

결정론적 유사량 산정공식의 민감도 분석에 관한 연구

김성원·고병련*·조정석**

영남대학교 토목공학과 · 제주산업정보대학 토목과 · 대구대학교 토목공학과
(1997년 8월 2일 접수)

A Study on the Sensitivity Analysis of the Deterministic Sediment Yield Formulas

Sung-Won Kim, Byoung-Ryouon Koh*, and Chung-Seok Cho**

Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ, Kyeongsan 712-749, Korea

*Dept. of Civil Engineering, Cheju College of Technology, Cheju 690-140, Korea

**Dept. of Civil Engineering, Taegu University, Kyeongsan 713-714, Korea

(Manuscript received 2 August 1997)

This study is aimed at the development of the adequate sediment yield formulas in Wi-Stream basin ; IHP representative basin in Korea. As a result of applying outstanding sediment yield formulas among the existing formulas, it is analyzed that including the Engelund & Hansen formula, Yang formula is proper to the Wi-Stream basin. And as a result of sensitivity analysis to the sediment parameters it is analyzed that Rijn and Ackers & White formula is more sensible than any other formulas which has been applied the velocity and depth among the parameters. Also, Engelund & Hansen and Yang formula is less sensible than any other formulas.

In Wi-Stream basin, it is analyzed that Yang and Engelund & Hansen formula is the most suitable sediment yield formula in this study. But because the existing formulas had been developed in foreign countries and applied the foreign natural rivers and reservoirs, it makes careful use of Korean alluvial river and hoped that it will be developed the most adequate formula in Wi-Stream basin.

Key words : Engelund & Hansen, Yang, sensitivity analysis, sediment yield formulas, Van Rijn, Ackers and White

1. 서 론

유수에 의한 유역 하천의 토사의 침식(Erosion), 이송(Transport)과 퇴적(Deposition)현상은 실무에서 부딪치는 난점들 중의 하나이다. 토사침식의 경우 국부적으로 하천제방이나 하천구조물의 안정을 해치며, 농경지의 비옥한 토양을 유실시키고, 토사유송은 터빈이나 펌프와 같은 수력기계를 마모시키면서, 나아가서 담수어양식, 수상위락, 상수처리 등에 문제를 야기시킨다. 또한 토사퇴적의 경우, 홍수시에 운반된 토사가 범람하여 농경지에 퇴적되면 농경지를 매몰하거나 비옥한 표토를 뒤덮기도 하고, 하천내에 퇴적되면 하천의 통수능단면을 축소시켜, 홍수범람규모를 증대시키고, 저수지내에 퇴적되면 저수용량을 감소시킨다. 한편 토사유송은 침식과 퇴적을 연결하는 중간고리이므로, 유사에 따른 문제들을 해결하기 위해서는 유사운송기구(Sediment Transport Mechanism)를 명확히 이해하는 것이 중요하다. 아직까지는 이론과 경험적지식은 대단히 불완전하다.

유사량산정공식 개발에 관한 연구로는 19세기말경 Duboys(1879)의 소류사량 공식으로 시작되는데, Duboys의 소류사공식은 한계소류력의 개념에 기초를 두고 있으며, Schoklitsch공식이나 Shield공식에 영향을 주었고, 1930-40년대 스위스의 연방공과대학(Swiss Federal Institute of Technology)에서는 Meyer-Peter의 연구진에 의하여 소류사량 추정공식인 Einstein(1934), Meyer-Peter & Muller공식(1948)을 개발해 내었다. 미국에서 Einstein(1942)에 의해 발표된 소류사 함수(Bed Load Function)는 총적하천에서의 총유사량을 산정하는 최초의 본격적인 모형인데, 소류사와 부유사를 각각 구분하여 추정하고 다시 합하여 총유사량을 산정하는 기법을 도입하였다. 그리고 Laursen(1958)은 총유사량을 하상전단응력과 한계소류력의 함수로 표시되었고, 하천의 수리변량과 하상특성의 무차원함수로 나타내었다. 총유사량산정에 있어서 Stream Power개념을 도입하여 Engelund & Hansen(1967)과 Ackers & White(1973)의 공식을 개발하였으며, 특히 Yang의

경우는 평균유속과 하천경사의 곱인 Unit Stream Power의 함수를 개발하였다. 1970년대 이후이 총유사량 개발공식은 컴퓨터의 영향으로 대량의 자료처리에 의해 경험계수들이 결정되어져서 Shen & Hung, Brownlie 등의 공식을 개발하였다. 특히 Van Rijn (1984)은 총유사량과 부유사량을 따로 구해 총유사량을 추정하였으며, 또한 공식의 개발에 기준농도점(Reference Concentration) 등 일부 변량들만 경험계수로 사용하였다.

국내에서의 유사에 관한 연구로는 서승덕(1967)이 Schoklitsch, Einstein, Duboys 등의 세 개의 공식들을 미국의 Money Creek 자료를 이용하여 적용하였으며, 지광하(1967)는 DH-48형과 P-46형 채취기를 이용하여 부유사를 실측하는 방법을 소개하고 있다. 안상진(1969)은 북한강의 유사량에 관한 연구에서 청평수위표 지점의 연유사량과 연퇴사량을 비교·분석하였다. 그리고 남선우(1978)는 한강하류의 유사량과 하상변동에 대한 연구가 있었고, 신동수, 김희종, 강주복(1981)은 낙동강의 한계소류력과 부유사량, 소류사량을 실측하고, 기존의 유사량산정 공식과 비교하여 낙동강유역에 적합한 유사량공식을 선정하고자 하였다. 그리고 건설부의 국제수문개발계획(IHP) 대표유역조사에서는 평창강, 보청천, 위천유역을 대표유역으로 설정, 장기간(1975~현재)에 걸쳐, 유사량을 포함한 각종 수문량을 측정하였으며, 건설기술연구원(1989)의 한국하천에 유사량 산정공식을 선택하여 각 공식의 특성 및 적용한계를 분석하고, 기준안을 개발하려는 연구가 있었으나, 전반적으로 자료의 가치가 있는 실측자료도 거의 없을 뿐만 아니라, 유사이론에 대한 심도있는 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 유사량산정모형중 우수한 것으로 판단된 공식들과 지명도가 높은 공식들을 선정하여, IHP 낙동강대표유역인 위천유역의 수리 및 유사특성치를 적용하여 유사량산정을 해석하고, 각 공식별로 민감도분석(Sensitivity Analysis)을 실시하고자 한다. 이와 같은 과정을 통하여 공식적용 대상 하천의 특성에 따라 적용가능한 공식을 선정하고, 연구대상하천에서 적절한 공식을 개발하고자 한다.

2. 결정론적 유사량산정공식 이론

유사량 산정공식을 분류하는 것은 여러가지 유형에 의해 분류될 수 있다. 먼저 적용대상에 따라 부유사량 공식, 소류사량공식, 그리고 총유사량 공식으로 구분될 수 있으나, 본 연구에서는 부유사량만을 추정하는 부유사량 공식은 제외되었으며, 또한 White, et al.(1973)의 확률이론적 해석을 포함하고 있지 않은 결정론적모형(Deterministic Model)을 연구대상 공식으로 사용하였다. 본 연구에 사용된 결정론적 유사량 산정공식은 다음과 같다.

2.1 Engelund & Hansen 공식

이 공식은 하천의 상사이론(Similarity Principle)에 기초하여 만들어졌으며, 마찰계수를 f , 무차원 유사량을 Φ , 무차원 소류력을 θ , 소류력을 τ_0 , 수심을 d 라고

했을 경우에 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f \Phi = 0.1 \theta^{5/2} \tag{1}$$

여기서,

$$f = \frac{2g d S}{V^2}, \Phi = \frac{q_t}{\gamma_s \sqrt{(s-1)d D_{50}^3}}, \theta = \frac{\tau_0}{[\gamma(s-1)D_{50}], \tau_0 = \gamma d S$$

윗 식을 정리하면 유사량을 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_t = 0.05 \gamma_s V^2 \frac{(dS)^{3/2}}{D_{50} \sqrt{s} (s-1)^2} \tag{2}$$

여기서, q_t 는 단위폭당 총유사량, V 는 평균유속, D_{50} 은 중앙입경, S 는 하천경사이고 s 는 유사의 비중을 나타낸 것이다. Engelund & Hansen은 수심과 유속등의 수리량과 유사량을 동시에 구할 수 있는 도표를 제안하였으나, 수리량이 실측된 경우에는 그 실측치를 직접 이용하여 유사량을 산정하도록 하였고, 사련하상을 제외한 다른 하상에는 적용성이 좋은 것으로 알려져 있다. Engelund & Hansen의 공식은 무차원량의 함수로 나타나 있으므로 사용단위의 일관성이 있으면 어느 단위 시스템에도 적용이 가능하다.

2.2 Shen & Hung 공식

Shen & Hung 공식의 유사운송기구는 매우 복잡한 현상이므로 몇 개의 변수들의 조합으로 모든 상황에서 유사운송기구를 물리적으로 기술하는 것이 불가능하다는 가정아래 이루어진다. 따라서 실용적인 측면에서 복잡한 식보다는 주요 수리 및 하상도 변수에 대한 간단한 회귀식이 계산이 간편하고, 더 나아가 얻어진 회귀식에 과거의 자료에 대한 상관성이 좋다면 다른 자료도 같은 자료의 범위내에서 적용될 경우 좋은 결과를 얻을 수 있다고 가정하였다. 이들은 독립변수로 유사입자의 침강속도(W), 평균유속(V), 수심(d), 중앙입경(D_{50})을 선택하였고, 종속변수로 유사농도(C_t)를 선택하였다. 이들은 실험자료를 이용하여 다중회귀분석을하여 다음 식(3)과 (4)와 같은 회귀식을 구하였다.

$$\log C_t = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \tag{3}$$

$$x = V^a S^b W^c d^d \tag{4}$$

여기서, C_t 는 유사의 농도이고, 이때 각 변수의 단위로써 유사농도는 ppm, 평균유속은 ft/sec, 침강속도는 ft/sec, 수심은 ft이다. 또한 a_0 에서 a_7 까지의 값은 상수로써 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_0 &= -107,404.45938164, a_1 = 324,214.74734085, \\ a_2 &= -326,309.58908739, a_3 = 109,503.87232539, \\ a_4 &= 0.00750189, a_5 = 0.00428802, a_6 = -0.00239974, a_7 = 0.0 \end{aligned} \tag{5}$$

2.3 Ackers & White 공식

Ackers & White 공식은 차원해석을 이용한 것이며 다음 식(6)과 같이 표시된다.

$$G_{\sigma} = C \left[\frac{F_{\sigma}}{A} - 1 \right]^m \tag{6}$$

위 식(6)에서 C 는 무차원 유사량을 표시하며, G 정의는 다음 식 (7)과 같다.

Table 1. The coefficients of Ackers & White formula

Coefficient	$1 < D_{gr} \leq 60$	$D_{gr} > 60$
C	$\log c = 2.86 \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3.53$	0.025
n	$1 - 0.56 \log D_{gr}$	0.0
A	$0.23 / \sqrt{D_{gr}} + 0.14$	0.17
m	$9.66 / D_{gr} + 1.34$	1.50

$$G_{gr} = \frac{C_i d}{sD} \left(\frac{\mu_*}{V} \right)^n \quad (7)$$

여기서, C_i 는 유사무게와 물-유사 혼합물의 무게의 비로 표시되는 유사농도이다. 한편, Ackers & White는 이동수(Mobility Number) F_{gr} 을 다음 식(8)과 같이 정의하였다.

$$F_{gr} = \frac{\mu_*^n}{\sqrt{gD}(s-1)} \left(\frac{V}{\sqrt{32} \log(10d/D)} \right)^{1-n} \quad (8)$$

이때 계수 m, C, A, n은 다음 식(9)와 같은 무차원 유사입경 D_{gr} 의 함수이며, Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{gr} = D \left(\frac{g(s-1)}{V^2} \right)^{1/3} \quad (9)$$

2.4 Yang 공식

Yang은 하천에서의 유사량은 단위무게의 물의 위치 에너지 감소율 즉 단위유수력(Unit Stream Power)에 의존한다고 가정하였다. 즉 단위유수력을 독립변수로 놓고, 자료를 다중회귀분석하여 다음 식(10)과 같은 유사농도(ppm) C_i 계산공식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \log C_i = & 5.435 - 0.286 \log \frac{wD_{50}}{v} - 0.457 \log \frac{\mu_*}{w} \\ & + \left(1.799 - 0.409 \frac{wD_{50}}{v} - 0.314 \log \frac{\mu_*}{w} \right) \\ & * \log \left(\frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 초기이동을 나타내는 한계유속은 다음 식(11) 및 (12)와 같이 표시된다.

$$\frac{V_{cr}}{w} = \frac{2.5}{\log(\mu_* D_{50}) - 0.66} = 0.66;$$

$$1.2 < \frac{\mu_* D_{50}}{v} < 70 \text{ 일때} \quad (11)$$

$$\frac{V_{cr}}{w} = 2.05; 70 \leq \frac{\mu_* D_{50}}{v} \text{ 일때} \quad (12)$$

그러나 Yang은 (10)식에서 한계조건을 나타내는 항인 $\log \left(\frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w} \right)$ 를 제거하고 다시 회귀분석(Regression Analysis)을 하여 다음 식(13)과 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned} \log C_i = & 5.165 - 0.153 \log \frac{wD_{50}}{v} - 0.297 \log \frac{\mu_*}{w} \\ & + \left(1.780 - 0.360 \log \frac{wD_{50}}{v} - 0.480 \log \frac{\mu_*}{w} \right) \\ & * \log \frac{VS}{w} \end{aligned} \quad (13)$$

Yang 공식도 무차원량의 함수로 표시되므로 단위 시스템에 관계없이 성립하고, 각 입도별로 계산할 수 있다.

2.5 Rijn 공식

Rijn공식은 총유사량을 부유사량과 소류사량의 합으로 나타내고 있다. Rijn은 사립자의 최대도약고(Maximum Saltation Height)를 운동방정식으로 기술하고, 입자가 최대도약고보다 낮게 도약하면 소류사로 구분하였고, 더 높이 도약하면 부유사로 구분하였다. 이를 전단속도 μ_* 와 침강속도 w 의 함수로 표시하면

$\frac{\mu_*}{w} < 1$ 이면 소류상태이고, $\frac{\mu_*}{w} > 1$ 이면 부유상태가 된다.

Rijn의 소류사량은 무차원 입경과 이송단계변수와 같이 두 개의 무차원 변수들로 나타내어 지고, 다음 식(14)와 (15)로 구하여 진다.

$$D_s = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} \quad (14)$$

$$T = \frac{(\mu_*')^2 - (\mu_{*,cr})^2}{(\mu_{*,cr})^2} \quad (15)$$

여기서, D_s 는 무차원입경(Particle Parameter), T 는 이송단계변수(Transport Stage Parameter), $\mu_{*,cr}$ 는 한계조건 전단속도($= [(s-1)gD_{50}\theta_{cr}]^{1/2}$), θ_{cr} 는 D_s 에 대응하는 Shields곡선상의 값이고 μ_*' 는 사립전단속도($= \frac{\sqrt{gV}}{C}$)이다. Rijn은 소류사량을 입자의 도약고와 입자의 속도 그리고 소류사 농도의 곱으로 가정하고 위의 변수들을 이용하여 다음 식(16)과 같은 소류사량 공식을 유도하였다.

$$\frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gD_{50}^3}} = 0.053 \frac{T^{21}}{D_s^{9.3}} \quad (16)$$

여기서, q_b 의 단위는 $m^3/sec/m$ 이다. 또한 Rijn은 부유사량을 산정하기 위하여 부유사농도 C 와 유속 μ 의 곱을 기준점 a 에서 수면까지 적분하여 다음 식(17)과 같이 나타내었다.

$$q_s = \int_a^d C \mu dy \quad (17)$$

나아가, 부유사농도의 연직분포를 알기 위해 확산방정식으로 나타내면 다음 식(18)과 같다.

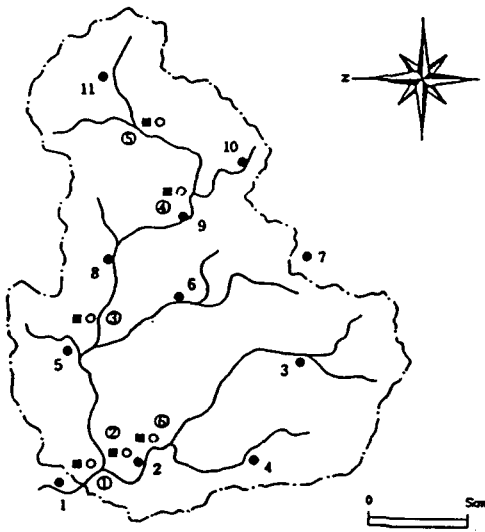
$$(1-C)CW_{s,m} + \epsilon_s dC/dy = 0 \quad (18)$$

윗 식에서 $W_{s,m}$ 은 농도영향을 고려한 사립자의 침강속도로 Richardson-Zaki의 공식을 이용하여 다음 식(19)와 같이 나타낸다.

$$W_{s,m} = (1-C)^m W_s \quad (19)$$

Table 2. The results of discharge measurements in the Bongwhang bridge

Observation	Discharge (m ³ /sec)	Velocity (m/sec)	Width (m)	Depth (m)	Slope	Temperature (°C)	Bed Material Diameter(mm)			
							D35	D50	D65	D90
7.13. 11:30	6.44	0.11	90.0	0.67	0.0001	21.0	0.821	1.320	2.021	4.212
12:00	34.07	0.32	104.0	1.22	0.0001	21.0	0.961	1.821	2.324	4.182
16:40	10.64	0.15	104.0	0.80	0.0001	20.8	0.904	1.431	2.241	4.192
7.18. 10:00	15.02	0.19	88.0	0.92	0.0001	20.5	0.897	1.392	2.121	4.210
13:00	75.15	0.62	97.0	1.40	0.0003	21.0	0.789	1.241	2.040	4.030
15:00	23.41	0.27	90.0	1.03	0.0002	21.0	0.824	1.221	2.040	4.120
8.15. 10:30	21.69	0.26	91.0	0.99	0.0002	20.0	0.831	1.250	2.110	4.040
14:30	50.96	0.44	97.0	1.34	0.0003	20.6	0.821	1.420	2.040	4.120
17:00	17.58	0.22	88.0	0.95	0.0001	20.0	0.811	1.320	2.060	4.080
8.25. 10:20	85.22	0.62	100.0	1.53	0.0006	19.8	0.904	1.350	2.110	4.210
13:00	653.11	2.78	113.5	2.46	0.0019	20.0	0.924	1.290	2.080	4.110
14:20	250.26	1.43	100.0	1.90	0.0014	20.0	0.897	1.140	2.110	4.040
17:40	60.46	0.51	97.0	1.39	0.0003	19.8	0.911	1.210	2.040	4.110
9.24. 13:30	32.44	0.31	94.0	1.15	0.0001	19.2	0.913	1.230	2.060	4.070
16:50	8.94	0.18	74.0	0.60	0.0001	19.1	0.925	1.140	2.090	4.210



Legend

- : Self-Recording Rain Gauge and Evaporation
- : Self-Recording Water Stage Gauge
- : Self-Recording Ground Water Stage Gauge

No. of Station

- | | | |
|-------------|-----------------|--------------|
| 1. KUNWI(S) | 7. SHINREUNG(W) | ① MUSEUNG |
| 2. HYOREUNG | 8. EUHHEUNG | ② BYEUNGCHUN |
| 3. DAERYUL | 9. HWASU | ③ MISEUNG |
| 4. KOME | 10. HWASAN | ④ KONO |
| 5. WOORO | 11. SEUKSAN | ⑤ DONGKOK |
| 6. SANSEUNG | | ⑥ HYOREUNG |

Fig. 1. Study river basin(Wi-stream).

유사의 확산계수 ϵ_s 는 Reynolds Analogy에 의해 난류에서의 운동량 확산계수 ϵ_j 를 이용하여 다음 식(20)과 같이 나타낸다.

$$\epsilon_s = \beta \Phi \epsilon_j \quad (20)$$

Rijn은 운동량 확산계수를 포물-상수형(Parabolic-Constant)분포를 이용하여 다음 식(21) 및 (22)와 같이

나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{j,max} = 0.25k\mu, a : y/d \geq 0.5 \quad (21)$$

$$\epsilon_j = y/d(1-y/d)k\mu, a : y/d < 0.5 \quad (22)$$

식(21)과 (22)에서 k는 von Karman 상수이며 약 0.4이고, 식 (21), (22)를 (19)식을 고려한 확산방정식 식 (18)에 각각 대입하여 적분하면 복잡한 형태의 농도분포식이 얻어지나, 부피농도 $C < C_a < 0.001$ 인 경우 다음 식 (23) 및 (24)와 같이 간략화된다.

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{d-y}{y} \cdot \frac{a}{d-a} \right)^2; y/d < 0.5 \quad (23)$$

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{a}{d-a} \right)^2 \cdot e^{-4x(y/d-0.5)}; 0.5 < y/d < 1.0 \quad (24)$$

3. 분석 대상 유역의 수리 및 유사 해석

본 연구의 대상유역은 낙동강유역의 IHP대표유역인 위천유역으로서 1982년부터 1998년 현재까지 약 16년에 걸쳐서 장기간 수문관측을 실시 하고 있으며, 수문관측시설은 수위관측소 6개소, 지하수위 관측소 6개소, 강우량 관측소 11개소 그리고 증발량 관측소 11개소가 있다. 그리고 기상관측소는 유역내에 없고 인근지역인 의성, 대구, 선산 및 영천에서 관측하고 있으나, 본 유역의 분석대상 유역을 대표할 수 없는 실정이다. 분석대상유역의 하천수계 구성은 Fig. 1과 같이 분류와 비교적 큰 1개의 지류로 구성되어 있다.

3.1 측정 지점의 선정

본 연구에서 선정된 측정지점은 그 지점이 유역을 대표할 수 있는 지점이고, 동시에 대상하천의 수리·수문학 특성상 유사특성을 잘 반영해야 하며, 채취가 용이하고 정확한 시료채취를 할 수 있는 곳이어야 한다. 본 유역에서는 이런 조건을 만족할 수 있는 지점을 유역의 하류부인 봉황교지점과 상류부에 속하는 나호교지점을 유사량 측정지점으로 선정하였다.

결정론적 유수량 산정공식의 민감도 분석에 관한 연구

Table 3. The results of discharge measurements in the Naho bridge

Observation	Discharge (m ³ /sec)	Velocity (m/sec)	Width (m)	Depth (m)	Slope	Temperature (° C)	Bed Material Diameter(mm)			
							D35	D50	D65	D90
7.13. 10:00	17.77	0.28	134.1	0.45	0.0002	21.0	0.749	1.120	2.010	3.980
13:30	43.24	0.43	145.0	0.75	0.0004	21.0	0.841	1.320	1.980	3.780
15:00	31.06	0.38	140.6	0.60	0.0004	20.7	0.781	1.240	2.080	4.020
7.18. 9:00	36.15	0.43	143.2	0.65	0.0004	20.0	0.821	1.140	2.020	3.980
11:30	72.71	0.49	157.1	1.03	0.0004	20.0	0.811	1.250	2.120	4.110
17:00	9.80	0.24	94.3	0.25	0.0003	21.0	0.823	1.290	2.060	3.980
8.15. 9:30	28.46	0.37	137.8	0.55	0.0003	20.0	0.741	1.020	1.840	3.850
11:30	41.18	0.41	137.8	0.75	0.0004	20.1	0.751	1.120	1.820	3.590
12:30	52.03	0.43	152.1	0.85	0.0004	21.0	0.721	1.040	1.920	4.020
8.25. 8:00	95.39	0.57	159.5	1.15	0.0009	19.0	0.821	1.090	1.940	4.040
8:50	212.54	0.99	159.5	1.45	0.0014	19.2	0.834	1.210	2.040	4.110
11:40	418.97	1.50	159.5	1.85	0.0021	19.4	0.825	1.340	2.050	4.210
15:30	76.90	0.57	154.7	0.95	0.0006	19.0	0.942	1.290	2.030	4.110
9.24. 11:00	24.75	0.33	137.8	0.54	0.0003	19.1	0.949	1.140	2.030	4.040
15:00	10.67	0.22	125.4	0.34	0.0002	19.8	0.897	1.040	2.110	4.080

Table 4. Sediment concentration & total sediment in the Bongwhang bridge

Number	Date	Time	Sediment Concentration(PPM)		Total Sediment (tons/day)
			Total	Sand	
1	920713	11:30	99.9	31.3	48.7
2	920713	12:00	170.0	44.4	848.1
3	920713	16:40	139.0	31.6	112.4
4	920718	10:00	271.0	92.2	351.4
5	920718	13:00	348.0	103.4	2,258.2
6	920718	15:00	129.0	36.8	110.3
7	920815	10:30	186.0	48.6	140.3
8	920815	14:30	260.0	72.8	702.9
9	920815	17:00	365.0	82.6	104.0
10	920825	10:20	448.0	139.0	790.4
11	920825	13:00	1,124.0	873.5	79,901.7
12	920825	14:20	965.0	426.2	20,867.3
13	920825	17:40	475.0	195.1	1,436.8
14	920924	13:30	213.0	60.2	969.1
15	920924	16:50	241.0	59.7	91.5

3.2 수리량 분석

유수량 측정시 병행하여 관측한 유속, 수심, 수면경사, 하폭, 수면등은 중요한 수리변수들이며, 이들 중 수위-유량자료를 이용하여 주 관측지점인 봉황교, 나호교 지점에 대해 수위-유량곡선(Rating Curve)을 작성하였다. 다음 Table 2와 Table 3은 봉황교와 나호교지점의 1992년 7월 13일에서 1992년 9월 24까지의 실측한 수리량측정성과이다. 그리고 Fig.2 와 Fig.3은 봉황교 및 나호교의 Rating-Curve을 나타낸 것이다.

3.3 유수량 측정

본 연구에 사용된 부유사 및 하상토 채취장비는 한국전설기술연구원이 보유하고 있는 P-61-A1 점적분 부유사 채취기와 BM 54 하상토 채취기를 사용하였다. 주 관측지점인 봉황교, 나호교지점은 20m 간격으로 측정선

을 정하였다. 부유사 채취는 부유사의 농도분포와 입경 분석을 위하여 수심적분 채취방법으로 각 측정선에 대하여 2회 실시하였으며, 부유사농도의 연직분포를 측정하기 위하여 각 측정선의 측정지점에서의 점적분 채취방법으로 부유사를 채취하였으며, 하상토채취는 BM 54의 채취법에 준하였다.

3.4 부유사 농도 분석

채취된 부유사농도를 측정하는 방법은 증발법과 여과법이 있으나, 본 연구에서는 증발법에 의한 부유사농도를 분석하였으며, 그 과정은 다음과 같다. 먼저 시료를 채취장소, 측정지점, 측정시간, 수온 등을 기록하여 부유물이 침전되도록 하루동안 냉암소에 보관한 후 시료병에 약 30ml 남기고 표층수만 제거하였으며, 나머지를 노건조시켜 부유사중량을 측정함으로써 농도를 측정하였다. 이때 용질물에 대한 보정치를 뺀 후 유사농도를

Table 5. Sediment concentration & total sediment in the Naho bridge

Number	Date	Time	Sediment Concentration(PPM)		Total Sediment (tons/day)
			Total	Sand	
1	920713	10:00	100.0	37.9	153.2
2	920713	13:30	189.0	53.9	705.3
3	920713	15:00	130.0	32.5	348.5
4	920718	09:00	186.0	56.5	581.6
5	920718	11:30	200.0	66.1	1,256.6
6	920718	17:00	16.0	3.8	12.7
7	920815	09:30	279.0	55.6	479.4
8	920815	11:30	346.0	92.4	519.2
9	920815	12:30	456.0	144.4	2,049.6
10	920825	08:00	364.0	130.9	1,320.4
11	920825	08:50	580.0	183.9	10,650.2
12	920825	11:40	1,073.0	439.5	38,825.4
13	920825	15:30	287.0	95.7	1,905.1
14	920924	11:00	432.0	163.2	606.9
15	920924	15:00	119.0	38.3	145.6

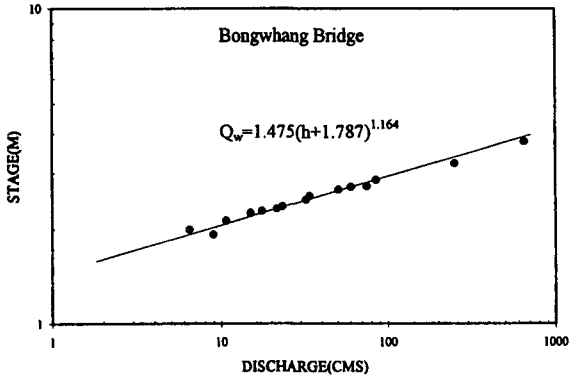


Fig. 2. The rating curve in the Bongwhang bridge station(Wi-stream, 1992.7~9).

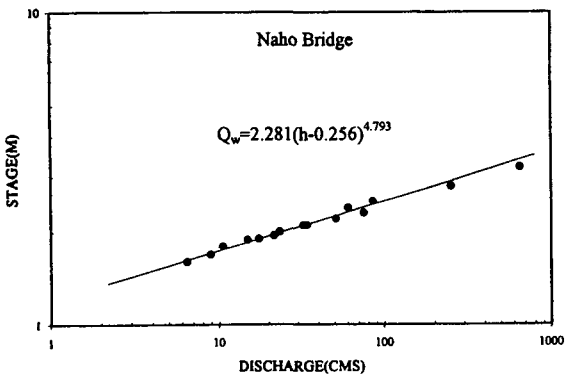


Fig. 3. The rating curve in the Naho bridge station (Wi-stream, 1992.7~9).

구하였다. 본 연구대상유역의 봉황교와 나호교에서의 유사농도와 유사량의 분석은 Table 4와 Table 5와 같다.

4. 유사량 공식의 민감도 분석

본 연구에서는 봉황교 및 나호교 두지점에서의

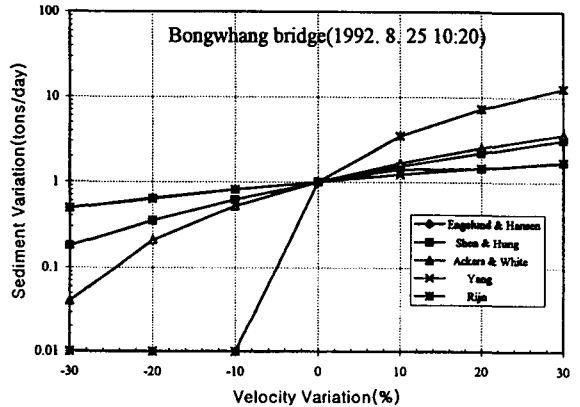


Fig. 4(a). The formulas sensitivity through the velocity variation in the Bongwhang bridge.

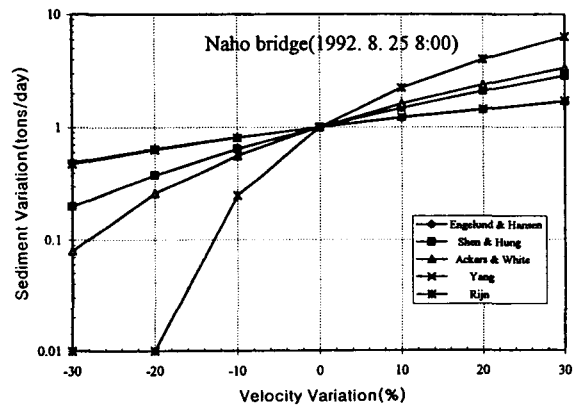


Fig. 4(b). The formulas sensitivity through the velocity variation in the Naho bridge.

1992년 7월 13일부터 1992년 9월 24일까지의 유량측정성과를 이용하여 유사량공식에 적용·분석하기 위하여, 본 연구에서 선정된 5개의 유사량공식을 전산화하여 분석하였으며, 수리량 변수인 유속, 수심, 경사, 및

Table 6(a). The comparison of total sediment load through the velocity variation in the Bongwhang bridge (1992. 8. 25 10:20)

Velocity Variation (m/sec)		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (tons/day)
-30%	0.434	421.0	39.2	5.77	393.0	-	-
-20%	0.496	550.0	76.0	28.0	518.0	-	-
-10%	0.558	695.0	133.0	68.9	660.0	-	-
0%	0.620	859.0	215.0	132.0	819.0	42.7	790.4
10%	0.682	1,040.0	328.0	219.0	996.0	149.0	-
20%	0.744	1,240.0	477.0	333.0	1,190.0	313.0	-
30%	0.806	1,450.0	667.0	478.0	1,400.0	539.0	-

Table 6(b). The comparison of total sediment load through the velocity variation in the Naho bridge(1992. 8. 25 8:00)

Velocity Variation (m/sec)		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (tons/day)
-30%	0.399	867.0	101.0	18.3	680.0	-	-
-20%	0.456	1,130.0	187.0	58.5	896.0	-	-
-10%	0.513	1,430.0	315.0	126.0	1,140.0	40.8	-
0%	0.570	1,770.0	494.0	226.0	1,420.0	163.0	1,320.4
10%	0.627	2,140.0	732.0	363.0	1,730.0	365.0	-
20%	0.684	2,550.0	1,040.0	541.0	2,070.0	655.0	-
30%	0.741	2,990.0	1,420.0	763.0	2,450.0	1,040.0	-

Table 7(a). The comparison of total sediment load through the depth variation in the Bongwhang bridge (1992. 8. 25 10:20)

Depth Variation (m)		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (tons/day)
-30%	1.071	753.0	81.6	21.3	709.0	-	-
-20%	1.224	784.0	111.0	41.3	740.0	-	-
-10%	1.377	819.0	153.0	75.2	776.0	-	-
0%	1.530	859.0	215.0	132.0	819.0	42.7	790.4
10%	1.683	905.0	309.0	228.0	871.0	190.0	-
20%	1.836	960.0	453.0	396.0	935.0	513.0	-
30%	1.989	1,030.0	685.0	702.0	1,020.0	1,160.0	-

Table 7(b). The comparison of total sediment load through the depth variation in the Naho bridge(1992. 8. 25 8:00)

Depth Variation (m)		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (ton/say)
-30%	0.805	1,550.0	204.0	48.0	1,210.0	-	-
-20%	0.920	1,620.0	270.0	82.1	1,270.0	-	-
-10%	1.035	1,690.0	362.0	137.0	1,340.0	38.0	-
0%	1.150	1,770.0	494.0	226.0	1,420.0	163.0	1,320.40
10%	1.265	1,870.0	686.0	375.0	1,520.0	435.0	-
20%	1.380	1,980.0	974.0	631.0	1,650.0	977.0	-
30%	1.495	2,120.0	1,420.0	1,090.0	1,800.0	2,040.0	-

수운을 -30%에서 10%단위로 30%까지 증가시켜, 유사량 산정결과의 거동을 나타내는 민감도분석을 실시하였다. 실측자료중에서는 자료의 신뢰성에 의하여 봉황교의 경우 1992년 8월 25일 10시 20분의 측정성적을 분석 입력자료로 작용하였고, 나호교에서는 1992년 8월 25일 8시의 자료를 적용하였다.

4.1 유속에 대한 민감도

유속에 대한 민감도분석은 유속을 -30%에서 30%까지 10%씩 변화시켜가면서 유사량의 변동을 분석하였으며, 각 변화치에 대하여 각유사량의 변동상태를 다음 Table 6(a),(b)와 같이 나타내었고, Fig. 4(a),(b)와 같이 나타내었다. 유사량산정에서 실측유사량과의 상관성을

Table 8(a). The comparison of total sediment load through the slope variation in the Bongwhang bridge (1992. 8. 25 10:20)

Slope Variation		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (tons/day)
-30%	0.00042	503.0	102.0	105.0	465.0	38.4	-
-20%	0.00048	614.0	136.0	115.0	576.0	39.6	-
-10%	0.00054	733.0	174.0	124.0	695.0	41.0	-
0%	0.00060	859.0	215.0	132.0	819.0	42.7	790.4
10%	0.00066	991.0	260.0	139.0	949.0	44.9	-
20%	0.00072	1,130.0	307.0	146.0	1,080.0	47.5	-
30%	0.00078	1,270.0	358.0	152.0	1,220.0	51.0	-

Table 8(b). The comparison of total sediment load through the slope variation in the Naho bridge(1992. 8. 25 8:00)

Slope Variation		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (tons/day)
-30%	0.00063	1,040.0	250.0	181.0	818.0	155.0	-
-20%	0.00072	1,270.0	325.0	198.0	1,010.0	157.0	-
-10%	0.00081	1,510.0	406.0	213.0	1,210.0	160.0	-
0%	0.00090	1,770.0	494.0	226.0	1,420.0	163.0	1,320.4
10%	0.00099	2,040.0	586.0	239.0	1,640.0	168.0	-
20%	0.00108	2,330.0	684.0	251.0	1,870.0	174.0	-
30%	0.00117	2,620.0	785.0	262.0	2,100.0	182.0	-

Table 9(a). The comparison of total sediment load through the temperature variation in the Bongwhang bridge(1992. 8. 25 10:20)

Temperature Variation		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (tons/day)
-30%	13.86	859.0	221.0	147.0	745.0	54.8	-
-20%	15.84	859.0	219.0	142.0	770.0	50.5	-
-10%	17.82	859.0	217.0	136.0	794.0	46.5	-
0%	19.80	859.0	215.0	132.0	819.0	42.7	790.4
10%	21.78	859.0	214.0	127.0	845.0	39.2	-
20%	23.76	859.0	213.0	122.0	872.0	35.9	-
30%	25.74	859.0	211.0	117.0	898.0	32.8	-

Table 9(b). The comparison of total sediment load through the temperature variation in the Naho bridge (1992. 8. 25 8:00)

Temperature Variation		Engelund & Hansen (tons/day)	Shen & Hung (tons/day)	Ackers & White (tons/day)	Yang (tons/day)	Rijn (tons/day)	Observed (tons/day)
-30%	13.3	1,770.0	506.0	250.0	1,320.0	188.0	-
-20%	15.2	1,770.0	502.0	242.0	1,350.0	179.0	-
-10%	17.1	1,770.0	498.0	234.0	1,390.0	171.0	-
0%	19.0	1,770.0	494.0	226.0	1,420.0	163.0	1,320.4
10%	20.9	1,770.0	490.0	219.0	1,460.0	156.0	-
20%	22.8	1,770.0	486.0	211.0	1,490.0	149.0	-
30%	24.7	1,770.0	483.0	204.0	1,530.0	143.0	-

비교한 결과 Engelund & Hansen공식과 Yang공식이 실측치 유사량과 가장 상관성이 높은 것으로 분석되었으며, 민감도분석 결과 Rijn공식과 Ackers & White공식이 가장 민감한 것으로 나타났다. 또한 Engelund & Hansen공식과 Yang공식이 가장 안정된 거동형태를 나타내는 것으로 분석되었다.

4.2 수심에 대한 민감도

수심에 대한 민감도분석은 수심을 -30%에서 30%까지 10%씩 변화시켜가면서 유사량의 변화율을 분석하였으며, 각 변화치에 대하여 각각의 변동상태는 다음 Table 7(a),(b)와 같이 나타내었고, Fig. 5(a),(b)와 같이 나타내었다. 민감도분석 결과 Rijn공식과 Ackers &

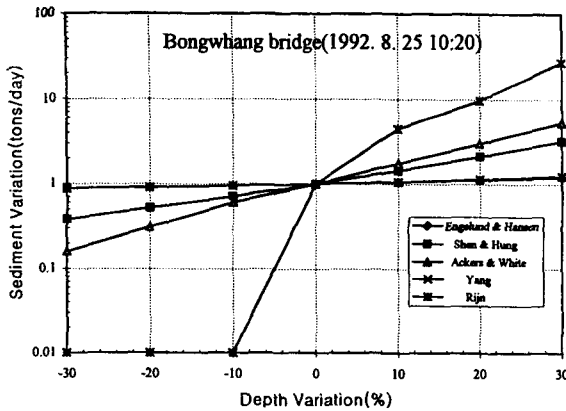


Fig. 5(a). The formulas sensitivity through the depth variation in the Bongwhang bridge.

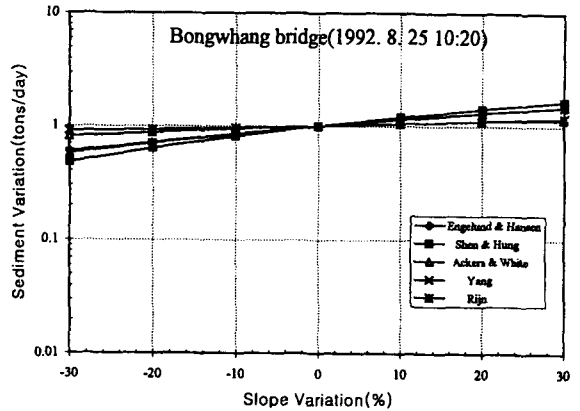


Fig. 6(a). The formulas sensitivity through the slope variation in the Bongwhang bridge.

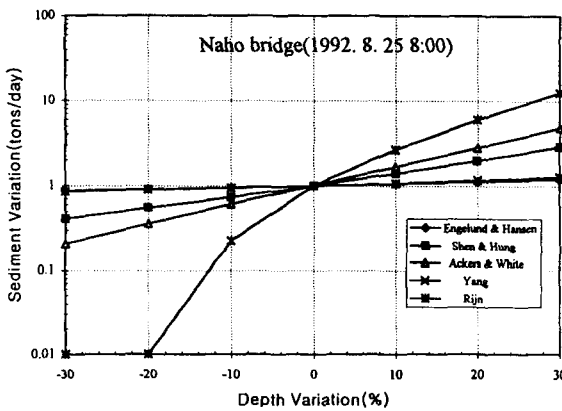


Fig. 5(b). The formulas sensitivity through the depth variation in the Naho bridge.

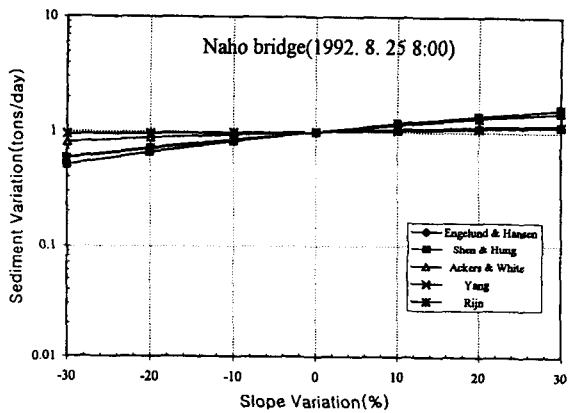


Fig. 6(b). The formulas sensitivity through the slope variation in the Naho bridge.

White공식이 가장 민감한 것으로 나타났다. 또한 Engelund & Hansen공식과 Yang공식이 가장 안정된 거동형태를 나타내는 것으로 분석되었다.

4.3 경사에 대한 민감도

경사에 대한 민감도분석은 경사를 -30%에서 30%까지 10%씩 변화시켜가면서 유사량의 변동을 분석하였으며, 각 변화치에 대하여 각각의 변동상태를 다음 Table 8(a),(b)와 같이 나타내었고, Fig. 6(a),(b)와 같이 나타내었다. 민감도분석 결과 경사의 변화에 대한 각 공식들은 안정한 상태를 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

4.4 수온에 대한 민감도

수온에 대한 민감도분석은 수온을 -30%에서 30%까지 10%씩 변화시켜가면서 유사량의 변동을 분석하였으며, 각 변화치에 대하여 각각의 변동상태를 다음 Table 9(a),(b)와 같이 나타내었고, Fig. 7(a),(b)와 같이 나타내었다. 그 결과 Engelund & Hansen공식은 수온에 관한 함이 없으므로 유사량에 있어서 변화량은 없고, 그 외의 공식은 수온에 그다지 민감한 것으로 나타나지 않았다. 그러나 다른 변수와는 달리 수온의 증가는 유사입자의

침강속도가 증가하여 유사량이 감소하나, Yang의 공식은 수온이 증가할 때 유사량도 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 알려진 수많은 유사량 산정공식들을 비교·검토하여 일반하천에 적합한 유사량공식을 선정하기 위하여, 공식의 민감도분석을 통한 공식의 적합성을 분석하였으며, 그 중에서 비교적 우수하다고 판단되는 유사량 산정공식 5개를 선정하여, IHP과업 대표 유역인 위천유역에 적용하여, 실측유사량 관측치와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 유도하였다.

1) 본 연구에서는 실측유사량 관측치와 유사량 산정공식을 비교·검토한 결과, 위천유역에서는 Engelund & Hansen공식과 Yang공식이 비교적 정확한 유사량산정공식으로 분석되었고, 일반적으로 정도가 높은 것으로 나타나 있는 Rijn, Ackers & White, Shen & Hung 공식은 본 유역의 경우는 적합성이 다소 떨어지는 것으로 분석되었다.

2) 본 연구에서는 유사량에 영향을 미치는 각 매개변수별(유속, 수심, 경사, 수온)로 민감도분석을 실시한 결

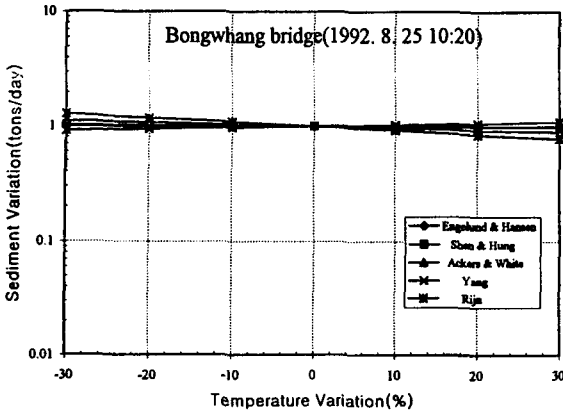


Fig. 7(a). The formulas sensitivity through the temperature variation in the Bongwhang bridge.

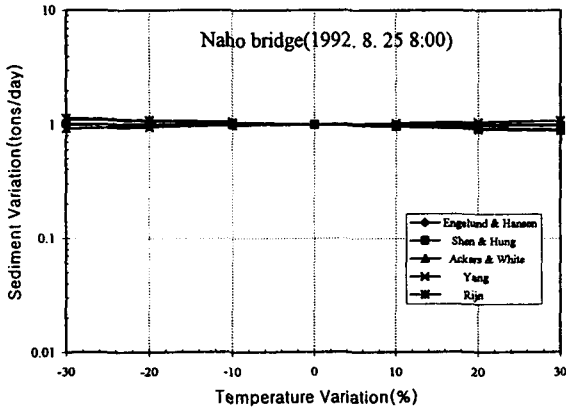


Fig. 7(b). The formulas sensitivity through the temperature variation in the Naho bridge.

과, 유속과 수심에서는 Rijn공식과 Ackers & White공식이 가장 민감한 반응을 나타내고 있고, Engelund & Hansen 공식과 Yang공식이 가장 안정된 거동형태를 나타내고 있는 것으로 분석되었으며, 경사와 수온에서는 모든 공식이 안정한 상태를 유지되는 것으로 분석되었다.

3) 따라서 본 하천에서는 유사 특성을 분석한 결과 완전한 의미의 층적하천이라고 볼 수 없으므로, 기 적용된 유사량 산정공식은 외국에서 개발된 공식인 관계로 본 하천에의 적용에 있어서는 많은 신중을 요하고 있으며, 앞으로의 연구에 의하여 본 하천에 가장 타당한 유사량산정공식을 개발할 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

건설부, 1982~1996, 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
남선우, 1978, 하천의 유사량과 하상변동에 관한 연구,

한국수문학회지, 제11권 제1호.
신동수, 김희중, 강주복, 1981, 한국하천의 유사량 산정에 관한 연구(1), 한국수문학회지, 제14권 제3호.
서승덕, 1967, 소류(하상)토사량 계산의 이론과 실제, 농업토목학회지, 제9권 제2호.
안상진, 1969, 북한강의 유사량에 관한 연구, 대한토목학회지, 제17권 제4호.
지광하, 1967, 유사시료의 채취와 유사량 계산방법, 농업토목학회지, 제9권 제1호.
한국건설기술연구원, 1989, 하천유사량산정방법의 선정기준개발, 기본 연구과제 보고서, 전기연 89-WR-112.

Ackers, P. and White, W. R., 1973, Sediment transport : new approach and analysis, J. of Hyd. Div., ASCE, Vol. 99, HY11.
Duboys, H.A., 1879, Le rhone et les rivieres a lit channels, Annales des Ponts et Chaussees, Series 5, Vol. 18.
Einstein, H.A., 1934, Der hydraulics oder profil radius, Schweizerische Bauzeitung, Vol. 103, No. 8.
Einstein, H.A., 1942, Formulas for the transportation of bed load, Trans. of ASCE, Vol. 107, Paper No. 2140.
Engelund, F., and Hansen, E., 1967, A Monograph on sediment transport in alluvial streams, Teknisk Vorlag, Copenhagen, Denmark.
Laursen, E.M., 1958, The total sediment load of streams, J. of Hy. Div., ASCE, Vol. 54, HY1, Feb.
Meyer-Peter, E., and Muller, R., 1948, Formulas for bed-load transport, Report on the 2nd Meeting of International Association for Hydraulic Research, Stockholm, Sweden.
Rijn, L.C. Van, 1984, Sediment transport, part I : bed load transport, J. of Hy. Div., ASCE, Vol. 110, HY10.
Shen, H.W. and Hung, C. S., 1971, An engineering approach to total bed material load by regression analysis, Proc. of Sedimentation Symposium, Berkeley, California.
Yang, C.T., 1979, Unit stream power equation for total load, J. of Hydrology, Vol. 40, No.1, pp. 123-138.
White, W.R., Milli, H. and Crabbe, A.D., 1973, Sediment transport : an appraisal methods, Vol. 2, Hydraulics Research Station, Report No. IT 119., Wallingford, U.K., Nov.