

진해·마산만의 환경관리를 위한 수질모델링 Water Quality Modeling for Environmental Management in Chinhae·Masan Bay

조흥연*·채장원*

Hong Yeon Cho* and Jang Won Chae*

요 旨 : 진해·마산만의 장기 수질변동을 예측할 수 있는 평면 2차원 수질계산 모형을 구성하였다. 유역내 22개 하천의 오염부하량 및 해역내 16개 정점의 수질을 월별, 계절별로 관측(1995. 5~1996. 4)하여 모형의 보정·검증자료로 이용하였으며, 저면퇴적물로부터의 오염물질 용출률을 측정하여 저층에서의 지역적 오염편차를 반영하였다. 구성된 모형을 적용하여 하계의 농도분포를 모의한 결과는 다음과 같다. 하천을 통한 오염물질 유입지점의 오염도가 매우 높으며, 외해방향으로 급격하게 농도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히, 마산만으로 유입되는 다량의 오염물질은 해역의 정체성으로 대부분이 침전되어 저질의 오염을 가중시키고 있다. 방류수역에서는 질소 및 인이 미처리상태로 방류되기 때문에, 해역의 부영양화가 진행되고 있는 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 수질, 모형, 환경관리, 오염부하량, 부영양화, 해저 퇴적물, 오염

Abstract □ The horizontal two-dimensional model which can predict the long-term water quality(WQ) change is setup for the environmental management. For the model calibration and verification, we measured the pollutants load at 22 streams and the WQ at 16 stations monthly and/or seasonally in Chinhae·Masan Bay. The pollutants release rate from the sediment was also measured to consider the regionally different sediment pollution level. From the model application results, it is shown that the WQ concentrations in most of the regions adjacent to land and river inflow are considerably high, but rapidly decrease along the seaward direction. In Masan Bay, the particulate inflow-pollutants were substantially deposited and gradually contaminated the bottom sediment on account of the excessive pollutants load and flow stagnancy. Eutrophication in the effluent discharge region was also being slowly progressed by the inefficiently treated wastewater containing amount of N and P constituents.

Keywords : water quality, model, environmental management, pollutants load, eutrophication, bottom sediment, contamination

1. 서 론

진해·마산만은 우리나라의 대표적인 폐쇄성 해역이다. 이 해역은 어류의 산란장 및 양식어장으로 이용될 정도로 수질이 양호하였으나, 1960년대부터 마산 수출자유지역 및 창원공업단지의 형성, 급속한 도시개발에 의한 인구증가, 과일 증·양식 등으로 인하여 수

질 및 底質이 심하게 오염되어 있다. 또한, 富營養化, 夏季 貧酸素層 形成, 赤潮 등의 빈번한 발생으로 灣內 생태계에 심각한 영향을 미치고 있다. 정부는 오염방지를 위하여 특별대책이 필요한 진해·마산만 해역을 1982년 특별관리해역으로 지정하였다. 또한, 마산·창원시의 오염물질이 유입되는 마산만의 정화사업 추진 계획의 일환으로 준설(1990~1994) 및 하수처리장 건

* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

설(1993. 11)사업을 수행하였다. 그러나, 이 유역의 지속적인 인구증가 및 오염배출시설의 증가, 간척·매립사업 등 각종 개발사업의 영향으로 인하여 수질환경의 개선은 기대하기 어려운 실정이다. 따라서, 진해·마산만의 환경을 개선하기 위해서는 유역 및 해역에 대한 종합적인 환경관리계획이 수립되어야 한다.

연안개발 및 환경개선사업이 지속적으로 추진되는 해역의 수질환경을 적절하게 관리하기 위해서는 변동하는 유역의 오염부하에 대한 해역의 수질변동 예측이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 진해·마산만 해역을 대상으로 수질변동을 예측할 수 있는 모형을 구축하기 위한 과정의 일환으로, 수질변동에 영향을 미치는 중요한 인자를 포함한 모형의 구성, 모형의 보정 및 다각적인 검증(적용)을 위한 현장 모니터링 등을 포함하는 수질모델링 연구를 수행하였다.

2. 국내·외 수질모델링(多次元모델)

국외의 수질모형은 선진국의 경우, 해역의 오염이 심각한 국가에서 자체적으로 개발되어 적용되고 있는 실정이다. 미국의 대표적인 폐쇄성 내만인 Chesapeake Bay에서는 CBMP 및 CE-QUAL-ICM(Cerco and Cole, 1994)이 개발·적용되었으며, 이 지역의 수질관리를 위한 모형으로 활용되고 있다. 한편 일본에서도 각각 독자적으로 수질모형을 개발하여 적용하고 있으며, 대표적으로 EUTROP(資源環境総合技術研究所, 1991) 모형 등이 있으며, 東京灣, 伊勢灣, 大阪灣 등의 해역에 적용하였다. Baltic Sea, North Sea, Adriatic Sea 등에 대한 수질모형 적용사례도 보고·발표되고 있다. 또한 DHI(Danish Hydraulic Institute)에서 개발한 고가의 상용모형인 MIKE-21 팩키지의 하위모형인 WQ Module 및 AD, EU Module이 세계 주요 지역에서 적용되어 모형의 우수성을 입증하고 있다. 또한, Park *et al.*(1993)은 연직 2차원 수질모형을 개발하여 Rappahannock River의 빈산소상태 및 부영양화 현상분석에 적용하였다.

李 等(1996)은 WSQEM(water-sediment quality model)을 日本 瀬戸内海(Seto inland sea)에 적용하여 해역에 대한 오염부하와 수질의 응답특성, 부하삭감의 영향을 분석하였다. 또한, 堀口 等(1995)은 종전의 유체역학-생태계 결합 모델을 폐쇄성 해역인 東京灣에 적용하여 COD, TN, TP 등의 환경기준에 관련된 수질항목 모의에 우수한 재현성을 보여주었다. 일반적으로, 국외의

수질모델링은 수질변동 및 환경오염문제가 지역성을 반영하고 있고, 수질모델개발능력이 있으므로 자체적으로 모형을 개발하여 현장의 수질관리에 적용하고 있다.

국내에서는 호소 및 해역의 수질모형 적용사례를 다차원 모형의 적용으로 제한하면, 趙 等(1993a), 趙·李(1995)는 팔당호 수질모델링을 WASP4 모형(Ambrose *et al.*, 1988)의 적용 및 직교곡선격자를 사용하는 평면 2차원 수질모형(흐름모형 포함)의 개발·적용을 통하여 수행하였다. 崔 等(1994), 金(1994)은 일본에서 개발된 생태학적 수질모형인 EUTROP 모형을 진해·마산만에 적용하여 각각 DO, 식물플랑크톤의 3차원적 거동을 분석한 바 있다. 또한, 柳·林(1991)는 청초호 준설의 타당성 조사를 위한 과업의 일환으로, 청초호에 WASP4 모형을 적용하였다. 반면, 金·李(1991)는 LARM 모형(Edinger and Buchak, 1975)을 대청호에 적용하여 연직방향의 수질변동을 예측한 바 있다.

3. 수질모형의 구조 및 특성

수질모형의 구조는 지배방정식 및 모형에서 모의하는 수질항목의 상호작용으로 파악할 수 있다. 진해·마산만의 연안환경관리를 위한 모형은 계절별로 수질변동을 예측할 수 있는 중·장기 수질예측모형으로, 수질항목의 상호작용을 모의하기 위한 수질모형의 지배방정식은 이송·확산·반응(advection-diffusion-reaction; ADR)을 포함한 운송방정식(transport equation)으로 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(uhc)}{\partial x} + \frac{\partial(vhc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD \frac{\partial c}{\partial y} \right) + h \cdot SSR \quad (1)$$

여기서 h 는 수심(m); (u, v) 는 각각 (x, y) 방향의 수심 평균 유속(m/s); c 는 모의수질항목의 농도(mg/l); D 는 확산계수(m^2/s), SSR 는 모의수질항목의 반응항 및 오염물질 유입·유출항(source/sink term)으로 반응 및 지역적인 특성에 따라 각각 다르게 구성된다.

본 연구에서 개발·적용된 수질모형에서 모의하는 항목은 COD, DO, SS, 대장균군수, 영양염류(암모니아성 질소, 질산성질소, 아질산성질소, 유기질소, 인산염인, 유기인), 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 등의 항목이

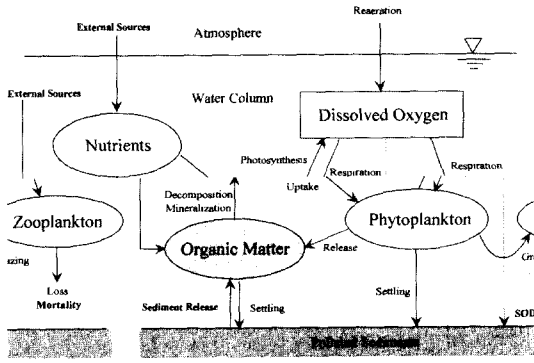


Fig. 1. Integrated reaction diagram of the water quality constituents.

다. SS, 대장균군수 등은 수질항목간 상호작용이 없는 독립적 수행항목으로 구성하였으며, COD 항목도 경우에 따라 독립적으로 모의할 수 있도록 구성하였다(趙·李, 1995). 한편, 질산성질소와 아질산성질소는 하나의 항목으로 취급하여 처리하고, 식물플랑크톤 항목은 탄소량(mgC/l)으로 표현하는 방법을 채택하였다. 상호작용을 고려하는 수질항목의 반응항 및 용출·소멸항은 식 (2)~(9)과 같다(Fig. 1참조).

$$\frac{d[A]}{dt} = \left(G_A - D_A - \frac{v_A}{H} \right) [A] - k_G [A] [Z] \quad (2)$$

$$\frac{d[COD]}{dt} = -[k_D + k_S (1 - f_P)] [COD] + \frac{L_{COD}}{h} + 2.667D_A [A] \quad (3)$$

$$\frac{d[DO]}{dt} = k_A ([DO_S] - [DO]) - k_D [COD] - \frac{SOD}{h} + 2.667(G_A [A] - k_R [A]) - 4.57k_n [NH_3] \quad (4)$$

$$\frac{d[Org.N]}{dt} = -k_{NM} [Org.N] + 0.176D_A f_{ON} [A] - \frac{v_{ON}}{h} [Org.N] + \frac{L_{ON}}{h} \quad (5)$$

$$\frac{d[NH_3]}{dt} = k_{NM} [Org.N] - k_N [NH_3] - 0.176G_A P_A [A] + 0.176D_A (1 - f_{ON}) [A] + \frac{L_{AN}}{h} \quad (6)$$

$$\frac{d[NO_3]}{dt} = k_N [NH_3] + 0.176G_A (1 - P_A) [A] - k_{DN} [NO_3] + \frac{L_{NN}}{h} \quad (7)$$

$$\frac{d[Org.P]}{dt} = -k_{PM} [Org.P] + 0.024D_A f_{OP} [A]$$

$$- \frac{v_{OP}}{h} [Org.P] + \frac{L_{OP}}{h} \quad (8)$$

$$\frac{d[PO_4]}{dt} = k_{PM} [Org.P] - 0.024G_A [A] + 0.024D_A (1 - f_{OP}) [A] + \frac{L_{PP}}{h} \quad (9)$$

여기서 [COD]는 화학적 산소요구량(COD)의 농도, [DO]는 용존산소(DO)의 농도, [DO_S]는 포화 용존산소의 농도(수온 및 염도의 함수; APHA, 1992), [A]는 식물플랑크톤(藻類)의 농도, [Org.N]은 유기 질소의 농도, [NH₃]는 암모늄이온과 암모니아성 질소의 농도, [NO₃]는 질산성 질소와 아질산성 질소의 농도, [Org.P]는 유기 인의 농도, [PO₄]는 인산염 인의 농도, [Z]는 동물플랑크톤의 개체수이다. 그외 식 (2)~(9)에서 사용한 변수에 대한 설명은 Table 1에 제시하였다.

수질항목의 反應項은 線形反應(1st order reaction)式으로 표현하였으며, 反應係數의 온도에 의한 변화는 Arrhenius 관계식(또는, van't Hoff 방정식)을 이용(온도 보정계수의 도입)하였으며, 기준온도는 20.0°C를 사용하였다.

$$k(T) = k(20^\circ C) \theta^{(T-20)} \quad (10)$$

여기서 k(T), k(20°C)는 각각 수온 T°C, 20°C에 해당하는 반응상수이며, θ는 k(T)에 대한 온도보정계수로 1.0~1.1 범위의 값이며, 모형에서는 1.024~1.072 범위의 값을 사용하여 온도의 영향을 고려하였다.

4. 수질 및 오염부하량의 현장 모니터링

연안해역의 수질모델링에서 현장 모니터링의 역할은 대상해역의 수질분포 특성의 파악과 모형 입력자료(오염부하량)의 제공 및 모형의 보정 및 검증자료(해역에서의 모의수질항목의 지점별 농도) 제공에 있다. 기존의 진해·마산만 현장관측자료는 해역의 수질농도에 제한되고, 오염부하량에 대한 자료가 미흡하여 수질모델링 작업에 많은 불확실성이 포함되었다. 다양한 인자에 의하여 영향을 받고 있는 해역의 수질변동 機構(mechanism)를 파악하기 위해서는 방대한 체계적인 관측이 필요하다. 그러나, 인력, 비용 및 시간의 제약과 모형의 정량적인 분석을 위한 기본적인 관측범위를 감안하면, 해역의 수질변동에 중요한 영향을 미치는 유역의 오염부하량 및 해역내부의 오염물질 용출량,

Table 1. Input parameter description and value in the water quality model.

Symbol	Description	Value	Unit	Remark
G_A	Algal growth rate: $G_M \cdot f(I_o, I_s, \gamma) \cdot f(k_{mP}, k_{mN})$			function
G_M	Max. algal growth rate	2.0	(1/day)	Calibration
I_o	Light intensity	320	(langley/day)	Measured
I_s	Saturated light intensity	300	(langley/day)	Textbook
γ	Light extinction coeff.	0.4	(1/m)	Riley Formula
k_{mP}	Half-saturation coeff. for P	0.003	(mg/l)	Textbook
k_{mN}	Half-saturation coeff. for N	0.015	(mg/l)	Textbook
D_A	Algal death rate: $k_R + m$			Calibration
k_R	Respiration rate	0.2	(1/day)	Calibration
m	Algal mortality rate	0.1	(1/day)	Textbook
k_G	Algal grazing/feeding rate	0.3	(1/day)	Measured
k_D	Decomposition/deoxygenation rate	0.1	(1/day)	Calibration
k_S	Settling rate of particulate COD	0.0	(1/day)	Not considered
k_A	Reaeration rate	1.0	(1/day)	$f(u, v, W)$
k_N	Nitrification rate	0.15	(1/day)	Calibration
k_{DN}	Denitrification rate	0.0	(1/day)	Calibration
k_{NM}	Mineralization rate of Organic N	0.01	(1/day)	Calibration
k_{PM}	Mineralization rate of Organic P	0.01	(1/day)	Calibration
v_A	Settling velocity of algae	0.5	(m/day)	Calibration
v_{ON}	Settling velocity of organic N	0.1	(m/day)	Textbook
v_{OP}	Settling velocity of organic P	0.1	(m/day)	Textbook
f_P	Fraction of the particulate COD	0.5	(-)	Measured
f_{ON}	Inorganic N recycling rate	0.75	(-)	Textbook
f_{OP}	Inorganic P recycling rate	0.75	(-)	Textbook
P_A	Ammonia preferences factor	-	(-)	$f([NH_3], [NO_3])$
SOD	Sediment oxygen demand	0.640~0.958	(g/m ² · day)	Measured
L_{COD}	COD release rate	0.217~0.292	(g/m ² · day)	Measured
L_{OP}	Organic P release rate	-	(g/m ² · day)	-
L_{PP}	Phosphate P release rate	0.008~0.017	(g/m ² · day)	Measured
L_{ON}	Organic N release rate	-	(g/m ² · day)	-
L_{AN}	Ammonia N release rate	0.062~0.132	(g/m ² · day)	Measured
L_{NN}	Nitrate & nitrite N release rate	-	(g/m ² · day)	-

해역의 수질관측이 적절할 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 진해·마산만 해역의 15개 지점에서 10여개 수질항목(수온, 염도, pH, 투명도, COD, DO, 부유물질[SS], 암모니아성질소, 질산성질소, 아질산성질소, 인산염인, 식물플랑크톤 등)을 1995년 5월부터 1996년 4월까지 월별(A1~A9) 또는 계절별(B1~B6)로 관측하였으며, 만으로 유입되는 22개 주요 하천(마산만 유역:창원천, 남천, 내동천, 삼호천, 양덕천, 교방천, 회원천, 장군천 등; 진해만 유역:구이동천, 여좌천, 진동천, 진전천, 구산천, 마암천, 광도천, 고현천 등)의 오염부하량도 측정하였다. 또한, 방류관을 통하여 해양으로 방류되는 하수의 오염부하량을 측정하였으며, 주요 지점(봉암천 하류, 돌섬, 해양방류구, 진동만)에 대해

서는 저면퇴적물에 의한 산소소비량(Sediment Oxygen Demand), 저면퇴적물로부터의 오염물질(COD, 암모니아성질소, 인산염인 등) 용출량을 측정하였다(한국해양연구소, 1996; Fig. 2).

5. 모형의 보정·검증 및 적용

5.1 모형 입력자료의 산정 및 보정·검증

수질예측모형의 입력자료는 기상자료, 해수유동자료, 오염부하량 자료 및 반응계수 등으로 구분된다. 기상자료(기온, 풍속 및 풍향, 광도, 일조시간 등)는 1985년 개국·운영중인 마산 기상대 자료(기상청, 1995)를 이용하였으며, 유역에서의 오염부하량 및 퇴적

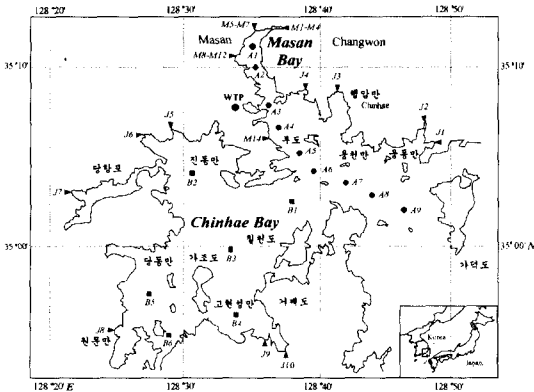


Fig. 2. Monitoring stations of the pollutant loads and water quality.

물로부터의 오염부하량은 관측값을 이용하였다(趙 · 蔡, 1998). 또한, 수리학적 입력자료(hydraulic input data)인 해수유동자료는 한국해양연구소에서 개발된 흐름모형(한국해양연구소, 1995)의 계산결과를 이용하였다. 수질항목의 주요 반응계수는 모형의 보정 및 검증과정에서 추정하였으며, 모형의 구조적 매개변수는 문헌 및 보고서(Bowie et al., 1985; Thomann and Mueller, 1987; Brown and Barnwell, 1987)에 제시된 값을 사용하였다 (Table 1).

수질관리 모형의 수행 · 적용을 위하여 진해 · 마산만을 계산격자망으로 구성하였다(Fig. 3). 격자간격은 (x, y) 방향 모두 375 m이며, 격자수는(x, y) 방향 각각 240개, 218개로 구성하였다. 모형의 격자체계는 교호 격자계(staggered grid system)이며, 지배방정식은

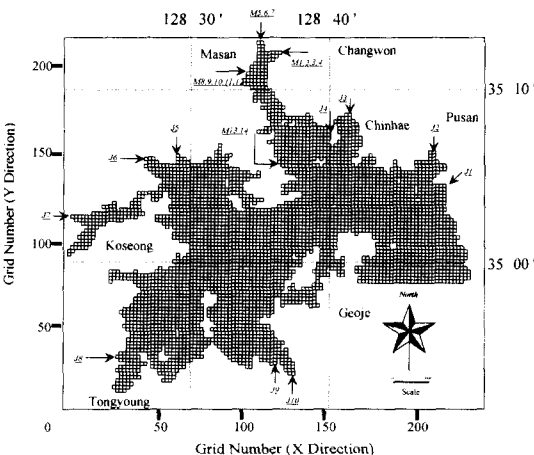


Fig. 3. Computation grid networks in Chinhae · Masan Bay.

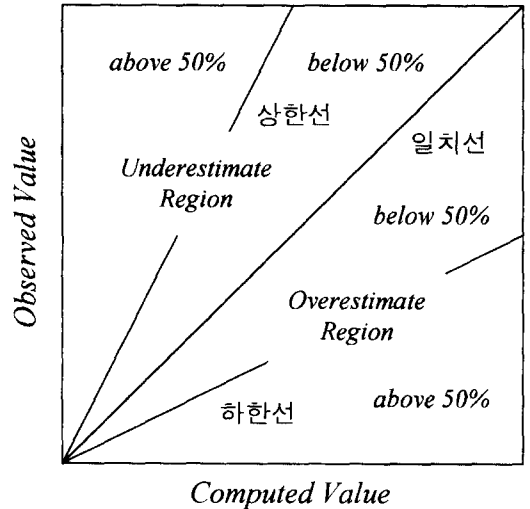


Fig. 4. Description diagram of the model calibration and verification.

ADI 기법을 이용하여 차분하였다(趙, 1994). 수립된 수질관리모형은 진해 · 마산만에서 측정한 1995년 5~6월 자료를 이용하여 보정하였으며, 1995년 7~9월 자료를 이용하여 검증하였다. 모형의 보정은 趙等(1993b)이 WASP4 모형의 보정에서 사용한 체계적인 시행착오법으로 수행하였다. 이 방법은 민감도분석을 통하여 보정 매개변수를 3~4개의 그룹으로 분류하여 독립적으로 보정을 수행하기 때문에, 수질모형과 같이 다수의 반응 매개변수를 이용한 보정에 효과적이다. 모형의 검증은 모형의 보정에서 추정된 반응 매개변수의 값을 고정하고, 환경인자(기상 및 오염부하량)를 검증시기에 해당하는 값으로 대체하여 수행하였다. 진해만의 수질관측농도와 모형의 계산농도를 대비하여 도시하였으며, 그림의 이해를 위하여 상한선, 일치선, 하한선을 제시하였다(Fig. 4). 그림이 표시된 영역의 중앙에 있는 선에 표시문자(○, St. No.)가 위치하면 계산치와 관측치가 일치하는 경우이다. 또한, 상한선과 일치선 사이에 표시문자가 위치한 경우는 계산치가 관측치보다 50% 작은 과소추정(underestimate) 영역에 해당하며, 하한선과 일치선 사이에 표시문자가 일치한 경우는 계산치가 관측치보다 50% 큰 과대추정(overestimate) 영역에 해당한다. 수질이 악화되어 있으며, 진해만 유역의 자료가 포함되어 있는 1995년 7월의 경우에 대하여 모형의 검증결과를 제시하였다(Fig. 5).

COD, 암모니아성 질소, 질산성질소, 인산염인 항목

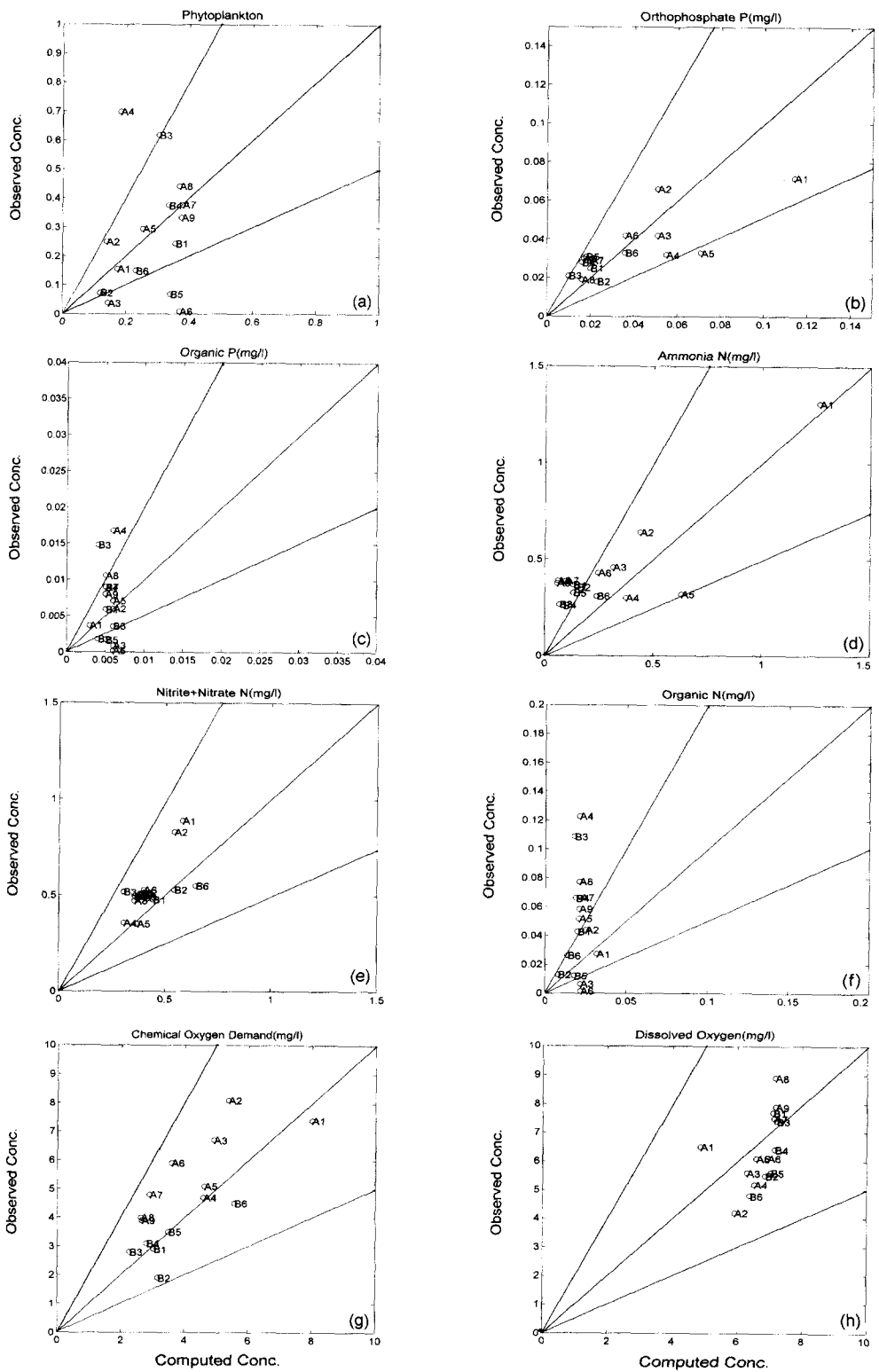


Fig. 5. Plots of the observed and computed WQ concentration comparison.

은 계산치와 관측치의 전체적인 경향이 일치하고 있으나, 유기인 및 유기질소 항목은 상이한 계산결과를 보이고 있다.

식물플랑크톤의 경우, A4, B3 지점은 과소추정하는 반면, A6, B5 지점은 과대추정하는 결과를 보이고 있다. 이러한 경향은 식물플랑크톤의 농도로 환산되는 유기질소 및 유기인 항목에서도 보이고 있다. 식물플랑크톤의 농도변화 범위는 매우 크기 때문에 보다 다양한 범위의 자료를 이용하여 다각적인 모형의 보정이 필요하다고 사료된다. 또한, 동물플랑크톤의 섭식률에 의한 영향을 정량적으로 검토할 필요가 있다고 사료된다.

인산염인, 질산성 질소 및 COD 항목은 농도가 높은 A1 지점(마산·창원유역의 오염물질 유입지점)을 포함한 전 영역에서 평균 $\pm 50\%$ 이내의 일치를 보이고 있다. 반면, 암모니아성 질소는 전반적으로 과소추정하는 경향을 보이고 있다. 이는 저층퇴적물로부터의 오염물질 용출률 측정값이 진동만에 제한되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 진해만 영역(B1~B6 지점)의 주요 지점에 대한 오염물질 용출률에 대한 조사가 보완되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 경계영역에서의 장기적인 오염물질 수지에 대한 검토도 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 진동만 지점에서 측정된 용출률은 진해만의 소규모 내만 및 양식장 영역을 대표하는 것으로 가정하였으며, 흐름이 강하고 수심이 깊은 진해만 중앙부 해역은 오염물질의 용출에 의한 영향이 없는 것으로 가정하였다.

한편, 유기질소 및 유기인의 농도모의는 관측자료와 큰 차이를 보이고 있다. 이는 생물과정이 간단하게 표현되었기 때문으로 사료되며, 보다 정확성있는 유기물의 모의를 위해서는 플랑크톤의 섭취, 세포외분비, 배설, 사망 등에 대한 내용을 추가하여 모델을 구성하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 유기물의 농도분포는 연변화가 심하기 때문에 보다 다양한 조건, 다양한 농도 하에서 모형의 보정·검증을 수행하는 것이 타당하다. 반면, 식물플랑크톤에 의한 유기질소 및 유기인 성분의 추정방법 및 환산계수의 지역적인 변동성, 즉 C/N/P 비율 및 식물플랑크톤의 세포수-엽록소 농도-유기탄소량 등의 환산방법·계수 등에 대한 검토도 수행되어야 하며, 생물과정의 정식화에 대한 연구가 수행되어야 한다.

반면, DO 농도는 표층의 과포화상태 및 저층의 빈산소층 형성 등 하계에 연직변화가 크기 때문에 평면

2차원 수질모형에 의한 모의에는 한계가 있다고 판단된다. 제시된 DO 관측자료도 연직방향 3개층의 자료를 산술평균한 자료이며, 하계 DO 농도의 평균적인 공간변화는 연직방향의 변화보다 작은 경향을 보이고 있다(한국해양연구소, 1996). 수심평균된 DO 농도는 전체적으로 양호한 수질(5.0 mg/l 이상)을 보이고 있으며, 貧酸素水塊의 형성 및 표층의 DO 과포화 상태는 3차원 수질모형의 구성 및 적용을 통하여 모의하여야 할 것으로 사료된다.

5.2 모형의 적용

개발된 수질모형을 진해만 해역에 적용하여, 1995년 하계의 전반적인 농도분포 양상을 주요 항목별로 도시하였다(Fig. 6).

주요 하천이 유입되는 지역에 인접한 해역은 오염물질의 농도가 높은 수치를 보이고 있으며, 마산만을 제외하고는 외해방향으로 급격하게 농도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 마산만은 흐름의 정체성으로 인하여 유입된 대부분의 입자성 오염물질이 灣內에 퇴적되어 底質을 서서히 오염시키고 있다. 또한, 수중 다중방류관(multipoint-diffuser)을 통하여 옥계해역으로 방류되는 하수는 질소 및 인 성분이 미처리 상태이기 때문에, 이 지역의 富營養化를 진행시키고 있는 것으로 파악되었다.

진해만 小灣의 내부 정체지역은 오염물질의 용출, 낮은 해수교환율, 환경용량을 초과하는 과도한 오염물질 유입으로 인하여 심각한 오염상태를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 지역은 유역의 오염부하에 의한 영향보다는 自生汚染(배설물 및 사료의 퇴적에 의한 저질과 수질의 악화 및 양식장의 생산성 저하; 한국수산회 어촌문제연구소, 1995)에 의한 영향이 지배적인 것으로 파악되었다. 특히, 당항포, 원문만, 고현성만, 웅천만 등의 해역은 오염부하량의 변동에 민감한 지역으로 파악되었다.

또한, 마산만에 비하여 진해만 해역은 수질이 양호한 상태를 유지하고 있으나, 해양수질기준에 의하면 TN, TP 농도가 III 등급을 상회하고 있다. 따라서, 진해·마산만 전역에 대한 영양염류 관리대책이 필요하며, 마산만은 마산·창원 유역의 오염부하 감소가 선행되어야 하며, 진해만의 양식장이 위치하고 있는 해역에서는 저질에서의 용출에 의한 영향을 정량화하고 오염물질 억제대책을 수립하여야 할 것으로 판단된다.

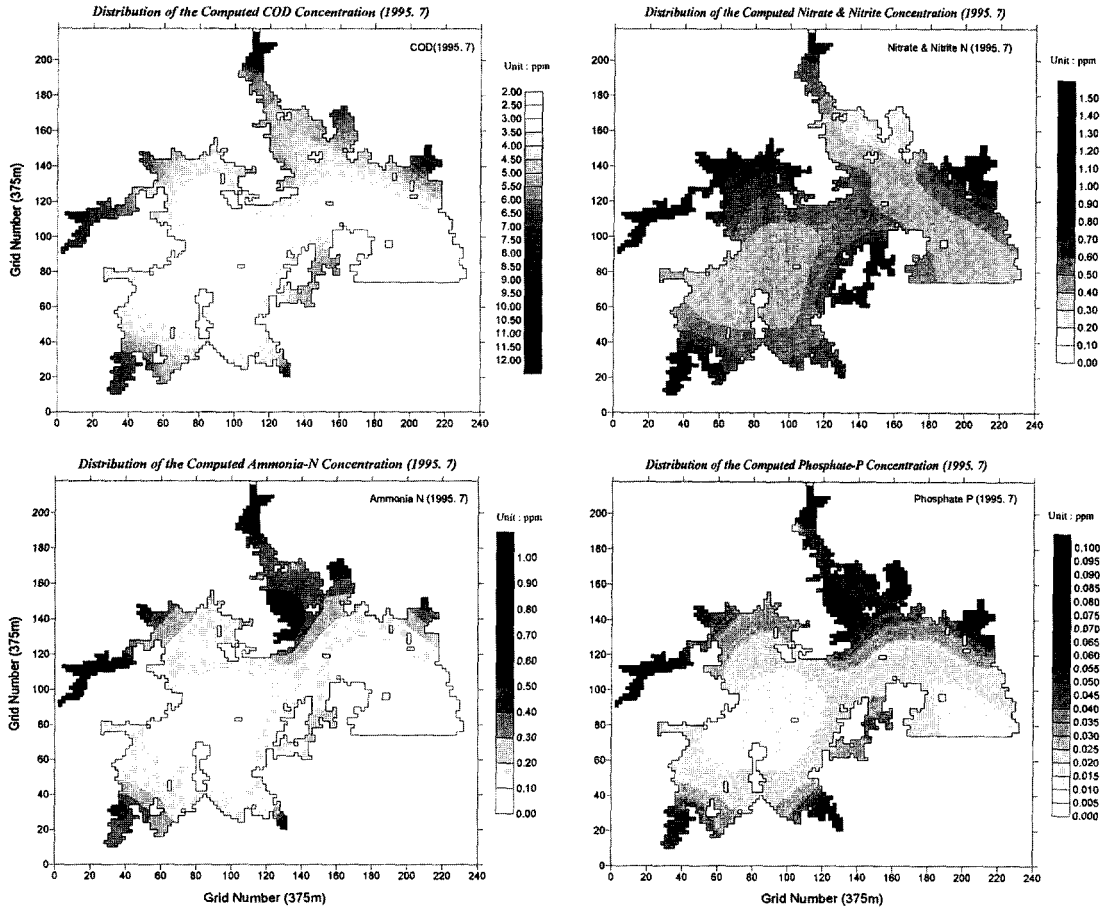


Fig. 6. Contour plot of the concentration distribution (1995. 7).

6. 결론 및 토의

진해·마산만의 환경관리를 위하여 개발된 수질모형은 COD, TN, TP 항목의 공간적인 농도분포를 성공적으로 모의하고 있으나, 유기물질 및 DO 농도분포모의에는 한계가 있다. DO 항목은 하계 연직변화가 평면변화보다 크기 때문에 3차원 수질모형을 적용하여 모의하는 것이 타당하며, 유기질소 및 유기인 항목은 생물화학적 과정을 정식한 모델을 적용하여야 할 것으로 사료된다. 따라서, 부영양화 모형과 생물학적 모형(플랑크톤의 상호작용 또는 포식자·피식자 모형)을 연계한 모형의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

우리나라 해역의 수질환경관리는 COD 및 TN, TP 항목을 중심으로 수행되고 있다. 따라서, 본 연구에서 개발된 모형은 향후 예상되는 오염부하량의 변화(환경기초시설에 의한 오염부하량 삭감 및 연안개발에 의한

오염부하량 증가)에 따른 해역의 수질변동을 예측할 수 있으며, 다양한 환경관리 시나리오에 대한 수질변동을 계절적으로 예측할 수 있기 때문에 진해·마산만의 수질관리를 위한 적절한 관리대안 및 최적의 수질관리 기법 도출에 활용할 수 있다.

사 사

본 논문은 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(1995~1996) 및 진해·마산만 수질환경 관리모형 개발사업(1997~1999)의 일환으로 수행된 결과로, 현장의 오염부하량 및 수질관측을 수행한 경남대학교 환경문제연구소 이찬원·권영택 교수에게 감사드립니다.

참고문헌

기상청, 1995. 기상연보.

- 김정욱, 이종호, 1991. 댐호의 2차원 수질예측기법에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **13**(4): 267-275.
- 김종구, 1994. 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 공학박사 학위논문.
- 유재소, 임재명, 1991. 靑草湖 준설 타당성 조사보고서, 환경처.
- 조홍연, 이길성, 1995. 직교곡선격자를 이용한 수질모형의 개발과 적용, *대한토목학회논문집*, **15**(5): 1311-1322.
- 조홍연, 전경수, 이길성, 1993a. WASP4 모형에 의한 수질 모델링, *한국해양·해양공학회지*, **5**(3): 221-231.
- 조홍연, 전경수, 이길성, 1993b. WASP4 모형의 매개변수 추정, -괄당호를 중심으로-, *대한토목학회논문집*, **13**(4): 177-188.
- 조홍연, 채장원, 1998. 진해·마산만 오염부하량의 특성 분석, *한국해양·해양공학회지*, **10**(3): 132-140.
- 최우정, 박청길, 이석모, 1994. 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 연구, *한국수산학회지*, **27**(4): 413-433.
- 한국수산회 어촌문제연구소, 1995. 바다를 살리자.
- 한국해양연구소, 1995. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(I), 제 1차년도 보고서, BSPN 00260-807-6, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1996. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(II), 제 2·3차년도 보고서, BSPN 00322-968-7, 과학기술처.
- Ambrose, R.B., Wool, T.A., Connolly, J.P. and Schanz, R. W., 1988. WASP4, *A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual and Programmer's Guide*, EPA, EPA/600/3-87/039.
- APHA, AWWA, 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (18th Ed.), Part 4000, American Public Health Association, American Water Works Association.
- Brown, L.C. and Barnwell, T.O., 1987. *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*, EPA.
- Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P. W.H. and Gherini, S.A., 1985. *Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling* (2nd Ed.), Tetra Tech, EPA/600/3-85/007.
- Cerco, C.F. and Cole, T., 1993. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay, *J. Env. Engrg.*, **119**(6), pp. 1006-1025.
- Edinger, J.E. and Buchak, E.M., 1975. *A Hydrodynamic, Two-Dimensional Reservoir Model*, J.E. Edinger Associates.
- Park, K., Kuo, A.Y. and Neilson, B.J., 1993. A modeling study of hypoxia and eutrophication in the tidal Rappahannock river, Virginia, *Special Report in Applied Science and Ocean Modeling*, No. 322, Virginia Institute of Marine Science.
- Thomann, R.V. and Mueller, J.A., 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row.
- 堀口文男, 中田喜三郎, 1995. 東京灣の水質のモデル解析, *Adv. Mar. Sci. Tech. Soc.*, **1**(1), pp. 71-92.
- 李寅鐵, 浮田正夫, 關根雅彦, 中西弘, 1996. 水·底質モデルによる瀬戸内海の水質管理に関する研究, *日本土木學會論文集*, No. 545/II-36, pp. 101-112.
- 資源環境總合技術研究所, 1991. 富栄養化豫測モデル (EUTROP)の理論.

Received December 19, 1998

Accepted February 12, 1999