「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 8, No. 4, pp. 369 — 379, November 2003

한국 남동 대륙붕 후 제4기 퇴적층의 시퀀스 층서

유동근* · 이치원 · 최진용[1] · 박수철[2] · 최진혁[3]
한국지질자원연구원 석유해저연구부
[1]군산대학교 해양정보과학과
[2]충남대학교 해양학과
[3]국방과학연구소

Sequence Stratigraphy of Late Quaternary Deposits in the Southeastern Continental Shelf, Korea

DONG-GEUN YOO*, CHI-WON LEE, JIN-YOUNG CHOI[1], SOO-CHUL PARK[2] AND JIN-HYUK CHOI[3]
Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), Daejon 305-350, Korea
[1]Department of Marine Information Science, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea
[2]Department of Oceanography, Chungnam National University, Daejon 305-764, Korea
[3]Agency for Defence Development, Jinhae 645-600, Korea

한국 남동해역 대륙붕에서 취득된 고해상 탄성파 탐사자료와 퇴적물 시료의 분석에 의하면 후 제4기 퇴적층은 마지막 빙하기 이후의 해수면 변화에 의해 조절되는 저해수면계열, 해침계열, 고해수면계열로 구성된다. 시퀀스 경계면 위의 저해수면계열(층서단위 I)은 마지막 빙하기 동안 퇴적된 니질사 혹은 사질니 퇴적물로 구성되며 대륙붕단과 해곡의 외해역에 분포한다. 해침면과 최대해침면 사이에 위치하는 해침계열(층서단위 II)은 지난 15,000-6,000년 사이에 퇴적되었으며 주로 사질퇴적물로 구성된다. 해침계열은 연구해역 전반에 걸쳐 넓게 분포하지만 저해수면계열과 고해수면계열에 비해 박층으로 분포한다. 이러한 해침계열은 분포특성에 따라 3개의 소퇴적단위로 세분된다. 즉, 대륙붕단의 초기해침계열(Unit IIa), 중간대륙붕의 중기해침계열(Unit IIb), 내대륙붕의 후기해침계열(Unit IIc)등으로 이들은 후배열층서의 특성을 가진다. 최대해침면 상부에 놓이는 고해수면계열(층서단위 III)은 해수면이 현수준에 도달한 지난 약 6,000년 이후에 퇴적된 현생 니질퇴적물로 구성되며 내대륙붕의 연안을 따라 제한적으로 분포한다.

Analysis of high-resolution seismic profiles and sediment data from the southeastern continental shelf of Korea reveals that the late Quaternary deposits consist of a set of lowstand (LST), transgressive (TST), and highstand systems tracts (HST) that corresponds to the sea-level change after the Last Glacial Maximum. LST (Unit I) above the sequence boundary consists of sandy mud or muddy sand deposited during the last glacial period and is confined to the shelf margin and trough region. TST (Unit II) between transgressive surface and maximum flooding surface consists of sandy sediments deposited during the postglacial transgression (15,000-6,000 yr BP). Although TST is widely distributed on the shelf, it is much thinner than LST and HST. On the basis of distribution pattern, TST can be divided into three sub-units: early TST (Unit IIa) on the shelf margin, middle TST (Unit IIb) on the mid-shelf, and late TST (Unit IIc) on the inner shelf, respectively. These are characterized by a backstepping depositional arrangement. HST(Unit III) above the maximum flooding surface is composed of the fine-grained sediments deposited during the last 6000 yrs when sea level was close to the present level and its distribution is restricted to the inner shelf along the coast.

Key words: Late Quaternary, Sequence Stratigraphy, Sea-Level Change, Southeastern Continental Shelf

서 론

후 제4기 동안 한반도 주변 해역에서의 퇴적작용은 해수면의 상대적인 위치에 따라 크게 지배되었으며 그 결과 퇴적상과 층서구조가 다양하게 발달한 것으로 알려졌다(민, 1994; Park and Choi, 1986; Park and Yoo, 1992; Yoo and Park, 1997; Yoo *et al.*, 2003). 이와 같이 해수면 변화와 연계되어 발달하는 대륙붕에서의 천부층서구조 분석을 통한 퇴적역사의 이해를 위해서는 분해력이 우수한 고주파수대의 정밀 탄성파탐사자료가 필요하다. 또한 탄성파자료의 분석시 상대적인 해수면의 위치에 따라 퇴적작용이 민감하게 반응하는 점에 역점을 두어 해석하고자 하는 시퀀스 층서(sequence stratigraphy)개념의 도입도 필요하다. 탄성파층서(seismic

*Corresponding author: dgyoo@kigam.re.kr

stratigraphy)는 탄성파자료를 기초로 퇴적상 및 퇴적층서를 해석하고자 하는 분야로 1970년대 미국 엑슨사(Exxon Production Research) 연구진에 의해 기본개념이 수립되었다(Vail *et al.*, 1977). 기본개념이 수립된 이후 많은 발전을 가져왔으며 1980년대 중반 이후에는 탄성파탐사자료, 고생물자료 및 물리검층자료들의 종합적인 해석을 통하여 퇴적상 및 퇴적층서를 시공간적인 측면에서 해석하려는 시퀀스 층서로 발전하게 되었다(Vail, 1987; Posamentier *et al.*, 1988).

시퀀스 층서 개념은 초창기에는 주로 다중채널을 이용한 심부 탄성파 탐사자료의 분석에 주로 적용되었다. 즉, 100-200만 년 규모의 해수면 변화와 연계되어 발달된 비교적 큰 규모의 퇴적층서나 지질구조 해석에 관심이 집중되어왔다. 그러나 1980년대 후반에 들어서면서 단일채널의 정밀탄성파 탐사자료를 기초로 상기의 시퀀스층서 개념을 적용하여 퇴적층서 및 환경을 규명하고자 하는 연구가 시작되었다(Boyd *et al.*, 1989). 그들의 연구에 의해 그동안 심부 층서구조 연구에 제한적으로 적용되어 왔던 시퀀스층서 개념이 천부 탄성파 자료를 기초로 하는 2만-3만 년 규모의 단기간 해수면 변화와 연계된 천부층서의 해석에도 적용 가능한 것으로 밝혀졌고 주로 대륙붕 및 대륙사면 지역에서의 천부 층서구조 및 퇴적역사 규명을 위해 광범위하게 적용되기 시작했다(Tesson *et al.*, 1990; Ericilla *et al.*, 1994; Hernandez-Molina *et al.*, 1994; Saito, 1994; Trincardi *et al.*, 1994; Tortora, 1996; Yoo and Park, 2000; Yoo *et al.*, 2002). 반면 국내의 연구 동향을 보면 비교적 짧은 주기의 해수면 변화와 연계된 후 제4기 퇴적층의 천부층서구조 및 퇴적역사를 규명하고자 하는 연구에 상기 시퀀스 층서 개념을 적용한 연구가 미비한 실정이다.

연구지역은 한반도의 남동단인 부산과 대마도 사이의 해역으로 폭이 60 km정도 되는 대륙붕으로 대륙붕의 폭이 좁고 낙동강으로부터 다량의 퇴적물이 공급되고 있으며 외해쪽에 최대수심이 230 m에 달하는 해곡이 위치하고 있다(Fig. 1). 이러한 퇴적환경특성상 연구지역은 한 주기의 해수면 변화, 즉 마지막 빙하기의 저해수면 - 홀로세 해침 - 현생 고해수면과 연계되어 발달하는 퇴적층서 연구가 가능하다. 본 연구에서는 대한해협에서 취득된 천부탄성파 탐사자료와 퇴적물 분석결과를 토대로 시퀀스층서 분석을 실시하였다. 분석결과를 토대로 짧은 주기의 해수면 변동(2–3만년)과 연계되어 발달하는 후 제4기 퇴적층의 발달과정을 규명하고, Vail(1987)에 의해 제시된 모델과 비교하여 우리나라 대륙붕에 적용 가능한 천부 시퀀스 층서 모델을 제시하고자 한다.

연구지역

본 연구지역은 한반도와 대마도 사이의 해역으로 폭 60 km정도의 좁은 대륙붕에 해당된다(Fig. 1). 연구지역은 표층 퇴적물 및 지형특성에 따라 내대륙붕, 중간대륙붕 그리고 외대륙붕(해곡지역)으로 구분된다. 수심 80 m 미만의 내대륙붕은 현생 니질퇴적물이 분포하며 완만한 경사를 가지고 외해를 향하면서 수심이 점차 증가한다. 대체로 특정표면 구조가 없는 평탄한 해저면 특성을 보여준다. 수심 80–120 m사이의 중간대륙붕은 수심변화가 별로 없는 완만한 경사지역으로 주로 패각과 역을 포함하는 사질퇴적물이 분포하며, 부분적으로 사퇴 및 모래파 등이 발달한다(Park and Choi, 1986). 특히 사질입자 중에는 석영의 함량이 높고 석영입자의 표면은 산화철이 피복된 경우를 흔히 볼 수 있다. 이와 같은 특성은 연구지역의 퇴적물이 대기중에 노출되었음을 시사해주며 외해쪽 대륙붕에서 흔히 볼 수 있는 잔류퇴적물(relict sediment)에 대비된다(Park and Choi, 1986). 중간대륙붕의 바깥쪽으로는 최대수심이 230 m에 달하는 해곡이 북동-남서방향으로 길게 발달해 있다. 해곡지역에는 주로 니질사 혹은 사질니 퇴적물이 분포한다(Yoo *et al.*, 1996).

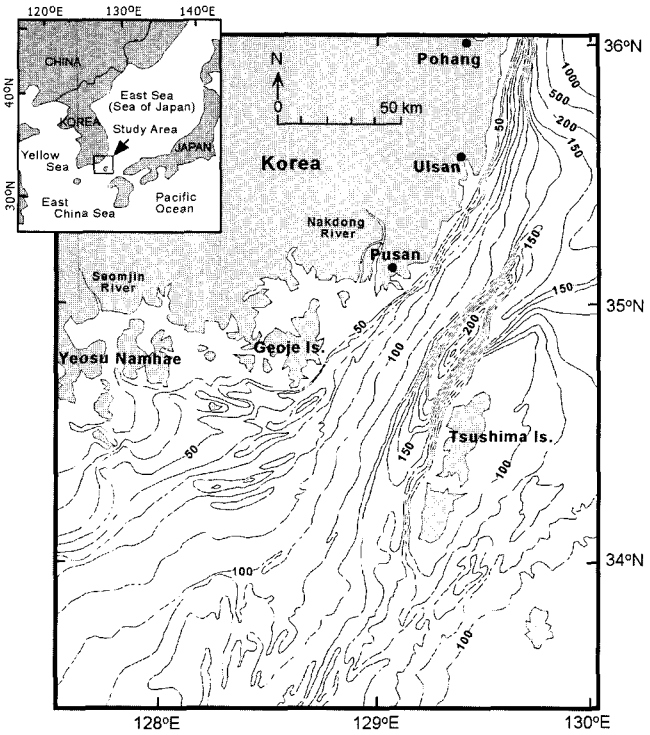

Fig. 1. Location and bathymetric map of the study area (contour interval is 10 m).

연구지역에는 낙동강에 의해 다량의 쇄설성 퇴적물이 공급된다. 낙동강은 유역면적이 23,860 km^{2}에 달하며 년간 담수 유출량은 630억톤에 이르며 그중 60–70%이상이 홍수기인 7월과 8월에 집중된다(Kim *et al.*, 1986). 또한 연간 460만 톤에 달하는 세립 퇴적물이 부유 상태로 연구지역에 유입되고 있으며 조립 퇴적물의 대부분은 강하구를 중심으로 퇴적되며 다양한 형태의 모래사주를 포함하는 넓은 삼각주를 형성하고 있다(Kim *et al.*, 1986). 연구지역의 연안에는 조류와 연안류가 우세한 반면 외해쪽은 대마난류의 영향을 주로 받고 있다. 대마난류는 연구해역을 통과하여 동해로 유입되고 있으며 표층유속은 30–90 cm/sec이며 높은 수온과 염분의 수괴를 동해로 운반하는 역할을 하고 있다(Kim *et al.*, 1986). 조류는 반일주조가 우세하며 북동-남서 방향을 가지고 흐른다(Korea Hydrographic Office, 1982).

재료 및 방법

본 연구를 위해 천부탄성파 탐사자료(스파커 및 3.5-kHz)를 활용하였다(Fig. 2). 스파커자료는 한국지질자원연구원에 의해 취득

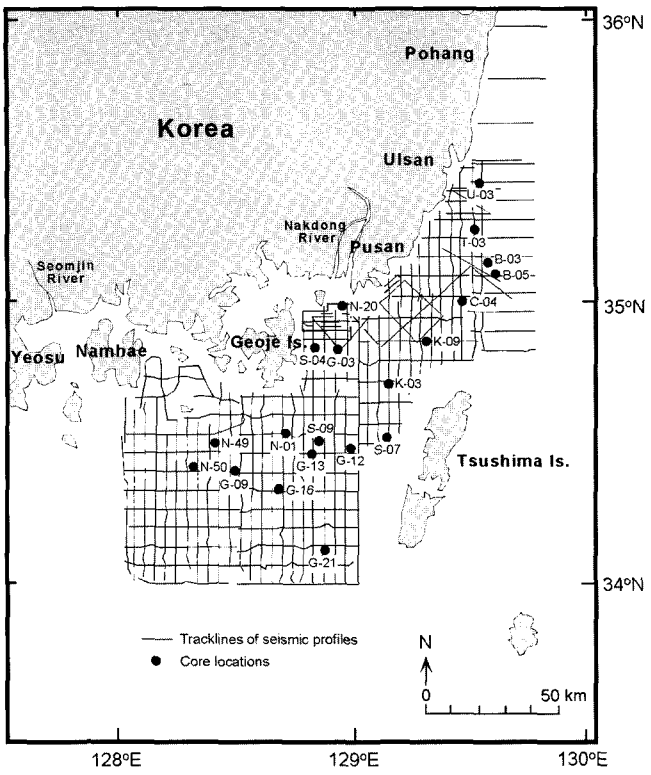

Fig. 2. Map showing the seismic-reflection tracklines and core locations.

된 자료로 사용된 장비는 주 음원으로 전기충격을 이용한 시스템이다. 음파발생장치는 EG&G사의 모델 462-7의 3-electrode spark array로서 500–1000 Joule의 energy level을 사용하였다. 음파를 수진하기 위해 24개의 수진자가 병렬로 연결되어 있는 Benthos사의 MESH 50/24P hydro-streamer를 사용하였으며 선미 후방 30 m에서 예인하였다. 수진된 음파는 200–1000 Hz의 band-pass filter를 거쳐 EPC사의 모델 3200 기록계를 이용하여 음파탐사자료 단면을 얻었다. 3.5-kHz 지층탐사자료는 미국 ORE사와 Data Sonic사의 정밀저층음파 탐사기(subbottom profiling system)로서 주파수가 2–7 kHz의 음원을 사용함에 따라 분해력이 매우 양호하여 연구지역과 같이 현생세립퇴적물이 분포하는 해역의 정밀층서 및 음향특성 연구에 적합하다.

탄성파자료와 함께 주상 퇴적물 시료가 채취 되었다(Fig. 2). 시료채취를 위한 야외조사는 부경대학교 실습선 부산 403호 및 탐양호를 이용하였다. 주상시료의 퇴적구조를 관찰하기 위하여 연X-선 사진촬영을 실시하였다. 사용된 기종은 SOFTEX M-1005이며, 5×20×1 cm의 퇴적물 슬랩을 만들어 전압 50–60 Kv, 전류 3–4 mA, 노출시간 40–60초의 조건하에서 촬영하였다. 촬영 후 20 cm 간격으로 부시료를 채취하여 건식체질과 피펫팅 방법에 의해 입도분석을 실시하였다. 퇴적물 시료의 연령을 규명하기 위하여 필요 구간에서 패각을 채취하여 탄소 동위원소(14C) 연대측정을 실시하였다. 연대측정 시료 채취 시 패각은 원형이 잘 보존되고 이동되지 않았을 것으로 추정되는 것들을 선택하였다. 연령측정은 뉴질랜드 Institute of Geological and Nuclear Sciences(IGNS)와 미국 Lawrence Livermore National Laboratory에서 입자가속 질량분석기(Accelerated Mass Spectrometer: AMS)를 이용하여 측정하였다.

탄성파 층서

탄성파 자료와 퇴적물 자료의 분석결과에 의하면 연구해역에 분포하는 천부퇴적층은 서로 다른 특성을 갖는 3개의 층서단위(하부로부터 I, II, III)로 구성된다(Figs. 3-5). 각 층서단위의 음향특성, 분포, 퇴적상은 다음과 같다.

층서단위 I

본 층서단위는 연구해역에 분포하는 천부퇴적층중 층서적으로 최하위에 속하며 대륙붕단 및 해곡지역에 제한적으로 분포한다(Fig. 6). 본 층은 탄성파 단면상에서 두 가지 형태의 탄성파상(seismic facies) 특성을 보여준다. 우선 비교적 완만한 경사를 갖는 해곡의 남서쪽에서는 내부층리 발달이 양호하며 해곡을 향하여 전진퇴적(prograding)하는 형태의 음향특성을 보여준다(Fig. 3A). 내부 반사면은 해곡을 향하면서 하부경계면에 다운랩(downlap) 된다. 반면 비교적 경사가 가파른 해곡의 북동쪽으로 향하면서 캐오틱(chaotic) 혹은 허모키(hummocky)한 음향특성을 보여준다(Fig. 3B and 3C). 일부 지역에서는 퇴적체의 일부가 해곡쪽으로 미끄러져 단절된 상태로 존재하며 하부의 고기 퇴적층이 해저면에 노출된 상태로 존재한다. 이 경우 내부 층리가 보존된 상태로 존재하지만(Fig. 3B), 일부 지역에서는 여러 개의 퇴적물 더미가 중첩되어 발달하며 내부층리가 파괴되고 불규칙한 해저면 특성을 갖는다(Fig. 3C). 기존의 연구에 의하면 이와 같은 현상은 슬럼프 혹은 슬라이드와 같은 중력류에 의한 결과로 해석되었다(Yoo *et al.*, 1996). 층서단위 I의 내부에는 하부층리구조를 볼 수 없는 음향혼탁층(acoustic turbid layer)이 국부적으로 존재하며 이는 퇴적층 중에 포함된 가스층의 존재에 의한 결과로 알려져 있다(민, 1994). 이러한 특성의 층서단위 I은 등층후도에 의하면 외해로 갈수록 두께가 증가하는 쐐기형태로 발달하며 대체로 15–25 m 두께로 분포한다(Fig. 7). 그러나 해곡의 남서단인 대마도 서측 해역에서는 최대 약 40 m이상에 달한다. 이러한 쐐기형태의 본 층서단위는 경사가 가파른 해곡의 북서쪽 사면으로 향하면서 층 두께가 불규칙해지고 대체로 10 m 미만으로 분포한다.

주상퇴적물 시료의 분석에 의하면 층서단위 I은 평균입도가 5.5–7.0Φ의 범위에 속하는 실트질사(silty sand) 혹은 사질실트(sandy silt)로 구성된다(Fig. 8). 대체로 실트의 함량이 높은 편이며 수직적인 변화가 없는 균질한 암상 특성을 갖는다. X-선 사진관찰에 의하면 대부분의 경우에 생물교란구조를 보여주며 부분적으로 약한 엽리구조를 포함한다. 그러나 경사가 가파른 북동쪽으로 향하면서 부분적으로 패각과 역을 함유하는 사질퇴적층이 협재되기도 한다. 일부 코아의 규조류 분석결과에 의하면 *Cocconeis placentula, Cymbella minuta, Diploneis, Gyrosigma accuminatum, Pinnularia borealis, Synedra ulna*등이 우세하게 나타나는데 이들은 주로 담수 혹은 염하구환경하에서 서식하는 종에 해당된다. 본 층서단위에서 채취한 시료의 탄소연대측정 결과에 의하면 15,440±60년으로 나타났다(Fig. 8A).

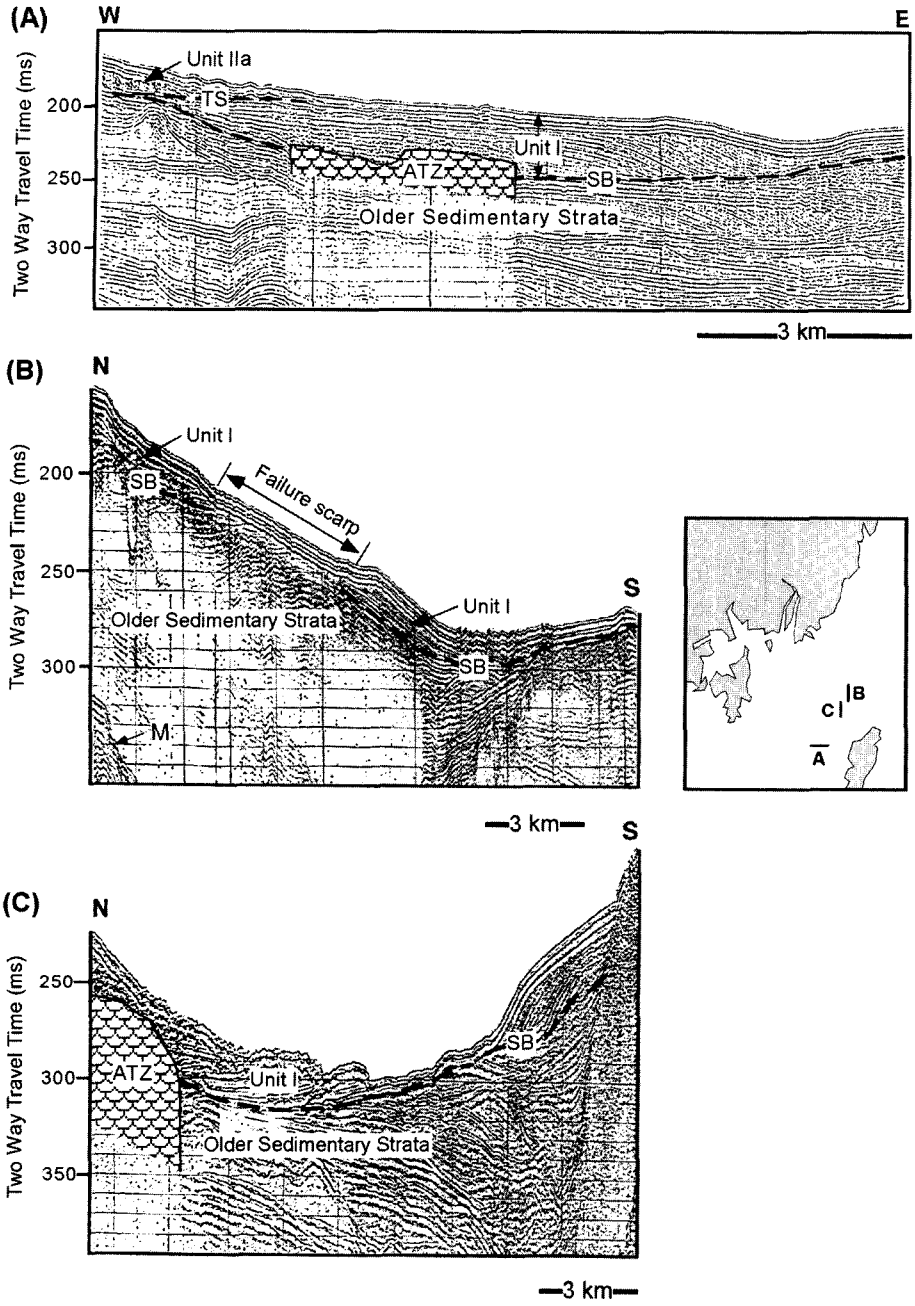

Fig. 3. High-resolution seismic profiles showing two (I and IIa) sedimentary units in the shelf margin and trough region. ATZ, acoustically turbid zone; SB, sequence boundary; TS, transgressive surface; M, multiple.

층서단위 II

본 층서단위는 퇴적상 및 분포위치에 따라 3개의 층서단위(하부로부터 IIa, IIb, IIc)로 세분된다(Fig. 4). 층서단위 IIa는 수심 110–140 m 사이 해역인 대륙붕단을 따라 북동-남서방향으로 길게 대상으로 분포하는 것이 특징적이다(Fig. 6). 탄성파 자료상에서 특정 내부층리를 보여주지 않는 허모키 혹은 무질서한 음향상을 보인다(Figs. 3A and 4A). 부분적으로는 외해쪽으로 기울어진 경사층리 음향상을 보여주기도 한다. 외부형태는 외해쪽으로 기울어진 뱅크(bank)형태를 보여주며 상부표면이 불규칙하다. 층서단위 IIa는 대부분 해역에서 5–10 m 내외의 두께로 발달하며 최대 15 m 이상에 달한다. 폭은 2–4 km정도가 되며 북동쪽으로 향하면서 퇴적체의 폭과 두께가 점차 감소하는 경향을 보여준다. 층서단위 IIa는 다량의 역과 패각을 함유하는 사질퇴적물로 구성되며 본 퇴적단위에 포함된 역은 최대 지름이 5 cm에 달하며 대체로 원마도가 양호하고 검은색 혹은 회색을 띠고 있다. 본 퇴적층은 상향 조립화하는 경향을 보여주고 있으며 퇴적층에 속하는 B-03 코아의 패각을 이용한 탄소연대측정에 의하면 15,080±150년으로 나타났다(Fig. 8).

층서단위 IIa가 대륙붕단에 제한적으로 분포하는 반면 층서단위 IIb는 중간대륙붕에 넓게 분포하며 해저면에 노출된 상태로 존재한다(Fig. 6). 본 층은 탄성파 단면상에서 약한 평행층리를 포함하는 반투명 혹은 허모키 음향상을 보여준다(Fig. 4B). 본 층서단위의 외부형태는 쉬트(sheet) 혹은 드래이프(drape)형의 특징을 가지며 대부분의 경우 5 m미만의 박층으로 나타난다. 퇴적물 분석 결과에 의하

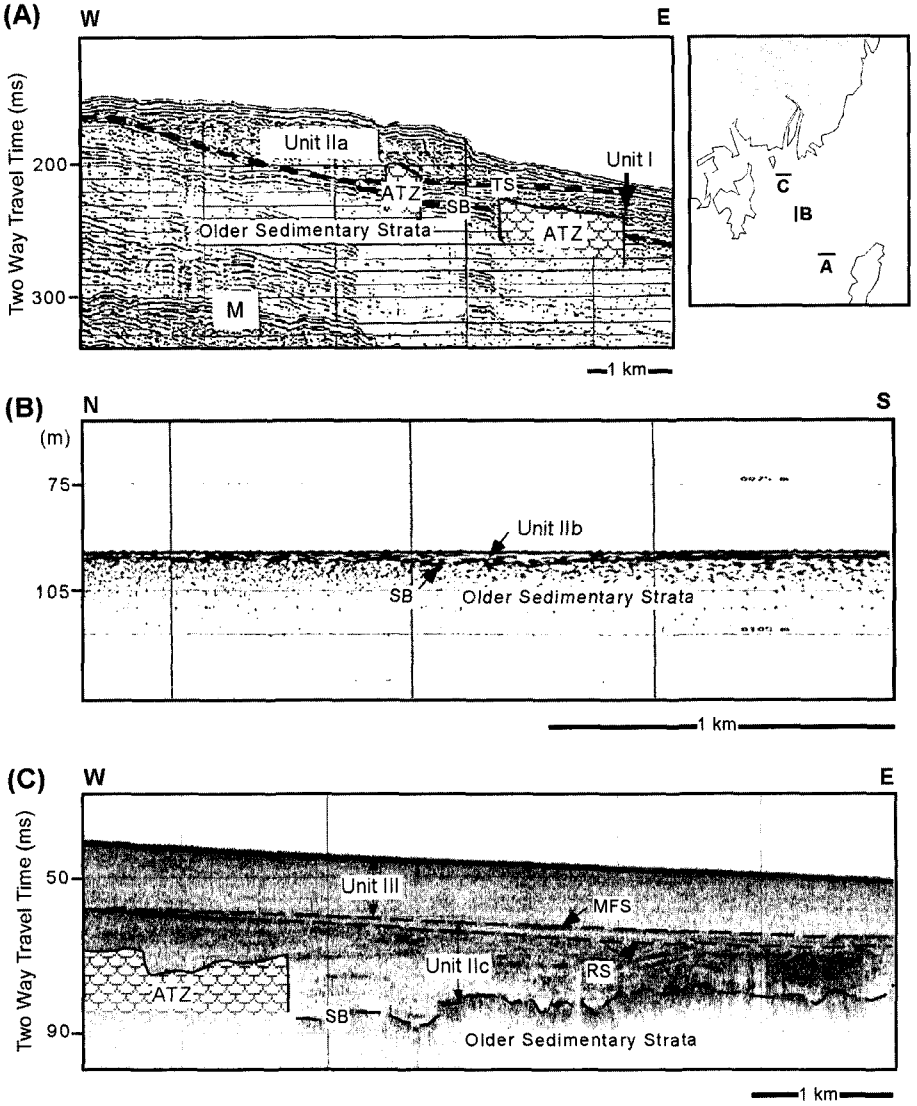

Fig. 4. High-resolution seismic profiles acquired from the shelf margin (A), the mid-shelf (B), and the inner shelf (C). ATZ, acoustically turbid zone; SB, sequence boundary; TS, transgressive surface; RS, ravinement surface; MFS, maximum flooding surface; M, multiple.

면 층서단위 IIb는 패각과 잔자갈을 다량 포함하는 사질퇴적물로 구성되며 분급이 다른 퇴적단위에 비해 양호한편이다. 본 퇴적단위에서 채취된 코아 시료에 포함된 패각의 탄소연대측정에 의하면 15,000년에서 약 5000년의 범위에 포함되는 것으로 밝혀졌다(Fig. 8).

기복이 심한 시퀀스 경계면 상부에 직접 놓이는 층서단위 IIc는 탄성파 단면상에서 부분적으로 약한 평행층리를 포함하는 반투명(semi-transparent) 혹은 투명한(transparent) 음향상을 보여준다(Figs. 4C and 5A). 층서단위 IIc는 거제도와 낙동강 하구역 사이의 내대륙붕과 섬진강과 연계되는 여수해만 외해쪽의 내대륙붕에 제한적으로 분포한다. 대부분의 경우 5–10 m의 층후를 보여주지만 거제도 동부해역에서는 최대 약 15 m에 달한다(Fig. 4C). 상기 특성을 갖는 본 층서단위는 기존 연구에 의하면 패각을 함유하는 사질니 혹은 니질사 퇴적물로 구성되며 탄소연대측정 결과 11,000–8000년 사이에 퇴적된 것으로 보고 되었다(한국지질자원연구원, 2000).

층서단위 III

층서적으로 최상부에 속하는 본 층서단위는 탄성파 단면상에서 특정 내부층리를 보여주지 않는 투명(transparent) 음향상, 불연속적인 약한 층리를 포함하는 반투명(semi-transparent) 음향상, 그리고 연속성이 양호한 평행층리(continuous well-stratified)음향상의 특징을 갖는다. 낙동강 하구역 부근에서는 주로 연속성이 양호한 평행층리 음향상을 보여주며(Fig. 5A) 외해쪽을 향하면서 점차 내부층리면의 연속성이 불량해지면서 거제도 동부 및 여수해만 외해쪽 대부분 지역에서는 반투명 혹은 투명음향상을 보여준다(Fig. 4C). 그러나 울산동부해역에서는 내부층리구조를 전혀 보여주지 않는 투명음향상의 특징을 보여준다(Fig. 5B). 본 층서단위는 층서단위 I에서와 같이 내부층리를 볼 수 없는 음향혼탁층을 포함하기도 한다. 이러한 층서단위 III은 연안을 따라 내대륙붕에 제한적으로 분포한다. 등층후도에 의하면 층서단위 I은 15–20 m의 두께로 발달한다(Fig. 7). 그러나 울산 동부해역에서는 최대 약 50 m 두께에 달하며 층후가 외해쪽으로 점차 감소하는 쐐기형태를 보여주고 있다(Figs. 5B and 7). 퇴적물 시료의 분석에 의하면 층서단위 III는 평균입도 7–9Φ의 니질퇴적물로 구성되어 있으며 사질함량이 5% 미만이다(Fig. 8). 수직적으로 암상의 변화가 거의 없

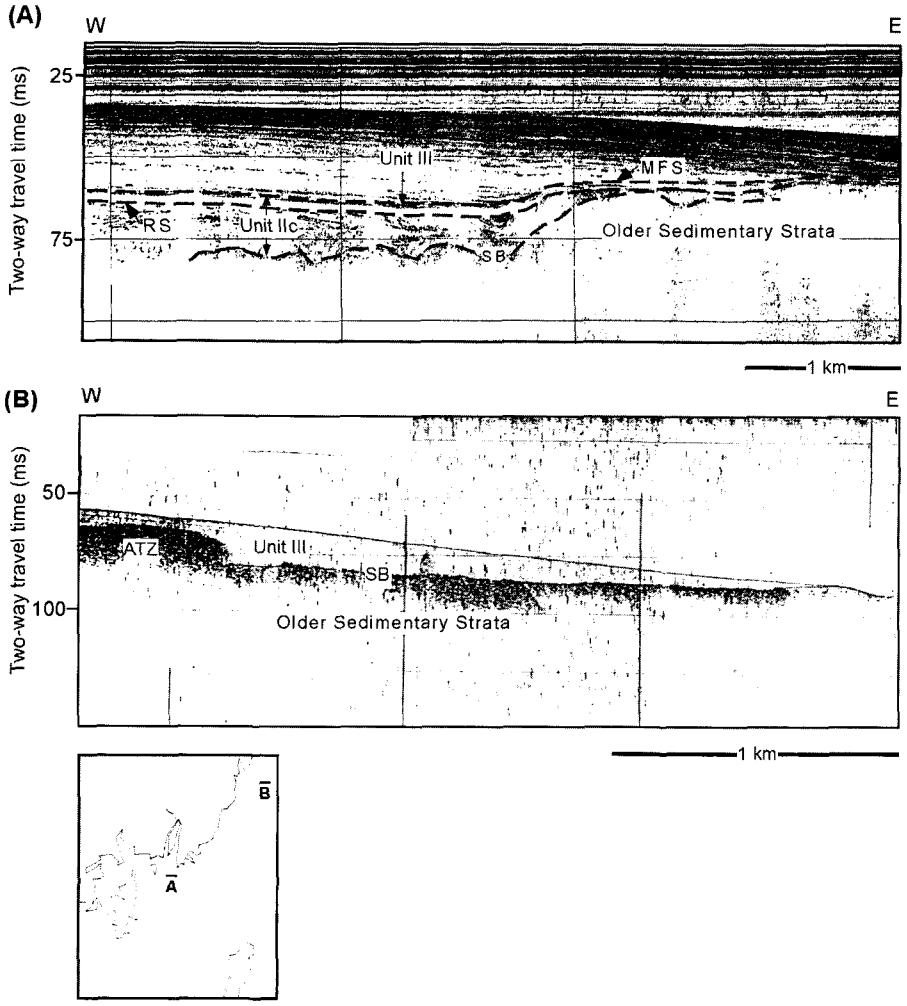

Fig. 5. High-resolution seismic profiles from the inner shelf off the Nakdong River (A) and off Ulsan (B). ATZ, acoustically turbid zone; SB, sequence boundary; RS, ravinement surface; MFS, maximum flooding surface.

는 균질한 특성을 보여주며 X-선 사진 분석결과 미약하게 발달한 평행층리구조만이 관찰된다.

후 제4기 퇴적역사

해수면 변화

기존의 연구(민, 1994; Suk, 1989)에 의하면 한국 남동해역에서의 후 제4기 해수면 곡선은 저해수면시기(15,000년 이전), 해침시기(15,000–6,000년), 고해수면 시기(6,000년 이후) 등 크게 세부분으로 구분된다(Fig. 9). 저해수면 시기는 해수면이 현재보다 최대 120–130 m 하강했던 마지막 빙하기에 해당되며 해곡 일부지역을 제외한 연구지역 대부분이 대기중에 노출된 상태로 존재하였다(Park *et al.*, 2000). 지난 15,000년을 전후로 빙하기가 끝나고 해침이 시작되어 지난 약 6,000년경 까지 해침이 지속되었다. 그러나 해침동안 해수면 상승이 일정 속도로 진행되기보다는 시기에 따라 다른 상승속도를 갖는 것으로 나타났다. 즉, 해침초기에는 일정속도로 진행되었으나 11,000년을 전후로 상승속도가 둔화 내지는 정체되었으며 지난 약 8,000년경부터 빠른 속도로 해침이 진행되어 6,000년경에 이르러 거의 현 수준까지 해수면이 상승한 것으로 보고되었다(Fig. 9; 민, 1994; Suk, 1989; Park *et al.*, 2000).

퇴적층서 발달

위에서 언급한 바와 같이 연구해역은 지난 마지막 빙하기 동안 해수면이 최대 약 120–130 m 하강한 것으로 알려졌다(민, 1994; Suk, 1989; Park *et al.*, 2000). 따라서 연구해역 중 해곡 일부지역을 제외한 대부분 지역이 대기중에 노출되었으며 심한 침식작용을 받았을 것으로 추정된다. 그 결과 기복이 심한 침식 부정합면인 시퀀스경계면(SB)을 형성하게 되었다(Figs. 4C and 5A). 현재의 강하구는 대륙붕단까지 연장됨에 따라 대륙붕을 가로지르는 침식수로가 발달하게 되었으며(Fig. 6) 다량의 육성퇴적물이 해곡까지 직접 운반된 것으로 보여 진다(Park and Yoo, 1992; Yoo and Park, 1997; Yoo *et al.*, 2003). 이와 같이 운반된 퇴적물은 해곡에 집적되어 층서단위 I을 형성한 것으로 생각된다. 따라서 본 퇴적단위는 이미 보고(Yoo and Park, 2000) 된 바와 같이 지난 마지막 빙하기동안 형성된 저해수면 연계 퇴적층으로 해석된다. 이러한 사실은 본 층서단위에서 채취한 퇴적물에 포함된 규조류의 분석결과에서도 볼 수 있다. 즉, 현재수심 150 m 이상의 외대륙붕에 위치하고 있는 퇴적물내에 염하구 환경에서 서식하는 종이 다량 산출되는 것으로 보아 이는 지난 마지막 빙하기동안 해안선이 대륙붕단 부근에 위치했었던 저해수면 환경하에서 형성되었음을 뒷받침 해주고 있다. 또한 탄소연대측정 결과에서도 15,440±60

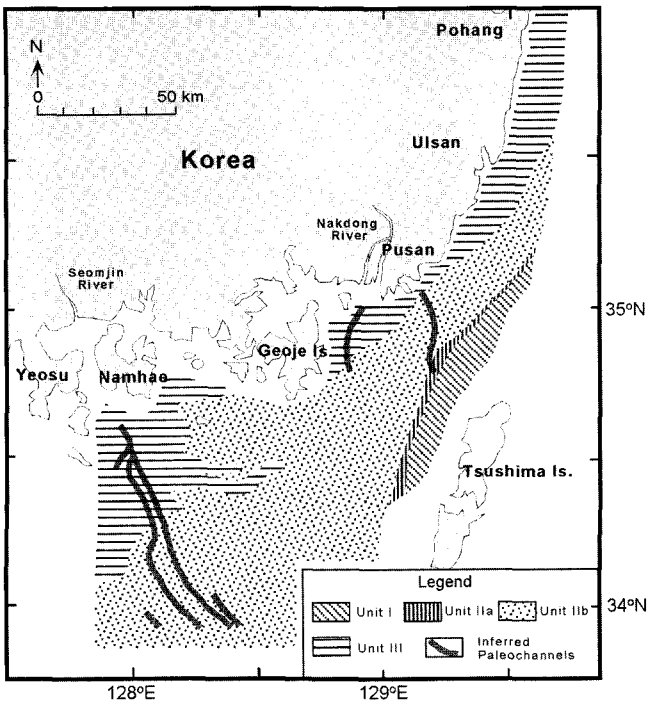

Fig. 6. Distribution of four sedimentary units (I, IIa, IIb, and III). Unit IIc in the inner shelf is completely covered by Unit III.

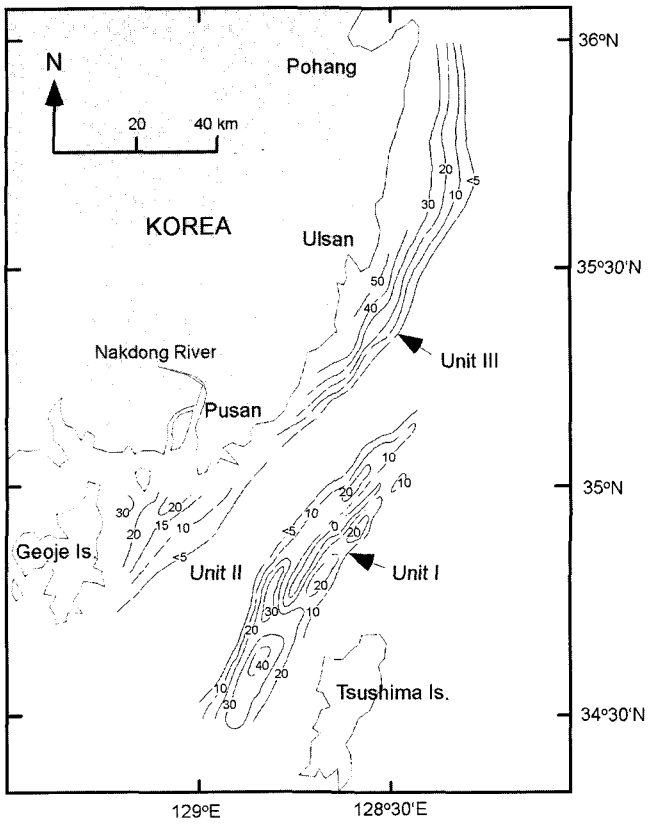

Fig. 7. Isopach map of sedimentary units. Contour in meters.

년으로 나타났다.

민(1994)과 Suk(1989)에 의하면, 연구지역은 지난 15,000년을 전후로 하여 저해수면 환경이 끝나고 해침이 시작된 것으로 알려지고 있다(Fig. 9). 해침 초기에는 해수면이 현재보다 120–130 m 정도 낮았으며 해안선이 현재의 대륙붕단 부근에 위치하고 있으면서 점차 해침이 진행되었을 것으로 생각된다(Park *et al.*, 2000). 따라서 해빈연계 연안환경이 일정 기간동안 대륙붕단 부근에 머물러 있었으며 이러한 조건하에서 층서단위 IIa가 형성된 것으로 해석된다. 이와 같은 사실은 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 본 층서단위가 수심 110–140 m 사이인 대륙붕단을 따라 길게 대상으로 발달해 있는 분포특성에서도 볼 수 있다. 또한 코아시료의 분석결과에서도 주로 역과 패각을 다량 함유하는 사질퇴적물로 구성 되어있으며 탄소동위원소 분석 결과에서도 15,000년 전후의 시기를 보여준다(Park and Yoo, 1992; 민, 1994; Yoo and Park, 1997). 따라서 대륙붕단에 제한적으로 분포하는 층서단위 IIc는 이미 다른 여러 지역에서 보고(Tesson *et al.*, 1990; Trincardi *et al.*, 1994; Totora, 1996) 된바 있는 것처럼 지난 후빙기 해침 초기 동안 고해안선과 연계되어 형성된 해침퇴적단위로 해석된다.

연구해역의 중간 대륙붕은 수심변화가 거의 없는 완만한 경사를 보인다. 따라서 해침이 진행되는 동안 해안선의 후퇴 속도가 매우 빨랐을 것으로 추정된다. 즉, 퇴적공간의 증가속도에 비해 퇴적물 공급이 미치지 못하게 되고 결과적으로 두꺼운 퇴적층의 형성보다는 대부분 지역에서 수 m미만의 박층의 퇴적층인 층서단위 IIb가 형성된 것으로 해석된다(Fig. 6) 이는 많은 지역에서 보고 된바 있는 해침 사질퇴적단위와 잘 대비된다(Trincardi *et al.*, 1994; Totora, 1996; Lee and Yoon, 1997).

해침이 진행되면서 지난 11,000–10,000년을 전후로 해안선이 거제도 동부 지역과 남해도 부근 해역까지 이동한 것으로 추정되며(한국지질자원연구원, 2000; Park *et al.*, 2000) 해침 후기에 이 지역은 하구 환경인 것으로 해석된다. 이러한 조건하에서 하천을 통하여 유입되는 다량의 육성퇴적물은 하구 내에 퇴적되었으며 결과적으로 층서단위 IIc를 형성한 것으로 해석된다. 지질자원연구원(2000)의 보고에 의하면 본 퇴적단위에 포함된 유공충의 경우 염하구 환경에서 서식하는 종이 우세한 것으로 알려졌으며 탄소동위원소 연대 측정에 의하면 11,000–8,000년 사이에 퇴적된 것으로 밝혀졌다.

연구지역은 지난 7,000년에 접어들면서 해수면 상승속도가 둔화되기 시작하였으며 지난 약 6,000년경에 이르러 해수면이 현 수준에 도달한 것으로 보고되고 있다(Suk, 1989;민, 1994; Park *et al.*, 2000). 이후 낙동강으로부터 다량의 퇴적물이 유입되었으며 내대륙붕을 중심으로 집적되어 층서단위 III을 형성하게 되었다. 이러한 층서단위 III은 외해로 갈수록 두께가 점차 감소하여 수심 70–80 m 지점에서 하부층서단위에 수렴된다.

시퀀스 층서

퇴적단위 경계면(bounding surface)

천부 퇴적층을 구성하는 층서단위를 분리하는 경계면은 하부로부터 시퀀스경계면(SB, sequence boundary), 해침면(TS, transgressive surface), 해침침식면(RS, ravinement surface), 그리고 최대해침면(MFS, maximum flooding surface)으로 구분된다(Figs. 3-5). 시퀀

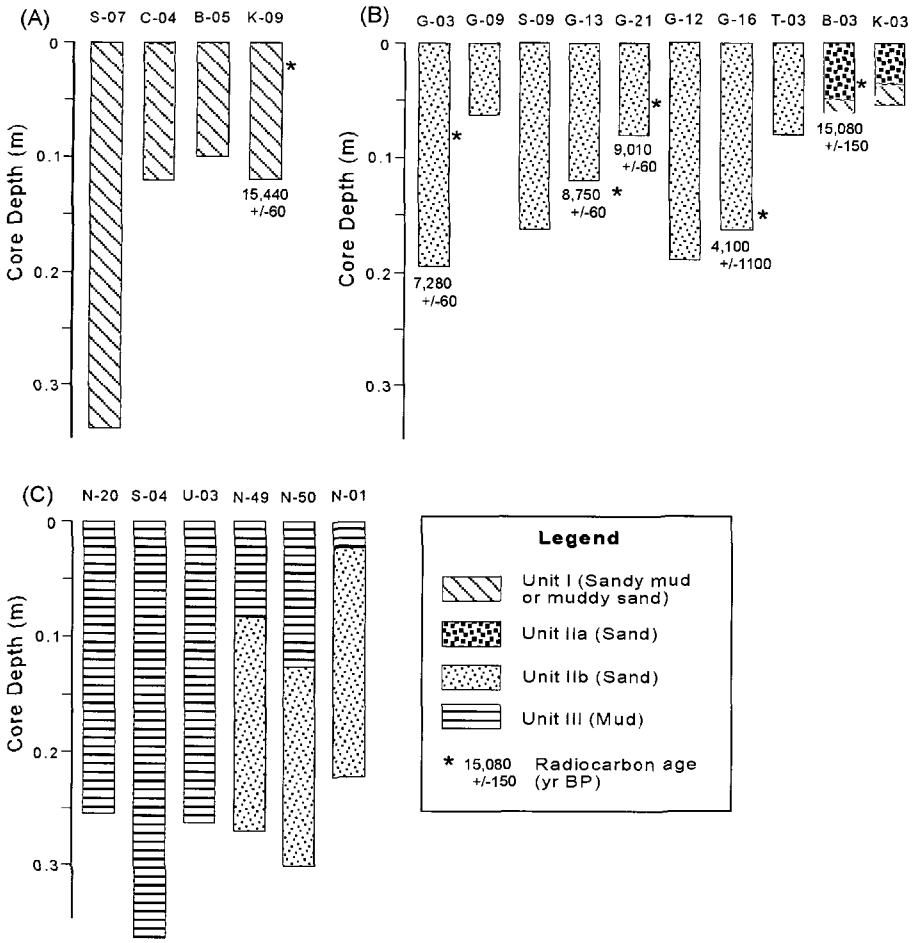

Fig. 8. Lithology of sedimentary units with ages. For core locations, see Fig. 2.

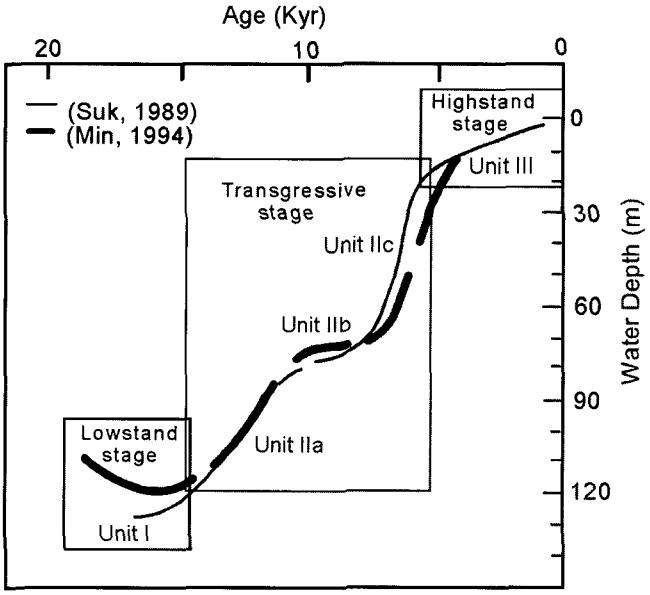

Fig. 9. Sea-level curves in the Korea Strait during the late Quaternary (after Suk, 1989; Min, 1994).

스경계면(SB)은 천부퇴적층의 하부 경계면을 구성하며 기복이 심한 침식부정합면의 형태로 나타난다(Figs. 4C and 5A). 이러한 시퀀스 경계면은 지난 마지막 빙하기동안 대기 노출에 따른 침식작용의 결과로 형성된 침식부정합면으로 고수로를 동반한다(민, 1994). 연구해역에 나타나는 시퀀스 경계면은 Posamentier and Allen(1993)의 기준에 의하면 타입-I 시퀀스경계면에 해당한다. 즉, 지구적 해수면 하강 속도가 대륙붕의 침강속도에 비해 빠르게 진행될 경우 대륙붕단까지 해수면이 하강하게 되고 고수로를 동반하는 광범위한 침식작용으로 기복이 심한 침식부정합면을 형성하게 된다. 후제4기 퇴적층에서 이와 유사한 특성을 갖는 타입-I 시퀀스 경계면이 발달한 예는 여러 지역에서 보고 된 바 있다(Tesson *et al.*, 1990; Ericilla *et al.*, 1994; Hernandez-Molina *et al.*, 1994; Saito, 1994).

해침면(TS)은 저해수면계열과 해침계열을 분리시켜 주는 경계면으로 해수면 상승이 시작되는 초기에 형성되는 면을 지시한다(Fig. 4A; Dermarest and Craft, 1987). 즉, 최초의 해침면이라고 할 수 있으며, 해안선이 외해 쪽으로 최대로 후퇴한 시점에 형성된 등시성 경계면(isochronous bounding surface)특성을 가진다(Dermarest and Craft, 1987). 따라서 해침면은 지난 마지막 빙하기동안 해수면 하강으로 후퇴한 고해안선의 위치 및 해수면과 연계된 퇴적작용의 이해를 위해 중요한 단서가 될 수 있다(Demarest and Craft, 1987). 연구지역에서 해침면이 나타나는 지점의 수심이 120–130 m사이의 대륙붕단 지역이다. 따라서 마지막 빙하기동안 해수면이 최소한 이 수준까지 하강했음을 추정할 수 있으며, 기존

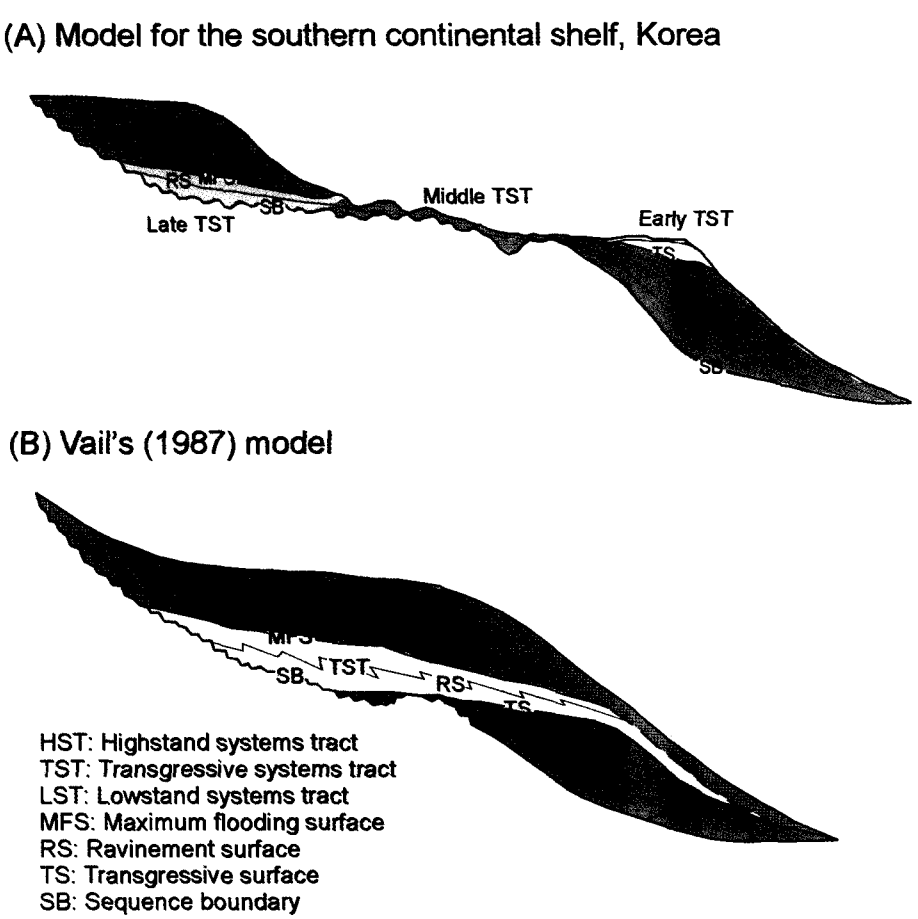

Fig. 10. Sequence stratigraphic model for the southeastern continental shelf, Korea (A) and the Vail's (1987) model (B).

의 연구 결과 밝혀진 -130 m 수심과도 잘 대비된다(민, 1994; Park and Choi, 1986; Park *et al.*, 2000).

해침침식면(RS)은 해침계열 내부에 위치하는 경계면(Figs. 4C and 5A)으로 해침과정 동안 해안선이 육지쪽으로 후퇴하면서 연안침식에 의해 형성되는 침식경계면을 말한다(Demarest and Craft, 1987). 따라서 침식면은 육지쪽으로 향하면서 생성 시기가 젊어지는 부등시성(diachronous) 경계면의 특성을 갖는다. 한국지질자원연구원(2000)은 시추코아 연구를 통해 이러한 해침침식면(RS)은 뚜렷한 침식경계면으로 나타나며 이를 경계로 암상이 현저하게 변화하는 특성을 보고 하였다.

최대해침면(MFS)은 해침계열과 고해수면계열을 분리시키는 경계면으로 해침면과는 대조적으로 해안선이 육지쪽으로 최대로 후퇴한 시점에 형성된다(Figs. 4C and 5A). 즉, 해침이 거의 완료된 시점에서 형성되는 등시성 경계면을 의미한다(Vail, 1987; Posamentier *et al.*, 1988). 하부의 해침침식면(RS)과는 달리 침식의 흔적이 거의 나타나지 않으며 정합면의 형태로 나타난다. 시추시료 분석에 의하면 최대해침면은 하부의 해침 사질 퇴적상에서 상부의 사질니 혹은 니질퇴적상으로 점이적으로 변화하는 특성을 보여준다(한국지질자원연구원, 2000). 이러한 최대해침면은 후배열 층서특성을 갖는 해침퇴적체를 형성하는 조건에서 외해쪽으로 전진하는 형태의 고해수면 퇴적체를 형성하는 환경으로의 변화를 지시하는 경계면의 역할을 한다(Posamentier *et al.*, 1988).

퇴적계열

연구해역에 분포하는 후 제4기 퇴적층은 마지막 빙하기이래로 형성된 저해수면계열, 해침계열, 고해수면계열을 구성한다(Fig. 10A). 시퀀스 경계면 위에 놓이는 층서단위 I은 층서적으로 최하위에 속하며 대륙붕단 및 해곡을 중심으로 하는 외대륙붕에 분포한다. 이는 지난 15,000년 이전인 저해수면 환경하에서 형성된 저해수면계열에 속한다(Fig. 10A). 해침면(TS)과 최대해침면(MFS) 사이에 위치하는 층서단위 II는 지난 15,000년경부터 지난 6,000년 사이에 형성된 해침계열에 속한다. 해침이 시작되면서 저해수면계열 상부에 해침면(TS)이 형성되고 해침초기 동안 대륙붕단을 중심으로 초기해침계열을 구성하는 층서단위 IIa가 형성된 것으로 생각된다. 해침이 진행되면서 해안선이 빠른 속도로 육지쪽으로 후퇴하게 되고 중간대륙붕에 넓게 분포하는 층서단위 IIb가 집적되여 중기 해침계열을 구성하는 것으로 생각된다. 해침 후기에 접어들면서 내대륙붕을 중심으로 분포하는 층서단위 IIc가 퇴적되었으며 이는 후기해침계열을 구성하게 되었다(Fig. 10A). 이와 같이 형성된 해침계열은 전반적으로 얇게 분포하며 육지쪽으로 후퇴하는 후배열(retrograding or backstepping arrangement)층서의 특징으로 발달한다. 최대해침면 상부에 놓이는 층서단위 III은 현생 니질퇴적물로 구성되며 해수면이 현 수준에 도달한 지난 6,000년 이후에 형성된 고해수면퇴적계열에 속한다(Fig. 10A). 이와 같이 형성된 고해수면 계열은 내대륙붕에 제한적으로 분포한다.

천부 시퀀스 층서 모델

상기 분석결과를 종합해 보면 연구해역에 분포하는 후 제4기 퇴적층은 단주기(2–4만년) 해수면 변화에 의해 조절되는 저해수면계열, 해침계열, 고해수면계열로 구성된다(Fig. 10A). 각 퇴적계열은 Vail(1987)에 의해 제시된 모델과 비교해 볼 때 다음과 같은 차이점을 갖고 있다(Figs. 10A and 10B). 첫째로 기존모델의 경우 고해수면 계열이 대륙붕을 지나 대륙사면까지 발달해 있는 반면 연구해역에는 연안 근처의 내대륙붕에 제한적으로 분포한다. 이러한 분포특성은 연구해역의 해황 특성과 관련이 있는 것으로 해석된다. 즉, 연구지역 외해역에는 연구해역을 통과하여 동해로 유입되는 대마난류가 흐르고 있으며 연안쪽에는 해안선을 따라 북쪽으로 흐르는 연안류가 존재하고 있다(Kim *et al.*, 1986). 따라서 그 사이에는 강한 전선이 존재하고 육지로부터 유입되는 퇴적물이 외해쪽으로 확산되지 못하고 연안을 따라 주로 북쪽으로 이동하는 것으로 해석되며, 결과적으로 연안을 따라 길게 대상으로 분포하게 된 것으로 보여 진다. Park *et al.*(1999)에 의한 최근의 연구에서도 고해수면계열을 구성하는 현생 니질퇴적물이 연안류와 조류에 의해 크게 조절되고 있는 것으로 보고된 바 있다.

둘째로 해침계열이 기존모델에 비해 매우 박층으로 분포한다. 이러한 분포 특성은 연구해역의 고 지형특성에 의한 것으로 해석된다. 즉 연구해역의 대부분을 차지하고 있는 중간대륙붕의 경우 수심이 80–120 m 사이로 매우 완만한 경사를 가지고 있다. 따라서 해침 동안 빠른 속도로 해안선이 이동하여 상대적으로 퇴적공간의 급속한 증가를 가져왔으며 결과적으로 퇴적물 공급원을 중심으로 하는 두꺼운 퇴적층의 형성보다는 넓은 지역에 확산되어 박층으로 분포하게 된 것으로 해석된다(Park and Choi, 1986; Yoo and Park, 2000). 이와 유사한 박층의 해침퇴적체에 대하여는 이미 여러 지역에서 보고 된바 있다(Trincardi *et al.*, 1994; Tortora, 1996; Lee and Yoon, 1997).

끝으로 저해수면계열의 경우 외대륙붕의 해곡을 따라 북동-남서방향으로 길게 분포하고 있다. 연구해역은 마지막 빙하기 동안 120 m 이상 해수면이 하강하였으며(Park and Choi, 1986; Park and Yoo, 1992) 해곡을 중심으로 좁은 수로 형태를 유지한 것으로 알려 지고 있으며 강한 고해류가 연구지역을 통과하여 동해로 유입되었을 것으로 추정된다. 결과적으로 이 기간동안에도 해성환경에 놓여 있었던 것으로 생각되는 해곡을 중심으로 퇴적작용이 진행되면서 저해수면계열이 북동-남서방향으로 길게 발달한 것으로 해석된다.

요 약

연구해역 대륙붕에 분포하는 후기 제4기 퇴적층은 지난 마지막 빙하기 이래로 형성된 3개의 층서단위(하부로부터 I, II, III)로 구분된다. 이들 퇴적단위는 마지막 빙하기이후의 해수면변화에 의해 조절되는 저해수면계열, 해침계열, 고해수면계열을 구성한다. 층서적으로 최하위에 속하는 층서단위 I은 사질니 혹은 니질사 퇴적물로 구성되며 해곡을 중심으로 하는 외대륙붕에 분포한다. 이러한 층서단위 I은 해수면이 120 m 이상 하강했던 지난 마지막 빙하기 동안 형성된 저해수면계열에 속하는 것으로 해석된다. 층서단위 II는 주로 사질 퇴적물로 구성되며 연구해역 전반에 걸쳐 넓게 분포하지만 대체로 박층으로 발달한다. 이러한 층서단위 II는 후빙기 해침동안(15,000–6,000년) 형성된 해침계열에 속한다. 이러한 해침계열은 퇴적시기 및 분포특징에 따라 3개의 층서단위로 세분된다. 즉, 해침 초기에 퇴적되었으며 대륙붕단에 분포하는 초기해침계열(층서단위 IIa), 중간대륙붕에 넓게 분포하는 중기해침계열(층서단위 IIb), 그리고 내대륙붕에 분포하는 후기해침계열(층서단위 IIc)등이 있으며 이들 퇴적단위는 육지쪽으로 후퇴하는 후배열 층서 특성을 가진다. 층서단위 III은 암상변화가 거의 없는 균질한 니질퇴적물로 구성되며 내대륙붕에 제한적으로 분포한다. 이러한 층서단위 III은 해침이 완료된 지난 6,000년 이후의 고해수면 환경하에서 퇴적된 고해수면계열에 해당된다.

연구해역의 고해수면계열은 내대륙붕에 제한적으로 분포하는 것은 퇴적물의 외해유출을 제한하는 북동방향의 연안류와 대마난류의 영향에 의한 것으로 해석된다. 둘째로 해침계열은 박층으로 분포하는데 이는 완만한 경사를 갖는 연구지역의 고 지형특성에 의한 결과로 해석된다. 끝으로 외대륙붕의 해곡지역에 제한적으로 분포하는 저해수면계열의 경우 연구해역이 지난 마지막 빙하기 동안 좁은 수로 형태로 존재하였으며 동해로 유입되는 고해류의 영향으로 북동-남서 방향으로 길게 발달한 것으로 해석된다.

감사의 글

본 연구는 교육부 학술연구조성비와 국방과학연구소의 지원에 의해 수행되었다. 또한 본 연구에 사용된 자료의 일부는 산업자원부 지원과제에 의해 취득되었다. 본 연구의 일부는 2000년도 군산대 교수장기해외연수사업의 일환으로 마무리되었다. 자료 분석에 도움을 준 충남대학교 해양학과 한혁수 군에게 고마움을 전합니다. 본 논문의 심사를 맡아주시고 유익한 조언을 주신 강효진 교수(한국해양대학교), 정갑식 박사(한국해양연구원), 이광훈 교수(부경대학교)께 감사드립니다.

참고문헌

민건홍, 1994. 한반도 남동대륙붕의 플라이오세-현세 퇴적층의 탄성파 층서 및 퇴적역사. 서울대 박사학위논문. 196 pp.

한국지질자원연구원, 2000. 해저 제4기 지층 및 퇴적환경 연구. KR-00(B)-02, 665 pp.

Boyd, R., J. Suter and S. Penland, 1989. Relation of sequence stratigraphy to modern sedimentary environments. *Geology,* **17**: 926–929.

Demarest, D.J. and J.C. Craft, 1987. Stratigraphic record of Quaternary sea levels: implications for more ancient strata. In: Nummedal, D., Pilkey, O.H., Howard, J.D. (Eds.), Sea-level Fluctuation and Costal Evolution. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.*, **41**: 223–239.

Ericilla, G., B. Alonso, and J. Baraza, 1994. Post-Calabrian sequence stratigraphy of the northwestern Alboran Sea (southwestern Mediterran Sea). *Mar. Geol.,* **120**: 249–265.

Hernandez-Molina, F.J., L. Somoza, J. Rey, and L. Pomar, 1994. Late Pleistocene-Holocene sediments on the Spanish continental shelves: Model for very high resolution sequence stratigraphy. *Mar. Geol.,* **120**: 129–174.

Lee, H.J. and S.H. Yoon, 1997. Development of stratigraphy and sediment distribution in the northeastern Yellow Sea during Holocene sea-level rise. *J. Sediment. Res.*, **67:** 341–349.

Kim, M.S., K.S., Chu, and O.S. Kim, 1986. Investigation of some influence of the Nakdong River water on marine environment in the estuarine area using Landsat imagery. *Report of Korea Ministry of Science and Technology*, 93–147 p.

Korea Hydrographic Office, 1982. Marine Environmental Atlas of Korea Waters. 38 p.

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

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

Park, S.C., D.G. Yoo, K.W. Lee, and H.H. Lee, 1999. Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea (Korea Strait). *Cont. Shelf Res.*, **19**: 589–608.

Park, S.C., D.G. Yoo, C.W. Lee, and E.L. Lee, 2000. Last glacial sea-level changes and paleogeography of the Korea (Tsushima) Strait. *Geo-Mar. Lett.*, **20**: 64–71.

Posanemtier, H.W. and G.P. Allen, 1993. Variability of the sequence stratigraphic model: Effects of local basin factors. Sedimentary Geology, 86: 91–109.

Posamentier, H.W., M.T. Jervey, and P.R. Vail, 1988. Eustatic controls on clastic deposition I - Conceptual framework. In Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C., (Eds.), Sea-level Changes: An Integrated Approach. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.*, **42**: 109–124.

Saito, Y., 1994. Shelf sequence and characteristic bounding surfaces in a wave-dominated setting: Latest Pleistocene-Holocene examples from Northeast Japan. *Mar. Geol.*, **120**: 105–127.

Suk, B.C., 1989. Quaternary sedimentation processes, structures and sea level changes in the East China Sea, the Yellow Sea and the Korea-Tsushima Strait Regions. PhD Thesis, Univ. Tokyo, Japan. 246 pp.

Tesson, M., B. Gensous, G.P. Allen, and C.H. Ravenne, 1990. Late Quaternary deltaic lowstand wedges on the Rhone Continental Shelf, France. *Mar. Geol.*, **91**: 325–332.

Tortora, P., 1996. Depositional and erosional coastal processes during the last postglacial sea-level rise: An example from the central Tyrrhean continental shelf (Italy). *J. Sediment. Res.*, **66**: 391–405.

Trincardi, F., A. Correggiari, and M. Roveri, 1994. Late Quaternary transgressive erosion and deposition in modern epicontinental shelf: the Adriatic Semienclosed Basin. *Geo-Marine Letters*, **14**: 41–51.

Vail, P.R., R.M. Mitchum, and S. Thompson, III., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap, in Payton, C.W., (Ed.), Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, **26**: 63–81.

Vail, P.R., 1987. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 1: seismic stratigraphy interpretation procedure, in Bally, A.W., ed., Atlas of Seismic Stratigraphy. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Stud. Geol.*, **27**: 1–10.

Yoo, D.G., C.W. Lee, S.P. Kim, J.H. Jin, J.K. Kim, and H.C. Han, 2002. Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf. *Mar. Geol.*, **187**: 313–328.

Yoo, D.G. and S.C. Park, 1997. Late Quaternary lowstand wedges on the shelf margin and trough region of the Korea Strait. *Sedi. Geol.*, **109**: 121–133.

Yoo, D.G. and S.C. Park, 2000. High-resolution seismic study as a tool for sequence stratigraphic evidence of high-frequency sea-level changes: Latest Pleistocene-Holocene example from the Korea Strait. *J. Sediment. Res.*, **70**: 210–223.

Yoo, D.G., S.C. Park, W.C. Shin, and W.S. Kim, 1996. Near-surface seismic facies at the Korea Strait shelf margin and trough region. *Geo-Mar. Lett.*, **16**: 49–56.

Yoo, D.G., S.C. Park, D. Sunwoo, and J.H. Oh, 2003. Evolution and chronology of late Pleistocene shelf-perched lowstand wedges in the Korea Strait. *J. Asian Earth Sci.*, **22**: 29–39.

2003년 5월 26일 원고접수
2003년 9월 9일 수정본 채택
담당편집위원: 강효진