

간행물 등록번호

NNIBR-2021-0000240-10

한반도 습지 퇴적토 고생물상 및 고환경 연구
- 2단계 3차년도 -

Research for the paleoenvironmental reconstruction
based on the biological analysis from Korean wetland
sediments -Vol. II(3)-

원생생물연구팀



국립낙동강생물자원관
Nakdonggang National Institute of Biological Resources

발간등록번호: NNIBR-2021-0000240-10

한반도 습지 퇴적토 고생물상 및 고환경 연구
-2단계 3차년도-

담수생물연구본부 미생물연구실 원생생물연구팀

윤석민, 이상득, 이창수, 한지혜, 배미정, 권대률, 박미례, 박채홍

Research for the paleoenvironmental
reconstruction based on the biological analysis
from Korean wetland sediments

-Vol. II(1)-

Suk Min Yun, Sang Deuk Lee, Chang soo Lee, Ji-Hye Han,
Mi-Jung Bae, Daeryul Kwon, Mirye Park, Chaehong Park

Protist Research Team
Microbial Research Department
Nakdonggang National Institute of Biological Resources

2021

목 차

목차	i
표 목차	iii
그림 목차	iv
초록	v
I. 서론	1
1. 연구사업의 배경	1
2. 연구사업의 배경 및 목표	2
II. 연구 방법	3
1. 연구진 구성 및 담당 업무	3
2. 연구 지역 및 지점 선정	4
가. 시추 지점 선정	4
3. 현장 조사 방법	5
가. 퇴적토 채취(시추)	5
나. 시추시료 전처리 및 분석용 시료 채취	6
4. 생물 및 지질분석 방법	7
가. 돌말류 분석	7
나. 고화분 분석	7
다. 원핵생물 군집구조 다양성 분석	7
라. 원핵생물 신종 탐색 및 특성 분석	8
마. 깔따구류(저서성대형무척추동물) 분석	8
바. 남조류 휴면포자(아키네트, Akinete) 분석	9
사. 지질 분석	9
III. 연구결과 및 고찰	10
1. 공검지 퇴적토의 지질학적 분석	10
가. 퇴적상 및 연대, 입도 분석 결과	10
나. 공검지와 공검지 주변지역의 결과 비교	11
2. 공검지 퇴적토의 돌말류 다양성 분석	13

가. 돌말류 다양성 및 군집분석	13
나. 공검지와 공검지 주변 지역의 돌말류 결과 비교	17
3. 공검지 퇴적토의 고화분 다양성 분석	18
가. 고화분 다양성 및 미세 슛 분석	18
4. 공검지 퇴적토의 남조류 휴면포자 다양성 분석	19
가. 남조류 휴면포자 다양성 분석	19
나. 남조류 휴면포자의 공검지와 공검지 주변 지역 결과비교	21
5. 공검지 퇴적토의 원핵생물 다양성 분석	21
가. 퇴적토 원핵생물 다양성 분석 대상 및 알파다양성 분석	21
나. 퇴적토 내에서의 원핵생물 분류학적 분포 특성	22
6. 공검지 퇴적토의 저서성대형무척추동물(갈따구류) 다양성 분석	23
가. 깊이별 퇴적층에 분포하는 갈따구류의 생물상 변화	23
나. 퇴적층에 분포하는 갈따구류의 생활상 변화 및 연도별 결과비교 ..	24
7. 고생물 표본 확보	25
8. 미기록종 및 신종 발굴	25
9. 연구성과	26
IV. 결 론 및 기대성과	27
1. 결론	27
2. 향후계획	28
3. 활용방안 및 기대성과	29
V. 참고문헌	31
VI. 부록	32

표 목차

표 1. 참여 연구자 및 담당 업무	3
표 2. '21년도 공검면 일대 5개 지점에 대한 시추 조사 정보	10
표 3. 21GG02코어의 돌말류 분류체계	13
표 4. 21GG02코어에서 깊이별 돌말류의 출현 양상	14
표 5. 저서성대형무척추동물(갈따구류)가 출현한 시추 지점 및 구간(깊이) ·	24
표 6. 연도별 공검지 퇴적층 중아부와 수변부 출현속 비교	24
표 7. 출현이 확인된 갈따구류 화상자료	25
표 8. 미세조류와 원핵생물의 신/미기록종 목록	26

그림 목차

그림 1. 연구사업의 목표	3
그림 2. 시추 조사 현장 위치	5
그림 3. 시추 조사 현장 사진 및 전처리 과정	5
그림 4. 시추 시료 전처리 및 분석용 시료 채취 과정	6
그림 5. 코어 퇴적물에 대한 퇴적상 분석 결과(CT 촬영)	11
그림 6. 연대 및 입도 분석 결과	11
그림 7. 공검지와 주변지역의 연대 및 입도 분석 결과	12
그림 8. 공검지 외부지역(사벌국면)에서 동천의 범람 범위	12
그림 9. 관찰된 돌말류 이미지	15
그림 10. 21GG02코어에서 연대별(깊이별) 종별 돌말류 산출량	16
그림 11. <i>Ulnaria</i> 속 현미경 사진	17
그림 12. 집괴분석을 통한 공검지와 주변지역 비교	18
그림 13. 다차원 척도법 분석을 통한 공검지와 주변지역 비교	18
그림 14. 수서식물의 고화분 균집분석 결과	19
그림 15. 남조류 휴면포자 PCR 분석결과	20
그림 16. 공검지내 각 지점에 따른 퇴적도 깊이별 남조류 휴면포자 분포 ...	21
그림 17. 퇴적도 20GG17 시료의 원핵생물 분포에 대한 알파다양성 지수 (CHAO 및 Shnnon)	22
그림 18. 공검지 퇴적도의 원핵생물 분류학적 분포	23

초록

돌말류(규조류)는 황색조 또는 황금조류라 불리는 미세조류의 분류군 중 하나로, 해양, 담수 및 기수에서 부유생활 및 부착생활을 하며, 엽록소를 가지고 있어 광합성을 하므로, 수계의 1차 생산자로서 생태학적으로 매우 중요한 구성원 중 하나다. 이들은 성장 온도범위도 넓어서 극지에서 온천에 이르기까지 생육하며, 건조상태의 대기 속에서도 이동을 하며, 나무나 돌에서도 산다. 특히, 이들은 단단한 규산질의 세포벽으로 인해, 퇴적층 속에 쉽게 화석상태로 남을 수 있어, 과거 환경을 대변할 수 있는 가장 대표적인 생물로 알려져 있으며, 현생종의 연구를 통하여 화석종의 생태를 연구할 수 있는 이점이 있다. 따라서 제 3기, 4기 퇴적층에서 고생물학적 연구를 하는데 매우 유용한 미화석류이다. 최근 들어, 과거 환경을 복원하기 위한 방법으로 돌말류 뿐 아니라, 퇴적도에 분포하는 저서성대형무척추동물인 깔따구류를 분석하는 연구가 중국을 중심으로 이뤄지고 있으며, 퇴적도에 분포하는 원핵생물 역시 활발하게 연구되고 있다.

본 과제에서는 크게 다음과 같은 4가지의 연구 목적을 설정하였다. (1) 퇴적도에 연대별(깊이별)로 분포하는 고생물(돌말류, 남조류 휴면포자, 깔따구, 화분, 원핵생물)의 군집분석 등을 통해 과거 생물상 변화를 해석하고, 지질 분석(입도 및 연대) 결과와 비교하여, 공검지와 주변 지역의 과거 환경변화 및 영향에 대해 규명, (2) 국립낙동강생물자원관 및 상주시(상주박물관), 참여연구기관(한국지질자원연구원, 건국대학교) 공동세미나 개최, (3) 기존의 연구결과를 종합하여, 고증된 사실에 근거하여 공검지의 습지 복원 및 활용에 관한 정책 방향성 제시 또는 건의 추진 (4) 신·미기록 돌말류 11종 및 원핵생물 2종 발굴, 화석돌말류 표본 500점 확보가 설정되었다.

연구 결과를 통해 공검지와 공검지 주변지역(사별국면)의 영향 관계를 확인해본 결과, '21년도 공검지 주변지역(사별국면)에서 시추를 통해 확인된 퇴적층은 환원 환경의 점토질 퇴적층이 발달하는 구간이 확인되었으나, 이 시기는 공검지 형성 시기와 큰 차이를 보이고 있어 공검지 형성과는 관련이 적은 것으로 판단되었음. 또한 돌말류를 통한 공검지와 공검지 주변 지역간의 군집 비교에서도 두 지역간의 차이는 뚜렷하게 나타나, 공검지 주변지역은 정체된 습지 또는 호수 환경이 아닌 공검지 주변의 하천에서의 영향을 더 크게 받은 지역인 것으로 확인되었음

I. 서론

1. 연구사업의 배경

일반적으로 지구환경 변화에 대한 자료는 연속적으로 퇴적된 해양 퇴적물의 기록에서는 쉽게 획득할 수 있어 해양퇴적층에 대한 연구가 비교적 활발히 이루어져 왔다. 이에 비하여 호수 등의 육성퇴적물을 이용한 고환경 연구는 자료 접근이 가능했던 소수의 학자들에 의해서만 이루어져 오고 있는 상태이다(예, Sintsov., 2003; Williams, 1993). 그 이유는 과거 지구환경 변화의 기록을 양호하게 잘 보존하고 있는 육성퇴적물의 분포가 전 세계적으로 극히 제한되어 있으며, 기술적으로 양호한 심부 퇴적층의 획득이 용이하지 않았기 때문이다. 다만 몇몇 선진국 학자들이 중심이 되어 지난 20년 동안 대규모 육성 호수 퇴적물을 이용한 고기후의 변동에 대한 연구는 꾸준히 진행 해 오고 있다(정과 김, 2008).

육상의 호수 퇴적물은 해양 퇴적물과 같이 연속적으로 퇴적되어, 호수가 형성된 이후 그 지역의 환경변화기록이 잘 보존되어 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 호수 퇴적물에 함유된 고생물 분석 연구는 기후변화뿐만 아니라 육상 지표환경변화를 잘 구명할 수 있다. 대표적인 예로 러시아의 바이칼(Baikal), 몽골의 흡수굴(Hovsgol) 및 중국의 칭하이(Qinghai) 호수들이 있는데, 이들은 독자적인 시추 프로젝트에 의해 획득된 퇴적물을 이용하여 고기후환경변화 연구를 추진하고 있다. 이들 호수에서 분석된 각종 환경변화 기록인자들은 제4기 동북아시아 육상지표환경변화를 구명하는데 매우 유용하게 쓰이고 있다(이상현, 2008).

돌말류(규조류)는 황색조 또는 황금조류라 불리는 미세조류의 분류군 중 하나로, 해양, 담수 및 기수에서 부유생활 및 부착생활을 하며, 엽록소를 통해 광합성을 하여, 수생태계의 1차생산자로서 중요한 구성원이다. 이들은 생장 온도 범위도 넓어서 극지에서 온천에 이르기까지 생육하며, 건조상태의 대기 속에서도 이동하며, 나무나 돌에서도 산다. 돌말류의 규산질 세포벽은 매우 단단하여 다른 조류에 비해 상대적으로 물리적 충격에 강하며 퇴적층에 쉽게 화석 형태로 남을 수 있다는 장점이 있다(Lee et al., 2003). 선행 연구에서는 백악기(1억 3,500만 년 전~6,500만년 전) 시기에 발견된 돌말화석이 가장 오래되었고 마이오세(약 2600만 년 전~700만 년 전) 이전에는 담수 돌말류가 없던 것으로 알려져 있어, 선사시대 이전의 호수 환경 연구에 이용되어 왔다(Harwood et al., 2007).

우리나라에서는 1900년대에 함경남도에서 러시아학자에 의해 최초로 퇴적층의 연구를 하였으며, 70년대부터 한국의 퇴적층에서 돌말류 화석 연구가 시

작되었다(Lee, 1976). 이후 국내 해안의 퇴적층을 중심으로 꾸준히 연구되고 있다(Lee, 1976; Lee et al., 1995; Go et al., 2013). 국립낙동강생물자원관에서는 2016년부터 ‘한반도 주요 습지의 고생물 및 고환경 연구’를 통해 우리나라 담수 및 기수 퇴적토를 시추하여 다양한 고생물(돌말류, 화분, 깔따구, 원핵생물)을 분석하고, 이를 통해 고환경 변화를 규명하는 역할을 수행해 왔다. 2016년에는 상주 공검지의 외부 4지점, 2017년에는 우포늪 내·외부 4지점, 2018년에는 순천만의 동천 하구 3지점, 2019년에 상주 공검지의 내부 2지점, 2020년에는 공검지 및 주변지역 17지점에 대해 시추를 하였고, 퇴적토에 깊이별로 분포하는 고생물군과 지질(입도 및 연대) 분석을 실시하였다. 그 결과 각각의 습지의 과거 환경 변화를 구명할 수 있었다. 2019년과 2020년의 공검지에 대한 생물학적 연구를 통해, 공검지 생성 시기, 규모, 역사적 사실에 대한 고증을 할 수 있었다.

2. 연구사업의 배경 및 목표

2017년 10월 31일에 구축된 ‘국가습지인벤토리(국립환경과학원)’에 의하면, 우리나라 전국에는 2,499개의 내륙습지가 존재한다고 알려져 있으며, 이들은 습지보호지역, 람사르습지, 문화재 등으로 지정되어 정부 및 지자체에 의해 관리되고 있다. 최근 들어, 이러한 습지는 육상생태계와 수생태계를 이어주는 중간단계의 생태적 환경특성을 지니는 자연 생태의 보고라는 점에서 연구의 중요성 대두되어 오고 있다. 따라서, 역사적으로 중요하다고 알려진 국내 담수 습지를 대상으로, 과거 해당 습지의 ‘생성 규모, 생성 역사, 고환경 변화’ 파악이 매우 중요하며, 이를 위해 습지퇴적층 돌말류 연구는 매우 중요하다. 본 과제는 크게 다음과 같은 4가지의 연구 목적을 설정하였다(그림 1).

(1) 퇴적토에 연대별(깊이별)로 분포하는 고생물(돌말류, 남조류 휴면포자, 깔따구, 화분, 원핵생물)의 군집분석 등을 통해 과거 생물상 변화를 해석하고, 지질 분석(입도 및 연대) 결과와 비교하여, 공검지와 주변 지역의 과거 환경 변화 및 영향에 대해 규명

(2) 국립낙동강생물자원관 및 상주시(상주박물관), 참여연구기관(한국지질자원연구원, 건국대학교) 공동세미나 개최

(3) 기존의 연구결과를 종합하여, 고증된 사실에 근거하여 공검지의 습지 복원 및 활용에 관한 정책 방향성 제시 또는 건의 추진

(4) 신·미기록 돌말류 11종 및 원핵생물 2종 발굴, 표본 500점 확보



<그림 1. 연구사업의 목표>

II. 연구방법

1. 연구진 구성 및 담당업무

본 과제는 국립낙동강생물자원관의 내부 연구진에 의해 수행되고 있으며, 한국지질자원연구원에서 자문으로 화분 분석, 지질 입도 분석 및 해석, 환경변화에 대한 해석 등을 담당, 건국대학교에서는 남조류 휴면포자에 대해서 분석 및 해석을 담당, 상주시 상주박물관에서는 인문사회학적 해석과 자문, 시추작업 주관 및 기타업무 협조를 하였다.(표 1).

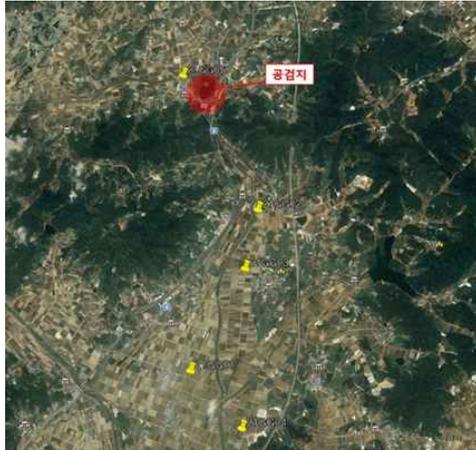
<표 1. 참여 연구자 및 담당 업무>

구분	소속	성명	담당
연구 책임자	원생생물 연구팀	윤석민 전임 연구원	- 사업 총괄 - 화석 돌말류 정성 및 정량 분석 - 미기록종 및 신종 돌말류 발굴(9종) - 화석 돌말류 표본 제작 및 동정(500점) - 지질 분석, 과거 환경변화 규명 - 논문 작성(2편), 보도자료 작성(2건)
내부 참여연구자	원생생물 연구팀	이창수 선임 연구원	- 지자체 및 유관기관 협업 관련 업무
내부 참여연구자	자원은행팀	이상득 선임 연구원	- 지자체 및 유관기관 협업 관련 업무 - 화석돌말류 분석에 관한 자문 - 퇴적토 저서무척추동물(갈따구류) 정성·정량 분석
내부 참여연구자	다양성 연구팀	배미정 선임 연구원	- 갈따구류 섭식·생활사 분석 - 과거 환경변화 규명
내부 참여연구자	원핵생물 연구팀	한지혜 선임 연구원	- 습지 퇴적토원핵생물 분석 - 신종 원핵생물 발굴(2종) - NGS 라이브러리 구축 및 비배양성 미생물 군집 분석 - 과거 환경변화 규명
내부 참여연구자	원생생물 연구팀	권대률 전임 연구원	- 부작돌말류 평가 지수 정보 확보 - 화석 돌말류 정성 및 정량 분석 - 미기록종 및 신종 돌말류 발굴(2종) - 과거 환경변화 규명
내부 참여연구자	원생생물 연구팀	박미례 연구원	- 화석 돌말류 현미경 화상자료 확보 - 화석 돌말류 화상자료 확보 및 표본 제작 보조(500점)
외부 참여연구원	건국대학교	박채홍 연구교수	- 퇴적토 내의 남조류 발굴 - 남조류 휴면포자 발굴 - 남조류 자문
자문	한국지질자원 연구원		- 화분 및 지질 분석, 결과 해석 - 과거 환경변화 규명 자문
	상주박물관		- 인문·사회학적 해석 및 자문 - 공검지 시추 작업 추진 및 협조

2. 연구 지역 및 지점 선정

가. 시추 지점 선정(그림 2, 3)

- 1) 본 과제의 연구 목표를 잘 반영 할수 있는 공검지 및 주변 지역에 대해 5지점을 선정



<그림 2. 시추 조사 현장 위치>



<그림 3. 시추 조사 현장 사진 및 전처리 과정>

1번: 21GG01, 2번: 21GG02, 3번: 21GG03, 4번: 21GG04, 5번: 21GG05, 6번: 시료 전처리 및 부시료 채집(한국지질자원연구원)>

3. 현장 조사 방법

가. 퇴적토 채취(시추)

(1) 시추 과정

- (가) 무수유압식시추 장비, 시추 필요 물품 공검지 현장으로 이동
- (나) 선정된 조사 지점 부근의 유기물(나뭇잎, 지푸라기 등) 제거¹⁾

1) 지표면의 유기물이 시추 시 퇴적토에 유입 되어, 연대 분석 시 잘못된 분석 결과가 나옴을 방지

(다) PVC관을 통해 시추 실시

(라) 확보된 시추 코어(1m단위)는 현장에서 밀봉 후, 라벨링

(마) 전처리를 위하여 한국지질자원연구원 또는 국립낙동강생물자원관으로 운반

나. 시추 시료 전처리 및 분석용 시료 채취(그림 4)

(1) 시료 전처리 및 부시료 채취

(가) 시추가 완료된 1 m 단위 코어를 세로로 절단(얇은 기타 줄 사용)

(나) 시료의 반은 분석용으로 사용, 나머지는 보관함

(다) 보관용 시료는 진공 포장 및 라벨링하여 보관

(라) 분무기, 솔 등을 사용하여 분석용 시료의 단면 정리²⁾

(마) 단면이 정리된 시료는 단면 사진 촬영 및 토색 측정

(바) 시추 시료의 토색, 산화대의 분포 등을 분석하여 퇴적상 정보 기재

(사) 연대분석(탄소 연대)을 위한 유기물 채취³⁾

(아) 지질분석(입도), 생물분석(돌말류, 남조류 휴면포자 원핵생물, 깔따구, 화분)을 위한 준비

1) 모든 분석 항목별 10cm 간격으로 시료 채취

2) 원핵생물의 경우, 오염 방지를 위해, 70% 에탄올을 사용하여 살균하여 시료 채취

(자) 시료 채취가 끝난 코어는 라벨링하여, 진공 포장 후 보관



<그림 4. 시추 시료 전처리 및 분석용 시료 채취 과정>

2) 시추 코어 단면의 사진 촬영 시 또는 퇴적상 기재시에 보다 정확한 퇴적 환경의 구분 가능

3) 퇴적도가 교란되지 않게 주의하여, 원하는 유기물만 핀셋으로 선별하여 채취

4. 생물 및 지질 분석 방법

가. 돌말류 분석

(1) 시료 전처리 및 슬라이드표본 제작

- (가) 건조된 퇴적물(1g)을 50ml 비커에 넣고 과산화수소(H_2O_2)를 15mL 첨가해 유기물 제거
- (나) 경사법을 이용하여 비커에 있는 과산화수소와 증류수의 상층액 제거
- (다) 전처리 후 돌말류의 정성 분석, 정량 분석을 위해 영구슬라이드 제작
- (라) 제작된 표본은 화상자료 확보 후 국립낙동강생물자원관의 '담수생물자원관리시스템'에 표본 정보 입력 후 라벨 부착, 식물건조 표본실에 수장
- (마) 중 동정 시 발견되는 신종·미기록종은 전계방사형주사전자현미경(FE-SEM)(MIR-3, TESCAN, Czech)을 통해 추가분석 하여 정밀 동정

나. 고화분 분석

(1) 시료 전처리 및 슬라이드표본 제작

- (가) 공검지에서 획득한 시추공의 퇴적물 특성과 불교란-인위적 교란 구간을 파악, 그 후 회색의 유기질 점토층 구간에서 10cm 간격으로 부시료(sub-sample)를 확보
- (나) 부시료는 화분분석을 위한 표준화분추출방법(Moore et al., 1998)을 적용하여 습식전처리 수행 후 15ml 용량의 유리 바이알 에 보관
- (다) 완전 탈수한 화분, 포자 등의 유기질 물질은 글리세린을 첨가하여 영구슬라이드 제작
- (라) 봉입제인 글리세린젤 리가 완전히 굳은 후 광학현미경에서 DIC 모드로 검경 실시

다. 원핵생물 군집구조 다양성 분석

(1) DNA 추출과 PCR

- (가) 시료를 PowerSoil DNA extraction kit (MOBIO, USA)를 사용하여 DNA 추출
- (나) 세균의 V1과 V3 hyper variable regions의 16S rRNA 유전자는 PCR 증폭 (프라이머 9F(5' -X-AC-GAGTTTGATCMTGGCTCAG-3')와 541R (5' -X-AC-WTTACCGCGGCTGCTGG3')를 이용하였으며, X는 각 DNA 샘플의 8-nucleotide barcode와 AC는 barcode와 프라이머

를 연결한 a linker 부위임)

- (다) Pyrosequencing은 Macrogen Inc. (Korea)이 Miseq Sequencing System (Illumina, USA)을 사용하여 제조사의 매뉴얼대로 수행
- (라) 결과는 mothur software package (version 1.33.1) (Schloss et al., 2009)을 사용하여 분석, cyanobacteria-like sequences를 제외, Taxonomic 분류는 80% cut-off 함

라. 원핵생물 신종 탐색 및 특성 분석

- (1) 퇴적토 내에 존재하는 원핵생물 미발굴종 탐색을 위해 토양 시료 1 g을 완충용액에 희석하여 5종의 배지에 도말, 25°C에서 최소 2주간 배양
- (2) 순수 분리된 원핵생물은 16S rRNA 유전자 분석을 통해 신종 후보 균주 선별
- (3) 신종 후보 원핵생물은 최적 성장 조건, 배양학적 특성, 집락과 세포의 형태학적 특성, 생리학적 특성을 분석, 계통수 작성을 통해 근연종과의 유연관계를 분석
- (4) 신종 후보의 분류학적 특성과 채집 정보, 분류체계, 계통수, 유전자 염기서열 국제등록번호 및 국립낙동강생물자원관 자원번호 등은 모두 기록지에 작성

마. 깔따구류(저서성대형무척추동물) 분석

- (1) 시료 전처리 및 슬라이드표본 제작
 - (가) Hood 내에 Hot plate를 놓고 10% KOH 용액을 100~150ml 넣은 후 70°C까지 가열
- ※ 깔따구류의 머리 부분이 손상되지 않도록 최대 30분이 넘지 않도록 함
 - (나) 시료 세척: 전처리가 완료된 시료에 증류수나 수돗물로 행균
 - (다) 개체 분리: Grided petri dish (10*10cm)에 세척된 시료를 균일하게 나누어 담은 후(샘플 한개당 8~15개) 해부 현미경(Nikon SMZ18) 하에 유기물과 토양 내에 깔따구류머리라고 생각되는 개체들을 분리
 - (라) Slide glass에 Mounting media (CMC-10)을 넣고 분리된 깔따구류 머리를 놓아cover slip을 덮고 위치를 조정하여 표본 제작
- ※ 제작된 슬라이드는 완전히 건조시키기 위해 1~2일 정도 건조시킴
 - (마) 제작된 슬라이드 표본은 광학현미경(Nikon Ni-U)하에서 분석 후 화상자료 확보

바. 남조류 휴면포자(아키네트, Akinete) 분석

(1) Panning method를 이용한 휴면포자 분리 및 밀도 분석

(가) 퇴적토 시료 습중량 1g(w/w)을 냉장 보관한 여과(0.2 μ m) 멸균수로 현탁 시키고 초음파기(JAC 4020type, 60Hz, 620w, Ultrasonic, Korea)로 초음파 처리(20초간 2회)

(가) 분쇄된 현탁액은 100 μ m와 60 μ m Nylon mesh를 사용해 순차적으로 여과 실시. 최종적으로 10 μ m Nylon mesh로 여과한 퇴적물 시료를 패닝법(panning method, Matsuoka and Fukuyo, 2000)에 따라 페트리디쉬(petridish) (직경 12cm)의 상층에 부유하는 가벼운 입자를 분리

(가) 가벼운 입자를 여과(0.2 μ m) 멸균수와 함께 총 10ml 부피로 정용한 후, 암갈색 유리병에 담아 약 4 $^{\circ}$ C 하에서 냉장 보관. 시료 1ml을 Sedgwick-Rafter chamber에 분주하여 독립현미경(Axiovert A1, ZEISS, Germany) 하에 휴면포자 세포계수

사. 지질 분석

(1) 탄소연대 분석: 시추된 퇴적토에서 탄소연대 측정 용 유기물(식물편 등)을 핀셋으로 채취, 유기물이 없는 부분은 토양시료로 탄소연대 측정

(2) AMS(accelerator mass spectrometer)분석

(가) 이물질이 제거된 시료는 표면을 세척, 분쇄하여 산, 염기 처리를 함

(나) 연대정보를 보존하고 있는 성분을 추출한 후 산화시켜 CO₂형태로 변환함(EA 사용)

(다) KIST reduction system에서 환원하여 흑연화 한 후 표적물질로 제작

(라) 가속기질량분석법으로 14C/12C의 비율 측정, 연대 계산

(3) OSL(optically stimulated luminescence)분석

(가) 시료 채취 시 빛이 닿으면 안되므로 암실에서 채취함

(나) Sodium pyrophosphate decahydrate(5%), 염산(10%), 과산화 수소(33%), Sodiumoxalation(0.01N)을 순서대로 처리 후 4-11 μ m 크기 입자만 분리

(다) H₂SiF₆에 2주간 처리, 증류수 세척 후 염산에 1시간 처리, 증류수 세척

(라) 전처리된 시료를 인공조명에 노출시켜 방출된 OSL 신호로 연대 계산

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

본 연구과제에서 공검지와 공검지 주변지역의 고환경 변화를 구명하기 위해 사별면 및 공검면 일대에 대한 5지점에 대해 시추를 하였으며(표 2), 각각의 시추한 시료에 대해 지질 분석(연대, 입도) 및 고생물군 분석을 수행하였다.

돌말류와 남조류 휴면포자의 경우, 과거 환경 변화를 잘 보존하고 있을 것으로 판단되는 21GG02, 21GG03 코어를 대상으로 분석을 하였고, 기타분류군들은 공검지와 주변지역에 대한 비교를 위해서 '20년도에 분석된 20GG07, 20GG17에 대한 지점에 대해 비교·분석하였다.

<표 2. '21년도 공검면 일대 5개 지점에 대한 시추 조사 정보>

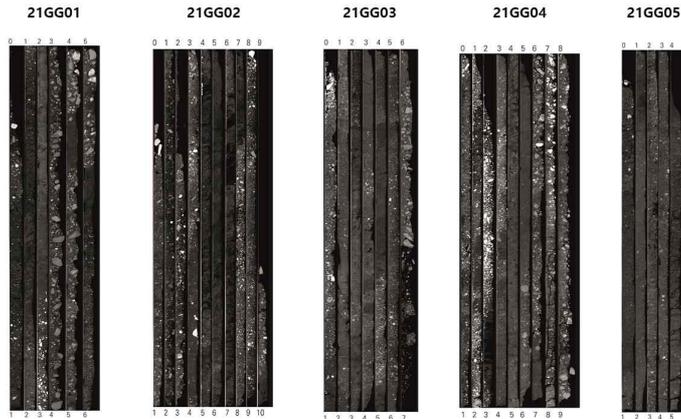
코어 번호	지번	위도(N)	경도(E)	시추심도	시추일자	해발고도
21GG01	상주 사별국면 언흥리 1855-7	36°28'28.90"	128°11'01.51"	6m	04.05.	79.875
21GG02	상주 사별국면 목가리 760-19	36°29'58.53"	128°10'52.01"	10m	04.06.	87.160
21GG03	상주 사별국면 두릉리 831-4	36°29'27.82"	128°11'02.19"	7m	04.06.	81.742
21GG04	상주 사별국면 덕담리 1441-8	36°28'14.97"	128°11'46.62"	9m	04.05.	79.078
21GG05	상주 공검면 양정리 883-31	36°30'46.29"	128°09'25.69"	6m	04.06.	92.421

1. 공검지 퇴적토의 지질학적 분석

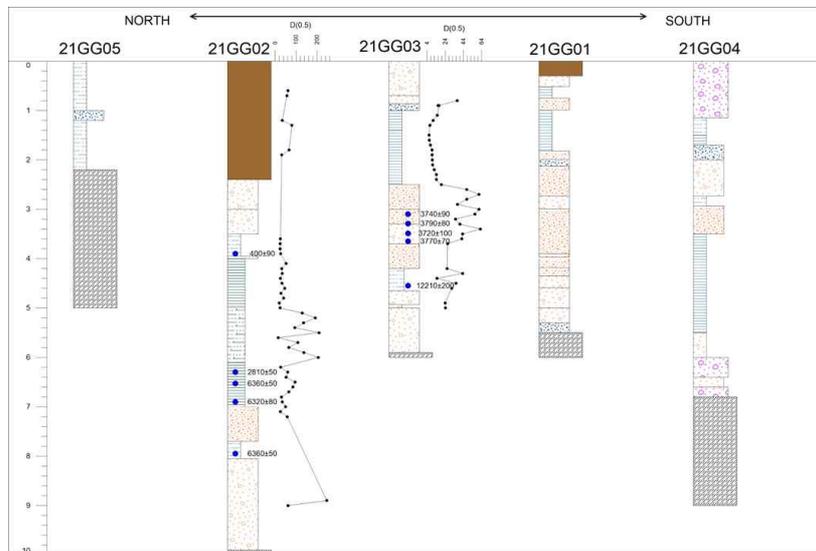
가. 퇴적상 및 연대, 입도 분석 결과(그림5, 6)

- (1) 21GG02의 연대는 약 6,300년 전~400년 전으로 분석되었으며, 21GG03의 연대는 약 12,200년 전~3,740년 전으로 분석 됨
- (2) 입도는 21GG02의 경우, 약 10m~8m 사이의 입도는 자갈모래층으로 이루어져 있어 크기가 매우 컸으며, 이후에는 실트-점토-모래층의 비교적 작은 크기 입자들이 번갈아 가면서 퇴적되는 양상을 보이다가 상부인 3.5m 이상부터는 자갈질 모래층으로 퇴적되는 양상을 보였음
- (3) 21GG03의 경우, 약 7m~6m 구간은 풍화대층이었고, 이후부터 비교적 크기가 큰 모래질의 퇴적층과 점토질의 지층을 이루는 양상을 보였음
- (4) 21GG05 코어는 공검지의 영향을 받지 않은 지역으로 확인되었고(주로 범람환경), 과거 공검지의 남쪽 경계로 확인됨

(5) 공검지 남부 4개소는 하천 또는 환원 환경의 습지, 호수가 발달한 환경이었고, 이후 현재와 비슷한 산화 환경의 범람원 지역으로 변화하였음



<그림 5. 코어 퇴적물에 대한 퇴적상 분석 결과(CT 촬영)>



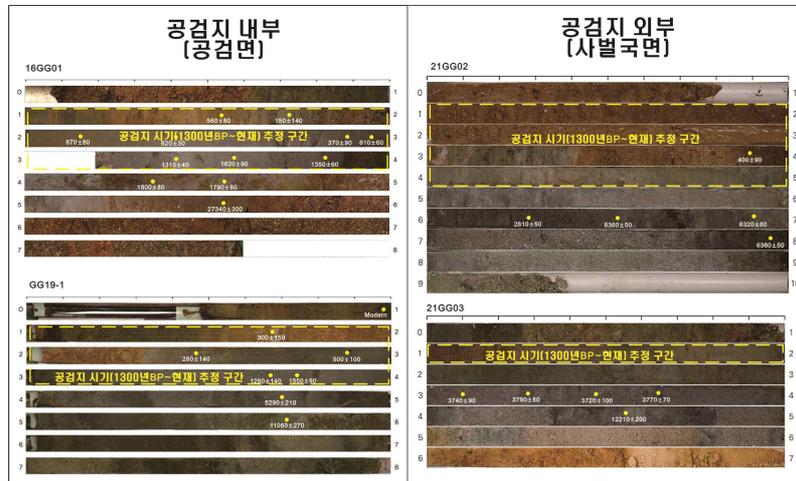
<그림 6. 연대 및 입도 분석 결과>

나. 공검지와 공검지 주변 지역의 결과 비교(그림7, 8)

- (1) 공검지 내부지역에서의 시추결과(16년도~20년도)는 공통적으로 뚜렷한 환원 환경의 점토질 퇴적층이 1~2m 내외의 두께로 발달하며, 연대측정 결과 점토질 퇴적층의 시작 시점은 약 1350년 전으로 규명됨
- (2) '21년도 공검지 주변지역(사벌국면)에서 시추를 통해 확인된 퇴적층은 환원 환경의 점토질 퇴적층이 발달하는 구간이 확인되었으나, 이 시기는 공검

지 형성 시기와 큰 차이를 보이고 있어 공검지 형성과는 관련이 적은 것으로 사료됨

- (3) 또한, 연대측정을 통해 추정 가능한 공검지 시기(1300년 BP~현재) 동안에는 공검지 내부에서 확인되는 환원 환경의 점토층 발달이 매우 빈약하며, 상대적으로 두께가 매우 얇음
- (4) 21GG02의 경우에는 공검지 시기로 추정되는 구간에서 모래층이 두껍게 발달하는 것으로 보아, 공검지 같은 정체된 습지 또는 호수 환경이 아닌 하천활동에 의한 것으로 판단됨
- (5) 따라서 공검지가 유지하였던 시기에는 주변지역(사벌국면)에서는 공검지에서 유출되는 하천인 ‘동천’의 영향이 강했던 것으로 판단되며, 동천 주변으로는 하천에 의한 범람이 빈번했을 것으로 해석됨



<그림 7. 공검지와 주변지역의 연대 및 입도 분석 결과>



<그림 8. 공검지 외부지역(사벌국면)에서 동천의 범람 범위>

2. 공검지 퇴적토의 돌말류 다양성 분석

가. 돌말류 다양성 및 군집분석(표 3, 4, 그림 9-11)

- (1) '21년도 공검지 퇴적토 깊이별(연대별) 돌말류의 분포를 알아보기 위해 시추된 퇴적토에서 돌말류가 관찰된 지점을 대상으로 퇴적토 내의 깊이별 돌말류 밀도를 파악하였음
- (2) 분석결과, 21GG02코어에서 돌말류가 6.2-7.2m 구간에서 산출되는 것을 확인하였으나, 21GG03코어에서는 돌말류의 출현이 없었던 것으로 확인되었음
- (3) 세포에 대한 보존성이 많이 떨어지는 것으로 확인 되었고, 이러한 영향은 지질학적 분석에서 언급되었던, 공검면에서 유출되는 하천인 '동천'의 영향이 강하여, 동천 주변으로는 하천에 의한 잦은 범람으로 인한 침식과 퇴적과정이 빈번하여 보존성이 떨어졌을 것으로 해석됨
- (4) 21GG02코어에 대해서 집중분석을 실시하였고, 깊이별로 출현한 돌말류는 1문 1강 8목 12과 16속 33종으로 분석되었음

<표 3. 21GG02코어의 돌말류 분류체계>

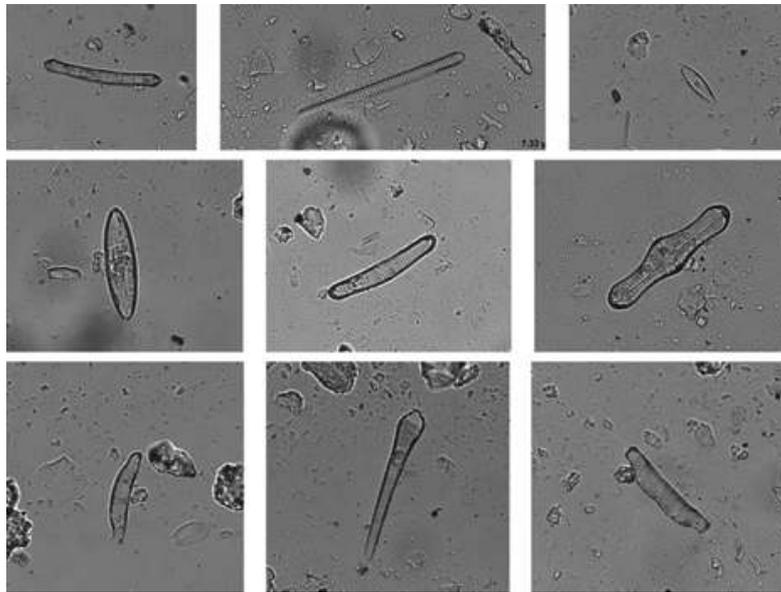
문	강	목	과	속	종명
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	<i>Hantzschia</i>	<i>Hantzschia amphioxys</i>
					<i>Hantzschia</i> sp.
				<i>Nitzschia</i>	<i>Nitzschia</i> sp.
		Cocconeidales	Achnanthidiaceae	Achnanthidium	<i>Achnanthidium minutissima</i>
					<i>Achnanthidium</i> sp.
				<i>Planothidium</i>	<i>Planothidium frequentissimum</i>
			Cocconeidaceae	<i>Cocconeis</i>	<i>Cocconeis placentula</i>
		Cymbellales	Cymbellaceae	<i>Cymbella</i>	<i>Cymbella cybiformis</i>
					<i>Cymbella</i> sp.
					<i>Cymbella turgidula</i>
			Gomphonemataceae	<i>Encyonema</i>	<i>Encyonema minutum</i>
					<i>Encyonema</i> sp.
				<i>Gomphonema</i>	<i>Gomphonema acuminatum</i>
					<i>Gomphonema olivaceum</i>
					<i>Gomphonema parvulum</i>
				<i>Gomphonema</i> sp.	
	Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Actinella</i>	<i>Actinella punctata</i>	
				<i>Eunotia bilunaris</i>	
				<i>Eunotia formica</i>	

문	강	목	과	속	종명
					<i>Eunotia minor</i>
					<i>Eunotia</i> sp.
	Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Fragilaria</i>		<i>Fragilaria</i> sp.
					<i>Fragilaria capucina</i>
	Licmophorales	Ulnariaceae	<i>Ulnaria</i>		<i>Ulnaria</i> sp.
					<i>Ulnaria ulna</i>
	Naviculales	Amphipleuraceae	<i>Frustulia</i>		<i>Frustulia vulgaris</i>
		Naviculaceae	<i>Navicula</i>		<i>Navicula gregaria</i>
					<i>Navicula lanceolata</i>
					<i>Navicula</i> sp.
					<i>Navicula</i> Sp.1
					<i>Navicula</i> sp.2
		Pinnulariaceae	<i>Pinnularia</i>		<i>Pinnularia</i> sp.
	Rhopalodiales	Rhopalodiaceae	<i>Epithemia</i>		<i>Epithemia adnata</i>

<표 4. 21GG02코어에서 깊이별 돌말류의 출현 양상>

No.	Species	6.2m	6.3m	6.4m	6.5m	6.6m	6.7m	6.8m	6.9m	7.0m	7.1m	7.2m
1	<i>Achnantheidium minutissima</i>				○				○			
2	<i>Achnantheidium</i> sp.	○	○	○	○	○		○		○		○
3	<i>Actinella punctata</i>					○						
4	<i>Cocconeis placentula</i>	○				○				○		
5	<i>Cymbella cybiformis</i>									○		
6	<i>Cymbella</i> sp.	○	○		○							
7	<i>Cymbella turgidula</i>			○		○						○
8	<i>Encyonema minutum</i>						○					
9	<i>Encyonema</i> sp.							○				
10	<i>Epithemia adnata</i>						○					
11	<i>Eunotia bilunaris</i>							○	○			
12	<i>Eunotia formica</i>	○	○	○		○	○		○	○	○	○
13	<i>Eunotia minor</i>					○						
14	<i>Eunotia</i> sp.		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15	<i>Fragilaria</i> sp.	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
16	<i>Frustulia vulgaris</i>							○				
17	<i>Gomphonema acuminatum</i>									○		
18	<i>Gomphonema olivaceum</i>		○			○	○					
19	<i>Gomphonema parvulum</i>								○			
20	<i>Gomphonema</i> sp.					○	○	○	○		○	
21	<i>Hantzschia amphioxys</i>			○				○	○		○	
22	<i>Hantzschia</i> sp.		○		○	○				○	○	○
23	<i>Navicula gregaria</i>					○						

No.	Species	6.2m	6.3m	6.4m	6.5m	6.6m	6.7m	6.8m	6.9m	7.0m	7.1m	7.2m
24	<i>Navicula lanceolata</i>			○								
25	<i>Navicula</i> sp.		○									
26	<i>Navicula</i> sp.1	○		○	○	○		○				
27	<i>Navicula</i> sp.2					○						
28	<i>Nitzschia</i> sp.						○	○				
29	<i>Pinnularia</i> sp.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
30	<i>Planorhynchium frequentissimum</i>							○				
31	<i>Ulnaria</i> sp.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
32	<i>Ulnaria ulna</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
33	<i>Fragilaria capucina</i>						○					

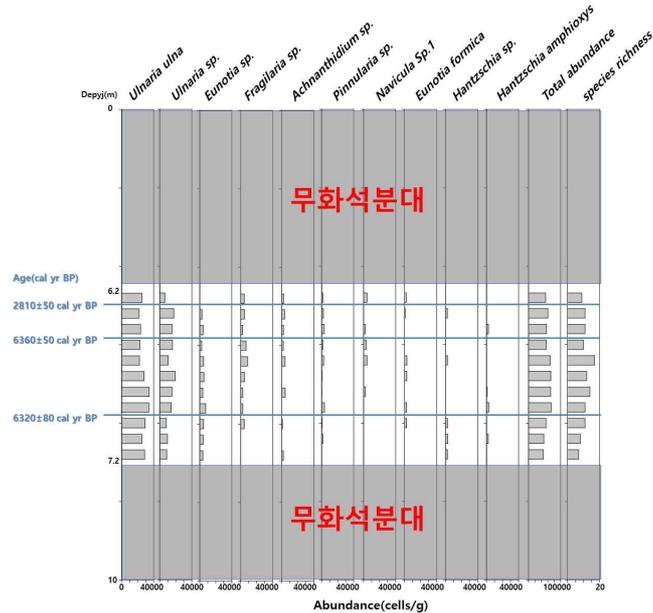


<그림 9. 관찰된 돌말류 이미지>

- (5) 21GG02코어에서 출현한 33종의 돌말류에 대한 깊이별 정량 분석 결과를 바탕으로 2% 이상 산출비를 나타내는 10종을 선별하였음 (*Ulnaria ulna*, *Ulnaria* sp., *Eunotia* sp., *Fragilaria* sp., *Achnanthisdium* sp., *Pinnularia* sp., *Navicula* sp.1, *Eunotia formica*, *Hantzschia* sp., *Hantzschia amphioxys*)
- (6) 돌말류의 산출 결과를 바탕으로 6.2-7.2m 구간에서만 돌말류가 산출되었음
- (7) 돌말류가 산출된 시기의 지층은 약 2,800-6,300년 이상의 구간으로 조사되었음
- (8) *Ulnaria ulna* 와 *Ulnaria* sp.은 각각 평균 26,893cells/g, 12,848cells/g의 산출량(개체수)을 보였고, 이는 전체 산출량(개체수)에 약 70%에 이르도록

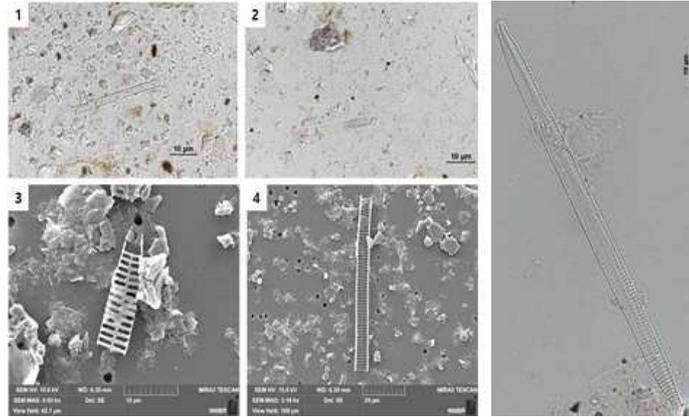
많은 산출량이었음,

- (9) 그 외에 *Eunotia*, *Fragilaria* 속 등이 약 6%로의 산출량을 보였고, 기타 다른 종들은 3% 미만인 것으로 조사되었음, 조사된 종들은 담수 하천 환경에서 자주 출현하는 것으로 보고되어있음



<그림 10. 21GG02코어에서 연대별(깊이별) 종별 돌말류 산출량>

- (10) 주요 우점종으로 조사된 *Ulnaria* 속은 단세포성이고, 전 세계의 보편적 종으로 알려져 있고, 국내에서 자주 출현하였음. 본 속은 빈영양에서 부영양 수역, 전기전도도가 다소 높은 수역에서 부유성, 저서성 또는 부착성으로도 출현하는 것으로 보고되어 있음
- (11) 육상화 지표종인 *Hantzschia amphioxys*와 약산성 환경에서 서식하는 것으로 알려져 있는 *Eunotia* 속도 자주 출현하는 특징을 보여, 수위가 낮은 수환경 또는 지표에 자주 노출되었던 환경인 것으로 사료되었음

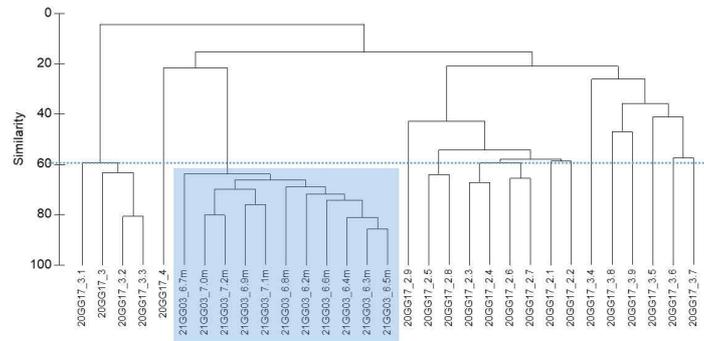


<그림 11. *Ulnaria* 속 현미경 사진. 1-2번: 광학현미경 사진, 3-4번: 전자현미경 사진>

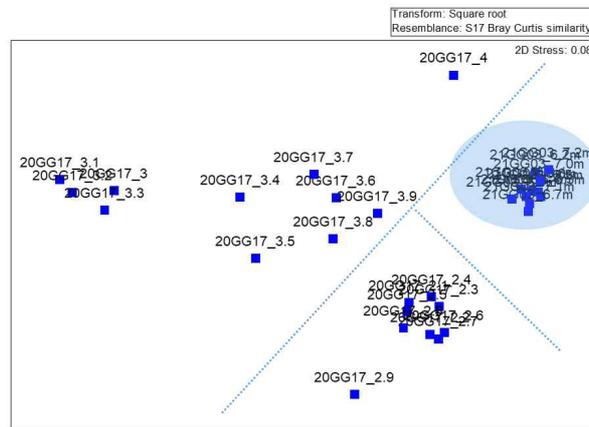
나. 공검지와 공검지 주변 지역의 돌말류 결과 비교(그림12, 13)

- (1) 공검지와 공검지 주변지역(사벌국면)의 영향 관계를 확인해보기 위해서 '20년도 20GG17 코어와 '21년도 21GG03 코어의 돌말류 결과를 통해서 집괴분석(Cluster Analysis)과 다차원 척도법(Multidimensional scaling, MDS)을 통해서 두 지역 간의 군집비교를 실시하였음
- (2) 분석된 결과, 두 지역 간의 군집차이는 확연한 것으로 나타났음. 집괴분석 결과에서 유사도 60%에서 20GG17 코어와 21GG03 코어 간의 구분이 뚜렷하게 분석되었음, 20GG17 4m 구간의 돌말류의 군집이 21GG03 코어의 돌말류 군집과 유사한 군집의 형태를 보였음
- (3) 다차원 척도법 분석에서는 21GG03 코어의 조사지역인 공검지 주변지역(사벌국면)의 돌말류 군집의 차이가 더 크게 나타났음. 집괴분석 상에서 20GG17 4m 구간의 돌말류의 군집이 가장 유사한 것으로 나타났지만, 21GG03코어와의 거리는 많이 차이나는 것으로 산출되었음
- (4) 본 결과는 지질학적 분석 결과와 비슷한 것으로 유추됨, 돌말류의 산출이 잦은 점토질 퇴적층이 발달이 상대적으로 미약하였고, 이 시기는 공검지 형성 시기와 큰 차이를 보이고 있어 공검지 형성과는 관련이 적은 것으로 판단됨
- (5) 지질학적 분석 결과에서도 21GG02의 경우, 공검지 시기로 추정되는 구간에서 모래층이 두껍게 발달하였고, 이 기간에 돌말류의 산출은 없는 무화석분대였던 것으로 보아, 하천활동이 활발했을 것으로 사료됨
- (6) 우점하였던 돌말류들의 산출량과 출현종의 생태적 특징에 기인하였을 때, 공검지 주변지역(사벌국면)에서는 공검지의 영향(예: 공검지의 우수 등)

보다는 주변 하천인 ‘동천’의 영향이 강했던 것으로 판단됨



<그림 12. 집괴분석을 통한 공검지와 주변지역 비교>



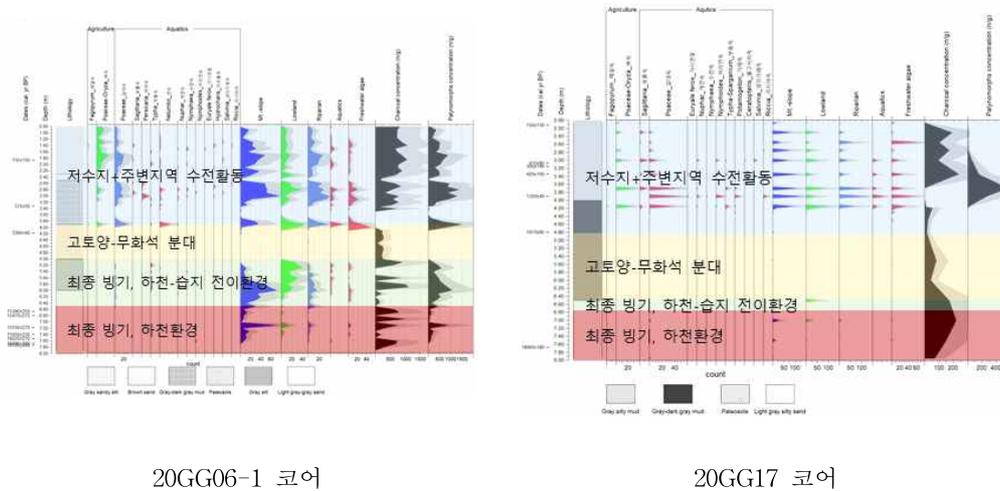
<그림 13. 다차원 척도법 분석을 통한 공검지와 주변지역 비교>

3. 공검지 퇴적토의 고화분 다양성 분석

가. 고화분 다양성 및 미세 숲 분석(그림 14)

- (1) 20GG06-1 퇴적토 시료에서 5cm 등간격으로 130개의 부시료 취하여 현미경 분석
- (2) 20GG17 퇴적토 시료에서 5cm 등간격으로 119개의 부시료 취하여 시료 분석
- (3) 고화분의 보존과 산출량은 비교적 양호하였음. 부시료 별 고화분의 농집도는 퇴적토 특성에 조절됨이 파악됨
- (4) 2개의 퇴적토에서 나타난 수서식물 군집변화 특성은 서로 잘 대비가 되었음. 즉, 하부로부터 하천환경→ 하천-습지 전이환경→ 고토양 환경→ 저수지와 주변 농경지 환경으로 변화했던 것으로 해석됨

- (5) 고화분 분석결과에 의하면 공검지일대의 수전농경은 약 1400년 전부터 시작했고, 주변 산지에서는 밭경작(메밀)을 했던 것으로 추정됨
- (6) 두 코어의 현재 표고가 약 2.46 m 차이가 존재하기 때문에 과거 공검지의 중앙부에 위치했던 20GG17 코어가 더 두꺼운 세립질 유기물층이 존재하며, 한때 저수지 수위가 낮아져 노출되었을 때 만들어진 고토양의 두께에서도 분명한 차이가 확인됨
- (7) 표고의 차이로 인하여 각 코어위치에서 저수지의 수심이 서로 다르기 때문에 동일시기 동안에도 수심에 민감한 정수식물과 부엽식물의 산출량이 20GG06-1 코어에서 더 풍부하게 산출됨. 반면에 두 코어 간에 수심에 덜 민감한 부유식물과 부유조류의 산출량은 매우 유사하게 나타냄
- (8) 두 코어에서 동일하게 벗짚 태우기로 만들어진 미세 숲의 산출량은 벼의 화분이 산출하는 심도(시기)와 매우 잘 일치함. 공검지 일대의 과거 농경활동이 활발했음을 잘 반영하는 것으로 해석할 수 있음



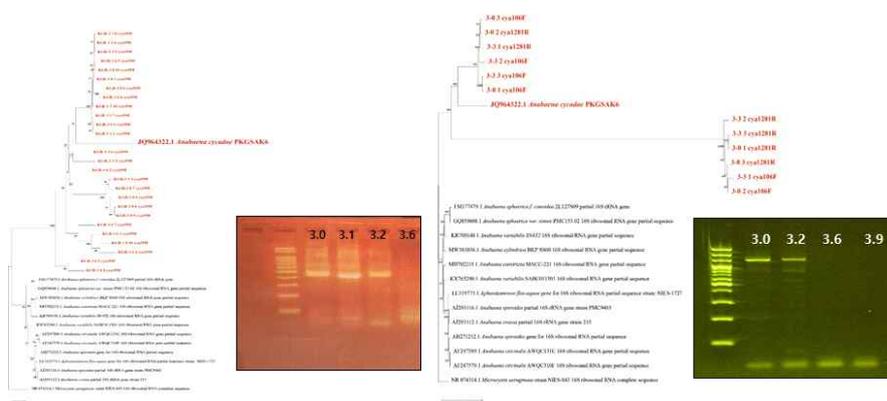
<그림 14. 수서식물의 고화분 군집분석 결과>

4. 공검지 퇴적토의 남조류 휴면포자 다양성 분석

가. 남조류 휴면포자 다양성 분석(그림 15)

- (1) '20년과 21년도 공검지 퇴적토 깊이별(연대별) 남조류 휴면포자의 분포를 알아보기 위해 시추된 퇴적토에서 돌말류가 관찰된 지점(20GG17, 21GG02, 21GG03)을 대상으로 퇴적토 내의 깊이별 휴면포자 밀도를 파악하였음
- (2) 지점별 휴면포자 밀도 조사 결과, 지점간의 시·공간적 분포 차이를 보였음

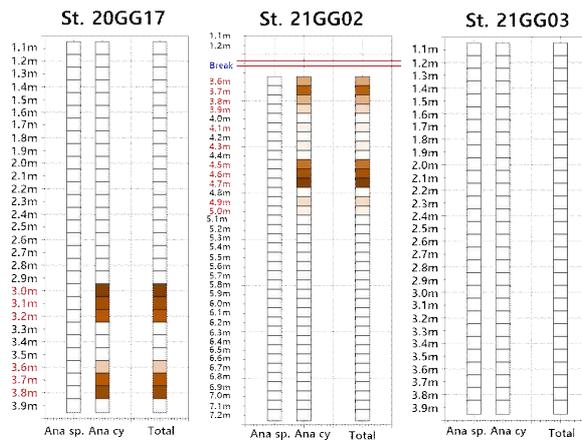
- (3) 20GG17 지점에서 두 가지 형태의 남조류 휴면포자가 생세포로 발견되었음
- (4) *Anabaena* sp. 휴면포자가 관찰되었는데, 이 휴면포자의 외형은 타원형이고 세포벽은 한 층으로 두껍게 형성되어 있었고, 광학현미경 하에 관찰된 휴면포자는 초록색이고 녹색 과립을 포함하고 있었음
- (5) 길이는 25~30 μ m, 폭 20~25 μ m이며, 일반적인 *Anabaena* 휴면포자의 특징인 양쪽 끝의 짧은 돌기(길이: 0.1~0.2 μ m)는 관찰할 수 없었음
- (6) 휴면포자의 운동성은 없었지만, 대부분의 깊이에서 관찰되지 않았거나 5개체 (단위: akinetes/g sediment) 이하의 낮은 밀도로 산출되었음. 한편, 특정한 퇴적층 깊이(3.1m~3.3m, 3.7m~3.9m)에서 *Anabaena cicadae*(*cycadae*) 휴면포자의 높은 현존량을 보였음(53~318 cells/g)
- (7) 약 450bp 크기의 PCR 산물은 모두 *Anabaena* 속으로 확인되었으며, 정확한 종 동정을 위해 1200bp 크기의 PCR 증폭시켜 Cloning 분석 결과, *Anabaena cicadae*로 동정 되었음
- (8) 21GG02 지점의 경우, 퇴적층별로 뚜렷한 차이를 보이며 특정 깊이 퇴적토 (3.6m~5.0m)에서 높은 밀도의 *Anabaena cicadae* 휴면포자가 관찰되었음
- (9) 퇴적토의 표층(1.1m)부터 3.5m까지 휴면포자는 관찰되지 않았으나 3.6m~5.0m에서는 약 50 cells/g의 현존량을 보였음
- (10) 5.1m 이하의 깊은 퇴적층(5.1m~7.2m)에서는 휴면포자가 관찰되지 않았고, 20GG17에서 발견되었던 *Anabaena* sp. 휴면포자도 관찰되지 않았음
- (11) 21GG03 지점은 돌말류의 결과와 동일하게 모든 퇴적토 깊이에서 휴면포자가 관찰되지 않았음



<그림 15. 남조류 휴면포자 PCR 분석결과>

나. 남조류 휴면포자의 공검지와 공검지 주변 지역 결과비교 (그림 16)

- (1) 20GG17코어에서 휴면포자가 대량 발견된(3.1m~3.3m, 3.7m~3.9m) 깊이는 약 300-400년 전이며, 돌말류의 경우 이 시기를 전후로 *Gyrosigma acuminatum*이 대량 발생하다가 급격하게 감소하였으며, *Cocconeis placentula*, *Achananthitium minutissimum*의 비율이 증가하는 시기였음
- (2) *Anabaena cicadae*의 밀도가 발견되지 않은 층에서는 *Gyrosigma acuminatum*의 밀도가 다시 급격히 증가하는 패턴을 보였음
- (3) *Anabaena cicadae*의 생리·생태적 특성과 분포 특성을 보면(Banerjee et al., 2005, Chang et al., 2019) 소철속 식물뿌리에 공생하여 생활하는 남조류로 알려져 있음
- (4) *Anabaena cicadae* 휴면포자가 출현하였던 퇴적토 시기의 공검지 지역은 물이 적거나 수심이 얇은 육상화가 진행의 가능성이 높을 것으로 판단되었음
- (5) 또한 토양의 pH 측정결과 5이하를 나타냄으로써 육상화된 토양층이 산소와 결합하여 산성화가 진행되었을 것으로 판단됨. 따라서 연대분석 결과에 따라 300~400년 전 20GG17와 21GG02 지점의 경우, 수심이 충분한 호소 환경이 아닌 물이 적은 육상화가 진행되고 있는 형태였을 것으로 사료됨



<그림 16. 공검지내 각 지점에 따른 퇴적토 깊이별 남조류 휴면포자 분포>

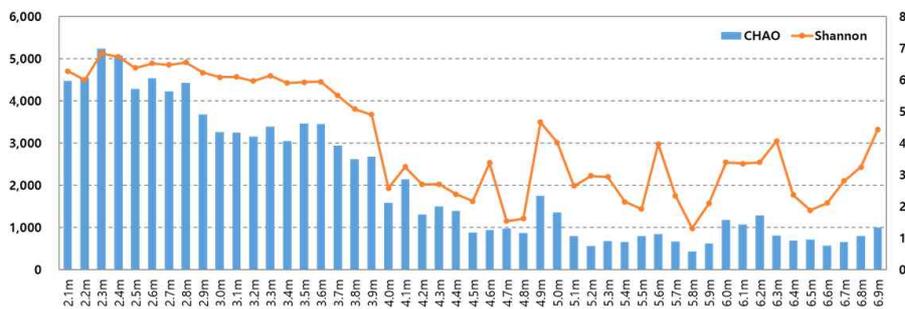
5. 공검지 퇴적토의 원핵생물 다양성 분석

가. '21년도 퇴적토 원핵생물 다양성 분석 대상 및 알파다양성 분석(그림 17)

- (1) '20년 시추가 진행된 20GG17 퇴적토 시료를 대상으로 원핵생물 군집 다양성을 분석하였으며, 시추 작업 시의 교란층을 제외하기 위하여 2.1m

부터 6.9m까지의 토양 시료를 10cm 간격으로 샘플링한 49시료를 대상으로 분석 진행

- (2) 총 4,040,639 reads가 확보되었고, 평균적으로 시료별 82,464 reads가 분석되었으며, 97%의 염기서열 유사도를 기반의 OTUs(operational taxonomic units)을 통해 다양성을 분석
- (3) 종의 풍부도와 균등도를 가장 잘 보여주는 다양성 지수 CHAO와 Shannon 지수를 분석한 결과 4m 이내의 시료는 종 다양성이 매우 높고, 균등도 지수도 높게 분석되어 다양한 원핵생물의 분포를 보였음
- (4) 4m 이상의 깊이에서는 종 다양성이 상대적으로 급격히 낮아지는 공통점을 보였으나 우점 분류군의 분포는 규칙성이 없는 것으로 분석되었음



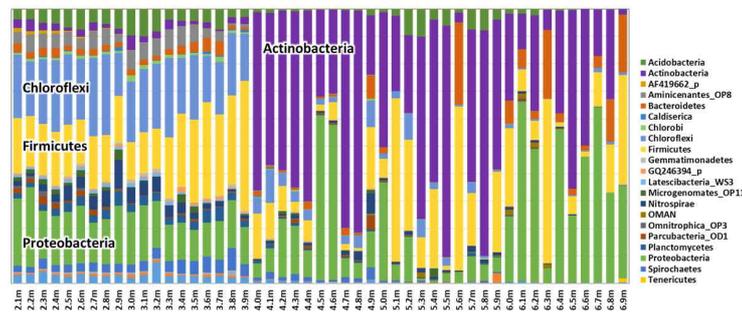
<그림 17. 퇴적토 20GG17 시료의 원핵생물 분포에 대한 알파다양성 지수(CHAO 및 Shannon)>

나. 퇴적토 내에서의 원핵생물 분류학적 분포 특성(그림 18)

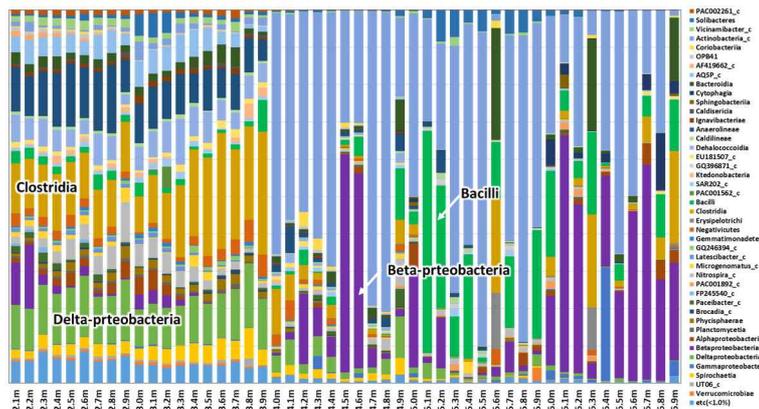
- (1) 퇴적토에서의 모든 시료에서 공통적으로 분포하는 분류군은 문(phylum) 수준에서 프로테오박테리아(Proteobacteria)와 후벽균(Firmicutes)으로 나타남
- (2) 그 외 주요 분류군은 깊이에 따라 크게 2개의 그룹으로 확연하게 구분되는 결과를 보여주었으며, 깊이 4m를 기준으로 2m~3.9m는 대표적인 혐기성 원핵생물로 알려진 클로로플렉시(Chloroflexi), 4m~6.9m는 방선균(Actinobacteria)가 주요 분류군으로 나타남
- (3) 강(class) 수준에서는 문 수준에서 공통 분류군으로 분석되었던 프로테오박테리아와 후벽균이 4m를 기준으로 2~3.9m는 델타 프로테오박테리아(Delta-proteobacteria)와 클로스트리디아(Clostridia), 4m 이상의 깊이에서는 베타 프로테오박테리아(Beta-proteobacteria)와 바실리(Bacilli) 분류군이 주요한 것으로 분석됨
- (4) 특히, 20년에 분석되었던 20GG06 지점이 깊이별로 크게 4개의 그룹으로

분류되며 환경변화가 다양하게 남아있었던 결과와 비교했을 때, 20GG17 지점은 원핵생물의 분포가 깊이별로는 2개의 그룹으로 구별되어 상대적으로 단순한 분포를 보였으나 각 시료 내에서는 극우점층 없이 훨씬 다양하게 나타남

- (5) 다른 코어의 결과에서 수환경이었을 것으로 예상되었던 깊이에서 주로 나타나는 분류군이 클로로플렉시 등의 혐기성 원핵생물이 주요했던 것으로 미루어 보았을 때, 20GG17의 시추지점은 약 3.9m의 깊이까지가 호수 환경, 그 이후는 하천·습지와 호수의 전이지대와 유사한 결과를 보임
- (6) 원핵생물 군집 분포가 깊이에 따라 급격하게 변화되는 양상을 보여, 결과적으로 공검지의 과거 환경 변화는 원핵생물 군집 조성 변화에 대한 확연한 연관성을 보여줌



문(phylum) 수준 원핵생물 분류학적 분포



강(class) 수준 원핵생물 분류학적 분포

<그림 18. 공검지 퇴적토의 원핵생물 분류학적 분포>

6. 공검지 퇴적토의 저서성대형무척추동물(갈따구류) 다양성 분석

가. 깊이별 퇴적층에 분포하는 갈따구류의 생물상 변화(표 5)

- (1) 분석 효율을 높이기 위해 돌말류 출현이 확인된 구간에서 깔따구류 우선 분석
- (2) 분석 결과 총 5속 27개체의 깔따구류 분포 확인
- (3) 지점별로 0~5개체, 0~3속의 깔따구류가 출현하였음, 2.3m에서는 깔따구류가 출현하지 않았음

<표 5. 저서성대형무척추동물(깔따구류)가 출현한 시추 지점 및 구간(깊이)>

Subsampling	깊이(m)	깔따구류 출현 유무
20GG17	2.1	○
20GG17	2.2	○
20GG17	2.3	-
20GG17	2.4	○
20GG17	2.5	○
20GG17	2.6	○
	...	
20GG17	3.9	전처리 중
20GG17	4.1	전처리 중
20GG17	5.1	전처리 중
20GG17	6.1	전처리 중
20GG17	7.1	전처리 중

※ 2019년: 11속, 191개체; 2020년: 4속 24개체의 출현이 확인되었음

나. 퇴적층에 분포하는 깔따구류의 생활상 변화 및 연도별 결과비교(표 6, 그림 19)

- (1) 출현종 모두 정수지역이면서 작은 하상 입자를 선호하는 종들이 주로 출현
- (2) 정수지역이면서 수변·수생식물 분포가 높고 작은 입자의 하상구성 비율이 높은 지역을 선호하는 종들이 주로 출현
- (3) 중앙부와 비교시, 수변부에 깔따구류의 다양성이 낮게 나타났음

<표 6. 연도별 공검지 퇴적층 중앙부와 수변부 출현속 비교>

Genus	2019	2020	2021
	중앙부	수변부	수변부2
<i>Chironomus</i>	○		
<i>Endochironomus</i>	○		○
<i>Polypedilum</i>	○		
<i>Tanytarsus</i>	○		○
<i>Cricotopus</i>	○	○	○
<i>Hydrobeanus</i>	○		
<i>Propillocerus</i>	○		
<i>Psectrocladius</i>	○		
<i>Clinotanypus</i>	○		
<i>Procladius</i>	○	○	
<i>Zavrelimyia</i>	○		○
<i>Dicrotendipes</i>		○	○

<표 7. 출현이 확인된 깔따구류 화상자료>

깔따구류	주요 특징
	<p>- <i>Dicotendipes</i> sp. : 정수지역에 수변·수생식물 분포가 높은 지역을 선호하며 담수서식지 내 작은 입자의 모래로 집을 지어 서식하며 주로 유기물을 주워먹는 특징을 가짐</p>
	<p>- <i>Cricotopus</i> sp. : 정수지역에 수변·수생식물 분포가 높은 지역을 선호하며 담수서식지 내 작은입자의 모래로 집을 지어 서식하며 주로 유기물을 갇아먹거나 주워먹는 특징을 가짐</p>
	<p>- <i>Endochironomus</i> sp. : 조류가 많은 정수지역을 선호하며 주로 수생식물을 갇아먹음</p>
	<p>- <i>Tanytarsus</i> sp. : 정수지역내 수변·수생식물 분포가 높은 지역을 선호하며 주로 흘러오는 유기물을 걸러 먹는 특징을 가짐</p>
	<p>- <i>Zavreliomyia</i> sp. : 유수 및 정수지역 모두 출현하나 유수환경의 경우 유속이 느린 곳을 선호하며 다른 생물을 잡아 먹음(예, 실지렁이, 깔따구류 등)</p>

7. 고생물 표본 확보

- 공검지 퇴적토 시료를 이용하여 총 528점(30과 94종)의 화석돌말류 표본 제작 및 수장, DB화 하였음

8. 미기록종 및 신종 발굴(부록 1)

<표 8. 미세조류와 원핵생물의 신/미기록종 목록>

신종(후보) 및 미기록 종 분류군 목록		
분류군	학 명	일련번호
미세조류(돌말류)	Diploneidaceae	
	<i>Diploneis fenestrata</i>	미세조류-001
	Pinnulariaceae	
	<i>Pinnularia borealis</i> var. <i>subislandica</i>	미세조류-002
	<i>Pinnularia reichardtii</i>	미세조류-003
	<i>Pinnularia dicephala</i>	미세조류-004
	<i>Pinnularia diandae</i>	미세조류-005
	Eunotiaceae	
	<i>Eunotia cisalpina</i>	미세조류-006
	<i>Eunotia latitaenia</i>	미세조류-007
	<i>Eunotia latinasuta</i>	미세조류-008
	<i>Eunotia boreoalpina</i>	미세조류-009
	Bacillariaceae	
	<i>Hantzschia dorgaliensis</i>	미세조류-010
Stauroneidaceae		
<i>Stauroneis angustilancea</i>	미세조류-011	
원핵생물	Alicyclobacillaceae	
	<i>Tumebacillus flagellatus</i>	원핵생물-001
	Streptosporangiaceae	
<i>Sphaerisporangium dianthi</i>	원핵생물-002	

9. 연구 성과(부록 2)

가. 계획대비 연구 성과

구분	1. 정책건의		2. 논문게재		3. 산업재산권			4. 홍보		기타
	제정	개정	국내논문*	Scopus, SCI-E 이상	출원	등록	기술 이전	보도 자료*	기고	
계획	1		1	1				2		공동세미나 개최
실적	0		0	1				2		
달성도(%)	0		0	100				100		

※ 국내 논문, 정책건의는 12월 중으로 달성 예정

나. 기타 연구 성과

- (1) 공동연구기관과 학제간 연구결과 교류 : ‘한국지질자원연구원’, ‘상주박물관’, ‘건국대학교’와 공검지 연구결과에 대한 세미나 실시, 연구결과 활용에 대한 방안 및 논의
- (2) 공검지 연구결과를 통한 공검지 활용에 대한 정책 건의서 작성 중

IV. 결론 및 기대성과

1. 결론

가. 공검지 퇴적토의 지질학적 분석

- (1) 공검지에서 시추된 5지점(21GG01-05)의 퇴적상을 분석한 결과, 연구지역은 21GG05 코어는 공검지의 영향을 받지 않은 지역으로 확인되었고 (주로 범람환경), 과거 공검지의 남쪽 경계로 확인됨
- (2) 공검지 남부 4개소는 하천 또는 환원 환경의 습지, 호수가 발달한 환경이었고, 이후 현재와 비슷한 산화 환경의 범람원 지역으로 변화하였음
- (3) 공검지와 공검지 주변지역(사별국면)에 대한 비교 분석 결과, 공검지 같은 정체된 습지 또는 호수 환경이 아닌 하천 활동에 의한 영향이 큰 것으로 판단됨

나. 공검지 퇴적토의 돌말류 다양성 분석

- (1) 21GG02코어에서 돌말류가 6.2-7.2m 구간에서 산출되는 것을 확인하였으나, 21GG03코어에서는 돌말류의 출현이 없었던 것으로 확인되었음
- (2) 공검지와 공검지 주변지역의 영향 관계를 확인해보기 위해서 ‘20년도 20GG17코어와 ‘21년도 21GG03코어에 대해 통계학적 모델링 분석으로 실시하였음
- (4) 결과적으로 두 지역간의 군집차이는 큰 것으로 확인 되었음. 추가적으로 세포에 대한 보존성이 많이 떨어졌으며, 이러한 영향은 공검면에서 유출되는 하천인 ‘동천’의 영향이 강하여, 동천 주변으로는 하천에 의한 잦은 범람으로 인한 침식과 퇴적과정이 빈번하여 보존성이 떨어졌을 것으로 해석됨

다. 공검지 퇴적토의 고화분 다양성 분석

- (1) 수서식물 군집변화 특성은 서로 잘 대비가 되었음. 즉, 하부로부터 하천환경→ 하천-습지 전이환경→ 고도양 환경→ 저수지와 주변 농경지 환경

으로 변화했던 것으로 해석됨

- (2) 고화분 분석결과에 의하면 공검지일대의 수전농경은 약 1400년 전부터 시작했고, 주변 산지에서는 밭경작(메밀)을 했던 것으로 추정됨
- (3) 벧짚 태우기로 만들어진 미세 숯의 산출량은 벼의 화분이 산출하는 심도(시기)와 매우 잘 일치하는 것으로 조사되어, 공검지 일대의 과거 농경 활동이 활발했던 것으로 사료됨

라. 공검지 퇴적토의 남조류 휴면포자 다양성 분석

- (1) 지점별 휴면포자 밀도 조사 결과, 지점간의 시·공간적 분포 차이를 보였음
- (2) 21GG02코어에서 퇴적층별로 뚜렷한 차이를 보이며 특정 깊이에서 높은 밀도의 *Anabaena cicadae* 휴면포자가 관찰되었음
- (3) *Anabaena cicadae* 휴면포자의 생리·생태학적 특성으로 통해서, 휴면포자가 출현하였던 퇴적토 시기의 공검지 지역은 물이 적거나 수심이 얕은 육상화가 진행의 가능성이 높을 것으로 판단되었음

마. 공검지 퇴적토의 원핵생물 다양성 분석

- (1) 퇴적토에서의 모든 시료에서 공통적으로 분포하는 분류군은 문(phylum) 수준에서 프로테오박테리아(Proteobacteria)와 후벽균(Firmicutes)으로 나타남
- (2) 20년에 분석되었던 20GG06 지점이 깊이별로 크게 4개의 그룹으로 분류되며 환경변화가 다양하게 남아있었던 반면, 20GG17 지점은 깊이별로 2개의 그룹으로 구별되었고, 각 시료 내에서는 극우점종 없이 훨씬 다양하게 나타남
- (3) 군집 분포가 깊이에 따라 급격하게 변화되는 양상을 보여, 공검지의 과거 환경 변화는 원핵생물 군집 조성 변화 영향을 끼친 것으로 판단됨

바. 공검지 퇴적토의 저서성대형무척추동물(갈따구류) 다양성 분석

- (1) 출현종 모두 정수지역이면서 작은 하상 입자를 선호하는 종들이 주로 출현
- (2) 정수지역이면서 수변·수생식물 분포가 높고 작은 입자의 하상구성 비율이 높은 지역을 선호하는 종들이 주로 출현
- (3) 수변부와 중앙부와 비교 시, 수변부에 갈따구류의 다양성이 낮게 나타났음

2. 향후 계획(2022년)

가. 공검지 연구결과를 활용한 정책보고서 작성

- (1) 기존에 수행 되어온 공검지의 고증된 연구사업 결과를 근거한 공검지 복원 방

법, 이용 및 활용에 대한 제안

- (가) 규명된 공검지의 옛터를 바탕으로 대표될 수 있는 범위 선정 후 들레길 조성
- (나) 과거 공검지 퇴적층까지 준설 후 당시 살았던 생물의 자연적 복원방향 제시
- (다) 공검지 기념품 제작 및 기념품샵 조성 등의 브랜드화 개발을 위한 방향 제시
- (2) 생물학, 지질학, 인문사회학 등의 분야별 전문가에 의한 자문 또는 자문회의를 통해 다학적이고, 현실성 있는 정책제안 선별 및 반영
- (3) 공검지 연구 결과를 종합, 정리, 타지역과의 유사 사례 비교·분석을 통해서 개발, 보전에 관한 방안 제시

3. 활용방안 및 기대성과

가. 연구결과의 활용방안

- (1) 역사적인 기록 또는 구전으로 전해내려 오는 습지의 실제 형성 시기를 과학적으로 규명
- (2) 습지 퇴적층에 서식하는 고생물 분석을 통해 과거 환경 변화를 파악, 이를 활용하여 습지 및 주변의 고환경 지도 및 고지형도 작성 가능
- (3) 연구 결과를 활용한 특별전시회 개최, 홍보물 배포 등으로 대국민 홍보 및 습지에 대한 인식 제고 및 기후 변화 등 과거 또는 미래 환경 예측 자료로 활용

나. 기대성과

- (1) 정책적 측면
 - (가) 습지보전법(환경부, '16.1.) 및 자연환경보전법(환경부, '17.11.) 등을 근거로 습지 보전 및 관리에 관한 조사 및 모니터링 계획에 본 과제의 연구결과를 제공할 수 있으며, 이를 통해 습지의 효율적인 복원·보전을 위한 국가습지정책에 적극 활용
 - (나) 담수 습지 보전 정책에 활용하기 위한 복원 모델 개발 가능
- (2) 생태환경적 측면
 - (가) 한반도 주요 습지의 고생물을 연구함으로써 생태학적 복원을 위한 기초·활용 자료 제공
- (3) 기술적 측면
 - (가) 고환경·고생물군 변화 연구방법 개발 및 예측모델과 관련 기술 개발

가능

- (나) 고생물군의 표본 확보, 미기록종 및 신종(후보) 발굴가능
- (다) 고생물군의 서식환경 데이터 확보를 통한, 차별화된 생태정보 확보 가능
- (4) 경제·산업적 측면
 - (가) 공검지 활용 및 자연친화적인 복원을 통한 지역경제의 활성화에 기여
 - (나) 습지의 가치 제고 및 인식 함양 등을 통해 일자리 증대와 홍보·관광 산업 등의 고부가가치 산업 창출 가능
- (5) 교육적 측면
 - (가) 학술적 연구를 통해 한반도 주요 습지의 역사를 재조명, 연구 결과를 홍보할 수 있는 기회를 적극 마련, 습지 해설사, 교육 기관 등에 교육 자료로 이용

V. 참고문헌

- 이상현. 2008. 호수 및 습지 퇴적물에 함유된 화분을 이용한 고기후 연구 동향. 지질학회지 44(1), 105-117.
- 정대교, 김복혜. 2008. 호수 및 습지퇴적물을 이용한 국내·외 고기후 연구 현황과 향후 연구 방향. 지질학회지, 44(1), 81-92.
- Go, A., T. Yukiya and K. Kaoru. 2013. Sedimentary environment of Hwajinpo using diatom analysis. Journal of the Geomorphological Association of Korea 20(2): 15-25.
- Harwood, D., V. Nikolaev and D. Winter. 2007. Cretaceous Records of Diatom Evolution, Radiation, and Expansion. The Paleontological Society Papers 13: 33-59.
- Lee, H.W., U.J. Yang and E.H. Kim. 2003. A study of fossil diatom in swamp Woopo marsh. Environmental Research Institute, Kyungnam University 26: 31-48
- Lee, Y.G. 1976. Fossil diatoms in the upper part of the Eoil Formation, Eoil area, Gyeongsangbuk-do, Korea. The Korea Society of Economic and Environmental Geology 9(2): 77-84.
- Lee, Y.G., Y.A. Park and J.Y. Choi. 1995. Sedimentary facies and micropaleontological study of tidal sediments off the Mankyung-Dongjin River estuary, west coast of Korea. The Journal of the Korean Society of Oceanography 30(2): 70-90.
- Sintsov, A.V., 2003, The structure and stress-strain field of the Baikal-Patom Foldbelt implications for origin, Russian Geology and Geophysics, 44, 884-892(in English).
- Williams, Douglas F., 1993, An International Investigation of the Paleolimnological and Tectonic Evolution of the Lake Baikal Sedimentary Basin, Southeastern Siberia, Russian Federation (unpublished).

VI. 부록

부록 1. 미기록종 및 신종 기록지

부록 2. 논문, 학술발표, 홍보 성과