

낙동강 하구 삼각주 퇴적물을 이용한 홀로세 고환경 연구

백세익^{1,2,5} · 정대교^{2,*} · 신승원² · 김진철³ · 박용희⁴ · 임현수⁵

¹한국석유공사

²강원대학교 지질학과

³한국지질자원연구원 국토지질연구본부

⁴강원대학교 지구물리학과

⁵부산대학교 지질환경과학과

요 약

한반도 남동부에 위치한 낙동강 하구에 분포하고 있는 삼각주 환경에서 한 개의 심부시추 코어(ND-01) 퇴적물 시료를 채취하여 홀로세 동안의 고환경을 복원하였다. 이는 퇴적물 조직 및 구조 관찰, 미화석 존재 유무를 통해 네 개의 퇴적단위로 분류된다. 퇴적단위 A (18.80~33.54 m)는 주로 균질한 점토로 이루어져 있으며 유공층, 구조, 해면골침, 조개파편들이 풍부하게 산출된다. 퇴적단위 B (16.60~18.80 m)는 전반적으로 엽층리를 보이는 점토에 세립질의 모래가 엽층리나 렌즈상으로 발달되어 있다. 퇴적단위 A에 비해 미화석의 산출량은 줄고, 식물 파편의 양은 증가한다. 퇴적단위 C (14.20~16.06 m)는 엽층리가 발달한 세립질 모래층과 점토층이 교호하며, 최상부인 퇴적단위 D (8.00~14.20 m)는 주로 두꺼운 괴상의 모래층으로 이루어져 있다. 이처럼 네 개의 퇴적단위는 전삼각주 환경에서 전면삼각주 환경으로 변하는 전형적인 삼각주 전진퇴적작용을 지시한다. 균질한 점토로 이루어진 퇴적단위 A는 유기지화학 분석 값의 변화를 기준으로 하부로부터 A1, A2, A3로 구분된다. A1 (29.84~33.54 m, 8.0 ka)은 높은 TC, TN 값과 낮은 C/N 값을 가지며, 해수면이 빠르게 상승하는 시기에 퇴적된 것으로 해석된다. 그 후의 퇴적단위 A2 (22.64~29.84 m, 5.4~8.0 ka) 형성시기에는 해수면 상승이 거의 멈추고 낙동강으로부터 퇴적물이 지속적으로 공급되어 해양의 영향이 점차 줄어들고 육상으로부터의 영향이 점차 강해진 것으로 해석된다. 퇴적단위 A3 (15.40~26.64 m, 2.5~5.4 ka)에서 급격하게 빨라진 퇴적률과 높아진 C/N 값은 이 시기에 낙동강 삼각주의 전진퇴적작용이 활발했음을 지시한다.

주요어: 낙동강, 삼각주 환경, 홀로세, 퇴적물, 고환경

Seik Paik, Daekyo Cheong, Seungwon Shin, Jin Cheul Kim, Yong-Hee Park and Hyoun Soo Lim, 2016, A paleoenvironmental study of Holocene delta sediments in Nakdong River Estuary. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 1, p. 15-30

ABSTRACT: The Holocene delta sediments (ND-01) from the Nakdong River Estuary is divided into four sedimentary units based on sedimentary structure, texture, and occurrence of microfossils. Unit A (18.80~33.54 m) is mostly homogeneous mud and shell fragments are well observed. Contents of marine microfossils such as ostracods, diatoms, and sponge spicules decrease towards the top. Unit B (16.60~18.80 m) is generally laminated mud and laminated sand. Marine microfossils disappear at the top of Unit B, but wood fragments contents increase towards the top. At Unit C (14.20~16.60 m), mud content is lower than Unit B and laminated sand is well developed. Unit D (8.00~14.20 m) is mostly homogeneous sand and shows better sorting than lower unit. The sedimentary environments of the sequence are supposed to be a progradational delta system. Unit A which is composed of homogeneous mud is subdivided into three units on the basis of organic geochemical data such as TN, TC, TOC, CaCO₃ contents and C/N ratio. Unit A1 (29.84~33.54 m, 8.0 ka) which shows high TN, TC contents and low C/N ratio was deposited during the stage of rapid sea level rise. At Unit A2 (26.64~29.84 m, 5.4~8.0 ka), decrease of TN, TC, CaCO₃ contents reflects deceleration of sea level rise or increase of fresh water inflow. Unit A3 (15.40~26.64 m, 2.5~5.4 ka) was formed in a prodelta environment influenced by continuous inflow from Nakdong River and relatively high sediment accumulation rate.

Key words: Nakdong River, Delta environment, Holocene, Sediments, Paleoenvironment

* Corresponding author: +82-33-250-8559, E-mail: dkcheong@kangwon.ac.kr

(Seik Paik, Korea National Oil Corporation, Ulsan 44538, Republic of Korea; Seik Paik, Daekyo Cheong and Seungwon Shin, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Jin Cheul Kim, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Dajeon 34132, Republic of Korea; Yong-Hee Park, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Seik Paik and Hyoun Soo Lim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea)

1. 서 론

지구 온난화로 인해 발생할 수 있는 미래의 해수면 상승에 대한 관심이 전 세계적으로 높아지면서 연안 지역의 해수면 변동 및 고환경 복원 연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서도 홀로세를 포함한 신생대 제4기 해수면변동과 관련된 퇴적환경과 고기후·고해양 환경 변화에 관한 연구가 여러 지역에서 수행되었다(Nam, 2011). 특히 육상과 해양의 영향을 모두 받고 있는 연안 환경에는 보통 두꺼운 홀로세 퇴적층이 잘 보존되어 있으며, 이러한 퇴적층은 고환경, 해수면 변화, 고기후 변화 등에 대한 연구에 이용될 수 있다(Lamb *et al.*, 2006). 이러한 이유로 한반도의 제4기 후기 환경에 대한 연구를 위해 해양 퇴적물 이외에도 동해안에 분포하고 있는 석호들과(Yum *et al.*, 2002; Lee and Yu, 2011) 서해안에 분포하고 있는 연안 환경에서(Kim and Kennet, 1998; Kim and Kucera, 2000; Nahm *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2010; Chang and Nam, 2011; Kim *et al.*, 2011; Bak, 2012) 채취한 퇴적물들이 이용되었다. 한반도 남동부의 낙동강 하구에 분포하고 있는 삼각주에도 최소 30 m 이상의 제4기 후기 퇴적층이 보존되어 있다(Ryu, 2003; Ryu *et al.*, 2005, 2011). 그러므로 이러한 환경에서 채취된 퇴적물은 제4기 후기의 한반도 남동부 연안지역의 고환경 및 해수면 변동 기록 복원에 이용될 수 있을 뿐만 아니라 한반도의 고기후 변화 연구를 위한 자료로도 활용될 수 있다.

낙동강 하구 외해역의 대륙붕 지역에 발달하는 제4기 후기 퇴적층의 층서 및 퇴적환경에 대한 연구는 최근에도 지속적으로 수행되었다(Park and Yoo, 1988; Park *et al.*, 1999; Nam *et al.*, 2003; Yoo, 2003; Yoo *et al.*, 2003, 2004, 2011; Kong and Park, 2007; Kong *et al.*, 2009; Chun *et al.*, 2015). 그러나 이 자료들이 현재 낙동강 하구 지역의 고환경 및 해수면 변화를 직접적으로는 지시할 수 없다. 지형학과 고고학 분야에서 패총을 이용해 낙동강 삼각주

일대의 해수면 변동사를 밝히는 연구가 수행된 바 있지만 연구자에 따라 차이를 보인다(Yoon and Yee, 1985; Hwang *et al.*, 2009). 이에 낙동강 삼각주 일대의 제4기 층서 확립과 퇴적환경 및 해수면 변동사를 명확히 규명하기 위해 낙동강 삼각주 여러 지역에서 퇴적상 분석, 유공충 군집 분석, 화분 분석 등을 이용한 제4기 지질학적 연구가 수행되었다(Ryu, 2003; Ryu *et al.*, 2005, 2011; Chung and Ryu, 2012). 하지만 앞으로도 더 많은 지역에서, 그리고 다양한 방법을 이용한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 연안지역에서 고환경 및 해수면 변동사를 복원하기 위한 연구에는 미화석을 이용한 방법이 흔히 사용된다(Lamb *et al.*, 2006). 한반도 여러 연안지역에서 구조(Ryu *et al.*, 2008; Bak, 2012)와 화분(Jun *et al.*, 2009), 유공충 분포(Cheong, 1989)를 이용한 고환경 복원 연구가 수행되었으며, 낙동강 삼각주에서도 주로 저서성 유공충 군집(Ryu *et al.*, 2005, 2011)과 화분분석(Chung and Ryu, 2012)을 이용한 고환경 연구가 수행되었다. 하지만 층서적으로 볼 때 연안지역 퇴적층의 미화석들은 연속적으로 산출하지 않을 수 있다. 예를 들어, 유공충은 육상의 영향이 강해지면 퇴적물 내의 함량이 감소하고, 화분은 해양 환경에서는 산출이 현저히 감소하게 될 것이다. 또한 미화석은 물리, 화학적 영향에 민감하여 일부 구간에서 보존되지 않을 수 있으며, 이는 고환경 복원 연구에 어려움을 줄 수 있다(Shennan *et al.*, 1999, 2000; Lamb *et al.*, 2006). 이러한 부분을 보완하기 위해 유기물의 근원에 관한 간접적인 정보를 제공하는 유기지화학적 자료들이 활용된다. 전 세계적으로도 많은 연안지역에서 유기지화학적 자료를 이용한 홀로세 고환경 및 해수면 복원 연구가 수행되고 있다(Haines, 1976; Deines, 1980; Cloern *et al.*, 2002; Wilson *et al.*, 2005a, 2005b; Zong *et al.*, 2006; Castro *et al.*, 2010).

이 연구의 목적은 낙동강 삼각주의 남서쪽 지역

에서 채취한 심부시추 코어 ND-01의 퇴적물 시료를 이용하여 낙동강 하구의 홀로세 고환경을 복원하는 것이다. ND-01코어는 고해상의 연대측정(Kim *et al.*, 2015)과 유공층을 이용한 고환경 해석(Takata *et al.*, 2015)이 수행된 바 있으며, 이번 연구에서는 퇴적학적 분석 이외에도 유기지화학적 분석과 저서성 유공층을 이용한 안정동위원소 분석을 이용해 낙동강 삼각주의 발달 과정과 삼각주 일대의 고환경 변화를 복원하는 데에 중점을 두었다.

2. 연구지역

연구지역은 한반도 남동부에 위치한 낙동강 하구에 분포하고 있는 삼각주 환경으로 전장 527 km의 낙동강과 남해가 만나는 곳에 발달되어 있다(그림 1). 낙동강 삼각주의 육상 면적은 약 173 km² (Ryu *et al.*, 2005)이며, 지형과 수리학적 특성에 따라 하중도(interdistributary island)와 자연제방으로 구성된 상부 삼각주 평원(upper delta plain), 사주, 조간대 및 해안평야로 이루어진 하부 삼각주 평원(lower delta plain), 그리고 전체 삼각주의 배후 저습지에 해당하는 삼각주 주변분지(marginal basin)로 크게 구분된다(Kwon, 1973). 이처럼 낙동강 삼각주는 전반적으로 삼각주 평원 지형으로 이루어져 있어 현재는 김해공항과 김해평야라 불리는 경작지와 주거지가 개발되어 있다.

낙동강 삼각주는 중생대 백악기의 기반암을 부정합으로 덮고 있다. 이 기반암은 삼각주 주변에 노출

되어 있으며, 경상누층군의 유천층군에 해당하는 안산암질 및 유문암질 암석과 이를 관입한 불국사 화강암류로 구성되어 있다. 또한 북북동 방향으로 발달한 양산단층이 낙동강 하구를 관통하고 있으며, 이는 제 4기 퇴적층을 퇴적시킨 침식곡저의 형성과 밀접한 관련이 있을 것이다(Ryu, 2003).

주 연구 대상인 ND-01 코어는 낙동강 삼각주의 상부 삼각주 평원 중 남서쪽 지역에서 채취하였으며, 이 지점은 서낙동강의 하구둑 밖과 인접하고 있다(그림 1). 좌표상으로는 동경 128°54'13.67", 북위 35°6'3.88"에 위치한다.

3. 연구방법

ND-01 시추 코어 퇴적물은 일반적으로 토질공학적 지반조사에서 이용되는 회전 수세식 방법을 통해 회수하였다. 총 55.3 m의 시료를 회수하였으며, 일부 사질 및 자갈질 퇴적층 구간은 손실되었다. 이질 퇴적물은 외경 76.2 mm, 길이 854 mm의 황동관에, 사질 및 자갈질 퇴적물은 내경 48 mm의 PVC관에 각각 회수하였다. 채취된 시추코어는 강원대학교 토목공학과 지반공학연구실에서 유압식 시료추출기를 이용하여 반으로 절개되어 있는 PVC관에 옮겨 담아 밀봉하여 보관하였다.

이번 연구에서는 비교적 연속적으로 발달해 있으며 해수면이 급격하게 상승하는 시기와 안정되는 시기를 포함할 것으로 예상되는 33.54 m 깊이부터 최상부 매립된 폐기물 층 구간이 시작되는 8 m 깊이까지의 시료를 이용하였다. 실내에서 코어시료의 단면 관찰을 통해 색, 조직, 구조 등의 특징들을 기재하고, 이를 바탕으로 일차적인 퇴적상을 분류하였다. 그 후 입도분석 자료와 미화석의 존재 유무, 경향성을 추가로 활용하였다. 입도분석은 10~20 cm 간격으로 약 5~10 g의 시료를 채취하여 50°C 오븐에서 건조시킨 뒤 실시하였다. 건조시킨 시료는 63 µm 체를 이용하여 모래와 이질 크기 입자들을 분리하였고, 모래 크기의 입자들은 다시 2 mm, 1 mm, 710 µm, 500 µm, 250 µm, 125 µm, 63 µm체와 기계식 요동기(Electromagnetic sieve shaker; CISA사)를 이용하여 분류하였다. 이질 크기의 입자들은 강원대학교 공동실험실습관의 입도분석기(Particle Size Analyzer; Malvern, Model Mastersizer 2000)를 이용하여 분석하였다. 미화석

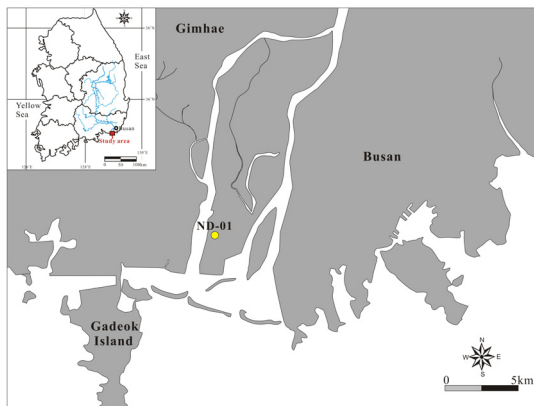


Fig. 1. Location map of the Nakdong Delta system showing the core site (ND-01).

존재 유무와 경향성을 파악하기 위해 15.40~33.54 m 구간에서 10 cm 간격으로 스미어 슬라이드(smear slide)를 제작하였다. 슬라이드 제작을 위해 이썬시개를 이용하여 소량의 퇴적물을 슬라이드 글라스에 올린 후 한 방울의 물을 떨어뜨리고 퇴적물을 넓게 펼치고, 슬라이드 글라스를 핫플레이트 위에서 건조시켰다. 건조된 슬라이드 글라스 위에 캐나다 발삼(Canada balsam)과 자일렌(Xylen)을 1:1의 비율로 섞은 용액을 이용하여 커버 글라스를 붙여 편광현미경으로 관찰하였다.

스미어 슬라이드 관찰을 통해 유공충 산출이 확인되는 구간(18.60~33.54 m)에서 20 cm 간격으로 5~10 g의 시료를 채취하여 안정동위원소 분석에 이용할 유공충을 선별하였다. 대부분의 유공충은 63 μm 이상의 크기를 가지므로, 일차적으로 증류수와 63 μm 체를 이용하여 이질 크기의 퇴적물을 제거하였다. 분리된 시료를 50°C 오븐에서 건조시킨 후 실체현미경 하에서 선별하여 홀 슬라이드에 보관하였다. 강원대학교 공동실험실습관의 전계방사형 주사전자현미경(FESEM; Hitachi, S-4300)을 이용하여 촬영한 사진과 연구지역 및 한반도 주변에 서식하는 기존 유공충 연구자료들을 참고하여(Cheong, 1991; Ryu, 2003) 분석에 사용될 종을 선별하였다. 이러한 과정을 통해 연구지역에서 가장 많이 산출되는 저서성 유공충인 *Pseudrotalia gaimardii* (d'Orbigny)를 안정동위원소 분석에 이용하였다. 분석을 위해 각 구간 별로 1~4 개체씩 추출하였으며, 이들을 작은 플라스틱 튜브에 넣고 증류수를 채운 후 초음파세척기를 이용하여 세척한 후 붓을 이용하여 유공충 각에 붙어 있는 이물질들을 제거하였다.

산소 및 탄소 안정동위원소 분석은 미국 아리조나 대학교(University of Arizona)의 Environmental Isotope Laboratory에 의뢰하여 질량분석기(Mass spectrometer; Finnigan MAT 252)를 이용하여 실시하였다. 표준시료는 NBS-19와 NBS-18을 사용하였으며, $\delta^{18}\text{O}$ 및 $\delta^{13}\text{C}$ 의 분석오차는 각각 $\pm 0.10\%$, $\pm 0.08\%$ 이다. 모든 분석값은 PDB (Peedee Belemnite)를 기준으로 표시하였다.

퇴적물의 유기지화학분석은 15.4~33.54 m 구간에서 10~20 cm 간격으로 약 5 g의 시료를 채취하여 실시하였다. 채취된 시료는 분석을 위해 아게이트 절구를 이용하여 분말 시료로 제작하였다. 한국해

양연구원 부설 극지연구소에서 Automatic elemental analyzer (FlashEA 1112)를 이용하여 총탄소(TC, total carbon)와 총질소(TC, total nitrogen) 함량을 분석하였으며, TIC analyzer (UIC)를 이용하여 총무기탄소(TIC, total inorganic carbon) 함량을 분석하였다. 총유기탄소(TOC, total organic carbon) 함량은 TC와 TIC 함량의 차를 통해 알 수 있으며, 탄산염 함량은 총무기탄소 함량에 8.333을 곱하면 구할 수 있다(Stein, 1991).

4. 연구 결과

4.1 퇴적학적 분석 결과

연구지역의 코어 퇴적물을 직접 관찰하여 기술한 자료와 퇴적물에 대한 입도분석, 스미어 슬라이드 관찰, 그리고 유공충 및 개형충의 산출 유무를 이용하여 퇴적단위를 네 개로 구분하였다. 이들은 하부로부터 퇴적단위 A (18.80~33.54 m), 퇴적단위 B (16.60~18.80 m), 퇴적단위 C (14.20~16.60 m), 그리고 퇴적단위 D (8.00~14.20 m)로 구분된다.

퇴적단위 A는 18.80~33.54 m 구간으로, 주로 중간 암회색(medium dark gray, N4)의 색을 띠는 균질한 점토로 이루어져 있다. 평균 입도는 6.5 ϕ 이고, 분급은 불량~매우 불량이다(그림 2). 이 퇴적단위에는 곳곳에 세립질 모래로 이루어진 렌즈상의 엽층이 발달해 있으며, 이 모래질 엽층은 상부로 올라갈수록 더 많이 관찰된다. 세립질 모래에서 왕모래(granule) 크기의 조개 파편이 이 퇴적단위에 전체적으로 산재되어 있는데 모래질 엽층의 상하부에 집중되기도 하며, 층을 이루며 발달하기도 한다. 특징적으로 27.8 m 깊이에서 10 cm 두께의 세립질 모래층이 관찰된다. 이 퇴적단위의 상부와 중부에서 서관구조(burrow)가 관찰되며, 구조, 유공충, 개형충, 해면동물 골침, 규편모류, 그리고 식물파편들이 산출된다(그림 2, 3). 구조(그림 3c)는 다양한 종이 나타나며 대부분의 구간에서 산출되지만, 상부로 올라갈수록 산출량이 줄어드는 경향을 보인다. 식물 파편(그림 3f)은 상부로 올라갈수록 자주 산출되었고, 특히 20.2 m 구간부터 산출량이 많아지는 양상을 보인다. 해면동물 골침(그림 3d)의 경우에도 하부에서는 많이 산출되지만 29.6 m 구간부터 산출량의 증감을 반복하다가 21 m 구간부터 급격히 감소한다. 규

편모류(그림 3a)는 31 m 구간에서 소량으로 산출된다. 대부분의 유공충 및 개형충(그림 3b, 3e)은 21 m에서 최하부까지 대체로 잘 나타나지만 산출량의 변동을 보인다. 저서성 유공충인 *Pseudorotalia gaimardii* (d'Orbigny)는 18.60~33.54 m 구간에서 산출되는 유공충 중 가장 많으며(표 2), *Quinqueloculina seminulum* (Linné)는 그 다음으로 많다. 하지만 29.60~30.60 m 구간에서는 *P. gaimardii*와 *Q. seminulum*의 산출량은 적으며, *Elphidium advenum* (Cushman)과 *Quinqueloculina lamarckiana* (d'Orbigny)가 우점종이다.

퇴적단위 B는 16.60~18.80 m의 깊이구간으로, 전반적으로 중간 회색(medium gray, N5)의 엽층리를 보이는 점토에 세립질의 모래가 엽층리나 렌즈상으로 발달되어 있다. 평균 입도는 6.1 ϕ 이며, 분급은 불량~매우 불량이다(그림 2). 엽층리가 잘 발달한 얇은 세립질 모래층은 하부로 갈수록 나타나지 않는다. 서관구조가 관찰되며, 조개파편은 주로 모래층 주변에서 발견되지만, 퇴적단위 A에 비해 적게 산출된다. 유공충도 이 퇴적단위에서는 거의 관찰되지 않는다. 반면에 식물파편은 퇴적단위 A에 비해 많이 관찰된다(그림 2). 특징적으로 18.83 m 구간에서 양

모래 크기의 역이 관찰된다.

퇴적단위 C는 14.20~16.60 m의 구간으로, 중간 올리브 갈색(moderate olive brown, 5Y 4/4)의 엽층리가 발달한 세립질 모래층과 올리브 회색(olive gray, 5Y 4/1)의 점토층이 교호하는데 퇴적단위 B에 비하여 점토층의 규모가 작다. 평균 입도는 5.0 ϕ 이며, 분급은 불량~매우 불량이다(그림 2). 이 퇴적

Table 1. OSL ages for sediments from the ND-01 (Kim et al., 2015).

Depth (m)	OSL age (ka)
8.60	0.41 ± 0.03
10.55	0.50 ± 0.03
13.95	0.82 ± 0.09
14.48	0.93 ± 0.10
16.60	1.32 ± 0.06
17.30	1.53 ± 0.08
19.00	2.51 ± 0.12
22.85	5.20 ± 0.33
26.93	5.44 ± 0.23
30.75	8.03 ± 0.43
31.65	8.06 ± 0.94

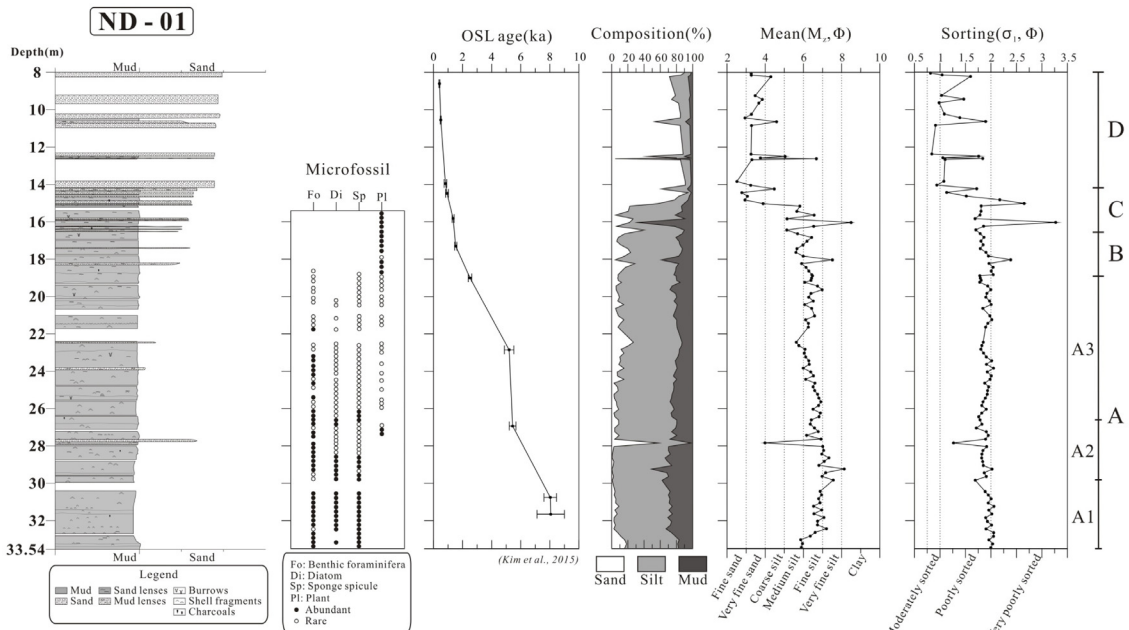


Fig. 2. Columnar sections with microfossils contents and grain size distribution of the ND-01 core sediments.

단위는 퇴적단위 D의 괴상 모래층과 매우 뚜렷한 층 경계를 이루고 있으며, 모래층과 점토층이 교호하는 구간 외에도 8~15 cm 두께의 분급이 불량한 모래층도 일부 포함되어 있다. 조립에서 중립질의 모래층 구간은 조개파편을 다량 포함하고 있으며, 점토층에서는 서관구조가 잘 관찰된다. 식물파편의 산출량은 퇴적단위 B보다 더 많았으며, 해양성 생물들은 관찰되지 않는다.

퇴적단위 D는 8.00~14.20 m 구간의 황회색(yellowish gray, 5Y 7/2) 모래퇴적물로, 상부에는 주로 두꺼운 균질한 모래층으로 이루어져 있으며, 하부에는 엽층리가 발달한 모래층과 엽층리가 발달한 실트층이 일부 교호하며 나타난다. 평균 입도는 3.80이며, 보통 내지는 불량한 분급을 보인다(그림 2).

4.2 유기지화학적 분석 결과

ND-01 코어 퇴적물의 15.40~33.54 m 구간에서 분석한 TN 함량은 전반적으로 0.05~0.14% 범위의 값을 보인다. 최하부에서 32.44 m까지의 구간에서는 0.1% 이하의 값을 가지며, 27.64~32.44 m 구간에서 0.1% 이상의 값을 가지다가 상부로 올라가면서 감소하는 경향을 보인다(그림 4). TC 함량의 변화

도 TN 함량 변화와 비슷한 경향성을 보이며, 약 1~3% 범위의 값을 보인다. TOC 함량은 전반적으로 0.6~1.3%의 값을 가진다. TOC 함량 변화는 최하부에서 27.64 m까지 TN 함량과 TC 함량의 변화와 비슷한 경향성을 보이지만, 상부로 갈수록 값이 감소 또는 증가하는 차이가 있다. 27.64 m와 28.34 m에서 현저하게 낮은 값을 나타내는 특징은 TN, TC, TOC 함량 변화에서 모두 유사하게 나타난다. CaCO₃ 함량은 최하부에서 29.84 m 구간까지는 8% 이상의 값을 갖지만, 그 이상의 구간에서 대부분 8% 이하의 값을 가지며 전반적으로 점점 감소하는 경향을 보인다. C/N 비는 26.34~26.64 m 구간을 기준으로 하부는 10 이하의 값을, 상부는 10 이상의 값을 각각 갖는다. 28.94 m에서 가장 낮은 값(6.81)을 보이고 10 이상의 C/N 비를 갖는 구간은 상부로 올라갈수록 점점 증가하며 15.84 m에서 가장 높은 값(18.5)을 보인다. 이러한 유기지화학 분석 값의 변화와 퇴적학적 분석을 종합하여, 특별한 내부구조가 없는 균질상의 점토퇴적상이 우세하나 약간의 상향 조립을 보이는 퇴적단위 A를 하부로부터 A1 (29.84~33.54 m), A2 (26.64~29.84 m), A3 (15.40~26.64 m)로 구분하였다(그림 4).

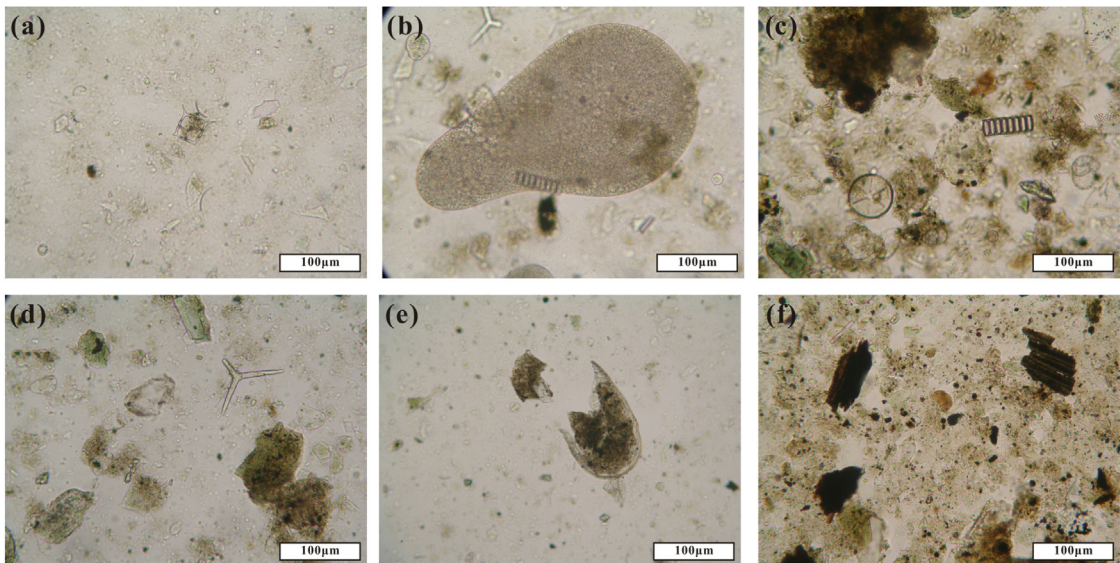


Fig. 3. Microphotographs of smear slides. Marine microfossils such as (a) silicoflagellates, (b,e) ostracods, (c) diatoms, and (d) sponge spicules are abundant in Unit A (18.80~33.54 m). (f) Wood fragments contents increase towards the top. (a) 31.33~31.34 m, (b) 29.93~29.94 m, (c) 26.60~26.61 m, (d) 24.73~24.74 m, (e) 22.53~22.54 m, (f) 19.13~19.14 m.

Table 2. Occurrence chart of *Pseudorotalia gaimardii* (d'Orbigny) from the ND-01 core sediments.

Depth (m)	Total number of <i>P.gaimardii</i> forampicked	No.	%	Depth (m)	Total number of <i>P.gaimardii</i> forampicked	No.	%
18.64	0	0	0.0	26.45	22	1	4.5
18.84	7	2	28.6	26.64	33	12	36.4
19.02	4	3	75.0	26.84	52	25	48.1
19.24	13	6	46.2	27.04	11	0	0.0
19.44	4	0	0.0	27.24	39	20	51.3
19.64	0	0	0.0	27.44	20	5	25.0
19.84	4	2	50.0	27.64	43	7	16.3
20.04	0	0	0.0	27.84	27	2	7.4
20.24	6	1	16.7	28.04	51	9	17.6
20.44	11	0	0.0	28.24	76	31	40.8
20.64	1	1	100.0	28.44	20	5	25.0
21.04	16	4	25.0	28.64	39	5	12.8
21.24	14	2	14.3	28.84	55	10	18.2
21.44	13	6	46.2	29.04	31	0	0.0
21.64	31	9	29.0	29.24	34	13	38.2
22.44	15	10	66.7	29.44	10	0	0.0
22.64	25	4	16.0	29.64	12	0	0.0
22.84	6	1	16.7	29.84	19	2	10.5
23.04	23	10	43.5	30.44	47	4	8.5
23.24	31	5	16.1	30.63	26	0	0.0
23.44	79	7	8.9	30.83	43	5	11.6
23.64	33	4	12.1	31.07	102	35	34.3
23.84	19	3	15.8	31.24	52	22	42.3
24.04	34	6	17.6	31.44	47	19	40.4
24.24	76	17	22.4	31.64	88	21	23.9
24.44	20	10	50.0	31.84	43	5	11.6
24.64	34	13	38.2	32.04	62	32	51.6
24.84	39	5	12.8	32.24	34	8	23.5
25.04	16	0	0.0	32.44	50	7	14.0
25.24	12	5	41.7	32.64	9	0	0.0
25.44	48	13	27.1	32.84	54	1	1.9
25.64	14	0	0.0	33.03	24	16	66.7
25.84	17	2	11.8	33.24	50	22	44.0
26.04	31	1	3.2	33.44	41	28	68.3
26.24	61	10	16.4				

4.3 안정동위원소 분석 결과

스미어 슬라이드 관찰을 통해 유공충 산출이 확인되는 구간인 18.60~33.54 m에서 가장 많이 산출되는 저서성 유공충 *P. gaimardii*을 이용하여 산소와 탄소 안정동위원소 분석을 실시하였다.

산소 안정동위원소($\delta^{18}O$)는 -1.24~0.78‰ 범위의 값을 가지며, 전반적으로 상부로 가면서 감소하는 경향을 보인다(그림 4). 최하부부터 26.24 m까지는 대체로 0 이상의 값과 비교적 작은 변동 범위를 가지며, 24.84~26.24 m 구간에서 일정한 값을 유지

하지만 24.84 m부터 상부까지는 -1.2~0.5‰의 비교적 큰 변동 범위를 보인다. 탄소 안정동위원소($\delta^{13}C$)는 -1.30~0.27‰의 범위를 나타내며, 전반적으로 뚜렷한 변화 경향을 보이지 않는다. 하지만 최하부부터 26.64 m까지 산소 안정동위원소 값과 비슷한 주기를 가지며 전체적으로 감소하는 경향을 볼 수 있다. 26.64 m부터 상부까지의 값들은 산소 안정동위원소 값의 변화 양상과 비슷한 구간도 일부 있으나 전반적으로 유사하지 않다.

4.4 연대측정 결과

코어 퇴적물에서 퇴적상이 변화하는 곳을 기준으로 측정된 총 11개(8.60 m, 10.55 m, 13.95 m, 14.48 m, 16.60 m, 17.30 m, 19.00 m, 22.85 m, 26.93 m, 30.75 m, 31.65 m)의 OSL 연대측정 자료(Kim *et al.*, 2015)를 이용하였다(표 1). 퇴적단위 A는 약 8.0~2.5 ka의 연대를 가지며, 약 5.4~5.2 ka 시기에 높은 퇴적률을 보이는 것이 특징이다. 퇴적단위 B와 퇴적단위 C의 연대값은 각각 약 2.5~1.5 ka와 1.5~0.8 ka다. 퇴적단위 D는 약 0.8~0.4 ka로 상대적으로 가장 높은 퇴적률을 보인다(그림 2).

5. 토 의

5.1 퇴적환경 변화

연구지역과 같은 삼각주 환경은 해수면 변동과 퇴적물 공급량 변화의 상호작용에 의해 퇴적작용 양상이 좌우될 수 있다. 지난 마지막 빙하기 동안 해수면은 낙동강 하구 해역 뿐만 아니라 전 지구적으로 현재보다 최대 120~130 m 이상 낮았던 것으로 보고되었다(Fairbanks, 1989; Suk, 1989; Min, 1994; Park *et al.*, 2000; Yoo *et al.*, 2004, 2011). 지난 약 15,000년 전 경에 빙하기가 끝난 후 해침이 시작되었으며, 특히 낙동강 하구 해역에서는 지난 약 8,000년 전 경부터 빠른 속도로 해수면이 상승하다가 지난 약 6,000년 전 경에 현수준의 해수면에 이른 것으로 보고되었다(Suk, 1989; Min, 1994; Park *et al.*, 2000).

현재 낙동강 하구에 분포하고 있는 퇴적층 중에서 지난 약 8,000년 동안 형성된 퇴적층은 조직 및 구조적 특징과 미화석 산출 경향을 기준으로 총 4개의 퇴적단위로 구분된다(A, B, C, D). 또한 최하부의 퇴적단위 A는 유기지화학적 분석 결과에 의해 다시

A1, A2, A3로 세분할 수 있다.

5.1.1 퇴적단위 A (18.80~33.54 m, ca. 8.0~2.5 ka)

ND-01 코어의 연대분석을 통해 퇴적단위 A는 지난 약 8,000년 전에서 약 2,500년 전 사이에 퇴적된 것을 알 수 있다(그림 4). 서관구조 외에는 특별한 구조가 관찰되지 않으며 조개 파편이 산재되어 있고, 점토질과 실트질이 우세한 구조 및 조직적 특징은 낙동강 삼각주 연구지역 주변에서 비슷한 시기에 퇴적된 다른 연구결과들과 유사하다(Ryu, 2003; Yoo *et al.*, 2004, 2011; Ryu *et al.*, 2005, 2011; Kong and Park, 2007). 또한 현생 전삼각주와 내대륙붕에서 피스톤 코어를 이용하여 채취한 퇴적물의 특징과도 상당히 유사하다(Yoo, 2003). 이러한 특징은 양쯔강 삼각주에서 채취한 심부시추 코어의 홀로세 전삼각주 퇴적층 구간과 현재 수심 30~50 m에 존재하는 양쯔강 현생 전삼각주의 표층퇴적물의 특징과도 비슷하다(Chen *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2002). 퇴적단위 A에서 가장 많이 산출되는 저서성 유공충 *P. gaimardii*는 수심 50 m 내외의 만(bay)에서 서식하는 종이며(Uchio, 1962; Kato 1986; Szarek *et al.*, 2006; Kang *et al.*, 2010), 다음으로 많은 *Q. seminulum* 역시 외해수의 영향을 많이 받는 만이나 내대륙붕에 주로 분포한다(Matoba and Fukasawa, 1992; Ryu *et al.*, 2011). 또한 해면동물 골침과 규편모류와 같은 해양성 생물들의 존재 역시 퇴적단위 A가 천해의 환경에서 퇴적되었음을 시사한다.

한편, 퇴적단위 A에서 얇은 사질층과 그 상하부에 존재하는 깨져있는 패각 파편들은 폭풍과 같은

고에너지의 파도에 의해 형성된 것으로 판단된다(Aigner, 1985). 특히 27.8 m 구간에서 나타나는 비교적 분급이 좋은 모래층은 아주 큰 폭풍에 의해 형성되었음을 시사한다.

퇴적단위 A1: 퇴적단위 A1은 지난 약 8,000년 전에 퇴적되었으며, TN, TC, TOC 함량이 하부로부터 증가하는 경향을 보인다. TN 값이 증가할 수 있는 원인으로 점토광물 중 일라이트에 암모늄 형태로 결합되어 있는 무기질소의 영향이 있으며, 무기탄소 외에 주로 질소를 포함하고 있는 단백질이 주요 구성원인 해양기원의 유기물에 의해서도 높아질 수 있다(Goni *et al.*, 1997). 낙동강 삼각주의 점토광물은 약 50%가 일라이트로 이루어져 있어(Ryu, 2003) 점토함량이 가장 높은 A1에서 TN 값이 높아지는 데에 무기질소의 영향이 있었을 수 있다. 하지만 A1 구간에서 해양성 생물들이 가장 많이 산출되는 점과, TN 함량이 가장 높은 구간에서 염수성의 저서성 유공충이 우점종인 것을 보아(그림 4) 연구지역의 TN 함량은 주로 해양기원의 유기물에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다.

섬진강 부근 남해 대륙붕에서 획득한 시추퇴적물의 유기지화학적 특성은 강하구로부터 멀어질수록 TN과 TC 함량 모두 높은 값을 보인다(Kong *et al.*, 2009). ND-01 코어에서 TN과 TC 함량 증가의 경향성이 유사하게 나타나는 것을 보아 이는 해양 또는 육지의 영향요소가 교차하며 영향을 준 것으로 판단된다. 그러므로 TN과 TC 함량이 가장 높은 A1 최상부 구간은 해양의 영향이 가장 강했거나 민물의 영향이 가장 작았던 시기로 생각할 수 있다.

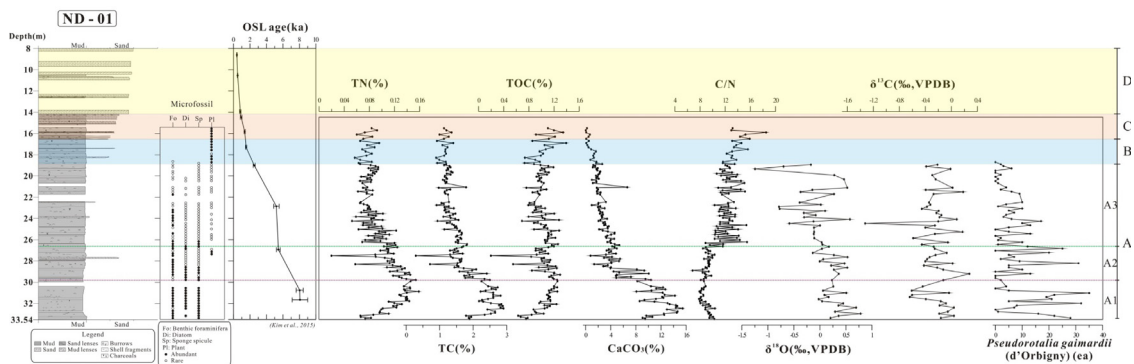


Fig. 4. Synthetic correlation among lithostratigraphy, organic geochemical composition (TN, TC, TOC, CaCO₃, C/N), stable isotope data ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$), distribution of microfossils, and OSL ages of the ND-01 core sediments.

Ryu *et al.* (2011)은 낙동강 삼각주 지역이 지난 약 7,200년 전 경에 외해의 영향이 최대에 달했던 것으로 해석한 바 있다. 퇴적단위 A1에서 C/N 비는 대체로 10 이하의 값을 가지며, TN과 TC, TOC 함량이 높은 30~31 m 구간에서 가장 낮은 값을 보인다. 일반적으로 해양의 식물성 플랑크톤은 10 이하의 낮은 C/N 비를 가지는 반면 육상의 고등식물들은 단백질보다 탄수화물의 함량이 높아 C/N비가 매우 높게 나타난다(Meyers, 1994, 1997; Tyson, 2001; Lamb *et al.*, 2006). 대부분의 육상 식물은 20 이상의 C/N비를 가지며(Meyers, 1994; Zong *et al.*, 2006), 보통 C/N비가 15이상일 때는 육상 기원의 유기물이 우세한 것으로 해석한다(Stein, 1991; Kong *et al.*, 2009). 그러므로 퇴적단위 A1에서의 낮은 C/N비도 해양의 영향이 강했을 가능성을 시사한다.

낙동강 하구 해역에서의 해수면 변동 곡선에 의하면 지난 약 10,000년 전부터 지난 약 8,000년 전까지 해수면 상승 속도는 둔화 내지 정체되었다(Suk, 1989; Min, 1994; Park *et al.*, 2000). 그리하여 상대적으로 민물의 영향을 많이 받던 연구지역은 지난 약 8,000년 전부터 빠른 속도로 해침이 진행되면서 해양의 영향이 상대적으로 증가하여 퇴적물 내 높은 TN, TC, TOC 함량과 낮은 C/N 비를 가지는 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 낮아지는 사질 함량과 높아지는 점토 함량은 수력학적으로 비교적 낮은 에너지의 환경으로 전이하였음을 지지해준다.

퇴적단위 A2 : 지난 약 8,000~5,000년 전 사이에 쌓인 퇴적단위 A2는 상부로 가면서 TN과 TC, TOC 함량이 감소한다. 28.7 m 깊이에서 CaCO₃ 함량이 급격하게 감소하고, 해면동물 골침류와 같은 해양성 생물들의 산출량이 줄어든다(그림 4). 일반적으로 퇴적물의 CaCO₃ 함량은 탄산염 패각을 갖고 있는 해양 생물의 공급과 세설성 퇴적물 유입에 의해 영향을 크게 받는다(Gardner, 1975). 이를 종합해 보면, 이 시기는 퇴적단위 A1과 반대로 해양의 영향이 점차 감소하거나 민물의 영향이 점차 증가함에 의한 것으로 보인다. 또한 같은 구간에서 염수성 저서성 유공충의 산출이 줄어들고 다시 염하구성 저서성 유공충의 산출량이 증가한다(그림 4). 이러한 결과 역시 해양의 영향이 이전보다 약해졌거나 민물의 영향이 강해지면서 염수성보다 기수성 유공충이 우점종을 이루었기 때문일 것이다. 일반적으로 삼각주 환

경에서 퇴적속도는 해수면 상승 정도보다 크기 때문에 해수면이 상승하고 있더라도 민물의 영향이 점차 증가할 수 있다. 또한 OSL 연대 측정 결과에 의하면 이 시기는 해수면 상승이 안정되는 시기를 포함하고 있어 해수의 영향이 상대적으로 감소했을 가능성도 있다.

퇴적단위 A3: 퇴적단위 A3는 해수면 변동이 거의 없었을 것으로 추정되는 지난 약 5,400~2,500년 전 사이에 형성되었다. 지난 약 5,400~5,200년 전에는 급격하게 빨라진 퇴적률과 상향조립화 경향을 볼 수 있으며, 식물파편이 지속적으로 산출된다(그림 2). 또한 TN과 TC, CaCO₃ 함량이 현저하게 감소하며, C/N 비는 10 이상의 값을 가진다(그림 4). 이러한 결과를 종합해보면 이 시기에 낙동강 삼각주의 전진 퇴적작용이 활발하게 일어났음을 알 수 있다. 퇴적단위 A3에서 TN과 TC 함량은 감소하는 반면에 TOC 함량은 증가한다. 해양퇴적물 내 TOC 함량은 표층 생산력의 증가 외에도 육상기원 유기물의 유입과도 깊은 관련이 있기 때문에(Stein, 1991), 높아진 TOC 함량은 육상으로부터의 많은 공급을 지시하는 것으로 판단된다. 이 시기에는 하부 퇴적단위에 비해 저서성 유공충 및 해면동물 골침류와 같은 해양성 생물들의 산출량이 상부로 갈수록 줄어든다. 또한 염하구성 저서성 유공충인 *P. gaimardii*의 산출량이 상부에서 급감하는 것을 볼 수 있다. 이는 연구지역에 낙동강으로부터 민물의 유입이 더 활발해져 염도가 감소하였기 때문이라고 생각된다.

결론적으로 연구지역은 지난 약 8,000년 전 경에 빠른 해수면 상승으로 인해 해양의 영향을 많이 받은 곳이었다. 그 후, 퇴적단위 A2 형성시기에 해수면 상승이 거의 멈추면서 해양 환경의 영향이 점차 줄어들고 육상으로부터의 하천수 유입과 퇴적물 공급이 점차 강해진 것으로 해석된다. 또한 지난 약 5,400년 전 경에 본격적인 낙동강 삼각주의 성장이 일어난 것으로 판단된다(그림 5). 연구지역과 인접한 곳에서도 해양환경이 지난 약 8,000년 전 경부터 증대되었다가 약 6,000년 전 경부터 다시 축소하기 시작하였고, 약 5,000년 전 경을 전후로 본격적인 낙동강 삼각주가 성장이 시작되었다고 보고된 바 있다(Min, 1994; Park *et al.*, 2000; Ryu *et al.*, 2005).

현재 낙동강 하구와 인접한 한반도 남동부의 내대

륙붕은 지난 약 7,000년 전부터 6,100년 전 사이에 쿠로시오 해류의 지류인 대마난류(Tsushima Current)의 영향을 받은 것으로 보고되었다(Kong and Park, 2007). 내대륙붕 지역에서 대마난류의 영향을 받으면서 산출량이 증가하는 염수성 저서성 유공충인 *E. advenum*과 *Q. lamarckiana* (Wang *et al.*, 1985)가 ND-01 코어의 29~30 m 구간에서 우점종으로 나타난다. 또한 31 m 구간에서 주로 난대성 해역에 분포하는 *Dictyochoa* 속 규편모류(Koh, 2004)가 관찰된다(그림 3a). 그러므로 연구지역은 퇴적단위 A1상부와 A2 하부가 형성될 때 대마난류의 영향을 받았던 것으로 추정되며, 그 이후에는 낙동강으로부터의 민물의 영향을 더 많이 받는 환경으로 전이하면서 대마난류의 영향이 축소된 것으로 생각된다.

5.1.2 퇴적단위 B (16.60~18.80 m, ca. 2.5~1.5 ka)

퇴적단위 B는 지난 약 2,500~1,500년 전 사이의 연대를 보인다. *P. gaimardii*가 하부를 제외하고는 산출되지 않는 점과 해양생물의 급격한 산출량 감소, 그리고 식물 파편의 산출 증가를 볼 수 있다(그림 4). 이는 해양 환경의 영향이 줄어들고 하천수의 영향이 하부 퇴적단위가 형성되었을 때보다 훨씬 더 강해지고 있음을 말해준다. 퇴적단위 B 상부에서 C/N 비가 15 이상의 값을 가지기 시작하는 것도 육상으로부터의 하천수 공급이 우세해짐을 시사한다(Stein, 1991). 이 퇴적단위에서 엽층리로 발달해 있거나 렌즈상의 모래층이 하부 단위에 비해 잘 관찰되는데, 이는 파도나 조류, 그리고 낙동강 홍수에 의해 유발된 저탁류에 의한 것으로 추정된다.

5.1.3 퇴적단위 C (14.20~16.60 m, ca. 1.5~0.8 ka)

퇴적단위 C에서 유공충 및 해양미생물이 산출되지 않는 것과 식물파편이 풍부하게 산출 되는 것은 퇴적단위 B에 비하여 더욱 하천 환경에 가까워졌음을 지시한다. 또한 점토층과 교호하는 엽층리 혹은 렌즈상으로 발달한 세립질 모래층이 퇴적단위 B에 비해 훨씬 더 자주 관찰되며, 어떤 층들은 엽층리가 발달한 모래에서 점이적으로 상부로 갈수록 점토로 변하는 경향을 가지고 있다. 이러한 구조들은 파도에 의한 영향, 홍수로 일어날 수 있는 낙동강으로부터의 갑작스러운 퇴적물 공급, 그리고 지속적인 부유성 물질의 퇴적을 반영하는 것으로 해석된다. 이

퇴적단위에서는 분급이 아주 불량한 구간이 일부 존재하는데, 이는 서관구조가 많이 관찰되는 것으로 보아 생교란작용에 의한 것이라 판단된다.

5.1.4 퇴적단위 D (8.00~14.20 m, ca. 0.8~0.4 ka)

퇴적단위 D는 지난 약 800년 전부터 약 400년 전까지 퇴적되었으며, 이 시기에 가장 빠른 퇴적률을 보인다. 대부분이 모래질로 이루어져 있는 것과 하부에 비해 양호한 분급은 파도의 영향이 큰 연안환경에서 퇴적되었을 가능성을 지시한다(그림 5). 하지만 하구사주(river mouth bar)에서 흔히 나타나는 사층리나 등정연흔 사엽리(climbing-ripple lamination) 구조는 거의 관찰되지 않아 전면삼각주의 하부환경에 해당한다고 생각된다. 이 퇴적단위가 하부에서 퇴적단위 C와 뚜렷한 경계를 이루고 점이층리를 보이는 실트층이 존재하는 것은 밀도가 높은 하천수가 낙동강으로부터 간헐적으로 공급되었기 때문으로 보인다. 연구지역의 인접한 곳에서도 뚜렷한 저부 침식면을 나타내는 괴상 혹은 희미한 층리를 가지고 있는 모래층이 발견되는데(Ryu *et al.*, 2011), 이는 밀도가 높은 하천수에 의한 급격한 퇴적작용을 지시한다고 보고된 바 있다(Todd, 1989; Maizels, 1993).

5.2 안정동위원소 분석을 통한 환경 해석

일반적으로 유공충의 산소동위원소 값은 당시 살았던 해수의 온도에 가장 큰 영향을 받는다. 만약 산소동위원소 값이 1‰ 감소한다면 수온은 4~5°C 상승한다고 알려져 있다(Epstein *et al.*, 1953). 또한 산소동위원소는 염분의 변화에도 영향을 받는데, 산소동위원소 값이 1‰ 감소한다면 염분은 2‰ 감소한다(Epstein *et al.*, 1953). 퇴적단위 A에서 저서성 유공충을 이용한 산소동위원소 값은 대략 2‰의 범위를 갖는다. 이 값이 만약 당시 해수의 온도를 반영하는 것이라면, 지난 약 8,000년 동안 8~10°C의 온도 변화가 있었다는 것을 지시한다. 하지만 염분의 변화에 의한 영향이라면 4‰의 염분 변화가 있었다는 것을 지시한다. 홀로세 동안 해수는 2°C 이하의 변화가 있었다는 보고(Webb, 1985; COHMAP, 1988; Crowley and North, 1991)와 연구지역이 민물의 영향을 지속적으로 받는 환경임을 고려하였을 때, 연구지역에서 서식했던 *P. gaimardii*의 산소동위원소 값은 염분의 변화를 반영한다고 판단된다. 또한 Kim and Kennett (1998)은 황해와 남해 갈

은 하천수가 유입되는 대륙 주변부의 얇은 바다에서 유공충의 산소동위원소 값은 주로 염분에 의한 영향을 받는다고 보고한 바 있다. 그러므로 퇴적단위 A에서 산소동위원소 값이 전체적으로 감소하는 경향은 민물의 영향이 점점 강해져 염도가 감소했기 때문으로 판단되며, 이는 유기지화학 자료 해석과도 일치한다. 퇴적단위 A1과 A2에서 산소동위원소 값은 1%의 차이를 보이지만, A3에서는 2%의 비교적 큰 차이를 보인다. 또한 얇은 렌즈상의 모래층이 퇴적단위 A3에서 자주 관찰된다. 이상을 종합해보면, 퇴적단위 A3의 형성 시기가 A1과 A2가 형성되었을 때보다 육상환경에 더 가까워져 간헐적인 홍수와 같은 민물의 대량유입의 영향을 더 많이 반영하였기 때문이라 생각된다.

유공충의 탄소동위원소 값은 해양 생물의 생산력에 의한 영향을 받는다(Kim *et al.*, 2004). 해양 생물의 생산력이 증가하면 광합성 작용이 활발해지는데, 이 때에 ^{12}C 의 소모가 많아지고 ^{13}C 값이 상대적으로 더 높아지게 되어 탄소동위원소 값은 증가하게 된다. ND-01 코어의 29~30 m에서 탄소동위원소 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 낮은 C/N 비와

높은 TN, TC, TOC 함량을 가지는 구간과 해양 생물이 많이 산출되는 구간과도 일치한다(그림 4). 그러므로 이 시기에 해양 생물의 생산력이 증가함에 따라 탄소동위원소 값이 증가한 것으로 생각된다.

탄소동위원소 값은 민물에 의한 영향도 받는다(Ingram *et al.*, 1996; Kim and Kennett, 1998; Kim *et al.*, 2004). 민물은 주로 ^{12}C 로 구성된 육지기원의 유기탄소를 많이 포함하고 있다. 따라서 일반적으로 민물의 영향을 많이 받을수록 산소동위원소와 탄소동위원소 값은 모두 낮아진다. ND-01 코어의 퇴적단위 A1과 A2에서 탄소동위원소 값은 산소동위원소 값의 변동 주기와 유사하다. 이는 탄소동위원소가 산소동위원소처럼 민물의 유입에 의한 염도변화를 반영하는 것으로 해석된다. Kim (2012)은 낙동강 하구역에 서식하는 현생 백합과(*Meretrix sp.*) 조개 패각을 이용해 낙동강 하구둑의 방류량이 증가할수록 낮은 탄소동위원소 값을 가진다고 보고하였다. 이는 낙동강으로부터의 하천수 유입이 강할수록 탄소동위원소 값이 낮아짐을 시사한다. 또한 황해 연안지역에서도 민물의 유입이 강할수록 저서성 유공

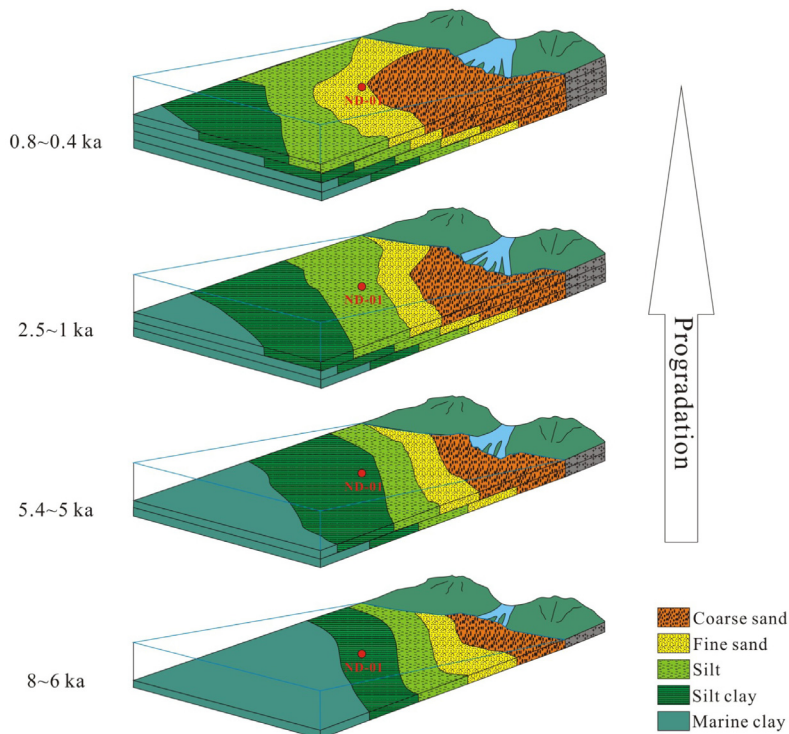


Fig. 5. Schematic diagram representing the evolution of Nakdong Delta system during last 8,000 years.

층의 산소동위원소 및 탄소동위원소는 함께 낮아진다고 보고된 바 있다(Kim and Kennet, 1998).

퇴적단위 A1과 A2에서 산소 및 탄소동위원소 값이 상대적으로 유사한 경향성을 보이는 반면에 퇴적단위 A3에서는 유사한 경향성을 보이지 않는다. 또한 *P. gaimardii*의 탄소동위원소가 민물의 영향을 반영한다면 퇴적단위 A3에서 하부 단위보다 더 낮은 값을 가져야 하지만 분석결과에서는 이와 같은 경향이 나타나지 않는다(그림 4). 유공충과 같이 탄산염각을 갖는 동물들은 고유의 생체작용(vital effect)에 의해 당시 해양환경을 정확하게 지시하지 않을 수 있으므로, 생체효과가 작을수록 안정동위원소 연구에 적합한 것으로 알려져 있다(Grossman, 1987; Kim et al., 2004). 하지만 염하구 지역의 저서성 유공충인 *P. gaimardii*를 이용한 안정동위원소 연구 결과는 지금까지 보고된 적이 없다. 따라서 *P. gaimardii*의 경우 강한 생체작용 효과 때문에 당시 해수의 환경을 직접적으로 지시하지 않을 가능성도 배제할 수 없다.

6. 결론

낙동강 하구 주변지역에서 획득한 홀로세 퇴적물의 퇴적학적, 유기지화학적, 안정동위원소 분석 및 OSL 연대측정 결과를 이용한 고환경 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 지난 약 8,000년 동안 형성된 퇴적층은 조직 및 구조적 특징, 미화석 산출 특징을 기준으로 총 4개의 퇴적단위(하부로부터 A, B, C, D)로 구분된다. 이 퇴적층은 하부의 전삼각주환경의 퇴적상에서 상부의 전면삼각주 퇴적상으로 변하는 전형적인 삼각주 전진퇴적 시퀀스를 보여준다.
- 2) 균질한 이질 퇴적층으로 구성되어 있는 퇴적단위 A는 유기지화학적 분석을 통하여 A1, A2, A3로 세분된다. 퇴적단위 A1 (8.0 ka)에서 TN, TC, TOC 함량의 증가와 C/N 비의 감소는 해양의 영향이 강해짐을 지시한다. A1 상부와 A2 하부에서 염수성 저서성 유공충인 *E. advenum*과 *Q. lamarckiana*와 주로 난대성 해역에 분포하는 *Dictyocha* 속 규편모류가 산출되는 것은 이 시기에 해수면이 빠르게 상승함에 따라 대마난류의 영향을 받았을 가능성을 시사한다. A2가 형성된 시기(8.0~5.4 ka)에는 해수면 상승 속도가

점점 감소하면서 해양의 영향이 줄어들고 육상의 영향이 강해지기 시작하면서 TN, TC, TOC, CaCO₃ 함량이 감소하는 것으로 해석된다. A3 최하부에서 급격하게 증가한 C/N 비와 빨라진 퇴적률을 통해 지난 약 5,400년 전부터 해수면 상승은 거의 정체 되었으며, 낙동강 삼각주가 본격적으로 성장하였다고 추정할 수 있다.

- 3) 퇴적단위 A에서 가장 많이 산출되는 저서성 유공충인 *P. gaimardii*을 이용하여 산소와 탄소동위원소 값을 얻었다. 상부로 갈수록 감소하는 산소동위원소의 값은 민물의 유입에 의한 염도 변화를 반영한다. 마찬가지로 탄소동위원소 값이 산소동위원소 값과 비슷한 경향을 보이는 일부 구간에서는 민물의 영향을 반영하는 것으로 보인다. 또한 해양 생물의 산출이 풍부한 곳에서는 생산력 증가로 인해 탄소동위원소 값이 증가한 것으로 판단된다. 반면에, 민물의 영향을 더 많이 받는 환경에서 감소하지 않은 탄소동위원소 값을 통해 *P. gaimardii*의 생체작용에 의한 영향이 일어났을 가능성도 배제할 수 없다.
- 4) 이번 연구를 통해 지난 약 8,000년 동안 낙동강 하구 지역의 환경변화와 낙동강 삼각주의 발달 과정을 복원하였다. 하지만 지난 마지막 빙하기 이후부터 일어난 해수면 변동과 관련된 고환경 변화를 복원하기 위해서는 하부 구간에 대한 추가 연구가 필요하다.

사 사

이번 연구는 한국연구재단의 연구비 지원(NRF-2012R1A1A2038789)을 받아 수행되었으며, 부분적으로 2013년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호C1010214-01-01)를 지원받아 연구하였기에 감사드립니다. 유공충 동정에 도움을 주신 민족사관고등학교의 김정무 박사님께 감사드립니다. 또한 유익한 지적과 도움말을 주신 강원대학교 지질학과 우경식 교수님, 익명의 심사위원님, 그리고 한국지질환경연구소 류춘길 박사님께 감사를 드립니다.

REFERENCES

Aigner, T., 1985, Storm Depositional Systems. Lecture

- notes in Earth Science, 3, Springer, Berlin, 174 p.
- Bak, Y.S., 2012, Sea-level changes during the Holocene in Keum River area, West Coast of Korea; based on the diatom assemblages. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 113-120 (in Korean with English abstract).
- Castro, D.F., Rossetti, D.F. and Pessenda, L.C.R., 2010, Facies, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and C/N analyses in a late Quaternary compound estuarine fill, northern Brazil and relation to sea level. *Marine Geology*, 274, 135-150.
- Chang, T.S. and Nam, S.I., 2011, Geochemical logging of shallow-sea tidal bar sediment cores using a XRF core scanner: an application of XRF core-scanning to lithostratigraphic analysis. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 471-484 (in Korean with English abstract).
- Chen, Z., Song, B., Wang, Z. and Cai, Y., 2000, Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation. *Marine Geology*, 162, 423-441.
- Cheong, H.K., 1989, A study on the benthic foraminifera from the tidal flats adjacent to Incheon, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 5, 39-52 (in Korean with English abstract).
- Cheong, H.K., 1991, Recent Benthic Foraminifera from the Southern Yellow Sea. PhD Thesis, Korea University, Seoul, Korea, 342 p.
- Chun, J.H., Kim, Y., Bahk, J.J., Kim, Y.J., Kang, D.H., Kim, Y.H., Kim, G.Y. and Ryu, B.J., 2015, Late Holocene distal mud deposits off the Nakdong delta, SE Korea: evidence for shore-parallel sediment transport in a current-dominated setting. *Geo-Marine Letters*, 6, 475-485
- Chung, C.H. and Ryu, C.K., 2012, Holocene vegetation dynamics and its environmental implications inferred from pollen record in Gimhae area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 1-10 (in Korean with English abstract).
- Cloern, J.E., Canuel, E.A. and Harris, D., 2002, Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system. *Limnology and Oceanography*, 47, 713-729.
- COHMAP (Cooperative Holocene Mapping Project) members, 1988, Climatic changes of the last 18,000 years: observations and model simulations. *Science* 241, 1043-052.
- Crowley, T.J. and North, G.R., 1991, *Paleoclimatology*. Oxford Monogr. Geol. Geophys. 16, 339 p.
- Deines, P., 1980, The isotopic composition of reduced organic carbon. In: Fritz, P., Fontes, J.C. (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. The Terrestrial Environment, vol. 1. A. Elsevier, Amsterdam, 329-406.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H. and Urey, H. C., 1953, Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bulletin of Geological Society of America*, 64, 1315-1326.
- Fairbanks, R.G., 1989, A 17000 year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the younger dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342, 637-642.
- Gardner, J.V., 1975, Late Pleistocene carbonate dissolution cycles in the Eastern Equatorial Atlantic In: Sliter, W.V., Be, A.W.H. and Berger, W.H. (Eds), *Dissolution of deep-sea carbonates: Cushman Found. Journal of Foraminifera Research*, 13, 129-141.
- Goni, M.A., Ruttenger, K.C. and Eglinton, T.I., 1997, Sources and contribution of terrigenous organic carbon to surface sediments in the Gulf of Mexico. *Nature*, 389, 275-278.
- Grossman, E.L., 1987, Stable isotopes in modern benthic foraminifera: A study of vital effect. *Journal of Foraminifera Research*, 17, 48-61.
- Haines, E.B., 1976, Stable carbon isotope ratios in biota, soils and tidal water of a Georgia salt marsh. *Estuarine and Coastal Marine Science*. 4, 609-616
- Hwang, S.I., Kim, J.Y. and Yoon, S.O., 2009, Late Holocene Environmental Change and Geomorphological Development in the Northwestern Part of the Paleogimhae Bay. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 16, 85-99 (in Korean with English abstract).
- Ingram, B.L., Ingle, J.C. and Conrad, M.E., 1996, A 2000yr record of Sacramento San Joaquin River inflow to San Francisco Bay estuary, California. *Geology*, 24, 331-334.
- Jun, C.P., Yi, S.H. and Lee, S.J., 2009, Holocene environmental reconstruction of Pyeongtaek blanket wetland inferred from palynological assemblages. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 299-309 (in Korean with English abstract).
- Jung, H.K., Park, J.H. and Kim, C.B., 2010, Carbon Isotope Analysis for the Climatic Environment Change in South Korea During the Holocene: a Case Study in Yengjong Islands of Yellow Sea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 31, 313-321 (in Korean with English abstract).
- Kang, S., Lim, D.I., Kim, S.Y. and Yoo, H.S., 2010, Benthic foraminiferal assemblage of core sediments from the inner-shelf of northern East China Sea and paleoceanographic change. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46 395-411 (in Korean with English abstract).
- Kato, M., 1986, Recent shallow water foraminifera in Hisoshima Bay, Seto Inland Sea, Japan. In: Matoba, Y. and Kato, M (eds.), *Studies on Cenozoic Benthic Foraminifera in Japan*, Mining College, Akita University,

- 27-42 (in Japanese).
- Kim, H.J., Bak, Y.S. and Lee, J.D., 2011, Holocene paleo-environmental analysis from the Sapsido in Boryeong, Yellow Sea: evidence from the diatom record. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 371-378 (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.
- Kim, J.M. and Kennett, J.P., 1998, Paleoenvironmental changes associated with the Holocene marine transgression, Yellow Sea (Hwanghae). *Marine Micropaleontology*, 34, 71-89.
- Kim, J.M. and Kucera, M., 2000, Benthic foraminifer record of environmental changes in the Yellow Sea (Hwanghae) during the last 15,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1067-1085.
- Kim, J.M., Woo, K.S., Lee, Y.J. and Seto, K., 2004, Foraminiferal stable isotope analysis and paleoceanographic changes in ODP Leg 204, NE Pacific. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 20, 155-172 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., 2012, Late Holocene paleoclimate reconstructions using the geochemical compositions of bivalves from the shell mounds in the Korean Peninsula and Jeju island. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 115 p (in Korean with English abstract).
- Koh, Y.K., 2004, Silicoflagellates, Ebridians, Archaeomonads and Endoskeletal Dinoflagellates. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, Special Publication, 147-163 (in Korean with English abstract).
- Kong, G.S., Han, H.C., Kim, S.P., Kim, J.H. and Stott, L., 2009, Organic Chemical Characteristics and Its Paleocyanographic Implications of the Holocene Sediments on the Continental Shelves Off the Southern Coast of Korea. *Economic and Environmental Geology*, 42, 107-120 (in Korean with English abstract).
- Kong, G.S. and Park, S.C., 2007, Paleoenvironmental changes and depositional history of the Korea (Tsushima) Strait since the LGM. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 84-104.
- Kwon, H.J., 1973, A Geomorphologic Study of the Nakdong Delta. *Journal of the Korean Geographical Society*, 8, 8-23 (in Korean with English abstract).
- Lamb, A.L., Wilson, G.P. and Leng, M.J., 2006, A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 75, 29-57.
- Lee, S.H. and Yu, K.M., 2011, Depositional environments of Holocene laminated layers in the core SJ99 collected from the Songjiho Lagoon on the eastern coast of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 123-137 (in Korean with English abstract).
- Li, C., Wang, P., Sun, H., Zhang, J., Fan, D. and Deng, B., 2002, Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution. *Sedimentary Geology*, 152, 133-158.
- Maizels, J., 1993, Lithofacies variations within sandur deposits: the role of runoff regime, flow dynamics and sediment supply characteristics. *Sedimentary Geology*, 85, 299-325.
- Matoba, Y. and Fukasawa, K., 1992, Depth Distribution of Recent Benthic Foraminifera on the Continental Shelf and Uppermost Slope off Southern Akita Prefecture, Northeast Japan (The Eastern Japan Sea). In: K. Ishizaki and T. Saito (eds.), *Centenary of Japanese Micropaleontology*, 207-226.
- Meyers, P.A., 1994, Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289-302.
- Meyers, P.A., 1997, Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27, 213-250.
- 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, Seoul, 196 p (in Korean with English abstract).
- Nahm, W.H., Kim, J.Y., Yang, D.Y., Bong, P.Y., Takayasu, K. and Yu, K.M., 2004, Organic geochemical and palynological evidence for Holocene climate fluctuations of the Yeongsan River estuary, southwestern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 441-454 (in Korean with English abstract).
- Nam, S.I., 2011, Current Research Issues on Paleoclimate and Paleocyanography in Korea: From Korean Peninsula to Antarctic-Arctic Polar Areas. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 441-442 (in Korean with English abstract).
- Nam, S.I., Chang, J.H., Kong, G.S., Kim, S.P. and Yoo, D.G., 2003, Holocene sea-level rise and paleoenvironmental changes in Korea Strait shelf. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 17, 7-16 (in Korean with English abstract).
- 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, K.W. and Lee, H.H., 1999, Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea (Korea Strait).

- Continental Shelf Research, 19, 589-608.
- Park, S.C., Yoo, D.G., Lee, C.W. and Lee, E.I., 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, Pusan National University, Busan, 220 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 delta. *Journal of Korean Earth Science Society*, 26, 443-458 (in Korean with English abstract).
- Ryu, C.K., Kang, S., Chung, S.G. and Jeon, Y.M., 2011, Late Quaternary depositional environmental change in the northern marginal area of the Nakdong River delta, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 213-233 (in Korean with English abstract).
- Ryu, E., Lee, S.J., Yang, D.Y. and Kim, J.Y., 2008, Paleoenvironmental studies of the Korean peninsula inferred from diatom assemblages. *Quaternary International*, 176-177, 36-45.
- Shennan, I., Lambeck, K., Horton, B., Innes, J., Lloyd, J., McArthur, J., Purcell, T. and Rutherford, M., 2000, Late Devensian and Holocene records of relative sea-level changes in northwest Scotland and their implications for glacio-hydro-isostatic modelling. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1103-1135.
- Shennan, I., Tooley, M.J., Green, F., Innes, J., Kennington, K., Lloyd, J. and Rutherford, M., 1999, Sea level, climate change and coastal evolution in Morar, northwest Scotland. *Geologie en Mijnbouw*, 77, 247-262.
- Stein, R., 1991, Accumulation of organic carbon in marine sediments. *Lecture Notes in Earth Sciences*, Springer, Heidelberg, 30-31.
- 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, Tokyo University, Tokyo, Japan, 246 p.
- Szarek, R., Kuhnt, W., Kawamura, H. and Kitazato, H., 2006, Distribution of recent benthic foraminifera on the Sunda Shelf (South China Sea). *Marine Micropaleontology*, 61, 171-195.
- Takata, H., Khim, B.K., Cheong, D.K., Shin, S.W., Takayasu, K., Park, Y.H. and Lim, H.S., 2015, Holocene benthic foraminiferal faunas in coastal deposits of the Nakdong River delta (Korea) and Izumo Plain (Japan). *Quaternary International*, In press.
- Todd, S.P., 1989, Stream-driven, high-density gravelly traction carpets: possible deposits in the Trabeg Conglomerate Formation, SW Ireland and theoretical considerations of their origin. *Sedimentology*, 36, 513-530.
- Tyson, R.V., 2001, Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: some results of a modeling study. *Organic Geochemistry*, 32, 333-339.
- Uchio, T., 1962, Influence of the River Shinano on foraminifera and sediment grain size distribution. *Publication of Seto Marine Biological Laboratory*, 10, 363-393.
- Wang, P., Zhang, J. and Min, Q., 1985, Distribution of foraminifera in surface sediments of the East China Sea. In: Wang, P. *et al.* (eds.), *Marine Micropaleontology of China*, China Ocean Press, 34-69.
- Webb, T., 1985, Holocene palynology and climate. In: Hecht, A.D. (Ed.), *Paleoclimate Analysis and Modeling*. Wiley-Interscience, New York, 163-96.
- Wilson, G.W., Lamb, A.L., Leng, M.J., Gonzalez, S. and Huddart, D., 2005a, Variability of organic $\delta^{13}C$ and C/N in the Mersey Estuary, UK and its implications for sea-level reconstruction studies. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64, 685-698.
- Wilson, G.P., Lamb, A.L., Leng, M.J., Gonzalez, S. and Huddart, D., 2005b, $\delta^{13}C$ and C/N as potential coastal palaeoenvironmental indicators in the Mersey Estuary, UK. *Quaternary Science Reviews*, 24, 2015-2029.
- Yoo, D.G., 2003, Study on the Late Quaternary paleoclimate changes, using deep-drill cores, in the Continental Shelf, South Sea. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 316 p (in Korean with English abstract).
- Yoo, D.G., Chang, J.H., Lee, H.Y., Kim, S.P., Nam, S.I. and Gong, K.S., 2004, Stratigraphy and depositional environments 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., Lee, C.W. and Park, S.C., 2011, Seismic Stratigraphy and Depositional History of Holocene Transgressive Deposits in the Southeastern Continental Shelf, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 44, 303-312 (in Korean with English abstract).
- 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. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 8, 369-379 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S. and Yee, E.J., 1985, The Molluscan assemblages of the Sugari shell-mound and the sea-level changes. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 1,

141-152 (in Korean with English abstract).
Yum, J.G., Yu, K.M., Sampei, Y., Tokuoka, T. and Nakamura, T., 2002, Depositional environmental change during the last 400 years in the Hwajinpo lagoon on the eastern coast of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 21-32 (in Korean with English abstract).
Zong, Y., Lloyd, J.M., Leng, M.J., Yim, W.W.-S. and Huang, G., 2006, Reconstruction of Holocene monsoon

history from the Pearl River Estuary, southern China, using diatoms and carbon isotope ratios. *The Holocene* 16(2), 251-263.

Received : December 3, 2015

Revised : February 3, 2016

Accepted : February 12, 2016