주위로 갈수록 퇴적층의 두께가 얇아지면서 결국 Unit 3 역시 나타나지 않으며, 음향기반암이 직접 노출된다. 일부 지역에서는 침식에 의한 고수로로 보이는 음향기반암 위에 Unit 3가 충진하는 형태로 나타난다 (Fig. 3b).

음향기반암은 내부 반사면이 거의 나타나지 않으며, 비교적 뚜렷한 표층 반사면이 특징적이나, 국지적으로는 상부 퇴적층과의 경계부가 모호하거나 탄성과 단면에서 인식되지 않는 경우도 있다.

Jin (2001)은 본 연구지역 인근에서 획득한 탄성과 탐사자료와 심부시추코어 (YSDP 106, 107) 자료 (Fig. 5)를 이용해 퇴적층서를 분류하고 퇴적 모델을 제시하였다. 또한 덕적도 북서쪽과 서쪽의 2개의 사퇴에서 각각 퇴적층서를 크게 SU IA와 SU IB (덕적도 북서쪽 사퇴), SU IIA, SU IIB, 그리고 SU IIC (덕적도 서쪽 사퇴)로 분류하고, 다시 여러 개의 세부층서로 구분하였다. 국립해양조사원 (2004, 2005, 2006) 역시 연안해역 해저정보조사를 위해 본 연구지역 인근에서 탄성과 탐사를 통한 퇴적층서 분류를 시행하였으며, 총 4개의 퇴적층서 (Unit 1 - 4)로 구분한 바 있다.

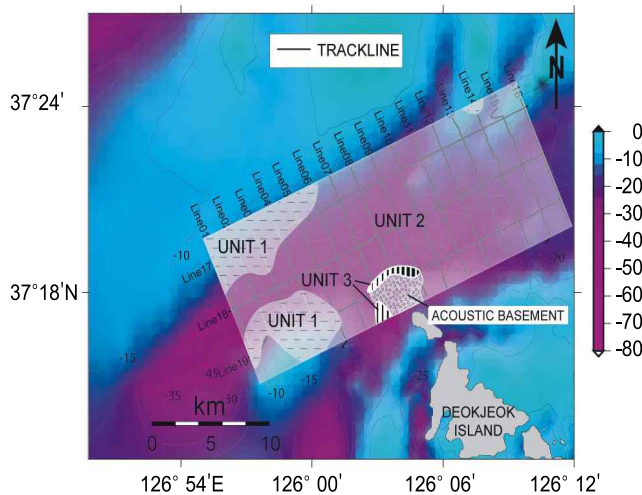


Fig. 4. Distribution of depositional units of the Gyunggi Bay area. Contours in meters. Unit 2 dominates the study area.

본 연구에서는 심부시추 코어 자료가 없기 때문에 직접적인 층서 해석은 불가능하지만, Jin (2001)의 연구지역 층서분류와 비교해 한국지질자원연구원의 심부시추코어 (KIGAM, 1997; YSDP 106, 107)자료를 적용시킬 수 있다. 그 결과, Unit 3는 YSDP 106의 6III 와 YSDP 107의 7V, 7VI, 7VII에 해당되며, Unit 2는 YSDP 106의 6II 와 YSDP 107의 7III층과 일치하고, Unit I은 YSDP 106의 6I 와 YSDP 107의 7I층에 해당된다 (Fig. 5). 따라서 본 연구지역의 Unit 3은 최후 빙하기 (18,000yr B.C. 이전) 동안 형성된 비해양기원 퇴적체로 생각된다. 해수면의 하강에 의해서 해저면이 대기하에 노출되어 형성된 침식 계곡 (incised valley) 등의 저지대를 해퇴 후기부터 해침 초기까지 하천 또는 연안조간대 퇴적물인 저해수면계 퇴적물 (lowstand sediment)로 충진되면서 이처럼 강한 진폭의 하부 침식면과 비교적 평행한 내부 반사면을 가지는 것으로 해석된다.

Unit 2는 해침기간동안 담수와 해수가 혼합되면서 만들어진 강어귀 퇴적체 일 것으로 추정된다. 해침 침식면으로 사료되는 하부 경계면위로 퇴적과 침식이 반복되면서 복잡한 내부 반사면을 형성했을 것이다. Unit 2의 내부에서 보이는 비연속적인 내부반사면들과 세부층서들은 최후빙하기 이후 해침에 따른 침식이 있었음을 보여주고 있다.

Unit 1은 홀로세 이후 고해수면계 퇴적물 (highstand sediment)로 형성된 퇴적체로써 연구지역에서는 강한 조류에 의해 선택적 집적과 침식으로 인해 사퇴의 상부를 형성하며 준평형의 사층리 구조를 보이는 것으로 생각된다.

#### 음향상

본 연구지역의 Chirp profiler에 의한 음향상을 Chough et al. (2002)의 분류를 기준으로 표면반사파와 내부반사파의 음향특성에 따라 편평한가 (Flat echoes; 음향상 1), 둔덕 모양인가 (Mounded echoes; 음향상 2), 불규칙하게 패였는가 (Irregular gullies echoes; 음향상 3)에 따라 크게 3개의 주요한 음향상으로 나누었으며, 이를 다시 총 7개의 음향상으로 세분하고 그 분포도를 작성하였다 (Table 1, Figs. 6, 7).

전반적으로 음향상이 혼재되어 복잡한 분포양식을 보이는 가운데 북동-남서 방향으로 길게 늘어져있다. 연구지역의 중심을 기준으로 좌우로 비교적 편평한 1번 음향상들이 분포하며, 사퇴의 끝부분에 해당하는 서쪽지역의 남쪽과 북쪽 두 지역에서 2번 음향상들이 주로 나타나고 연구지역 북동쪽과 덕적도 북쪽지역에서 거친 반사면을 보이는 3번 음향상들이 우세하게 나타난다 (Fig. 7).

#### 음향상 1-1

해저면은 대체로 평탄하고, 표면반사파가 뚜렷하여 내부반사파가 나타나지 않는다 (Fig. 6a). 일부 하부 반사파가 존재하기도 하나, 매우 불규칙하고 표면반사파가 확산되어 나타나 구별이 쉽지 않다. 연구지역 중심부의 수심이 비교적 깊은 곳에서 북동-남서 방향으로 발달하며 그 외 일부 지역에서 국지적으로 나타난다 (Fig. 7).

표면에서 반사파가 뚜렷하게 나타나며, 음파가 퇴적물 내로 거의 투과하지 못하는 것으로 보아 조립퇴적물이 천부에

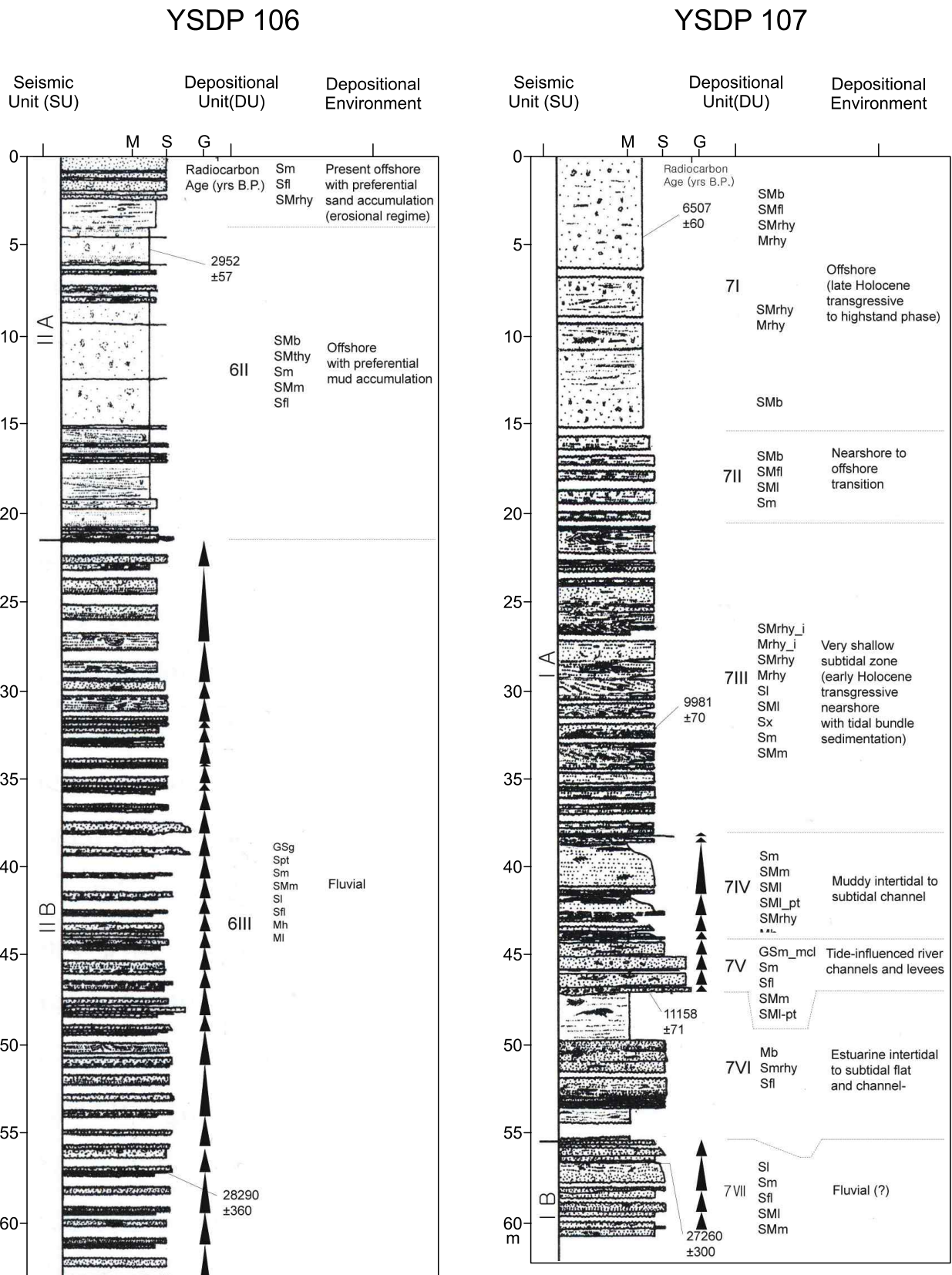


Fig. 5. Analytical results of a deep drill hole (modified after Jin, 2001).

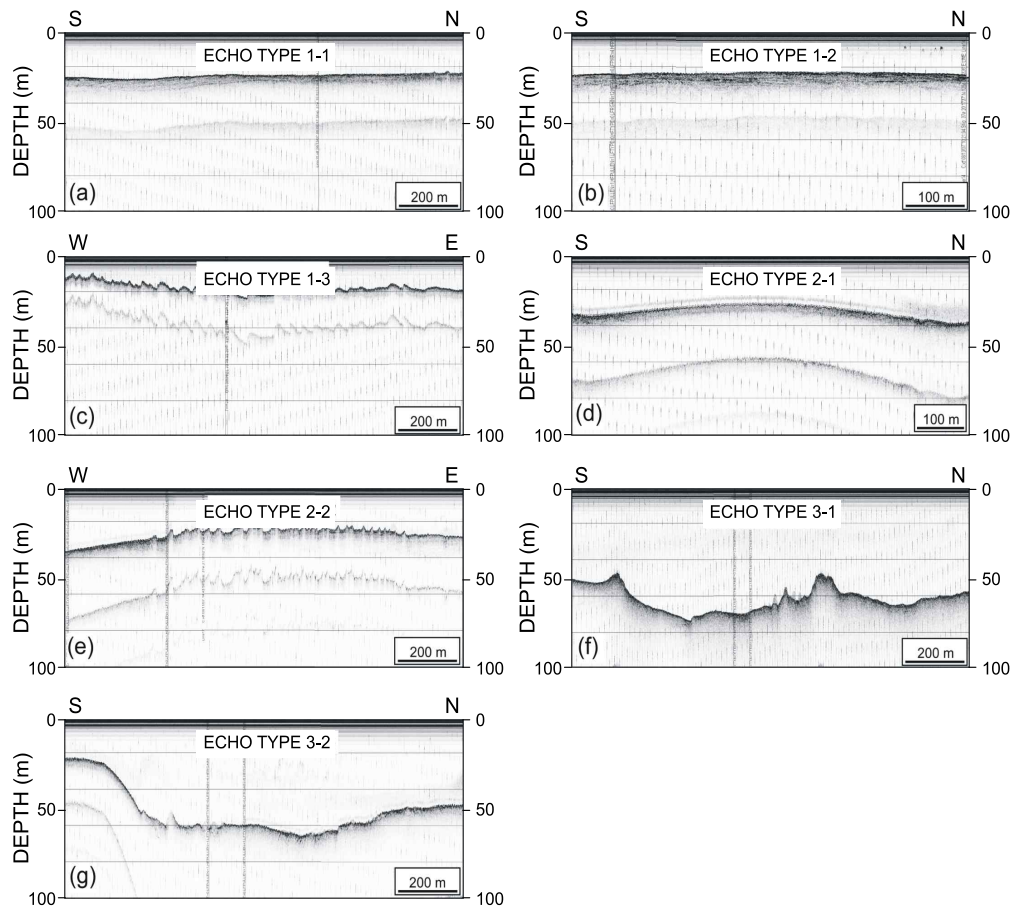


Fig. 6. Chirp seismic profiles of echo types identified in the study area: (1) flat seafloor with sharp bottom echoes (echo types 1-1, 1-2 and 1-3; transgressive sediment sheets or relict sands), (2) mounded seafloor with either smooth surface or superposed bedforms (echo types 2-1 and 2-2; tidal ridges), and (3) various-scale eroded seafloor (echo types 3-1 and 3-2; channels).

두껍게 쌓여 있는 것으로 생각된다. 일부 지역에서는 표층반사파가 다소 확산되어 나타나기도 하는데, 이는 해저표면에 고주파 음향으로 분해하기 힘든 작은 규모의 퇴적구조가 분포하거나 상대적으로 세립질의 퇴적물이 존재 할 때 나타나는 것으로 알려져 있다 (Ewing et al., 1973; Damuth, 1980).

#### 음향상 1-2

대체로 평탄한 해저면과 뚜렷한 표면 반사파를 보이면서, 음파에너지가 해저면 아래 약 10 - 20 m 까지 비교적 깊이 투과된다 (Fig. 6b). 내부반사면은 부분적으로 끊기거나 다소 경사져 있으나 전체적으로는 표층반사면과 평행하며 반사면은 대부분 뚜렷하지 않고 다소 확산되어 있다. 주로 연구지역의 중심부와 남동쪽 외곽의 수심변화가 적은 지역에서 넓게 분포한다 (Fig. 7).

분명한 표면 반사파와 다수의 내부 반사면은 음향상 1-2의 구성 퇴적물이 음향상 1-1 보다 비교적 세립하거나 덜 고화되었음을 지시한다 (Damuth 1978; Chough et al. 1997). 지형적으로 수심 변화가 적은 지역에서 분포하는 것으로 보아, 상대적

으로 조용한 환경에서 형성된 퇴적층으로 사료된다.

#### 음향상 1-3

대체로 평탄한 해저면 위에 연흔형태의 층면구조가 규칙적으로 표면에 잘 발달되어 있다 (Fig. 6c). 연흔의 높이는 약 3 - 7 m, 폭은 20 - 70 m 정도이며, 북동에서 남서방향으로 약 5 - 20°가량 기울어져 있다. 연구지역의 북동쪽에서 북동-남서 방향으로 분포하는 경향을 보인다 (Fig. 7).

이러한 연흔구조는 황해 동부의 강한 조류의 왕복운동을 통해 형성되며, 일반적으로 사질 퇴적물로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다 (Jin and Chough, 2002). 북동-남서 방향의 탄성과 단면상에서 연흔구조가 더 뚜렷하게 보이는 점은 조류의 왕복운동 방향이 북동-남서 방향으로 이루어짐을 시사한다.

#### 음향상 2-1

해저면이 구릉형태를 보이며, 탄성과 단면상에서 표면은 매끈하다 (Fig. 6d). 구릉이 끝나는 골 (trough) 지역에서는 표층 반사파가 확산되어 보이거나 내부반사면이 일부 나타나는 경우도 있지만 마루 (crest) 지역에서는 하부반사면이 보이지

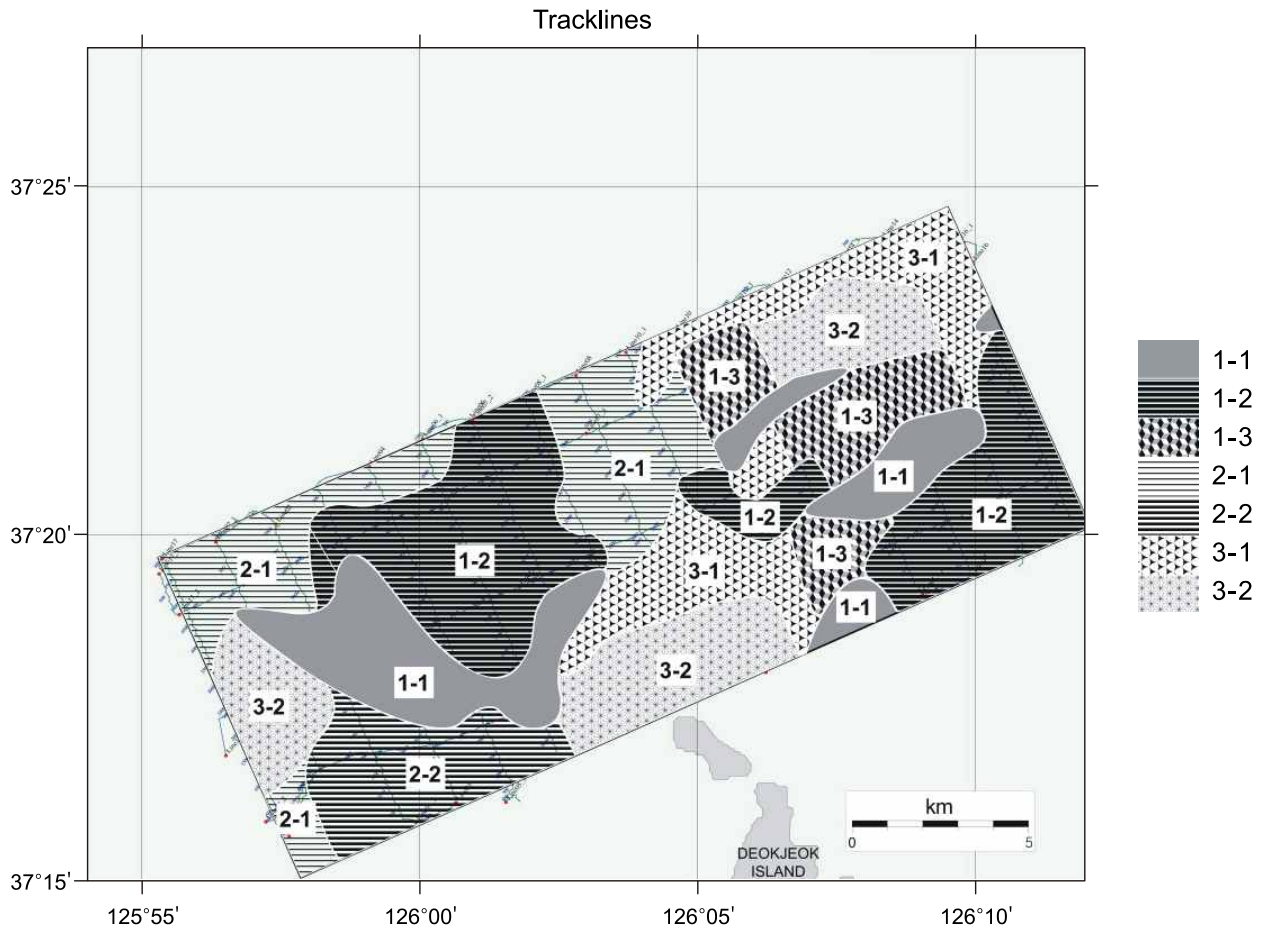


Fig. 7. Distribution of echo types in the study area. Flat echo type 1 dominates in the center and eastern part of study area. Mounded echo type 2 appears mainly in the western part that is overlain by sedimentary sequence Unit 1. Echo type 3 is comprehensively distributed to the northeastern part of study area and the northern part of Deokjeok island with exposed seafloor.

Table 1. Summary of echo types (modified after Chough et al., 2002)

| Class | Type | Line drawing | Description   |   |
|-------|------|--------------|---|---|
| 1     | 1-1  |              | Relatively flat seafloor with no subbottom reflectors             | Seafloor covered by coarse-grained sediments, relict sands    |
|       | 1-2  |              | Flat seafloor with little subbottom reflectors                    | Seafloor covered by relatively fine-grained surface sediments |
|       | 1-3  |              | Flat seafloor covered by regularly spaced, wavy bedforms          | Large-scale dunes formed by tidal currents                    |
| 2     | 2-1  |              | Mounds with no bedforms, with absent internal reflectors          | Tidal ridges, temporarily dormant                             |
|       | 2-2  |              | Mounds covered by bedforms  | Tidal ridges, subaqueous dunes, active                        |
| 3     | 3-1  |              | Regionally flat seafloor incised by shallow troughs               | Shallow channel incision by strong currents                   |
|       | 3-2  |              | Sea floors of great topographic relief and deeply incised valleys | Extensive channel erosion or acoustic basement                |

않는다. 이러한 구릉의 높이는 약 10 - 30 m 이며, 길이는 약 1 km 이상이다. 연구지역의 서쪽 외곽 수심이 급격히 변화하면서 이와 같은 구릉형태의 음향상이 나타난다 (Fig. 7).

음향상 2-1과 같은 해저지형 및 음향특성은 조석사퇴 (tidal sand ridges)에서 주로 나타난다 (Jin and Chough, 2002). 구릉의 마루 지역이 골 지역에 비해 표면 반사면이 더 뚜렷하고 탄성과 투과깊이가 얇은 것은 지역적 조석운동에 의해 세립질 퇴적물이 골 지역에 집적되었거나, 탄성과 산란특성에 의해 골 지역에서 표면 반산파가 확산되어 나타나기 때문이다 (Sylwester, 1983).

#### 음향상 2-2

전체적으로 구릉형태로 음향상 2-1과 비슷한 특성을 가지나, 표면에 연흔 형태의 층면구조가 나타난다 (Fig. 6e). 구릉의 가장 윗부분인 마루 (crest)지역에서 연흔이 분포하며, 연흔의 높이는 약 2 - 10 m, 폭은 10 - 50 m 로 음향상 1-3의 연흔에 비해 비교적 작은 크기를 가지고 있다. 연구지역의 남서쪽 사퇴일부에서 나타난다 (Fig. 7).

조석사퇴 (tidal sand ridges)의 가장 윗부분에서 연흔구조가 나타나는 것은 이 지역에 강한 조류의 왕복운동으로 현재에도 이 사퇴가 만들어지고 있거나, 또는 침식에 의한 사퇴가 쇠퇴 단계에 도달했음을 지시한다 (Jin and Chough, 2002).

#### 음향상 3-1

해저면이 전체적으로는 평탄한 가운데, 작은 규모의 골 형태가 널리 발달되어 있다 (Fig. 6f). 표면반사파가 매우 강해 지층 내부 반사면은 나타나지 않는다. 골의 높이는 약 5 - 20 m 이며, 폭은 약 20 - 400 m 의 분포를 보인다. 연구지역의 가운데 지역과 북동쪽의 수심이 깊은 지역에 위치하며 음향상 3-2를 감싸는 형태로 분포하고 있다 (Fig. 7).

강한 조류에 의해 해저면이 깊게 침식된 결과로 해석되며, 음향상 3-2 주위에 분포하고 비교적 작은 규모의 침식형태를 보이는 점을 미루어 음향상 3-2의 침식 수로의 중간 단계로 볼 수 있다.

#### 음향상 3-2

불규칙적이고 고도차이가 큰 골 형태의 해저지형을 가지며 표면반사파가 강하고 뚜렷해 내부반사면이 나타나지 않는다 (Fig. 6g). 높이 약 20 - 40 m, 폭 1 - 4 km의 수로형태를 보이고 있다. 따라서 연구지역의 서쪽과 턱적도 북쪽의 수심이 가장 깊은 지역에서 나타난다 (Fig. 7).

강한 조류의 영향으로 해저면이 침식되어 형성된 것으로 해석되며, 연구지역에서는 사퇴와 사퇴 사이의 해저수로와 섬 주위의 빠른 유속에 의해 들어난 기반암이 이 음향상에 해당된다.

#### 음향이상

일부 탄성과 단면도 (Sparker) 상에서 강한 진폭의 연속적인 내부 반사면들이 특정지역에서 갑자기 끊어지면서 음파가 차단되어 나타나는 음향흔락층이 보인다 (Fig. 8). 음향흔락층에 의한 음향이상은 퇴적물 내에 천부가스가 존재함에 따라 탄성파가 퇴적물 내에서 음파 속도 감쇠와 음에너지 감쇠

및 산란에 의해 나타나는 것으로 알려져 있다 (Hampton and Anderson, 1974; Briggs and Richardson, 1996).

본 연구지역에서 나타나는 음향이상은 상부반사면이 대체로 평탄하면서 하부반사면을 완전히 차폐하고 있다. 해저면 아래 약 3 - 30 m 깊이에 상부 반사면이 존재하며 음향이상의 양쪽 끝 부분은 날카롭게 잘려 나간 형태를 보이고 있다. 음향이상은 연구지역 중앙부에서 북동쪽으로 약간 치우쳐 약 4 km<sup>2</sup>의 면적에 걸쳐 분포하며, 북서-남동 방향으로 약 1 km, 북동-남서 방향으로 약 4 km의 길이로 북동-남서 방향으로 길게 늘어져 있다 (Fig. 9).

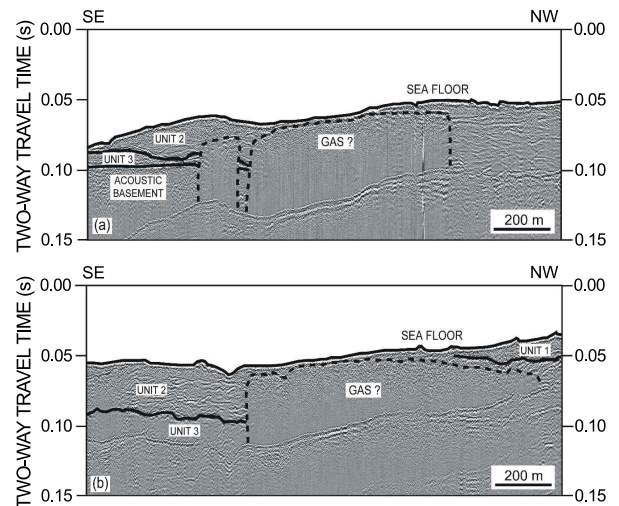


Fig. 8. Sparker seismic profiles of gas-related sediments in the study area. Location is indicated in Fig. 9.

음향이상의 원인이 되는 천부가스는 퇴적물내의 유기물이 박테리아에 의해 분해 및 생화학 작용을 거치면서 발생되며, 대부분 메탄가스로 이루어져 있는 것으로 알려져 있다 (Floodgate and Judd, 1992). 우리나라 주변지역에서도 울산연안을 포함한 동남해역 (Park et al., 1999; Kim et al., 2004)과 진해만 (Lee, 1992; Park and Lee, 1996; Kim et al., 2008), 그리고 광양만과 여수해만 일대 (Oh et al., 2000) 등 여러 만 및 연안지역에서 천부가스에 의한 음향이상 이 보고된바 있다. 하지만 이들 천부가스에 의한 음향이상은 모두 니질퇴적체에서 나타나는 반면, 본 연구지역에 존재하는 음향이상은 사질니 또는 니사질 퇴적체에서 나타나고 있다.

일반적으로 천부 퇴적물의 가스 생성은 그 지역의 유기물 함량, 퇴적물, 그리고 퇴적환경 등에 의해 좌우된다 (Floodgate and Judd, 1992). 유기물 함량은 퇴적물이 세립 할수록 높은 것으로 알려져 있으며, 해수와 담수가 만나는 지점이나, 반폐쇄성 만에서 부영양화에 의해 높은 값을 보인다 (Hyun et al., 2003; Kim et al., 2005; Noh et al., 2006). 경기만은 한강으로부터 연간  $1.25 \times 10^6 - 7.5 \times 10^4$  ton의 퇴적물이 유입 (Schubel et al., 1984; Suk, 1989)되면서 높은 퇴적물을 가지는 가운데 활발한 왕복성 조류의 영향으로 퇴적물의 선택적인 집적이



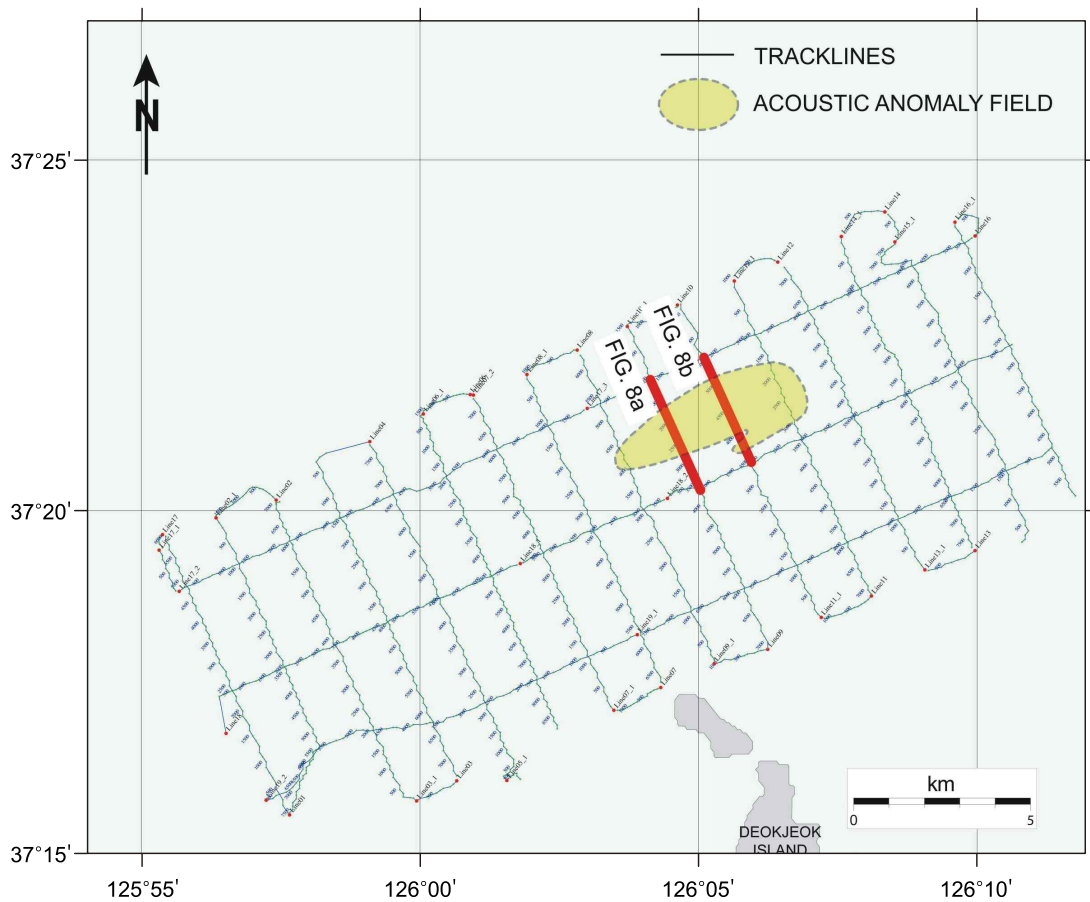


Fig. 9. Distribution of acoustic turbid zone in the study area.

이루어지고 있다. 또한 음향이상을 발생시키는 천부가스는 저해수면 시기에 퇴적된 유기물 함량이 높은 니질 층서에서 생성되어 상위층서의 해침퇴적상이나 고해수면 퇴적체에서 주로 나타나며 (Allen and Posamentier, 1993; Thomas and Anderson, 1994; Garcia-Gil et al., 2002), 본 연구지역에 나타나는 음향이상 역시 해침퇴적상인 Unit 2 내부에 존재한다.

따라서 본 연구지역에서 퇴적층서 Unit 2가 생성되는 동안 일부 다량의 유기물을 함유한 니질 또는 사니질 퇴적물이 선택적으로 집적 되고, 후에 퇴적환경이 바뀌어 상부에 조립한 퇴적물이 퇴적되면서 박테리아의 활발한 유기물 분해로 인해 퇴적물 내에 천부가스가 생성되었을 것이라 생각 할 수 있다. 음향이상의 상부반사면은 퇴적층서 Unit 2 내에서만 나타나며, 음향이상이 나타나는 지역은 여러 음향상 (1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 그리고 3-1)을 포함하고 있다.

### 결 론

본 연구지역에서 시행된 고해상도 탄성과 탐사를 통해 음향기반암 위로 세 개의 탄성과 퇴적층서 (Unit 1, Unit 2, Unit 3)를 확인 할 수 있었으며, 각 층서의 침식경계면과 내부반사면의 특징들을 통해 본 연구지역에서 과거 최후빙기이후부터

의 퇴적환경을 유추해 볼 수 있었다. 과거 최후빙기 동안 해수면 하강과 상승의 과정을 거치면서 형성된 침식계곡을 Unit 3가 충전하며 퇴적되고, 해침 침식면 위로 해침퇴적체인 Unit 2와 고해수면 퇴적체인 Unit 1이 차례로 퇴적되었음을 알 수 있었다. 연구지역의 강한 조류의 영향으로 퇴적물의 선택적 집적과 침식이 발생하여 Unit 1이 사퇴의 상부를 형성하고 사퇴사이로 길은 골과 함께 Unit 2와 Unit 3가 해저면에 직접적으로 노출되어 있다. 강한 조류의 영향은 음향상 분포도에서도 나타났으며, 대부분의 음향상들이 조류방향과 평행하게 북동-남서 방향으로 늘어져 분포하며 사퇴의 상부에서는 연흔 형태의 층면구조가 규칙적으로 발달하고 덕적도 주위에 침식의 특징을 가지는 음향상들이 분포하는 형태들이 모두 본 연구지역에서 강한 조류에 의해 나타나는 퇴적 특징들이었다.

연구지역의 고해상도 탄성과 단면도 상에 천부가스의 존재로 믿어지는 음향이상층이 나타났으며, 이를 통해 연구지역내에 유기물 함량이 높은 퇴적물의 공급과 공급된 퇴적물의 선택적 집적이 이루어졌음을 알 수 있었다. 이와 같은 사실들을 종합하면, 경기만은 이전부터 한강에서 유입된 다량의 퇴적물이 낙조류 우세에 의해 외해로 퇴적물의 이동이 이루어졌으나, 강한 왕복성 조류의 영향으로 경기만내에 사질 또는

니사질 퇴적물이 퇴적과 침식의 과정을 반복하면서 대단위의 사퇴와 사퇴사이의 깊은 수로를 형성하는 복잡한 퇴적환경을 갖추고 있음을 확인 할 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부의 국가 연구개발 사업인 “동북아해 퇴적물 기원연구 및 모니터링” (과제번호 : PM554-51, 주관연구기관 : 한국해양연구원)에 의해 수행되었습니다. 탄성과 자료획득에 도움을 준 지마텍(주) 직원들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Allen GP and Posamentier HW. 1993. Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: the Gironde Estuary, France. *J Sed Petro* 63, 379-391.
- Baek JY. 1991. Sedimentological process by net budget of the suspended sediments in yomha channel, Han estuary, Korea. M. S. Thesis, Inha University, 196 pp.
- Bahng HK, Lee HY, Chang JH, Lee CW and Oh JK. 1994. History and Characteristics of Tidal Sand Ridges in Kyeonggi Bay, Korea. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* 29, 278-286.
- Briggs K and Richardson MD. 1996. Variability in shear strength of gassy muds. *Geo-Marine Letters* 16, 189-195.
- Choi JH. 1991. Estimation of Boundary Shear Velocities from Tidal Current in the Gyeonggi Bay, Korea. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* 26, 340-349.
- Chough SK, Lee SH, Kim JW, Park SC, Yoo DG, Han HS, Yoon SH, Oh SB, Kim YB and Back GG. 1997. Chirp (2-7kHz) echo characters in the Ullnung Basin. *Geoscience Journal* 1, 143-153.
- Chough SK, Kim JW, Lee SH, Shinn YJ, Jin JH, Suh MC and Lee JS. 2002. High-resolution acoustic characteristics of epocontinental sea deposits, central-eastern Yellow Sea. *Marine Geology* 188, 317-331.
- Chough SK, Chun SS and Shinn YJ. 2004. Depositional processes of late Quaternary sediments in the Yellow Sea: a review. *Geosciences Journal* 8, 211-264.
- Damuth JE. 1975. Echo characters of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Marine Geology* 18, 17-45.
- Damuth JE 1978. Echo character of the Norwegian-Greenland Sea: relationship to Quaternary sedimentation. *Marine Geology* 28, 1-36.
- Damuth JE 1980. Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deepsea: a review. *Marine Geology* 38, 51-75.
- Damuth JE and Hayes DE. 1977. Echo character of the east Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. *Marine Geology* 24, 73-95.
- Ewing M, Embley RW and Shipley TH. 1973. Observations of shallow layering utilizing the pinger-probe echo sounding system. *Marine Geology* 14, 55-63.
- Floodgate GD and Judd AG. 1992. The origin of shallow gas. *Continental Shelf Research*, 12, 1145-1156.
- Garcia-Gil G, Villas F and Garcia-Garcia A. 2002. Shallow gas features in incised-valley fills (Ria de Vigo, NW Spain). *Continental Shelf Research* 22, 2203-2315.
- Hampton LD and Anderson AA. 1974. Acoustics and gas on sediments: Applied Research Laboratories (ARL) experience: In Kaplan, I. (ed), *Natural Gases in Marine Sediments*. Plenum Press, New York.
- Hyun SM, Lee TH, Choi JS, Choi DL and Woo HJ. 2003. Geochemical Characteristics and Heavy Metal Pollutions in the Surface Sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea. *The sea : The Journal of the Korean Society of Oceanography* 8, 380-391.
- Jin JH 2001. A sedimentological Study of Long Sediment Cores in the Eastern Yellow Sea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 176 pp.
- Jin JH and Chough SK. 1998. Partitioning of transgressive deposits in the southeastern Yellow Sea: a sequence stratigraphic interpretation. *Marine Geology* 149, 79-92.
- Jin JH and Chough SK. 2002. Erosional shelf ridges in the mid-eastern Yellow Sea. *Geo-Marine Letters* 21, 219-225.
- Jung WY, Suk BC, Min GH and Lee YK. 1998. Sedimentary structure and origin of a mud-cored pseudotidal sand ridge, eastern Yellow Sea, Korea. *Marine Geology* 151, 73-88.
- Kim DC, Lee KW, Seo YK, Kim GY, Kim SY and Wilkens RH. 2004. Distribution and acoustic characteristics of shallow gas in the Korea Strait shelf

- mud off SE Korea. *Marine Georesources & Geotechnology* 22, 21-31.
- Kim DC, Lee GS, Lee GH and Park SC. 2008. Sediment echo types and acoustic characteristics of gas-related acoustic anomalies in Jinhae Bay, southern Korea. *Geosciences Journal* 12, 47-61.
- Kim SK, Lee MK and Ahn JH. 2005. The Effects of Mean Grain Size and Organic Matter Contents in Sediments on the Nutrients and Heavy Metals Concentrations. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 27, 923-931.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM). 1997. Yellow Sea Drilling Program for Studies on Quaternary Geology (Analyses of YSDP-106, YSDP-107 Cores). 401 pp.
- LeBlanc LR, Mayer L, Rufino M, Schock SG and King J. 1992. Marine sediment classification using the Chirp sonar. *Journal of the Acoustic Society of America* 91, 107-115.
- Lee KW. 1992. Seismic characteristics and depositional process of sediments in Jinhae Bay, Southeastern Coast of Korea. M. S. Thesis, Chungnam National University, 49 pp.
- Lee CB, Yoo HR and Park KS. 1992. Distribution and properties of intertidal surface sediments of Kyeonggi Bay, west coast of Korea. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* 27, 277-289.
- National Oceanographic Research Institute (NORI). 2004. A study report on the seabed information near the coast of Dugjuc island. 136 pp
- NORI. 2005. A study report on the seabed information near the coast of Daeijak island. 198 pp
- NORI. 2006. A study report on the seabed information near the coast of Seongap island. 120 pp
- Noh IH, Yoon YH and Kim DI. 2006. The Spatio-temporal Distribution of Organic Matter on the Surface Sediment and Its Origin in Gamak Bay, Korea. *Journal of Korean Society of Marine Environmental Engineering* 9, 1-13
- Oh JK and Kum BC. 2001. Deposition of marine environmental engineering, 9, 1-13. 1 Environments and Characteristics of Surface Sediments in the Nearshore and Offshore off the Mid-Western Coast of the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Earth Science Society* 22, 377-387.
- Oh JY, Lee YG, Yun HS and Kim SR. 2000. 3.5 kHz seismic images of the gas-charged shallow sediment at Kwangyang Bay and the Yeosu Sound on the southern coast of Korea. *Economic and environmental geology* 33, 239-246.
- Park SC and Lee KW. 1996. Modern Sedimentary Environment of Jinhae Bay, SE Korea. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* 31, 43-54.
- Park SH and Yoo DG. 1997. Bedform Distribution and Sand Transport Trend on a Subtidal Sand Ridge in a Macrotidal Bay, West Coast of Korea. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* 32, 181-190.
- Park SC, Yoo DG, Lee KW and Lee HH. 1999. Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea (Korea Strait). *Continental Shelf Research* 19, 589-608.
- Park SC, Lee HH, Han HS, Lee GH, Kim DC and Yoo DG. 2000. Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow sea. *Marine Geology* 170, 271-288.
- Park YA, Choi JY, Lee CB, Kim DC and Choi KW. 1994. Sediment Distributions and Depositional Processes on the Inner Continental Shelf Off the West Coast (Middle Part) of Korea. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* 29, 357-365.
- Ryang WH, Jin JH, Jang SH, Kim SP, Kim HT, Lee CW, Chang JH and Choi JH. 2001. Geoacoustic characteristics of Quaternary stratigraphic sequences in the mid-eastern Yellow Sea. *The sea : The Journal of the Korean Society of Oceanography* 6, 81-92.
- Schock SG, LeBlanc LR and Mayer LA. 1989. Chirp subbottom profiler for quantitative sediment analysis. *Geophysics* 54, 445-450.
- Schubel JR, Shen HT and Park MJ. 1984. A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea. In: *Proc. Korea-U.S. seminar and workshop on marine geology and physical processes of the Yellow Sea*, edited by Y.A. Park, O.H. Pilkey and S.W. Kim, Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, pp. 286-308.
- Suk BC. 1989. Sedimentology and history of sea level changes in the East China Sea and adjacent seas. In: Taira, A., Masuda, F. (Eds.), *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*. Terra, Tokyo, pp. 215-231.
- Sylwester RE. 1983. Single-channel, high-resolution seismic-reflection profiling, a review of the fundamentals and instrumentation: In Geyer, R. A.

- (ed.), Handbook of Geophysical Exploration at Sea: CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 77 - 122.
- Thomas MA and Anderson JB. 1994. Sea-level controls on the facies architecture of the Trinity/Sabine incised-valley system, Texas continental shelf: In Dalrymple, R.W., Boyd, R. and Zaitlin, B.A. (eds.), Incised-valley systems: Origin and sedimentary sequences. SEPM spec pub 51, 3-10.
- Yoo DG, Lee CW, Kim SP, Jin JH, Kim JK and Han HC. 2002. Late Quaternary transgressive and high-stand systems tracks in the northern East China Sea mid-shelf. Marine Geology 187, 313-328.

---

2009년 8월 6일 접수

2009년 11월 30일 수정

2009년 12월 11일 수리