

## 오탉방지막을 포함하는 3차원 흐름 수치모델의 현장적용 Field Application of Three Dimensional Numerical for Flow with Silt Protector

홍남식<sup>1</sup>, 강윤구<sup>2</sup>

Namseeg Hong<sup>1</sup> and Yoon-Koo Kang<sup>2</sup>

### 1. 서 론

오탉방지막은 해상이나 하천에서 준설 및 매립 공사등으로 인한 부유사 확산을 방지하는 막체구조로서 여과기능이 있는 막체부는 유연막으로 이루어져 있으며 부유사확산을 저지하는 중요한 역할을 하게 된다. 일반적으로 유속은 수면에 가까울수록 크기 때문에 특히 수면 부근에서 문제가 된다. 오탉방지막이 설치되지 않은 상태에서 수면 부근에 오탉이 발생하면 흐름방향으로 확산되어 농도가 증가된다. 이때, 유속이 크면 확산시간이 짧더라도 멀리까지 확산되기 때문에 회석이 충분하게 되지 않으며 따라서 단시간 내에 고농도의 오탉 영역이 멀리까지 형성된다. 여기서 오탉방지막을 유속이 빠른 수면 가까이 설치하면 오탉확산에 영향을 주는 유속은 작아져서 상대적으로 작은 연직방향의 확산속도와 복합되어 먼 곳으로의 확산에 장시간이 필요하게 되며 그 결과 오탉수는 충분히 회석되며 저농도로 되어간다.

유연막체로 인한 파랑제어효과에 관해서는 Wang and Ren(1993)이 연구를 시작한 이후 다양한 연구(Yu and Chawang, 1994; 조일형, 1994; 조일형과 홍석원, 1995; Cho et al., 1997, 1998; Cho and Kim, 2000; 기성태, 2002)가 수행되어 왔다. 수행된 연구들의 기본개념은 유연 막체를 두께가 얇은 유공판으로 보고 통과유속이 Darcy의 법칙을 따른다고 가정하여 속도 포텐셜  $\phi$ 를 미지수로 하여 정식화한 후, 막체를 내부경계조건으로 경계치문제(Boundary Value Problem)를 해석하는 것이었다. 파랑의 경우는 조석에 비

해 파장이 훨씬 짧으므로, 수치모의시 상기 연구의 가정 및 해석법을 적용할 수 있으나 보다 더 정확한 해를 얻기 위해서는 작은 격자간격을 유지해야 하기 때문에 모델영역이 줄어들 수 밖에 없다. 그러나, 조석의 경우는 파랑에 비해 파장이 길 뿐만 아니라 해석영역 또한 넓어 파랑의 경우 적용했던 모델을 동일하게 적용하기에는 한계가 있다.

조석에 의한 흐름장내에 수공구조(hydraulic structure)와 같은 장애물이 존재할 경우 Jager and Schijn -del(2000)는 운동량방정식내에 장애물의 영향을 표현하였다. 장애물을 운동량방정식의 에너지 손실로 고려하여, 운동량보존 법칙으로부터 장애물로 인한 에너지손실은 장애물 근처경계에서 압력수두차로 나타남으로 표현하였다. 즉, 에너지손실을 비선형 2차손실항으로서 유속과 손실계수로 표현하였다. 또한, 홍남식등(2008)은 조석에 의한 흐름장내에 설치된 오탉방지막을 운동량방정식내의 비선형 2차 에너지 손실항으로 표현하여 3차원 조석흐름 수치모형을 수행하였으며, 비선형 2차 손실항의 손실계수는 수조 실험을 통하여 얻었으며, 수조실험과의 결과비교를 통해 수치모형을 검증하였다.

그러므로, 본 논문은 홍남식등(2008)에 의해서 개발된 모델을 실패역인 울산항 북방파제공사에 설치될 오탉방지막에 적용함으로써 실패역에서의 막체 유속제어효과를 검토하고, 모델의 실패역 적용시 개선해야할 점을 조사하였다.

실패역에 모델을 적용한 결과, 오탉방지막으로

1 발표자: 동아대학교 토목공학부 교수

2 (주)삼성물산 건설부문 연구원

인한 유속제어효과가 잘 표현되는 것을 확인하였다. 그러나, 실험역에서의 최소격자간격(20m)에서는 막체깊이/수심 비가 80% 에서도 막체 후면에 발생할 역류와동현상이 최소격자간격의 한계(홍남식등의 논문에서는 최소격자간격 1m)로 재현되지 않음을 확인하였으며, 막체의 수평방향 양 끝단에서 압력수두차가 실제로 존재하지 않음에도 수평방향으로 막체의 전 구간에 동일한 압력수두차를 적용함으로써 오류가 발생할 수 있음을 인지하였다.

## 2. 수학 모델

### 2.1 지배방정식

본 연구에서 취급할 모델영역의 수심이 수평방향 길이에 비해 상당히 작으므로 식(1)  $\sigma$ 좌표계를 적용하였다.

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad (1)$$

여기서,  $z$  는 실제 연직좌표계,  $\zeta$  는 기준면 ( $z=0$ )상의 자유수면 변위,  $d$  는 기준면하의 수심, 그리고  $H (=d+\zeta)$  는 총 수심을 나타낸다.  $\sigma$ 좌표계에서 수심평균 연속방정식은 식 (2)와 같으며 수평방향  $\zeta$ ,  $\eta$ 방향의 운동량방정식은 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{J_{\eta\eta}}]}{\partial \eta} + \frac{1}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)W\sqrt{J_{\zeta\zeta}}]}{\partial \eta} = Q \quad (2)$$

여기서,  $J_{\zeta\zeta}$ 와  $J_{\eta\eta}$ 는 수평좌표계( $\zeta$ ,  $\eta$ )에서의 Jacobian을  $U$ ,  $W$ 는 수평방향의 수심평균유속을 나타내며  $Q$ 는 단위면적당 유입, 용출량으로 식 (3)과 같다.

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{output} - q_{input}) d\sigma \quad (3)$$

여기서  $q_{output}$ ,  $q_{input}$  은 단위체적당 국부적 발생 유입, 용출량 (sink and source) 이다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{v}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} + \frac{uv}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \eta} - fv = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + S_{\zeta} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{v}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} - \frac{u^2}{\sqrt{J_{\zeta\zeta}}\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \eta} + fu = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + S_{\eta} \quad (5)$$

여기서,  $f$ 는 coriolis 상수,  $v$ 는 와동점성계수를 나타내며  $S_{\zeta}$  와  $S_{\eta}$  는 각각  $\zeta$ ,  $\eta$ 방향의 운동량 source나 sink로서 본 연구에서는 2.3절에 기술될 바와 같이 막체로 인한 외력항으로 표현하였다. 또한,  $u$  와  $v$ 는 각각 수평방향인  $\zeta$ ,  $\eta$

방향의 유속을  $\vec{w}$  는 연직  $\zeta$  방향의 이동  $\sigma$ -plane에 대한 상대유속으로 연속방정식으로 부터 계산된다.

### 2.2 막체로 인한 에너지손실

흐름장내에 막체와 같은 장애물이 있는 경우 장애물 전후에서 조위차가 발생하므로 막체 설치위치에서 급격한 압력경사가 나타나게 된다. 그러나, 조석유동모델에서는 격자간격을 최소화하여 이 압력경사를 수치적으로 격자에 표현하더라도 해의 정확성에 문제가 발생하게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 오락방지막의 막체를 유공판(porous plate)으로 보고 구조물로 인한 에너지손실을 격자의 경계에서 표현하기 위해 parameter화하였다. , 에너지손실을 운동량방정식 (4), (5)의 유입항(source term)에 다음 식(6), (7)과 같은 2차 손실항(quadratic loss term)을 추가함으로써 표현하였다.

$$S_{\zeta} = -\frac{C_{loss-u}}{\Delta x} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$S_{\eta} = -\frac{C_{loss-v}}{\Delta y} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

여기서,  $C_{loss-u}$ ,  $C_{loss-v}$ 는 에너지손실계수이며 식(6), (7)은 막체부의 단면수축으로 인한 에너지손실을 나타낸다. 즉, 단면수축으로 인한 정상 상류(subcritical flow) 유량은 막체 전·후의 수위차와 관계되며 식(8)과 같다.

$$Q = \mu A \sqrt{2g(\zeta_u - \zeta_d)} \quad (8)$$

여기서,  $\mu(0 \leq \mu \leq 1)$ 은 단면수축계수,  $A$ 는 wet area, 그리고  $\zeta_u$ ,  $\zeta_d$ 는 각각 막체 전(upstream)과 후(downstream)의 수위를 나타낸다.

식(8)의 양변을 제곱한 후 양변을  $2\mu^2 A^2 \Delta x$ 로 나누면 식(9)와 같으며, 식(9)의 우변을 식(6)과 같이 놓으면 식(10)이 된다.

$$g \frac{\zeta_u - \zeta_d}{\Delta x} = \frac{Q^2}{2\mu^2 A^2 \Delta x} \quad (9)$$

$$g \frac{\zeta_u - \zeta_d}{\Delta x} = \frac{Q^2}{2\mu^2 A^2 \Delta x} = \frac{C_{loss-u}}{\Delta x} u \vec{u} \quad (10)$$

식(10)의 두 번째 항과 세 번째 항의 비교로부터 식(11)의 관계식을 찾아낼 수 있으며, 이 관계식으로 부터 수축계수를 알면 에너지손실계수를 구할 수 있게 된다.

$$C_{loss-u} = \frac{1}{2\mu^2} \quad (11)$$

그러나, 흐름전면을 차단하는 일반 판(plate)과는 달리, 유공판의 경우 수축계수를 산정하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 식(11)의 첫 번째 항

과 세 번째 항의 관계를 이용하여 수조실험 결과로부터 직접 산정하는 방법을 채택하였다.

### 3. 수치 모형

#### 3.1 수치 모형 개요

본 연구에서 사용한 격자체계는 staggered grid 3차원 지배방정식을 시간과 공간에 대하여 유한차분화 한다. 연직방향으로는 수심의 변화에 관계없이 수평방향의 전 영역에 걸쳐 동일한 층(layer)의 개수를 갖는  $\sigma$ 좌표격자를 적용한다.

ADI(Alternating Direction Integration) scheme (Leendertse and Gritton, 1971; Leendertse et al., 1973)이 시간이력 적분을 위하여 기본적으로 적용되며, 수평방향의 이류항에 대한 공간이산화(spatial discretization)를 위하여 ADI scheme을 개선한 방법(Stelling and Leendertse, 1991)이 적용된다.

#### 3.2 수조실험을 통한 손실계수 산정

유동모델에 막체와 같은 수중구조물을 식 (6), (7)의 2차손실항을 사용하여 표현할 때 가장 중요한 요소는 합리적인 손실계수  $c_{loss}$ 의 산정이다. 본 연구에서는 수조실험을 통하여 막체로 인한 손실계수를 산정하였다.

수조실험에서 계측된 수위차와 측정된 유속을 식(10)에 적용하면 손실계수를 얻을 수 있으며, 수심에 따라 유속의 변화가 거의 없으므로 막체의 깊이로 나누어 막체 전체에 균등하게 분포시켰다.

## 4. 실험해역의 적용

#### 4.1 적용해역 및 오탉방지막 설치개요

본 연구에서 적용한 해역은 Fig.1에서 보듯이 울산신항 북방파제 공사에 설치될 오탉방지막을 대상으로 하였다.

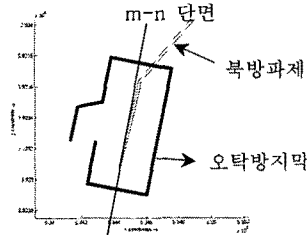
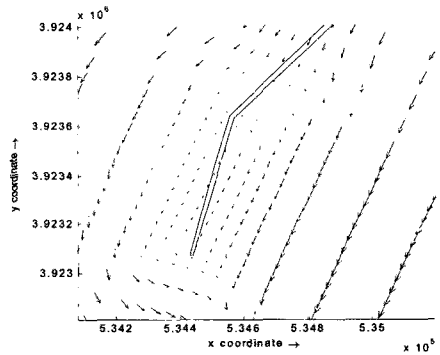


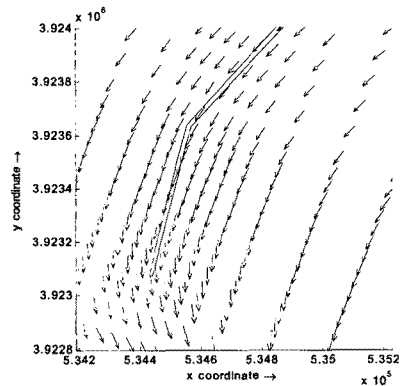
Fig. 1. 오탉방지막 설치 개요

#### 4.2 적용결과 및 분석

Fig.1과 같이 설치한 오탉방지막에 대하여 막체 깊이/수심 비 30%, 50%, 80% 세가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 오탉방지막 미설치시와 80% 오탉방지막을 설치하였을 경우의 수표면 유속장을 비교한 것으로 막체로 인한 유속 차단효과가 나타남을 알 수 있다. Fig. 3은 Fig.1의 m-n단면에서의 유속장을 막체 미설치시, 30%, 50% 및 80% 막체 설치시를 비교한 것으로 홍남식등(2008)의 단면수조 경우처럼 유사한 유속 차단효과를 나타내나, 80% 에서도 막체 후면에 발생할 역류와동현상이 최소격자간격의 한계(홍남식등의 논문에서는 최소격자간격 1m)로 재현되지 않음을 확인하였다. 이외에도, 막체의 수평방향 양끝단에서 압력수두차가 실제로 존재하지 않음에도 수평방향으로 막체의 전 구간에 동일한 압력수두차를 적용함으로써 오류가 발생할 수 있음을 인지하였다. 그러므로, 향후 상기의 문제를 반영하여 모델을 개선할 필요가 있음을 알았다.



(a) 막체설치



(a) 막체미설치

Fig. 2. 막체설치로 인한 유속장 변화

## 5. 결 론

본 논문은 홍남식등(2008)에 의해서 개발된 모델을 실패역인 울산항 북방파제공사에 설치될 오탉방지막에 적용함으로써 실패역에서의 막체 유속 제어효과를 검토하고, 모델의 실패역 적용시 개선해야할 점을 조사한것으로, 오탉방지막으로 인한 유속제어효과가 잘 표현되는 것을 확인하였다. 그러나, 실패역에서의 최소격자간격(20m)에서는 막체깊이/수심 비가 80% 에서도 막체 후면에 발생할 역류와동현상이 재현되지 않음을 확인하였으며, 막체의 수평방향 양끝단에서 압력수두차가 실제로 존재하지 않음에도 수평방향으로 막체의 전구간에 동일한 압력수두차를 적용함으로써 오류가 발생할 수 있음을 인지하였다. 그러므로, 향후 상기의 문제를 반영하여 모델을 개선할 필요가 있음을 알았다.

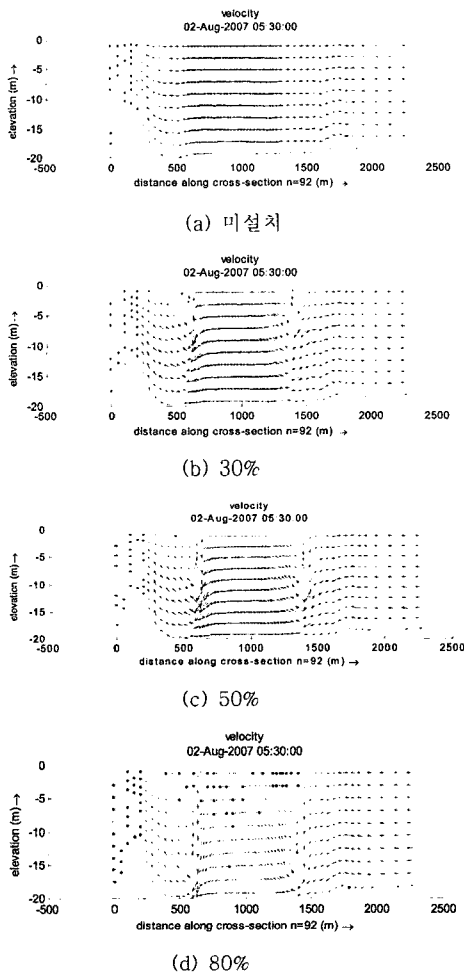


Fig. 3. 막체깊이/수심 비에 따른 유속장 변화

## 참고문헌

- 기성태 (2002). "수중 유연막 방파제 I: 수평-수직 유연막으로 구성된 라멘형 시스템", 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 7-14.
- 조일형 (1994). "파랑중 막구조 방파제의 거동 특성", 한국항만학회지, 제8권, 제1호, pp 15-22.
- 조일형, 홍석원 (1995). "유연막 방파제에 의한 경사파의 산란", 한국해양·해양공학회지, 제7권, 제3호, pp 219-226.
- 홍남식, 김가야, 강윤구 (2008). "오탉방지막을 포함하는 3차원 흐름 수치모델", 한국해양공학회지, 제22권, 제3호, pp 1-7.
- Cho, I.H. and Kim, M.H. (2000). "Interactions of horizontal porous flexible membrane with waves", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ASCE), Vol 126, No 5, pp 245-253.
- Cho, I.H., Kee, S.T. and Kim, M.H. (1997). "The Performance of Flexible Membrane Wave Barrier in Oblique Wave", Journal of Applied Ocean Research, Vol 19, No 3-4, pp 171-182.
- Cho, I.H., Kee, S.T. and Kim, M.H. (1998). "Performance of Dual Flexible Membrane Wave Barrier in Oblique Wave", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ASCE), Vol 124, No 1, pp 21-30.
- Jager, B. and Schijndel, S.V. (2000). 3D Computations around Structures, Report Q2487, WL | Delft Hydraulics, Delft, Netherlands.
- Leendertse, J.J. and Gritton, E.C. (1971). A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: Vol II, Computation Procedures, Report R-708-NYC, The Rand Corporation, Santa Monica.
- Leendertse, J.J., Alexander, R.C. and Liu, S.K. (1973). A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: Vol I-IV, Report R-1417, 1764, 1884, 2187-OWRT, The Rand Corporation, Santa Monica.
- Stelling, G.S. and Leendertse, J.J. (1991). "Approximation of Convective Processes by Cyclic ACI Methods", Proceedings of 2nd ASCE Conference on Estuarine and Coastal Modelling, Tampa.
- Wang, K.H. and Ren, X. (1993). "Wave Motion Through Porous Structures", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol 120, No 5, pp 989-1008.
- Yu, X. and Chawang A.T. (1994). "Water Wave Above a Submerged Porous Plate", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol 121, No 5, pp 1270-1278.