

한반도 홀로세 온난기후 최적기 (Holocene Climate Optimum)와 지표환경 변화

남옥현*, 임재수

한국지질자원연구원 제4기질연구실

Holocene Climate Optimum and environmental changes in the Paju and the Cheollipo areas of Korea

Wook-Hyun Nahm, and Jaesoo Lim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

요약 : 본 연구는 한반도에서 홀로세 동안 온난기후 최적기 등 기후변화와 함께 지표환경의 변화 시기와 양상을 알아보기 위한 것이다. 경기도 파주시 운정동의 곡간 퇴적물 (UJ-03, UJ-12 시추공)과 충청남도 태안군 소원면 의항리 (천리포 수목원)의 습지 퇴적물 (CL-4 시추공)을 대상으로 시추시료를 채취하였다. 파주시 운정동 지역에서는 약 7100-5000년 정도에 잔자갈과 왕모래 등 조립질 퇴적물이 퇴적되는 양상을 보이며, 약 5000-2200년 정도에는 이탄질 퇴적물이 쌓이고, 약 2200년 이후에는 간헐적으로 퇴적이 되고 토양화 작용을 받는 양상을 보인다. 천리포 수목원 지역에서는 약 7360-5000년 정도에 육성 호수가 발달하며, 약 5000-2600년 정도에는 호수 환경에서 유기물 퇴적이 점차 증가하는 양상을 보이고, 약 2600년 이후에는 이탄층이 두껍게 형성된다. 두 지역에서 지표환경의 변화 양상은 지역적, 지형적 요인에 따라 서로 다르게 나타나지만, 변화 시기는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 지표환경의 변화에는 강수량 또는 유수의 세기 (에너지) 등 수문학적 요인이 주요하게 작용한 것으로 보인다. 또한 천리포 수목원 지역은 연안에 위치한 관계로 해수면 상승 높이에 따라 지형이 크게 변화하였을 것으로 생각할 수 있는데, 이에 대한 연구는 앞으로 더 진행되어야 할 것이다.

주요어 : 홀로세, 온난기후 최적기, 기후변화, 지표환경, 해수면

Abstract : Three sediment cores from two different locations (UJ-03 and UJ-12 cores of valley sediment in Paju area, and CL-4 core of wetland sediment in Cheollipo area) along the western Korean Peninsula yield crucial information on the timing and spatial pattern of century-scale climate changes and subsequent surficial responses during the Holocene. In Paju area, the sediments included abundant coarse-grained sediment (coarse sands and pebbles) from 7100 to 5000 cal. yrBP, total organic carbon (TOC) values showed a marked increase from 5000 to 2200 cal. yrBP, several intermittent depositional layers were observed from 2200 cal. yrBP. In Cheollipo area, lake environment developed from 7360 to 5000 cal. yrBP, the deposition of organic materials increased from 5000 to 2600 cal. yrBP, peatland formed from 2600 cal. yrBP. The two patterns of surficial responses to the climate changes through the Holocene are different to each other. This might be due to the dissimilarity in geomorphic conditions. However, the approximate simultaneity of environmental changes in two areas shows that they both can be correlated to the major climate changes. Two areas which have undergone significant changes indicated that the

* corresponding author: Wook-Hyun Nahm, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, 305-350, Korea (e-mail: nahmwh@empal.com, phone: +82-42-868-3119, fax: +82-42-868-3413)

hydrological factors including precipitation and strength of water flow were most responsible for the landscape and geomorphic evolutions. Although the upwards trend in relative sea-level also played a primary role for environmental changes in coastal area (Cheollipo area), detailed studies have still to be undertaken.

Key Words : Holocene, Climate Optimum, climate changes, surficial changes, sea-level

1. 서론

마지막 빙하기 이후 약 1만년(11500 cal. yrBP) 전에서 현재에 이르는 홀로세 동안에는 수차례에 걸쳐 기후환경의 변동이 있었으며, 이러한 과거 기후변화는 당시의 지형 변화나 퇴적물의 이동과 같은 육상 지표환경 뿐만 아니라 생태계와 인간 활동에도 지대한 영향을 주었다(Polyak and Asmerom, 2001; Wu and Liu, 2004). 앞으로 기후변화가 어떻게 전개될지에 관심이 높아지면서, 과거 홀로세 동안 기후가 언제 어떻게 왜 변화하였는지, 또 과거 기후변화에 따라 지표환경은 어떻게 반응하였는지에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

우리나라를 포함한 동아시아 일대에서는 동아시아 문순이 특히 강수량과 관련된 기후변화의 주요한 원인이다(Yuan *et al.*, 2004; Shao *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2009). 동아시아 문순은 홀로세가 시작하면서 강화되었으며 홀로세 중-후기 이후에 약화되었는데, 이러한 경향은 대체로 북반구 여름 태양 일사량의 변화와 유사한 것으로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2008). 중국에서는 동굴 생성물(Yuan *et al.*, 2004; Shao *et al.*, 2006; Cosford *et al.*, 2008), 이탄 습지(Hong *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2005), 호수 퇴적물(Hodell *et al.*, 1999; Xiao *et al.*, 2004; Shen *et al.*, 2005), 해양 퇴적물(Wang *et al.*, 1999; Gupta *et al.*, 2003; Tao *et al.*, 2006) 등 다양한 퇴적물에서 여러 방법을 통하여 홀로세 동안의 기후변화 시기와 양상을 연구하고 있다.

특히 홀로세 온난기후 최적기(Holocene Climate Optimum) 동안에 표층의 기온은 현재보다 지역

에 따라 약 1-4°C 정도 높았던 것으로 알려져 있다(Fisher and Koerner, 2003). 현재 온난화가 진행되면서 앞으로 연평균 기온이 상승할 때에 지표면에서는 어떠한 일이 일어날지에 대하여 많은 관심이 쏠리고 있다. 실제로 온도가 높았던 홀로세 온난기후 최적기 동안 지표환경이 어떻게 변화하였는지를 찾아보면 앞으로의 지표환경 변화를 예측하는데에 큰 도움이 될 것으로 생각할 수 있다. 그러나 우리나라에서는 아직 홀로세 온난기후 최적기에 대한 연구가 많지 않다. 홀로세 온난기후 최적기의 시기, 온도 변화의 정도, 강수량 변화의 유무, 식생 변화의 정도 등 기본적인 연구도 부족한 실정이다(Yi *et al.*, 2008; Nahm *et al.*, 2011).

본 연구는 경기도 파주시 운정동에서 곡간 퇴적물, 충청남도 태안군 소원면 의항리(천리포 수목원)에서 습지 퇴적물을 대상으로 홀로세, 특히 온난기후 최적기 동안 지표환경이 언제 어떻게 변화하였는지를 살펴보기 위한 것이다. 온난기후 최적기의 시기를 밝히는 것은 지역에 따른 기후구배(climate gradient) 양상의 변화를 추적하고, 해수면 변화 등 주요한 지형변화 요인을 구분하고, 기후변화 메커니즘에 대한 정보를 제공하는데에 가장 기본적이고 핵심적인 작업일 것이다.

2. 연구지역

2.1. 경기도 파주시 운정동 곡간 퇴적물

장월평천(유로 길이 약 7.8 km)은 경기도 파주시 일대를 서남 방향으로 흘러 한강(유로 길이 약 481.7 km)으로 흘러드는 작은 지천이다. 연구지역

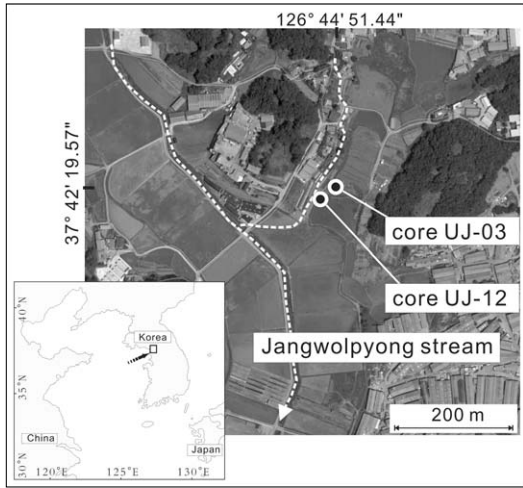


Fig. 1. Location of study area(Paju) and the coring sites(UJ-03 and 12).

은 장월평천과 한강 합류부에서 장월평천 상류로 약 7 km 올라온 곳에 위치하고 있는 낮은 구릉 사이의 폭 약 150 m 정도의 편평하고 경사가 완만한 계곡이며, 해발고도는 약 18.7-19.3 m 정도이다. 연구지역은 하천에 의한 범람의 영향을 받기 보다는 상부 사면에서 유입되는 물질이 주로 퇴적된 것으로 보인다. 실제로 시추 지점의 지형이 비교적 평탄하고 넓어 하천에 의한 범람원과 같은 형태로 보이나, 주변 하천의 규모와 유역의 규모를 고려하여 보면 침식분지와 같은 형태로 발달했을 가능성이 높다(그림 1).

연구지역을 중심으로 남쪽은 비교적 평탄한 범람원이 분포하며, 북쪽으로는 40-60 m 정도 높이의 구릉이 분포하고 있다. 선캠브리아기의 호상편마암이 기반암을 이루고 있다(안건상 외, 1998). 연구지역 일대의 연평균 기온은 11.8℃, 가장 추운 1월 평균기온은 -4.9℃, 가장 더운 8월 평균기온은 25.5℃, 연강수량은 1,214 mm이다. 토지이용 상황을 보면 연구지역의 남쪽 평탄한 곡저(valley bottom)는 주로 논으로 이용하고 있으며, 주변 구릉지의 경사면은 삼림지, 밭 등으로 이용하고 있다.

2.2. 충청남도 태안군 소원면 의항리(천리포 수목원) 습지 퇴적물

천리포 습지 퇴적물이 분포하는 충청남도 태안군 소원면 의항리 일대는 선캠브리아기의 화강편마암 복합체를 기반암으로 하며, 구암맥이 북동-남서 방향으로 발달한다(장태우와 이상용, 1982). 본 지역의 동쪽은 기반암 산지가 둘러싸고 있으며, 서쪽은 사구와 사구성 구릉에 의하여 바다와 떨어진 저지대를 이루고 있다. 이 저지대에 퇴적층이 두껍게 분포하고 있다. 천리포 해수욕장 부근에는 우리나라 최초의 민간 수목원인 천리포 수목원(1979년 설립)이 있는데, 수목원 조경의 일환으로 인공호소를 조성하여 퇴적층에서 파낸 토탄을 시비용으로 이용한 바 있으며, 천리포 수목원 북쪽으로도 논으로 조성된 곳 하층부에 토탄층 일부가 분포하고 있다. 연구지역은 천리포 해수욕장 북측에 위치한 천리포 수목원 내의 논이며, 서쪽의 서해안에서 약 200 m 정도 떨어진 곳이다(그림 2).

천리포 주변 지역은 서쪽으로 바다, 동쪽으로는 해발 약 120 m의 높지 않은 산으로 이뤄지는 구릉지와 작은 분지가 존재하는데 따른 국부 기후요소의 영향을 받아 여름에는 내륙보다 서늘하고 겨울

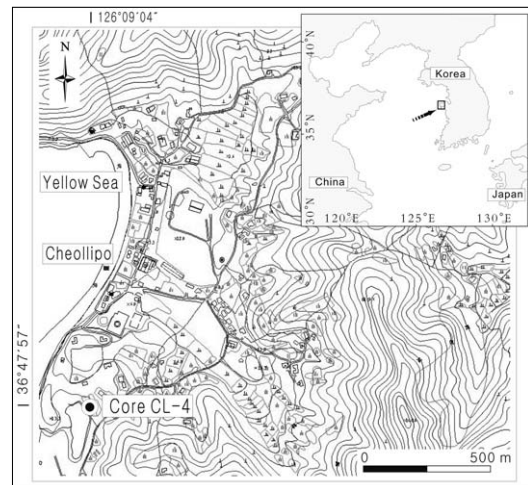


Fig. 2. Location of study area(Cheollipo) and the coring sites(CL-4).

에는 오히려 온난하여 난대성 식물에서 아한대성 식물들까지 다양한 식물들이 분포한다. 1974년부터 기록된 수목원의 기상자료에 의하면 연평균 강수량은 약 1000 mm로 다른 지역에 비하여 다소 적은 편이고 겨울의 최저온도는 평균 -10°C 이하로 내려가지 않는다. 여름에도 최고온도가 30°C 를 상회하는 경우가 7-8월 중의 불과 몇 일에 불과하므로 내륙에 비하여 서늘하다.

3. 연구방법

퇴적물 채취 및 기재: 퇴적물 채취를 위하여 표준 유압식 피스톤 시료채취기를 이용한 시추조사를 실시하였다. 파주시 운정동에서는 UJ-03($126^{\circ}44'51''\text{E}$, $37^{\circ}42'19''\text{N}$)(고도 16.97-18.67 m, 길이 1.70 m), 그리고 하류 방향으로 10.71 m 내려와서 UJ-12($126^{\circ}44'51''\text{E}$, $37^{\circ}42'19''\text{N}$)(고도 16.77-18.53 m, 길이 1.76 m) 등 2개의 시추공에서 시추조사를 실시하였다. 천리포 수목원에서는 해안선에서 약 200 m 정도 떨어진 천리포 수목원 내의 습지에서 CL-04($126^{\circ}09'04''\text{E}$, $36^{\circ}47'57''\text{N}$)(고도 -1.65-3.74 m, 길이 5.39 m) 시추공 시료를 획득하였다.

퇴적물 기재는 실험실에서 육안 관찰, 사진 촬영, soft X-radiograph로 실시하였고, 색상은 토양색 측정기 SPAD-503(Minolta Co. Ltd., Japan)과 Munsell soil charts(1975)를 이용하였다.

입도 분석: 퇴적물의 입도를 측정하기 위하여 0.02-2000 micro-m의 측정범위를 갖는 Mastersizer 2000(Malvern Instruments, Ltd., Worcestershire, UK) 장비를 이용하여 Laser Diffraction 방법으로 입도분석을 실시하였다. 필요 구간에서 입도분석을 위한 부시료(subsample)를 채취하여 2000 micro-m 이하의 fraction만 선별하였으며, 이를 과산화수소수(H_2O_2)에 반응시켜 유기물을 제거하

였다. 또한 아세트산나트륨(CH_3COONa) 용액에 아세트산(CH_3COOH)을 첨가하여 pH를 5로 맞추고, 이를 시료와 교반 반응시켜 탄산염을 제거하였다. 이온수로 시료를 세척한 후에는 수산화나트륨(NaOH)을 이용하여 pH를 10으로 맞춘 피로인산나트륨($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) 용액을 첨가, 교반 분산하여 입도분석을 실시하였다.

유기지화학(C/N/S) 분석: 분말화된 퇴적물 부시료(subsample) 5 mg을 aluminum capsule에 넣고, FlashEA-1112(Thermo Finnigan S.p.A., Milan, Italy) 기기를 이용하여 1100°C 의 combustion 온도에서 TC(total carbon), TN(total nitrogen), TS(total sulfur) 함량을 측정하였다. 또 분말시료에 10% hydrochloric acid를 첨가하여 1일 이상 충분히 반응하도록 방치하여 탄산염을 제거한 뒤에, pH 6-7 정도가 될 때까지 증류수로 약 10회 정도 세척하여 chloride를 모두 제거하였다. 그리고 다시 FlashEA-1112 기기를 이용하여 TOC(total organic carbon) 함량을 측정하였다. 각 함량의 단위는 weight %이다.

연대측정 분석: 퇴적층의 층서를 확립하고 정확한 퇴적기작 및 퇴적환경을 해석하기 위하여 한국 지질자원연구원의 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer, AMS)를 이용한 ^{14}C 연대측정을 실시하였다. 연대측정을 위한 시료는 sediment bulk 또는 식물 파편을 이용하였다. 측정된 방사성 탄소연대(radiocarbon age, ^{14}C yrBP)는 CalPal07 program(www.calpal-online.de)을 이용하여 보정연대(calibrated age, cal. yrBP)로 계산하였다(Danzeglocke *et al.*, 2008). 또한 각 층위의 연대는 보정연대 사이의 선형 보간법(linear interpolation)으로 구하였다.

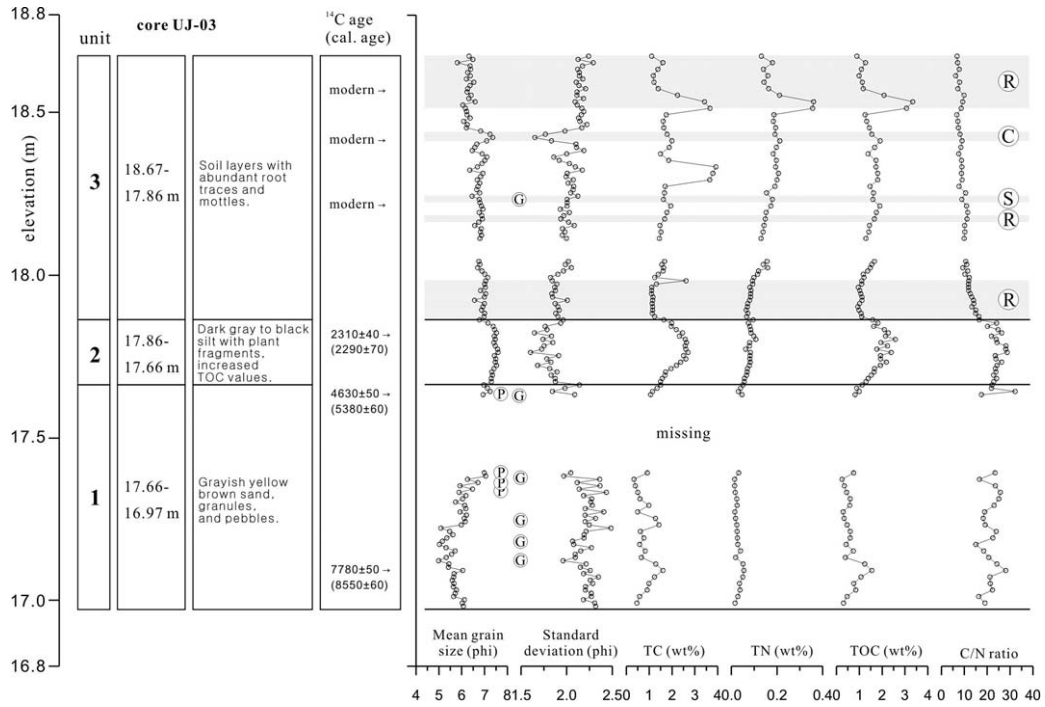


Fig. 3. Simplified radiocarbon-dated sediment strata of core UJ-03 with multiproxy data(R: root cast layer, C: clay layer, S: sand layer, P: pebble, G: granule).

Table 1. AMS ¹⁴C dates from Core UJ-03

sample ID	elevation(m)	material	¹⁴ C year	δ ¹³ C(‰)	calendar year
ISA080011	18.57	sediment bulk	modern	-32.7	modern
ISA080012	18.42	sediment bulk	modern	-27.6	modern
ISA080013	18.22	sediment bulk	modern	-29.9	modern
ISA080014	17.82	sediment bulk	2310 ± 40	-26.9	2290 ± 70
ISA080015	17.64	sediment bulk	4630 ± 50	-27.6	5380 ± 60
ISA080016	17.10	sediment bulk	7780 ± 50	-23.7	8550 ± 60

4. 연구 결과

4.1. 파주시 운정동 UJ-03 시추공(길이 1.70 m)

UJ-03 시추공 시료는 하부에서부터 암상에 따라 unit 1(16.97-17.66 m), unit 2(17.66-17.86 m), unit 3(17.86-18.67 m) 등 크게 3개의 unit으로 구분할 수 있다(그림 3). 연대측정 결과는 표 1에 표시하였다. unit 1의 일부(17.40-17.62 m)에서는 시료를 회수하지 못하였는데, 이 부분에 특

히 자갈과 모래 등 조립질 퇴적물이 많이 들어있기 때문인 것으로 판단된다. unit 1은 주로 조립질 모래와 왕모래로 구성된다. 고도 17.11-17.28 m 구간에는 모래와 실트질 점토가 서로 교호하는 양상을 보이면서 분포하고 있으며, 고도 17.32-17.40 m 구간에는 직경 1-2 cm 정도의 잔자갈도 다량 포함한다. unit 2는 실트질 점토로 구성되며 식물 파편을 일부 포함한다. 전체적으로 암회색이 우세하다. unit 3은 주로 실트와 세립질 모래로 구성된

다. 암회색, 암적회색, 암갈색 등 색상이 다양한 점, 반점모양(mottle)이 나타나는 점 등으로 미루어 토양화 작용을 받은 것으로 보인다. unit 3에서는 고도 17.87-17.98, 18.16-18.18, 18.22-18.24, 18.41-18.44, 18.51-18.67 m 구간 등, 식물뿌리 흔적(P), 모래(S), 점토(C) 등이 집중적으로 분포하는 5개의 layer를 구분할 수 있다. 전체적으로 TOC값은 1-2 wt% 정도인데, unit 1에서는 TOC값이 평균 0.6 wt% 정도로 unit 2의 1.7 wt%, unit 3의 1.4 wt%와 비교하여 절반 이하의 값을 보이고 있다. unit 2에서는 고도 약 17.66 m 부근에서부터 상부로 가면서 TOC값이 최대 약 2.5 wt% 까지 증가했다가 고도 약 17.85 m 까지 점차 감소하는 특징적인 양상을 볼 수 있다. TOC/TN 비를 보면 unit 1에서 대체로 18-28 정도, unit 2에서 20-32 정도의 값을 보인다. 그러나

unit 3에서는 TOC/TN 비가 평균 약 10 정도이고, 상부로 가면서 약간 감소하는 경향이 특징적이다.

4.2. 파주시 운정동 UJ-12 시추공(길이 1,76 m)

UJ-12 시추공 시료는 하부에서부터 암상에 따라 unit 1(16.77-17.49 m), unit 2(17.49-17.78 m), unit 3(17.78-18.53 m) 등 크게 3개의 unit으로 구분할 수 있다(그림 4). 연대측정 결과는 표 2에 표시하였다. unit 1은 연회색에서 암갈색의 색상을 보이는 모래 또는 왕모래로 구성된다. 고도 17.26-17.49 m 구간에는 직경 1-2 cm 정도의 잔자갈을 포함한다. unit 2는 암회색이나 흑색의 점토질 실트로 구성되며, 식물과편도 상당히 많이 포함하고 있다. unit 3은 주로 암갈색을 보이는 실트 및 세립질 모래로 구성된 토양층이다. 17.78-

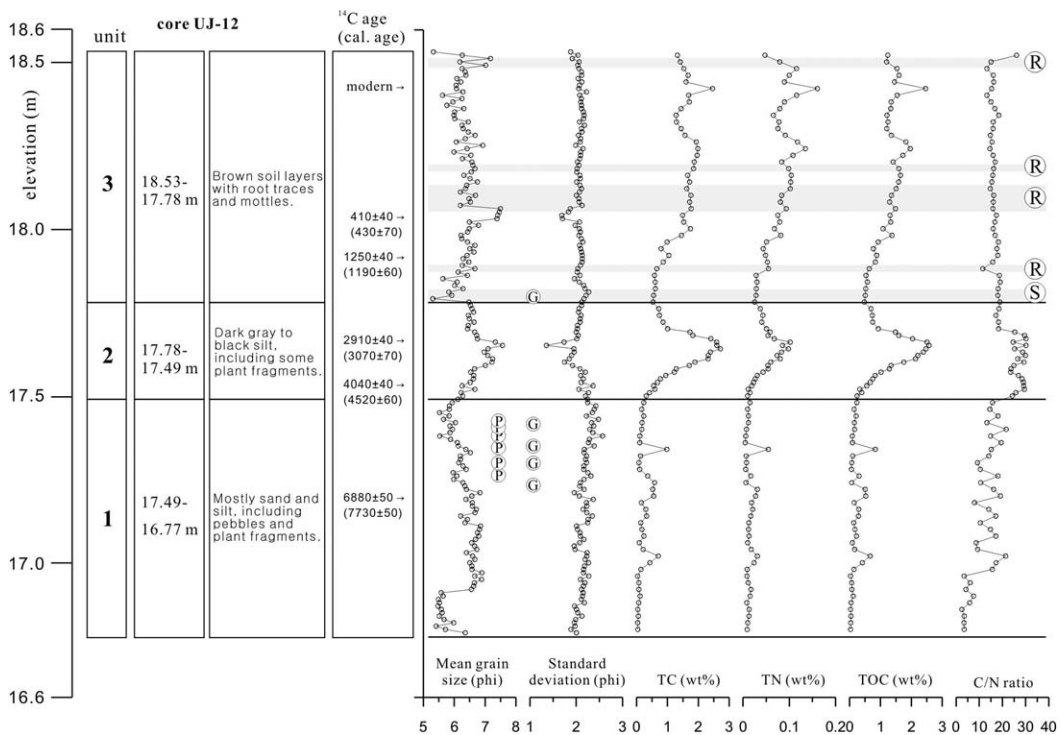


Fig. 4. Simplified radiocarbon-dated sediment strata of core UJ-12 with multiproxy data(R: root cast layer, S: sand layer, P: pebble, G: granule).

Table 2. AMS ^{14}C dates from Core UJ-12

sample ID	elevation(m)	material	^{14}C year	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	calendar year
IWD070117	18.42	plant fragment	modern	-29.9	modern
ISA080022	18.04	sediment bulk	410 ± 40	-28.4	430 ± 70
ISA080023	17.92	sediment bulk	1250 ± 40	-24.6	1190 ± 60
ISA080024	17.67	sediment bulk	2910 ± 40	-28.6	3070 ± 70
ISA080025	17.54	sediment bulk	4040 ± 40	-27.2	4520 ± 60
ISA080009	17.20	sediment bulk	6880 ± 50	-25.3	7730 ± 50

17.82 m 구간은 모래가 layer 형태로 협재하고 있다. 이 모래 layer의 하부 경계에는 생물활동의 흔적으로서 서식관(burrow) 흔적을 관찰할 수 있다. 이 서식관은 3-4 cm 정도의 길이이며, 모래 layer의 모래로 채워져 있다. 또한 17.87-17.89, 18.05-18.13, 18.17-18.19, 18.48-18.51 m 등 4개 구간에서는 특히 식물뿌리 흔적이 집중적으로 분포하고 있다. TOC값은 전체적으로 약간씩 증가하다가 unit 2의 고도 약 17.50 m 부근에서 크게 증가하여 약 2.5 wt% 까지 증가했다가 다시 고도 약 17.71 m 부근에서 감소하는 양상을 관찰할 수 있다. unit 1과 unit 2에서 TOC/TN 비는 대체로 10-20 사이에서 큰 폭으로 변화하는 양상을 보이며, 특히 17.5 m 부근에서는 30-40 사이에서 변화하는 양상을 보인다. 그러나 unit 3에서는 대체로 14-16 정도로 안정된 값을 보이고 있다.

4.3. 천리포 수목원 CL-4 시추공(길이 5.39 m)

CL-4 시추공 시료는 하부에서부터 암상에 따라 unit 1(-1.65-0.04 m), unit 2(0.04-2.47 m), unit 3(2.47-3.21 m), unit 4(3.21-3.74 m) 등 모두 4개의 unit으로 구분할 수 있다(그림 5). 연대측정 결과는 표 3에 표시하였다. unit-1은 암녹회색(10GY4/1)의 이토(mud)로 구성된다. 특히 최하부에서 고도 -0.80 m 부근까지는 왕모래나 조립질 모래를 포함하고 있으며, 평균입도값의 변동도 심하여 퇴적환경이 불안정했었던 것으로 생각할 수 있다. TOC와 TN값은 매우 낮으나, TOC/TN 비는 10 이하의 값을 보이며 TOC/TS 비도 2 정도를 나타내고 있다. unit 2는 대체로 세립질 미사로 구성되며, 미세한 엽리구조가 전체적으로 나타난다. 하부에는 회녹색(5Y4/2)이 우세한 반면 상부로 가면서 녹흑색(5Y3/1)이 우세하다. TOC와 TN

Table 3. AMS ^{14}C dates from Core CL-4

sample ID	elevation(m)	material	^{14}C year	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	calendar year
SNU04-445	3.07	sediment bulk	1410 ± 40	-26.84	1330 ± 20
SNU04-446	2.76	plant fragment	1840 ± 70	-32.70	1780 ± 80
SNU04-447	2.48	sediment bulk	2430 ± 110	-27.12	2530 ± 150
SNU04-448	2.11	sediment bulk	4560 ± 80	-24.11	5230 ± 150
SNU04-449	1.20	sediment bulk	5660 ± 30	-29.45	6450 ± 30
SNU04-450	0.68	sediment bulk	5820 ± 150	-30.42	6650 ± 170
SNU04-451	0.63	sediment bulk	6050 ± 40	-28.59	6900 ± 60
SNU04-452	0.21	sediment bulk	6330 ± 40	-29.11	7260 ± 50
ISa070041	-0.04	sediment bulk	7430 ± 50	-23.68	8270 ± 60
SNU04-454	-0.24	plant fragment	6640 ± 40	-26.72	7530 ± 40
ISa070040	-0.66	sediment bulk	7100 ± 100	-22.71	7920 ± 100
SNU04-456	-1.44	sediment bulk	8920 ± 150	-29.40	9980 ± 210

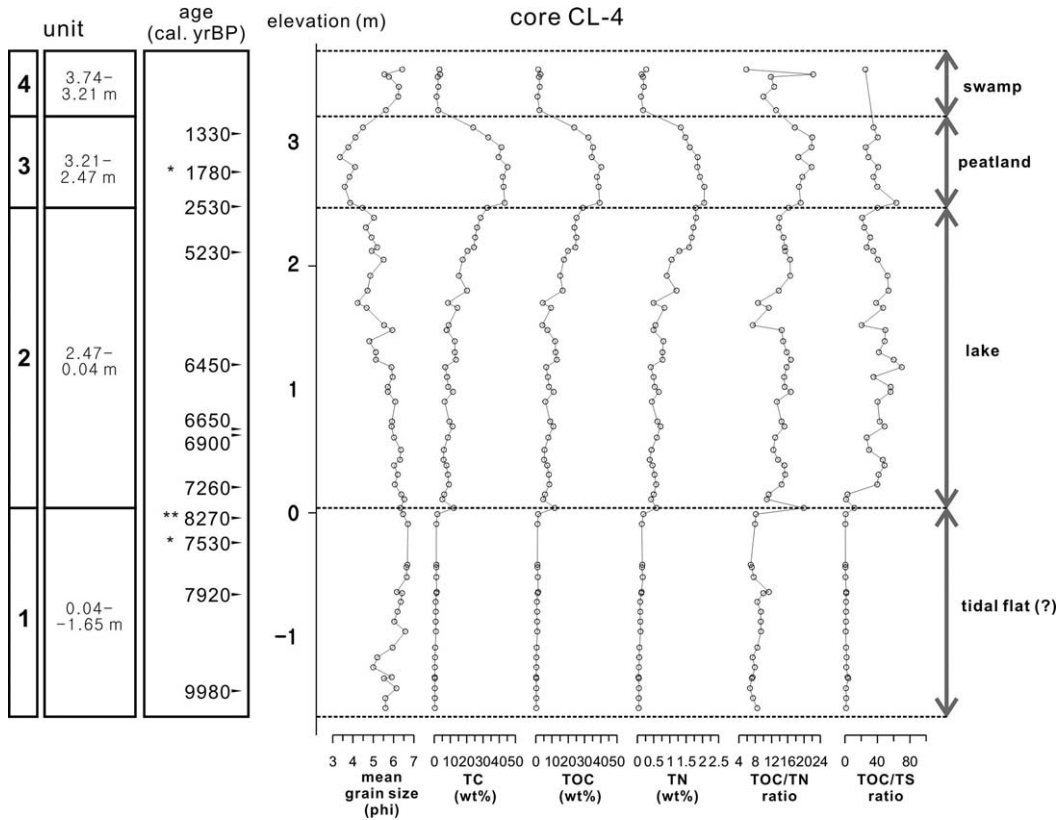


Fig. 5. Simplified radiocarbon-dated sediment strata of core CL-4 with multiproxy data.

값도 작은 폭으로 증가하며, TOC값은 대략 10% 전후의 값을 보인다. TOC/TN 비도 10 이상의 값을 나타내나, 20을 넘지는 않아 주변의 육상 고등 식물에서 유래한 유기물과 함께 수생 조류 등의 영향이 있었음을 지시해 준다. 고도 1.20 m 부근에서는 물밤(마름, *Trapa*)이 집적되어 나타나며, 엽리구조의 양상도 약간 불명확하고 보다 두껍게 나타난다. unit 3은 분해가 심하게 진행된 식물 잔뿌리 등 식물 파편을 다량 포함하고 있으며, 색상도 검정색(N2/1)이 우세하게 나타나고 있다. 평균입도는 세립질~중립질 미사 정도이며, 전체적으로 대체로 괴상을 보이거나, 일부 엽리구조가 희미하게 관찰되기도 한다. TOC와 TN값이 크게 증가하여 유기물 함량이 매우 높은 것을 알 수 있다. 특히

TOC값은 40%까지 높게 나타난다. TOC/TN 비는 20 이상의 값을 보여 유기물 대부분이 육상에서 유래한 것임을 시사하고 있다. 이 구간에서 TS값도 높게 나타나는데, 습지에서 일부 환원환경이 형성되었을 때에 황철석 등 황화광물이 형성되어 높은 TS값을 보이는 것으로 생각할 수 있다(Farooqui and Bajpai, 2003). unit 4에서는 전체적으로 식물 파편 등 유기물 함량은 낮은 것으로 보인다. 이는 TOC와 TN값이 크게 감소한 것에서도 확인할 수 있다. 고도 3.55 m 부근에서는 조립질 미사의 함량이 일시적으로 증가하면서 TOC/TN 비도 일시적으로 증가하고 있는데, 이는 홍수 등 범람에 의하여 육성 영향을 받은 것으로 생각할 수 있다.

5. 토론

5.1. 파주시 운정동의 홀로세 퇴적환경

5.1.1. 7100–5000 cal. yrBP: 잔자갈의 출현

6400 14C yrBP(7100 cal. yrBP)를 기준으로 그 이전에는 잔자갈이 나타나지 않는다. 그러나 6400 14C yrBP 이후에는 직경 2–3 cm 정도의 원마도가 불량한 잔자갈과 왕모래가 다량 산출된다. 연구지역 일대의 하천(장월평천)이 산사면에서 계곡으로 흐르면서 기울기가 급변하는 변곡점(nickpoint)에서 약 200 m 정도 떨어진 곳에 시추 지점이 위치하고 있으며, 시추 지점 일대의 경사는 약 0.99° 정도로 매우 완만하다. 또한 하천의 규모가 작고 하천 유출량도 적어서 퇴적 당시 하천이 조립질 퇴적물을 다량으로 운반하기는 어려웠을 것으로 보인다. 따라서, 잔자갈과 왕모래 등 조립질 퇴적물은 주변의 가까운 산사면에서 사면 작용으로 퇴적된 것 또는 일시적인 강한 하천 작용으로 퇴적된 것으로 생각할 수 있다. 일반적으로 강한 폭풍 때와 같이 강수량이 크게 증가할 때에 산사면이 침식되는 것으로 알려져 있다(Wells and Harvey, 1987). 식생이 풍부한 경우에는 지표수의 흐름(runoff)이 줄어들어 산사태가 일어나기 어렵게 되지만(Lespez *et al.*, 2008), 강수량 또는 강수 강도가 임계점(threshold)를 넘어설 경우에는 충분히 산사면 붕괴가 일어날 수 있다. 이 시기에 많은 강수량으로 인하여 조립질 퇴적물이 운반되어 계곡에 퇴적된 것으로 생각할 수 있으며, 이러한 현상은 6400 14C yrBP(7100 cal. yrBP) 이후에 본격화된 것으로 추정할 수 있다.

5.1.2. 5000–2200 cal. yrBP: TOC값의 증가

UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 1에서는 총유기탄소(TOC) 함량이 매우 낮다. unit 2와 3과 비교하여 자갈, 왕모래, 모래 등 상대적으로 조립질 입자로 구성되어 있는 unit 1에서는 산소를 포함하는 지하

수 또는 공극수가 쉽게 흐를 수 있었으며, 이로 인하여 유기물이 산화, 분해되어 낮은 TOC값을 보이고 있는 것으로 생각할 수 있다. 그러나, UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 2(5000 cal. yrBP 이후)에서는 TOC값이 크게 증가하는 양상이 특징적이다. TOC값은 퇴적물의 유기물이 운반-집적된 과정의 종합적인 결과라고 할 수 있으며, 지역적 생물 자원의 총량(biomass)을 간접적으로 지시한다고 할 수 있다(Meyers, 2003; Zhou *et al.*, 2004). 그러므로 TOC값은 지역적 식생 분포에 영향을 미치는 강수량의 변화를 반영할 수도 있으며, 수생 초본류(aquatic grasses, sedges)가 번성할 수 있는 습지 환경의 변화를 반영할 수도 있다. 또한, TOC값이 높다는 것은 산소가 부족하든지 온도가 낮아 유기물이 잘 보존될 수 있는 환경이었음을 지시할 수도 있다(Meyers and Ishiwatari, 1993; Meyers and Lallier-Verges, 1999). UJ-03과 UJ-12 시추공의 추상도를 보면 실트나 모래 위에 TOC값이 2.5 wt% 정도로 높은 유기물이 풍부한 퇴적층이 형성되어 있는데, 이는 4400 14C yrBP(5000 cal. yrBP) 시기에 연구지역 일대에서 습지화 과정(paludification)이 일어난 결과로 보인다(Kremenetski *et al.*, 2003). 일반적으로 습지 형성은 온도 하강 또는 강수량 감소 등 기후변화로 인한 퇴적물 공급 변화, 수문학적 조건의 변화 등에 기인하는 것으로 알려져 있다(Meyers and Ishiwatari, 1993; Meyers and Lallier-Verges, 1999; Kremenetski *et al.*, 2003; Wust and Bustin, 2004).

5.1.3. 2200 cal. yrBP – modern: 간헐적 퇴적 및 높은 퇴적율

UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 3 하부의 추정연대는 모두 2100 14C yrBP(2200 cal. yrBP)이다. unit 3은 모두 주로 실트와 세립질 모래로 구성된다. unit 3에는 갈색, 암갈색, 암회색, 암적회색 등 다양한 색상을 보이며, 반점모양(mottled)을 보이며, 식물뿌리 흔적이 나타나며, 식물과편도 다량

포함하고 있는 등의 특징이 있는데, 이러한 점으로 미루어 unit 3은 토양화 작용을 받은 것으로 보인다. unit 3에서는 식물뿌리 흔적이 집중적으로 나타나는 layer나 모래나 점토가 얇게 분포하는 layer 등 몇몇 layer를 인지할 수 있는데, 이들 각각의 layer는 일시적인 퇴적 중단을 대표하는 면으로 볼 수 있다. 즉, 퇴적물이 어느 정도 퇴적된 후에 퇴적이 중단되고, 퇴적면이 대기중에 노출되면서 생물이 활동을 한다든지 또는 식물이 뿌리를 내리고 자라게 된다든지 하면서 퇴적층 상부는 토양화 작용을 받게 된 것으로 판단할 수 있다. 또 모래나 점토가 얇게 분포하는 layer는 유수와 같은 어떤 작용에 의하여 일시적으로 퇴적된 것으로 볼 수 있는데, 이러한 층의 존재는 그 상하부에서 퇴적작용이 연속적이 아니라 간헐적이었다는 것을 시사한다. 또한 퇴적이 중단됨에 따라 퇴적면 하부의 퇴적층 일부가 침식되었을 가능성도 배재할 수는 없을 것이다. UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 3에서도 하나의 특징은 퇴적율이 각각 0.37, 0.34 mm/yr로 UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 2에서의 퇴적율 각각 0.07, 0.10 mm/yr 보다 3-5배 이상 높다는 점이다. 이렇게 UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 3은 간헐적인 퇴적, 퇴적 중단, 그리고 높은 퇴적율이 특징적이다. UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 3의 몇몇 간헐적인 퇴적 layer는 돌발적인 물의 흐름에 의하여 퇴적된 것으로 보인다. 보통 돌발적인 물의 흐름은 일반적인 물의 흐름 보다 많은 양의 퇴적물을 운반하는 것으로 알려져 있으며 (Laronne and Reid, 1993), 이러한 사실에서 높은 퇴적율을 설명할 수 있다. 또한 유역 내에 식생 피복이 제거된 불안정한 산사면이 존재한다면 식생 피복이 있는 산사면과 비교하여 동일한 강수량이나 강수강도에 의해서도 훨씬 많은 양의 퇴적물이 침식될 수 있다. 돌발적인 물의 흐름의 원인으로, 기후변화에 따른 강수 양상의 변화, 강수량의 증가, 인간활동의 영향 등 여러 가지를 생각할

수 있다. UJ-03과 UJ-12 시추공 unit 3에서 볼 수 있는 간헐적인 퇴적과 높은 퇴적율의 원인은 벌목 등과 같은 인간활동에 의한 토지이용의 변화로 보는 것이 타당할 것이다(Lang, 2003; Macklin *et al.*, 2005; Ward *et al.*, 2009).

5.2. 천리포 수목원의 홀로세 퇴적환경

unit 1은 7360 cal. yrBP 이전의 퇴적물로 구성되며, 고도는 -1.65에서 0.04 m까지 이다. 류은영 외(2005)는 unit 1에서 해성 구조를 기재하고 해수면 상승시기에 형성된 간석지 환경으로 해석한 바 있다. 한편, unit 1에서 화분을 분석한 장병오 외(2006)은 이 시기가 비교적 온난하고 습윤한 냉온대 중부/산지형 낙엽활엽수림이 우점한 시기로 해석하고, 해수의 영향과 관련하여서는 명아주과(Chenopodiaceae)의 화분 증거를 제시한 바 있다. 본 연구에서도 TOC/TS 비가 2 정도로 측정되어 해수 영향의 가능성이 있을 수 있는 것으로 해석할 수 있다. 한반도 서해안에서의 해수면 변동에 대해서 크게 두 가지 서로 다른 견해가 있는데, 하나는 홀로세 동안 해수면은 진동(fluctuation)을 하면서 상승했으며 6000년 전 정도에 해수면 고도가 현재보다 2-5m 정도 높았다고 하는 주장(박용안과 Bloom, 1984; 박용안 외, 1994; 장진호 외, 1996; Lee and Yoon, 1997; Chough *et al.*, 2004), 다른 하나는 해수면은 점진적(smooth)으로 상승했으며 6000년 전 정도에는 현재보다 낮은 위치에 있었다는 주장(Jo, 1980; 이동영, 1987; 윤순옥, 1996, 1997; 황상일, 1998)이다. 아직도 이에 대한 논의가 계속되는 중이며, 본 unit 1의 퇴적환경은 이러한 관점에서 매우 중요하다. 한반도 서해안이 지구조적으로 안정하며 최종빙기 최성기 때에 빙하로 덮여 있지 않았다는 점(박용안 외, 1994) 등을 고려할 때, 동아시아 일대의 평균적인 점진적 상승 경향(Woodroffe and Horton, 2005)과 대체로 일치하는 것이 타당할 것으로 보인다. 그러나 지역적

인 해안의 지형, 수문학적 특성, 지반 운동의 차이 등에 따라 해수면 상승 경향은 매우 다양하게 나타나므로 이에 대한 보다 자세한 연구가 절실히 필요하다. unit 2는 7360 cal. yrBP에 시작한다. TOC/TN 비가 20 정도로 높다는 점, TOC/TS 비가 40-60 정도로 높은 값을 보이는 점, 물땀(마름, Trapa)과 식물 파편이 다량 산출되는 점 등을 고려하면 해수의 영향을 찾아보기는 어려우며, 물땀이 생육할 수 있는 어느 정도 규모가 있는 연못 또는 호수 정도의 환경을 유추할 수 있다. unit 3은 분해가 심하게 진행된 식물 잔뿌리 등 식물 파편을 다량 포함하고 있으며, TOC와 TN값이 크게 증가하여 유기물 함량이 매우 높다. 특히 TOC값은 40%까지 높게 나타나는데, Dellwig *et al.*(2001)은 쇠설성 퇴적층에서 1.3-6.3% 정도, 이탄층에서 16.0-52.6% 정도의 TOC값을 보고하고, 이러한 TOC값의 차이로 이탄층을 구분한 바 있다. 이 Dellwig *et al.*(2001)의 분류에 따르면 unit 3은 이탄층에 해당하는 것으로 볼 수 있다. TOC/TN 비는 20 이상의 값을 보여 유기물 대부분이 육상에서 유래하였음을 나타내고 있다. 이렇게 이탄층이 형성되기 시작한 시점은 약 2600년 전이다. unit 4에서는 식물 파편 함량, TOC와 TN값 등이 낮다. 일부 조립질 퇴적물(미사)의 함량이 높은 구간이 있어 상대적으로 강한 에너지가 있었음을 나타내고 있다. 이러한 점으로 미루어 unit 4는 하천 본류 주변의 저습지 정도의 환경이었음을 유추할 수 있다.

5.3. 서해안 퇴적환경의 변화 시기

파주시 운정동 지역에서 7100-5000 cal. yrBP 동안에는 잔자갈과 왕모래 등이 다수 퇴적되어 있다. 이는 7100 cal. yrBP 이전과 비교하여 강수량이 증가하였을 가능성, 하천의 흐름이 시추위치에 가깝게 접근했을 가능성 등을 나타내고 있다 (Nahm *et al.*, 2011). 천리포 수목원 지역에서는 7360 cal. yrBP 이후에 호수 환경으로 바뀌고 있

다. 이의 원인으로서 해수면이 상승하였다가 하강하였는지, 또는 해수면의 위치는 변하지 않았지만 해안에 사구(sand dune)가 발달하여 시추 위치에 해수의 영향이 미치지 않게 되었는지, 또는 해수면과는 상관없이 강수량이 증가하여 호수가 발달하게 되었는지 등 정확한 지형 변화과정과 기작을 파악하기는 어렵다. 어떠한 경우라 하더라도 이러한 변화가 7360 cal. yrBP 정도에 일어나고 있으며, 이렇게 환경이 변화하는 시점이 두 지역에서 거의 일치한다는 점에 주목할 필요가 있다.

Yi *et al.*(2008)은 화분 분석자료를 근거로 한반도에서는 약 7000년 전부터 홀로세 온난기후 최적기가 시작한다고 보고한 바 있는데, 본 연구에서의 7360-7100 cal. yrBP 정도의 시기와 거의 일치하고 있다. 따라서 파주시 운정동 지역에서 계곡 퇴적물에 잔자갈과 왕모래 등 조립질 퇴적물이 퇴적되기 시작하는 것과 천리포 수목원 지역에서 호수가 발달하기 시작하는 것 모두 기후변화에 따른 지표면의 반응이라 할 수 있을 것이다. 화분 자료는 이 시기보다 300-100년 정도의 시간 지연이 있는데, 이렇게 식생 반응에 있어 시간 지연이 있는 경우는 여러 연구에서 보고된 바 있다(Bradley, 1999; Williams *et al.*, 2002). 성숙한 교목이나 관목 등 목본식물은 기후변화에 비교적 덜 민감하여 반응이 느릴 수 있다는 점 또는 연대측정값의 불확실성과 오차가 있을 수 있다는 점 등이 그 원인이 될 수 있을 것이다.

약 7000 cal. yrBP 정도에 변화한 지형 조건은 약 5000 cal. yrBP 정도까지 지속되는데, 5000 cal. yrBP 이후에 파주시 운정동 지역은 습지화되면서 이탄질 퇴적물(peaty sediment)이 퇴적되기 시작한다. 이 때에 천리포 수목원 지역에서는 호수 환경에서 크게 변화하지는 않지만, TOC값이 점차로 증가하는 양상을 보여 유기물 퇴적이 증가했던 것을 알 수 있다. 그리고 약 2600 cal. yrBP 정도에는 이탄층이 퇴적되는 이탄지(peatland) 환경으로 바뀌게 된다. 파주시 운정동 지역에서는 약

2200 cal. yrBP 시기에 간헐적인 퇴적이 일어나는 상황으로 바뀌게 된다.

이렇게 파주시 운정동 지역과 천리포 수목원 지역에서 살펴본 퇴적환경 변화 시기는 서로 거의 일치하고 있다. 지형적 위치가 각각 계곡과 저지대인 점을 감안하면 강수량, 물의 흐름의 세기, 유기물의 유입과 집적 등의 양상에 따라 각각 지형적인 특성에 맞게 기후변화에 반응하고 있음을 알 수 있다. 특히, 강수량이 많았으며 기온도 높았던 것으로 알려져 있는 홀로세 온난기후 최적기는 약 7000년 전부터 5000년 전 정도까지이며, 이는 두 지역 퇴적물의 퇴적 양상에 잘 반영되어 나타난 것으로 볼 수 있다.

6. 결론

홀로세 동안의 기후변화와 이에 따른 지표환경의 변화는 인류 문명의 발전과 밀접한 관계가 있으며, 현재의 지형을 만드는 중요한 과정이었다. 홀로세 동안 중요한 몇몇 기후변화 양상이 있는데, 이 중에서도 홀로세 온난기후 최적기는 현재보다 지표 온도가 수 °C 정도 높았던 시기로 알려져 있다. 현재 온난화와 같은 기후변동이 급작스럽게 진행되면서 앞으로 연평균 기온이 수 °C 상승하게 되면 어떠한 변화가 있을지에 관심이 모아지면서, 과거 홀로세 온난기후 최적기 동안에 일어났던 지형 변화와 식생 변화 등을 밝히는 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 한반도에서는 아직 이러한 연구가 미흡한 실정이며, 특히 홀로세 온난기후 최적기의 시기에 대해서도 명확하게 밝혀진 바 없다.

본 연구는 파주시 운정동의 곡간 퇴적물과 천리포 수목원의 습지 퇴적물을 이용하여 홀로세 온난기후 최적기의 시기를 규명하고 이에 따른 지표환경의 반응을 알아보고자 하는 시도이다. 두 지역에서 모두 약 7000년 전 정도에 지형 변화를 인지할

수 있었다. 파주시 운정동 지역에서는 강한 물의 흐름(에너지)에 의한 조립질 퇴적물의 퇴적, 천리포 수목원 지역에서는 육상 호수의 발달이 시작되었다. 이러한 환경 변화는 약 5000년 전 까지 지속되다가 파주시 운정동 지역에서는 이탄질 퇴적물의 퇴적, 천리포 수목원 지역에서는 유기물 유입의 증가가 시작된다. 약 2600-2200년 전 정도부터 파주시 운정동 지역에서는 간헐적인 퇴적과 토양화 과정이 시작되며, 천리포 수목원 지역에서는 이탄층이 퇴적되기 시작한다. 두 지역에서 지표환경이 변화하는 시점이 서로 거의 일치하는 점으로 미루어 이러한 변화의 원동력은 최소한 두 지역에 걸친 기후변화임을 유추할 수 있으며, 특히 강수량이나 유수의 세기 등 수문학적 요인이 지형 발달에 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

해안 지역에서 지표환경의 변화에 가장 중요한 역할을 하는 해수면에 대해서는 아직도 이견이 많다. 해수면 위치는 과거 선사시대의 주거 위치, 농경 등 토지이용 등에 막대한 영향을 미친 중요한 요소이므로, 이에 대해서는 보다 많은 자료의 축적과 함께 섬세한 연구가 필요할 것으로 보인다.

사 사

본 논문에 대한 건설적인 비평을 아끼지 않으신 편집위원장님과 심사위원님께 감사드립니다. 이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “영산강 유역의 제4기 지질계통 확립과 지표환경변화 연구” 과제의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

류은영, 남옥현, 양동윤, 김주용, 2005, 한국 서해 연안습지의 구조 및 고환경 연구. 지질학회지

- 41, 227-239.
- 박용안, Bloom, A.L., 1984, 한국 황해의 완신세 해수면. *지질학회지* 20, 189-194.
- 박용안, 김부근, 자오송링, 1994, 황해 분지의 해수면 변동. *한국해양학회지* 29, 42-49.
- 안건상, 박영석, 김정빈, 채장평, 1998, 경기육괴 북서부의 파주-김포지역에 분포하는 편마암복합체의 변성작용. *암석학회지* 7, 177-189.
- 윤순옥, 1996, Holocene 후기 삼천포 해안층적평야 지형발달과 환경변화. *한국지형학회지* 3, 83-98.
- 윤순옥, 1997, 화분분석을 중심으로 본 일산지역의 홀로세 환경변화와 고지리복원. *대한지리학회지* 65, 15-30.
- 이동영, 1987, 한반도 제4기층의 층서적 고찰. *한국계4기학회지* 1, 3-20.
- 장병오, 양동윤, 김주용, 최기룡, 2006, 한반도 중서부 지역의 후빙기 식생 변천사. *한국생태학회지* 29, 573-580.
- 장진호, 박용안, 한상준, 1996, 한국 서해안 곰소만 조간대의 제4기 층서와 해수면 변화. *바다: 한국해양학회지* 1, 59-72.
- 장태우, 이상용, 1982, 한국지질도 : 서산, 모항도폭. 한국동력자원연구소, 30 p.
- 황상일, 1998, 일산 층적평야의 홀로세 퇴적환경변화와 해면변동. *대한지리학회지* 33, 143-163.
- Bradley, R. S., 1999, *Paleoclimatology, Restructuring Climate of the Quaternary*. (2nd edition). Academic Press, New York, 610 p.
- Chen, F., Yu, Z., Yang, M., Ito, E., Wang, S., Madsen, D. B., Huang, X., Zhao, Y., Sato, T., Birks, H. J. B., Boomer, I., Chen, J., An, C. and Wunnemann, B., 2008, Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quaternary Science Reviews* 27, 351-364.
- Chough, S. K., Lee, H. J., Chun, S. S. and Shinn, Y. J., 2004, Depositional processes of late Quaternary sediments in the Yellow Sea: a review. *Geosciences Journal* 8, 211-264.
- Cosford, J., Qing, H., Eglington, B., Matthey, D., Yuan, D., Zhang, M. and Cheng, H., 2008, East Asian monsoon variability since the mid-Holocene recorded in a high-resolution, absolute-dated aragonite speleothem from eastern China. *Earth and Planetary Science Letters* 275, 296-307.
- Danzeglocke, U., Joris, O. and Weninger, B., 2008, CalPal-2007. www.calpal-online.de.
- Dellwig, O., Watermann, F., Brumsack, H. J., Gerdes, G. and Krumbein, W. E., 2001, Sulphur and iron geochemistry of Holocene coastal peats(NW Germany): a tool for palaeoenvironmental reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 167, 359-379.
- Farooqui, A. and Bajpai, U., 2003, Biogenic arsenopyrite in Holocene peat sediment, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 55, 157-161.
- Fisher, D. A. and Koerner, R. M., 2003, Holocene ice core climate history, a multi-variable approach. In: Mackay, A. W., Battarbee, R. W., Birks, H. J. B. and Oldfield, F.(eds.), *Global Change in the Holocene: approaches to reconstructing fine-resolution climate change*. Arnold, London, 281-293.
- Gupta, A. K., Anderson, D. M. and Overpeck, J. T., 2003, Abrupt Changes in the Asian Southwest Monsoon during the Holocene and Their Links to the North Atlantic Ocean. *Nature* 421, 354-357.
- Hodell, D. A., Brenner, M., Kanfoush, S. L. Curtis, J.

- H., Stoner, J. S., Song, X., Wu, Y. and Whitmore, T. J., 1999, Paleoclimate of southwestern China for the past 50,000 yr inferred from lake sediment records. *Quaternary Research* 52, 369-380.
- Hong, Y. T., Hong, B., Lin, Q. H., Zhu, Y. X., Yasuyuki, S., Masashi, H., Uchida, M, Leng, X. T., Jiang, H. B., Xu, H., Wang, H. and Yi, L., 2003, Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene. *Earth and Planetary Science Letters* 211, 371-380.
- Jo, W. R., 1980, Holocene sea-level changes on the east coast of Korea Peninsula. *Geographical Review of Japan* 53, 317-328.(in Japanese with English abstract).
- Kremenetski, K. V., Velichko, A. A., Borisova, O. K., MacDonald, G. M., Smith, L. C., Frey, K. E. and Orlova, L. A., 2003, Peatlands of the western Siberian lowlands: current knowledge on zonation, carbon content and Late Quaternary history. *Quaternary Science Reviews* 22, 703-723.
- Lang, A., 2003, Phases of soil erosion-derived colluviation in the loess hills of south Germany. *Catena* 51, 209-221.
- Laronne, J. B. and Reid, I., 1993, Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers. *Nature* 366, 148-150.
- Lee, H. J. and Yoon, S. H., 1997, Development of stratigraphy and sediment distribution in the northeastern Yellow Sea during Holocene sea-level rise. *Journal of Sedimentary Research* 67, 341-349.
- Lespez, L., Clet-Pellerin, M., Limondin-Lozouet, N., Pastre, J. -F., Fontugne, M. and Marcigny, C., 2008, Fluvial system evolution and environmental changes during the Holocene in the Mue valley(western France). *Geomorphology* 98, 55-70.
- Macklin, M. G., Johnstone, E. and Lewin, J., 2005, Pervasive and long-term forcing of Holocene river instability and flooding in Great Britain by centennial-scale climate change. *Holocene* 15, 937-943.
- Meyers, P. A., 2003, Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry* 34, 261-289.
- Meyers, P. A. and Ishiwatari, R., 1993, Lacustrine organic geochemistry - an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry* 20, 867-900.
- Meyers, P. A. and Lallier-Verges, E., 1999, Lacustrine sedimentary organic matter records of late Quaternary paleoclimates. *Journal of Paleolimnology* 21, 345-372.
- Munsell soil color charts, 1975, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation. Baltimore, USA.
- 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.
- Polyak, V. J. and Asmerom, Y., 2001, Late Holocene Climate and Cultural Changes in the southwestern United States. *Science* 294, 148-151.
- Shao, X., Wang, Y.J., Cheng, H., Kong, X., Wu, J. and Edwards, R. L., 2006, Long-term trend and

- abrupt events of the Holocene Asian monsoon inferred from a stalagmite $\delta^{18}O$ record from Shennongjia in central China. *Chinese Science Bulletin* 51, 1-8.
- Shen, J., Liu, X. Q., Wang, S. M. and Matsumoto, R., 2005, Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years. *Quaternary International* 136, 131-140.
- Tao, J., Chen, M. T. and Xu, S., 2006, A Holocene environmental record from the southern Yangtze River delta, eastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 230, 204-229.
- Wang, L., Samthein, M., Erlenkeuser, H., Grimalt, J., Grootes, P., Heilig, S., Ivanova, E., Kienast, M., Pelejero, C. and Pflaumann, U., 1999, East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology* 156, 245-284.
- Wang, P., Clemens, S., Beaufort, L., Braconnot, P., Ganssen, G., Jian, Z., Kershaw, P. and Samthein, M., 2005, Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues. *Quaternary Science Reviews* 24, 595-629.
- Ward, P. J., van Balen, R. T., Verstraeten, G., Renssen, H. and Vandenberghe, J., 2009, The impact of land use and climate change on late Holocene and future suspended sediment yield of the Meuse catchment. *Geomorphology* 103, 389-400.
- Wells, S. G. and Harvey, A. M., 1987, Sedimentologic and geomorphic variations in storm-generated alluvial fans, Howgill Fells, northwest England. *Geological Society of America Bulletin* 98, 182-194.
- Williams, J. W., Post, D. M., Cwynar, L. C., Lotter, A. F. and Levesque, A.J., 2002, Rapid and widespread vegetation responses to past climate change in the North Atlantic region. *Geology* 30, 971-974.
- Woodroffe, S. A. and Horton, B. P., 2005, Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific. *Journal of Asian Earth Sciences* 25, 29-43.
- Wu, W. and Liu, T., 2004, Possible role of the "Holocene event 3" on the collapse of Neolithic cultures around the Central Plain of China. *Quaternary International* 117, 153-166.
- Wust, R. A. J. and Bustin, R. M., 2004, Late Pleistocene and Holocene development of the interior peat-accumulating basin of tropical Tasek Bera, Peninsular Malaysia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 211, 241-270.
- Xiao, J. L., Xu, Q. H., Nakamura, T., Yang, X. L., Liang, W. D. and Inouchi, Y., 2004, Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of North-Central China: a direct indication of the Asian monsoon climatic history. *Quaternary Science Reviews* 23, 1669-1679.
- Yi, S., Kim, J. Y., Yang, D. Y., Oh, K. C. and Hong, S. S., 2008, Mid- and Late-Holocene palynofloral and environmental change of Korean central region. *Quaternary International* 176-177, 112-120.
- Yuan, D., Cheng, H., Edwards, R. L., Dykoski, C. A., Kelly, M. J., Zhang, M., Qing, J., Lin, Y., Wang, Y., Wu, J., Dorale, J. A., An, Z. and Cai, Y., 2004, Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian Monsoon. *Science* 304, 575-578.

- Zhao, Y., Yu, Z., Chen, F., Zhang, J. and Yang, B., 2009, Vegetation response to Holocene climate change in monsoon-influenced region of China. *Earth-Science Reviews* 97, 242-256.
- Zhou, W., Xie, S., Meyers, P.A. and Zheng, Y., 2005, Reconstruction of late glacial and Holocene climate evolution in southern China from geolipids and pollen in the Dingnan peat sequence. *Organic Geochemistry* 36, 1272-1284.
- Zhou, W., Yu, X., Jull, T. A., Burr, G., Xiao, J. Y., Lu, X. and Xian, F., 2004, High-resolution evidence from southern China of an early Holocene optimum and a mid-Holocene dry event during the past 18,000 years. *Quaternary Research* 62, 39-48.

투 고 일 2011. 4. 12

심 사 일 2011. 4. 14

심사완료일 2011. 5. 25