

하천 유사량 공식들의 비교평가

Comparative Evaluation of Some Selected Sediment Transport Formulas

유 권 규* · 우 효 섭**
 Yu, Kwone Kyu · Woo, Hyo Seop

Abstract

Performances of a total of 6 selected sediment transport formulas including Engelund & Hansen(EH)'s, Ackers & White(AW)'s, Yang(YN)'s, Brownlie(BR)'s, Karim & Kennedy(KK)'s, and Rijn(RJ)'s ones, which have been known to be relatively reliable, were tested using the 1,399 measured sediment discharge data points of the 20 rivers selected from Brownlie's compendium of sediment discharge. The calculated results were plotted with the input parameters such as the unit discharge, mean velocity, flow depth, energy slope, and median diameter respectively, and trend of each formula's performance was analyzed. These analyses revealed that, in general, EH's and RJ's formulas are more reliable, BR's, AW's, and KK's ones are moderately reliable, and YN's one is less reliable. AW's formula drastically overestimates sediment discharge for fine sediment($D < 0.15\text{mm}$), and YN's one underestimates sediment discharge for streams with large water discharge($q > 5\text{ cms/m}$).

요 약

현재까지 학계에 발표된 총유사량 산정공식들중 그 결과가 비교적 우수한 것으로 알려진 Engelund & Hansen(EH), Ackers & White(AW), Yang(YN), Brownlie(BR), Karim & Kennedy(KK), Rijn(RJ) 공식 등 6개 공식을 Brownlie의 유사량 자료집에서 선정된 20개 하천의 1,399개 유사량 실측 자료에 적용하여 그 결과를 비교하였다. 또한 그 계산 결과를 입력변수인 단위유량, 유속, 수심, 에너지 경사, 중앙입경별로 도시하여, 이러한 각 변수에 대한 각 공식의 계산결과의 경향을 검토하였다. 그 결과 EH와 RJ공식은 비교적 우수하고, BR, AW, KK공식은 보통이며, YN공식은 상대적으로 불량한 것으로 나타났다. 또한 AW공식은 세사의 경우 ($D < 0.15\text{mm}$)에 유사량을 매우 과대추정하며, YN공식은 유량이 큰 경우 ($q > 5\text{ cms/m}$) 유사량을 과소추정하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원

1. 序 論

충적하천(Alluvial Channel)의 유사량산정은 하천연구의 기본 과제중의 하나로써, 하천구역내의 수리구조물의 설계 및 유지관리, 하천개수 및 하도의 안정, 저수지의 설계 및 관리 등 수자원 계획, 개발 및 관리에 반드시 고려해야 할 사항이다. 또한 장기적인 면에서 저수지내의 유사이송 및 퇴적에 따른 저수지 기능의 감소와 그에 따른 수명 단축의 문제, 하상변동과 취수구 지점 매물에 따른 용수취수 곤란의 문제, 또는 유사에 의한 오염원의 확산 문제 등은 심각한 문제로 대두될 수 있다.

그런데, 하천 유사량을 직접 실측하는 데는 많은 인력과 경비와 시간이 소요되며 실제 측정도 용이하지 않으므로, 측정이 비교적 용이한 수심, 유속, 경사 등 몇 가지 수리량자료와 하상토(Bed Material)자료를 유사량 공식에 적용하여 유사량을 산정하는 것이 보편적이다. 그러나, 하천유사량 산정 공식은 학계나 실무에 알려진 것만도 수십개나 넘는다. 더우기 각 공식의 계산결과가 심지어 수백배 이상까지 서로 큰 차이를 보이기도 하며, 실측치와의 오차도 공식에 따라 매우 다른 양상을 보이므로, 실제 적용시 어느 공식을 사용할 것인가는 매우 중요한 문제이다.

따라서, 본 연구의 목적은 널리 알려진 유사량 공식들중 비교적 우수한 것으로 알려진 5-6개의 공식들을 선정하여 각각의 유사량산정 결과의 정확도를 비교 검토하고, 각 공식의 특징과 문제점들을 밝혀서 적절한 유사량 공식의 선정에 기여할 수 있게 하기 위한 것이다. 이를 위하여, Brownlie⁽⁴⁾의 유사량 실측자료집에서 1,399개의 자료를 엄선하여 사용하였다.

2. 유사량 공식들의 비교 연구 동향

현재 학계에 알려진 유사량 산정 공식들은 약 60여개가 넘으며⁽¹⁾, 이 분야에 대한 연구의 진척과 전자계산기의 발달에 따라 더 증가할 것으로 예상된다. 그러나 이러한 공식들의 유사량 산정결과는 천차만별이어서 그 계산 결과치가 수십배 차이가 나는 경우도 많다. 따라서 이 공식들의 우열을 가리는 것이 중요한 문제가 되며, 1960년에 Vanoni 등⁽²⁾이 미국의 Colorado강 등 4개 하천의 유사량

실측자료 120여개를 Du Boys공식의 7개 공식에 적용하여 비교한 것을 효시로 문헌상으로 적어도 15개 이상의 비교 연구가 수행된 바 있다. 이를 요약하면 표 1과 같으며, 이 중 주목할 만한 것으로는 비교연구방법이 합리적이고, 사용된 자료가 충실한 White 등⁽³⁾의 연구와 Brownlie⁽³⁾의 연구를 들 수 있다. 이러한 유사량공식의 비교연구에 대한 보다 자세한 사항은 각 원전을 참조하거나 우 및 유⁽¹⁾의 보고서를 참조하기 바란다.

3. 비교대상 공식의 산정

우 및 유⁽¹⁾는 Einstein공식 등 총 9개 총유사량 공식들에 대해 민감도 분석, 가상하천자료에 의한 분석, 실측자료를 이용한 분석을 수행하여 다음과 같이 결론을 내렸다.

- ① Engelund & Hansen⁽⁵⁾, Ackers & White⁽²⁾, Rijn⁽⁷⁾등의 공식이 유사량 산정결과가 비교적 양호한 것으로 판명되었다. 또한 각 공식의 적절한 적용범위는 EH, AW 공식의 경우 중규모 이하의 하천, RJ공식의 경우 중규모 이상의 하천인 것으로 나타났다.
- ② Colby공식과 Yang⁽¹¹⁾공식도 비교적 양호하였으나, 대하천에 적용할 경우 전자는 유사량을 과대 산정하고, 후자는 과소산정하는 경향이 있다.
- ③ Einstein, Toffaleti, Shen & Hung, Ranga Raju공식들은 유사량 산정 결과가 상대적으로 불량하므로 특별한 근거 없이는 사용을 지양하는 것이 좋다.
- ④ 민감도 분석 결과, Einstein공식과 Toffaleti공식은 물리 현상에 위배되는 듯한 거동을 보였으며, 다른 공식들에 비해 공식의 유사량 산정 결과가 일관성이 없게 나타났다.
- ⑤ 문헌에 의해 한국 하천 유사의 특성을 개략적으로 분석한 결과, 한국 하천은 일반적으로 완전한 의미의 충적하천이 흔하지 않으며, 따라서 외국에서 개발된 이러한 유사량공식들의 무비판적인 한국하천에의 적용은 신중을 요한다.
이들뿐만 아니라 표1의 여러 연구들의 결과에서도 Einstein, Colby, Toffaleti 공식들은 그 결과가 상대적으로 불량하므로 본 비교연구의 대상에서 제외한다. 따라서 본 연구의 비교 공식으로는 위의 연구뿐만 아니라 표 1에서 보는 바와 같이 비교적

우수한 것으로 판명된 EH, RJ, YN공식등 4개 공식을 선정하였다. 또한, 최근에 개발된 공식중에서 KK[®] 공식과 ER[®]공식을 추가하여 총 6개 공식을 비교하기로 한다.

각 공식의 개요에 대해서는 EH, AW, YN, RJ 공식은 유사량 관련 문헌에 널리 소개되어 있거나 원전을 구하기가 비교적 쉬우므로 여기서는 설명을 생략하고 ER과 KK공식에 대해서만 간단히 설명한다.

Brownlie⁽³⁾는 먼저 다음과 같은 두 가지 변수를 선정하였다.

$$\text{입경 Froude수 } F_g = \frac{V}{\sqrt{(s-1)g D_{50}}} \quad (1)$$

$$\text{입경 Reynolds수 } R_g = \frac{\sqrt{g D_{50}^3}}{\nu} \quad (2)$$

윗식에서, V=평균유속, s=유사의 비중, g=중력가속도, D₅₀=하상토의 중앙입경, ν=물의 동점성계수이다.

한편 Shields 곡선은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_0 = 0.22Y + 0.06(10)^{-7.7Y} \quad (3)$$

여기서

$$Y = (\sqrt{(s-1)}R_g)^{-0.6} \quad (4)$$

이다. 한편 입경 Froude수의 한계값은

$$F_{g0} = 4.596 \tau_0^{0.233} S^{-0.145} \alpha_g^{-0.105} \quad (5)$$

이다. 윗식에서, S=하천경사, α_g=하상토의 입도(gradation)이다. 위의 식들을 이용하여 회귀분석한 결과 유사농도 C(ppm)는

$$C = 7115C_r(F_g - F_{g0})^{1.98} S^{0.621} (r/D_{50})^{-0.321} \quad (6)$$

이다. 여기서 C_r의 값은 실험수로인 경우 100, 하천인 경우는 1268이고, r=경심이다.

한편 Karim & Kennedy⁽⁶⁾의 TLTM(Total Load Transport Model)은 많은 무차원 변수들에 대해 다중회귀분석을 한뒤 그 중에서 몇가지 중요 변수만을 선정하여 간략화한 것으로 공식의 형태는 다음과 같다.

$$\log\left(\frac{q}{\sqrt{(s-1)g D_{50}^3}}\right) = -2.2786 + 2.9719 X_1 + 0.2989 X_2 X_6 + 1.0600 X_1 X_6 \quad (7)$$

여기서 무차원 변수 X₁, X₂, X₆는 다음과 같다.

$$X_1 = \log(V/\sqrt{(s-1)g D_{50}}) \quad (8a)$$

$$X_2 = \log(d/D_{50}) \quad (8b)$$

$$X_6 = \log\left(\frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{(s-1)g D_{50}}}\right) \quad (8c)$$

이다. 윗식에서, q=단위폭당 유사량, d=수심, u_{*}=마찰속도, u_{*c}=한계마찰속도이다.

4. 비교검토 방법

유사량공식들을 비교하는 방법으로는 유사량곡선(Sediment Rating Curve)상에 유사량 실측치와 계산치를 함께 도시하는 방법과 유사량계산치와 실측치의 비인 불일치율(Discrepancy Ratio)을 이용하는 방법이 있다. 이중 후자가 각 공식의 우열을 정량적으로 나타낼 수 있어 합리적이라 하겠다. 불일치율은 다음과 같이 정의된다^(8,9).

$$\text{불일치율}(r) = \text{유사량 산정치}/\text{유사량 실측치} \quad (9)$$

이때 r의 하한은 0이고 상한은 없으므로 비교시 r의 산술 평균은 의미가 적고, 대신 r의 기하평균이 각 공식의 우열을 가늠하는 기준으로 쓰인다. 또한 r은 일반적으로 대수정규분포를 따르므로, r의 기하평균 m_r과 기하표준편차 S_r을 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_r = (r_1 \cdot 0 \text{을 제외한 모든 } r_i \text{의 곱})^{1/n} \quad (10a)$$

$$= \left(\prod_{i=1}^n r_i\right)^{1/n} \quad (10b)$$

식(10a)의 양변에 상용대수를 취하면

$$\log m_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log r_i \quad (11)$$

따라서, 기하표준편차 S_r은 다음과 같이 표시된다.

$$\log S_r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log r_i - \log m_r)^2 \quad (12)$$

또한 r의 16백분위수와 84백분위수는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{16} = m_r / S_r \quad (13a)$$

$$P_{84} = m_r \cdot S_r \quad (13b)$$

여기서, m_r=S_r=1.0이면 그 공식의 산정치는 실측치와 완전히 일치하는 것이다. S_r은 항상 1.0보다 크거나 같지만 m_r은 1.0보다 클 수도 있고 작을 수도 있다. m_r이 1.0보다 작으면 이 공식은 유사량을 과소산정하는 것이며, 1.0보다 크면 유사량을 과대산정하는 것이다. 예를 들어 m_r=2.0이면 이 공식은 평균적으로 유사량을 2배 과대추정하는 것이며, m_r=0.5이면 유사량 1/2배로 과소추정하는 것이다. S_r이 1.0배 보다 상당히 크면 산정치의 편차가 크다

표 2. 비교연구에 사용된 자료의 범위

코드	전체 자료수	이용 자료수	유량 (cms)	하폭 (m)	수심 (m)	에너지경사 (x0.001)	중앙입경 (mm)	유사농도 (ppm)
ACP	151	141	27.50- 528.68	35.36- 140.21	0.76- 4.30	0.0551- 0.1658	0.083- 0.364	13.0- 2,083.0
AMC	11	10	1.22- 29.42	3.20- 22.19	0.80- 2.59	0.0580- 0.3300	0.096- 0.715	44.0- 448.0
ATC	72	63	1,200.60- 14,186.31	313.94- 503.22	6.40- 14.75	0.0096- 0.0513	0.085- 0.303	12.5- 567.3
CHI	32	7	1.29- 166.36	4.31- 66.55	0.79- 3.41	0.0567- 0.1646	0.064- 0.082	726.0- 1,316.9
CHO	33	33	27.52- 427.57	23.77- 121.62	1.31- 3.41	0.0510- 0.2538	0.155- 0.695	18.1- 768.7
CHP	33	33	27.52- 427.57	23.77- 121.62	1.31- 3.41	0.0510- 0.2538	0.090- 0.311	115.7- 1,316.9
COL	131	102	77.53- 500.16	92.64- 254.55	1.131 3.89	0.0370- 0.4070	0.155- 0.695	18.1- 768.7
HII	38	23	0.05- 4.85	0.80- 8.00	0.11- 0.73	0.8400- 1.7200	1.260- 1.460	116.3- 552.9
LEO	72	55	83.33- 499.30	88.70- 250.55	0.96- 4.11	0.0370- 0.3460	0.140- 0.814	11.2- 1,090.6
MID	38	38	9.03- 13.62	37.49- 46.63	0.25- 0.41	0.9280- 1.5720	0.215- 0.436	437.8- 2,444.0
MIS	165	164	1,512.07- 28,825.68	371.22- 1,109.47	4.66- 17.28	0.0183- 0.1336	0.163- 1.129	12.1- 511.7
MOU	100	68	0.19- 1.49	3.92- 4.33	0.10- 0.44	1.3600- 2.7600	0.286- 0.899	26.8- 931.4
NEO	113	60	38.00- 10,200.0	30.00- 845.00	1.39- 13.28	0.0030- 0.6200	0.100- 1.050	10.2- 2,000.4
NIO	40	40	5.86- 16.06	21.03- 21.95	0.40- 0.59	1.1364- 1.7992	0.212- 0.359	392.0- 2,750.0
POR	219	218	29.00- 659.98	69.60- 188.94	0.33- 2.43	0.5400- 0.9700	2.204- 2.603	26.5- 350.9
RED	30	29	190.28- 1,537.56	130.45- 182.88	3.00- 7.38	0.0661- 0.0824	0.094- 0.217	20.9- 499.8
RGC	33	8	15.86- 39.08	20.42- 22.86	0.92- 1.51	0.5300- 0.8000	0.180- 0.280	674.0- 2,695.0
RGR	293	268	0.50- 285.99	7.93- 121.92	0.16- 3.12	0.5300- 2.4600	0.173- 1.407	11.0- 11,400.0
RIO	38	38	35.11- 285.99	40.54- 196.60	0.32- 1.46	0.7400- 0.8900	0.207- 0.368	463.7- 4,544.4
TRI	4	1	39.64	30.18	0.847	3.0000	3.400	1,316.9
계	1,764	1,399	0.05- 28,825.68	0.80- 1,109.47	0.10- 17.28	0.0030- 3.0000	0.064- 3.400	10.2- 11,400.0

표 3. 유사량 공식들의 비교연구 결과

	구 간	EH	AW	YN	BR	KK	RJ
불일치율의 분포 자료수	=0.0	0	1	1	1	1	2
	~0.1	15	21	136	21	35	11
	~0.25	71	78	255	75	122	67
	~0.5	211	303	328	319	306	219
	~1.0	428	431	272	569	498	466
	~2.0	478	349	225	330	322	386
	~4.0	151	144	138	67	91	175
	~10.0	41	50	43	17	23	66
>10.0	4	22	1	0	1	7	
정확도(%) ^{a)}		64.8	55.8	35.5	64.3	58.6	60.9
불일치율의 통계량	최소값 ^{b)}	0.012	0.013	0.011	0.026	0.020	0.038
	최대값	25.63	115.61	10.87	9.70	10.53	13.99
	m _r	0.913	0.844	0.486	0.691	0.699	0.939
	s _r	2.276	2.719	3.329	2.114	2.393	2.453
	P ₅	0.401	0.310	0.146	0.327	0.279	0.383
	P ₉₅	2.077	2.295	1.617	1.462	1.600	2.303

주 a) $1/2 < r < 20$ 인 경우 공식이 정확한 값을 추정한 것으로 판단함.

b) $r=0.0$ 을 제외한 값임.

표 4. 각 공식별 특기 사항

공식	특징 또는 장점	문제점 또는 단점
EH	정확도 우수. 계산 간편.	
AW	계산 간편. 정확도 보통	입경이 작을때 과대추정.
YN	계산 간편.	정확도 불량 대하천에 대해 과소추정.
BR	정확도 우수 계산 간편 불일치율의 표준편차 작음	유사량 추정의 편이성 큼
KK	정확도 보통 계산 간편	유사량 추정의 편이성 큼 단순한 회귀공식으로 각 변수의 물리적 의미 없음.
RJ	정확도 우수 각 변수의 물리적 의미 분명	계산 복잡

는 것을 알 수 있다.

이러한 불일치율의 평균과 표준편차의 크기뿐 아니라 각 입력자료에 따른 분포도 또한 의미가 있다. 특히 어떤 공식의 불일치율의 분포가 유량이나 증양입경에 따라 특이한 경향을 보인다면, 이 공식

의 개발시 자료의 선택에 문제가 있었거나 계수보정(calibration) 과정상 어떤 문제가 있었음을 알 수 있다. 이런 연구 방법은 우 및 유⁽¹⁾의 연구에서 처음으로 채택된 바 있다. 따라서 본 연구에서도 입력변수인 단위유량, 수심, 에너지 경사, 증양입경

에 대해 각 공식의 불일치율의 경향을 분석하였다.

5. 자료의 선정

본 연구의 주된 관심은 하천의 유사량을 산정하는 것이므로, Brownlie의 자료집에서 실험수자료를 제외한 하천자료만을 이용하기로 한다. 이 자료집의 하천자료 1,764개중 유사량을 산정하는데 필요한 사항이 누락되었거나 지나치게 극단적인 값을 갖는 등 적합하지 않은 자료를 삭제하여 각 공식의 우열을 보다 정확하게 평가하고자 하였다. 본 연구에서는 일단 모든 자료 자체의 신뢰성을 인정하고 다만 각 유사량공식의 적용시 필요사항이 누락된 자료만을 삭제한 결과 20개 하천의 1,399개 자료가 남았으며, 이 자료들의 범위는 유량 $Q=0.047\sim 28,800\text{m}^3/\text{s}$, 하폭 $B=0.80\sim 1,100\text{m}$, 수심 $d=0.010\sim 17\text{m}$, 에너지 경사 $S=0.000003\sim 0.003\text{m}/\text{m}$, 중앙입경 $D_{50}=0.064\sim 34\text{mm}$, 실측유사농도 $C_r=10.2\sim 11,400\text{ppm}$ 으로 실제 하천에서 부딪힐 수 있는 자료의 범위를 거의 총망라하고 있다. 이를 자세히 나타내면 표 2와 같다.

6. 비교결과의 검토

위의 6개 공식들을 1,399개 하천자료에 적용하여 계산한 결과를 요약하면 표 3과 그림 1과 같다. 이 결과를 개략적으로 살펴보면, 먼저 정확도면에서 EH와 BR, RJ공식의 유사량 산정결과가 비교적 우수하고, AW와 KK는 보통, YN은 상대적으로 불량한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 YN공식을 제외하고는 기존의 비교연구결과와 일반적으로 일치하고 있다. 특히 1967년에 개발된 EH공식이 그후에 개발된 여타 공식보다 우수하다는 것은 매우 놀라운 사실이 아닐 수 없다. BR공식 역시 EH공식만큼 우수한 결과를 보이니, 이는 당연한 것으로 BR공식은 본 연구에서 사용된 유사량 자료중 일부를 사용하여 보정된 공식이기 때문이다. 또한 특기할 만한 것은 RJ공식의 경우 공식의 기본구조는 이송-확산형(Advection-Diffusion Model)으로서 복잡한 해석적인 방법으로 개발되었음에도 불구하고 상당히 우수한 결과를 보인다는 것이다. RJ공식과 같은 이송-확산형 공식인 Einstein, Toffaleti공식 등이 결과가 상대적으로 매우 불량하고, 계산 결과가 일관성이 없거나 물리현상에 위배되는 경향이 있는데

비해 본다면⁽¹⁾, 이 공식의 우수성은 높이 평가할 만한 것이다. RJ공식을 제외한 다른 5가지 공식들은 그 구조가 비교적 간단한 에너지 개념의 모형이거나 단순한 회귀모형이다.

또한 불일치율의 통계량을 보면, EH와 RJ는 평균이 거의 1.00으로 유사량 추정의 편이성이 없으나, AW, BR, KK는 각각 0.84, 0.69, 0.70으로 약간씩 과소 추정을 하며, YN의 경우 평균이 0.49로 유사량을 평균적으로 거의 절반값으로 추정한다는 것을 알 수 있다. 더구나 이 공식은 표준편차도 상당히 커서 공식의 결과치가 불량함을 알 수 있다.

불일치율의 최대, 최소값을 보면 특히 문제가 되는 것은 AW의 최대값이 100을 넘는다는 것이다. 이 공식이 세사에 대해 매우 과대추정을 한다는 것은 이미 Woo 등⁽¹⁰⁾에 의해 지적된 바 있다.

한편 그림 2~7은 각 공식의 불일치율을 단위유량 별로 도시한 것이다. 여기서 보면 EH, BR, KK, RJ 공식은 특별한 경향성을 보이지 않으나 AW는 편차가 상당히 크고, YN은 대하천으로 갈수록(즉 유량이 커질수록) 유사량을 현저히 과소추정함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Rijn⁽⁷⁾과 우 및 유⁽¹⁾에서도 입증된 바 있다.

그림 8에서 보면 앞에서 언급한 바와 같이 AW공식은 세사의 경우 유사량을 매우 과대추정함을 알 수 있다. 이것은 이 공식의 개발시 몇몇 변수의 계수보정이 잘못되었기 때문이다. 그 결과 입경이 작은 세사의 경우 계산치가 거의 기하급수적으로 증가한다. 그림 8⁽¹⁰⁾에서 보면 유사입경이 AW 자신들이 제안한 공식의 적용한계인 0.4mm에 근접하면 유사농도가 거의 무한대로 증가하여 10^6ppm 보다 커지는 모순된 결과를 보인다. 따라서 AW공식은 D_{50} 이 0.15mm보다 작은 세사의 경우 적용을 지양해야 할 것이다.

이상의 각 공식별 특징과 장점 또는 문제점을 간략히 요약하면 표 4와 같다.

7. 요약 및 결론

본 연구는 24개 하천의 1,399개 하천유사량 실측자료를 EH 등 6개 공식에 적용하여 그 정확성과 문제점 등을 규명하고자 하는 것이다. 본 연구에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

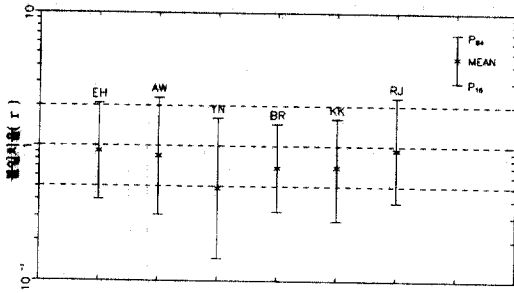


그림 1. 각 방법별 유사량 산정결과와 비교

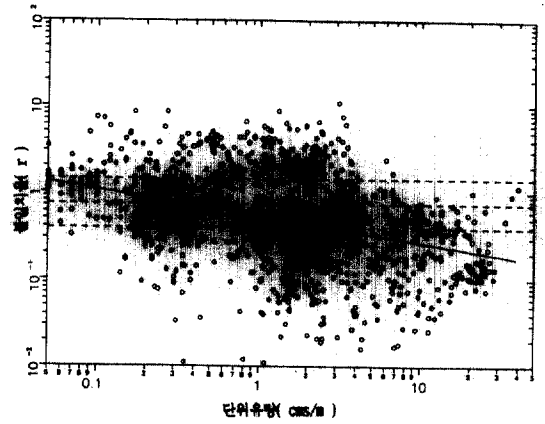


그림 4. Yang공식의 유사량 산정 결과

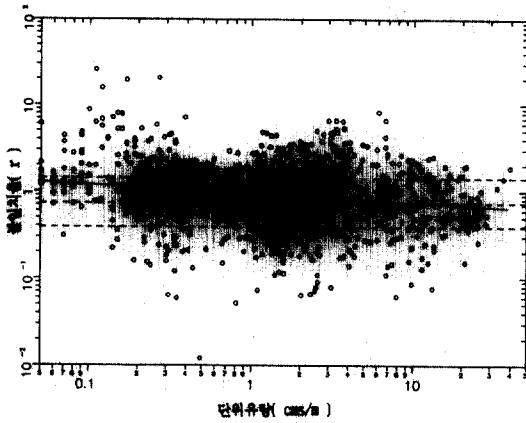


그림 2. Engelund & Hansen공식의 유사량 산정 결과

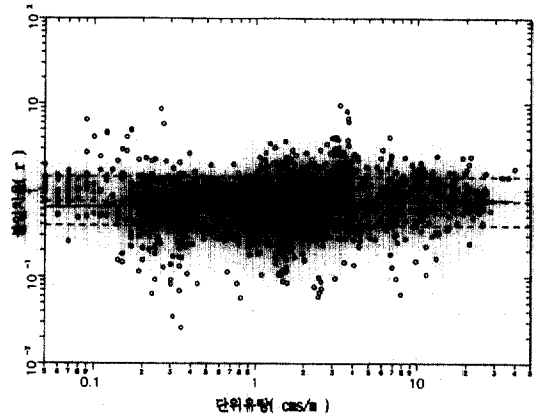


그림 5. Brownlie 공식의 유사량 산정 결과

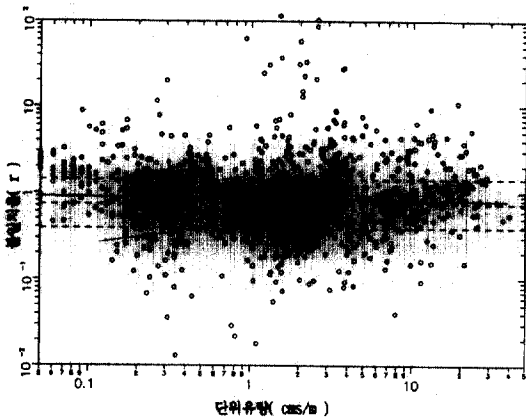


그림 3. Ackers & White 공식의 유사량 산정 결과

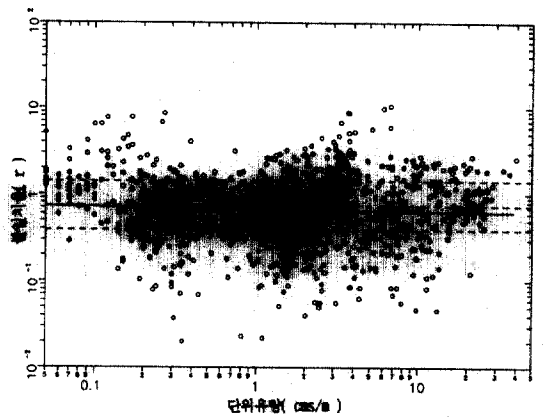


그림 6. Karim & Kennedy공식의 유사량 산정 결과

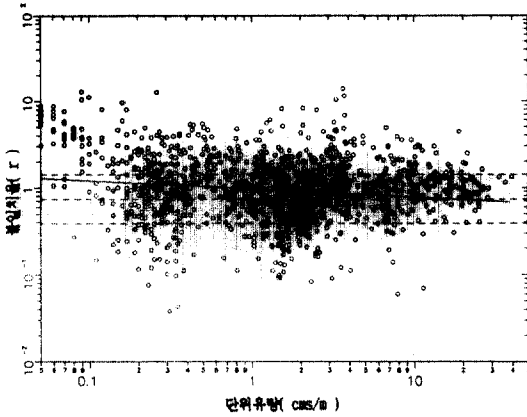


그림 7. Rijn 공식의 유사량 산정 결과

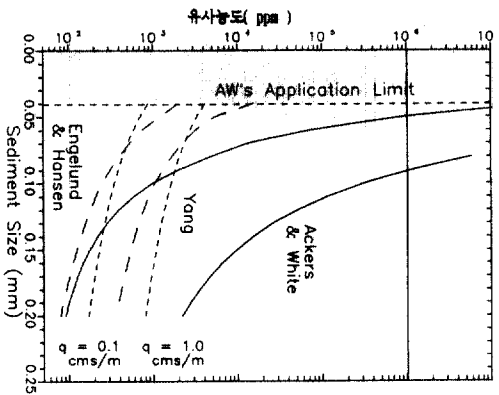


그림 8. 세사에 대한 Ackers & White, Englund & Hansen, Yang공식의 유사농도 계산 결과

- ① EH, RJ공식은 유사량 산정결과가 비교적 우수하다.
- ② KK공식은 Missouri강에서의 유사량 자료 등 한정된 범위의 자료를 회귀분석하여 개발된 공식이므로, 타 하천에 적용시 신중을 요한다.
- ③ BR공식은 KK공식에서 이용된 자료보다 훨씬 광범위한 자료를 이용하여 개발된 공식이나, 그 결과는 KK공식에 비해 크게 향상되지는 않았다.

- ④ AW공식은 세사의 경우 과대추정하므로 세사에 대한 적용은 지양하여야 한다.
- ⑤ YN공식은 유사량 산정결과가 불량하며 특히 유량이 커질수록 유사량을 과소추정하는 경향이 있다.

마지막으로 본 연구 및 기타 비교연구에서 공히 우수한 것으로 판명된 RJ공식은 타공식들에 비해 그 공식의 구조가 보다 물리적으로 분명하다. 특히, 최근의 유사량공식의 개발이 전자계산기를 이용한 대량자료의 단순한 회귀분석에 의존하는 경향이 커지고 있으나 이는 바람직한 경향이라 할 수 없다. 이러한 점에서 RJ공식은 보다 물리적이고 해석적인 하천의 유사이송연구에 크게 기여하고 있다고 할 수 있겠다.

기호의 설명

- C : 유사농도
 - d : 수심
 - D_{50} : 하상토의중양입경
 - Q : 단위폭당 유사량
 - r : 경심
 - s : 하상토의 비중
 - S : 에너지 경사
 - u_b : 마찰속도
 - u_{bc} : 한계마찰속도
 - σ_g : 하상토의 입도(size gradation)또는 기하표준편차
- $$= 1/2(D_{84}/D_{16} + D_{84}/D_{50})$$

참고 문헌

1. 우효섭, 유권규, 하천유사량 산정방법의 선정기준 개발, 기본연구과제 보고서, 전기연 89-WR-113, 한국건설기술연구원, 1989.
2. Ackers, P. and White, W.R., "Sediment Transport : New Approach and Analysis," *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol.99, 1973, pp.2041~2060.
3. Brownlie, W.R., *Prediction of Flow Depth and Sediment Discharge in Open Channels*. W.M Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resource, Report No. KH-R-43A, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1981a.
4. Brownlie, W.R., *Compilation of Alluvial Channel Data : Laboratory and Field*, W.M.Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resource, Report

- No. KH-R-43B, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1981b.
5. Engelund, F. and Hansen, E., *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 1967.
 6. Karim, M.F. and Kennedy, F.F., *Computer-Based Predicators for Sediment Discharge and Friction Factor of Alluvial Streams*. Report No. 242, Iowa Inst. of Hydr. Res., The Univ. of Iowa, 1983.
 7. Rijn, L.C. van, "Sediment Transport, part II : Suspended Load Transport," *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol.110, HY11, 1984, pp.1613~1641
 8. Vanoni, V.A., Brooks, N.H. and Kennedy, J.F., *Lecture Notes on Sediment Transportation and Channel Stability*, Report No. KH-R-1, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resource, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1960.
 9. White, W.R., Milli, H. and Crabbe, A.D., *Sediment Transport: An Appraisal Methods. Vol.2. Performance of Theoretical Methods. When Applied to Flume and Field Data*. Hydraulics Research Station. Report No. IT 119, Wallingford, U.K., 1973.
 10. Woo, H., Yoo, K., and Seoh, B., "Performance Test of Some Selected Sediment Transport Formulas," *Proc. of the 1990 National Conference. Vol.1. Hydraulic Engineering*, Chang, H.H. and Hill, J.C.ed., San Diego, California, 1990, pp.694~699.
 11. Yang, C.T., "Incipient Motion and Sediment Transport," *J. of Hyd. Div.*, ASCE Vol.99, HY10, 1973, pp.1679~1704.

(接受: 1989. 10. 23)