

모래결 위의 부유사 농도 변화 Variation of Suspended Sediment Concentration Over Ripple

김효섭¹ · 정병순¹ · 윤석준¹ · 정영복¹
Hyoseob Kim¹, Byungsoon Jung¹, Sukjun Yun¹ and Youngbok Jung¹

1. 서 론

사질 퇴적물로 구성된 해저면은 모래결(ripple)을 이루고 있는 경우가 많으며 이는 흐름 또는 파랑상태가 변화하는데 따라 쉽게 변화한다. 모래결은 해수의 움직임에 영향을 받아 자연적으로 형성되는 저면의 굴곡이지만, 모래결의 크기가 역으로 해수의 거동에 상당한 영향을 미치므로 모래결과 해수흐름의 상호간섭 현상은 많은 관심을 끌어왔다.

최근에는 모래결 또는 평탄한 저면 위의 부유사 농도를 측정하는 기술이 정밀하게 발달하여 이를 이용한 실험이 수행되고 있다. 모래결 위의 흐름과 퇴적물 이동을 고려한 실험실 측정으로 Bosman (1982)을 들 수 있다. 이러한 흐름이나 퇴적물 변화에 대한 관측 결과에 의하면 파랑주기에 대하여 부유사 농도가 몇 개의 첨두 값(peak of value)을 갖는 것으로 나타났다.

Nakato *et al.* (1977)와 Bosman (1982)의 실험에 의하면 모래결 위의 골(trough)과 봉(crest)에서 측정된 결과 부유사 농도 변화시 네 개의 첨두 값이 있다고 하였다. 첫번째 2회의 주 첨두 값은 수입자 이동방향이 바뀌는 순간에 최대 전단응력이 일어나는 때와 모래결의 하강사면(lee-side)에서 발생한 와류에 의해서 발생한다고 하였다. 2회의 부 첨두(secondary peak)는 사흔의 상승사면(stoss-side)에서 왕복 최대유속의 발생 때문이라 하였다. 규칙파에 의한 부유사 농도의 부 첨두 값은 여러가지 조건에 의해 일어난다고 볼 수 있다. 예를 들어, 흐름, 모래결 길이 방향의 측정기 위치, 측정 높이, 저면의 재료 등을 들 수 있다. Nakato *et al.* (1977)와

Bosman (1982)은 궤도운동의 진폭과 모래결 길이의 비율을 각각 0.81~0.90, 0.87 이라 하였다.

수리실험에 의하면 부유사는 모래결 위의 전 구간에서 부상(entrainment)하는 것으로 밝혀졌다 (Boss-man, 1992; van Rijn, 1987). Nielsen (1992)은 평탄한 지역 위의 등류 흐름에 대한 van Rijn (1993)의 경험식을 수정한 순간 부상률에 대한 경험식을 제안하였다. Nielsen (1992)의 식은 다음과 같다.

$$E \cong 0.017\beta w_f (\theta - \theta_{crit})^{1.5}, \quad \theta > \theta_{crit} \quad (1) \\ = 0, \quad \theta > \theta_{crit}$$

여기서, E 의 단위는 단위면적당 단위시간당의 부상률 (입자부피; m^3/m^2s)이며, β 는 퇴적물 부상률의 조정계수, w_f 는 입자의 침강속도, θ 는 순간 Shield 계수, θ_{crit} 는 한계 Shields 계수(완전 난류인 경우 0.05)이며, F 는 저면 전단응력과 저면 속도와의 위상 차이에 의한 함수이다. 식(1)의 조정계수를 실험치와 비교하여 조정하면 모래결의 저면에서도 사용할 수 있다. 여기서는 Nielsen (1992)의 부상률 식을 흐름과 부유사의 변화를 파악하기 위하여 사용한다.

본 연구에서는 모래결 위의 흐름 및 부유사 농도 변화에 대하여 수리실험과 비교하기 위한 수치모형을 수립·적용하려 한다. 수치모형은 규칙파에 대한 모래결 길이와 궤도운동 길이의 진폭 비율을 변수로 모래결 위의 부유사 농도 변화를 실험한 Bosman (1982)에 적용한다.

¹ 국민대학교 건설시스템공학부 (School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea)

2. 본 론

2.1 수치모형 체계(KU-2DVF-94)

본 연구에 적용한 수치모형 체계는 왕복하는 흐름에 대한 흐름과 부유사 농도분포에 적용할 수 있는 수치모형 시스템이다.

2.1.1 흐름 모형

본 흐름 모형은 파랑에 대하여 모래결 위에서의 흐름장을 해석할 수 있다(Kim *et al.* (1994)). Kim *et al.* (1994)의 모형(KU-2DVF-94)은 Welch *et al.* (1966)의 Marker-and-Cell(MAC) 방법과 Amsden and Harlow (1970)와 Hirt *et al.* (1975)의 수정된 Marker-and-Cell (SM AC)을 기초로 하였다. Hirt *et al.* (1975) 모형(SOLA)의 x , z 방향에 대한 유속성분과 압력분포를 이용한 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad (4)$$

여기서, x 와 z 는 Cartesian 좌표계의 수평과 수직좌표, u 와 w 는 난류평균 유체입자 속도, t 는 시간, ρ 는 유체밀도, p 는 압력, τ 는 $x-z$ 평면의 전단응력이다. 본 KU-2DVF-94 모형은 식 (3)과 (4)의 난류 영향에 대한 항을 평균속도 경사에 의한 전단응력을 포함한 와동점성 개념을 적용하였다.

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (5)$$

여기서, ν_t 는 와동점성을 나타낸다. 또한, 와동점성은 혼합거리를 이용하여 구할 수 있다.

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right| \quad (6)$$

여기서, l_m 은 혼합거리이다.

2.1.2 퇴적물 이동 모형

퇴적물 이동 모형(Kim *et al.*, 2000)은 모래결

위에서의 부유사 이동에 적용할 수 있다. 부유사 이동 수치모형의 지배방정식은 부유사의 질량보존 법칙에 기초한 이류·확산 방정식이다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_r) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + S \quad (7)$$

여기서, c 는 순간 부유사 농도, D_x 와 D_z 는 x 와 z 방향의 확산계수, S 는 부유사 이동의 Source/Sink항이며, 유속 u 와 w 는 앞의 흐름 모형의 결과치를 적용한다. 부유사 확산계수는 흐름의 와동점성과 일치한다고 가정하고 와동점성은 흐름 모형에서 구한다.

저면의 표면(유체-고체 경계면)에서의 퇴적물 부유는 수치모형에서 전체 모래결 표면에서 일어나며, 식(8)은 모래결 표면으로부터의 부상률에 대한 식이다.

$$E = 0.017\beta w_f (\theta - \theta_{crit})^{1.5}, \quad \theta > \theta_{crit} \quad (8)$$

$$= 0, \quad \theta > \theta_{crit}$$

식 (8)은 앞의 Nielsen (1992)의 식중 함수 F 에 대하여 흐름과 부유사 사이의 위상차를 무시하여 1로 가정한 것이다.

모래결 표면에서의 전단응력은 유체속도에 의해서 계산된다.

$$u_* = \kappa u / \ln(z/z_0) \quad (9)$$

여기서, u_* 는 표면 마찰속도, z_0 는 $u=0$ 일 때의 z 값으로서 $z_0 = 0.033k_s$ 이며, k_s 저면의 유효조도계수, u 는 z 에 대한 유체의 수평 유속, κ 는 von-Karman 상수이다.

퇴적물 이동 모형의 격자망은 흐름 모형과 동일한 직교 격자망을 사용하며, 수치기법은 흐름 모형과 동일하게 사용한다 (Kim, 1993).

2.2 모형의 적용

본 수치모형을 DHL Wavetunnel을 이용한 실험(Bosman, 1982) 에 적용하였다. 실험 조건은 Table 1과 같다. 아래의 Table 1 에서 H 는 파고, L 은 파장, T 는 파의 주기, d 는 수심, a 는 입자궤적의진폭, $U_{s,max}$ 는 파랑 경계층에서의 최대 입자속도, d_{50} 은 퇴적물의 중앙입경, L_c 은 모래결의 길이, H_c 은 모래결의 높이이다.

2.3 적용 결과

2.3.1 흐름 모형 결과

Bosman (1982)의 실험 조건을 적용하여 첫번째 파랑 반주기까지의 파랑 위상에 대한 흐름 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

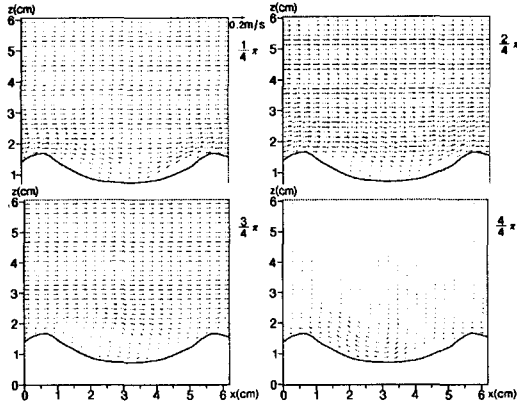


Fig. 1. Bosman (1982)의 경우에 대한 흐름도.

Sato (1987)는 모래결의 길이와 같은 강한 와류가 흐름이 역전하면서 발생한다고 하였다. Fig. 1에서 보듯이 흐름이 반전되는 순간에 저면 부근에서 모래결의 봉쪽으로 와류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 2번째 파랑 반주기 동안의 흐름은 첫번째 반주기와 비교했을 때 x 축 방향으로 대칭이다.

Table 1. 적용 조건

Case\ Variable (unit)	H (m)	L (m)	T (s)	d (m)	a (m)
Bosman (1982)	-	-	1.0	-	0.04 g
Case\ Variable (unit)	$U_{\delta_{max}}$ (m/s)	d_{50} (μm)	L_r (m)	H_r (m)	a/L_r
Bosman (1982)	0.30	221	0.05 5	0.010	0.87

2.3.1 퇴적물 모형 결과

앞에서 계산된 유속을 이용하여 적용한 결과중 파의 위상에 따른 부유사 농도 분포도를 Fig. 2에 제시하였다. 부상물 식인 (8)의 조정계수 β 는 Bosman (1982)의 경우에는 1.2를 적용하였다. Fig. 2를 보면 부유 입자가 와류쪽으로 유입되면서 와류의 움직임에 따라 퇴적물이 모래결의 양

꼭대기에 쌓이는 것을 보여주고 있다.

모형 결과 값과 관측 값과의 시간 변화에 따른 부유사 변화량을 비교하기 위하여 Bosman (1982)의 경우에는 모래결의 봉 위 1cm와 골 위 2cm에서의 자료를 이용하여 비교하여 Fig. 3에 나타내었다

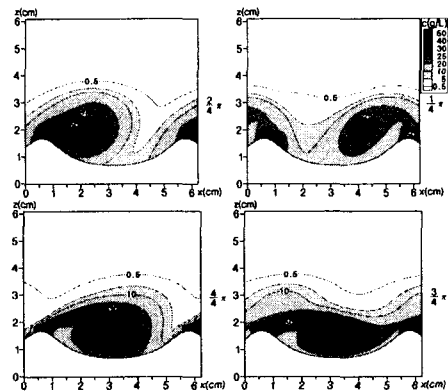


Fig. 2. Bosman (1982)에 대한 부유사 농도 분포도.

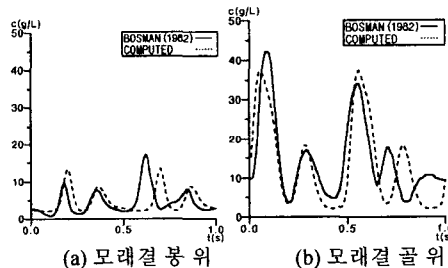


Fig. 3. 시간변화에 따른 부유사 농도 (Bosman (1982)).

계산치와 측정치와의 최고 값의 차이는 저면부근에서 부유사 농도의 측정에 고려하는 수준인 30%보다 작게 나타났다. 전반적으로 퇴적물 모형이 모래결 위의 부유사 이동을 제대로 재현했다.

3. 결 론

본 연구에서는 수치모형을 이용하여 모래결 길이와 궤도운동 길이의 진폭비(a/L_r)가 0.87인 경우에 대하여 수리실험과 동일한 조건을 적용하였다. 실험에 대한 수치모형 결과 흐름 모형의 경우 와류는 흐름이 변하는 지역에서 발달하며, 수심에 대한 연직속도의 계산 결과와 측정 자료가 일치하는 것으로 나

타났다. Bosman (1982)의 실험의 경우에 모래결의 골과 붓에서의 시간에 대한 부유사 농도 변화의 모형 결과 값과 실험 자료가 일치하는 것을 보여줬다.

Bosman (1982)의 저면 위에서 관측한 측정치와 모형 실험에 의한 파랑주기 평균의 부유사 농도 형태도 잘 맞는 것으로 나타났다. 저면에서 멀리 떨어진 곳에서의 부유사 농도는 전반적으로 부유사 농도 형태가 계산 결과와 측정 값이 일치하는 것으로 나타났다.

본 모형은 모래결 위의 파랑/연안류 흐름과 퇴적물이동에 대하여 사용할 수 있다. 앞으로 입경 분포를 고려하여 정밀도를 높이는 과정을 수행해야 한다. 모래결 형태에 따른 실험을 수리실험과 병행해서 수행해야 한다.

참고문헌

- Amsden, A.A. and Harlow, F.H. 1970. The SMAC method, *Los Alamos Scientific Laboratory, Report LA-4370*.
- Bosman, J.J. 1982. Concentration measurements under oscillatory motion. *DH Report M 1695, Part II*.
- Engelund, B. and J. Fredsøe., 1982. Hydraulic theory of alluvial rivers. *Advances in Hydrodynamics*.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D. and Romero, N.C. 1975. SOLA: A numerical solution algorithm for transient fluid flows. *Los Alamos Scientific Laboratory, Report LA-5852*
- Kim, H. 1993. Three-dimensional sediment transport model. *Ph.D. Thesis, The University of Liverpool, Liverpool, UK*.
- Kim, H., O'Connor, B.A., Shim, Y. 1994. Numerical modelling of flow over ripples using SOLA method. *Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE*, pp. 2140-2154.
- Kim, H., O'Connor, B.A., Kim, T.H., and Williams, J.J. 2000. Suspended sediment concentration over ripples. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Sydney, Australia*, pp. 2873-2885.
- Nakato, T., Locher, F.A., Glover, J.R., and Kennedy, J.F. 1977. Wave entrainment of sediment from rippled beds. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Vol. 103 (WW1)*, pp. 83-99.
- Nielsen, P. 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *World Scientific*.
- Sato, S. 1987. Oscillatory boundary layer flow and sand movement over ripples. *Ph.D. Thesis, The University of Tokyo, Japan*
- van Rijn, L.C., 1987. Data base sand concentration profiles for currents and/or waves. *Delft Hydraulics Report M1695-04-1*
- van Rijn, L.C. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas. *Aqua Publications, Amsterdam, Netherlands*
- Welch, J.E., Harlow, F.H., Shannon, J.P. and Daly, B.J. 1966. The MAC method. *Los Alamos Scientific Laboratory, Report LA-3425*.
- Yalin, M.S., 1977. Mechanics of sediment transport. *Pergamon Press*.