

유한요소법에 의한 하구의 수질모델 BAYQUAL

류 병 로 · 한 양 수*

대전산업대학교 환경공학과 · 대구대학교 토목공학과
(1998년 11월 10일 접수)

BAYQUAL Model for the Water Quality Simulation of a Bay Using Finite Element Method

Byong-Ro Ryu and Yang-Su Han*

Dept. of Environmental Engineering, Taejon National University of Technology, Taejon 305-320, Korea

*Dept. of Civil Engineering, Taegu University, Taegu 705-714, Korea

(Manuscript received 10 November, 1998)

The aim of this study is to develop the water quality simulation model (BAYQUAL) that deal with the physical, chemical and biological aspects of fate/behavior of pollutants in the bay. BAYQUAL is a two dimensional, time-variable finite element water quality model based on the flow simulation model in bay(BAYFLOW). The algorithm is composed of a hydrodynamic module which solves the equations of motion and continuity, a pollutant dispersion module which solves the dispersion-advection equation. The applicability and feasibility of the model are discussed by applications of the model to the Kwangyang bay of south coastal waters of Korea.

Based on the field data, the BAYQUAL model was calibrated and verified. The results were in good agreement with measured value within relative error of 14% for COD, T-N, T-P. Numerical simulations of velocity components and tide amplitude(M2) were agreed closely with the actual data.

Key words : BAYQUAL, FEM model, water quality model, coastal water

1. 서 론

리아스식 해안으로 구성된 광양만과 같은 해역의 흐름은 매우 복잡하며 특히 潮汐의 영향을 받는 하구에서의 흐름 및 오염물질 확산이동 특성을 해석하는 것은 많은 제약조건이 따른다. 이는 자연상태의 영향인자들이 너무 많고 서로 복합적으로 작용하고 있어 물리적 모델 실험을 하더라도 실험실내에서 고려해야 할 인자들의 제약이 뒤따르며, 실측에 의해 해석하려는 경우에도 경제적, 시간적 제약이 수반되기 때문이다.^{1,2)}

연안해역의 수질모델링은 구자공 외³⁾가 광양만 유역의 비점오염원의 COD 원단위 추정을 위해 광양만을 거대한 3개의 CSTR Box로 보고 해수중의 유기물질 분해를 1차 반응식으로 나타내 모의한 적이 있으며, 류청로 등³⁾은 부산, 울산을 중심으로 한 남동해안의 유류분산 수치 모델링을 연구하였다. 또한 김광수 등⁴⁾은 우리나라 서해안의 넓은 수역에 대하여 3차원 유동모델 COSMOS를 이용하여 수리해석을 하였고 DO와 관련된 생태요소에 대하여는 EUTRP2 생태 모델을 적용하였다. 최근 황병기와 Lung⁶⁾은 연안역 개발에 따른 해양환경 변화를 모의하기 위하여 미국 EPA가 개발한 WASP/ EUTRO5

모델을 메릴랜드 연안만에 적용하였다. 하구역을 중심으로 류병로와 안상진⁷⁾은 천해역의 흐름 해석을 위하여 유한요소법에 의한 유동장 해석모델인 BAYFLOW를 개발하여 아산만, 한강하구 및 광양만, 목포만 등에 적용하였고 그 결과 유용성을 보인 바 있다. 이를 토대로 본 연구에서는 자연수역, 특히 조석의 영향을 받는 천해역의 흐름 및 오염물질 확산이송 특성을 해석하기 위한 수치모델을 개발하고, 이를 활용하여 광양만의 실측자료와 비교 검증하여 모델의 적용성을 평가하므로써 향후 이러한 수역에서 행해지는 준설, 간척 등 건설사업 등에 의한 오염물질의 확산이송을 해석할 수 있도록 함에 있다.

2. 모델의 支配 方程式

모델에서 사용된 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식과 확산이송방정식이다. 본 연구에서는 鉛直方向으로 혼합이 잘 이루어져 수심방향의 변동성분을 평균치로 대표할 수 있는 淺海領域에 적용할 것을 목적으로 수평방향의 2차원해석이 수행되었다. 유체의 흐름특성을 해석하기 위해서는 천해영역의 흐름을 2차원 방정식으로 해석하기 위해 물은 비압축성이며, 鉛直流速成分과 가속성

분을 무시하고 해수면에서 바람에 기인된 유속성분이 없다고 가정하였다.^{8,9)} 또한 본 개발모델은 장기간의 생태학적 수질변동 보다는 간척, 준설 및 대규모 오염원의 신설에 따른 하구역의 단기간 수질변동을 모의하기 위한 것으로 주로 해역에서 일어나는 반응들을 단순화시켜 모의 대상항목으로 하였다.

2.1. 해수유동방정식

유체에 대한 질량보존식으로부터 Leibnitz rule을 적용하여 수표면과 하상에서의 유속성분에 대한 경계조건을 대입하고 수심방향에 대하여 적분하여 얻어진 식(1)의 2차원 연속방정식을 사용하였다.¹⁰⁻¹²⁾

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

여기서 H는 수심 h와 조석에 의한 수면변동량 ζ 의 합($H=h+\zeta$)이며 U, V는 각각 x, y에 대한 평균유속이다. 본 연구에서는 연직방향으로 균일 분포를 갖는 수평방향 평균류만을 연구대상으로 하고 있으므로 비 압축성 유체에서 3차원 운동방정식으로부터 수심방향에 대해 적분하고, Leibnitz rule을 적용한 후 경계조건을 고려하면 천수 영역의 흐름분석에 널리 이용되는 다음 식(2)의 2차원 운동방정식이 얻어진다.⁹⁾

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} + g\frac{\partial \zeta}{\partial x} - fV \\ & + \frac{f r U}{H} \sqrt{U^2 + V^2} - \epsilon_v \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] = 0 \\ & \frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + g\frac{\partial \zeta}{\partial y} - fU \\ & + \frac{f r V}{H} \sqrt{U^2 + V^2} - \epsilon_v \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, f=지구 자전에 기인되는 Coriolis 매개변수, g는 중력가속도, ϵ_v 는 수심평균 와점성계수이고, 또 fr은 저면마찰계수이다. 식 (2)에서 바람에 의한 영향은 매우 작은 것으로 간주하여 수표면 마찰용력항을 생략하였다.

2.2. 오염물질의 이류·확산방정식

일반적인 물질평형방정식은 다음과 같다.⁹⁾

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial c}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(D_x\frac{\partial c}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(D_y\frac{\partial c}{\partial y}) = b \quad (3)$$

여기서 \bar{u} , \bar{v} 는 각각 x, y방향의 평균유속성분이고, D_x , D_y 는 각각 x, y방향의 와동확산계수이다. b는 오염물의 생성이나 소멸 혹은 생화학적 작용을 나타내는 항이며 c는 깊이에 대해 평균을 취한 오염물의 농도이다.

수중의 수질변화 특히 생화학적 변화는 항목간의 복잡한 상호작용에 의해 발생되며 장기간의 지속성을 갖기 때문에 이들의 작용이 정상상태에 있다고 하더라도 확정한 방법으로 해석하기는 어렵다. 그러나 본 연구에서는 하수처리장 등 환경기초시설의 효과나 물리적인 변화가 수질에 미치는 효과를 비교분석하기 위한 목적으로 모델을 적용하기 위하여 수질 인자들과 이들의 상호작용을 단순화 시켜 모델을 구성하였으며 본 모델에서 모의

하려고 하는 주요수질 성분인 COD, N, P에 대한 반응식은 다음과 같다. 사용된 반응계수에 대한 설명 및 보정후 적용된 값은 Table 1에 나타내었다.

2.2.1. 화학적 산소요구량(COD, mg/ℓ)

해수중의 COD 농도변화는 해역 외부로부터 유기오염물 유입, 영양염류의 과다유입에 의한 조류의 번식, 생화학적 반응에 의한 분해와 침전 등에 주 요인이 있으며 이를 단순화 시켜 다음 식으로 표현하였다.

$$dL/dt = -K_1L - K_4L + \alpha cA \quad (4)$$

여기서, L : COD농도(mg/ℓ)

A : 조류농도($\mu\text{g}/\ell$)

2.2.2. 유기성 질소(Organic Nitrogen)

유기성 질소의 농도변화는 조류의 감쇄에 의한 유기성 질소의 증가, 유기성 질소의 가수분해에 의한 감소, 유기성 질소의 침전에 의한 감소를 고려하였다.

$$dN_4/dt = \alpha_N \sigma_1 A - \beta_4 N_4 - \sigma_4 N_4 \quad (5)$$

2.2.3. 암모니아성 질소(Ammonia Nitrogen)

암모니아성 질소의 농도는 유기성 질소의 가수분해에 의한 증가, 암모니아성 질소의 질산화에 의한 감소, 하상 퇴적물로부터 부상에 의한 증가, 조류의 섭취에 의한 감소를 고려 하였다.

$$dN_1/dt = \beta_4 N_4 - \beta_1 N_1 - \sigma_3 N_1/d - F_{NA} \alpha_N \mu A \quad (6)$$

Table 1. Calibrated Reaction Coefficients for BAYQUAL.

| Variable | Description | Unit | Calibrated Value |
|------------|--|-------------------------|------------------|
| K_1 | Carbonaceous deoxygenation rate constant | day ⁻¹ | 0.06 |
| K_4 | Rate of loss of COD due settling | day ⁻¹ | 0.002 |
| α_c | Fraction of algal biomass then is COD | $\frac{mg-COD}{mg-A}$ | 0.4 |
| α_N | Fraction of algal biomass then is nitrogen | $\frac{mg-N}{mg-A}$ | 0.2 |
| α_P | Fraction of algal biomass then is phosphorus | $\frac{mg-P}{mg-A}$ | 0.02 |
| β_1 | Rate constant for the biological oxidation of NH ₃ to NO ₂ | day ⁻¹ | 0.13 |
| β_2 | Rate constant for the biological oxidation of NO ₂ to NO ₃ | day ⁻¹ | 0.8 |
| β_3 | Rate constant for the biological oxidation of organic-P to dissolved-P | day ⁻¹ | 0.04 |
| β_4 | Rate constant for the hydrolysis of organic-N to ammonia | day ⁻¹ | 0.021 |
| ρ | Algae respiration rate | day ⁻¹ | 0.1 |
| σ_1 | Algae settling rate | ft / day | 0.2 |
| σ_3 | Benthos source rate for dissolved nitrogen | $\frac{mg-N}{ft^2-day}$ | 0 |
| σ_5 | Organic phosphorus settling rate | day ⁻¹ | 1.0 |

여기서, $F_{NA} = P_N N_1 / [P_N N_1 + (1 - P_N) N_3]$
 N_1 : 암모니아성 질소의 농도(mg-N/L)
 N_4 : 유기성 질소의 농도(mg-N/L)
 F_{NA} : 조류의 암모니아성 질소의 섭취분율
 μ : 조류의 비증식속도(1/day)
 P_N : 암모니아성 질소에 대한 선호도 인자(0~1.0)
 d : 평균수심(m)

2.2.4. 아질산성 질소(Nitrite Nitrogen)

아질산성 질소 농도는 암모니아성 질소의 산화에 의한 증가, 질산화에 의한 감소 등을 고려하였다.

$$dN_2/dt = \beta_1 N_1 - \beta_2 N_2 \quad (7)$$

여기서, N_2 : 아질산성 질소의 농도(mg-N/L)

2.2.5. 질산성 질소(Nitrate Nitrogen)

질산성 질소의 농도변화는 아질산성 질소의 산화에 의한 증가, 조류의 섭취에 의한 감소를 고려하였다.

$$dN_3/dt = \beta_2 N_2 - (1 - F_{N_3}) \alpha_1 \mu A \quad (8)$$

여기서, N_3 : 질산성 질소의 농도(mg-N/L)
 F_{N_3} : 조류의 질산성 질소 섭취분율

2.2.6. 유기성 인(Organic Phosphorus)

유기성 인의 농도변화는 조류의 사멸에 의한 증가, 유기성 인의 용존인자로 전환에 의한 감소, 유기성 인 침전에 의한 감소를 고려하였다.

$$dP_1/dt = \alpha_P \rho A - \beta_3 P_1 - \sigma_3 P_1 \quad (9)$$

여기서, P_1 : 유기성 인의 농도(mg-P/L)

3. 유한요소식의 구성

기본방정식(1)~(3)을 풀기 위해 유한요소법을 사용하였다. 유한요소법은 근사적분법의 개념을 이용한 방법으로, 미분 방정식에서의 미지의 변수를 각 절점에 대하여 적절히 선정한 근사함수로 표현된 근사값과 미지변수의 도함수값의 선형조합으로 표현하고, 변분법 또는 가중잔차법을 이용하면 분할된 각 요소에 대하여 성립되는 주어진 미분방정식에 등가인 유한요소식이 구해진다. 이는 통상 다원연립방정식의 형태를 가지며, 이 연립방정식을 풀어서 그 해를 구하면 미지변수의 절점값이 결정된다.

Galerkin방법이 사용되었으며 보간함수로는 1차 선형 함수를 이용했고, 유한요소로는 다각형의 유한요소 중 불규칙한 지형조건을 고려하기에 편리한 삼각형 요소를 이용했다.

보간함수인 $N_i(x, y)$ 를 가중함수로 취하여 식(1)~(3)에 적용하면 가중잔차 방정식이 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$\int_A \int \left[\frac{dC_i}{dt} N_i N_i + \left(\sum_k U_k N_k \right) \frac{\partial N_i}{\partial x} N_i + \left(\sum_k V_k N_k \right) \frac{\partial N_i}{\partial y} N_i - f U_i N_i N_i + g \zeta_i \frac{\partial N_i}{\partial x} N_i - \epsilon_v \left(\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \right) N_i \right] d_x d_y = 0 \quad (10)$$

$$\int_A \int \left[\frac{\partial U_i}{\partial t} N_i N_i + \left(\sum_k U_k N_k \right) U_i \frac{\partial N_i}{\partial x} N_i + \left(\sum_k V_k N_k \right) V_i \frac{\partial N_i}{\partial y} N_i - f V_i N_i N_i + g \zeta_i \frac{\partial N_i}{\partial x} N_i + \frac{f h \left(\sum_k U_k N_k \right)^2 + \left(\sum_k V_k N_k \right)^2}{\sum_k (\zeta_k + h_k) N_k} U_i N_i N_i - \epsilon_v \left(\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \right) U_i N_i \right] d_x d_y = 0 \quad (11)$$

$$\int_A \int \left[\frac{\partial V_i}{\partial t} N_i N_i + \left(\sum_k U_k N_k \right) V_i \frac{\partial N_i}{\partial x} N_i + \left(\sum_k V_k N_k \right) V_i \frac{\partial N_i}{\partial y} N_i - f U_i N_i N_i + g \zeta_i \frac{\partial N_i}{\partial y} N_i + \frac{f h \left(\sum_k U_k N_k \right)^2 + \left(\sum_k V_k N_k \right)^2}{\sum_k (\zeta_k + h_k) N_k} V_i N_i N_i - \epsilon_v \left(\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \right) V_i N_i \right] d_x d_y = 0 \quad (12)$$

$$\int_A \int \left[\left(\frac{dC_i}{dt} N_i N_i + \left(\sum_k U_k N_k \right) \frac{\partial N_i}{\partial x} C_i N_i + \left(\sum_k V_k N_k \right) \frac{\partial N_i}{\partial y} C_i N_i - \frac{D_x \partial^2 N_i}{\partial x^2} C_i N_i - \frac{D_y \partial^2 N_i}{\partial y^2} C_i N_i - b N_i \right) dx dy = 0 \quad (13)$$

여기서, n 은 유한요소 영역내의 절점의 수, A 는 요소의 면적이고, ϵ_v 는 와동점성계수이다. 또 f 은 저면 마찰 손실계수로서 여기서는 Chezy식을 사용하였다. 식(11), (12)의 피적분항 중 와동점성에 의한 마찰을 나타내는 마지막항은 Green의 정리를 이용하여 1계 편미분으로 한후 식(10)~(13)을 행렬형태로 조합하면 식(14)가 된다.

$$[M] \dot{q} + [K] q = [P] \quad (14)$$

여기서 $q^T = (\zeta_i, U_i, V_i)$, $\dot{q}^T = \left(\frac{d\zeta_i}{dt}, \frac{dU_i}{dt}, \frac{dV_i}{dt} \right)$
 식 (14)에서 $[M]$ 은 질량행렬로서 다음 식 (15)와 같이 표현된다.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 $m_1 = \langle N_i, N_i \rangle$
 또 $[K]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$[K] = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ S_2 & S_4 & S_6 \\ S_3 & S_5 & S_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$S_1 = \left\langle \frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\sum_k U_k N_k \right) N_i \right\rangle + \left\langle N_i \sum_k U_k \frac{\partial N_k}{\partial x} N_i \right\rangle + \left\langle \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\sum_k V_k N_k \right) N_i \right\rangle + \left\langle N_i \sum_k V_k \frac{\partial N_k}{\partial y} N_i \right\rangle$$

$$S_2 = \left\langle g \frac{\partial N_i}{\partial x} N_i \right\rangle$$

$$S_3 = \langle g \frac{\partial N_i}{\partial y} N_i \rangle$$

$$S_4 = \langle (\sum_{k=1}^M U_k N_k) \frac{\partial N_i}{\partial x} N_i \rangle + \langle (\sum_{k=1}^M V_k N_k) \frac{\partial N_i}{\partial y} N_i \rangle$$

$$+ \langle \epsilon_{ii} (\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y}) \rangle$$

$$+ \langle \frac{fM (\sum_{k=1}^M U_k N_k)^2 + \sum_{k=1}^M V_k N_k)^2)^{1/2}}{\sum_{k=1}^M (\zeta_k + h_k) N_k} N_i N_i \rangle$$

$$S_5 = \langle fN_i N_i \rangle$$

$$S_6 = \langle -fN_i N_i \rangle$$

여기서, 기호 $\langle \rangle$ 는 임의 변수에 대한 면적분치를 의미하며, i, j 는 1, 2, 3이고 M 은 3이다. 식 (14)에서 $[P]$ 는 경계조건에 대한 값이다. 이식은 하나의 요소에 대한 식이므로 전체 영역에 대한 조합이면 다음 식 (17)을 얻게 되고 같은 방법으로 식 (13)을 전개하면 식 (18)을 얻게 되며 이를 모델에서 사용한다.

$$[M_C] \dot{Q} + [K_C] Q = [P_C] \tag{17}$$

$$[M_C] \dot{C} = [F_C] C + (B_C) + (P_C) \tag{18}$$

여기서, 첨자 G 는 식 (14)의 행렬과 벡터를 전 영역에 대해 조합한 것을 의미하며 \dot{Q}, Q 는 $\{dq/dt, \{q\}$ 를 전 영역에 대해 조합한 것이고 $[P_C]$ 는 경계조건 조합이다.

4. 수질자료

4.1. 유입하천 수질현황

모델의 입력자료로서 광양항 주변지역의 총 5개 지천 유입지점을 선정하여 1998년 2월부터 4월까지 3회에 걸쳐 하천수질을 실측 조사하였다. 조사항목은 하천수 환경기준 설정 항목 중 수온, pH, DO, BOD, COD, 인, 질소 항목 등 총 9개 항목에 대하여 분석을 실시하였고, 시료채취 및 각 수질항목에 대한 분석은 수질오염 공정시험법에 준하여 현장 및 실험실 분석을 실시하였다. 분석 결과를 수질환경기준과 비교 검토하면, BOD는 섬진강에서 2.0mg/l, 광양서천에서 3.9mg/l 이고 동광양의 생활오수가 유입되는 실개천의 하수는 28.5 mg/l 와 36.1 mg/l 로 나타났다. DO항목은 하천에서 9.6~11.6mg/l 이었는데 이는 수온이 비교적 낮은 시기여서 비교적 높은 수치를 기록하고 있으나 하수가 유하하는 지점은 2.0mg/l 이하의 낮은 농도를 보이고 있다. COD농도는 지역에 따라 다소의 차이는 있으나 BOD농도와 비교하여 같거나 약간 높은 것으로 측정되었다. 총질소농도는 하천에서 0.33~1.59mg/l, 하수토구에서 3.2~4.3mg/l 의 범위를 나타냈다. 대장균군은 하천에서 268~2700MPN/100ml, 하수토구에서 3300~3900 MPN/100ml를 나타냈다.

4.2. 해양수질 현황

모델의 변수를 보정하고 적용성을 검증하기 위해서 Fig. 5.의 광양만내 9개의 조사지점에서 수질을 조사하였다. 광양만의 9개지점에서 2월, 3월 및 4월에 각 1회의 수질을 분석한 결과를 해역 수질환경기준과 비교 검토하

면, COD는 OW-1지점에서 2.6~3.2mg/l 으로 가장 높고 다음은 순천 및 광양(구광양읍)의 하수가 유입되는 수역인 OW -4지점에서 2.1~2.64mg/l 으로 다음이며 대체로 모도 내측에는 1.6~2.3mg/l 범위로서 수질환경기준 II~III 등급 수질이고, 모도의측에서 여수의해 구간에는 1.2~1.8mg/l 범위로서 II등급 수질을 나타내고 있다. 용존산소, 부유물질량, 대장균군수, 노르말 핵산 추출물질 등은 모두 I~II등급 수준이다. T-N과 T-P의 경우 모도를 중심으로 한 광양만 내측에서 T-N은 0.4~0.7mg/l, T-P(PO4-P)는 0.05~0.08mg/l 의 범위를 보여 III등급 기준인 0.2mg/l, 0.03mg/l 을 각각 2배가 되는 수준이다. 반면 모도를 중심으로 한 외해측의 OW-7 ~ OW-9지점은 질소, 인 공히 III등급 수질을 보이거나 약간 상회하는 수준이다.

5. 해수유동 및 수질 모델링

5.1. 해수유동 모델의 격자망

해수유동 및 오염물질 확산해석을 위해 광양만의 격자망 구성이 필요하므로 Fig. 1과 같이 여수 앞 바다를 외해 경계면으로하여 919개의 삼각형 요소로 구분하고 549개의 절점을 구성하였다. 모도 양측의 협수로에 대하여는 삼각형 요소의 크기를 작게하여 상세히 도시할 수 있도록 하였으며 비교적 균일한 크기를 갖도록 하여 안정도를 높였다.

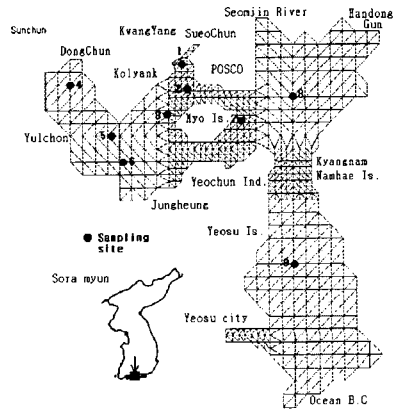


Fig. 1. System segmentation and sampling site.

5.2. 모델의 보정

수심분석에 사용된 자료는 광양만의 해도로서 1984년부터 1994년까지 수로국에서 측량, 제작한 것으로서 1/50,000 축척의 No.256 도면이다. 조석의 조화상수와 비조화 상수는 매시의 수위기록을 최소자승법에 의하여 조화분석을 실시함으로써 구하였으며 연안역에서 우세한 M2분조를 사용하였다. 계산시간 간격은 2단계 양해법의 안정도 조건을 고려하여 5초로 하였으며 여수 앞 바다를 외해 경계로 하고 섬진강, 광양서천 등 하천 유입과 여수 시 및 광양시의 하수 및 실개천 유입을 고려하였다. 육지 경계면에서는 slip조건을 부여하고 유속의 수직성분은 0으로 하였다.

5.2.1. 조위

오염물질 확산이송 계산을 위해 유동장 해석이 필요하며 확산 모델과 동시에 모의된다.

본 모델에 의해 광양항 검조소(PT-3)지점의 계산조위도는 Fig. 2와 같이 대조차 320 Cm(소조차 112.8Cm)로서 실측된 조위표의 대조차 311.6Cm와 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주고 있으며 상관계수는 0.99의 높은 상관성을 보였다.

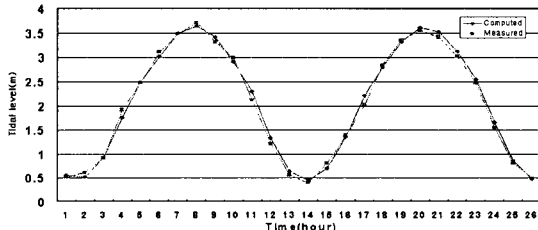


Fig. 2. Tidal level of Kwangyang gaging station (spring tide, station PT-3).

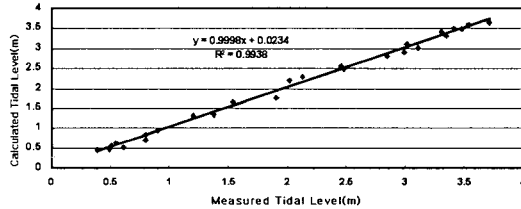


Fig. 3. Comparison of calculated and measured tidal levels.

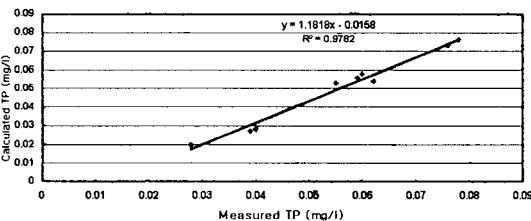
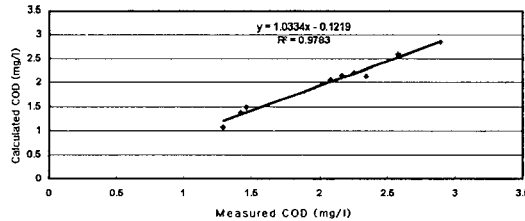
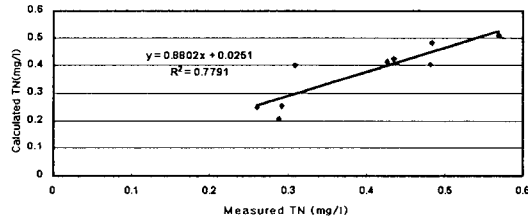


Fig. 4. Calibration of water quality parameters.

5.2.2. 오염물 확산이송 보정

제1차(1998년 2월)의 수질자료를 사용하여 모델에서

사용된 확산이송 및 오염물질의 생화학적 반응 계수를 보정한 결과 Table 1의 반응계수 값을 사용하였다. 보정 결과 COD, 총질소 및 총인에 대한 실측치와 계산치의 상관식 및 상관계수는 Fig. 4와 같다. COD의 경우 상관계수는 0.9783으로서 매우 높은 상관성을 보여주고 있으며 전 지점에 대하여 오차도 3%로서 양호한 결과를 보이고 있다. 총질소의 경우에도 상관계수는 0.7791이고 오차는 5.5%이고, 총인의 경우 상관계수는 0.9782 이고 평균오차는 13.4%로서 모델변수의 보정이 매우 양호하였음을 보여주고 있다.

5.3. 유동장 모의결과 및 고찰

광양항 대조기시의 창조,낙조시의 조류 모의 결과를 Fig. 5~Fig. 6에 나타내었다. 광양만 일대의 조류상황을 보면 묘도 주변에서 유속이 가장 빠르며 다음은 외해 경계면인 여수 앞바다와 진주만으로 연결되는 노량리의 남해대교 부근이다. 유속이 가장 빠른 묘도의 북측에서 창조류는 0.93 m/s~1.21m/s, 낙조류는 1.16~1.48 m/s로서 낙조류가 0.23~0.27m/s가 빠르고 방향은 창조류는 NW~W방향이고 낙조류는 그 반대이다. 묘도 남측 수로 및 광양만 입구부에서는 창조 및 낙조류가 약 0.2 m/s 낮은 것으로 계산되었으며 방향은 동일한 것으로 나타났다.

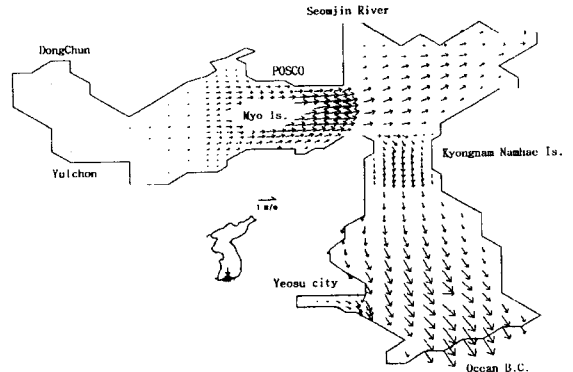


Fig. 5. Velocity field of spring tide(2hrs before high tide at Yeosu).

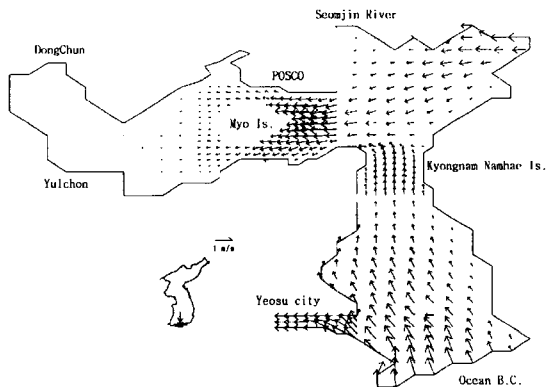


Fig. 6. Velocity field of spring tide (4hrs after high tide at Yeosu).

5.4. 오염물질 확산이송 모델링 및 고찰

전절에서 보정된 모형을 사용하여 광양만의 수질을 모의한 결과는 Fig. 7~Fig. 10과 같다. 그림에서 가로와 세로 축은 거리(Km)이다. 묘도를 기준으로 광양만 내해와 외해의 수질은 현저히 다르며, COD의 경우 1998년 현재 묘도내측 6개 지점(OW1~OW6)은 2~3mg/l로서 3등급 수질을 나타내고 있고 외측 3개 지점(OW7~OW9)은 1~2mg/l로서 2등급 수질을 나타내고 있다. 총 질소의 경우 묘도 내해에서 0.4mg/l로 높은 반면 외해

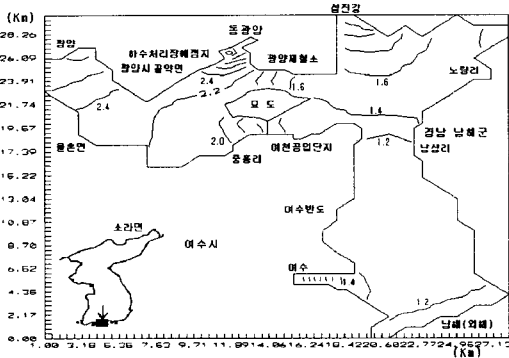


Fig. 7. COD(mg/l) simulation results of Kwangyang bay.

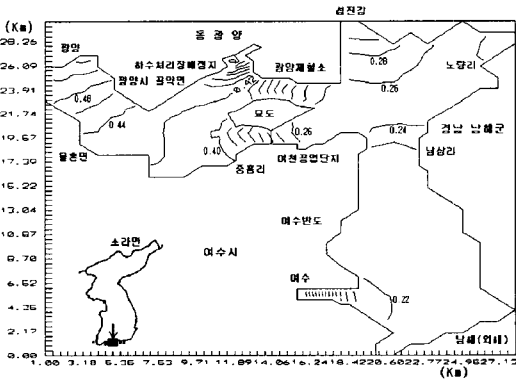


Fig. 8. T-N(mg/l) simulation results of Kwangyang bay.

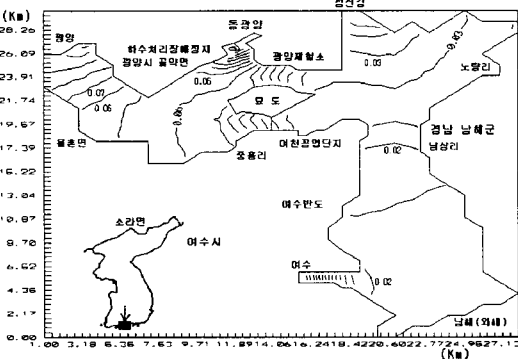


Fig. 9. T-P(mg/l) simulation results of Kwangyang bay.

는 확산의 영향으로 0.2~0.25 mg/l로 낮은 것으로 나타났고, 총인의 경우 내해는 0.05~0.11mg/l로 높은 농도를 보였으나 외해의 경우 0.01~0.02mg/l의 낮은 농도분포를 보였다. Fig. 10은 COD, TN, TP에 대하여 각각 내해측(OW1~OW6)으로부터 외해측(OW7~OW9)으로 오염물질 농도가 감소하는 경향을 잘 보여주고 있다.

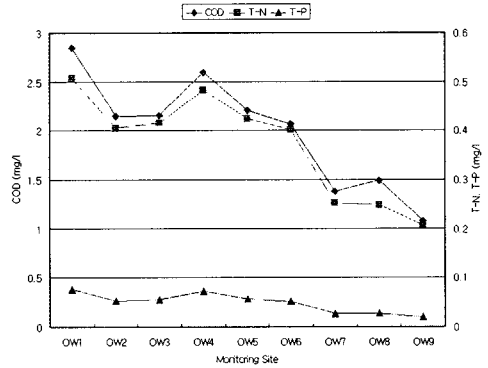


Fig. 10. Prediction of water quality in Kwangyang bay.

6. 결 론

본 연구는 하구역의 유동장 해석을 위해 개발되어 아산만, 광양만 등에 적용한 바 있는 2차원 유한요소법 수치해석 모델인 BAYFLOW모형을 기본 유체해석 모델로 하고 여기에 오염물질의 확산이송 및 물리·화학·생물학적 반응을 모의할 수 있는 모듈을 개발 보완하여 하구역의 수질모형을 개발한 것으로 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 유동장 해석 및 영양염류 해석이 가능한 수심평균 2차원 수질예측 유한요소 모델이 구성되어 조석의 영향을 받는 하구에서의 2차원 흐름 및 수질 모델이 개발되었다.
- 2) 조위에 대한 검정결과 실측치와 계산치 간에는 상관관계수 0.99의 높은 상관성을 보여 유동장 해석에 유용함을 보였다.
- 3) 수질예측 모듈에 대한 보정결과 9개 관측지점의 실측치와 계산치간의 상관관계수는 COD의 경우 0.98, TN은 0.78, TP는 0.98로 나타나 매우 높은 상관성을 보였으며, 각 수질항목에 대해 14%이내의 상대오차를 나타냈다.
- 4) 개발된 BAYQUAL 모델은 모델에서 사용되는 각종 반응계수, 모델의 적용조건 등을 적용대상 지역의 실험을 통해 보완하면 하구역에서 일어나는 각종 토목공사가 수질에 미치는 영향을 모의할 수 있는 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Donaldson, C. dup. 1973, Atmospheric Turbulence and the Dispersal of Atmospheric Pollutants, AMS Workshop on Micrometeorology. D. A. Haugen, ed., Science Press, Boston, 313-390.
- 2) Edinger, J. E., D. K. Brady, and J. C. Geyer, 1974,

- Heat Exchange and Transport in the Environment, Report 14, ERRI Publication No. 74-049-00-3, prepared for Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- 3) 구자광, 김유리, 문형부, 이우범, 1993, Box 모델을 이용한 광양만 유역의 비점오염원 COD 원단위 추정, 한국수질보전학회지, 9(2), 122-130.
 - 4) 류정로, 장선덕, 이화운, 1993, 연안해역 유류분산의 수치모델링, 한국수질보전학회지, 9(3), 167-177.
 - 5) 김광수, 박정길, 조은일, 1996, 생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, 한국수질보전학회지, 12(4), 383-400.
 - 6) 황병기, W. S. Lung, 1998, WASP/EUTRO5 모델링 시스템을 이용한 연안역 개발에 따른 향후 수질예측 및 관리사례, 한국수질보전학회지, 14(2), 177-186.
 - 7) 류병로, 안상진, 1989, 유한요소법에 의한 호소의 수질 예측 모형, 한국환경농학회지, 8(1), 37-46.
 - 8) Leonard, B. P., 1979, A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Upstream Interpolation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 19, 59-98.
 - 9) Sheng, Y. P., 1986, A Three-Dimensional Mathematical Model of Coastal, Estuarine and Lake Currents Using Boundary Fitted Grid, Report No. 585, A. R. A. P. Group of Titan Systems, New Jersey, Princeton, NJ.
 - 10) Lewellen, W. S., 1977, Use of Invariant Modeling, Handbook of Turbulence. W. Frost, ed., Plenum Publishing Corp., 1, 237-280.
 - 11) Sheng, Y. P., 1982, Hydraulic Applications of a Second-Order Closure Model of Turbulent Transport, Applying Research to Hydraulic Practice. P. Smith, ed., ASCE, 106-119.
 - 12) Sheng, Y. P., 1983, Chesapeake Bay : A Framework for Action, V. K. Tippie et al., technical coordinators, US Environmental Protection Agency, Region III, Philadelphia, PA. US Environmental Protection Agency, D. A. Flemmer et al., 1983, "Chesapeake Bay: A Profile of Environmental Change", technical coordinators, US Environmental Protection Agency, Region III, Philadelphia, PA.