

## 생태계 모델을 이용한 하계 일본 하마나호의 수질 시뮬레이션 Simulation of Summer Water Quality in Hamana Lake, Japan Using Ecosystem Model

육진희<sup>1</sup>, 青木伸<sup>2</sup>,  
Jin-Hee Yuk<sup>1</sup> and Shin-ichi Aoki<sup>2</sup>

### 1. 서 론

연안 해역 및 내만은 육지로부터의 많은 영양염류를 수용하여 다양한 생명체로 구성된 생태계를 유지하면서, 인간에게는 항만, 임해공단, 어항 및 관광지 등이 되고 있다. 그러나 육상으로부터 영양물질이 과도하게 공급되면 식물플랑크톤의 이상증식에 의한 적조발생 등 해양조류의 이상증식과 부영양화를 초래하고, 궁극적으로 저층에 빈산소 수괴를 형성하는 요인이 된다. 최근, 이러한 연안 해역의 환경문제는 중요 관심사가 되고 있고, 연안 환경의 보전은 연안 및 해양생태계의 지속가능한 개발과 더불어 중요한 해양학적 과제이며, 이를 위해서는 해양생태계에 대한 과학적인 탐구가 필수적이고, 또한 현상을 적절하게 시뮬레이션할 수 있는 모형이 필요하다. 이러한 해양생태계모델은 우리나라뿐만 아니라 전세계적으로 해양의 수질 예측과 평가에 유용한 도구가 되고 있다.

본 연구에서는 해양생태계모델을 이용하여, 일본의 대표적인 폐쇄성 내만 중 하나인 하마나호(浜名湖)의 하계의 수질을 재현하고, 하마나호의 부속 호수 중 하나인 이노하나호(猪鼻湖)의 수질개선을 위한 대책방안을 강구하고자 한다.

### 2. 재료와 방법

#### 2.1 대상해역의 개요

일본의 본주의 중앙 부근에 위치한 총 면적 74 km<sup>2</sup>, 평균수심 4.3m인 하마나호는 일반적인 육지

의 호수가 아니라, 태평양 해역으로부터 유입한 해수와 담수가 만나는 기수역이다(Fig. 1). 今切口로 불리는 호수의 inlet의 폭은 1951년 태풍 13호의 피해를 계기로 1953년에 200m로 콘크리트 고정되었고, 그 후 외해측에는 700m의 도류제가 20년에 걸쳐서 건설되었다. 좁은 湖口로서 태평양과 접해 있고, 호수의 남측해역은 평균수심이 2.5m로 얕다. 호수 중앙에서 수심이 급하게 깊어지고, 호수의 북측해역은 수심이 7.2m(湖心の 수심은 12m)로 깊고, 약 75m의 狭수로 이노하나호와 연결되어 있고, 하마나호의 최대하천인 Miyakoda강(都田川)이 있는 호소에호(細江湖)가 위치하고 있다. 주변지역의 산업화, 개발 등으로 인해 해역의 부영양화가 진행되고 있고, 적조현상 및 저층에 빈산소 수괴가 발생하고 있다고 보고되고 있다(Taguchi and Nakata, 1998). 특히 수심이 깊고, 외해와 멀리 떨어져 있는 북측해역에서는 매년 여름마다 저층에 빈산소수괴가 발생하고 있고, 이노하나호는 여름을 제외한 전 계절에서 저층에 빈산소수괴 또는 무산소수괴가 발생하고 있어, 심각한 환경문제가 되고 있다(日本静岡県, 2006).

#### 2.2 생태계 모델

생태계 모델은 해수유동 모델과 생태계 모델로 구성된다. 본 연구에서 사용된 해수유동 모델은 田中 등(1985)에 개발되어 적용된 다층 모델이며 생태계 모델은 Kremer and Nixon(1978)에 의해 개발, 적용된 모델의 지배방정식을 바탕으로 grid 모델

1 豊橋技術科學大學 미래기술유동연구센터 연구원

2 豊橋技術科學大學 건설공학계 교수

형태로 구성되어 있다(홍 등, 2007). 이 모델은 일본 Shinji and Nakaumi의 수질 평가분석에 사용되었고, 국내에서도 광양만, 진해만 등의 내만의 수질시물레이션에 사용되어 적용성이 검토된 바 있다(Nakata et al., 2000; Lee et al., 2005; 홍 등, 2007).

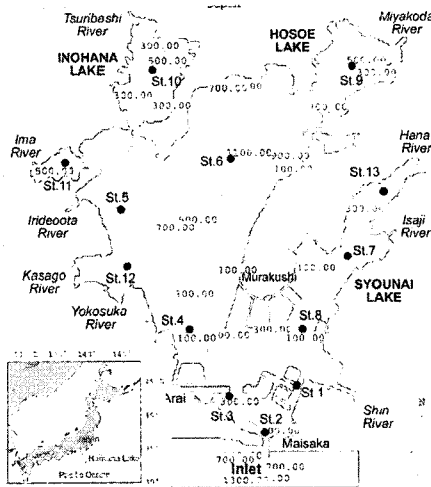


Fig. 1. Study area and the observation stations marked with black dots. The thick horizontal line in the lowest part denotes the open boundary.

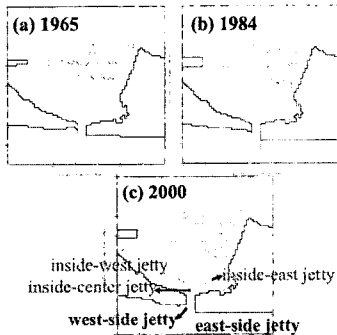


Fig. 2. Topographic changes near the inlet

우선 생태계모형을 이용하여 하나마호의 도류제에 의한 하나마호의 수질변화를 평가하고, 빈산소수괴의 발생 등 환경문제가 심각한 이노하나호에 대해서 부하삭감 시나리오별 시물레이션을 계획하여 수행하였다. Fig. 2에 도류제의 경년변화가 제시되고 있는데, 1965~1984년 사이에 외측 도류제가 건설되었고, 1984~2000년 사이에 내측 도류제가 연장된 것을 알 수 있다. 도류제 영향 평가 시물레이션은, 1965년도, 1984년도, 2000년도 상황의 3개의 시물레이션을 수행하였는데, 지형과 수심 이외의 모든 계산입력자료는 2000년도 시물레이

션의 계산조건을 동일하게 사용하여 도류제가 호내 수질환경에 미친 영향을 평가하였다.

계산 격자 간격은 x, y 방향으로 각각 50m로 하였고, 전체격자는 291×313×8층으로 구성하였다 (Table 1). 계산시간, 시간간격 등의 입력 자료는 Table 1에 제시되고 있다. 경계에서의 조위는 M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub> 분조의 조위데이터를 이용하였다. 바람, 일사량, 운량 등의 기상학적 인자는 최다빈도수와 여름 평균값을 이용하였다(Yuk, 2008). 해수유동 모델에서 정상상태에 도달한 이후 한 조석주기의 유동, 수온 등이 생태계 모델의 자료로 입력되었으며, 격자는 해수유동 모델과 동일하고, 계산시간 간격은 20초로 하였다. 생물학적 parameter는 Taguchi and Nakata(1998)과 관측 및 문헌 자료를 기초로 입력하였다(Yuk, 2008).

Table 1. Input data for the hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 50m$
Level	1:0-1m, 2:1-2m, 3:2-3m, 4:3-4m, 5:4-5m, 6:5-6.5m, 7:6.5-8m, 8:8-18m
Time step / Calculation time	2 s / 200 tidal cycles
Open boundary condition	29.74 cm
(Tidal amplitude)	
Coriolis coefficient ( $f=2\omega \sin\phi$ )	$8.60E-5 \text{ sec}^{-1}$
Surface friction coefficient	0.0013
Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0026
Horizontal viscosity and diffusion coefficient	$4.27E3 \text{ cm}^2/\text{sec}$
Vertical viscosity and diffusion coefficient	Calculated by the turbulence model

### 3. 모델 결과

#### 3.1 모델의 검증

Fig. 3은 해수유동 모델의 재현 결과를 검증하기 위하여 Fig. 1의 13개 수질 모니터링 지점에서의 관측자료와 계산결과를 비교한 것이다. 호내의 유동장 또한 관측치와 거의 일치하였고, 수온과 염분도 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 수질 인자인 용존산소(DO) 농도의 관측치와 계산치를 비교하여 생태계모형을 검증하였다. 평균치의 비교에서는 관측치와 계산치의 불일치가 몇몇 지점에서 존재하였으나, 계산 결과는 하계 관측치의 범위 안에 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 모델은 하계 하나마호의 수환경, 특히 저층의 환경을 잘 재현하고 있는 것으로

판단할 수 있다.

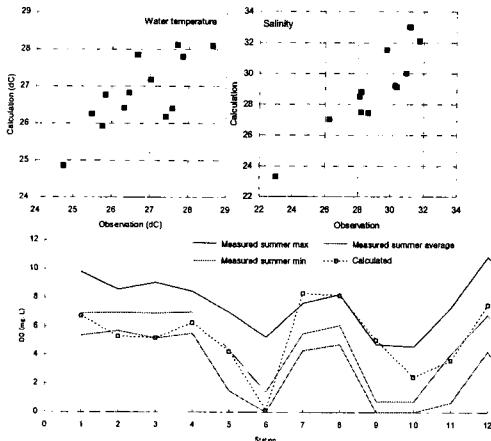


Fig. 3. Comparison of observation and calculation

### 3.2 도류제에 의한 호내 환경 변화 평가

하마나호는, 1955년~1973년에 외측에 동서 방향의 도류제가 건설되었고, 1984년~1992년에 내측에 동서 방향으로 도류제가 연장되었다. 1965년도, 1984년도, 2000년도의 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 내외측 도류제에 의한 호내 환경변화에의 영향을 파악할 수 있다. 1965년과 1984년도의 시뮬레이션 비교에서, 호내 저층, 특히 수심이 깊은 북측 해역 저층에서 유속, 염분이 증가하였다. 즉, 외해와의 해수교환이 좋아진 것을 의미한다. 따라서 Fig. 4에서 보듯이, 저층의 DO 농도는 증가했고, 저층의 수질은 개선된 것을 알 수 있다. 그러나 1984년과 2000년도의 시뮬레이션 비교에서는, 두 시뮬레이션 결과, 유속, 염분, DO 농도 등의 차이는 거의 없었다. 따라서 외해측에 건설된 외측 도류제에 의해 호내 수질은 개선되었으나, 내측 도류제는 수로로서의 그 역할을 수행하고 있지 못함을 알 수 있었다. 또한 1955년~1973년에 건설된 외측 도류제에 의해 외해와의 해수교환율이 증가해서 호내 수질은 좋아졌고, 이 개선된 호내 환경은 외측 도류제 건설 후에 지속되고 있다고 판단된다.

### 3.3 부하삭감에 따른 수질개선 시뮬레이션

하마나호는 COD, DO, TN, TP 등의 기준치를 지정해서 해역의 수질을 관리하고 있다. 북측해역에 위치한 이노하나호에 대해서는, COD 3 mg/L 이하, 하마나호 湖心에 대해서는 2 mg/L의 환경 기준치가 정해져 있지만, 달성되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 폐쇄성이 매우 강한 이노하나호의 빈산소수괴 형성을 억제하고 COD 3 mg/L의 환경기준치를 달성하기 위하여 하천으로부터의 부하 삭감의 case 시

뮬레이션을 통해 수질개선 방법을 모색하였다. 2000년도 시뮬레이션을 standard 시뮬레이션으로 하고, 하천으로부터의 유입되는 부하량을 조절, 입력하여 이노하나호의 DO와 COD 농도의 변화를 산정하였다.

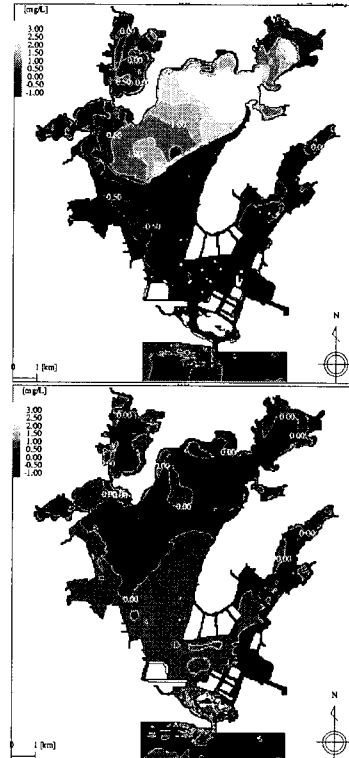


Fig. 4. DO change during summertime between 1965 and 1984 (upper), and between 1984 and 2000 (lower). The positive indicates the increase.

Yuk(2008)은 이노하나호로의 인의 공급은, 하천유입량보다 하마나호로부터의 인의 유입량이 더 큰 부분을 차지하고 있다고 보고하였고, 수질시뮬레이션에서 저층 유속 벡터 분포를 보면, 유속은 작지만, 저층류가 호소에호에서 나와서 이노하나호를 향하고 있는 것이 확인되어, 호소에호에 위치한 최대하천인 Miyakoda강으로부터의 인(DIP)의 유입을 50% 삭감한 경우에 대해서 수질변화를 산정해 보았다. 또한 이노하나호에 직접적으로 영향을 주는 Tsuribashi River의 DIP의 유입을 50% 삭감한 경우에 대해서도 수질변화를 산정하였다. standard 시뮬레이션에서, 이노하나호의 저층 DO의 현존량은 14005.3kgO<sub>2</sub>, 표층의 COD농도는 3.19 mg/L 이었고, 위의 두 부하삭감 시뮬레이션에 대해서는 변화가 없었다. 하마나호를 둘러싼 모든 하천(Fig. 1에서 9개의 하천)으로부터의 유기물 및 영양염 부하량(DIP+DIN+POC+DOC)을 30,

50, 70, 90 %를 삭감했을 경우와 DIP 또는 DIN만을 50% 삭감했을 경우에 대해서 DO와 COD 변화를 산정하였고, 그 변화는 Table 2에 제시되고 있다. 모든 하천으로부터의 DIP 또는 DIN 만의 삭감에, 저층 DO 현존량은 변화가 없거나 미미했다. COD는 DIP의 삭감에는 약간 증가하였고, DIN의 삭감에는 감소하였다. 그러나 두 경우 모두 수질을 개선시키지 못하였다. 유기물과 영양염류 모두를 30~70% 삭감하였을 경우, 이노하나호의 DO는 standard 시뮬레이션보다 1.8% 정도의 증가를 보였고, 90% 삭감의 경우는 오히려 저층 DO의 증가율이 작아졌다. 이것은 영양염류의 큰 감소로 식물플랑크톤의 광합성 생산량이 감소했기 때문이다. COD의 환경기준치의 달성을 위한 부하삭감 시뮬레이션에서는 유기물과 영양염류를 90% 삭감한 경우에 대해서 달성되는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여, 단지 육상부하량 삭감에 의한 수질개선효과는 작고, 90% 이상의 육상기원 부하량의 삭감도 현실적으로 어려우므로, 퇴적물 산소 요구량의 저감, 저질용출부하 삭감(홍 등, 2007) 등의 다른 수질개선 방안을 검토해야 할 필요가 있다. 또한 외해와의 해수교환율의 향상에 대하여, 이노하나호의 DO 변화가 거의 없었던 점으로부터, 육상기원부하량의 삭감에 관계없이 이노하나호의 높은 폐쇄성이 호수의 수질을 악화시키고 있다고 사료된다. 따라서 비현실적이기는 하지만, 이노하나호의 수질개선 방안을 모색하기 위해서 하마나호와 연결된 수로의 확장 또는 굴착을 통한 수심확보 등이 향후 시뮬레이션으로 검토된다.

**Table 2. Estimation of effects of pollutant load reduction**

Case	DO change	COD(mg/L)
DIP 50% reduction	-	3.19
DIN 50% reduction	0.4% decrease	3.16
DIP+DIN+POC+DOC 30% reduction	1.8% increase	3.11
DIP+DIN+POC+DOC 50% reduction	1.8% increase	3.15
DIP+DIN+POC+DOC 70% reduction	1.8% increase	3.11
DIP+DIN+POC+DOC 90% reduction	0.6% increase	2.94

#### 4. 결 론

본 연구에서는 생태계 모델을 이용하여 일본 하마나호의 하계 저층의 수질을 시뮬레이션하였고, 도류

제에 의한 수질변화 영향 평가, 육상부하량 삭감에 의한 이노하나호의 하계 수질 개선 방안에 대해 검토하였다. 외해측 도류제에 의하여 하마나호의 수질개선 효과를 확인할 수 있었으나 내해측 도류제는 수질개선에 기여하고 있지 못한 것을 알 수 있었다. 육상기원부하량의 삭감 시뮬레이션을 통해서 90% 이상의 삭감에서 환경기준치를 달성함을 알 수 있었다. 그러나 이노하나호의 만성적인 하계 저층의 빈산소수괴 해결 방안 모의는 육상기원부하량만의 삭감을 통해서 어렵다고 판단되며, 저질로부터의 용출을 통한 부하의 삭감 등 저질 환경 개선 및 이노하나호의 폐쇄도의 저감 등이 근본적인 대책 방안이라고 판단된다.

향후 저질용출부하의 삭감, 이노하나호의 폐쇄 정도의 저감 등의 시뮬레이션을 통해 이노하나호의 하마나호와의 해수교환율 향상 및 수질 개선 방안을 모색할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- 홍석진, 이원찬, 정래홍, 오현택, 장주형, 구준호, 김동명. (2007). 2003년 하계 진해만 수질 개선을 위한 생태계 모델링. 해양환경안전학회, 13(2), 103-110.
- 中田喜三郎, 石川公敏, 松川康夫 (1985). 内湾の流動場の数值実験, 沿岸海洋研究ノート. 22(2), 96-108.
- 日本静岡県 (2006). 猪鼻湖情報-水と緑と土と空-No.1.
- Kremer, J.N. and Nixon, S.W. (1978). A coastal marine ecosystem, In: Simulation and Analysis, Ecological Studies, 24. Springer, Berlin.217pp.
- Lee, D.I., Park, C.K. and Cho, H.S. (2005). Ecological modeling for water quality management of Kwangyang Bay, Korea. Journal of Environmental Management, 74, 327-337.
- Nakata, K., Horigucci, F. and Yamamuro, M. (2000). Model study of lakes Shinji and Nakaumi—a coupled coastal lagoon system. Journal of Marine Systems, 26, 145- 169.
- Taguchi, K. and Nakata, K. (1998). Analysis of water quality in Lake Hamana using a coupled physical and biochemical model. Journal of Marine System, 16, 107-132.
- Yuk, J.-H. (2008). Water exchange and material transport in a semi-enclosed estuary - The characteristics and long-term changes in Hamana Lake -, PhD. thesis. Toyohashi University of Technology, Japan.