

# 자갈하천에서 연속적인 수위 자료를 이용한 경사면적법 유량 산정 -달천 사례연구

## Application of Slope-area Discharge Estimation Method using Continuously Observed Water Level Data in a Gravel Bed River -Case Study of the Dal Cheon River

이 찬 주\* / 김 지 성\*\* / 김 치 영\*\*\* / 김 동 구\*\*\*

Lee, Chan Joo / Kim, Ji Sung / Kim, Chi Young / Kim, Dong Gu

### Abstract

In this study we calculate discharge by slope-area method using continuously observed water level data and analyse the results. This study is performed in the Dalcheon river reach of 960 m length including riffles and a pool, which is located downstream of the Goesan Dam. Three values of roughness coefficient are applied to discharge calculation, which are established using bed material size analysis. Another roughness coefficient value obtained from the river improvement plan is also used. Calculated discharges by slope-area method are compared with dam discharges. Relative difference from dam discharges appears to be largely affected by roughness values and a value of 0.042 or more seems most suitable for the entire study reach. Smaller roughness value is suitable to the reach which has gentler water surface slope than mean channel slope of the entire study reach, while a larger value to steeper reach. In case roughness value is set considering overall slope of the channel, it is desirable to select the entire calculation reach including both gentler and steeper sub-reaches. Since relative difference becomes nearly constant at over 500 cms, in case that verification of applied roughness is conducted with other directly measured discharge, accuracy of measurement by slope-area method for larger discharge may be improved.

**keywords** : slope-area method, roughness coefficient, relative difference, water surface slope

### 요 지

본 연구에서는 연속적인 수위 자료를 이용하여 경사면적법으로 유량을 산정하고 그 결과를 분석하였다. 대상 하천은 괴산댐 하류의 달천으로 여울과 웅덩이를 포함하는 약 960m의 구간이다. 하상 재료의 입경을 분석하였고 이를 이용하여 3가지 조도계수값을 산정하여 유량 계산에 활용하였으며, 추가로 하천정비기본계획의 조도계수도 사용되었다. 경사면적법으로 계산된 유량은 댐 방류량과 비교되었다. 댐 방류량과 비교한 상대오차는 조도계수에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 연구 대상 구간에 적절한 조도계수는 0.042 이상인 것으로 나타났다. 대상 구간의 평균하상

\* 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원  
Researcher, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea,  
(e-mail: c0gnitum@kict.re.kr)  
\*\* 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 박사후연구원  
Post-doctor, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea  
\*\*\* 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원  
Researcher, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

경사보다 완만한 수면경사를 갖는 계산 구간에서는 구간 전체의 조도계수보다 낮은 조도계수를 사용할 경우 유량 오차가 적었으며, 수면경사가 평균하상경사보다 급한 구간에서는 조도계수를 크게 사용하여야 상대오차가 감소하는 것으로 나타났다. 하도의 전체적인 하상경사를 고려하여 조도계수를 설정할 경우에는 수면경사가 완만한 구간과 급한 구간을 모두 포함하도록 전체 계산 구간을 설정하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 500 cms 이상의 유량에서는 실측 유량과의 상대 오차가 일정해지므로, 비교 유량 측정이 이루어질 경우 조도계수를 검증한 후, 경사면적법을 적용함으로써 간접 유량측정 결과의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 경사면적법, 조도계수, 상대오차, 수면경사

## 1. 서 론

상하류의 수위차를 이용하여 유량을 간접적으로 산정하는 경사면적법은 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 홍수 유량만을 필요로 하는 지점의 경우 상하류 수위 측정만으로 별도의 유량 측정 없이 유량값을 얻을 수 있다. 둘째, 불가피한 사유로 직접 침투 홍수량을 측정하지 못했을 경우에도 홍수 유량 자료를 제공한다. 이를 통해 측정된 자료를 기반으로 수립한 수위-유량 관계 곡선의 외삽 범위에 대한 참고 유량을 제시할 수 있다. 셋째, 유속계를 이용한 측정 방법에 비해 불확실도가 높은 부자법으로 측정하는 유량값의 비교, 검토를 위한 유량값을 제공할 수 있다. 특히 홍수시 유량이 급격하게 변할 때에 측정된 유량값은 평저수시에 측정된 유량값과 달리 정확성이 의심되고 이상성이 있다고 판단된다고 재측정이 거의 불가능하므로 보완적인 자료의 필요성이 크다는 점에서 참고 유량값의 존재 여부가 매우 중요하다고 할 수 있다. 넷째, 유량 측정이 매년 이루어지지 않는 지점에서도 홍수 빈도 분석에 필요한 홍수량 자료를 구축할 수가 있다. 다섯째, 하상경사가 매우 급하고 하상에 거석이 많아 부자법의 적용이 곤란한 지점에서 유량 측정이 가능하다. 이처럼 경사면적법은 기존의 홍수 유량 측정 방법을 보완하고 측정이 곤란한 환경에서의 자료를 획득할 수 있는 장점들을 갖고 있음에도 불구하고 우리나라에서는 홍수 유량 측정의 직접적이거나 보조적인 수단으로는 거의 활용되지 못하고 있으며, 나아가 이를 적용하려는 시도 또한 별로 없었던 것이 사실이다. 본 연구는 국내에서는 실제 유량 측정에 거의 쓰이지 않지만 위와 같은 장점을 가진 경사면적법을 실제로 적용하고 분석함으로써 그 특성을 파악하고 국내 하천에 대한 도입 가능성을 검토하고자 한다.

간접적인 유량측정 방법으로서의 경사면적법은 Chow(1959), Dalrymple and Benson(1968) 등에 자세하게 소개되어 있으며, 경사면적법의 적용을 위한 이론적

인 배경과 계산 방법이 상세히 기술되어 있다. 또한 Dalrymple and Benson(1968)은 미국 USGS에서 십 수 년 간의 현장 적용 결과를 토대로 경사면적법을 이용하여 유량을 가능한 한 정확하게 산정할 수 있는 현장 조사 기법 및 유량 계산 기법을 제시하였다. 또한 이들은 1948년의 컴벌리아강의 홍수에 대해 직접 유량 측정 방법과의 비교를 통해 22회의 측정 자료 중 21개가 직접 유량 측정 대비 평균 6.7%, 최대 15.6%의 상대 오차를 나타내고 있음을 보고하였다. Jarrett(1987)은 급경사 하천에서 얻은 70개의 경사면적법 측정 자료를 이용하여 경사면적법의 오차에 영향을 주는 요인으로서 조도계수, 침식, 팽창·축소 손실, 점성, 부정류, 단면 수 등을 분석하였으며 이를 통해 경사면적법의 적용시 발생하는 문제에 대한 해결 방안을 제시하고자 하였다. Quick (1991)의 연구 역시 경사면적법에 의한 홍수 유량 산정값의 오차에 영향을 미치는 요인에 대한 분석을 다루고 있다. 그는 특히 수면경사 및 에너지경사의 오차, 유사 이송으로 인해 발생하는 오차, 그리고 조도계수의 오차를 집중적으로 다루었다. Barnes와 Davidian(1978), Riggs(1976) 등은 경사면적법의 보다 간편한 적용 방법에 관한 연구를 수행하였다. Dingman과 Sharma(1997)는 경사면적법 적용시 조도계수의 설정이 곤란하여 발생하는 불확실성을 해결하는 방법으로 500여개 이상의 실측 자료를 통해 조도계수와 수면경사의 상관관계를 제시하고 이를 통해 경사면적법의 보완 방법을 제시하였다.

기존에는 경사면적법이 주로 홍수 발생 이후에 흔적 조사를 통해 유량을 산정하는데 활용되어 왔다. 따라서 수위가 변하는 홍수 사상 전체에 대한 측정이 곤란하여 침투 유량의 계산에 제한적으로 사용된다. 그리고 계산된 유량을 다른 방법으로 비교하기가 어려운 여건 하에 수행되었기에 정확성에 대한 분석이 미흡하였다. 종종 산정된 유량은 심지어 100% 이상의 오차를 갖는 등의 결과를 초래하기도 하였다(Quick, 1991). 경사면적법으로 산정된 유량이 실제 유량과 차이를 나타내는

원인은 측정된 흔적수위의 신뢰성 문제와 더불어 하천 단면, 조도, 경사는 물론 유량이 시공간적으로 변하여 등류 개념의 도입이 매우 제한되기 때문이다(우효섭, 2001). 김지성 등(2007a, b)은 단면의 시공간적 변화가 적은 자갈하천인 달천에서 실측 수위로부터 유량에 따른 조도계수의 변화를 검토하였으며, 측정된 수위결과로부터 정상상태가 유지되는 시점의 등류, 부등류, 부정류 계산을 통한 조도계수의 산정결과가 비교적 차이를 나타내지 않음을 보였다. 이는 실제 고정상 하천에서 측정된 수위의 정확도 확보와 정상상태 가정이 가능할 경우, 경사면적법을 이용한 간접 유량산정의 가능성을 의미한다.

최신의 센서로 인해 거대한 수위 관측 구조물이 불필요한 저렴한 수위계가 많이 보급됨에 따라 수위 흔적에 비하여 연속적이면서도 정확한 수위 측정이 가능하여 적은 유량부터 큰 유량까지의 수위 변화와 한 지점을 통과한 여러 차례의 홍수 사상에 대한 수위 변동을 기록할 수 있게 되었다. 이는 폭넓은 범위에서 경사면적법 유량 산정의 검증이 가능할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 관점에서 본 연구는 센서에 의해 기록된 연속적인 수위 관측 자료를 활용함으로써 경사면적법의 적용 가능성을 검토하고자 한다. 나아가 이렇게 산정된 유량을 넓은 범위에 걸쳐 얻어진 실측 유량과 비교함으로써 유량 범위에 따른 오차의 변화 정도를 분석하고자 한다. 이러한 결과를 토대로 추가적으로 실측 수위계 운영을 통한 경사면적법의 적용 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 대상 하천 현황

본 연구에서는 남한강 제1지류 달천의 일부구간을 대상구간으로 하였다. 대상구간은 Fig. 1과 같이 충북

괴산군 칠성면 외사리에 소재한 괴산댐으로부터 3.3 km 하류의 쌍천과 합류하는 구간이다. 연구 대상하천은 주요 하상재료가 호박돌(cobble)인 자갈 하천으로서 여울과 웅덩이가 교호적으로 나타나며, 이에 따라 저수시에는 수면 경사 또한 급한 구간과 완만한 구간이 뚜렷하게 구별된다. 하지만 유량 증가에 따라 이러한 차이는 사라지고 수면경사가 균일해지는 특징을 나타낸다. 구간 전체의 평균하상경사는 0.154% 이다. 괴산댐의 유역면적은 675.2 km<sup>2</sup>로 대상구간의 계획홍수량은 1,750 m<sup>3</sup>/s이다. 대상 구간의 상류에는 수문 조작에 따라 6~2,100 m<sup>3</sup>/s의 유량을 방류하는 괴산댐이 있어 홍수 유량 측정 방법의 정확도 비교에 적절한 조건을 갖추고 있기에 본 연구에서는 경사면적법 유량의 비교 자료로서 활용되었다. 대상구간에는 Fig. 2와 같이 총 8종 18대의 수위계가 설치되어 있으며 이 중 하도 구간을 따라서는 총 8대의 기포식 수위계가 설치되어 있다.

적절한 구간의 선정은 경사면적법의 적용에 매우 중요하다. 하도 구간은 가능한 균일하고 직선의 선형을 가지며, 통수능의 변화가 적은 것이 좋다. 또한 하폭과 단면이 늘어나는 확장 하도보다는 축소형 하도가 좋은 것으로 알려져 있다(Dalrymple and Benson, 1968). 이



Fig. 1. Location and a Photo of the Study Site

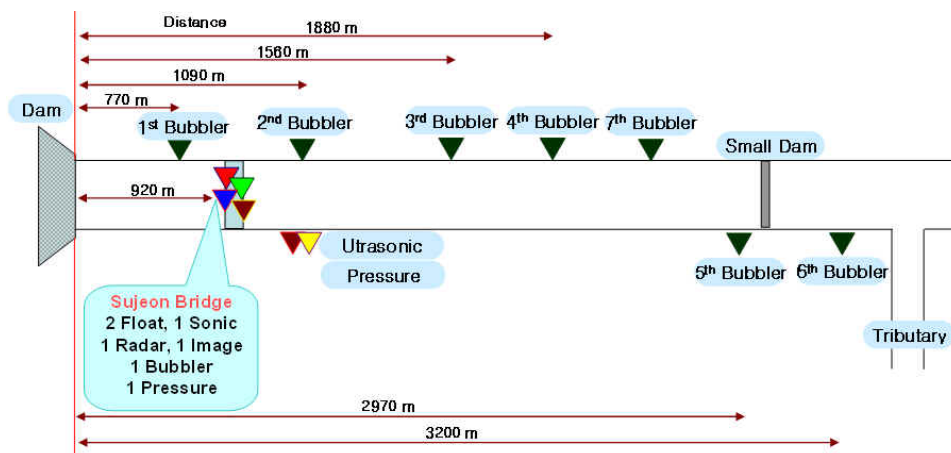


Fig. 2. Locations of Water Level Gauges

러한 하도 조건은 자연 하천에서 모두 만족시키는 것은 어려우므로, 가급적 유사한 조건을 가진 하도가 적절하다. 피산댐 하류 달천 구간의 경우 1번 수위계부터 4번 수위계가 있는 지점까지는 대체로 직선형 하도이며, 홍수 흐름에 영향을 크게 미칠만한 큰 사주나 하폭의 급격한 확대가 발생하는 구간은 없다. 다만 1번 수위계 하류에 하천을 비스듬하게 횡단하는 수전교가 있어서 흐름 교란이 있으므로 계산 구간의 시작을 수전교 수위계가 있는 단면으로 설정하였고, 그 하류의 2, 3, 4번 기포식 수위계 등 총 4대의 수위계 단면이 사용되었다.

경사면적법 유량 산정에 필수적인 조도계수의 산정을 위해 하상 재료의 입도분포를 조사하였다. 하상재료는 3.3km 전체 구간에서 Fig. 3과 같이 접근이 용이한

사주와 여울의 하상 12개 지점에서 선적자법에 의해 수집한 후 디지털캘리퍼스로 중축(intermediate axis)을 측정하였다.

각 지점의 하상재료의 분석결과와 하천의 누가입도 분포곡선은 Fig. 4와 같으며 이를 이용하여 Table 1과 같은 입경 대표값을 산정하였다. 여기서  $d_{16}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{84}$ ,  $d_{90}$ 은 입경 크기가 작은 것부터 16%, 50%(중앙값), 80%, 90%에 해당하는 입자의 직경이다. Limerinos (1970)는 각 특성입도자료로 계산된 값과 실측된 조도계수 매개변수( $n/R^{1/6}$ )와의 표준편차로부터 각 입도에 가중치를 계산해서 가중된 입자의 직경  $d_w$ 을 계산하였다. 그는  $d_w$  계산을 위하여 84% 입도에는 0.6, 50% 입도에는 0.3, 16% 입도에는 0.1의 가중치를 사용하였다.

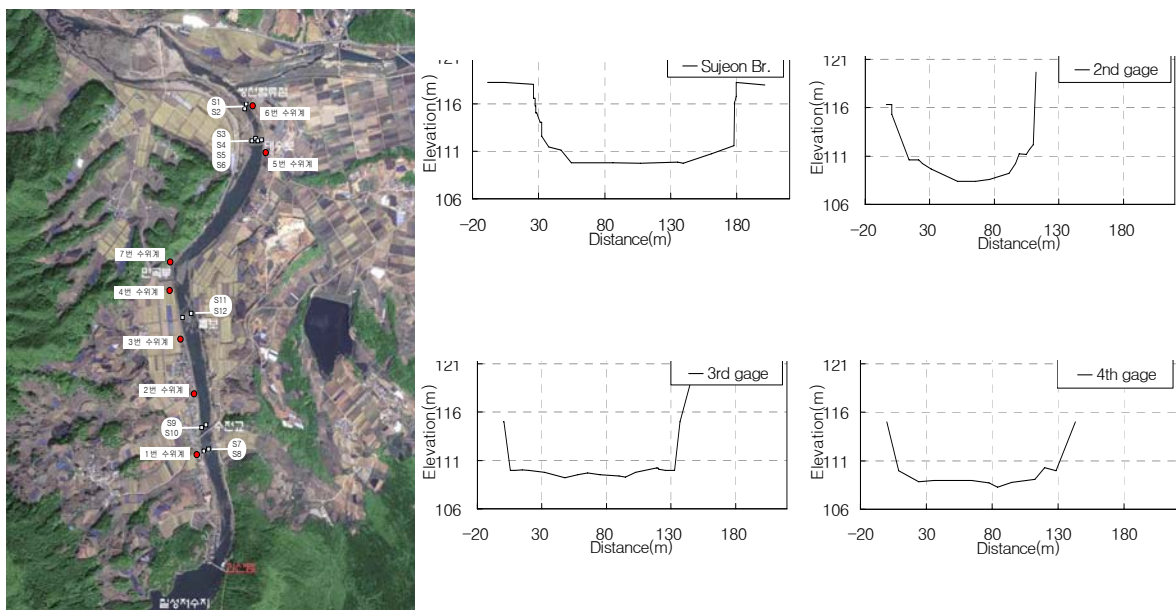


Fig. 3. Location of Sampling the Stream-Bed Materials and Cross Sections of Gage Station

Table 1. Representative Bed Material Sizes for Study Reach

(unit : mm)

Location	$d_{16}$	$d_{50}$	$d_{86}$	$d_{90}$	$d_w$	Remark
S1	70.79	109.65	194.98	218.78	156.96	cobble bar
S2	48.98	89.13	165.96	190.55	131.21	cobble bar
S3	47.86	102.33	208.93	239.88	160.84	cobble bar
S4	64.57	151.36	295.12	354.81	228.94	riffle bed
S5	74.13	141.25	234.42	281.84	190.44	riffle bed
S6	85.11	158.49	239.88	281.84	199.99	riffle bed
S7	64.57	162.18	239.88	281.84	199.04	riffle bed
S8	79.43	162.18	309.03	371.54	242.02	riffle bed
S9	74.13	138.04	245.47	363.08	196.11	riffle bed
S10	85.11	165.96	288.40	363.08	231.34	riffle bed
S11	63.10	120.23	229.09	281.84	179.83	riffle bed
S12	70.79	151.36	257.04	316.23	206.71	riffle bed
Average	69.05	137.68	242.35	295.44	193.62	

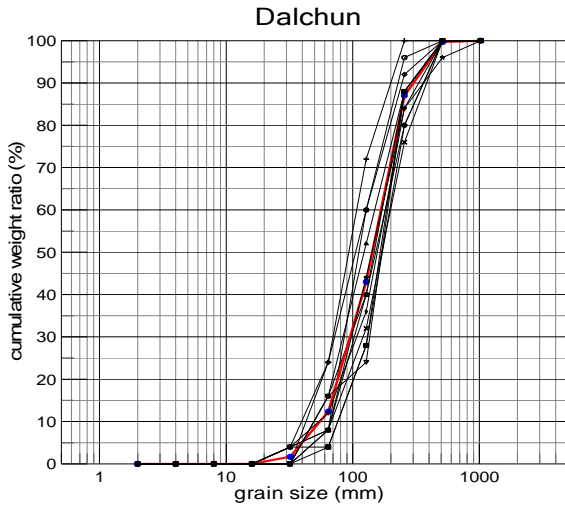


Fig. 4. Cumulative Particle Distribution Curves

입도분포분석결과, 여울의 하상재료와 사주의 하상재료는 약간의 차이를 나타내고 있으며 본 연구 대상하천의 평균적인 특징은 각 입경의 산술평균값을 사용하였다.

### 3. 경사면적법의 적용

#### 3.1 기본 공식

실측 수위로부터 경사면적법으로 유량을 계산하기 위해 미지질조사국(USGS)에서 개발한 SAC 프로그램을 사용하였다(Fulford, 1994). SAC는 상하류 및 홍수위에 대한 측량 자료와 조도계수를 이용하여 경사면적법에 의해 유량을 계산하는 프로그램이다. 경사면적법 적용의 기본 이론은 다음과 같다.

유량 산정을 위한 Manning 공식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 유량,  $n$ 은 Manning 조도계수,  $A$ 는 단면적,  $R$ 은 동수반경,  $S$ 는 에너지 경사이다.

부등류에서 상류단과 하류단 단면 사이의 에너지 보존식은 다음과 같다.

$$(h + h_g)_1 = (h + h_g)_2 + (h_f)_{1-2} + k(\Delta h_v)_{1-2} \quad (2)$$

여기서  $h$ 는 상하류 단면의 수면고이며,  $h_g$ 는 속도수두로서  $\alpha V^2/2g$ 와 같다.  $h_f$ 는 마찰손실,  $k(\Delta h_v)$ 는 축소, 확대 단면에서 가속, 감속으로 인한 에너지 손실이다.

그리고 Manning 공식에 사용되는 마찰경사  $S$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{h_f}{L} = \frac{\Delta h + \Delta h_g - k(\Delta h_v)}{L} \quad (3)$$

여기서  $\Delta h_g$ 는 상류와 하류간 속도수두 차이이고,  $L$ 은 상하류 구간의 길이이며,  $k$ 는 수축·확장 계수로 단면 수축시 0, 확장시 0.5이다(Dalrymple과 Benson, 1968).

Manning 공식을 사용할 경우, 통수능  $K(=n^{-1}AR^{2/3})$ 이 계산되며, 상하류 두 단면의 기하평균 통수능이 유량계산에 사용된다.

$$Q = \sqrt{K_1 K_2 S} \quad (4)$$

2개 이상의 단면을 사용할 경우 경사면적법 유량 계산의 공식은 다음과 같다.

$$Q = K_n \sqrt{\frac{\Delta h}{A + B}} \quad (5)$$

여기서,  $K_n$ 은  $n$ 번째 단면의 통수능이며,

$$A = K_n^2 \frac{L_{1-2}}{K_1 K_2} + K_n^2 \frac{L_{2-3}}{K_2 K_3} + \dots + K_n^2 \frac{L_{(n-1)-n}}{K_{(n-1)} K_n}$$

이고,

$$B = \left[ \begin{aligned} & -\alpha_1 \left( \frac{A_n}{A_1} \right)^2 (1 - k_{1-2}) \\ & + \alpha_2 \left( \frac{A_n}{A_2} \right)^2 (k_{2-3} - k_{1-2}) + \dots \\ & + \alpha_{(n-1)} \left( \frac{A_n}{A_{n-1}} \right)^2 (k_{(n-1)-n} - k_{(n-2)-(n-1)}) \\ & + \alpha_n (1 - k_{(n-1)-n}) \end{aligned} \right]$$

이다.

#### 3.2 수위 실측

본 연구의 대상구간에서는 2005년 7월과 2006년 7월에 각각 첨두유량이 계획홍수량의 58%, 76%인 1,023  $m^3/s$ , 1,331.8  $m^3/s$ 의 홍수사상이 있었으며, 연속적으로 실측된 수위기록으로부터 수위가 대체로 일정하게 유지되는 20개 시점의 자료를 선정하여 경사면적법으로 유량을 계산하였다. 선정된 자료는 댐 방류량을 기준으로 최소 62.7  $m^3/s$ 에서 최대 1,332  $m^3/s$ 까지 다양한 유량에 해당한다. 수위 실측은 5분 간격으로 연속 수위 측정이 가능한 기포식 수위계를 이용하였으며, 연구에 활용된 20개 시점의 실측 수위는 Table 2에 제시한 바와 같다. 또한 각 홍수 사상에서 수전교 수위계로부터

Table 2. Measured Water Level at Each Section

(unit : m<sup>3</sup>/s, m)

No.	Event	Dam Discharge	Sujeon Br.(X1)	2nd gage(X2)	3rd gage(X3)	4th gage(X4)
1	2005-07-01 18:30	99.1	111.293	111.122	110.989	110.253
2	2005-07-03 23:30	576.0	113.243	113.037	112.659	111.843
3	2005-07-04 03:15	427.0	112.753	112.567	112.254	111.433
4	2005-07-04 09:45	251.0	112.033	111.877	111.639	110.853
5	2005-07-11 16:40	1,023.0	114.343	114.077	113.674	112.768
6	2005-07-12 15:45	171.0	111.643	111.472	111.359	110.528
7	2005-07-12 04:30	306.0	112.293	112.112	111.939	111.033
8	2006-07-11 01:00	146.0	111.623	111.471	111.303	110.568
9	2006-07-11 13:00	143.0	111.573	111.421	111.253	110.523
10	2006-07-11 19:30	62.7	111.063	110.926	110.833	110.083
11	2006-07-16 18:30	645.0	113.413	113.211	112.858	112.058
12	2006-07-16 20:30	901.0	113.993	113.776	113.313	112.538
13	2006-07-16 21:30	1,183.0	114.743	114.486	113.948	113.303
14	2006-07-16 22:30	1,237.3	114.823	114.556	114.003	113.373
15	2006-07-16 23:30	1,331.8	115.073	114.776	114.223	113.643
16	2006-07-17 03:30	839.3	113.843	113.641	113.173	112.353
17	2006-07-17 13:30	383.0	112.523	112.361	112.058	111.238
18	2006-07-18 01:30	758.5	113.573	113.356	112.928	112.108
19	2006-07-19 12:00	290.0	112.183	112.031	111.763	110.963
20	2006-07-31 14:45	64.0	111.073	110.931	110.833	110.078

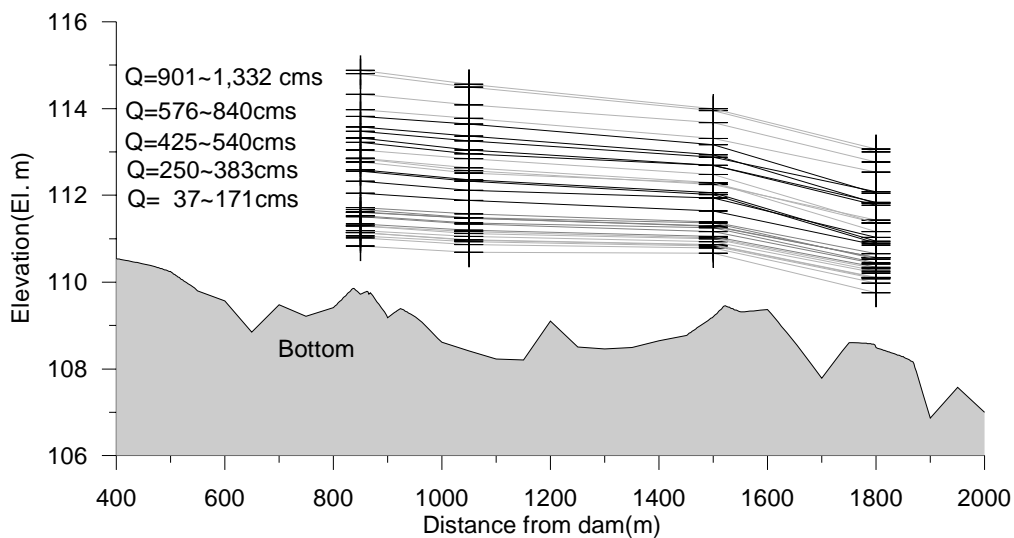


Fig. 5. Longitudinal Water Surface Profiles for each event

4번 기포식 수위계까지 측정된 수면 곡선은 Fig. 5와 같다. 편의를 위해 본 논문에서는 상류의 수전교 수위계로부터 4번 수위계 단면을 X1 ~ X4 단면으로 칭하기로 한다.

X1 ~ X4 단면 사이의 구간거리와 측정된 수위값을 이용하여 계산한 각 홍수 사상의 수면경사와 구간별 평균하상경사를 Table 3에 제시하였다.

전체적으로 보면, 구간에 따라 저수시의 수면경사는

크게 차이가 나타나는데, 가장 완만한 X2-X3 구간의 경우 0.02%인데 비해, 가장 급한 X3-X4 구간의 경우 0.24%에 달한다. 이러한 수면경사의 차이는 하상의 굴곡으로 인한 것이다. Fig. 5에서 나타나듯이 하상은 승강을 반복하면서 점차 낮아지는 자갈하천의 특성을 잘 보여주고 있다. 이에 따라 저수시에는 하상경사와 수면경사가 모두 급한 여울(riffle) 구간과 하상경사가 완만하거나 하류의 여울 마루(riffle crest)에 의해 역경사가

나타나면서 배수영향으로 수면경사가 매우 완만한 웅덩이(pool)가 나타난다. 그러나 이러한 수면경사의 차이는 유량이 증가하면서 점차 소멸되며, 매우 큰 홍수량에서는 여울과 웅덩이의 수면경사 차이가 감소하며 평균화상경사에 가까워지는 특성을 나타내고 있다(Richards, 1982). Table 3의 결과 역시 이러한 경향을 반영하는 것으로 볼 수 있다.

그러나 X3-X4 구간의 수면경사 변화는 다른 구간과는 다른 특성을 나타내고 있다. X3-X4 구간은 유량 306.0 cms 까지는 수면경사가 약간 증가하다가 그 이후에는 다시 점차 감소하는 특징을 보이고 있다. 이는 주로 X4 단면 하류의 배수 영향이 변하는데 기인하는 것으로 분석되었다. 왜냐하면, X4 단면 하류 쪽에 위치하여 평상시 통제 역할을 하는 대수보가 약 300 cms 이상이 되면 하류 수심에 잠기게 되어 보다 하류로부터 배수 영향을 받기 때문이다(이찬주 등, 2007).

### 3.3 조도계수의 설정

조도계수의 설정은 경사면적법을 이용한 유량 산정에서 가장 중요한 부분 중에 하나이다. 조도계수의 값에 따라 계산된 유량이 크게 달라질 수 있으므로 유량

측정의 정확도 또한 크게 좌우된다(Jarrett, 1987; Quick, 1991). 그러나 조도계수의 정확하고도 객관적인 산정은 쉽지 않은 일이며, 종종 기술적으로 숙련된 경험을 요구한다(Benson과 Dalrymple, 1968).

조도계수는 주로 하상재료, 하도 단면의 불규칙성, 수심, 식생 상태, 하천의 선형 등을 반영하지만, 종종 하도 경사 등과도 관련이 있다(Jarrett, 1987). 조도계수를 산정하는 방법은 몇 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 유량과 수위를 실측하여 조도계수를 산정하는 방법이다(Barnes, 1967; Hicks와 Mason, 1991; Limerinos, 1970; 김지성 등, 2007a). 이 방법은 미국, 뉴질랜드, 호주 등의 여러 나라에서 활용되어 왔으며, 참모하천에 대한 조도계수 자료집으로 정리되었다. 이 방법은 실측 자료를 필요로 하므로 실측 구간이 아닌 곳에서 미지의 유량을 산정하는 데는 적합하지 않다. 둘째, 하상재료의 입경 분석을 통해 조도계수를 산정하는 방법인데, 주로 Strickler(1923)형의 경험식을 사용한다(김지성 등, 2007a). 이 방법은 하상재료에 대한 조사만으로 조도계수를 얻을 수 있지만, 입경 크기 이외의 흐름 저항 요인을 반영하기 곤란하며, 어떤 식을 선택하느냐에 따라 조도계수가 크게 달라질 수 있다. 셋째, 입경 특성을 기

Table 3. Water Surface Slope Calculated for Each Event with Averaged Bed Slope (unit : %)

Dam Discharge (m <sup>3</sup> /s)	X1-X2	X2-X3	X3-X4	X1-X3	X2-X4	X1-X4
62.7	0.079	0.020	0.240	0.036	0.108	0.102
64.0	0.082	0.021	0.241	0.037	0.109	0.104
99.1	0.098	0.028	0.235	0.047	0.111	0.109
143.0	0.087	0.036	0.233	0.050	0.115	0.110
146.0	0.087	0.036	0.235	0.050	0.115	0.110
171.0	0.098	0.024	0.265	0.044	0.121	0.117
251.0	0.090	0.051	0.251	0.061	0.131	0.123
290.0	0.087	0.057	0.256	0.065	0.136	0.127
306.0	0.104	0.037	0.289	0.055	0.138	0.132
383.0	0.093	0.064	0.262	0.072	0.143	0.134
427.0	0.107	0.067	0.262	0.077	0.145	0.138
576.0	0.118	0.080	0.261	0.091	0.152	0.146
645.0	0.116	0.075	0.256	0.086	0.147	0.142
758.5	0.125	0.091	0.262	0.100	0.159	0.153
839.3	0.116	0.100	0.262	0.104	0.164	0.156
901.0	0.125	0.099	0.248	0.106	0.158	0.152
1,023.0	0.153	0.086	0.289	0.104	0.167	0.165
1,183.0	0.148	0.114	0.206	0.123	0.151	0.150
1,237.3	0.153	0.118	0.201	0.127	0.151	0.152
1,331.8	0.171	0.118	0.185	0.132	0.145	0.149
Bed slope	0.747	-0.166	0.294	0.081	0.018	0.150

초로 기본 조도계수를 설정한 후, 하도 단면의 불규칙성, 수심, 식생 상태, 하천의 선형을 반영하여 조도계수에 가감하는 방법으로 USGS에서 많이 사용하며, Cowan 방법(Cowan, 1956)으로 알려져 있다. 이 방법은 조도에 영향을 미치는 요소에 대한 평가를 통해 조도계수값을 결정할 때, 주관적 판단이 다소 개입되지만, 실측 자료 없이 조도계수를 산정할 수 있다. 넷째, 단면의 수심 실측을 통해 수심에 따른 가변 조도계수를 활용하는 것이다. 이의 대표적인 사례는 Limerinos(1970)의 경험식으로, 주로 자갈 내지는 호박돌 하천에 적용된다. Jarrett(1984)는 경사가 0.2% 이상인 급경사 하천에서 마찰경사와 동수반경을 이용하여 조도계수를 산정하는 경험식을 제시하였는데, 이는 Limerinos의 식과는 달리 하상재료의 입경을 고려하지 않는다. 우리나라에서는 부등류 모형을 이용하여 조도계수를 산정하기도 하는데 이 방법 역시 실측된 유량과 수위가 있어야만 조도계수를 산정할 수 있다(이찬주 등, 2007). 그러므로 위의 방법들 중에서 유량을 미지수로 할 경우 활용 가능한 방법은 고정 조도계수값이 산정되는 둘째, 셋째 방법과 가변 조도계수값이 산정되는 넷째 방법이다.

본 연구에서는 앞 절에서 경사면적법 유량 산정에 가능하다고 판단한 세 가지 방법을 모두 사용하여 조도계수를 산정하였다. 먼저, 입경 특성에 의한 방법 중에서는 Bray(1979)의 경험식을 사용하였다. Bray의 식을 S1~S12 지점의 입경 분석 결과에 적용할 경우 조도계수는 0.039~0.042의 범위에 해당되며, 직접적인 수면경사의 분석 구간만을 고려하면 계산된 조도계수는 0.041~0.043이 된다. Bray의 식으로 계산된 조도계수의 범위가 크지 않으므로 중간값인 0.042를 적용하기로 하였다. 다음으로 Cowan(1956)의 방법을 적용하여 조도계수를 산정하였다. Cowan의 방법에 의한 조도계수는 동일한 지점에 대한 연구를 수행했던 김지성 등(2007a)의 결과를 공통으로 활용하여 n값을 0.039로 산정하였다. Cowan의 값은 연구자에 따라 값이 조금씩 다를 수 있으나 본 연구에 적용된 다른 방법과 n값의 차이가 너무 적을 경우 적용한 조도계수에 따른 유량 차이가 거의 발생하지 않는 점을 고려하여 n값을 결정하였다. 세 번째 방법은 가변 조도계수값을 활용하는 것으로 Limerinos(1970)의 경험식을 이용하였는데, 이는 연구 대상 구간이 호박돌 위주의 자갈 하천으로 Limerinos의 경험식이 도출된 조건과 유사성이 있다고 판단하였기 때문이다. 그리고 실시간, 연속 수위의 측정이 가능하므로 이를 이용하면 각 계산 단면에서 동수반경이 계산 가능하다. 본 연구에서는 최대 4개 단면의 동수반경을 평균하여 사용하였다. 이렇게 산정된 조도계수값은 62.7

~ 1,331.8 cms의 유량 범위에서 0.050 ~ 0.042이다.

추가로, 다른 방법으로 구한 조도계수와의 비교를 위해 하천정비기본계획에서 제시한 조도계수를 사용하였다. 그 이유는 두 가지이다. 첫째, 하천정비기본계획이 국내 대부분의 지방2급 이상의 하천에 거의 수립되어 있으며, 이를 활용할 경우 별도의 조도계수를 산정하는 불편을 줄일 수 있으므로 실무자가 활용할 가능성이 높기 때문이다. 둘째, 달천 하천정비기본계획에서 본 연구의 대상구간에 해당하는 조도계수가 0.033으로 나머지 세 가지 방법으로 구한 조도계수값과의 차이가 크므로 유량 산정시 조도계수 차이에 따른 영향을 뚜렷하게 비교할 수 있기 때문이다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 조도계수에 따른 특성

Fig. 6과 Table 4는 조도계수를 다르게 적용했을 때 경사면적법에 의해 산정된 유량과 댐 방류량의 상대오차를 보여주고 있으며, 유량의 상대오차는 Eq. (6)에 의하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{Relative difference(\%)} & \quad (6) \\ & = (Q_{\text{slope-area}} - Q_{\text{dam}}) / Q_{\text{dam}} * 100 \end{aligned}$$

전체적인 경향을 보면 조도계수가 0.033으로부터 점차 커질수록 상대오차가 줄어드는 특성을 나타낸다. 즉, 조도계수 0.033에서는 상대오차 범위가 -15 ~ 351% 이나 0.039에서는 -28 ~ 280%, 0.042에서는 -34 ~ 252%, 가변 조도계수 적용시는 -42 ~ 194%로 감소하였다. 한편, 조도계수 0.033을 적용할 경우에는 S2-S3 구간에서 산정한 몇 건의 사상 외에는 실측 유량과 비교하여 ±10% 범위에 드는 결과가 없는 반면에, 0.039, 0.042의 조도계수 및 가변 조도계수(최소 0.042)를 적용할 경우에는 유량에 따라 차이가 있으나 S3-S4 구간의 경우를 제외한 모든 계산구간에서 유량의 상대오차가 ±10% 범위로 산정됨을 알 수 있다.

Fig. 5와 Table 3을 보면, X2-X3 구간의 수면경사가 가장 작게 나타나며, 그 다음으로 완만한 경사는 X1-X3 구간인데, 이 두 계산구간은 유량이 증가하여 수면경사가 커지더라도 대상구간 전체의 평균하상경사인 0.154%에 못 미치는 특성을 나타내고 있다. 구간 전체의 평균하상경사에 비해 수면경사가 완만한 이 두 구간에서 n값으로 0.033을 사용하더라도 상대적으로 적은 유량 산정 오차를 나타내고 있다. 그런데 n값이 0.039, 0.042, 그리고 0.042 이상의 값을 갖는 가변 조도 순으



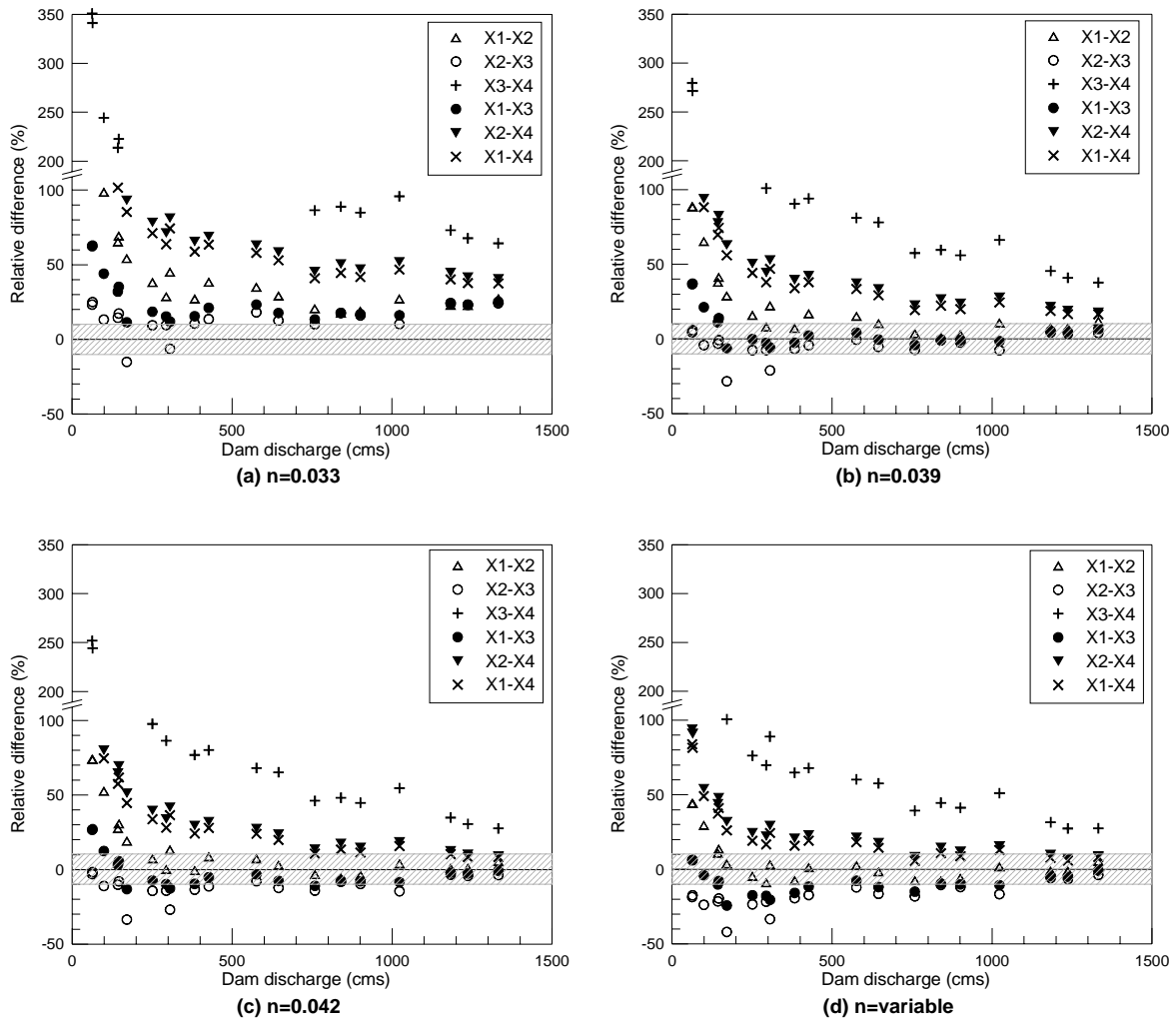


Fig. 6. Relative Difference between Slope-area and Dam Discharges

Table 4. Applied Roughness Coefficient Values

Roughness coefficient	0.033	0.039	0.042	Variable 0.050 ~ 0.042
estimated from	From River Improvement Plan (Chungcheongbukdo, 1995)	By Cowan's method (Kim, et. al., 2007)	By Bray(1979)'s Equation	By Limerinos(1970)'s equation

로 증가할 경우 전체적인 상대오차는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그리고  $n$ 값을 0.042 이상으로 적용할 때는 유량이 500 cms 이상인 조건에서는 구간 전체의 평균하상경사보다 1.5배 이상의 수면경사를 나타내는 X3-X4 구간을 제외한 모든 구간에서 상대오차가 적게 산정되었다.

#### 4.2 계산 구간에 따른 특성

본 연구에서는 총 4개 수위관측 단면이 있으므로 유량 계산에 적용할 수 있는 6가지 개별 단면쌍(X1-X2, X2-X3, X3-X4, X1-X3, X2-X4, X1-X4)으로 구성된

계산 구간이 가능하다. 하지만, 구간의 길이 측면에서 보면 X1-X2 구간의 경우 유량이 300 cms 이상일 경우 경사면적법의 권장 길이 기준인 수심의 75배(Dalrymple and Benson, 1968)에 미달하여 계산 결과의 신뢰성이 떨어지므로 분석에서 제외하였다. 각 계산 구간은 Fig. 5에서 보듯이 그 특성이 서로 다르게 나타나므로 그 특성별로 결과를 분석하였다.

X1-X3 구간과 X2-X3 구간에는 하상 및 수면의 급경사가 발생하는 여울 구간은 포함되지 않으나 X3 단면 바로 하류에 위치한 돌보의 영향으로 배수를 받는다 (Fig. 3). 따라서 전체 유량 범위에서 하도의 평균경사

에 비해 완만한 수면경사를 나타내고 있다. 그 결과 조도계수 0.033을 적용할 경우에도 다른 구간에 비해 오차가 상대적으로 작으며, 0.039 이상의 조도계수 적용시에는 상대오차가  $\pm 10\%$  범위에 포함되거나 근접하게 나타난다. 특히 X2-X3 구간은 평저수시에는 돌보의 배수 영향만을 받는 단일하게 매우 완만한 수면 구간으로 유량이 500 cms 이하이거나 조도계수가 0.042 이상으로 높게 적용될 경우 실측 유량에 비해 적은 유량이 산정

된다. 이러한 특성은 전체 하도의 평균하상경사에 비해 수면경사가 완만한 구간의 경우 조도계수 역시 분석한 X1-X4 구간 전체에 적용한 것보다 작은 값을 쓰는 것이 적절함을 보여준다. 다만 완만한 수면 구간의 경우 15cm 이상의 낙차가 확보되는 수위 이상에서 활용해야 할 것으로 보인다(Dalrymple and Benson, 1968).

X3-X4 구간은 X3 구간 바로 하류에 위치한 돌보로부터 7번 수위계(Fig. 2, 3 참고) 바로 상류의 만곡부가

Table 5. Relative Error from Dam Discharge (unit : %)

Section Dam Discharge (m <sup>3</sup> /s) <i>n</i>	X1-X2				X2-X3				X3-X4				
	0.033	0.039	0.042	Variable	0.033	0.039	0.042	Variable	0.033	0.039	0.042	Variable	0.056
62.7	127.6	88.7	74.0	44.2	23.3	4.5	-3.0	-18.5	351.2	279.6	251.8	194.4	162.4
64.0	127.3	88.4	73.8	44.2	25.0	5.8	-1.7	-17.3	341.4	271.4	244.2	188.1	156.9
99.1	98.6	65.3	52.6	29.6	13.2	-4.1	-11.0	-23.7	244.3	189.5	168.3	129.2	100.1
143.0	65.3	38.0	27.6	10.8	14.5	-3.2	-10.1	-21.4	213.7	163.8	144.4	113.2	82.2
146.0	69.2	41.3	30.6	13.6	17.3	-0.8	-7.9	-19.5	222.7	171.4	151.5	119.4	87.5
171.0	54.1	28.8	19.1	3.6	-15.1	-28.4	-33.5	-41.9	193.8	147.7	129.8	100.6	71.8
251.0	38.1	15.8	7.2	-4.6	9.4	-7.6	-14.2	-23.4	153.0	113.1	97.6	76.2	47.5
290.0	28.6	8.0	0.0	-8.9	9.6	-7.5	-14.1	-21.6	138.4	101.0	86.3	69.9	39.2
306.0	45.1	22.2	13.2	3.2	-6.4	-21.1	-26.9	-33.3	164.0	123.2	107.2	89.1	55.2
383.0	27.0	7.0	-0.7	-7.5	10.5	-6.7	-13.4	-19.3	126.0	90.6	76.8	64.9	32.2
427.0	38.3	16.9	8.5	1.3	13.5	-4.3	-11.2	-17.2	130.1	94.1	80.1	67.9	34.7
576.0	35.0	15.2	7.3	2.6	18.1	-0.5	-7.8	-12.0	114.5	81.1	68.0	60.3	25.7
645.0	29.0	10.4	2.9	-1.6	12.6	-5.3	-12.3	-16.4	111.0	78.1	65.2	57.6	23.6
758.5	20.5	3.5	-3.4	-7.5	10.1	-7.3	-14.1	-18.1	86.5	57.5	46.1	39.4	9.4
839.3	17.4	1.1	-5.6	-7.6	17.7	-1.0	-8.2	-10.4	88.9	59.6	48.1	44.7	10.9
901.0	19.0	2.7	-3.9	-5.9	16.0	-2.5	-9.6	-11.8	85.0	56.0	44.8	41.4	8.3
1,023.0	27.1	10.7	3.9	1.7	10.2	-7.6	-14.5	-16.6	95.8	66.3	54.6	51.0	16.3
1,183.0	22.9	7.4	0.9	-1.1	24.3	4.3	-3.4	-5.8	73.2	45.5	34.8	31.6	0.5
1,237.3	22.6	7.3	0.9	-1.1	23.3	3.4	-4.2	-6.5	67.7	40.9	30.5	27.4	-2.8
1,331.8	27.2	11.9	5.4	5.4	24.2	4.0	-3.7	-3.7	64.3	37.8	27.6	27.6	-5.1

Section Dam Discharge (m <sup>3</sup> /s) <i>n</i>	X1-X3				X2-X4				X1-X4			
	0.033	0.039	0.042	Variable	0.033	0.039	0.042	Variable	0.033	0.039	0.042	Variable
62.7	62.4	36.7	26.6	6.1	194.7	149.0	131.1	93.9	181.7	137.0	119.6	83.9
64.0	62.8	37.0	27.0	6.4	190.3	145.3	127.7	91.1	178.1	134.1	117.0	81.6
99.1	44.0	21.3	12.4	-3.9	129.8	94.0	80.0	54.2	123.6	88.3	74.6	49.1
143.0	32.0	11.1	3.1	-10.1	110.6	77.8	64.9	44.1	101.7	69.8	57.4	37.3
146.0	35.2	13.9	5.5	-7.8	116.6	82.7	69.5	48.2	107.3	74.5	61.7	41.2
171.0	11.4	-6.3	-13.1	-24.2	93.3	63.1	51.3	32.2	85.3	56.0	44.7	26.3
251.0	18.5	-0.1	-7.4	-17.4	78.5	50.6	39.7	24.7	71.1	44.2	33.7	19.3
290.0	15.3	-2.7	-9.8	-17.7	71.3	44.6	34.1	22.3	63.7	38.0	28.0	16.7
306.0	11.9	-5.8	-12.6	-20.4	81.3	53.0	41.9	29.4	74.4	47.1	36.4	24.4
383.0	15.5	-2.6	-9.6	-15.7	65.6	39.8	29.7	20.9	58.8	34.0	24.3	15.9
427.0	21.1	2.2	-5.2	-11.5	69.0	42.6	32.2	23.3	63.4	37.9	27.9	19.3
576.0	23.3	4.2	-3.2	-7.7	63.2	37.6	27.6	21.7	58.0	33.5	23.9	18.2
645.0	17.7	-0.4	-7.6	-11.8	58.6	33.6	23.8	18.1	52.9	29.2	19.9	14.4
758.5	13.3	-4.1	-10.9	-14.9	45.6	22.8	13.8	8.6	40.9	19.2	10.7	5.7
839.3	17.6	-0.4	-7.5	-9.6	50.6	26.9	17.7	14.9	44.4	22.2	13.5	10.9
901.0	16.9	-0.9	-7.9	-10.1	47.3	24.0	14.9	12.2	41.8	20.0	11.4	8.8
1,023.0	16.1	-1.5	-8.5	-10.6	51.9	28.0	18.7	15.9	46.7	24.5	15.7	13.1
1,183.0	23.9	5.3	-2.1	-4.3	45.0	21.7	12.7	10.0	40.2	18.8	10.3	7.8
1,237.3	23.1	4.7	-2.6	-4.9	41.9	19.1	10.3	7.7	37.6	16.6	8.4	5.9
1,331.8	25.2	6.6	-0.8	-0.8	40.6	17.9	9.1	9.1	37.5	16.6	8.3	8.3

지에 걸쳐 있는 급한 여울 구간에 위치하고 있어 수면이 잠기는 다른 구간에 비해 하상 마찰이 크다. 이러한 마찰은 흐름의 불규칙성, 흐름 장애물의 영향에 기인한다. 분석된 유량 범위에 대해 이 구간의 최대수면경사는 0.289%에 달하며, 평균수면경사는 0.247%로 대상구간 전체의 평균하상경사 0.154%의 1.6배에 달한다. 또한 분석 기간 중 가장 큰 홍수 사상인 1,331.8 cms의 유량 조건에서도 평균하상경사의 1.2배를 넘는 수면경사를 나타내고 있다. 이러한 현상은 이 구간이 다른 구간과는 달리 하도경사가 매우 급격하여 저수시 뿐만 아니라 상당한 규모의 홍수시에도 하류에 의한 배수 영향이 거의 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 이 구간의 경우 모든 적용된 조도계수값에서 상대오차가 크게 산정되었다. 즉,  $n$ 값이 0.033일 때는 최소 오차가 64%, 최대 오차는 351%이며, 최대 유량 1,331.8 cms에서 가장 큰  $n$ 값인 0.042를 적용할 경우에도 27%의 오차가 발생하였다. Jarrett(1984)은 경사 0.002 이상의 호박돌, 거석 하천에서 조도계수가 경사에 비례하여 증가하며, 이러한 하천에 대해 일반적인 방법으로 조도계수를 산정할 경우 실제에 비해 약 59% 낮게 산정되므로 유량 오차가 100%에 이를 수 있다고 하였다. Jarrett의 연구 결과를 참고하여  $n$ 값 0.033을 59%로 가정하면, X3-X4 구간에 맞는 조도계수는 0.033의 약 1.7배인 0.056이다. 이를 X3-X4 구간에 대해 적용할 경우 약 700 cms 이상부터 대체로 상대오차가 10% 정도가 되는 점으로 미루어 대체로 적절한 것으로 나타났으며, 다른  $n$ 값에 비해 전체적인 상대오차의 수준이 감소하였다(Fig. 7). 다만 앞절에서 분석한 결과를 고려하여 기준 조도계수를 대상구간 전체(X1-X4)와 비교적 잘 맞는 0.042로 채택할 경우 1.7배를 적용할 경우 유량이 과소 산정되며, Jarrett(1984)의 연구에 포함된 하천들의 하상경사가 0.2% ~ 6.6%의 범위에 있으므로 달천의 하상경사보다 더 가파른 특성을 나타내므로, 0.042를 기준으로 약 1.3배 정도 증가된 조도계수가 산정되었다.

X1-X4 구간과 X2-X4 구간은 대체로 분석 대상 전체 구간 길이의 100%와 82%를 차지하며, 완만한 수면경사를 가진 배수 구간과 급경사의 여울 구간을 모두 포함한다. 이들 구간은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 어떤 조도계수를 사용하더라도 상대오차가 거의 같게 나타난다. X1-X4 또는 X2-X4 구간에서 유량을 계산할 경우 0.042나 그 이상의 가변 조도계수에 대해 700 cms 이상의 유량에서 10 ~ 20 % 정도의 상대오차가 나타나고 있다. 이는 계산에 적용되는 하도 구간이 길어지고 부분적인 완경사 또는 급경사의 효과가 평균화된데 기인하는 것으로 보여진다.

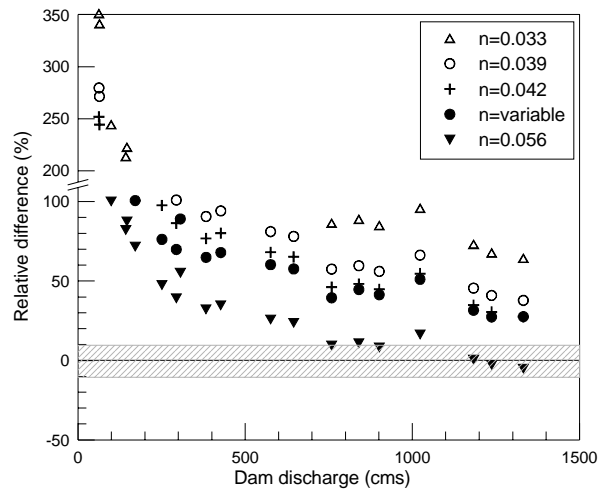


Fig. 7. Relative difference for reach X3-X4

본 연구의 결과들은 평수시를 기준으로 명확하게 수면경사가 대비되는 두 계산구간(X2-X3과 X3-X4)에서 경사면적법에 의해 유량을 정확하게 산정하기 위해서는 조도계수를 크게 달리 입력해야 한다는 것을 보여주며, 역으로 동일한 하천에서 일반적인 조도계수를 사용할 경우 계산 구간의 선택에 따라 유량 오차가 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 또한 수면경사가 완만한 구간과 급한 구간을 포괄하는 보다 긴 구간에서 유량을 계산할 경우 수면경사가 급한 구간만을 택했을 경우에 비해 유량의 상대오차를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이는 자갈하천에서 하상경사가 여울 구간에서는 급하게 나타나고 웅덩이 구간에서는 완만하거나 역경사로 나타나므로 하도의 평균하상경사를 구하기 위해서는 여울과 웅덩이를 적절하게 포함하여야 하는 것처럼 경사면적법 적용시에도 수면 곡선이 특정하게 평활하거나 급한 구간을 선정하기보다는 보다 긴 거리에서 종단 수면곡선의 변화를 검토하고 홍수시의 수면곡선과 근접할 수 있도록 수위 측정 구간을 선정해야 한다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 기존의 연구가 제시해 주지 못했던 것으로 실무적으로 여울과 웅덩이가 반복되는 자갈 하천에서 경사면적법의 적용시 종단곡선 상에서 수위 관측 및 계산단면의 위치 선정을 위한 참고가 될 수 있다.

#### 4.3 유량 규모와 오차 변화

본 연구의 결과는 유량이 약 750 cms 이상에서는 유량에 따른 오차 변화가 적어진다는 것을 보여준다. 나아가 X3-X4 구간 및 거리가 짧은 X1-X2 구간을 제외한 나머지 네 구간으로 유량을 계산할 경우 계획홍수량의 29%인 약 500 cms 이상에서 방류량 대비 상대오차의 변화 정도가 적어진다. 이러한 특성을 이용하면, 직접적인 유량 측정 방법이 적용 가능한 다소 작은 유량

규모에서 경사면적법을 적용하여 비교함으로써 조도계수를 조정하고, 이를 다시 큰 규모의 유량에 적용함으로써 경사면적법에 의한 유량 산정의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 요약과 결론

본 연구에서는 호박돌 하천인 달천에서 2005년과 2006년에 측정된 연속 수위자료를 이용하여, 경사면적법에 의해 간접적으로 유량을 산정하였다. 유량 산정시 조도계수는 하천정비기본계획의 조도계수(충청북도, 1995), Cowan(1956) 방법, 입경 크기를 이용한 Bray(1979)의 방법, 그리고 수심에 따른 가변 조도계수 계산법인 Limerinos(1970)의 경험식에 의한 방법을 적용하였으며, 수전교로부터 4번 기포식 수위계까지 총 4개 단면을 이용하여 유량을 계산하였다. 그리고 산정된 유량을 댐에서 방류한 실측 유량과 비교하여 정확성과 경사면적법의 적용성을 분석하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 경사면적법에 의한 유량 산정에는 조도계수가 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 대상하천에서 0.042 또는 그 이상의 값을 갖는 가변조도계수를 적용할 경우 댐 방류량 대비 상대오차가 상대적으로 작게 나타났다.
- 2) 대상구간의 평균하상경사보다 완만한 수면경사를 갖는 웅덩이 구간과 같은 조건에서는 조도계수가 상대적으로 작은 값에서, 반대로 보다 급한 경사를 갖는 여울 구간의 조건에서는 조도계수가 큰 값에서 댐 방류량 대비 상대오차가 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 미계측 구간의 조도계수는 주로 하상재료와 하상경사, 단면 형태 등의 하도 특성을 토대로 산정된다는 점을 고려하면 상하류의 수위 측정만으로 유량을 산정하고자 할 때, 하도의 전체적인 경사를 반영하는 구간을 설정하여 수행하는 것이 적절한 것으로 나타났다.
- 3) 유량이 일정한 수준에 이르면, 실측 유량과의 상대오차가 변화하는 경향성이 감소하고 오차가 대체로 일정한 상태가 되므로, 다른 직접 유량 측정 방법의 적용이 가능할 경우 조도계수의 조정을 위한 기회를 제공할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 주요 하상재료가 호박돌로 구성되어 있고, 여울과 웅덩이가 교호적으로 나타나는 자갈 하천의 일부 구간을 대상으로 경사면적법을 적용한 사

례로서 유량 산정 방법으로서 경사면적법의 정확성에 관한 일반적인 결론을 도출하기에는 미흡한 것이 사실이며, 보다 많은 하천에서의 적용이 필요하다. 다만 경사면적법의 정확성은 조도계수 산정 및 계산 단면의 설정에 크게 좌우될 수 있다는 점에서 향후 본 연구의 사례를 참고할 경우 경사면적법을 실제 하천에 적용하는데 참고가 될 수 있을 뿐만 아니라 이를 통해 홍수 유량 측정의 참고값을 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 2-1-3).

## 참고 문헌

- 김지성, 이찬주, 김원 (2007a). "실측 수위에 의한 자갈 하천의 조도계수 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 755-768
- 김지성, 이찬주, 김원 (2007b). "현장실측에 의한 조도계수 산정의 불확실도 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 801-810
- 우효섭 (2001). **하천수리학**, 청문각
- 이찬주, 김원, 김지성 (2007). "국내하천의 조도계수 산정방법 조사." **2007년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 966-970
- 이찬주, 김원, 김동구, 김치영 (2007). "동시유량측정에 의한 다양한 유량측정 방법 비교." **2007년 대한토목학회 학술발표회논문집**, 대한토목학회, CD-ROM
- 충청북도 (1995). **달천 하천정비기본계획보고서**(지방2급하천)
- Barnes, H. H., Davidian, J. (1978). "Indirect methods." In: Herschy, R. W. (ed.), *Hydrometry: principles and practices*, Wiley, New York, pp. 189-190
- Barnes, H.H., Jr. (1967). *Roughness characteristics of natural channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849
- Benson, M. A., Dalrymple, T. (1967). "General field and office procedures for indirect discharge measurements," *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigation*, book 3, Chapter A-1
- Bowers, J. C. (2001). *Flood in Cuyana Valley*,

- California, February 1998, USGS Fact Sheet fs162-00
- Bray, D.I. (1979). "Estimating average velocity in gravel-bed rivers." *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1122.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*, New York, McGraw-Hill
- Cowan, W.L. (1956). "Estimating hydraulic roughness coefficients." *Agricultural Engineering*, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475.
- Dalrymple, T., Benson, M.A. (1968). "Measurement of peak discharge by the slope-area method," *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigation*, book 3, Chapter A-2, 12p.
- Dingman, S.L., Sharma, K.P. (1997). "Statistical development and validation of discharge equations for natural channels", *Journal of Hydrology*, Vol. 199, pp. 13-35
- Fulford, J. M. (1994). *User's guide to SAC, a computer program for computing discharge by slope-area method*, US Geological Survey Open-File Report 94-360
- Hicks, D.M. and Mason, P.D. (1991). *Roughness characteristics of New Zealand Rivers*, DSIR Marine and freshwater, Wellington.
- Jarrett, R.D. (1984). "Hydraulics of high-gradient streams," *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 110, No. 11, pp. 1519-1539
- Jarrett, R.D. (1987). "Errors in slope-area computations of peak discharges in mountain streams." *Journal of Hydrology*, Vol. 96, pp. 53-67
- Limerinos, J.T. (1970). *Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1898-B, 47pp.
- Quick, M.C. (1991). "Reliability of flood discharge estimates." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, pp. 624-630
- Richards, K. (1982). *Rivers : form and process in alluvial channels*, New York, Methuen
- Riggs, H.C. (1976). "A simplified slope-area method for estimating flood discharges in natural channels." *Journal of Research*, U.S. Geological Survey, Vol. 4, pp. 285-291
- Strickler, A. (1923). "Beitrage zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen fur Strome, Kanale und geschlossene Leitungen." *Mitteilungen des Eidgenossischen Amtes fur Wasserwirtschaft 16*, Bern, Switzerland (Translated as "Contributions to the question of a velocity formula and roughness data for streams, channels and closed pipelines." by T. Roesgan and W. R. Brownie, Translation T-10, W. M. Keck Lab of Hydraulics and Water Resources, Calif. Inst. Tech., Pasadena, Calif. January 1981).
- USGS (2000). *Sparta, New Jersey, Flood of August 11-14, 2000*, USGS Fact Sheet fs104-01

(논문번호:08-15/접수:2008.01.30/심사완료:2008.03.24)