

## 동해 후포분지 퇴적물의 입도와 광물 분석을 통한 고환경 해석

### Paleoenvironmental Reconstruction of the Hupo Basin Using Grain Size and Mineral Analysis

전 창 표(Chang-Pyo Jun)<sup>1</sup> · 김 창 환(Chang-Hwan Kim)<sup>2</sup> · 김 영 규(Yeongkyoo Kim)<sup>1</sup> · 이 성 주(Seong-Joo Lee)<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungbook National University, Daegu, Korea)

<sup>2</sup>한국해양과학기술원 동해연구소 독도전문연구센터

(Dokdo Research Center, East Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST), Uljin, Korea)

**요약** : 동해 후포분지의 고환경을 규명하기 위해 HB 13-2 코어를 대상으로 퇴적물의 입도 분석 및 XRD, XRF를 통한 광물 분석을 실시하였다. HB 13-2 코어 퇴적물은 0.4 mbsf를 기준으로 엽리가 미약하고 생교란작용이 나타나는 퇴적상과 생교란작용이 하부로 갈수록 강해지는 두 개의 퇴적상으로 구분된다. 0-0.82 mbsf 구간에서의 비응집성 실트(sortable silt) 함량의 갑작스러운 증가와 상부층준에서의 민감입도 요소의 변화는 대마난류의 영향이 증가하였음을 보여준다. 퇴적물의 주 구성광물은 석영, 미사장석, 정장석, 알바이트와 더불어 녹니석, 캐올리나이트, 일라이트와 같은 점토광물이 포함되어 있으며 이들은 시료의 깊이 및 입도와 크게 연관성이 없는 것으로 나타나는데 이는 코아시료의 퇴적기간 동안 수문학적 변화는 크지 않았음을 시사한다. 1.4 mbsf부터 점토광물의 결정도가 감소하고 S/I 피크가 증가하는 현상은 온난다습한 기후의 영향으로 판단된다.

**주요어** : 후포분지, 입도분석, 민감입도요소, 점토광물, 대마난류

**ABSTRACT** : Holocene plaeoenvironmental changes were interpreted by grain size and mineral analyses of a piston core (HB 13-2), obtained along the western slope of the Hupo Basin, Korea. The core sediments are characterized by two discrete, sedimentary facies: upper unit (0-0.4 mbsf) dominated by bioturbation structures with weak lamination, and lower unit (0.4-3.3 mbsf) characterized by intensified bioturbation toward bottom. Analysis of sensitive grain size and sortable silt demonstrated that the inflow of the Tsushima Warm Current (TWC) into the Hupo Basin strengthen from the period of sediment deposition over 0.82 mbsf. The minerals of the core sediments are composed mainly of quartz, microcline, orthoclase, albite and clay minerals including chlorite, kaolinite and illite. No noticeable changes of the mineral percentage was observed according to the grain size and depth of the samples. The integral breadth ( $\Delta^2\theta$ ) of clay minerals from 1.4 mbsf to top layer shows an increasing trend, which clearly means climate warming from the period of sediment deposition above 1.4 mbsf. This interval correlates with the Holocene climate optimum at Mid Holocene.

**Key words** : Hupo Basin, grain size analysis, sensitive grain size, clay mineral, Tsushima Warm Current

\*Corresponding author: +82-053-950-5355, E-mail: sjl@knu.ac.kr

## 서 론

해양은 해수의 순환, 해수 성분, 해양 생물 군집, 해저 퇴적물 등과 같은 다양한 요인이 유기적인 관계를 이루며 진행되는 하나의 시스템이다. 따라서 어느 한 요인의 변화는 전체 해양 환경의 궁극적인 변화를 초래하고 각각 요소들의 상대적인 중요치는 각 해역마다 상이하며, 같은 해역일지라도 국지적인 해저환경에 따라 달라질 수 있다(Chapman, 1989; Adams *et al.*, 1992). 이러한 해양 환경을 이해하는데 해저 퇴적물은 해양에서 일어나는 일련의 과정들이 최종적으로 집약된 결과물을 연구하는 기회를 제공한다. 따라서 해저 퇴적물의 입도 특성과 광물 성분을 밝히는 것은 단순히 퇴적물의 성질을 밝히는 것이 아니라, 해양의 종합적인 특성을 규명하는 것이다. 예를 들어 해양분지의 수심과 해류의 속도는 해저 퇴적물의 입도 분포에 투영되며, 해저 저층수의 흐름 방향은 퇴적물의 조직 변수를 통해 파악 할 수 있다(Gao *et al.*, 1994; Poizot *et al.*, 2008). 이러한 퇴적물의 입도 분포는 또한 해양 생물의 군집 분포에도 많은 영향을 미친다(McLachlan *et al.*, 1996; Cahoon *et al.*, 1999; Gimenez *et al.*, 2014). 예를 들어 대형 패각 생물 및 어류는 조립질의 퇴적물에, 소형 저서성 생물은 세립질의 퇴적물에 주로 서식한다. 즉 해저 퇴적물의 퇴적상은 해류의 순환에 영향을 받으며, 해양 서식 생물상에 영향을 주는 관계를 가진다. 또한 퇴적물을 구성하고 있는 광물의 경우 퇴적물의 공급의 암상, 해류 등 다양한 요소에 의하여 영향을 받을 수 있으며 퇴적환경 및 고환경 변화와 밀접한 관계를 가지고 있다(Dou *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2014).

동해 중부 연안은 서해와 남해 연안에 비해 경사가 심하고 쇄설성 퇴적물의 낮은 공급으로 인해 홀로세 해침 이후의 환경변화에 대한 연구가 매우 제한적이다. 반면 후포분지는 수심 200 m 이하의 넓고 평탄한 지형을 갖고 있고 동쪽으로 남북 방향의 후포뱅크가 가로막아 다른 지역에 비해 퇴적물이 높다(Kim *et al.*, 2010). 따라서 후포분지는 동해 중부 연안에서 홀로세 해침 이후 환경변화를 연구할 수 있는 이상적인 지역이다. 또한 동해의 제 4기 고해양 환경 복원에 관한 연구는 주로 울릉분지(Kim *et al.*, 2000; Ryu *et al.*, 2005; Lee, 2007)와 대한 해협(Lim *et al.*, 2006; Nishida and Ikehara, 2013)에 집중되어 있다. 이에 반해 후포분

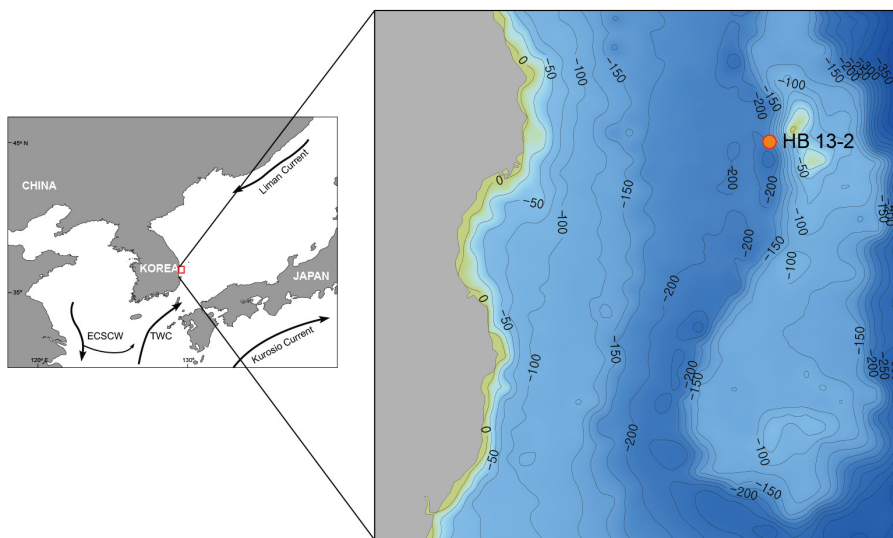
지에 대한 연구는 극히 미비하다. 또한 해저 퇴적물을 구성하고 있는 광물성분의 경우 최근 서해와 남해는 이에 대한 연구가 활발하나 동해 특히 후포분지에 대하여는 수행된 바 없다(Cho *et al.*, 2011; Cho *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013). 본 연구는 시추코어 퇴적물의 입도 분석 및 지화학적 분석을 통해 홀로세 동안의 후포분지의 고해양 환경 변화를 규명하고자 한다.

## 시료 및 방법

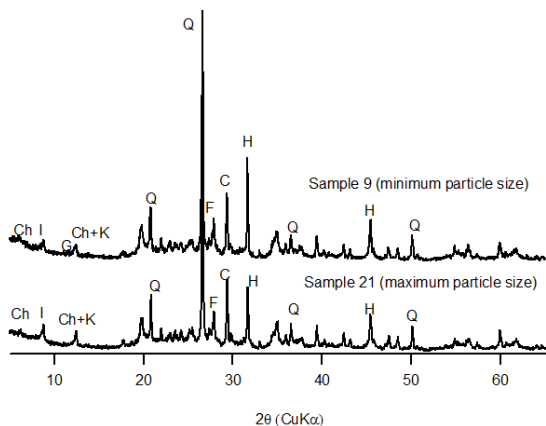
후포분지에 유입되는 퇴적물의 기원지 및 고해양환경을 규명하기 위해 한국해양과학기술원의 이 어도호를 이용하여 HB 13-2 피스톤 코어를 채취하였다(Fig. 1). 채취한 코어는 밀봉한 뒤 실내 연구실로 냉장 이동하였다. 회수된 코어의 길이는 3.3 m 이며 퇴적학적 관찰 및 부시료 채취를 위해 반으로 절개하였다. 절개된 코어는 Itrax사의 XRF 코어 스캐너를 이용하여 1 cm 간격으로 주요 원소들의 함량을 측정하였다. 그 후 입도 및 광물 분석을 위하여 부시료를 채취하였으며, 입도 및 점토광물 분석을 위해 동결 건조하였다.

### 광물 분석 및 입도 분석

퇴적물 시료의 광물의 분석은 12 cm 간격으로 총 28개 시료를 대상으로 진행하였다. 시료들의 광물성분을 알아보기 위하여 분말 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD) 분석을 실시하였다. 분석을 위하여 기초과학지원연구소 대구센터의 Phillips X'pert APD를 이용하였으며 Cu 타겟을 이용하여 5에서 65°까지 분석하였다. 분석 조건은 40 kV 30 mA를 사용하였으며 0.02° 2θ의 스텝을 사용하였고 각 스텝 당 1초의 시간을 사용하였다. 또한 각 시료에 들어있는 광물 함량을 정량분석하기 위하여 Sietronics사의 SIROQUANT를 사용하였다. 추가적으로 점토광물의 반정량분석을 위해 각 시료에 대하여 2 μm 이하의 시료를 원심분리기로 분리한 후 이를 슬라이드 글라스 위에 방향성 시료를 제작하였다. 이 시료를 60 °C에서 24시간 에틸렌글리콜로 포화시켜서 점토광물의 동정 및 함량을 구하는데 사용하였다. 기초과학지원연구소 대구센터의 Phillips X'pert APD를 이용하여 XRD 분석을 실시하였다. Cu 파장을 이용하여 40 kv와 30 mA 조건에서 초당 0.02° 2θ의 스텝으로 스텝당 2초를 사용하여 2θ 2~15 ° 범위에서 분석하였다.



**Fig. 1.** Locality map of a piston core (HB 13-2, solid circle) located along the western slope of Wangdolcho, Hupo Basin. Main currents affecting the Hupo Basin are represented in a left small box (TWC: Tsushima Warm Current, ECSCW: East China Sea Coastal Water).

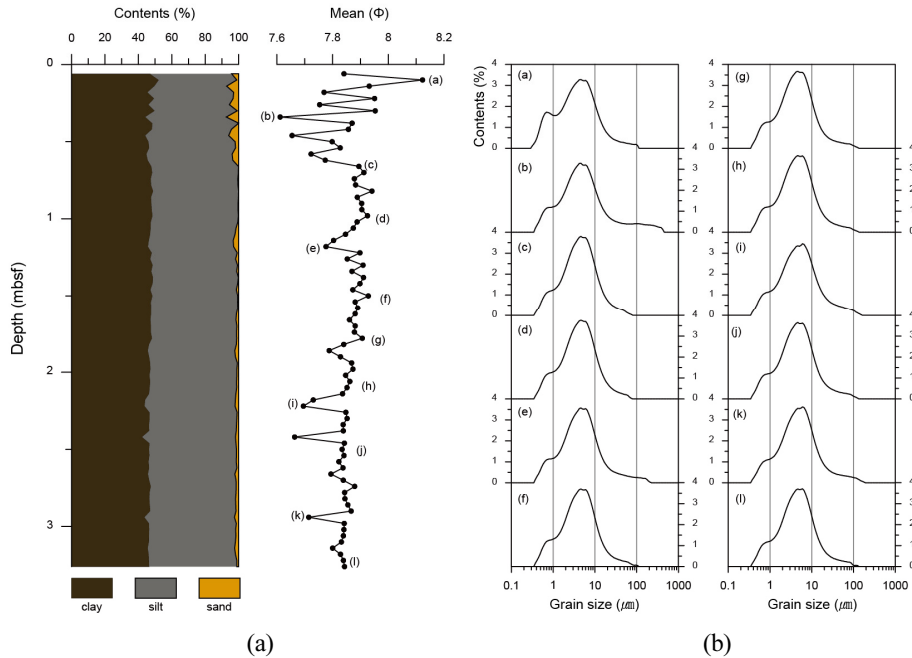


**Fig. 2.** XRD patterns of core sediment samples collected from the Hupo Basin. C: calcite, Ch: chlorite, F: feldspar, G: gypsum, H: halite, I: illite, Q: quartz.

얻어진 광물 회절 자료는 MacDiff 프로그램 (Petschick, 2000)을 이용하여 점토광물의 상대함량 및 결정도, 스멕타이트/일라이트 피크 세기 비율(smectite/illite peak intensity ratio, S/I)을 구하였다. 점토광물의 반정량분석을 위해 17 Å(스멕타이트), 10 Å(일라이트), 7 Å(녹니석과 캐올리나이트) 피크의 면적을 구하였으며, 얻어진 값은 가중

치를 곱해 보정하였다(Biscaye, 1965). 점토광물의 결정도는 17 Å 피크(스멕타이트)와 10 Å 피크(일라이트)의 integral breadth( $\Delta^2\theta$ ) 측정을 통해 구하였다. Integral breadth는 측정된 피크와 동일한 면적 및 높이를 갖는 사각형의 폭으로 정의되며, 최대반폭치(FWHM, full width at half maximum)보다 피크 꼬리부분에서의 변화에 대해 더 민감한 것으로 알려져 있다(Klug and Alexander, 1974). 점토광물의 결정도가 좋아질수록 integral breadth ( $\Delta^2\theta$ )의 값은 작아진다. Ehrmann (1998)과 Ehrmann *et al.* (2005)의 기준을 적용하여 스멕타이트( $<1.0 \Delta^2\theta$  : 매우 좋음,  $1.0-1.5 \Delta^2\theta$  : 좋음,  $1.5-2.0 \Delta^2\theta$  : 보통,  $>2.0 \Delta^2\theta$  : 불량)와 일라이트( $<0.4 \Delta^2\theta$  : 매우 좋음,  $0.4-0.6 \Delta^2\theta$  : 좋음,  $0.6-0.8 \Delta^2\theta$  : 보통,  $>0.8 \Delta^2\theta$  : 불량)의 결정도를 구분하였다. S/I 피크비는 글리콜 처리한 스멕타이트와 일라이트의 피크 높이 비율( $17 \text{ \AA}_{EG}/10 \text{ \AA}_{EG}$ )로 구하였다(Horiuchi *et al.*, 2000).

퇴적물의 입도 분석은 4 cm 간격으로 81개 시료를 대상으로 진행하였다. 건조된 시료 1 g을 10%의 과산화수소 및 1 N의 염산과 반응시켜 유기물과 탄산염을 제거한 후 증류수를 이용하여 수차례 증화과정을 거쳤다. 묻쳐 있는 입자들의 확산을 위해 10% 칼콘(sodium hexametaphosphate) 용액을 첨가한 후 초음파세척기에서 5분 정도 반응시



**Fig. 3.** Grain size analysis of a core sediment (HB 13-2). (a) vertical variation of siliciclastic particles (clay, silt and sand) and mean grain size, (b) grain size frequency distribution data.

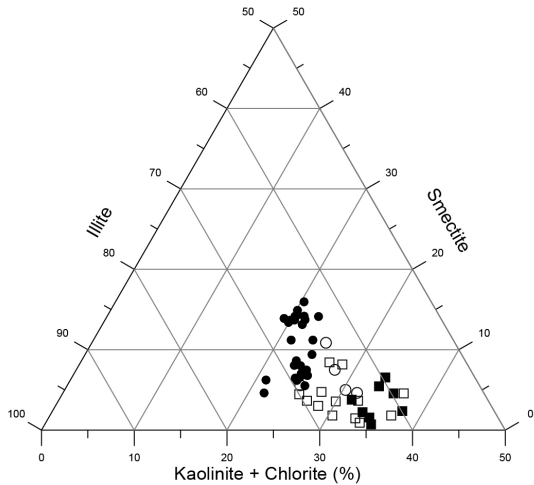
켰다. 한국지질자원연구원의 Microtrac S3500 기기를 이용하여 입도분석을 진행하였고 얻어진 입도 자료는 Gradstat (Blott and Pye, 2001)을 이용하여 통계 분석하였다. 입도 자료로부터 환경에 민감하게 반응하는 요소의 차출을 위해 표준편차를 활용한 민감 입도요소(sensitive grain size)를 추출하였다(Boulay *et al.*, 2003). 민감 입도요소는 전체 시료에 대한 각 구간의 표준 편차를 통해 구할 수 있으며, 표준 편차가 클수록 환경 변화에 민감하게 반응하는 요소를 의미한다. 비응집성 실트의 함량 변화를 알기 위해 전체 니질 함량에 대한 10-63  $\mu\text{m}$  크기에 해당하는 입자들의 백분위 비를 구하였다(McCave *et al.*, 1995).

### 결과 및 토의

HB 13-2 코어 퇴적물은 대부분 괴상의 암회색 실트로 구성되어 있다. 특별한 층리 구조는 관찰되지 않고 생교란작용에 의한 층리의 교란이 우세하고 패각은 극히 드물게 산출된다. Kim *et al.* (2010)은 후포분지의 홀로세 퇴적물을 단위층 A (약한 생교란작용의 퇴적상), 단위층 B (약엽리 퇴

적상과 함께 생교란작용이 우세한 퇴적상), 단위층 C 혹은 C' (생교란작용이 코어 하부로 갈수록 강해지거나 약해지는 전이구간), 단위층 D (균질 이질 퇴적상)로 구분한 바 있다. HB 13-2 코어는 0-0.4 mbsf는 단위층 B, 그 하부(0.4-3.27 mbsf)는 단위층 C로 구분된다. 단위층 C에서 균질 이질 퇴적상이 일부 내재하지만, 그 층후는 매우 얇으며 생교란작용으로 인해 실질적인 단위층로의 구분은 불가능하다. HB 13-2로부터 4.5 km 떨어진 08HQP-03 코어의 연대 분석 결과에 따르면 후포분지의 퇴적 속도는 48-50 cm/ka이다(KIGAM, 2009). 이러한 퇴적 속도와 연대 분석 자료 및 퇴적상의 대비를 감안 하였을 때 HB 13-2 코어는 전기 홀로세부터 중기 홀로세 동안에 퇴적된 것으로 판단된다.

후포분지의 퇴적물은 실트와 점토의 함량이 높으며 사질의 함량은 대체로 낮다(Fig. 3). 평균입도의 큰 변화는 보이지 않고(7.6-8.1  $\Phi$ ), 최상부 구간을 제외한 모든 시료는 세립질 실트에 해당한다. 사질의 함량은 하부에서 3% 미만의 낮은 값을 유지하나 0.6 mbsf부터 상부 구간으로 갈수록 점차 증가하며 큰 변동 폭을 보인다. 사질 크기 퇴적물의 증가와 함께 점토의 함유량은 감소한다. 입도



**Fig. 4.** Ternary diagram of a core sediment (HB 13-2) using clay minerals' ratios (illite, smectite, and kaolinite+chlorite). Solid circles represent data of HB 13-2, and others are used for comparison (solid squares: Yellow Sea, open circles: East Sea, open squares: South Sea, from Choi and Kim, 1998).

빈도 분포 곡선(grain size frequency curve)은 평균 입도의 변화와 관계없이 전체 구간에서 이봉분포(bimodal distribution)를 보이며, 이는 HB 13-2 코어의 퇴적물이 두 개의 근원지로부터 지속적으로 퇴적물의 공급을 받았음을 의미한다.

#### 구성 광물 및 점토 광물의 함량과 결정도

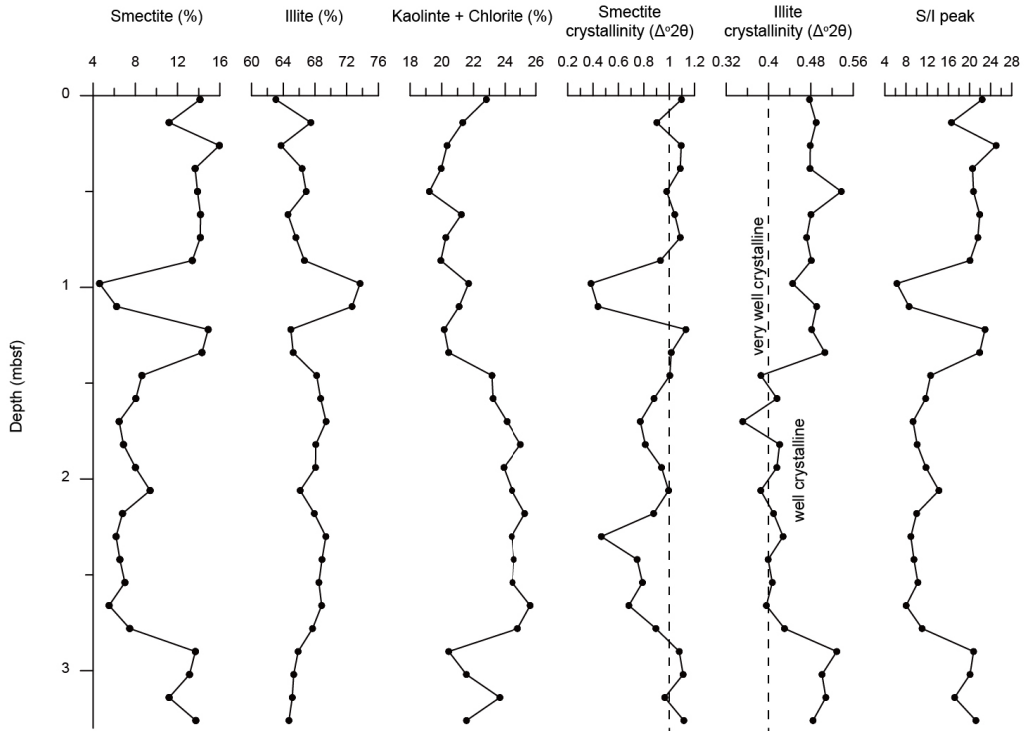
구성 광물의 종류는 대부분의 시료에서 큰 차이를 보이지 않고 이들의 분포 또한 크게 차이가 없다. 퇴적물의 대부분은 석영과 미사장석, 정장석, 알바이트 등의 장석류 쇄설성 광물들로 이루어져 있으며 녹니석, 캐올리나이트, 일라이트와 같은 점토광물들도 포함되어 있다(Fig. 2). XRD 패턴 중 광물 성분의 경우 입자의 평균 크기가 가장 큰 9번 시료와 가장 작은 21번 시료에 대한 XRD 패턴에서는 황철석과 방해석 등의 퇴적 생물작용 및 속성작용으로 형성된 광물들도 일부 관찰된다. 20에서 30°2θ 사이에 XRD 피크의 강도 증가는 비정질의 오팔A에 의한 것으로 판단된다.

SIROQUANT를 이용하여 계산한 결과 비정질 성분을 제외하고 가장 많은 광물은 석영이며 일라이트, 알바이트, 방해석, 녹니석 등의 순서로 분포한다. 깊이와 광물 입자의 변화에 따른 광물 함유

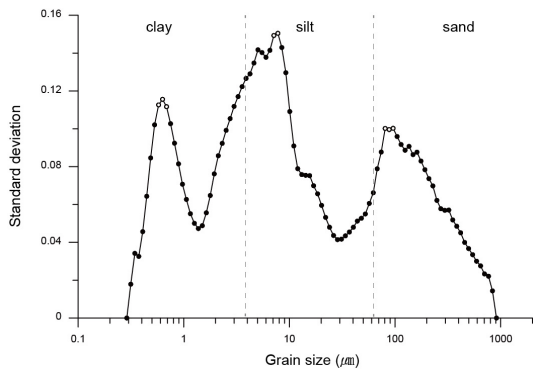
량의 경우 거의 차이가 없으며 캐올리나이트의 경우 9번 시료와 21번 시료에서 2.69와 2.33 wt%를 보여 캐올리나이트의 함량이 입자의 크기에 일부 기여를 했을 가능성을 보인다.

점토광물의 반정량 분석법을 이용하여 상대적 함량을 구한 결과 일라이트가 63.0-73.7%(평균  $67.2 \pm 2.4\%$ )로 가장 풍부하게 산출되며, 녹니석과 캐올리나이트는 19.2-25.6%(평균  $22.5 \pm 1.9\%$ )의 함량을, 스멕타이트는 4.6-16.0%(평균  $10.3 \pm 3.6\%$ )의 함량을 보인다. 한반도 주변해역에 분포하는 점토광물의 양과 비교하면(e.g., Choi and Kim, 1998) 스멕타이트의 양이 다소 많으며, 일라이트의 양은 적은 특징을 보인다(Fig. 4). 한반도 근해 퇴적물에 포함된 스멕타이트의 양은 5% 미만의 값을 보이는 것이 일반적이지만(e.g., Lee *et al.*, 1996; Moon *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2010), 이러한 스멕타이트의 높은 함유량은 제3기 분지의 화산쇄설암의 영향을 받았을 것으로 판단된다. 연구지역 인근에는 화산 쇄설성 퇴적층이 넓게 분포하며, 이에 포함된 스멕타이트가 하천의 유입과 함께 연안에 위치한 후포분지에 퇴적되었을 것이다.

일라이트의 결정도는 크게 3개의 구간으로 구분된다(Fig. 5). 1.4-2.8 mbsf에서 산출되는 일라이트의 결정도는 매우 좋음 내지 매우 좋음과 좋은 경계에 분포하고 나머지 구간은 0.4 Δ2θ 이상의 결정도를 가진다. 스멕타이트의 결정도는 일라이트의 결정도에 비해 뚜렷한 차이를 보이지는 않지만, 0.86-1.2 mbsf와 1.4-2.8 mbsf에서 1 Δ2θ 미만의 값을 보인다. 이러한 양상은 S/I 피크에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 0-1.4 mbsf, 2.8-3.3 mbsf에서는 12 이상의 값을 가지지만, 1.4-2.8 mbsf에서는 12 미만의 값을 보인다. 일라이트와 스멕타이트의 결정도는 고기후의 지시자로 사용될 수 있다(cf. Lamy *et al.*, 2000; Alizai *et al.*, 2012). 고온 다습한 기후는 광물의 가수분해의 강화에 따른 용탈작용을 촉진시키며 이로 인해 일라이트와 스멕타이트의 결정도는 낮아지기 때문이다. S/I 피크 또한 그 값이 증가할 때 따뜻한 기후를, 감소할 때 한랭한 기후를 나타내는 지시자로 활용될 수 있다(Horiuchi *et al.*, 2000). 따라서 점토광물의 결정도와 S/I 피크 값이 증가하는 0-1.4 mbsf 구간은 온난 다습한 기후에서 퇴적된 것으로 보인다. 우리나라의 홀로세 온난 최적기(Holocene climate optimum)는 5-7 ka 동안으로 알려져 있으며(Nahm



**Fig. 5.** Down-core variation of clay minerals' (smectite, illite, kaolinite+chlorite) content (%), crystallinity ( $\Delta^2\theta$ , smectite, illite), and S/I peak. Vertical dotted lines represent a base line of smectite and illite crystallinity.



**Fig. 6.** Log diagram of grain size versus standard deviation. Three sensitive areas (open circles) were detected in clay, silt and sand size ranges, respectively.

*et al.*, 2011; Yi, 2011; Park *et al.*, 2012), 0-1.4 mbsf 구간에 대비되는 것으로 판단된다.

#### 비응집성 실트 및 민감 입도 요소

비응집성 실트의 평균 크기는 하부로부터 0.82 mbsf까지 약하게 감소하는 경향을 보이고, 이후 크게 증가하여 비교적 높은 값을 유지한다(Fig. 7). 10  $\mu\text{m}$  이상의 실트 입자들은 수문학적 조건에 따라서 입자의 분급을 보이기 때문에 이를 이용하여 저층수의 유속을 추론할 수 있다(McCave *et al.*, 1995; McCave *et al.*, 2013; Tornalley *et al.*, 2013). 홀로세 해침 이후 동해로 유입되기 시작한 대마난류는 7-8 ka부터 현재와 비슷한 순환 경로를 갖은 것으로 알려져 있다(Domitsu and Oda, 2008; Koizumi, 2008). 표층퇴적물의 이동 경로 벡터분석에 의하면 후포분지는 대마난류의 영향을 직접적으로 받는다. 따라서 비응집성 실트의 함량이 증가하는 0-0.82 mbsf 구간은 후포분지로 유입되는 대마난류의 유입양이 점차 증가하였음을 의미한다.

표준 편차를 이용한 민감 입도 요소는 3개의 구간(80.7-95.96  $\mu\text{m}$ , 7.13-7.78  $\mu\text{m}$ , 0.578-0.688  $\mu\text{m}$ )에서 확인되었고 각 요소는 사질, 실트, 점토에

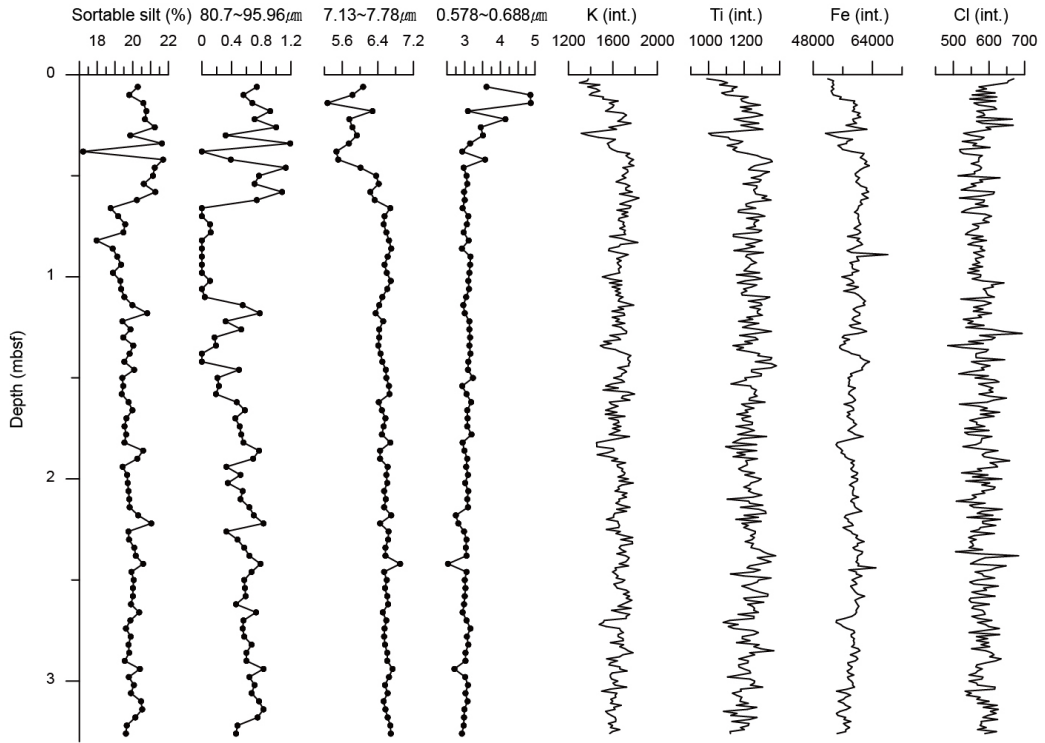


Fig. 7. Vertical variation of sortable silt, three sensitive particles (seen in Fig. 6), and some elements' XRF data which are related with sensitive particles.

해당한다(Fig. 7). 사질크기에 해당하는 80.7-95.96 μm의 입자는 하부로부터 점차 감소하는 경향을 보이며 0.82 mbsf부터 증가한 후 큰 변동 폭을 보인다(Fig. 7). 이러한 경향은 비응집성 실트의 평균 크기 변화와 동일한 증감을 보이기 때문에 저층수의 유속 변화에 민감하게 반응하는 요소로 판단된다. 7.13-7.78 μm과 0.578-0.688 μm의 함유량은 서로 상반되는 경향을 보이며 산출된다. 7.13-7.78 μm은 하부로부터 0.66 mbsf까지 6.4-6.8%의 비율을 유지하고 0.42 mbsf와 0.14 mbsf에서 크게 감소하는 경향을 보인다. 0.578-0.688 μm은 하부로부터 3% 정도의 낮은 비율을 유지하지만 0.42 mbsf부터 점차 증가하는 양상을 보인다. 7.13-7.78 μm은 육상 퇴적물의 유입을 지시하는 칼륨(K), 티타늄(Ti), 철(Fe) 원소(cf. Wei *et al.*, 2003; Kylander *et al.*, 2011)의 증감과 유사하다. 따라서 7.13-7.78 μm의 증가는 후포분지로 유입되는 담수의 양이 증가하였음을 의미한다. 0.578-0.688 μm은 고염수의 유입을 지시하는 염소(Cl) 원소(Yao *et al.*, 2012)의 증감과 유사하다. 대마 난류는 쿠로시오의

지류로서 고염의 쿠로시오 해류와 저염의 동중국해 연안수가 혼합된 수괴이므로 0.578-0.688 μm의 증가와 7.13-7.78 μm의 감소가 나타나는 0-0.42 mbsf 구간은 동중국해 연안수와 동해안을 따라 직접적으로 유입되는 담수의 유입이 상대적으로 감소했음을 지시한다. 이는 홀로세 기후 최적기 동안 해수면의 상승으로 인해 쿠로시오 해류의 유입이 보다 많아졌기 때문으로 판단된다.

## 결론

후포분지에서 채취한 HB 13-2 코어 퇴적물의 입도 및 지화학적 분석을 통하여 홀로세 동안의 고해양 환경 변화를 복원하였다. HB 13-2 코어 퇴적물은 염층리를 비롯한 퇴적구조를 기준으로 0.4 mbsf에서 두 개의 퇴적상으로 구분된다. 상부 층준은 하부 층준에 비해 대마난류의 유입이 강화돼 오늘날과 같은 해양환경에서 퇴적된 것으로 밝혀졌다. 입도 분석 결과 점토와 실트질 입자들이 각각 약 45%의 함량으로 구성되어 있으며 소량의 사

질입자들도 관찰된다. 깊이에 따른 입자 분포의 비율은 대체로 일정하다. 점토광물들의 함량은 일라이트가 가장 우세하며 카올리나이트와 녹니석이 다음으로 많고 스멕타이트가 소량(10% 내외) 분포한다. 다른 지역에 비해 스멕타이트의 함량이 높게 나타나는데 이는 인근 제3기 분지의 화산쇄설암의 영향을 받은 것으로 판단된다. 점토광물의 결정도와 S/I 피크는 0-1.4 mbsf에서 증가하는 경향을 보인다. 광물의 결정도와 S/I 피크는 기후에 의해서 조절되기 때문에 이러한 변화는 홀로세 기후 최적기의 온난 다습한 기후를 반영하는 것으로 해석된다. 비응집성 실트의 함량은 0.82 mbsf부터 크게 증가하는 경향을 보이며 이는 홀로세 중기에 후포 분지로 유입되는 대마난류의 유입량이 증가하였음을 의미한다.

## 사 사

이 연구는 한국해양과학기술원의 ‘동해 심해 극한환경 및 서식생물 특성연구(PE99201)’ 사업의 지원을 받아 수행되었다. 분석에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 류병재 박사와 경북대학교 이수지 학생에게 감사를 드린다. 논문의 심사 과정에서 많은 조언과 건설적인 비판을 통해 논문의 질적 향상에 도움을 주신 익명의 심사위원께 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

Adams, W.J., Kimerle, R.A., and Barnett Jr., J.W. (1992) Sediment quality and aquatic life assessment. *Environmental Science and Technology*, 26, 1863-1876.

Alizai, A., Hillier, S., Clift, P.D., Giosan, L., Hurst, A., VanLaningham, S., and Macklin, M. (2012) Clay mineral variations in Holocene terrestrial sediments from the Indus Basin. *Quaternary Research*, 77, 368-381.

Biscaye, P.E. (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay on the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76, 803-832.

Blott, S.J., and Pye, K. (2001) GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.

Boulay, S., Colin, C., Trentesaux, A., Pluquet, F., Bertaux, J., Blamart, D., Buehring, C., and Wang, P. (2003) Mineralogy and sedimentology of

Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144). In: Prell, W.L., Wang, P., Blum, P., Rea, D.K. and Clemens, S.C. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 184, 1-21.

Cahoon, L.B., Nearhoof, J.E., and Tilton, C.L. (1999) Sediment grain size effect on benthic microalgal biomass in shallow aquatic ecosystems. *Estuaries*, 22, 735-741.

Chapman, P.M. (1989) Current approaches to developing sediment quality criteria. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 8, 589-599.

Cho, H.G., Kim, S.O., and Yi, H.I. (2012) Clay mineral distribution and characteristics in the southeastern Yellow Sea mud deposits. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 25, 163-173 (in Korean with English abstract).

Cho, H.G., Kim, S.O., Yi, H.I., and Shin, K.H. (2012) Mineral distribution in the southeastern Yellow Sea surface sediments; KORDI cruise samples in 2010. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 24, 205-216 (in Korean with English abstract).

Choi, J.-Y., Lim, D.-I., Park, C.-H., Kim, S.-Y., Kang, S., and Jung, H.-S. (2010) Characteristics of clay mineral compositions in river sediments around the Yellow Sea and its application to the provenance of the continental shelf mud deposits. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 497-509 (in Korean with English abstract).

Domitsu, H., and Oda, M. (2008) Holocene influx of the Tsushima Current into the Japan Sea signalled by spatial and temporal changes in *Neogloboquadrina incompata* distribution. *The Holocene*, 18, 345-352.

Dou, Y., Yang, S., Li, Z., Clift, P.D., Yu, Hua, Berne, S., and Shi, X. (2010) Clay mineral evolution in the central Okinawa Trough since 28 ka: implications for sediment provenance and paleoenvironmental change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 288, 108-117.

Ehrmann, W. (1998) Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 139, 213-231.

Ehrmann, W., Setti, M., and Marinoni, L. (2005) Clay minerals in Cenozoic sediments off Cape Roberts (McMurdo Sound, Antarctica) reveal palaeoclimatic history. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229, 187-211.

Gao, S., Collins, M.B., Lanckneus, J., DeMoor, G.,



- and Van Lancker, V. (1994) Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf. *Marine Geology*, 121, 171-185.
- Gimenez, L., Venturini, N., Kandraticius, N., Hutton, M., Landfranconi, A., Rodriguez, M., Brugnoli, E., and Muniz, P. (2014) Macrofaunal patterns and animal-sediment relationships in Uruguayan estuaries and coastal lagoons (Atlantic coast of South America). *Journal of Sea Research*, 87, 46-55.
- Horiuchi, K., Minoura, K., Hoshino, K., Oda, T., Nakamura, T., and Kawai, T. (2000) Palaeoenvironmental history of Lake Baikal during the last 23000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 157, 95-108.
- KIGAM (2009) Coastal geohazard factor analysis (Uljin area). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KiGAM, Daejeon, 279p.
- Kim, J.-H., Park, M.-H., Kong, G.-S., Han, H.-C., Cheong, T.-J., Choi, J., Kim, J.H., Kang, M.-H., Lee, C.-W., and Oh, J.-H. (2010) Geochemical results and implications of the organic matter in the Holocene sediments from the Hupo Basin. *Economic and Environmental Geology*, 43, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-M., Kennett, J.P., Park, B.-K., Kim, D.C., Kim, G.Y., and Roark, E.B. (2000) Paleooceanographic change during the last deglaciation, East Sea of Korea. *Paleoceanography*, 15, 254-266.
- Koizumi, I. (2008) Diatom-derived SSTs (Td' ratio) indicate warm seas off Japan during the middle Holocene (8.2-3.3 kyr BP). *Marine Micropaleontology*, 69, 263-281.
- Kylander, M.E., Ample, 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, 109-117.
- Lamy, F., Klump, J., Hebbeln, D., and Wefer, G. (2000) Late Quaternary rapid climate change in northern Chile. *Terra Nova*, 12, 8-13.
- Lee, K.E., 2007, Surface water changes recorded in Late Quaternary marine sediments of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 18-31.
- Lee, Y.D., You, H.S., and Kim, S.Y. (1996) Silicoflagellate biostaratigraphy and sediment facies in Ulleung Basin, the East Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 32, 73-90 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.J., Cho, H.G., Kim, S.O., Ahn S.J., and Choi, H. (2013) Sediment Provenance of southwestern Cheju Island mud using principal component analysis. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 26, 189-196 (in Korean with English abstract).
- Lim, D.I., Kang, S., Yoo, H.S., Choi, J.Y., Kim, H.N., and Shin, I.H. (2006) Late Quaternary sediments on the outer shelf of the Korea Strait and their paleoceanographic implications. *Geo-Marine Letters*, 26, 287-296.
- Liu, J.P., Milliman, J.D., Gao, S., and Cheng, P. (2004) Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. *Marine Geology*, 209, 45-67.
- McCave, I.N., Crowhurst, S.J., Kuhn, G., Hillenbrand, C.-D., and Meredith, M.P. (2014) Minimal change in Antarctic Circumpolar Current flow speed between the last glacial and Holocene. *Nature Geoscience*, 7, 113-116.
- McCave, I.N., Manighetti, B., and Robinson, S.G. (1995) Sortable silt and fine sediment size/composition slicing : Parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography. *Paleoceanography*, 10, 593-610.
- McLachlan, A. (1996) Physical factors in benthic ecology: effects of changing sand particle size on beach fauna. *Marine Ecology Progress Series*, 131, 205-217.
- Moon, D.K., Yi, H.-I., Shin, K.-H., Do, J.Y., and Cho, H.G. (2009) Mineral distribution of the southeastern Yellow Sea and South Sea of Korea using quantitative XRD analysis. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 22, 49-61 (in Korean with English abstract).
- Nahm, W.-H., Kim, J.-Y., Lim, J., and Yu, K.-M. (2011) Responses of the upriver valley sediment to Holocene environmental changes in the Paju area of Korea. *Geomorphology*, 133, 80-89.
- Nishida, N., and Ikehara, K. (2013) Holocene evolution of depositional processes off southwest Japan: Response to the Tsushima Warm Current and sea-level rise. *Sedimentary Geology*, 290, 138-148.
- Park, J., Yu, K.B., Lim, H.S., and Shin, Y.H. (2012) Holocene environmental changes on the east coast of Korea. *Journal of Paleolimnology*, 48, 535-544.
- Petschick, R. (2000) MacDiff 4.2.5 Manual. Available from World Wide Web: <http://www.geologie.uni-frankfurt.de/Staff/Homepages/Petschick/RainerE.html>.
- Poizot, E., Mear, Y., and Biscara, L. (2008) Sediment Trend Analysis through the variation of granulometry.

- metric parameters: A review of theories and applications. *Earth-Science Reviews*, 86, 15-41.
- Ryu, E., Yi, S., and Lee, S.-J. (2005) Late Pleistocene-Holocene paleoenvironmental changes inferred from the diatom record of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Marine Micropaleontology*, 55, 157-182.
- Thornalley, D.J.R., Barker, S., Becker, J., Hall, I.R., and Knorr, G. (2013) Abrupt changes in deep Atlantic circulation during the transition to full glacial conditions. *Paleoceanography*, 28, 253-262.
- Wei, G., Liu, Y., Li, X., Shao, L., and Liang, X. (2003) Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: Evidence from ODP Site 1144, South China Sea. *Geochemical Journal*, 37, 593-602.
- Xu, Z., Li, T., Chang, F., Wan, S., Choi, J., and Lim D. (2014) Clay-sized sediment provenance in the northern Okinawa Trough since 22 kyr BP and its paleoenvironmental implication. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 399, 236-246.
- Yao, Z., Liu, Y., Shi, X., and Suk, B.-C. (2012) Paleoenvironmental changes in the East/Japan Sea during the last 48 ka: indications from high-resolution X-ray fluorescence core scanning. *Journal of Quaternary Science*, 27, 932-940.
- Yi, S. (2011) Holocene vegetation responses to East Asian Monsoonal changes in South Korea. In: Blanco, J. and Kheradmand, H. (eds.), *Climate Change*, 157-178.

---

접수일(2014년 9월 19일), 수정일(1차 : 2014년 9월 24일),  
게재확정일(2014년 9월 27일), 책임편집위원 : 김정진