

대암산 고층습원의 환경변천

강 상 준* · Takahito Yoshioka¹

(충북대학교 사범대학 과학교육학부, ¹Nagoya 대학 대기수권과학연구소)

Environmental Change of High Moor in Mt. Dae-Am of Korean Peninsula. Kang, Sang-Joon* and Takahito Yoshioka¹ (School of Science Ed., College of Education, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea; ¹Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya Univ., Nagoya 464-8601, Japan)

The environmental change of Yong-nup in Mt. Dae-Am, which is located at the northern part of Kangwon-Do, Korea, was assessed with peat sedimentary carbon and nitrogen isotope analysis. The surface layer of the peat (0~5 cm) was 190 year BP, and the middle layers (30~35 cm and 50~55 cm) were 870 year BP and 1900 year BP, respectively. Bulk sedimentation rate was estimated to be about 0.4 mm year⁻¹ for 0 cm to 30 cm and 0.15 mm year⁻¹ for 35 cm to 50 cm. The ¹⁴C age of the bottom sediment (75~80 cm) collected and measured in this study was about 1900 year BP, although it was measured that the ¹⁴C of the lowest bottom sediment in Yong-nup was 4105±175 year BP (GX-23200). Since the ¹⁴C ages for 50~55 cm and 75~80 cm layers were almost the same as 1890±80 year BP (NUTA 5364) and 1850±90 year BP (NUTA 5462), respectively, we have estimated that the deep layers (55~80 cm) in the high moor were the original forest soil. The low organic C and N contents in the deeper layers supported the inference. The sediment of 50~55 cm layer contains much sandy material and showed very low organic content, suggesting the erosion (flooding) from the surrounding area. In this context, the Yong-nup, high moor, of Mt. Dae-Am, might have developed to the sampling site at about 1900 year BP. The δ¹³C values of organic carbon and the δ¹⁵N values of total nitrogen in the peat sediments fluctuated with the depths. The profile of δ¹³C may indicate that the Yong-nup of Mt. Dae-Am have experienced the dry-wet and cool-warm period cycles during the development of the high moor. The δ¹⁵N may indicate that the nitrogen cycling in the Yong-nup have changed from the closed (regeneration depending) system to the open (rain NO₃⁻ and N₂ fixation depending) system during the development of the high moor.

Key words : high moor, stable isotope, carbon isotope ratio, nitrogen isotope ratio, absolute year, bulk sedimentation rate

서 론

대암산(1,316 m)은 강원도 양구군과 인제군 서화면의

경계에 위치하고 있는 고산으로서 그 서북 사면의 1,280 m 고도에는 습지 면적 7,490 m²인 우리나라 유일의 고층 습원 (high moor, raised bog)이라고 알려진 용늪이 있고 그 주위의 작은 용늪을 포함한 일원 1.06 km² 지역은 생

* Corresponding author: Tel: 043) 261-2730, Fax: 043) 271-0526, E-mail : kangsj@cbucc.chungbuk.ac.kr

태계 보전지역으로 지정(1989. 12. 29), 관리되고 있다.

이 습원은 흔히 「용늪」으로 불리는 대룡포(大龍浦)로서 인위적인 교란의 흔적은 남아 있지만 원형이 비교적 잘 보존되어 있는 그러한 곳이다. 이 용늪은 1997년 3월 28일 우리나라에서는 최초로 Ramsar협약에 가입된 습원이다.

습원은 식물의 생산량이 분해량을 초과할 때 만들어지며 또 습원의 형성이나 유지에는 물의 양이나 질이 중요할 뿐 아니라 지수함양성(地水涵養性 soligen)이나 또는 강수함양성(降水涵養性 ombrogen)이나에 따라 습원의 성격이 결정된다(阪口, 1974; 강, 1987).

대암산 고층습원은 빗물을 주된 함양원으로 하며 빈영양성의 생육환경을 좋아하는 물이끼(*Sphagnum*) 등으로 형성된 Hummock의 식생과 Hollow의 식생이 섞여 군락을 이루고 있는 재생복합체(再生複合體 regeneration complex)가 교대로 반복, 퇴적하고 있는 특유의 고층습원인 것이다(Osvald, 1928, 1930; Willis, 1973; 강, 1987).

고층습원은 강수함양성이므로 무기염류가 결핍되어 있고 산성이므로 식물 유체의 분해가 불완전하게 되어 미분해 상태의 이탄(泥炭, peat)이 장기간에 걸쳐 퇴적하게 되는 것이다. 그러므로 이러한 고층습원은 환경의 변천을 연구하는데 유용한 장소가 되고 있다(Faegri and Iversen, 1975; Moore and Webb, 1978; Birks and Birks, 1980; Moore et al., 1991).

육상 환경의 변천은 호소나 습원의 퇴적물에 기록되어 있기 때문에 화분분석(花粉分析 pollen analysis)의 방법으로 과거의 환경 복원을 시도하고 있다(中村, 1967; 塚田, 1974; Birks and Birks, 1980; Birks and Gordon, 1985).

1970년대 부터 안정동위원소(stable isotope, SI)를 생태학적 연구에 적용하기 시작한 이후(Rundel et al., 1988),

특히 퇴적물속에 함유된 안정동위원소의 양과 비(ratio)를 정밀하게 측정하므로써 과거의 환경변천에 관련된 정보를 얻기 시작하였다(Williams and Gordon, 1970; Schultz and Calder, 1976; Ishizuka, 1977; Peters et al., 1978; Benner et al., 1987; Kitagawa, 1987; Yoshioka et al., 1988; Kitagawa and Matsumoto, 1993; White et al., 1994; Minomo et al., 1997; Yoshioka et al., 2002).

우리나라에서 안정동위원소와 관련된 연구는 中井 및 洪(1980)에 의한 속초 영랑호의 퇴적물을 이용하여 한반도의 고기후 변천에 대한 연구를 시도한 것이 최초이고, 그 후 Kang et al. (2001)의 대암산 용늪에서 탄소동위원소 비(carbon isotopic ratio)의 profile을 이용하여 소빙기(little ice age)의 존재를 확인한 연구가 있을 뿐이다.

본 연구에서는 대암산 용늪의 퇴적물에 대하여 절대연대(¹⁴C year)와 탄소 및 질소의 안정동위원소 비(stable isotopic ratios)의 변화를 측정하여 습원의 형성과정에 따른 환경변천 과정의 해석을 시도하였다.

재료 및 방법

용늪은 장경 약 300 m, 단경 약 120~190 m인 습지 면적 7,490 m²의 고층습원으로서 이탄의 최고 깊이는 180 cm이며 (Fig. 1), 연평균기온 3.3°C, 연강수량 1,251 mm, 강설량 3.7m에 달하는 다설 지역이다(Kang, 1976). 용늪은 물이끼(*Sphagnum palustre*)와 삿갓사초(*Carex dispalata*)를 주로 하는 이탄층이 50 cm에서 180 cm의 두께로 퇴적되어 있다.

본 실험에 사용한 이탄시료는 1995년 7월 29일에 Fig. 1의 5번 지점에서 Hiller-type borer를 이용하여 퇴적물을 5 cm 간격으로 80 cm의 깊이까지 채취한 시료를 풍건

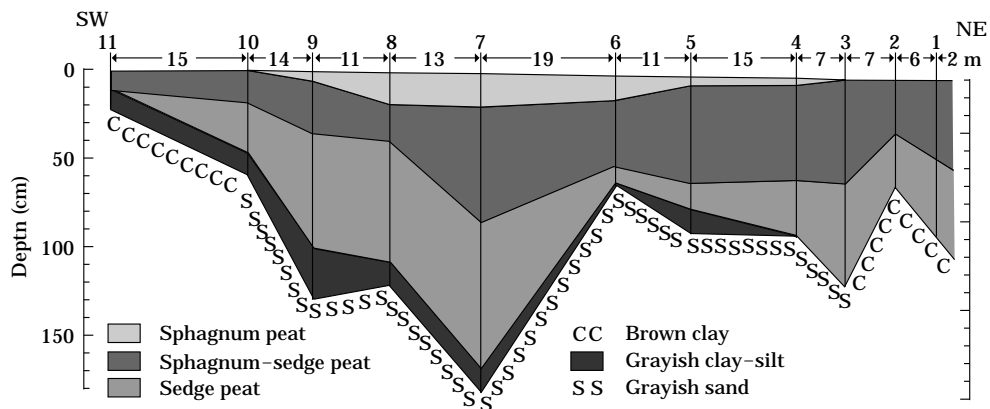


Fig. 1. Section diagram of Yong-nup, high moor, in Mt. Dae-Am (Kang, 1988).

한 후 사용하였다.

풍건된 시료는 mesh size 500 μm , 250 μm 의 stainless sieve로 입자의 크기를 3단계로 분리한 것 (<250 μm , 250~500 μm , >500 μm)을 동위원소 측정 시료로 사용하였다.

봉관연소법 (sealed quartz-tube combustion method, Minagawa *et al.*, 1984)으로 유기탄소 (Org. C)와 질소 (TN)를 CO₂와 N₂로 gas화 하고, 압력 sensor를 이용하여 탄소와 질소량을 측정 한 후 동위원소비 측정용의 질량분석계 (isotopic ratio mass spectrometer, Fennigan MAT 252, Thermoquest, Ltd.)로 동위원소비를 측정하였으며 표준편차는 0.2‰ 이하였고, 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$\delta^{13}\text{C} \text{ 또는 } \delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

여기에서 R = ¹⁵N/¹⁴N 또는 ¹³C/¹²C이며, $\delta^{15}\text{N}$ 의 표준시료는 대기 질소를, $\delta^{13}\text{C}$ 의 표준시료는 Peedee belemnite (PDB)를 사용하였다.

절대연대의 측정은 Nagoya 대학 연대측정자료연구센터의 가속기질량분석계 (Tandetron Accelerator Mass Spectrometer)로 80 cm 깊이 까지의 5개 시료의 ¹⁴C 연대를 측정하였으며, 한편 최하층의 절대연대는 미국의 Geochron Laboratories, Krueger Enterprise, INC, Massachusetts에 의뢰하여 측정하였다.

결 과

이탄 퇴적물의 색은 표층 (0 cm)에서부터 30 cm까지 갈색, 30~40 cm 명갈색, 40~50 cm 암갈색, 50~55 cm 암회색, 55~80 cm 명갈색으로 변화를 보이었으며, 40 cm 이하의 깊이에서는 모래가 포함되었고 특히 50~55 cm층에서는 모래의 양이 많았다.

이탄 퇴적물의 입자 크기 분포를 보면, 표층인 5 cm에서부터 20 cm까지는 250 μm 크기의 분획이 75~82%를 점유하였고, 35 cm 이하의 깊이에서는 40% 전후 또는 그 이하로 낮아졌다. 500 μm 이상 크기의 분획은 심층부에서 많았고 35 cm 이하의 깊이에서는 40~50%를 점하였다. 각 입자 크기 마다의 유기태 탄소와 질소 함량은 같은 깊이에서 보면 거의 변하지 않았는데, 질적으로는 거의 같은 것이지만 크기만이 다르다고 생각된다 (Figs. 2, 3). 다만 250 μm 이하 분획의 유기태 탄소와 질소 함량은 40 cm 깊이 까지에서는 다른 분획에 비하여 가장 낮아 45 cm 이하의 깊이에서는 거꾸로 가장 높은 변화

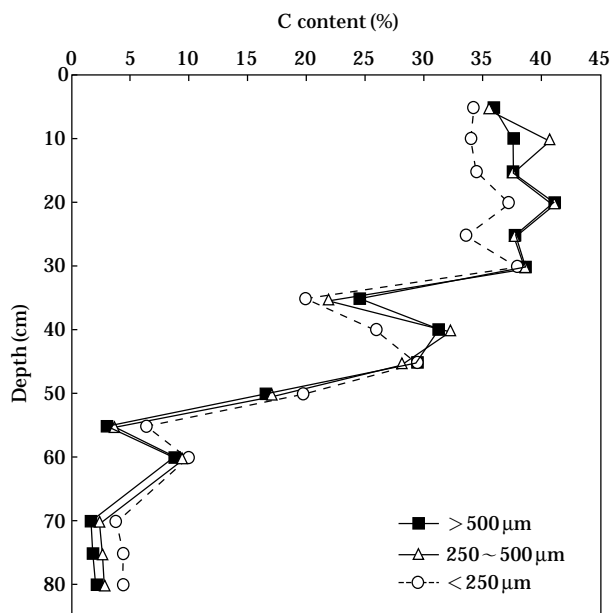


Fig. 2. Vertical distributions of carbon content in each size fraction.

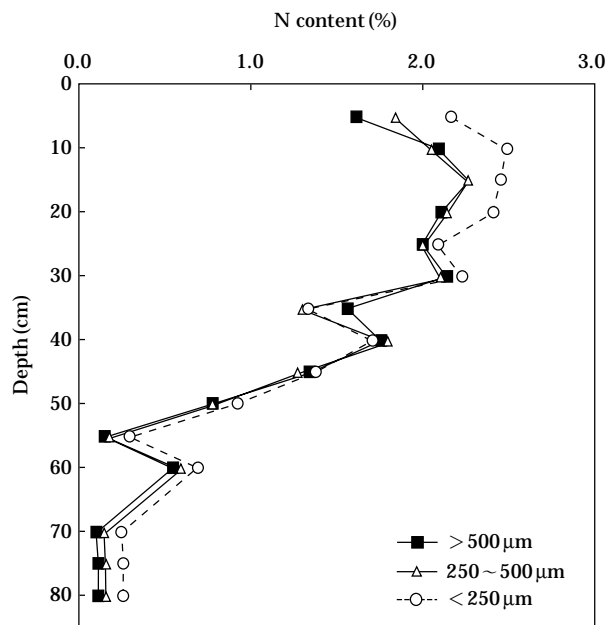


Fig. 3. Vertical distribution of nitrogen content in each size fraction.

를 보이였다.

각 층의 유기태 탄소 및 질소 함량은 깊이 방향으로 크게 변화하였고 0 cm로 부터 30 cm까지에서는 탄소와 질소는 35%에서부터 40% (Fig. 2), 질소는 1.5%에서부터 2.5%로

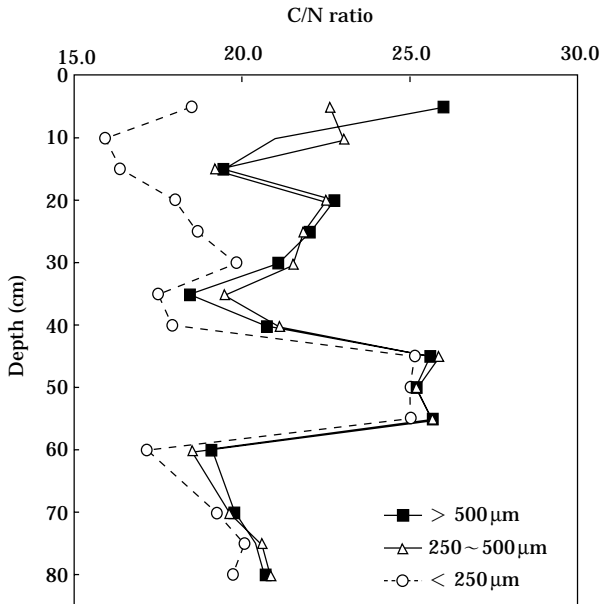


Fig. 4. Vertical distribution of C/N ratio in each size fraction.

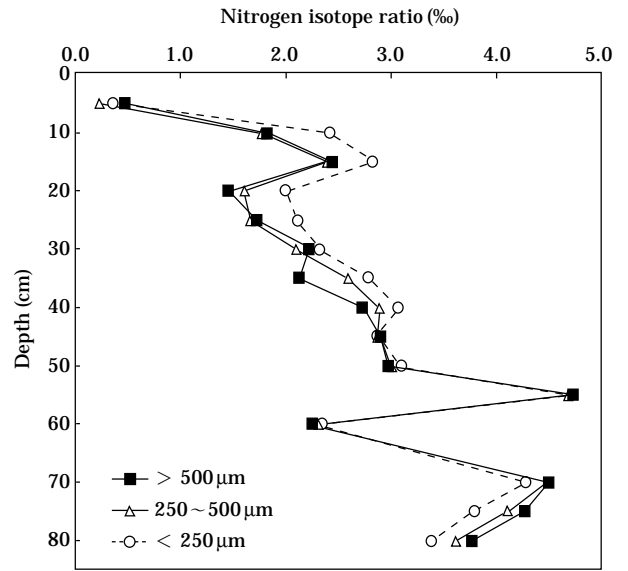


Fig. 6. Vertical distribution of nitrogen isotope ratio in each size fraction.

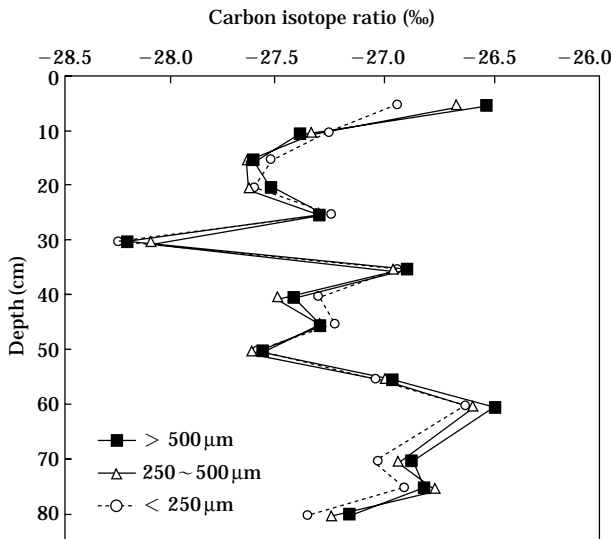


Fig. 5. Vertical distribution of carbon isotope ratio in each size fraction.

매우 높는데 대하여 (Fig. 3), 45 cm 이하의 깊이에서는 급감하였고 50 ~ 55 cm에서는 최소를 나타낸 후 70 cm 이하의 깊이에서 탄소 5% 이하, 질소 0.3% 이하로 줄어들었다.

C/N비 (원자비)는 변동이 컸는데 입자의 크기 조성을 고려하여 측정된 모든 퇴적물의 값을 보면 10 ~ 15 cm층, 30 ~ 35 cm층, 55 ~ 60 cm층에서 최소치 (18에서 19)를 나

Table 1. Radiocarbon ages of Yong-nup peats in Mt. Dae-Am of Korea.

Layer (cm)	¹⁴ C age (BP)	Lab Cod
0 ~ 5	180 ± 70	NUTA-5365
30 ~ 35	870 ± 80	NUTA-5288
45 ~ 50	1,900 ± 70	NUTA-5287
55 ~ 60	1,890 ± 80	NUTA-5364
75 ~ 80	1,850 ± 90	NUTA-5462
100 ~ 110	3,470 ± 240	GX-23199
155 ~ 170	4,105 ± 175	GX-23200

NUTA : Center for Chronological Research in Nagoya University, Japan
GX : Geochron Laboratories, Krueger Enterprise, INC, Massachusetts, USA

타내었고 0 ~ 5 cm층, 15 ~ 20 cm층, 40 ~ 55 cm층에서 최대치 (각각 22.7, 22.5, 25.1 ~ 25.5)를 나타내었다 (Fig. 4).

탄소 동위원소비를 보면 전체의 변화폭은 -28.2‰에서 -26.6‰로 작았으나 변화의 pattern은 유기태 탄소나 질소 함량에 비해서는 복잡하였고, 10 ~ 15 cm, 25 ~ 30 cm, 45 ~ 50 cm층에서 최소치를, 최하층인 75 ~ 80 cm층에서도 낮은치를 보이였다 (Fig. 5). 한편, 질소 동위원소비는 변동은 있었지만 표층의 0.4‰에서부터 심층의 4‰로 증가하였다 (Fig. 6).

¹⁴C 연대는 가장 표층인 0.5 cm는 BP 180 ± 70년 (Calendar year로 AD 1670년 ~ 현재), 30 ~ 35 cm는 BP 870 ± 80년 (AD 1200년경), 45 ~ 50 cm는 BP 1900 ± 70년

경) 55~60 cm는 1890±80년 (AD 120년경), 75~80 cm는 1850±90년 (AD 140~200년경)이 되고, 55 cm 이하의 깊이는 대개 비슷한 년대를 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편 용늪 이탄 퇴적물의 심층부에 대한 절대연대를 별도로 측정해 본 결과, 100~110 cm는 BP 3470±240년, 155~170 cm는 4105±175년이었다 (Table 1).

고찰

1. 습원의 형성과정

이탄 퇴적물속의 유기물 함량으로 보아, 본 연구에서 시료를 채취한 지점에서는 깊이 55 cm 부근 부터 습원화가 진행되어 이탄층이 축적된 것으로 생각할 수 있다. 금번 채취한 시료는 습원의 중앙으로부터 약간 벗어난 이탄층이 얇은 지점에서 채취한 이탄 시료이지만 ¹⁴C 절대연대 측정치로 추정하면 이 지점은 지금부터 약 1800년부터 1900년전에 습원화가 됐음을 시사해 주고 있다.

¹⁴C 연대를 측정한 이탄 층간의 퇴적 속도가 일정하다고 가정한다면 표층 35 cm까지의 유기물 함량이 높은 층에서의 퇴적 속도는 Bulk로서 약 0.4 mm/년, 유기물 함량에 큰 변화를 보이고 있는 35 cm에서 50 cm까지는 약 0.15 mm/년이 된다. 이러한 퇴적 속도는 위도적으로 가까운 일본의 Ozegahara 습원에서 얻은 1 mm/년 이하의 퇴적 속도와 비교하면 다소 낮은 퇴적 속도이지만 거의 비슷한 퇴적을 입을 알 수 있다 (Minomo *et al.*, 1997).

강 (1988)에 의하면 용늪의 표면 부근은 물이끼 (*Sphagnum*)질의 이탄으로, 그 이하는 사초과 (*Carex sp.*) 식물의 이탄이 퇴적되어 있다. 이러한 습원 식생의 변화 역시 퇴적 속도에 영향을 미칠 것이라고 생각된다.

45~50 cm층과 55~60cm층의 ¹⁴C 연대는 BP 1900년과 BP 1890년으로 거의 비슷하고 이 두 층 중간인 50~55 cm층에는 모래가 포함되어 있고 또 유기물 함량 역시 최소치를 나타내는 것으로 보아서 BP 1900년경에 유기물이 적은 토사 성분이 단기간 내에 유입, 퇴적된 것으로 생각된다.

50 cm 이하 깊이에서 유기물 함량의 변화로 보면, 55~80 cm층은 원래의 토양층이었고 55~60 cm층은 그 당시 표면에 퇴적되어 있었던 유기물층이라고 추정할 수가 있다.

Bertram과 Schleser (1982)는 Podsol 토양의 용탈층에서 유기물의 $\delta^{13}C$ 치가 낮아진다고 하였는데, 용늪에서도 유기물 함량이 낮은 하부 이탄층에서 $\delta^{13}C$ 치가 낮았다.

그리고 이들 하부 이탄층에서의 $\delta^{15}N$ 치는 4‰ 전후로 높았으나 유기물 함량이 비교적 높은 55~60 cm에서는 오히려 그 반대로 가장 낮은치를 보이였다. 이것은 50~55 cm층의 퇴적물은 주변의 토양 표층으로부터 유래된 퇴적물일 가능성이 있음을 시사해 주는 것이다.

다시 말하면, 1900년 전에 토사 유입이 용늪에 있었음을 의미하며 그 후 습원화가 이루어졌다고 추정이 된다. 그렇지만 이 토사 유입이나 유출이 대암산 용늪 전체에 걸쳐 일어났는지 여부는 명확하지가 않다.

강 (1988)은 습원 중앙의 170 cm 전후 깊이의 이탄을 이용한 절대연대 측정으로 BP 3870년 (약 4500년전)에 습원 형성이 시작되었고, 40~50 cm층은 BP 2360년전에 상당한다고 보고한 바 있다. 그러므로 대암산 고층습원의 형성과정이 계속적으로 일어난 것이라고 가정한다면, 약 2000년 전에 대암산 고층습원이 금번 시료를 채취한 지점까지 발전, 확대되었다고 생각된다.

2. 습원의 환경변화

식물체의 탄소·질소동위원소 비 ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$)는 식물의 서식환경을 반영하여 변동한다는 것이 알려졌다. 예를 들면, $\delta^{13}C$ 치는 식물의 수분 이용 효율 (water use efficiency)을 반영하여 변동하기 때문에 건조한 조건에서는 식물의 $\delta^{13}C$ 치는 높고, 습윤한 조건에서는 낮아진다

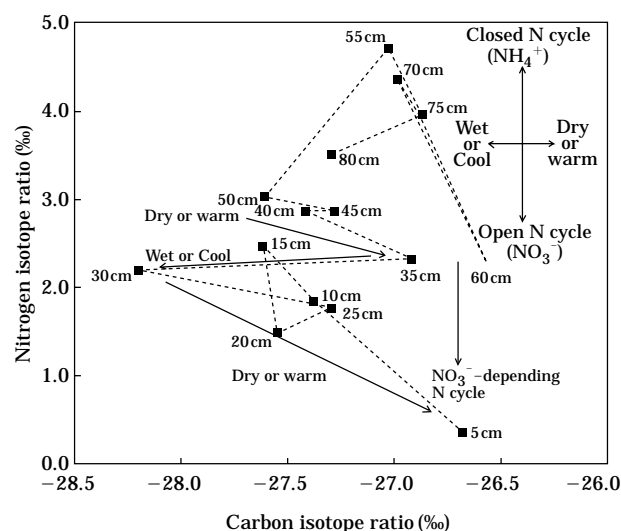


Fig. 7. Map of carbon and nitrogen isotope ratios in the peat sediment. The layers of 5 cm to 30 cm and 50 cm to 35 cm denote dry or warm period, and the layer of 35 cm to 30 cm denote wet or cool period. The layers of 5 cm to 30 cm denote NO₃-depending N-cycle and 30 cm to 80 cm denote closed N-cycle.

(Farquhar and Richard, 1984). Sukumar *et al.* (1993)은 인도 남부의 열대 이탄지에서 C₃식물과 C₄식물의 비율을 이탄의 $\delta^{13}\text{C}$ 로부터 구하여 후빙기 제4기의 기후변화의 복원을 시도하였다.

White *et al.* (1994)은 이탄속의 물이끼 (*Sphagnum*)와 사초과 (*Carex* sp.) 식물의 $\delta^{13}\text{C}$ 치를 각각 측정하므로써 수분조건과 대기 CO₂ 농도의 효과를 평가하는 새로운 방법을 제안하였다. Fig. 7은 이탄 퇴적물의 $\delta^{13}\text{C}$ ~ $\delta^{15}\text{N}$ map이지만 습원의 발달 단계에 따라 크게 변동하고 있음을 알 수 있다.

습원의 형성과정에서 기술했듯이 대암산 용늪의 이탄은 전체적으로 *Carex*에서 *Sphagnum*으로 식생의 변화가 있었다. White *et al.* (1994)은 *Carex*와 *Sphagnum*에서 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 다르다는 점과 이들 두 종간에 $\delta^{13}\text{C}$ 치의 변동 요인이 다르다는 것을 밝힌 바 있다. 또한 식물체내 유기물 중에서 cellulose와 lignin은 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 다르며 (Minomo *et al.*, 1997), 분해됨에 따라 lignin 함량이 증가하므로 bulk의 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 낮아진다는 것을 알아내었고

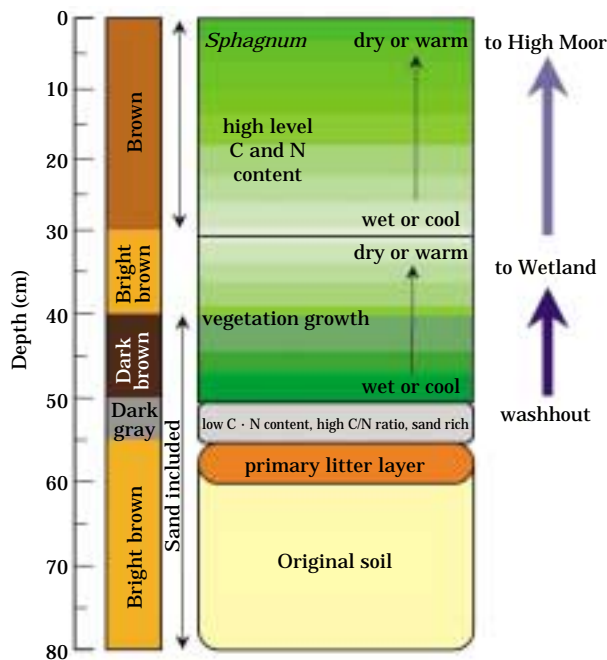


Fig. 8. A possible process of development of Yong-Nup, high moor, in Mt. Dae-Am. The layers from 30 cm to surface experienced from wet or cool to dry or warm periods. In this period, high moor composed of *Sphagnum* was formed from wetland successively. The layer from 55 cm to 50 cm was sedimented by sand washout from surrounding watershed. The sediment below 60 cm was bright brown coloured soil.

(Benner *et al.*, 1987), 그렇기 때문에 Ozegahara 습원의 퇴적물에서 깊은 층 일수록 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 치를 나타내는 것은 lignin의 잔존량이 많기 때문이라고 하였다 (Minomo *et al.*, 1997). 이와같이 습원의 환경변화를 이탄의 $\delta^{13}\text{C}$ 변화로 부터 단순하게 해석할 수는 없다.

그렇지만 $\delta^{13}\text{C}$ 치는 깊이가 깊어짐에 따라 일반적으로 저하하는 것은 아니고 또 *Carex*의 비율이 많다고 생각되는 층(30~50 cm)과 *Sphagnum*의 비율이 높은 표층(0~10 cm)에서 공히 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 낮을수록 유기태 탄소 함량이 높아진다는 공통점이 보인다는 점에서 어떤 환경변화를 나타내는 지표가 될 수 있다고 생각된다.

BP900년전에서 BP1900년 사이(35~50 cm)와 최근(0~15 cm, 0.4 mm/년의 퇴적속도로서 약 400년간)에 있어서 $\delta^{13}\text{C}$ 치의 상승은 기후가 온난화(warm) 내지는 건조화(dry)되었다고 생각되며, 25~30 cm층에서 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 1% 이하로 저하하고 있는 것으로 보아 BP900년경 부터 100여년간 이 시기에는 급격한 한냉화(cool)가 있었던 것으로 추정된다(Fig. 8).

강(1988)은 화분분석에 의해 대암산 고층습원은 약 4500년전 경 *Quercus*를 주로 하는 삼림내에 사초과, 벼과, 물이끼류로 구성된 습원이 형성되기 시작하여 2360년전 경에는 *Quercus*가 감소하고 *Pinus*, *Abies*와 한대요소인 *Betula*가 증가하였으며, 습원에서는 *Sphagnum* 화분이 증가하는 것으로 보아 2000년전 경은 감난기(decreasing warm period)가 있었다고 해석한 바 있다.

中井와 洪(1980)은 속초 영랑호의 퇴적물을 이용하여 퇴적물속의 $\delta^{13}\text{C}$ 치로부터 고환경의 해석을 시도하였다. 그 결과에 의하면 ¹⁴C연대로 BP2500년부터 BP1000년 경에 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 최소임을 보이며 이 시기는 청동기 중기(일본 편년으로 Yayoi 말기)의 빙기였다고 보고하였다.

영랑호의 자료를 상세히 보면 BP1800년부터 BP1310년에 걸쳐서 약간 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 상승했다가 저하하였고 BP660년 이후에는 $\delta^{13}\text{C}$ 치가 크게 상승하고 있다. 대암산 용늪의 이탄에서 보이는 $\delta^{13}\text{C}$ 치의 변동은 위상이 약간 벗어나 있지만 BP1900년부터 BP900년 사이에 상승과 그 후의 저하의 시기를 거쳐 현재를 향해서 다시 상승하는 대응관계가 있음을 지적할 수 있다.

식물체의 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 식물이 이용하는 질소 영양염의 양과 그 동위원소비에 영향을 받으며 질소고정이나 강우속의 질산 이온에 의존하는 식생의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 0‰ 전후의 낮은치를 나타내며 토양에서의 무기화에 의한 내부 순환에 의존하고 있는 식생에서는 높다는 것이 알려졌다(Vitousek *et al.*, 1989). 또한 토양의 유기태 질소에 관해서는 분해에 의하여 질소 함량이 낮아짐에 따라 동위원

소비가 상승한다는 것도 잘 알려져 있다 (Mariotti *et al.*, 1980; Nadelhoffer and Fry, 1988). 습윤한 tussock tundra의 유기 토양층에서도 깊이에 따라 $\delta^{15}\text{N}$ 치가 높아지고 있음을 확인하였다 (Nadelhoffer *et al.*, 1996). 이것은 분해과정에 있어서 ^{14}N 이 우선적으로 무기화되어 유실되기 때문이라고 한다.

대암산 용늪에서 습원화 되기 전이라고 생각되는 55 cm 이하 깊이의 토양의 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 지금까지 보고된 삼림 토양의 치(值)의 범위내에 있다. 토양층의 심부로 향해서 $\delta^{15}\text{N}$ 치가 저하되는 삼림 토양과는 다른 변화를 보이고 있으나 습원화 되기 이전에는 삼림 토양으로서의 질소순환의 기능을 했다고 생각된다. 습원화 이후의 유기물 함량이 많은 이탄층(0~15 cm)에서 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변화는 10~15 cm층에서 최대치를 보이었고 표층에서는 낮아졌다.

Evans and Ehleringer (1993)는 질소 함량과 $\delta^{15}\text{N}$ 의 관계로 부터 분해시의 동위원소 분별 (isotopic fractionation)을 구하여 1.2‰에서 1.3‰ 치를 얻어 내었다. 이것은 upland forest의 토양에서 얻은 치(1.5‰에서 1.8‰)에 비하여 낮은 치이다. 이탄에서는 유기물 함량이 매우 높기 때문에 유기태 질소가 분해되어 감소되더라도 유기물(유기태 탄소)의 감소량이 크다고 하면(실제로 C/N비는 15~20 cm에서 최대이고 깊이가 낮아짐에 따라 저하하고 있다), 중량 %로 나타낸 질소함량은 외관상 저하하지 않는다.

그렇지만 실제의 질소 함량의 저하(유기태 질소 분해량 증대)에 대한 $\delta^{15}\text{N}$ 치의 상승의 정도(분해에 의한 동위원소 분별)는 더욱 더 적어진다. 또한 최표층인 0~5 cm에서부터 5~10 cm, 10~15 cm에 걸쳐서는 질소 함량, $\delta^{15}\text{N}$ 치도 깊이가 깊어짐에 따라 높아졌으므로 삼림 토양과 같이 분해, 용탈로 질소의 동태를 이해하기는 곤란하다.

여하튼 질소함량의 저하와 $\delta^{15}\text{N}$ 치의 상승과의 관계는 삼림 (upland) 토양에서 보고된 것과 같은 정도로 뚜렷하지 않았으며 또 질소함량은 깊이에 따라 일정하게 감소하지 않는 점 등으로 볼 때, 삼림 토양에 있어서 질소순환과는 다른 mechanism을 고려할 필요가 있다. 이러한 사실은 표면 식생에 의한 질소동화 과정에 변동요인이 있음을 시사해 주는 것이다.

습원화(대암산 습원에서는 한냉, 습윤 조건이 되었다고 생각된다)에 의해 유기물의 분해가 억제되어 질소의 회기(回歸)가 적어져 전체로서 질소 결핍 상태가 되었다고 생각된다.

그 결과 대암산 고층습원은 강우속의 질산 이온 또는 질소고정을 주로 하는 외부 순환계에 크게 의존한 생태계를 형성하였다고 생각된다. 이탄 퇴적물의 표층을 향해

서 $\delta^{15}\text{N}$ 치의 저하는 습원 형성중에 질소의 외부 순환의 존도가 상승했음을 시사해 주는 것이다. 20 cm부근에서 $\delta^{15}\text{N}$ 의 변동 원인은 불확실하지만 식생의 변동(*Carex*에서 *Sphagnum*)이나 수위 변동(습원의 확대) 등에 따라 질소 영양염의 공급, 흡수 과정에 변화가 있었을지도 모른다. 금후 습원 퇴적물의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 기록을 해석하는 것 이외에도 습원 식생이나 수위 변동과 질소 순환 과정과의 관계를 밝힐 필요가 있다.

금번 탄소, 질소 안정동위원소비에 의한 해석에 의하면 대암산 고층습원의 발달사에 있어서 BP1900년(철기시대 말기의 소빙기)경에 습원화가 되므로서 질소순환 과정에 변화가 있었고, 그 후 한냉 (cool), 습윤 (wet) 및 온난 (warm), 건조 (dry)의 기후변화를 경험했을 가능성을 지적할 수 있다 (Figs. 7, 8). 앞으로 대암산 고층습원의 고환경변천은 한반도나 일본 등을 포함한 동아시아의 고환경과 어떠한 관계가 있는지를 밝히는 일이 필요할 것이다.

적 요

강원도 양구군과 인제군의 경계에 있는 대암산 용늪의 이탄 퇴적물을 사용하여 탄소 및 질소 동위원소비의 해석을 통하여 용늪의 환경변천의 해석을 시도하였다.

표층 0~5 cm의 연대는 BP1900년, 30~35 cm층 및 50~55 cm층에서는 각각 BP870, BP1870년으로 추정되었다. 유기물 함량이 높은 0~35 cm의 이탄층에서 bulk의 퇴적속도는 약 0.4 mm/년으로 계산되었다. 금번 시료를 채취한 지점의 퇴적물 최하층인 75~80 cm층의 ^{14}C 연대는 약 BP1900년으로 추정되었고 50~55 cm와 75~80 cm층의 추정연대가 거의 비슷한 것으로 보아서 용늪의 심층부는 원래의 삼림 토양인 것으로 판단되었다.

50~55 cm층은 모래 성분이 포함되어 있고 또한 유기물 함량이 낮은 것으로 보아 주변 지역의 침식으로부터 유래되었을 가능성이 있다고 판단되었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 이용한 시료의 채취 지점에서는 BP1900년 경부터 습원화가 되었다고 추정된다.

유기탄소 동위원소비, 총 질소동위원소비는 깊이 방향으로 변동이 보였다. 이러한 사실로부터 대암산 고층습원의 발달과정에 있어서 기후조건의 변동과 함께 질소순환계의 변화도 있었던 것으로 추론 되었다.

사 사

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의

연구비 지원에 의하여 연구되었음. 본 연구를 수행하는 동안 실험을 함께 해 주신 이재용 박사님 (Nagoya대학 대기수권과학연구소) 및 Nagoya대학 연대측정자료연구센터의 Aoki 박사님에게 깊은 감사사를 드린다.

인 용 문 헌

- 강상준. 1987. 대암산 고층습원의 식물생태학적 연구. 휴전선 일대의 자연연구. 강원대학교 출판부. pp.169-201.
- 강상준. 1988. 대암산 고층습원의 이탄구조와 화분분석. 환경청. 대암산 자연생태계 조사보고서. pp. 99-146.
- 中井信之, 洪思澳. 1980. 韓國永郎湖堆積物の地球化學的手段による古氣候變遷の研究-安定同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)及び硫黃物含量にとる-. 文部省海外學術調査現 地調査中間報告. (404332). pp.57-61.
- 中村 純. 1967. 花粉分析. 古今書院. 東京. p.232.
- 阪口豊. 1974. 泥炭地の地學-環境の變化を探る-. 東京大學出版會. 東京. p.329.
- 塚田松雄. 1974. 古生態學 II.-應用編-. 共立出版株式會社. 東京. p.231.
- Benner, R., M.L. Fogel, E.K. Sprague and R.E. Hodson, 1987. Depletion of ^{13}C in lignin and its implication for stable isotope studies. *Nature*. **329**: 708-710.
- Bertram, H.G. and G.H. Schleser. 1982. The $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios in a North-German podzol. In Stable Isotopes. Schmidt H.L., H. Foerstel and K. Heinzinger eds., Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. pp. 115-120.
- Birks, H.J.B. and H.H. Birks. 1980. Quaternary Palaeoecology. Edward Arnold. London. p.289.
- Birks, H.J.B. and A.D. Gordon. 1985. Numerical Methods in Quaternary Pollen Analysis. Academic Press. Orlando. p.317.
- Evans, R. and J.R. Ehleringer. 1993. A break in the nitrogen cycle in aridlands? Evidence from $\delta^{15}\text{N}$ of soil. *Oecologia*. **94**: 314-317.
- Faegri, K. and J. Iversen. 1975. Textbook of Pollen Analysis. Munksgaard. Denmark. p.295.
- Farquhar, G.D. and P.A. Richards. 1984. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aust. J. Plant Physiol.* **11**: 539-552.
- Ishizuka, T. 1977. Stable carbon isotope composition of organic material and carbonate in sediment of a swamp and lakes in Honshu island, *Jap. J. Earth Sci. Nagoya Univ.* **25**: 11-21.
- Kang, S.J. 1976. Ecological studies of the raised bog in Dae-Am mountain adjacent to DMZ in Korea. *J. Res. Sci. Ed., Chuncheon Teachers College.* **2**: 81-104
- Kang, S.J., T. Yoshioka, J.Y. Lee and H.A. Takahashi 2001. Paleo-environment in Dae-Am San high moor in the Korean peninsula. *Radiocarbon.* **43**: 555-559.
- Kitagawa, H. 1987. Carbon isotope ratio of cellulose extracted from Sugi tree (*Cryptomeria japonica*). *Geosci. Repts. Shizuoka Univ.* **13**: 25-30.
- Kitagawa, H. and E. Matsumoto. 1993. Climate implication of $\delta^{13}\text{C}$ variations in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) during the last two millenia. *Geophysical Res. Letters.* **22**: 2155-2158.
- Mariotti, A., P.D. Pierre, J.C. Vedy and S. Bruckert. 1980. The abundance of natural nitrogen-15 in the organic matter of soils along an altitudinal gradient (Chablais, Haute Savoie, France). *Catena.* **7**: 293-300.
- Minagawa, M., D.A. Winter and I.R. Kaplan. 1984. Comparison on kjeldahl and combustion methods for measurement of nitrogen isotope ratios in organic matter. *Anal. Chem.* **56**: 1859-1861.
- Minomo, K., T. Akagi, S. Yonemura, M. Yoh, H. Turuta and T. Nakamura. 1997. $\delta^{13}\text{C}$ vertical change of peats in the Ozegahara wetland. Dating and Materials Research Center, Nagoya Univ. **III**: 146-151.
- Moore, P.D. and J.A. Webb. 1978. An Illustrated Guide to Pollen Analysis. Hodder and Stoughton. London. p.133.
- Moore, P.D., J.A. Webb and M.E. Collinson. 1991. Pollen Analysis. Blackwell Scientific Pub. London. p.216.
- Nadelhoffer, K.J. and B. Fry. 1988. Controls on natural nitrogen-15 and carbon-13 abundances in forest soil organic matter. *Soil Sci. Am. J.* **52**: 1633-1640.
- Nadelhoffer, K., G. Shaver, B. Fry, A. Giblin, L. Johnson and R. McKane. 1996. ^{15}N natural abundances and N use by tundra plants. *Oecologia.* **107**: 386-394.
- Osvald, H. 1928. Nordamerikanska mosstyper. *Svensk Bot. Tids.* **22**: 377-391.
- Osvald, H. 1930. Soedra sveriges mosstyper. *Svensk Geogr. Arsb.* **30**: 117-140.
- Peters, K.E., R.E. Sweeney and I.R. Kaplan. 1978. Correlation of carbon and nitrogen stable isotope ratios in sedimentary organic matter. *Limnol. Oceanogr.* **24**: 598-604.
- Rundel, P.W., J.R. Ehleringer and K.A. Nagy. 1988. Stable Isotope in Ecological Research. Ecological Studies. Vol. 68. Springer-Verlag. New York.
- Schultz, D.J. and J.A. Calder. 1976. Organic carbon $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in estuarine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **40**: 381-385.
- Sukumar, R., T. Ramesh, R.K. Pant and G. Rajagopalan.

1993. A $\delta^{13}\text{C}$ record of late Quaternary climate change from tropical peats in southern India. *Nature*. **364**: 703-706.
- Vitousek, P.M., G. Shearer and D.H. Kohl. 1989. Foliar ^{15}N natural abundance in Hawaiian rainforest: patterns and possible mechanism. *Oecologia*. **78**: 383-388.
- White, J.W.C., P. Ciais, R.A. Figgs, R. Kenny and V. Markgraf. 1994. A high-resolution record of atmospheric CO_2 content from carbon isotopes in peats. *Nature*. **367**: 153-156.
- Williams, P.M. and L.I. Gordon. 1970. Carbon-13 : carbon-12 ratios in dissolved and particulate organic matter in the sea. *Deep-Sea Res.* **17**: 19-27.
- Willis, A.J. 1973. Introduction to Plant Ecology. London Allen & Unwin Ltd. Oxford. pp.56-73.
- Yoshioka, T., E. Wada and Y. Saijo. 1988. Isotopic characterization of lake Kizaki and Suwa. *Jap. J. Limnology*. **49**: 119-128.
- Yoshioka, T., S. Ueda, T. Miyajima, E. Wada, N. Yoshida, A. Sugimoto, P. Vijarnsorn and S. Boonprakub. 2002. Biogeochemical properties of a tropical swamp forest ecosystem in southern Thailand. *Limnology*. **3**: 51-59.

(Manuscript received 10 September 2004,
Revision accepted 28 February 2005)