



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

박 경 교수 지도

석사학위 청구논문

자화율을 이용한 홀로세 동안  
한반도의 기후환경변화 연구

2016

성신여자대학교 대학원

지리학과

최지은

자화율을 이용한 홀로세 동안  
한반도의 기후환경변화 연구

박 경 교수 지도

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2015년 11월

성신여자대학교 대학원

지리학과

최지은

# 인 준 서

최지은의 석사학위 논문으로 인준함

2015년 11월

심사위원장.....(서명 또는 인)

심 사 위 원.....(서명 또는 인)

심 사 위 원.....(서명 또는 인)

성신여자대학교 대학원

## 논문 개요

미래의 기후변동에 대한 연구를 위한 기초 자료로서 고기후환경변화복원 연구는 매우 중요하다. 한반도의 고기후 및 환경변화에 대한 연구들이 진행되고 있으나 그 수가 적으며 주된 연구방법이 화분분석으로 한정되어 있다. 화분분석의 경우 분석 대상에 남아 있는 대리자(proxy)의 양이 매우 적기 때문에 분석에 어려움이 있다. 주로 또한 화분이 퇴적물에 남아있기 위해서는 습지나 호수퇴적물과 같은 저온다습하며 산소공급이 차단된 환경이 필요하나 온대기후인 우리나라의 호수퇴적물들은 물의 역전현상으로 인해 연속적인 퇴적물을 얻기가 어렵다는 단점이 있다.

이와 같은 한계를 극복하기 위하여 본 연구는 기존에 거의 실시되지 않은 자기적 분석을 통해 홀로세 기간동안 한반도의 고기후환경변화를 복원하고자 하였다. 이전의 연구에서 기후 지표로서의 정확성과 강우량과의 연결성이 확인된 자기적 변수인 질량 자화율과 주파수 의존률을 이용하여 분석하였다.

연구지역은 제주 김녕사구, 운여해안사구, 강릉 안인사구, 양양 여운포사구로 선정하였다. 연구 방법은 각 연구 지역을 대상으로 샘플을 채취하여 Bartington사의 MS2B 센서와 MS3 미터를 통하여 질량 자화율과 주파수 의존률을 측정하였다. 또한 동아시아 지역 중 홀로세 동안 중국의 고기후환경변화 자료를 이용하여 비교 분석하였다.

연구결과는 김녕사구, 운여해안사구의 고토양층에서 질량 자화율의 뚜렷한 증가와 피크를 확인하였고 주파수 의존률을 통해 고토양층에서 초상자성 자성물질의 존재를 확인하였으며 이를 통해 고토양층이 퇴적될 당시 온난습윤하고 토양형성과정이 진행될 만큼 안정한 기후조건이었음을 확인할 수 있었다. 강릉 안인사구와 양양 여운포사구의 경우 연대가 오래되지

않았기 때문에 다양한 퇴적물 공급원에 영향을 받아 낮은 주파수 의존률을 보이는 것으로 추정된다. 또한 중국의 고기후환경변화 자료와 비교한 결과, 본 연구 결과에서 홀로세 기후 최적기를 뚜렷하게 확인할 수 있었으며 기후변화 추세가 비슷함을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 자기적 변수가 고기후환경변화 복원에 유용한 지표임을 확인하였다.

본 연구는 샘플을 채취한 각 지점별로 연대측정을 실시하지 못했다는 점과 본 연구에서 사용한 자화율과 주파수 의존률 외 다른 자기적 변수들을 이용하지 못했다는 한계점이 있다. 그러나 자화율 측정 시 무게와 질량을 표준화하여 정확한 질량 자화율 값을 얻었으며 표준화를 통해 다른 지역의 질량 자화율 값과 비교분석할 수 있다는 점과 주파수 의존률을 이용하여 초상자성 물질을 확인함을 통해 고기후환경변화 분석에 정확성을 높였다는 점에서 의의가 있다.

# 목 차

## 논문 개요

I. 서론	1
II. 선행연구 및 이론적 배경	5
1. 한반도 홀로세 환경변화	5
2. 이론적 배경	10
1) 자화율과 자성물질	10
2) 주파수 의존률	18
3) 토양에서의 자성물질과 기후와의 연관성	20
4) 중국의 홀로세의 기후환경변화 복원 연구	25
III. 연구 지역 및 연구 방법	30
1. 제주 김녕사구	33
2. 서해안 운여해안사구	37
3. 강릉 안인사구 및 양양 여운포 사구	40

IV. 연구 결과	43
1. 제주 김녕사구 분석 결과	43
2. 서해안 운여해안사구 분석 결과	47
3. 강릉 안인사구 및 양양 여운포 사구 분석 결과	50
4. 중국의 홀로세 기후변화 결과와 비교	54
V. 결론 및 논의	56

참 고 문 헌

Abstract

부 록

## 표 목 차

표 1. 한반도 홀로세 동안 고기후환경변화에 관한 선행연구.....	6
표 2. 자기적 행동에 따른 물질의 종류와 질량 자화율 값.....	13
표 3. 주파수 의존률 값에 따른 초미립 자성광물의 양.....	20

## 그림 목 차

그림 1. 환경물질과 광물들의 종류별 자화율 값.....	15
그림 2. 자철석 입자 크기에 따른 질량 자화율과 주파수 의존률의 변화.....	17
그림 3. 토양생성 자화율과 연 강우량의 관계.....	22
그림 4. 홀로세 동안 중국에 영향을 미친 여름 몬순 강우의 시공간적 분포.....	27
그림 5. 중국의 위도별 기후복원 결과.....	28
그림 6. 측정에 사용된 MS2B 센서와 MS3 미터(좌) 샘플용기(우) .....	31
그림 7. 연구지역 지도.....	32
그림 8. 김녕 사구 지형도.....	33
그림 9. 김녕 사구 모습.....	35
그림 10. 김녕 사구에서 샘플 채취하는 모습.....	36
그림 11. 운여 해안사구 지형도.....	37
그림 12. 운여 해안사구 모습 .....	39
그림 13. 운여 해안사구 단면(좌: UY1, 우: UY2).....	39
그림 14. 강릉 안인사구 지형도.....	41
그림 15. 양양 여운포사구 지형도.....	42
그림 16. 김녕 사구 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프 .....	43
그림 17. UY1 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프 .....	48
그림 18. UY2 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프 .....	49
그림 19. 안인 사구 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프 .....	51
그림 20. 여운포사구 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프 .....	53
그림 21. 김녕 및 운여해안사구 질량자화율과 그린란드 GISP 2의 O <sup>18</sup> 값.....	55

## I. 서론

미래의 기후변동에 대한 연구를 위해 과거의 기후변화를 연구하는 것은 매우 중요하며, 고기후 복원 자료들은 미래의 기후변동 분석에 대해 정량적인 기초자료를 제공한다. 또한 홀로세 기후 최적기(Holocene climate optimum) 또는 힉시서멀(hypsithermal)은 현재와 비교하여 기온이 2~3°C 높았으며 강수량도 10~15% 정도 많았던 시기로, 이 시기의 기후 및 환경에 대한 특성을 이해하는 것은 앞으로 미래의 기후변화연구에 있어 중요하다. 과거의 한반도의 기후 및 환경변화를 복원하여 한반도 기후환경변화의 모델을 만드는 것은 미래의 기후변화에 대한 연구에 필요한 기초 자료를 제공한다. 지금까지 한반도의 고기후 및 환경변화에 대한 연구들이 진행되어 왔지만, 한반도 과거 기후변화에 대한 기준이 되는 모델을 만들기에는 그 수가 적고 아직 밝혀지지 않은 부분이 많다. 그러므로 앞으로 다양한 분야에서 여러 분석방법들을 이용한 연구가 필요하다.

제4기 기후환경변화 복원에 이용되는 분석 대상은 오랜 시간동안의 기후변화기록을 보존하고 있는 나무의 나이테, 산호초, 해양퇴적물, 빙하, 육상퇴적물이 있다. 먼저 분석 대상으로서 침식 지형은 형성되는 과정에서 과거의 기록이 제거되는 과정을 겪기 때문에 고기후환경변화 복원에 적합하지 않다. 그러므로 과거의 기록이 잘 보존되고 축적되어온 퇴적지형을 대상으로 고기후환경변화에 대한 연구가 진행된다.

지금까지 가장 많이 이용되어 온 빙하퇴적물과 융기된 산호초는 한반도에 존재하지 않기 때문에 분석대상이 될 수 없다. 해양퇴적물은 연속적으로 오랜 기간 동안 퇴적되어 고기후변화 및 환경복원에 유용하며 활발히 연구되고 있다. 그러나 바다 한 가운데서 코어를 시추해야 하므로 접근성이 낮고 고비용의 문제가 있다. 해양퇴적물에 관한 연구는 현재 중국을 중심으로 황

해바다 해양퇴적물을 대상으로 한 연구가 집중되고 있다<sup>1)</sup>.

나무의 나이테 분석은 나무가 성장하는 기간 동안 형성된 나이테의 폭을 대상으로 하며, 탄소연대측정에 대한 보정 값으로도 이용되고 있다. 나무의 나이테는 매년 만들어지기 때문에 연 단위의 기후정보를 비교적 정확하게 알 수 있다는 장점이 있다. 최근 산림과학원에서는 경북 울진 소광리와 충남 태안 안면도 지역의 소나무를 대상으로 한 연구를 통해 나이테 연대기 (tree-ring chronology)를 작성하였다. 나무가 자라온 기간의 강수량, 습도, 온도변화와 정확한 절대연도를 통해 기후변화에 대한 신뢰도를 높였다. 이를 바탕으로 산림과학원에서는 2020년까지 우리나라 전국을 대상으로 나이테 연대기를 작성할 예정이다. 그러나 미국과 독일 등 나이테 연구가 이루어진 나라들과 달리 한반도에서는 고기후환경변화 복원에 이용할 만큼 오래된 나무 샘플을 찾기 어렵다는 단점이 있다.

육상퇴적물 중 고기후환경변화 복원에 이용되는 대상은 호수퇴적물, 하천퇴적물, 동굴퇴적물, 퇴스(loess)퇴적층, 사구퇴적물 등이 있다. 호수퇴적물의 경우, 우리나라와 같은 온대기후에서는 계절에 따라 물의 역전 현상으로 인해 퇴적물이 역전되므로 연속적으로 축적된 퇴적물을 얻기 어렵다는 단점이 있다. 동굴퇴적물은 연생장선을 통해 연속적이고 비교적 오랜 기간의 자료를 얻을 수 있지만 대부분이 천연기념물로 지정되어 보호받고 있어 분석할 대상을 채취하기 어려우며 접근성이 낮다. 퇴스퇴적물에 대한 연구는 일부 퇴스로 추정되는 퇴적층을 대상으로 연구가 진행되고 있다<sup>2)</sup>.

- 
- 1) Zheng, Y., Kissel, C., Zheng, H. B., Laj, C., Wang, K., 2010, Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: Magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications, *Marine Geology* 268, 34-42; Liu, J. P., Milliman, J. D., Gao, S. and Cheng, P., 2004, Holocene development of the yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea, *Marine Geology*, 209, 45-67; Xiang, R., Yang, Z., Saito, Y., Fan, D., Chen, M., Guo, Z. and Chen, Z., 2008, Paleoenvironmental changes during the last 8400 years in the southern Yellow Sea: Benthic foraminiferal and stable isotopic evidence, *Marine Micropaleontology*, 67, 104-119.
  - 2) 황상일·강창혁·윤순옥, 2011, 경남 거창분지 정장리 퇴스-고토양 연속층의 퇴적물 특성과

사구퇴적물은 다른 분석대상에 비해 접근성이 좋으며 오랜 기간 동안 연속적으로 퇴적되어왔기 때문에 한반도의 고기후환경변화를 복원하는데 있어 유용하다<sup>3)</sup>. 본 연구는 고기후환경변화에 대한 여러 분석 대상 중 사구퇴적물을 연구 대상으로 이용하였다.

이러한 분석 대상속의 대리자(proxy)들은 기후변화에 대한 자료를 제공한다<sup>4)</sup>. 제4기 퇴적물을 이용하여 고기후 환경복원을 위한 정량적 분석방법은 화분분석, 식물규산체분석, 구조분석, 지화학 분석, 자화율분석, 화산재분석, 퇴스 분석등이 있다.

한반도를 대상으로 기존의 연구는 주로 화분분석을 위주로 진행되어 왔으나 화분분석을 포함한 구조분석, 식물규산체 분석은 분석 대상에 남아 있는 대리자(proxy)의 양이 매우 적기 때문에 분석에 어려움이 있다. 식물 화석 대리자 중 화분과 포자는 식물 화석의 다른 분석들 중에서는 화학적으로 안정적이며 풍부한 양을 가지고 있지만, 분석 대상물의 양에 비해 차지하는 화분의 양은 매우 적기 때문에 분석에 어려움이 있다. 또한 화분이 퇴적물에 남아있기 위해서는 습지나 호수퇴적물과 같은 저온다습하며 산소공급이 차단된 환경이 필요하나 앞서 언급한 바와 같이 우리나라의 호수퇴적물들은 물의 역전현상으로 인해 연속적인 퇴적물을 얻기가 어렵다는 단점이 있다.

---

편년, 대한지리학회지, 46(1), 1-19; 박충선·윤순옥·황상일, 2007, 전북 부안 화강암지역 퇴스-고토양 연속층의 퇴적물 특성과 기원지, 대한지리학회지, 42(6), 898-913; 박충선·윤순옥·황상일, 2014, 강릉시 불화산 일대 퇴스 퇴적층의 형성 과정과 퇴적 환경, 한국지형학회지, 21(3), 49-61.

3) 박 경·박지훈, 2011, 충남 부여지역의 홀로세 기후변화-탄소동위원소분석과 대자율분석을 이용하여, 대한지리학회지, 46(4), 396-412; 황상일 등, 2011, op. cit, 1-19; 신영호, 2011, 하구역 퇴적물의 대자율 변화와 기후변화의 연관성, 한국지역지리학회지, 17(5), 521-535; 신영호, 2015, 하구역 간석지 퇴적물 자화율의 통합과 주기성 검토, 한국지역지리학회지, 21(3), 593-607.

4) Burroughs, W.J., 2005, Climate change in prehistory-the end of the reign of chaos, Cambridge university press.

이에 비해 자화율 분석은 앞선 연구들에 의해 기후 대리자(proxy)로서의 연결성과 분석의 유용성이 확인되어왔다<sup>5)</sup>. 이에 본 연구는 홀로세 동안 한반도의 고기후환경이 어떻게 변화하였는지를 복원하기 위하여 사구퇴적물을 분석대상으로 하여 질량 자화율과 주파수 의존률을 이용하여 정량적 분석을 하였으며 중국의 연구 결과와의 비교를 통해 분석 하였다.

---

5) Maher, B.A., Alekseev, A., Alekseeva, T., 2003, Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 201, 321-341; Maher, B.A., MengYu, H., Roberts, H.M., Wintle, A.G., 2003, Holocene loess accumulation and soil development at the western edge of the Chinese Loess Plateau: implications for magnetic proxies of paleorainfall, *Quaternary Science Review*, 22, 445-451; Fang, X., Ono, Y., Fukusawa, H., Bao-Tian, P., Li, J., Dong-Hong, Guan., Oi, K., Tsukamoto, S., Torii, M., Mishima, T., 1999, Asian summer monsoon instability during the past 60,000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau, *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 219-232.

## II. 선행 연구 및 이론적 배경

### 1. 한반도 홀로세 기후환경변화

제4기(Quaternary)는 마지막 지질시대로, 약 200만 년 전부터 지금까지의 시대를 말하며 플라이스토세(Pleistocene Epoch)와 홀로세(Holocene Epoch)로 나뉜다. 그 중 홀로세는 약 1만 년 전에 시작되어 현재까지의 시대를 말한다. 한반도에서 홀로세 시기동안 고기후환경변화에 대한 연구들을 표로 정리하였다(표 1).

우리나라에서 고기후환경변화에 대한 연구는 주로 화분분석을 통해 이루어졌다. 화분분석으로 기후환경변화가 밝혀진 시기는 28,000yrBP<sup>6)</sup>부터 현재까지이며 연대측정방법은 주로 탄소연대측정을 이용하였으며 박지훈·박경(2009)은 OSL 연대측정방법을 이용하였다<sup>7)</sup>. 목본 식생과 초본 식생의 화분 출현율을 통해 기후환경을 추정하였다.

---

6) yrBP : year Before Present

7) 박지훈·박 경, 2009, 화분분석으로 본 제주도 김녕사구 일대의 후빙기 중기 이후 환경변화, 한국지형학회지, 16(1), 43-55.

표 1. 한반도 홀로세 동안 고기후환경변화에 관한 선행연구

	논문	연구시기	연구 지역	지형	연대측정방법
화분 분석	박지훈·박경 (2009)	6,180yrBP~현재	제주 김녕사구	해안사구	OSL
	정철환·오강호 (2010)	9,400yrBP~2,500yrBP	제주 서귀포시 한남리	중산간지역	탄소연대
	전창표 등(2009)	10,638yrBP~4,807yrBP	경기도 평택시 현덕면 황산리	낮은 구릉지	탄소연대
	윤순옥 등(2002)	5,000yrBP~현재	경기도 김포시 고촌면 신곡리	충적 평야	탄소연대
	윤순옥 등(2013)	1,700yrBP~현재	강원도 인제군 점봉산 고산습지	고산습지	탄소연대
	윤순옥 등(2008)	5,150yrBP~현재	강원도 강릉시 경포호	석호	탄소연대
	김혜령 등(2007)	23,000yrBP~8,000yrBP	충청남도 천안시 성정동	충적 평야	탄소연대
	이상현 등(2004)	6,000yrBP~현재	전라북도 고창군 용두리	해안가	탄소연대
	윤순옥·황상일 (2009)	3,000yrBP~현재	대구시 남구 유천동 월배지역, 북구 구암동 칠곡지역	배후습지	탄소연대
	정철환·류춘길 (2012)	8,000yrBP~4,000yrBP	김해 낙동강 삼각주	삼각주	탄소연대
구조 분석	이상현 등(2005)	2,300yrBP~	일산 이산포 근처 평야	평야	탄소연대

유기 지화학 분석	남옥현·임재수 (2011)	8,550yrBP~현재, 7,730yrBP~현재 9,980yrBP~1,330yrBP	경기 파주시 운정동, 충남 태안군 소원면 의향리	계곡, 습 지	탄소연 대
	정혜경 등(2010)	6,600yrBP~210yrBP	인천 중구 운 서동	낮은 구 릉지	탄소연 대
	정혜경·김정빈 (2012)	10,000yrBP~4,370yrBP	경남 남강과 관문천 합류지 역	충적 평 야	OSL, 탄 소연대
자화 율 분석	박경·박지훈 (2011)	8,400yrBP~현재	충남 부여군 가탑리 일대	선상지	탄소연 대
	황상일 등(2011)	119,000yrBP~현재	경남 거창군 거창읍 거창분 지	분지-퇴 스퇴적층	OSL
	신영호(2011)	40ka~0.04ka	충남 모산만 하구역	하구역	OSL
	신영호(2015)	16.8ka~0.06ka	충남 모산만 하구역	하구역	OSL

자화율을 이용한 고기후환경변화에 대한 분석으로, 박경·박지훈(2011)은 충남 부여군 가탑리 일대 선상지를 대상으로 8,400yrBP부터 현재까지를 복원하였다. 연구지역을 대상으로 이전에 분석된 층상해석 및 지형분석 자료, 화분분석 자료를 바탕으로 탄소동위원소비와 자화율 분석을 실시하였다. 자화율 분석으로 통해 최대치가 나타난 시기동안 온난습윤한 기후환경이었고 토양화 작용이 일어난 구릉사면의 퇴적물이 선상지로 유입되었음을 확인하였다. 황상일 등(2011)은 경남 거창군 거창읍 거창분지에서 퇴스 퇴적층으로 추정되는 지역을 대상으로 119,000yrBP부터 현재까지의 퇴적환경과 기후환경 변화를 복원하였다. 충남 모산만 하구역의 퇴적층을 대상으로 자화율을 이용한 고기후환경변화를 분석한 연구에서는 40ka ~ 0.04ka까지의 퇴적환경과 기후환경 변화를 복원하였다<sup>8)</sup>.

자화율 분석은 고기후환경복원 뿐만 아니라 퇴적물 기원지나 퇴적환경을 추정하는 연구에도 이용되어 왔다. 박지훈·박경(2010)은 충남 천안 구룡천 하류부 안골유역에서 최종빙기 이후의 구릉 사면에서 기원한 사면물질이동 내력을 밝혔다. 층상·층서해석과 입도분석, 자화율 분석, 탄소연대측정을 이용하여 9,850yrBP부터 현재까지 사면물질이동이 최소 4회 이상 있었음을 확인하였다. 또한 퇴스-고토양 연속층으로 추정되는 퇴적층을 따라 연대측정 및 토양분석, 입도분석, 자화율 분석을 통해 퇴적층의 형성과정과 퇴적환경을 밝히는 연구가 진행되어왔다<sup>9)</sup>.

8) 신영호, 2011, op. cit, 521-535; 신영호, 2015, op. cit, 593-607.

9) 박충선·윤순옥·황상일, 2014, 강릉시 불화산 일대 퇴스 퇴적층의 형성 과정과 퇴적 환경, 한국지형학회지, 21(3), 49-61; 박충선·윤순옥·황상일, 2007, 전북 부안 화강암지역 퇴스-고토양 연속층의 퇴적물 특성과 기원지, 대한지리학회지, 42(6), 898-913; 신재봉·Naruse, T.·유강민, 2005, 퇴스-고토양 퇴적층을 이용한 홍천강 중류에 발달한 하안단구의 형성시기, 지질학회지, 41(3), 323-333; 윤순옥·박충선·황상일, 2013, 진천분지 퇴스-고토양 연속층의 형성과 퇴적환경, 한국지형학회지, 20(3), 1-14; 황상일·박충선·윤순옥, 2009, 전북 완주군 봉동 하안단구 상부 퇴스-고토양 연속층의 풍화특성과 기원지, 대한지리학회지, 44(4), 463-480.

자화율분석은 다양한 분야의 연구에서 이용되고 있으나 이전의 국내 연구들은 자화율 측정 시 휴대용 측정기기를 이용하여 토양 단면에 기기를 대고 측정하는 방식을 이용하였다<sup>10)</sup>. 그러나 이 방식은 분석대상의 부피와 질량을 표준화시키지 않았기 때문에 측정값에 대한 정확도가 떨어지고, 다른 지역의 샘플들의 값과 절대적인 자화율의 값을 비교하기 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 토양 단면으로부터 정량화되고 이방성을 최소화한 재질의 용기에 샘플을 채취하여 자화율을 측정해야한다<sup>11)</sup>. 자화율 분석을 이용한 일부 연구에서는 부피와 질량을 표준화 시킨 방법을 이용하여 자화율을 측정하였다<sup>12)</sup>.

---

10) 박충선·윤순옥·황상일, 2014, 강릉시 불화산 일대 퇴적층의 형성 과정과 퇴적 환경, 한국지형학회지, 21(3), 49-61; 박충선·윤순옥·황상일, 2007, 전북 부안 화강암지역 퇴스-고토양 연속층의 퇴적물 특성과 기원지, 대한지리학회지, 42(6), 898-913; 신재봉·Naruse, T.·유강민, 2005, 퇴스-고토양 퇴적층을 이용한 홍천강 중류에 발달한 하안단구의 형성시기, 지질학회지, 41(3), 323-333; 윤순옥·박충선·황상일, 2013, 진천분지 퇴스-고토양 연속층의 형성과 퇴적환경, 한국지형학회지, 20(3), 1-14; 황상일·박충선·윤순옥, 2009, 전북 완주군 봉동 하안단구 상부 퇴스-고토양 연속층의 풍화특성과 기원지, 대한지리학회지, 44(4), 463-480.

11) 박경, 1998, Paleoclimatic reconstruction in the Central Great Plains using environmental magnetism and stable isotope, 대한지리학회지, 33(3), 377-394.

12) 박 경·박지훈, 2011, 충남 부여지역의 홀로세 기후변화-탄소동위원소분석과 대자율분석을 이용하여, 대한지리학회지, 46(4), 396-412; 신영호, 2011, 하구역 퇴적물의 대자율 변화와 기후변화의 연관성, 한국지역지리학회지, 17(5), 521-535; 신영호, 2015, 하구역 간석지 퇴적물 자화율의 통합과 주기성 검토, 한국지역지리학회지, 21(3), 593-607.

## 2. 이론적 배경

### 1) 자화율과 자성물질

자화율(magnetic susceptibility)은 물질이 자성을 가질 수 있는 정도를 나타내는 물리적 지표이다. 물질은 외부자기장 영향 하에서 자화되어 자성을 얻고, 자기장이 사라지면 자화를 잃게 된다. 이렇게 외부 자기장에 의해 유도된 자화를 유도자화(induced magnetization,  $J_i$ )라 한다. 그러나 외부자기장을 제거하여도 자성을 잃지 않는 물질들도 존재하는데 이러한 자화를 잔류자화(remanent magnetization,  $J_r$ )이라 한다. 물질의 자기특성은 자화정도와 방향뿐만 아니라 외부자기장 변화에 따른 물질의 유도자화의 변화 정도로 나타낼 수 있으며, 이러한 변화를 좌우하는 물질의 자기특성을 자화율(magnetic susceptibility,  $\kappa$ )이라 한다.

$$J_i = \kappa H$$

$J_i$ 는 단위 부피당 자기모멘트 값이고,  $\kappa$ 는 단위 부피에 대한 값으로 부피 자화율(volume susceptibility)이라 한다.  $J_i$ 와  $H$ 의 단위가 A/m이므로 SI단위에서는  $\kappa$ 는 단위가 없다<sup>13)</sup>.

부피 자화율(volume susceptibility)을 측정하다 보면 물질의 실제 자화율 값과 측정된 자화율 값에 차이가 생긴다. 그 이유는 자연환경에서 채취한 샘플들은 다양한 밀도를 가지고 있기 때문이다. 만약 같은 물질로 이루어진 샘플의 자화율을 측정 할 때, 큰 샘플은 높은 자화율을 가지고, 작은 샘플은 작은 자화율을 가질 것이다. 그렇기 때문에 실제 물질이 가지는 정확한 자

---

13) 도성재·김광호, 1999, 고지자기학, 아르케.

화율 값을 측정하기 위해서는 밀도를 이용하여 표준화를 시켜야 한다. 질량 자화율(Mass specific susceptibility)는 부피와 질량을 고려한 자화율 값으로 부피 자화율  $\kappa$ 를 각 샘플의 밀도( $\rho$ )로 나눈 값이다. 부피 자화율은 단위가 없지만 질량 자화율은 부피 자화율을 밀도로 나눈 값이므로 단위는 SI 단위로  $10^{-6} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  이다.

물질의 자기적 특성은 원자핵 주위의 전자들의 스핀방향에 의한 자기 모멘트차이에 의해 나타나며 강자성, 페리자성, 반강자성, 경사 반강자성, 상자성, 반자성으로 6가지로 나뉜다. 강자성(ferromagnetic)은 전자들의 스핀이 모두 같은 방향으로 배열되어 있어 원자들의 자기모멘트가 강한 상호작용을 하므로 자성을 갖으며 큰 양의 자화율 값을 갖는 것으로 철, 니켈, 코발트등이 해당된다. 페리자성(ferrimagnetic)은 반강자성과 강자성의 중간적 성질을 가지며 한쪽의 스핀배열이 반대쪽 스핀 배열보다 많아 자성을 띤다. 이온격자들의 자기모멘트 방향은 반대지만 크기가 달라 자화를 갖으며, 강자성체보다 작지만 비교적 큰 양의 자화율 값을 갖는다. 광물 속에서는 자철석(Magnetite)과 맥히마이트(Maghemite)등이 속한다. 반강자성(antiferromagnetism)은 매우 작은 양의 자화율 값을 가지며 온도가 감소함에 따라 자화율 값이 증가한다. Neel온도<sup>14)</sup> 이하에서는 자기모멘트 방향이 거의 반대로 배열되며, 자화율이 감소하며 반강자성의 특성을 갖는다.

경사 반강자성(canted antiferromagnetic)은 이상적인 반강자성과는 다르게 자기모멘트가 반대방향으로 배열되지 않고 약간 경사진 방향으로 자화를 갖는다. 적철석(Hematite)과 침철석(Goethite)이 이에 해당한다. 상자성(paramagnetic)은 원자의 자기 모멘트가 상호 소멸되지 않고 전자들의 스핀 방향이 랜덤하게 배열되어 있으므로 자화는 0이다. 이에 외부자기장을 가하면 매우 작은 양의 자화율 값을 갖는다. 반자성(diamagnetic)은 외부자기장

---

14) Neel 온도 : 반강자성 물질이 온도가 높아지게 되면 열진동으로 인해 원자 배열이 무너지게 된다. 상자성과 비슷한 성질을 보이게 되는 한계 온도를 말한다.

이 가하여지면 전자들의 스핀 방향이 모두 임의의 방향을 가지고, 외부자기장과 반대 방향의 자기모멘트가 유도된다. 외부자기장이 없는 경우에도 자기모멘트의 합이 0이 된다. 매우 작은 음의 자화율 값을 가지며 온도와는 무관하다. 반자성에 속하는 물질들은 물, 유기물, 플라스틱, 석영, 갈슘, 탄산염 등이 있다. <표 2>는 자기물질의 종류와 그에 따른 질량 자화율을 보여준다. 철, 니켈, 코발트와 같은 강자성 물질의 자화율은 자철석, 맥히마이트와 같은 페리자성 물질의 자화율보다 100배 이상 큰 값을 가지며, 또한 페리자성 물질들은 반강자성, 경사반강자성물질의 자화율에 비해 몇 백배 이상의 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 자기적 행동에 따른 물질의 종류와 질량 자화율 값 (Dearing, 1999)

Mineral/Material	Formula	Iron(%)	Mass specific magnetic susceptibility ( $10^{-6} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )
<b>Ferromagnetic metals</b> Iron Cobalt Nikel	$\alpha\text{Fe}$ Co Ni	100	276000 204000 68850
<b>Ferrimagnetic</b> Magnetite (0.012-0.069 $\mu\text{m}$ )  (0.09-2000 $\mu\text{m}$ ) (1-250 $\mu\text{m}$ )  Maghemite  Titanomagnetite Titanohaematite Pyrrhotite Greigite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$    $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{TiO}_4$ $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeTiO}_3$ $\text{Fe}_7\text{S}_8$ $\text{Fe}_3\text{S}_4$	72    70	513-1116 500-1000 596±77 440-716 390-580 410,440 286-371 169-290 281-315 50,53
<b>(Canted) antiferromagnetic</b> Hematite   Goethite	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$    $\alpha\text{FeOOH}$	70    63	1.19-1.69 0.58-0.78 0.49-0.65 0.27,0.31,0.6, <0.63 0.35,0.38,0.7, <1.26

<b>Diamagnetic</b>		
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	-0.0048
Alkali-feldspar	Ca,Na,K,Al silicate	-0.005
Plastic		-0.005
Quartz	SiO <sub>2</sub>	-0.0058
Organic matter		-0.009
Water	H <sub>2</sub> O	-0.009
Halite	NaCl	-0.009
Kaolinite	Al <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	-0.019

<그림 1>은 암석의 종류 및 토양의 종류, 자연환경 물질에 따른 자화율 분포를 나타낸다. 대부분의 암석과 토양의 경우  $0.01 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 의 자화율을 갖으며 페리자성 물질들은 그에 10배 이상의 큰 자화율을 갖는다. <표 1>에서 물질의 자기적 특성에 따라 자화율의 차이가 매우 크게 나타나는 점과 <그림 1>에서 대부분의 암석과 토양의 자화율 값과 페리자성물질의 자화율 값의 차이를 해 샘플에서 자성을 띠는 물질이 포함되어있을 때 자화율이 민감하게 반응한다는 점을 통해 절대적으로 적은 대리자의 양으로도 유용한 고기후환경복원 자료가 될 수 있음을 보여준다.

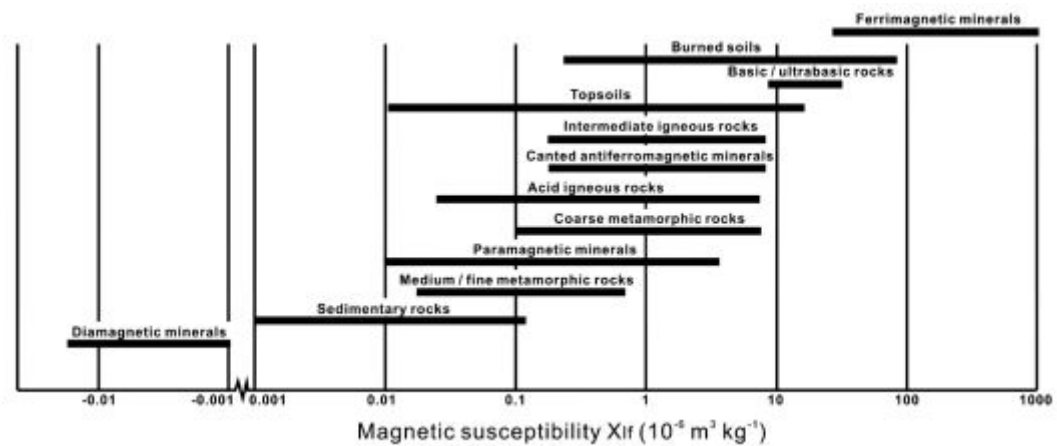


그림 1. 환경물질과 광물들의 종류별 자화율 값 (Dearing, 1999)

자화율을 조절하는 4가지 요소는 밀도, 광물의 구성, 결정의 모양과 크기이다. 샘플 속 자성광물의 밀도를 알기 위해서는 샘플의 자화율 값을 이미 알고 있는 자성광물의 종류의 자화율 값으로 나누어야 한다. 광물의 구성 성분은 순수한 자철석 산화물부터 마그헤마이트(Maghemite), 티타노마그네타이트(Titanomagnetite), 티타노마그헤마이트(Titanomaghemite)와 같은 불순

한 산화물까지 다양하며 각각의 광물의 구성성분에 따라 자화율이 달라진다.

결정의 모양과 크기를 보면 지름  $110\mu\text{m}$  이상의 자철석 입자들은 다자구(multi domain, MD)이라고 불린다. 이들은 에너지적으로 단자구(single domain, SD)보다 많은 도메인을 선호하기 때문이다.  $0.2\mu\text{m}$ 보다 작은 입자들은 부피가 제한되기 때문에 단자구(single domain)만을 형성한다.  $0.2\sim 110\mu\text{m}$  사이의 입자들은 다자구(multi domain)를 형성할 만큼 크기가 크지만 단자구(single domain)의 자성을 보인다. 이들을 pseudo-single domain(PSD)이라 한다. 그러나  $0.03\mu\text{m}$ 보다 작은 초미립자들은 단자구이지만 독특한 성질을 보인다. 자화는 강하지만 열적에너지 대응이 자화를 매우 빠르게 유도하기 때문에 불안정하다. 이러한 행동은 상자성과 유사하나 더 강한 대자율을 가진다. 이러한 성질을 초상자성(superparamagnetic, SP) 행동이라 불린다.  $0.03\mu\text{m}$ 보다 작은 크기의 자연적 또는 인위적으로 만들어진 자철석의 측정값은 결정 크기와 도메인과 함께 대자율에서의 주요 변화들을 정의하는데 도움이 된다.

<그림 2>를 보면 다자구(MD), PSD, 안정한 단자구 (stable single domain, SSD)을 포함하는 결정 크기( $0.09\sim 6000\mu\text{m}$ )에서는  $\chi_{\text{Ir}}$ 의 변화가 거의 없으며  $596\times 10^{-6}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ 의 상수 평균을 가진다. 결정 지름이  $0.03\mu\text{m}$ 보다 작을 때, 도메인의 SP이며  $\chi_{\text{Ir}}$ 값은 더 크고  $1000\times 10^{-6}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ 를 초과할 것이다. 초상자성(SP) 결정들은 서로 다른 주파수에서 측정될 때 자성광물들의 다른 반응에 의해 자화율이 측정되고 주파수 의존률(frequency dependence)에 의해 감지된다.

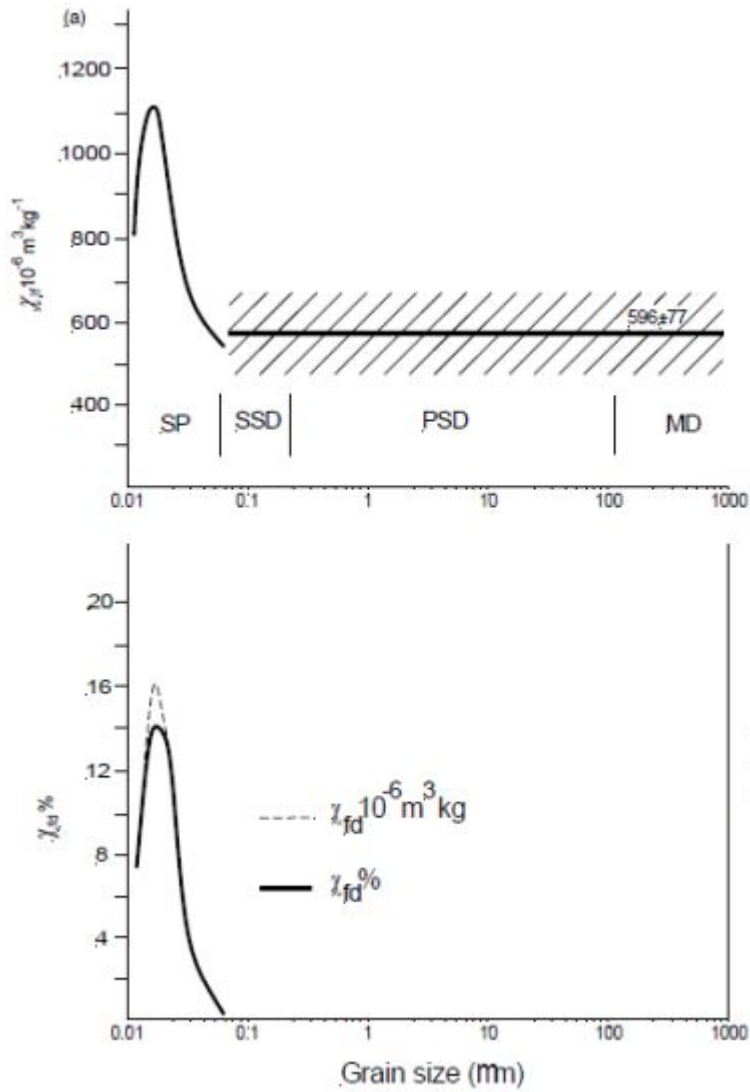


그림 2. 자철석 입자 크기에 따른 질량 자화율과 주파수 의존률의 변화 (Dearing, 1999)

## 2) 주파수 의존률

자화율은 측정 시 이용하는 외부자기장의 강도에 따라 저자기장 자화율(low-field susceptibility)과 고자기장 자화율(high-field susceptibility)로 구분한다. 일반적으로 자화율이라 하면 지구자기장 정도의 낮은 자기장 강도에서 측정하는 저자기장 자화율을 의미한다<sup>15)</sup>.

주파수 의존 자화율(frequency dependent susceptibility)은 저 주파수와 고 주파수에서(0.46kHz, 4.6kHz) 각각 측정된 자화율을 통해 얻어지는 값이다. 주파수 의존 자화율은 토양에서 생화학적 과정을 거쳐 생성된 입자로서 초미립자의 자철석으로 대표되는 초상자성 페리자성체 미네랄의 존재를 감지하기 위해 사용한다. 주파수 의존 자화율을 이용하여 주파수 의존도(frequency dependence, %)를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\chi_{fd}(\%) = \left( \frac{\chi_{lf} - \chi_{hf}}{\chi_{lf}} \right) \times 100$$

토양 샘플을 저주파수(0.47kHz)와 고주파수(4.7kHz)의 두 주파수에서 자화율을 측정한 뒤, 측정된 자화율 값의 차이를 통해 초미립 자성광물의 양을 추정할 수 있다<sup>16)</sup>. 저자기장 자화율(low-field susceptibility)을 측정할 때는 안정한 단자구 입자(SSD)의 경계에 가까운 초상자성(SP)결정들이 자화율에 완전하게 기여하기 때문에 더 큰 자화율 값을 가진다. 반면 고자기장 자화율(high-field susceptibility)을 측정할 때는 안정한 단자구 입자(SSD)의 경

---

15) 도성재·김광호, 1999, 고지자기학, 아르케.

16) 박지훈·박 경, 2010, 충남 천안 구룡천 하류부 안골유역의 최종빙기 이후 사면물질이동, 한국지형학회지, 17(3), 31-47; Dearing, J., 1999, Environmental Magnetic Susceptibility-Using the Bartington MS2 System.

계에 가까운 초상자성(SP) 결정들이 안정한 단자구 입자와 비슷하게 행동하므로 저자기장 자화율보다 낮은 자화율 값을 가진다. 만약 초미립 자성광물이 샘플 속에 존재하지 않는다면 두 주파수에서 동일한 자화율 값을 보인다<sup>17)</sup>. 또한 앞의 그림 2에서 확인한 것과 같이, 2가지의 주파수에서 측정된 주파수 의존률은 모든 크기의 초상자성(SP)입자들(0~30nm)에 대해서가 민감한 것이 아니라 18nm~20nm 크기의 자철석 입자의 존재에만 민감하게 반응한다.

측정된 주파수 의존률 값에 따라 초미립 자성광물이 얼마나 존재하는지는 다음 <표 3>에 정리하였다. 주파수 의존률이 2보다 작은 경우 초상자성 입자가 10%미만으로 거의 없는 상태를 의미하고, 2에서 10사이인 경우 초상자성 입자와 초상자성이 아닌 굵은 입자들이 혼합된 상태이다. 주파수 의존률이 10에서 14인 경우, 75% 이상의 거의 대부분의 입자가 초상자성인 상태이다. 토양 샘플을 측정 시 높은 자화율 값과 높은 주파수 의존률을 보인다면 그 샘플은 주자성 세균(magneto-tactic bacteria)에 의해 형성된 초미립 자철석을 많이 함유하고 있음을 의미하며 토양화가 많이 진행되었고 그 토양이 퇴적될 시기에 토양형성에 좋은 기후였음을 확인할 수 있다. 만약 주파수 의존률이 14이상의 값이 나온다면 그 샘플은 오염되었거나 자성이 매우 약한 샘플임을 의미한다.

---

17) Dearing, J., 1999, Environmental Magnetic Susceptibility-Using the Bartington MS2 System.

표 3. 주파수 의존률 값에 따른 초미립 자성광물의 양 (출처: Dearing, 1999)

Low $X_{fd}(\%)$	< 2.0	초상자성 입자가 거의 없는 상태(<10%).
Medium $X_{fd}(\%)$	2.0 ~ 10.0	초상자성 입자와 0.005 $\mu\text{m}$ 보다 작은 초상자성입자 또는 초상자성이 아닌 굵은 입자들이 혼합된 상태.
High $X_{fd}(\%)$	10.0 ~ 14.0	사실상 거의 모든 입자가 초상자성인 상태(>75%).
Very high $X_{fd}(\%)$	> 14.0	드문 값으로 잘못된 측정, 약한 샘플이거나 오염된 샘플.

### 3) 토양에서의 자성물질과 기후와의 연관성

Heller와 Liu(1982)는 고토양이 풍화되지 않은 퇴스보다 높은 자화율 값을 가지는 것을 확인하였다. 고토양이 일반적으로 따뜻하고 습윤한 조건에서 형성되고 춥고 건조한 조건에서는 형성되기 어렵다는 조건을 바탕으로 자화율이 기후 대리자(proxy)로서 이용될 수 있음을 보였다. 여러 연구자들은 중국 퇴스 고원의 자기적 성질과 기후 대리자(proxy)로서의 역할을 인정했지만, 고토양과 풍화되지 않은 퇴스층에서 자화율의 변화에 대한 근본적 원인에 대한 논쟁이 있어왔다.

먼저 Kukla 등(1988)는 자화율의 변동은 인접한 지역에서부터 먼지 입자들에 유입에 의한 것으로 보았다. 춥고 건조한 기간 동안 주변 지역에서 바람에 의해 많은 양의 퇴스가 유입되었고, 온난하고 습윤한 기간 동안에는

식생과 수분이 먼지입자의 유입을 막았기 때문에 고토양과 퇴스퇴적층 사이에 자화율의 변동이 생긴 것으로 보았다.

이후 진행된 연구에서 Zhou 등(1990)은 실험 결과를 통해 고토양에서 검출되는 자성물질이 퇴스층의 것 보다 더 작은 입자크기를 가지고 있으며 더 작은 입자크기는 토양의 형성과정동안 발생하는 일련의 과정에 의한 것이라 주장했다. 이는 고토양과 퇴스층 사이의 자화율의 차이가 먼지의 유입과 희석에 의한 것이라는 앞선 연구가 적절하지 않았다는 의미이다. 또한 Maher 등(2003)은 현재 먼지 입자 유입에 의한 영향이 매우 작으며, 퇴스를 기반으로 하는 러시아 스텝토를 대상으로 자기적 성질과 강우와의 연결성을 밝혔다.

Maher 등(1994)은 토양생성 자화율과 현재 기후 변수와의 관계를 제시하였다. Maher 등(2003)은 토양 형성 과정을 보여주는 자기적 신호인 토양생성 자화율(pedogenic susceptibility,  $X_{ped}$ )을 제시하였다. 토양생성 자화율은 토양 B층의 최대 자화율에서 모재 퇴스의 자화율 뺀 값을 의미한다. 토양생성 자화율과 연간 강우량 변수 사이의 강한 상관성( $R^2=0.94$ )을 확인하였다.

<그림 3>는 토양 생성 자화율과 연간 강우량의 관계를 나타내는 그래프이다. 중국 퇴스 고원에서의 연구<sup>18)</sup>와 다른 북반구 지역의 연구<sup>19)</sup> 그리고 러시아 스텝토의 연구에서 토양생성 자화율과 연간 강우량은 선형관계를 가짐을 보여준다. 이는 연간 강우량이 증가할수록 토양생성 자화율 값이 증가함을 의미한다. 또한 자화율 기록이 심해퇴적물의 산소 동위원소 기록과 강한 상관관계가 있다는 연구들이 있어왔다<sup>20)</sup>.

---

18) Porter, S.C., Hallet, B., Wu, X. and An, Z., 2001, Dependence of near-surface magnetic susceptibility on dust accumulation rate and precipitation on the Chinese Loess Plateau, *Quat. Res.*, 55, 271-283; Maher, B. A., Thompson, R. and Zhou, L. P., 1994, Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian paleomonsoon: A new mineral magnetic approach, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 125, 461-471.

19) Maher, B. A. and Thompson, R., 1995, Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols, *Quat. Res.*, 44, 383-391.

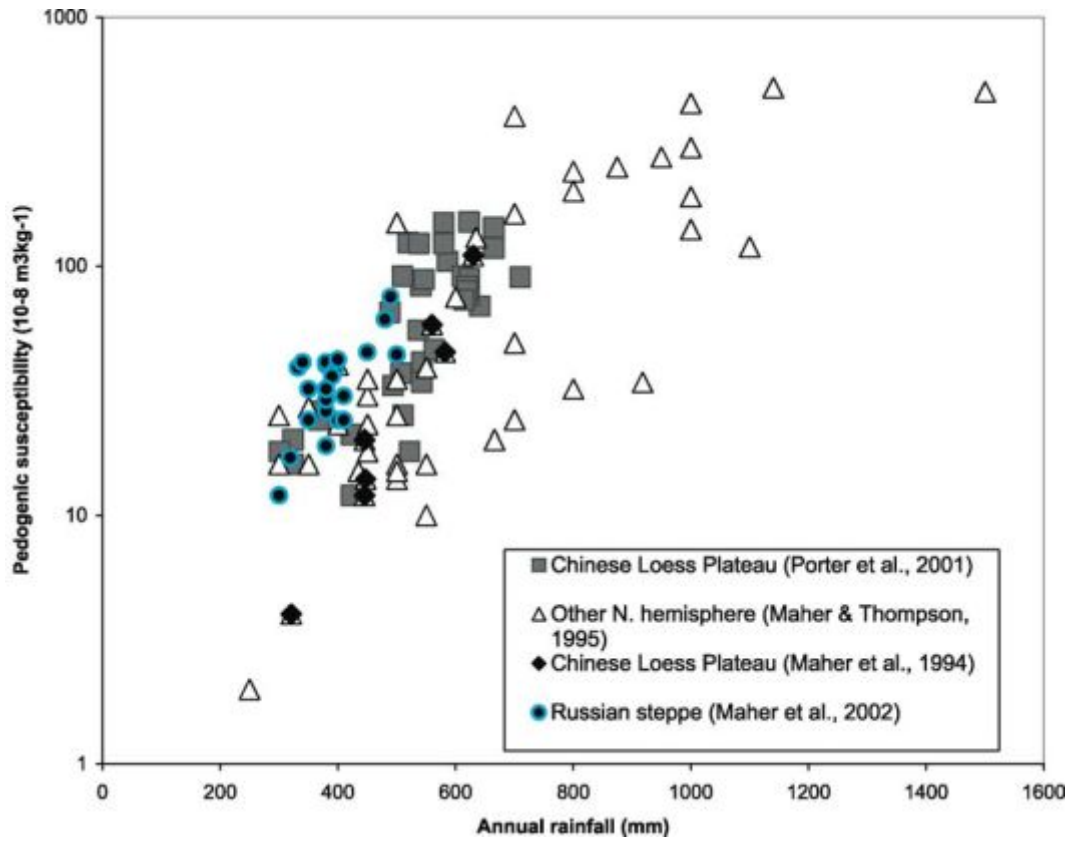


그림 3. 토양생성 자화율과 연 강우량의 관계 (출처: Maher et al, 2003)

- 20) Heller, F., Liu, T., 1984, Magnetism of Chinese loess deposits, *Journal of Geophysical Research* 77, 125-141; Kukla, G., Heller, F., Liu, X. M., Xu, T. C., Liu, T. S., An, Z. A., 1988, Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility, *Geology* 16, 811-814.

토양을 형성하는 5가지 요소는 모재, 기후, 유기물, 지형, 시간이다. 이 5가지 요소와 더불어 여러 복합적인 과정을 거쳐 토양이 생성된다. 먼저 토양이 생성되기 위해서는 용해 물질들과 콜로이드성 입자들이 물에 녹아 이동하고, 식생의 부식으로 인해 물속에 유기산이 풍부해져야 한다. 또한 몇몇 유기물질들은 물에 의해 이동하며 점토에 흡수됨으로써 그 성질을 바꾸고, 박테리아는 유기물을 분해하는 것을 돕고 무기반응과 철과 망간의 산화에 촉매역할을 하는 이러한 복합적인 반응의 결과 토양이 생성된다<sup>21)</sup>.

이렇게 배수가 잘되고 완충작용을 받으며 생성된 토양은 자기적 특성을 가지고 있으며 이는 기후, 특히 강우와 관련이 있다<sup>22)</sup>. 토양 속에서 강한 자성을 가지는 주된 물질인 자철석(magnetite)은 혼합된  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  철 산화물이다. 다음의 화학식을 통해 형성이 되며 토양에서 관찰되는 자성의 증가에 기여한다는 가설을 통해 토양 속 자철석의 존재가 기후 중 특히 강우와 관련 있음이 확인되었다<sup>23)</sup>.



토양형성 조건 아래에서 퇴적물의 유입 없이, 초미립자 자철석은 암석기원 또는 생물기원에 의해 형성될 수 있고, 토양의 자성함량은 토양화가 진행됨에 따라 증가한다<sup>24)</sup>. Maher와 Taylor(1988)는 자화율 분석을 통해 퇴적

21) Krauskopf, K. B., 1979, Introduction to Geochemistry, McGraw-Hill Publishing Company.

22) Maher, B. A., Thompson, R. and Zhou, L. P., 1994, Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian paleomonsoon: A new mineral magnetic approach, Earth Planet. Sci. Lett., 125, 461-471; Han, J., Lu, H., Wu, N. and Guo, Z., 1996, Magnetic susceptibility of modern soils in China and climate conditions, Stud. Geophys. Geodet., 40, 262-275.

23) Maher, B. A., Alekseev, A. and Alekseeva, T., 2003, Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 201, 321-341.

24) Maher, B. A. and Taylor, R. M., 1988, Formation of ultrafine-grained magnetite in

물 유입이 없어도 배수가 잘되는 토양에서는 자철석 광물이 생성될 수 있음을 확인하였다. 그리고 자연 퇴적층에서 층위에 따라 자화율의 차이가 나타나면 그 원인은 퇴적물의 입도 차이<sup>25)</sup> 또는 화학적 원인이나 철박테리아의 활동에 의한 초미립자성광물의 생성 때문임이 밝혀졌다<sup>26)</sup>. 층위별로 자화율 값이 일정한 경우, 그 층이 형성될 당시 퇴적물 공급의 변화가 적었으며, 자화율 값의 변화가 클 경우 퇴적물 공급이 일정하지 않았다는 것을 의미한다<sup>27)</sup>.

생물기원 초미립 자철석은 암석기원 초미립 자철석의 형태와 구성이 분명하게 다르다<sup>28)</sup>. 생물기원 자철석은 자기를 감지하여 자력선 방향으로 운동하는 세균인 주자성 세균(magnetotactic bacteria, 走磁性細菌)에 의해 토양 생성과정에서 만들어진다. 생물기원 자철석은 만들어 지는 방식에 따라 두 가지 종류로 구분할 수 있다. 하나는 자철석의 형성이 능동적으로 세포내에서 만들어지는 생물학적 광물생성작용에 의한 것이고 다른 하나는 대사성 생산물이 세포 밖에서 광물을 생성하는 생물학적으로 유도된 광물생성작용에 의한 것이다<sup>29)</sup>. 또한 해양 퇴적물에서, 주자성세균(magnetotactic bacteria)는 주로 잔류자기 이동체인 초미립자 단자구의 자철석의 원천이 된다<sup>30)</sup>.

---

soils, Nature, 336(6197), 368-370.

25) Thompson, R. and Morton, D. J., 1979, Magnetic susceptibility and particle-size distribution in recent sediments of the Loch Lomond Drainage Basin, Scotland, Journal of Sedimentary Petrology, 49(3), 801-811.

26) Maher, B. A. and Thompson, R., 1995, Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols, Quat. Res., 44, 383-391.

27) Maher and Thompson, 1995, op. cit, 383-391.

28) Maher, B. A. and Taylor, R., 1988, Formation of ultrafine-grained magnetite in soils, Nature, 336(6197), 368-370.

29) Lowenstam, H. A., 1981, Minerals formed by organisms, Science 13, 211(4487), 1126-1131.

30) Stolz, J. F., Chang, S. R. and Kirschvink, J. L., 1986, Magnetotactic bacteria and single-domain magnetite in hemipelagic sediments, Nature, 321, 849-851.

주자성 세균에 의해 만들어진 생물기원 자철석은 입자의 크기와 모양을 통해 구분될 수 있다<sup>31)</sup>. 주로 체인모양으로 발생하며 좁고 생물학적으로 제한된 단자구 크기로 독특한 육각형 모양 또는 눈물방울 모양을 가진다<sup>32)</sup>. 주자성 세균에 의해 형성된 생물학적 광물생성작용의 마그네토솜(magnetosomes)은 초미립 자철석의 상당한 부분의 기원을 담당한다<sup>33)</sup>.

자철석은 이후 마그헤마이트(maghemite)와 적철광(hematite)으로 산화될 수 있다<sup>34)</sup>. 중국 고토양에서 볼 수 있는 이 독특한 자성물질은 화재나 오염의 영향 없이 배수가 잘된 현대의 토양에서 찾아지는 것과 일치한다. 실제 토양 환경과 같은 실험실 조건에서 합성된 것에도 일치한다. 고토양의 자기적 성질은 자연 물질들과 자철석, 마그헤마이트에 의해 강하게 영향을 받는다<sup>35)</sup>.

#### 4) 중국의 홀로세 기후환경변화 복원 연구

동아시아의 다른 지역인 중국의 홀로세 동안 기후환경변화를 복원한 연구 결과와 본 연구결과를 비교 분석함으로써 자기적 변수를 이용한 고기후환경 변화 복원의 유용성을 확인할 수 있으며 홀로세 시기동안 한반도의 고기후 환경변화 복원의 정확성을 높일 수 있다.

중국에서는 고기후환경변화에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 특히 중국

---

31) Petersen, N., van Dobbeneck, J. L., and Vali, H., 1986, Fossil bacterial magnetite in deep-sea sediments from the South Atlantic Ocean, *Nature* 320, 611-615.

32) Lowenstam, 1981, *op. cit.*, 1126-1131.

33) Petersen et al, 1986, *op. cit.*, 611-615.

34) Schwermann, U. and Taylor, R. M., 1987, Iron oxides. In: Dixon, J.B., Weed, S.B.(Eds.), *Minerals in Soil Environments*, 2<sup>nd</sup> ed. Soil Sci. Soc. Am.,Madison.

35) Maher, B. A. and Thompson, R., 1991, Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols, *Geology*, 19, 3-6.

퇴스 고원은 고기후복원의 대상지로 많이 이용되어왔다<sup>36)</sup>. 그러나 중국 퇴스 고원의 연구는 본 연구에서 다루는 시기(현재부터 약 6,000년 까지)보다 매우 오랜 기간을 다루고 있기 때문에 기후변화 추세를 비교하기에 적합하지 않다.

중국의 연구에서 확인되는 홀로세 기후 최적기(Holocene climatic optimum)또는 힝시서멀(Hypsithermal)은 홀로세 동안 지금보다 기온이 약 2~3℃ 높았으며 강수량도 10~15%정도 많았던 시기로 추정되며 연대는 약 9,000yrBP부터 2,500yrBP로 추정된다. 주로 6,000yrBP를 기준으로 앞뒤로 3,000년 정도로 확인된다. 특히 COHMAP(1988)는 9,000yrBP부터 6,000yrBP 시기에 호수 수위가 높았으며 물수지 값이 높았던 시기였음을 확인하였다. 동시에 태양이 지구에 미치는 영향에 관한 연구로부터 북반구의 태양복사가 최대인 시기였음이 확인되었다.

An 등(2000)은 홀로세 동안 중국에 영향을 주는 여름 몬순에 대한 강수의 시공간적 분포에 대해 밝히면서 지질학적 자료와 호수 수위, 화분자료, 퇴스-고토양 자료를 이용하였다. 여름 몬순에 의한 강우가 최대가 되는 홀로세의 기후 최적기가 중국의 모든 지역에서 동시에 나타나지 않고 지역에 따라서 다른 시기에 나타났음을 확인하였다. <그림 4>에 나타난 것처럼, 북동쪽 지역에서는 10,000~8,000년에 최대치를, 북쪽 중앙지역과 북동 중앙지역

---

36) Fang, X., Ono, Y., Fukusawa, H., Bao-Tian, P., Li, J., Dong-Hong, Guan., Oi, K., Tsukamoto, S., Torii, M. and Mishima, T., 1999, Asian summer monsoon instability during the past 60,000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau, *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 219-232; Maher, B. A. and Taylor, R., 1988, Formation of ultrafine-grained magnetite in soils, *Nature*, 336(6197), 368-370; Maher, B. A. and Hu, M., 2006, A high-resolution record of Holocene rainfall variations from the western Chinese Loess Plateau: antiphase behaviour of the African/Indian and East Asian Summer monsoons, *The Holocene*, 16(3), 309-319; Maher, B. A., MengYu, H., Roberts, H. M. and Wintle, A. G., 2003, Holocene loess accumulation and soil development at the western edge of the Chinese Loess Plateau: implications for magnetic proxies of paleorainfall, *Quaternary Science Review*, 22, 445-451.



Zhou 등(2004)은 18,000년 동안 중국을 대상으로 한 고기후환경변화 복원을 통해 홀로세 기후최적기와 홀로세 중기의 건조했던 시기를 확인하였다. 이 연구에서도 중국을 위도별로 나누어 기후 최적기의 시기가 위도별로 차이가 있음을 확인하였다. <그림 5>은 연대에 따른 대리자(proxy)의 분석결과를 나타낸다. A는 그린란드의 GISP 2 아이스 코어의  $\delta^{18}O$  결과이고, B는 뤼스와 사막의 경계인 미디완(Midiwan) 지역의 총 유기 탄소 양(%)을 나타낸다. C는 홀루(Hulu) 동굴 석순의  $\delta^{18}O$  결과이고 D는 다후 습지의 총 유기 탄소 양을 나타낸다. E는 남중국해 코어 17940의 화분분석 결과이며, F는 북반구의 태양복사량을 나타낸 것이다.

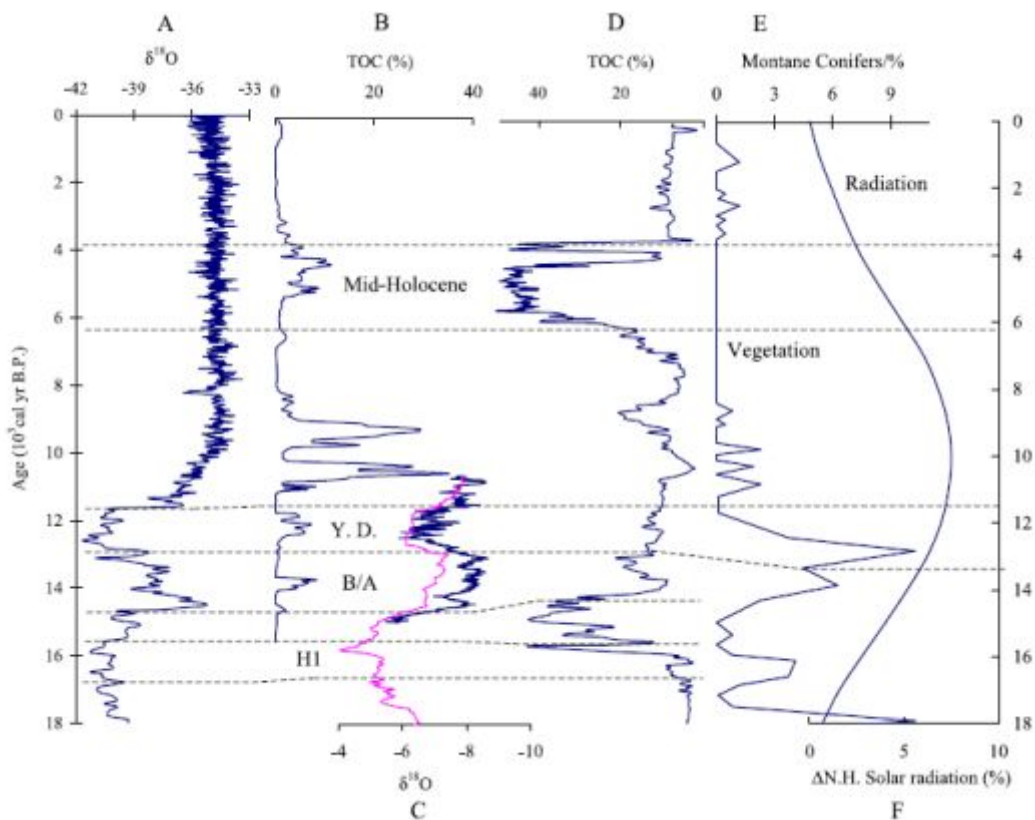


그림 5. 중국의 위도별 기후복원 결과 (출처: Zhou et al. 2004)

그래프 A의 아이스코어 산소동위원소비( $\delta O^{18}$ )는 물이 상변화를 일으킬 때 산소구성비가 달라지는 것을 기반으로 한 대리자(proxy)로 빙하기에는 감소하며 간빙기에는 증가한다. B와 D의 그래프에 나타난 총 유기탄소의 양(TOC, %)은 수문학적 변화를 나타내는 대리자(proxy)로서 값이 높으면 습윤했음을 보여주고 낮으면 건조했음을 보여준다. B의 샘플 지역은 <그림 4>에서 중국 북쪽 지역으로 기후 최적기가 9,000yrBP 선상의 지역이다. D 지역은 중국의 남쪽 지역으로 An 등(2000)은 이 지역의 기후 최적기가 3,000yrBP 선상의 지역으로 보았지만 Zhou 등(2004)은 이 지역의 기후 최적기는 6,000yrBP 선상으로 보았다.

본 연구의 한반도의 샘플 위도의 경우 미디완 지역과 다후지역의 사이 지역에 해당되고 An 등(2000)과 Zhou 등(2004) 연구결과들에 따라 약 6,000yrBP 시기가 현재보다 온난습윤했던 기후최적기로 확인되었다. 중국의 미디완지역의 경우 10,000yrBP부터 8,000yrBP에 기후최적기를 보이며 또한 홀로세 중기인 6,000yrBP~4,000yrBP시기에 기후최적기 시기보다는 작지만 최대치를 갖는 것으로 확인되었다.

### Ⅲ. 연구지역 및 연구방법

연구지역은 서해안의 운여 해안사구, 동해안의 안인사구와 여운포사구, 제주 김녕사구 이다. 해안사구란 사빈 퇴적물이 바람에 의해 다시 운반되어 내륙 쪽으로 퇴적되어 형성된다. 해안사구는 퇴적환경의 변화에 민감하며 영향을 미치는 조건들로 해수면, 바람, 태풍 강도, 식생 구성요소와 활동들에 의해 사구의 모양과 특징이 결정된다. 사구의 모래 공급이 중지되면 사구 표면에는 식생들이 자라게 된다. 이들이 오랜 기간 동안 안정적으로 토양형성 작용을 받으면 주후 흑색의 부식질로 바뀌어 흑색사질부식층(black humus sand)이 형성되거나<sup>37)</sup> 적황색을 띠는 고토양이 형성된다.

연구방법은 제주 김녕사구, 서해 운여해안사구, 동해 안인사구 및 여운포사구의 사구퇴적층으로부터 부피 10cm<sup>3</sup>, 지름 2.6cm 원기둥 모양의 이방성이 최소화된 용기를 이용하여 샘플을 채취한다. 제주 김녕사구에서는 깊이 137cm, 샘플 50개를 채취하였고 서해 운여해안사구에서는 깊이 108cm, 샘플 40개와 깊이 130cm 샘플 50개를 채취하였다. 동해 안인사구 및 여운포사구에서는 각각 81cm, 샘플 30개와 70cm, 샘플 25개를 채취하였다.

채취한 샘플은 그늘에서 자연건조 한 뒤, 채취한 샘플들의 각각 무게를 측정하였다. 자화율 측정기인 Bartington® dual frequency magnetic susceptibility MS2B 센서와 MS3 미터를 이용하여 저주파수 자화율과 고주파수 자화율 값을 3회 반복 측정하였고 평균값을 통해 저 주파수 질량 자화율(low frequency mass specific susceptibility,  $X_{lf}$ )를 측정하였다(그림 6). 저주파수 자화율과 고주파수 자화율 값을 통해 주파수 의존률(frequency dependence, %)을 계산하였다. 저 주파수 질량 자화율과 주파수 의존률 결

---

37) 박 경·박지훈, 2009, 제주 김녕사구의 형성기와 고정기에 관한 연구, 한국지형학회지, 16(2), 111-122.

과를 토양 단면과 비교 분석하고 각 연구지역의 연대측정자료와 선행연구에서 제시된 다른 대리자(proxy) 결과와 비교하여 고기후환경변화를 추정하였다.

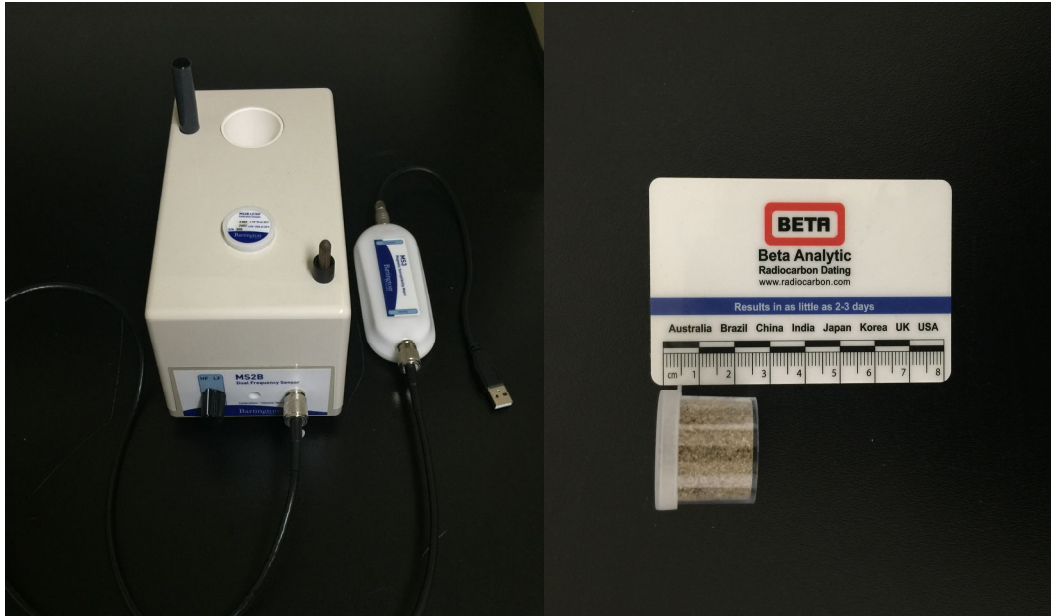


그림 6. 측정에 사용된 MS2B 센서와 MS3 미터(좌) 샘플용기(우)



그림 7. 연구지역 지도 (지도 출처: 국토지리정보원 온맵)

## 1. 제주 김녕사구

연구 지역은 북제주군 김녕리와 월정리에 걸쳐 내륙 쪽으로 6km 이상 길게 발달한 사구이다. 이 지역의 사구는 단일 사빈에서 기원한 모래가 형성한 사구가 아닌 별개의 사빈에서 불려온 폐각질의 모래가 북서풍의 영향을 받아 내륙 쪽으로 발달한 사구이다<sup>38)</sup>. 제주도의 바람장미를 분석한 결과 제주지방의 탁월풍은 북서풍이며 1~2월에 걸쳐 가장 탁월한 바람임을 확인하였고 풍속을 고려했을 때 겨울철에 80일 이상의 기간 동안 모래가 내륙으로 운반될 수 있음을 확인하였다<sup>39)</sup>.

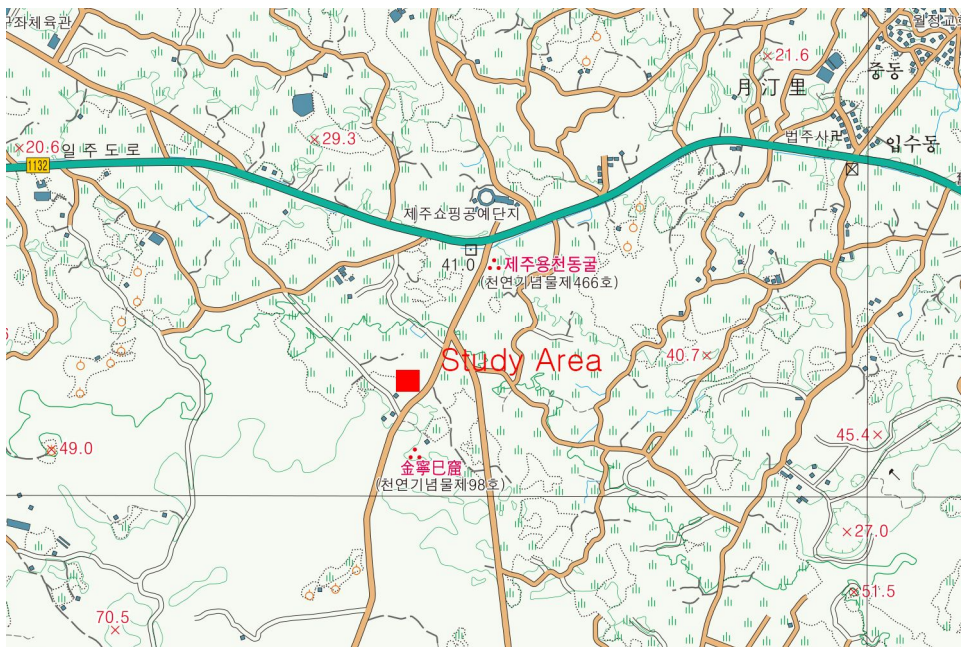


그림 8. 김녕 사구 지형도 (출처: 국토지리정보원 온맵)

38) 박경·손일·장은미, 2004, 제주 김녕-월정사구의 발달과정에 관하여, 한국지역지리학회지, 10(4), 851-864.

39) 박경 등, 2004, op. cit, 851-864.

제주도의 사빈퇴적물의 구성성분과 색은 퇴적물을 구성하는 입자의 함량 차이, 연안류의 방향, 폭풍의 영향 등의 다양한 요인에 의해 결정된다<sup>40)</sup>. 제주도의 하천은 북서-남동 방향으로 발달되어 있어 하천에 의한 화산암암편들의 영향을 많이 받은 이호, 삼양, 화순지역은 퇴적물의 색이 흑색을 띤다. 그 외의 지역의 사빈퇴적물은 하천으로부터의 화산암편의 공급보다 탄산염 입자의 공급이 더 많아 밝은 색을 띠게 된다<sup>41)</sup>.

사빈퇴적물의 주 공급원은 하천이지만 제주도의 대부분의 하천이 건천이므로 사빈을 형성하는데 가장 중요한 요인은 연안류이다<sup>42)</sup>. 연안류에 의해 운반된 패각질로 이루어진 사빈퇴적물이 사구를 형성하였다. 사빈퇴적물의 평균 입도는 0.28mm 이고 .밝은 색을 띠는 사빈퇴적물은 탄산염광물로 구성성분은 주로 연체동물(mollusk)과 홍조류(red algae)의 각질 파편으로 구성되어 있으며 유공충, 성게류, 태선동물은 약 30% 정도를 차지한다<sup>43)</sup>. 또한 이전의 연구를 통해 패각질로 구성된 해양 퇴적물에서 주자성세균에 의해 만들어지는 것과 비슷한 단자구의 자철석의 입자가 존재하는 것이 밝혀졌다<sup>44)</sup>. 이를 통해 패각질이 주 구성성분인 김녕사구에서도 주자성세균에 의한 자철석과 유사한 자철석의 형성이 가능함을 확인 할 수 있었다.

김녕사구의 퇴적물은 북동쪽 해안의 사빈퇴적물이 바람에 의해 재이동한 것이며 탄산염퇴적물의 평균 입도는 0.07~0.47mm 이며 극세립과 세립 크기를 보이는 것은 고토양층의 발달과 함께 용식작용이 일어났기 때문으로 추정한다<sup>45)</sup>. 김녕 사구의 단면을 보면 고토양층인 흑색사질부식층 2개가 풍성

40) 지옥미·우경식, 1995, 제주도 사빈퇴적물의 구성성분, 해양학회지, 30, 480-492.

41) 지옥미·우경식, 1995, op. cit, 480-492.

42) 윤정수·고기원, 1994, 제주도 연안 사빈퇴적물의 계절적 변화에 관한 연구, 한국지구화학회지, 15(1), 46-59.

43) 지효선·우경식·김련·최돈원·양동윤·박병권, 2008, 제주도 구좌읍 김녕 일대에 분포하는 해안사구 퇴적물의 기원과 형성시기, 지질학회지, 44(5), 615-628; 지옥미·우경식, 1995, op. cit, 480-492; 윤정수·고기원, 1994, op. cit, 46-59.

44) McNeill, D. F., Ginsburg, R. N., Chang, S. R. and Kirschvink, J. L., 1988, Magnetostratigraphic dating of shallow-water carbonates from San Salvador, Bahamas, Geology, 16, 8-12.

사층 사이에 존재함을 확인할 수 있다<sup>46)</sup>.



그림 9. 김녕 사구 모습

---

45) 지효선 등, 2008, op. cit, 615-628.

46) 박 경·손 일, 2007, 제주도 김녕·월정사구의 OSL 연대측정 결과와 그 의미, 한국지형학회지, 14(2), 33-41; 박 경·박지훈, 2009, 제주 김녕사구의 형성기와 고정기에 관한 연구, 한국지형학회지, 16(2), 111-122; 박지훈·박 경, 2009, 화분분석으로 본 제주도 김녕사구 일대의 후빙기 중기 이후 환경변화, 한국지형학회지, 16(1), 43-55; 박경 등, 2004, op. cit, 851-864.



그림 10. 김녕 사구에서 샘플 채취하는 모습

## 2. 서해안 운여해안사구

서해안의 퇴적지형은 홀로세 동안 해수면 상승에 영향을 받아 형성된 지형들이며 해수면 변동과정은 서해안 사구 형성에 영향을 미친다<sup>47)</sup>. 서해안의 사빈은 태안반도, 안면도, 변산반도와 같이 들출된 부분에서 파랑의 많이 받는 해안에 주로 분포한다. 서해안의 사빈은 유입되는 하천이 드물기 때문에 파랑에 의해 침식된 연안 침식물질로 이루어져있다. 하천에 의한 공급이 적고 모래가 부족하기 때문에 주로 포켓비치(pocket beach) 형태로 발달한다. 또한 서해안 사빈의 경사가 완만하기 때문에 대조시에는 해안사구까지 파랑의 영향이 미친다. 서해안 해안사구는 북서 계절풍의 영향을 강하게 받아 드리는 해안에 주로 발달한다<sup>48)</sup>.



그림 11. 운여 해안사구 지형도 (출처: 국토지리정보원 온맵)

47) 홍성찬·최정현·김종욱, 2010, 홀로세 중기 이후 신두리 해안사구의 성장: 기후변화 및 해수면 변동과의 관련 가능성, 한국지형학회지, 17(2), 87-98.

48) 권혁재, 2005, 지형학, 범문사.

운여 해안사구는 북에서 북동쪽으로 발달해있으며 내륙 쪽으로 약 240m 뻗어 있다. Munyikwa 등(2005)는 운여해안의 해안사구에 대한 퇴적학적 조사와 OSL 연대측정을 실시하였다. 사구퇴적층은 상부의 담황색 모래층과 하부의 적갈색 모래층으로 구성되어 있는데 적갈색 모래층은 약 5~7ka에 형성된 것으로 적갈색을 띠는 것은 과거의 토양화작용에 의한 것으로 분석하였다. 입도분석에 의하며, 상부 모래층(깊이 1.8m)의 평균 크기는  $175.6\mu\text{m}$ 이고 하부 모래층(깊이 3.3m, 3.9m, 4.3m)의 평균 크기는 각각  $176.8\mu\text{m}$ ,  $176.8\mu\text{m}$ ,  $176.9\mu\text{m}$ 이다. 상부와 하부의 모래층의 입도 분석 결과와 주사전자현미경을 통한 형태와 표면조직 특성을 통해 퇴적층이 색은 달라도 바람에 의해 퇴적된 것임을 확인하였다. 서해안 운여지역 고사구층에서 발견된 적색층을 대상으로 5000yrBP에 전 세계적으로 홀로세 동안의 기후최적기에 해당하는 시기로 서해안 사구 안정되고 식생이 자라고 토양이 발달하여 사구의 적색화를 가져왔음을 확인하였다<sup>49)</sup>.

---

49) Munyikwa, K., Choi, K. H., Choi, J. H., Park, K. and Kim, J. W., 2005, The sedimentology and luminescence chronology of a coastal dune sequence at Unyo Beach, Taean-Gun, Journal of the geomorphological association of Korea, 12(1), 167-178.



그림 12. 운여해안사구 모습



그림 13. 운여해안사구 단면 (좌: UY1, 우: UY2)

### 3. 강릉 안인사구 및 양양 여운포사구

우리나라 동해안은 서해안과 남해안에 비해 해안선이 단조롭고 활발한 파랑의 작용을 받으며 여러 하천에 의해 토사가 공급되기 때문에 사빈이 잘 발달해 있다. 해안선을 따라 해안절벽과 과식대가 주로 발달하며 좁고 길게 형성된 사빈이 발달한다. 동해안은 서남해안에 비해 파랑과 연안류의 작용이 강하기 때문에 동해안에서 확인되는 사빈은 주로 점토가 아닌 모래와 자갈로 이루어져 있다. 국토해양부(2009)에 따르면, 서남해안의 경우 퇴적해안보다 암석해안의 비율이 더 높는데 비해 동해안은 암석해안의 비율이 44.4%(165.1km), 퇴적해안 비율이 55.6%(207.0km)로 퇴적해안이 더 우세하다. 사빈과 평행하게 발달한 사구열은 농경지, 교통로, 주거지등으로 이용되고 있어 원래의 모습이 보존된 곳을 찾기가 어렵다.

강릉 안인사구는 강릉시 강동면 안인리와 하시동리에 위치한 해안사구로 강릉 남대천 하구에서 남동쪽으로 약 2.5km, 군선강 하구에서 북서쪽으로 약 1km 지점이다. 길이는 약 3km 이며, 폭은 만조선에서 최대 500m 이다. 안인사구에 퇴적물을 공급하는 사빈은 강릉의 남대천으로부터 모래를 공급받는다. 홍수 시에 남대천을 따라 하천으로 흘러나오는 토사들은 삼각주를 형성하는 대신 연안류를 따라 남쪽으로 이동하여 사빈에 퇴적된다. 하구부근의 모래는 굵고 거칠며 남쪽으로 이동할수록 원마작용을 받아 원형도가 높아진다<sup>50)</sup>. 사구형성에 영향을 주는 주된 바람은 남서풍이 우세하며, 여름철에만 북풍~북동풍보다 겨울철 남서풍의 풍속이 더 빠르다.

---

50) 권혁재, 2005, 지형학, 범문사.



그림 14. 강릉 안인사구 지형도 (출처: 국토지리정보원 온맵)

최광희(2009)는 안인사구의 퇴적물 특성에 대한 분석과 연대측정을 하였다. 안인사구 퇴적물에 대한 입도분석 결과 대체로 조립사로 평균입경이 600~1,100 $\mu$ m 로 측정되었다. 표층의 샘플은 대체로 세립질이었으며 하층의 샘플은 표층에 비해 조립질이었으며 사빈의 입도와 유사하였다. OSL 연대 측정결과, 안인사구의 전사구는 약 0.9ka~1.1ka이며 전사구저지는 첫째 열은 1.6~1.9ka, 두 번째 열은 1.8~2.2ka, 세 번째 열은 약 2.6~3.3ka로 측정되었다. 마지막 열의 하부 자갈층이 20~33ka로 분석되었고 그위에 퇴적된 모래층의 연대는 약 6.0~8.4ka로 분석되었다. 해안으로부터 멀어질수록 퇴적층의 연대가 증가한 결과를 통해 안인사구지대가 홀로세 동안 바다쪽으로 전진했음을 확인하였다.

양양 여운포사구는 강원도 양양군 손양면의 동호리부터 북서-남동쪽 방향의 여운포리, 중광정리에 걸쳐 해안을 따라 형성된 해안사구이다. 북쪽의 상운천과 남쪽의 광정천으로부터 모래를 공급받아 형성되었다. 국립환경과학원(2004)에서 여운포사구의 표층퇴적물의 입도분석한 결과 평균 입경이 약  $361\sim 528\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 최광희(2009)는 시추를 통해 입도의 수직적 변화를 파악하였다. 표층의 평균 입경은  $400\sim 500\mu\text{m}$ 이고 지하수면 아래의 평균 입경은  $450\sim 700\mu\text{m}$ 로 조립사로 나타났다. OSL 연대측정 결과는 표층의 연대는 약 150년 전후이며 이는 사구지대형성후 풍성사구사의 퇴적에 의한 것으로 추정된다. 최대 연대는 3000년 이전으로 추정되었다.



그림 15. 양양 여운포사구 지형도 (출처: 국토지리정보원 온맵)

## IV. 연구 결과

### 1. 김녕사구 분석 결과

다음 <그림 16>은 김녕사구의 퇴적상과 깊이에 따른 자화율, 주파수 의존률을 보여준다. 김녕사구의 퇴적상을 살펴보면 0~40cm 까지 상부 고토양층이며 특히 0~20cm 사이에 부식의 정도가 높아 색이 더 진하게 확인되었다. 40~50cm는 중부 모래층이며 50~90cm까지 하부 고토양층으로 63~90cm에서 부식의 정도가 높은 층이 확인되었다. 90cm 이하로는 하부 모래층이 나타난다. 퇴적층이 형성된 연대는 박경·손일(2007)이 측정한 OSL 연대측정치를 활용하였다. 중부 모래층(40~50m)의 연대는  $1.38 \pm 0.18ka$ 이고, 하부 모래층

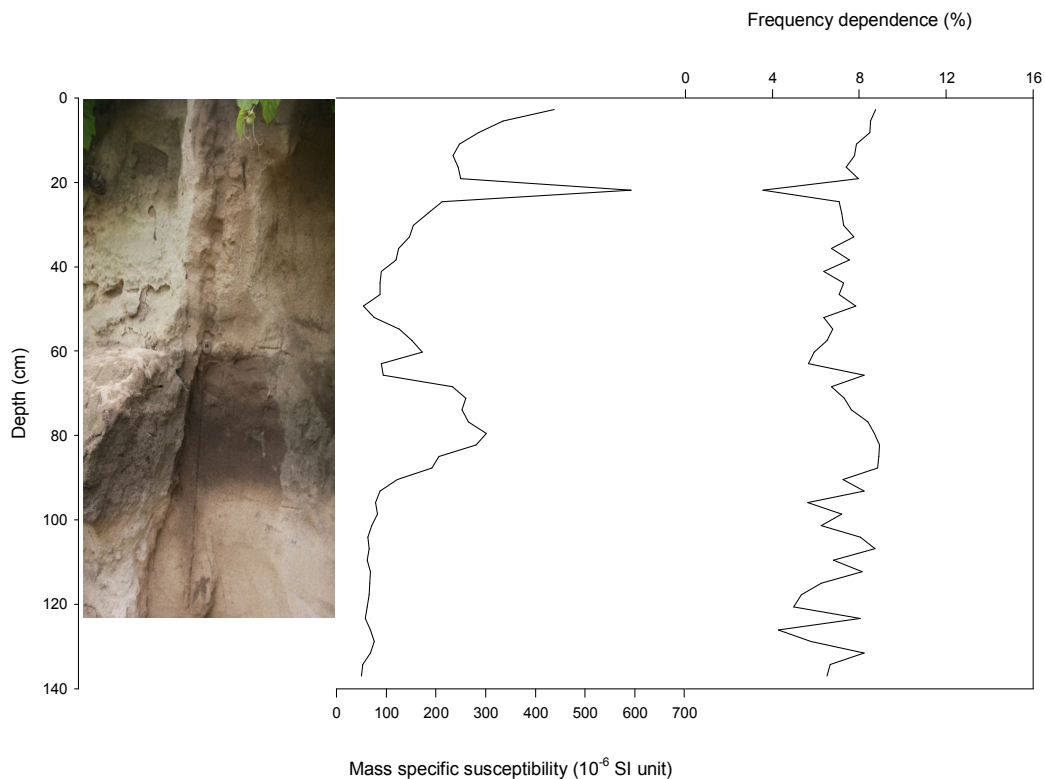


그림 16. 김녕사구 퇴적층의 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프

(90m이하)의 연대는  $6.18 \pm 2.02$ ka이다.

박지훈과 박경(2009)은 같은 연구지역을 대상으로 10cm 간격으로 9개의 샘플을 채취하여 화분분석을 시행하였다. 중부 모래층에서 확인된 화분의 양이 극히 적어 제외된 나머지 8개 샘플을 주요 화분의 출현율의 변화와 퇴적상의 변화 등을 고려하여 2개의 화분대 KY-1(상부 고토양층), KY-2(하부 고토양층)으로 구분하였고, 이 두 개의 화분대를 각각 아화분대(KY-1a, KY-1b, KY-1c, KY-2a, KY-2b, KY-2c)로 구분하였다.

KY-1(상부 고토양층)은  $1.38 \pm 0.18$ ka 이후부터 퇴적되었으며 검출된 주요 화분은 Cyclobalanopsis와 같은 상록활엽수(17~50%), Pinus·Tsuga와 상록침엽수(25~50%)와 낙엽활엽수인 Corylus, Pterocarya, Tilia(15%)가 골고루 나타난다. 비수목화분의 경우 Gramineae가 압도적이며, Cyperaceae, Persicaria 순이다. KY-1a대에서는 Cyclobalanopsis와 같은 상록활엽수, Pinus·Tsuga와 상록침엽수, Corylus, Pterocarya, Tilia가 골고루 출현하여 침활혼합림이 나타났다. KY-1b대에서는 상록활엽수가 1% 미만으로 급감하였고 Pinus와 같은 상록침엽수가 44%로 급증하였고 낙엽활엽수도 10%전후로 나타났음을 확인하였다. KY-1c대에서는 상록침엽수가 10~25%로 다소 감소하고 상록활엽수가 30~50%로 다시 증가하였다. Cyclobalanopsis와 같은 상록활엽수림에는 우리나라에서는 Cyclobalanopsis(가시나무아류)와 Carpinus(서어나무속)이 포함되며 이들은 난온대 상록수림에 포함되는 종들이다. 이를 통해 KY-1대(상부 고토양층)에는 기후가 난온대였음을 확인하였고 특히 상록활엽수림이 주를 이루던 KY-1c대에는 기온이 더 온난했을 것으로 추정하였다.

KY-2(하부 고토양층)은  $6.18 \pm 2.02$ ka이후부터  $1.38 \pm 0.18$ ka 사이에 퇴적되었으며 이시기에는 Cyclobalanopsis와 같은 상록활엽수가 29~35%, Pinus와 같은 상록침엽수가 18~67%의 비율로 함께 나타난다. 비수목화분의 경우,

Pterisaria가 하위 층에서 가장 높게 출현하였고, Gramineae가 중위 층에서 가장 높게 출현하였다. KY-2a대에서는 상록활엽수(Cyclobalanopsis, Ilex)와 상록침엽수(Pinus) 그리고 낙엽활엽수(Carpinus, Corylus)가 골고루 나타났다. KY-2b대에서는 Cyclobalanopsis가 1% 이하로 감소했으며 Pinus가 67%로 급증하였고 낙엽활엽수는 KY-2a대와 비슷하였다. KY-2c대의 경우, Cyclobalanopsis가 33~35%로 증가하였고, Pinus가 6~29%로 감소하였으며, 낙엽활엽수는 이전시기에 비해 증가하여 Carpinus가 24~29%로 나타났음을 확인하였다. 이를 통해 KY-2대(하부 고토양층)에는 기후가 난온대였음을 확인하였고 특히 상록활엽수림이 증가했던 KY-1c대에는 기온이 더 온난했을 것으로 추정하였다.

깊이에 따른 질량 자화율(mass specific susceptibility)값을 보면 두 개의 고토양층에서 중부와 하부 모래층의 자화율 값에 비해 3~5배 높은 값을 보였다. 이는 김녕사구의 퇴적층에서 토양화 작용이 일어난 층의 자화율이 높게 나타났음을 의미하며 자화율이 토양화 과정에 따른 과거 기후 변화를 알아내는 지표로 이용될 수 있음을 의미한다. 특히 고토양층내에서 부식의 정도가 더 높은 진한 흑색의 상부의 토양에서 하부 토양에 비해 더 높은 값을 보였다. 이는 그 시기에 자성을 띠는 물질이 더 많이 생성되기 좋은 기후조건을 가지고 있었다는 것을 의미한다. 이 결과는 고토양 상부층인 KY-1c, KY-2c시기에 조금 더 온난한 기후였을 것이며 이시기에 토양생성작용이 더 활발히 일어났을 것이라는 화분분석 결과와 일치하기 때문에 앞선 연구에서 밝혀진 토양화에 의한 자성광물의 형성이 과거 기후환경변화의 지표가 될 수 있다는 결과를 뒷받침한다.

질량 자화율(mass specific susceptibility)과 주파수 의존율(frequency dependence) 두 변수를 비교하여 분석하면, 깊이 20cm 부근의 한 샘플이 자화율 값이 다른 값들에 비해 비정상적으로 높게 나왔으며, 주파수 의존률

(frequency dependence) 값이 자화율 값에 비해 매우 작게 나온 것으로 보아 샘플이 철분 등에 오염된 것으로 볼 수 있다. 연대측정결과를 고려할 때 신석기 이후에 퇴적된 물질로 인류가 등장한 이후의 샘플들은 농경생활이 시작되면서 오염원에 영향을 받을 가능성 존재하기 때문에 이를 고려하여 분석하여야 한다. 주파수 의존률(frequency dependence) 값은 4에서 8사이 값을 가지며 자화율의 급격한 증가를 보이는 하부 고토양층에서는 8이상의 값을 나타낸다. 자화율 그래프에 비해 뚜렷한 변화를 보이지 않지만 하부 고토양층에서 8이상의 값을 가지는 것으로 보아 초미립자성광물이 혼재되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 이전의 연구에서 패각질로 구성된 해양 퇴적물에서 주자성 세균에 의해 만들어지는 것과 비슷한 단자구의 자철석의 입자가 존재한다는 결과를 뒷받침한다<sup>51)</sup>. 이를 통해 하부 고토양층이 형성될 시기로 추정되는  $6.18 \pm 2.02\text{ka}$  이후부터  $1.38 \pm 0.18\text{ka}$  사이 기간동안 연구지역의 기후환경은 토양이 잘 형성될 수 있는 온난습윤한 환경이었음을 확인할 수 있다.

---

51) McNeill et al, 1988, op. cit, 8-12.

## 2. 서해안 운여해안사구 결과

운여 해안사구에서는 노두가 드러난 두 곳에서 샘플을 채취하였다. UY1은 사구의 상부퇴적층으로 깊이 108cm, 샘플 40개를 채취하였고 UY2는 하부퇴적층으로 깊이 130cm, 샘플 50개를 채취하였다. UY1층은 Munyikwa 등(2005)의 OSL 연대측정값에 의해 현재부터 5ka 사이에 퇴적된 층으로 확인되었다.

<그림 17>의 UY1의 토양 단면을 보면 담황색의 모래가 퇴적되어 있으며 50cm~73cm 사이에서 얇은 3개의 진한 회색의 고토양층이 번갈아 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 먼저 질량 자화율을 보면 고토양층이 번갈아 나타난 50cm~73cm 사이에서 자화율의 피크를 확인할 수 있다. 눈으로 확인된 번갈아 나타나던 진한 회색의 고토양층이 다른 퇴적층에 비해 더 많은 자성물질들을 가지고 있음을 의미한다. 주파수 의존률과 비교하면, 자화율의 피크가 나온 층에서 주파수 의존률이 12에 가까운 값을 보였고 최대 14까지 확인할 수 있었다. 층위간 자화율의 변화를 통해 얇은 간격으로 번갈아 형성된 고토양층을 확인할 수 있으며, 주파수 의존률을 통해 형성된 고토양의 높은 자화율이 토양 형성 과정 중 주자성 세균에 의한 자철석 때문임을 확인하였다. 두 변수를 통해 5ka 이후에 운여해안사구는 일정 시기동안 토양이 생성 될 수 있는 기후환경을 거쳤음을 의미한다.

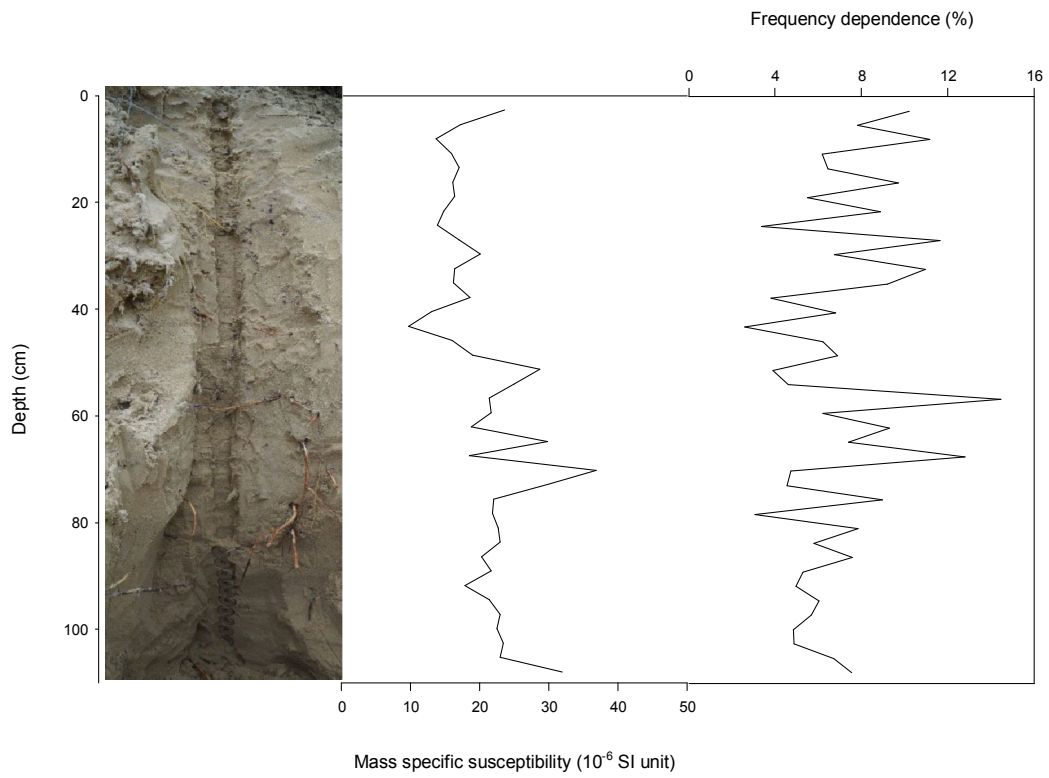


그림 17. UY1의 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프

<그림 18>의 UY2 토양층의 모습을 살펴보면 상부에서 약 60cm 까지 모래퇴적물로 구성되어 있고 60cm부터 120cm 까지 진한 적갈색의 고토양퇴적층이 나타난다. Munyikwa 등(2005)의 OSL 연대측정값에 의해 진한 적갈색의 고토양퇴적층은 5ka 이후 시기에 형성된 것으로 확인되었다. 퇴적층에 따른 질량 자화율의 그래프를 살펴보면 모래퇴적층의 자화율은  $20\sim30\times 10^{-6}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$  정도이며 적갈색의 고토양층에서는 자화율이 급격히 증가하여 상부의 모래퇴적물 보다 2배 이상의 높은 자화율을 보인다. 주파수 의존률이 적갈색의 퇴적층에서 높게 나타나는 것으로 보아 초상자성 자성물질을 많이 가지고 있음을 확인 할 수 있다.

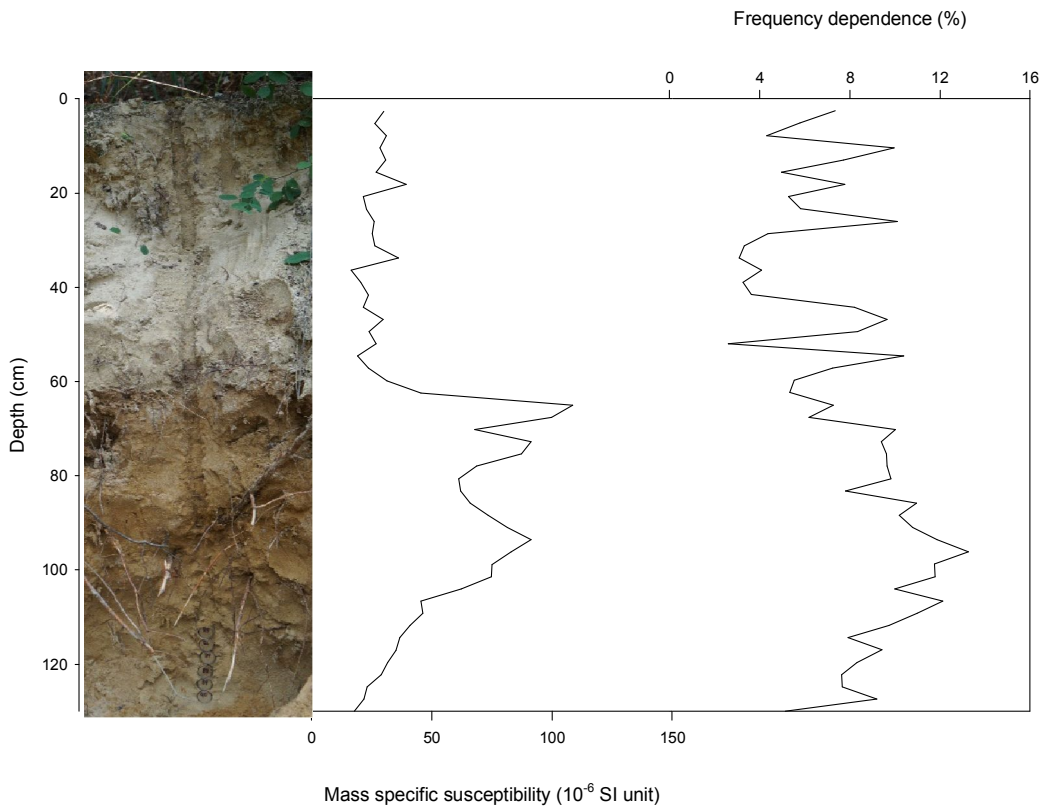


그림 18. UY2의 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프

### 3. 강릉 안인사구 및 양양 여운포 사구 결과

먼저 강릉 안인사구의 결과를 살펴보면, <그림 20>은 안인사구의 퇴적 단면과 깊이에 따른 질량 자화율과 주파수 의존률 결과이다. 안인사구 표면에는 해송 및 식생이 자라고 있었고 퇴적물의 입자크기가 다른 연구지역인 김녕사구, 운여해안사구에 비해 큰편으로 육안으로 차이가 구별할 수 있는 정도였다. 자화율의 변화를 보면 0cm에서 35cm까지는 약  $100 \times 10^{-6} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ 로 하부 퇴적층 보다 높은 자화율을 보였으며 35cm부터 감소하는 경향을 보였다. 이전 연구의 연대측정결과에 따르면 안인사구의 전사구 지대의 연대는 0.9ka~1.1ka이다. 약 1000년 전부터 퇴적된 안인사구는 안정되고 온난습윤한 기후환경조건에서 토양화작용을 받아왔음을 확인할 수 있다.

주파수 의존률 경우, 대체적으로 4% 이하의 낮은 결과를 보여준다. 안인사구의 주파수 의존률이 다른 연구지역의 결과 보다 대체적으로 낮게 나타난 이유는 다른 지역에 비해 안인사구의 연대가 어리고 퇴적물의 공급원이 다양하기 때문으로 추정된다. 안인사구의 연대는 0.9ka~1.1ka로 상대적으로 어린 지형이기 때문에 초상자성(SP) 입자가 형성될 시간이 충분하지 않았다. 그로 인해 층위별로 주파수 자화율 값의 변화가 크게 나타나지 않았다. 또한 안인사구의 샘플을 채취한 지점은 퇴적물 유입하천으로부터 멀리 떨어진 곳이며 퇴적물의 공급원이 다양하다. 여러 물질이 섞인 하천 퇴적물의 유입과 후방퇴적물과 연안류로부터의 물질의 유입이 자화율과 주파수 의존률에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 기존의 자기적 변수를 이용한 연구처럼 중국 퇴스 고원이나 러시아 스텝토와 같이 공급원이 단순하고 안정된 지역의 결과와는 차이가 있다.

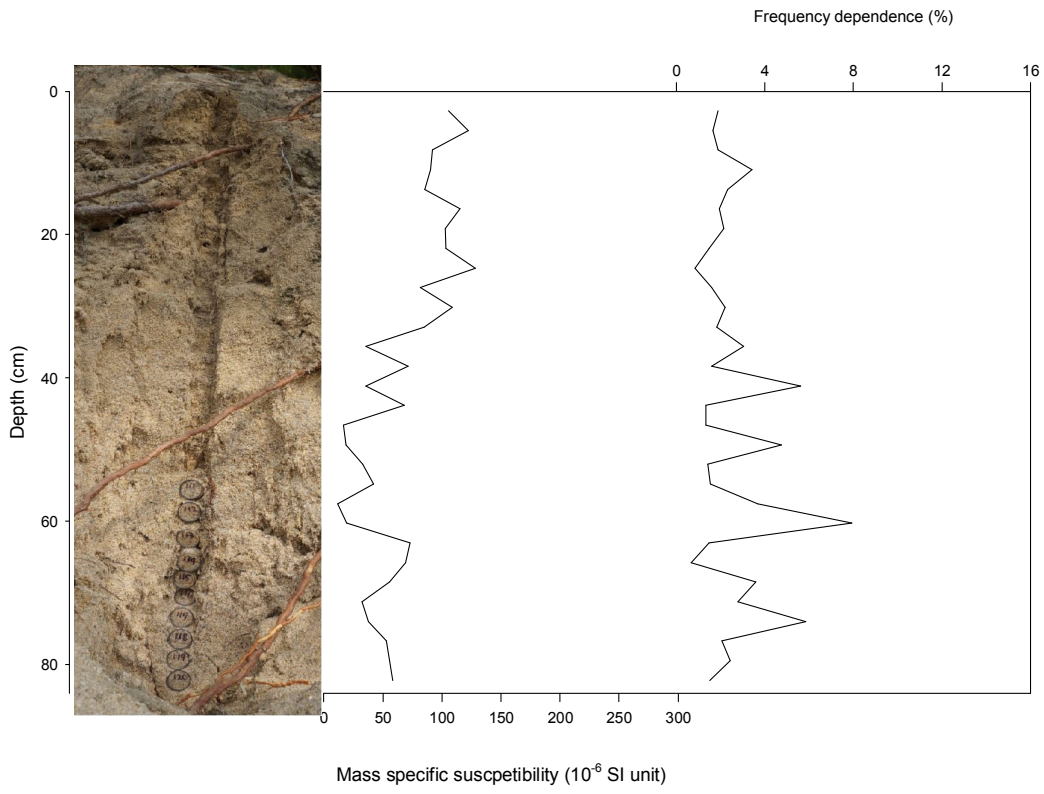


그림 19. 안인 사구 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프

<그림 21>은 여운포사구의 퇴적 단면 및 질량 자화율과 주파수 의존률의 변화를 보여준다. 0cm에서 50cm까지  $150\sim 200\times 10^{-6}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ 의 높은 자화율을 보이고 50cm 아래층은 감소하여  $50\sim 150\times 10^{-6}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ 의 자화율 값을 보인다. 0cm에서 50cm까지 현재 토양화가 진행되는 층으로 확인되었다. 주파수 의존률은 4%이하로 낮은 값을 보인다. 여운포 사구 역시 안인사구와 같이 주 퇴적물 공급원이 하천퇴적물이고 후방퇴적물의 영향을 받았으며 초상자성 입자가 형성되기에 아직 형성시기가 오래되지 않았기 때문에 낮게 나타났다.

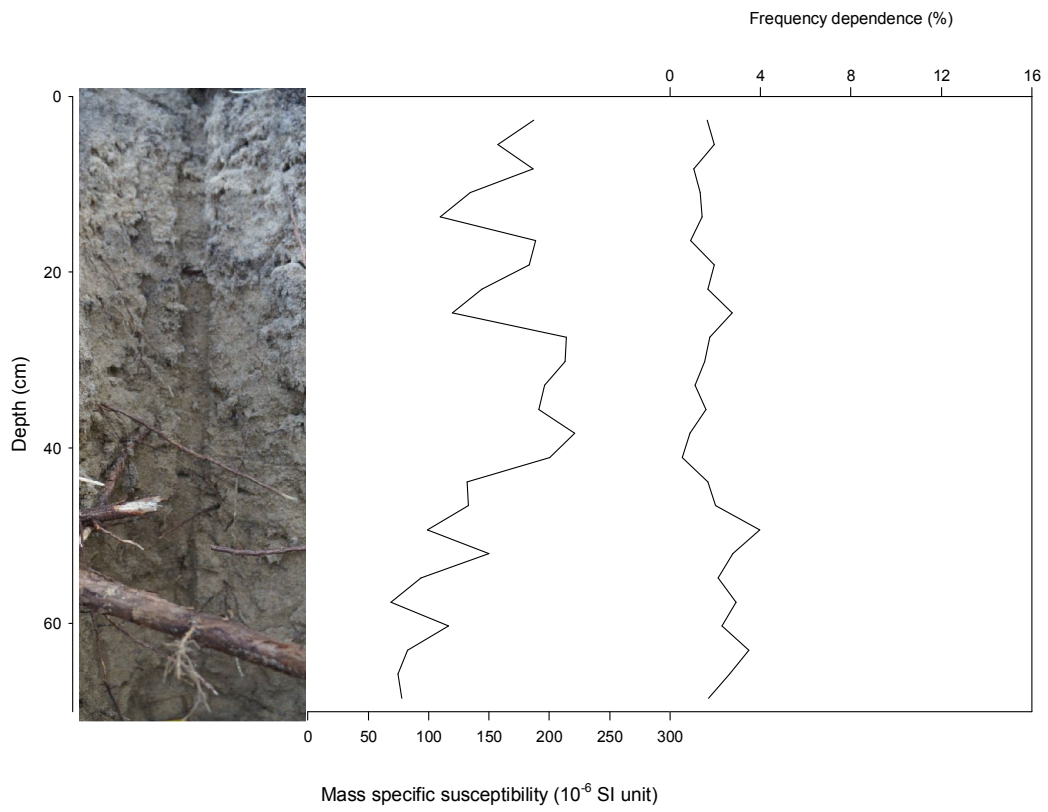


그림 20. 여운포사구 퇴적층 단면 및 자화율, 주파수 의존률 그래프

#### 4. 중국의 홀로세 기후변화 결과와 비교

본 연구에서 밝힌 상대적으로 연대가 긴 김녕 사구와 운여해안사구의 결과와 선행연구에서 확인한 중국의 홀로세 동안 기후변화 결과와 비교하였다. 중국의 경우 나라의 면적이 크며 우리나라 보다 넓은 범위의 위도대를 포함하고 있다. 본 연구지역인 김녕사구와 운여해안사구는 위도상으로 중국의 중앙 지역으로 볼 수 있다. 중국 중앙 지역은 이전 연구들로부터 5,000yrBP~7,000yrBP에 홀로세 기후 최적기가 있던 것으로 확인되었다.

<그림 22>는 김녕사구와 운여해안사구의 질량 자화율 값의 변화를  $\delta^{18}O$  결과와 함께 나타낸 그래프이다. 그래프에 따르면 김녕사구의 경우 질량 자화율 값이 4,000yrBP~6,000yrBP 동안 최대치를 보였으며 그 시기에 지금보다 온난습윤했음을 확인하였다. 또한 운여해안사구의 경우 질량 자화율 값이 4,000yrBP~5,000yrBP 시기에 적색 고토양층이 형성되었고 자화율의 최대값을 확인하였다. 이는 중국의 홀로세 기간 동안의 기후변화 추세와 일치함을 확인할 수 있다.

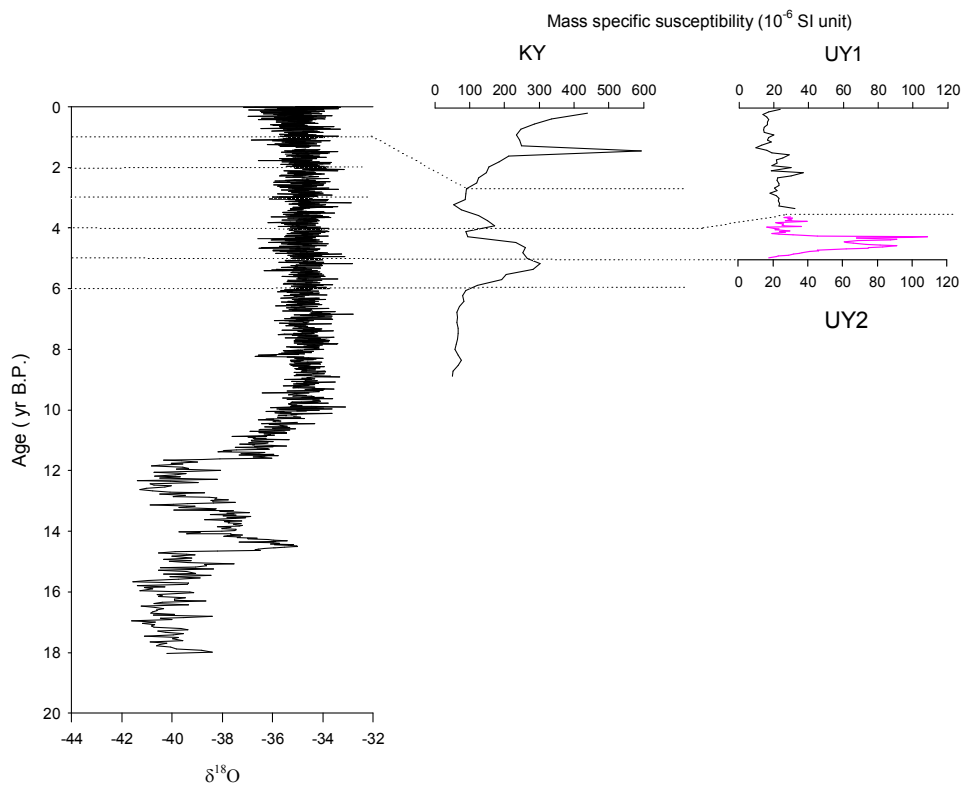


그림 21. 김녕사구와 운여해안사구 질량 자화율과 그린란드 GISP 2의  $\delta^{18}\text{O}$  값

## V. 결론 및 논의

고기후환경변화를 복원하는 것은 미래의 기후환경변화를 예측하고 분석하는데 기초 자료를 제공하기 때문에 매우 중요하다. 한반도를 대상으로 고기후환경변화를 복원하려는 많은 연구들이 진행되어 왔으나 그 수가 부족한 실정이며 다양한 분석방법을 이용한 연구가 필요하다.

본 연구는 홀로세 시기동안 한반도의 기후환경변화를 복원하기 위해 제주 김녕사구, 서해안의 운여해안사구, 동해안의 강릉 안인사구, 양양 여운포사구를 대상으로 자기적 성질을 분석하였다. 연구에 이용한 자기적 변수는 질량 자화율(mass specific susceptibility)과 주파수 의존률(frequency dependence)이다.

이전의 연구와 달리 자화율을 측정 시 부피와 질량을 표준화시킴으로써 실제 샘플의 자화율을 정확하게 측정하였다. 표준화된 질량 자화율은 다른 지역의 자화율 값과 비교분석이 가능하다는 장점이 있다. 서로 다른 두 개의 주파수에서 자화율을 통해 얻어지는 주파수 의존률은 샘플 내에 초상자성 물질의 양을 알 수 있는 변수이다.

특히 주파수 의존률에 의해 측정되는 초상자성 물질은  $0.03\mu\text{m}$  크기의 초미립자이다. 고토양 속에서 주자성 세균(magnetotactic bacteria, 走磁性細菌)에 의해 만들어지는 자철석이 확인된다는 것은 고토양이 퇴적될 당시 토양형성과정을 거쳤으며 토양형성과정이 진행될 만큼 안정되고 온난한 기후였음을 의미한다. 그러므로 질량 자화율과 주파수 의존률, 두 가지 자기적 변수는 고기후환경변화를 복원하는데 유용한 변수로 분석되었다.

김녕사구의 경우 두 개의 고토양층에서 질량 자화율의 최대값을 확인할 수 있었으며 상부의 고토양층에서는 질량 자화율이 비정상적으로 높게 나온 동시에 주파수 의존률이 매우 낮은 샘플을 확인하였다. 이 예외적으로 높은 값은 연대측정결과를 고려할 때 신석기 이후에 인류에 의해 오염원의 영향을 받은 것으로 추정할 수 있었다. 주파수 의존률과 함께 고려할 때 상부의 고토양층은  $1.38 \pm 0.18\text{ka}$  이후부터 현재까지 토양 형성과정이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 하부의 고토양층은  $6.18 \pm 2.02\text{ka}$  이후부터  $1.38 \pm 0.18\text{ka}$  까지 퇴적된 층으로 질량 자화율이 급격히 증가하고 최대값을 보이며, 주파수 의존률이 8이상의 값까지 보였다. 이 시기에 김녕사구 지역은 토양이 잘 형성될 수 있는 온난습윤한 환경이었음을 확인할 수 있다.

운여 해안사구의 경우 상부 퇴적층인 UY1과 하부 퇴적층인 UY2의 결과를 분석하였다. UY1의 경우, 50cm~73cm 사이에서 얇은 3개의 진한 회색의 고토양층이 번갈아 존재하는 것을 육안으로 확인할 수 있었고 또한 질량 자화율의 피크를 통해서도 확인할 수 있었다. 주파수 의존률의 경우, 자화율의 피크가 나온 층에서 주파수 의존률이 12에 가까운 높은 값을 보이는 것으로 보아 고토양층이 형성될 당시 토양 형성 과정을 겪었으며 기후가 온난습윤했음을 확인할 수 있다. 육안으로 확인하기에도 매우 얇은 고토양층의 존재를 질량 자화율과 주파수 의존률을 통해 확인할 수 있는 것으로 보아 두 변수가 상당히 민감한 변수임을 알 수 있다.

UY2의 경우, 60cm부터 120cm 까지 진한 적갈색의 고토양퇴적층이 나타난다. 이 고토양은 연대측정결과에 의해 5ka 이후 시기에 형성되었으며 질량 자화율의 급격한 증가와 최대값을 확인할 수 있었다. 주파수 의존률 역시 적갈색의 퇴적층에서 12에 가까운 피크를 확인할 수 있었다. 이를 통해 적갈색 고토양층이 퇴적된 5ka 이후 동안 온난습윤한 기후환경이었으며 홀로세 기후 최적기(Holocene climate optimum)와 일치함을 확인할 수 있었

다.

강릉 안인사구와 양양 여운포 사구의 경우, 김녕사구와 운여 해안사구에 비해 형성 시기가 오래되지 않았으며 상부의 토양화 과정을 겪는 층에서는 질량 자화율의 증가를 확인 할 수 있었다. 그러나 두 지역 모두 주파수 의존률의 경우 4이하의 낮은 값을 보인다. 그 이유는 다른 지역에 비해 연대가 어리기 때문에 초상자성(superparamagnetic) 입자가 형성될 시간이 충분하지 않았다. 또한 동해안의 사구의 경우 해안가에서 멀리 떨어지지 않았으며 퇴적물의 공급원이 다양하기 때문으로 추정된다. 주 퇴적물 공급원이 하천으로 여러 물질이 유입될 가능성이 높으며 후방퇴적물과 연안류로부터의 물질의 유입이 자화율과 주파수 의존률에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

김녕사구와 운여 해안사구의 측정 결과를 중국의 고기후환경변화 복원 값과 비교분석하였다. 중국의 경우 위도별로 동아시아 여름 몬순의 영향이 달라 시기별로 홀로세 기후 최적기가 다르다. 우리나라의 경우 김녕 사구와 운여해안사구가 중국의 중앙 지역과 같은 선상으로 볼 수 있다.

중국 중앙 지역의 경우 7,000yrBP~5,000yrBP에 홀로세 기후 최적기가 있던 것으로 확인되었다. 이러한 경향을 김녕사구와 운여해안사구의 결과에서도 확인 할 수 있었다. 김녕사구의 경우 질량 자화율 값이 4,000yrBP~6,000yrBP 동안 최대치를 보였으며 그 시기에 지금보다 온난습윤했음을 확인하였다. 또한 운여해안사구의 경우 질량 자화율 값이 4,000yrBP~5,000yrBP 시기에 적색 고토양층이 형성되었고 자화율의 최대값을 확인하였다. 이를 통해 중국과 한반도의 고기후환경변화 추세가 일치함을 확인할 수 있으며 자기적 변수를 이용한 고기후환경변화 복원의 유용성을 확인할 수 있었다.

본 연구는 샘플을 채취한 각 지점별로 연대측정을 실시하지 못했다는 점과 본 연구에서 사용한 자화율과 주파수 의존률 외 다른 자기적 변수들을 이용하지 못했다는 한계점이 있다. 그러나 자화율 측정 시 무게와 질량을 표준화하여 정확한 자화율 값을 얻었으며 표준화를 통해 다른 지역의 질량 자화율 값과 비교분석할 수 있다는 점과 주파수 의존률을 이용하여 초상자성 물질을 확인함을 통해 고기후환경변화 분석에 정확성을 높였다는 점에서 의의가 있다.

## 참 고 문 헌

### <단행본>

국토해양부, 2009, 연안실태에 관한 기초조사

권혁재, 2005, 지형학, 법문사.

도성재·김광호, 1999, 고지자기학, 아르케.

Burroughs, W. J., 2005, Climate change in prehistory-the end of the reign of chaos, Cambridge university press.

Dearing, J., 1999, Environmental Magnetic Susceptibility-Using the Bartington MS2 System.

Krauskopf, K. B., 1979, Introduction to Geochemistry, McGraw-Hill Publishing Company.

### <학술지>

김정찬, 2008, 한국의 고기후/고해양 연구: 현황과 미래 연구방향, 지질학회지, 44(1), 1-4.

남욱현·임재수, 2011, 한반도 홀로세 온난기후 최적기와 지표환경 변화, 한국 제4기학회지, 26(2), 165-172.

박 경, 1998, Paleoclimatic reconstruction in the Central Great Plains using environmental magnetism and stable isotope, 대한지리학회지, 33(3), 377-394.

박 경·박지훈, 2009, 제주 김녕사구의 형성기와 고정기에 관한 연구, 한국지형학회지, 16(2), 111-122.

박 경·박지훈, 2011, 충남 부여지역의 홀로세 기후변화-탄소동위원소분석과 대자율분석을 이용하여, 대한지리학회지, 46(4), 396-412.

- 박 경·손 일, 2007, 제주도 김녕·월정사구의 OSL 연대측정 결과와 그 의미, 한국지형학회지, 14(2), 33-41.
- 박 경·손 일·장은미, 2004, 제주 김녕-월정사구의 발달과정에 관하여, 한국지역지리학회지, 10(4), 851-864.
- 박지훈, 2011, 한국의 제4기 환경연구 - 최종간빙기~홀로세 환경연구를 중심으로, 한국지형학회지, 18(4), 97-126.
- 박지훈·박 경, 2009, 화분분석으로 본 제주도 김녕사구 일대의 후빙기 중기 이후 환경변화, 한국지형학회지, 16(1), 43-55.
- 박지훈·박 경, 2010, 충남 천안 구룡천 하류부 안골유역의 최종빙기 이후 사면물질이동, 한국지형학회지, 17(3), 31-47.
- 박충선·윤순옥·황상일, 2007, 전북 부안 화강암지역 퇴스-고토양 연속층의 퇴적물 특성과 기원지, 대한지리학회지, 42(6), 898-913.
- 박충선·윤순옥·황상일, 2014, 강릉시 불화산 일대 퇴스 퇴적층의 형성 과정과 퇴적 환경, 한국지형학회지, 21(3), 49-61.
- 신영호, 2011, 하구역 퇴적물의 대자율 변화와 기후변화의 연관성, 한국지역지리학회지, 17(5), 521-535.
- 신영호, 2015, 하구역 간석지 퇴적물 자화율의 통합과 주기성 검토, 한국지역지리학회지, 21(3), 593-607.
- 신재봉·Naruse, T·유강민, 2005, 퇴스-고토양 퇴적층을 이용한 홍천강 중류에 발달한 하안단구의 형성시기, 지질학회지, 41(3), 323-333.
- 이상현·류은영·김주용·남옥현·양동윤·신숙정, 2005, 경기도 일산 이산포지역의 후기 홀로세 고환경 변화 연구: 화분과 규조분석, 지질학회지, 41(3), 295-322.
- 윤순옥·김민지·황상일, 2013, 점봉산 고산습지의 화분분석과 홀로세 후기 기후변화, 한국지형학회지, 20(4), 101-115.

- 윤순옥·문영룡·황상일, 2008, 경포호 홀로세 퇴적층에 대한 화분분석과 환경 변화, 지질학회지, 44(6), 781-794.
- 윤순옥·박충선·황상일, 2013, 진천분지 퇴스-고토양 연속층의 형성과 퇴적환경, 한국지형학회지, 20(3), 1-14.
- 윤순옥·황상일, 2009, 대구 분지의 화분분석과 홀로세 후기 기후 환경변화, 한국지형학회지, 16(4), 47-59.
- 윤정수·고기원, 1994, 제주도 연안 사빈퇴적물의 계절적 변화에 관한 연구, 한국지구화학학회지, 15(1), 46-59.
- 전창표·이상현·이성주, 경기도 평택지역의 홀로세 고환경 변화 연구, 지질학회지, 45(4), 299-309.
- 정철환·류준길, 2012, 화분분석을 통한 김해지역의 홀로세 식생 변천 및 고환경 연구, 지질학회지, 48(1), 1-10.
- 정철환·오강호, 2010, 화분분석을 통한 제주도 한남리지역의 홀로세 고식생 및 고기후 연구, 고생물학회지, 26(2), 165-172.
- 정혜경·김정빈, 2012, 휴무스분석을 이용한 함평천 유역의 홀로세 후기 충적 평야의 지형발달과 기후환경변화, 한국지구과학회지, 33(4), 320-328.
- 정혜경·박지훈·김정빈, 2010, 탄소동위원소분석을 이용한 한국 홀로세의 기후환경변화: 서해 영종도 지역을 사례로, 한국지구과학회지, 31(4), 313-321.
- 지옥미·우경식, 1995, 제주도 사빈퇴적물의 구성성분, 해양학회지, 30, 480-492.
- 황상일·강창혁·윤순옥, 2011, 경남 거창분지 정장리 퇴스-고토양 연속층의 퇴적물 특성과 편년, 대한지리학회지, 46(1), 1-19.
- 황상일·박충선·윤순옥, 2009, 전북 완주군 봉동 하안단구 상부 퇴스-고토양 연속층의 풍화특성과 기원지, 대한지리학회지, 44(4), 463-480.

- Demske, D., Heumann, G., Granoszewski, W., Nita, M., Mamakowa, K., Tarasov, P.E. and Oberhansli, H., 2005, Late glacial and Holocene vegetation and regional climate variability evidence in high-resolution pollen records from Lake Baikal. *Global and Planetary Change*, 46, 255-279.
- Fang, X., Ono, Y., Fukusawa, H., Bao-Tian, P., Li, J., Dong-Hong, Guan., Oi, K., Tsukamoto, S., Torii, M. and Mishima, T., 1999, Asian summer monsoon instability during the past 60,000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau, *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 219-232.
- Han, J., Lu, H., Wu, N. and Guo, Z., 1996, Magnetic susceptibility of modern soils in China and climate conditions, *Stud. Geophys. Geodet.*, 40, 262-275.
- Heller, F. and Liu, T., 1982, Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China, *Nature* 300, 431-433.
- Heller, F. and Liu, T., 1984, Magnetism of Chinese loess deposits, *Journal of Geophysical Research* 77, 125-141.
- Kukla, G., Heller, F., Liu, X. M., Xu, T. C., Liu, T. S. and An, Z. A., 1988, Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility, *Geology* 16, 811-814.
- Liu, J. P., Milliman, J. D., Gao, S. and Cheng, P., 2004, Holocene development of the yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea, *Marine Geology*, 209, 45-67.
- Lowenstam, H. A., 1981, Minerals formed by organisms, *Science* 13,

211(4487), 1126-1131.

- Maher, B. A., 1986, Characterization of soils by mineral magnetic measurements, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, 76 - 92.
- Maher, B. A., Alekseev, A. and Alekseeva, T., 2003, Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 201, 321-341.
- Maher, B. A. and Hu, M., 2006, A high-resolution record of Holocene rainfall variations from the western Chinese Loess Plateau: antiphase behaviour of the African/Indian and East Asian Summer monsoons, *The Holocene*, 16(3), 309-319.
- Maher, B. A., MengYu, H., Roberts, H. M. and Wintle, A. G., 2003, Holocene loess accumulation and soil development at the western edge of the Chinese Loess Plateau: implications for magnetic proxies of paleorainfall, *Quaternary Science Review*, 22, 445-451.
- Maher, B. A. and Taylor, R., 1988, Formation of ultrafine-grained magnetite in soils, *Nature*, 336(6197), 368-370.
- Maher, B. A. and Thompson, R., 1991, Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols, *Geology*, 19, 3-6.
- Maher, B. A. and Thompson, R., 1995, Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols, *Quat. Res.*, 44, 383-391.
- Maher, B. A., Thompson, R. and Zhou, L. P., 1994, Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian paleomonsoon: A new

- mineral magnetic approach, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 125, 461-471.
- McNeill, D. F., Ginsburg, R. N., Chang, S. R. and Kirschvink, J. L., 1988, Magnetostratigraphic dating of shallow-water carbonates from San Salvador, Bahamas, *Geology*, 16, 8-12.
- Petersen, N., van Dobbeneck, J. L., and Vali, H., 1986, Fossil bacterial magnetite in deep-sea sediments from the South Atlantic Ocean, *Nature* 320, 611-615.
- Porter, S. C., Hallet, B., Wu, X. and An, Z., 2001, Dependence of near-surface magnetic susceptibility on dust accumulation rate and precipitation on the Chinese Loess Plateau, *Quat. Res.*, 55, 271-283.
- Schwermann, U. and Taylor, R. M., 1987, Iron oxides. In: Dixon, J.B., Weed, S.B.(Eds.), *Minerals in Soil Environments*, 2<sup>nd</sup> ed. Soil Sci. Soc. Am.,Madison.
- Stolz, J. F., Chang, S. R. and Kirschvink, J. L., 1986, Magnetotactic bacteria and single-domain magnetite in hemipelagic sediments, *Nature*, 321, 849-851.
- Thompson, R. and Morton, D. J., 1979, Magnetic susceptibility and particle-size distribution in recent sediments of the Loch Lomond Drainage Basin, Scotland, *Journal of Sedimentary Petrology*, 49(3), 801-811.
- Xiang, R., Yang, Z., Saito, Y., Fan, D., Chen, M., Guo, Z. and Chen, Z., 2008, Paleoenvironmental changes during the last 8400 years in the southern Yellow Sea: Benthic foraminiferal and stable isotopic evidence, *Marine Micropaleontology*, 67, 104-119.

- Zhou, L. P., Oldfield, F., Winkle, A. G., Robinson, S. G. and Wang, J. T., 1990, Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess, *Nature* 346, 737-739.
- Zheng, Y., Kissel, C., Zheng, H. B., Laj, C. and Wang, K., 2010, Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: Magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications, *Marine Geology* 268, 34-42.

## ABSTRACT

### An Analysis on Holocene Paleoclimate Environments in Korean Peninsula Reconstructed from Magnetic Evidences

Ji eun, Choi  
Department of Geography  
Graduate School of  
Sungshin University

This study intended to reconstruct paleoclimate changes of the Korea peninsular during the Holocene by using the magnetic properties which are mass specific susceptibility and frequency dependence. Study Areas were Kimyoung sanddune in Jeju, Unyo sanddune in west coast, Anin sanddune and Yeounpo sanddune in east coast. Samples from each study areas showed the highest mass specific susceptibility and high level of frequency dependence in the paleosol stages. This results indicated that climate condition was warm and humid during the formation period of paleosol stages. According to the comparative analysis between this study's record and chinese climate change records, study results coincided with chinese climate trends and Holocene climate optimum.

## 부 록

표 1. 김녕사구 샘플 측정값

샘플 번호 (KY)	깊이 (cm)	샘플 무게 (g)	1차 (SI)		2차 (SI)		3차 (SI)		평균 X <sub>lf</sub>	평균 X <sub>hf</sub>	FD (%)
			X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>			
01	2.74	15.2	4.41E-04	4.02E-04	4.36E-04	3.99E-04	4.36E-04	3.97E-04	4.38E-04	3.99E-04	8.76
02	5.48	13.7	3.35E-04	3.07E-04	3.33E-04	3.07E-04	3.36E-04	3.05E-04	3.35E-04	3.06E-04	8.50
03	8.22	14.5	2.87E-04	2.63E-04	2.86E-04	2.63E-04	2.86E-04	2.61E-04	2.86E-04	2.62E-04	8.48
04	10.96	13.9	2.48E-04	2.28E-04	2.47E-04	2.27E-04	2.47E-04	2.29E-04	2.47E-04	2.28E-04	7.86
05	13.7	13.5	2.36E-04	2.17E-04	2.34E-04	2.16E-04	2.35E-04	2.17E-04	2.35E-04	2.17E-04	7.78
06	16.44	12.6	2.45E-04	2.26E-04	2.43E-04	2.27E-04	2.45E-04	2.26E-04	2.44E-04	2.26E-04	7.41
07	19.18	12.6	2.49E-04	2.31E-04	2.50E-04	2.29E-04	2.49E-04	2.28E-04	2.49E-04	2.29E-04	7.95
08	21.92	13.5	5.93E-04	5.73E-04	5.93E-04	5.73E-04	5.93E-04	5.70E-04	5.93E-04	5.72E-04	3.57
09	24.66	12.9	2.10E-04	1.95E-04	2.14E-04	1.98E-04	2.14E-04	1.99E-04	2.13E-04	1.98E-04	7.07
10	27.4	13.2	1.84E-04	1.70E-04	1.84E-04	1.71E-04	1.83E-04	1.71E-04	1.84E-04	1.71E-04	7.20
11	30.14	12.8	1.54E-04	1.42E-04	1.55E-04	1.42E-04	1.55E-04	1.45E-04	1.55E-04	1.43E-04	7.27
12	32.88	13.6	1.47E-04	1.36E-04	1.47E-04	1.36E-04	1.47E-04	1.36E-04	1.47E-04	1.36E-04	7.76
13	35.62	13.8	1.27E-04	1.16E-04	1.24E-04	1.16E-04	1.24E-04	1.17E-04	1.25E-04	1.16E-04	6.71
14	38.36	14.4	1.22E-04	1.10E-04	1.18E-04	1.10E-04	1.19E-04	1.11E-04	1.20E-04	1.11E-04	7.55
15	41.1	12.5	9.26E-05	8.53E-05	8.99E-05	8.66E-05	8.86E-05	8.20E-05	9.04E-05	8.46E-05	6.38
16	43.84	13.5	8.60E-05	8.07E-05	8.93E-05	8.27E-05	8.79E-05	8.07E-05	8.77E-05	8.14E-05	7.26
17	46.58	12.9	8.86E-05	8.26E-05	8.86E-05	8.26E-05	8.53E-05	7.87E-05	8.75E-05	8.13E-05	7.07
18	49.32	9.6	5.55E-05	4.96E-05	5.35E-05	4.96E-05	5.16E-05	4.89E-05	5.36E-05	4.94E-05	7.83
19	52.06	12	7.80E-05	7.27E-05	7.67E-05	6.88E-05	7.41E-05	7.27E-05	7.63E-05	7.14E-05	6.36
20	54.8	12.8	1.27E-04	1.18E-04	1.26E-04	1.18E-04	1.26E-04	1.16E-04	1.26E-04	1.18E-04	6.77
21	57.54	12.5	1.52E-04	1.42E-04	1.52E-04	1.44E-04	1.53E-04	1.41E-04	1.52E-04	1.42E-04	6.51
22	60.28	12.8	1.73E-04	1.61E-04	1.72E-04	1.61E-04	1.71E-04	1.63E-04	1.72E-04	1.62E-04	5.92
23	63.02	13	9.00E-05	8.47E-05	8.99E-05	8.47E-05	8.86E-05	8.40E-05	8.95E-05	8.44E-05	5.66

24	65.76	10.6	9.65E-05	8.73E-05	9.26E-05	8.53E-05	9.32E-05	8.66E-05	9.41E-05	8.64E-05	8.21
25	68.5	13.5	2.33E-04	2.18E-04	2.32E-04	2.17E-04	2.33E-04	2.18E-04	2.33E-04	2.17E-04	6.72
26	71.24	13.4	2.60E-04	2.41E-04	2.59E-04	2.41E-04	2.60E-04	2.41E-04	2.60E-04	2.41E-04	7.30
27	73.98	13.3	2.53E-04	2.33E-04	2.53E-04	2.32E-04	2.50E-04	2.33E-04	2.52E-04	2.33E-04	7.62
28	76.72	12.7	2.66E-04	2.44E-04	2.65E-04	2.42E-04	2.64E-04	2.42E-04	2.65E-04	2.43E-04	8.40
29	79.46	12.4	3.04E-04	2.76E-04	3.01E-04	2.75E-04	3.00E-04	2.74E-04	3.02E-04	2.75E-04	8.71
30	82.2	12.8	2.81E-04	2.57E-04	2.80E-04	2.56E-04	2.83E-04	2.56E-04	2.82E-04	2.56E-04	8.94
31	84.94	11.8	2.06E-04	1.86E-04	2.04E-04	1.88E-04	2.06E-04	1.87E-04	2.05E-04	1.87E-04	8.91
32	87.68	12.9	1.91E-04	1.74E-04	1.91E-04	1.75E-04	1.93E-04	1.76E-04	1.92E-04	1.75E-04	8.83
33	90.42	12.9	1.22E-04	1.13E-04	1.21E-04	1.15E-04	1.23E-04	1.12E-04	1.22E-04	1.13E-04	7.25
34	93.16	10.9	8.86E-05	8.13E-05	8.79E-05	8.13E-05	8.73E-05	7.94E-05	8.79E-05	8.07E-05	8.23
35	95.9	10.9	7.94E-05	7.54E-05	7.74E-05	7.34E-05	8.01E-05	7.47E-05	7.90E-05	7.45E-05	5.64
36	98.64	11.5	8.20E-05	7.61E-05	8.53E-05	7.87E-05	8.14E-05	7.60E-05	8.29E-05	7.69E-05	7.18
37	101.38	11.5	7.21E-05	6.68E-05	7.07E-05	6.48E-05	6.95E-05	6.74E-05	7.08E-05	6.64E-05	6.25
38	104.12	10.9	6.35E-05	5.76E-05	6.28E-05	5.69E-05	6.22E-05	5.88E-05	6.28E-05	5.78E-05	8.05
39	106.86	11.5	6.55E-05	6.02E-05	6.61E-05	5.95E-05	6.48E-05	5.96E-05	6.55E-05	5.97E-05	8.71
40	109.6	11.2	6.29E-05	5.95E-05	6.08E-05	5.56E-05	6.22E-05	5.82E-05	6.20E-05	5.78E-05	6.80
41	112.34	12	6.74E-05	6.28E-05	6.81E-05	6.02E-05	6.74E-05	6.35E-05	6.77E-05	6.22E-05	8.12
42	115.08	11.8	6.75E-05	6.28E-05	6.68E-05	6.35E-05	6.75E-05	6.28E-05	6.72E-05	6.30E-05	6.26
43	117.82	11.7	6.54E-05	6.21E-05	6.41E-05	6.15E-05	6.74E-05	6.28E-05	6.57E-05	6.22E-05	5.33
44	120.56	11.3	6.08E-05	5.75E-05	6.15E-05	5.95E-05	6.08E-05	5.69E-05	6.10E-05	5.80E-05	4.99
45	123.3	10.8	5.75E-05	5.36E-05	5.69E-05	5.16E-05	5.75E-05	5.29E-05	5.73E-05	5.27E-05	8.03
46	126.04	11.5	6.88E-05	6.54E-05	6.68E-05	6.41E-05	6.68E-05	6.42E-05	6.75E-05	6.46E-05	4.27
47	128.78	12	7.74E-05	7.27E-05	7.54E-05	7.15E-05	7.54E-05	7.08E-05	7.60E-05	7.17E-05	5.76
48	131.52	12.4	6.88E-05	6.41E-05	6.62E-05	6.08E-05	6.74E-05	6.08E-05	6.75E-05	6.19E-05	8.21
49	134.26	11.7	5.22E-05	4.89E-05	5.16E-05	4.96E-05	5.35E-05	4.83E-05	5.24E-05	4.89E-05	6.67
50	137	11.9	5.09E-05	4.63E-05	5.03E-05	4.82E-05	5.02E-05	4.70E-05	5.05E-05	4.72E-05	6.52

표 2. 운여해안사구(UY1) 샘플 측정값

샘플 번호 (UY1)	깊이 (cm)	샘플 무게 (g)	1차 (SI)		2차 (SI)		3차 (SI)		평균 X <sub>lf</sub>	평균 X <sub>hf</sub>	FD (%)
			X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>			
01	2.7	16.2	2.31E-05	2.12E-05	2.38E-05	2.11E-05	2.38E-05	2.12E-05	2.36E-05	2.12E-05	10.21
02	5.4	17	1.79E-05	1.58E-05	1.65E-05	1.59E-05	1.72E-05	1.58E-05	1.72E-05	1.59E-05	7.80
03	8.1	17.1	1.32E-05	1.13E-05	1.32E-05	1.13E-05	1.45E-05	1.39E-05	1.37E-05	1.21E-05	11.16
04	10.8	16.3	1.59E-05	1.46E-05	1.59E-05	1.49E-05	1.59E-05	1.52E-05	1.59E-05	1.49E-05	6.16
05	13.5	16	1.65E-05	1.52E-05	1.72E-05	1.59E-05	1.72E-05	1.65E-05	1.70E-05	1.59E-05	6.43
06	16.2	17	1.59E-05	1.39E-05	1.59E-05	1.45E-05	1.65E-05	1.52E-05	1.61E-05	1.45E-05	9.69
07	18.9	16.3	1.52E-05	1.46E-05	1.65E-05	1.58E-05	1.72E-05	1.59E-05	1.63E-05	1.54E-05	5.51
08	21.6	17.4	1.39E-05	1.32E-05	1.52E-05	1.32E-05	1.53E-05	1.39E-05	1.48E-05	1.35E-05	8.89
09	24.3	16.3	1.39E-05	1.33E-05	1.46E-05	1.38E-05	1.32E-05	1.32E-05	1.39E-05	1.34E-05	3.36
10	27	17	1.72E-05	1.46E-05	1.72E-05	1.46E-05	1.66E-05	1.59E-05	1.70E-05	1.50E-05	11.63
11	29.7	17.1	1.92E-05	1.79E-05	2.06E-05	1.92E-05	2.05E-05	1.92E-05	2.01E-05	1.87E-05	6.73
12	32.4	17.5	1.66E-05	1.52E-05	1.59E-05	1.39E-05	1.65E-05	1.45E-05	1.63E-05	1.45E-05	10.94
13	35.1	17	1.66E-05	1.52E-05	1.59E-05	1.42E-05	1.59E-05	1.45E-05	1.61E-05	1.46E-05	9.22
14	37.8	17.4	1.85E-05	1.79E-05	1.79E-05	1.72E-05	1.92E-05	1.85E-05	1.85E-05	1.78E-05	3.82
15	40.5	16.4	1.38E-05	1.26E-05	1.32E-05	1.25E-05	1.19E-05	1.12E-05	1.30E-05	1.21E-05	6.80
16	43.2	16.3	9.92E-06	9.91E-06	9.29E-06	9.20E-06	9.95E-06	9.29E-06	9.72E-06	9.47E-06	2.60
17	45.9	16.9	1.55E-05	1.52E-05	1.65E-05	1.52E-05	1.59E-05	1.46E-05	1.60E-05	1.50E-05	6.20
18	48.6	16.5	1.92E-05	1.79E-05	1.85E-05	1.72E-05	1.92E-05	1.79E-05	1.90E-05	1.76E-05	6.90
19	51.3	17.3	2.78E-05	2.71E-05	2.91E-05	2.85E-05	2.91E-05	2.71E-05	2.87E-05	2.76E-05	3.89
20	54	16.3	2.45E-05	2.38E-05	2.64E-05	2.51E-05	2.38E-05	2.24E-05	2.49E-05	2.38E-05	4.61
21	56.7	18	2.18E-05	1.85E-05	2.12E-05	1.86E-05	1.99E-05	1.79E-05	2.10E-05	1.83E-05	12.66
22	59.4	18	2.11E-05	2.05E-05	2.25E-05	1.92E-05	2.12E-05	2.11E-05	2.16E-05	2.03E-05	6.21
23	62.1	18.4	1.92E-05	1.66E-05	1.85E-05	1.78E-05	1.85E-05	1.65E-05	1.87E-05	1.70E-05	9.30
24	64.8	18.9	3.04E-05	2.78E-05	2.98E-05	2.78E-05	2.91E-05	2.71E-05	2.97E-05	2.75E-05	7.40
25	67.5	18.2	1.98E-05	1.66E-05	1.91E-05	1.66E-05	1.65E-05	1.52E-05	1.85E-05	1.61E-05	12.78
26	70.2	17.3	3.57E-05	3.44E-05	3.83E-05	3.57E-05	3.63E-05	3.51E-05	3.68E-05	3.51E-05	4.73

27	72.9	19	2.91E -05	2.78E -05	2.91E -05	2.84E -05	3.11E -05	2.91E -05	2.98E -05	2.84E -05	4.55
28	75.6	18.7	2.24E -05	1.92E -05	2.12E -05	1.98E -05	2.25E -05	2.12E -05	2.20E -05	2.01E -05	8.95
29	78.3	17.7	2.05E -05	1.99E -05	2.25E -05	2.25E -05	2.25E -05	2.11E -05	2.18E -05	2.12E -05	3.08
30	81	16.8	2.24E -05	2.05E -05	2.25E -05	2.05E -05	2.31E -05	2.18E -05	2.27E -05	2.09E -05	7.85
31	83.7	17.8	2.18E -05	2.11E -05	2.31E -05	2.12E -05	2.38E -05	2.25E -05	2.29E -05	2.16E -05	5.78
32	86.4	17	1.92E -05	1.72E -05	2.12E -05	1.98E -05	2.05E -05	1.92E -05	2.03E -05	1.87E -05	7.57
33	89.1	17.7	2.05E -05	1.98E -05	2.18E -05	2.05E -05	2.25E -05	2.12E -05	2.16E -05	2.05E -05	5.29
34	91.8	17.5	1.79E -05	1.72E -05	1.91E -05	1.72E -05	1.66E -05	1.65E -05	1.79E -05	1.70E -05	4.97
35	94.5	17.5	2.05E -05	1.92E -05	2.18E -05	2.05E -05	2.18E -05	2.05E -05	2.13E -05	2.01E -05	6.04
36	97.2	17.7	2.31E -05	2.12E -05	2.18E -05	2.18E -05	2.38E -05	2.19E -05	2.29E -05	2.16E -05	5.67
37	99.9	17.3	2.31E -05	2.11E -05	2.25E -05	2.18E -05	2.18E -05	2.12E -05	2.25E -05	2.14E -05	4.83
38	102.6	18.2	2.45E -05	2.24E -05	2.32E -05	2.24E -05	2.25E -05	2.18E -05	2.34E -05	2.22E -05	4.87
39	105.3	18.1	2.31E -05	2.18E -05	2.25E -05	2.05E -05	2.31E -05	2.18E -05	2.29E -05	2.14E -05	6.70
40	108	17.9	3.31E -05	2.98E -05	3.04E -05	2.92E -05	3.24E -05	2.97E -05	3.20E -05	2.96E -05	7.53

표 3. 운여해안사구(UY2) 샘플 측정값

샘플 번호 (UY2)	깊이 (cm)	샘플 무게 (g)	1차 (SI)		2차 (SI)		3차 (SI)		평균 X <sub>lf</sub>	평균 X <sub>hf</sub>	FD (%)
			X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>			
41	2.6	15.8	2.85E-05	2.78E-05	2.98E-05	2.65E-05	3.18E-05	2.91E-05	3.00E-05	2.78E-05	7.35
42	5.2	15.9	2.65E-05	2.45E-05	2.51E-05	2.45E-05	2.78E-05	2.58E-05	2.65E-05	2.49E-05	5.78
43	7.8	17.9	3.04E-05	2.98E-05	3.11E-05	3.11E-05	3.18E-05	2.84E-05	3.11E-05	2.98E-05	4.31
44	10.4	17.3	2.77E-05	2.58E-05	2.78E-05	2.51E-05	2.97E-05	2.58E-05	2.84E-05	2.56E-05	9.97
45	13	16.7	3.04E-05	2.84E-05	3.04E-05	2.85E-05	3.17E-05	2.85E-05	3.08E-05	2.85E-05	7.74
46	15.6	17.3	2.71E-05	2.64E-05	2.65E-05	2.58E-05	2.71E-05	2.45E-05	2.69E-05	2.56E-05	4.96
47	18.2	17.1	3.84E-05	3.77E-05	3.77E-05	3.44E-05	4.23E-05	3.71E-05	3.94E-05	3.64E-05	7.79
48	20.8	17.5	2.19E-05	2.11E-05	2.25E-05	1.99E-05	2.05E-05	2.05E-05	2.16E-05	2.05E-05	5.28
49	23.4	17.3	2.18E-05	2.04E-05	2.51E-05	2.32E-05	2.18E-05	2.11E-05	2.29E-05	2.16E-05	5.83
50	26	17.1	2.58E-05	2.38E-05	2.58E-05	2.31E-05	2.64E-05	2.32E-05	2.60E-05	2.34E-05	10.11
51	28.6	16.2	2.58E-05	2.51E-05	2.51E-05	2.31E-05	2.51E-05	2.45E-05	2.53E-05	2.42E-05	4.36
52	31.2	17.3	2.71E-05	2.64E-05	2.51E-05	2.38E-05	2.71E-05	2.64E-05	2.64E-05	2.56E-05	3.33
53	33.8	15.7	3.70E-05	3.51E-05	3.57E-05	3.51E-05	3.57E-05	3.50E-05	3.62E-05	3.50E-05	3.10
54	36.4	14.3	1.59E-05	1.59E-05	1.65E-05	1.46E-05	1.72E-05	1.71E-05	1.65E-05	1.59E-05	4.10
55	39	16.9	1.98E-05	1.92E-05	2.05E-05	1.98E-05	2.11E-05	2.05E-05	2.05E-05	1.98E-05	3.25
56	41.6	16.3	2.31E-05	2.25E-05	2.38E-05	2.31E-05	2.38E-05	2.25E-05	2.36E-05	2.27E-05	3.62
57	44.2	17.2	2.18E-05	1.99E-05	2.18E-05	1.98E-05	2.06E-05	1.92E-05	2.14E-05	1.96E-05	8.21
58	46.8	17.7	3.17E-05	2.78E-05	2.78E-05	2.71E-05	2.98E-05	2.58E-05	2.98E-05	2.69E-05	9.67
59	49.4	17.2	2.45E-05	2.25E-05	2.31E-05	2.12E-05	2.38E-05	2.18E-05	2.38E-05	2.18E-05	8.34
60	52	16.9	2.64E-05	2.58E-05	2.65E-05	2.64E-05	2.78E-05	2.64E-05	2.69E-05	2.62E-05	2.60
61	54.6	15.9	1.91E-05	1.72E-05	1.92E-05	1.72E-05	1.92E-05	1.72E-05	1.92E-05	1.72E-05	10.39
62	57.2	16.5	2.31E-05	2.12E-05	2.32E-05	2.19E-05	2.44E-05	2.25E-05	2.36E-05	2.19E-05	7.23
63	59.8	16.7	3.30E-05	2.98E-05	3.04E-05	2.91E-05	3.11E-05	3.04E-05	3.15E-05	2.98E-05	5.54
64	62.4	17.6	4.56E-05	4.36E-05	4.43E-05	4.30E-05	4.69E-05	4.30E-05	4.56E-05	4.32E-05	5.35
65	65	17	1.09E-04	1.01E-04	1.08E-04	1.01E-04	1.09E-04	1.01E-04	1.09E-04	1.01E-04	7.26
66	67.6	16.9	9.98E-05	9.26E-05	9.98E-05	9.39E-05	9.98E-05	9.45E-05	9.98E-05	9.37E-05	6.18

67	70.2	16.6	6.88E-05	5.96E-05	6.75E-05	6.15E-05	6.75E-05	6.22E-05	6.79E-05	6.11E-05	10.04
68	72.8	17.4	9.13E-05	8.27E-05	9.06E-05	8.33E-05	9.19E-05	8.20E-05	9.13E-05	8.27E-05	9.40
69	75.4	17.3	8.73E-05	7.93E-05	8.67E-05	7.87E-05	8.80E-05	7.87E-05	8.73E-05	7.89E-05	9.63
70	78	16.9	6.88E-05	6.22E-05	6.81E-05	6.08E-05	6.88E-05	6.28E-05	6.86E-05	6.19E-05	9.66
71	80.6	16.3	6.08E-05	5.49E-05	6.15E-05	5.55E-05	6.08E-05	5.49E-05	6.11E-05	5.51E-05	9.82
72	83.2	17	6.15E-05	5.62E-05	6.09E-05	5.56E-05	6.35E-05	5.95E-05	6.19E-05	5.71E-05	7.80
73	85.8	17.5	6.68E-05	6.02E-05	6.48E-05	5.76E-05	6.68E-05	5.89E-05	6.61E-05	5.89E-05	10.96
74	88.4	17.2	7.34E-05	6.62E-05	7.34E-05	6.48E-05	7.34E-05	6.67E-05	7.34E-05	6.59E-05	10.19
75	91	17.6	8.27E-05	7.21E-05	8.07E-05	7.27E-05	8.14E-05	7.34E-05	8.16E-05	7.28E-05	10.80
76	93.6	16.9	9.06E-05	8.07E-05	9.13E-05	8.00E-05	9.20E-05	8.07E-05	9.13E-05	8.05E-05	11.87
77	96.2	15.5	8.27E-05	7.21E-05	8.33E-05	7.21E-05	8.34E-05	7.21E-05	8.31E-05	7.21E-05	13.27
78	98.8	16	7.61E-05	6.61E-05	7.34E-05	6.68E-05	7.54E-05	6.55E-05	7.49E-05	6.61E-05	11.75
79	101.4	17.7	7.54E-05	6.55E-05	7.41E-05	6.55E-05	7.47E-05	6.68E-05	7.47E-05	6.59E-05	11.80
80	104	17	6.16E-05	5.62E-05	6.29E-05	5.62E-05	6.22E-05	5.55E-05	6.22E-05	5.60E-05	9.99
81	106.6	15	4.56E-05	4.03E-05	4.57E-05	4.03E-05	4.56E-05	3.97E-05	4.56E-05	4.01E-05	12.12
82	109.2	16.6	4.50E-05	4.03E-05	4.69E-05	4.10E-05	4.70E-05	4.23E-05	4.63E-05	4.12E-05	10.99
83	111.8	16.8	4.17E-05	3.76E-05	3.97E-05	3.57E-05	4.17E-05	3.77E-05	4.10E-05	3.70E-05	9.75
84	114.4	17.2	3.70E-05	3.44E-05	3.71E-05	3.37E-05	3.57E-05	3.30E-05	3.66E-05	3.37E-05	7.92
85	117	17.4	3.51E-05	3.11E-05	3.50E-05	3.24E-05	3.50E-05	3.17E-05	3.50E-05	3.17E-05	9.44
86	119.6	17.9	3.31E-05	2.98E-05	3.11E-05	2.91E-05	3.11E-05	2.84E-05	3.17E-05	2.91E-05	8.31
87	122.2	17.8	2.91E-05	2.65E-05	2.84E-05	2.65E-05	2.91E-05	2.71E-05	2.89E-05	2.67E-05	7.64
88	124.8	17.2	2.32E-05	2.12E-05	2.32E-05	2.12E-05	2.32E-05	2.18E-05	2.32E-05	2.14E-05	7.68
89	127.4	17	2.18E-05	1.98E-05	2.19E-05	2.05E-05	2.18E-05	1.92E-05	2.18E-05	1.98E-05	9.20
90	130	17.2	1.72E-05	1.72E-05	1.79E-05	1.65E-05	1.79E-05	1.65E-05	1.77E-05	1.68E-05	5.13

표 4. 안인사구 샘플 측정값

샘플 번호 (AI)	깊이 (cm)	샘플 무게 (g)	1차 (SI)		2차 (SI)		3차 (SI)		평균 X <sub>lf</sub>	평균 X <sub>hf</sub>	FD (%)
			X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>			
91	2.74	17.5	1.06E-04	1.04E-04	1.05E-04	1.03E-04	1.06E-04	1.04E-04	1.06E-04	1.04E-04	1.88
92	5.48	17.4	1.22E-04	1.20E-04	1.22E-04	1.20E-04	1.22E-04	1.20E-04	1.22E-04	1.20E-04	1.64
93	8.22	17.4	9.39E-05	9.06E-05	9.06E-05	9.00E-05	9.19E-05	9.06E-05	9.21E-05	9.04E-05	1.88
94	10.96	18.4	9.25E-05	8.79E-05	9.13E-05	8.72E-05	8.80E-05	8.73E-05	9.06E-05	8.75E-05	3.43
95	13.7	16.2	8.20E-05	8.20E-05	8.86E-05	8.40E-05	8.54E-05	8.40E-05	8.53E-05	8.33E-05	2.33
96	16.44	17.6	1.14E-04	1.12E-04	1.16E-04	1.14E-04	1.15E-04	1.13E-04	1.15E-04	1.13E-04	1.95
97	19.18	16.9	1.03E-04	1.01E-04	1.03E-04	1.01E-04	1.04E-04	9.99E-05	1.03E-04	1.01E-04	2.16
98	21.92	16.8	1.05E-04	1.02E-04	1.03E-04	1.02E-04	1.02E-04	1.01E-04	1.03E-04	1.02E-04	1.47
99	24.66	18	1.28E-04	1.28E-04	1.28E-04	1.28E-04	1.28E-04	1.26E-04	1.28E-04	1.27E-04	0.84
100	27.4	17.7	8.14E-05	7.94E-05	8.20E-05	8.07E-05	8.13E-05	8.07E-05	8.16E-05	8.03E-05	1.59
101	30.14	18.7	1.09E-04	1.06E-04	1.09E-04	1.07E-04	1.08E-04	1.07E-04	1.09E-04	1.06E-04	2.21
102	32.88	16.8	8.33E-05	8.26E-05	8.40E-05	8.27E-05	8.67E-05	8.40E-05	8.47E-05	8.31E-05	1.84
103	35.62	18.6	3.57E-05	3.51E-05	3.63E-05	3.44E-05	3.51E-05	3.44E-05	3.57E-05	3.46E-05	3.04
104	38.36	18.8	7.34E-05	7.07E-05	7.08E-05	7.01E-05	7.01E-05	7.01E-05	7.14E-05	7.03E-05	1.59
105	41.1	18.3	3.57E-05	3.37E-05	3.51E-05	3.37E-05	3.64E-05	3.37E-05	3.57E-05	3.37E-05	5.61
106	43.84	18.7	6.88E-05	6.75E-05	6.87E-05	6.74E-05	6.75E-05	6.74E-05	6.83E-05	6.74E-05	1.33
107	46.58	18	1.78E-05	1.72E-05	1.66E-05	1.66E-05	1.59E-05	1.59E-05	1.68E-05	1.65E-05	1.33
108	49.32	17.4	1.92E-05	1.79E-05	1.85E-05	1.78E-05	1.78E-05	1.72E-05	1.85E-05	1.76E-05	4.74
109	52.06	18.3	3.31E-05	3.31E-05	3.24E-05	3.24E-05	3.31E-05	3.18E-05	3.29E-05	3.24E-05	1.43
110	54.8	16.8	4.17E-05	4.16E-05	4.17E-05	4.04E-05	4.30E-05	4.24E-05	4.21E-05	4.15E-05	1.55
111	57.54	15.7	1.12E-05	1.06E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.13E-05	1.17E-05	1.12E-05	3.68
112	60.28	18	1.85E-05	1.72E-05	1.92E-05	1.78E-05	2.05E-05	1.85E-05	1.94E-05	1.78E-05	7.92
113	63.02	18.8	7.27E-05	7.21E-05	7.34E-05	7.14E-05	7.27E-05	7.21E-05	7.29E-05	7.19E-05	1.48
114	65.76	18.4	6.48E-05	6.42E-05	7.01E-05	6.95E-05	7.21E-05	7.21E-05	6.90E-05	6.86E-05	0.67
115	68.5	17.9	5.62E-05	5.42E-05	5.42E-05	5.22E-05	5.62E-05	5.42E-05	5.55E-05	5.35E-05	3.60
116	71.24	18.5	3.11E-05	3.11E-05	3.30E-05	3.11E-05	3.24E-05	3.17E-05	3.22E-05	3.13E-05	2.79

117	73.98	18.3	3.64E -05	3.50E -05	3.90E -05	3.58E -05	3.84E -05	3.64E -05	3.79E -05	3.57E -05	5.84
118	76.72	18.9	5.35E -05	5.23E -05	5.36E -05	5.16E -05	5.10E -05	5.09E -05	5.27E -05	5.16E -05	2.06
119	79.46	17.5	5.56E -05	5.42E -05	5.62E -05	5.42E -05	5.55E -05	5.49E -05	5.58E -05	5.44E -05	2.45
120	82.2	17.6	5.82E -05	5.69E -05	5.82E -05	5.76E -05	5.82E -05	5.76E -05	5.82E -05	5.73E -05	1.51

표 5. 여운포사구 샘플 측정값

샘플 번호 (AI)	깊이 (cm)	샘플 무게 (g)	1차 (SI)		2차 (SI)		3차 (SI)		평균 X <sub>lf</sub>	평균 X <sub>hf</sub>	FD (%)
			X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>	X <sub>lf</sub>	X <sub>hf</sub>			
121	2.74	15.5	1.86E-04	1.84E-04	1.88E-04	1.84E-04	1.88E-04	1.84E-04	1.87E-04	1.84E-04	1.65
122	5.48	14.5	1.60E-04	1.54E-04	1.55E-04	1.54E-04	1.57E-04	1.55E-04	1.57E-04	1.54E-04	1.95
123	8.22	15.9	1.88E-04	1.85E-04	1.86E-04	1.84E-04	1.86E-04	1.85E-04	1.87E-04	1.85E-04	1.06
124	10.96	16.7	1.35E-04	1.34E-04	1.34E-04	1.32E-04	1.34E-04	1.32E-04	1.34E-04	1.33E-04	1.33
125	13.7	17.2	1.10E-04	1.08E-04	1.10E-04	1.08E-04	1.10E-04	1.08E-04	1.10E-04	1.08E-04	1.44
126	16.44	17.1	1.88E-04	1.87E-04	1.89E-04	1.87E-04	1.89E-04	1.87E-04	1.89E-04	1.87E-04	0.93
127	19.18	17.1	1.83E-04	1.78E-04	1.83E-04	1.81E-04	1.83E-04	1.80E-04	1.83E-04	1.80E-04	1.95
128	21.92	16.2	1.46E-04	1.42E-04	1.44E-04	1.43E-04	1.43E-04	1.41E-04	1.44E-04	1.42E-04	1.68
129	24.66	17.4	1.21E-04	1.16E-04	1.20E-04	1.18E-04	1.19E-04	1.16E-04	1.20E-04	1.17E-04	2.76
130	27.4	17.1	2.16E-04	2.10E-04	2.14E-04	2.10E-04	2.12E-04	2.11E-04	2.14E-04	2.10E-04	1.75
131	30.14	17.4	2.14E-04	2.10E-04	2.13E-04	2.10E-04	2.13E-04	2.10E-04	2.13E-04	2.10E-04	1.54
132	32.88	17.5	1.98E-04	1.95E-04	1.96E-04	1.93E-04	1.94E-04	1.93E-04	1.96E-04	1.94E-04	1.12
133	35.62	17.1	1.89E-04	1.86E-04	1.90E-04	1.89E-04	1.94E-04	1.89E-04	1.91E-04	1.88E-04	1.61
134	38.36	18.2	2.21E-04	2.20E-04	2.22E-04	2.19E-04	2.21E-04	2.19E-04	2.21E-04	2.19E-04	0.90
135	41.1	17	2.02E-04	2.01E-04	2.00E-04	1.99E-04	2.00E-04	1.98E-04	2.01E-04	1.99E-04	0.56
136	43.84	17.3	1.32E-04	1.31E-04	1.31E-04	1.28E-04	1.33E-04	1.30E-04	1.32E-04	1.30E-04	1.68
137	46.58	17.1	1.32E-04	1.29E-04	1.34E-04	1.30E-04	1.34E-04	1.33E-04	1.33E-04	1.31E-04	2.02
138	49.32	17.6	9.92E-05	9.46E-05	9.72E-05	9.59E-05	1.01E-04	9.52E-05	9.92E-05	9.52E-05	3.98
139	52.06	17.4	1.47E-04	1.43E-04	1.53E-04	1.46E-04	1.49E-04	1.48E-04	1.50E-04	1.46E-04	2.79
140	54.8	17	9.32E-05	9.06E-05	9.32E-05	9.12E-05	9.40E-05	9.26E-05	9.35E-05	9.15E-05	2.13
141	57.54	16.5	6.88E-05	6.87E-05	6.68E-05	6.61E-05	7.01E-05	6.48E-05	6.86E-05	6.65E-05	2.93
142	60.28	17.8	1.15E-04	1.14E-04	1.15E-04	1.13E-04	1.20E-04	1.15E-04	1.17E-04	1.14E-04	2.30
143	63.02	17	8.07E-05	7.94E-05	8.60E-05	7.94E-05	8.07E-05	8.00E-05	8.25E-05	7.96E-05	3.49
144	65.76	16.9	7.41E-05	7.01E-05	7.34E-05	7.34E-05	7.60E-05	7.41E-05	7.45E-05	7.25E-05	2.63
145	68.5	16.1	7.67E-05	7.47E-05	7.80E-05	7.74E-05	7.87E-05	7.74E-05	7.78E-05	7.65E-05	1.70