

낙동강 삼각주의 층서 및 퇴적역사

유동근^{1,*} · 이광수¹ · 강년건¹ · 이보연¹ · 공기수¹ · 김길영¹ · 장세원¹ · 이상현² · 김진철²

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부

²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

요 약

고해상 탄성파자료 및 퇴적물 분석결과에 의하면 연구해역에 분포하는 낙동강 삼각주 퇴적층은 마지막 빙하기 이후 형성된 네 개의 퇴적단위(하성퇴적층, 하구퇴적층, 해침사질퇴적층, 삼각주퇴적층)로 구성된다. 기반암 상부에 놓이는 퇴적단위-IV는 역을 포함하는 사질퇴적물로 구성되며 지난 마지막 빙하기 동안 하성환경에서 퇴적된 저해수면퇴적계열에 해당된다. 퇴적단위-III은 사질니 혹은 니질사 퇴적상의 특징을 보여주며 홀로세 해침후기 하구환경 하에서 퇴적된 해침퇴적계열에 속한다. 퇴적단위-II는 분급이 양호한 박층의 사질퇴적물로 구성되며 홀로세 해침동안 연안환경에서 퇴적된 해침퇴적계열에 속한다. 층서적으로 최상부에 속하는 퇴적단위-I은 홀로세 해침이 완료된 이후에 형성된 삼각주 퇴적층으로 고해수면퇴적계열에 해당된다. 이러한 삼각주 퇴적층은 사질로 구성된 삼각주 평원, 니질퇴적물로 구성된 삼각주 전면부, 그리고 점토질로 구성된 전삼각주로 구성된다.

주요어: 해수면 변동, 낙동강 삼각주, 층서 및 퇴적역사

Dong-Geun Yoo, Gwang-Soo Lee, Nyeon-Keon Kang, Bo-Yeon Yi, Gee-Soo Kong, Gil-Young Kim, Se-Won Chang, Sangheon Yi and Jin Cheul Kim, 2017, Stratigraphy and depositional history of Nakdong River Delta. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 5, p. 619-630

ABSTRACT: Analysis of high-resolution seismic profiles and sediment core data reveals that the Nakdong River Delta consists of four sedimentary units (fluvial deposits, estuarine deposits, transgressive sand deposits, delta deposits) formed since the last glacial period. Unit-IV underlying the basement rock consists of gravelly sand and were regarded as lowstand systems tract deposited under fluvial environments during the last glacial period. Unit-III consisting of sandy mud or muddy sand belongs to transgressive systems tract formed under the estuarine condition during the last transgressive stage. Unit-II consists of well-sorted sand and formed in coastal environments during the transgression. The uppermost unit-I belongs to the Nakdong River Delta deposited after the recent highstand of sea level. Delta deposits include delta plain, delta front, and prodelta.

Key words: sea-level change, Nakdong River Delta, stratigraphy and depositional history

(Dong-Geun Yoo, Gwang-Soo Lee, Nyeon-Keon Kang, Bo-Yeon Yi, Gee-Soo Kong, Gil-Young Kim and Se-Won Chang, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Sangheon Yi and Jin Cheul Kim, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

삼각주(delta)는 하천이 바다나 호수에 유입되면서 하구를 중심으로 운반하던 퇴적물을 집적시키면서 발달하는 퇴적지형을 말한다. 대부분의 삼각주는 해수면 하에서 퇴적대지 형태의 해성층을 만들면서

외해쪽으로 성장해나간다. 따라서 해수면 위에 노출된 삼각주는 전체 삼각주의 일부에 해당되며 해수면 밑으로 연장되어 발달한다. 한반도 남동부의 낙동강 하구 일대에 발달해 있는 삼각주는 양산천이 낙동강 본류에 합류하는 물금 부근에서 낙동강 하구를 향해 넓게 펼쳐지는 한국 최대 규모의 삼각주로서 동서쪽

* Corresponding author: +82-42-868-3324, E-mail: dgyoo@kigam.re.kr

으로 산맥에 의해 둘러싸인 하나의 분지를 이루고 있다(그림 1, 2; Oh, 1994; Ryu *et al.*, 2005). 지형도상에서의 계측에 의하면 낙동강 삼각주는 약 6-10 km의 폭과 20 km 이상의 길이를 갖는 광활한 협곡지에 위치한 하구형 삼각주(estuarine delta)에 속한다(Kwon, 1973; Oh, 1994). 육상에 노출된 삼각주의 면적은 약 136 km²이고 해수면 하에 위치하는 간석지가 약 37 km²에 달한다(Kwon, 1973). 상기 특성을 갖는 낙동강 삼각주는 지난 홀로세 동안 낙동강으로부터 유입된 퇴적물이 집적되어 최대 60 m 이상의 두께로 발달한다. 해양환경과 접하는 해안선 부근에는 다양한 규모와 형태를 갖는 사주가 발달하며 사주와 하중도 사이에는 넓은 간석지가 분포하고 있다(Oh, 1992; Ryu *et al.*, 2005; Yoo *et al.*, 2014a).

낙동강 삼각주에 대한 기존 연구는 주로 삼각주의 지형변화 및 형성과정(Kwon, 1973; Oh, 1994)에 대한 연구와 하류쪽에 발달하는 사주(Ban, 1986)를 중심으로 수행되었다. Kim and Lee (1980)는 낙동강 하구지역의 퇴적물 운반 및 퇴적작용에 관한 연구를 수행하였으며, Kim and Ha (2001)는 낙동강 하구 주변 해역에서 표층 퇴적물 시료를 이용한 표층 퇴적상 특성 및 퇴적환경에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Kim (2005)은 1987년 하구둑이 완공된 이후의

삼각주 지형변화를 고찰하였으며, Ryu *et al.* (2005)은 삼각주 평원에서 취득한 시추코어 분석을 통하여 낙동강 삼각주의 제4기 고환경 변화에 대한 연구를 수행하였다. 그들의 연구에 의하면 낙동강 하구역은 지난 마지막 빙하기 이후 홀로세 해침 과정에서 담수의 영향을 받는 하구 조간대 및 내대륙붕 환경하에서 퇴적작용이 진행 되었으며 약 6,000년 전을 전후로 해수면이 안정화 되면서 낙동강 삼각주가 발달하기 시작한 것으로 해석하였다. 최근에 보고된 OSL (Optically stimulated luminescence) 연대측정 결과에서도 이 시기를 전후로 낙동강 삼각주를 구성하는 퇴적층이 발달하기 시작한 것으로 알려졌다(Kim *et al.*, 2015). 해수면 하에 위치하는 삼각주 전면부(delta front)와 전삼각주(prodelta)지역에서는 고해상 탄성과 자료와 퇴적물 분석에 의한 이들 퇴적층의 형성과정과 퇴적작용에 대한 연구가 수행 되었다(Kim and Lee, 1980; Jang, 1990; Park *et al.*, 1990; Lee and Chung, 2000; Kim and Ha, 2001; Yoo *et al.*, 2004, 2014a, 2016; Lee *et al.*, 2005). 상기과 같은 다양한 연구가 수행되었지만 아직까지 낙동강 하구곡을 따라 육상으로부터 해양으로 발달해 있는 삼각

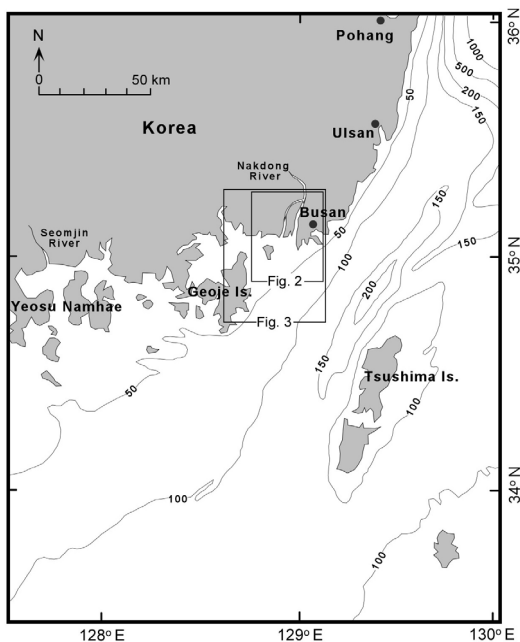


Fig. 1. Map showing the study area. Contours in meters.

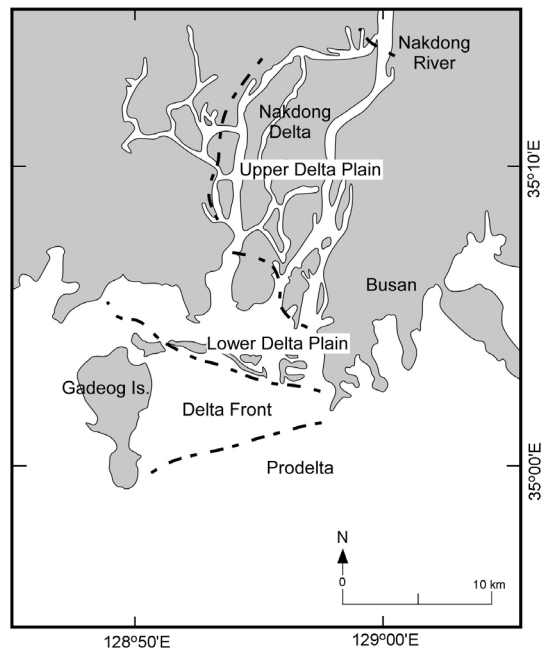


Fig. 2. Physiography of the Nakdong River delta consisting of delta plain, delta front and prodelta (modified from Ryu *et al.*, 2005).

주를 대상으로 하는 층서 및 퇴적역사에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 삼각주 평원에서 취득된 시추시료와 삼각주 전면부 및 전 삼각주지역에서 취득된 고해상 탄성과 자료 및 주상시료 분석 결과를 토대로 낙동강 삼각주를 구성하는 퇴적층의 층서를 구분하고 삼각주가 발달한 과정에 대하여 알아보고자 한다.

2. 연구지역

낙동강 삼각주가 위치하고 있는 한반도 남동부 해안은 진해만을 비롯한 다수의 만과 섬들이 발달된 전형적인 리아스식 해안에 접해 있으며 국지적으로 니질 조간대와 소규모 해빈이 분포하고 있다. 인근 육상의 지질은 대체로 중생대 백악기에 형성된 기반암으로 경상누층군으로 대표되며, 낙동강 인근에는 백악기 화성암도 산출된다(KIGAM, 2000). 연구 지역의 해저 지형은 비교적 완만한 경사 지형을 보이면서 남동쪽으로 향하면서 수심이 점차 증가하며, 퇴적물 분

석에 의하면 연구해역은 니질퇴적물이 우세하게 분포하고 있다(Jang, 1990; Lee and Chung, 2000; Lee *et al.*, 2005). 연구지역의 연안에는 조류와 연안류가 우세한 반면 외해쪽은 대마난류의 영향을 주로 받고 있다. 연구 지역은 중조차 환경으로 부산지역에서의 조차는 1.2 m 정도이며, 동에서 서로 갈수록 조차가 증가한다. 조류는 반일주조가 우세하며 북동-남서 방향으로 흐른다(Korea Hydrographic Office, 1982). 외해쪽에는 대마난류가 연구해역을 통과하여 동해로 유입되며 표층유속은 30-90 cm/sec 정도의 범위를 가지며 높은 수온과 염분의 수괴를 동해로 운반하는 역할을 하고 있다(Kim *et al.*, 1986).

낙동강은 전장이 527 km로서 유역면적이 23,860 km²에 달한다(Kim and Lee, 1980). 낙동강의 연간 담수 유출량은 630억 톤에 이르며 그중 약 60-70% 이상이 홍수기인 7, 8월에 집중된다(Kim *et al.*, 1986). 또한 연간 460만 톤에 달하는 세립 퇴적물이 부유 상태로 연구지역에 유입되고 있으며 이러한 쇄설성 퇴적물중 조립한 퇴적물의 대부분은 강하구를 중심으로 퇴적되며 다양한 형태의 모래사장을 포함하는 넓은 삼각주를 형성하고 있다(Ban, 1986; Kim *et al.*, 1986). 이러한 낙동강 삼각주는 지형과 수리학적 특성에 따라 하중도(intertributary island)와 자연제방으로 구성된 상부 삼각주평원(upper delta plain), 사주, 조간대 및 해안평야를 포함하는 하부 삼각주 평원(lower delta plain), 그리고 삼각주의 배후 저습지에 해당하는 삼각주 주변분지(marginal basin)로 대별된다(그림 2; Kwon, 1973; Ryu, 2003). 하부 삼각주 평원 외해쪽으로는 삼각주 전면부와 전삼각주가 발달해 있다(Park *et al.*, 1990; Lee and Chung, 2000; Lee *et al.*, 2005; Yoo *et al.*, 2014a).

3. 재료 및 방법

본 연구를 위해 탄성과 탐사자료와 시추코어 시료를 활용하였다(그림 3). 삼각주 평원 및 전면부의 퇴적학적 특성은 기존의 시추자료를 이용하였다(Ban, 1986; Oh, 1992, 1994; Lee and Chung, 2000; Ryu, 2003; Ryu *et al.*, 2005). 해수면 하에 위치하는 삼각주 전면부와 전 삼각주지역에서는 고해상 탄성과 탐사자료(에어진, Chirp)가 취득되었다(그림 3). 탄성과 탐사자료와 함께 피스톤코어 퇴적물을 채취하였

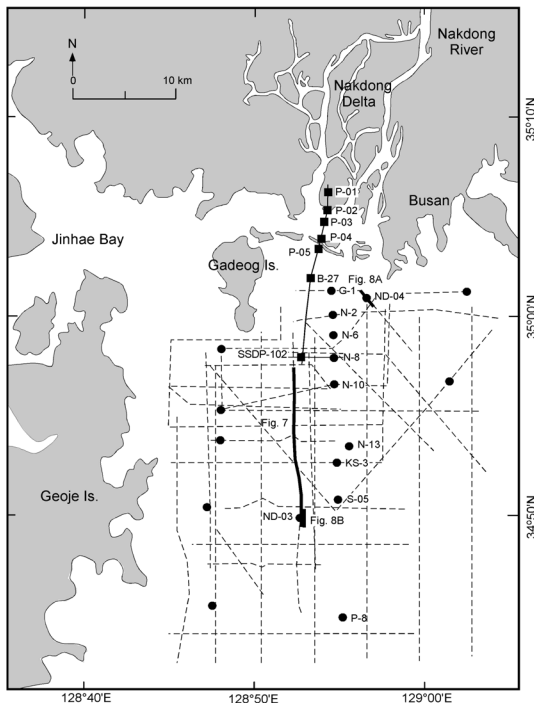


Fig. 3. Tracklines of high-resolution (3.5 kHz and air-gun) seismic profiles and locations of borehole (filled tetragon) with 17 piston cores (filled circles). Heavy lines denote selected profiles shown in Figs. 7 to 8.

다. 에어건 탄성과 자료를 위해 30 in³의 음원을 사용하였으며 8-채널의 수진기를 사용하였다. 3.5 kHz 지층탐사자료는 미국 O.R.E.사와 Data Sonic의 정밀저층음파 탐사기(Subbottom Profiling System)로서 주파수가 2-7 kHz의 음원을 사용함에 따라 분해력이 매우 양호하여 연구지역과 같이 세립퇴적물의 정밀층서 및 음향특성 연구에 적합하다.

고해상 탄성과 탐사자료와 직접 비교를 위하여 낙동강 하구 외해역에서 32 m에 달하는 심부시추코아(SSDP-102)를 획득하였다(KIGAM, 2000). 시추지점은 낙동강 하구 외해역 수심 40 m 지점이며 기 취득된 고해상 탄성과탐사자료를 근거로 선정하였다(그림 3). 시추작업은 중국 상해 석유물리탐사공사 소속의 시추선박(Kan 407호)을 이용하였다. 시추코아와 더불어 1-6 m에 달하는 피스톤코어를 취득하였다. 취득된 코어는 절개 후 육안관찰과 사진촬영을 하였다. 육안 판독이 어려운 퇴적구조 분석을 위하여 30 cm × 5 cm × 1 cm의 편형시료를 채취하여 X-선 촬영을 하였다. 촬영조건은 모든 시료에 대하여 70 kVp, 3 mA, 40 sec를 적용하였으며, 필름 현상 후 형태의 왜곡과 명암 변화 방지를 위하여 현

상된 필름은 흑백 인화지에 밀착하여 1:1 비율로 인화하였다. 퇴적물 조직 표준치(textural parameters)와 유형(sediment types)을 알기 위하여 육안 기재결과를 참고하여 필요 구간에서 부시료를 채취한 후, 표준 입도분석(체질과 피펫팅)을 실시하였다. 조직 표준치는 그래픽 방법을 적용하여 구하였으며, 퇴적물 유형은 Folk의 삼각 분류법(Folk, 1954)으로 결정하였다.

입도분석과 함께 약 5 g의 부시료를 채취하여 탄산염(CaCO₃), 총유기탄소(TOC, total organic carbon), C/N비등 유기지화학 분석을 실시하였으며 유공충분석, 유기물의 탄소 동위원소 분석도 실시하였다. 총 탄소(TC, total carbon)와 총 질소(TN, total nitrogen) 함량은 약 2-3 mg의 분말 시료를 취하여 CHN-Analyzer (Leco CHN-900)로 분석하였다(KIGAM, 2000). 총 유기탄소(TOC, total organic carbon)와 탄산염(CaCO₃) 함량을 측정하기 위하여 균질한 분말 퇴적물 시료(약 2 g)에 10% 염산을 첨가하여 탄산염을 제거하여 증류수로 pH 5정도가 될 때까지 희석시켜 오븐에 24시간 건조시켰다. 건조된 시료는 다시 균질하게 분말로 만든 후 약 2-3 mg의 시료를 취하여 무기탄소(IC, inorganic carbon) 함량을 측정하였다. 산소와 탄소 안정동위원소 분석을 위해 시추코아의 퇴적층에 우세하게 산출되는 저서성 유공충인 *E. advenum*과 *A. beccarii*를 동정하였으

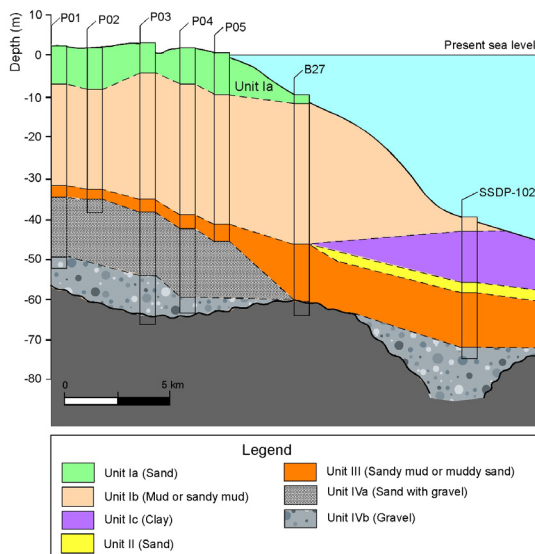


Fig. 4. Lithologic description of boreholes (Modified from Ban, 1986; Oh, 1992, 1994; Lee and Chung, 2000; KIGAM, 2000; Ryu, 2003, Ryu *et al.*, 2005). See Fig 3 for locations of cores. The sedimentary sequence above the acoustic basement consists of four sediment units (unit IV, III, II, and I in ascending order).

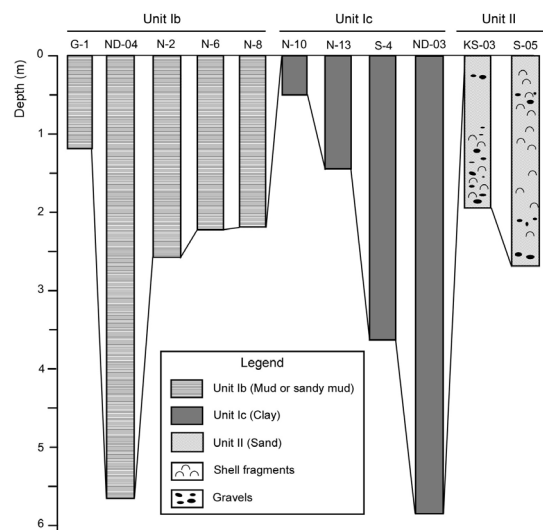


Fig. 5. Lithology of piston cores. See Fig 3 for locations of cores.

며, 일정한 동위원소 값을 얻기 위하여 125-250 μm 크기의 유공층(약 60-80 μg)을 선별하여 추출하였다(KIGAM, 2000). 퇴적층의 연대 및 층서확립을 위하여 AMS ^{14}C 연대측정이 실시되었다. 연대측정 시료 채취시 유공층과 유기물은 가급적 생물 교란되지 않은 저 에너지 환경으로 해석되는 구간에서 채취하였고, 패각은 원형이 잘 보존되고 이동되지 않았을 것으로 추정되는 구간에서 채취하였다. 연대측정 시료를 채취할 때 유공층과 유기물은 가급적 생물 교란되지 않은 구간에서 채취하였고 연대측정은 뉴질랜드 Institute of Geological and Nuclear Sciences (IGNS)와 독일 Kiel 대학교에서 수행하였다.

4. 연구결과

고해상 탄성파 자료와 시추퇴적물 분석 결과에 의하면 낙동강 하구역에 분포하는 천부퇴적층은 기반암 상부에 놓이는 4개의 퇴적단위(하부로부터 IV, III, II, I)로 구성된다(그림 4, 5).

4.1 퇴적단위 IV

기반암 위에 직접 놓이는 퇴적단위 IV는 낙동강 하구역에 분포하는 퇴적단위 중 최하위에 속한다(그림 4). 시추자료에 의하면 본 퇴적단위는 역 퇴적상

(unit IVb) 및 역을 포함하는 사질 퇴적상(unit IVa)으로 구성된다. 무질서한 형태의 역으로 구성된 퇴적상은 기반암 상부에 직접 놓이며 역을 포함하는 사질 퇴적상은 그 위에 놓인다(그림 4). 즉, 하부의 역이 우세한 퇴적상에서 상부로 향하면서 역의 함량이 감소하고 사질함량이 증가하는 퇴적상으로 변화한다(KIGAM, 2000; Ryu, 2003). 이러한 퇴적상 변화는 수심 약 40 m 지점의 내대륙붕에서 취득한 SSDP-102 시추자료에서도 잘 보여주고 있으며, 삼각주평원의 시추코어 분석결과에서도 유사한 경향을 갖는 것으로 보고되었다(Oh, 1992; KIGAM, 2000; Ryu *et al.*, 2005). 퇴적단위 IV에 포함된 역의 장경은 수 mm 미만의 크기에서 10 cm 이상의 크기에 달하는 것까지 매우 다양하다(Oh, 1992; KIGAM, 2000). 원마도는 대체로 좋으며 원형도는 불량한 편이다. 상기 특징을 갖는 퇴적단위 IV는 해수면 하에 위치하는 시추코어(SSDP-102)에도 분포하지만 육지쪽으로 향하면서 하구곡을 채워주는 형태로 발달해 있다(그림 4, 6). 대부분의 시추코어가 기반암까지 투과되지 못해 정확한 두께를 알 수 없으나 본 퇴적단위는 삼각주 평원 부근에서는 10-15 m의 규모로 분포하며 최대 20 m 이상의 두께에 달한다. KIGAM (2000)의 보고에 의하면 본 퇴적단위를 구성하는 역의 원마도는 양호한 편이지만 구형도는 낮은 것으로 알려졌다.

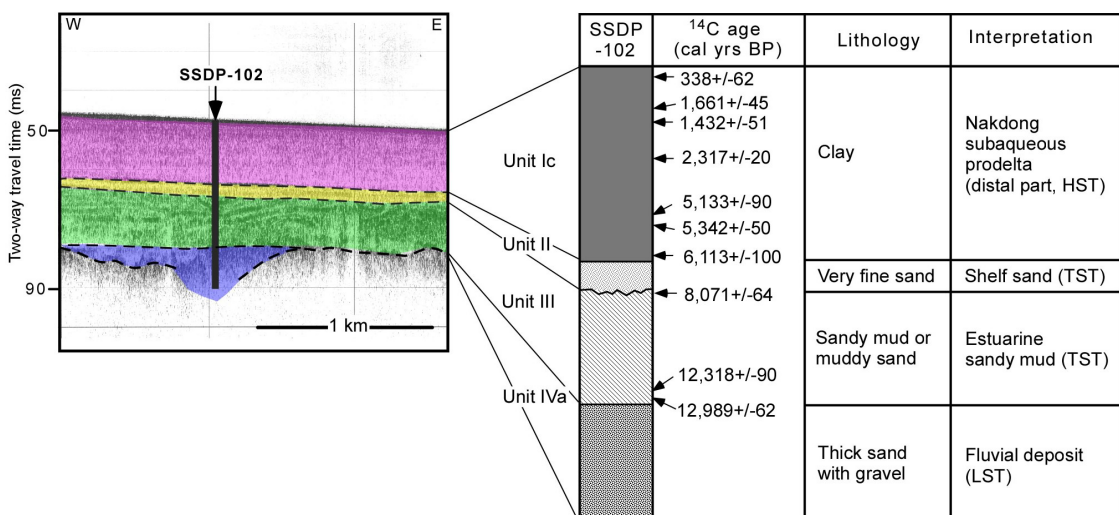


Fig. 6. Selected borehole collected from the prodelta (For location, see Fig. 3) across the seismic profile. Based on borehole data, the sedimentary sequence above the acoustic basement contains four distinctive sediment units with ten corrected radiocarbon ages.

구성암석은 화산암류(응회암, 조면암, 반암류), 화강암, 그리고 사암과 적색 셰일을 포함하는 퇴적암류로 보고되었다(KIGAM, 2000).

4.2 퇴적단위 III

퇴적단위 III은 갈회색(brownish gray, 5YR 4/1)을 띠는 사질니 혹은 니질사 퇴적상으로 구성된다(그림 6; KIGAM, 2000; Nam *et al.*, 2003; Yoo *et al.*, 2014a). 평균입도는 5.6-7.3 ϕ 값을 보이며 분급도는 2.5-3.5 ϕ 로 매우 불량하다. 니질 함량은 30-90%로 변화폭이 크다. 수직적인 퇴적상 변화 역시 다양하며 평행층리, 사층리 퇴적구조를 포함한다. 특히, 사질니 또는 니질사 퇴적물에서는 렌즈상(lenticular) 엽층리, 우상(flaser) 엽층리, 파상(wavy) 엽층리, 교호엽층리 구조가 우세하게 나타나며, 경사엽층리 구조와 생흔혈(burrows)이 부분적으로 발달해 있다(KIGAM, 2000; Nam *et al.*, 2003). 일부 구간에서는 패각편과 목편, 이토역(mud ball)이 포함 되어있다. 본 퇴적단위 하부에 위치한 이탄질 엽리를 이용한 탄소동위원소 연대측정 결과에 의하면 12,989+/-62

yr BP, 12,318+/-90 yr BP로 밝혀졌다(그림 6). 상기 특성을 갖는 퇴적단위 III은 SSDP-102와 B-27이 위치한 해수면하 부근에서 10-15 m 두께로 분포하며 육지쪽으로 향하면서 점차 얇아지는 경향을 보인다(그림 4).

고해상도 탄성과 자료에 의하면 본 퇴적단위는 대부분의 경우 불규칙한 음향기반 상부에 위치하며 부분적으로 퇴적단위 IV를 피복한다(그림 4, 7). 퇴적단위 내부반사면은 투명 혹은 반투명 음향상과 연속성이 불량한 약한 층리 음향상을 보여주고 있으며 이와 같은 특징은 본 퇴적단위의 구성 퇴적물이 사질니 혹은 니질사인 결과와 잘 대비된다(그림 7). 퇴적단위 내부에는 부분적으로 발산(divergent) 혹은 전진구축 음향상 특징을 보여준다. 간혹 층 내에는 하부 퇴적단위의 내부구조를 차폐시키는 음향혼탁층이 나타나기도 한다.

4.3 퇴적단위 II

퇴적단위 II는 사질퇴적물이 우세하며, 퇴적물의 색상은 대체로 암녹회색(5GY 4/1)을 띠고 있다. 분

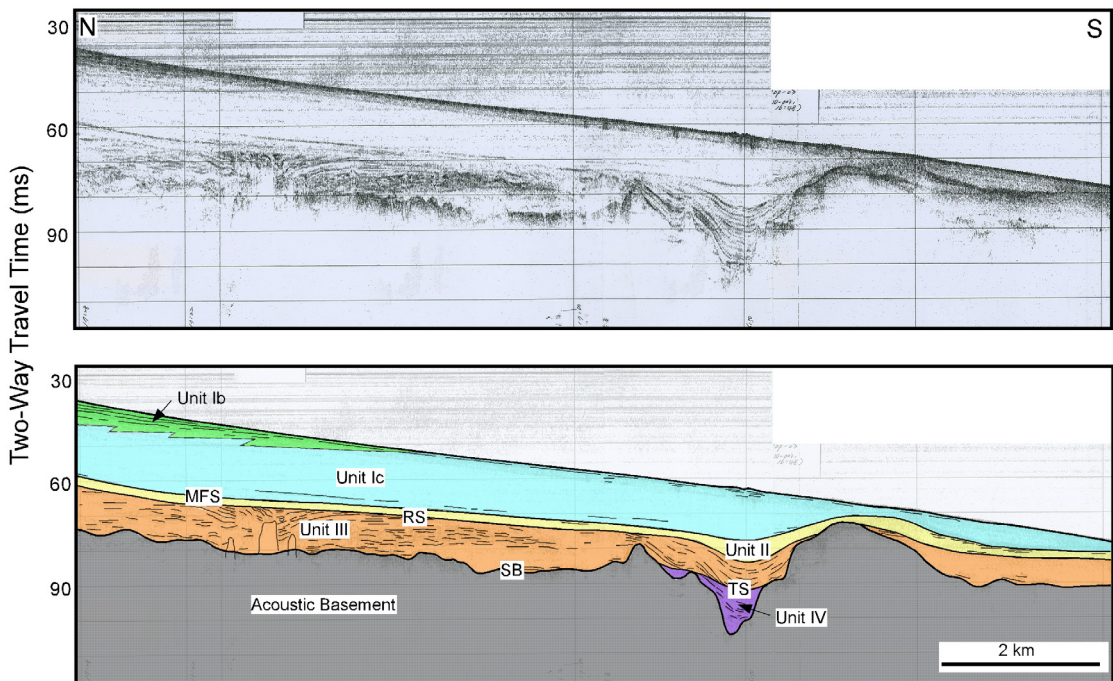


Fig. 7. High-resolution (3.5 kHz) seismic profile and interpretation showing four seismic units above the acoustic basement. See Fig 3 for locations of cores. MFS; maximum flooding surface, RS; ravinement surface, TS; transgressive surface, SB; sequence boundary.

급이 양호한 중립 내지 세립 사 퇴적상 특성을 보이며 다량의 패각편을 함유하고 있다. 사질퇴적물 함량이 최대 70% 이상에 달하며 상향 세립화 하는 층리구조를 갖는다(KIGAM, 2000). 부분적으로 이토역(mud ball or clast)을 포함한다. 퇴적단위 II의 하부 경계면은 침식면의 특성을 보여주며 이는 탄성과 단면 상에서 보여주는 반사면의 특성과 잘 일치한다(그림 6). 본 퇴적단위의 하부에서 얻어진 AMS ^{14}C 연대측정 값은 $8,426 \pm 58$ yr BP로 나타났다(그림 6).

퇴적단위 II는 탄성과 단면상에서 음향학적으로 낮은 진폭의 허모키(hummocky) 음향상과 반투명 음향상을 보여준다(그림 7). 이러한 퇴적단위 II는 대부분의 경우 수 m 미만의 박층으로 발달한다(그림 4). 본 퇴적단위는 판상의 외부형태를 가지며 내대륙붕에서는 퇴적단위 I에 의해 피복되지만 외해쪽으로 향하면서 대부분 해역에서 해저면에 노출된 상태로 분포한다.

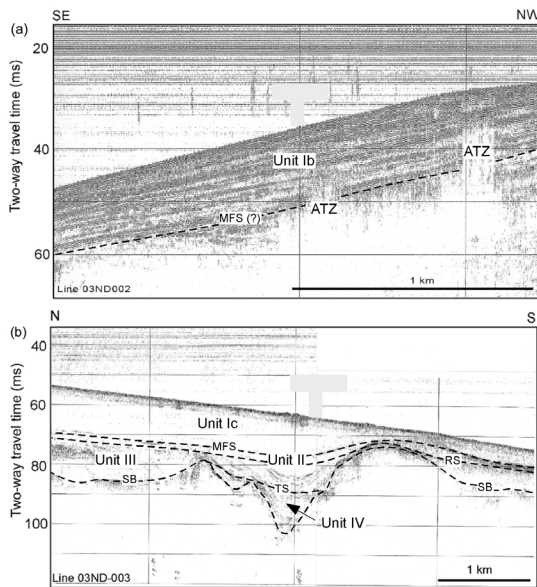


Fig. 8. High-resolution (3.5 kHz) seismic profiles showing unit I characterized by two different seismic facies (for location, see Fig. 3). Note that (a) unit Ib acoustically exhibited well-stratified seaward prograding reflection patterns in the landward portion off the river mouth, whereas (b) unit Ic was characterized by transparent subbottoms offshore (Modified from Yoo *et al.*, 2014a). MFS; maximum flooding surface, RS; ravinement surface, TS; transgressive surface, SB; sequence boundary, ATZ; acoustically turbid zone.

4.4 퇴적단위 I

퇴적단위 I은 연구지역에 분포하는 퇴적단위 중 최상부층에 해당되며 하구역에 발달하는 퇴적층의 대부분을 구성하고 있다(그림 4). 본 퇴적단위는 육지쪽의 경우 25 ~ 30 m의 두께로 분포하는 반면 외해쪽을 향하면서 두께가 급격히 감소하여 수심 70 ~ 80 m 지점에서 하부퇴적단위에 수렴하는 켜기형태로 발달해 있다(그림 4, 7). 시추퇴적물 자료와 고해상 탄성과 자료에 의하면 본 퇴적단위는 3개의 퇴적상(하부로부터 Ic, Ib, Ia)으로 세분된다(그림 4, 5). 퇴적상 Ic는 퇴적단위 I의 최하부를 구성하며 점토질 퇴적물이 우세하다. 탄성과단면 상에서 특징 층리를 거의 보여주지 않는 투명음향상이 대부분을 차지하며(그림 8), 이와 같은 특징은 본 퇴적상이 사질 입자를 거의 포함하지 않는 세립퇴적물로 구성되어 있는 결과와도 잘 일치한다. 본 퇴적상 분포해역에서 취득한 시추코어의 분석결과에서도 입도 변화가 거의 없는 니질 퇴적물로만 이루어진 것으로 보고되었다(KIGAM, 2000).

퇴적상 Ib는 퇴적단위 I의 대부분을 구성하며 20-25 m 두께로 두껍게 발달한다(그림 4). 퇴적물 자료에 의하면 퇴적상 Ib는 니질퇴적물이 우세하며 부분적으로 사질니 퇴적물을 포함한다(Ryu *et al.*, 2005). 본 퇴적상은 외해쪽으로 향하면서 두께가 급격히 감소하여 수심 약 20 ~ 30 m 해역에서 점이적으로 퇴적상 Ic에 수렴된다.

퇴적상 Ia는 퇴적단위 I의 최상부를 구성하며 대부분 지역에서 10 m 정도의 두께로 분포한다. 퇴적물 자료에 의하면 주로 사질퇴적물 혹은 부분적으로 사질니 퇴적상으로 구성되며 산화작용의 흔적과 다량의 식물편을 포함하고 있다(그림 4; Ryu *et al.*, 2005). 상기 특징을 갖는 퇴적상 Ia는 외해쪽으로 향하면서 두께가 감소하여 수심 약 10 m 해역에서 퇴적상 Ib에 수렴된다.

5. 토 의

5.1 퇴적층서 발달사

기존 연구에 의하면 대한해협 대륙붕은 지난 마지막 빙하기동안 해수면이 현재 대비 약 120-130 m 하강한 것으로 알려지고 있다(Suk, 1989; Min, 1994; Park *et al.*, 2000). 이는 황해 및 동지나해에서 보고

된 것(Liu *et al.*, 2004)과 유사한 수준으로 그 당시 해안선은 현 해안선으로부터 남동쪽으로 약 60 km 정도 이동했을 것으로 추정된다(Yoo and Park, 2000). 따라서 대한해협은 한국해곡 일부를 제외하고 대기 중에 노출 되었으며 낙동강과 연계된 하천침식을 포함하는 광범위한 침식작용이 진행 되었을 것으로 추정된다(Park and Yoo, 1988; Min, 1994; Yoo and Park, 1997, 2000). 이 기간 동안 현재의 낙동강 하구는 대륙붕단으로 이동하였고 대륙붕을 가로지르는 고수로가 발달했으며, 본 연구지역인 현재의 낙동강 하구는 하천환경의 연장이었을 것으로 추정된다(그림 9a; Yoo and Park, 2000; Yoo *et al.*, 2003). 이러

한 환경 하에서 육상에서 운반되는 퇴적물 중 역을 포함하는 사질 퇴적물이 고수로를 중심으로 퇴적 된 것으로 해석된다. 시추자료 분석결과에서도 본 퇴적 단위는 역을 포함하는 사질퇴적물로 구성되며 주로 하구곡 중앙부를 중심으로 두껍게 분포하는 경향을 보여주어 이와 같은 해석을 뒷받침해 주고 있다. 따라서 퇴적단위 IV는 일부 연구에 보고된 바와 같이 주로 지난 마지막 빙하기동안 하천환경에서 퇴적된 저해수면 퇴적층에 해당되는 것으로 해석된다(Min, 1994; KIGAM, 2000; Ryu *et al.*, 2005; Yoo *et al.*, 2014a).

마지막 빙하기가 끝나고 해침이 시작되면서 대륙 봉단 부근에 위치고 있던 낙동강과 연계된 고하구는 점차 북서방향으로 후퇴하기 시작하였다(Min, 1994; Park *et al.*, 2000). 해침이 진행되면서 지난 약 11,000 년경에 이르러 낙동강 고하구는 연구지역의 남쪽 부근인 거제도 남동단 부근까지 이동한 것으로 알려지고 있다(KIGAM, 2000; Park *et al.*, 2000; Yoo *et al.*, 2014b). 이 시기 이후 해침이 진행되면서 거제도 동부해역에서 현재의 낙동강어귀 사이는 하구환경 하에 놓이게 된 것으로 해석된다(Min, 1994; KIGAM, 2000; Yoo and Park, 2000). 결과적으로 퇴적공간은 고 하구를 중심으로 우선적으로 형성 되었으며 낙동강으로부터 유입되는 퇴적물이 고 하구를 중심으로 집적되기 시작하였으며 퇴적단위 III을 형성하게 되었다(그림 9b). 퇴적단위 III을 구성하는 퇴적물이 염하구 조건하에서 퇴적되었다는 사실은 이미 시추 시료의 미화석 분석 결과에서도 보고 된 바 있다(KIGAM, 2000; Nam *et al.*, 2003; Yoo *et al.*, 2014a; Kim *et al.*, 2015). 즉, 유공충 분석에 의하면 퇴적단위 III의 경우 저서성 유공충이 거의 나타나지 않으며 *A. beccarii*, *E. advenum* and *Q. seminulum*와 같은 염하구 서식종의 유공충을 포함하고 있다. 또한 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 의 분석결과 역시 퇴적단위 III을 구성하고 있는 퇴적물이 담수의 영향을 우세하게 받았음을 시사해주고 있다(Nam *et al.*, 2003). 탄소 연대측정 결과에서도 본 퇴적단위가 주로 12,000-8,000년 사이에 퇴적된 것으로 알려졌다(그림 6). 따라서 퇴적단위 III은 홀로세 해침 중기에서 후기동안 퇴적된 하구퇴적층으로 해석된다.

해침이 좀 더 진행되면서 표층 근처의 퇴적물은 파랑에 의한 침식, 재동으로 해침식면(ravinement

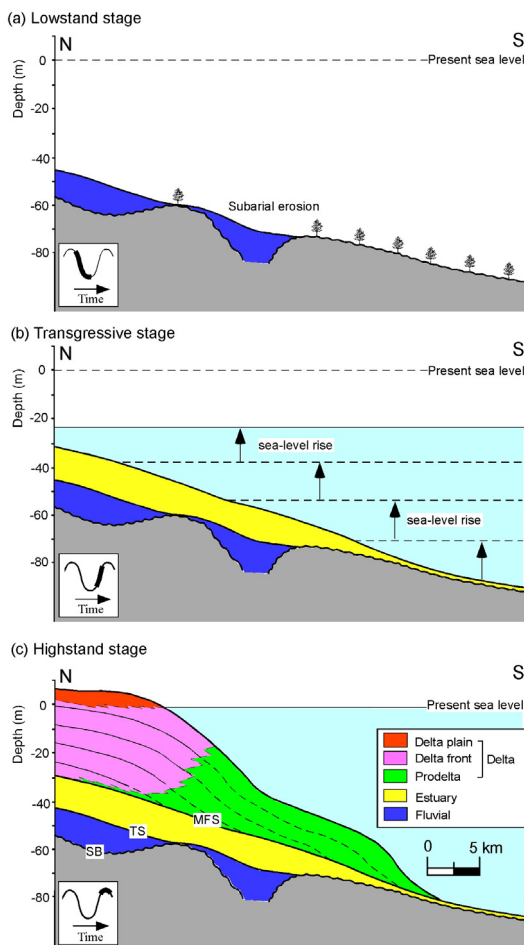


Fig. 9. Schematic diagram illustrating the depositional history of the Nakdong River delta deposits created in response to sea-level rise. See text for details. MFS; maximum flooding surface, RS; ravinement surface, SB; sequence boundary.

surface)이 형성되었으며, 침식면 위에는 재동된 퇴적물이 집적되어 박층의 사질 퇴적단위(II)를 형성한 것으로 해석된다(Min, 1994; Yoo *et al.*, 1996, 2014b). 퇴적물 분석결과에서도 다량의 패각편을 포함하고 있으며, 분급이 양호하고 상향세립화 하는 퇴적구조를 보이는 등 연안환경 하에서 강한 해조류의 영향을 받아 형성된 것으로 해석되는 특징들을 보여준다. 본 퇴적단위와 같이 해침과정에서 형성된 수 미터 미만의 박층 사질 퇴적체의 존재에 대하여 이미 여러 지역 대륙붕에서 보고 된 바 있다(Tesson *et al.*, 1990; Saito, 1994; Trincardi *et al.*, 1994; Tortora, 1996; Lee and Yoon, 1997; Yoo *et al.*, 2002; Shinn *et al.*, 2007).

대한해협은 지난 7,000년에 접어들면서 해수면의 상승 속도가 둔화 되었으며, 지난 약 6,000년경에 이르러 현 해수면 수준에 도달한 것으로 알려져 있다(Suk, 1989; Min, 1994; Park *et al.*, 2000). 최근에 삼각주 평원에서 취득된 시료의 연대측정 결과에서도 지난 약 6,000년을 전후로 낙동강 삼각주를 구성하고 있는 퇴적단위 I을 집적시키는 퇴적작용이 시작

되었음을 보고하였다(Kim *et al.*, 2015). 이 시기는 퇴적단위 I의 하부 경계면인 최대 해침면(maximum flooding surface)이 만들어진 시기와 일치하며 탄소동위원소를 이용한 연대측정 결과와도 잘 대비된다(그림 6). 이 시기는 퇴적환경 상에 있어 중요한 전환점이 되는 시기로 기존의 해침퇴적단위(III, II)를 집적하던 후배열(retrograding) 퇴적환경에서 고해수면 퇴적단위(I)를 퇴적시키는 전진구축(prograding) 퇴적환경으로 전환되는 시점이다(Min, 1994; Yoo and Park, 2000; Yoo *et al.*, 2003). 해침이 종료되고 고해수면 환경이 시작되면서 낙동강으로부터 유입되는 세립 퇴적물의 집적이 시작되었으며 삼각주의 대부분을 구성하고 있는 퇴적단위 I을 형성하기 시작하였다(그림 9c). 본 퇴적단위 하부에서 얻은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값을 보면 -23.2 ~ -22.6‰으로 아직까지 육성기원 유기물의 유입이 우세하게 진행되고 있음을 반영하고 있는 반면, 퇴적단위 상부로 향하면서 점차 해양기원 유기물이 우세한 경향을 보여준다(Nam *et al.*, 2003). 따라서 해수면 상승이 완료된 시점으로 부터 점차 염하구 환경에서 해양환경으로 변화하는 것으로 해석된다. 즉, 고해수면 조건 이후 낙동강 삼각주의 모체인 구조곡은 큰 규모의 하구역 조건하에 놓였으며 낙동강으로부터 유입되는 다량의 퇴적물이 집적되기 시작하여 현재와 같은 규모의 낙동강 삼각주를 형성하게 되었다.

5.2 낙동강 삼각주 층서

낙동강하구 및 내대륙붕에 분포하는 낙동강 삼각주를 구성하고 있는 퇴적층은 하부로부터 하성퇴적층(fluvial deposits), 하구퇴적층(estuarine deposits), 해침 사질퇴적층(transgressive sand deposits), 삼각주퇴적층(delta deposits) 등으로 구성된다(그림 10). 상기 특징을 갖는 낙동강 삼각주 퇴적층은 지난 마지막 빙하기부터 현재까지 형성되었으며, 순차층서 분석에 의하면 저해수면계열(lowstand systems tract), 해침계열(transgressive systems tract), 고해수면계열(highstand systems tract)을 구성하고 있다. 기반암 상부에 위치하며 낙동강 삼각주의 기저부에 해당되는 하성퇴적층(퇴적단위 IV)는 지난 마지막 빙하기 동안 하천환경 하에서 퇴적된 저해수면퇴적계열로 해석되며, 주로 하구곡 및 침식수로에 제한적으로 분포한다. 주로 사질니 혹은 니질사 퇴적물로 구

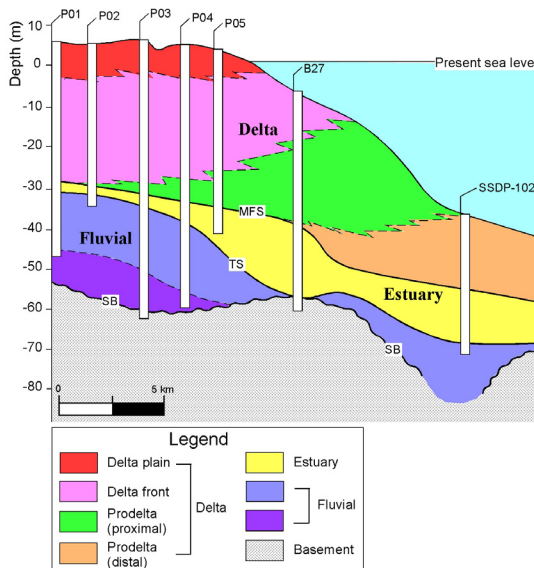


Fig. 10. Proposed sequence stratigraphic architecture for the Nakdong River delta in the area. The Nakdong River delta consists of four depositional systems: fluvial-channel fill, estuary, shelf sand, and delta formed since the LGM (Last Glacial Maximum). MFS; maximum flooding surface, RS; ravinement surface, SB; sequence boundary.

성된 하구퇴적층(퇴적단위 III)은 해침 중기 및 후기 동안 형성된 해침퇴적계열로 해석된다. 이러한 하구 퇴적층은 주로 내대륙붕에 분포하며 하구곡을 향하면서 점차 두께가 감소하다가 하부의 하성퇴적층에 수렴된다. 분급이 양호한 사질퇴적물로 구성된 해침 사질퇴적층(퇴적단위 II)는 해침 후기동안 연안 침식에 의해 형성된 해침퇴적계열로 삼각주 퇴적층의 하부에 위치한다. 연구해역에 분포하는 퇴적층 중 최상부에 해당되는 퇴적단위 I은 낙동강삼각주의 대부분을 구성하고 있으며 해수면이 현수준까지 도달한 이후 형성된 고해수면퇴적계열에 속한다(그림 10). 삼각주퇴적층(퇴적단위 I)은 낙동강 삼각주가 외해 쪽으로 전진하면서 발달해 가는 썰기형태를 보여주며 삼각주평원(delta plain), 삼각주전면부(delta front), 전삼각주(prodelta) 등으로 구성된다. 본 연구지역에 발달해 있는 낙동강 삼각주와 유사한 층서구조를 갖는 현생 삼각주에 대한 연구사례는 여러 지역에서 볼 수 있다(Hori *et al.*, 2002; Tanabe *et al.*, 2006; Nguyen *et al.*, 2010). 양쯔강 하구역에 발달해 있는 삼각주 퇴적층의 연구 결과에 의하면 최대 두께가 80 m 이상에 달하며 하부로부터 하성층, 하구퇴적층, 삼각주퇴적층으로 구성된다(Hori *et al.*, 2002). 이러한 특징을 갖는 양쯔강 삼각주는 순차층서 개념에 의하면 저해수면퇴적계열, 해침퇴적계열, 그리고 고해수면퇴적계열로 해석되며 주로 마지막 빙하기 이후 퇴적된 것으로 보고되었다(Hori *et al.*, 2002). 또한 베트남 송홍 삼각주의 연구 결과에 의하면 하구역을 중심으로 최대 70 m 이상에 달하는 삼각주가 발달해 있으며 하부로부터 저해수면 계열에 속하는 하성층, 해침퇴적계열에 해당하는 하구역 조간대 퇴적층, 고해수면 계열을 구성하는 삼각주 퇴적층으로 구성된다(Tanabe *et al.*, 2006). Nguyen *et al.* (2010)에 의한 메콩강 삼각주의 연구결과에서도 양쯔강 삼각주와 송홍 삼각주와 유사한 층서 및 진화과정을 갖는 것으로 보고되었다. 따라서 하구역을 중심으로 발달해 있는 낙동강 삼각주의 경우도 다른 지역에 발달해 있는 삼각주와 유사한 층서 특징을 갖는 것으로 해석된다.

6. 결 론

연구해역에 발달한 낙동강 삼각주는 기반암위에

놓이는 4개의 퇴적단위로 구성된다. 최하위에 놓이는 퇴적단위 IV는 역을 포함하는 사질퇴적물로 구성된 하성퇴적층으로 주로 마지막 빙하기 동안 형성된 저해수면퇴적계열에 해당된다. 사질니 혹은 니질사 퇴적상의 특징을 보여주는 퇴적단위 III은 연대측정 및 미화석 분석에 의하면 홀로세 해침 중기 및 후기에 걸쳐 하구환경 하에서 퇴적된 해침퇴적계열에 속한다. 박층의 사질퇴적상으로 구성되는 퇴적단위 II는 해침 후기동안 연안 침식에 의해 형성된 해침사질퇴적층으로 해침퇴적계열로 해석된다. 최상부 퇴적단위 I은 낙동강 삼각주의 대부분을 구성하는 퇴적층으로 삼각주 평원, 삼각주 전면부, 전 삼각주로 구성되는 고해수면 퇴적계열에 해당된다. 이러한 낙동강 삼각주는 해수면 상승이 완료된 이후 낙동강으로부터 유입되는 다량의 퇴적물이 집적되기 시작하여 현재와 같은 규모의 삼각주를 형성하게 되었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 연구과제 “유가스 부존특성 및 해저천부구조 정밀 규명을 위한 융복합 탐사기술개발(17-3312)”와 해양수산부의 지원으로 수행된 “관할해역 해양지질 및 지구조 연구” 사업의 일부인 “남해 제4기 퇴적층서 연구(17-9856)”의 지원에 의해 수행되었다. 유익한 조언을 주신 신영재 박사와 익명의 심사자에게 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Ban, Y.B., 1986, Analysis of the landforms and surface sediments in the Nakdong Delta. Ph.D. Thesis, Kyunghee University, Korea, 115 p (in Korean with English abstract).
- Folk, R.L., 1954, The distribution between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology*, 62, 334-359.
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q. and Wang, P., 2002, Evolution of the coastal depositional systems of the Changjiang (Yangtze) River in response to late Pleistocene-Holocene sea-level changes. *J. Sedimentary Research*, 72, 884-897.
- Jang, K.M., 1990, Sedimentation of fine-grained sediments on the inner shelf off the southeastern coast of Korea. Master Thesis, Chungnam National University, Korea, 113 p (in Korean with English abstract).
- Kim, M.S., Chu, K.S. and Kim, O.S., 1986, Investigation

- of some influence of the Nakdong River water on marine environment in the estuarine area using Landsat imagery. Technical Report of Korea Ministry Sciences Technology, 93-147.
- Kim, S.H., 2005, The morphological changes of deltaic barrier islands in the Nakdong River estuary after the construction of river barrage, *Journal of Korean Geographical Society*, 40, 416-427 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.Y. and Ha, J.S., 2001, Sedimentary facies and environmental changes of the Nakdong River estuary and adjacent coastal area. *Journal of Korean Fish Society*, 34, 268-278 (in Korean with English abstract).
- Kim, W.H. and Lee, H.H., 1980, Sediment transport and deposition in the Nakdong Estuary, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 16, 180-188 (in Korean with English abstract).
- Kwon, H.J., 1973, A geomorphologic study of the Nakdong Delta. *Journal of Korean Geographical Society*, 8, 8-23 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.C., Cheong, D.K., Shin, S.W., Park, Y.H. and Hong, S.S., 2015, OSL chronology and accumulation rate of the Nakdong deltaic sediments, southeastern Korean Peninsula. *Quaternary Geochronology*, 30, 245-250.
- Korea Hydrographic Office, 1982, Marine Environmental Atlas of Korean waters. Korea Hydrographic Office, Incheon, Korea, 38.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2000, Study on Quaternary Stratigraphy and Environmental Changes. Report of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 665 p (in Korean with English abstract).
- Lee, H.J. and Yoon, S.H., 1997, Development of stratigraphy and sediment distribution in the northeastern Yellow Sea during Holocene sea-level rise. *Journal of Sedimentary Research*, 67, 341-349.
- Lee, C.S. and Chung, Y.H., 2000, Late Quaternary sedimentation in the Kadeok region, Korea. *Geo-Marine Letters*, 20, 72-79.
- Lee, S.H., Lee, H.J., Jo, H.R., Bahk, J.J. and Chu, Y.S., 2005, Complex sedimentation of the Holocene mud deposits in a ria-type coastal area, eastern Korea Strait. *Marine Geology*, 214, 389-409.
- Liu, J.P., Milliman, J.D., Gao, S. and Cheng, P., 2004, Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. *Marine Geology*, 209, 45-67.
- Min, G.H., 1994, Seismic stratigraphy and depositional history of Pliocene- Holocene deposits in the southeastern shelf, Korean Peninsula. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea, 196 p (in Korean with English abstract).
- Nam, S.L., Chang, J.H., Kong, G.S., Kim, S.P. and Yoo, D.G., 2003, Holocene sea-level rise and paleoenvironmental changes in the Korea Strait shelf. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 17, 7-16 (in Korean with English abstract).
- Nguyen, V.L., Ta, T.K.O. and Saito, Y., 2010, Early Holocene initiation of the Mekong River delta, Vietnam, and the response to Holocene sea-level changes detected from DT1 core analyses. *Sedimentary Geology*, 230, 146-155.
- Oh, G.H., 1992, The geomorphic development of the Nakdong River Delta. *Busan Giri*, 1, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Oh, G.H., 1994, The paleoenvironment of the northern part of the Nakdong River Delta. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 8, 33-42 (in Korean with English abstract).
- Park, S.C., Jang, K.M. and Lee, S.D., 1990, High-resolution seismic study of modern fine-grained deposits: Inner shelf off the southeastern coast of Korea. *Geo-Marine Letters*, 10, 145-149.
- Park, S.C. and Yoo, D.G., 1988, Depositional history of Quaternary sediments on the continental shelf off the southeastern coast of Korea (Korea Strait). *Marine Geology*, 79, 65-75.
- Park, S.C., Yoo, D.G., Lee, C.W. and Lee, E.L., 2000, Last glacial sea-level changes and paleogeography of the Korea (Tsushima) Strait. *Geo-Marine Letters*, 20, 64-71.
- Ryu, C.K., 2003, Engineering geological characteristics of the Holocene marine clayey sediments in the estuary of Nakdong River. Ph.D. Thesis, Busan National University, Korea, 230 p (in Korean with English abstract).
- Ryu, C.K., Kang, S. and Chung, S.G., 2005, Late Quaternary paleoenvironmental changes in the western Nakdong River. *Journal of Korean Earth Science Society*, 26, 443-458 (in Korean with English abstract).
- Saito, Y., 1994, Shelf sequence and characteristic bounding surfaces in a wave-dominated setting: Latest Pleistocene-Holocene examples from Northeast Japan. *Marine Geology*, 120, 105-127.
- Shinn, Y.J., Chough, S.K., Kim, J.W. and Woo, J., 2007, Development of depositional systems in the southeastern Yellow Sea during the postglacial transgression. *Marine Geology*, 239, 59-82.
- 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. Ph.D. Thesis, University of Tokyo, Japan, 246 p.
- Tanabe, S., Saito, Y., Vu, Q.L., Hanebuth, T.J.J., Ngo, Q.L. and Kitamura, A., 2006, Holocene evolution of the Song Hong (Red River) delta system, northern Vietnam. *Sedimentary Geology*, 187, 29-61.

- Tesson, M., Gensous, B., Allen, G.P. and Ravenne, Ch., 1990, Late Quaternary deltaic lowstand wedges on Rhone continental shelf, France. *Marine Geology*, 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). *Journal of Sedimentary Research*, 66, 391-405.
- Trincardi, F., Correggiari, A. and Roveri, M., 1994, Late Quaternary transgressive erosion and deposition in modern epicontinental shelf: the Adriatic Semienclosed Basin. *Geo-Marine Letters*, 14, 41-51.
- Yoo, D.G., Chang, J.H., Lee, H.Y., Kim, S.P., Nam, S.I. and Kong, G.S., 2004, Stratigraphy and depositional environment of Holocene deposits in the inner shelf off the Nakdong River mouth. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 395-407 (in Korean with English abstract).
- Yoo, D.G., Kim, S.P., Chang, T.S., Kong, G.S., Kang, N.K., Kwon, Y.K., Nam, S.L. and Park, S.C., 2014a, Late Quaternary inner shelf deposits in response to late Pleistocene-Holocene sea level changes: Nakdong River, SE Korea. *Quaternary International*, 344, 156-169.
- Yoo, D.G., Kim, S.P., Lee, C.W., Chang, T.S., Kang, N.K. and Lee, G.S., 2014b, Late Quaternary transgressive deposits in a low-gradient environmental setting: Korea Strait shelf, SE Korea. *Quaternary International*, 344, 143-155.
- Yoo, D.G., Koo, N.H., Lee, H.Y., Kim, B.Y., Kim, Y.J. and Cheong, S., 2016, Acquisition, processing and interpretation of high-resolution seismic data using a small-scale multi-channel system: an example from the Korea Strait inner shelf, south-east Korea. *Exploration Geophysics*, 47, 341-351.
- Yoo, D.G., Lee, C.W., Choi, J.Y., Park, S.C. and Choi, J.H., 2003, Sequence stratigraphy of late Quaternary deposits in the southeastern continental shelf, Korea. *The Sea. Journal of the Korean Society of Oceanography*, 8, 369-379 (in Korean with English abstract).
- Yoo, D.G., Lee, C.W., Kim, S.P., Jin, J.H., Kim, J.K. and Han, H.C., 2002, Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf. *Marine Geology*, 187, 313-328.
- Yoo, D.G. and Park, S.C., 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. *Journal of Sedimentary Research*, 70, 210-223.
- Yoo, D.G. and Park, S.C., 1997, Late Quaternary lowstand wedges on the shelf margin and trough region of the Korea Strait. *Sedimentary Geology*, 109, 121-133.
- Yoo, D.G., Park, S.C., Shin, W.C. and Kim, W.S., 1996, Near-surface seismic facies at the Korea Strait shelf margin and trough region. *Geo-Marine Letters*, 16, 49-56.
- Yoo, D.G., Park, S.C., Sunwoo, D. and Oh, J.H., 2003, Evolution and chronology of late Pleistocene shelf-perched lowstand wedges in the Korea Strait. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22, 29-39.

Received : July 14, 2017

Revised : August 18, 2017

Accepted : September 13, 2017