

후기 제 4기 MIS 3 해수면 변동에 따른 북부 동중국해의 퇴적환경변화

남승일^{1*}, 손영주¹, 김성필^{2,3}, 유동근², 장정해^{2,4}, 장세원², 안드레아스 막켄센⁵

¹극지연구소 극지고환경연구부, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, ²한국지질자원연구원 석유해저연구본부, 대전광역시 유성구 과학로 124, ³한국지질자원연구원 포항지질자원실증연구센터, 포항시 북구 영일만대로 905, ⁴신성엔지니어링 환경사업본부, 서울특별시 서초구 언남길 5, ⁵알프레드 베게너 극지-해양연구소, 독일 브레머하펜

Sedimentary and paleoenvironmental changes related to sea level fluctuations from the northern East China Sea during the MIS 3

S.I. Nam^{1*}, Y.J. Son¹, S.P. Kim^{2,3}, D.G. Yoo², J.H. Chang^{2,4},
S.W. Chang², Andreas Mackensen⁵

¹Division of Polar Paleoenvironment, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea, ²Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea, ³KIGAM Pohang Branch, KIGAM, Pohang 37559, Korea, ⁴ShinSung Engineering Co., Ltd., Seoul 06779, Korea, ⁵Alfred-Wegener-Institute for Polar- and Marine Research, 27568 Bremerhaven, Germany

요약 : 양자강 영향을 받는 동중국해 북부해역에서 시추된 길이 65.2 m의 퇴적물 코어 ECSDP-102를 이용하여 후기 제 4기 해수면 변동에 의한 퇴적환경 변화를 연구하였다. 6점의 AMS ¹⁴C 연대 측정 자료에 의하면 코어 ECSDP-102는 해수면이 현재보다 낮았고 변화폭이 매우 컸던 MIS 3과 홀로세 동안 다양한 환경에서 퇴적되었다. 특히 저서성 유공충인 *A. ketienziensis*와 부유성인 *G. ruber*의 산소·탄소 안정동위원소 값과 유기물의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값에 의하면 코어 ECSDP-102는 MIS 3 이후 해수면 변동에 따른 기수(강 하구)역에서 해양환경으로 전이되는 환경에서 퇴적된 것으로 보인다. 특히 *G. ruber*의 부분적인 출현과 산소동위원소 값 그리고 -22‰보다 무거운 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값에 의하면 상부 홀로세 층을 제외한 63 m 두께의 퇴적층은 해수면 상승(~20 m)으로 해침이 일어난 MIS 3.3과 3.31 사이의 짧은 기간 동안 비교적 우세한 해양환경/기수환경에서 퇴적된 것으로 보인다. 또한 이 시기의 약 1,000년의 짧은 기간 동안 퇴적물이 양자강과 고향하강에서 대규모로 유입되어 퇴적된 결과 육상기원의 유기물 유입이 증가하면서 비교적 높은 C/N 값과 가벼운 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값을 보인다.

주요어 : 북부 동중국해, *A. ketienziensis*, *G. ruber*, 산소 및 탄소 안정동위원소, 유기물 탄소동위원소, 해수면 변동, 퇴적환경 변화

Abstract : A 65.2 m long sediment core ECSDP-102 was drilled from the northern East China Sea, off the mouth of the Yangtze River in order to investigate sedimentary and paleoenvironmental changes during the late Quaternary sea-level fluctuations. According to 6 AMS ¹⁴C ages the sediment core ECSDP-102 appears to be deposited under largely different environmental settings related to highly fluctuated sea-level changes during MIS 3 and Holocene. In particular, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records of benthic

foraminifer *A. ketienziensis* and limited stable isotope data of planktonic foraminifer *G. ruber* together with $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values indicate that the core ECSDP-102 was deposited under different sedimentary settings from brackish (estuarine) to modern marine conditions strongly associated with global sea level fluctuations since MIS 3. Based on $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records of *G. ruber* and heavy $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values of $>-22\text{‰}$, about 63 m thick sediment excepting for Holocene sequence was deposited under brackish/estuarine environments during the marine transgression at the early period of MIS 3 (i.e., MIS 3.3 or 3.31) when the sea level increased to stand ~ 20 m higher (approximately ~ 60 m) than during the late period (approximately ~ 80 m) of MIS 4. Furthermore, large amounts of sediments were discharged through the paleo-Yellow River and/or the Yangtze River into the northern East China Sea probably within short interval of 1,000 years. Consequently, relatively high C/N ratio and light $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values also indicate relatively increased supply of terrestrial organic matters during that period.

Key words : Northern East China Sea, *A. ketienziensis*, stable oxygen and carbon isotopes, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, sea-level fluctuations, sedimentary environmental changes

1. 서론

동중국해는 북서태평양과 황해를 연결하는 수심이 200 m 이하인 넓은 대륙붕과 좁은 대륙 사면으로 이루어진 전형적인 대륙주변해(Marginal Sea)이다(Qin *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2000). 북부 동중국해는 쿠로시오 해류의 지류인 황해난류(Yellow Sea Warm Current)와 연안류(Coastal Current) 그리고 황해한류(Yellow Sea Cold Current)의 영향을 주로 받는다. 따라서 황해 남부와 연결된 북부 동중국해는 해수면 변동에 따른 환경변화뿐 아니라 동중국해에서 계절별로 일어나는 수괴의 특성변화의 영향을 직접적으로 받는다(Chen *et al.*, 1994; Qin *et al.*, 1996; Yanagi *et al.*, 1997; Matsuno, 2003; 김동선 외, 2009). 특히 동중국해 북부 대륙붕 해역은 중국 양자강에서 유입되는 담수의 영향을 직접 받기 때문에 양자강과 고황하강을 통해 운반되어 대규모의 퇴적물뿐 아니라 입자성 부유물질이 담수와 함께 유입되어 퇴적물이 퇴적되는 곳이다(Milliman and Meade, 1983; 김동선 외, 2009)(Fig. 1). 따라서 비교적 수심이 낮은 대륙붕으로 형성된 북부 동중국해는 후기 제4기 빙하기-간빙기에 일어난 전지구적인 해수면변동에 따라 육상과 담수-반해양성-해양성 환경에서 퇴적된 기후환경변화의 기록이 잘 퇴적되어 있다(Kim and Kennett, 1998; Kim *et al.*, 1999; Li *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 2000;

Berne *et al.*, 2002; 남승일 외, 2003).

동중국해에서는 수심이 낮은 내 대륙붕 해역(Tang, 1996; Yang *et al.*, 1996)과 동남부 해역에서 해수면 변동에 의한 고해양환경변화를 복원하기 위하여 유공충의 종조성 분포를 이용한 연구가 일부 수행되었다(Li *et al.*, 1999). 최동림 외(2005)는 제주도 남부해역 인근에 위치한 동중국해 북동부 대륙붕에서 고해상의 Chirp 자료를 분석하여 마지막 최대 빙하기 이후 북동부 외대륙붕에 발달한 니질 퇴적체의 규모와 형태, 층서 발달 양상 및 생성 기원을 밝혔다. 특히 한국지질자원연구원에서는 지난 2001년 북부 동중국해역에서 고해상의 탄성과탐사자료를 획득하고 심부시추 퇴적물 코어(약 65-70 m 길이)를 시추하여 후기 제 4기 동안의 퇴적 층서를 밝히고 해수면 변동에 따른 퇴적환경을 복원연구 사업을 수행하였다(한국지질자원연구원, 2001). Berne *et al.* (2002)과 Yoo *et al.* (2002)은 동중국해 북부해역에서 획득한 탄성과 탐사자료와 퇴적물 시추코어를 이용하여 후기 제 4기 퇴적 층서를 규명하고 해수면 변동에 따른 퇴적환경변화를 연구하였다. 특히 양자강의 영향을 받는 북부 동중국해에서 시추된 코어 퇴적물과 황해 남부 등 주변해역에서 획득한 퇴적물의 유기지화학 자료와 퇴적물에 산출되는 저서성 유공충의 산소와 탄소 안정동위원소 자료를 이용하여 마지막 해빙기에 일어난 해침시기뿐 아니라 홀로세 이후 연구해역에서 일

어난 해침에 의한 고환경변화를 정밀하게 복원하였다(e.g., Kim and Kennett, 1998; Kim *et al.*, 1999; 남승일 외, 2003). 최근에는 Badejo *et al.* (2014)은 n-alkane를 포함한 다중 프록시(multi-proxies)를 이용하여 동중국해 북부해역에서 시추된 퇴적물에 기록된 마지막 해빙기 이후 표층 수온변화 등 해수면 상승에 따른 고환경변화를 복원하였다.

그러나 북부 동중국해에서 시추된 퇴적물 코어를 이용한 홀로세 이전 해수면이 하강하였던 마지막 최대 빙하기뿐 아니라 해수면 변동이 매우 크게 일어난 MIS (Marine Isotope Stage) 3의 시기인 6만년부터 2만 5천 년 전 동안(Siddall *et al.*, 2008) 퇴적된 기록에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다(e.g., 한국지질자원연구원, 2001). 이는 마지막 최대 빙하기에 수심이 낮은 대부분의 동중국해 대륙붕 해역은 대기에 노출되어 퇴적이 거의 이루어지지 않았으며, 해수면 변동이 크게 일어난 MIS 3 시기에 퇴적된 퇴적물 및 층서 연대를 설정하는데 필요한 탄산염질 유공충과 같은 시료를 확보하는데 어려움이 있었다.

이 연구에서는 한국지질자원연구원이 지난 2001년 북부 동중국해에서 시추한 65.2 m 길이의 퇴적물 코어(ECSDP-102)에서 홀로세 이전에 퇴적된 퇴적물에서 분석된 유기지화학 자료와 저서성 및 부유성 유공충 (*A. ketienziensis*)의 산소·탄소 안정동위원소를 이용하여 해수면 변화가 크게 일어난 MIS 3 동안 서로 다른 환경에서 퇴적된 고환경변화를 처음으로 복원하고자 하였다. 그러나 매우 제한된 깊이의 퇴적층에 산출되는 저서성 유공충을 이용한 AMS ¹⁴C 연대측정자료를 이용하였기 때문에 보다 정확한 층서를 정립하는 문제점이 여전히 남아있다. 따라서 본 연구에서는 현재보다 수심이 80~90 m 낮았던 MIS 3 동안 급격한 해수면 변동에 따라 다양한 환경 아래 북부 동중국해역에서 일어난 퇴적환경 및 고환경변화를 파악하는데 목적이 있다. 동일 코어의 약 2 m 상부 층에서 분석된 다중 프록시 자료를 이용하여 마지막 해빙기 이후 홀로세 동안 해침(marine transgression)과 해수면 상승에 따른 북부 동중국해와 황해 중부해역에서 일어난 고환경

변화는 남승일 외(2003)에 의해 자세히 보고되었다.

2. 재료 및 방법

2.1 시추코어 획득

총 길이 65.2 m의 퇴적물 코어 ECSDP-102는 수심이 약 68 m인 동중국해 북부해역(북위 32°02.8495', 동경 125°33.7253')에서 1,500톤 급 중국 시추선 칸 407호를 이용하여 시추되었다(한국지질자원연구원, 2001) (Fig. 1). 시추된 퇴적물은 선상에서 퇴적학적 관찰 및 기체를 하였으며 주로 사질 및 니질 퇴적물로 구성되었으며 일부 구간에서 패각편이 발견되었다(한국지질자원연구원 2001). 퇴적상 분석결과 ECSDP-102는 크게 4개의 퇴적상으로 구분된다: 1) 각각 특이한 물리적 퇴적구조를 관찰할 수 없는 균질니의 퇴적상(homogenous mud facies), 2) 사질과 니질의 교호구조를 보이는 사질니 퇴적상(sand/mud couplet facies), 3) 평행엽리를 갖는 엽리사질 퇴적상(horizontally laminated sand facies), 4) 점이층리를 보이는 사질 퇴적상(graded sand facies)이다(한국지질자원연구원, 2001).

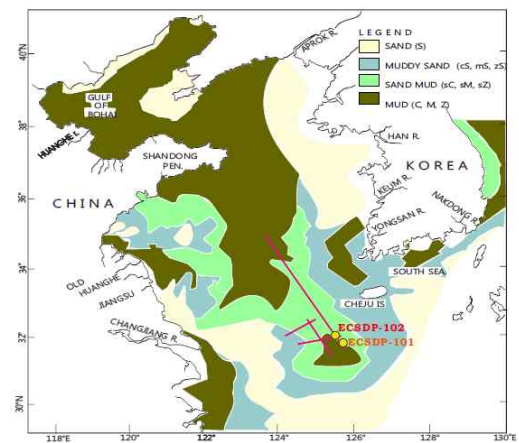


Fig. 1. Map of seismic survey lines and drilled core sites ECSDP-101 and 102 (from KIGAM, 2001). Distribution pattern of surface sediment is also indicated.

2.2 함수율 및 유기화학 분석

시추 퇴적물의 물리적 성질을 측정하기 위하여 북동중국 해역에서 시추한 코어 ECSDP-102에서 약 10-20 cm 간격으로 약 5 g의 시료를 채취하여 무게를 측정한 후, 24 시간 이상 냉동시켰다. 냉동된 시료는 냉동 건조기(freeze dryer)에 24 시간 동결 건조 시킨 후, 다시 무게를 측정하여 퇴적물의 함수율은 다음 식[2.1]으로 계산하였다(e.g., Hamilton, 1971). 함수율은 총 327개의 시료를 이용하여 측정하였다.

$$\text{H}_2\text{O} (\%) = 100 * (\text{wet weight} - \text{dry weight}) / \text{wet weight} \quad [2.1]$$

함수율을 측정할 건조퇴적물은 퇴적물의 건조 전밀도(bulk grain density, g/cm³) 측정과 유기화학 분석을 위하여 균일하게 분말로 만들었다.

총 탄소(TC, total carbon), 총 질소(TN, total nitrogen) 함량은 약 2 mg의 분말시료를 취하여 원소분석기(CHN-Analyzer)로 분석하였다. 총 유기탄소(TOC)와 탄산염(CaCO₃) 함량을 측정하기 위하여 균일한 분말 퇴적물 시료(약 2g)에 10% 염산(HCl)을 첨가하여 탄산염을 제거하였다. 탄산염을 제거한 시료는 증류수로 pH 5정도가 될 때까지 5회 이상 희석시킨 다음 오븐에 넣어 24 시간 건조시킨다. 건조된 시료는 다시 균일하게 분말로 만들어 약 2 mg의 시료를 취하여 원소분석기를 이용하여 탄산염이 제거된 퇴적물(TOC', decarbonated sediment) 함량을 측정한다. TOC와 탄산염(CaCO₃) 함량은 다음 식[2.2 & 2.3]으로 계산하였다(Stein, 1991).

$$\text{TOC} (\%) = [100 - (8.333 * \text{TC}) / [(100 / \text{TOC}') - 8.333]] \quad [2.2]$$

$$\text{CaCO}_3 (\%) = (\text{TC} - \text{TOC}) * 8.333 \quad [2.3]$$

C/N 비(total organic carbon/total nitrogen ratio)는 해양 퇴적물에서 유기물이 육상 또는 해양기원을 추정할 수 있는 기초적인 방법으로 알려져

있다(Mueller, 1977; Stein 1991). 일반적으로 C/N 비가 7-8 이하의 값을 보이면 유기물의 기원이 해양성이 우세하며, 10-15의 값은 해양과 육상 기원이 혼합되어 있음을 지시하고, 15 이상의 값을 보이면 유기물이 육상 기원임을 의미한다(Stein, 1991; 남승일 외, 2003).

2.3 유기물의 탄소동위원소 분석($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)

퇴적물에 포함된 유기물 기원(육상기원 vs 해양기원)을 보다 정확하게 밝히기 위하여 코어 ECSDP-102에서 전 구간에 걸쳐 총 132개의 퇴적물 분말시료를 선택하여 탄산염이 제거된 퇴적물을 이용하여 유기물의 탄소동위원소($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)를 분석하였다. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 비 분석은 한국기초과학지원연구원에서 질량분석기를 이용하여 분석되었다. 특히 퇴적물에서 -22‰보다 무거운 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 비는 해수의 표층생산력이 증가되어 해양기원 유기물이 해저퇴적물에 많이 유입되었음을 의미하며, -24‰보다 가벼운 값은 주로 육상기원 유기물이 우세하게 퇴적되었음을 의미한다(cf. Stein, 1991). 따라서 유기물의 탄소동위원소 비는 대륙주변부 해역의 퇴적물에 쌓인 유기물의 특성과 기원을 밝히는데 중요한 지시자(indicator)로서 이용된다.

2.4 유공충의 산소 및 탄소 안정동위원소 분석

유공충의 산소 및 탄소 안정동위원소를 분석하기 위하여 시추 퇴적물에서 약 10 g의 시료를 채취하여 63 μm 체(sieve)로 습식 체질한 후, 사질(>63 μm) 시료를 50℃의 오븐에서 24시간 건조시켰다. 건조된 시료는 125 μm 체를 이용하여 다시 세립질(<63 μm)과 125 μm 이상의 조립 사질로 분리하였다. 산소 및 탄소 안정동위원소 분석을 위해 실체 현미경으로 코어의 전 구간을 관찰하였으며, 특히 코어의 상부 층에 비교적 우세하게 출현하는 저서성 유공충인 *A. ketieneziensis*와 하부 층에 주로 출현하는 *A. beccarii* s.l.를 각각 20여 개체(약 60 μg)씩 추출하였다. 또한 코어 퇴적물에서 부분적으로 산출되는 부유성 유공충인 *G. ruber*의 산소 및 탄소동위원소도 측정하였다. 특히 일정한 동위원소 값을 얻기 위해서 125-250 μ

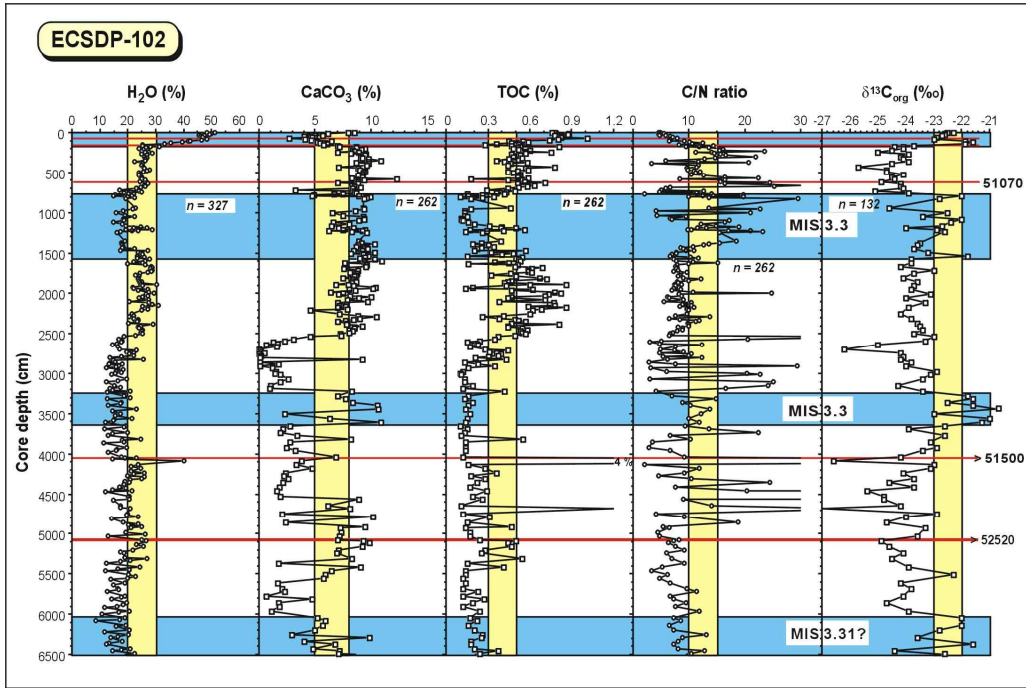


Figure 2. Contents (%) of water, CaCO₃ and total organic carbon (TOC), C/N ratio and δ¹³C_{org} values analyzed from a sediment core ECS DP-102 are shown. AMS ¹⁴C ages are indicated with red lines. AMS ¹⁴C dated ages using benthic foraminifer occurred in the upper part are shown in Table 1.

m 크기의 유공충을 추출하였다. 코어 퇴적물에서 추출된 유공충 시료는 독일 Alfred-Wegener 극지-해양연구소 안정동위원소 Lab에서 질량분석기 Finnigan Mat 251을 이용하여 산소 및 탄소 동위원소를 분석이 수행되었다. 분석 결과는 V-PDB (‰)로 계산하여 δ(delta)로 표시되었다.

2.5 AMS ¹⁴C 연대 측정

후기 제 4기 및 홀로세의 층서를 확립하고 정확한 퇴적 기작 및 퇴적 환경을 해석하기 위하여 북부 동중국 해역에서 시추된 코어 퇴적물의 연대 측정 방법이 수행되었다. AMS ¹⁴C 연대 측정에는 코어 ECS DP-102에서 6점의 시료에서 저서성 유공충을 추출(약 >10 mg)하여 독일 Kiel 대학의 Leibniz 연대측정실험실에서 수행되었다(Table 1).

3. 결 과

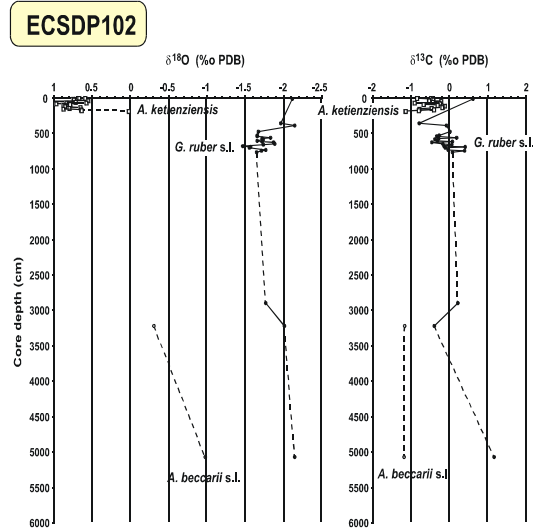
3.1 시추코어 ECS DP-102

심부 시추코어 ECS DP-102의 퇴적물 시료의 함수율은 상부 1.8 m의 홀로세 이후에 형성된 층을 제외한 전 구간에서 10 %와 30 % 사이에서 변화하는 값을 보인다(Fig. 2). 마지막 최대빙하기에서 홀로세로 전환되면서 함수율이 약 25 %에서 표층에서는 52 %의 높은 값으로 증가한다.

탄산염 함량은 0 %에서 13 % 사이에서 급격한 변화를 보인다(Fig. 2). 특히 25 m 이하의 하부 층의 탄산염 함량이 0 %에서 12 % 사이에서 급격한 변화를 보이는 반면, 25 m 이상의 상부 층에서 홀로세 이전까지 비교적 높은 약 10 % 정도의 값을 나타낸다. 특히 진동 코어를 이용해 시추된

상부 퇴적물의 탄산염 함량은 하부 2 m에서 10 % 정도의 값에서 상부 층으로 향하면서 점진적으로 감소하는 경향을 보인 후, 최상부에서 9 % 까지 다시 증가한다(Fig. 2). 일반적으로 홀로세의 탄산염 함량은 저서성 유공충의 산출량과 잘 대비된다(남승일 외, 2003). 유기탄소 함량은 0.1 %에서 4.0 % 값의 범위에서 급격한 변화를 보인다(Fig. 2). 특히 41 m 구간의 피트(peat) 층에서 4 %의 높은 유기탄소 함량을 보인다. 또한 25 m 하부 층에서는 유기탄소 함량이 0.2 % 이하의 낮은 값을 보이는 반면, 일부 구간을 제외한 상부 층 전 구간에서 유기탄소 함량은 0.4 % 이상의 값을 갖는다. 상부의 홀로세 층에서 유기탄소 함량은 하부에서 비교적 낮은 값을 보인 후, 상부로 가면서 0.8 %로 점진적으로 증가한다(Fig. 2) (남승일 외, 2003). C/N 비는 5 이하의 낮은 값에서 30까지 급격한 변화를 보인다(Fig. 2). 특히 하부의 피트 층에서 C/N비는 30 이상의 높은 값을 나타낸다. 또한 홀로세 층의 C/N비는 하부에서 10 이상의 값을 갖는 반면, 상부로 증가하면서 5.1 ka 전 이후에는 10 이하의 값을 보인다(Fig. 2) (남승일 외, 2003). 유기물의 탄소동위원소($\delta^{13}C_{org}$) 비는 -26‰보다 가벼운 값과 -21‰의 무거운 값 사이의 뚜렷한 변화를 나타낸다(Fig. 2). 특히 홀로세 동안의 $\delta^{13}C_{org}$ 비는 -23‰보다 무거운 값을 나타내며 (남승일 외, 2003), 또한 이와 유사한 값이 51.1 ka와 약 60 ka 사이의 층에서 3회에 걸쳐 나타난다(Fig. 2).

ECSDP-102의 코어의 8 m 하부에서는 기수환경(brackish environment)에서 서식하는 *A. beccarii* s.l. 종이 매우 제한적으로 산출된다. 따라서 나머지 구간에서는 저서성 유공충이 거의 산출되지 않기 때문에 산소 및 탄소안정동위원소 값을 얻지 못하였다(Fig. 3). 그러나 코어 깊이 8 m에서부터 홀로세 층 구간에 산출되는 부유성 유공충인 *G. ruber*의 산소동위원소 비는 -1.4‰에서 -2.1‰의 가벼운 값을 나타낸다(Fig. 3). 반면 *G. ruber*의 탄소동위원소 비는 -0.8‰에서 0.6‰ 범위에서 변화한다. 이와 반대로 홀로세 층에 출현하는 저서성 유공충인 *A. ketienziensis*의 산소 동위원소 비는 1.0‰에서 0.0‰ 사이의 범위에서 변화하며, 탄



소 동위원소 값은 -1.75‰에서 -0.25‰ 사이의 비교적 가벼운 값을 보인다(Fig. 3). 특히 마지막 최대빙하기 이후 홀로세가 시작되는 시기에서 산소 및 탄소동위원소 비는 홀로세 후기보다 비교적 가벼운 값을 나타낸다.

3.2 AMS ^{14}C 연대측정 및 퇴적을

코어 ECSDP-102에서 분석한 AMS ^{14}C 연대측정 결과는 Table 1에 표시하였다. 코어 ECSDP-102의 홀로세 평균 퇴적율은 0.21 m/kyr의 값을 보인다. 특히 ECSDP-102의 6.15 m, 40.50 m, 50.71 m에서 측정된 연대는 산소 동위원소 MIS 3.3에 해당하는 시기이다(Martinson *et al.*, 1987). 대기과 해양 사이의 CO_2 reservoir 영향을 보정하지 않은 연대측정 결과를 기초로 계산한 6.15 m와 50.71 m 사이의 평균 퇴적율은 약 31.8 m/kyr의 매우 높은 값을 보인다(Table 1).

4. 토 의

Table 1. AMS ¹⁴C dating and linear sedimentation rate of core ECSDP-102.

Sample No.	Core depth (m)	Materials	¹⁴ C-Age (ka) (uncorrected)	Linear Sedimentation Rate (LSR, m/kyr)
ECSDP-102	0.8	Benthic foraminifera	1.83	0.44
	1.2	Benthic foraminifera	4.81	0.13
	1.6	Benthic foraminifera	7.72	0.14
	6.15	Benthic foraminifera	51.1	0.12
	40.50	Benthic foraminifera	>51.5	85.9
	50.71	Benthic foraminifera	>52.5	10.2

4.1 MIS 3(60~25 ka BP) 동안 동중국해의 고환경변화

동중국해는 서태평양과 황해를 연결하는 대륙 주변해로 200 m 이하의 넓은 대륙붕과 좁은 대륙 사면으로 형성되어 있기 때문에 후기 제 4기 빙하기-간빙기에 일어난 전 지구적인 해수면 변화에 민감한 해역이다. 해수면 높이가 현재의 위치에 도달한 이후 동중국해 북부해역은 대만난류의 지류인 황해난류가 유입되며 중국연안류와 황해한류의 영향을 받는 해역으로 황해와 해류의 순환이 일어나는 곳이다. 특히 동중국해 북부해역은 평균수심이 약 70 m 이하의 넓은 대륙붕으로 이루어져 있다. 후기 제 4기 빙하기와 간빙기 때 극지방에 존재하였던 대륙빙하의 확장 후퇴에 따라 전 지구적으로 해수면이 상승과 하강을 반복하였기 때문에(Aharon and Chappell, 1986; Fairbanks, 1989; Chappell *et al.*, 1996) (Fig. 4), 연구해역도 이러한 해수면 변화의 영향을 직접적으로 받았다. 특히 해수면이 최대 130 m 낮았던 마지막 최대빙하기(LGM, last glacial maximum) 동안에 북부 동중국해역은 대기에 노출되어 있었거나 고황해와 양자강에서 유입되는 대규모의 담수

에 의해 호수 환경이 형성되었다. 따라서 황해와 연결된 동중국해 북부해역은 중국 양자강에서 유입되는 담수의 영향을 받는 곳으로 해수면 변동에 따라 담수-반해양성-해양성 환경의 변화가 일어났기 때문에 해수면 위치가 다른 시기에 쌓인 퇴적물에는 이러한 변화가 비교적 잘 기록되어 있다(Park *et al.*, 2000; Yoo *et al.*, 2002). 그러나 북부 동중국해역에서 시추된 코어 ECSDP-102에 대한 정확한 연대측정 자료가 불충분한 상태에서 층서를 확립하는 문제가 여전히 남아있으나, 본 연구에서는 코어 퇴적물에서 분석한 제한된 AMS ¹⁴C 연대측정 자료를 이용하여 후기 제 4기 MIS 3(60-25 ka BP) 동안 해수면 변동에 따라 북부 동중국해역에서 일어난 퇴적환경 및 고환경변화를 다음과 같이 해석이 가능하다.

일반적으로 마지막 최대 간빙기인 Eemian (130~115 ka BP) 이후 해수면은 점차 감소하여 빙하기인 MIS 4동안 해수면은 현재 높이보다 약 80~90 m 낮았고, 이후 MIS 3에는 약 20~40 m 상승하였다(e.g., Aharon and Chappell, 1986; Fairbanks, 1989; Chappell *et al.*, 1996; Siddall *et al.*, 2008). 특히 MIS 3의 전기(MIS 3.3)에는 후기(MIS 3.1)보다 해수면이 약 20 m 상승한 상태였다. MIS 3의 전기 동안 이렇게 급격하게 해수면이 상승한 것은 그 당시 북위 65°에서 여름철 태양 입사량이 증가하여 북극 대륙에 존재했던 빙상의 대규모 해빙이 일어난 시기와 밀접한 관련이 있다(Berger, 1978; Nam, 1997).

코어의 깊이 50.7 m에서 저서성 유공충을 분석해서 얻은 연대측정 자료에 의하면 시추 코어 ECSDP-102는 52.5 ka BP 이전에 퇴적된 것으로 해석된다. 따라서 약 5 m 두께의 최 하부 층(깊이 65~60 m)에서 분석된 유기물의 탄소동위원소($\delta^{13}C_{org}$) 값은 -23.3‰ ~ -22.4‰로 무거운 값을 보인다(Fig. 2). 이는 퇴적당시 해양환경에서 기원된 유기물이 우세하게 퇴적된 것을 의미한다. 또한 깊이 40.5 m와 6.15 m에서 저서성 유공충을 이용해 측정된 연대도 각각 51.5 ka BP와 51.1 ka BP로 밝혀졌다(Fig. 2). 따라서 이 시기는 MIS 3.3에서 3.31에 해당하는 비교적 온난한 시기(interstadial)로 Chappell *et al.* (1996) 및 Siddall *et*

al. (2008)에 의해 제시된 전 지구적인 해수면 변화 커브에 의하면 그 당시 전 연구해역은 해수면이 50-60 m 정도 하강한 상태였다(Fig. 4). 따라서 그 당시 연구 해역의 해안선은 바다 쪽으로 물러나 현재보다 시추 코어와 인접한 곳에 위치하였으며, 그 결과 양자강에서 유입되는 대규모의 퇴적물이 강 하구와 가까운 지역에 퇴적되었던 것으로 보인다(Liu *et al.*, 2010). 동시에 MIS 3.3과 3.31 동안에 연구해역은 비교적 해수의 영향을 받았던 환경이었던 것으로 생각된다. 이는 MIS 3.3과 3.31 시기에 퇴적된 $\delta^{13}C_{org}$ 비를 대비해보면 홀로세와 같이 무거운 값(-23‰ ~ -21‰)을 보인다. 이는 당시의 표층환경이 현재와 유사하였던 조건이 일정 기간 지속되었던 것으로 해석된다. 따라서 해양 환경 하에서 표층생산력은 증가되게 되어 비교적 많은 해양기원 유기물이 해저에 유입된 동시에 담수의 영향은 비교적 감소되어 육성기원 유기물이 해저에 유입되는 양이 상대적으로 감소되었을 것으로 해석된다.

그러나 이와 반대로 해수면이 비교적 낮았던 MIS 3시기 중에서 한랭기(stadial)에도 완전히 대기에 노출되었거나 전형적인 담수환경은 아니었던 것으로 생각된다. 따라서 연구해역은 최소한 해수와 담수의 영향이 존재하였던 기수환경 하에 있었으며 육지에서 유입된 유기물이 우세하게 쌓였던 것으로 추정된다. 따라서 MIS 3.31, 3.3 그리고 3.1 시기 사이에는 $\delta^{13}C_{org}$ 비가 주로 -24‰에서 -23‰ 범위의 값을 보이는 것은 그 당시 연구해역이 담수의 영향을 받는 델타나 강 하구와 같은 기수환경이 우세하였음을 잘 지시한다(Tan and Strain, 1979; Tan *et al.*, 1991; 남승일 외, 2003). 이와 동일한 시기에 대규모 두께의 퇴적체가 황해 중앙 서쪽해역에서도 확인된다(e.g., Liu *et al.*, 2010). 또한 이때패류가 함유된 퇴적층에서 탄산염 함량(약 10%)이 비교적 높게 나타나는 시기와 $\delta^{13}C_{org}$ 비가 -24‰ 이하의 낮은 값을 보이는 구간과 잘 일치하는 것 역시 당시 담수의 유입이 증가된 환경이었음을 뒷받침한다. 그러나 토탄층(약 47 m와 42 m)에서는 $\delta^{13}C_{org}$ 비가 -26‰ 이하의 매우 낮은 값을 보이는 것은 이 시기에는 해수면 하강되어 육성 환경이 우세하였던 것을 지시

한다. 따라서 ECSDP-102가 퇴적된 동중국해 북부해역은 지난 6만년 동안 홀로세와 유사하게 해양성 환경이 우세하고 비교적 육상에서 유입되는 퇴적물이 감소하여 퇴적된 시기가 최소한 3회 정도 존재하였음을 지시한다.

또한 부분적으로 출현하는 저서성 유공충의 양상 역시 해수면 변동에 의한 동중국해역의 고환경 변화를 잘 지시한다. 특히 4-8 m 사이에 부유성 유공충인 *G. ruber*가 산출되는 것은 그 당시 북부 동중국해에 쿠로시오 해류의 지류인 비교적 따뜻한 해수의 영향이 어느 정도 미쳤음을 의미한다(Fig. 3). 그러나 실제현미경을 이용하여 *G. ruber*의 크기를 살펴보면 비교적 작은 개체들이 우세하게 산출된다. 이는 당시 부유성 유공충인 *G. ruber* 종이 대만난류(Taiwan Warm Current)와 같은 표층수를 따라 북부 동중국해까지 이동하였던 것으로 추정된다(Liu *et al.*, 2010). 그러나 그 당시 염분도나 수온 등 수괴의 조건이 더 이상 성장에 필요한 적합한 환경이 형성되지 못했었던 것으로 보인다. 이는 당시 양자강의 영향이 현재보다 강하게 작용했기 때문에 대규모의 담수와 퇴적물이 연구해역에 유입된 결과 부유성 유공충이 성장하고 번식하기에는 서식환경이 매우 불안정한 조건이었을 것으로 해석된다. 또한 이 시기의 $\delta^{13}C_{org}$ 비도 -22‰에서 -24‰로 약 -2‰ 정도 가벼운 값을 보이는 것은 이는 당시 양자강을 통해 다량의 육성기원 유기물이 유입되어 북부 동중국해에 퇴적환경에 영향을 미쳤음을 의미한다.

따라서 북부 동중국해는 MIS 3.3과 3.31 시기에는 해수의 유입으로 일정기간 해양환경이 형성되었으며, 또한 해양환경이 형성되었던 사이에 일어난 해수면의 변동에 의해 담수의 영향이 우세하였던 시기가 존재하였던 것으로 보인다. 이러한 증거는 북부 동중국해역의 퇴적층에서 얻은 부유성과 저서성 유공충의 산출변화와 그 종의 산소 및 탄소동위원소 값 그리고 유기물의 $\delta^{13}C_{org}$ 비의 변화에 뚜렷하게 기록되어 있다. 또한 마지막 최대빙하기에 연구해역은 해수면 위에 위치해 있는 육상 환경이었기 때문에 시추 코어에는 당시의 퇴적기록이 보존되어 있지 않은 것으로 해석된다.

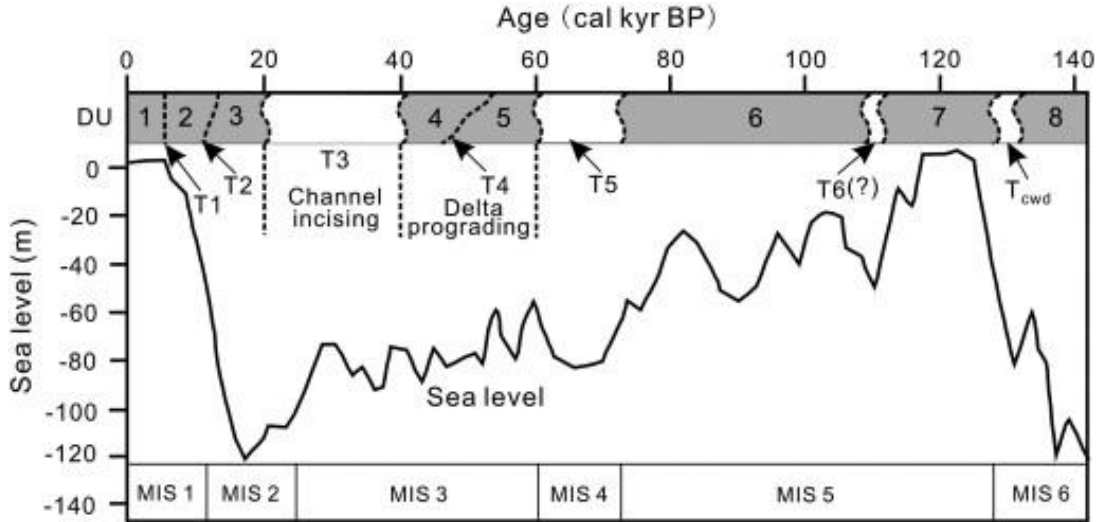


Fig. 4. Correlation between sea-level changes over the past 140 ka (modified from Chappell *et al.*, 1996; Aharon and Chappell, 1986) and the depositional sequences in the western South Yellow Sea. Marine isotopic stages 1 to 6 (MIS 1 to MIS 6) are shown at the bottom. Depositional units (DU 1 to DU 8) reconstructed from the western South Yellow Sea are shown on the top, and seismic surfaces T1 to T6 and the basal boundary of MIS 5 cold-water deposits (Tcwd) are inserted between various depositional units (from Liu *et al.*, 2010).

5. 결론

6점의 AMS ^{14}C 연대측정자료에 의하면 북부 동중국해에서 시추된 65.2 m 길이의 퇴적물 코어 ECSDP-102는 MIS 3과 마지막 최대 빙하기 이후 해침이 시작된 홀로세 동안 퇴적되었다. 홀로세 이전의 퇴적물에서 얻은 3점의 연대측정 자료에 의하면 상부 약 2 m의 퇴적층을 제외한 약 63 m 두께의 퇴적체는 해수면 변동이 크고 강하게 일어났던 MIS 3(약 6만년~2만 5천 년 전) 동안에 퇴적된 것으로 해석된다. 따라서 퇴적 당시 해수면 높이에 따라 현재의 해안선의 위치가 이동하였기 때문에 서로 다른 환경에서 쌓인 퇴적물에는 이러한 해수면 변화에 의한 퇴적환경변화가 비교적 잘 기록되어 있다. 특히 퇴적물에서 분석된 유기물 탄소동위원소($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 값, 일정 구간에서 출현하는 부유성 및 저서성 유공충과 이들의 산소·탄소 안정동위원소 값에 의하면 시추코어가 퇴적된

북부 동중국해는 MIS 3 동안 해수면 변동에 의해 담수-반해양성-해양성 환경에서 퇴적된 것으로 보인다. 특히 이들 두꺼운 퇴적체는 빙하기인 MIS 4 이후 해수면이 약 20 m 이상 상승하였던 온난한 시기(interstadial)인 MIS 3.3/3.1 동안에 고황하강이나 양자강에서 유입된 대규모의 퇴적물이 급격하게 퇴적된 결과로 보인다. 특히 *G. ruber*의 부분적인 출현과 산소동위원소 값 그리고 -22% 보다 무거운 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값은 하부 63 m 두께의 퇴적층은 해수면 상승(~20 m)으로 해침이 일어난 MIS 3.3과 3.1 사이의 짧은 기간 동안 비교적 우세한 해양환경/기수환경에서 퇴적된 것으로 보인다. 특히 63 m 두께의 퇴적층은 약 1,000년의 짧은 기간 동안 퇴적물이 양자강과 고황하강에서 대규모로 유입되어 퇴적된 결과로 보인다. 동시에 이 시기에는 육상기원의 유기물 유입이 증가하면서 비교적 높은 C/N 값과 가벼운 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값을 보인다.

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원에서 수행한 결과를 극지연구소에서 자료를 정리 하였으며, 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술원의 지원을 받아 한국지질자원연구원에서 수행하고 있는 "남해 제4기 퇴적층서 연구(#16-9856)" 과제 및 한국연구재단에서 추진한 한-프 협력기반조성사업의 일환으로 수행 된 「북극환경변화: 생물지표인 유공충 관점 (NRF-2014K1A3A1A21001427)」의 일부지원을 받아 최종 마무리 하였다. 또한 본 연구를 위해 필요한 자료를 제공해 주고 조언을 아끼지 않은 한국지질자원연구원 석유해저자원연구본부의 동료 연구원들께 감사를 전한다. 유기물의 탄소 동위원소 분석을 수행 해 주신 한국기초과학지원연구원의 이광식 박사님께 감사를 표한다. 본 논문이 완성될 수 있도록 노력해 주신 극지연구소의 김성중 박사님께도 사의를 표한다.

참고문헌

김동선, 최상화, 김경희, 김철호, 2009. 동중국해 북부해역에서 부유물질과 입자성유기탄소의 분포 특성 및 연간변화. *Ocean and Polar Research*, 31, 2190229.

남승일, 김성필, 장정해, A. Mackensen, 2003. 마지막 해빙기 해침 이후 동중국해 북부해역과 황해의 고환경 변화. *지질학회지*, 39, 149-160.

최동림, 이태희, 유해수, 임동일, 허식, 김광희, 2005. 동중국해 북부대륙붕에 발달한 니질 퇴적체의 탄성과 연구. *자원환경지질*, 38, 633-642.

한국지질자원연구원/KIGAM, 2001, 황해 종합조사-해저지질·자원조사. '01 종합보고서 (2000-N -LO-01-A-03), 326 p.

Aharon, P. and Chappell, J., 1986. Oxygen isotopes, sea level changes and temperature history of a coral reef environment in New Guinea over the last 105 years.

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 56, 337-379.

Badejo, A.O., Gal, J.K., Hyun, S.M., Yi, H.-I., Shin, K.-H., 2014. Reconstruction of paleohydrological and paleoenvironmental changes using organic carbon and biomarker analyses of sediments from the northern East China Sea. *Quaternary International*, 344, 211-223.

Berger, A.L., 1978. Long-term variations of Caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 9, 139-167.

Berne, S., Vagner, P., Guichard, F., Lericolais, G., Liu, Z., Trentesaux, A., Yin, P. and Yi, H.I., 2002. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea. *Marine Geology*, 188, 293-315.

Chappell, J., Omura, A., Esat, T., McCulloch, M., Pandolfi, J., Ota, Y., Pillans, B., 1996. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep-sea oxygen isotope records. *Earth and Planetary Science Letters*, 141, 227-236.

Chen, C., Beardsley, R.C., Limeburner, R. and Kim, K., 1994. Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow Sea and East China Sea and adjacent Kuroshio during 1986. *Continental Shelf Research*, 14, 909-929.

Fairbanks, R.G., 1989, A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates in the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342: 637-642.

Hamilton, E.L., 1971. Prediction of in situ acoustic and elastic properties of marine sediments. *Geophysics*, 36. 266-284.

Kim, D, Park, B.-K. and Shin, I.C., 1999, Paleoenvironmental changes of the Yellow Sea during the Late Quaternary. *Geo-Marine Letters*, 18, 189-194.

Kim, J.-M. and Kennett, J.P., 1998,

- Paleoenvironmental changes associated with the Holocene marine transgression, Yellow Sea (Hwanghae). *Marine Micro-paleontology*, 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.
- Li, B., Park, B.-K. and Kim, D., 1999, Paleooceanographic records from the Northern shelf of the East China Sea since the Last Glacial Maximum. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 34, 151-166.
- Liu, Z.-X., Berne, S., Saito, Y., Lericolais, G. and Marsset, T., 2000, Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 441-452.
- Liu, J., Saito, Y., Kong, X., Wang, H., Wen, C., Yang, Z., Nakashima, R., 2010, Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea. *Marine Geology*, 278, 54-76.
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C. and Shackleton, N.J., 1987, Age dating and the orbital theory of ice ages: development of high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27, 1-29.
- Matsuno, T., 2003, Circulation of the bottom water on the shelf in the East China Sea. *Proceedings of International Symposium on Oceanographic Environmental Change after Completion of the Changjiang (Yangtze River) Three Gorges Dam*, 38-46.
- Milliam, J.D. and Meade, R.H., 1983, World-wide diversity of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91, 1-21.
- Mueller, P., 1977, C/N ratios in Pacific deep-sea sediments: Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 765-776.
- Nam, S.-I., 1997 Late Quaternary glacial history and paleoceanographic reconstructions along the East Greenland continental margin: Evidence from high-resolution records of stable isotopes and ice-rafted debris. *Berichte zur Polarforschung*, 241, Bremerhaven, 157 p.
- Park, S.-C., Lee, H.-H., Han, H.-S., Lee, G.-H., Kim, D.-C. and Yoo, D.-G., 2000, Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea. *Marine Geology*, 170, 271-288.
- Qin, Y., Zhao, Y., Chen, L. and Zhao, S., 1996, *Geology of the East China Sea. A Series of Solid Earth Sciences Research in China*. Science Press, Beijing, 357 p.
- Siddall M., Rolling, E.J., Thompson, W.G. and Waelbroeck, C., 2008, Marine isotope stage 3 sea level fluctuations: Data synthesis and new outlook. *Reviews of Geophysics*, 46, 1-29.
- Stein, R., 1991, Accumulation of organic carbon in marine sediments. *Lecture Notes in Earth Sciences* 34, Springer, Heidelberg, 217 p.
- Tan, F.C. and Strain, P.M., 1979, Organic carbon isotope ratios in recent sediments in the St. Lawrence Estuary and the Gulf of St. Lawrence. *Estuarine, Coastal and Continental Shelf Science*, 8, 213-225.
- Tan, F.C., Cai, D.L. and Edmond, J.M., 1991, Carbon isotope geochemistry of the Changjiang estuary. *Estuarine, Coastal and Continental Shelf Science*, 32, 395-403.
- Tang, B., 1996, Quaternary stratigraphy in the shelf of the East China. In: *Quaternary stratigraphy in China and its international correlation*. In: Yang, Z. and Lin, H. (eds.), Geological Publishing House, Beijing, 56-75. (in Chinese)
- Yanagi, T., Morimoto, A. and Ichikawa, K., 1997, Seasonal variation in surface circulation of

the East China Sea and the Yellow Sea derived from satellite altimetric data. *Continental Shelf Research*, 17, 655-664.

Yang, Z., Lin, H. and Zhang, G., 1996, Quaternary stratigraphy in the shelf of the East China. In: Yang, Z. and Lin, H. (eds.), *Quaternary stratigraphy in China and its international correlation*. Geological Publishing House, Beijing, 31-55. (in Chinese)

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.