

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(I) - 제주항의 물리해양환경의 변화 -

조 은 일 · 이 병 길 · 오 윤 근
제주대학교 환경공학과 · 제주대학교 해양토목공학과
(2001년 9월 5일 접수; 2001년 12월 28일 채택)

Water quality management of Jeju Harbor using material cycle model(I)

- The Variation of Physical Oceanographic Environments in Jeju Harbor -

Eun-Il Cho, Byung-Gul Lee* and Youn-Keun Oh

Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea,

*Dept. of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

(Manuscript received 5 September, 2001; accepted 28 December, 2001)

In order to control of water quality in Jeju harbor, variation of physical oceanographic environments was estimated using material cycle model. It is composed of the three-dimensional hydrodynamic model for the simulation of water flow and material cycle model for the simulation of water quality. The three dimensional hydrodynamic model simulation of the circulation and mixing in Jeju Harbor has been conducted forced by Sanzi River Discharge, Tidal elevation, wind and Solar heat in case of August and November, 2000 and February and May, 2001, respectively. The results of numerical model and observation show that the model can produce realistic results of current in the harbor. The monthly variation of velocity pattern are not so much changed are found in Jeju Harbor. The residual current was forced by temperature, salinity, density, wind and tidal current. The residual current of August, 2000 are the strongest among four month. It can be explained that the density effect can be important role in residual current at Jeju Harbor. As the results of salinity distribution simulation, very low concentration of all levels were simulated in August, 2000. The flowrate of Sanzi river was investigated 77,760m³/d in August, 2000. Therefore, pollutant loadings from Sanzi river should be considered for water quality management in Jeju harbor.

Key words : material cycle model, three dimensional hydrodynamic model, Sanzi River, Jeju Harbor, residual current, salinity

1. 서 론

제주도내 주요 항만인 제주항은 대부분 선박운항으로 발생되는 폐유, 선박생활오수, 화물 부스러기 그리고 주변지역에서 발생되는 미 처리된 생활오수 등으로 인해 항내 수질이 악화되고 있는 실정

이며 우리 나라 환경부에서도 제주항의 해역 수질 등급을 III등급으로 정해놓고 있다.^{1,2)} 항만 내로 담수인 산지천이 유입되어 담수와 해수가 교차하는 복잡한 물리적인 변화 특성을 가지고 있으며 유입된 오염물질의 영향을 받는 제주항의 수질관리를 하기 위해서는 항만 내에서 발생하는 물리·화학 그리고 생물학적인 변화과정을 조사할 필요가 있다.

항만 내에서 물리적인 변화특성을 파악하고 물질수송이나 환경오염에 의한 오염물질확산에 관련된 유동문제를 해결하기 위해서는 2차원이나 3차원 수

Corresponding Author; Eun-Il Cho, Dept. of Environmental Engineering, Cheju Nat'l Univ., Jeju 690-756, Korea
Phone : +82-64-754-3447
E-mail : eunilcho@cheju.cheju.ac.kr

치모델을 많이 이용한다. 그 중에서도 일반적으로 비교적 간단한 2차원 모델을 많이 이용한다.^{3,4)} 그러나 2차원 모델의 경우 연직 평균화된 유동은 잘 나타내지만 밀도류를 일으키는 담수의 유입으로 인한 밀도성층 현상과 수심에 따른 유속변동이나 연직 유속을 계산할 수 없다는 단점이 있으므로 이러한 단점을 보완하면서 유체의 전반적인 유동구조를 알기 위해서는 3차원 수치모델을 이용해야 한다.^{5,6,7,8,9)} 또한 3차원 해수유동 모델을 이용하여 물질수송 특성을 파악하기 위해서는 유동장 중에서도 장기적인 물질수송과 직접적인 관련이 있고 바람, 담수량, 외해로부터의 흐름 그리고 조류의 비선형성에 의하여 발생하는 비주기적인 유동인 잔차류를 이용한 연구가 많이 진행되고 있다. 최⁵⁾는 진해만에서 빈산소 수괴 형성에 관한 연구에 있어 유입되는 오염물질의 확산을 잔차류를 이용하여 규명하였고 김⁶⁾은 진해만에서 하계 부영양화 모델링을 수행하면서 잔차류를 이용하였고 또한 조⁹⁾는 생태계 모델을 이용하여 가막만의 환경용량을 산정할 때 이를 이용하였다.

따라서 본 연구는 제주항의 수질관리를 위한 첫 단계로 오염물질의 수송에 직접적인 관련이 있고 유입된 오염물질의 물리적인 거동을 밝힐 수 있는 3차원 모델 중에서도 파의 전파를 잘 계산하는 유한차분법을 적용한 Level모델을 이용하여 제주항의 유동장을 조사하여 항만 내의 물질이나 오염물질 혹은 하천유입에 따른 확산변동에 직접적인 영향을 주는 잔차류의 특성을 파악한 후, 보존성 물질인 염분을 이용하여 제주항의 물리해양변화 특성을 파악하는 것이 목적이다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상해역

3차원 수치모델을 이용하여 물리해양변화 특성을 조사하기 위한 대상지역은 제주항을 선정하였다.

본 연구에 적용한 제주항은 제주도의 북부중앙에 위치하고 있으며, 개항장이고 제 1종 지정항만으로서 제주도에서 제일 큰 항구이다. 항만의 경계는 서방파제 첨단 1km에서 사라봉 동단과 화북포구 서단 중단을 연결한 선내로서 항내 수면적은 7.904×10^6 m², 임해지구 면적은 4,404m², 항내수심은 1.5~14.3m이다. 조류는 연안에 병행하여 흐르고 평균 유속은 1.4 노트 내외이며 창조류는 서쪽으로 낙조류는 동쪽으로 흐른다. 년 최고 潮差는 2.94m이고 년간 표층 수온의 범위는 13.0~26.4℃이다.^{10,11)}

조사항목으로는 계절별 변동 특성을 파악하기 위하여 하계와 추계는 2000년 8월과 11월 그리고 동계와 춘계는 2001년 2월과 5월에 수온과 염분 그리고

산지천 유량을 관측하였다.

2.2. 3차원 모델의 구성

이 프로그램은 조석이 침입하는 내만에서 밀도류계의 3차원 해석을 행할 수 있고 생태계 모델을 위한 유동장의 모델로도 이용할 수 있다.¹²⁾

2.2.1. 기본방정식

본 수치 모델은 내만 및 하구에서 유체의 운동을 정식화한 운동방정식, 연속방정식, 조위의 변화를 정식화한 방정식, 염소량 확산 방정식, 열(수온)의 확산 방정식 및 해수의 밀도와 염소량, 수온과의 관계를 정식화한 상태방정식으로 구성된다.

유체의 운동에 대한 기본방정식은 운동방정식, 연속방정식, 자유표면 방정식, 염소량 수지식, 열 수지식 및 해수의 밀도를 염소량과 수온과의 관계로 표현한 상태방정식으로 구성된다.

1) x-방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_{xv} \\ & -g\frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_x^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(N_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(N_y \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(N_z \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned}$$

2) y-방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) - f_{yv} \\ & -g\frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_y^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(N_x \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(N_y \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(N_z \frac{\partial v}{\partial z}) \end{aligned}$$

3) 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

4) 자유표면(조위) 방정식

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\xi} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\xi} v dz \right)$$

5) 열수지 방정식 (온도의 확산방정식)

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) \end{aligned}$$

6) 염소량 수지방정식 (염소량 확산방정식)

$$\begin{aligned} \frac{\partial Cl}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial z}(w \cdot Cl) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot \frac{\partial Cl}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot \frac{\partial Cl}{\partial y}) \end{aligned}$$

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(I)

$$+ \frac{\partial}{\partial z} (K_z \cdot \frac{\partial Cl}{\partial z})$$

7) 상태방정식

$$\rho = \rho (Cl, T)$$

여기서는 Kundsen 식을 사용한다.

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{1000} + 1.$$

$$\sigma_t = \Sigma_t + (\sigma_0 + 0.1324) \{1 - A_t + B_t (\sigma_0 - 0.1324)\},$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708Cl - 0.001570Cl^2 + 0.0000398Cl^3$$

$$\Sigma_t = \frac{(T - 3.98)^2}{503.570} \cdot \frac{T + 28.30}{T + 67.26}$$

$$A_t = T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3}$$

$$B_t = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6}$$

여기서, u, v, w : X, Y, Z방향의 유속성분(cm/sec)

ζ : 평균수면에서 자유표면까지의 높이(cm),

H : 평균수면에서 해저까지의 깊이(cm)

ρ : 유체밀도(g/cm³)

f_0 : 코리올리 인자(sec⁻¹)

g : 중력가속도(cm/sec²)

P_a : 대기압(g/cm²sec²)

T : 수온(°C), Cl : 염소량(‰)

N_x, N_y, N_z : x, y, z 방향의 渦動粘性係數(cm²/sec)

K_x, K_y, K_z : x, y, z 방향의 渦動擴散係數(cm²/sec)

k_x, k_y, k_z : x, y, z 방향의 熱擴散係數(cm²/sec)

2.2.2. 경계조건

기초식 수치계산을 실행해서 요구되는 정도의 수치 해를 얻기 위해서는 각 상태량에 대해서 적절한 경계조건을 설정하는 것이 필요하다. 제주항을 시뮬레이션하기 위해 해수유동모델의 입력 자료는 Table 1, Table 2 그리고 Table 3에 나타내었다. 경계에서의 조위는 만일주조성분인 M₂분조를 사용하였다. X, Y방향의 격자 크기는 각각 25m로 하였으며 전체격자는 75×89×3층으로 구성하였다. 본 연구에서는 Table 2와 Table 3에 나타난 것과 같이 2000년 8월과 11월 그리고 2001년 2월과 5월의 수온, 염분 그리고 밀도값을 사용하였고, 월별 유동변화를 보기 위해 산지천 유량은 동 조사시기에 실측한 유량과 수온을 입력하였으며 표층에서 유입되는 것을 조건으로 하였다. 또한 취송류의 영향을 파악하기 위하여 계절별 기상자료 중 풍향과 풍속을 입력하였다. 해저마찰계수는 심해의 최적치인 일반적으로 해의 안정성을 주는 R=0.0025를 적용하였다. 수평확산계수는 여러 관측자에 의해 보고되고 있는데 최⁵⁾는

진해만의 확산계수로서 3.0×10⁵cm²/sec를 적용하였으나 우리나라 내만에 대한 확산계수의 측정치가 단편적이고 전체적으로 적용할 시에는 문제가 있다.⁷⁾ 日本의 경우, 東京灣, 大阪灣, 三河灣 등 瀬戸内海에 대한 확산계수를 조사한 결과 대부분이 10³~10⁶의 범위로 측정되었다.^{13,14,15)} 본 연구에서는 제주항에 조사된 값이 없으므로 이 범위내의 값인 1.0×10³cm²/sec를 적용하였다. 본 연구에서 시뮬레이션한 모델 계산 영역은 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. Input data for three-dimensional hydrodynamic model

| Parameter | Input Value |
|---|--|
| Total mesh value | 75 × 89 × 3 = 20,025 |
| Mesh size | $\Delta x = \Delta y = 25m$ |
| Water depth | chart datum + MSL |
| Time interval | 5sec |
| Level | S : 0 ~ 3m M : 3 ~ 6m B : below 6m |
| Tidal level and degree at open boundary | A : 69.7cm, 304.1 ° B : 69.7cm, 304.1 ° |
| Water temp. and chlorinity at open boundary | S : Table 2 M : Table 2 B : Table 2 |
| Coriolis coefficient | $f = 2 w \sin\theta$ |
| Surface friction coefficient | 0.0013 |
| Internal friction coefficient | 0.0013 |
| Bottom friction coefficient | 0.0025 |
| Horizontal viscosity coefficient | 1.0E5(cm ² /s) |
| Horizontal diffusion coefficient | 1.0E5(cm ² /s) |
| Calculation time | 5 tidal cycle |

Table 2. Water temp. and Chlorinity at open boundary

| Month | Cl(‰) | | | Temp(°C) | | |
|----------|-------|-------|-------|----------|------|------|
| | S | M | B | S | M | B |
| August | 15.89 | 16.05 | 16.05 | 25.7 | 25.1 | 25.0 |
| November | 18.43 | 18.43 | 18.43 | 19.2 | 19.3 | 19.4 |
| February | 18.77 | 18.77 | 18.82 | 14.1 | 13.8 | 13.8 |
| May | 18.21 | 18.21 | 18.32 | 19.6 | 19.4 | 19.0 |

Table 3. Initial condition at Jeju Harbor and Frowrate and Temp. at Sanzi River

| Month | Level | Temp (°C) | Sal (‰) | Cl (‰) | Wind | | Sanzi River | |
|----------|-------|-----------|---------|--------|--------------|----------------|------------------------------|-----------|
| | | | | | Speed (cm/s) | Direction (16) | Flowrate (m ³ /d) | Temp (°C) |
| August | S | 27.7 | 23.48 | 13.00 | 290 | SW | 77,760 | 20.1 |
| | M | 25.8 | 28.80 | 15.94 | | | | |
| | B | 24.7 | 28.85 | 15.97 | | | | |
| November | S | 18.6 | 27.45 | 15.20 | 300 | N | 46,656 | 15.4 |
| | M | 18.8 | 33.17 | 18.36 | | | | |
| | B | 19.0 | 33.30 | 18.43 | | | | |
| Febuary | S | 13.3 | 30.23 | 16.73 | 330 | SW | 60,307 | 13.5 |
| | M | 13.5 | 33.70 | 18.65 | | | | |
| | B | 13.6 | 33.90 | 18.77 | | | | |
| May | S | 19.2 | 30.98 | 17.15 | 240 | SE | 38,880 | 17.8 |
| | M | 18.7 | 32.70 | 18.10 | | | | |
| | B | 18.6 | 32.95 | 18.24 | | | | |

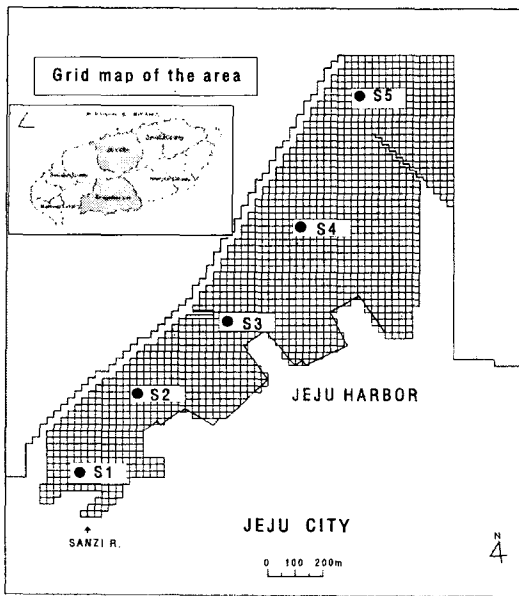


Fig. 1. Finite-difference grid of Jeju harbor.

3. 결과 및 고찰

3.1 3차원 수치모델의 적용성 검토

3차원 수치모델의 적용성을 검토하기 위하여 관측치와 계산치를 Fig. 2를 이용하여 비교하였다.

관측치는 양¹⁶⁾이 1999년 8월에 조사한 창조류의 유속을 이용하였고 계산치는 2000년 8월의 조건을 입력한 시뮬레이션 결과이다. 결과를 보면 항만의

중앙부에서는 약간의 유향의 차이를 보였으나 유속의 크기는 전반적으로 관측치와 계산치가 잘 일치됨을 알 수 있다. 따라서 본 모델에서 제시된 결과는 제주항 내의 유속분포를 잘 나타내고 있다고 사료된다.

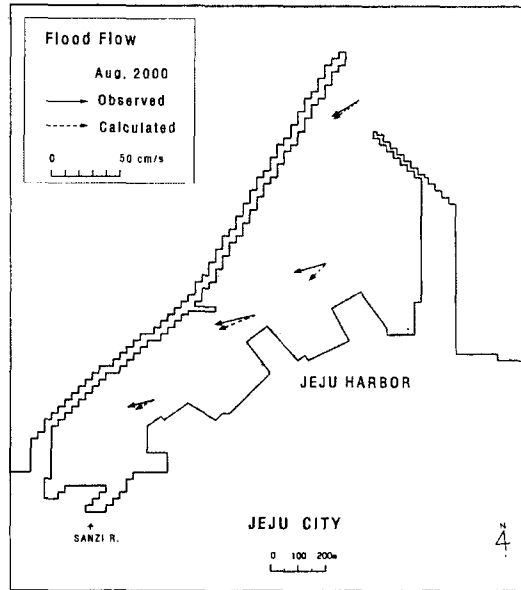


Fig. 2. Comparison of tidal current between calculated and observed results.

3.2 제주항에서의 조류분포특성

취송류와 밀도류를 고려한 제주항의 경우 수심이 대체적으로 얕고 조석이 강함으로 인하여 표층, 중층 그리고 저층의 유동 형태나 유속 크기는 큰 변화가 없었다. 항만 입구부에서는 30-40cm/sec의 강한 유속대를 보여주고 있으나 항만의 중앙부분과 산지천이 있는 항만 안쪽 부분에서는 유속이 다소 감소하여 대체적으로 10cm/sec 내외로 나타났다. 전반적인 유동양상을 보면 창조류와 낙조류 때의 유동은 위상이 반대인 것 외에는 거의 같은 유속분포를 보여주고 있는 것을 알 수 있었다.

3.3 계절별 잔차류의 분포특성

계절별의 잔차류 분포는 Fig. 3에서 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 3는 계절별 표층의 잔차류 패턴을 보여주고 있다. 잔차류 패턴을 보면 항만 입구부에는 강한 와류가 발생하는데 이것은 주로 유속이 강하게 작용하는 조석류의 비선형성분에 의하여 발생된 것으로 사료된다. 또한 항만의 중앙부에 방파제로 인하여 좁아지는 해역에서도 약간의 와류가 발생되고 있음

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(I)

을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 잔차류는 지형이 갑자기 바뀌는 해역과 밀도가 강하게 형성될 수 있는 해역에 잘 발생될 수 있음을 보여준다. 계절별로 보면 11월과 2월에 비해 8월의 항만 입구부에서 와류가 작게 나타나는데 이는 산지천의 유량 증가로 인한 밀도류의 영향으로 사료된다.

중층에서의 잔차류 패턴은 Fig. 4에 나타내었으며 이를 보면 표층에서와 마찬가지로 항만의 입구부에서 강한 잔차류의 특성을 보여주고 있으며 또한 표층과 마찬가지로 중층에도 약간의 와류를 보여주고 있다. 그러나 8월의 표층과 중층의 잔차류를 비교해 보면 중층이 와류의 영향이 더 크게 나타난다. 따라서 밀도류에 의해 발생될 수 있는 잔차류는 표층에 상당히 국한되어 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5에 나타낸 저층에서의 잔차류 패턴을 보면 표층이나 중층에 보이듯이 항만의 입구부에는 여전히 상대적으로 강한 잔차류를 보여주고 있으나 중층에서 보여주었던 항만 중앙부의 잔차류는 나타나지 않고 있다. 이상의 결과를 보면, 제주항의 경우 지형변화와 밀도류에 의하여 잔차류의 형태와 세기가 달라질 수 있음을 알 수 있으며, 특히 잔차류의 계절별 변동은 주로 산지천의 유량 변화에 의한 밀도류에 의하여 나타남을 알 수 있었다.

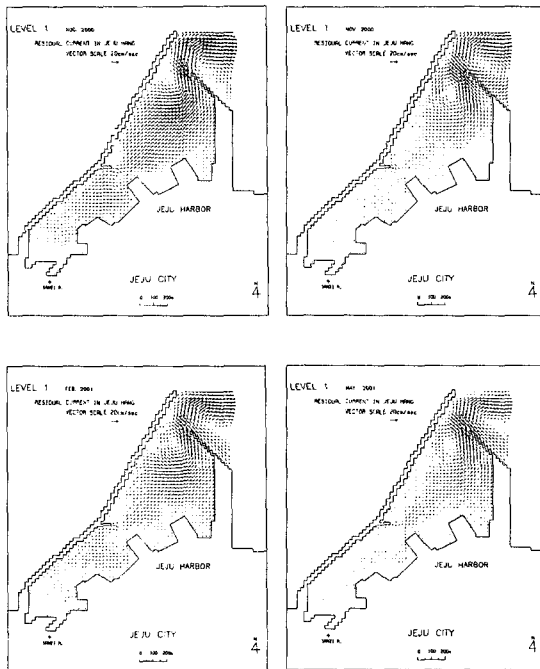


Fig. 3. Distribution of computed residual currents at 1st level in Jeju Harbor.

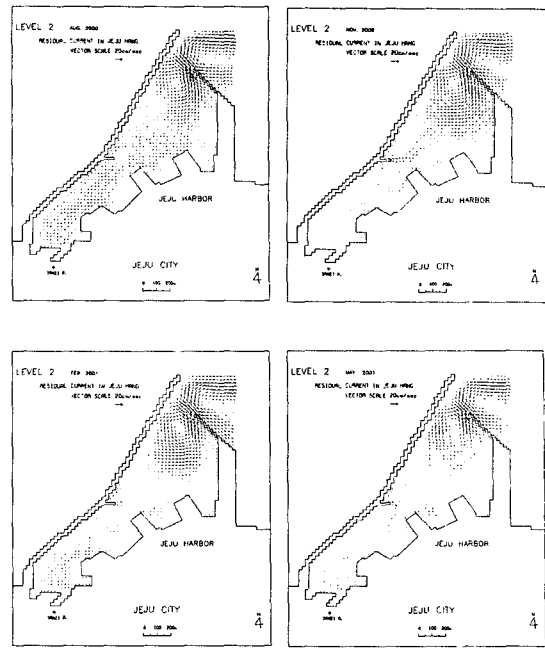


Fig. 4. Distribution of computed residual currents at 2nd level in Jeju Harbor.

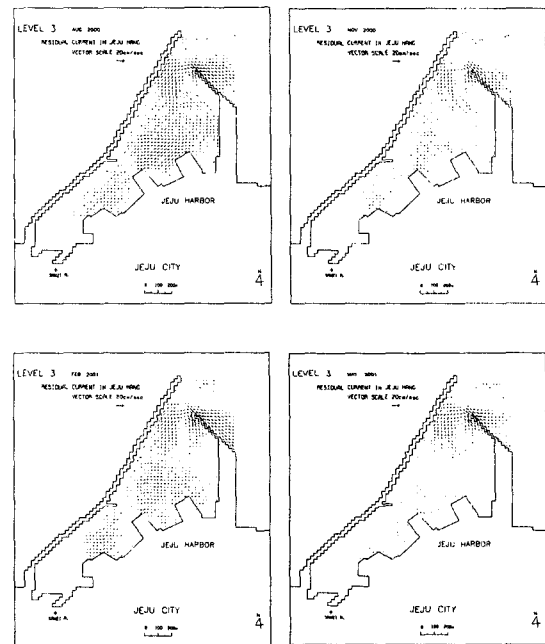


Fig. 5. Distribution of computed residual currents at 3rd level in Jeju Harbor.

3.4. 제주항에서의 염분분포특성

3.4.1. 계절별 염분분포 시뮬레이션

3차원 수치모델을 이용하여 염분분포를 시뮬레이

선하였고 Table 4와 Table 5에 계절별 관측치와 계산치의 지점별 상대오차를 이용하여 비교하였다. 각 층별로 상대오차를 이용하여 계절별 관측치와 계산치를 비교한 결과 각 층별 평균값은 10%이하의 매우 낮은 값을 나타냈으며 특히 춘계인 2001년 5월의 각 층별 상대오차는 2.0% 이하의 매우 낮은 값을 보였다.

Table 4. The comparison of computed with the observed salinity at surface, middle and bottom levels in the Jeju Harbor, August and November, 2000

| August, 2000 | | | | | |
|----------------|------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| Level | St. | Computed (A) (%) | Observed (B) (%) | Error (B-A) (%) | R.E. $ B-A /B$ (%) |
| S | 1 | 25.7 | 21.1 | -4.6 | 21.8 |
| | 2 | 26.3 | 26.9 | 0.6 | 2.2 |
| | 3 | 26.9 | 27.8 | 0.9 | 3.2 |
| | 4 | 27.4 | 27.8 | 0.4 | 1.4 |
| | 5 | 28.2 | 28.0 | -0.2 | 0.7 |
| | Mean | 26.9 | 26.3 | -0.6 | 5.9 |
| M | 2 | 26.7 | 28.6 | 1.9 | 6.6 |
| | 3 | 27.1 | 28.8 | 1.7 | 5.9 |
| | 4 | 27.7 | 28.9 | 1.2 | 4.2 |
| | 5 | 28.5 | 28.9 | 0.4 | 1.4 |
| | | Mean | 27.5 | 28.8 | 1.3 |
| B | 4 | 28.0 | 28.8 | 0.8 | 2.8 |
| | 5 | 28.7 | 28.9 | 0.2 | 0.7 |
| | Mean | 28.4 | 28.9 | 0.5 | 1.7 |
| November, 2000 | | | | | |
| Level | St. | Computed (A) (%) | Observed (B) (%) | Error (B-A) (%) | R.E. $ B-A /B$ (%) |
| S | 1 | 28.3 | 21.2 | -7.1 | 33.5 |
| | 2 | 30.4 | 28.8 | -1.6 | 5.6 |
| | 3 | 31.1 | 33.1 | 2.0 | 6.0 |
| | 4 | 31.8 | 33.2 | 1.4 | 4.2 |
| | 5 | 32.6 | 33.2 | 0.6 | 1.8 |
| | Mean | 30.8 | 29.9 | -0.9 | 10.2 |
| M | 2 | 30.5 | 33.0 | 2.5 | 7.6 |
| | 3 | 31.2 | 33.3 | 2.1 | 6.3 |
| | 4 | 31.9 | 33.2 | 1.3 | 3.9 |
| | 5 | 32.8 | 33.2 | 0.4 | 1.2 |
| | | Mean | 31.6 | 33.2 | 1.6 |
| B | 4 | 32.1 | 33.3 | 1.2 | 3.6 |
| | 5 | 33.0 | 33.3 | 0.3 | 0.9 |
| | Mean | 32.6 | 33.3 | 0.8 | 2.3 |

Table 5. The comparison of computed with the observed salinity at surface, middle and bottom levels in the Jeju Harbor, February and May, 2001

| February, 2001 | | | | | |
|----------------|------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| Level | St. | Computed (A) (%) | Observed (B) (%) | Error (B-A) (%) | R.E. $ B-A /B$ (%) |
| S | 1 | 31.6 | 27.0 | -4.6 | 17.0 |
| | 2 | 32.1 | 31.0 | -1.1 | 3.5 |
| | 3 | 32.6 | 33.2 | 0.6 | 1.8 |
| | 4 | 33.0 | 33.7 | 0.7 | 2.1 |
| | 5 | 33.5 | 33.9 | 0.4 | 1.2 |
| | Mean | 32.6 | 31.8 | -0.8 | 5.1 |
| M | 2 | 32.2 | 33.4 | 1.2 | 3.6 |
| | 3 | 32.6 | 33.8 | 1.2 | 6.6 |
| | 4 | 33.0 | 33.8 | 0.8 | 2.4 |
| | 5 | 33.6 | 33.8 | 0.2 | 0.6 |
| | | Mean | 32.9 | 33.7 | 0.9 |
| B | 4 | 33.1 | 33.9 | 0.8 | 2.4 |
| | 5 | 33.7 | 33.9 | 0.2 | 0.6 |
| | Mean | 33.4 | 33.9 | 0.5 | 1.5 |
| May, 2001 | | | | | |
| Level | St. | Computed (A) (%) | Observed (B) (%) | Error (B-A) (%) | R.E. $ B-A /B$ (%) |
| S | 1 | 31.5 | 32.0 | 0.5 | 1.6 |
| | 2 | 31.9 | 32.4 | 0.5 | 1.5 |
| | 3 | 32.1 | 32.5 | 0.4 | 1.2 |
| | 4 | 32.3 | 32.6 | 0.3 | 0.9 |
| | 5 | 32.7 | 32.7 | 0.0 | 0.0 |
| | Mean | 32.1 | 32.4 | 0.3 | 1.1 |
| M | 2 | 32.0 | 32.6 | 0.6 | 1.8 |
| | 3 | 32.2 | 32.6 | 0.4 | 1.2 |
| | 4 | 32.4 | 32.7 | 0.3 | 0.9 |
| | 5 | 32.8 | 32.9 | 0.1 | 0.3 |
| | | Mean | 32.3 | 32.7 | 0.4 |
| B | 4 | 32.5 | 32.9 | 0.4 | 1.2 |
| | 5 | 32.9 | 33.0 | 0.1 | 0.3 |
| | Mean | 32.7 | 33.0 | 0.3 | 0.8 |

3.4.2. 계절별 염분분포 특성

계절별 염분의 공간적인 분포특성은 Fig. 6에서 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 6는 계절별 표층의 염분분포를 나타낸 것으로 계절별 염분분포는 산지천 유입으로 인한 밀도

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(I)

류의 영향을 모두 나타내고 있으며 특히 산지천의 유량이 77,760m³/d로 가장 많이 유입되는 하계인 8월에 가장 큰 영향을 보이고 있으며 항만 내의 전 수층의 염분 농도가 29‰이하의 저농도를 보이고 있다. 그리고 항만구부의 계절별 염분 농도 범위를 보면 표층의 경우 2000년 8월, 11월, 2001년 2월 그리고 5월의 경우 각각 28‰, 32.5‰, 33.5‰ 그리고 32.5‰을 보여 표층에서는 밀도류의 영향이 매우 크게 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 7과 Fig. 8에 나타낸 중층과 저층에서의 염분분포를 보면 표층과 유사한 패턴을 보여 주고 있으나 염분의 농도와 범위를 보면 표층보다는 높은 농도를 보이고 있으며 밀도류의 영향 범위는 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서 이상의 결과를 보면 제주항의 물리해양환경의 변화에 크게 영향을 미치는 것은 담수 유입인 산지천이라는 것을 알 수 있으며 산지천에 많은 오염물질이 함유되어 있을 경우 특히 산지천 유량이 증가하는 하계에는 오염물질의 영향이 표층의 경우, 항만 전체에 영향을 미치는 것을 예상할 수 있다.

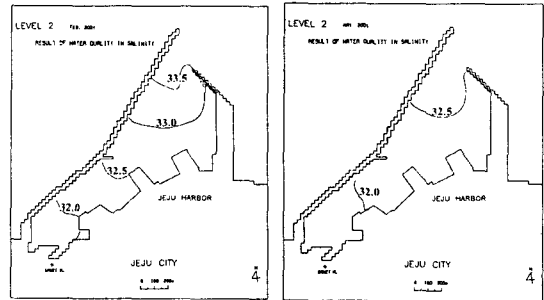
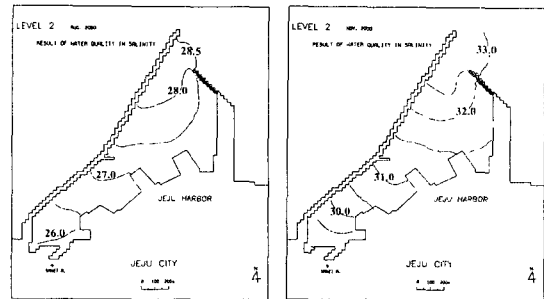


Fig. 7. Distribution of salinity at 2nd level in Jeju Harbor.

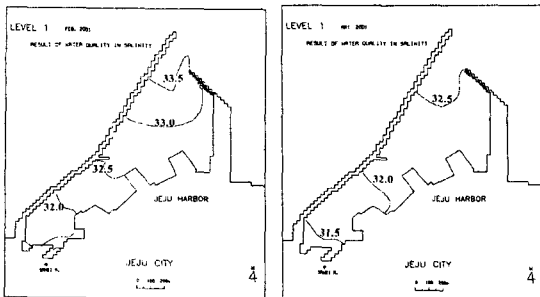
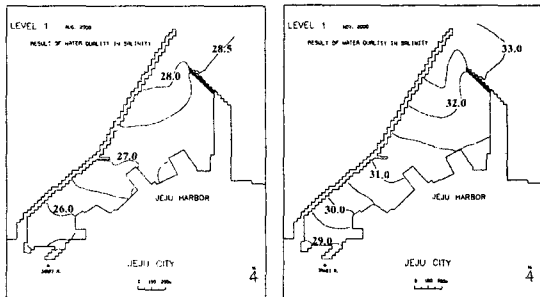


Fig. 6. Distribution of salinity at 1st level in Jeju Harbor.

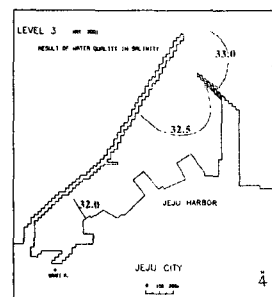
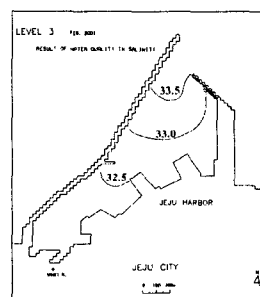
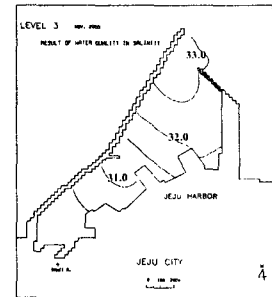
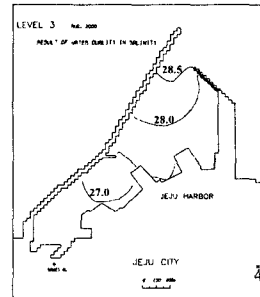


Fig. 8. Distribution of salinity at 3rd level in Jeju Harbor.

4. 요약

제주항의 수질관리를 위한 첫 단계로 3차원 수치모델을 이용하여 제주항내의 계절별 제주항의 물리해양환경의 변화 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

3차원 수치모델을 시뮬레이션한 결과, 관측치와 계산치를 비교해 보면 만의 중앙부에서는 약간의 유향의 차이를 보이는 것을 제외하고는 잘 일치됨을 알 수 있다. 취송류와 밀도류를 고려한 조석류의

계절별 변화를 보면 제주항의 경우 수심이 대체적으로 얇고 조석이 강함으로 인하여 표층, 중층 그리고 저층의 유동 형태나 유속 크기에 큰 변화가 없었다.

계절별 잔차류 패턴을 보면 표층에서는 항만 입구부와 중앙부에 와류가 발생되고 있으며 이러한 결과를 볼 때 잔차류는 지형이 갑자기 바뀌는 해역과 밀도가 강하게 형성될 수 있는 해역에 잘 발생될 수 있음을 알 수 있었으며 밀도류에 의해 발생될 수 있는 잔차류는 표층에 많은 영향을 보임을 알 수 있었다. 특히 잔차류의 계절별 변동은 주로 산지천의 유량 변화에 의한 밀도류에 의하여 나타남을 알 수 있었다.

3차원 수치모델을 이용하여 염분분포를 시뮬레이션한 결과를 보면 각 층별로 상대오차를 이용하여 계절별 관측치와 계산치를 비교한 결과 각 층별 평균값은 10%이하의 매우 낮은 값을 나타내었다. 계절별 염분분포를 살펴보면 분포는 산지천 유입으로 인한 밀도류의 영향을 모두 나타내고 있으며 항만 구부의 계절별 염분 농도 범위를 보면 표층의 경우 8월, 11월 그리고 2월의 경우 각각 28%, 32.5% 그리고 33.5%을 보여 표층에서는 밀도류의 영향이 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

따라서 제주항의 물리해양환경의 변화에 크게 영향을 미치는 것은 담수 유입인 산지천이라는 것을 알 수 있으며 해역 수질을 악화시키는 원인 중 큰 영향을 미치는 육상오염부하인 미처리된 하·폐수가 산지천을 통하여 제주항으로 유입될 때 오염물질의 영향은 항만 전체에 미치는 것을 예상할 수 있다. 이상의 결과는 제주항의 수질관리를 위하여 항만내 오염물질의 거동 및 제어를 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2000년도 제주대학교 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

1) 환경부, 1996, 환경통계연감, 577.

2) 國立環境研究院, 1991, 全國 主要沿岸 流入汚染負荷量 算定에 關한 調査研究, 71.

3) 정은진, 1994, 수치모델을 이용한 득량만의 조류 특성에 관한 연구, 부산수산대학교 석사학위논문, 39

4) 조은일, 이석모, 박청길, 1995, 수영만 수질에 미치는 비점원 오염부하의 특성과 영향, 한국수산학회지, 28(3), 279-293.

5) 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소수피 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 27(4), 413-433.

6) 김종구, 박청길, 김광수, 1994, 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용, 한국환경과학회지, 3(3), 185-195.

7) 김종구, 박청길, 신성교, 1995, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링(I) : 생태계모델을 이용한 식물플랑크톤 농도 분포 시뮬레이션, 대한환경과학회지, 17(2), 121-135.

8) 김광수, 박청길, 조은일, 1996, 생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, 한국수질보전학회지, 12(4), 383-399.

9) 조은일, 박청길, 이석모, 1996, 駕炭灣의 環境容量 算定(I) - 생태계모델을 이용한 기초생산력산정 -, 한국수산학회지, 29(3), 369-385.

10) 濟州道, 1994, 濟州道 綜合開發計劃, 531.

11) 제주도, 1997, 제주도 친환경개발을 위한 환경지표설정, 238.

12) 中田喜三郎·石川公敏·松川康夫, 1985, 内灣の流動場の数値實驗, 沿岸海洋研究ノート, 27(2), 96-108.

13) 中村曲行, 西田克司, 早川典生, 西村, 1989, 沿岸海域における鉛直擴散係數の推定に關する研究, 沿岸工學論文集, 36, 809-813.

14) 宇野木早嵩, 1974, 内灣の海水交流と鉛直混合に關する考察, 沿岸海洋研究ノート, 11(2), 85-95

15) 上嶋英機, 早川典生, 1982, 瀬戸内海の物質擴散分散特性, 沿岸海洋研究ノート, 20(1), 1-11.

16) 양성기, 최찬문, 1999, 제주항의 해양수리학적 특성, 제주대학교 해양연구소 연구논문집, 23, 9-21.