

고해상 탄성과 자료를 이용한 황해 중부 해역에서의 제4기 퇴적환경

허 식 · 천종화 · 한상준 · 신동혁 · 이희일 · 김성렬 · 최동림 · 이용국 · 정백훈 · 석봉출
한국해양연구소 해양지질연구단

요 약

정밀 탄성과 탐사자료의 분석에 의하면 황해 중부의 퇴적환경은 크게 중국쪽 황하의 삼각주(delta) 환경, 황해 중심부의 침식대(erosional zone), 그리고 한국쪽의 모래퇴(sand ridge) 및 모래파(sand wave) 환경으로 뚜렷하게 구분된다. 중국 황하 말단부에서는 전진퇴적 양상의 삼각주 전면(delta front)에서 점진적으로 전위삼각주(prodelta)로 변한다. 삼각주 퇴적물들은 황해 중심부로 이동하지 못하고, 대부분이 산둥반도를 돌아서 남하한다. 황해 중심부에 발달한 침식대에서는 북서-남동 방향으로 발달한 다수의 해저수로들과 불규칙한 형태의 침식면이 관찰된다. 이 해역의 일부에서는 선현세 산화대층이 해저면에 노출되어 있는데, 홀로세 동안에 퇴적물의 집적보다는 무퇴적 또는 침식작용이 우세하였음을 지시한다. 한국측 주변 해역에서는 규칙적인 배열 및 형태를 갖는 모래퇴 또는 모래파들이 발달되어 있다. 이 모래질 퇴적물들은 대부분이 저해수면 시기에 하천으로부터 공급된 퇴적물로서 해수면이 다시 상승할 때 재동·잔류된 것으로 해석된다. 현생 모래퇴들은 북동-남서 방향으로 배열되어 있는데, 이것은 조류의 영향에 의한 것으로 해석된다.

주요어: 황해, 삼각주, 침식대, 산화대, 모래퇴, 모래파

Huh, Sik, Chun, Jong-Hwa, Han, Sang-Joon, Shin, Dong-Hyeok, Yi, Hi-Il, Kim, Seong-Ryul, Choi, Dong-Lim, Lee, Yong-Kuk, Jung, Baek-Hoon, and Suk, Bong-Chool, 1999, Quaternary Depositional Environments in the Central Yellow Sea Interpreted from Chirp Seismic Data. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 3, p. 191-200.

ABSTRACT: Analysis of chirp high-resolution seismic profiles from the central Yellow Sea reveals that depositional environments in this area can be divided into three distinctive zones from west to east: (1) subaqueous delta system near the Shandong Peninsula, (2) erosional zone in the central Yellow Sea, and (3) tidal sand ridges and sand waves near the Korean Peninsula. The Shandong subaqueous delta, extending southward from the Shandong Peninsula, changes gradually into prodelta southeastward. The sediments originated from the Yellow River are transported southward along the Chinese coastal area. The erosional zone in the central Yellow Sea contains numerous paleochannels and shows linear erosional features trending northwest-southeast. The erosional zone would be dominated by non-depositional or erosional processes during the Holocene. Tidal sand ridges and sand waves are well developed along the western coast of Korea. The residual sands, which were originally fluvial sediments at the sea-level lowstand, are interpreted as the result of winnowing process during the sea-level rise. Modern sand ridges generally migrates in a northeast-southwestern direction, which coincide with dominant tidal current direction.

Key words: Yellow Sea, Delta, Erosional zone, Oxidized layer, Sand ridge, Sand wave

(Huh, Sik, Chun, Jong-Hwa, Han, Sang-Joon, Shin, Dong-Hyeok, Yi, Hi-Il, Kim, Seong-Ryul, Choi, Dong-Lim, Lee, Yong-Kuk, Jung, Baek-Hoon, and Suk, Bong-Chool, Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O.Box 29, Seoul 425-600, Korea. email: sikhuh@kordi.re.kr)

1. 서 론

한국과 중국 사이에 위치한 황해는 평균 수심이 55 m 정도인 반폐쇄적 주변해(epicontinental shelf)이다. 황해는 남쪽과 북쪽으로 각각 동중국해(East China Sea)와 발해(Bohai Sea)로 연결된다. 수심은 연안으로부터 멀어질수록 점차 깊어져 중심부에서 최대 100 m에 이르고, 거의 평탄한 해저지형이 발달한다(Fig. 1). 황해 퇴적물은 대조차 환경에 의한 조류의 영향과 계절적인 태풍 또는 폭풍해일(storm surge), 그리고 일부 쿠로시오 해류에 의한 영향 등을 함께 받는다(Kang et al., 1998).

지난 50년 동안 황해의 연구는 지구물리학적, 광물학적, 지구화학적 및 퇴적학적 관점에서 다양하게 실시되었다. Niino · Emery (1961)는 황해와

동중국해 표층퇴적물의 전반적인 분포양상을 처음으로 보고하였다. 이후 표층퇴적물 분포 및 이동 특성 등에 관한 연구(Chen, 1989; Suk, 1989; Alexander et al., 1991; 최동림 외, 1992)가 활발히 이루어졌다. 또한 한국해양연구소(신동혁 외, 1998)와 한국자원연구소(이치원 외, 1995) 등에 의해서 황해 천부 및 심부 지층의 형성과정이 일부 밝혀졌다. 그 결과에 의하면 황해는 플라이오세-플라이스토세 이후 광역적인 해침을 받았으며, 이로 인하여 기존의 육성층 상부에 천해성 해성층이 퇴적된 것으로 알려져 있다(Park · Han, 1987; 이치원 외, 1995). 특히 최후 빙하기(last glacial maximum) 이후의 현세 해침시기 동안의 편향적인 퇴적물 공급에 의해서 현재의 해저지형이 대부분 형성된 것으로 추정된다. 한국 서해안에서의 현세 해수면

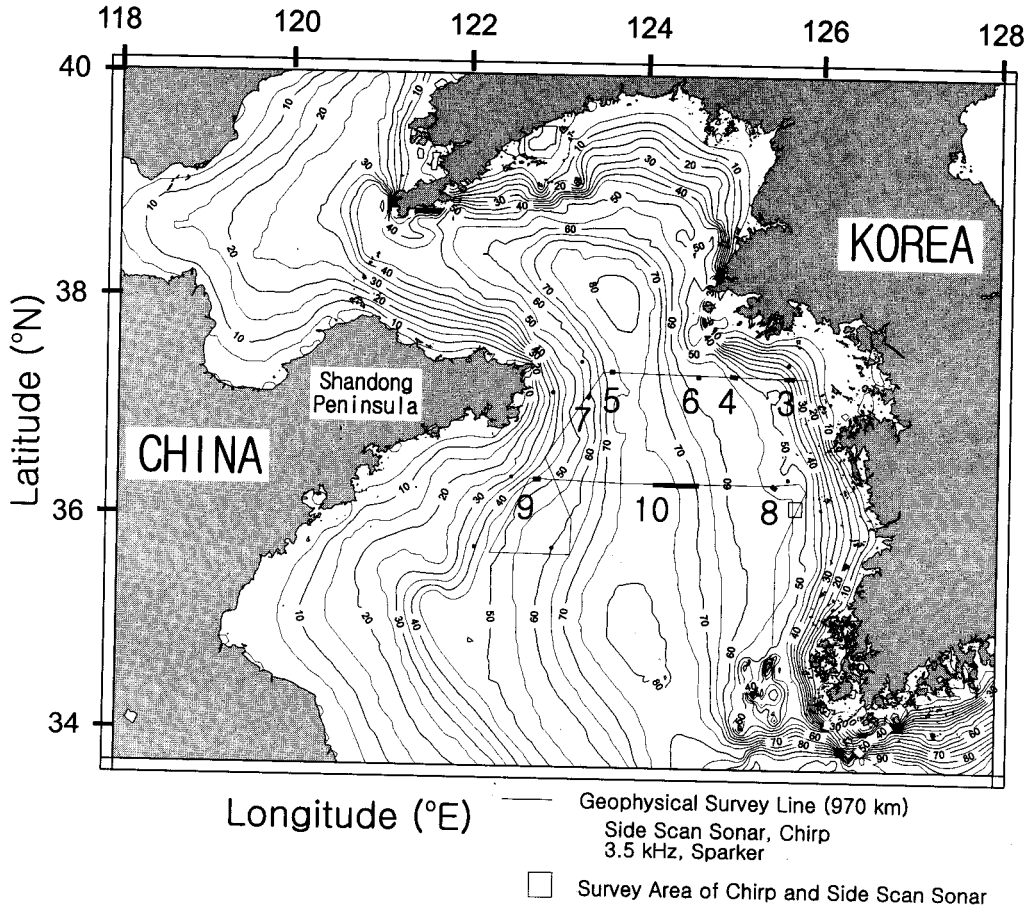


Fig. 1. Location map showing tracklines of chirp seismic profiles. Heavy line segments with numbers represent the location of profiles used in this study. Contours of bathymetric map are in meters.

변동 연구에 의하면 황해의 해수면은 해침 이후에 약 4,800년 전까지 빠른 상승이 일어났으며, 그 이후에는 해수면의 상승속도가 급속히 둔화되어 현재 해수면에 이른 것으로 알려져 있다(Park · Bloom, 1984). 그러나 일부 학자들은(Jo, 1980; 신동혁, 1998) 홀로세 동안에도 현재 해수면보다 다소 높았던 시기가 존재하였다고 주장하고 있다. 또한 황해 현생 퇴적물의 이동을 규명하기 위한 수리물리학적 연구(Choi, 1980; Larsen *et al.*, 1985; Kang *et al.*, 1998)가 함께 진행되어 왔는데,

한국 연안의 서한만, 경기만, 서해 중부해역, 그리고 목포 서부해역에서 모래질 퇴적물 이동 등에 대한 연구(Off, 1963; Klein *et al.*, 1982; 최동림 외, 1992; 이치원 외, 1995)와 조간대(김여상, 1988; 천종화 외, 1995; 신동혁, 1998) 연구가 집중적으로 이루어졌다. 중국측의 황하와 양자강 하구에서는 삼각주의 규모 및 이동에 관한 연구가 주로 이루어졌다(Xiang *et al.*, 1983; Butenko *et al.*, 1985; Yang · Sun, 1988). 그러나 지금까지 황해의 퇴적학적 연구는 연안을 중심으로 이루어졌을 뿐, 중

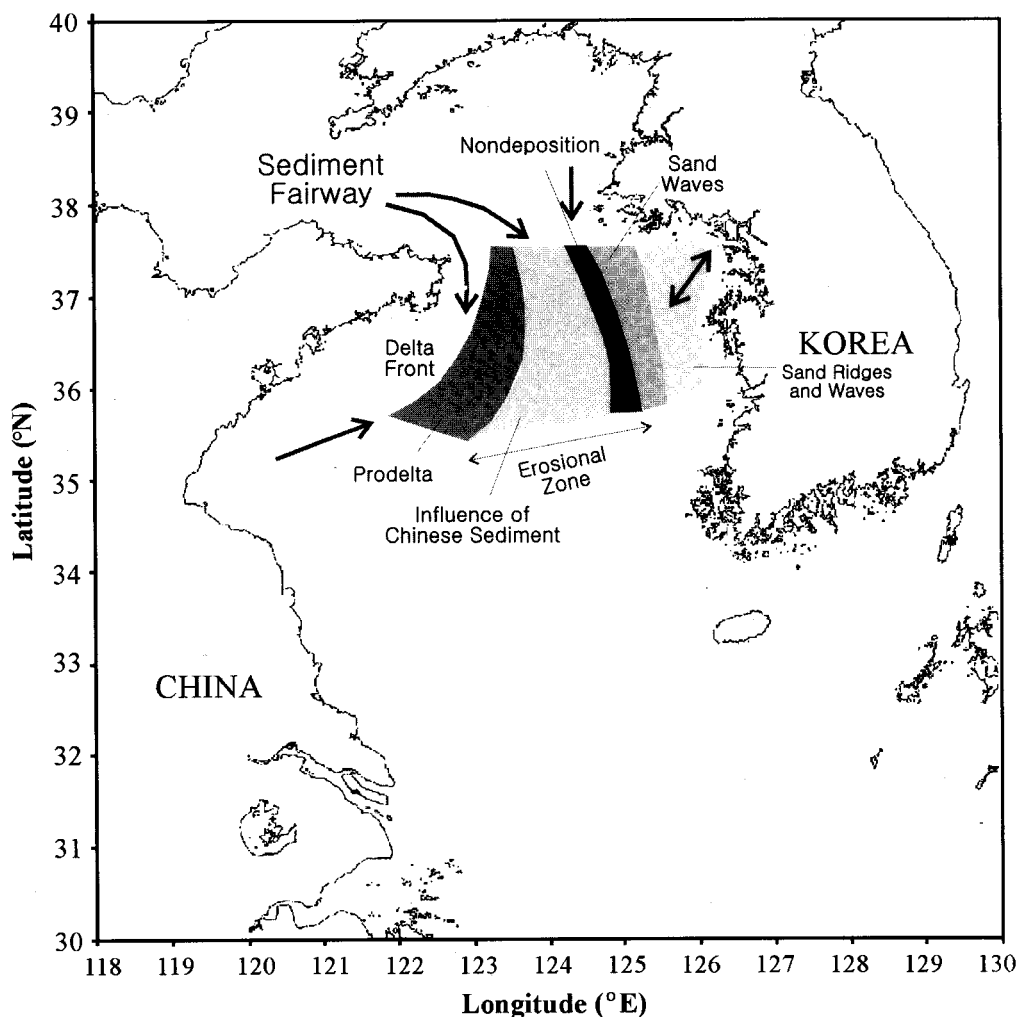


Fig. 2. Depositional environments of the Yellow Sea are divided into three distinctive zones such as subaqueous delta system near the Shandong Peninsula, erosional zone in the central Yellow Sea, and tidal sand ridge and sand wave offshore Korea. Arrows represent the sediment fairways.

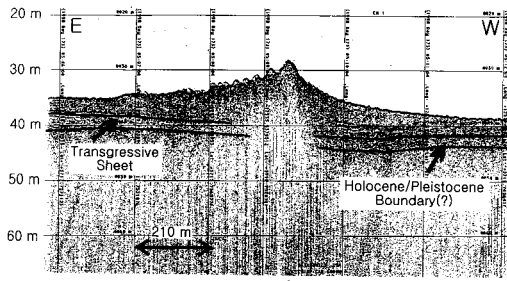


Fig. 3. Chirp seismic profile across a large tidal sand ridge offshore Korea. Superimposed sand waves have their length of 100-500 m and height as great as 2 m. The depositional environment is dominated by high tidal currents with coarse-grained sands or gravels. Location of line is shown in Fig. 1.

국과 한국을 가로지르는 동-서 축선을 따라 실시된 종합적이고 체계적인 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구는 1998년에 한국해양연구소(Korea Ocean Research and Development Institute)와 중국 해양국 소속 제1해양연구소(First Institute of Oceanography in State of Ocean Administration)의 국제공동연구로 추진되어, 한국과 중국 관할해역에서 획득한 지구물리 탐사(sparker, chirp, side scan sonar) 및 해양지질조사(표층 퇴적물, 시추 퇴적물, 부유 퇴적물, 박스코아 퇴적물) 자료를 이용하였다(신동혁 외, 1998). 이번 연구를 통해 황해 중부의 해저 지형과 지층내부 구조 등의 자료를 이용하여 각 퇴적환경의 특성을 밝히고, 저해수면 시기인 후기 플라이스토세의 최후 빙하기 이-후부터 홀로세 동안의 해수면 변동에 의한 수직적인 퇴적 진화과정을 해석하고자 한다. 그리고 황해 중부에 분포하는 현생 퇴적물 기원지, 이동 및 집적장소를 제시할 것이다.

2. 연구 조사 방법

황해 중부의 지구물리탐사는 1998년 6월 23일부터 6월 30일까지 연구선 이어도를 사용하여 122° 10'~125° 50', 35° 30'~37° 30'에서 수행되었다. 조사축선은 동서 및 남북 방향으로 총 축선거리 약 970 line-km에 대해 천부 지층탐사를 실시하였다(Fig. 1). 이 해역의 지층 내부구조 및

해저지형을 밝히기 위하여 DGPS 정밀위치 측정기, 정밀 수심측정기, 칩(chirp) 고해상 지층탐사기, 중·천부 지층탐사를 위한 스파커(sparker) 시스템을 사용하였다. 그리고 모래퇴 지역에서는 해저면 정밀조사를 위하여 다른 지구물리 탐사와 더불어 side scan sonar를 이용한 탐사를 병행하였다.

수심측량은 정밀 수심 측정기(Precision Survey Fathometer; Raytheon사, 모델 DE719D MK2형)를 사용하였으며, 중심 주파수는 200 kHz이고 최대측심 범위는 수심 200 m까지이다. 송·수신기는 연구선 현측의 수면하 1 m 위치에 고정하였으며, 측심 조사는 지층탐사와 동시에 수행되어 항적 위치 자료와 함께 매 초 간격으로 기록되었다. 고해상 지층탐사에 사용된 칩 시스템은 음파의 위상과 진폭이 일정한 비율로 변조된 주파수 변조방식(FM 타입)의 복합주파수(1~10 kHz) 음원을 사용하였는데, 해저퇴적층에 대한 투과력과 분해력이 종전의 연속음파방식(CW 타입)의 탐사기록보다 월등히 우수하다. 고주파의 음파발신 간격은 초당 4회씩으로 고정하고 음원인 수중 예인체는 연구선 현측에서 수면하 약 5 m 깊이로 예인되었다. 스파커 지층탐사기의 음원 중심주파수는 400 Hz 정도로 쉼, 약 4,500 볼트의 직류 고전압을 순간적으로 수중에서 방전시켜 음파를 만든다. 본 조사에서는 음파발신 간격을 초당 4회씩으로 고정하여 기록시간을 250 ms (1/4 초 sweep)로 일치시켰다. 음원 예인체와 음향 수신기는 연구선 후미에서 30 m 이격 거리를 두고 각각 예인되었으며, 탐사수행시 연구선의 항해속도는 평균 3~4 노트(knot)를 유지하였다.

3. 해저지형과 퇴적환경 분류

한국측 경기만 부근 해역에는 현세 조류성 모래퇴들이 설형(tongue)으로 발달하며(신동혁 외, 1998), 수심은 남서 방향으로 가면서 점차 깊어진다(Fig. 1). 이 해역에 발달된 모래퇴들의 높이는 10 m 내외이며 모래퇴 사이의 골의 폭은 250 m이다. 이 모래퇴들은 대조환경의 조류성 조하대 모래퇴로 해석되었다(Klein *et al.*, 1982). 모래퇴의 형태는 동쪽의 경사도가 더 완만한 비대칭 형태이며, 상대적으로 완만한 경사를 보이는 가장자리에는 1 m 내외의 모래파가 모래퇴 상부를 덮고 있다(Fig. 3). 한국측 연안에 발달한 모래퇴의 형태적 특징은 대륙붕의 폭이 넓고 조류가 강한 해역에서 생성되

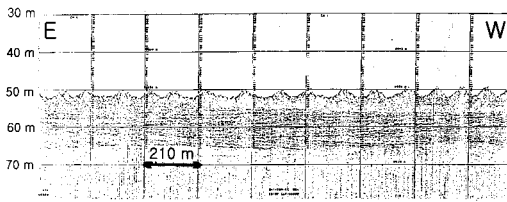


Fig. 4. Chirp profile across a sand wave with reverse stoss-lee side compared with coastal sand waves. Note the superimposed ripples on the sand waves and the horizontally bedded sub-bottom strata.

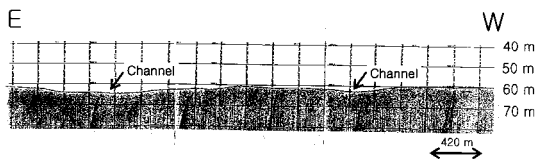


Fig. 5. Chirp seismic profile of erosional zone with present submarine channels. The channels show a strong-amplitude reflector.

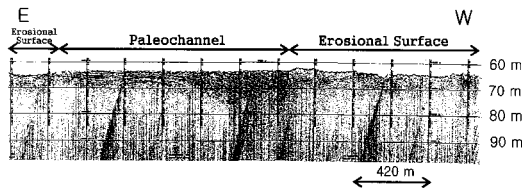


Fig. 6. Chirp seismic profile showing the buried paleochannel. Well-defined central drainage system channel shows deformed layers in the cross bedded channel fill.

는 조류기원(Off, 1963)의 모래퇴와 일치한다.

황해 중심부를 향하여 수심이 점차적으로 깊어 지면서 모래파가 분포하는 평탄한 해저지형으로 전이한다(Fig. 3). 이 해역은 모래퇴가 발달된 해역보다 수심 변화가 덜 하나, 북동-남서 방향성을 갖는 굴곡진 해저지형이 발달한다. 이 모래파들은 북위 35° 이북의 해저면에서 특징적으로 나타나고, 그 이남 지역에서는 거의 관찰되지 않는다. 일반적으로 모래파는 모래질 퇴적물 공급이 풍부하고 조류가 강한 천해 환경에서 형성된다고 알려져 있다(Kenyon · Stride, 1970). 이들 모래파들의 형태는 대체로 동쪽 내지 북동쪽으로 급사면을 갖는 비대칭형인데, 이것은 남서에서 북동 방향으로의

우세한 조류 영향에 의한 것으로 추정된다(Fig. 4). 이에 반해 대칭형 모래파들은 북쪽에 발달해 있는 모래퇴의 상부면에서만 국부적으로 나타난다.

황해 중심부는 황하의 전위삼각주 퇴적물과 한국쪽 연안의 모래파 퇴적물의 영향이 거의 미치지 않는다. 이 해역은 수심이 60~85 m의 범위이고, 다양한 규모의 해저수로들이 북서-남동 방향으로 발달한다(신동혁 외, 1998). 이 해역의 현생 및 고해저수로들은 침식작용에 의해서 골과 능의 불규칙한 해저 표면구조를 형성하며, 이러한 표면구조를 얇게 덮는 홀로세 퇴적층은 서쪽에서 더욱 박층화된다(Fig. 5). 고해저수로들은 비대칭 형태로 발달하며(Fig. 6), 내부 반사면들의 강도는 변화가 심하고 횡적인 연장성이 불량하다. 특히 이 층의 상부 반사면들은 표층의 모래들로 인한 강한 반사 강도 때문에 내부 반사구조가 잘 보이지 않으며, 단지 일부 지역에서만 충진형(channel-fill) 해저수로 형태를 보인다.

중국 황하 발달부에 발달한 삼각주 퇴적층들은 연속성이 양호하고 내부에 평행한 반사면 구조를 보여 주고 있다(Fig. 9). 전진퇴적 양상의 삼각주 전면은 점진적으로 전위삼각주로 변하며, 이들은 약 10 m 정도의 수심 차이를 보이므로 쉽게 구별된다(Fig. 7). 황하의 현생 삼각주의 층후는 최고 40 m 인 것으로 보고되었으나(Milliman *et al.*, 1985), 이번 조사지역의 탄성과 도면에서는 최대 약 25 m의 층후를 보인다. 황하 삼각주의 퇴적체는 내부에 가스를 많이 함유하고 있는데(Fig. 7), 이들 소

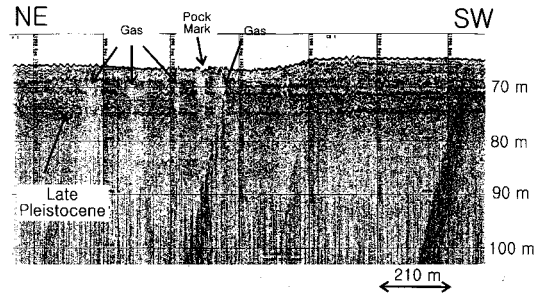


Fig. 7. Chirp seismic profile of the Shandong subaqueous delta deposited in the northeast-southwest direction. Pock marks on the inner shelf of China are caused by the venting of biogenic gas, which is resulted from the deposition of organic material buried within horizontal-derived sediments from Yellow River. Gas-charged sediments are characterized by the masking of reflectors(acoustic void).

규모 가스 함유 퇴적층들은 내부 반사면이 흐리고 연속성이 매우 불량하며 반사강도의 변화가 심하다.

이와 같이 황해 중부해역의 퇴적환경은 해저지형과 수심에 의해서 크게 세 지역으로 뚜렷이 구분된다. 한국측 연안에서는 북동-남서 방향의 강한 조류에 의해서 형성된 모래파 및 모래퇴 환경, 황해 중심부에서는 다양한 형태의 현생 및 고해저수로들이 발달된 침식대, 그리고 중국측 연안에서는 대규모의 황하로부터 삼각주 환경이 형성되어 있다(Fig. 2).

4. 퇴적층의 진화과정

저해수면 시기인 후기 플라이스토세의 최후 빙하기 이후부터 홀로세 동안 황해 퇴적분지에서의 해수면 변동에 따른 수직적인 퇴적 진화과정을 살펴보면, 황해는 제4기 최후 빙하기 동안 해수면의 하강에 의해서 해저면이 대기하에 노출되어 침식 계곡(incised valley) 등을 포함하는 다수의 저지대가 형성되었다(Fig. 8). 이 저지대의 일부에서는 해퇴시부터 해침 초기까지 하천 또는 습지퇴적물인 저해수면계 퇴적물(lowstand sediment)로 충진되어 있으며, 이 퇴적층의 하부면은 침식면 또는 강한 진폭의 반사면을 가진다. 이 퇴적물들은 해침 초기에 상당 부분이 재동되었으며, 이후 황해는 점차적으로 조류에 의해 새로운 퇴적물이 공급되기 시작하였다. 황해에서의 지속적인 해수면 상승으로 인하여 광범위한 천해를 형성했고 파랑 침식면을 생성하였다. 이 침식면의 상부는 해침계 퇴적물(transgressive sediment)로 덮이게 된다. 외대륙붕 대부분 지역에서 빨질 모래 퇴적상 및 세립 모래질 퇴적상이 박층으로 형성되었는데, 이는 해침이

지속되면서 파랑작용 및 조류와 같은 고에너지 기구가 점차 강하게 발달하여 발생한 자연체질(winnowing)에 의한 결과로 해석된다(이치원 외, 1995). 한국 연안의 모래퇴 하부의 반사면은 해침시 침식작용으로 형성된 해침면으로 해석되며, 이 모래퇴는 주로 고해저수로를 충전하고 있는 양상을 보인다. 이 반사면 상부에서 아래걸침(downlap)의 형태를 보이는 퇴적층은 고해수면계 퇴적물(highstand sediment)로 해석된다. 내대륙붕 지역에서는 조류의 영향과 다량의 세립질 퇴적물 공급으로 층리를 보이는 빨질 퇴적상이 두껍게 형성되었다(이치원 외, 1995; 천중화 외, 1995). 해침이 종료되고 해수면이 현재 위치에 도달하였을 때 내대륙붕 일부 지역에서만 고수위 퇴적계 다발이 형성되었고, 외대륙붕에서는 괴상의 세립 또는 극세립 모래로 구성된 모래질 층이 퇴적되었다. 특히 침식대내에서는 다수의 침식면이나 무퇴적면을 보이고 있다(Fig. 5).

규칙적인 배열과 형태를 갖는 현생 모래퇴(Figs. 2, 3) 직하부에 놓이는 해침 퇴적상은 침식대에서부터 한국쪽으로 연장되며, 일부 침식작용에 의해서 불연속적으로 발달하고 있다. 해침 퇴적상은 평탄한 탄성과 반사면이 관찰되는 곳에서는 1~2 m의 층후를 갖지만 한국쪽으로 가면서 두꺼워진다(Fig. 8). 현생 모래퇴들은 북동-남서 방향으로 배열되어 있으며, 경기만까지 연장되어 분포하고 있다. 고해상도 탄성과 단면에서는 현생 모래퇴가 무층리 탄성과 유형을 보이며, 하부의 해침 퇴적상 위에 고립되어 나타나기도 한다. Fig. 3의 모래퇴는 하부의 해침 모래 박층(transgressive sand sheet) 상위에 12 m의 높이와 1,550 m의 폭으로 횡적인 연장성을 보이며(신동혁 외, 1998) 발달하고 있다.

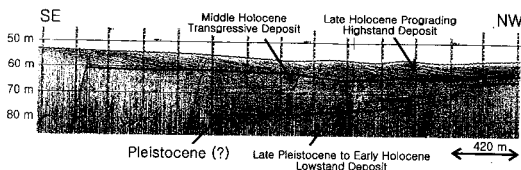


Fig. 8. Chirp seismic profile in the sand ridge area offshore Korea. The section shows late Pleistocene erosional surface (and possible channel), infilled sediment (channel sand), transgressional layer (presumably sand and peat), and late Holocene prograding highstand sediment.

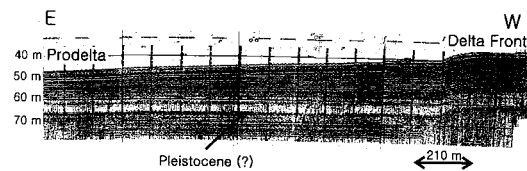


Fig. 9. Chirp seismic profile of the Shandong subaqueous delta showing superimposed deltas offshore China in the Yellow Sea. This feature exhibits a cliniform morphology and the internal stratification characteristic of a subaqueous delta (gently dipping topset, steeply dipping foreset, and gently dipping acoustically transparent bottomset deposits).

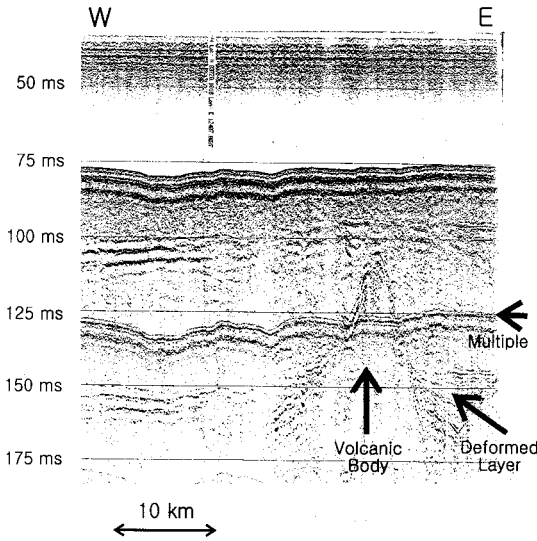


Fig. 10. Sparker profile over shallow volcanic body which disturbs the sediment layers in the erosional zone. Rock pinnacle(volcanic origin) protrudes above the sediments.

황해 중부의 북쪽 측선을 따라서는 홀로세 퇴적층의 두께가 급격히 변하는데, 외해로 갈수록 층의 두께가 12 m에서 2 m로, 모래퇴의 높이는 7 m에서 2 m로 감소한다. 특히 큰 규모의 잔류 모래퇴(remnant sand ridge)들은 재동(reworking) 작용과 침식을 받아 높이가 낮아지고 폭이 넓어지는 양상을 보여주고 있다.

황해 중부해역의 남쪽 측선을 따라서 서쪽으로는 회미하거나 무층리 유형의 층리면이, 동쪽으로는 아주 연속성이 좋고 투과깊이가 40 m에 달하는 평탄한 층리면의 반사면이 발달한다(Fig. 9). 침식대 근처의 전위삼각주 지역에는 무층리 반사면 혹은 변형된 플라이스토세 퇴적 층리면 위에 층리면을 가진 퇴적물이 분포하고 있다. 특히 침식대 지역의 퇴적층 표면에서는 선현세의 산화대층(oxidized layer)이 관찰되는데, 이는 해역이 홀로세 동안에 무퇴적 또는 침식이 우세한 지역임을 뒷받침하는 것이다(Fig. 6). 이 침식대는 지리적으로 군산분지의 북측에 위치하고 있다. 스파커 자료에서도 해저면 약 25 m 하부에 관입 화산체에 의해 심한 변형을 받은 심부 퇴적층이 관찰된다(Fig. 10). 본 연구지역의 화산체는 동중국해에 위치한 Fukien-Reinan Massif(124° 04', 32° 30'; Emery · Niino, 1967)로 불리는 뾰족탑(pinnacle) 형태의

감람석-현무암(olivine-basalt rock) 성분의 화산체와 대비시킬 수 있다. 이러한 심부 화산체들은 황해와 동중국해에서 전반적으로 제3기에 활발한 화산 활동이 있었음을 지시한다.

중국 연안의 삼각주 퇴적층에는 많은 고해저수로가 나타나고, 삼각주 퇴적물은 변형된 플라이스토세 퇴적층 위에 두껍게 퇴적되어 있다. 전위삼각주의 퇴적층은 표층이 빨리 구성되어 있으며(신동혁 외, 1998), 탄성과 단면도에서 두께가 25 m 이상 두께의 퇴적층이 확인되었다(Fig. 9). 하부 퇴적층의 침식 경계면을 따라 대규모 고해저수로가 관찰되는데, 이 침식면은 플라이스토세와 홀로세 퇴적층과의 경계면으로 추정된다. 한편 삼각주 퇴적물 하부에는 많은 천부 가스층이 형성되어 있으며(Fig. 7), 탄성과 단면도 상에서는 반사면이 뚜렷하게 나타난다.

5. 퇴적물의 이동역사

황해의 표층퇴적물 분포는 다양한 수리역학적 조건과 퇴적물 기원지에 의해서 아주 복잡한 양상을 보인다(Butenko *et al.*, 1983, 1985). 최후 빙하기 동안에 대기에 노출된 황해는 홀로세 동안의 해수면 상승에 따른 해침(transgression)으로 표층퇴적물 분포에 큰 변화가 일어났다. 황해 중부의 서측과 중앙부는 주로 황해에서 유입된 전위삼각주 퇴적물들이 넓게 분포한다(Milliman *et al.*, 1985). 황해 중부의 동측에는 주로 분급도가 양호한 모래질 퇴적물이 분포하며, 해안을 따라서는 빨질의 조건대가 넓게 발달하고 있다. 또한 금강 하구역에서부터 제주도 북서 해역까지 남북 방향으로 길게 발달한 빨띠(mud belt) 퇴적체가 형성되어 있다(Lee · Chough, 1989; Khim · Park, 1992; 이치원 외, 1995).

Niino · Emery (1961)는 황해와 동중국해 외대륙붕에 분포하는 모래질 퇴적물을 최후 빙하기 이전에 공급된 잔류퇴적물로 해석하였다. 그리고 황해 서측 연안의 세립질 퇴적물은 황해와 양자강을 통해 공급된 현생 삼각주 퇴적물로 해석하였다(Niino · Emery, 1961). 또한 현생 황하기원 퇴적물의 90% 이상은 말해만 내에 집적되며, 나머지 약 10% 가량의 퇴적물만이 황해로 공급되는 것으로 알려졌다(Fig. 2; Nittrouer *et al.*, 1984; Alexander *et al.*, 1991). 이에 반해 한국 연근해에 분포하는 세립질 퇴적물은 중국 대륙으로부터 기원되지 않

고, 한국의 주변 하천으로부터 공급된 현생 퇴적물로 해석하였다(이치원 외, 1995).

한국측 연안의 조류의 유형은 외해에서 회전성을 보이다가 점차 경기만 내해를 향해 접근하면서 진행방향이 반시계 방향의 타원형을 형성하는데, 북동-남서 방향의 장축을 갖고 강한 왕복성을 보인다(Kang *et al.*, 1998). 따라서 이 해역에 발달한 모래퇴와 모래파는 남쪽 내지 남동쪽으로 급사면을 갖는 비대칭형 모래퇴들이(Fig. 3) 조류와 평행하거나 반시계 방향으로 약간 빗겨지면서 길게 발달한 특징을 보이고 있다(Fig. 2). 모래퇴를 구성하는 퇴적물은 주로 한강 및 주변 육지에서 공급된 것이며, 강한 조류와 파랑운동에 의해 재동되어 퇴적되고 있는 것으로 추정된다. 그리고 동측 내지 북동측의 급사면을 갖는 비대칭형 모래파는 외해쪽의 비교적 평탄한 해저면에 발달한다(Fig. 4). 이것은 강한 북동-남서 방향의 조류와 함께 계절풍에 의해서 경기만쪽으로 강한 해저유속과 해저전단응력이 발생하여(Kang · Choi, 1984) 해저면에 모래파를 형성하고 퇴적물을 이동시킨 것으로 사료된다. 또한 일시적으로 폭풍 해일에 의해 발생하는 강한 해저류도 해저면에 영향을 미친 것으로 추측된다.

황해 중심부에 위치하는 침식대에서는 조류의 세기가 점차 약화되다가 서쪽의 전위삼각주 지대에서는 거의 소멸된다. 따라서 전위삼각주에 퇴적되는 현생 황하 삼각주 빨 퇴적물은 황하의 유속과 퇴적량 그리고 해류의 흐름에 크게 좌우될 것으로 추정된다. 고히왕가 위치했던 산동반도 하부는 다시 조류의 흐름이 빨라지나 그 방향은 대칭형 혹은 동서 방향이다. 연구지역 아래의 북위 36° 30'을 경계로 조류의 흐름은 시계방향으로 바뀌고 남쪽으로 가면서 강해진다. 황하에서 유래된 삼각주 빨 퇴적물은 침식대 중심으로 갈수록 렌즈형의 얇은 퇴적상을 보이며, 중심부에서는 침식 등으로 인하여 거의 퇴적되지 않는다(Fig. 5).

중국 연안 북쪽의 삼각주 퇴적물은 평행하고 연속적인 반사면을 보여 현재의 황하에서 내려온 퇴적물이 두껍게 집적된 것으로 해석된다(Fig. 7). 이에 반해 남쪽의 삼각주 퇴적물은 층 경계면이 잘 보이지 않는 괴상의 반사면을 보여 고히왕가의 영향으로 많은 퇴적물이 짧은 시간 동안에 퇴적되었음을 알 수 있다. 현생 삼각주 퇴적층의 두꺼운 빨 퇴적물은 많은 양의 세립입자들이 뜬짐으로 지속적으로 공급되어 축적된 것으로 해석되며, 층리

면이 잘 발달한 얇은 빨 퇴적층과 두꺼운 빨 퇴적층이 교호하며 반복된다. 이러한 교호 퇴적층은 유체흐름이 빠르고 퇴적물 공급이 충분할 때는 층리를 형성하다가, 상대적으로 유속이 느리고 퇴적물 공급이 적어질 때는 저서생물의 교란에 의해 층리가 파괴되는 반복의 결과로 해석된다.

6. 결론

황해의 퇴적환경은 크게 중국쪽 황하의 삼각주 환경, 황해 중심부의 침식대, 그리고 한국쪽의 모래파 및 모래퇴 환경으로 뚜렷하게 구분된다.

황하 말단부에 발달한 삼각주 퇴적층들은 연속성이 양호한 평행한 반사면을 보인다. 전진퇴적양상을 갖는 삼각주 전면은 점진적으로 전위삼각주로 변하며, 약 10 m 정도의 수심 차이를 보이므로 쉽게 구분된다. 황하의 현세 퇴적물은 황하 말단부에서 산동반도를 돌아서 남하하는 양상을 보이는데 현세 퇴적층의 등층후도에 의해서도 확인된다. 이 퇴적층은 산동반도 하부에 위치했던 고히왕 퇴적물 상단에 중첩되어 나타난다. 그리고 전위삼각주의 빨 퇴적물은 황해 중심부에 발달한 침식대 지역을 향해서 점차 얇아져 소멸된다.

황해 중심에 발달한 침식대는 황하의 전위삼각주 퇴적물의 말단부에서부터 한국측 연안의 모래파 퇴적물이 형성된 지점 사이의 구간이다. 침식대는 탄성과 단면도 상에서 강한 진폭을 갖는 반사면으로 나타나며, 다수의 해저수로 형태들과 침식면이 관찰된다. 특히 침식대 지역의 퇴적층 표면에서는 선현세의 산화대층이 관찰되는데, 후기플레이스토세의 최후 빙하기 이후에 무퇴적 또는 침식작용이 우세했음을 지시한다. 그리고 한국측의 일부 침식대 지역에서는 모래퇴가 발달하며 북서-남동 방향으로 배열되어 있다. 황해 중심부에 발달한 침식대는 중국측 기원 퇴적물과 한국측 기원 퇴적물의 경계부분으로 해석된다.

한국측 주변 해역에서는 규칙적인 배열 및 형태를 갖는 모래퇴 또는 모래파가 발달한다. 현생 모래퇴 직하부에 놓이는 해침 퇴적상은 침식대에서부터 한국쪽으로 연장되며, 일부 침식작용에 의해서 불연속적으로 발달한다. 이 퇴적상은 평탄한 탄성과 반사면이 발달하는 곳에서는 1~2 m의 층후를 갖지만 한국쪽으로 가면서 20~30 m의 층후로 두꺼워진다. 현생 모래퇴들은 북동-남서 방향으로 배열되어 있으며, 이곳의 조류방향과 일치한다.

현생 모래퇴는 주로 무층리 탄성과 유형을 보이고, 하부의 해침 퇴적상 위에 고립되어 나타나기도 한다. 연구지역에서 가장 규모가 큰 현생 모래퇴는 높이가 10~25 m이고, 횡적으로는 20~30 km 정도 연장되어 있는 상태로 분포한다. 모래퇴는 외해로 가면서 규모는 감소하고 방향성이 뚜렷하지 않다. 이것은 모래퇴를 형성하는 퇴적물들이 외해로 확산·이동되기보다는 조류에 의해서 주로 북동-남서 방향으로 이동하였음을 지시한다.

사 사

본 연구는 한국해양연구소에서 수행한 해양수산부의 “98 황해 퇴적물 이동현상 및 퇴적환경 연구” 사업 결과의 일부이다. 자료처리와 정리에 힘써 주신 한국해양연구소 해양지질연구단 참여자들, 그리고 이어도호 이봉원 선장외 전 승조원들에게 감사드린다. 또한 이 논문의 도면 작성을 도와준 이현주씨와 원고를 심사해 주시고 좋은 의견을 주신 강원대 정대교 교수와 한국자원연구소 유동근 박사께 진심으로 감사드린다.

참고문헌

- 김여상, 1988, 한국 서해 천수만 사장포 해안의 조간대층의 퇴적환경과 진화. 서울대학교 박사학위 논문.
- 신동혁, 1998, 한국 서해안 가로림만 조간대 퇴적환경과 홀로세 해수면 변동. 인하대학교 박사학위 논문.
- 신동혁 외, 1998, '98 황해 퇴적물 이동현상 및 퇴적환경 연구, 해양수산부, 서울.
- 이치원 외, 1995, 해저지질조사 연구(흑산해역), KR-95 (C)-27, 한국자원연구소, 유성.
- 천종화, 한상준, 장진호, 1995, 황해 끝소만 조간대의 후기 플레이스토세 니질 산화대층의 퇴적작용과 속성작용, 지질학회지, 31, 546-559.
- 최동립, 석봉출, 김성렬, 한상준, 1992, 한반도 황해 중부 태안반도 근해 사질 퇴적물의 이동, 해양학회지, 27, 66-77.
- Alexander, C.R., DeMaster, D.J., and Nittrouer, C. A., 1991, Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting, The Yellow Sea, Marine Geol., 98, 51-72.
- Butenko, J., Ye, J.D., and Milliman, J.D., 1983, Morphology, sediments and late Quaternary history of the East China Sea: in Yuru, L., Eds., Acta Oceanologica Sinica, Proceedings of international symposium on sedimentation on the continental shelf with special reference to the East China Sea, China Ocean Press, Beijing, 725-751.
- Butenko, J., Milliman, J.D., and Yincan, Y., 1985, Geomorphology, shallow structure, and geological hazards in the East China Sea, Conti. Shelf Research, 4, 121-141.
- Chen, L., 1989, A study of mineral assemblage in sediments of the Bohai Sea, the Huanghai Sea and East China Sea, Marine Sciences, 1, 1-13.
- Choi, B.H., 1980, Development of fine-grid numerical tidal models of the Yellow Sea and the East China Sea, Journal of Korean Society of Coastal & Ocean Engineering, 2, 231-244.
- Emery, K.O. and Niino, H., 1967, Stratigraphy and petroleum prospects of Korean Strait and the East China Sea, Report of Geophysical Exploration, Geological Survey Korea, 1, 249-263.
- Jo, W., 1980, Holocene sea-level changes on the east coast of Korea Peninsula (in Japanese with English abstract), Geogr. Rev., Japan, 53, 317-328.
- Kang, S.W. and Choi, J.K., 1984, Surface waves and bottom shear stresses in the Yellow Sea, J. Oceanol. Soc. Korea, 19, 118-124.
- Kang, S.K., Lee, S.R., and Lie, H.J., 1998, Fine Grid Tidal Modeling of the Yellow and East China Seas, Conti. Shelf-Res, 18, 739-772.
- Kenyon, N.H. and Stride, A.H., 1970, The tide-swept continental shelf sediments between the Shetland Isles and France, Sedimentology, 14, 159-173.
- Khim, B.K. and Park, Y.A., 1992, Smectite as a possible source-indicative clay mineral in the Yellow Sea, Geo-Marine letters, 12, 228-231.
- Klein, G. De V., Park, Y.A., Chang, J.H., and Kim, C.S., 1982, Sedimentology of a subtidal, tide-dominated sand body in the Yellow Sea, southwest Korea, Mar. Geol., 50, 221-240.
- Larsen, L.H., Cannon, G.A., and Choi, B.H., 1985, East China Sea tide current, Continental Shelf Research, 4, 77-103.
- Lee, H.J. and Chough, S.K., 1989, Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea, Mar. Geol., 89, 195-205.
- Milliman, J.D., Beardsley, R.C., Yang, Z.S., and Limeburner, R., 1985, Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: Identification and potential transport mechanism, Conti. Shelf Res., 4, 175-188.
- Niino, H. and Emery, K.O., 1961, Sediments of shallow portions of East China Sea and South China Sea, Geol. Soc. Am. Bull., 72, 731-761.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., McKee, B.A., Cutshall,

- N.H., and Larsen, I.L., 1984, The effect of sediment mixing on ^{210}Pb accumulation rates for the Washington continental shelf, *Mar. Geol.*, 54, 201-221.
- Off, T., 1963, Rhythmic linear sand bodies caused by tidal currents, *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 47, 324-341.
- Park, B.K. and Han, S.J., 1987, Surface sediments, basin evolution, and sedimentary sequence of the Yellow Sea, *Ocean Research*, 9, 51-64.
- Park, Y.A. and Blomm, A.L., 1984, Holocene sea-level history in the Yellow Sea, Korea, *Journal of the Geology Society of Korea*, 20, 189-194.
- Suk, B.C., 1989, Sedimentology and history of sea level changes in the East China Sea and Adjacent Seas: *in* Taira, A. and Masuda., F., Eds., *Sedimentary facies in the active plate margin*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 215-231.
- Xiang, Z.C., Ye, Y.C., Yuan, Y.R., Cheng, G.D., and Chen, Q., 1983, Shallow structure of recent Changjiang river submarine delta: *in* Yuru, L., Eds., *Acta Oceanologica Sinica, Proceedings of international symposium on sedimentation on the continental shelf, with special reference to the East China Sea*, China Ocean Press, 678-686.
- Yang, C.S. and Sun, J.S., 1988, Tidal sand ridges on the East China Sea Shelf: *in* de Boer, P.L., van Gelder, A., and Nio, S.D., Eds., *Tidal-influenced sedimentology environments and facies. Sedimentology and Petroleum Geology*, 23-28.

1999년 5월 1일 원고접수

1999년 8월 27일 원고채택