

수두차를 이용한 해저퇴적물 흡입현상의 수치시물레이션

정 광 열^{1*}, 이 영 길², 정 우 철³, 손 충 렬⁴

NUMERICAL SIMULATION ON THE FLOW PHENOMENON OF SEDIMENT INHALATION BY DIFFERENCE OF WATER HEAD

K.-L. Jeong, Y.-G. Lee, Uh-Cheul Jeong and Choong-Yul Son

In this study the water including sediment is assumed that the density is different from fresh water. And the phenomenon inhaled by low pressure around the pipe is numerically simulated in two dimension. The simulation is done using finite difference method in rectangular staggered mesh system and Navier-Stokes equations and continuity equation are employed as governing equations. The method of Irregular leg lengths and stars are adopted to satisfy boundary condition of body boundary. Marker-Density method is used to calculate the density of mixed flow. Also SGS turbulence model is applied to consider vortex smaller than grid at high Reynolds number. This study is to analyze inhalation phenomenon of mixed flow with sediment and to verify the numerical method for mixed flow. To verify the numerical results are compared with experimental results

Key Words: 수두(Water Head), 밀도합수법(Marker-Density Method), 이층류 유동(Two-Phase Flow), 퇴적물(Sediment)

1. 서 론

육지로부터 연근해로 유입된 유기 퇴적물은 해양을 오염시키는 주요한 원인이다. 이러한 유기 퇴적물은 주로 어패류의 사체 또는 양식장의 사료 등이 주를 이루게 된다. 이러한 퇴적물은 밀도가 작아 압밀되지 않고 해류와 조류에 의하여 이동하며 오염지역을 확대 시킨다. 오염물질의 제거와 오염지역의 확대방지를 위하여 퇴적물의 수거는 필수적이다. 현재 사용되는 수거방법으로는 그레브 준설방법과 펌프 준설방법이 있다. 이러한 준설방법은 상층부 퇴적물 외에 상당부분의 이토까지 준설하게 되며, 비중이 작은 오염물질을 확산시키는 원인이 되기도 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 압밀되어 있지 않은 퇴적물만을 선별적으로 수거할 수 있도록 저압으로 흡입하는 방법이 필요하다.

퇴적물의 이동에 관한 연구는 퇴적작용과 침식작용에 관

한 연구가 주로 수행되어 왔다. Fries[1]는 flume에서의 실험을 통해 작은 퇴적물 더미에서 초기에 ripple이 발생하는 과정을 실험하였으며, Roux[2]는 퇴적물의 모양에 따른 유체역학적 특성을 고려하여 settling velocity를 예측하였다. 또한 Tomkins[3]는 퇴적물의 크기와 밀도에 따른 settling velocity를 실험을 통하여 측정하였다.

본 연구의 목적은 수두차에 의한 관주에서의 혼합류의 흡입현상을 시물레이션 하고 이를 이용하여 혼합류 흡입의 유동 특성을 알아보는데 있다. 혼합류는 밀도합수법을 이용하여 퇴적물의 함유량을 결정하였으며, 점성의 변화는 무시하고 물과 같다고 하였다.

2. 모형실험

직사각형 모양의 박스를 정수 중에 넣은 후 펌프를 이용하여 일정한 수두차를 유지하도록 하였다. 수두차는 0.07m와 0.09m로 변화시켰으며, 초기 퇴적물과 흡입관 사이의 거리는 8mm로 일정하게 하였다. 수거대상으로 선정한 퇴적물은 양식장의 비료나 음식점의 음식찌꺼기 등으로 비중이 작으므로 본 연구에서는 곡물(조, 비중=1.6)을 이용하여 모형실험을 수

1 학생회원, 인하대학교 대학원 선박공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학부 선박해양공학전공

3 인하공업전문대학 선박해양시스템과

4 인하대학교 기계공학부 선박해양공학전공

* Corresponding author E-mail: jeongkl@naver.com

행하였다. 흡입 후 퇴적물과 물의 체적비를 이용하여 흡입효율을 확인하였다. Fig. 1은 수두차에 의해 퇴적물이 흡입되는 모습을 찍은 사진이다. 수두차에 의한 저압으로 퇴적물이 교란 없이 안정적으로 흡입되는 것을 확인할 수 있다.

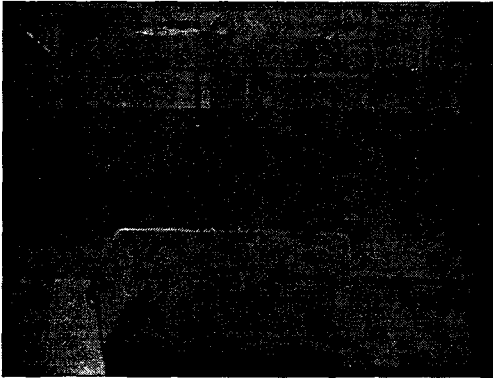


Fig. 1 Photograph of model experiment

2. 수치계산법

2.1 지배방정식 및 차분법

계산에 사용된 지배방정식은 2차원 비압축성 점성유동에서의 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다. 지배방정식은 fixed staggered variable mesh system에서 시간에 대하여는 전진차분법으로 차분화 되었다. 또한 대류항에 대하여는 정도를 향상시키기 위해 Adams-Bashforth 기법을 사용하였다. 대류항의 공간적 차분 근사를 위하여 3차 상류차분기법, 그리고 2차 혼합기법, 1차 상류차분기법을 주위 격자의 개수를 고려하여 적용하였다. 나머지 공간적 도함수 항들은 중심차분법으로 이산화 되었다. 압력분포는 압력의 Poisson 방정식을 SOR 기법으로 풀어서 얻게 된다.

또한 본 연구에서는 vortex를 포함하는 높은 레이놀즈 수에서의 유동을 좀 더 정확하게 시뮬레이션하기 위하여 2차원 SGS 난류모형을 적용하였다[4].

SGS 레이놀즈 응력은 식(1)과 같다.

$$R_{ij} = \frac{1}{3} \overline{u_i u_j} \delta_{ij} - \nu_s \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

위식의 ν_s 는 와점성계수이다.

$$\nu_s = (C_0 \Delta)^{\frac{1}{2}} = (C_1 \Delta)^{\frac{4}{3}} \quad (2)$$

식(2)의 $C_0=0.094$ 이고 $C_1=0.10$ 이다. 그리고 식(2)의 k 는 난류의 운동학적 에너지 이고, ε 은 난류 에너지 소산 이다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (3)$$

$$= \nu_s \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

식(4)를 식(1)에 대입시켜주면 SGS점성계수 ν_s 를 얻을수 있다.

$$(\nu_s)_{i,k} = (C_1 \Delta)^2 \left\{ 2 \left(\frac{\partial u^2}{\partial x_{i,k}} + \frac{\partial w^2}{\partial z_{i,k}} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{i,k}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

이 경우 Δ 는 $(\Delta x \cdot \Delta z)^{\frac{1}{2}}$ 이다.

난류 압력은 식(6)과 같고, 난류 전단 응력은 식(7)와 같다.

$$(\phi)_{i,k} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(\nu_s)^2}{(C_0 \cdot \Delta)^2} \quad (6)$$

$$\tau_{i,k} = (\nu_s)_{i,k} \cdot \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right)_{i,k} + \left(\frac{\partial \overline{w}}{\partial x} \right)_{i,k} \quad (7)$$

Navier-stokes 방정식에 난류에 의한 운동량항(식(8))을 더해 준다.

$$\begin{aligned} (\xi_M)_{i,k} &= \left(-\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right)_{i,k} + 2 \cdot (\nu_s)_{i,k} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \bigg|_{i,k} + \frac{\partial \tau}{\partial z} \bigg|_{i,k} \cdot \Delta t \\ (\zeta_M)_{i,k} &= \left(-\frac{\partial \phi_i}{\partial z} \right)_{i,k} + 2 \cdot (\nu_s)_{i,k} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \bigg|_{i,k} + \frac{\partial \tau}{\partial x} \bigg|_{i,k} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (8)$$

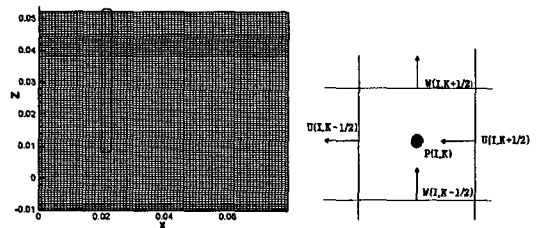


Fig. 2 Computational domain and mesh system

2.2 계산조건

수두차를 변화시키며 흡입관 주위의 유동을 시뮬레이션 하였다.

Fig. 2는 격자계와 계산 영역을 나타내고 있다. 왼쪽 경계에 대칭조건을 적용하여 계산을 수행하였다. X-방향 격자 크기는 0.002m로 등 간격이며 Z-방향 격자 크기는 0.001m ~ 0.005m로 혼합류의 밀도변화가 심한 곳에 집중시켜 정도를 향상 시켰다. 시간간격은 0.00005초로 계산하였다.

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} + u \frac{\partial M_p}{\partial x} + w \frac{\partial M_p}{\partial z} = 0 \tag{9}$$

혼합류의 유동을 계산하기 위해서 식(9)와 같은 밀도함수법을 이용하였다. 밀도함수법은 쇄파현상과 같은 비선형 2층류문제에 적용된 기법이었으나 혼합류와 같이 밀도값이 변하는 문제에 적용이 가능하다[5]. 물의 밀도가 $\rho^{(1)}$, 퇴적물의 밀도가 $\rho^{(2)}$ 일 때 밀도함수 M_p 는 각각 밀도의 스칼라 값으로부터 정의되었다. 격자의 밀도함수 값이 $\rho^{(1)}$ 과 $\rho^{(2)}$ 의 중간 값을 갖는 격자의 경우 퇴적물과 물이 섞여 있는 상태로 가정하였다. 혼합류를 계산하는 경우 밀도함수값을 이용하여 혼합류의 밀도를 결정하였으며, 혼합류의 점성은 퇴적물의 함유량에 따라 변하게 되나 그 차이가 적어 물의 점성과 같다고 가정하였다[6].

Fig. 3은 밀도함수값과 벡터포인트의 관계를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 이웃하는 격자의 밀도함수값이 퇴적물의 밀도와 비슷하고, 그 격자의 밀도함수값 또한 퇴적물의 밀도와 차이가 적을 경우 퇴적물이 섞여 있는 것으로 가정하여 속도 벡터 값을 '0'으로 주었다. 본 연구의 경우 ρ_c 는 퇴적물의 비중에 0.995를 곱한 값으로 하였다. 퇴적물의 흡입량은 관입구에서 흡입되는 유체의 체적을 적분한 값과 밀도값을 적분한 값을 이용하여 혼합류 중 퇴적물이 차지하는 비율을 계산하였다.

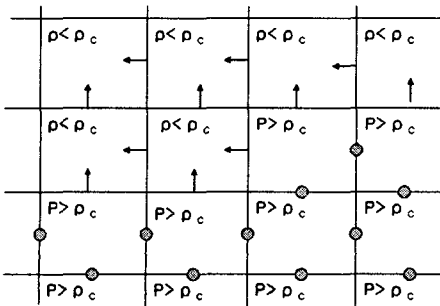


Fig. 3 Schematic view of vector points in the mixed flow

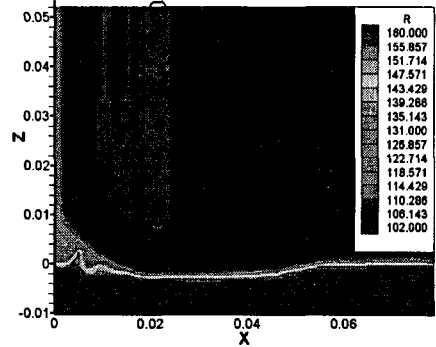


Fig. 4 Density contour (H=0.07m, 6.75sec; unit=kg/m³)

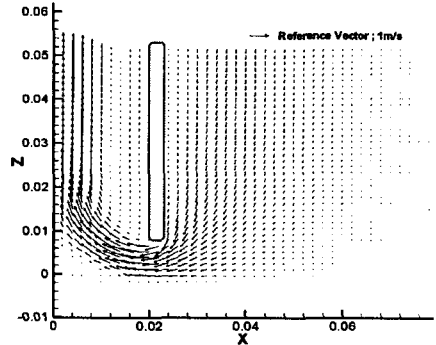


Fig. 5 Variation of velocity vectors (H=0.07m, 6.75sec)

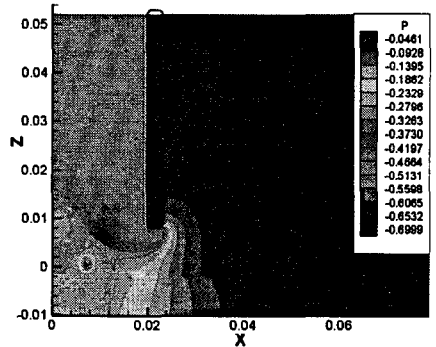


Fig. 6 Pressure contour (H=0.07m, 6.75sec; unit=kgf/m³)

3. 결과 및 고찰

Table. 1은 실험결과와 수치시뮬레이션 결과를 비교한 표이다. 실험결과는 1분간 흡입된 전체체적 중 퇴적물의 체적을 비율로 나타낸 것이다. 수치시뮬레이션 결과는 관을 통과하는 전체 유량 중 퇴적물이 차지하는 비율을 밀도함수값을 이용하여 계산한 값이다. 정성적으로 실험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

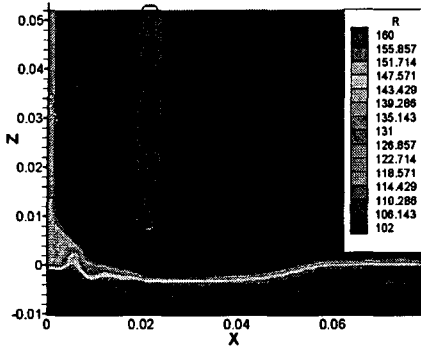


Fig. 7 Density contour (H=0.09m, 6.75sec; unit=kg/m³/g)

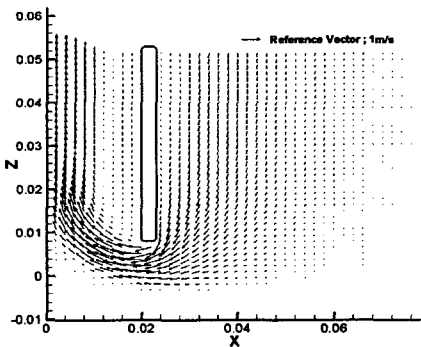


Fig. 8 Variation of velocity vectors (H=0.07m, 6.75sec)

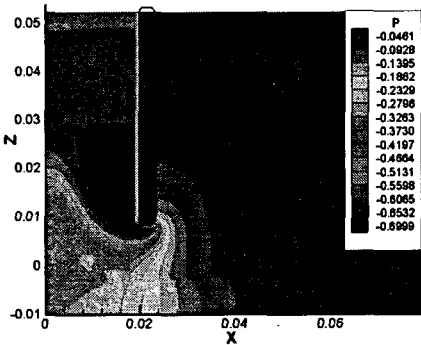


Fig. 9 Pressure contour (H=0.09m, 6.75sec; unit=kgf/m²)

Table. 1 Experiment and numerical simulation results

| Water head | Experiment (sediment) | Numerical simulation (sediment) |
|------------|-----------------------|---------------------------------|
| 0.07m | 0.23% | 0.34% |
| 0.09m | 0.33% | 0.62% |

Fig. 4는 수두차(0.07m)에 의하여 흡입되는 혼합류의 밀도 분포를 나타내고 있다. 흡입된 퇴적물은 관의 중심을 따라 올라 가는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 4에서 침식현상은 압력이 낮은 관의 중심보다 속도가 빠른 관의 가장자리에서 먼저 침식이 일어나 깊게 파인 것을 볼 수 있다. Fig 5는 속도분포를 보여주고 있다. 흡입되는 물과 퇴적물은 대부분 관의 중심에서 올라오게 되고 관의 가장자리에서는 흡입되는 양이 매우 작음을 Fig. 5와 8에서 볼 수 있다. 또한 Fig. 6과 7에서 보는 바와 같이 관의 끝에서 압력이 가장 낮게 나타난다.

수두차를 증가시켜(0.09m) 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 7-9에 나타나 있다. Fig. 7과 4를 비교해 보면 수두차를 증가시킨 결과 퇴적물이 더 깊고 넓게 침식 된 것을 확인 할 수 있다. 관 밖에서부터 마찰에 의하여 유입된 퇴적물은 물과 섞여 관을 따라 올라 가게 된다. 수두차가 작은 Fig. 4의 경우 수두차가 큰 Fig. 7에 비하여 낮은 밀도의 혼합류가 흡입되는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

밀도함수법을 이용하여 수두차에 의한 퇴적물의 흡입현상을 시뮬레이션 하였다. 밀도함수값을 유동의 계산에 직접 사용함으로써 물과 퇴적물이 섞여있는 혼합류의 밀도변화를 고려해 주었다. 계산결과는 실험결과와 비교되었으며, 정성적으로 일치하는 것을 확인하였다. 더 많은 실험결과를 바탕으로 적절한 ρ_c 를 결정한다면 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 본 연구에서는 실험적 결과에 비하여 정량적으로 퇴적물이 많이 수거되었다. 이는 혼합류의 퇴적물 비율에 따른 점성의 변화를 무시하여 나타난 것으로 생각된다. 퇴적물의 비율에 따른 점성의 변화를 고려하게 되면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부 과제 "수두차를 이용한 퇴적물 준설 장비 개발"의 일부분으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Fries, J.S. 2004, "General Threshold for sediment transport induced by mounds," Journal of Sediment Research, Vol.74-1, p.144-147.
 [2] Roux,J.P., 2004, "Ahydrodynamic Classification of grain



- shapes," J. Sediment Research, Vol.74-6, p.906-911.
- [3] Tomkins, M.R. et al., 2003, "Selective entrainment of sediment graded by size and density under waves," J. Sediment Reserach, Vol.73-6, p.906-911.
- [4] 정광열, 이영길 2004, "밀도함수를 포함하는 이층류 해석에 의한 경사진 해변에서의 쇄파현상에 관한 연구," 대한조선학회춘계학술대회, Vol2, p.1101-1106.
- [5] Heo, J.-K. and Lee, Y.-G., 1996, "A numerical simulation of two-dimensional nonlinear waves in surf zone," Proc. KOJAM'96, p.309-317.
- [6] 何材三郎, 1982, 何砂水理學, 森北出版株式會社, p40-43.