

## 물질순환 모델을 이용한 마산만의 질소, 인 수지 산정

김 동 명 · 박 청 길 · 김 종 구\*  
부경대학교 환경공학과 · 군산대학교 해양환경학과  
(1998년 8월 25일 접수)

### The Estimation of N, P mass Balance in Masan Bay using a Material Cycle Model

Dong-Myung Kim, Chung-Kil Park, and Jong-Gu Kim\*  
Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea  
\*Dept. of Marine Environment, Kunsan National University, Kunsan 573-400, Korea  
(Manuscript received 25 August 1998)

It is noted that the red tides and the oxygen-deficient water mass are extensively developed in Masan Bay during summer. The nutrients mass balance was calculated in Masan Bay, using the three-dimensional numerical hydrodynamic model and the material cycle model.

The material cycle model was calibrated with the data obtained on the field of the study area in June 1993. The nutrients mass balance calculated by the combination of the residual currents and material cycle model results showed nutrients of surface and middle levels to be transported from the inner part to the outer part of Masan Bay, and nutrients of bottom level to be transported from outer part to inner part of Masan Bay. The uptake rate of DIN in the box A1(surface level of inner part) was found to be  $337.5 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{day}$ , the largest value in all 9 boxes and that of DIP was found to be  $18.6 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{day}$  in box A1, and the regeneration rate of DIN was found to be  $78.2 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{day}$  in the box A3(bottom level of inner part), and that of DIP was found to be  $18.6 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{day}$  in box A1. The regenerations of DIN and DIP in the water column of the entire Bay were found to be  $7.66 \text{ ton/day}$  and  $760 \text{ kg/day}$ , respectively. And the releases of DIN and DIP from the sediments of the entire Bay were found to be  $2.86 \text{ ton/day}$  and  $634 \text{ kg/day}$ , respectively. The regeneration rate was 2.5 times as high as the release rate in DIN, and 1.2 times in DIP.

The results of mass balance calculation showed not only the nutrients released from the sediments but the nutrients regenerated in water column to be important in the control and management of water quality in Masan Bay.

Key words : Nutrients mass balance, material cycle model, Masan Bay

#### 1. 서 론

마산만은 창원군, 마산시, 창원시, 진해시, 의창군 등으로 둘러싸여 있으며, 평균수심 약 11m로 수심이 얇고 폭이 좁으며 지형의 굴곡이 심한 장방형의 내만으로 해수교환이 적어서 소량의 오염물질이 유입되어도 수질이 악화될 우려가 있는 반폐쇄성 해역이며 우리나라에서 가장 오염이 심한 만 중의 하나이다. 특히 하계 저층에 용존산소가 결핍되어 무산소층이 형성되고 부영양화 현상이 심각하게 진행되어 적조의 발생이 빈번한 해역이다.

적조현상은 영양염류가 풍부한 부영양화된 해역에서 잘 발생하고 기상조건, 수온, 염분, 영양염, 빛, 물의 유동 등이 적조발생에 영향을 주는데 이때 식물플랑크톤

의 대량증식에 절대적으로 필요한 것이 빛과 질소, 인 등의 영양염이다. 부영양화 현상과 적조의 발생을 정확히 파악하고 효과적으로 대처하기 위해서는 해역에서의 영양염의 거동과 함께 물질수지를 통하여 수괴 내에서 이동, 섭취, 재생되는 영양염량에 대한 정량적인 파악이 필요하다.

마산만에 대한 연구로는 박주석 외(1967)의 적조현상에 관한 연구를 비롯하여 적조현상과 적조생물에 관한 많은 연구가 이루어져 왔고, 부영양화 현상에 관한 박청길(1975), 양동범(1987), 나기환(1987)의 연구 등이 있었다. 또 환경처(1991)가 진행한 일원 오염실태에 관해서 조사하였고 해양연구소(1987, 1989), 서봉수(1987) 등이 마산만의 수질과 오염부하에 관하여 연구하였다.

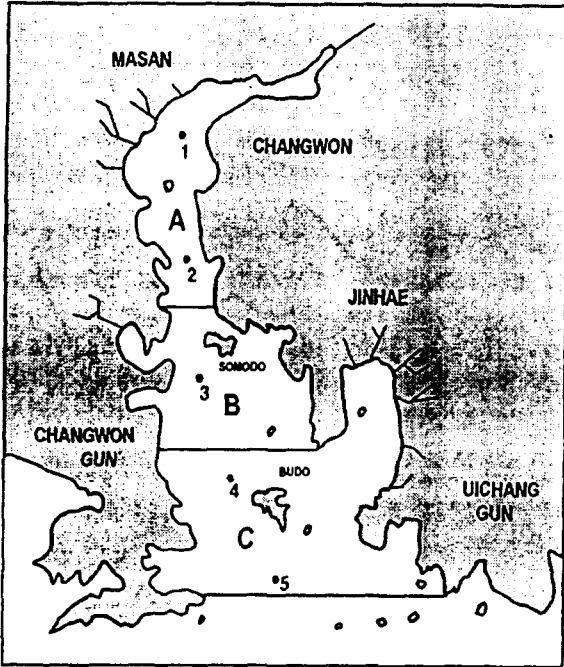


Fig. 1. The location of sampling stations in Masan Bay.

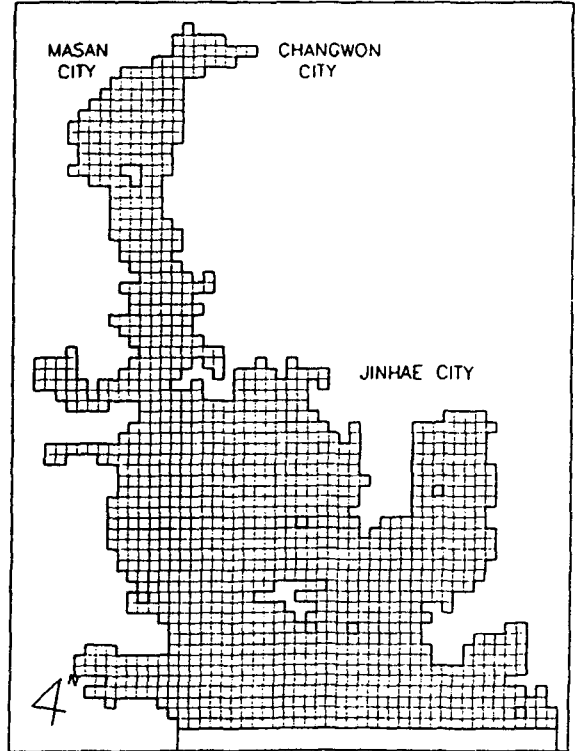


Fig. 2. Finite-difference grid map of model domain.

물리적 현상에 관해서는 김종화 외(1986a)의 마산만 해수유동에 관한 연구, 김종화 외(1986b)의 해수교환율에 관한 연구, 마산만의 물질분산에 관한 김종화(1993)의 연구가 있고 기타 수질오염에 관한 최희구(1989), 김용원(1992)의 연구가 있다. 이와 같이 많은 연구가 이루어졌지만 수질오염에 관한 연구 대부분이 적조생물에 관한 연구와 오염물질의 농도분포 등에 관한 연구로 영양염의 물질수지에 관한 연구는 없었다.

국내외의 물질수지에 관한 연구에 대해 살펴보면 Yasuo와 Teruaki(1985)가 box 모델을 사용하여 부영양화된 하구에서 질소와 인의 거동에 관해 연구하였고, Hidetaka *et al.*(1986)이 box 모델을 사용하여 열수지와 산소수지에 관하여 연구하였다. 그리고 Masao *et al.*(1988)이 하구에서의 영양염 이동과 물질수지에 관하여 연구하였고, Teruaki *et al.*(1987)이 성층이 발달한 만에서 용존무기질소와 용존산소의 물질수지에 관하여 연구하였다. 또 Katusuyuki *et al.*(1988)의 동경만에서 질소수지에 관한 연구, Tetsuo *et al.*(1993)의 탄소수지에 관한 연구, Mayumi *et al.*(1989)의 연구 등이 있다. 그러나 이들의 연구는 주로 대상해역을 몇 개의 커다란 box로 나누고 그 box의 특성을 동일한 것으로 보고 물질순환을 다루었고, 또 물리적인 이류, 확산에 의한 희석만을 고려하여 물질수지를 산정한 것이 많기 때문에 수질관리의 측면에서 이용하기에는 부족하다. 국내에서는 최영찬(1991)이 Qual 2E모형을 사용하여 낙동강 하구에 대하여 BOD수지와 용존산소수지를 산정하였고 송교욱(1992)이 낙동강 전역에 대하여 Qual 2E모형을 사용하여 용존산소와 영양염에 대한 물질수지를 산정하

였다. 그러나 국내에서는 해역에서의 영양염 물질수지에 관한 연구는 거의 없었다.

따라서 본 연구는 마산만에서 행암만에 이르는 해역에 대하여 영양염의 거동과 정량적인 파악을 위해 해수유동모델(COSMOS)과 물질순환모델(EUTROP2; 日本通商産業省, 1991)을 사용하여 영양염의 현황을 재현하고 해수유동모델과 물질순환모델의 계산결과를 이용하여 영양염 물질수지를 산정하여 수질관리에 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대상해역

본 연구의 대상해역은 마산만과 행암만을 포함한 부도 남단까지의 해역으로 넓이 약 78.69km<sup>2</sup>, 평균수면하 해수용적 약 0.8614km<sup>3</sup>, 평균수심 약 11.1m의 수심이 얇고 폭이 좁으며 지형의 굴곡이 심하고 해수의 교환이 적은 폐쇄성 해역이다(서봉수, 1987).

### 2.2 수질조사

마산만의 오염정도를 파악하기 위해서 Fig. 1에 나타난 5개 지점을 선정하여 1993년 6월에 조사를 실시하였으며, 시수는 각 지점에서 수심에 따라 반돈(Van Dorn) 채수기를 사용하여 층별(0m, 4m, 10m, 15m, 저층수)로 채수하였다. 정점 2에서 Core sampler를 이용하여 채취한 저질의 영양염 용출속도를 실내실험을 통하여 산정하였다. 수온, 용존산소(DO), 투명도는 각각

Table 1. Input data for hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 250m$
Total mesh	$53 \times 69 \times 3 = 10971$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	10sec
Level	1 : 0 - 3m 2 : 3 - 7m 3 : below 7m
Tidal level and degree at open boundary	60.0~60.5cm (M <sub>2</sub> ) 250.0° ~ 246.4°
Water temp. and density at open boundary	level 1 : 21°C, 18.0‰ level 2 : 21°C, 18.0‰ level 3 : 21°C, 18.0‰
Coriolis coefficient	$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin\phi$
Surface friction coefficient	0.0013
Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity & diffusion coefficient	3.0E5 (cm <sup>2</sup> /sec)
River flow	3.0E5 (cm <sup>2</sup> /sec)
Calculation time	Refer to Table 2 20 tidal cycles

봉상온도계, DO meter (YSI 57), Secchi disk를 사용하여 현장 측정하였다. 총부유물질(TSS)은 Whatman GF/C 여과지를 사용하여 일정량의 시수를 여과시킨 후 여과지를 105~110°C의 항온건조기에서 2시간 이상 건조시킨 후 항량의 무게 차이로 구하였고, 휘발성부유물질(VSS)은 건조된 Whatman GF/C 여과지를 사용하여 550°C의 전기로에서 회화시킨 후 총부유물질과의 무게 차이로 구하였다. 암모니아 질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)는 Indophenol법, 아질산 질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)는 Sulfanilamide-NED법, 질산 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)는 Cadmium reduction법, 인산인(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)은 Ascorbic acid법으로 비색 정량하였다. 화학적 산소요구량(COD)은 알칼리성 과망간산 칼륨법으로 정량하였고, 클로로필 a (Chlorophyll a)는 Strickland & Parson법으로 비색 정량하였다. POC는 CHN Analyzer (YANACO MT2)를 사용하여 분석하였고, DOC는 시수를 GF/F 여과지로 여과한 후 여액을 TOC Analyzer (Simazu 500)를 사용하여 분석하였다.

2.3 수치모델

2.3.1 해수유동모델

해수유동모델의 계산영역은 대상해역을 수평방향으로 250m의 정방격자로 구분하였고 수심방향으로는 0~3m, 3~7m, 7m 이심의 3층으로 구분하여, 동서 및 남북방향으로 53×69개의 격자로, 수심방향으로는 3개의 층으로 구성하였다. 대상해역의 격자망은 Fig. 2에

Table 2. Input data for material cycle model

Parameters	Input values						
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 250m$						
Water depth	chart datum + MSL						
Time interval	400 Sec						
Horizontal viscosity coefficient	3.0E5(cm <sup>2</sup> /sec)						
Horizontal diffusion coefficient	3.0E5(cm <sup>2</sup> /sec)						
Vertical diffusion coefficient	level 1	0.1					
	level 2~3	0.01					
Total runtime	30 tidal cycles						
	DO	COD	DIP	DIN	Phytoplankton	POC	DOC
	( mg/l )	( )	( μg-at/l )	( )	( mgC/m <sup>3</sup> )	( )	( μg/l )
Initial conc.							
level 1	15.12	7.39	0.23	40.86	1812.3	1089.7	3722
level 2	8.66	4.18	0.36	20.78	1427.0	388.8	2583
level 3	5.83	3.19	1.51	24.50	195.0	354.2	1123
Boundary conc.							
level 1	14.90	6.39	0.06	1.63	904.0	347.9	4370
level 2	9.40	3.19	0.18	1.99	247.6	411.2	3570
level 3	7.90	6.69	0.21	1.33	110.2	265.5	3300
Pollutant load	Flow	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC
Subarea	(m <sup>3</sup> /day)	( ton/day )	( )	( )	( )	kg/day	( )
A	588852	17.904	0.244	419.19	14930.14	5783.0	10957.25
B	20218	0.509	0.032	51.66	990.14	0	311.51
C	29214	1.078	0.108	59.43	745.20	164.41	659.74
						348.19	

Table 3. Used range of reaction coefficients for calculation

Symbol	Definition	Value	Unit
a <sub>1</sub>	Phytoplankton Maximum growth rate at 0°C	0.49	/day
a <sub>2</sub>	Phytoplankton respiration rate at 0°C	0.01	/day
a <sub>3</sub>	Zooplankton maximum filtration rate at 0°C	0.18	mgC/mgZoo · day
a <sub>4</sub>	Phytoplankton mortality rate	0.01	/day
a <sub>5</sub>	Zooplankton mortality rate	0.064	/day
a <sub>6</sub>	POC decomposition rate at 0°C	0.065	/day
a <sub>7</sub>	DOC decomposition rate at 0°C	0.007	/day
a <sub>8</sub>	Sediment release rate for dissolved phosphorous	8.0	mg/m <sup>2</sup> /d
a <sub>9</sub>	Sediment release rate for dissolved nitrogen	36.37	mg/m <sup>2</sup> /d
a <sub>b</sub>	Sediment oxygen uptake rate	1500	mg/m <sup>2</sup> /d
Ka	Reaeration coefficient	0.15	/day
Kp	Half saturation constants for phosphate phosphorous	0.11	mg/l
Kn	Half saturation constants for nitrogen	0.41	mg/l
Wp	Phytoplankton settling velocity	0.17	m/day
Wpoc	Detritus settling velocity	0.27	m/day
P*	Factor for grazing	75.0	mg C/m <sup>3</sup>
λ	Ivlev Index for grazing	0.01	(mg C/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
μ	Zooplankton ingestion efficiency	0.7	
ν	Zooplankton growth efficiency	0.3	
K <sub>DO1</sub>	Half saturation constants for POC decomposition	1.0	mg/l
K <sub>DO2</sub>	Half saturation constants for DOC decomposition	1.0	mg/l

나타내었다.

해수유동모델에서의 조위는 마산만에서 우세한 M<sub>2</sub>분조를 취하여 유동장을 재현하였고, 조석류와 잔차류 성분을 계산하였다. 개방경계 서편의 진폭과 위상은 각각 62.5cm와 250.0°, 개방경계 동편의 진폭과 위상은 각각 60.0cm와 246.4°(해양연구소, 1989)로 하였으며, 수평확산계수는 마산만에서 조사한 김종화(1993)의 자료를 바탕으로 하여 3.0×10<sup>5</sup>cm<sup>2</sup>/sec로 하였다. 모델의 계산 결과와 기존 관측된 조류타원도를 비교하여 해수유동의 재현성을 검토하였다. 해수유동모델의 잔차류 성분의 계산 결과를 물질순환모델에 사용하였으며 해수유동모델의 입력자료는 Table 1에 나타내었다.

### 2.3.2 물질순환모델

물질순환모델의 입력자료는 조사기간에 조사된 수질 자료를 이용하였다. 물질순환모델은 해수유동모델에서 유속과 조위가 정상상태에 도달한 이후의 한 조석주기의 평균유동, 즉 잔차류를 기본 유동자료로 입력하였다. 각 방향의 격자크기는 해수유동모델과 같이 수평방향으로 250m의 정방격자로, 수심방향으로는 3층으로 구분하였다. 각 층에서 영양염, 용존산소, 화학적산소요구량, 식물플랑크톤 등의 초기조건과 경계조건은 조사기간에 관측된 수질자료를 이용하였다. 마산만과 행암만으로 유입하는 10여 개 하천으로부터의 용존산소량과

화학적산소요구량, 인산염, 용존무기질소 등의 오염부하량은 환경처(1991)에 의해서 조사된 자료를 이용하여 산정하였으며, 각 하천에 대한 POC와 DOC의 부하는 최우정(1993)의 자료를 이용하였고, 기타 입력자료와 함께 Table 2에 나타내었다. 저질의 영양염 용출속도 및 산소소비속도는 실내실험에서 산출한 값을 적용하였고, 문헌조사를 통하여 선정한 각종 생물학적 파라미터는 Table 3에 제시하였다.

### 2.4 영양염 수치 계산

영양염 수치는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 수평방향으로 A, B, C 3개의 Block으로 분할하고 층별로는 3층으로 구분하여 Block A의 1층을 box A1으로 표시하여 box A1에서 C3까지 총 9개의 box로 나눈 후, 각 box내 각각의 격자점에서 계산된 해수유동시물레이션 결과와 물질순환시물레이션 결과를 이용하여 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수질 현황

마산만에 대한 수질조사 결과는 Table 4에 나타내었다.

조사기간 동안 대상해역의 용존산소(DO)는 표층의 경우는 14.5~16.0mg/l의 범위였고 저층의 경우는 만 내측의 정점 1에서 2.6mg/l의 농도를 보인 반면 외해쪽의

Table 4. The results of water analysis in Masan Bay, June 1993

St.	Temp	S.D.	pH	DO	TSS	VSS	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	Chl.a	POC	DOC
	℃	m		(	mg/l	)	(	μg-at/l	)	(	mg/m <sup>3</sup>	)		
1-0	22.0	0.7	8.72	15.2	12.72	10.53	5.47	3.44	0.03	103.58	-	212.50	3852	4670
4	21.3		8.71	7.6	9.07	8.11	5.09	4.78	0.11	53.96	-	206.63	3230	3230
B	17.8		7.85	2.6	4.53	3.02	0.77	76.26	0.32	5.70	3.12	11.82	923	923
2-0	21.0	1.5	8.56	15.0	10.65	7.67	5.51	11.77	1.51	46.68	0.19	146.15		2360
4	19.5		8.40	8.6	9.38	6.09	5.32	2.25	0.83	19.02	0.23	81.93		
10	17.6		7.91	5.3	2.63	1.16	2.95	14.30	0.28	4.03	0.98	3.12		
B	17.5		7.93	4.8	3.30	2.47	2.65	17.82	0.29	3.41	1.17	2.55		
3-0	21.5	1.4	8.72	16.0	13.60	10.81	8.29	0.75	1.28	29.31	0.26	145.51	2967	2980
4	19.5		8.27	9.0	4.44	4.17	4.87	5.41	0.69	10.57	0.94	92.34	1690	1690
10	18.0		8.10	6.9	2.39	1.48	2.73	15.34	0.15	2.32	0.98	4.12	296	296
B	17.3		8.00	5.7	10.25	2.44	1.70	9.91	0.29	2.36	0.71	11.60	646	646
4-0	20.5	2.0	8.61	14.5	10.27	6.31	11.28	2.82	0.08	1.49	0.23	51.36		4230
4	19.6		8.25	8.3	4.27	2.08	2.97	1.78	0.25	2.56	0.11	18.96		
10	18.0		8.17	8.3	3.55	1.42	3.35	1.27	0.11	1.94	0.19	7.04		
B	17.5		8.09	7.0	17.16	3.87	4.89	1.27	0.25	2.99	0.30	12.92		
5-0	20.5	2.2	8.65	14.9	8.93	4.47	6.39	0.34	0.08	1.18	-	29.17	1252	4370
4	18.5		8.29	9.8	4.17	1.72	2.63	0.23	0.11	1.33	0.15	9.17	659	659
B	17.5		8.09	7.4	7.32	1.22	6.69	1.37	0.24	2.29	0.34	4.08	376	376

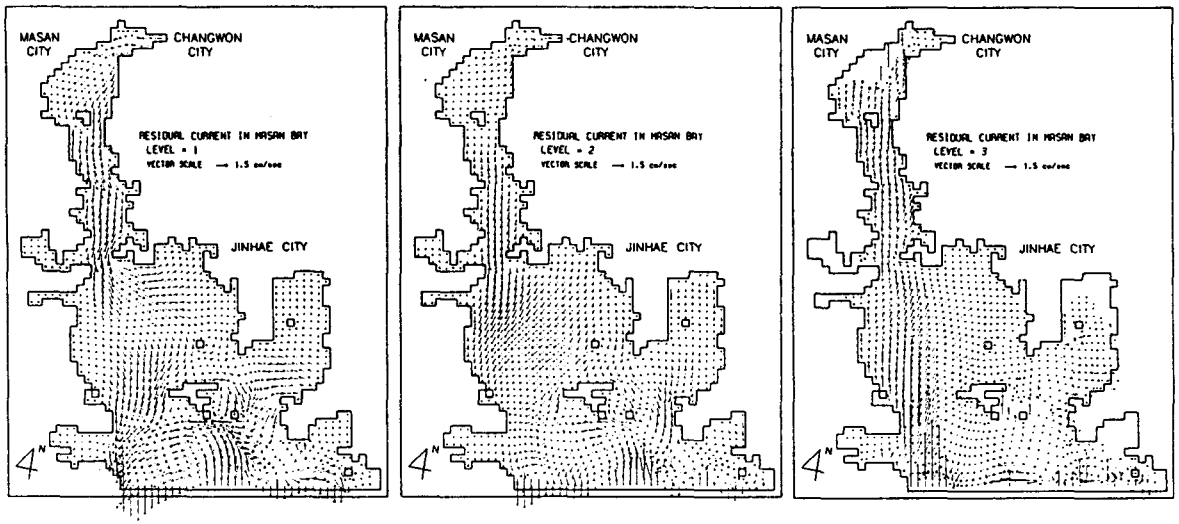


Fig. 3. The simulated residual currents in each level.

로 나갈수록 높아져 정점 5에서는 7.4mg/l의 농도를 나타내어, 표층부근에서는 과포화된 반면에 만 내측 저층에는 빈산소 수위가 발생한 것으로 보인다.

암모니아질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)는 표층에서 0.34~11.77μg-at/l, 저층에서 0.23~76.26μg-at/l로 표층에 비해 저층이 높게 나타났고, 만 내측 정점 1의 저층에서 가장 높게 나타났다. 질산질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)는 표층에서 1.18~

103.58μg-at/l, 저층에서 1.33~5.70μg-at/l로 저층에 비해 표층이 높게 나타났고, 수심에 따른 차이는 만 내측 정점 1에서 가장 크게 나타났으며 외해쪽에서는 수심에 따른 차이가 거의 없었다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 합계를 의미하는 용존무기질소(DIN)는 1.69~107.05μg-at/l로 표층이 저층보다 높게 나타났으며, 수심에 따른 농도의 차이는 만 내측에서 가장 크게 나타났고 바

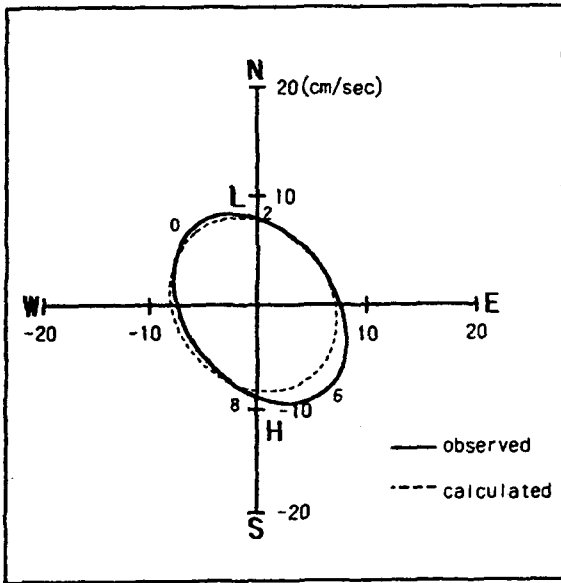


Fig. 4. Comparison of the tidal current ellipse between the observed and the calculated results.

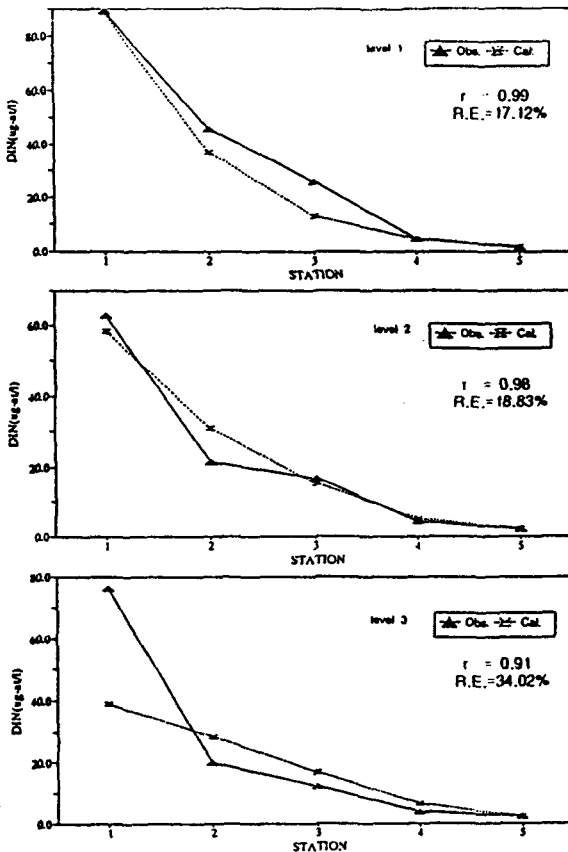


Fig. 5. Comparison between the simulated and the observed DIN at selected stations.

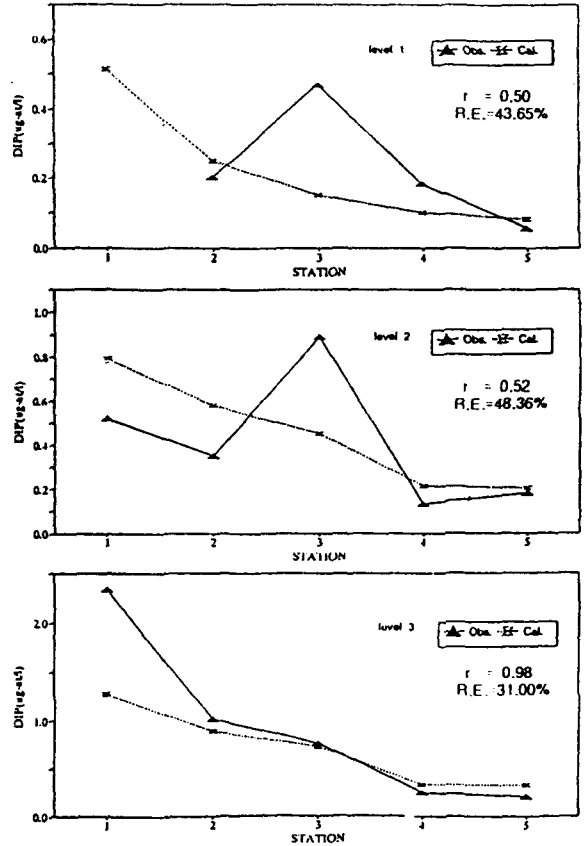


Fig. 6. Comparison between the simulated and the observed DIP at selected stations.

갈수록 갈수록 차이가 거의 없었다. 용존무기질소의 농도는 전체적으로 만 내측에서 외해쪽으로 나갈수록 감소하였는데 이는 육상으로부터 만 내측으로 유입한 용존무기질소가 외해쪽으로 오면서 희석된 것으로 보인다.

인산인( $PO_4^{3-}-P$ )은 표층에서  $0.19 \sim 0.26 \mu\text{g-at/l}$ , 저층에서  $0.15 \sim 3.12 \mu\text{g-at/l}$ 로 저층이 표층보다 높게 나타났다. 정점 1의 저층에서  $3.12 \mu\text{g-at/l}$ 로 가장 높은 값을 나타내었다. 정점 2의 저층에서도 다른 지점에 비해 높은 값이 관찰되었다.

클로로필 a (Chlorophyll a)는 표층에서  $29.17 \sim 212.50 \text{mg/m}^3$ , 저층에서  $2.55 \sim 12.92 \text{mg/m}^3$ 의 범위로 나타났다. 정점 1, 2, 3의 표층에서  $140.00 \text{mg/m}^3$  이상의 높은 농도를 나타내었다.

### 3.2 해수유동 및 물질순환 시뮬레이션

#### 3.2.1 해수유동

유동 시뮬레이션에서 얻어진 층별 잔차류의 분포는 Fig. 3과 같다. 잔차류는  $3 \text{cm/sec}$  이하였으며 1층에서는 부도 남측에서 반시계방향의 흐름이 나타났고 전체적으로 만 안쪽에서 바깥쪽으로의 흐름이 나타났다. 2층에서는 만 중앙부의 흐름은 극히 미약했고 부도 주

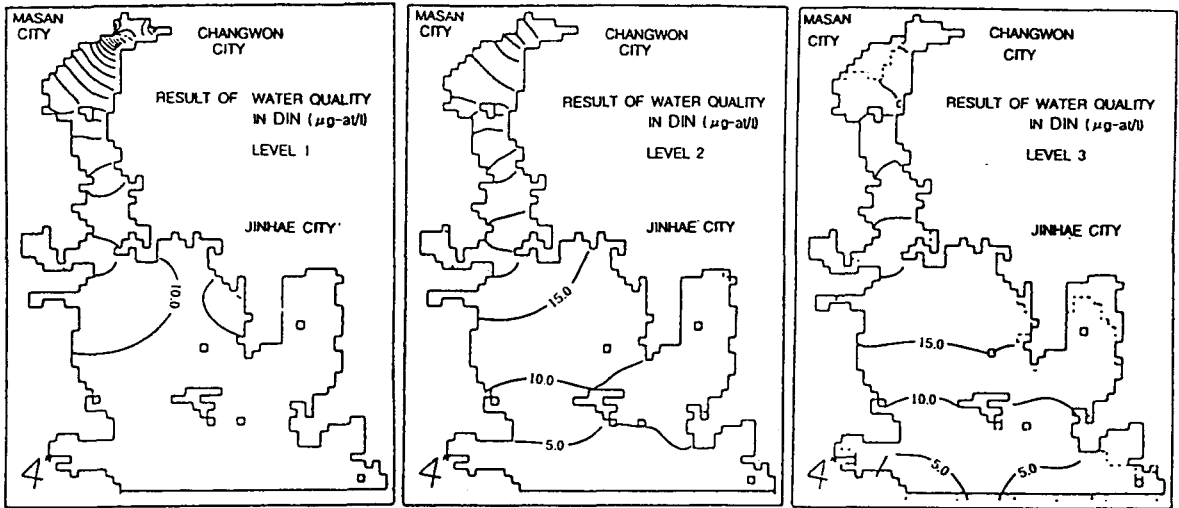


Fig. 7. Distribution of the simulated DIN in each level.

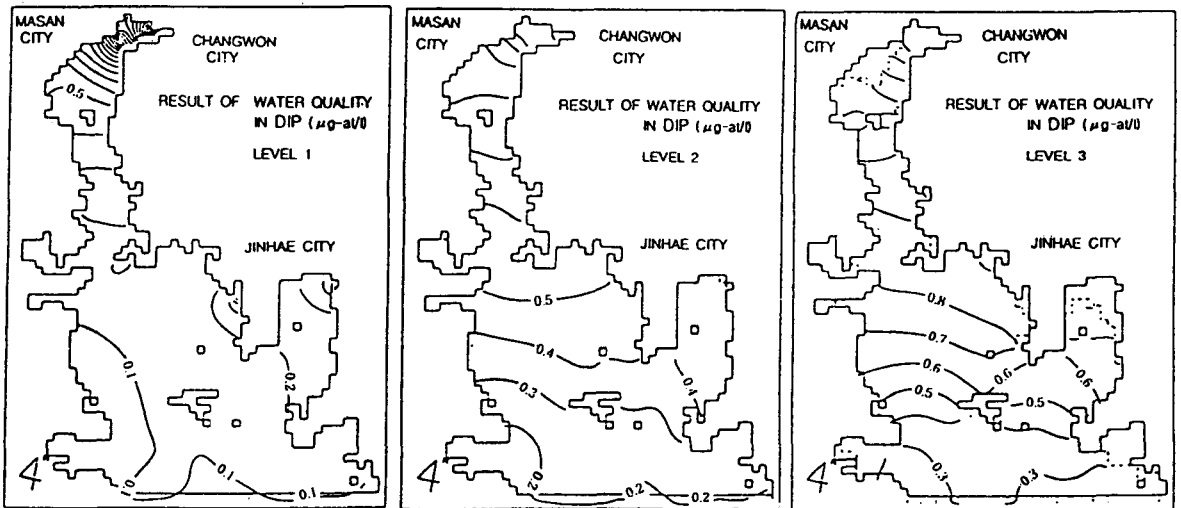


Fig. 8. Distribution of the simulated DIP in each level.

위에서 복잡한 형태의 환류가 나타났다. 3층에서의 흐름은 1층과는 반대로 만 바깥쪽에서 만 안쪽으로의 흐름이 나타났다. 모델의 계산결과와 기존 관측된 조류타원도(김종화 외, 1986b)를 비교하여 해수유동의 재현성을 Fig. 4에 나타내었다.

### 3.2.2 물질순환모델

각 관측지점에서 DIN과 DIP에 대한 관측값과 물질순환모델의 시뮬레이션 결과의 비교는 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 용존무기질소의 관측값에 대한 계산값의 상대오차는 1층에서 17.12%, 2층에서 18.83%, 3층에서 34.02%로 표층에서의 상대오차가 가장 작았고 3층에서 조금 크게 나타났다. 상관성(r)은 1층에서 0.99, 2층에서 0.98, 3층에서는 0.91로 전 층에서 높은 상관성을 나타내었다. 계산된 용존무기질소의 각 층별 분포는 Fig. 7에 나타내었다.

용존무기인의 상대오차는 1층에서 43.65%, 2층에서 48.36%로 1, 2층에서 상대오차가 크게 나타났고, 3층에서는 31.00%로 양호하게 나타났다. 상관성(r)은 1, 2층에서 0.5정도의 낮은 상관성을 나타내었으나 점점 3층을 제외하면 상관성은 1층에서 0.7, 2층에서 0.9 이상의 상관성을 나타내었다. 3층에서는 0.98로 높은 상관성을 나타내었다. 계산된 용존무기인의 각 층별 분포는 Fig. 8에 나타내었다.

### 3.3 영양염 수치

영양염 수치는 Fig. 1과 같이 수평방향으로 A, B, C의 3개 Block으로, 층별로는 1, 2, 3의 3개의 층으로 나누어 box A1에서 C3까지 총 9개의 box로 구분하여 해수유동모델에서 계산된 각 단면의 유속과 물질순환모델의 자료를 이용하여 물질수지를 계산하였다. 각 box의 제원은 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Dimension of boxes in Masan Bay

Subarea level	Area (Km <sup>2</sup> )	Volume (×10 <sup>2</sup> Km <sup>3</sup> )	Depth (m)
A	1	12.81	3.84
	2	12.81	4.94
	3	11.01	4.05
Total		12.83	
B	1	24.38	7.31
	2	24.25	9.29
	3	22.00	12.12
Total		28.72	
C	1	41.50	12.45
	2	41.37	15.89
	3	36.75	16.18
Total		44.52	
Total Volume		86.07 (10 <sup>2</sup> ×Km <sup>3</sup> )	
Mean Depth		10.97 (m)	

3.3.1 영양염 수지 산정

영양염 수지의 계산결과는 Table 6~Table 7과 Fig. 9~Fig. 10에 나타내었다. 용존무기질소를 살펴보면, 제 1층에서 하천으로부터의 유입이 있고 1층과 2층에서 용존무기질소는 만내측에서 Block B와 C로 이동하여 외해로 유출된다. 3층에서는 Block C에서 일부가 외해쪽으로 유출되고 나머지는 Block A쪽인 만의 내측으로 들

어온다. 이것은 Fig. 3에 나타난 것처럼 3층의 잔차류가 외해에서 만 내측으로 흘러 들어오는데 영향을 받은 것으로 여겨진다. 식물플랑크톤의 섭취에 의한 용존무기질소의 감소량은 box A1에서 12.95 ton/day로 가장 크게 나타났고, 수층에서의 영양염 재생량은 box C3에서 4.37 ton/day로 가장 크게 나타났고, 단위 부피당 용존무기질소의 증감량을 살펴보면 육상으로부터 오염의 영향을 가장 직접적으로 받고 클로로필의 농도가 가장 높은 box A1에서 337.5mg/m<sup>3</sup>·day로 단위 부피당 감소량이 가장 크게 나타났고, box B1, box C1으로 갈수록 그 수치가 낮아졌다. 용존무기질소의 단위 부피당 재생량은 각 Block의 2층보다 3층에서 크게 나타났고, box A3에서 78.2mg/m<sup>3</sup>·day로 가장 크게 나타났고,

용존무기인의 경우도 용존무기질소의 경우와 비슷하여 제 1층에서 하천으로부터의 유입이 있고, 1층과 2층에서 용존무기인은 만에서 Block C로 이동하여 외해로 유출되고 3층에서는 외해쪽에서 Block A쪽인 만의 내측으로 들어온다. 식물플랑크톤의 섭취에 의한 용존무기인의 감소량은 box A1에서 712 kg/day로 가장 크게 나타났고, 재생량은 box A3에서 279 kg/day로 가장 크게 나타났고, 단위 부피당 용존무기인의 증감량은 용존무기질소와 유사한 분포를 나타내었으며 box A1에서 18.6mg/m<sup>3</sup>·day로 단위 부피당 감소량이 가장 크게 나타났고, 용존무기인의 재생은 각 Block의 3층에서 나타났고 box A3에서 6.9mg/m<sup>3</sup>·day로 가장 크게 나타났고,

전체적으로는 대상해역에서 감소하는 용존무기질소의 총량은 14.77ton/day로 나타났고, 용존무기인의 경

Table 6. Mass balance of DIN and DIP in each box in Masan Bay, June 1993

Subarea	level	Stock	Input	Output	Regen.(+)	Regen./Uptake	
					/Uptake(-)	per Unit Volume	
Unit		( ton )	( ton/day )	( mg/m <sup>3</sup> ·day )			
DIN	A	1	47.40	17.53	4.58	- 12.95	- 337.5
		2	35.65	4.49	4.52	+ 0.03	+ 0.6
		3	20.00	1.32	4.49	+ 3.17	+ 78.2
	B	1	13.12	9.11	3.42	- 5.69	- 77.8
		2	19.91	5.45	3.97	- 1.48	- 15.9
		3	29.18	1.54	4.45	+ 2.91	+ 24.0
	C	1	6.74	8.54	3.51	- 5.03	- 40.4
		2	13.22	5.38	5.59	+ 0.21	+ 1.3
		3	17.89	1.34	5.71	+ 4.37	+ 27.0
Unit		(×10 <sup>2</sup> Kg)	( ×10 <sup>2</sup> Kg/day )	( mg/m <sup>3</sup> ·day )			
DIP	A	1	8.17	7.74	0.62	- 7.12	- 18.6
		2	12.08	4.56	4.26	- 0.30	- 0.6
		3	14.77	1.77	4.56	+ 2.79	+ 6.9
	B	1	3.24	4.83	0.95	- 3.88	- 5.3
		2	13.26	5.01	4.04	- 0.97	- 1.0
		3	28.27	2.60	5.18	+ 2.58	+ 2.1
	C	1	5.38	7.44	4.75	- 2.69	- 2.2
		2	13.87	8.14	7.23	- 0.91	- 0.6
		3	20.92	6.40	8.63	+ 2.23	+ 1.4



Table 7. Mass balance of DIN and DIP in system

	DIN (ton/d)	DIP ( $\times 10^2$ Kg/day)
Input from river	16.67	5.30
Input from off-sea	-	3.44
Input from sediment	2.86	6.34
Output	4.76	6.08
Stock	203.11	79.69
Uptake (net)	14.77	9.00

우는 감소하는 양이 900kg/day로 나타났다.

3.3.2 영양염 용출량과 재생량의 비교

각 box에서 용존무기질소와 용존무기인의 재생량과 저질로부터의 용출량의 비교는 Table 8에 나타내었다. 용존무기질소의 재생은 Block A의 2와 3, B의 3, C의 2와 3층에서 나타났고 저질로부터의 용출은 Block A와 B의 1층을 제외하고 전 box에서 나타났는데 1, 2층에서의 용출은 각 층의 경계수심보다 낮은 수심을 나타내는 부분으로부터의 용출이다. Block A에서 재생량은 3.20ton/day, 저질로부터의 용출량은 0.46ton/day, Block B에서 재생량은 2.91ton/day, 용출량은 0.89ton/day, Block C에서 재생량은 1.55ton/day, 용출량은 1.51ton/day로 나타났고 전체적으로는 하루에 7.66ton의 용존무기질소가 수층으로부터 재생되고 2.

86ton이 저질로부터 용출되었다. 이 결과에서 저질로부터 용출된 양은 수층에서 재생된 양의 37%정도에 해당한다.

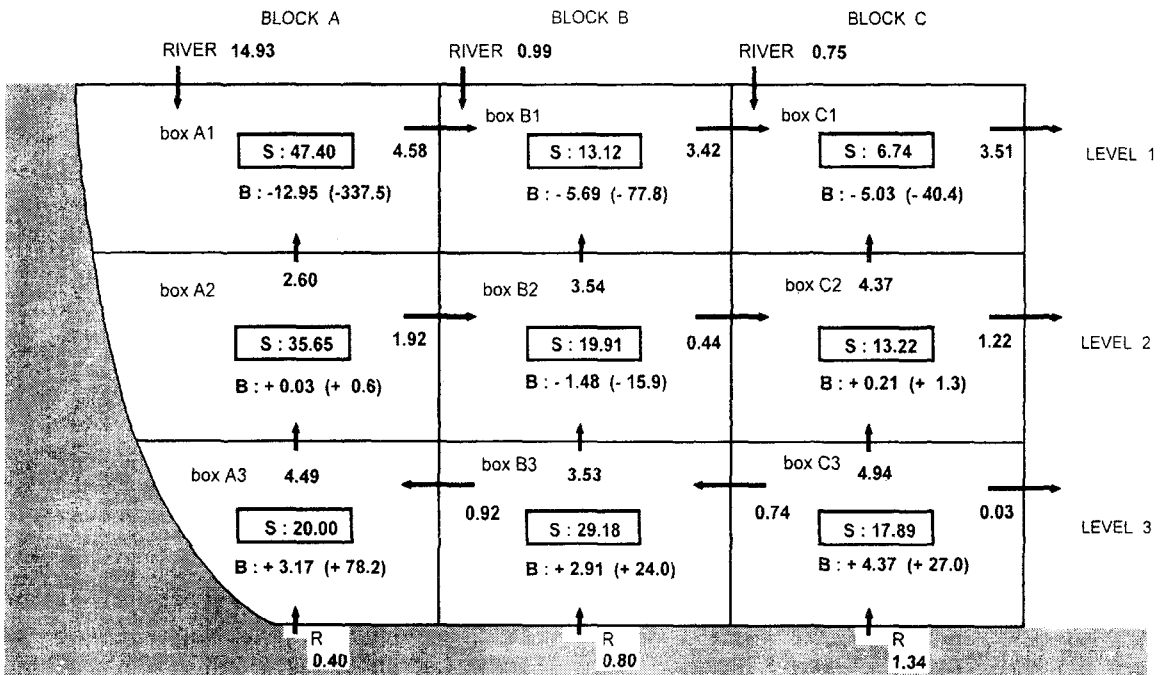
용존무기인의 재생은 각 Block의 3층에서 나타났고 저질로부터의 용출은 Block A와 B의 1층을 제외하고 전 box에서 나타났다. Block A에서 재생량은 279kg/day, 저질로부터의 용출량은 105kg/day, Block B에서 재생량은 258kg/day, 용출량은 193kg/day, Block C에서 재생량은 223kg/day, 용출량은 336kg/day로 나타났고 전체적으로는 하루에 760kg의 용존무기인이 수층으로부터 재생되고 634kg이 저질로부터 용출되어 나왔다. 이 결과에서 저질로부터 용출된 양은 수층에서 재생된 양의 83%정도에 해당한다.

용존무기질소와 인의 물질수지 계산 결과 저층의 수층으로부터의 재생된 영양염량이 용존무기질소의 경우 저질로부터의 용출량에 비해 약 2.5배 정도, 용존무기인의 경우는 1.2배 정도 높게 나타났다.

이는 하계의 경우 대량 증식한 플랑크톤이 사멸, 침강 하면서 재생된 영양염량이 용출량 등에 비해서 상대적으로 큼을 나타내고 있다. 따라서 하계의 경우 해역의 영양염을 제어하기 위해서는 저층으로부터의 용출뿐만 아니라 수층에서 재생된 양에 대한 고려도 필요할 것으로 사료된다(Katsujl, 1982).

4. 결 론

부영양화된 마산만에서 영양염의 거동을 정량적으로



$\rightleftarrows$  : Transport across interface (ton/day)      [S] : Stock (ton)  
 B : Biological change (ton/day)      R : Release (ton/day)  
 - Uptake    + Regeneration      (mg/m<sup>3</sup> · d) : Change per unit volume

Fig. 9. DIN mass balance in each box, June 1993.

Table 8. Comparison of regeneration and release of nutrients in each box

Subarea	level	DIN (ton/d)		DIP ( $\times 10^2$ Kg/day)	
		Regeneration	Release	Regeneration	Release
A	2	0.03	0.06	-	0.16
	3	3.17	0.40	2.79	0.89
		3.20(100)	0.46(14.38)	2.79(100)	1.05(37.63)
B	1	-	0.01	-	0.01
	2	-	0.08	-	0.16
	3	2.91	0.80	2.58	1.76
		2.91(100)	0.89(30.58)	2.58(100)	1.93(74.81)
C	2	0.21	0.17	-	0.40
	3	1.34	1.34	2.23	2.96
		1.55(100)	1.51(97.42)	2.23(100)	3.36(150.67)
Total		7.66(100)	2.86(37.34)	7.60(100)	6.34(82.77)

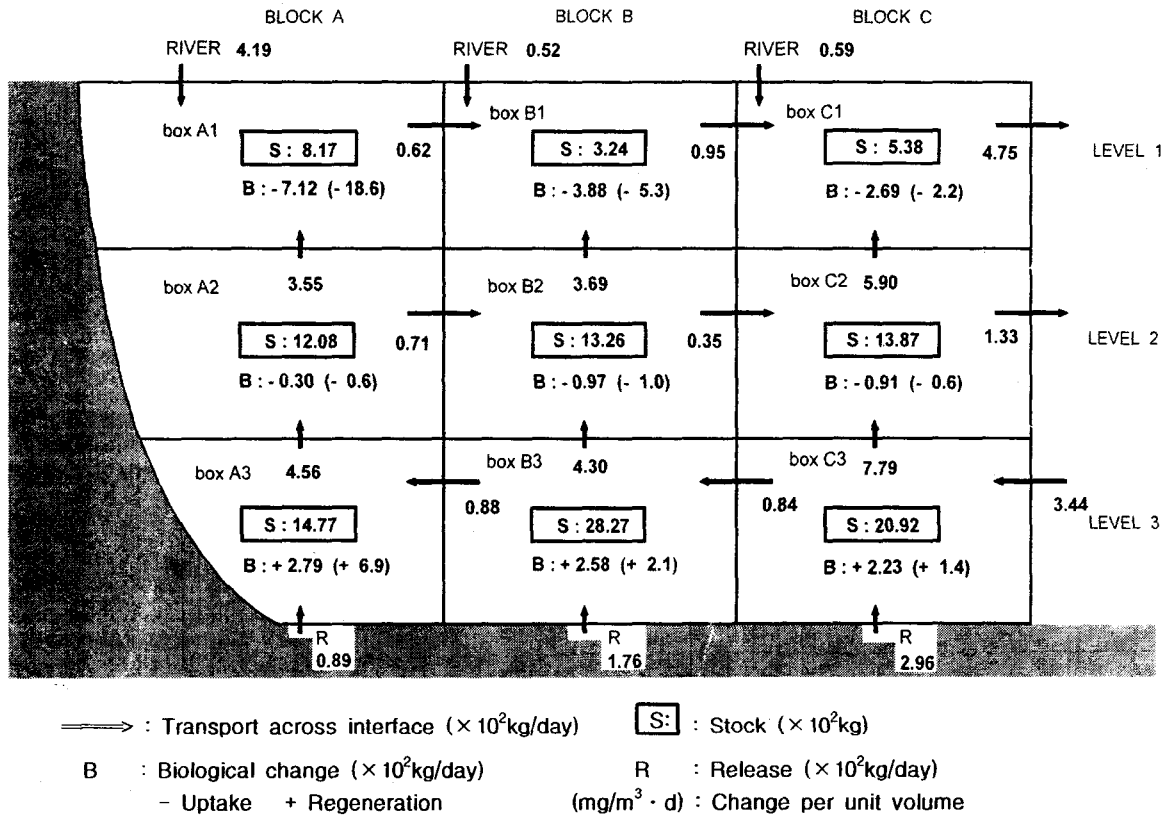


Fig. 10. DIP mass balance in each box, June 1993.

파악하기 위해서 해수유동모델과 물질순환모델을 사용하여 현황을 재현한 후 물질수지를 계산하였다. 층별 잔차류의 계산결과 1층에서는 부도 남측에서 반시계방향의 흐름이 나타났고 전체적으로 만 안쪽에서 바깥쪽으로의 흐름이 나타났으며, 3층에서의 흐름은 1층과는 반대로 만 바깥쪽에서 만 안쪽으로의 흐름이 나타났다. 각 관측지점에서 관측값과 계산값의 상대오차는 용존무기질소의 경우 17.12~34.02%였고 용존무기인의 경우 상대오차는 31.00~48.36%였다.

식물플랑크톤의 섭취에 의한 단위 부피당 용존무기질

소의 감소량은 box A1에서 337.5mg/m<sup>3</sup> · day, 재생량은 box A3에서 78.2mg/m<sup>3</sup> · day로 각각 가장 크게 나타났다, 단위 부피당 용존무기인의 감소량은 box A1에서 18.6mg/m<sup>3</sup> · day, 재생량은 box A3에서 6.9mg/m<sup>3</sup> · day로 각각 가장 크게 나타났다. 용존무기질소의 경우 수층으로부터의 재생량이 7.66ton/day, 저질로부터 용출량이 2.86ton/day였고, 용존무기인의 경우 수층으로부터의 재생량은 760kg/day, 저질로부터 용출량은 634kg/day였다.

물질수지 계산결과 저층의 수층으로부터 재생성된 량

이 용존무기질소의 경우 저질로부터의 용출량에 비해 약 2.5배 정도, 용존무기인의 경우는 1.2배 정도 높게 나타났고, 이는 하계의 경우 대량 증식한 플랑크톤이 사멸, 침강하면서 재생된 영양염 량이 큼을 나타내고 있다. 따라서 하계의 경우 해역의 영양염을 제어하기 위해서는 저질로부터의 용출뿐만 아니라 수층에서 재생된 량에 대한 고려도 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

국립수산진흥원, 1992, 연안 양식어장 환경용량 산정 모델 개발연구 - 기본해역인 원문만을 중심으로 74-80.

김용원, 1992, 진해만 적조해역에서 234Th, 210Po 및 미량 중금속의 농도분포. 부산수산대학교 대학원 석사학위논문.

김종화, 장선덕, 김삼곤, 1986a, 마산만의 해수유동에 관하여. 한국수산학회지, 19(3), 274-280.

김종화, 장선덕, 김해룡, 1986b, 마산만의 해수 교환률. 어업기술, 22(3), 237-243.

김종화, 1993, 폐쇄성 내만에 있어서 물질분산에 미치는 지배적 요인. 부산대학교 대학원 박사학위논문.

나기환, 1987, 진해만 일원의 적조발생과 환경. 적조현상과 어장보전, 39-44.

박주석, 김중두, 1967, 진해만의 적조현상에 관한 연구. 국립 수산진흥원 연구 보고, 43, 63-79.

박청길, 1975, 진해만 해수의 부영양화와 Chlorophyll a 분포. 한국수산학회지, 8(3), 121-126.

서봉수, 1987, 마산만의 오염물질 부하와 대책. 적조현상과 어장보전, 19-26.

송교욱, 1992, 낙동강 수계 수질관리를 위한 모델링. 부산수산대학교 대학원 박사학위논문.

양동범, 1987, 진해만의 영양염과 클로로필 a 농도의 일주변화. 적조현상과 어장보전, 59-70.

日本通商産業省, 資源環境技術研究所, 1991, 兵名湖・磐田地域 産業公害 總合事前調査.

최영찬, 1991, 낙동강 하류의 부영양화 모델링에 관한 연구. 부산수산대학교 대학원 박사학위논문.

최우정, 1993, 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 시뮬레이션. 부산수산대학교 대학원 박사학위논문.

최희구, 1989, 마산만에서의 PCB의 잔류평가에 관한 연구. 부산수산대학교 대학원 석사학위논문.

환경처, 1991, 진해만 일원 오염실태 조사 보고서.

해양연구소, 1987, 진해만의 질소화합물 순환에 대한 연구. BSPE00086-145-4.

해양연구소, 1989, 연안환경 보전기술 개발연구. BSPG0083-242-4.

Hidetaka Takeoka, Tadashi Ochi, Kazuhiko Takatani, 1986, The Anoxic Water Mass in Hiu-chi-Nada, Part 2. the Heat and Oxygen Budget Model. J. Oceanol. Soc. Jpn., 42, 12-21.

Katsuji Matsunaga, 1982, An Estimation of Allochthonous and Autochthonous Organic Matter of the Fresh Sediments on the basis of Ti Content. Jap. J. Limnol., 43(2), 113-120.

Masao Ukita, Hiroshi Nakanishi, Masahiko Sekine, 1988, Study on Transport and Material Balance of Nutrients in Yamaguchi Estuary (Japan). Wat. Sci. Tech. Vol., 20, 199-210.

Mayumi Murakami, Yukio Oonishi, and Hideaki Kunishi, 1989, Heat and Salt Balances in the Seto Inland Sea. J. Oceanol. Soc. Jpn., 45, 204-216.

Myung-Soo Han, Se-Wha Kim, Young-Ok Kim, 1991, Influence of Discontinuous Layer on Plankton Community Structure and Distribution in Masan Bay, Korea. Bull. Korean Fish. Soc., 24(6), 459-471.

Teruaki Suzuki and Yasuo Matsukawa, 1987, Hydrography and Budget of Dissolved Total Nitrogen and Dissolved Oxygen in the Stratified Season in Mikawa Bay. Japan. J. Oceanol. Soc. Jpn., 43, 37-48.

Tetsuo Yanagi, Toshiro Saino, Takashi Ishimaru, Shin-ichi Uye, 1993, A Carbon Budget in Tokyo Bay. J. Oceanography, 49, 249-256.

Yasuo Matsukawa and Katsuyuki Sasaki, 1988, Nitrogen Budget in Tokyo Bay with Special Reference to the Low Sedimentation to Supply Ratio. J. Oceanol. Soc. Jpn., 44, 44-54.

Yasuo Matsukawa and Teruaki Suzuki, 1985, Box Model Analysis of Hydrography and Behaviour of Nitrogen and Phosphorus in a Eutrophic Estuary. J. Oceanol. Soc. Jpn., 41, 407-426.

Yoo-shin Ahn, Young-seup Kim, Young-ho Han, 1982, Oceanic Diffusion Characteristics in Jinhae Bay. Bull. Korean Fish. Tech. Soc., 18(1), 1-10.