

파와 해류에 의한 토사이동

유 동 훈*

1. 서 론

일방향 흐름에 표면파가 중첩하여 작용할 때 해저면 마찰력의 증가로 토사이동량의 증대가 예상된다. 표면파는 왕복운동 특성을 갖고 있으며, 유속과 해저전단력간의 위상차와 해저전단력과 토사이동발생 시각간의 위상차가 존재하기 때문에 토사이동량 산정에 많은 어려움이 따른다. 그러나 이렇게 복잡한 현상이 내포되어 있음에도 불구하고 일반적인 기법으로 하천 토사이동량 산정식을 수정하거나 비례상수를 재조정하여 파와 해류에 의한 토사이동량을 산정해 왔다. 최근 Woo와 Yoo(1990), Lee와 Lee(1992) 등은 기존의 하천 소류사량 산정식들을 실험자료나 현장관측자료에 비교하여 각 산정식의 유효적용범위, 특징과 우열 등을 판단하고자 하였으며, 유(1994)는 각 산정식에 내포된 현상학적 의미를 파악하고 각 산정식의 개선책을 제안하였다. 한편 Yoo(1995)는 van Rijn(1984)식의 우수성을 인지하고 실험자료와 보다 잘 일치하는 산정식을 개발하였으며, 유와 문(1995)은 실험자료와의 비교로부터 각 산정식의 특징을 파악하고 각 식의 개선방안을 마련한 후 실험자료와의 회귀분석으로 보다 우수한 산정식들을 개발하였다.

토사이동량 산정에 있어 파와 해류가 동시에 작용할 때 고려해야 될 사항은 여러가지가 있다. 모래결(ripple)의 발생 여부와 모래결 주위에서의 와운동 특성, 파운동의 비대칭성, 각 작용력과 결과로 나타나는 현상간의 위상차 등이다. 이러한 미세 수리특성에 대한 현상 파악은 매우 지난할 뿐만아니라 토사이동에 미치는 영향도에 대하여 단일식으로서의 정량화가 거의 불가능한 것으로 인식된다. 따라서 파와 해류가 해저면에 미치는 작용특징을 어느 정도 대표할 수 있으며, 정량화가 단순한 관련변수를 도출하여 하천토사량 산정식에 도입하는 방법이 일반적으로 흔히 사용되는 방법이다. Bijker(1966)는 Kalinske-Frijlink의 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-Frijlink식, Einstein식, Shields식 등을 적용하여 Bijker의 실험자료와 비교하여 보았으나 계산결과는 크게 만족스럽지 못하였다.

파와 해류가 동시에 작용하여 토사가 이동될 때, 증폭된 평균마찰력은 토사이동에 중요한 요인으로 작용하지만 이에 못지 않게 중요한 요인은 최대마찰력과 최저마찰력이다. 특히 최대마찰력은 임계세굴력과 대비하여 평균마찰력과 버금갈 정도로 중요한 요인으로 판단된다. 본고는 유와 문(1995)이 개선하여 제안한 하천소류사량 산정식에 평균마찰력과 최대마찰력을 도입하여 산정식을 개발하고자 하였다. 파와 해류에 의한 평균마찰력과 최대마찰력의 계산에는 유(1994)가 10여년간 개선 보완한 BYO 모형을 이용하였으며, 파와 해류에 의한 토사이동에 관한 관측자료로 Rijk(1966)의 실험자료를 이용하여 제 산정식의 관련상수를 결정하였다.

2. BYO모형에 의한 평균마찰력과 최대마찰력

Bijker (1966, 1967)는 파와 해류의 마찰력을 계산하기 위하여 대수분포식과 접하는 점에서 파의 유속과 해류의 유속을 합성하는 방법을 개발하였다. 이후 유동훈은 합성시 난류확산의 증폭에 따라 해류유속이 감속하는 점을 고려하고 계산과정에 대두되는 여러 해를 양해법으로 구하는 방안을 강구하는 일련의 논문을 발표하였으며(Yoo, 1989; 유, 1994), 이를 BYO 모형이라 일컫는다. BYO모형에 의하면 평균마찰력과 최대마찰력은 다음과 같이 산정된다.

* 아주대학교 토목공학과 부교수

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

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

여기서 해류만의 마찰력 $\tau_c = \rho C_c U^2$, C_c 는 해류의 마찰계수, U 는 해류의 수심평균 유속, τ_m 는 평균마찰응력, τ_x 는 최대마찰응력이고 증폭계수 β , x 는 다음과 같이 산정된다.

$$\beta = a^2(a + b\mu_c) \quad (3)$$

$$x = a^2 + \mu_a^2 + 2a\mu_a \sin \theta \quad (4)$$

여기서 상수 a , b , c 는 합성각 θ 의 함수이며 [참조; Yoo (1989)], $\mu_a = \mu/a$, $\mu = u_{Bw}/u_{Bc}$, u_{Bw} 는 Bijker point에서의 최대파유속, u_{Bc} 는 Bijker point에서의 해류유속이고,

$$\mu = \sqrt{\frac{C_w}{C_c} \frac{u_{wm}}{U}} \quad (5)$$

C_w 는 파의 마찰계수, u_{wm} 은 파의 해저면 최대유속이며, α 는 해류유속의 감소율로서 다음 식으로 산정된다.

$$\alpha = (0.08 + (1.9 - 0.6\theta^{0.25})\zeta^{0.35})\mu^{-1} \quad \mu > \mu_c \quad (6)$$

$$\alpha = \tanh[A(\ln(\mu_c/\mu))^{1.2} + C] \quad \mu < \mu_c \quad (7)$$

여기서

$$\mu_c = \exp(1.7 + 0.35 \ln \zeta) \quad (8)$$

$$A = 0.65 - 0.18\theta^{0.25} - 0.06(1 - 0.6\theta^{0.25})\zeta^{0.5} \quad (9)$$

$$C = 0.4 - 0.14\theta^{0.25} \quad (10)$$

파마찰계수 C_w 는 다음과 같은 Swart의 양해법식을 이용하여 산정하며,

$$C_w = \exp[5.213 \min(2, \frac{k_s}{A_p})^{0.194} - 6.67] \quad (11)$$

k_s 는 유효조고이고 A_p 는 파운동의 해저면에서 최대이동거리이다. 해류의 마찰계수 C_c 는 Keulegan의 대수분포식 가정하에 유도된 산정식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{C_c}} = \frac{1}{k} \left[\ln \frac{d}{k_s} + B \right] \quad (12)$$

d 는 수심이며, Keulegan 가정에 의하면 $B = 2.40$ 이다. 유(1995)는 Bijker의 광폭수로에서 관측된 실험자료에 대비하여 $B = 2.5$ 가 적합한 수치인 것으로 산정하였으며 이 수치를 적용하여 고정상 수로인 경우 해류만의 마찰력이나 파와 해류의 마찰력 모두 상당히 정확하게 산정할 수 있었다.

유와 이(1992)는 Bijker가 실험한 이동상 저면 조건의 평균마찰력에 대하여 모래결의 형상

과 크기를 Nielsen(1979)의 경험식을 사용하여 추정한 후 유효조고를 산정하고 평균마찰력을 계산하였으나 전반적으로 실험자료에 비하여 과소산정하는 경향을 보였으며, 이의 원인으로 토사이동에 의한 에너지손실 영향이 있는 것으로 파악하였다. 최근 유(1995)는 해류 마찰계수 공식 (12)에 제시된 바와 같이 Keulegan식을 수정하여 고정상에 대하여는 평균마찰력을 아주 정확히 예측한 바 있으며, 유와 김(1995)은 모래결의 형상과 크기를 Grant and Madsen(1984)의 경험식을 이용하고 유효조고 산정의 비례상수를 조정하여 유효조고를 보다 정확히 추정하는 것으로 추론된다. 그러나 보다 개선된 수정식들을 사용하여도 Bijker의 이동상 조건에 대한 평균마찰력은 근접하게 예측할 수 없었다. 이의 주 원인은 모래결이 생성 발달할 때 유효조고의 산정이 매우 부정확하기 때문인 것으로 파악되는데 모래결형상에 대한 산정식이 파조건에 대하여 개발한 것이므로 이에 따른 오차가 큰 것으로 판단된다. 본 연구는 토사이동량 산정에 주안점을 두었기 때문에 평균마찰력이 관측자료와 일치할 때까지 유효조고를 시산하여 결정하고, 이렇게 시산하여 결정된 유효조고 조건으로 산정된 평균마찰력과 최대마찰력을 이용하여 소류사양량 산정식을 개발하였다. Table 1에는 Bijker(1966)의 이동상 파-해류 실험의 각 조건에 대하여 이러한 방법으로 유효조고를 결정한 후 산정된 평균마찰력과 최대마찰력이 제시되어 있다.

(Laboratory experiments conducted by Bijker(1966))

No	d (mm)	V (mm/s)	H (mm)	k_s (mm)	I_c (N/m)	τ_u (N/m)	I_{wc} (N/m)	τ_m (N/m)	τ_x (N/m)	τ_n (N/m)	ϕ_c 10^{-4}	ϕ_{wc} 10^{-4}
358	140	320	34	48.5	1.28	1.29	1.34	1.34	2.02	0.33	342	613
332	210	357	55	19.5	0.98	0.92	1.08	1.07	3.85	2.66	245	495
315	210	400	43	13.4	0.87	0.93	1.09	1.09	2.50	0.96	192	304
303	200	370	23	15.5	0.84	0.86	0.90	0.90	1.40	0.16	178	243
319	300	400	64	15.5	0.78	0.86	1.07	1.08	3.03	1.69	123	252
342	200	319	52	28.2	0.78	0.88	0.91	0.91	2.15	0.77	56	191
307	300	390	34	11.2	0.66	0.73	0.80	0.80	1.43	0.15	62	51
335	340	328	73	22.0	0.59	0.67	0.84	0.85	3.86	3.07	15	177
365	300	300	65	11.5	0.40	0.43	0.45	0.45	0.63	0.18	58	16
322	380	310	75	10.5	0.34	0.42	0.55	0.55	1.99	1.39	12.7	143
341	200	241	55	19.5	0.34	0.43	0.50	0.50	1.66	1.07	3.3	21
318	300	300	55	8.0	0.30	0.38	0.50	0.49	1.45	0.86	3	66
302	200	300	22	3.2	0.29	0.33	0.34	0.34	0.55	0.04	3.8	9.6
344	270	241	63	11.0	0.27	0.31	0.34	0.34	0.91	0.45	0.2	11.4
314	210	280	43	6.9	0.26	0.36	0.45	0.45	1.29	0.74	4.5	42
329	300	241	64	15.0	0.20	0.33	0.44	0.44	2.48	2.14	14	180
310	380	320	45	2.8	0.19	0.30	0.32	0.32	0.59	0.07	8.8	12.9
334	340	213	67	17.0	0.16	0.26	0.36	0.36	2.52	2.29	0.6	75

3. 파와 해류에 의한 소류사양 산정식

유와 문(1995)은 하천에서의 소류사양량에 대하여 Brownlie(1984)가 수집한 실험자료와의 비교로부터 Einstein, Kalinske, Engelund-Hansen 등 각 산정식의 특징을 파악하고 각 식의 개선된 근사식을 개발한 바 있다. Table 2에는 개선된 근사식이 요약 정리되어 있다. 제시된 바와 같이 개선식의 주요 공통점은 임계마찰력과의 차 ($Z-1$)을 도입한 점이며, 나머지 비례관계에 있는 변수에 따라 각 식의 특징이 구별된다. 여기서 Z 는 활동지수(mobility ratio)라 칭하며, 마찰력 대 임계마찰력의 비이다. 하천에서의 소류사양을 산정할 때는 활동지수 계산에 있어 마찰력은 당연히 평균마찰력을 사용하나, 파와 해류에 의한 소류사양 산정에서는 최대마찰력을 사용하고 나머지 변수중 하나에 평균마찰력을 사용하여 최대마찰력과 평균마찰력의 영향을 모두 고려

한다.

Table 2. Yoo's modified bed load formulas

공 식	Φ	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_{cw}
EBY	$60(Z-1)^3 F_{*c}^3 F_t$	57.5	82.6	92.9	$2(Z-1)^3 F_{*c}^3 F_t$	
KY	$25(Z-1)^2 F_{*c}^2 F_t$	70.0	83.7	93.8	$0.83(Z-1)^3 F_{*c}^3 F_t$	$0.03(Z_x-1)^3 F_{*c}^3 F_{*m}$
EHY	$0.1(Z-1)^{1.5} F_{*c}^{1.5} F_t^2$	78.1	92.3	97.0	$0.0033(Z-1)^{1.5} F_{*c}^{1.5} F_t^2$	
MMY	$30(Z-1)^3 F_{*c}^3$	69.6	85.5	93.8	$(Z-1)^3 F_{*c}^3$	$0.01(Z-1)^3 F_{*c}^3$
RY	$0.5N^{-0.2}(Z-1)^3$	51.9	76.1	87.6	$0.017N^{-0.2}(Z-1)^3$	
Yoo 1	$1.5N^{-0.2}(Z-1)^2 F_t$	61.6	82.6	91.4	$0.05N^{-0.2}(Z-1)^2 F_t$	$0.015N^{-0.2}(Z_x-1)^2 F_{*m}$
Yoo 2	$0.12N^{-0.2}(Z-1)^2 F_t$	70.5	85.8	92.9	$0.004N^{-0.2}(Z-1)^2 F_t$	$0.0002N^{-0.2}(Z_x-1)^2 F_t$
Yoo 3	$0.25N^{-0.2}(Z-1)^{1.5} F_t F$	75.2	88.2	94.7	$0.0083N^{-0.2}(Z-1)^{1.5} F_t F$	$0.004N^{-0.2}(Z_x-1)^{1.5} F_{*m} F$

Kalinske-Yoo식의 형태로 파와 해류의 소류사량 산정식을 다음과 같은 형태를 취한다.

$$\Phi = \delta(Z_x-1)^2 F_{*c}^2 F_{*m} \quad (13)$$

여기서 Φ 은 Meyer-Peter and Muller 무차원수로서

$$\Phi = \frac{q}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (14)$$

q 는 단위폭당 소류사이동량, s 는 토사의 상대밀도, d 는 토사의 입경, Z_x 는 최대마찰력을 이용한 활동지수로서

$$Z_x = \frac{u_{*x}}{u_{*c}} = \frac{F_{*x}}{F_{*c}} \quad (15)$$

u_{*x} 는 최대마찰속도, u_{*c} 는 임계마찰속도, F_{*x} 는 최대마찰후루드수, F_{*m} 은 평균마찰후루드수, F_{*c} 는 임계마찰후루드수로서

$$F_{*c} = \frac{u_{*c}}{\sqrt{(s-1)gd}} \quad (16)$$

상기식에 u_{*c} 대신에 u_{*x} 를 사용하면 F_{*x} 가 되며, 평균마찰속도 u_{*m} 을 사용하면 F_{*m} 이 된다. Kalinske-Yoo의 소류사량 산정식 (13)에서 하천소류사인 경우 비례상수 δ 는 Brownlie가 수집한 관측자료의 분석결과 약 25 정도로 산정되었다. 그러나 Bijker의 실험자료와 대비하여 비례상수는 25의 1/30인 0.83으로 줄어들었다. Figure 1에는 조정된 비례상수를 사용하여 산정된 수치와 관측자료의 비교가 제시되어 있다. 비례상수 감소의 정확한 원인은 현재 분석중이며, 본고에서는 해류만 작용했을 경우의 Bijker 실험자료에 적합한 수치와 비교하여 파와 해류의 소류사량 산정식을 검토한다. 파와 해류에 의한 소류사인 경우 최대마찰력과 평균마찰력과의 차이, 왕복운동에 의한 잔여분과 위상차 등에 의하여 비례상수 δ 의 변이가 클 것으로 예상된다.

식 (13)과 같이 모든 산정식에 활동지수에는 최대마찰력을 이용하여 유사한 형태의 파-해류 소류사량 산정식을 개발하였다. 비례상수 결정에 사용된 관측자료는 Bijker(1966, 1967)의 실험자료를 이용하였다. 개선된 하천소류사량 산정식중 EBY식, MMY식, RY식에는 활동지수로서

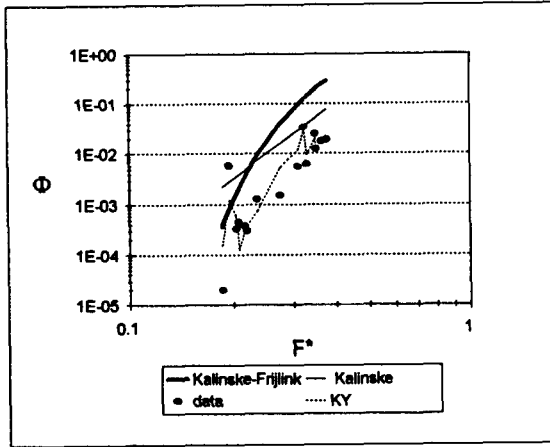


Fig.1 Φ against F_* by current-only flow
(Lab. experiments by Bijker(1966))

최대마찰력을 사용할 경우 평균마찰력을 도입할 수 없는데 MMY식의 경우에만 최대마찰력을 이용하여 산정식을 개발하여 보았다. 제시된 바와 같이 MMY식의 경우 비례상수가 1/100정도로 매우 작아지는 것으로 나타났다. 이밖에 KY식과 나머지 세가지 형태의 Yoo식만 파-해류 소류사량 산정식 개발에 이용하였다. Bijker의 실험자료중 소류사량 산정에 이용할 수 있는 자료는 모두 32가지이나 그중 2개는 소류사량이 비현실적으로 매우 크게 나타나 분명히 관측의 결함으로 파악되어 분석에서 제외하였다. 이상의 과정으로 분석하여 비례상수를 결정하고 제안된 파-해류 소류사량 산정식은 Table 2의 마지막 칸에 제시된 바와 같다. 제안된 모든 산정식들은 관측자료와의 비교로 Fig.2에 도시된 바와 같이 거의 유사한 불일치율을 보이고 있다.

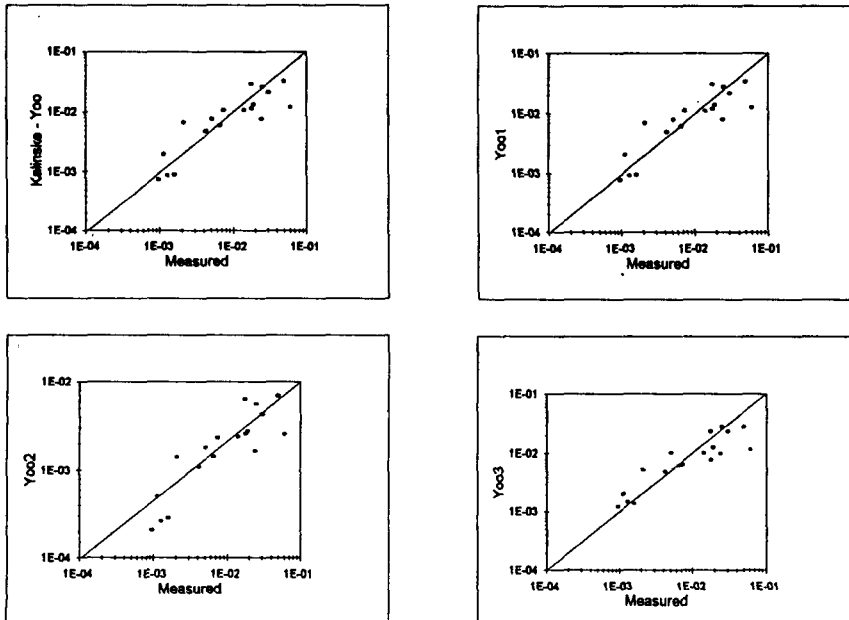


Fig.2 Φ determined by various equations
(Lab. experiments by Bijker(1966))

4. 결론 및 토의

파와 해류에 의한 소류사량 산정식으로 하천소류사량 산정식을 응용하여 개발하였다. 파와 해류가 해저면에 동시에 작용할 때 평균마찰력뿐만 아니라 최대마찰력도 중요할 것으로 판단하여 두 요인을 모두 포함하는 관계식을 개발하였으며, 두 요인을 모두 고려할 때 기준식으로 Kalinske-Yoo식과 Yoo의 세가지 산정식이 다른 식 보다 유리한 것으로 판단된다. 개발된 산정식들은 Bijker의 관측자료와 비교하여 매우 양호한 정밀성을 보였다. 그러나 유와 문(1995)의 개선된 산정식들에 포함된 비례상수가 Brownlie 자료와 대비한 수치와 Bijker 자료와 대비하여 구한 수치 사이에 상당한 차이를 보이기 때문에 보다 포괄성이 확보된 하천소류사량 산정식 개발이 요구된다.

5. 참고 문헌

- 유동훈, 1993, 전난류에서의 파마찰계수, 한국해양해양공학회지, 5(2): 51-57.
- 유동훈, 1994, 전난류에서 파랑과 해류의 마찰력, 한국해양해양공학회지, 6(3): 226-233.
- 유동훈, 1994, 소류사량 산정의 개선책, 한국해양해양공학회 학술발표 논문초록집: 53-57.
- 유동훈, 김창식, 1995, 불규칙파에 의한 연안류, 한국해양해양공학회지, 7(1): 12-23.
- 유동훈, 문성원, 1995, 소류사량 산정식 검토 및 개선, 대한토목학회 학술발표회 발표예정.
- 유동훈, 이동수, 1992, 이동상 해저면에서의 마찰력, 한국해양해양공학회지, 4(2): 63-71.
- Bijker, E.W., 1966, The increase of bed shear in a current due to wave motion, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., ASCE, 1: 746-765.
- Brownlie, W.R., 1981, Compilation of alluvial channel data, laboratory and field, W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resource, Report KH-R-438, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Einstein, H.A., 1942, Formulas for the transportation of bed load, Trans. Am. Soc. Civil Eng., 107.
- Engelund, F. and Hansen, E., 1967, A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Technisk Forlag, Copenhagen, 62 pp.
- Grant, M.D. and Madsen, O.S., 1982, Movable bed roughness in oscillatory flow, J. Geophys. Research, 87(1): 469-481.
- Kalinske, A.A., 1947, Movement of sediment as bed-load in rivers, Trans. Amer. Geophysical Union, 28-4.
- Lee, K.S. and Lee, N.J., 1992, Comparative study of selected sediment-transport formulas, Abstracts of papers for annual meeting of Korean Society of Civil Engineers: 121-124.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R., 1948, Formulas for bed load transport, Proc. 2nd IAHR meeting, Stockholm.
- Nielsen, P., 1979, Some basic concepts of wave sediment transport, Series Paper 20, Inst. of Hydrod. and Hydraulic Eng., Technical University of Denmark.
- Rijn, L.C. van, 1984, Sediment transport, part I: bed load transport, J. Hydraulic Eng., ASCE, 110(10): 1431-1455.
- Swart, D.H., 1976, Predictive equations regarding coastal transports, 15th Int. Conf. Coastal Eng., Hawaii: 1113-1132.
- Woo, H. and Yoo, K., 1990, Performance test of some selected sediment transport formulas, Proc. 90 Nat. Hydr. Eng. Conf., ASCE, San Diego, Calif., Vol. 1: 694-699.
- Yoo, D., 1989, Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow, Coastal Eng., 13: 325-340.