

## PCB로 오염된 연안 퇴적물 입자의 침강 및 연직확산 모델연구

이두곤<sup>(1)</sup>

### Modeling of Sedimentation and Vertical Dispersion of Coastal Sediment Particles Contaminated with PCBs

by

Du Gon Lee<sup>(1)</sup>

#### 요약

본 연구는 수중에서 PCB로 오염된 연안퇴적물 입자의 입자크기분포의 변화를 시뮬레이션 할 수 있는 수치모델을 제시한다. 이 모델은 입자의 침강과 연직확산과 함께 응집 현상을 포함하며 공간적으로는 연직방향으로 일차원 모델이다. 연직방향 메커니즘에 대한 고려는 퇴적물 입자의 수중 체류시간을 계산하기 위함이다. 본 연구에서는 모델을 개발 제시함과 아울러 실제 미국의 한 사례지역에서의 PCB로 오염된 연안퇴적물의 입자크기분포를 사용하여 모델의 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 이 결과 모의시간인 48 시간 내에 퇴적물 입자크기 변화가 상당히 진행되며 수중에서 입자크기별로 입자가 다르게 제거됨과 이 과정에서 응집이 중요한 요인이 될 수 있음을 보이고 있다. 본 연구에서 개발 제시된 모델은 준설 등 환경정화사업과 관련 불가피하게 수반될 수 있는 오염퇴적물의 재부유로 인한 오염확산범위를 평가하는데 유용하게 이용될 수 있다.

#### Abstract

This study presents a numerical model that can simulate changes of particle size distribution (PSD) of PCB-contaminated coastal sediments. The developed model has one spatial dimension including sedimentation and vertical dispersion as well as coagulation. The reason for considering the vertical transport mechanisms is to calculate residence time of the particles. Using the model and initial PSD data based on actual coastal sediments contaminated with PCBs, this study shows results of model simulations. Within 48 hours of the simulation time, the PSD changed significantly and the particles were removed from water in different rates between different particle sizes. It also shows that coagulation can act an important role in this process. The model may be useful in assessing the range of resuspended sediments that can pollute neighboring areas during environmental remediation projects such as dredging.

Keywords: 퇴적물, PCBs, 입자크기분포, 응집, 침강, 준설

---

(1) 정회원, 한국교원대학교

## 1. 서론

환경오염이 심각히 문제가 되는 지역의 연안퇴적물은 인근 지역으로부터 유입되는 생활하수, 공장폐수, 하수처리장의 방류수 등에 포함된 중금속과 농약 또는 자연에서 분해가 되기 어려운 PCB (polychlorinated biphenyls) 같은 유해오염물질의 최종 집적소(sink) 같은 역할을 할 수 있다. 왜냐하면 이들 오염물질이 대체로 매우 강한 소수성(hydrophobic)의 성질을 가지고 있어 수중에서 물에 잘 녹지 않고 대부분이 수중의 부유입자에 흡착되어 있거나 이들 입자의 침전과 함께 바닥에 퇴적된 상태로 있기 때문이다. 그래서 다음에서 거론할 미국의 한 경우에서처럼 사회적으로 큰 문제가 될 수 있다.

본 연구는 PCB와 같이 입자에 흡착되는 성질이 큰 환경오염물질로 오염된 연안퇴적물에 대해 환경정화 사업의 일환으로 준설 등이 실시될 때 바닥 퇴적물이 재부유(resuspension)되면서 인근해역을 오염시킬 수 있는 가능성을 평가하기 위해 부유된 퇴적물의 연직이동속도를 수치적으로 파악함으로써 이들 부유퇴적물의 수중 체류시간을 구하는 방식을 제시하고자 한다. 특징적으로 본 연구에서는 수중에서 입자가 다양한 크기로 존재하고 있음을 입자크기분포(particle size distribution)로 고려하고, 또 입자가 집합체(aggregate)를 이루는 응집(coagulation) 현상도 분석모델에 포함시켜 수심방향으로 1차원으로 시간에 따라 입자크기분포의 변화를 모의할 수 있는 수치모델을 개발 제시하였다. 그리고 개발된 수치모형을 이용하여 오염퇴적물 입자의 수중 체류시간을 입자크기분포별로 보였으며 또한 응집현상의 영향도 분석하였다. 결과적으로, 본 연구는 오염된 연안 퇴적물의 입자가 연직방향으로 이동하는 주요 메커니즘인 침강, 연직확산, 그리고 응집현상에 의해 입자의 크기분포가 변화하는 매우 복잡한 현상을 모의할 수 있게 함으로써 재부유된 입자가 수중에 떠 있을 수 있는 시간을 계산할 수 있게 한 것으로 이는 오염된 부유퇴적물의 확산범위(수평방향의) 등을 예측하는데 있어 중요한 의미가 있을 것으로 생각된다.

## 2. PCB 오염

PCB는 유기염소계화합물로서 biphenyl( $C_{12}H_{10}$ )기

에 하나 또는 그 이상의 수소원자와 염소원자가 치환된 물질의 총칭으로 치환된 수소원자의 수와 위치에 따라 209개의 이성질체(isomers)를 갖는 화합물이다. PCB는 전기절연성이 우수하고 화학적으로 불활성이며 열에 안정된 성질을 갖고 있어 산업재료로서 우수한 성질로 인해 세계적으로 1930년대 초기부터 변압기와 축전기 등에 사용되어 왔으며 우리 나라의 경우 1975년 수입되기 시작하여 1984년 수입금지때까지 약 560톤 가까이 수입된 것으로 추정된다(정 외[1995]). PCB를 포함한 제품들은 자연계에 배출되어 물, 토양, 해양, 퇴적물 등에 존재하게 되며 특히 먹이사슬과 생물농축에 의해 물고기, 조개, 새 같은 먹이사슬의 높은 단계에 있는 생물에게는 훨씬 더 높은 농도로 축적된다. 이러한 과정을 거쳐 PCB는 궁극적으로 사람의 몸에도 축적될 수 있는데, 생물체 안에 축적된 PCB는 신경장애와 암을 유발하는 등 매우 강한 독성을 갖는다. 이러한 문제가 심각히 대두되면서 PCB의 생산은 1970년대 후반 세계 대부분의 나라에서 금지되었다.

현재 PCB는 더 이상 생산되고 있지 않으나 오래 전에 만들어진 변압기와 축전기 등에는 아직 사용되고 있어 PCB가 포함된 제품이 폐기될 때 혹은 쓰레기 매립장 등에서 PCB가 환경에 유출되기도 한다. PCB는 환경에서 무척 분해되기가 어려운 난분해성 물질이어서 자연에 유출된 PCB는 잘 변화되거나 분해되지 않고 지속적으로 존재하게 되며 또 전지구적으로 순환하게 되어 심지어 남극에 사는 생물의 몸속 지방조직에서도 높은 농도의 PCB가 발견되기도 한다. 최근 국립환경연구원의 연구에 의하면(정 외[1995]) 우리 나라 주요 연안(울산, 마산, 광양, 인천, 낙동강 하구 등)의 퇴적물중 PCB는 1-300 ppb 정도인 것으로 보고된 바 있으나 우리 나라에서는 아직 이 부분에 대한 연구가 축적되어 있지 않은 상황이다.

## 3. 오염된 부유퇴적물의 확산범위

미국 동북부 메사츄세츠주에 있는 New Bedford Harbor라는 항만의 바닥퇴적물이 인근 유역으로부터 유입된 PCB로 오염되어 1982년 미국 연방정부의 오염지역 정화 프로그램인 Superfund Program의 정화대상지역으로 지정이 되었다. 이 지역의 오염퇴적물중 PCB농도는 몇 ppm 정도에서 심하게는 100,000 ppm에 이르러 미국환경청(EPA)의

퇴적물중 PCB기준인 50 ppm을 크게 초과하는 것이었다 (Sanders[1990]). 이에 이 지역의 환경정화를 위해 많은 연구가 진행되었는데 가장 유효한 방법으로 고려되었던 대안중 하나가 오염된 바닥 퇴적물의 준설(dredging)이었으며 마침내 최근 (1994-1995) 이 지역에 준설작업이 환경복원의 방법으로 시행되었다 (Cullen[1996]).

그런데 오염퇴적물의 준설을 계획하며 심각히 고려되었던 문제가 준설과정에서 PCB로 오염된 퇴적물이 재부유(resuspension)되어 상대적으로 덜 오염된 지역까지 확산시켜 문제를 일으킬 수 있다는 것이었다. 물 속에서 PCB는 거의 물에 녹지 않고 이들 퇴적물(sediments) 입자에 흡착(adsorption)되어 존재하는데 준설과정에서 불가피하게 퇴적물이 재부유 되면 퇴적물과 함께 이에 흡착된 PCB가 다시 수중에 노출되게 되고 이들 퇴적물은 해류, 조류(tidal current), 취송류(wind-driven current) 등에 의해 수평방향으로 보다 넓은 지역으로 확산되어 나갈 것이란 것이다. 결국 재부유된 퇴적물의 확산범위 즉 PCB의 준설에 의한 오염가능 범위를 과학적으로 계산하고 판단하는 것이 중요한 과제가 되었다.

이 문제를 접근하는 한가지 방법이 재부유된 퇴적물의 수중 체류시간(residence time)을 계산하는 것이다. 재부유된 퇴적물의 체류시간은 미세한 부유퇴적물질이 수중에 떠 있을 수 있는 시간이므로 이는 바로 퇴적물 입자의 침강속도를 구하면 되는데 입자의 침강속도는 Stokes 법칙에 따라 입자크기(직경)의 제곱에 비례하는 관계이므로 같은 조건에서 입자크기가 2배 크면 침강속도는 4배, 10배 크면 침강속도는 100배 커지는 관계가 되므로 위 문제-퇴적물 확산범위 계산-를 고려함에 있어 입자크기(particle size)를 고려해야 함이 매우 중요하게 요청된다고 하겠다.

### 3.1 입자크기분포

수중에는 다양한 크기의 입자들이 존재하는데 이런 입자들이 그 크기별로 어떻게 분포하는지를 나타낸 것이 입자크기분포(particle size distribution, PSD)이다. PSD는 입자의 크기를 나타내는 입자의 직경, 입자의 부피, 질량, 표면적 등의 변수들 중 하나를 기준으로 하여 수중에 입자의 크기구간별로 단위부피의 물에 입자가 얼마나 (몇 개) 존재하느냐로 나타낼 수 있다 (Stumm & Morgan

[1981]). 이를 좀더 자세히 살펴보면,  $N$ 을 입자부피가  $v$  ( $\mu\text{m}^3$ ) 보다 같거나 작은 전체입자의 농도 (total concentration of particles; 단위:  $\# \text{cm}^{-3}$ )라 할 때  $\Delta N/\Delta v$  (또는  $dN/dv$ )가  $n(v)$ 로 나타내는 입자크기분포이다. 따라서 이는 누적함수 개념인 전체입자농도 함수( $N$ )의 기울기가 된다. 그러므로 입자크기분포 그래프에서  $x$  축의 어떤 구간  $v_1$ 과  $v_2$  (즉  $v_1 \leq \text{입자크기} \leq v_2$ ) 사이에 입자가 얼마나 분포하는가 하는 것은  $n(v)$  그래프상의 이 구간의 면적이 된다.  $n(v)$ 의 단위는  $\# \text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-3}$ 이다. 또 같은 이치로 입자크기분포를 위와 같이 입자부피  $v$ 를 기준으로 하지 않고 입자직경( $d_p$ )을 기준으로 표현하기도 하는데 이 경우  $\Delta N/\Delta d_p$  (또는  $dN/dd_p$ )가  $n(d_p)$ 으로 나타내는 입자크기분포이며 이것의 단위는  $\# \text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ 이다.

환경공학(또는 환경과학)의 분야에서 수중의 입자크기분포와 그 변화에 관한 관심은 오래 전부터 있어 왔으나, 수치리 분야 등에서 입자크기분포를 측정하고 분석하는 것이 본격적으로 도입된 것은 미국에서 1970년대 말 정도부터이다. 이는 Coulter Counter 같은 자동화된 입자크기분포 측정기기가 개발 보급됨과 함께 수치모델로 이를 모의할 수 있는 기법과 강력한 컴퓨터의 도입과 함께 가능하게 된 것이다 (Lawler[1979]). 그 이전까지는 환경분야에서 수중의 부유입자들은 주로 총량개념으로 즉 입자크기를 고려하지 않고 물의 단위 부피(liter) 당 포함된 부유물질의 질량(mg)으로 나타낸 총부유물질 (Total Suspended Solids, TSS)개념으로 접근하였다. 그러나 본 연구의 문제에서처럼 입자크기를 고려하지 않은 평균적인 접근보다도 입자크기분포를 고려해야 하는 접근이 요청되는 문제들이 있을 것이다. 현재 수질, 대기, 폐기물 등 환경관련 연구분야에서 다양한 종류의 입자의 입자크기분포와 그 변화에 대한 연구가 활발히 시도되고 있다.

앞서 우리의 문제에서는 입자크기분포가 침강속도에 큰 영향을 미치기 때문에 중요하다고 보았는데 이에 추가하여 물 속에서는 다음에서 보는 바와 같이 미세한 입자들이 어떤 조건이 되면 뭉쳐져 입자들의 집합체(aggregates)가 되는 응집이라는 현상이 존재하므로 입자크기분포에 대한 고려는 더욱 요청된다 하겠다.

### 3.2 응집(coagulation) 현상

수중에 미세한 입자 상태로 존재하는 점토 입자, 조류(algae), 세균(bacteria) 등은 수중에서 입자 표면이 전하를 띄게 되어 (대부분 음전하) 서로 밀쳐내는 힘(척력)이 작용하여 입자들의 집합(aggregation)이 잘 이루어지지 않고, 침전속도가 아주 느린 관계로 잘 침전되지 않은 채 계속 부유 상태로 ‘안정’ 되어 있는 경우가 많다. 수처리 과정에서는 이러한 입자성 부유물질들을 제거하기 위해 약품(응집제)을 투입하여 물속 부유입자의 표면화학적 상태를 바꾸어 줌으로써 입자상호간 척력을 약화시켜 입자들의 집합체가 되게 하는 과정이 있는데 이를 응집(coagulation)이라 한다 (조외[1992]). 침강속도가 아주 작은 미세한 입자가 응집이 되면 입자의 집합체가 되어 커지면서 침강속도가 크게 증가하므로 입자상 오염물질의 고액분리과정 즉 침전이나 여과과정 등에 큰 도움을 준다. 따라서 응집과정은 수처리공정에서 매우 중요한 부분이다.

자연계에서도 응집현상을 찾아 볼 수 있는데 예를 들면 하천에 의해 운반된 미세한 부유입자들이 강하구에 이르러 많이 침전되는데 여기에는 응집현상이 관련한다고 알려져 있다 (Edzwald et al.[1974]). 즉 강하구에서 담수와 해수가 섞여지면서 염분(salinity)이 높아지고 이것이 부유입자들의 표면전기화학적 성질을 응집이 잘 되도록 변화시켜, 입자가 집합체가 되고 입자크기가 커짐으로써 침전이 크게 증가된다는 것이다.

따라서 본 연구의 문제인 연안 환경에서 재부유오염퇴적물의 체류시간을 계산하기 위해서는 미세한 입자의 응집현상을 함께 고려하여야 할 필요가 있다. 응집에 의해 입자가 커지면 개별입자가 침강할 때보다도 침강속도가 훨씬 더 커지기 때문이다. 또 이 효과를 분석하기 위해서는 응집에 의한 입자크기 분포의 변화를 분석할 수 있어야 할 것이다.

## 4. 수학적 모형의 구성

### 4.1 지배방정식

재부유된 퇴적물입자가 다시 연직방향으로 침강하면서 응집이 진행되어 시간과 수심에 따라 입자크기분포가 변화하는 것을 수치적으로 모의하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 지배방정식을 설정하였다.

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 n_k}{\partial z^2} - w_k \frac{\partial n_k}{\partial z} + \theta_k \quad (1)$$

이 식에서  $n_k$  는 입자의 크기(크기구분, categories)가  $k$ 인 입자의 농도(number concentration,  $\#/cm^3$ )이며,  $t$ 는 시간(sec),  $D_z$ 는 연직방향의 확산계수( $cm^2/sec$ ),  $w_k$ 는 입자크기  $k$ 인 입자의 침강속도( $cm/sec$ ), 그리고  $\theta_k$ 는 응집에 의한 변화항목이다. 즉 응집에 의해 입자크기  $k$ 인 입자가 보다 작은 입자로부터 생성되기도 하고, 입자크기가  $k$ 인 입자가 다른 크기의 입자와 결합하여 보다 큰 입자가 되어 빠져나가기도 하는데 이 부분은 Smoluchowski 식(equation)에 의해 다음 식으로 표현할 수 있다 (Smoluchowski[1917]).

$$\begin{aligned} \theta_k &= \frac{dn_k}{dt} \\ &= \frac{1}{2} a \sum_{i+j=k} \beta(i, j)n_i n_j - a n_k \sum_{i=1}^k \beta(i, k)n_i \end{aligned} \quad (2)$$

이 식에서  $\beta(i, j)$ 는 충돌주기함수(collision frequency function)로서 입자간에 충돌이 확률적으로 얼마나 자주 생기는지를 나타낸다. 이 식은 수중에서 입자간에 충돌이 어떤 기작(mechanism)에 의해 발생하면 그 중 일부가 집합체가 된다는 이론의 기본적 틀을 보여주고 있다.  $a$ 는 총 충돌중 얼마나 집합체가 되는지를 보여 주는 충돌효율계수(collision efficiency factor)로서  $a$ 가 1이면 발생한 입자간 충돌 중 100%가 집합체가 된다는 것을 의미하고  $a$ 가 만약 0.1이면 충돌의 10%가 집합체가 된다는 것을 의미한다. 이 식의 첫 번째 sum 기호 아래 표시된  $i + j = k$ 의 의미는 응집에 의해 입자 크기구분  $k$ 보다 작은 두 입자가 결합하여 크기구분  $k$ 인 하나의 입자가 될 때, 크기구분  $k$ 를 형성할 수 있는 모든 가능한 두 크기구분의 조합(combination)으로  $i, j$ 에 대해 sum을 하여야 한다는 것이며, 두 번째 sum 기호 위의  $c$ 는 가장 큰 입자 크기구분을 의미한다. 따라서 식(2)는 응집을 두 입자간 충돌(binary collision)로 모형화한 것이다.

수중에서 입자간 충돌은 세 가지 중요한 기작에 의해서 발생하는데 그것들은 브라운 운동(Brownian motion), 물의 속도경사(fluid shear), 그리고 입자간 침강속도의 차이(differential sedimentation)에 의한 것인데 이 세 가지 메커니

즘에 대해 충돌주기함수는 다음과 같이 표현할 수 있다 (Lawler[1986]).

$$\beta_{BR}(v_i, v_j) = \frac{2kT}{3\mu} (v_i^{1/3} + v_j^{1/3})(v_i^{-1/3} + v_j^{-1/3}) \quad (3)$$

$$\beta_{SH}(v_i, v_j) = \frac{G}{\pi} (v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^3 \quad (4)$$

$$\beta_{DS}(v_i, v_j) = \frac{g}{12\mu} (\pi/6)^{-1/3} (\rho_p - \rho_w) \times (v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^3 |v_i^{1/3} - v_j^{1/3}| \quad (5)$$

식 (3)은 브라운 운동에 의한 두 입자  $i, j$  (입자크기  $v_i, v_j$ )의 충돌주기함수이며 이식에서  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도,  $\mu$ 는 물의 점성계수이다. 식 (4)는 속도경사에 의한 것으로  $G$ 는 평균속도경사( $\text{sec}^{-1}$ )이고, 식 (5)는 입자간 침강속도의 차이에 의한 것으로  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_p$ 와  $\rho_w$ 는 입자와 물의 밀도이다.

식 (1)에서 식 (5)까지가 하나의 완결된 체계를 이루어 이 시스템 내에서의 변화를 설명하는 것이 된다. 그런데 이 다섯 수식들은 연직 방향의 한 수심에서 하나의 입자크기( $k$ )에 대한 표현이므로 연속적인 입자크기분포를 몇 개의 구간으로 구분하느냐에 따라 그 수만큼의 수식이 필요하다. 수치모형에서 이는 parameter로 처리하여 필요에 따라 그 값을 바꾸어 넣을 수 있게 하였다.

또 본 연구에서는 식 (1)의 입자 침강속도는 Stokes식을 사용하였다 (Tchobanoglous & Schroeder [1985]).

$$w_k = \frac{g}{18\mu} (\rho_p - \rho_w) d_p^2 \quad (6)$$

이 식에서  $d_p$ 는 앞서 입자크기분포를 설명할 때와 같이 입자직경으로 구형입자를 가정하고 있다.

#### 4.2 경계조건

이 모형의 경계조건으로 제일 상층부는 입자의 flux가 없는 경계조건(no-flux boundary)으로 하였는데 이는 다음 수식으로 표현할 수 있다.

$$D_z \frac{\partial n_k}{\partial z} = w_k n_k \quad (7)$$

이 수식이 의미하는 바는 물의 최상층 표면에서

입자들이 대기 중 확산 등으로 빠져나가지 않는다는 것을 의미한다. 가장 아래 면에서는 흡착 경계조건(adsorptive boundary)으로 설정하였는데 이는 다음수식으로 표현되며

$$D_z \frac{\partial n_k}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

이 경계조건의 의미는 일단 입자들이 바닥에 침전되면 다시 재부유되지 않고 계에서 완전히 빠져나간다는 가정이다.

#### 4.3 수치모형

본 연구에서 위에서 설정한 수학모형과 경계조건을 반영하는 수치모형을 유한구간법(finite segment method) (Thomann & Mueller[1987])을 적용하여 개발하였다. 유한구간법은 유한차분법(finite difference method)의 한 방식으로 볼 수 있는데 각 구간은 균질한 물리화학적 성질을 갖는다고 가정하고 인접한 구간간 영향을 수치화합에 있어 물질수지식(mass balance equation)을 사용한다는 특징을 가지고 있다. 본 수치모형의 컴퓨터 code는 Fortran 77 언어를 사용 개발되었다.

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

이렇게 개발된 모형의 시뮬레이션 결과를 시현함에 있어, 입자크기분포는 16구간으로 구분하였으며, 연직방향 깊이 2m에 대해 모의하였다. 이때 깊이 방향으로는 12개 구간으로 나누었다. 이는 이 연구와 밀접히 관련되는 다른 연구 (Sanders[1990], Bonner et al. [1994])의 조건을 반영하는 것이다. 모형을 시뮬레이션 함에 있어 time=0에서 입자크기분포는 수심 2m 전체구간에서 균일하다고 가정하였으며 그 16개 입자크기 구간별로 입력한 값은 앞서 언급한 PCB로 오염된 New Bedford Harbor (MA) 퇴적물의 입자크기분포의 측정치 중 (Sanders[1990]) 일부 대표치를 사용하여 입력하였다. 또 본 시뮬레이션의 시현에 사용된 parameter들의 값은 Table 1 과 같다.

연구에서 개발된 모형을 이용하여 특정시간과 특정깊이에서 입자크기 분포가 어떻게 변화하는지 예측할 수 있는데 Fig. 1은 깊이 106 cm에서 PSD의 변화를 예측하고 있다. 이 그림에서 y 축은 입자의 부피분포(volume distribution)를 나타내는데 이는 앞서 설명한 PSD를 나타내는 여러 형식

중 하나이다. 각 크기별 입자부피와  $n(d_p)$  에서 나타나는 입자수농도(number concentration)를 곱하면 입자크기( $d_p$ )별로 차지하는 입자부피분포를 구할 수 있는데 Fig. 1은

므로 상용로그의 값으로 표현하는 것이 분포특성을 보다 더 잘 나타낼 수 있기 때문이다.  $n(d_p)$ 의 경우처럼 이 부피분포 그래프의 아래쪽 면적은  $x$  축의 그 구간에 해당하는 입자크기 범위 내에 있

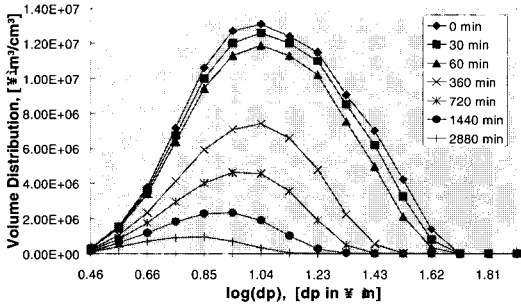


Fig. 1 Evolution of Volume Distribution (Depth =106cm) in the Case of  $\alpha = 0.1$

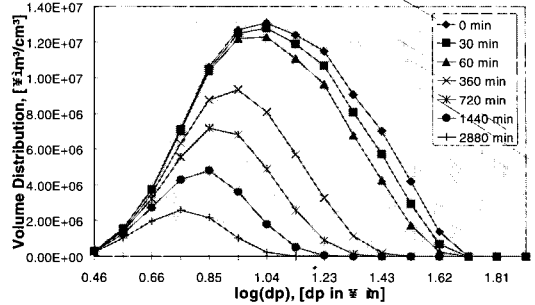


Fig. 2 Evolution of Volume Distribution (Depth =106cm) in the Case of  $\alpha = 0.0$

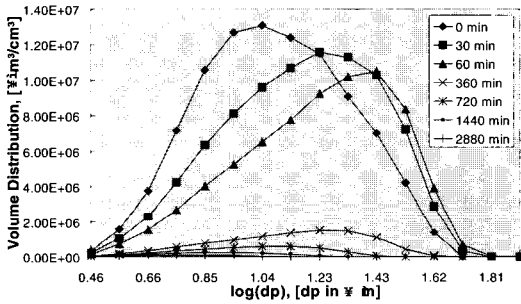


Fig. 3 Evolution of Volume Distribution (Depth =106cm) in the Case of  $\alpha = 1.0$

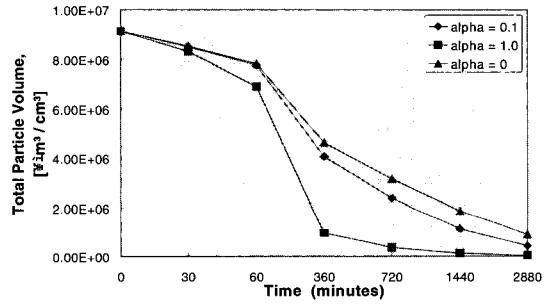


Fig. 4 Evolution of Total Particle Volume in the Water (Depth=106cm)

Table 1. Parameters used in the model simulation.

parameter	기호	사용된 값
수온 (절대온도)	$T$	293 K
물의 밀도	$\rho_w$	$1.0 \text{ g cm}^{-3}$
입자의 밀도	$\rho_p$	$1.7 \text{ g cm}^{-3}$
점성계수	$\mu$	$1.04 \times 10^{-2} \text{ g cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$
평균속도경사	$G$	$20 \text{ sec}^{-1}$
연직확산계수	$D_z$	$3.2 \text{ cm}^2\text{sec}^{-1}$
충돌효율계수	$a$	0.1

입자의 부피분포를  $\log d_p$ 에 대하여 나타낸 것이다.  $x$  축을  $d_p$ 가 아닌  $\log d_p$ 로 한 이유는 수중에 입자들이 그 크기가 아주 큰 범위에 걸쳐 존재하

는 수중의 입자부피가 된다 (O'Melia[1985]).

Fig. 1에서 볼 수 있는 바, time=0 일 때 수중의 입자들은  $0.46 \leq \log d_p \leq 1.91$  즉  $2.9 \mu\text{m} \leq d_p \leq 81.3 \mu\text{m}$  사이에 분포하는데 대부분 입자들은  $\log d_p = 1.72$  (즉  $d_p = 52.5 \mu\text{m}$ )이하에 존재한다. 이러한 초기 입자분포가 시간이 경과함에 따라 응집, 침강, 연직확산이 동시에 진행되며 변화하는 것을 이 그림이 보여주고 있다. 특기할 사항으로 이 모의에 사용한  $a$  값은 0.1 인데 이 값은 Edzwald et al. [1974]이 해수의 영향을 받는 하구 퇴적물(estuarine sediments)에 대해 연구 보고한  $a$  값 0.05 - 0.22 범위에 포함되는 값으로 대체적으로 연안환경에서 부유퇴적물의 충돌효율계수를 나타내는 값으로 생각된다. Fig. 1을 보면 이

러한 조건하에서 모의시간인 48시간 내에 큰 입자와 작은 입자 모두 상당한 정도로 침강해 없어지는 것으로 예측하고 있다.

Fig. 1에서 입자가 수중에서 제거되는 것에는 응집이 관련되어 있는데 즉 응집에 의해 입자가 커지게 되면 침강속도가 커지게 되어 입자의 제거속도가 더 크게 된다. 따라서 입자가 제거되는데 응집 메커니즘이 주는 영향을 Fig. 1에서는 바로 분리해 알기 어려워 Fig. 2에서는 Fig. 1과 다른 모든 조건은 같고 다만  $a$  값만 0 으로 바꾸어 모의한 결과를 보여주고 있다.  $a$  가 0 이라 함은 응집이 전혀 되지 않는 조건이므로 이 그림과 비교해 보면 Fig. 1에서 응집이 주는 영향을 분리할 수 있다. Fig. 2에서 보면 Fig. 1과 비교하여 같은 시간대의 그래프가  $x$  축과 이루는 면적이 더 큰 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2가 같은 시간대에 수중에 더 많은 입자부피가 존재함을 의미한다. 즉 Fig. 1에서  $a = 0.1$  만큼의 응집효율로 응집이 진행되면서 커진 입자의 집합체가 더 빠른 속도로 침강하면서 수중에서 없어진다는 것을 의미한다. 또 입자크기가 작은 영역을 살펴볼 때 ( $\log d_p \leq 0.85$ , 즉  $d_p \leq 7.1 \mu\text{m}$ ) Fig. 2의 경우 작은 입자들이 수중에 많이 남아 있는 데 비하여 Fig. 1에서는 작은 입자들도 상당히 많이 없어지고 있음을 볼 수 있다. 이렇게 아주 크기가 작은 입자들은 침강속도가 아주 느리므로 Fig. 2에서 보는 것처럼 응집이 되지 않을 때 별로 제거되지 않으나 Fig. 1에서는 이 작은 입자들이 응집을 통해 제거되고 있는 것이다. 이 응집의 효과를 보다 분명히 보기 위해 Fig. 3에서는  $a = 1.0$  즉 100% 응집효율을 가질 때의 경우를 모의하였는데 Fig. 3은 Fig. 1 보다 훨씬 더 입자들이 빠른 속도로 없어지고 있음을 알 수 있다. 또한 이 경우 특징적으로 응집에 의해 PSD 그래프의 모양 자체도 시간에 따라 상당히 많이 변화하여 시간이 30분과 60분이 경과한 때의 그래프에서처럼 입자크기가 중간구간 ( $1.23 \leq \log d_p \leq 1.62$ , 즉  $17.0 \mu\text{m} \leq d_p \leq 41.7 \mu\text{m}$ )에서 시간이 경과함에 따라 입자부피가 응집에 의해 더 많아지게 되는 경우도 발생할 수 있음을 보이고 있다.

Fig. 4는 입자크기분포를 고려하지 않고 단위 체적(ml)의 물에 있는 전체입자부피의 시간에 대한 변화를  $a$ 별로 나타내어 비교한 것이다. 즉 이 그래프상의 한점이 갖는 값은 Fig. 1-3에서 각 시간대의 그래프와  $x$  축이 만드는 면적에 해당된다.

Fig. 4에서  $a$ 가 0, 0.1, 그리고 1.0 일 때 시간이 경과하면서 잔류하는 퇴적물 부피가 상당히 차이가 남을 볼 수 있는데 (이는 Fig. 1-3에서도 부피분포 그래프들과  $x$  축이 차지하는 면적으로도 확인된다.) 예를 들면 48 시간 경과시  $a = 0$  일 때 물 1 ml 당 전체입자부피가  $8.91 \times 10^5 \mu\text{m}^3$  인데 비해,  $a = 0.1$  일 때는 이의 약 45%인  $4.05 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ ,  $a = 1.0$  일 때는 이의 5%인  $4.64 \times 10^4 \mu\text{m}^3$  이다.

## 6. 결론

본 연구는 오염된 부유퇴적물의 확산범위를 계산하기 위한 방법으로 부유퇴적물의 수중 체류시간을 계산하는 접근방식을 제시하였다. 해류 및 조류 등의 영향을 받는 수평적인 오염 확산범위는 부유퇴적물의 수중체류시간을 좌우하는 연직이동과 독립적으로 계산이 가능하므로 이 연구는 부유퇴적물의 연직이동 메커니즘을 밝힘으로써 그 오염의 영향을 받는 확산범위가 제시될 수 있다고 보는 것이다. 우리문제에서 제시된 PCB를 포함하여 농약이나 중금속 등 유해오염물질은 퇴적물에 흡착된 상태로 존재하고 또 함께 이동하므로 부유(재부유) 퇴적물의 연직방향 이동에 관한 연구는 중요한 의미를 갖는다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 입자의 침강속도에 입자크기가 중요한 영향을 미치므로 입자크기분포와 그 변화를 고려함이 필요하다는 것을 보였다. 또한 미세한 입자들이 수중에서 집합체를 이루는 현상인 응집이 입자를 크게 하여 침강속도를 증가시켜 부유퇴적물의 체류시간에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 본 연구에서 개발한 모형의 시뮬레이션을 통해 보였다. 따라서 이것은 우리의 문제인 오염확산 범위의 예측을 위해서 응집이 중요한 고려요소가 되어야함을 의미한다. 전체적으로 연안환경에서 오염된 재부유 퇴적물의 확산범위를 예측하기 위해 본 연구가 제시한 입자크기분포와 그 변화에 대한 고려, 그리고 응집과 침강을 함께 이 분석에 도입한 방식은 개발된 모형의 모의결과를 보아 매우 유효했다는 것을 시사하고 있다. 이 분야의 연구 발전을 위해, 또 실제적 문제에 적용을 위해 실험관측 및 이론과 모형연구가 기대된다.

참고문헌

- [1] 조영일, 이수구, 정연규, 박영규, 박돈희, 1992, *환경공학*, 동화기술, 121-140.
- [2] 정성웅, 권오상, 이윤, 허인애, 이시용, 김기환, 이동훈, 김광수, 1995, "해양오염감시망 구축 및 오염실태 변화 연구(III)-우리 나라 주요연안 퇴적물중 PCBs의 분포", 국립환경연구원보 제17권, 377-392.
- [3] Bonner, J.S., Ernest, A.N., Autenrieth, R.L. and Ducharme, S.H., 1994, "Parameterizing Models for Contaminated Sediment Transport", In *Transport and Transformation of Contaminants Near the Sediment-Water Interface* (Edited by DePinto J.V., Lick W. and Paul J.F.), Lewis, 281-305.
- [4] Cullen, A.C., Vorhees, D.J. and Altshul, L.M., 1996, "Influence of Harbor Contamination on the Level and Composition of Polychlorinated Biphenyls in Produce in Greater New Bedford, Massachusetts", *Envir. Sci. Technol*, Vol.30, No.5, 1581-1588.
- [5] Edzwald, J.K., Upchurch, J.B. and O'Melia, C.R., 1974, "Coagulation in Estuaries", *Envir. Sci. Technol.*, Vol.8, No.1, 58-63.
- [6] Lawler, D.F., 1979, A Particle Approach to the Thickening Process, Ph.D. Dissertation, University of North Carolina.
- [7] Lawler, D.F., 1986, "Removing Particles in Water and Wastewater", *Envir. Sci. Technol.*, Vol.20, No.9, 856-861.
- [8] O'Melia, C.R., 1985, "The Influence of Coagulation and Sedimentation on the Fate of Particles, Associated Pollutants, and Nutrients in Lakes", In *Chemical Processes in Lakes* (Edited by Stumm W.), John Wiley & Sons, 207-224.
- [9] Sanders, S.C., 1990, Vertical Transport and Dynamic Size Distribution of New Bedford Harbor Sediments, MS Thesis, Texas A&M University.
- [10] Smoluchowski, M., 1917, "Versuch einer thematischen Theories der Koagulations kinetik Kolloider Losungen" *Z. Phys. Chem.(Munich)*, Vol.92, 129-158.
- [11] Stumm, S. and Morgan, J.J., 1981, *Aquatic Chemistry*, 2nd Ed., Wiley Interscience, Chapter 10, 653-656.
- [12] Tchobanoglous, G. and Schroeder, E.D., 1985, *Water Quality*, Addison Wesley, 491-495.
- [13] Thomann, R.V. and Mueller, J.A., 1987, *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row, 123-165.