

수심적분법에 의한 유사량 추정연구

A Study on Estimation by Depth Integrating Method of Sediment Discharge

서 승 덕* · 김 활 곤** · 우 호 섭***
Suh, Seung Duk · Kim, Hwal Gon · Woo, Hyo Seop

Summary

In Korea, total sediment discharge of a river has been estimated simply by using certain sediment transport formulas including, among others, Einstein's formula. Those formular, however, are known not to be reliable enough for the result calculated by them to be used directly to river planning and management.

Therefore, the study used the Modified Einstein Procedure to the estimation of total sediment discharge, because this method is reliable estimated by measurement.

Here, measurement of sediment discharge used depth integrating method.

The major results obtained from the study for estimation by depth integrating method of sediment discharge in Naeseong stream are as follow;

1. The seditment characteristics of Naeseong stream are;

The distribution of sediment grain size shows that silt and clay are 55% and sand is 45%. and the bed load sediment grain size is constituted that sand contained with the grain size from 0.062mm to 2.0mm is 80%

2. The sediment rating formulas derived from the regression analysis between the sediment discharge and flow discharge are;

Seogpo-Gyo : $Q_s = 0.017 \times 10^{-4} Q^{2.352}$, where discharge is $10\text{cms} < Q < 100\text{cms}$.

Songriweon-Gyo : $Q_s = 0.074 \times 10^{-4} Q^{2.066}$, where discharge is $10\text{cms} < Q < 120\text{cms}$.

3. The sediment discharge fluctuates with the wider range variation than the flow discharge does. As the rate of flow discharge increased, the portion of suspend load in total load increased as well.

* 경북대학교 농과대학

** 경북대학교 농과대학 수공학연구소

*** 한국건설기술연구원 수자원연구소

키워드 : 수정 Einstein방법, 수심적분법, 유량, 총 유사량, 부유사량, 부유사의 입경분포, 하상토의 입경 분포

I. 서 론

충적하천에서 총유사량을 추정하는 방법으로는 크게 실측을 통한 직접적인 방법과 유사 및 수리량 자료를 이용한 계산에 의한 간접적인 방법이 있다. 전자는 하천에서 직접 유사량과 수리량을 측정하는 방법으로 신뢰도가 높은 방법이나 시간, 노력, 비용이 많이 든다. 더구나 아직 소류사량의 측정은 부유사량의 측정 만큼 정도가 높지 않다. 따라서 측정결과와의 충분한 신뢰도를 얻기 위해서는 소류사 측정방법의 개선이 요구된다.

후자인 간접적인 방법은 하천유사량 산정공식을 이용하여 그 하천의 수리량 및 하상토 특성 즉 유량, 하폭, 평균 수심, 하천 경사, 사립자 입경, 사립자 비중등을 대입하여 유사량을 측정하는 방법으로 시간, 노력, 경비가 덜 소요되는 장점이 있다. 그러나 기존의 하천유사량공식들은 하상토 이송만을 추정하는 식이 많아서 유사량 중 Wash load 가 지배적인 하천인 경우 유사량공식의 이용에는 한계가 있다. 따라서 직접 측정에 의한 방법과 간접 계산에 의한 방법을 절충한 방법으로서, 부유사 채취기로 채취가능한 하상 가까이 까지 부유사를 결정하고 하상과 채취기 노즐 사이의 미채취 구간을 계산에 의하여 조합하는 방법인 수정 Einstein 방법이 사용되고 있다.

본 연구는 보다 신뢰성이 높은 유사연구의 기초가 되어, 많은 피해를 야기시키고 있는 유사관련 문제를 해결할 수 있도록 하고, 댐의 설계 및 운영, 수리구조물의 설계 및 유지관리, 하천개수 및 하도의 안정, 홍수터 관리 등 수자원 개발 및 관리를 위한 하천계획에 필요한 자료를 제공하는데 그 목적을 두고, 모래 하천으로서 유사량 측정의 의미가 있는 낙동강수계 중 주요 직할하천인 내성천 상류를 시험류역으로 하여 유역내의 송리원교 지점과 송리원교에서 상류로 약 16km 위치의

석포교 지점을 주 관측지점으로 선정 하였다. 각 선정지점에 대하여 수리량과 유사량을 실측하여 수리특성 및 유사의 물리적 특성을 분석하였으며, 분석한 자료 즉, 유량, 하폭, 평균 수심, 수온, 평균 측정선 수심, 미측정 구간높이, 측정부유사의 평균농도, 부유사와 하상토의 입경분포, 유사의 비중을 수정 아인슈타인 방법을 전산화한 MODEIN 프로그램에 입력하여 측정 지점별 총유사량을 추정하였다.

II. 유사량 측정 및 분석

1. 유사량 측정

가. 측정 장비

부유사를 채취하는 가장 이상적인 방법은 단위 시간당 한 하천단면의 통과 유수전체를 채취한 뒤, 물을 제거시켜 유사중량을 측정하는 것이 바람직한 방법이나 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서 하천의 물리적 특성에 따라 채취장비를 선정하여 부분 단면에 채취된 유사의 특성을 분석하여 부유사를 추정한다.

부유사 및 하상토 채취 장비의 선정방법에는 여러가지 조건이 있으나, 본 연구에 있어서는 Table-1과 같은 한국건설기술연구원이 보유하고 있는 P-61-A1 점적분 부유사 채취기와 BM 54 하상토 채취기를 사용하였다.

부유사 채취는 부유사의 농도분포와 입경분

Table-1. Specification of sediment sampling equipments

Calss	P-61-A1	BM 54
Usage	Collection of suspended sediment	Collection of bed material
Weight	46kg	45.5kg
Length	71.1cm	55.9cm
Characteristics	Point-integrating sampler.	To collect bed material from the top 5cm of a stream bed, with a single scoop-type bucket.

포분석을 위하여 수심적분 채취방법으로 각 측정선에 대하여 2회 실시하였으며 하상토 채취는 BM 54의 채취법에 준하였다.

나. 측정선 결정

측정선의 결정방법으로는 규모가 작은 소하천에서 하천중심 또는 유심선에서 시료를 채취하는 가장 간단한 간편법과 사전에 유량측정을 하여 하천의 횡단면을 몇 개의 등유량 단면으로 나누고 이 단면을 대표하는 측정선에서 시료를 채취하는 등유량법 그리고 하천단면에 일정한 간격으로 측정선을 정하고, 이 선에서 부유사를 채취하는 등간격법으로 대별할 수 있다.

본 연구에서는 유속분포와 하상 등을 파악하기 쉬우며, 부유사 시료를 한데 합쳐서 부유사 농도나 입경분포를 분석할 수 있는 장점을 가진 Fig. 1과 같이 등간격법을 택하여 각각 15m 간격으로 측정선을 정하였다.

수시, 홍수시 등 가능한한 자주 측정하였다. 유속이 작을 경우($V < 1.5m/s$)는 유속계를 이용하고, 클때는 점적분 부유사 채취기를 이용하여 채취한 점적분시료의 부피를 노출의 단면적과 채취시간으로 나누어 간접적으로 측정했다.

라. 측정 기간

내성천 시험조사구역에서 유사량 측정을 위한 사전 작업으로 1992년 3월에서 5월사이에 측정예정지를 답사하고 본류의 석포교 지점과 송리원교 지점을 선정하였다.

5월 12일에 각 지점별 하천횡단측량을 실시하여 측정선을 결정하였으며 6월에 각 측정지점에 측정선 및 수위표를 설치하였다.

7월 11일 처음으로 유속과 수심, 수온의 측정 등 기본적인 수리량을 측정하였으며, 7월 17일 홍수 때 부터 유사채취를 시작하여 10월 4일까지 수리량 및 유사량을 측정을 하였다.

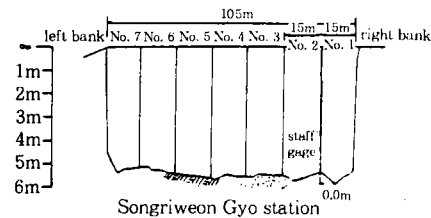
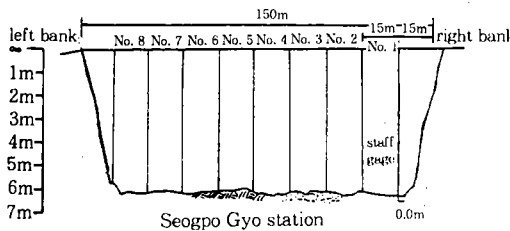


Fig. 1. Cross sectional views of vertical sampling lines and water stage gauging station

다. 수리량 측정

유사량 실측시 병행해서 측정해야 할 수리량은 유속, 수심, 온도 등이다. 여기서 유속은 유사량 실측시 뿐만 아니라 비가 온 직후, 갈

2. 분석 방법

가. 부유사 농도 분석

채취된 부유사 농도를 측정하는 방법은 증발법과 여과법이 있다.

본 연구에서는 증발법에 의한 부유사 농도를 분석하였으며 그 과정은 약술하면 다음과 같다.

시료를 채취장소, 측정지점, 측정시간, 수온 등을 기록하여 부유물이 침전되도록 약 1일간 냉암소에 보관한 후 시료병에 약 30ml 남기고 표층수만 제거하였으며 나머지를 노건조시켜 부유사중량을 측정하므로써 농도를 측정하였다. 이때 용질물에 대하여 보정하고 유사중량에서 용질물에 대한 보정치를 뺀 후 유사농도를 구하였다.

나. 부유사 및 하상토 입경 분석

유사의 입경분포 분석방법으로서 부유사는 BW 관법, 하상토는 체분석법을 사용하였다.

BW(Bottom Withdrawal)관법은 시료의 부유사가 이토나 점토로 되어있으며 농도가

낮은 경우 부유사 입경분포를 분석하는 방법으로 채용되고 있다.

하상도 입경분포는 체 분석을 하여 입경별 누적통과 백분율을 대수확률지상에 도시하여 구하였다.

그래프 상에서 D_{16} , D_{50} , D_{84} 를 구하고 이값을 이용하여 하상의 기하표 준편차 σ 는

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{50}}{D_{16}} + \frac{D_{84}}{D_{50}} \right) \text{으로부터 구하였다.}$$

다. 총유사량 추정

총유사량 추정은 한국건설기술연구원에서 자체개발한 수정 아인슈타인 방법을 전산프로그램화한 MODEIN 프로그램에 실측 및 실험분석한 유량, 평균유속, 하폭, 평균수심, 수온, 평균측정선수심, 미측정구간높이, 수면경사, 측정 부유사의 평균농도, 부유사와 하상토의 입경분포, 유사의 비중 등을 입력자료로 하여 Fig. 2의 흐름도에 따라 총유사량을 추정하였다.

여기서 MODEIN 프로그램은 하상에서 부유사채취기 노출까지 채취 불가능한 구간(약 10cm)은 하상특성을 대입하여 계산하고, 채취 가능한 구간은 실측하여 실측치를 계산치로 환산하여 총유사량을 추정하는 프로그램이다.

따라서 본 연구에서는 채취불가능한 구간은 계산에 의하고 채취 가능한 구간은 실측하여 총유사량을 추정하는 수정 아인슈타인 방법을 사용하여 보다 신뢰도를 높이고자 하였다.

Table-2는 부프로그램의 기능으로 Phipsi는

$$\phi = \frac{i_B}{i_b} \frac{Q_B}{\gamma_s} \left(\frac{1}{gD_i^3} \frac{1}{(s-1)} \right)^{1/2} \text{와}$$

$$\Psi_* = \xi i Y \left(\frac{\beta}{\beta_x} \right)^2 (s-1) \frac{D}{B_b S} \text{의 관계를 계산하}$$

는 프로그램,

Nakato는 수정 아인슈타인 적분

$$J_1 = \int_{\eta_0}^1 \left[\frac{1-\eta}{\eta} \right]^{z'} d\eta \text{ 와 } J_2 = \int_{\eta_0}^1 \left[\frac{1-\eta}{\eta} \right]^{z'} \ln \eta d\eta$$

를 계산하는 프로그램, Lara는 사립자의 침강

속도 Z' 를 그리고 Simp는 Simpson의 수치적분

$$I = \frac{\Delta}{6} \sum_{i=1}^m \{ f(X_{2i-1}) + 4f(X_{2i}) + f(X_{2i+1}) \} \text{를 계}$$

산하는 프로그램이다.

여기서,

- ϕ_* : 각 입경에 대한 이송강도
- Ψ_* : 각 입경에 대한 흐름강도
- ξ_i : 입경 i 에 해당하는 아인슈타인 차폐계수
- β : 유사의 농도 확산계수와 유수의 운동량 확산계수와의 비
- β_x : 아인슈타인 공식의 보정계수
- J_1, J_2 : 수정 아인슈타인 방법의 적분
- η : 무차원 수심

Table-2. Function of subprograms in MODEIN program

Program name	Function
Phipsi	Einstein's $\phi_* - \Psi_*$
Nakato	Calculation of Einstein's integrals
Lara	Calculation of z'
Simp	Simpson numerical integration procedure

III. 결과 및 과찰

1. 입경 분포

가. 부유사의 입경 분포

본 연구에서 부유사 입경분포분석은 전술한 바와 같이 BW 관을 사용하여 분석하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 본 시험조사류역에서 부유사 입경분포는 석포교, 송리원교 지점 모두 비슷한 분포를 보이고 있으며 0.062mm 이하인 이토와 점토가 약 55%이고 모래가 약 45%이며 유량이 증가함에 따라 부유사내에 모래의 비율이 많이 함유되어 있음

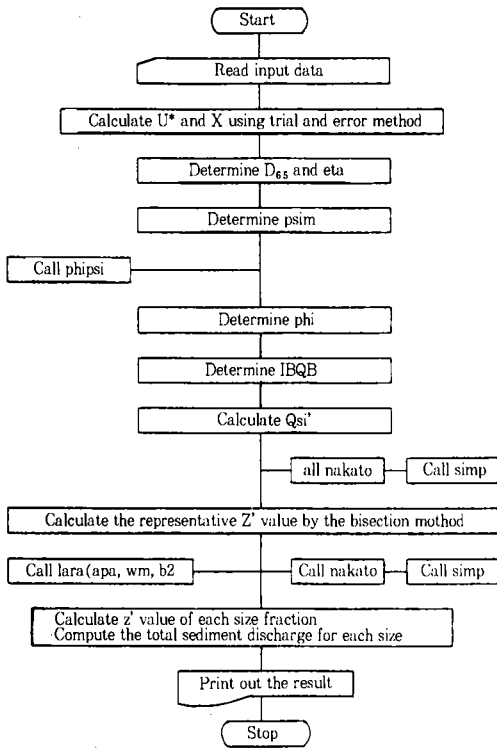


Fig. 2. Flowchart of the MODEIN program

을 알 수있다. 이는 유수의 흐름에 있어 유량이 클 경우 난류발달이 커지기 때문인 것으로 사료된다.

나. 하상토의 입경 분포

하상토의 입경분포는 전술한 바와 같이 체분석을 하여 입경별 누적통과 백분율을 Fig. 4와 같이 대수확률지 상에 도시하여 구하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 내성천 시험조사 유역의 하상토 입경 분포는 0.062~2.0mm 사이의 모래가 80%를 차지하고 있으며 부유사와는 달리 유량이 변하여도 입경분포의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

또한 Fig. 4에서 구한 D_{16} , D_{50} , D_{84} 를 이용하여 하상토의 기하표준편차 σ 즉 하상토 입도를 구한 결과 2.0내외로서 일반적으로 알려진 하상토 입도 2.5보다 약간 작은 모래 하천으로 나타났다. 이는 하상 재료의 약 80%가 모래이며 균일한 입경으로 이루어져 있는데 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

2. 유사량 추정 결과

전술한 바와 같이 본 연구에서 총유사량 추정은 수정 아인슈타인 방법의 전산 프로그램인 MODEIN에 실측 및 실험분석한 유량, 유속, 하폭, 평균수심, 수온, 평균측정선 수심, 미측정구간높이, 수면경사, 측정부유사의 평균

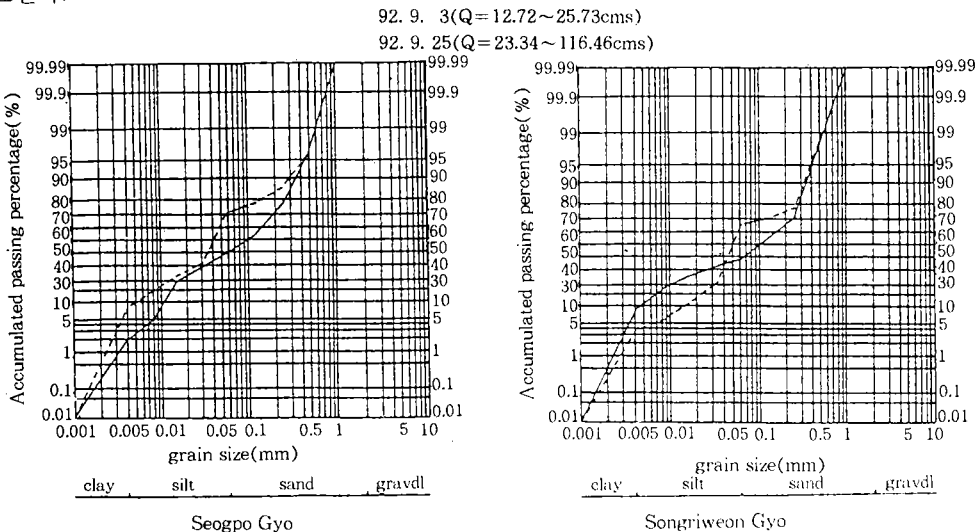


Fig. 3. Grain size distribution of suspended sediment at each stations(92.9.3 & 92.9.25)

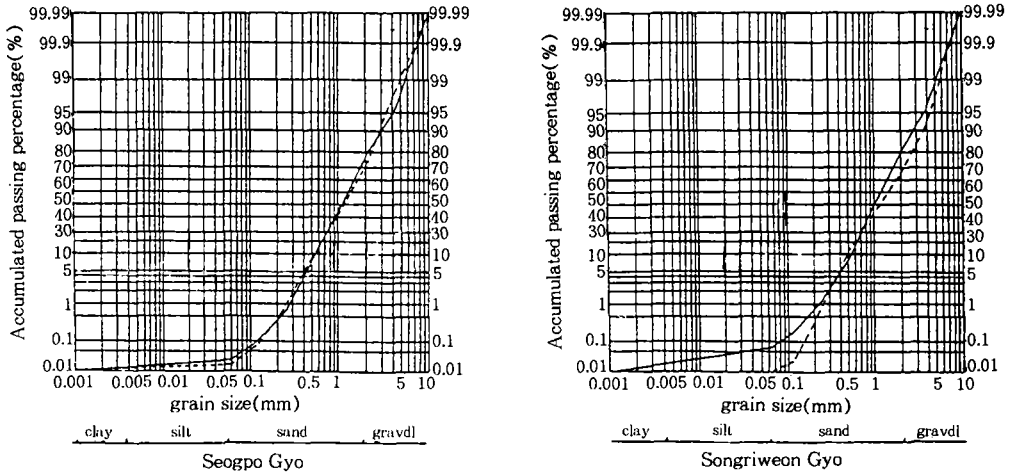


Fig. 4. Grain size distribution of bed sediment at each stations(92. 9. 3 & 92. 9. 25)

농도, 부유사와 하상토의 입경분포 그리고 유사의 비중 등을 입력하여 구하였으며, 그 결과는 Table-3, Table-4와 같다.

Fig. 5는 상기 Table를 이용하여 석포교와 송리원교 지점의 측정기간내 시간적 변화에 따른 유량과 유사량관계를 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 유량의 증감폭

에 비하여 유사량 증감폭이 크게 나타났다.

또한 유량 증가시 유사량 증가율도 크나 유량 감소시 유사량 감소율은 더 크다. 이것은 유량이 적을 때는 난류상태가 미약하여 모래 함량이 적지만 유량이 증가하면 난류의 발달로 인하여 유수 중에 모래를 많이 함유하기 때문으로 사료된다.

Table-3. Flow and sediment discharges at Seogpo Gyo

Date	Time	Dis-charge (cms)	Suspended sediment discharge (tons/day) Q_{su}	Bed load discharge (tons/day) Q_b	Total sediment discharge	
					(tons/day) Q_t	(10^{-4} ton/sec) Q_s
92.8.25	17:15	28.45	166.9	10.9	177.8	20.5
92.8. 3	15:25	25.73	111.1	8.4	119.5	13.8
92.8. 8	13:45	9.73	37.2	7.5	44.7	5.2
92.8. 9	14:50	13.42	64.4	8.9	73.3	8.5
92.8.24	17:10	19.65	168.6	14.8	183.4	21.2
92.8.25	04:20	103.25	9991.7	305.3	10297.0	1191.7
92.8.25	10:40	62.09	2750.6	177.3	2927.9	338.8
92.8.25	14:50	52.95	1794.0	116.7	1910.7	221.1
92.8.25	18:40	47.20	1375.3	105.0	1480.3	171.3
92.8.26	08:20	30.69	466.5	21.5	488.0	56.4
92.8.29	15:40	11.44	46.1	12.6	58.7	6.7

Table-4. Flow and sediment discharges at Songriweon Gyo

Date	Time	Dis-charge (cms)	Suspended sediment discharge (tons/day) Q_{su}	Bed load discharge (tons/day) Q_b	Total sediment discharge	
					(tons/day) Q_t	(10^{-4} ton/sec) Q_s
92.7.17	17:45	49.68	8396.6	320.1	8716.7	1008.8
92.7.25	12:50	29.50	1731.1	75.7	1806.8	209.1
92.7. 3	18:00	25.03	378.2	75.9	454.1	52.5
92.7. 8	15:00	13.51	108.7	13.4	122.1	14.1
92.7. 9	16:30	16.11	161.0	7.9	168.9	19.5
92.7.24	18:20	20.85	194.8	48.4	243.2	28.1
92.7.25	06:05	121.09	14172.9	297.9	14470.8	1674.8
92.7.25	08:40	116.46	12921.0	384.1	13305.1	1539.9
92.7.25	16:30	85.50	3478.9	357.0	3835.9	443.9
92.7.25	20:00	81.22	3112.8	344.8	3457.6	400.1
92.7.26	10:10	43.76	1031.9	97.9	1129.8	130.7
92.7.29	17:10	17.15	172.6	105.8	278.4	32.2

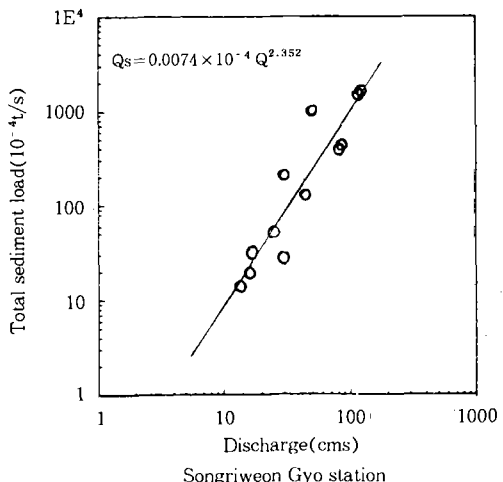
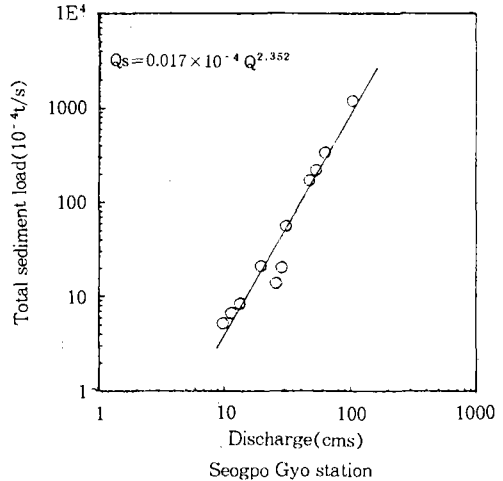
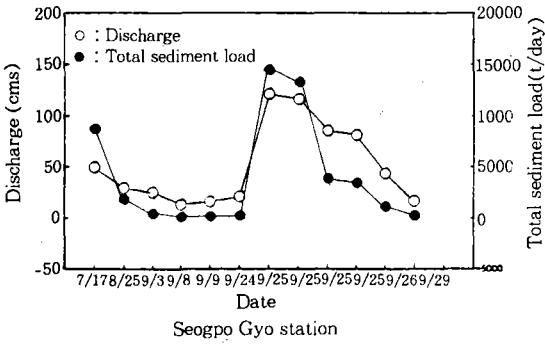
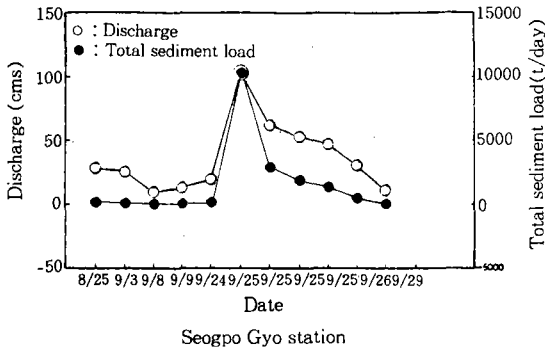


Fig. 5. Variation of discharge and total sediment load at each stations

Fig. 6. Sediment rating curve in the Naeseong stream watershed (92. 7. 17~92. 9. 29)

3. 유량과 유사량

유량(Q)과 총유사량(Qs) 자료를 이용하여 석포교 지점과 송리원교 지점에 대한 유량-유사량 관계 그래프를 그린 결과 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 두 지점의 유량-유사량 관계 곡선은 석포교 지점 $Q_s = 0.017 \times 10^{-4} Q^{2.352}$: $10 < Q < 100$ cms이고, 송리원교 지점 $Q_s = 0.074 \times 10^{-4} Q^{2.066}$: $10 < Q < 120$ cms였다.

Fig. 7은 유량의 변화에 따른 총유사량과 소류사량의 변화를 나타내고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 유량이 증가함에 따라 총유사량과 소류사량은 큰 차이를 보이고 있다. 이는 유량이 증가할수록 난류로 인하여 하상 사립이 부유되어 부유사량의 비율이 많아진 결과라고 사료된다.

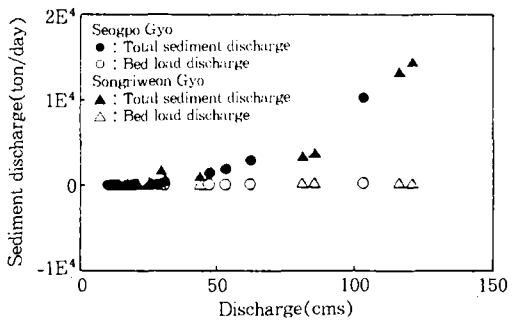


Fig. 7. Relationship between discharge and sediment discharge(92. 7. 11~92. 10. 4)

IV. 결 론

낙동강수계 중 직할하천인 내성천 시험조사 유역에서의 수심적분법에 의한 유사량 측정분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 부유사의 입경분포는 석포교, 송리원교지점 모두 비슷한 0.062mm 이하인 이토와 점토가 약 55% 이고 모래가 약 45%이며 유량이 증가함에 따라 부유사내에 모래 함유율이 크게 나타났다.

2. 하상토 입경은 0.062~2.0mm 사이의 모래가 80% 로 구성되어 있고 입도는 2.0 내외로서 일반적으로 알려진 하상토 입도 2.5보다 약간 작게 나타났다.

3. 유량(Q)와 총유사량(Qs)의 관계분석에서 석포교 지점은 $Q_s = 0.017 \times 10^{-4} Q^{2.352}$, 송리원교 지점은 $Q_s = 0.074 \times 10^{-4} Q^{2.066}$ 의 유량-유사량 관계식을 얻었다. 또한 유량의 증감폭에 비하여 유사량 증감폭이 크게 나타났고, 유량이 증가함에 따라 부유사량이 차지하는 비율이 크게 나타났다.

이 논문은 1992년도 건설부 한국기술 연구원의 위탁용역에 의하여 연구가 수행 되었으며, 연구원 측에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 1992, 댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사. 연구.
2. 김활근, 1994, 중소유역하천의 수문학적 특성이 유사량에 미치는 영향, 경북대학교 박사학위논문.
3. 서승덕, 1986, 하천유역의 물리적특성과 농업용저수지의 내용적변화와의 상관관계 연구, 경북대학교 논문집, 41 : 455-477.
4. 서승덕, 김활근, 1992, 내성천 시험조사 유역에서의 유사량실측, 경북대 농업과학기술연구소.
5. 한국건설기술연구원, 수정아인쉬타인 방법의 한국 하천에서의 적용 —하천 총유사량의 추정—, 건기연 90-WR-112.
6. Antsyferov, S. M. and Kos'yan, R. D., 1980, Sediment Suspended in Stream Flow, J. of Hyd, ASCE, Vol. 106, HY2.
7. Colby, B. R. and Hembree, C. H., 1955, Computations of Total Sediment discharge, Niobrara River near Cody, Nebraska, U. S. Geological Survey, Water Supply Paper 1357.
8. Einstein, H. A., 1950, The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, Technical Bulletin 1026, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
9. Vanoni, V. A. Ed., 1975, Sedimentation Engineering, ASCE.