

## XRF 코어 스캐너를 이용한 조석사주 시추코어 지화학 분석: 시추코어 퇴적층서분석에의 적용

장태수<sup>1,\*</sup> · 남승일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 석유해저연구본부

<sup>2</sup>극지연구소 극지기후연구부

### 요 약

황해 아산만 중앙천퇴에서 시추된 조석사주 퇴적물코어에 대하여 XRF 코어 스캐너로 분석한 지화학 원소의 수직분포와 퇴적층서를 대비하였다. 원소 분석기로 분석한 유기 지화학 자료, 유기탄소 및 질소 안정동위원소 값과 <sup>14</sup>C 연대측정자료를 층서 대비에 이용하여 XRF 원소분석이 퇴적층서분석에 어느 정도 유용한지를 밝혔다. 먼저 퇴적상분석 결과, 중앙천퇴는 하성퇴적물, 해침잔류퇴적물, 염하구 조간대 및 조석사주퇴적물의 4개의 퇴적상 조합으로 구분된다. 전체적인 퇴적층서는 상향조립화 경향을 나타내며, 이는 홀로세의 해수면 상승에 따라 해침에 의한 잔류퇴적물과 조간대 위에 조립의 사주퇴적층이 놓인 것으로 보인다. 이러한 층서분석 결과와 XRF 원소분석 값의 변화는 잘 일치한다. 육성기원의 Al, Si, K, Ti 및 Fe 값은 하성퇴적물 구간에서 가장 높은 값을 보였으며, 조간대 구간에서는 중간 값을, 해양환경의 사주퇴적물 구간은 가장 낮은 값을 나타낸다. 생물기원의 Ca, Mn, Br 및 Sr은 이와 반대의 경향을 보인다. 유기 지화학 및 안정동위원소 분석자료에 의하면, 조간대 구간은 육성기원 유기물이 우세한 반면에, 사주퇴적물에는 해양기원의 유기물이 비교적 우세하게 유입되었던 것으로 밝혀졌다. 이와 같이, 천해 혹은 조석 퇴적물에 대한 XRF 코어 스캐너를 사용한 원소분석은 유용하며, 고환경분석의 프록시로 사용 가능하다.

**주요어:** XRF 코어스캐닝, 지화학 원소 로깅, 조석사주, 퇴적층서분석, 아산만

**Tae Soo CHANG and Seung-Il Nam, 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. v. 47, no. 5, p. 471-484**

**ABSTRACT:** In order to evaluate the relationship between lithostratigraphy and geochemistry of core sediments using a XRF core scanner, two drilled-cores collected on a large tidal bar, outer Asan Bay of Korea were examined. Stable isotopes of organic carbon and nitrogen and organic carbon and CaCO<sub>3</sub> measured by a CHN analyzer were additionally used for correlation of the investigated cores, complemented by <sup>14</sup>C ages of foraminifera. The Asan bay tidal bar deposits can be divided into four major facies assemblages: a) fluvial deposits, b) transgressive gravel lag deposits, c) estuarine tidal flat deposits and d) tidal bar deposits in ascending order. The Holocene stratigraphy reveals an overall trend of upward-coarsening textural composition indicative of transgressive deposition coupled with local sea-level rise, tidal-flat muds being overlain by sand-dominated tidal bar successions. These lithostratigraphic units correlate well with the chemical logging data. Terrigenous elements such as Al, Si, K, Ti and Fe show distinctly the greatest value at the interval of fluvial deposits, and medium value in tidal mud beds. However, these elements are poorer in uppermost tidal bar succession. The opposite pattern is shown in biogenic elements such as Ca, Mn, Br and Sr. Organic matter contents and stable isotopes of organic carbon and nitrogen reveal that terrigenous organic matters were dominated in tidal mud deposits, by contrast, at the upper sand bar interval, organic matters were derived from marine environment. The XRF core scanning data seem to be thus applicable, thereby chemical logging data being paleoenvironmental proxy.

**Key words:** XRF core-scanning, geochemical core logging, tidal sand bar, lithostratigraphic analysis, Asan Bay

(Tae Soo CHANG, Korea Institute of Geosciences & Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea; Seung-Il Nam, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Republic of Korea)

\* Corresponding author: +82-42-868-3197, E-mail: tschang@kigam.re.kr

## 1. 서 론

최근 과학기술의 발전과 더불어 지구과학분야에 적용 가능한 첨단 분석 장비들이 도입되고 있다. 이들 중의 하나는 퇴적물코어뿐만 아니라 암석코어시료까지 초고해상의 비파괴방식으로 지화학 원소들을 분석하는 XRF 코어 스캐너이다(Jansen *et al.*, 1998; Croudace *et al.*, 2006). XRF 코어 스캐너는 1998년 초창기의 모델이 개발된 이래 비약적으로 발전한 2세대의 코어 스캐너들이 유럽, 미국 및 아시아 국가에 보급되어 활용되고 있다(엄인권 외, 2009; 박옥분과 남승일, 2010; Jansen *et al.*, 1998; Rothwell, 2006; Croudace and Rothwell, 2010). 코어 스캐너는 기존의 지화학 원소의 재래식 정량분석기인 X선 회절분석기(XRD), X선 형광분석기(XRF) 및 유도결합플라즈마 원자흡광기(ICP-AES)와는 달리 코어시료 내 개별 원소들이 X-선(형광)을 반사한 강도를 측정하는 준 정량적인 원소자료를 산출한다(박옥분과 남승일, 2009; Rothwell and Rack, 2006). 그럼에도 원소의 재래식 정량분석 결과와의 대비, 함수율 및 입도의 영향평가 및 보정(calibration) 연구결과들은 XRF 코어 스캐너의 자료가 준 정량적인지만 그 변화양상이 정량적 결과와 일치하며 코어 내 원소분포를 잘 반영하는 것으로 나타났다(엄인권 외, 2009; Kido *et al.*, 2006; Boening *et al.*, 2007; Tjallingii *et al.*, 2007; Weltje and Tjallingii, 2008; Ziegler *et al.*, 2008; Bertrand *et al.*, 2010; Cuven *et al.*, 2010; Loewemark *et al.*, 2011).

XRF 코어스캐닝에 의한 주원소 및 미량원소분석은 비파괴방식으로 전처리 과정이 필요 없어 부시료 채취 오차요인을 제거하고 신뢰성을 높일 수 있을 뿐만 아니라 0.1 mm 간격의 초고해상 분해 능력으로 연단위(annual)의 고기후 및 고해양 변화 연구까지 가능한 것으로 알려지고 있다(Haug *et al.*, 2003; Giralt *et al.*, in press). XRF 코어 스캐너는 비교적 그 퇴적환경이 안정되어 지속적으로 퇴적되었거나 기후변화 기록을 간직한 호소환경 또는 심해저 해양 환경 퇴적물의 원소분석에 대부분 활용되고 있으며, 육상환경의 고기후 변화뿐만 아니라 고해양 환경변화의 지화학 프록시 자료를 생산하는데 적합한 것으로 판명되었다(엄인권 외, 2009; 박옥분과 남승일, 2010; Jahn *et al.*, 2003; Kuhlmann *et al.*, 2004;

Lamy *et al.*, 2004; Rogerson *et al.*, 2006; Moreno *et al.*, 2007; Spofforth *et al.*, 2008; Kylander *et al.*, 2011).

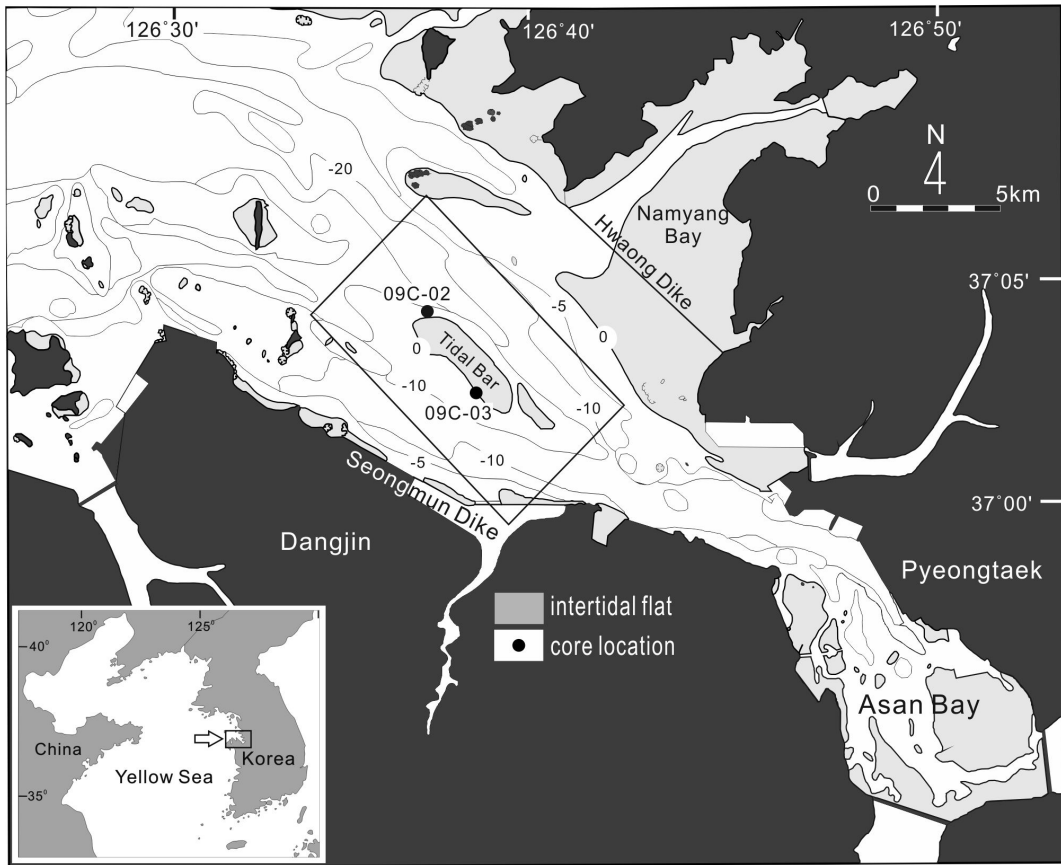
이와 같이, XRF 코어 스캐너는 고기후 및 고해양 분야에 많은 연구가 있었던 반면에 암층서 혹은 퇴적층서분석에 적용한 연구는 상대적으로 적다(Rothwell *et al.*, 2006). 또한 퇴적환경을 고려할 때, 해수면의 상승과 하강에 의해 침식이 빈번하게 발생하고 폭풍에 의한 재침식 및 조류에 의한 재이동으로 연속적인 퇴적기록이 보존되기 어려운 조간대와 대륙붕의 천해 해양환경의 코어시료에 대한 XRF 코어 스캐닝 연구는 거의 이루어지지 않았다.

황해 아산만의 중앙천퇴 조석사주에서 획득한 코어퇴적물시료는 최하부의 육성 하천퇴적물에서 염하구환경의 조간대 퇴적물 그리고 최상부 해양환경의 조석사주 퇴적물로 구성되어 퇴적층서 분석결과와 XRF 코어로깅에 나타난 원소분포를 대비하는데 적합하다. 이 연구는 조석사주에서 획득한 천해 코어퇴적물시료에 대한 첫 번째 XRF 코어 스캐너를 활용한 원소분석결과이며, 이를 퇴적층서분석과 비교한 연구이다. 또한, 지화학 원소분석 외에 유기물 분석을 추가적으로 실시하여 이들을 상호 대비하는데 이용하였다. 이를 통해, XRF 코어 스캐너의 화학 분석결과가 천해 퇴적물코어 시료분석에 적용 가능한지를 평가하였으며, 퇴적층서 구분에 어느 정도 유용한지를 밝혔다.

## 2. 연구지역 및 시추코어분석

### 2.1 아산만 중앙천퇴

아산만은 서해안의 중부에 위치한 천해의 반폐쇄성 만(embayment)으로 황해와 연결되어 있으며 아산만 외해는 평택-당진항의 항해수로로 사용되고 있다. 만내에는 최대수심이 30 m에 달하는 동서방향의 조수로가 발달하고 있으며, 이와 함께 조수로를 따라 동서방향으로 신장된 조석사주가 나타난다(그림 1). 조석은 반일주조(semidiurnal)로서 일조부등(daily inequality)은 약 1 m에 이른다. 대조기의 조차는 약 8 m로서 대조차(upper macrotidal)환경에 해당한다. 최근에 관측된 조류의 최대유속은 2.2 m/s로서 창조류 우세로 나타났다(국립해양조사원, 2009). 주변의 주요하천은 모두 방조제로 가로막혀 담수의



**Fig. 1.** Map showing the study area, bathymetry, and the coring locations. The large elongated mid-channel sand bar is situated in the outer Asan Bay. Two 30 m long drill-cores were recovered from the bar tops, having been used for the lithostratigraphic and geochemical analyses using a XRF core scanner.

유입은 매우 미약하다. 주변해역에 존재하는 수많은 섬의 간섭에 의해 파랑은 1 m 이하로 낮아 그 영향은 미미하다. 연구해역의 풍향은 문순 계절풍의 영향을 받아 겨울은 북서-북풍이, 여름은 남동-남풍이 우세하다. 인근 평택조위관측소에서 측정한 염분관측 자료는 연구해역의 평균염분도가 23~29 psu 범위로서 계절에 따라 강수량의 차이로 그 변화가 발생하는 것으로 보인다.

아산만의 중앙천퇴 조석사주는 최대길이가 약 15 km, 폭 2-5 km, 그리고 지형기복은 약 15 m이다. 그 폭과 길이의 비율에 따라 매우 길쭉한 형태를 띠며, 구조류의 방향에 대략 10°사각으로 놓여있다(그림 1). 간조시에는 조석사주의 상당부분이 대기중에 노출되며, 만조시에는 전체가 잠긴다. 인접 해안을 따라 지난 30여년 동안의 방조제 건설로 인해 해안선

은 매우 단조로워졌기 때문에 조석에너지는 크게 감소하였고, 창·낙조류의 양상 또한 바뀌었다(박문진, 2008; Park, 2000). 조석사주의 해저지형변화 또한 감지되었는데 직간접적으로는 수로의 준설 및 외해의 바다모래 채취의 영향 때문으로 알려졌다(Chang *et al.*, 2010).

## 2.2 시추코어 및 퇴적상분석

퇴적물 코어 09C-02와 09C-03은 해도상 수심(D.L.)이 0 m인 중앙천퇴 조석사주의 상부에서 시추되었으며(그림 1), 길이는 각각 약 30 m와 25.5 m이다. 시추는 6 x 8 m의 플랫폼바지(SEP Barge)를 사주 위에 설치하여 이루어졌다. 시추기는 유압식 시추기, 드릴파이프는 길이 3 m와 폭 89 mm를 사용하였다. 회수한 코어시료는 실험실로 운반하여 저온

**Table 1.** Measured geochemical components using the Aavaatech XRF core-scanner for each kV and filter in this study.

	Measured chemical components	Filter
10 kV	Al, Si, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Ti, B, Cr, Mn, Fe	-
30 kV	Zn, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Pb, Bi, U	Pd Thick
50 kV	Sn, Te, I, Ba	Cu

창고에 보관하였다.

코어는 실내에서 절개하여 한 쪽은 퇴적상, 입도 및 유기물분석에 이용하고 다른 한쪽은 사진이미지 작업과 XRF 코어 스캐닝에 사용하였다. 퇴적상의 기술은 일차적으로 육안으로 그 특징을 구분하고 입도분석자료와 X-ray 이미지자료(X-ray radiography)를 추가로 활용하였다. 각각의 퇴적상은 입도, 1차 퇴적구조, 퇴적물 색, 생교란정도 및 2차 변형퇴적구조를 바탕으로 구분하였다. 분류된 각각의 퇴적상은 퇴적상조합으로 다시 묶었으며 시추 추상도를 작성하고 퇴적층서분석을 하였다. 이러한 결과는 XRF 코어 스캐너의 지화학성분자료, 유기물분석자료와 층서 대비 및 퇴적환경변화를 유추하는데 사용하였다.

### 2.3 XRF 코어 스캐닝

시추퇴적물 코어내 지화학 원소의 고해상분석은 한국지질자원연구원이 보유한 Aavaatech사의 XRF 코어 스캐너를 이용하였으며 2 cm 간격으로 코어 퇴적물의 원소 함량변화를 측정하였다. XRF 코어 스캐너 분석은 대상 원소별로 가속전압과 전류를 달리하여 측정하였고(표 1), 측정 슬릿의 크기는 15 x 2 mm, 측정시간은 30초로 하였다. 코어 최하부의 잔자갈층은 불규칙한 표면특성으로 분석하지 못하였다. 박옥분과 남승일(2009)에 의해 제시된 XRF 코어 스캐닝 분석 방법에 따라 코어퇴적물 시료에 대한 XRF 지화학 원소분석을 실시하였다.

### 2.4 유기 지화학 및 동위원소분석

총 탄소(TC, total carbon)와 총 질소(TN, total nitrogen) 함량은 약 4 mg의 분말 시료를 취하여 Iso-Prime GV CHN-Analyzer (UK)로 분석하였다. 총 유기탄소(TOC, total organic carbon)와 탄산염(CaCO<sub>3</sub>) 함량을 측정하기 위하여 균질한 분말 퇴적물 시료(약 2 g)에 10% 염산을 첨가하여 탄산염을 제거하고 증류수로 pH 5정도가 될 때까지 희석시켜 오븐에 24

시간 건조시킨 후 다시 균질하게 분말로 만든 후 약 4 mg의 시료를 취하여 무기탄소(IC, inorganic carbon) 함량을 측정하였다. 유기탄소와 탄산염 함량은 다음의 식[1]과 [2]로 계산하였다(Stein, 1991).

$$\text{TOC} (\%) = [100 - (8.333 * \text{TC})] / [(100 / \text{IC}) - 8.333] \quad [1]$$

$$\text{CaCO}_3 (\%) = (\text{TC} - \text{TOC}) * 8.333 \quad [2]$$

해양 퇴적물에 쌓인 유기물이 육상 또는 해양 기원이 우세한지 알아보기 위해 C/N 비(total organic carbon/total nitrogen ratio)를 계산하였다(Mueller, 1977; Stein 1991). 또한 보다 정확한 유기물의 기원을 밝히기 위하여 탄산염이 제거된 분말 퇴적물(약 40 mg)을 이용하여 유기물의 탄소동위원소( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) 비를 측정하였다. 유기물의 탄소동위원소( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )와 질소동위원소( $\delta^{15}\text{N}$ )는 서울대학교 농업생물과 학연구센터 CF-IRMS (continuous flow isotope ratio mass spectrometer)를 이용하여 분석하였다.

### 2.5 유공충의 AMS <sup>14</sup>C 연대측정

퇴적물 시추 코어 퇴적층의 층서를 확립하기 위하여 2개의 코어에서 각각 2지점을 선택하여 총 4점의 AMS <sup>14</sup>C 연대측정을 수행하였다(표 2). AMS <sup>14</sup>C 연대측정을 위하여 시추 코어의 저서성 유공충이 출현하는 퇴적층에서 약 2-3 g 퇴적물을 채취하여 63 μm 체(sieve)로 습식체질한 후 잔여물을 건조시켰다. 저서성 유공충이 충분히 출현하는 깊이에서 실체 현미경을 이용하여 약 100 개체(>10 mg)의 유공충 패각을 추출하였다. 추출한 저서성 유공충 패각은 뉴질랜드 지질 핵과학연구소(GNS)의 Rafter Radiocarbon 실험실에서 질량가속기(Accelerator Mass Spectrometry)를 이용하여 연대측정을 수행하였다. AMS <sup>14</sup>C 연대 측정 결과는 Fairbanks *et al.* (2005)에 의하여 연년으로 계산하였다(표 2).

**Table 2.** AMS  $^{14}\text{C}$  radiocarbon datings of benthic foraminiferal tests collected from the core sediments. Radiocarbon ages are converted to calendar years using the calibration curve of Fairbanks *et al.* (2005).

Sample No.	Core No.	Core Depth (m)	AMS $^{14}\text{C}$ Age (Years)	Calendar Age (Years BP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
1	09C-02/06	8.4	2472 ± 20	2574 ± 81	-1.2
2	09C-02/11	15.0	2503 ± 30	2624 ± 85	-0.9
3	09C-03/03	3.45	2572 ± 30	2722 ± 29	-0.6
4	09C-03/07	9.6	3486 ± 30	3754 ± 53	-0.9

**Table 3.** Four facies assemblages, each characterized by a number of environmentally diagnostic sedimentary facies observed in cores.

Facies types	Lithology	Characteristic feature	Interpretation
A (Sand bar)	cross-lam. sand (xS), low-angle x-lam. sand (lxS), ripple x-lam. sand (rS), massive sand (mS)	restricted to topmost section, sand-dominated, little mud, bidirectional stratification, forams & scattered shell fragments	intertidal to subtidal facies, 2D ripples/dunes, swash bars, storm beds
B (Estuarine tidal flat)	sand-mud couplets (SM), laminated mud (IM), flaser-bedded sand (fS), gravel-mud couplets (GM)	heterolithic nature, sand-mud couplets thickness varies systematically, sometimes sharply overlain by gravel layer	intertidal to subtidal flat
C (Transgressive lag)	gravel layer (G), homogeneous mud (hM)	pebble size, clast-supported, moderate to well rounded, variable gravel contents, mud pebbles included, sharp erosional base, abruptly underlain by mud	deposition as gravel lag during transgression
D (Fluvial)	yellowish brown gravel (ymG), yellowish/greenish silty sand (yzS)	granule to pebble size, clast-supported, yellowish brown/greenish in color, very stiff silty sand layer, no foraminifers and shells in lowermost section of the cores	oxidized layer indicative of subaerial exposure. interpreted as fluvial channel lag deposits

### 3. 결 과

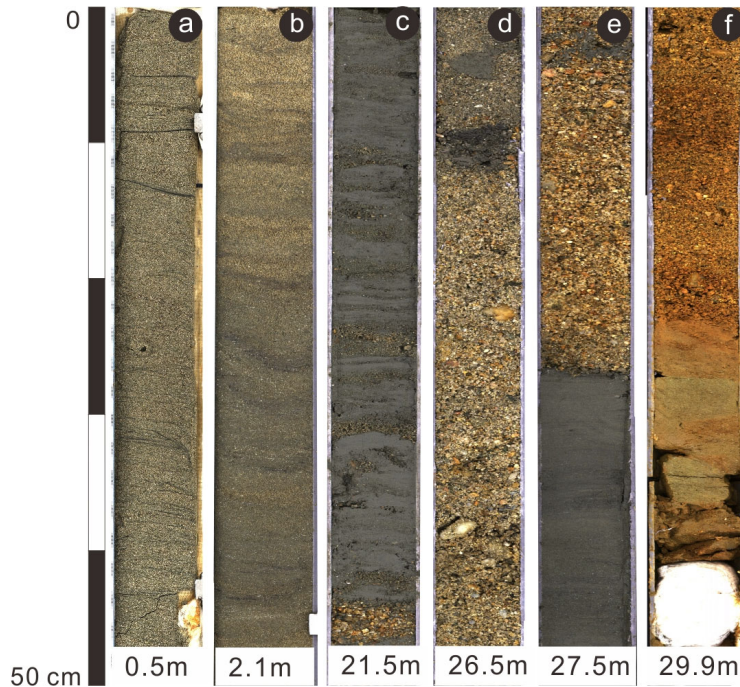
#### 3.1 시추코어 퇴적상조합

조석사주에서 획득한 2개의 시추코어의 퇴적상 분석 결과 11개의 퇴적상 유형으로 구분하였다. 각각의 퇴적상은 암상, 퇴적구조, 생물교란정도와 퇴적물 색에 근거하였다. 이를 다시 고유한 퇴적환경을 지시하는 퇴적상끼리 묶어 퇴적상조합을 실시하였다. 결과적으로 중앙천퇴 조석사주는 4개의 퇴적상조합, 즉 1) 하성(fluvial), 2) 잔류퇴적물(gravel lag), 3) 조간대(tidal flat) 그리고 4) 사주(sand bar) 퇴적상으로 구분하였다(표 3).

모래가 우세한 사주(sand bar) 퇴적상조합(상조합 A)은 코어의 최상부에 10 m 이상으로 매우 두껍게 나타난다. 이는 시추코어에서 염하구 조간대 퇴

적층과 침식경계를 이루며 위에 놓여있어 전반적으로 퇴적물입도의 상향조립화 경향을 보인다. 이 퇴적상조합은 주로 사층리 모래, 준수평층리 모래, 연흔 모래와 괴상의 무구조 모래로 구성된다(그림 2a, 2b). 코어상에서 니질퇴적층은 나타나지 않은 반면 유공층 및 패각편은 산출되었다. 서로 다른 방향의 사층리 모래가 간헐적으로 관찰된다. 이러한 특징은 2차원 연흔 혹은 사구, 스위쉬 바(swash bar) 그리고 폭풍퇴적층을 지시하며, 해양환경(open marine)에서 측방성장하는 조석사주(tidal sand ridge or bar)로 해석된다(Fenies and Tastet, 1998; Dalrymple and Choi, 2007; Chaumillon *et al.*, 2008).

조간대 상조합(상조합 B)은 불균질한 세립 모래와 니의 교호층이 특징적이다(그림 2c). 흔히 잔자갈 층 위에 놓여있으며 두꺼운 사주퇴적층 아래에 존재



**Fig. 2.** Representative sedimentary facies of Core 09C-02 and/or 09C-03. a) and b) near-horizontally laminated sands, cross-laminated sand and rippled sands suggestive of swash bar deposits. c) tidal bedding with alternating sand and mud layers. d) transgressive gravel lag deposits with mud pebbles. e) gravel lag deposits with a sharp erosional base overlain by fluvial (?) muds. f) yellowish brown gravel lag deposits overlain by yellowish and greenish silty sands.

한다. 일부 세립 모래와 니 교호층은 구성 엽리의 체계적인 두께 변화가 나타나며 우상층리의 퇴적구조도 관찰된다. 조립의 모래(혹은 잔자갈)와 니의 교호층이 간헐적으로 발견된다. 모래와 니 엽리 교호층의 두께변화는 조건대층을 지시한다(Dalrymple *et al.*, 2003; Chang *et al.*, 2006).

조립의 잔자갈로 구성된 잔자갈 해침잔류퇴적물 퇴적상조합(상조합 C)은 최하부의 하성퇴적층과는 점이적 경계를 이루고 위에 놓여 있으며, 반면에 상부의 조건대층과는 침식경계를 보인다(Choi and Kim, 2006). 잔자갈층은 역 지지(clast-supported)이며, 역의 원마도는 양호한 편이다. 역의 성분은 다양하며, 잔자갈 크기의 니질 덩어리가 간헐적으로 포함되어 있다. 특이한 것은 해침잔류퇴적층이 2 m 이상의 매우 두꺼운 층으로 발달해 있으며 퇴적구조가 없는 균질한 니질층이 협재한다.

시추코어의 최하부 약 28-30 m 깊이에 나타나는 하성퇴적층(상조합 D)은 황갈색의 잔자갈과 황색 또는 옅은 녹색의 실트질 모래로 구성되어 있다.

녹황색의 실트층은 매우 고화되어있다. 그 위의 잔자갈층은 역 지지(clast-supported)를 나타내며 원마도는 비교적 양호하다(그림 2f). 자갈 겉표면은 산화의 흔적이 보인다. 특징적으로 유공층과 패각은 발견되지 않는다. 이 퇴적층의 상부에는 황갈색이 아닌 잔자갈층과 무구조의 균질한 니질층이 나타난다. 서해안에서 발견되는 황갈색 퇴적층은 퇴적 당시 대기 중 노출을 지시하며 따라서 산화대층으로 알려졌다(임동일 외, 2003; Park *et al.*, 1998). 이와 같이, 산화대층의 존재, 황갈색의 잔자갈 잔류물 및 고화된 녹색의 실트층은 이 퇴적층이 하성환경의 수로에서 퇴적되었음을 지시한다(천중화 외, 1995; Yoo and Park, 2000; Jin *et al.*, 2002; Boyd *et al.*, 2006; Choi and Kim, 2006).

### 3.2 유기 지화학 및 동위원소 특성

시추코어 퇴적물 09C-02에서 분석한 총 질소(TN) 함량은 전반적으로 0.06% 이하의 매우 낮은 값을 보인다. 어두운 회색의 니질층인 하부 16-25 m 구간에

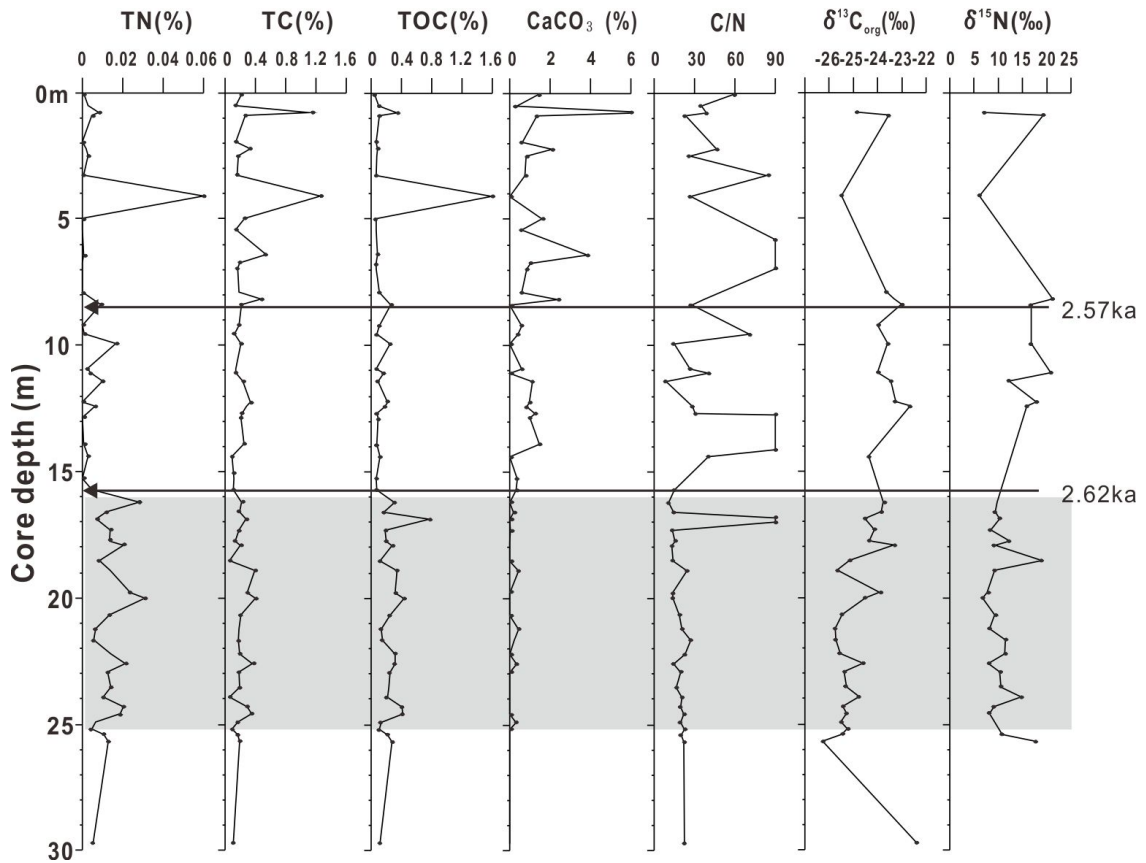


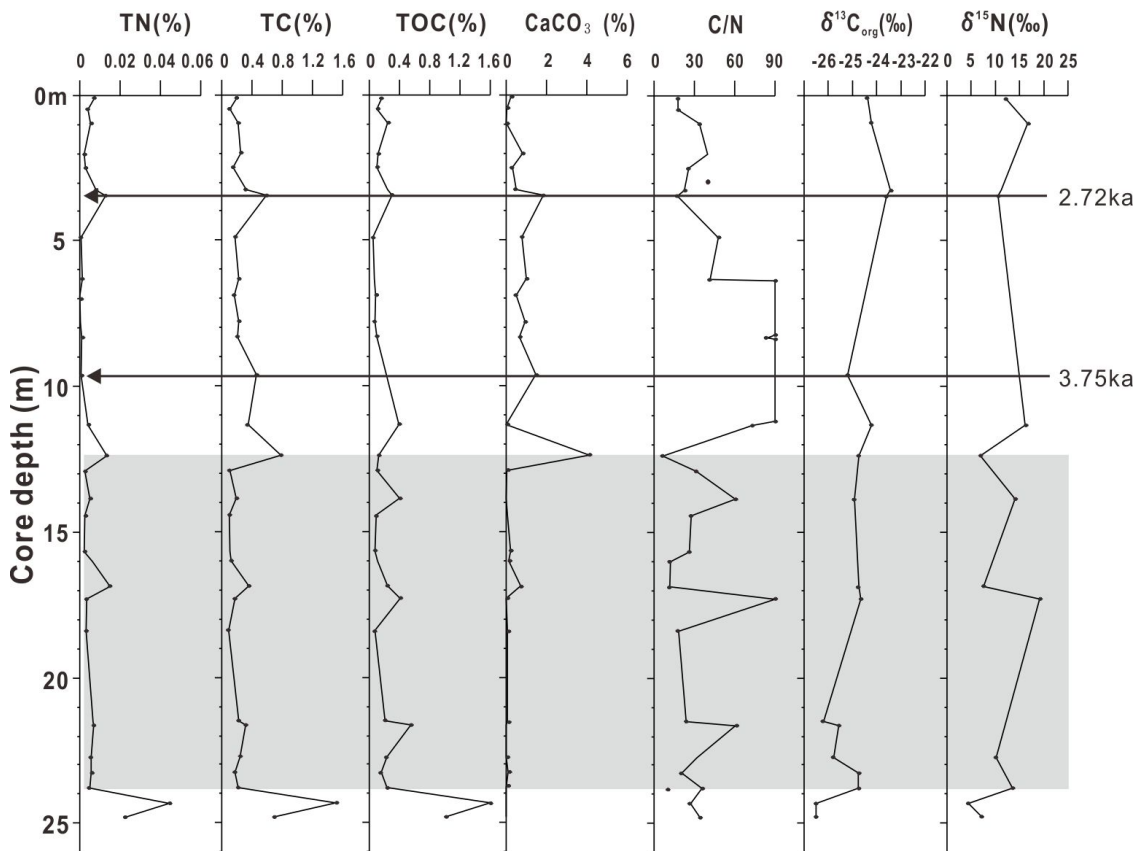
Fig. 3. Downcore variations in total carbon (TC, wt.%), total nitrogen (TN, wt.%), total organic carbon (TOC, wt.%) and  $\text{CaCO}_3$  (wt.%), organic carbon and nitrogen isotopes and C/N ratio of sediment core 09C-02. Calendar ages are shown. Light shading indicates the sequence of estuarine tidal flat.

서 총 질소 함량이 다른 구간에 비하여 비교적 높게 나타나며, 상부 4 m 구간에서 가장 높은 값(0.06%)을 보인다. 총 탄소(TC) 함량은 0%에서 1.3% 범위에서 변화하며 상부 층의 일부 구간에서 높은 값을 보인다. 총 유기탄소(TOC) 함량도 총 탄소 함량변화와 유사한 경향을 보이며, 16 m 이하의 하부의 구간에서 약간 높은 값을 보인다. 상부 4 m 구간에서 1.6%의 높은 값을 제외하면 비교적 0.2% 내외의 낮은 값을 보인다(그림 3). 탄산염( $\text{CaCO}_3$ ) 함량은 16 m 이하의 하부 구간에서 0.2% 이하의 매우 낮은 값을 나타내는 반면, 상부구간은 상대적으로 증가한다. 패각이 산출되는 구간에서는 탄산염함량이 2% 이상 높게 나타난다. 일부 상부구간에서는 기수환경에서 서식하는 저서성 유공충인 *A. beccarii*와 *E. advenum* 종이 산출된다. C/N 비는 총 질소 함량이 나타나는 16

m 이하의 하부 구간에서 10에서 30 사이의 값을 보인다. 상부구간에서 C/N 비가 매우 높게 나타나는 것은 총 질소 함량이 낮게 나타나기 때문으로 보인다.

유기물의 탄소동위원소( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) 비는 약 -26.5‰와 -22.5‰ 범위에서 변화를 보인다. 특히  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  비는 하부에서 26.5 m에서 상부로 향하면서 약 16 m 구간까지 완만하게 증가하는 패턴을 보인다. 또한 일부 구간(12.5 m)에서  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  비는 -22.5‰ 정도의 비교적 무거운 값을 보이며 약 8.45 m 구간에서도 -23‰의 값을 보인다(그림 3).  $\delta^{15}\text{N}$  비는 16 m의 하부구간에서 비교적 가벼운 값을 보이는 반면 상부구간에서는 비교적 무거운 값을 보인다.

시추코어 퇴적물 09C-03에서 분석한 총 질소 함량은 코어 09C-02보다 더 낮은 0.04% 이하의 값을



**Fig. 4.** Total carbon (TC, wt.%), total nitrogen (TN, wt.%), total organic carbon (TOC, wt.%) and  $\text{CaCO}_3$  (wt.%), organic carbon and nitrogen isotopes and C/N ratio from sediment core 09C-03, plotted against stratigraphic depth, with calendar ages of foraminifera. Lightly shaded zone indicates the sequence of estuarine tidal flat.

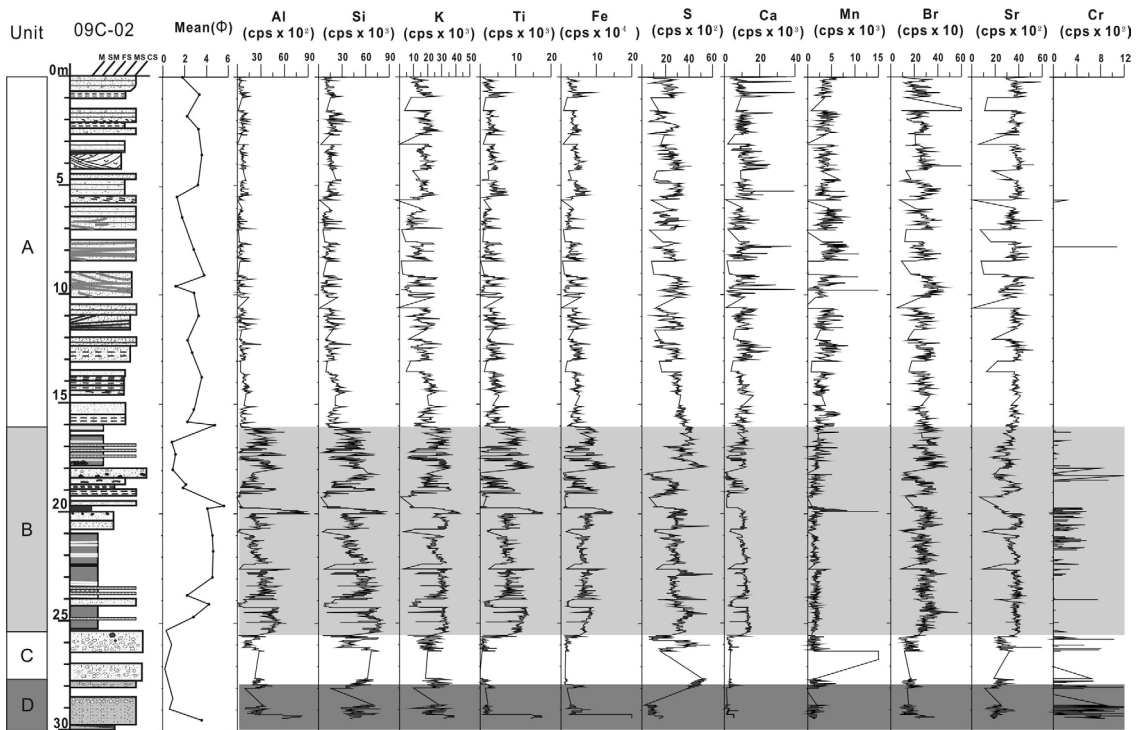
보인다. 또한 코어 09C-02와 같이 12.5 m 이하의 하부구간에서 총 질소 함량이 상부구간보다 비교적 높게 나타난다. 특히 상부의 대부분 구간에서 총 질소 함량이 거의 없다. 총 탄소 함량은 1.2% 이하의 범위에서 변화한다. 총 유기탄소 함량은 총 탄소 함량변화와 반대의 경향을 보이며, 12.5 m 하부구간에서 약간 높은 값을 보인다(그림 4). 탄산염 함량은 12.5 m 이하의 하부 구간에 거의 나타나지 않으며 상부구간은 2% 내외로 증가한다. 패각이 산출되는 12.4 m 구간에서는 4% 이상 높게 나타난다. 코어 09C-02와 같이 일부 상부구간에서는 기수환경에 서식하는 저서성 유공충인 *A. beccarii*와 *E. advenum* 종이 산출되어 AMS  $^{14}\text{C}$  연대측정에 이용하였다. 질소가 거의 없는 구간을 제외한 구간에서 C/N 비는 30 내외의 비교적 높은 값을 보인다.

$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  비는 약 -26.5‰와 -23.4‰ 범위에서 변화한 코어 09C-02와 같이 하부구간에서 상부로 향하면서 점진적으로 증가하는 패턴을 보인다(그림 4).  $\delta^{15}\text{N}$  비는 퇴적물에 함유된 총 질소가 거의 없거나 너무 낮기 때문에 분석 자료가 매우 제한적이다. 그러나  $\delta^{15}\text{N}$  비는 최 하부구간에서 5‰ 이하의 가장 가벼운 값을 보이는 반면 상부구간에서는 10‰ 이상의 비교적 무거운 값을 보인다.

### 3.3 코어퇴적물 XRF 지화학원소의 수직분포 특성

XRF 코어 스캐너를 이용하여 분석한 시추코어 09C-02의 지화학 원소자료 중 Al을 비롯한 10종 원소를 그림 5에 나타내었다. 일반적으로 분석된 원소 값은 자갈층과 하천기원의 퇴적물이 나타나는 25.5 m 이하를 제외하면 16 m 깊이를 기준으로 하부구





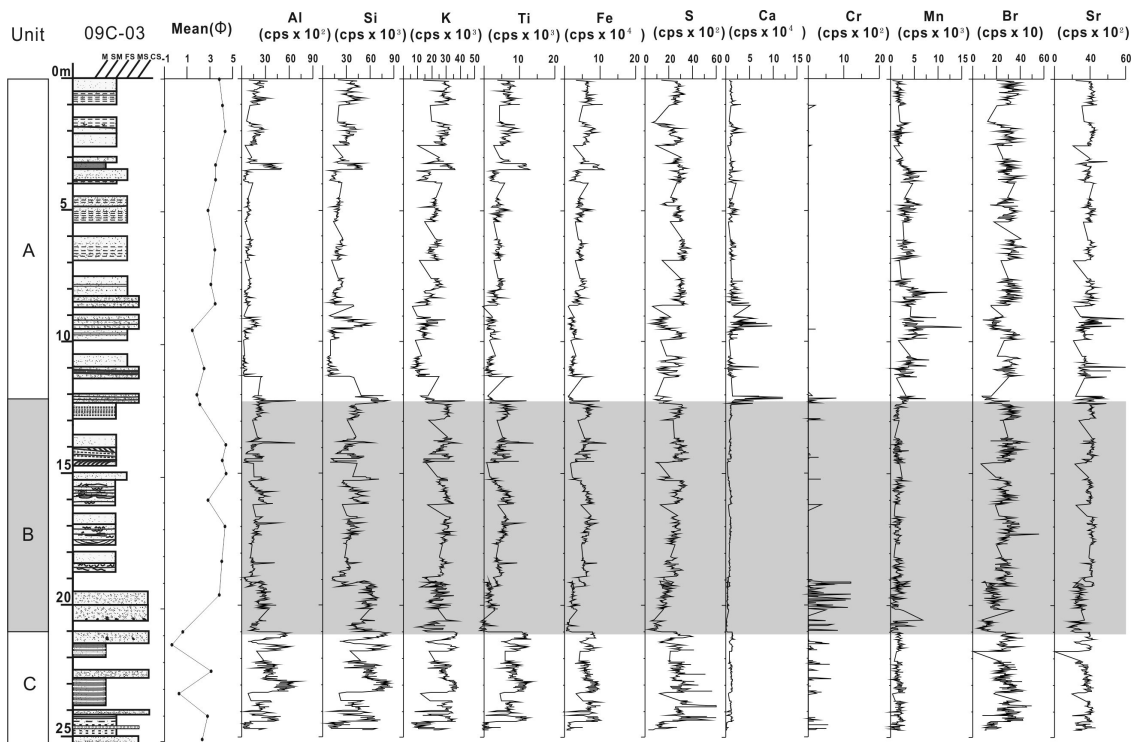
**Fig. 5.** Downcore geochemical profiles of sediment core 09C-02 using a XRF core scanner. Note the distinctive variations in geochemical character of terrigenous elements (Al, Si, K, Ti, Fe, Cr) and biogenic elements (Ca, Mn, Br, Sr). The sharp peaks in each elements correlate well with the sedimentary units. Light shaded interval indicates estuarine tidal deposit and the lower shading the oxidized fluvial sequence.

간과 상부구간에서 약간의 변화를 보이지만 뚜렷한 변화는 보이지 않는다. 그러나 크롬은 최 하부구간에서 높게 나타내며 16 m 지점을 경계로 하부에서는 측정되었으나 상부구간에는 거의 측정되지 않았다. 반대로 망간은 하부 일부구간을 제외하고 16 m 깊이를 기준으로 하부에서는 낮은 값을 보이는 반면, 상부에서는 값이 증가한다. 칼슘 값은 패각이 산출되는 일부 구간을 제외하면 거의 일정한 패턴을 보인다. 브롬은 총 유기탄소 함량이 높게 나타나는 구간에서 값이 증가한다(그림 3, 5).

육성기원을 반영하는 Al, Si, K, Ti와 Fe 값은 깊이 16 m 기준으로 뚜렷하게 변화한다(그림 5). 대략 16 m 이하의 하부 층에서는 모든 값이 2-3배 높은 값을 보이는 동시에 변화의 폭이 매우 크게 나타난다. 반면 16 m 이상의 상부 층에서는 Al, Si, Ti 그리고 Fe 값이 뚜렷하게 감소하며 변화의 폭도 작게 나타난다. K는 나머지 4가지 원소에 비하여 상하의 변화폭이 크지 않게 나타난다.

시추코어 09C-03의 XRF 코어스캐닝 지화학 원소 자료 중 11종 원소 모두 그림 6에 도시하였다. 코어 09C-02와 유사하게 일반적으로 분석된 원소 값은 12.5 m 깊이를 기준으로 하부구간과 상부구간에서 약간의 변화가 나타나지만 뚜렷한 변화는 보이지 않는다. 그러나 12.5 m 기준으로 Ca와 Mn은 하부에서 낮은 값을 나타내고 상부에서 뚜렷하게 증가하는 반면, Cr은 12.5 m 이상의 상부에서 거의 기록되지 않는다(그림 6). Ca 값이 높게 나타나는 구간은 패각이 산출되거나 저서성 유공충이 산출되는 구간과 일치한다. 특히 Ca의 피크가 나타나는 구간은 원소분석에 의해 얻은  $\text{CaCO}_3$  함량이 증가하는 구간과 잘 일치한다(그림 4, 6).

코어 09C-03에서 육성기원을 반영하는 Al, Si, K, Ti와 Fe 값도 약 12.5 m를 기준으로 뚜렷하게 변화한다(그림 6). 약 12.5 m 이하의 하부 층에서는 모든 값이 상대적으로 높은 값을 보이는 동시에 변화의 폭이 크다. 하부구간에서 Al과 Si가 매우 유사한 변



**Fig. 6.** XRF geochemical logging profiles from sediment core 09C-03 to illustrate downcore variations in elements. Note the distinctive variations in geochemical character of terrigenous elements (Al, Si, K, Ti, Fe, Cr) and biogenic elements (Ca, Mn, Br, Sr). The sharp peaks in each elements correlate well with the sedimentary units (left panel). Shaded rectangle corresponds to estuarine tidal deposit.

화양상을 보이는 반면 Ti과 Fe의 변화양상이 유사하게 나타난다. 모든 원소는 12.5 m에서 뚜렷하게 감소한 다음 상부로 향하면서 점진적으로 Al, Si, Ti 과 Fe 값이 증가하는 경향을 보인다. K는 나머지 4 가지 원소에 비하여 상하의 변화폭이 크지 않게 나타난다.

### 3.4 AMS $^{14}\text{C}$ 연대측정

저서성 유공충이 산출되는 코어 09C-02의 깊이 8.4 m와 15.0 m에서 측정된 AMS  $^{14}\text{C}$  연대를 역년으로 변환하여 각각 약 2.57 ka BP와 2.62 ka BP의 값을 얻었다. 코어 09C-03의 깊이 3.45 m 및 9.6 m에서 측정된 AMS  $^{14}\text{C}$  연대의 역년은 각각 2.72 ka BP와 3.75 ka BP로 밝혀졌다(표 2). 이와 같이, 4점의 연대측정 결과에 의하면 퇴적층은 역전되지 않고 쌓인 것으로 나타났으며, 사주퇴적상을 지시하는 상부의 모래우세 퇴적층은 비교적 가까운 약 3,800년 내외로 후기 홀로세에 퇴적된 것으로 보인다(그림 3,

4). 그러나 하부 구간에서는 유공충 및 패각이 추출되지 않아 연대측정이 불가능하여 조간대층의 형성 시기를 밝힐 수 없었다.

## 4. 토 의

### 4.1 XRF 코어 스캐닝과 산화대층

시추코어 09C-02의 최하부에서 관찰되는 황갈색의 잔자갈 및 모래질 실트 퇴적층 구간은 단단하게 고화되어 있고 유공충 및 패각이 발견되지 않는다. 이러한 퇴적학적 특징은 황갈색 퇴적층이 퇴적 후 대기중에 노출되었으며 서해안의 퇴적층에 분포하는 산화대층을 지시한다(천중화 외, 1995; 임동일 외, 2003; Park *et al.*, 1998). 잔자갈 구간은 XRF의 기계적인 한계로 화학 원소 값을 얻지 못하였지만, 모래 및 실트의 일부 구간에서는 XRF 값을 얻을 수 있었다. 그림 5에 나타난 것처럼, Al, Si, K, Ti과 Fe 값은 산화대층 구간에서 가장 높은 값을 나타낸다. 이와

반대로 해양환경의 사주퇴적층 구간은 매우 낮은 값을 보인다. 또한, 이 원소들의 함량은 상부의 조간대 층에 비해 상대적으로 높게 나타난다. 이와 같이, 아산만 중앙천퇴 시추코어에서 발견되는 황갈색의 퇴적층은 일시적으로 대기에 노출되었기 보다는 퇴적된 후 상당기간 산화작용을 겪었던 것으로 보인다. 따라서 이 퇴적층은 해수면 상승 시 일시적으로 형성되는 해침잔류퇴적물 보다는 하성환경의 하천퇴적물로 해석된다(박용안 외, 1997; 황남순과 최진용, 1999).

산화대층에 대한 XRF 코어스캐닝에 의한 육성기원 원소의 수직적인 함량변화는 기존의 재래식 분석의 유도결합플라즈마 원자흡광기(ICP-AES)에 의한 값의 변화와 일치한다(천중화 외, 1995; Lim *et al.*, 2003). ICP를 사용한 산화대층의 지화학 분석 결과, XRF 원소분석과 마찬가지로 알루미늄산화물( $Al_2O_3$ )과 철산화물( $Fe_2O_3$ )의 함량이 뚜렷이 증가하였으며, Zr과 Cr 미량원소 또한 산화대층에서 증가하였다. 이와 같이, XRF 코어 스캐너의 원소분석은 재래식의 지화학 원소 분석의 변화를 잘 반영하는 결과를 보여주며, 비록 준정량적인 원소 자료이지만 재래식의 분석방식을 대체 할 수 있을 것으로 보인다(Rothwell, 2006).

#### 4.2 퇴적상, 유기지화학과 XRF 원소의 수직분포 대비

XRF 코어 스캐너를 이용하여 분석한 26종의 지화학 원소자료 중에서 변화가 뚜렷한 총 11가지 원소를 도시하였다(그림 5, 6). 이들 중 가장 특징적인 것은 육성기원(Al, Si, K, Ti, Fe)을 지시하는 원소들의 변화가 퇴적상의 변화와 잘 일치하는 현상이다. 또한 상하부 층의 경계에서 그 값이 뚜렷한 변화를 보인다. 이러한 특징은 Cr 원소에도 나타난다. 특히, 두 코어 09C-02와 코어 09C-03의 하부에서 육성기원 원소 값이 2-3배 이상 높게 나타난다(그림 5, 6). 이와 같이, 상하부 경계를 중심으로 육성기원 원소 함량의 급격한 변화는 당시 퇴적환경의 변화와 대비할 수 있다(Rothwell *et al.*, 2006; Thomson *et al.*, 2006). 실제로 이들 경계를 중심으로 퇴적상과 유기지화학 자료에서도 동일하게 변화하는 패턴을 보인다. 따라서, 코어의 하부 층은 육성기원 퇴적물이 매우 우세하게 유입된 시기로 판단되며, 퇴적당시 주

로 주변 하천의 활동이 활발하여 많은 양의 담수가 유입되면서 육성기원 물질이나 유기물이 공급되어 코어 퇴적물의 원소 분포에 영향을 미친 것으로 추정된다. 이와 반대로 12.5 m 이상의 상부퇴적층(코어 09C-02)과 16 m 이상의 상부퇴적층(코어 09C-03)에 나타나는 6개 원소함량은 급격히 감소한다. 육성기원 원소의 값이 감소하는 것은 육상에서 하천에 의해 유입되는 퇴적물이 감소한 것이 가장 큰 요인으로 보이며, 실제 유기 지화학 자료는 당시 퇴적환경은 담수의 영향이 감소하고 해수의 영향이 증가하였음을 지시한다. 생물기원의 원소(Ca, Sr, Br)들은 전반적으로 상하부 퇴적층에서 커다란 변화를 보이지 않지만, 일부 하성퇴적물 구간에서 이들의 원소 함량은 매우 낮게 기록되어 뚜렷한 변화가 인지된다. 일부 상부 층에 나타나는 Ca의 피크는 대부분 패각성분이나 저서성 유공충의 산출정도를 반영하는 것으로 보인다.

#### 4.3 유기물 특성과 기원

시추 코어에서 산출되는 저서성 유공충을 이용하여 측정된  $^{14}C$  연대측정값을 보정한 역년자료에 의하면 코어 09C-02는 깊이 15.7 m와 8.4 m에서 각각 2.62 ka와 2.57 ka BP에 퇴적된 것으로 나타났으며 최하부 30 m부터 15.7 m까지 유공충이 산출되지 않아 퇴적된 시대는 미상으로 남아있다(그림 3). 2.62 ka BP 이전의 하부 층에는 유기탄소 함량이 상부보다 비교적 높게 나타나는 반면, 탄산염 함량은 매우 낮은 값을 보인다. 유기탄소 함량이 비교적 높게 나타나는 것은 일부 구간을 제외하고 대부분 조간대에서 형성된 어두운 회색의 니질 층에 잘 보존되었기 때문이다. 이 시기에 쌓인 유기물은 C/N 비(<15-20)와  $-24\%$  이하의 가벼운 유기물의 탄소동위원소( $\delta^{13}C_{org}$ )와  $10\%$  이하의 질소동위원소( $\delta^{15}N$ ) 비의 특징을 갖는다. 이는 유기물이 주로 강에 의해 유입된 육성기원임을 지시하는 것으로 해석된다. 특히 이 시기에 유공충이나 패각의 산출이 매우 낮기 때문에  $CaCO_3$  함량이 매우 낮게 나타난다. 따라서 어두운 색의 니질 층이 퇴적된 이 시기는 비교적 조석의 영향이 적고 육상에서 유입된 담수의 영향이 비교적 우세하였던 환경에서 세립질 퇴적물이 주로 쌓인 것으로 보인다. 이로 인하여 유기탄소 함량이 높게 나타나는 것은 담수에 의해 육성기원 유기물의 유입이

증가하였을 뿐만 아니라 유기물이 비교적 잘 보존되었기 때문이다.

그러나 2.62 ka BP 이후 약 2.50 ka BP까지 짧은 시간동안 유기물 함량은 감소하고 CaCO<sub>3</sub> 함량은 비교적 뚜렷하게 증가한다. 이 시기는 비교적 육상에서 유입되는 담수의 영향이 줄어들고 해양환경이 비교적 우세하였던 것으로 보인다. 실제로 유기탄소 함량은 하부에 비교하여 낮은 값을 보이지만 유기물의 탄소동위원소 비는 비교적 무거운 -24‰과 -22.5‰ 사이의 값을 나타낸다. 이는 당시 육상기원의 유기물이 담수에 의해 지속적으로 유입되었었지만, 짧은 시기동안 아산만의 퇴적환경은 해수의 영향이 증가하였던 것으로 보인다. 해수의 영향이 우세하였던 비교적 안정된 해양환경에서 표층생산력이 증가한 결과 해양기원의 유기물이 비교적 우세하게 퇴적되었다. 이러한 환경 조건에서 기수환경에 우세하게 서식하는 저서성 유공충의 산출이 증가하였다. 또한 2.50 ka BP 이후 유기탄소 함량이 최대치가 나타나는 일부구간(4 m)을 제외하면 전 구간에서 비교적 낮은 유기탄소 함량이 나타나고 CaCO<sub>3</sub> 함량은 비교적 높게 나타난다. 그러나 이시기에는 대부분의 유기물은 육성기원이 우세하게 퇴적되었다. 깊이 4 m에 나타나는 유기탄소 피크는 약 30정도의 높은 C/N 비와 -25.5‰의 가벼운 탄소동위원소 값에 의하면 육성기원 유기물에 의한 것으로 추정된다. 또한 높은 CaCO<sub>3</sub> 피크가 나타나는 깊이는 조개류 패각의 산출지점과 일치한다.

## 5. 결론

아산만의 조석사주에서 획득한 약 30 m에 이르는 퇴적물 시추코어를 대상으로 처음으로 XRF 코어스캐너를 사용하여 준정량적인 11개의 주원소 및 미량 원소 분석을 하였다. 이 화학원소 분석자료를 코어 퇴적층서 분석결과 및 유기 지화학 자료와 대비하였으며 그 주요한 결론은 다음과 같다.

코어퇴적상 분석결과, 아산만 조석사주는 4개의 퇴적상 조합, 즉 최하부의 1) 하성(fluvial) 퇴적물, 2) 해침상류퇴적물(transgressive lag), 3) 염하구 조간대 및 최상부의 4) 사주(sand bar)로 구분할 수 있었다. 코어퇴적층서는 전반적으로 상향조립화 입도경향을 보인다. 이는 홀로세의 해수면 상승과 더불어

해침을 받아 세립의 조간대 퇴적층 위에 해양환경의 사주퇴적층이 놓인 것으로 해석된다.

이러한 퇴적층서는 유기 지화학 및 XRF 원소 분석결과와 잘 대비된다. 육성기원 원소 Al, Si, K, Ti 및 Fe는 최하부의 하성퇴적물에서 가장 높은 값을 보인다. 조간대 퇴적층 구간에서는 비교적 중간 값을 나타낸 반면, 최상부의 사주퇴적물 구간에서는 그 값이 급격히 감소하여 가장 낮은 값을 보였다. 이와 반대의 원소분포 결과가 생물기원으로 분류할 수 있는 Ca, Mn, Br, Sr의 원소 거동에서 관찰되었다. 조간대 및 하성퇴적물 구간에서의 낮은 CaCO<sub>3</sub> 함량과 비교적 높은 C/N 비(<15-20), -24‰ 이하의 가벼운 유기물의 탄소동위원소( $\delta^{13}C_{org}$ )와 질소동위원소( $\delta^{15}N$ ) 비는 퇴적층이 주로 주변의 하천에 의해 유입된 육성기원임을 지시한다. 2.62 ka BP 이후, 최상부의 사주퇴적층 구간에서는 이와 반대로 높은 값이 나타내는데, 이는 해수의 영향이 우세한 안정된 해양환경에서 해양기원 유기물이 우세하게 퇴적되었기 때문으로 보인다.

천해 연안 및 조석환경의 퇴적물코어에 대한 XRF 코어 스캐너의 지화학 원소 분석자료, 유기 지화학 자료와 퇴적층서분석결과는 잘 일치하였다. 특히, 육성기원 원소는 해성 퇴적층과 비교할 때, 그 변화양상이 뚜렷이 구분되어 코어 상에서 산화작용 같은 육성퇴적현상을 인지하는데 매우 유용하다. 결과적으로 XRF 원소분석은 복잡한 퇴적환경에서 고풍경 프록시로 사용할 수 있으며, 특히 퇴적물 원소의 기원지 연구에 적합할 것으로 보이며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 사 사

CHN 및 XRF 코어스캐닝 분석에 도움을 준 박옥분(한국가스공사)석사에게 감사드립니다. 장대건(전남대)석사는 그림준비에 도움을 주었습니다. 이 연구는 한국지질자원연구원이 수행하는 “해저 퇴적층 시추 및 코어분석 고도화 기술 개발(GP2009-026)”과 제와 극지연구소에서 수행중인 기후변화 프록시 개발을 위한 K-Polar (PP11070) 사업에서 지원받았습니다. 논문심사 과정에서 세심한 검토와 건설적인 의견을 주신 국립해양조사원의 이은일 박사님과 전남대 최경식 교수께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 국립해양조사원, 2009, 해양조사기술연보. 서지번호, 820, 401 p.
- 박문진, 2008, 화용(남양만)방조제에 따른 아산만의 조석 변화. 한국해양학회지(바다), 13(4), 320-324.
- 박옥분, 남승일, 2009, XRF 코어 스캐너를 이용한 시추 코어의 초고해상 화학성분 분석방법. 지질학회지, 45(1), 77-83.
- 박옥분, 남승일, 2010, 색지수 이미지를 이용한 후기 제4기 동해 퇴적물 코어의 고해상 층서 복원. 지질학회지, 46(5), 439-452.
- 박옥안, 임동일, 최진용, 이영길, 1997, 한국 서남해 함평만 조간대 퇴적층의 제4기 후기 층서 연구. 한국해양학회지(바다), 2(2), 138-150.
- 엄인권, 김지훈, 남승일, 최현수, 박옥분, 2009, XRF 코어 스캐너를 이용한 북동태평양 퇴적물 내 원소의 고해상 분석. 한국광물학회지, 22(2), 129-138.
- 천중화, 한상준, 장진호, 1995, 황해 곰소만 조간대의 후기 플레이스트세 니질 산화대층의 퇴적환경과 속성작용. 지질학회지, 31(5), 546-559.
- 황남순, 최진용, 1999, 천수만 조간대 퇴적체 사질퇴적물의 광물성분과 석영표면구조. 군산대학교, 연안연구, 11(1), 37-48.
- Bertrand, S., Huguen, K., Giosan, L. and Stuut, J.-B., 2010, Limited influence of sediment grain-size on elemental XRF core scanner intensities. 18th International Sedimentological Congress(Abstracts), Mendoza, Argentina, Sept. 26-Oct. 1, 175 p.
- Boening, P., Bard, E. and Rose, J., 2007, Toward direct, micron-scale XRF elemental maps and quantitative profiles of wet marine sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(5), doi:10.1029/2006GC001480.
- Boyd, R., Dalrymple, R.W. and Zaitlin, B.A., 2006, Estuarine and incised-valley facies models. In: *Facies Models Revisited*, Posamentier, H.W. and Walker, R.G. (eds.), SEPM, Special Publication, No. 84, 171-235.
- Chang, T.S., Flemming, B.W., Tilch, E., Bartholomae, A. and Woestmann, R., 2006, Late Holocene stratigraphic evolution of a back-barrier tidal basin in the East Frisian Wadden Sea, southern North Sea: transgressive deposition and its preservation potential. *Facies*, 52, 329-340.
- Chang, T.S., Kim, S.-P., Yoo, D.G., Lee, S. and Lee, E., 2010, A large mid-channel sand bar in the macrotidal seaway of outer Asan Bay, Korea: 30 years of morphologic response to anthropogenic impacts. *Geo-Marine Letters*, 30, 15-22.
- Chaumillon, E., Bertin, X., Falchetto, H., Allard, J., Weber, N., Walker, P., Pouvreau, N. and Woppelmann, G., 2008, Multi time-scale evolution of a wide estuary linear sandbank, the Longe de Boyard, on the French Atlantic coast. *Marine Geology*, 251, 209-223.
- Choi, K. and Kim, S.-P., 2006, Late Quaternary evolution of macrotidal Kimpo tidal flat, Kyonggi Bay, west coast of Korea. *Marine Geology*, 232, 17-34.
- Croudace, I.W., Rindby, A. and Rothwell, R.G., 2006, ITRAX: description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner. In: *New Techniques in Sediment Core Analysis*, Rothwell, R.G. (ed.), Geological Soc., London, Spec. Publ., 267, 51-63.
- Croudace, I.W. and Rothwell, R.G., 2010, Micro-XRF sediment core scanners: important new tools for the environmental and earth sciences. *Spectroscopy Europe*, 22(3), 6-13.
- Cuven, S., Francus, P. and Lamoureux, S.F., 2010, Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic. *J. Paleolimnol.*, 44, 803-817.
- Dalrymple, R.W., Baker, E.K., Harris, P.T. and Hughes, M.G., 2003, Sedimentology and stratigraphy of a tide-dominated foreland-basin delta (Fly River, Papua New Guinea). In: *Tropical Deltas of Southeast Asia-Sedimentology, Stratigraphy, and Petroleum Geology*, Sidi, F. H., Nummedal, D., Imbert, P., Darman, H. and Posamentier, H.W. (eds.), SEPM, Special Publication, No. 76, 147-173.
- Dalrymple, R.W. and Choi, K., 2007, Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems: a schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews*, 81, 135-174.
- Fairbanks, R.G., Mortlock, R.A., Chiu, T.-C., Cao, L., Kaplan, A., Guilderson, T.P., Fairbanks, T.W., Bloom, A.L., Grootes, P.M. and Nadeau, M.-J., 2005, Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  dates on pristine corals. *Quaternary Sci. Rev.*, 24, 1781-1796.
- Fenies, H. and Tastet, J.-P., 1998, Facies and architecture of an estuarine tidal bar (the Trompeloup bar, Gironde Estuary, SW France). *Marine Geology*, 150, 149-169.
- Giralt, S., Rico-Herrero, M.T., Vega, J.C. and Valero-Garces, B.L., in press, Quantitative climate reconstruction linking meteorological, limnological and XRF core scanner datasets: the Lake Sanabria case study, NW Spain. *J. Paleolimnol.*, DOI 10.1007/s10933-011-9509-x.
- Haug, G.H., Guenther, D., Peterson, L.C., Sigman, D.M., Huguen, K.A. and Aeschlimann, B., 2003, Climate and the collapse of Mayan civilisation. *Science*, 299, 1731-1735.
- Jahn, B., Donner, B., Mueller, P.J., Röhl, U., Schneider, R. and Wefer, G., 2003, Pleistocene variations in dust input and marine productivity in the northern Benguela Current: evidence of evolution of global glacial-interglacial cycles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193, 515-533.
- Jansen, J.H.F., Van Der Gaast, S.J., Koster, B. and Vaars, A.J., 1998, CORTEX, a shipboard XRF-scanner for element analyses in split sediment cores. *Marine Geology*,

- 151(1-4), 143-153.
- Jin, J.H., Chough, S.K. and Ryang, W.H., 2002, Sequence aggradation and systems tracts partitioning in the mid-eastern Yellow Sea: roles of glacio-eustasy, subsidence and tidal dynamics. *Marine Geology*, 184, 249-271.
- Kido, Y., Koshikawa, T. and Tada, R., 2006, Rapid and quantitative major element analysis method for wet fine-grained sediments using an XRF microscanner. *Marine Geology*, 229, 209-225.
- Kuhlmann, H., Freudenthal, T., Helmke, P. and Meggers, H., 2004, Reconstruction of paleoceanography off NW Africa for the last 40,000 years: influence of local and regional factors on sediment accumulation. *Marine Geology*, 207, 209-234.
- Kylander, M.E., Ampel, L., Wohlfarth, B. and Veres, D., 2011, High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: new insights from chemical proxies. *Journal of Quaternary Science*, 26(1), 109-117.
- Lamy, F., Kaiser, J., Ninnemann, U., Hebbeln, D., Arz, H.W. and Stoner, J., 2004, Antarctic timing of surface water changes off Chile and Patagonian ice-sheet response. *Science*, 304, 1959-1962.
- Lim, D.-I., Jung, H.-S., Yoo, H.-S., Seo, J.-M. and Paeng, W.-H., 2003, Late Pleistocene unconformity in tidal-flat deposit of Gyeonggi Bay, western coast of Korea. *Jour. Korean Earth Science Society*, 24(8), 657-667.
- Loewemark, L., Chen, H.-F., Yang, T.-N., Kylander, M., Yu, E.-F., Hsu, Y.-W., Lee, T.-Q. and Song, S.-R., 2011, Normalizing XRF-scanner data: a cautionary note on the interpretation of high-resolution records from organic-rich lakes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 1250-1256.
- Moreno, A., Giralt, S., Valero-Garces, B., Saez, A., Bao, R., Prego, R., Pueyo, J.J., Gonzalez-Samperiz, P. and Taberner, C., 2007, A 14kyr record of the tropical Andes: The Lago Chungara sequence (18°S, northern Chilean Altiplano). *Quaternary International*, 161, 4-21.
- 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.
- Park, M.-J., 2000, Modeling of sediment transport and sand bank formation in a macrotidal sea. *J. Korean Soc. Oceanography*, 35, 1-10.
- Park, Y.A., Lim, D.I., Khim, B.K., Choi, J.Y. and Doh, S.J., 1998, Stratigraphy and subaerial exposure of late Quaternary tidal deposits in Haenam Bay, Korea (South-eastern Yellow Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, 523-533.
- Rogerson, M., Weaver, P.P.E., Rohling, E.J., Lourens, L.J., Murray, J.W. and Hayes, A., 2006, Colour logging as a tool in high-resolution palaeoceanography. In: *New Techniques in Sediment Core Analysis*, Rothwell, R.G. (ed.), Geological Soc., London, Spec. Publ., 267, 99-112.
- Rothwell, R.G., 2006, *New Techniques in Sediment Core Analysis*. Geological Society, London, Special Publication, No. 267, 266 p.
- Rothwell, R.G., Hoogakker, B., Thomson, J., Croudace, I.W. and Frenz, M., 2006, Turbidite emplacement on the southern Balearic abyssal plain (western Mediterranean Sea) during marine isotope stages 1-3: an application of ITRAX XRF scanning of sediment cores to lithostratigraphic analysis. In: *New Techniques in Sediment Core Analysis*, Rothwell, R.G. (ed.), Geological Soc., London, Spec. Publ., 267, 79-98.
- Rothwell, R.G. and Rack, F.R., 2006, New techniques in sediment core analysis: an introduction. In: *New Techniques in Sediment Core Analysis*, Rothwell, R.G. (ed.), Geological Soc., London, Spec. Publ., 267, 1-29.
- Spofforth, D.J.A., Paelike, H. and Green, D., 2008, Paleogene record of elemental concentrations in sediments from the Arctic Ocean obtained by XRF analyses. *Paleoceanography*, 23, PA1S09, doi: 10.1029/2007PA001489.
- Stein, R., 1991, Accumulation of organic carbon in marine sediments. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 34, Springer, Heidelberg, 217 p.
- Thomson, J., Croudace, I.W. and Rothwell, R.G., 2006, A geochemical application of the ITRAX scanner to a sediment core containing eastern Mediterranean sapropel units. In: *New Techniques in Sediment Core Analysis*, Rothwell, R.G. (ed.), Geological Soc., London, Spec. Publ., 267, 65-77.
- Tjallingii, R., Roehl, U., Koelling, M. and Bickert, T., 2007, Influence of the water content on X-ray fluorescence core-scanning measurements in soft marine sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2), doi:10.1029/2006GC001393.
- Weltje, G.J. and Tjallingii, R., 2008, Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: theory and application. *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 423-438.
- Yoo, D.-G. and Park, S.-C., 2000, High-resolution seismic study as a tool for sequence stratigraphic evidence of high-frequency sea-level changes: latest Pleistocene-Holocene example from the Korea Strait. *Journal of Sedimentary Research*, 70(2), 296-309.
- Ziegler, M., Jilbert, T., de Lange, G.J., Lourens, L.J. and Reichert, G.-J., 2008, Bromine counts from XRF scanning as an estimate of the marine organic carbon content of sediment cores. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5), doi:10.1029/2007GC001932.

---

투 고 일 : 2011년 7월 19일

심 사 일 : 2011년 7월 21일

심사완료일 : 2011년 9월 16일