

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2021.26.2.096>  
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

# 낙동강 하구에서 담수 유입에 따른 연안 클로로필-a 증가 : 낙동강의 육상-해양 coupling 패턴 분석

김수현<sup>1</sup> · 안순모<sup>2\*</sup><sup>1</sup>부산대학교 해양학과 대학원생, <sup>2</sup>부산대학교 해양학과 교수

## Enhanced Primary Production in Response to Freshwater Inflow in the Nakdong River Estuary: Characteristics of land-Ocean Coupling (LOC)

SUHYUN KIM<sup>1</sup> AND SOONMO AN<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Graduate Student, Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea<sup>2</sup>Professor, Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea

\*Corresponding author: sman@pusan.ac.kr

Editor Gi Beum Kim

Received 3 March 2021; Revised 23 April 2021; Accepted 26 April 2021

### ABSTRACT

담수를 통해 유입되는 육상 기원 물질은 연안 일차 생산을 제어하는 주요 요소이므로 육상-해양 coupling을 파악하는 것은 연안 생태 변화를 이해하는데 중요하다. 본 논문에서는 육상-해양 coupling 양상을 시간에 따라 세 단계(Base flow, Plume event, Residual flow)로 구분하여 개념화하였고, 낙동강 하구에서 각 양상의 출현을 확인하기 위해 다양한 플랫폼에서 측정된 자료를 사용하여 분석하였다. 사용된 자료는 원격 탐사 측정 자료(Geostationary Ocean Color Image; GOCI), 현장 실측 자료(Marine Environment Information System; MEIS), 연속 측정 자료(유량 자료, 기상 자료)로 구분될 수 있다. 주성분분석을 통해 MEIS 자료를 육상-해양 coupling의 세 단계로 구분하였고, 이 구분을 2013-2018년 동안의 여타 자료에 적용하여 단기간 육상-해양 coupling 양상을 살펴보았다. 낙동강 하구에서는 예상과는 달리 Plume event 때 Chlorophyll-a (Chl-a) 최대값이 나타났다. 이는 담수 증가에도 탁도 증가는 크지 않았고, 플러싱 효과도 약해 식물플랑크톤이 증가 할 수 있는 여건이 조성되었기 때문으로 분석되었다. 육상-해양 coupling을 기반으로 여러 하구들과 비교해보았을 때 육상-해양 coupling은 담수 유입에 영향을 받는 하구에서 흔한 현상이나 하구에서 형성되는 플룸 크기에 따라 육상-해양 coupling이 다르게 나타났다. 낙동강 하구처럼 작은 플룸(~10 km 규모)이 형성되는 하구에서는 식물플랑크톤의 즉각적인 반응으로 인해 Plume event 단계에 Chl-a 최댓값이 나타나는 반면, ~100 km 이상의 큰 플룸이 형성되는 하구(담수 배출이 크고, 플러싱이 강한 곳)에서는 본 연구에서 개념화한 육상-해양 coupling 양상(Residual flow 때 Chl-a 최대)을 따르는 것으로 나타났다.

Since terrestrial input plays a major role in coastal primary production, an understanding of land-ocean coupling (LOC) is key to understand coastal ecological changes. In this study, the LOC has been classified into three stages (i.e., the baseflow, plume event and residual flow). In order to characterize its pattern in Nakdong River estuary, multi-platform data were obtained from remote sensing (geostationary ocean color image (GOCI)), in-situ measurement (marine environment information system (MEIS)), on-site measurement (discharge data and meteorological data). The MEIS data were grouped into three stages of LOC using principal component analysis (PCA), and the LOC (2013 ~ 2018) was examined at each stage using multi-platform data. In the Nakdong River estuary, the maximum value of chlorophyll-a (chl-a) was unexpectedly appeared during the plume event. It is assumed that there was no significant increase in turbidity, expected during the typical plume event, together with the weak flushing effect, caused the enhanced phytoplankton growth. Compared with other estuaries, LOC is common in estuaries affected by freshwater inflow, but LOC has different pattern depending on the size of the plume. While estuaries that form small plumes of about 10 km (low freshwater discharge and weak flushing effect) observed high chl-a in the plume event because the phytoplankton can respond to the increased nutrient more rapidly, estuaries that form large plumes of more than 100 km est (high freshwater discharge and strong flushing effect) follow the typical LOC pattern conceptualized in this study (high chl-a in the residual flow).

**Keywords:** Land-ocean coupling, Freshwater, River plume, Chlorophyll-a, Nakdong River

## 1. 서론

하구의 일차 생산은 일반적으로 봄, 가을에 높고 여름, 겨울에 낮은 계절적 패턴을 가진다(Fisher *et al.*, 1988; Park *et al.*, 2016). 일반적으로 하구에서 담수 유입이 풍부한 여름철은 일차생산이 낮은 계절에 속하는데 영양염의 유입이라는 생산성에 유리한 환경이 조성됨에도 불구하고, 탁도가 같이 증가하면 일차생산이 저해될 수 있기 때문이다. 그러나 강을 통해 육상 기원 영양염들이 연안으로 유입되면 연안 환경의 영양염 제한이 해소될 수 있어 여름철 식물플랑크톤 생산성 증가할 가능성은 상존하고 있다(Dagg and Breed, 2003; Green *et al.*, 2006). 즉 강우로 인해 연안으로의 담수 유입량이 증가함에 따라 육상 기원 물질 유입량이 증가하고, 이는 식물플랑크톤 성장을 증가시킨다(Lohrenz *et al.*, 1997; Cravo *et al.*, 2006; Schlacher *et al.*, 2008). 본 논문에서는 담수 유입이 연안 환경의 일차 생산 증가로 이어지는 것을 육상-해양 coupling이라고 정의했다.

담수는 플룸의 형태로 유입되는데 해수와의 밀도 차이로 인해 주로 연안 표층으로 유입된다. 플룸 크기는 10 km 이하에서 수백 km 이상까지 다양하며(Grimes and Kingsford, 1996) 담수 유출량, 조석의 세기, 바람에 따라 다양한 특성을 보이고 있다(Morris *et al.*, 1995). 플룸의 가장 큰 특징은 성층화, 탁도 증가, 육상 기원물질 유입이며 이는 식물플랑크톤 생산에 영향을 미치는 요소(빛, 수층 안정성, 영양염)를 변화시킨다(Mallin *et al.*, 1993; Smith and Russell, 1995). 그러므로 특정 지역의 플룸은 그 지역의 연안 일차 생산에 많은 영향을 미친다고 할 수 있으며 더 나아가 먹이 그물 유지에 중요한 역할을 하여 궁극적으로 상위 영양 단계(동물플랑크톤, 어류) 생산에도 영향을 미친다(Grimes and Finucane, 1991; Cravo *et al.*, 2006; Schlacher *et al.*, 2008; Carreon-Martinez *et al.*, 2014). 육상-해양 coupling은 플룸을 매개체로 수산업과 연안 환경 오염 등 인간 생활과 밀접한 연안 환경 변화를 나타내기 때문에 개념화와 그 양상을 살피는 것이 중요하다.

플룸은 육상 기원 물질(영양염, 퇴적물)의 주요 공급원으로서 그 형성과 소멸, 생태적 의의에 대한 연구가 주로 이루어져왔다(Fisher *et al.*, 1988; Dortch and Whitlege, 1992; Lohrenz *et al.*, 1999; Cravo *et al.*, 2006). 이전 연구들은 플룸을 통해 육상 기원 영양염이 유입되고 이로 인해 중간 염분(20~30 psu)이 나타나는 플룸 전선에서 일차 생산이 증가하는 패턴을 관측했다. 또한 플룸이 배출 후 외해로 이동하면서 높은 탁도로 인한 수층 빛 제한에서 식물플랑크톤 성장에 따른 영양염 고갈이나 탁남에 따라 일차 생산의 증가, 감소가 공간적인 변이를 보임을 확인하였다(Dagg and Breed, 2003; Liu and Dagg, 2003; Green *et al.*, 2006). 이처럼 이전 연구에서는 플룸이 형성되는 공간적 변이에 따른 일차 생산 변화를 주로 살펴보았다. 그러나 본 논문에서는 이전 논문들과 다르게 육상-해양 coupling을 비교적 일정한 지역에서 시간적인 개념으로 살펴보고자 하였다.

Schalcher *et al.*(2008)은 호주 Mooloolah 하구에서 담수 유입에 의한 해양 일차 생산 증가를 세 단계(Baseflow, Plume event, Residual flow)로 설명하였다. 본 논문에서는 이 개념을 좀 더 일반적으로 확장하여 육상 영향(강우)이 해양의 일차 생

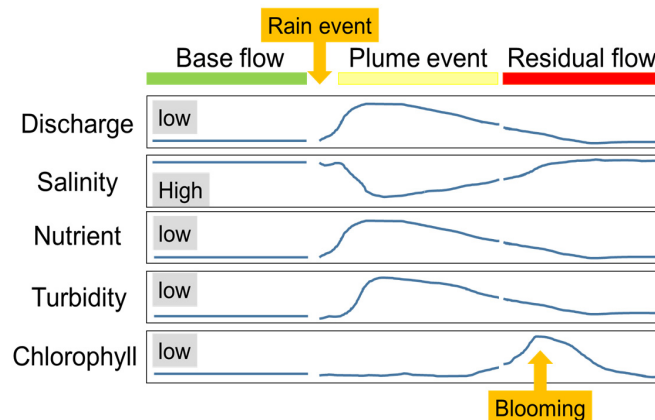


Fig. 1. Schematic diagram of land-ocean coupling. In the case of turbidity, it indicates the expected observed value through the GOCI.

산(Chlorophyll-a; Chl-a)으로 이어지는 과정을 개념화하였다(Fig. 1). Baseflow는 담수 배출이 적어 높은 염분, 낮은 Chl-a, 낮은 영양염, 낮은 탁도가 나타나는 단계이다. 주로 강우량이 적은 겨울철이 해당되며 플룸이 형성되지 않는다. 전반적으로 식물플랑크톤이 성장하기 어려운 환경이므로 낮은 Chl-a이 나타난다. Plume event는 플룸이 형성되고 강한 담수 유입으로 인해 식물플랑크톤이 성장하지 못하는 단계이다. 많은 강우가 일어난 후 담수 배출이 증가하여 연안 표층 염분은 낮아지고 탁도와 영양염은 증가한다(Grimes and Kingsford, 1996). 높은 탁도로 인한 수층 빛 저해와 많은 담수 유입 양으로 인한 강한 플러싱 효과로 인해 식물플랑크톤이 성장하지 못한 채 그대로 외해로 휩쓸려 나가기 때문에 낮은 Chl-a이 나타난다. Residual flow는 플룸 형성 후 증가된 일차 생산이 나타나는 단계이다. 부유물질이 침강하여 수층 빛이 개선되고 식물플랑크톤 성장에 따른 생물학적 섭취로 인해 영양염은 감소하고 Chl-a은 증가한다. 전체적으로 육상-해양 coupling이 잘 드러나는 과정은 강우가 일어난 후 Plume event를 거쳐 Residual flow 단계에 높은 일차 생산이 나타나는 것이다.

본 연구의 목적은 낙동강 하구에서 앞에서 제시한 세 단계가 어떻게 나타나는지 다양한 자료를 이용하여 살펴보는 것이다. 담수 유입과 일차 생산 증가의 연관성에 대해 알아보기 위한 자료는 낙동강 하구에서 측정/추정된 멀티플랫폼 자료(원격 탐사 측정 자료, 현장 실측 자료로 Chl-a 관측)를 사용하였다. 이를 통해 낙동강 하구의 육상-해양 coupling을 판단할 수 있을 것이라 기대하였다. 또한 각 자료는 각각의 장, 단점과 한계를 가지고 있으므로 이들을 종합함으로써 육상-해양 coupling을 좀 더 면밀하게 살필 수 있을 것이라 기대하였다.

## 2. 재료 및 방법

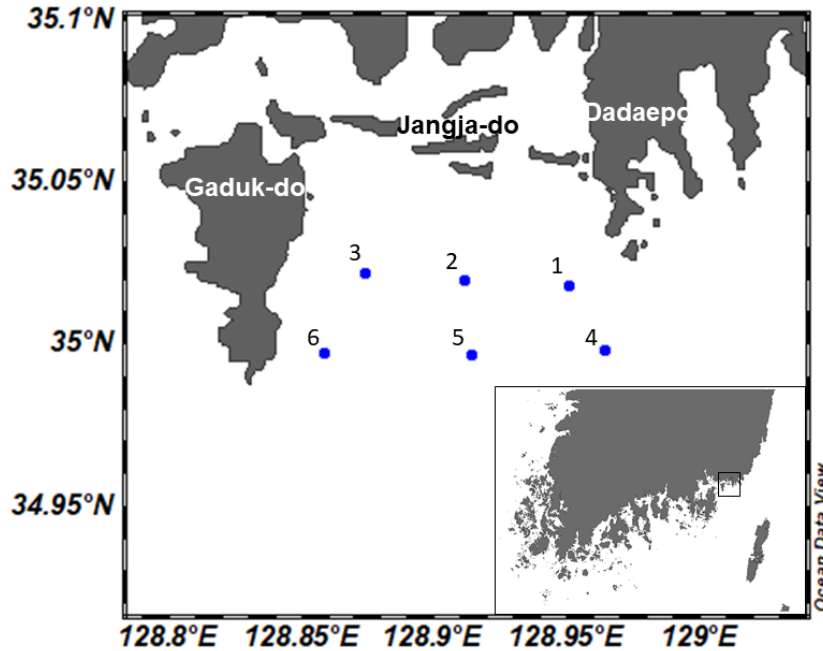
### 2.1 낙동강 하구

낙동강은 한국에서 유일하게 조석과 파랑 작용으로 삼각주, 사주가 잘 발달된 하구이다(Park *et al.*, 2016; Kim an Youn, 2019). 그러나 높은 개발 압력으로 인해 많은 환경 변화를 겪었으며 특히, 1987년 7월 하굿둑이 건설된 이후 낙동강 수계의 혼합과 순환 체계가 많이 변환되었다(Jang and Kim, 2006; Song *et al.*, 2014). 낙동강 하굿둑은 수문 개폐를 통해 담수 방출량을 조절하며 간헐적인 배출 시 저염의 담수 플룸이 형성된다. 담수 플룸은 3개 저염축(가덕도, 장자도, 다대포)을 가지며 표층에 직접적으로 영향을 미친다(Fig. 2; Jang and Kim, 2006; Song *et al.*, 2014).

### 2.2 멀티플랫폼 자료

본 논문에서는 육상-해양 coupling의 주요 인자들(담수 배출, 염분, 영양염, 탁도, Chl-a)의 자세한 변동을 알기 위해선 고해상도의 단기간 자료가 필요하다. 이를 단일 플랫폼만으로 관측하기엔 어려움이 있다고 판단하여 각기 다른 측정 플랫폼을 가진 자료들을 사용하였다. 크게 원격 탐사 측정 자료(Geostationary Ocean Color Image; GOCI), 현장 실측 자료(Marine Environment Information System; MEIS), 현장 관측 자료(유량 자료와 기상 자료) 세 가지 플랫폼의 네 가지 자료로 구분하였다(Table 1).

원격 탐사 측정 자료(Remote sensing data) : GOCI 자료는 해양위성센터(Korea Ocean Satellite Center; KOSC)에서 제공하는 2013 ~ 2018년의 Chl-a, Total Suspended Sediment (TSS)를 사용하였다. GOCI는 한반도 주변 지역을 한 시간 간격으로 하루 8번 관측하므로 높은 시공간 해상도의 자료를 얻을 수 있다(Yang *et al.*, 2010). 그러나 측정 파장대로 인해(Moon *et al.*, 2010) 구름에 가려진 지역은 자료 손실이 발생한다. 그러므로 자료 병합을 해야 관측 공간 범위에 대한 전체적인 자료를 얻을 수 있기 때문에 GOCI data-processing system (GDPS) 프로그램을 이용하여 자료들의 평균값으로 일일 병합 하였다. 자료 처리 시, 8시간 측정 자료 중 오차가 많은 오후 4시 자료는 제외하였으며 평균값 산출 시 구름 자료는 포함되지 않는다.



**Fig. 2.** Study station of the Nakdong river estuary by MEIS, used as a standard for multi-platform data (station 1: 35.02111N°, 128.9647E°; station 2: 35.0197N°, 128.9114E°; station 3: 35.0219N°, 128.8738E°; station 4: 34.9983N°, 128.965E°; station 5: 34.9972N°, 128.9142E°; station 6: 34.9975N°, 128.8581E°).

**Table 1.** Summary of the characteristics of multi-platform data

Platform	On-site measurement		In-situ measurement (MEIS)	Remote sensing data (GOCI)
	Meteorological data	Discharge data		
Organization	K-water	KMA	NIFS	KOSC
Measurement	Daily solar irradiance	Daily total discharge	Salinity, Chl-a, SS, Nutrients (TN, TP, etc.)	Chl-a, TSS
Temporal resolution	1day	1day	Once in two months	8 times a day
Period of use	February 2013 ~ December 2018			
Observation area	Busan 159		Nakdong River estuary	

K-water : Korea Water Resources Coporation; KMA : Korea Meteorological Administration; NIFS : National Institute of Fisheries Science; KOSC : Korea Ocean Satellite Center; TN : Total Nitrogen; TP : Total Phosphorous; TSS : Total Suspended Sediment

현장 실측 자료(In-situ measurement) : 어장환경모니터링(MEIS) 자료는 국립수산물과학원(National Institute of Fisheries Science; NIFS)에서 제공하는 2013 ~ 2018년까지 두 달 간격으로 관측된 낙동강 하구 정점의 자료들(수온, 염분, Chl-a 등)을 사용하였다(<http://www.nifs.go.kr>). 낙동강 하구에서의 관측 기간 동안 6개 정점에 대한 MEIS 패턴을 보면 정점들 간 차이는 있으나 전체적으로 담수 유입을 시사하는 염분 감소에 따라 수온, Suspended Sediment (SS), Total Nitrogen (TN), Total Phosphorous (TP), Chl-a이 증가한다. 또한 낙동강의 풍수기인 8월에(Kim and Youn, 2019) 매년 가장 큰 염분 감소와 나머지 항목들의 증가가 나타난다(Fig. 3). 이를 통해 MEIS 자료는 낙동강 환경 변화를 잘 나타내는 것으로 보인다. 현장 실측 자료인 MEIS는 원격탐사자료인 GOCI와 반대되는 장단점을 가진다. 현장에서 샘플링하고 실험한다는 점에서 자료를 신뢰할 수 있다는 가장 큰 장점이 있지만 측정 기간, 측정 장소에 대한 한계가 존재한다.

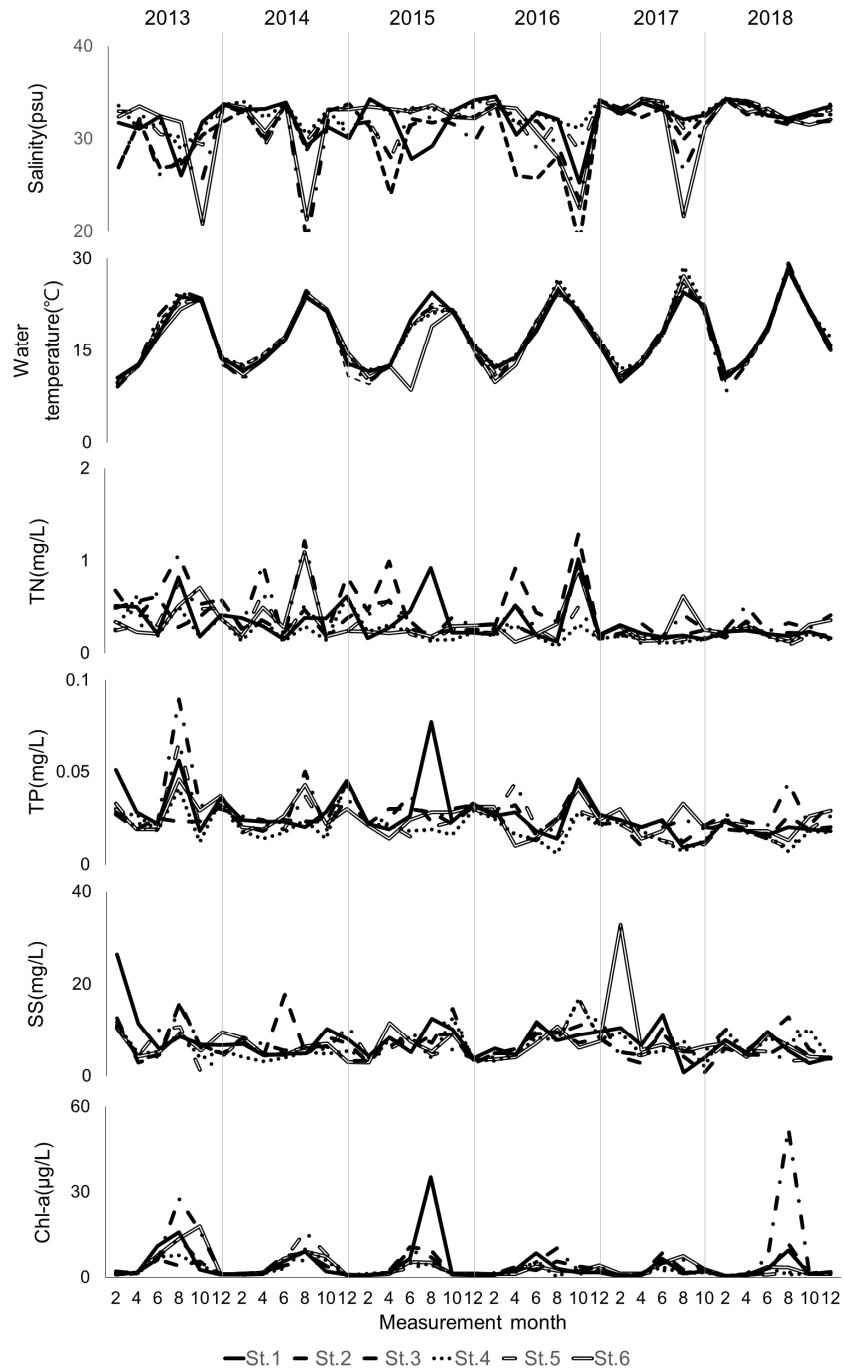


Fig. 3. Temporal variations of environmental factors and water quality variables near Nakdong river estuary (MEIS data).

현장 관측 자료(On-site measurement): 현장 관측 자료에는 유량 자료와 기상 자료가 포함된다. 유량 자료는 수자원공사 (Korea Water Resources Coporation; K-water)에서 제공하는 낙동강 하굿둑의 일일 총방류량 자료를 이용하였다(<http://water.or.kr/index.do>). 기상자료는 기상청(Korea Meteorological Administration; KMA)에서 제공하는 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System; ASOS) 자료인 일일 일사량 자료를 사용하였다([data.kma.go.kr](http://data.kma.go.kr)). 현장 관측인 두 자료 전부 정해진 시간에 대해 지속적으로 관측을 한다는 점에서 높은 빈도와 신뢰성을 가지고 있으나 유량자료의 경우 수문에서 배출되는 담수 양만 알 수 있을 뿐 담수의 영향 범위까지는 알 수 없다.

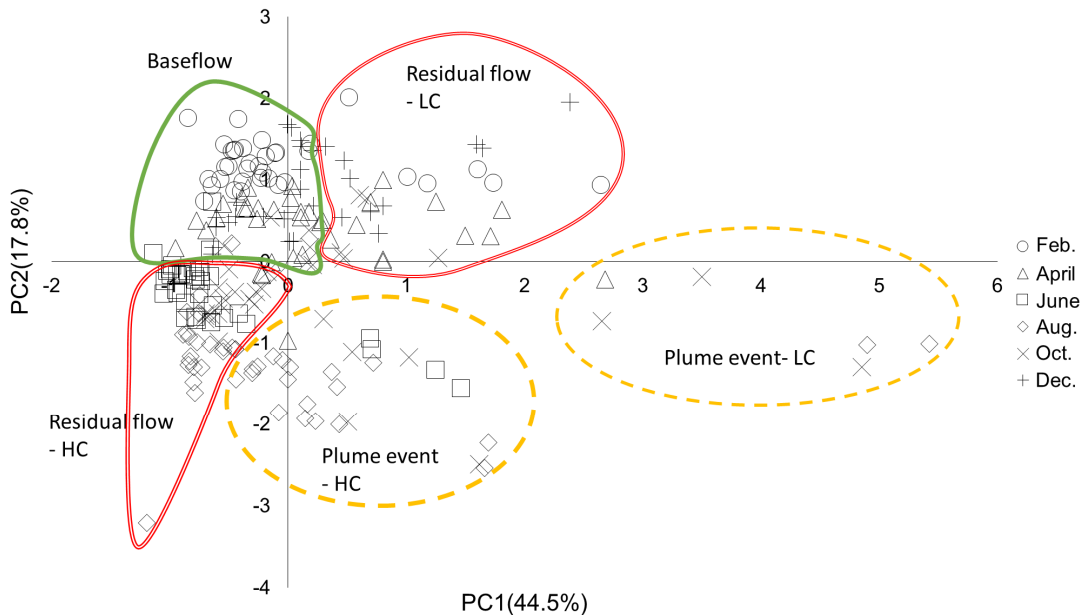
정점 선정: 네 자료를 최대한 낙동강 하구를 반영하면서 동일한 공간에 대해서 보기 위해 MEIS의 낙동강 하구 정점을 기준으로 살펴보았다(Fig. 3). GOCI의 경우 일일 병합을 한 이미지에서 각 정점에 해당하는 값을 뽑아 이용하였다. 유량자료와 기상자료의 경우 자료 특성 상 연구 정점에 해당하는 자료는 얻을 수 없었다. 따라서 유량자료는 낙동강 하구둑에서 방출되는 담수 배출량을 그대로 이용하였고 기상자료는 부산 159번 지점(위도 : 35.1047, 경도 : 129.0320)에서 측정된 자료를 이용하였다.

### 2.3 주성분분석

낙동강 하구에서 Fig. 1과 같은 육상-해양 coupling의 특징이 나타나는지 보기 위해 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 프로그램을 이용하여 주성분분석(Principal Component Analysis; PCA)을 실시하였다. 본 연구에서는 주성분분석 시 MEIS 자료들(2013.02 ~ 2018.12; 총 210개; 사용항목: 수온, 염분, SS, Chl-a, 영양염(총인, 총질소, 용존무기질소, 질산염, 아질산염, 규산염, 용존무기인))을 이용하였다. 측정값들을 각 주성분 축(Principal Component 1; PC1, Principal Component 2; PC2)에 대하여 나타낸 후 그룹화 하였다. 각 그룹의 물리, 화학적 특성을 고려하여 육상-해양 coupling의 세 단계로 구분하고 단계 별 특성을 살펴보고자 하였다. 즉 본 논문에서는 MEIS 자료로 주성분분석한 점들을 육상-해양 coupling의 세 단계로 구분 후 멀티플랫폼 자료로 각 단계 별로 시간에 따른 변화와 특성을 살펴보았다.

### 3. 결 과

MEIS 자료를 이용하여 주성분분석을 실시한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. PC1 축은 44.5%, PC2 축은 17.8%로 총 62.3%의 변이를 두 축으로 설명하였다. PC1은 분석 항목(염분, 수온, SS, Chl-a 등) 중 아질산염을 가장 잘 나타내었으며(0.836,



**Fig. 4.** Principal-component analysis on the date of measurement based on the similarity of the physicochemical properties of the water column in the estuary. The solid green line indicates the baseflow, the yellow dotted lines the Plume event, and the red overlapping lines the residual flow. The HC means high Chl-a. The LC means low Chl-a.

0.001) 이는 담수를 통한 영양염 유입을 지시할 수 있다. 반면 PC2는 Chl-a (0.018, 0.821)을 가장 잘 나타내었다. 두 축기준으로 분포하는 측정값들은 크게 5개의 그룹으로 나눌 수 있었다(Fig. 4). 그룹화된 각 측정값들의 평균 표층 염분과 Suspended Solid (SS)는 구분되는 경향을 보였다. 그러므로 육상-해양 coupling의 세 단계(Baseflow, Plume event, Residual flow) 구분에 담수 유입을 나타내는 염분과 SS를 사용하는 것이 적절함을 시사한다. 이에 따라 염분 > 33 psu, SS > 6 mg/L인 그룹은 Baseflow, 염분 < 28 psu, SS > 7 mg/L인 그룹은 Plume event, 28 psu < 염분 < 33 psu, SS > 6.5 mg/L인 그룹은 Residual flow로 구분하였다.

Baseflow에는 201개의 점들 중 78개의 점들이 포함되었다. 측정 시기 중 2, 4, 12월에 해당하는 점들이 가장 많이 속해있었으며 6, 10월 점들의 경우 거의 속하지 않았다. 포함된 소수의 6, 10월 점들은 다른 단계의 6, 10월 점들에 비해 염분이 높게 나타나는 특징을 보였다. 또한 6년(2013 ~ 2018년)의 모든 측정 연도가 포함되어있었다.

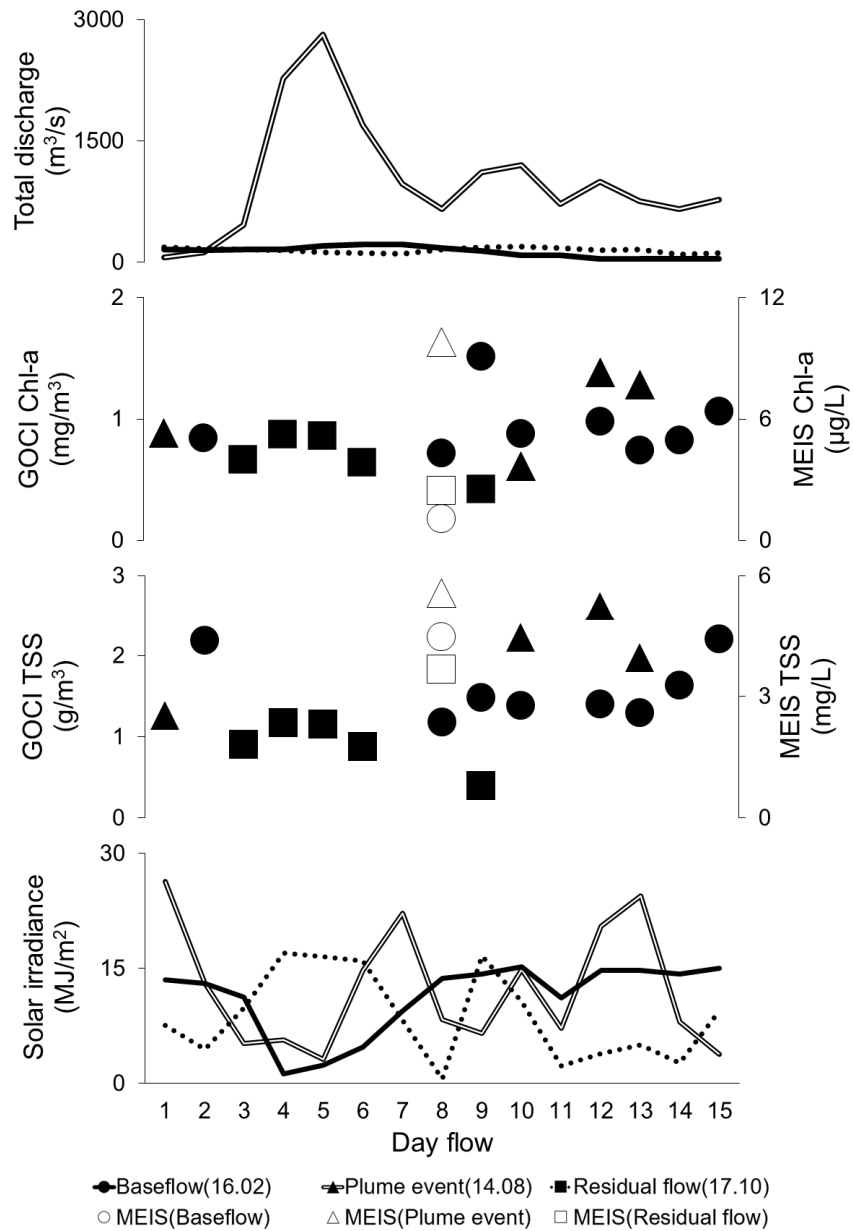
Plume event는 총 33개의 점들이 속해있었다. 8월 점들이 가장 많이 포함되어있었으며 10, 6, 4월 순으로 많이 나타났다. 4, 6월 점들은 소수만 포함되어있었으며 다른 단계의 점들에 비해 염분은 낮고 영양염은 높으며 5 mg/L 이상인 SS 값이 나타났다. Baseflow와 달리 2013, 2016년도 점들이 대다수였고 2015, 2017, 2018년도 점들은 거의 나타나지 않았다.

Residual flow는 총 99개로 세 단계 중 가장 많은 점들이 포함되었다. 6월을 중점적으로 2, 4, 8, 10, 12월 모든 측정 달들이 분포하고 있었다. 이중 여름, 가을인 6, 8, 10월은 Residual flow-HC (High Chl-a), 봄, 겨울인 2, 4, 12월은 Residual flow-LC (Low Chl-a)에 속해있었다. LC 그룹은 Baseflow에 속한 같은 측정 달들에 비해 염분이 낮고 영양염과 SS는 높았다. 그리고 Baseflow와 마찬가지로 모든 관측 연도가 나타났다.

Residual flow와 동일하게 Plume event도 Chl-a를 기준으로 HC, LC 두 그룹으로 나눌 수 있었다. 두 단계 모두 HC 그룹이 LC 그룹보다 높은 염분, Chl-a 그리고 낮은 영양염 농도를 보였다.

주성분분석을 통해 구분한 낙동강 하구의 육상-해양 coupling을 Fig. 1에 제시한 개념에 적용해보기 위해 주요 항목들의 평균값과 시간에 따른 변화를 살펴보았다(Fig. 5, Table 2). 이때 평균값은 MEIS, 유량자료, 기상자료를 이용하였고 시간에 따른 변화는 멀티플랫폼 자료를 이용하여 평균값으로 나타내었다. 모든 기간을 다 나타낼 수 없을뿐더러 각 단계 별로 해당되는 기간들이 비슷한 특징을 띠기 때문에 대표 기간을 선정하여 비교하였다. 모든 정점이 포함되고 염분과 SS 조건이 맞는 MEIS 날짜를 선정하여 이를 기준으로 전후 7일씩 포함한 15일 기간에 대한 변화를 살펴보려고 하였다. 모든 정점이 포함되지 않는 경우 4개 이상의 정점이 포함된 기간으로 선정하였다. 이러한 기준들로 선정된 대표 기간은 다음과 같다. Baseflow : 16/01/25 ~ 16/02/08, Plume event : 14/07/31 ~ 14/08/14, Residual flow : 17/10/05 ~ 17/10/19.

세 단계에서 Chl-a를 제외한 대부분의 항목들이 Fig. 1에 제시된 각 요소들의 시간적 변화와 일치하는 경향을 보였다. Plume event에서 평균 300 m<sup>3</sup>/s 이상의 방류가 이루어졌으나 Baseflow와 Residual flow는 200 m<sup>3</sup>/s에 웃도는 방류가 나타났다(Table 2). 방류량 변화에 따라 세 단계에 따라 염분이 감소했다가 증가하고 영양염과 SS는 증가했다가 감소하는 패턴이 나타났다(Table 2). SS의 경우 비록 GOCI TSS 패턴에서 Baseflow가 일시적으로 증가하는 경향이 나타나나 전반적으로 예상한 패턴을 보였다(Fig. 5). 연구 정점에서의 표층 수온은 8월이 주로 포함된 Plume event가 가장 높았으며 이는 여름철 연안보다 더 높은 낙동강 수온이 반영된 것으로 보인다(Table 2). 일사량은 세 단계 모두 변동이 컸으나 Baseflow가 가장 낮은 범위 내에서 변화를 보였고 Plume event와 Residual flow는 이보다 더 높은 범위에서 변화가 나타났다(Fig. 5). 반면 Chl-a은 Fig. 1과 달리 Plume event에서 가장 높았으며(Table 2) GOCI Chl-a 패턴에서도 큰 차이는 없으나 전반적으로 높은 범위에서 값이 나타났다(Fig. 5). 즉 세 단계의 특징들이 명확하게 나타나며 Chl-a가 증가하는 단계가 Fig. 1과는 달리 Plume event라는 것을 확인할 수 있었다.



**Fig. 5.** Comparison of the three stages (Baseflow, Plume event, Residual flow) of the land-ocean coupling. Circles and solid lines are Baseflow, triangles and overlapping lines are Plume event, and squares and dashed lines are Residual flow. The empty Fig.s (circle, triangle, square) are from the MEIS data for each period.

**Table 2.** Average MEIS values for each flow stage

Period	Water temperature (°C)	Salinity (psu)	TN (mg/L)	Chl-a (µg/L)	SS (mg/L)	solar irradiance (MJ/m <sup>2</sup> )	Total discharge (m <sup>3</sup> /s)
Baseflow	13.47	33.40	0.24	1.30	6.72	12.27	190.39
Plume event	21.97	24.67	0.81	6.59	7.12	15.48	330.37
Residual flow	17.24	31.61	0.36	3.33	6.92	14.38	232.26



## 4. 토 의

### 4.1 멀티플랫폼 자료의 유용성과 한계

Schlacher *et al.*(2008)은 호주 Mooloolah 하구에서 고해상도로 측정된 강수량, Chl-a, 염분 자료를 이용한 단기 육상-해양 coupling을 관측하였다. 그러나 본 논문의 연구지역인 낙동강 하구에서는 이러한 고해상도의 자료가 없었으며, 다양한 방법으로 측정된 멀티플랫폼 자료로 각 자료의 단점을 상호 보완하고자 하였다.

멀티플랫폼 자료는 다음과 같은 유용성을 가졌다. 첫 번째로 담수 영향에 따른 일차 생산 변화를 MEIS와 GOCI로 서로 보완하여 살펴보았다. 두 자료는 신뢰성과 해상도에서 정반대의 장단점을 가진다. 그러므로 이들은 장단점이 상호 보완될 수 있기 때문에 MIES와 GOCI 자료를 통해 일차 생산의 시간적 변화와 육상-해양 coupling 세 단계의 클로로필 농도 차이를 보는데 유용했다. 두 번째로 방류된 담수의 공간적 영향을 추정할 수 있었다. 방류량 자료를 통해 방류 유무와 방류되는 양은 알 수 있으나 담수의 영향과 플룸 규모는 알 수 없다. 이는 GOCI와 MEIS 자료의 수온, 염분, Chl-a 등을 통해 낙동강 하구의 모든 정점에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 마지막으로 일사량 자료를 통해 식물플랑크톤 성장에 중요한 조건 중 하나인 빛 조건을 추측할 수 있었다. 담수 유입으로 인해 영양염은 높고 SS는 높지 않아 식물플랑크톤이 성장하기 좋은 환경임에도 불구하고 Chl-a 증가가 일어나지 않은 경우에 대해 그 원인을 추정할 수 있는 하나의 근거로서 사용될 수 있었다.

그러나 각 자료의 상호 보완으로도 극복하기 힘든 한계점도 있었다. 첫 번째로 본 연구에서는 현장실측자료의 부족함으로 인해 Schlacher *et al.*(2008)과 달리 시간에 따른 연속적인 육상-해양 coupling 패턴을 관측할 수 없었다. Schlacher *et al.*(2008)에서 육상-해양 coupling 세 단계가 시간에 따라 순서대로 발생하고 이러한 coupling이 강우에 따라 하나의 주기로 서 반복되어 일어남을 확인하였다. 낙동강의 경우 주로 6월이 Residual flow, 8월이 Plume event에 속한 것으로 보아(Fig. 4) 낙동강의 육상-해양 coupling은 두 달보다 짧은 수일~수주의 단기간 동안 발생한다고 유추할 수 있었다. 그러나 MEIS는 두 달 간격의 자료이며, MEIS 외에 실측값이 없었기 때문에 단기간(수일~수주) 변화를 확인할 수 없었다. 두 번째로 담수 유입에 따른 정점과 관측 연도 별 차이를 반영할 수 없었다. 담수는 하류로 이동하면서 해당 시기의 바람, 조석 등에 따라 이동 방향과 규모가 달라지게 된다(Morris *et al.*, 1995). 또한 방류량과 더불어 방류 지속 시기와 방류 주기에 따라 플룸의 영향이 달라진다(Kim and Youn, 2019). 이로 인해 방류량과 염분은 낮은 상관관계를 보였으며(Fig. 6) 염분, 영양염 등은 정점마다 나

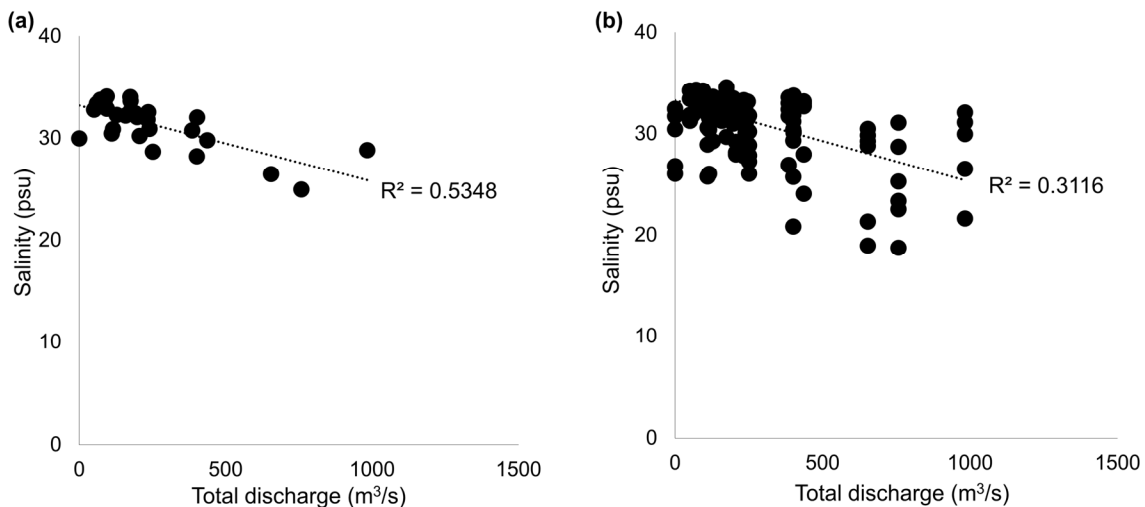


Fig. 6. (a) Correlation of the average daily salinity and total daily discharge; (b) correlation of the station salinity and total daily discharge.

타나는 경향이 달랐다. 관측 연도의 경우, Baseflow와 Residual flow는 모든 측정 연도가 고르게 속한 반면 Plume event는 2015, 2017, 2018년도에 해당하는 점들의 거의 없었다. 이는 2015, 2017, 2018년도에 많은 방류가 이루어졌음에도 불구하고 MEIS 측정 달에 해당되는 짝수 달에 방류량이 적어 마치 Plume event가 거의 일어나지 않은 것처럼 반영된 것으로 추측된다. 본 논문에선 주성분분석 내 분포하는 점들의 패턴을 우선시 하였기 때문에 이러한 차이들을 반영하기 어려웠다.

### 4.2 낙동강 플룸 특징

담수 플룸은 육상 기원 물질을 가지고 유입되며 연안 환경에 직접적인 영향을 미친다. 또한 담수 플룸의 특성(크기, 수명, 플러싱 효과, Chl-a, 영양염)에 따라 그 지역의 육상-해양 coupling이 달라지기 때문에 담수 플룸은 육상-해양 coupling을 결정짓는 중요한 요소이다. 그러므로 낙동강의 육상-해양 coupling 특성을 보기 위해선 낙동강의 플룸 특성을 같이 살펴보아야한다.

본 논문에서는 멀티플랫폼 자료들을 이용하여 낙동강 플룸 특성을 추정하였다(Table 3). 첫 번째로 플룸의 규모는 수평, 수직적 염분 차이를 통해 확인할 수 있으나(Morris *et al.*, 1995) 본 논문에 사용된 자료들로는 수직적인 염분 분포는 알 수 없어 수평적인 염분 변화를 이용하였다. 이를 보기 위해 낙동강 하구 정점에서의 표층 염분 변화 살펴보았다. Fig. 6에서 연안으로의 담수 유입을 시사하는 방류량 증가에 따라 표층 염분이 감소하는 경향이 나타났다. 이에 따라 낙동강 담수 플룸이 연구 정점에 영향을 미쳤음을 시사하므로 낙동강 플룸 크기는 낙동강 수문과 정점 간의 거리인 최대 약 25 km로 추정하였다. 플룸 크기는 아마존, 미시시피 강의 약 0.05~0.1배, Mooloolah 하구의 약 20배 이상으로 소~중규모로 추정된다. 두 번째로 플룸 수명은 플룸 형성과 소멸을 관측하지 못했기 때문에 플룸이 머무르는 동안 일차 생산이 증가한다고 가정하여 Chl-a 유지 기간을 통해 간접적으로 추정하였다. Fig. 5에서 Plume event의 GOCI Chl-a를 이용하여 플룸 수명을 Chl-a 증가 기간인 일주일로 추정하였다. 방출된 낙동강 플룸은 주수로에서 해수와 혼합되지 않기 때문에(Kim and Youn, 2019) 다른 강, 하구들에 비해 오랜 기간 유지된 것으로 추측하였다. 그러나 플룸 소멸 후에도 Chl-a이 증가할 수 있기 때문에(Schlacher *et al.*, 2008) 본 논문에서 플룸 수명을 과대추정했을 가능성이 있다. 마지막으로 플러싱 효과는 하구 크기에 비례하므로(Schlacher *et al.*, 2008) 낙동강 플룸 규모에 따라 강하지 않았을 것으로 추측했으며 Chl-a와 영양염은 MEIS를 참고했다.

### 4.3 낙동강 하구 육상-해양 coupling 특징

육상-해양 coupling의 일반적인 양상은 Fig. 1과 같이 Plume event 때 많은 양의 담수가 유입된 후 Residual flow 때 일차 생산이 증가하는 것이다. 그러나 낙동강에서 나타난 육상-해양 coupling은 Plume event 때 높은 일차 생산이 나타났으며 이 이유에 대해 추측해보았다.

Plume event에서 높은 Chl-a이 나타난 이유는 담수 유입에 의한 식물플랑크톤이 성장하기 좋은 환경의 형성과 약한 플러싱 효과의 영향으로 추정할 수 있었다. Plume event 때 많은 양의 담수 유입으로 인해 표층 수온은 증가하고 염분은 감소하여

**Table 3.** Comparison of the Nakdong River estuary with other rivers and estuaries (e.g., Mooloolah estuary: Gaston *et al.*, 2006, Schlacher *et al.*, 2008; Mississippi river: Grimes and Finucane 1991, Grimes and Kingsford 1996, Liu *et al.*, 2005, Lohrenz *et al.*, 1999; Amazon river: Grimes and Kingsford 1996, Santos *et al.*, 2008)

Estuary	Plume size	Plume lifespan	Flushing effect	Chl-a (max)	Nutrients (NO <sub>x</sub> )
Amazon river	<500 km	4 hr	Strong	0.0041 mg/L	0.991 mg/L
Mississippi river	<200 km	Few days	Strong	0.006 mg/L	21.6 mg/L
Mooloolah estuary	<1 km	One week	Weak	0.004 mg/L	0.162 mg/L
Nakdong River estuary	<25 km	One week	Weak/ Mediate	0.051 mg/L	0.997 mg/L

표, 저층 간의 수온, 염분 차가 증가하였다(표, 저층 수온 차 4.21°C, 표, 저층 염분 차 6.71 psu). 이에 따른 표, 저층 간 증가한 밀도 차로 인해 성층이 형성되었을 것이다(Fisher *et al.*, 1988). 또한 담수와 함께 많은 육상 기원 물질 유입으로 인해 표층 영양염 농도는 증가하였다(Table 2). 이와 더불어 강이 배출된 자리로의 저층수 용승과 활발한 재광물로 인한(Dagg and Breed, 2003) 추가적인 영양염 공급이 일어났을 것이다. SS의 경우, Fig. 1과 같이 유입된 많은 SS가 수층 빛을 저해하여 일차 생산이 제한될 것이라고 예상했다. 그러나 Plume event 때 평균 SS는 수층 빛이 강하게 저해되기 시작하는 농도인 10 mg/L (Smith Jr and Demaster, 1996)보다 낮아(Table 2) 예상보다 빛 조건이 빠르게 개선된 것으로 보인다. 플러싱 효과는 하구 크기에 비례하므로(Schlacher *et al.*, 2008) 소~중규모의 낙동강 하구에서는 플러싱 효과가 크지 않았던 것으로 보인다. 또한 수문에서 연구 정점까지 최소 20 km 거리이며 주수로로 벗어난 후에는 해수와 혼합이 시작되기 때문에 플러싱 효과는 더욱 약해졌을 것이다. 결과적으로 담수 유입으로 인해 식물플랑크톤이 성장하기 좋은 환경이 형성됨과 동시에 플러싱 효과가 약해 식물플랑크톤이 휩쓸려 나가지 않고 연구지역에 머물러 생체량을 축적할 수 있었다.

Residual flow의 경우 오히려 Chl-a이 감소하였다. Residual flow 때의 환경을 추정해보자면 우선 담수 유입이 적어짐에 따라 낮아져 표, 저층 밀도 차가 감소하여 수층 안정성이 감소했을 것이다(표, 저층 수온 차 2.38°C, 염분 차 5.09 psu). 그러나 Plume event와 큰 차이가 나지 않아 성층이 약해지긴 했으나 식물플랑크톤 성장에 큰 피해를 일으켰을지는 불확실하다. 오히려 영양염이 Plume event 때 식물플랑크톤 성장으로 인해 소비되어 특히 식물플랑크톤 성장에 중요한 질소(Smith Jr and Demaster, 1996; Huret *et al.*, 2005)의 가장 큰 감소가 일어난 것을 확인할 수 있었다(Table 2). 그러므로 낙동강 하구에서는 Residual flow 때 영양염 감소로 인해 점차 식물플랑크톤 성장이 저해되어 추가적인 Chl-a 증가는 일어나지 않고 오히려 Plume event 때 증가했던 Chl-a이 해수와 혼합되면서 희석되는 패턴이 나타난 것으로 보인다.

#### 4.4 다른 하구들의 육상-해양 coupling과 비교

앞에서 유추해본 낙동강 하구 플룸과 육상-해양 coupling 특성을 작은 하구에 해당하는 호주 Mooloolah 하구와 큰 하구에 해당하는 아마존, 미시시피와 비교해보았다(Table 3; Grimes and Kingsford, 1996).

네 하구 전부 육상-해양 coupling이 나타나는 곳이나 형성되는 플룸 크기에 따라 각기 다른 패턴이 나타났다. 100 km 이상의 플룸을 형성하는 하구인 아마존과 미시시피 강은 많은 양의 담수 배출이 일어나며 이에 비례하여 많은 영양염과 부유물질이 연안으로 유입된다(Smith and Russell, 1995; Dagg and Breed, 2003). 이로 인해 높아진 탁도가 유광층이 1 m가 되지 않을 정도로(Dortch and Whitley, 1992) 수층 빛 이용성을 제한하므로 충분히 많은 양의 퇴적물이 가라앉아야 식물플랑크톤이 성장할 수 있다(Lohrenz *et al.*, 1990; Smith Jr and Demaster, 1996). 따라서 큰 하구는 식물플랑크톤이 플룸에 대해 즉각적인 반응을 할 수 없으며, 시간적으로 봤을 때 Residual flow에서 일차 생산이 증가하는 것으로 보인다(Fig. 1). 반대로 Mooloolah 하구같이 담수 배출량이 많지 않은 하구는 약 10 km 정도의 작고 일시적인 플룸이 형성되며 이와 같은 곳에선 플러싱 효과가 짧게 나타난다(Schlacher *et al.*, 2008). 그러므로 담수 플룸 유입에 따른 성층 형성에 식물플랑크톤이 즉각적으로 반응하여 곧바로 일차 생산이 증가하게 되고(Schlacher *et al.*, 2008) 이를 시간적으로 봤을 때 작은 하구에서는 Plume event 때 높은 일차 생산이 나타난다고 할 수 있다. 낙동강도 Mooloolah 하구처럼 Plume event에서 Chl-a 최대값이 나타난 것으로 보아 작은 하구에 가까운 특성을 가지는 것으로 보인다.

하구들 간의 비교를 통해 육상-해양 coupling은 담수 유입의 영향을 받는 연안에서는 혼한 현상이나 형성되는 플룸 크기에 따라 육상-해양 coupling 양상이 다른 것을 볼 수 있었다. 100 km 이상의 큰 플룸이 형성되고 플러싱이 큰 하구는 Residual flow에 Chl-a 최대값이 나타나는 본 연구에서 개념화한 육상-해양 coupling 패턴(Fig. 1)을 가지며 10 km 정도의 작은 플룸이 형성되고 플러싱이 약한 하구는 Plume event에서 Chl-a 최대값이 나타나는 패턴(Fig. 7)을 가진다.

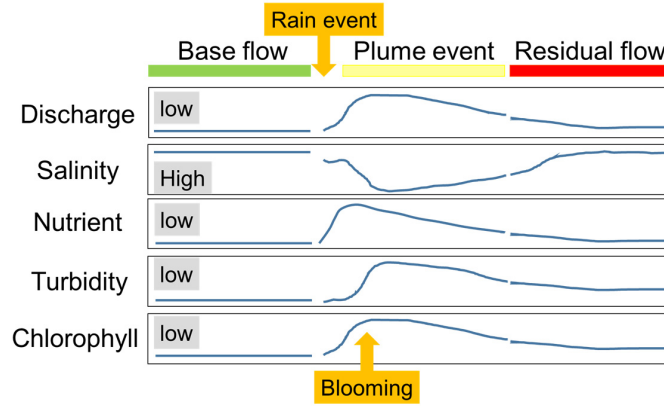


Fig. 7. Schematic diagram of land-ocean coupling in the Nakdong estuary. Unlike Fig. 1, the maximum Chl-a appeared during the Plume event.

## 5. 요약 및 제언

본 논문에서 낙동강 하구에서 단기간(수일~수주) 육상-해양 coupling을 개념화하고 담수 유입에 따른 식물플랑크톤 성장을 확인하였다. 그러나 이러한 육상-해양 coupling 패턴은 플룸 크기에 따라 다르게 나타났다. 100 km 이상의 큰 플룸을 형성하는 하구는 많은 양의 담수 배출에 따른 높은 탁도로 인한 빛 저해가 일어나 식물플랑크톤이 즉각적으로 반응하지 못하므로 본 연구에서 개념화한 바와 같은 육상-해양 coupling이 나타난다. 반면 약 10 km 정도의 작은 플룸을 형성하는 하구는 적은 담수 배출로 인해 식물플랑크톤이 빠르게 반응하여 더 빠른 일차 생산 증가가 나타나는 육상-해양 coupling이 나타난다. 낙동강은 Plume event 때 낮은 염분, 높은 영양염이 나타났고 10 mg/L보다 낮은 SS로 인해 일차 생산이 증가하다. 낙동강 하구는 작은 하구의 육상-해양 coupling과 비슷한 패턴을 가질 것이며, 추가적인 연구를 통해 낙동강과 연안 환경 간의 영향에 대한 이해도를 높일 수 있을 것이다.

## 사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌(References)

- Carreon-Martinez, L.B., K.W. Wellband, T.B. Johnson, S.A. Ludsins and D.D. Heath, 2014. Novel molecular approach demonstrates that turbid river plumes reduce predation mortality on larval fish. *Molecular Ecology*, **23**(21): 5366-5377.
- Cravo, A., M. Madureira, H. Felícia, F. Rita and M.J. Bebianno, 2006. Impact of outflow from the Guadiana River on the distribution of suspended particulate matter and nutrients in the adjacent coastal zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **70**(1-2): 63-75.
- Dagg, M.J. and G.A. Breed, 2003. Biological effects of Mississippi River nitrogen on the northern Gulf of Mexico—a review and synthesis. *Journal of Marine Systems*, **43**(3-4): 133-152.
- Dortch, Q. and T.E. Whitledge, 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?. *Continental Shelf Research*, **12**(11): 1293-1309.

- Fisher, T.R. L.W. Harding Jr, D.W. Stanley and L.G. Ward, 1988. Phytoplankton, nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **27**(1): 61-93.
- Gaston, T.F., T.A. Schlacher and R.M. Connolly, 2006. Flood discharges of a small river into open coastal waters: plume traits and material fate. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **69**(1-2): 4-9.
- Green, R.E., T.S. Bianchi, M.J. Dagg, N.D. Walker and G.A. Breed, 2006. An organic carbon budget for the Mississippi River turbidity plume and plume contributions to air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and bottom water hypoxia. *Estuaries and Coasts*, **29**(4): 579-597.
- Grimes, C.B. and J.H. Finucane, 1991. Spatial distribution and abundance of larval and juvenile fish, chlorophyll and macrozooplankton around the Mississippi River discharge plume, and the role of the plume in fish recruitment. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, **75**(2): 109-119.
- Grimes, C.B. and M.J. Kingsford, 1996. How do riverine plumes of different sizes influence fish larvae: do they enhance recruitment?. *Marine and Freshwater Research*, **47**(2): 191-208.
- Huret, M., I. Dadou, F. Dumas, P. Lazure and V. Garçon, 2005. Coupling physical and biogeochemical processes in the Rio de la Plata plume. *Continental Shelf Research*, **25**(5-6): 629-653.
- Jang, S.T. and K.C. Kim, 2006. Change of oceanographic environment in the Nakdong Estuary. *The Sea*, **11**(1): 11-20.
- Kim, S. and S.H. Youn, 2019. Effect of Freshwater Discharge on the Nakdong River Estuary: Mooring Observations of Water Temperature and Salinity. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **25**(1): 89-95.
- Liu, H. and M. Dagg, 2003. Interactions between nutrients, phytoplankton growth, and micro- and mesozooplankton grazing in the plume of the Mississippi River. *Marine Ecology Progress Series*, **258**: 31-42.
- Liu, H., M.J. Dagg, C.J. Wu and K.P. Chiang, 2005. Mesozooplankton consumption of microplankton in the Mississippi River plume, with special emphasis on planktonic ciliates. *Marine Ecology Progress Series*, **286**: 133-144.
- Lohrenz, S.E., G.L. Fahnenstiel, D.G. Redalje, G.A. Lang, M.J. Dagg, T.E. Whittedge and Q. Dortch, 1999. Nutrients, irradiance, and mixing as factors regulating primary production in coastal waters impacted by the Mississippi River plume. *Continental Shelf Research*, **19**(9): 1113-1141.
- Lohrenz, S.E., G.L. Fahnenstiel, D.G. Redalje, G.A. Lang, X. Chen and M.J. Dagg, 1997. Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River. *Marine Ecology Progress Series*, **155**: 45-54.
- Lohrenz, S.E., M.J. Dagg and T.E. Whittedge, 1990. Enhanced primary production at the plume/oceanic interface of the Mississippi River. *Continental shelf research*, **10**(7): 639-664.
- Mallin, M.A., H.W. Paerl, J. Rudek and P.W. Bates, 1993. Regulation of estuarine primary production by watershed rainfall and river flow. *Marine Ecology-Progress Series*, **93**: 199-199.
- Moon, J.E., Y.H. Ahn, J.H. Ryu and P. Shanmugam, 2010. Development of ocean environmental algorithms for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). *Korean Journal of Remote Sensing*, **26**(2): 189-207.
- Morris, A.W., J.I. Allen, R.J.M. Howland and R.G. Wood, 1995. The estuary plume zone: source or sink for land-derived nutrient discharges?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **40**(4): 387-402.
- Park, S., J. Lee, J.U. Choi, N. Heo and S. An, 2016. Study on the long-term changes in water quality and benthic ecology and evaluation on effect of the barrage in Nakdong River estuary. *Journal of wetlands research*, **18**(1): 58-67.
- Santos, M.L., K. Muniz, B. Barros-Neto and M. Araujo, 2008. Nutrient and phytoplankton biomass in the Amazon River shelf waters. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **80**(4): 703-717.
- Schlacher, T.A., A.J. Skillington, R.M. Connolly, W. Robinson and T.F. Gaston, 2008. Coupling between marine plankton and freshwater flow in the plumes off a small estuary. *International Review of Hydrobiology*, **93**(6): 641-658.
- Smith Jr, W.O. and D.J. Demaster, 1996. Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: correlation with seasonal river discharge. *Continental Shelf Research*, **16**(3): 291-319.

- Smith, W.O. and G.J. Russell, 1995. Phytoplankton biomass and nutrient distributions in the Amazon River plume: environmental correlates. *Geo-Marine Letters*, **15**(3): 195-198.
- Song, J.I., B.I. Yoon, J.W. Kim, C.W. Lim and S.B. Woo, 2014. Spatial and Temporal Variability of Residual Current and Salinity Distribution according to Freshwater Discharge during Monsoon in Nakdong River Estuary. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, **26**(3): 184-195.
- Yang, C.S., S.S. Bae, H.J. Han, Y.H. Ahn, J.H. Ryu, T.H. Han and H.R. Yoo, (2010). Introduction of acquisition system, processing system and distributing service for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data. *Korean Journal of Remote Sensing*, **26**(2): 263-275.