

## 목포항 주변 하구역의 영양염 수치

김영태\* · 최윤석\*\*† · 조윤식\*\* · 오현택\*\*\* · 전승렬\*\* · 최용현\*\* · 한형균\*\*

\*, \*\* 국립수산과학원 갯벌연구센터, \*\*\* 국립수산과학원 해역이용영향평가센터

## The Budget of Nutrients in the Estuaries Near Mokpo Harbor

Yeong-Tae Kim\* · Yoon-Seok Choi\*\*† · Yoon-Sik Cho\*\* · Hyun-Taik Oh\*\*\* ·

Seung-Ryul Jeon\*\* · Yong Hyeon Choi\*\* · Hyoung-Kyun Han\*\*

\*, \*\* Tidal Flat Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute, Kunsan, 54014, Korea

\*\*\* Marine Environmental Impact Assessment Center, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 46083, Korea

**요 약** : LOICZ(Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) 모델을 이용하여, 목포항 주변의 하구역(영산호 하구역, 영암호-금호호 하구역)에서 일어나는 생지화학적인 순환 과정을 이해하고자 계절별 영양염 수치를 산정하였다. 비성층화 시기인 2008년 5월, 9월, 11월에는 simple three-box model을 적용하였고, 성층이 발생했던 7월에는 two-layer box model을 적용하였다. 물질 수치를 산정한 결과, 5월과 7월에 외해역으로부터 영양염이 역유입되었고, 외해수와와의 혼합에 의한 교환( $V_{x-3}$ , 또는  $V_{deep}$ )을 통해 하구역으로 유입되는 영양염(DIP) 부하량이 인공 호수의 대규모 방류 영향을 받은 육상기인 유입량보다 더 많았다. 그리고 9월 물질 수치 결과에서는 하구역과 외해역의 영향을 동시에 받는 하구역 입구(sub-region III)에서 영양염의 과잉 적체가 발생되었다. 저수온기(11월)에 인공 호수(영산호)의 방류 영향이 없는 하구역에서는 영양염이 제거되었고, 담수 방류(영암호-금호호)의 영향을 받은 하구역에서는 수주 내 영양염이 축적되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과들은 목포항 주변 하구역으로 유입되는 영양염들이 육상에서 기인할 뿐만 아니라, 외해역 그리고 하구역 내에서도 추가 공급되고 있다는 점을 시사하고 있다. 따라서 목포항 주변 하구역의 수질 관리를 위해서는 담수를 통한 육상기인 영양염 부하량을 저감하는 방안과 함께, 주변 해안으로의 영양염 유입도 저감하기 위한 통합 환경관리 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : LOICZ 모델, 영양염 수치, 성층화, 대량 방류, 역유입

**Abstract** : Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) models for nutrient budgets were used to estimate the seasonal capacity of the Youngsan Estuary and Youngam-Geumho Estuary to sink and/or supply nutrients such as dissolved inorganic phosphorus (DIP) and nitrogen (DIN) to provide an understanding of the behavior of the coupled biogeochemical cycles of phosphorus and nitrogen in the estuaries (Youngsan Estuary, Youngam-Geumho Estuary) near Mokpo Harbor. During non-stratified periods (May, September, and November, 2008), simple three-box models were applied in each sub-region of the system, while a two-layer box model was applied during on-site observation of stratification development (July, 2008). The resulting mass-balance calculation indicated that even after large discharges from artificial lakes (in May and July), DIP influxes due to a mixing exchange ( $V_{x-3}$ , or  $V_{deep}$ ) were more than terrigenous loads, indicating the backward transportation of nutrients from a marine source. The model results also indicated that for nutrient loads (DIP and DIN fluxes) in September, an extreme congestion of nutrients occurred around the mouths (sub-region III of the model) of the estuaries, possibly due to an imbalance in physical circulations between the estuaries and offshore locations. In November, the Youngam-Geumho Estuary, into which freshwater was discharged from artificial lakes (Youngam and Geumho Lake), showed nutrient enrichment in the water column, but the Youngsan Estuary showed nutrient depletion. In conclusion, to efficiently control water quality in the estuaries near Mokpo Harbor, integrated environmental management programs should be implemented. I.e., the reduction of nutrient loads from land basins as well as the deposit of nutrient loads into adjacent coastal lines.

**Key Words** : LOICZ model, Nutrient budgets, Stratification, Large discharges, Backward transportation

\* First Author : ytrack@naver.com, 063-472-8614

† Corresponding Author : grcys@korea.kr, 063-472-8611

## 1. 서론

우리나라 주요 강 하구에 건설된 방조제는 그 지역의 사회·경제 활동에 필요한 용수를 공급하기도 하고, 필요에 따라 수문을 개방하여 담수를 해양으로 방류함으로써, 강 하류의 수위를 조절하고, 범람을 방지하는 역할을 하고 있다 (Rhew and Lee, 2011). 그러나 이러한 순기능 외에, 방조제와 같은 인공 구조물의 설치 및 장기 운용으로 인해 유속이 감소하고, 자연적인 물질 순환의 불균형이 초래되고 있으며, 하구역의 기수 생태계 및 환경은 여러 가지 부정적인 영향이 누적되고 있는 실정이다(Byun et al., 2007; Park et al., 2010; Yoon et al., 2013; Woo et al., 2014).

주지하는 바와 같이 우리나라 주요 하구역과 연안 수역에서의 부영양화 심화, 수질 저하, 빈산소 수괴 발생, 적조 출현 등의 문제는 각각의 수질 등급, 연안 환경 및 생태계적 문제 발생 빈도의 차이가 있다고 해도, 이미 수십년 전부터 제기되고 있는 현안들이다(Choi et al., 1994; Kim, 2006; Lee and Kim, 2008). 또한 그동안 연안역의 개발과 인공 구조물 설치, 방조제 건설 등의 복합적인 요인들로 인해 조석 주기가 인위적인 방해를 받음으로써, 조석 비대칭이 더욱 심화되고 있다(Byun et al., 2007). 이로 인해 국지적으로는 창조 우세(서해 중부 및 북부 연안 해역) 또는 낙조 우세 특성(서해 남부 해역)이 더욱 강화되기도 하지만(Jung, 2011; Jung and Jeong, 2013), 보다 장기적인 관점에서 보면, 연안의 해수 유동 방향과 속도, 부유사 및 오염 물질의 이동과 확산 정도 등에 변형을 초래하게 된다(Ryu et al., 2000; Kang and Moon, 2001; Bang et al., 2013). 더욱이 조석 주기 동안 담수와 외해수 간 혼합 및 교환 작용이 크게 제한을 받고 있는 상황에서, 인공호의 방류 유무에 따라서도 연안 수질을 결정하는 인자들 간 인과 관계가 복잡하게 연계되고 있어, 수질 예측의 불확실성도 계속 증대되고 있다(Rhew and Lee, 2011; Kim et al., 2013). 한편, 육상기인 오염물질이 하구역 내 저층 퇴적물에 장기간 축적되는 동안, 수온 상승 및 미생물의 활동도 증가에 따른 분해 과정에서 무기 영양염이 대량으로 용출되어 주변 수역으로 확산되기도 하고(Conley et al., 1995), 저층수의 산소 결핍이 수반되어 여러 형태의 환원성 물질이 발생함으로써(Mucci et al., 2000), 기수 생태계에 부정적인 영향을 미치기도 한다. 영산호 하구역에서도 이와 같은 사례들이 빈번하게 보고되고 있다(Jeong et al., 1999; MEIS, 2015). 그러나 이에 대해 그동안의 연구는 해양 환경 및 생태계에서 나타나고 있는 부정적 현상의 나열에만 초점을 두거나 단순 추론을 통한 일부 원인만을 규명하고 있을 뿐이었다(Kim et al., 2015). 각 집수역에서 하구역(영산호 하구역, 영암호-금호호 하구역)으로 유입된 다양한 물질 중 연안 수역에

서 부영양화를 심화시키는 질소와 인이 기수역을 통과하면서 물리적, 생지화학적 반응, 그리고 외해역에서 유입되는 고염수와의 혼합 과정 등을 통해 제거 또는 첨가되는 과정과 거동을 추적한 사례는 거의 보고되고 있지 않은 실정이다(Lee and Jun, 2009). 영산호 하구역을 비롯한 영암-금호호 하구역과 같이 간헐적이면서도 일시에 대량의 담수 방류가 이루어지는 연안 수역에서 오염물질의 거동을 파악하기 위해서는 담수 방류의 규모와 시기를 고려한 수질 변화 양상을 파악해야 하며(Kim et al., 2015), 이를 바탕으로 물질 수지를 산정하는 과정이 필요하다. 따라서 이번 연구에서 목포항 주변에 조성된 이들 인공 담수호들의 방류 유무에 따라, LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) 모델(Gordon et al., 1996)을 이용하여 물질 수지를 산정함으로써, 하구역(영산호 하구역, 영암호-금호호 하구역)에서 연안 수역까지의 영양염의 거동을 분석하고자 한다. 이 과정에서 영양염의 유입 부하량과 이동 경로, 그리고 변환 과정 등을 종합적으로 파악함으로써, 목포항 주변 해역의 통합 수질 관리를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 물질 수지 산정을 위한 박스 모델 수립

박스 모델의 경우, 일정 구획의 수역(system)으로 유입되는 양과 외해로의 유출량에서 나타나는 오염물질(영양염)의 변화(차이)를 각 소해역 내에서 일어난 해양물리적, 생지화학적 반응의 결과( $\Delta Y$ )로 간주하여, 그 물질의 순환과 거동을 해석하는데 유용한 방법이다.

하구역(영산호, 영암호-금호호 하구역)과 외해역에 대한 현장 조사는 2008년 5월 26일, 7월 16일, 9월 20일, 11월 26일 등 모두 4회 수행하였으며, 만조에서 간조 사이(낙조류)에 조사를 완료하였다. 이 중, 7월 조사에서 하구역 내 밀도 성층이 관측되었다. 따라서 5월, 9월, 11월의 경우에는 3개의 소해역으로 구성된 단순 박스 모델(simple three-box model)로써, 7월에는 성층 박스 모델(two-layer box model)을 통해 물질 수지를 표현하였다.

#### 2.1.1 단순 박스 모델

단순 박스 모델의 수립 과정으로써, 먼저 담수 유입과 유출을 통한 물 수지를 파악하고, 영산호 하구역 내의 염분이 보존적이라는 가정 하에 잔차류(residual flow)의 유량을 결정하여, 조사 시기 동안 각각의 유출·입 수량과 현장 관측 또는 문헌 조사에서 수집한 항목별 농도의 곱을 통해 유동량을 산정하였다. 이를 위하여 다음과 같은 전제 조건을 설정하였다.

- ① 조사 기간 동안 하구역 및 목포 연안 해역의 체적(V)은 정상상태 또는 준정상상태(quasi-steady state:  $\frac{dV}{dt} \approx 0$ )를 유지한다.
- ② 하구역으로 유입되는 물의 주 공급원에는 인공 호수의 방류 및 소하천을 포함한 하천수( $V_Q$ ), 오페수( $V_O$ ), 담지하수( $V_{FG}$ ), 강우( $V_P$ ), 조석 작용에 의한 외해수( $V_X$ ) 등이 있다. 유출원은 증발량( $V_E$ )과 하구역에서 만 외로 유출되는 잔차류( $V_R$ )이다(Fig. 1). 소해역 간, 또는 외해역/하구역 간 해수의 유동( $V_X$ )은 물 수지 산정 과정에 따라 유출원이 되기도 하고, 유입원이 되기도 한다. 염지하수( $V_{SGW}$ )의 경우, 퇴적물과 저층수 간 경계면을 통해 순환을 반복하며, 항상 일정하다고 가정한다.
- ③ 염분은 보존 성분으로서, 하구역(system of the model) 내로 유입된 후 생지화화학적인 반응이나 활동에 의해 제거되거나, 생산되지 않는다( $\frac{dS_{syst}}{dt} = 0$ ).

Fig. 1에서  $S_{syst}$ 는 하구역 내 염분,  $S_Q$ 는 하천수의 염분,  $S_O$ 는 오페수 내 염분,  $S_P$ 는 강수의 염분,  $V_X$ 는 조석작용에 의하여 하구역과 외해역 경계를 유출·입하는 해수 교환량,  $S_{ocn}$ 는 외해의 염분 농도,  $S_E$ 는 증발에 의해 소실되는 염분 농도,  $S_{FG}$ 는 담지하수의 염분 농도를 각각 나타낸다.  $S_{syst}$ ,  $S_{ocn}$ ,  $S_X$ ,  $S_R$ 를 제외한 염분값들은 통상 0으로 가정할 수 있다.

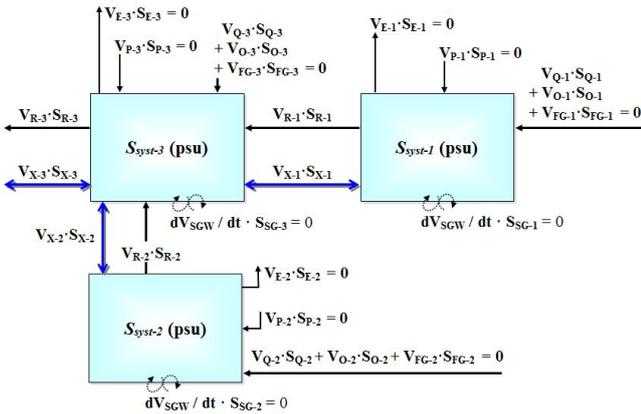


Fig. 1. Simple diagram of water and salt budgets ( $g\ day^{-1}$ ) on non-stratification periods.

한편 하구역과 외해역 간 해수 교환량( $V_X$ )과 잔차 유동량( $V_R$ )의 합에 대해 하구역의 체적( $m^3$ )인  $V_{syst}$ 로서 나누게 되면, 외해수에 의한 하구역 내 물(해수)의 평균 체류 시간(residence time,  $\tau^*$ )을 알 수 있다.

$$\tau^* = \frac{V_{syst}}{|V_X| + |V_R|} \quad (1)$$

### 2.1.2 성층 박스 모델

(1) 성층 박스 모델 적용을 위한 가정

- ① 담수 유입으로 인한 잔차류( $V_R$ ), 그리고 저층을 통한 외해에서 유입되어 표층으로 용승한 외해 유입수( $V_{deep}$ )의 하구 외(外) 유출은 표층에서만 일어난다.
- ② 외해수는 저층을 통해서만 하구 내로 유입( $V_{deep}$ )되어, 표층으로 운반된 다음, 표층수 내 잔차류와 함께 하구 외로 유출된다. 따라서  $V_{surf} = -V_{deep} + V_R$  (여기서  $V_{deep}$ 은 양의 부호이고,  $V_R$ 과  $V_{surf}$ 는 음의 부호를 갖는다)이라는 등식이 성립된다.
- ③ 비성층화 시기에 적용되는 단순 박스 모델에서와 같은 하구역과 외해역 간 해수 교환량( $V_X$ )은 무시한다.
- ④ 하구 내에서 염분과 물은 하구 순환(estuarine circulation) 과정을 거치며 밀도 차이에 의해 수직 혼합된다(Fig. 2). 표층부 내 염분 수지는 저층을 통해 하구 내로 유입된 외해수( $V_{deep}$ )와 표층수의 수직 혼합( $V_Z$ )에 의해 보존된다. 저층부 내 염분 수지는 외해 저층수( $V_{deep}$ )의 유입에 의해 유지된다.

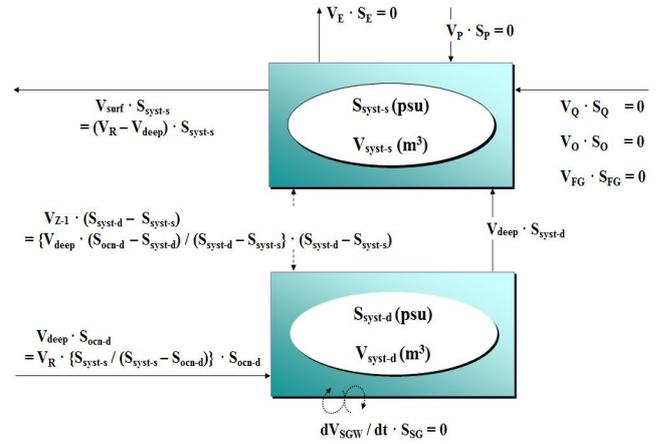


Fig. 2. Simple diagram of water and salt budget ( $g\ day^{-1}$ ) on stratification period.

(2) 성층화 기간 동안 해수의 체류 시간(residence time)

수주(water column)의 상층부( $\tau_s$ ) 및 저층부( $\tau_d$ ) 내 해수의 체류 시간은 각각 다음과 같이 계산한다.

$$\tau_s = \frac{V_{syst-s}}{|V_{surf}| + |V_Z|} \quad (2)$$

$$\tau_d = \frac{V_{syst-d}}{|V_{deep}| + |V_Z|} \quad (3)$$

( $V_{syst-s}$  : water volume of the upper layer during stratification period;  $V_{syst-d}$  : water volume of the lower layer)

## 목포항 주변 하구역의 영양염 수치

(3) 성층화 시기 염분 수치 계산:

상부 혼합층에서 염분 수치 방정식은 다음과 같다.

$$V_{\text{deep}} \cdot S_{\text{sys-t-d}} + V_Z \cdot (S_{\text{sys-t-d}} - S_{\text{sys-t-s}}) - V_{\text{surf}} \cdot S_{\text{sys-t-s}} = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$V_Z = V_{\text{deep}} \cdot \frac{S_{\text{ocn-d}} - S_{\text{sys-t-d}}}{S_{\text{sys-t-d}} - S_{\text{sys-t-s}}} \\ = \left\{ V_R \cdot \frac{S_{\text{sys-t-s}}}{S_{\text{sys-t-s}} - S_{\text{ocn-d}}} \right\} \cdot \frac{S_{\text{ocn-d}} - S_{\text{sys-t-d}}}{S_{\text{sys-t-d}} - S_{\text{sys-t-s}}} \quad (5)$$

$$V_{\text{surf}} = V_R - V_{\text{deep}} \quad (6)$$

한편, 저층수에서의 염분 수치 방정식은 다음과 같다.

$$V_{\text{deep}} \cdot S_{\text{ocn-d}} - V_{\text{deep}} \cdot S_{\text{sys-t-d}} - V_Z \cdot (S_{\text{sys-t-d}} - S_{\text{sys-t-s}}) = 0 \quad (7)$$

## 2.2 영양염 수치 산정

### 2.2.1 소해역 구분

해수 유동 모델 결과에 따르면(MLTM, 2009), 영산호 및 영암호-금호호 하구역과 외해역과의 해수 유동은 서쪽에 위치한 3개의 조수로(해남군 화원면 매월리~달리도, 달리도~눌도, 눌도~압해도)를 통해 유출·입되고 있으며, 이 중 해남군 화원면 매월리~달리도 사이의 수로는 유속이 빠르고 수심이 깊어 해수와 물질의 유출·입량이 제일 많은 것으로 조사되었다. 따라서 이곳의 주조수를 중간 경계 수역으로 하여 하구역(영산호 하구역, 영암호-금호호 하구역)과 외해역을 각각 구분하였다. 그리고 하구역에 대해서는 동서 방향과 남북 방향으로 각각 길고 넓게 분포해 있는 지형적 특성을 고려하였다. 이에 따라 영산호 방조제와 목포 시내로부터 육상 부하량의 영향을 받는 수역(Sector I), 영암호 및 금호호 방조제의 수문 개방에 따른 육상 담수 방류의 영향을 받는 수역(Sector II), 그리고 목포항 북항 지역의 육상 오염원의 영향을 받으면서 수로부(외해역과 하구역 간 통로)에 해당되는 수역(Sector III) 등 3개의 소해역으로 세분하였다(Fig. 3). 소해역 I(Sector I)의 면적은 약 15 km<sup>2</sup>로써, 동쪽으로 영산호 방조제의 전면 해역에서 시작하여 목포시, 대불공단지역, 고하도, 하사도 등에 둘러싸인 해역이다. 소해역 II(Sector II)의 면적은 약 20 km<sup>2</sup>로써, 영암방조제와 금호방조제 전면 수역에서 해남군 화원반도(화원면 구립리)와 허사도를 평행하게 가로지르는 선 이내의 해역이다. 외해역과 하구역을 연결하는 수로부에 위치한 소해역 III(Sector III)의 면적은 20 km<sup>2</sup>이다. 동쪽으로는 목포 북항 지역과 고하도의 북단 사이의 해수역, 서쪽으로는 화원반도 내측, 달리도 내측, 울도 내측, 압해도 내측을 연결한 선, 남쪽으로는 해남군

화원반도 내측에서 허사도 사이의 해역, 북쪽으로는 압해도교를 중앙으로 목포시 삼향동과 압해도(신안군 압해읍 신장리)를 평행하게 잇는 선 이내의 해역이다. 조사 해역에서의 수심은 Byun et al.(2004; 2007)과 Kim et al.(2013)의 등심선 자료에 근거하여, 소해역 I의 평균 수심은 약 15 m, 소해역 II와 소해역 III의 평균 수심은 각각 약 10 m로 정하였다.

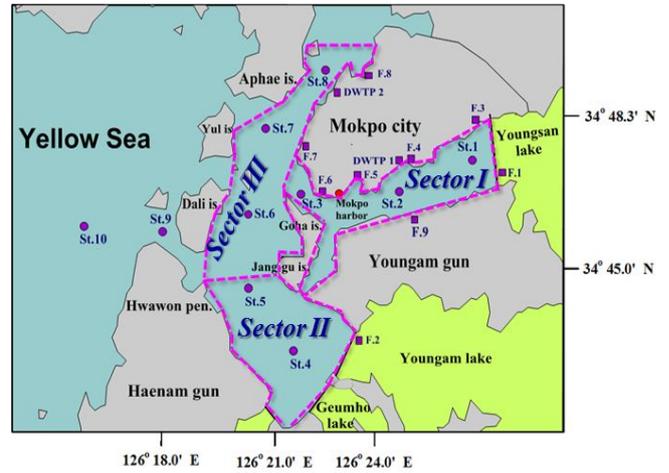


Fig. 3. Section for estimation of mass budgets in the vicinity of Mokpo harbor. (DWTP 1: the Namhae domestic wastewater treatment plant; DWTP 2: the North Harbor domestic wastewater treatment plant; F.1: Youngsan lake; F.2: Youngam lake; F.3: Samhyang stream; F.4: Ib-am stream; F.5: Dongmyeong drain; F.6: Hae-an-ro drain; F.7: Juk-kyo stream; F.8: Sanjeong agricultural industrial complex drain; F.9: Daebul industrial complex drain).

### 2.2.2 물질 수치 산정을 위한 기초 자료

수온, 염분은 현장에서 CTD(Seabird-911)를 이용하여 각 정점별로 표층에서 저층부까지 연직 방향으로 측정하였다. 이때 정점별 수심을 측정하여 5 m 이상인 경우, 표층과 저층, 또는 표층, 중층, 저층 등으로 수층을 세분화하여 채수한 다음, 분석 항목과 목적에 따라 현장에서 전처리하거나 드라이아이스로 냉동하여 실험실로 운반하였다. 특히 채수 직후, 용존 산소 측정용 시료는 고정 시약으로 즉시 전처리한 후, 수 시간 이내에 Winkler 적정법으로 정량하였다. 실험실에서는 해수 및 기수(St. 1 ~ 9), 폐수처리장 방류수(남해환경관리소, 북환경관리소), 담수호(영산호, 영암호-금호호) 등에서 채수한 시료에 대해, 해양환경공정시험기준(MLTM, 2006) 방법에 따라, Chlorophyll-a(이후 Chl-a), 부유물질(suspended solids, 이후 SS), 영양염을 각각 분석하였다. 담수호의 방류량은 한국농어촌공사 영산강 사업단(Youngsangang Project Office, KRC, 2008)으로부터 자료(Personal communication)를 제공 받았

다. 목포항 주변 해역은 반일주조(semidiurnal tide)에 의한 왕복성 조류가 우세하고, 조차가 4 m에 이르는 대조차 환경으로써 대조기에서 소조기로 또는 소조기에서 대조기로 바뀌는 기간이 최소 7일 이상인 점을 고려하여 이 기간을 전후해서 유입 담수와 물질이 해수와 충분히 혼합될 수 있다는 가정에서, 조사일로부터 최대 10여일 전까지의 실제 방류량 자료를 사용하였다. 목포시에서 유입되는 하천수의 수량과 용존 영양염 농도는 Lee(2000)의 자료를 인용하였다.

분석하거나 인용한 자료 중 영양염에 대해서, 용존 무기인(dissolved inorganic phosphorus, 이후 DIP)은 인산 인(PO<sub>4</sub>-P)으로 구하였으며, 용존 무기 질소(dissolved inorganic nitrogen, 이후 DIN)는 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N의 농도 합계로 구하였다. 이를 통해 목포항 주변 육상기원 담수 내 DIP, DIN 등의 영양염 농도값(Y<sub>0</sub>)은 소하천(Q<sub>s</sub>)과 인공호(Q<sub>a</sub>) 각각의 유입 수량의 합에 대한 각 유입 부하량의 합의 비로써 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$Y_0 = \frac{Y_s \times Q_s + Y_a \times Q_a}{Q_s + Q_a} \quad (8)$$

(Y<sub>s</sub> : Concentration of nutrients in each stream,

Y<sub>a</sub> : Concentration of nutrients in each artificial lake)

Sylaios et al.(2005)의 연구에 따르면, 현장 조사일로부터 7일 이전 동안의 누적 강우량 영향으로 만(Kavala Gulf, Northern Greece)의 표층수에서 DIN의 주요 형태(75~85%)인 NO<sub>3</sub>-N 농도값이 유의하게 증가(r<sup>2</sup> = 0.60; P = 0.004; n = 12)하였다. 따라서 강우량 및 증발량 자료에 대해 목포 기상대(Mokpo Meteorological Observatory, 2008)의 기후 데이터 중에서 현장 조사 전 일주일간의 기상 자료(강우량, 증발량)를 평균하여 부하량 계산에 이용하였다. 해안선을 따라 유출될 것으로 예상되는 담지하수(fresh groundwater)는 영산강-섬진강권역 해안지역의 지하수 유출량이 각 소해역별 집수 구역(Sector I: 42 km<sup>2</sup>, II: 32 km<sup>2</sup>, III: 24 km<sup>2</sup>) 내 강수량(mm day<sup>-1</sup>) 대비 1.10%라는 과학기술부(MST, 2007)의 조사 결과를 적용하여 추정하였다. 한편 영산강 집수역(약 3,427 km<sup>2</sup>) 내 토지 이용 용도 중에서 지하 대수층(acquifer)을 흐르는 지하수의 오염에 주된 영향을 미칠 것으로 예상되는 경작지(약 32%) 내 농업용 수용 관정(well) 지하수(Lee and Ahn, 2000), 그리고 하구역 주변의 육상에서 생활용수로 사용되는 지하수 등에서 각각 분석한 국립지하수정보센터(GIMS, 2009)의 영양염 자료를 평균하여 담지하수의 수질로 활용하였다. 퇴적물로부터의 영양염 공급량은 각 조사 시기별 저층 용출율(benthic nutrient fluxes by Fick's law: MLTM, 2009)에 각 소해역의 표면적을 곱하여 산정하였다.

### 2.2.3 영양염에 대한 물질 수지

DIN, DIP 각각의 농도(mmol m<sup>-3</sup>)에 유출·입 수량(V in m<sup>3</sup>)을 곱하여 영양염의 유동량(flux, load)을 계산한다. 비보존성 물질인 용존 무기염류(Y)의 수지(ΔY)를 나타내는 일반식은 다음과 같이 표현된다.

$$V \frac{dY}{dt} = V_1 \sum \text{influxes} - V_2 \sum \text{effluxes} + V_3 \cdot Y \quad (9)$$

정상 상태에서,  $V \frac{dY}{dt} = 0$  이므로,

$$\Delta Y = - \{V_1 \sum \text{influxes} - V_2 \sum \text{effluxes}\} \quad (10)$$

ΔY는 영양염이 하구역 내 수주에서 순 공급(net internal source, supply, or enrichment)되거나 순 제거(net internal sink, or depletion)되는 양을 나타낸다. ΔY에 관여하는 생지화학적 반응에는 광합성(primary production: PP), 섭식(grazing), 포식(predation), 사망(mortality), 분해(decomposition), 호흡(respiration), 퇴적(deposition), 저층수와 퇴적물 경계를 통한 용출(release) 작용 등이 포함되어 있다.

### 2.3 생태계 순 생산량(net ecosystem production: NEP) 추정

생태계 순 생산량(NEP: net ecosystem production)은 NEM (net ecosystem metabolism)으로 표시하기도 하며, 생산량(p: production)과 호흡량(r: respiration)의 차이로써 나타낸다. 즉, 하구역에서 총 ΔDIP flux가 입자성 유기물(POM)의 생산과 소비에 비례한다는 가정 하에, 다음과 같이 생태계의 순 생산량(이후 NEP)을 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{NEP} &= [p - r] \\ &= - (C/P \text{ ratio}) \times \frac{\Delta \text{DIP}}{A} \end{aligned} \quad (11)$$

하구역에서 주도적인 기초 생산자를 식물플랑크톤이라고 가정하면, Redfield ratio C : P = 106 : 1이 된다. A는 소해역의 표면적(m<sup>2</sup>)이다. 계산된 NEP의 값이 (+) 부호이면 하구역은 광합성에 의한 일차 생산을 통해 CO<sub>2</sub> 및 무기 영양염을 소비하는 독립영양 상태(autotrophic status)를 나타내고, 반대로 (-) 부호이면 호흡을 통해 CO<sub>2</sub> 및 무기영양염을 생산하는 종속영양 상태(heterotrophic status)로 판단한다.

## 3. 결 과

### 3.1 목포항 주변 하구역 및 연안역의 수질

목포항 주변 해역의 수질 인자에 대해 각 시기별 및 소해

목포항 주변 하구역의 영양염 수치

Table 1. Water qualities in the vicinity of Mokpo harbor

| Date*      | Section**  | Water temp.   | Sal. | Chl-a              | DO                 | SS   | DIP  | DIN   | NH <sub>4</sub> -N   | NO <sub>3</sub> -N | NO <sub>2</sub> -N |      |
|------------|------------|---------------|------|--------------------|--------------------|------|------|-------|----------------------|--------------------|--------------------|------|
|            |            | °C            | psu  | µg l <sup>-1</sup> | mg l <sup>-1</sup> |      |      |       | µmol l <sup>-1</sup> |                    |                    |      |
| May, 2008  | Sector I   | 16.9          | 32.0 | 3.7                | 10.3               | 6.7  | 0.37 | 12.51 | 4.33                 | 7.34               | 0.84               |      |
|            | Sector II  | 17.0          | 32.7 | 1.8                | 10.8               | 12.8 | 0.33 | 3.99  | 0.92                 | 2.81               | 0.25               |      |
|            | Sector III | 17.8          | 32.2 | 1.9                | 9.6                | 22.7 | 0.37 | 7.24  | 1.35                 | 5.52               | 0.37               |      |
|            | Offshore   | 16.7          | 32.9 | 1.5                | 9.6                | 13.7 | 0.44 | 8.50  | 1.12                 | 6.89               | 0.49               |      |
| Sep., 2008 | Sector I   | 25.4          | 31.3 | 7.9                | 9.1                | 16.2 | 1.01 | 6.58  | 2.62                 | 3.45               | 0.51               |      |
|            | Sector II  | 25.0          | 31.1 | 7.7                | 8.7                | 19.7 | 0.35 | 4.64  | 1.64                 | 2.26               | 0.74               |      |
|            | Sector III | 25.6          | 31.3 | 2.4                | 7.7                | 38.6 | 0.70 | 7.70  | 3.68                 | 3.26               | 0.76               |      |
|            | Offshore   | 24.8          | 31.6 | 2.3                | 8.3                | 39.4 | 0.42 | 6.60  | 1.50                 | 3.78               | 1.32               |      |
| Nov., 2008 | Sector I   | 13.7          | 32.0 | 1.4                | 9.6                | 7.4  | 0.88 | 14.92 | 3.00                 | 11.04              | 0.89               |      |
|            | Sector II  | 13.7          | 32.3 | 1.0                | 10.1               | 5.6  | 0.68 | 12.42 | 1.11                 | 10.57              | 0.73               |      |
|            | Sector III | 13.4          | 32.3 | 0.8                | 9.8                | 15.3 | 0.69 | 11.75 | 0.95                 | 10.12              | 0.68               |      |
|            | Offshore   | 14.0          | 32.7 | 0.8                | 9.8                | 23.4 | 0.63 | 10.66 | 0.63                 | 9.83               | 0.20               |      |
| Jul., 2008 | Estuary    | Surface layer | 24.0 | 28.5               | 19.9               | 13.6 | 28.1 | 0.34  | 11.64                | 0.39               | 10.04              | 1.21 |
|            |            | Deep layer    | 22.2 | 30.8               | 9.9                | 9.8  | 29.0 | 0.62  | 12.11                | 1.50               | 9.27               | 1.34 |
|            | Offshore   | Surface layer | 23.0 | 31.3               | 8.0                | 11.3 | 29.8 | 0.36  | 1.36                 | 0.19               | 0.98               | 0.19 |
|            |            | Deep layer    | 21.8 | 31.8               | 9.4                | 9.8  | 35.9 | 0.35  | 5.76                 | 0.64               | 4.66               | 0.46 |

\* The data of May, September, and November are mean values on the whole layer of between surface and bottom depth, while on July, the data of surface layer are mean values investigated from the water depth from 0 m to ca. 5 m, and deep layer data are mean values below ca. 5 m.

\*\* Sector I : St. 1~3; Sector II: St. 4~5; Sector III: St. 6~8; Offshore: St. 9~10; Estuary: St. 1~8.

역별로 구분하였다(Table 1). 현장 조사 시 수온, 염분의 수층 분포를 근거로, 비성층화 시기인 2008년 5월, 9월, 11월에는 하구역(Sector I, II)과 입구(Sector III), 그리고 외해역으로 구분하였다. 이번 조사 기간 동안 목포항 주변 해역 전체에서 수온 및 염분 성층이 발생한 7월에는 상부 혼합층(수심 약 5m 이내)과 저층부로 구분하여 외해역과 비교 정리하였다. 각 수질 인자의 분포 특성에 대한 구체적인 설명은 Kim et al.(2015)에서 상세하게 언급되어 있다. 여기서는 용존 무기 영양염(DIP, DIN)에 대한 물질 수지를 산정하여, 그 결과에 대한 이유를 설명하고, 영양염의 거동(behavior)을 이해하기 위한 자료로 활용하였다.

3.2 인공호의 담수 방류 유무에 따른 체류 시간

인공 호수의 방류량을 비교해 보면, 5월에 영산호의 방류량은 영암호-금호호의 방류량에 비해 약 2.7배 이상 많았다(Table 2). 7월에는 현장 조사 하루 전 영산호의 방류가 이루어졌고, 영암호-금호호에서는 10일 전 담수 방류가 이루어져, 담수 방류 시기에 있어서 큰 차이를 나타냈다(Table 2). 9월과 11월에는 현장 조사일을 기준으로 10여일 동안 담수 방류가 없었던 것으로 파악되었다(Table 2). 반면 영암호-금호호로부터 9월에 현장 조사 전날까지 5일 연속 담수 방류가 이루어졌고, 11월에는 7일 전 담수 방류가 이루어졌다(Table 2). 이와 같은 담수 방류 규모와 시점의 차이는 각 조사 시기별, 소해역에서의 체류 시간 증가, 또는 감소 등으로 나타났다(Fig. 4).

통합 물-염분 수치에서 산정된 체류 시간을 정리해 보면,

Table 2. Discharges of freshwater from artificial lakes in the vicinity of Mokpo harbor

| Sampling date | Young-san lake |   | Young-am and Geum-ho lakes |   |
|---------------|----------------|---|----------------------------|---|
|               | Discharge date | Discharge volume (×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) | Discharge date             | Discharge volume (×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) |
| 2008.05.26    | 2008.05.20 ~21 | 18,572  | 2008.05.17 ~19             | 6,657   |
| 2008.07.16    | 2008.07.15     | 7,451   | 2008.07.06                 | 5,100   |
| 2008.09.20    | 2008.09        | -*  | 2008.09.15 ~19             | 34,139  |
| 2008.11.26    | 2008.11        | -**   | 2008.11.17                 | 12,890  |

\*, \*\* Hyphens mean that freshwater was not discharged from each artificial lake for about 10 days before the sampling date.

5월의 경우, 현장 조사 5일 전 영산호에서 방류된 담수의 영향으로 소해역 I에서의 체류 시간은 약 1일이었다. 반면 6일 전 영암호-금호호의 담수 방류가 이루어진 소해역 II에서의 체류 시간은 약 3일로 계산되었다. 이와 같은 차이는 담수 방류 규모와 시기 차이에 의해서 영향을 받은 것으로 사료된다. 누적 방류량에 있어서 영산호가 영암호-금호호보다 약 2.7배 이상 많았다. 또한 현장 조사일과 가까운 시기에 담수가 방류됨으로써, 하구역(각 소해역)에서의 체류 시간이 짧아졌고, 반대의 경우에는 체류 시간이 길어졌다. 9월과 11월에는 특징적으로 소해역 I에서 영산호의 방류가 없었던 시기로, 체류 시간은 각각 약 10여일 이상으로 나타나, 같은 시기 영암호-금호호에서의 담수 방류에 의한 각각의 체류 시간 0.6일(9월), 1.7일(11월)과 큰 차이를 보였다. 한편 7월 조사에서 가장 특징적인 현상은 목포항 주변 해역의 수주에

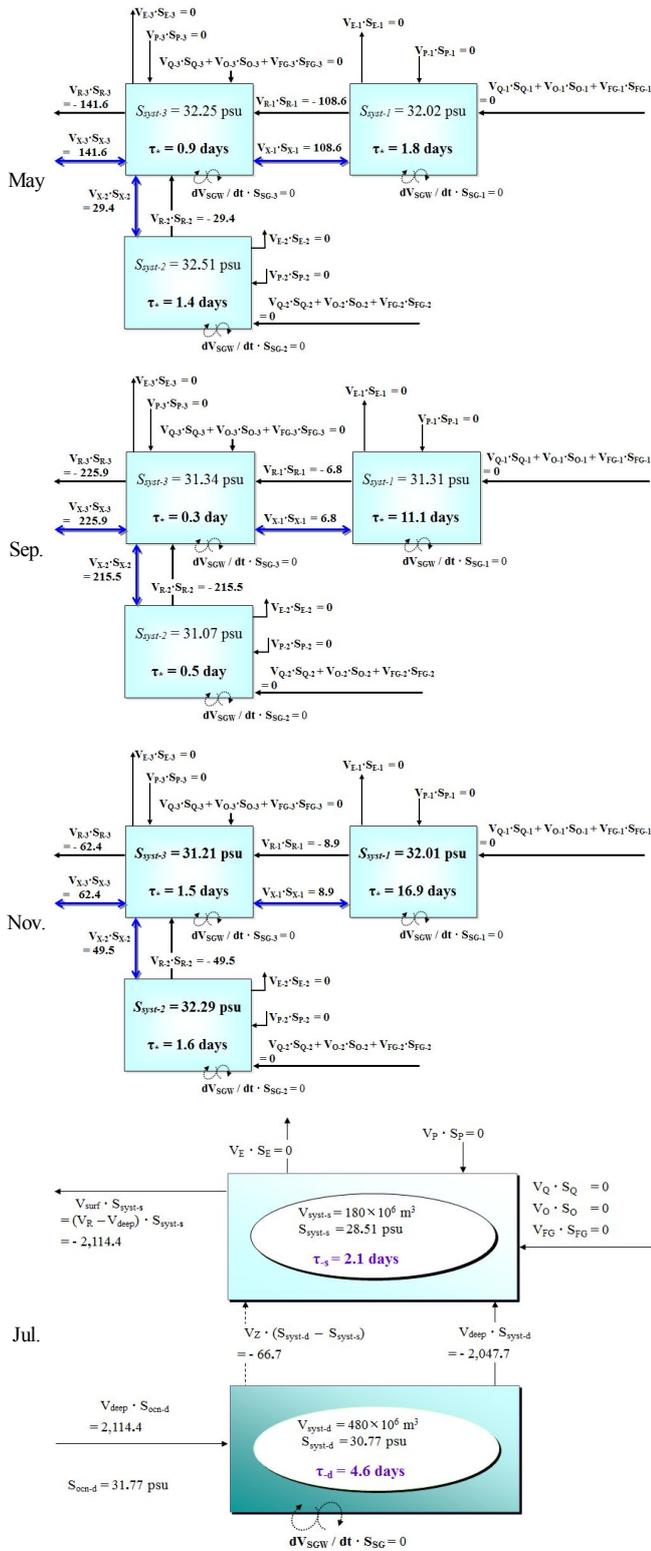


Fig. 4. Water and salt budgets ( $\times 10^9$  g day<sup>-1</sup>) in 2008. Each sign for loads means the direction of flow: Negative signs mean outputs from each water column in the system.

표층과 저층부 간 수온 및 염분 성층이 광범위하게 발생하였다는 점이다(Kim et al., 2015). 이 시기 저층부에서의 체류 시간은 4.6일이었고, 표층부는 2.1일이었다. 연직 수층 간 이러한 체류 시간 차이는 현장 조사 이전 3곳의 인공 호수(영산호, 영암호, 금호호)에서 고온 저밀도의 담수 방류가 이루어져, 큰 밀도 차이로 인해 수직적인 혼합이 제한된 상태에서, 표층수가 유동(flow)에 의해 상대적으로 빠르게 외해역으로 밀려갔을 것으로 예상할 수 있다. 이와 대조적으로 저층부는 해저 지형의 복잡한 구조와 기복, 불규칙한 수심 분포, 마찰력 등에 의해 체류 시간이 장기화되었을 것으로 추측된다.

### 3.3 영양염 수치

#### 3.3.1 용존 무기인(DIP) 수치

5월에는 두 하구역에 각각 담수호의 방류가 있었다(Table 2). 소해역 I(영산호 하구역)에서 5월에 DIP 부하량의 주요 유입원은 영산호 방류를 비롯한 담수 내 육상기인 부하량( $11.69 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>), 소해역 III과의 혼합( $8.57 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>), 퇴적물 용출( $2.36 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>) 등이었으며, 영산호 하구 내에서  $21.28 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>이 순 제거(- $\Delta Y$ )되는 것으로 파악되었다(Fig. 5). 한편, 소해역 II(영암호-금호호 하구역)에서는 소해역 III과의 혼합 과정을 통한 유입량( $16.13 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>)이 가장 많았고, 5월 단위 부하량 중 가장 많은 유동량을 나타냈다. 영암호-금호호 하구역 내에서는  $15.98 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>이 순 제거(- $\Delta Y$ )되었다. 가장 외측에 있는 소해역 III에서는 외해역으로부터  $13.26 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>의 DIP가 유입되고 있어, 하구역(특히 영산호 하구역)을 통한 DIP 부하량에 상당하는 유입량을 나타냈다.

9월에 영산호에서는 조사 직전 10여일 동안 담수 방류가 없었다(Table 2). 그럼에도 불구하고 소해역 I에서 DIP의 주요 유입원은 목포시의 남해하수처리장 방류수와 소하천을 통한 유입 부하량이었으며, 다음으로 퇴적물로부터의 용출량이 뒤를 이었다(Fig. 5). 한편 조석 혼합 과정과 잔차류( $12.01 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>)를 통해 소해역 III으로 DIP 부하량이 유출되었고, 소해역 I에 위치한 영산호 하구역 내에서  $5.09 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>이 순 제거(- $\Delta Y$ )되었다. 소해역 II의 경우, 영암호-금호호에서 현장 조사일 하루 전까지 5일 연속 담수 방류가 이루어졌다. 그러나 육상기인 부하량( $0.88 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>)보다는 소해역 III으로부터 유입된 DIP 유동량( $25.27 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>)이 28배 이상 많았다. 한편 수로부에 위치한 소해역 III의 수주에서는 DIP 부하량이 공급 과잉( $\Delta 214.38 \times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>) 상태를 나타냈다.

11월에 영산호에서는 현장 조사일 전에(10여일 동안) 담수 방류가 이루어지지 않았다. 이 시기 소해역 I에서는 폐수 처리장 방류수(남해하수처리장)와 소하천을 통한 DIP 부하량

## 목포항 주변 하구역의 영양염 수치

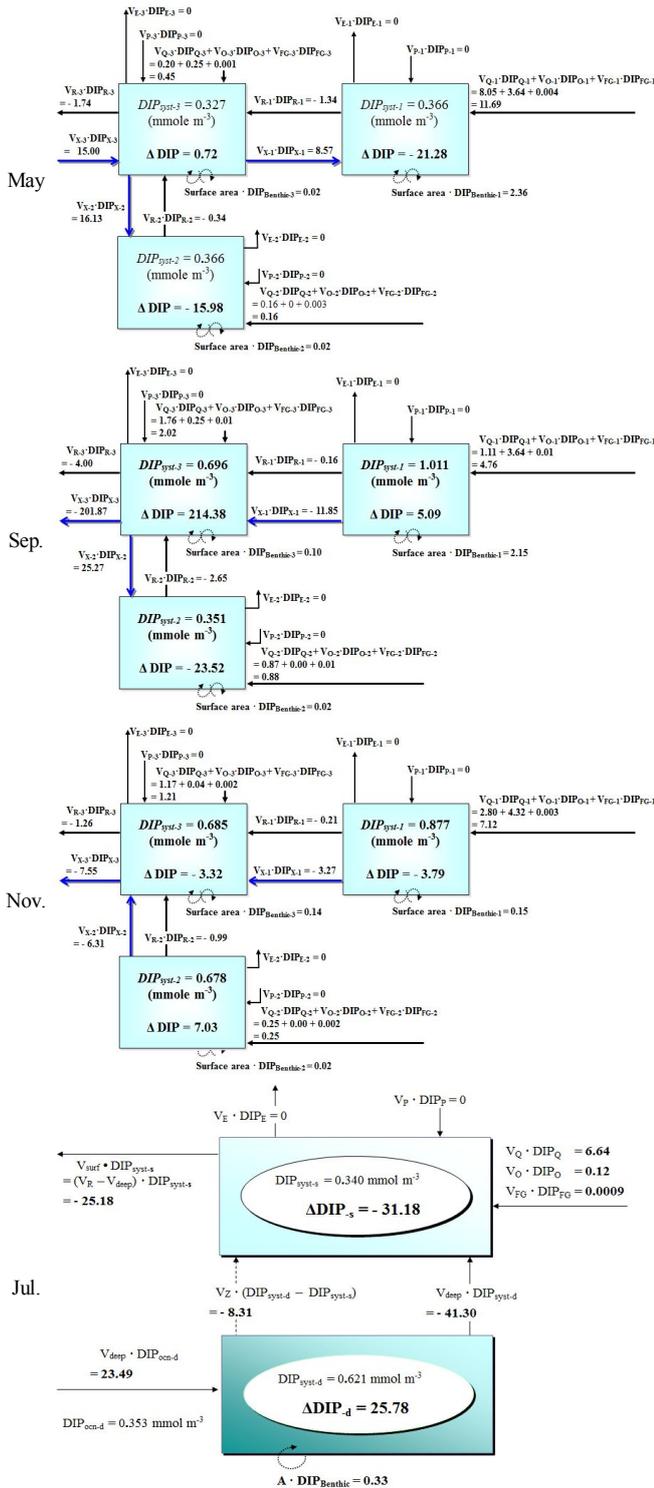


Fig. 5. DIP (dissolved inorganic phosphorus) budget ( $\times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ ) in 2008. Each sign for loads means the direction of flow. Negative signs of delta ( $\Delta$ ) mean the degree of removal, sink, or deficiency from each water column in the system.

( $7.12 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )이 가장 많았다(Fig. 5). 소해역 II의 경우, 영암호-금호호에서 담수 방류가 있었음에도, 이를 통한 DIP 부하량은 상대적으로 매우 낮았다( $0.25 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ ), 퇴적물로부터의 용출을 통한 유입량은 더 미미하였다( $0.02 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ ). 반면 조석 혼합과 잔차류를 통해 각각  $6.31 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ ,  $0.99 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 이 소해역 III으로 유출되었다. 소해역 II 내 물질 수지 결과를 보면 DIP가 축적되고 있었다( $\Delta 7.03 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ ). 소해역 III에서 DIP 부하량의 대부분은 조석 혼합과 잔차류를 통해 소해역 I ( $3.27 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )과 II( $6.31 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )에서 각각 유입된 양이었으며(Fig. 5), 육상 기인 부하량과 퇴적물 용출량( $1.35 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )은 상대적으로 적은 비율을 나타냈다. 소해역 III을 통해 외해역으로 유출되는 DIP 부하량은  $8.81 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 로 계산되었다. 소해역 III 내 물질 수지 결과를 보면 DIP가 순 제거( $\Delta - 3.32 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )되고 있었다.

한편, 7월 조사 전 영산호, 영암호-금호호 등의 인공 호수에서 방류가 이루어져 목포 주변 해역이 담수의 영향을 받았고, 성층화가 광범위하게 발생하였다(Kim et al., 2015). 이 시기 외해역으로부터 저층수를 통해  $23.49 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 의 DIP가 목포 연안 해역으로 유입되었다. 퇴적물에서는  $0.33 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 이 용출되었다(Fig. 5). 또한 저층 수주에서는 DIP의 추가 부하량( $25.78 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )이 발생하였고, 하구 순환(estuarine circulation) 과정을 통해 표층수로 이동한 다음, 육상기인 DIP 부하량과 혼합된 후, 외해역으로 유출( $25.18 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )되는 것으로 나타났다. 결과적으로 7월 영양염 수치에서 저층수에서는 DIP 부하량이 축적되었고, 표층수에서는 DIP가 순 제거되었다.

### 3.3.2 용존 무기질소(DIN) 수치

5월에 소해역 I에서 DIN 부하량 중 영산호의 방류를 비롯한 육상기인 담수( $470.6 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )가 가장 많은 비중을 차지하였고, 다음으로 퇴적물에서  $32.6 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 이 공급되었다(Fig. 6). 그러나 잔차류와 조석 혼합을 통해  $518.6 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 이 소해역 III으로 유출되었다. 결과적으로 소해역 I에서 DIN  $15.4 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 이 순 제거되었다. 소해역 II에서 영암호-금호호의 담수 방류를 통한 DIN 유입량은  $67.1 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 이었다(Fig. 6). 이 때 소해역 III과의 물리적 혼합(조석 혼합)을 통해 유입되는 양은  $662.5 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 로 9배 이상 많았다. 외부(소해역 III)로 유출되는 양( $5.6 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ )은 상대적으로 적어, 결국 소해역 II의 수주 전체에서  $725.5 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ 이 순 제거되었다. 소해역 III에서 DIN 부하량 중 가장 큰 유입 경로는 소해역 I과의 물리적 순환이었고( $518.6 \times 10^6$  mmole  $day^{-1}$ ), 다

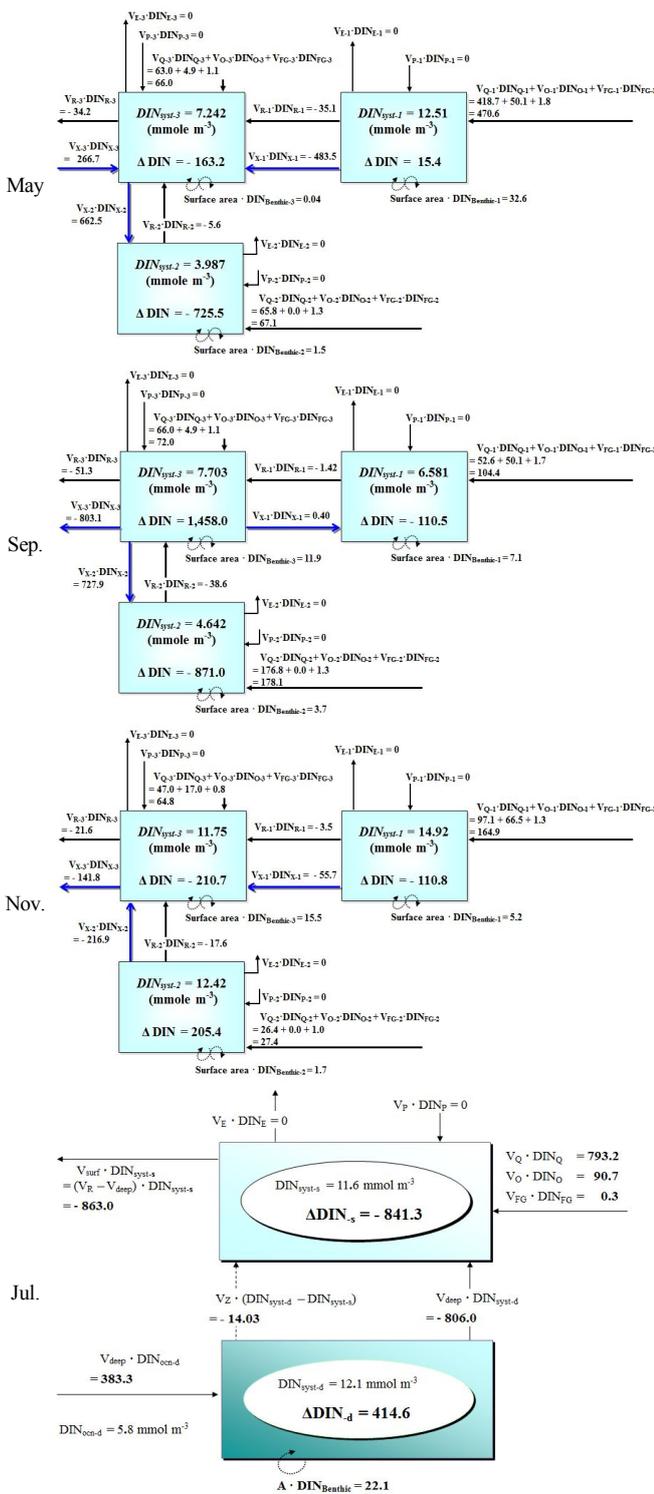


Fig. 6. DIN (dissolved inorganic nitrogen) budget ( $\times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ ) in 2008. Each sign for loads means the direction of flow. Negative signs of delta ( $\Delta$ ) mean the degree of removal, sink, or deficiency from each water column in the system.

음으로 외해에서 유입되는 양( $266.7 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )이었다. 주요 유출 경로는 소해역 II와의 조석 혼합( $662.5 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )이었다.

9월에 현장 조사 전 10일 동안 영산호의 방류는 기록되지 않았다(Table 2). 이 시기 소해역 I에서 DIN의 주요 유입원은 주변 집수역에서 유입되는 담수(소하천, 남해하수처리장)와 퇴적물 용출이었다(Fig. 6). 영암호-금호호의 방류가 이루어진 소해역 II의 경우, 담수를 통한 DIN 유입( $178.1 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )이 있었으나, 소해역 III으로부터  $727.9 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ 이 유입되어 가장 큰 비중을 나타냈다. 이 시기 소해역 I과 II에서는 수중에서 DIN 부하량이 순 제거되었다. 그러나 소해역 III에서는 매우 높은 DIN 부하량이 축적되었다( $\Delta 1,458.0 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ ).

영산호의 방류가 없었던 11월에도 소해역 I에서는 소하천과 남해하수처리장 방류수 등을 통한 담수 내 DIN 부하량이 가장 큰 유입원이었다( $164.9 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ ). 이에 비해 소해역 II에서는 담수(영암호-금호호) 방류가 있었음에도 육상기인 DIN 부하량( $27.4 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )은 상대적으로 작았다. 이 때 DIN의 주요 유출 경로는 소해역 III과의 물리적 순환( $234.5 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )이었다. 결과적으로 영암호-금호호 하구역에서 DIN이 축적( $\Delta 205.4 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )되어 있는 것으로 파악되었다.

염분 및 수온 성층이 발생한 7월에, DIN 부하량의 주요 유입 경로는 인공 담수호(영산호, 영암호-금호호)를 비롯한 육상기원 담수( $884.2 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )였다(Fig. 6). 한편으로 저층수를 통해 외해역에서 하구역으로 유입( $383.3 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ )이 있었고, 결국 저층부( $\Delta \text{DIN}_{\text{d}}$ )에서는  $414.6 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ 의 DIN이 축적되고 있었다. 이 시기 하구역(표층부) 내에서 순 제거( $-\Delta Y$ )되는 DIN은  $841.3 \times 10^6 \text{ mmole day}^{-1}$ 이었다.

### 3.4 생태계 내 순 생산량(net ecosystem production: NEP)

생태계 내 순 생산량(NEP)에 있어서 비성층화 시기인 5월에 영산호, 영암호-금호호의 방류 영향을 각각 받은 소해역 I과 II에서 양(+)의 부호를 나타냈다. 이로써, 이 시기에 식물플랑크톤에 의한 일차 생산이 우세한 독립영양 상태(autotrophic status)로 파악되었다(Table 3).

9월에는 영암호-금호호의 담수 방류 영향을 받은 소해역 II에서는 독립영양 상태를 나타냈으나, 담수 방류 영향이 없었던 소해역 I에서는 종속영양 상태(heterotrophic status)를 나타냈다. 11월에 NEP 결과는 소해역 I과 III에서 일차 생산이 우세하다는 것을 나타내고 있다. 반면, 5월과 9월에는 소해역 III에서, 11월에는 소해역 II에서 각각 NEP가 음(-)의 부호를 나타냄으로써, 종속영양 상태를 보였다.

강한 밀도 성층이 발생한 7월에 표층수 내 NEP는 일차 생

## 목포항 주변 하구역의 영양염 수치

산(+ 부호)이 우세한 것으로 나타났다(Table 3). 그러나 밀도 약층 이심의 저층수에서는 호흡 활동(- 부호)이 훨씬 강한 것으로 나타났다.

Table 3. Net ecosystem production (NEP) in the vicinity of Mokpo harbor in 2008.

| Unit: g C m <sup>-2</sup> · day <sup>-1</sup> |                    |         |        |                |        |
|---|--------------------|---------|--------|----------------|--------|
| Net ecosystem production                      |                    |         |        |                |        |
| Section                                       | Non stratification |         |        | Stratification |        |
|   | May                | Sep.    | Nov.   | Layer          | Jul.   |
| Sector I                                      | 1.80               | -0.43   | 0.32   | Surface        | 0.72   |
| Sector II                                     | 1.02               | 1.50    | - 0.45 | Deep           | - 0.60 |
| Sector III                                    | - 0.05             | - 13.64 | 0.21   |                |        |

\* Net ecosystem production (NEP) is calculated as the difference of production and respiration (p - r).

## 4. 토 의

### 4.1 하구역의 계절별 영양염 거동 특성

하구역은 지리·지형적인 특성(개방형/폐쇄형 지형), 조차(대조차/소조차), 방조제 등 대형 인공 구조물 설치 등에 의해 담수·기수와 해수의 순환 체계가 큰 변동을 겪게 된다(Park et al., 2001). 하구역의 영양염 분포 변화 및 거동에 영향을 미치는 주요 인자는 담수 방류와 계절 변화이다(Kwon et al., 2004; Jeong et al., 2005). 특히 목포항 주변 하구역은 영산호 및 영암호-금호호에서 매일 또는 규칙적으로 수문을 개방하는 것이 아니라, 각 담수호의 저수 용량과 주변 해역의 해양물리적인 인자들을 고려하여 간헐적인 담수 방류가 이뤄지고 있다. 또한 담수 방류량에 있어서도 각 하구역(영산호 하구역, 영암호-금호호 하구역)별로 차이가 크고, 방류 시점, 연속 방류 기간 등이 제각각 다른 양상을 보이고 있다(Kim et al., 2015). Table 4에 제시된 자료는 각각의 현장 조사일을 기준 시점으로 이러한 요인들이 복합적으로 작용한 결과이다. 먼저 5월에 DIP는 인공호(영산호, 영암호-금호호)의 방류가 있었던 소해역 I과 II에서 매우 높은 제거율(94% 이상)을 보였다(Table 2, Table 4). 반면, DIN은 소해역 별로 큰 차이를 보였다. 담수 방류량이 더 많았고, 현장 조사 5일 전까지 담수 방류가 이루어졌던 소해역 I에서 DIN이 소비(제거)되지 않고, 일부는 축적되는 것으로 나타났다(3.1%). 이와 대조적으로 담수 방류일부터 7일 경과한 소해역 II에서는 유입된 DIN 부하량의 대부분이 제거(99.2%)되는 것으로 나타났다(Table 2, Table 4). 이 시기 영산호와 영암호의 방류수 내 DIP 농도는 각각 2.44 μmol L<sup>-1</sup>, 0.20 μmol L<sup>-1</sup>로써 12배 이상 큰 차이가 있었음에도(Kim et al., 2015), 소해역 I과 소해

역 II에서 DIP 농도는 각각 0.37 μmol L<sup>-1</sup>, 0.33 μmol L<sup>-1</sup>로 비슷한 분포를 보였다(Table 2). 하구역에서 DIP의 주요 제거 경로는 식물플랑크톤에 의한 흡수(uptake)이다(Jeong et al., 2005). 이 시기 소해역 I에서의 Chl-*a* 농도는 평균 3.7 μg L<sup>-1</sup> 이었고, 소해역 II에서는 평균 1.8 μg L<sup>-1</sup>이었다. 이와 같이 식물플랑크톤의 생체량(as Chl-*a*) 차이는 시간 경과에 따른 수중 DIP의 제거율 변화에도 큰 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 수중 DIP의 다른 제거 요인은 흡착(adsorption) 과정이다(Lim et al., 2007). 육상기원 담수에서 DIP는 고농도를 유지하나, 하구역으로 유입된 후 저염분에서 고염분 해역(5월 조사 시, 32.0 psu 이상)으로 운반되면서, 양이온 성분(Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>), 유·무기성 부유물(suspended solids: SS) 등과의 흡착을 통해서 수중에서 제거된다(Lim et al., 2007). 5월 조사 시, SS 농도가 소해역 I에서 6.7 mg L<sup>-1</sup>이었고, 소해역 II에서는 12.8 mg L<sup>-1</sup>이었다. 상관성(Pearson's correlation) 분석 결과, 영산호 하구역(r=-0.63, P<0.05)보다는 영암호-금호호 하구역(r=-0.70, P<0.05)에서 SS가 흡착을 통해 수중 DIP 제거에 조금 더 실효적인 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

한편, 5월 영양염 수치 결과에서 특이한 점으로, DIP와 DIN이 외해역에서 수로부(소해역 III)를 통해 영산호 하구역과 영암호-금호호 하구역으로 역(逆)유입되고 있었다(Figs. 5 and 6). 이와 같은 사실은 기존 연구(Yoon, 2001)에서 저수온기(2월, 11월 조사)에 영산호 하구역 내 DIP 농도 증가 원인이 담수 방류보다는 외해수와의 교환에 의해서 더 큰 영향을 받고 있기 때문이라는 결과와 함께, 다른 시기에도 외해역으로부터 영양염이 공급되고 있다는 점을 시사하고 있다. 목포항 주변 해역 전체로 보면, 하구역에서 영양염의 제거가 훨씬 우세하다고 하더라도, 외해수와의 교환이 원활하지 않은 영산호 하구역(소해역 I)으로 역유입되고 있는 영양염은 해저 지형(sill)과 상대적으로 깊은 수심, 높은 육상기원 유입 부하량 등의 영향으로 수질을 더욱 저하시키고 부영양화를 심화시키게 된다(Kim, 2006; Kim et al., 2015).

9월에 각 소해역별 영양염 수치 결과에서는 변동이 매우 컸다. DIP의 경우 담수 방류가 없었던 소해역 I 내에서 약 73% 이상 증가하였다(Table 4). 또한 9월은 이번 현장 조사 기간 중 수온이 가장 높았던 시기(Table 1)로, 미생물의 활동성 증가와 그에 따른 유기물 분해가 활발하게 진행되었을 것으로 추측된다. 실제로도 저층 퇴적물로부터 DIP 용출 부하량이 목포항 주변 세 소해역 중에서 가장 많았다(Fig. 5).

무기 영양염들의 농도(DIP: 0.37~2.64 μmol L<sup>-1</sup>; DIN: 1.11~17.3 μmol L<sup>-1</sup>)에 있어서도 표층수에 비해 저층수에서 최대 15배 이상 높은 값을 보였다(Kim et al., 2015). 이와 같은 사실은 퇴적층으로부터의 영양염 용출 외에도(Figs. 5 and 6), 고수온기(9월 목포항 주변 전 수역 평균 수온 25.0°C 이상)

Table 4. Variation of nutrient budgets in each sub-region of the vicinity of Mokpo harbor

Unit:  $\times 10^6$  mmole day<sup>-1</sup>

| Month | Mass balance      | DIP budget   |                 |                 | Mass balance      | DIN budget   |               |                 |
|-------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|---------------|-----------------|
|       |                   | Sector I     | Sector II       | Sector III      |                   | Sector I     | Sector II     | Sector III      |
| May   | ΣInputs           | 22.62        | 16.32           | 17.16           | ΣInputs           | 503.2        | 731.1         | 859.9           |
|       | ΣOutputs          | 1.34         | 0.34            | 17.88           | ΣOutputs          | 518.6        | 5.6           | 696.7           |
|       | <b>Budget (%)</b> | <b>▽94.1</b> | <b>▽97.9</b>    | <b>△4.2</b>     | <b>Budget (%)</b> | <b>△3.1</b>  | <b>▽99.2</b>  | <b>▽19.0</b>    |
| Sep.  | ΣInputs           | 6.91         | 26.17           | 16.76           | ΣInputs           | 111.9        | 909.7         | 124.3           |
|       | ΣOutputs          | 12.00        | 2.65            | 231.14          | ΣOutputs          | 1.4          | 38.6          | 1,582.3         |
|       | <b>Budget (%)</b> | <b>△73.7</b> | <b>▽89.9</b>    | <b>△1,279.2</b> | <b>Budget (%)</b> | <b>▽98.7</b> | <b>▽95.8</b>  | <b>△1,172.6</b> |
| Nov.  | ΣInputs           | 7.27         | 0.27            | 12.13           | ΣInputs           | 170.0        | 29.1          | 374.1           |
|       | ΣOutputs          | 3.48         | 7.30            | 8.81            | ΣOutputs          | 59.2         | 234.4         | 163.4           |
|       | <b>Budget (%)</b> | <b>▽52.2</b> | <b>△2,590.4</b> | <b>▽27.4</b>    | <b>Budget (%)</b> | <b>▽65.2</b> | <b>△706.3</b> | <b>▽56.3</b>    |

| Month | Mass balance      | DIP budget    |               | Mass balance      | DIN budget    |               |
|-------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|
|       |                   | Surface layer | Deep layer    |                   | Surface layer | Deep layer    |
| Jul.  | ΣInputs           | 57.61         | 24.75         | ΣInputs           | 1,724.8       | 437.3         |
|       | ΣOutputs          | 25.82         | 50.86         | ΣOutputs          | 884.8         | 840.8         |
|       | <b>Budget (%)</b> | <b>▽55.3</b>  | <b>△108.2</b> | <b>Budget (%)</b> | <b>▽49.4</b>  | <b>△102.3</b> |

△(%) indicates positive (+) sign meaning supply, or excess into the system, whereas ▽(%) indicates negative (-) sign meaning removal, or sink from the system.

미생물 활성도 증가에 따라 수중에서도 영양염의 재생이 진행되고 있었을 가능성을 시사하고 있다(Conley et al., 1995; Kim et al., 2015). 한편 소해역 II에서는 9월 현장 조사 직전 대규모의 담수 방류가 이루어졌음에도 불구하고(Table 1), 물질수지 산정 결과, 상대적으로 적은 양의 유입 부하량이 나타났다(Fig. 5). 이러한 이유는 영암호-금호호 집수역에 분포한 경작지(영산강 집수역 약 3,427 km<sup>2</sup> 내 전체 토지 이용률 중 농경지 32% 차지: Kim et al., 1999)에서 성숙기 또는 추수기에 접어든 작물에 대한 비료 사용량 감소와 그에 따른 인위적인 영양염의 발생 감소, 유입 부하량 감소 등의 영향 때문으로 사료된다. 실제로 7월에 비해 9월에 영암호 내 DIP 농도가 15배 이상 감소하였고, DIN 농도는 6배 이상 감소한 것으로 나타났다(Kim et al., 2015).

또 한가지 특이한 점은 9월 소해역별 Chl-*a* 농도 분포에 있어서, 소해역 III 내 Chl-*a*의 농도가 다른 소해역에 비해 현격하게(31% 수준) 낮았으며, 대조적으로 수중 SS 농도, 무기영양염 농도(특히, DSi, DIN)는 소해역 III에서 가장 높았다는 점이다. 또한 생태계 내 순 생산량(이하 NEP)에 있어서, 소해역 III에서 매우 높은 음의 부호(-13.64 g C m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup>)를 나타냈다(Table 2). 이러한 결과에 대한 원인으로 우선 고려할 수 있는 가능성은 유기물의 산화, 해양 생물들의 호흡 등에 의해 수중 내 영양염의 추가 공급, 즉 영양염의 재생(regeneration)이 있음을 시사하였다. 두 번째 가능성은 소해역 III에 유입된 대량의 영양염들이 상대적으로 낮은 식물플랑크톤 분포로 인해 흡수(uptake), 제거되지 않은 채, 축적

(enrichment)되어 있었던 것으로 추정된다. 그러나 이 시기(9월) 소해역 III의 체류 시간은 0.3일에 불과하여, 생화학적 과정만으로는 일정 구역(수역)에서 영양염의 부하량이 대량으로 증가했다고 추정하기에는 무리가 있다. 목포항 주변해역에서 영양염의 국지적인 축적 현상이 일시적인 것인지, 또는 빈도가 높은 현상인지는 추후 연구가 필요할 것으로 사료되나, 주시하다시피 본 연구 해역이 매우 복잡한 해안 구조와 반폐쇄된 지형 특성으로 외해역과의 물질 순환이 원활하지 않다는 점을 주목할 필요가 있다. 소해역 III은 영산호 하구역과 영암호-금호호 하구역의 입구에 해당되며, 주변에 산재해 있는 도서(압해도, 울도, 달리도, 고하도, 장구도 등)가 해수 유동을 방해하고 있다. 이와 비슷한 사례에 대해 Kim(1990)은 해수 유동이 원활하지 않은 내만 해역에서, 만(또는 하구역)과 외해역 간 수온 및 염분 차이에 의해 만(灣) 입구에서 일시적인 수괴 갇힘 현상(tidal trapping)이 나타나며, 두 수역 간 밀도차가 커질수록 이 현상이 증대한다고 하였다. 목포항 주변 하구역은 담수 방류의 영향이 매우 큰 수역이므로, 밀도 차이에 의한 수괴 이동의 정체 상태가 빈번하게 발생할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 세 번째 가능성으로써, 하구역과 외해역 간 물리적 순환의 불균형으로 인해 수괴 내 영양염의 과잉 축적, 즉 적체(congestion)가 발생한 것으로 판단된다. 수괴의 정체 시간이 상대적으로 짧게 끝나고, 해수 유동이 다시 원활해질 수 있으나, 여기서 주목해야 할 점은 낙조류에서 창조류, 또는 창조류에서 낙조류로의 유향 및 유속 변화에 의해 정체된 수괴가 인접한 하구

역(영산호 하구역, 영암호-금호호 하구역)으로 언제든지 재 유입되어 해양 환경적인 문제 발생의 요인이 될 수 있다는 점이다. 이러한 가능성은 영양염 수치 산정을 위한 과정과 결과에서 잘 나타나고 있다. 9월에 소해역 I과 II에 비해, 육상과 퇴적층으로부터 소해역 III 안으로 유입되는 영양염 부하량이 현저하게 높지 않거나(DIP 부하량), 오히려 유입량이 더 낮은(DIN 부하량) 수치를 가리키고 있음에도, 소해역 III에서 주변 수역으로, 특히 소해역 I(DIN 부하량), 또는 소해역 II(DIP 및 DIN 부하량)의 하구역 방향으로 영양염이 역(逆)운반되고 있었다(Figs. 5 and 6). 이번 연구 결과에서는 영암호-금호호 하구역으로 재유입되는 영양염 부하량이 훨씬 많아, 외해수와의 혼합을 통해 부하량에 의한 영향이 곧 저감(희석 효과, 자연 정화)될 것으로 예상되나, 향후 집중 조사를 통해 해양물리적 순환 체계에 따른 영양염의 이동 경로를 보다 면밀하게 파악해 둘 필요가 있다고 판단된다.

11월에 영산호 하구역에 위치한 소해역 I과 주요 수로부인 소해역 III에서 DIP 부하량이 제거되는 결과를 나타냈다. 반면, 현장 조사 7일 전, 영암호-금호호로부터 담수 방류가 있었던 소해역 II의 수층에서는 DIP가 축적되고 있는 것으로 나타났다. 이 시기 소해역 II에서 Chl-*a*의 평균 농도는  $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로써, 담수 방류가 없었던 소해역 I에서의 농도보다 오히려 낮은 농도값을 보였다. 이처럼 수주 내 Chl-*a*의 낮은 농도는 식물플랑크톤에 의한 영양염의 소비 감소로 이어지며, 결국 수계 내 영양염의 축적을 야기한 것으로 판단된다. 한편 NEP 산정 결과(Table 3), 11월에 소해역 II에서 광합성에 의한 1차 생산량보다 호흡량이 더 큰 것으로 나타났다( $-0.45 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ). 이러한 수치는 다른 측면에서 소해역 II에서 영양염이 호흡과정을 통해 추가 공급되었다는 가능성을 뒷받침하고 있다.

성층화가 가장 뚜렷하게 발생한 7월의 물질수지를 계산한 결과에서, 밀도약층 상층부(수심 약 5 m 이내, 이하 표층수)에서 DIP와 DIN 부하량 중 약 절반은 제거되었고, 나머지는 외해역으로 유출되었다. 이 때 NEP는 양의 부호를 갖는 수치( $0.72 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )를 보임으로써, 광합성에 의한 일차 생산이 우세하였다. 한편, 저층수에서는 DIP와 DIN 부하량 모두 추가 공급되고 있었다(Table 4). 또한 NEP 산정 결과에서도 음의 값( $-0.60 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )을 나타내, 호흡량이 더 큰 것으로 나타났다. 이번 7월 현장 조사에서 수주의 성층화가 장기화되면서 나타나게 되는 저층수 내 산소 결핍이나 빈산소 상태는 관측되지 않았다. 그러나 상기 언급된 저층수 내 호흡량에 대해 소비된 산소 요구량으로 환산하면  $50.0 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 이다. 이 값을 여름철 빈번하게 빈산소 상태가 발생하는 영산호 하구역(소해역 I의 면적: 약  $15 \text{ km}^2$ )의 저층수( $4.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ )에 적용하면, 이론적으로 하루 이내에

완전한 무산소 상태( $5.45 \times 10^{-8} \text{ mg L}^{-1}$ )가 된다. 수주 내 성층이 발생되면, 대기로부터 수직 혼합을 통한 산소 공급은 거의 차단되고, 외해수와의 교환에 의해서만 용존 산소가 공급되나(Jeong and Cho, 2003; Kim and Kim, 2003), 영산호 하구역은 길고 협소한 수로형 구조, 해저 지형의 기복 등에 의해 외해수와의 혼합이 제한을 받고 있다. 또한 7월 저층수 내 해수의 체류 시간은 4.6일로써(Fig. 4), 저층 수괴의 산소 결핍 상태를 해소하지 못할 것이다. 영산호 하구역처럼 반폐쇄적 지형 특성이 있는 마산만의 연구 결과에서도 이를 뒷받침하고 있다. 즉, 마산만 및 진해만의 하계(6월) 성층화 발생 시기에 저층 빈산소 수괴 형성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 SOD(sediment oxygen demand in  $47.4 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )라는 연구 결과(Choi et al., 1994)와도 잘 부합하고 있다. 7월 물질 수치 결과와 기존 연구(Choi et al., 1994)를 종합해 보면, 영산호 하구역의 빈산소 수괴 형성을 방지하기 위해서는 예방적 조치로써 유기물, 영양염 등의 유입 부하량을 저감하는 대책이 선행되어야 하며, 수주의 성층화가 진행되었을 경우에는 SOD를 저감하기 위한 방안을 모색해야 할 것이다.

#### 4.2 영산호 및 영암호-금호호 하구역에 대한 수질 관리 대책 제언

영산호 하구역은 지형 특성, 외해수와의 혼합률, 체류 시간 등에서 영암호-금호호 하구역보다 폐쇄성이 훨씬 더 크며, 육상기원 담수와 해저 퇴적층에서 용출되는 영양염 부하량도 더 많았다. 특히 고수온기에 식물플랑크톤(as Chl-*a*)의 대량 증식(7월, 9월)과 영양염 농축(9월 - DIP) 등의 현상이 발생되고 있다(Kim et al., 2015). 더욱이 물질수지 산정 결과에서도 나타났듯이, 외해역으로부터 목포항 주변 하구역으로 역(逆)유입되는 영양염 부하량의 비율도 매우 높았다(5월, 7월). 이러한 결과는 목포항 주변 하구역 내 오염 물질의 공급원이 육상과 퇴적층에서뿐만 아니라 해수 유동에 따라 외해수와의 혼합을 통해 유입되고 있음을 시사하고 있다. 한편, 영산호 하구역과 영암호-금호호 하구역의 입구에서 영양염의 과잉 적체(congestion)가 발생하기도 하였다(9월). 이와 같이 하구역으로 유입된 영양염이 외해역으로 유출되지 않고, 내만으로 재유입되거나 축적되면서, 목포항 주변 하구역의 수질에 직간접적인 영향을 미치고 있는 것으로 판단되었다. 향후 영산호 하구역에 대한 오염물질 저감 및 관리 대책 수립 시, 하구역의 집수역뿐만 아니라 주변 연안 수역을 통한 오염원 유입을 저감하고 효율적으로 관리하기 위한 방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다. 하구역을 중심으로 영양염을 비롯한 육상기원 오염 물질의 발생과 유입을 저감하기 위한 집수역 환경개선 대책을 강화하고, 신안군, 영암군, 해남군 등의 해안선을 통해 연안역으로 유출되는 오염

물질을 제어할 수 있는 시설을 마련하여 보다 장기적인 해양 수질 개선 노력을 기울여야 할 것이다. 예를 들면, 소하천 하류의 수변, 해안에 인접한 지대 등에 완충지(buffer zone)로서 적정 규모의 유수지를 조성하여 정화 식물과 염생 식물을 식재하고, 바닥에 쌓인 오염 물질을 정기적으로 수거, 처리하는 등의 친환경적인 오염 저감 시설을 고안, 운영하는 방안이 있다. 또한 영산호 하구역에서 하계 성층화 발생에 따른 빈산소 수괴 형성을 방지하기 위해서는 준설 등을 통해 퇴적물 내에 축적된 유기물을 제거하고, 수층에서의 영양염 재생을 억제하기 위한 방안도 강구되어야 할 것이다. 이와 병행하여, 향후 하구역(특히 영산호 하구역)과 주변 해역의 수질 개선을 위해 각 오염물질별(유기물, 영양염 등) 부하량에 대한 저감율을 수치 모델로 정량 예측할 수 있는 기법을 개발함으로써, 통합 수질 관리 정책에 반영할 수 있도록 관계자들 간 협력이 필요하다고 사료된다.

## 5. 결론

영산호 하구역과 영암호-금호호 하구역과 주변 해역에서 비성층화 시기인 5월, 9월, 11월에, 그리고 성층화 시기인 7월에 각각 현장 조사를 수행하였다. 여기에서 획득한 이화학적 수질 인자들과 영양염에 대해 LOICZ 모델을 이용하여 물질 수지를 산정하였다. 비성층화 시기에는 3개의 소해역으로 구성된 단순 박스 모델을 적용하였고, 밀도 성층이 관측된 시기에는 2개의 수층으로 구성된 박스 모델을 적용하였다. 이에 따라 용존 무기 질소(DIN)와 용존 무기 인(DIP)에 대해 제거하거나 추가 공급하고 있는 영산호 하구역과 영암호-금호호 하구역에서의 영양염 수지를 산정하였다. 영양염에 대한 물질 수지 결과에서, 외해역과의 물리적 순환을 통해 하구역으로 역(逆)유입되는 영양염 부하량이 인공 호수의 대규모 방류 영향을 받은 육상기인 유입량보다 더 많은 시기가 있었다(5월). 그리고 하구역과 외해역의 영향을 동시에 받는 소해역 III의 수주(water column) 내에서는 영양염이 과잉으로 적체되었다(9월). 저수온기(11월)에는 인공 호수의 방류 영향이 없는 하구역(영산호 하구역)에서는 영양염이 제거되었고, 담수 방류 영향을 받은 하구역(영암호-금호호 하구역)에서는 영양염의 추가 공급이 나타났다. 한편 성층화가 강하게 발달한 시기(7월)에 외해역과 퇴적층으로부터 영양염이 공급되었고, 하구 순환(estuarine circulation) 과정을 통해 표층부로 이동하였다. 표층수에는 육상기인 영양염, 특히 DIN이 대량 유입되었다. 하구역에서 외해역으로 해수가 유동하는 동안 약 절반 정도의 영양염이 제거되었다. 이와 같은 결과들은 목포항 주변 하구역으로 유입되는 영양염들이 육상에서 기인할 뿐만 아니라, 외해역 그리고 하구 수역 내

(퇴적물 용출, 수층 내 영양염 재생 등)에서도 추가 공급되고 있다는 점을 시사하고 있다. 따라서 목포항 주변 하구역의 수질 관리를 위해서는 담수를 통한 육상기인 영양염 부하량을 저감하는 방안과 함께, 주변 집수역에서 해안선을 통해 유입되는 오염물질의 부하량을 저감하기 위한 대책이 병행 수립되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R201657)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Bang, K. Y., T. I. Kim, Y. S. Song, J. H. Lee, S. W. Kim, J. G. Cho, J. W. Kim, S. B. Woo and J. K. Oh(2013), Numerical modeling of sediment transport during the 2011 summer flood in the Youngsan River Estuary, Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 76-93.
- [2] Byun, D. S., X. H. Wang and P. E. Holloway(2004), Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo Coastal Zone, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 59, pp. 185-196.
- [3] Byun, D. S., X. H. Wang, M. Zavatarelli and Y. K. Cho(2007), Effects of resuspended sediments and vertical mixing on phytoplankton spring bloom dynamics in a tidal estuarine embayment. *Journal of Marine Systems*, Vol. 67, pp. 102-118.
- [4] Choi, W. J., C. K. Park and S. M. Lee(1994), Numerical simulation of the formation of oxygen deficient water-masses in Jinhae Bay. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 413-433.
- [5] Conley, D. J., W. M. Smith, J. C. Cornwell and T. R. Fisher(1995), Transformation of particle-bound phosphorus at the land-sea interface. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 40, pp. 161-176.
- [6] GIMS(2009), An Annual Report of Groundwater Investigation. National Groundwater Information Center, Available from: <http://www.gims.go.kr/>.
- [7] Gordon, D. C., P. R. Boudreau, K. H. Mann, J. E. Ong, W. L. Silvert, S. V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff and T. Yanagi(1996), LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines,

- LOICZ Reports and Studies, No. 5, LOICZ, Texel, the Netherlands, p. 96.
- [8] Jeong, D. D., J. W. Lee and S. G. Gug(1999), A study on the Change of water quality in the vicinity of Mokpo harbor due to the discharges from Yongsan River Estuary weir and Yongam-Kumho sea dike. *Journal of Port Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 1-8.
- [9] Jeong, Y. H., Y. T. Kim, Y. Z. Chae, C. W. Rhee, K. R. Ko, J. Y. Jeong and J. S. Yang(2005), Analysis of long-term monitoring data from the Geum River Estuary. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 10, No. 3, pp. 139-144.
- [10] Jeong, W. G. and S. M. Cho(2003), The physicochemical characteristics of seawater and sediment of marine shellfish farm in Jindong Bay. *Korean Journal of Malacology*, Vol. 19, No. 2, pp. 161-169.
- [11] Jung, T. S.(2011), Numerical modeling of tide asymmetry in the Southeast Coastal Zone of Yellow Sea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 6, pp. 429-441.
- [12] Jung, T. S. and J. K. Jeong(2013), Spatial distribution and time variation of  $M_2$  tide in the Western Coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 25, No. 4, pp. 255-265.
- [13] Kang, J. W. and S. R. Moon(2001), Tidal propagation characteristics in the estuary which shows significant shallow tides. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 13, No. 1, pp. 56-60.
- [14] Kim, D. H.(2006), Management of water quality by the point source in Mokpo inner bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 12, No. 4, pp. 273-283.
- [15] Kim, D. S. and S. W. Kim(2003), Mechanism of oxygen-deficient water formation in Jindong Bay. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 8, No. 2, pp. 177-186.
- [16] Kim, H. S., B. S. Kim and J. S. Lee(1999), Distribution of specific plants and hydrophytes in the wetland of Youngsan River. *Korean Journal of Plant Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 301-311.
- [17] Kim, J. H.(1990). Cross-sectional velocity variability and tidal exchange in a bay. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 353-359.
- [18] Kim, J. W., B. I. Yoon, J. I. Song, C. W. Lim and S. B. Woo(2013), Spatial and temporal variability of residual current and salinity according to freshwater discharge in Yeongsan river estuary. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 25, No. 2, pp. 103-111.
- [19] Kim, Y. T., Y. S. Choi, Y. S. Cho, Y. H. Choi and S. R. Jeon(2015), Characteristic distributions of nutrients and water quality parameters in the vicinity of Mokpo harbor after freshwater inputs. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 21, No. 6, pp. 617-636.
- [20] Kwon, K. Y., C. H. Moon, J. S. Lee, S. R. Yang, M. O. Park and P. Y. Lee(2004), Estuarine behavior and flux of nutrients in the Seomjin River Estuary. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 9, No. 4, pp. 153-163.
- [21] Lee, K. S. and S. K. Jun(2009), Material budget in the Youngsan river estuary with simple box model. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 248-254.
- [22] Lee, N. I.(2000), The estimation of pollution loads flowing into Mokpo harbour. Master's thesis, Mokpo National Maritime University, pp. 22-68.
- [23] Lee, S. H. and Y. Ahn(2000), Measures for groundwater pollution due to agricultural activities. *Journal of Rural Communities and Environment*, Vol. 10, No. 3, pp. 58-69.
- [24] Lee, M. O. and J. K. Kim(2008), Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea. *Marine Environmental Research*, Vol. 65, pp. 128-147.
- [25] MEIS(2015), An Annual Report on Marine Environment of Korea (South), Marine Environment Information System, Available from: <http://www.meis.go.kr/>.
- [26] MLTM(2006), Marine Environment Standard Methods, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. pp. 15-73.
- [27] MLTM(2009), A Study on Construction of Management System for the Estuary: The Youngsan River Estuary. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Final Report, pp. 231-240.
- [28] Mokpo Meteorological Observatory(2008), Available from: <http://mokpo.kma.go.kr/>.
- [29] MST(2007), 21st Century Frontier R & D Program - Sustainable Water Resources Research Program: Application of Optimal Management System for Coastal Groundwater, Ministry of Science and Technology, Final Report, p. 57.
- [30] Mucci, A., L. F. Richard, M. Lucotte and C. Guignard(2000), The Differential geochemical behavior of arsenic and phosphorus in the water column and sediments of the Saguenay Fjord Estuary, Canada. *Aquatic Geochemistry*, Vol.

6, pp. 293-324.

- [31] Park, L. H., Y. K. Cho, C. Cho, Y. J. Sun and K. Y. Park(2001), Hydrography and circulation in the Youngsan river estuary in summer, 2000. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 6, No. 4, pp. 218-224.
- [32] Park, S. Y., S. S. Kim, P. J. Kim, E. S. Cho, S. Y. Kim, Y. S. Choi, B. M. Kim and D. U. Kim(2010), Long-term variation and characteristics of water quality in the Mokpo coastal areas of the Yellow Sea, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 16, No. 4, pp. 321-337.
- [33] Rhew, H. S. and G. H. Lee(2011), Relationships on magnitude and frequency of freshwater discharge and rainfall in the altered Yeongsan Estuary. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 16, No. 4, pp. 223-237.
- [34] Ryu, S. O., J. Y. Kim and H. S. You(2000), Seasonal variation and transport pattern of suspended matters in semiclosed Muan Bay, Southwestern coast of Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, Vol. 21, No. 2, pp. 128-136.
- [35] Sylaios, G., N. Stamatis, A. Kallianiotis and P. Vidoris(2005), Monitoring water quality and assessment of land-based nutrient loadings and cycling in Kavala Gulf. *Water Resources Management*, Vol. 19, pp. 713-735.
- [36] Woo, J. S., H. S. Choi, H. J. Lee and T. H. Kim(2014), Organic matter in the sediments of Youngsan River Estuary distribution and sources. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 7, pp. 1375-1383.
- [37] Yoon, B. B., E. J. Lee, T. A. Kang and Y. S. Shin(2013), Long-term change of phytoplankton biomass (chlorophyll-a), environmental factors and freshwater discharge in Youngsan Estuary. *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 46, No. 2, pp. 205-214.
- [38] Yoon, Y. H.(2001), On the spatio-temporal distribution of water quality and chlorophyll a, and the environmental factors on the variation of the phytoplankton biomass in the Mokpo Coastal Waters, Southeastern Korea during low temperature season. *Journal of Korean Society of Water Quality*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-13.
- [39] Youngsangang Project Office, KRC(Korea Rural Community Corporation)(2008), Report on Freshwater Discharges (Personal communication).

---

Received : 2016. 09. 12.

Revised : 2016. 10. 18. (1st)

: 2016. 10. 24. (2nd)

Accepted : 2016. 10. 27.