

# 함평만의 유입오염부하량 및 물질수지에 관한 연구

김종구\*† · 장효상\*\*

\*, \*\* 군산대학교 환경공학과

## A Study on the Inflowing Pollution Load and Material Budgets in Hampyeong Bay

Jong-Gu Kim\*† · Hyo-Sang Jang\*\*

\*, \*\* Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 함평만의 육상기원오염 물질의 유입특성을 파악하고, 물질순환을 정량화하기 위해, Simple box model을 적용하였다. 함평만의 하천 유입 오염부하 특성을 보면, BOD, COD, TOC의 평균 유기물질 오염부하가 각각 79.7 kg-BOD/day, 144.06 kg-COD/day, 93.0 kg-TOC/day를 나타내었다. 하천별 유기물 유입 오염부하량은 손불 방조제>주포교>양만단지 순으로 나타났다. 계절별로는 하계 강우 시기인 7월에 높은 부하 특성을 보였다. 영양염류의 평균 유입 오염부하는 각각 20.9 kg-DIN/day, 17.1 kg-DIP/day, 148 kg-TN/day, 37.4 kg-TP/day를 나타내었다. 하천별 영양염 유입부하량은 양만단지>백옥교>주포교 순으로 나타났다. 박스모델을 이용한 함평만 물질수지에서 담수체류시간은 52.4일로 해수교환이 낮은 반 폐쇄성 해역의 특성을 나타내었다. 영양염 물질수지에서 용존 무기질소의 경우  $\Delta$ DIN이 (-)의 탈질상태를 나타내어 유입된 질소보다 광합성에 의한 소비 및 외해 유출이 큰 경향을 보였다. 용존 무기질의 경우  $\Delta$ DIP가 (+)를 나타내어 유기물 분해에 의한 공급, 퇴적물의 용출부하, 하천 유입부하가 식물플랑크톤에 의한 소비 및 외해 유출보다 큰 것으로 나타나 축적되는 경향을 보였다.

**핵심용어 :** 함평만, 유기물질, 오염부하, 영양염 물질수지, 박스모델, 체류시간

**Abstract :** In this paper, an analysis of the inflowing pollution load of the rivers in Hampyeong bay showed the average organic matter pollution loads of BOD, COD, and TOC to be 79.7 kg-BOD/day, 144.06 kg-COD/day, and 93.0 kg-TOC/day, respectively. The inflowing organic matter pollution load was the heaviest in Sonbul dike, followed by Jupo bridge and Yangman complex. With regard to season, the load characteristics were outstanding in July, the rainy period in the summer. The average inflowing pollution loads of nutrients were 20.9 kg-DIN/day, 17.1 kg-DIP/day, 148 kg-TN/day, and 37.4 kg-TP/day. A comparison of the inflowing nutrients loads for each river showed the load to be the heaviest in Yangman complex, followed by Baegok bridge and Jupo bridge. In the experiment on the material budgets of Hampyeong bridge conducted using a box model, the detention time of fresh water was found to be 52.4 days, with the bay displaying the characteristics of a so dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the nutrients material budgets,  $\Delta$ DIN values were found to be negative, indicating the tendency of consumption and open sea leak by photosynthesis to be higher than the nitrogen that flowed in. As for dissolved inorganic phosphorus (DIP),  $\Delta$ DIP showed positive values, indicating a tendency for accumulation as the supply through organic matter decomposition, elution load of sediments, and inflowing load of the river turned out to be higher than the consumption by phytoplankton and outflow to open sea.

**Key Words :** Hampyeong bay, Organic matter, Pollution load, Nutrient material budget, Box model, Detention time

### 1. 서 론

최근 국내 연안은 육상기원 오염물질에 의한 영향으로 해양환경 오염이 악화되어 가고 있는 실정으로 환경관리를 위

한 환경관리해역 지정 및 연안오염총량관리제 도입 등 해양환경 개선 및 보전을 위한 다양한 해양환경정책의 추진이 실시되고 있다. 특히 연안이용률이 높은 하구를 포함한 반 폐쇄성 내만은 다양한 종류의 오염물질이 유입되고 있어 이에 대한 대책 수립이 절실한 실정이다. 따라서 육상에서 발생하는 오염원에 대한 정량, 정성적인 현황조사와 아울러

† Corresponding Author : kjg466@kunsan.ac.kr, 063-469-1874

이들이 해양환경에 미치는 영향을 정확하게 평가하고 저감 방안 수립을 통하여 해양환경을 보전하는 기법을 개발해야 한다.

육상기원 오염물질의 관리를 위해서는 육역에서 발생하는 오염부하량을 정확하게 산정하여야 하며, 이러한 자료를 바탕으로 해역에서의 오염물질의 영향을 평가하고 관리하기 위한 모델링 작업이 필요하게 된다. 육역에서 발생하는 오염부하량에 산정에 대한 조사연구는 이미 국내 연구자에 의해서 많이 수행되어져 왔으며, 점원을 비롯한 비점원 오염부하량 조사까지 실시되고 있다.

산정된 오염부하량 자료를 바탕으로 해역에서의 영향을 평가하기 위해서는 모델링 작업이 필요하며, 해역의 오염물질 영향을 평가하는 모델에는 수치생태모델과 박스모델 등이 개발되어 있다. 그러나 수치생태모델의 경우 많은 매개변수의 자료가 필요하며 정확한 매개변수가 산정되지 않은 경우 부정확한 결과를 생산할 수 있다. 특히 폐쇄성만이나 하구의 경우 복잡한 생태적 메카니즘을 가지기 때문에 보다 정밀한 조사가 필요하게 된다. 이러한 해역의 경우 모델을 단순화한 박스모델을 적용함으로써 오차를 줄이면서 보다 실용적인 결과를 생산할 수 있다. 대표적으로 해역에 많이 적용되는 박스모델은 IGBP(International Geosphere-Biosphere Program)에서 개발된 LOICZ(Land - Ocean Interaction in Coastal Zone)을 많이 이용하고 있는데, 이는 복잡한 자연현상을 단순화하고 모든 개개의 과정을 거시적으로 포괄하여 양적인 흐름을 전체적으로 파악할 수 있는 장점이 있다.

LOICZ 모델은 연안해역에서의 육지역과의 상호작용을 해석하는 모델로서 연안역 물질 flux 또는 물질수송 특성을 해석하는 모델이다. 연안역과 관련된 국내외 연구를 보면, 부영양화된 하구의 질소와 인의 거동에 관한 연구(Matsukawa and Suzuki, 1985), 하구에서의 영양염 이동과 물질수지에 관한 연구(Ukita et al., 1988) 및 세토내해에서의 물질수지 산정 연구(Yanagi, 1997)가 있으며, 단순 박스모델을 이용한 물질수지 산정연구로 세토내해 외에 양자강 유역(Shen et al., 2000), Gulf of Riga(Savchuk and Swaney, 1999), 체사피크만(Boynton et al., 1995) 등 많은 만 및 해역을 대상으로 국외연구가 선행되었다. 국내에서는 낙동강 하구해역에서의 담수, 질소 및 인 수치(Hong, 1998)와 금강 하구해역의 물질수지 산정에 관한 연구(Kim et al., 2000), 영산강 하구해역의 물질수지 연구(Lee and Jun, 2009)를 수행한 바가 있으며, 마산만의 자생유기물 저감을 위한 박스모델의 적용(Hong et al., 2007) 및 가막만 물질체류시간과 순생태계 대사(Eom et al., 2011) 등의 연구가 수행되었다.

함평만과 관련된 연구를 보면, 오염부하와 관련된 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 함평만의 해양수질환경 및 물질

수지와 관련한 연구로는 Kang et al.(2009)이 함평만 조위변화에 따른 영양염 변동과 관련한 연구와 Chu et al.(2000)이 하계 함평만 입구부의 부유퇴적물 거동과 플럭스에 관하여 연구된 바가 있었다. 그러나 함평만에서 수행된 대부분의 연구는 갯벌 및 퇴적환경과 관련된 연구(Ryu et al., 1999; Ryu, 2003; Hwang and Koh, 2012)가 많았고, 특히 저서생물과 관련된 연구가 많이 수행되었다. 그러나 함평만의 하천유입특성 및 해양물질수지와 관련된 연구는 진행된 바 없다. 함평만 주변해역을 대상으로 한 조사는 국립수산과학원에서 1997년부터 2010년까지 “환경관리해역 측정망”을 운영하고 있으며, 이후 해양환경관리공단에서 운영하고 있다. 2008년까지는 함평만내 2개 정점을 대상으로 조사하였으나, 2009년부터 함평만 내측 뿐 만 아니라 외측해역도 포함하여 4개 정점을 대상으로 연 4회 조사가 실시되었다. 조사항목은 수온, 염분을 포함한 총 15개 수질항목에 대해 실시하고 있다.

본 연구에서는 육역 오염부하의 여러 특성 중에서 농어촌 지역의 특성을 가진 함평만을 대상으로 연안수계의 관리를 위하여 육역으로부터의 오염부하 특성 조사 및 박스모델을 이용한 물질수지를 산정하고자 한다.

특히, 함평만의 하천유입부하 특성을 조사하고, LOICZ모델의 기본개념을 중심으로 박스형 물질수지를 계산하여 함평만의 물질순환 특성을 파악하고자 한다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 대상해역

서해 남부에 전남 함평군, 영광군, 무안군으로 둘러싸인 함평만은 최대 폭 12 km, 길이 17 km 정도의 비교적 큰 만으로서 육지방향으로 길게 만입해 있고, 육지와 연결된 큰 규모의 수계가 존재하지 않는 반폐쇄된 지형을 이루고 있으며, 만 입구는 최대 수심 23 m로서 매우 협소한 폭(약 1.8 km)과 급경사(1.63~2.90도)를 이루고 있다. 함평만 환경보전해역의 지정단면적은 306.53 km<sup>2</sup>이고 해역은 138.35 km<sup>2</sup>, 육역은 168.18 km<sup>2</sup>을 차지하고 있다.

함평만의 조석은 반일주조와 일조부동을 나타내며 소조차는 205.4 cm, 대조차는 425.3 cm, 평균조차는 315.4 cm이며, 조류의 최대 유속은 만 입구에서 창조시 125 cm/s, 낙조시 138 cm/s로 낙조우세 환경이다.

주 조류는 좁은 폭을 가지고 만 입구에서 남동해안을 따라 만의 내측까지 길게 발달되어 있고, 조간대는 주 조류로의 가장자리를 따라 발달되어 있으며 조간대 곳곳에는 사주와 조류로, 그리고 조류세곡 등이 발달되어 있다.

함평만은 농지확보를 위하여 소규모 간척사업이 진행됨에 따라 해안선의 변화가 컸으며, 현재의 해안선 가까운 곳에

## 함평만의 유입오염부하량 및 물질수지에 관한 연구

위치한 저수지도 이러한 간척의 결과로 형성되었으며, 이들 농지의 농업용수 확보를 위하여 현재도 하천 하류부에 제방 및 수문이 대부분 설치되어 있으며, 해수에 의한 해안침식과 농경지, 해안시설물 파괴와 훼손을 방지하기 위하여 많은 방조제가 조성되어 있다.

그래서 함평만으로 유입되는 하천은 대부분이 관개지의 농업용수로 사용하기 때문에 평상시에 큰 하천유출이 발생하지 않기 때문에, 일부하천은 평상시 건천상태였으며, 대부분의 하천에서는 우기에 강우유출이 발생하는 특성을 보였다.

또한 1990년 이후 해양환경에 큰 영향을 미치는 축산폐수와 산업폐수의 배출요인인 목장용지와 공장용지의 이용비중이 꾸준히 높아지고 있어 향후 함평만 수질관리는 축산폐수와 산업폐수에 대한 관리 대책 수립이 필요한 것으로 예상된다.

### 2.2 하천오염부하량 조사

함평만 오염부하량 산정을 위하여 함평만으로 유입되는 하천을 조사한 결과 대부분 소규모 하천이었으며, 조사 대상하천으로 광각천(GK), 월천교(백옥교, BY), 죽암천(주포교, JP), 양만단지(YM)와 손불방조제(SB), 자명천(JM), 유수교(YS)의 7개 하천을 선정하여 2009년 5월, 7월, 8월, 9월, 10월, 11월, 2010년 1월에 조사를 실시하였다(Fig. 1).

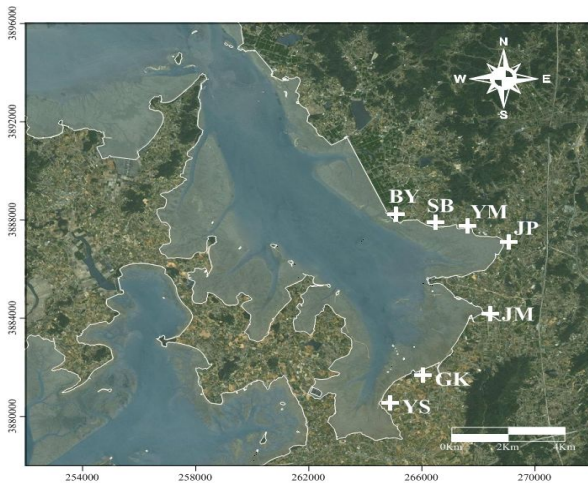


Fig. 1. Sampling station of input stream in Hampyeong Bay.

조사는 건기와 우기의 특성을 파악하기 위하여 하계 우기 시 강우 발생 후 조사를 실시하였고, 나머지 시기에는 건기 시에 조사를 실시하였다. 대상하천은 강우의 영향을 받는 하천의 경우 조사 시기에 따라 변동이 발생하였다.

하천조사는 차량을 이용하여 하천 말단부의 해수의 영향을 받지 않는 지점을 선정하여 대표지점에서 표층수를 채수하

였다. 채수된 시료는 미리 세척된 폴리에틸렌병(2L)에 보관하여 냉암소상태로 즉시 실험실로 운반하여 분석을 실시하였다. 측정항목 중 현장에서 측정 가능한 pH, DO, 유속은 현장에서 직접 측정하였다.

하천유량은 하천의 단면을 일정간격으로 나누어 단면적을 구한 후, 직독식 전자유속계 및 부표를 이용하여 각 구간의 유속을 측정하여 유량을 산정하였다. 유량조사는 가능한 동 일정점에서 실시하였으며, 바람 등 외부의 영향을 받지 않는 지점을 선정하여 측정하였다.

수질조사 항목으로 일반항목(pH, DO, BOD, DOC, POC, SS)과 영양염류(TN, TP,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )를 측정하였고 수질환경오염공정시험법(ME, 2009) 및 그에 준하는 방법으로 측정하였다.

### 2.3 시스템 구성 및 박스모델 입력자료 산정

#### 1) 시스템 구성

함평만의 오염물질 물질수지 계산을 위하여 함평만을 Fig. 2와 같이 1개의 박스로 구성하였으며, 박스의 외측 경계는 무안군 송석리 노리포와 함평군 손불면 상해를 잇는 구간을 만의 경계로 정하였다. 함평만의 육역 유역면적은 구적기를 이용하여 산출하였고, 평균수심은 해도를 중심으로 격자를 세분화하여 각 격자의 수심을 산출한 후 전체 평균을 구하여 적용하였다. 계산된 박스의 해역면적은  $85.7\text{ km}^2$ , 평균 수심은  $6.795\text{ m}$ , 총 박스체적은  $0.5778\text{ km}^3$ 이다.

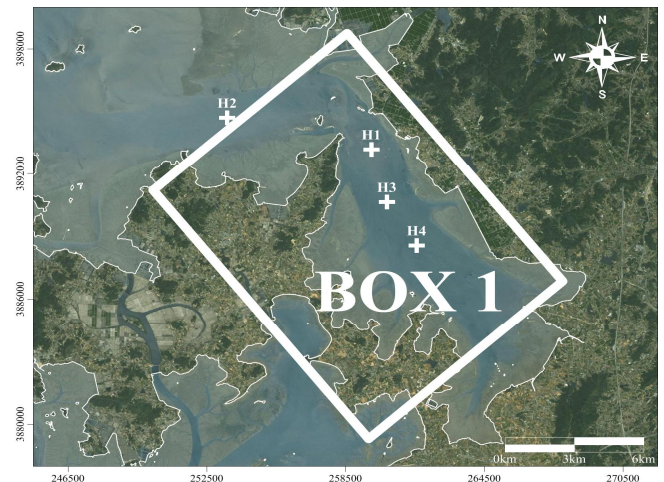


Fig. 2. Map of the system boundaries in Hampyeong bay.

#### 2) 담수-염분수지 입력인자 산정

함평만의 물질수지 산정을 위한 박스모델 입력자료는 담수와 염분의 입·출입을 기초로 담수수지와 염분수지를 계산하여 담수의 박스 내 체류시간과 해수교환율을 평가한다.

담수-염분수지를 계산하기 위하여 필요로 하는 입력인자로는 박스 내·외측의 대표 염분농도와 박스로 유입되는 육역에서의 하천 유입유량이 필요하다.

하천 유입유량 자료는 2009년 조사된 오염부하량 조사에서 실측된 유량자료를 이용하였으며, 7회 조사기간 동안 각 하천에서 관측된 총 유량을 근거로 산정하였다. 증발량 및 강수량 자료는 함평만에서 가까운 관측소인 목포기상대의 2009년 월별 관측자료를 이용하여 산출하였다(Fig. 3). 또한 만내, 외측의 염분 농도는 국립수산과학원에서 수행한 함평연안 4개 정점에서 수행한 국가해양환경측정망 자료(NIFS, 2009-2010)를 이용하였다(Fig. 2, Table 1).

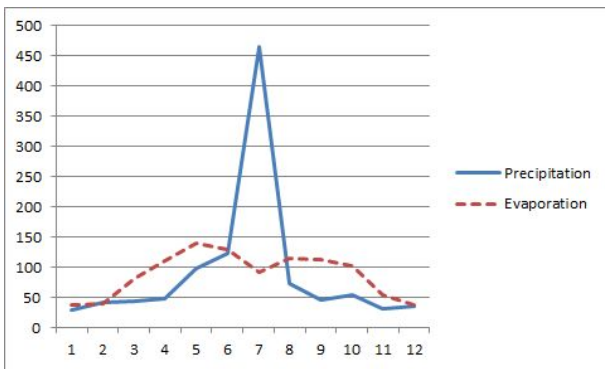


Fig. 3. Monthly variation of precipitation and evaporation in study area.

Table 1. Input data used to Box model calculation in Hampyeong bay

Input Data			COD (mg/L)	DIN (mg/L)	DIP (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Salt-Water budget	Salinity in Inner bay (%)	31.68					
	Salinity in Outer bay (%)	31.85					
	Evaporation rate (mm/month)	87.9					
	Precipitation rate (mm/month)	90.7					
	Stream discharge (m <sup>3</sup> /s)	0.593					
Nutrient budget	Environment. standard (mg/L)	I	1			0.3	0.03
		II	2			0.5	0.06
		III	4			1.0	0.09
	Pollutant Conc. in Inner bay (mg/L)		1.00	0.141	0.010	0.451	0.072
	Pollutant Conc. in Outer bay (mg/L)		1.32	0.188	0.013	0.496	0.095
Pollutant conc. from stream (mg/L)		13.04	5.471	0.568	8.823	1.59	

### 3) 영양염수지 입력자료 산정

함평만 영양염 수지 산정을 위해서는 만 내측 및 외측의 영양염류(DIN, DIP) 연평균 농도 및 하천을 통하여 유입되는 연평균농도와 유량자료가 필요하다. 물질수지 계산을 위해 필요한 만 내,외측의 영양염류(DIN, DIP) 농도는 국립수산과학원에서 수행한 함평연안 4개 정점에서 수행한 국가해양환경측정망 자료(NIFS, 2009-2010)를 이용하였다.

박스내로 유입되는 육역으로부터의 유입농도는 오염부하량 조사에서 측정된 유입하천의 연평균농도를 사용하였다. 하천유입농도는 월별 측정된 하천별 농도와 유량을 곱하여 총유입부하량을 구하고, 이를 유입유량으로 나누어 유입농도를 계산하였다. 모델입력인자로 적용되는 하천 유입유량은 2.18 m<sup>3</sup>/s로 산출되었고, 연평균 유입농도는 COD 13.04 mg/L, TN 8.823 mg/L, TP 1.519 mg/L, DIN 5.471 mg/L, DIP 0.568 mg/L로 나타났다(Table 1).

## 3. 모델의 이론적 배경

### 3.1 LOICZ 박스모델

수지모델(Budget model)은 대상해역의 시스템구간 해역내 일정기간동안 대상인자의 물질수지를 계산하기 위하여 실측자료를 이용하여 물질 유입 flux와 유출 flux를 구하고 그 결과를 해석하여 대상해역에서의 물질의 순환 및 이동특성을 밝히는데 이용할 수 있다. 즉, 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dM}{dt} = \sum inputs - \sum outputs + \sum [sources - sinks] \quad (1)$$

### 1) 담수유량수지

시스템의 체적(V)은 유입과 유출에 있어 균형을 이루므로 보존된다고 가정한다.

$$\frac{dV}{dt} = Q + P + G + O - E - R \quad (2)$$

여기서, dV/dt는 모델화한 연안해역 유량의 시간변동량(m<sup>3</sup>/month), Q는 하천수 유입량(m<sup>3</sup>/month), P는 해면으로의 강수량(m<sup>3</sup>/month), G는 지하수 유입량(m<sup>3</sup>/month), O는 공장폐수·하수유입량(m<sup>3</sup>/month), E는 해면에서의 증발량(m<sup>3</sup>/month), R은 외양경계를 통한 유출수량(m<sup>3</sup>/month)을 나타낸다.

대상해역의 담수 존재량(Vf)을 담수 유출량(R)으로 나누어 정의한 담수의 평균체류시간 τ<sub>f</sub>는 물질수지모델에서의 시간 scale의 결정요인이 된다.

함평만의 유입염부하량 및 물질수지에 관한 연구

$$\tau_f = \frac{V_f}{R} \quad (3)$$

모델 해석내 담수 존재량  $V_f$ 는 식(4)와 같고,  $S_1$ 은 시스템 내 평균 염분농도,  $S_2$  는 외양의 대표 염분을 나타낸다.

$$V_f = \frac{(S_2 - S_1)}{S_2} V \quad (4)$$

2) 염분수지(보존성물질)

보존성물질인 염분의 수지를 나타내는 모식도는 Fig. 4에 나타내었다. 모델영역 내에서의 염분변동을 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{d(VS_1)}{dt} = QS_Q + PS_P + GS_G + OS_O - ES_E - RS_1 - V_X(S_1 - S_2) \quad (5)$$

여기서,  $S_1$ 은 모델 영역내 평균염분농도(%),  $S_Q$ 는 하천수의 염분농도(%),  $S_P$ 는 강수의 염분농도(%),  $S_G$ 는 지하수의 염분농도(%),  $S_O$ 는 공장배수 및 하수중 염분농도(%),  $S_E$ 는

증발에 의해 소실되는 염분농도(%),  $V_X$ 는 외양경계를 통한 해수교환량,  $S_2$ 는 외양의 염분농도(%)를 나타낸다.

$S_1$ 과  $S_2$ 를 제외한 값들은 통상 0로 가정될 수 있으며,  $V$ 를 일정하다고 가정할 때 식(5)는 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$V \frac{dS_1}{dt} = -RS_1 - V_X(S_1 - S_2) \quad (6)$$

식(6)의 미지항은 개방경계에서의 해수교환량  $V_X$ 로서 정상상태에서의 평균염분자료를 이용하여 식(7)로 구한다.

$$V_X = \frac{RS_1}{S_2 - S_1} \quad (7)$$

만의 체적  $V$ 를  $V_X$ 로 나누면 외양수에 의한 만내수의 평균 교환시간  $\tau^*$ 를 구할 수 있다.

3) 영양염 수지(비보존성물질)

비보존성물질인 영양염류의 수지를 나타내는 모식도를 Fig. 4에 나타내었다. 영양염류의 농도를  $Y$ 로 보았을 때  $Y$ 의

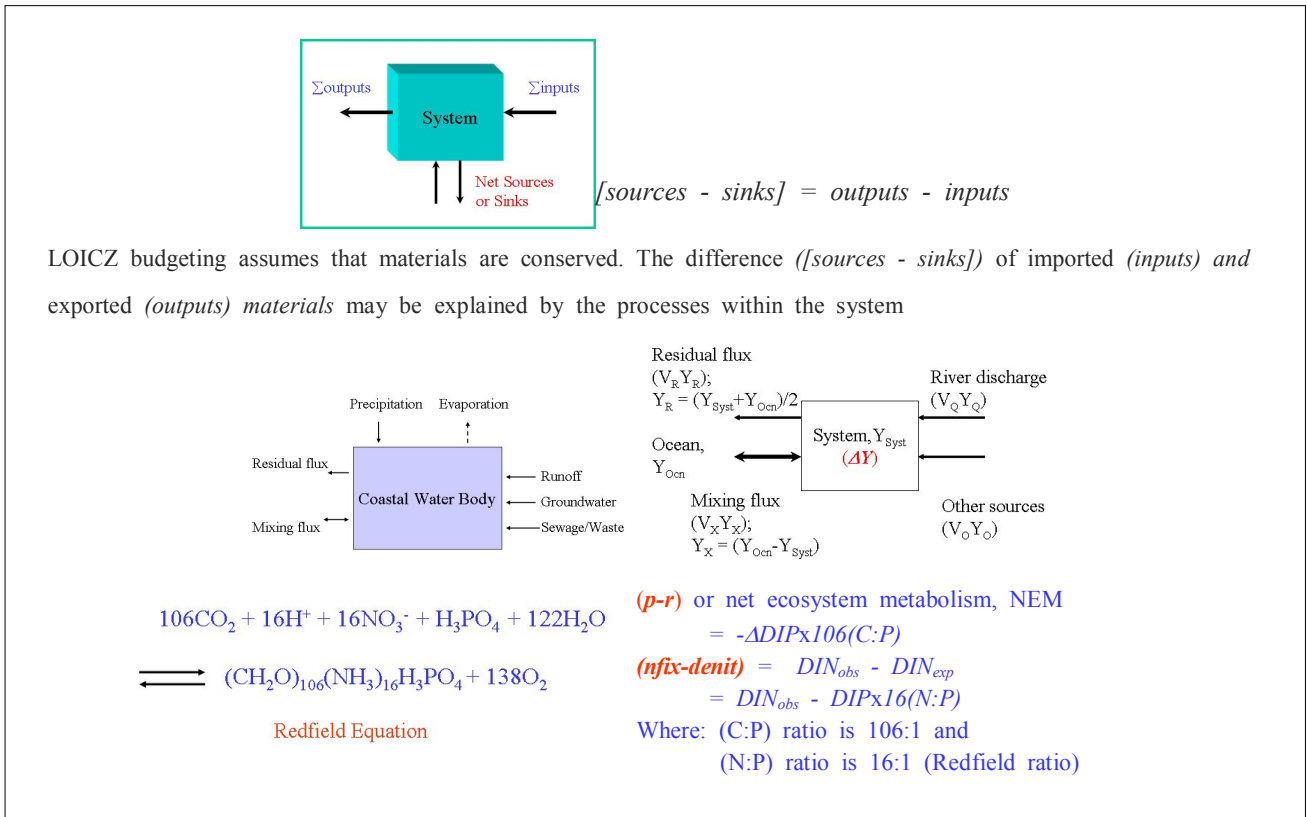


Fig. 4. Conceptual diagram of Simple box model (LOICZ) (<http://www.nioz.nl/loicz> and in Gordon et al., 1996; LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Reports & Studies No 5, 1-96).

박스 내에서의 변동을 식(8)로 표현할 수 있다.

$$V \frac{dY_1}{dt} = QY_Q + PY_P + GY_G + OY_O + RY_1 - V_X(Y_1 - Y_2) + \Delta Y \quad (8)$$

Y는 물질의 농도(mg/L), Y<sub>1</sub>은 시스템내 비보존성 물질의 농도(mg/L), Y<sub>2</sub>는 외양의 농도(mg/L)를 의미한다. 첨자는 염분과 같이 하천유출(Q), 강수(P), 증발(E), 하수(O)를 의미하고, ΔY는 비보존성물질의 생성 및 소멸항이다. 관측자료로부터 ΔY를 제외한 모든 자료를 구하여 식(8)에서 ΔY를 추정한다. ΔY가 (+)면 생성을, (-)면 소실을 의미한다.

ΔY에는 광합성, 섭식, 포식, 사망, 분해, 퇴적, 용출 등 전체의 화학, 생물학적 과정에 의한 변환과정을 포함하고 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 하천 오염부하특성

#### 1) 유량

유량 조사결과를 보면, 5월 조사에서 320.2~17,985.5 m<sup>3</sup>/d, 7월 조사에서 1,703.1~111,844.7 m<sup>3</sup>/d, 8월 조사에서 2,126.6~28,241.4 m<sup>3</sup>/d, 9월 조사에서 73.9~142.2 m<sup>3</sup>/d, 10월 조사에서 16.9~463.5 m<sup>3</sup>/d, 11월 조사에서 44.2~735.3 m<sup>3</sup>/d, 1월 조사에서 26.3~427.9 m<sup>3</sup>/d의 범위를 나타내었다(Fig. 5).

월별 유량 특성을 보면, 강우의 영향을 받는 5월부터 8월에 약간 높은 유량을 보였으며, 특히 강우유출 발생 후 관측된 7월 조사에서 가장 높은 유량을 나타내었다. 또한 건기시기인 9월부터 1월 조사에서 낮은 유량을 나타내었다.

하천의 유량부하는 손불방조제와 주포교에서 가장 큰 부하를 보였으며, 유수교와 손불방조제의 경우 건기시에는 유량유출이 발생하지 않았다.

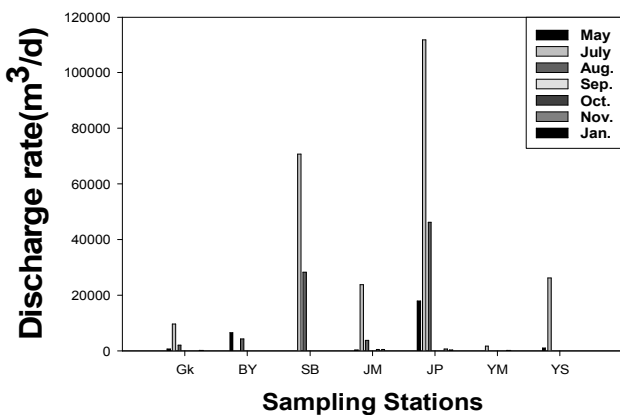


Fig. 5. Monthly variation of discharge from each stream in Hampyeong Bay.

#### 2) 유기물질의 유입부하량

함평만에서 조사된 항목은 유기물질을 대표하는 BOD, COD, TOC 그리고 부유물질 농도를 측정하였다.

생물학적산소요구량(BOD)의 유입부하량은 전체 조사에서 0.1~899.6 kg/day의 범위로 평균 79.7 kg/day로 나타났다(Fig. 6). 하천별 부하에서 손불방조제를 통한 부하가 가장 크게 나타났고, 강우시기인 7월 부하가 가장 크게 나타났다. 화학적산소요구량(COD)의 유입부하량은 전체 조사에서 0.3~1384.6 kg/day의 범위로 평균 144.06 kg/day로 나타났다(Fig. 7). 하천별 부하에서 손불방조제를 통한 부하가 가장 크게 나타났고, 강우시기인 7월 부하가 가장 크게 나타났다. 총유기탄소(TOC)의 유입부하량은 전체 조사에서 0.1~816.9 kg/day 범위로 평균 93 kg/day로 나타났다(Fig. 8). 하천별 부하에서 손불방조제를 통한 부하가 가장 크게 나타났고, 강우시기인 7월 부하가 가장 크게 나타났다. 유기물질의 부하 크기는 COD 부하가 가장 크게 나타났고, TOC, BOD 순으로 나타났다.

총부유물질(TSS)의 유입부하량은 전체 조사에서 0.02~20,188.5 kg/day으로 평균 93 kg/day로 나타났다(Fig. 9). 하천별 부하에서 손불방조제를 통한 부하가 가장 크게 나타났고, 강우시기인 7월 부하가 가장 크게 나타났다.

#### 3) 영양염류의 유입부하량

함평만 영양염 유입부하량 산정을 위해 조사된 항목은 총질소와 총인, 무기질소와 무기인을 측정하였다.

무기질소의 유입부하를 보면, 암모니아질소의 유입부하량은 전체 조사에서 0.003~247.96 kg/day의 범위로 평균 20.9 kg/day이고, 아질산질소의 유입부하량은 전체 조사에서 0.002~48.96 kg/day의 범위로 평균 2.83 kg/day이며, 질산질소의 유입부하량은 전체 조사에서 0.09~1718.76 kg/day의 범위로 평균 78.69 kg/day으로 나타났다. 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소의 합인 용존무기질소(DIN)의 부하량은 전체 조사에서 0.11~1925.75 kg/day의 범위로 평균 102.4 kg/day로 나타났고, 하천별로는 양만단지에서 부하가 가장 크게 나타났고, 강우시기별로는 강우유출이 가장 큰 시기인 7월 가장 크게 나타났다(Fig. 10).

용존무기인(DIP)의 유입부하량은 0.01~419.41 kg/day의 범위로 평균 17.1 kg/day로 나타났고, 용존무기질소와 비슷한 특성을 보였다(Fig. 11).

총질소(TN)의 유입부하량은 전체 조사에서 0.2~2408.1 kg/day의 범위로 평균 148 kg/day로 나타났다. 하천별 부하에서 양만단지, 손불방조제 순으로 높게 나타났고, 강우시기인 7월 부하가 가장 크게 나타났다(Fig. 12).

총인(TP)의 유입부하량은 전체 조사에서 0.02~783.4 kg/day의 범위로 평균 37.4 kg/day로 나타났다. 하천별 부하에서 양만단지, 손불방조제 순으로 높게 나타났고, 강우시기인 7월 부하가 가장 크게 나타났다(Fig. 13).

함평만의 유입오염부하량 및 물질수지에 관한 연구

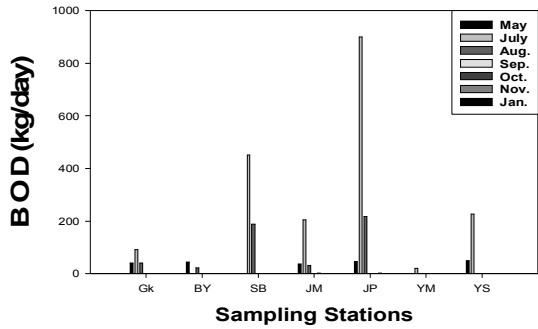


Fig. 6. Monthly variation of BOD loading in each stream for Hampyeong Bay.

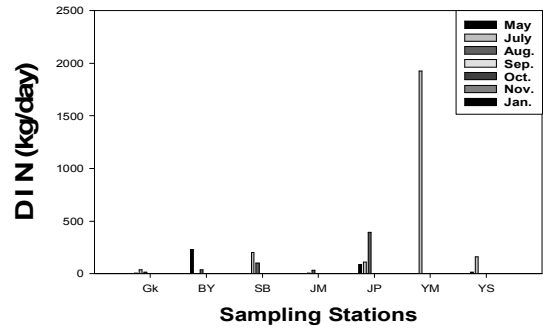


Fig. 10. Monthly variation of DIN loading in each stream for Hampyeong Bay.

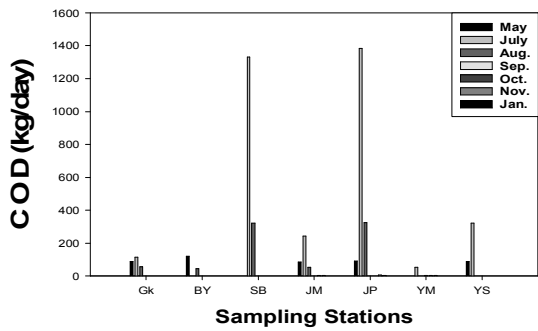


Fig. 7. Monthly variation of COD loading in each stream for Hampyeong Bay.

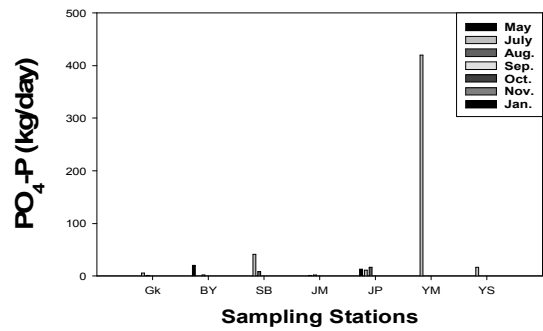


Fig. 11. Monthly variation of DIP loading in each stream for Hampyeong Bay.

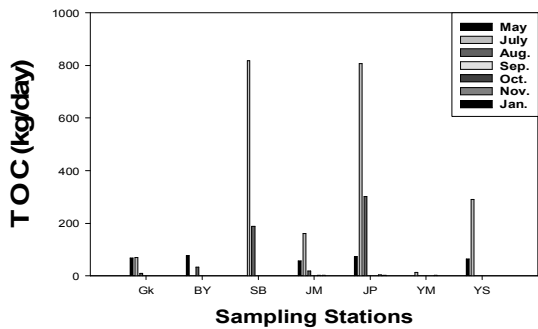


Fig. 8. Monthly variation of TOC loading in each stream for Hampyeong Bay.

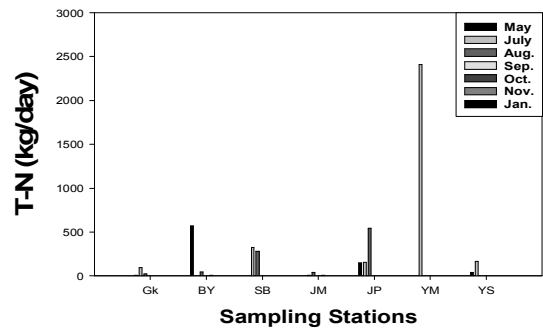


Fig. 12. Monthly variation of TN loading in each stream for Hampyeong Bay.

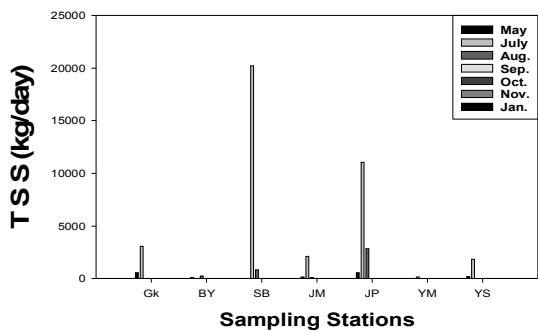


Fig. 9. Monthly variation of TSS loading in each stream for Hampyeong Bay.

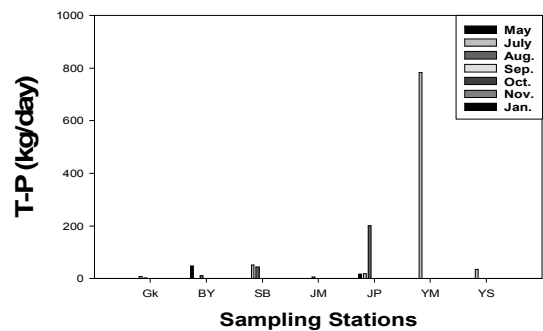


Fig. 13. Monthly variation of TP loading in each stream for Hampyeong Bay.

4.2 LOICZ 모델을 이용한 함평만 물질수지 산정

1) 담수-염분수지 결과

함평만의 담수-염분수지 계산을 위하여 함평만 주변하천을 대상으로 2009년 7회 조사된 실측유량과 목포기상대의 2009년 증발 및 강우자료, 그리고 국립수산과학원에 수행한 2009년 4계절 함평연안 해양환경측정망의 염분 관측자료를 이용하였다.

물질수지 계산에 사용된 값은 만내 평균 염분농도 31.68 psu, 만의 평균 염분농도 31.85 psu이고, 하천 유입유량은 0.593 m<sup>3</sup>/s, 강우량은 90.7 mm/month, 증발량은 87.9 mm/month로 계산되었고, 강우 및 하천을 통한 염분 유입은 무시하였다.

함평만의 담수저장량은 3.11×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이며, 박스를 통한 담수유출량은 -59.12×10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>로 계산되었고, 해수교환량은 11.05×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>로 나타났으며, 만내 담수체류시간은 52.4일로 계산되었다(Fig. 14, Fig. 15). 이는 Kim et al.(2000)이 금강하구역 물질수지 연구에서 조사된 체류시간 1.6~10.0일이나, Hong(1998)이 낙동강 하구에서 산출한 체류시간 2.03일 보다는 훨씬 길게 나타났다.

이는 하천형 만의 특성을 가진 금강하구나 낙동강하구의 특성상 담수체류시간은 낮으나, 본 연구대상지역인 함평만의 경우 반폐쇄성 내만 해역의 특성을 가지고 있어 긴 체류시간을 나타낸 것으로 판단된다.

2) 영양염 수지 결과

함평만의 영양염 물질수지 계산을 위하여 함평만 주변하천을 대상으로 2009년 7회 조사된 실측농도를 적용하였고, 만내, 외측의 평균농도는 국립수산과학원에 수행한 2009년 4계절 함평연안 해양환경측정망 자료를 이용하여 산출하였다.

물질수지 계산에 적용된 만 내측 및 외측의 용존무기질소(DIN) 농도는 각각 0.141 mg/L, 0.188 mg/L 이고, 용존무기인(DIP) 농도는 각각 0.010 mg/L, 0.013 mg/L를 적용하였다. 하천을 통한 유입농도의 경우 DIN은 5.471 mg/L, DIP는 0.568 mg/L를 적용하였다.

대상해역의 DIP 물질수지에서 단위시간당 DIP의 생성 소모율을 나타내는 ΔDIP가 (+)항일 경우 생성을, (-)항일 경우 소멸을 의미하며, 생성의 경우 유기체의 사망과 분해, 용출, 유입 등에 의한 영양염의 증가를 의미하고, 소멸의 경우 광합성, 생물의 섭식, 퇴적, 유출 등의 영양염 감소를 나타낸다. 본 해역에서 나타난 ΔDIP의 값이 (+)값을 나타내어 유기물질 순소비 형태로써 호흡에 의하여 생성되는 것으로 나타났다(Fig. 16).

DIN 물질수지에서 (nfix-denit)값이 (-)면 탈질을 나타내는 것이고, (+)면 질소고정을 나타내는 상태라고 할 수 있다. 함평만의 질소수지 계산 결과 (-)값을 나타내어 탈질상태로써

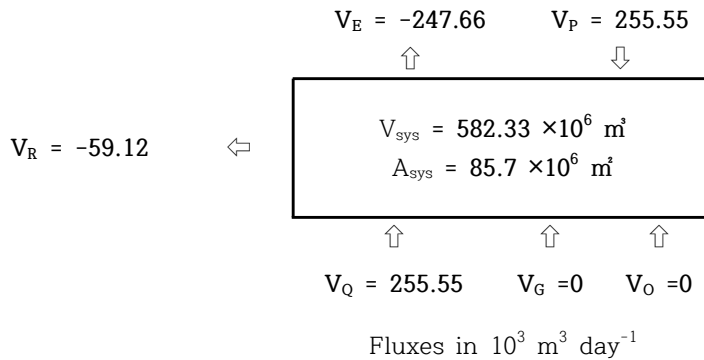


Fig. 14. Box diagram illustrating the water budget in Hampyeong bay.

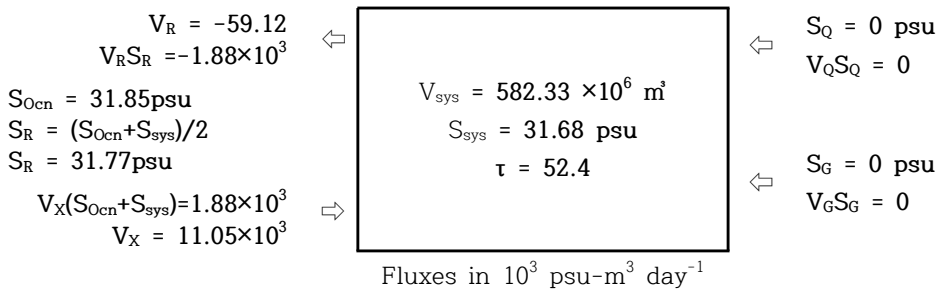


Fig. 15. Box diagram illustrating the salt budget in Hampyeong bay.



## 함평만의 유입오염부하량 및 물질수지에 관한 연구

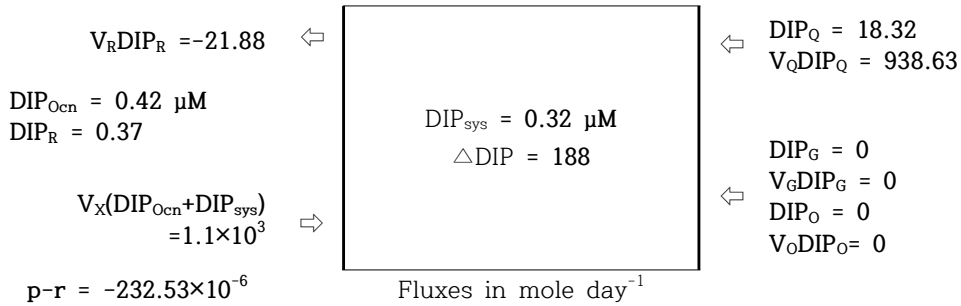


Fig. 16. Box diagram illustrating dissolved inorganic phosphorus (DIP) budget in Hampyeong bay.

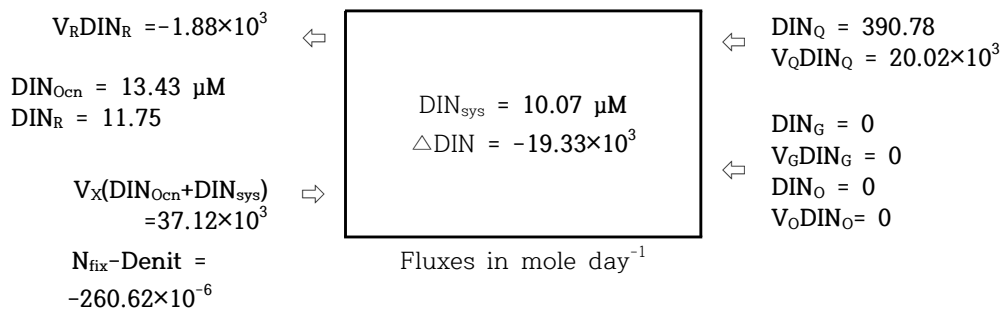


Fig. 17. Box diagram illustrating dissolved inorganic nitrogen (DIN) budget in Hampyeong bay.

식물플랑크톤에 의한 질소 고정을 나타내거나, 외해로의 유출에 의한 소비되는 것으로 나타났다(Fig. 17).

나타내어 만내 유기체의 분해에 의한 공급이나, 퇴적물로부터의 유출에 의한 부하, 하천을 통한 부하가 식물플랑크톤에 의한 소비 또는 외해유출보다 큰 것으로 나타났다.

### 5. 결론

함평만의 육상오염부하 특성 및 물질수지를 조사한 결과는 다음과 같다.

함평만의 하천 오염부하 특성을 보면, 유기물질에 대한 오염부하의 경우 BOD, COD, TOC 모두 하천유입량이 가장 많은 손불방조제, 주포교, 양만단지 순으로 하천부하가 가장 큰 것으로 나타났다. 계절별로는 강우시기인 7월에 높은 부하 특성을 나타내었다. 영양염류의 부하특성을 보면, 강우의 영향을 많이 받는 5, 7, 8월에 거의 모든 부하가 집중되었으며, 가장 큰 부하는 7월 양만단지를 통한 부하가 가장 크게 나타났다. 하천별로는 양만단지, 백옥교, 주포교 순으로 높은 부하를 보였다.

박스모델을 이용한 함평만 물질수지 결과를 보면, 담수체류시간이 52.4일로 나타나, 만입구를 통한 해수교환이 낮은 반폐쇄성 해역의 특성을 나타내었다. 영양염 물질수지에서 용존무기질소의 경우 만내에서 탈질상태를 나타내어 만으로 유입된 질소가 식물플랑크톤에 의해 고정되거나 외해로 유출되는 특성을 보였고, 용존무기인의 경우 ΔDIP가 (+)를

### 후 기

이 논문은 2015년도 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

### References

- [1] Boynton, W. R., J. H. Garber, R. Summers and W. M. Kemp (1995), Inputs, transformations, and transport of nitrogen and phosphorus in Chesapeake Bay and selected tributaries, *Estuaries*, Vol. 18, pp. 285-314.
- [2] Chu, Y. S., H. J. Lee, E. S. Park, Y. G. Lee and K. S. Jeong(2000), Summer-time behaviour and flux of suspended sediments at the entrance to semi-closed Hampyeong bay, southwestern coast of Korea, 『The Sea』 Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 5, No. 2, pp. 105-118.
- [3] Eom, K. H., W. C. Lee, S. E. Park, S. J. Hong, H. C. Kim and Y. S. Cho(2011), Dissolved nutrient balance and net

- ecosystem metabolism using a simple box model in Gamak bay, Korea, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 257-263.
- [4] Hong, S. J.(1998), Budgets of freshwater, Nitrogen and phosphorus in the Nakdong estuary, Master's thesis, Pukyung National University.
- [5] Hong, S. J., W. C. Lee, S. P. Yoon, S. E. Park, Y. S. Cho, J. N. Kwon and D. M. Kim(2007), Reduction of autochthonous organics in Masan bay using a simple box model, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 13, No. 2, pp. 111-118.
- [6] Hwang, D. W. and B. S. Koh(2012), Sedimentary and benthic Environment characteristics in Macroalgal habitats of the intertidal zone in Hampyeong bay, Kor J Fish Aquat Sci., Vol. 45, No. 6, pp. 694-703.
- [7] Kang, M. R., D. I. Lim, P. G. Jang, G. B. Kim and Y. S. Kang(2009), Tidal variation of nutrient concentraion in Hampyeong bay, west coast of Korea, Jounal of the Korean Society for Marne Environmental Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 202-208.
- [8] Kim, J. G., D. M. Kim and J. S. Yang(2000), Estimation of material budget for Keum river estuary using a box model, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 76-90.
- [9] Lee, K. S. and S. K. Jun(2009), Material budgets 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.
- [10] Matsukawa, Y. and T. Suzki(1985), Box model analysis of hydrography and behaviour of nitrogen and phosphorus in a eutrophic estuary, J. Oceanol. Soc. Jpn., Vol. 41, pp. 407-426.
- [11] ME(2009), Ministry of Environment, Standard Method for Examination of Water and Wastewater, Retrieved from <http://www.law.go.kr/DRF/lawService.do?OC=jaa806&target=admrul&ID=2100000035547&type=HTML&mobileYn=>.
- [12] NIFS(2009-2010), National Institute of Fisheries Science, The monitoring data of national marine environment, Retrieved from [http://kodc.nifs.go.kr/page?id=obs\\_04\\_01](http://kodc.nifs.go.kr/page?id=obs_04_01).
- [13] Ryu, S. O., H. S. You and J. D. Lee(1999), Seasonal variation of surface sediments and accumulation rate on the intertidal flats in Hampyong bay, southwestern coast of Korea, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 4, No. 2, pp. 127-135.
- [14] Ryu, S. O.(2003), Seasonal variation patterns of tidal flat sediments in semi-enclosed Hampyong and Kwangyang bays, west and south coast of Korea, Jour. Korean Earth Science Society, Vol. 24, No. 6, pp. 578-591.
- [15] Savchuk, O. P. and D. P. Swaney(1999), Water and Nutrient Budgets of the Gulf of Riga, Retrieved from <http://nest.su.se/mnode/Europe/Gulf%20of%20Riga/rigabud.htm>.
- [16] Shen, H. T., Q. H. Huang and X. C. Liu(2000), Fluxes of the dissolved inorganic nitrogen and phosphorus through the key interfaces in the Changjiang estuary, Retrieved from <http://nest.su.se/mnode/Asia/SEASIA.HTM>.
- [17] Ukita, M., H. Nakanishi and M. Sekine(1988), Study on transport and material balance of nutrients in yamaguchi estuary, Wat. Sci. Tech., Vol. 20, pp. 199-210.
- [18] Yanagi, T.(1997), Water, Salt, DIP and DIN Budgets in Tokyo, Ise and Osaka Bays, The Oceanographic Society of Japan, Vol. 35, No. 1, pp. 25-33.

---

Received : 2016. 01. 28.

Revised : 2016. 02. 19.

Accepted : 2016. 02. 25.