경기만 서부 덕적도 사퇴의 탄성파층서 및 퇴적환경 연구

이윤오¹ · 최상일^{1*} · 정교철²

¹광운대학교 환경공학과, ²안동대학교 지구환경과학과

Seismic Stratigraphy and Sedimentary Environment of the Dukjuk-Do Sand Ridge in Western Gyeonggi Bay, Korea

Yoon-Oh Lee¹, Sang-II Choi^{1*}, and Gyo-Cheol Jeong²

¹Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

²Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

서해 경기만의 덕적도 서부에 발달하고 있는 사퇴해역에서 획득된 고해상 탄성파탐사자료, 해저면측사탐사자료, 표층퇴적물 및 주상코어시료에 대한 정밀분석과 연구가 실시되었다. 탄성파탐사 자료에 의하면 사퇴의 층서는 3개의 퇴적단위(sequence I, II, III)로 구분되어진다. 최상부 퇴적단위 I은 ¹⁴C 연대측정 자료에 의하면 5,000~6,000 yr BP경 본 해역이 해침을 받은 후 강한 왕복성 조류에 의하여 형성된 것으로 사료된다. 퇴적단위 II는 주상코어 자료에 의하면 니질이 주로 분포하는 고 조간대 니질퇴적층으로 추정된다. 퇴적단위 III은 중생대에 관입한 화강암으로 분포된 음향기반암 상부에 플라이스토세 말기로 추정되는 육성퇴적층인 자갈 내지는 조립질 퇴적물이 부정합으로 퇴적된 것으로 판단된다. 해저면측사탐사 자료에 의하면 사퇴 정상부의 해저면은 모래파가 발달되어 있으며, 이는 대체로 조류의 방향과 일치하는 N20°W 방향이다. 사퇴 정상부에서 멀어지면 모래물결자국이 발달하고, 경사면에서는 균질한 사질로 분포한다. 표층퇴적물과 주상퇴적물(시료 VC-1, 2, 3)은 특정 내부 구조를 갖지 않는 비교적 균질한 중립토 내지 세립토(Mz, 1-2φ)로 분포하는 특징을 보인다.

주요어 : 탄성파층서, 사퇴, 음향기반암, 해저면측사탐사, 퇴적환경

We examined high-resolution seismic data, side scan sonar data, surface sediments, and vibrocore samples from a sand ridge off the western part of Dukjuk-Do in Gyeonggi Bay, with the aim of interpretation of seismic stratigraphy and sedimentary environment. Based on the seismic data, the deposited sands are divided into three sedimentary units. ¹⁴C age data indicate that the top sequence (sequence I) formed at 5000-6000 yr BP, when a transgression resulted in strong shifting tides. Analyses of the vibrocore samples indicate that sequence II is a paleo-mudflat layer of intertidal sediments dominated by mud. Sequence III consists of terrestrial sediments that are presumed to have been deposited at the end of the Pleistocene, unconformably overlying the acoustic bedrock and Mesozoic granite. The side scan sonar data indicate that sand waves were formed on the seabed on top of the sand ridge. Generally, this is the direction of N20°E, which coincides with the direction of tidal flow. Sand ripples occur away from the top of the sand ridge and are distributed homogeneously across a sandy slope. Vibrocore analyses indicate that the surface sediments and core sediments (samples VC-1, -2, and -3) are homogeneous, without any internal structures, and are characterized by a mixture of medium and fine sand (1-2φ), respectively.

Key words : seismic stratigraphy, sand ridge, acoustic basement, side scan sonar, sedimentary environment

*Corresponding author: sichoi@kw.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

해양물리탐사는 해양공학 측면으로 보면, 해저자원탐사, 항만준설, 수중에 건설되는 교량이나 방파제의 기초지반의 심도, 인공섬이나 매립지의 연약지반 분포상황, 해상풍력 발전기 건설과 같은 해양구조물의 기초지반조사 활용에 중요한 기초자료가 될 것이다. 이와 같이 고해상도탄성파탐사는 한 지점 개념의 해상시추 자료와 병행하여 퇴적환경과 공간적인 해저지층분포를 파악할 수 있는 아주 경제적인 탐사방법중의 하나이다.

경기만은 한반도의 중부에 위치하여 크고 작은 섬들이 산재하며, 이들 섬주위에 조류의 방향과 평행한 사퇴가 잘 발달되어 있다. 이러한 지형적인 요인에 의해 넓은 조간대, 조류성사퇴 그리고 섬들 주위에 깊은 수로가 형성하고 있으며 깊은 곳은 60 m 정도 된다. 조류성 사퇴의 특성은 강한 왕복성 조류에 의한 사질퇴적물의 이동으로 조류방향과 대체로 일치하며 불연속적으로 발달

하고 있어 앞으로의 항만준설, 수중에 건설되는 교량이나 방파제 및 해상풍력 발전기 건설 등과 같은 해양구조물의 건설을 위해서는 해저 퇴적구조의 규명이 매우 중요하게 다루어져야 할 것이다.

본 연구의 목적은 덕적도 서부해역에 발달하고 있는 사퇴에 대한 고해상도탄성파탐사(high resolution seismic survey, 3.5 kHz) 자료에 의한 퇴적층서와 퇴적상을 규명하고, 탄성파음향기반암(acoustic basement)을 설정하여 상위에 쌓인 해저퇴적층의 부정합면 혹은 정합면에 의한 퇴적단위 구분과 퇴적층의 두께를 밝히고자하며, 또한 사퇴에 대한 퇴적환경을 규명하는데 목적이 있다. 이를 위하여 탄성파탐사자료, 해저면측사탐사(side scan sonar)자료, 해저퇴적물 시료분석 그리고 주상시추자료 등의 분석 및 해석을 통해 사퇴에 대한 수평적 및 수직적 퇴적양상을 파악하고, 고기후학적 퇴적환경과 퇴적의 역사 등을 규명하고자 한다.

Fig. 1. Bathymetric map of Gyeonggi Bay showing the location of the study area.

연구해역

연구해역은 한반도 서해 경기만의 서부에 위치한 덕적도 해역으로 북위 37°05'~37°20', 동경 125°55'~126°15' 내에 위치한다(Fig. 1).

경기만은 크고 작은 섬들과 육지로 둘러싸여 지형적으로 매우 복잡한 양상을 보이는 해역으로 북동쪽의 강화도 염하수로를 통하여 한강의 담수와 쇄설퇴적물질이 유입하여 넓은 조간대, 깊은 수로 그리고 조류의 방향과 평행한 사퇴가 섬 주위에 잘 발달되어 있다.

경기만 일대의 표층퇴적물은 입도특성에 따라 3개의 퇴적상으로 구분된다. 첫째 넓은 조간대의 니사질퇴적상, 둘째 사퇴가 발달한 사질퇴적상, 셋째 수로에서의 사력질퇴적상 등과 같은 특징적인 분포를 보이는 것은 각각의 다른 조석 조류 등의 에너지환경에 따라 결정된 것으로 볼 수 있다.

경기만 해역의 조석은 반일주조의 양상으로 거의 일조부등이다. 유향은 대체로 수로방향과 평행한다. 조차는 해저지형에 따라 차이가 있지만 대체로 내만으로 갈수록 커진다. 덕적도의 경우 대(소)조차는 7.8(5.8) m이며, 유속은 Fig. 2에서 보느바와 같이 북수도 섬 사이에서 최대 창조류(낙조류)시 4.3(5.3) knots, 반도수도의 덕적도~이작도 섬 사이의 최대 창조류(낙조류)시 5.5(6.4) knots이다. 이와 같이 낙조류가 창조류 보다 우세한 경향을 보여 준다(Lee et al, 1994, 1995).

경기만의 도서 및 인접 육상지질은 선캄브리아 초기의 서산층군과 선캄브리아 후기의 경기편마암복합체를 이루어져 있는 변성암류가 주로 분포하며, 이들을 관입한 중생대 유라기의 대보화강암은 덕적도, 자월도, 용유도 등에 분포하는 특징으로 인하여 이 일대는 조립질 퇴적물이 우세한 편이다.

자료취득 및 분석방법

해상물리탐사 측선은 6개 측선 중 측선 4를 대표로 선정하여 탄성파층서 및 퇴적상 등의 해석에 이용하였고, 해양물리탐사는 탄성파탐사(mini-sparker system, 3.5 kHz), 해저면층사탐사, 해저지형조사를 위한 음향수심측정(echo-sounding)을 실시하였다(Fig. 3).

해저표층시료는 시료채취기를 사용하였으며, 코어시료 채취는 퇴적물 특성에 따라 피스톤 코어채취기(최대 심도 3 m) 또는 진동식 코어채취기(최대 투과심도 5 m)를 사용하였다. 취득된 코어는 절개 후 육안감정과 사진

Fig. 2. Tidal current chart for Gyeonggi Bay.

Fig. 3. Map showing tracklines of high-resolution seismic profiling. The dots represent surface sample sites, and squares are vibrocore sample sites.

촬영, X-선 촬영을 하여 퇴적물의 입도분포 특성과 퇴적구조를 파악하는데 활용하였다.

사질퇴적층에서 150 m 내외의 양호한 투과력을 갖는 탄성파탐사기를 사용하였다. 주파수는 3.5 kHz의 음원을 사용하였고 또한 분해능을 높이기 위하여 탐사선 속도는 5-6 knot를 유지하여 해상도가 좋은 자료를 획득하였다. 획득된 자료는 현생퇴적물이 분포하는 사퇴에 대한 층서규명 및 퇴적상 연구에 적용하였다.

해저면측사탐사에 사용된 장비는 EG & G의 Model 260 기록계와 Model 272형 Tow-fish를 이용하였다. 주파수는 105 kHz를 사용하였고, 측사범위는 조사해역의 수심에 따라 좌우 각각 50 m, 100 m, 150 m, 300 m로 적절히 변동시킬 수 있으나, 기본적으로 100 m로 선정하여 분해능을 좋게 하였다. 수중예인체(towfish)는 선체 후미로부터 거리는 수심과 탐사선박 추진기의 잡음 영향을 고려하여 20 m 내외가 되게 설정하였다.

해상물리탐사 및 해저퇴적물 시료채취시의 조사선 위치측량은 GPS를 사용하였다. 표층퇴적물 분석시료는 29 개를 대상으로 하였고, 입도분석은 KSF 2502 규정을 참고하였으며, 퇴적물의 특성에 따라 100 g 정도의 시료들을 63 μ 의 체를 사용하여 습식 체질하였으며, 뿔과 모래 및 자갈을 분리시켰다. 모래와 자갈은 1 ϕ 간격으로 건식 체질하고, 뿔은 습식 피펫법에 의해 1 ϕ 간격으로 입도별 중량백분율을 구하여 누적곡선도위에 옮겨 Folk and Ward (1957)의 그래픽 방법을 이용하여 퇴적물의 이름을 정하고, 각 입도별 무게 백분율에서 계산한 네 개의 적률 즉, 평균입도, 분급도, 왜도 및 첨도의 조직표준치를 구하였다. 퇴적물의 유형분류는 자갈, 모래 및 뿔(실트 및 점토)의 함량에 의한 삼각도표 방법을 이용하였다.

진동식주상코어시료 채취는 최대심도 5 m의 한계로 인하여 사퇴의 서쪽 경사면에서 총 4개 지점을 대상으로 시추하였고, 코어시료를 대상으로 입도분석 등을 실시하여 시추주상도를 작성하였다.

결과 및 토의

탄성과 퇴적층 분석

탄성과 탐사자료는 Mitchum and Vail (1977) 및 Vail (1987)의 해석방법에 따라 탄성과 퇴적층 분석, 음향상 분석 등 2단계과정을 통해 해석되었다.

탄성과 퇴적층 분석은 반사면끝(reflection termination)에 의해 부정합을 인지함으로써 퇴적연속층과 퇴적계를

찾아낸다. 이 부정합면은 새로운 층과 고기층을 분리하는 결층을 표시하는 침식면 혹은 무퇴적면이고, 수렴되는 반사면끝이 경계반사면이다. 반사면 끝은 상향중첩, 하향중첩, 절단 및 상부중첩 등으로 분류되며, 이러한 경계반사면을 퇴적층 경계면으로 하였다.

해저퇴적층의 탄성파층서 및 퇴적상

덕적도 서부 해역에 분포하는 해저 사퇴를 횡단하는 조사선 중 대표적인 예로서 측선 4의 탄성파탐사기록지의 단면해석도(Fig. 4)에서 보는 바와 같이 1개의 강한 반사면과 2개의 약한 반사면으로 구분되는 퇴적층은 부정합면 혹은 정합면에 의해 3개의 퇴적단위(상위로 부터 I, II, III)로 구분되며, 이들은 음향기반암 상위에 쌓인 쇄설성퇴적층으로 이루어져 있다.

최상위층인 퇴적단위 I은 특정 내부구조를 갖지 않고 불연속적인 반사파들이 불규칙하게 혼재하며, 이는 짧은 시간동안 갑작스런 퇴적작용이 진행되었거나, 사질퇴적물이 우세한 경우에 나타나는 특징을 갖는 퇴적단위로 해석된다. 퇴적 두께는 음파왕복주시 약 15~20 ms로 발달되었고 사퇴 정상부의 두께는 최대 30 ms 정도이다. 사퇴가 끝나는 동·서 양변의 해저 골짜기에서 모래층은 거의 존재하지 않거나 자갈층 표면에 박층으로 분포한다. 일부해역의 해저면에서는 부분적으로 모래파와 같은 다양한 표면구조가 발달되어 있다. 퇴적단위 I의 하부경계면은 평탄한 반사면이 강한 정합면에 의해 경계되는 특성을 보인다.

퇴적단위 II는 두께 20 ms 내외로 분포하고, 사퇴 하부지역에서는 대부분 고진폭의 평행반사면을 보이며 일부는 퇴적작용으로 인하여 한 방향으로 이동해가는 진진하는 형태의 퇴적구조를 보이며, 사퇴의 동·서 양변의 해저 골짜기를 향하여 퇴적구조가 무질서한 음향상으로 변화된다. 본 층의 퇴적상은 이질 및 이질사층이 호층을 이루면서 퇴적된 것으로 해석된다. 모래파는 하부 퇴적층을 삭박하면서 발달되는 수로충진 구조가 발달된 것으로 보인다. 이는 과거 지질시대동안 해수면 하강으로 연구해역이 대기 중에 노출된 조건 하에서 육지의 하천 혹은 강이 연장되어 흐르면서 형성된 고하천으로 판단되며, 해수면이 상승하면서 수로 충진퇴적층을 발달시킨 것으로 해석된다. 퇴적단위 II의 하위경계면은 대부분 정합면으로 경계되나, 일부는 부정합면에 의해 경계되는 특징을 보인다.

퇴적단위 III은 탄성과 잡음이 신호음과 혼재한다. 특히 해저면에 의해 야기된 다중반사면이 혼재되어 신호

Fig. 4. High-resolution seismic profile across the sand ridge, showing the three seismic sequences in survey Line 4.

음과의 구별이 쉽지 않다. 퇴적단위 III의 상부경계면은 부분적으로 절단 혹은 상부중첩으로 접한다. 반사면이 절단된 경우에는 퇴적단위 III의 퇴적 후 지각응기 및 침식에 의해 지층이 삭박되어 상위 퇴적층 II와는 퇴적 시간차를 보이는 반면, 상부중첩인 경우에는 퇴적시간차를 보이지 않는다. 신호음의 부재는 사퇴의 양측에 해저 골짜기가 발달되면서 육상에서 기원된 하천퇴적층이 짧은 시간동안 집중적으로 일어난 퇴적층으로 형성된 무질서 퇴적상 혹은 내부구조가 없는 투명한 상으로 해석이 가능하다.

해저면 특성분석

해저면측사탐사를 통한 정보취득 중 조사해역의 해저면에서 반사되어온 음향특성에 따라 특징적인 퇴적물의 이동구조와 퇴적물의 분포양상 즉 암반노출, 자갈, 모래 및 펄의 분포상태 등이 영상으로 보이기 때문에 자료해석이 거의 정확하게 구분지을 수 있다.

조사해역의 해저면은 반사강도가 강한 모래파가 발달하는 해역, 반사강도가 강하지만 모래파가 아닌 연흔이 발달하는 해역, 그리고 반사강도가 약한 세립질모래 내지 펄질이 발달하는 해역으로 이루어져 있다(Fig. 5). 모래파는 주로 사퇴 정상부에 잘 발달되어 있으며, 모래파는 상당한 세기의 물흐름이 있는 해역에서 발달하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 물리적 성질을 고려할 때

조사해역의 사퇴 표면에 발달하고 있는 모래파는 조사해역에 모래파를 형성시킬 수 있는 강한 수류가 있음을 지시하고 있다. 정상부에서 사퇴경사면(동쪽 또는 서쪽)으로 갈수록 소규모 연흔 또는 특징이 없는 해저면을 보인다.

본 해역에서는 Fig. 5에서와 같이 모래파의 방향은 대체적으로 N20°W이다. 반사강도가 강한 모래파는 기존의 펄층이 침식되고 그 하부에 있는 모래층이 해저에 노출되어 조립질 퇴적물로 재동되어 분포된 것으로 보인다. 조류의 방향은 창조류 때는 북동쪽으로 낙조류 때는 남서쪽으로 흐르면서 모래물결 자국을 잘 발달시킨 것으로 보여 진다. 이러한 결과를 고려할 때 조사해역에 발달하고 있는 모래파는 섬과 섬 사이로 강한 왕복성 조류에 의하여 형성된 것으로 암시하고 있다.

연흔은 모래파가 발달하는 주변에 주로 분포하고 있으며, 이 연흔 역시 모래파의 발달 방향과 동일하여, 조사해역에 흐르는 조류에 의해 생성되었음을 알 수 있다.

해저지형탐사

단일빔음향측심기(single beam echo sounder)는 Raytheon사의 Model 719B의 본체와 송수파기로 구성되어 있으며, 수심이 얇은 연안지역의 수심측량은 주로 200 kHz 내외의 주파수를 사용하여 연속음향측심을 실시하였다. 측심된 수심은 조석을 보정하여 등수심도를

Fig. 5. Seismic profile and side scan sonar data across the sand waves.

Fig. 6. Three-dimensional sub-bottom topographic map.

Fig. 7. Isopach map of seismic data(contour interval: 2 m).

작성하였고 또한 3차원으로 표현하였다(Fig. 6). 덕적도 사퇴 중심으로 북쪽(북수도) 선미도 서편 해저수로에서 최대수심은 62m이고 사퇴 동쪽연안 수로에서 수심이 60 m 내외 되며, 남쪽으로 갈수록 해저지형이 완만하여 10 m 내외로 된다.

덕적도 사퇴의 발달형태는 해저지형도(Fig. 6) 및 등층후도(Fig. 7)를 보는 바와 같이 사퇴의 산마루선은 북동-남서 방향(N8°E)으로 길게 발달하고 있으며, 그 길이는 약 18 km, 폭 약 5 km, 높이 약 50 m 정도이다.

사퇴의 발달은 수로의 방향과 대체로 평행하고, 또한 왕복성 조류의 방향과 거의 일치하는 양상을 보인다. 사퇴정부의 수심은 약 0.3-8 m 이하로 매우 낮으며, 사퇴

는 서쪽보다 더적도 연안의 동쪽경사면이 급한 비대칭 형태를 보이며, 침식과 퇴적이 반복되며 퇴적물이 재동되어 남서쪽으로 발달하고 있는 사퇴라 할 수 있다.

경기만 해역은 넓은 조간대와 깊은 수로 그리고 조류의 방향과 평행한 사퇴가 잘 발달되어 있다. 이러한 지형적 특성은 강한 조류가 덕적도와 선미도 사이를 통과할 때 생기는 유속이 더욱 빨라지는 현상으로 인하여 섬주위에 깊은 골짜기가 생기며, 높은 조차와 강한 왕복성 조류에 의해 사질퇴적물의 집적 또는 침식이 이루어져 남서 방향으로 재동되어 전진구축되고 있는 사퇴라 할 수 있다.

Table 1. Results of particle size analysis of surface samples.

Sample No.	Gravel (%)	Sand (%)	Mud (%)		Sediment Type	Fineness Modulus	Mz (phi)	Sorting	Sk	Kg
			Silt	Clay						
1	0.00	99.93	0.06	0.00	S	1.81	1.50	0.38	0.09	1.11
2	0.00	99.78	0.22	0.00	S	1.74	1.60	0.34	0.16	1.23
3	0.01	99.90	0.10	0.00	(g)S	1.90	1.40	0.36	-0.07	1.09
4	0.02	99.23	0.75	0.00	(g)S	2.24	1.00	0.49	-0.07	1.04
5	16.50	83.30	0.18	0.00	gS	2.60	0.60	1.44	-0.51	1.35
6	0.00	78.38	14.53	7.10	mS	0.78	3.10	2.10	0.78	2.60
7	0.04	99.34	0.62	0.00	(g)S	1.59	1.70	0.52	0.09	1.10
8	1.14	98.71	0.16	1.00	(g)S	1.94	1.30	0.49	-0.06	1.34
9	0.34	99.36	0.30	0.00	(g)S	1.61	1.60	0.52	0.05	1.00
10	1.34	98.51	0.14	0.00	(g)S	1.96	1.40	0.37	0.00	1.07
11	0.04	98.29	1.65	0.00	(g)S	1.49	1.80	0.50	0.21	1.20
12	12.75	83.69	3.55	0.00	gS	1.74	1.90	1.50	-0.32	2.95
13	0.84	99.06	0.09	0.00	(g)S	1.88	1.50	0.34	-0.12	1.09
14	1.36	97.06	1.58	0.00	(g)S	1.69	1.60	0.54	0.26	1.23
15	1.63	96.55	1.83	0.00	(g)S	1.28	2.00	0.77	-0.20	1.81
16	0.07	25.47	47.44	27.01	sM	0.14	6.40	3.24	0.40	0.87
17	0.00	99.02	0.98	0.00	S	1.11	2.10	0.43	0.10	1.23
18	1.64	97.15	1.20	0.00	(g)S	1.94	1.30	0.52	0.02	1.43
19	4.97	93.98	1.06	0.00	(g)S	2.06	1.30	0.77	-0.14	2.46
20	1.84	98.12	0.04	0.00	(g)S	2.43	0.80	0.52	-0.23	1.10
21	0.00	99.46	0.55	0.00	S	1.42	1.80	0.54	0.15	1.02
22	1.73	97.88	0.39	0.00	(g)S	1.39	1.90	0.52	-0.04	1.10
23	1.00	98.42	0.58	0.00	(g)S	1.51	1.80	0.63	0.11	1.08
24	0.00	29.56	44.34	26.10	sM	0.30	6.00	3.53	0.27	0.89
25	1.93	88.89	6.40	2.78	(g)S	1.45	1.90	1.22	0.26	2.38
26	1.99	97.94	0.79	0.00	(g)S	2.07	1.20	0.47	-0.11	1.34
27	0.46	99.18	0.47	0.00	(g)S	1.87	1.40	0.36	0.06	1.14
28	57.16	28.25	11.40	3.20	msG	4.70	-1.50	3.79	0.75	0.68
29	100.00	0.00	0.00	0.00	G					
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00		0.14	-1.50	0.34	-0.51	0.68
Max.	100.00	99.93	47.44	27.01		4.70	6.40	3.79	0.78	2.95
Ave.	6.92	86.40	4.58	2.17		1.77	1.75	0.94	0.05	1.35

*S (Sand), (g)S (slightly gravelly Sand), gS (gravelly Sand), mS (muddy Sand), sM (sandy Mud), G (Gravel), msG (muddy sandy Gravel).

표층 퇴적물의 특성

덕적도 사퇴주변에서 채취된 29개의 표층시료(Fig. 3)에 대한 입도분석 결과(Table 1)를 보면, 전체적으로 시료의 평균입도는 극조립사 내지 세립사로 분포한다. 퇴적물형태는 조립질의 경우 자갈이 5% 이하 함유하는 모래로 분포하는 특징을 나타낸다.

그러나 사퇴는 해저지형 및 조류의 양상과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있는데, 즉 덕적도 사퇴 북쪽의 섬과 섬 사이는 강한 조류의 영향을 받는 곳으로 깊은 수로를 형성하여 기반암이 불규칙하게 노출된 암반사이에 자갈과 굵은 모래로 분포하며, 사퇴 정부에는 주로 잔자갈을 소량 함유하는 중립 내지 세립질모래로 분포하고

Fig. 8. Horizontal variations in mean grain size (ϕ) over the sand ridge.

있다. 사면의 양측에서는 강한 조류의 영향으로 침식 또는 퇴적되는 양상을 보이며 세립사를 함유하는 빨로 분포하는 특징을 나타내고 있다. 사퇴가 조립사 내지 세립사의 이동에 의해 형성된다는 관점에서 횡단선인 조사 측선 4번에 대한 사퇴를 정부, 동측 경사면, 서측 경사면, 해저골짜기로 구분하여 각각의 평균입도에 대한 분포 결과를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 정부에서는 조립질로 분포하고, 경사면은 세립질로, 다시 건너편 사면으로 가면서 실트로 분포하는 특징을 잘 나타내 보인다.

주상시추코어의 퇴적물의 특성

주상시추는 Fig. 11에서와 같이 최대심도 5 m 가능하며 덕적도 사퇴의 퇴적단위 I의 예상 심도는 15 m 이상 이어서 이를 고려하여 사퇴의 지형적 특성과 탄성파탐사 자료를 참고로 하여 사퇴의 서쪽 경사진 해역을 선정하여 4개 지점에서 진동식 코어채취기(Fig. 9)로 주상코어시료를 채취하였다.

입도분석결과(Fig. 10, Table 2) 코어시료 VC-1을 보면 3.2 m까지는 주로 극소량의 폐각편이 함유하는 중립사로 분포하는 특징을 보이며, 그 이하는 자갈, 빨이 혼재하는 모래질로 구성하고 있다. 코어시료 VC-2, VC-3의 경우 주로 중립사로 분포하는 특징을 보인다.

그러나 VC-4 (Fig. 11)를 보면 표층 30 cm까지는 현생 퇴적층으로 분포하며 중립사로 구성하지만 그 이하 4.7 m까지는 주로 빨질로 구성한다. 이 빨층 사이에 5~15 cm 두께의 세립사 내지 중립사로 수평층리를 이루는 9개의 호층으로 분포하는 특징을 나타내고 있다. 이러한 퇴적상을 종합하면 이 층은 현세의 고조간대 층으로 사료되며, 강한 왕복성조류의 영향으로 사퇴가 침식되어 재동되었거나, 홍수 때 이루어진 고조간대층이라

Fig. 9. Mimetic diagram of vibrocore sampling.

Fig. 10. Vertical variations in the mean grain size (ϕ) of core samples. Location is shown in Fig. 3.

인지할 수 있다.

표층퇴적물의 화학분석

표층시료에 대한 주성분원소분석결과와 Table 3과 같다. 분석에 사용된 시료들은 사퇴의 정상부에 해당하는

Fig. 11. Section showing the lithology and description of vibrocore samples.

시료들이며, 입자의 크기는 조립사 내지 중립사로 분포한다. Fig. 12는 평균입도에 대한 화학분석치를 대비한 것으로 주로 1~1.5 ϕ 내외의 범위에서 높은 값을 보인다.

쇄설광물질의 주성분은 SiO_2 이며, 평균함량은 SiO_2 85.04%, Al_2O_3 6.98%, Fe_2O_3 0.86%, MgO 0.14%, CaO 1.01% 등으로 분포한다. 주광물질은 석영으로 구

Table 2. Results of particle size analysis of vibrocore samples.

Core No.	Sample Depth (cm)	Gravel (%)	Sand (%)	Mud (%)		ST	FM	Mz (ph)	Sorting	Sk	Kg
				Silt	Clay						
vc-1	40-60	0	94.49	5.51	0	S	1.27	2.03	0.75	0.49	1.49
	100-120	0	97.28	2.72	0	S	1.35	1.88	0.60	0.31	1.34
	160-180	0	97.94	2.06	0	S	1.41	1.86	0.56	0.35	1.47
	220-240	0	98.39	1.60	0	S	1.43	1.83	0.61	0.21	1.19
	280-300	0	98.89	1.11	0	S	1.52	1.77	0.53	0.24	1.33
vc-2	20-40	0	99.95	0.05	0	S	1.69	1.63	0.38	0.13	1.14
	80-100	0	99.81	0.19	0	S	1.67	1.65	0.33	0.03	1.23
	140-160	0	99.78	0.22	0	S	1.64	1.66	0.36	0.13	1.27
vc-3	20-40	0	99.47	0.53	0	S	1.60	1.62	0.35	0.13	1.29
	80-100	0	99.47	0.53	0	S	1.66	1.59	0.42	0.08	1.15
	140-160	0	99.76	0.24	0	S	1.76	1.51	0.42	0.07	1.11
vc-4	5-30	2.45	93.66	3.89	0	(g)S	1.88	1.42	0.79	0.09	2.71
	60-82	0	18.25	58.72	23.03	sZ	0.13	6.30	2.92	0.37	1.23
	104-118	0	94.98	5.02	0	S	1.71	1.52	0.67	0.46	3.21
	140-159	0	24.11	56.08	19.81	sZ	0.11	5.77	2.78	0.52	1.38
	190-210	0	32.54	39.40	28.06	sM	0.25	6.10	3.16	0.14	0.73
	250-265	0	91.40	8.60	0	S	1.58	1.77	0.90	0.66	3.05
	320-340	0	36.92	48.51	14.57	sZ	0.46	4.59	2.93	0.17	1.10
	409-420	0	96.77	3.23	0	S	1.83	1.41	0.60	0.17	3.15
	450-472	0	19.09	51.95	28.96	sM	0.20	6.66	3.15	0.23	0.93
Min.		0.00	18.25	0.05	0		0.11	1.41	0.33	0.03	0.73
Max.		2.45	99.95	58.72	28.96		1.88	6.68	3.16	0.66	3.21
Ave.		0.12	79.65	14.51	5.72		1.26	2.73	1.16	0.25	1.58

* ST (Sediment Type), FM (Fineness Modulus), S (sand), (g)s (slightly gravelly sand), Sz (sandy silt), sM (sandy Mud), Sk (Skewness), Kg (Kurtosis).

Table 3. Chemical compositions of surface sediments.

Sample No.	Sediment type	Mean Size Phi	Chemical Constituents											Total (%)
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Lol.	
1	S	1.50	84.92		7.62	0.92		0.20	0.36					94.02
3	(g)S	1.40	85.64		7.31	0.81		0.07	0.22					94.05
8	(g)S	1.30	84.70		7.58	0.82		0.09	0.62					93.81
13	(g)S	0.50	85.05		7.60	0.82		0.07	0.42					93.96
26	(g)S	1.20	86.98		6.75	0.71		0.07	0.11					94.62
C 6	gS	0.49	84.02	0.09	5.15	1.02	0.18	0.22	4.60	0.81	2.74	0.00	1.36	99.08
C 7	(g)S	1.71	83.92	0.12	6.83	0.93	0.11	0.29	0.73	1.43	3.25	0.01	1.89	99.51
Min.		0.49	83.92	0.09	5.15	0.71	0.11	0.07	0.11	0.81	2.74	0.00	1.36	93.81
Max.		1.71	86.98	0.12	7.62	1.02	0.18	0.29	4.60	1.43	3.25	0.01	1.89	99.08
Ave.		1.30	85.04	0.11	6.98	0.86	0.15	0.14	1.01	1.12	3.00	0.01	1.63	95.74

* S (sand), (g)s (slightly gravelly sand), gs (gravelly sand)

Fig. 12. Results of chemical analyses of the mean grain size (%).

성되어 있으며, 표층퇴적물의 SiO₂ 함량은 대체적으로 북쪽보다는 남쪽부에서 조금 높은 수치를 나타내는 특징을 보인다.

사퇴의 퇴적환경과 고기후 환경

사퇴의 수평적 퇴적상은 넓은 공간의 환경을 나타낸다. 특히 본 해역에서는 사퇴의 정상부에는 조류에 의한 강한에너지의 영향으로 쇄설물질 입자는 조립질로 분포하며 큰 모래파가 잘 발달되어 있다. 그러나 사퇴의 중앙부에서 멀어질수록 조류에 의한 에너지는 약화되어 모래의 입도는 세립사로 분포하며, 표면은 모래물결이 발달되어 있다. 이러한 특징적인 퇴적 분포양상은 섬과 섬 사이로 조류가 통과할 때 생기는 빠른 유속으로 인하여 입도의 분포가 각각 다른 양상을 보인다. 덕적도의 연안과 사퇴의 양쪽은 강한 왕복성 조류에 의한 깊은 수로가 형성되어 있으며, 조립질퇴적물과 자갈이 혼재하는 퇴적구조를 나타내고 있다. 경기만의 넓은 조간대 그리고 조류성 사퇴는 파랑의 영향이 약하고 조차가 큰 대조간대 환경에서 발달되는 전형적인 지형의 특징이다 (Elliott, 1986).

수직적인 퇴적상의 관계는 시간에 따른 환경의 변화를 나타내며 층서학적 퇴적환경을 규명할 수 있다. 덕적도 사퇴의 탄성파탐사 단면자료에 의하면, 음향기반암층은 선캠브리아기의 변성암류를 관입한 유라기의 화강암류로 구성된 음향기반암 상부에 퇴적단위 III이 부정합으로 자갈 및 조립질 퇴적층이 쌓인 것으로 보이며, 그

시기는 플라이스토세 말기부터 퇴적된 것으로 유추할 수 있다.

퇴적단위 III의 퇴적 후 침식에 의해 지층이 삭박되며 구조운동 없이 퇴적단위 II가 정합적으로 쌓인 것으로 판단된다. 퇴적물질은 니질 및 니사질층의 호층으로 구성된 퇴적단위 II가 쌓일 때, 연구해역에서는 하천이 발달되고, 해침에 의한 수로충진 층이 퇴적단위 II와 동시대적으로 퇴적된 것으로 해석할 수 있다. 그 상위 퇴적단위 I의 지층은 최대 약 30 ms의 사퇴가 조류에 의해 연구해역 중앙부에 남-북 방향으로 발달되고, 사퇴의 동서 양경사면에서 강한조류에 의한 해저 골짜기가 생성되면서 최대 약 40 ms의 퇴적층을 삭박하여 쇄설물질을 북동 또는 남서 방향으로 이동시킨 것으로 판단된다.

고기후 환경과 퇴적시기로 볼 때 최후빙기인 뷔름빙기 또는 위스콘신빙기는 약 18,000년 전 경에 빙하가 최고조에 달했을 때 현재의 해수면위치에서 약 100~130 m 아래에 있었다(Emery, 1967; Milliman and Emery, 1968; Min, 1994).

우리나라의 경우 황해는 남·동해보다 과거 해수면 변동의 영향을 가장 많이 받은 해역이다. 현재 서해의 평균수심은 약 55m이고 최대수심은 약 100m이다. 따라서 현재보다 약 120 m 정도 해수면이 낮았던 관계로 마지막 최대빙하기 동안에는 대부분 육지로 드러나 있었으며, 제주도는 한반도와 육지로 연결되어 있었다. 그 후 약 11,000년 전 경부터 기후가 온난화되면서 빙하가 녹기 시작하여 해수면이 점차 상승하게 되었다.

후빙기의 기후는 한·온의 작은 기복을 되풀이하면서 차차 따뜻해졌고, 현세에 들어오면서 기후는 더욱 더워졌으며, 이에 따라 해빙이 일어나면서 해수면이 점차 상승하여 낮은 곳은 해수에 침수되어 현재의 해안선이 형성되었다.

현세 충적층은 해침으로 빨층과 그 위아래의 사질층으로 세부분으로 나뉜다. 본 해역의 퇴적 시기는 해침초기인 15,000년 전경에 빙하기가 끝나고 해침이 시작되어 지난 약 6,000년 전 경까지 해침이 지속되어 왔으며, 이러한 시기에 한강을 통하여 유입된 다량의 쇄설성 퇴적물은 고수로 및 갯어귀를 중심으로 퇴적작용이 진행된 것으로 추정되며, 해안선에 평행하게 발달하는 사퇴가 형성된 것으로 사료된다. 그러나 해수면 상승이 일정속도로 진행되기보다는 시기에 따라 다른 상승속도를 갖는 것으로 나타났다. 즉 해침초기에는 일정속도로 상승하였으나 11,000년 전경 전후로 상승속도가 둔화 내지는 정체되었으며, 지난 약 8,000년 전 경부터 빠른 속도로 해침이 진행되어 6,000년 전 경에 이르러 현재 수준까지 해수면이 상승한 것으로 발표된바 있다(Min, 1994; Suk, 1989; Park et al., 2000). 본 연구해역의 같은 시기(Lee et al., 1995)에 진동식주상시추를 실시된 바 있는 덕적도 동남쪽 약 18 km에 위치한 승봉도 사퇴에서 패각편을 대상으로 ^{14}C 연대측정(일본 학습원대학교 연대측정 연구실)을 의뢰하여 실시하였다. 그 결과 시추심도 93-132 cm (시료번호 VF-8B)에서 $3,100 \pm 250$ 년 전 이었고, 또 시추심도 350-380 cm (시료번호 VF-11A)에서 $4,900 \pm 100$ 년 전 경으로 확인되었다.

탄성파탐사 자료에 의하면 퇴적단위 I의 모래층의 깊이는 탄성파왕복주시 약 20 ms 정도 이므로 그보다 오래된 홀로세 중기의 약 5,000-6,000년 전 경에 본 해역이 해침을 받은 이후 생성된 퇴적층이라고 할 수 있다.

결 론

경기만의 서부에 위치한 덕적도 사퇴를 선정하여 탄성파층서, 퇴적상의 변화 및 퇴적환경 규명을 위하여 해양지질학적 및 해양지질학적 연구를 수행하였다.

탄성파탐사 및 시추코어자료 분석결과에 의하면 덕적도 사퇴의 퇴적환경은 홀로세 해수면 변화와 밀접하게 관련되어 있음이 밝혀졌다. 즉 경기만 일대의 해저지층은 선크브리아기의 변성암류가 주로 분포하는데 덕적도는 중생대에 이들 변성암류를 관입한 화강암이 음향기반암으로 구성되어 있다. 그 상부의 퇴적단위 III은 최

후의 빙기인 플라이스토세 후기로 추정되는 하성퇴적층이 부정합으로 덮여있으며, 플라이스토세 지층 상부의 퇴적단위 II는 홀로세의 고조간대로 형성하고, 이들 상부에 퇴적단위 I은 중립 내지 세립질의 모래층이 순차적으로 발달되어 있는 퇴적층이라고 해석되어진다.

퇴적단위 I의 퇴적시기는 인근 사퇴 상부를 구성하는 모래층의 조개껍질을 대상으로 ^{14}C 연대측정을 실시한 자료(Lee et al., 1995)에 의하면, 사퇴의 상부를 구성하는 최대심도 380 cm까지의 모래층은 약 4900 ± 100 yr BP. 경에 퇴적된 것으로 규명되었다. 이와 같이 덕적도 사퇴의 퇴적시기도 이와 비슷할 것으로 유추할 수 있다. 그러나 퇴적단위 I의 모래층의 깊이는 탄성파왕복주시 약 20 ms 정도이므로 그보다 오래된 홀로세 중기의 약 5,000-6,000 yr BP. 경 본 해역이 해침을 받은 이후 생성된 퇴적층이라고 할 수 있다.

덕적도 사퇴의 퇴적환경은 경기만 해역에서 한강에 의한 삼각주 퇴적환경의 영향 보다는 섬과 섬 사이로 흐르는 강한 왕복성 조류에 의하여 고하성 기원의 쇄설 퇴적물들이 재동되어 비교적 단기간에 퇴적된 것으로 판단되며, 현재는 조류양상에 따라 평형상태를 유지하고 있는 조류성 사퇴라고 해석되어진다. 그러나 조사해역에 대하여 현재 확보된 자료보다 앞으로 심부시추 자료가 확보된다면 보다 정확하고 포괄적인 해석을 할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국자원연구소(1994~1995)에서 실시한 바다골재자원연구의 일부분이며, 야외에서 많은 자료 획득과 실내실험에 수고해주신 연구 참여자께 깊이 감사드리며, 조언과 토론에 기꺼이 응해주신 박관순 박사, 민건홍 박사께 감사드립니다.

References

- Elliott, T., 1986, Siliclastic Shorelines. In: H. G. Reading (ed.), *Sedimentary environments and faces*, 2nd ed., Blackwell Sci. publ., Oxford etc., pp. 155-188.
- Emery, K. O., 1967, Estuaries and lagoons in relation to continental shelves. In: Lauff, G.H. (ed.), *Estuaries* Amer. Assoc. Adv. Sci. Publ. 83, Washington, DC. pp. 9-11.
- Folk, R. L. and Ward, W. C., 1957, Brazos River Bar : A study in the significance of grain size parameters. *Jour. Sed. Petrology*, 42, 973-974.
- Lee, Y. O., Park, Y. S., Jhin, J. H., et al., 1994, Evaluation

- of aggregate resources report. (sea aggregate of northern Kyeonggi bay, Korea), In : Lee, D. Y., et al., Korea institute of geology, mining and materials, Vol. 2, pp. 16-149(in Korean).
- Lee, Y. O., Park, Y. S., Kim, S. W., et al., 1995, Evaluation of aggregate resources report. (sea aggregate of southern Kyeonggi bay, Korea.) In : Lee, D. Y., et al., Korea institute of geology, mining and materials, Vol. 1, pp. 520-539 (in Korean).
- Milliman, J. D. and Emery, K. O., 1968, Sea level during the past 35,000 years, Science, 162, 1121-1123.
- Min, G. H., 1994, Seismic stratigraphy and depositional history of Pliocene-Holocene deposits in the south-eastern shelf, Korean Peninsula. PhD Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 196p (in Korean).
- Mitchum, R. M. and Vail, P. R., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7 : Seismic stratigraphic interpretation procedure. In : Payton, C. W. ed., Seismic Stratigraphy-Application to Hydrocarbon Exploration. A.A.P.G. Mem. 26, 135-143.
- Park, S. C., Yoo, D. G. Lee, C. W., and Lee, E. L., 2000, Last glacial sea-level changes and paleo-geography of the Korea (Tsushima) Strait Geo-Mar. Lett., 20, 64-71.
- Suk, B. C., 1989, Quaternary sedimentation processes, structures and sea level changes in the Korea-Tsushima Strait Regions. PhD Thesis, Univ. tokyo, Japan. 246p.
- Vail, P. R., 1987, part I : seismic stratigraphy interpretation procedure. In Bally, A.W. ed., Atlas of Seismic Stratigraphy, VI. A.A.P.G. studies parameter. Jour. Sed. Pet. 44, 295p.

이윤오

(주)한국종합기술

137-933, 서울시 서초구 서초 중앙로 206

Tel: 02) 537-1275

E-mail: marineoldboy@empas.com

최상일

광운대학교 환경공학과

서울시 노원구 광운길 26

Tel: 02) 940-5183

Fax: 02) 911-2033

E-mail: sichoi@kw.ac.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과

760-749 경북 안동시 경동로 1375

Tel: 054) 820-5753

Fax: 054) 822-5467

E-mail: jeong@anu.ac.kr

원고접수일: 2013년 10월 15일

수정본채택: 2014년 3월 14일

게재확정일: 2014년 3월 17일