

멀티프록시를 이용한 홀로세 후기, 루이지애나 주 미시시피강 담수습지 환경 복원

류중형* · 리우 캄비우**

Multi-proxy Records of Environmental Changes in a Freshwater Wetland in Louisiana during the Late Holocene

Junghyung Ryu* · Kam-biu Liu**

요약: 본 연구는 홀로세 후기 미시시피강 담수습지 형성과 변화과정을 멀티프록시(작열손실량, X선 형광분석법, 층서학, 화분분석) 접근을 통해 다양한 관점(지질, 지화학, 생태계)에서 분석하였다. 이 연구를 위해, 360cm 길이의 시추코어가 미국 루이지애나 주 폰트르레인(Pontchartrain) 호수 주변의 습지에서 채취되었다. 분석결과에 따르면, 홀로세 후기 동안, 연구지역은 총 네 번의 생태계 변이를 겪은 것으로 밝혀졌다. 5,000~4,000년 전 해수면 안정과 함께 발달한 사주 조간대(back-barrier)내에 굴암초를 형성하며 높은 해성원소(Ca)를 퇴적하던 환경은, 삼각주의 해진(Delta switching)의 영향으로 높은 Zr, Br 원소를 포함하는 전이층을 4,000~3,500년 동안 형성하였다. St. Bernard 삼각주진퇴적의 영향으로 육성퇴적물(Zr)이 크게 증가하였고, 이후 바다와 완전히 분리된 호수를 약 3,500~2,000년 사이에 완성하였다. 2,000년 경 범람원의 확장과 더불어 주변지역으로 벼풀과 애기부들류의 담수식물들이 번성하기 시작하였다. 2,500년 경 발생한 큰 화재의 영향으로 초본류가 주를 이루던 생태계가 크게 교란되었다. 본 연구는 고환경 분석에 있어서, 멀티프록시 접근을 통해, 전반적인 퇴적물 운반프로세스를 다른 생태학적 지형학적 요소와 함께 이해함으로써, 발전된 습지환경 분석을 유도했다.

주요어 : 습지, 삼각주, 루이지애나, 화분분석, 작열손실량, X선 형광분석법

Abstract : This study reports on a palynology-based multi-proxy analysis of a 360 cm sediment core retrieved from a freshwater marsh near Lake Pontchartrain in southern Louisiana, U.S.A. The site has experienced significant geological and eco-logical alterations during the late Holocene. Palynological and geochemical data suggest that four stages of ecological succession occurred during the last 5,000 years. The site changed from an oyster reef in the back-barrier system (5.0-4.0 cal yr BP) with elevated marine elemental concentration of Ca to a transitional stage (4.0-3.5 cal yr BP) with high Zr/Br ratio, and then to a lake stage (3.5-2.0 cal yr BP) during the St. Bernard delta complex with increasing terrestrial elemental concentration of Zr. It finally changed to a *Sagittaria-Typha* freshwater marsh (2.0 cal yr BP to present) with elevated Br concentration. The high charcoal concentration suggests an intense fire event that occurred prior to the establishment of the *Sagittaria-*

*루이지애나 주립대학교 해양학과 박사수료(Ph.D. Candidate, Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, jryu1@lsu.edu)

**루이지애나 주립대학교 해양학과 학과장(Professor and Chair, George W. Barineau III Professor, Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, kliu1@lsu.edu)

Typha freshwater marsh around 2.0 cal yr BP. These findings suggest that our multi-proxy data are useful for identifying the origin of sediments and reconstructing the paleoenvironment in coastal wetlands.

Key Words : Wetland, Delta, Louisiana, Pollen, Loss-on-ignition, X-ray fluorescence

I. 서론

미국 루이지애나 남부에 위치한 미시시피강 하류는 다양한 식생과 습지를 보존하는 지역으로, 매년 5억 톤 가량의 퇴적물을 강 하류로 운반한다(Couvillion *et al.*, 2011). 이렇게 운반된 퇴적물은 지난 6천 년 동안 약 320km² 이상의 광활한 해안습지지형을 발달시켜 왔는데, 특히, 북으로는 저지대 활엽수 수림이 표고 35m 이상의 제4기 지형 내에 발달하고, 남으로는 담수와 해수의 접이 지대를 따라 기수역 습지가 발달되어져 있다. 멕시코만과 접해 있는 해안습지 지역에는 해안선을 따라 맹그로브가 넓게 발달한다(Alleman and Hester, 2011). 하지만, 이들 습지는, 지구온난화에 따른 기온변화와 해수면 상승으로 인한 심각한 생태계 변이를 겪고 있다(Couvillion *et al.*, 2011). 지난 50년간 많은 연구가 진행되어져 왔으나(Palmisano, Jr., 1970; Sklar and Browder, 1998; Kulp *et al.*, 2005; Doyle *et al.*, 2010; Day *et al.*, 2012), 생태학적, 지화학, 지질학적 분석이 종합적으로 적용된 사례는 많지 않을 뿐 아니라, 생태학을 중심으로 진행된 연구는 대부분 연구기간이 짧게 이루어졌다(Cowardin and Golet, 1995; Mitsch *et al.*, 2009; Cronk and Fennessy, 2016). 이와 같은 문제는 습지연구에 있어서, 미래변화와 대책방안에 대한 연구의 제약을 가져왔다(Justic *et al.*, 2016).

본 연구는, 멀티프록시(작열손실량, X선 형광분석법, 층서학, 화분분석)를 통해 미시시피강 하구, 담수습지에서 진행된, 지질, 지형, 그리고 그에 따른 생태환경적 변화를 진단하고, 다양한 관점에서 세밀히 분석 하였다. 특히, 다변량관계분석(식생, 지질, 지화학)을 통해, 미시시피강 하류 삼각주의 형성과정과 퇴적 작용이 생태계에 미치는 상관관계를 분석하였다. 이는 기존습지연구 방법을 보완하고, 발전하는 방식으로, 향후 지질, 식생변화, 해수면변화 같은 기후변화와 관련된 연안연구를 진행하는 데 도움을 주고, 습지 보존연구에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대하고 있다.

지난 30년 넘게, 국내 생태계와 관련하여, 고환경복원에 다양한 프록시 기술이 도입되어져 왔다(Kang and

Lee, 2000; Liu *et al.*, 2004; 류춘길 등, 2005; Jun *et al.*, 2010). 특히 기존 지질학적(Kim, 1988; 박용안, 1995; Kim *et al.*, 1999), 지형학적(김상호 등, 2003; 박경 등, 2005; 이광률·박충선, 2006; 윤한삼 등, 2007) 분석을 넘어, 생태학적(이점숙 등, 2009; 류춘길 등, 2011; 손명원 등, 2013) 분석을 수행함으로써, 환경복원 연구가 활발하게 진행되어져 왔다. 최근 많은 연구에 적용되고 있는 지화학 분석은 퇴적물에 대한 기원을 밝히는 데 많이 기여를 하고 있다(박옥분·남승일, 2009; 장태수·남승일, 2011; 장태수 등, 2012). 이러한 다양한 분석법이 새롭게 등장하고, 적용됨에도 불구하고, 고환경 복원에 있어서, 화분분석은 여전히 상당한 비중을 차지하고 있다(남옥현 등, 2003; 정철환 등, 2004; 박지훈·최광희, 2009; 박정재, 2013). 하지만, 화분분석을 기초로 하는 고환경 분석은 몇 가지 문제점들은 안고 있는 것이 사실이다(Faegri, 1966; 박지훈, 2008). 화분분석을 이용한, 습지환경복원 연구는 퇴적물 분석에 그 뿌리를 두고 있는 만큼, 퇴적물이 쌓이는 과정 내에서 발생할 수 있는 수문학적 대기학적 변수가 그 연구결과에 중대한 영향을 끼치기도 한다(Hartman, 1968; Davis and Brubaker, 1973; Janssen, 1973). 이를 보완하고자, 최근 해외에서는 멀티프록시에 기반을 둔 연구가 활발하다(Liu *et al.*, 2015; McCloskey *et al.*, 2018; Ryu *et al.*, 2018). 이들 연구는, 퇴적물의 기원을 밝히고, 기존 지질학과 화분학에 기초한 연구를 보완함으로써 고환경복원을 한 단계 발전시키는 데 노력하고 있다. 본 연구는 기존연구의 지역을 확대하고 점검함으로써 도출된 연구결과가 추후 국내에 적용될 수 있는지를 검토하였다.

II. 연구지역 및 연구방법

1. 미시시피강 삼각주 역사

루이지애나주 남부는 미시시피강과 걸프만의 양방향 관계하에서 지난 7천 년 동안 약 30,000km² 이상의 삼각



그림 1. 연구지역 위성사진

- * A: 루이지애나 미시시피강 하류에 넓게 분포한 습지와 Gulf of Mexico의 위치적 상관관계를 보여주며, 다양한 색으로 표현된 복합 삼각주의 발달단계가 연도별로 정리되어 있음.
- ** B: 연구지역 주변으로 호수(Lake Maurepas와 Lake Pontchartrain), 미시시피강, 도시(뉴올리언스)의 지리적 위치를 나타냄.
- *** C: 연구지역 내에 남아있는 수로(canals)와 근처의 도로를 나타냄.

주를 발달시켜왔다(Kulp *et al.*, 2005). 이들 삼각주는 크게 6개의 복합삼각주(Maringouin, Teche, St. Bernard, Lafourche, Plaquemine/Balize, and Atchafalaya)를 발달시켜 왔으며(Frazier, 1967), 세부적으로 16개의 작은 삼각주를 완성해왔다(그림 1).

주요 6개의 복합삼각주 중에서 본 연구지역은 후기 홀로세 동안 Teche, St. Bernard, Lafoucha 삼각주의 직·간접적인 영향을 받아왔다(Kulp *et al.*, 2005). Frazier(1967)는 약 5~6천여 년 전 Teche삼각주의 해진과 함께 연안에 발달하는 하중도와 사주퇴적상(Distributary mouth-bar facies)의 조립질 퇴적층을 Pontchartrain 호수 주변으로 발달시킨 것을 확인하였다. 내륙으로는 하천 퇴적물의 영향으로 만들어지는 매적범람원(Aggradational-floodplain),

자연제방, 틈상퇴적체(crevasse deposits)등 주요 하천지형을 발달시켰다. 이후 4천 년 전부터 St. Bernard 삼각주는 활동을 멈춘 Tech 삼각주 상부에 많은 양의 점토 퇴적물을 쌓았고, 기존에 형성된 연안 골짜기(Interdistributary channel)를 메우며 성장해 갔다. 이로 인해 조립질의 하상퇴적물이 세립질로 변하는 상향세립질(Fining-upward sequence)층을 발전시켰다. 해진과 해퇴를 반복하며 광범위한 연안습지를 발달시키던 미시시피 삼각주는 3천 년 전부터 시작된 Lafourche 삼각주의 활동으로 강과 호수 등에 충적토를 퇴적하며 루이지애나 최남단으로부터 영역을 확장해갔다. 이후 많은 식생들이 성장해 가면서 다량의 유기물퇴적물을 충적토위에 형성하였다. 꾸준히 발전해오던 습지는 17, 18세기에 시작된 이주민의 증가

와 도시 확장으로 서서히 파괴되기 시작한다. 18세기 이후, 증가한 인간 활동은 벌목, 도시 확장, 댐, 제방과 같은 인조 건축물의 폭발적 증가를 가져왔으며, 특히, 물과 토사의 길을 막는 자연제방과 댐 건설은 염피해, 하구퇴적물 감소를 동반한 지반침하를 일으켰다(Ryu *et al.*, 2018). 또한, 오일과 천연가스 개발은, 해안 습지와 근해 생태계를 훼손하는데 주요한 영향을 미쳤다.

2 연구지역

연구지역은 루이지애나 남부에 위치한 야생동물 관리 지역(Joyce Wildlife Management Area)으로, Pontchartrain

분지 내에 위치해 있다. 동쪽과 서쪽으로 두 호수(Pontchartrain, Maurepas)가 자리잡고 있어, 연구지역은 이 두 호수의 교각 역할을 하고 있다(그림 1). 대표식생으로는 미국 남부의 대표수종인 Bald cypress와 Water tupelo (*Taxodium distichum-Nyssa aquatica*)가 주변 습지를 조성하고 있으며, 높은 밀도의 관목과 초본류(*Eleocharis*, *Sagittaria*, *Typha*, *Polygonum*, *Ipomoea*, *Vigna luteola*, *Alternanthera*, *Cyperus*, *Kosteletzkya*, *Quercus*, *Zanthoxylum*, *Wax myrtle*, *Acer rubrum* 등)가 담수습지환경에서 서식하고 있다(그림 2). 조사지역에서 수 km 북쪽으로, 도시 해먼드(Hammond)와 남쪽으로 뉴올리언스(New Orleans)가 위치하고 있다(그림 1). 많은 양의 차량이 주변 도로

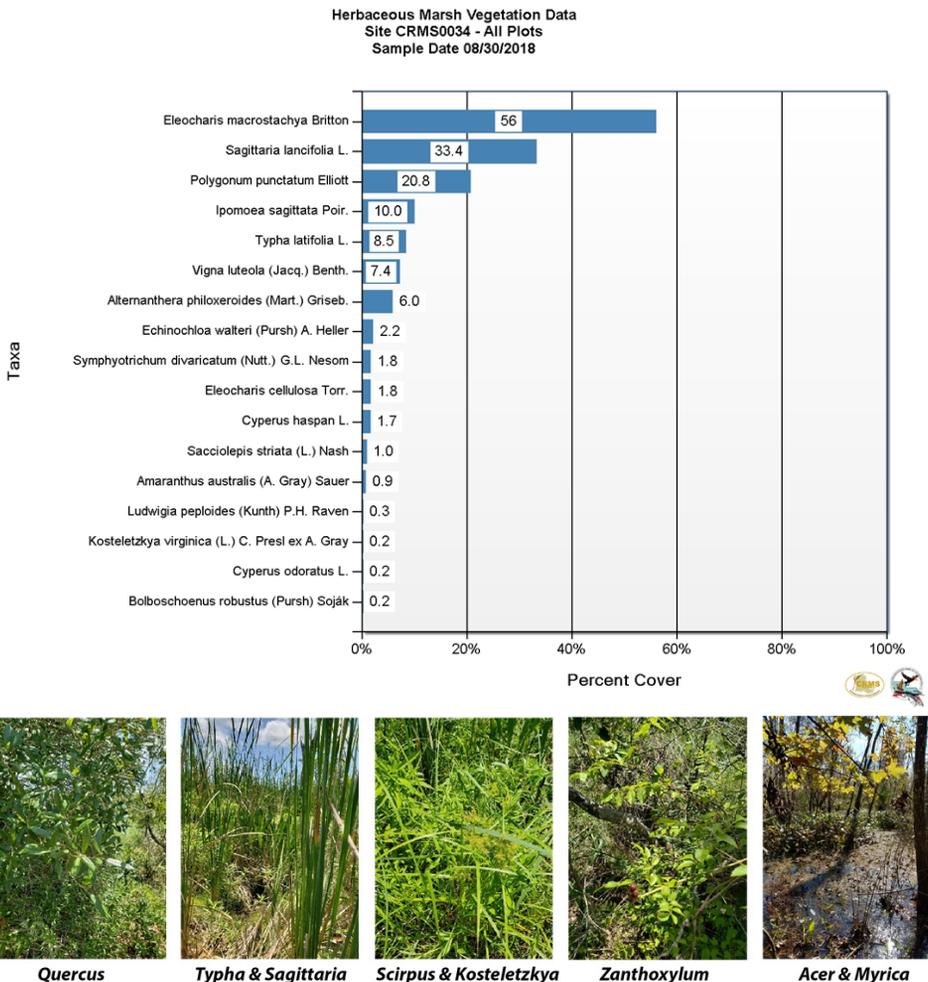


그림 2. 연구지역 식생 분포(2018년 6월)

출처 : CRMS(그래프); CWPPRA(사진).

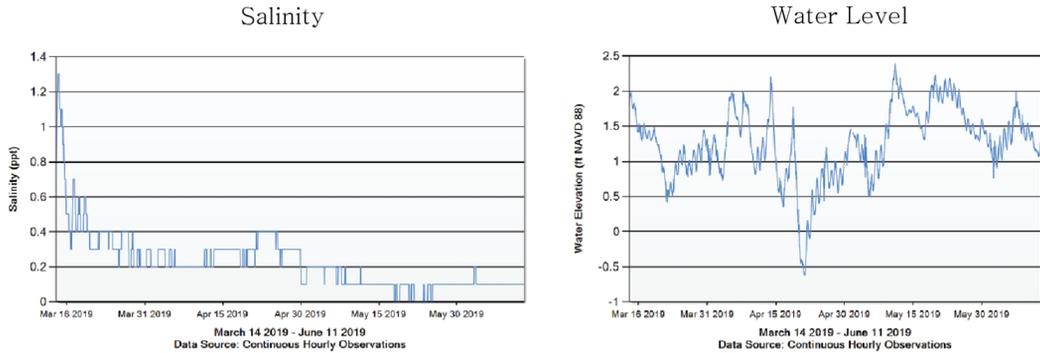


그림 3. 연구지역 수면과 염도

출처 : CRMS.

(U. S. Highway 51과 I-10)를 통해 이 지역을 지나고, 19세기부터 20세기에 걸친 철도 사업과 벌목사업의 영향으로, 자연습지가 상당부분 파괴 또는 변형 되었다(Ryu *et al.*, 2018).

Coastwide Reference Monitoring System(CRMS)에서 측정된 주변 환경 염도는 0~1ppt를 유지하는 모습을 보였다(그림 3). 수면은 계절적 영향을 받으며 15~60cm 내에서 진폭을 유지하고 있다(그림 3).

3. 연구방법

지질, 식생, 지화학에 대한 연구가 다양한 분석법(작열손실량, X선 형광분석, 화분분석, 화석분석)을 통해 이루어졌다. 2017년 11월 3일 루이지애나 주립대학교 해양학과 소속(Global Change and Coastal Paleoecology) 연구실 팀은 루이지애나 남부에 위치한 담수 습지에서 식물 생태계 조사와, 주변 허리케인 피해 조사를 실시하였다. 습지의 수천 년 전 생태계와 지질환경 조사를 위해, 토양시료가 다양한 방법으로 채취되었다. 표층과 상단 유기층 분석을 위해 Russian Peat Borer가 사용되었다. 수차례에 걸친 표층샘플 분석 후 지정된 곳에서 Vibracorer를 이용하여, 총 길이 360cm의 시추코어를 획득하였다. 특히 Vibracorer를 이용한 토양 시추에는 총 길이 6m에 달하는 알루미늄 파이프가 사용되었다. 화학적 변형과 박테리아 증식을 막기 위해, 채취된 코어는 4°C에서 보관되었다.

모든 실험은 학내 연구실(Global Change and Coastal Paleoecology)에서 실행되었다. 퇴적물 분석을 위해 다

양한 기구가(표준체, 먼셀토색집)가 사용되었다. 토양의 수분, 유기물, 탄산염, 규산염의 함량분석을 위해 작열손실량 측정이 매 1cm마다 총 360개의 샘플에서 실행되었다. 샘플은 각 단계에 마다 오븐(Thermolyne D1 Large Tabletop Muffle Furnace) 안에서 정해진 시간과 온도에 따라 실행되었다(Dean, Jr., 1974). 토양수분함량 측정을 위해 시료는 105°C에서 약 48시간 동안 수분제거 과정을 거쳤으며, 수분이 완전히 제거된 샘플은 550°C에서 약 4시간 동안 유기물 측정을 위해 구워졌다. 탄산염과 규산염 함량 분석을 위해 샘플을 약 5시간 동안 1,000°C에서 태워졌으며, 각 단계마다 샘플의 무게는 화학천칭 (Analytical balance)에서 마이크로그램(μg)단위로 측정됐다.

지화학 분석을 위해 X선 형광분석법이 사용되었다. 이를 위해 Delta Premium DP-4000 X-ray fluorescence analyser가 사용되었으며, 360cm의 토양 시료는 2cm간격으로 스캔되었다. 각 층의 화학 구성요소는 Parts per million(ppm) 단위로 측정 되었다. 이 방법은 X-ray가 시료의 내각 전자를 방출시킬 때, 방출된 전자의 자리를 채우기 위해 다른 전자껍질에서 전자가 이동하며 방출되는 에너지를 측정하는 원리로, 토양내 원소의 양을 알 수 있다.

생태환경 분석에는 숯과 미화석분석(화분, 포자, 곰팡이, 유공충) 및 대화석분석이 실행되었다. 대화석분석은 퇴적물 내 매장된 식물이나 조개류 화석을 매 5~10cm마다 분석하고 기록하며 진행되었다. 발견된 식물과 조개 화석은 채에 걸러진 후 시료에 옮겨져 현미경 분석에 사용되었다. 미화석 분석을 위해 50cm마다 토양샘플이 채

취되었으며, 추출물은 채에 걸러진 후 다섯 단계에 걸친 화학재처리 과정을 거쳤다(Liu *et al.*, 2008). 칼슘 제거를 위해 10% 염산용액이 사용되었다. 부식산 제거와 해교작업을 위해 10%의 수산화칼슘용액을 넣고 끓는 물에서 2~5분간 중탕 처리된 후, 채에(125~15 μ m) 걸러져 미화석을 분리했다. 규산염 제거를 위해 불화수소용액이 사용되었으며, 아세트산용액은 섬유소 제거를 위해 사용되었다. 삼차부틸알콜을 첨가해 마지막 남은 수분을 제거하였다. 현미경 분석에는 통계적 유의성을 높이기 위해 300개 이상의 화분과 10 μ m 크기 이상의 슛 조각이 분석되었다.

탄소동위원소측정을 위해 샘플은 미국 플로리다 주의 International Chemical Analysis(ICA) 연구소로 보내졌다.

III. 연구 결과 및 토의

1. 층서학적 결과분석

멀티프로кси(토양분석, 작열손실량, X선 형광분석, 미화석분석) 분석 결과, 시추코어는 4개의 뚜렷한 층으로 구분되었다. 최하단부부터 Zone1(360-335cm)은 조립질 퇴적물과 굴 껍질이 쌓인 패사층을 구성했다. 탄소 동위원소결과 최 하단부는 약 5,300년 전에 퇴적된 것으로 밝혀졌다(그림 4). 작열손실량 분석 결과, 수분 함유량 18~40%, 유기물함량 0~5%, 탄산염 함유량 0~7%, 규산염 84~95%로 구성되었다. 패사의 대부분은 비교적 잘 보존된 굴 껍질이 대부분이며, 패사의 파쇄정도가 심하지 않았다(그림 4). 잘게 부서진 패사의 영향으로 탄소

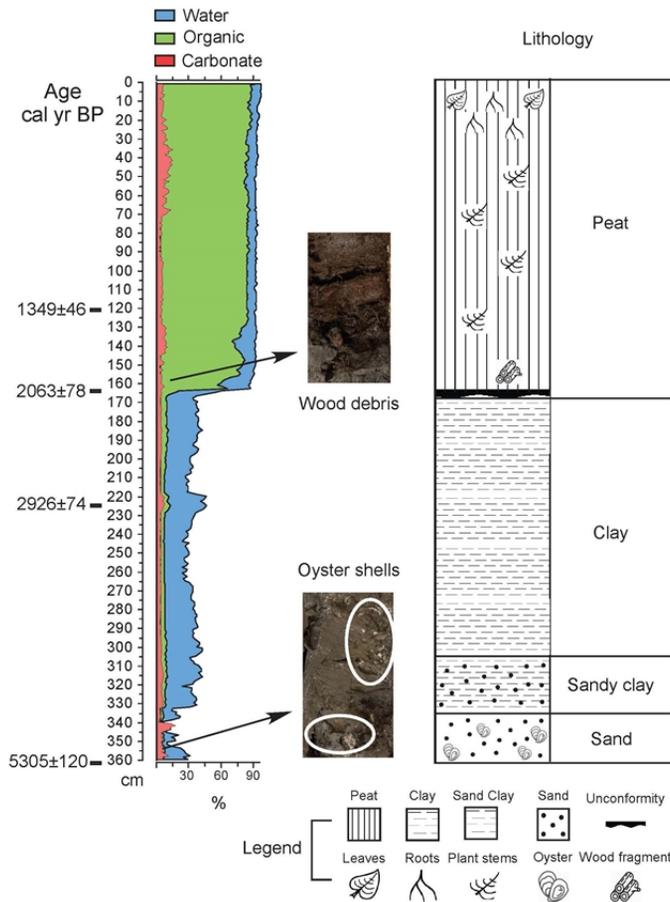


그림 4. 작열손실량과 층서

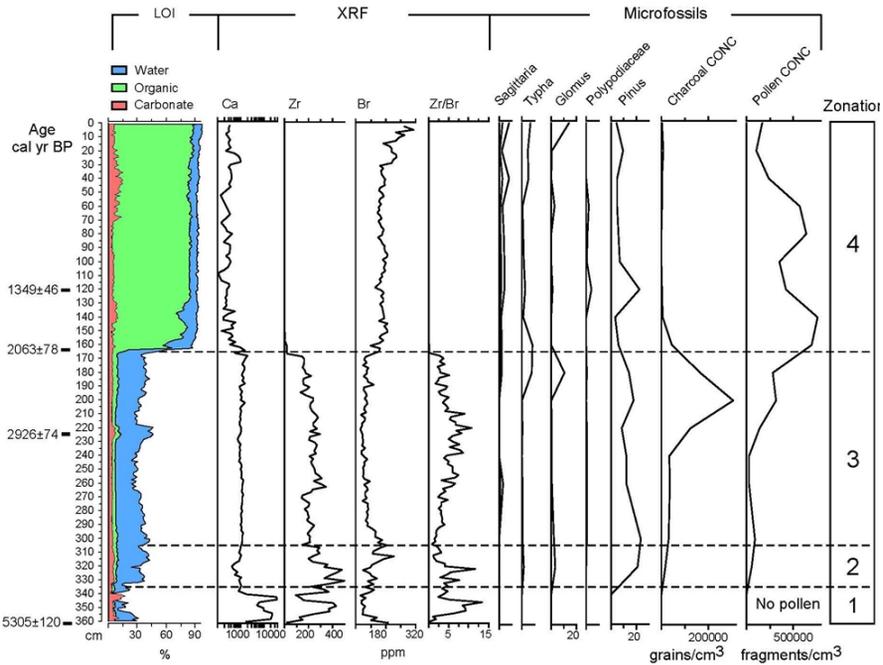


그림 5. 작열손실량, X선 형광분석, 화분분석 결과

* 분석 결과, 4개의 뚜렷한 층으로 구분되었음.

염 함유량이 높고, 조립질과 세립질 퇴적물이 혼합되어 분급이 불량했다. Zone 2(335~305cm)는 상대적으로 높은 수분(26~49%)과 유기물(2~7%) 함유량을 보여준다. 높은 함량의 규산염(90~97%)이 사질층을 구성하는 반면, 적은 양의 검은 회색 점토는 유기물(7%)과 회색되었다. 급격히 감소하는 패사의 양과 상대적으로 증가하는 세립질 퇴적물에 따라 전이층을 구성하였다. Zone 3(305~168cm)은 밝은 회색의 세립질 호소성 퇴적물이 주요 구성을 이룬다. 작열손실량 측정결과 수분 34~52%, 유기물 3~9%, 그리고 적은 양의 탄산염(1~3%)과 상대적으로 감소한 규산염(88~96%)이 주요 퇴적 성분을 구성했다. 토탄층(220~230cm)에서 추출된 샘플의 탄소동위원소 측정 결과 3,000년 전에 퇴적된 것으로 밝혀졌다. 세립질 토양과 호소성 퇴적물 사이로 식물화석들이 발견됐다. Zone 4는 많은 양의 수분(42~93%)과 유기물(6~91%)을 함유한 토탄층이 Zone 3과 경계를 뚜렷하며, 탄산염 함유량 1~6%, 규산염은 최저 6%를 보이며 주요 퇴적물이 썩은 식물 잔해(잎, 줄기, 뿌리)를 구성하고 있다.

2 X선 형광분석결과

X선 형광분석 결과, 육상퇴적물(Zr, Br)과 해성퇴적물(Ca)에 기인한 화학 원소의 뚜렷한 변화를 확인하였다(그림 5). 바다와 육지의 영향을 받는 퇴적환경 하의 연안습지의 지질과 수문학을 분석하기 위해 Zr/Br 함량비가 적용되었다. Ca와 Zr 농도는 시료의 상부로 가면서 점차 낮아지는 경향을 보이는 반면에 Br 농도는 점차 증가하는 경향을 보였다. Zr 농도는 Zone 2에서 가장 높은 수준을 보이며 Zone 3에서 소폭 감소하나, 여전히 높은 수준을 유지하지만, Zone 4에서 급격히 감소했다. Ca 농도는 패사층에서 가장 높게 나타나고, 이후에는 비슷한 수준을 유지하다가, Zone 4에서 급격히 감소했다. Zone 2의 Br 농도는 잠시 증가했다가 Zone 3를 향해 감소하며, 이내 다시 Zone 4에서 증가하며 시료의 상부로 가면서 가장 높게 나타났다. Zr/Br 함량비는 시료 하단부에서 가장 높게 나타났으며, 230cm 부근에서 요동치는 현상을 보였다.

3. 대항화석 분석결과

수집된 화석은 다양한 크기의 굴 화석, 나무 조각, 식물 줄기와 뿌리, 화분과 흙씨, 숯 등 여러 종류로 세분화되었다. Zone 1에서는 상당한 크기(1~3cm)의 굴 화석이 발견되었다(그림 4). 하지만, 규산염과 탄산염을 구성하는 퇴적물 특성상, 화분 및 흙씨 등은 발견되지 않았다. Zone 2와 3에서는 대부분 부서진 상태의 아주 적은 양의 식물 줄기와 뿌리가 점토층에서 섞여서 발견되었다. 반면에, Zone 4는 대부분 온전한 상태의 식물 줄기와 뿌리 상태를 보존하고 있었다. 나뭇가지로 추정되는 약 6cm의 온전한 상태의 나뭇조각이 155cm 부근에서 발견되었다(그림 4). 시료 상단부에 위치한 표층과 유기층에서는 현재 서식하는 부들, 사초과와 꽃식물의 줄기와 뿌리섭유가 확인되었다.

4. 미화석 분석결과

화분과 흙씨, 숯 분석결과 총 네 번의 생태환경 변화가 관찰되었다. 패사층을 이루고 있는 Zone 1에서는 유의미한 미화석이 발견되지 않았으나, Zone 2에서는 *Pinus*와 *Glomus*의 점진적인 증가가 관찰되었다. Zone 3에서는 *Pinus*가 점차 감소하는 모습을 보이는 반면, *Sagittaria*와 *Typha*는 적은 양으로 증가하는 경향을 나타내었다. 화분농도는 Zone 4를 향해 점차 증가하는 모습을 보였다. 무엇보다 200~220cm에서 높은 농도의 숯이 관찰되었다. 유기물 층으로 이루어진 Zone 4는 일반적으로 높은 화분농도와 함께 많은 양의 *Sagittaria*와 *Typha* 화분이 발견되었다. 하지만, 20cm 부근에서 담수 초본류와 *Glomus*의 급격한 증가, 그리고 상대적으로 적응 양의 화분농도가 확인되었다.

5. 토의

상기 결과에 의하면, 조사지역은 5천 년 전부터 총 4단계의 화학적 지질학적 생태학적 성장 과정을 거쳐 온 것으로 해석된다. 초기 삼각주 형성 단계에 해당하는 Zone 1은 5~4천 년 전 사주 조간대(back barrier)내에 형성된 굴암초 지형으로 여겨진다. 미시시피강에서 흘러나온 막대한 양의 토사가 바다를 만나면서 유속이 감소하는데, 이는 토사가 연안으로 분산된 형태의 지형을 건

설하도록 도와준다. 이때, 연안류와 파도의 영향으로 사주, 해변 등을 포함하는 사주 조간대가 삼각주와 바다가 만나는 끝단에 자리잡게 된다. 사주 조간대는 전면(바다)으로 해변과 사구를 발달하고, 후면(내륙)으로는 석호, 굴암초, 염생습지 등을 발달시킨다. 이전 연구에서 탄성파탐사를 통해 이 지역 내의 해식면(Ravinement)와 그 위에 연속적으로 자리잡은 해안퇴적층과 석호지형을 확인하였다(Kindinger *et al.*, 1997). 높은 Zr/Br 함량비는 하천에 기인한 조립질 퇴적물을 암시한다. 높은 탄산염 농도는 굴 껍질과 패사에서 유입된 것으로 보인다(Ryu *et al.*, 2018; Yao *et al.*, 2018). 많은 양의 굴 껍질을 포함한 조립질 지층은 당시 환경이 굴이 성장하기 좋은 형태의 지형적 화학적 요건을 상당기간 유지했던 것으로 보인다.

Zone 2는 3,500여 년 전, 미시시피강의 영향을 간접적으로 받으며 조간대 평지 또는 조간대 수로의 진퇴적을 이루며 육지화 되는 과정에서 만들어진 전이층으로 해석된다. *Pinus* 화분을 포함한 규산염 사질토와 점토의 혼합물이 패사 위에 천천히 쌓이며 형성된 것으로 보아, 이 기간 내에는 점차적인 지형적 변화를 겪은 것으로 보인다. 특히 미화석은 퇴적 당시의 환경을 잘 설명하는데, *Glomus*의 증가는 당시 퇴적환경이, 대기 중의 산소와 접촉이 제한된 상태, 즉 물이 탁하고 부유물이 많이 섞여 있던 상태를 설명한다(Tacon *et al.*, 1983; Stenlund and Charvat, 1994). 높은 Zr 농도는 미시시피강과 주변 하천의 활발한 활동을 잘 설명한다. 당시 미시시피강의 세력은 현재보다 왕성했으며 강한 수력과 많은 양의 토사를 아주 먼 거리까지 이동시켰을 것으로 보인다(Alfonso *et al.*, 2006).

Zone 3은 St. Bernard 삼각주의 발달과 함께 바다와 완전히 분리된 호소지형을 형성 하는 시기로 해석된다(Kindinger *et al.*, 1997). Zone 3에서 증감하는 Zr/Br 함량비는 St. Bernard 삼각주의 세력이 3천 년 전 후로 가장 강했던 것으로 여겨진다. 이와 같은 습지환경 내에서 급격한 생태계 변화가 빈번히 관찰되는데, 무엇보다 해일, 홍수, 화재에 의한 영향이 많은 것으로 알려져 있다(Liu *et al.*, 2008). 200~220cm에서 급격히 증가하는 숯 농도는 주변에서 발생한 자연 발생적 화재와 그에 따른 환경 변화를 암시한다. 급격히 증가한 숯의 양은 Zone 4에 접어들어 감소하는 모습을 보인다. 이와 반대로, 화분의 농도는 급격히 증가하는데 이는 지역적 화분퇴적

물과 유기퇴적물의 증가에 의한 것으로 해석된다. 연구 지역 주변으로 발생했던 대대적인 화재와 3천 년 전에 활동을 시작하여 2천 년 전 후로 연구지역에 큰 영향을 미친 Lafourche 삼각주가 기존 생태계를 바꾸는 데 중요한 역할을 한 것으로 보인다. 호소 또는 상대적으로 지대가 낮은 습지지형은 강에서 운반되는 많은 양의 토사를 지속적으로 퇴적하여 새로운 식생이 성장할 수 있는 환경을 제공한다(Ewel, 1995). 화재로 인해 기존 식생이 제거된 지역에 하천으로부터 유입된 토사는 *Sagittaria*, *Typha*가 성장하기 알맞은 얇은 수면의 담수습지환경을 제공하는 것으로 보인다.

2천 년 이후, Zone 1에서 식물잔해(줄기, 잎, 뿌리)를 포함한 유기퇴적물이 60% 이상을 구성한다. Br 농도가 점차적으로 증가하는 것으로 보아, *Sagittaria*, *Typha*와 같은 초본류가 자리를 잡은 이후, 더 이상 외부로부터 추가적인 토사유입은 없었던 것으로 해석된다. 공기를 통해 먼 거리를 이동하는, *Pinus* 화분과 수로를 타고 상당한 거리를 이동하는 Polypodiaceae는, 이들이 하천 지류와 대기를 타고 꽤 먼 지역에서 주기적으로 연구지역 주변지역으로 유입된 것으로 보인다. 20cm에서 부근에서, 증가하는 *Glomus*와 담수 초본류의 증가는 20세기에 이루어진 삼림벌목, 도로, 철도 건설과 관련한 인간 활동의 간섭이 상당했던 것으로 해석된다. 이는 기존연구와 공통적으로 발견된 부분으로, 이 지역 내의 인간 활동과 관련한 수문학적 변화와 관련이 깊은 것으로 해석된다 (Ryu *et al.*, 2018).

본 연구를 통해 연안습지와 고환경 연구에 있어서, 멀티프로кси 접근의 중요성을 확인하였다. 다양한 분석기법을 기반으로 데이터를 분석함으로써, 퇴적물의 기원과 그 운반 프로세스를 종합적으로 파악할 수 있었으며, 제한적 분석기법이 줄 수 있는 해석적 오류를 줄이는 데 큰 역할을 했다. 예를 들어, 먼 거리를 이동하는, 지역의 화분과 포자로 인해 발생할 수 있는 화분 분석적 오류를 최소화하고, 미시시피강과 삼각주의 지질학적 수문학적 프로세스를 전반적으로 이해함으로써, 자연적 요소(강과 바다, 삼각주, 화재)가 생태계 전반에 미치는 영향에 대해 상세히 밝혀냈다. 한반도 해안 연구 중, 해수면변동과 관련하여, 홀로세 동안 해수면이 진동하면서 상승해오다가, 7천 년 경 현재 수준에 도달하고, 이후 미변동을 통해 현대와 같은 모습으로 변화했다는 주장(Jo, 1980; 황상일·윤순옥, 2011; 황상일 등, 2016)과, 이와

반대로 최종빙기 최성기 이후 꾸준하고 급격하게 상승하던 해수면이 5,000년 경 그 속도를 낮추고, 이후 2.4m 가량 천천히 상승하였다는(Bloom and Park, 1985) 두 가지 논의가 진행되고 있다. 이러한 차이는, 주로 연구방법(사용되는 시료의 차이)의 차이에 기인한 것으로 밝혀졌다(황상일 등, 2016). 삼각주의 확장, 해수면변동 등 연안지역 연구에 있어서, 탄소동위원소 분석에 이용되는 시료들(폐각과 토탄 등)이, 해안에 가까울수록 파도, 해일, 또는 주변 하천의 영향을 받아 층서간의 교란 또는 오염이 심하게 발생될 수 있고, 육지에서는 죽은 동식물이 강과 하천의 영향으로 인해, 먼 거리를 이동하여 연안에서 퇴적되기도 하는 여러 가지 복잡한 환경적 특성을 안고 있다. 따라서 연안에서 실시되는 고환경 연구에 있어서, 퇴적물의 기원을 밝히고 운반 프로세스를 이해하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 본 연구는 멀티프로кси 접근을 통해, 고환경 분석에 있어서, 전반적인 퇴적물 운반 프로세스를 다른 생태학적 요소와 함께 이해함으로써, 발전된 생태환경적 해석을 유도했다. 이와 같은 연구가, 많은 변수(하천, 해일, 삼각주 지형 변화)를 고려해야하는 연안습지와 관련한 다양한 연구 분야에서 여러 각도의 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 요약 및 결론

연구지역은 미시시피강의 성장과 발달 기간 동안 형성된 담수습지로 후기 홀로세 기간 동안 크게 4단계의 생태환경 변화를 겪어왔다. Zone 1은 약 5천 년 전 굴암초를 해수면 안정기에 사주 조간대 내에 형성했다. Zone 2는 하천의 영향력을 가장 강하게 받던 시기로, 삼각주 확장을 통해 호소성 환경으로 변환되는 과정에서 형성되었다. 4천 년 전부터 St. Bernard 삼각주의 영향을 주로 받던 호소성 환경은 화재와 주변 하천의 영향으로 생태계가 급격히 변화하는 모습을 보이며, 2천 년 전부터 *Sagittaria*, *Typha*가 번성하는 담수습지의 모습을 완성했다. 20세기에 이루어진 벌목을 동반한 다양한 인간의 간섭은 담수생태계를 변화시키는 데 중요한 역할을 한 것으로 보인다. 본 연구에서 사용된 멀티프로кси 접근은, 기존 연구방법을 확장하고 보완하는 형태로, 추후에 쉽게 연안습지와 관련한 연구에 크게 도움을 줄 것으로 보인다.

참고문헌

- 김상호·신승호·양상용·이중우, 2003, “낙동강 하구 사주 발달에 관한 연구” 한국해양환경·에너지학회지, 6(3), 26-36.
- 남옥현·김주용·양동운·홍세선·봉필운·이운수·염종권, 2003, “영산강 하구의 제4기 후기 층서 및 고환경” 자원환경 지질, 36, 545-556.
- 류춘길·강소라·정성교, 2005, “낙동강 삼각주 서부지역의 제4기 후기 고환경 변화” 한국지구과학회지, 26(5), 443-458.
- 류춘길·강소라·정성교·전용문, 2011, “제4기 후기 해수면 변동에 의한 낙동강 삼각주 북부의 고환경 변화” 지질학회지, 47(3), 213-233.
- 박경·이해미·김지영, 2005, “섬진강 중상류 습지의 지형과 자연환경” 응용지리, 26, 73-91.
- 박옥분·남승일, 2009, XRF 시료 스캐너를 이용한 시추 시료의 초고해상 화학성분 분석방법, 지질학회지, 45(1), 77-83.
- 박용안, 1995, “한국 해저 (지질) 해양학의 어제와 오늘” Ocean and Polar Research, 17(2), 79-90.
- 박정재, 2013, “남한 지역의 홀로세 중후기 기후변화” 기후연구, 8(2), 127-142.
- 박지훈, 2008, “화분분석을 이용한 고기후 추정의 문제점 - 東北日本の 제4기 후기 온난기를 중심으로” 기후연구, 3(1), 1-16.
- 박지훈·최광희, 2009, “전남 신안군 임자도 대광사구의 화분 분석” 고생물학회지, 25(2), 207-221.
- 손명원·장문기·윤광성·최태봉, 2013, “담양 하천습지 내 단위 생태계의 분류” 한국지역지리학회지, 19(1), 1-13.
- 윤한삼·유창일·강윤구·류청로, 2007, “낙동강 하구역 삼각주 발달에 관한 문헌 고찰 연구” 한국해양공학회지, 21(2), 22-34.
- 이광률·박충선, 2006, “광양만 일대 해안단구의 퇴적물 특성과 지형 형성시기” 대한지리학회지, 41(3), 346-360.
- 이점숙·임병선·명현호·박정원·김하승, 2009, “한국 서·남해안 염습지 복원을 위한 염생식물의 생육지와 토양환경 분석” 한국자원식물학회지, 22(1), 102-110.
- 장태수·남승일, 2011, “XRF 시료 스캐너를 이용한 조석사주 시추시료 지화학 분석 시추시료 퇴적층서 분석에의 적용” 지질학회지, 47(5), 471-484.
- 장태수·엄인권·정종욱, 2012, “ITRAX와 Avaatech XRF Core-scanner의 시료퇴적물 지화학 원소 분석 상호 비교” 대한조선헌회 학술대회자료집, 304-304.
- 정철환·윤호일·이승현, 2004, “제주도 서귀포지역 제4기 퇴적층에서 산출된 포자, 화분의 고기후적 의미” 한국지구과학회지, 25(5), 377-385.
- 한상훈, 1998, “습지생태계와 그 중요성” 국립공원문화, 73, 88-97.
- 황상일·윤순옥, 2011, “해수면 변동으로 본 한반도 홀로세 (Holocene) 기후변화” 한국지형학회지, 18(4), 235-246.
- 황상일·정무열·윤순옥, 2016, “밀양 수산제 일대 Holocene 후기 해수면변동” 한국지형학회지, 23(4), 1-15.
- Alfonso, J., Martínez, M., Flores, S., and Benzo, Z., 2006, Distribution of trace elements in off shore sediments of the Orinoco Delta, *Journal of Coastal Research*, 22(3), 502-510.
- Alleman, L. and Hester, M., 2011, Refinement of the fundamental niche of black mangrove (*Avicennia germinans*) seedlings in Louisiana: Applications for restoration, *Wetlands Ecology and Management*, 19(1), 47-60.
- Bloom, A.L. and Park, Y.A., 1985, Holocene sea-level history and tectonic movements, Republic of Korea, *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, 24(2), 77-84.
- Brooks, R.A. and Ferrell, Jr., R.E., 1970, The lateral distribution of clay minerals in Lakes Pontchartrain and Maurepas, Louisiana, *Journal of Sedimentary Research*, 40(3), 855-863.
- Couvillion, B.R., Barras, J.A., Steyer, G.D., Sleavin, W., Fischer, M., Beck, H., and Heckman, D., 2011, Land area change in coastal Louisiana from 1932 to 2010 (https://tamug-ir.tdl.org/bitstream/handle/1969.3/29288/SIM3164_Pamphlet.pdf?sequence=1).
- Couvillion, B.R. and Beck, H., 2013, Marsh collapse thresholds for coastal Louisiana estimated using elevation and vegetation index data, *Journal of Coastal Research*, 63(sp1), 58-67.
- Cowardin, L.M. and Golet, F.C., 1995, US Fish and Wildlife Service 1979 wetland classification: A review, in Finlayson, C.M. and van der Valk, A., eds., *Classification and Inventory of the World's Wetlands*,

- Dordrecht, Netherlands: Springer, 139-152.
- Cronk, J.K. and Fennessy, M.S., 2001, *Wetland Plants: Biology and Ecology*, Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Davis, M.B. and Brubaker, L.B., 1973, Differential Sedimentation of pollen grains in lakes 1, *Limnology and Oceanography*, 18(4), 635-646.
- Day, J., Hunter, R., Keim, R.F., DeLaune, R., Shaffer, G., Evers, E., and Day, J., 2012, Ecological response of forested wetlands with and without large-scale Mississippi River input: Implications for management, *Ecological Engineering*, 46, 57-67.
- Dean, Jr., W.E., 1974, Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods, *Journal of Sedimentary Research*, 44(1), 242-248.
- Doyle, T.W., Krauss, K.W., Conner, W.H., and From, A.S., 2010, Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise, *Forest Ecology and Management*, 259(4), 770-777.
- Ewel, K.C., 1995, Fire in cypress swamps in the Southeastern United States, in Cerulean, S.I., and Engstrom, R.T., eds., *Proceedings of 19th Tall Timbers Fire Ecology Conference: Fire in Wetlands: A Management Perspective*, Tallahassee, FL: Tall Timbers Research Station, 111-116.
- Faegri, K., 1966, Some problems of representivity in pollen analysis, *Palaeobotanist*, 15(1,2), 135-140.
- Frazier, D.E., 1967, Recent deltaic deposits of the Mississippi River: Their development and chronology, *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 17, 287-315.
- Hartman, A.A., 1968, A study on pollen dispersal and sedimentation in the western part of the Netherlands, *Acta Botanica Neerlandica*, 17(6), 506-549.
- Janssen, C.R., 1973, *Local and Regional Pollen Deposition*, New York: Halsted Press.
- Jo, W., 1980, Holocene sea-level changes on the east coast of Korea Peninsula, *Geographical Review of Japan*, 53(5), 317-328.
- Jun, C.P., Yi, S., and Lee, S.J., 2010, Palynological implication of Holocene vegetation and environment in Pyeongtaek wetland, Korea, *Quaternary International*, 227(1), 68-74.
- Justic, D., Duke-Sylvesterx, S., Visserx, J., Xue, Z., and Liang, J., 2016, Coastal ecosystem modeling in the context of climate change: An overview with case studies, *Developments in Environmental Modelling*, 28, 227-260.
- Kang, S. and Lee, Y.G., 2000, The Holocene environmental change of the estuary of Nagdong River, southern Korea, *Laguna*, 7, 15-21.
- Kim, H.-M., 1988, Assessment of tectonic and depositional environments of Nakdong Delta, Korea, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 9(1), 45-69.
- Kim, Y., Lee, H., Chun, S., Han, S., and Chough, S., 1999, Holocene transgressive stratigraphy of a macrotidal flat in the southeastern Yellow Sea; Gomsu Bay, Korea, *Journal of Sedimentary Research*, 69(2), 328-337.
- Kindinger, J.L., Williams, S.J., Penland, S., Flocks, J.G., and Connor, P., 1997, Holocene geologic framework of Lake Pontchartrain Basin and lakes of southeastern Louisiana, *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 47, 635-638.
- Kulp, M., Penland, S., Williams, S.J., Jenkins, C., Flocks, J., and Kindinger, J., 2005, Geologic framework, evolution, and sediment resources for restoration of the Louisiana coastal zone, *Journal of Coastal Research*, 44, 56-71.
- Liu, J., Zhu, R., Roberts, A.P., Li, S., and Chang, J.H., 2004, High-resolution analysis of early diagenetic effects on magnetic minerals in post-middle-Holocene continental shelf sediments from the Korea Strait, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3) (<https://doi.org/10.1029/2003JB002813>).
- Liu, K., Lu, H., and Shen, C., 2008, A 1200-year proxy record of hurricanes and fires from the Gulf of Mexico coast: Testing the hypothesis of hurricane-fire interactions, *Quaternary Research*, 69(1), 29-41.
- Liu, K., McCloskey, T., Ortego, S., and Maiti, K., 2015,

- Sedimentary signature of Hurricane Isaac in a Taxodium swamp on the western margin of Lake Pontchartrain, Louisiana, USA, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, Proc. IAHS, 367, 421-428.
- McCloskey, T.A., Smith, C.G., Liu, K., Marot, M., and Haller, C., 2018, How could a freshwater swamp produce a chemical signature characteristic of a saltmarsh? *ACS Earth and Space Chemistry*, 2018-2, 9-20 (doi: 10.1021/acsearthspacechem.7b00098).
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., Zhang, L., and Anderson, C.J., 2009, *Wetland Ecosystems*, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Palmisano, Jr., A.W., 1970, Plant Community -Soil Relationships in Louisiana Coastal Marshes, Unpublished Ph.D. Dissertation, Department of Botany and Plant Pathology, Louisiana State University.
- Ryu, J., Bianchette, T.A., Liu, K., Yao, Q., and Maiti, K.D., 2018, Palynological and geochemical records of environmental changes in a Taxodium swamp near Lake Pontchartrain in southern Louisiana (USA) during the last 150 years, *Journal of Coastal Research*, 85(sp1), 381-385.
- Sklar, F.H. and Browder, J.A., 1998, Coastal environmental impacts brought about by alterations to freshwater flow in the Gulf of Mexico, *Environmental Management*, 22(4), 547-562.
- Stenlund, D.L. and Charvat, I.D., 1994, Vesicular arbuscular mycorrhizae in floating wetland mat communities dominated by Typha, *Mycorrhiza*, 4(3), 131-137.
- Tacon, F.L., Skinner, F., and Mosse, B., 1983, Spore germination and hyphal growth of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus mosseae* (Gerdemann and Trappe), under decreased oxygen and increased carbon dioxide concentrations, *Canadian Journal of Microbiology*, 29(10), 1280-1285.
- Yao, Q., Liu, K., and Ryu, J., 2018, Multi-proxy characterization of Hurricanes Rita and Ike Storm deposits in the Rockefeller Wildlife Refuge, Southwestern Louisiana, *Journal of Coastal Research*, 85, 841-845.
- CRMS (Coastwide Reference Monitoring System), <https://lacoast.gov/crms>
- CWPPRA (Coastal Wetlands Planning, Protection and Restoration Act), <https://www.lacoast.gov>
- 교신 : 류중형, 70803, 미국 루이지애나 주 배턴루지 1002-Y, 에너지 · 해양 · 환경동, 루이지애나 주립 대학교 해양환경대학 해양학과(이메일: jryu1@lsu.edu)
- Correspondence : Junghyung Ryu, 70803, 1002-Y, Energy, Coast & Environment Building, Baton Rouge, Louisiana State, USA, Department of Oceanography and Coastal Sciences, College of the Coast and Environment, Louisiana State University (Email: jryu1@lsu.edu)
- 투 고 일: 2019년 8월 18일
심사완료일: 2019년 9월 24일
투고확정일: 2019년 10월 10일