

심해저 자원 개발과정에서 재부유 퇴적물 입자의 동태 예측에 관한 연구

이두곤
한국교원대학교

Prediction of Fate of Resuspended Sediment in the Development of Deep-sea Mineral Resources

DU GON LEE

Korea National University of Education, Cheongwon, Chung Buk 363-791 Korea

KEY WORDS: Deep-sea Mineral Resources 심해저 광물자원, Manganese Nodule 망간 단괴, Resuspended Sediment 재부유 퇴적물 Particle Size Distribution 입자크기분포, Coagulation 응집, Resedimentation 재침전

ABSTRACT: This study presents a modeling method to predict fate of resuspended sediment in the development of deep-sea mineral resources. Resuspended deep-sea sediment during the development is considered a major environmental problem. In order to quantitatively analyze the resuspended sediment in the water column, particle size distribution (PSD) is considered an important factor. The model developed here includes PSD and coagulation process, as well as sedimentation process. Using the model, basic simulation was performed under representative environmental setting. The simulation showed the dynamics of change of particle size distribution for 50 m depth of water column up to 10 days of simulation time. Coagulation seemed an important factor in the fate of resuspended deep-sea sediment.

1. 서론

최근 태평양 심해저 지역에 부존 되어 있는 망간단괴의 개발이 국가적 연구과제가 되고 있다. 우리나라는 UN으로부터 심해저 자원개발 광구로 하와이 동남의 클라리온-클리퍼턴 (Clarion-Clipperton) 해역을 확보하여 현재 다각도로 망간단괴 개발을 위한 기초적인 연구가 진행 중이다. 망간단괴 채광을 위한 심해저 자원개발은 태양 빛이 전혀 도달하지 않는 수심 5000 m의 암흑의 심해저에서 높은 수압과 아직 충분히 이해하지 못하는 환경에서 채광기를 적절한 방법으로 가동하여 단괴를 채취해야 하므로 극복해야 하는 많은 기술적인 어려움을 안고 있다.

망간 단괴는 해저 니토층 사이에 과상으로 매우 많은 양이 부존되어 있는데, 심해저 자원 개발시 한가지 중요하게 고려되어야 하는 측면이 심해저 개발과정에서 있을 수 있는 환경 영향을 사전에 예측 평가하고 그 피해를 최소화하는 대책을 수립하여야 하는 것이다. 심해저 개발시 야기될 수 있는 주요 환경문제로 생각되는 것은 망간단괴 개발과정에서 채광기에 의해 심해저면이 직접적으로 교란되어 심해 저서 생태계에 영향을 주는 것과 이 과정에서 재부유되는 심해저 퇴적물에 의해 수층이 오염되고, 또한 재침전에 의해 직접 교란되지 않는 해

역에까지도 영향을 크게 받을 수 있다는 것이다 (한국해양연구소, 1993; ISOPE, 2002).

본 연구에서는 심해저 개발과정에서 재부유되는 심해저 퇴적물의 재침전 과정을 입자크기를 고려하여 정량적으로 예측하는 모델링 기법을 개발하였다. 재부유되는 퇴적물 입자의 크기가 침강에 크게 영향을 미치므로 입자크기를 고려한 분석 기법이 필요하며, 응집 과정은 입자의 크기를 변화시키는 주요 과정이므로 응집을 중요한 과정으로 고려하여야 한다. 따라서 본 연구는 심해저 개발시 발생하는 부유퇴적물의 동태를 정확하게 예측하기 위해 재부유되는 퇴적물의 재침전 양상을 입자 크기별로 예측하는 모형을 개발하고, 기초적인 시뮬레이션 수행하여 제시하였다.

2. 재부유된 심해저 퇴적물의 동태 예측 모형

채광기에 의해 부유되는 저니는 중력에 의해 재침전이 될 것이며 또한 채광기에 의해 발생하는 플룸과 심해저 해류 등에 의해 수평적 이동도 함께 이루어져 부유가 일어났던 지역으로부터 다양한 거리에 떨어져 결국 해저면에 다시 침전할 것이다 (한국해양연구소, 1993). 심해저 개발과정에서 불가피하게 많은 양의 저니가 부유되므로 상부 수층으로부터 자연적으

로 심해저에 퇴적되는 퇴적물보다 훨씬 더 큰 퇴적물이 발생될 것으로 보이며, 이렇게 재퇴적 되는 부유저니는 저서 생물들의 생존 환경에 해로운 영향을 줄 수 있다. 이러한 영향을 정량적으로 이해하고 예측하기 위해서는 침강 등 연직방향으로 부유입자의 이동을 분석 예측하는 것이 핵심적으로 중요하다.

부유퇴적물의 연직 방향의 이동을 예측하기 위해서는 Stokes 식에서 보이듯이 부유 퇴적물 입자의 크기를 고려하는 것이 필요하다. 또 이와 함께 심해저 퇴적물은 주로 점토와 실트 정도의 미세한 크기의 점착성 입자들이므로 이들 입자가 집합체를 이루는 응집(coagulation) 현상이 침강 속도에 중요한 영향을 줄 것으로 생각된다.

이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 재부유된 퇴적물입자의 동태를 설명하기 위해 응집 과정을 포함하여 침강과 연직 확산을 하며 시간과 수심에 따라 입자크기분포(particle size distribution)가 변화하는 것을 모의하기 위해 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 크기가 k 인 입자의 농도(number concentration, #/cm³)이며, t 는 시간(sec), D_z 는 연직 방향의 확산계수(cm²/sec), w_k 는 입자크기 k 인 입자의 침강속도(cm/sec), 그리고 θ_k 는 응집에 의한 변화항목이다. 응집에 의한 영향은 Smoluchowski 식에 의해 다음 식으로 표현할 수 있다 (Lee et al, 2000).

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

이 식에서 $\beta(i, j)$ 는 충돌주기함수(collision frequency function)이며, 입자간에 충돌이 확률적으로 얼마나 자주 생기는지를 나타낸다. 식 (1)과 (2)에 대한 보다 세부적인 논의는 선행 연구를 참조할 수 있다(이두곤, 1998, 1999).

α 는 충돌물 중 얼마나 집합체가 되는지를 보여주는 충돌효율계수(collision efficiency factor)이다. 대체적으로 β 는 물속에서 입자의 이동 또는 운동을 나타내는 응집의 물리적 측면을 반영하며, α 는 물속에서 입자가 얼마나 점착성(sticky)이 있는지를 나타내는 응집의 화학적 측면을 반영하고 있다고 이해할 수 있다(O'Melia and Tiller, 1993).

수중에서 입자간 충돌은 세 가지 중요한 기작에 의해서 발생하는데 그것들은 브라운 운동(Brownian motion), 물의 속도 경사(fluid shear), 그리고 입자간 침강속도의 차이(differential sedimentation)에 의한 것이다. 이 세 가지 메커니즘에 대해 충돌주기함수는 다음과 같이 표현 할 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, μ 는 물의 점성계수이다. 식 (4)는 속도 경사에 의한 것으로 G 는 평균속도경사(sec⁻¹)이고, 식 (5)는 입자간 침강속도의 차이에 의한 것으로 g 는 중력가속도, ρ_p 와 ρ_w 는 입자와 물의 밀도이다.

식 (1)에서 식 (5)까지가 하나의 완결된 체계를 이루어 이 시스템 내에서의 변화를 설명하는 것이 된다. 따라서 이 모형은 심해저 개발에 따른 해저 니토의 재부유가 발생하고 이 입자들이 다시 해저면에 침전할 때 물 속의 한 위치에서 다양한 크기의 입자들이 확산과 침전 그리고 응집에 의해 입자수 농도가 변화되는 것을 설명하는 기본모형이라 할 수 있다.

3. 재부유된 퇴적물의 재침전 양상을 입자크기 별로 예측하는 컴퓨터 모델의 개발

본 연구에서는 위에서 설정된 수학적 기본 모형에 입각하여 심해저 개발시 재부유된 해저퇴적물이 연직방향으로 이동되며 입자크기분포가 변화되는 것을 모의할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 입력자료로서 초기의 입자크기분포와 제반 환경 parameter를 설정해 주면 시간별로 깊이별로 수중에 존재하는 입자들의 크기와 입자수를 위 모형에 입각하여 예측할 수 있다.

수치모델에서는 Finite Segment Method (Thoman, 1972)을 사용하였으며 심해저 자원개발시 발생하는 부유 니토의 재침전현상에 관한 컴퓨터 시뮬레이션함에 있어서 일단 해저면으로부터 50 m 높이까지 재부유 되는 경우를 상정하여 컴퓨터 모의를 할 수 있도록 고안하였다. 모델에서는 연직방향으로 50 m를 20 cm 크기의 250 개 Box로 나누어 각 Box 안에서는 입자크기분포가 같다고 보고 수치계산을 수행하였다.

Boundary Condition으로는 수치 모델의 제일 상층부(즉, 해저면에서 50 m 위)에서는 No Flux Boundary Condition을 적용하였으며, 제일 하층부(해저면)의 Boundary Condition으로는 Advective Boundary Condition을 적용하였다. 수식으로 이 Boundary Condition을 나타내면 다음과 같다.

$$D_z \frac{\partial n_k}{\partial z} = w_k n_k \quad \text{제일 위층} \quad (6)$$

$$D_z \frac{\partial n_k}{\partial z} = 0 \quad \text{해지면} \quad (7)$$

따라서 모델에서는 재부유된 입자가 해저면에 침전되면 더 이상 재부유되지 않고 해저면에 완전히 흡수된다고 가정하였다.

또 본 연구에서 식 (1)의 입자침강속도는 Stokes식을 사용하였다 (Tchobanoglous & Schroeder, 1985).

$$w_k = \frac{g}{18\mu} (\rho_p - \rho_w) d_p^2 \quad (8)$$

수치모델에서 입자크기는 전체 입자크기를 크기구간이 log 값으로 균분된 16개 Size Category로 나누어 계산을 수행했는데, 이는 선행연구에서 그 적합성이 어느 정도 확인되었으므로 (이두근, 1999; Ernest et al, 1995) 이 방식을 본 연구에서도 계속 사용하였다.

모델의 Code는 연구자의 선행연구(Lee, 1996; Lee et al, 2000)에서 개발된 Code를 수정함으로써 이루어졌으며, Computer Code는 Fortran Language를 사용하여 PC에서 운용할 수 있도록 하였다. 또한 개발된 프로그램의 컴파일은 Lahey/Fujitsu Fortran LF95를 사용하였다. 개발된 모델은 수심별로 50m 까지 시간적으로 10일간 입자크기 분포의 변화를 시뮬레이션 하는데 Pentium III PC에서 약 4분간의 CPU time 이 소요되었다.

4. 결과 및 토의

4.1 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 심해저 환경 parameter 설정

본 연구에서 개발된 모델은 심해저 개발과정에서 재부유된 퇴적물이 재침전하는 양상을 설명 예측하는 것으로, 모델은 저니가 수층에 재부유된 상태에서 시간이 경과함에 따라 수층에 존재하는 부유 입자들의 입자크기 분포의 변화를 예측하는 것이다. 해저 퇴적물이 어느 정도 수층에 부유하게 될 지는 앞으로 개발될 채광기에 의해서, 또 작업의 규모와 방식 등에 의해서 달라질 것이므로 현 단계에서 본 연구의 시뮬레이션의 주된 성격은 대표적인 심해저 환경에서 재부유된 퇴적물의 재침전 과정을 분석하는 기법을 제시하고 시사점을 얻는데 있다.

이러한 관점에서 본 시뮬레이션에서는 가능한 한 단순화 시켜 해저 퇴적물을 한 가지 입자크기를 갖는 것으로 하고 (mono-dispersed), 재부유된 초기에 해저면으로부터 50 m 까지의 수층에 균일하게 부유된 상태를 초기 조건으로 설정하였다. 본 연구에서는 심해저 퇴적물 입자를 3.6 μm 의 크기를 갖는 점토 입자로 수층에 심해 퇴적물로 재부유된 정도는 60 mg/L 로 설정하였다. (모델의 입자 크기 구간에서 이는 3.2 μm 에서 4.1 μm 사이 구간이며 대표적 입자크기가 3.6 μm 가 된다.) 이는 오염된 연안 퇴적물의 준설 작업 시 재부유

되는 퇴적물에 대한 선행연구(Bonner et al, 1994)를 참고하여 본 시뮬레이션 연구에 적용한 것이다.

연구에서 설정한 경 parameter는 Table 1 과 같다. 여기서 사용된 parameter 값은 심해저 개발환경에 대한 선행 연구를 참조로 하여 대략적으로 대표적인 값으로 생각되는 값이다 (한국해양연구소, 1993, 1998; 한국기계연구원, 1996).

Table 1의 parameter 값 중 수온과 해수의 밀도 및 퇴적물 입자의 밀도는 한국해양연구소(1998)와 한국기계연구원(1996)의 선행 연구자료, 즉 클라리온-클리퍼턴 해역의 실측 자료에 의한 것이며, 점성계수는 이 물의 온도 (1 $^{\circ}\text{C}$)와 압력(약 500 기압) 고려하여 설정한 값이다. 연직확산계수(D_z)는 물의 상호 유동정도를 나타내는 평균속도경사(G)와 밀접한 관계가 있다. 선행 연구(Ducharme, 1989; Sanders, 1990; Bonner et al., 1994)에 의하면 대체적으로 D_z 는 G 와 비례적 관계가 있다. 즉 물에 교반을 많이 해 주거나 어떤 개발 행위에 의해 물에 유동이 많이 생기게 되면 물의 평균속도경사가 커지고 동시에 연직 확산계수 D_z 도 비례적으로 커지게 된다. 따라서 G 와 D_z 값이 심해저 개발 환경에서 어느 정도 될지는 어떤 채광 시스템으로 어떤 방식으로 채광하느냐에 달려 있으므로 현 단계에서는 채광시스템 자체가 연구 개발 단계이므로 정확히 이 값을 예측하기는 어렵다. 본 시뮬레이션에서는 연안 환경에서 오염된 퇴적물을 준설하는 환경영향을 평가한 선행 연구를 참조하여 (Sanders, 1990; Bonner et al., 1994; Lee, 1996; 이두근, 1998,1999) 일단 대표적인 G 값을 20 sec^{-1} 그리고 D_z 를 3.2 $\text{cm}^2\text{sec}^{-1}$ 로 설정하였다. 또한 응집효율을 나타내는 충돌유효 계수 α 에 대해서는 해수 중 α 의 값이 상당히 다를 수 있겠으나 선행 연구를 참조로 하여(McCave, 1984; Edzwald et al., 1974) 일단 심해저 환경에서의 해수 중 부유된 해저퇴적물 입자의 α 값을 0.1 로 설정하였다. 이 의미는 입자의 충돌 중 10% 가 유효 충돌이 되어 응집이 일어난다는 것으로 해석되는 값이다.

Table 1 Parameters used in the Model Simulation.

Parameter		Value Used in the Simulation
Water Temperature	T	274 K
Density of Water	ρ_w	1.03 g cm^{-3}
Density of Particle	ρ_p	1.24 g cm^{-3}
Dynamic Viscosity	μ	1.61 x 10 ⁻⁴ g $\text{cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$
Average Velocity Gradient	G	20 sec^{-1}
Vertical Dispersion Coef.	D_z	3.2 $\text{cm}^2\text{sec}^{-1}$
Collision Efficiency Factor	α	0.1

4.2 시뮬레이션 결과

해저면으로부터 깊이 50m에 10일간에 걸쳐 각 깊이별로 입

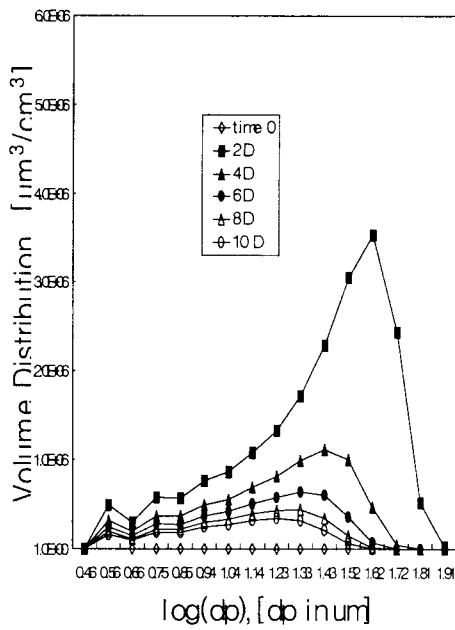


Fig. 1 Predicted Volume Distribution (Depth = 10 m)

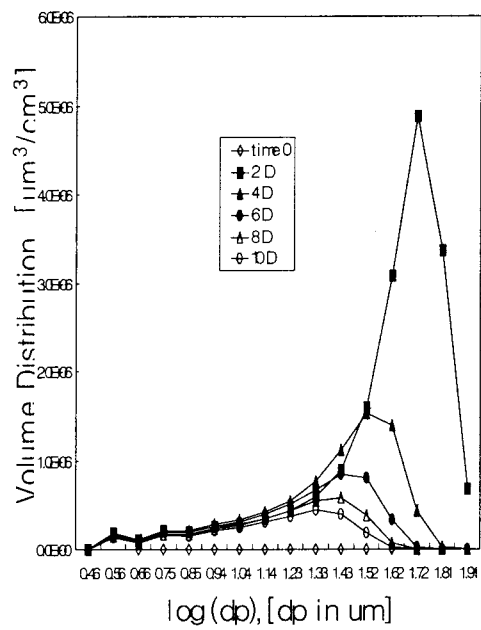


Fig. 2 Predicted Volume Distribution (Depth = 20 m)

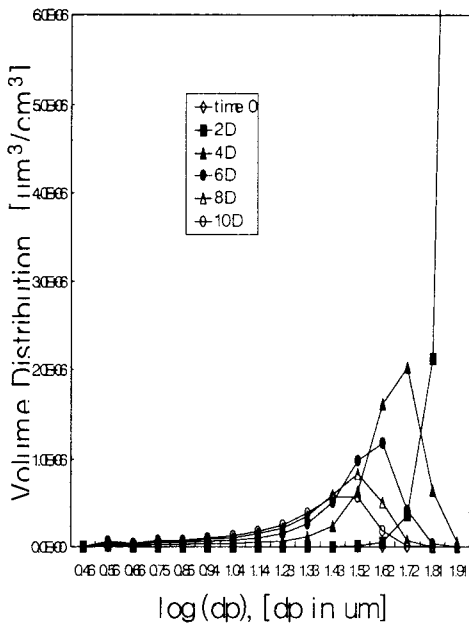


Fig. 3 Predicted Volume Distribution (Depth = 40 m)

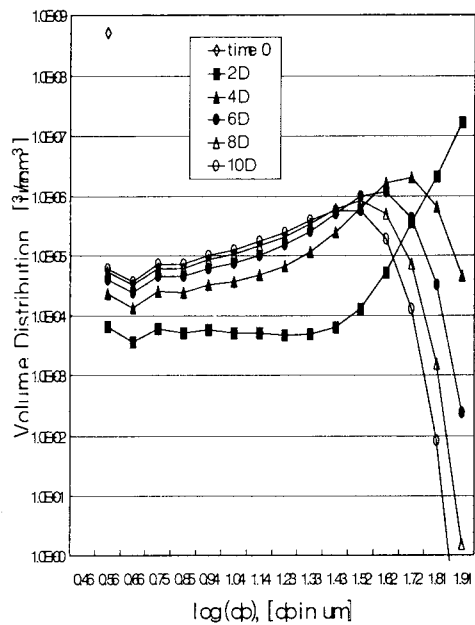


Fig. 4 Predicted Volume Distribution (Depth = 40 m) with y-axis in log scale

자크기 분포가 변화되는 것을 모델은 예측하고 있는데, 대표적으로 세 가지 깊이 (10 m, 20 m, 50 m)에 대해 입자크기 분포의 변화를 Fig. 1에서 Fig. 3까지 나타내고 있다. 이렇게 나타낸 입자크기 분포 그래프(Volume Distribution)는 그래프와 입자크기를 나타내는 x 축과 이루는 면적이 그 입자크기 구간에

존재하는 입자의 전체 부피를 나타내는 것이 된다 (이두근, 1998).

먼저 Fig. 1은 깊이 10m에서의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 깊이가 10m라 함은 해저면으로부터 50m 높이에서 해저면 방향으로 10m를 말한다. 즉 해저면으로부터는 40m에 해당된다.

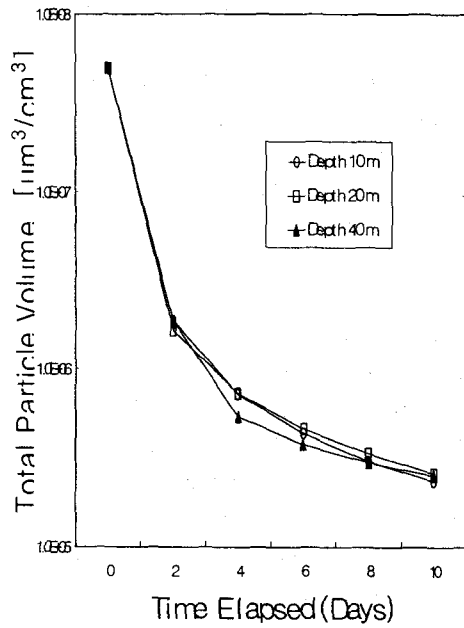


Fig. 5 Predicted Total Volume Distribution with y-axis in log scale

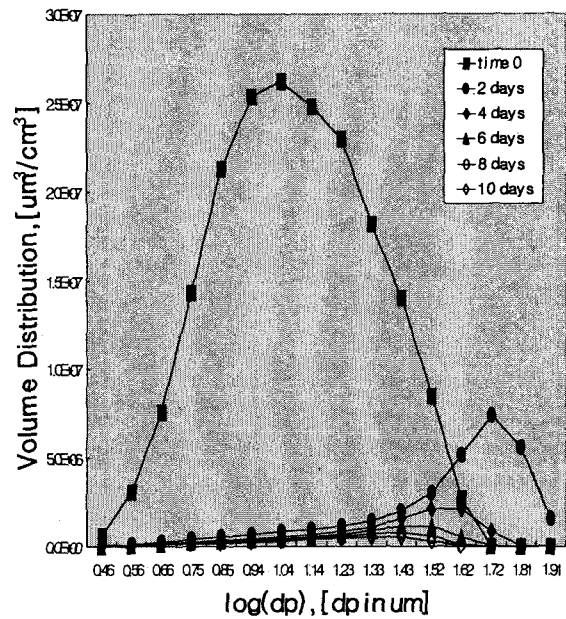


Fig. 6 Predicted Volume Distribution (Depth = 20 m) in the Previous Research Using Coastal Sediment as Initial Data (See text.)

이 그래프에서 초기의 입자 분포는 모델의 초기 입력치에서 설정한 $3.6 \mu\text{m}$ 의 입자크기($\log dp = 0.56$)에 모두 분포하고 있으므로 Fig. 1~3 에서는 잘 나타나지 않는다.

Fig. 1을 보면 time 0에서 한 입자크기로만 존재했던 퇴적물들이 시간이 경과함에 따라 다양한 입자크기로 변화했음을 알 수 있다. 이는 응집에 의한 것이다. 즉 응집에 의해 수층에서 입자의 크기분포가 변화함을 모델은 예측하고 있는데, 이는 매우 중요한 시사점을 갖는 것이다. 즉 응집에 의해 입자크기가 커지고, 입자크기가 커짐으로써 그렇지 않을 때에 비해 침강속도가 크게 증가하여 수층에서 빨리 침전하여 퇴적되는 것이다. 즉 응집에 대한 고려가 매우 중요함을 보여주는 것이다.

Fig. 1~3을 함께 비교해 보았을 때 깊이별로 입자크기 분포가 상당히 차이가 남을 볼 수 있다. 이는 침강에 의해 퇴적물 입자가 수층의 아래로 내려가면서 깊이별로 입자분포가 달라짐을 뜻한다. 큰 입자가 더 빨리 침강하므로 수층의 아래 쪽에는 위 층보다 더 큰 입자의 축적을 예상해 볼 수 있는데, 이를 Fig. 2와 Fig. 3에서 2일과 4일이 경과했을 때 수심 10 m 보다 20 m와 40 m 깊이에 큰 입자의 구간에 입자가 많아짐을 그래프에서 볼 수 있다.

Fig. 3의 변화를 보다 자세히 볼 수 있도록 Fig. 4에서 y축을 log 축적으로 나타내 보았다. y 축을 log 값으로 나타내면 큰 비율의 변화가 생기는 현상을 비교하는 데 도움을 준다. Fig. 4에서는 Fig. 3에서는 잘 나타나지 않는 체류 입자부피의

상대적 크기를 보다 뚜렷이 보여준다. 이 그래프에서 수심 40 m 에서는 2일 경과 시 $\log dp = 1.81$ (즉 $dp = 64.6 \mu\text{m}$)와 $\log dp = 1.91$ (즉 $dp = 81.3 \mu\text{m}$) 구간에서 많아지고 시간이 경과함에 따라 이 큰 입자들이 침강에 의해 줄어드는 것을 나타낸다. 현재 이 모델은 이 구간까지를 계산에 포함하고 있다.

Fig 5는 수층에 체류하는 입자의 총부피를 예측한 것이다. 이는 Fig. 1~3의 각 그래프와 x 축이 이루는 면적에서 도출될 수 있다. 10일 경과 시 깊이별 약간의 차이는 있지만 수층에 남는 부유 퇴적물은 약 0.5 % 정도인 것으로 예측되었다. 즉 time 0에서 60 mg/L 의 재부유 퇴적물은 10일 경과 시 약 0.3 mg/L 이 되는 것으로 모델은 예측하고 있다.

Fig. 6은 자연적인 다양한 입자 크기 분포를 갖는 연안 퇴적물 입자를 초기 입자분포로 이용한 선행연구의 예측 그래프이다 (이두곤, 2002). 초기 입자 분포가 하나의 크기 (mono-dispersed)만으로 이루어진 본 연구의 예측치와 비교해 볼 때 대체로 유사한 변화를 보이는 것을 볼 수 있다. 즉 초기에 입자 크기가 하나의 종류로 있더라도 응집에 의해 다양한 크기별로 입자 집합체(aggregate)가 형성되며 형성된 입자 집합체도 계속적으로 응집이 진행된다는 것으로 모델은 설명하는 것이다.

이상의 시험적 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 개발된 부유 퇴적물 예측 모델은 기본적으로 심해저 개발과정에서 수층에 부유되는 해저퇴적물이 응집, 침강, 확산되며 입자크기분포가

변화되는 것과 물 속에 부유하고 있는 퇴적물 입자의 양(총부피)을 입자크기별로 또한 총체적으로 예측할 수 있음을 보여 주었다.

5. 결론

본 연구에서는 심해저 자원 개발과정에서 중요한 환경 영향 요소로 생각되는 해저 저니의 부유와 재침전에 관한 분석 및 예측을 위해 재부유된 저니의 재침전 과정을 입자크기를 고려하여 예측할 수 있는 모델을 개발 제시하였다. 개발된 모델을 이용한 시뮬레이션은 응집 현상이 수중에서 심해저 퇴적물의 동태를 예측하는데 상당히 중요한 영향을 주는 것으로 예측하고 있다.

심해저 개발과정에서 불가피하게 재부유된 해저퇴적물 입자는 해류 등에 의해 확산이 되면서 원래 침전되어 있던 자리가 아니라 멀리 떨어진 곳까지 가서 재침전 할 수 있으며, 이는 수중과 심해저에 중요한 환경 문제를 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 입자크기 분포와 응집 과정을 고려한 접근 방법은 심해저 개발시 중요 환경문제인 퇴적물의 재부유 및 확산과 재침전에 의한 영향을 예측하는 연구에 있어서 유효한 기초가 될 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 한국해양연구원의 위탁과제인 "심해저 광물자원 개발에 대한 첨단 기술 응용방안 연구"에서 지원된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 이두곤 (1998). "PCB로 오염된 연안 퇴적물 입자의 침강 및 연직확산 모델연구", 한국해양환경공학회지 제1권 1호, pp 39~46.
- 이두곤 (1999). "Settling Column의 입자분포 측정치를 이용한 연안 퇴적물 입자의 연직이동 모델연구", 한국해양환경공학회지 제 2권 1호, pp 26~33.
- 이두곤 (2002). "심해저 자원 개발과정에서 재부유되는 해저퇴적물 입자의 재침전과정을 예측하기 위한 모델 연구", 한국해양환경공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, pp 121~128.
- 한국기계연구원 (1996). 심해저 단과채집장치 개발 (I)
- 한국해양연구소 (1993). 심해저 광물자원 탐사기술개발 및 환경보전연구
- 한국해양연구소 (1998). 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보전연구, 제1권
- 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, pp 281~305.
- Ducharme, S.L. (1989). Design and Validation of a Settling Column for Particle Transport Studies, MS Thesis, Texas A&M University.
- Edzwald, J.K., Upchurch, J.B. and O'Melia, C.R. (1974). "Coagulation in Estuaries", *Envir. Sci. Technol.*, Vol.8, No.1, pp 58~63.
- Ernest, A.N., Bonner, J.S., Autenrieth, R.L. (1995). "Determination of Particle Collision Efficiency for Flocculent Transport Models", *J. Envir. Engng., Am. Soc. Civ. Engrs.*, Vol 121, pp 320~329.
- ISOPE (2002). "Deep Seabed Mining Environment: Preliminary Engineering and Environmental Assessment". Special Report OMS-EN-1, International Society of Offshore and Polar Engineers, Retrieved October 11, 2002, from <http://www.isopec.org/conferences/conferences.htm>
- Lawler, D.F., (1986) "Removing Particles in Water and Wastewater", *Envir. Sci. Technol.*, Vol 20 No.9, pp 856~861.
- 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.
- Lee, D.G., Bonner, J.S., Garton, L.S., Ernest, A.N.S. and Autenrieth, R.L. (2000). "Modeling Coagulation Kinetics Incorporating Fractal Theories: a Fractal Rectilinear Approach", *Water Research*, Vol 34 No 7, pp 1987~2000.
- Lee, D.G., Bonner, J.S., Garton, L.S., Ernest, A.N.S. and Autenrieth, R.L. (2002). "Modeling Coagulation Kinetics Incorporating Fractal Theories: Comparison with Observed Data", *Water Research*, Vol 36, pp 1056~1066.
- McCave, I.N. (1984). "Size Spectra and Aggregation of Suspended Particles in the Deep Ocean", *Deep-Sea Res.*, Vol 31, pp 329~352.
- 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, pp 353~386.
- Sanders, S.C. (1990). Vertical Transport and Dynamic Size Distribution of New Bedford Harbor Sediments, MS Thesis, Texas A&M University.
- Tchobanoglous, G. and Schroeder, E.D. (1985). *Water Quality*, Addison Wesley, pp 491~495.
- Thomann, R.V. (1972). *System Analysis and Water Quality Management*, Environmental Research and Applications, Inc., New York.