「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 6, No. 2, pp. 71 — 80, May 2001

동해 울릉분지 남단 주상퇴적물에 대한 최종빙기-홀로세간의 지화학적 기록 변화: 고해양환경 변화

현상민* · 허 식 · 한상준
한국해양연구원 해양환경 · 기후연구본부

Last Glacial Maximum-Holocene Variability in Geochemical Records of a Core Sediment from the Southern Part of the Ulleung Basin, East Sea: Implications for Paleoceanographic Changes

SANGMIN HYUN*, SIK HUH AND SANG-JOON HAN
Marine Environment and Climate Change Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P. O Box 29, Seoul 425-600, Korea

최종빙기와 홀로세 사이의 전이기에 일어난 동해의 고해양환경 변화를 이해하기 위하여 울릉분지 최남단 대륙사면에서 얻어진 주상시료(95PC-1) 퇴적물에 대한 지화학적 고분해 연구를 하였다. 지화학적 결과는 주요 고해양학적 변화가 이 전이기에 뚜렷하게 일어나고 있음을 밝히고 있다. 주요원소를 분석한 결과 최종빙기와 홀로세 사이에 뚜렷한 퇴적물의 조성변화를 보이고 있으며 이는 퇴적물의 공급변화가 수반되었음을 지시하고 있다. 퇴적물 중의 TiO_2/Al_2O_3는 홀로세와 최종빙기의 퇴적물 조성이 다름을 지시하고 있다. 유기탄소 함량도 약 0.5~4% 정도의 폭으로 변화하고 있으며 이러한 변화는 평균적인 최종빙기와 간빙기(홀로세)의 값과 비교했을 때 각각 2~4배, 2배 정도 증가하여 전이기에 생물생산이 증가한 것임을 알 수 있다. 대륙기원 유기물의 유입을 지시하는 C/N 비도 이 전이기를 중심으로 10이상을 보이고 있어 유기물이 인근 대륙으로부터 유입되었음을 지시하고 있으며, 특히 최종빙기 동안에는 활발하게 대륙으로부터 유기물이 유입되었음을 알 수 있다. 탄산염 함량변화는 홀로세 기간동안에는 비교적 안정하여 약 2.5% 전후의 값을 보이고 있다가 전이기에 큰 폭의 변화를 보이면서 최종빙기에는 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 퇴적물의 화학원소에 근거한 풍화지수(CIW)를 조사해본 결과 약 1만년을 경계로 뚜렷하게 변화하고 있으며 이러한 점은 유기물과 탄산염에 나타난 전이기와 잘 일치하고 있다. 입도분석 결과 나타난 최종빙기와 홀로세 간의 실트질 퇴적물의 함량차이는 빙기동안에 강해진 기후요소와 밀접히 관계되는 것으로 생각된다. 따라서 전이기에 나타나는 지화학적 기록변화는 해수면 상승과 결부된 해양환경변화 및 지역적인 기후변동과도 밀접히 관계되고 있음을 지시한다.

To understand paleoceanographic environmental changes in the Esat Sea during the transitional period between Holocene and last glacial maximum, geochemical high resolution study was conducted by using a piston core (95PC-1) samples collected from the southernmost part of the Ulleung Basin. Geochemical results reveal that major distinctive paleoceanographic variations in transitional period are prominent. Major elemental concentrations show distinctive variations between glacial and Holocene suggesting changes in sediment supply. TiO_2/Al_2O_3 ratio of the sediment indicates different sediment composition between Holocene and glacial period. The content of total organic carbon ranging from 0.5% to 4% during transitional period. These values showed 2–4 times and two times higher than those of last glacial and Holocene, respectively. The C/N ratios deduced from organic matters exceed 10 during transitional period suggesting terrigenous organic matter are supplied from continent, especially during last glacial maximum. Carbonate contents are relatively stable during Holocene and last glacial maximum with gradual decrease during glacial period with high fluctuation during transitional period. The variations of chemical index of weathering (CIW) also show a distinctive variation between glacial and Holocene, which is coincident with those of carbonate and organic carbon. The grain size distribution indicates that the difference content of silt fraction during Holocene and glacial period is closely related with climatic effect during glacial period. Therefore geochemical differences in sediment composition between Holocene and last glacial maximum is thought to be related to paleoceanographic, sea-level change and local paleoclimatic changes.

*Corresponding author: smhyun@kordi.re.kr

서 론

동해는 네 곳의 얕은 해협으로 둘러싸인 반 폐쇄적인 지형의 전형적인 후배호분지(back-arc basin)이다. 외해와 연결된 대부분의 해협은 평균수심이 130 m 이하이기 때문에, 특히 최종빙기(last glacial period) 동안에는 낮아진 해수면에 의해 동해가 완전히 고립되었으며 그후 홀로세로 이르는 동안 여러 기간에 걸쳐 외해수의 유입이 일어났을 가능성이 제시되었다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1992; Tada *et al.*, 1997). 이와 같은 최종빙기–홀로세 동안의 점진적인 해수면 상승과 결부된 고해양 환경변화의 결과는 퇴적학적, 지화학적, 고해양학적, 고생물학적인 기록에서 찾아볼 수 있다(Woo *et al.*, 1995; Bahk *et al.*, 1997; Park *et al.*, 1997; Hyun *et al.*, 1998; Bahk *et al.*, 2000).

동해의 퇴적물 조성은 인근 대륙기원 퇴적물을 주로하며 빙기–간빙기의 고해양환경변화와 기후변동에 관한 중요한 정보를 제공하고 있다(Tada *et al.*, 1992; Dersch and Stein, 1994; Stax and Stein, 1994; Hyun *et al.*, 1998). 따라서 동해의 퇴적물에 대한 자세한 연구는 고해양환경변화 및 기후변동과의 연계성을 좀 더 세밀하게 밝혀줄 것으로 기대된다. 이 연구에서 이용된 주상시료 퇴적물이 채취된 울릉분지의 남쪽 하부사면은 상대적으로 분지중앙보다 수심이 얕고 빙기–간빙기를 통해 해수면 상승이 일어날 때 외해수의 유입 및 그와 관계되는 고해양학적 기록이 민감하게 나타날 것으로 예상되는 지역이다. 또한 주상시료 퇴적물은 비교적 높은 퇴적속도를 보이고 있어 빙기–간빙기간의 환경변화를 비롯한 고해양 환경변화를 이해하는데 중요한 지점으로 생각된다.

동해에 대한 수많은 연구가 수행되었고(Minai *et al.*, 1992; Dersch and Stein, 1994; Han *et al.*, 1997; Hyun *et al.*, 1998; Bahk *et al.*, 2000; Gorbarenko and Southon, 2000) 현재도 계속적인 연구를 수행하고 있지만, 기존의 연구결과 중에서 최종빙기에서 홀로세로 이어지는 전이기(transitional period)에 대한 고분해 고해양환경 변동에 초점을 맞춘 연구는 그리 많지 않다. 따라서 이 연구는 최종빙기에서 홀로세에 이르는 전이기에 대한 자세한 해석에 주력하였다. 이 연구의 목적은 퇴적물내에 기록된 여러 지화학적 자료를 이용하여 최종빙기에서 홀로세로 이행되는 전이기 동안의 고해양환경 변화를 복원하는 것과 고해양환경과 기후변동간의 관계를 규명하는 것이다.

재료 및 방법

본 연구에 사용된 길이 940 cm의 주상시료 코아 95PC-1은 수심 1634 m의 울릉분지 남쪽 대륙사면(36°03.9'N, 130°59.4'E)에서 취득되었다(Fig. 1). 동해의 고해양환경을 이해하기 위하여 본 연구에서는 지화학 연구결과에 기초하여 퇴적물 조성, 유기물 함량, 탄산염 함량변화 등을 분석하였다.

주상시료 퇴적물에 대한 주요원소(major elements)의 함량변화를 알아보기 위하여 20~40 cm 간격으로 시료를 채취한 다음 100°C에서 24시간 이상 건조시키고 Retsch를 이용하여 완전히 분말화하였다. 분말화된 시료는 다시 건조시킨 후 한국기초과학 연구소(KBSI)에서 X선 형광분석기(XRF-Philips/PW 1840)를 이용하여 주요원소를 분석하였다. 주요원소의 오차 범위는 중복측정결과 약

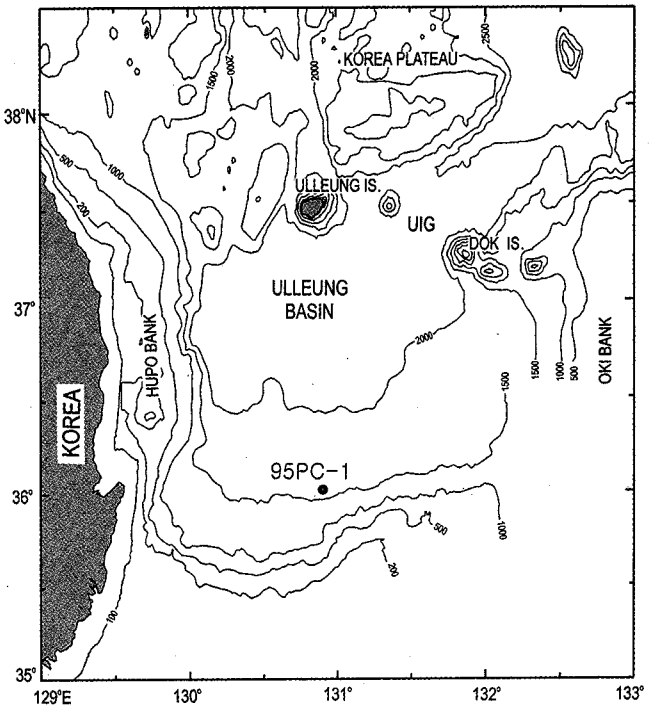

Fig. 1. Location map of a piston core analyzed in this study. UIG indicates Ulleung Interplane Gap.

3% 내외인 것으로 나타났다. 동일 시료에 대한 총 탄소(total carbon; TC) 및 총 유기탄소(total organic carbon; TOC) 함량은 CHN 분석기(Leco CHN-1000)를 이용하여 제주대학교 해양연구소에서 분석하였다. 총 탄소는 분말화(powdered)한 시료를 잘 건조시킨 후 전처리 없이 분석하였고, 총 유기탄소는 1N 염산으로 무기탄소(inorganic carbon)를 제거한 후 측정하였으며, 탄산염 함량(carbonate content)은 총 탄소와 총 유기탄소의 함량차이를 이용하여 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

탄산염함량(%) = [총 탄소(%) – 총 유기탄소(%)]×8.33

퇴적물속에 기록된 기후변동과 고해양환경과의 관계를 살펴보기 위하여 주요원소를 조합하여 다음과 같이 화학적 풍화지수(chemical index of weathering; CIW)를 계산하였다(Harnouis, 1988).

$$CIW = Al_2O_3(\%)/(Al_2O_3(\%) + CaO(\%) + Na_2O(\%)) \times 100$$

입도분석(grain-size analysis) 결과 나타난 각 심도에서의 사질(sand fraction)과 silt질(silt fraction)퇴적물에 대한 함량은 한국해양연구소(1996)를 이용했다.

결과 및 토의

암상과 주요원소의 시간적 변화

이 연구에서 사용한 주상시료에 대한 면밀한 육안관찰 결과에 의하면 이 코아 퇴적물은 생물교란된 점토가 우세한 니질 퇴적물(0~160 cm)과 사질 니(680 cm 이하), 희미한 층리 니(crudely laminated mud)와 균질 니(homogenous mud)(475~620 cm) 등으로 이루어져 있다(Fig. 2). 또한 입도와 함수률, 전단응력 등은 심도

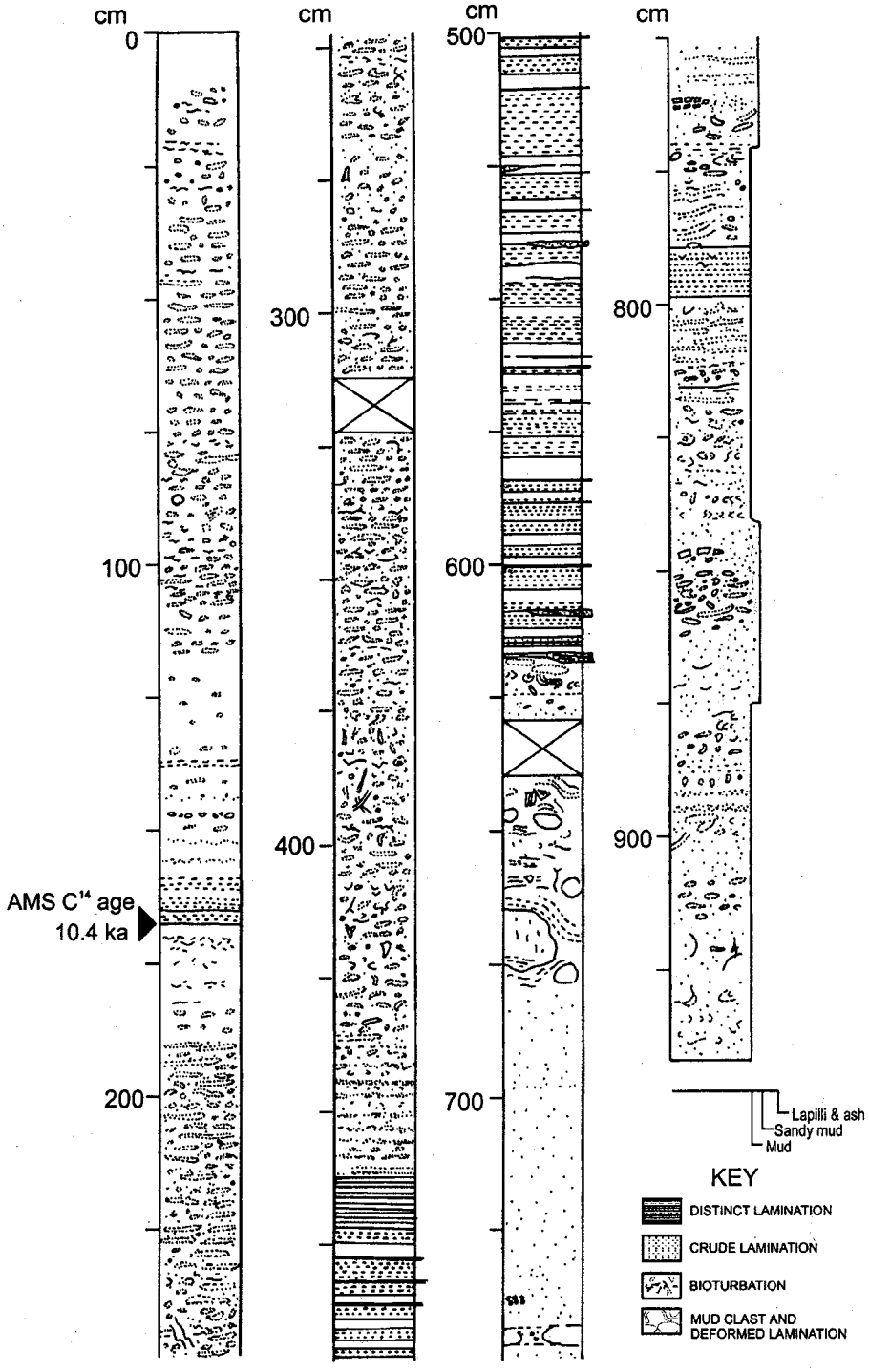

Fig. 2. Visual core description (after KORDI, 1998) and a AMS ^{14}C age dating point.

약 200 cm와 600 cm에서 크게 변화하고 있는 것으로 나타났다(한국해양연구소, 1996). 특히 니질 퇴적물과 함수률은 심도 약 200 cm을 경계로 상부방향으로 급격히 증가한다. 상세한 육안관찰과 X-Ray 조사에 의하면 심도 약 619 cm 이하는 퇴적구조가 관찰되지 않거나(structureless) 니질편니가 나타나며 사면사태에 의한 퇴적물이 지배적인 것으로 해석된다(한국해양연구소, 1996).

심도 450 cm에서 심도 610 cm 까지는 엽리(lamination)를 가지는 것이 이 주상시료의 특징이다(한국해양연구소, 1996). 이러한 엽리는 반원양성 퇴적물과 해양성 퇴적물의 주기적인 변화를 지시하는 것으로 고해양환경 특히 저층의 산소상태와 관계있는 것으로 해석되었다(Bahk *et al.*, 2000).

주상시료 95PC-1의 퇴적물에 대한 대표적인 주요원소의 수직적인 변화를 살펴보면 MnO와 P_2O_5를 제외한 다른 원소들은 심도 약 220 cm를 경계로 뚜렷한 함량변화를 보여주고 있다(Fig. 3). 심도 220 cm를 경계로 상부쪽으로 SiO_2와 CaO의 함량이 뚜렷하게 감소하고 있으며 나머지 원소들(Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, MgO, K_2O,

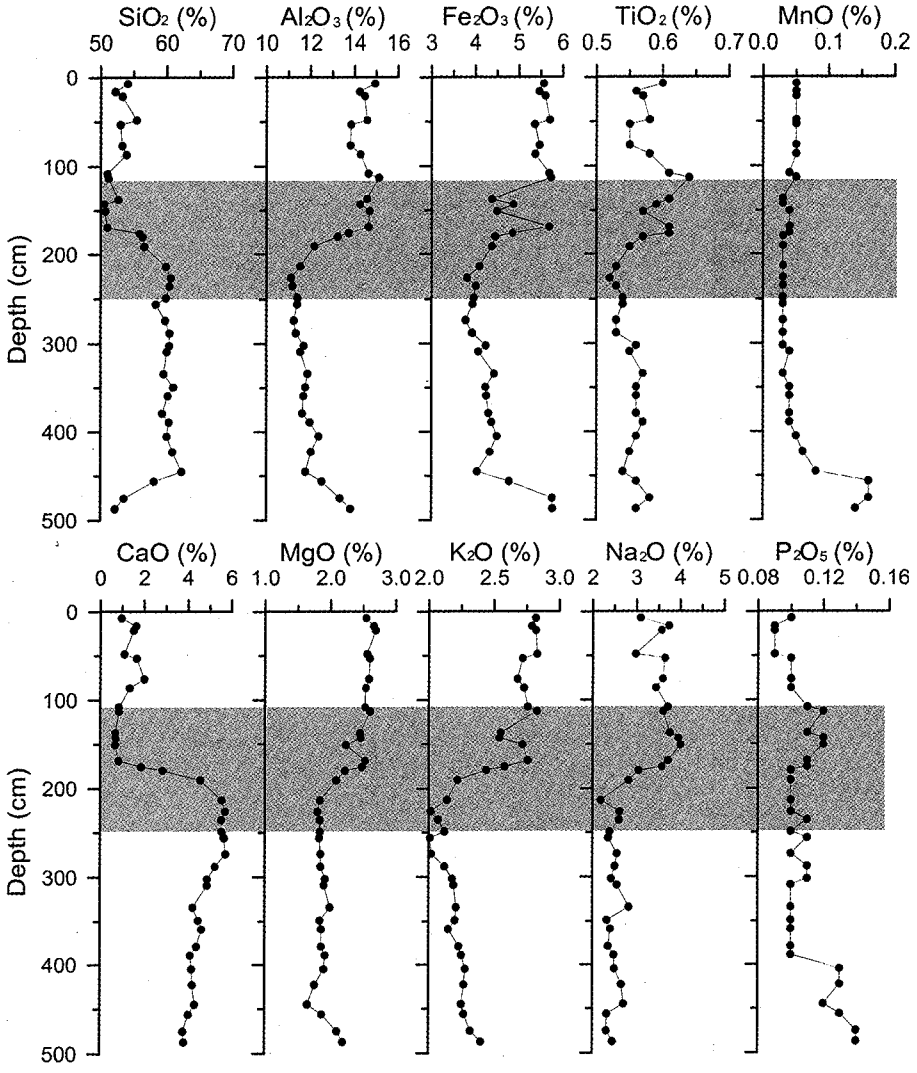

Fig. 3. Vertical profiles of major elements. Shaded areas are transitional period between the last glacial maximum and Holocene.

Na_2O)의 함량은 증가하고 있다. 탄소 절대연령(AMS ^{14}C age)를 측정한 결과 본 주상시료는 심도 168 cm에서 연대가 10430 ± 60 yr로 나타나고 있어(한국해양연구소, 1996), 심도 약 160 cm까지는 홀로세 퇴적물로 규정지을 수 있다. 평균퇴적속도를 외삽하여 계산한 연령은 지화학적 층서가 뚜렷하게 변화하는 심도 약 220 cm에서 약 13 kyr가 된다. 즉, 13 kyr에서부터 주요원소의 함량변화가 일어나기 시작하여 일부원소는(SiO_2, CaO, Al_2O_3, MgO, K_2O, Na_2O) 약 3 ka동안에 급격한 함량변화를 보이고 있으며 심도 약 100 cm(약 7 kyr) 이하에서 안정해지고 있다(Fig. 3).

한 원소의 수직적인 함량변화는 다른 원소 혹은 다른 기원을 가지는 퇴적물의 유입정도에 따라 희석되거나 농축되는 경우가 있다. 따라서 보다 정확한 평가를 하기 위해서는 보존성 원소에 의해 평준화(normalization)하는 과정이 필요하다. 일반적으로 보존성 원소(conservative element)이며 대표적인 대륙기원 원소(terrigenous element)로 분류되는 Al_2O, TiO_2 등은 퇴적물의 기원 판단 및 고환경연구에 유용하게 사용된다(Goldberg and Arrhenius, 1958; Bhatt, 1974; Spears and Kanris-Sotirios, 1976; Moorby, 1983). 또한 주요원소 중 Na_2O 및 CaO 등은 전형적으로 유동성원소(mobile element)로 간주되고 있으며 상대적으로 저항력이 강한 K_2O와 조합하여 풍화에 대한 안정도를 조사하거나 퇴적물의 기원을 평가하는데 유용한 원소로 분류된다(Nesbitt and Young, 1982; Harnouis, 1988). 이 연구에서 나타난 TiO_2/Al_2O_3의 비는 다른 원소의 함량비 변화와 유사한 경향을 보이고 있으며 심도 약 220 cm (13 kyr)에서 변이점이 나타나기 시작하고 있다(Fig. 4). 특히 K_2O/CaO, Na_2O/K_2O 및 Na_2O/Fe_2O_3의 변화는 최종빙기에서 홀로세로 변화하는 기간에서 수직적으로 뚜렷하게 증가하거나 감소하는 경향을 보이며 TiO_2/Al_2O_3에서 나타나는 변이점과 거의 같은 부근에서 나타나고 있다. 특히 K_2O/CaO의 변화는 심도 200 cm에서 150 cm의 좁은 기간동안 급격하게 일어나고 있어 퇴적물의 조성변화가 짧은 시간내에 야기되었음을 지시하고 있다. 그러나 좀더 넓은 범위를 설정한다면 심도 100~200 cm는 지화학적 변화가 가장 뚜렷하게 일어나는 지점으로 설정 할 수 있다. 이러한 현상은 조립질 혹은 세립질 퇴적물의 공급원이 이 경계점을 경계로 급격히 변했으며 최소한 최종빙기에서 홀로세가 되어 안정해지기까지의 이 전이기(13~7 kyr)를 기준으로 퇴적환경이 크게 변했거나 기후변동이나 해수면변동과 결부되어 속성이 다른 퇴적물이 공급되

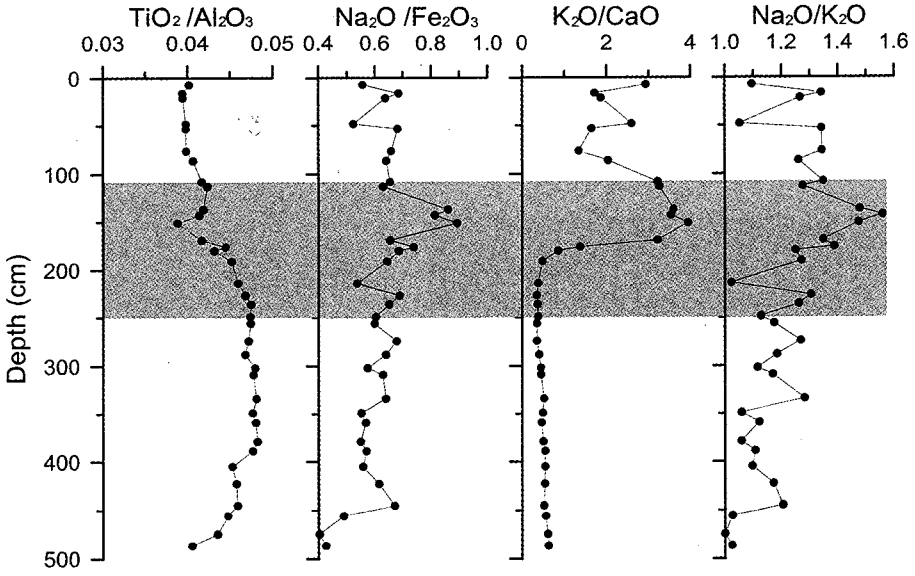

Fig. 4. Vertical profiles of the ratios of major elements. Shaded areas are transitional period between the last glacial maximum and Holocene.

었음을 지시하고 있다.

화학원소의 조성에 의한 퇴적물의 조성변화 형태는 입도의 변화에서도 간접적으로 나타나고 있다. 입도분석결과 나타난 사질 및 silt질 퇴적물 함량변화는 홀로세와 최종빙기간에 뚜렷한 차이를 보이고 있다(Fig. 5). Silt질 퇴적물은 전이기를 기준으로 해서

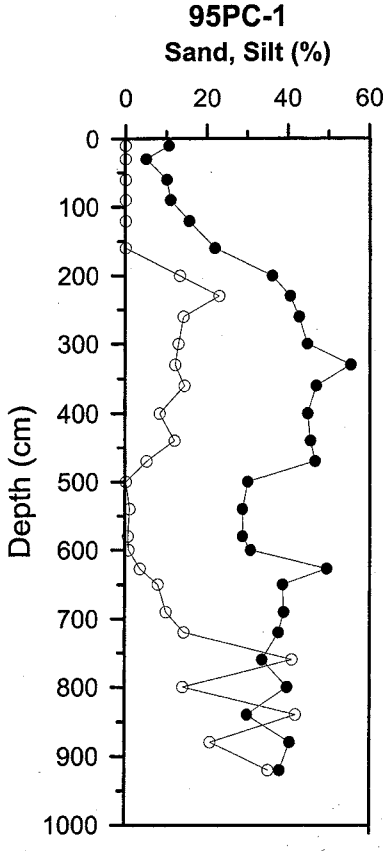

Fig. 5. Vertical profiles of the silt and sand fractions. Black points are silt fractions and blank symbols are sand fractions.

최종빙기 동안에는 홀로세의 약 4배정도 증가하고 있으며 사질퇴적물도 이 전이기를 기준으로 해서 하부방향으로 증가하고있다. 따라서 화학원소의 변이가 전이기 동안 일어나는 것은 이와 같은 silt 및 사질 퇴적물이 이 기간동안 다량으로 유입된 결과로 해석된다. Silt질이나 사질 퇴적물은 기후변화나 해류 등과 같은 요인에 의해 주변에서 유입되기 쉽다. Silt질 퇴적물의 공급은 최종빙기 동안에 낮아졌던 해수면이 단계적으로 상승함에 따라 내대륙붕에 고정되어 있던 조립질 퇴적물이 이 기간 동안에 해수면 상승과 결부되어 단계적으로 이동되어 왔다고 생각된다. 또한 후술하는 바와 같이 풍화지수가 이 기간에 증가한 것으로 보아 전이기 동안에 증가한 silt질 퇴적물은 강화된 기후요소에 의해 풍성기원으로 유입되었을 가능성도 있다. 그러나 홀로세의 안정기가 된 후에는 이러한 조립질 퇴적물이 급격하게 감소하는 특징을 보이고 있다. 홀로세 기간에는 화학원소의 변이가 나타나지 않으며 풍화지수가 비교적 안정하게 유지되고 있다.

유기물 및 탄산염 함량변화

주상시료 95PC-1 퇴적물을 분석한 결과 유기물(총 유기탄소)의 함량은 심도 약 150 cm에서 최고 4%에 달한다. 또한 심도 250 cm 보다 깊은 곳에서 비교적 안정하게 낮은 값(1% 내외)을 유지하다가 심도 200 cm에서 갑자기 증가하기 시작하여 심도 160 cm에서 급격히 감소하는 특징을 보이고 있다. 홀로세의 안정기간이 시작되는 지점이라 생각되는 심도 100 cm 이하에서는 큰 변화를 보이지 않고 2% 전후의 값을 가진다(Fig. 6). 따라서 이 주상시료에서 최대 유기탄소의 함량은 최소 유기탄소의 함량과 비교했을 때 약 4배정도 높게 나타나고 있으며 가장 높게 나타나는 지점은 빙기에서 홀로세로의 전이기(심도 200~100 cm)에 해당한다.

퇴적물 속에 보존되어 있는 유기물 함량변화는 표층에서의 생물생산 정도와 대륙으로부터의 유입정도 그리고 그 유기물이 퇴적물속에 얼마나 잘 보존될 수 있는가 하는 해저환경상태에 따라 달라질 수 있기 때문에(Muller and Suess, 1979; Stein, 1990, 1991) 함량변화에 근거하여 그 원인을 결정하기는 어렵다. 이 연구에서

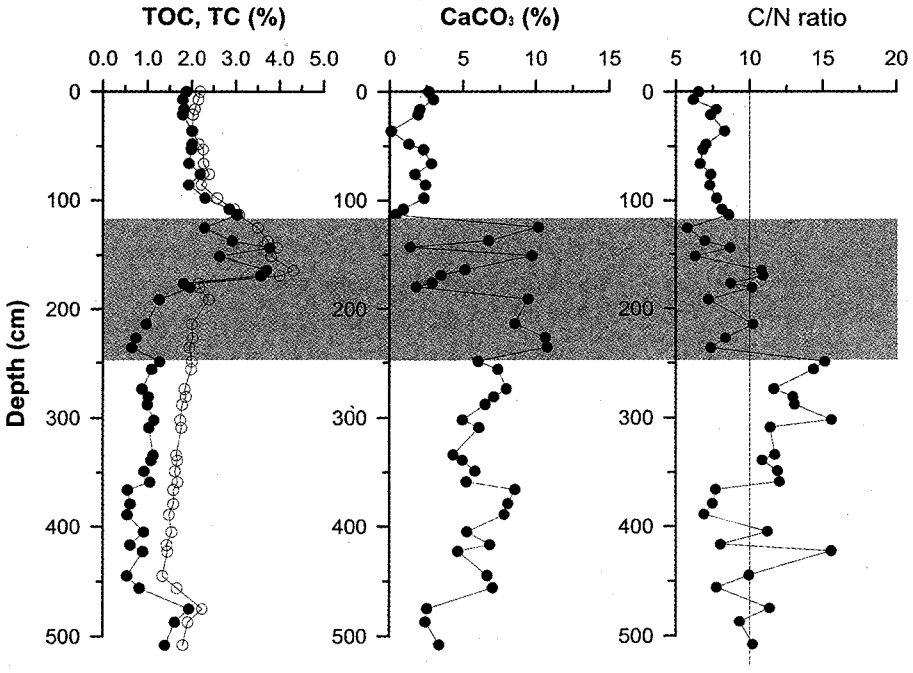

Fig. 6. Vertical profiles of total organic carbon, total carbon contents, carbonate contents (%) and C/N ratio. Blank symbols in the left figure indicate total carbon content.

는 이러한 점을 고려하여 Organic carbon/Carbonate carbon(Org. C/Carb. C)를 생물생산의 지표로 고려했다. 일반적으로 생물생산을 지시하는 지표중에서 Org. C/Carb. C은 무기탄산염에 대한 유기탄소의 생산량을 지시하고 있다(Kano, 1990; Ware *et al.*, 1992). 95PC-1에서 Org. C/Car. C 비를 조사한 결과 전이기를 중심으로 하부층에서 뚜렷하게 작아지는 변화형태를 보이고 있다(Fig. 7). 따라서 최소한 빙기보다는 홀로세 기간에 유기탄소생산이 다소 증가했을 가능성이 있다. 반대로 최종빙기 동안에 탄산염함량이 증가했거나 탄산염 용해가 미약했을 가능성이 있다. 특히 전이기에 해당하는 구간에서의 급격한 증가는 생물생산이 해수면 변동 혹은 육지로부터 유기물 유입 등과 같은 요인과 결부되어 증가되었을 가능성을 배제하지는 못한다. Biomarker인 알케논(alkenone)에 근거하여 표층수온을 조사해본 결과 최종빙기에서 홀로세가 시작되는 시점까지는(17.5~11.6 kyr) 동안에는 수온이 감소했으며, 이 연구에서 규정한 전이기에 해당하는 약 11.6~11.1 kyr 기간에는 쓰시마 난류(Tsushima warm current)가 유입되어 표층수온이 크게 증가되었다(Ishiwatari *et al.*, 1999). 이와 같은 현상은 냉수와 난류수의 유입에 따른 해수의 혼합이 용이해진 결과로 해석되었으며 그에 따라 홀로세가 시작되기 직전인 12~11 kyr 기간에는 유기탄소가 대폭적으로 증가하게 되었음이 지적되었다(Ishiwatari *et al.*, 1999). 따라서 이 연구에 나타난 전이기의 특징은 외해수 유입과 관계된 생물생산의 증가로 해석 가능하다. 그러나 생산량이라는 관점에서 고려한다면 이와 같은 빙기-간빙기간의 변화는 일반적인 중위도 지역의 빙기에 증가하고 간빙기에 감소하는 생물생산 형태와는 상반되는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 적어도 연구지역의 생물생산 변화는 일반적인 해양환경 변화나 기후변동의 영향과 더불어 지형학적 혹은 지리학적인 영향을 받았음을 지시하고 있다.

일반적으로 총 유기탄소에 대한 총 질소의 함량비(C/N ratio)는 퇴적물 중에 보존된 유기물의 특성과 그 기원을 파악하기 위하여

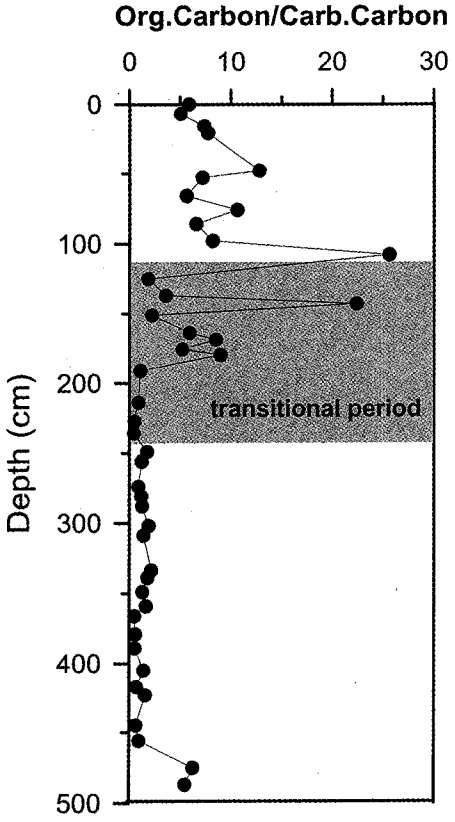

Fig. 7. Org.C/Carb.C ratio. Relative low value during glacial, and deep trough and peak during transitional period are recognized.

사용된다(Muller and Suess, 1979; Stein, 1990, 1991). 기존의 연구결과에 의하면 C/N 비는 유기물의 기원이나 그 특성에 따라 달라지게 되며 일반적으로 해양기원의 유기물은 그 비가 5~10 정

도의 값을 보이는 반면, 대륙기원의 유기물은 보통 10 이상의 값을 보인다(Stein, 1991). 이 연구에서 나타난 유기물 함량중에서 C/N 비는 심도 150 cm 이내의 깊이에서는 전체가 10 이하의 값을, 심도 250~350 cm 사이에서는 10 이상의 값을, 그리고 전이기에 해당하는 150~250 cm 사이에서는 다소 높은 값을 보이며 큰 폭으로 변화하고 있음을 알 수 있다(Fig. 6). 이러한 C/N의 변화는 홀로세 기간를 제외한다면 대륙에서 기원된 유기물과 생물생산에 의한 유기물이 혼합되어 있음을 지시한다. 하지만 이렇게 혼합된 유기물의 함량변화는 비록 빙기-간빙기간 뚜렷하게 나타나고 있다 할지라도 대륙기원 유기물의 유입과는 관계없이 생물생산의 변화로 해석할 수 있다. 특히 전이기에 해당하는 구간인 160 cm에서는 C/N 비가 10이상을 지시하고 있어 대륙기원 유기물이 일시적 혹은 간헐적으로 공급되어 왔음을 알 수 있다. 이에 반하여 빙기라 생각되는 심도 250~350 cm에서는 뚜렷하게 C/N 비가 10 이상을 보이고 있어 대륙에서 유입된 외래기원 유기물(allochthonous organic matter)이 다량으로 포함되어 있음을 지시하고 있다.

분석된 주상시료의 약 200~400 cm 심도에서는 다량의 조립질 퇴적물을 포함하고 있으며 탄산염 함량은 이보다 상부인 심도 100~200 cm에서 큰 폭의 변화를 보인 후 하부쪽으로 비교적 안정적으로 변화하고 있음을 보여주고 있다(한국해양연구소, 1996). 탄산염 함량은 최대로 약 10%를 넘는 구간이 존재하는 반면 탄산염 함량이 거의 존재하지 않은 구간이 전이기와 심도 약 45 cm에서 나타나고 있다. 특징적인 것은 심도 100 cm 상부에서는 전체적으로 2.5% 이내에서 큰 변화를 보이지 않으나 전이기에 해당하는 100~220 cm에서는 0.5~10%의 범위로 그 함량 변화폭이 매우 클 뿐만 아니라 2번에 걸친 급격한 감소 및 증가현상이 나타나고 있다(Fig. 6). 심도 250 cm 하부에서는 다소 높은 탄산염 함량을 보이면서 하부쪽으로 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 6).

수심이 2000 m 이상인 울릉분지 중앙에서 채취한 주상시료 퇴적물에서는(95PC-3, 95PC-4) 최종빙기에서 홀로세로 이르는 동안 탄산염 함량이 크게 증가하는 구간이 있으며 퇴적특성 또한 이 연구에서 보여진 특성과 비슷한 것으로 나타나고 있다(한국해양연구소, 1996; Bahk *et al.*, 2000; Gorbarenko and Southon, 2000). 이와 같은 현상은 최종빙기 동안 해수면이 낮아진 결과 외해수의 유입이 차단되고 심층수가 정체되어 무산소 혹은 빈산소 상태가 진행됨에 따라 탄산염의 보존을 촉진시킨 결과이거나 탄산염 보상심도가 수심보다 위에 존재하고 있기 때문인 것으로 해석될 수 있다. 빙기동안에 심층수가 무산소(euxinic)나 빈산소(poorly oxygenated bottom water or dysaerobic) 상태로 존재했었다는 연구결과는 기존의 고생물학 및 지화학적 연구결과에서도 찾아볼 수 있다(Woo *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 1997; Bahk *et al.*, 2000).

기존의 연구결과에 의하면 동해의 탄산염 보상심도(carbonate compensation depth; CCD)는 일반 외양보다 얕은 1500~2200 m 사이에 존재하는 것으로 보고되어 있다(Ujiie and Ichikura, 1973; Ichikura and Ujiie, 1976). 이 연구에 사용된 주상시료가 채취된 지점인 울릉분지 남단의 수심은 1634 m로 탄산염 보상심도의 경계에 위치하고 있다. 동해의 저층환경은 빙기-간빙기를 통하여 산소가 풍부한 환경과 산소가 다소 결핍된 환경이 교대된 것으로 보고되고 있으며 이러한 저층환경의 변화가 탄산염함량(용해 및 보존의 결과)의 증감에 관계되는 것으로 보고되었다(Oba *et al.*, 1991; Bahk *et al.*, 2000; Gorbarenko and Southon, 2000).

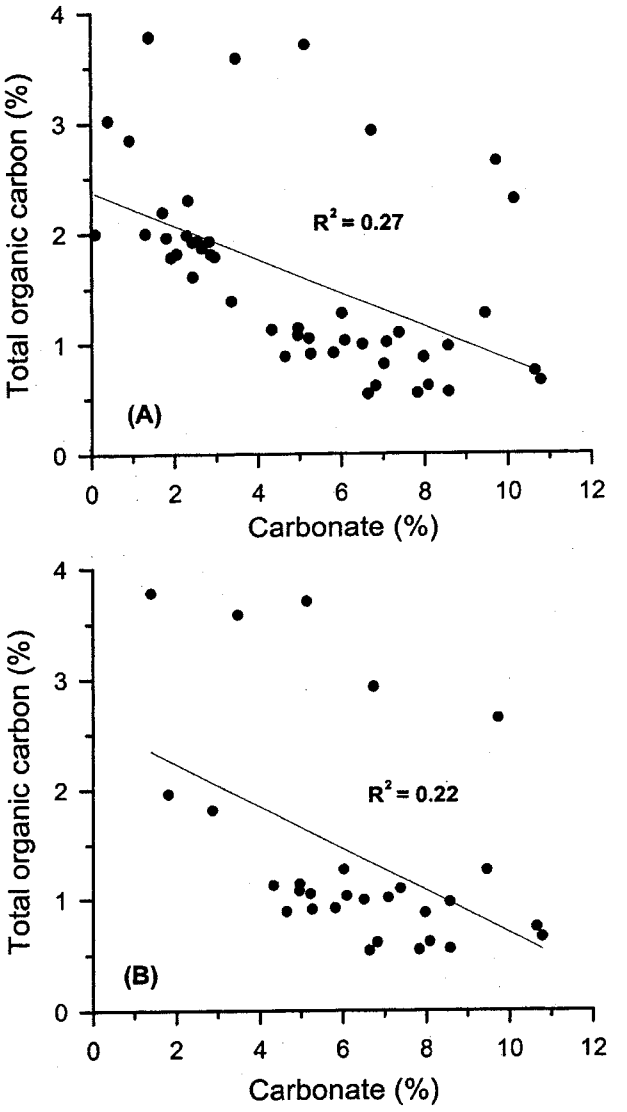

Fig. 8. Relationship between carbonate content and total organic carbon. (A) is analyzed total sample, and (B) indicates that relationship between carbonate content and total organic carbon content during glacial period.

일반적으로 전체퇴적물은 탄산염, 유기물 그리고 대륙기원 물질로 구성되어 있어 이들과의 관계로 퇴적조성이 변하게 되는데 이를 three-component system이라 한다(Ricken, 1993). 해양퇴적물에서는 각 요소의 공급정도에 따라 한 요소가 다른 요소를 희석시키는 결과를 가져오고 결국 여러 가지 퇴적상이나 서로 다른 암상이 나타나게 된다. 특히 탄산염을 다량으로 함유하는 반원양성 혹은 연안퇴적물인 경우 탄산염과 유기탄소 및 대륙기원 물질들간의 상관관계는 퇴적률이나 희석효과, 생산량증가에 대한 정보를 제공한다(Ricken, 1993). 이 연구에 사용된 주상시료에서는 탄산염과 유기탄소간의 상관관계가 전체 혹은 빙기동안에 약한 음의상관(negative relationship)을 보이고 있다(Fig. 8). 따라서 빙기

동안에 탄산염이 증가하기는 하였으나 그 결과가 직접적으로 탄산염 생산이 증가한 결과를 지시하지는 않는다. 그러나 전이기 내에서도 탄산염 함량이 최대 20배 가까이 변화하고 있어 일시적인 생산력 증가나 탄산염이 공급되는 것과 같은 요인에 의해 탄산염 함량이 조절되었다고 생각할 수 있다.

고해양환경변동과 관련된 기후변동의 기록

95PC-1 주상시료가 채취된 울릉분지 남단 지역은 쿠로시오(Kuroshio)의 지류인 쓰시마 난류가 동해로 유입되는 지역에 위치하고 있어 동해의 해양환경변화를 이해하는데 유리한 지점에 위치하고 있다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 동 주상시료 퇴적물에 대한 유기탄소 및 탄산염함량을 조사한 결과 전이기(13~7 kyr)에 급격히 증가하는 경향을 보일 뿐만 아니라 이 전이기를 경계로 상부와 하부가 뚜렷한 함량변화를 보이고 있다. 또한 주요원소의 함량 및 그 비에 의해서도 전이기를 기준으로 하여 상하가 뚜렷한 변화를 보여주고 있다. 기술한 바와 같이 기존의 자료에서 이 코아퇴적물에 대한 연대측정(AMS ^{14}C age) 결과는 심도 168 cm에서 10430 ± 60 yr로 나타났다(한국해양연구소, 1996). 이러한 사실을 근거로 한다면 심도 약 160 cm까지는 홀로세 퇴적물로 유추가능하다. 기존의 연구결과에 의해서도 동해의 대부분 퇴적물은 뚜렷한 홀로세 경계를 가지는 것으로 보고되었으며 이러한 홀로세와 최종빙기간에 일어난 퇴적물의 조성차이는 빙기동안에 육성기원 퇴적물의 증가된 공급으로 해석되었다(Hyun *et al.*, 1998). 홀로세 기간에는 silt함량이 10%내외로 변화하고 있으나 전이기에 해당하는 심도 100~200 cm 구간에서 급격히 증가하여 심도 200~400 cm에서는 40%이상 증가하고 있다. 빙기에는 고위도 지방과 저위도 지방의 열경사(thermal gradient)가 심해지고 편서풍이 강한 결과로 대륙기원 물질이 더욱 쉽게 운반되었다고 생각할 수 있다. 동해의 또 다른 지역에서는 빙기동안에 증가된 풍성기원 석영(quartz)이 관찰되었으며 더욱이 이러한 현상은 빙기-간빙기간 뚜렷한 주기성을 가지고 변화하는 것으로 보고되어 있다(Dersch and Stein, 1994). 그 외 다른 해역에서도 풍성기원 퇴적물의 빙기-간빙기간 공급변화와 그에 따른 기후변동과의 관계는 밀접하게 연관되어 있다(Hoven *et al.*, 1989; Rea, 1990; Rea and Janecek, 1982; Roaldest, 1972; Taylor *et al.*, 1983; Windom, 1975). 따라서 전이기를 거치면서 빙기동안에 증가된 silt질 입자의 함량증가는 결국 퇴적물의 조성변화를 야기했으며 퇴적물의 조성변화는 다시 빙기동안에 강화된 기후영향 및 해수면 변동과 관계되는 것으로 해석할 수 있다. 또한 해수면의 상승과 결부되어 최종빙기에서 홀로세로 변화하는 전이기에서는 탄산염함량 및 C/N 비의 변화가 큰 폭으로 변화하고 있어 홀로세 및 빙기와는 다른 해양환경이었음을 지시하고 있다.

빙기에서 간빙기로 이어지는 기간에 간헐적인 쓰시마 난류의 유입은 퇴적물중 난류 저서생물의 출현을 지배하여 왔으며 특히 최종빙기에서 홀로세로 이행되는 기간에서는 뚜렷하게 이 지역의 고해양환경 변화와 밀접하게 연관되어 있다(Oba *et al.*, 1991). 그러나 이러한 변화가 빙기 및 홀로세 그 자체에서보다 이러한 전이기에서 보다 뚜렷하게 나타나고 있는 것은 이 연구의 중요한 결론으로 앞으로 이 전이기에 대한 보다 세밀한 고분해 연구가 수행되어야 할 것이다.

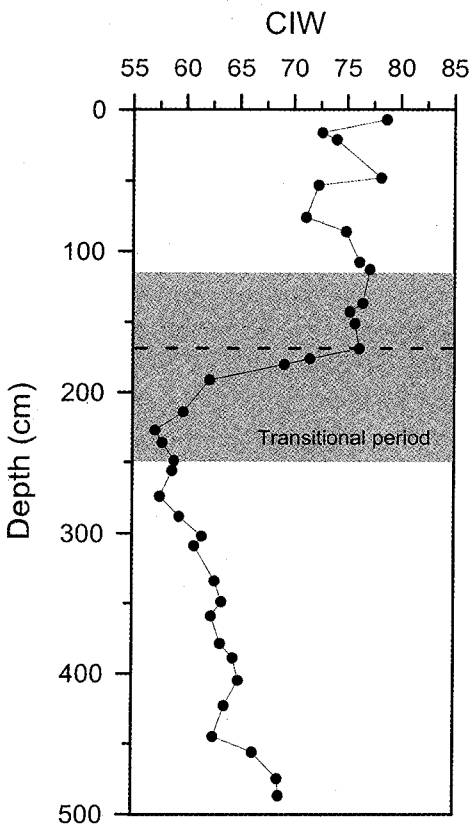

Fig. 9. CIW(chemical index of weathering) variation. Shaded area is transitional period between the glacial maximum and Holocene. Broken line indicates onset of stable CIW.

화학원소의 조합에 근거한 기후변동 기록을 지시하는 풍화지수는 최종빙기 동안의 점이적인 감소와 1만년 전을 기준으로 한 급격한 변화 그리고 홀로세 기간동안의 다소 불안정하지만 비교적 안정한 70~80 정도의 값을 보이는 특징이 있다(Fig. 9). 또한 심도 약 220 cm 이하는 하부쪽으로 풍화지수가 점이적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 최종빙기의 높은 풍화효과(weathering effect)가 홀로세가 시작되기 직전인 1.3만년 전까지 점이적으로 감소하는 기후체계가 유지되어 왔으며 약 1만년 전을 전후하여 급격한 변화를 보인 후 다시 홀로세를 경계로 하여 안정화 되었음을 지시한다. 전이기에 화학적 원소가 명료한 변이를 보이는 것은 이 퇴적물의 조성차이가 기후변동 및 퇴적물 공급원의 차이에 의해 야기되었을 가능성을 지시하고 있다. 유기탄소 및 탄산염함량에 의한 전이기의 기록과 좀더 세분하여 비교한다면, 화학적 풍화지수가 급격한 변화를 보이는 지점은 탄산염과 유기물에 근거한 전이기의 하부에 해당한다(Fig. 9). 즉, 급격한 변화가 시작되는 지점은 유기물 및 탄산염에 의한 변이점과 대체적으로 일치하고 있지만 전이기가 끝나는 시기는 서로 다르다고 할 수 있다. 따라서 화학원소의 조합에 의한 기후변동의 신호는 유기물에 근거한 해양환경변화 이전에 선행된 것으로 해석된다. 즉 기후변화가 선행된 후에 해양환경변화가 그 뒤를 따랐다고 할 수 있다. 이러한 사실은 기후변화는 해양환경 변화과 연동되어 나타나지만 시간적 차이가 있다는 사실을 지시하고 있다.

결 론

주요원소의 수직적인 변화는 빙기에서 홀로세로 이행되는 전이기(13~7 kyr)를 경계로 극적인 변화를 보이고 있으며 상부와 하부가 뚜렷하게 구분되고 있어 이 전이기를 기준으로 퇴적물의 조성차이가 뚜렷하게 나타나고 있다. 최종빙기에서 홀로세로 이행하는 전이기의 이러한 변화는 짧은 기간내에 퇴적물의 공급차이에 의해 퇴적물의 조성이 변했음을 지시한다. 입도분석결과 나타난 전이기 기간에 극적으로 증가하는 silt질 퇴적물 함량은 퇴적물 조성의 근본적 차이를 가져온 한 원인이며, 이러한 퇴적물 조성변화는 이 기간동안 해수면 변동 및 기후변동과 관계있는 것으로 생각된다. 빙기-간빙기의 전이기 초기에 풍화지수가 급격히 증가한 것은 이러한 사실을 지시하는 것으로 해석된다.

유기물의 함량변화는 최종빙기에서 홀로세로 이행되는 전이기간에 뚜렷하게 증가하고 있다. 전이기의 유기탄소 함량은 최종빙기에 비해 약 4배 정도, 그리고 홀로세에 배해 약 2배 정도 증가한 것으로 나타났다. 특히 Org.C/Carb.C에 근거한 고생물생산량은 최종빙기가 아닌 최종빙기에서 홀로세로 전이되는 시기에 크게 증가하였다. 이러한 현상은 일반적인 중위도 지역의 생물생산 형태와 다르게 나타나고 있으며 이는 최종빙기 동안에 낮아진 해수면과 고립화된 해양환경변화에 그 원인이 있는 것으로 생각된다.

탄산염함량은 홀로세 보다 빙기에 증가하고 있으며 특히 전이기 동안에 심한 변화를 보여주고 있는데 이는 저층환경의 변화에 의해 조절되었거나 빙기동안에 강화된 기후요소에 의해 탄산염이 풍성기원으로 공급되었을 가능성으로도 생각해 볼 수 있다. 또한 전이기 동안에 두 번에 걸친 탄산염의 극적인 함량변화는 해양환경이 대단히 짧은 시간내에서 변화했음을 지시하고 있다.

지화학적 기록과 기후변동간의 관계를 지시하는 화학적 풍화지수는 약 만년을 경계로 안정해지고 있으며 빙기에 강해진 편서풍의 영향으로 다량의 대륙기원 물질이 유입되었음을 지시하고 있다. 화학적 풍화지수의 전이기가 시작되는 시점은 유기탄소의 전이기와 일치하고 있으나 안정화되는 시기는 유기탄소보다 약간 빠르게 일어나고 있어 기후변화가 안정하게 된 후에 그 뒤를 이어 해양환경변화가 안정해졌음을 지시하고 있다.

사 사

이 연구는 한국해양연구소에서 수행하는 "동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화연구(BSPE 99799-00-1236-5)"의 연구결과중 일부분에 속한다. 시료채취에 도움을 주신 온누리호 승무원 및 실험실의 동료들에게 감사드린다. 아울러 심도있는 지적을 주신 박장준 박사와 익명의 심사위원님 에게도 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

한국해양연구소, 1996. 한국 대수심 해역의 지구적 해저환경 연구 (2-3차년도), BSPN 00321-950-5. 548 pp.

한국해양연구소, 1999. 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구(3차년도). BSPN 99755-00-1236-5. 388 pp.

Bahk, J.J, S.K. Chough and S-J. Han., 2000. Origin and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, **162**: 459-477.

Bahk, J.J., S.K. Kim., S.J. Han. and S.K. Chough., 1997. Origin of laminated muds and its paleocenographic implication: Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Ocean Res.*, **19**: 265-274.

Bhatt, J.J., 1974. Ti/Al ratio as chemical indicator of paleoenvironment-a note. *Chem, Geol.*, **13**: 75-78.

Dersch, M. and R. Stein., 1994. Late Cenozoic records of aeolian quartz in the Sea of Japan (ODP Leg 128, Sites 798 and 799) and paleoclimate in Asia. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, **108**: 523-535.

Goldberg, E.D. and G.O.S. Arrenhius., 1958. Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **13**: 153-212.

Gorbarenko, S.A. and Southon, J.R., 2000. Detailed Japan Sea paleocenoagraphy during the last 25 kyr: constraints from AMS dating and ^{18}O of planktonic foraminifera. *Paleogeo. Paleoclimat. Paleoecolo.*, **156**: 177-193.

Harnouis, L., 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sediment. Geol.*, **55**: 319-322.

Han, S-J., S. Huh, J.-J. Bahk, J.-H. Chun, S.-H. Kim., H.-J. Woo, H.-J. Lee, G.-H. Hong, D.-H. Shin and H.-I. Yi, 1997. Paleoenvironments near Ulleung and Dok Islands in the Ulleung Basin, East Sea of Korea. *Ocean Res.*, **19**: 71-90 (in Korean with English abstract).

Hoven, S.A., D.K. Rea., N.G. Pisias. and N.J. Shackelton., 1989. A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}O$ records: Aeolian Flux to the North Pacific. *Nature*, **340**: 296-298.

Hyun, S., S.-J. Han, and J.-J. Bahk., 1998. Major element changes in the upper Quaternary sediment of the East Sea (Sea of Japan): Their implications for the onset of Holocene. *J. Korean Soci. Oceanogr.*, **33**: 185-195.

Ichikura, M. and H. Ujiie., 1976. Lithology and planktonic foraminifera of the Sea of Japan piston core. *Bull. Sci. Mus., Ser. C*, **2**: 151-178.

Ishiwatari, R., K. Yamada, K. Matsumoto, M. Houtatsu, and H. Naraoka, 1999. Organic molecular and carbon isotopic records of the Japan Sea over the past 30 kyr. *Paleoceanography*, **14**: 260-270.

Kano, Y., 1990. Relation between increase of coral and atmospheric carbon dioxide concentration. *Umi to sora*, **65**: 259-265 (in Japanese with English abstract).

Kim, S.H., G.H. Hong., C.S. Chung. and S.-J. Han., 1997. Oxygenation level of deep water in the East Sea (Sea of Japan) since the late Pleistocene: trace metal indicator. *Ocean Res.*, **19**: 285-296.

Minai, Y., R. Matusmoto., Y. Watanabe. T. and Tominaga., 1992. Chemistry of rare earth and other trace elements in sediment from Sites 798 and 799, Japan Sea. *Proc. ODP Sci. Results*, **127/128**: 719-737.

Moorby, S.A., 1983. The geochemistry of transitional sediments recoverd from the Galapagos hydrothermal mounds field during DSDP Leg 70-implications for mound formation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**: 367-376.

Muller, P.J. and E. Suess., 1979. Productivity, sedimentation rate and sedimentary organic carbon in the ocean 1. Organic carbon preservation. *Deep-Sea Res.*, **26**: 1347-1362.

Nesbitt, H.W. and G.M. Young., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**: 715−717.

Oba, T., M. Kato., H. Kitazato., I. Koizumi., A. Omura., T. Sakai, and T. Takayama., 1991. Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, **6**: 499−518.

Park, B.K., I.C. Shin, and S.-J. Han., 1997. East Sea (Japan Sea) climatic event during the Younger Dryas and last deglaciation. *Ocean Res.*, **19**: 257−264.

Rea, D.K., 1990. Aspects of atmospheric circulation: the Late Pleistocene (0-950,000 yr) record of eolian deposition in the Pacific Ocean. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, **79**: 217−227.

Rea, D.K. and T.R. Janecek., 1982. Late Cenozoic changes in atmospheric circulation deduced from North Pacific eolian sediments. *Mar. Geol.*, **49**: 149−167.

Ricken, W., 1993. Sedimentation as a Three-Component System. Springer-Verlag, Berlin, 211 pp.

Roaldest, E., 1972. Mineralogy and geochemistry of Quaternary clays in the Numedal area, southern Norway. *Norsk. Geol. Tidsskr.*, **52**: 335−369.

Spears, D.A. and R. Kanris-Sotirios., 1976. Titanium in some carboniferous sediment from Great Britain. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**: 345−351.

Stax, Rainer and Stein Ruediger, 1994. Quaternary organic carbon cycles in t Japan Sea (ODP-Site 798) and their paleoceanographic implications. *Paleogeo. Paleoclimatol. Paleoecolo.*, **108**: 509−521.

Stein, R., 1990. Organic carbon/sedimentation rate relationship and its paleoceanographic significance for marine sediments. *Geo-Marine Lett.*, **10**: 37−44.

Stein, R., 1991. Accumulation of organic carbon in marine sediments. In: Lecture Notes in Earth Science, edited by Smodev, B., G.M. Friedman, H.J. Neugerbauer and A. Seilacher, Springer Verlag, Berlin, 217 pp.

Tada, R., I. Koizumi., A. Cramp, and A. Rahman., 1992. Correlation of dark and light layers, the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea. *Proc. ODP Sci Results*, **127/128**: 577−601.

Tada, R., 1997. Paleoenvironmental changes in and around the Japan Sea since the last glacial period. *Quat. Res. Japan*, **36**: 287−300. (in Japanese with English abstract).

Taylor, S.R., S.M. McLennan, and M.T. McCulloch., 1983. Geochemistry of loess, continental crust composition and crustal model ages. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**: 1897−1905.

Ujiie, H., M. Ichikura., 1973. Holocene to uppermost Pleistocene palnktonic foraminiferas in a piston core from off the San's district, Sea of Japan. *Trans. Palaeont. Soc. Japan, New Ser.*, **9**: 137−150.

Ware, R.J., S.V. Smith, and M.L. Reaka-Kudla, 1992. Coral reefs: source of sink of atmospheric CO_2?. *Coral reefs*, **11**: 127−147.

Windom, H.L., 1975. Eolian contributions to marine sediments. *J. Sediment. Petrol.*, **45**: 520−529.

Woo, H.J., H.K. Cheong., S.-J. Han., H.D. Chang, and S.H. Yoon., 1995. Paleoenvironments in western part of the East Sea, Korea, during the late Quaternary using benthic foraminifera. *Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 493−511.

2000년 10월 17일 원고접수
2001년 4월 18일 수정본 채택
담당편집위원: 이희준