

일사량의 확률분포를 이용한 용존산소의 수치예측실험

이 인 철
부경대학교 해양공학과

A Numerical Simulation of Dissolved Oxygen Based on Stochastically-Changing Solar Radiation Intensity

In-Cheol LEE

Department of Ocean Engineering, Pukyong National University,
Pusan 608-737, Korea

To predict the seasonal variation of dissolved oxygen (DO) in Hakata bay, Japan, possible 20 time-series of different hourly-solar-radiation intensities were generated based on stochastically changing solar radiation intensity, and a numerical simulation on dissolved oxygen (DO) was carried out for each time series by using the Sediment-Water Ecological Model (SWEM). The model, consisting of two sub-models with hydrodynamic and biological models, simulates the circulation process of nutrient between water column and sediment, such as nutrient regeneration from sediments as well as ecological structures on the growth of phytoplankton and zooplankton. The results of the model calibration followed the seasonal variation of observed water quality well, and generated cumulative-frequency-distribution (CFD) curves of daily solar radiation agreed well with observed ones. The simulation results indicated that the exchange of sea water would have a great influence on the DO concentration, and that the concentration could change more than 1 mg/L in a day. This prediction method seems to be an effective way to examine a solution to minimize fishery damage when DO is depleted.

Key words: Numerical simulation, Dissolved oxygen, Hakata Bay, Solar radiation intensity, Sediment-Water Ecological Model

서 론

반폐쇄성 내만해역은 주변의 육역으로부터 대량의 생활하수와 공장폐수 등의 오염부하량이 유입되어 해역의 부영양화를 진행시켜 적조현상과 같은 식물플랑크톤의 이상증식과 저층에서의 빈산소수괴의 발생을 초래하여 수질 및 수산생태계의 환경에 악영향을 미치고 있어 이에 대한 수질관리대책이 시급히 요구되고 있다.

이러한 내만의 수질환경의 변동요인들로는 예를 들어 해수교환 (Chang et al., 1984), 내부생산 유기물 (Nakanishi et al., 1991; Hoshika et al., 1998), 영양염과 용존산소 (DO) 변동 (Hong et al., 1991), 입자성유기물질 조성변동 (Lee et al., 2001)과 조류성장제한 영양염 (Kang et al., 1999), 빈산소수괴 변동 (Lee et al., 1993) 및 적조현상 (Park and Kim, 1967) 등이 있다. 이중 수산생물의 서식환경과 밀접한 빈산소수괴의 발생요인에 대해서는 수치모형실험을 이용한 연구도 다수 보고되고 있으며 (Takeoka, 1989; Kishi et al., 1991; Nakata and Kuramoto, 1992; Choi, 1993; etc.), 이들 수치모형실험의 대부분은 DO농도의 수치예측에 중점을 두고 있다. 그러나, 양식어장 및 저서생물의 서식장에 치명적인 영향을 미치는 용존산소의 변동을 정량적으로 예측하기 위해서는 수층과 저층간의 영양염과 DO농도의 상호작용 (Fisher et al., 1982; Smith and van der Molen, 1993; Lee et al., 1998), 국소적인 빈산소수괴의 발생빈도 (Sekine et al., 1995) 및 DO농도의 실시간 변동예측 등에 대하여 보다 상세한 검토가 이루어져야 하며 장기

간에 걸친 DO농도의 변동예측을 위해서는 수치모형실험의 입력 조건이면서 수질변화의 직접적인 변동요인 (예를 들면, 기온, 일사량, 강우량, 부하량 등)에 대한 발생빈도 해석과 확률론적인 시계열해석이 수반되어야 할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 일본 博多灣의 DO농도의 계절변동을 예측하기 위하여 일사량의 확률분포에 의해 생성된 발생가능한 서로 다른 20개의 시간별 일사량의 시계열을 기초로 한 수-저질생태계모델 (Lee and Ryu, 2001)의 수치예측실험을 실시하여 수층과 저질간의 물질순환 및 일사량의 변동에 따른 DO농도의 계절변동에 대하여 검토하였다.

재료 및 방법

1. 연구해역의 개요

일본의九州연안에 위치한 博多灣은東西 약 20 km,南北 약 10 km, 유역면적이 약 690 km²의 길고 협소한 반폐쇄성 내만이다 (Fig. 1). 만의 수심은 동부해역 (HE)이 5 m 이하, 중부해역 (HC)이 5~10 m, 서부해역 (HW)이 10~20 m 정도로 만의 면적과 체적은 각각 약 140 km²와 1.4×10⁹ m³ 정도이다. 특히, 동부해역의 연안에 둘러싸인 면적 약 80 ha 정도의 和白 (Wajiro) 간석지와 주변의 천해역은 저서생물과 치자어의 생육장 및 철새들의 월동지로서 널리 알려져 있다. 그러나, 이 해역은 육역과 인접하여 많은 오염물질이 유입·축적되기 쉬움에 따라 전면해역은 COD농도가 약 3.5 mg/L를 넘는 부영양화 해역으로 이로 인하여 적조현상과 빈산소수괴가 매년 발생하고 있을 뿐만 아니라 최근에는 거

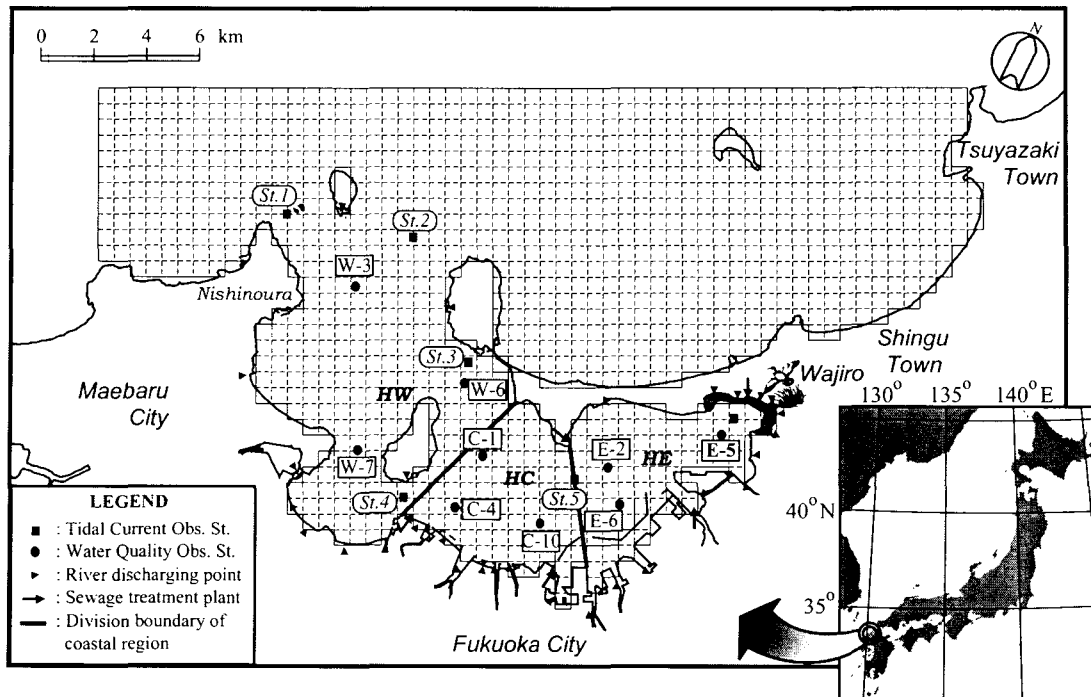


Fig. 1. Map shows the calculation grid system and field observation stations in Hakata Bay. The shaded zone shows Wajiro tidal flat area, and HW, HC and HE denotes the western region, the center and the eastern region of Hakata Bay, respectively.

울철의 수질오염 현상이 대두되고 있어 연중 적정한 수질관리 대책이 요구되고 있다. 博多灣의 연평균 담수유입량은 약 $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 정도로서 9월에 가장 많았으며, 이 시기에 만내에 유입되는 오염부하량도 가장 많았다. 博多灣의 연평균부하량은 COD가 약 17.4 ton/day, 총질소 (T-N)가 약 14.7 ton/day, 총인 (T-P)이 약 1.2 ton/day로서, 해역별 오염부하량은 동부해역 (HE)에 집중하여 전체 오염부하량의 70% 이상을 차지하였다 (Table 1).

Table 1. Annually averaged values of freshwater discharge and pollutant loads at each region in Hakata Bay

Region	Freshwater discharge ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$)	Pollutant loads (ton/day)		
		COD	T-N	T-P
HE	1.40	12.5	11.7	0.85
HC	0.34	2.3	1.7	0.11
HW	0.26	2.5	1.3	0.23
Total	2.00	17.4	14.7	1.19

2. 물질순환의 계절변동 예측

博多灣의 물질순환을 예측하기 위해 水-底質생태계모델 (Sediment-Water Ecological Model; 이하 SWEM이라 칭함)을 이용하였으며 이 모델은 밀도류와 취송류를 고려한 유동예측모델과 식물·동물플랑크톤의 생태학적구조 뿐만아니라 수층과 저질간의 영양염거동을 표현한 생태계예측모델로 구성되어 있다 (Lee and Ryu, 2001). 본 모델에 의한 博多灣의 유동 및 물질순환은 1989년 4월 1일~1990년 3월 31일과 1996년 4월 1일~1997년 3월 31일까

지 2년에 걸쳐 매일간격의 실시간에 의한 수치모형실험으로 예측되었다. 모델의 검증은 博多灣의 15일간 (1990년 3월 14일~3월 29일) 조류연속관측결과 (Port & Harbor Bureau of Fukuoka City, 1990)와 월별의 수질관측결과 (Environmental Bureau of Fukuoka City, 1990; 1997)를 이용하였다. 본 수치모형의 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다.

1) 유동예측모델

유동예측모델은 연직방향으로 Boussinesq근사를 가정하여 층별로 연직적분한 Navier-Stokes 방정식과 연속식, 열수지식, 염소이온의 물질수지식 및 해수의 밀도와 수온·염분을 관련시킨 상태방정식 (Japan Society on Oceanography, 1990)을 기초식으로한 연직다층의 레벨모델로서 밀도류와 취송류를 고려하고 있다. 경계조건으로는 바람응력의 계산, 해저마찰력의 계산 및 수면에서의 Heat flux의 계산으로 주어지고 외해경계 조위진동의 조석분조는 주요 4대분조인 M_2, S_2, O_1, K_1 분조와 $K_2, N_2, P_1, Q_1, M_4, MS_4$ 분조의 10분조로 설정하였다. 博多灣의 수치계산격자와 조류관측점 및 수질관측점을 Fig. 1에 나타내었다. 계산격자간격은 수평방향으로는 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 로 하고, 연직방향으로는 수면으로부터 6m 사이는 2m씩 3층, 6~14m 사이는 4m씩 2층, 수심 14m 이하를 1층으로 총 6층으로 분할하였다.

2) 생태계예측모델

생태계예측모델은 앞절의 유동예측모델과 연결되어 유동계산에서 얻어진 시간간격별 유속 및 물리적 변수를 가지고 생태계구성

요소의 농도분포를 예측하는 구조로 되어있다 (Fig. 2). 생태계모델을 구성하는 각 요소의 현존량에 대한 시간변화는 해수유동에 의한 물리적 수송·확산, 系外로부터의 물질유입 및 系内の 각종 생물·화학적 반응과정에 의한 물질보존법칙에 의해 기술된다. 모델내의 각 생태계요소는 水相系와 底質系가 개별의 변수로서 정의되어 있으며, 系内の 물질순환을 계면물질의 이동기구로 연결함으로써 수층과 저질사이의 물질순환과정을 계산하는 것으로 설정되었다. 수층의 계산범위 및 수평·연직방향의 층구분은 유동예측 모델과 동일하며, 저질층은 연직으로 표층 1cm, 저층 4cm의 2층 구조로 분할하였다. 모델내의 각 요소는 水相系와 底質系에서 각각 11개 항목으로 구성되어 水相系에서는 생물요소로서 증식특성이 서로 다른 두 종류의 식물플랑크톤 (Phyto1과 Phyto2)과 동물플랑크톤 (Zoo-Pl.) 및 Detritus의 4항목이고, 화학종별 영양염 5항목, 산소수지요소인 COD 및 DO의 2항목이다. 그리고, 底質系는 水相系로부터 공급 (침강)되는 총유기인 (TOP)과 총유기질소 (TON), 간극수층의 영양염 (DIP, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N), 화학적 반응형 흡착형태의 인 (ER), 흡탈착형태의 인과 질소 (EP와 EN), DO, 산화층 (산화철; OM), 환원층 (환원철; AM)으로 구성된다. 이들 각 생태계 요소는 식물플랑크톤의 기초생산과정과 수층과 저질간의 물질의 생물·화학적 상호순환작용으로 수식화되어 있으며, 크게 생물순환, 영양염순환 (질소, 인), 용존산소순환으로 구분된다. 이들 물질순환은 식물플랑크톤에 의한 광합성에 의하여 유발되며, 질소·인의 섭취와 분해·회귀과정에 의해 동적으로 상호순환되고 있다.

3. 용존산소 (DO) 농도의 변동예측

DO농도의 변동예측은 앞서 설명한 물질순환예측에서 1996년 4

월 1일~1997년 3월 31일까지의 일사량조건으로 예측된 DO농도 계산결과와 확률이론 (Lu et al., 1998)에 의해 산출된 서로 다른 20 Case의 일사량조건에 따른 DO농도 변동에 대한 수치실험 결과들을 통하여 검토하였다. 일사량 조건변화에 따른 DO농도의 수치예측실험 기간은 해역에서 부영양화와 빈산소수괴의 두 현상이 동시에 발생할 수 있는 기간으로 가정하여 육역으로부터 유입되는 영양염부하가 가장 많고 성층현상이 활발하였던 1996년 7월 20일~8월 13일 (25일간)까지로 설정하였다. 이는 강수량이 가장 많이 있었던 7월 19일 (65 mm/day) 이후부터 강수량이 적었던 8월 13일까지를 대상기간으로 설정한 것이다.

확률분포를 이용한 서로 다른 20 Case의 일사량 시계열 조건을 얻기 위한 일사량의 발생빈도해석은 일별 청천지수 (K_i: 대기권 외계의 태양복사열에 대한 실제 태양복사열의 比)의 누적빈도분포 (CFD; Cumulative Frequency Distribution)와 이를 근거로 한 일별 그리고 매시간별 청천지수의 발생 및 난수발생으로 생성된 서로 다른 20 Case의 매시간별 일사량 시계열의 발생 등의 과정으로서 산출방법을 요약하면 다음과 같다.

1) 일사량의 누적빈도분포 (CFD)의 산출

일별 청천지수 (K_i)의 확률분포를 일사량의 장기 기상관측자료 (1991년~1999년)로부터 구하여 식 (1)에 의해 CFD를 구하였다.

$$F(K_i) = -0.01 + \frac{a}{1 + \exp(\frac{b - K_i}{c})} \quad (1)$$

여기서, a, b와 c는 주어진 K_i에 대한 곡선점합에 의해 추정할 수 있으며, 대기권외계 일사량은 Duffie and Beckman (1991)의 식을 이용하여 구하였다.

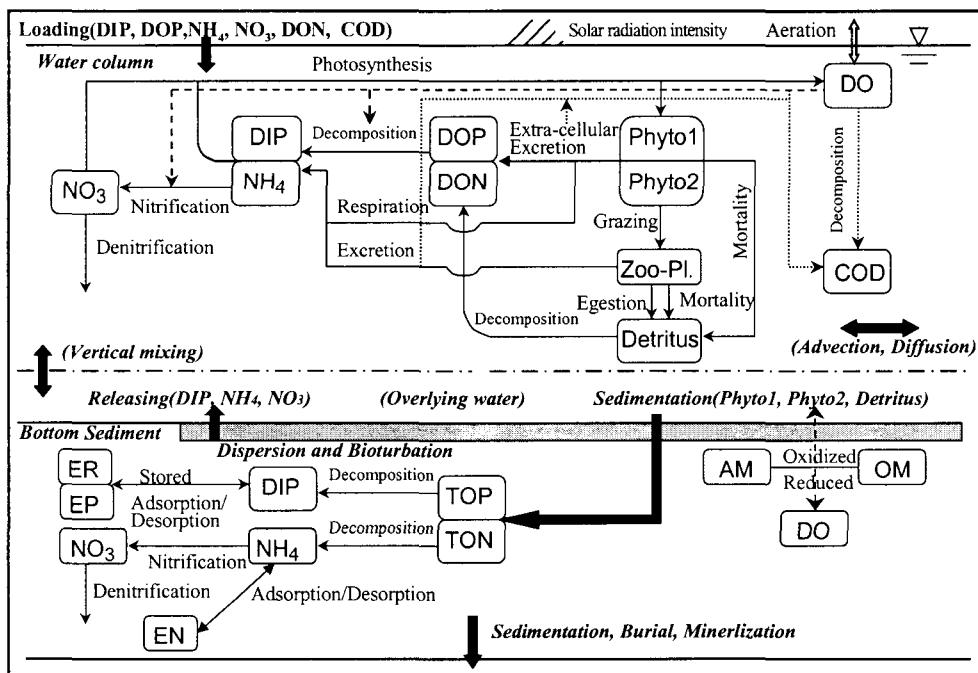


Fig. 2. A schematic view of material circulation flow in the SWEM model.

2) 일별 청천지수의 생성

일별 일사량의 생성자료는 Box and Jenkins (1976)의 1계 자기회귀모형 (AR1모형; first order autoregressive model)을 이용하여 구하였다. Box and Jenkins에 의한 시계열 (예를 들면, 기온, 일사량 등)의 모형화 방법은 모형을 식별하고 모수를 추정한 후 적합성을 진단하는 방법으로 시계열의 자기상관함수와 부분자기상관함수를 분석하여 이동평균 및 자기회귀의 차수를 정하며, 시계열에 비정상성이 있으면 계절적, 비계절적 차분을 하여 정상 시계열로 만든 후에 분석·예측한다. 이와 같은 과정을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\chi(t) = \rho\chi(t-1) + \omega \tag{2}$$

$$K_{\theta} = b - c \cdot \ln \left\{ a / \left[\frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\chi(t)}{\sqrt{2}} \right) \right) + 0.01 \right] - 1 \right\} \tag{3}$$

여기서, $\chi(t)$ 는 일별 일사량의 시계열을 나타내며, ρ 는 무차원의 자기상관계수 (-1~+1), ω 항은 0과 표준편차 (1- ρ)의 평균을 가진 정규분포화된 확률변수로서 무작위의 일별의 일사량의 변동값을 나타낸다. 또한, AR1모형에 의해 산출되는 일별 일사량은 K_{θ} 를 가우스분포도에 의해 정규분포 변수로 치환한 후에 구해진다 (Amato et al., 1986; Graham et al., 1988). 따라서, 치환된 일별 청천지수 (K_{θ})는 식 (3)과 같이 계산되며, K_{θ} 변수의 새로운 시계열은 초기 χ 값을 0으로 설정한 후에 구할 수 있다.

3) 매시간별 청천지수의 생성

매시간별 일사량은 앞절에서 산출된 일별 일사량을 배분하여 구하게 되며, 이는 Knight et al. (1991)에 의한 식 (4)를 이용하여 구해진다.

$$k_i = K_m - \frac{\sigma_i}{1.58} \cdot \ln \left\{ 1 / \left[\frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\Psi(i)}{\sqrt{2}} \right) \right) \right] - 1 \right\} \tag{4}$$

$$K_m = K_s [p + q \cdot \cos(h)] \tag{5}$$

$$p = 0.409 + 0.5016 \sin(h_s - 60)$$

$$q = 0.6609 - 0.4767 \sin(h_s - 60)$$

$$h_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot -\tan \delta)$$

$$\sigma_i = 0.1557 \sin \left(\frac{\pi K_s}{0.933} \right) \tag{6}$$

$$\Psi(i) = \Phi \Psi(i-1) + \epsilon \tag{7}$$

여기서, K_m 은 Duffie and Beckman (1991)의 보고에 의한 것으로 일몰시간의 각도와 임의시간의 각도에 따른 일별 일사량이 작아지는 것을 표현한 것이다. 또한, σ_i 는 표준편차 (Knight et al., 1991)이며, Ψ_i 는 AR1모형에서 표현되는 시계열 자료의 난수발생을 나타낸 것으로서, 난수발생에 의한 서로 다른 20 Case의 매시간별 일사량 시계열 자료는 Φ 의 초기치를 0으로 하여 Φ 가 0.54 (Graham and Hollands, 1990)일 때 계산된 ϵ 값에 의해 발생된다.

결과 및 고찰

1. 물질순환의 계절변동

1) 수질의 계절변동

博多灣의 만 중앙쪽 (St. E-2)에서의 상층과 저층의 수질인자중 용존산소 (DO)와 클로로필-a (Chl-a) 농도의 관측치와 계산치를 Fig. 3에 나타내었다. 상층에서 관측된 Chl-a의 연평균농도는 약 0.01 mg/L로서 5월~9월 사이에 높고 11월에 최저치를 보였으며 12월 이후에 연평균농도의 값으로 재차 증가하는 것으로 나타났다. 저층의 Chl-a는 연평균농도가 약 0.007 mg/L 정도로서 계절적인 변동양상은 상층의 Chl-a 농도와 유사하였으나 평균농도로부터 편차는 상층에 비하여 별로 크지 않았다. 또한, 관측된 DO 농도는 겨울철 (12월~2월)에 약 10 mg/L 전후로 높았으며 수온이 높아지는 여름철 (6월~8월)에 낮게 나타났다. 특히, 5월~7월 사이에 상층의 DO농도가 높게 나타난 것은 같은 시기의 Chl-a 농도 변동에서 알 수 있듯이 이 시기의 식물플랑크톤의 활발한 내부생산작용에 의한 영향으로 보인다. 반면에 7월과 9월 사이의 저층에서의 DO농도는 성층에 의해 낮은 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 한편, Chl-a와 DO농도의 계산치는 월별로 관측된 농도 범위와는 다소 불일치하였으나, 연간에 걸친 두 농도의 계절변동은 월별 관측치와 거의 유사하게 나타났다.

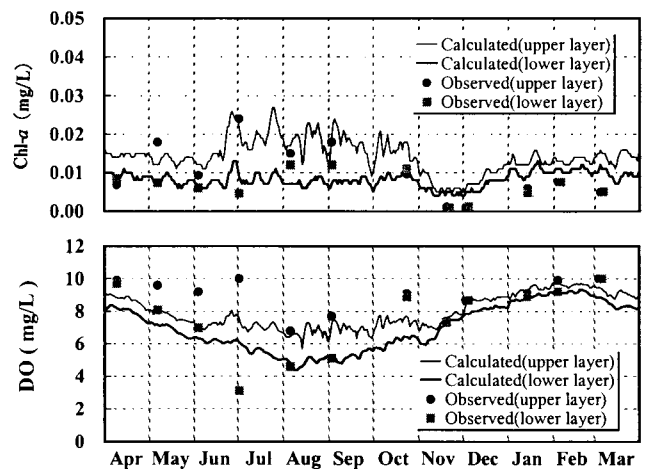


Fig. 3. Comparison between calculated results on Chl-a and DO concentration and observed ones at the upper (lower) layer of St. E-2 in Hakata Bay.

2) 인의 물질순환

博多灣에서 식물플랑크톤의 기초생산 (내부생산)의 제한영양염 인자는 인으로서 수질보전대책은 하수처리장으로부터의 인의 유입부하량 삭감을 중심으로 실시되고 있어 만내의 인의 거동을 파악하는 것은 중요한 사항이다. 따라서, 수질오염이 현저한 HE해역 안쪽 (Fig. 4의 사선부)에 있어서 인의 물질순환과정을 파악하기 위하여 1996년 4월 1일~1997년 3월 31일까지의 수-저질의 실시간 계산결과를 토대로 인산염 (DIP)의 생물·화학적 순환과정의 계절변동에 대하여 고찰하였다.

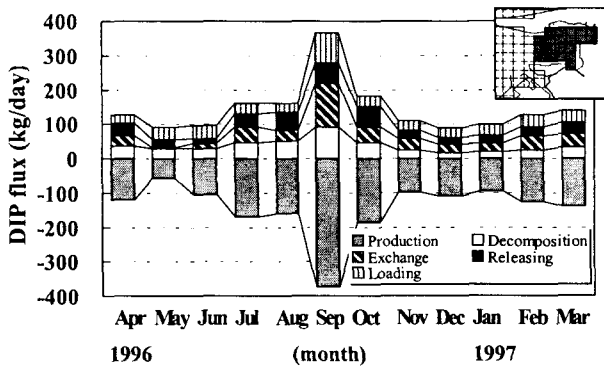


Fig. 4. Simulated results of seasonal variation in the biochemical processes for DIP around the head of Hakata Bay. (The production means a difference of photosynthesis and respiration of phytoplankton).

Fig. 4는 HE해역의 천해역에서의 DIP 물질수지를 월별로 나타낸 것이다. 세로축의 정방향 (+)은 해역내의 DIP의 공급량을 의미하는 것으로 육역으로부터 유입되는 DIP부하량 (loading), 저니로부터 용출되는 DIP용출량 (releasing), 개경계에서의 물질교환량 (exchange), 유기물의 분해량 (decomposition)을 나타내며, 음방향 (-)은 DIP의 소비량을 의미하는 것으로 식물플랑크톤의 광합성량에서 호흡량을 뺀 기초생산량 (production)을 나타낸다. 월별의 DIP의 공급량과 소비량은 월별로 따라 flux의 변동은 다소 있지만 전체적으로 거의 같은 정도의 flux로 DIP공급량과 식물플랑크톤 증식량이 밀접하게 관계하고 있음을 알 수 있어 DIP부하의 삭감이 만내의 수질오염 저감에 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 또한, DIP 공급요소를 연평균치로 보면 육역부하, 저질용출, 개경계 물질교환, 유기물분해의 각 요소 모두 30~38 kg/day로 거의 비슷한 정도로 이들 각 요소가 당해역에의 DIP공급에 같은 정도로 기여하고 있는 것으로 예상되어 하수처리를 통한 육역으로부터의 유입부하량 삭감뿐만아니라 저질로부터의 용출영양염의 제어방안도 강구할 필요가 있는 것으로 추정할 수 있다.

2. 용존산소 (DO)농도의 변동

1) 일별·시간별 일사량의 발생빈도

Fig. 5는 일별 청천지수의 누적빈도분포 (CFD)곡선을 나타낸 것으로 1991년~1999년까지의 관측자료로부터 얻어진 CFD와 식 (1)에 의해 근사된 CFD 및 난수 발생에 의해 생성된 CFD의 3 가지 경우를 나타낸 것이다. 관측자료와 근사식으로부터 얻어진 CFD곡선은 아주 잘 일치하였으며, 난수 발생에 의해 생성된 CFD곡선은 일별 청천지수가 0.1 이상의 범위에서 나머지 CFD곡선들과 거의 유사하게 일치하여 이 결과를 기초로하여 시간별 일사량의 청천지수를 생성시켰다.

2) DO농도의 수치예측실험

앞절에서 설명한 난수발생에 의해 얻어진 서로 다른 20 Case의 시간별 일사량의 시계열을 각각 입력조건으로 하여 DO농도에 대한 수치예측실험을 실시하였다. Fig. 6은 20 Case의 시간별 일사량의 시계열에 대한 해역의 DO농도 변동을 수치예측한 실험결과중

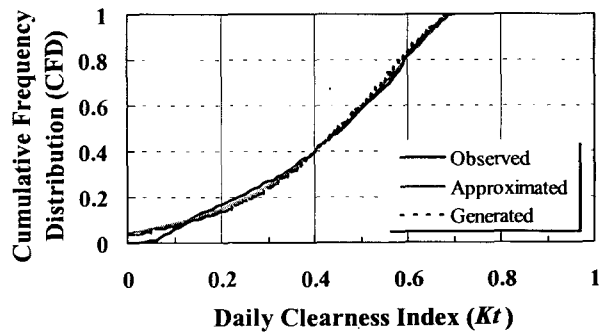


Fig. 5. Comparison of three cumulative frequency distribution (CFD) curves of daily clearness index.

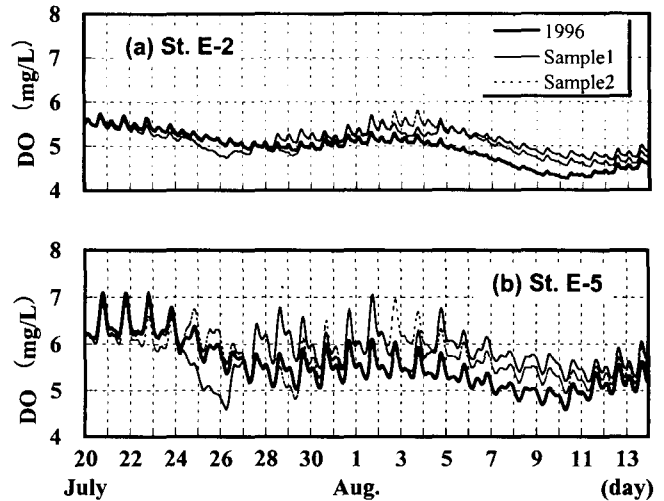


Fig. 6. Simulated results of DO concentration at lower layer of St. E-2 and St. E-5.

일부로서 St. E-2 (만중앙부)와 St. E-5 (만안부)에서 계산된 저층의 DO농도 시계열을 나타낸다. 그림내의 1996은 Fig. 3에 나타난 1996년 7월 20일~8월 13일까지의 일사량 관측자료를 이용하여 계산된 DO농도의 예측결과이며, Sample 1과 Sample 2는 서로 다른 20 Case의 시간별 일사량의 시계열 자료를 이용하여 계산된 결과 중, HE해역의 천해역 (St. E-5)에서 각각 최저 DO농도가 나타났을 때와 8월초에 최고 DO농도가 나타났을 때의 수치실험 결과를 나타낸 것이다. DO농도의 시계열 변동을 살펴보면 15일간의 주기성을 가지고 대조기 (7월 30일과 8월 14일)에 농도가 증가하고, 소조기 (7월 24일과 8월 6일)에 감소하는 양상으로 DO농도가 해수교환정도에 크게 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며 만중앙부에 위치한 St. E-2에서는 하루의 (이른 아침부터 늦은 저녁사이)의 DO농도 변동폭은 작았으나, 만내부에 위치한 St. E-5에서는 약 1 mg/L의 이상의 농도차를 가진 시계열 변동을 나타내었다.

Fig. 7은 20 Case의 DO농도의 수치예측 실험결과에서 St. E-2와 St. E-5에서 발생한 최저 DO농도의 상대빈도분포와 확률밀도함수를 나타낸 것이다. 20 Case의 DO농도 계산치를 평균하여 얻어진 St. E-2와 St. E-5에서의 최저 DO농도는 각각 4.44 mg/L와 4.82 mg/L 정

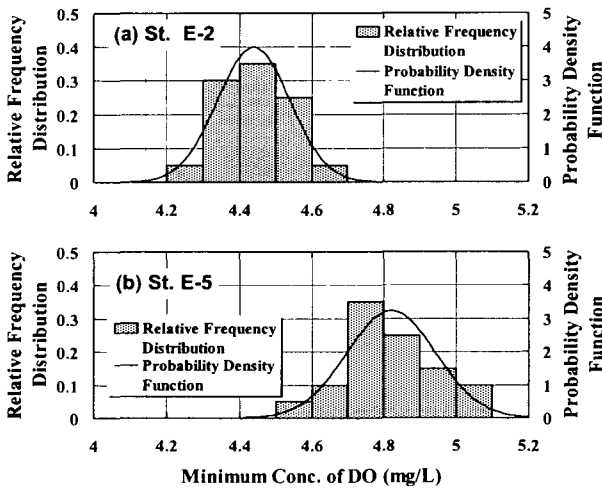


Fig. 7. Relative frequency distribution and probability density function of minimum DO concentration at the St. E-2 and St. E-5.

도로서 그 표준편차는 각각 0.1 mg/L와 0.123 mg/L이었다. 博多灣에서 관측된 DO농도와 패류 생물량의 관계에 따르면 만약 직상수(해저로부터 1 m 위의 수층)의 DO농도가 5 mg/L 이하가 되면 패류가 패사한다고 보고하고 있다 (Environmental Bureau of Fukuoka City, 2000). 이는 이 해역에서 DO농도 5 mg/L가 패류의 생존을 위한 서식환경의 한계농도로서 간주될 수 있는 것으로서 Fig. 6과 비교하면 St. E-2 부근해역에서 8월 10일을 전후하여 패류의 패사가 일어날 수 있음을 시사하고 있다. 이상의 결과로부터 어떤 해역에서 발생가능한 일사량의 조건변화에 따른 DO농도의 시간별 예측은 수산자원의 피해를 최소화할 수 있는 적정 DO농도의 예측에 합리적으로 이용될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 수질예측 모형실험의 입력조건이면서 수질변화의 직접적인 변동요인으로 생각되는 일사량 자료에 대한 확률해석을 기초로하여 DO농도의 수치예측실험을 실시한 결과이다.

앞으로는 기온, 강우량, 부하량 등의 여러 가지 입력조건들에 대한 발생빈도로부터 얻어지는 각각의 시계열 자료의 확률해석을 병행하여, 빈산소수괴 및 적조의 발생 등과 같은 수질환경의 장래 예측에 대한 수치모형실험이 필요할 것으로 생각된다.

요 약

일본 博多灣의 DO농도의 계절변동을 예측하기 위하여 일사량의 확률분포에 의해 생성된 발생가능한 서로 다른 20개의 시간별 일사량의 시계열을 기초로 DO농도변동에 대한 수치예측실험을 실시하여 수층과 저질간의 물질순환 및 일사량의 변동에 따른 DO농도의 계절변동에 대하여 검토하였다. 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

수질 및 물질순환의 예측결과 博多灣의 동부해역 (HE해역)의 수질은 식물플랑크톤에 의한 내부생산에 크게 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며, DIP의 물질수지로부터 저질의 영양염 플럭스

가 만내의 수질변화에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

일별일사량의 관측자료와 근사식 및 난수발생에 의해 얻어진 CFD곡선은 잘 일치하였다. 또한, DO농도가 해수교환정도에 크게 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며, 만내부에 위치한 St. E-5에서는 약 1 mg/L의 이상의 농도차를 가진 시계열의 변동을 나타내었다.

수치예측실험 20 Case의 DO농도 계산치를 평균하여 얻어진 St. E-2와 St. E-5에서의 최저 DO농도는 각각 4.44 mg/L와 4.82 mg/L 정도였으며 그 표준편차는 각각 0.1 mg/L와 0.123 mg/L로 계산되었다.

어떤 해역에서 발생가능한 일사량의 조건변화에 따른 DO농도의 시간별 예측은 수산자원의 피해를 최소화할 수 있는 적정 DO농도의 예측에 합리적으로 이용될 수 있는 수법으로 제시되었다.

참 고 문 헌

- Amato, U., A. Andretta, B. Bartori, B. Coluzzi and V. Cuomo. 1986. Markov processes and fourier analysis as a tool to describe and simulate daily solar irradiance. *Solar Energy*, 37, 179~194.
- Box, G.E.P. and G.M. Jenkins. 1976. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco, pp. 182.
- Chang, S.D., M.O. Lee, J.H. Kim, K.S. Park, B.K. Kim and K.B. Lim. 1984. The sea water circulation in eastern Chinhae Bay. *Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency*, 32, 7~23 (in Korean).
- Choi, W.J. 1993. Numerical simulation of the formation of oxygen deficient water mass in Jinhae Bay. Ph. D. dissertation, Nat. Fish. Univ. of Pusan, pp. 97 (in Korean).
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 292.
- Environmental Bureau of Fukuoka City, Japan. 1990. Data Report of water quality observation at Hakata Bay in March 1989 to April 1990. 16~148 (in Japanese).
- Environmental Bureau of Fukuoka City, Japan. 1997. Data Report of water quality observation at Hakata Bay in March 1996 to April 1997. 10~164 (in Japanese).
- Environmental Bureau of Fukuoka City, Japan. 2000. Data Report of water quality observation at Hakata Bay in 1993 to 1999. 78~105 (in Japanese).
- Fisher, T.R., P.R. Carlson and R.T. Barber. 1982. Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 14, 101~116.
- Graham, V.A., K.G.T. Hollands and T.E. Unny. 1988. A time series model for K_t with application to global synthetic weather generation, *Solar Energy*, 40, 83~92.
- Graham, V.A. and K.G.T. Hollands. 1990. A method to generate synthetic hourly solar radiation globally. *Solar Energy*, 44, 333~341.
- Hong, G.H., Y.A. Kim, S.J. Pae, S.H. Kim and S.H. Lee. 1991. Annual cycles of nutrients and dissolved oxygen in a nutrient-rich temperate coastal bay, Chinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 56, 204~222.
- Hoshika, A., T. Tanimoto and Y. Mishima. 1998. Eutrophication and organic pollution in the Osaka Bay, Seto Inland Sea. *J. Japan Soc. Water Environment*, 21, 765~771 (in Japanese).

- Japan Society on Oceanography. 1990. Marine Observation Indicator, Japan Meteorological Agency, pp. 428.
- Kang, C.K., P.J. Kim, W.C. Lee and P.Y. Lee. 1999. Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N and P in particulate matter in the coastal bay systems. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 34, 86~94.
- Kishi, M.J., Y. Iwata and M. Uchiyama. 1991. Numerical simulation model for quantitative management of mariculture. *Mar. pollution Bulle.*, 23, 765~767.
- Knight, K.M., S.A. Klein and J.A. Duffie. 1991. A methodology for the synthesis of hourly weather data. *Solar Energy*, 46, 109~120.
- Lee, I.C. and C.R. Ryu. 2001. A numerical prediction of nutrient circulation in Hakata Bay by Sediment-Water Ecological Model (SWEM). *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 4, 3~14 (in Korean).
- Lee, I.C., S.D. Chang, J.K. Kim and M. Ukita. 1998. Application to the water and sediment model for the management of water quality in eutrophicated Seto Inland Sea, Japan. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 1, 96~108 (in Korean).
- Lee, P.Y., C.K. Kang, W.J. Choi, W.C. Lee and H.S. Yang. 2001. Temporal and spatial variations of particulate organic matter in the southeastern coastal bays of Korea. *J. Korean Fish. Soc.*, 34, 57~69 (in Korean).
- Lee, P.Y., J.S. Park, C.M. Kang, H.G. Choi and J.S. Park. 1993. Studies on oxygen-deficient water mass in Chinhae Bay. *Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency*, 48, 25~28 (in Korean).
- Lu, Z., R.H. Piedrahita and C. dos Santos Neto. 1998. Generation of daily and hourly solar radiation values for modeling water quality in aquaculture ponds. *Trans. ASAE (Ameri. Soc. Agri. Eng.)*, 41, 1853~1859.
- Nakata, K. and T. Kuramoto. 1992. A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay. *Proc. of Advanced Marine Technology Conf.*, 5, 107~132.
- Nakanishi, H., M. Ukita and M. Sekine. 1991. Evaluation of primary production loads and their control in enclosed seas. *Mar. pollution Bulle.*, 23, 25~29.
- Park, J.S. and J.D. Kim. 1967. A study on the "red-water" caused at Chinhae Bay. *Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency*, 1, 63~79 (in Korean).
- Port & Harbor Bureau of Fukuoka City, Japan. 1990. Data Report of tidal current observation at Hakata Bay, 12~127 (in Japanese).
- Sekine, M., I.C. Lee, T. Narazaki, M. Ukita, T. Imai and H. Nakanishi. 1995. Handling of dissolved oxygen in the Seto Inland Sea fisheries ecological model. *J. Environ. Eng. Res., JSCE*, 32, 301~310 (in Japanese).
- Smith, J.G.C. and D.T. van der Molen. 1993. Application of SWI-TCH, a model for sediment-water exchange of nutrients, to Lake Veluwe in the Netherland. *Hydrobiologia*, 253, 281~300.
- Takeoka, H. 1989. Physical model of oxygen deficient water formation. *Bull. Coastal Oceanogr.*, 26, 101~108 (in Japanese).

2001년 9월 12일 접수

2001년 11월 13일 수리