

파와 해류에 의한 소류사량 산정 Computation of Bed Load Transport by Combined Wave-Current Flows

유동훈¹·임학수¹·박성준¹

Dong Hoon Yoo¹, Hak Su Lim¹, and Sung Jun Park¹

1. 서 론

파와 해류에 의한 기존의 소류사량 산정방법은 일반적인 기법으로 하천 소류사량 산정식을 수정하거나 비례상수를 재조정하여 그대로 사용해왔다. 그러나 파와 해류가 중복하여 작용할 때 해저면의 평균마찰력과 파의 일주기 동안 발생하는 최대마찰력은 상당한 증대가 예상된다. 해류의 일방향흐름과 표면파의 왕복운동특성으로 평균유속과 해저전단력간의 위상차와 해저전단력과 해저토사이동발생 시간간의 위상차가 존재하기 때문에 토사이동량 산정에 많은 어려움이 따른다. 최근 유(1995)는 천해파의 조건이 전방과 후방 모두 세굴임계조건을 충분히 초과한다고 가정하여 파와 해류에 의한 합성류 소류사량 산정식을 개발하였다. 본 연구는 유(1995)가 개발한 합성류 소류사량 산정식에 최근 개발된 천해파와 해류의 합성류 최대 마찰력(유동훈과 김인호, 2001)과 하천 소류사량 산정식(유동훈, 신승호와 임학수, 2000)을 적용하여 새로운 산정식 개선에 주안점을 두었다.

최근 유, 신과 임(2000)은 기존에 사용되고 있는 하천 소류사 이동량 산정식들이 형식의 다양함과 관련 변수들의 불일치로 각 공식의 특징을 파악하기 힘들며 사용된 관측자료가 다르기 때문에 상대적인 비교가 어렵고 산정식의 유도과정에서 사용되는 기본적인 가정들의 개선여지가 많은 것으로 판단하여 새로운 산정식을 개발하였다. 기존 산정식의 문제점을 해결하기 위하여 소류사량과 직접적으로 관련된 여러 무차원수를 제시하고 그들간의 관계식을 도출하여 가장 적합하다고 판단되는 무차원수를 도입하여 van Rijn(1984)이 제시한 관계식을 간단한 형식으로 도출

하여 새로운 소류사 이동량 산정식을 개발하였다. 새로운 산정식은 Brownlie (1981)가 수집 정리한 관측자료와 대비하여 경험계수의 적합한 수치를 도출하고 광범위한 조건에서 유효하고 정밀도가 높은 조정식을 개발하였다.

파와 해류가 동시에 작용할 때 토사 이동에 영향을 미치는 주요 요인으로 모래결의 발생 여부와 모래결 주위에서의 와운동 특성, 파운동의 비대칭성, 각 작용력과 결과로 나타나는 현상간의 위상차 등이다. 이러한 미세 수리특성에 대한 현상 파악은 매우 어려울 뿐만 아니라 토사이동에 미치는 영향도에 대하여 단일식으로는 정량화가 매우 곤란한 것으로 인식된다. 합성류 소류사량 산정에 있어 파와 해류가 해저면에 미치는 작용특징을 어느 정도 대표할 수 있으며, 정량화가 용이한 관련변수를 도출하여 하천 토사 이동량 산정식에 도입하는 방법이 일반적으로 흔히 사용되는 방법이다. Bijker (1967)는 Kalinske-Frijlinke의 하천소류사량 산정식에 평균마찰력과 모래결상수를 도입하여 파와 해류에 의한 토사이동량을 산정하고자 하였으며, 그의 실험자료와 비교하여 보았다. 유와 이(1992)는 모래결상수를 도입하는 대신에 평균마찰력을 계산할 때 모래결의 형상과 크기를 산정하여 유효조고의 증폭을 고려하였다. 그들은 Kalinske-Frijlinke 식, Einstein 식, Shields 식 등을 적용하여 Bijker의 실험자료와 비교하여 보았으나 계산결과는 크게 만족스럽지 못하였다.

유(1995)는 파와 해류가 동시에 작용하여 토사가 이동될 때, 증폭된 평균마찰력과 최대마찰력을 토사이동에 중요한 요인으로 판단하였다. 본 논문에서는 유, 신과 임(2001)이 개선하여 제안한 하천 소류사 이동량 산정식에 유와 김(2001)이 제안한 파와 해류의

¹ 아주대학교 토목설계공학과(Dept of Civil Engrg., Ajou Univ., Suwon, Kyonggi, 442-749, Korea)

합성류 평균마찰력과 최대마찰력을 적용하여 합성류 소류사 이동량 산정식을 개선하고자 하였다. 파와 해류에 의한 평균마찰력과 최대마찰력의 계산에는 유(1994)가 15 여년간 개선 보완한 BYO 모형을 이용하였다. BYO 모형에서 해류에 의한 일방향흐름 평균마찰력은 유(2000)가 개발한 지수형 마찰계수 산정식을 사용하였고 파에 의한 최대마찰력은 유와 김(2001)이 개발한 지수형 파 마찰계수 산정식을 적용하였다. 등가조고는 일방향흐름 관측결과와 일치하는 평균마찰력이 산정되는 수치를 택하였다. 파와 해류에 의한 토사이동에 관한 관측자료로 Bijker(1966)의 실험자료를 이용하여 선택된 제 산정식의 관련상수를 결정하였다.

2. 파와 해류에 의한 합성류 마찰력

파도는 해안에 접근하여 해저면을 느끼기 시작하면서 천수, 굴절, 회절, 반사현상 등에 따라 급격한 변형을 겪게 되며 쇠퇴되기 이전까지 파에너지의 대부분은 해저면과의 마찰력에 의하여 감소한다. 따라서 파에 의한 마찰력 또는 파마찰계수와 파와 해류의 합성류에 의한 마찰력을 올바르게 산정하기 위한 연구 노력은 오랫동안 경주되어 왔다. 특히 Bijker(1967)는 파와 해류에 의한 합성류 마찰력을 계산하기 위하여 대수분포식과 접하는 점, 즉 Bijker Point에서 파의 유속과 해류의 유속을 합성하는 방법을 개발하였다. 이후 합성시 난류확산의 증폭에 따라 해류유속이 감소하는 점을 고려하고 계산과정에 대두되는 여러 해를 양해법으로 구하는 방안을 강구하는 일련의 논문이 발표된 바 있으며(Yoo, 1989; 유동훈, 1994), 평균마찰력 이외에 최대마찰력과 절대치의 평균을 구하는 산정식들도 개발된 바 있다(Yoo, 1989). 또한 최대마찰력이 발생할 때의 유속감소율을 도입한 바 있다(유, 김, 2001). 본고에서는 BYO모형에 유와 김(2001)이 개발한 최대마찰력을 적용하였다.

BYO 모형에 의하여 파도와 해류가 합성할 때 발생하는 해저면마찰력은 일방향흐름의 마찰력에 증폭계수를 곱하여 구하여지며, 평균마찰력과 최대마찰력의 산정식은 각각 다음과 같다.

$$\tau_m = \beta \tau_c \quad (1)$$

$$\tau_x = \xi \tau_c \quad (2)$$

$$\tau'_x = \xi w \tau_c \quad (3)$$

식(3)은 BYO모형을 난류확산의 지체를 고려한 FY모형(유, 1993)에 비교하여 최대마찰력 산정식(2)에 일방향 흐름에서 산정한 난류확산의 지체를 고려한 조정계수 w 를 포함한 조정식이다. 여기서 w 는 수심 h 와 파운동의 최대행정거리 A_b 의 함수로 다음과 같다. 그림 1은 h/A_b 에 대한 BYO 모형과 FY 모형의 최대마찰력 비를 일방향 흐름 관측자료와 식(4)의 산정결과를 도시하였다.

$$w = 0.0185(h/A_b)^{1.58} \quad (4)$$

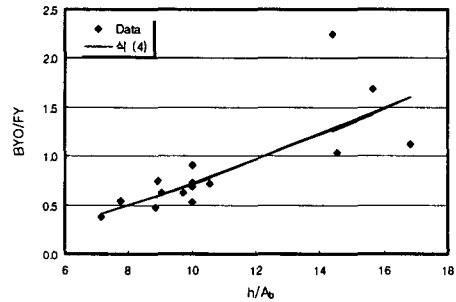


Fig. 1. Ratio of maximum shear stress() against of wave-current flow computed by Yoo and Kim eq(2001). (Lab. experiment by Bijker(1967)).

일방향 흐름에 의한 마찰력 $\tau_c = \rho C_c U^2$ 이며, 해류마찰계수 C_c 는 절점계수 B 가 조정된 식으로부터 산정된다. τ_m 은 주기평균 합성류 마찰력, τ_x 는 최대 합성류 마찰력, β 와 ξ 는 각각 해당 마찰력의 증폭계수이며 산정식은 각각 다음과 같다.

$$\beta = \alpha^2 (a + b \mu_\alpha^c) \quad (5)$$

$$\xi = \alpha_x^2 + \mu_{\alpha x}^2 + 2\alpha_x \mu_{\alpha x} \sin \theta \quad (6)$$

여기서 상수 a, b, c 는 합성각 θ 의 함수이며(Yoo, 1989), $\mu_\alpha = \mu/\alpha$, $\mu_{\alpha x} = \mu/\alpha_x$, $\mu = U_{BW}/u_{BC}$, U_{BW} 는 Bijker point에서의 최대파유속, u_{BC} 는 Bijker point에서의 해류유속, 는 해류유속의 평균 감소율이고, α_x 는 최대마찰력이 발생할 때의 유속감소율이다.

해류 유속의 평균감소율 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \left(\frac{D_c}{\xi D_{w*} + D_{c*}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

여기서, $\xi = 0.3 + 0.7 \sin \theta$ 이다. 또한, $D_{w*} = \delta \rho C_w U_b^3$, $D_{c*} = \beta D_c$, $D_c = \rho C_c U^3$ 이며 δ 와 β 는 각각 다음과 같다.

$$\delta = \frac{4}{3\pi} + \gamma\mu_a^q \quad (8)$$

$$\beta = \alpha^2(a + b\mu_a^c) \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)을 식 (7)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$a\alpha^5 + b\mu^c\alpha^{5-c} + \xi\eta\mu^{2+q}\alpha^{3-q} + 0.424\xi\eta\mu^2\alpha^3 - 1 = 0 \quad (10)$$

위의 식은 5차식이므로 음해법으로 풀어야 한다. 식(10)을 μ, θ, η 의 함수로 취하는 양해적 근사식은 다음과 같다.

$$\alpha = (0.08 + (1.9 - 0.6\theta^{0.25})\eta^{0.35})\mu^{-1} \quad \mu > \mu_c \\ = \tanh[A(\ln(\mu_c/\mu))^{1.2} + C] \quad \mu < \mu_c \quad (11)$$

여기서,

$$\mu_c = \exp(1.7 + 0.35\ln\zeta) \quad (12)$$

$$A = 0.65 - 0.18\theta^{0.25} - 0.06(1 - 0.6\theta^{0.25})\zeta^{0.5} \quad (13)$$

$$C = 0.4 - 0.14\zeta^{0.25} \quad (14)$$

또한 최대마찰력이 발생할 때의 유속감소율도 Yoo(1989)는 평균마찰력 산정시와 동일하게 취하였는데 본고에서는 합성류의 최대 마찰력을 고려하여 α_x 는 다음과 같다.

$$\alpha_x = \left(\frac{D_c}{\xi D_{w^*x} + D_{c^*x}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

여기서, $\xi = 0.3 + 0.7\sin\theta$ 이며, $D_{w^*x} = \delta_x \rho C_w U_b^{\beta_x}$, $D_{c^*x} \approx D_c \equiv \beta D_c = \beta_x D_c$ 이고 δ_x 와 β_x 는 각각 다음과 같다.

$$\delta_x = (1 + \mu_x^{-1}\sin\theta)^2 \quad (16)$$

$$\beta_x = \alpha_x^2(a + b\mu_x^c) \quad (17)$$

여기서, $\mu_x = \mu/\alpha_x$ 이다. 식 (16)과 식 (17)을 식 (19)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$(a + \xi\eta\sin^2\theta)\alpha^5 + 2\xi\eta\mu\sin\theta\alpha^4 + b\mu^c\alpha^{5-c} + \xi\mu^2\eta\alpha^3 - 1 = 0 \quad (18)$$

파마찰계수 산정식은 유와 김(2001)이 제안한 지수형 산정식을 적용하였다. 우선 층류와 완난류 조건에서 의 레이놀즈수의 지수형으로 다음과 같다.

$$C_{wS} = \alpha R_A^\beta \quad (19)$$

여기서, C_{wS} 는 완난류 파마찰계수, R_A 는 레이놀즈 수이며 $R_A = A_b U_b / \nu$ 이다. 표1에는 층류 및 완난류 파마찰계수 산정식의 관련상수 α 와 β 를 제시 하였다.

Table 1. 층류 및 완난류 파마찰계수 관련상수

구 간	α	β
$R_A < 600$	22.0	-1.00
$600 < R_A < 310,000$	0.957	-0.50
$310,000 < R_A < 510,000$	8×10^{-7}	0.62
$510,000 < R_A <$	0.026	-0.18

완난류와 전난류가 동시에 발생하는 복합구간에서의 파마찰계수의 산정식은 아래와 같다.

$$C_{wM} = \alpha R_A^\beta A_f^\zeta \quad (20)$$

여기서, $A_f = A_b / k_w$ 이고, β 값을 -0.2로 고정할 경우 α 값은 0.65가 되며 ζ 값은 -0.33이 된다.

전난류 파마찰계수의 산정식 개발에는 Jonsson식 (1967)을 수정하였으며 다음과 같다.

$$C_{wR} = \alpha A_f^\beta \quad (21)$$

표 2에는 전난류 파마찰계수 산정식의 관련상수 α 와 β 를 제시하였다.

Table 2. 전난류 파마찰계수 관련상수

구 간	α	β
$A_f < 20$	0.18	-0.7
$20 < A_f$	0.11	-0.5

일방향흐름 또는 해류의 마찰계수 C_c 는 대수형 개수로 마찰계수 산정식(유, 이, 1999)으로부터

사용하여 구한 마찰력과 합성류 최대마찰력을 BYO 모형으로 계산하여 보았을 때 계산된 마찰력 τ_u 는 관측된 마찰력 I_c 와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 계산된 합성류 최대마찰력 τ_x 도 신뢰할 수 있는 수치일 것으로 판단된다. 합성류 최대마찰력 난류확산의 지체를 고려한 w 를 고려한 최대마찰력 τ_x' 는 전반적으로 마찰력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 파와 해류에 의한 소류사량 산정식 개발에 있어 최소마찰력은 무시하고 일방향흐름의 마찰력과 합성류에 의한 최대마찰력과 평균마찰력만 이용하였다. 실제로 최대마찰력과 최소마찰력의 차이와 최소마찰력의 방향이 파의 진행방향과 같은 방향인가 또는 반대방향인가에 따라 상당한 차이를 보일

것으로 예상되는데, 이들의 영향도 대부분의 경우 최대마찰력과 평균마찰력만을 고려하여 표현될 수 있는 것으로 판단된다

3. 파와 해류에 의한 소류사량 산정

Yoo(1995), 유와 신과 임(2000)은 하천에서의 소류사량 산정에 대하여 Brownlie (1984)가 수집한 실험 자료와의 비교로부터 Einstein, Kalinske, Engleund-Hansen, Meyer-Peter and Muller, Sinohara-Tsubaki, van Rijn 등 기존 산정식들의 특징을 파악하고 각 식의 개선된 근사식들의 특징을 파악하고 각 식의 개선된 근사식을 개발한 바 있다.

Table 3. Bed shear stresses and bed load transport by combined waves and current(Laboratory experiment conducted by Bijker(1967), mm)

No	D mm	V mm/s	H mm	T Sec	k_s mm	I_c N/m^2	τ_u N/m^2	I_{wc} N/m^2	τ_m N/m^2	τ_x N/m^2	τ_x' N/m^2	Φ_c 10^{-4}	Φ_{cw} 10^{-4}
358	140	320	34	0.68	4.6	1.28	0.73	1.34	1.34	2.67	2.71	342	613
332	210	357	55	2.00	3.8	0.98	0.70	1.08	1.08	2.54	0.34	245	495
315	210	400	43	1.57	2.5	0.87	0.57	1.09	1.09	1.92	0.54	192	304
303	200	370	23	1.57	0.5	0.84	0.27	0.90	0.90	1.13	0.49	178	243
319	300	400	64	1.57	2.8	0.78	0.62	1.07	1.07	2.17	0.88	123	252
342	200	319	52	0.68	3.0	0.99	0.55	1.11	1.11	1.99	3.42	56	191
307	300	390	34	1.57	1.3	0.68	0.31	0.80	0.80	1.09	0.97	62	51
335	340	328	73	2.00	3.7	0.59	0.55	0.84	0.84	2.18	0.64	15	177
365	300	300	65	0.68	0.1	0.40	0.14	0.45	0.45	0.58	2.86	58	16
322	380	310	75	1.57	2.4	0.34	0.34	0.55	0.55	1.37	0.87	12.7	143
341	200	241	55	0.68	2.7	0.34	0.28	0.50	0.50	1.21	2.15	3.3	21
318	300	300	55	1.57	2.5	0.30	0.28	0.49	0.49	1.18	0.64	3	66
302	200	300	22	1.57	0.2	0.29	0.16	0.34	0.34	0.61	0.32	3.8	9.6
344	270	241	63	0.68	0.9	0.27	0.15	0.34	0.34	0.55	2.73	0.2	11.4
314	210	280	43	1.57	1.8	0.26	0.27	0.45	0.45	1.02	0.32	4.5	42
329	300	241	64	2.00	3.2	0.20	0.29	0.44	0.44	1.36	0.37	14	180
310	380	320	45	1.57	0.9	0.19	0.15	0.32	0.32	0.55	0.73	8.8	12.9
334	340	213	67	2.00	8.5	0.16	0.47	0.36	0.36	3.01	0.97	0.6	75
324	290	338	87	2.00	2.0	0.30	0.33	0.51	0.51	1.47	0.22	7.0	1260
362	200	390	47	0.68	2.8	1.30	0.63	1.45	1.45	2.21	4.00	926	2446

Table 4에는 개선된 근사식이 요약 정리되어 있다. 제시된 바와 같이 개선식의 주요 공통점은 임계 마찰력의 차 (S-1)을 도입한 점이며, 나머지 비례 관계에 있는 변수에 따라 각 식의 특징이 구별된다. 여기서 S는 활동지수(mobility ratio)라 칭하며, 임계마찰력 대 마찰력의 비이다. 하천에서의 소류사량을 산정할 때는 활동지수 계산에 있어 당연히

평균마찰력을 사용하나, 파와 해류에 의한 소류사량 산정에서는 최대마찰력을 사용하고 나머지 변수중 하나에 평균마찰력을 사용하여 최대마찰력과 평균마찰력의 영향을 모두 고려할 수 있도록 조치하였다. 표 4에는 Brownlie(1981) 자료에 대한 하천 소류사량 산정식과 Bijker(1967) 자료에 대한 파와 해류의 소류사량 산정식을 제시하였다.

최대마찰력을 활동지수 S에 도입하고 평균마찰력을 마찰후루두수 F_c 에 도입하면, Kalinske-Yoo식의 형태로 파와 해류의 합성류 소류사량 산정식은 다음과 같은 형태를 취한다.

$$\Phi_B = \delta(S_x - 1)^2 F_c^2 F_m \quad (23)$$

여기서 Φ_B 는 Meyer-Peter and Muller 무차원수로서

$$\Phi_B = \frac{q_b}{\sqrt{(S-1)g\phi^3}} \quad (24)$$

여기서 q_b 는 단위폭당 소류사이동량, s 는 토사의 상대밀도, ϕ 는 토사의 입경, S_x 는 최대마찰력을 이용한 활동지수로서

$$S_x = \frac{u_x}{u_c} = \frac{F_x}{F_c} \quad (25)$$

u_x 는 최대마찰속도, u_c 는 임계마찰속도, F_x 는 최대마찰후루두수, F_c 는 임계마찰후루두수로서

$$F_c = \frac{u_c}{\sqrt{(s-1)gd}} \quad (26)$$

임계후루두수 F_c 는 토사입경이 주어질 때 R-F수 N의 함수인데 유와 김(1995)은 $N < 6000$ 까지 유효한 단일식을 다음과 같이 제안한 바 있다.

$$F_c = \exp[-2.83 + 0.17 \ln N + \frac{5.3}{2.5 + 0.22N}] \quad (27)$$

여기서 N은 R-F 무차원수로서 다음과 같다.

$$N = \frac{\sqrt{(S-1)g\phi^3}}{\nu} \quad (28)$$

여기서 ν 는 동점성계수이다.

식 (26)에 u_c 대신에 u_x 를 사용하면 F_x 가 되며, 평균마찰속도 u_m 을 사용하면 F_m 이 된다.

Kalinske-Yoo의 소류사량 산정식 (23)에서 하천 소류사인 경우 비례상수 δ 는 Brownlie가 수집한 관측자료의 분석결과 약 25정도로 추정되었다. 그러나 Bijker의 실험자료와 대비하여 비례상수는 25의 1/11.4인 2.2로 줄어들었다. 그림 3에는 조정된 비례상수를 사용하여 산정된 수치와 관측자료의 비교가 제시되어 있다. 비례상수 감소의 원인은 실험조건, 관측방법, 마찰력 산정방법, 모래결의 존재여부 등의 차이점 때문이며 현재 정확한 원인을 분석중이나, 본고에서는 해류만 작용했을 경우의 Bijker실험자료에 적합한 수치와 비교하여 파와 해류의 소류사량 산정식을 검토하였다.

파와 해류에 의한 소류사인 경우 최대마찰력과 평균 마찰력과의 차이, 왕복운동에 의한 잔여분과 위상차 등에 의하여 비례상수 δ 의 변이가 클 것으로 예상된다.

Table 4. Yoo's modified bed load formulars for current-only flow and for combined waves-current flow

공식	Φ_B	against Brownlie data discrepancy ratio (r)			against Bijker laboratory data		
		$0.75 \leq r \leq 1.5$	$0.5 \leq r \leq 2.0$	$0.33 \leq r \leq 3.0$	Φ_C	Φ_{WC}	Φ'_{WC}
EB Y	$60(S-1)^3 F_c^3 F_t$	57.5	82.6	92.9	$1(S-1)^3 F_c^3 F_t$		
KY	$25(S-1)^2 F_c^2 F_m$	70.0	83.7	93.8	$2.2(S-1)^2 F_c^2 F_m$	$0.15(S_x-1)^2 F_c^2 F_m$	$0.8(S_x-1)^2 F_c^2 F_m$
M M Y	$30(S-1)^3 F_c^3$	69.6	85.5	93.8	$6(S-1)^3 F_c^3$	$0.25(S_x-1)^3 F_c^3$	$1.7(S_x-1)^3 F_c^3$
RY	$0.5N^{-0.2}(S-1)^3$	51.9	76.1	87.6	$0.15N^{-0.2}(S-1)^3$		
ST	$23(S^2-1)F_c^2 F_s^{2.5}$	75.2	91.1	96.5	$1(S^2-1)F_c^2 F_s^{2.5}$	$0.15(S_x^2-1)F_c^2 F_s^{2.5}$	$0.7(S_x^2-1)F_c^2 F_s^{2.5}$
Yo o	$1.7N^{-0.2}(S-1)^2 F_m$	58.0	80.0	90.0	$0.2N^{-0.2}(S-1)^2 F_m$	$0.015N^{-0.2}(S_x-1)^2 F_{mp}$	$0.08N^{-0.2}(S_x-1)^2 F_{mp}$

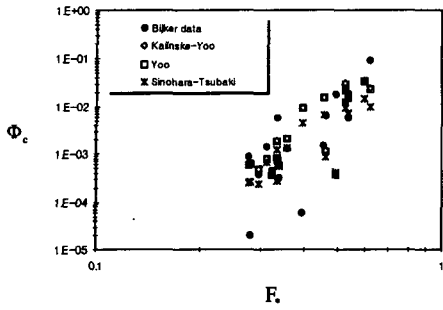
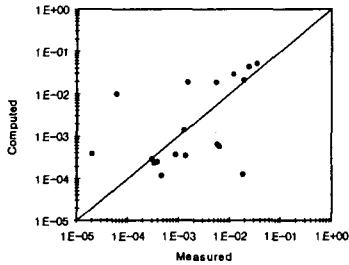


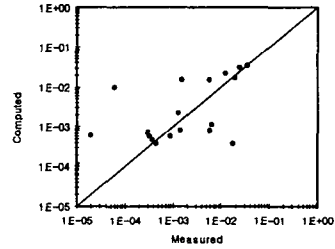
Fig. 3. Φ_C against F_c of current-only flow computed by Kalinske-Yoo eq., Mayer-Peter and Mueller eq. and Yoo 2 eq. (Lab. experiment by Bijker(1966)).

식 (23)과 같이 모든 산정식의 활동지수에는 최대마찰력을 이용하여 유사한 형태의 파-해류

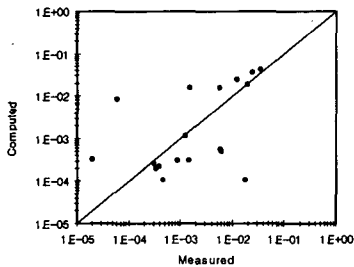
소류사량 산정식을 개선하였다. 비례상수 결정에 사용된 관측자료는 Bijker(1967)의 실험자료를 이용하였다. 개선된 하천소류사량 산정식중 EBY 식, MMY식, RY식에는 활동지수로서 최대마찰력을 사용할 경우 평균마찰력을 도입할 수 없는데 MMY 식의 경우에만 최대마찰력을 이용하여 산정식을 개선하였다. 제시된 바와 같이 MMY 식의 경우 비례상수가 1/24 정도로 작아지는 것으로 나타났다. 이밖에 최대 마찰력과 평균마찰력을 모두 도입할 수 있는 KY 식과 두 가지 형태의 Yoo 식만파-해류 소류사량 산정식을 이용하였다. Bijker의 실험자료 중 소류사량 산정에 이용할 수 있는 자료는 모두 20 가지이나 그 중 No. 324와 No.362로 명기된 2 개의 자료는 소류사량이 비현실적으로 매우 크게 나타나 관측의 결함인 것으로



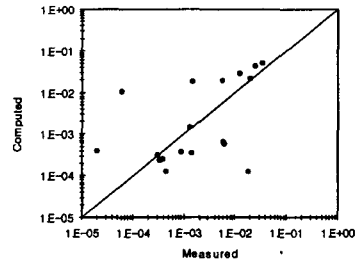
(a) Einstein-Brown-Yoo



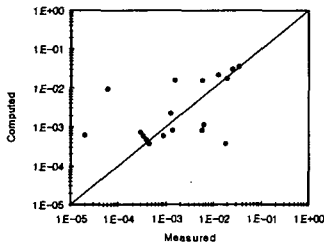
(b) Kalinske-Yoo



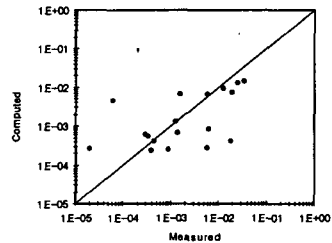
(c) Meyer-Peter and Mueller-Yoo



(d) van Rijn-Yoo



(e) Yoo



(f) Sinohara-Tsubaki

Fig. 4. Φ_C determined by various equation (Lab. experiments by Biker(1967)).

파악되었으며, 분석에서 제외하였다. 이상의 과정으로 분석하여 비례상수를 결정하고 제안된 파-연안류 소류사량 산정식은 Table 4의 마지막 칸에 제시된 바와 같다. 제안된 모든 산정식들은 관측 자료와의 비교로 그림 4와 그림 5에 도시된 바와 같이

거의 유사한 불일치율을 보이고 있다. 그림 6에는 조정된 파마찰계수 불일치율이 높게 나타났는데 이는 일방향 흐름에서 산정한 조정계수 w 의 산정값에서 문제가 발생한 것으로 판단된다.

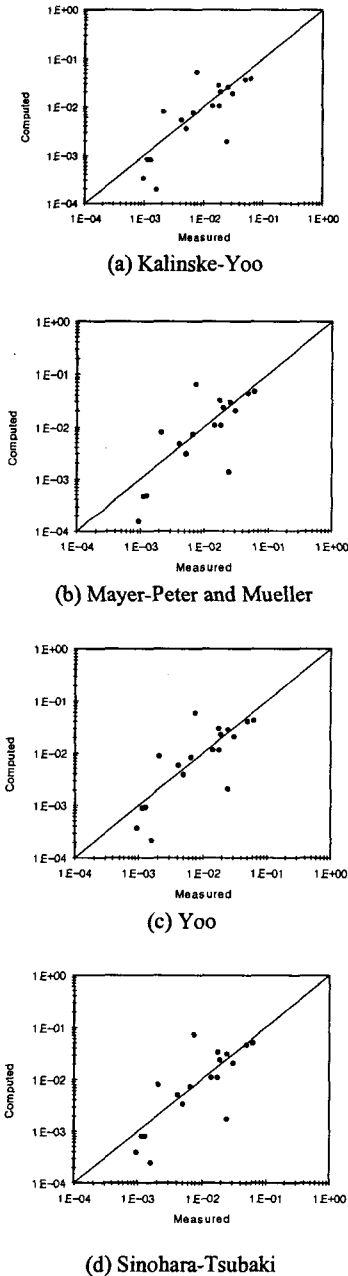


Fig. 5. Φ_{WC} determined by various equation (Lab. experiments by Biker(1967)).

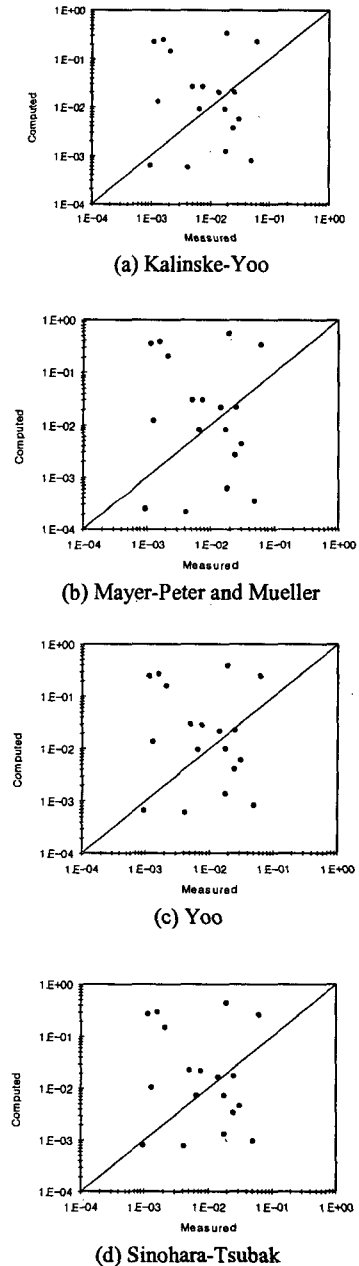


Fig. 6. Φ_{WC} determined by various equation (Lab. experiments by Biker(1967)).

이상의 연구결과로 파와 해류에 의한 합성류 소류사량 산정식으로 비례상수가 단위치에 근접하고 형태가 단순한 Kalinske-Yoo 식, Sinohara-Tsubaki 식, Yoo 식을 최종적인 결과로 제안하며 이들 산정식은 다음과 같다.

Kalinske-Yoo 식

$$\Phi = 0.15(S_x - 1)^2 F_c^2 F_m \quad (29)$$

Sinohara-Tsubaki 식

$$\Phi = 0.15(S_x^2 - 1)F_c^2 F_m^{2.5} \quad (30)$$

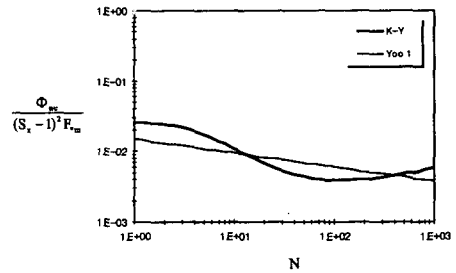
Yoo 식

$$\Phi = 0.015N^{-0.2}(S_x - 1)^2 F_m \quad (31)$$

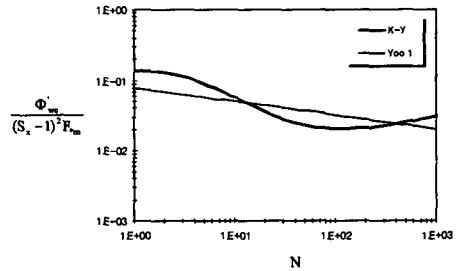
위의 Kalinske-Yoo 식과 Yoo 식을 비교하여 보면 $F_c = \sqrt{0.1N^{-0.2}}$ 의 관계가 성립하는데 이는 Bijker의 실험이 평균입경 0.25 mm인 동일토사에서 이루어졌기 때문이다. 즉, $\phi = 0.25\text{mm}$ 일 때 $N = 15.9$ 이며, 식 (25)로 산정된 $F_c = 0.228$ 는 $F_c = \sqrt{0.1N^{-0.2}} = 0.239$ 과 유사함을 알 수 있다. 표 2에 도시된 바와 같이 하천 소류사량 산정식에서 임계마찰력을 고려한 Sinohara-Tsubaki 식과 Kalinske-Yoo 식 그리고 Yoo 식은 전반적으로 향상된 정밀도를 보이고 있다. 이는 파와 연안류에 의한 소류사량 산정식에서도 임계마찰력이 중요한 요소로 판단된다.

그림 7에는 파와 해류의 합성류에 의한 $\Phi_{wc}/(Z_x - 1)^2 F_m$ 과 $\Phi_{wc}'/(Z_x - 1)^2 F_m$ 을 여러 N에 대하여 Kalinske-Yoo 식과 Yoo 식으로 구한 수치가 비교되어 있다. 도시된 바와 같이 $N = 16$ 에 근접한 범위에서 두 산정식은 유사한 수치를 제공하나 이 범위 밖에서 상당한 차이점을 보임을 알 수 있다. $N < 16$ 의 범위에서 Kalinske-Yoo 식은 Yoo 식에 비하여 최대 50% 가량 과대 산정하는 경향이 보이며, $16 < N$ 의 범위에서 Kalinske-Yoo 식은 Yoo 식에 비하여 최소 40% 가량 과소 산정하는 경향이 보인다. 이는 Kalinske-Yoo 식에는 Yoo 식과 달리 소류사량 산정에 있어서 임계마찰력의 영향이 중요한 요인으로 작용했기 때문이다. 그리고 Yoo 식은 소류사 이동 깊이나 평균농도 산정식에 이용된 van Rijn 관측

자료의 토사입경이 0.2 mm로부터 1.7 mm까지 다양한 크기의 토사에 대한 자료에 기초하여 개발된 산정식 이므로 Kalinske-Yoo 식보다 광범위한 조건에서 유효할 것으로 추론한다. 또한 MMY (Meyer-Peter and Muller - Yoo)식은 Bijker의 실험자료에는 다른 산정식들과 유사하게 양호한 산정결과를 보이나 산정식에 평균마찰력이 결여되어 있으므로 파조건 보다 해류가 우세한 조건에 적합치 않을 것으로 여겨지며, 이로서 MMY 식은 일반성이 상실된 것으로 판단된다.



(a) 기존식



(b) 조정식

Fig. 7. $\Phi_{wc}/(S_x - 1)^2 F_m$ against N computed by Kalinske-Yoo eq and Yoo eq.

4. 결 론

파와 해류에 의한 소류사량 산정식으로 개선된 하천 소류사량 산정식과 파와 해류의 합성류 평균마찰력과 최대마찰력을 모두 응용한 관계식을 개발하였다. 세 요인을 모두 고려할 때 기존식으로 Kalinske-Yoo 식, Sinohara-Tsubaki 식과 Yoo 식이 다른 식들보다 형태의 단순성이나 비례상수가 단위치에 근접한다는 점으로 보아 유리한 것으로 판단된다.

개발된 산정식들은 Bijker의 관측자료와 비교하여

매우 양호한 정밀성을 보였다. 그러나 산정식들에 포함된 비례상수가 Brownlie 자료와 대비한 수치와 Bijker 자료와 대비하여 구한 수치 사이에 상당한 차이를 보이기 때문에 보다 포괄성이 확보된 파와 해류에 의한 최대마찰력 산정식이 요구되었다. 이를 위하여 난류확산의 지체를 고려한 조정계수를 포함한 조정식을 적용한 결과 비례계수는 증가하였으나 관측자료와의 일치율이 낮게 나타났다. 이는 일방향흐름에서 개발된 조정계수의 적용한계로 인해 부정확한 결과를 얻은 것으로 판단된다.

하천소류사랑 산정식들의 재수정이 필요하며, 동시에 모래결 영향에 의한 소류사랑 감소를 고려키 위하여 연흔상수의 도입이 필요할 것이다. 또한 토사의 평균입경 0.25 mm 에 근접한 토사에 대하여는 Kalinske-Yoo 식과 Yoo 식이 거의 유사한 산정치를 제공하나 토사입경이 다를 때 상당한 차이를 보이므로 보다 광범위하게 유효한 합성류 소류사랑 산정식 개발을 위하여는 다양한 크기의 토사를 이용한 수조실험이나 현장관측자료가 요구된다.

참고문헌

- 유동훈, 이동수, 1992. 이동상 해저면에서의 마찰력 한국해양 해양공학회지, 4(2): 63-71.
- 유동훈, 1993. 전난류에서의 파마찰계수, 한국해양 해양공학회지, 5(2): 51-57.
- 유동훈, 1994. 전난류에서 파랑과 해류의 마찰력, 한국해양해양공학회지, 6(3): 226-233.
- 유동훈, 1995. 파와 해류에 의한 소류사 이동, 한국해양해양공학회지, 7(3): 257-264
- 유동훈, 이민호, 1999. 대수형 개수로 마찰계수 산정식, 대한토목학회 논문집, 19(II-2): 159-167.
- 유동훈, 2000. 수리학, 세론, pp. 100-104.
- 유동훈, 신승호, 임학수, 2000. 하천 소류사 이동량의 산정, 한국수자원학회 논문집, 33(6): 711-723.
- 유동훈, 김인호, 2001. 천해파와 해류의 해저면 마찰력, 한국해양해양공학회지(심의회).
- Bijker, E.W., 1967. *Some consideration about scales for costal models with movable bed*, Delft Hydraulics Lab., Publ., No. 50.
- Browlie, W.R. (1981). "Compilation of alluvial channel data, laboratory and field.", Report KH-R- 438, W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Jonsson, I.G., 1967. Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Int. Conf. *Coastal Engineering*, ASCE, Tokyo, pp. 127-148.
- 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 Hydrod. and Hydraulic Eng., Tech. Univ. of Denmark, Series Paper No. 20.*
- Van Rijn, L. C., 1984. Sediment transport Part I : Bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No10, pp1431 -1456
- Yoo, D., 1989, Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow, *Coastal Engineering*, 13, pp. 325-340