

동해 울릉분지 남서해역 해양투기장의 퇴적물 특성

천종화 · 허 식 · 한상준 · 신동혁 · 정대교¹ · 홍기훈² · 김석현²

한국해양연구소 해양지질연구단, ¹강원대학교 지질학과, ²한국해양연구소 해양화학연구단

Sediment Characteristics of Waste Disposal Sites in the Southwestern Ulleung Basin, the East Sea

JONG-HWA CHUN, SIK HUH, SANG-JOON HAN, DONG-HYEOK SHIN
DAE-KYO CHEONG¹, KI-HOON HONG² AND SUK HYUN KIM²

Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Seoul 425-600, Korea

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

²Chemical Oceanography Division, Korea Ocean Research & Development Institute, Seoul 425-600, Korea

동해 울릉분지 남서측 해양투기장해역의 퇴적환경을 밝히기 위하여 해저지형과 퇴적물 특성을 조사하였다. 울릉분지 남서측 외대륙붕에 위치한 해양투기장 정해역은 팔림세스트(palimpsest) 퇴적물과 니질퇴적물의 교호퇴적상이 두껍게 나타난다. 울릉분지 남서측 대륙사면에 위치한 병해역은 대륙붕단으로부터 사질퇴적물의 간헐적인 유입을 제외하고는 반원양성 입자들의 수직적인 집적에 의해서 유동성이 큰 니질퇴적물(fluidized mud)이 해저지형을 평행하게 피복한다. 정해역과 병해역에서의 시추퇴적물에서는 저서생물의 교란에 의한 생흔구조들이 다수 관찰되며, 이에 의해서 퇴적물의 수직적인 혼합이 우세하게 일어난다. 표층퇴적물은 잔류퇴적물의 재동에 의한 조립질의 팔림세스트와 세립질퇴적물의 상대적 함량, 분급도, 그리고 중광물 특성들에 의해서 네 종류의 사질퇴적물(S-1, S-2, S-3, S-4)과 두 종류의 니질퇴적물(M-1, M-2)로 구분된다. 사질퇴적물들은 대부분이 태풍 또는 폭풍으로 야기된 고에너지 환경하에서 잔류퇴적물로부터 재동된 것으로 해석된다. 이에 반해 니질퇴적물은 낙동강에서 유입된 현생 퇴적물, 대륙붕에서 재동된 세립질퇴적물, 그리고 동한난류(East Sea Warm Current)에 의해서 뜬짐으로 공급되는 입자성 부유물질 등으로 다양한 기원을 가진다.

We have studied both submarine morphology and sediment characteristics of waste disposal sites in the southwestern Ulleung Basin, East Sea, as part of a marine environmental preservation program. The Jung waste disposal site in the outer shelf is characterized by the thick accumulation of coarse-grained palimpsest sediments and fine-grained sediments from various sources. The Byung waste disposal site in the continental slope is generally characterized by hemipelagic muds with intermittent sandy sediments originated from the outer shelf and upper slope. The hemipelagic sediments, draping the seafloor, consist of fluidized muds. The core sediments show numerous bioturbation structures which cause vertical mixing of sediments. The surface sediments can be divided into four sand types (S-1, S-2, S-3, and S-4) and two mud types (M-1 and M-2) based on relative contents of reworked coarse-grained palimpsest sediments and fine-grained sediments, sorting and heavy mineral contents. The sands are probably relict sediments reworked during high-energy conditions such as typhoon or storm. On the other hand, the muds were originated from various sources such as recent input from the Nakdong River, reworked fine-grained sediment from the shelf or suspended particulate matter from the East Sea Warm Current.

서 론

울릉분지 남측은 평탄한 대륙붕에서 급경사의 대륙사면으로 전이되는 환경으로 외대륙붕은 다수의 해저수로들이 대륙붕단까지 연장되어 있다(한국해양연구소, 1998b). 동해 해양투기장인 정해역과 병해역은 각각 외대륙붕과 대륙사면에 위치하며 폐기물 투기량은 해마다 증가하고 있다(한국해양연구소, 1997, 1998a). 국내에서는 해양투기물의 배출에 대한 해양환경영향에

관한 논의가 1990년대부터 시작되었으며(박 등, 1998; 신과 이, 1998), 최근에 종합적이고 체계적인 연구가 이루어졌다(한국해양연구소, 1997, 1998a). 1996년 10월부터 1997년 9월까지의 통계자료에 의하면 동해 정해역에는 약 7,200 톤의 입자성 해양투기물인 각종 오니들이 투기되었다(한국해양연구소, 1997). 그리고 동해 병해역에서는 각종 오니 약 1,600,000 톤과 수저준설토가 약 14,500 톤이나 투기되었다(한국해양연구소, 1997). 정해역에는 주로 분뇨가 투기되는 반면에 병해역은 각종 오니와 수저

준설토가 투기되는 것으로 보고되었다(한국해양연구소, 1997).

울릉분지 남측 대륙붕의 퇴적학적 특성은 많은 학자들에 의해서 연구되었다(박 등, 1987; 이 등, 1989; 한국해양연구소, 1994; Park and Han, 1985; Park and Choi, 1986; Park et al., 1988; Hong et al., 1997; Khim et al., 1997). 내대륙붕은 주로 니질퇴적물이 분포하고(박 등, 1987; 이 등, 1989), 외대륙붕은 사질퇴적물과 니질사퇴적물이 발달한다(한국해양연구소, 1994; Park and Choi, 1986; Park and Han, 1985). 내대륙붕에 형성된 니질퇴적물은 홀로세 동안의 해침시기에 형성된 낙동강의 전위퇴적물로 해석되었으며(Lee, 1993), 낙동강 하구(Park and Yoo, 1988)와 울산 연안에서는(민, 1994; 최 등, 1997) 이 니질퇴적물들이 최대 60 m 층후를 갖는다. 일부 학자들은 세립질퇴적물의 일부가 중국의 하천에서도 기원한다고 보고하였다(Suk, 1986). 최후빙하기 시기에는 현재보다 평균해수면이 약 130 m 정도 하강하여, 대한해협 일부만이 남해와 동해를 연결하는 수로로 작용한 것으로 해석되었다(Park and Yoo, 1992). 대륙붕에 발달한 패각편을 포함한 사질퇴적물은 대부분 저해수면 시기에 공급된 잔류퇴적물이 재동된 팔립세스트 퇴적물로 해석하였다(Park and Choi, 1986).

본 연구에서는 대륙붕과 대륙사면에 위치한 해양투기장 주변에서 채취한 시추퇴적물과 표층퇴적물의 퇴적상을 자세히 구분하고, 해수층에 포함된 입자성 부유물의 공간적, 계절적 변동을

분석하고자 한다. 이 결과들에 의해서 해양투기장 주변해역의 퇴적물 이동 경로와 집적장소를 밝히고자 한다. 또한 조사해역에서 획득된 천부 지층탐사자료를 해석하여 해저지형과 천부퇴적층의 특성 등을 밝힘으로써 해양투기장 퇴적물의 장기적인 재동 가능성 등을 해석하고자 한다.

연구방법

울릉분지 남서측 대륙붕과 대륙사면의 퇴적물 특성 조사와 천부지층탐사를 위하여 해양연구소 “온누리호”와 “이어도”를 사용하여 1992년부터 1997년까지 자료를 획득하였다. 조사해역에서 그래프샘플러를 사용하여 총 34점의 표층퇴적물을 채취하였고, 동일한 34개의 정점에서 계절별(1992년 5월, 1992년 12월, 1993년 8월, 1994년 1월)로 해수층에 포함된 입자성 부유물을 수직적으로 실측하였다(Fig. 1). 또한 대한해협을 가로지르는 축선을 설정하여, 총 11개 정점에서 계절별(1992년 4월, 1993년 1월, 1993년 7월, 1993년 10월)로 해수층에 포함된 입자성 부유물을 수직적으로 분석하였다(Fig. 1). 시추퇴적물은 3 m의 피스톤코아러를 사용하여 총 9점을 채취하였고, 퇴적물이 거의 교란되지 않는 박스코아러를 사용하여 총 11점을 채취하였다(Fig. 1; Table 1).

퇴적물 시료들은 입도분석을 위하여 과산화수소와 염산을 차례로 넣어 유기물과 탄산염을 제거하였다. 이 시료들은 건조시

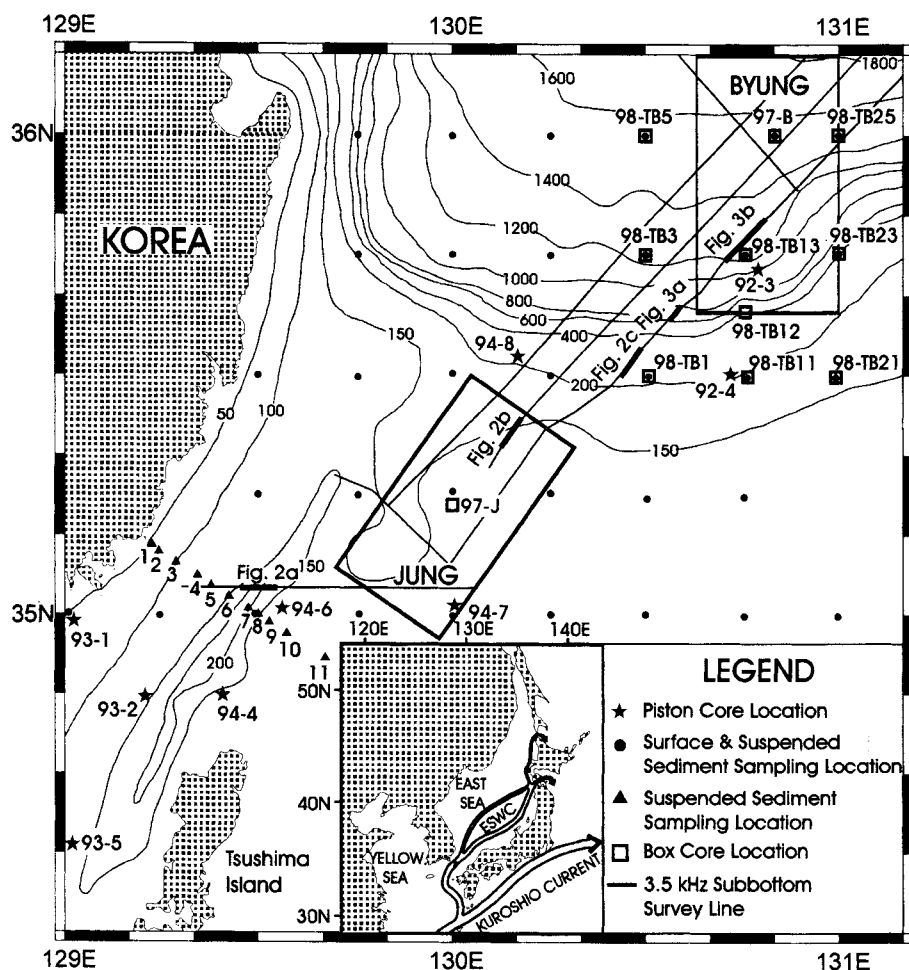


Fig. 1. Location map showing the study area, sediment sampling locations, and seismic survey lines. Contours are given in meters. ESWC=East Sea Warm Current.

Table 1. Characteristics of core sediments obtained from the southwestern Ulleung Basin

Station	Latitude	Longitude	Water Depth (m)	Core Length (cm)	Remark
TB12	35°38.05'N	130°45.50'E	430	30	Box core
TB1	35°30.48'N	130°30.48'E	211	24	Box core
TB3	35°45.51'N	130°30.67'E	1,280	39	Box core
TB5	36°00.46'N	130°30.50'E	1,547	37	Box core
TB11	35°30.57'N	130°45.45'E	2,11	15	Box core
TB13	35°45.53'N	130°45.49'E	1,216	33	Box core
TB21	35°30.43'N	131°00.51'E	1,57	25	Box core
TB23	35°45.49'N	131°00.57'E	416	29	Box core
TB25	36°00.49'N	131°00.49'E	1,525	36	Box core
B	36°00.85'N	130°48.99'E	1,500	37	Box core
J	35°13.52'N	130°00.05'E	147	16	Box core
93-1	35°59'47.22"	129°00'56.58"E	44	227	Piston core
93-5	34°30'57.60"N	129°00'03.60"E	112	192	Piston core
93-2	34°50'24.00"N	129°13'11.40"E	137	210	Piston core
94-7	35°06'06.04"N	130°00'03.05"E	144	212	Piston core
94-4	34°50'20.60"N	129°23'26.66"E	175	231	Piston core
94-6	35°05'54.77"N	129°32'07.70"E	184	155	Piston core
92-4	35°30'06.80"N	130°44'50.38"E	212	78	Piston core
94-8	35°32'31.39"N	130°10'36.22"E	247	56	Piston core
92-3	35°42'00.94"N	130°46'16.24"E	937	247	Piston core

킨 후에 무게를 측정하였으며 4Φ 체로 습식체질하였다. 이 때 4Φ 이하 조립질 시료는 로탭진탕기(Rotap sieve shaker)로, 그리고 4Φ 이상의 세립질 시료는 자동입도분석기(Sedigraph 5100)로 분석하였다. 입도분석 결과는 통계분석처리 하였고 퇴적상 분석은 Folk(1968)의 분류법에 따랐다. 피스톤코아러와 박스코아러를 사용하여 채취한 시추퇴적물들은 양면으로 절개하여 각각 입도분석과 퇴적구조 관찰에 이용하였다. 퇴적구조관찰을 위해서 제작한 퇴적물 슬랩은 X선 촬영기(Softex M-1005)에서 촬영하여 인화하였는데, 이 X사진은 입도와 퇴적구조에 따른 퇴적상 분석에 이용하였다. 퇴적물의 탄산염함량은 일정량의 시료에 2N의 염산을 넣어 염산과 탄산염이 반응하여 발생한 이산화탄소의 양을 측정하여, 대기압과 온도에 따라 보정한 값을 퇴적물 내의 탄산염량으로 환산하여 측정하였다. 해수중에 포함된 입자성 부유물의 함량분석을 위하여 채수 정점에서 각 수층별로 약 2 l의 해수를 니스킨 채수기로 채취하였다. 채취한 해수는 밀리포아 멤브레인 여과지(Millipore membrane filter paper: pore size 0.45 μm)를 사용하여 흡입여과 하였으며, 염분을 제거하기 위하여 증류수를 사용하여 세척하였다.

해저지형과 천부퇴적층 특성

울릉분지 남서측 대륙붕에 위치한 해양투기장 정해역은 외대륙붕에 위치한다(Fig. 1). 내대륙붕은 수심 약 80 m 이내의 얕은 지역(박 등, 1987)으로 해안선과 평행하게 발달한다. 외대륙붕에는 저해수면(lowstand) 시기에 형성된 다수의 침식계곡(incised valley)들이 발달하며, 이 침식계곡들은 홀로세 동안의 해침(transgression)에 의해서 해저수로(submarine channel)로

작용되었다. 현재 대륙붕에 발달한 해저수로의 방향(유 등, 1998)은 북위 35°20'이남에서는 북동-남서방향이 우세하고(Fig. 2a), 북위 35°20'~35°40' 사이 구간은 등수심선과 거의 평행한 동서방향으로 발달한다(Figs. 2b and 2c).

해저수로들은 지리적 위치에 의해서 뚜렷한 퇴적작용의 차이를 보인다. 대한해협을 횡단하는 측선 Fig. 2a에서 획득한 천부 지층자료에 의하면 해저면에 뚜렷한(sharp) 반사면이 발달하는데, 이것은 천해기원의 모래 또는 역질 퇴적물의 특성으로 해석된다(Damuth, 1980). 완만한 경사의 U-형 해저수로는 폭이 약 25 km이고 깊이가 약 100 m에 달한다(Fig. 2a). 해저곡은 분급이 양호한 역질 모래퇴적물로 구성되어 있으며, 질량류기원의 해저곡 잔류퇴적물의 재동에 의한 것으로 해석하였다(Park and Yoo, 1992). 외대륙붕에 발달한 다수의 해저수로들(Figs. 2b, 2c)은 대륙붕단 주변에 위치하며, 주로 동서방향으로 발달한다(한국해양연구소, 1998b). 정해역에 위치한 해저수로(Fig. 2b) 주변은 두꺼운 평행층리가 발달한 탄성과 유형이 잘 연장되어 나타나, 해저곡은 뚜렷한 상부 반사면을 보이고 있다. 이것은 해저곡에서의 퇴적작용이 미미하였거나 또는 기존 퇴적물의 침식작용이 우세하게 일어났음을 지시한다. 해양투기장 정해역과 병해역사이의 수심 200~300 m 지역에서도 다수의 해저수로들(Fig. 2c)이 동서방향으로 발달한다(유 등, 1998). 이 해저수로에는 다양한 형태의 탄성과 반사면이 발달한다. 횡적인 전진퇴적(lateral prograding)과 희미한 평행층리가 발달한 반사면의 교호상상이 뚜렷하게 나타난다. 이는 저해수면시기에 외대륙붕에서 울릉분지 남측 상부대륙사면까지 연장된 육상하천으로부터 많은 양의 퇴적물 공급에 의해 해저수로의 횡적 이동이 우세하였기 때문일 것이다. 이후 홀로세 동안의 해수면 상승에 의해,

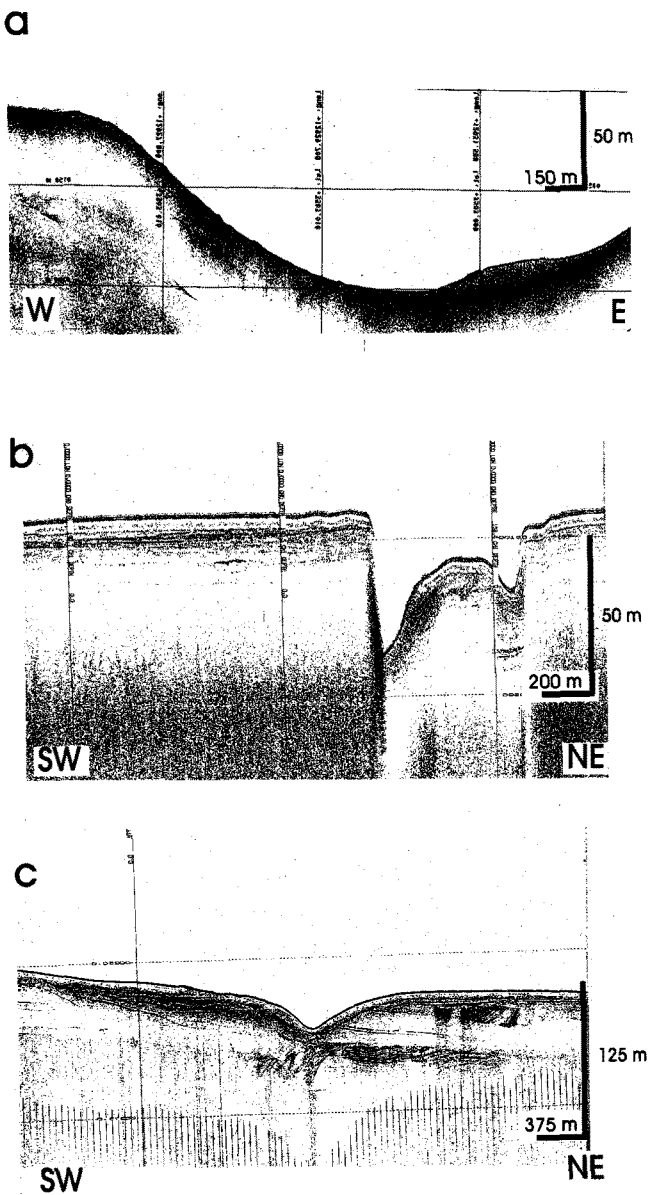


Fig. 2. 3.5 kHz subbottom profiles in the southwestern continental shelf of the Ulleung Basin showing submarine channels. (a) U-shaped channel in the Korea Strait, (b) steep slope channel near the outer shelf, (c) small-scale channel near the shelf edge.

이들 해저수로는 퇴적물 공급이 급작스럽게 감소하였고, 반원양성 퇴적물의 수직적인 집적(vertical aggradation)이 우세하게 된 것으로 추정된다. 해저수로의 최상부는 수 m 층후의 음향학적으로 투명한 반사면이 지형을 따라서 거의 동일하게 덮고 있다 (Fig. 2c).

동해 병해역은 울릉분지 남측 대륙사면에서 분지평원에 이르는 지역에 위치한다(Fig. 1). 울릉분지 남측 대륙사면은 동쪽사면과 서쪽사면보다는 완만한 경사를 갖지만, 일부 해저협곡이 발달된 지역에서는 불규칙한 침식지형이 형성되어 있다. 수심 600~800 m 구간의 대륙사면에 위치한 해저협곡에서는 뚜렷한 평행층리가 발달한 반사층과 내부구조가 없이 투명한 반사층이 덮혀 있다(Fig. 3a). 뚜렷한 평행층리가 발달된 탄성

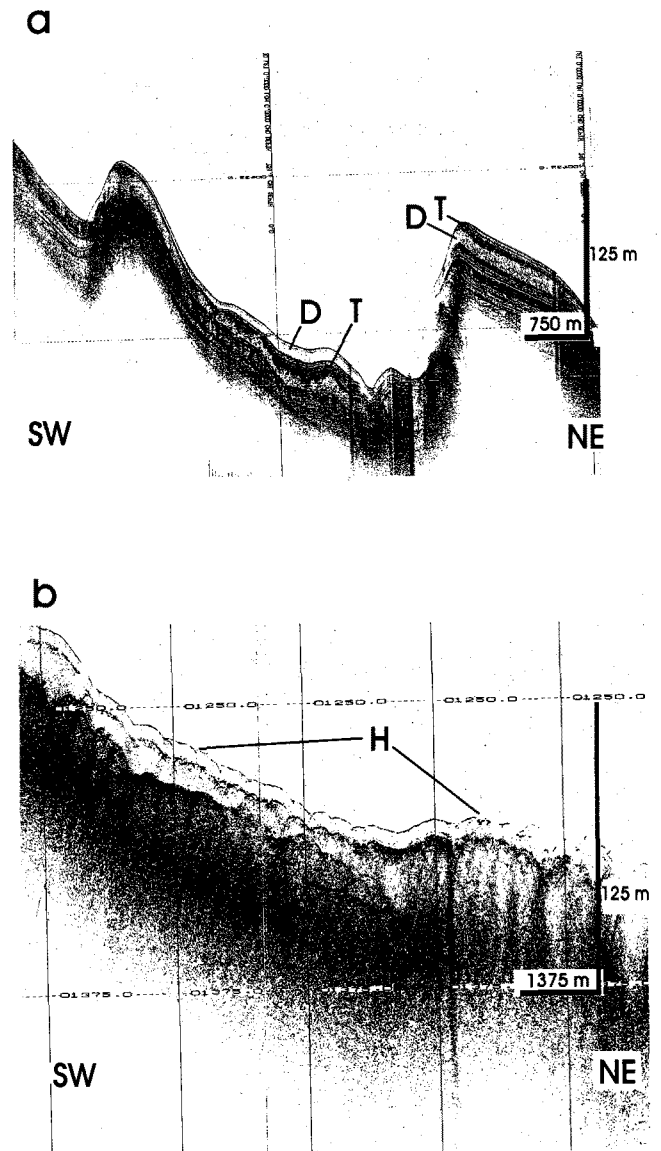


Fig. 3. 3.5 kHz subbottom profiles in the southwestern continental slope of the Ulleung Basin showing (a) canyon (b) debris deposits. The canyon is covered with turbidites (T) and debris (D). Transparent debris along middle continental slope is characterized by overlapping hyperbolae (H).

과 특성은 저탁류(turbidity current)에 의한 퇴적작용으로 해석되며(Damuth, 1975; Chough *et al.*, 1997), 음향학적으로 투명한(transparent) 탄성과 특성은 암설류(debrite)의 공급에 의한 것으로 해석된다(Embley, 1976; Chough *et al.*, 1997). 해저협곡 사이의 정상부분은 층리가 잘 발달된 퇴적층이 놓이는 반면에 해저협곡내의 퇴적층은 미끄럼작용(slumping)에 의해서 층리들이 변형되어 있다(Fig. 3a). 수심 1200~1400 m 구간의 대륙사면의 음향학적으로 투명한 암설류는 쌍곡선표면반사파(hyperbolic reflector)가 잘 나타난다(Fig. 3b). 울릉분지 남쪽 대륙사면에서는 막대한 양의 암설류가 분지평원으로 유입된다(Fig. 3b; 한국해양연구소, 1998b; Chough *et al.*, 1997).

퇴적물 특성

표층퇴적물 분류

울릉분지 남서측의 표층퇴적물은 연안, 대륙붕, 그리고 대륙사면을 포함한 분지평원에서 지역적으로 크게 세가지로 분류된다. 연안퇴적물은 평균입도가 7~8Φ이고 분급도는 3Φ정도로 아주 불량(very poorly sorted)하게 나타난다(Figs. 4a, 4b). 수심 150~200 m 정도의 대륙붕 해역은 평균입도가 최대 2Φ이고 분급도는 1Φ 정도로 보통(moderately sorted)으로 나타난다(Figs. 4a, 4b). 그리고 수심 1,000 m 보다 깊은 대륙사면과 분지평원에서는 9Φ 이상의 세립질 퇴적물이 분포한다(Fig. 4a). 평균입도 분포는 해저지형과 밀접한 관계를 가지는 반면에 분급도는 연안과 평행하게 외해로 가면서 점차적으로 양호해진다. 대륙붕단의 표층퇴적물은 모래함량이 90%보다 높게 나타난다(Fig. 4c). 점토함량은 육지의 해안선과 평행하게 외해로 가면서 60%에서 10% 이하로 낮아진다(Fig. 4d). 표층퇴적물의 탄산칼슘함량은 잔류퇴적물내에 포함된 패각편들의 함량에 의해서 지배되는데, 대마도 북서쪽의 대한해협에서 취득한 표층퇴적물은 탄산칼슘함량이 20~30% 정도이고 대륙붕단에서는 10~20%, 그리고 대륙사면과 분지평원에서는 10% 이하의 함량을 가진다(Fig. 5a). 대륙붕에 발달한 표층퇴적물의 탄산칼슘함량은 대마도의 북동쪽 해역에서 60%로 가장 높게 나타난다(Fig. 5a). 표층퇴적물내에 포함된 총 중광물함량은 낙동강 주변에서 4%로 가장 높으며, 해안선과 평행하게 외해로 가면서 점차적으로 낮아진다(Fig. 5b). 그러나 중광물의 구성성분중에서 휘석류의 함량은 일본측 대륙붕에서 가장 높게 나타나고 한국측으로 가면서 점차적으로 낮아진다(Fig. 5c).

해양투기장 주변해역에 분포한 표층퇴적물중에 사질퇴적물은 입도, 분급도, 탄산칼슘함량과 그리고 중광물함량 등에 의해서 네가지 유형의 퇴적물(S-1, S-2, S-3, S-4)로 구별되고, 니질퇴적물은 입도, 분급도, 점토함량 등에 의해서 두가지 유형의 퇴적물(M-1, M-2)로 구별된다(Fig. 5d). S-1 퇴적물로 표시된 대륙붕단에 발달한 표층퇴적물은 평균입도와 분급도가 각각 2~4Φ와 1~2Φ의 범위이고, 구성성분중에서 점토함량이 10% 미만이다. 이 퇴적물은 세립질퇴적물의 아주 제한적인 공급 또는 빈번한 자연 체질작용이 우세한 대륙붕단에 분포한다. 대륙붕에서 자연 체질의 대부분은 태풍 등의 고에너지 환경의 영향을 받는 곳에서 일어나는 것으로 보고되었다(Doyle and Sparks, 1980; Morton and Price, 1987). S-2 퇴적물로 분류된 외대륙붕에 발달한 표층퇴적물은 평균입도와 분급도가 각각 3~5Φ와 2~3Φ 정도이고, 점토함량이 10~40%로 높게 나타난다. 이 퇴적물은 연안에 발달한 니질퇴적물과 평행하게 발달하는데, 점토 성분은 낙동강과 동한난류에 각각 포함된 세립질 부유물질의 공급에 의한 것으로 추정된다. S-3 퇴적물로 분류된 대마도 북동쪽 해역의 패각편을 다수 포함한 잔류퇴적물은 평균입도와 분급도가 각각 4~5Φ와 2~3Φ 정도이고, 탄산칼슘함량은 30~60%이다(Table 2). 이 퇴적물은 연안으로부터 퇴적물 공급 또는 재동에 의한 퇴적물의 자연 체질작용이 거의 일어나지 않았음을 보여준다. 조사해역의 최남동 해역은 다수의 휘석류가 포함되어 있으며, 평균입도와 분급도는 각각 3~5Φ와 2~3Φ이다. 이 해역에 위치한 S-4 퇴적물은 퇴적학적 특성이 S-3 퇴적물과 거의 유사하다. 중광물의 대다수가 휘석류로 구성된 이 퇴적물은 일본 연안에 발달하는 화산암류로부터 기원된 것으로 해석된다(Choi et al., 1995).

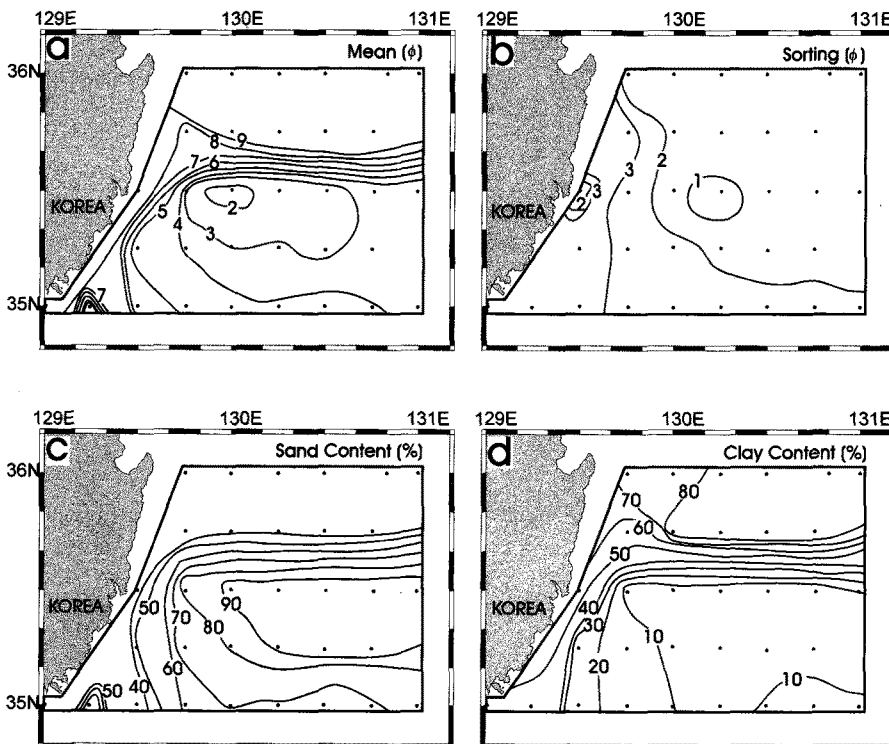


Fig. 4. Surface sediment characteristics in the southwestern shelf and slope. (a) mean grain size, (b) sorting, (c) sand content, and (d) clay content.

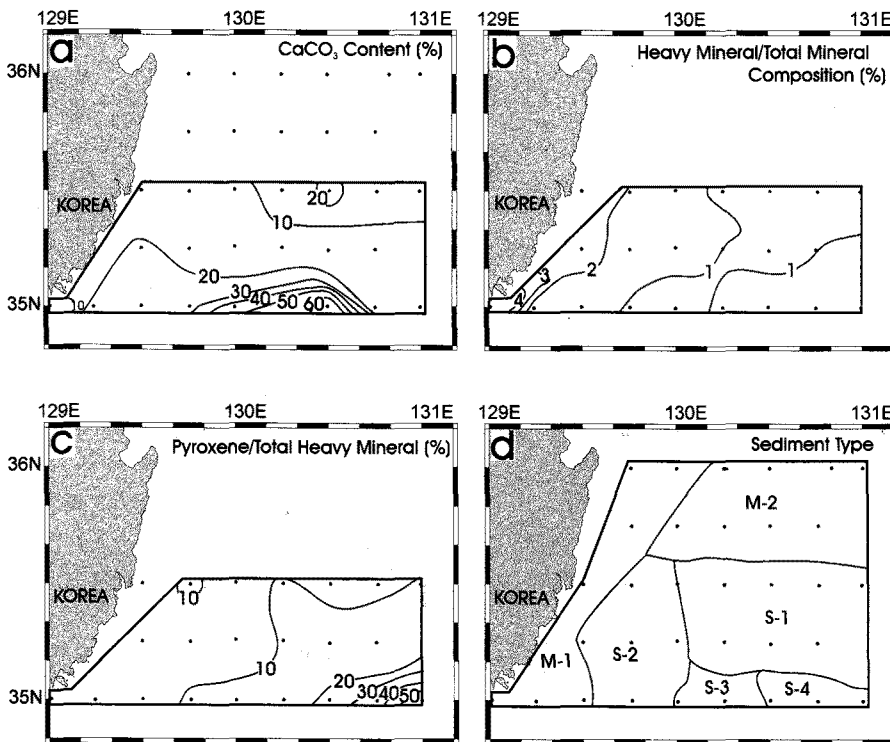


Fig. 5. (a) CaCO₃ content, (b) heavy mineral/total mineral composition (%), (c) pyroxene/total heavy mineral (%), and (d) sedimentary facies of surface sediments. S-1, palimpsest; S-2, palimpsest and recent sediments; S-3, palimpsest and relict sediments; S-4, palimpsest (commonly derived from Japan); M-1, fine-grained sediment derived from the Nakdong River; and M-2, fine-grained hemipelagic sediments.

Table 2. Sedimentary facies of surface sediments in the study area.

Type Sediment	Characteristics					Interpretation
	Mean grain size (phi)	Sorting (phi)	CaCO ₃ content (%)	Clay content (%)	Pyroxene/Total heavy mineral (%)	
S-1	2-4	1-2	10-20	< 10	10-20	palimpsest; winnowing by seasonal typhoon or storm generation; sometimes spillover into continental slope
S-2	3-6	2-3	20-30	10-40	10-20	palimpsest + recent sediments; high sediment supply
S-3	4-5	2-3	40-60	10-20	10-30	palimpsest + relict sediments
S-4	3-5	2-3	10-20	< 10	30-50	palimpsest; commonly derived from Japan
M-1	7-9	3	-	30-80	-	fine-grained sediments derived from Nakdong River
M-2	> 9	1-2	-	> 80	-	fine-grained sediments by hemipelagic settling

M-1 퇴적물은 연안과 대륙붕에 분포하고 평균입도와 분급도가 각각 7~9Φ와 3Φ의 범위이다. 그리고 니질퇴적물의 구성 성분중에서 점토함량은 30~80%로 넓은 범위를 갖는다. 이 퇴적물은 대부분이 낙동강으로부터 유입된 세립질퇴적물들로 해석된다(민, 1994; 최 등, 1997). M-2 퇴적물은 울릉분지 중부 대륙사면에서 분지평원까지 발달한 니질퇴적물이다(Fig. 5d). 이 퇴적물은 평균입도가 9Φ 이상이며, 분급도는 1~2Φ로, M-1 퇴적물과 뚜렷히 구분된다. 또한 니질퇴적물의 구성성분중에서 점토함량이 80% 이상으로 아주 높게 나타난다. M-2 퇴적물은 주로 반원양성 퇴적물의 수직 집적에 의해서 공급된 것으로 추론된다.

해수중의 포함된 입자성 부유물의 분포

해수중에 포함된 입자성 부유물의 함량 및 분포는 계절적, 수심별 변동이 심하게 나타난다. 조사해역의 입자성 부유물의 함량은 전체적으로 동계(1992년 11월, 1994 1월)보다 하계(1992

년 5월, 1993년 8월)에 높게 나타났다(Fig. 6). 표층수의 입자성 부유물 함량은 1992년 5월에 최고 14 mg/l로 가장 높게 나타났다. 이 시기에 연안에서는 10 mg/l 이상으로 높게 나타나, 외해쪽으로는 등수심선과 평행하게 낮아진다(Fig. 6a). 이에 반해 1992년 11월에 표층수의 입자성 부유물 함량은 조사기간중에서 1~2 mg/l로 가장 낮게 나타났다(Fig. 6b). 그리고 1993년 8월과 1994년 1월에 관측한 표층수의 입자성 부유물 함량은 3~6 mg/l 범위를 가진다. 이 시기에는 대륙사면에서 가장 낮고 조사해역의 북쪽에서 다소 높게 나타난다(Figs. 6b, 6c). 이와 동시기에 측정된 수심 100 m에서의 입자성 부유물 함량은 표층수에서의 분포양상과 상이하게 나타난다(Fig. 7). 1992년 5월에 관측된 입자성 부유물함량은 대륙붕에서 9 mg/l로 가장 높으며, 등수심선과 평행하게 수심이 깊어질수록 낮아진다(Fig. 7a). 1993년 8월과 1994년 1월에 관측된 수심 100 m의 입자성 부유물함량은 표층수와 마찬가지로 조사해역의 북측 분지평원과 대륙사면에서 높은 함량을 보인다(Figs. 7c, 7d).

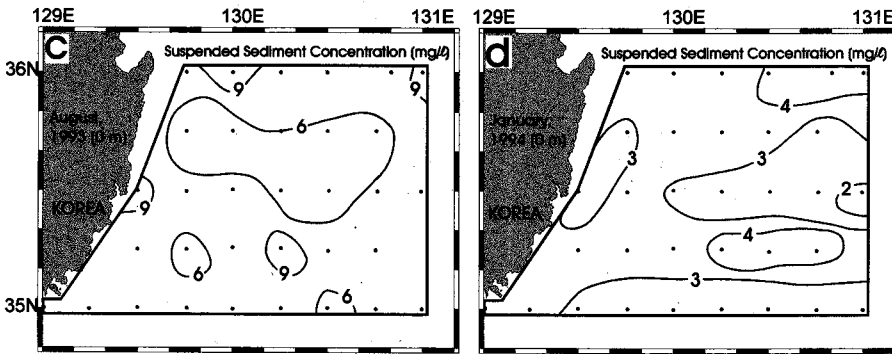
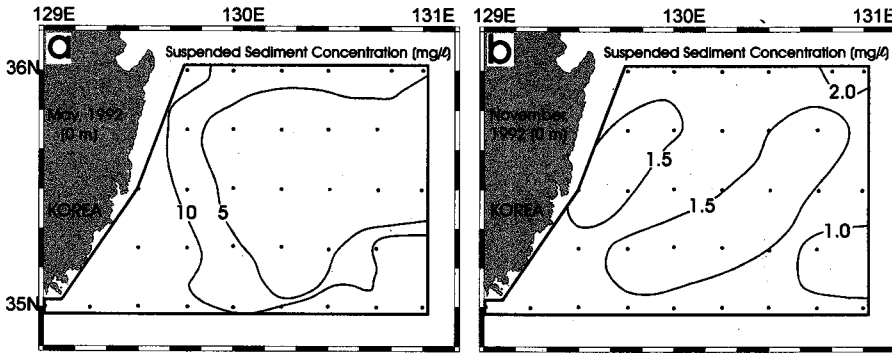


Fig. 6. Seasonal variations of suspended sediment concentrations (mg/l) in surface water in the southwestern Ulleung Basin. (a) May, 1992; (b) November, 1992; (c) August, 1993; (d) January, 1994.

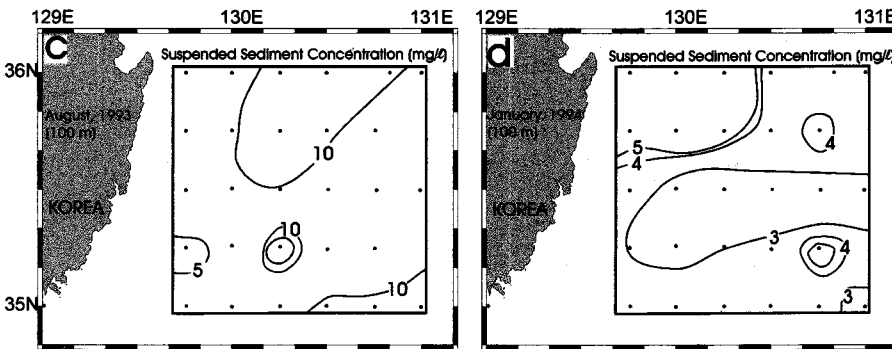
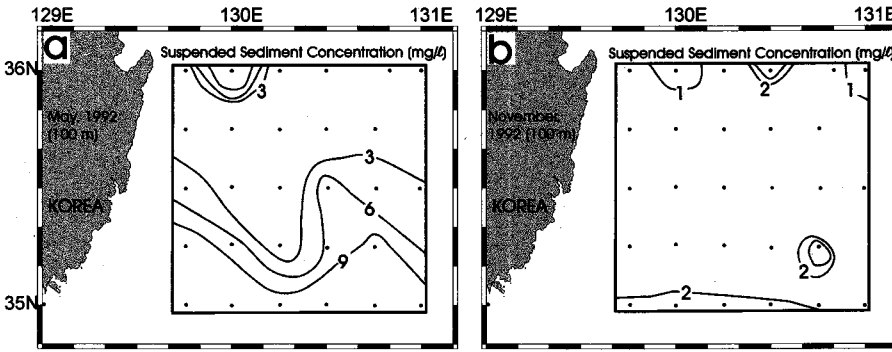


Fig. 7. Seasonal variations of suspended sediment concentrations (mg/l) in 100 m water depth in the southwestern Ulleung Basin. (a) May, 1992; (b) November, 1992; (c) August, 1993; (d) January, 1994.

그리고 1992년 11월에는 전체적으로 2 mg/l 이하의 낮은 입자성 부유물함량을 보인다(Fig. 7b). 하계기간동안은 표층수의 입자성 부유물함량이 연안과 평행하게 분포한 반면에, 수심 100 m에서는 대륙붕에서 높은 함량을 보이는데 이는 세립질입자의 재부유 등에 의한 영향으로 해석된다.

대한해협을 횡단하는 조사측선은 연안과 해저수로에서의 계절별(1992년 4월, 1993년 1월, 1993년 7월, 1993년 10월), 수층별로 입자성 부유물함량을 분석하기 위해 설정하였다. 조사측선은 대한해협에서 가장 수심이 깊은 골을 지나며, 최대 수심은 220 m이고 폭은 25 km에 달한다(Fig. 8). 동계(1993년 1월)

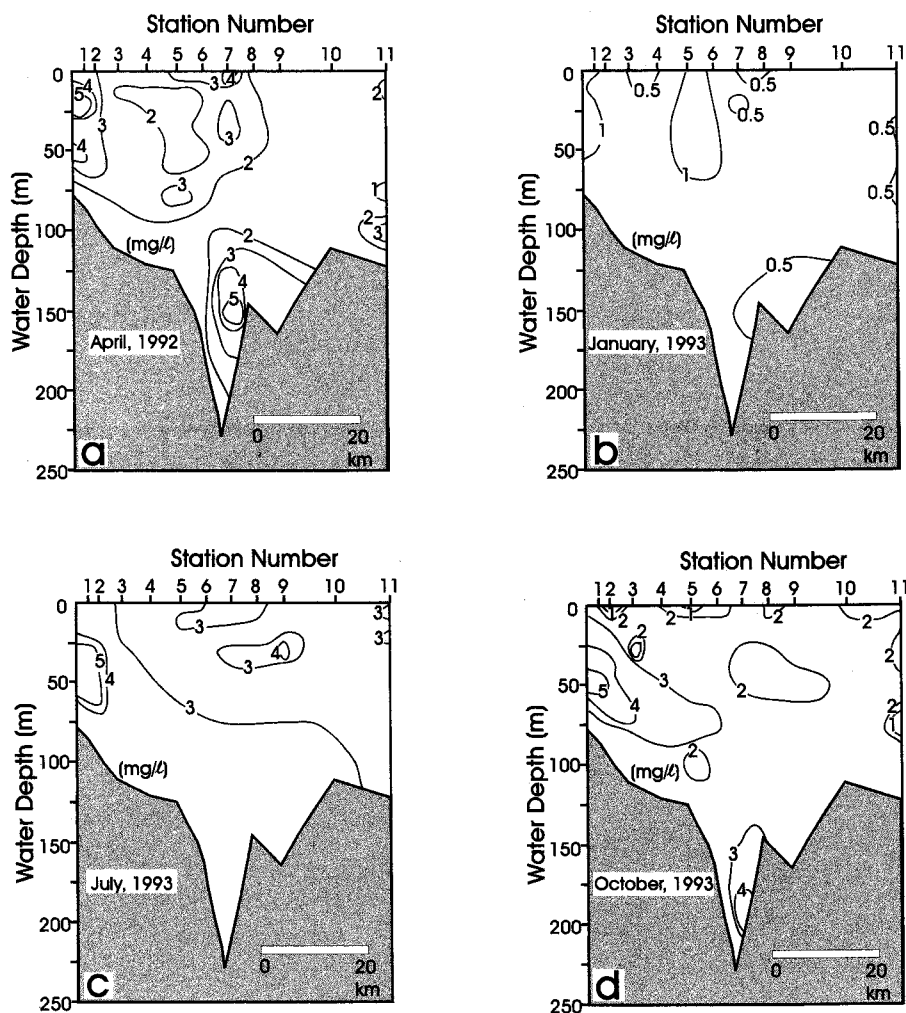


Fig. 8. Seasonal variations of suspended sediment concentrations (mg/l) across the Korea Strait. (a) April, 1992; (b) January, 1993; (c) July, 1993; (d) October, 1993.

를 제외한 나머지 관측시기에는 한국측 연안에 고함량의 입자성 부유물이 수층 20~50 m 구간에 형성되어 있다(Figs. 8a, 8c, 8d). 그리고 1992년 4월과 1993년 10월에 관측된 입자성 부유물함량은 해저수위가 위치한 수심 125~200 m 구간에서 5 mg/l로 높게 나타났다(Figs. 8a, 8d).

울릉분지 남서측해역의 입자성 부유물의 함량은 동계보다 하계 동안에 높게 나타나는데(Figs. 6, 7), 이것은 대부분이 동한난

류수에 포함된 입자성 부유물의 양에 의해서 조절되는 것으로 사료된다. 그리고 일부 입자성 부유물들은 육상 하천으로부터 공급되거나(Fig. 8), 재부유에 의해서 이동된 것으로 해석된다.

시추퇴적물과 박스코아퇴적물

동해에 위치한 해양투기장 주변에서 채취한 9점의 시추퇴적물과 10점의 박스코아퇴적물(Fig. 1)은 각각 해저지형과 수심변

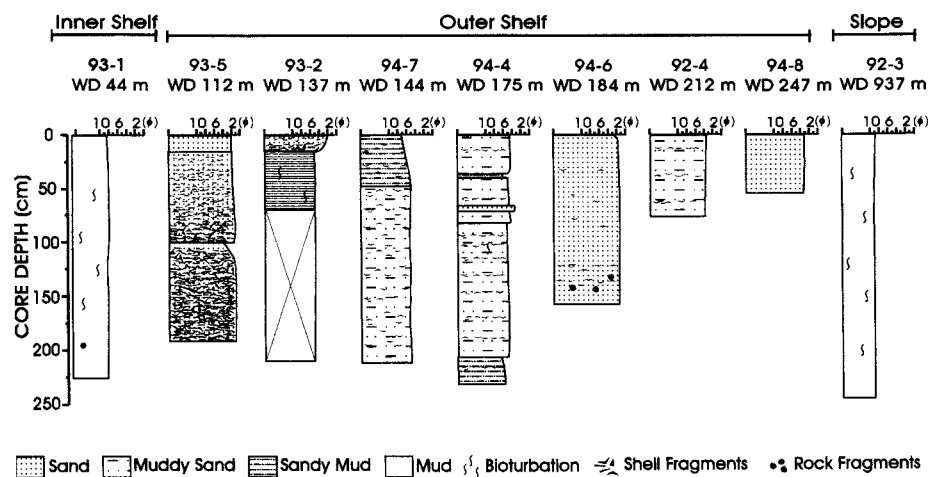


Fig. 9. Simplified sedimentary facies of piston-core samples obtained from the southwestern Ulleung Basin. For core locations, see Fig. 1. WD=Water Depth.

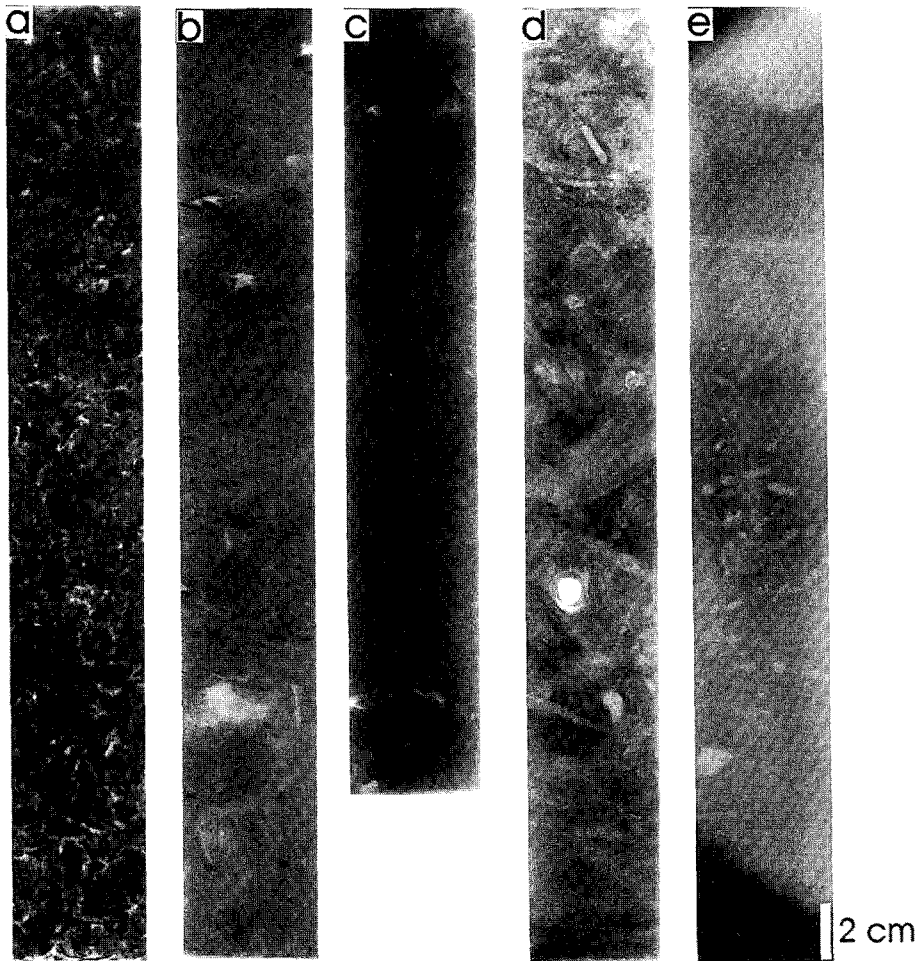


Fig. 10. X-radiographs of core sediments. (a) core 93-5 (core depth, 150-180 cm), (b) core 94-7 (core depth, 150-180 cm), (c) core 98TB1 (core depth, 0-25 cm), (d) core 98TB23 (core depth, 0-30 cm), (e) core 98TB5 (core depth, 0-30 cm).

화에 의해서 가장 큰 영향을 받는다. 내대륙붕의 수심 44 m에서 채취한 시추퇴적물에는(Fig. 9) 아주 두꺼운 생물교란된 니질퇴적상(bioturbated mud)이 발달한다. 이 니질퇴적물들은 대부분 낙동강으로부터 유입된 현생퇴적물로 해석되며, 이는 하계 동안에 집중적인 강우로 많은 양의 퇴적물이 하천을 통하여 연안으로 유입되었기 때문에 사료된다. 생물교란된 니질퇴적물은 연안의 등수심과 평행하게 분포하며, 울산부근에서는 최대 60 m 두께를 가진다(민, 1994). 외대륙붕에서 채취한 시추퇴적물에서 균질 사질퇴적상(homogeneous sand), 희미한 층리가 발달한 사질퇴적상(weakly laminated sand), 희미한 층리가 발달한 니질사퇴적상(weakly laminated muddy sand), 생물교란된 사질니퇴적상(bioturbated sandy mud), 그리고 패각편을 포함한 사질퇴적상(shelly sand) 등 다양한 퇴적상이 나타난다(Fig. 9). 패각편을 포함하는 사질퇴적상은 퇴적구조와 패각편의 조직에 의해서 잔류퇴적물과 팔립세스트 퇴적물로 구분된다. 잔류퇴적물(relict sediment)에는 패각편들이 무질서하게 배열되어 있고 패각편 크기가 수직적으로 거의 변화되지 않지만(Fig. 10a), 대륙붕 해역에서 저해수면시기에 공급된 잔류퇴적물이 재동된 팔립세스트 퇴적물은 패각편들이 층리에 평행하게 배열되며 패각편의 크기가 상향세립해진다(Fig. 10b). 외대륙붕에서는 대한해협을 경계로 연안쪽과 외해쪽의 퇴적상이 큰 차이를 보여준다. 연안쪽의 93-5 시추퇴적물에서는 패각편들이 무질서하게 배열

된 잔류퇴적물 상위에 100 cm 두께의 팔립세스트 퇴적물이 덮이며, 현생 세립질퇴적물의 공급은 아주 제한적이다. 낙동강 말단부 근처의 93-2 시추퇴적물에는 두꺼운 생물교란된 사질니퇴적물이 퇴적되어 있으며, 최상부에 패각편을 포함하는 사질퇴적상이 나타난다. 대한해협으로부터 외해쪽에 위치한 외대륙붕에서는 전체적으로 패각편들이 산재되거나, 층리에 평행하게 배열된 니질사 또는 사질니퇴적상(Fig. 10b)들이 수회 반복되어 나타난다. 이 해역은 세립질퇴적물과 재동된 패각편들의 지속적인 공급으로 타 지역에 비해서 두꺼운 퇴적물이 집적되어 있다. 그러나 수심 184 m의 해저수로 주변에서 채취한 94-6 시추퇴적물은 희미한 층리가 발달한 사질퇴적물로 구성되어 있다. 수심 약 200 m 정도의 대륙붕단에는 희미한 층리가 발달한 니질사퇴적상과 사질퇴적상이 발달한다(Fig. 9). 해양투기장 병해역 부근의 대륙붕단에서 채취한 92-4 시추퇴적물은 니질사퇴적상이 두껍게 퇴적되었으나, 그 보다 서측에서 획득한 94-8 시추퇴적물은 균질한 사질퇴적상이 발달한다. 이 사질퇴적상은 고에너지 환경하에서의 지속적인 자연 체질(winnowing)에 의한 것이거나 또는 이 해역의 잔류퇴적물이 근원적으로 패각편들을 포함하지 않았기 때문으로 해석된다. 울릉분지 남측 중부사면에서 채취한 92-3 시추퇴적물은 두꺼운 니질퇴적물로 구성되며, 저서생물의 생흔작용에 의해서 퇴적물의 교란이 심하게 나타난다.

정해역에서 채취한 97-J 박스코아퇴적물은 패각편들이 수회

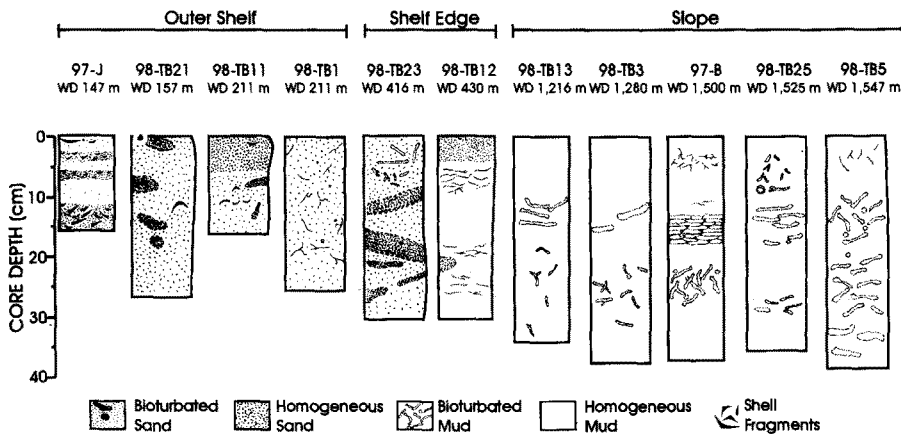


Fig. 11. Detailed descriptions of box-cores obtained in the southwestern Ulleung Basin. For box core locations, see Fig. 1. WD=Water Depth.

반복적으로 층리를 형성한다(Fig. 11). 대륙붕단에서 채취한 3점의 박스코아퇴적물들은 사질퇴적물로 구성되어 있다. 이들 중에서 2점의 박스코아퇴적물(Fig. 11; 98-TB11, 98-TB21)은 고기에 형성된 해저수로 해역에 위치한다. 사질퇴적물내에는 다수의 패각편들이 포함되어 있으며, 직경 2 cm 내외의 생흔구조가 다수 발달되어 있다. 이보다 서측의 대륙붕단에서 채취한 98-TB1 박스코아퇴적물은 패각편들이 포함되지 않으며, 생흔구조의 직경이 수 mm로 감소되었다.

울릉분지 남측 상부 대륙사면에서 채취한 98-TB23 박스코아퇴적물은 사질퇴적물로 구성되며, 직경 수 cm의 생흔구조가 발달한다. 98-TB12 박스코아퇴적물은 표층으로부터 5 cm 구간까지는 사질퇴적물이 덮이고, 그 이하에서는 니질퇴적물이 놓인다(Fig. 11). 울릉분지 남측 대륙사면은 니질경계선(mud line; Stanley *et al.*, 1983)이 수심 약 400~600 m의 대륙사면에 형성되어 있으며, 이 지역의 점토함량은 80% 이상이다. 98TB12 박스코아퇴적물은 현재 대륙붕으로부터 간헐적으로 사질퇴적물이 대륙사면으로 흘러 넘쳐 유입되고 있음을 지시한다.

병해역이 위치한 중부 및 허부 대륙사면에서 채취한 5점의 박스코아퇴적물은 직경 수 mm 정도의 생흔구조가 조밀하게 발달된 니질퇴적물로 구성된다. 이들은 해저지형을 따라서 평행하게 덮혀있고 음향학적으로 투명한 탄성과 반사면의 특성을 갖는다(Fig. 3a). 이 니질퇴적물들은 함수율이 200% 이상인 고 함수율 니질퇴적물(fluidized mud; Metha, 1991)로 분석되었다.

토 의

동해에 위치한 정해역과 병해역은 재동된 잔류퇴적물들과 반원양성의 세립질퇴적물들의 공급에 의한 퇴적작용이 활발하며, 다수의 저서생물에 의한 퇴적물의 수직적인 혼합이 우세하다. 이 폐기물 투기해역에서는 높은 퇴적율과 저서생물의 교란에 의해서 기존의 퇴적물과 폐기물의 회석작용이 활발히 일어날 것으로 추정된다.

해양투기장 정해역은 얇고 평탄한 해저지형의 안정된 퇴적환경이 형성되어 있다. 이에 반해 대륙사면에 위치한 병해역은 최후빙하기의 저해수면시기에 사면붕괴에 의해서 많은 양의 사면퇴적물들이 암설류와 질량류에 의해 분지평원의 저지대로 운반되었다(Chun *et al.*, 1997). 퇴적물의 공학적 특성에 의해서 유추된 울릉분지 대륙사면의 안정성은 지진 등의 충격을 제외한, 퇴적물 자

체의 하중 또는 높은 퇴적률에 의한 재동은 무시될 수 있는 것으로 보고되었다(Chough *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 1993).

본 연구에 의하면 홀로세동안에 울릉분지 남서측 대륙사면에 공급된 반원양성의 니질퇴적물이 해저지형에 평행하게 덮인 것이 관찰되었다. 음향학적으로 투명한 탄성과 반사특성을 갖는 이 퇴적층은 고 함수율(150%~200%) 니질퇴적물로 분석되었다. 향후 고함수율 니질퇴적물 자체의 재동 가능성에 대한 연구가 필요하다.

결 론

울릉분지 남서측 대륙붕과 대륙사면에 각각 위치한 정해역 및 병해역 해양투기장과 주변해역은 각종 오니와 수저준설토의 투기에 의한 다량의 퇴적물이 인위적으로 공급되고 있다. 이들 해역의 표층퇴적물은 입도, 분급도, 탄산칼슘함량, 그리고 중광물함량 등에 의해 네종류의 사질퇴적물과 두종류의 니질퇴적물로 구분되었다. 사질퇴적물은 잔류퇴적물과 팔립세스트 퇴적물로 구분되며, 점토함량과 중광물 구성의 차이에 의해서 세분된다. 니질퇴적물은 연안의 등수심과 평행하게 발달한 내대륙붕 지역과 울릉분지내 수심 약 600 m 이하에 분포하는 것으로 구분된다. 얇은 수심의 대륙붕에 위치한 정해역은 조립질의 팔립세스트 퇴적물과 다량의 세립질퇴적물의 공급으로 높은 퇴적율을 갖는다. 대한해협에 발달한 북동-남서 방향의 해저수로는 퇴적물의 집적보다는 이동 통로의 역할이 우세한 것으로 사료된다. 해수중에 포함된 입자성 부유물질의 함량은 동계보다 하계에 높게 나타났으며, 대한해협의 해저수로에서도 하계동안에는 높은 함량을 보였다. 대한해협의 해저수로는 대륙붕단까지 연장되고 이곳에서는 등수심과 거의 평행한 동서 방향의 해저수로가 형성되어 있다. 수심 약 300 m의 상부 대륙사면까지 연장된 해저수로에는 해저지형과 평행하게 현생퇴적물들이 덮인다. 병해역이 위치한 대륙사면의 일부 해저협곡이 발달된 지역에서는 불규칙한 침식지형이 형성되어 있으며, 사면사태에 의해 공급된 저탁류와 암설류가 피복하고 있다. 지형적으로 저지대인 해저협곡내에는 최표층에 음향학적으로 투명한 탄성과 반사특성을 갖는 고 함수율(150%~200%) 니질퇴적물이 집중적으로 퇴적되어 있다. 이들 해양투기장에서 채취한 시추퇴적물과 박스코아퇴적물들에서는 대부분이 저서생물의 교란에 의해서 형성된 수 cm 투과깊이의 생흔구조들이 산재되어 있다. 결론적으로 해양투기장해역은 많은 양의 퇴적물의 공급과 저서생물에 의한 퇴

적물의 수직적 혼합이 활발히 일어나며, 해류의 계절적인 영향이 우세한 곳으로 해석된다.

사 사

본 논문에서 사용된 자료들은 환경부에서 시행한 환경공학기술개발사업인 “해양 환경감시 및 평가기술; 해양투기장 해역의 환경모니터링”과, “한국해역 종합 해양환경도 작성연구; 대한해협(3차년도)” 연구사업에서 획득한 것이다. 본 연구에 필요한 자료를 제공해주시고, 많은 토의를 해주신 한국해양연구소의 석봉출 박사, 김성렬 박사, 유해수 박사, 최동립 박사, 이희준 박사에게 감사드린다. 그리고 퇴적물 시료들의 퇴적학적 특성과 지화학적 분석 및 중광물 분석에 도움을 주신 차현주 박사, 최진용 박사, 장석, 김광산씨에게 고마움을 전한다. 그리고 본 논문을 심사하신 두 분의 심사자와 편집위원장에게도 감사드린다.

참고문헌

민건홍, 1994. 한반도 남동대륙붕의 플라이오세-현세퇴적층의 탄성파층서 및 퇴적사. 서울대학교 대학원 박사학위논문, 196 pp.

박용안, 김경렬, 박수철, 박상윤, 1987. 한국 대한해협 대륙붕 표층 퇴적물의 특성과 세립퇴적물의 지구화학적 특성. 한국해양학회지, **22**: 43-56.

박용철, 이효진, 손주원, 손승규, 1998. 황해 해양투기해역에서의 해양화학환경. 한국해양학회지 바다, **3**: 203-213.

신임철, 이희일, 1998. 유공층을 이용한 동해의 환경 안정성 연구. 한국해양학회지 바다, **3**: 234-248.

이장복, 박용안, 최진용, 김기범, 1989. 한국 동남해역 대륙붕과 대륙사면 표면퇴적물의 분포와 특성. 한국해양학회지, **24**: 39-51.

최동립, 오재경, 이치원, 우한준, 1997. 한국 남동 내 대륙붕해역의 홀로세 백질 퇴적층의 고해상도 탄성파 특성. 한국해양학회지 바다, **2**: 8-13.

한국해양연구소, 1994. 한국해역 종합 해양환경도 작성연구; 대한해협(3차년도). BSPN 00227-733-3, pp. 439-715.

한국해양연구소, 1996. 한국 대수심 해역의 지구적 해저환경 연구(2-3차년도). BSPN 00321-950-5, 548 pp.

한국해양연구소, 1997. 해양 환경감시 및 평가기술; 해양투기장 해역의 환경모니터링 기술. BSPN 96340-00-1012-4, 414 pp.

한국해양연구소, 1998a. 해양 환경감시 및 평가기술; 해양투기장 해역의 환경모니터링 기술(3차년도). 747 pp.

한국해양연구소, 1998b. '98 배타적 경제수역 해양자원조사. 695 pp.

Choi, J.Y., Y.A. Park and K.W. Choi, 1995. Heavy mineral sands on the southeastern continental shelf of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 271-278.

Chough, S.K., H.J. Lee and S.J. Han, 1991. Sedimentological and geotechnical properties of fine-grained sediments in part of the South Sea, Korea. *Cont. Shelf Res.*, **11**: 183-195.

Chough, S.K., S.H. Lee, J.W. Kim, S.C. Park, D.G. Yoo, H.S. Han, S.H. Yoon, S.B. Oh, Y.B. Kim and G.G. Back, 1997. Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geosci. J.*, **1**: 143-154.

Chun, J.H., S.J. Han and D.K. Cheong, 1997. Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea: Late Pleistocene to Holocene. *Geosci. J.*, **1**: 154-166.

Damuth, J.E., 1975. Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Mar. Geol.*, **18**: 17-45.

Damuth, J.E., 1980. Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. *Mar. Geol.*, **38**: 51-75.

Doyle, L.F. and T.N. Sparks, 1980. Sediment of the Mississippi, Alabama and Florida (NAFLA) continental shelf. *J. Sed. Petrol.*, **50**: 905-916.

Embley, R.W., 1976. New evidence for occurrence of debris flow deposits in the deep-sea. *Geol.*, **3**: 371-374.

Folk, R.L., 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Austin, Texas, Hemphill's Bookstore, 170 pp.

Hong, G.H., S.H. Kim, C.S. Chung, D.J. Kang, D.H. Shin, H.J. Lee and S.J. Han, 1997. ²¹⁰Pb-derived sediment accumulation rates in the southwestern East Sea (Sea of Japan). *Geo-Mar. Lett.*, **17**: 126-132.

Khim, B.K., D.H. Shin and S.J. Han, 1997. Organic carbon, calcium carbonate, and clay mineral distributions in the Korea Strait region the southern part of the East Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **32**: 128-137.

Lee, H.J., S.S. Chun, S.H. Yoon and S.R. Kim, 1993. Slope stability and geotechnical properties of sediment of the southern margin of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, **110**: 31-45.

Lee, Y.D., 1993. A study on the characteristics of submarine geology in Pusan bay: Sedimentation processes in the Nakdong River Estuary, Korea. *J. Kor. Envir. Sci. Soc.*, **14**: 67-64.

Metha, A.J., 1991. Understanding fluid mud in a dynamic environment. *Geo-Mar. Lett.*, **11**: 113-118.

Morton, R.A. and W.A. Price, 1987. Late Quaternary sea-level fluctuations and sedimentary phases of the Texas coastal plain and shelf. SEPM special publication, 41, pp. 181-198.

Park, B.K. and S.J. Han, 1985. The distribution of clay minerals in recent sediments of the Korea Strait. *Sed. Geol.*, **41**: 173-184.

Park, S.C. and D.G. Yoo, 1988. Depositional History of Quaternary Sediments on the Continental Shelf Off the Southeastern Coast of Korea (Korea Strait). *Mar. Geol.*, **79**: 65-75.

Park, S.C. and D.G. Yoo, 1992. Deposition of coarse-grained sediments in the Korea Strait during late Pleistocene low sea level. *Geo-Mar. Lett.*, **12**: 19-23.

Park, Y.A. and J.Y. Choi, 1986. Factor analysis of the continental shelf sediments off the southeast coast of Korea and its implication to the depositional environments. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **21**: 34-45.

Park, Y.A., K.R. Kim, J.Y. Choi and S.C. Park, 1988. Size distribution of suspended particulate materials in the southern East Sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **23**: 76-88.

Stanley, D.J., S.K. Addy and E.W. Behrens, 1983. The mudline: variability of its position relative to shelfbreak. SEPM special publication, 33, pp. 279-298.

Suk, B.C., 1986. Depositional environment of Late Quaternary sediments and suspended particulate matter on the southeastern continental shelf, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, **22**: 10-20.

1999년 3월 24일 원고 접수

1999년 7월 10일 수정본 채택