

낙동강 삼각주 퇴적체 중부 지역에서 채취한 시추퇴적물 시료를 이용한 신생대 제4기 후기 퇴적환경 변화 연구

함아름^{1,2} · 신승원¹ · 김진철³ · 정상용⁴ · Sharma Komal¹ · 정대교^{1,*}

¹강원대학교 지질·지구물리학과

²한국농어촌공사

³한국지질자원연구원

⁴부경대학교 지구환경과학과

요 약

낙동강 삼각주 퇴적체의 중부 지역에서 회수한 시추코어(OW-1) 퇴적물의 퇴적조직 및 퇴적구조 관찰, 입도 분석, 유기지화학 분석, 색지수 측정, 연대측정 및 구조 분석을 실시하여 제4기 후기 동안의 낙동강 하구지역 퇴적환경 변화를 연구하였다. 시추퇴적층은 일곱 개의 퇴적단위로 분류되는데, 하부로부터 퇴적단위 A, B, C, D, E, F, G이고, OSL과 AMS 연대 측정 결과에 의하면 시추코어는 지난 플라이스토세 최후기 인 약 13,000년 전부터 현재까지 퇴적되었다. 퇴적단위 A (11-13 ka)는 해침이 일어나기 전 육성 환경에서 형성된 하도 퇴적층으로 모래 입자표면에 국부적으로 산화된 흔적이 관찰된다. 퇴적단위 B (9.8-11 ka)는 하위 A층에 비해 세립한 입도를 보이며 퇴적물의 색에 의해 구분이 가능하고, 해양 기원의 패각도 산출된다. 따라서 연구지역은 퇴적단위 B의 형성시기부터 해침에 의해 해양환경으로 전이되었다고 해석된다. 퇴적단위 C (8-9.8 ka)의 퇴적시기엔 해수면이 본격적으로 상승을 하면서 퇴적작용도 활발하게 진행된 하천 하구 환경으로 전이된 것으로 보인다. 퇴적단위 D (6-8 ka)는 TN, TC, TOC 값들이 높고 C/N ratio가 낮은 것으로 보아 해침이 좀 더 진행되어 해수의 영향이 최대에 이른 시기를 지시한다. 코어 상부의 퇴적단위 E와 F, G는 해수면이 현재 상태에 도달한 후, 약 5,000년 전부터 낙동강 삼각주의 전진 퇴적에 의해 형성된 것으로 해석된다.

주요어: 낙동강 삼각주, 제4기 후기, 하구, 연대측정, 퇴적환경

A-Reum Ham, Seungwon Shin, Jin-Cheul Kim, Sang-Yong Jung, Sharma Komal and Daekyo Cheong, 2018, Late Quaternary depositional environmental changes from the middle part of Nakdong River delta core sediments. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 1, p. 47-59

ABSTRACT: OW-1 core sediments from the middle part of Nakdong River delta can be divided into seven sedimentary units based on sedimentary texture, organic geochemical analysis, sediment color and occurrence of microfossils. According to age dating, OW-1 core sediments started to be formed around 13 ka. Unit A is fluvial channel sediments formed in a continental environment before transgression. Unit B has a finer grain size than the underlying Unit A, and the sediment tends to be slightly brighter. This sediment is considered to have been deposited at the time of transgression because the shell fragments were contained. Unit C appears to have been deposited in the estuarine environment as the sea level rose, and Unit D with high TN, TC, TOC and low C/N ratio was deposited in a solely marine environment. Since the sea level has been stillstand (after 5 ka), Unit E, F and G have been deposited by progradation of the Nakdong River delta.

Key words: Nakdong River delta, late Quaternary, estuarine, age dating, sedimentary environment

(A-Reum Ham, Seungwon Shin, Sharma Komal and Daekyo Cheong, Division of Geology & Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; A-Reum Ham, Korea Rural Community Corporation, Naju 58217, Republic of Korea; Jin-Cheul Kim, Korea Institute of Geoscience and Mining of Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Sang-Yong Jung, Department of Earth and Environmental Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)

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

1. 서론

전 세계에 분포하는 하구 혹은 삼각주와 같은 연안지역은 해수면 변화에 민감하게 반응하는 동시에 신생대 제4기 후기 퇴적환경 변화에 대한 기록을 잘 보존하고 있다. 특히 홀로세 동안의 해수면 상승은 연안지역 개발, 항만건설, 해양구조물 축조 및 도심시설이 위치한 해안지역의 침수 및 해안지형변화와 관련되어 매우 큰 영향을 주고 있다(KIGAM, 2003). 그리고 하구지역은 육상과 해양으로부터 다량의 퇴적물이 공급되는 곳으로서 두꺼운 홀로세 퇴적층이 잘 보존되어 있기 때문에, 이곳의 퇴적층은 고환경, 고기후, 해수면 변화 등의 연구에 자주 이용된다(Lamb *et al.*, 2006). 삼각주는 하구에 발달하는 대표적인 퇴적체로서 신생대 제4기 후기 고환경 연구 재료로 유용하게 활용될 수 있다(Li *et al.*, 2002).

연구지역인 낙동강 삼각주는 주향이동단층대인 양산단층대의 연장선상에 위치하고 있어 신생대 후기 동안 낙동강으로부터 유입된 퇴적물이 최대 80 m 이상의 두께로 퇴적될 수 있는 공간이 단층작용에 의해 형성될 수 있었던 것으로 추정되며 이러한 두꺼운 퇴적층은 고해상의 홀로세 고환경 변화 연구의 유용한 대상이 된다. 그러나 과거에는 주로 낙동강 하류 지역의 모래톱 성장과 관련된 지형학적 연구 및 토목지

질학적 연구만이 국한적으로 진행되어 왔다(Kwon, 1973; Ban, 1987; Oh, 1994). 이후 지형학과 고고학 분야에서 패총을 이용해 낙동강 일대의 해수면 변동사를 밝히는 연구가 수행되었으며(Yoon and Lee, 1985; Lee and Yoon, 1992; Hwang *et al.*, 2009), 미고생물을 이용한 지질학적 연구가 단편적으로 진행된 바 있다(Ryu, 2003; Ryu *et al.*, 2005a, 2011). 그리고 최근 들어 낙동강 삼각주 퇴적층에 대한 관심이 증가하여 낙동강 하구지역에서 채취한 퇴적층 시추코어인 ND-01(강원대학교 시추)를 활용하여 다양한 연대측정과 유공충 및 구조 분석을 통한 미고생물학적 연구뿐만 아니라, 고지자기 방향 등에 대한 다양한 지질학적 연구가 활발히 진행되어 왔다(Kim *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2015; Takata *et al.*, 2016; Cho *et al.*, 2017). 이 밖에도 연안지역에서 획득한 코어 및 탄성파 자료를 활용하여 보다 광역적인 삼각주의 성장 모델이 제시되기도 하였다(Yoo *et al.*, 2004, 2011, 2014).

이번 연구에서는 아직 많은 연구가 진행되지 않은 낙동강 삼각주 퇴적체의 중동부지역에서 획득한 코어퇴적물을 연구 대상으로 하였다. 이번 연구를 통해 56 m 길이의 시추코어 퇴적물을 대상으로 육안관찰, 입도분석, 미화석 관찰, 유기지화학 분석, 구조 분석 및 연대측정을 실시하여 낙동강 삼각주 퇴적층의 보다 정확한 성장과정 및 한반도 남동부 제4기 후기 퇴

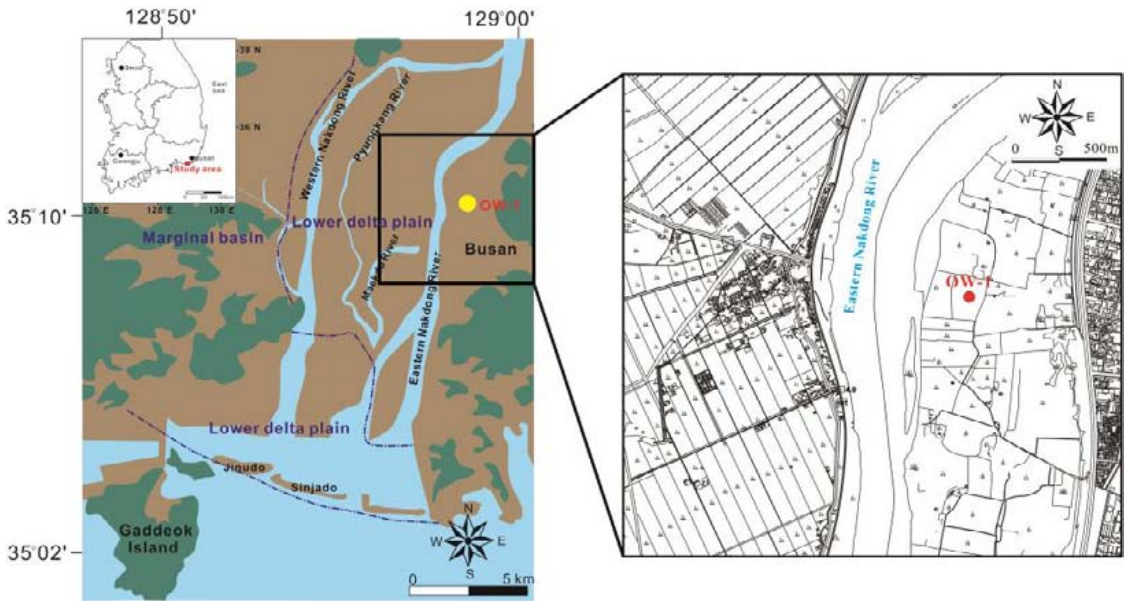


Fig. 1. Location of the Nakdong River Delta where a sediment core (OW-1) was obtained.

적층의 해수면 변동과 관련된 퇴적환경 변화를 규명하고자 하였다.

2. 연구 지역

연구지역은 한반도 남동부 낙동강 하구 일대에 발달한 낙동강 삼각주이다. 낙동강 삼각주는 양산천이 낙동강 본류에 합류하는 물금 부근에서 낙동강 하구를 향해 펼쳐지는 한국 최대 규모의 삼각주로서 동서쪽으로 산맥에 의해 둘러싸인 하나의 긴 곡분형태를 이루고 있다. 현재 낙동강 삼각주 중 육상에 노출된 면적은 약 136 km²이고, 해수면 하에 위치하는 간석지가 약 37 km²으로, 지형과 수리학적 특성에 따라 하중도(interdistributary island)와 자연제방으로 구성된 상부 삼각주평원(upper delta plain), 사주, 조간대 및 해안평야로 이루어진 하부 삼각주평원(lower delta plain), 그리고 전체 삼각주의 배후저습지에 해당하는 삼각주 주변분지(marginal basin)로 구분할 수 있다(Kwon, 1973)(그림 1). 이처럼 현재 노출된 낙동강 삼각주는 전반적으로 삼각주 평원으로 분류할 수 있으며, 김해국제공항 및 시가지로 개발 활용되고 있는 상태이다.

낙동강 삼각주 퇴적층은 중생대 백악기 각섬석 화강암을 기반암으로 하여 이를 부정합으로 덮고 있는데, 시추지역 주변 또한 경상누층군에 해당하는 퇴적암류, 화산암류 및 화강암류가 산계를 형성하며 에워싸고 있다. 또한 북북동 방향으로 발달한 양산단층이 낙동강 하구를 관통하고 있으며, 이는 제 4기 퇴적층을 퇴적시킨 침식곡저의 형성과 밀접한 관련이 있을 것으로 추정된다(Ryu, 2003).

이번 연구대상인 시추퇴적물 코어시료는 낙동강 삼각주 상부 삼각주 평원 중 중앙부의 동쪽지역에서 채취하였다. 채취한 지점은 부산광역시 사상구 삼락동에 위치한 삼락공원에 해당하며, 좌표상으로는 동경 128° 58' 15.11", 북위 35° 10' 32.28"에 위치한다.

3. 연구 방법

OW-1 코어는 낙동강 델타 퇴적층 부지특성 평가 기술 개발 연구과제의 수행 과정 중에 획득한 시추코어이다. 따라서 표준관입시험(SPT: Standard penetration Test) 수행 중에 회수된 부분 퇴적물 시료로 이

루어져 있다. 또한, 1 m 길이의 완전한 코어 6개를 획득하여 이번 연구에 활용하였다. 획득한 코어에 대해 실내에서 퇴적물 시료의 단면 관찰을 통해 색도, 조직, 퇴적구조 등의 특징들을 기재하여 주상도를 작성하였다. 그리고 75개의 부분시료와 1 m 길이의 완전한 코어시료에서 색, 입도가 변하는 구간을 위주로 7~12개 지점에서 시료를 채취하여 총 127개 지점에서 입도분석을 수행하였다. 입도분석은 과산화수소(H₂O₂)와 소량의 염산(HCl)을 이용하여 하루 동안 반응시켜 유기물과 탄산염 입자를 제거한 후에 63 μm 체를 이용하여 모래와 이질 크기의 입자들을 분리하였고, 모래 크기의 입자들은 다시 기계식 요동기(Mechanical seive shaker; CISA사)를 이용하여 입도별로 분류하였다. 이질 크기의 입자들은 강원대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 입도분석기(Particle Analyzer; Malvern, Model Mastersizer 2000)를 활용하여 분석하였다. 입도분석으로 나온 결과를 바탕으로 주상도와 비교하여 일차적인 퇴적단위를 분류하였다.

유기지화학적 분석은 주로 세립질 퇴적물로 구성된 8~22 m 깊이 구간에 대해서 수행하였다. 세립질 퇴적물을 아게이트 절구를 사용하여 분말시료로 제작한 후 한국해양연구원 부설 극지연구소에 의뢰하여 분석을 수행하였다. Automatic elemental analyzer (FlashEA 1112)를 통해 총탄소(TC, total carbon)와 총질소(TN, total nitrogen) 함량이 분석되었으며, TIC analyzer를 이용해 총무기탄소(TIC, total inorganic carbon) 함량을 분석하였다. 총유기탄소(TOC, total organic carbon) 함량은 TC와 TIC 함량의 차를 통해 추정하였으며, 탄산염 함량은 총무기탄소 함량에 8.333을 곱해 산출하였다(Stein, 1991). 그리고 세립질 구간에서는 스미어슬라이드(smear slide)를 제작하여 구조와 유공층과 같은 미화석 유무 및 함량을 실체현미경 하에서 판별하였으며, 다양한 구조가 나오는 것을 확인하고 동정(8~24 m 깊이)을 실시하였다.

하부 모래 구간(30~56 m 깊이)에 대해서는 분광광도계(spectrophotometer)를 사용하여 총 26개 지점에서 색지수를 측정하였다. 측정 장비는 분광 파장 범위가 360~740 nm 인 코니카 미놀타사의 CM-2600d를 사용하였고, 퇴적물의 색특성 중에서 밝기(L*), 색도 좌표 a* (녹색;- , 빨강색;+), 색도 좌표 b* (파랑색;- , 노랑색;+)에 대한 정량적인 값을 구하였다.

퇴적물의 연대측정은 총 6개 지점에서 실시하였

으며, OSL (optically stimulated luminescence)과 방사성 탄소연대측정을 각각 3개씩 실시하였다. 방사성탄소연대 측정을 위해서 18 m, 23 m, 37 m 깊이에서 조개 파편시료를 채취하였다. 한국지질자원연구원의 AMS (HVE 4110)를 이용한 방사성탄소연대측정을 실시하였으며, 측정된 연대값은 CALIB 7.1 프로그램과 IntCal 13을 사용하여 보정하였다.

OSL 연대측정을 위해서 암실에서 코어를 개봉한 후 빛에 노출되지 않도록 모래 시료를 채취(6 m, 34 m, 53 m)하여 은박지로 포장하여 보관하였다. 채취한 시료는 한국지질자원연구원에 설치된 TL/OSL 측정 장비(DA-20)를 통해 분석되었다.

규조 분석은 8~24 m 깊이 구간에서 총 17개의 시료를 이용하여 수행하였다. 시료는 실험 전에 하루 동안 동결건조 시켰으며, 동결건조된 시료에서 약 0.5 g을 채취하여 200 ml 비커에 담은 후 5 ml의 30% 과산화수소와 2 ml의 3% 염산을 넣어 유기물과 탄산염 입자를 제거하였다. 120°C의 핫플레이트 위에서 1시간 동안 반응시킨 후 증류수를 넣고, 위에 뜬 깨끗한 액체를 따라 버렸다. 증류수를 넣고 빼내는 과정을 4시간 간격으로 세 번 반복한 후에 마이크로피펫을 이용하여 용액의 0.5 ml, 0.3 ml를 끌어올려 슬라이드글라스에 떨어 후 본드를 첨가하여 커버글라

스를 덮어주었다. 규조의 동정은 1,000배 내지 2,000배의 고배율 현미경 하에서 행하였으며, 한 개의 슬라이드글라스 당 약 200개의 규조를 분석하였고 규조의 산출이 적은 구간은 제외하였다.

4. 연구 결과

4.1 육안관찰 및 입도분석 결과

OW-1 시추코어는 최상부에서 28 m 깊이까지는 1 m 당 두 개의 부분시료(표준관입시험)들, 29 m 깊이부터 56 m 깊이까지는 1 m당 한 개의 부분시료들 그리고 총 6구간에서 1 m 길이로 획득한 완전코어 퇴적물로 구성되어 있다. 그래서 주상도 작성은 부분시료에 대한 퇴적물 관찰을 위주로 진행되었으며, 입도분석, 유기지화학적 분석 및 색지수 측정 등으로 총 7개의 퇴적단위로 분류하였다(그림 2). 입도분석 결과를 토대로 처음에는 퇴적단위를 여섯 개로 분류하였지만 최하부의 두꺼운 모래층에 대한 입도를 조금 더 자세히 분석하기 위하여 하부 구간에 대한 입도를 very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand로 구분하여 분석하였다. 그 결과, 45 m를 경계로 아래쪽에 조립질의 퇴적물이 많이 분포하는 것을 확인한 후 일곱 개로 재

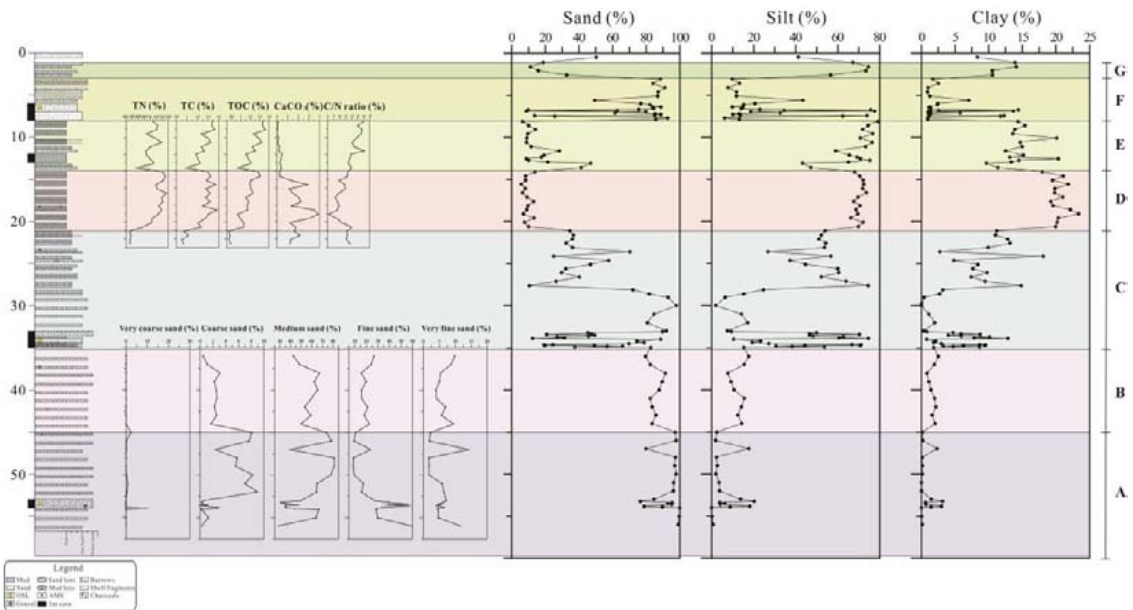


Fig. 2. Synthetic data correlation among grain size, organic geochemical compositons (TN, TC, TOC, CaCO₃, C/N ratio), and age dating results of the OW-1 core sediments.

분류 하였다(그림 2).

퇴적단위 A (Unit A)는 최하부 45~56 m 깊이 구간이며, 이질성분이 없는 모래층으로 구성된다. 전체 코어 중에서 가장 조립질 구간에 해당하며, 평균 입도는 중립 모래에 포함된다. 그리고 드물게 1 cm 크기의 자갈도 소량 포함되어 있으며, 분급은 중간에서 불량 정도에 해당한다. 또한 일부 구간에서는 모래층 내에 붉은 색으로 변질되어 산화 받은 흔적이 관찰되는 것으로 보아 퇴적당시 대기와 연결된 산화환경에 노출되었을 것으로 해석된다(그림 3a).

퇴적단위 B (Unit B)는 36~44 m 깊이 구간으로 하위의 퇴적단위 A에 비하여 세립질이고, 평균입도는 세립질 모래에 해당한다. 이 구간에서는 부분시료만을 획득하여 특별한 퇴적구조를 관찰하기 어려웠으나, 퇴적 당시에는 엽층리가 발달하였을 것으로 추정된다. 퇴적물의 분급은 중간에서 불량 분급에 해당하며, 처음으로 해양 기원 패각편들이 관찰되기 시작하며 이 구간부터 해양환경의 영향을 받은 것으로 판단된다.

퇴적단위 C (Unit C)는 21~35 m 깊이 구간이며, 부분시료와 1 m 시추코어 2개로 구성되어있다. 하위 퇴적단위 B에 비하여 이질퇴적물 함량이 크게 증가하였고 이질층과 모래층이 호층을 이루고 있다(그림 3b, 3c). 전체적으로 엽층리가 발달하고 있지만 일부 이질층은 과상이다. 간혹 패각편이 산재되어 관찰되며 목탄 또한 발견된다. 퇴적물의 분급은 하위 퇴적단위와 같은 중간에서 불량에 해당하지만, 평균값

을 비교하면 좀 더 불량에 가깝게 나타난다.

퇴적단위 D (Unit D)는 14~20 m 깊이 구간으로, 부분시료에서만 관찰된다. 이 구간은 퇴적구조가 잘 관찰되지 않는 균질한 이질퇴적물로 구성되어 있고 퇴적물의 분급은 불량하며 패각이 소량으로 산재되어 관찰된다(그림 3d).

퇴적단위 E (Unit E)는 8~13 m 구간으로 1 m의 완전한 시추코어 한 개와 부분시료에서 관찰된다. 퇴적물은 대부분 점토로 구성되어 있으나 소량의 모래입자를 포함하며, 모래층을 따라서 엽층리(lamination)를 보이거나 사층리(cross-bedding) 구조가 관찰된다(그림 3e). 퇴적물의 분급은 하위의 퇴적단위 D와 같은 불량에 해당한다.

퇴적단위 F (Unit F)는 3~7 m 구간으로, 1 m의 완전한 시추코어 한 개와 부분시료에서 관찰된다. 이 구간의 퇴적물은 대부분 세립질의 모래로 구성되어 있으며 소량의 점토가 포함되고, 분급은 중간에서 불량 정도이다. 그리고 5 m 깊이 부근의 점토와 모래가 함께 나타나는 구간에서는 모래입자 주변으로는 심하게 산화 받은 흔적이 관찰된다(그림 3f).

퇴적단위 G (Unit G)는 0.6~2 m 구간의 최상부 층으로 부분시료에서만 관찰된다. 퇴적물은 모래질 점토로 구성되며 특별한 퇴적구조 없이 전체적으로 산화된 흔적이 관찰된다. 분급은 불량에 해당한다.

4.2 유기지화학 분석 결과

OW-1 코어 퇴적물 중 주로 이질 퇴적물로 이루어

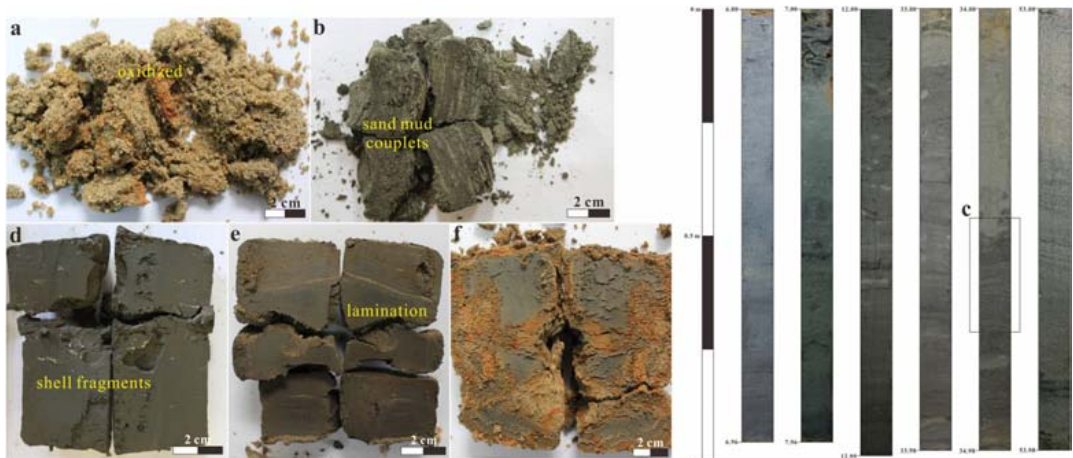


Fig. 3. Photographs of partial sediment samples and full core sediments from the OW-1. (a) 48 m down (b) 26 m (c) 34.5~34.8 m (d) 20 m down (e) 10 m up (f) 5 m down.

진 8~22 m 깊이 구간 퇴적물에 대해 분석한 결과 TN 함량은 0.06~0.13% 범위의 값을 가진다(그림 2). 최하부 21~22 m 깊이 구간에서는 0.07% 이하의 값으로 가장 낮은 값을 보이며, 20 m 깊이에서 값이 급격하게 증가하여 14 m 깊이까지는 증감의 변화는 있지만 대체적으로 값이 증가하는 경향을 보인다. 그리고 다시 13 m 깊이 부근에서 값이 급격하게 감소하였다가 증가와 감소가 반복되는데 전체적으로 상부로 갈수록 값이 증가하는 경향성을 보인다. TC 함량은 0.8~1.6% 범위의 값을 가지며, TN의 함량 변화와 대체적으로 비슷한 변화 경향성을 보인다. TOC 함량은 0.7~1.6%을 가지며, TOC 함량 변화 또한 TC와 TN의 함량 변화와 거의 유사한 경향을 보인다. CaCO₃ 함량은 최하부부터 15 m 깊이까지는 1~4% 범위의 값을 가지며 증가와 감소가 반복되고, 19 m 깊이에서 최대값을 보인다. 그리고 14 m 깊이에서부터 값이 급격하게 감소하여 최상부 8 m 깊이에서는 0.5% 미만의 값을 나타낸다. C/N 비는 11 값을 기준으로 최하부에서 20 m 깊이까지의 구간과 14 m 깊이에서 최상부까지는 11 이상의 값을 보이지만 20 m 깊이에서 14 m 깊이 사이의 구간에서는 11 이하의 값을 가진다. 그리고 19 m 깊이에서 가장 작은 값을 가지며, 19 m 깊이에서 상부로 올라갈수록 작은 증

가와 감소의 변화가 있지만 전반적으로 값이 꾸준히 증가하는 경향을 보인다.

결과적으로 TC, TN, TOC, CaCO₃의 함량 값은 14 m와 21 m를 경계로 경향성이 변화한다. 이 경계는 입도분석 결과를 기준으로 구분한 퇴적단위의 경계와도 일치한다(그림 2).

4.3 Smear slide 관찰 결과

OW-1 시추 코어 퇴적물 중 이질 퇴적물로 구성된 8~22 m 깊이 구간 퇴적물에 대해 제작한 smear slide 관찰 결과, 유공충, 구조, 목탄, 규질편모류 등의 미화석들이 산출되며 깊이에 따른 특별한 경향성은 보이지 않는다(그림 4). 전체적으로 유공충과 구조의 산출 경향이 높지만, 유공충에 비해 구조의 산출이 더 높으며 전 구간에 걸쳐 다양한 구조화석이 발견된다. 스미어 슬라이드 관찰 시에는 구조나 유공충과 같은 미화석들의 종은 정확히 판별하지 못하기 때문에 미화석의 함유유무와 산출빈도 경향성만을 파악하였다.

4.4 색지수 측정 결과

퇴적물의 색깔은 분광광도계(spectrophotometer)를 사용하여 색지수를 측정하였다. 그림 5에서 L*는 밝기를, a*와 b*는 색도를 나타낸다. +a*와 -a*는 각각

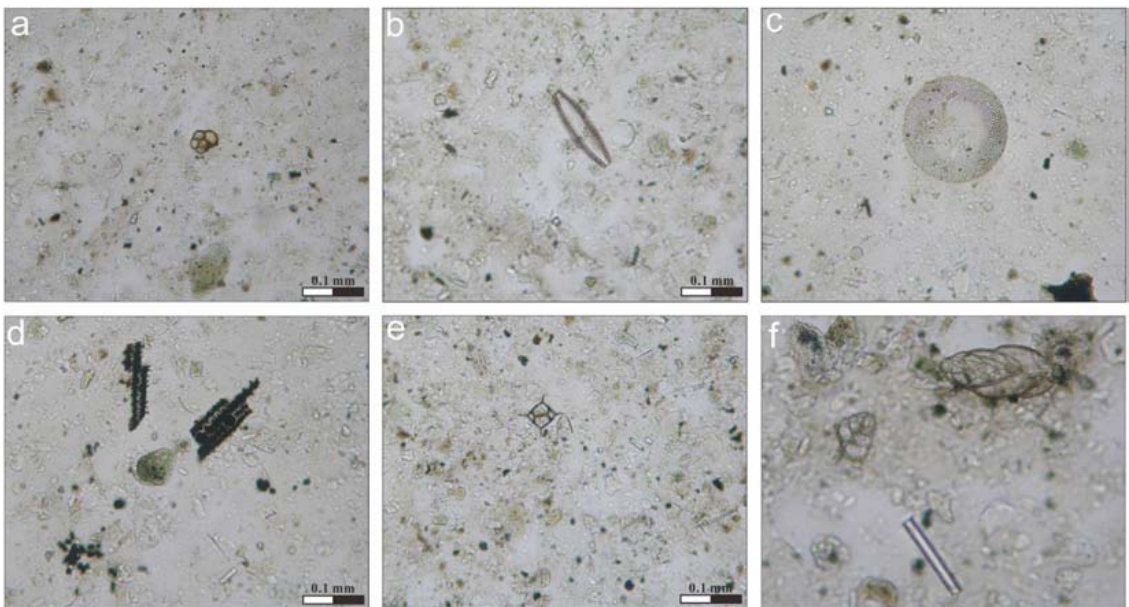


Fig. 4. Photographs of smear slides of the OW-1 core sediments. (a) Planktonic foraminifera (8 m) (b) Diatom (8 m) (c) Diatom (15 m) (d) Charcoal (18 m) (e) Silicoflagellates (18 m) (f) Benthic foraminifera (19 m).

적색과 녹색 방향을 지시하며, +b*와 -b*는 각각 노란색과 청색방향을 지시한다. 퇴적물의 밝기는 하부에서 상부로 올라오면서 45 m 깊이까지는 증감의 변화는 있지만 상부로 올라가면서 밝아지는 경향을 보이며, 45 m 깊이 부근에서 급격하게 퇴적물의 색이 어두워지는 것을 확인할 수 있다. 42 m 깊이 지점에서 최저값의 밝기를 보이다가 다시 상부로 가면서 밝아지는 경향성이 관찰된다. 색도 좌표 a*와 b* 또한 45 m 깊이를 경계로 구분하여 설명할 수 있다. 색도 좌표 a*와 b*는 45 m 깊이를 경계로 하부 구간에서는 상부로 올라가면서 증감의 폭이 크게 변하지만 값이 대체적으로 증가하는 경향을 보이며, 45 m 깊이를 경계로 색도의 값이 확연하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 45 m 깊이를 기준으로 상부 구간에서는 약간의 증감의 변화가 관찰되긴 하지만 그 변화

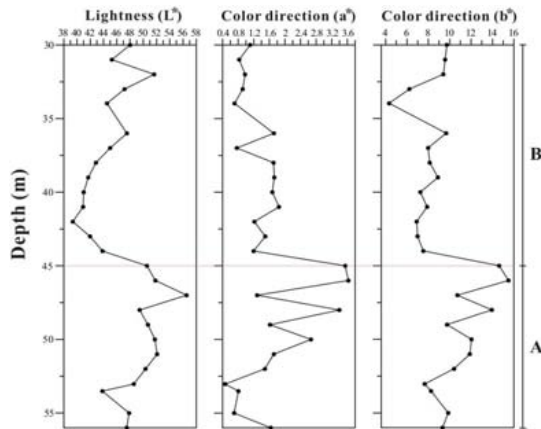


Fig. 5. Color index results of the OW-1 core sediments (30~56 m) (Lightness (L*), Color direction a* (green;- , red;+), Color direction b* (blue;- , yellow;+).

의 폭은 작으며, 상부로 가면서 거의 유사한 값을 가지지만 색도 좌표 33.9 m 지점에서는 b*의 값이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

4.5 연대측정 결과

코어 시료 중 총 6개(6 m, 18 m, 23 m, 34 m, 37 m, 53 m)의 지점에서 연대측정을 실시하였다(그림 6). 이 중 18 m, 23 m, 37 m에서는 AMS 연대측정을 실시했고, 6 m, 34 m, 53 m에서는 OSL 연대측정을 실시했다(표 1, 2). 최하부 53 m 구간에서 12,800±1,500년 전으로 가장 오래된 연대결과를 획득하였으며, 해수

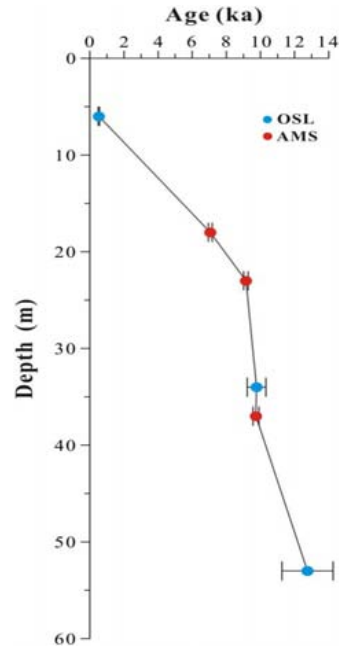


Fig. 6. Age dating results of the OW-1 core sediments.

Table 1. AMS age-dating results of the OW-1 core sediments.

Depth (m)	Material	14C age (yr BP)	Calibrated age (B.P. Cal yr)
18	shell fragment	6,170 ± 40	7,060 ± 110
23	shell fragment	8,190 ± 50	9,150 ± 140
37	shell fragment	8,760 ± 40	9,740 ± 170

Table 2. OSL age dating results of the OW-1 core sediments.

Depth (m)	Water contents (%)	Dose Rate (Gy/ka)	D _e (Gy)	Age (ka)
6	0.32	3.28 ± 0.13	1.72 ± 0.11	530 ± 50
34	0.27	3.43 ± 0.13	33.55 ± 1.39	9,800 ± 550
53	0.27	3.15 ± 0.13	40.22 ± 4.47	12,800 ± 1,500

면의 상승이 일어나기 이전의 플라이스토세 후기로 추정되었다. 이후 37~23 m 구간까지 약 9천년 전 연대로 측정되었는데, 이 기간에 퇴적률은 매우 높았던 것으로 해석된다. 하지만 조개편을 측정할 때 AMS 연대측정 결과는 일부 재동(reworking)에 의해 왜곡되었을 가능성을 보여주고 있어 주변의 다른 시추 코어의 연대측정 자료와 비교해 볼 필요성이 있다.

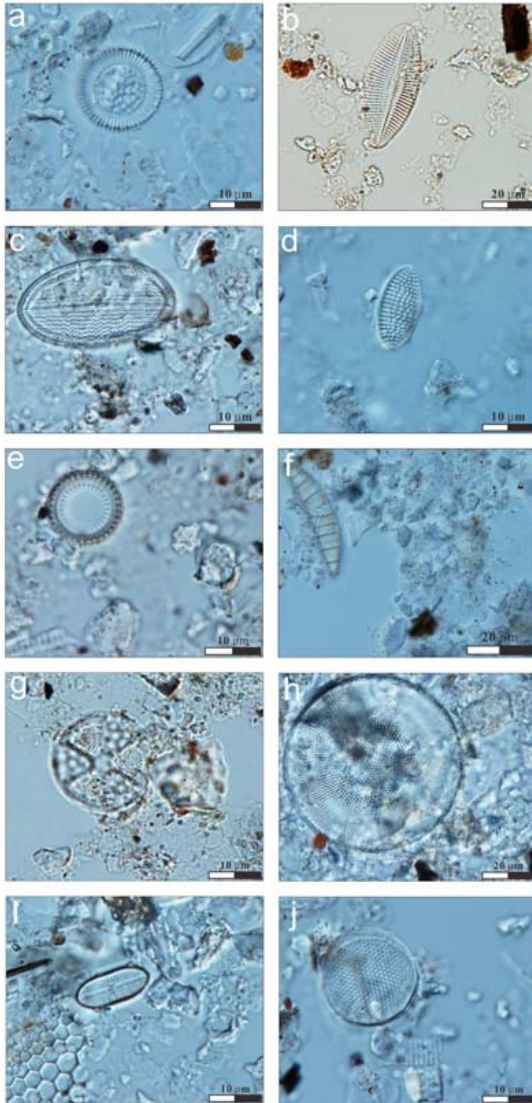


Fig. 7. Photographs of dominant diatom species from the OW-1 core sediments. (a) *Cyclotella litoralis* (b) *Diploneis smithii* (c) *Cocconeis scutellum* (d) *Nitzschia granulata* (e) *Palaria sulcata* (f) *Epithemia adnata* (g) *Actinoptychus senarius* (h) *Coscinodiscus granii* (i) *Diploneis estuarii* (j) *Thalassiosira lineata*.

4.6 규조 분석 결과

OW-1 시추 코어의 8~24 m 깊이 구간에서 채취한 퇴적물을 분석한 결과 총 17개의 시료 모두에서 규조가 산출되었지만, 10 m, 11 m, 12.5 m 깊이에서는 규조가 아주 소량으로 산출되었기 때문에 분석 과정에서 제외하였다. 총 50종의 규조가 분류되었으며, 산출 결과를 살펴보면 *Paralia sulcata*, *Cyclotella litoralis*, *Epithemia adnata*, *Thalassiosira lineata* 순으로 높은 산출빈도를 보인다. 이 외에도 *Cocconeis scutellum*, *Diploneis estuarii*, *Coscinodiscus granii*, *Nitzschia granulata*, *Diploneis smithii* 등이 산출된다(그림 7). 규조를 통한 고환경 해석을 위하여 해수(marine), 기수(marine-brackish), 담수(fresh) 종을 구분하여, 우점종을 위주로 산출경향성을 살펴보았다(그림 8). 담수 환경에서 서식하는 *Epithemia adnata*는 최하부 24 m 깊이에서는 약 9%를 차지하지만 상부로 올라가면서 그 값이 확연하게 감소하여, 13 m 까지는 계속 작은 값을 유지하다가 다시 최상부에서는 20% 이상 높은 산출빈도를 보인다. 그리고 해수 종과 해수-기수 종은 뚜렷한 산출 경향성이 없지만, 최하부 24 m 깊이 구간과 최상부 8~9 m 깊이에서는 아주 작은 값을 보이는 반면 13~22 m 깊이 구간에서는 확연하게 높은 산출빈도를 보인다.

5. 토 의

입도분석, 유기화학분석, 규조분석, 색지수 측정 결과 등을 이용해 구분해보면 OW-1의 퇴적층은 총 일곱 개의 퇴적단위로 분류되며(A, B, C, D, E, F, G), 연대측정 결과 연구대상 퇴적층은 지난 약 13,000년 전부터 형성되기 시작한 것으로 추정된다(그림 6).

신생대 제4기 후기 마지막 빙하기 동안 해수면은 전 지구적으로 현재보다 120 m 정도 가량 낮았던 것으로 보고되었다(Fairbanks, 1989; Suk, 1989; Min, 1994). 그리고 지난 약 15,000년 전을 전후로 빙하기가 서서히 끝나고 해침이 시작되었으며, 약 6,000년 전까지 해침이 지속되었다(Wang et al., 2013; Xu et al., 2015). 그러나 초기에 해침이 시작되었을 때는 일정하게 빠른 속도로 해수면이 상승하였지만, 11,000년 전을 전후로 상승속도가 둔화되었으며 약 8,000년 전부터 다시 비교적 빠른 속도로 상승하여 약 6,000년 전경에 이르러 현재 해수면 수준까지 도달한 것으로 분

석되었다(KIGAM, 2003). 이러한 해수면 변동에 따른 퇴적물 공급률과 퇴적장소의 변화가 삼각주의 형태를 결정한다. 따라서 연구지역 주변에서 제시된 해수면 변동 곡선을 참조하여 해수면 변화와 퇴적물과의 상호작용에 의한 낙동강 하구 삼각주 퇴적층의 형성 과정을 유추해 보았다.

퇴적단위 A (45~56 m)는 연대측정 결과 약 13,000년 전에서 약 11,000년 전 사이의 연대를 보는데, 이 시기 동안은 해수면이 현재보다 약 60 m 가량 낮았던 시기로 OW-1의 위치까지는 아직 해안선이 도달하지 못하였기 때문에 육성 환경에서 하성퇴적층이 퇴적된 것으로 보인다(Paik *et al.*, 2016). 또한 이 퇴적단위는 세립~조립의 모래입자로 구성되며, 약 1 cm 크기의 자갈이 소량 포함되어 있는 것으로 보아 세립과 조립 퇴적물을 번갈아 운반할 수 있는 하천 하도환경에서 퇴적되었다고 해석된다. 그리고 이 구간에서는 산화철로 코팅된 흔적(48 m)과 46~52 m 깊이에서 국부적으로 산화된 모래입자를 포함하고 있는 것으로 보아 대기와 연결된 산화조건 환경임을 알 수 있다. OW-1과 약 10 km 떨어진 지역에서 시추한 ND-01에서도 약 46 m 하부에서 모래로 구성된 하도 환경이 관찰되었으며, 플라이스토세 최후기에는 해수면이 낮아 현재의 낙동강 하구 지역은 모두 하천 혹은 선상지와 관련된 퇴적환경이 우세한

것으로 추정된다(Shin, 2016).

퇴적단위 B (36~44 m)는 연대측정 결과 약 11,000년 전부터 약 9,800년 전까지 퇴적된 것으로 보인다. 이 퇴적단위는 하위의 퇴적단위 A와 비교했을 때 45 m를 경계로 입도가 다소 세립질로 변화하며, 퇴적물의 색이 밝아지는 경향이 있어 구분된다. 또한 이 구간부터 해양 기원 패각이 소량 혼재한다. 패각의 출현으로 보아 이 퇴적층이 퇴적되었던 시기 동안에는 해안선이 연구지역까지 이미 도달하였음을 알 수 있다. 따라서 해침이 시작된 경계시점을 45 m 깊이의 퇴적 시기로 추정하였다. 또한 ND-01 코어와의 비교에서도 약 46 m 상부에서 해성환경이 시작된 것으로 보고되었으며, OW-1과는 해발고도 차이가 거의 없이 급격한 해수면의 상승으로 인하여 거의 같은 시기에 해양환경이 된 것으로 해석된다. 그러나 ND-01 코어에서는 이질과 세립질 모래가 혼재된 하구 환경 퇴적층으로 해석하였으나, OW-1 시료의 경우는 해안선과 가까운 지역이기 때문에 모래가 퇴적된 것으로 추정된다. 퇴적단위 B는 아직 해수의 영향이 비교적 약했던 시기에 쌓인 퇴적체로서, 하구와 인접한 하도로부터 쏟아져 나온 사질퇴적물도 같이 퇴적된 것으로 판단된다. 하구에 인접한 하도로부터 세립~조립의 모래입자들이 쏟아져 나와 형성된 퇴적체가 bay-head delta 퇴적층을 이루며 퇴적된 것으로 해석된다.

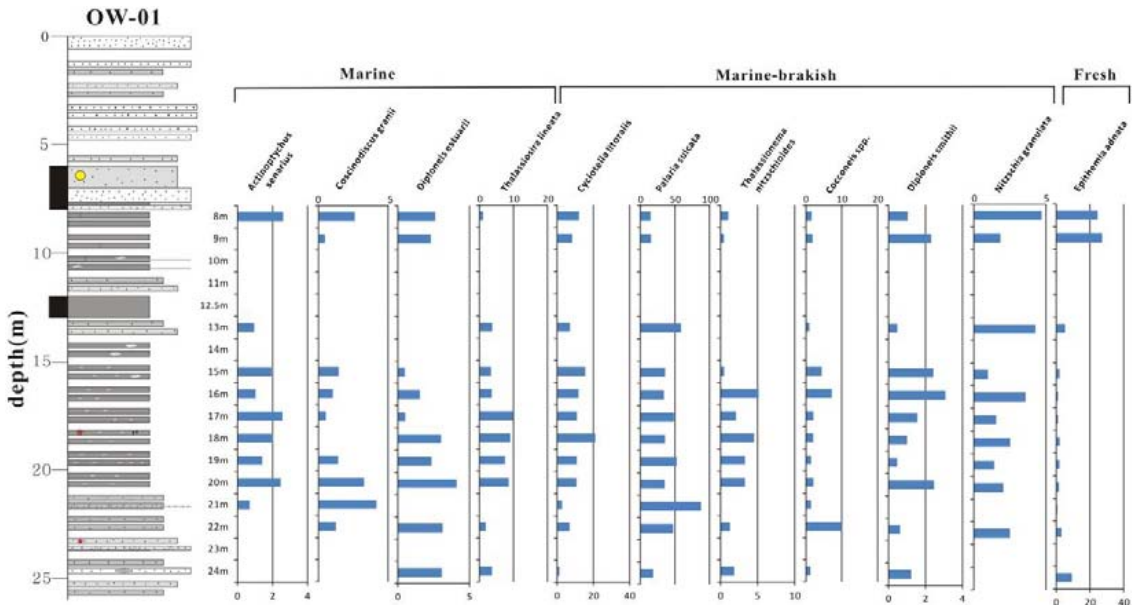


Fig. 8. Columnar section with diatom analysis results of the OW-1 core sediments (8~24 m).

퇴적단위 C (21~34 m)는 연대측정 결과 약 9,800년 전부터 약 8,000년 전 사이에 퇴적된 것으로 보인다. 이 시기에는 해수면이 본격적으로 상승하여 연구지역이 하구 환경(estuarine)으로 전이된 것으로 보인다. 일반적으로 파도가 우세한 환경에서 하구는 세 구역으로 분류되는데, 비교적 하도와 인접해 있으며, 모래가 다소 우세한 퇴적층으로 구성된 inner estuary, 이질 퇴적층으로 이루어진 central estuary, 그리고 해안과 인접해있으며 모래 사주들이 분포해 있는 outer estuary로 구분할 수 있다. 하구 환경임을 지시하는 퇴적 구조인 sand-mud couplets을 관찰할 수 있으며, 패각 또한 흔재한다. 이 시기는 해수면의 상승으로 인하여 수심이 깊어짐에 따라 모래와 머드가 교호하는 퇴적구조가 관찰되는데, ND-01의 경우는 육상에서 해양환경으로 전이되면서 바로 이러한 퇴적층이 관찰되었고 육상의 영향을 더 많이 받는 OW-01 지역은 모래층이 쌓이다가 수심이 깊어지면서 일반적인 하구 퇴적층이 형성된 것으로 보인다. 그리고 목탄이 관찰되는 것으로 보아 하구환경 중에서도 비교적 하도와 인접해있는 inner estuary 환경에서 퇴적된 것으로 해석된다. 그리고 이 퇴적단위 C (21~34 m)에서의 입도분석 결과를 살펴보면, 35 m 깊이 부근에 입도분포 경향이 급격하게 변화하는 것을 확인 할 수 있는데(그림 2), 이는 28~32 m 깊이 구간에서 지반조사용 퇴적물 시료 채취를 통해 부분시료를 회수하는 과정에서 이질 퇴적물에 비해 조립의 퇴적물이 비교적 선별적으로 회수가 잘 되었기 때문에 일어난 왜곡으로 판단된다.

퇴적단위 D (14~20 m)는 8,000~6,000년 전 기간 동안 형성된 퇴적층이며, 하부 구간에 비해 TN, TC, TOC 함량이 증가하는 경향을 보인다. 이 구간에서 TN, TC, TOC 함량 증감의 반복적으로 나타나는 것은 해양 또는 육성환경의 영향요소가 교대하여 작용한 것이라 판단된다. TN 값이 증가할 수 있는 원인으로서는 높은 질소함량을 갖는 단백질로 주로 구성된 해양기원의 유기물이 꼽힌다(Goni *et al.*, 1997). TOC 함량이 증가하는 원인 또한 해양기원의 유기물의 함량이 증가한 영향이라고 판단된다. 그리고 일반적으로 TC, TN의 함량 값은 하구로부터 멀어져 외해 쪽으로 갈수록 높은 값을 가진다고 보고된 바 있다(Kong *et al.*, 2009).

CaCO₃ 함량 값 또한 이 구간에서 가장 높은 값을

가지는데, CaCO₃ 함량은 탄산염 패각을 갖고 있는 해양 생물의 공급과 쇄설성 탄산염 퇴적물의 유입에 의해 크게 영향을 받는다(Gardner, 1975). 그리고 C/N ratio는 14 m 깊이를 경계로 하여 상부에서는 11 이하의 작은 값을 보인다. 일반적으로 해양의 식물성 플랑크톤은 10 이하의 작은 C/N ratio를 가진다고 하는데(Meyers, 1994, 1997; Typson, 2001; Lamb *et al.*, 2006), 유기지화학 분석 결과 이 구간은 해양의 영향이 가장 강했고 민물의 영향이 가장 약했던 시기로 추정된다.

낙동강 삼각주 지역은 약 7,200년 전에 외해의 영향이 최대에 이르렀던 것으로 보고된 적이 있다(Ryu *et al.*, 2011). 이 구간에서의 높은 TC, TN, TOC, CaCO₃ 함량 값과 11 이하의 작은 C/N ratio를 통하여 이 시기에 해양의 영향이 최대에 도달했음을 알 수 있다(그림 2). 해양환경에서만 서식하는 규편모류의 산출 또한 이 구간의 퇴적이 외해의 영향이 최대에 이른 시기에 일어났음을 지시한다. 따라서 이 시기 동안의 이질퇴적층은 외해의 영향을 많이 받으며, 수력학적으로 비교적 약한 에너지 환경인 central estuary 내에서 형성된 것으로 해석된다. 또한 ND-01 코어의 유공층과 구조 분석을 통해서도 수심이 가장 깊은 환경으로 해석한 바 있다(Takata *et al.*, 2016; Cho *et al.*, 2017).

퇴적단위 E (8~13 m 깊이)에 대해서는 연대측정이 이루어지지 않아 정확한 연대는 파악할 수 없지만, 약 6,000년 전 이후 해수면 상승이 완화된 시기에 퇴적된 것으로 보인다. 이 구간에서는 CaCO₃ 함량이 대폭 감소하며, 11 이상의 C/N ratio 값을 보이는 것으로 보아 하위의 퇴적단위 D에 비해 해양환경의 영향요소가 줄어들고, 육성환경의 영향을 더 받기 시작했다는 것을 알 수 있다. 그러나 비교적 높은 값을 보이는 TN, TC의 함량은 해수의 영향이 아직 남아있음을 시사한다.

구조 분석에서도 유기지화학 분석과 같은 결과를 확인할 수 있다. 구조는 광합성을 하는 단세포 원생 식물로서 모든 수성환경(해수, 기수 및 담수)에서 부유성 혹은 저서성으로 서식하는 가장 중요한 일차생산자이다. 이들은 염분농도, 수온, 온도 등의 변화에 민감하게 반응하며, 이러한 요소들의 변화에 따라 서식 및 분포의 제한을 받을 뿐만 아니라 어느 한 요소의 변화에도 구조군집은 크게 변하기 때문에 교환

경을 연구하는데 매우 유용한 화석종으로 알려져 있다(Ryu *et al.*, 2005b). 이 구간에서는 담수에서만 서식하는 *Epithemia adnata*이 다량 산출되어 육지로부터의 영향이 컸던 시기였다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 이 시기는 약 6,000년 전 경에 해수면 상승이 완료되면서 해양환경의 영향이 점차 줄어들고 낙동강 하도로부터 유량이 증가하고 퇴적물 공급이 많아진 시기인 것으로 판단되며, 육지로부터 공급되는 부유성 퇴적물의 전진퇴적작용으로 형성된 prodelta 퇴적체가 이곳에 위치한 시기로 해석된다.

연구지역과 인접한 곳에서 수행된 연구에서도 해양환경이 지난 약 8,000년 전부터 증대되었다가 약 6,000년 전부터 다시 축소하기 시작하였고, 약 5,000년 전을 전후로 본격적인 낙동강 삼각주의 성장이 시작되었다고 보고하고 있다(Ryu *et al.*, 2005a).

퇴적단위 F (3~7 m)는 OSL 연대 측정 결과 약 1,500년 전부터 형성된 퇴적층으로 추정된다. 하위의 퇴적단위 E와 비교했을 때 모래가 우세하고 상향조립의 층서를 보이는 것으로 보아 낙동강 삼각주의 전진퇴적작용으로 인해 형성된 delta front 퇴적체로 추정된다.

마지막으로 퇴적단위 G (0.6~2 m)는 0.6 m의 매립토를 포함하는 최상부층으로 현재와 같은 삼각주 평원 퇴적층에 해당한다. 그러나 낙동강 하구의 경우는 삼각주 퇴적체가 형성되었지만, 만(bay) 지형의 조건에서 퇴적작용이 발생하였으므로 일반적인 삼각주와는 다른 환경의 변화가 관찰된다.

OW-1 시추 코어는 대부분이 표준관입시험 시료를 통해 회수된 부분시료로 이루어져 있기 때문에, 보다 정확한 퇴적환경 변화 연구를 위해서는 OW-1과 인접하여 위치한 지점에서 완전한 시추퇴적물 코어를 획득 분석하여 비교, 대비가 이루어져야 하고, 특히 상부 퇴적층에 대한 추가적인 연대측정을 통해 퇴적물 변화를 체계적으로 비교할 수 있으면 퇴적환경 변화 또한 정확하게 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

낙동강 삼각주 중부지역에서 획득한 시추 코어 OW-1을 이용하여 입도분석, 유기화학 분석, 미화학 관찰, 구조 분석 및 연대측정 결과를 종합해 신생대 제4기 최후기의 이 지역 퇴적환경 변화를 연구한 결과는 다음과 같다.

- 1) 연대측정 결과 OW-1 시추코어는 지난 약 13,000년 동안 형성된 퇴적층으로 육안관찰, 입도분석, 유기화학 분석, 구조분석 및 색지수 측정을 기준으로 총 일곱 개의 퇴적단위로 구분된다(하부로부터 A, B, C, D, E, F, G).
- 2) 연구지역에서의 신생대 제4기 후기 동안의 퇴적환경 변화는 다음과 같다.
 - (1) 지난 13,000년 전부터 11,000년 전까지 형성된 최하부 퇴적층(퇴적단위A)은 해안선이 아직 연구지역까지 도달하지 못한 상태로 육성 환경인 하천 하도에서 형성된 퇴적층으로 해석된다.
 - (2) 45 m 깊이를 경계로 해안선이 OW-1 채취지점까지 도달하여 연구지역은 천해 환경으로 변화된다. 퇴적단위 B는 지난 11,000년 전부터 9,800년 전 경까지 퇴적되었으며, 이 시기는 해수면 상승이 일시적으로 정체, 둔화되는 시기로 비교적 해수의 영향이 잦아들었기 때문에 하도로부터 사질 퇴적층이 쏟아져 나와 형성된 bay-head 삼각주 퇴적층으로 해석된다.
 - (3) 퇴적단위 C 퇴적시기에는 해수면 상승이 다시 빠르게 진행되어 연구지역이 하구환경으로 전이된다. 모래층과 점토층이 교호하며, 목탄의 출현으로 보아 비교적 하도와 인접한 inner estuary 환경에서 퇴적되었다고 추정된다.
 - (4) 퇴적단위 D는 큰 TC, TN, TOC, CaCO₃ 함량과 11 이하의 C/N ratio를 통하여 해수의 영향이 최대에 이르렀던 시기에 퇴적된 것으로 판단된다. Central estuary 환경에서 퇴적된 이질층으로 해석된다.
 - (5) 퇴적단위 E, F와 G는 지난 6,000년 전 경 해수면 상승이 현재와 비슷한 수준이 되면서 해양의 영향이 줄어들고 육상으로부터의 퇴적물 공급이 활발하게 이루어지는 전진퇴적작용 기간 동안 형성된 전형적인 낙동강 삼각주 퇴적층으로 해석된다.

감사의 글

이번 연구는 한국연구재단의 연구비 지원(NRF-2012R1A1A2038789)을 받아 수행되었으며, 부분적으로는 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조

성비(과제번호 D1000431-01-01)를 지원받아 연구 하였기에 감사드립니다. 그리고 분석에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 이진영 박사께도 감사드립니다.

REFERENCES

- Ban, Y.B., 1987, Analysis of the landforms and surface sediments in the Nakdong delta. Ph.D. thesis, Kyung Hee University, Seoul (in Korean with English abstract).
- Cho, A., Cheong, D.K., Kim, J.C., Shin, S.W., Park, Y.H. and Katsuki, K., 2017, Delta formation in the Nakdong River, Korea, during the Holocene as inferred from the diatom assemblage. *Journal of Coastal Research*, 33, 67-77.
- 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.L., 1997, Sources and contribution of terrigenous organic carbon to surface sediments in the Gulf of Mexico. *Nature*, 389, 275-278.
- Hwang, S.I., Kim, J.Y. and Yoon, S.O., 2009, Late Holocene Environmental Change and Geomorphological Development in the Northwestern Part of the Paleo-Gimhae Bay. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 16, 85-99 (in Korean with English abstract).
- Jang, 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).
- Kim, J.C., Cheong, D., Shin, S., 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.
- 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).
- Kong, G.S., Han, H.C., Kim, S.P., Kim, J.H. and Stott, L., 2009, Organic Chemical Characteristics and Its Paleoceanographic 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).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource (KIGAM), 2003, Study on the Late Quaternary paleoclimate changes using deep-drill cores, in the Continental Shelf, South Sea. KIGAM Research Report Police-02 final (2) 31-56.
- Lamb, A.L., Wilson, G.P. and Leng, M.J., 2006, A review of coastal paleoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 75, 29-57.
- Lee, Y.G. and Yoon, S., 1992, Study on the Molluscan Fossil Fauna of Sugari Sell Mound, Kimhae. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 335-341 (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.
- Meyers, P.A., 1994, Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289-02.
- 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 south-eastern shelf, Korean peninsula. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, 196 p (in Korean with English abstract).
- Oh, G.H., 1994, The Paleoenvironment of the Northern Part of the Nagdong River Delta. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 8, 33-42 (in Korean with English abstract).
- Paik, S., Cheong, D., Shin, S., Kim, J.C., Park, Y.H. and Lim, H.S., 2016, A paleoenvironmental study of Holocene delta sediments in Nakdong River Estuary. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 15-30 (in Korean with English abstract).
- 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., 2005a, 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.Y., Nam, W.H., Yang, D.Y. and Kim, J.Y., 2005b,

- Diatom Floras of a Western Coastal Wetland in Korea: Implication for Late Quaternary Paleoenvironment. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 227-239 (in Korean with English abstract).
- Shin, S., Park, Y.H., Park, J.H. and Han, S., 2015, Relative paleointensity data from the late Holocene deltaic sediments in Korea. *Geosciences Journal*, 19, 579-585.
- 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. Ph.D. Thesis, Tokyo University, Tokyo, Japan, 246 p.
- Takata, H., Khim, B.K., Cheong, D.K., Shin, S.W., Takayasu, K., Y.H., Lim, H.S., 2016, Holocene benthic foraminiferal faunas in coastal deposits of the Nakdong River delta (Korea) and Izumo Plain (Japan). *Quaternary International*, 392, 13-24.
- Typson, R.V., 2001, Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: some results of a modeling study. *Organic Geochemistry*, 32, 333-339.
- Wang, Z., Zhan, Q., Long, H., Saito, Y., Gao, X., Xu, X., Li, L. and Zhao, Y., 2013, Early to mid-Holocene rapid sea-level rise and coastal response on the southern Yangtze delta plain, China. *JOURNAL OF QUATERNARY SCIENCE*, 28(7), 659-672.
- Xu, Q., Yang, J., Yuan, G., Chu, Z. and Zhang, Z., 2015, Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM. *Marine Geology*, 367, 69-82.
- 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., Chang, T.S., Kong, G.S., Kang, N.K., Kwon, Y.G., Nam, S.L. and Park, S.C., 2014, 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. 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).
- 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).

Received : November 23, 2017

Revised : December 27, 2017

Accepted : December 28, 2017