

TSP15010-049-12

빙하노출지역 해변 모래 퇴적물 조성과 환경 변화 관계 연구

Composition of beach sands of the King George Island
and their relationship with environmental
conditions in the Antarctic area



서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 빙붕 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사 복원 기술 개발” 과제의 위탁연구 “빙하노출지역 해빙 모래 퇴적물 조성과 환경 변화 관계 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2016. 1.

총괄연구책임자	: 윤 호 일
위탁연구기관명	: 서 울 대 학 교
위탁연구책임자	: 이 용 일
위탁참여연구원	: 김 동 현 이 효 종 김 문 기

보고서 초록

위탁연구과제명	빙하노출지역 해빈 모래 퇴적물 조성과 환경 변화 관계 연구				
위탁연구책임자	이용일	해당단계 참여연구원수		해당단계 연구비	20,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>1. 극지 식생의 종류별 안정 탄소 동위원소비 ($\delta^{13}C$)</p> <p>C_3 관다발 식물: $-28.8 \pm 1.5\%$ (평균 \pm 표준편차), 이끼: $-25.8 \pm 2.2\%$, 지의류: $-23.5 \pm 2.6\%$ C_3 관다발 식물 < 이끼 < 지의류 순으로 식생 집단 별 탄소 동위원소 비에 차이</p> <p>2. 극지 식생의 안정 탄소 동위원소비와 환경 요인의 관계</p> <p>2.1. C_3 관다발식물</p> <p>2.1.1. 강수량 기존 연구들에서의 강한 상관관계와 달리, 극지에서는 연 강수량과 식생의 $\delta^{13}C$ 간 상관관계 부재 중·저위도에서의 동일 강수량 지역 평균에 비해 낮은 $\delta^{13}C$ 값 → 용빙수의 공급과 제한된 증발 및 배수로, 적은 강수에도 극지 식생의 수분이 비교적 양호히 유지</p> <p>2.1.2. 기온 연 평균 기온 및 여름 평균 기온과 약한 양의 상관관계 → 상대적으로 높은 온도에서 동화작용의 속도가 빨라진 결과로 해석됨</p> <p>2.1.3 위도 위도와 음의 상관관계. 개별 요인 중 가장 높은 기여도 ($R^2 = 0.38$) 특정 생물 속 (<i>Carex sp.</i>) 단위에서도 동일한 추세가 발견 → 위도에 따른 기온 변화나 생물종의 분포로는 충분히 설명되지 않는 부분이 존재 여름철 백야현상과 낮은 단위시간당 광량이 가장 합리적인 설명으로 제안됨 태양광이 극지 식물의 성장에 중요한 제한 조건으로 작용하고 있을 가능성</p> <p>2.2. 이끼 및 지의류 강수량 혹은 기온 지표와 상관관계 부재. 위도와는 음의 상관관계 (이끼: $R^2=0.21$; 지의류 $R^2=0.44$) 구체적인 귀인을 위해서는 이들 식생에 대한 기초연구가 마련되어야 할 것</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	식생, 안정 탄소 동위원소, 강수량, 위도, 이끼, 지의류			
	영 어	vegetation, stable carbon isotope, precipitation, latitude, moss, lichen			

요 약 문

I. 제 목

빙하노출지역 해빈 모래 퇴적물 조성과 환경변화 관계 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

오늘날 극 지역의 생태계는 급격한 기후 변화 하에 놓여있다. 남극과 북극에서 자라는 현생 식물들의 안정 탄소 동위원소 비를 분석하여, 서로 다른 환경 요인이 이들의 광합성에 미치는 영향을 살피고자 한다. 일반적으로 식물의 탄소 동위원소 조성은 강수량에 가장 크게 좌우되는 것으로 알려져 있으나, 지구상의 타 지역과는 구별되는 극지의 특수한 환경 조건 하에서는 온도와 광량 등 여타 요인이 중요하게 부각될 가능성이 있다. 이를 확인하는 한편, 일반적인 초본과 목본식물에 더해 극지 육상 생태계에서 갖는 중요성에 비해 충분히 연구되지 못했던 이끼와 지의류를 총체적으로 아우르는 데이터베이스를 구축하는 것을 연구의 목적으로 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

남극의 킹 조지섬과 노르웨이 스발바르 뉘알레순 식생 시료의 안정 탄소 동위원소 조성을 분석한다. 기존 문헌으로부터 수집한 고위도 식생의 탄소 동위원소 비 자료에 새로 얻은 분석 값을 추가하여 데이터베이스를 구축하고, 관다발식물, 이끼, 지의류의 조성을 비교하는 한편, 각각의 값이 강수, 기온, 위도 등 극지의 다양한 환경 요소 아래서 어떠한 양상으로 나타나는지 통계 분석을 수행한다.

IV. 연구개발결과

수집된 자료를 바탕으로 분석한 결과, 극지 식생의 탄소 동위원소 조성비는 관다발식물이 평균적으로 가장 낮았고 이끼, 지의류의 순이었다. 한편 세 식생 그룹 모두에서 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 위도와 가장 큰 관련성을 보였으며, 극에 가까울수록 낮았다. 반면 온도와 탄소 동위원소 조성의 관련성은 없거나 미미했고, 강수량과는 완전히 무관했으며 전 지구적 평균에 비해 대체로 낮은 값을 가졌다. 저위도 및 중위도 지역과 뚜렷하게 구분되는 극지에서의 이러한 특징은 수분으로 인한 제약이 크지 않으며 태양광 등 기타 환경 요인의 영향이 부각되는 극지 생태의 특수성을 암시한다.

V. 연구개발결과의 활용계획

극지 식생의 탄소 동위원소 조성과 환경 조건의 관계가 기존 인식과 큰 차이가 있다는 연구 결과는, 남극과 북극의 현생 식생 및 과거 유기물 자료 해석은 물론 생태계 변화 연구에 시사하는 바가 크다. 또한 본 연구를 통해 종합 정리된 고위도 식생의 자료는 관련 연구의 기초 자료로서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Composition of beach sands of the King George Island and their relationship with environmental conditions in the Antarctic area

II. Purpose and Necessity of R&D

The polar ecosystem is under the drastic climate change in recent days. By analyzing the stable carbon isotope composition of modern plants growing in the polar regions, the influence of various environmental factors on the photosynthetic activities of vegetation were investigated. Although the general consensus supports that carbon isotope composition of plants is largely determined by precipitation, temperature or sunlight may play the bigger role under the unique environmental conditions of the polar regions. This study aims to confirm the idea, and build the comprehensive database incorporating vascular plants, mosses, and lichens.

III. Contents and Extent of R&D

Various vegetation species were sampled from both the Antarctic and the Arctic, Barton Peninsula, King George Island and Ny-Alesund, Svalbard, Norway, and were analyzed for stable carbon isotope composition. A database of carbon isotope ratio of polar vegetation was built based on literature, with the addition of newly acquired data. The carbon isotope composition of vascular plants, mosses, and lichens were compared, and statistical analysis was adopted to analyze its pattern under the varying environmental conditions of the polar regions.

IV. R&D Results

Based on the collected data, the carbon isotope composition was the lowest for vascular plants in average, followed by mosses, and lichens. In all three vegetation groups, it had negative correlation with latitude. The correlation with temperature was small to none. Carbon isotope composition was totally irrelevant to precipitation, having more negative value compared to the global average. Such trends are distinguished from the general pattern in the mid- to low-latitude areas, and support smaller water stress and greater influence of other environmental factors such as sunlight.

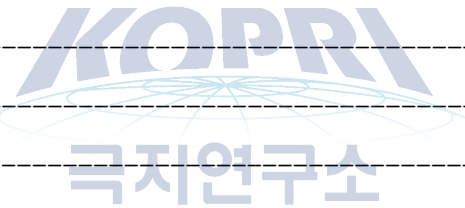
V. Application Plans of R&D Results

The results of this study indicating distinctive physiology of polar vegetation has implication on the researches regarding the terrestrial ecosystem change in the Antarctic and Arctic. The collection of carbon isotope data incorporated in our study also can be utilized as a useful data source for regarding studies.



목 차

제 1 장 서론 -----	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황 -----	15
제 3 장 연구개발수행 내용 및 방법 -----	16
제 4 장 연구개발 결과 -----	23
제 5 장 연구개발결과 토의 -----	31
제 1 절 관다발 식물 -----	31
제 2 절 이끼 및 지의류 -----	35
제 6 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 -----	36
제 7 장 연구개발결과의 활용계획 -----	37
제 8 장 참고문헌 -----	38



Contents

Chapter 1	Introduction	10
Chapter 2	Current Development State	15
Chapter 3	Materials and Methods	16
Chapter 4	Research Results	23
Chapter 5	Discussion	31
	1. Vascular Plants	31
	2. Mosses and Lichens	35
Chapter 6	Research Achievement	36
Chapter 7	Application Plan of Results	37
Chapter 8	References	38



제 1 장 서론

극 지역의 급격한 기후 변화는 온난화로 인한 빙봉의 감소라는 물리적 환경 변화 이외에도 해당 지역의 생태계 전반에 큰 영향을 미친다. 기온을 비롯한 여러 가지 기후 조건이 생물의 성장과 활동에 직접적인 영향을 줄뿐 아니라, 빙하노출지역의 확대와 여름철의 신장은 그 생명 활동이 일어날 수 있는 시공간적 영역 자체를 바꾸어놓는다는 의미를 가진다. 한편 생물의 활동은 다시 빙하노출지역의 토양을 비롯한 지표환경의 물리적 화학적 변화를 가져오는 방식으로 상호 기능하기도 한다.

육상 생태계에서 가장 중추적인 역할을 하는 구성원은 1차 생산자인 식생이다. 이는 지구상의 다양한 생태계를 그 식생의 종류와 형태에 따라 열대우림, 사바나, 온대활엽수림, 사막 등으로 구분하는 생물 군계(biome)의 개념이 반영하는 바와 같다. 이는 생명활동의 밀도가 비교적 낮은 극 지역의 툰드라 환경에서도 예외가 아니며, 이러한 차원에서 극지 식생에 대한 깊이 있는 이해는 기후 변화에 따른 극지방의 생태계 변화, 더 나아가 총체적인 환경 변화를 예측하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 이에 관한 하나의 접근으로, 극지 식생의 안정 탄소 동위원소 구성비를 종합적으로 살펴보고자 한다. 탄소는 식물의 광합성, 즉 햇빛에너지를 통해 대기 중의 이산화탄소를 당과 같은 양분으로 변환하는 물질 대사의 뼈대를 이루는 원소이다. 식물 조직 내 탄소의 동위원소 비는 이 과정에서 이산화탄소의 수요와 공급, 즉 광합성으로 인한 소모와 기공을 통한 확산의 상대적 속도를 반영하게 된다(Farquhar et al. 1982; Brugnoli et al. 1988). 식생의 탄소 동위원소 비와 환경적 요인의 관계에 대한 검토는, 따라서 특정 환경 조건에서 식물의 생명활동이 얼마나 활발히 이루어지거나 혹은 제약되는지에 관한 정보를 제공한다.

통제된 실험 조건 하에서 강수, 기온, 광량, 염도 등 개별 환경 요인이 식물의 탄소 동위원소 구성에 미치는 영향은 오랜 기간 많은 연구자들에 의해 체계적으로 연구 정리되어온 바 있다(Farquhar et al. 1989; Dawson et al. 2002). 그러나 이들 요인이 실제 자연 조건 하에서 복합적으로 작용할 때의 상대적 영향은 충분히 검토되지 못했으며, 일부 연구만이 존재한다(Ma et al., 2005; Murphy and Bowman, 2009; Wang et al., 2013). 이들 연구가 택한 접근은 변인을 인위적으로 조작하는 대신 강수, 기온, 고도 등 여러 환경 조건이 서로 다르게 나타나는 다수의 지역들에서의 식물 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 비교 분석함으로써 각 요인의 중요도를 살피는 방식이라 할 수 있다. 지금까지 지구 전역에 걸친 가장 풍부한 자료를 바탕으로 한 기존 연구로는 Diefendorf et al. (2010)과 Kohn (2010)이 대표적이다. 이들은 전세계 문헌으로부터 C_3 식물들의 탄소 동위원소 분석 자료를 수집하고, 다중 회귀분석을 취하는 방식으로 다양한 환경 요인

의 기여도를 평가하였다.

본 연구에서는 Diefendorf et al. (2010)과 Kohn (2010)의 연구 방법을 응용하되, 해당 연구들에 포함된 95% 이상의 자료가 위도 60도 이하의 저·중위도에 집중되어 있다는 점에 착안, 양 극에 가까운 고위도에서의 양상만을 분리하여 별개로 살펴보는 것을 목표로 한다. 상기 연구들은 모두 연 평균 강수량(mean annual precipitation)을 식생의 $\delta^{13}\text{C}$ 값에 영향을 미치는 주요한 요인으로 보았으나, 극히 낮은 기온과 약한 광량, 독특한 수문학적 특징 등 극지 식생이 놓인 환경의 특수성으로 미루어 볼 때, 이 지역에서의 환경 요인과 그에 따른 식물의 생리는 중위도 및 저위도의 타 지역과는 상당히 다른 양상으로 전개될 것이 예상되기 때문이다 (Chapin, 1987; Loader et al., 2013). 또한 관다발을 가진 목본·초본류의 C_3 및 C_4 식물이 식생의 대부분을 차지하는 일반적인 육상 생태계와 달리, 극지는 초본·덤불류의 C_3 식물과 더불어 이끼와 지의류가 식생의 중요한 구성원으로 대두된다는 점에서도 차이가 있다. 이에 본 연구는 기존 연구자들이 크게 관심을 두지 않았던 이끼와 지의류에 관한 자료수집 및 분석을 병행하여, 극지 식생에 관한 보다 포괄적인 이해를 얻고자 한다. 자료에는 지금까지 남·북반구 위도 60도 이상의 지역에서 보고된 현생 식생의 탄소 동위원소 문헌 자료를 모두 포함시켰고, 여기에 남극 킹조지 섬 바튼 반도의 자료와 노르웨이 스발바르 뉘올레순 인근에서 새로 획득한 분석 자료를 추가하였다 (Fig. 1, 2, 3).



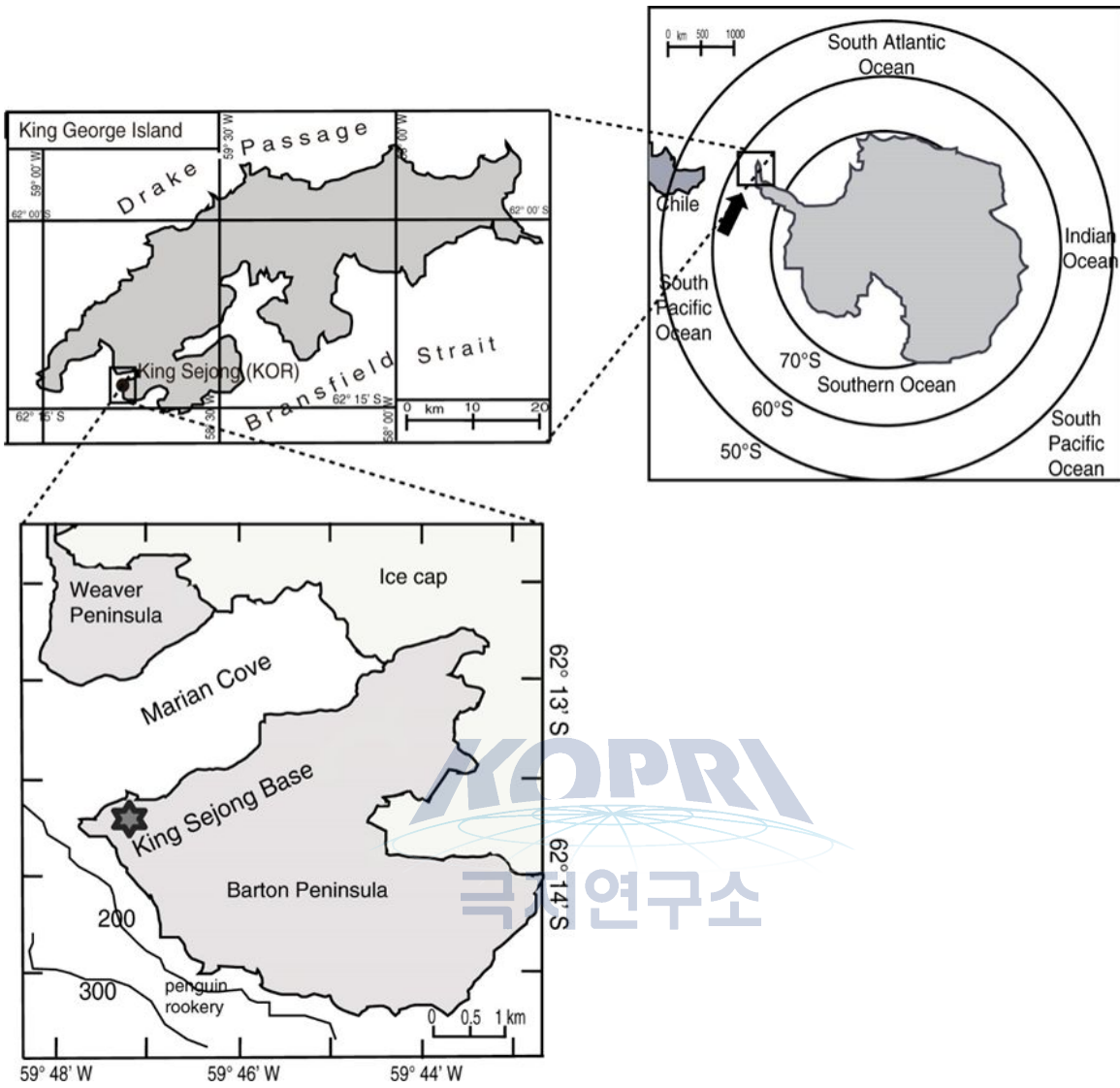


Fig. 1. Map showing the geographic location of Barton Peninsula, King George Island, Antarctica

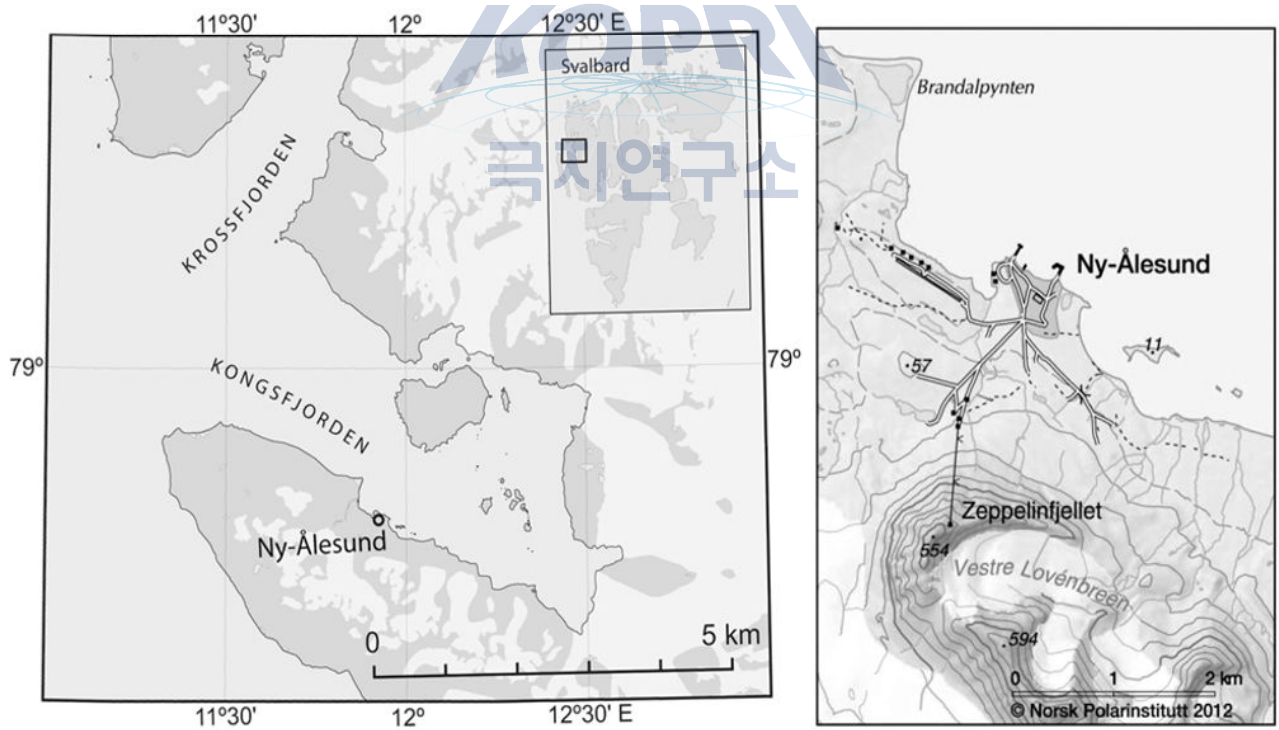
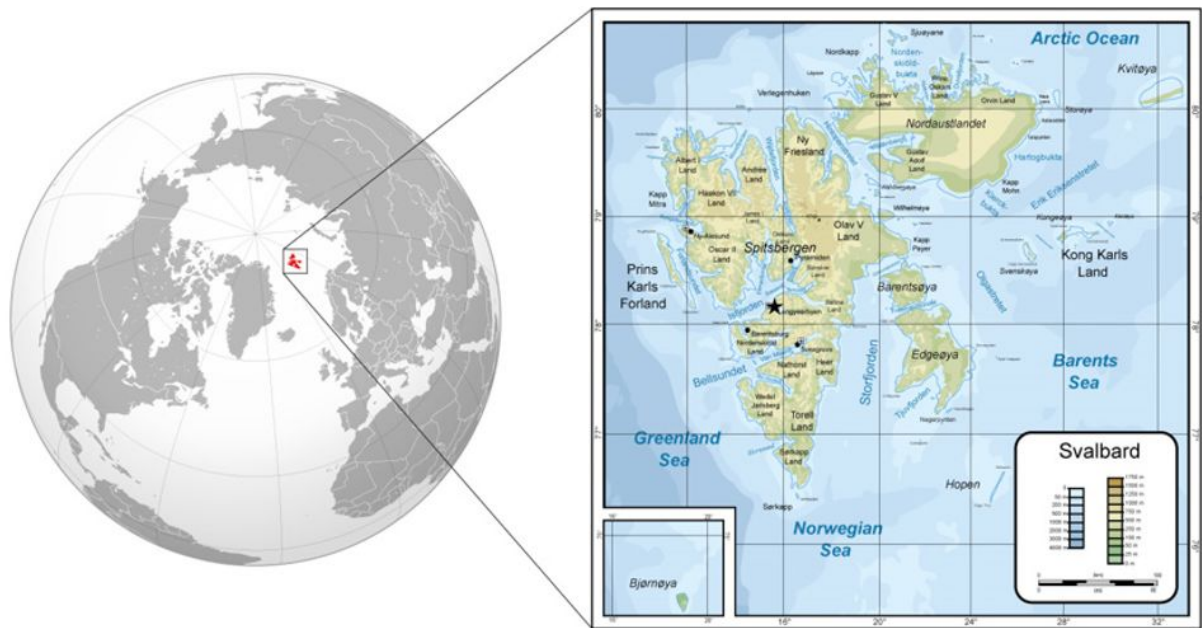


Fig. 2. Map showing the geographic location of Ny-Ålesund, Svalbard, Norway.

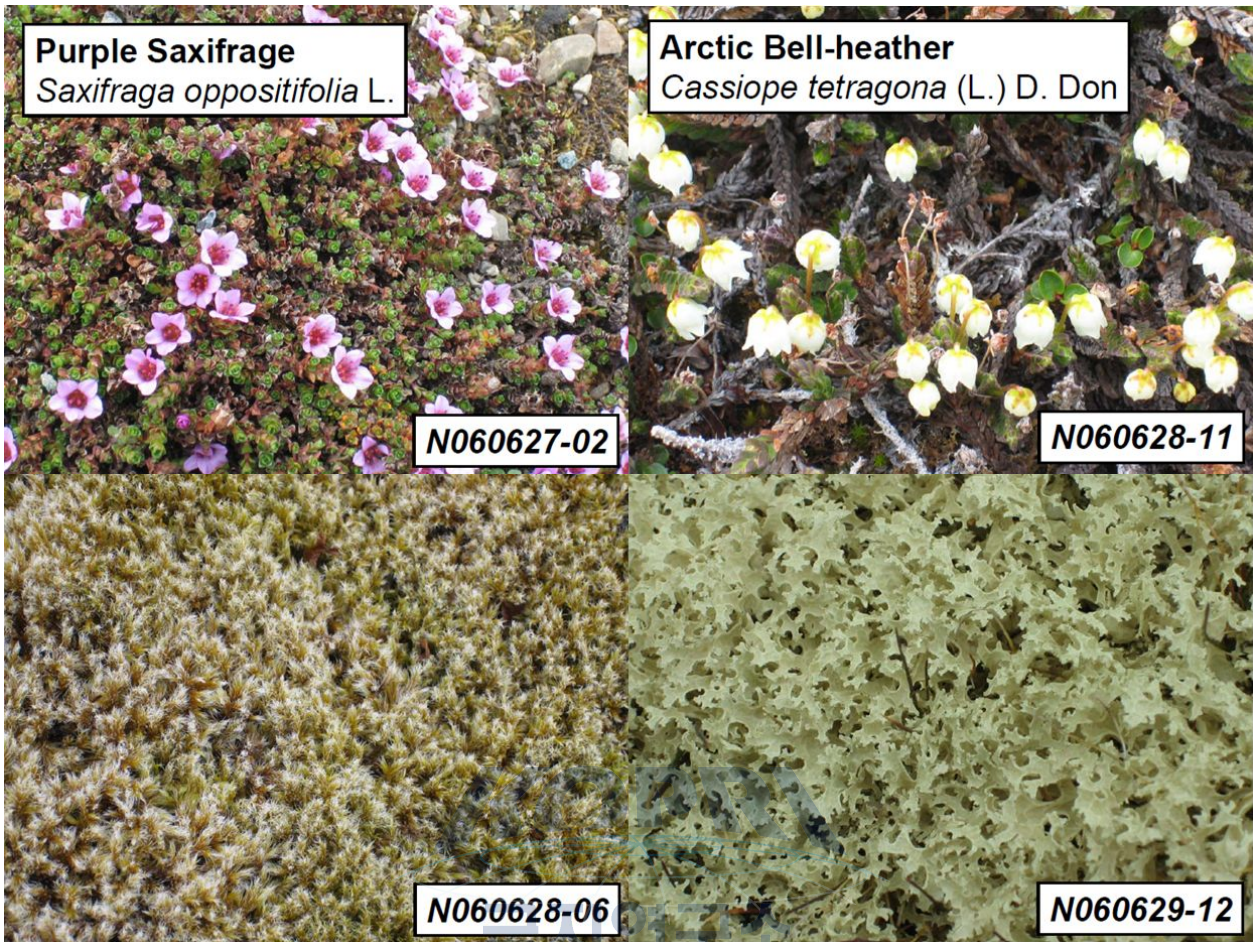


Fig. 3. Photos of the various vegetation samples of the polar regions

제 2 장 국내외 기술개발 현황

극 지역 식생의 탄소 동위원소 구성비에 관한 연구는 상당히 제한적으로 수행되어져 왔다 (Blake, 1991; Galimov et al. 2000; Skrzypek et al, 2008). 저·중위도 지역에서의 식물 탄소 동위원소 분석을 바탕으로 한 기존 문헌의 방대한 양에 비하면, 위도 60도 이상의 남북극에서 얻어진 자료는 아직까지 그 수가 극히 적은 편이다. 특히, 하나 혹은 인접한 몇 개 지점의 국지적 자료가 아닌 넓은 공간적 규모에서 서로 다른 고위도 지역들의 식물 탄소 동위원소 값을 다룬 경우는 예를 찾기 어렵다. 이는 극 지역 시료에 대한 접근의 어려움과 더불어, 통상적으로 학자들의 많은 관심을 받아온 목본류 식물이 극지에 드물게 분포하는 것에서 기인했다고 여겨진다.

국내 연구자에 의한 극지 식생의 탄소 동위원소 값에 관한 연구는 Park et al. (2007)과 Lee et al. (2009) 외에 전례를 찾을 수 없으며, 국내 학술지에 보고된 바는 전무하다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 방법

1. 남북극 식생의 탄소 동위원소 조성 화학 분석

남극 킹 조지섬 바톤 반도(남위 62.2도, 서경 59.8도; Fig. 4) 에서 자라는 식생의 안정 탄소 동위원소 조성 자료에 노르웨이 스발바르 제도의 뉘올레순(북위 78.9도, 동경 11.8도)의 식생을 추가로 채취, 분석하였다.

남극 세종 기지가 위치한 바톤 반도의 연 강수량은 440 mm 이며, 연 평균 기온은 -2°C , 여름철 평균기온은 2°C 이다. 지면에는 빙하에 의해 기반암이 침식된 빙식 작용의 흔적들이 남아있고, 지표 대부분은 기반암, 빙퇴석, 기계풍화산물, 구조토, 고해빈 등 주로 물리적 풍화작용으로 생긴 물질로 덮여있다 (Araya and Herve, 1970). 이 곳의 후기 팔레오세~에오세 퇴적층에서는 열대~아열대성 기후를 지시하는 고사리류와 너도밤나무 등 활엽수류의 식물화석이 보고되기도 하였다 (전희영 외, 1994).

한편 뉘올레순의 연 강수량은 430 mm 이며, 연 평균 기온은 -5°C , 여름철 평균 기온은 4°C 이다 (Førland et al., 2011). 인근의 빙하전면지와 그로부터 조금 떨어진 해안에서 관다발식물, 이끼, 지의류를 포함하는 다양한 식생을 무작위로 채취하였으며, 도감을 활용하여 생물종을 동정하였다. 채취한 시료는 관다발식물 28점, 이끼 16점, 지의류 11점 등 총 55점이다. 시료의 채취 장소는 Fig. 5에 도시되어있으며, 세부 GPS 정보와 생물종 동정 자료는 Table 1에 정리하였다.

각각의 시료는 세척, 건조 후 분말 형태로 갈아 탄소 동위원소 분석을 수행하였다. 분석에는 서울대학교 농생명과학공동기기원의 elemental analyzer가 부착된 IsoPrime continuous gas flow stable isotope mass spectrometer (NA Series 2, CE Instruments)를 활용하였다. 탄소 동위원소 분석치의 오차는 0.1‰ 미만이다.

2. 남북극 식생의 탄소 동위원소 조성 통계 분석

기존 문헌으로부터 식생의 탄소 동위원소 분석 자료를 수집하였다 (Table 1). 극지방의 독특한 환경적 특성을 다루어내기 위해, 조사 범위는 남·북반구 위도 60도 이상에 한정하였다. 자료에 포함된 지역은 유럽 북부, 시베리아, 알래스카, 캐나다 북부, 그린란드와 남극대륙 및 부속 도서 등이다. 해당 지점들을 세계지도 상에 도시하면 Fig. 6와 같다. 자료의 수집은 실험실 혹은 인공적인 환경 조작의 영향을 받지 않고 야생에 존재하는 현생 식물만을 대상으로 한정

하였으며, 식물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 각각이 채취된 지점의 위도와 경도, 연 평균 기온과 6월~8월 여름철 평균 기온, 연 강수량을 데이터 셋에 포함하였다. 이때 각 지역의 기후조건은 원 출처에 명기된 경우 그대로 사용하였으며, 그렇지 않은 경우 GPCC 0.5*0.5 V6 Precipitation (1981-2010) 과 GHCN-CAMS 0.5*0.5 Land Temperature (1981-2010) 에서 자료를 보충하였다. 각각의 샘플이 채취된 연대를 반영하여 화석연료 사용에 따른 대기 중 이산화탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 감소를 보정하였으며 (Rubino et al. 2013), 식물체 전부가 아닌 잎 등 일부분을 활용한 분석 값의 경우 식물 조직 간의 차이를 고려하여 역시 보정하였다(Badeck et al., 2005; Cernusak et al., 2009).

3. 극지 식생의 탄소 동위원소비와 환경 요인의 관련성

1과 2를 통하여 구축한 데이터베이스를 바탕으로 통계분석을 수행하였다. 우선 One-way ANOVA로 관다발식물, 이끼, 지의류 세 식생 그룹 간에 탄소 동위원소 구성비에 차이가 나타나는지 확인하였다. 또 각 그룹에 대해 단순 선형 회귀분석을 수행하여 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 개별 환경요소의 관련성을 확인하였다. 샘플링 빈도에 따른 자료의 편향을 줄이기 위해, 동일 연구 동일 지점에서 제시된 탄소 동위원소비 자료들은 일차적으로 동일 종의 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 평균내고, 다시 서로 다른 종들의 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 평균하는 방식으로 해당 지점을 대표할 만한 식생 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 얻도록 하였다. 회귀분석의 인자에는 연 평균기온, 여름철 평균기온, 연 강수량, 위도가 포함되었으며, 각각은 잔차의 정규분포 원칙을 위배하지 않는다. 한편 단순 선형 회귀분석에서 가장 큰 기여도를 보인 인자에 나머지 요소를 차례로 추가하는 방식으로 다중 회귀분석을 수행하고, F-test를 통해 모델의 설명력에 유의한 증가가 있는지 확인하였다. 모든 통계 처리에는 통계프로그램 R을 활용하였다.

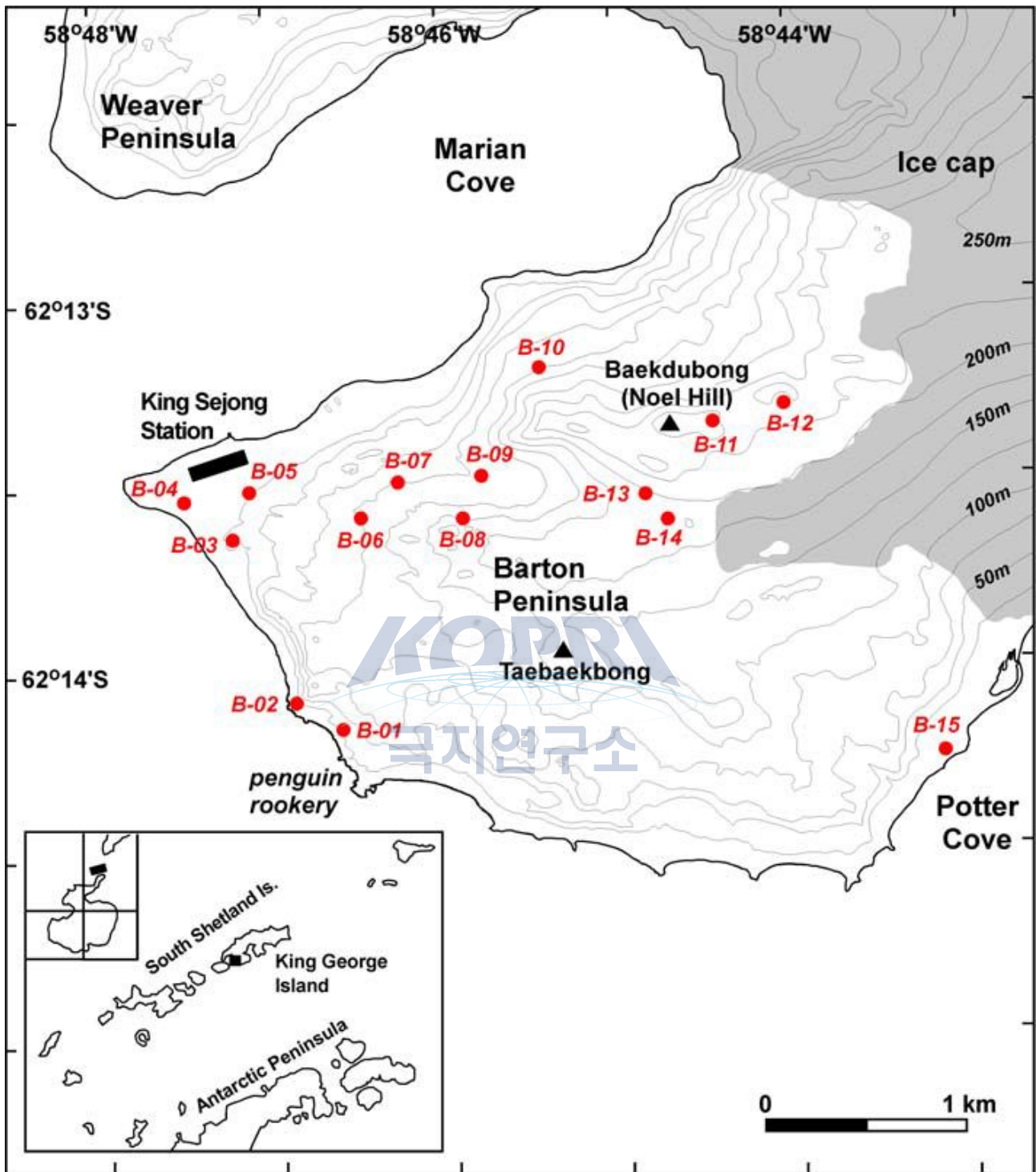


Fig. 4. Map showing the sampling sites in Barton peninsula, King George Island, Antarctica



Fig. 5. Map showing the sampling sites in Ny-Alesund (Google Earth)

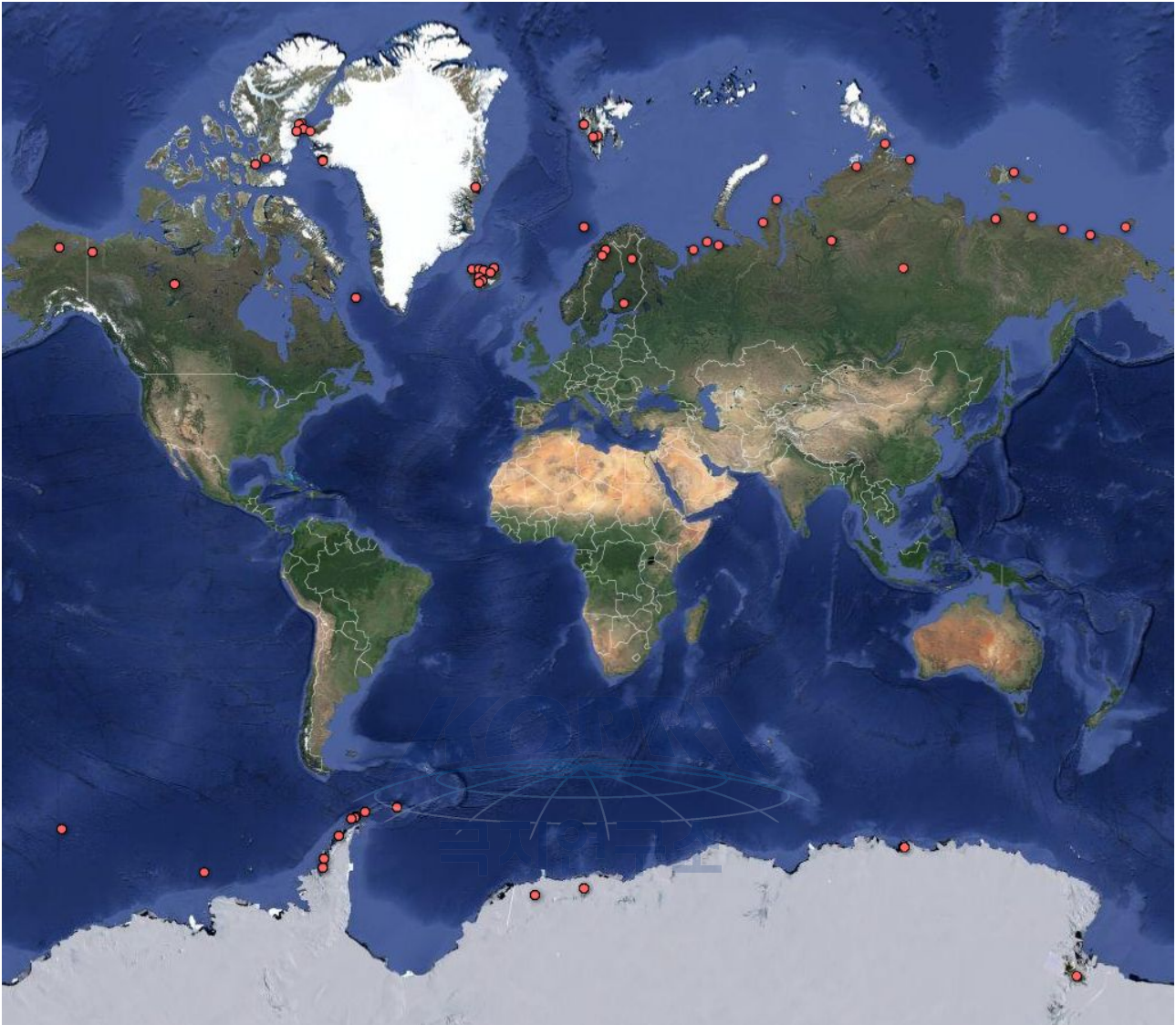


Fig. 6. Map indicating the location of the sites included in the $\delta^{13}\text{C}$ dataset (Google Fusion Table)

Type	Latitude	$\delta^{13}\text{C}$	MAP	MAT	MST	Data source
Vascular plants	68.4	-28.1	300	1	7	Aerts et al. 1999
	76.7	-28.2	180	-17	2	Blake 1991
	78.5	-31.7	240	-14	2	Blake 1991
	78.6	-29.5	240	-14	2	Blake 1991
	78.9	-30.4	240	-14	4	Blake 1991
	78.5	-31.5	110	-10	3	Blake 1991
	76.3	-29.3	180	-17	2	Choy et al. 2010
	78.6	-30	240	-14	2	Choy et al. 2010
	-62.1	-25.9	370	-2	2	Cipro et al. 2011
	-60.7	-28.3	270	-3	1	Galimov 2000
	61.5	-26.5	640	4	15	Hemming et al. 2005
	67.4	-29	500	-1	12	Hemming et al. 2005
	-67.6	-30	500	-5	-1	Huiskes et al. 2006
	64.3	-28.6	1040	4	10	Kloppel et al. 1998
	69.4	-26.3	420	-10	10	Kloppel et al. 1998
	74.5	-28.1	260	-9	1	Kristensen et al. 2011
	78.9	-29.6	490	-6	3	Kume et al. 2003
	-62.2	-26	440	-2	2	Lee et al. 2009
	68.4	-27.3	300	-1	7	Michelsen et al. 1996
	68.4	-26.9	300	-5	3	Michelsen et al. 1996
	68.1	-28	270	-9	13	Milligan et al. 2010
	74.5	-28.3	260	-9	4	Mosbacher et al. 2013
	-64.8	-27.8	750	-2	2	Park et al. 2006
	64.6	-28.9	620	-1	8	Skrzypek et al. 2008
	66.1	-29.3	620	3	10	Skrzypek et al. 2008
	76.5	-27.9	120	-11	5	Sullivan & Welker 2007
	66.2	-28.7	590	3	8	Wang & Wooller 2006
	66.1	-29	550	4	9	Wang & Wooller 2006
	66	-26.5	650	3	9	Wang & Wooller 2006
	65	-29.4	710	0	6	Wang & Wooller 2006
	68.4	-27.8	350	-2	6	Welker et al. 2003
	69.3	-28.2	340	-6	6	Welker et al. 2003
	68.9	-28	340	-6	7	Welker et al. 2003
	71.3	-27.5	310	-8	5	Welker et al. 2003
	73.4	-28.4	260	-10	3	Welker et al. 2003
	74.6	-29.3	240	-14	2	Welker et al. 2003
	77.7	-28.6	210	-15	0	Welker et al. 2003
	76.6	-30.4	190	-15	2	Welker et al. 2003
	71.6	-27.7	180	-14	3	Welker et al. 2003
	75.7	-29.9	170	-15	1	Welker et al. 2003
	71.9	-29.6	240	-15	6	Welker et al. 2003
	70.6	-28	210	-13	5	Welker et al. 2003
	70	-28.3	300	-13	3	Welker et al. 2003
	70.9	-28.3	180	-11	2	Welker et al. 2003

	79	-30.2	430	-5	4	This study
Mosses	68.4	-27.7	300	1	7	Aerts et al. 1999
	78.5	-23.3	240	-14	2	Blake 1991
	78.9	-25.1	240	-14	2	Blake 1991
	78.6	-29.8	240	-14	2	Blake 1991
	79	-31.2	240	-14	2	Blake 1991
	-68.6	-23.9	500	-5	-1	Bokhorst et al. 2007
	-62.1	-23.5	370	-2	2	Cipro 2011
	-71.5	-27.6		-16	-8	Cocks et al. 1998
	-60.7	-24.4	270	-3	1	Galimov 2000
	-61.5	-24.2		-3	1	Galimov 2000
	-62.5	-24.8	600	-3	2	Galimov 2000
	-62.4	-24.2	600	-3	2	Galimov 2000
	-78	-25.9	200	-18	-2	Hopkins 2009
	78.9	-28	490	-6	3	Kume et al. 2003
	-62.2	-25.8	440	-2	2	Lee et al. 2009
	-64.8	-27.7	750	-2	2	Park et al. 2007
	-64.6	-20.1	620	-1	8	Skrzypek 2008
	-66.1	-26.5	620	3	10	Skrzypek 2008
	-70.8	-26.6		-10	-1	Strauch et al. 2011
	-66.2	-25.7	590	3	8	Wang et al. 2006
	66.1	-26.1	550	4	9	Wang et al. 2006
	65	-27.9	710	0	6	Wang et al. 2006
	-66.3	-24.5	220	-9	0	Wasley et al. 2006a
	78.9	-27.4	430	-5	4	This study
78.9	-27.5	430	-5	4	This study	
Lichens	68.6	-22.4	500	-5	-1	Bokhorst et al. 2007
	76.3	-23.9	180	-17	2	Choy et al. 2010
	78.6	-24.4	240	-14	2	Choy et al. 2010
	62.2	-20.4	370	-2	2	Cipro et al. 2011
	71.5	-23.9		-16	-8	Cocks et al. 1998
	60.7	-22.6	270	-3	1	Galimov 2000
	61.5	-22.0		-3	1	Galimov 2000
	62.5	-22.8	600	-3	2	Galimov 2000
	67.6	-21.8	500	-5	-1	Huiskes et al. 2006
	78.9	-27.8	490	-6	2	Kume et al. 2003
	62.2	-24.1	440	-2	2	Lee et al. 2009
	70.8	-23.4		-10	-1	Strauch et al. 2011
	66.2	-23.2	590	3	8	Wang & Wooller 2006
	66.1	-25	550	4	9	Wang & Wooller 2006
	65	-24.4	710	0	6	Wang & Wooller 2006
	66.3	-25.2	220	-9	0	Wasley et al. 2006b
	78.9	-27.0	430	-5	4	This study

Table 1. Summary of collected vegetation $\delta^{13}\text{C}$ literature data from the polar regions

제 4장 연구개발 결과

새로 분석한 식생 시료의 안정 탄소 동위원소 분석 결과는 Table 2와 같다.

기존 문헌으로부터 수집한 고위도 지역 자료에 새로 획득한 자료를 더하여 데이터셋을 구축하였다. 수집된 식생의 탄소 동위원소 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -32.1% 에서 -16.9% 의 넓은 범위를 보였다. 극지 식생의 주요 그룹들 간에는 뚜렷한 차이가 관찰되었다. C_3 관다발 식물은 $-28.8 \pm 1.5\%$ (평균 \pm 표준편차), 이끼는 $-25.8 \pm 2.2\%$, 지의류는 $-23.5 \pm 2.6\%$ 의 평균값을 보인다. 이를 평균값과 최대값 최소값을 포함하는 그래프로 도시하면 Fig. 7과 같다. One-way ANOVA를 통한 통계검증은 관다발식물-이끼, 관다발식물-지의류, 이끼-지의류의 모든 쌍에 대해 통계적으로 유의한 ($p < 0.001$) $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이가 나타남을 지지하며, 그 값은 관다발식물-이끼-지의류 순으로 증가하였다.



Type	Sample number	$\delta^{13}\text{C}$	Location	Species
Vascular plants	060627-1	-31.7	N78 55 20.8, E11 53 14.9	<i>Saxifraga cespitosa</i>
	060630-26	-31.2	N78 55 50.5, E11 50 18.9	<i>Saxifraga cespitosa</i>
	060627-2	-29.9	N78 55 20.9, E11 53 16.2	<i>Saxifraga oppositifolia</i>
	060627-6	-28.6	N78 55 21.1, E11 53 16.0	<i>Saxifraga oppositifolia</i>
	060627-14	-27.4	N78 55 17.5, E11 53 43.0	<i>Saxifraga oppositifolia</i>
	060627-9	-29.8	N78 55 18.2, E11 52 49.0	<i>Silene acaulis</i>
	060627-12	-29.0	N78 55 17.4, E11 52 41.5	<i>Silene acaulis</i>
	060630-12	-27.6	N78 55 39.6, E11 51 16.3	<i>Silene acaulis</i>
	060627-10	-31.4	N78 55 18.1, E11 52 50.6	<i>Luzular arctica</i>
	060630-11	-31.7	N78 55 35.6, E11 51 46.6	<i>Dryas octopetala</i>
	060630-22	-29.2	N78 56 0.2, E11 48 58.8	<i>Cassiope tetragona</i>
	060630-22	-29.2	N78 56 0.2, E11 48 58.8	<i>Cassiope tetragona</i>
	060630-25	-30.7	N78 55 50.7, E11 48 40.9	<i>Pedicularis hirsuta</i>
	060627-4	-27.0	N78 55 21.9, E11 53 15.7	<i>Salix polaris</i>
	060630-23	-29.8	N78 55 50.7, E11 48 40.9	<i>Draba oxycarpa</i>
	060630-24	-29.7	N78 55 50.7, E11 48 40.9	<i>Cerastium arcticum</i>
	060627-8	-30.6	N78 55 20.2, E11 52 50.8	(unidentified)
	060627-28	-29.2	N78 55 3.5, E11 50 17.7	<i>Saxifraga oppositifolia</i>
	060627-24	-28.7	N78 55 1.9, E11 50 38.7	<i>Silene acaulis</i>
	060627-20	-30.0	N78 55 2.0, E11 50 37.0	<i>Luzular arctica</i>
	060627-30	-30.0	N78 55 0.1, E11 50 10.3	<i>Luzular arctica</i>
	060627-18	-31.3	N78 55 1.8, E11 50 36.6	<i>Dryas octopetala</i>
	060701-06	-30.2	N78 55 7.8, E11 51 0.1	<i>Oxyria digyna</i>
	060701-05	-29.7	N78 55 7.8, E11 51 0.1	<i>Pedicularis hirsuta</i>
	060627-25	-29.1	N78 55 4.4, E11 50 29.1	<i>Salix polaris</i>
	060628-5	-31.4	N78 54 44.6, E11 49 48.8	<i>Dryas octopetala</i>
	060628-7	-28.8	N78 54 43.9, E11 49 51.9	<i>Oxyria digyna</i>
	060628-11	-28.8	N78 54 44.0, E11 50 6.2	<i>Cassiope tetragona</i>

Mosses	060627-3	-30.5	N78 55 20.9, E11 53 16.5	<i>Sanionia uncinata</i>
	060627-13	-29.0	N78 55 17.6, E11 52 41.5	<i>Sanionia uncinata</i>
	060627-7	-26.0	N78 55 22.2, E11 53 3.6	(unidentified)
	060627-5	-27.9	N78 55 21.8, E11 53 15.5	(unidentified)
	060627-16	-25.6	N78 55 1.3, E11 50 34.9	<i>Sanionia uncinata</i>
	060627-23	-24.4	N78 55 1.7, E11 50 38.3	<i>Sanionia uncinata</i>
	060627-27	-26.7	N78 55 4.2, E11 50 26.9	<i>Sanionia uncinata</i>
	060627-15	-26.7	N78 55 1.2, E11 50 33.4	(unidentified)
	060627-26	-26.1	N78 55 4.2, E11 50 26.9	(unidentified)
	060627-22	-27.9	N78 55 1.7, E11 50 38.3	<i>Tomenthypnum nitens</i>
	060628-3	-27.9	N78 54 47.2, E11 49 33.7	<i>Sanionia uncinata</i>
	060628-4	-26.6	N78 54 44.6, E11 49 48.8	<i>Tomenthypnum nitens</i>
	060628-12	-31.1	N78 54 44.0, E11 50 6.2	<i>Tomenthypnum nitens</i>
	060628-6	-26.3	N78 54 44.6, E11 49 48.8	(unidentified)
	060629-02	-27.5	N79 8 35.8, E11 33 59.3	(unidentified)
Lichens	060627-11	-27.6	N78 55 18.2, E11 52 49.5	(unidentified)
	060627-17	-28.6	N78 55 1.3, E11 50 34.9	(unidentified)
	060627-19	-28.6	N78 55 1.8, E11 50 36.6	(unidentified)
	060627-21	-26.8	N78 55 2.0, E11 50 37.0	(unidentified)
	060627-29	-27.7	N78 55 3.7, E11 50 6.9	(unidentified)
	060628-8	-27.2	N78 54 39.0, E11 50 22.2	(unidentified)
	060629-05	-26.3	N79 8 40.2, E11 33 12.8	(unidentified)
	060629-04	-27.9	N79 8 39.2, E11 33 22.3	(unidentified)
	060629-12	-24.1	N79 11 5.5, E11 38 10.6	(unidentified)
	060629-03	-28.4	N79 8 35.8, E11 33 59.3	<i>Cladonia spp.</i>
060629-13	-29.0	N79 11 5.5, E11 38 10.6	<i>Cladonia spp.</i>	

Table 2. Stable carbon isotope composition of vegetation of the Ny-Alesund, Svalbard,

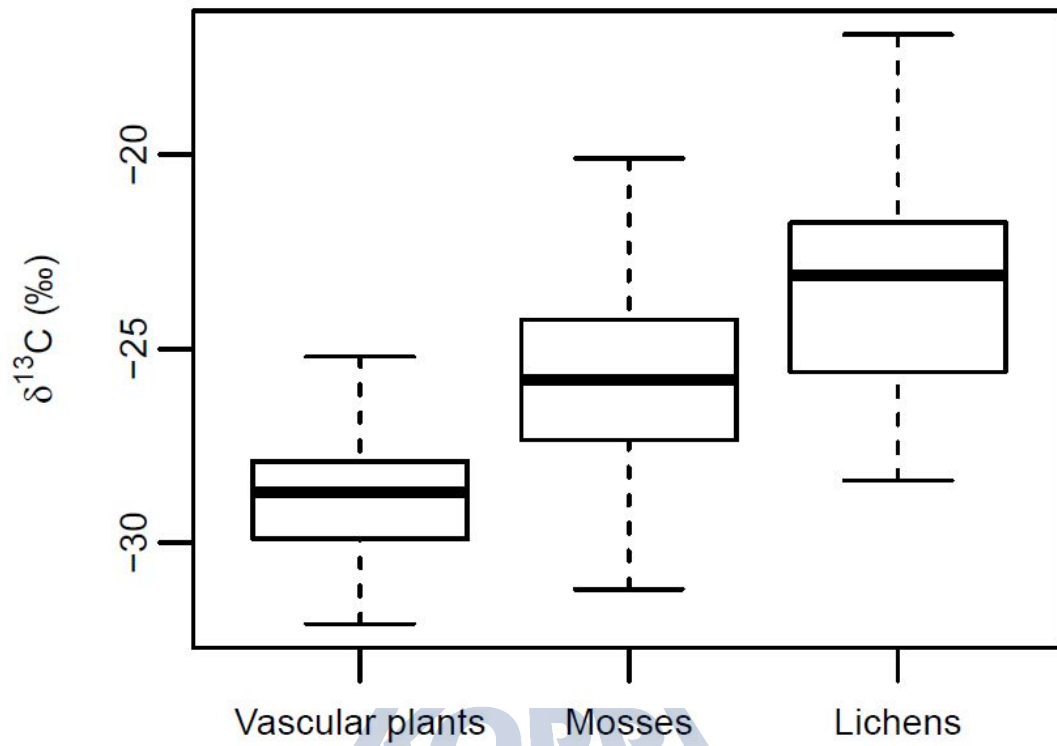


Fig. 7. Box and whisker plots of $\delta^{13}\text{C}$ values of three main groups of polar vegetation, C-3 vascular plants, mosses, and lichens. Median, upper and lower quartiles, maximum and minimum values are shown

세 식생 그룹이 모두 서로 다른 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 갖는 것으로 확인됨에 따라, 이들 집단 각각에 대해 별도로 환경 요인의 기여도를 평가하였다.

Fig. 8은 C_3 관다발 식물에 대한 단순 선형 회귀분석 결과를 종합한 것이다. 평균 연 강수량과 그 로그값 모두 $\delta^{13}\text{C}$ 과 통계적으로 유의한 상관관계를 보이지 않았다 (연 강수량 $p = 0.211$; \log_{10} (연 강수량) $p = 0.085$). 연 평균 온도와 여름철 평균 온도는 둘 모두 $\delta^{13}\text{C}$ 와 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났지만, 그 설명력은 미미했다 (연 평균 온도 $p = 0.014$, $R^2 = 0.13$; 여름철 평균 온도 $p = 0.050$, $R^2 = 0.09$). 반면 위도의 경우, 가장 뚜렷한 음의 상관관계가 관찰되었다 ($p < 0.001$, $R^2 = 0.38$). 이에 위도와 연 강수량, 위도와 연 평균 온도, 혹은 위도와 여름철 온도를 동시에 포함하는 다중 회귀 모델을 검토하였으나, F-test 결과 어떤 것도 위도만을 포함하는 단순 회귀 모델에서 통계적으로 유의한 수준의 설명력 증가를 가져오지 못했다.

이끼와 지의류의 경우에도, $\delta^{13}\text{C}$ 는 강수량과 무관한 것으로 나타났으며, 연 평균 및 여름 평균 온도와는 없거나 미미한 상관성을 보였다. 반면, 관다발 식물의 경우와 마찬가지로 위도와 $\delta^{13}\text{C}$ 사이에는 뚜렷한 음의 상관관계가 관찰되었다 (이끼 $R^2 = 0.21$, $p = 0.024$; 지의류 $R^2 = 0.44$, $p = 0.003$). Fig. 9는 이를 그래프 상에 도시한 것이다.

상기한 세 가지 식생 그룹의 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 여러 환경 요인 간의 관계에 관한 통계분석 결과를 정리하면 Table 3와 같다.



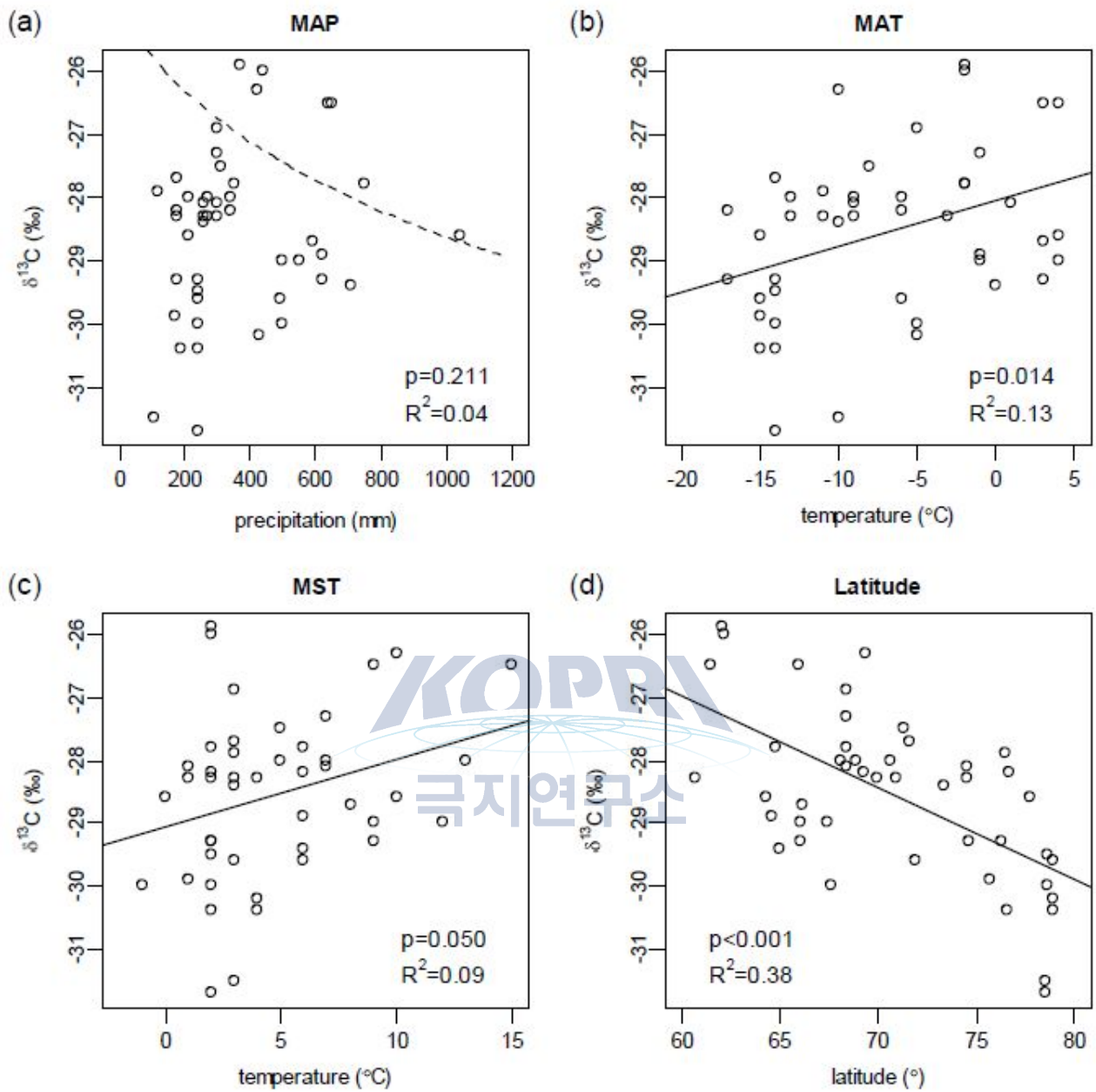


Fig. 8. Simple linear regression on $\delta^{13}\text{C}$ of C3 vascular plants with (a) MAP, (b) MAT, (c) MST, and (d) latitude. Solid regression lines are drawn only for statistically significant ($p<0.05$) relationship. Dotted line in (A) indicates global average $\delta^{13}\text{C}$ value proposed by Kohn (2010).

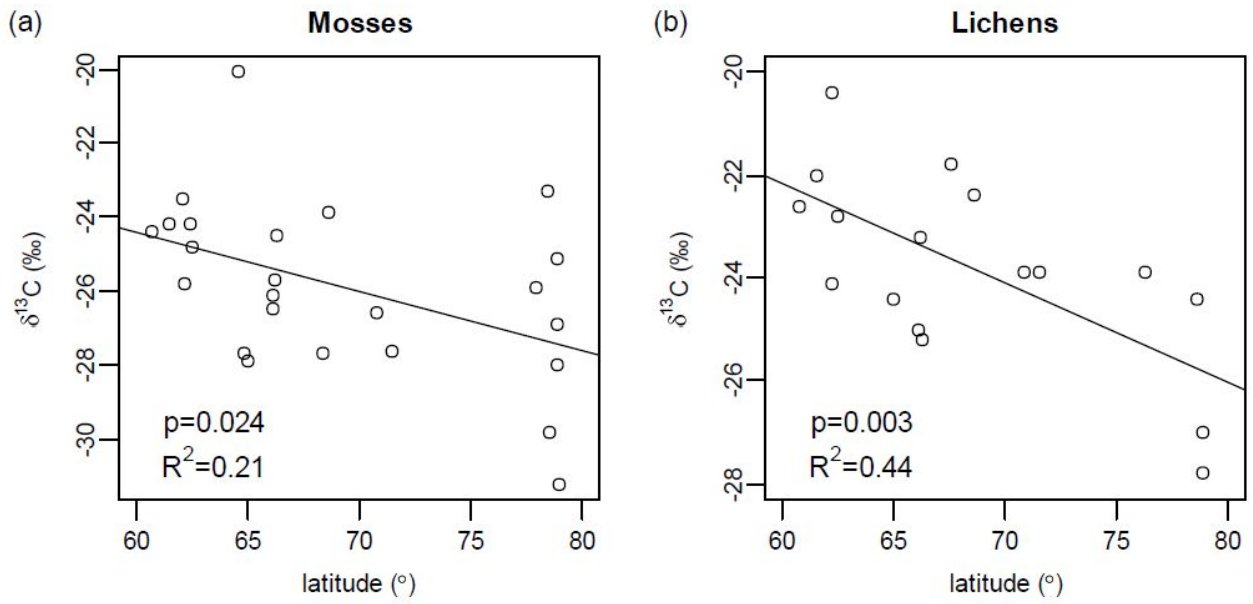


Fig. 9. Simple linear regression for the relationship between latitude and $\delta^{13}\text{C}$ of (a) mosses, and (b) lichens



	MAP	Log ₁₀ MAP	MAT	MST	Latitude
Vascular plants	p=0.211 R ² =0.04 (n=45)	p=0.085 R ² =0.07 (n=45)	p=0.014 R²=0.13 (n=45)	p=0.050 R²=0.09 (n=45)	p<0.001 R²=0.38 (n=45)
Mosses	p=0.622 R ² =0.01 (n=21)	p=0.552 R ² =0.02 (n=21)	p=0.267 R ² =0.06 (n=24)	p=0.732 R ² =0.01 (n=24)	p=0.024 R²=0.21 (n=24)
Lichens	p=0.997 R ² =0.00 (n=14)	p=0.975 R ² =0.00 (n=14)	p=0.575 R ² =0.02 (n=17)	p=0.439 R ² =0.04 (n=17)	p=0.003 R²=0.44 (n=17)

Table 3. Simple linear regression for each environmental parameter on vegetation $\delta^{13}\text{C}$

제 5 장 연구개발결과 토의

상기 연구 결과를 바탕으로, 우선 기존 연구가 어느 정도 수행되어져 온 관다발 식물에 대해 각 환경 요인과 식생 탄소 동위원소 비 간의 관계를 해석하고, 끝으로 이끼와 지의류의 경우를 검토하고자 한다.

제 1 절 C₃ 관다발 식물

1. 강수량

극 지역에 주목한 본 연구의 결과 극지 식생의 탄소 동위원소비는 강수량과 상관관계를 갖지 않는 것으로 나타났다. 이는 전 지구적으로 연 강수량이 식물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 좌우하는, 결과적으로 식물의 생명활동을 제약하는 주된 요소라고 결론지은 기존의 연구들과 정면으로 배치되는 결과이다 (Diefendorf et al., 2010; Kohn, 2010). 이러한 불일치는 두 가지 차원에서 설명될 수 있을 것으로 여겨진다.

비교적 단순한 해석은, 극 지역에서는 연 강수량이 저위도 중위도 지역에서만 토포의 실제 수분 환경을 충실히 반영하는 지표가 되지 못한다는 설명이다. 연 강수량은 특정 지역이 얼마나 습윤 혹은 건조한지를 대체적으로 가늠할 수 있게 하지만, 식물이 활용 가능한 토양 내 수분은 강수의 계절성이나, 안개와 개천 등 추가적인 수분 공급원, 미기후(microclimate) 등에 따라 달라질 수 있기 때문이다(Diefendorf et al., 2010). 특히 극 지역에서는 여름철이 짧아 식물이 성장하는 기간 동안의 물 조건과 연중 총 강수가 비례하지 않을 가능성이 있고, 빙하와 눈이 녹은 용빙수의 공급 등이 예상되는 바, 연 강수량과 실제 식물이 겪는 물 제한에는 차이가 있을 수 있다. 만약 토양 내 수분 함량이나 습도와 같은 지표가 대신 사용되었다면 $\delta^{13}\text{C}$ 과의 보다 뚜렷한 상관성이 나타났을 가능성도 있다.

그러나 이러한 한계를 일정 부분 받아들이더라도, 연 100 mm 내외에서 1000 mm 이상의 강수량 범위를 갖는 서로 다른 지역들의 자료에서 연 강수량과 $\delta^{13}\text{C}$ 의 상관관계가 전혀 나타나지 않았다는 점은 이례적이다. 특히 연 강수량 300 mm 이하의 지역 가운데에서도 식물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 -30‰ 내외의 낮은 수치를 보이는 곳들이 상당수 있는 것은 주목할 만하다. Fig. 8 (a)에 도시한 점선은 Kohn (2010)의 전 지구적 모델에서 제시한 강수량에 따른 평균 $\delta^{13}\text{C}$ 로, 본 연구에서 수집한 극 지역 식생 자료들의 대부분이 이를 수% 이상 하회하는 것을 확인할

수 있다. 따라서 강수량에 무관하게 나타나는 비교적 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 는 극 지역 전반에 걸친 특성으로 해석되며, 이는 강수량, 더 나아가 수분에 따른 식생의 성장 제한이 여타 중·저위도 지역에 비해 심각하지 않음을 지시하는 것으로 보인다. 앞서 언급되었던 용빙수의 충분한 공급이 그 한 가지 원인이 될 수 있으며, 낮은 기온으로 증발이 적게 일어나고 영구동토층으로 인해 배수가 제약되는 것도 극지에서 식물이 성장하는 환경이 비교적 습윤하게 유지되는 원인일 수 있을 것이다.

(2) 온도

온도와 식생의 $\delta^{13}\text{C}$ 값에 관한 기존 연구들은 상충되는 결과를 제시한다. 연구에 따라 양의 상관관계를 보인 경우와 음의 상관관계가 관찰된 경우가 모두 있으며 (Korner et al., 1991, Menot and Burns, 2001; Wang et al., 2013), 전 지구 단위의 메타분석은 기온이 $\delta^{13}\text{C}$ 에 영향을 미치지 않거나 그 영향이 매우 미미한 것으로 결론지은 바 있다 (Diefendorf et al. 2010; Kohn 2010). 본 연구에서는 둘 사이에 음의 상관관계, 즉 온도가 높을수록 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 높게 나타나는, 분별이 적게 일어나는 경향이 관찰되었다. 이는 높은 온도 하에서 동화작용의 속도가 빨라진다는 점과 높은 온도로 인해 수분 결핍이 강화되는 두 가지 측면에서 설명되는데, 앞서 살핀 극지방의 물 조건 특성을 고려한다면 전자가 좀 더 설득력 있는 원인으로 여겨진다. 다만 온도와 $\delta^{13}\text{C}$ 사이의 약한 상관성(연 평균 기온 $R^2 = 0.13$; 여름 평균 기온 $R^2 = 0.09$)을 감안할 때 온도 역시 극지 식생의 성장에 주되게 관여하는 요소라고 보기는 어렵다.

(3) 위도

극 지역 식생에 대한 분석에서 탄소 동위원소 비를 가장 잘 설명하는 것으로 밝혀진 요인은 강수량이나 기온이 아닌 위도였다. 위도는 그 자체로 식물에게 영향을 주는 원인이 될 수는 없으므로, 위도에 따라 변하는 하나 혹은 그 이상의 환경 요인이 이러한 결과를 가져왔을 것으로 생각할 수 있다.

앞서 살핀 온도 역시 그 중 하나일 가능성이 있다. 본 연구에 활용된 자료에서 온도는 실제로 위도와 어느 정도의 연관성을 보이는 바(연 평균 온도 $r = -0.50$; 여름 평균 온도 $r = -0.61$), 높은 위도에서의 낮은 기온이 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 이끌었다는 해석이 가능하다. 그러나 위도가 식생의 탄소 동위원소 비에 대해 갖는 기여도 ($R^2 = 0.38$)에 비해 온도의 기여도(연 평균 기온 $R^2 = 0.13$; 여름 평균 기온 $R^2 = 0.09$)가 크게 떨어지는 것은 온도 외에 다른 요인이 여전히 주되게 관여하고 있음을 말해준다.

다른 원인으로 고려해볼 수 있는 것은 위도에 따른 서로 다른 생물종의 분포이다. 같은 C₃ 관다발 식물이라 하더라도 키 큰 나무, 덩굴, 초본 등 그 형태에 따라 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이가 존재하며, 종에 따라서도 $\delta^{13}\text{C}$ 값에 차이가 있을 수 있음이 알려져 있다 (Brooks et al. 1997). 만약 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 갖는 생물종들이 대체로 더 높은 위도에 분포한다면, 관찰된 바와 같은 위도에 따른 $\delta^{13}\text{C}$ 변화 양상이 나타날 수도 있을 것이다. 그러나 특정 종을 대상으로 한 자료의 재분석은, 이러한 설명의 설득력을 약화시킨다. Fig. 10은 수집된 자료에서 극지방 전역에 널리 분포하는 식물의 한 속(genus)인 *Carex* 의 탄소 동위원소 값을 별도로 추출하여 위도와 함께 도시한 것이다. 개별 개체의 분석치를 포함하는 까닭에 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 편차는 다소 크게 나타나지만, 여전히 위도에 따른 감소 추세가 같은 생물 속 범위 내에서도 동일하게 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

이에 위도에 따른 탄소 동위원소 값의 변화를 이끄는 또다른 원인으로 고려해볼 수 있는 것은 햇빛의 영향이다. 위도에 따라 변하는 햇빛 조건은 크게 두 가지, 일조시간과 광량이다. 식물의 생장이 활발한 여름철에, 위도 66.5도 이상의 남북극권 내에서는 백야현상이 발생하며, 이 백야현상의 지속 기간은 극에 가까울수록 길어진다. 반면 이 기간 동안 태양은 아주 낮은 고도에 머무르며, 따라서 단위시간당 광량은 낮은 수준으로 유지된다. 식생의 탄소 동위원소 값에 미치는 빛의 영향에 관한 기존 실험 연구에 따르면, 식생의 탄소 동위원소는 낮과 밤이 교차하는 조건에 비해 24시간 내내 빛이 지속적으로 비치는 조건에서, 또한 강한 빛 보다는 약한 빛 아래서 더 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 를 갖는다 (Zimmerman and Ehleringer, 1990; Yang et al., 2009). 이는 위도 증가에 따른 $\delta^{13}\text{C}$ 의 감소 패턴과 잘 부합한다.

이러한 설명은 위도에 따른 탄소 동위원소 값의 변화가 중·저위도의 기존 연구에서는 왜 잘 관찰되지 않았는지에 대한 답을 함께 제시한다. 낮은 위도에서는 백야현상이 발생하지 않을 뿐만 아니라, 광량의 제약이 심하지 않고 위도 변화에 따른 광량의 차이 역시 상대적으로 크지 않기 때문이다(Campbell and Aarup, 1989). 광량과 탄소 동위원소 값의 관계를 살핀 기존 연구에서도, 햇빛이 식물의 광합성을 제한하는 요인으로 작용하는 것은 주로 광량이 상당히 낮게 유지되는 조건 하의 경우임을 확인할 수 있다(Hanba et al., 1997).

종합하면, 현재로서 극 지방에서의 위도에 따른 $\delta^{13}\text{C}$ 의 변화를 비교적 잘 설명해내는 가설은 일조시간과 광량인 것으로 판단된다. 그러나 이는 위도로부터 간접적으로 얻은 추론인 만큼, 햇빛 조건의 차이가 극 지역 식생의 생물활동을 제한하는 주된 환경 요인이라는 추정을 보다 명확히 하기 위해서는 각 지점에서의 실측을 통한 자료 획득 등이 수반되어야 할 것으로 보인다.

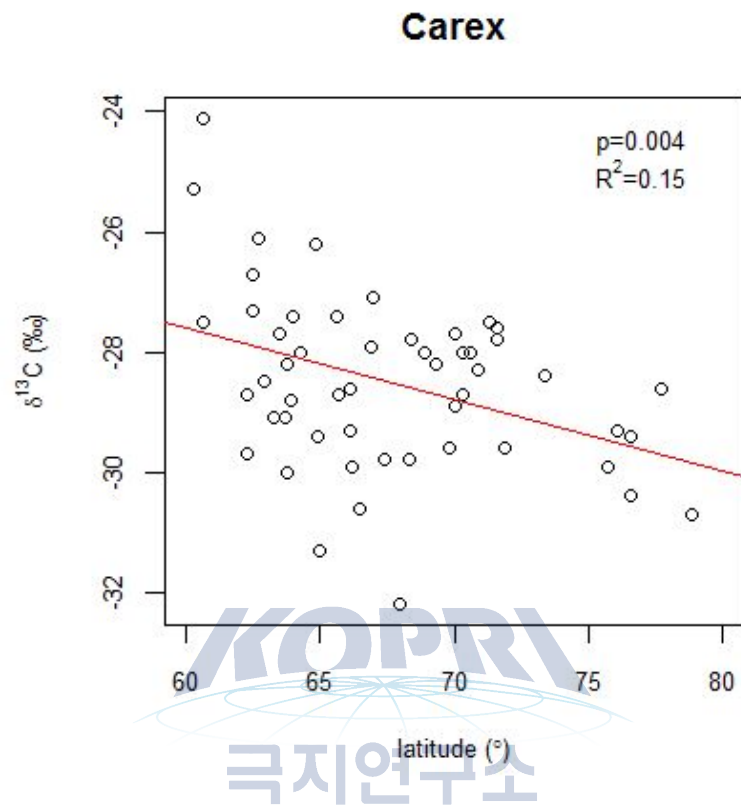


Fig. 10. Simple linear regression for the relationship between latitude and $\delta^{13}\text{C}$ of *Carex*

제 2 절 이끼 및 지의류

이끼와 지의류의 광합성 기작 및 안정 탄소 동위원소 조성에 관해서는 현재까지 충분한 연구가 수행되지 못하였고, 극지방에서는 특히 부족한 실정이다. 본 연구 결과에 따르면 이끼와 지의류는 각각 C₃ 관다발 식물을 약간 상회하는 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가진다.

한편 강수량 및 온도와 무관하며 위도에 따라 변하는 이끼 및 지의류의 $\delta^{13}\text{C}$ 값 패턴은 관다발식물의 경우와 유사하다. 그러나 이끼 및 지의류는 수분 조절을 능동적으로 하지 못하는 poikilohydric한 특성을 갖는 등 관다발식물과는 그 생리에 근본적인 차이가 있으므로 (Schlensog et al., 2013; Wasley et al., 2006), 동일한 설명을 적용할 수는 없다. 여러 환경 요인과 이끼 혹은 지의류의 탄소 동위원소 비와의 관계는 실험실 조건에서도 여전히 명확히 규명되지 않은 바, 본 연구에서 관찰된 패턴을 보다 명확히 해석하기 위해서는 기초연구들이 선행되어야 할 것이다.



제 6 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

이 연구는 연구계획서에 제시된 대로 수행되었으며, 결과보고서에 정리된 연구결과는 전문 학술지에 투고하고자 한다. 현재까지 고위도 식생의 탄소 동위원소 구성비를 전 지구 단위에서 종합하여 다룬 연구는 전무하므로, 수집된 자료는 관련 분야의 타 연구자들에게 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 연구 결과는 극지에서의 기후 변화에 따른 지표 식생의 변화를 예측하거나, 혹은 동식물의 사체 등 유기물을 이용한 고기후·고환경 복원에도 유용한 참고 사항으로 활용될 수 있을 것이다.



제 7 장 연구개발결과의 활용계획

이 연구결과는 논문으로 작성되어 관련 학술지에 투고할 것이다.



제 8 장 참고문헌

- 전희영, 장순근, 이종익, 1994, 킹조지섬 바톤반도의 세종기지 주변에서 산출되는 식물화석과 그 층서. 한국고생물학회지, v. 10, p. 69-82.
- Araya, A. R. and Herve, F. A., 1970, Periglacial phenomena in the South Shetland Islands. In: Adie, R. J. (Ed.), Antarctic Geology and Geophysics, Oslo, 1972, Universitetsforlaget, pp. 105-111.
- Badeck, F.W., Tcherkez, G., Nogues, S., Piel, C., Ghashghaie, J., 2005. Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs--a widespread phenomenon. Rapid communications in mass spectrometry : RCM 19, 1381-1391.
- Blake, W., 1991, Ratios of stable carbon isotopes in some High Arctic plants and lake sediments. Journal of Paleolimnology 6, 157-166.
- Brooks, J. R., Flanagan, L. B., Buchmann, N., Ehleringer, J. R., 1997. Carbon isotope composition of boreal plants: Functional grouping of life forms. Oecologia 110, 301-311
- Brugnoli, E., Hubick, K. T., von Caemmerer, S., 1988. Correlation between the carbon isotope discrimination in leaf starch and sugars of C₃ plants and the ratio of intercellular and atmospheric partial pressures of carbon dioxide. Plant Physiology 88, 1418 - 24
- Campbell, J.W., Aarup, T., 1989. Photosynthetically Available Radiation at High-Latitudes. Limnol Oceanogr 34, 1490-1499.
- Cernusak, L.A., Tcherkez, G., Keitel, C., Cornwell, W.K., Santiago, L.S., Knohl, A., Barbour, M.M., Williams, D.G., Reich, P.B., Ellsworth, D.S., Dawson, T.E., Griffiths, H.G., Farquhar, G.D., Wright, I.J., 2009. Viewpoint: Why are non-photosynthetic tissues generally ¹³C enriched compared with leaves in C₃ plants? Review and synthesis of current hypotheses. Functional Plant Biology 36, 199-213.
- Chapin, F.S., 1987. Environmental controls over growth of tundra plants. Ecological Bulletins, 69-76.
- Diefendorf, A.F., Mueller, K.E., Wing, S.L., Koch, P.L., Freeman, K.H., 2010. Global patterns in leaf ¹³C discrimination and implications for studies of past and future climate. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 107, 5738-5743.
- Farquhar, G. D., O'Leary, M. H., Berry, J. A., 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and intercellular carbon dioxide concentration in leaves. Australian

Journal of Plant Physiology 9, 121 - 137

- Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R., Hubick, K. T., 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual review of plant biology* 40, 503–537
- Førland, E.J., Benestad, R., Hanssen-Bauer, I., Haugen, J.E., Skaugen, T.E., 2011. Temperature and Precipitation Development at Svalbard 1900 - 2100. *Advances in Meteorology* 2011, 1–14.
- Galimov, E. M., 2000. Carbon isotope composition of Antarctic plants. *Geochim Cosmochim Acta* 64, 1737–1739.
- Hanba, Y.T., Mori, S., Lei, T.T., Koike, T., Wada, E., 1997. Variations in leaf $\delta^{13}\text{C}$ along a vertical profile of irradiance in a temperate Japanese forest. *Oecologia* 110, 253–261
- Kohn, M.J., 2010. Carbon isotope compositions of terrestrial C_3 plants as indicators of (paleo)ecology and (paleo)climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 19691–19695.
- Korner, C., Farquhar, G.D., Wong, S.C., 1991. Carbon Isotope Discrimination by Plants Follows Latitudinal and Altitudinal Trends. *Oecologia* 88, 30–40.
- Lee, Y.I., Lim, H.S., Yoon H.I., 2009. Carbon and nitrogen isotope composition of vegetation on King George Island, maritime Antarctic. *Polar Biology* 32, 1607–1615.
- Loader, N.J., Young, G.H.F., Grudd, H., McCarroll, D., 2013. Stable carbon isotopes from Torneträsk, northern Sweden provide a millennial length reconstruction of summer sunshine and its relationship to Arctic circulation. *Quaternary Science Reviews* 62, 97–113.
- Ma, J.Y., Chen, T., Qiang, W.Y., Wang, G., 2005. Correlations between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors in desert plant *Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim. *J Integr Plant Biol* 47, 1065–1073
- Menot, G., Burns, S.J., 2001. Carbon isotopes in ombrogenic peat bog plants as climatic indicators: calibration from an altitudinal transect in Switzerland. *Organic Geochemistry* 32, 233–245.
- Murphy, B. P., Bowman, D. M. J. S., 2009, The carbon and nitrogen isotope composition of Australian grasses in relation to climate. *Functional Ecology* 23, 1040–1049
- Park, J.H., Day, T. A., Strauss, S., Ruhland, C. T., 2006. Biogeochemical pools and fluxes of carbon and nitrogen in a maritime tundra near penguin colonies along the Antarctic Peninsula. *Polar Biology* 30, 199–207.

- Rubino, M., Etheridge, D.M., Trudinger, C.M., Allison, C.E., Battle, M.O., Langenfelds, R.L., Steele, L.P., Curran, M., Bender, M., White, J.W.C., Jenk, T.M., Blunier, T., Francey, R.J., 2013. A revised 1000 year atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ -CO₂ record from Law Dome and South Pole, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, 8482–8499.
- Schlenso, M., Green, T.G., Schroeter, B., 2013. Life form and water source interact to determine active time and environment in cryptogams: an example from the maritime Antarctic. *Oecologia* 173, 59–72.
- Skrzypek, G., Paul, D., Wojtun, B., 2008. Stable isotope composition of plants and peat from Arctic mire and geothermal area in Iceland. *Polish Polar Research* 29, 365–376.
- Wang, N., Xu, S.S., Jia, X., Gao, J., Zhang, W.P., Qiu, Y.P., Wang, G.X., 2013. Variations in foliar stable carbon isotopes among functional groups and along environmental gradients in China – a meta-analysis. *Plant biology* 15, 144–151.
- Wasley, J., Robinson, S.A., Lovelock, C.E., Popp, M., 2006. Some like it wet – biological characteristics underpinning tolerance of extreme water stress events in Antarctic bryophytes. *Functional Plant Biology* 33, 443.
- Yang, H., Pagani, M., Briggs, D.E., Equiza, M.A., Jagels, R., Leng, Q., Lepage, B.A., 2009. Carbon and hydrogen isotope fractionation under continuous light: implications for paleoenvironmental interpretations of the High Arctic during Paleogene warming. *Oecologia* 160, 461–470.
- Zimmerman, J.K., Ehleringer, J.R., 1990. Carbon isotope ratios are correlated with irradiance levels in the Panamanian orchid *Catasetum viridiflavum*. *Oecologia* 83, 247–249.



1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.