

# 지난 800년 동안 진행된 루이지애나 남부 삼각주의 형태역학 및 지질진화 연구\*

류중형\*\* · 리우 캄비우\*\*\*

## Deltaic Morphodynamics and Geological Evolution in Southern Louisiana, USA, during the Last 800 Years\*

Junghyung Ryu\*\* · Kam-biu Liu\*\*\*

**요약 :** 본 논문은 루이지애나 남부의 해안 습지에서 지난 800년 동안 진행되어온 해안 형태와 지질역학적 진화를 연구하는 것을 목표로 하였다. 호소성 염습지 내에서 채취한 200cm 퇴적물 코어에 대하여 멀티프록시 분석을 수행하였다. 분석 결과, 이 지역은 지난 800년 동안 삼각주 진화와 상대적 해수면 상승 및 허리케인 등과 관련한 지형학적 및 지질학적 변화가 진행된 것으로 나타났다. 호수성 지형인 Bayou Lafourche 삼각주는 육성퇴적물(K, Ti, Zr)을 이동시키며 약 600cal yr BP까지 발달시켰다. 그 후, 육지 침강과 해수면 상승의 결과 약 100cal yr BP경 삼각주는 퇴화과정을 겪으며 해양성 퇴적물(Ca, Sr)을 축적했다.

주요어 : 습지, 삼각주, 루이지애나, 작열손실량, X선 형광분석법, PCA 분석

**Abstract :** This study aims to investigate coastal morphodynamics and geological evolution during the last 800 years in a coastal wetland behind Bay Champagne near Port Fourchon, Louisiana. Multi-proxy analyses (loss-on-ignition, X-ray fluorescence, and principal component analyses) were conducted on a 200cm sediment core retrieved from a small pond on a mangrove-dominated island. The study area has experienced significant morphodynamic and geological changes due to delta-lobe switching, relative sea level rise, and hurricane events over the last 800 years. An increase in sediment supply and fluvial processes led to the development of marsh ~ 600cal yr BP during the Bayou Lafourche delta progradation, marked by elevated terrestrial elements (K, Ti, Zr). After that, land subsidence and sea level rise accelerated saline water incursion and coastal retreat after the abandonment of the Bayou Lafourche delta ~ 100cal yr BP, marked by elevated marine concentrations (Ca, Sr). Key Words : Wetland, Delta, Louisiana, Loss on ignition, XRF (X-ray fluorescence), Principal component analysis

### I. 서론

습지는 육상생태계와 해안생태계의 접이지대에 형성되는 두 생태계의 지질적(백영숙 등, 2009), 지형학적(권

동희, 2006), 지화학적(김선영 · 강호정, 2003) 특성 및 그 자체의 고유특성이 나타나는 자연생태계로서, 담수(강, 하천, 지하수)와 해수로부터 습한 환경에 영향을 받은 동물과 식물들의 성장을 생태적으로 지원하는데 중

\*본 논문은 미국 국립 과학 재단연구사업비 지원을 받아 연구되었음(This study was supported by grants from the U.S. National Science Foundation [NSF #BCS-1759715]).

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

\*\*\*루이지애나 주립대학교 해양학과 교수(Professor, Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, kliu1@lsu.edu)

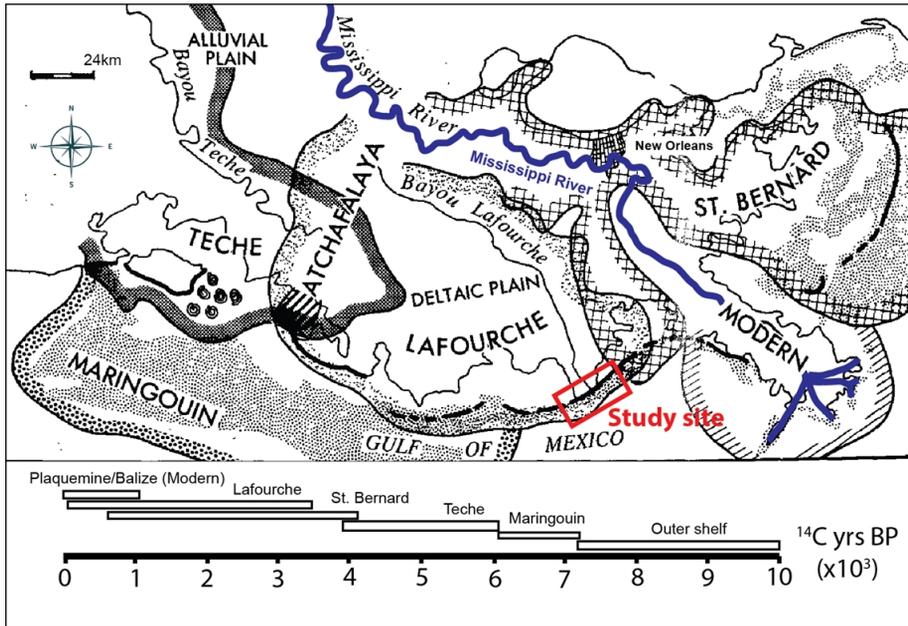


그림 1. 미시시피강 삼각주 삽화

\* Penland *et al.*(1985) 재구성.

\*\* 루이지애나 미시시피강의 주요삼각주(Maringouin, Teche, St. Bernard, Lafourche, and Plaquemine/Balze), 그리고 하류에 넓게 분포한 삼각주 평야와 Gulf of Mexico의 위치적 상관관계를 보여주고 삼각주의 발달 단계가 연도별로 정리되어 있음.

요한 역할을 하는 지역이다.

미국의 미시시피강은 해수면이 안정기에 접어든 약 7천 년전(<1mm/yr)(Törnqvist *et al.*, 2004; Törnqvist *et al.*, 2006; Blum *et al.*, 2008) 경에 막대한 양의 육성기원 퇴적물을 멕시코만 대륙붕 일대에 퇴적하며 약 120km 이상의 해진을 통해 약 30,000km<sup>2</sup> 이상의 면적에 달하는 광범위한 삼각주를 발달시켜왔다(Kulp *et al.*, 2005).

이들 삼각주는 크게 6개의 복합삼각주(Maringouin, Teche, St. Bernard, Lafourche, and Plaquemine/Balze)를 구성하고 있으며 세부로 16개의 작은 삼각주를 구성하며 발달해 왔다(Frazier, 1967)(그림 1). 안정화에 접어든 미시시피 삼각주는 매년 5억 톤 가량의 퇴적물을 강 하류로 운반하며, 현재의 해수면 형태를 갖추고 다양한 식생과 해안지형을 발달시켰다. 하지만, 18세기 이후, 홍수 조절을 위한 댐과 제방의 건축은 강 하구 퇴적물의 감소를 야기하였을 뿐 아니라, 주택과 철도 건설을 위한 많은 양의 벌목이 이루어졌다. 특히, 오일과 천연가스 개발을 위한 습지내 수로건설과 다리건설은 해안습지를 심각하게 훼손하였고, 결과적으로 5,197km<sup>2</sup>에 달하는

습지를 1930년대 이후로 잃어갔다. 이는 매시간 축구장 크기에 달하는 삼각주 평야를 잃고 있는 것과 같다(Couvillion *et al.*, 2017).

이와 같은 습지환경의 파괴는 해안을 따라 서식하는 나무숲의 초목화, 담수 습지의 염습지화, 염습지의 파괴에 따른 해안선 후퇴 등과 같은 심각한 생태계 변화를 초래하였다. 극심한 생태계 변화는 직접적으로 인간생활(개인 주거공간 및 상업지구의 파괴, 인구가동)에 영향을 미치고 있다. 미국정부는 습지보호 산업(Coastal Master Plan)을 시작하고, 위와 같은 심각한 습지환경파괴를 일으키는 다양한 문제들을 연구하고 현재와 미래의 습지보호 산업을 육성하기 위해 다양한 방면에서 노력하고 있다(Protection and Authority, 2020). 무엇보다 체계적이고 자세한 습지문제의 분석을 위해서, 다양한 분야의 과학자들이 과거 습지환경과 기후를 복원하기 위해 힘을 쏟고 있다(Justic *et al.*, 2016; Hijma *et al.*, 2017; Jankowski *et al.*, 2017; Ryu *et al.*, 2018; Bomer *et al.*, 2019).

본 연구는 과거습지 환경복원의 일환으로 미국 미시

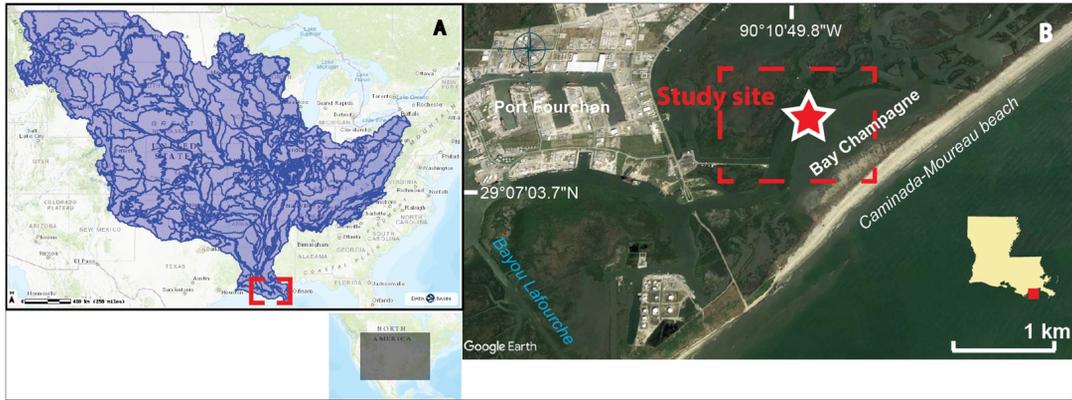


그림 2 연구지역 위성사진

\* (A) 미시시피강 분수계와 강 하류에 속하는 연구지역이 붉은 박스로 표시; (B) 연구지역(별 표시)과 주변 Port Fourchon 및 Caminada-Moureau beach의 위치.

시피강 하류에 형성된 염습지를 대상으로, 삼각주의 진화(발달과 쇠퇴)와 그 생태환경의 변화를 멀티프록시 분석법(지질학적, 지형학적, 지화학적)을 통해 역학적으로 분석하고, 후기 홀로세 기간 동안의 퇴적물 변화와 수문학적 변화에 따른 생태환경 변화를 다양한 관점에서 해석하였다.

이와 같은 연구는 추후 습지의 미래모습을 복원하는 모델링 연구에 유의미한 자료를 제공하고 습지보호 산업에 유용한 자료로 사용될 수 있다(Visser and Duke-Sylvester, 2017). 또한 최근의 염습지연구는 다양한 특성을 고려하여 종합적인(지질, 지형, 화학)관점에서 접근하는 멀티프록시 분석법이 이용되지만, 국내 염습지에 대한 연구는 상대적으로 그 비중이 적고 단일 특성을 분석한 연구가 대부분을 차지하고 있다(황길순 등, 2000; 김성환 등, 2007; 유동근 등, 2017). 따라서 멀티프록시 분석법을 기초로 하는 해외 주요 염습지(미시시피강 하구) 연구방법의 도입은 향후 국내 염습지연구의 발전에 크게 기여하게 될 것이다.

## II. 연구지역

### 1. 연구지역

본 논문의 연구지역은 미시시피강 하류에 위치한 염습지로, 염습지를 대표하는 열대성 관목인 블랙 맹그로

브(*Avicennia Geminans*)가 숲을 형성한 섬형태의 지형이다(그림 2).

바다와 근접한 지리적 위치는 바다로부터 발생하는 높은 파도와 폭풍해일의 영향을 빈번히 받으며 지난 50년간 해안선의 급격한 후퇴를 일으켰다. 대표 식생으로는 블랙 맹그로브와 염습지 초본류(*Spartina Alterniflora* & *Juncus*)가 만연하며, 반경 2 km 이내에 형성된 해안사구와 해변(Caminada-Moureau Beach)에는 갈대류와 초본류(*Phragmite* & *Batis* & *Salicornia*)의 수종이 대표 식생을 이룬다. 연구지역내에 위치한 Bay Champagne 호수는 깊이 2 m 이내의 얇은 호소로, 사구에서 밀려든 모래가 퇴적되어 지난 수십 년간 호수의 형태와 깊이를 변형시켜 왔다.

### 2. 미시시피 삼각주

미시시피강은 막대한 양의 토사를 대륙붕에 퇴적하며 수천 년에 걸쳐 복합삼각주를 형성해 왔다. 하나의 삼각주가 완전한 형태를 이루게 되면 해수면 보다 높은 지형을 발달시키게 된다. 상대적으로 높아진 지형은 강의 본류를 상대적으로 낮은 지형으로 이동시키며, 새로운 수로를 발달시키며 강의 퇴적물을 새로운 삼각주로 이동시킨다. 이른바 “삼각주 전환(Delta-lobe switching)”은 해수면이 안정화된 7천 년 이후, 주요 6개의 복합 삼각주를 발달시켜 왔다(그림 1). 본 연구지역은 St. Bernard 와 Bayou Lafourche 삼각주의 직접적인 영향을 받으며

다양한 습지환경을 구성하였다. 약 4천 년 전 St. Bernard 삼각주에 해당하는 Bayou Des Families 지류와 약 2천 년 전부터 영향을 미친 Lafourche subdeltas(Bayou Blue and Bayou Lafourche)의 영향으로 연구지역은 광활한 삼각주 평야를 발달시켜왔다. 보다 자세한 이들 삼각주에 대한 내용은 토의에서 논의되었다.

### 3. 해수면 변동

멕시코만 일대의 절대해수면 상승률은 약 7천 년 전부터 지속적으로 감소해 오다가(3.5mm/yr) 7천 년 이후 1.5mm/yr으로 감소하였다(Gonzalez and Törnqvist, 2009). 하지만, 이후 미시시피 삼각주의 침강을 동반한 해수면 상승은 상대 해수면 상승을 유발하였다. 상대 해수면 상승률은 지역에 따라 약간의 차이를 보이나, 연구지역의 경우, 최대 10~12mm/yr에 달하는 아주 빠른 속도의 해수면 상승률을 보이고 있다(Blum and Roberts, 2009). 이는 상대적으로 약한 기반을 형성한 삼각주지층이 다양한 지질 작용(지하수의 탈수, 지층의 다짐작용)을 겪으며 지층의 침하를 가속화한 것으로 보인다.

### 4. 허리케인

미시시피강 하류 지역은 빈번한 허리케인의 영향을 지속적으로 받아왔다. 특히 지난 50년간 이 지역을 강타했던 대표적인 허리케인은 Betsy(1965), Camille(1969), Katrina(2005) 등이 대표되는데, 강한 바람과 막대한 양의 강수량을 동반하는 이들 허리케인은 광범위한 홍수를 발생시키며 도시를 파괴하고 습지환경에 큰 변화를 일으켜 왔다. 해안선을 따라서 주로 발생하는 폭풍해일은 해안선을 침식 시키고, 염수를 담수지역으로 유입시켜 생태계 교란의 주요 원인으로 분석되었다(Control and Prevention, 2005; McCloskey *et al.*, 2018).

## III. 연구방법

본 연구를 위하여 미시시피강 하류 삼각주에 위치한 Port Fourchon 주위의 블랙 맹그로브 숲과 다양한 염습지 식물(사초과, 벼과 등) 생태계 조사와 그 일대의 지형, 지질 조사를 실시하였다. 토양시료 추출을 위해 지름 약

7.5cm 길이의 알루미늄 Push corer를 사용하였고, 총 길이 200cm의 시추코어를 획득하였다. 추출된 코어는, 화학적 변형과 박테리아 증식을 막기 위해, 섭씨4도를 유지하는 시료보관실에서 보관되었다. 모든 실험은 루이지애나 주립대학교 Global Change and Coastal Paleocology 연구실에서 실행되었다. 본 연구의 시료분석은, 지난 70년간 이루어진 많은 지질연구(Fisk, 1944; Kolb, 1958; Saucier, 1963; Frazier, 1967; Gagliano *et al.*, 1981; Penland *et al.*, 1985; Flocks *et al.*, 2006)를 바탕으로, 새로운 화학, 지질, 통계적 접근을 통해 이루어졌으며, 토양샘플의 층서구분은 다양한 분석 결과(퇴적물, 작열손실량, X선 형광분석, 통계)를 통해 이루어졌다.

### 1. 퇴적물분석

퇴적물 분석을 위해 다양한 분석법(작열손실량, 대형화석, 먼셀토색척)이 사용되었다. 토양의 수분, 유기물, 탄산염, 규산염의 함량분석을 위해 작열손실량 측정은 매 1cm마다 총 200개의 샘플에서 실행되었다. 채취된 샘플은 각 단계마다 오븐(Thermolyne D1 Large Tabletop Muffle Furnace)안에서 정해진 시간과 온도에 따라 실행되었다(Dean, Jr., 1974). 채취된 시료는 105도에서 약 48시간 동안 수분 제거 과정을 거쳤으며, 건조된 시료의 무게가 측정되었다. 수분이 완전히 제거된 샘플은 다시 550도에서 약 4시간 동안 유기물 측정을 위해 처리하였다. 무게 측정 후, 시료는 약 5시간 동안 탄산염과 규산염 함량 분석을 위해 1,000도에서 태워졌다. 샘플의 무게 측정을 위해 화학분석저울(Analytical balance)이 사용되었으며 마이크로그램( $\mu\text{g}$ )단위로 측정하였다. 토양의 특성과 토색 분석을 위해 먼셀토색척이 이용되었다.

### 2. 지화학 분석(X선 형광분석)

수문환경분석과 지화학분석을 위해 X선 형광분석법이 사용되었다. 이를 위해 Delta Premium DP-4000 X-Ray Fluorescence Analyzer가 사용되었다. 형광분석법은 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(류중형 · 리우 캄비우, 2019). 추출된 200cm의 토양 시료는 2cm간격으로 스캔 되었다. 각 층의 화학

구성요소는 Parts per million(ppm) 단위로 측정되었다. 정확한 측정값을 계산하기 위한 표준 기준 값 (NIST 2710a and 2711a)이 적용되었다. 분포 오차 값의 보정을 위해 로그 그래프가 적용되었다(Sharma *et al.*, 2014; Groover and Izbicki, 2019). 기존 연구를 바탕으로(Liu *et al.*, 2014; McCloskey *et al.*, 2018; Ryu *et al.*, 2018), 해성원소(Cl, Sr, Ca)와 육성원소(K, Ti, Fe, Mn, Zn, Zr, Br)가 선택되었고, 해성원소 비율 값(Cl/Br)과 육성원소 비율 값(Zr/Br)이 계산되었다. 해성원소 Cl과 하천 퇴적물과 관련한 중금속원소 Zr을 유기물과 높은 반응성을 보이는 Br원소로 표준화 하였다. Br원소는 특정한 상황을 제외하고(Rittenhouse, 1967), 중금속 또는 하천, 해양 퇴적물과 낮은 반응성을 보이는 이유로, 기후, 수문, 하천 퇴적물과 관련한 환경분석 연구에서 다양하게 사용되어져 왔다(Kesler *et al.*, 1995; Dill, 2010; Bahr *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014).

## 2. 퇴적층 연대분석

탄소동위원소측정을 위해 3개의 유기물 샘플이 채취되었으며, 채취된 샘플은 미국 플로리다주의 International Chemical Analysis(ICA) 연구소로 보내졌다. 연대분석 모델링을 위해 Clam v2.2(Blaauw, 2010)가 사용되었다(그림 3). 95% 신뢰도 수준의 정규분포 범위를 기준으로 역년이 결정되었으며(Christen and Pérez, 2009), 퇴적물

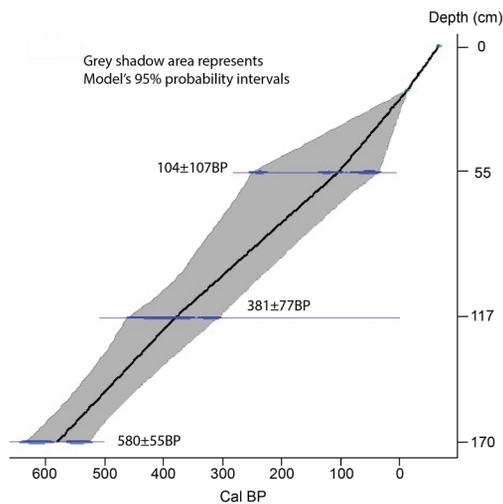


그림 3. 탄소연대분석 퇴적층 대비 역년분포 모델

대비 역년분포와 역년 보간법이 모델링을 통해 완성되었다(Talma and Vogel, 1993; Stuiver *et al.*, 1998).

## 3. 통계분석

보다 자세한 지화학적 분석을 위해 다양한 통계분석이 사용되었다. 각 변수의 대표성(Quality of representation) 및 변수기여도(Contribution)가 주성분분석(Principal Component Analysis) 및 분석되었다(Principle Component Analysis). 토양샘플의 명확한 층서구분을 위해 모든 지화학 성분들간의 차이를 각 지점들 상호간의 유사도나 거리로 계산하는 클러스터분석(Cluster Analysis)이 이용되었다. 통계분석을 위해 R 프로그램의 통계분석 패키지가 이용되었다(Ihaka and Gentleman, 1996). 통계분석 결과가 PCA 분석지도를 통해 표현되었다. 변수간의 관계분석 및 기여도가 변수 기여도점수(Subject's scores)를 통해 표현되었다. 변수간의 긍정적인 관계는 동일방향으로, 변수간의 부정적인 관계는 반대방향으로 나타내어졌다.

## IV. 결과

멀티프록시 분석 결과 퇴적층은 총 4개의 층서(Zone)로 구분되었다(그림 4). 각 층의 퇴적물, 작열손실량, X선 형광분석, 통계분석 결과는 이하 멀티프록시 결과에서 자세히 설명되었다.

### 1. 퇴적층 층서학

Zone 1(200~175cm)은 동질적(structureless) 회색 세립질 호수성 양토층이 주를 이룬다. 작열손실량 분석 결과, 수분 함유량 37~49%, 유기물함량 5~6.5%, 탄산염 함유량 3~4%, 규산염 89~91.5%로 구성되었다. 퇴적물에는 조개류나 다른 해양성 유기물이 발견되지 않았다.

Zone 2(175~56cm)는 상대적으로 높은 수분(30~75%)과 유기물(3~30%) 및 탄산염(1~4%) 함유량을 보여준다. 상대적으로 낮은 함량의 규산염(>67%)이 세립질 양토와 질토 혼합층에서 나타나는 반면 조립질 양토층에서 높은 수준의 규산염(<96%) 함유량을 보여준다. 퇴적층 전반에 걸쳐 입경의 분포가 변화하는데, 약 140~110cm 부근에서 검은색 질토의 함량이 급격히 증가하는 모습

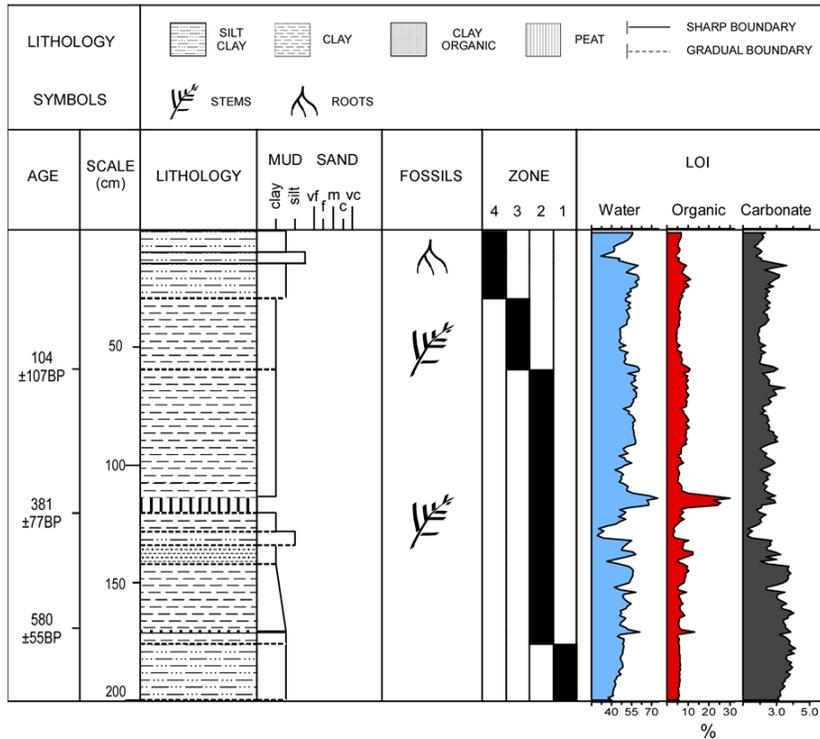


그림 4. 지질의 층위와 특성

\* 지질의 층위와 그 특성이 작열손실량과 함께 구분되었음.

을 보이고, 그 외 퇴적층에서는 동질의 회색 양토와 질토 혼합층이 고르게 분포한다. 약 130~125cm에 조립질 퇴적물이 급격히 증가하고, 상부 세립질 질토(125~110cm)가 그 층을 구분한다. Zone 2전반에 걸쳐 많은 양의 식물 잔재(줄기와 뿌리)가 고르게 섞여 있다.

Zone 3(56~26cm)은 밝은 회색의 세립질 호수성 양토 층이 주요 구성을 이룬다. 작열손실량 측정 결과 수분 함유량 46~55%, 유기물 4.5~8%, 그리고 상대적으로 적은 양의 탄산염 2~2.5%와 증가하는 규산염 89~93%로 구성되었다.

Zone 4(26~0cm)는 어두운 회색의 세립질 호수성 양토 층이 수분 32~60%와 상대적으로 많은 유기물 3~11%를 함유하고 있다. 작열손실량 측정 결과, 탄산염 1.5~3%와 규산염 86~95%의 함량이 측정되었다. 26~20cm 부근에 식물 잔재(뿌리 및 줄기)퇴적물이 관찰되었다. 반면에, 9~11cm사이에서는 급격히 낮아지는 수분, 유기물, 탄산염 함량을 동반한 층서 변화가 관찰되었다.

## 2. 퇴적층 연대분석

퇴적물 대비 연년분포와 연년 보간법 모델링 결과, 채취된 시료는 약 800년 이상의 퇴적 역사를 지닌 것으로 나타났다. 55, 117, 170cm에서 채취된 시료의 연년은 각각 104±107BP, 381±77BP, 580±55BP로 분석되었다. 연년분포 모델링 결과 시추코어 상부로 갈수록 95% 신뢰도 수준의 정규분포 범위가 증가하였다. 연년 보간법으로 완성된 각 층의 연대를 기준으로 각 지층 연대가 계산되었다. 104±107B의 경우 95% 신뢰도 수준의 정규분포 범위가 각각 32~83(56.2 probability), 97~108(3.3 probability), 111~137(15.1 probability), 223~255BP(20.5 probability)로 집계 되었다. 이를 반영한 95% 신뢰도 수준의 정규분포에 해당하는 오차범위가 측정되었다.

## 3. 지화학 분석(X선 형광분석)

X선 형광분석 결과, Zone 1은 해성원소와 육성원소가

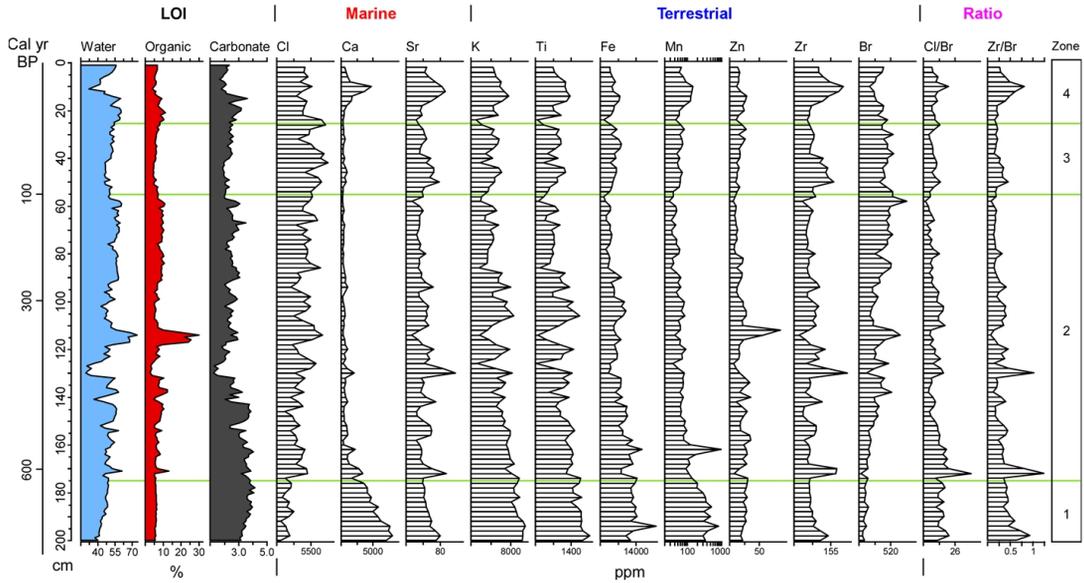


그림 5. 작열손실량과 X선 형광분석 결과

높은 농도를 보여주었다(그림 5). 해성원소(Ca 와 Sr)의 함량이 상단부분으로 갈수록 감소하는 반면, 육성원소는 모든 부분에서 높은 함량을 보였다. Zone 2는 급격히 증가하는 Zr/Br비율과 점차 감소하는 육성 및 해성원소의 함량으로 특정 지어진다. 상대적으로 점차 증가하는 Br원소가 상단부분까지 유지되며, 유기물이 증가하는 층(약 125~110cm)에서 급격한 Br원소의 증가를 보인다. 조립질 양토가 나타나는 층(약 130~125cm)에서 높은 Zr 농도와 Zr/Br 비율이 증가하는 모습을 보이며, 세립질 양토가 나타나는 층(115~110cm)에서 높은 Zn 농도를 보였다. Zone 3하단부(약 55~40cm)에서 Zr농도가 급격히 증가한 후 감소하는 모습을 보이는 반면 Sr과 Cl 농도가 높은 수준으로 증가하였다. Zone 4에서 전반적으로 높은 수준의 해성원소 함유량을 보였다. 수분, 유기물, 탄산염이 낮아지는 9~11cm구간에서 Cl/Br 비율과 Ca과 Zr 농도가 급격히 증가하는 모습을 보였다.

#### 4. 통계분석

주성분 분석을 통한 각 변수의 대표성(Quality of representation) 분석 결과 Sr, Zr, K 원소가 상위 85%의 대표성을 보였으며, 이어서 Fe, Ti, Br, Ca가 상위 75% 이상의 대표성을 보였다. Cl, Mn, Zn 원소는 그보다 적은

75~50% 사이의 대표성을 보였다(그림 6).

PCA 분석에서 결과, Sr과 Zr 원소가 깊은 상관관계를 보였고, 낮은 대표성을 보이는 해성원소 Ca를 제외한 K, Ti, Mn 원소들이 높은 상관관계를 보였다(그림 7). Br원소는 다른 원소들과 낮은 상관관계를 보였고, 해성원소 사이들 간의 상관관계 또한 낮았다. 상관관계 분석에서 대표성이 높은 원소들을 중심으로 각 Zone의 환경 분석이 수행되었다(그림 7).

클러스터 분석 결과 200~175cm에 속하는 원소는 제4사분면에서 클러스터를 형성하며 육성원소(Fe, Zn, K)와 높은 상관관계를 보이며 Zone 1을 구성하는 것으로 나타났다. 175~56cm에 속하는 원소들은 전체(1~4)사분면에 걸쳐서 다양한 분포를 보이고 있으나, 제3사분면에서 그 중심 클러스터를 형성하고 있으며, Br 원소와 높은 상관관계를 보이는 Zone 2를 구성하고 있다. 56~26cm에 분포하는 원소들은 제 2사분면에서 Zone 3의 클러스터를 형성하며 Cl원소와 높은 상관관계를 보이고 있다. 26~0cm에 속한 원소들은 제1사분면에서 Zone4의 클러스터를 형성하고 있으며 Zr, Sr 원소들과 높은 상관관계를 나타내고 있다. 통계분석 결과 해성원소(Cl, Sr, Ca)와 육성원소(K, Ti, Fe, Mn, Zn, Zr, Br)들이 각기 다른 사분면 안에서 다른 클러스터를 형성하며, 각 층의 특성을 뚜렷이 나타냈다. 퇴적층 하단에서 상단으로 갈수록 육

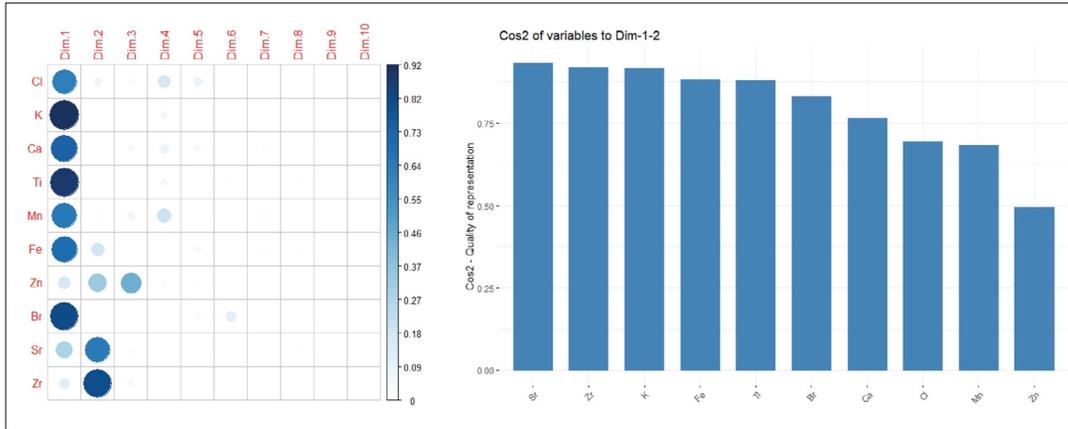


그림 6. 각 화학원소의 대표성(Quality of representation) 및 변수기여도(Contribution)

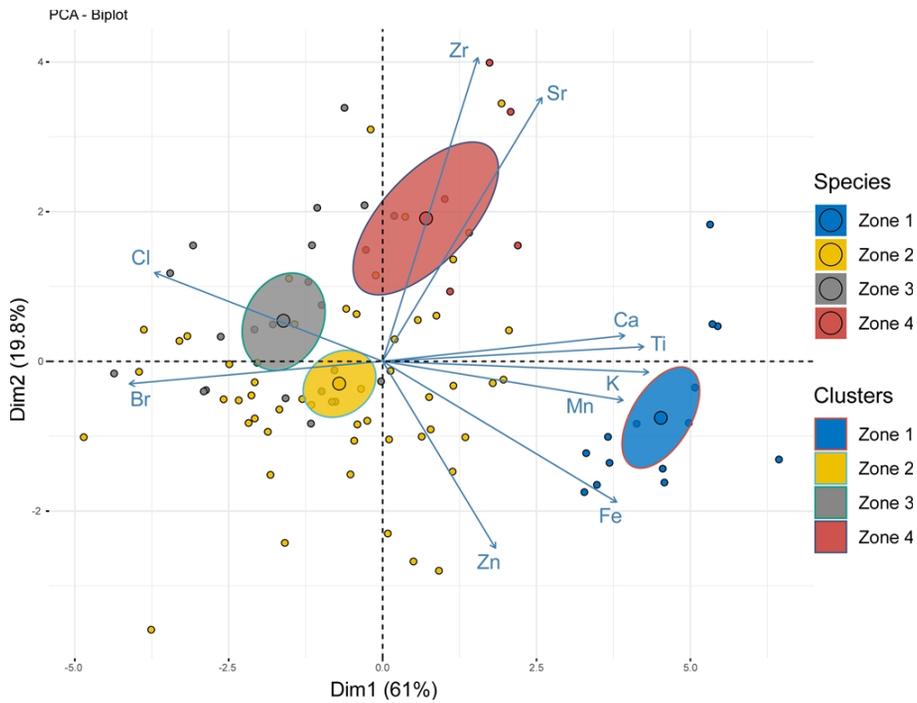


그림 7. 주성분 분석과 클러스터 분석법을 통한 화학원소들 간의 관계 및 변수기여도

성-해성원소변화가 뚜렷이 나타났는데, 육성원소가 지배적인 퇴적층 하단부(Zone 1)에서 토양층 상부(Zone 4)로 갈수록 해성원소의 비중이 높아지는 경향성을 보여 주었다.

## V. 토의

### 1. 고환경 복원

상기 결과에 의하면, 조사 지역은 지난 800년 동안 총 4단계의 화학적 지질학적 진화과정을 거쳐 온 것으로 분

석됐다. 동질의 회색 세립질 호수성 양토층이 주를 이루는 Zone 1은 약 660cal yr BP까지 퇴적된 지층으로 해안 습지의 낮은 지형에 주로 형성되는 호소 또는 호수성 지형내 세립질 퇴적물의 집적작용에 의해서 주로 형성되는데, 이러한 지형적 특성은 하구 삼각주 평야에서 주로 나타난다. 삼각주 평야내의 하천 또는 큰 강의 유수가 강 하구를 따라 이동할 때, 함께 운반되는 세립질 토양은, 주로 강의 범람이나 평탄한 지형을 흐르는 지표수가 증가할 때 많이 이동되는데, 이때 상대적으로 낮은 지대의 호수 또는 호소와 같은 상대적으로 지대가 낮은 지형에 상당한 양의 양토를 퇴적한 것으로 보인다(van Rijn, 1993). 육성원소(K, Ti, Fe)가 Zone 1의 전체 부분에서 높은 수준을 유지하고, 조개류나 다른 해양성 유기물이 발견되지 않는 것으로 보아, 이 기간 동안 활성화된 강과 하천은, 육성기원 퇴적물을 오랜 기간에 걸쳐 강 하구로 운반하며 양토층을 형성한 것으로 보인다. 약 1,000년 전에 시작된 Bayou Lafourche 삼각주의 형성은 약 800~700년경 사이에 현재 연구지역에 막대한 양의 토사를 운반하며 삼각주 평야를 바다로 확장하며 발전했는데(Chamberlain *et al.*, 2018)(그림 2), 이 기간 동안 막대한 양의 육성기원 퇴적물을 연구지역에 퇴적한 것으로 보인다. 미시시피 삼각주 진화 모델(Flocks *et al.*, 2006)에 비추어 볼 때, 연구지역은 3단계에 해당하는 삼각주 확장단계에 속한다(그림 8). 이 기간 동안 넓은 삼각주평야를 가로지르는 지류와 그 지류주변으로 발생하는 범람원과 습지호수성 지형이 다양하게 발달한 것으로 보인다.

Zone 1의 회색 세립질 호수성 양토층은 Zone 2에서 양토와 질토 혼합층과 많은 양의 식물잔재(줄기와 뿌리)가 나타나는 습지성 토양으로 변화하는데, 점진적으로 변화하는 층서관계를 보아, 퇴적물 변화가 비교적 천천히 오랜 기간 동안에 일어난 것으로 보인다. 이는, 상대적으로 지대가 낮은 호수성 지형에 세립질 토양이 지속적으로 유입되면서, 결국에 호수가 매적되는 일련의 과정, 이른바 Encroachment of marsh 과정을 약 700~660cal yr BP사이에 겪으며 발생한 것으로 보인다. 많은 양의 초본류 줄기와 뿌리가 나타나는 질토층과 높은 육성원소(Ti, Fe, Zr)의 농도는, 이 기간 동안 연구지역의 습지환경에 많은 양의 초본식물이 담수환경 안에서 활발히 성장하고 있었음을 잘 보여준다. 520~420cal yr BP(약 140~110cm) 동안 퇴적된 검은색 질토는 주변 식생으로부터 유입되

는 많은 유기물들이 산화되지 못하고 축적될 때 형성되는데, 주로 습지의 습한 토양환경에서 주로 발견된다(Kirby, Jr., 1971). 이 기간 동안, 주변 하천과 지하수에서 지속적인 수분공급이 연구지역에 이루어지면서, 습지환경을 풍요롭게 유지한 것으로 보인다. 이 같은 환경은 주요 퇴적물이 주변 식생에서 제공되는 유기물이 주가 되기 때문에, 상대적으로 퇴적물의 양이 급감하는 모습을 보인다. 유기물의 증가와 함께 점진적으로 증가하는 Br원소의 농도는 이 기간 동안 유기퇴적물이 지속적으로 증가했음을 보여준다(Ryu *et al.*, 2018). Westerhoff *et al.*(2004)는 Br, Cl원소의 유기물 반응성 실험에서, Br원소가 유기물질과 높은 친밀도를 보이는 것으로 관찰했다. 이는 Br의 높은 친전자성 치환(electrophilic substitution)능력과 깊은 관계가 있는 것으로 해석됐다. 약 480~450cal yr BP(125~130cm)에 퇴적된 조립질 퇴적물은 상부 세립질 질토(125~110cm)와 그 층을 구분하는데, 이와 같이 연속적으로 퇴적된 두 지층의 관계는 Bayou Lafourche 지류의 활동과 관련이 있는 것으로 여겨진다(Chamberlain *et al.*, 2018). 증가하는 Zr/Br비율과 높은 Zn농도는 이 기간 동안의 육성 퇴적물의 갑작스런 유입을 보여주는데, 이는 Bayou Lafourche 지류가 곡류 또는 사행을 하며 조립질 퇴적물을 연구지역에 퇴적한 것으로 보인다. 하천의 곡류 또는 사행 과정에서 발생하는 하천의 범람 또는 틈살 퇴적(crevasse splay)이 이와 같은 조립질 퇴적층을 형성하는데 관련된 것으로 보인다(Davis, 1993).

담수의 영향이 지배적이던 습지환경은 약 200~100cal yr BP까지 이어진 것으로 보인다. 약 100cal yr BP(56~26 cm)이후 형성된 밝은 회색의 세립질 호수성 양토층은 낮은 Zr농도를 보이는 반면, 증가하는 해성원소(Sr, Cl)의 농도는 연구지역의 바닷물 유입이 증가하였음을 보여준다(Liu *et al.*, 2014). 이와 같은 해성원소의 증가는 미시시피강의 본류가 동남쪽으로 이동하면서 새롭게 발달시킨 새로운 삼각주(Plaquemine/Balize 삼각주)의 형성과 깊은 관련이 있는 것으로 보인다. 미시시피강 본류 이동에 의해 발생하는 삼각주이동(delta-lobe switching)은 기존에 형성된 삼각주의 퇴행을 유발하게 되는데 결과적으로, 기존 Bayou Lafourche 삼각주의 퇴행을 유발하고, 이는 연구지역으로 유입되던 담수와 토사의 양을 급격히 감소시킨 것으로 보인다.

삼각주이동(delta-lobe switching)에 따라 감소하는 토

사의 양과 급격하게 줄어든 담수의 유입은 습지의 침강 및 해양으로부터의 침입을 가속화시켰다. 상부의 어두운 회색 세립질 양토층은 지속되어온 해침의 영향과 상승하는 상대적 해수면상승의 영향에 기인하는 것으로 보인다. 습지의 침강은 연구지역의 석호화를 가중시켰으며, 해수면 상승과 해안선의 후퇴는, 허리케인으로부터의 피해를 가중시켰다. 기존 연구에 따르면, 19세기 이후, 이 지역의 해안선 후퇴속도는 최대 18m/yr에 달하는 것으로 조사되었다(Morgan and Larimore, 1957; Penland *et al.*, 2005)(그림 9). 전반적으로 높은 수준의 해성원소(Ca, Sr)의 농도는 점차 증가하는 해침의 영향을 잘 보여준다. 최대 10~12mm/yr에 달하는 아주 빠른 속도의 해수면 상승은 이와 같은 해침의 가속화를 이끌어 냈다(Blum and Roberts, 2009). 이 지역 생태학 연구에 따르면, 해수면 상승과 해침에 의한 염분 상승은 전 지구적 온도상승과 관련한 블랙 맨그로브숲의 염습지 침투의 가속화를 이끌어낸 것으로 조사되었다(Michot *et al.*, 2010; Osland *et al.*, 2017).

## 2. 오버워시(Overwash)

수분, 유기물, 탄산염이 낮아지는 9~11cm구간은 높은 수준의 Cl/Br비율을 보여주는데, 이는 과거 허리케인의 피해에 의해 유발되는 오버워시(overwash) 퇴적층과 매우 유사하다(Liu *et al.*, 2011). 오버워시 퇴적층은 허리케인으로 유발된 높은 해일이 해안선을 강타하면서, 해변 또는 사구 등의 조립질 퇴적물을 육지를 향해 퇴적하는 현상을 말한다(Liu and Fearn, 2000). 오버워시 퇴적층의 높은 Ca과 Zr원소는 이들 퇴적물이 해성퇴적물(조개껍데기 또는 칼슘함유 유기물)과 육성퇴적물(삼각주 형성과정에 관여한 사질토)의 혼합 구성물이라는 것을 나타낸다.

습지의 침강과 그에 따른 습지의 환경 변화의 가속화는 이와 같은 미시시피강의 본류 이동과 아주 밀접한 관련이 있음이 드러났다. 본 연구지역은 열대성 대표 식생 중의 하나인 블랙 맨그로브가 광범위하게 서식하는 환경으로, 이와 관련된 기후, 식생 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구는 지질, 지화학과 지화학에 초점을 맞추어 진행되었으므로, 추후 연구에서 꽃가루와 생태학연구를 통해 블랙 맨그로브와 관련된 연구가 진행될 것이다.

## VI. 결론

본 논문은 루이지애나 Port Fourchon의 Bay Champagne 인근 해안 습지에서 지난 800년 동안 진행되어온 삼각주 하구 지형 형태와 삼각주 진화에 대한 연구로, 본 연구결과와 해석은 샘플이 채취된 지역에 한해서 이루어 졌으며, 이에 대한 지역적 확대해석을 위해서는 그 지역의 지질, 지층 구조의 비교가 반드시 요구된다. 지질, 지형, 지화학 분석 결과 본 연구지역은 총 4단계의 삼각주 진화 과정을 겪은 것으로 나타났으며, 약 800BP 전부터 이어진 Bayou Lafourche 삼각주의 전진퇴적은 호수/호수성 지형의 습지화를 이끌어 냈다. 또한 상당한 양의 육성원소(K, Ti, Fe)를 포함한 육성퇴적물이 호수의 매적 작용에 기여했다. 호수의 습지화(encroachment of marsh)는 Bayou Lafourche 삼각주가 활발히 활동하던 약 660~200cal yr BP까지 진행된 것으로 보이며, 미시시피강의 본류 이동과 그에 따른 삼각주이동(delta-lobe switching)은 Bayou Lafourche 삼각주의 퇴행을 유발했다. 100cal yr BP 이후 급격히 줄어든 토사와 담수의 양은 해침을 가속화하며 습지의 침강을 유도했다. 증가하는 해성원소(Ca, Sr, Cl)는 해침 가속화, 해안선 후퇴와 관련이 있으며, 이는 습지지역의 침강과 상대해수면 상승에 기인하는 것으로 보인다.

## 참고문헌

- 권동희, 2006, “한국의 습지지형 연구 성과와 과제” 한국지형학회지, 13(1), 25-34.
- 김선영·강호정, 2003, “대기중 이산화탄소 농도 증가가 습지 식물에 미치는 영향” 한국하천호수학회지, 36(4), 391-402.
- 김성환·류호상·신영호, 2007, “낙동강 삼각주연안 사주섬 표층퇴적물의 입도특성과 공간적 분포” 한국지역지리학회지, 13(1), 43-53.
- 류중형·리우 캄비우, 2019, “멀티프록시를 이용한 홀로세 후기, 루이지애나 주 미시시피강 담수습지 환경 복원” 한국지리학회지, 8(3), 417-428.
- 백영숙·전승수·신선자, 2009, “한국 서남해안 두우리 개방형 조간대에서 관찰되는 계절변화에 따른 퇴적구조와 생흔상” 지질학회지, 45(3), 187-208.
- 유동근·이광수·강년건·이보연·공기수·김길영·장세원·이상

- 현·김진철 2017, “낙동강 삼각주의 층서 및 퇴적역사” 지질학회지, 53(5), 619-630.
- 황길순·김범철·김호섭·전만식, 2000, “습지에 의한 수질개선 효과” 한국하천호수학회지, 33(3), 295-303.
- Bahr, A., Jiménez-Espejo, F.J., Kolasinac, N., Grunert, P., Hernández-Molina, F.J., Röhl, U., Voelker, A.H., Escutia, C., Stow, D.A., and Hodell, D., 2014, Deciphering bottom current velocity and paleoclimate signals from contourite deposits in the Gulf of Cádiz during the last 140 kyr: An inorganic geochemical approach, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(8), 3145-3160.
- Blaauw, M., 2010, Methods and code for ‘classical’ age-modelling of radiocarbon sequences, *Quaternary Geochronology*, 5, 512-518.
- Blum, M.D. and Roberts, H.H., 2009, Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise, *Nature Geoscience*, 2(7), 488-491.
- Blum, M.D., Tomkin, J.H., Purcell, A., and Lancaster, R.R., 2008, Ups and downs of the Mississippi Delta, *Geology*, 36(9), 675-678.
- Bomer, E.J., Bentley, S.J., Hughes, J.E., Wilson, C.A., Crawford, E., and Xu, K., 2019, Deltaic morphodynamics and stratigraphic evolution of middle Barataria Bay and middle Breton sound regions, Louisiana, USA: Implications for river-sediment diversions, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 224, 20-33.
- Chamberlain, E.L., Törnqvist, T.E., Shen, Z., Mauz, B., and Wallinga, J., 2018, Anatomy of Mississippi Delta growth and its implications for coastal restoration, *Science Advances*, 4(4), 4740 (doi: 10.1126/sciadv.aar4740).
- Christen, J.A. and Pérez, S., 2009, A new robust statistical model for radiocarbon data, *Radiocarbon*, 51(3), 1047-1059.
- Couvillion, B.R., Beck, H., Schoolmaster, D., and Fischer, M., 2017, *Land Area Change in Coastal Louisiana from 1932 to 2010: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3164*, scale 1:265,000, 12 (pamphlet).
- Davis, D.W., 1993, Crevasses on the lower course of the Mississippi River, *Paper Presented at the Coastal Zone '93*, July 19-23, New Orleans, USA, 133-151.
- 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.
- Dill, H.G., 2010, The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium, *Earth-Science Reviews*, 100(1-4), 1-420.
- Fisk, H.N., 1944, *Geological Investigation of the Alluvial Valley of the Lower Mississippi River*, Vol. 15, Tulsa, OK: Tulsa Geological Society.
- Flocks, J.G., Ferina, N.F., Dreher, C., Kindinger, J.L., FitzGerald, D.M., and Kulp, M.A., 2006, High-resolution stratigraphy of a Mississippi subdelta-lobe progradation in the Barataria Bight, North-Central Gulf of Mexico. *Journal of Sedimentary Research*, 76(3), 429-443.
- Frazier, D.E., 1967, Recent deltaic deposits of the Mississippi River: Their development and chronology, *Transactions-Gulf Coast Association of Geological Societies*, 17, 287-315.
- Gagliano, S.M., Meyerarendt, K.J., and Wicker, K.M., 1981, Land loss in Mississippi River deltaic plain, *AAPG Bulletin*, 65(9), 1684-1685.
- Groover, K.D. and Izbicki, J.A., 2019, Selected trace-elements in alluvium and rocks, western Mojave Desert, southern California, *Journal of Geochemical Exploration*, 200, 234-248.
- Hijma, M.P., Shen, Z., Törnqvist, T.E., and Mauz, B., 2017, Late Holocene evolution of a coupled, mud-dominated delta plain-chenier plain system, coastal Louisiana, USA, *Earth Surface Dynamics*, 5(4), 689.
- Ihaka, R. and Gentleman, R., 1996, R: A language for data analysis and graphics, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3), 299-314.
- Jankowski, K.L., Törnqvist, T.E., and Fernandes, A.M., 2017, Vulnerability of Louisiana’s coastal wetlands

- to present-day rates of relative sea-level rise, *Nature Communications*, 8, 14792.
- Justic, D., Duke-Sylvester, S., Visser, J., Xue, Z., and Liang, J., 2016, Coastal ecosystem modeling in the context of climate change: An overview with case studies, *Ecological Model Types*, 28, 227-260.
- Kazerounie, N., 2005, Surveillance for illness and injury after hurricane Katrina - New Orleans, Louisiana, September 8-25, 2005, *MMWR: Morbidity and Mortality Weekly Report*, 54(40), 1018-1021.
- Kesler, S.E., Appold, M.S., Martini, A.M., Walter, L.M., Huston, T.J., and Richard Kyle, J., 1995, Na-Cl-Br systematics of mineralizing brines in Mississippi Valley-type deposits, *Geology*, 23(7), 641-644.
- Kirby, Jr., C.J., 1971, The Annual Net Primary Production and Decomposition of the Salt Marsh Grass, *Spartina Alterniflora*, Loisel. In the Barataria Bay Estuary of Louisiana, Unpublished Ph.D. Dissertations, Department of Botany, Louisiana State University.
- Kolb, C.R. and van Lopik, J.R., 1958, *Geology of the Mississippi River Deltaic Plain, Southeastern Louisiana*, Vol. 1, Vicksburg, MI: Army Engineer Waterways Experiment Station.
- 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*, SI(44), 56-71.
- Liu, K. and Fearn, M.L., 2000, Holocene history of catastrophic hurricane landfalls along the Gulf of Mexico coast reconstructed from coastal lake and marsh sediments, in *Current Stresses and Potential Vulnerabilities: Implications of Global Change for the Gulf Coast Region of the United States*, Baton Rouge: Franklin Press, 38-47.
- Liu, K., Li, C., Bianchette, T., McCloskey, T., Yao, Q., and Weeks, E., 2011, Storm deposition in a coastal backbarrier lake in Louisiana caused by Hurricanes Gustav and Ike, *Journal of Coastal Research*, SI(64), 1866-1870.
- Liu, K., McCloskey, T.A., Bianchette, T.A., Keller, G., Lam, N.S., Cable, J.E., and Arriola, J., 2014, Hurricane Isaac storm surge deposition in a coastal wetland along Lake Pontchartrain, southern Louisiana, *Journal of Coastal Research*, SI(70), 266-271.
- McCloskey, T.A., Smith, C.G., Liu, K., and Nelson, P.R., 2018, The effects of tropical cyclone-generated deposition on the sustainability of the Pearl River Marsh, Louisiana: The importance of the geologic framework, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, 179.
- Michot, T., Day, R., and Wells, C., 2010, Increase in black mangrove abundance in coastal Louisiana, Louisiana natural resources news, *Newsletter of the Louisiana Association of Professional Biologists*, 1 (LWF 2010 Convention/LAPB Spring Meeting), 4-5.
- Morgan, J.P. and Larimore, P.B., 1957, *Changes in the Louisiana Shoreline*, No. 57-5, Louisiana, NO: C.S.I. Contribution.
- Osland, M.J., Day, R.H., Hall, C.T., Brumfield, M.D., Dugas, J.L., and Jones, W.R., 2017, Mangrove expansion and contraction at a poleward range limit: Climate extremes and land-ocean temperature gradients, *Ecology*, 98(1), 125-137.
- Penland, S., Connor, Jr., P.F., Beall, A., Fearnley, S., and Williams, S.J., 2005, Changes in Louisiana's shoreline: 1855-2002, *Journal of Coastal Research*, SI(44), 7-39.
- Penland, S., Suter, J.R., and Boyd, R., 1985, Barrier island arcs along abandoned Mississippi River deltas, *Marine Geology*, 63(1-4), 197-233.
- Protection, C. and Authority, R., 2020, Coastal Protection and Restoration Authority (CPRA) of Louisiana, coastwide reference monitoring system -Wetlands monitoring data, Retrieved from Coastal Information Management System (CIMS) database (<https://lacoast.gov/crms>).
- Rittenhouse, G., 1967, Bromine in oil-field waters and its use in determining possibilities of origin of these waters, *AAPG Bulletin*, 51(12), 2430-2440.
- 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*, SI(85), 381-385.
- Saucier, R.T., 1963, Recent Geomorphic History of the Pontchartrain Basin, Unpublished Ph.D. Dissertations, Department of Geography and Anthropology, Louisiana State University.
- Sharma, A., Weindorf, D.C., Man, T., Aldabaa, A.A.A., and Chakraborty, S., 2014, Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 3. Soil reaction (pH), *Geoderma*, 232, 141-147.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., van der Plicht, J., and Spurk, M., 1998, INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP, *Radiocarbon*, 40(3), 1041-1083.
- Talma, A. and Vogel, J.C., 1993, A simplified approach to calibrating 14 C dates, *Radiocarbon*, 35(2), 317-322.
- Törnqvist, Tr.E., Bick, S.J., van der Borg, K., and de Jong, A.F., 2006, How stable is the Mississippi Delta?, *Geology*, 34(8), 697-700.
- Törnqvist, Tr.E., González, J.L., Newsom, L.A., van der Borg, K., de Jong, A.F., and Kurnik, C.W., 2004, Deciphering Holocene sea-level history on the US Gulf Coast: A high-resolution record from the Mississippi Delta, *Geological Society of America Bulletin*, 116(7-8), 1026-1039.
- van Rijn, L.C., 1993, *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Vol. 1006, Amsterdam: Aqua publications.
- Visser, J. and Duke-Sylvester, S., 2017, LaVegMod v2: Modeling coastal vegetation dynamics in response to proposed coastal restoration and protection projects in Louisiana, USA, *Sustainability*, 9(9), 1625.
- Westerhoff, P., Chao, P., and Mash, H., 2004, Reactivity of natural organic matter with aqueous chlorine and bromine, *Water Research*, 38(6), 1502-1513.
- 교신 : 류중형, 70803, 미국 루이지애나 주 배턴루지 1002-Y, 에너지·해양·환경동, 루이지애나 주립대학교 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)
- 투고접수일: 2020년 7월 14일  
심사완료일: 2020년 7월 28일  
게재확정일: 2020년 8월 6일

