

JP2015-002-2016(1)

제주도 제4기 미고결 퇴적층 연구 중장기 계획 수립

A Planning of Quaternary Sediments Research in
Jeju island

2016. 04. 30

한국지질자원연구원

JP2015-002-2016(1)

제주도 제4기 미고결 퇴적층 연구 중장기 계획 수립

**A Planning of Quaternary Sediments Research in
Jeju island**

2016. 04. 30.

한국지질자원연구원

제 출 문

한국지질자원연구원장 귀하

본 보고서를 “제주도 제4기 미고결 퇴적층 연구 중장기 계획 수립”
자체사업의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 04. 30

주관연구기관명 : 한국지질자원연구원

주관연구책임자 : 이 진 영

참 여 연 구 원 : 홍 세 선

” : 최 한 우

” : 임 재 수

” : 김 진 철

” : 권 창 우

” : 카츠키 코우타

요 약 문

I. 제 목

제주도 제4기 미고결 퇴적층 연구 중장기 계획 수립

II. 연구 목적 및 필요성

- 제주도 제4기 퇴적층에 대한 층서 규명 및 제주도의 고환경 해석기술 활용
- 제주도 화산활동 시기와 제4기 퇴적층의 지질학적 활용 계획 수립
- 제주도 지질조사와 새로운 증거를 기반으로 한 제주도 지질층서 수립

III. 연구 내용 및 범위

- 제주도를 대상으로 한 국내외 연구논문 분석을 통해 제주도 연구의 현황 및 시사점을 도출함
- 제4기 지질연구에서 가장 중요한 미고결 퇴적층시료의 획득과 지질연대측정방법을 제주도 화산활동 규명과 고환경 해석의 목적에서 검토하고 시범 조사를 수행함
- 제4기퇴적층 시료획득을 위하여 핸드오거, 피트샘플, 시추기기 등의 활용을 검토하고 시범적인 예비 연구를 수행함
- 제4기퇴적층에 적용 가능한 지질연대 측정 방법을 검토하고, 현무암 사이에 협재한 미고결퇴적층과 습지퇴적층, 그리고 화산체의 사면퇴적층을 대상으로 방사성탄소연대분석과 광여기루미네센스(OSL) 분석을 예비 검토함
- 제4기퇴적층의 고환경 변화를 분석하기 위하여 퇴적물의 입도분석과 대자율 측정, 탄소안정동위원소 분석, 주성분 분석과 광물조성 등의 활용을 검토함
- 이를 통하여, 제4기 지질학적 관점에서 제주도에 대한 연구 수요와 문제를 검토하고, 문제 해결을 위한 과제 도출, 해결 방안 및 추진 전략을 도출함

IV. 연구 결과 및 해석

- 제주도에 대한 국내외 연구는 지질학적인 측면의 연구가 빈약하여 장기적이고 지속적인 지질조사연구가 필수적으로 요구됨
- 제주도에 분포하는 제4기 미고결 퇴적층은 화산활동과 화산활동 사이에 나타난 고환경의 변화기록을 포함하고 있기 때문에 제주도의 고환경 복원연구가 가능할 것으로 평가됨
- 제4기퇴적층의 형성시기는 화산활동 시기를 규명하는데 매우 유용하며, 특히 방사성탄소연대측정 및 OSL 연대측정이 적용가능하여, 제주도의 화산활동 층서 정립에 즉각적인 활용이 가능한 것으로 조사됨. 이러한 측면에서 제주도의 새로운 지질층서의 정립이 가능할 것으로 평가됨
- 제주도에 분포하는 제4기 미고결 퇴적층에 대한 예비 조사와 검토를 토대로 3개의 문제 해결형 과제를 우선 도출함
 - 제주도 한라산 일대의 지표지질환경도 제작 연구
 - 제주도 미고결 퇴적층 분포와 소형화산체 화산 층서 재정립 연구
 - 제주도 제4기 지질조사 및 고환경 변화 연구

V. 연구 결과의 활용계획

- 제주도가 형성되기 시작한 시기부터 현재에 이르기까지의 기간은 지질학적으로 제4기(Quaternary)에 해당되며, 이 시기는 지질학적으로 급격한 환경변화가 있었으며, 화산활동을 포함한 기후환경의 변화 연구를 통해 제주도의 고환경을 이해하고 미래의 정책 수립에 유용할 것으로 기대됨
- 현재까지 도출된 문제해결형 과제는 제주도의 지속발전과 항구적 활용을 위하여 필수적인 연구로서 장기적인 관점에서 반드시 수행되어야 할 과제임
- 향후 본 연구결과를 통해 제주도에 분포하는 제4기퇴적층을 이해하고, 제주도에 산재한 오름의 분출시기 해석과 같은 추가적인 연구가 수행된다면, 제주도의 화산활동과 미래 제주의 안전을 위하여 매우 중요한 연구결과로 활용될 것임

S U M M A R Y

I. Title

A Planning of Quaternary Sediments Research in Jeju island

II. Research objective and necessity

- To secure stratigraphy and paleoclimate interpretation techniques for Jeju Island Quaternary deposits.
- Paleoclimate analysis and interpreting geological evolution of Quaternary deposits related to Jeju island volcanic activity.
- Establishing geological stratigraphy over Jeju Island based on geological survey and new evidences.

III. Research contents and scope

- Identifying the current status and implications of Quaternary research of Jeju Island through analyzing domestic and international papers.
- Development of geological dating methods and the acquisition of unconsolidated sediment samples to identify past volcanic activities and to interpret paleo environmental changes over Jeju Island.
- Assessment of hand augers, peat samplers and drilling tools for obtaining Quaternary deposits - carrying out preliminary research.
- Assessment of possible applications of geological dating methods. In particular, applications of radiocarbon dating and optically stimulated luminescence (OSL) dating methods to unconsolidated sediments, marsh sediments and slope deposits.
- Assessment of possible applications of particle size analysis, susceptibility measurements, along with carbon stable isotope, main component and

mineral composition analysis (XRD, XRF) to Quaternary deposits in order to better understand the Quaternary environmental changes over Jeju Island.

- By doing so, we can assess the Quaternary geological issues and research needs of Jeju island. Then, we can derive tasks for troubleshooting and develop problem-solving strategies for these important Quaternary geological issues.

IV. Research result and interpretation

- There has been little research on Quaternary geology of Juju Island and a long-term sustainable geological research is needed.
- Quaternary unconsolidated sediments contain records of paleo environmental changes during and between volcanic activities - these will enable us to reconstruct the past environmental changes.
- Understanding the formation period of the Quaternary sediments is very useful for identifying periods of volcanic activities. It is possible to identify the formation period by utilizing radiocarbon dating and optically stimulated luminescence (OSL) dating methods. In this respect, we expect to establish new geological stratigraphy over Jeju Island.
- Based on the preliminary investigation and review of unconsolidated sediments in Jeju Island, we suggest three priority tasks to solve:
 - Thematic mapping of surface environmental Geology around Mt. Halla.
 - Re-evaluation of unconsolidated Quaternary deposit distribution and small-scale volcanic stratigraphy.
 - Investigation of Quaternary geology and past environmental changes over Jeju Island.

V. Plan for research result application

- Juju Island was formed during the Quaternary period. Since the formation of the island, there has been rapid geological and environmental changes. Therefore, Quaternary deposits distributed throughout Jeju island contain important paleoclimate records such as volcanic events. Investigating these past environmental changes from quaternary deposits will be extremely useful for future policy making.
- Three priority tasks suggested above should be conducted for long-term sustainable development of Jeju Island.
- Further understanding of the quaternary deposits of Jeju island through this research result and additional studies of volcanic cone spouting time interpretation will be used as an instrumental result for volcanic activity and future safety of Jeju island.

목 차

제 1 장 기획 연구의 배경 및 필요성	1
제 1 절 배경 및 필요성	1
제 2 절 국내외 연구 현황 및 문제 도출	3
1. 제주 관련 국내외 연구 논문 현황	3
2. 제주 화산 지질 관련 국내외 연구 현황	19
3. 제주도 기후변화 현황 및 전망	22
4. 시사점 및 문제 도출	43
제 3 절 문제해결을 위한 과제 도출	45
1. 제주도의 주요 현안 및 문제 검토	45
2. 문제해결 요구과제 도출 및 우선순위 평가	48
제 2 장 과제 핵심기술 선정 및 타당성 검토	52
제 1 절 문제해결 관련 적용기술 검토	52
1. 과제 해결을 위한 관련 적용기술 도출	52
제 2 절 화산 지질학적 조사 기술	53
1. 화산체 지표 조사 및 제4기 퇴적층 조사 기술	53
2. 지표지질정보 및 지하정보 통합기술	58
제 3 절 시료확보 기술의 적용성 검토	60
1. 핸드 오거를 이용한 제4기 퇴적층 시료 확보 사례 검토	60
2. 핸드 오거를 이용한 제4기 습지 퇴적층 시료 확보 사례 검토	68
3. 시추기기를 이용한 제4기 퇴적층 시료 확보 기술 사례 검토	72

제 4 절 연대측정 기술 및 적용성 검토.....	73
1. 제4기 퇴적층의 연대분석(14C, OSL) 기술.....	73
2. 제4기 퇴적층의 연대분석 (14C, OSL) 사례 검토.....	75
제 5 절 고환경 분석 및 해석기술 적용 검토.....	87
1. 제4기 퇴적층 시료의 고환경 분석 방법.....	87
2. 제주 제4기 퇴적층 형성시기의 고환경 변화.....	88
3. 제주 제4기 퇴적층 시료의 고환경 분석 사례.....	98
 제 3 장 문제 해결형 과제 제안 및 이행방안 도출.....	104
 제 4 장 연구 결과의 활용계획.....	113
 제 5 장 참고문헌	114

그 립 목 차

<그림 1> 제주도 주요 연구현황 및 문제검토 내용 및 방법	3
<그림 2> 제주도 관련 연구논문의 연도별 논문편수	5
<그림 3> 10년 단위의 제주도 연구논문 편수	5
<그림 4> 학회지별 제주도 관련 연구논문 편수	7
<그림 5> 제1저자가 게재한 논문편수	8
<그림 6> 제1저자의 개인별 게재한 논문편수	9
<그림 7> 제1저자의 소속기관별 연구논문 게재실적	10
<그림 8> 주요 분야별 논문편수	11
<그림 9> 연도별 해외 학술지에 게재된 논문편수	12
<그림 10> 해외 학술지별 제주도 관련 지질과학 게재논문편수	13
<그림 11> 제1저자별 해외 학술지에 게재한 논문편수	15
<그림 12> 제1저자의 소속국가별 논문게재편수	16
<그림 13> 제1저자 소속기관별 제주도 관련 논문게재 편수	17
<그림 14> 해외 학술지에 게재된 주요연구분야별 논문편수	18
<그림 15> 6개 관측지점에 대한 10년 평균기온의 변화추세(1912-2008).....	23
<그림 16> 14개 관측지점에 대한 연간 강수일수 및 호우일수의 변화추세 (1954-2008년).....	24
<그림 17> 6개 관측지점에 대한 10년 평균강수량의 변화추세 (1912-2008년)··	24
<그림 18> 한반도 지역의 20세기말(1971-2000년) 대비 기온(℃) 및 강수량(%)의 변화··	25
<그림 19> 트레와다 기준에 의한 아열대 기후구 전망(기상청, 2008).....	27
<그림 20> RPC 시나리오와 SRES	29
<그림 21> 제주 기후변화 영향 (최저기온: Tmin) 분석결과 및 분포	29
<그림 22> 제주 기후변화 영향 (최고기온: Tmax) 분석결과 및 분포	30
<그림 23> 제주 기후변화 영향 (평균기온: Tavg) 분석결과 및 분포	30
<그림 24> 제주 기후변화 영향 기온서리일수(Frost days; FD0) 분석결과	31
<그림 25> 제주지역 천연기념물 기온서리일수(Frost days; FD0) 변화추이	32
<그림 26> 제주 문화 유적 관리 지역 기후변화 영향 기온여름일수 (Summer	

days; SU25) 분석결과 및 분포	33
<그림 27> 천연기념물 문화재 기온여름일수(Summer days; SU25) 변화추이 34	
<그림 28> 기후변화 영향 기온폭염일수(Summer days; SU33) 분석결과 및 분포·35	
<그림 29> 천연기념물 문화재 기온폭염일수(Summer days; SU33) 변화추이 35	
<그림 30> 기후변화 영향 기온결빙일수(Ice days; ID0) 분석결과 및 분포 37	
<그림 31> 천연기념물 문화재 기온결빙일수(Ice days; ID0) 변화추이 37	
<그림 32> 기후변화 영향 기온열대야(Tropical nights; TR25) 분석결과 및 분포· 39	
<그림 33> 천연기념물 문화재 기온열대야(Tropical nights; TR25)변화추이 ... 39	
<그림 34> 기온식물성장기간(Growing Season Length; GSL) 분석결과 및 분포... 41	
<그림 35> 기온식물성장기간(Growing Season Length; GSL) 변화추이 42	
<그림 36> 현황 분석을 통한 전략적 시사점 및 문제 검토 방법	45
<그림 37> SWOT 분석을 통한 전략 및 비전 수립 방법	48
<그림 38> 제주도에 분포하는 다양한 지질요소	49
<그림 39> 제주도 지표에 나타나는 암석의 연대분포	49
<그림 40> 전략과 비전 도출 방법	51
<그림 41> 직간접 측정 방식을 활용한 소형화산체 형성시기 분석 방법	53
<그림 42> 화산암류 협재 미고결 퇴적층을 이용한 형성시기 분석방법	54
<그림 43> 소형화산체를 포함하는 화산암류 층서 규명 방법	54
<그림 44> 화산암류 사이 미고결 퇴적층의 형성시기 규명 사례(수월봉)..... 55	
<그림 45> 화산암류에 직접 측정 및 간접측정 방법을 활용한 층서규명 사례 (거문덕이 퇴적층)..... 55	
<그림 46> 화산암류 하부의 미고결 퇴적층의 연대측정을 통한 화산체 형성 시기 간접 규명 사례(교래교 1 퇴적층)..... 56	
<그림 47> 소형화산체 하부의 화산암류 사이에 협재한 미고결 퇴적층의 연 대측정을 통한 화산층서 규명사례(교래교 2 퇴적층)..... 56	
<그림 48> 미고결 퇴적층의 형성시기와 해수면 등의 자연환경 변화를 통한 화산활동 시기 규명 사례(고산층 연구사례)..... 57	
<그림 49> 지표지질조사 및 시추조사 통합 3차원 모델링 과정 요약..... 58	
<그림 50> 시추정보와 모델링 정보 활용 예시	58
<그림 51> 도심지역 3차원 통합 모델의 지하 공간 활용 예시	59

<그림 52> 제주 한라산 백록담 지역 전경	60
<그림 53> 제주 한라산 백록담 주변의 미고결퇴적층 시료채취 검토	61
<그림 54> 제주 한라산 백록담 주변의 시료채취 과정	61
<그림 55> 제주 한라산 백록담 주변의 시료채취 결과	62
<그림 56> 한라산 사라오름 습지 퇴적층 시료의 핸드오거 시료 채취 전경	63
<그림 57> 한라산 사라오름에서 핸드오거를 통해 채취된 시료 전경	63
<그림 58> 한라산 사라오름에서 핸드오거를 통해 채취된 시료 분할예시	64
<그림 59> 제주시 부대오름의 핸드오거 시추 적용검토 대상지역 위치	65
<그림 60> 제주시 조천읍 부대오름의 대상지역 3차원 형태	65
<그림 61> 제주시 조천읍 부대오름 주변의 퇴적층 시료	66
<그림 62> 제주시 조천읍 부대오름 주변의 하부 퇴적층 시료	66
<그림 63> 제주 물장울 습지 시료 채취 검토 지역(개략)	68
<그림 64> 물장울 습지의 전경	69
<그림 65> 물장울 습지 퇴적층 시료 채취 결과	69
<그림 66> 사라오름 습지 시료 채취 지역	70
<그림 67> 제주 사라오름에서 채취된 습지 퇴적층 전경	71
<그림 68> 제주 사람오름에 대한 시료채취 전경	71
<그림 69> 제주 하논 습지 퇴적층의 시추기기 활용성 검토	72
<그림 70> 다양한 시기의 연대측정 방법 및 연대 분석 구간	73
<그림 71> 제주시 외도동 퇴적층 조사지역 위치	75
<그림 72> 외도동 퇴적층의 분포 전경	76
<그림 73> 외도동 퇴적층 조사 단면에서 확인되는 토양썰기 구조	77
<그림 74> 외도동 퇴적층의 연대측정 분석결과 1	77
<그림 75> 외도동 퇴적층의 연대측정 분석결과 2	78
<그림 76> 제주 내도동 퇴적층 조사지역 및 분포범위	79
<그림 77> 제주 내도동 퇴적층의 노두 단면	80
<그림 78> 내도동 퇴적층의 연대측정 결과	80
<그림 79> 제주도 미고결 퇴적층 형성시기 연구 보고 사례	81
<그림 80> 제주 입석동 역암층 노두 단면	82
<그림 81> 제주도 입석동 역암층 주변 화산암류와 협재된 미고결퇴적층	82

<그림 82> 제주도 입석동 역암층의 형성시기와 하부 퇴적층의 형성시기	83
<그림 83> 제주도 입석동 역암층 상류에서 확인되는 미고결퇴적층	83
<그림 84> 입석동 퇴적층 상류 미고결 퇴적층의 형성시기 분석결과	84
<그림 85> 입석동 퇴적층 상류 미고결 퇴적층 전경과 형성시기 분석결과 ..	84
<그림 86> 방애오름 3차원 전경	85
<그림 87> 방애오름 3지점에서 채취된 시료 전경	85
<그림 88> 방애오름 방사선탄소연대 및 측정 심도	86
<그림 89> 전 지구적 해수면 변화 및 모델 예측결과 비교	92
<그림 90> 마지막 해빙기 동안의 기후변화와 온실가스 농도의 기록	94
<그림 91> 그린란드와 캐나다 북극지역 빙하코어로부터 분석된 산소동위원소 기록(From Fisher and Koerner, 2002).	97
<그림 92> 고산층의 분포 위치 및 노두 단면	99
<그림 93> 고산층에 대한 입도 분석 및 지화학 분석결과	101
<그림 94> 고산층에 대한 고환경 프록시 비교 검토 결과	103
<그림 95> 전략과 비전 도출 결과	105

표 목 차

[표 1] 환경지질연구정보센터에 수록된 연도별 제주도 관련 논문수	4
[표 2] 국내 학술지에 발표된 제주도 관련 지질과학 논문편수	6
[표 3] 국내 학술지에 발표된 제1저자의 논문편수	8
[표 4] 해외 학술지에 수록된 연도별 제주도 관련 논문편수	12
[표 5] 국외 학술지에 발표된 제주도 관련 지질과학 논문편수	14
[표 6] 국외 학술지에 발표된 제1저자의 논문편수	15
[표 7] 기온서리일수(Frost days; FD0) 분석결과.....	32
[표 8] 기온여름일수(Summer days; SU25) 분석결과.....	34
[표 9] 기온폭염일수(Summer days; SU33) 분석결과.....	36
[표 10] 기온결빙일수(Ice days; ID0) 분석결과.....	38
[표 11] 기온열대야(Tropical nights; TR25) 분석결과.....	40
[표 12] 기온식물성장기간(Growing Season Length; GSL) 분석결과.....	42
[표 13] 방해오름 방사선 탄소연대 분석결과.....	86

제 1 장 기획 연구의 배경 및 필요성

제 1 절 배경 및 필요성

- 제주도 화산활동 최종 시기와 관련한 제4기 퇴적층의 지질학적 의미 재조명
 - 제주도에 지금까지 알려진 제4기 퇴적층은 50개소가 넘게 보고되고 있으며, 세부적인 연구내용이 보고된 적이 거의 없어, 기존의 조사지역 중에서 제4기층의 분포가 확인된 약 20개 지역에 대해 현지 조사 정보를 취득
- 점차 최근의 시기에 해당되는 제주도의 화산활동이 보고되고 있음
 - 제주도 화산암류의 연대는 Ar-Ar, K-Ar 등 암석연대측정 방식에 의해 측정된 결과가 대부분이며, 제주도에 현재까지 공식적으로 보고된 가장 최근의 화산활동 시기는 4 천년 전후로 휴화산 범주에서 관리가 요구됨
 - 그러나 화산암류와 화산암류 사이에 존재하는 제4기층의 연구에서 방사성탄소연대 측정결과로 5천년 전후의 연대가 확인된 바 있으며, 제4기 미고결 퇴적층을 중심으로 OSL 연대측정을 통해 수 만년 이내의 화산활동 시기가 규명되고 있음
 - 화산암류 사이에 분포하는 퇴적층은 제4기 동안의 화산활동과 휴지기 그리고 화산활동의 지리적 분포를 설명할 수 있는 좋은 연구재료로 보고됨
- 제주도 화산활동과 관련한 제4기 퇴적층의 고환경 분석과 지질학적 의미 해석
 - 화산암류 사이에 분포하는 퇴적층은 제4기 동안의 화산활동 사이의 휴지기 동안의 고환경에 대한 정보를 기록하고 있으며, 이러한 퇴적층을 통하여 제주도의 고환경 변화에 대한 해석이 가능한 것으로 평가됨
- 기술적 측면
 - 제주도 제4기 퇴적층의 연대분석 및 층서해석 기술이 확보됨
 - 제주도의 화산암류 사이에 분포하는 퇴적층에 대한 연대분석결과가 보고되고 있으며, 다양한 퇴적층을 대상으로 연대측정이 시도되고 결과가 도출됨

- 제주 화산활동으로 형성되지 않는 석영과 같은 물질이 제주도내 퇴적층에서 확인되면서 OSL 연대측정이 가능해지고, 방사선 탄소연대측정 등의 기술적 활용이 시범 적용되어 연구결과가 도출됨

○ 경제.산업적 측면

- 제주도의 제4기 퇴적층의 고환경 정보는 제주도의 화산활동과 관련한 부가적인 정보를 제공할 수 있으며, 지질조사 등의 빈약한 연구정보를 기반으로 제공되는 관광 정보 보완과 정책 수립을 위한 기초자료 활용이 가능해짐
- 제주도 화산활동의 시기 규명을 통해 화산활동의 안정성을 검토하여 제주의 지속적인 발전과

○ 사회.문화적 측면

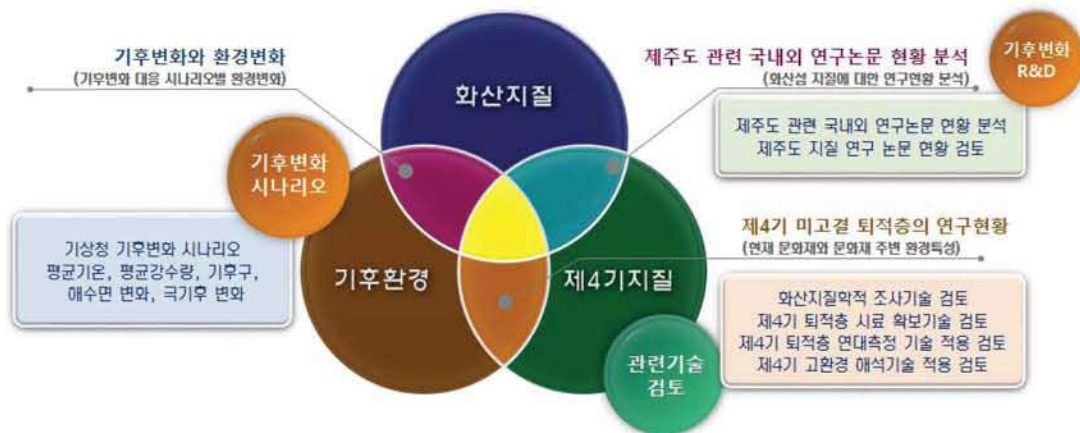
- 제주도의 한라산에 대한 화산활동은 지역 사회의 중요한 관심사항으로 연구결과와 관련해 지질학적으로 의미 있는 정보제공 활용을 위해 연대 등의 명확한 결과 도출이 절실히 요구됨

제 2 절 국내외 연구 현황 및 문제 도출

- 제주도에 대한 국내외 연구현황 및 문제 도출을 위하여 3가지 측면에서 검토함
- 1단계로 제주도 관련 국내외에 출간된 논문을 총 정리하고 현황을 분석. 이를 통해 제주도에 대한 어떤 분야의 연구가 진행되었고, 지질 및 제4기 분야의 연구 현황을 검토하였음
- 2단계로 제주도가 화산섬인 특징을 고려하여 화산지질 및 제주도내 제4기 미고결 퇴적층에 대한 국내외 연구현황을 분석하였음
- 3단계로 기후변화 시나리오를 이용하여 제주지역에 예상되는 기후변화를 천연보호 구역이 포함된 주요 자연유산을 중심으로 평가함

■ 제주도 주요 현황 및 문제 검토 내용 및 방법

- 1단계 - 제주도 관련 국내외 연구논문 현황 분석
- 2단계 - 제주 화산 지질 및 제4기 미고결퇴적층 관련 국내외 현황 분석
- 3단계 - 기후변화시나리오를 이용한 기후변화 평가 (평균기온, 평균강수량, 기우구, 해수면 변화, 극기후 변화)



<그림 1> 제주도 주요 연구현황 및 문제검토 내용 및 방법

1. 제주 관련 국내외 연구 논문 현황

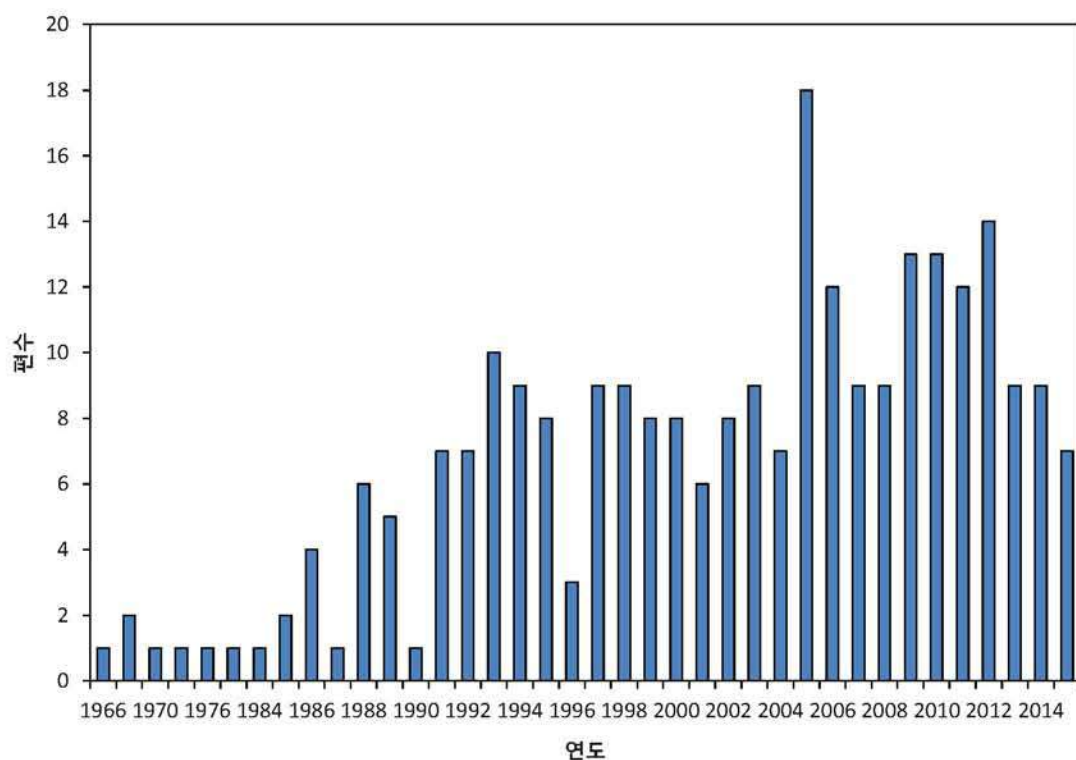
- 국내의 제주도와 관련된 지구과학분야 연구결과는 환경지질연구정보센터 (<http://ieg.or.kr>)에 등록된 학회지들을 대상으로 검색함

[표 1] 환경지질연구정보센터에 수록된 연도별 제주도 관련 논문수

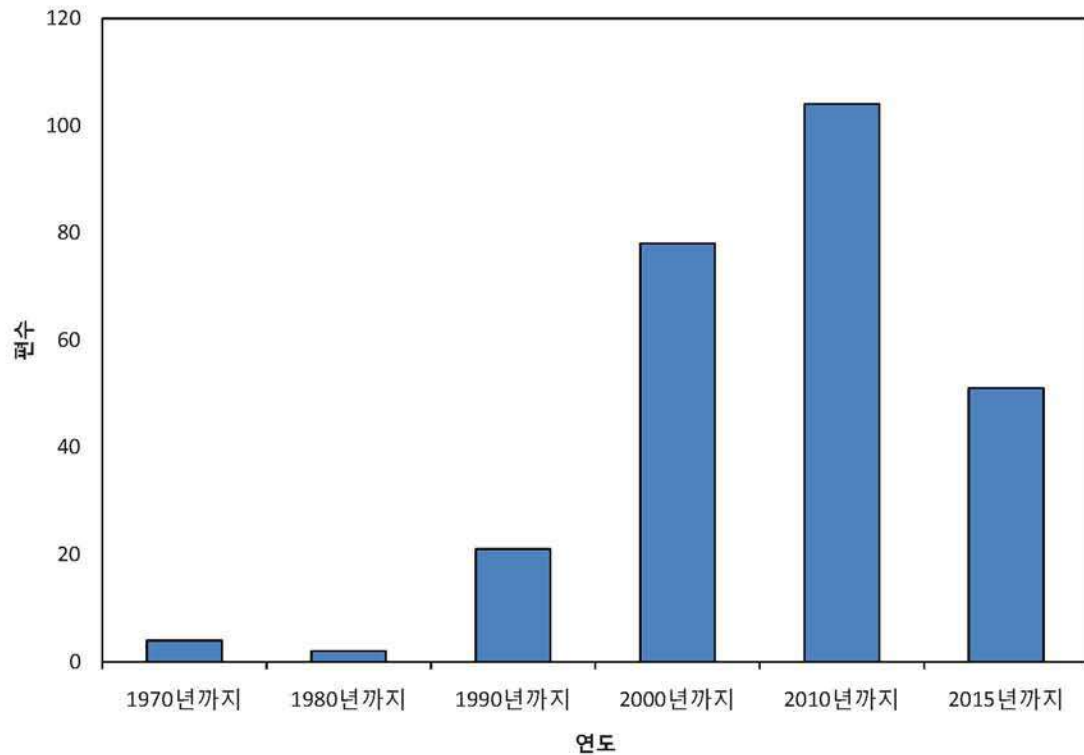
연도	1966년	1967년	1968년	1969년	1970년
논문편수	1편	0편	0편	2편	1편
연도	1971년	1972년	1973년	1974년	1975년
논문편수	0편	0편	0편	1편	0편
연도	1976년	1977년	1978년	1979년	1980년
논문편수	1편	0편	0편	0편	0편
연도	1981년	1982년	1983년	1984년	1985년
논문편수	0편	0편	1편	1편	2편
연도	1986년	1987년	1988년	1989년	1990년
논문편수	4편	1편	6편	5편	1편
연도	1991년	1992년	1993년	1994년	1995년
논문편수	7편	7편	10편	9편	8편
연도	1996년	1997년	1998년	1999년	2000년
논문편수	3편	9편	9편	8편	8편
연도	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년
논문편수	6편	8편	9편	7편	18편
연도	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
논문편수	12편	9편	9편	13편	13편
연도	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년
논문편수	12편	14편	9편	9편	7편

- 지구과학분야의 지질학회지, 자원환경지질(광산지질), 한국지구과학회지, 대한원격탐사학회지, 고생물학회지, 한국광물학회지, 암석학회지, 한국석유지질학회지, 지질공학, 한국GIS학회지, 한국결정학회지, 지구물리와 물리탐사(지구물리와 물리탐사, 지구물리), 지하수토양환경학회지(지하수토양환경, 지하수환경, 대한환경공학회지) 등 13개 학회에서 발행된 학회지를 검색대상으로 함

- 1966년에 처음으로 지질학회지가 출간된 이후 2015년까지 13개 학회지에 수록된 논문은 약 11,369편이며, 이들 논문 중에서 제주도와 관련하여 연구된 논문은 약 260편으로 검색되며, 전체 검색된 논문들 중 약 2.29%로 제주도에 대한 연구활동은 매우 빈약한 편임
- 지구과학분야에서 제주도와 관련된 첫 논문은 1966년 지질학회지에 실린 이상만 교수의 '제주도의 화산암류'임
- 1966년의 첫 논문을 시작으로 1970년도까지는 제주도 관련 논문이 4편 게재되었으며, 1980년도 까지 약 10년 동안은 단 2편만이 게재됨
- 1981년부터 1990년까지는 21편, 1991년부터 2000년도까지는 78편, 2001년부터 2010년까지는 104편, 2011년부터 2015년도까지는 51편으로 매 10년 주기로 연구실적이 급등하고 있음
- 특히, 2007년 세계자연유산으로 등재된 전후와 2010년 세계지질공원으로 인증된 이후 연구논문이 급증하고 있는 추세임



〈그림 2〉 제주도 관련 연구논문의 연도별 논문편수

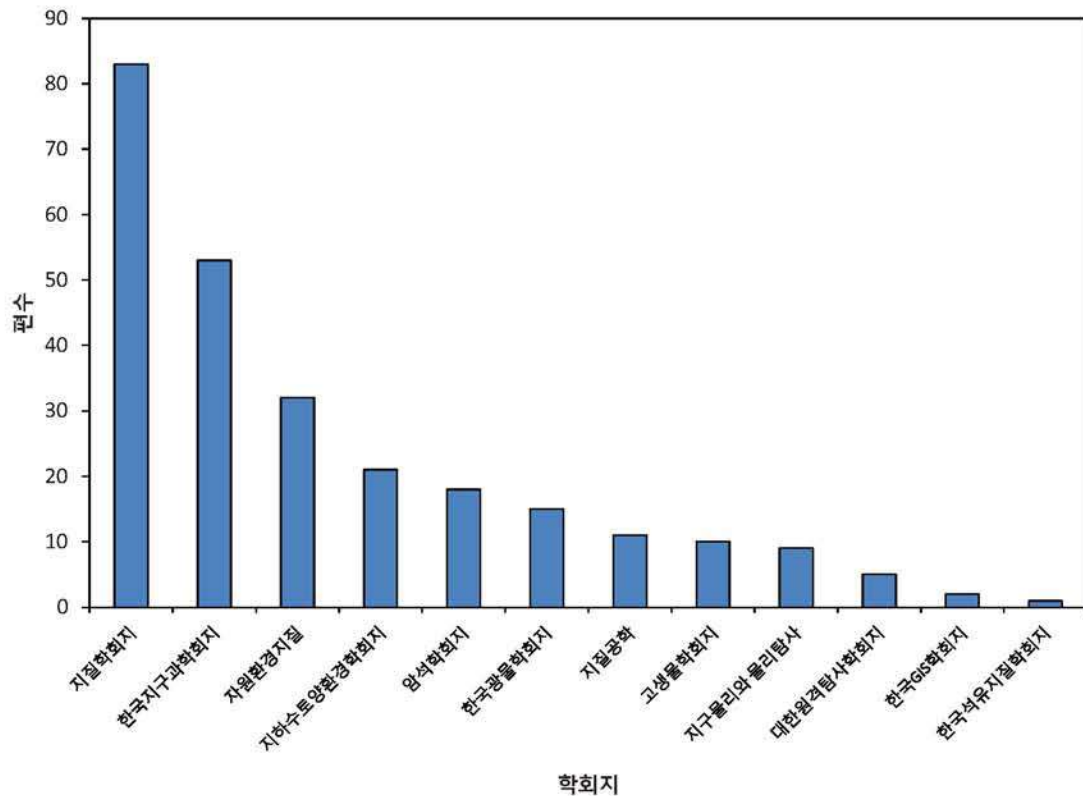


〈그림 3〉 10년 단위의 제주도 연구논문 편수

- 환경지질연구정보센터에 등록된 학회지별로 제주도와 관련된 논문편수를 살펴보면, 지질학회지가 83편으로 가장 많고, 그 다음으로 한국지구과학회지 53편, 자원환경지질 32편, 지하수토양환경학회지 21편, 암석학회지 18편, 한국광물학회지 15편, 지질공학 11편, 고생물학회지 10편 등 10편 이상의 논문을 게재한 학술지는 8개 학회지임

[표 2] 국내 학술지에 발표된 제주도 관련 지질과학 논문편수

학술지명	논문 편수	학술지명	논문 편수
지질학회지	83	지질공학	11
한국지구과학회지	53	고생물학회지	10
자원환경지질	32	지구물리와 물리탐사	9
지하수토양환경학회지	21	대한원격탐사학회지	5
암석학회지	18	한국GIS학회지	2
한국광물학회지	15	한국석유지질학회지	1

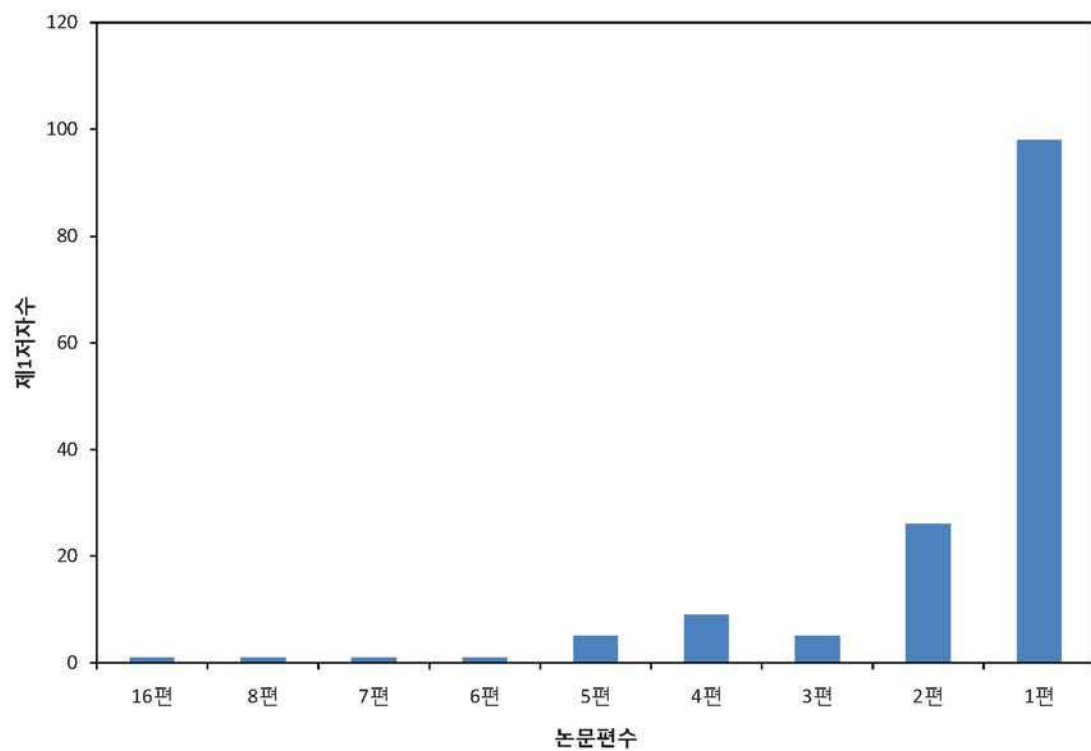


〈그림 4〉 학회지별 제주도 관련 연구논문 편수

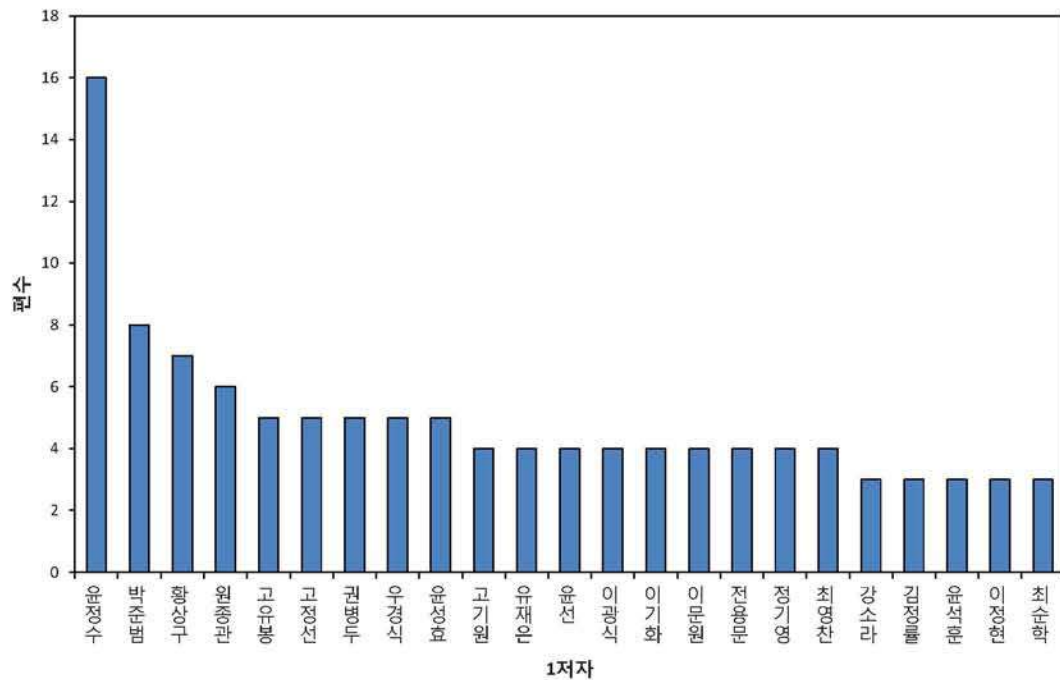
- 제주도의 지구과학분야에서 논문을 게재한 연구자는 제1저자를 기준으로 144명임. 연구자들 중 가장 많은 논문을 게재한 연구자는 제주대학교의 윤정수교수로 총 16편을 발표하였음. 그 다음으로 미육군극동공병단의 박준범 박사가 8편, 안동대학교의 황상구 교수가 7편, 건국대학교의 원종관 교수가 6편을 발표하였음
- 고유봉(제주대학교), 고정선(부산대학교), 권병두(서울대학교), 우경식(강원대학교), 윤성효(부산대학교)가 각각 5편을 발표하였으며, 고기원(제주특별자치도개발공사), 유재은(부산대학교), 윤선(부산대학교), 이광식(한국기초과학지원연구원), 이기화(서울대학교), 이문원(강원대학교), 전용문(세계유산 한라산연구원), 정기영(안동대학교), 최영찬(제주대학교) 등 9명이 각각 4편의 논문을 게재하였으며, 강소라(부산대학교) 등 5명이 각각 3편의 논문을, 김봉균(서울대학교) 등 26명이 2편의 논문을, 그리고 98명의 연구자가 각각 1편의 논문을 게재하였음

[표 3] 국내 학술지에 발표된 제1저자의 논문편수

제1저자	논문 편수	제1저자	논문 편수	제1저자	논문 편수
윤정수	16	고기원	4	강소라	3
박준범	8	유재은	4	김정률	3
황상구	7	윤선	4	윤석훈	3
원종관	6	이광식	4	이정현	3
고유봉	5	이기화	4	최순학	3
고정선	5	이문원	4	이진영 등 26인	2
권병두	5	전용문	4	임재수 등 98인	1
우경식	5	정기영	4		
윤성효	5	최영찬	4		

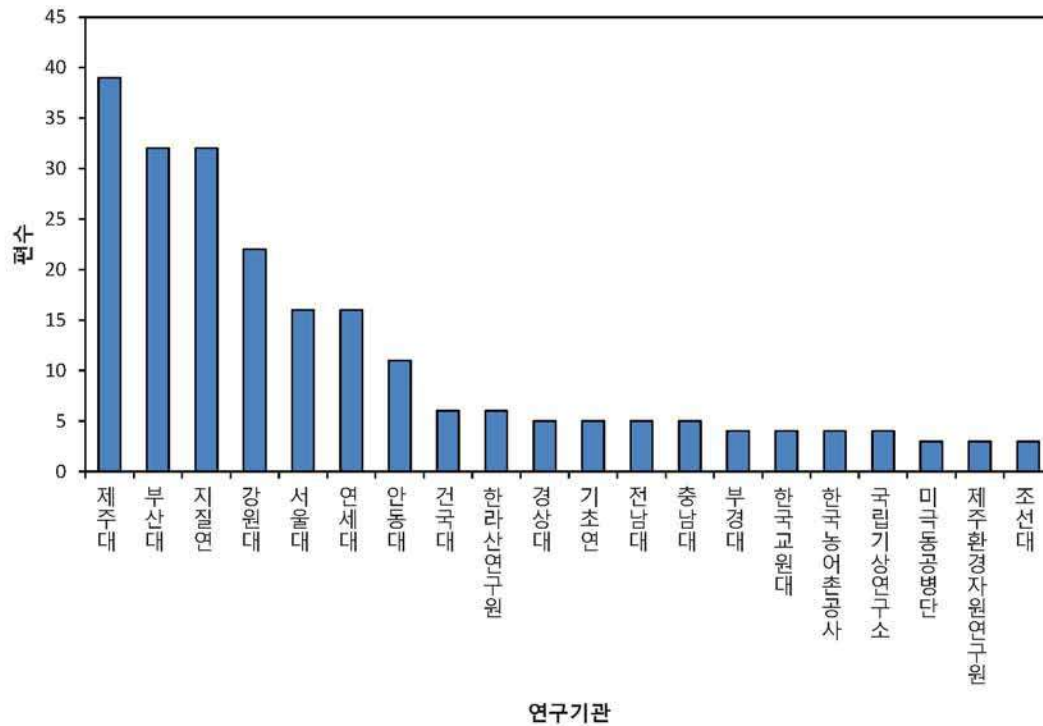


<그림 5> 제1저자가 게재한 논문편수



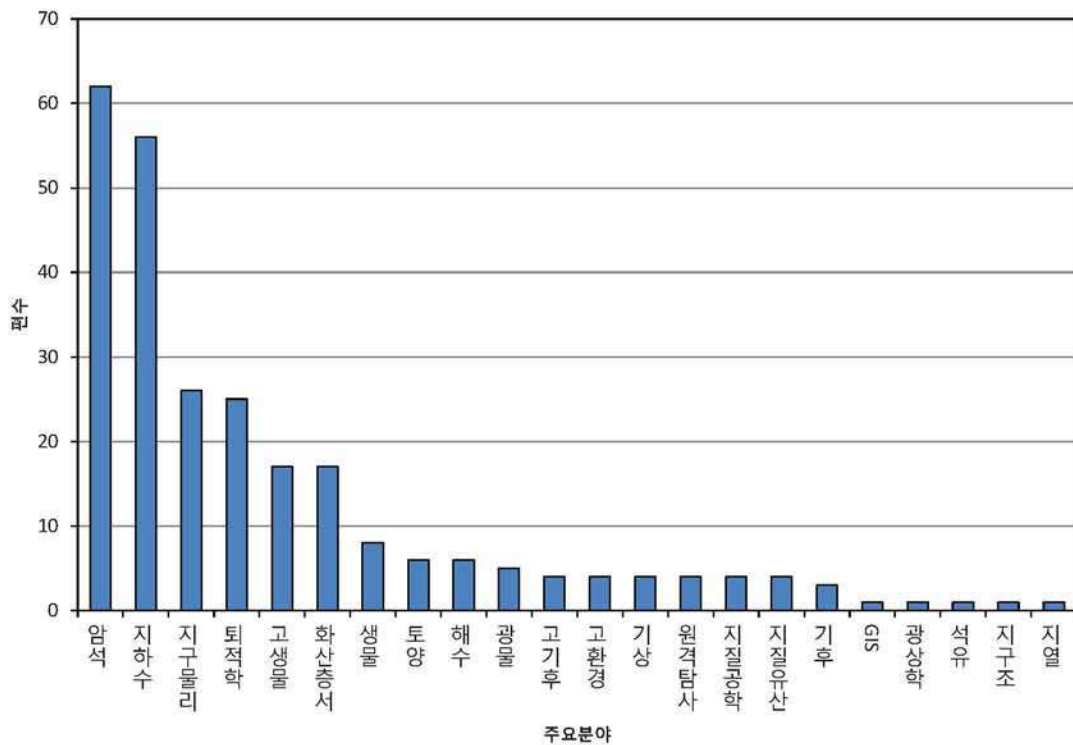
〈그림 6〉 제1저자의 개인별 게재한 논문편수

- 제1저자의 소속기관별로 보면 총 51개 기관에서 제주도에 대한 연구를 하였으나 게재 당시의 소속이며, 명칭변경 등의 사유로 실질적으로는 이보다는 약간 적을 것으로 보임
- 논문을 가장 많이 게재한 기관은 총 39편을 발표한 제주대학교이며, 그 다음으로 부산대학교(32편), 한국지질자원연구원(32편), 강원대학교(22편), 서울대학교(16편), 연세대학교(16편), 안동대학교(11편) 등으로 10편 이상의 논문을 게재한 기관은 7개 기관임
- 건국대학교와 세계유산한라산연구원은 각각 6편을 게재하였으며, 경상대학교, 한국기초과학연구원, 전남대학교, 충남대학교 등 4개 기관은 각각 5편씩, 부경대학교, 한국농어촌공사, 한국교원대학교, 국립기상연구소 등 4개 기관은 각각 4편씩을, 그리고 미육군극동공병단 등 3개 기관은 각각 3편씩, 국립농업과학원 등 4개 기관은 2편씩을 게재하였으며, 경북대학교 등 27개 기관에서는 각 1편씩의 논문을 게재하였음



〈그림 7〉 제1저자의 소속기관별 연구논문 게재실적

- 제주도는 전역이 제4기 화산활동에 의해 형성된 섬으로 주요분야는 제4기지질 분야이나 이를 좀더 세분하여 게재된 논문들의 키워드로 분석한 연구의 주요분야는 총 22개 분야인 것으로 파악되었음
- 암석학 분야가 62편으로 가장 많은 논문게재 편수를 보였으며, 그 다음으로 지하수 분야 56편, 지구물리분야 26편, 퇴적학 분야 25편, 고생물 분야 17편, 화산층서 분야 17편 등의 순을 보이고 있음

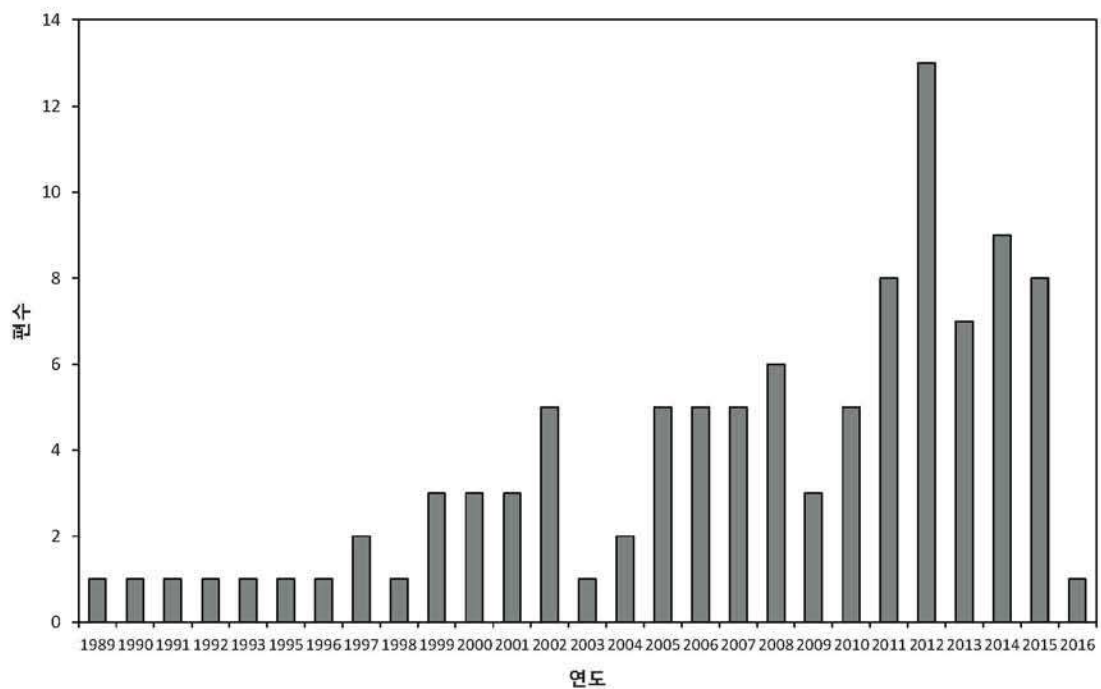


〈그림 8〉 주요 분야별 논문편수

- 해외 SCI와 SCIE 등에 게재된 제주도의 지질과학 분야 논문은 한국지질자원연구원 전자도서관의 e-Journal에서 검색하였으며, 총 103편으로 조사되었음
- 지질과학 분야에서 제주도와 관련된 첫 해외 논문은 1988년 'Deveolpments in Paleontology and Stratigraphy'에 게재된 'Plio-Pleistocene Ostracods from the Sohuipo Formation, Cheju Island, Korea'로 조사됨
- 연도별로 보면 1988년의 첫 논문을 시작으로 1990년도까지는 2편, 2000년도까지는 14편이 게재되었으며, 2000년도 이후에는 급격히 증가하였으며, 특히, 2007년 세계자연유산으로 지정된 전후를 기점으로 2010년까지는 40편이 게재되었으며, 2016년 초까지는 46편이 발표되었음

[표 4] 해외 학술지에 수록된 연도별 제주도 관련 논문편수

연도			1988년	1989년	1990년
논문편수			1편	1편	1편
연도	1991년	1992년	1993년	1994년	1995년
논문편수	1편	1편	1편	0편	1편
연도	1996년	1997년	1998년	1999년	2000년
논문편수	1편	2편	1편	3편	3편
연도	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년
논문편수	3편	5편	1편	2편	5편
연도	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
논문편수	5편	5편	6편	3편	5편
연도	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년
논문편수	8편	13편	7편	9편	8편
연도	2016년				
논문편수	1편				

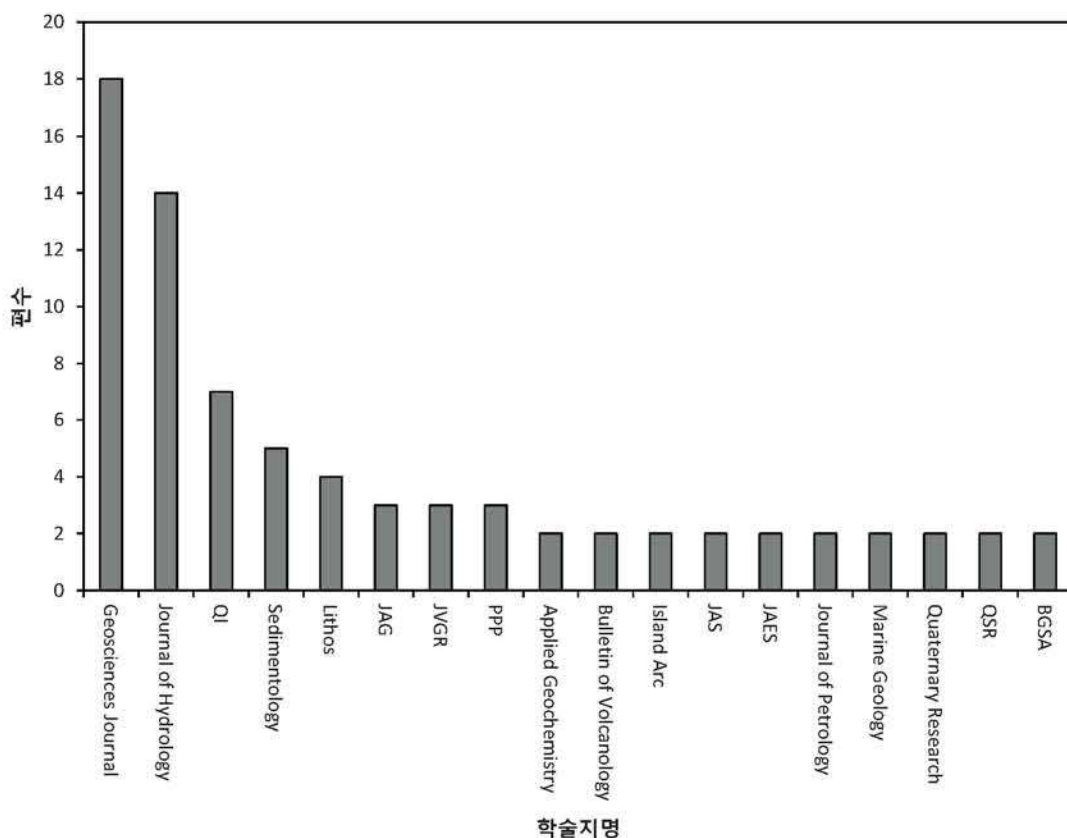


<그림 9> 연도별 해외 학술지에 게재된 논문편수

○ 해외 SCI와 SCIE 등에 게재된 제주도의 지질과학 분야 논문은 한국지질자원연구

원 전자도서관의 e-Journal에서 검색하였으며, 제주도 관련 논문이 게재된 해외학술지는 국내 SCIE인 Geoscience Journal을 포함하여 모두 44종임

- Geoscience Journal에는 총 18편이 게재되었으며, Journal of Hydrology에는 14편이 게재되어 해외에서 발행되는 학술지에서는 가장 많은 논문이 수록되었음. 그 다음으로 Quaternary International(QI)에 7편, Sedimentology에 5편, Lithos에 4편, Journal of Applied Geophysics(JAG), Journal of Volcanology and Geothermal Research(JVGR), Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology(PPP) 등 3개 학술지에 각 3편씩, Applied Geochemistry, Bulletin of Volcanology, Island Arc, Journal of Archaeological Science(JAS), Journal of Asian Earth Sciences(JAES), Journal of Petrology, Marine Geology, Quaternary Research, Quaternary Science Reviews(QSR), Bulletin of the Geological Society of America(BGSA) 등 10개 학술지에 각각 2편씩의 논문이 게재되었으며, Geology, Geophysical Research Letters, Terra Nova 등을 포함한 24개 해외 학술지에 각각 1편씩의 논문이 게재됨



<그림 10> 해외 학술지별 제주도 관련 지질과학 게재논문편수

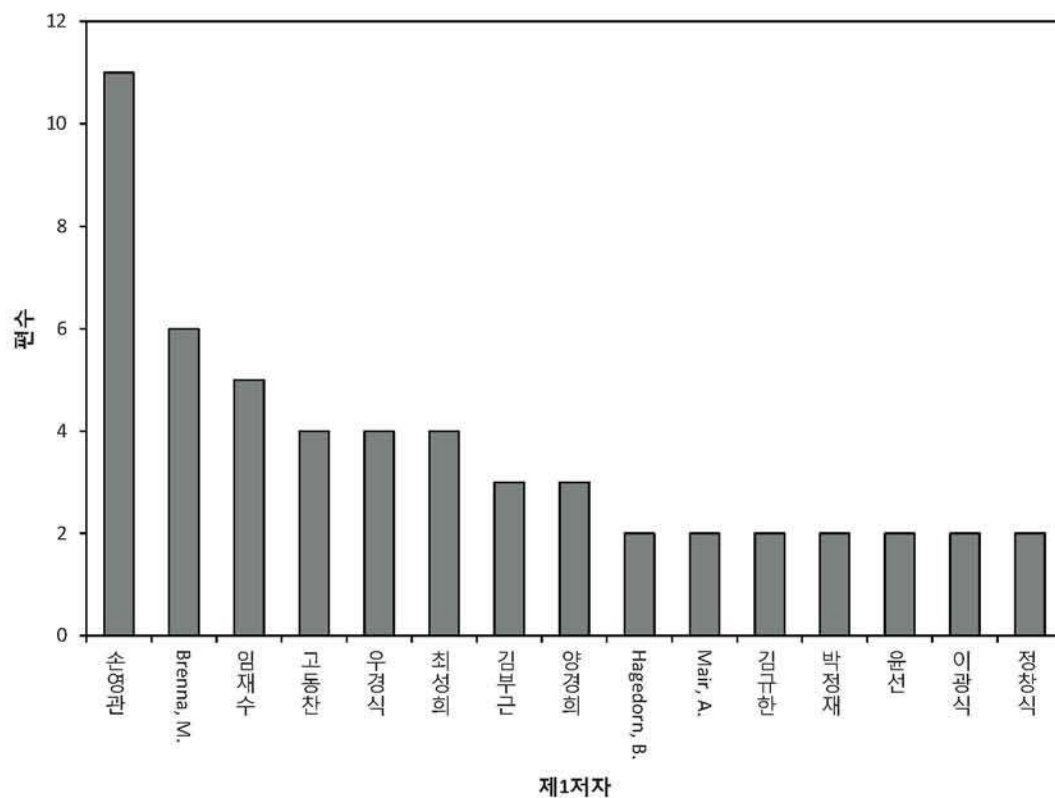
[표 5] 국외 학술지에 발표된 제주도 관련 지질과학 논문편수

학술지명	논문 편수	학술지명	논문 편수
Geoscience Journal	18	Contributions to Mineralogy and Petrology	1
Journal of Hydrology	14	Engineering Geology	1
Quaternary International	7	Estuarine, Coastal and shelf Science	1
Sedimentology	5	Geochemical Journal	1
Lithos	4	Geology	1
Journal of Applied Geophysics	3	Geophysical Research Letters	1
Journal of Volcanology and Geothermal Research	3	Ichnos	1
Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	3	Ichnos:an International Journal of Plant and Animal	1
Applied Geochemistry	2	Journal of Geodynamics	1
Bulletin of Volcanology	2	Journal of Geophysical Research Atmospheres	1
Island Arc	2	Journal of Quaternary Science	1
Journal of Archaeological Science	2	Journal of Southeast Asian Earth Sciences	1
Journal of Asian Earth Science	2	Mineralogy and Petrology	1
Journal of Petrology	2	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	1
Marine Geology	2	Paleontological Research	1
Quaternary Research	2	Quaternary Geochronology	1
Quaternary Science Reviews	2	Quaternary Research(Tokyo)	1
Bulletin of the Geological Science of America	2	Sedimentary Geology	1
American Mineralogist	1	Tectonics	1
Applied Radiation and Isotopes	1	Tectonophysics	1
Chemical Geology	1	Terra Nova	1

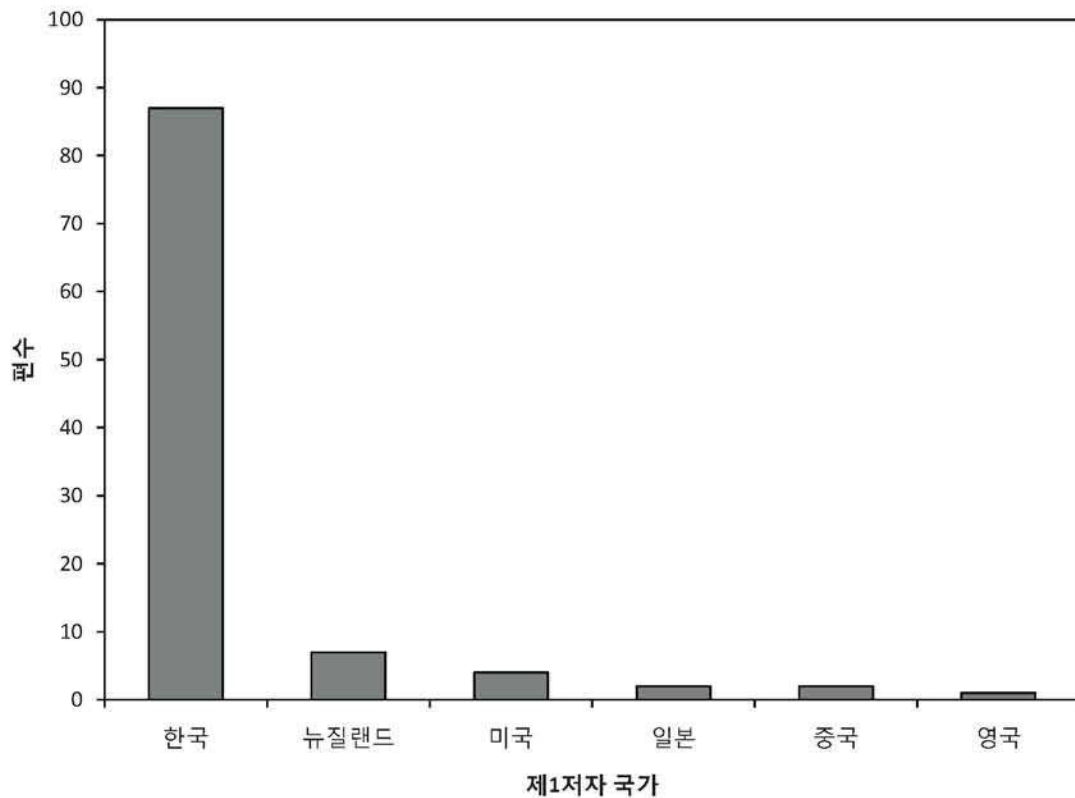
- 연구자들 중 가장 많이 해외 학술지에 게재한 연구자는 경상대학교 손영관 교수로 총 11편이 수록된 것으로 검색되었으며, 그 다음으로는 뉴질랜드 Massey대학교의 Brenna(6편), 한국지질자원연구원의 임재수(5편), 한국지질자원연구원의 고동찬, 강원대학교 우경식, 충남대학교 최성희 교수 등이 각각 4편씩의 논문을 게재함
- 김부근(부산대학교), 양경희(부산대학교)가 각각 3편씩, Hagedorn, B.(캘리포니아주립대학교), Mair, A.(하와이대학교), 김규한(이화여자대학교), 박정재(서울대학교), 윤선(부산대학교), 이광식(한국기초과학지원연구원), 정창식(한국기초과학지원연구원)이 각각 2편씩의 논문을 발표되었으며, 그 외 문상호(한국지질자원연구원) 등 88명이 각각 1편씩의 논문을 게재함

[표 6] 국외 학술지에 발표된 제1저자의 논문편수

제1저자	논문편수	제1저자	논문편수	제1저자	논문편수
손영관	11	김부근	3	윤선	2
Brenna, M.	6	양경희	3	이광식	2
임재수	5	Hagedorn, B.	2	정창식	2
고동찬	4	Mair, A.	2	이승렬 등 49인	1
우경식	4	김규한	2		
최성희	4	박정재	2		

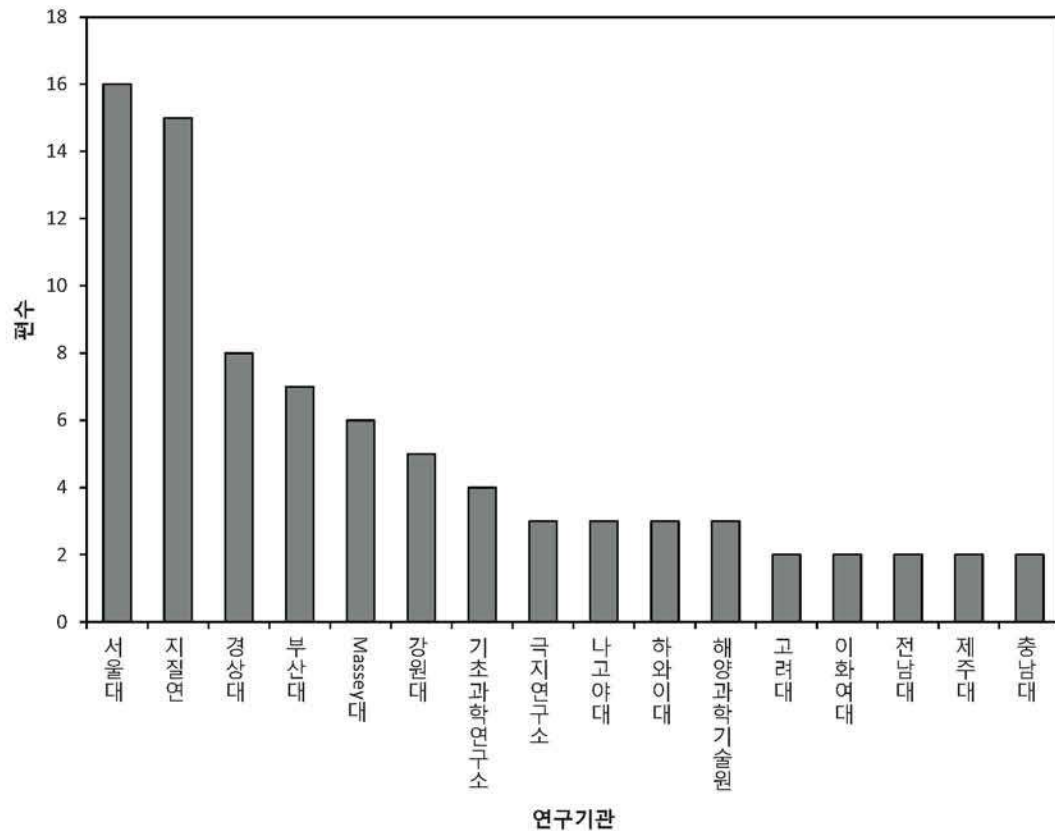


<그림 11> 제1저자별 해외 학술지에 게재된 논문편수



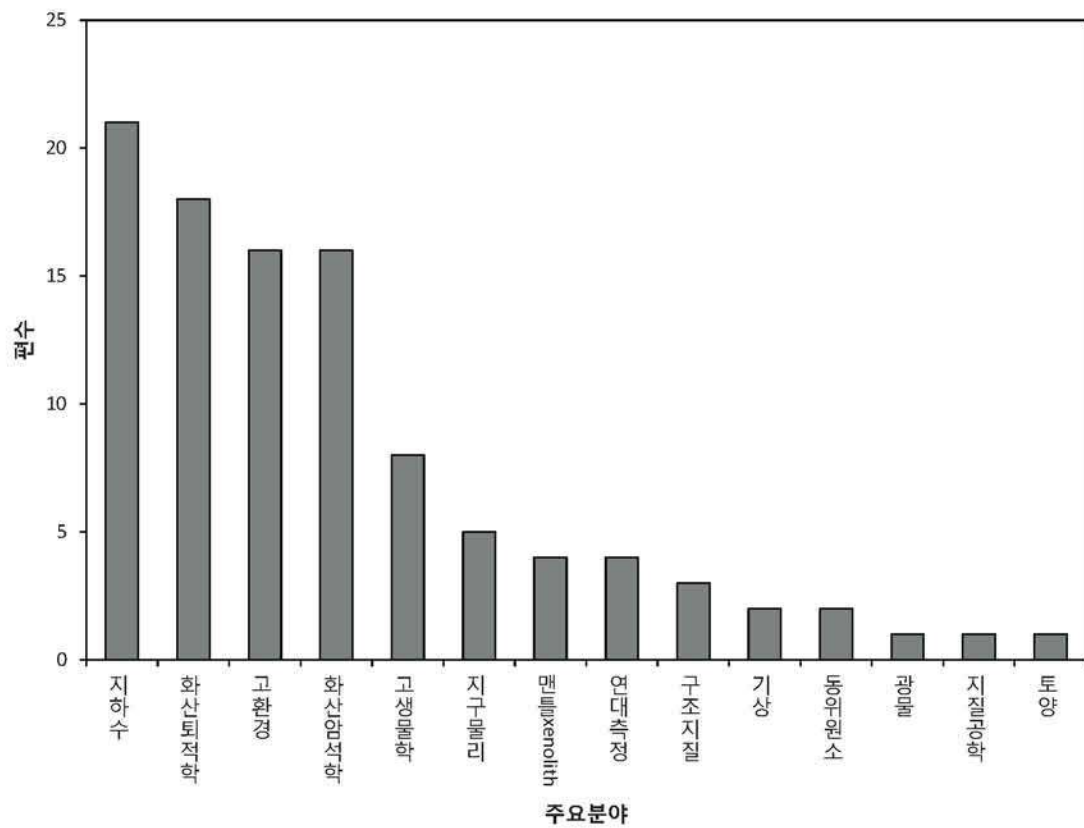
〈그림 12〉 제1저자의 소속국가별 논문게재편수

- 제1저자의 소속 국가별 현황을 보면 16편의 논문이 해외 연구자들에 의해 게재되었으며, 국내 연구자가 제1저자인 경우는 87편으로 파악됨. 한국 이외의 국가는 뉴질랜드 7편, 미국 4편, 일본 2편, 중국 2편, 영국 1편임
- 제1저자의 소속기관별로 보면 국내외에서 총 36개 기관에서 제주도에 대한 연구를 하였으나 게재 당시의 소속이며, 명칭변경 등의 사유로 실질적으로는 이보다는 약간 적을 것으로 보임
- 논문을 가장 많이 게재한 기관은 총 16편을 발표한 서울대학교이며, 그 다음으로 한국지질자원연구원(15편), 경상대학교(8편), 부산대학교(7편), Massey대학교(6편), 강원대학교(5편) 등으로 5편 이상의 논문을 게재한 기관은 6개 기관임
- 한국기초과학지원연구원은 4편, 극지연구소, 나고야대학, 하와이대학, 한국해양과학기술원은 각각 3편을 게재하였으며, 고려대학교, 이화여자대학교, 전남대학교, 제주대학교, 충남대학교는 각각 2편씩의 논문을 게재하였음. 경북대학교를 비롯한 20개 기관에서는 각 1편씩의 논문을 게재하였음



〈그림 13〉 제1저자 소속기관별 제주도 관련 논문게재 편수

- 게재된 제주도의 논문들의 키워드로 분석한 연구의 주요분야는 총 15개 분야인 것으로 파악되었음
- 지하수 분야가 21편으로 가장 많은 논문게재 편수를 보였으며, 그 다음으로 화산 퇴적학(층서) 분야 18편, 고환경분야 16편, 화산암석학 분야 16편이며, 고생물 분야 8편, 지구물리 분야 5편 등의 순을 보이고 있음



〈그림 14〉 해외 학술지에 게재된 주요연구분야별 논문편수

2. 제주 화산 지질 관련 국내외 연구 현황

- 제주도는 현재 섬이지만 근본적인 생성과정은 대륙붕 위에서 대륙지각내 화산활동(continental intraplate volcanism)으로 형성되어 울릉도, 독도와는 근본적인 차이를 지님. 제주도 제4기 화산암류의 기반암은 지표에는 나타나지 않으나 심부 시추결과에서 제주도 하부에 응회암류와 화강암류가 분포하고 있음이 확인
- 특히 제주도에는 368개(Jeju Special Self-Governing Province, 1997)에서 455개(Lee and Yun, 2012)에 이르는 “오름”이라 불리는 작은 화산체가 산재하는데, 이들 대부분은 분석구(scoria cone 혹은 cinder cone)이고, 응회환(tuff ring), 응회구(tuff cone), 마르(maar), 용암돔(lava dome), 소순상화산(small shield volcano)으로 구성(Lee and Yun, 2012).
- 이러한 소화산체는 주로 규모가 큰 순상화산 혹은 성층화산의 주화도(main conduit)의 측방 이동 혹은 열극을 따라 만들어진 화산이란 의미에서 기생화산(parasitic volcano)이라 알려졌으나, 최근 연구는 이들이 순상화산과 성층화산의 사면 분화(flank eruption) 활동과 관계없이, 현무암질 화산지대에서 독립적인 화산체로서도 만들어 질 수 있으므로(예: Settle, 1979; Riedel et al., 2003), 각각 단일 화산활동에 의해 만들어진 화산체라는 의미에서 단성화산(monogenetic volcano)으로 정의(Cas and Wright, 1987; Valentine and Gregg, 2008; Németh, 2010; Fornaciai et al., 2012).
- 지금까지 제주도의 화산활동은 Haraguchi (1931) 이후 여러 연구자들에 의해 단계별 모델이 제시되었으며(e.g., Won, 1976; Lee, 1982, 1994; Lee et al., 1994; Yoon et al., 1995; Son et al., 1998; Won et al., 1998; Oh et al., 2000; Kim et al., 2002; Yun, 2004), 최근까지 Lee (1982)의 네단계 형성 모델-(1) 기저현무암 분출기, (2) 용암대지 형성기, (3) 한라산체 형성기, (4) 기생화산 형성기-이 흔히 인용되고 있다(예: Kim and Choi, 2012). 또한 제주도 지질도폭 및 도폭설명서에서도 유사한 모델이 사용됨(Won et al., 1993, 1995; Park et al., 1998, 2000a, 2000b, 2000c, 2008). 이들 전통적인 화산활동 모델은 첫째, 제주도 전체를 해양 화산도(특히 하와이섬)와 같은 하나의 순상화산체로 설정하고, 둘째, 시추공에서 얻어진 용암 시료를 통해 해석된 기저현무암을 제외하면 그 외의 화산활동으로 분출된 용암류는 대부분 지표에 노출되어 있는 것으로 전제하고 있음
- 최근의 연구에 의하면 알칼리현무암질 용암이 약 1 Ma 전 최초 육상에서 분출하였으며, 화산활동은 홀로세까지도 진행되었으며, 제주도의 화산활동은 서귀포층을

층준으로 크게 퇴적동시대 화산활동기(약 1.88~0.5 Ma)와 퇴적이후 화산활동기(0.5 Ma~홀로세)로 구분. 퇴적동시대 화산활동기는 약 1 Ma경 알칼리현무암질 용암의 육상 분출이 수반된 수성화산활동, 분화된 알칼리 계열 용암류의 동상 분출, 알칼리 계열 용암류의 분출로 구분되는데, 이들은 서귀포층이 퇴적되는 동안 발생한 국지적이며 간헐적인 화산활동이었으며, 퇴적이후 화산활동기는 서귀포층의 퇴적이 종료된 이후 전도에 걸친 활발한 육상화산활동으로 정의(Koh et al., 2013).

- 특히 약 0.3~0.1 Ma 동안의 활발한 화산활동은 제주도 지형의 골격을 형성하였고, 0.1 Ma이후 홀로세까지 이어진 화산활동은 한라산체를 포함한 제주도의 현재 지형이 만들어짐. 기존 연구자들(Koh et al., 2013)의 연구는 제주도가 한라산체를 중심으로 하는 복성 복합화산체와 수많은 단성화산체로 부터 분출한 용암류 및 화산쇄설물이 층상으로 누적되어 형성된 것임을 의미하며, 수성화산분출물과 연안 퇴적물로 구성된 서귀포층에 협재하거나 피복하는 것으로 보고
- 제주도의 형성과 관련한 현재까지의 연구는 암석의 연대에 근거한 것으로 현재까지 확인된 가장 젊은 연대의 용암분출기록은 백록담 조면암(K-Ar 절대연대, 25 ± 8 ka, Won et al., 1986)과 비양도 조면현무암($40\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 27 ± 9 ka, Koh et al., 2008)이며, 이 시기동안의 해수면 변동을 고려하면 이들은 육상 환경(Koh et al., 2008; Brenna et al., 2010)에서 분출되었음을 지시
- 지금까지 확인된 암석연대는 제주도 화산암류의 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정법으로는 약 2만년에서 최근까지의 화산활동은 연대측정방법의 오차범위로 볼 때 정확한 연대를 측정하는 것이 매우 어려움(Lee et al., 2014)
- 제주도에서 용암류 사이에 퇴적층이 분포하는 것은 국지적이거나 다수의 연구와 시추자료 기록을 통해 상당히 다양한 지역에서 분포하고 있음이 확인(Koh et al., 2008, Shon et al., 2008, Lee et al., 2014, Lee et al., 2015, Lim et al., 2015). 제주도의 화산암 사이에 나타나는 퇴적층은 일반적으로 고토양층이라 명명되어왔으며 퇴적구조의 발달이 드물고 두께가 수십 cm 에서 수 m 로 주로 분급이 불량한 사질-역질 퇴적물로 구성되고, 암색은 대부분 황갈색 또는 적색을 띠는 것으로 알려짐.
- 고토양층은 용암류의 휴지기 동안 대기중에 노출된 환경에서 지형기복을 따라 일시적으로 쌓인 퇴적물이 토양화작용을 받아 형성되었으며(Park et al., 2008), 퇴적층은 단속적인 분포를 보이며, 괴상 또는 층리가 발달한 사암과 이암 및 역암 등으로 구성. 퇴적층은 주로 대기 중에 노출된 육성환경에서 간헐적인 하천작용에 의해 저지대 혹은 바닷가에서 형성된 것으로 알려져 있으나(예, Park et al., 1998,

Shon and Park, 2004) 최근 활발한 기재와 연구가 진행되고 있음. 신양리층은 제주도 동단의 신양리와 성산 일출봉 사이의 해안에 분포하며 퇴적층의 연체동물 화석의 방사성 탄소동위원소 연대는 4780 ± 60 yr BP(Sameshima et al., 1988)로 보고되었고, 하모리층은 제주도 서부 송악산 양측의 동서 해안을 따라 분포하는 재동된 화산재 퇴적층(Shon et al., 2002)으로 OSL 연대는 7.6 ± 0.5 ka 에서 6.8 ± 0.3 ka (Cho et al., 2005), 5.1 ± 0.3 ka (Cheong et al., 2007)으로 보고됨

- 아직까지 기존 연구의 대부분의 용암류 사이의 퇴적층(고토양층)은 노두상의 기재를 통해 분포만 확인되고 있으며 이들의 형성시기와 퇴적환경에 대해서는 많은 연구가 진행되지 않고 있다(Park et al., 2008; 2000a, 2000b).
- 가까운 주변 국가인 일본의 경우 일본 열도에서 제4기 동안에 화산의 활동이 보고된 것은 약 456개소로 확인. 그 가운데 홀로세 기간에 분화활동이 확인된 화산은 약 110개소로 알려짐(Geological survey of Japan DB, Volcanoes of Japan ver. 1.03). 2백만년 이전에 일본 열도에서 화산암과 심성암이 나타나는 화산활동 지역은 현재의 화산활동 지역과는 다른 지역으로 나타나지만 그 이후의 화산활동 지역은 현재와 거의 유사한 지역에서 나타남. 2 Ma 이후의 서남 일본에서의 대규모 화산활동(VIE=6이상)의 빈도는 1.6-2.0 Ma 기간에 높은 빈도를 보이다가 0.4 Ma이후의 0.4-1.6 Ma기간에 낮은 빈도를 나타냄. 또한 1.6 Ma 이전의 서남일본에서의 광역 테프라의 대부분은 중부산맥지역(히다산맥) 칼데라의 화산에서 유래한 것이며, 규수 지역의 경우 특히 0.5 Ma 이후의 화산활동이 증가. 화산 분출을 정리한 이력정보를 기초로 일본의 87개소의 활화산의 화산활동 빈도는 30 ka 이후 과거로 갈수록 분화빈도가 낮아지는 것으로 나타나는데, 이러한 원인은 실제 화산활동이 적어졌을 가능성과 풍화 등의 작용에 의해 오래된 화산활동의 기록이 사라지는 원인에 의해 적어졌을 가능성이 있음. 화산활동의 감소현상을 제외하면 각 화산에서의 분화시기가 일정한 양상을 보이지 않음(General insurance Rating Organization of Japan, 2008). 다만 과거 2 ka 이후 100년마다 일본에서 중급(VIE=4이상) 규모 이상의 분화기록을 보면 9세기를 중심으로 화산활동이 증가하고, 19세기를 제외한 17세기 이후에 화산 활동이 증가하는 것으로 보고됨(Hayakawa, 1999).

3. 제주도 기후변화 현황 및 전망

3.1. 한반도 기후변화 현황 및 전망

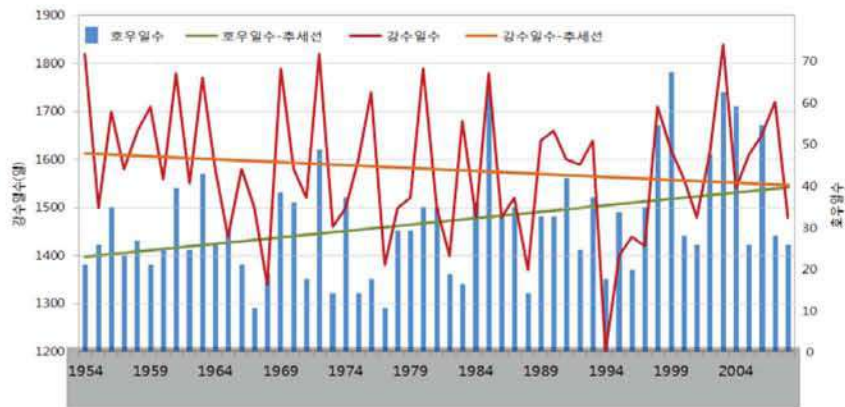
- 기상청은 2011년 11월 29일 「新 기후변화 시나리오에 따른 미래기후 전망 및 기후변화 영향」을 발표
- 전 세계적으로 탄소 배출 감축을 이행하지 않을 경우, 2050년 우리나라의 기온은 3.2도 상승하고, 강수량은 16% 증가하며, 해수면은 27cm 상승할 것으로 전망하고 있다. 이렇게 되면, 현재보다 고온현상은 2~6배 증가하고, 호우일수도 60% 증가할 것으로 예상
- 지난 100년(1911-2010)간 지구의 평균기온은 0.75°C 상승했으며, 최근 50년간의 기후변화에 의한 온도 상승은 0.128°C/10년으로 과거 100년간의 변화인 0.075°C/10년에 비해 가속화
- 한반도의 경우 과거 100년간 온도가 1.8°C로 상승하여 지구평균보다 2배 이상 크게 나타나고 있으며, 이에 따라 여름은 길어지고 겨울은 짧아지는 계절변화 발생
- 과거 100년간 관측된 자료에 의하면 연간강수량이 1940년대와 1970년대를 제외하고는 계속 증가하고 있으며, 100년간 217mm이 증가하였으나 강수일수는 18% 감소하여 강수강도가 증가
- 최근 발표된 IPCC 특별보고서에 의하면 21세기 후반의 폭염 발생 주기가 현재의 20년 빈도에서 2~5년 빈도로 짧아지고, 호우도 동아시아 지역에서 현재의 20년 빈도에서 5년 빈도로 짧아져 잦은 기상재해가 나타날 것으로 전망
- 기후변화로 인해 한반도에서 폭염 등에 의한 사망자 증가, 기상재해 피해액 증가, 사과, 채소 등의 재배지 북상, 난대성 어종의 북상 등 다양한 분야에 걸쳐 영향이 관찰되고 있으며, 앞으로 그 변화가 커질 것으로 예상
- IPCC 4차 보고서에 따르면 현재(1980 ~ 1999년)에 비하여 금세기 말(2090 ~ 2099년)의 지구 평균기온은 최대 6.4°C, 해수면은 최대 59 cm 상승한다고 예측하였고, 한반도를 포함한 아시아 지역은 기후변화에 가장 취약하여 생물다양성 감소, 질병, 홍수 등의 문제가 발생할 것으로 예측
- 특히 우리나라의 경우 지구평균의 2배가량 빠른 속도로 기온이 상승하고 있으며, 제주도 지역의 해수면 상승은 지구평균의 3배에 달하고 있어 기후변화에 취약. 한반도에서 이상고온, 집중호우 등 이상기후가 자주 발생하고 이로 인한 피해가 점차 커지고 있으며, 앞으로도 기후변화에 따른 이상기후의 발생은 빈발할 것으로 예상

- 한반도에서 관측된 기후변화의 경향을 살펴보면, 1961 ~ 1990년의 연평균기온이 1931 ~ 1960년보다 0.4°C 증가하였고, 1904년 이후 2000년까지 우리나라에서 관측된 20세기 기온자료를 분석한 결과 평균기온이 1.5°C 상승
- 한반도의 평균기온 변화 추세는 약 100년간(1912 ~ 2008년) 6개 관측지점 (서울, 인천, 강릉, 대구, 목포, 부산)의 평균기온 상승률은 1.7°C로 전지구 평균기온 상승률($0.74 \pm 0.03^{\circ}\text{C}$)에 비해 높으며, 기온 상승률의 약 20 ~ 30%는 도시화 효과로 추정됨.
- ※ 1950년대 이후에 기온 상승률은 20세기 전체기간에 비해 약 1.5배 이상 증가하였으며, 사계절 중 겨울에 가장 크게 증가한 반면 여름철 평균기온 상승 경향은 뚜렷하지 않음.



<그림 15> 6개 관측지점에 대한 10년 평균기온의 변화추세(1912-2008)

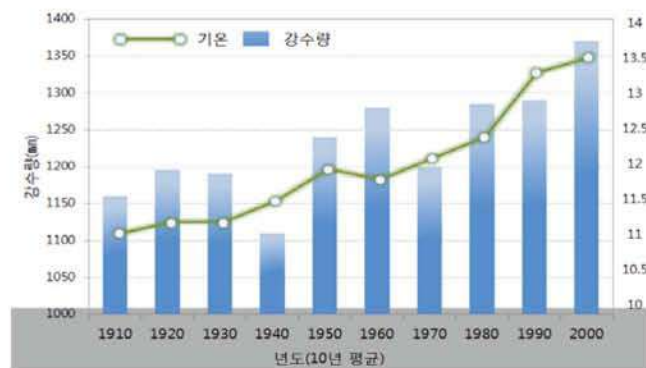
- 기상청(2008)에 따르면 한반도 지역의 연평균 강수량은 수십 년 주기의 큰 변동 폭을 보이나 장기적으로 증가추세. 특히 최근 10년(1996 ~ 2005) 평균 연강수량은 1,485.7 mm로 평년에 비해 약 10% 증가하였으며, 호우일수(일강수량 80mm 이상)는 최근 10년간 28일로 종전 20일보다 증가



<그림 16> 14개 관측지점에 대한 연간 강수일수 및 호우일수의 변화추세(1954-2008년)

- 한반도의 강수량 변화 추세는 약 100년간(1912 ~ 2008년) 6개 관측지점의 평균 연강수량은 변동성이 매우 크고(최소 712mm ~ 최대1,929mm), 최근 10년 동안 20세기 초반 10년에 비해 약 19%(220mm) 증가함

※ 연 강수량은 계절적으로 여름철 7~8월에, 공간적으로 태백산맥 주변지역에 집중호우의 강도 증가에 의해 뚜렷하게 나타남. 반면 겨울철 강수량의 변화는 뚜렷하지 않으나 온난화에 의해서 강설에서 강우로 나타나는 비율이 점차 높아지고 있음



<그림 17> 6개 관측지점에 대한 10년 평균강수량의 변화추세 (1912-2008년)

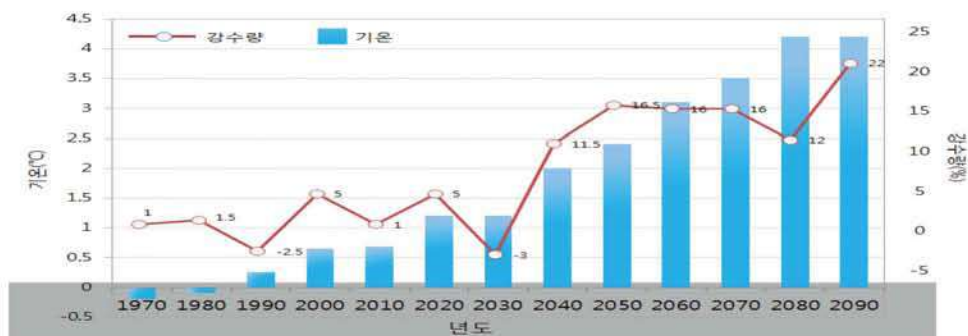
- 한반도의 해수면 변화 추세는 1964년부터 2006년까지 최근 43년간 우리나라의 해수면은 약 8cm상승 (제주특별자치도 22cm, 매년 5.1mm 상승) 하는 추세에 있음
- 한반도의 기온변화 전망은 지역기후모형을 이용하여 1)IPCC의 SRES 시나리오 중

1) IPCC SRES(Special Report on Emission Scenarios) : IPCC 배출 시나리오에 관한 특별보고서

A1B시나리오의 미래를 예측한 결과 2100년도에는 한반도 전 지역에 대하여 온도가 4°C 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 겨울에 두드러질 전망이다. 일최고기온 보다 일최저기온의 상승이 뚜렷하여 기온 연교차는 현재보다 감소할 것으로 예측됨.

- 한반도의 강수량 변화 전망은 2)A1B 시나리오에 따른 20세기말(1971~2000년) 대비 21세기말(2071~2100년) 한반도 연 강수량은 17% 증가가 전망되며, 8월과 9월의 강수량 증가가 큼. 강수량의 시공간 변동성은 더 커질 것으로 예상되며, 지역에 따라 가뭄 및 호우 현상과 같은 서로 상반된 강수현상이 심화될 가능성이 높음. 흑서일이 증가하며 흑한일이 감소하고 8 ~ 9월 사이의 강수량 증가가 뚜렷할 것으로 전망

※ 기후변화에 영향을 미치는 기후요소로 기온, 강수량, 습도, 증발산량, 일조시간, 풍향, 풍속 등 다양한 것들이 관찰되지만, 온도와 강수량이 자연 및 인간계에서 발생하는 현상을 설명하는데 공간적·시간적 변동성이 큰 강수량보다 온도를 주로 사용(IPCC, 2007).



<그림 18> 한반도 지역의 20세기말(1971~2000년) 대비 기온(°C) 및 강수량(%)의 변화

- 한반도의 해수면 변화 전망은 2008년 대비 2050년 9.5cm, 2100년 20.9cm로 상승할 것으로 전망됨
- 우리나라 해수 온도 전망은 2008년 대비하여 2050년 1.3°C, 2100년 2.9°C 상승할 것으로 전망됨
- A1B시나리오에 따른 미래 기후구 전망에 따르면, 아열대 기후구 북쪽 경계가 점차 북상하며, 특히 동해안지역의 아열대화의 가속이 뚜렷하고, 2021 ~ 2050년에는

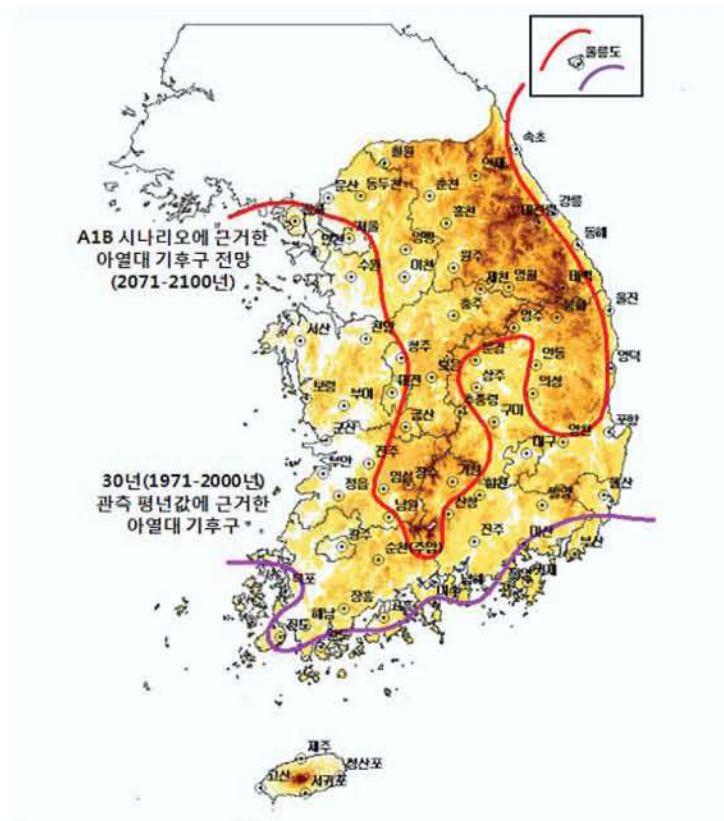
2) A1B 시나리오 : SRES 시나리오 4중(A1, A2, B1, B2) 하나이며, A1 시나리오의 줄거리는 세계 경제의 매우 급속한 성장, 금세기 중반에 최고에 도달할 지구촌 인구, 새롭고 좀더 효율적인 기술의 급속한 도입을 가정하고, 기술변화 방향에 따라 3개군(화석집약적: A1F1, 비화석: A1T, 모든 자원간의 균형: A1B)으로 구분함.

남해안과 동해안지역이 모두 아열대 기후구에 속하게 되며, 그 이후에도 아열대 기후구 경계의 북상이 계속되어 2071~ 2100년에 이르러서는 태백산맥과 소백산맥 등 주요 산지를 제외한 내륙지역까지 아열대 기후구가 확장될 것으로 전망

※ 3)트레와다 방법에 따른 아열대 기후구의 정의는 최한월 평균기온이 18℃ 이하 이면서 월평균기온이 10℃ 이상인 달이 8 ~ 12개월 이상이며(Trewartha and Horn,1980), 이를 현재 평년기후(1971 ~ 2000년)에 적용하면 제주도 지역과 남해안 일부 관측 지점(거제, 마산, 부산, 통영, 목포, 여수, 완도)이 포함됨

- 미래에는 여름의 시작이 빨라지고, 가을의 시작이 늦어짐에 따라 여름에 해당하는 기간은 길어질 것으로 전망. 여름 지속기간에 따른 공간패턴은 현재와 미래에 큰 변화가 없지만, 위도가 낮을수록 여름지속기간은 더 길어질 것으로 나타나며, 가장 위도가 낮은 서귀포의 경우 6개월 이상이 여름철에 해당할 것으로 전망.
- 겨울 지속기간은 겨울 시작일이 늦어지고, 봄 시작일이 빨라짐에 따라 짧아질 것으로 예상되며, 제주도와 울릉도 및 동해안지역, 그리고 남해안지역의 경우 겨울이 사라지며, 강원산지만 90일 이상의 겨울 지속기간이 나타날 것으로 전망
- A1B시나리오에 근거한 21세기말(2091 ~ 2100년)에는 주요 산악지역을 제외한 모든 지역에서 3월 이전에 봄이 시작되고, 여름 시작일이 가장 이른 대구의 경우 5월 말경에서 4월 말경으로 한 달 가량 빨라질 것으로 전망되며, 해양의 영향을 받는 인접지역은 여름시작일의 빨라지는 추세가 상대적으로 느리게 나타나고, 전국이 9월 이후에 가을이 시작되며 20일 정도 가을시작일이 늦어지고, 겨울은 일최저기온의 두드러진 상승으로 남부 및 남서부지역의 경우 이듬해 1월이 되어서야 겨울에 접어드는 것으로 나타나며, 제주도와 울릉도를 포함한 남해안 및 동해안, 남해안지역에서는 기상학적 겨울이 없어지는 것으로 전망됨

3) 트레와다(G. T. Trewartha) ; 쾨펜의 기후구분에 대한 수정으로 기후구분을 식물분포에 따라서 더욱 자세하게 구분한 사람



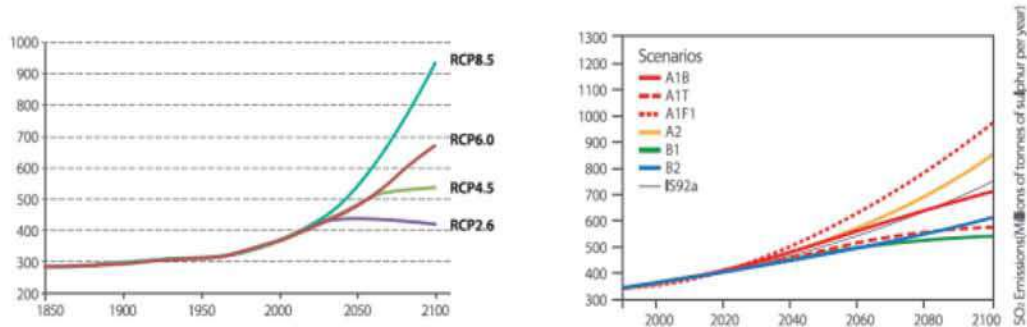
<그림 19> 트레와다 기준에 의한 아열대 기후구 전망(기상청, 2008)

3.2. 제주도 천연기념물 문화재 분포지역과 기후변화시나리오

- 제주도 천연기념물 문화재 분포지역에 대한 기후변화의 영향을 분석하기 위하여 기상청에서 제공하는 기후변화시나리오를 활용함. 기후변화 영향 분석은 기상청에서 제공하는 남한상세자료인 평균기온(tavg), 최고기온(tmax), 최저기온(tmin), 강수량(prcp) 자료와 기후극한지수인 서리일수(FD0), 여름일수(SU25), 폭염일수(SU33), 결빙일수(ID0), 열대야(TR25), 식물성장기간(GSL)을 활용함
- 제주도 천연기념물 문화재 분포지역에 대한 기후변화의 영향을 분석하기 위하여 기상청에서 제공하는 2000년부터 2010년까지 기후자료를 기준으로 2011년부터 2100년까지 월별 자료를 이용하였으며, 2013년부터 2030년까지의 평균자료와 2031년부터 2060년까지의 평균자료, 2061년부터 2100년까지의 평균자료를 제작
- 제주도 천연기념물 문화재 분포지역에 대한 기후변화 영향은 현재(2010), 2030년까지의 평균자료, 2060년까지의 평균자료, 2100년까지의 평균자료를 토대로 향후

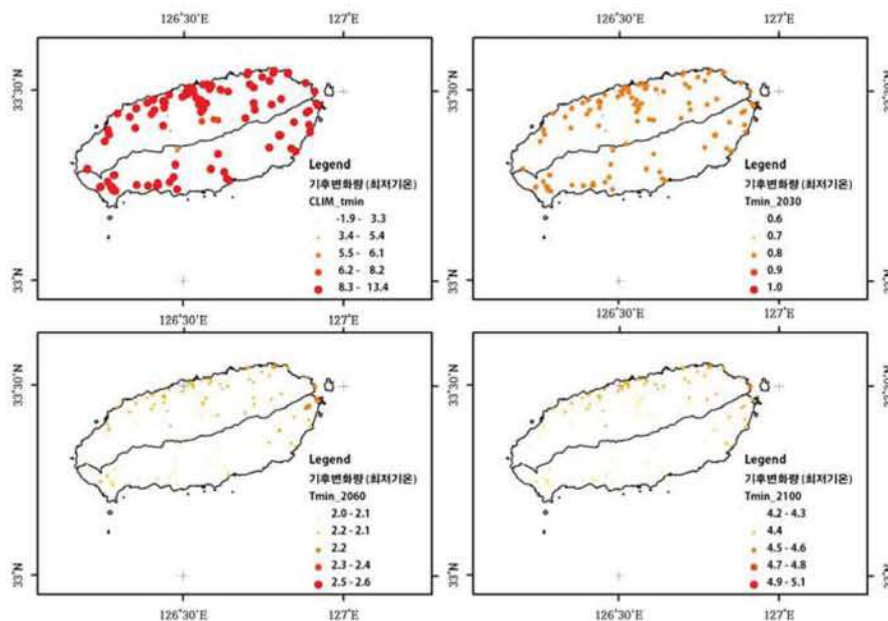
문화재 분포지역에서의 기후변화를 예측하는데 활용하였음.

- ※ 문화재 위치에 대한 기후변화 영향 분석에 사용된 남한 상세(1km) 기후변화 시나리오는 지역기후모델을 통해 생산된 한반도(12.5km) 기후변화 시나리오를 바탕으로 통계적 상세화 과정을 통해 생산되었으며, 관측자료(2000~2010)를 PRIDE* 모델에 적용하여 1km 해상도의 관측격자 자료를 생산하여 기후값으로 사용. 그리고 12.5km 한반도 시나리오 자료에서 각 격자점별로 계절 변동(Seasonal cycle)을 제거한 편차(Anomaly) 자료를 추출. 관측에서 얻은 기후값에 지역기후모델의 편차를 더하면, 모델 계통오차가 제거된 새로운 1km 격자형 시나리오 자료가 생산.
- ※ PRIDE 모델은 PRISM based Downscaling Estimation Model의 약자이며, 기후를 결정하는데 중요한 역할을 하는 DEM(Digital Elevation Model) 고도, 거리, 지형면(topographic facet), 해양도(coastal proximity)의 영향을 고려하여 고해상도 격자 자료를 산출하는 PRISM (Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model)을 남한 1km 격자 에 적합하게 수정한 한국형 PRISM임.
- ※ IPCC 5차 평가 보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정의. 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 '대표(Representative)'라는 표현을 사용하고, 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 '경로(Pathways)'라는 의미를 포함. RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영하였으며 최근 예측 모델에 맞게 해상도 등을 갱신하였음
- ※ RCP에서 4가지 대표 온실가스 농도는 2.6, 4.5, 6.0, 8.5를 사용하여 시나리오를 만드는데, 문화재 분석에 사용된 시나리오는 RCP8.5로 현재 추세(저감노력 없이)로 온실가스가 배출되는 경우(BAU시나리오)를 사용 (RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m² 지상에 도달되는 태양복사가 약 238W/m²이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당)

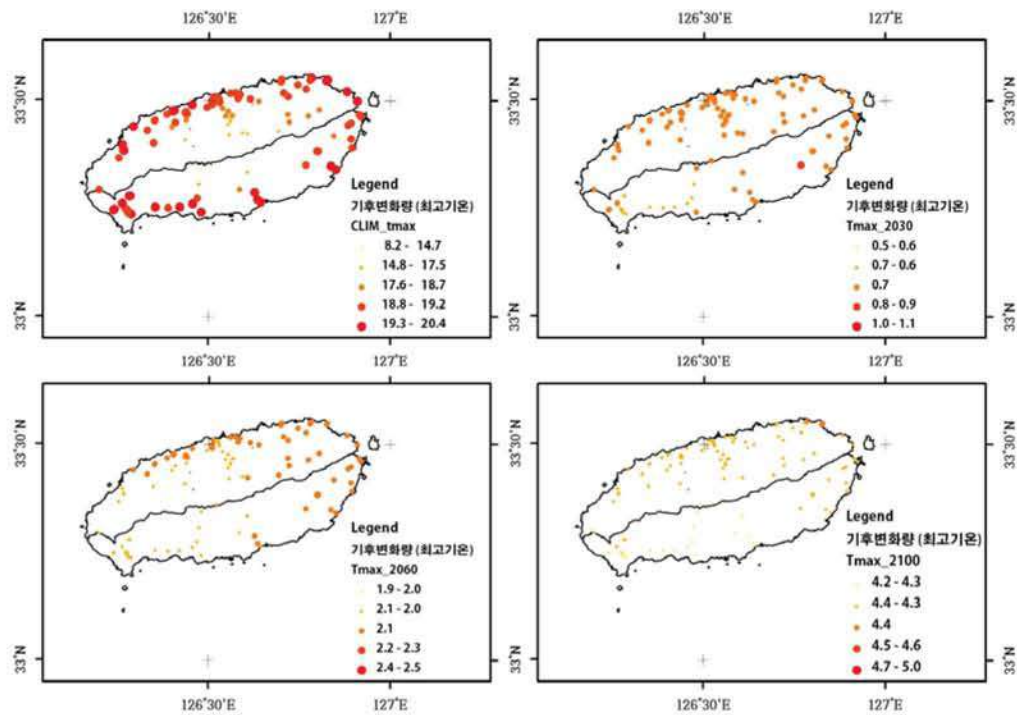


<그림 20> RPC 시나리오(2010년 개발; 좌)와 SRES(1990년대 말 개발; 우) 시나리오의 온실가스 농도변화 비교 (2012, 기상청 기후변화정보센터)

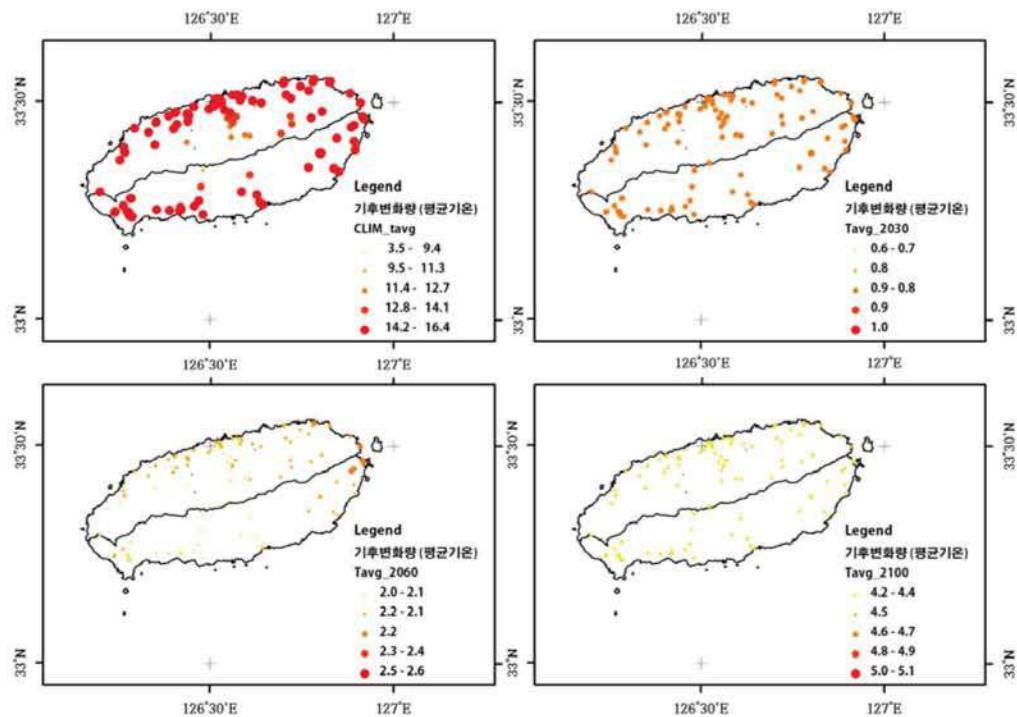
- 전국의 문화재 분포지역의 평균기온변화는 2100년까지 최고온도의 상승은 둔화되고, 최저온도의 상승이 가속화되면서, 최고기온과 최저기온의 차이가 적어지면서 전반적으로 온도상승이 진행되는 것으로 나타남.
- 기존 분석결과에 의하면 행정구역에 따라 문화재 분포 지역의 2000년부터 2100년까지의 연평균온도는 제주특별자치도 15.2°C, 전라남도 12.9°C, 경상남도 12.8°C, 전라북도 12.1°C, 충청남도 11.9°C, 경상북도 11.8°C, 경기도 11.5°C, 충청북도 11.1°C, 강원도 10.2°C이며, 제주특별자치도가 가장 높고, 강원도가 가장 낮은 지형과 위도에 따른 변화가 뚜렷함



<그림 21> 제주 문화 유적 관리 지역기후변화 영향 (최저기온: Tmin) 분석결과 및 분포



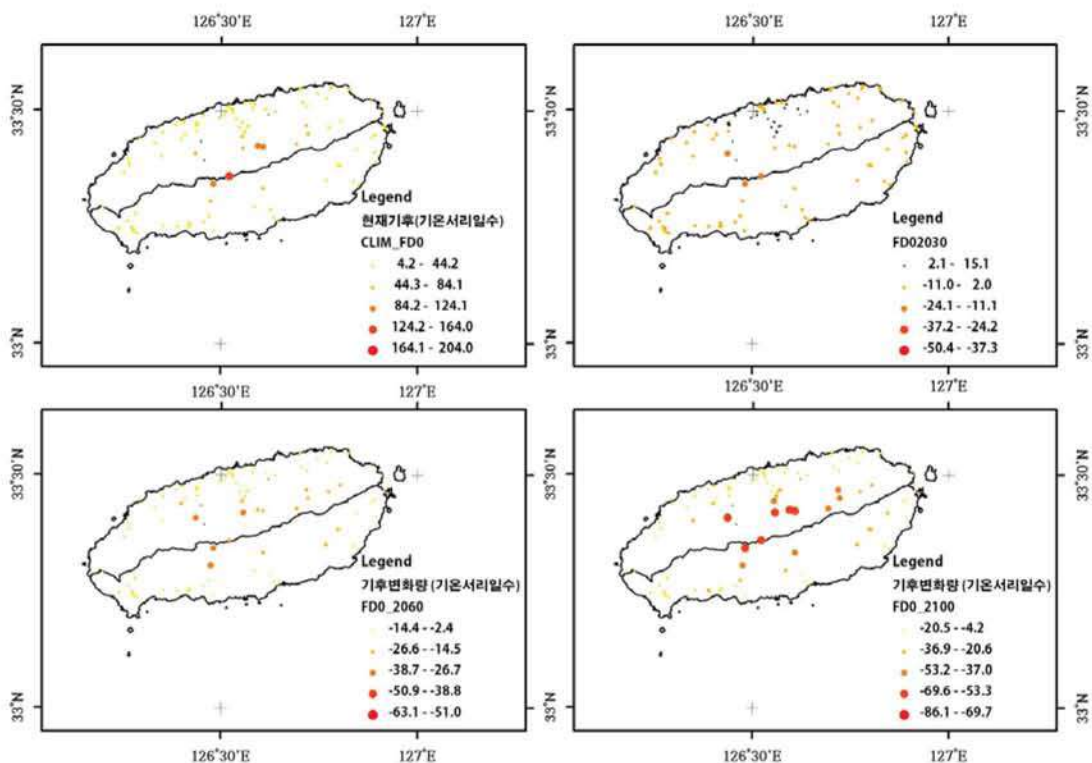
<그림 22> 제주 문화 유적 관리 지역기후변화 영향 (최고기온: Tmax) 분석결과 및 분포



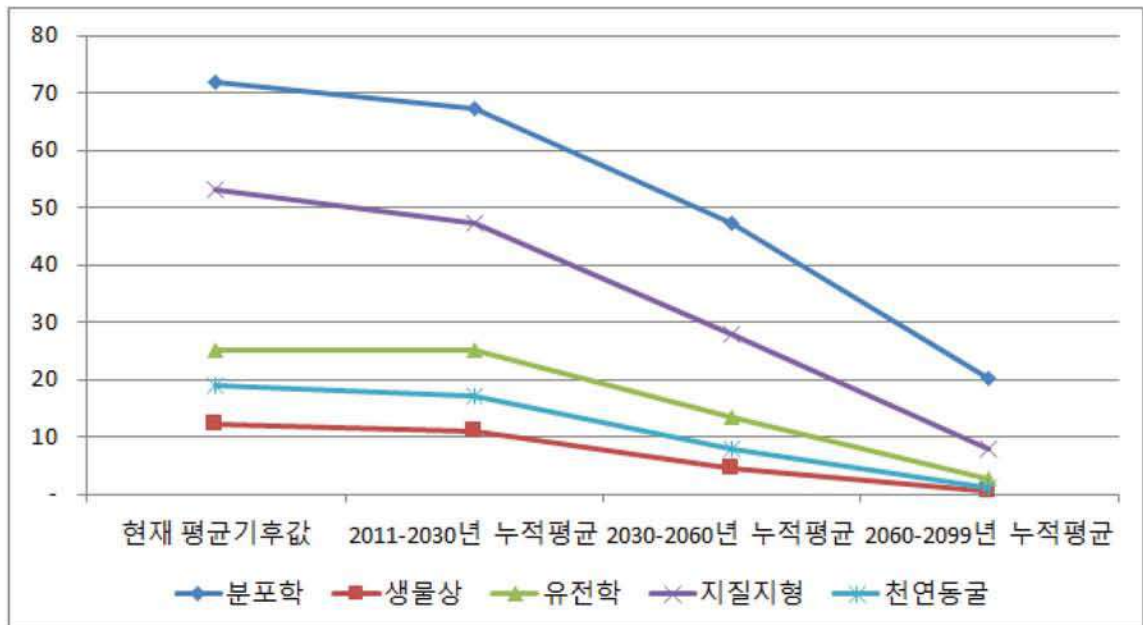
<그림 23> 제주 문화 유적 관리 지역기후변화 영향 (평균기온: Tavg) 분석결과 및 분포

3.3. 제주도 천연기념물 문화재 분포지역 기후변화 영향분석 결과

- 본 극기상 기후 분석 결과는 국가 및 시도 지정문화재 가운데 지도상으로 관리되는 문화재 정보 가운데 제주도에 위치한 천연기념물 및 천연보호구역 분포지역 22개소를 대상으로 기상청에서 제공하는 기후변화 시나리오를 기반으로 기후변화의 영향을 분석한 결과임.
- 기상청에서 기후변화 시나리오와 함께 제공하고 있는 극기상 기후는 총 6가지 종류이며, 기온서리일수(FD0), 기온여름일수(SU25), 기온폭염일수(SU33), 기온결빙일수(ID0), 기온열대야(TR25), 기온식물성장기간(GSL) 등이 해당됨
- 기온서리일수(Frost days: FD0)는 일최저기온이 0도 미만인 날의 연중 일수를 의미. 기온서리일수의 변화는 현재 기온서리일수를 기준으로 각각의 분류기준에 따른 변화율을 볼 때, 대체적으로 감소하는 유사한 경향을 나타내며, 현재부터 2030년까지는 완만한 감소세를 보이다가 2060년부터 2099년까지는 보다 감소율이 높아지는 것으로 나타남



<그림 24> 제주 문화 유적 관리 지역 기후변화 영향 기온서리일수(Frost days; FD0) 분석결과 및 분포

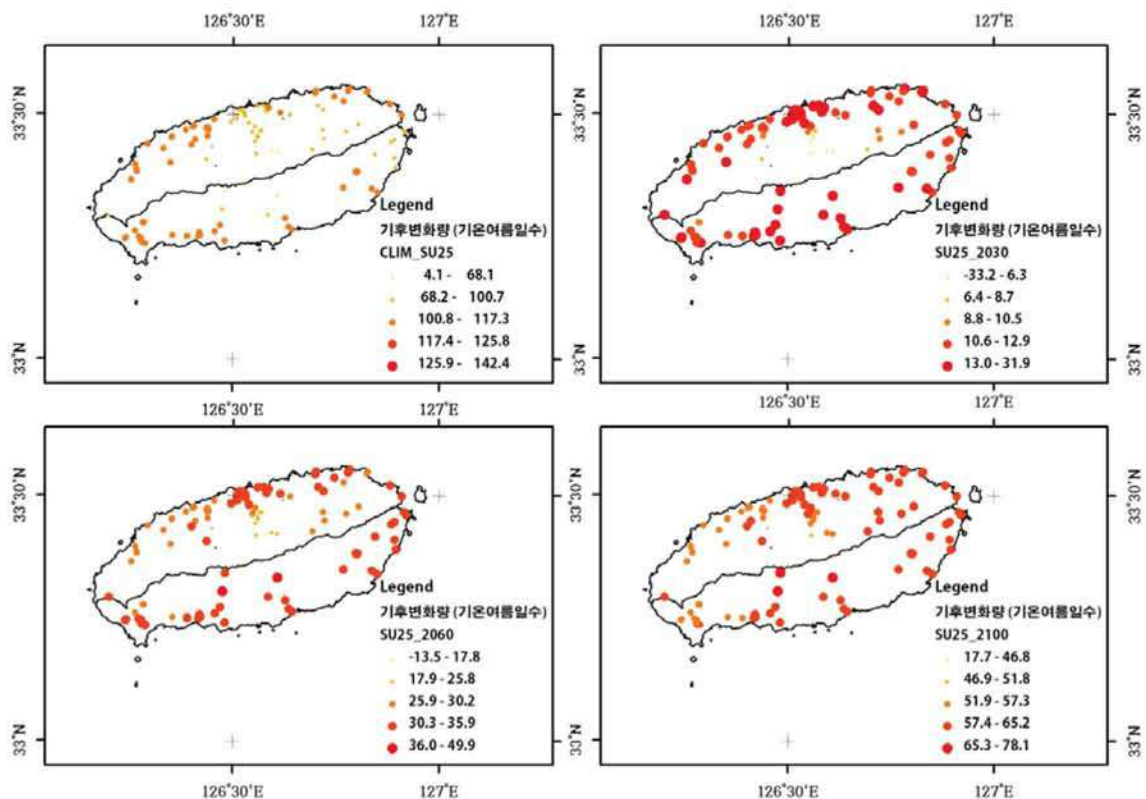


<그림 25> 제주지역 천연기념물 기온서리일수(Frost days; FD0) 변화추이

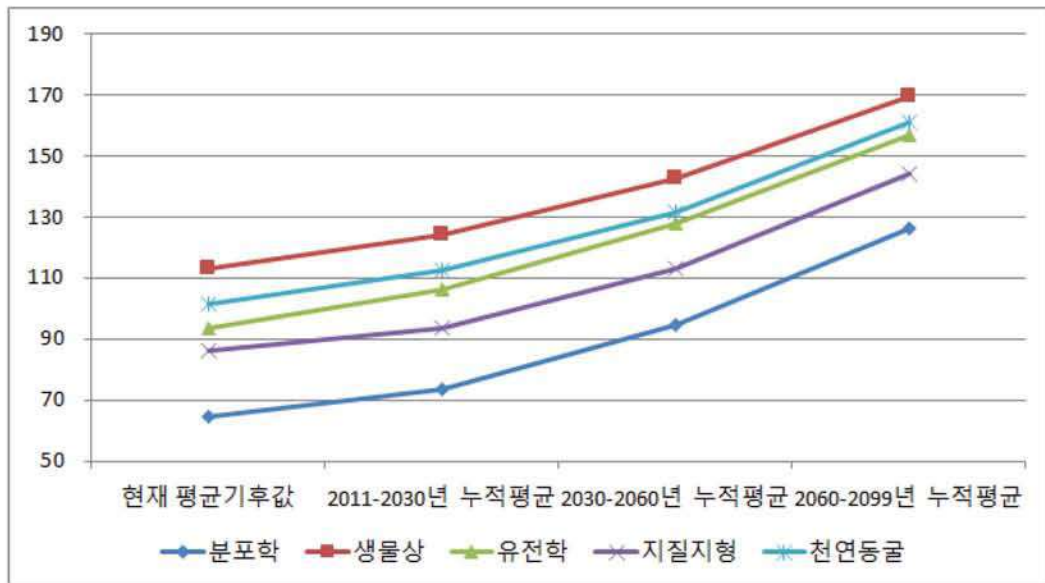
[표 7] 기온서리일수(Frost days; FD0) 분석결과

FD0 분석	중분류	세분류	개수	현재	2030년	2060년	2099년
천연기념물	문화역사 기념물	민속	22	37	35	22	10
		생활	3	31	32	19	6
	문화역사기념물 요약		2	56	52	35	14
	생물과학 기념물	분포학	5	41	40	26	9
		생물상	2	72	67	47	20
		유전학	4	12	11	5	0
	생물과학기념물 요약		1	25	25	13	3
	지구과학 기념물	지질지형	7	31	29	18	6
		천연동굴	2	53	47	28	8
	지구과학기념물 요약		7	19	17	8	1
천연기념물 요약			9	27	24	12	3
천연보호구역	문화 및 자연결합성	경관 및 과학성	21	32	29	17	5
	문화 및 자연결합성 요약		1	155	144	130	100
천연보호구역 요약			1	155	144	130	100
총합계			1	155	144	130	100

○ 기온여름일수(Summer days; SU25)는 일최고기온이 25도 이상인 날의 연중 일수를 의미. 기온여름일수분석결과, 분석된 제주지역의 천연기념물 및 천연보호구역은 연중 평균 92일이었던 현재의 기후가 2030년에는 101일로 증가하고, 2060년까지 평균 120일로 증가하며, 2099년까지는 평균 149일로 증가하며, 기온여름일수의 변화는 현재 기온여름일수를 기준으로 각각의 분류기준에 따른 변화율을 볼 때, 대체적으로 동일한 지속적인 증가 경향



<그림 26> 제주 문화 유적 관리 지역 기후변화 영향 기온여름일수(Summer days; SU25) 분석결과 및 분포

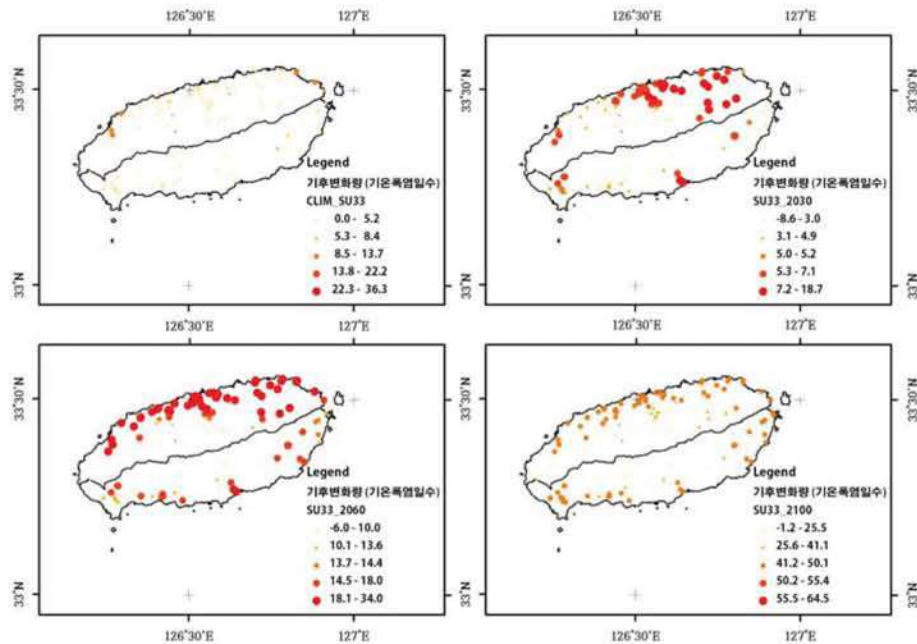


<그림 27> 천연기념물 문화재 기온여름일수(Summer days; SU25) 변화추이

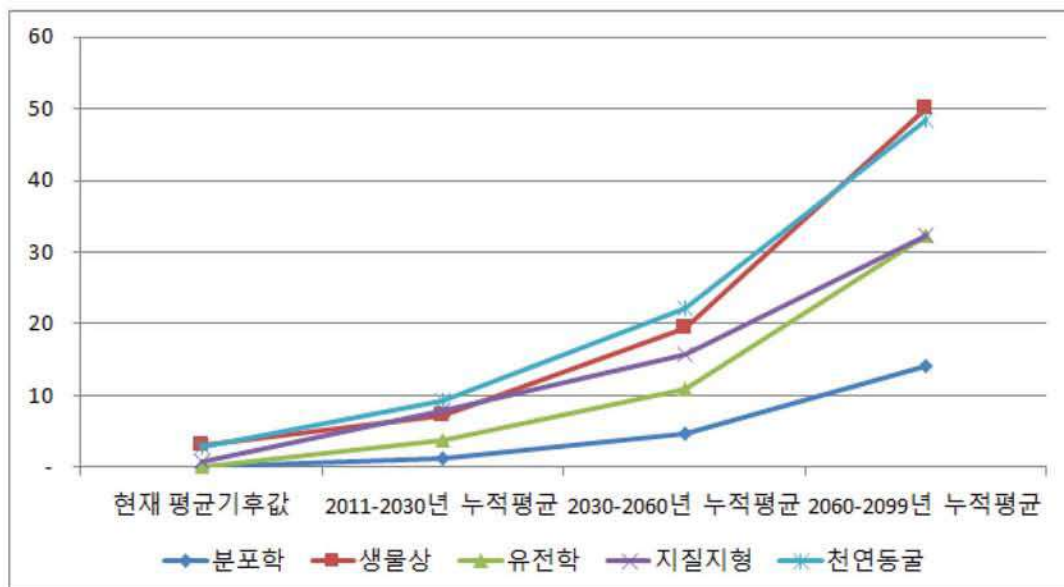
[표 8] 기온여름일수(Summer days; SU25) 분석결과

SU25 분석	중분류	세분류	개수	현재	2030년	2060년	2099년
천연기념물	문화역사 기념물	민속	3	98	106	125	155
		생활	2	80	87	107	138
	문화역사기념물 요약		5	91	99	118	148
	생물과학 기념물	분포학	2	65	74	95	126
		생물상	4	113	124	143	169
		유전학	1	93	106	128	157
	생물과학기념물 요약		7	96	107	127	155
	지구과학 기념물	지질지형	2	86	93	113	144
		천연동굴	7	101	112	131	161
	지구과학기념물 요약		9	98	108	127	157
천연기념물 요약			21	96	106	125	155
천연보호구역	문화 및 자연결합성	경관 및 과학성	1	4	6	15	42
		문화 및 자연결합성 요약		1	4	6	15
천연보호구역 요약			1	4	6	15	42
총합계			22	92	101	120	149

- 기온폭염일수(Summer days; SU33)는 일최고기온이 33도 이상인 날의 연중 일수를 의미. 기온폭염일수분석결과, 분석된 제주지역의 천연기념물 및 천연보호구역은 연중 2일이었던 현재의 기후가 2030년에는 7일로 증가하고, 2060년까지 평균 16일로 증가하며, 2099년까지는 평균 38일로 증가하는 것으로 나타나며, 지역에 따라 증가 패턴이 조금씩 달라짐



<그림 28> 제주 문화 유적 관리 지역 기후변화 영향 기온폭염일수(Summer days; SU33) 분석결과 및 분포

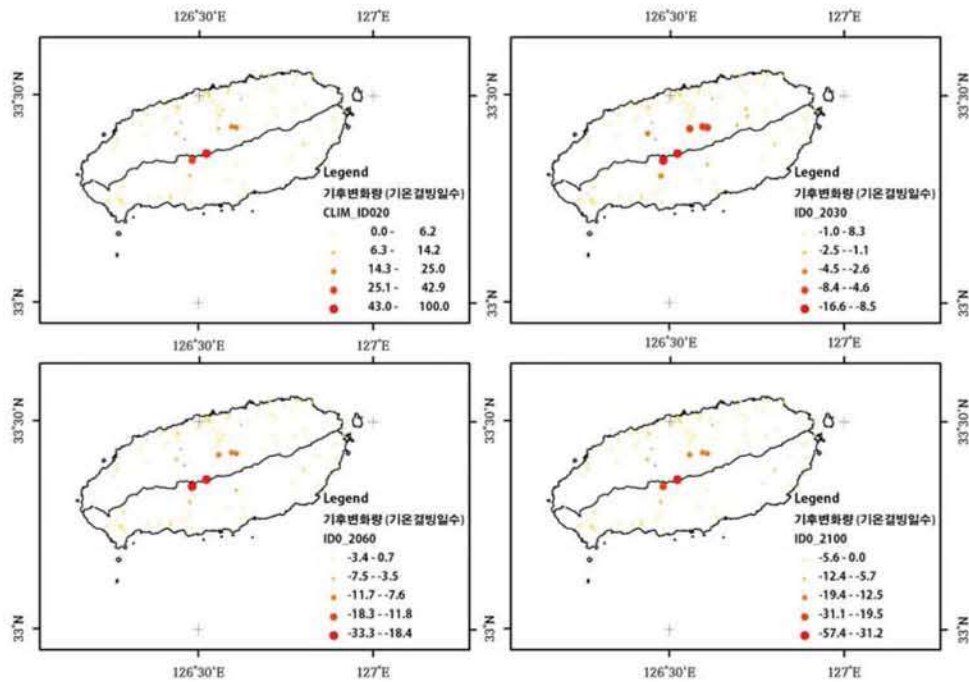


<그림 29> 천연기념물 문화재 기온폭염일수(Summer days; SU33) 변화추이

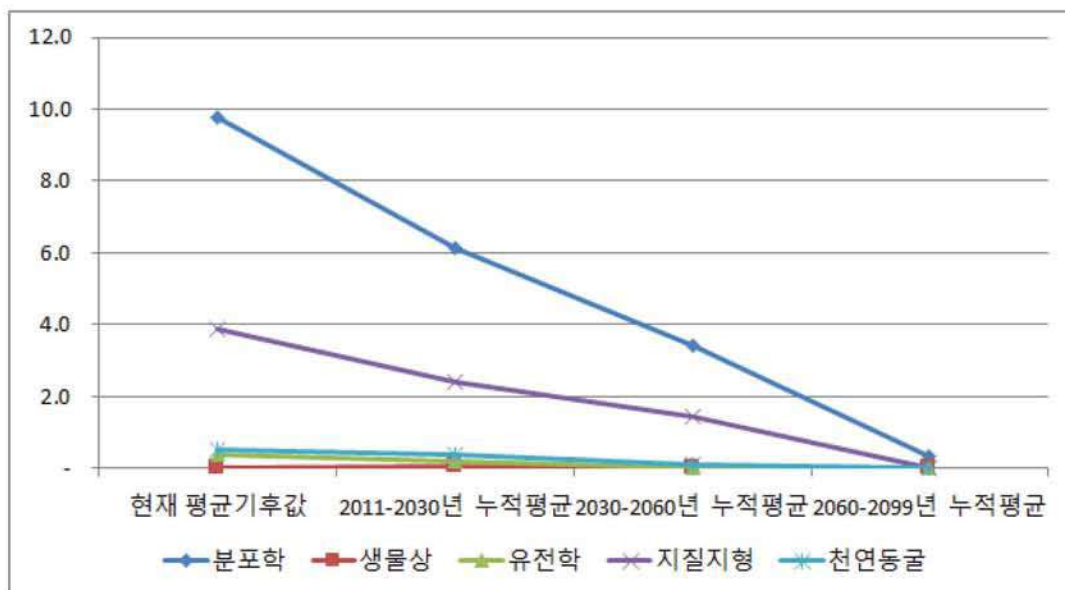
[표 9] 기온폭염일수(Summer days; SU33) 분석결과

SU33 분석	중분류	세분류	개수	현재	2030년	2060년	2099년
천연기념물	문화역사 기념물	민속	3	2	6	17	41
		생활	2	1	6	13	29
	문화역사기념물 요약		5	1	6	15	36
	생물과학 기념물	분포학	2	-	1	5	14
		생물상	4	3	7	19	50
		유전학	1	0	4	11	32
	생물과학기념물 요약		7	2	5	14	37
	지구과학 기념물	지질지형	2	1	8	16	32
		천연동굴	7	3	9	22	48
	지구과학기념물 요약		9	2	9	21	45
천연기념물 요약			21	2	7	17	40
천연보호구역	문화 및 자연결합성	경관 및 과학성	1	-	-	0	0
	문화 및 자연결합성 요약		1	-	-	0	0
천연보호구역 요약			1	-	-	0	0
총합계			22	2	7	16	38

- 기온결빙일수(Ice days; ID0)는 일최고기온이 0도 미만인 날의 연중일수를 의미. 기온결빙일수분석결과, 분석된 제주지역의 천연기념물 및 천연보호구역은 연중 5.2일이었던 현재의 기후가 2030년에는 3.8일로 감소하고, 2060년까지 평균 2.3일로 감소하며, 2099년까지는 평균 0.7일로 감소하는 것으로 나타나며, 분포 지역에 따라 감소폭이 다르게 나타남



<그림 30> 제주 문화 유적 관리 지역 기후변화 영향 기온결빙일수(Ice days; ID0) 분석결과 및 분포

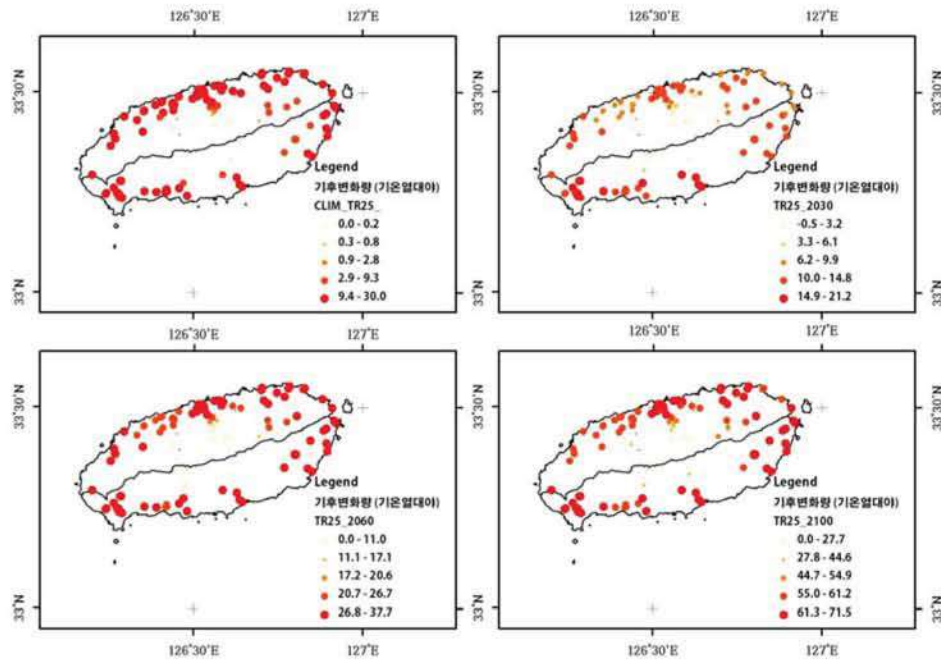


<그림 31> 천연기념물 문화재 기온결빙일수(Ice days; ID0) 변화추이

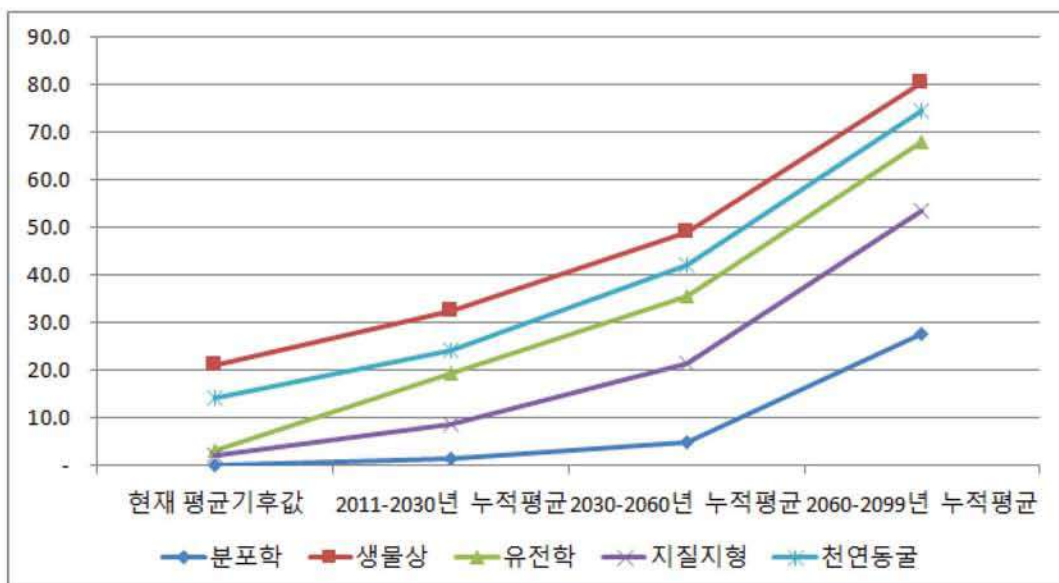
[표 10] 기온결빙일수(Ice days; ID0) 분석결과

ID0 분석	중분류	세분류	개수	현재	2030년	2060년	2099년
천연기념물	문화역사 기념물	민속	3	2	2.2	1.2	0.1
		생활	2	7.5	5	2.9	0.3
	문화역사기념물 요약		5	4.2	3.3	1.9	0.2
	생물과학 기념물	분포학	2	9.8	6.2	3.4	0.4
		생물상	4	-	0.1	-	-
		유전학	1	0.4	0.2	-	-
	생물과학기념물 요약		7	2.8	1.8	1	0.1
	지구과학 기념물	지질지형	2	3.9	2.4	1.5	-
		천연동굴	7	0.5	0.4	0.1	-
	지구과학기념물 요약		9	1.3	0.8	0.4	-
천연기념물 요약			21	2.5	1.7	0.9	0.1
천연보호구역	문화 및 자연결합성	경관 및 과학성	1	61.2	45.9	30.7	13.9
		문화 및 자연결합성 요약		1	61.2	45.9	30.7
천연보호구역 요약			1	61.2	45.9	30.7	13.9
총합계			22	5.2	3.8	2.3	0.7

- 기온열대야(Tropical nights; TR25)는 일최저기온이 25도 이상인 날의 연중 일수를 의미. 기온열대야 일수분석결과, 분석된 제주지역의 천연기념물 및 천연보호구역은 연중 10.3일이었던 현재의 기후가 2030년에는 18.3일로 증가하고, 2060년까지 평균 32일로 증가하며, 2099년까지는 평균 61.2일로 증가하는 것으로 나타나며, 분포 지역에 따라 증가폭이 다르게 나타남



<그림 32> 제주 문화 유적 관리 지역 기후변화 영향 기온열대야 (Tropical nights; TR25) 분석결과 및 분포

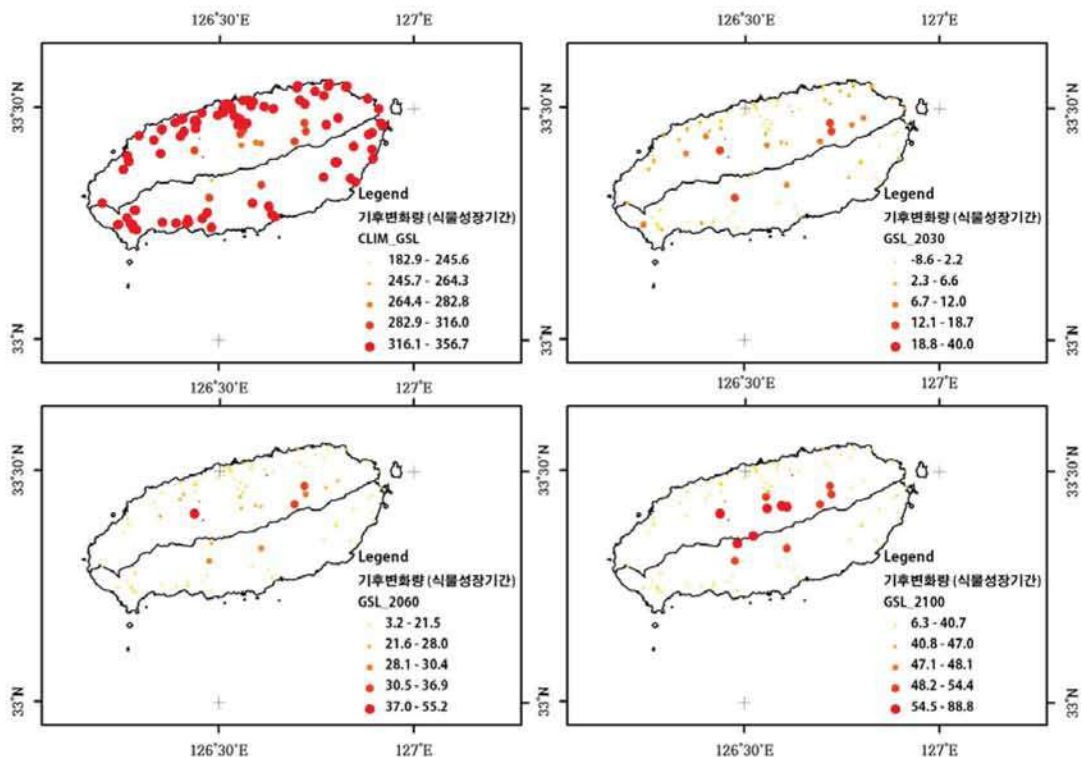


<그림 33> 천연기념물 문화재 기온열대야(Tropical nights; TR25)변화추이

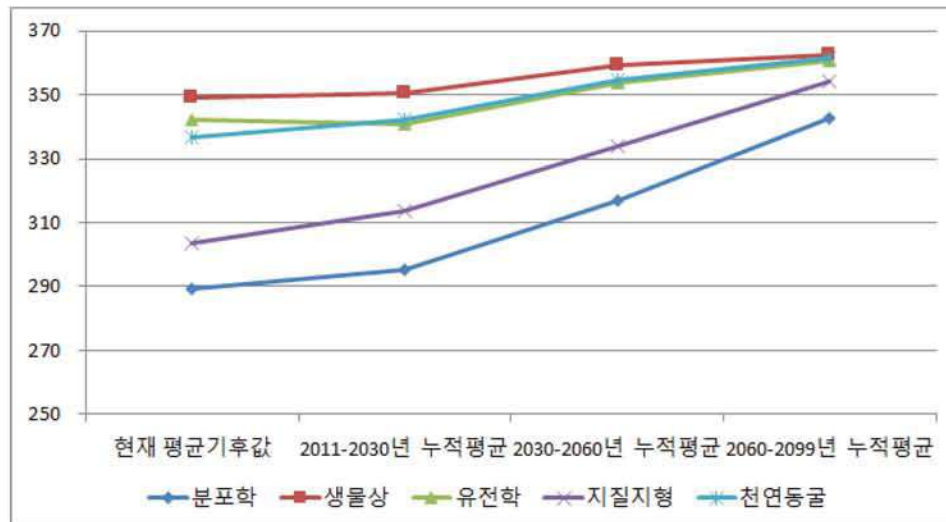
[표 11] 기온열대야(Tropical nights; TR25) 분석결과

IDO 분석	중분류	세분류	개수	현재	2030년	2060년	2099년
천연기념물	문화역사 기념물	민속	3	9.2	15.4	29.5	61.1
		생활	2	3.9	9.2	18.4	44.2
	문화역사기념물 요약		5	7.1	12.9	25.1	54.3
	생물과학 기념물	분포학	2	0.1	1.3	4.8	27.8
		생물상	4	21.1	32.4	49.1	80.4
		유전학	1	3	19.4	35.6	68.1
	생물과학기념물 요약		7	12.5	21.7	34.5	63.6
	지구과학 기념물	지질지형	2	2.2	8.6	21.3	53.6
		천연동굴	7	14.2	24	42	74.7
	지구과학기념물 요약		9	11.5	20.6	37.4	70
천연기념물 요약			21	10.8	19.1	33.5	64.1
천연보호구역	문화 및 자연결합성	경관 및 과학성	1	-	-	-	-
		문화 및 자연결합성 요약		1	-	-	-
천연보호구역 요약			1	-	-	-	-
총합계			22	10.3	18.3	32	61.2

- 기온식물성장기간(Growing Season Length; GSL)은 일평균기온이 5°C 보다 높은 날이 적어도 6일 이상 지속된 첫 날부터 일평균기온이 5°C 미만인 날이 적어도 6일 이상 지속된 첫 날까지 사이의 연중 일수를 의미. 기온식물성장기간 일수분석결과, 분석된 제주지역의 천연기념물 및 천연보호구역은 연중 321일이었던 현재의 기후가 2030년에는 326일로 증가하고, 2060년까지 평균 340일로 증가하며, 2099년까지는 평균 345일로 증가
- 기온식물성장기간의 변화는 현재 기온식물성장기간을 기준으로 각각의 분류기준에 따른 변화율을 볼 때, 대체적으로 증가하는 경향은 유사하게 나타나며, 2011년부터 2030년까지는 매우 완만하게 증가하다가, 2030년 이후부터는 빠르게 증가하는 것으로 나타남



<그림 34> 제주 문화 유적 관리 지역 기후변화 영향 기온식물성장기간 (Growing Season Length; GSL) 분석결과 및 분포



<그림 35> 천연기념물 문화재 입지 기온식물성장기간(Growing Season Length; GSL) 변화추이

[표 12] 기온식물성장기간(Growing Season Length; GSL) 분석결과

GSL 분석	중분류	세분류	개수	현재	2030년	2060년	2099년
천연기념물	문화역사 기념물	민속	3	327	329	345	357
		생활	2	300	306	327	347
	문화역사기념물 요약		5	316	320	338	353
	생물과학 기념물	분포학	2	289	295	317	343
		생물상	4	349	351	359	362
		유전학	1	342	341	354	361
	생물과학기념물 요약		7	331	333	346	356
	지구과학 기념물	지질지형	2	304	314	334	354
		천연동굴	7	337	342	355	361
지구과학기념물 요약		9	329	336	350	360	
천연기념물 요약			21	327	331	346	357
천연보호구역	문화 및 자연결합성	경관 및 과학성	1	202	208	224	259
		문화 및 자연결합성 요약		1	202	208	224
천연보호구역 요약			1	202	208	224	259
총합계			22	321	326	340	353

4. 시사점 및 문제 도출

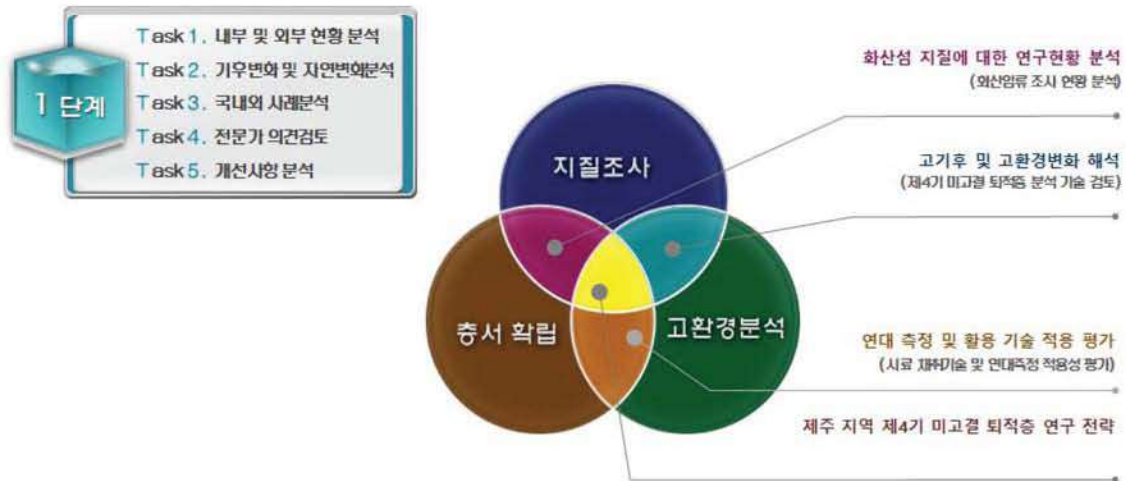
- 화산섬으로서의 제주가 갖는 지질학적 가치를 평가하고 화산활동에 의한 안정성 확보를 위해서 현재 국가차원에서 관리되고 있는 천연보호구역에 대한 가치 재조명과 추가적인 학술조사가 필수적으로 요구됨
- 최근까지 진행된 다수의 연구는 암석기반의 연구에서 미고화 퇴적층을 대상으로 한 연구로 경향이 점차 변화하고 있으며, 현재 기후환경변화와 관련한 고기후와 고환경에 대한 연구가 점차 증가하는 경향을 보임
- 제주도 형성과정에 대한 논란과 최근의 연구결과를 반영한 제주 화산섬 형성모델의 개발이 필요하며, 제주 지역 전반에 대한 지질조사가 요구됨
- 제주도 화산 재해에 대한 안정성 확보와 경제적 안정을 위하여 소형화산체의 화산 활동 시기에 대한 규명이 필요하며, 이러한 결과는 제주의 관광자원 확보 차원에서도 중요
- 기후 변화의 영향을 가장 먼저 받게 되며, 그 변화의 폭도 크기 때문에 고 기후 환경 및 미래 기후 환경에 대한 철저한 연구가 요구됨
- 제주도의 지리적 위치를 고려한 고기후 및 고환경 연구는 한반도 및 동아시아 전 반의 고기후 및 고환경 해석에 중요한 정보를 제공할 수 있으며, 기후 변화 패턴 및 향후 예상되는 기후변화에 대한 대응에도 필수적인 연구로 인식됨
- 한반도 기후변화로 인해 한반도 내에서도 천연기념물로 지정 보호되고 있는 천연 기념물 문화재의 영향이 예상되며, 산악지대의 고산대와 아고산대 그리고 바다에 고립되어 있는 섬 등 생물의 이동 가능성이 낮은 곳과 함께 습지, 사구 등 연약한 생태계에서 기후변화에 따른 생태계의 큰 피해가 발생할 수 있으므로 취약한 생태 계에 대한 지속적이고 집중적인 관측과 조사가 요구됨
- 한반도에서 기후변화에 따라 천연기념물로 보호되고 있는 생물 문화재는 사라질 위기의 생물종과 단위생태계에 대한 종합적인 조사를 통해 생물종 다양성 보전노 력이 필요하며, 기후변화에 취약한 북방계 생물과 이동성이 낮은 동물과 식물의 보 전 대책이 마련이 절실
- 한반도의 기후변화로 천연기념물 가운데 동물생태계의 변화는 육상동물 중 분포의 북한계 또는 남한계가 존재하는 종은 모두 한계선이 북상할 것이며, 남방계(아열대 종)의 지속적인 유입으로 토착종과의 경쟁으로 기존 동물생태계의 변화가 예상됨
- 천연기념물의 기후변화에 대한 영향은 생물 문화재의 경우 멸종위기종, 분포가 한

정되어 있는 고유종, 양서파충류와 같이 이동속도가 느리거나 장거리 이동이 불가능한 확산능력 결핍종, 서식 한계역의 개체군, 더 이상 이동이 불가능한 냉수성 어종 등과 같은 기후변화 취약종의 지역멸종이 예견됨

- 천연기념물 문화재의 기후변화에 대한 대응으로 이들의 멸종방지를 위한 노력이 필요하며, 기후변화 시나리오를 바탕으로 취약종의 분포를 예측하고, 서식지 적합성 분석을 통하여 적지로 남아있는 지역을 피난처로 지정하고 보호대책을 수립할 필요가 있음. 또한 취약종의 서식지역 확대 및 서식지 재생방안을 마련하여 서식지 내 보전에 노력하며, 다른 한편으로는 인공사육을 통한 개체수 증식방안과 유전자 확보방안 등을 수립하여 서식지외 보전 노력이 요구됨
- 기후변화가 육상 및 산림생태계에 미치는 영향을 파악하고 적응 방안을 수립하기 위해서 자연생태계에서 진행되고 있는 현상에 대한 체계적이고 지속적으로 관측이 필요하며, 기후변화와 생태계 문제를 연구하는 집단(pool)과 연구 성과를 통합 관리하는 네트워크의 구축이 요구됨.

제 3 절 문제해결을 위한 과제 도출

1. 제주도의 주요 현안 및 문제 검토



<그림 36> 현황 분석을 통한 전략적 시사점 및 문제 검토 방법

- 제주도에 대한 지질학적 학술연구 현황 및 전문가 의견을 종합해 볼 때, 제주도에 서 시급히 해결해야할 주요한 문제는 다음과 같이 요약됨
- 기후변화로 인한 지질환경 변화에 대한 집중 연구 필요
 - 문화재로 관리되고 있는 천연기념물은 동물과 식물, 지질과 지형 등으로 기후변화와 직 간접적인 영향을 받고 있으며, 인간의 활동에 의해 변화가 가속될 수 있기 때문에 자연 환경을 구성하는 화산섬에 대한 기본적인 이해가 요구됨
- 기후변화로 인한 자연환경 변화에 대한 집중 연구 필요
 - 문화재로 관리되고 있는 천연기념물은 동물과 식물, 지질과 지형 등으로 기후변화에 직 접적으로 영향을 받고, 가장 큰 피해를 입는 것으로 나타났으나 관련 정책과 연구의 보 완이 시급함
- 기후변화 영향에 대한 단주기 또는 장주기 모니터링 절실
 - 기후변화의 영향은 단기적으로는 재해의 위험과 연결되지만, 실제 기후변화는 장기적이고 점진적으로 변화하기 때문에 적극적인 대응을 위한 지속적인 관찰과 연구가 요구됨
 - 특히 천연기념물과 같은 생태환경과 관련해서 나타나는 기후변화의 영향을 파악하기 위 한 장기적이고 종합적인 장주기 모니터링이 절실

- 체계적인 동물과 식물, 지질과 지형 현황에 대한 조사가 요구됨
 - 기후변화 대응을 위한 동물과 식물, 지질과 지형에 대한 표준화와 현황에 대한 지속적인 조사가 요구되며, 학술조사 현황정보자료의 DB 구축이 필요함
- 기후변화의 지리적 특성을 고려한 고도별 정책 수립이 요구됨
 - 기후변화 양상은 지역에 따라 다르게 나타나고, 특히 한라산을 중심으로 고도별 환경 변화가 크게 나타날 것으로 예측되며, 한라산 천연보호구역 일대는 기후구의 변화로 가장 심각한 변화가 예상됨
 - 따라서 한라산 천연보호구역에 대한 전반적인 현황조사가 필요하며, 천연기념물에 대한 정밀한 보호 정책수립이 요구됨
- 선행적인 기후변화에 따른 기후요인의 취약성 분석 필요
 - 기후변화에 따라 새로이 증가하는 위험에 선제적으로 대응할 수 있는 정부 정책의 수립을 위해 제주도에 대한 기후요인(평균기온 상승, 강수량 증가, 폭염일수 증가 등)의 취약성을 분석하고, 고도별 대응 정책의 수립이 절실함
- 기후변화에 따른 자연생태환경의 변화 및 새로운 위험요소 발생
 - 한반도에서 기후변화에 따라 천연기념물로 보호되고 있는 생물 문화재는 사라질 위기의 생물종과 단위생태계에 대한 종합적인 조사를 통해 생물종 다양성 보전노력이 필요하며, 기후변화에 취약한 북방계 생물과 이동성이 낮은 동물과 식물의 보전 대책이 마련 절실
 - 천연기념물 문화재의 기후변화에 대한 대응으로 이들의 멸종방지를 위한 노력이 필요하며, 기후변화 시나리오를 바탕으로 취약종의 분포를 예측하고, 서식지 적합성 분석을 통하여 적지로 남아있는 지역을 피난처로 지정하고 보호대책을 수립할 필요가 있음. 또한 취약종의 서식역 확대 및 서식지 재생방안을 마련하여 서식지내 보전에 노력하며, 다른 한편으로는 인공사육을 통한 개체수 증식방안과 유전자 확보방안 등을 수립하여 서식지 외 보전 노력이 요구됨
- 제주 지질조사 및 화산활동 시기 규명 필요
 - 제주도는 대륙붕 위에서 발생한 대륙지각 내 화산활동(continental intraplate volcanism)에 의해 만들어진 화산섬으로, 두꺼운 화산쇄설암, 용암류 및 퇴적암 등의 암석으로 구성되어 있음.
 - 수많은 지질조사에도 불구하고, 제주도의 형성사 및 화산활동을 정의하는데 많은 논란이 있으며, 이는 화산암류에 대한 종합적인 해석이 부족한 결과로 보여짐.
- 제주도의 종합적인 화산형성과정을 규명하기 위해 한라산 보호구역에 대한 정밀 지표지질조사와 화산암류에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 필요
 - 최근 해발 600m 이하에서 시행된 시추코어에서 채취한 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측

정결과는 제주도의 화산활동이 크게 퇴적동시대 화산활동기(약 1.88 Ma~0.5 Ma)와 퇴적이후 화산활동기(0.5 Ma~홀로세)로 구분됨을 보여줌.

- 하지만 현재 600m 이상 지역(한라산 보호구역)에 대한 정밀 연대측정이 부족하여 제주도의 전체적인 화산활동시기와 형성과정에 대해 명확한 해석이 부족한 실정임.

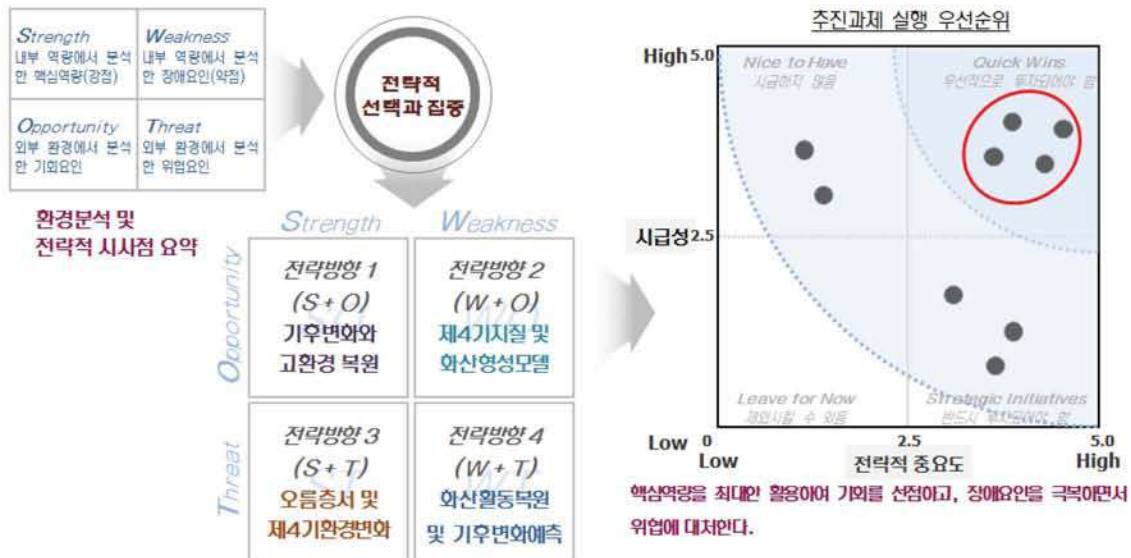
○ 지표의 젊은(<2만년) 용암류 및 소화산체(응회환, 응회구, 분석구 등)에 대한 정밀 지표지질조사와 연대측정을 통해 이들의 화구추정, 시기별 분출단위분대 그리고 제주도의 가장 젊은 화산활동사 복원 필요

- 최근 용암류 사이에 협재된 퇴적층에서의 광여기 루미니센스 연대 측정과 방사성 탄소 연대 측정은 약 5,000년 전후에 형성된 것으로 보고되고 있어, 제주도의 가장 젊은 화산 분출작용에 대한 지질조사가 요구됨.

○ 제주도 화산암류의 지질조사를 통해 새로운 제주도의 화산활동사 및 화산유형 개발이 요구됨

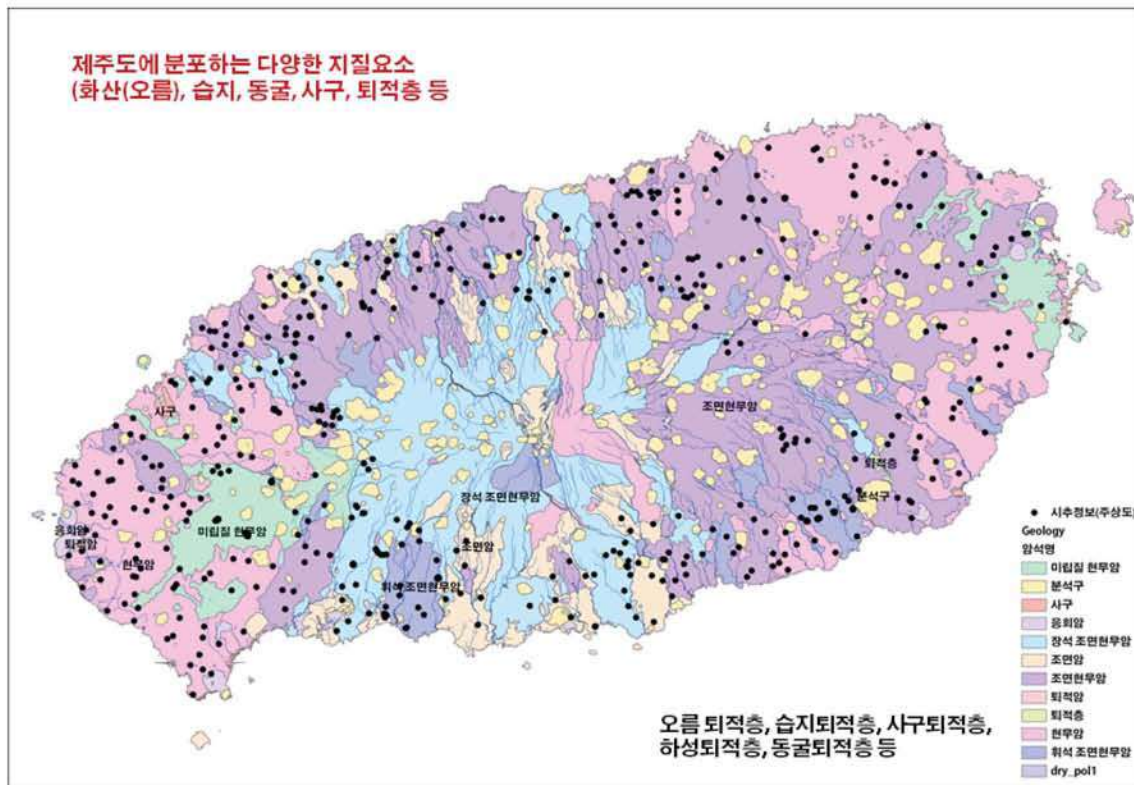
- 기존 제주도의 화산활동의 네 단계 형성 모델- (1) 기저현무암 분출기, (2) 용암대지 형성기, (3) 한라산체 형성기, (4) 기생화산 형성기-은 제주도 섬 전체를 하나의 순상화산체로 해석하였음.
- 하지만 최근 소화산체(응회환, 응회구, 분석구 등)에 대한 지구화학연구 결과들은 소화산체 하나 하나가 개별적인 단성화산체(monogenetic volcano)이며, 제주도는 이들의 집합체인 현무암질 화산지대에 해당된다는 주장이 제기되고 있음.
- 제주도의 화산유형, 화산분출시기 및 화산형성과정을 규명하기 위해서는 제주도의 화산암류에 대한 정밀 지표지질조사와 연대측정을 통해 종합적인 해석이 요구됨.

2. 문제해결 요구과제 도출 및 우선순위 평가

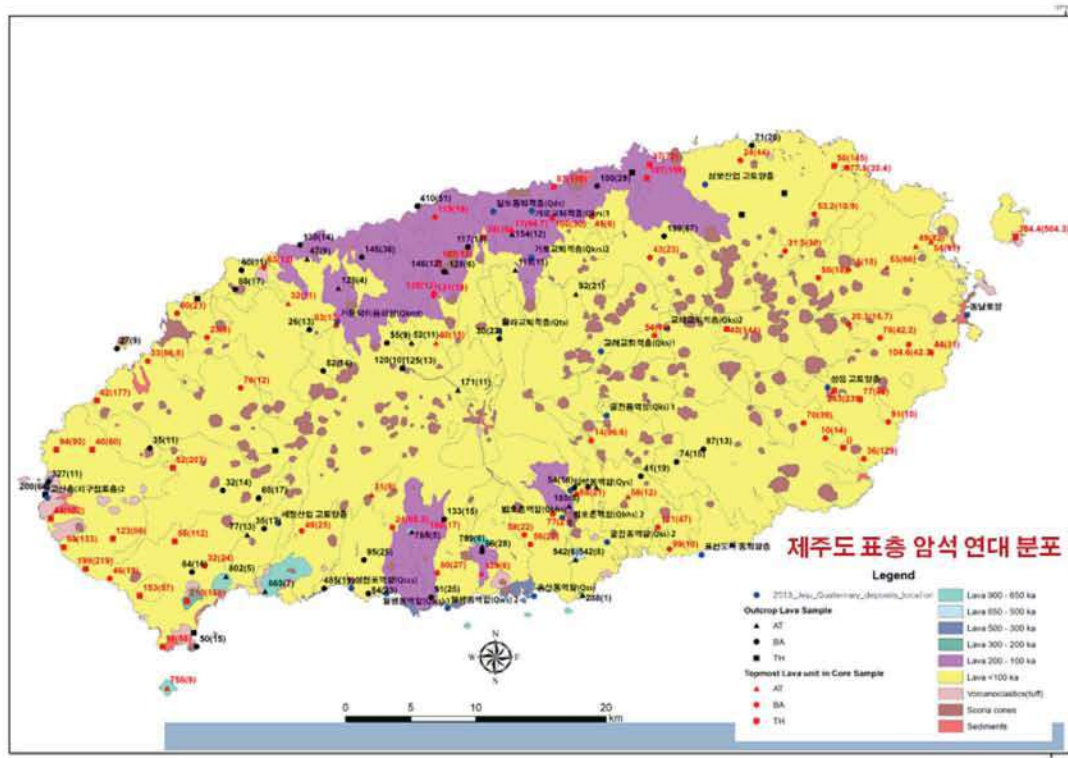


<그림 37> SWOT 분석을 통한 전략 및 비전 수립 방법

- SWOT 분석은 다양한 전략의 수립에 활용될 수 있는 유용한 기법으로, 외부 환경과 내부 역량을 요약하여 볼 수 있음
- 외부 환경 중 기회요인(Opportunities)과 위협요인(Treats)을 파악하고 내부 역량 중 강점요인(Strengths)과 약점요인(Weaknesses)을 분석할 수 있는 기법으로 이 기법을 응용하여 전략적 대안을 도출함
- SWOT 분석을 통해 4개의 주요 방안을 도출함. 첫째, 기후변화와 고환경 복원, 둘째, 제4기지질 및 화산형성모델, 셋째, 오름층서 및 제4기환경변화, 넷째, 화산활동복원 및 기후변화 예측
- 이러한 전략적 방향을 토대로 제주도 화산활동 최종 시기와 관련한 제4기 퇴적층의 지질학적 의미 재조명
 - 제주도에 지금까지 알려진 제4기 퇴적층은 50개소가 넘게 보고되고 있으며, 이를 토대로 세부적인 검토를 진행함



<그림 38> 제주도에 분포하는 다양한 지질요소



<그림 39> 제주도 지표에 나타나는 암석의 연대분포

○ 전략적 대응방향 설정

- 추진과제는 시급성과 전략적 중요도를 고려하여 핵심역량을 최대한 활용하여 기회를 선점하고, 장애요인을 극복하면서 위협에 대처할 수 있는 과제를 우선적으로 선정함

○ SWOT 분석을 통해 도출된 4개의 주요 방안을 토대로 전략적 도전 키워드를 분석하고, 도출된 키워드를 요약하면 아래와 같음

- 기후변화와 고환경 변화 집중 연구
- 기후변화와 자연환경 변화 집중 연구
- 기후 요소별 취약성, 안정성 분석
- 기후변화 장단기 모니터링 추진 방안
- 제계적인 현황 조사(동식물/ 지형지질)
- 제주지형 특성별 고도별 정책 수립
- 자연생태 환경변화 모니터링 정책 도입
- 소형 화산체(오름) 활동시기 규명
- 화산 활동사 및 화산 유형 종합조사
- 한라산 중심의 체계적 관리방안 도입
- 통합적 자료관리 방안 구축 구축 필요



<그림 40> 전략과 비전 도출 방법

○ 전략적 대응방향 정의

- 우선적으로 국가차원에서 관리되고 있는 제주 지역의 자연유산을 중심으로 체계적인 학술 가치를 조사함
- 제주지역에 분포하는 다양한 제4기 미고결 퇴적층을 이용하여 제주지역의 고환경과 미래 기후변화에 대한 연구를 추진함
- 소형화산체에 대한 화산활동 기록 복원과 화산암류 기반의 활동시기 규명을 통해 제주도 화산활동사를 규명하여 제주지역에 대한 화산 안정성을 검토함

제 2 장 과제 핵심기술 선정 및 타당성 검토

제 1 절 문제해결 관련 적용기술 검토

1. 과제 해결을 위한 관련 적용기술 도출

- 현황 분석과 시사점 검토, SWOT 분석 등을 통해 도출된 전략적 대응방향에 따라 제주도에 문제 해결을 위한 최소한 요구되는 관련기술은 다음과 같이 요약됨

□ 화산 지질학적 조사 기술

- 화산섬으로 형성된 제주도에 대한 제4기 지질조사는 화산암류에 대한 지질조사 방법이 적용되어야 하며, 지역에 발달하는 제4기 미고결 퇴적층의 경우 화산섬의 특성을 고려한 해석이 선행되어야 함

□ 비교란 퇴적층 시료 확보 기술

- 제주도에 분포하는 다양한 미고결 퇴적층은 퇴적층의 분포 특성에 따라 지표에서 확보가 필요한 경우와 지하에서 확보가 필요한 경우가 나타남. 지표상에서 확인되는 노두는 단면조사를 통해 시료를 확보할 수 있지만, 대부분의 경우 지하에 매몰된 형태의 퇴적층에 대한 조사가 요구되어 퇴적층 시료를 확보하는 기술에 대한 검토가 요구됨.
- 제주도에 분포하는 퇴적층의 시료확보 기술에 대한 검토는 핸드오거를 이용한 일반적인 토양시료 채취 방법과 핸드오거를 이용한 피트시료채취 방법, 그리고 전문적인 시추장비를 활용하는 방법 등이 검토됨

□ 비교란 퇴적층 연대 측정 적용 기술

- 암석에 대한 연대측정은 일반적인 지질조사 방법의 적용을 통해 진행하며, 미고결 퇴적층 시료에서의 연대 측정 기술의 적용성을 검토함
- 퇴적층 시료에 대한 연대측정기술의 적용성 검토는 방사선탄소를 이용한 연대측정 방법과 광여기루미네선스(OSL)를 이용한 연대측정 방법을 검토함

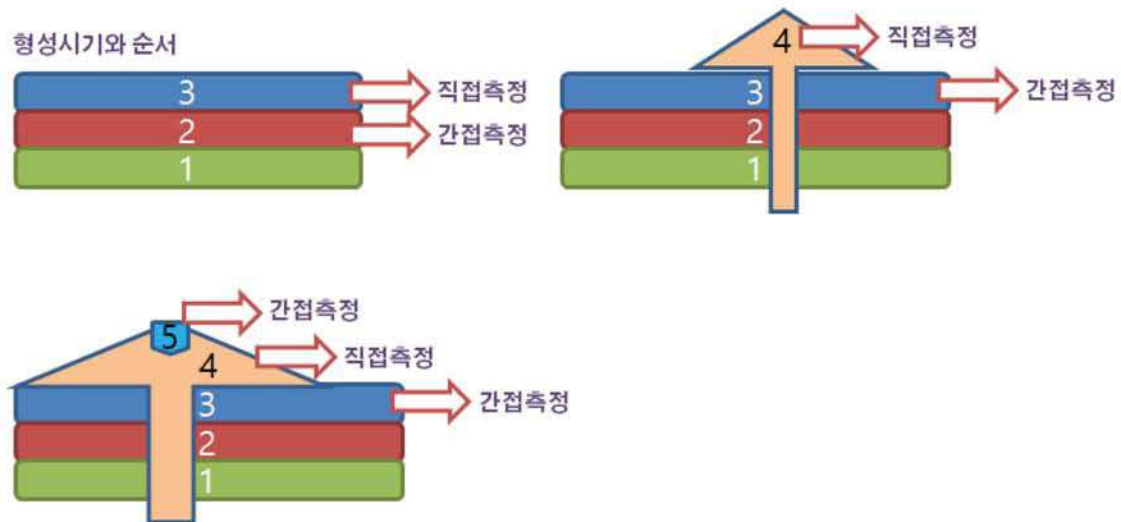
□ 비교란 퇴적층 고환경 해석 기술

- 제4기의 미고결 퇴적층에 대한 고환경 해석을 위하여 내륙에서 활용되고 있는 일반적인 입도분석, 대자율 측정, 지화학 분석 등을 적용하여 퇴적층에 남아있는 기록을 통해 고환경 해석의 가능성을 검토함

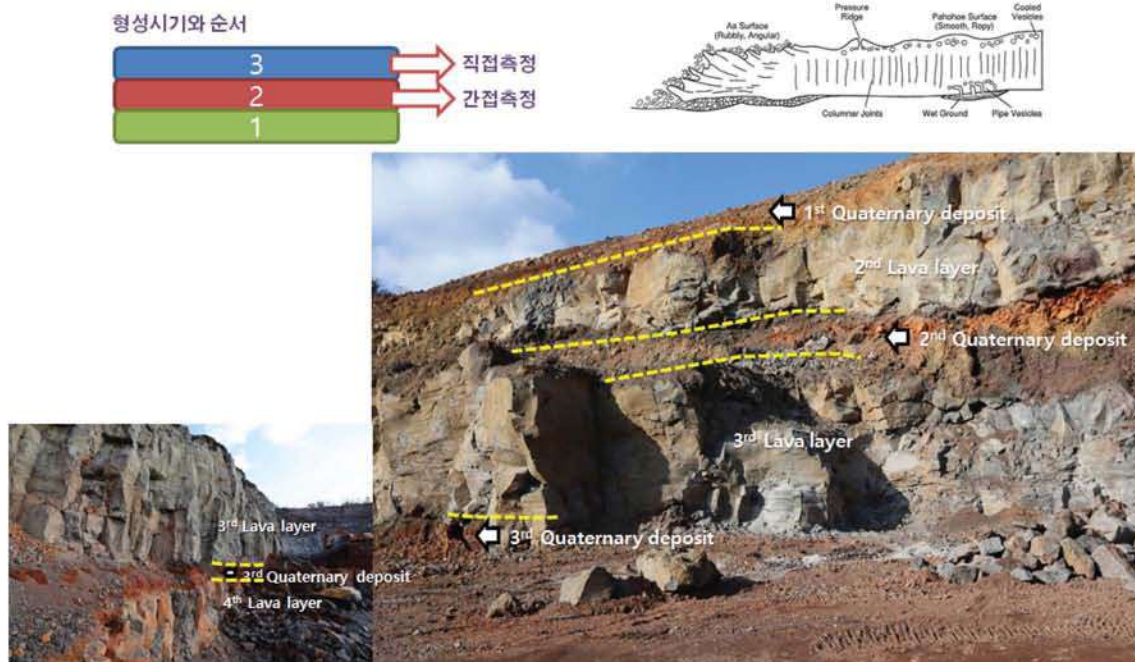
제 2 절 화산 지질학적 조사 기술

1. 화산체 지표 조사 및 제4기 퇴적층 조사 기술

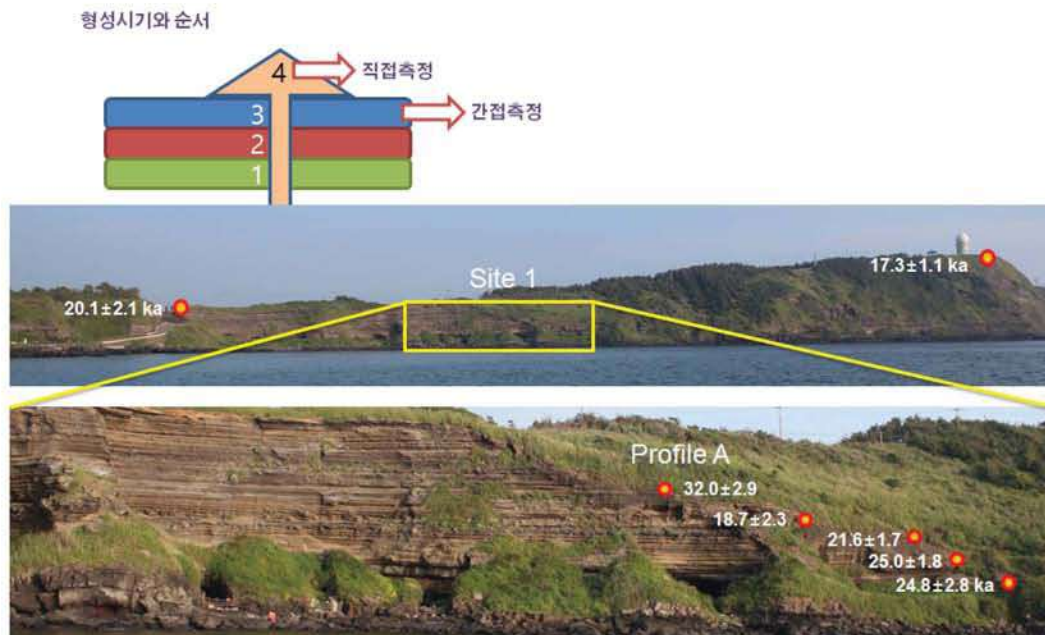
- 제주도에 대한 지질조사는 지금까지 암석학적 기반에서 주로 진행되어 왔으며 최근 화산암류 사이에 분포하는 미고결 퇴적층에 대한 연구가 진행되면서 암석학 기반의 연구와 상호 보완적인 지질조사가 가능하게 됨
- 이러한 측면에서 화산체에 대한 시기규명이 가능해 짐으로서 암석 기반의 연구에 상호 보완적인 접근이 가능해지고, 다양한 지질학적 해석이 진행됨
- 화산체 지표조사는 화산암류 사이에 분포하는 미고결 퇴적층에 기록된 고환경을 해석하는 것이 주요 목적이며, 이 과정에서 일반적인 암석학적 조사를 통해 규명하기 어려운 화산체의 형성시기를 규명하여 전반적인 지질층서 규명을 가능하게 함



<그림 41> 직접 측정 및 간접 측정 방식을 활용한 소형화산체 형성시기 분석 방법

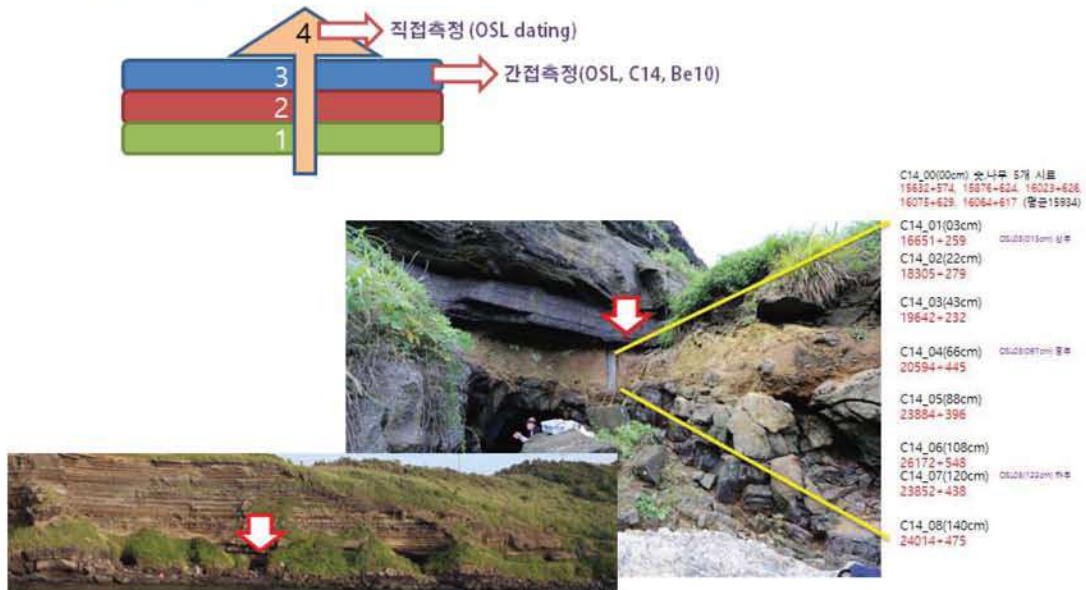


<그림 42> 화산암류 사이에 분포하는 미고결 퇴적층을 이용한 형성시기 분석방법

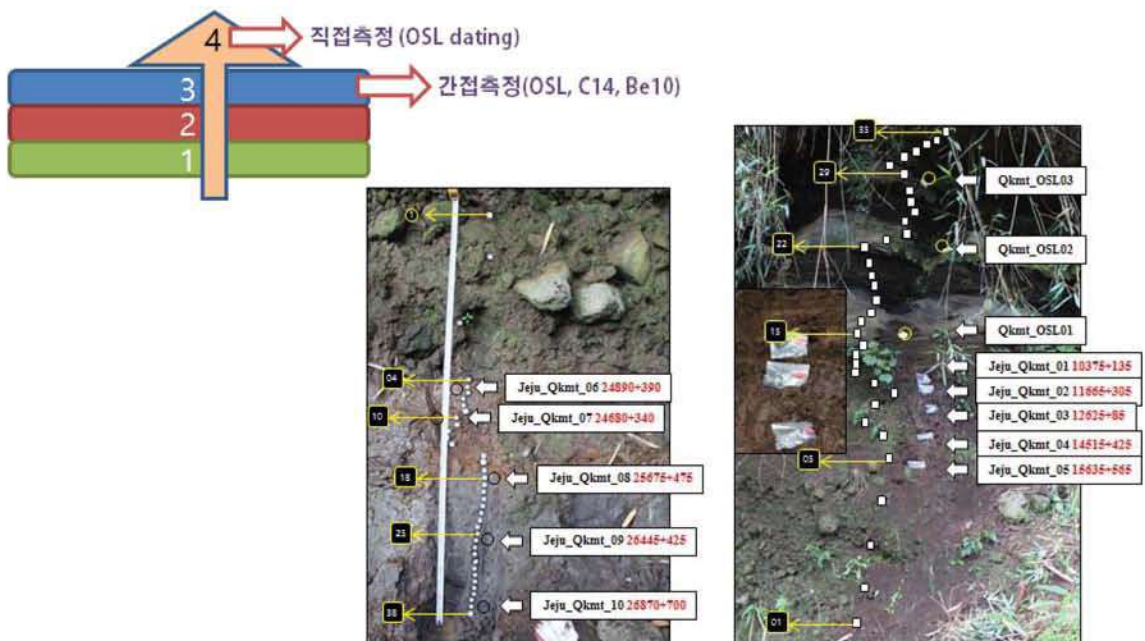


<그림 43> 소형화산체를 포함하는 화산암류 층서 규명 방법

형성시기와 순서



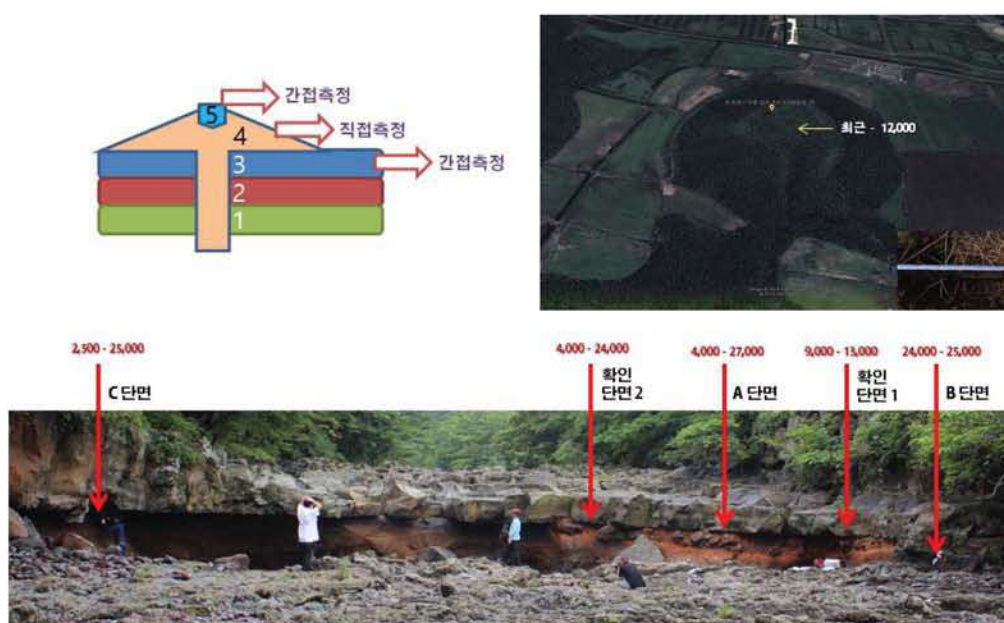
<그림 44> 화산암류 사이에 분포하는 미고결 퇴적층의 형성시기 규명 사례(수월봉)



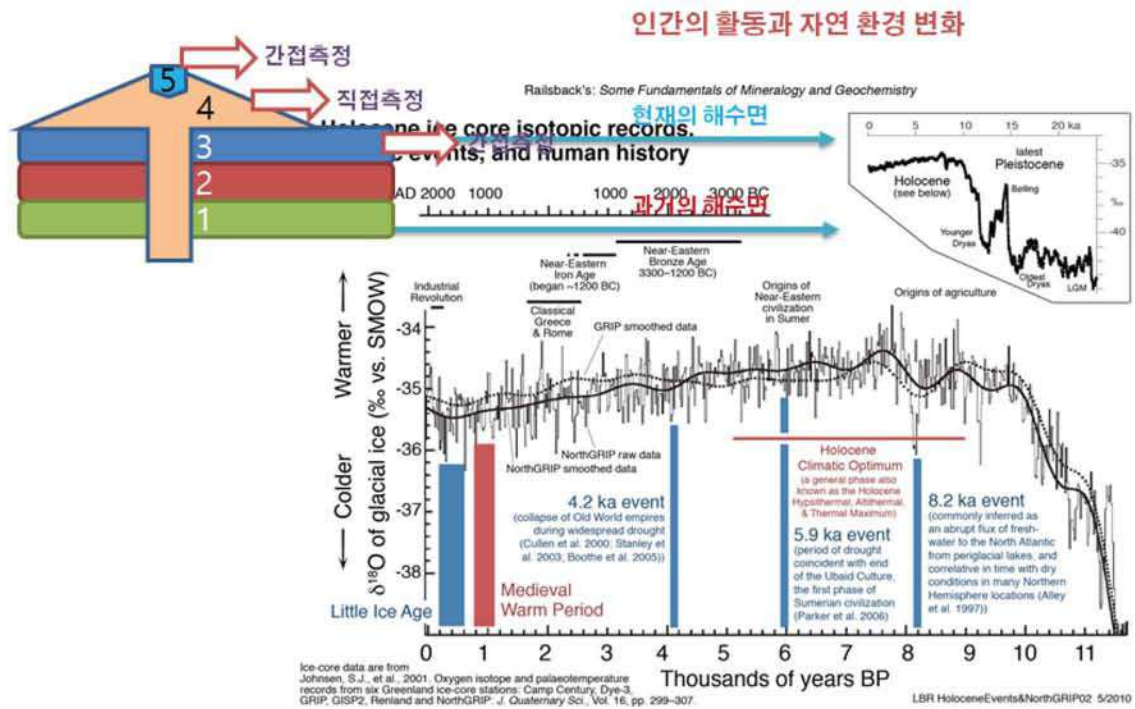
<그림 45> 화산암류에 직접 측정 및 간접측정 방법을 활용한 층서규명 사례(거문
덕이 퇴적층)



<그림 46> 화산암류 하부의 미고결 퇴적층의 연대측정을 통한 화산체 형성시기 간접 규명 사례(교래교 1 퇴적층)



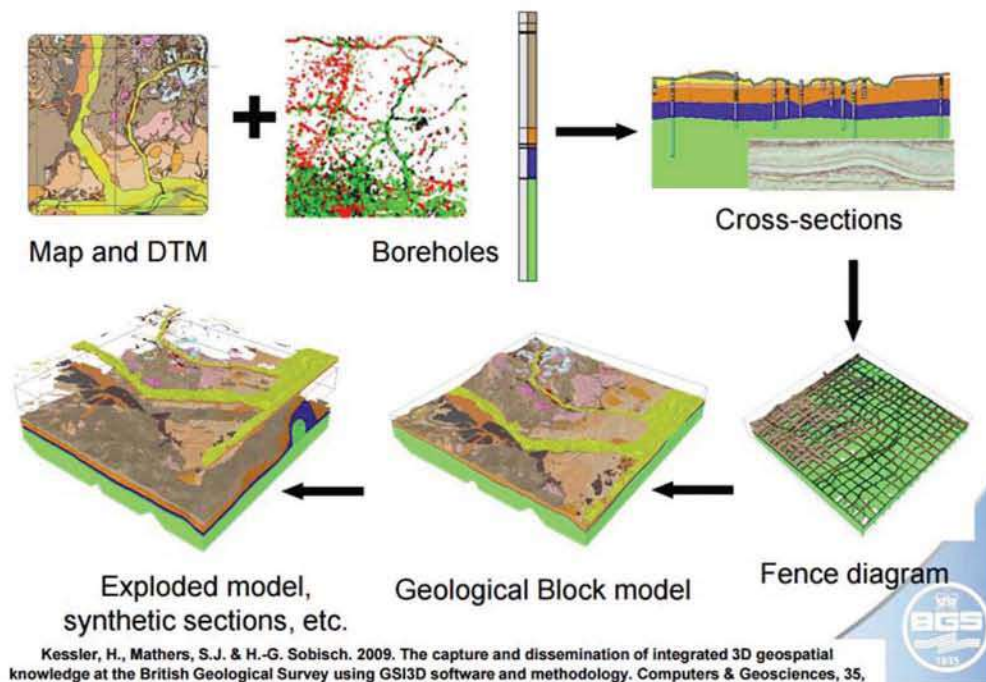
<그림 47> 소형화산체 하부의 화산암류 사이에 협재한 미고결 퇴적층의 연대측정을 통한 화산층서 규명사례(교래교 2 퇴적층)



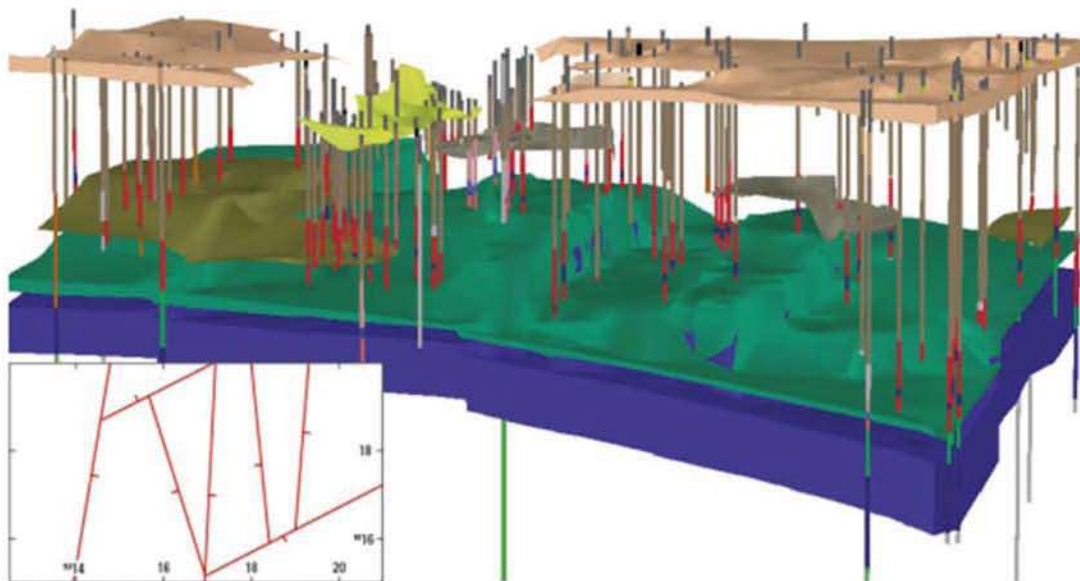
<그림 48> 미고결 퇴적층의 형성시기와 해수면 등의 자연환경 변화를 통한 화산활동 시기 규명 사례(고산층 연구사례)

2. 지표지질정보 및 지하정보 통합기술

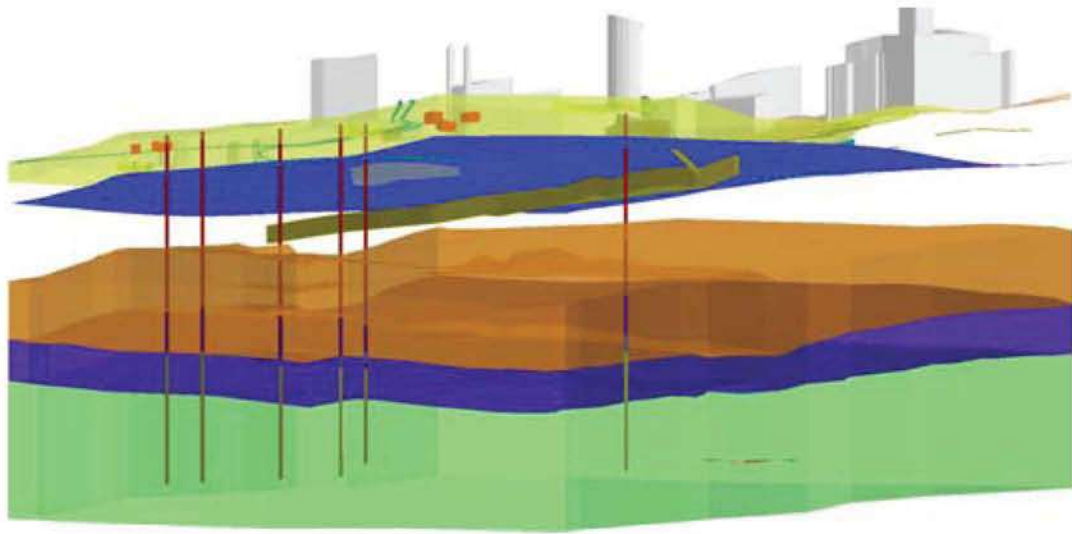
- 제주도 지질조사와 시추조사를 통합하는 3차원 모델 기술은 현재 선진국의 경우 고도화 단계에 이르고 있으며, 국내의 경우 기술적 성숙도는 매우 높으나 조사자료의 양과 질에 대한 부족으로 접근이 어려운 상태에 있음



<그림 49> 지표지질조사 및 시추조사 통합 3차원 모델링 과정 요약



<그림 50> 시추정보와 모델링 정보 활용 예시



<그림 51> 도심지역 3차원 통합 모델의 지하 공간 활용 예시

제 3 절 시료확보 기술의 적용성 검토

1. 핸드 오거를 이용한 제4기 퇴적층 시료 확보 사례 검토

- 제주도에 분포하는 퇴적층에 대한 시료 확보는 내륙에서 적용되는 다양한 시료채취 기술의 검토가 필요함. 특히 내륙 지역과 달리 차량의 접근이 불가능하고 사람의 접근이 어려운 지역이 많아 장비의 휴대성과 운반성에 대한 활용성 검토가 요구됨



<그림 52> 제주 한라산 백록담 지역 전경



<그림 53> 제주 한라산 백록담 주변의 미고결퇴적층 시료채취 검토



<그림 54> 제주 한라산 백록담 주변의 시료채취 과정



<그림 55> 제주 한라산 백록담 주변의 시료채취 결과

○ 제주도 한라산 백록담 일대에 분포하는 습지 퇴적층 시료 채취 검토 결과

- 본 연구에서는 가장 접근이 어렵고 관심도가 높은 한라산 백록담 주변의 미
고결 퇴적층에 대한 시료채취 가능성과 연대측정 가능성을 검토함
- 핸드오거를 활용한 시료채취 검토 결과 2미터 이상의 퇴적층 시료의 확보가
가능하였으며, 퇴적층에 남아 있는 유기물을 통해 연대 측정이 가능함을 확
인 하였음



<그림 56> 한라산 사라오름 습지 퇴적층 시료의 핸드오거 시료 채취 전경



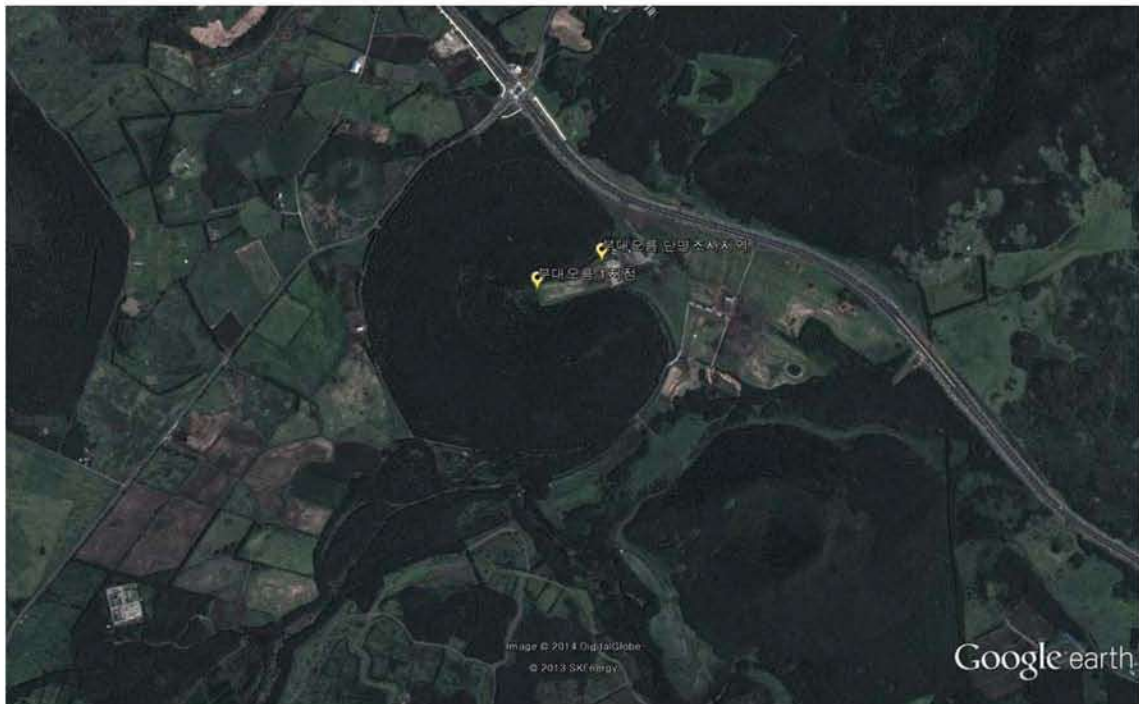
<그림 57> 한라산 사라오름에서 핸드오거를 통해 채취된 시료 전경



<그림 58> 한라산 사라오름에서 핸드오거를 통해 채취된 시료 분할예시

○ 제주도 한라산 사라오름에 분포하는 습지 퇴적층 시료 채취 검토 결과

- 한라산 사라오름 분화구에 형성된 미고결 습지 퇴적층에 대한 시료채취 가능성과 연대측정 가능성을 검토함
- 핸드오거를 활용한 시료채취 검토 결과 2미터 이상의 퇴적층 시료의 확보가 가능하였으며, 퇴적층에 남아 있는 유기물을 통해 연대 측정이 가능함을 확인 하였음. 또한 규조류 잔재를 확인할 수 있었으며, 고환경 연구가 가능함을 확인하였음



<그림 59> 제주시 조천읍 선흘리 일대에 위치한 부대오름의 핸드오거 시추 적용검토 대상지역 위치



<그림 60> 제주시 조천읍 선흘리에 위치한 부대오름의 대상지역 3차원 형태



<그림 61> 제주시 조천읍 선흘리에 위치한 부대오름 주변의 퇴적층 시료



<그림 62> 제주시 조천읍 선흘리에 위치한 부대오름 주변의 하부 퇴적층 시료

○ 제주도 제주시 조천읍 선흘리에 위치한 부대오름 주변의 미고결 퇴적층 시료 채취 검토 결과

- 부대오름 주변에 분포하는 미고결 퇴적층에 대한 시료채취 가능성과 연대측정 가능성을 검토함
- 핸드오거를 활용한 시료채취 검토 결과 2미터 이상의 퇴적층 시료의 확보가 가능하였으며, 퇴적층에 남아 있는 유기물을 통해 연대 측정이 가능함을 확인 하였음.
- 퇴적층의 형성시기는 약 2 천년 전에서 9 천년 전까지로 분석되었으며, 다양한 퇴적기록을 포함하고 있을 것으로 추정됨

2. 핸드 오거를 이용한 제4기 습지 퇴적층 시료 확보 사례 검토

- 제주도 소형화산체 분화구에 형성된 습지 퇴적층에 대한 시료채취를 위하여 습지 시료채취가 가능한 핸드오거를 활용하였으며, 현재 습지의 기능이 유지되고 있고, 호소가 형성되어 있어 수중에서 시료를 채취하였음
- 물장울 습지에 대한 습지시료채취를 통해 시료채취 가능성과 연대측정 가능성을 검토함
- 핸드오거를 활용한 시료채취 검토 결과 2미터 이상의 퇴적층 시료의 확보가 가능하였으며, 퇴적층에 남아 있는 유기물을 통해 연대 측정이 가능함을 확인 하였음.



<그림 63> 제주 물장울 습지 시료 채취 검토 지역(개략)



<그림 64> 물장울 습지의 전경



<그림 65> 물장울 습지 퇴적층 시료 채취 결과

○ 습지 시료 채취용 핸드오거를 이용한 제주도 한라산 사라오름에 분포하는 습지 퇴적층 시료 채취 검토 결과

□ 한라산 사라오름 분화구에 형성된 미고결 습지 퇴적층에 대한 시료채취 가능성과 연대측정 가능성을 검토함

□ 핸드오거를 활용한 시료채취 검토 결과 2미터 이상의 퇴적층 시료의 확보가 가능하였으며, 퇴적층에 남아 있는 유기물을 통해 연대 측정이 가능함을 확인 하였음. 또한 규조류 잔재를 확인할 수 있었으며, 고환경 연구가 가능함을 확인하였음



<그림 66> 사라오름 습지 시료 채취 지역



<그림 67> 제주 사라오름에서 채취된 습지 퇴적층 전경



<그림 68> 제주 사람오름에 대한 시료채취 전경

3. 시추기기를 이용한 제4기 퇴적층 시료 확보 기술 사례 검토

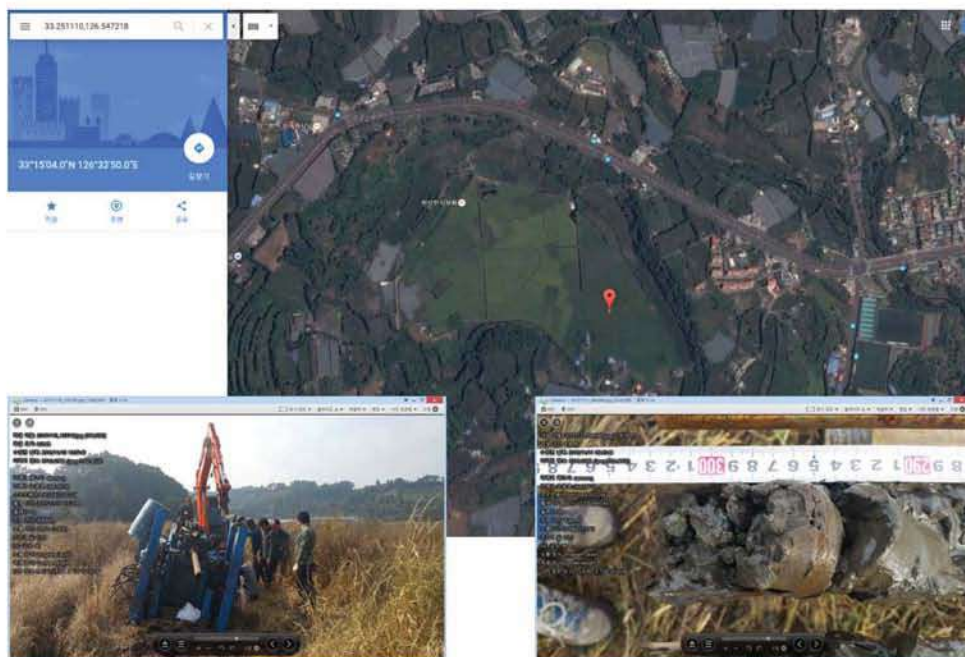
○ 차량의 접근이 가능한 지역의 미고결 퇴적층의 시료확보는 내륙과 동일한 방법으로 시추장비를 활용하여 시료 확보기술 적용을 검토함

□ 시추기기를 이용한 미고결 퇴적층 시료의 확보는 기존 저류지 개발 과정에서 단면이 노출되어 하부 층의 구조가 나타난 다랑쉬 오름 주변의 저류지 주변과 제주의 대표적인 습지지역인 하논 습지 그리고 제주 송당리 일대의 퇴적층을 대상으로 함

□ 제주 다랑쉬 오름 주변의 저류지에서는 화산암류와 하부의 고토양층을 시추 조사를 통해 확인할 수 있었으며, 시추 조사를 통한 시료확보 및 층서 연구의 가능성을 확인함

□ 제주 송당리와 하논 습지에 대한 퇴적층 시료는 비교란 시료의 확보가 가능하였으며, 미고결 퇴적층 및 습지 시료에 대한 비교란 시료의 확보 가능성과 퇴적층의 온전한 회수 가능성을 확인하였음

□ 시추 기술의 적용성은 검토되었으며, 확보된 시료에 대한 추가 분석이 필요한 상황임



<그림 69> 제주 하논 습지 퇴적층의 시추기기 활용성 검토

제 4 절 연대측정 기술 및 적용성 검토

1. 제4기 퇴적층의 연대분석(^{14}C , OSL) 기술

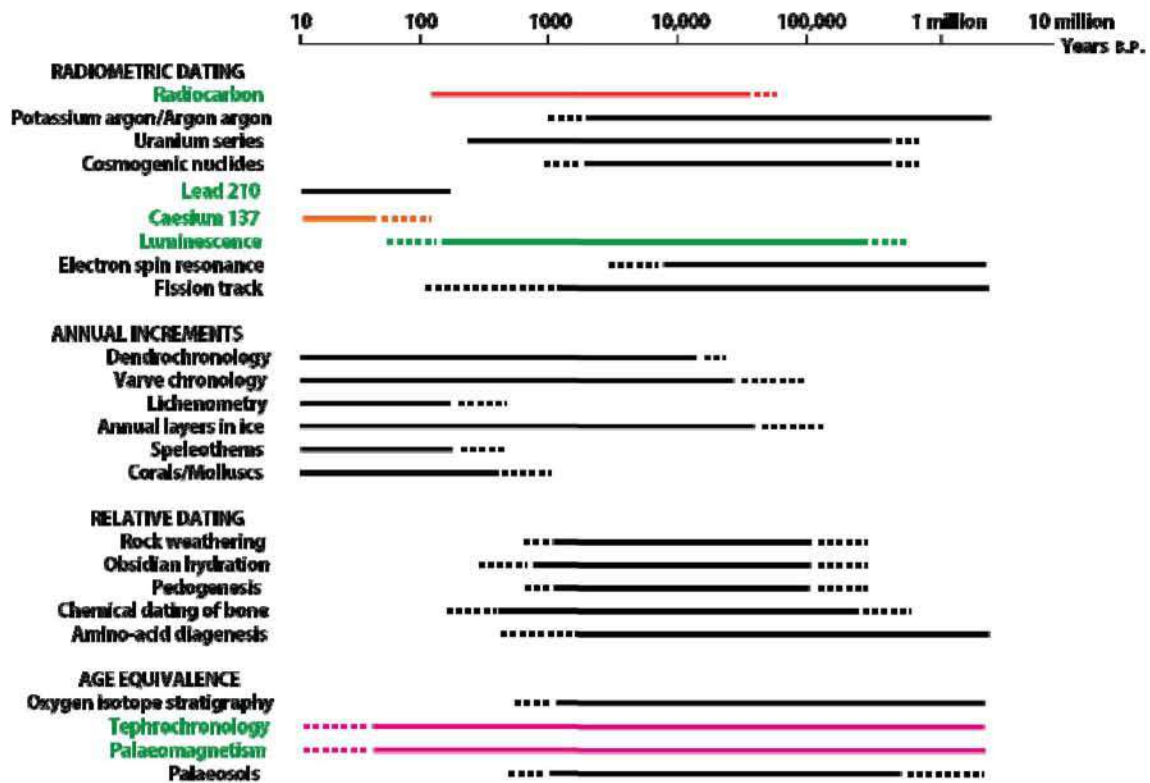


Figure 1.6 The effective dating ranges of the different techniques discussed in this book

<그림 70> 다양한 시기의 연대측정 방법 및 연대 분석 구간

- 방사성 탄소 연대 측정법(放射性炭素年代測定法, Radiocarbon dating)은 방사성 동위원소의 조성비를 측정하여 연대를 추정하는 연대측정방법
- 방사성 동위원소인 탄소14(^{14}C)의 조성비를 측정하여 연대를 추정하는 방법으로 대기 중의 ^{14}C 의 비율이 일정하다고 가정하면, 식물은 광합성, 동물은 호흡을 통해 대기과 탄소를 주고 받는 과정에서 살아있는 동물과 식물이 가지고 있는 ^{14}C 의 비율은 대기 중의 비율과 일치. 그러나 동식물의 사후에는 대기과 교류하지 않기 때문에 동물과 식물이 가지고 있었던 ^{14}C 동위원소의 비가 감소하므로 반감기를 통해 시간의 추정이 가능
- 일반적으로 사용하는 ^{14}C 의 반감기는 약 5,730년이며, 이를 이용하여 최근 6만년까지의 연대를 측정하기도 하는데, 탄소연대측정 결과는 보정(calibration)을 거치지 않은 순 연대에 대해 흔히 1950년을 기준으로 거꾸로

올라가는 BP(Before Present)라는 단위를 쓰며, 여러 가지 보정을 통해 보정된 연대를 calibration BP(Cal. BP) 사용

□ 1950년의 기준은 핵실험에 의해 대기의 탄소가 급격히 변화한 시점을 적용한 것이며, 대기 중의 탄소동위원소비의 보정을 위하여 연륜연대분석자료를 활용하기도 함

□ C^{14} 의 양을 실험적으로 측정하는 방법은 방사성 계측법과 가속기 질량 분석법이 이용되며 방사성 계측법은 시료 속에 포함된 C^{14} 가 자연적으로 붕괴하면서 방출하는 전자의 수를 액체 섬광 검출기나 기체 비례 계수기와 같은 장비로 정밀 측정하여 탄소-14의 양을 역산하는 방법. 하지만 이 방법은 C^{14} 의 반감기가 상대적으로 길기 때문에 적은 수의 전자만을 관찰할 수 있고, 이에 따라 상대적으로 큰 통계적 오차를 발생시킴.

□ 이에 비해 가속기 질량 분석법은 매우 적은 양의 시료로도 C^{14} 의 비율을 정확히 알 수 있음. 가속기 질량 분석법은 시료속의 탄소 원자를 이온화 시킨 후, 입자 가속기로 가속한다. 가속된 이온을 자기장을 통과 시켜 질량 차이를 이용하여 C^{14} 동위원소의 비율을 계산할 수 있음.

○ 본 연구에서는 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer, AMS)를 이용한 ^{14}C 연대측정을 실시함. Cs 이온빔으로 graphite로 바꾸어진 탄소 시료를 조사하여 탄소를 음이온 상태로 만들고, 이를 가속하여 ^{14}C , ^{13}C , ^{12}C 원자의 수를 직접 측정하는 방법으로 연대측정을 위한 시료는 주로 식물 파편과 sediment bulk 등이며, 한국지질자원연구원의 AMS 기기를 이용

○ 광여기루미네선스(OSL; Optically Stimulated Luminescence) 연대측정법은 1980년대부터 제 4기 퇴적층의 퇴적연대 측정에 활발히 이용되고 있는 방법. 이 방법은 석영과 장석 등을 포함한 퇴적물이 퇴적된 이후 주위 퇴적물로부터 자연방사선에 노출되면 전자 형태의 에너지가 축적되고 축적된 에너지는 빛(luminescence)의 형태로 다시 방출되는데 이를 연대측정에 활용하는 방법

□ OSL 연대측정법은 탄소 연대측정법의 한계 측정 범위인 5만년 이상부터 수십 만년에 이르기까지 적용 가능한 연대측정법으로 연대범위가 넓은 것이 장점.

□ 또한 연대측정에 사용되는 대상 시료(석영과 장석)가 퇴적물의 조암광물로 흔하게 분포하기 때문에 시료의 획득이 용이한 것이 장점

유물층(unit I)과 경계를 이루는 하부의 퇴적층(unit II)으로 구분됨. Unit I은 황갈색을 띠는 실트질 모래층이며, 다수의 숯과 토기편, 석기 등이 출토되고, Unit II는 암갈색에서 암녹색으로 점이적인 색상변화를 보이고, 다양한 크기의 각력이 포함된 자갈질 모래층으로 하향조립화 경향을 보이며, 특징적으로 토양썰기 형태의 구조를 보임

- 유적 발굴과정에서 노출된 단면에서 방사성탄소연대측정과 광여기루미네선스(OSL) 연대측정을 수행
- OSL 연대 측정은 층리면에 평행하게 3개의 수평코어를 획득하여 모래크기(90-250 μm)와 실트크기(4-11 μm)의 석영을 선별하였고 단일시료재현법(SAR method)을 이용하여 한국지질자원연구원에서 측정(Murray and Wintle, 2000).
- 방사성탄소연대측정시료는 unit I에서 숯과 토양(bulk soil) 시료를 포함하여 7개의 시료를 분석. 연대측정결과 상부와 하부의 토양시료는 유기물 함량이 매우 낮아 측정 결과를 얻지 못한 반면, unit I의 숯 시료에서 분석된 연대는 1,700년 전에서 2,000년 전 사이의 연대 분포 범위를 보임.
- 제주 외도동 퇴적층에서 채취된 OSL 연대측정 결과는 토양썰기구조가 나타나는 unit II의 상부에서 하부까지 $32.2 \pm 2.3 \text{ ka}$, $71.0 \pm 5.9 \text{ ka}$, $74.8 \pm 5.8 \text{ ka}$ 로 분석됨



<그림 72> 외도동 퇴적층의 분포 전경



<그림 73> 외도동 퇴적층 조사 단면에서 확인되는 토양채기 구조



<그림 74> 외도동 퇴적층의 연대측정 분석결과 1



<그림 75> 외도동 퇴적층의 연대측정 분석결과 2

○ 제주시 내도동 퇴적층 연대분석 결과(Kim et al., 대한지질학회 심사 중)

□ 제주도 북서부에 위치하며 행정구역상 제주도 제주시 내도동에 위치하며, 원마도가 매우 양호한 하성 자갈층이 노두상에서 확인됨. 역의 종류는 현무암과 하와이아이트, 조면안산암 등 매우 다양하며 크기도 수 cm에서 수십 cm에 이르기까지 다양. 자갈층은 단면상에 2~3 m 두께로 관찰되며, 이들은 외도천과 도근천을 따라 상류로부터 침식 운반되어 하천이 합류되는 지점에서 퇴적된 것으로 해석(Park et al., 1998).

□ 내도동 퇴적층은 약 6~7m 정도의 두께로 현재 어시천을 따라 노출되어 있으며, 퇴적층은 하부로부터 황갈색 실트질 퇴적층, 하성 자갈층 그리고 현무암층으로 구분됨. 퇴적 단면 최하부에는 약 50cm 두께의 실트-모래질 미고화 퇴적층이 분포하며 그 상부에는 실트질이 우세하며 토양썰기형태가 잘 발달하는 황갈색 실트질 미고화 퇴적층이 분포. 두 퇴적층 사이에는 현무암질의 암편들이 다수 포함되어 있고 이러한 암편들은 일부 거력이 확인됨. 상부 자갈층은 2~3m 두께로 분포하며 하부의 미고화층과 그 경계가 명확하고 자갈들은 원마도가 양호하나 분급이 불량하며 미약하게 인편구조가 관찰됨. 최상부에는 2~3 m 두께의 현무암질 용암류가 분포



<그림 76> 제주 내도동 퇴적층 조사지역 및 분포범위

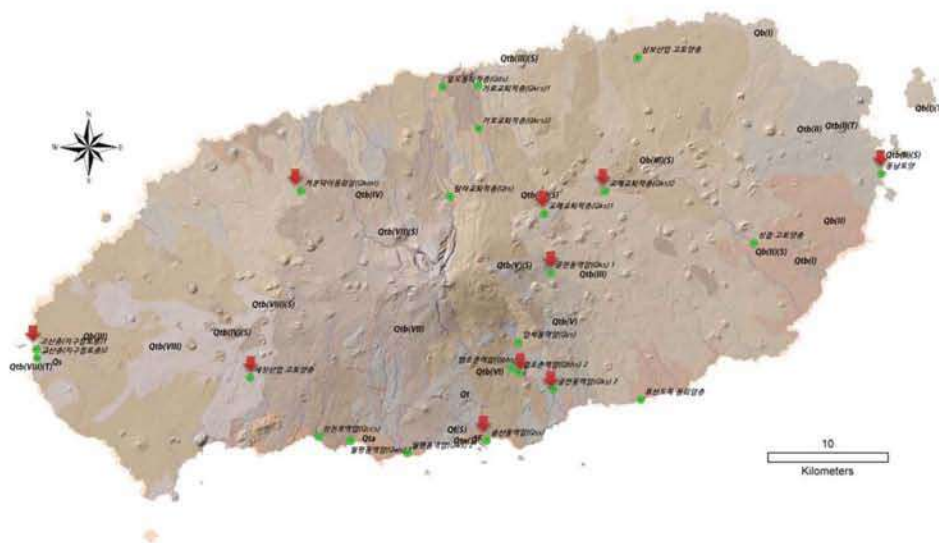


<그림 77> 제주 내도동 퇴적층의 노두 단면



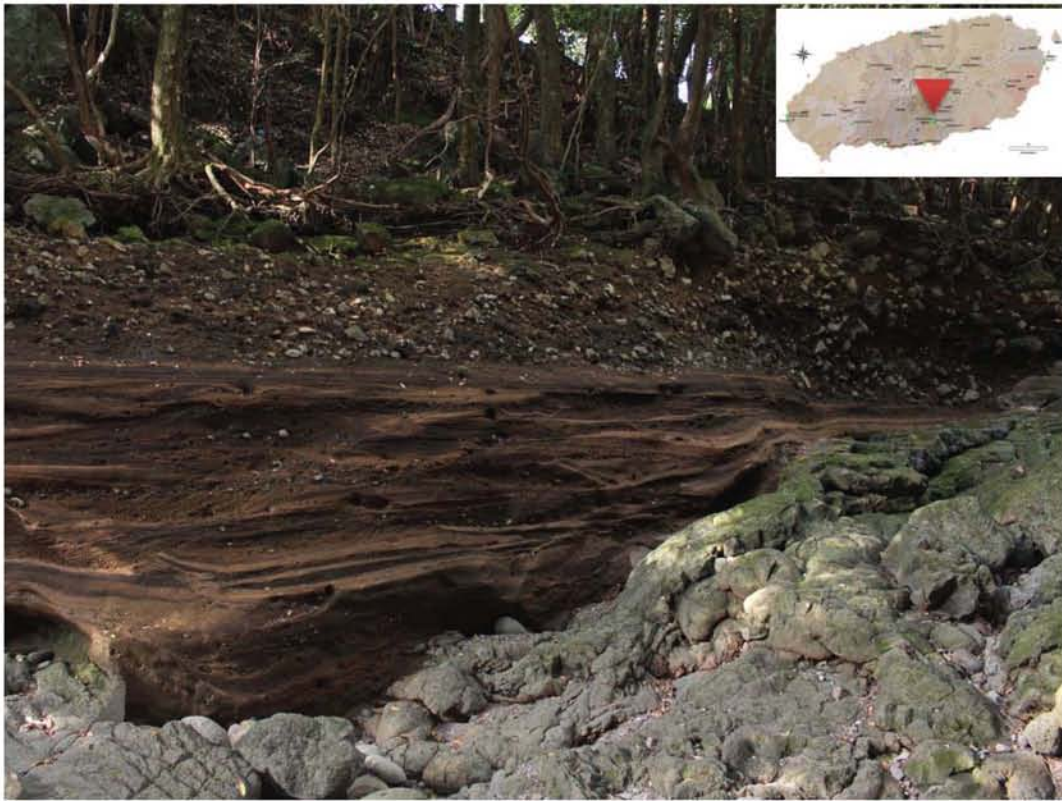
<그림 78> 내도동 퇴적층의 연대측정 결과

- 내도동 연구단면 하부의 미고화 퇴적층은 상당한 정도의 토양화 과정이 진행되었기 때문에 뚜렷한 퇴적환경을 나타내지는 않지만 이전 제주도 미고화층을 대상으로 한 연구결과들(Lee *et al.*, 2014, 2015; Lim *et al.*, 2015)에서 제시한 바와 마찬가지로 화산활동의 휴지기 동안에 주변의 화산쇄설물 또는 바람에 의한 풍성기원 퇴적물의 유입 등에 의해 퇴적층이 형성되었고 고토양화 작용을 받은 이후 하성 환경의 자갈층과 후기 화산활동에 의해 용암류가 상부를 피복한 것으로 해석이 가능함
- OSL 연대측정 결과, 내도동 미고화 퇴적층은 49 ± 5 ka 부터 94 ± 11 ka의 연대 분포 범위를 보임. A01과 A02 사이에는 상하 관계가 불명확하며, A01은 51 ± 7 ka 로 49 ± 5 ka의 A02보다 오래된 퇴적연대를 지시하였으며, 비교적 층서적으로 상하관계가 명확한 A02~A04 시료들의 경우 49 ± 5 ka 부터 66 ± 6 ka 범위의 층서적으로 잘 일치되는 연대결과를 보임. 최하부 시료인 A05의 경우 94 ± 11 ka의 연대결과를 보이며 A04 시료와는 약 30 ka 정도의 시간 간격이 존재한다. 따라서 A04와 A05 사이의 시기에는 부정합이 존재하였거나 퇴적작용이 매우 미약하였을 것으로 추정됨

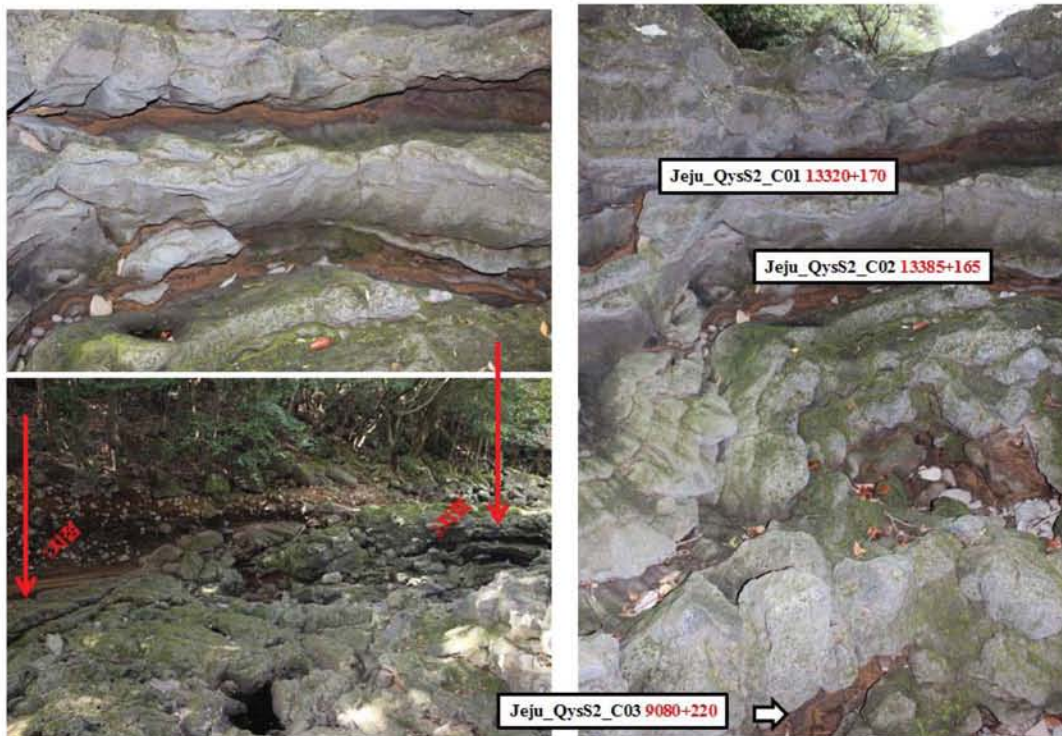


<그림 79> 제주도 미고결 퇴적층 형성시기 연구 보고 사례

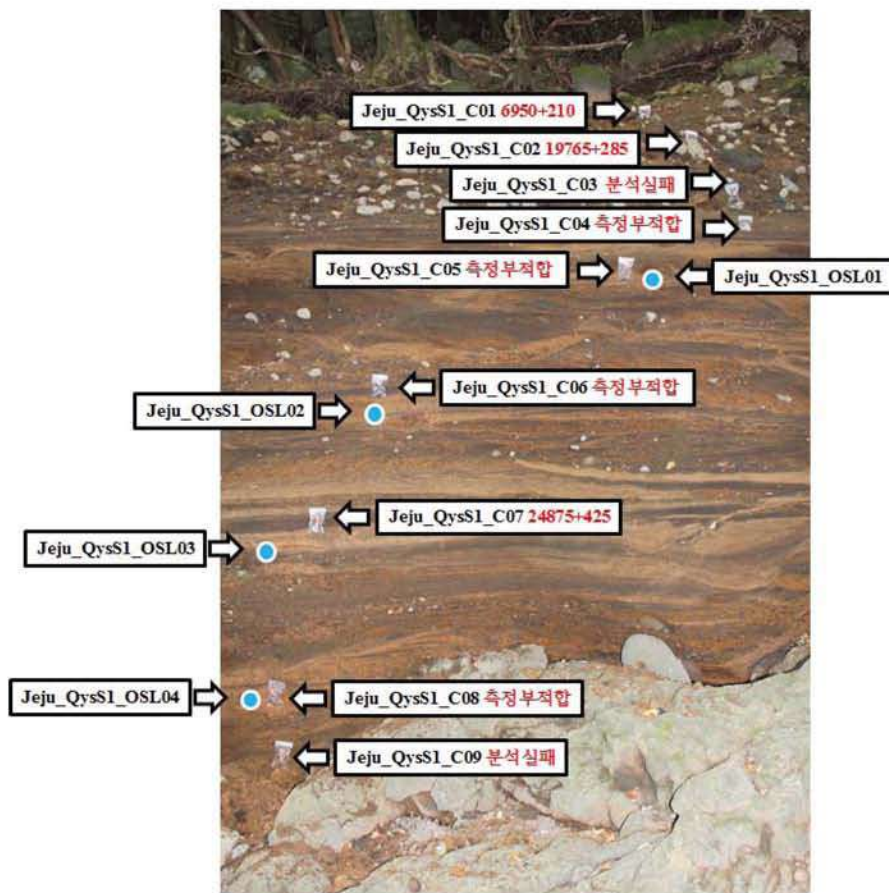
○ 제주 입석동 제4기 미고화 퇴적층 조사 사례



<그림 80> 제주 입석동 역암층 노두 단면



<그림 81> 제주도 입석동 역암층 주변 화산암류와 협재된 미고결퇴적층



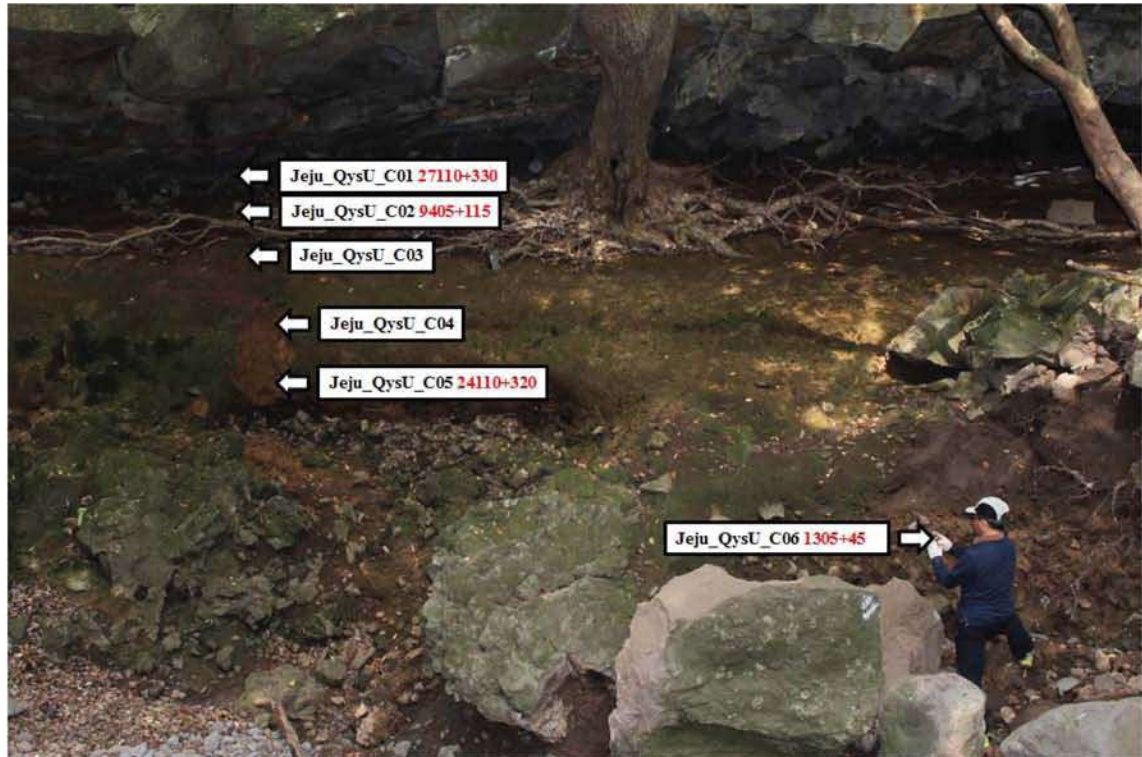
<그림 82> 제주도 입석동 역암층의 형성시기와 하부 미고결 퇴적층의 형성시기



<그림 83> 제주도 입석동 역암층 상류에서 확인되는 미고결퇴적층



<그림 84> 입석동 퇴적층 상류에 위치한 미고결 퇴적층의 형성시기 분석결과



<그림 85> 입석동 퇴적층 상류 미고결 퇴적층 전경과 형성시기 분석결과

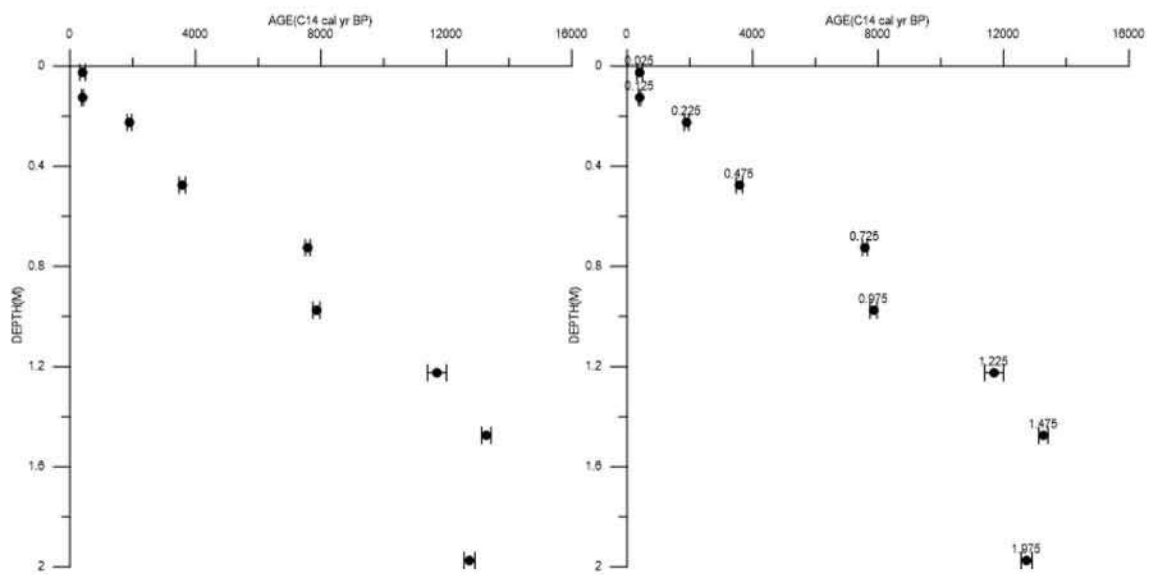
○ 방애오름 연대측정 사례



<그림 86> 방애오름 3차원 전경



<그림 87> 방애오름 3지점에서 채취된 시료 전경



<그림 88> 방해오름 방사선탄소연대 및 측정 심도

[표 13] 방해오름 방사선 탄소연대 분석결과

의뢰번호	시료번호	탄소연대	오차	d13C(per mil)	d13c오차	연대표기
ITg140483	Jeju_BA_VE_CO3_1	340	30	-26.3	0.7	400±90
ITg140484	Jeju_BA_VE_CO3_5	1940	30	-17.9	1.6	1895±75
ITg140485	Jeju_BA_VE_CO3_10	3340	30	-13.8	0.4	3580±100
ITg140486	Jeju_BA_VE_CO3_15	6710	40	-18.8	1	7580±80
ITg140487	Jeju_BA_VE_CO3_20	7040	50	-20	1.3	7860±110
ITg140488	Jeju_BA_VE_CO3_25	10110	60	-26.4	1.4	11700±300
ITg140489	Jeju_BA_VE_CO3_30	11430	60	-25.8	1.1	13275±145
ITg140490	Jeju_BA_VE_CO3_35	10810	90	-28.2	0.4	12735±175

제 5 절 고환경 분석 및 해석기술 적용 검토

1. 제4기 퇴적층 시료의 고환경 분석 방법

- 퇴적물의 입도를 측정하기 위하여 0.02 ~ 2000 μ m의 측정범위를 갖는 Mastersizer 2000(Malvern Instruments, Ltd., Worcestershire, UK) 장비를 이용하여 Laser Diffraction 방법으로 입도분석을 실시. 필요 구간에서 입도분석을 위한 부시료를 채취하여 2000 μ m 이하의 fraction만 선별하였으며, 이를 과산화수소수(H₂O₂)에 반응시켜 유기물을 제거(Anderson, 1963). HCl 1M 용액과 반응시켜 탄산염을 제거하였고, 증류수로 시료를 세척한 후 교반 분산하여 입도분석을 실시
- 대자율 측정을 통해 고지자기학적 분석을 수행하였으며, 고지자기용 큐브에 퇴적물 부시료를 채취. 큐브의 내부 부피는 약 7cc, 길이는 약 2.2cm이며, 아크릴 재질로서 형태 이방성이 최소화되도록 특수 제작된 것을 사용.
 - 큐브 안에서 퇴적물 시료가 건조하여 파괴되거나 교란되는 것을 방지하기 위하여 박스를 밀봉하고, 고지자기연구에서 가장 기본적인 데이터가 되는 초기 대자율 값을 얻기 위해 모든 시료에 대하여 Bartington 대자율 측정기(MS2 susceptibility meter, Bartington Instruments Ltd., UK)를 이용하여 xLF를 측정
- 탄소안정도위원소 측정을 위하여 퇴적물 부시료(subsample)를 24시간 이상 동결 건조시킨 후 균일한 분말시료를 제작
 - 분말시료 5mg을 취하여 aluminum capsule에 넣고, 원소분석기를 이용하여 1100°C의 combustion 온도에서 TC, TN, TS를 측정
 - 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 제거. 마지막으로 다시 원소분석기를 이용하여 TOC를 측정함. 각 함량의 단위는 weight %를 적용
 - 탄소동위원소 분석은 염산을 통해 탄산염을 제거한 퇴적물 부시료를 대상으로 Isoprime(GV Instrument, U.K.) 장비를 이용하여 측정. 참고시료로는 IAEA의 CH6 (sucrose, $\delta^{13}\text{C} = -10.45 \pm 0.033\%$)을 사용
- 주 원소성분은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃(t), CaO, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅와 LOI 등 모두 11 개 성분이며, 이들 성분분석을 위하여 한국지질자원연구원이 보유하고 있는 X선 형광분석기(XRF, X-ray fluorescence spectrometer,

Shimadzu MXF-2100)를 이용

- XRD는 X선의 파장이 원자 및 이온의 크기, 혹은 격자의 크기와 비슷한 상황에서 회절하는 현상을 이용하며, 분말 형태의 시료(Al_2O_3 ZnO_2 SiO_2 TiO_2 B_2O_3)를 임의의 조성으로 혼합한 뒤, X-Ray Diffraction법으로 측정. 본 연구에 사용된 시료는 분말 처리 후 분석

2. 제주 제4기 퇴적층 형성시기의 고환경 변화

○ 지난 약 2만년 간의 전 지구적 기후변화

- 제주도 고토양층 형성과 과거 고환경 변화와의 관계에 대한 토론을 위해 한반도를 포함하는 동아시아 지역에 중대한 영향을 미친 전 지구적인 고기후 변화를 시기 별로 크게 1) 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum; 약 23,000~18,000년 전), 2) 마지막 해빙기(Last Deglaciation; 약 18,000~11,000년전), 3) 현 간빙기(Current Interglacial Period; 약 11,000년전~현재)로 나누어 고찰하였으며, 주로 2007년 발간된 IPCC 보고서를 참고로 작성
- 전 지구적인 고기후 변화를 추정하기 위해서 고기후 연구자들은 세계 각지에서 획득한 매우 다양한 특성을 지니는 프록시(proxy) 자료를 활용. 따라서 시기 별 고기후 변화를 다루기 전에 반드시 이러한 고기후 자료의 특성을 파악이 반드시 선행되어야 함
- 현대 고기후학의 발전을 다지는 데에는 주로 극지역의 빙하 내에 포획되어 있는 기체 또는 에어로솔(aerosol)을 추출하는 기술이 대표적인 역할을 해왔으며, 이를 통해 과거 약 65만 년 전부터 현재까지의 대기 중 가스와 에어로솔의 농도변화가 매우 높은 정확도(accuracy)로 복원. 이 외에도 빙하를 통해 복원된 기록보다는 그 정확도 측면에서 부족하지만, 과거 수백만년 내지 수만년 간의 대기 중 CO_2 농도를 추정할 수 있는 프록시 자료들이 발표된 바 있음.
- 단일 프록시 자료의 불완전성을 극복하기 위해 고기후학자들은 대체로 다양한 프록시 혹은 분석기술을 활용하여 최종적인 고기후 환경을 유추. 지난 수십 년 동안 고기후학적 연구방법은 크게 발전하여 성숙단계에 도달하였으며, 고기후 변화 연구방법은 지하수 온도, 빙하코어(ice core) 기포 내 기체함량, 해양퇴적물 공극수 변화 및 빙하 분포 변화와 같은 정량적 복원에서부터 물리화학적 및 생물학적 프록시 변수들의 상대적인 변화를 통한 정성적 복원에 이르기까지 매우 다양

- 이와 같이 지표물질을 활용한 연구방법들과 더불어, 최근세에 대해서는 과거의 문헌자료 역시 활용. 프록시 자료로서 전통적으로 활발히 이용되어 온 지구물질들을 열거하면 나무(나이테), 산호, 곤충 및 기타 미생물들의 성장과 군집 등이며, 나무 나이테, 바다와 호수의 플랑크톤(plankton) 및 화분은 수백년 내지 수천년 단위의 기후변화를 연구하기에 적합.
- 나무나이테의 폭과 밀도는 과거의 온도와 습도를 유추하는데 사용되는데, 이 경우 실제 기온 측정 자료를 이용하여 현재의 나무나이테가 기후변화를 효율적으로 지시하고 있는 지에 대해 충분한 검증 및 보정연구를 거친 후 수행
- 해양 및 호수퇴적물 코어 내 화분과 플랑크톤 군집의 분포는 온도, 염도 및 강수량 등 과거 기후변화의 정량적인 평가에 사용될 수 있는데, 이러한 평가법 역시 현재 발생되고 있는 변화와 통계적 기법을 함께 적용. 특히 바다에 서식하며 CaCO_3 각질을 형성하는 동물성 플랑크톤의 일종인 유공충과 같은 미고생물을 활용하면 이들의 안정동위원소 조성을 포함한 화학조성과 온도 사이의 열역학적 상관성을 이용하여 온도변화를 직접 확인할 수 있음
- 과거의 온도와 염도를 평가하기 위해서는 주로 산호나 유공충의 산소동위원소 비, Mg/Ca 및 Sr/Ca 비가 활용된다. 과거의 해수 수온을 알 수 있는 또 다른 방법으로 코코리스 등 나노(nano) 미생물 기원의 알케논 포화지수 등을 활용
- 고기후 변화를 추정하기 위해 프록시를 연구하는 것과는 별도로, 변화의 시기를 특정하기 위해 필수적인 기술이 연대측정법이며, 각 연대측정법에 따라 매우 다른 장단점을 내포하지만 일반적으로 시기가 오래될수록 연대측정 결과의 정확도는 떨어지고 적용 가능한 시간 범위를 초과하는 경우가 많음.
- 나이테 카운팅법(counting)은 가장 정확한 연대측정법으로 알려져 있으며, 최대 수천 년 이전까지 1년 단위 내지 계절 단위의 연대를 계산할 수 있음. 이와 유사하게 성장(또는 퇴적)선 또는 띠를 남기는 기타 지질물질의 예로는 산호, 호수퇴적물, 동굴생성물, 빙하를 들 수 있음.
- 일반적으로 고기후학자들은 연대측정 기법의 불확실성(uncertainty)을 줄이기 위해 한 가지 프록시를 대상으로 여러 다양한 기법의 연대측정법을 적용하기도 하는데, 방사성 연대측정분야는 각 세부 기법에 따라 개발 이후 현재까지 많은 진보 이루어고 있음.
- 방사성 연대측정은 각각 방사성 동위원소의 시스템에 따라 다르며, 첨단 분석기기를 통한 동위원소 측정이라는 특성으로 인해 필연적으로 오차범위가 함께 표기됨

- 이외에도 측정 기법에 따라 다양한 가정을 필요로 하므로, 연대측정 결과의 정확성을 검토하기 위해 그 가정의 유효성을 우선적으로 확인하는 연구결과도 보고됨. 예를 들어, 방사성 탄소 연대측정의 기본 가정 중 첫 번째 가정인 대기 중 방사성 탄소 농도는 지난 12,000년에 대해서는 확실하게 규명되어 있으며, 여전히 불완전한 측면은 있지만 지난 35,000년에 대해서도 상당 부분 잘 알려져 있음. 이러한 대기 중 방사성 탄소 농도의 변화는 일부의 잘 형성된 나무나이테, 산호, 호수퇴적물로부터 14C 연대와 절대연대 사이의 모델을 만들고, 이와는 독립적으로 일부 탄산염 성분의 프록시를 활용하여 우라늄 계열 연대측정법과 함께 대기 중 14C 농도를 계산한 결과를 비교하여 평가 가능
- 고기후 수치모델은 과거 기후변화의 메커니즘(mechanism)을 이해하는데 활용되며, 과거의 특정 기후사건 또는 시기를 모의하는 데에도 사용. 기후모델은 밀란코비치(Milankovitch) 가설 등 주요 고기후학적 가설을 정량적으로 검증하는데 특히 중요한 역할을 하며, 이들을 통해 연구대상이 되는 과거 기후변화의 원인과 결과를 확인하는데 활용됨
- 고기후 프록시 자료는 그 결과에 있어 시공간적으로 불완전한 경우가 많고 특정 계절 또는 기후 요인에 따른 편향성이 내포되어 있기 때문에, 고기후 수치모델을 통해 이러한 불완전성을 해결하기 위한 연구가 시도됨.
- 무엇보다도 미래의 기후변화를 예측하기 위해 고기후 프록시 자료와 수치모델을 근거로 기후변화 메커니즘에 대한 정량적 이해를 높이는 것이 필수적이며, 고기후 복원자료는 기후모델을 검증할 수 있는 기회를 제공하는데, 특히 기후를 조절하는 주요 강제요인(forcing factor)이 잘 알려져 있고 이에 따른 반응이 충분히 제한되어 있을 경우 보다 정확한 검증이 가능
- 기후변화가 기본적으로 장기적인 변화라는 관점에서 수치모델을 현대 기기로 측정 한 기후자료로 확인하는 것은 어려우며, 고기후 자료를 이용하여 기후 모델을 검증하는 것이 매우 중요. 예를 들어 만약 현재 대기 중의 CO₂ 농도를 기준으로 현재의 기후 조건을 성공적으로 모사했다고 하더라도 이것은 CO₂에 대한 실제적 민감도에 대한 최종결과가 될 수는 없음. 왜냐하면 CO₂에 대한 실제적 민감도를 테스트하기 위해서는 여러 CO₂ 농도 하에서의 고기후 조건 모사가 동시에 이루어져야 하기 때문. 무엇보다도, 최초 기후모델 구성 시 구름변수와 혼합체제 등 매개변수들의 상호 수식화는 현재의 관측 결과만을 통해서 개발되었기 때문. 따라서 모델 개발 시의 기후조건과 서로 다른 기후 조건은 완성된 모델을 테스트하는데 중요한 기준을 제공

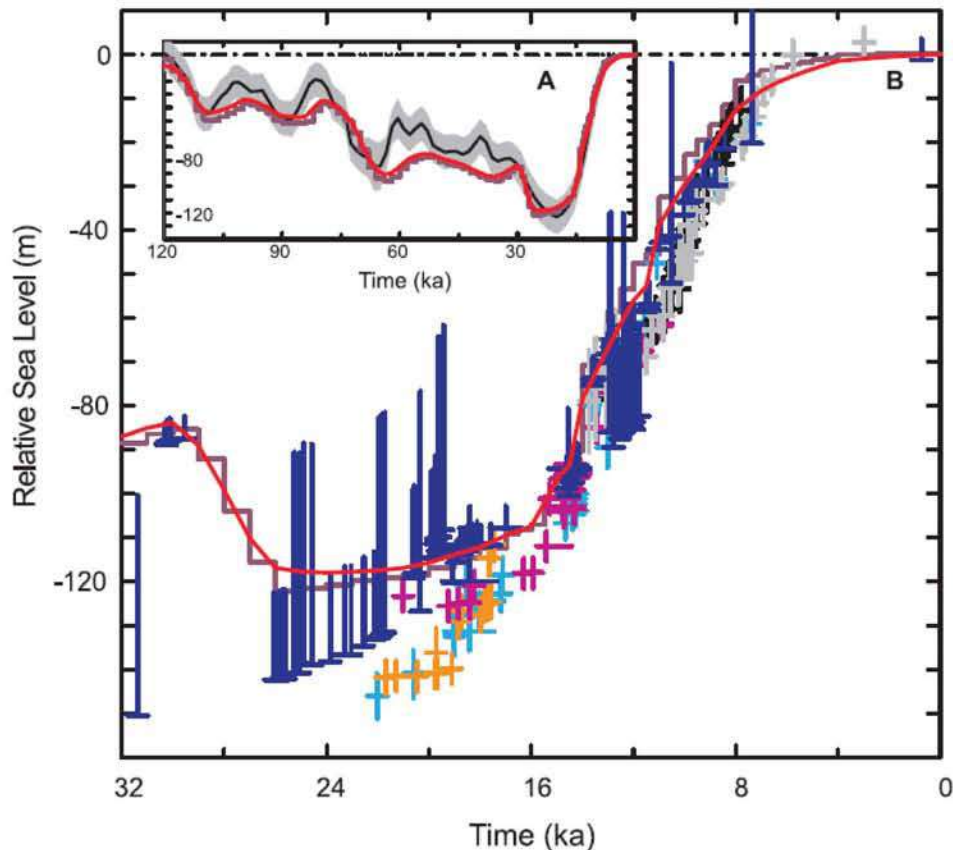
- 일반적으로 현재 또는 미래 기후변화 시나리오를 구성하는데 활용되는 기후모델이 고기후 모사에도 사용되는데, 이 경우 해당 시기의 강제요인 차와 바다 및 육지의 분포양상 차를 고려하여 모사를 진행

○ 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum: 약 23,000~18,000년전)

- 밀란코비치 이론에 의하면, 현재 빙하기-간빙기 순환 중 빙하기는 북반구 고위도 지역에서의 여름철 일사량(insolation) 감소로부터 여름 기온이 하강하기 때문에 시작.
- 뒤 이어 고위도 지역을 중심으로 겨울철 강설이 연중 녹지 못하고 유지 및 축적되는 작용이 반복되면서 북반구 극지 및 고위도 지역에 빙상이 형성되었고 곧 빙하기로 이어짐. 육상의 빙상 확장과 연관된 큰 규모의 해수면 하강은 북반구 고위도 지역의 여름철 일사량 최소 시기와 일치하는 약 116,000년경에 발생(Waelbroeck et al., 2002)⁴⁾.
- 고기후 모델을 활용한 연구에서는 일사량 변화만을 고려하였을 때에는 고위도 강설 및 유지 현상을 재현하는데 실패하였으나, 이후 수목 북방한계선의 이동, 고위도의 해빙확장, 빙상 형성을 위한 수분 공급의 기원인 저위도 대양의 수온 상승을 고려하면 이러한 기후 상황이 확인됨(e.g., Risebrobakken et al., 2005)
- 이러한 일련의 결과들은 저위도에서의 대기-해양 순환 현상이 고위도 지역의 일사량 강제력과 연결 및 증폭시키고 빙상의 성장을 확산시키는 피드백(feedback)을 제공한다는 가설을 증명(e.g., Jo et al., 2014)
- 이러한 빙하기-간빙기 순환은 지난 65만년 동안 지속된 것으로 알려져 있다. 빙하 시추코어로부터 획득한 자료에 의하면 이 기간 동안의 대기 중 이산화탄소의 농도는 180~300 ppm, 메탄가스는 320~790 ppb의 범위를 보임
- 빙하기-간빙기 순환 중 약 23,000~18,000년전에 해당하는 마지막 최대 빙하기는 지질학적 증거가 매우 풍부하고 현재와 가장 가까운 빙하기라는 점으로 인해 수많은 연구가 진행되고 있으며, 이에 따라 다양한 후속 기후 모델 적용 연구가 수행된 바 있음. 이 시기는 대륙 빙상이 최대의 부피로 확장되었던 시기로서 현재의 북유

4) 그림 (A) 빙기-간빙기 순환에 걸친 빙상의 크기에 따라 변하는 전 지구적 해수면 변화(Waelbroeck et al., 2002; From IPCC, 2007). 저서성 유공충의 산소동위원소 비를 통해 계산된 상대 해수면 높이의 중간값(검은색 실선)과 오차범위(회색부분). 붉은색 실선은 바바도스 지역 산호연구를 통해 추정된 해수면 변화 ICE-5G(VM2)모델의 예측 값.

럽(Fennoscandian 빙상)과 북미 대륙(Laurentide 빙상) 미국 북부에 이르기까지 수천 m 두께의 대규모 대륙 빙하가 전진한 시기. 이러한 빙하의 중위도 지역으로의 전진은 해수면 변동과 직접 연결되는데 이 시기에는 현재에 비해 약 120 m 내외의 해수면 하강이 이루어진 것으로 연구결과 밝혀짐



<그림 89> 전 지구적 해수면 변화 및 모델 예측결과 비교. (A) 빙기-간빙기 순환에 걸친 빙상의 크기에 따라 변하는 전 지구적 해수면 변화(Waelbroeck et al., 2002; From IPCC, 2007). (B) 과거 32,000년전부터 현재까지의 카리브해 바바도스 섬에서 산호로부터 획득한 RSL기록에 대한 ICE-5G(VM2) 모델 예측 결과(붉은색 실선)과 이외 지역의 결과(다양한 색으로 표시된 십자 및 오차막대 심볼)의 비교.

□ 마지막 최대 빙하기 직전 약 30,000년 전까지는 북대서양 지역을 중심으로 최대 약 16도까지 급격한 온난화와 한랭화가 반복적으로 일어난 것으로 그린란드의 빙하코어 기록으로부터 보고됨

- 이러한 급격한 기후변동은 일명 Dansgaard-Oeschger (D-O) cycles 라고 불리

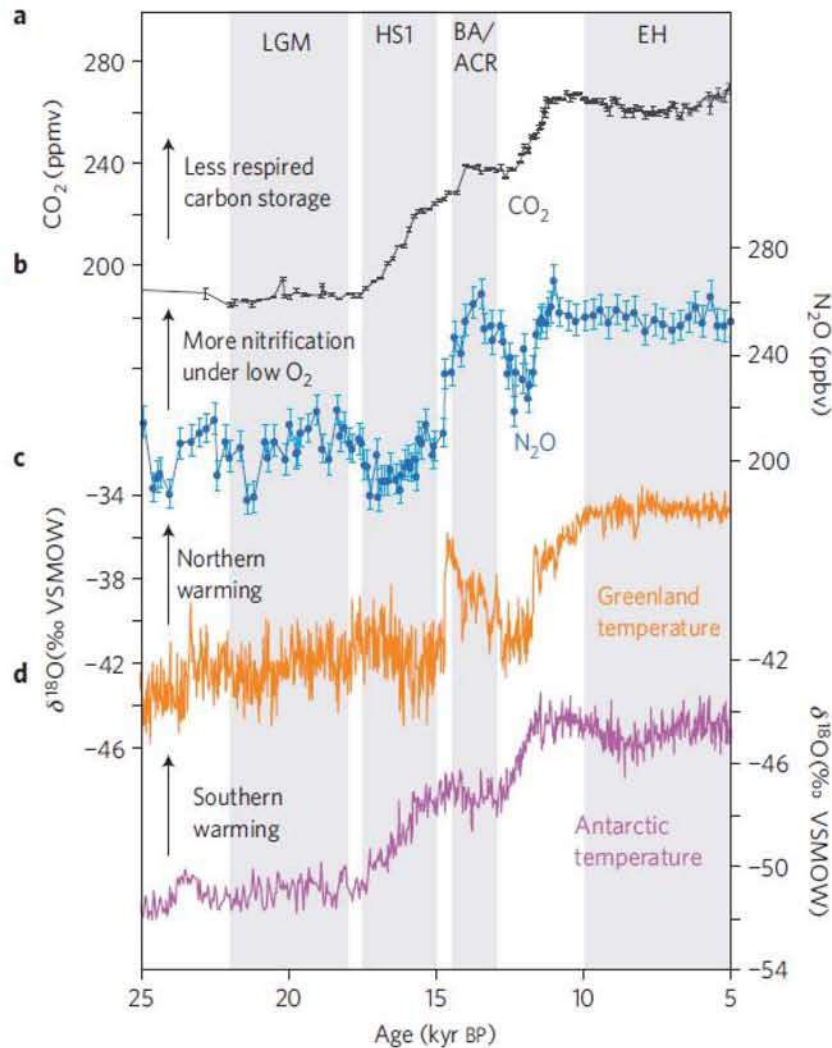
며, 그 영향권이 전 지구적 규모였을 것으로 보인다. 또한 이러한 변화와 직접적으로 연관된 것이 우리나라를 포함하여 동아시아 지역에 중대한 영향을 미치는 동아시아 몬순의 변화를 나타냄. 따라서 그린란드에서의 기온변동과 열대 및 아열대 지역(일부의 중위도 지역 포함) 강우현상의 심각한 변화가 서로 연관되어 있는 것으로 알려져 있음

- 기후모델링 결과에 의하면 마지막 최대 빙하기 동안에는 현재와는 다른 온실가스 농도와 빙하 분포 면적 때문에 대기의 평균 기온이 현재보다 3~5도 정도 낮았던 것으로 알려져 있음
- 아직 많은 의문점이 존재하지만 대기 중 분진의 양과 식생 변화의 영향을 고려하면 추가로 전 지구의 기온이 1~2도 정도 더 낮았을 것으로 추정. 따라서 마지막 최대 빙하기와 현재의 전 지구적인 평균 기온은 약 4~7도 정도의 차이를 보이는 것으로 보임.
- 반면 과거 해양 환경을 유추할 수 있는 유공충과 산호의 산소동위원소 및 Mg/Ca 비 연구결과들에 의하면 열대지역의 경우 마지막 최대 빙하기 동안 해수온도가 현재에 비해 평균 약 2~3도 정도만 낮았을 것으로 추정하고 있음. 따라서 고위도 지역의 해양 환경에서 보다 높은 수온 변화를 겪었으며, 해빙에 의해 바다가 덮혔던 면적 등 추가적인 현상들로 인해 변화의 정도가 보다 큰 경향을 보였을 것으로 평가됨.
- 육상 자료도 해양의 자료와 유사한 경향을 나타내는데, 마지막 최대 빙하기 동안 열대지역 기온이 약 5도 가량 낮았던 반면, 고위도 지역의 기온은 이보다 큰 폭으로 떨어졌을 것으로 보고됨
- 기후모델 연구에 의하면 이러한 마지막 최대 빙하기와 현재 기후 사이의 위도 별 온도변화 차이는 모델의 종류에 따라 다른 결과를 보이고 있음

○ 마지막 해빙기(Last Deglaciation; 약 18,000~11,000년전)

- 마지막 최대 빙하기 이후 홀로세 간빙기 이전까지는 마지막 빙하기-간빙기 순환 내에서 가장 빠르고 뚜렷한 온난화가 진행되는데, 이를 흔히 마지막 해빙기라고 칭하며 이 마지막 해빙기의 중간점을 빙하기 종료시점(glacial termination) 이라함
- 마지막 해빙기의 시작은 지역에 따라 다소 차이가 있는데 빙하코어 연구결과에 의하면 약 14,000년전 비교적 급격한 변화와 함께 시작된 것으로 보고됨. 이에 반해 남극 빙하코어에 의해 복원된 남극지역에서의 마지막 해빙기의 시작은 약 18,000

년전으로 상대적으로 점진적인 양상을 보임



<그림 90> 마지막 해빙기 동안의 기후변화와 온실가스 농도의 기록(From Jaccard and Galbraith, 2012). (a) 남극 빙하코어로부터 분석된 대기 이산화탄소 농도. (b) 대기 아산화질소 농도. (c) 그린란드 빙하코어의 산소동위원소 비. (d) 남극 EDML 빙하코어로부터 분석된 산소동위원소 비.

□ 빙하코어 내 기체 분석 결과는 대기 중 이산화탄소, 메탄 등과 같은 온실가스의 농도가 전 지구적인 온도변화 및 남극지역에서의 온도변화와 전반적으로 매우 유사한 경향을 나타냄(Petit et al., 1999). 마지막 해빙기 동안에는 약 $54 \times 10^6 \text{ km}^3$ 의 대륙빙하가 소멸되었던 것으로 보고되었으며(Yokoyama et al., 2000), 이와 같은 대륙빙하의 부피는 약 121 m의 해수면 상승을 의미. 또한 이 해빙기를 거치면서 발생한 전 지구적 평균온도 상승은 약 4~7도 정도였으며, 지역에 따라 최대

약 20도의 기온 하강을 보고한 연구결과도 있음

- 주변 동아시아 지역의 연구결과에 의하면 한반도의 경우 약 8도 내외의 온도변화를 겪었을 것으로 추정되지만, 현재까지 정량적 기온변동을 제시한 프록시 연구결과가 보고된 바가 없음
- 마지막 해빙기 중 매우 뚜렷하고 특징적인 급격한 기후변동이 보고되었으며, 이 시기를 Younger Dryas 사건이라고 명명하였는데, 고기후학자들로부터 마지막 해빙기 중 가장 중요한 기후변동 사건으로 인식됨
- 북대서양 및 북유럽에서 매우 다양한 프록시 기록에 의해 처음 보고된 이 시기는 특히 그린란드 빙하코어에서 명확하게 보고, 중국 동굴생성물의 우라늄계열 연대측정으로부터 재정립된 Younger Dryas 시기는 마지막 해빙기최후기에 해당하는 약 12,800년전부터 11,500년까지이며, 따라서 이와 같은 매우 급격한 기후변동이 중국의 아열대 지역에서도 발견됨에 따라 그 범위가 적어도 반구 규모 이상이었음이 확인되었다. 이외에도 카리브해와 에티오피아 등의 열대지역의 연구결과에서도 보고된 바 있음. 그러나 남극 빙하코어 자료를 비롯하여 호주 및 뉴질랜드 등지의 연구결과들에 의하면 남반구 지역에서는 그 실체가 뚜렷하지 않거나 전혀 기록되지 않은 경우가 대부분.
- 이 해빙기의 급격한 기후변동의 원인에 대해서는 아직까지 다양한 이론이 적용되었으나 가장 대표적인 학설은 북대서양 심층수 형성과 관련 있음. 즉, 마지막 해빙기 최후기에 그동안 진행되었던 대륙빙하 용빙수의 대륙 내 축적과 이 용빙수의 폭발적인 바다로의 유입으로 인해 북대서양 표층수의 밀도를 급격히 떨어뜨렸으며, 최종적으로 북대서양 심층수 형성의 약화와 북대서양 적도의 열에너지 수송이 원활하게 진행되지 못해 해당 지역에 급격한 한랭화가 진행되었다는 학설.
- 이러한 북대서양 지역의 급격한 온도하강은 동아시아 지역에 다량의 열에너지와 강수를 공급하는 몬순을 크게 약화시키는 것으로 알려져 있기 때문에 한반도를 비롯한 주변 지역에도 중대한 영향을 미쳤을 것으로 추정할 수 있음

○ 현 간빙기(Current Interglacial Period; 약 11,000년전~현재)

- 마지막 해빙기 이후 진행된 현 간빙기의 기후변화는 크게 인간간섭으로 인한 급격한 지구온난화가 진행된 약 200년 전을 기준으로 이전과 이후의 시기로 구분
- 지난 약 10,000년 동안을 100년 단위로 분석한 고기후 기록을 보면 인간간섭 이전인 산업혁명 이전에도 지역에 따라 일시적으로 온난했던 시기들이 있었다는 증거

는 매우 많으나 이러한 시기들은 전 지구적으로 동시에 발생하지는 않은 것으로 보고되고 있음

- 마찬가지로 여러 지역에서 10년 단위로 분석된 현 간빙기의 고해상도 고기후 기록도 지역에 따라 주기적 또는 준주기적인 기후변동이 있었다는 증거를 잘 제시

□ 현 간빙기의 최초기인 약 11,000~10,000년 전까지는 마지막 해빙기의 연장에 해당하며 해빙기에 비해 변화율이 상대적으로 낮지만 지속적인 온도 상승이 발생된 시기.

- 북반구의 여러 산악지역에 있는 빙하는 지난 약 10,000~5,000년 사이에 지구궤도 운동과 이에 의한 지역적인 온난화 현상 때문에 지속적으로 후퇴하였으며, 5,000년전 이전에는 현재에 비해 빙하의 크기가 훨씬 더 작았거나 혹은 거의 없었던 시기도 있었던 것으로 알려짐

- 최근 기후모델 연구에서 중요한 요인으로 평가되고 있는 수문학적 변화(hydrological change)와 관련하여 열대 및 아열대 지역의 몬순은 약 8,000~7,000년 전에 최대치를 보였던 것으로 보고

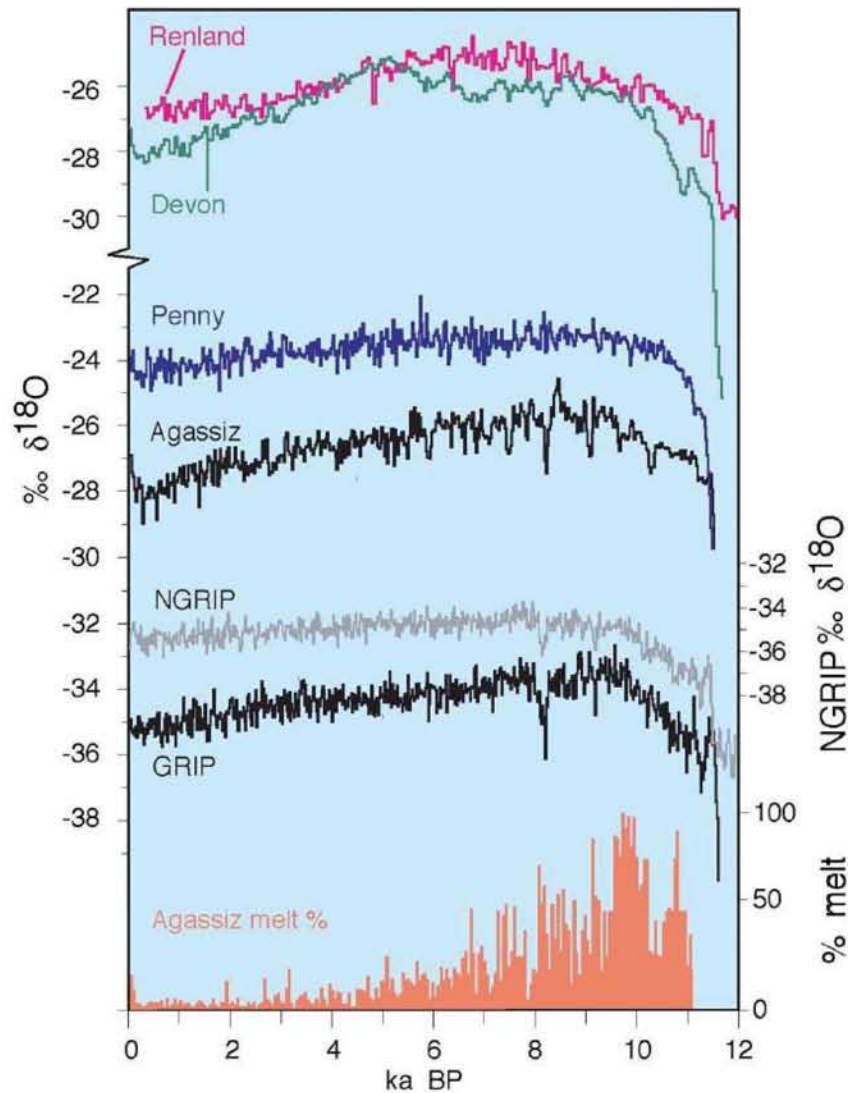
□ 기후 및 식생복원을 위한 수치모델들은 아한대 북방 수목한계선(boreal treeline)이 현 간빙기 전기의 온난화에 의해 현재에 비해 고위도 지역으로 이동했다는 사실을 보임

- 이외의 고기후 기록도 이러한 북방 수목한계선의 이동이 온난화를 더욱 촉진하는 방향으로 유도했다는 점을 제시. 대순환모델(General Circulation Models: GCMs)의 결과에 의하면 홀로세 중기 즉, 약 6,000년전에는 전 지구 평균기온은 지역에 따라 현재에 비해 약 2~3도 가량 높았던 것으로 보고되었으며, 고기후 프록시 연구결과에 의하면 전기 및 중기에 비해 말기로 진행되면서 지역적으로 큰 편차가 있으나 전반적으로 기온과 강수량의 감소가 진행된 것으로 알려짐

○ 지역적으로 발생한 열대지역의 태풍, 홍수, 수십 년 단위의 가뭄, 아프리카/아시아 여름 몬순의 강도와 같은 10~100년 규모의 급격한 기후현상은 지난 10,000년 동안에도 지속적으로 일어났을 가능성이 매우 높음

- 해수면 변화의 경우 기후변화와는 다소 다른 양상을 보이고 프록시 기록과 지역에 따라 그 결과가 다르게 보고되고 있으나, 전반적으로 약 11,000~6,000년전까지는 점진적인 해수면 상승이 보고되어 왔으며, 이후 현재의 해수면과 유사한 수준으로 유지된 것으로 알려짐

- 인간간섭으로 인해 진행되고 있는 것으로 받아들여지고 있는 지난 200년 내 현재의 지구온난화의 경우 현 간빙기 내에서는 전례를 찾아볼 수 없는 온실가스 농도를 나타내고 있으며, 가장 빠른 기온 상승률을 기록하고 있으며, 이에 따라 해수면 상승과 극지 빙하 후퇴가 급격하게 발생되고 있는 시기에 해당됨



<그림 91> 그린란드와 캐나다 북극지역 빙하코어로부터 분석된 산소동위원소 기록(From Fisher and Koerner, 2002).

3. 제주 제4기 퇴적층 시료의 고환경 분석 사례

○ 제주도 고산층의 고환경학적 화산학적 의미(Lim et al., 2015)

- 제주도 고산리 해안 일대에 분포하는 고산층은 당산봉 일대에서 수월봉 일대에 이르기 까지 비교적 넓은 지역에 걸쳐 발견됨(Park et al., 1998). 수월봉 일대의 고산층은 하부 광해악현무암과 상부 응회암층 사이에 니질 퇴적층으로 분포하며 약 23,000년 이전에 형성되었을 것으로 보고됨(Cheong et al., 2007).
- 당산봉 서쪽 해안, 차귀도 선착장의 주차장 뒤편에 위치하는 고산층은 제주시 현경면 고산리 지구내 해안에 인접. 조사된 수월봉 응회암층 하부의 고산층은 해발고도가 0.5 m에 위치하며, 노출된 단면부를 제거하면 갈색에 가까운 니질 퇴적층이 나타난다. 차귀도 선착장 일대에서 관찰되는 고산층은 특별한 퇴적구조를 보이지 않고, 점토질이 우세하며 굵은 모래와 1 cm 미만의 잔자갈이 극히 부분적으로 관찰됨
- 상부에 놓인 용암류 또는 응회암으로 인해 하부에 놓인 고토양 또는 습지 퇴적물이 침식 및 생교란 작용 등의 영향을 받지 않게 되어 상대적으로 완전한 퇴적체로 유지될 수 있기에 이 퇴적체가 형성된 시기의 고환경/기후 정보를 고스란히 간직할 수 있음(e.g., Sheldon, 2003; Bader et al., 2015).
- 퇴적층 속에 기록된 과거 환경 변화는 환경 지시자들에 의해서 추적될 수 있다. 예를 들어 퇴적물 속에 포함된 유기 탄소동위원소비($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) 값의 변화는 과거 기후/환경 변화에 의해서 야기된 식생변화를 보여줄 수 있음.
 - 일반적으로 육상 식물이 탄소를 고정할 때 탄소동위원소 분별이 일어나는데, 고정 방법에 따라서 크게 C3식물과 C4식물로 나눌 수 있음. 캘빈회로(Calvin cycle)를 이용하는 C3식물은 탄소동위원소비 값이 -32‰에서 -21‰의 범위를 보이며 평균 값은 약 -27‰. 주로 잡초류로 구성된 C4식물의 경우는 해치-슬랙 회로(Hatch-Slack cycle)를 이용하며, -17‰에서 -9‰의 변동폭을 가지며 **평균** 약 -13‰의 값을 보임 (O'Leary, 1981, 1988; Tieszen, 1991; Meyers, 1997).
 - 이렇게 식물의 조직에 기록된 탄소동위원소 값은 퇴적된 이후에도 그 값이 크게 변하지 않기 때문에 길게는 과거 수백만 년 전에 분포했었던 식생정보를 제공 (Meyers, 1997; An et al., 2005).
- C3식물과 C4식물의 분포는 이들의 서로 다른 자연환경에 대한 생리적 반응에 의한 것으로 알려져 있다. 현재 일본열도를 따라 분포하는 사초과 C4식물의 점유율은 연평균온도에 비례하며, 고위도로 갈수록 점유율이 감소(Ueno and Takeda,

1992). 또한 C4식물은 C3식물에 비해 수분 활용 기능(water-use efficiency)이 뛰어나기 때문에 건조한 기후에 강한 것으로 알려져 있으며, 대기 중 탄소농도가 낮을 때 C3식물보다 C4식물이 더 잘 자라는 것으로 보고(Cerling et al., 1997; Collatz et al., 1998; Schefuß et al., 2003; Zhang et al., 2003; Huang et al., 2001 and 2006).

- 현재 제주도에서의 C4식물은 새(*A. hirta*), 개솔새(*Cymbopogon tortillis*), 개억새(*E. speciosa*), 억새(*Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*), 쥐꼬리새(*Muhlenbergia japonica*), 솔새(*Themada japonicus*) 등이 야초지에서 발견되며, C4식물의 점유율이 10-20%를 차지(Chang and Lee, 1983a and 1983b). Lim and Fujiki (2011)에서는 제주도 동수악 습지퇴적물 속에 포함된 유기 탄소동위원소 값의 변화로부터 지난 6500년 동안 C3식물과 C4식물의 상대적 점유율 변화를 추적하여, 보다 습한 환경에서 C3식물이 증가하였고, 반대로 건조한 환경에서 C4식물이 증가하였음을 제시

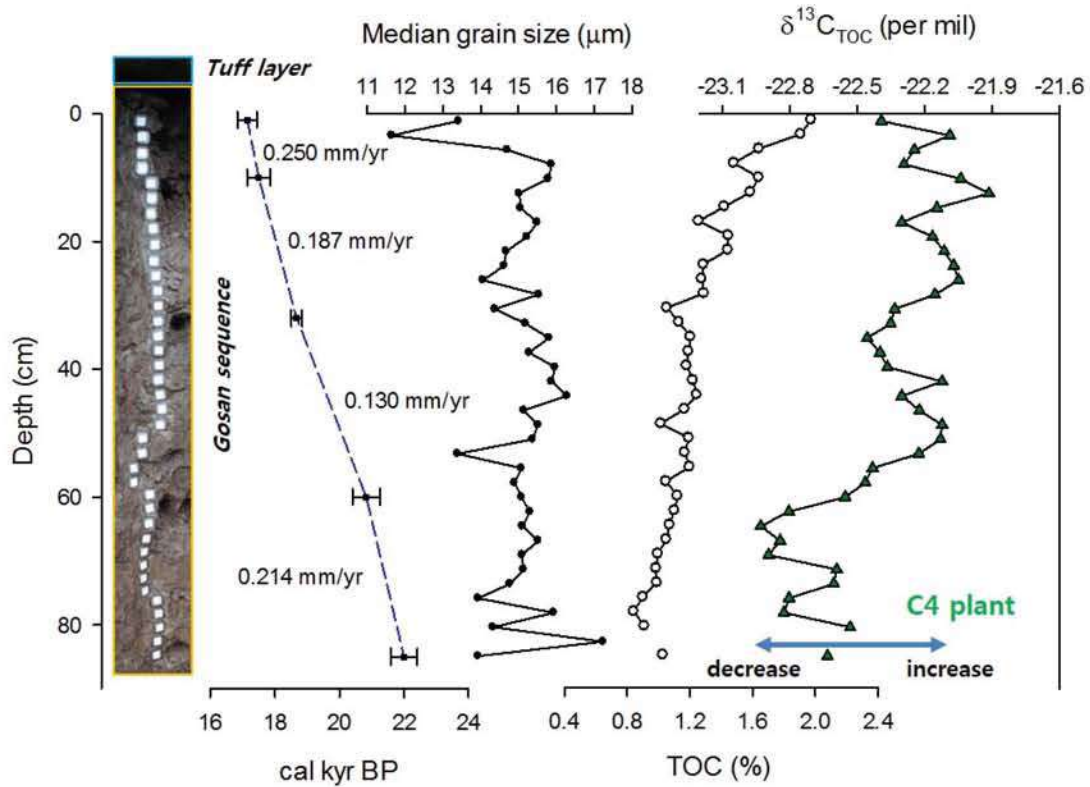


<그림 92> 고산층의 분포 위치 및 노두 단면

- 퇴적물 시료 속에 포함된 유기탄소를 이용한 방사성 탄소연대측정 결과 고산층에서의 연대는 상부로부터 하부로 17,140±300 cal. yr BP, 17,500±360 cal. yr BP, 18,675±165 cal. yr BP, 20,830±430 cal. yr BP, 22,000±400 cal. yr BP의 순차적으로 나타남
- 고산층은 점토 16~20%, 실트 68~80 %, 그리고 모래 2~10%를 함유하고 있다. 퇴적물의 중앙값(median grain size)은 약 11~18 μm 의 범위를 보였으며, 전체적으로 세립질 실트 입자로 구성
- 유기탄소함량은 퇴적층의 하부에서 약 0.8~1 %의 값을 보였으며, 상부로 갈수록

증가하는 경향을 보여 최상부에서는 약 1.8 %의 값을 보임. 유기 탄소동위원소 값 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$)은 -22 ‰에서 -23 ‰의 좁은 분포범위를 보였으며 전체적으로 유기탄소함량 변화와 비슷한 증가추세를 보임.

- 특히 탄소동위원소 값은 뚜렷한 증가와 감소가 반복되었는데, 예를 들어 85~64.6 cm 깊이에서는 깊이가 낮아짐에 따라 탄소동위원소 값이 -22.5 ‰에서 -22.9 ‰로 감소하였으며, 64.6~48.5 cm 구간에서는 -22.1 ‰ 까지 증가. 26.2 cm와 12.3 cm 깊이에서 각각 -22 ‰과 -21.9 ‰ 증가
- 고산층은 과거 22,000년~17,000년 전 사이에 형성되었으며, 이 시기는 최후빙하기의 후반부에 해당되며, 지금보다 해수면이 약 100~120 m 정도 낮았다고 여겨지는 시기 (Linsley, 1996; Liu et al., 2004)
- 해수면 변동과 관련해서 서부 태평양에 위치한 Sulu Sea 퇴적물 속에 포함된 유공충의 산소동위원소 값은 빙기-간빙기 및 수천년 규모의 대륙빙하량 및 해수면 변화를 지시한다고 제안(Linsley, 1996).
- 과거 22,000년~17,000년 전의 산소동위원소 값은 해수면이 과거 6만년 동안 가장 낮았던 시기에 해당. 현재 고산층 상부 해발고도가 약 0.5 m임을 고려하면, 고산층이 해안에서 멀리 떨어진 해발고도 약 100~120 m의 내륙에서 형성되었다고 생각될 수 있음
- 또한 연구지역은 동아시아 몬순변화에 민감한 지역이므로 과거 여름-겨울 몬순 세기 변화에 크게 영향을 받았을 것으로 판단됨 (Chung, 2007; Lee et al., 2008; Park et al., 2014a and 2014b; Park and Park, 2015).
- 중국 남부지방에서 회수된 동굴생성물(석순)의 산소동위원소 값에 의하면 여름 몬순의 강도가 약 3만 년 전 부터 급격히 약해져서 22,000년~17,000년 전 사이에는 여름 강수량이 상당히 감소했음 (Wang et al., 2001). 기 조사에 따르면, 고산층은 조사지역의 해안에서부터 내륙으로 확장되어 넓게 분포하는데, 이러한 점을 미루어 볼 때 고산층은 고산리 일대에 넓게 분포한 평지 또는 습지 등의 육상환경에서 형성된 것으로 추정 가능



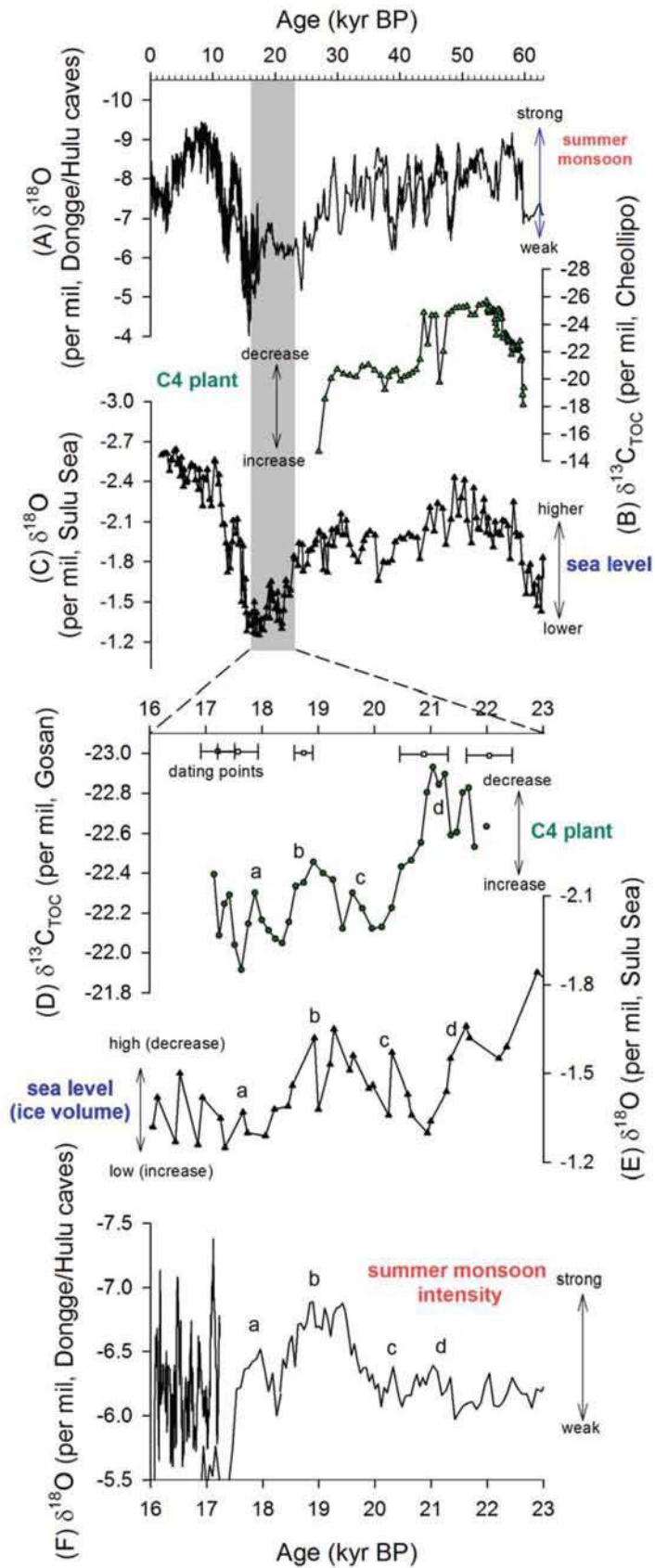
<그림 93> 고산층에 대한 입도 분석 및 지화학 분석결과

□ 과거 22,000년~17,000년 동안 고산층의 탄소동위원소 값의 변화 즉 식생변화는 해수면 변동 또는 대륙 빙하량 변동, 그리고 여름 몬순 변동의 영향을 받음.

- 고산층의 유기물 구성은 주로 C3식물 기원으로 형성되었지만, 다소 C3식물이 감소하면서 C4식물의 증가가 나타나는 수천 년 규모의 변동을 보임. 비록 연대측정의 오차로 인해서 시기적인 일치를 보이지는 않지만, a~d로 표시되어 있는 탄소동위원소 값의 변동은 대륙 빙하량 또는 해수면 변화와 유사하며, 또한 여름 몬순 변동과 부분적으로 비슷⁵⁾

5) Comparison of the $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ values, a proxy for relative abundance change of C4 or C3 plants, from Gosan Formation sediments in Jeju Island, Korea with other paleoenvironmental proxies. (A and F) Asian summer monsoon index reconstructed from $\delta^{18}\text{O}$ values of stalagmites in Hulu and Dongge caves, south China (Wang *et al.*, 2001). (B) $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ values of sediments from Cheollipo, Korea (Lim *et al.*, 2010). (C and E) Continental ice volume or sea level inferred from $\delta^{18}\text{O}$ values in deep-sea sediment from the Sulu Sea (Linsley, 1996). (D) $\delta^{13}\text{C}$ values from Gosan Formation sediments in Jeju Island, Korea. Comparable millennial-scale changes in $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ values in Gosan Formation, Jeju Island and $\delta^{18}\text{O}$ values from Sulu Sea and Dongge Cave were assigned to each peak from a to d. Squares with error ranges represent age-dating points in the Gosan Formation, Jeju Island, Korea.

- 고산층의 유기 탄소동위원소 값의 변화는 C3식물과 C4식물의 상대적 분포량 변화 및 습윤도 변화에 따른 C3식물 내의 탄소동위원소 값의 변화라는 두 가지 측면에서 의미를 추적할 수 있겠지만, 고산층의 탄소동위원소 값이 C4식물 영향을 완전히 배제할 수 없는 약 -22 ‰에서 -23 ‰의 범위를 가진다는 점에서 두 가지 영향을 동시에 받았을 것으로 판단됨. 두 가지 해석 모두 강수량 변화 즉 여름몬순 강도 변화에 크게 영향을 받았음을 알 수 있기에 22,000~17,000년 전 동안 고산층에서 발견된 탄소동위원소 값의 변동은 수천 년 규모의 습윤도 또는 건조도 변화를 보여준다고 할 수 있음



<그림 94> 고산층에 대한 고환경 프록시 비교 검토 결과

제 3 장 문제 해결형 과제 제안 및 이행방안 도출

○ SWOT 분석을 통해 도출된 주요 방안을 토대로 전략적 도전 키워드를 분석하고, 도출된 키워드를 적용하면 아래와 같음

- 기후변화와 고환경 변화 집중 연구
- 기후변화와 자연환경 변화 집중 연구
- 기후 요소별 취약성, 안정성 분석
- 기후변화 장단기 모니터링 추진 방안
- 세계적인 현황 조사(동식물/ 지형지질)
- 제주지형 특성별 고도별 정책 수립
- 자연생태 환경변화 모니터링 정책 도입
- 소형 화산체(오름) 활동시기 규명
- 화산 활동사 및 화산 유형 종합조사
- 한라산 중심의 체계적 관리방안 도입
- 통합적 자료관리 방안 구축 구축 필요



<그림 95> 전략과 비전 도출 결과

○ 정의된 전략적 대응방향을 고려하여 문제 해결을 위한 이행과제 제안

- 우선적으로 국가차원에서 관리되고 있는 제주 지역의 자연유산을 중심으로 체계적인 학술 가치를 조사함
- 제주지역에 분포하는 다양한 제4기 미고결 퇴적층을 이용하여 제주지역의 고환경과 미래 기후변화에 대한 연구를 추진함
- 소형화산체에 대한 화산활동 기록 복원과 화산암류 기반의 활동시기 규명을 통해 제주도 화산활동사를 규명하여 제주지역에 대한 화산 안정성을 검토함

제안주제 : 제주도 한라산 지역의 지표지질환경도 제작 연구

□ 핵심 가치

- 제주도의 지표지질을 담은 지도가 나온다.
- 제주도 지표지질도는 지표에서 확인되는 화산(오름), 습지, 토양, 암석의 시기와 생성환경을 담고 있으며, 지하퇴적층의 정보를 포함하는 3차원 환경정보(Profile type)를 제공한다.
- 제주도 지표지질에 대한 연구는 제주도의 화산활동과 퇴적층의 생성시기 그리고 환경변화를 포함하며 과거의 지표환경에 대한 정보를 재현한다. 이러한 환경변화와 과거의 지표환경은 화산의 활동과 관련한 재난 대책 수립 및 기후변화에 대한 적응 대책 수립의 중요 자료로 활용될 수 있다.

□ 핵심 이행 주제

이행과제 1. 제주도 한라산 지역의 지표지질환경도 제작

이행과제 2. 제주도 한라산 지역의 미래지질자원 개발

이행과제 3. 제주도 미고결 퇴적층을 이용한 화산활동의 시기 및 환경 규명

**이행
과제1**

**[제주도 한라산 지역의 지표지질환경도 제작 연구]
과제 요약**

□ 사업목적

- 제주도 한라산 지역의 지표에서 확인되는 지질 요소 (화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 형성시기(층서)와 지하 퇴적층(또는 암석)의 정보를 포함하는 3차원 환경정보(profile type map)을 제공함으로써 제주도의 중장기 발전을 위한 새로운 수요시장을 창출하고자 함

□ 사업내용

- 사업기간 및 사업비 : 2017년~2021년(5년) / 15,000백만원
- 사업시행주체 : 한국지질자원연구원, 한라산 연구소

□ 기대효과

- 제주도 한라산 지역에 분포하는 화산, 오름, 습지, 암석, 토양 등을 대상으로 형성 시기와 형성 환경 등을 밝히고 각 지질요소에 대한 분포를 지도로 제작함으로써 관광자원의 개발과 재난위험 대비, 기후변화 대응을 위한 기반정보를 구축함
- 제주도의 화산활동 연구는 특히 화산의 분포, 화산 활동의 시기, 화산 활동의 빈도 등으로 요약되는 정보를 제공함으로써 현재 제주도 중장기 발전과 관련한 재난위험에 대한 사전 대비와 화산 자원의 안정적 활용이 가능함
- 향후 제주도 전역에 걸친 지표지질환경도는 제주도 토지이용, 관광자원 및 지질자원에 대한 활용계획 수립의 기반으로 국내 관광자원의 고도화와 신규 관광자원 및 신규 지질자원개발을 통해 미래 신

성장동력의 수요창출과 기회창출에 기여

□ 사업추진 방향

- 제주도 한라산의 지표지질요소의 형성시기 및 환경 규명
 - 화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 형성 시기 및 환경 규명
 - 화산 활동 시기 규명을 위한 연대측정 활용기술 개발
- 지표 지질요소 및 관광 자원 융합연구개발 기반 구축
 - 화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 관광자원 개발 기반 구축
 - 화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 지질자원 개발 기반 구축
- 제주도 재난 안전 및 기후변화 적응 기반 구축
 - 미래 재난 요인인 제주도 화산 활동 시기와 빈도 규명
 - 미고결 퇴적층의 기후변화 결과를 활용한 미래 적응기반 구축
- 제주 지표지질요소의 미래창조형 실용화 융합기술 개발
 - 지표지질요소에 대한 관광자원 개발(관광거점 및 신규 코스 개발)
 - 지표지질물질(화산송이 등)에 대한 고부가 상용화 기술 지원
- 제주 경제 활성화를 위한 기술 사업화 지원
 - 지질요소에 대한 관광자원 개발
 - 지자체/중소기업 연계 지질자원 고부가 상용화 기술 지원 및 유망 신기술 아이템 공동 발굴/지원

□ 연차별 투자계획

(백만원)

구 분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
제주도 한라산 지역의 지표지질환경도 제작	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000

**이행
과제2**

**[제주도 한라산 지역의 미래지질자원 개발]
과제 요약**

□ 사업목적

- 제주도 한라산 지역의 지표에서 확인되는 지질 요소 (화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 형성시기(층서)와 지하 퇴적층(또는 암석)의 미래활용을 위한 미래지질자원의 개발을 통해 제주도의 중장기 발전을 위한 새로운 수요시장을 창출하고자 함

□ 사업내용

- 사업기간 및 사업비 : 2017년~2021년(5년) / 15,000백만원
- 사업시행주체 : 한국지질자원연구원, 한라산 연구소

□ 기대효과

- 제주도 한라산 지역에 분포하는 화산, 오름, 습지, 암석, 토양 등을 대상으로 형성 시기와 형성 환경 등을 밝히고 각 지질요소에 대한 분포를 지도로 제작함으로서 관광자원의 개발과 재난위험 대비, 기후변화 대응을 위한 기반정보를 구축함
- 향후 제주도 전역에 걸친 지표지질환경도는 제주도 관광자원 및 지질자원에 대한 활용계획 수립의 기반으로 국내 관광자원의 고도화와 신규 관광자원 및 신규 지질자원개발을 통해 미래 신성장동력으로 관련 수요창출과 기회창출에 기여

□ 사업추진 방향

- 제주도 한라산의 지표지질요소의 형성시기 및 환경 규명
 - 화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 형성 시기 및 환경 규명
 - 화산 활동 시기 규명을 위한 연대측정 활용기술 개발
- 지표 지질요소 및 관광 자원 융합연구개발 기반 구축
 - 화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 관광자원 개발 기반 구축
 - 화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 지질자원 개발 기반 구축
- 제주도 재난 안전 및 기후변화 적응 기반 구축
 - 미래 재난 요인인 제주도 화산 활동 시기와 빈도 규명
 - 미고결 퇴적층의 기후변화 결과를 활용한 미래 적응기반 구축
- 제주 지표지질요소의 미래창조형 실용화 융합기술 개발
 - 지표지질요소에 대한 관광자원 개발(관광거점 및 신규 코스 개발)
 - 지표지질물질(화산송이 등)에 대한 고부가 상용화 기술 지원
- 제주 경제 활성화를 위한 기술 사업화 지원
 - 지질요소에 대한 관광자원 개발
 - 지자체/중소기업 연계 지질자원 고부가 상용화 기술 지원 및 유망 신기술 아이템 공동 발굴/지원

□ 연차별 투자계획

(백만원)

구 분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
제주도 한라산 지역의 미래지질자원 개발	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000

**이행
과제3**

**[제주도 미고결 퇴적층을 이용한 화산활동의 시기
및 환경 규명] 과제 요약**

□ 사업목적

- 제주도 한라산 지역의 지표에서 확인되는 지질 요소 (화산(오름), 습지, 암석, 토양 등의 형성시기(층서)와 지하 퇴적층(또는 암석)의 정보를 포함하는 화산활동 층서 규명을 통해 제주의 형성모델 및 제주도 지질도 제작

□ 사업내용

- 사업기간 및 사업비 : 2017년~2021년(5년) / 15,000백만원
- 사업시행주체 : 한국지질자원연구원, 한라산 연구소

□ 기대효과

- 제주도 한라산 지역에 분포하는 화산암류와 미고결 퇴적층을 대상으로 형성 시기와 형성 환경 등을 밝히고 각 지질요소의 시간적 선후관계를 규명하여, 제주도의 형성모델(진화모델)을 제작
- 제주도 시추정보를 기반으로 제주 심부의 지질과 연대측정자료를 기반으로 3차원의 제주도 형성모델을 제작하여 지하수 및 제주도 국토이용을 위한 기반정보를 구축함
- 제주도의 화산활동 연구는 특히 화산의 분포, 화산 활동의 시기, 화산 활동의 빈도 등으로 요약되는 정보를 제공함으로써 현재 제주도 중장기 발전과 관련한 재난위험에 대한 사전 대비와 화산 자원의 안정적 활용이 가능함
- 향후 제주도 전역을 포괄하는 제주도 형성모델과 지질도를 작성함으로써 제주도 토지이용, 지하수 활용, 심부 지질 활용에 대한 기반정

보를 구축하고 이를 토대로 체계적인 지하개발이 가능할 것으로 기대되며, 미래의 지하공간 활용을 대비함으로서 미래 신성장동력의 수요창출과 기회창출에 기여

□ 사업추진 방향

- 제주도 한라산 중심의 시추조사를 통한 한라산 형성 모델 개발
 - 한라산 중심의 시추조사를 통해 심부 기반암까지 지질시료 확보
 - 지질시료 화산암류/미고결 퇴적층 조사/ 형성 시기 및 환경 규명
 - 지표지질조사 및 지질도 제작/연대측정 활용기술 개발
- 제주도 동부지역 시추조사를 통한 제주도 동부 형성모델 개발
 - 제주도 동부 시추조사를 통해 심부 기반암까지 지질시료 확보
 - 지질시료 화산암류/미고결 퇴적층 조사/ 형성 시기 및 환경 규명
 - 동부지역 지표지질조사 및 지질도 제작/연대측정 활용기술 개발
- 제주도 서부지역 시추조사를 통한 제주도 서부 형성모델 개발
 - 제주도 서부 시추조사를 통해 심부 기반암까지 지질시료 확보
 - 지질시료 화산암류/미고결 퇴적층 조사/ 형성 시기 및 환경 규명
 - 서부지역 지표지질조사 및 지질도 제작/연대측정 활용기술 개발
- 제주도 형성 모델 통합 개발 및 지표지질정보 통합 모델 개발
 - 시추 정보 중심의 3차원 통합 모델 개발 및 제주 형성모델 제작
 - 지하공간 개발에 필요한 지반 정보 데이터 통합 모델 개발
 - 지하수 관리 시스템과 지하공간 개발 모델 통합

□ 연차별 투자계획

(백만원)

구 분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
제주도 미고결 퇴적층을 이용한 화산활동의 시기 및 환경 규명	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000

제 4 장 연구 결과의 활용계획

- 본 연구에서 검토된 제주도의 제4기퇴적층은 기존의 지질조사과정에서 조사된 지역과 본 연구 과정에서 새롭게 확인된 조사지역에 대한 연구결과를 포함한다. 이러한 연구결과와 가장 중요한 시사점은 제주도의 제4기퇴적층에 대한 연구가 아직까지 매우 초보적이거나 미진하여 제4기퇴적층의 형성환경과 시기에 대해 논의가 진전되기 위해서는 보다 많은 연구가 선행되어야 한다는 점이다.
- 특히 제주도의 형성시기부터 현재에 이르기까지의 기간은 제4기(Quaternary)에 해당되며 이 시기는 지질학적으로 급격한 환경의 변화를 동반하는 시기이다. 때문에 제주도의 연구는 기후환경의 변화와 관련한 접근이 매우 중요한데, 이러한 기록은 제주도에 분포하는 제4기퇴적층에서 찾을 수 있다.
- 따라서 지금까지 알려진 암석학적 연구와 더불어 제4기 동안의 제주도에서 일어나는 환경의 변화, 즉 기후 변화에 대한 연구가 필수적으로 요구된다. 이러한 점을 고려할 때 아래와 같은 연구결과와 활용이 기대된다.
 - 현재까지 알려진 화산활동의 최후기에 대한 연구를 발전시킬 수 있다.
 - 제주도의 제4기 후기 동안에 일어난 화산활동과 관련한 퇴적층의 기록을 통해 화산활동 휴지기 동안의 고환경 변화에 대한 정보를 제공할 수 있다.
 - 제주도의 퇴적층에 대한 다양한 연대 분석 방식을 활용할 수 있다.
 - 제주도의 환경 변화 해석에 필요한 다양한 프록시를 활용할 수 있다.
- 향후 본 연구결과를 통해 제주도에 분포하는 제4기퇴적층에 대한 추가적인 조사와 특히, 오름 등의 분출시기 분석 등은 제주도의 화산활동과 미래 제주의 안전을 위하여 매우 중요한 연구주제로 다루어질 필요가 있겠다.

제 5 장 참고문헌

- Ahn, U.S., Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ryu, C.K., Jeong, J.O. and Kang, C.W., 2015, Geochemical fingerprinting of basaltic glass in tephra deposits underlying the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Provenance of tephra and age of the human footprints. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 105-126 (in Korean with English abstract).
- Alvarado, G.E., Soto, G.J., Salani, F.M., Ruiz, P., de Mendoza, L.H., 2011, The formation and evolution of Hule and Río Cuarto maars, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 201, 342-356.
- Avellán, D.R., Macías, J.L., Pardo, N., Scolamacchia, T., Rodriguez, D., 2012, Stratigraphy, geomorphology, geochemistry and hazard implications of the Nejapa Volcanic Field, western Managua, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 213-214, 51-71.
- Bader, N.E., Nicolaysen, K.P., Lopez-Maldonado, R., Murray, K.E., and Mudd, A.C., 2015, Extensive middle Miocene weathering interpreted from a well-preserved paleosol, Cricket Flat, Oregon, USA. *Geoderma*, 2339-240, 195-205.
- Black, R.F., 1976, Periglacial features indicative of permafrost: Ice and soil wedges. *Quaternary Research*, 6, 3-26.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Németh, K., 2010, Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 931-950.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, *Volcanic Successions*. Allen and Unwin, London, 528 p.
- Cerling, T.E., Harris, J.M., MacFadden, B.J., Leakey, M.G., Quade, J., Eisenmann, V., and Ehleringer, J.M., 1997, Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature*, 389, 153-158.

- Chang, N.-K. and Lee, S.-K., 1983a. Studies on the Classification, Productivity and Distribution of C3, C4 and CAM Plants in Vegetations of Korea I. C3 and C4 type plants. *Korean Journal of Ecology* 6, 62-69.
- Chang, N.-K., and Lee, S.-K., 1983b. Studies on the classification, productivity and distribution of C3, C4 and CAM plants in vegetations of Korea: III. The distribution of C3 and C4 type plants. *Korean Journal of Ecology* 6, 128-141 (in Korean with English abstract).
- Chang, Y., 2013. Human activity and lithic technology between Korea and Japan from MIS 3 to MIS 2 in the late paleolithic period. *Quaternary International*, 308-309, 13-26.
- Cheong, C.-S., Jeong, Y.-J., Sohn, Y.K., Choi, M.S. and Park, B.-K., 2006. Introduction to sample preparation and thermal ionization mass spectrometry for ^{238}U - ^{230}Th dating of Quaternary volcanic rocks. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 455-465 (in Korean with English abstract).
- Cheong, C.S., Choi, J.H., Sohn, Y.K., Kim, J.C., Jeong, G.Y., 2007. Optical dating of hydromagmatic volcanoes on the southern coast of Jeju Island, Korea. *Quaternary Geochronology*, 2, 266-271.
- Cho, D.Y., Park, K-H., Jin, J.H. and Hong, W., 2005. Age Constraints on Human Footmarks in Hamori Formation, Jeju Island, Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.14, p. 149-156 (in Korean with English abstract).
- Choi, J-H., Cheong, C-S. and Chang, H-W., 2004. Principles of quartz OSL(Optically Stimulated Luminescence) dating and its geological applications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 567-583(in Korean with English abstract).
- Chung, C.-H., 2007. Vegetation response to climate change on Jeju Island, South Korea, during the last deglaciation based on pollen record. *Geosciences Journal*, 11, 147-155.
- Collatz, G.J., Berry, J.A., Clark, J.S., 1998. Effect of climate and atmospheric CO_2 partial pressure on the global distribution of C4 grasses: present, past, and future. *Oecologia* 114, 441-454.

- Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Lin, Y., Qing, J., An, Z., Revenaugh, J., 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters* 233, 71-86.
- Farquhar, G.D., O'Leary, M.H., Berry, J.A., 1982, On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration of leaves. *Australia Journal of Plant Physiology*, 9, 121-137.
- Fisher, D.A. and Koerner, R.M., 2002. 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.
- Fornaciai, A., Favalli, M., Karaton, D., Tarquini, S. and Boschi, E., 2012, Morphometry of scoria cones, and their relation to geodynamic setting: A DEM-based analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 217-218, 56-72.
- Gatti, E., Mokhtar, S., Talib, K., Rashidi, N., Gibbard, P. and Oppenheimer, C., 2013, Depositional processes of reworked tephra from the late pleistocene youngest Toba tuff deposits in the Lenggong valley, Malaysia. *Quaternary Research*, 79, 228-241.
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Saishu (Jeju) Island. *Bulletin of Geological Survey of Korea*. 10, 1-34 (in Japanese).
- Hong, S., Choi, J-H., Yeo, E-Y. and Kim, J-W., 2013, Principles of K-Feldspar IRSL (InfraRed Stimulated Luminescence) Dating and Its Applications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 305-324(in Korean with English abstract).
- Huang, Y., Shuman, B., Wang, Y., Webb, T., Grimm, E.C., Jacobson, G.L., 2006. Climatic and environmental controls on the variation of C3 and C4 plant abundances in central Florida for the past 62,000 years. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 237, 428-435.
- Huang, Y., Street-Perrott, F.A., Metcalfe, S.E., Brenner, M., Moreland, M., and Freeman, K.H., 2001, Climate change as the dominant control on

- glacial-interglacial variations in C3 and C4 plant abundance. *Science* 293, 1647-1651.
- Huang, Y., Street-Perrott, F.A., Metcalfe, S.E., Brenner, M., Moreland, M., and Freeman, K.H., 2001, Climate change as the dominant control on glacial-interglacial variations in C3 and C4 plant abundance. *Science*, 293, 1647-1651.
- Jaccard, S.L. and Galbraith, E.D., 2012. Large climate-driven changes of oceanic oxygen concentrations during the last deglaciation. *Nature Geoscience* 5, 151-156.
- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R. and Zhang, D., 2007. Paleoclimate. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jeju Cultural Heritage Institute, 2014, The brief excavation report of the cultural sites at Oedo-dong for construction of a Jeju sports center for disabled people (in Korean).
- Jeong, G.Y., Choi, J.-H., Lim, H.S., Seong, C. and Yi, S.B., 2013, Deposition and weathering of asian dust in paleolithic sites, Korea. *Quaternary Science Reviews*, 78, 283-300.
- Jo, K., Woo, K.S., Yi, S., Yang, D.Y., Lim, H.S., Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., 2014. Mid-latitude interhemispheric hydrologic seesaw over the past 550,000 years. *Nature* 508, 378-382.
- Kim, J.C., Duller, G.A.T., Roberts, H.M., Wintle, A.G., Lee, Y.I. and Yi, S.B., 2010, Re-evaluation of the chronology of the palaeolithic site at Jeongokri, Korea, using OSL and TT-OSL signals from quartz. *Quaternary Geochronology*, 5, 365-370.
- Kim, J.C., Eum, C.H., Yi, S. and Lim, J-S., 2011, Evaluation of the

- possibility of OSL application to the exposed sediments core. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 707-713 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.Y., Yang, D.Y., Nahm, W.H., Yi, S.H., Kim, J.C., Hong, S.-S., Yun, H.-S., Lee, J.Y., Kim, J.-K., Oh, K.-C. and Choi, D.-W., 2008, Last Glacial and Holocene fluvial wetland sedimentary stratigraphy: Comparison between Soro-ri and Jangheung-ri archeological sites, Korea. Quaternary International, 176-177, 135-142.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidence of the presence of old continental basement in Cheju volcanic island, South Korea, re-vealed by radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. Geochemical Journal, 36, 421-441.
- Kim, Y.S. and Choi, S.H., 2012, Plagioclase-rich nodules in Taeheungri basalt from Namwon, Jeju Island and its implications for tholeiitic magmatism. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 313-324 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.-B., 2010a, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (II): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute ages of the Volcanic Rocks in Gapado-Marado, Jeju Island. Economic and Environmental Geology, 43, 53-66 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.B., 2010b, The study on geology and volcanism in Jeju Island (III): early lava effusion records in Jeju Island on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of lava samples. Economic and Environmental Geology, 43, 163-176 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.B., Kang, B.-R., Kim, G.-P. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. (unpublished Ph.D. thesis), Pusan National University, Pusan, 326 p (in Korean with English abstract).

- Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 41, 93-113 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.-R., Kim, G.-P., and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, K.H., Park, J.B. and Park, W.B., 2008, Interpretation on volcanic activities in Biyangdo, western Jeju Island. *Annual conference of the Geological Society of Korea (Abstracts)*, Jeju, 27-28 (in Korean, title translated).
- Koh, G.W., Park, Y.S. and Park, W.B., 2004, Subsurface stratigraphy and ^{40}Ar - ^{39}Ar absolute age in the eastern area of Jeju Island. *Volcanic rocks and Volcanic activities in Jeju Island. Field Trip Guide, Spring Excursion of the Geological Society of Korea*, Jeju, 29-50 (in Korean, title translated).
- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Hong, H.-C., 2005a, Morphology and petrology of Jisagae columnar joint on the Daepodong basalt in Jeju Island, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 14, 212-225 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.-S., Yun, S.-H., Hyeon, G.B., Lee, M.W. and Gil, Y.-W., 2005, Petrology of the basalt in the Udo mono- genetic volcano, Jeju Island. *Journal of Petrological Society of Korea*, 14, 45-60 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.S., Yun, S.H. and Kang, S.S., 2003, Petrology of the volcanic rocks in the Paekrogdam crater area, Mt. Halla, Jeju Island. *Journal of Petrological Society of Korea*, 12, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.Y., Yun, S.K., Kim, J.Y. and Kim, Y.J., 1988, Quaternary geology of the Jeju Island. *Korea Institute Energy & Resources Rpt 87-29*, 233-278 (in Korean).
- Lee, J.-Y., Kim, J.C., Lim, J., Hong, S.S. and Kho, J., 2015, The formation

- age of the soil wedges developed in the Quaternary deposits in Oedo-dong, Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 51, 605-610(in Korean with English abstract).
- Lee, J-Y., Kim, J.C., Park, J.B., Lim, J., Hong, S.S. and Choi, H., 2014, Age of volcanic activity from Quaternary deposits in Sangchang-ri, Jeju island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 697-706(in Korean with English abstract).
- Lee, J.H. and Yun, S.H., 2012, Morphological analysis of Quaternary monogenetic volcanoes in Jeju island. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 383-400 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Kim, J.C., Park, J.B., Lim, J., Hong, S.S. and Choi, H.W., 2014, Age of volcanic activity from Quaternary deposits in Sangchang-ri, Jeju island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. 50, 697-706 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W., 1982, Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea. Sci Rep., Tohoku Univ., Ser., 315, 521-541.
- Lee, M.W., 1994, Formation History and geologic structures of Jeju Volcanic Island. Symposium of environmental conservation, development and use of ground- water resources in Jeju Island (Abstracts), Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Jeju, 54-74 (in Korean, title translated).
- Lee, M.W., Won, J.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S., 1994, Stratigraphy petrology of volcanic rocks in southern Cheju island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 30, 521-541 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-K. and Chang, N.-K., 1983. Studies on the Classification, Productivity and Distribution of C3, C4 and CAM Plants in Vegetations of Korea II. Production and Productivity of C3 and C4 type plants. Korean Journal of Ecology 6, 114-127.
- Lee, S.H., Lee, Y.I., Yoon, H.I. and Yoo, K.C., 2008, East Asian monsoon variation and climate changes in Jeju Island, Korea, during the latest

- Pleistocene to early Holocene. *Quaternary Research*, 70, 265-274.
- Lim, J. and Fujiki, T., 2011, Vegetation and climate variability in East Asia driven by low-latitude oceanic forcing during the middle to late Holocene, *Quaternary Science Reviews*, 30, 2487-2497.
- Lim, J., Lee, J.-Y., Kim, J.C., Hong, S.S. and Choi, H., 2015, Paleoenvironmental and volcanologic implications of the Gosan Formation in Jeju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 537-544(in Korean with English abstract).
- Lim, J., Matsumoto, E. and Kitagawa, H., 2005, Eolian quartz flux variations in Cheju Island, Korea, during the last 6500 yr and a possible Sun-moon linkage. *Quaternary Research*, 64, 12-20.
- Lim, J., Nahm, W.-H., Kim, J.-K., Yang, D.-Y., 2010, Regional climate-driven C3 and C4 plant variation in the Cheollipo area, Korea, during the late Pleistocene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 298, 370-377.
- Linsley, B.K., 1996, Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150,000 years. *Nature*, 380, 234-237.
- Liu, J.P., Milliman, J.D., Gao, S., Cheng, P., 2004, Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. *Marine Geology*, 209, 45-67.
- Liu, W.G., Feng, X.H., Ning, Y.F., Zhang, Q.G., Cao, U.N., and An, Z.S., 2005, $\delta^{13}C$ variation of C3 and C4 plants across an Asian monsoon rainfall gradient in arid northwestern China. *Global Change Biology*, 11, 1094-1100.
- Lowe, D. J., 2011, Tephrochronology and its application: A review. *Quaternary Geochronology*, 6, 107-153.
- Manville, V., Németh, K. and Kano, K., 2009, Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcanoclastic processes, deposits, and hazards. *Sedimentary Geology*, 220, 136-161.

- Marques, R., Prudencio, M.I., Waerenborgh, J.C., Rocha, F., Dias, M.I., Ruiz, F., Ferreira da Silva, E., Abad, M. and Munoz, A.M., 2014, Origin of reddening in a paleosol buried by lava flows in Fogo island(Cape Verde). *J. Afr. Earth Sci.* 96, 60-70.
- Meyers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of palaeoceanographic, palaeolimnologic, and palaeoclimatic processes. *Organic Geochemistry* 27, 213-250.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Németh, K., 2010, Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 931-950.
- O'Leary, M.H., 1981, Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry*, 20, 553-567.
- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G.W., Yun, H. and Lee, J.-D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 181-194 (in Korean with English abstract).
- Park, J. and Park, J., 2015, Pollen-based temperature reconstructions from Jeju island, South Korea and its implication for coastal climate of East Asia during the late Pleistocene and early Holocene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 417, 445-457.
- Park, J., Lim, H.S., Lim, J., Yu, K.B., Choi, J., 2014a, Orbital- and millennial-scale climate and vegetation changes between 32.5 and 6.9 ka BP from Hanon Maar paleolake on Jeju Island, South Korea. *Journal of Quaternary Science*, 29, 570-580.
- Park, J., Lim, H.S., Lim, J., Park, Y.-H., 2014b, High-resolution multi-proxy evidence for millennial- and centennial-scale climate oscillations during the last deglaciation in Jeju Island, South Korea. *Quaternary Science Reviews*, 105, 112-125.
- Park, J.B. and Kwon, S.T., 1996, Tholeiitic volcanism in Cheju Island, Korea.

- 5, 66-83 Journal of Petrological Society of Korea, 5, 66-83 (in Korean with English abstract).
- Park, J.B., Park, K.H. and Cheong, C.S., 1996, Sr-Nd-Pb Isotopic compositions of lavas from Cheju Island, Korea. Journal of Petrological Society of Korea, 5, 66-83 (in Korean with English abstract).
- Park, J.B., Park, K.H., Cho, D.L. and Koh, G.W., 1999, Petrochemical classification of the Quaternary volcanic rocks in Cheju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 253-264 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000, Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.-C., Cho, B.-W., Jang, Y.N., Lee, B.-J., Lee, S.-R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U., 2000b, Geologic report of the Segwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Koh, D.C., Kim, Y.C., Moon, S.H., Seong, K.S., Shin, J.H., Yum, B.U., Jeon, C.M., Chae, K.T., Hwang, S.H., Kim, G.Y., Kim, Y.J., Kim, T.H., Park, I.H., Park, K.K., Ahn, J.S., Lee, B.J., Cho, S.Y. and Ha, K.C., 2008, Integrated analysis of groundwater occurrence in Jeju. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2007-009-04-2008(2), 365 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju-Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Kim, J.C., Cho, D.L., Lee, S.R., Park, D.W., Lee, S.R., Choi, Y.S., Yeum, D.Y., Kim, J.Y., Seo, J.Y. and Shin, H.M., 2000c, Geologic report of the Jeju (including Baekado-Jinnampo) Sheet

- (1:250,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 59 p (in Korean with English abstract).
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., PÉpin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.
- Riedel, C., Ernst, G.G.J. and Riley, M., 2003. Controls on the growth and geometry of pyroclastic constructs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127, 121-152.
- Risebrobakken, B., Dokken, T.M. and Jansen, E., 2005. Extent and variability of the meridional Atlantic circulation in the eastern Nordic seas during marine isotope stage 5 and its influence on the inception of the last glacial. In: Drange, H., et al. (eds.), *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*. Geophysical Monographs Vol. 158, American Geophysical Union, Washington, DC, USA.
- Rodriguez-Gonzalez, A., Fernandez-Turiel, J.L., Perez-Torrado, F.J., Hansen, A., Aulinas, M., Carracedo, J. C., Gimeno, D., Guillou, H., Paris, R. and Paterne, M., 2009, The Holocene volcanic history of Gran Canaria island: Implications for volcanic hazards. *Journal of Quaternary Science*, 24, 697-709.
- Sameshima, T., Ogawa, T. and Kashima, N. (1988) 5th International Symposium on Vulcanospeleology Excursion Guide Book, Tokyo, Japan, 80p.
- Schefuß, E., Schouten, S., Jansen, J.H.F., Sinninghe Damsté, J.S., 2003, Africa vegetation controlled by tropical sea surface temperatures in the mid-Pleistocene period. *Nature*, 422, 418-421.
- Settle, M., 1979, The structure and emplacement of cinder cone fields. *American Journal of Science*, 279, 1089-1107.
- Sheldon, N.D., 2003, Pedogenesis and geochemical alteration of the Picture Gorge subgroup, Columbia River basalt, Oregon. *Geological Society of*

- America Bulletin, 115, 1377-1387.
- Shin, J.-B., Naruse, T. and Yu, K.-Y., 2005, The application of loess-paleosol deposits on the development age of river terraces at the midstream of Hongcheon river. Journal of the Geological Society of Korea, 41, 323-333 (in Korean with English abstract).
- Sohn, Y. K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island. Korea. Geosciences Journal, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W., 2002, Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 119, 1-20.
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydrovolcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. Sedimentology, 55, 899-924.
- Son, I.S., Lee, M.W. and Youn, J.S., 1998, The subsurface stratigraphy of Cheju volcanic island, Korea. Journal of the Korean Earth Science Society, 19, 581-589 (in Korean with English abstract).
- Song, S.T., 2000, Distributions and Lithology of the Aa Rubble Flows in Cheju Island, Korea. PhD dissertation, department of geology, graduate School, Pusan National University, 118p.
- Song, S.T., 2003, Lavas in Gotjawal Terrain, Jeju Island, Korea No. 4. Byeongak Gotjawal Lava. The journal of basic sciences Cheju national university, 16, 57-63 (in Korean with English abstract).
- Stewart, G.R., Turnbull, M.H., Schmidt, S., and Erskine, P.D., 1995, 13C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: a biological integrator of water availability. Australian Journal of Plant Physiology, 22, 51-55.
- Suchodoletz, H.v., Blanchard, H., Hilgers, A., Radtke, U., Fuchs, M., Dietze M. and Zöller, L., 2012, TL and ESR dating of middle pleistocene lava flows on Lanzarote island, Canary islands (Spain). Quaternary

- Geochronology, 9, 54-64.
- The Korean speleological society, 1990, History of 'Billemot Cave' that officially recognized as the world's longest known lava cave. Journal of the Korean speleological society, 22, 97-108 (in Korean).
- Tieszen, L.L., 1991, Natural variations in the carbon isotope values of plants: Implications for archaeology, ecology, and paleoecology. Journal of Archaeological Science, 18, 227-248.
- Ueno, O. and Takeda, T., 1992, Photosynthetic pathways, ecological characteristics, and the geographical distribution of the Cyperaceae in Japan. Oecologia, 89, 195-203.
- Valentine, G.A. and Gregg, T.K.P., 2008, Continental basaltic volcanoes-processes and problems. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 177, 857-873.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J.C., McManus, J.F., Lambeck, K., Balbon, E. and Labracherie, M., 2002. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. Quaternary Science Reviews 21, 295-305.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Chen, C.-C., Dorale, J.A., 2001. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. Science 294, 2345-2348.
- Won, C.-K., Lee, M.-W., Yun, S.-H. and Ko, B.-K., 1998, Geochemical Characteristics of the volcanic rocks in Pyoseon Area, Southeast Cheju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 34, 172-191 (in Korean with English abstract).
- Won, C.K., 1976, Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 12, 207-226 (in Korean with English abstract).
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, Y.K., 1993, Explanatory text of the geological map of Sungsan Sheet (1:50,000), Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 104 p (in Korean, title translated).
- Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W., 1986,

- Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju island, Korea. Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 19, 25-33.
- Yokoyama, Y., Lambeck, K., De Deckker, P., Johnston, P. and Fifield, L.K., 2000. Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. Nature 406, 713-716.
- Yoon, S., Hyun, W.H. and Jung, C.Y., 2005, Geology of Hallasan (Mt. Halla), Jeju Island, Journal of the Geological Society of Korea. 41, 481-497 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S., Jung, C.Y., Hyun, W.H. and Song, S.T., 2014, Tectonic history of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 457-474(in Korean with English abstract).
- Yoon, S.-H., Lee, B.-G. and Shon, Y.K., 2006, Geomorphic and geological characteristics and eruption process of the Hanon volcano, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Yu, H., Liu, Z., Berné, S., Jia, G., Xiong, Y., Dickens, G.R., Wei, X., Liu, J.P., Chen, F., 2009. Variations in temperature and salinity of the surface water above the middle Okinawa Trough during the past 37 kyr. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 281, 154-164.
- Yun, S.H., 2004, The volcanic sequences of Jeju volcano: General. The second international symposium of Jeju volcanological institute (Abstracts), Jeju, 17-29.
- Yun, S.K., Han, D.S., and Lee, D.Y., 1987, Quaternary geology in the southern part of Jeju Island. Korea Institute Energy & Resources Rpt KR-86-2-(B)-2, 64 p (in Korean).
- Zhang, Z.H., Zhao, M.X., Lu, H.U., Faiia, A.M., 2003, Low temperature as the main cause of C4 plant declines during the glacial periods on the Chinese Loess Plateau. Earth and Planetary Science Letters, 214, 467-481.

주 의

1. 이 보고서는 한국지질자원연구원에서 시행한 자체 연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국지질자원연구원의 자체연구사업 보고서임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.