

진해·마산만의 해수유동과 생태계를 고려한 수질예측 수치모델에 관한 연구

최재원¹⁾ · 윤종성²⁾ · 한동진³⁾

1. 서론

반 폐쇄성 내만의 수질개선과 차세대로의 환경계승은, 앞으로 해결하지 않으면 안 되는 커다란 과제이다. 우리나라의 대표적인 반 폐쇄성 내만인 진해·마산만은 1970년대 이후 산업발전에 의해 많은 경제성장을 거듭해 왔고, 이에 맞추어 연안 및 하천의 오염도 같이 증가해 왔다. 더욱이, 해안선의 굴곡이 심하고, 수심이 비교적 얕으며 바람과 해류의 영향이 적어, 외 해수와 외 해수교환율이 낮기 때문에, 유입된 오염물질은 축적되게 된다. 내만은 육지로부터 유입된 질소, 인등의 영양분의 축적에 의해 영양염화의 정도가 서서히 증가한다. 게다가, 적조의 발생에 의해 어업피해와 경관저해, 저층에서의 빈 산소수괴 형성에 의한 생물의 생식영역 협소화를 초래하게 된다.

현재까지 마산·진해만 내의 오염현상과 해수유동, 부영양화, 빈산소수괴의 형성 등에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 지금까지 마산·진해만의 유동 및 수질오락 기구에 대한 연구결과에도 불구하고, 마산·진해만의 유동구조 및 수질구조에 대해서 공학적으로 체계화된 해명이 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 흐름과 밀도의 연직구조가 표현 가능한 3차원 유동모델에 의해 동역학적으로 뒷받침된 생태계모델을 구축한다. 그리고, 마산·진해만 내의 수질 및 유동분포의 특성에 대하여 수질의 수송, 확산과정, 생물·화학적 물질변화 과정과 관련시켜 검토하고, 만 내(灣內)의 수질오락기구에 대하여 공학적인 검토를 하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 수질예측 수치모델의 개발

2.1 밀도류를 고려한 3차원 해수유동모델

기본방정식은 다음 가정을 적용하였다.

- ① 수직방향의 압력분포는 정수압으로 표현하고 물은 비압축성이다.
- ② Boussinesq의 근사를 채용하고 밀도변화의 영향은 압력항에서만 고려한다.
- ③ 상태방정식의 밀도 변화는 수온 및 염분에 의해서 선형화로 표현한다.
- ④ 확산방정식에 의해서 수송되어진 물질은 수온편차와 염분편차가 있다.

다음 식을 사용하였다.

-연속방정식과 운동방정식

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

1) (주) 대영엔지니어링 기술부 사원, 공학석사

2) 인제대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

3) 일본 Hydro-Soft Technology Institute Co. Ltd. Chief Researcher, 공학박사

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = fV - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -fU - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial V}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4)$$

-온도편차와 염분편차의 확산방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \Delta T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_a C_p} \frac{dq}{dz} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta S}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta S}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta S}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta S}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial \Delta S}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

-농도방정식

$$\rho = f(T, S) \quad (7)$$

2.2 생태계를 고려한 3차원 물질순환모델

1) 대상으로 하는 물질(수질지표항목)

수질예측모델에서 대상으로 하는 수질지표항목은 대표적인 유기오탁지표인 화학적 산소요구량 (COD), 영양염화의 원인지표인 총 질소(T-N), 총 인(T-P)와, 해역생물의 생식지표인 DO를 대상으로 한다.

각 수질 형태중, 생물체유기물은 식물플랑크톤(chl-a)이 대표하는 것으로 한다. 이들 수질 지표치로부터 각 생물체 COD, 생물체 질소, 생물체 인으로의 변환은 각 변환계수를 곱해서 산정 하는 것으로 하며, 유기물의 [detritus태 + 용존태]는 [비생물체]라 칭한다.

수질예측모델의 각 상태변수는 다음 7항목으로, 식물플랑크톤(Chl-a), 비생물체 COD(NL-COD), 비생물체 유기태 질소(NL-O-N), 비생물체 유기태 인(NL-O-P), 무기태 질소(I-N), 무기태 인(I-P), 용존산소(DO)로 구성된다.

2) 3차원 물질순환모델의 기초방정식

각 상태변수 물질지수의 기초방정식은 일반적으로 다음처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} = -U \frac{\partial C_i}{\partial x} - V \frac{\partial C_i}{\partial y} - W \frac{\partial C_i}{\partial z} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \sum S_i(C_i) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, C_i : i 에서 물질의 농도
 U, V, W : x, y, z 방향의 수평이동속도
 K_H, K_V : 수평, 연직방향의 와동확산계수
 $S_i(C_j)$: j 항 물질의 i 항 물질로의 변환속도 (생성항)

본 논문에 있어서 수질예측모델의 이류속도 (U, V, W), 확산계수 (K_H, K_V) 등 생성항에 관계되는 수온은, 유동모델의 계산결과를 이용하였다. 그 때문에 위 식을 유동모델의 이류량과의 관계로서 본다.

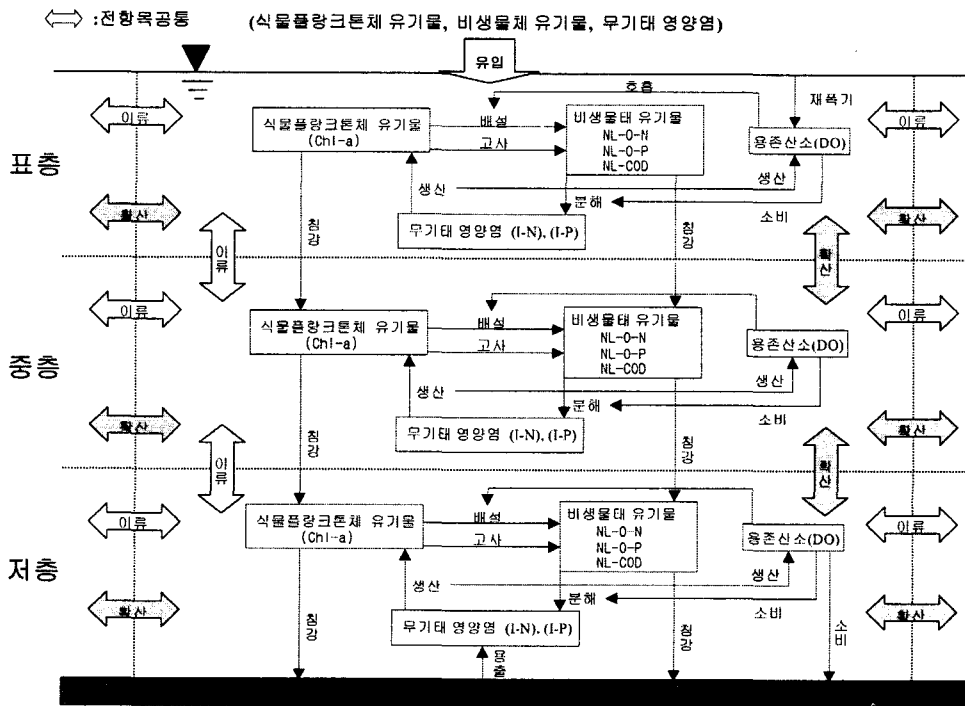


그림 1 해역내 물질순환 모식도

2.3 모델의 타당성 검증

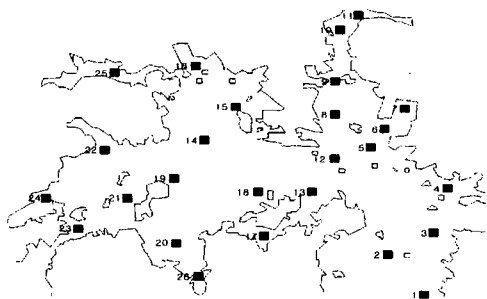


그림 2 해역의 수질 관측지점

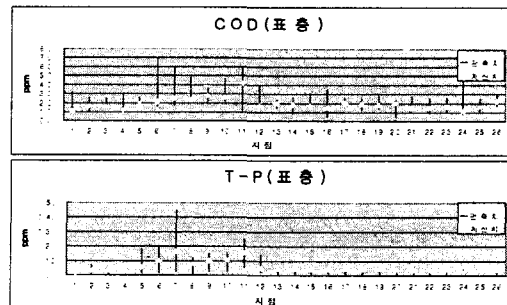


그림 3 관측치와 계산치 비교

각 수질 항목에서 DO를 제외하고는 전체적으로 계산치와 관측치의 경향이 거의 일치하고 있다. 한편, DO에 관해서는 진해·마산만에 속해있는 6개의 소규모 만 (원문만, 진동만, 고현만, 마산만 등)내에서의 계산치가 관측치보다 낮게 계산되고 있다. 그러나, 이는 기존의 많은 연구사례와 관측조사에서 빈산소수괴가 빈번히 형성되고 있는 것으로부터 판단할 때, 수질관측 데이터의 수집과정에서의 오류에 기인하는 것으로 생각되며 본 연구에서의 계산결과가 기존의 연구사례를 잘 재현하는 것으로 사료된다.

3. 수치계산 결과

1) 해수유동모델에서 계산된 진해·마산만의 해수유동 특성을 살펴보면, 창조시 가덕수로를 통하여 유입된 해수는 수로를 따라서 북서로 진행하여 대부분이 진해·마산만 서부해역으로 이동하고, 마산만으로는 극히 일부만이 유입되고 있다. 이는 지형적인 특성상 조류의 움직임이 주수로를 통하여 움직이고 있다는 것을 알 수 있었다. 유속의 크기를 보면 창조시 가덕수로를 통하여 50~70cm/sec 정도의 강한 흐름이 나타났다. 낙조시의 흐름경향은 창조시와 반대의 경향을 보이며 나타나고, 유속은 낙조시가 다소 크게 나타났다. 이는 기존의 연구와 비교해 볼 때 유사한 유동패턴을 나타내었다.

2) 전체 영양염의 농도분포가 T-P :0.01~0.18mg/l, T-N :0.2~2.0mg/l로 나타났다. 마산만 해역에서는 적조발생의 주요인자가 되는 영양염의 농도범위가 T-P 0.1~0.18mg/l, T-N : 1.0~2.0mg/l으로 높은 농도분포를 보이고 있어 부영양화 상태에 도달해 있음을 나타내었다.

3) COD는 전체해역에서 대략 2mg/l 정도의 농도분포를 나타내고 있었고, 마산만 해역에서는 5mg/l의 높은 농도 분포를 나타내고 있으며, 또한 CHL-A의 분포에 지배를 받는 것을 알 수 있었다.

4) DO는 표층에서는 대략 4~7mg/l의 분포를 나타내고 있었고, 저층에서는 표층에 비해 1~2mg/l정도 낮은 분포를 보이고 있었다. 그리고 마산만과 진해·마산만 서부의 내만 해역에서 3mg/l 이하의 빈산소수괴가 형성되고 있었다.

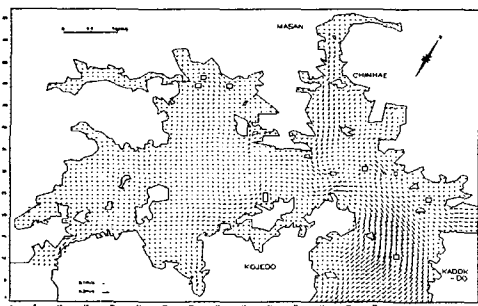


그림 4 진해·마산만 잔차류 벡터도

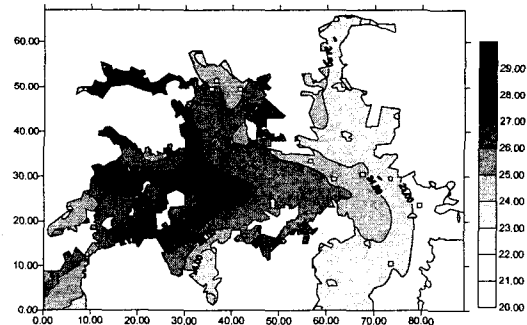


그림 5 진해·마산만 수온분포도

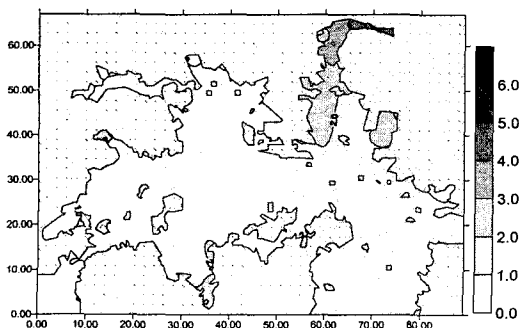


그림 6 진해·마산만 수질농도분포 (COD)

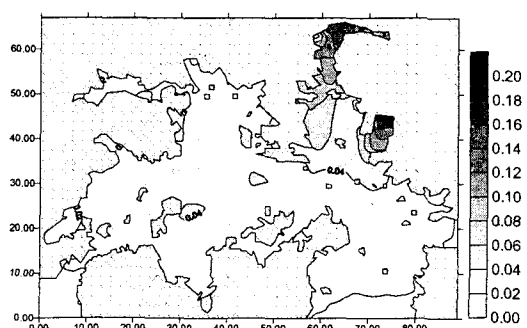


그림 7 진해·마산만 수질농도분포 (T-P)

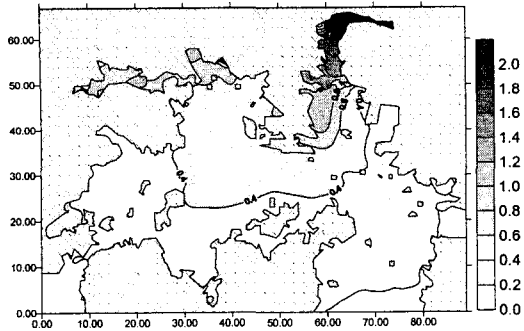


그림 8 진해·마산만 수질농도분포 (T-N)

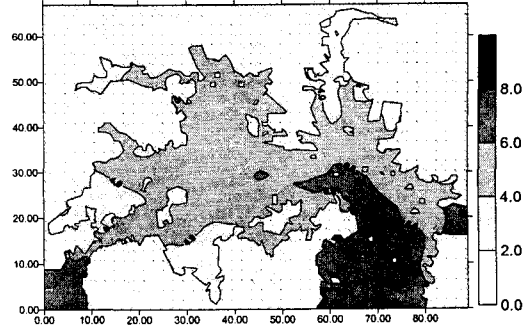


그림 9 진해·마산만 수질농도분포 (DO)

4. 해역환경 변화에 따른 수질영향

4.1 하천부하가 수질에 미치는 영향

하천의 부하량 제어가 어느 정도 수질개선에 영향을 주는지를 검토하기 위해 전체 하천부하의 약 60%를 차지하는 마산만의 부하를 감소시켰을 경우에 대해서 비교를 실시하였다.

대표적인 유기오염 지표인 COD와 영양염류의 원인 지표인 T-N, T-P에 대해서 각각 50%와 80%를 감소시켰을 때, 그림 4~5에서 볼 수 있듯이 영양염류의 경우 하천부하 감소량에 비례하여 농도가 줄어들었으나, COD의 경우 25~30%정도 감소하는데 그쳤다. 이는 앞서서도 서술하였듯이 CHL-A의 영향이 있었기 때문으로 사료된다. 또한 80%정도의 부하를 감소시켰을 경우 약 70~80%정도의 영양염류 농도의 감소를 가져와 마산만 내에서 1급수 수질을 유지하였다. 이로서 하천 부하량의 영향이 해역에 미치는 영향이 상당히 큰 것을 알 수 있다.

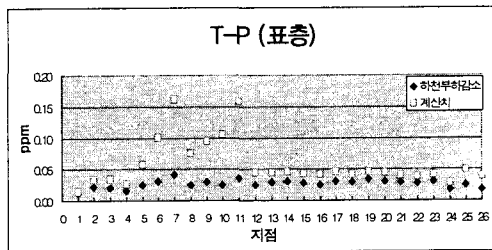


그림 10 하천부하 감소에 따른 영향 (80%)

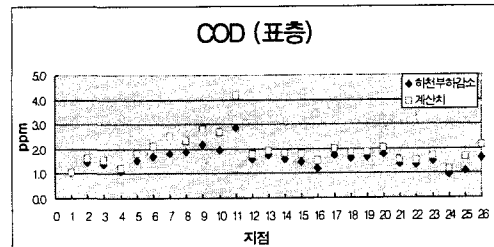


그림 11 하천부하 감소에 따른 영향 (80%)

4.2 용출부하가 수질에 미치는 영향

진해·마산만 내의 저니준설(또는 복사)의 영향이 수질개선에 어느 정도 영향을 주는지 검토하기 위해 마산만의 용출속도를 감소시켰을 경우에 대해 비교를 실시하였다.

마산만 해역의 경우 하천부하의 영향이 우세하기 때문에 용출부하 감소의 효과가 크게 나타나지는 않았다. 그러나 마산만을 제외한 나머지 해역에 있어서는 15~40%에 이르는 수질개선 효과를 보이고 있다.

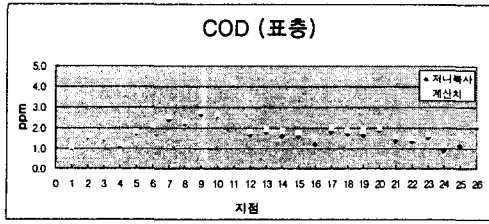


그림 12 용출부하 감소에 따른 영향

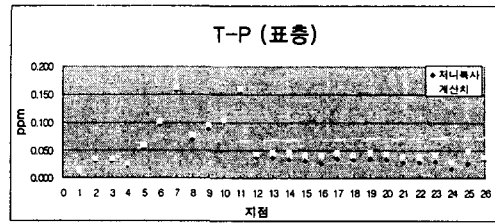


그림 13 용출부하 감소에 따른 영향

5. 결론

해수유동결과에서 진해만의 해수유동특성을 보면 전체적으로 가덕수로를 통한 해수교환이 진해·마산만의 해수교환에 가장 큰 영향을 주고 있으며, 가덕수로를 통하여 유입된 해수는 대부분 진해서부해역으로 유입하고 일부는 마산만으로 유입하였다. 한편, 연직 유속분포를 보면, 저층에서는 만 내로 유입하는 흐름이 형성되고 표층에서는 만 외로 유출하는 흐름의 경향을 보였다. 또한, 잔차류 유속벡터도를 보면 칠전도 좌측과 잠도 상부를 기준으로 하여 좌우로 2개의 반 시계방향의 지형성 수평와가 형성되고 있는 것을 알 수 있다. 이로 인해 만 내에서 해수교환이 분리되어 만 내의 해수교환을 저하시키고, 결국 이러한 물리적인 요인이 만 내의 수질구조를 악화시키는 하나의 중요한 요인으로 작용하였다.

생태계 물질순환모델의 결과, 마산만과 고현만 해역에 오염부하량의 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 마산만 내에 위치한 다수의 하천을 통한 유입부하의 영향이 주된 원인으로 작용하고 있으며, 고현만의 경우 열수지 및 조석에 의한 외력의 영향이 거의 미치지 않아 해수의 정체가 심한 것이 그 원인으로 보여진다.

진해·마산만 해역의 농도분포 및 하천부하와 용출부하 감소에 대해서 비교한 결과를 볼 때, 진해·마산만의 해수질 오염에 가장 큰 영향을 미치는 오염부하는 하천부하로서, 마산만을 비롯하여 당항만, 고현만, 진동만, 원문만 등의 해역의 해수질을 유지하기 위해서는 하천 부하량의 제어가 필요할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- 1) 山根伸之 (1998). “大阪灣の流動構造と生態系を考慮した水質豫測モデルに関する研究.” 大阪大學 博士論文
- 2) 조흥연·채장원 (1999). “진해·마산만 일반수질항목 및 영양염류의 장기추이분석” Ocean Reserch Vol.21 No.1 : 13-25
- 3) 김종구 (1998). “진해만 해역의 하계 부영양화 모델링” 부산수산대학교 박사논문.
- 4) Nakatsuji, K. and Fujiwara, T. (1997) “Recent advances in simulating estuarine circulation in semi-enclose coastal seas” J. Hydraulic Eng. , ASCE.
- 5) 中辻啓二 (1994). “大阪灣における殘差流系と物質輸送.” 水工学シリーズ 94-A-9, 土木學會 水理委員會, pp. A9. pp. 1-28.
- 6) 한국해양연구소(1997~1999) “진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(Ⅰ),(Ⅱ),(Ⅲ)”
- 7) 한국해양연구소(1981). “진해만의 적조 및 오염 모니터링 시스템 개발을 위한 연구”, BSPE:00031-56-7
- 8) 한국해양연구소(1983). “진해만의 적조 및 오염 모니터링 시스템 개발을 위한 연구”, BSPE:00048-80-7
- 9) 국립수산진흥원(1996). “한국연안 어장환경 오염조사 결과보고서 (1989~1994)”
- 10) 김상훈(2001). “성층해역에서의 유동구조에 관한 3차원 수치모형실험” 부산대학교 청정공학협동과정 석사학위논문