

## 波와 海流에 의한 掃流砂 移動 Bed Load Transport by Waves and Current

유 동 훈\*  
Dong Hoon Yoo\*

**要 旨** : 파와 해류가 동시에 작용할 때 소류사 이동에 미치는 제 요인을 파악하고, 합성류 소류사량 산정을 위하여 이들 제 요인중 평균마찰력과 최대마찰력을 모두 고려하기 위하여 하천 소류사량 산정식들중 적절한 형식 몇가지를 선택하였다. 합성류에 의한 최대마찰력과 평균마찰력의 산정을 위하여 BYO 모형을 적용하였으며, 일방향흐름 마찰계수 산정식은 수정 Keulegan식을 사용하였고 등가조고는 일방향흐름 관측결과와 일치하는 마찰력이 산정되는 수치를 택하였다. 각 소류사량 산정식에 도입된 비례상수는 Bijker(1966)의 수조관측자료에 적용하여 결정하였으며, 최종 결과로부터 각 산정식을 비교하여 논하였다.

**Abstract** [ ] Various factors are investigated on the bed load transport driven by waves and current, and proper forms of bed load transport formulas mainly used in river hydraulics are chosen for the estimation of combined flow bed load transport after considering the additional factors. The BYO Model is employed for the computation of maximum bed shear stress and mean bed shear stress of the combined flow. The friction factor of uni-directional flow is estimated by using modified Keulegan equation, and equivalent roughness height is determined by obtaining correct answer for the bed shear stress of uni-directional flow. Empirical constant in each bed load formula is determined by applying it to Bijker's laboratory data of bed load transport by waves and current, and the formulas obtained are discussed on their final forms with the values of empirical constants.

### 1. 서 론

일방향 흐름에 표면파가 중첩하여 작용할 때 해저면 평균마찰력이 증가하고 파의 일주기동안 발생하는 최대마찰력은 평균마찰력 보다 몇배이상 크기 때문에 토사이동량의 상당한 증대가 예상된다. 표면파는 왕복운동 특성을 갖고 있으며, 유속과 해저전단력간의 위상차와 해저전단력과 토사이동발생 시각간의 위상차가 존재하기 때문에 토사이동량 산정에 많은 어려움이 따른다. 이러한 위상차는 파의 진행방향과 같은 전진운동시 세굴되었던 토사가 후진운동시에만 이동되어 잔여이동량은 후진방향으로만 작용하는 등 토사이동양식의 복잡성을 더하여 준다. 그러나 이렇게 복잡한 현상이 내포되어 있음에도 불구하고 일반적인 기법으로 하천 토사이동량 산정식을 수정하거나 비례상수를 재조정하여 파와 해류에 의한 토사이동량을

산정해 왔다. 이러한 기법은 천해파의 조건이 전방과 후방 모두 세굴입계조건을 충분히 초과할 때 성립하는데 본 연구도 이러한 조건에 한정하여 파와 해류에 의한 합성류 소류사량 산정식 개발에 주안점을 두었다.

최근 Woo와 Yoo(1990), Lee와 Lee(1992) 등은 기존의 하천 소류사량 산정식들을 실험자료나 현장관측자료에 비교하여 각 산정식의 유효적용범위, 특징과 우열 등을 판단하고자 하였으며, 비교대상 산정식들은 Einstein식, Engelund-Hansen식, van Rijn식, Yang식 등 10여개에 이르렀다. 한편 유(1994)는 각 산정식에 내포된 역학적 의미를 파악하고 각 산정식의 개선책을 제안하였으며, Yoo(1995)는 van Rijn(1984)식의 우수성을 인지하고 그가 제안한 관계식중 토사이동속도 산정식이 실험자료와 잘 일치하지 않음을 발견하고 보다 잘 일치하는 관계식을 개발하여 수정식을 제안

\*아주대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea)

하였다. 또한 유와 문(1995)과 유(1995b)는 실험자료와의 비교로부터 각 산정식의 특징과 결함을 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 어려울 뿐만아니라 토사이동에 미치는 영향도에 대하여 단일식으로서의 정량화가 매우 곤란한 것으로 인식된다. 따라서 합성류 소류사량 산정에 있어 파와 해류가 해저면에 미치는 작용특징을 어느 정도 대표할 수 있으며, 정량화가 용이한 관련 변수를 도출하여 하천토사량 산정식에 도입하는 방법이 일반적으로 흔히 사용되는 방법이다. Bijker(1966)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-Frijlinke식, 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 최소마찰력이다. 특히 최대마찰력은 입계세굴력과 대비하여 평균마찰력과 버금갈 정도로 중요한 요인으로 판단된다. 본고는 유와 문(1995)과 유(1995b)가 개선하여 제안한 하천소류사량 산정식에 평균마찰력과 최대마찰력을 도입하여 이들 두 요인을 모두 고려할 수 있는 하천소류사량 산정식을 택한 후 합성류 소류사량 산정식을 개발하고자 하였다. 파와 해류에 의한 평균마찰력과 최대마찰력의 계산에는 유(1994)가 10여년간 개선 보완한 BYO 모형을 이용하였으며, 일방향흐름 마찰계수 산정식은 수정 Keulegan식을 사용하였고 등가조고는 일방향흐름 관측결과와 일치하는 마찰력이 산정되는 수치를 택하였다. 파와 해류에 의한 토사이동에 관한 관측자료로 Bijker(1966)의 실험자료를 이용하여 선택된 제 산정식의 관련상

수를 결정하였다.

## 2. BYO모형에 의한 합성류 마찰력

Bijker(1966)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; 유, 1994), 평균마찰력 이외에 최대마찰력과 절대치의 평균을 구하는 산정식들도 개발된 바 있다(Yoo, 1989). 이를 BYO 모형이라 일컫는데, BYO모형에 의하면 평균마찰력, 최대마찰력과 최소마찰력은 다음과 같이 산정된다.

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

$$\tau_r = \kappa \tau_c \quad (2)$$

$$\tau_n = \xi \tau_c \quad (3)$$

여기서 해류 또는 일방향흐름의 마찰력  $\tau_c = \rho C_c U^2$ ,  $C_c$ 는 해류 또는 일방향흐름의 마찰계수,  $U$ 는 해류의 수심평균 유속,  $\tau_m$ 는 평균마찰응력,  $\tau_r$ 는 최대마찰응력,  $\tau_n$ 는 최소마찰응력이고 증폭계수  $\beta$ ,  $\kappa$ ,  $\xi$ 는 다음과 같이 산정된다.

$$\beta = \alpha^2(a + b\mu_\alpha^c) \quad (4)$$

$$\kappa = \alpha^2 + \mu_\alpha^2 + 2\alpha\mu_\alpha \sin\theta \quad (5)$$

$$\xi = \alpha^2 - \mu_\alpha^2 - 2\alpha\mu_\alpha \sin\theta \quad (6)$$

여기서 상수  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 합성각  $\theta$ 의 함수이며(Yoo, 1989),  $\mu_\alpha = \mu/\alpha$ ,  $\mu = u_{Bw}/u_{Bc}$ ,  $u_{Bw}$ 는 Bijker Point에서의 최대파유속,  $u_{Bc}$ 는 Bijker Point에서의 해류유속이고, 각 흐름의 마찰계수가 주어질 때 다음과 같이 산정된다.

$$\mu = \sqrt{\frac{C_w}{C_c}} \frac{u_{wm}}{U} \quad (7)$$

$C_w$ 는 파의 마찰계수,  $u_{wm}$ 은 파의 해저면 최대유속이며,  $\alpha$ 는 해류유속의 감소율로서 다음의 양해법 근사식으로 산정된다.

$$\alpha = (0.08 + (1.9 - 0.60^{0.25})\zeta^{0.35})\mu^{-1} \quad \mu > \mu_c \quad (8)$$

$$\alpha = \tanh[A(\ln(\mu_c/\mu)^{1.2} + C)] \quad \mu < \mu_c \quad (9)$$

여기서

$$\mu_c = \exp(1.7 + 0.35 \ln \zeta) \quad (10)$$

$$A = 0.65 - 0.180^{0.25} - 0.06(1 - 0.60^{0.25})\zeta^{0.5} \quad (11)$$

$$C = 0.4 - 0.140^{0.25} \quad (12)$$

파마찰계수  $C_w$ 는 다음과 같은 Swart의 양해법 근사식을 이용하여 산정하며,

$$C_w = \exp[5.213 \min(2, \frac{k_s}{A_b})^{0.194} - 6.67] \quad (13)$$

$k_s$ 는 유효조고 또는 Nikuradse 등가조고이고  $A_b$ 는 파운동의 해저면에서 최대이동거리이다.

일방향흐름 또는 해류의 마찰계수  $C_c$ 의 산정에 있어 하천흐름에서는 전통적으로 Bazin식이나 Manning식 등을 사용하여 왔으며, 해안수리학에 있어서는 전란류조건과 Keulegan의 대수분포식 가정하에 유도된 산정식을 주로 사용하여 왔다. 그러나 유(1995a)는 최근 연구에서 Bazin(1895)이나 Manning(1889) 등이 이용하였던 Bazin자료가 전란류구간이 아니라 완란류구간에 들어 있고 단지 등가조고가 증가함에 따라 관로마찰계수 분포로부터 평행으로 상향이동함을 발견하고 사각형수로에 대하여 대수분포식의 절점조정법에 의한 수정식을 개발한 바 있다. 이들 절점조정법 또는 경사-절점조정법 산정식에 대한 추가 연구가 현재 제형이나 반원형 수로에 대하여도 진행중이고, 완란류나 전란류구간의 판별을 위한 경계조건식의 개발에도 수로실험과 함께 이론연구가 수행중이며, 그 연구성과는 1년여의 기간이 경과되어야 나올 것으로 예상된다. 따라서 금번 소류사량 산정식 개발에 필요한 일방향흐름 마찰계수 산정에는 유(1994a)가 이미 시도하였던 수정Keulegan식을 이용하며 이에 의하면 일방향흐름 마찰계수 산정식은 다음과 같다.

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

$d$ 는 수심이며, Keulegan 가정에 의하면  $B=2.40$ 이다. 유(1994a)는 Bijker의 고정상 광폭수로에서 관측된 실험자료에 대비하여  $B=2.5$ 가 적합한 수치인 것으로

추정하였으며 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 형상과 크기를 Nielsen(1979)의 경험식을 사용하여 추정된 후 유효조고를 산정하고 평균마찰력을 계산하였으나 전반적으로 실험자료에 비하여 과소산정하는 경향을 보였으며, 이의 원인으로 토사이동에 의한 에너지손실 영향이 있는 것으로 파악하였다. 최근 유(1994a)는 해류 마찰계수를 식 (14)에 제시된 바와 같이 Keulegan식을 수정하여 고정상에 대하여는 평균마찰력을 오차율이 1.5% 이내로 아주 정확히 예측한 바 있으며, 유와 김(1995)은 모래결의 형상과 크기를 Grant and Madsen(1984)의 경험식을 이용하고 유효조고 산정의 비례상수를 조정하여 유효조고를 추정하였다. 그러나 보다 개선된 수정식들을 사용하여도 Bijker의 이동상 조건에 대한 평균마찰력을 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 소류사이동량 산정식을 개발하였다.

Table 1에는 Bijker(1966)의 이동상 파-해류 실험의 각 조건에 대하여 이러한 방법으로 유효조고를 결정한 후 산정된 평균마찰력과 최대마찰력이 제시되어 있다. Bijker는 평균입경 0.25 mm 의 동일 토사가 깔려있는 수조에 수리조건만 다양하게 변화시켜 실험하였는데 실험조건에 따라 모래결의 형상과 크기가 다양하게 변이하였다. 상기 표에서 H는 파고이며 다양한 변이를 보이나, 파주기는 1.57 sec 로서 모두 동일하다.  $I_c$ 는 일방향흐름 마찰력의 관측결과이며,  $I_{wc}$ 는 파와 일방향흐름이 동시에 작용하는 합성류 마찰력의 관측결과이고,  $\tau_u$ 와  $\tau_m$ 은 각각에 대한 BYO 모형의 계산결과이다. Table 1에 제시된 바와 같이  $\tau_u$ 가  $I_c$ 와 일치해지도록 등가조고  $k_s$ 를 결정하였는데 이렇게 조정된 등가조고를 사용하여 합성류에 의한 평균마찰력을 BYO 모형으로 계산하여 보았을 때 계산된 합성류

**Table 1.** Bed shear stresses and bed load transport by combined waves and current (Laboratory experiments conducted by Bijker(1966), T=1.57 sec and  $\phi=0.25$  mm)

No.	d(mm)	V(mm/s)	H(mm)	$k_s$ (mm)	$I_c$ (N/m <sup>2</sup> )	$\tau_u$ (N/m <sup>2</sup> )	$I_{wc}$ (N/m <sup>2</sup> )	$\tau_m$ (N/m <sup>2</sup> )	$\tau_x$ (N/m <sup>2</sup> )	$\tau_n$ (N/m <sup>2</sup> )	$\Phi_c 10^{-4}$	$\Phi_{wc} 10^{-4}$
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
324	290	338	87	4.6	0.30	0.44	0.51	0.51	1.96	-1.42	7.0	1260
362	200	390	47	38.5	1.30	1.42	1.45	1.45	1.94	0.71	926	2446

**Table 2.** Yoo's modified bed load formulas for current-only flow and for combined waves-current flow

공 식	$\Phi$	against Brownlie data discrepancy ratio (r)			against Bijker laboratory data	
		$0.75 \leq r \leq 1.5$	$0.5 \leq r \leq 2.0$	$0.33 \leq r \leq 3.0$	$\Phi_c$	$\Phi_{wc}$
EBY	$60(Z-1)^3 F_c^3 F_i$	57.5	82.6	92.9	$2(Z-1)^3 F_c^3 F_i$	$0.15(Z_x-1)^2 F_c^2 F_m$
KY	$25(Z-1)^2 F_c^2 F_i$	70.0%	83.7	93.8	$0.83(Z-1)^2 F_c^2 F_i$	
EHY	$0.1(Z-1)^{1.5} F_c^{1.5} F_i^2$	78.1	92.3	97.0	$0.0033(Z-1)^{1.5} F_c^{1.5} F_i^2$	$0.01(Z_x-1)^3 F_c^3$
MMY	$30(Z-1)^3 F_c^3$	69.6	85.5	93.8	$(Z-1)^3 F_c^3$	
RY	$0.5N^{-0.2}(Z-1)^3$	51.9	76.1	87.6	$0.017N^{-0.2}(Z-1)^3$	$0.015N^{-0.2}(Z_x-1)^2 F_m$
Yoo 1	$1.5N^{-0.2}(Z-1)^2 F_c$	61.6	82.6	91.4	$0.05N^{-0.2}(Z-1)^2 F_c$	
Yoo 2	$0.12N^{-0.2}(Z-1)^2 F_c$	70.5	85.8	92.9	$0.004N^{-0.2}(Z-1)^2 F_c$	
Yoo 3	$0.25N^{-0.2}(Z-1)^{1.5} F_c F_i$	75.2	88.2	94.7	$0.0083N^{-0.2}(Z-1)^{1.5} F_c F_i$	$0.004N^{-0.2}(Z_x-1)^{1.5} F_m F_i$

평균마찰력  $\tau_m$ 은 관측된 합성류 평균마찰력  $I_{wc}$ 와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 계산된 최대마찰력  $\tau_x$ 와 최소마찰력  $\tau_n$ 도 신뢰할 수 있는 수치일 것으로 판단한다. 본 연구의 소류사량 산정식 개발에 있어 최소마찰력은 무시하고 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 산정식

Yoo(1995), 유와 문(1995)과 유(1995b)는 하천에서의 소류사이동량 산정에 대하여 Brownlie(1984)가 수집한 실험자료와의 비교로부터 Einstein, Kalinske, Engelund-Hansen, Meyer-Peter and Muller, van Rijn 등 기존 산정식들의 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 Z는 활동지수(mobility ratio)라 칭하며, 입계마찰력 대 마찰력의 비이다. 하천에서의 소류사량을 산정할 때는 활동지수 계산에 있어 마찰력은 당연히 평균마찰력을 사용하나, 파와 해류에 의한 소류사량 산정에서는 최대마찰력을 사용하고 나머지 변수중 하나에 평균마찰력을 사용하여 최대마찰력과 평균마찰력의 영향을 모두 고려할 수 있도록 조치하였다.

최대마찰력을 활동지수 Z에 도입하고 평균마찰력을 마찰후루드수  $F^*$ 에 도입하면, Kalinske-Yoo식의 형태로 파와 해류의 합성류 소류사량 산정식은 다음과 같은 형태를 취한다.

$$\Phi = \delta(Z_x - 1)^2 F_c^2 F_m \quad (15)$$

여기서  $\Phi$ 은 Meyer-Peter and Muller 무차원수로서

$$\Phi = \frac{q}{\sqrt{(s-1)g\phi^3}} \quad (16)$$

$q$ 는 단위폭당 소류사이동량,  $s$ 는 토사의 상대밀도,  $\phi$ 는 토사의 입경,  $Z_x$ 는 최대마찰력을 이용한 활동지수 (mobility ratio)로서

$$Z_x = \frac{u_x}{u_c} = \frac{F_x}{F_c} \quad (17)$$

$u_x$ 는 최대마찰속도,  $u_c$ 는 입계마찰속도,  $F_x$ 는 최대 마찰후루드수,  $F_m$ 은 평균마찰후루드수,  $F_c$ 는 입계마찰후루드수로서

$$F_c = \frac{u_c}{\sqrt{(s-1)gd}} \quad (18)$$

입계마찰후루드수  $F_c$ 는 토사입경이 주어질 때 R-F수 N의 함수인데 van Rijn(1984)은 조건에 따라 6가지 수식중 하나를 선택하는 관계식을 개발한 바 있으며, 유와 김(1995)은  $N < 6000$ 까지 유효한 단일식을 제안한 바 있다. 유와 김의 입계마찰후루드수 산정식은 다음과 같다.

$$F_c = \exp\left[-2.83 + 0.17 \ln N + \frac{5.3}{2.5 + 0.22N}\right] \quad (19)$$

여기서 N는 R-F 무차원수로서 다음과 같다.

$$N = \frac{\sqrt{(s-1)g\phi^3}}{v} \quad (20)$$

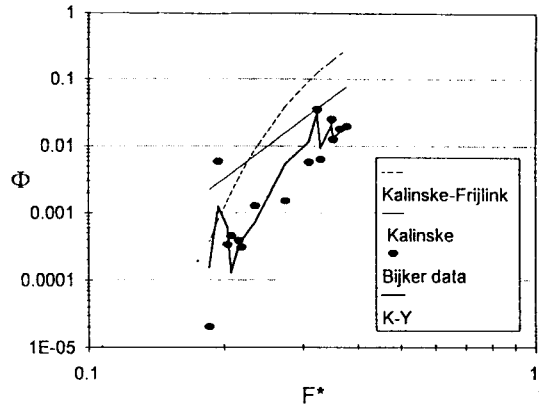


Fig. 1.  $\Phi_c$  against  $F^*$  of current-only flow computed by Kalinske eq., Kalinske-Frijlink eq. and Kalinske-Yoo eq. (Lab. experiments by Bijker(1966)).

여기서  $v$ 는 동점성계수이다.

식 (18)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 (15)에서 하천소류사인 경우 비례상수는 Brownlie가 수집한 관측자료의 분석결과 약 25 정도로 추정되었다. 그러나 Bijker의 실험자료와 대비하여 비례상수는 25의 1/30인 0.83으로 줄어들었다. Fig. 1에는 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 평균마찰력과의 차이, 왕복운동에 의한 잔여분과 위상차 등에 의하여 비례상수  $\delta$ 의 변이가 클 것으로 예상된다.

식 (15)와 같이 모든 산정식에 활동지수에는 최대 마찰력을 이용하여 유사한 형태의 파-해류 소류사량 산정식을 개발하였다. 비례상수 결정에 사용된 관측 자료는 Bijker(1966, 1967)의 실험자료를 이용하였다. 개선된 하천소류사량 산정식중 EBY식, MMY식, RY 식에는 활동지수로서 최대마찰력을 사용할 경우 평균마찰력을 도입할 수 없는데 MMY식의 경우에만 최대마찰력을 이용하여 산정식을 개발하여 보았다. 제시된 바와 같이 MMY식의 경우 비례상수가 1/100 정도로 매우 작아지는 것으로 나타났다. 이밖에 최대마찰력과 평균마찰력을 모두 도입할 수 있는 KY

식과 세가지 형태의 Yoo식만 파-해류 소류사량 산정식 개발에 이용하였다. Bijker의 실험자료중 소류사량 산정에 이용할 수 있는 자료는 모두 20가지이나 그중

No.324와 No.362로 명기된 2개의 자료는 소류사량이 비현실적으로 매우 크게 나타나 관측의 결함인 것으로 파악되었으며, 분석에서 제외하였다. 이상의 과정으로

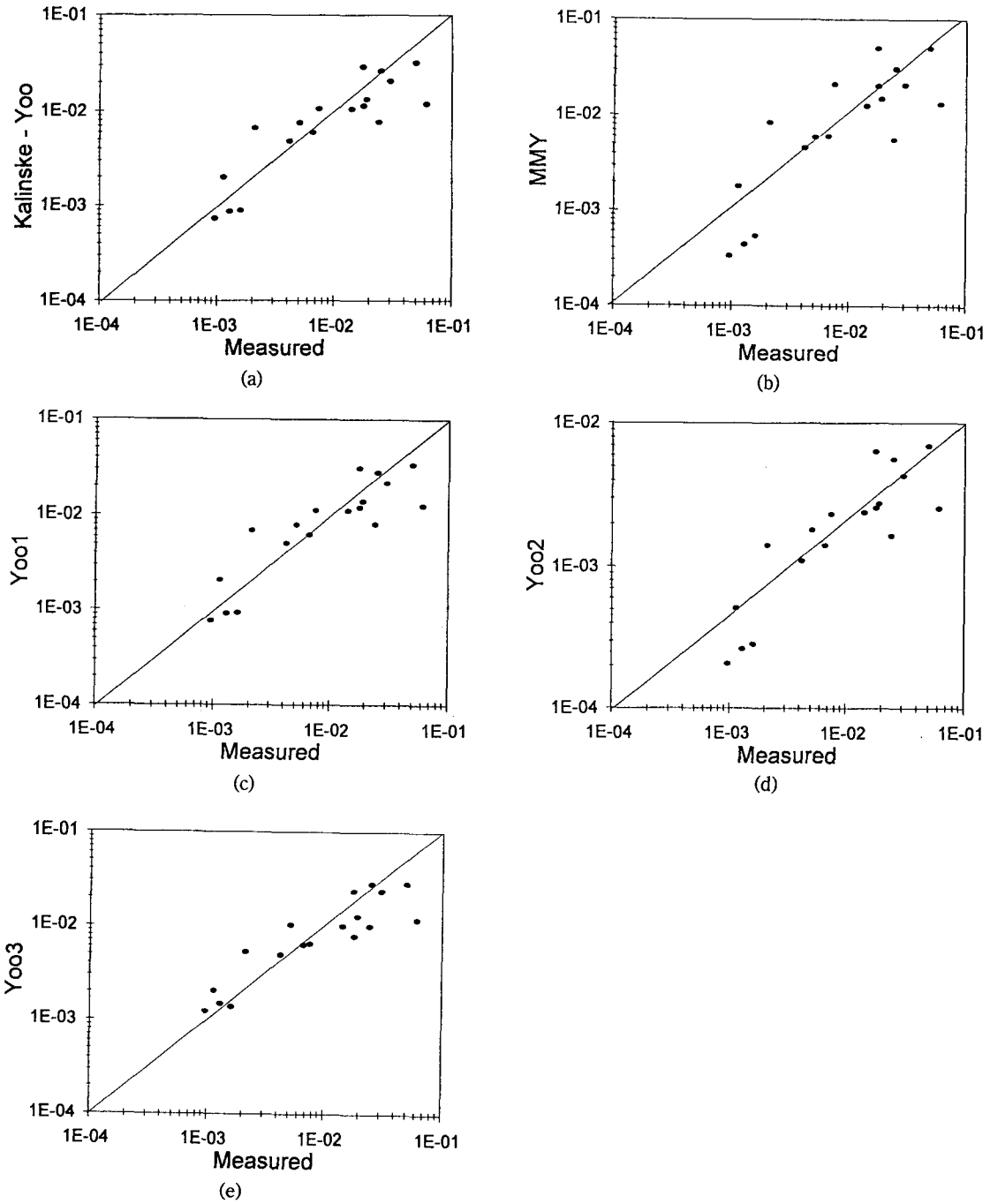


Fig. 2.  $\Phi_w$  determined by various equations (Lab. experiments by Bijker(1966)).  
 (a) Kalinske-Yoo eq. (b) Meyer-Peter & Muller - Yoo eq. (c) Yoo-1 eq. (d) Yoo-2 eq. (e) Yoo-3 eq.

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.

이상의 연구결과로 파와 해류에 의한 합성류 소류사량 산정식으로 비례상수가 단위치에 근접하고 형태가 단순한 Kalinske-Yoo식과 Yoo-1식을 금번 연구의 최종적인 결과로 제안하며 이들 산정식은 다음과 같다.

Kalinske-Yoo식 :

$$\Phi = 0.15(Z_x - 1)^2 F_c^2 F_m \quad (21)$$

Yoo-1 식 :

$$\Phi = 0.015N^{0.2}(Z_x - 1)^2 F_m \quad (22)$$

상기식 (21)과 (22)를 비교하면  $F_c = \sqrt{0.1 N^{0.2}}$ 의 관계가 성립하는데 이는 Bijker의 실험이 평균입경 0.25 mm인 동일토사에서 이루어졌기 때문이다. 즉,  $\phi = 0.25$  mm일 때  $N = 15.8$ 이며, 식 (19)로 산정된  $F_c = 0.225$ 는  $F_c = \sqrt{0.1 N^{0.2}} = 0.223$ 과 유사함을 알 수 있다. 그러나 토사입경이 0.25 mm 보다 훨씬 더 크거나 훨씬 더 작을 때 식 (21)과 (22)는 상당한 차이를 보일 것이다. Fig. 3에는  $\Phi/(Z_x - 1)^2 F_m$ 을 여러 N에 대하여 식 (21)로 구한 수치와 식 (22)로 구한 수치가 비교되어 있다. 이들 비교에 있어  $F_c$ 는 식 (17)로 산정하였다. 도시된 바와 같이  $N = 15.8$ 에 근접한 범위에서 두 산정식은 유사한 수치를 제공하나 이 범위 밖에서 상당한 차이점을 보임을 알 수 있다.  $N < 15.8$ 의 범위에서 Kalinske-Yoo식은 Yoo-1식에 비하여 최대 50% 가량 과대 산정하는 경향이 보이며,  $15.8 < N$ 의 범위에서 Kalinske-Yoo식은 Yoo-1식에 비하여 최대 40% 가량 과소 산정하는 경향이 보인다. 현재로서는 소류사 이동깊이나 평균농도 산정식에 이용된 van Rijn 관측자료의 토사입경이 0.2 mm로부터 1.7 mm 까지 다양한 크기의 토사에 대한 자료이고 Yoo식들은 이들 자료에 기초하여 개발된 산정식이므로 Yoo-1식이 Kalinske-Yoo식보다 광범위한 조건에서 유효할 것으로 추론한다.

평균유속을 포함한 후루드수 F를 도입한 Yoo-2식이나 Yoo-3식은 평균유속의 크기가 너무 크고 이의

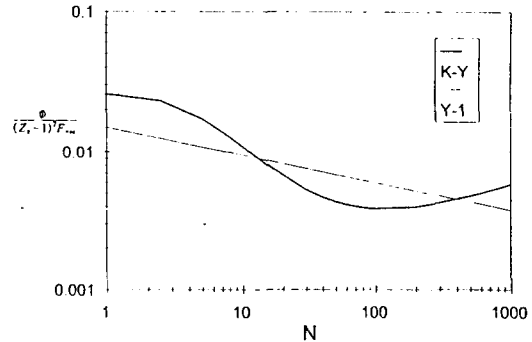


Fig. 3.  $\Phi/(Z_x - 1)^2 F_m$  against N computed by Kalinske-Yoo eq. (21) and Yoo-1 eq. (22).

영향이 상당히 큰 비중으로 작용하였기 때문에 비례상수가 단위치보다 상당히 작게 산정되었다. 따라서 현장적용에 신뢰성을 가질 수 없을 것으로 판단된다. 또한 MMY(Meyer-Peter and Muller-Yoo)식도 Bijker의 실험자료에는 다른 산정식들과 유사하게 양호한 산정결과를 보이나 산정식에 평균마찰력이 결여되어 있으므로 파조건보다 해류가 우세한 조건에 적합치 않을 것으로 여겨지며, 이로서 MMY식은 일반성이 상실된 것으로 판단된다.

#### 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 Yoo-1식이 다른 식들보다 형태의 단순성이나 비례상수가 단위치에 근접한다는 점으로 보아 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. 이를 위하여 하천소류사량 산정식들의 재수정이 필요하며, 동시에 모래결 영향에 의한 소류사량 감소를 고려키 위하여 연흔상수의 도입이 필요할 것이다.

또한 입경 0.25 mm에 근접한 토사에 대하여는 Kalinske-Yoo식과 Yoo-1식이 거의 유사한 산정치를 제공하나 토사입경이 다를 때 상당한 차이를 보일 수 있으므로 보다 광범위하게 유효한 합성류 소류사량 산정식 개발을 위하여는 다양한 크기의 토사를 이용한 수조실험이나 현장관측자료가 요구된다.

## 사 사

본 연구의 일부는 1995년도 아주대학교 교내 연구비의 지원을 받았으며, 실험자료 분석에 도움을 준 아주대학교 토목공학과 학부과정의 문성원군에게 감사함을 표한다.

## 참고문헌

- 유동훈, 1993. 전난류에서의 파마찰계수, 한국해양·해양공학회지, 5(2): 51-57.
- 유동훈, 1994a. 전난류에서 파랑과 해류의 마찰력, 한국해양·해양공학회지, 6(3): 226-233.
- 유동훈, 1994b. 소류사량 산정의 개선책, 한국해양·해양공학회 학술발표 논문초록집, 53-57.
- 유동훈, 1995a. 사각형 개수로 마찰계수, 한국수자원학회지, 28(2): 155-168.
- 유동훈, 1995b. 하천 소류사량 산정식, 대한토목학회 논문집, 제출.
- 유동훈, 김창식, 1995. 불규칙파에 의한 연안류, 한국해양·해양공학회지, 7(1): 12-23.
- 유동훈, 문성원, 1995. 소류사량 산정식 검토 및 개선, 대한토목학회 학술발표회, 발표예정.
- 유동훈, 이동수, 1992. 이동상 해저면에서의 마찰력, 한국해양·해양공학회지, 4(2): 63-71.
- Bazin, H.E., 1897. Etude d'Une Nouvelle Formule pour Calculer le Debit des Canaux De'couverts, Memoir No. 41, Annales des Ponts et Chausses, 14: 20-70.
- 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, Report KH-R-438, W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resource, 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 Vorlag, Copenhagen.
- 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.
- Manning, R., 1889. On the flow of water in open channels and pipes, Trans. Inst. Civil Eng. Ireland, 20: 161-195.
- 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.