

## 교각의 저항의 받는 하구역에서 부유사 확산 Suspended sediment transport in the estuary under the resistance of pier

조영준<sup>1</sup>, 박일흠<sup>2</sup>, 최요한<sup>3</sup>, 황성수<sup>4</sup>  
 Young Jun Cho<sup>1</sup>, Il Heum Park<sup>2</sup>, Yo Han Choi<sup>3</sup> and Sung su Hwang<sup>4</sup>

### 1. 서 론

하구역이나 연안해역에서 부유사 현상은 다양한 원인에 의하여 발생하나 본 연구에서는 하천에서 하구역로 이송되는 부유사 현상에 한정하여 그 특성을 기술하였다. 하천에서 이송된 부유사는 대부분 일단 해저에 침전하게 되며 해저에 침전된 표사는 조류와 파랑작용에 의하여 재 부상되어 조류에 의해 운반되고 다시 침전되는 과정이 반복되어 일어난다. 부유사에 의한 문제는 하구역에 두드러지게 나타나고 있는데, 하구역에서 부유사의 퇴적은 생태계의 파손과 관련해서 해양공학, 해양환경 및 해양생물학 분야에서 대단히 중요한 문제로 대두되고 있다. 그러나, 이러한 복잡한 인자들의 관계에 대한 수식화가 아직 정립되어 있지 않기 때문에, 해석적 연구에 앞서 이에 대한 기초연구로서 수치모형실험 또는 현장관측 자료를 기초로 하여 부유사 확산을 재현할 수 있는 연구가 우선 수행되어야 할 것이다 (van Rijn, 1993).

본 연구에서는 교각의 유수 저항과 부유사 확산을 적용할 수 있는 DIVAST 모형을 구성하였다. 해수유통의 검증은 전남대학교 수산과학연구소 (2009)의 조석·조류 자료와 비교·검증하여 수치모의하였다. 부유사 확산은 기존 연구자들 (Winterwerp et al., 1991)의 실험결과를 활용하여 침식률 산정식의 계수를 결정하여 수치모의하였으며, 계산된 부유사 농도의 시간변화를 관측치

와 비교하였다.

### 2. 수치모형

#### 2.1 해수유통모형

본 연구에서 조석·조류의 재현에 사용된 수치모형은 DIVAST(Falconer, 1976; Falconer and Owens, 1987; Falconer, 1991)의 Code를 기본적으로 이용하여 물체에 의한 유수저항을 적용할 수 있도록 수정한 모형(박일흠, 2004; 박일흠 등, 1998; 이종섭과 박일흠, 1995)을 사용하였다. 본 모형에서 사용된 기본 방정식 및 구성은 다음과 같다. 3차원 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 수심적분된 형태로 나타내면 식(1)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \beta \left( \frac{\partial U q_x}{\partial x} + \frac{\partial V q_x}{\partial y} \right) = f q_y - g H \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \epsilon H \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \beta \left( \frac{\partial U q_y}{\partial x} + \frac{\partial V q_y}{\partial y} \right) = -f q_x - g H \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} dz + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon H \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \epsilon H \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $q_x$ ,  $q_y$ 는  $x$ ,  $y$ 방향의 수심적분된 속도성분,  $\beta$ 는 운동량보정계수,  $U$ ,  $V$ 는

1 발표자: 전남대학교 해양공학과 대학원  
 2 전남대학교 해양기술학부 교수  
 3 전남대학교 해양공학과 대학원  
 4 (주)새한지오택 해양사업부 부장

x, y방향의 수심평균된 속도성분,  $f$ 는 Coriolis 계수,  $g$ 는 중력가속도,  $H$ 는 전수심,  $\zeta$ 는 수면변위,  $h$ 는 수심,  $t_x, t_y$ 는 x, y방향의 전단응력성분,  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $\varepsilon$ 은 수심평균된 와동점성계수이다. 유속의 연직방향에 대한 현장조사가 결여된 경우, 운동량 보정계수  $\beta$ 는 1.0 값을 사용하거나 연직방향으로 logarithmic 속도분포를 사용한다.

식(1)~(2)의 전단응력항에 바람 및 저면에 의한 마찰을 고려하고, 저항물체가 있는 경우 단위면적당 항력을 도입하면, x방향의 전단응력항은 식(4)와 같이 표현된다. 이 식에서 우변 첫 번째의 바람응력항은 정상등류에 관한 수평분력, 두 번째의 저면전단 응력항은 개수로에서 정상등류로부터 유도된 2차의 마찰법칙, 그리고 세 번째의 저항물체에 의한 전단응력항은 항력계수를 도입한 항력을 각각 사용하여 나타내었다.

$$\frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz = -\frac{c_f \rho_a W_x W_s}{\rho} + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} + \frac{n C_{Dx} A_{Dx} U_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2}}{2} \quad (4)$$

여기서,  $c_f$ 는 수면에서 계면저항계수,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도,  $W_x$ 는 바람의 x방향 속도성분,  $W_s$ 는 바람의 속력,  $n$ 은 단위면적당 저항물체의 개수,  $C_{Dx}$ 는 x방향의 항력계수,  $A_{Dx}$ 는 물체의 x방향 투영면적 그리고  $U_a, V_a$ 는 x, y방향의 접근유속이다.

한편,  $C'$ 는 Reynolds 수의 효과가 중요한 간석지에서 흐름을 모형화하는 데 유용한 Colebrook-White 공식을 사용하였다(Falconer and Owens, 1987).

본 모형의 기본방정식은 ADI 법으로 풀어지며, 공간적으로 엇갈린 격자체계를 사용하였다. 계산영역의 경계는 육상부의 폐경계와 하천이나 외해와 접한 개경계로 나뉘며, 육상부의 경계는 간석지가 발달되어 있는 경우, 수위의 변화에 따라 폐경계의 위치가 변하는 이동경계를 취하고 있으며, 개경계에서 경계조건은 수위나 유속에 의한 제어가 가능하도록 구성되어 있다.

## 2.2 부유사 이동모형

부유사 이동에 관한 수치모형은 Falconer (1986), 조현영(1999) 및 김길권(2006)의 결과를 바탕으로 구성하였으며, 수치모형에서 부유사 플럭스

예측에 대한 대부분의 표사이동은 수심적분된 이류확산방정식인 식(5)의 수치해에 기초를 두고 있고, 다음의 형태로 쓰여진다.

$$\frac{\partial SH}{\partial t} + \left[ \frac{\partial SUH}{\partial x} + \frac{\partial SVH}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ HD_{xx} \frac{\partial S}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial S}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ HD_{yx} \frac{\partial S}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial S}{\partial y} \right] = E \quad (5)$$

여기서  $S$ = 수심평균된 부유사농도,  $E$ = 저면의 단위면적당 순침식 혹은 순퇴적량이다. 수심평균된 순침식 또는 퇴적률은 다음의 형태로 표현될 수 있다(Owens, 1987).

$$E = \gamma W_f (S_e - S) \quad (6)$$

여기서  $S_e$ = 수심평균된 평형농도로서 적절한 표사이동공식으로부터 결정된다.  $W_f$  = 입자침강속도 그리고  $\gamma$ = 어떤 농도분포인자로서, 수심평균된 농도  $S$ 에서 저면기준점 농도  $S_a$ 에 대한 비로 주어진다(van Rijn, 1984).

그리고, 수치모형에서 부유사의 이동 모델링에서는 지배방정식인 식(5)가 이용되었고, 우측의 순침식항  $E$ 는 다음 식(7)과 같은 형태로 새롭게 정의된다.

$$E = \frac{dm}{dt} \quad (7)$$

여기서,  $m$ = 단위면적당 표사의 질량으로 다음 식(8)의 조건에 따라 침식 혹은 퇴적의 형태로 나타낼 수 있다.

$$Deposition: \frac{dm}{dt} = W_f S \left[ \frac{\tau_b}{\tau_d} - 1 \right] \quad \text{when } \tau_b \leq \tau_d \quad (8a)$$

$$Erosion: \frac{dm}{dt} = M \left[ \frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right] \quad \text{when } \tau_b \geq \tau_e \quad (8b)$$

$$Neither: \frac{dm}{dt} = 0 \quad \text{when } \tau_d < \tau_b < \tau_e \quad (8c)$$

여기서  $\tau_b$ = 저면전단응력(N/m<sup>2</sup>),  $\tau_d$ = 퇴적한계전단응력(N/m<sup>2</sup>),  $\tau_e$ = 침식한계전단응력(N/m<sup>2</sup>), 그리고  $M$ = 실험적인 침식계수(0.00001~0.0005)이다.

침강속도는 Stokes 법칙을 이용해서 계산될 수 있고, 점착성 토사가 floc을 이룰 경우 floc의 평균 크기는 개개의 입자크기 보다 더 크며, 밀도는 또한 응집효과를 반영한다. 그러므로, 점성토의 침강속도는 부유사 농도에 따라 두 개의 범위에서 다음 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_f = kS_v^m; S = 10 \sim 10000 \quad (9a)$$

$$W_{f,m} = W_f(1 - \gamma S_v)^\beta; S \geq 10000 \text{mg}/\ell \quad (9b)$$

여기서,  $W_f$  = 침강속도,  $W_{f,m}$  = 간접침강속도,  $\gamma$  = 경험계수,  $m$  = 경험계수(1~2)  $k$  = 경험계수,  $\beta$  = 경험계수(3~5) 그리고  $S_v$  = 체적농도이다.

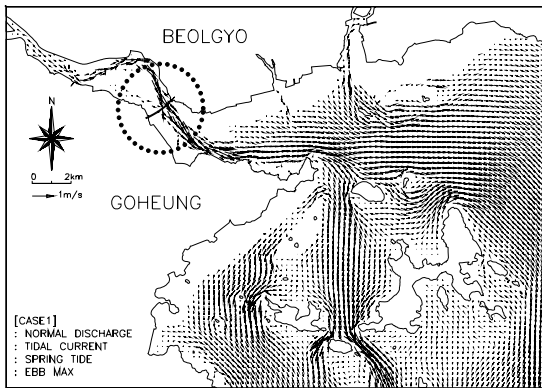
이상과 같은 방정식으로부터 부유사 이동에 관한 수치모형을 구성하였으며, 정의되지 않는 매개변수는 시행착오적인 방법에 의하여 최적화된 값으로 결정하여 사용되었다.

### 3. 수치모형의 적용

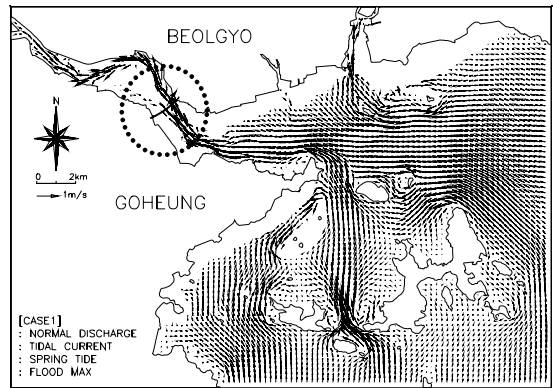
수치실험을 수행하기 위하여 본 연구에서는 교각을 중심으로 주변해역을 격자간격 30m의 417×298(12.51km×8.94km) 격자망으로 구성하였으

며, 수심자료는 국립해양조사원에서 발행한 수치해도 No.256과 2008년 수심측량자료(전남대학교 수산과학연구소, 2009)를 참고하였다. 모형의 검증을 위해 조위와 조류자료는 2008년의 현장관측 결과(전남대학교 수산과학연구소, 2009)를 참고하였다. 계산은 평균대조기와 평균소조기를 포함하는 7.5일간에 대해 연속모의하였으며, 정상상태의 해를 얻기 위하여 약 1일간 예비 계산하였다.

한편, 하구역에는 총교량길이 940m 대형 교량이 건설되고, 6개의 교각, 2개의 교대로 구성되어 있다. 실제 6개의 교각 중 1개를 제외한 5개가 해역에 존재하여 이에 대한 유수저항을 고려하여 계산을 수행하였다. 상기의 계산결과를 토대로 유속의 크기가 가장 크게 나타나는 대조기 최강창·낙조류의 흐름양상을 나타낸 것은 Fig.1(a)과 (b)

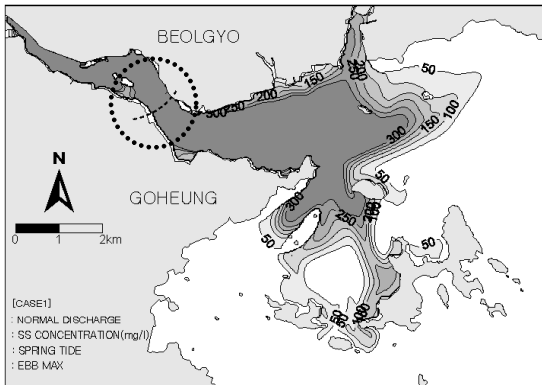


(a) Maximum flood currents

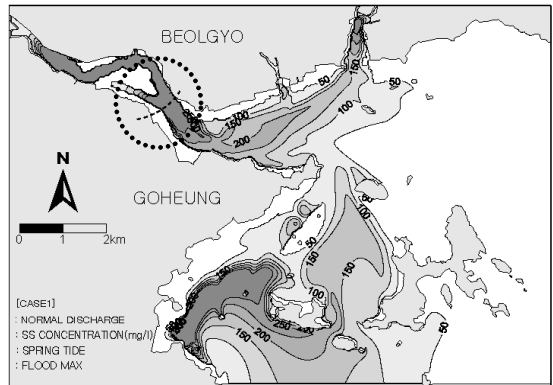


(b) Maximum ebb currents

Fig. 1. Distribution of maximum Flood(a) and ebb(b) currents in spring tide.



(a) Maximum flood currents



(b) Maximum ebb currents

Fig. 2. Distribution of SS concentration at maximum flood(a) and ebb(b) currents.

에 나타내었다. 이들 그림에서와 같이 교각 주변 해역에서 수치실험으로 재현된 해황 중 대조기의 순간 유속은 최강낙조시에 비해 최강창조시가 약간 크게 나타나지만, 전반적으로는 낙조류가 창조류보다 약간 우세하게 나타났으며, 지형적인 특성상 창조류는 북서류, 낙조류는 남동류가 주류를 이루고 있다.

Fig.2(a)는 대조기 창조시 부유사 농도분포도, Fig. 2(b)는 대조기 낙조시 부유사 농도분포도이다. 창조시에 따른 농도의 공간분포 형태는 전반적으로 유속이 강한 수로 중앙부를 따라 300mg/l 이상의 고농도 부분이 나타나고 있으며, 해안선 부근에서 느린 유속으로 인하여 농도가 낮게 나타났다. 낙조시에는 창조시와 유사하지만 300mg/l 이상의 고농도 부분이 수로를 따라 고힘반도 하단부까지 나타났다. 이는 하천에서 유입되는 부유사가 낙조시의 강한 흐름과 동반하여 범위가 확장되어 진 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 교각의 유수 저항과 부유사 확산을 적용할 수 있는 2차원 DIVAST 모형을 구성하였으며, 하구역에 적용하여 모형의 현장 적용성을 검토하였다.

해수유동을 모의한 결과는 조위변화와 낙조류 우세현상을 보이는 조류에 대해 구성된 모형이 잘 재현되었다. 계산된 부유사 확산은 시간에 따른 현장 관측치와 비교하여 농도변화가 전반적으로 잘 일치하였다. 따라서 하구역에서 교각이나 인공 구조물 등에 의한 유수 저항을 고려한 부유사 확산을 모의하는데 널리 활용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

김길균 (2006). 제방식 구조물의 철거에 따른 흐름장 및 점착성토사의 이동에 관한 수치실험, 여수대학교 대학원 해양공학과 공학석사 학위논문, 1-70pp.  
박일흠 (2004). 잔교식 항만구조물 주변에서 해수유동의 평가, 한국해양환경공학회지, 7(2).

박일흠, 이종섭, 이문옥 (1998). 저항물체 배후의 이차원 후류에 관한 대격자 수치모형, 한국해양-해양공학회지, 10(2).

이종섭, 박일흠, (1995). 수하식 양식시설에 의한 유수 저항의 평가와 수치모형, 한국수산학회지, 28(5).

전남대학교 수산과학연구소 (2009). 목포-광양간 고속도로 벌교대교 건설에 따른 어업권 피해조사

조현영 (1999). 점성토 수송모델에 의한 부유사농도 및 수심변화 예측에 관한 연구, 부경대학교 대학원 해양산업공학과 석사학위논문, 1-98p.

Falconer, R.A. 1976. Mathematical modelling of jet-forced circulation in reservoirs and harbours. Thesis submitted to Univ. of London in partial fulfillment of degree of Ph.D., Nov..

Falconer, R.A. 1991. Review of modelling flow and pollutant transport processes in hydraulic basins. Proc. 1st Int. Conf. on Water Pollution : Modelling, Measuring and Prediction, Southampton, Computational Mechanics Publications, Sep., 3~23.

Falconer, R.A. and Owens P.H. (1987). Numerical simulation of flooding and drying and wind stress effects in a two-dimensional tidal numerical model. Proc. Inst. of Civil Eng., 83, Part 2, Mar., 161~180.

Owens, P.H. (1987). mathematical modelling of sediment transport in estuaries, Ph.D. thesis, University of Birmingham, Birmingham, 220p.

van Rijn, L.C. (1984). Sediment transport part 1: Suspended load transport, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol.10, 1613~1641.

van Rijn, L.C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, The Netherland, 673p.

Winterwerp, J.C., Cornelisse J.M. and Kuijper C. (1991). Erosion of natural sediments from the Netherlands, Report Z161-35/37, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.