

항만공사로 인한 부유토사의 확산 거동 수치모의 Numerical Simulation of Suspended Sediment Transport due to Port and Harbour Construction

강시환¹, 전기천¹, 장원호², 김상익³

See-Whan Kang¹, Kicheon Jun¹, Won-Ho Jang², Sang-Ik Kim³

1. 서 론

항만 및 연안개발사업의 준설, 방파제, 방조제, 호안 축조, 매립 등의 다양한 공사는 주변 해역의 장단기적인 환경변화를 유발하며, 궁극적으로는 다양한 방식으로 연안생태계에 큰 변화를 초래할 수 있다 (IADC/CEDA, 2000). 특히, 호안부두, 방파제 등 항만 구조물의 건설 공정 가운데 준설이나 구조물의 기초 지반 구축을 위한 사석투하 과정에서는 다량의 부유토사가 발생한다(Penekamp *et al*, 1996). 따라서, 사전에 수치 모형이나 수치모형 모의실험을 통하여 공사 중에 발생하는 부유토사의 확산범위를 파악하여 피해경감 대책을 수립하는 것이 필요하다.

국내에서는 서승원(1996), 김영도 등(2000), 정태성 등(2004), 강시환 등(2004a, 2004b), Kang(2006), 강시환 등 (2006)에 의해 부유토사의 이송·확산연구가 수행된 바 있다. 최근 Eulerian 방법과 Lagrangian 방법을 결합한 Eulerian-Lagrangian 방법이 많이 사용되는데, 이 방법으로 수치진동과 수치확산을 줄일 수 있어 정확성이 크게 개선되었다(서승원, 1996; 정태성 등, 2004).

본 연구는 PTM(Particle Tracking Method) 방법을 사용한 이송·확산 모형을 부산신항 공사현장에 적용하여, 부유토사의 확산 범위를 예측하였다. 초기발생 부하시점으로부터 24시간 동안의 부유토사의 거동을 수치모의하였으며, 조류에 의한 결과가 확실히 구분되는 때 6시간마다의 확산농도와 부유입자추적 분포의 결과를 검토하였다.

2. 수치모형의 수립

2.1 해수유동모형

본 연구에서는 부산 신항과 가덕도 사이의 해역을 대상으로 해수 유동 모형을 적용하여, 주요 4개 분조에 대한 조위와 조류를 계산하였다. 한편 이들 모형 결과는 확산 모형의 입력 자료로 사용되어 부유토사의 이송·확산 계산에 사용되었다. 최종 계산에 사용된 격자는 50m×50m로 구성되었는데, 이 정밀 격자의 개방경계 조건을 구하기 위해 4단계의 격자체계를 구축하였다.

1단계 격자는 광역 격자로서 경도 117~143°E, 위도 20~50°N의 영역에 대하여 위도와 경도 방향 모두 1/12°의 격자로 구성하여 동해, 서해, 남해 및 동중국해를 포함한다. 2단계는 남해 일부와 동해 일부를 포함하는 중간역 격자로 격자 간격은 위도와 경도 방향 모두 1/60°(약 10km)이다. 3단계는 거제도 포함하는 상세역 격자로 300m의 격자를 사용하였으며, 마지막 4단계는 부산 신항과 가덕도 주변을 포함하는 정밀 격자 영역으로 구성하였다. 광역 격자의 개방경계에서는 4개 분조(M2, S2, K1 및 O1)로 해수위를 설정하였다.

2.2 부유사 입자추적(PTM) 모형

부유사 이송·확산 모형의 지배방정식은 식(1)과 같다(Fischer *et al*, 1979).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v} C = \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla C) + Q \quad (1)$$

여기서 C 는 농도, \mathbf{v} 는 유속벡터, \mathbf{K} 는 확산텐서, 그리고 Q 는 점오염원이다. 이러한 이송모형의 지배방

1 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원

2 (주)헤인 E&C 설계1본부

3 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임기술원

정식의 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$C(\mathbf{x}, t) = C_0(\mathbf{x}) \text{ at } t=0 \text{ in } \Omega \quad (2)$$

$$C(\mathbf{x}, t) = \bar{C}(\mathbf{x}, t) \text{ at } t>0 \text{ on } \Gamma_1 \quad (3)$$

$$q_n(\mathbf{x}, t) = \bar{q}_n(\mathbf{x}, t) \text{ at } t>0 \text{ on } \Gamma_2 \quad (4)$$

여기서, q_n 는 경계에 직각방향인 흐름틀이고, Ω 는 내부경계, Γ_1 은 외측 개경계, Γ_2 는 외측 폐경계이다.

수송모형은 지배방정식의 해를 직접 구하는 이송·확산 모형과 오염원이 개별적인 입자들로 표현되는 입자추적 모형으로 나누어지고, 이송·확산 모형은 Eulerian 모형과 Lagrangian 모형(이중섭·김호진, 1995) 그리고 Eulerian-Lagrangian 모형으로 분류된다. Eulerian-Lagrangian 모형의 지배방정식을 유도하기 위하여 이송·확산 방정식을 시간 차분화 시키면 다음과 같다.

$$\frac{C^n - C^{n-1}}{\Delta t} + [\mathbf{v} \cdot \nabla C]^{n-1} = [\nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla C)]^n \quad (5)$$

여기서 매개변수를 삽입하면 선형성으로 인해 식 (5)를 이송 성분과 확산 성분으로 분리할 수 있으므로 Eulerian-Lagrangian 모형의 지배방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{C^f - C^{n-1}}{\Delta t} + [(\mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{K}) \cdot \nabla C]^{n-1} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{C^n - C^f}{\Delta t} = [\mathbf{K} \cdot \nabla^2 C]^n \quad (7)$$

실제 자연상태에서 일어나는 물질의 혼합과정은 이송·확산 모형과 같이 농도로 표현된 기본식에 의해 설명되기보다는 물질입자 개개의 무작위 움직임으로 표현하는 것이 물리적으로 보다 타당하다(서승원, 1996). 이러한 입자추적 모형에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dx_i}{dt} = a(x_i, t) + b(x_i, t)\xi(t) \quad (8)$$

여기서 $i(=1, 2, 3)$ 는 좌표계이고, a 는 확정적 인자, b 는 확률적 인자, ξ 는 난수이다.

입자추적모형의 기본 개념은 용존질량이 다수의 입자들 집합으로 이루어졌다고 간주하고, 이 입자들의 운동이 확정적인 이송역학에 의하여 움직이는 것과 어떤 특정 분포를 따르는 확률적인 확산의 운동으로 구성되어 있다고 간주한다(Kim et al, 2000). 또한 입자추적 모형을 사용하면 원역에서의 불충분한 공간적인 해로 인한 수치 확산을 소거할 수 있다. 다만 일반적인 수송모형은 수리화학적 정보에 대해 흐름 모형에 종속되므로, 두 모형의 시간간격의 차이는 불필요한 계산시간과 저장공간 등의 문제를 만든다. 그래서 작은 시간간격의 해수유동 모형의 유속과 난류

확산 결과를 이송모형의 시간 간격동안에 걸쳐서 평균하는 기법을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 입자추적모형의 수치계산 흐름도는 Fig. 1와 같다.

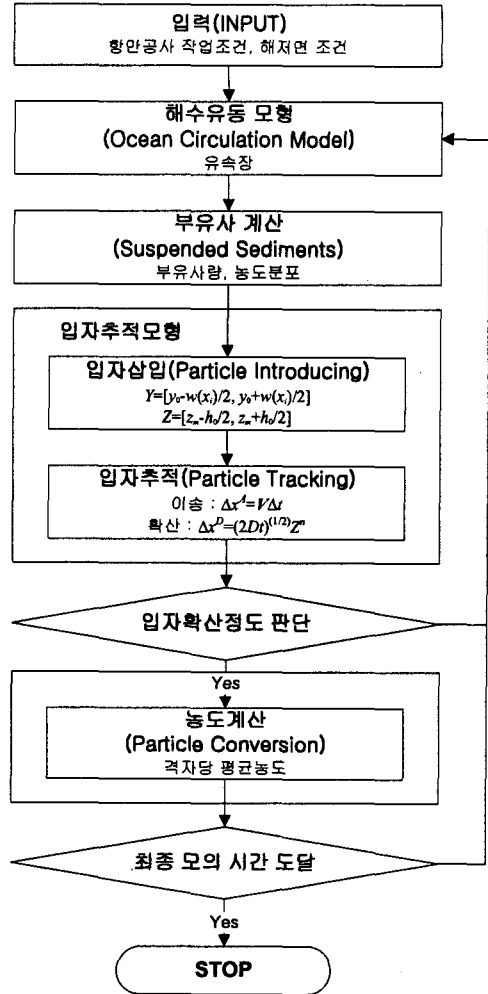


Fig. 1. 입자추적모형의 수치계산 흐름도

3. 부유사 확산범위 수치모의

3.1 해수유동장 모의

Fig. 2는 해수유동장 산정을 위한 해수유동모형의 계산 영역과 항만공사의 위치(A지점)를 나타낸 것이다. 대상 지역은 가덕도를 중심으로, 놀차도와 진우도를 포함하며, 전체 크기는 동서 6km, 세로 6km 내외의 구간이다. 확산에 따른 피해 범위를 예측하기 위해 진우도 좌측 해역의 양식장까지 영역을 포함하였다. Fig. 2의 A지점이 부유사가 발생하는 지점이며, 여기

서 최강창조류의 유속은 0.4065m/s, 최강낙조류의 유속은 0.4673m/s이다. Fig. 3은 대조기 최강 조류 분포를 창조시와 낙조시로 구분하여 나타낸 것이다.

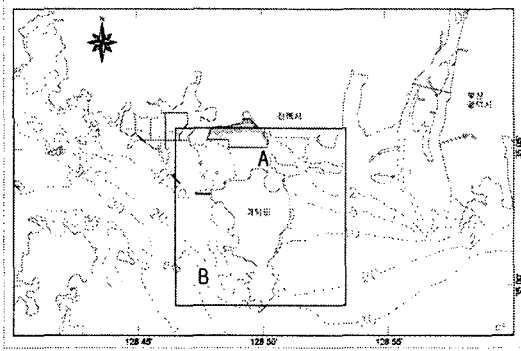


Fig. 2. 모래마운드 조성공사 위치도 (A: 부유사발생 부하지점, B: 조위 및 조류속도 산정지점)

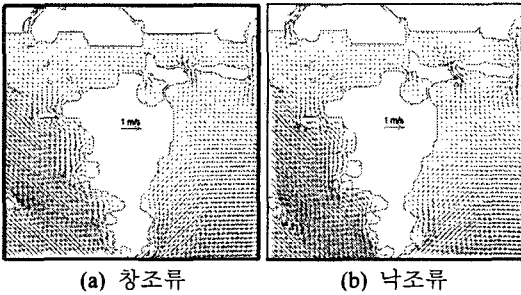


Fig. 3. 대조기 창조시 및 낙조시의 최강유속장 분포

3.2 부유사 확산 모의실험

Fig. 2의 A지점에서 모래마운드 조성공사를 위해 투기한 매립용 모래로부터 발생한 부유사의 확산 분포를 예측하기 위해 확산실험을 수행하였다. 공사작업시간은 일일 10시간 계속한다고 가정하였으며, 초기발생 부하지점(대조기 만조시)으로부터 24시간동안 수치모의하여 확산농도와 부유입자 분포를 계산하였다.

본 수치모의실험에서는 Table 1에 나타낸 바와 같이 공사물량, 공사일수, 일일작업시간에 따라 부유사 발생량을 산정하였으며, AMJP(Air Mixed Jet Pump) 공법으로 모래를 부설하여 호안하부기초 모래마운드(197,000m³)를 축조하고 육상작업은 SCP(Sand Compaction Pile)로 한다고 가정하였으며, 마운드조성 매립용 모래의 입경분포는 Table 2와 같다(대우건설, 2004).

Table 1. 모래마운드 조성공사에 의한 부유사 발생량

공사물량 (m ³)	공사일수 (개월/일)	일일작업 시간 (hr)	작업강도 (m/hr)	발생원단위 (kg/m ³)	SS발생량 (kg/hr)
197,000	3/60	10	328.3	5.7	1871.5

Table 2. 매립용 모래의 입경분포

종류	sand	coarse silt	fine silt	clay
비율(%)	85	2	11	2

3.3 모의실험결과

부유입자의 이송과 확산 상황을 추적한 결과를 매 6시간 간격으로 Fig. 4에 도시하였다. 그림과 같이 부유사의 입자들이 공사지점 동쪽 양식장 방향으로 흘러가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4(a)에서 초기 6시간 동안은 낙조기이기 때문에 부유사가 놀차도와 진우도 사이의 좁은 구간을 통하여 외해 방향으로 빠져 나간다. 이 때, 부유사는 아직 놀차도와 가덕도 사이의 놀차교 아래에는 도달하지 않은 상태이다.

Fig. 4(b)는 다음 12시간 후의 상황을 보여 주고 있다. 12시간 후는 창조기로, 외해로 나갔던 부유사들이 내해 쪽으로 다시 밀려 들어와서 진우도도와 부산시 강서구 녹산동 사이의 좁은 해역으로 확산되는 것을 알 수 있다. 또한, 이 때는 놀차교 아래까지 부유사가 도달한 것을 보여주고 있다.

Fig. 4(c)는 다음 18시간 후의 상황을 보여 주고 있다. 18시간 후에는 이러한 과정들이 중첩이 되면서, 놀차도와 진우도 사이의 해역을 통해 더 많은 부유사들이 널리 확산되어 최대 확산된 상황을 보여 주고 있다. 또한 진우도와 녹산동 사이의 해역에도 광범위하게 부유사가 확산되고 있다. 반면, 이 때는 놀차교 아래의 부유사는 오히려 확산 범위가 좁아진 것을 보여 주고 있다.

Fig. 4(d)는 24시간 후의 최종적인 부유사 확산 범위와 상황을 보여주고 있는데, 놀차도와 진우도 사이의 해역에서는 확산 범위가 일부 축소되었다. 진우도와 녹산동 사이의 해역은 최대 확산을 보여 주고 있으나, 놀차교 인근 해역에서도 최대 확산을 보여 주고 있다. 그러나, 12시간 경과 후부터는 확산 범위에 있어 큰 차이가 없었다.

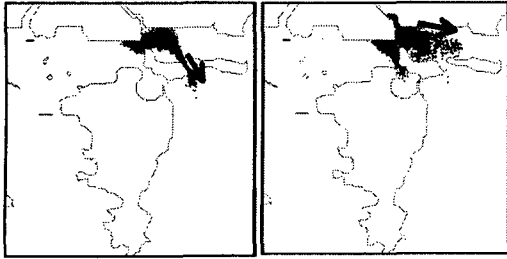
Fig. 5은 공사지점(A지점)에서 동쪽 방향으로 이송된 거리에 따른 농도의 시간변화를 나타낸 것이다.

후 기

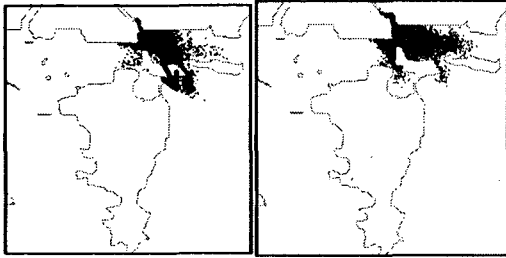
본 논문은 (주)대우건설의 연구지원과 한국해양연구원의 연구정책지원사업에 의해 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- 강시환, 강인남, 이정렬 (2006). 준설탁도 플룸의 3차원 이송-확산 거동모의. 대한토목학회 논문집(심사중).
- 강시환, 김상익, 강인남, 정태성 (2004a). 준설탁도 퇴적물의 초기 확산 거동 모의. 대한토목학회 논문집, 24(1B), 63-68.
- 강시환, 전기천, 강인남, 한성대 (2004b). 준설탁도 플룸 거동의 수리학적 특성 해석. 대한토목학회 논문집, 24(4B), 341-346.
- 김영도, 강시환, 서일원, 오병철 (2000). 3차원 입자추적 모형에 의한 수중방류 하수의 이송-확산 예측. 대한토목학회 논문집, 20(6B), 843-852.
- 대우건설 (2004). 부산신항 다목적부두 배후부지 조성공사 현장자료.
- 서승원 (1996). Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 결합모형에 의한 연안의 부유사 확산 해석. 한국해양-해양공학회지, 8(2), 185-192.
- 이종섭, 김호진 (1995). Random Walk 모형에 의한 확산해의 민감도 분석. 대한토목학회 논문집, 15(5), 1267-1277.
- 정태성, 김태식, 강시환 (2004). 준설탁공사시 부유사 확산예측시스템의 개발. 한국해양-해양공학회지, 16(1), 47-55.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). Mixing in inland and coastal waters. Academic Press, New York.
- IADC/CEDA (2000). Effects, ecology and economy. Environmental aspects of dredging, Vol. 6.
- Kang, S.W. (2006). Modelling transport of suspended sediment caused from dredging operation. J. Ocean Science & Technology (JOST), 3(1), 38-43.
- Kim, Y.D., Seo, I.W., Kang, S.W., and Oh, B.C. (2001). Modeling the mixing of wastewater effluent discharged from ocean outfalls using a hybrid model. Coastal Engineering Journal, JSCE, 43(4), 259-288.
- Penekamp, J.G.S., Epskamp, W.F., Rosenbrand, A., Mulie, G.L., Wessel, T.A., Deibel, I.K. (1996). Turbidity caused by dredging; viewed in perspective. Terra et Aqua, 64, 10-17.



a) 6시간 경과 후 b) 12시간 경과 후



c) 18시간 경과 후 d) 24시간 경과 후

Fig. 4. 부유사 확산분포 수치모의 결과

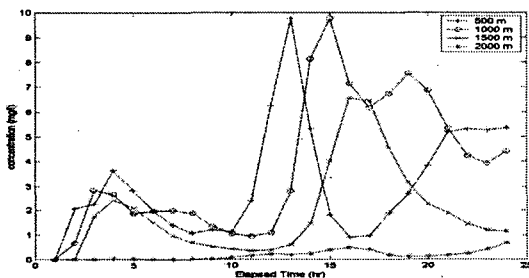


Fig. 5. 공사지점(A지점) 동측방향의 이송 거리에 따른 농도의 시간변화

4. 결 론

부산신항 조성공사로 인해 발생하는 부유토사가 주변 해양 환경에 영향을 미치는 범위를 예측하기 위해 부유사 이송확산 모형(PTM)을 이용하여 수치 모의를 수행하였다. 실제 모래마운드 조성공사의 공사물량, 일일작업시간 등의 자료를 수집하고 작업강도를 계산하여 수치모의의 입력자료로 사용하였다. 부유토사가 확산되는 범위와 작업강도에 따른 부유사 농도를 예측할 수 있으며, 이 부유토사가 주변 해역으로 확산되는 과정과 범위를 적절히 모의하였다. 수치모의 결과에서 부유사는 24시간 경과 후에는 공사 지역으로부터 2km 정도 떨어진 동측의 수역까지 확산되었으며, 그 농도는 5mg/l 이내로 인근 해역에 심각한 환경피해를 유발할 정도는 아니었으나, 저감대책을 수립할 필요가 있다.