

# 하천 소류사량 산정식

유 동 훈\* 문 성 원\*\* 신 승 호\*\*\*

## 1. 서론

토사유송현상에 의해 수중구조물이나 교량, 또는 해안에 인접한 구조물등 광범위한 구조물 등이 심대한 영향을 받는다. 이 영향으로 인한 피해를 미연에 방지하기 위하여 토사이동구조에 대한 심층적 이해가 필요하다. 그러나, 토사이동에 대한 이해는 첫째, 실험이 용이치 않으며, 둘째, 토사이동에 대한 물리적인 개념이 확실히 정립되지 않아 토사이동의 정량화가 쉽지 않았다.

토사이동에 대한 정확한 이해와 정량화를 기하기 위해서는 우선 기존 연구자들의 토사이동량 산정식과 연구자료를 검토하여 불합리한 점을 개선하는 것이 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 토사이동의 한 형태인 소류사만 국한하여, 소류사량 산정식을 검토하고 개선하였다. 이 소류사량 산정이 실측치와 유사하다면 부유사량을 산정하는데 있어서도 그 개념이 이용되고 또한 기본 농도를 계산하는 데 있어서도 영향인자로 작용하며, 해안의 환경변화를 일으킬 수 있는 파와 해류에 의한 토사이동량 산정에도 이용될 수 있어 기존 공식의 개선이 필수적이다.

국내에서도 한국건설기술연구원(1989), Woo & Yoo(1990)와 Lee & Lee(1992) 등이 기존 소류사량 산정식들을 비교 검토하고 국내 하천에 적용한 바 있다. 본 연구에서 참고하여 개선한 기존 공식들은 Einstein(1942), Kalinske(1947), Meyer-Peter and Muller(1948), Engelund-Hansen(1967), Van Rijn(1984)등이 개발한 식들이며, 본 연구에서 제안한 소류사량 공식에서는 기존의 공식에서 적절히 고려하지 못한 임계마찰력과 같은 물리적 성질을 지닌 인자를 식에 포함시켜 소류사량 산정에 적합한 관계변수를 제시하였다. 기존 산정식에 제시된 종말속도 산정을 위해 종말후르드수와 레이놀즈-후르드수와 같은 2개의 무차원수를 제시하였다. 또한 Yoo(1995)의 소류사량 공식에서 제시되었던 각각의 소류사량 산정공식에 대하여 관측자료를 재분석하여 제 공식의 계수를 재조정하였다. 그리고 기존산정식과 수회에 걸쳐 개선보완한 Yoo(1995)의 소류사량 산정식을 Brownlie(1980)의 관측 자료에 비교하였다.

## 2. 기존소류사량 산정식의 검토

DuBoys의 소류사량 산정식은  $n$ 개층의 토사가 선형비례로 이동한다는 가정하에 유도되었으며 다음과 같이 최종식이 도출되었다.

$$q_w = \delta \tau (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

여기서  $q_w$ 는 단위폭당 소류사 이동중량,  $\tau$ 는 저면마찰력,  $\tau_c$ 는 임계마찰력이며  $\delta$ 는 비례상수이나 무차원수는 아니다. 비례상수  $\delta$ 는 무차원수가 아니므로 일반화가 쉽지 않아 일반성확보에 성공하지 못한 것으로 보인다.

Einstein(1942)은 토사입경  $d$ 대 이동거리  $L$ 의 비가 일정한 상수이며, 즉  $L/d = \lambda$ , 토사가 세굴되어 상향이동할 때 상향이동속도  $w_L$ 가 침강속도  $w_f$ 에 비례한다, 즉,  $w_L - w_f$  라는 가정하에 다음

\* 아주대학교 환경·도시공학부 토목설계공학과 부교수  
\*\* 아주대학교 토목공학과 졸업, 현재 LG건설 근무  
\*\*\* 아주대학교 토목공학과 대학원 석사과정

과 같은 무차원수를 도출하였다.

$$\Phi_E = \frac{q_w}{\rho_s g w_j d} \quad (2)$$

마찰후루드수가 작을 때 Einstein은 다음과 같은 상관관계가 성립함을 발견하였다.

$$\Phi_E = \exp(0.766 - 0.391 F_*^{-2}) \quad (3)$$

또한 Brown은 실험관측결과로부터 보다 광범위한 조건에서 적합한 다음과 같은 간단한 형태의 상관식을 도출하였다.

$$\Phi_E = 40 F_*^6 \quad (4)$$

상기식은 광범위한 조건에서 적용되는데 이 식을 Einstein-Brown 식이라 칭한다. 이 식 중  $F_*$ 는 마찰후루드수이다.

$$F_* = \frac{u_*}{\sqrt{(s-1)gd}} \quad (5)$$

이에 반하여 Kalinske(1947)는 상향이동속도가 마찰속도  $u_*$ 에 비례한다고 하였으며 다음과 같이 무차원수를 도출하였고

$$\Phi_K = \frac{q_w}{\rho_s g u_* d} \quad (6)$$

실험자료로부터 다음과 같이 유도하여 이 식을 Kalinske-Frijlink식이라 칭한다.

$$\Phi_K = \exp(1.61 - 0.27 F_*^{-2}) \quad (7)$$

상기식들의 장점은 DuBoys의 식과 달리 무차원수를 도입하여 수식 이용에 편리성과 일반성을 제공하였다는 점이다. 그러나, 이 식들은 저면마찰력이 임계마찰력보다 작더라도 임계마찰력에 관계 없이 토사이동량이 산정된다는 점에 있어서 문제점을 보인다. 즉, 마찰력이 임계마찰력과 비교하여 임계마찰력을 초과하는지의 판단을 가능케 하는 항이 수식에 포함되어있지 않은 것이 관련수치의 일반성을 의심하게 한다.

한편 Meyer-Peter and Muller(1948)가 제시한 산정식은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\Phi_M = 8(Z^2 - 1)^{1.5} F_{*c}^3 \quad (8)$$

$\Phi_M$ 은 Meyer-Peter and Muller 무차원수로서  $\Phi_M = q/\sqrt{(s-1)gd^3}$ 이며,  $q$ 는 체적으로 표기되는 토사이동량이다.

Engelund와 Hansen(1957)는 전유사량 산정식으로 다음과 같은 형태의 식을 제시하였다.

$$q = \frac{0.05V^6}{(s-1)^2 g^{0.5} h C_h^3} \quad (9)$$

여기서  $V$ 는 단면평균유속,  $C_h$ 는 Chezy 마찰계수,  $h$ 는 수심이다. 상기식도 Meyer-Peter and Muller(1948)의 무차원수를 도입하면 다음과 같이 표시된다.

$$\phi_M = 0.05 F_*^3 F^2 \quad (10)$$

다른 산정식들과 달리 상기식은 부유사일 때 영향이 크게 미칠 것으로 판단되는 평균유속  $V$ 가 포함되어 있는 점이 특기할만하다.

Van Rijn(1984)은 소류사 이동량을 이동속도, 이동높이와 평균농도의 곱으로 구할 것을 제시하고 각각의 관계식을 실험결과로부터 도출하여 다음과 같은 소류사량 산정식을 개발하였다.

$$\phi_M = 0.053N^{-2}(Z^2-1)^{2.1} \quad (11)$$

Van Rijn은 상기 산정의 적용범위를  $0.2 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$ 로 제한하였는데, 이러한 제한의 주원인이 토사이동속도의 부정확성 때문인 것으로 판단된다.

### 3. 기존소류사량 산정식의 개선

Yoo(1995)는 Van Rijn이 이론적인 해석으로 토사이동속도 산정식을 제시하였음에도 불구하고, 실험결과와 상당한 차이점이 있음을 해소하기 위하여 관측자료를 이용하여 보다 정확한 토사이동속도 산정식을 개발하였으며, 다음과 같은 소류사량 산정식을 제시하였다.

$$\phi_M = 1.2N^{-0.2}(Z-1)^{2.6}F_* \quad (12)$$

Yoo는 Van Rijn과 달리 토사이동속도 산정에 활동지수  $Z$ 뿐만 아니라, 마찰속도가 포함된  $F_*$ 를 고려하였다. 이상의 산정식을 Brownlie(1980)가 수집하여 제시한 관측자료에 적용하였는데, 적용방법으로는 임계마찰속도 보다 마찰속도가 큰 자료를 선정한 다음, 이 자료 중에서도 마찰속도  $u_*$ 가 침강속도  $w_r$  보다 작은 자료를 선정하였다. 이는 Van Rijn의 제안에 의한 것이다.

기존공식의 개선은 다음을 바탕으로 시행하였다. 첫째, 소류사 이동은 임계마찰속도 보다 하상에서의 마찰속도가 커야한다. 기존의 소류사량 공식 중 임계후루드수를 이용한 공식의 우수성이 Brownlie 자료를 이용해 비교한 결과로 정하였다. 또한 개선식은 임계후루드수를 나타내는데 있어서 Yoo의 단일식을 이용하였다.

$$F_{*c} = \exp\left[-2.83+0.17\ln N + \frac{5.3}{2.5+0.22N}\right] \quad (13)$$

둘째, 기존 공식 중 비교적 토사이동의 물리적 개념에 충실한 Van Rijn 공식을 기본 이론으로 하고 Van Rijn 공식의 문제점을 개선하였다. 이상의 검토된 산정식들을 모두 Meyer-Peter and Muller(1948)의 무차원수  $\phi_M$ 로 정리하여 표 1에 제시하였다. 표 1에 제시된 식 중 기존식으로 표

시된 수식들이 바로 이상의 검토된 산정식들이다. 이 식들은 본 고에서 제시된 무차원수로 통일하여 표기하였다.

이상 검토된 결과를 불일치율의 결과로서 볼 때, Engelund-Hansen이 상당한 정밀도를 보이는 데, 이는 Brownlie의 관측자료가 부유사량도 포함되어있고, Engelund-Hansen의 식이 부유사에 대한 산정항이 있어 포함되어 있기 때문인 것으로 보인다. 또한 불일치율을 검토하여 보면 임계마찰속도를 고려하여 개선한 회귀분석식이 기존산정식의 결과에 비해 정밀도에 있어서 상당한 향상을 보이는 것으로 보아 임계마찰력을 고려하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

Yoo(1995)는 Yoo-1식 (12)를 개선하기 위하여 Engelund-Hansen식과 같이 단면평균유속이 포함된 F 또는 FF를 도입한 후 Brownlie의 자료를 적용하여 Yoo-2, Yoo-3식의 회귀분석식을 제시하였다. 그러나 이 회귀분석식이 토사이동량의 불확실성에 비해 너무 복잡한 식으로 표시되어 있어서 단순한 계산과정이 요구되는 근사식을 제안하였다. 이러한 Yoo(1995)의 근사식들은 회귀분석식과 유사할 정도의 정밀도를 보였다. 본 연구에서의 근사식은 Yoo(1995)의 기존 연구를 바탕으로하여 개선한 것으로써 이 근사식은 기존의 Yoo(1995)의 근사식에 비해 정밀도가 향상되었으며, 개선된 점은 다음 식에서 제시된 바와 같이 임계조건 지수치의 변화와 마찰후루드수의 관계변수의 변화이다.

유의 기존 근사식 즉 제1형 근사식들은 다음과 같다.

$$Yoo\ 1\ \Phi_M = 1.5N^{-0.2}(Z-1)^2F \tag{14}$$

$$Yoo\ 2\ \Phi_M = 0.12N^{-0.2}(Z-1)^2F^{2.4} \tag{15}$$

$$Yoo\ 3\ \Phi_M = 0.25N^{-0.2}(Z-1)^{1.5}F.F \tag{16}$$

유의 개선된 근사식 즉 제2형 근사식들은 다음과 같다.

$$Yoo\ 1\ \Phi_M = 10N^{-0.2}(Z-1)F^3 \tag{17}$$

$$Yoo\ 2\ \Phi_M = 0.01N^{-0.2}(Z-1)F^{2.4} \tag{18}$$

$$Yoo\ 3\ \Phi_M = 0.16N^{-0.2}(Z-1)(F.F)^{1.5} \tag{19}$$

#### 4. 결론

본 논문에서는 현재까지 알려진 소류사량 공식 중 Einstein(1942), Kalinske(1947), Meyer-Peter and Muller(1948), Engelund-Hansen(1967), Van Rijn(1984) 등이 개발한 공식을 개선하였으며, Yoo(1996)의 소류사량 공식을 제시하였다. 불일치율로써 각공식의 우수성을 논의한다면 Meyer-Peter and Muller 공식과 Van Rijn 공식, Englund and Hansen 공식 등이 상당한 우수성을 가지고 있음을 알 수 있었으며, 본고에서 제시한 Yoo 공식은 공식 개발시 데이터 제한의 문제성은 있지만 상당한 우수성이 입증되었다.

또한 기존산정식에서 개선된 식이 보다 좋은 정밀도를 보이는 것으로 보아 임계마찰력이 중요한 변수임을 알 수 있으며, 타 공식과 비교하여 Yoo와 Van Rijn의 식은 무차원수 N의 역비례로서 나타나는 점에 있어서, 토사입경이 클 경우 타 산정식에 비하여 소류사 이동량이 작게 산정될 것이나, 무차원수 N의 영향은 분명히 밝힐 수 없었다. 또한 Yoo(1995)의 제1형 근사식에 비해 본고에 제시된 제2형 근사식들이 약간의 정밀도의 향상을 보였다. 그러나 영향은 밝힐 수 없었다.

참 고 문 헌

Brown, C.B., 1950, Engineering Hydraulics, edited by H. Rouse, John Wiley & Sons Inc., NewYork.

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 Vorlag, Copenhagen, 62 pp.

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.

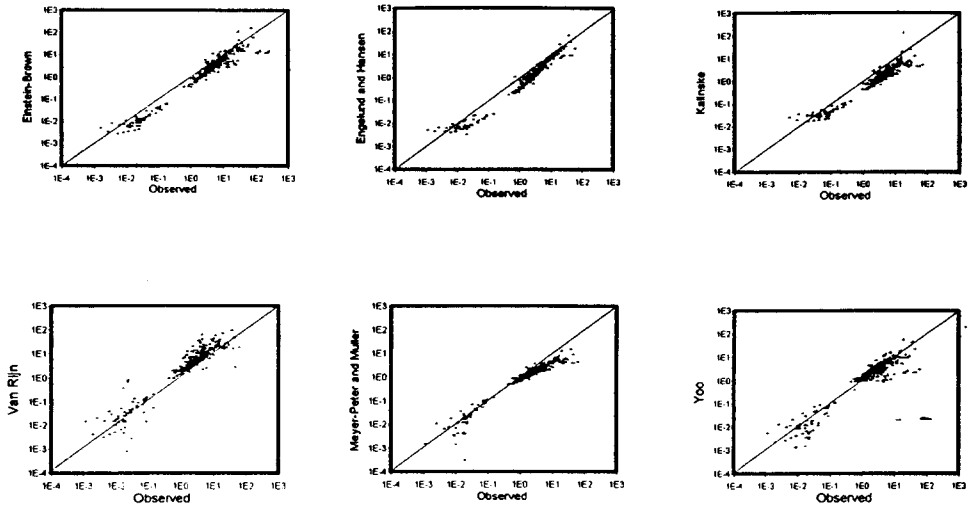
Meyer-Peter, E. and Muller, R., 1948, Formulas for bed load transport, Proc. 2nd IAHR meeting, Stockholm.

Rijn, L.C. van, 1984, Sediment transport, part I: bed load transport, J. Hydraulic Eng., ASCE, 110, HY10; 1431-1455.

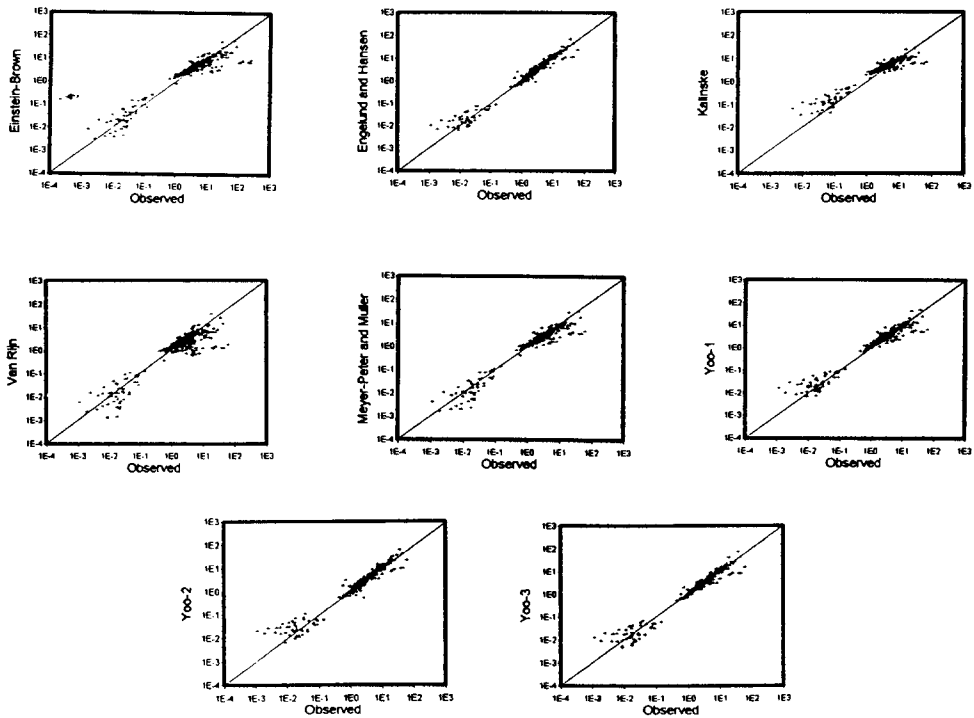
유동훈, 1996, 소류사량 산정식, 한국 해안-해양 공학회지 8권 1호 (출판중)

표 1. 제 소류사량 산정식들의 불일치율

공식		$\Phi_M$	불일치율(%)		
			$0.75 \leq r \leq 1.5$	$0.50 \leq r \leq 2.0$	$0.33 \leq r \leq 3.0$
Einstein - Brown	기존식	$40F_c^{.5}$ Ft	18.0	63.0	89.0
	회귀분석식	$78.4(F_c - F_{c*})^{.518}$ Ft	54.6	82.6	92.0
	근사식	$60(Z-1)^3$ Ft $F_{c*}^3$	57.5	82.6	92.9
Kalinske	기존식	$10F_c^{.5}$	5.3	22.0	71.0
	회귀분석식	$35.4(F_c - F_{c*})^{.24}$ F.	70.2	87.9	92.9
	근사식	$25(Z-1)^2$ $F_{c*}^2$ F.	70.0	83.7	93.8
Engelund and Hansen	기존식	$0.05F_c^3$ $F^2$	14.0	47.0	84.0
	회귀분석식	$0.1(F_c - F_{c*})^{1.6}$ $F^2$	73.1	91.4	97.9
	근사식	$0.1(Z-1)^{1.5}$ $F_{c*}^{1.5}$ $F^2$	78.1	92.3	97.0
Meyer - Peter and Muller	기존식	$8(F_c^2 - F_{c*}^2)^{1.5}$	26.5	68.7	90.6
	회귀분석식	$36.8(F_c - F_{c*})^{2.97}$	68.1	86.4	94.4
	근사식	$30(Z-1)^3$ $F_{c*}^3$	63.1	84.3	92.6
Van Rijn	기존식	$0.053N^{-0.2}(Z^2-1)^{2.1}$	49.6	73.4	89.4
	회귀분석식	$0.7N^{-0.2}(Z-1)^{2.32}$	44.5	74.3	89.0
	근사식	$0.5N^{-0.2}(Z-1)^3$	51.9	76.1	87.6
Yoo 1	기존식	$1.2N^{-0.2}(Z-1)^{2.6}$ F.	55.0	81.0	90.0
	근사식 제1형	$1.5N^{-0.2}(Z-1)^3$ F.	61.6	82.6	91.4
	근사식 제2형	$10N^{-0.2}(Z-1)F_c^3$	69.0	88.0	95.0
Yoo 2	기존식	$1.2N^{-0.2}(Z-1)^{2.6}$ F.	55.0	81.0	90.0
	근사식 제1형	$0.12N^{-0.2}(Z-1)^2$ F	70.5	85.8	92.9
	근사식 제2형	$0.01N^{-0.2}(Z-1)F_c^{2.4}$	70.5	88.0	95.0
Yoo 3	기존식	$1.2N^{-0.2}(Z-1)^{2.6}$ F.	55.0	81.0	90.0
	근사식 제1형	$0.25N^{-0.2}(Z-1)^{1.5}$ F.F	75.2	88.2	94.7
	근사식 제2형	$0.16N^{-0.2}(Z-1)(F_c F)^{1.5}$	76.0	90.0	97.0



< Fig 1 Bed load transport computed by existing formulas against Brownlie's data >



< Fig 2 Bed load transport computed by refined formulas against Brownlie's data >