

移動狀 海底面에서의 摩擽力 Bottom Friction on Mobile Coastal Beach

유동훈* · 이동수**

Dong Hoon Yoo* and Dong Soo Lee**

要 旨 : 연흔(ripple)이 발달할 수 있는 移動狀 海底面에서 波浪과 海流가 함께 작용할 때의 摩擽力을 구하는 解法을 개발하였다. 본 解法에서 연흔의 형상에 대한 판별은 경험식을 이용하였다. 解法의 주요 골격은 프란틀의 混合距離理論이며 海流의 減速率을 구하기 위한 擴散係數比를 계산할 때 任意角의 合成影響을 고려하였으며, 모든 數值積分式의 解는 約산式으로 표현하여 계산효율을 증진시켰다. 또한 연흔을 고려하여 구한 摩擽力을 既存 土砂移動量 算定式에 적용하였으며 이를 發表된 實驗資料와 比較하여 보았다.

Abstract □ A solution method is developed for computing the bed shear stress driven by combined wave and current flow on a natural mobile coastal beach. An empirical equation is introduced to determine the shape of ripples formed on the natural sandy beach. The model being based on the Prandtl's mixing length theory, the effect of arbitrarily-angled interaction is included in the estimation of current velocity reduction and all numerical integrations are expressed by explicit approximate equations to improve the computation speed. In addition the computed sediment transport rates were compared with the measured values, reported in literature, using the refined bottom friction model considering the ripple formation.

1. 서 론

沿岸域에서 波浪과 海流는 빈번히 교차하게 되며 특히 海岸線의 變形에 직접적으로 큰 영향을 미치는 沿岸流는 대부분 波浪에 의하여 생성 발달되며, 沿岸流에 의한 土砂의 洗掘, 移動, 沈降 등은 波浪과의 合成流에 의한 海底摩擽力과 토사의 종류 크기 등에 따른 조건과의 상관관계에 따라 결정된다. 따라서 波浪과 海流의 合成에 의한 海底摩擽力에 대한 정확한 계산은 모든 海岸環境水理問題의 영향평가에 있어 필수적으로 전제되는 과정이라 할 것이다.

合成流에 의한 海底摩擽力을 계산하는 방법은 이제까지 여러 방법들이 제안되어 왔으나, 각 방법의 기본개념에는 큰 차이점이 없다 하겠다. 波浪에 의한 摩擽力計算도 해류에 의한 마찰력계산과 마찬가지로 이차원방정식으로 시행하나 해류에 의한 마찰력계산에는 수심평균유속을 쓰는 반면에 파도에 의한 마찰

력계산에는 선형파동방정식으로 계산되는 해저면유속을 사용하고 또한 유속의 수직분포가 서로 판이하게 다르기 때문에 두 유속의 單純合成만으로 계산하면 많은 오차를 유발한다(Yoo and O'Connor, 1987).

Bijker, Yoo 그리고 O'Connor가 개발한 모형(BYO model)은 전적으로 Prandtl의 混合距離理論(mixing length theory)에 기초를 두어 합성류에 의한 해저면 마찰력을 계산하는데 있어 두 유속의 연직분포를 고려한다(Bijker, 1967 ; O'Connor and Yoo, 1988 ; Yoo, 1989). Prandtl의 이론 역시 경험으로부터 연유한 해석방법론이기는 하지만, 이 이론은 어떤 난류운동을 해석하던지 일반성을 잃지 않는다. 이는 Boussinesq의 난류확산개념(eddy viscosity concept)보다 한 단계 발전된 개념이며, 이 이론에서 도출되는 Von Karman Constant는 어느 조건에서도 변하지 않는 상수이다. 이에 반하여 난류확산계수는 흐름의 조건에 따라 많은 변이를 나타낸다.

*亞州大學校 土木工學科(Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 441-749, Korea)

**韓國海洋科學技術(株)(Korea Ocean Science and Engineering Corp., Yongsan, Seoul 140-190, Korea)

혼합거리이론에서 유속의 난류성분은 혼합거리와 유속의 연직변화율과의 곱에 비례한다고 가정하며, 이때 혼합거리는 해저면으로부터의 거리에 비례한다. 기본적으로 BYO 모형은 혼합거리이론을 이용하여 모든 유속의 연직분포가 海底面으로부터의 직선과 접선으로 만나는 점(Bijker point)을 도출하여 파운동 유속과 해류유속의 합성을 이 점에서 시행하여 일주기의 평균값을 구한다. 이때 증폭된 난류의 정도에 따라 해저면 가까이에서의 유속이 감소하는데 이는 확산계수의 비로서 減速率을 구하며, 계산효율을 증진시키기 위하여 합성유속의 주기평균치는 약산식으로 제시하였다. BYO 모형은 파도와 해류의 흐름조건이 혼합거리이론으로 해석할 수 없거나 이상의 가정에 문제점을 야기시킬때 정확한 해를 제시할 수 없을 가능성이 있다. 그러한 가능성은 특히 연흔(ripples)이 존재하여 Eddy가 크게 발달할 때 나타날 수 있다. 즉 연흔이 존재할 때는 혼합거리를 정확히 측정할 수 없으며 유속의 연직변화율이 같은 점에서의 난류크기와 직접 관계가 없을 가능성도 많다. 이런 경우 어떤 α 도 정확한 해석이 불가능할 것으로 판단되며 BYO 모형도 예외는 아닐 것이다. 그러나 이와 같이 해저면의 상태가 매우 복잡한 경우일지라도 BYO 모형은 어느 정도 해의 근사치를 제공할 수 있을 것으로 사료되는데, 이는 연흔 주위에서 발달하는 아무리 큰 Eddy라도 해저면에 근접한 곳에서의 난류정도에 좌우될 것으로 판단되기 때문이다. 이러한 사유로 본 BYO 모형을 좀 더 수정하여 연흔이 발달할 수 있는 移動狀 海底面에서의 合成流摩擦력을 계산하는데 적용코자 한다.

파운동하에서 연흔은 쉽게 발달될 수 있기 때문에 이동상의 해저면에서 合成流에 의한 全摩擦力(total friction)을 계산하는데 있어 연흔의 형상을 평가하는 것은 필수적이다. 연흔의 형상은 보통 해저면 토사의 크기와 表面摩擦力(skin friction)으로 결정되며, 전마찰력을 구하기 위한 有效粗도크기(effective roughness height)는 연흔의 높이와 경사도로서 구해질 수 있다. Bijker는 移動狀 底面에서 전마찰력을 구하는 실험을 수행한 바 있으며, 본 연구에서는 그의 실험결과를 이용하여 수정된 BYO 모형을 검증하고자 한다. 또한 일방향흐름에서의 표사이동량을 산출하는 몇가지 경험식들에 합성류마찰력을 적용하여 합성류 표사이동량 산출에 대한 이들의 확장 가능성을 살펴

보고자 한다.

2. 海流 減速率

이전의 연구들(Yoo and O'Connor 1987, O'Connor and Yoo 1988, Yoo 1989)에서 해류가 파도와 합성할 때 해저면 가까이에서 해류유속의 감속률은 해류만의 에너지손실률의 합성류에 의한 에너지손실률에 대한 비의 세제곱근으로 구할 수 있다고 제시하였다. 이때 임의각으로 합성되는 경우의 난류비를 고려하는 문제에 대하여 뚜렷이 명시하지 않았다. 반면에 Yoo (1986)의 논문에서는 파도와 해류가 정면으로 나란히 교차하는 경우와 직각으로 교차하는 경우에 대하여 다음과 같이 速度減速率을 구할 수 있다고 제시하였다. 즉,

$$\alpha = \begin{cases} (D_c/(D_c^* + D_w^*))^{1/3} & \theta = \pi/2 \\ (D_c/(D_c^* + D_w^*/3))^{1/3} & \theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 α 는 해류의 속도감속률, D_c 는 해류만에 의한 에너지손실률, D_c^* 는 증분된 해류에너지손실률, D_w^* 는 증분된 파랑에너지손실률이며 θ 는 파랑의 진행방향과 해류의 연직축과 이루는 각이다. 따라서 두 인자가 나란히 합성될 때 $\theta = \pi/2$ 이며, 직각으로 합성될 때 $\theta = 0$ 이다. 합성류에 의한 총에너지손실률은 증분된 두 손실률의 합, 즉 $D_c^* + D_w^*$ 이다. 나란히 합성될 때는 D_w^* 의 전손실이 해류의 감속에 기여한다고 가정하였으며, 직각으로 교차할 때는 D_w^* 의 1/3만 해류의 감속에 기여한다고 가정하였다. 이는 실험결과로부터 연유하여 난류운동에 있어 주방향난류에너지는 직각 방향난류에너지의 세배가량된다는 사실로부터 얻은 가설이다.

실험결과에 의하면 shear stress에 의한 에너지손실은 normal stress에 의한 에너지손실의 30%이다. 즉, 에너지손실은 럭비공 모양과 같은 橢圓體形으로 발생한다고 볼 수 있는데, 이때 에너지손실타원체의 각 축을 에너지손실률밀도 d_r 라 하면 이는 각 stress에 의한 에너지손실과 차원이 일치한다. 따라서 다음과 같은 관계식이 성립한다고 가정할 수 있다.

$$d_s = 0.3 d_n \quad (2)$$

여기서 d_n 는 주방향에서의 에너지손실률밀도이며, d_s 는 이에 직각인 방향에서의 에너지손실률밀도이다(Yoo(19

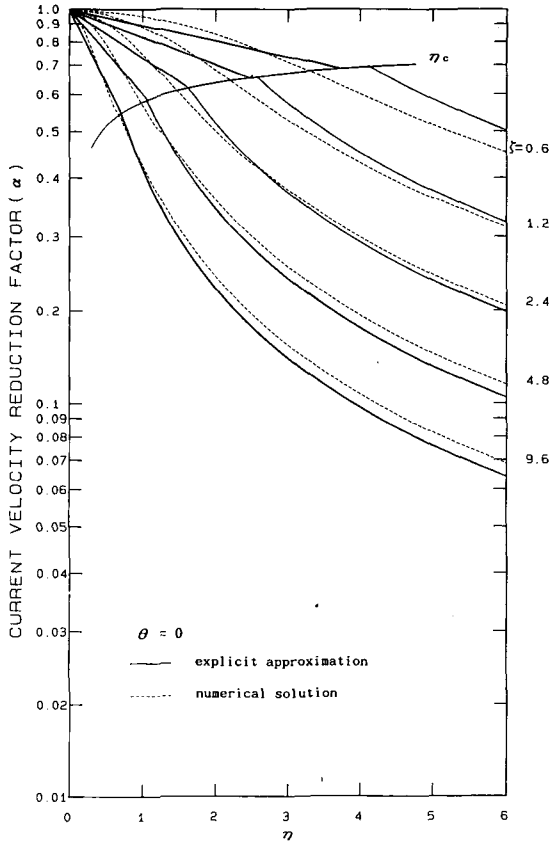


Fig. 1. Comparison of α against η between numerical solution and explicit approximation with various values of ζ for $\theta=0$.

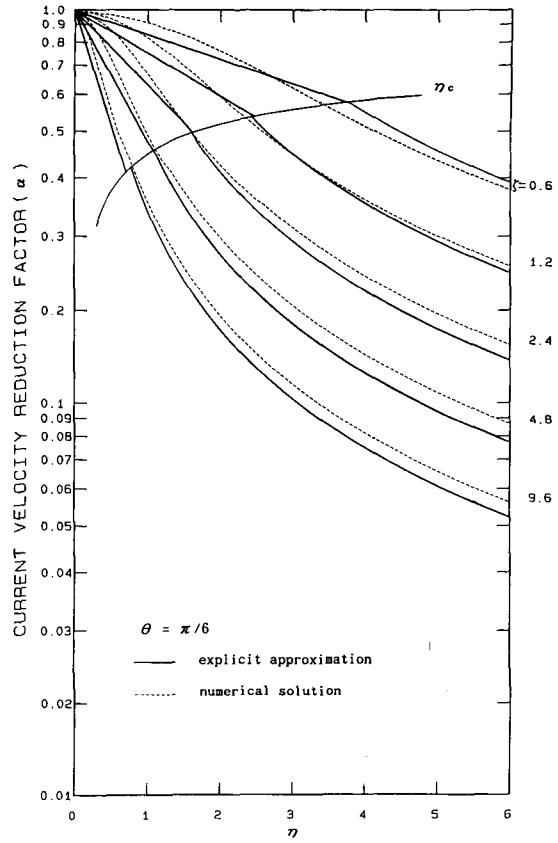


Fig. 2. Comparison of α values against η between numerical solution and explicit approximation with various values of ζ for $\theta=\pi/6$.

91)에 발표된 관계식은 약간의 오류가 있었음). 파랑의 진행방향이 해류와 임의각 θ 를 이루며 합성할 때, 파에너지 손실 타원체에서 해류방향의 손실밀도 d_c 는 파진행방향의 손실밀도 d_w 와 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$d_c = (0.3 + 0.7 \sin\theta) d_w \quad (3)$$

상기식으로부터 파랑이 해류와 직각으로 교차할 때 d_c 는 d_w 의 30%가 됨을 알 수 있다.

합성류에 의한 총에너지손실률중 증분된 파에너지 손실률 D_w^* 는 주로 파진행방향에 작용할 것으로 예상할 수 있으며, 증분된 해류에너지손실률 D_c^* 는 주로 해류방향에 작용할 것으로 예상할 수 있다. 따라서

$$\alpha = (D_c / (D_c^* + \xi D_w^*))^{1/3} \quad (4)$$

또는 :

$$a\alpha^5 + b\mu\alpha^{5-c} + \xi r\eta\mu^{2+q}\alpha^{3-q} + 0.424\xi\eta\mu^2\alpha^3 - 1 = 0 \quad (5)$$

여기서 $\xi = 0.3 + 0.7 \sin\theta$, $\mu = \zeta\eta$, $\zeta = (C_w/C_c)^{1/2}$, $\eta = u_b/U$, C_w 는 파랑마찰계수, C_c 는 해류마찰계수, u_b 는 해저면에서의 최대파속, U 는 해류의 평균유속이며, 상수들 a, b, r, q 는 주기평균치들로써 회귀분석으로부터 약산식으로 구해진다(Yoo, 1989). 여러번의 시행착오를 거쳐서 감속률 α 는 다음과 같은 약산식으로 간단히 계산될 수 있다. 즉,

$$\alpha = \begin{cases} (0.08 + (1.91 - 0.60\eta^{1/4})\zeta^{-0.8})\eta^{-1} & \eta \geq \eta_c \\ \exp(-(0.14 + 0.11\eta^{1/2})\zeta^{0.8})\eta & \eta < \eta_c \end{cases} \quad (6)$$

여기서 θ 는 라디안으로 읽히고 항상 陽의 값을 취하며,

$$\eta_c = 4.1 \exp(-0.4 - 0.6 \ln \zeta) \quad (7)$$

$\theta = 0, \pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ 등 각각에 대하여 Figs. 1,

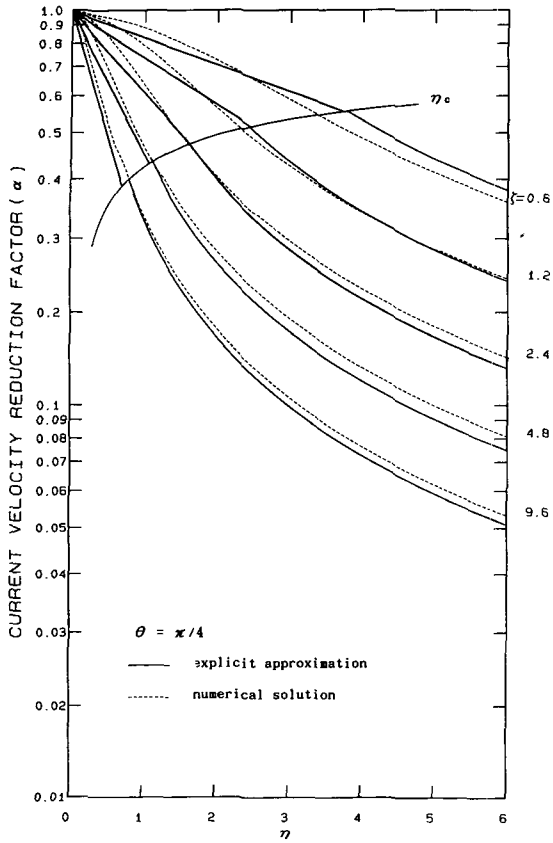


Fig. 3. Comparison of α values against η between numerical solution and explicit approximation with various values of ζ for $\theta = \pi/4$.

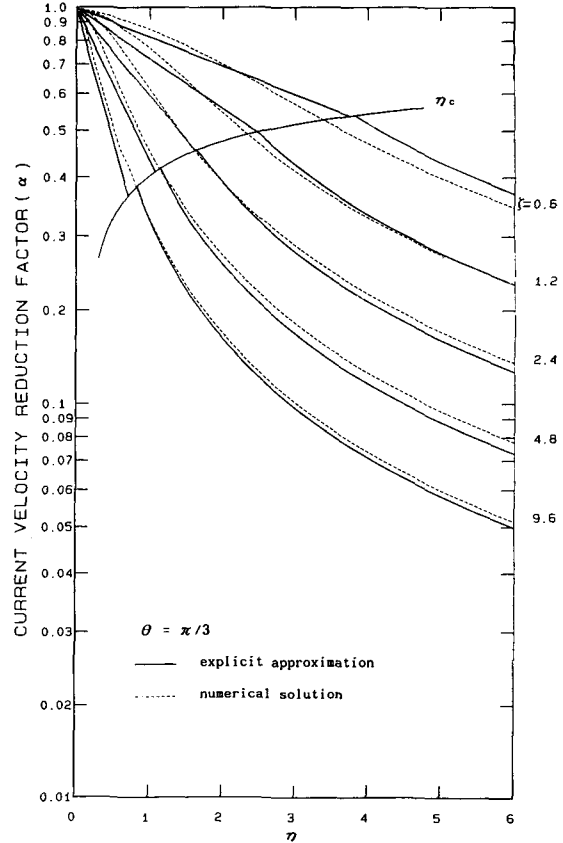


Fig. 4. Comparison of α values against η between numerical solution and explicit approximation with various values of ζ for $\theta = \pi/3$.

2, 3, 4, 5에 제시된 바와 같이 약산식 (6)으로 계산된 감속률 α 는 식 (5)를 수치해석으로 구한 감속률 α 에 비하여 ζ 와 η 의 넓은 범위에 걸쳐 어느정도 정확한 해를 줄을 알 수 있다. 단지 ζ 의 값이 작을 때, 즉 파랑마찰계수가 해류마찰계수에 비하여 작을 때 약간 큰 오차를 보이는데 이러한 경우는 극히 드물 것으로 판단되어 약산식의 이용에 큰 문제점은 없을 것으로 사료된다.

3. 연흔의 형상

전마찰력을 계산하는데 있어 유효조도크기를 결정 하려면 연흔의 높이(ripple height)와 형상계수(ripple steepness)를 알아야 하는데 이들을 구하는 여러 경험식들이 제시되어 왔다. 본 저자들이 알기로는 합성류조건에서 연흔의 형상을 구하는 경험식은 아직

개발된 바 없으나, 파도조건 또는 일방향흐름조건하에서의 연흔형상을 구하는 경험식은 많이 제시되어 있다. 연흔은 일방향흐름조건에서보다 왕복운동을 하는 파도조건에서 쉽게 발달되므로 합성류조건에서의 연흔형상을 구하는데 파도조건에서 사용하는 식을 사용하는 것이 나으리라 판단된다. 상당히 많은 양의 실험자료와 현장자료들을 수집하여 분석한 결과, Nielsen(1979)은 다음과 같은 경험식을 제시하였다. 즉, 수조상 규칙파조건에서

$$\Delta/\lambda = 0.182 - 0.24(\hat{c}/\gamma_s \Phi)^{1.5} \tag{8}$$

$$\Delta/A_b = 0.275 - 0.022 u_b/(\gamma_s \Phi/\rho)^{0.5} \tag{9}$$

여기서 Δ 는 연흔의 높이, λ 는 연흔의 길이, A_b 는 해저면에서 파운동의 최대이동 거리, γ_s 는 토사의 비중무게, ρ 는 해수의 밀도, Φ 는 토사의 직경이며, \hat{c} 는

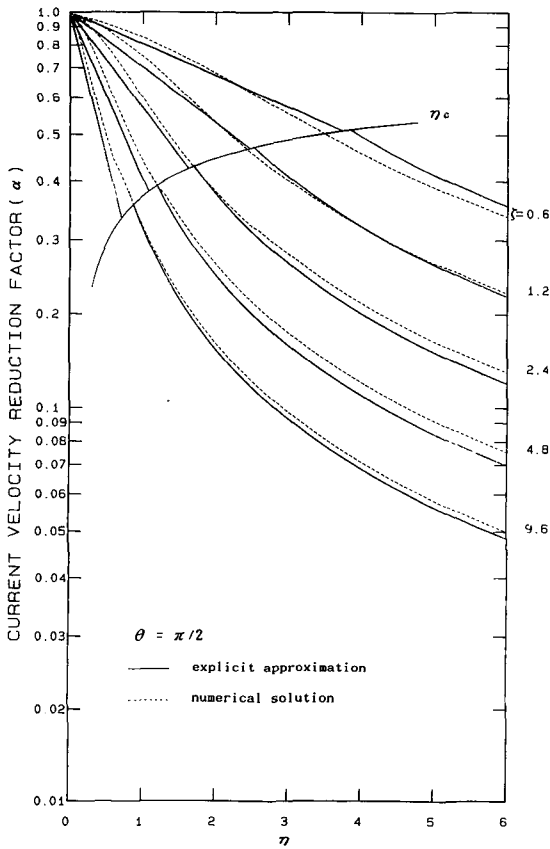


Fig. 5. Comparison of α values against η between numerical solution and explicit approximation with various values of ζ for $\theta = \pi/2$.

최대마찰력이다. 또한 그는 현장조건일지라도 파도조건을 有效波로 계산하면 상기 식을 그대로 사용할 수 있음을 밝혔다. 본 적용에서, α 에는 합성류에 의한 最大 表面摩擦력을 사용하는데, 이때 유효조도계수에는 토사의 평균직경을 사용한다.

海底面이 고를 때, 유효조도계수는 보통 토사의 직경과 동일하다고 가정한다. 해저면이 거칠고 여러 크기의 토사 입자로 구성되어 있을 때, 유효조도계수 R은 보통 다음과 같이 계산된다. 즉,

$$R = \alpha_r \Phi_m \quad (10)$$

여기서 Φ_m 는 토사의 평균입경이며, Engelund와 Hansen(1972)에 의하면 $\alpha_r = 2.5$ 인데, 최대 4까지 추천되었다. 식 (10)은 또한 연흔이 존재할 때 表面摩擦력을 구하는데 사용된다. 연흔이 존재할 때 유효조도계수를 구하는 경험식은 Swart(1976)가 제시한 바

있는데, 많은 양의 현장자료와 실험자료를 분석한 결과,

$$R = \beta_r \Delta^2 / \lambda \quad (11)$$

여기서 β_r 는 상수이며, 보통 $\beta_r = 8 - 25$, 따라서 전마찰력을 계산하기 위한 유효조도계수는 식 (11)을 사용하여 구한다.

4. BYO 模型의 檢證

이상의 수정된 BYO 모형은 이전의 연구들(O'Connor and Yoo, 1988 ; Yoo, 1989 ; 유, 1989)에서 검증에 사용되었던 固定狀 海底面에 대한 실험자료에 적용하여 직각교차인 경우 약간의 정도 향상을 보임을 확인하였다. Bijker(1967)는 移動狀 海底面에 대한 수조실험을 수행한 바 있는데 본 연구에서 이 자료를 이용하여 수정된 BYO 모형의 최종 검증을 실시하고자 한다. O'Connor and Yoo(1988)가 언급한 바와 같이 Bijker의 실험자료중 $\theta = \pi/6$ 인 경우 바닥면이 이동상이므로 바닥면이 고정상인 $\theta = 0$ 인 경우에 비하여 자료의 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단되었다. 그러나 이는 연흔의 형상을 계산에 포함시키지 않은 결과이며, 유효조도계수산정에 연흔을 고려하여 정확도가 상당히 향상된 계산결과를 얻을 수 있었다.

$\theta = \pi/6$ 인 경우 Bijker는 평균직경 $\Phi_m = 0.23$ mm이고 $\Phi_{90} = 0.34$ mm인 자연상태의 토사를 사용하였으며 그의 여러 실험조건에서 다양한 크기의 연흔이 발달함을 확인할 수 있었다. 그는 또한 平均摩擦력을 구하기 위하여 각 경우에 대하여 水面傾斜 i 를 관측하였는데 이점에 주의가 필요한 것으로 판단된다. 단일 에너지손실이 전적으로 마찰력에 의해서만 일어난다면, 일방향흐름이던지 합성류가 작용하던지 주기평균 해저면마찰력 $\langle \tau \rangle$ 는 $\rho g d i$ 와 일치한다. 그러나 해저면 토사가 고정되어 있지않고 이동되면, 추가적인 에너지손실이 토사이동에 의하여 발생될 수 있기 때문에 $\rho g d i$ 는 $\langle \tau \rangle$ 보다 클 수 있다. Table 1에 제시된 바와 같이, 똑같은 토사를 사용했는지라도 연흔의 크기와 형상은 여러 수리조건에 따라 다양하게 나타남을 알 수 있다. $\beta_r = 15$ 을 사용하였을 경우 유효조도계수는 최소 약 3 mm부터 최대 약 40 mm까지 계산된다. 이러한 값들은 고정상 해저면에서의 조도계수치보다 훨씬 더 큰 수치들인데 실험에서 확인된

Table 1. Comparison of computed bed shear stress against Bijker laboratory data($\beta_r=15.0$)

No.	d m	U m/s	θ degr	H m	T s	Φ_m mm	Δ mm	R mm	pgdi N/m ²	$\langle\tau\rangle$ N/m ²
312	0.20	0.13	0.0	0.037	1.57	0.23	6.8	18.2	0.14	0.07
314	0.21	0.28	0.0	0.043	1.57	0.23	7.4	19.7	0.45	0.32
315	0.21	0.40	0.0	0.043	1.57	0.23	7.4	19.3	1.09	0.95
316	0.30	0.12	0.0	0.058	1.57	0.23	7.8	21.0	0.11	0.06
317	0.30	0.21	0.0	0.056	1.57	0.23	7.6	20.3	0.24	0.18
318	0.30	0.30	0.0	0.055	1.57	0.23	7.5	19.9	0.49	0.37
319	0.30	0.40	0.0	0.064	1.57	0.23	8.4	21.8	1.07	0.91
320	0.38	0.15	0.0	0.073	1.57	0.23	8.2	21.8	0.14	0.08
322	0.38	0.31	0.0	0.075	1.57	0.23	8.3	22.0	0.55	0.44
300	0.20	0.13	0.0	0.025	1.57	0.23	4.8	13.1	0.08	0.07
302	0.20	0.30	0.0	0.022	1.57	0.23	4.3	11.5	0.34	0.30
303	0.20	0.37	0.0	0.023	1.57	0.23	4.5	11.8	0.90	0.82
304	0.30	0.13	0.0	0.026	1.57	0.23	3.9	10.7	0.06	0.05
306	0.30	0.33	0.0	0.028	1.57	0.23	4.2	11.2	0.27	0.23
307	0.30	0.39	0.0	0.034	1.57	0.23	5.0	13.2	0.79	0.68
310	0.38	0.32	0.0	0.045	1.57	0.23	5.5	14.7	0.32	0.21
357	0.12	0.29	0.0	0.030	0.68	0.23	2.3	6.1	0.82	0.78
358	0.14	0.32	0.0	0.034	0.68	0.23	2.2	5.9	1.34	1.37
362	0.20	0.39	0.0	0.047	0.68	0.23	1.9	5.0	1.45	1.29
365	0.30	0.30	0.0	0.065	0.68	0.23	1.2	3.3	0.45	0.40
356	0.12	0.21	0.0	0.040	0.68	0.23	3.0	7.8	0.18	0.16
355	0.12	0.10	0.0	0.038	0.68	0.23	2.8	7.6	0.05	0.04
360	0.20	0.22	0.0	0.052	0.68	0.23	2.1	5.7	0.17	0.12
359	0.20	0.12	0.0	0.054	0.68	0.23	2.2	5.9	0.06	0.04
340	0.20	0.14	15.0	0.058	0.68	0.23	2.6	6.9	0.14	0.10
341	0.20	0.25	15.0	0.056	0.68	0.23	2.7	7.0	0.50	0.46
343	0.27	0.16	15.0	0.065	0.68	0.23	1.8	4.8	0.12	0.08
342	0.20	0.35	15.0	0.052	0.68	0.23	2.6	6.9	1.12	1.03
349	0.13	0.10	15.0	0.038	0.68	0.23	2.8	7.5	0.08	0.07
350	0.20	0.11	15.0	0.062	0.68	0.23	2.7	7.1	0.05	0.06
351	0.27	0.11	15.0	0.063	0.68	0.23	1.7	4.5	0.06	0.05
343	0.27	0.16	15.0	0.065	0.68	0.23	1.8	4.8	0.12	0.12
344	0.27	0.25	15.0	0.063	0.68	0.23	1.9	5.0	0.34	0.29
340	0.20	0.14	15.0	0.058	0.68	0.23	2.6	6.9	0.15	0.15
341	0.20	0.25	15.0	0.055	0.68	0.23	2.6	6.9	0.36	0.31
342	0.20	0.33	15.0	0.052	0.68	0.23	2.6	6.8	0.71	0.59
323	0.28	0.22	15.0	0.088	2.00	0.23	14.9	37.9	0.35	0.25
324	0.29	0.35	15.0	0.087	2.00	0.23	15.0	37.0	0.51	0.38
325	0.20	0.22	15.0	0.080	2.00	0.23	15.8	39.4	0.45	0.32
326	0.20	0.30	15.0	0.094	2.00	0.23	17.2	40.0	0.89	0.97
327	0.30	0.12	15.0	0.071	2.00	0.23	12.5	33.0	0.22	0.10
329	0.30	0.25	15.0	0.064	2.00	0.23	11.9	31.1	0.44	0.26
331	0.20	0.10	15.0	0.047	2.00	0.23	11.0	29.4	0.06	0.04
333	0.34	0.11	15.0	0.067	2.00	0.23	11.3	30.1	0.24	0.11
334	0.34	0.22	15.0	0.071	2.00	0.23	12.0	31.6	0.67	0.26
335	0.34	0.34	15.0	0.073	2.00	0.23	12.5	32.1	0.84	0.70
332	0.21	0.37	15.0	0.055	2.00	0.23	12.7	32.2	1.08	1.11
334	0.34	0.22	15.0	0.067	2.00	0.23	11.5	30.4	0.36	0.22

average deviation=21.19%

값들과는 매우 유사하다(Bijker, 1967). 거의 모든 경우에서 계산된 $\langle \tau \rangle$ 는 관측된 $\rho g d_i$ 보다 작으며 전체 평균오차는 약 21%이다. 토사이동에 의한 에너지손실을 고려하였을 때, 본 계산 결과는 만족스러운 것으로 사료된다.

5. 合成流에 의한 土砂移動

합성류에 의한 토사의 이동량을 산정하는 경험식을 개발하고자 하는 노력은 오랫동안 경주되어 왔으나 아직 만족할만한 성과는 거두지 못한 듯하다. 합성류에 의한 토사 이동량 산정식을 개발하고자 하는 본격적인 시도는 Bijker(1967)에 의하였다. 그의 접근방법은 아주 간단하여 기존 일방향흐름에 사용하는 Kalinske-Frijlink(1952) 경험식을 사용하였는데 식의 형태는 그대로 유지하고 단지 사용되는 변수중 몇가지를 합성류의 조건으로부터 얻어지는 변수로 대체하고(일방향흐름 전단력을 합성류 평균전단력으로 대체) 추가로 연흔계수를 도입하여 합성류에 의한 이동량을 산정하고자 하였다. 그 자신의 실험결과와 비교하여 밝혀진 바와 같이 상기 수정된 Kalinske-Frijlink 경험식은 많은 오차를 유발하여 최대 10배까지 크거나 작은 것으로 나타났다. 이후 파운동에 의한 토사이동양상에 대한 많은 실험 및 이론 연구가 시행되어 왔음에도 불구하고 이러한 복잡한 미케니즘을 이동량 산정식에 정량적으로 수식화하는데는 성공적이지 못하여 Bijker의 시도와 유사한 형태의 경험식을 도입하고 있는 실정이다.

Bijker의 合成流剪斷力 계산방법은 이후 많은 수정과 보완을 거쳐 본 논문에 발표된 바와 같이 移動狀 海底面에서의 합성류전단력을 계산하는 데까지 이르렀다. 연흔의 형상을 고려했을 때의 조도계수는 그렇지 않았을 때의 조도계수에 비하여 최대 50배까지 이르며, 이로써 연흔형상을 고려치 않을 때 전단력 계산은 1/3 이하로 과소평가될 가능성이 많다. 따라서 Bijker가 시도했던 수정된 Kalinske-Frijlink 경험식의 오차중 상당부분은 전단력계산의 부정확성에 연유한 것으로 가정할 수 있다. 이러한 추설에 근거하여 Kalinske-Frijlink 경험식을 재검토하고자 한다. Kalinske-Frijlink의 토사이동량 산정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{S_b}{\phi(\mu\tau_c/\rho)^{1/2}} = b \exp\left[a \frac{(\rho_s - \rho)g\phi}{\mu\tau} \right] \quad (12)$$

여기서 S_b 는 소류토사이동량, μ 는 연흔계수, τ_c 는 해류만에 의한 전단력, τ 는 합성류의 전단력, ρ 는 해수의 밀도, ρ_s 는 토사의 밀도, a , b 는 실험상수로써 $a = -0.27$, $b = 5$ 를 제시하였다. Bijker가 시도했던 바와 같이 파도와 해류의 합성류인 경우 전단력항에는 합성류의 평균전단력을 사용한다. Bijker는 연흔의 영향을 고려하기 위하여 연흔이 형성되므로서 증가되는 조도계수를 기준 조도계수(연흔이 형성되기 이전의 조도계수)와의 비로서 표현하였는데 본 모형의 적용에는 이미 연흔의 형성에 따른 마찰력의 증가가 고려되었기 때문에 연흔계수를 τ 로 도입할 필요성은 없다고 본다.

수정된 BYO 모형을 이용하여 平均摩擦力을 구하고 식 (12)를 사용하여 합성류에 의한 土砂移動량을 산정할 수 있으며 Bijker의 여러 실험조건에 대한 비교가 Table 2에 제시되어 있다. 비교로부터 분명히 인식될 수 있듯이 평균마찰력이 보다 정확히 계산되었음에도 불구하고 토사이동량산정에 있어 정확도의 향상은 전혀 나타나지 않는다. 이러한 계산 결과는 이와 유사한 형태의 몇가지 수정된 토사이동량 산정공식을 사용했을 때도 나타나는데 그들은 다음과 같다.

Shields(1963)에 의하면

$$S_b = 6.23U\phi\psi(\psi - \psi_{cr}) \quad (13)$$

Madsen-Grant(1976)에 의하면

$$S_b = 40\psi^3\omega_0\phi \quad (14)$$

$$\psi = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)g\phi}$$

$$\psi_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho)g\phi}$$

$$\tau_{cr} = \rho U_c^2$$

여기서, U 는 해류유속, ω_0 는 토사의 침강속도, U_c 는 한계마찰속도

상기 경험식을 합성류에 적용할 때 전단력항에만 합성류 平均剪斷力을 사용하는 것이 일반적인 관계이며 본 연구에서도 그대로 시행하여 얻어진 계산

Table 2. Results of computed sediment transport rate by combined wave-current flow in comparison between various methods against the Bijker's laboratory data(1967)

No.	$\rho g d_i$ N/m ²	τ N/m ²	S (10 ⁻⁶ m ³ /sec)			
			Lab.	eq. 12	eq. 13	eq. 14
314	0.45	0.32	6.886	4.286	34.818	43.470
316	0.11	0.06	2.833	0.000	0.800	0.694
318	0.49	0.37	11.895	4.908	40.528	48.314
319	1.07	0.91	39.127	47.040	212.895	303.268
320	0.14	0.08	3.913	0.000	1.848	1.683
302	0.34	0.30	1.659	9.316	22.326	21.203
303	0.90	0.82	38.032	41.839	69.778	78.159
307	0.79	0.68	7.982	41.852	80.145	87.081
310	0.32	0.21	2.019	4.414	29.838	28.545
357	0.82	0.78	20.816	8.329	19.767	19.021
358	1.34	1.37	53.526	14.509	27.873	26.699
362	1.45	1.29	382.820	48.237	49.698	45.055
365	0.45	0.40	2.504	3.920	6.175	3.487
356	0.18	0.16	0.360	0.584	6.285	6.022
360	0.17	0.12	0.188	0.224	3.642	2.595
340	0.14	0.10	0.360	0.000	0.732	0.488
341	0.50	0.46	3.287	0.901	7.583	6.055
344	0.34	0.29	1.784	0.314	4.089	2.533
340	0.15	0.15	0.360	0.000	0.732	0.488
341	0.36	0.31	3.287	0.883	7.417	5.871
342	0.71	0.59	27.076	10.612	27.733	25.135
323	0.35	0.25	53.213	0.304	18.538	24.989
324	0.51	0.38	197.201	24.596	182.125	294.178
325	0.45	0.32	94.844	0.678	23.540	35.258
326	0.89	0.97	98.600	15.345	113.656	208.676
327	0.22	0.10	14.555	0.000	0.802	0.696
329	0.44	0.26	28.172	0.715	23.213	28.569
331	0.06	0.04	16.903	0.000	0.439	0.373
333	0.24	0.11	5.634	0.000	0.535	0.428
334	0.67	0.26	11.738	0.107	12.045	13.609
332	1.08	1.11	77.472	42.904	221.657	385.811
334	0.36	0.22	11.738	0.096	11.236	12.351

Note: error more or less than 10%
 ——— error more or less than 30%

결과가 Table 2에 함께 제시되어 있다. Kalinske-Frijlink 경험식을 적용했던 경우와 마찬가지로 대부분의 경우 오차가 크며 약간의 경향은 보이긴 하지만 비슷한 산정량을 보인 경우는 오히려 우연의 일치라 할 수 있을 정도로 계산 결과는 매우 실망적이다. 이상의 비교에서 오차가 10%내에 드는 자료는 12개이며 30%내에 드는 자료를 추려보아도 9개 밖에 추가되지 않는다. 세 공식중 그나마 Madsen-Grant가 제시한 식 (14)가 우수한 것으로 여겨지나 오차의 정도가

크기 때문에 실제 적용에 있어 많은 주의를 요한다.

이와 같이 계산결과와 실험치의 차이가 큰 이유는 파랑운동 또는 합성류에 의한 土砂移動 미케니즘에는 일방향흐름하에서 발생하는 토사이동 미케니즘에서 잘 나타나지 않는 여러 추가적인 사항이 있기 때문일 것이다. 연흔의 형성, 연흔 전면에서의 Eddy 발생 미케니즘, 파운동의 비대칭성, 전진운동에서 세굴된 토사의 후진운동에서의 時間差移動, 쇄파조건에 따른 浮遊率 등 현재까지 밝혀진 미케니즘만 이해한다해도 이상의 시도는 무모할 것이다. 따라서 합성류에 의한 토사이동량 산정을 위한 경험식의 개발에는 전혀 다른 접근방법이 시도되어야 할 것이라고 믿는다.

6. 결 론

해류의 감속률을 구할 때 난류합성의 임의각 교차 영향을 고려하여 감속률을 보다 정확히 계산할 수 있었으며, 연흔의 형상을 경험식으로 산정한 후 유효조도계수를 구함으로써 移動狀 海底面에서의 합성류전단력을 올바르게 계산할 수 있었다. 일방향흐름에 사용하였던 기존 토사이동량 산정식의 수정만으로는 합성류 토사이동량 산정을 제대로 기할 수 없으리라 판단되며, 파도에 의한 토사이동의 여러 복잡한 미케니즘의 수식화가 이루어진 연후에야 소기의 성과를 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

謝 辭

본 연구는 산학재단 1990년도 연구기금으로 지원 받았으며, (주)한국해양과학기술 이석우 사장의 연구 지원에 감사드린다.

參考文獻

- 유동훈, 1989. 합성류 전단력 계산을 위한 혼합거리모델, 한국해양·해양공학회지, 1(1): 8-14.
 Bijker, E.W., 1967. Some consideration about scales for coastal models with movable bed, Delft Hydraulics Lab., Publ. No. 50.
 Engelund, F.A. and Hansen, E., 1972. A monograph on sediment transport, Teknisk Forlag, Copenhagen, 67 p.
 Frijlink, H.C., 1952. Discussion des formules de débit solide de Kalinske, Einstein et Meyer-Peter et Mueller compte tenue des mesures récentes de transport dans

- les rivières Néerlandaises, 2^{me} Journ. Hydraulique. Soc. Hydr. de France, Grenoble, pp. 98-103.
- Madsen, O.S., and Grant, W.D. 1976. Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093-1112.
- Nielsen, P., 1979. Some basic concepts of wave sediment transport, Inst. of Hydrom. and Hydraulic Eng., Tech. Univ. of Denmark, Series Paper No. 20.
- O'Connor, B.A. and Yoo, D., 1988. Mean bed friction of combined wave-current flow, Coastal Engineering, 12, pp. 1-21.
- Shields, A., 1936. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitteil. Preuss. Versuchsanstalt Wasser-, Erd-, Schiffsbau, Berlin, No. 26.
- Swart, D.H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Delft Hydraulics Lab., Publ. No. 131.
- Yoo, D., 1986. Mathematical modelling of wave-current interacted flow on shallow waters, Ph. D. thesis, University of Manchester.
- Yoo, D., 1989. Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow, Coastal Engineering, 13, pp. 325-340.
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1987. Bed friction model of wave-current interacted flow, Proc. Spec. Conf. Coastal Hydrodynamics, ASCE, pp. 93-106.
- Yoo, D., 1991. Bottom friction of wave-current flow on a natural beach, 제 3회 한국해양해양공학회 학술회의 논문초록집, pp. 6-10.