

생태계모델을 이용한 마산·진해만에서의 빈산소수괴의 형성 및 발달에 관한 연구

A Study on Formation and Development for Oxygen Deficient Water Mass, Using Ecological Model in Masan · Jinhae Bay

윤종성¹, 김연중², 김준현³

Jong Sung Yoon¹, Yeon Joong Kim² and Joon Hun Kim³

1. 서 론

한국의 대표적인 반폐쇄성 내만인 마산·진해만은 해안선의 굴곡이 심하고 수심이 비교적 얕으며, 바람과 해류의 영향이 적어 외해수와 해수교환율이 낮기 때문에 육역으로부터 유입된 오염물질의 영향으로 빈번한 적조의 발생으로 인한 어업피해와, 저층에서의 빈산소수괴 형성에 의한 생물의 생식영역 협소화 등을 초래하고 있다. 이러한 이유 등으로 정부에서는 1982년 마산만을 오염우심해역으로 규정하여 특별관리 해역으로 지정하였으며, 2005년부터 마산만에서 오염물질의 배출을 농도가 아닌 총량기준으로 규제하여, 해역의 자정능력 범위 내에서 통제하는 오염총량관리를 시행하고 있는 실정이다.

특히 연안역의 저층의 빈산소화는 적조와 청조 등의 수질오염을 발생시키는 근본적인 원인이 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 폐쇄성해역에서의 수질오염기구에 대한 정성적, 정량적 평가를 위해서는 유동구조의 해석을 포함한 빈산소화의 진행과정에 대한 장기적인 관측과 아울러 이를 모의하기 위한 수단의 확립이 필요할 것으로 생각 되어진다.

국립수산과학원(2004)에서 발표된 마산·진해만 빈산소수괴 발생현황의 자료를 이용하여 DO와 회귀분석을 실시한 결과, 수온성층의 형성에 강하게 의존하는 것으로 나타났으며, 조홍연 등(2002)의 연구에서도 마산·진해만의 관측한 결과를 이용하여 수온관

리매개변수로 DO를 선정하는 경우, 성층화 재현이 우선되어야 한다는 연구 결과를 제시하고 있으며, 또한, 이러한 수질오염의 여러 가지 원인과 메카니즘을 밝히기 위하여 조상우(2007)의 연구결과에서 수질모델의 재현에 앞서 먼저 선행되어야 할 성층화 재현이 이루어져야 한다는 것을 제시 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 폐쇄성 해역에서의 유동구조의 해명과 빈산소수괴의 거동의 재현을 위해 먼저 선행되어야 할 지형성 저혈효과와 하천수 유출을 고려한 성층유동 모델을 구축하여 수온 성층구조를 재현함으로써 저니 내의 질소·인의 용출기구를 고려해, 해수와 저니를 일체화 한 수질·저질모델을 구축하여 공학적인 메카니즘의 검토를 목적으로 한다.

2. 성층 유동모델

2.1 기초방정식

본 연구에 사용된 성층유동모델은 연속방정식, 3방향 운동방정식, 수온·염분의 확산방정식, 해표면에서의 열수지식 및 밀도의 상태방정식으로 구성되어 있으며 기초방정식은 다음의 가정을 통해 밀도류를 고려한다.

(1) 흐름의 연직방향가속도는 중력가속도에 비교하여 아주 작다. 따라서 연직방향의 압력분포는 정수압에 의해 근사되어 표현된다.

(2) 물은 비압축성이고, 상태방정식의 밀도 변

1 인제대학교 토목공학과 교수

2 발표자: 인제대학교 토목공학과 석사과정

3 (주)서영엔지니어링 향만부

화는 수온 및 염분에 의해서 선형화로 표현한다.

(3) Boussinesq의 근사를 채용한다. 그래서 밀도변화의 영향은 압력항에 한해서 고려한다.

(4) 확산방정식에 의해서 수송되어진 물질은 부력편차 $\Delta\rho$ 가 있다.

수온 확산방정식

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

염분 확산방정식

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta S}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta S}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_V \frac{\partial \Delta S}{\partial z}) \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, ρ_a 는 기준밀도, $\Delta\rho$ 는 밀도편차, f 는 Coriolis factor, ΔT 는 수온편차, ΔS 는 염분편차, A_H, A_V 는 수평·연직방향의 와동점성계수, K_H, K_V 는 수평·연직방향의 와확산계수, C_p 는 수온 20°C에서 시간 증력비열(=4.18×10⁻⁶), q 는 단파방사량의 열원함수이다.

또한 밀도의 상태방정식은 온도와 염분의 함수로 표현되기에 아래와 같이 표현된다.

$$\rho = f(T, S) \quad (3)$$

2.2 수평·연직 와동점성계수 및 와확산계수의 산정

연안역의 유동현상을 재현하기 위해서는 난류효과를 정량적으로 평가하는 것이 중요하므로, 본 모델에서는 유동 난류장에 있어서 난류의 표현으로서 수평방향으로 식(4), Smagorinsky형의 와동점성계수를 사용했으며, 연직방향의 난류계수에는 "0(Zero)" 방정식 모델을 채용하여 방정식을 완결(Closure)을 실시하며, 밀도차를 고려하기 위해 성층화 함수를 도입하여 하천으로부터의 담수유입 및 해면에서 열수지에 대한 연직방향의 혼합의 강약을 고려하였다. 성층화된 경계층에서 난류 혼합계수에는 많은 경험식이 제안되고 있지만, 일반적으로 리차드슨수 Ri로서 식(5)와 같이 정의되고 있다.

$$A_H = C^2 \Delta x \Delta y \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

여기서, C 는 SGS 모델의 비례계수(=0.12)이

다. 일반적으로 $A_H = K_H$ 로 된다.

$$Ri = \frac{g \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)}{\rho_a \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad (5)$$

2.3 열수지 산정을 고려한 모델

기상 DATA를 이용하여 열수지 산정식은 호수와 해양을 대상으로 많은 식이 제청되고 있지만, 본 모델에서는 Murakami 등(1987)에 대한 일련의 산정식을 채용한다.

$$Q_{flux} = Q_S + Q_R + Q_E + Q_C \quad (5)$$

여기서, Q_{flux} 는 수면에서 거둬들일 수 있는 전 열수송량, Q_S 는 유효일사량, Q_R 는 장파방사에 대한 유효복사열수송량, Q_E 는 증발로 인한 잠열수송량, Q_C 는 기온과 수온의 차이에 의한 현열수송량이며, 모식도를 Fig 1.에 나타내었다.

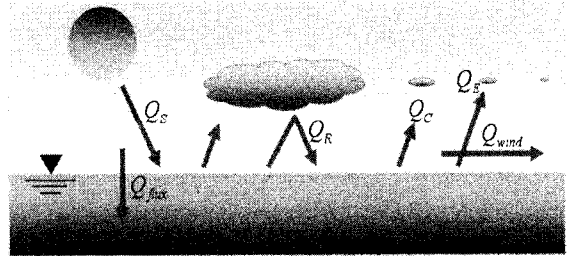


Fig. 1. Heat budget on the surface of

3. 생태계 모델

수질모델은 식물플랑크톤의 1차 생산까지를 고려한 저차 수질모델을 이용하였으며, 3차원 밀도류 모델에서 산정된 유동장에 의한 질소, 인, COD, DO의 생물·화학적 변화 과정을 모델화하였다. 계산 대상으로 하는 물질형태는 생물체 유기물을 대표하는 식물플랑크톤량으로서 Chl-a, 영양염으로서 무기태질소(I-N), 무기태인(I-P), 비생물체의 유기물로서의 질소(NL-ON), 유기태인(NL-OP), COD(NL-COD), 그리고 용존산소(DO)를 산정하였다. Fig 3.은 수질모델의 개요를 나타낸다. 저질모델은 해수에서 저니로의 입자상 유기물(POM)의 침강에서 시작하며, 유기태인과 유기태질소가 박테리아에 의해 분해되고, 해수와 저니의 농도차에 따른 직상수로의 용출, 무기태인과 무기태질소의 흡탈착, 혐기상태의 질소의 탈

질작용을 등을 모델화 하였다. 또한, 저질모델에서 계산대상으로 하는 물질형태로서는 인과 질소의 저니에서 직상수로의 용출속도와 저니 내의 T-N, T-P, I-N, I-P를 설정하였다.

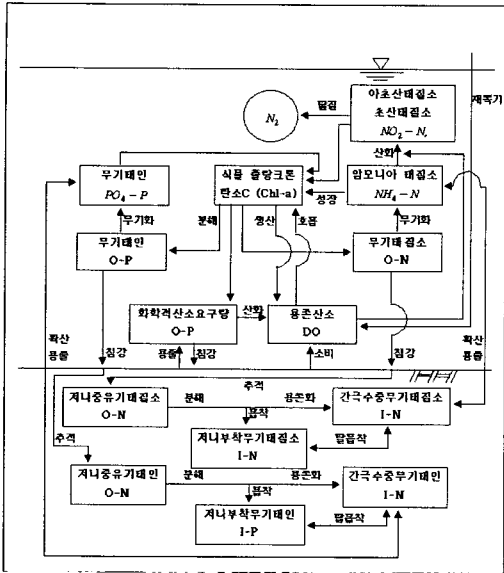


Fig. 2. The schematic diagram of Water quality model

4. 성층유동모델의 적용

해역에서의 성층화 재현을 위해서는 먼저 유동구조를 규명해야 하므로, 성층유동모델을 이용하여 마산·진해만의 수온 성층구조를 파악하였다. 만내의 수온을 재현할 수 있는 30일을 총 계산시간으로 계산 영역내의 개경계 조건은 국립해양조사원에서 제공하는 마산·진해만의 주요 4분조 (M2+S2+O1+K1)를 사용하였으며, 수온과 염분은 민감도 분석을 실시하였으며, 대상해역으로 유입하는 하천에 대해서는 총 40여개의 하천 중 영향이 상당하다고 판단되는 15개의 하천만을 선정하여 유입하천의 수온 및 염분을 고려하였고, 하천수는 정상상태로 유입시켰다. 또한 해수표면에 있어 열수지 산정에 필요한 기상 DATA는 주변지역의 2002~2007년 사이에 관측된 하계 DATA를 사용하였다. 성층유동모델의 계산 조건을 Table 1.에 나타냈으며 영역내의 개경계조건 및 조위관측위치를 Fig 2.에 수온 관측지점을 Fig.4.에 각각 나타냈으며, 수온관측지점의 산정은 국립수산진흥원에서 마산·진해만에 관하여 2002~2007년까지의 관측되어진 비교적 일관성 있는 자료를 기초로 하여 수질계산의 DATA 및 적용성 검토에 사

용하였다.

Table 1. Computational conditions applied to the Jinhae-Masan bay

	Condition of Computation
Horizontal	$\Delta x = \Delta y = 400m$
Vertical	$\Delta z = 2m \times 10 \text{ layer}, 4m \times 5 \text{ layer}$
Total number of grid	$104 \times 80 \times 15 = 124,800$
Initial Salinity	33 psu
Initial Temperature	18 °C
Time Interval	20 sec
Total Time of Computation	30 days

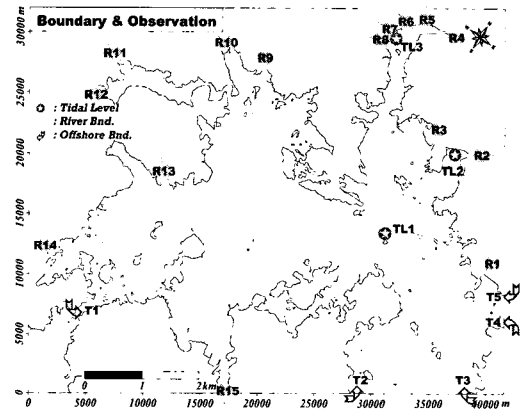


Fig. 3. Boundary conditions and Observed point of tidal level

4.1 성층유동모델 검증

본 모델의 마산·진해만에 대한 수온성층구조 재현의 결과를 논의하기 위해 앞서 적용 해역에서 모델의 타당성을 검증하기 위해 조위에 대한 계산치와 관측치의 비교를 실시하였고(Fig 3.), 대상영역내의 유입 및 유출에 대한 연속방정식 만족 여부를 유량수지를 대상으로 Mass check를 실시하였다. 대소조기와 위상에 따른 창·낙조를 잘 재현하였으며, Fig 4.에서 표층의 잔차류 유속분포에 대한 결과를 나타내었다. 계산 결과를 보면, 낙조가 우세하게 발생하며 마산·진해만 내를 비롯하여, 진해-가덕 수로를 통하여 유입된 흐름도 거제-가덕수로를 통하여 유출되고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 실시한 30일간의 Mass check의 결과와 동떨어진 결과로 볼 수 있다.

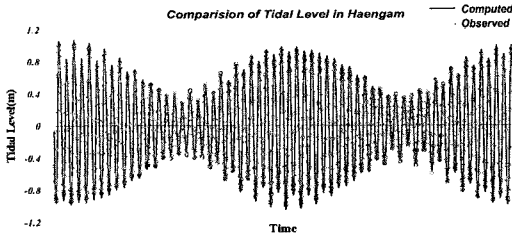


Fig. 4. Comparison of tidal level in Haengam(TL2)

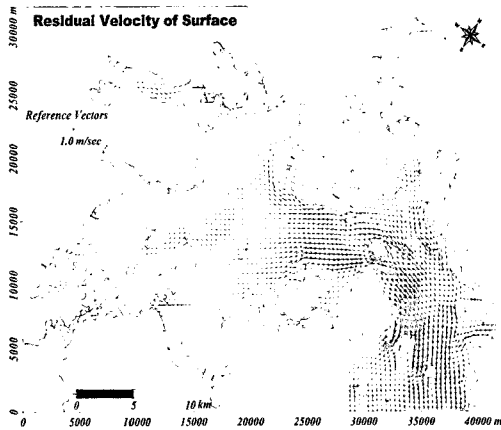


Fig. 5. Velocity distribution of residual velocity of surface

수온 비교결과는 여름의 관측치와 비교를 실시하였으며 관측치를 표층과 저층으로 나누어 Max, Min, Ave를 나타내었으며, Fig 5.에 관측치와 계산치의 Ave를 비교한 결과를 나타내었다. 수온분포는 표층에서 23~27℃의 분포를 나타내고 있으며, 만의 입구부인 거제-가덕-진해 해역에서는 수온이 23.5℃정도를 나타내고 있다. 만 내측으로 갈수록 수온이 상승하고 있으며 마산만에서는 24~26℃, 진동만 원문만에서는 25~27℃, 고현만에서는 25~26℃의 분포를 나타내고 있다. 전체 대상역에서 수심이 깊은 곳에서는 수온 분포의 차이가 약 1℃의 정도의 차이를 보이고 있지만, 마산만 내에서의 분포는 표,저층간에 약 3~4℃ 차이를 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

4.2 생태계모델의 검증 및 결과

수질구조의 특성을 이해하기 위해 수질 지표항목인 COD, DO, 영양염인 T-N, T-P 등의 분포를 각각 표,저층으로 계산치와 관측치와의 비교를 실시하였으며(Fig.6), 마산진해만 해역의 성층구

조와 관련한 빈산소수괴의 거동을 논의하기 위해서는 성층이 발행하는 하계를 대상으로 실시하였다

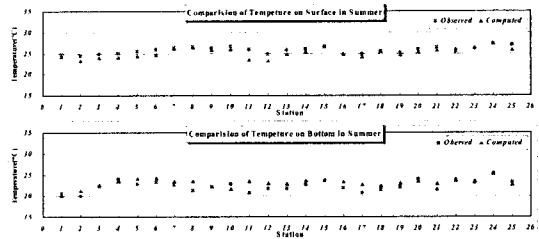


Fig. 6. Comparison of computed and observed value

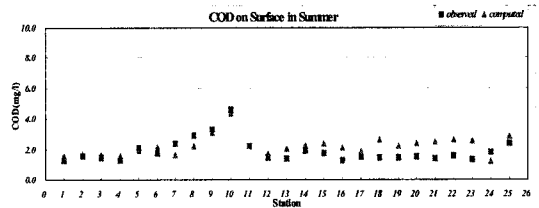


Fig. 7. Comparison of computed and observed value (COD - surface)

5. 결 론

본 연구에서는 수질모델의 재현에 앞서 선행되어야 할 성층화 재현을 지형성 저열효과 및 하천수유출을 고려한 성층유동모델로 전개하여 성층구조를 재현을 실현한 모델을 구축하였으며, 위의 유동장을 이용하여 마산진해만의 빈산소수괴의 형성에 관한 모의를 실현하였다. 앞으로 유입부하량에 따른 빈산소수괴의 형성과정에 따른 모의를 실시하여 좀 더 효과적인 해역관리 모델을 구축함과 동시에 유입오염부하량 산정에 관한 연구 또한 필요 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 조흥연, 채장원, 전시영 (2002). “진해-마산만의 성층화 및 DO 농도변화”, 한국해양안해양공학회, 제 14 권 제 4호, pp 295-307.
- 조상우 (2007). “해역에서의 해수유동과 생태계를 고려한 수질. 저질 예측수치모델에 관한 연구” 인제대학교 대학원 토목공학과 석사학위 논문.
- Smgorinsky, J (1963). General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment, monthly weather review, Vol 91, No3, pp 99-164.