

BOX 모델을 이용한 금강 하구해역의 물질수지 산정

김종구⁽¹⁾, 김동명⁽²⁾, 양재삼⁽³⁾

Estimation of material budget for Keum river estuary using a Box Model

by

Jong-Gu Kim⁽¹⁾, Dong-Myung Kim⁽²⁾ and Jae-Sam Yang⁽³⁾

요 약

물질수송 해석을 위한 박스모델 형태의 물질수지모델을 이용하여, 주변의 많은 환경적 변화 요인을 내재하고 있는 금강하구를 대상으로 계절별 영양염 물질순환 특성을 평가하였다. 담수 유입 및 유출은 계절에 따라 약 4~14배의 큰 차이를 나타내었다. 물수지에 의한 담수유출량은 $1.014 \times 10^8 \sim 12.566 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ 로 나타났으며, 담수유출량의 99.7%가 하천수의 유출에 의한 것으로 나타났다. 염분수지에 의해 계산된 담수존재량은 $0.339 \times 10^8 \sim 0.652 \times 10^8 \text{ m}^3$ 이었고, 평균체류시간은 1.6~10.0일, 해수교환시간은 2.2~11.9일로 계산되었다. 평균체류시간은 계절별로 큰 차이를 보였는데 강우집중시기인 하계 풍수기에는 1.6일의 짧은 체류시간을 보인 반면 동계 갈수기에는 10.0일의 평균체류시간을 나타내었다. 영양염 수치로 계산된 DIP의 유입flux의 범위는 5.57~32.68ton/month이었고, DIN 유입flux는 234.93~2,373.39ton/month로 계산되었다. 영양염의 체류시간을 보면, DIP의 경우 1.1~6.4일의 범위를, DIN의 경우 1.8~10.9일의 범위를 보였고, 담수체류시간과 비교하면, DIP는 0.39~2.31배, DIN은 0.83~1.13배를 나타내었다. DIP의 경우 하계를 제외한 전 계절에서 담수 체류시간보다 짧아 DIP가 빠르게 순환되었으나, DIN의 경우 하계와 동계에 담수체류시간보다 긴 순환비를 보여 영양염이 축적됨을 알 수 있다.

Abstract

The estimation of material cycle of pollutants is necessary for the environment management in coastal zone. Model for material budgets are useful tools to understand the phenomena of natural system and to provide an insight into the complex processes including physical, chemical and biological processes occurring in natural system. Budgets of fresh water, salt and nutrients were estimated in order to clarify the characteristics of seasonal material cycle in Keum river estuary. Inflow volumes of freshwater into system was approximately $1.014 \times 10^8 \sim 12.566 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ and discharge in Keum river has

(1) 정희원, 군산대학교 해양환경공학과, kjg466@kunsan.ac.kr

(2) 정희원, 부경대학교 환경공학과, dmk5260@chollian.net

(3) 군산대학교 해양정보과학과, yangjs@kunsan.ac.kr

occupied 99.7% of total freshwater. Seasonal variations of freshwater volume in the system were found to be very high in the range of about 4 ~ 14 times due to rainfall in summer season. Existing water mass of freshwater in system calculated by salt budget was approximately $0.339 \times 10^8 \sim 0.652 \times 10^8 \text{m}^3$. Mean residence time of freshwater was calculated to be about 1.6~10.0day, and exchange time was calculated to be about 2.2~11.9day. Mean residence time was short as 1.6day in summer due to precipitation, and long as 10.1day in winter due to a drought. Inflow masses of DIP and DIN were approximately 5.57~32.68ton/month and 234.93~2,373.39ton/month, respectively. Seasonal inflow mass of DIP was larger than the outflow mass except for summer season. Thus, we postulate that accumulation of DIP in the system will happen. Residence times of DIP and DIN were calculated to be 1.1~6.4day and 1.8~10.9day, respectively. The ratio of water residence time *versus* DIP, DIN residence time was calculated to be 0.39~2.31 times and 0.83~1.13 times, respectively.

Keywords: Material budget, Nutrients(DIP, DIN), Seasonal variation, Residence time, Freshwater budget, Salt budget, Nutrient budget

1. 서 론

한반도 서해 중부역에 위치하고 있는 금강 수계는 국내 4대강의 하나로서 발원지인 전라북도 진안에서 군산하구까지 총 유로연장이 약 400km에 달하며, 집수면적은 9880km²으로 담수유출량은 $6.4 \times 10^9 \text{ton/year}$ 에 이른다(임과 최, [1996]).

1988년에 농업용수와 공업용수의 안정적 확보를 목적으로 전라북도 옥구군 성산면 성덕리와 충청남도 서천군 마서면 도산리를 연결하는 총 1,841m길이의 금강하구둑이 건설되었고, 1994년 8월 하구언 갑문이 반영구적으로 폐쇄됨에 따라 하구해역에 큰 환경변화가 나타났다(이와 양, [1997]; 김 등, [1998]). 또한 금강하구는 새만금 간척사업, 군장국가공단 조성사업, 군산해상도시 건설 등으로 인하여 대규모 방조제 건설 및 매립 사업이 실시되고 있고, 군산 내·외항 수로 준설 사업 등 환경적 변화요인이 항상 내재하고 있어 해양 환경관리의 필요성이 대두된 해역이다.

일반적으로 하구역 수질관리를 위해서는 대상 해역에서의 생물의 생태적 특성이나 수질 및 저질환경의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 연안에서의 오염물질의 거동을 정량적으로 파악하는 것은 수질관리방안을 도출하는데 기초가 된다. 연안환경의 생태계 특성을 결정하는 인자는, 1) 하구해역에서의 조석 등에 의한 물질의 이동, 확산과 관련된 물리적인 변환과정, 2) 오염물질 자

체의 자산화와 상호간의 화학적반응을 통한 화학적 변화과정, 3) 세균, 박테리아등에 의한 생물학적 분해과정을 포함한 생물학적 변환과정을 들 수 있다. 이들 각각의 변환과정이 기여하는 바를 평가하는 것은 매우 어렵다. 특히 하구역은 다양한 생물들이 존재하고 생산과 소비의 균형이 이루어진 정교한 생태계이므로 복잡한 물리, 화학 및 생물학적인 과정에 의한 변동을 규명하기는 어렵다. 따라서 이러한 과정을 보다 잘 이해하기 위해서는 이들 과정을 단순화시킨 물질수지의 산정을 통한 물질의 유출입을 고려한 접근방법이 유효할 것이다. 더구나 조간대가 넓은 연안역의 경우는 물질수지에 미치는 조간대의 영향이 상대적으로 크기 때문에 오염물질의 거동 메카니즘을 정확하게 파악하는 것이 더욱 어렵다. 이러한 경우 단순 박스모델을 통한 물질순환 해석이 유리할 것으로 생각된다.

최근에는 LOICZ(Land-Ocean Interaction in Coastal Zone)라는 국제적인 연구회에서 미래의 상태를 정량적으로 예측하기 위하여 불확실한 항을 감소시킨다는 목적으로 연안역 물질 flux 또는 물질수송에 관한 연구가 진행 중에 있다. 이들은 단순 박스모델을 이용하여 瀬戶内海(柳, [1997])를 비롯한 Ria of Vigo(S. Smith, [1996]), Solent estuary(S. Smith, [1996]), Bang Pakong estuary(G. Wattayakorn, [1997]), Lagos Lagoon(C. Isebor, [1998]), Thomas bay(J.

Hollibaugh, [1997]) 및 East China sea(Yanagi, [1997])등 많은 해역을 대상으로 물질수지에 관하여 연구하고 있다. 이 모델은 복잡한 자연현상을 단순화하고 모든 개개의 과정을 거시적으로 포괄하여 양적인 흐름을 전체적으로 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다(Gordon et al., [1996]).

하구와 만에서의 물질수지와 관련된 연구로는 영양염의 순환 및 거동에 관한 연구(Yasuo and Teruaki, [1985]; 才野敏郎, [1988]; Masao et al., [1988])가 있으며, 산소, 열, 탄소, 영양염류의 물질수지에 관한 연구(Hidetaka et al., [1986]; Teruaki and Yasuo, [1987]; Yasuo and Katsuyuki, [1988]; Tetsuo et al., [1993]; 柳 等, [1985]; 柳 等, [1989]; 柳 等, [1989])등 많은 연구가 있다. 국내의 물질수지에 관한 연구로는 하천에서의 물질수지에 관한 연구(최, [1991]; 송, [1992])와 마산만에서의 수치모델을 이용한 물질수지에 관한 연구(김 등, [1998])가 있고, 최근 낙동강 하구해역의 담수, 질소 및 인수지에 관한 연구(홍, [1998])가 있으나, 다양한 특성을 가진 여러 하구에서의 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 LOICZ에서 보고된 바가 있는 물질수송 해석을 위한 박스모델 형태의 물질수지모델을 이용하여, 주변의 많은 환경적 변화요인을 내재하고 있는 금강하구를 대상으로 계절별 영양염 물질순환 특성을 밝힘으로써 수질관리의 기초자료를 제공하고자 한다.

1.1 물질수지모델

1) 박스모델의 개요

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

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

시간에 따른 물질의 변화량은 (1)식과 같이 단

순화할 수 있으며, 좌변은 일정한 것으로 가정한다. 물질수지모델은 대상물질의 유·출입을 직접적으로 관찰하고 거동을 표현하는 것이 아니므로 대상해역 내부에서의 물질순환과 이송과정을 밝힐 수 없다. 그러나 개방경계를 통한 물질의 유·출입 flux를 알면 시스템 내부해역에서의 물질의 물리, 화학 및 생물학적 과정의 결과를 추정하는 것은 가능하다.

따라서 모델의 단순화 작업을 통하여 시스템 내의 반응을 하나의 total reaction으로 보고 물질의 변환을 해석함으로써 차후 복잡한 구조를 가진 생태계로의 접근이 용이해진다.

따라서 다수화 조화화되 box 모델은 해수교화가 많고 물질의 체류시간이 짧아 오염물질의 분자 확산에 의한 변화보다 이류에 의한 기여도가 큰 만이나 하구해역에 적용이 적합한 특성을 가진다.

2) 모델의 구조

연안해역에서는 물질수지에는 담수유량의 수지와 보존성물질인 염분의 변화 그리고 질소, 인과 같은 용존성 및 입자성 물질 사이의 비보존적 변화, 탄소와 같이 해면의 가스교환을 통한 변화 등 다양한 물질순환 과정이 존재한다. 이들의 물질수지계산은 각각 다르다. 본 연구의 물질수지는 담수유량수지, 염분수지, 비보존성 물질수지의 산정을 통한 내부 물질의 거시적 이동특성을 고찰하고자 한다.

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/dt 는 모델화한 연안해역 유량의 시간 변동량($m^3/month$), Q는 하천수 유입량($m^3/month$), P는 해면으로의 강수량($m^3/month$), G는 지하수 유입량($m^3/month$), O는 공장폐수·하수유입량($m^3/month$), E는 해면에서의 증발량($m^3/month$), R은 외양경계를 통한 유출수량($m^3/month$)을 나타낸다.

(2)식을 나타내는 담수유량수지 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. (2)식의 우변항 중 직접 관측 또

는 계산이 불가능한 R은 전체 물수지 계산에서 산정한다.

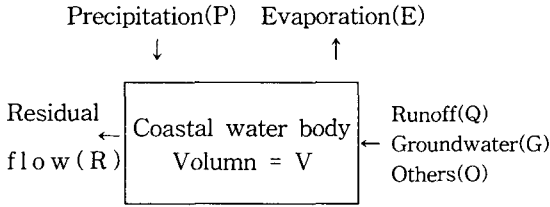


Fig. 1 Generalised box diagram showing the water budget for a coastal water body.

대상해역의 담수 존재량(V_f)을 담수 유출량(R)으로 나누어 정의한 담수의 평균체류시간 τ_f 는 물질수지모델에서의 시간scale의 결정요인이 된다.

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

모델 해역내 담수 존재량 V_f 는 식(4)와 같고, S_1 은 시스템내 평균농도, S_2 는 외양의 대표염분을 나타낸다.

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

② 염분수지(보존성물질)

보존성물질인 염분의 수지를 나타내는 모식도는 Fig. 2에 나타내었다. 모델영역내에서의 염분변동을 (5)식으로 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 모델영역내 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 소

실되는 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 (5)식은 (6)식으로 표현할 수 있다.

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

(6)식의 미지항은 개방경계에서의 해수교환량 V_X 로서 정상상태에서의 평균염분자료를 이용하여 (7)식으로 구한다.

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

만의 체적 V 를 V_X 로 나누면 외양수에 의한 만내수의 평균교환시간 τ_* 를 구할 수 있다.

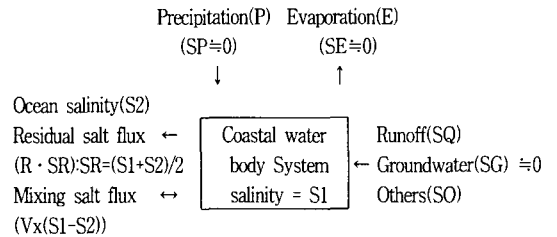


Fig. 2 Generalised box diagram showing the salt budget for a coastal water body.

③ 영양염 수지(비보존성물질)

비보존성물질인 영양염류의 수지를 나타내는 모식도를 Fig.3에 나타내었다. 영양염류의 농도를 Y 로 보았을 때 Y 의 박스내에서의 변동을 (8)식으로 표현할 수 있다.

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

Y 는 물질의 농도(mg/L), Y_1 은 시스템내 비보존성 물질의 농도(mg/L), Y_2 는 외양의 농도(mg/L)를 의

미한다. 첨자는 염분과 같이 하천유출(Q), 강수(P), 증발(E), 하수(O)를 의미하고, ΔY 는 비보존성물질의 생성 및 소멸항이다. 관측자료로부터 ΔY 를 제외한 모든 자료를 구하여 (8)식에서 ΔY 를 추정한다. ΔY 가 (+)면 생성을, (-)면 소실을 의미한다.

ΔY 에는 광합성, 섭식, 포식, 사망, 분해, 퇴적, 용출 등 전체의 화학, 생물학적 과정에 의한 변환 과정을 포함하고 있다.

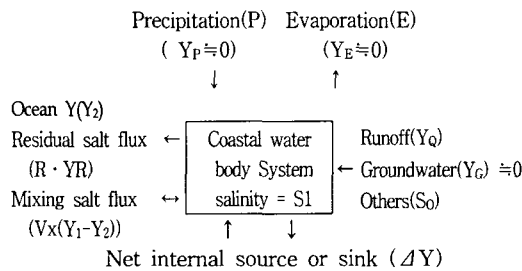


Fig. 3 Generalised box diagram showing the budget of nonconservative material, Y for a coastal water body.

2. 연구내용 및 방법

2.1 대상해역의 유역특성 및 시스템 구분

모델의 구성 및 개방경계의 설정에는 지형적 특성, 유동특성, 물질분포특성, 생태계의 특성 등 다양한 요인이 관여할 수 있다. 그러나 모델구성의 고려사항 중 중요한 것은 연구의 목적에 따른 취급인자, 이용 가능한 자료의 질과 양에 따라 최대한 합리적인 모델영역의 설정이다. 또 모델 경계는 지형적 특성이나 서식환경이 없는 경우 유동시스템이나 물질의 농도분포 등을 이용하여 설정할 수 있다. 즉, 수체의 수평적인 잔차류 순환의 경계가 되는 유동구조와 물질농도의 전선구조가 모델경계 설정의 주요인자가 될 수 있다.

대상해역은 금강 유출수 뿐만 아니라 군산, 장항의 생활하수가 유입되는 하구해역으로서 하구 외측에는 군장국가공단 사업의 일부로서 남북도류계 공사가 상당히 진척되어 있는 실정이다. 이 공사가 완공되면 금강하구는 하구둑을 기점으로 하여 길이가 약 21Km의 긴 만의 형태를 가진 하구의 형태가 된다(Fig. 4). 본 연구에서는 유역의

지형적 특성 및 오염물질 분포특성을 고려하여 금강하구둑에서부터 남북도류계가 끝나는 지점인 명암까지를 대상유역으로 하였다.

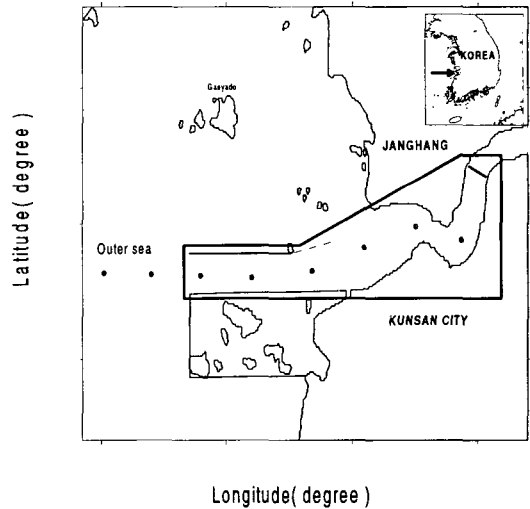


Fig. 4 Map of the system boundaries in the Keum river estuary.

2.2 시스템 적용 자료 도출

대상해역 면적은 구적기(X-plan II 360)을 이용하여 산출하였고, 평균수심을 구하기 위해 30.3m × 30.3m 크기의 격자로 세분화하여 해당 부분의 수심을 구한 후 전체 평균하여 산출하였다. 적용수심은 해도상에 표시된 수심자료에 평균해수면을 합친 값을 사용하였다. 대상면적에 평균수심을 곱한 값을 대상해역의 체적 즉, 해수의 체적으로 하였다.

수지계산에 필요한 강수량, 증발량, 하천유입량 및 대상해역의 염분 및 영양염농도 자료는 1995년부터 1997년까지 3년간의 측정자료를 이용하였다.

하천유입수량은 금강하구둑 관리사무소(농어촌진흥공사)의 방류량 자료를 이용하였고, 하천의 영양염 농도는 금강환경청에서 금강하구내 3개지점을 대상으로 조사한 질소와 총인 측정자료의 평균농도를 이용하였다. 강수량과 증발량은 기상년보에 발표된 군산기상대의 자료를 이용하였다. 이중 증발량은 1985년부터 1991년까지 관측된 자료가 있으나, 그 이후 관측된 자료가 없어 증발량 관련인자와의 중회귀분석을 통하여 산출하였

다. 대상해역의 염분 및 영양염 자료는 국립수산진흥원에서 조사한 연안어장 환경 오염조사(1995~1996년)와 해양오염측정망(1997년)의 자료를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상해역의 특성 및 제원

모델 해역은 상류로부터 유입하는 금강하천수 및 군산시 생활하수의 영향을 받고 있으며, 하류부는 일부 공장하수가 간헐적으로 유입되나 무시 가능한 정도의 수준이다. 대상하구의 제원 산출을 위하여 도상에서 평균수심과 면적을 산출하여 계산한 결과를 보면, 전체면적은 $34.52 \times 10^6 \text{m}^2$ 이고, 평균수심은 6.165m로서 해수의 전체 체적은 $212.8158 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 계산되었다.

3.2. 담수유량수지

대상해역의 담수수지 계산을 위한 유입인자는 금강하구둑 방류량과 대기를 통한 강수유입 및 군산시 생활하수 유입을 고려하였고, 유출인자는 증발과 박스에서외의 유출로 정의하였다.

강수는 1995년 1월부터 1997년 12월 동안 군산기상대에서 관측된 자료를 이용하였고, 증발량의 관측자료는 없어 증발량 추정방법을 이용하여 계산하였다. 증발량 산출방법은 Yanagi[1989]가 제시한 증발량 산출방법과 공기동역학적 방법(윤, [1986])에 의한 수표면 온도에서의 포화증기압과 실제증기압과의 관계를 이용한 추정방법 등 여러 가지 방법이 제시되어 있다. 본 조사에서 Yanagi 방법과 공기 동역학적 방법 중 적용 가능한 3가지 방법을 이용하여 월별 증발량을 계산하였고, 계산된 월 변동특성을 군산기상대에서 기관측 [1985~1991년] 자료의 월 변동과 비교 분석하였으나, 상당히 큰 차이를 나타내어 적용의 문제점이 나타났다. 그래서 증발량 산출을 위해 중회귀 분석법을 사용하였는데, 이는 증발량 관측자료가

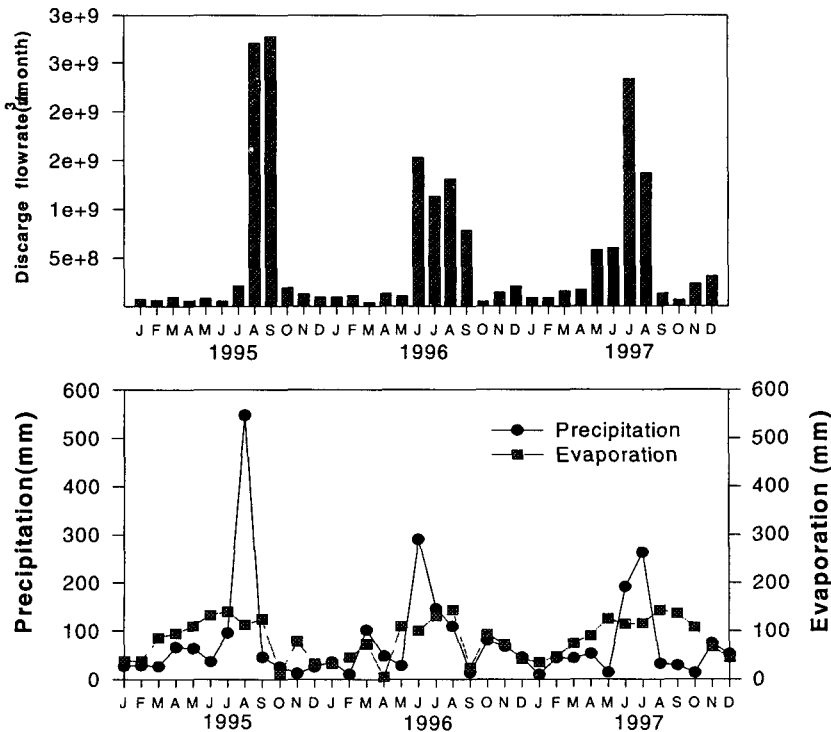


Fig. 5 Monthly variation of discharge flowrate, precipitation and evaporation in study area.

Table 1 Seasonal mean values of discharge, rainfall and evaporation during 1995~1997

Item Season	River inflow (m ³ /month)	Precipitation (m ³ /month)	Evaporation (m ³ /month)	Discharge flux(m ³ /month)
Spring	1.591×10 ⁸	1.706×10 ⁹	3.285×10 ⁹	1.595×10 ⁸
Summer	12.520×10 ⁸	6.944×10 ⁹	4.341×10 ⁹	12.566×10 ⁸
Autumn	5.013×10 ⁸	1.769×10 ⁹	3.514×10 ⁹	5.015×10 ⁸
Winter	0.920×10 ⁸	0.978×10 ⁹	1.336×10 ⁹	1.014×10 ⁸

있는 시기[1985~1991년]의 자료를 이용하였고, 증발량과 가장 밀접한 관련을 가지는 결정인자인 기온, 수온, 풍속, 강수량, 상대습도, 운량과의 중회귀분석을 통하여 관계식을 도출하였다. 중회귀 분석을 통하여 도출된 상관식은 (9)식과 같으며, 중회귀 상관성이 $r^2=0.867$ ($P<0.01$)로서 전체 증발량 변동의 86.7%를 설명할 수 있다. 이 식을 이용하여 대상기간[1995-1997년]동안의 증발량을 산출하였다.

$$\begin{aligned} \text{Evaporation(mm/month)} = & 32.526 + 0.117 \\ & \text{Temp.}(^{\circ}\text{C}) + 4.474 \text{ Air Temp.}(^{\circ}\text{C}) \\ & + 20.765 \text{ Wind(m/s)} - 0.0882 \\ & \text{Precipitation(mm)} \end{aligned} \quad (9)$$

대상유역으로 유입되는 생활하수량은 실제 관측된 자료가 없어, 일반적으로 많이 이용하는 원단위 산정법을 이용하였다. 이는 유역인구(cap.)에 단위 상수량(ℓ /cap.day)을 곱하여 산출하는 방법

으로 군산시 통계연보[1997]에서 경포천 유역인 구수와 1995년~1997년의 평균 상수보급량 자료를 이용하였다. 추정된 유입하수량은 일유입량 $65,427\text{m}^3/\text{d}$ ($145,072\text{명} \times 451 \ell/\text{명}/\text{day}$)이며, 월유입량 $1,962,824\text{m}^3/\text{month}$ 로 계산되었다. 유입지하수량 및 공장배수량은 없는 것으로 가정하였다.

Fig. 5는 1995-1997년 사이의 금강을 통한 담수유입량과 대기를 통한 강수유입 및 증발량의 월평균 변화를 나타내었다. Table 1은 대상유역으로의 계절별 강수, 증발량 및 하천수 유입량을 나타내었다. Fig. 6은 계절별 담수수지 box diagram을 나타내고 있다.

담수 유입 및 유출은 계절에 따라 약 4~14배의 큰 차이를 나타내었다. 강우의 경우 하계 장마로 인하여 타 계절보다 4~8배 이상이 나타났으며, 강우와 증발의 변화를 보면, 하계에 강우가 크게 나타났고, 춘계, 추계와 동계에 증발이 크게 나타나는 경향을 보였다.

Table 2 The Results of salt budget and salt concentration in the system.

Season	Salinity(‰) in system	Salinity(‰) of outer sea	Mass of Freshwater (m ³)	Mean Residual Time(day)	Mass of Exchange (m ³ /month)	Mean Exchange Time(day)
Spring	24.53	30.99	0.444×10^9	8.3	6.056×10^8	10.5
Summer	19.86	28.64	0.652×10^9	1.6	23.423×10^8	2.2
Autumn	25.91	32.45	0.429×10^9	2.6	19.869×10^8	3.2
Winter	27.42	32.62	0.339×10^9	10.0	5.347×10^8	11.9

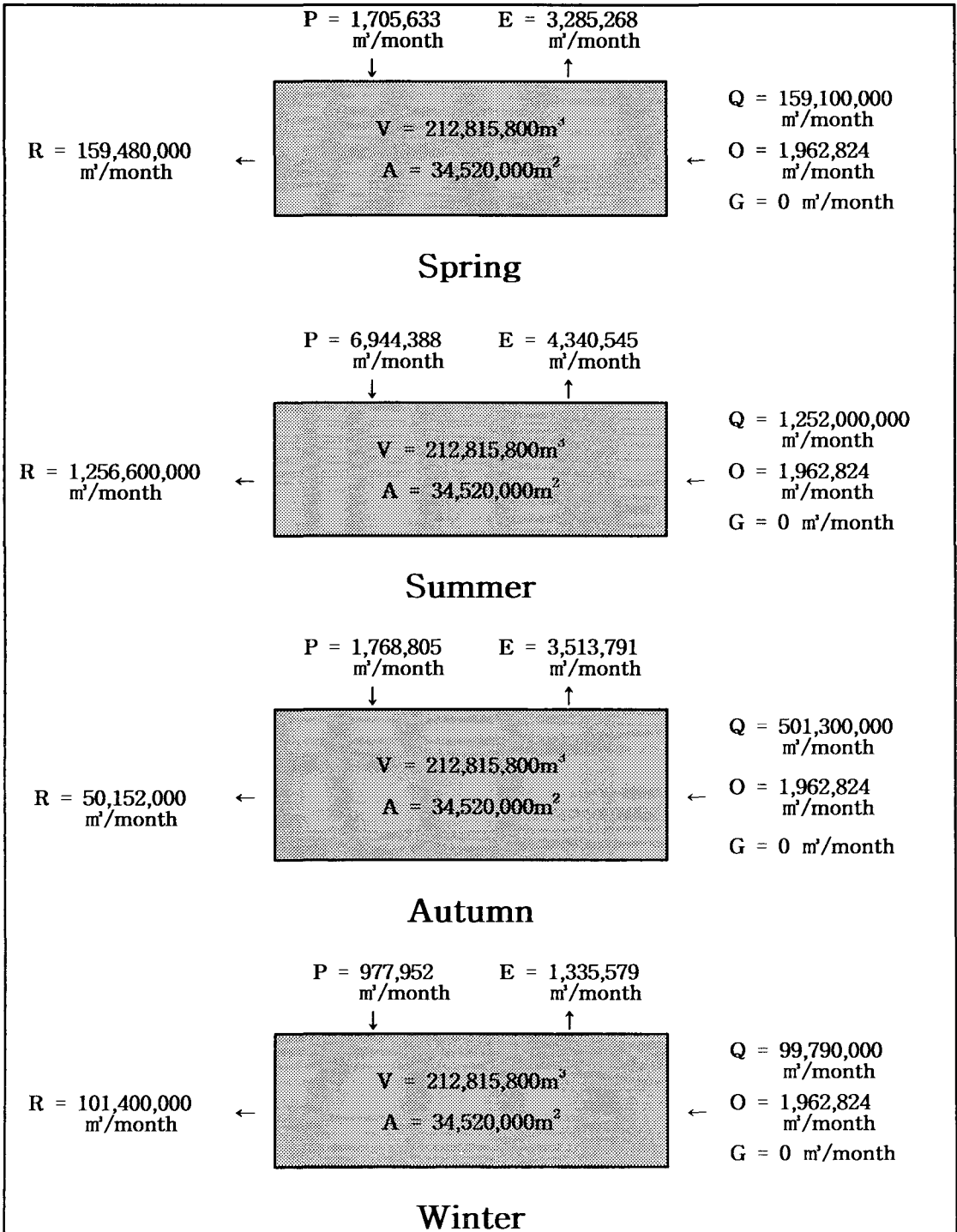


Fig. 6 Box diagram illustrating the water budget of Keum River estuary

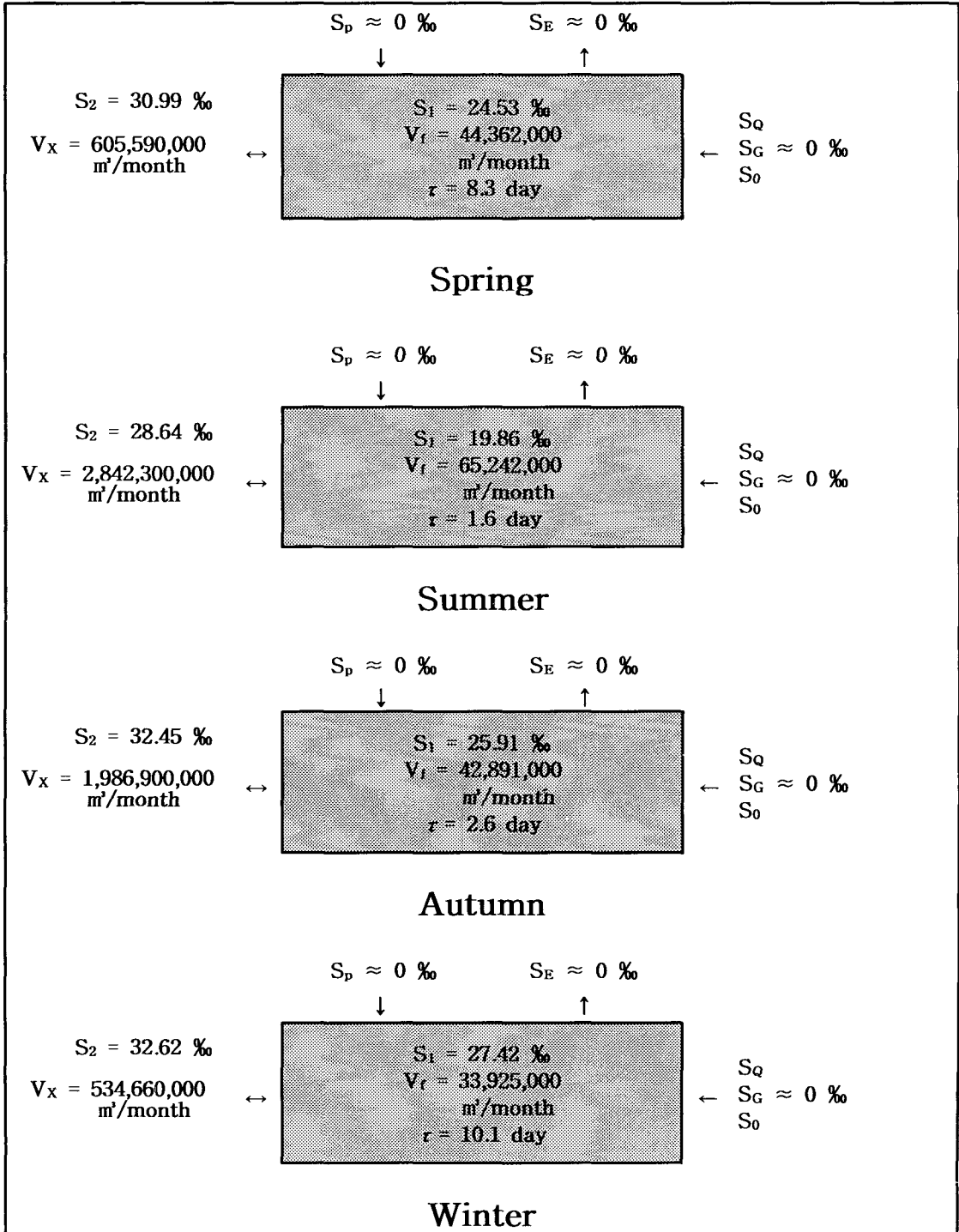


Fig. 7 Box diagram illustrating the salt budget of Keum River estuary

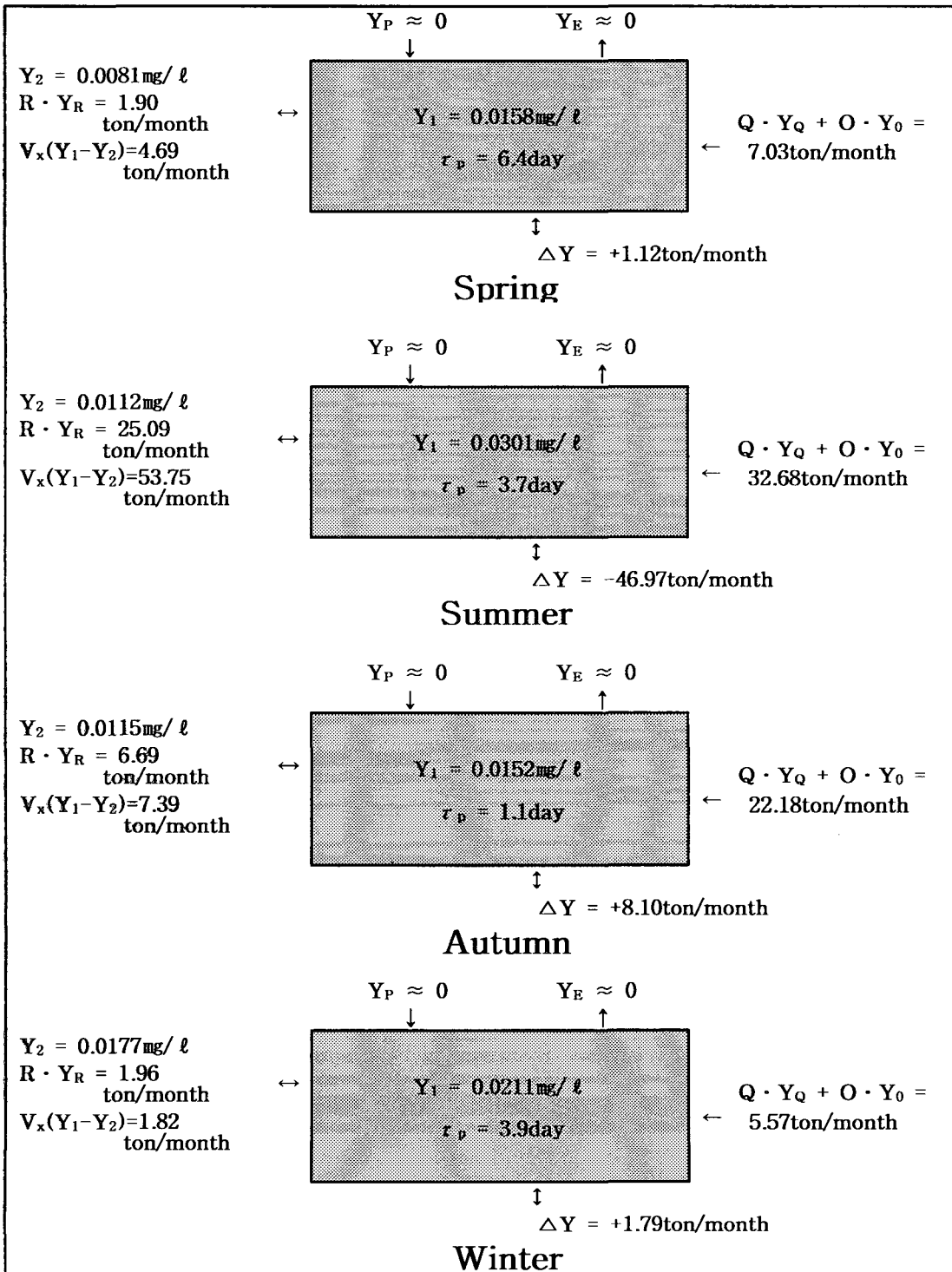


Fig. 8 Box diagram illustrating the DIP budget of Keum River estuary

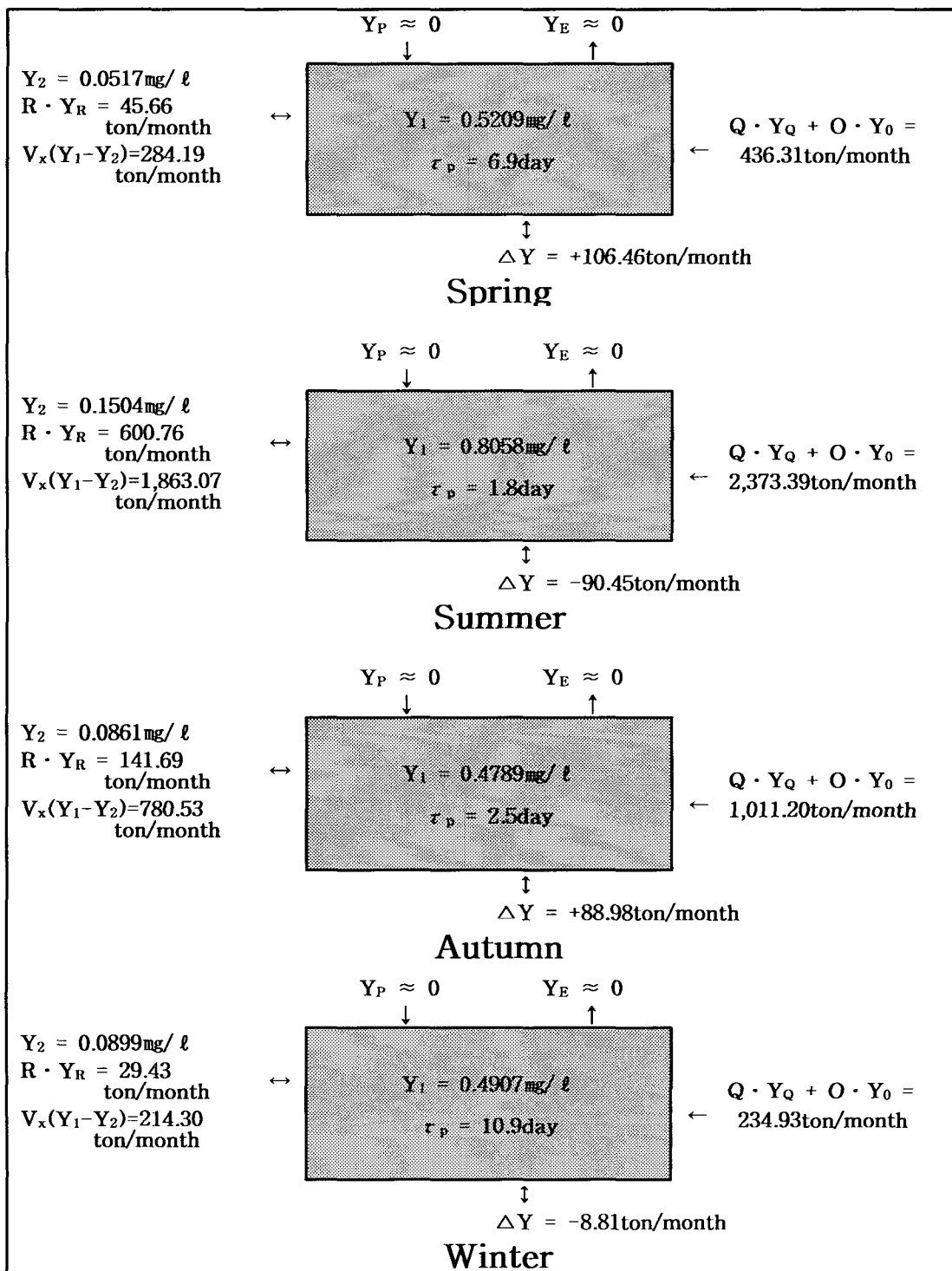


Fig. 9 Box diagram illustrating the DIN budget of Keum River estuary

담수수지에 의한 담수유출량은 $1.014 \times 10^8 \sim 12.566 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ 로 나타났으며, 담수유출량의 99.7%가 하천수의 유출에 의한 것으로 나타났다.

3.3 염분수지

염분수지 계산을 위하여 박스내의 해역을 대상해역으로, 박스 바깥해역을 외해역으로 정의하여 각각의 s평균 염분농도를 계산하였다. 염분자료는 국립수산진흥원 연안어장 환경오염조사[1995~1996년]와 해양오염측정망[1997년] 자료중 금강하구해역 조사자료를 이용하여 대상해역과 외해역의 염분농도를 산출하였다.

관측지점은 명암을 기점(동경 $126^\circ 30' 00''$)으로 하여 대상해역에서 총 6개 정점이 조사되었고, 외해역에서 2개 지점이 조사되었으며(Fig. 4), 각 정점에서 표층수와 저층수가 측정되었다. 대상해역 및 외해역의 평균 염분농도는 각 해역의 전체자료를 산술평균하여 구하였다.

Table 2은 염분수지 계산에 사용된 대상해역과 외해역의 계절별 평균염분농도와 염분수지에 의해 계산된 담수존재량, 평균체류시간 및 교환시간을 나타내었고, Fig. 7는 계절별 염분수지 box diagram을 나타내고 있다.

대상해역의 계절별 평균 염분농도는 19.86~27.42‰의 범위였으며, 인접한 외해역의 염분농도는 28.64~32.62‰이었다. 강우 및 하천을 통한 염분유입은 무시하였다.

계절별 담수존재량은 $0.339 \times 10^8 \sim 0.652 \times 10^8 \text{ m}^3$ 의 범위로 하계에 가장 크고 동계에 작았다. 담수의 평균체류시간은 1.6~10.0일로서 계절별로 큰 차이를 보였는데 강우집중시기인 하계 풍수기에는 1.6일의 짧은 체류시간을 보인 반면 동계 갈수기에는 10.0일의 평균체류시간을 나타내었다. 해수교환량은 $5.347 \times 10^8 \sim 28.423 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ 의 범위였고, 하계 해수교환량이 가장 크게 나타났다. 해수교환시간은 2.2~11.9일의 범위로 나타났는데, 평균체류시간과 동일한 패턴으로 하계에 2.2일, 동계에 11.9일로 나타나, 금강하구가 강우의 영향을 아주 크게 받고 있으며, 연중 수질변화도 상당히 크게 나타날 것으로 예상되었다.

이는 홍[1998]이 낙동강 하구에서 구한 연 평균체류시간 2.03일보다 긴 체류시간이었으며, 하구해역이면서 시스템 체적이 $1.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ 인 solent 강(Smith, [1996])의 19일 및 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 인 Bang Pakong강(Wattayacorn, [1996])의 5일과 비교하

여 유사한 체류시간을 나타내었다.

3.4 영양염수지

대상해역과 외해역의 인산인(DIP), 총무기질소(DIN) 농도는 국립수산진흥원 연안어장 환경오염조사(1995~1996년)와 해양오염 측정망 자료(1997년) 자료중 금강하구해역 조사자료를 이용하여 대상해역과 외해역의 영양염농도를 산출하였다.

염분 관측지점과 동일 지점에서 측정된 자료를 이용하여 대상해역과 외해역의 계절별 평균 영양염 농도를 계산하였다.

금강방류수의 유입농도는 금강환경관리청의 금강하구연 수질관측점에 대한 월 측정자료를 이용하였다. 하천수중의 인산인 농도는 총인(TP)으로 측정되어 수지계산을 위하여 TP에 대한 DIP의 비율을 계절별로 적용하였다. 적용비율은 신[1996]이 낙동강에서 측정한 TP과 DIP의 비율을 계절별로 산출하여 적용하였는데, 춘계 24.0%, 하계 24.1%, 추계 34.9%, 동계 52.6%를 적용하였다.

군산시 생활하수의 영양염 자료는 군산시[2000] 자료를 적용하였으며, 계절별 변화는 없는 것으로 간주하였다. 계산에 적용된 농도는 DIN 10.0mg/L, DIP 1.34mg/L이다. 강우에 의한 유입은 없는 것으로 간주하였다.

Table 3은 영양염 수지계산에 적용된 대상해역과 외해역 및 하천수의 영양염 농도를 나타내었다. Fig. 8~9은 계산된 계절별 DIP와 DIN의 물질수지 box diagram을 나타내고 있다.

대상해역내 DIP의 평균농도는 0.0152~0.0301 mg/L의 범위였고, 외해역의 DIP 평균농도는 0.0081~0.0177mg/L이었다. 금강방류수의 DIP 유입농도는 0.0240~0.0390mg/L로서, 금강과 생활하수에 의한 DIP의 유입flux의 범위는 5.57~32.68 ton/month이었다.

대상해역의 DIN의 평균농도는 0.4789~0.8058 mg/L의 범위였고, 외해역의 DIN 평균농도는 0.0517~0.1504mg/L이었다. 금강방류수의 DIN 유입농도는 1.8800~2.6190mg/L로서, 금강과 생활하수에 의한 DIN 유입flux는 234.93~2,373.39ton/month로 계산되었다.

유입되는 부하량에 대한 시스템 내부의 영양염 존재량으로 영양염 체류시간을 계산하였다(Table 4). 시스템 내부의 존재량은 시스템내 영양염 농

Table 3 Input data for calculation of nutrient budget in the system.

Item	Estuary				Keum River	
	DIN(mg/L)		DIP(mg/L)		DIN(mg/L)	DIP(mg/L)
	system	outer sea	system	outer sea		
Spring	0.5209	0.0517	0.0158	0.0081	2.6190	0.0320
Summer	0.8058	0.1504	0.0301	0.0112	1.8800	0.0240
Autumn	0.4789	0.0861	0.0152	0.0115	1.9780	0.0390
Winter	0.4907	0.0899	0.0211	0.0177	2.3400	0.0320

Table 4 Seasonal residence time of fresh water, DIP, DIN and their ratios.

Item Season	Freshwater τ_f (day)	DIP		DIN	
		τ_p (day)	τ_p/τ_f	τ_N (day)	τ_N/τ_f
Spring	8.3	6.4	0.77	6.9	0.83
Summer	1.6	3.7	2.31	1.8	1.13
Autumn	2.6	1.1	0.42	2.5	0.96
Winter	10.0	3.9	0.39	10.9	1.09

도에서 외해역의 기저농도를 뺀 값에 해수의 제적을 곱하여 구하였으며, 이를 일정기간동안 시스템 내로 유입하는 양을 나누어 체류시간을 계산하였다. 이러한 방법은 물질수송의 비선형성이나 영양염 재순환 등의 복잡한 과정은 고려하지 않은 단순히 유출입의 조건으로만 구한 것이다.

영양염의 체류시간을 보면, DIP의 경우 1.1~6.4일의 범위를, DIN의 경우 1.8~10.9일의 범위를 보였다. 이는 반폐쇄성 내만에서 나타나는 1개월 이상의 체류시간에 비하면 짧지만, 홍[1998]의 낙동강 하구역에서 구한 체류시간인 DIP 1.61일, DIN 1.57일 보다는 긴 것으로 나타났다. 이는 대상 해역이 남북도류제 공사로 인하여 긴 하천 형태의 만 형상을 가지고 있어, open sea의 형태를 가진 낙동강 보다 영양염의 유출이 적음을 알 수 있다.

이를 담수체류시간과 비교하면, DIP는 0.42~2.31배, DIN은 0.83~1.13배를 나타내었다. DIP의 경우 하계를 제외한 전 계절에서 담수 체류시간보다 짧아 DIP가 빠르게 순환되었으나, DIN의

경우 하계와 동계에 담수체류시간보다 긴 순환비를 보여 영양염이 축적됨을 알 수 있다.

대상해역내에서 DIN과 DIP의 유입량 및 유출량의 변화와 단위면적당 변화량을 Table 5에 나타내었다. 여기서 비보존성물질의 생성 및 소멸을 의미하는 ΔY 는 (+)항 일 경우 생성을, (-)항 일 경우 소멸을 의미한다. 생성의 경우 유기체의 사망과 분해, 용출, 유입 등에 의한 영양염의 증가를 의미하고, 소멸의 경우 광합성, 생물의 섭식, 퇴적, 유출 등의 영양염 감소를 나타낸다.

DIP의 경우 하계 조류의 광합성에 의한 소비와 강우시 부유사 유출에 의한 퇴적 그리고 외해로의 유출 증가로 인하여 영양염의 소멸이 일어남을 알 수 있으나, 그 외 계절에는 분해 및 용출에 의한 증가하는 경향을 나타내었다. DIN의 경우 하계와 동계에 영양염의 소멸이 크고, 춘계와 추계에 영양염의 생성이 크게 나타나고 있다.

ΔDIP 의 경우 하계 소실된 양이 모두 광합성에 의한 것으로 가정하여 Redfield비(N:P=16:1)를 적용하여 동일량의 DIN으로 바꾸면 751.52ton/

Table 5 Calculated nutrients fluxes of DIP and DIN in the system.

	Variation of DIP		Variation of DIN	
	Sink(-) or Source(+)	Flux	Sink(-) or Source(+)	Flux
	ton/month	mg/m ² /d	ton/month	mg/m ² /d
Spring	1.12	1.08	106.46	102.80
Summer	-46.97	-45.35	-90.45	-87.34
Autumn	8.10	7.82	88.98	85.92
Winter	1.79	1.73	-8.81	-8.51

month가 되는데, 이같은 Δ DIN의 소실량인 90.45ton/month와 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 DIP의 소실이 광합성에 의한 변환 뿐만아니라 외해로의 유출과 퇴적작용에 의한 영향을 크게 받고 있음을 판단할 수 있다.

따라서 DIP와 DIN의 계절별 변화 특성은 하계에는 강우유입에 따른 담수량의 증가로 인하여 외해로의 유출이 증가함으로써 내부로 유입된 영양염의 외해유출이 두드러지게 증가하고 있음을 알 수 있고, 다른 계절에는 영양염의 축적이 크게 일어남을 판단할 수 있다.

특히, DIN의 연간 변화량은 소멸보다 생성이 크게 작용하고 있어 장기적으로 질소의 축적이 예상되는데, 이는 이와 양[1997]이 금강하구둑 수문 조작후인 1995년과 1996년도의 조사에서 질소 농도가 수문조작 전에 비하여 증가하고 있다는 설명과 일치하고 있다.

4. 요약

하구의 특성이 복잡한 금강하구역을 대상으로 하여 박스모델을 이용한 담수, 염분수지 및 영양염 수지를 계산한 결과는 다음과 같다.

1. 담수 유입 및 유출은 계절에 따라 약 4~14배의 큰 차이를 나타내었다. 물수지에 의한 담수유출량은 $1.014 \times 10^8 \sim 12.566 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ 로 나타났으며, 담수유출량의 99.7%가 하천수의 유출에 의한 것으로 나타났다.
2. 염분수지에 의해 계산된 담수존재량은 $0.339 \times 10^8 \sim 0.652 \times 10^8 \text{ m}^3$ 이었고, 담수의 평균체류시간은

1.6~10.0일, 해수교환시간은 2.2~11.9일로 계산되었다. 평균체류시간은 계절별로 큰 차이를 보였는데 강우집중시기인 하계 풍수기에는 1.6일의 짧은 체류시간을 보인 반면 동계 갈수기에는 10.0일의 평균체류시간을 나타내었다.

3. 영양염 수지로 계산된 DIP의 유입flux의 범위는 5.57~32.68ton/month이었고, DIN 유입flux는 234.93~2,373.39ton/month로 계산되었다.

4. 영양염의 체류시간을 보면, DIP의 경우 1.1~6.4일의 범위를, DIN의 경우 1.8~10.9일의 범위를 보였고, 담수체류시간과 비교하면, DIP는 0.39~2.31배, DIN은 0.83~1.13배를 나타내었다.

5. DIP의 경우 하계를 제외한 전 계절에서 담수 체류시간보다 짧아 DIP가 빠르게 순환되었으나, DIN의 경우 하계와 동계에 담수체류시간보다 긴 순환비를 보여 영양염이 축적됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 기상청, 1995-1997, 기상연보.
- [2] 국립수산진흥원, 1995-1996, "연안어장 환경오염조사 보고서".
- [3] 국립수산진흥원, 1997, "해양오염 측정망 조사 보고서".
- [4] 군산시, 2000, "군산시 하수도 정비 기본계획 변경(안) 보고서", 군산시
- [5] 김종구, 유선재, 권정노, 1998, "금강하구둑 건설 후의 수질변화", 한국수산학회지 31(5), 685-694.
- [6] 김동명, 1994, "마산만의 영양염 물질수지에 관한 연구", 부경대학교 석사학위논문.

- [7] 농어촌진흥공사 금강사업단, 1997, “금강호, 하구둑 유지관리 보고서”, 354-376.
- [8] 송교육, 1992, “낙동강 수계의 수질관리를 위한 모델링”, 부경대학교, 박사학위논문.
- [9] 신성교, 1996, “자생BOD를 고려한 낙동강의 수질관리”, 부경대학교, 박사학위논문.
- [10] 최영찬, 1991, “낙동강 하류의 부영양화 모델링에 관한 연구”, 부경대학교 박사학위논문.
- [11] 홍석진, 1998, “낙동강 하구해역에서의 담수, 질소 및 인수지”, 부경대학교 석사학위논문.
- [12] D.C.Gordon et.al., 1996, LOICZ “Biogeochemical Modelling Guideline”, LOICZ Reports & Studies No.5, <http://www.nioz.nl/LOICZ/>.
- [13] Hidetaka Takeoka, Tadashi Ochi, Kazuhiko Takatani, 1986, “The Anoxic Water Mass in Hiuchi-nada, Part 2. the Heat and Oxygen Budget Model”, J. Oceanol. Soc. Jpn, Vol.42, 12-21.
- [14] Masao Ukita, Hiroshi Nakanishi, Masahiko Sekine, 1988, “Study on Transport and Material Ballance of Nutrients in Yamaguchi Estuary(Japan)”, Wat. Sci. Tech. Vol.20, 199-210.
- [15] S.Smith, F.Wulff, 1998, “Description of Budgets Worldwide map”, LOICZ Bio-geoc- hemical Modelling Node, <http://data.ecology.su.se/MNODE/>.
- [16] Tetsuo Yanagi, Toshiro Saino, Takashi Ishimaru, Shin-ichi Uye, 1993, “A Carbon budget in Tokyo bay”, J. Oceanography, 49, 249-256.
- [17] Teruaki Suzuki and Yasuo Matsukawa, 1987, “Hydrography and Budget of Dissolved Total Nitrogen and Dissolved Oxygen in the Stratified Season in Mika wa bay”, Japan. J. Oceanol. Soc. Jpn. Vol.43, 37-48.
- [18] Yasuo Matsukawa and Teruaki Suzki, 1985, “Box Model Analysis of Hydrography and Behaviour of Nitrogen and Phosphorus in a Eutrophic Estuary”, j. Ocean. Soc. Jpn, Vol.41, 407-426.
- [19] Yasuo Matsukawa and Katsuyuki Sasaki, 1988, “Nitrogen in Tokyo Bay with Special Reference to the Low Sedimentation to Supply Ratio”, J. Oceanol. Soc. Jpn. Vol.44, 44-54.
- [20] 柳哲雄, 1997, “東京灣, 伊勢灣, 大阪灣의 淡水·鹽分·DIP·DIN 收支”, 沿岸海洋研究ノート, 35(1).
- [21] 柳哲雄, 1997, “沿岸海域의 物質收支モデル”, 海の研究, 6(3), 163-171.
- [22] 柳哲雄, 1997, “瀬戸内海의 淡水·鹽分·窒素·リン 收支”, 海の研究, 6(3), pp. 151-161.
- [23] 柳哲雄, 柴木秀之, 武岡英隆, 1985, “播磨灘·大阪灣의 鹽分, 窒素, 리 收支”, 沿岸海洋研究ノート, 22(2), 159-164.
- [24] 柳哲雄, 中丞昌紀, 工藤勝宏, 1989, “冬季 豊後水道의 熱·鹽分 收支”, 海と空, 65(3), 143-149.
- [25] 才野敏郎, 1988, “東京灣における 榮養鹽類의 循環”, 沿岸海洋研究ノート, 25(2) 114-133.