

## 퇴적물 준설에 따른 수환경 영향 예측 모의

안재환 · 김미경<sup>†</sup> · 이미경 · 황병기\*

한국건설기술연구원 건설환경연구부 · \*상명대학교, 토목환경공학부

(2005년 8월 5일 접수, 2005년 11월 26일 채택)

## Modeling for Prediction of Water Quality According to Dredging Operation

Jae-Hwan Ahn · Mee-Kyung Kim<sup>†</sup> · Mi-Kyung Lee · Byung-Gi Hwang\*

Department of Construction Environmental Research, Korea Institute of Construction Technology

\*Department of Civil and Environmental Engineering, Sangmyung University

**ABSTRACT :** In order to predict the long-term effects of pollutants in sediment on the water quality and the improvement of water quality according to dredging operation, models applied to decide the location and the propriety of dredging were developed. At first, the area was divided into several segments and the developed model was applied to simulate the behaviors of contaminants in an aquatic environment by using estimated parameters. And then through the sensitivity analysis between parameters, the optimum values were determined. The long-term modelling in the area A forecasted that PCBs concentration in the hot spot was decreased from 3.1  $\mu\text{g/L}$  to 2.4  $\mu\text{g/L}$  in 30 years. Contaminants in sediment as a source of water pollution did not reduce remarkably in the long run. Therefore it is difficult to expect the improvement of water qualities without the fundamental isolation of contaminants from sediment. It is considered that the selective dredging in the spot improves the water quality consequently.

**Key Words :** Sediments, Dredging Operation, PCBs, Modeling

**요약 :** 퇴적물 내에 포함되어 있는 오염물질이 장기적으로 수질에 미치는 영향을 예측하고, 준설에 따른 수질개선 효과를 예측하여 준설규모나 위치를 선정하는데 적용할 수 있는 수환경 모형을 개발하였다. 대상수역의 수질수문자료를 중심으로 구역을 분획하고 매개변수를 추정하여 모의한 후, 변수에 대한 민감도 분석을 통하여 최적의 값들을 결정하였다. 이를 토대로 시범수역 A의 PCBs 농도를 장기간 모니터링 한 결과, 가장 오염되어 있는 구간의 수층 PCBs 농도는 30년 후 3.1  $\mu\text{g/L}$ 에서 2.4  $\mu\text{g/L}$ 로 감소하는 것으로 예측되었다. 이는 퇴적층의 오염물질이 수층의 오염공급원으로 존재하는 한, 장시간이 지나더라도 수층의 농도는 크게 감소하지 않아 퇴적물로부터의 오염원의 공급을 원천적으로 차단하지 않고는 수질개선효과는 기대하기 어려울 것으로 나타났다. 따라서 심각한 오염지역의 오염물질을 선택적으로 준설함으로써 수층의 수질개선 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

**주제어 :** 퇴적물, 준설, PCBs, 모델링

### 1. 서 론

수질개선을 위한 정부의 부단한 노력에도 불구하고 지난 10여 년간 팔당상수원을 비롯한 국내 호소의 수질은 크게 개선되지 않고 있는 실정이다(Fig. 1). 이는 여러 가지 요인이 있을 수 있으나 특히 호소 바다의 퇴적물로부터 오염물질이 지속적으로 수체로 유입되는 것도 중요한 원인 중의 하나인 것으로 알려져 있다.

오염된 퇴적물을 처리하는 방법에는 여러 가지가 있으나 오염물을 근본적으로 제거한다는 점에서 준설이 현재까지 이용되는 가장 일반적인 처리방법이다. 그러나 준설의 경우, 퇴적층의 오염물이 재부유되는 문제가 있어, 준설작업에 따른 환경영향에 대한 연구와 더불어 대안기술에 대한 연구가 광

범위하게 이루어지고 있다.

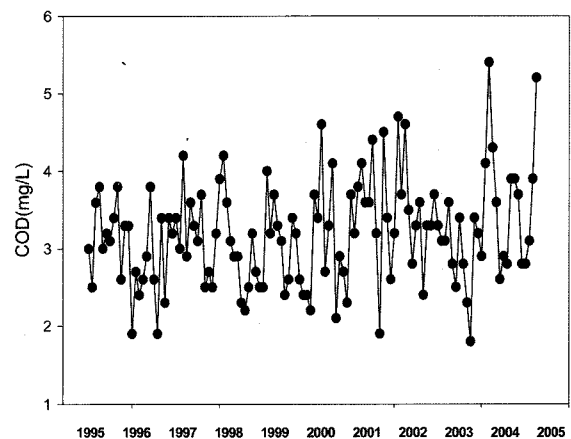


Fig. 1. Chronological variation of water quality on Paldang Lake.<sup>1)</sup>

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: mkkim@kict.re.kr  
Tel: 031-910-0617

Fax: 031-910-0291

국내에서는 창원과 마산의 공업단지로부터 마산만으로 유입되는 중금속 부하를 측정하고, 중금속 수치분석을 위한 수질모델이 개발되었다. 이 모델을 통하여 유입 오염부하량과 마산만 입구에 퇴적되어 있는 중금속의 이동경로, 분포, 배출량 등을 예측 할 수 있었다.<sup>2)</sup> 미국 샌프란시스코만의 준설에 대한 연구에서는 SFBM(San Francisco Bay Model)을 개발하였으며, 유사이동 모델을 사용하여 준설 후 시간에 따른 부유사의 이동 현상을 시뮬레이션 하였다.<sup>3)</sup> 또한 미국 매사추세츠주 New Bedford 항구의 퇴적층의 PCBs가 수층으로 이동하는 기작을 규명하였으며, 준설이 수층의 PCBs 농도를 낮추는데 기여하는 정도를 파악하고자 다양한 복원기법을 통하여 수층의 수질개선 정도를 시뮬레이션 하였다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 퇴적물 준설 시 발생할 수 있는 오염물질의 확산모형을 개발 적용함으로써 향후 퇴적물 준설에 필요한 기초자료로서 활용하기 위하여, 퇴적물의 준설 시 호소 및 정체된 하천에서 발생하는 수층-퇴적층 간의 오염물질 상호전달 기작을 기초로 퇴적물의 준설에 따른 수환경의 영향을 예측할 수 있는 모형을 개발하여 준설 후 수질개선 효과를 모의하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 수환경 영향예측 모델 개발

#### 2.1.1. 모델의 원리

수층의 한 지점 *i*에서 물질수지 방정식은 식 (1)과 같으며, 퇴적층 내 임의의 지점 *i*에서 물질수지식은 식 (2)과 같다.

$$V_{1i} \frac{dC_{T_{1,i}}}{dt} = \sum_{j=1}^N (Q_{i,j} C_{T_{1,j}} - Q_{j,i} C_{T_{1,i}}) + \sum_{j=1}^N E_{i,j} (C_{T_{1,j}} - C_{T_{1,i}}) - K_{f,i}^{12} A_s \left( \frac{f_{d2,i} C_{T_{2,i}}}{\phi_{2,i}} - f_{d1,i} C_{T_{1,i}} \right) - K_{1,i} V_{1,i} C_{T_{1,i}} - v_{s,i} A_s f_{p1,i} C_{T_1} + v_{u,i} A_s f_{p2,i} C_{T_{2,i}} + W_{T_{1,i}} \quad (1)$$

$$V_{2i} \frac{dC_{T_{2,i}}}{dt} = -K_{f,i}^{12} A_s \left( \frac{f_{d2,i} C_{T_{2,i}}}{\phi_{2,i}} - f_{d1,i} C_{T_{1,i}} \right) - K_{2,i} V_{2,i} C_{T_{2,i}} + v_{s,i} A_s f_{p1,i} C_{T_{1,i}} - v_{u,i} A_s f_{p2,i} C_{T_{2,i}} - v_{d,i} A_s f_{p2,i} C_{T_{2,i}} + K_{f,i}^{23} A_s \left( \frac{f_{d3,i} C_{T_{3,i}}}{\phi_{3,i}} - \frac{f_{d2,i} C_{T_{2,i}}}{\phi_{2,i}} \right) + E_{23,i} (C_{T_{3,i}} - C_{T_{2,i}}) \quad (2)$$

여기서, 침자 1, 2, 3은 각각 수층, 상부침전층(저표면층), 하부침전층(저면저층)을 뜻하며,  $C_{T_i}$ 은 구획 *i*에서 총 독성물질 농도,  $Q_{ij}$ 와  $E_{ij}$ 는 각각 구획 *i*와 *j*사이의 유량과 확산계수,  $K_{f,i}$ 는 수층과 저표면층 및 저표면층과 저면저층 사이의 확산에 의한 수직교환계수,  $A_s$ 는 수층과 저면표층과의 접촉

면적,  $\phi_i$ 는 저층에서의 공극률,  $f_{p,i}$ 는 입자성 독성물질의 분율,  $K_i$ 는 가수분해, 광분해, 산화/환원, 그리고 생분해에 의한 총 감쇄율,  $v_{s,i}$ ,  $v_{u,i}$ ,  $v_{d,i}$ 는 각각 침강, 재부유, 그리고 순침전속도,  $W_{T_{1,i}}$ 는 수층에서 외부로부터의 오염부하량이다.

퇴적층에서 총 독성물질 농도  $C_T$ 는 식 (3)과 같이 입자상 농도  $C_p$ 와 공극수에서의 농도  $C_{pore}$ 의 합으로 표시할 수 있으며, 공극수에서의 농도는 콜로이드에 부착되어 있는 용존성 형태  $C_d^{DOC}$ 와 자유로운 상태에 있는 용존성형태  $C_d^f$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$C_T = C_p + C_{pore} \quad (3)$$

$$C_{pore} = C_d^f + C_d^{DOC} \quad (4)$$

$$C_d^{DOC} = m_{DOC} K_{DOC} C_d^f \quad (5)$$

그러므로 총 독성물질농도는 용존성, 입자성, 콜로이드성의 3성분의 합으로 아래 식 (6)과 같이 표현될 수 있고, 각 성분별 농도는 총 독성물질 농도의 분율로서 나타낼 수 있다.<sup>5)</sup>

$$C_T = mK_p C_d^f + C_d^f + m_{DOC} K_{DOC} C_d^f = (mK_p + 1 + m_{DOC} K_{DOC}) C_d^f \quad (6)$$

$$C_p = f_p C_T \quad C_d^f = f_d^f C_T \quad C_d^{DOC} = f_d^{DOC} C_T \quad (7)$$

$$f_p = \frac{mK_p}{mK_p + 1 + m_{DOC} K_{DOC}} \quad (8)$$

$$f_d^f = \frac{1}{mK_p + 1 + m_{DOC} K_{DOC}} \quad (9)$$

$$f_d^{DOC} = \frac{m_{DOC} K_{DOC}}{mK_p + 1 + m_{DOC} K_{DOC}} \quad (10)$$

$$f_p + f_d^f + f_d^{DOC} = 1 \quad (11)$$

#### 2.1.2. 모델의 반응 메커니즘

##### (1) 퇴적물층과 수층사이의 수직교환

수층과 퇴적물층과의 상호작용은 Fig. 2에서와 같이 침강 및 부유에 의한 입자상 물질의 이동과 수직확산에 의한 용존성 오염물질의 교환으로 분류된다. 그림에서  $C_p$ 와  $C_d$ 는 오염물질의 입자상 및 용존상 농도이며, 침자 1, 2, 3은 수층, 상부침전층, 하부침전층을 각각 지칭한다.  $A_s$ 는 수층과 저표면층사이의 면적으로 수직교환이 발생하는 면적이고,  $v_u$ 는 재부유 속도,  $v_s$ 는 침강속도로서 입자상 물질의 이동에 관계하는 상수이며,  $H_2$ 와  $H_3$ 는 상부침전층 및 하부침전층의 깊이이다.

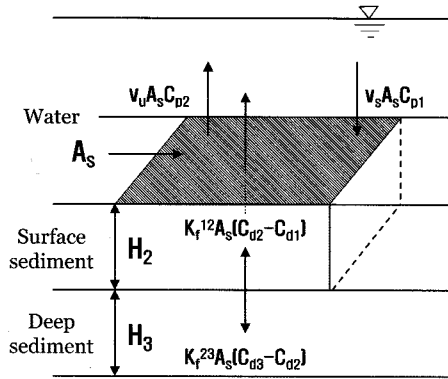


Fig. 2. Vertical exchange mechanism.

(2) 수층과 대기층사이의 교환

퇴적물로부터 운송된 오염물질은 수층에서 이류 및 확산에 의하여 운송이 되며, 오염물질의 특성에 따라 수면에 접한 대기층과의 교환에 의하여 운송된다. 수층과 대기층과의 운송기작은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V \frac{dC_T}{dt} = k_l A_s \left( \frac{C_g}{H_e} - f_d C_T \right) \tag{12}$$

수면을 중심으로 상부와 하부에 매우 얇은 기체막과 액체막으로 되어 있다고 가정하여 이 막을 통하여 농도 차이에 의하여 수층과 수면 위 대기층과의 이동이 일어난다고 보는 것이다. 휘발에 대한 질량전이계수  $k_l$ 은 다음과 같이 산정할 수 있으며,  $K_l$ 과  $K_g$ 는 액체막과 기체막 전이계수이다.

$$\frac{1}{k_l} = \frac{1}{K_l} + \frac{1}{H_e K_g} \tag{13}$$

(3) 수층에서의 이류 및 확산 운송

수직교환을 통하여 수층으로 유입된 오염물질은 수층에서의 운송 메카니즘인 이류와 분산에 의하여 농도가 결정된다.

(4) 환경학적 변환 과정에 의한 손실

광분해, 가수분해, 생분해 등 환경학적 변환에 의한 손실은 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $k_T$ 는 생분해, 광분해, 가수분해에 의한 소멸기작을 대표하는 총괄매개변수이며,  $k_b$ ,  $k_p$ ,  $k_h$ 는 각각 생분해, 광분해, 가수분해 계수이다. 퇴적물층은 무산소상태이므로 생분해율이 높지 않아 변수는 0.001 ~ 0.1/day의 범위에 있다.

$$V \frac{dC_T}{dt} = -k_T V C_T \tag{14}$$

$$k_T = k_b + k_p + k_h \tag{15}$$

2.2. 모델의 적용성 검증

본 연구에서는 시험수역을 선정하여 모형의 적용성을 검증하였으며, 4차에 걸친 대대적인 준설사업을 수행한 A 지

역을 시험수역으로 선정하였다. 하지만 시험수역 A는 퇴적물 내 오염물질의 자료가 부족하여, 미국 New Bedford 항구의 PCBs 퇴적물에 대한 자료를 이용하여 모의하였다. 이 지역은 PCBs의 배출이 1970년에 중단되었으나, 현재까지도 수층의 PCBs 농도가 높아 조업을 하지 못하고 있는 항구로서, 외부유입 오염원이 차단된 상태에서 내부 오염원 즉, 퇴적물에 포함되어 있는 PCBs가 수층으로 지속적으로 배출되고 있는 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 시험수역 A에 New Bedford 항구의 오염조건을 가정하여 모형의 적용성을 평가하였다.

2.2.1. New Bedford 항구 모의

(1) 소구간 분할

대상 수역을 수질자료를 중심으로 Fig. 3과 같이 26개 수층 소구간으로 구성하였으며, 26개의 수층과 하부의 4층의 퇴적층을 동일하게 분할하여 총 130개의 소구간으로 구성하였다. 퇴적물층은 상부로부터 1층 6 cm, 2층 8 cm, 3층 12 cm, 4층 16 cm로 퇴적층 분석 자료에 근거하여 층의 두께를 결정하였다. 또한 대상 수역의 유량, 단면적, 수층의 난류확산계수, 소구간별 길이, 수심 및 체적을 모형 구성의 자료로서 이용하였다.

(2) 매개변수의 추정

본 연구에서 사용된 주요 매개변수를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

① 분배계수

대상 수역의 PCBs는 주로 Aroclor 1242와 Aroclor 1254로 구성되어 있으며, 분배계수  $K_{ow}$ 는  $10^5 \sim 10^6$  L/kg 범위에 분포하는 것으로 조사되었다. 따라서 수층의 분배계수  $\Pi$ 는 Brownawell과 Farrington<sup>6)</sup>의 연구결과를 근거로  $K_{ow}$ 와 유사한 값을 가지는 것으로 가정하였다. 침전물에서 분배계수는 일반

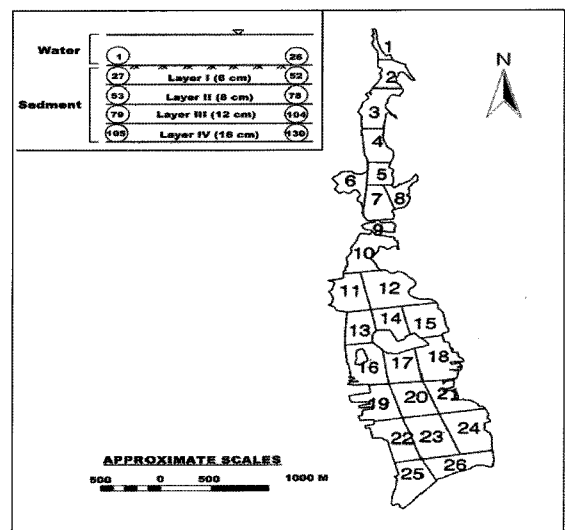


Fig. 3. Segmentation system of the New Bedford Harbor, Massachusetts.

적으로 수층보다 낮은 것으로 알려져 있으며 Karickhoff의 연구 결과에 의하면,  $K_{ow}$ 의 0.1~0.001배의 값을 가지는 것으로 보고하고 있다.<sup>7)</sup> 따라서 침전물 분배계수  $K_p$ 는  $10^3 \sim 10^4$  L/kg의 값을 적용하였으며, 콜로이드상과 용존상 사이의 분배계수  $K_{DOC}$ 는  $K_{ow}$ 와 유사하거나 약간 작은 값을 가지는 것으로 보고하고 있어  $10^5$  L/kg을 적용하였다.

### ② 수직 교환계수

공극수와 수층사이의 확산은 분자확산계수에 의하여 산정되며 그 범위는 대략  $10^{-5} \sim 10^{-7}$   $cm^2/s$  정도이다. 그러나 Sch-noor는 저서생물에 의한 교란이 공극수와 수층사이의 오염물질의 교환을 증가시킬 수 있다는 연구 결과를 발표하였다.<sup>8)</sup> 따라서 본 연구에서는 생교란에 의한 영향을 고려하여 수층과 퇴적물 표층, 퇴적물 표층과 퇴적물 저층들 사이의 교환계수에 각각  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  및  $10^{-5} \sim 10^{-7}$   $cm^2/s$ 를 적용하였다.

### ③ 증발율 상수

증발에 관한 헨리의 상수는 PCBs의 경우  $7.65(\pm 4.5) \times 10^{-3}$   $atm \cdot m^3/mole$ 를 적용하여 증발율 상수를 산정하였으며, 본 모델에서 1.0~3.0 m/d를 모형에서 적용하였다.

### ④ 환경변환 계수

환경학적 변환은 광분해, 가수분해, 생분해 등에 대한 변환의 합으로 산정한다. PCBs와 같은 화학물질의 경우에, 광분해와 가수분해는 중요한 프로세스가 아니며, 아주 특별한 환경을 제외하고는 PCBs는 산화, 환원, 부가, 제거 등의 반응이 일어나지 않는다고 보고되었다.<sup>9)</sup> DDT와 같은 살충제는 산성, 중성 및 염기성 가수분해 계수가 각각 35.6,  $6.84 \times 10^{-6}$ , 0/M · hr이며, PCBs는 모두 0/M · hr로 주어졌다. 생분해의 경우에도 0을 적용하였다.

**Table 1.** Physicochemical parameters used in the model

| Notation  | Description   | Value                        |
|-----------|---|------------------------------|
| $\Pi$     | Water column partition coeff.                             | $10^5 - 10^6$ L/kg           |
| $K'_p$    | Sediment partition coeff.                                 | $10^3 - 10^6$ L/kg           |
| $K_{ow}$  | Octanol/water partition coeff.                            | $10^6$ L/kg                  |
| $K_{DOC}$ | DOC partition coeff.                                      | $10^5$ L/kg                  |
| $m_1$     | Solids conc. in water columns                             | 2 - 8 mg/L                   |
| $m_2$     | Solids conc. in sediments                                 | 500 - 700 g/L                |
| $m_{DOC}$ | DOC conc. in sediments                                    | 10 - 30 mg/L                 |
| $f_{oc}$  | Fraction organic carbon in water columns                  | 0.07                         |
| $f_{soc}$ | Fraction organic carbon in sediments                      | 0.02                         |
| $D_{ij}$  | Diffusion coeff. at interfaces i, j                       | $10^4 - 10^6$ $cm^2/s$       |
| $K_f$     | Vertical exchange coeff.                                  | $10^{-5} - 10^{-4}$ $cm^2/s$ |
| $k_1$     | Volatilization rate constant                              | 1.0 - 3.0 m/d                |
| $\Phi$    | Porosity  | 0.75 - 0.9                   |
| K         | Lumped parameter for environmental transformation process | 0.0                          |
| $C_g$     | Gas phase toxicant concentration                          | 0.0                          |
| T         | Temperature   | 30 - 70 °F                   |

**Table 2.** PCBs concentrations in sediment layers (mg/kg)

| Segment No. | Sediment layer 1 | Sediment layer 2 | Sediment layer 3 | Sediment layer 4 |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1           | 200.0            | 400.0            | 300.0            | 50.0             |
| 2           | 1,200.0          | 1,500.0          | 1,000.0          | 75.0             |
| 3           | 600.0            | 1,000.0          | 800.0            | 50.0             |
| 4           | 400.0            | 500.0            | 400.0            | 25.0             |
| 5           | 300.0            | 400.0            | 400.0            | 12.5             |
| 6           | 300.0            | 350.0            | 350.0            | 12.5             |
| 7           | 200.0            | 250.0            | 200.0            | 12.5             |
| 8           | 100.0            | 200.0            | 200.0            | 12.5             |
| 9           | 50.0             | 100.0            | 100.0            | 12.5             |
| 10          | 10.0             | 15.0             | 15.0             | 5.0              |
| 11          | 10.0             | 15.0             | 15.0             | 5.0              |
| 12          | 15.0             | 20.0             | 20.0             | 5.0              |
| 13          | 15.0             | 20.0             | 20.0             | 2.5              |
| 14          | 15.0             | 20.0             | 20.0             | 2.5              |
| 15          | 15.0             | 20.0             | 20.0             | 2.5              |
| 16          | 2.5              | 5.0              | 5.0              | 2.5              |
| 17          | 2.5              | 5.0              | 5.0              | 2.5              |
| 18          | 2.5              | 5.0              | 5.0              | 2.5              |
| 19          | 2.5              | 5.0              | 5.0              | 2.5              |
| 20          | 2.5              | 5.0              | 5.0              | 2.5              |
| 21          | 2.5              | 5.0              | 5.0              | 2.5              |
| 22          | 7.5              | 10.0             | 10.0             | 5.0              |
| 23          | 7.5              | 10.0             | 10.0             | 5.0              |
| 24          | 10.0             | 15.0             | 15.0             | 5.0              |
| 25          | 15.0             | 20.0             | 20.0             | 5.0              |
| 26          | 15.0             | 20.0             | 20.0             | 5.0              |

### ⑤ 기타

수층에서의 고형물 농도는 2~8 mg/L, 퇴적물층에서의 고형물 농도는 500~700 g/L를 적용하였다. 퇴적물층에서의 DOC 농도는 10~30 mg/L를, 수층에서의 농도는 상당히 작아 무시하였다. 수층과 퇴적물층에서의 유기탄소 비율은 0.07, 0.02를 각각 적용하였다.

### (3) 부하량 산정

대상 수역은 1970년부터 외부로부터의 PCBs 유입이 중단된 상태이며, 그때까지 하상에는  $1.5 \times 10^5$  kg이 퇴적된 것으로 추정하고 있다. Table 2에 소구간별 · 퇴적층별 PCBs 농도를 나타내었으며, 퇴적 표층(0~8 cm)보다 하부층(9~16 cm)의 오염이 더 심각한 것으로 조사되었다. 이는 상류에서 오염되지 않은 토사가 유입되어 퇴적층에 쌓였기 때문인 것으로 판단된다.

## 2.2.2. 시범수역 A 모의

### (1) 소구간 분할

대상 수역을 수질자료를 중심으로 10개 소구간으로 분할하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. 모형 구성에 필요한 유

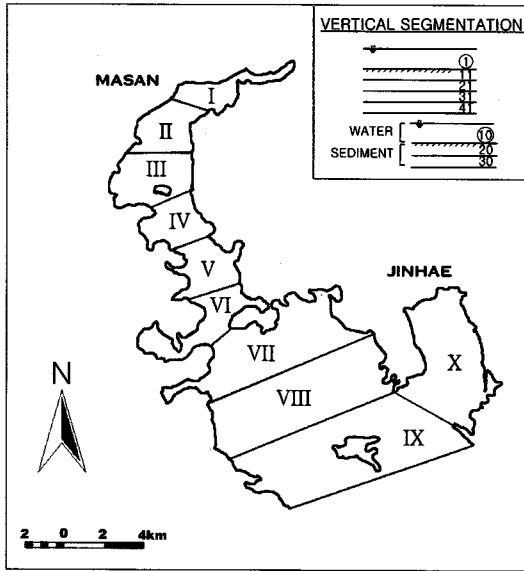


Fig. 4. Segmentation system of the area A.

Table 3. Surface area, depth and volume of each segments in the area A

| No. of segment | Surface Area (km <sup>2</sup> ) | Depth (m) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|----------------|---------------------------------|-----------|--------------------------|
| I              | 1.180                           | 10        | 11,800,000               |
| II             | 2.550                           | 10        | 25,500,000               |
| III            | 3.570                           | 13        | 46,410,000               |
| IV             | 2.120                           | 15        | 31,800,000               |
| V              | 2.900                           | 17        | 49,300,000               |
| VI             | 3.490                           | 18        | 62,820,000               |
| VII            | 11.810                          | 15        | 177,150,000              |
| VIII           | 12.280                          | 15        | 184,200,000              |
| IX             | 15.396                          | 13.5      | 207,846,000              |
| X              | 10.264                          | 10        | 102,640,000              |

Table 4. Cross-sectional area and mixing length of the area A

| From | To | Boundary length (m) | Depth (m) | Cross section area(m <sup>2</sup> ) | Mixing length (m) |
|------|----|---------------------|-----------|-------------------------------------|-------------------|
| 1    | 2  | 988                 | 10        | 9,880                               | 1,975             |
| 2    | 3  | 2,371               | 10        | 23,710                              | 1,877             |
| 3    | 4  | 1,482               | 10        | 14,820                              | 1,975             |
| 4    | 5  | 1,185               | 15        | 17,775                              | 1,975             |
| 5    | 6  | 1,679               | 15        | 25,185                              | 1,778             |
| 6    | 7  | 988                 | 20        | 19,760                              | 2,766             |
| 7    | 8  | 6,224               | 15        | 93,360                              | 3,062             |
| 8    | 9  | 5,532               | 15        | 82,980                              | 4,050             |
| 9    | 10 | 5,924               | 15        | 88,860                              | 4,050             |
| 10   | 0  | 3,842               | 10        | 40,879                              | 2,845             |

량, 단면적, 수층의 난류확산계수 등을 Table 3에 소구간별 길이, 수심 및 체적을 Table 4에 나타내었다. 또한 변수들은 앞에서 구한 값을 적용하였으며, 하상퇴적물의 PCB 농도는 New Bedford 항구의 자료를 이용하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. New Bedford 항구 모의 결과

##### (1) 모형의 보정 및 민감도 분석

모형 시뮬레이션 결과에 결정적인 영향을 미치는 주요 매개변수에 대한 민감도 분석을 통하여 변수별로 적절한 값을 선택하고자 하였다. 주요 매개변수로는 분배계수, 고품물의 농도, 수직교환계수, 용존성 유기물질의 농도 등이며, 매개변수를 1개씩 변화시키면서 수층의 용존상 및 입자상 PCBs 농도 실측값에 근접하도록 모의하여 민감도를 파악하였다.

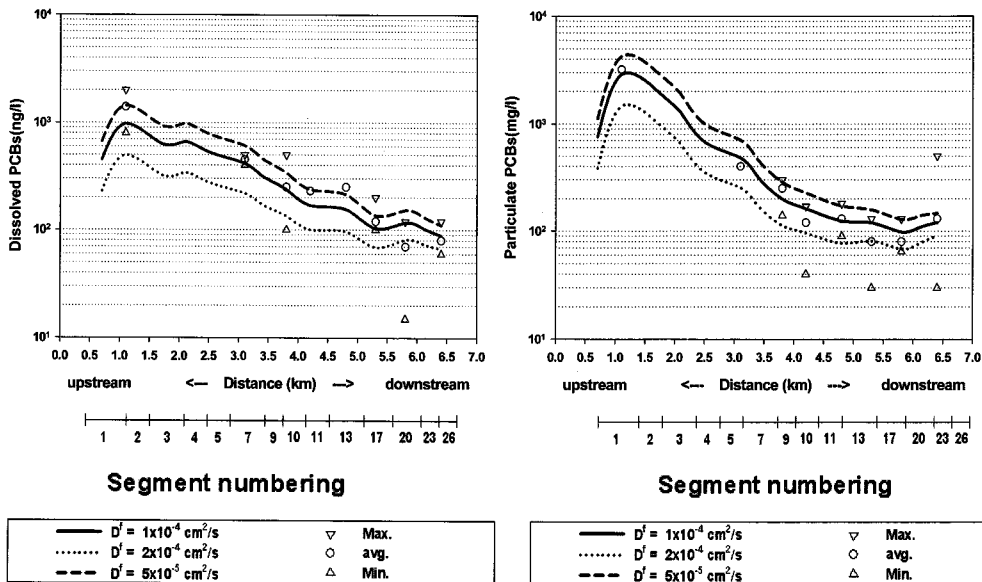


Fig. 5. Model sensitivity to vertical exchange coefficients.

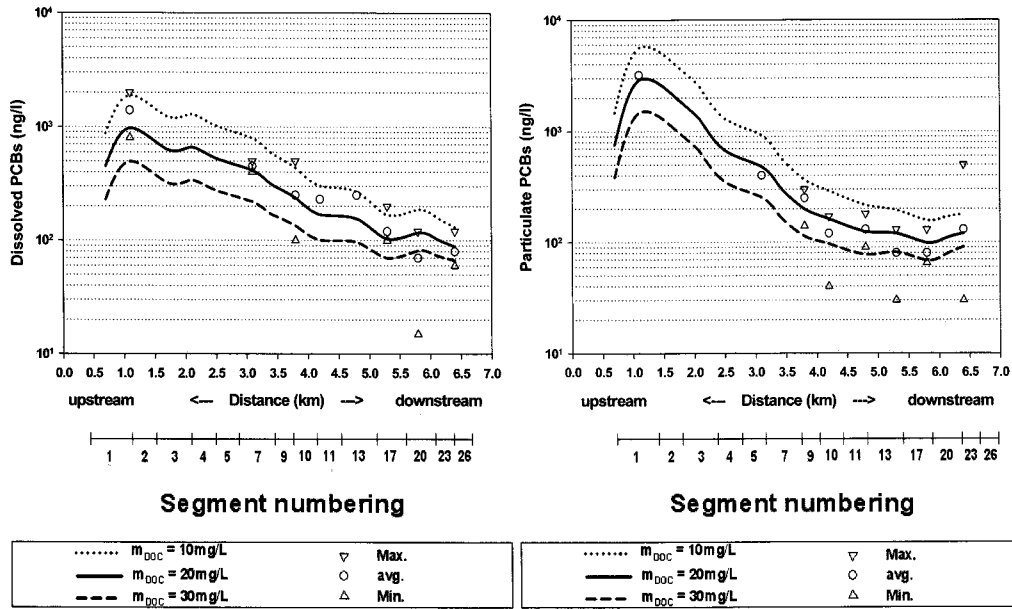


Fig. 6. Model sensitivity to dissolved organic carbon concentrations.

① 수직교환계수

분자 확산계수 및 생교란에 의한 영향을 반영한 수직확산 계수를  $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$  값의 범위에서 모의한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 수직확산계수가  $5 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-4}, 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 인 경우를 모의한 결과, 지점에 따라 차이는 있으나  $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 를 사용하여 모의한 결과가 수층의 실측자료를 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다.

② 용존성 유기물질 농도

침전물의 공극수에 존재하는 PCBs는 용존상뿐만 아니라 콜로이드상 입자에도 흡착되어 있으며 이는 용존성 물질로 간주된다. 대상 수역의 하상 퇴적물내의 용존성 유기물질 농

도는 약 20 mg/L이므로 본 연구에서 이를 기준으로  $\pm 10 \text{ mg/L}$  범위에서 모의하였다. 모의 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 20 mg/L의 모의결과가 수층의 농도를 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다.

③ 상전이 기작

일반적으로 수층에서 특정 오염물질의 농도가 높다면, 퇴적물 표층의 공극수에서 용존성 물질의 농도가 높게 나타난다. 그러나 대상 수역 하상퇴적물의 용존성 PCBs 농도는 0.11 mg/L이며 수층의 입자상 및 용존상 PCBs는 각각 3.5와 1.2  $\mu\text{g/L}$ 로 나타나, 수층에서의 농도가 과소평가된 것으로 사료된다.

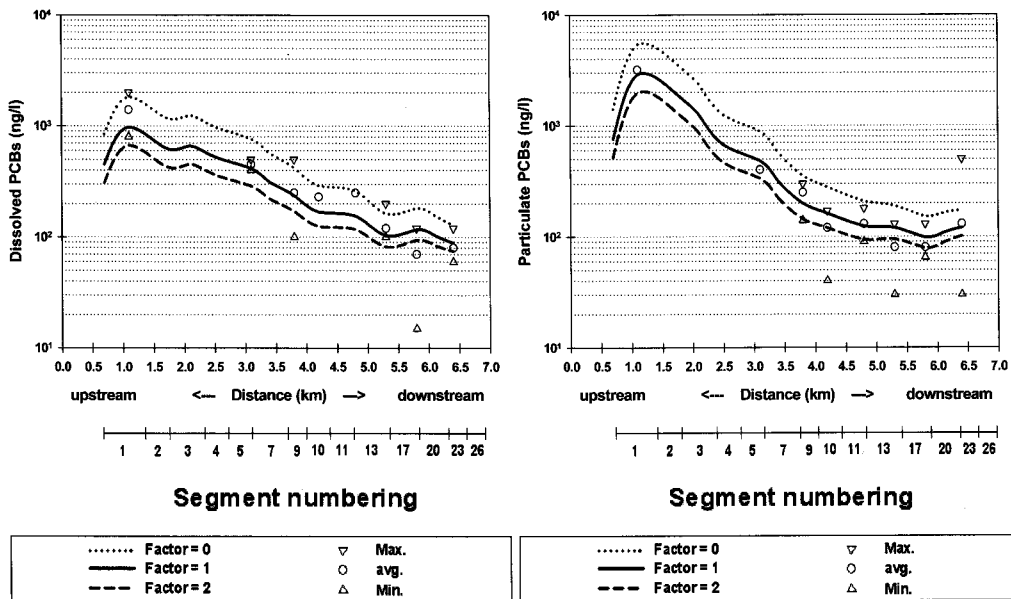


Fig. 7. Model sensitivity to phase transfer mechanism.

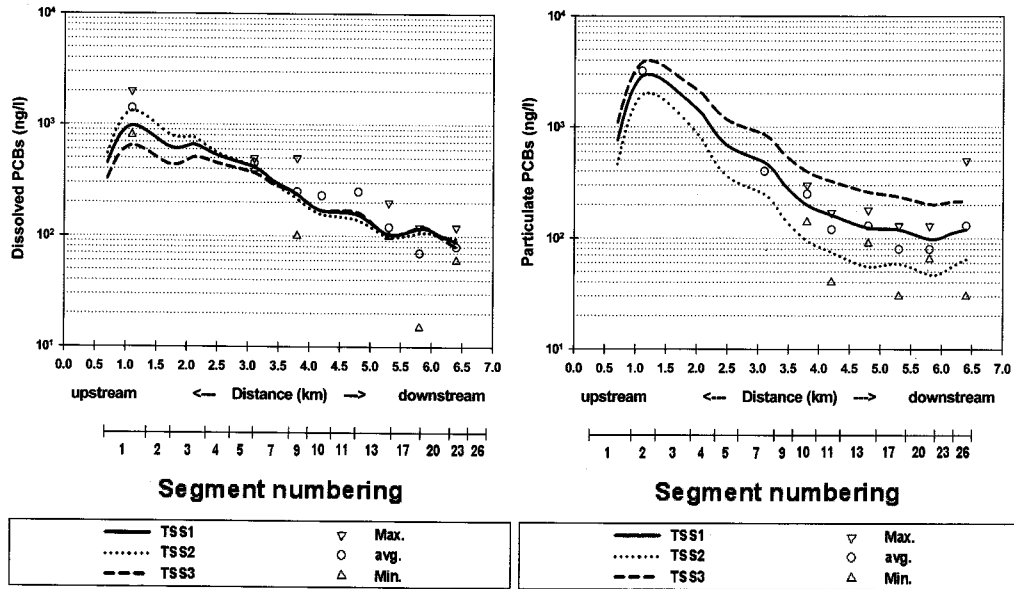


Fig. 8. Model sensitivity to solid concentration in the water column.

Fig. 7에서 상전이가 없는 경우(factor = 0)에 예상대로 수층의 용존상 농도가 과소평가되고 있으며, 입자상은 소구간 2를 제외하고는 실측 농도와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 상전이가 분배계수에 의하여 결정된 용존상 농도와 같은 만큼 일어나는 경우(factor = 1)를 가정하여 모의한 결과, 수층의 용존상 및 입자상 실측 농도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 2배의 상전이가 일어나는 경우 (factor = 2)는 수층의 실측 용존상 농도는 무난히 모의하였으나, 입자상 농도는 과대평가한 것으로 나타났다. 이 결과로 보아 상전이가 기작은 수층의 높은 농도를 제대로 반영하기 위하여 반드시 필요한 메카니즘이며, factor = 1의 상전이가 있는 것을 가정한 경우가 실측 수층의 농도를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

④ 고형물의 농도

수층에서의 고형물의 농도의 분포를 2~4(TSS1), 4~8(TSS2), 6~12(TSS3) mg/L로 변화시키면서 모의하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 고형물 농도가 높은 경우에는 입자상의 농도가 높았으며, 낮은 경우는 그 반대였다. 농도의 분

포가 4~8 mg/L인 경우가 실측 농도를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

(2) 장기간 시뮬레이션

민감도 분석을 통하여 구한 주요 계수들을 적용하여 장기간 수층 PCBs 농도를 시뮬레이션하였으며, 실측 농도자료가 있는 2, 3, 13 소구간에 대한 모의결과를 Fig. 9~11에 각각 도시하였다. Fig. 9에 가장 오염되어 있는 소구간(Segment 2)의 모의 결과를 나타내었으며, 수층의 농도는 2~5 µg/L(평균 3µg/L)에서 30년 후에 1~3 µg/L(평균 1.5µg/L)로 감소하는 것으로 예측되었다. 그에 따라 퇴적표층의 농도도 1200 mg/L로부터 750 mg/L로 줄어드는 것으로 나타났다. 가장 오염되어 있는 곳으로부터 약 1.5 km 하류에 위치하고 있는 소구간(Segment 5)의 모의 결과는 Fig. 10에 나타내었으며, 수층의 농도는 0.5~1.5 µg/L(평균 0.75 µg/L)에서 30년 후에 0.25~0.75 µg/L(평균 0.5 µg/L)로 감소하는 것으로 예측되었다. 소구간 2로부터 4 km 하류에 위치한 소구간 13의 모의결과는 Fig. 11에 나타내었으며 수층의 농도는 0.15~

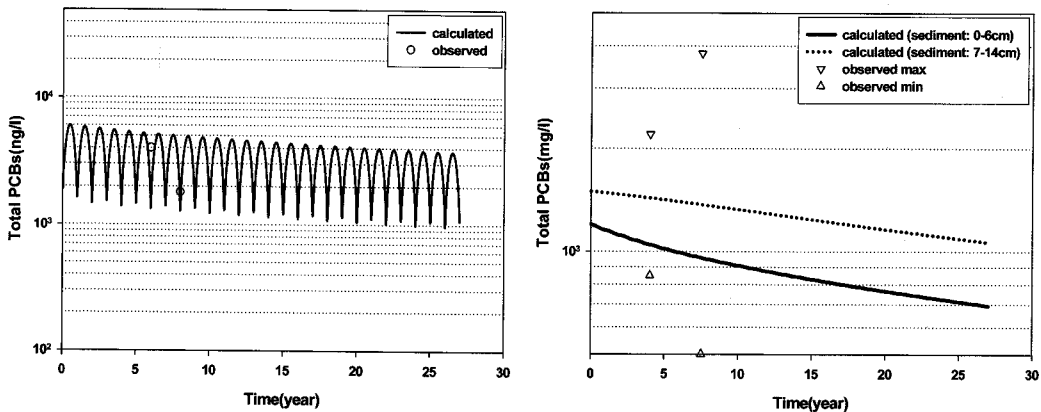


Fig. 9. Long-term simulation of total PCBs concentrations in water column and sediment bed(Segment 2).

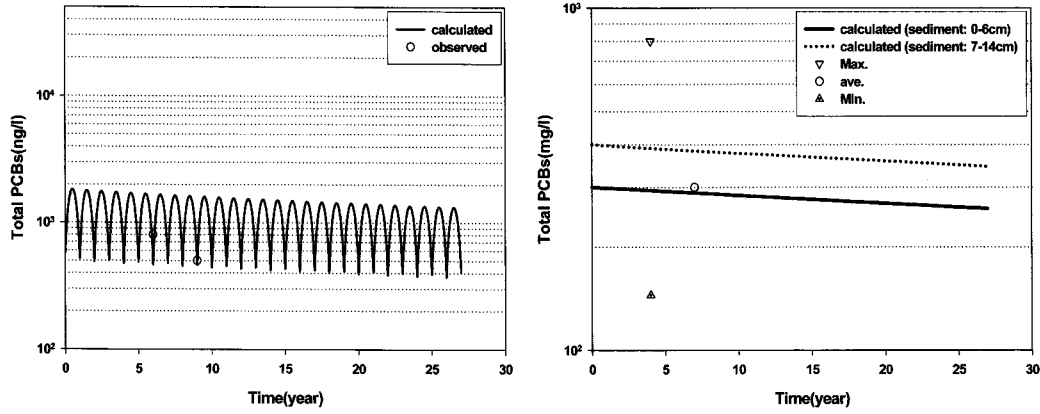


Fig. 10. Long-term simulation of total PCBs concentrations in water column and sediment bed(Segment 5).

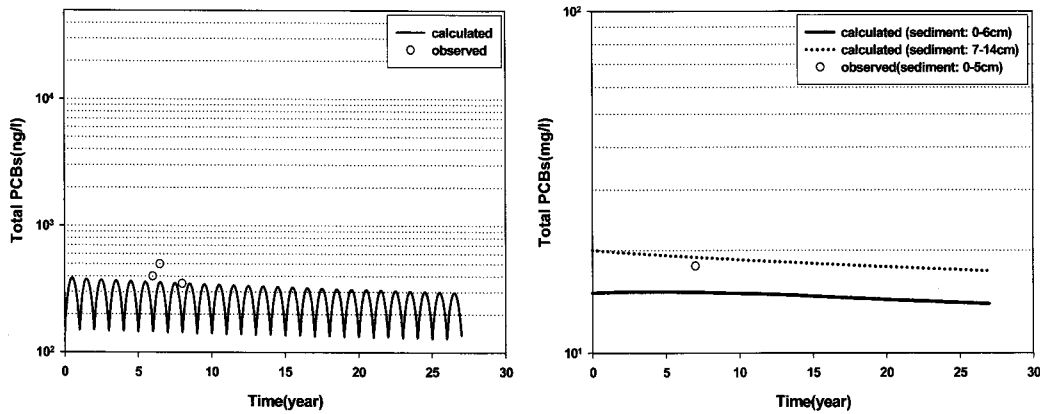


Fig. 11. Long-term simulation of total PCBs concentrations in water column and sediment bed(Segment 13).

0.4  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.25  $\mu\text{g/L}$ )에서 30년 후에 0.15~0.25  $\mu\text{g/L}$ (평균 0.2  $\mu\text{g/L}$ )로 감소하는 것으로 예측되었다.

(3) 준설에 따른 개선 효과 예측

수층의 PCBs 농도를 낮출 수 있는 대안으로 오염된 퇴적토를 준설하는 것을 고려할 수 있으나, 얼마나 많은 양의 준설이 필요하며, 어느 장소에서의 준설이 수층의 농도 감소에 효과적인 지에 대한 평가를 할 필요가 있다. 본 연구에서는 하상퇴적물이 가장 오염되어 있는 소구간 2와 수심이 낮고 흐름이 거의 없어 준설에 편리한 소구간 6을 준설하는 것으로 가정하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 Fig. 12에 도시하였다. 현재의 수층의 농도를 실선으로, 자연상태로 30년이 지났을 때의 농도를 점선으로, 소구간 2를 준설하였을 때(scenario 1)의 농도를 일점쇄선으로, 소구간 6을 준설하였을 때(scenario 2)의 농도를 이점쇄선으로 표시하였다. 결과적으로 소구간 2의 하상퇴적물을 준설하는 것이 수층의 농도를 원하는 수준까지 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

3.2. 시범수역 A 모의 결과

(1) 장기간 시뮬레이션

1, 2, 5 소구간에 대한 수층 PCBs 농도의 장기간 모의결과를 Fig. 13~15에 도시하였다. Fig. 13에 소구간 1의 모의

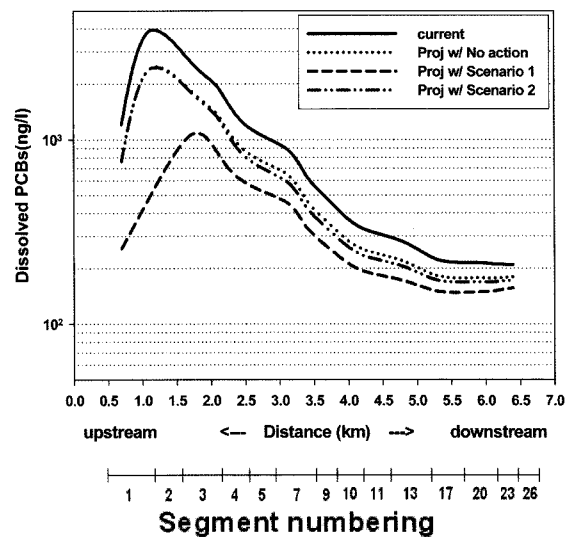


Fig. 12. Total PCBs concentrations in water column under various remediation scenarios.

결과를 나타내었으며, 수층의 농도는 0.8~2.4  $\mu\text{g/L}$ (평균 1.8  $\mu\text{g/L}$ )에서 30년 후에 0.6~1.8  $\mu\text{g/L}$ (평균 1.2  $\mu\text{g/L}$ )로 감소하는 것으로 예측되었다. 그에 따라 퇴적표층의 농도도 280  $\text{mg/L}$ 로부터 205  $\text{mg/L}$ 로 감소하는 것으로 나타났다. 가장 오염되어 있는 소구간(Segment 2)에서 모의 결과는 Fig. 14



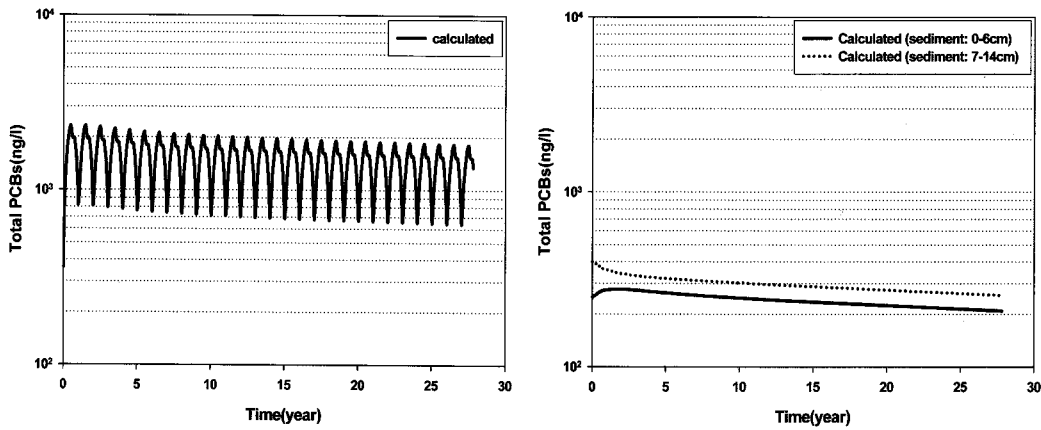


Fig. 13. Long-term simulation of total PCBs concentrations in water column and sediment bed(Segment 1).

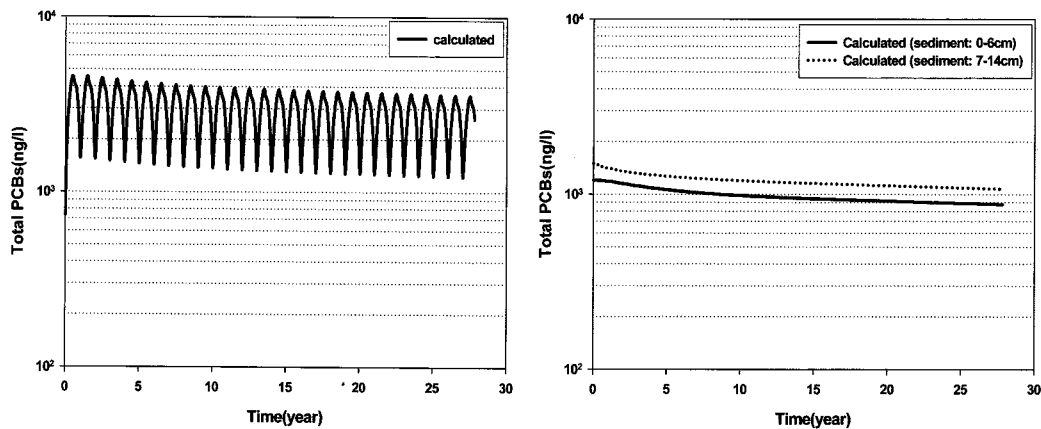


Fig. 14. Long-term simulation of total PCBs concentrations in water column and sediment bed(Segment 2).

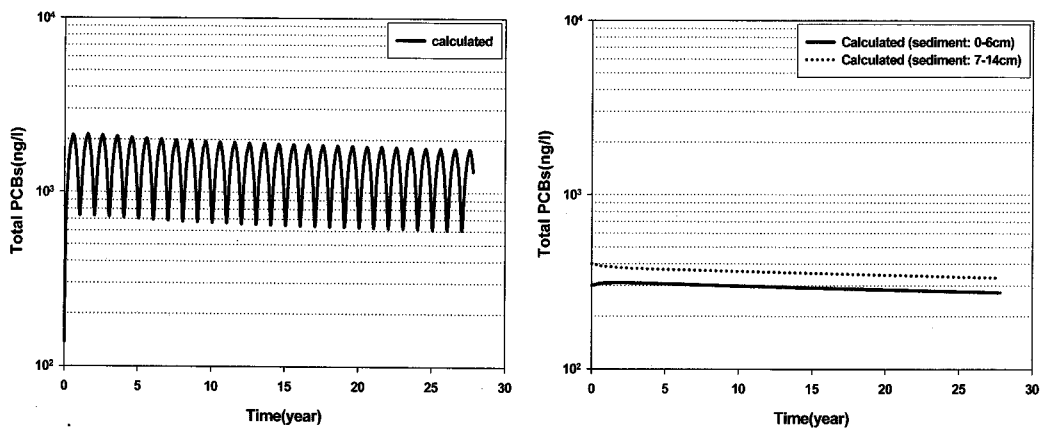


Fig. 15. Long-term simulation of total PCBs concentrations in water column and sediment bed(Segment 5).

에 나타내었으며, 수층의 농도는 1.6~4.5  $\mu\text{g/L}$ (평균 3.1  $\mu\text{g/L}$ )에서 30년 후에 1.2~3.6  $\mu\text{g/L}$ (평균 2.4  $\mu\text{g/L}$ )로 감소하는 것으로 예측되었으며, 퇴적표층의 농도도 1200 mg/L로부터 900 mg/L로 감소하는 것으로 나타났다. 가장 오염되어 있는 곳으로부터 약 2.5 km 하류에 위치하고 있는 소구간(Segment 5)의 모의 결과는 Fig. 15에 나타내었으며, 수층의 농도는 0.7~2.1  $\mu\text{g/L}$ (평균 1.5  $\mu\text{g/L}$ )에서 30년 후에 0.6~1.8  $\mu\text{g/L}$ (평균 1.3  $\mu\text{g/L}$ )로 감소하는 것으로 예측되었다.

이는 퇴적층의 오염물질이 수층의 오염공급원으로 존재하는 한, 상당한 시간이 지나도 수층의 농도는 크게 낮아지지 않는 것으로 판단되었다.

수역의 전구간에서 자연상태 조건하에서 시간이 10년, 20년, 30년이 지났을 때 수층의 농도를 시물레이션하여 Fig. 16에 도시하였는데, 처음 10년 동안은 오염물질의 농도가 빠른 속도로 감소하였으나, 차츰 감소속도가 둔화되는 것으로 나타났다.

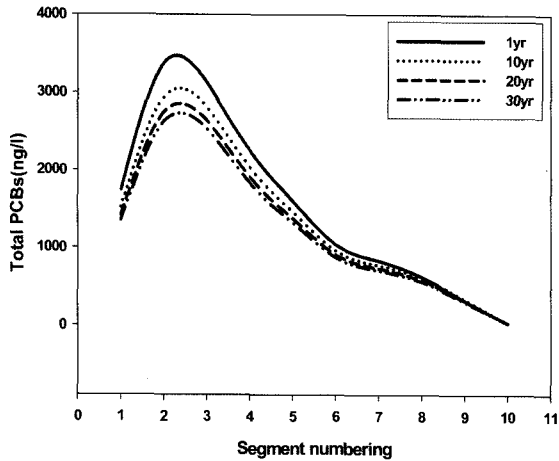


Fig. 16. Total PCBs concentrations in water column after 10, 20, and 30 year simulations.

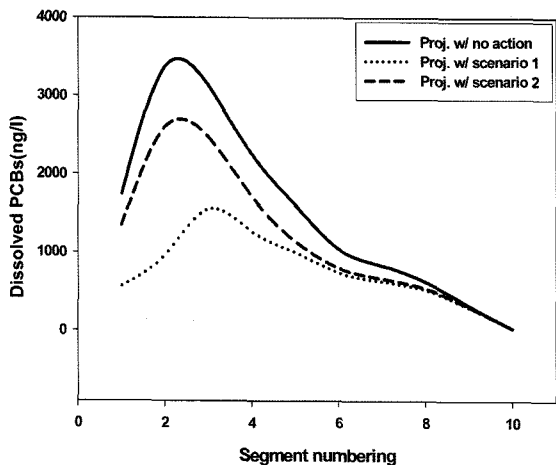


Fig. 17. Total PCBs concentrations in water column under several remediation scenarios.

#### (2) 준설에 따른 개선 효과 예측

본 연구에서는 하상퇴적물이 가장 오염되어 있는 소구간 2와 수심이 낮고 흐름이 거의 없어 준설이 편리한 소구간 5를 대안으로 설정하고 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 Fig. 17에 도시하였다. 자연상태로 30년이 지났을 때의 농도를 실선으로, 소구간 2를 준설하였을 때(scenario 1)의 농도를 점선으로, 소구간 5를 준설하였을 때(scenario 2)의 농도를 대쉬선으로 표시하였다. 결과적으로 소구간 2의 하상퇴적물을 준설하는 것이 수층의 농도를 원하는 수준으로 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

장기적으로 퇴적물에 포함되어 있는 오염물질이 수체 내 수질에 미치는 영향을 예측하고, 준설 대안을 설정하여 대안에 따른 수질개선 효과를 예측하여 준설규모나 위치를 선정하는데 적용할 수 있는 수환경 모형을 개발하였다.

1) 오염물질 전달기작을 프로그래밍하여 수환경 예측모형을 개발하여 모의한 결과, 퇴적물층에 존재하는 오염물질이 수층에 끊임없이 오염물질을 공급함으로써 퇴적층으로부터의 공급을 차단하지 않고는 수층의 수질개선효과는 기대하기 어려울 것으로 파악되었다.

2) 본 연구에서 대상물질로 사용한 PCBs의 경우 수층의 깊이, 수층에서의 물의 순환 정도에 따라 차이가 있으나, 호소나 만과 같은 반폐쇄 수역인 경우에는 퇴적층에서 수층으로 전달된 오염물질이 수층에 장기간 체류하면서 수층의 농도를 상당히 높일 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 극심 오염지역의 오염물질을 선택적으로 준설함으로써 수층의 수질개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료되었다. 또한 개발된 모형을 이용하여 준설대안에 따른 수질개선효과를 모의하여 준설 적지와 규모를 판단하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

1. 환경부, <http://www.me.go.kr>(2005).
2. 황병기, "하구환경에서의 중금속 수지분석을 위한 수질모델의 개발," 한국물환경학회지, **15**(4), 615~624(1999).
3. Pankow, V. R., "San Francisco Bay : Modeling System for Dredged Material Disposal and Hydraulic Transport," US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, Technical Report HL-88-27(1988).
4. Hwang, B. and Lung, W. S., "Developing a Fate and Transport Model of PCBs in the New Bedford Harbor," *Environmental and Water Resources Engineering Research Report*, **16**(1995).
5. Hwang, B. G., "Importance of DOC in Sediments for Contaminant Transport Modeling," *Water Sci. Technol.*, **38**(11), 193~199(1998).
6. Brownawell, B. J. and Farrington, J. W., "Biochemistry of PCBs in Interstitial Waters of a Coastal Marine Sediment," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **50**, 157~169(1985).
7. Karickhoff, S. W., Brown, D. S., and Scott, T. A., "Sorption of Hydrophobic Pollutants on Natural Sediments," *Water Research*, **13**, 241~248(1984).
8. Schnoor, J. L., Sato, C., McKechnie, D., and Sahoo, D., "Processes, Coefficients, and Models for Simulating Toxic Organics and Heavy Metals in Surface Waters," EPA/600/3-87/015, U.S. EPA(1987).
9. Mills, W. B., "Water Quality Assessment: A Screening Procedure for Toxic and Conventional Pollutants in Surface and Ground Water-Part I," EPA/600/6-85/002a, U.S. EPA(1985).