

## Settling Column의 입자분포 측정치를 이용한 연안 퇴적물 입자의 연직이동 모델연구

이두곤<sup>(1)</sup>

### A Study on a Vertical Transport Model of Coastal Sediments Using Particle Size Distribution Data From a Settling Column

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

#### 요 약

오염된 지역의 연안 퇴적물은 PCB 등 소수성 오염 물질을 흡착하고 있으며, 준설과 같은 환경 정화사업을 할 때, 재부유되어 오염되지 않은 인근 수역으로 이동될 수 있다. 이러한 환경 영향의 평가를 위해 저자는 앞서 침강, 연직확산, 응집에 의해 입자크기 분포가 변화하는 것을 모사할 수 있는 수학적 모델을 개발 제시한 바 있다. 본 연구에서는 이 모델을 이용하여, 연안환경을 실험적으로 재현한 높이 2 m의 settling column으로부터 측정된 입자크기분포 자료를 이용하여 시뮬레이션하며 분석한 결과를 제시하였다. 분석결과, 모델은 퇴적물 입자가 column 내에서 연직이동을 하며 입자분포가 시간적으로 또 수심별로 변화하는 것을 상당히 잘 예측하는 것으로 나타났으며 재부유된 퇴적물 입자는 연직이동과 함께 응집이 되고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구는 크기가 다양한 오염된 퇴적물이 응집에 의해 입자크기분포가 변화하며 연직 이동되는 매우 복잡한 현상에 대해 유효하게 컴퓨터 모사할 수 있음을 보였다.

#### Abstract

Coastal sediments in polluted areas adsorb many hydrophobic pollutants such as PCBs. During environmental remediation projects like dredging, they can be resuspended and transported to less polluted areas. To assess the environmental impact, the author previously developed a mathematical model that can simulate the changes of particle size distribution (PSD) due to sedimentation, vertical dispersion and coagulation. In this research, the simulation results using this model

---

(1) 정회원, 한국교원대학교

were presented in conjunction with observed PSDs from a 2-m settling column simulating coastal environments. The simulations showed that the model predictions were in fairly good agreement with the observed data (changes of PSDs in terms of depths and times), and that the resuspended sediments coagulated during the vertical transport. So, this study showed that the developed model has a good ability to describe the very complicated phenomena of real aggregation and vertical transport dynamics of coastal sediments with various particle sizes.

Keywords: 연안퇴적물, 연직이동 모델, 입자크기분포, 응집, 침강, 준설

## 1. 서 론

PCB (polychlorinated biphenyls)와 같이 수중에 있는 많은 유해 오염물질들은 매우 강한 소수성을 가지고 있어 오염된 지역의 연안퇴적물은 이들 오염물질들을 흡착하고 있으며 준설과 같은 환경정화 사업이 시행될 때 침전된 바닥퇴적물이 재부유하여 오염물질을 흡착한 채 오염되지 않은 인근해역으로 이동 확산할 수 있는 문제를 일으킨다. 이러한 환경영향의 평가를 위해서는 연안퇴적물 입자의 재부유 및 이동 확산과 관계한 메커니즘에 대한 연구가 필요하며 특히 오염물질 확산범위의 산정을 위해 재부유된 입자의 수중체류시간의 계산 및 이를 결정하는 입자의 연직이동에 대한 이해가 필요하다. 이를 위해 저자는 연안퇴적물 입자의 침강, 응집, 연직확산의 메커니즘을 포함하는 퇴적물 입자의 연직 이동모델을 개발 제시한 바 있다 (이두곤[1998]). 이 모델은 수중의 재부유된 퇴적물 입자를 입자크기분포(particle size distribution)로 파악하며 각 크기의 입자가 다른 속도로 응집과 침강 및 연직확산이 진행되어 입자크기분포가 시간적으로 공간적으로 변화함을 모의할 수 있다. 이 모델에 의한 모의 결과, 입자가 집합체를 형성하는 응집과정이 입자의 연직이동에 상당히 큰 영향을 줄 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 개발된 이 모델을 이용하여, 실험 자료와 비교 분석하며 시뮬레이션한 결과를 제시하고자 한다. 실험 자료는 연안환경을 실험실에서 재현한 높이 2m의 settling column에서 깊이 별로 8개의 sampling ports, 그리고 시간별로 약

40시간에 걸쳐 10회 정도 시료를 채취, Coulter Counter를 이용하여 입자크기 분포의 변화를 측정 한 것이다 (Sanders[1990], Bonner et al.[1994]). 이 실험 자료는 유해한 합성유기화학 물질인 PCB로 바닥 퇴적물이 크게 오염되어 미국연방정부의 Superfund Site로 지정된 New Bedford Harbor (MA)에 대한 환경복원 연구와 관련한 것으로 본 연구에서 분석된 실험 자료는 이 중 일부이다.

분석결과, 모델의 예측치는 복잡한 입자의 크기분포 변화 현상을 시간별로 또 깊이별로 상당히 잘 설명하였다. 또 실험 자료와 비교한 시뮬레이션 결과, 재부유한 연안퇴적물 입자들간에 응집이 발생하고 있음을 보였다.

## 2. 연안퇴적물 연직 이동 모델

본 연구에서 분석도구로 사용된 연안 퇴적물 입자의 연직 이동모델은 선행 연구에서 개발된 것으로 (이두곤[1998]) 여기서는 이 모델이 포함하는 주요 메커니즘만 이해를 돕기 위해 제시하고자 한다.

모델의 지배방정식은 퇴적물 입자의 연직확산, 응집, 침강 메커니즘을 포함하며 이들 메커니즘에 의한 퇴적물 입자의 크기분포 변화를 시뮬레이션 하기 위해 다음식으로 설정되었다.

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

이 식에서  $n_k$  는 입자의 크기  $k$ 인 입자의 수 농도 (number concentration,  $\#/cm^3$ )이며,  $t$ 는 시간,  $D_z$

Table 1 Parameter values used in model predictions

parameter	기 호	사용된 값
수온 (절대온도)	T	293 K
물의 밀도	$\rho_w$	1.0 g cm <sup>-3</sup>
입자의 밀도	$\rho_p$	1.7 g cm <sup>-3</sup>
점성계수	$\mu$	1.04 x 10 <sup>-2</sup> g cm <sup>-1</sup> sec <sup>-1</sup>
평균속도경사	G	20 sec <sup>-1</sup>
연직확산계수	D <sub>z</sub>	3.2 cm <sup>2</sup> sec <sup>-1</sup>
충돌효율계수	$\alpha$	0.1

는 연직확산계수,  $w_k$ 는 침강속도(cm/sec), 그리고  $\theta_k$ 는 응집을 나타내는 것으로 다음 Smoluchowski 식으로 표현할 수 있다.

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

이 식에서  $\beta(i, j)$ 는 충돌주기함수(collision frequency function)이며  $\alpha$ 는 충돌효율계수(collision efficiency factor)이다. 수중에서 입자간 충돌이 발생하는 세가지 주요 메커니즘은 브라운 운동(Brownian motion), 유체전단(fluid shear), 그리고 속도차 침전(differential sedimentation)인데 이 메커니즘들에 대해 충돌주기함수는 다음과 같이 제시될 수 있다 (Lawler[1986]).

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

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

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

여기서  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도,  $\mu$ 는 물의 점성계수이다.  $G$ 는 평균속도경사(sec<sup>-1</sup>)이고,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_p$ 와  $\rho_w$ 는 입자와 물의 밀도이다. 입자의 침강속도는 Stokes식을 사용하였다 (Tchobanoglous & Schroeder [1985]). 이 모델의

경계조건으로 제일 상층부는 입자의 flux가 없는 경계조건(no-flux boundary) 그리고 가장 아래 면에서는 흡착 경계조건(adsorptive boundary) 즉 일단 입자들이 바닥에 침전되면 다시 재부유되지 않고 계에서 완전히 빠져나간다는 가정을 하였다.

### 3. 연구에 이용된 settling column data

본 연구에 사용된 실험 자료는 앞서 설명한 settling column에 New Bedford Harbor (미국 메사추세츠주)의 PCB로 오염된 연안퇴적물을 실험 조건을 달리하며 투입하여, 완전 혼합시키고 column의 중심축에 설치한 impeller의 회전속도를 computer로 조절하며 난류정도(turbulence level)를 실험적으로 제어한 연안 환경의 조건 아래 그 입자크기분포가 시간별로 깊이별로 변화한 것을 측정하는 것이다 (Ducharme[1989], Bonner et al. [1994]). 입자크기분포는 자동입자분석기인 Coulter Counter를 사용하여 측정하는 것이다 (Coulter Electronics Limited[1986]). 이 입자분석기는 한 시점의 시료내 입자의 크기분포를 256 구간으로 구분하여 각 크기구간에 존재하는 입자의 수농도(number conc.)를 제시하는데 본 연구에 있어서는 모델 시뮬레이션의 제약조건을 감안 이를 16 구간으로 환산하여 측정치와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 원래의 실험은 연안환경의 다양한 조건을 반영한 여러 가지 실험조건으로 (난류, 염분, 수중의 퇴적물 농도, 퇴적물이 PCB로 오염된 정도 등) 실시되었는데 본 연구에서 모델 결과와 비교 제시된 실험의 조건은 column 내 평균속도경사(G)가 20 sec<sup>-1</sup>, 염도가 30 ppt, 초기조건으로 수중의 (퇴

적물) 부유물질 농도(SS)가 40 ppm, 그리고 퇴적물 중 흡착된 PCB 농도가 6.1 ppm인 것이다 (Sanders[1990]의 Exp 20). 참고로 이 실험조건과 G 값이 같은 다른 실험치를 사용한 모델 분석 결과도 본 연구에서 분석 제시한 결과와 비슷한 경향을 보였으나 이 실험치를 대표치로 사용한 시뮬레이션 결과를 제시하였다 (이두곤[1996]).

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

모델을 시뮬레이션함에 있어 사용된 parameter들의 값은 Table 1과 같다. 여기서 입자의 밀도는 위 연안퇴적물에 대한 측정치이며 (Sanders [1990]), G 값( $20 \text{ sec}^{-1}$ )은 settling column에서 제어된 값이며, 연직확산계수  $3.2 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ 은 column을 이용한 물감시험(dye test)을 통해 이 G 값에서 산정된 값이다 (Ducharme[1989], Bonner et al.[1994]). 충돌효율계수  $\alpha$  값 0.1은 연안환경의 퇴적물에 대해 Edzwald et al.[1974]이 연구 보고한 값의 범위인 0.05-0.22 정도에서 대표적인 값으로 이 연구에서 기본예측치를 위해 사용한 것이며  $\alpha$  값을 변화시키면서 시뮬레이션한 결과도 본 연구에서 분석 제시하였다.

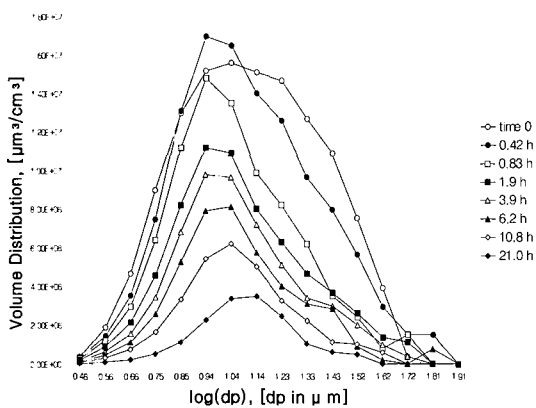
분석결과를 살펴 보면 먼저 Fig. 1은 측정값을 column내 세가지 다른 깊이 (top, middle, bottom) 별로 PSD의 시간적 변화를 나타낸 것이며 이와 대비하여 Fig. 2는 모델의 예측치를 같은 깊이에 대해 나타낸 것으로 전반적으로 모델이 측정치의 경향을 상당히 잘 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이는 이 모델이 예측하고 있는 대상이 수중에서 다양한 크기와 형태와 물리적 화학적 성질을 가진 퇴적물 입자가 침강, 연직확산 또 이 보다 더 복잡한 현상이라 할 수 있는 응집이라는 현상이며, 이를 단순화시켜 모델링한 것을 고려해 볼 때 놀라울 정도로 시간별 깊이별 그 입자크기 분포의 변화를 모델이 추적하고 있음을 의미한다.

이 그림들이 주는 의미를 보다 자세히 살펴보면 x 축은 입자크기를 log 값으로 나타낸 것으로 측정치의 초기값을 살펴 보면 입자 크기가  $0.46 \leq \log d_p \leq 1.72$  즉  $2.9 \mu\text{m} \leq d_p \leq 52.5 \mu\text{m}$  범위 내에 거의 대부분이 있음을 볼 수 있는데 이 그래프들은 입자크기분포를 나타내는 방법 중 한 가지인 부피분포이며 이렇게 나타낸 그래프에서는 이 그래프와 x 축이 이루는 면적이 그 입자크기 구간내 단위부피의 물에 존재하는 입자의 총부피

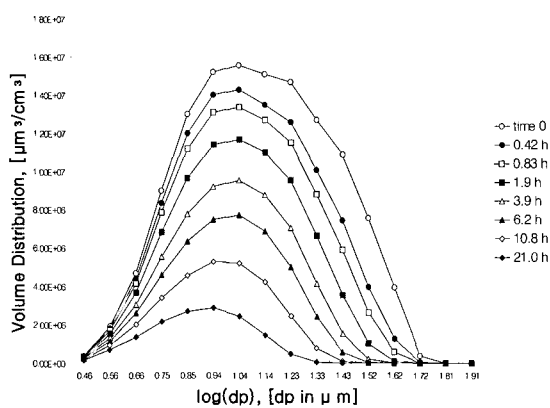
가 된다 (O'Melia[1985]). 이 부피분포로 나타낸 초기 측정값 (time 0) 그래프를 Fig. 1에서 볼 때 초기의 입자분포는  $\log d_p = 1.14$  즉  $d_p$ 가  $14 \mu\text{m}$  정도가 부피분포상의 대략적인 중간값으로 나타난다. 즉  $14 \mu\text{m}$  이하 입자의 총부피와 그 이상의 부피가 비슷하다는 의미이다. 이 실험의 모니터링 시간은 약 21 시간인데 time 21.1 h 에서 측정치를 2m column의 중간 깊이인 106cm에서 볼 때 (Fig. 1(b)) 일부 입자들(특히  $\log d_p = 1.33$  즉  $d_p$ 가  $21.4 \mu\text{m}$  이하)은 여전히 어느 정도 체류하나 전체적으로 상당히 많이 제거된 것을 나타내는데 모델이 이 경향을 상당히 잘 예측하고 있다 (Fig. 2(b)).

Fig. 3은 단위부피의 물에 존재하는 총입자부피의 시간별 깊이별 변화를 나타낸 것으로 측정값과 모델이 예측한 값을 비교한 것이다. 즉 이 그래프는 Fig. 1과 Fig. 2의 각 시간별 깊이별 그래프와 x 축 전체구간과 이루는 면적에 대응하는 값에 해당된다. Fig. 1과 Fig. 2의 비교에서 예견된 것이나 Fig. 3을 볼 때 물에 잔류하는 총 입자부피에 대해 모델이 측정치를 매우 잘 예측하고 있음을 확인해 준다. Fig. 1과 Fig. 2에서 보여주는 부피분포는 입자크기가 고려되지 않은 총입자부피보다 입자크기별로 세분화된 정보를 보여주는 것이기 때문에 부피분포의 변화를 잘 묘사한다는 것은 바로 총입자부피 그래프도 잘 묘사하게 된다. 특기할 사항으로 Fig. 3에서 깊이별로 비교해 볼 때, column의 깊이별 8개 측정 port중 가장 바닥과 가까운 깊이인 159.7 cm에서 나온 측정결과(Fig. 3(c))와 모델 예측치의 차이가 그 상부의 깊이에서 보이는 결과에 비해 가장 크게 나고 있음을 볼 수 있다. 이는 모델이 바닥면의 경계조건을 흡착경계조건으로 설정하여 일단 침강에 의해 퇴적물 입자가 바닥에 떨어지면 다시 재부유하지 않고 계에서 완전히 벗어나는 것으로 가정하고 있는데 반해, 실제 column에서는 바닥에서 어느 정도 재부유가 발생하고 있기 때문인 것으로 해석할 수 있는데 이러한 생각은 이 논문에서는 제시되지 않으나 난류정도가 더 높은 다른 실험치 (G 값이  $40 \text{ sec}^{-1}$ 인)에서 이러한 경향(재부유로 해석되는)이 더 크게 발생하는 것으로 보아 개연성이 큰 것으로 판단된다 (이두곤[1996]).

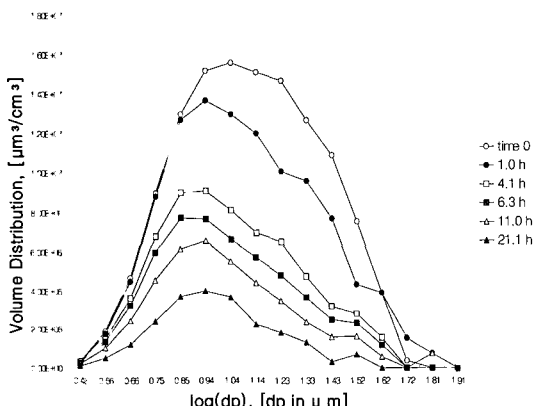
이두곤



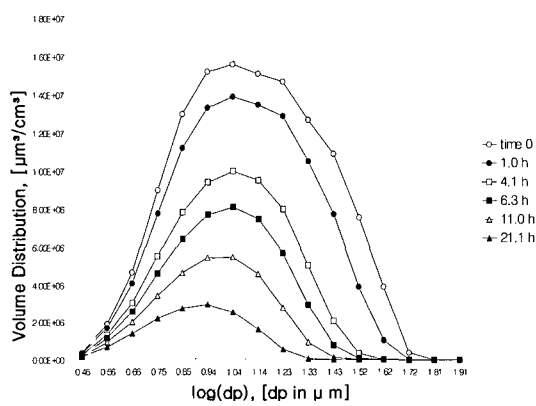
(a) depth 34.4cm



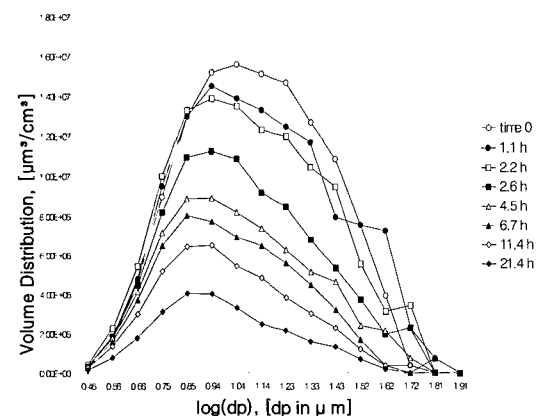
(a) depth 34.4cm



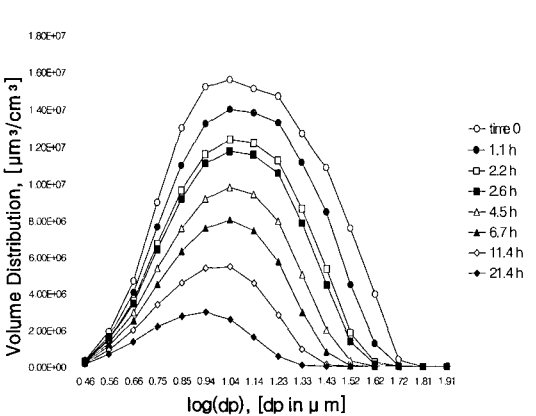
(b) depth 106.0cm



(b) depth 106.0cm



(c) depth 159.7cm



(c) depth 159.7cm

Fig. 1 Observed volume distribution at different depths

Fig. 2 Predicted volume distribution at different depths

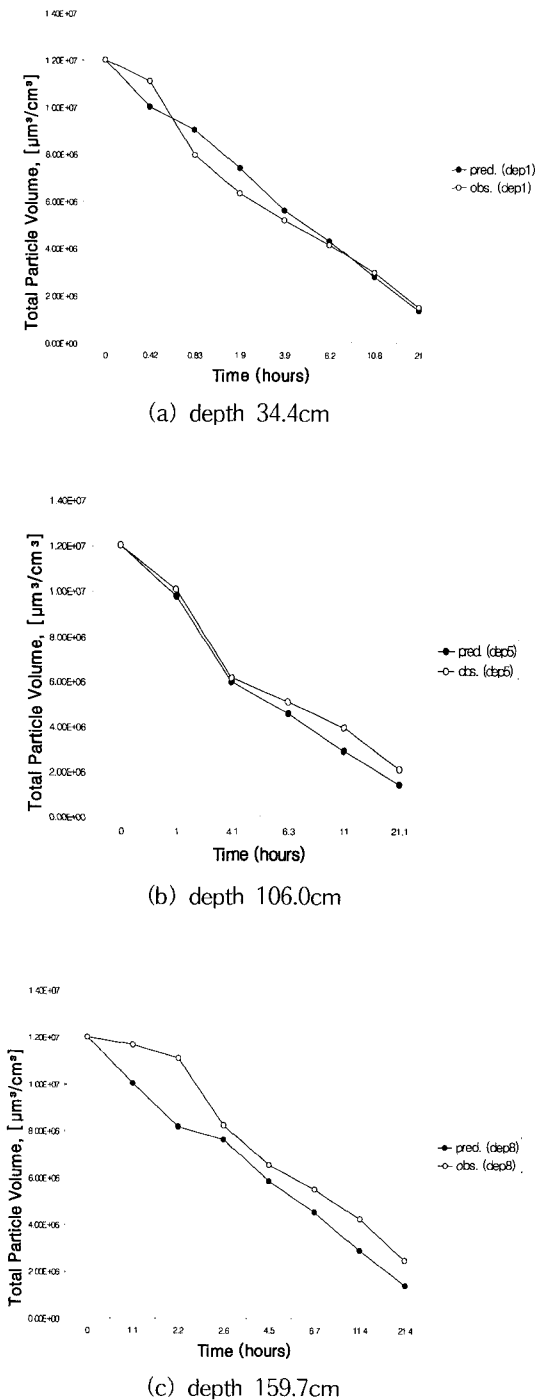


Fig. 3 Predicted and observed total volume concentration at different depths

Fig. 3에서 또 한가지 특기 할 사항으로 초기 (time 0)에 총입자부피가 약  $1.2 \times 10^7 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 로 나타난다는 것이다. 이것은 부피비로 12 ppm에 해당되는데 원래 이 실험조건이 퇴적물의 부유물질농도(SS)가 40 ppm (이는 40 mg/l의 의미)이라 하였는데 이 차이는 어떻게 설명될 수 있을까? 퇴적물의 밀도가  $1.7 \text{ g/cm}^3$ 이므로 부피비 12 ppm에 곱하여도 20.4 ppm으로 계획한 40 ppm에 50% 수준에 미칠 뿐이다. 이 이유는 간과하기 쉬운 중요한 점으로서 입자 측정분석기인 Coulter Counter의 측정치의 성격에 있다고 본다. 즉 Coulter Counter는 입자의 집합체(aggregate)의 부피를 측정함에 있어 구성입자 사이의 물로 채워진 공극을 포함한 전체적인 입자 집합체의 부피를 측정하기 보다 고체로 채워진 입자의 부피(solid volume of the aggregate)에 가까운 값으로 측정하는 것으로 알려져 있다 (Trewick & Morgan[1977]). 이 주장에 대해서는 논란이 되고 있는 바 추가적인 연구가 필요하지만 퇴적물의 공극이 약 50 % 수준이라고 보면 초기 총입자부피는 12 ppm은 공극을 포함할 때 부피비로 약 24 ppm이 되며 여기에 퇴적물의 밀도(bulk density)  $1.7 \text{ g/cm}^3$ 를 곱하면 40.8 ppm으로 대략적 계산이지만 실험 부유물질농도 40ppm과 비슷한 정도의 값이 산출됨을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 a의 값을 다르게 하며 모델이 예측하는 부피분포의 변화와 측정치와 비교한 것이다. a 값은 계의 응집이 되는 정도를 총돌하는 입자 중 결합이 되는 비율로 나타내는 것으로 이는 계의 화학적인 상태를 반영하는 계수로 볼 수 있다 (McCave[1984]). a 값이 0 이면 응집이 전혀 발생하지 않는다는 것을 또 이 값이 1 이면 총돌하는 모든 입자는 집합체를 형성한다는 것으로 일반적으로 이해되는 계수이다. 여기서 일반적으로 이해된다고 함은 응집과 관계한 입자의 충돌이론이 최근, 곡선형 이론(curvilinear theories)과 프랙탈 이론(fractal theories)의 새로운 도입으로 이 a 값이 이해되는 전통적 의미가 재해석 될 수 있다고 논란이 되고 있기 때문이다 (O'Melia & Tiller[1993], Lee[1996]). 본 연구에서는 a 값에 대한 새로운 이해와 그 논의는 뒤로 미루고 전통적

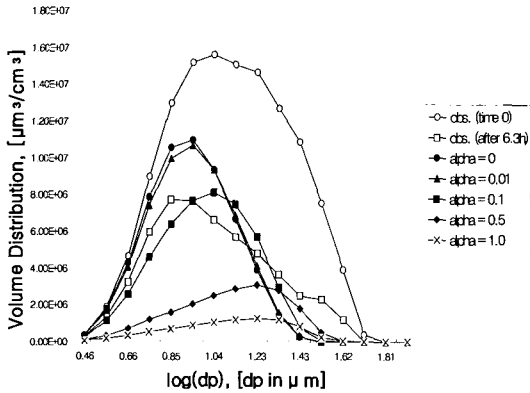


Fig. 4 Comparison of total volume distribution for different alpha values (depth 106.0cm)

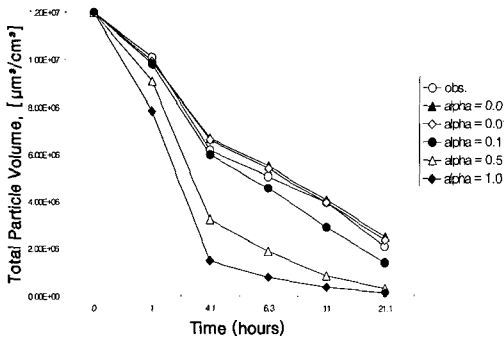


Fig. 5 Comparison of total volume concentration for different alpha values (depth 106.0cm)

의미에서 응집의 정도를 나타내는 계수로 일단 이해하기로 한다.

Fig. 4는 column의 중간 깊이인 106.0 cm 깊이에서 6.3 시간이 경과했을 때를 기준으로 하여  $\alpha$  값을 0에서 1까지 변화시키며 이 시간에서의 모델의 예측치와 측정치를 비교하였는데 이 결과를 살펴보면 본 연구에서 연안환경에서의  $\alpha$  값의 기본으로 설정하고 앞의 기본 예측치 시뮬레이션에서 사용한 0.1의 값을 사용한 부피분포 예측치가 다른  $\alpha$  값(0, 0.01, 0.5, 1.0)을 사용했을 때의 예측치보다 대체로 가장 잘 측정치의 부피분포의 변화를 설명하고 있는 것으로 보인다.

Fig. 5에서는 이를 총입자부피 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 볼 때는  $\alpha$  값이 0.5와

1.0에서는 모델이 측정치보다 응집정도를 지나치게 크게 평가하여 수중의 잔류하는 입자부피를 과소 평가한 것으로 나타나며 이는 실제  $\alpha$  값이 이 정도로 높지는 않을 것임을 시사하는 것이다. 이 그림에서 볼 때  $\alpha$  값이 0에서 0.1 사이에서는 총입자부피의 변화에서 큰 차이를 보이지 않으므로 이  $\alpha$  값의 범위에서는  $\alpha$  값이 총입자부피에 미치는 민감도가 그리 크지 않음을 보여주고 있다.

### 5. 결론

본 연구는 선행 연구를 통해 개발 제시한 바 있는 퇴적물 입자의 연직 이동모델과 연안환경을 실험실에서 재현한 2m 높이의 settling column에서 PCB로 오염된 미국의 한 연안퇴적물의 시간별 깊이별 입자 크기분포의 변화를 모니터링한 실험 자료를 이용하여 모델의 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 분석결과 모델의 예측치는 복잡한 입자의 부피분포 변화와 시간의 경과에 따라 잔류되는 총입자 부피의 변화를 상당히 잘 설명하였다. 이는 모델의 대상이 물리 화학적 성질과 형태가 일정하지 않고 순수하지 않은 실제 연안퇴적물 입자를 대상으로 한 측정치인 점과 입자크기분포의 변화에 관련되는 메커니즘이 침강, 연직확산, 그리고 크고 작은 입자들 상호 충돌과 결합에 의한 응집으로서 매우 복잡해 보이는 현상인 것을 감안하면 이를 단순화한 이 모델이 보인 설명 및 예측력이 상당히 크다고 하겠다.  $\alpha$ 를 변화시킨 시뮬레이션에서는 연안퇴적물의 대표적  $\alpha$  값으로 볼 수 있는  $\alpha=0.1$ 의 값을 사용한 예측치가  $\alpha$  값을 0, 0.01, 0.5, 1.0 등 다른 값을 사용했을 때 보다 실험치를 대체로 더 잘 묘사해 주고 있음을 볼 수 있었다. 이는 오염된 연안 퇴적물이 준설 등에 의해 재부유가 되어 이동 확산되는 것을 예측함에 있어 응집의 영향과 입자크기분포의 고려를 실질적으로 해 줄 필요가 있음을 시사하고 있는 것이라 하겠다. 결론적으로 이 연구를 통해 개발 사용된 퇴적물 입자의 연직이동 모델과 입자크기분포를 고려한 분석 방법은 오염된 부유퇴적물의 이동 확산에 관한 환경평가기 유용하게 이용될 수 있다고 본다.

### 참고문헌

[1] 이두곤, 1998, "PCB로 오염된 연안 퇴적물 입자의 침강 및 연직확산 모델연구", 한국해양환경

공학회지, 제1권 제1호, 39-46.

[2] Lee, D. G., 1996, *Mathematical Modeling of Particle Aggregation and Vertical Transport in Aquatic Environments Using Fractal and Curvilinear Approaches*, Ph. D. Dissertation, Texas A&M University.

[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] Coulter Electronics Limited, 1986, *Fine Particle Application Notes for Coulter Counter*, Luton, Beds, England.

[5] Ducharme, S. L., 1989, *Design and Validation of a Settling Column for Particle Transport Studies*, MS Thesis, Texas A&M University.

[6] Edzwald, J. K., Upchurch, J. B. and O'Melia, C. R., 1974, "Coagulation in Estuaries", *Envir. Sci. Technol.*, Vol. 8, No. 1, 58-63.

[7] Lawler, D. F., 1986, "Removing Particles in Water and Wastewater", *Envir. Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 9, 856-861.

[8] McCave, I. N., 1984, "Size Spectra and Aggregation of Suspended Particles in the Deep Ocean", *Deep-Sea Res.*, Vol. 31, 329-352.

[9] 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.

[10] O'Melia, C. R. and Tiller, C. L., 1993, "Physicochemical Aggregation and Deposition in Aquatic Environments", In *Environmental Particles II* (Edited by Buffle, J. and Van Leeuwen, H. P.), Lewis, 353-386.

[11] Sanders, S. C., 1990, *Vertical Transport and Dynamic Size Distribution of New Bedford Harbor Sediments*, MS Thesis, Texas A&M University.

[12] Smoluchowski, M., 1917, "Versuch einer Mathematischen Theories der Koagulationskinetik Kolloider Losungen", *Z.*

*Phys. Chem.(Munich)*, Vol. 92, 129-158.

[13] Tchobanoglous, G. and Schroeder, E. D., 1985, *Water Quality*, Addison Wesley, 491-495.

[14] Treweek, G. P. and Morgan, J. J., 1977, "Size Distributions of Flocculated Particles: Application of Electronic Particle Counters", *Envir. Sci. Technol.*, Vol. 11, 707-714.