

수리모형을 이용한 평창강 합류구간의 횡단면 수위차 분석

Analysis for Difference of Water Surface Elevation at Cross Section in Pyungchang River Contained Junction Using Hydraulic Model

김 기 형* / 최 계 운**

Kim, Gee Hyoung / Choi, Gye Woon

Abstract

In this study, hydraulic model same as natural channel with junction area and curved reach is constructed, and after that the variation of difference of the water surface elevation at cross section in junction area is analyzed using constructed hydraulic model. In junction area, the variation of maximum water level based on downstream section is more affected in discharge ratio at upstream than downstream. The maximum water level increased as closed to junction and the peak level appeared at just downstream of junction. The slope of water elevation at cross section is affected in section shape and decreased as discharge ratio is reduce. The expressed formulas developed in the channel consist of constant curvature and section shape showed difference of 60% with measured value, but the suggested formula in this study to compute difference of water surface elevation showed difference of 10% with measured value.

key words : the difference of water surface elevation at cross section, the slope of water surface at cross section, junction, curved channel

요 지

본 연구에서는 본류와 지류가 만나는 합류구간, 만곡 및 사행구간이 있는 자연하천과 동일한수리모형을 제작하고 합류부를 중심으로 본류와 지류의 유량비 변화에 따라 모형의 합류부 횡단면에서 발생하는 수위차의 변화를 분석하였다. 합류이전의 최하류단면 수위를 기준으로 하는 합류부 각 단면의 최대수위 변화에 미치는 유량비의 영향은 합류부 하류구간보다 상류구간에서 더 크게 나타난다. 횡단면의 최소수위에 대한 최대수위의 변화는 합류부 중심에 가까울수록 증가하며 합류부 중심 직하류에서 최대를 보인다. 또한 합류구간 횡단면의 수면경사는 단면형태에 따라 영향을 받으며 본류에 대한 지류의 유량비가 감소할수록 수면경사도 감소한다. 기존에 제안된 일정한 곡률반경과 정형화된 단면에서 도출된 횡단면 수위차 산정 공식이 평창강과 동일하게 제작된 모형수로에서 실측값과 약 60%의 차이를 보인 반면 본 연구에서는 실측값과 약 10%의 차이를 보이는 수위차 산정 공식을 제안하였다.

핵심용어 : 횡단면 수위차, 수면경사, 합류부, 만곡수로

* 수자원연구원 수자원환경연구소 위촉선임연구원 (e-mail: water0418@paran.com)

** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수

1. 서 론

자연상태에서의 하천은 유역내 지형조건에 따라 직선구간과 사행구간이 혼재되기도 하고 서로 다른 유로가 만나기도 하는 등 매우 복잡한 형태를 보인다. 이러한 복잡한 하천의 하도에서 홍수위 해석을 통해 제방을 축조하는 경우 만곡부에서는 좌안과 우안의 수위가 다르게 나타난다. 통상적으로 하천개수를 통해 정비된 하천의 만곡부 제방은 좌안과 우안의 높이가 다른 경우가 많으며 이는 하천의 좌안과 우안의 같지 않은 수위를 감안하여 경제적인 제방고를 결정하기 때 문이라고 볼 수 있다.

일반적으로 합류부가 없는 단일하천의 만곡부에서 횡단면의 수위차를 계산하기 위해서는 주로 수리모형을 이용한 연구들이 진행되고 있으며 이때, 실제하천의 복잡성으로 인하여 대부분 정형화된 일정한 단면의 모형을 이용한 횡단면의 수위차를 계산할 수 있는 경험식들이 제안되고 있다. 더우기 만곡부에 합류부가 존재하는 실제 하천에 대해서는 아직까지 수리모형을 통한 연구가 진행된 바가 없기 때문에 만곡부에 합류부가 존재하는 경우에도 합류부가 없는 만곡부의 수위차 계산공식을 적용할 수밖에 없으므로 실제 하천에서의 횡단면 수위차보다 더 큰 오차를 유발할 수 있다. 따라서 만곡부에 합류부가 존재하는 실제하천에서의 횡단면 수위차를 계산하기 위해서는 합류부가 존재하는 실제와 동일한 모형을 이용한 연구가 필요하다. 이때, 제작되는 모형은 기본적으로 실제 하천의 축척, 조도, 상사 등을 고려하여 자연상태의 하천과 최대한 동일한 조건을 유지해야 하며, 특히 단면형태, 곡률반경, 합류상태, 본류와 지류의 유량 상태 등이 실제 하천과 동일해야 하므로 모형의 제작은 매우 신중해야 한다.

하천의 합류구간에 대한 연구는 동일한 하천폭을 지니고 경사가 없는 평형하천의 합류구간 흐름특성을 모형실험과 이론적 해석으로 분석한 Taylor(1944) 이후, Behlke와 Pritchett(1966)가 합류구간의 흐름 특성을 파악하기 위한 수리모형실험 장치의 구성에 대한 사항을 정리하였고, Webber와 Greated(1966)는 개수로에서의 합류점에 대한 이론적 결과를 검증하였으며, Bowers 등(1968)은 합류부에서 발생하는 수위증가에 있어서 안정성 확보를 위해 제방의 높이 결정을 위한 모형실험을 수행하였다.

국내의 연구로는 만곡수로의 흐름 및 하상변동에 관한 연구로 최한규(1977)가 하천의 만곡부에서 발생하는 흐름에 대한 이론을 정리하였으며, 이종태와 윤세의 등(1992)은 수심이 얇은 만곡부 흐름에서의

편의각에 대해 연구하였다.

백창식(1998)은 만곡각도가 45° 일 때 합류되는 각도 및 유량비에 따른 수위와 유속의 변화를 관측하고 RMA-2모형을 이용한 수치해석을 실시하였는데, 실험에서 수심은 합류부 이전의 수심대비 30% 증가 현상을 보였다고 하였으며 수심의 상승비는 유량비에 비례한다고 하였다. 또한 합류부가 없는 만곡수로에서는 최대유속의 이동경로는 본류 유량이 증가할수록 외측제방으로 편의하며 수치모형과의 비교에서 만곡부는 수심보다 유속에 더 영향을 미친다고 하였다. 차영기 등(2000)은 만곡수로의 횡단면에서의 수위차는 만곡각 75° 에서 급격히 상승하며 교각 설치시에 배수위는 상류 512m, 하류 128m까지 영향을 미친다고 하였으며 180° 만곡수로를 이용하여 고정상 및 이동상에 대한 수위, 횡단면에서의 수위차, 배수위 등에 대하여 분석하고 횡단면에서 발생하는 수위차의 경우 고정상에서 6번 단면, 9번 단면에서 최대를 보이고 배수위는 교각 직하류에서 급감소하다가 하류로 갈수록 회복된다고 하였다.

정현수 등(1999)은 만곡각이 30° 부근에서 최대 횡방향 수면차가 발생한다고 하였으며, 최대수심증가율은 중심각 30° 외측제방 부근에서 6%로 측정되었다고 하였다. 최계운(1994)은 하천이 합류되는 경우에 합류각도에 따른 흐름해석을 위해 합류점에서의 모멘트 방정식을 이용하여 계산하는 알고리즘을 제안하였으며, 박용섭(2003)은 직선수로의 합류점에서의 유량변화와 합류각도의 변화에 따른 흐름특성을 연구하고 합류구간 이후 유속이 증가하는 가속구간에 대해 정의하였다.

2. 수리모형 실험

2.1 모형이론

통상적으로 모형의 축척은 실험의 목적, 실험대상의 지형 및 수리적 특성 등을 고려하여 모형과 원형과의 상사성을 만족시키고, 수리모형의 제작 및 경제적 여건, 실험장의 부지와 측정의 용이성 등을 고려하여 결정하게 되는데, 본 연구에서는 활용이 가능한 실험부지의 면적이 30×20m인 점을 감안하여 실험 대상 하천을 모두 나타내기 위하여 수평방향 축척은 1/200로 하였다.

하천과 같이 자유수면을 갖는 흐름은 중력에 의해 지배되어 Froude 상사법칙이 적용되는데 원형과 모형사이에는 식(1)과 같은 Froude 상사가 적용된다.

$$F_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r Y_r}} \quad (1)$$

여기서, 아래첨자 r은 원형과 모형의 비를 나타내고 F는 Froude 수, V는 유속, g는 중력가속도이며 Y는 수심을 나타낸다. 이때 원형하천의 흐름을 Manning 공식에 따라 표현하면 식(2)와 같고 여기에 Froude 상사법칙을 적용하여 정리하면 조도의 축척은 식(3)과 같다.

$$V_r = \frac{1}{n_r} L_r^{2/3} \quad (2)$$

$$n_r = L_r^{1/6} \quad (3)$$

여기서 n은 조도계수를 의미하고 L은 길이를 나타낸다.

실험여건상 모형의 수평 및 연직방향으로 축척을 동일하게 적용하기 어려운 경우 왜곡모형을 이용하기도 한다. 왜곡모형에서 왜곡도는 수평축척과 연직축척의 비를 나타내는 것으로 너무 크지 않아야 한다. 만약 왜곡도가 지나치게 큰 경우에는 하천 사행부의 흐름과 같은 곡선흐름에서 유속 및 압력분포를 심각하게 변형시킬 우려가 있으며 수리모형실험지침서(US Department of the Interior/Water and Power Resources Service(1980))에서는 왜곡도를 2~7 범위에서 조정하도록 권장하고 있다.

본 연구의 경우 식(3)에 따라 조도계수를 계산하면, 원형의 조도가 0.03~0.035의 범위일 때 모형의 조도는 0.012~0.016의 범위로 현실적으로 모형의 제작이 거의 불가능하기 때문에 1/200의 축척에 대하여 모형에서 측정을 위한 최소한의 수심을 유지하기 위하여 왜곡도를 3으로 하여 수심방향 축척은 1/66.7로 모형을 제작하였다. 축척에 따라 제작된 수리모형의 각 단면간의 거리는 1m로 전체구간의 24개 단면 중 본 연구에 활용된 단면은 합류부를 중심으로 12개 단면이며 전체 구간의 하상경사는 본류가 0.00434, 지류가 0.0064이고 본류구간은 30m, 지류구간은 6m이다.

왜곡모형에서의 조도와 유량은 식(4), 식(5)와 같이 계산된다.

$$n_r = \frac{R_r^{2/3}}{X_r^{1/2}} \quad (4)$$

$$Q_r = X_r Y_r^{3/2} \quad (5)$$

2.2 횡단면의 수위차

곡률반경 r 을 갖는 유선의 모든 요소에 대하여 가속도 a_r 은 만곡중심을 향하고 V^2/r 로 표시된다. 그림 1에서 반경방향에서 계에 작용하는 힘의 성분은 Newton 제2법칙으로부터 식(6)과 같다.

그림 1. 곡면에서의 힘의 요소

$$(p + dp)ds - pds + dW \cos \theta = -\frac{(pdrds)V^2}{r} \quad (6)$$

여기서, $\cos \theta = dz/dr$, $dW = wdrds$

따라서, 식(6)은 식(7)로 정리되며 비회전흐름에 대하여 Bernoulli 방정식을 r 에 관해 미분하면 식(7)은 식(8)과 같다.

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{p}{w} + z \right) = -\frac{V^2}{gr} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left(\frac{p}{w} + \frac{V^2}{2g} + z \right) &= \frac{d}{dr} \left(\frac{p}{w} + z \right) + \frac{2VdV}{2gdr} = 0 \\ \frac{d}{dr} \left(\frac{p}{w} + z \right) &= -\frac{VdV}{gdr} \quad (8) \end{aligned}$$

이는 식(7)과 연립하면 $\frac{V^2}{gr} = -\frac{VdV}{gdr}$ 또는 $Vdr + rdV = 0$ 로 표현할 수 있는데, 이를 적분하면 식(9)와 같다.

$$V \cdot r = const. \quad (9)$$

즉, 유속 V 는 만곡중심점으로 부터의 거리 r 에 반

비례한다.

이를 이용하여 완만한 경사로 양안이 동심원인 곡선수로에 일정한 유속으로 유량이 흐르는 경우 만곡의 내측과 외측의 수위차 Δh 를 구할 수 있다. 식(7)은 개수로 흐름에서 $\frac{dh}{dr} = \frac{V^2}{gr}$ 로 표시되며 이는 횡방향의 수면경사를 나타낸다. $dh = \frac{V^2}{gr} dr$ 을 적분하면 식(10)과 같이 수위차 Δh 를 구할 수 있다.

$$h_2 - h_1 = \int_{r_i}^{r_o} \frac{V^2}{gr} dr = \frac{V^2}{g} \log_e \left(\frac{r_o}{r_i} \right)$$

$$\Delta h = K \frac{V^2}{g} \quad (10)$$

횡방향 수면경사(I_r)의 산정식은 계수 K를 이용하여 식(11)과 같은 일반식으로 표현된다.

$$I_r = K \frac{V^2}{gB} \quad (11)$$

기준에 곡률반경과 단면형태가 일정한 모형수로에서 실험을 통해 제안된 횡단면 수위차 산정 공식을 표 1에 나타내었다. 횡단면에서의 수위차는 속도수두와 비례계수(K)로 계산할 수 있으며 비례계수(K)는 하도의 곡률반경(r)과 하폭(B)에 의해 결정되어 진다. 표 1의 공식은 실제하천에서는 하도의 곡률반경과 하폭이 단면마다 일정하지 않으며 합류구간 등이 존재하기 때문에 기존의 공식을 적용하여 계산된 횡단면의 수위차는 실제와 많은 차이를 보일 수 있다.

표 1. 고정단면의 횡단면 수위차 계산을 위한 기준 공식

Δh	제안자	K
$K \frac{V^2}{g}$	Grashof	$2.30 \log \frac{r_o}{r_i}$
	Woodward	$\frac{20}{3} \frac{r_c}{B} - 16 \frac{r_c^3}{B^3} + \left(\frac{4r_c^2}{B^2} - 1 \right)^2 \ln \frac{2r_c + B}{2r_c - B}$
	Ippen (I)	$\frac{B}{r_c} \left[\frac{1}{1 - B^2/(4r_c^2)} \right]$
	Ippen (II)	$\frac{B}{r_c} \left[\frac{1}{1 - B^2/(12r_c^2)} \right]$

김윤태 등(1997)

2.3 모형제작

실험대상 지역은 강원도 영월의 평창강과 남한강

합류부로 합류지역은 90° 에 가까운 접근각도로 합류되고 있으며, 합류하류구간의 우안은 암석으로 구성된 절벽이 위치하고 있다. 합류부 하류에 소수력발전을 위한 수중보와 취수를 위한 취수보, 그리고 홍수때는 잠기는 잠수교가 설치되어 있다. 실험에 이용된 모형은 비교적 규모가 큰 대규모 실험 모형으로 20HP 펌프 2대, 15HP 펌프 1대를 사용하여 최대 0.12m³/sec의 유량을 공급할 수 있도록 하였다. 지하 저수조에서 펌핑된 유량은 지상 3m높이에 설치된 고수조로 공급되어 고수조에서 일정수두를 유지하면서 원형과 이프를 통해 모형 최상류에 설치된 2개의 유량공급조에 자연유하 되도록 하고 유량 조절은 파이프에 설치된 밸브를 이용하였다. 직접적으로 유량을 공급하는 유량공급조는 2.0×3.0×0.9m 크기로 강철판으로 제작하였으며 월류판 1개, 정류판 3개를 설치하였고 모형수로의 최상류부분 상단에 설치하였다.

유량공급조에서 모형으로 유입되는 유량은 유량조절조에 설치된 폭 50cm의 사각위어를 통해 측정하며 사각위어는 한국공업규격(KS B 6302)에 따라 제작하고 검증을 통해 유량계수를 산정한 후 제시된 유량관계식에 따라 공급되는 유량을 계산하였다. 유량공급조에서 공급되는 유량이 실험구간에 유량이 정류상태로 유입되도록 하기 위해 모형수로의 최 상류부분에 모형수로와 일체로 설치된 유량 안정화부분으로 유입되어 정류판 3개를 통과하면서 정류상태가 되도록 하였다. 수로를 통과한 유량은 수로 말단의 집수정과 연결된 회수파이프를 통해 지하저수조로 회수되도록 하였다. 회수파이프에는 밸브를 설치하여 수로의 하류경계수위를 조절할 수 있도록 하였다.

원형 하천의 평면도와 제작된 모형수로는 그림 2에 나타나 있으며 그림 3은 모형의 유량공급 개략도이다.

합류부의 흐름특성을 분석하기 위하여 합류부 하류의 유량을 원형 하천의 100년 빈도 유량으로 고정하고 합류부 상류의 분류와 지류의 유량비를 변화시켜 분류유량(Qm)에 대한 지류유량(Qs)의 유량비(Qr=Qs/Qm)가 0.99, 0.85, 0.72, 0.57 등 4가지의 경우에 대해 흐름특성을 분석하였는데 식(5)에 따른 원형과 모형의 유량은 표 2에 나타내었다.

2.4 위어 검증

완성된 수리모형에 유량을 공급하기 위한 유량공급조의 위어를 이용한 정확한 유량측정을 위해 위어 검증을 실시하였다. 위어의 월류 높이에 따른 유량을 측정하여 유량계수를 계산하고 측정값과 계산값의 검도를 통해 위어의 평균 유량계수를 결정하여 위어 월류



그림 2. 원형하천의 평면도 및 제작된 모형수로

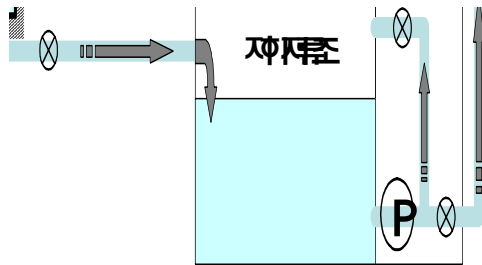


그림 3. 모형의 유량공급

높이에 따른 수위-유량곡선을 작성하고 이를 통해 모형에 공급되는 유량을 조절하였다.

표 2. 유량비에 따른 원형과 모형의 유량
(단위 : m³/sec)

유량비 (Q _s /Q _m)	형태	남한강 (분류)	평창강 (지류)	합류부 하류
0.99	원형	6,090	6,000	12,090
	모형	0.059	0.052	0.111
0.85	원형	6,530	5,560	12,090
	모형	0.060	0.051	0.111
0.72	원형	7,040	5,050	12,090
	모형	0.065	0.046	0.111
0.57	원형	7,720	4,370	12,090
	모형	0.071	0.040	0.111

위어의 유량공식은 한국공업규격에서 제시하고 있는 4각위어 공식을 이용하였으며 유량계수(K)는 위

수리모형을 이용한 평창강 합류구간의 횡단면 수위차 분석

어검증을 통해 도출된 평균 유량계수 값을 적용하여 식(12)와 같은 유량공식을 도출하였다.

$$Q = 1.7604 bh^{1.5} \quad (12)$$

여기서, Q : 사각위어를 통한 유입유량(m³/sec)

b : 위어 폭(5m)

h : 위어 월류수심(m)

검증을 통해 작성된 위어의 수위-유량곡선은 그림 4에 나타내었다.

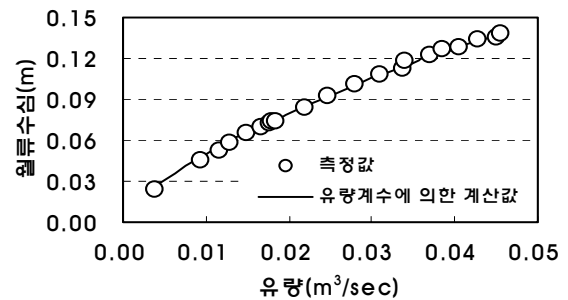


그림 4. 위어의 수위-유량 곡선

2.5 조도 조정

본 실험에서 모형의 조도를 조정하기 위해 원형하천의 실측 지형자료를 HEC-RAS의 정류해석 입력자료로 하여 수치모의를 수행하고 모의 결과와 모형에서 실측된 수위를 비교하며 시행착오를 통해 모형의 조도를 조정하는 수위일치법을 적용하였다. 이때 정류

해석을 위한 경계자료는 합류부 상류의 영월1 및 영월2의 수위표와 합류하류의 영춘수위표를 기준으로 수위와 유량자료를 입력하였다.

모형의 조도를 조정하기 위해 시멘트로 제작된 반구형 조도블럭을 사용하였으며 조도블럭의 높이는 1.2cm, 지름은 각각 2, 3, 4cm로 제작하였다. 모형의 조도조정은 5회에 걸쳐 수행하였으며 원형하천의 실제 설계유량인 50년 빈도의 25, 50, 75, 100%에 해당하는 유량과 100년 빈도의 유량 등 5개 유량을 식(5)를 통해 상사하여 조도조정을 위한 실험유량으로 사용하였다. 그림 5는 조도블럭이 부착된 모형의 합류부를 보여주고 있으며 그림 6에는 모의를 통해 계산된 수위와 조도조정 후 모형에서 실측된 수위의 비교 결과를 나타내었다.



그림 5. 조도블럭이 부착된 모형의 합류부

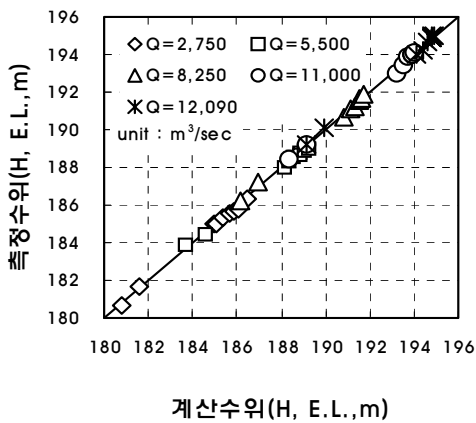


그림 6. 조도검증 결과

3. 실험결과

본류에 대한 지류의 유량비를 0.99, 0.85, 0.72, 0.57로 변화시키면서 합류구간에서의 수위변화율을 검토하였다.

그림 7은 하도구간에서 합류구간의 최하류단면과 각 단면간 최대수위차(H)를 최하류단면의 수위(Hdown)에 대한 변화율로 나타낸 것이다.

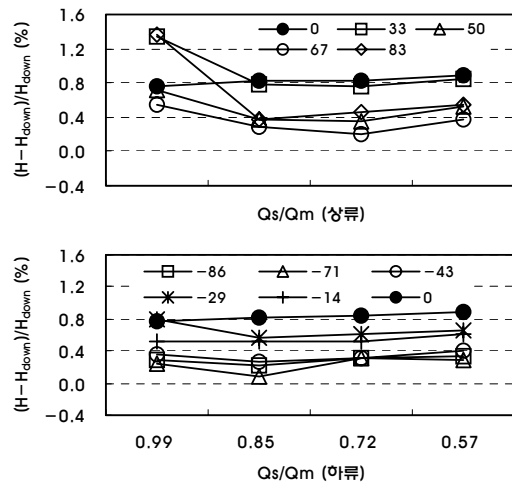


그림 7. 하류수위에 대한 최대수위의 변화

그림에서 범례의 숫자는 합류 중심으로부터 상류와 하류구간에 대한 거리비율(%)을 나타내는 것으로 (-)는 하류방향을 의미하는데 하도내에서 합류부 중심부에 가까울수록 합류구간의 최하류단면과 각 단면의 수위차는 증가하는 것으로 나타나 합류부 중심부에서 수위가 증가하고 있음을 알 수 있다.

또한 유량비가 0.99에서 0.85로 감소하면 최하류단면과 하도내 각 단면의 수위차는 감소하지만 유량비가 0.85에서 0.57로 감소하여 지류의 유량에 비해 본류의 유량이 증가할수록 최하류단면과 각 단면의 수위차는 증가하고 있으며 또한, 하류에 비해 상류구간에서 변화폭이 더 크게 나타나고 있어 본류의 유량 변화는 합류부 하류구간보다 상류구간에 더욱 민감한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

한편 그림 8에서는 합류부 중심 횡단면에서의 수위차(Δh_j)에 대한 각 횡단면의 수위차(Δh)를 합류부 중심으로부터의 거리에 따라 나타내었다. 이때 L_{up} 은 합류부 중심에서 최상류단면까지의 거리, L_{down} 은 하류단면까지의 거리를 의미하고 L 은 합류부 중심에서 각 단면까지의 거리를 의미한다.

대체로 합류부 중심의 수위차와 비교하여 각 횡단면에서 수위차는 합류부에서 멀어질수록 감소하다가 L/L_{up} 과 L/L_{down} 가 약 0.8 이후에서는 다시 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 합류부의 영향이 미치지 않기 때문으로 판단되며 합류부가 횡단면의 수위차에 영향을 미치는 구간은 상류와 하류에서 큰 차이

는 없는 것으로 사료된다.

합류부의 상류구간보다는 하류구간의 수위차 변동이 더 크게 나타나고 있는데 합류부 하류 구간의 경우에는 L/L_{down} 이 약 0.5까지는 수위차가 증감을 반복하는데 이는 유량비의 영향이라기보다는 합류부 하류의 하도 및 단면형태가 주된 원인일 것으로 사료된다.

따라서 횡단면의 수위차를 산정하기 위해 본수리모형의 단면폭과 기존의 연구 내용 중 속도수두와의 관계를 검토하여 그림 9에 나타내었다. 가로축은 수위차 (Δh)를 수면폭(B)에 대해 무차원으로 나타낸 것이고 세로축은 속도수두 ($V^2/2g$)에 대해 무차원으로 나타낸 것이다.

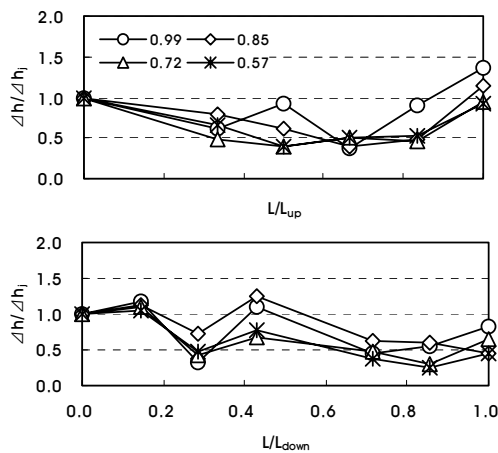


그림 8. 거리에 따른 횡단면의 수위차

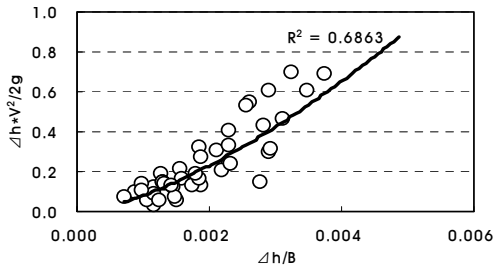


그림 9. 속도수두와 하폭에 대한 수위차

횡단면의 하폭이 감소할수록 속도수두는 증가하고 있음을 알 수 있으며 속도수두와 수면폭에 대해 각각 무차원으로 표현된 횡단면 수위차는 지수함수의 관계를 갖고 있으며 결정계수는 약 0.7을 보이고 있어 식 (1)과 마찬가지로 속도수두와 수면폭은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 따라서, 그림 9에서 보여진 결과를 이용하여 합류구간의 횡단면 수위차를 산정하기 위하여 속도수두와 수면폭을 변수로 하여 횡단면에서의 수위차를 산정하기 위한 공식을 식(13)과 같이 제안하였다.

$$\left(\frac{\Delta h}{B}\right) \times \left(\frac{h}{B}\right) \times \left(\frac{V^2}{2g}\right) = 5.7 \times \left(\frac{B}{R}\right)^{-3.3} \quad (13)$$

이때, Δh 는 횡단면의 수위차, B는 수면폭, h는 평균수심, R은 동수반경을 의미한다.

2.2절에서 검토한 바와 같이 기존의 횡단면 수위차 산정 공식은 연속방정식과 운동방정식의 해로써 산정하게 되고 표 1에 나타난 바와 같이 속도수두와 비례상수(K)의 곱으로 표현되는데, 하도와 단면의 형태가 주요 영향인자로서 식(13)에는 속도수두와 단면형태를 무차원으로 표현한 단면형상계수(B/R)를 영향인자로 고려하고 단면마다 일정하지 않은 곡률 반경을 고려하지 않았다.

그림 10은 단면형태와 속도수두를 고려한 횡단면의 수위변화 관계를 나타내고 있다.

본 연구에서 제안된 횡단면 수위차 산정 공식은 결정계수가 약 0.7로 나타났는데, 기존 제안식에 의한 결과와의 차이를 확인하기 위하여 본 연구를 통해 제안된 실험식과 기존의 연구를 통해 제안되어 사용되고 있는 횡단면의 수위차 산정공식에 의한 계산 결과를 비교 검토하였다.

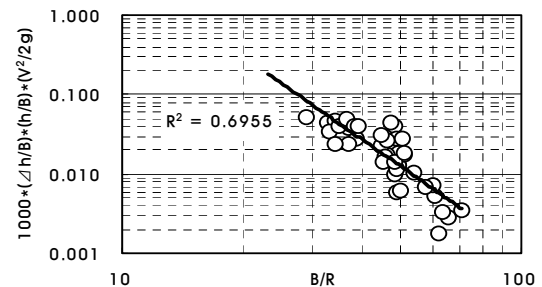


그림 10. 횡단면의 수위차 산정공식

횡단면에서의 수위차를 비교 검토하기 위하여 표 1과 같은 기존식들을 이용하였다. 표에서 B는 하폭을 나타내며, r_o, r_i, r_c 는 각각 하도의 외측, 내측, 하도중심의 곡률반경을 의미한다. 또한 기존의 식은 하폭과 단면이 일정한 고정단면에서 사용되는 공식이나, 현 상황에서는 자연단면에서 사용할 수 있는 특별한 공식이 없으므로 기존의 식을 본 실험모형에 그대로 적용하여 분석하였다.

본 연구에서 제안한 식(13)은 만족된 하도내 각 단면의 곡률반경은 영향인자로 고려하지 않았으며 각 단면에서의 속도수두와 단면형태만을 고려하였고, 기존 공식의 하폭(B)에는 수면폭을 적용하였다.

먼저 기존의 횡단면 수위차 계산 공식을 이용하여

계산된 결과를 그림 11에 나타내었다. 분석결과 기존에 제안된 공식에 의해 계산된 횡단면의 수위차는 본 연구를 통해 자연하천과 동일한 수리모형에서 측정된 횡단면의 수위차보다 평균적으로 약 60% 작게 산정하고 있다. 이는 기존에 제안된 공식들은 만곡된 곡률반경과 단면형태가 일정한 하도에서 수행된 실험을 통해 제안된 것으로 곡률반경과 단면형태가 일정한 수리모형에서는 많은 오차를 보이지 않고 있으나(김윤태 등(1997)) 실제 자연하천과 같이 하도의 곡률반경, 단면형태 등이 일정하지 않은 본 연구에서 사용된 자연하천과 동일한 모형에서는 많은 오차가 발생되는 것으로 판단된다.

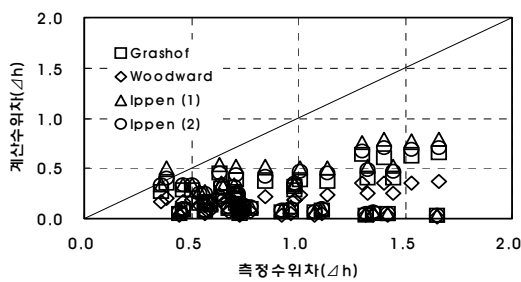


그림 11. 기존공식과의 수위차 비교

실험에서 측정된 Δh 에 대하여 식(13)의 계산 값은 평균적으로 약 10% 작게 산정되고 있는데 기존에 제안된 식들이 실측값과 약 60%의 차이를 보이고 있는 것과 비교하면 상당히 개선된 것으로 판단된다. 그러나 실측값과 비교하면 여전히 오차를 보이고 있는데, 이는 자연하천의 경우 합류부의 횡단면 수위차를 산정할 때 고려해야 하는 변수들이 곡률각, 곡률반경, 합류각도, 단면형태, 수면폭 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서의 제안식은 이를 모두 반영하지 못하고 있기 때문으로 판단된다.

한편, 횡단면의 수면경사를 측정값과 본 실험의 경험식, 기존의 경험식으로 계산하여 표 3과 그림 12에 나타내었다.

표 3. 유량비에 따른 수면경사 변화

Qr	실측	제안식	Grashof	Woodward	Ippen (1)	Ippen (2)
0.99	0.0022	0.0026	0.0005	0.0003	0.0006	0.0006
0.85	0.0020	0.0019	0.0005	0.0003	0.0007	0.0006
0.72	0.0020	0.0018	0.0006	0.0004	0.0007	0.0007
0.57	0.0019	0.0016	0.0005	0.0003	0.0007	0.0006

유량비에 따른 횡단면의 평균 수면경사를 실측값과

비교한 결과 기존의 제안식에 의한 수면경사는 실측 수면경사에 비해 매우 작은 값을 보이며 유량비에 따라 거의 변화를 보이지 않고 있다. 그러나 실측결과와 본 연구에서 제안된 식에 의한 계산결과는 유량비가 감소하여 합류부에서 지류의 유량이 감소하고 본류의 유량이 증가할수록 합류구간내 횡단면의 평균 수면경사가 감소하고 있음을 보여주고 있다.

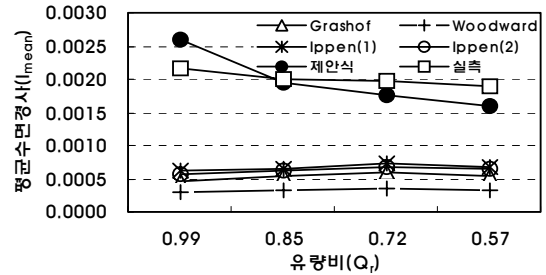


그림 12. 기존공식과의 수면경사 비교

실측된 횡단면의 수면경사와 본 연구에서 제안된 식(13)에 의한 수면경사는 여전히 다소의 차이를 보이고 있어 실제 적용시 주의가 필요하며 향후 식(13)에서 고려하지 못한 영향 인자를 고려한 횡단면 수위차 연구가 필요할 것으로 사료되나, 기존의 공식에 비해서는 실제 자연하천과 동일한 수리모형에서의 수면경사 변화를 잘 나타내고 있다(그림 13 참조).

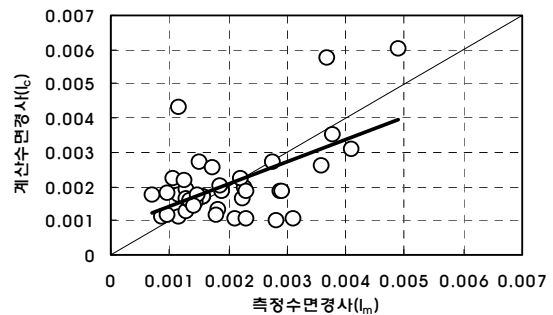


그림 13. 계산수면경사와 측정수면경사의 비교

4. 결론

본 연구에서는 하도의 곡률반경과 단면형태가 일정한 수리모형이 아닌 자연하천과 같이 곡률반경과 단면형태 등이 일정하지 않은 자연하천 형태의 수리모형에서 본류와 지류의 유량비가 변화하는 경우 합류구간 횡단면에서의 수위차를 분석하였다.

합류구간 횡단면의 수위차는 합류 이후 하류의 경우 감소와 증가를 반복하는 구간도 있으나 대체로 합

류부 전체 구간에서 합류부 중심에서 멀어질수록 감소한다.

각 단면에서의 속도수두는 하폭과 반비례의 관계를 보이고 속도수두와 수면폭에 대해 각각 무차원화된 횡단면의 수위차는 서로 비례적인 관계를 보여 속도수두와 단면형태를 영향인자로 고려한 횡단면의 수위차를 산정하기 위한 식을 제안하였다. 하도의 곡률과 단면형태가 일정한 인공수로모형을 대상으로 제안된 기존 공식이 평창강 모형에서 약 60%의 차이를 보이는 것에 비해 본 연구에서는 결정계수가 약 0.7이고 평창강과 동일한 수리모형에서 실제 측정된 횡단면의 수위차와의 오차가 약 10%로 개선된 횡단면 수위차 산정식을 제안하였다.

유량비가 감소할수록 실제 측정된 횡단면의 수면경사도 감소하는데 본 연구에서 제안된 식으로 계산된 수면경사도 동일한 경향을 보이고 있으나 여전히 오차를 나타내고 있어 실제 적용시 주의가 필요하다. 향후 본 연구에서 제안된 식에서 고려하지 못한 영향인자를 고려한 연구가 필요할 것으로 사료되나 기존의 공식에 비해서는 실제 평창강과 동일한 수리모형에서의 수면경사 변화를 잘 나타내고 있어 향후 자연하천의 만곡된 하도내 횡단면 수위차 산정을 위한 연구에 좋은 자료로 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

김윤태, 김지호, 박영진, 송재우 (1997). 만곡수로에서의 횡방향 수면경사 산정모형의 비교, 대한토목학회 논문집, Vol.17, No. II-2, pp. 129~135.

박용섭 (2003). 합류부에서 유량 및 접근각도 변화에 따른 수리학적 특성 분석, 인천대학교 박사학위 논문.

백창식 (1998). 180° 만곡수로 합류부의 흐름특성 분석, 경기대학교 박사학위 논문.

이종태, 윤세의, 김종우 (1992). 수심이 얇은 만곡수로에서의 흐름특성 분석, 경기대학교 산업기술종합연구소 논문집, Vol.8, pp. 5~18.

정현수, 한정석, 윤세의 (1999). RMA-2 모형을 이용한 만곡수로 합류부의 흐름 특성 분석, 산업기술종합연구소 논문집, Vol.18, 경기대학교 산업기술

연구소, pp. 17~25.

차영기, 김이현, 이만석 (2000). 만곡수로에서 교각으로 인한 수위변화 분석, 단국대학교 신소재연구논문집, Vol.9, pp. 41~53.

최계운 (1994). 수지형 하천에서의 부정류 흐름의 해석 알고리즘, 대한토목학회논문집, Vol.14, No.4, pp. 839~846.

최인호, 박영진, 김지호, 송재우 (2001). 하천 만곡부에 위치한 기초를 갖는 불균일 교각에서의 국부세굴심 산정에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 21. No.4-B, pp. 393~402.

최한규 (1977). 하천의 만곡류에 관한 이론적 고찰, 한국수문학회지, Vol.10, No.2, pp. 61~65.

Behlke, C.E. and Pritchett, H.D. (1966). "The Design of Supercritical Flow at Channel Junctions", Highway Research Record No. 123, Publication 1365, Highway Research Board, National Research Council, Washington D. C. pp. 17~35.

Bowers, C.E., Harris, G.S. and Pabst, A.F. (1968). "The Real Time Computation of Runoff and Storm Flow in the Minneapolis St. Paul Interceptor Sewers", Memo M-118, St. Anthony Falls Hyd. Lab., Univ. of Minnesota.

Taylor, E.H. (1944). "Flow Characteristics at Rectangular Open-Channel Junctions", Transactions, No. 109, ASCE, pp. 893~902.

US Department of the Interior/Water and Power Resources Service(1980). "Hydraulic laboratory technique"

Webber, N.B. and Greated, C.A. (1966). "An Investigation of Flow Behaviour at the Junction of Rectangular Channels", Proceedings, Vol.34, Session 1965~1966, The Institution of Civil Engineers, pp. 321~334.

- ◎ 논문접수일 : 2006년 10월 26일
- ◎ 심사의뢰일 : 2006년 10월 30일
- ◎ 심사완료일 : 2006년 12월 05일