

OD3) 실시간 수질모니터링 자료를 이용한 DO 수지모델링

최양호, 노영재¹, 이주희, 최승현
국립수산과학원 남해수산연구소, ¹충남대학교 해양학과

1. 서 론

연안 및 하구 해역은 육지와 해양의 경계에 위치하기 때문에 육상기원의 오염물질 부하에 직접적인 영향을 받는다. 연안 개발과 인구 증가에 따른 오염물질의 증가는 인근 해역의 부영양화를 일으키게 되며, 그에 따른 적조 및 빈산소 수괴의 형성은 연안 생태계에 심각한 타격을 주게 된다.

특히 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)는 해양생물의 생명유지에 필수적인 요소로써, 해양생태계의 건강과 수질의 주요 지표가 되는 환경 변수이다. 용존산소는 대기와 식물의 광합성에 기원을 두고 있으며, 표층수로 유입된 산소는 혼합 등의 과정을 통해 저층으로 공급된다. 그러나 산소 공급이 제한되거나 산소 소비가 공급을 초과하게 되면, 저층수의 용존산소는 해양생물의 생명유지에 필요한 기준농도 이하의 빈산소 농도를 보인다. 따라서 빈산소 수괴의 형성은 해양생물의 대량 사멸을 일으키는 주 요인으로 작용하게 된다(Boesch and Rabalais, 1991 Diaz, 2001).

복잡한 환경변수의 지배를 받고 있는 해양에서 빈산소 수괴를 정량적으로 이해하기 위해서는 상세 관측자료를 이용하여 시계열 변동 특성을 정확하게 파악해야 하고, 대기-해수-저층간의 수지 해석이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 환경변수에 대한 상세 관측을 위하여 실시간 모니터링 시스템을 개발하고, 개발한 시스템을 활용하여 수질 항목을 관측하고자 하였다. 아울러 관측 자료의 시계열 분석을 통하여 파악된 용존산소 변동 특성을 근거로 수지 방정식을 수립하고, 3차원 수질 예측 모델의 모듈화를 위한 간단한 수지 모형을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구해역

천수만은 한반도 서해 중부연안에 위치한 반 폐쇄성 내만으로서 오염물질의 유입이 거의 없는 청정수질로 양식 및 어업활동이 활발한 천혜의 해역이었다. 그러나 1983년에 방조제가 건설되고 연안 개발로 인한 급격한 해양 환경 변화를 겪으면서 수질 악화 및 수산업 피해가 늘고 있다(충남대학교 해양연구소, 1996).

천수만은 길이 약 30 km, 폭 약 10 km로 남-북 방향으로 길게 놓여 있으며, 만 내의 평균 수심은 약 10 m이고 입구에서 약 30 m의 최대수심을 보인다(Fig. 1). 조석은 형태수(Tidal Factor) 0.22로 일조부등이 작은 반일주조가 특징적이며, 만 입구에서 대조 및 소조

시 평균조차는 각각 7.0 m, 5.2 m이고, 평균 고조간격은 3시간이다. 유속은 입구에서 창·낙 조류 각각 1.8 m/sec, 1.6 m/sec이며, 만 내에서는 각각 0.6 m/sec, 0.9 m/sec로 약화되고 방 조제 인근에서는 0.2 m/sec 내외이다(수로국, 1992).

2.2. 자료관측 및 분석

본 연구를 위해 만 입구에 위치한 월도 인근 양식장 1개 정점을 포함한 총 11개 정점에서 수온, 염분, pH 및 용존산소 등을 관측하였다(Fig. 1). 양식장 인근에 위치한 정점은 저층(해저 2 m 수심)에 설치된 실시간 모니터링 시스템(Ro and Choi, 2004)을 이용하여 2001년 6월 ~ 2002년 6월까지 1년 동안 10분 간격으로 연속 관측하였으며, 같은 지점에서 조류 관측도 실시하였다. 조석 자료는 고정항 검조소의 자료를 활용하였다. 만 입구에서부터 약 3 km 간격의 10개 정점에서는 1개월 간격으로 만조 기준 약 3시간 동안 수심별로 관측하였다.

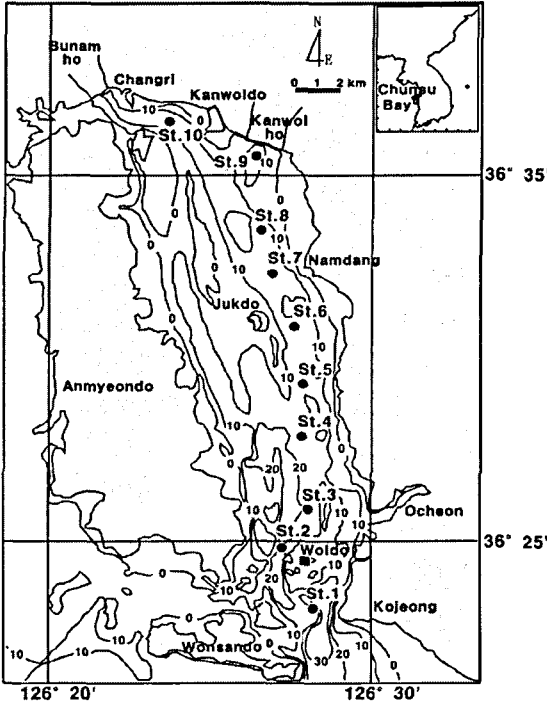


Fig. 1. Bathymetry and Station map of the Chunsu Bay.

자료 관측에는 YSI 6000R 수질측정기가 사용되었으며, 실시간 모니터링 시스템은 매 1~2주마다 센서 교정을 실시하였다. 장기변동 자료와의 비교분석을 위하여 최근 5년 동안(1997~2001년) 3개월 간격으로 관측된 국립수산과학원 해양환경조사 자료 중 양식장에 가장 인접한 정점 5의 자료를 활용하였다.

2.3. 실시간 모니터링 시스템

본 연구에서 개발한 실시간 수질 모니터링 시스템은 자료의 객관성과 신뢰성을 확보하기 위하여 관측에서부터 처리 및 제공에 이르기까지 모든 과정이 인위적인 과정을 배제하고 자동으로 이루어지게 된다.

Fig. 2는 실시간 수질 모니터링 시스템의 모식도이다. 본 시스템은 대상 해역의 수질 변수들을 실시간으로 감시하고 그 결과를 원격지의 서버로 전송해주는 원격 감시 시스템과 전송된 자료를 데이터 베이스화하고 이를 인터넷을 통하여 실시간으로 제공하는 웹 표출 시스템으로 구성된다. 통신 방식은 경제성과 확장성 및 호환성이 확보되고, 지속적인 자료의 생산과 활용이 용이한 무선인터넷통신을 이용한다.

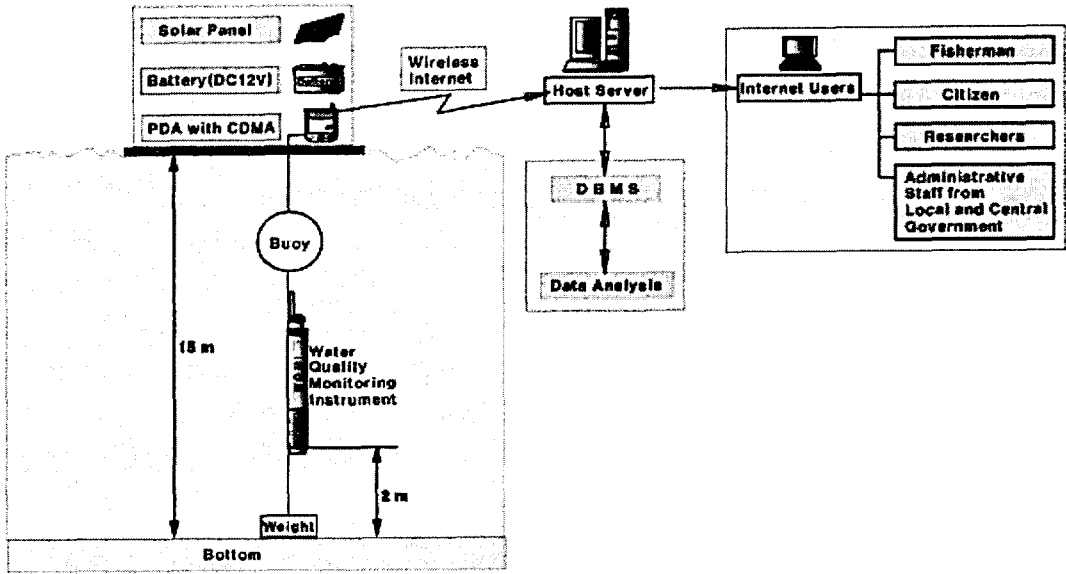


Fig. 2. Schematic system configuration of the realtime monitoring system.

원격 감시 시스템은 해양환경을 실시간으로 감시하고 그 결과를 원격지의 서버에 전송하는 시스템으로서 크게 관측부와 송신부로 구성된다.

관측부는 해양환경을 관측하기 위한 각종 센서들을 포함하며 센서의 종류는 현장 상황 및 연구 목적에 따라 확장 가능해야 한다. 본 연구에서는 수온, 염분, pH 및 용존산소 센서가 탑재된 YSI 6000R 수질 측정기를 활용하였으며, Turbidity 및 Chlorophyll 센서 등의 추가 탑재가 가능하다.

송신부는 관측부의 결과를 서버로 전송해 주는 부분으로서, 자료 전송 방식에 따라 크게 유·무선 통신으로 구분할 수 있다. 특히 송신부는 본 시스템에서 가장 중요한 부분으로서 자료 생산 및 전송의 안정성과 통신비용 및 관리비용 등을 고려하여 설계되어야 한다. 본 연구에서는 무선 인터넷을 기반으로 하는 통신 방식을 채택하고, CDMA Module이 탑재된 PDA 단말기를 이용하여 시스템을 구축하였다.

현재 국내·외적으로 많이 이용되고 있는 모뎀을 이용한 자료의 전송방식은 1대 다중 통신에 대한 한계성을 지니고 있다. 따라서 현장 상황 및 연구 목적에 따라서 1대 다중 통신이 가능한 방안으로 CDMA Module이 내장된 PDA 단말기를 이용한 무선인터넷 방식에 의한 시스템 성능의 최적화를 기하였다. PDA 단말기를 이용할 경우 무선인터넷을 통하여 TCP/IP 방식의 파일전송(FTP)이 가능하다. 따라서 1대 다중 통신이 가능하며 서버의 접근이 용이하다는 장점을 갖고 있다.

현장에 설치된 PDA 단말기는 계측장비에서 발생한 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 일시적으로 메모리에 저장한 후 스케줄링에 의해 주기적으로 육상의 서버에 데이터를 전송하게 된다. 따라서 원격 감시 시스템의 개발에 있어서 각종 센서와 이들을 연결하는 Interface 및 소프트웨어의 개발이 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 Windows CE 기반의

Interface 및 통신 프로그램을 작성하여 향후 기기 변경 및 센서 확장에 대한 호환성을 확보하였다.



Fig. 3. Examples of realtime display on text mode.

이 시스템과 웹의 연동(통합)은 본 시스템 구현을 위한 핵심 부분으로서, 본 연구에서는 PHP를 이용한 데이터베이스 접근 방식을 택하였다.

PHP(server-side HTML embedded scripting language)는 HTML 문서 내에 추가하여 서버에서 작동되는 스크립트 언어이다. PHP의 특징은 가장 기본적인 레벨에서 CGI 프로그램에서 할 수 있는 모든 것을 할 수 있다. form data를 가져오고, 동적인 웹페이지를 만들거나, Cookie를 보내고 받을 수도 있다. 특히 PHP의 가장 강력한 부분은 데이터베이스와의 연동이다. PHP를 사용하면 IMAP나 SNMP, NNTP, POP3, HTTP등의 프로토콜을 사용해서 다른 서비스들과 데이터를 교환할 수 있으며, 다른 CGI 프로그램(Javascript 등)에 비해 간단하게 웹 페이지를 구현할 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 MySQL을 이용하여 데이터베이스 서버를 구축하였다. 현장에 설치된 원격 감시 시스템은 매 10분마다 수온, 염분, pH 및 용존산소를 측정하고 일차적으로 PDA 단말기에 1시간 단위로 저장하여 무선 인터넷을 통하여 서버로 전송한다. 전송된 자료는 인위적인 가공을 거치지 않고 데이터베이스에 저장됨과 동시에 웹 서버에 전달되어 인터넷 사용자들을 위하여 실시간 웹 표출(Fig. 3)을 실시하게 된다.

2.4. 수지방정식

해수중의 용존산소는 수피내의 산소 공급과 소비의 수지균형에 의해서 조절되며, 해수 유

등 등에 의한 영향을 받는다. 이를 단위부피의 용존산소(C) 수치균형 식으로 정리하면 식 (1)과 같다(Thomann and Mueller, 1987).

$$\frac{dC}{dt} = \text{reaeration} + (\text{photosynthesis} - \text{respiration})$$

- sediment oxygen demand
- oxidation of CBOD \pm oxygen transport

(1)

대기와 직접적인 접촉이 없는 저층수의 경우, 대기보다는 표층수로부터 공급이 이루어지고, 퇴적물과의 경계면에서 이루어지는 소비 기작에 지배적인 영향을 받는다. 따라서 식 (1)에서 광합성 및 호흡 등이 저층수의 용존산소 변화에 미치는 영향보다 표층수에 의한 공급과 저층 퇴적물에 의한 소비 기작이 지배적이라 가정하면, 저층수의 용존산소 수치균형은 식 (2)와 같이 표현된다(Kuo et al., 1991).

$$\frac{dC}{dt} = \text{replenishment by vertical and horizontal diffusion and mixing}$$

- sediment oxygen demand - oxidation of CBOD

(2)

식 (2)에서 우변 첫째 항은 주기적인 해수유동에 의한 산소 공급을, 둘째 항은 저층 퇴적물에 의한 산소 소비를, 셋째 항은 수괴내의 생화학적 과정에 의한 산소 소비를 표현하는 Fig. 4와 같은 모형을 고려하고, 이를 수치균형 방정식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{dC}{dt} = \alpha(C_s - C) - \beta(C - C_d) - CBOD$$
(3)

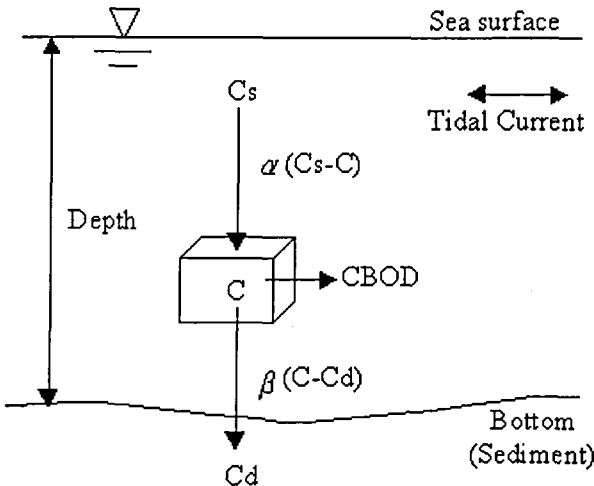


Fig. 4. A conceptual model of the dissolved oxygen(DO) budget for the bottom water.

이때, C는 저층수의 용존산소 농도(mg/l), C_s 는 표층수의 용존산소 농도(mg/l), C_d 는 저층 퇴적물의 산소 농도(mg/l), α 는 표층수로부터의 산소 공급계수(day^{-1}), β 는 퇴적물에 의한 산소 소비계수(day^{-1}), CBOD (Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand)는 생화학적 산소 요구량(mg/l/day)이다.

식 (3)에서 표층수에 의한 산소의 공급은 표·저층간의 농도차와 공급계수(α)에 의해서 결정되며, 산소 공급계수(α)는 해수 유동에 의한 영향을 고려하기 위하여 유속 관측 자료와 수온에 따라 변화하는 값으로 정

의하였다(식 4). 유속은 최강 유속값으로 평균화한 무차원 값을 사용하였다.

$$\alpha = K_a^{(T-20)} + P_a (U/U_{\max}) \quad (4)$$

이때, $K_a(\text{day}^{-1})$ 는 최저 산소 공급계수로서 수온 20°C의 보정 계수를 포함한 값이며, T (°C)는 수온, P_a 는 비례상수, U_{\max} (m/sec)는 최강 유속값이다.

퇴적물에 의한 산소 소비는 유기물이 분해되는 과정에서 이루어지며, 일반적으로 퇴적물의 산소 농도와 수온에 의해 지배적인 영향을 받는 퇴적물에 의한 산소 요구량(Sediment Oxygen Demand, SOD)으로 모식화 된다(DiToro and Connolly, 1980). 최근 Sloth et al.(1996)과 Tengberg et al.(2003)는 퇴적물의 재부유에 의해 산소 소비가 증가함을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 퇴적물 부유 농도에 의한 산소 소비를 고려하기 위하여 수온과 퇴적물 부유 농도에 따라 변화하는 소비계수(β)를 이용하였다. 저층에서의 산소 소비는 조류에 의한 퇴적물의 재부유 농도에 비례한다고 가정하고 식 (5)와 같이 산소 소비계수(β)를 정의하였으며, 퇴적물 부유 농도는 최대 농도로 평균화한 무차원 값을 이용하였다.

$$\beta = K_s^{(T-20)} + P_s (SS/SS_{\max}) \quad (5)$$

이때, $K_s(\text{day}^{-1})$ 는 최저 산소 소비계수로서 수온 20°C의 보정 계수를 포함한 값이며, P_s 는 비례상수, SS_{\max} (mg/l)는 퇴적물 최대 부유 농도 값이다.

Rouse(1938)는 임계 유속 이상에서 발생하는 저층 퇴적물의 수심별 재부유 농도를 침강 속도 및 전단유속(Shear velocity)과의 관계식으로 제시하였으며, Clarke and Elliott(1998)과 Shi et al.(2003)은 이러한 관계식을 이용하여 한 정점에서 수심별 퇴적물 부유 농도를 추정하였다. 본 연구에서도 같은 방법(Rouse, 1938; Clarke and Elliott, 1998; Shi et al., 2003)을 이용하여 조류에 의한 퇴적물의 재부유 농도를 추정하였다(식 6).

$$\frac{SS}{SS_a} = \left[\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^R \quad (6)$$

이때 SS (mg/l)는 수심 z 에서의 퇴적물의 재부유 농도, SS_a (mg/l)는 기준 수심(a)에서의 부유 농도, h (m)는 수심이며, $R = w_s/ku_*$ 은 Rouse number로서 침강속도(w_s), von Karman 계수(k), 전단유속(u_*)으로 정의된다.

퇴적물의 재부유 농도 추정을 위해 식 (7)과 같이 수심평균 유속과 관련된 전단 유속 (Clarke and Elliott, 1998)을 이용하였으며, 수심평균 유속은 관측 자료를 근거로 수심별 유속을 로그 함수에 적용하여 계산하였다.

$$u_* = \frac{kU}{[\ln(h/z_0) - 1]} \quad (7)$$

이때, u_* (m/s)는 전단유속, U (m/s)는 수심평균 유속, z_0 (m)는 해저면 거침(Bottom roughness)이다.

식 (6) ~ (7)을 대입하여 산소 소비계수(β)에 대한 식 (5)를 정리하면 다음과 같다.

$$\beta = K_s^{(T-20)} + P_s \left(\frac{SS_a}{SS_{\max}} \right) \left[\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^{\frac{w_s [\ln(h/z_0) - 1]}{k^2 U}} \quad (8)$$

저층 수괴내의 산소 소비는 수괴내의 유기물 분해에 필요한 생화학적 산소 요구량(CBOD)에 의해 결정되며, 탈산소계수(K_b , day^{-1})와 저용존산소 보정항을 이용하여 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$CBOD = K_b^{(T-20)} \left(\frac{C}{K_{BOD} + C} \right) C_b \quad (9)$$

이때 K_{BOD} 는 산소 소모율이 1/2로 줄어드는 용존산소 농도(mg/l)이며, C_b 는 최대 생화학적 산소 요구량(mg/L)이다.

용존산소 수치 균형 방정식 (3)의 해는 Runge-Kutta 방법으로 구하였다. 이때 초기 조건은 $C=C_0$ 를 이용하였으며, 표층수의 포화농도(C_s)는 8.0 mg/l , 초기 용존산소 농도(C_0)는 7.5 mg/l 로 설정하였다. 부유 물질의 침강속도는 하구역 세립질 퇴적물의 평균값에 준하는 2 mm/sec 로 가정하였으며(Shi et al., 2003), 해저면 거침정도는 $2 \times 10^{-4} \text{ m}$, Karman 계수는 0.4를 사용하였다. 퇴적물의 산소 농도(C_d)는 1.0 mg/l , 수괴내의 생화학적 산소 요구량(C_b)은 1.5 mg/l 로 가정하였으며, 최저 산소 공급계수(K_a), 최저 산소 소비계수(K_s) 및 수괴내의 탈산소계수(K_b)은 각각 0.5 day^{-1} , 0.3 day^{-1} 과 0.2 day^{-1} 로써 기존 연구 결과를 참고하였다(O'Connor and Thomann, 1972; Covar, 1976). 수치 해석 결과는 빈산소가 형성된 기간을 전후한 12일 동안(2001년 7월 18일~7월 29일)의 관측자료와 비교·검증하였다.

3. 결 과

3.1. 시계열 변동 특성

Fig. 5는 2001년 6월 ~ 2002년 6월의 용존산소 연속 관측 자료와 최근 5년(1997년 8월 ~ 2002년 5월) 동안의 국립수산과학원 해양환경조사 저층 용존산소 자료(정점 5)를 비교한 것이다. 최근 5년 동안의 평균 용존산소는 7.8 mg/L 이었으며, 월별 평균은 8월에 가장 낮은 5.6 mg/L , 2월에 가장 높은 10.2 mg/L 로서 4.6 mg/L 의 변동폭을 보였다. 연속 관측 자료에

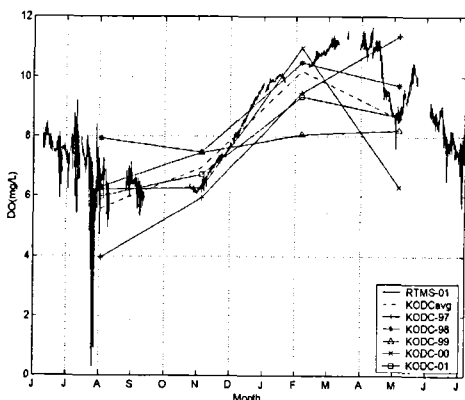


Fig. 5. Time series plot of the DO concentration for 5 years in Chunsu Bay.

서도 이러한 계절적인 변동 특성이 잘 나타났으며, 3개월 간격의 관측에서는 파악할 수 없는 단주기적인 변동을 잘 보여주고 있다.

용존산소와 조위 자료(2001년 6월과 7월, 15일간)의 비교에 의하면, 용존산소는 조위와 약 2~3시간 정도의 위상차를 가지고 주기적으로 변동하는 특성을 보여주고 있다.

용존산소의 변동폭은 조차에 따라 변하고 있는데, 6월과 7월의 소조기에는 1 mg/L 이내의 변동을 보인 반면, 대조기에는 각각 2 mg/L , 7 mg/L 내외의 변동폭을 보였다. 6월과 7월의 용존산소와 조위 자료를 이용한 Coherency 분석 결과, 6월과 7월 각각 약 11.9시간과 12.2시간에

서 유의한 값을 보이고 있으며, 위상차는 각각 3.5시간과 1.2시간이었다(Fig. 6). 이는 용존산소의 변동이 반일주기의 조석과 유의함을 보여주는 것으로, 간조 후 약 2~3 시간(최강 창조류) 정도에 용존산소의 최저치가 나타나는 것과 일치한다.

3.2. 수지모델 결과

Fig. 7은 수지 모델 결과를 빈산소 수괴가 관측된 기간(2001년 7월 18일 ~ 7월 29일)의 자료와 비교한 것으로써, 관측 자료의 단주기적인 변동과 빈산소 형성을 모델 결과에서 잘 보여주고 있다. 모델 결과의 평균 농도는 6.0 mg/L로서 관측 자료의 6.1 mg/L에 비해 0.1 mg/L 정도 낮게 추정되었다. 최고 농도와 최저 농도는 각각 7.5 mg/L, 1.7 mg/L로 관측 자료값 8.4 mg/L, 0.1 mg/L에 비해 좁은 변동 폭을 보였다(Fig. 7a). 관측 자료를 이용한 분석 결과, 총 288개(n)의 관측 자료에 대해 표준 추정 오차는 0.9 mg/L를 보였으며, 선형관계 분석 결과(Fig. 7b), $y=0.77x+1.5$ ($r^2=0.8$)의 비교적 좋은 선형 상관성을 보였다.

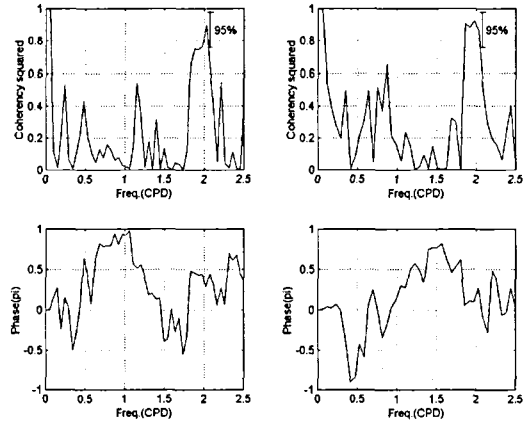


Fig. 6. Coherency between the concentration of DO and tidal elevation (a) in Jun., and (b) in Jul., 2001.

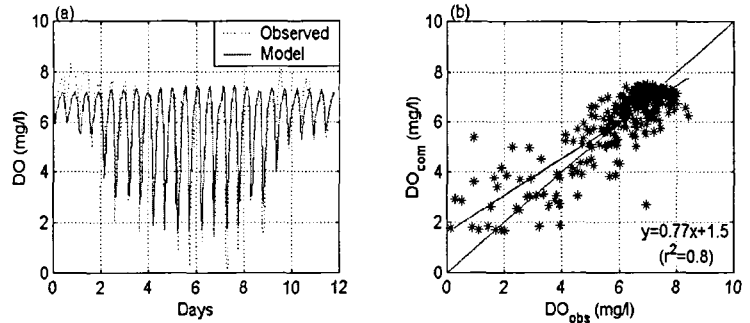


Fig. 7. Verification results of the model, (a) data comparison of model results with observed time series data for the period of 18-29, July, 2001. (b) Scatter plot of the model results against the observations.

$$\text{Standard error of estimate} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (10)$$

이때, n는 자료 개수, y는 모델 결과, x는 관측 자료이다.

용존산소 수지분석을 위하여 산소 공급과 소비의 기여도 분석을 수행하였다(Fig. 8). 빈산소 수괴 형성 시기의 표층수에 의한 산소 공급($\alpha(C_s - C)$)과 퇴적물에 의한 산소 소비($\beta(C - C_d)$)에 대한 시계열 자료로써, (a)는 산소 공급량, (b)는 산소 소비량, (c)는 산소 공급에 대한 소비의 상대적인 크기($\beta(C - C_d)/\alpha(C_s - C)$)이며, (d)는 용존산소 모델 결과이다.

모델 기간 동안 산소 공급계수(α)는 $0.5 \sim 1.7 \text{ day}^{-1}$, 산소 소비계수(β)는 $0.3 \sim 5.3 \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 그에 따른 산소 공급량은 $0.4 \sim 3.5 \text{ mg/L/day}$, 소비량은 $0.2 \sim 6.6$

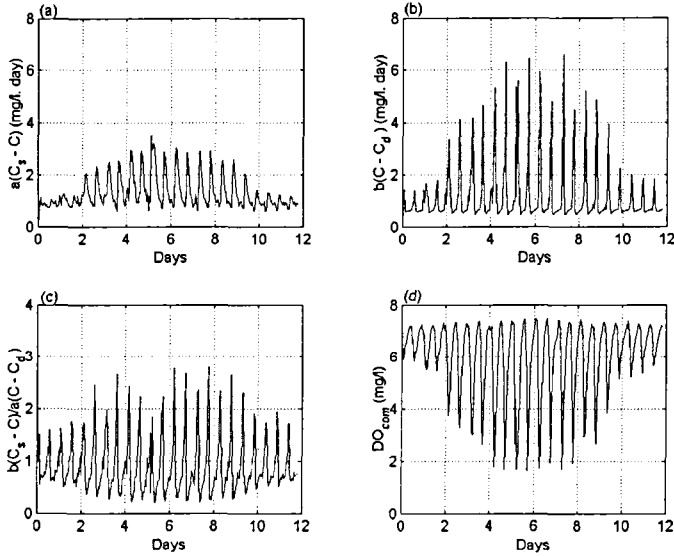


Fig. 8. Time variation of (a) the source term($\alpha(C_s - C)$), (b) the sink term ($\beta(C - C_d)$) of the dissolved oxygen, (c) the ratio of the sink to source term during the model run, and (d) dissolved oxygen of the model result.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 실시간 연안 수질 모니터링 시스템을 개발하여 천수만 해역에 설치 운용한 결과, 연안 환경 관리 시스템으로써의 활용 가능성을 확인할 수 있었으며, 상세 관측 자료에 대한 웹기반 데이터베이스를 구축할 수 있었다.

상세 관측 결과, 기존 자료에서는 볼 수 없었던 용존산소 단주기 변동 특성을 파악할 수 있었다. 특히 여름철 저층의 빈산소 현상이 세밀하게 관측되었으며, 무산소에 이르는 과정을 연속적으로 관측할 수 있었다. Coherency 분석 결과, 용존산소의 변동이 약 2 ~ 3시간의 위상차를 가지고 반일주기의 조석과 유의함을 보였으며, 변동폭은 조차에 따라 변하며 대조기에 가장 크게 나타났다. 이러한 단주기 변동 특성은 관측 자료에 나타난 비대칭적인 조류와 관련이 있는 것으로 판단된다.

빈산소 수괴가 관측된 기간(2001년 7월 18일~7월 29일)에 대한 모델 결과, 용존산소 단주기 변동 및 빈산소 형성을 효과적으로 재현할 수 있었다. 모델 결과는 관측 자료와 높은 선형 상관성($r^2=0.8$)을 보였으며, 표준 추정 오차는 0.9 mg/L를 보였다. 민감도 실험 결과, 산소 공급계수보다는 소비계수의 변화에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

본 연구 결과, 해수 유동에 의한 산소 공급율과 퇴적물 부유 농도에 의한 소비율의 변화를 이용하여 주기적인 변동과 빈산소화를 효과적으로 모형화할 수 있음을 보여주는 것으로 판단된다. 수치 모델에서 산소 공급계수(α)는 유속에 따라 변화하는 $0.5 \sim 1.7 \text{ day}^{-1}$ 의 값을 사용하였다. 산소 공급계수는 수온, 수심 및 유속 등의 조건에 따라 변화하는 값으로써, 기

mg/L/day의 범위를 보였다. 산소 공급에 대한 소비의 상대적인 크기는 0.2 ~ 2.8의 범위를 보였다. 저산소 농도는 산소 소비가 공급에 비해 상대적으로 큰 시기에 발생하는데, 산소 소비가 공급의 2배 이상 이면서 3 mg/L/day 이상의 산소 소비가 이루어지면 용존산소 농도는 4 mg/L 이하로 낮아지고, 산소 소비가 4.5 mg/L/day 이상에서는 2 mg/L 이하의 용존산소 농도를 보였다.

존의 연구에 의하면 $0.05 \sim 12.2 \text{ day}^{-1}$ 의 넓은 범위를 갖는다(Covar, 1976). 산소 공급과 소비의 수치 분석 결과, 퇴적물 부유 농도에 비례하는 $0.3 \sim 5.3 \text{ day}^{-1}$ 범위의 산소 소비계수(β)에 의한 산소 소비는 $0.2 \sim 6.6 \text{ mg/L/day}$ 의 범위로 산소 공급에 대해 0.2~2.8의 상대적인 크기를 보였다. 이러한 산소 소비량을 1 m 내외의 저층 퇴적물에서 대한 산소 요구량(SOD)으로 환산하면 $0.2 \sim 6.6 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 DiToro and Connolly(1980)에 의한 $0.2 \sim 4.0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 값보다 약간 크게 나타난다. Sloth et al.(1996)은 퇴적물의 재부유에 의해서 산소의 소비가 10배로 증가함을 보고하였고, Tengberg et al.(2003)은 퇴적물의 재부유에 의해 겨울철에도 산소 소비가 2배까지 증가한다고 보고하였다. 향후 이러한 값들에 대한 정량화 연구가 필요할 것으로 판단된다.

모델 결과에 의하면, 저층 용존산소의 빈산소화 과정에 있어서 산소 소비율의 역할이 중요한 것으로 나타난다. 이는 퇴적물에 의한 산소 소비의 중요성을 보여주는 결과로써, Park et al.(1996)은 퇴적물에 의한 산소 요구량이 일정 값 이상 존재할 경우 유입수의 용존산소 농도와 관계없이 저층수가 빈산소화 될 수 있음을 지적하였고, Rutherford et al.(1991)은 조류가 강한 하구역에서 퇴적물에 의한 산소 요구량이 총 산소 요구량의 90%를 설명할 수 있다고 보고하였다.

천수만은 서산 방조제의 건설 이후 유속장의 변화(유속의 약화)와 만 내에 산재한 가두리 양식 등으로 인하여 저층 유기퇴적물이 증가하고있다. 본 연구 결과는 비록 특정 조건 하에서 발생한 현상을 대상으로 하고 있지만, 빈산소 발생은 천수만의 건강상태를 단적으로 보여주는 예이다. 따라서 천수만의 유속분포와 저층 유기퇴적물의 증가를 고려할 때, 앞으로 빈산소 수피의 빈발 가능성은 충분히 높다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 대한민국 수로국, 1992. 수로기술연보, 서지 제 1433호.
- 충남대학교 해양연구소, 1996. 천수만의 해양환경. 해양연구소 심포지움 논문집, 67 pp.
- Boesch, D. F. and N. N. Rabalais, 1991. Effects of hypoxia on continental shelf benthos: comparisons between the New York Bight and the northern Gulf of Mexico. in Modern and ancient continental shelf anoxia. spec. publ. no. 58. Geol. Soc. London. 27-34.
- Clarke, S. and A. J. Elliott, 1998. Modelling Suspended Sediment Concentrations in the Firth of Forth. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 47, 235-250.
- Covar, A. P., 1976. Selecting the Proper Reaeration Coefficient for use in Water Quality Models. Presented at the U.S. EPA conference on Environmental Simulation Modeling, April 19-22, 1976. Cincinnati, Ohio.
- Diaz, R. J., 2001. Overview of Hypoxia around the world. J. Environ. Quality, 30(2), 275-281.
- DiToro, D. M. and J. P. Connolly, 1980. Mathematical Models of Water Quality in Large Lakes, Part 2: Lake Erie. EPA-600/3-80-065. 90-101.

- Kuo, A. Y., K. Park and M. Z. Moustafa, 1991. Spatial and temporal variabilities of Hypoxia in the Rappahannock River, Virginia, *Estuaries*, 14(2), 113-121.
- Park, K., A. Y. Kuo and B. J. Neilson, 1996. A numerical model study of hypoxia in the Tidal Rappahannock river of Chesapeake bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 42, 563-581.
- Ro, Y.J. and Y.H. Choi, 2004. Application of Realtime Monitoring of Oceanic Conditions in the Coastal Water for Environmental Management. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 39(2), 148~154.
- Rouse, H., 1938. Experiments on the mechanics of sediment suspension. *Proceedings of the Fifth Int'l Congress for Applied Mechanics*, Cambridge, Massachusetts, 550-554.
- Shi, Z., Zhou, H. J., Eittreim, S. L. and Winterwerp, J. C., 2003. Settling velocities of fine suspended particles in the Changjiang Estuary, China, *J. Asian Earth Sci.*, in press.
- Sloth, N. P., B. Reimann, L. P. Nielsen and T. H. Blackburn, 1996. Resilience of pelagic and benthic microbial communities to sediment resuspension in a coastal ecosystem, *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 42, 405-415.
- Tengberg, A., E. Almroth and P. Hall, 2003. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments: in situ measurements using new experimental technology. *J. Exp. Mar. Biol. and Ecol.* 285-286, 119-142.
- Thomann, R. V. and J. A. Mueller, 1987. *Principles of surface water quality modeling and control*, Haper & Row, publishers, New York, 644 pp.