

현장관측 및 원격탐사 자료를 이용한 북동 멕시코 만에서 El Niño와 La Niña 기간 동안 표층 입자성 유기탄소의 시/공간적 변화 연구

손영백¹ · Wilford D. Gardner²

¹한국해양연구원 해양위성센터

²Texas A&M University 해양학과

Determining Spatial and Temporal Variations of Surface Particulate Organic Carbon (POC) using *in situ* Measurements and Remote Sensing Data in the Northeastern Gulf of Mexico during El Niño and La Niña

YOUNG BAEK SON¹ AND WILFORD D. GARDNER²

¹Korea Ocean Satellite Center, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Oceanography, Texas A&M University, College Station, Texas, USA, 77843-3146

북동 멕시코 만에서 particulate organic carbon(POC)의 시/공간적 변화를 조사하기 위하여, 1997년 11월부터 2000년 8월까지 총 9번의 관측이 이루어 졌으며, 같은 기간 동안 위성자료(해색, 표층수온, 해면고도이상, 표층바람)와 주요 강들의 유출량이 조사되었다. POC 농도는 내 대륙붕과 미시시피 하구 역에서 높은 값을 (>100 mg/m³) 나타내고 대륙붕과 대륙사면으로 가면서 감소된다. POC의 경년 변화는 상대적으로 1997과 1998년(El Niño)이 1999과 2000년(La Niña) 보다 상대적으로 증가되어 나타난다. 이런 현상은 미시시피강 및 다른 주요 강들에 영향을 주는 강우량 변화에 따른 담수 유입의 변화와 직접적으로 연관되어 있으며, 강우량 변화는 ENSO 현상과 같은 세계 기후변화와 관련이 있는 것으로 사료된다. 북동 멕시코 만 연안으로 유입되는 주요 강들의 방류량은 초봄에 증가되어 여름과 가을에 감소되지만, 공간적으로 확장된 높은 농도의 POC 분포는 여름 조사기간에서 관측되고, 낮은 농도 및 제한된 확산은 가을과 초 봄 관측에서 나타난다. 여름철 동안 상대적인 강의 유출량은 봄에 비하여 현저하게 감소하지만, 증가된 표층수온은 수층을 강하게 성층화시키고 표층에서 부력을 증가시킨다. 이런 조건에서 고농도의 POC를 함유하는 저염수는 상부 대륙사면까지 확장되고 이는 Loop Current와 Loop Current Eddies의해서 조절된다. 봄과 가을 동안 유출량은 보통이거나 이상을 보이지만, 증가된 바람과 낮은 표층수온으로 인하여 수직적 혼합을 유발하고 이는 높은 농도의 POC를 내 대륙붕에 제한시키는 것으로 사료된다.

Surface particulate organic carbon (POC) concentration was measured in the Northeastern Gulf of Mexico on 9 cruises from November 1997 to August 2000 to investigate the seasonal and spatial variability related to synchronous remote sensing data (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), sea surface temperature (SST), sea surface height anomaly (SSHA), and sea surface wind (SSW)) and recorded river discharge data. Surface POC concentrations have higher values (>100 mg/m³) on the inner shelf and near the Mississippi Delta, and decrease across the shelf and slope. The inter-annual variations of surface POC concentrations are relatively higher during 1997 and 1998 (El Niño) than during 1999 and 2000 (La Niña) in the study area. This phenomenon is directly related to the output of Mississippi River and other major rivers, which associated with global climate change such as ENSO events. Although highest river runoff into the northern Gulf of Mexico Coast occurs in early spring and lowest flow in late summer and fall, wide-range POC plumes are observed during the summer cruises and lower concentrations and narrow dispersion of POC during the spring and fall cruises. During the summer seasons, the river discharge remarkably decreases compared to the spring, but increasing temperature causes strong stratification of the water column and increasing buoyancy in near-surface waters. Low-density plumes containing higher POC concentrations extend out over the shelf and slope with spatial patterns and controlled by the Loop Current and eddies, which dominate offshore circulation. Although river discharge is normal or abnormal during the spring and fall seasons, increasing wind stress and decreasing temperature cause vertical mixing, with higher surface POC concentrations confined to the inner shelf.

Keywords: Particulate organic carbon(POC), Remotely sensing data, Freshwater plume, The Gulf of Mexico, Loop Current/Eddy, ENSO event

*Corresponding author: sonyb@kordi.re.kr

서론

멕시코 만에서 연안 및 대륙붕 지역은(Gilbes *et al.*, 1996; Walker, 1996; Hu *et al.*, 2003) 외해에서 Loop Current나 Loop Current Eddies의 (Biggs, 1992; Biggs and Muller-Karger, 1994) 영향을 받는 지역보다 높은 생산성을 나타낸다. 이런 조건들은 때때로 증가된 유/무기물의 연안 유입으로 인하여 악영향을 미치기도 한다. 예를 들면, 미시시피강 주변에서는 hypoxia가 일어나 “dead zone”(Rabalais *et al.*, 1996) 만들거나, 서부 플로리다 지역에서는 적조 현상과 관련되어 “black water”(SWFDOG, 2002; Hu *et al.*, 2004)라고 불리는 현상을 초래하기도 한다.

이런 현상들의 주원인은 증가된 영양염 및 오염물질을 함유하는 미시시피강 및 주변 주요 강들에서 유입되는 담수의 직접적인 영향을 받는 것으로 보고되었다(Walker *et al.*, 1994; Oey, 1995; Morey *et al.*, 2003). 한편 방류량에 영향을 주는 강우량은 뚜렷한 계절 및 매년 변화를 보이는데, 이런 변화는 ENSO(El Niño/Southern Oscillation) 현상과 같은 세계 기후변화에 깊은 관계를 가지는 것으로 조사되었다(Enfield *et al.*, 2001; Schmidt *et al.*, 2001; Son, 2006). 연구지역에서 El Niño 시기에는 온난화 현상으로 인하여 상대적으로 높은 강우량을 보이고(Ropelewski and Halpert, 1986), La Niña(Smith *et al.*, 1998) 기간에는 상대적으로 감소된 강우량을 나타내는 것으로 보고되었다.

연안으로 유입된 상대적으로 밀도가 낮은 담수는 공간적으로 표층 순환 해류 시스템에서 의해서 영향을 받거나 조절되는 것으로 조사되었다. 연구지역에서 여름철 표층바람은 남동풍을 보이고, 가을과 겨울철에는 북-북동풍을 나타내는데(Morey *et al.*, 2003; Ohlmann and Niiler, 2005), 연안 역에서는 이런 계절적 바람의 강도 및 방향에 따라서 표층 흐름이 조절된다(Ohlmann and Niiler, 2005). 반면 외해에서는 중규모 해류 시스템인 Loop Current와 Loop Current Eddies에 의해서 표층 흐름이 영향을 받는 것으로 보고 되었다(Walker *et al.*, 1994). 대표적인 외해의 중규모 해류 시스템인 Loop Current는 Gulf Stream의 지류로서 Yucatan

Channel를 통하여 멕시코 만으로 유입되어 시간방향으로 회전하면서 Florida Strait 통하여 대서양으로 빠져 나간다. Loop Current는 일반적으로 미시시피강 주변해역까지 발달되며 온수성(warm-core) 및 난수성(cold-core)외류를 생성한다(Elliott, 1982; Vukovich and Maul, 1985; Frolov *et al.*, 2004). 이런 외류들 경계 면에서는 연안수의 유입이 이루어 지고 상당 부분이 외해로의 교환이 이루어지면서 생산성 증가 요인으로 작용되어 진다(Brooks and Legeckis, 1982).

본 연구에서는 시/공간적인 표층 입자들의 변화, 특히 particulate organic carbon(POC)의 변화를 파악하고자 하였으면, 이는 해양에서 일어나는 carbon cycling을 이해하는데 중요한 요인으로 사료된다(Son *et al.*, 2009). 또한 POC의 분포에 영향을 주는 물리적 요인은 계절적 변화뿐만 아니라 공간적 변화를 이해할 수 있는 기본적인 자료로 이용하였다. 기본적으로 강의 방류량, 바람, 그리고 해류 시스템과 같은 POC 분포에 영향을 주는 요인은 위성 및 현장 관측 자료들을 이용하였으며, 이는 지역적으로 제한된 결과이지만 향후 다양한 해양환경 변화에 미치는 요인을 파악하고 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

재료 및 방법

현장관측 자료

NEGOM(Northeastern Gulf of Mexico)은 북동 멕시코 만의 대륙붕 및 대륙사면에서 프로젝트가 수행되었다. 현장조사는 1997년 11월부터 2000년 8월까지 총 9번의 관측이 11개 라인을 따라 100개 정도의 정점에서 물리적, 화학적, 생물학적 자료에 대하여 조사가 이루어 졌다(Fig. 1). 각각 세 번의 봄, 여름, 그리고 가을의 관측이 수심 10 m에서 1000 m까지의 다양한 환경에서 관측이 이루어 졌다. 기본적인 수온 및 염분은 CTD를 통하여 관측되었고, 아표층(sub-surface) 해류는 배에 장착된 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)에 의해서 얻어진 자료로 계산되었다.

POC 농도는 해수 1-3 리터를 여과한 GF/F(사용 전에 550에서

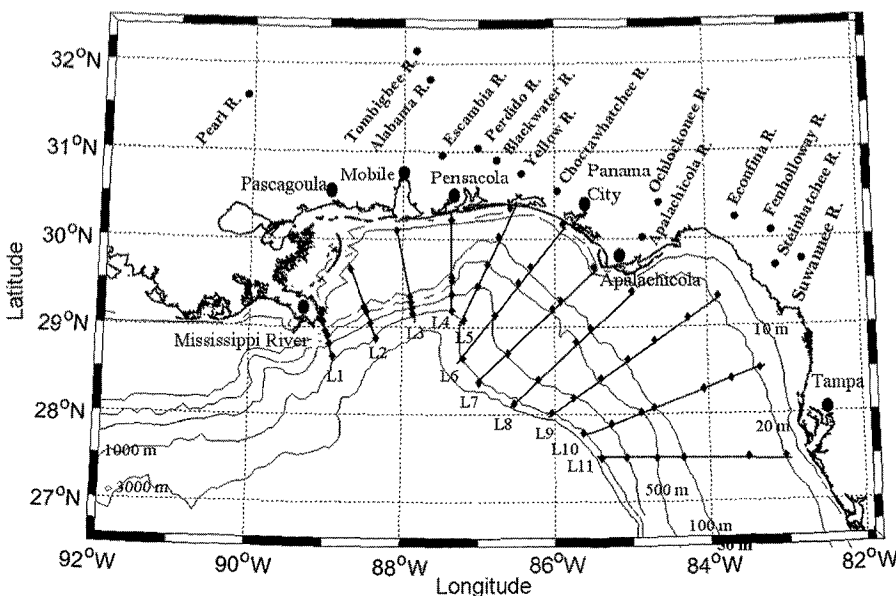


Fig. 1. Bathymetry in the Gulf of Mexico and Northeastern Gulf of Mexico (NEGOM) sampling station from November 1997 to August 2000 (11 sampling tracks and 60 sampling stations).

5시간 건조)를 건조한 후 염산을 이용하여 무기탄소를 제거한 후에 Carbon Erba CNS 분석기를 이용하여 분석하였다(JGOFS, 1996; Son *et al.*, 2009).

북동 멕시코 만의 주요 강들의 방류량

본 연구에 사용된 북동 멕시코 만의 주요 강의 유출량은 과거 4년간(1997-2000) 미국 국립지리원 (USGS; <http://waterdata.usgs.gov/nwis/sw>)과 미 육군 공병대 (U.S. Army Corps of Engineers; <http://www.mvn.usace.army.mil/eng/edhd/Wcontrol/miss.htm>)로부터 관측된 자료를 사용하였다. 월평균 방류량은 본 관측이 이루어진 기간과 비교하기 위하여, 크게 두 지역으로(미시시피, 플로리다) 나누어서 그 양을 합산 하였다. 1) 미시시피 지역; Mississippi, Pearl, Pascagoula, Tombigbee, Alabama River; 2) 플로리다 지역; Escambia, Perdido, Blackwater, Yellow, Choctawhatchee, Ochlockonee, Apalachicola, Econfinia, Fenholloway, Steinhatchee, Suwannee River(Fig. 1).

위성자료

관측기간 동안 멕시코 만을 포함하는 해상 위성센서인 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)의 자료는 NASA Ocean Biology Processing Group(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)로부터 제공 받아, Level 1A 자료는 SeaWiFS 전용처리 프로그램인

SeaDAS(SeaWiFS Data Analysis System)를 이용하여 1km 해상도를 가지는 Level 2 자료로 처리 되었다(McClain *et al.*, 2004). Normalized water-leaving radiance(L_{wn}) 자료는 각각의 관측기간 동안에 POC의 농도를 추정하는데 사용하였고, 기존의 연구결과인MNDCI(Maximum Normalized Difference Carbon Index) 알고리즘을 이용하여 계산되었다(Son *et al.*, 2009). 위성 자료를 이용하여 추정된 POC 자료는 해면고도이상(sea surface height anomaly) 자료와 합성되었다.

관측기간 동안의 표층수온 자료는 NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR)를 사용하였으며, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center(PO.DAAC)로 제공 받아(<http://podaac.jpl.nasa.gov/index.html>) 연구지역에 맞도록 4 km 해상도로 재 계산되었다. 표층수온 자료는 또한 해면고도이상 자료와 병합되었다.

해면고도이상은 TOPEX/POSEIDON altimeter를 이용해 관측된 자료를 PO.DAAC(<http://podaac.jpl.nasa.gov/index.html>)에서 제공 받아 계산되었다. 기본적인 보정을 통하여 9 km의 해상도를 가지는 자료로 처리되었다. 해면고도이상 자료는 연구지역에서 중규모 해류 시스템인 Loop Current와 Loop Current Eddies를 관측하는데 사용되었으며, POC 및 표층 수온 분포 자료와 병합되어 연구지역에 맞도록 재 구성되었다.

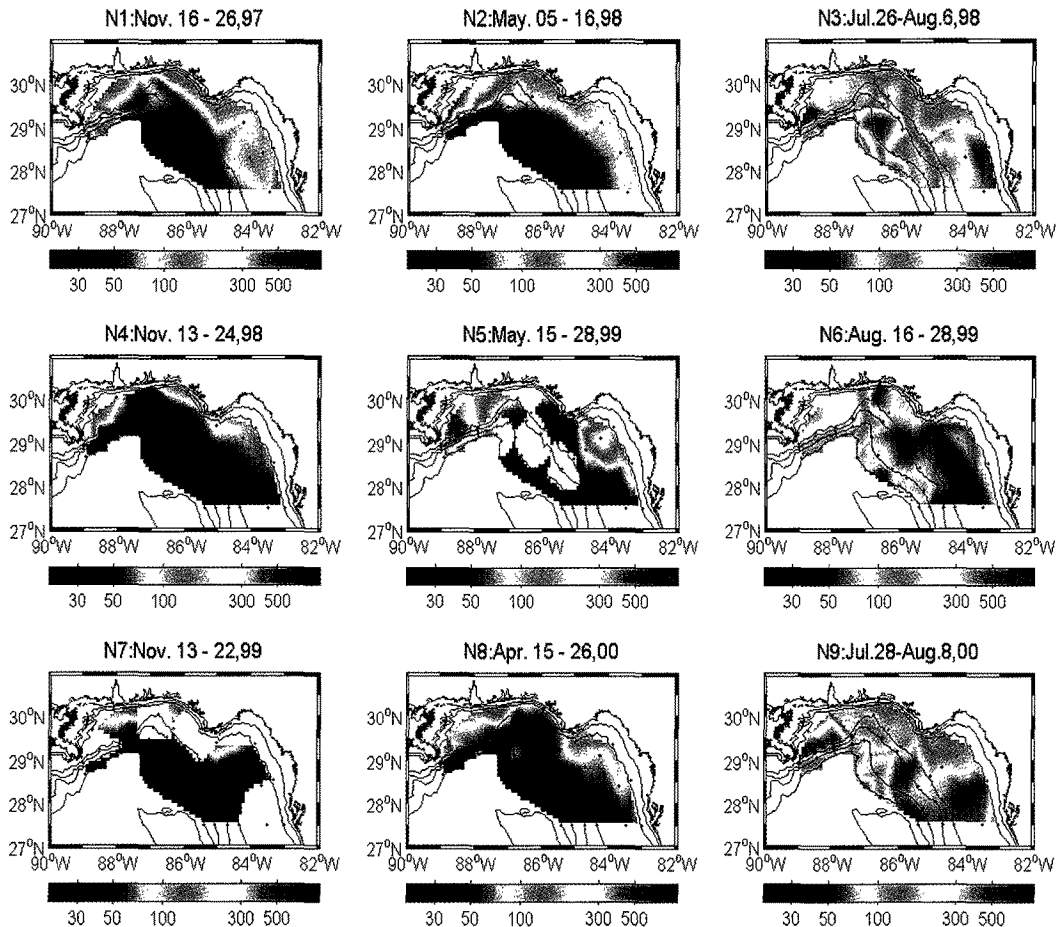


Fig. 2. Surface particulate organic matter concentration (mg/m^3) contoured from bottle samples collected at ~60 stations during each NEGOM hydrographic cruise. Cruises N1/N4/N7 were completed during the fall, N2/N5/N8 - during the spring, and N3/N6/N9 - during the summer.

해수면 표층바람은 SSM/I(Special sensor Microwave/Image)을 이용해 관측된 자료로서 Remote Sensing System in Santa Rosa, California(<http://www.remss.com>)로부터 제공 받아 연구지역에 맞도록 재 계산 하였다(Wentz, 1997).

결과 및 고찰

POC의 계절적 변화

연구지역에서 표층 해수의 물리적 특성 및 POC의 농도 변화는 계절에 따라 다양한 변화를 보였다. 관측기간 동안 POC는 ~ 15 - ~ 771 mg/m^3 , 표층 염분도는 ~ 18 - ~ 36 (psu), 표층 수온은 ~ 18 - ~ 32 ($^{\circ}\text{C}$)의 내외의 변화를 보였다(Figs. 2-4). 봄 관측 동안 POC는 평균 89 mg/m^3 , 여름 관측 동안은 평균 142 mg/m^3 , 그리고 가을 관측 동안은 평균 59 mg/m^3 으로 여름 관측에서 상대적으로 증가되어진 값을 보였다(Fig. 5a). 봄과 가을 관측에서 평균 염분은 각각 34와 35 내외를 보이다가, 여름 관측에서는 염분도 다소 감소하여 평균 32를 나타내었다(Figs. 3 & 5a). 여름철 POC의 공간적 분포는 확장된 저염수를 따라서 높은 농도의 POC가 외해까지 확산되는 구조를 나타내었다(Figs. 2 & 3). 그러나 가을철 높은 농도의 POC는 대륙사면 내에서 제한되어 발달되었다(Fig. 2). POC와 표층 염분의 상관관계에서 특이한 계절 변화는 보이지 않지만, 일반적으로 저염수에서 높은 농도의 POC 변화를 보였다(Fig. 5b).

가을 관측에서 (11월 관측: N1-1997, N4-1998, N7-1999) 상대적으로 높은 농도의 POC(>100 mg/m^3) 분포는 내 대륙붕에 제한되어 발달되고, 미시시피강 주변에서 증가되어 나타났다(Fig. 2). 전반적으로 POC의 농도는 외 대륙붕 및 사면지역으로 가면서 급격히 감소되고, 염분도는 급격히 증가되는 변화를 보였다(Figs. 2 & 3). POC 경년 변화에서 1997년 가을(N1)의 평균 POC 농도는 (80 mg/m^3) 1998, 1999, 그리고 전체 가을 평균 농도보다(52 , 46 , 59 mg/m^3 ; Fig. 5a) 월등히 높은 값을 변화를 보였다. 염분도는 가을 관측기간 동안 큰 변화를 나타내지 않았지만, 1997년 가을(N1)의 평균 수온은(~ 22 $^{\circ}\text{C}$) 다른 해보다 $1\sim 2$ $^{\circ}\text{C}$ 정도 낮게 조사 되었다(N4(24.4 $^{\circ}\text{C}$), N7(23.7 $^{\circ}\text{C}$), Figs. 4 & 5a).

봄 관측에서 (4월-5월관측: N2-1998, N5-1999, N8-2000) 100 mg/m^3 이상의 POC 분포는 내 대륙붕 안에 제한되어 발달하지만, 주요 강 입구에서는 가을 관측보다 증가되어 나타났다(Fig. 2). 연구지역에서 미시시피 지역의 방류량은 평균 이상의 값을 나타냈지만(Fig. 6a), 플로리다 지역에서는 1998년 봄을 제외하고 1999과 2000년에는 평균보다 다소 낮은 값을 보였다(Fig. 6b). 이는 미시시피 지역에 담수의 유입이 플로리다 지역보다 높았음을 지시하면, 이로 인하여 Mobile Bay와 Mississippi Delta 사이에서 상대적으로 증가된 담수의 영향을 받았던 것으로 판단된다. 그러나 1998년 봄의 담수의 유입은 평균보다 증가되었지만, 1999년 봄의 평균 POC 농도는 (N5; 129 mg/m^3) 1998, 2000, 그리고 평균값

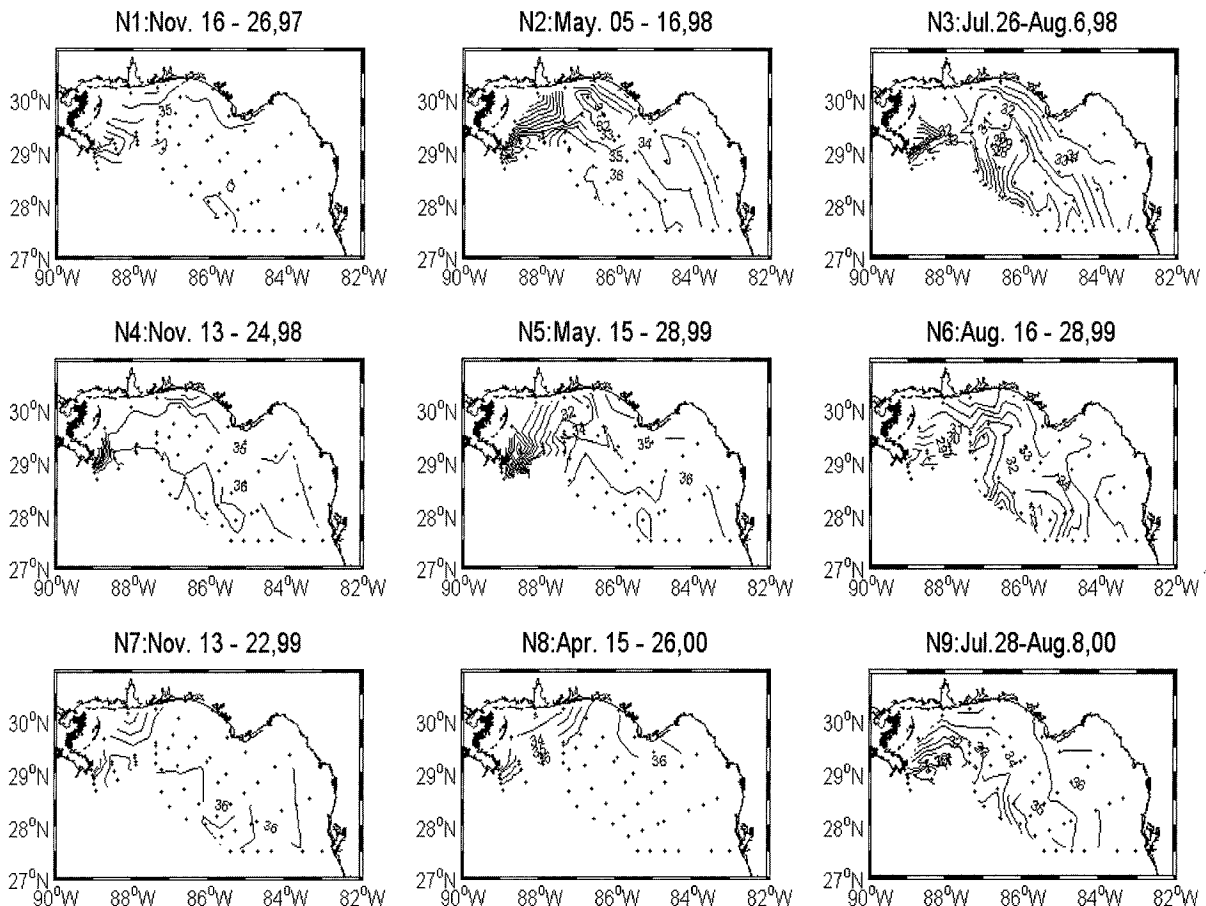


Fig. 3. Surface salinity from CTD data averaged during each NEGOM hydrographic cruise. Contour interval is 1.

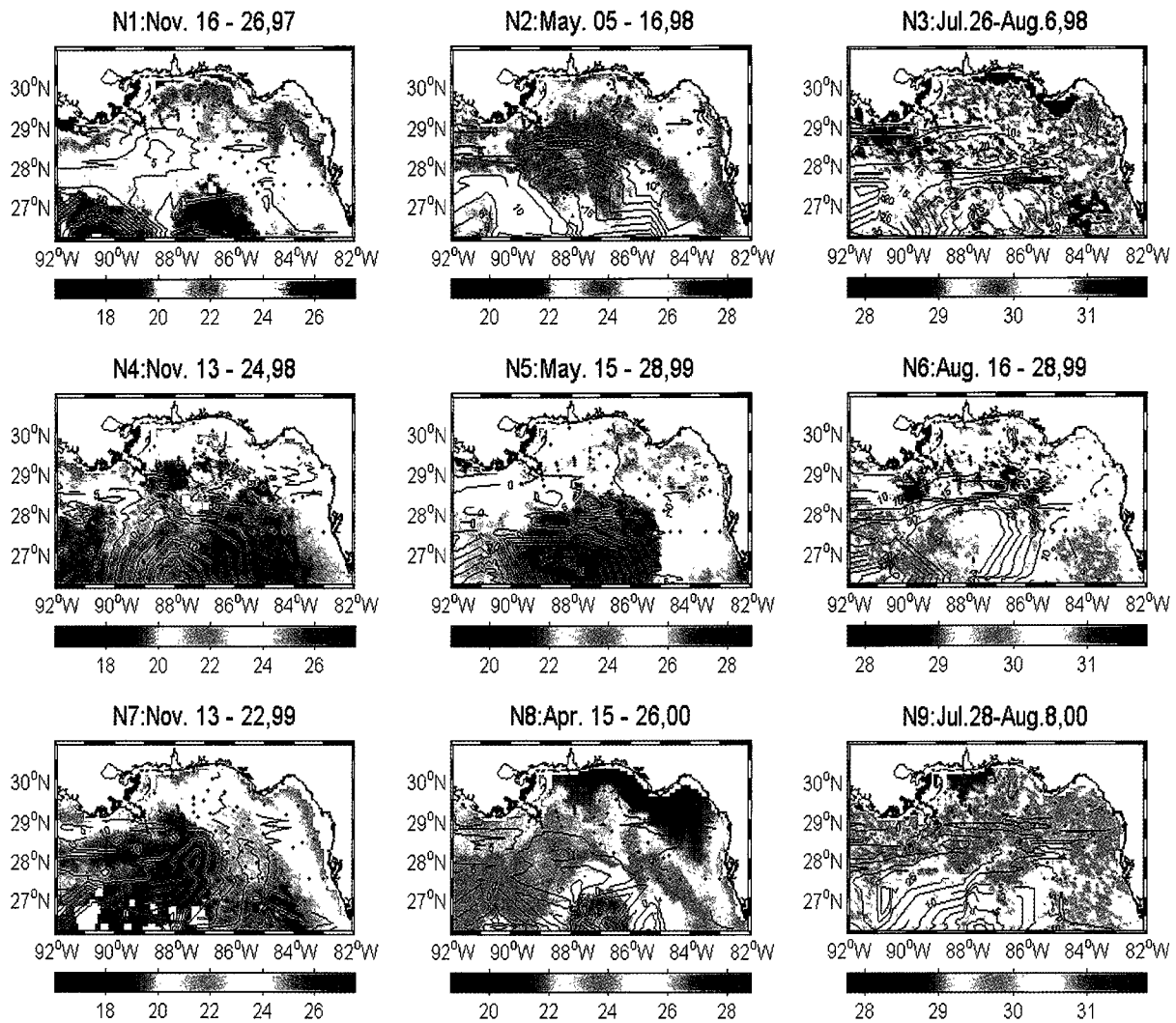


Fig. 4. Sea surface temperature (SST) from NOAA AVHRR satellite data averaged over each NEGOM cruise (°C) superimposed on sea surface height anomaly (SSHA) from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data averaged over each NEGOM cruise (cm). Contour interval is 5 cm.

보다 높게 나타났다(87, 55, 89 mg/m³; Fig. 5a).

여름 관측에서 (7월-8월 관측: N3-1998, N6-1999, N9-2000) 높은 농도의 POC는 (>100 mg/m³) 주요 강들이 위치한 지역에서 나타날 뿐 아니라 외 대륙붕 및 대륙사면까지 확장되어 분포하는 양상을 보였다(Fig. 2). 높은 농도의 POC 분포는 Mobile Bay와 Mississippi Delta 사이에서 발달되어 남동쪽 방향으로 확장을 보였다. 낮은 농도의 POC는 외 대륙붕과 동쪽 내 대륙붕 지역에서 발견되었다. 이런 증가된 POC 분포는 낮은 염분도를 가지는 수괴의 확장과 일치되지만(Figs. 2 & 3), 주요 강들의 절대적인 유출량과는 약한 상관관계를 보이는 것으로 조사되었다(Fig. 6). 왜냐하면 연구지역에서 절대적인 방류량은 여름철에 급격히 줄어들어 평균이거나 평균 이하의 값을 나타내기 때문이다. 다만 1998년 여름은 다소 평균값보다 증가되었지만, 1999와 2000년의 절대 방류량은 평균 이하의 감소된 값을 보였다(Fig. 6) (1998년 증가된 방류량으로 인하여 농도 및 수평적 분포에서 다른 해보다 증가되었다(Fig. 2)). 여름관측 동안 표층 수온은 큰 변화를 나타내지 않았고(평균 ~30 °C, Figs. 4 and 5a), 내해의 저밀도의 수괴가 확장되

면서 외해에서는 넓은 범위 저염수 분포를 보였다(Figs. 2 & 3).

주요 강의 방류량 및 수층의 성층화

앞의 결과에서 높은 농도의 POC 분포는 저염수의 분포와 높은 상관관계를 보여주고 있는데(Figs. 2, 3, 5b), 이는 북동 멕시코 만에 위치하는 주요 강들로부터 유입되는 담수의 영향을 직간접적으로 받고 있는 것으로 생각된다. 연구지역에서 대부분의 담수는 미시시피 지역에서 유입되고(전체 방류량의 >92%), 나머지는 플로리다 지역에서(전체 방류량의 <8%; Fig. 6) 유입된다. 방류량의 계절적 변화에서 최대 방류량은 초봄이고 늦 여름에서 가을로 가면서 감소된다(Fig. 6).

Fig. 5a에서 보여 주듯이, 1997과 1998년 동안 평균 수온 및 염분도는 (~25.1 °C & ~33.9 psu) 1999과 2000년보다(~26.5 °C & ~34.2 psu) 낮았고, 평균 POC 농도는 1997과 1998년이(~100 mg/m³) 다소 증가되어진 양상을 보였다(1999 & 2000: ~96 mg/m³). 이는 방류량의 경년변화에서 1997과 1998년의 평균 방류량이 (~4×10⁵) 전체 평균값보다 높았으며, 또한 1999와 2000년 평균보

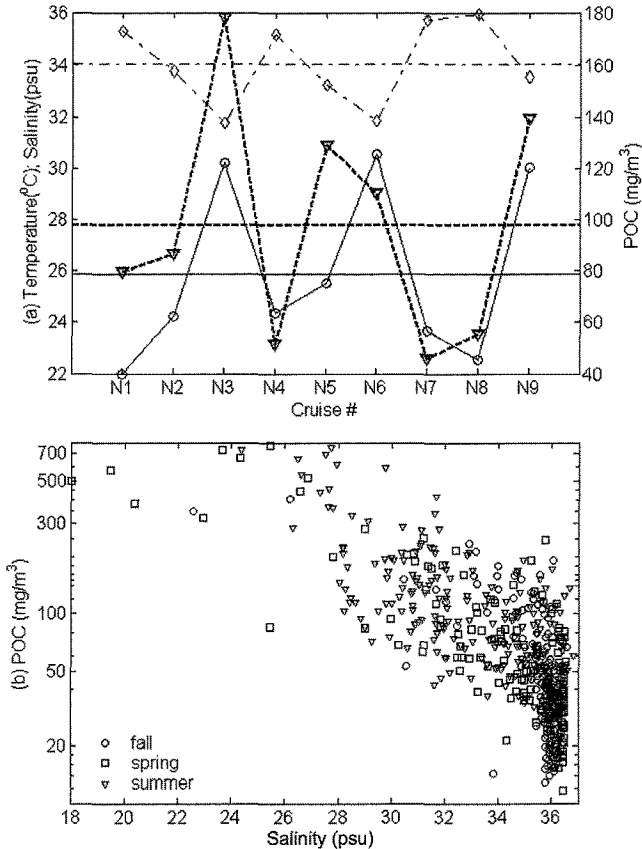


Fig. 5. (a) Surface temperature (circle), salinity (diamond), and POC (triangle) averaged over areas with each cruise. Each line is the mean value of temperature, salinity, and POC. (b) Surface POC concentration as a function of salinity (fall is circle, spring is square, and summer is triangle). POC concentration is inversely correlated with surface salinity.

다($\sim 2.5 \times 10^5$; Fig. 6) 월등히 증가된 것과 일치된다. 이렇게 증가된 담수의 유입은 증가된 POC농도 및 확장된 분포에 영향을 주는 것으로 사료된다.

Fig. 6의 주요 강들의 방류량 그래프에서 보여주듯이, 1997년부터 2000년까지 방류량의 변화는 계절적으로 값의 차이는 보이지 않지만 ENSO 현상의 경년 변화와 유사한 경향을 보여준다. 이는 방류량의 변화가 직/간접적으로 강우량의 영향을 받은 것으로 판단된다(Enfield *et al.*, 2001; Schmidt *et al.*, 2001). El Niño가 일어났던 1997과 1998년 동안에 방류량은 평균보다 증가되었고, La Niña 시기인 1999과 2000년 동안에 유출량은 상대적으로 감소되어 나타났다(Fig. 6). 서론 부분에서 언급하였듯이 연구지역의 대륙에서 유입된 담수의 변화는 El Niño와 La Niña 시기의 뚜렷한 강우량 변화와 관계를 보고하였다(Ropelewski and Halpert, 1986; Smith *et al.*, 1998; Enfield *et al.*, 2001; Schmidt *et al.*, 2001; Son, 2006). El Niño시기에 연구지역은 평균 또는 La Niña 시기보다 상층 대기의 습한 조건으로 인하여 상대적으로 강우량이 증가된 것으로 조사되었다. 반면 La Niña 시기는 평균 또는 El Niño시기보다 건조한 대기 조건으로 인하여 상대적으로 강우량이 감소된 것으로 보고되었다(Enfield *et al.*, 2001; Schmidt *et al.*, 2001).

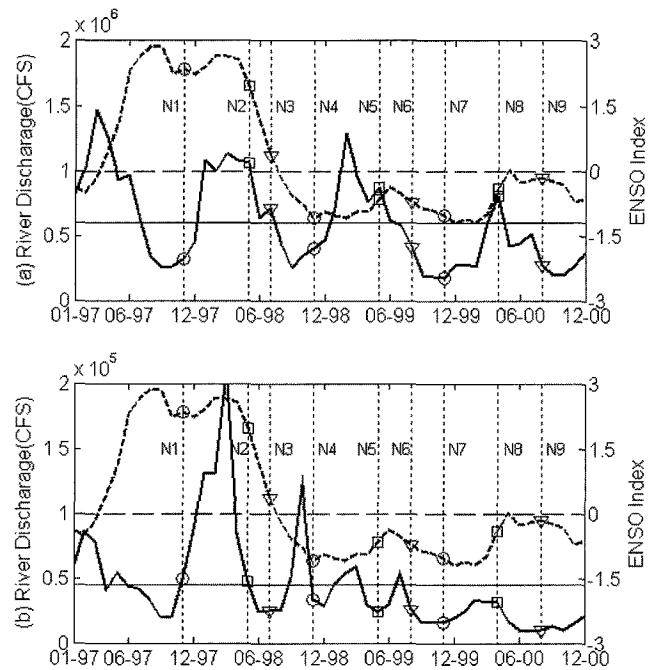


Fig. 6. Monthly discharge for major rivers in the northeastern Gulf of Mexico (fall is circle, spring is square, summer is triangle, solid line is mean value, and dashed line is ENSO index) for (a) the Mississippi area; (b) the Florida area (note the much smaller range than in (a)). Monthly river discharges in major rivers were greater during 1997 and 1998 than during 1999 and 2000.

Son(2006)은 또한 해양의 위성 강우량 자료를 분석한 결과에서 El Niño가 일어났던 시기에 상대적으로 높은 강우량을 나타내는 것으로 보고 하였다. 이는 일차적으로 장기적인 강의 유출량의 변화는 강우량의 변화에 영향을 받았으며, 직/간접적으로 POC의 농도 및 분포에 영향을 준 것으로 판단된다.

장기적인 변화와는 달리 계절적으로 최대 유출량을 보이는 봄의 경우, 미시시피 지역에서는 1997년부터 1999년까지 평균 이상의 높은 값을 보였고, 플로리다 지역에서는 1998년에 상대적으로 증가되었다(Fig. 6). 하지만 공간적 분포에서 저염수 및 고농도의 POC 분포는 주요 강 입구에서 제한되어 증가되어 나타난다(Figs. 2 & 3). Gilbes *et al.*(1996)은 위성 클로로필 자료를 이용하여 이런 일시적인 확장된 분포는 봄철에 일어나고 보통 1-6주 정도 이 지역에서 지속 된다고 보고했지만, 본 연구에서는 봄철보다 확장된 분포는 매년 여름철에 강하게 발생 것으로 조사되었다(Figs. 2 & 3).

이런 현상은 수층의 성층화(stratification)와 표층에서 증가된 부력(buoyancy)의 영향에 의한 것으로 조사되었다. Fig. 7의 왼쪽 부분은 수온의 수직 단면도이고, 오른쪽은 염분도의 수직 단면도를 보여준다. Figs. 7a와 7b는 Fig. 1에서 line 4(L4)의 단면도이고, Figs. 7c와 7d는 수심1000 m를 따르는 관측 정점들의 수직 단면도로 1997년 가을(N1)의 관측 결과이다. 혼합층의 깊이는 50 m 이상을 나타내고 고온 고염의 수괴가 대륙붕 지역을 가로질러 발달되어 있음을 보여준다. 이는 연안에서 발달된 혼합 수괴에 의해서 구별되며, 서로 다른 수괴의 혼합과 깊어진 혼합층에서 부유 입자들은 수평적 확장보다는 수직적인 혼합이 증가되는 것으로 보

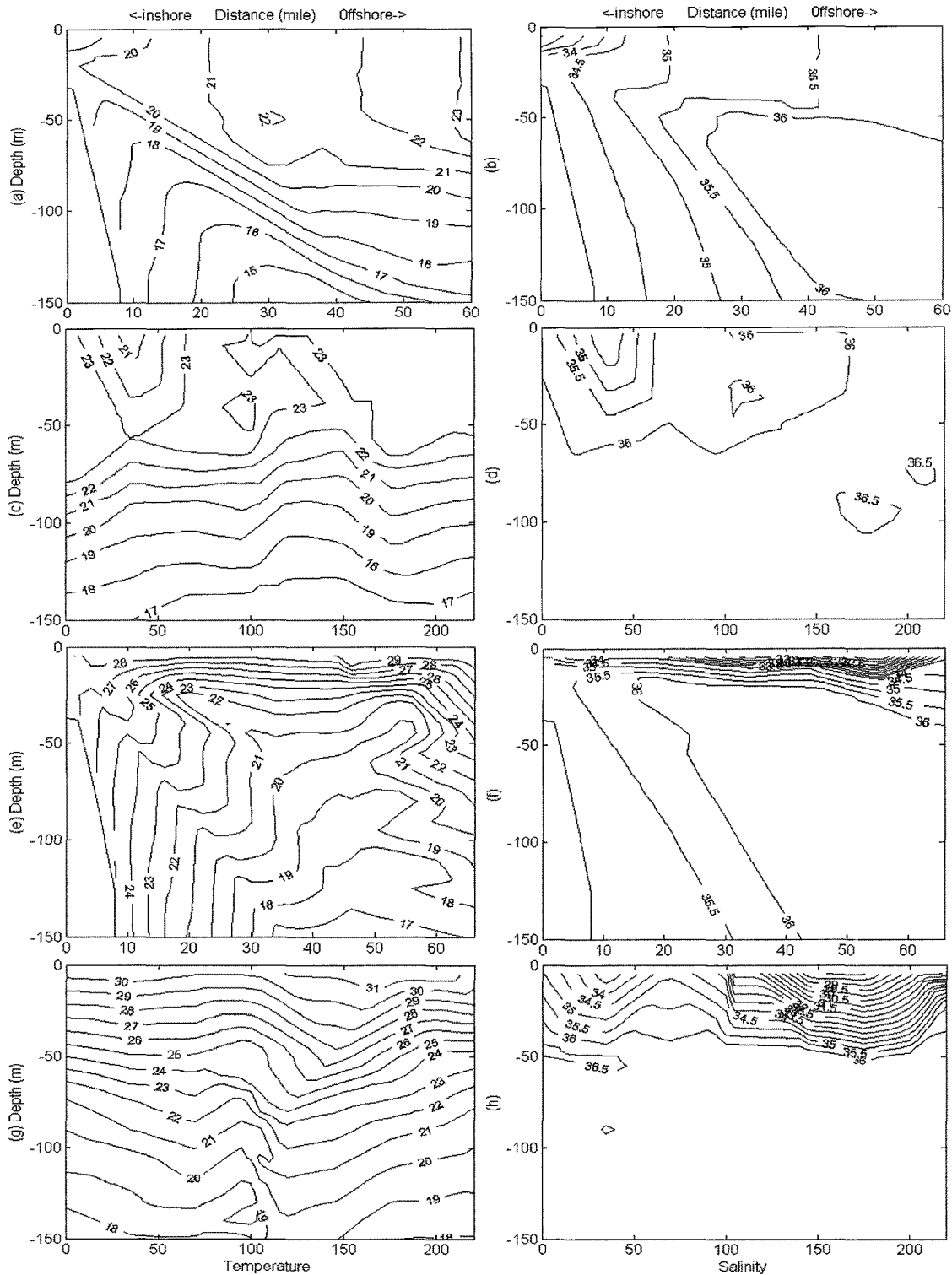


Fig. 7. Vertical profile of potential temperature (left) and salinity (right) from (a) to (d) is 1997 fall cruise (N1) and from (e) to (h) is 1998 summer cruise (N3). (a), (b), (e), and (f) is vertical structure of line 4 and (c), (d), (g), and (h) is along 1,000 m contour in both cruises (see Fig. 1).

여준다. 또한 표층수온과 해면고도이상 자료를 이용하여 합성된 자료에서(Fig. 4) 보여지듯이, 상대적으로 높은 온도를 가지는 와류 및 수괴가 미시시피강 남부해역 및 대륙붕 지역까지 발달되어 있는 것을 보여준다. 이런 수직/수평적 구조는 봄철 관측에서도 비

슷한 현상을 보여준다(Son, 2006). 봄철은 가을보다 절대적인 강의 유출량이 증가되면서 주요 강들 주변에서 표층을 따라 증가된 POC 농도 및 분포를 나타냈지만, 이는 내 대륙붕 지역에 제한되거나 미시시피강의 남부에서 다소 확장된 분포만을 보여준다(Fig. 2).

1998년 여름(N3) 관측된 수온 및 염분 수직단면도(Figs. 7e-7h)에서, 수층의 성층화가 증가되면서 혼합층의 깊이는 낮아지고 표층에서는 저염 고온의 수괴가 위치하고 있음을 보여준다. 이는 미시시피강 및 주변 강으로부터 유출된 담수에 의한 영향으로 넓은 범위에 저염수가 확장되어 그 영향권에 위치하고 있음을 지시한다. 특히 여름철 복사량의 증가로 표층수온은 주위 고염의 수괴보다 빠르게 증가되고(Figs. 7e-7h), 그 결과 밀도가 감소하여 안정적으로 표층에 잔류하게 된다. 이런 수괴는 수직적 혼합보다는 수평적 확장이 우세하게 나타나는 것으로 보고 되었다(Walker *et al.*, 1994). 저염수는 수층에서 강한 성층화로 인하여 혼합이 제한되어 지면서 멕시코 만에서 대륙사면까지 확장되고, 때로는 멕시코 만을 빠져나가 대서양으로 이동하는 사례도 보고 되었다(Walker *et al.*, 1994).

연안 및 외해 해류 순환 시스템

서론 부분에서 언급했듯이, 북동 멕시코 만의 주요 강에서 연안으로 유입된 담수는 취송류에 의한 영향을 받지만, 외해로의 순환은 중규모 해류 시스템에 의해 조절되는 것으로 보고 되었다. 연구지역에서 관측 기간 동안 바람의 방향은 다양한 변화를 보여주는데, 가을 평균 풍속은 ~7 m/s로 이는 봄(~4.5 m/s)과 여름(~3 m/s) 관측에서보다 전반적으로 증가된 양상을 보였다(Fig. 8).

1997와 1999년 가을 관측(N1 & N7) 동안 증가된 동풍은 (Fig. 8) 일반적으로 미시시피강 하구에서 동쪽 채널을 통한 담수의 유출을 제한하지만, 남-남서쪽 채널로의 방류량은 증가되는 것으로 보고 되었다(Walker, 1996, Fig. 2). 1998년 가을 관측(N4)에서는 남동풍의 영향으로(Fig. 8) 남쪽 채널의 유출이 상대적으로 제한되고 반면에 동쪽 채널에서는 높은 농도의 POC 분포를 보였다(Fig. 2).

1998년 봄 관측(N2)에서 남풍(평균 ~5 m/s)이 증가 되면서 높은 농도의 POC를 포함하는 저염수가 동쪽 및 북동쪽 방향으로 확장이 우세하며(Figs. 2 & 8), 1999년 봄 관측(N5)에서는 동풍이 상대적으로 약해지면서 높은 농도의 POC를 포함하는 저염수는 남쪽 및 동쪽 방향으로 확산되는 것을 보였다(Walker, 1996; Figs. 2, 3 & 8). 2000년 봄의 관측(N8)에서 강의 유출량은 평균값보다 증가되었지만(Fig. 6), 앞에서 보여준 높은 농도의 POC 분포는 나타나지 않았다. 1997와 1998년 관측은 계절적으로 오월에 관측이 이루어졌지만, 2000년 봄의(N8) 관측은 이른 봄인 사월에 관측되어 혼합층이 상대적으로 깊어져 수직 혼합에 의한 영향이 앞의 두 번의 봄의 관측보다 큰 것으로 판단된다(Son, 2006).

Walker(1996)은 미시시피강 하구에서 상대적으로 동풍의 영향이 약해질 때 높은 농도의 부유물질이 남쪽으로 확산되어 외 대륙붕까지 퍼져 나간다는 것을 보고 했지만, 여름 관측(N3, N6, N9) 동안 외해에서 넓게 분포하는 저염수의 분포는 상대적으로 줄어든

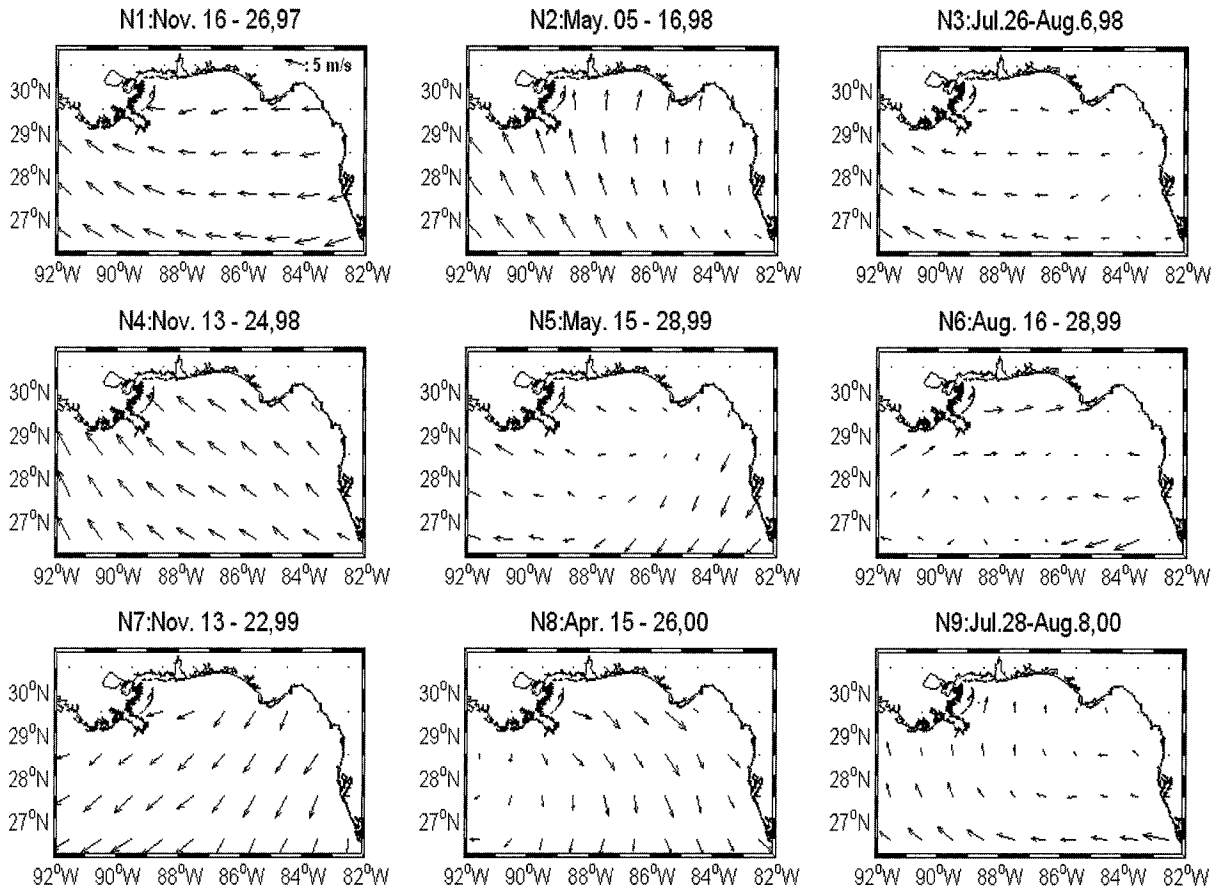


Fig. 8. Sea surface wind (SSW) from scatterometer data averaged over each NEGOM cruise (m/s). Wind patterns in the Gulf of Mexico have a significant seasonal pattern. During the fall and early spring, relatively strong winds interrupted the dispersion of particulate materials due to strong vertical mixing. During the late spring and summer seasons, winds were relatively weak and insignificant in the Gulf coast.

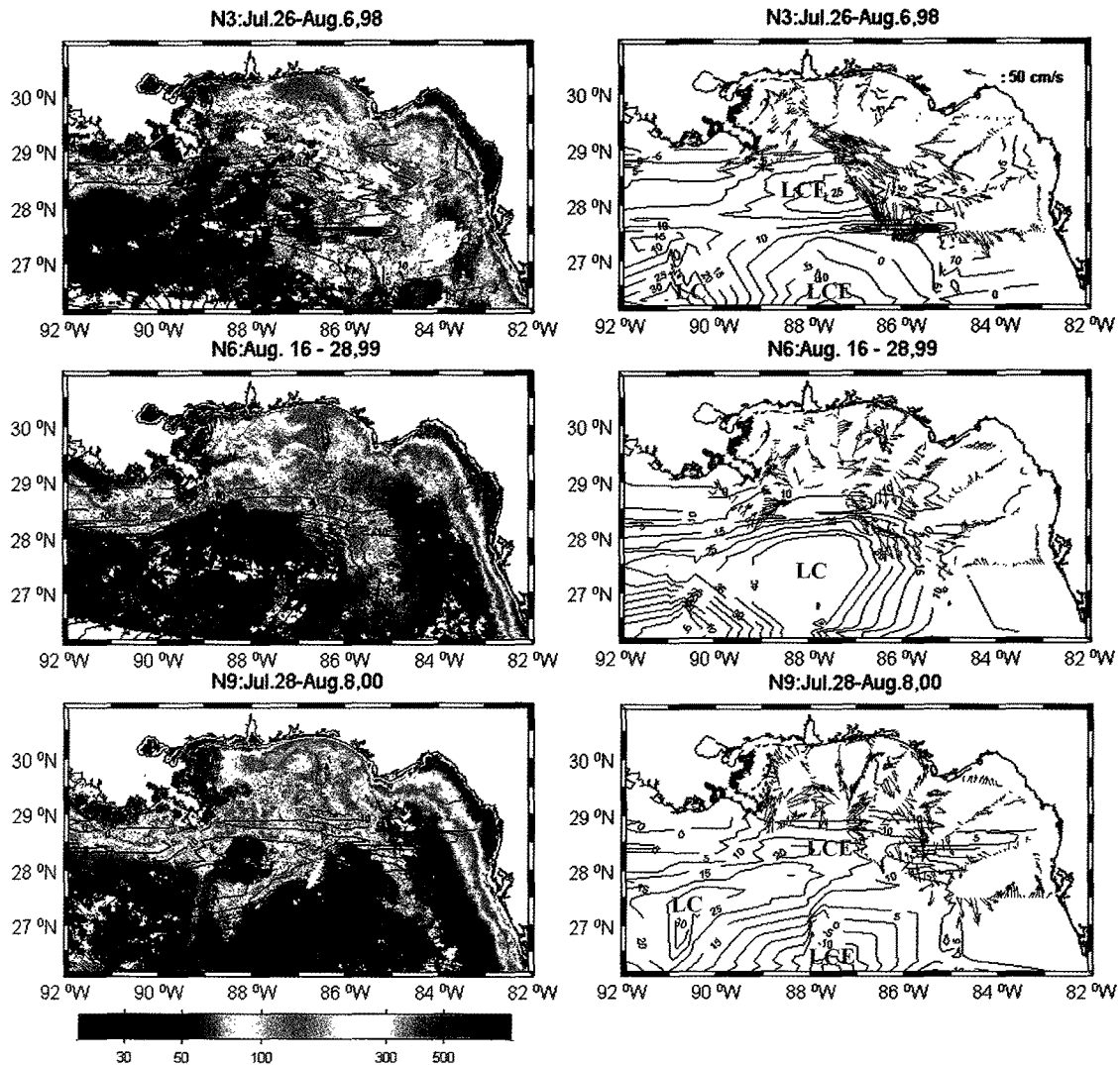


Fig. 9. Contours of sea surface height anomaly (SSHA) from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter (interval: 5 cm) superimposed on estimated POC concentrations (mg/m^3) averaged over each NEGOM cruise and on sub-surface ADCP data (~ 12 m) during the summer cruises. The movement of particle-laden water from shelf to slope was affected by the Loop Current (LC) and Eddies (LCEs) despite the forcing of local winds.

강의 유출량과 바람에 의한 영향으로 설명되기 보다는 다른 영향에 의한 것으로 사료된다(Figs. 3, 6, & 8).

Fig. 9는 외해에서의 자세한 해류 시스템을 이해하기 위해서 각각 여름 관측 기간 동안 평균된 해면고도이상 자료는 위성에서 추정된 POC 자료(왼쪽 그림) 및 아표층(~ 12 m) 해류 자료와(오른쪽 그림) 합성하였다. 이런 결과는 ~ 60 개 정점에서 관측된 현장 관측 값을 이용하여 그려진 Fig. 2의 POC 분포와 비교하여서, 현장 관측 결과는(Fig. 2) 연안 및 외해에서 주요한 변화를 관측하는데 제한되거나 또는 정밀한 관측이 힘들지만 위성자료에 의한 결과에서는 더욱 세밀하고 확장된 부분에 대해서 상관관계를 보여주는 것으로 사료된다(Son *et al.*, 2009). 관측 기간 동안 Loop Current와 Loop Current Eddies는 남쪽 Mississippi Delta까지 발달되고 서에서 동으로 가로지는 움직임이 나타났다. 낮은 농도의 POC는 난수성 외류(Biggs, 1992; Biggs and Muller-Karger, 1994)에서 보이고 높은 농도의 POC는 Loop Current의 가장자리와 와

류 사이에서 관측되었다(Figs. 4 & 9).

미시시피강의 남동쪽에서 표층해류는 동-남동 방향으로 강하게 발달되고, 서쪽 플로리다에서는 남쪽 방향의 흐름이 보였다(Fig. 9b). Ohlmann and Niiler(2005)는 이런 평균 흐름의 양과 방향은 변화지만 전반적으로 서쪽에서 동쪽으로, 또는 대륙붕을 가로질러 확장되어 진다고 보고하였다. N3와 N9 관측 기간 동안(Figs. 4 & 9), 동-남동쪽 방향의 흐름을 가지는 시계방향 와류는 미시시피강의 남동쪽까지 발달되고 이 지역에서 표층해류는 $50 \text{ cm}/\text{s}$ 이상을 보였다. N6 관측기간 동안 서쪽 플로리다에서 Loop Current는 중요한 요인으로 작용하여, 강한 남쪽 성분의 해류는 높은 농도의 POC를 남쪽 방향으로 이동을 도와주고 있음을 보여준다(Molinari and Mayer, 1982; Walker *et al.*, 1994, Fig. 9). Hu *et al.*(2003)는 1998과 1999년 여름 동안 난수성 외류가 미시시피강 부근까지 발달되어 지면서 저염수, 고농도의 클로로필 및 CDOM(colored dissolved organic matter)를 함유하는 수피의 확장을 도와주는 것

으로 보고 하였다. 이런 수괴는 고농도의 POC 함량을 보였다(Fig. 9; N3). 또한 N9 관측에서 상대적으로 높은 농도의 POC분포는 반시계 및 시계 방향의 외류 경계 면을 따라 남서쪽 방향으로 확산되는 것이 관측되었다. 이는 시계 방향의 흐름이 반시계 방향의 흐름과 병합되면서 연안에 유입된 고농도의 POC를 대륙붕에서 대륙사면으로 이동시켜주는 것으로 생각된다.

결론적으로 이 지역에서 표층 해류의 흐름은 Loop Current와 Loop Current Eddies와 같은 중규모 해류의 영향을 받고 있으며, 이런 해류의 흐름은 대륙붕에서 대륙사면으로 수괴의 이동을 도와 육지로부터 유입된 담수를 대륙사면으로 이동 시키는 것으로 판단되며(Brooks and Legeckis, 1982; Gilbes *et al.*, 1996; Sahl *et al.*, 1997), 이는 위성자료를 이용하여 합성된 자료에서 그 결과를 잘 나타내어 주는 것으로 사료된다(Figs 4 & 9).

결론

연구지역인 북동 멕시코 만에서 높은 농도의 POC가 넓은 범위에 분포하는 것은 여름에 관측되었고, 제한되어 분포하는 것은 봄과 가을에 관측되었다. 위와 같은 POC의 시/공간적 농도 및 분포 변화는 하나 또는 이상의 주요 요인들에 의해서 조절 되는 것으로 조사되었다. 특히 주요 강의 방류량, 수층의 성층화, 바람, 그리고 중규모 해류 등이 주요한 요인으로 사료되면, 본 연구에서 각각의 영향에 대해서 조사하였다.

POC의 계절적 변화에 영향을 주는 방류량은 봄에 최대를 보이며, 여름 및 가을로 가면서 감소한다. 방류량의 절대적인 양은 미시시피 지역이 플로리다 지역보다 높게 나타난다. 전체적으로 POC 농도 및 방류량의 변화는 1997과 1998년(El Niño) 1999과 2000년 보다(La Niña) 증가된 양상을 보이며, 이는 POC 변화에 영향을 주는 강우량 및 방류량의 변화가 ENSO 현상과 같은 기후변화에 영향을 받은 것으로 판단된다.

높은 농도의 POC를 포함하는 저염수가 연안으로 유입되면서 공간적인 분포는 다른 요인에 의해서 조절되는 것으로 조사되었다. 봄과 가을 동안 바람에 의한 해류의 흐름은 강해지면서 혼합층의 수심은 깊어지고, 수직적인 혼합이 증가된다. 이런 조건은 입자들의 수평적인 확장보다는 수직적인 혼합을 증가 시키는 것으로 판단된다. 이는 높은 농도의 POC가 외해로 확장보다는 내 대륙붕 내에서만 발견되는 것과 일치한다. 다만 봄철에 증가된 담수의 유입은 미시시피강 및 주요 강 주변에서 부분적으로 증가된 경향을 보였다.

계절적 변화에서 여름철 분포는 방류량의 절대적 양과 다른 관계를 보인다. 방류량 및 바람에 의한 영향은 줄어들었지만, 높은 농도의 POC는 연안을 비롯하여 외해에서도 확장되어 나타났다. 연안에 유입된 저밀도의 담수는 복사량의 증가로 인하여 밀도가 더욱 낮아지는 현상을 보고하였다. 이로 인하여 표층의 성층화는 더욱 증가되고 혼합층의 깊이는 얕아지며, 따라서 수직적 혼합보다 수평적인 확장이 증가되어 나타나는 것으로 판단된다. 이런 저염수에 포함된 높은 농도의 POC는 표층에 잔류하면서 중규모의 해류인 Loop Current 및 Loop Current Eddies에 의해서 동 또는 남동쪽 방향으로 이동되거나, 외류와 외류 경계 면에서 다른 방향으로 외해로 유출이나 확산되는 것으로 판단된다.

위의 연구 결과에서 보듯이 시/공간적 POC의 변화는 하나 이상의 주요한 요인들에 의해 영향을 받는 것으로 추정된다. (1) 강의 유출량 변화가 주요한 원인으로 특히 기후변화에 따른 강우량의 변화가 POC 농도에 영향을 주며, (2) 비록 봄의 경우 방류량은 증가되었지만 성층화가 약한 봄과 가을철 POC 분포는 바람에 의한 영향으로 제한된 확장을 하고, (3) 그리고 방류량 및 바람에 의한 영향이 줄어든 여름철에는 강한 성층화로 인하여 상대적으로 알려진 혼합층을 따라서 높은 농도의 POC를 포함하는 저염수는 외해로 확장되면서 중규모의 해류 시스템에 의해서 영향을 받는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 Minerals Management Service funded Northeastern Gulf of Mexico Physical Oceanography Program(NEGOM; OCS Study 98-0060)에 의해서 수행되었으면, 국토해양부 연구개발사업인 정지케도 해양 위성 활용연구지원 사업(PM55660)에서 지원되었습니다. 연구에 도움을 주신 많은 연구원 및 승조원 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- Biggs, D.C., 1992. Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the Western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, **97**: 2143-2154.
- Biggs, D.C. and F.E. Muller-Karger, 1994. Ship and satellite observation of chlorophyll stocks in interesting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, **99**(4): 7371-7384.
- Brooks, D.A. and R.V. Legeckis, 1982. A ship and satellite view of hydrographic features in the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, **87**: 4195-4206.
- Elliott, B.A., 1982. Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, **12**: 1292-1309.
- Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nunez and P.J. Trimble, 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophys. Res. Lett.*, **28**: 2077-2080.
- Frolov, S.A., G.G. Sutyryn, G.D. Rowe and L.M. Rothstein, 2004. Loop Current eddy interaction with the western boundary in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**: 2223-2237.
- Gilbes, F., C. Thomas, J.J. Walsh and F.E. Muller-Karger, 1996. An episodic chlorophyll plume on the West Florida Shelf. *Cont. Shelf Res.*, **16**: 1201-1224.
- Hu, C., F.E. Muller-Karger, D.C. Biggs, K.L. Carder, B. Nababan, D. Dadeau and J. Vanderbloemen, 2003. Comparison of ship and satellite bio-optical measurements on the continental margin of the NE Gulf of Mexico. *Int. J. Remote Sens.*, **24**(13): 2597-2612.
- Hu, C., F.E. Muller-Karger, G.A. Vargo, M.B. Neely and E. Johns, 2004. Linkages between coastal runoff and the Florida Keys ecosystem: A study of a dark plume event. *Geophys. Res. Lett.*, **31**: doi:10.1029/2004GL020382.
- JGOFS, 1996. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)

- core measurements. Report #19, Intergovernmental Oceanographic Commission, Bergen, Norway, 170 pp.
- McClain, C.R., G.C. Feldman and S.B. Hooker, 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep-Sea Res. II*, **51**: 5–42.
- Molinari, R.L. and D.A. Mayer, 1982. Current meter observations on the continental slope at two sites in the eastern Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.* **12**: 1480–1492.
- Morey, S.L., P.J. Martin, J.J. O'Brien, A.A. Wallcraft and J. Zavala-Hidalgo, 2003. Export pathways for river discharged fresh water in the northern Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, **108**(C10): 3303 doi:10.1029/20002JC001674.
- Oey, L.-Y., 1995. Eddy and wind-forced shelf circulation. *J. Geophys. Res.*, **100**: 8621–8637.
- Ohlmann, J.C. and P.P. Niiler, 2005. Circulation over the continental shelf in the northern Gulf of Mexico. *Pro. Oceanogr.*, **64**: 45–81.
- Rabalais, N.N., R.E. Turner, D. Justic, Q. Dortch, W.J. Wiseman and B.K. Sen Gupta, 1996. Nutrient Changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent continental shelf. *Estuaries*, **19**: 386–407.
- Ropelewski, C.F. and M.S. Halpert, 1986. North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Mon. Weather Rev.*, **114**: 2352–2362.
- Sahl, L.E., D.A. Wiesenburg and W.J. Merrell, 1997. Interactions of mesoscale features with Texas shelf and slope waters. *Cont. Shelf Res.*, **17**: 117–136.
- Schmidt, N., E.K. Lipp, J.B. Rose and M.E. Luter, 2001. ENSO influences on seasonal rainfall and river discharge in Florida. *J. Clim.*, **14**: 615–628.
- Smith, S.R., P.M. Green, A.P. Leonardi and J.J. O'Brien, 1998. Role of multiple-level tropospheric circulations in forcing ENSO winter precipitation anomalies. *Mon. Weather Rev.*, **126**: 3102–3116.
- Son, Y.B., W.D. Gardner, A.V. Mishonov and M.J. Richardson, 2009. Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): The Gulf of Mexico. *Remote Sens. Environ.*, **113**: 50–61.
- Son, Y.B., (2006). POC algorithms based on spectral remote sensing data and its temporal and spatial variability in the Gulf of Mexico, Ph.D. thesis, 200 pp., Texas A&M Univ., College Station.
- SWFDOG 2002. Satellite images track “black water” event off Florida coast. *EOS*, **83**: 281–285.
- Vukovich, F.M. and G.A. Maul, 1985. Cyclonic Eddies in the Eastern Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**: 105–117.
- Walker, N.D., L.J. Rouse, B. Rouge, G.S. Fargion and D.C. Biggs, 1994. The great flood of summer 1993: Mississippi River discharge studied. *EOS*, **75**: 409.
- Walker, N.D., 1996. Satellite assessment of Mississippi River plume variability: causes and predictability. *Remote Sens. Environ.*, **58**: 21–35.
- Wentz, F.J., 1997. A well-calibrated ocean algorithms for SSM/I. *J. Geophys. Res.*, **102**(C4): 8703–8718.

2010년 12월 28일 원고접수
 2010년 2월 22일 수정본 채택
 담당편집위원: 서영상