

## 범용 파랑 · 흐름 공존시의 비점착성 퇴적물이동 예측식 A General Formula of Total Sediment Transport Rate for Waves and Currents

김효섭\* · 장창환\*\*  
Hyoseob Kim\* and Changhwan Jang\*\*

**요 지 :** 파랑과 흐름이 공존하는 해안에서의 비점착성 퇴적물이동에 대하여 육지-외해방향 총 퇴적물 이동률을 산정할 수 있는 경험식을 제안한다. 본 경험식은 파랑만 존재하는 경우와 흐름만 존재하는 경우에도 범용적으로 사용할 수 있다. 해수면 기준 비대칭인 파랑을 이용하여 퇴적물의 부상률과 이동거리의 곱으로 단위면적당 총 퇴적물 이동률을 계산할 수 있다. 대체로 파고가 큰 파랑이 입사하는 경우 퇴적물은 외해방향으로 이동하는 반면 파고가 작은 파랑의 경우 육지방향으로 퇴적물을 이동시키는 경향을 본 예측식이 잘 재현하고 있다. 또한 장주기 파랑의 경우 퇴적물을 육지방향으로 이동시키려는 경향을 본 예측식이 잘 보여준다.

**핵심용어 :** 비점착성 퇴적물이동, 위상차, 부상률, 이동거리

**Abstract :** This study suggests a general formula of non-cohesive sediment transport rates for waves and currents which is also valid for wave only or current only condition. On-offshore sediment transport rates with the second order Stokes wave in the shallow water are calculated as the pickup rate times the distance. The formula depicts reasonably that high waves move material offshore, and low waves move material onshore. Also the formula, as is the case the waves with long period tend to move material onshore, shows good results.

**Keywords :** non-cohesive sediment transport, phase lag, pickup rate, transport distance

### 1. 서 론

지금까지 비점착성 퇴적물 이동률을 표현하기 위하여 많은 경험식이 제안되어 왔다. 대상 퇴적물을 점착성 퇴적물이나 점착성 비점착성 혼합 퇴적물로 확대한다면 더욱 복잡하게 될 것이며 본 논문에서는 비점착성 퇴적물의 이동만 기술하기로 한다.

비점착성 퇴적물이동 경험식은 크게 파랑만에 대한 경험식, 흐름만에 대한 경험식, 그리고 파랑 흐름 공존시의 경험식으로 대별할 수 있다. 여기에서, 파랑 흐름 공존시의 경험식은 흐름만 존재할 때의 퇴적물이동 예측에 활용 가능한 형태이나, 파랑 단독시의 퇴적물이동 예측에 사용할 수 없는 형태로 제시되어 왔다는 문제점이 있다.

파랑 단독시의 경험식은 파랑주기 내에서 순간 퇴적물 이

동량과 이동방향을 구하여 파랑주기에 대하여 적분하면 파랑 한 주기 동안의 퇴적물 이동량과 방향을 구하는 형태로 되어있는 경우가 많다(Brown, 1950). 이러한 형태의 경험식은 선형 파랑(해수면 기준 대칭형)이나 순수 단주기 왕복성 흐름(예: water tunnel)에 대하여 영의 퇴적물 이동률을 보이며, 별 의미가 없다. Stokes의 해수면 기준 비대칭성을 갖는 파랑에 대하여서는 영이 아닌 순 퇴적물 이동률이 나타나게 되나, 항상 육지방향 이동률이 양이 되는 부정확해지는 문제점이 있다.

실제 해안에서의 관측 자료는 순수 파랑에 의한 퇴적물 이동 방향이 육지방향이 되기도 하고 외해방향이 되기도 하여, 이러한 방향이 나누어지는 조건을 구별하기가 간단하지 않은 것으로 알려져 있다. 이러한 순수 파랑에 의한 퇴적물이동 순방향은 퇴적물 입자크기, 난류강도, 파랑의 비

\*국민대학교 건설시스템공학부(Department of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea, hkim@kookmin.ac.kr)

\*\*국민대학교 건설시스템공학부(Corresponding author: Department of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea, cjang@kookmin.ac.kr)



Fig. 1. Classification of existing formulas.

대칭성, 파랑 진행 반대방향으로의 저층류(undertow), 저면 전단응력과 파랑경계층 인근에서의 입자속도 간의 위상차, 그리고 저면에 존재하는 저면 형상과 같은 많은 물리적 요소의 영향을 받으므로, 단순하면서도 범용으로 사용할 수 있는 예측기법이 아직 확립되어 있지 않은 편이다.

파랑만 존재시 해안에서의 육지-외해방향(on-offshore or cross-shore) 퇴적물이동 예측을 정확하게 하기 위하여 노력이 있어 왔다. 자연 상태에서 큰 파랑이 내습하면 해안선 전후나 해안 사구가 침식되어 침식 퇴적물 중 일부가 외해 방향으로 이동하며, 해수면 아래 수중둔덕(offshore bar)이 형성되는 경우가 많다. 반면 비교적 작은 파랑이 내습하는 시기에 해수면 아래의 지형이 변화하여 육지방향으로 퇴적물이 이동하는 경향이 있다고 알려져 있다. 이러한 양상은 계절마다 반복되어 지형변화가 크지 않은 해안의 경우 장기적으로는 적절한 평형을 유지하고 있는 것으로 보인다.

실험실 조파수조에서 육지-외해방향 퇴적물이동과 지형 변화에 관한 실험이 많이 수행되었다(Nielsen et al., 1978; Sunamura, 1984; Tsujimoto and Hayakawa, 1986; Rakha et al., 1997; Nicholson et al., 1997). 대부분의 육지-외해방향 퇴적물이동 실험은 일정 해저면경사를 초기조건으로 결정한 상태에서 강한 파랑내습으로 인한 종단면의 변화를 재현한 실험들로서, 보통 크기나 약한 파랑이 침입할 때 해저면 종단면의 경사가 해안으로의 퇴적 현상이 재현되는 실험은 재현한 실험은 보고된 바가 드물다.

파랑만 존재하는 경우의 육지-외해방향 퇴적물이동에서 방향은 여러 가지의 물리적 조건에 의하여 좌우된다. 파랑의 해수면 기준 비대칭성, 파랑의 역방향 흐름, 해저면 소규모 형상, 극소 해저면 경사, 쇄파에 의한 난류에너지의 주요 요소로 알려져 왔다. 파랑의 비대칭성으로 인하여 파봉에서 해저면 인근 물입자의 육지방향 속도가 짧은 시간동안 크며, 파곡에서 외해방향 속도가 상대적으로 긴 시간동안 속도는 상대적으로 작다. 퇴적물이동이 해저면 인근 순간 물입자 속도 또는 순간 해저면 전단응력에 의하여 결정된다고 가정할 경우 퇴적물이동은 언제나 육지방향으로 발생한다는 결과를 낳는 모순이 있다.

파랑만 존재하는 경우에도 단면기준 파랑주기 총 유량이 영이 된다는 점을 고려하면 해수면 근방에서 파랑진행방향

으로 질량이 이동되는 것과 반대로 해수면 근방을 제외한 중저수층에서는 파랑 진행방향의 미약한 순 질량이동이 발생한다는 점이 잘 알려져 있다. 이 흐름방향으로 퇴적물이 이동한다면 퇴적물이 언제나 외해방향으로 이동하는 모순이 발생한다.

해저면에 형성되는 소규모 형상으로 모래결(ripple)을 들 수 있다. 현재 모래결의 단면형상을 예측하기 위한 노력들이 있었다(Dalrymple and Rhodes, 1995; Faraci and Foti, 2002; Grasmeijer and Kleinans, 2004; Catano-Lopera and Garcia, 2006; Whitmeyer and FitzGerald, 2007). 모래결의 존재는 흐름장에 영향을 주어, 모래결 파봉사이의 공간에 형성되었다가 흐름 반전시에 수층으로 방출되는 회전류(vortex) 속에 해저면에서 부상한 퇴적물을 가두거나 회전성(vorticity)이 약해질 때 방출하기도 한다(Fig. 2). 이 때문에 퇴적물이동이 해저면 인근 물입자의 수평방향이동과 같은 속도와 위상을 갖지 않게 된다. 회전류의 특성, 퇴적물의 유입, 방출에 관한 세부적 정보가 중요한 정보이겠지만, 측정이 좁은 공간에서의 어려운 문제라고 할 수 있다. 해저면의 경사 또한 퇴적물이동을 외해방향으로 유도하는 역할을 할 것이다. 해저면 경사는 소류사 형태의 이동에 영향을 크겠지만, 부유사 형태의 이동이나 해저면 경사가 완만한 경우에는 영향이 미미할 것으로 예상할 수 있다. 해저면에 모래결과 같은 소규모 형상이 존재하는 경우 모래결 파봉에서 부상물이 파곡보다는 높을 것이며, 부상한 퇴적물은 모래결 파봉사이에 형성되는 회전류 속으로 포획되거나 회전류 상층으로 이동하기도 하며, 입자의 크기, 부상한 높이, 난류의 강도에 따라 부유하다가 침강하여 퇴적된다. 이러한 퇴적물의 움직임은 부유사이동이나 소류사이동이나를 구분하기가 적절하지 않다.

부유사로 인한 위상차를 고려하기 위하여 몇 연구가 수행된 바 있다. Dohmen-Janssen and Hanes(2002)는 파랑에

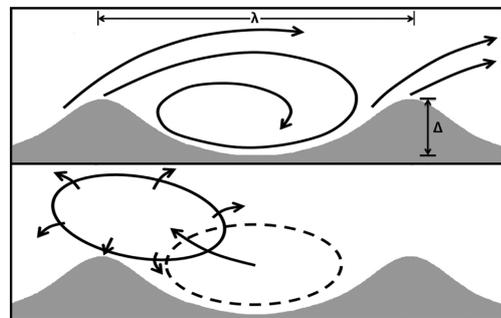


Fig. 2. Non-cohesive sediment transport pattern for rippled bed.

의한 순간 퇴적물 이동률을 파랑주기 내 임의의 시각에 적용하여 구하고, 파랑주기평균 퇴적물 이동률을 구한다음 저면전단응력과 파랑경계층내의 물입자의 속도와의 위상차, 부유사이동으로 인한 위상차를 반영한 감쇠계수를 구하여 곱함으로써 최종 파랑주기평균 퇴적물 이동률을 구하는 식을 제안한 바 있다. 그러나 제시된 식은 총 퇴적물 이동률에 감쇠계수를 곱하는 형태로서 총 퇴적물이동 방향이 평균흐름방향과 반대가 되기도 하는 현상을 표현할 수 없는 한계가 있다.

본 논문에서는 해수면기준 비대칭인 단주기 파랑인 경우를 대상으로 하여 파랑 단독, 흐름 단독, 그리고 파랑-흐름 공존시 모두 사용할 수 있는 퇴적물 이동률 예측식을 제시하고자 한다. 이 식을 사용하여 파랑 단독의 경우, 파랑과 약한 흐름이 같은 방향(inline)으로 공존하는 경우, 그리고 파랑과 파랑 진행방향에 반대로 약한 흐름이 공존하는 경우에 퇴적물이 이동하는 방향을 예측할 수 있음을 보이고자 한다. 순간 부상률(pickup rate)과 그 시점에 부상한 퇴적물이 이동하는 거리(distance)를 곱한 값을 파랑주기 내에서 평균한 값으로 나타내고, 이동거리에 위상차(phase lag)를 도입한 형태의 식을 제시한다. 또한 파고와 주기의 변화에 대하여 퇴적물 이동률이 어떻게 달라지는지 검토한다.

## 2. 제안 경험식

먼저 해안에서 파랑과 흐름이 같은 방향으로 진행되는 경우를 생각한다. 해저면에서 파랑의 경계층 두께 ( $\delta_w$ ) 만큼 올라간 높이에서의 물입자의 속도는 Fig. 5(a)와 같다.

$$u_{wc}(t) = u_w(t) + u_c \quad (1)$$

여기서  $u_{wc}$ 는 파랑과 흐름의 합성 유속,  $u_w$ 는 파랑에 의한 유속, 그리고  $u_c$ 는 평균 흐름의 경계층 상단에서의 유속이다.

파랑에 의하여 증가된 평균전단응력을 고려하지 않고 에너지경사가 주어진 경우로 취급하여 파랑에 의한 전단응력과 흐름에 의한 전단응력을 구하여 합하기로 한다. 파랑과 흐름의 주기가 다르므로 파랑과 흐름에 의한 저면에 작용하는 전단응력은 각각 다른 마찰계수를 이용하여 구한다. 파랑과 흐름에 의한 전단응력은 Fig. 5(b)와 같이 변화한다. 저면전단응력이 물입자의 속도보다 위상이 약간 빠르나, 뒤에 부상 퇴적물이 침강시까지의 움직임을 계산할 때 이 영향을 포함하기로 하고, 파랑 수입자의 위상과 같다고 가정하면,

$$\tau_{wc} = \tau_w(t) + \tau_c \quad (2)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w u_w^2 \quad (3)$$

$$\tau_c = \frac{1}{8} \rho f_c u_c^2 \quad (4)$$

여기서  $\tau_{wc}$ 는 파랑과 흐름의 합성 전단응력,  $\tau_w$ 는 파랑에 의한 전단응력, 그리고  $\tau_c$ 는 흐름에 의한 전단응력,  $\rho$ 는 물의 밀도( $1025 \text{ kg/m}^3$ )이다.  $f_w$ 와  $f_c$ 는 각각 파랑에 의한 저면 마찰계수와 흐름에 의한 저면 마찰계수를 의미하며,  $f_w$ 는 Kim(2004)이 제안한 식을 사용한다.

$$f_w = 0.000684 \exp(7.8(A_e/z_0)^{-0.106}) \quad (5)$$

여기서  $A_e$ 는 해저면에서의 물입자 이동거리 진폭(the peak value of the orbital excursion amplitude)이고  $H/(2\sinh(kh))$ 로 표현된다.  $z_0$ 는  $k_s/30$ ,  $k_s$ 는 Nikurase의 조도이며 아래 식으로 구한다.

$$k_s = (1-4)H_r \quad (6)$$

여기서  $H_r$ 은 모래결의 높이이며, Nielsen(1979)이 제안한 다음의 모래결의 기울기(ripple steepness) 예측 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\frac{H_r}{L_r} = 0.182 - 0.24(\theta)^{3/2} \quad (7)$$

여기서  $L_r$ 은 모래결의 길이( $2 \times A_e$ )이고, 표면조도  $k'(=2.5 \times d_{50})$ 에 대한 해저 표면 마찰(skin friction)에 해당하는 유효 Shields parameter  $\theta'=2.5 \times d_{50}$ ,  $d_{50}$ 은 퇴적물의 중앙입경이다.

해저면에 형상이 존재할 경우 형상의 표면에서 부상한 퇴적물은 회전류 속에 갇히는 양과 직접 수층으로 유입되는 양을 포함하여 평균적으로 어떠한 높이에도 도달하였다가 물보다 비중이 크므로 침강하여 퇴적되게 된다. 해저면에 소규모 형상이 존재하지 않는 평평한 흐름(sheet flow)의 경우에도 난류의 발달로 인하여 해저면에서 부상한 퇴적물입자는 상당한 높이까지 부상하였다가 이후 침강하게 된다. 퇴적물 입자가 해저면으로부터 어느 높이까지 부상한 후 침강하는지에 따라 수평방향의 이동거리도 달라진다. 퇴적물이 저면에서 부상하는 높이는 파랑 경계층 두께( $\delta_w$ )와 저면에 적용하는 전단력의 크기에 크게 좌우된다.

$$r = f(u_{*wc, \max}, u_{*cri}, \delta_w, w_f) = c_1 \frac{u_{*wc, \max}}{u_{*cri}} \delta_w \quad (8)$$

여기서  $r$ 은 부상고,  $c_1$ 는 부상에 관련된 계수,  $u_{*wc, \max}$ 는

파랑주기내 최대 전단 속도(maximum shear velocity),  $u_{*cri}$ 는 침식한계 전단 속도이다. 파랑 경계층 두께( $\delta_w$ )는 Kim(1993)이 제안한 overshooting까지의 높이를 구하는 공식을 활용하여 그 값의 반이 되는 값을 적용하였고 다음 식을 사용한다.

$$\delta_w = 3.57 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(12.0(A_c/z_0)^{0.046})z_0 \quad (9)$$

퇴적물입자의 거동은 엄격하게는 저면에서의 마찰속도에 의해서 부상한 후 유체입자의 거동의 영향을 지속적으로 받기 때문에 유체입자의 거동과는 다르게 거동한다. 그러나 본 논문에서는 퇴적물입자의 거동을 수평방향의 물입자와의 상호작용을 무시하고 단순히 난류확산으로 인한 지연과 중력에 의한 침강효과를 고려하여 출발시점에서의 조건으로부터 바닥에 침강할 때까지의 시간( $t_s$ )을 구하기로 한다.

$$t_s = \frac{r}{w_f} \quad (10)$$

이때 퇴적물 이동이 소류사이동 형태에 가까울수록  $t_s$ 가 작아지며, 비점착성 퇴적물의 경우  $t_s$ 는 보통 파랑주기보다 작을 것으로 추정된다. 특정 시각에 부유한 퇴적물입자는 수평방향으로  $t_s$ 시간만큼 움직이다가 해저면에 퇴적된다. 수평방향 물입자의 속도가 파랑 경계층 내에서 변화하지 않는다고 가정하면, 부유 퇴적물입자가 수평방향으로 움직이는 거리는 Fig. 5(d)와 같다.

$$d(t) = \int_t^{t+t_s} u_{wc}(\tau) d\tau \quad (11)$$

기존의 van Rijn(1984)의 경험식을 Nielsen(1992)이 수정한 순간부상률(instantaneous pickup rate,  $p$ )을 구하는 경험식은 다음과 같으며,

$$p(t) = c_2 0.473(\tau - \tau_{cri})^{1.5} \quad (12)$$

이를 이용하여 파랑주기 평균 총퇴적물 이동률은 아래의 식으로 구할 수 있다(Fig. 5(c) 참조).

$$q_t = c_3 \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot d(t) dt = c_3 \bar{p} \bar{d} \quad (13)$$

여기서  $c_2$ 와  $c_3$ 는 조정계수로 각각 0.00033과 0.01을 사용하였다.

수평이동거리,  $d$ 는 한번 부상한 입자의 수평방향에 대한 속도 누적치이므로 속도의 변화 형태가 비슷하나, 위상차가 발생하고, 변화폭이 완화되어 나타난다. 변화폭의 완화(attenuation)를 무시하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$d \approx c_1 t_s u_{ws}(t - t_0) \quad (14)$$

여기서  $t_0$ 는 대표적 위상차를 시간으로 환산한 값으로 전단응력과 수평유속의 위상차, 해저면 형상사이의 공간에 형성되는 회전류로 인한 지연효과를 포함하는 값이며 다음과 같이 가정한다.

$$t_0 \approx \frac{t_s}{2} \quad (15)$$

$$q_t = \frac{c_3 t_s}{T} \int_0^T p(t) u_{wc}(t - t_0) dt \quad (16)$$

$$\begin{cases} t_s: \text{parameter for settling} = c_1 \frac{u_{*wc, \max} \delta_w}{u_{*cri} w_f} \\ t_0: \text{equivalent time lag} \approx \frac{t_s}{2} \end{cases}$$

시간을 위상단위로 환산하면,

$$\phi_0 = \frac{2\pi t_0}{T} \quad (17)$$

이다. 소류사이동만 있는 경우와 같이 위상차가 문제가 되지 않을 경우에는 위 식을 아래 식과 같이 단순화할 수 있으며, 이는 기존의 Brown(1950)의 식과 같은 형태의 식이 된다.

$$q_t = c_3 \bar{p} \bar{d} = c_3 \bar{p} \bar{d} \quad (18)$$

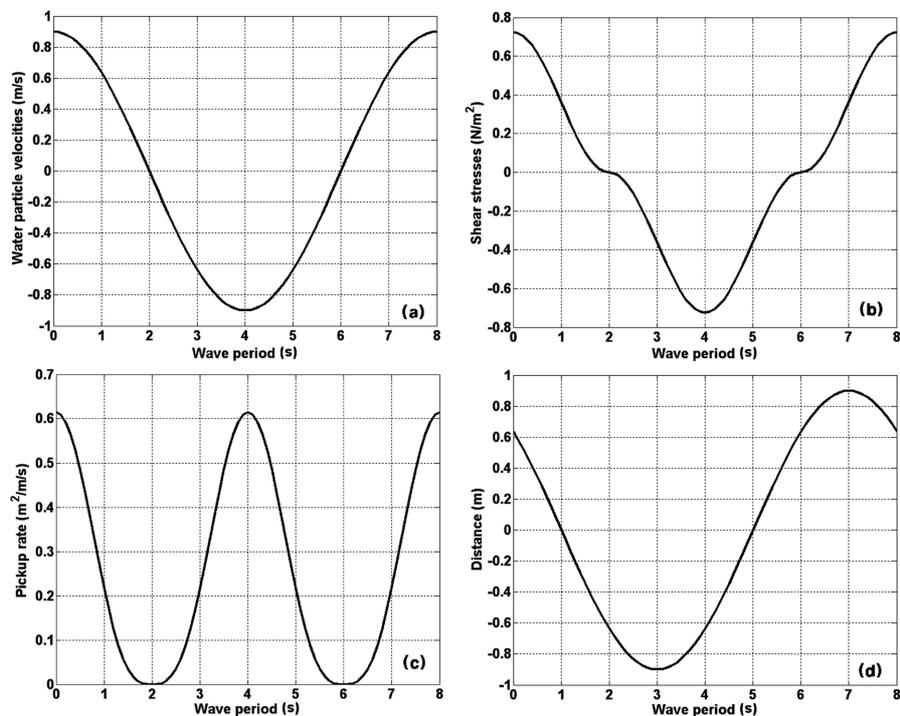
그러나, 쇄파가 발생하는 해안선 인근 해역에서는 부유사이동이 중요한 비중을 차지하고 있으므로 위상차를 무시할 수 없다.

### 3. 결 과

파랑만 존재하는 경우와 파랑과 흐름이 공존하는 경우에 대해서 파고와 파주기에 변화를 주어 비점착성 퇴적물 이동의 양상을 본 예측식을 이용하여 계산하고 관찰하였다. 본 논문에서는 퇴적물이 육지로 이동하는 방향을 양으로 표현하고, 외해로 이동하는 방향을 음으로 표현한다. 또한 Case I은 해수면기준 대칭인 단주기 파랑만 존재하는 경우에 대하여, Case II는 해수면기준 비대칭인 단주기 파랑만 존재하는 경우에 대하여 퇴적물 이동률을 계산하였다. Case III은 해수면기준 비대칭인 단주기 파랑과 흐름이 같은 방향으로 공존하는 경우이고, Case IV는 해수면기준 비대칭인 단주기 파랑과 흐름이 반대 방향으로 공존하는 경우에 대

**Table 1.** Computed non-cohesive sediment transport rates with the new formula for several different cases

$T$ (s)	$H$ (m)	Case I $Q_t$ ( $m^3/m/s$ )	Case II $Q_t$ ( $m^3/m/s$ )	Case III $Q_t$ ( $m^3/m/s$ )	Case IV $sQ_t$ ( $m^3/m/s$ )
6	0.8	0.0001	0.0003	0.0003	0.0003
6	1.1	0.00016	0.0011	0.0013	0.0010
6	1.4	0.0003	0.0028	0.0034	0.0023
6	1.7	0.00049	0.0046	0.0060	0.0032
6	2.0	0.00047	0.0031	0.0061	-0.00002
6	2.2	0.00022	-0.0031	0.0018	-0.0081
6	2.4	-0.00036	-0.0156	-0.0080	-0.0232
6	2.6	-0.0014	-0.0337	-0.0223	-0.0451
6	2.8	-0.0031	-0.0521	-0.0355	-0.0688
8	1.0	0.00012	0.0013	0.0014	0.0012
8	1.4	0.00033	0.0056	0.0062	0.0049
8	1.8	0.00065	0.0129	0.0152	0.0105
8	2.2	0.0009	0.0088	0.0155	0.0022
8	2.4	0.0008	-0.0096	0.0009	-0.0202
8	2.6	0.0005	-0.0467	-0.0304	-0.0630
10	1.0	0.00015	0.0022	0.0024	0.0021
10	1.4	0.00033	0.0104	0.0113	0.0095
10	1.8	0.00074	0.0416	0.0331	0.0265
10	2.2	0.0013	0.0477	0.0579	0.0376
10	2.4	0.0016	0.0353	0.0521	0.0186
10	2.6	0.0018	-0.0159	0.0108	-0.0425

**Fig. 3.** The factors of non-cohesive sediment transport rate calculated for linear wave.

하여 계산하였다. Case별 비점착성 퇴적물 이동률은 Table 1에서 제시하였다. Fig. 3은 Case I에 대한 퇴적물 이동률

을 계산하기 위한 요소들에 대하여 한 예를 제시하였다. Fig. 3(c)에서 보이는 것처럼, 부상물이 파주기에 대하여 대

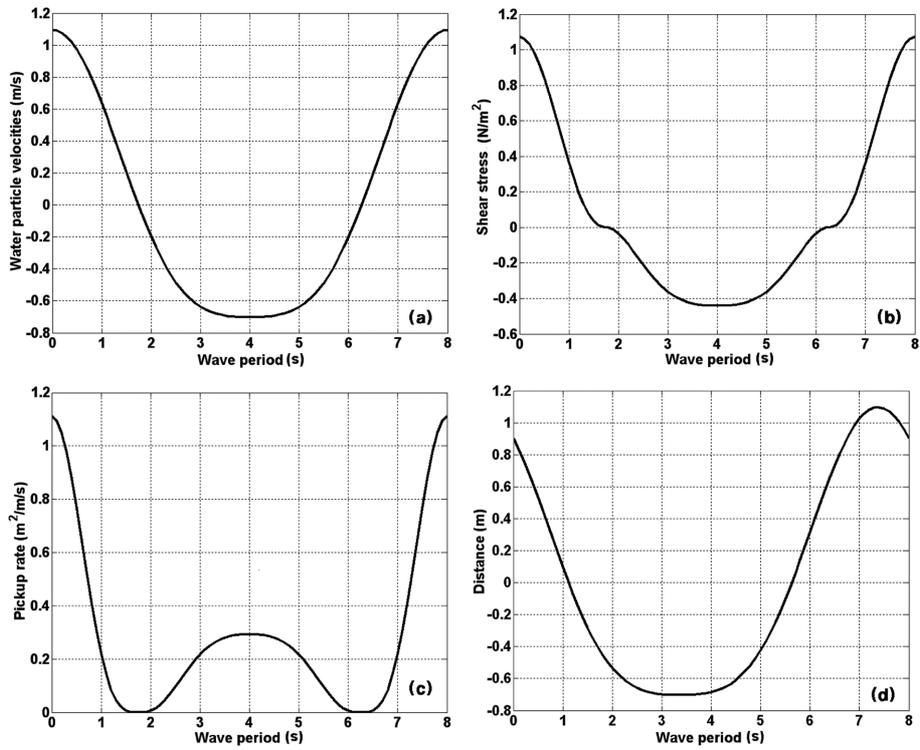


Fig. 4. The factors of non-cohesive sediment transport rate calculated for Stokes wave.

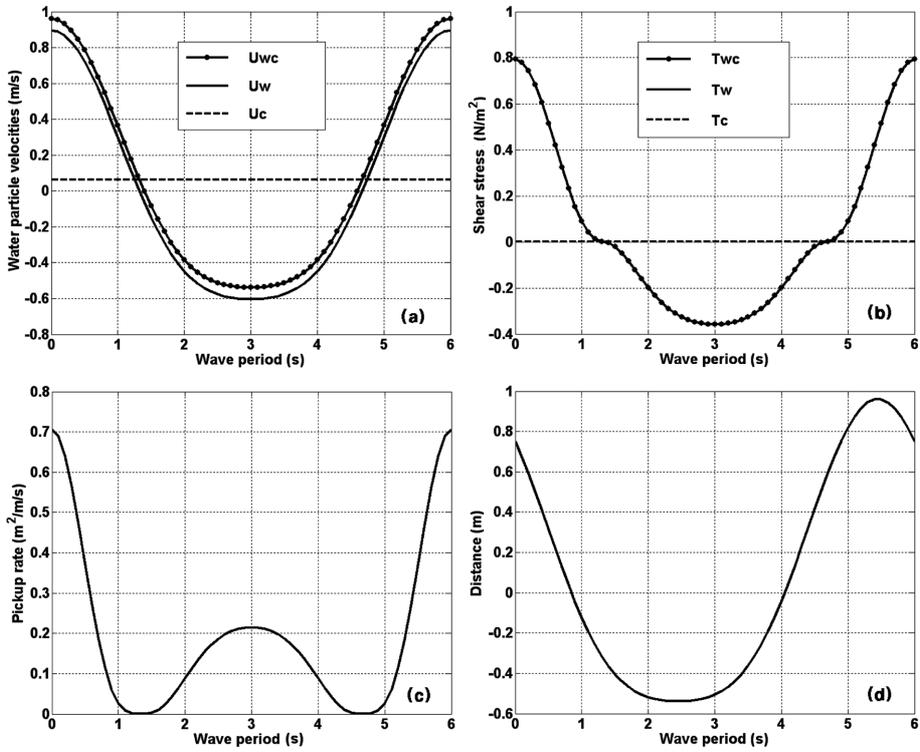


Fig. 5. The factors of non-cohesive sediment transport rate calculated for inline.

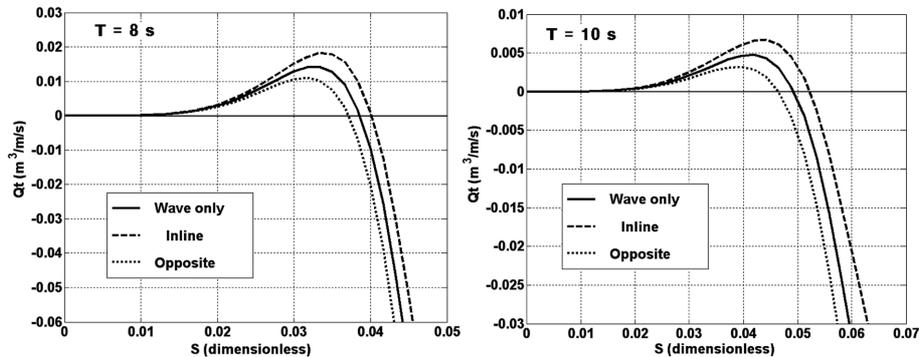


Fig. 6. Non-cohesive sediment transport rates vs. Wave steepness.

칭을 이루지만 Fig. 3(d)에서처럼, 이동거리가 변화하여 퇴적물을 육지방향(+) 또는 외해방향(-)으로 이동시킨다. Case II는 Fig. 4에서와 같이, 비선형(the second order Stokes wave) 단주기 파랑의 경우를 대상으로 파랑 단독에 대한 퇴적물 이동률의 계산 결과를 나타내고 있으며, 선형 파랑보다 외해방향으로 퇴적물을 이동시킴을 보여준다. 파랑과 흐름이 같은 방향으로 공존(inline)하는 Case III에 대해서 퇴적물 이동률은 비선형 파랑 단독인 Case II 경우보다 흐름에 의해서 '+'가 되는 경향을 보이고, 파랑과 흐름이 반대 방향으로 공존하는(opposite) 경우인 Case IV는 비선형 파랑 단독인 Case II 경우보다 퇴적물 이동률이 '-'가 되는 경향을 보인다. Case II, Case III, 그리고 Case IV에 대하여 일정한 파주기와 함께 파고를 0.3 m 부터 3.0 m 까지 0.1 m 간격으로 변화하여 관찰한 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 파주기가 길어지면 고 파랑에서도 퇴적물이 육지방향으로 이동하려는 경향을 보였다. 이는 비점착성 퇴적물 이동률이 파형기울기(wave steepness),  $S=H/L$ 와 상당히 연관이 있음을 의미한다.

#### 4. 결 론

파고가 크면 클수록 전단응력이 증가되면서 퇴적물이 더 높게 부상하는데, 파주기가 짧으면 부상된 퇴적물이 육지 방향으로 전진하다가 침강하기 전에 유속장이 바뀌면서 외해방향으로 후퇴한다. 반대로 파주기가 길면 길수록 부상된 퇴적물이 침강할 때까지 육지방향으로 전진을 하면서 해안선 가까운 곳에 퇴적될 것이다. 다시 말하면, 해저퇴적물의 부유특성이 적절히 조성되는 경우 파고가 증가할수록 퇴적물이 외해방향으로 이동하고, 파고가 작은 경우 퇴적물이 육지방향으로 이동하는 경향을 보일 수 있다. 특히 파

형기울기가 전체적으로 작은 값을 가지는 해안은 퇴적될 것이며, 큰 값을 가지는 해안은 침식되는 경향을 보이는 편이다. 본 논문에서는 지금까지 파랑 흐름 공존시 퇴적물 이동의 방향과 크기에 영향을 미치는 요소인 최대저면 전단응력의 크기(전단응력의 시간변화), 파랑과 흐름의 방향, 해저면 경사, 쇄파의 영향, 해저면 형상의 존재로 인한 지연효과 중 최대저면전단응력의 크기(전단응력의 시간 변화), 파랑의 비대칭성, 파랑과 흐름의 방향, 해저면에서 부상한 퇴적물이 해저면에 다시 퇴적될 때까지의 지연효과를 고려하는 경험식을 제시하였다. 해저면 경사와 쇄파의 직접적인 영향은 본 논문에서 제안하는 식에서는 고려하지 않았다. 육지-외해방향 비점착성 퇴적물 이동률에 대하여 기존의 실험식 관측자료 또는 신규 실험실 관측자료를 활용하여 본 예측식을 보정·검증할 예정이며, 추후 그 결과를 제시하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 주관 해양환경보존기술개발사업과 국민대학교 교내 연구지원(2009년) 결과입니다.

#### 참고문헌

- Brown, C. B. (1950). Sediment transportation, In Engineering Hydraulics(edited by H. Rouse) Wiley, New York., USA.
- Catao-Lopera, Y. A. and Garca, M. H. (2006). Geometry and migration characteristics of bedforms under waves and currents. Part 1: Sandwave morphodynamics. Coastal Engineering, Elsevier., 53, 767-780.
- Catao-Lopera, Y. A. and Garca, M. H. (2006). Geometry and migration characteristics of bedforms under waves and cur-

- rents. Part 2: Ripples superimposed on sandwaves. *Coastal Engineering*, Elsevier., 53, 781-792.
- Dalrymple, R. W. and Rhodes, R. N. (1995). Estuarine dunes and bars. *Geomorphology and sedimentology of estuaries. Development in sedimentology 53.*, edited by G. M. E. Perillo.
- Dohmen-Janssen, C. Marjolein and Hanes, Daniel M. (2002). Sheet flow dynamics under monochromatic nonbreaking waves. *Journal of Geophysical Research. Pt. C Oceans.*, 107(10), p. 3149, ISSN 0148-0227.
- Faraci, C. and Foti, E. (2002). Geometry, migration and evolution of small-scale bedforms generated by regular and irregular waves. *Coastal Engineering*, Elsevier., 47, 35-52.
- Grasmeijer, B. T. and Kleinhans, M. G. (2004). Observed and predicted bed forms and their effect on suspended sand concentrations. *Coastal Engineering*, Elsevier., 51, 351-371.
- Kim, H. (1993). Three-dimensional sediment transport model. Ph.D. dissertation, University of Liverpool.
- Kim, H. (2004). Effective form roughness of ripples for waves, *Journal of Coastal Research*, 20(3), 731-738.
- Liu, Z. (2001). Sediment transport. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik Aalborg Universitet.
- Nicholson, J., Broker, I., Roelvink, J. A., Price, D., Tanguy, J. M. and Moreno, L. (1997). Intercomparison of coastal area morphodynamic models. *Coastal Engineering*, Elsevier., 31, 97-123.
- Nielsen, P., Svendsen, I. and Staub, C. (1978). Onshore-Offshore sediment movement on a beach. *Coastal Engineering*, Chapter 87, 1475-1492.
- Nielsen, P. (1979). Some basic concepts of wave sediment transport. *Instit. Hydrodyn. Hydroul. Engrg.(ISVA), Series paper 20*, Tech. University of Denmark, 1979.
- Nielsen, P. (1992). Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *World Scientific, Advanced Series on Ocean Engineering - Vol 4*.
- Rakha, K. A., Deigaard, R. and Brøker, I. (1997). A phase-resolving cross shore sediment transport model profile evolution. *Coastal Engineering*, Elsevier., 31, 231-261.
- Sunamura, T. (1984). Onshore-Offshore sediment transport rate in the swash zone of laboratory beaches. *Coastal Engineering in Japan.*, Vol. 27.
- Tsujimoto, G. and Hayakawa, N. (1986). Modelling of Onshore-Offshore sediment transport mechanism under the presence of vortical motion. *Coastal Engineering in Japan.*, Vol. 29.
- U.S. Army Corp. (1984). *Shore Protection Manual. Volume I*.
- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua publications., Amsterdam.
- Whitmeyer, S. J. and Fitzgerald, D. (2007). A relic sand wave field in a tidal channel. *Proceedings Coastal Sediments '07 Conference*, ASCE Press, Reston., VA, 2164-2176.

---

원고접수일: 2009년 11월 13일

수정본채택: 2009년 12월 10일

게재확정일: 2009년 12월 17일