



미계측 하천의 홍수위 해석을 위한 단면 추정 기법 개선

Improvement of Cross-section Estimation Method for Flood Stage Analysis in Unmeasured Streams

전상민^a · 황순호^a · 송정헌^b · 김시내^c · 최순군^d · 강문성^{e, †}

Jun, Sang Min · Hwang, Soon Ho · Song, Jung-Hun · Kim, Si Nae · Choi, Soon-Kun · Kang, Moon Seong

ABSTRACT

The objective of this study was to improve the cross-sectional area and height estimation method using stream width. Stream water levels should be calculated together to simulate inundation of agricultural land. However, cross-sectional survey data of small rural rivers are insufficient. The previous study has developed regression equations between the width and the cross-sectional area and between the width and the height of stream cross-section, but can not be applied to a wide range of stream widths. In this study, cross-sectional survey data of 6 streams (Doowol, Chungmi, Jiseok, Gam, Wonpyeong, and Bokha stream) were collected and divided into upstream, midstream and downstream considering the locations of cross-sections. The regression equations were estimated using the complete data. R^2 between the stream width and cross-sectional area was 0.96, and R^2 between width and height was 0.81. The regression equations were also estimated using divided data for upstream, midstream and downstream considering the locations of cross-sections. The range of R^2 between the stream width and cross-sectional area was 0.86 - 0.91, and the range of R^2 between width and height was 0.79 - 0.92. As a result of estimating the cross-sections of 6 rivers using the regression equations, the regression equations considering the locations of cross-sections showed better performance both in the cross-sectional area and height estimation than the regression equations estimated using the complete data. Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) was used to simulate the flood stage analysis of the estimated and the measured cross-sections for 50-year, 100-year, and 200-year frequency floods. As a result of flood stage analysis, the regression equations considering the locations of cross-sections also showed better performance than the regression equations estimated using the complete data. Future research would be needed to consider the factors affecting the cross-sectional shape such as river slope and average flow velocity. This study can be useful for inundation simulation of agricultural land adjacent to an unmeasured stream.

Keywords: Unmeasured stream; stream cross-section; regression equation; HEC-RAS; flood stage analysis

1. 서론

농촌 지역은 도시 지역에 비해 홍수에 취약하여 극한강우에 의한 농경지 침수 피해가 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 대한 대책 수립을 위해서는 수리·수문 모델링에 의한 정확한

피해 예측이 선행되어야 한다 (Jun et al., 2013; Jun et al., 2018). 강우시 농경지에서 발생한 과잉수는 배수로망을 통해 하천으로 배제되며 (Kang, 2014), 하천의 홍수위 (외수위)가 상승할 경우 범람, 배수지연 및 역류 현상 등에 의해 농경지 침수 피해가 발생할 수 있다 (Cho et al., 2015). 따라서 농경지 침수 모의는 농경지 수위의 고도와 하천 수위의 고도를 동시에 해석 및 비교하여 수행되어야 한다.

하천의 홍수위 해석은 대부분 Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS)를 이용해 수행하고 있다. HEC-RAS를 이용한 홍수위 모의를 위해서는 하천단면의 형상, 조도계수 등의 단면 특성을 입력해야 한다. 하천의 통수면적은 단면적, 폭, 높이 등 단면의 형상에 의해 결정되므로, 정확한 홍수위 해석을 위해서는 실제 지형에 가까운 단면 형상을 입력해야 한다. 하천 단면 특성 자료는 대부분 하천기본계획 수립 시 정밀측량을 통해 생성되고 있다. 하지만, 지방하천 및 농촌 소하천은 하천 단면 자료가 존재하지 않는 경우가 대부분이다 (Choi et al., 2008; Shin et al., 2016). 따라서 미계측 하천의 홍수위 해석을 위해서는 정확도 높은 하천 단면 추정 기법의 개발이 필요하다.

^a PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b Research Scholar, Department of Agricultural and Biological Engineering & Tropical Research and Education Center, University of Florida

^c Undergraduate Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^d Researcher, Climate Change and Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences

^e Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax.: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: March 7, 2019

Revised: May 22, 2019

Accepted: May 22, 2019

미계측 하천의 단면 및 수리 특성을 추정하는 연구로는 Hydrologic simulation program - FORTRAN (HSPF) 모형의 수리학적 정확도 향상을 위해 하천의 수리인자 산정회귀식을 개발 및 적용한 연구 (Mohamound, 2007; Mohamound et al., 2006), GIS 등을 이용하여 단면 특성을 추출하거나 보간하는 연구 (Zhang et al., 2016; Gichamo et al., 2012; Lee et al., 2010; Pramanik et al., 2010; Choi, 2009; Choi et al., 2008; Kim, 2001) 등이 진행된 바 있으나, 홍수위 해석을 위해 미측정 단면 형상을 추정하는 연구는 부족한 실정이다.

이러한 한계를 극복하고자 Shin et al. (2016)은 미계측 유역에서의 홍수위 예측을 위하여 하천의 폭을 이용해 횡단면적, 높이 등을 추정하는 기법을 개발하였다. 원평천을 대상으로 하천의 폭과 횡단면적, 폭과 높이 사이의 회귀식을 추출하고 회귀식을 이용해 하천 단면을 추정 후, 실제 단면과 추정 단면에서의 홍수위 모의 결과를 비교하여 미측정 하천 단면 추정 기법의 적용성을 평가하였다. 하지만 Shin et al. (2016)의 연구에서는 횡단면적 추정을 위한 하천 폭과 횡단면적 사이의 회귀식을 1차식으로 추정하여 하천 폭이 일정값 이상으로 작아지면 횡단면적이 음의 값을 가지며, 회귀식 개발에 사용한 하천 폭이 80 m에서 180 m 사이로 한정되어 있어 다양한 크기의 폭을 가지는 하천에 적용하기에는 한계가 있을 것으로 사료된다. 따라서 기존연구의 한계점을 보완하기 위해 다양한 하천 폭의 크기를 가지는 하천의 단면자료를 추가하여 1차식 이외의 다른 형태의 회귀식을 추출할 필요가 있다.

본 연구에서는 미측정 하천 단면 추정 기법을 개선하기 위하여 총 6개 하천의 단면 자료를 수집하고, 하천의 폭을 이용해 횡단면적 및 높이를 추정할 수 있는 회귀식을 개발하고자 한다. 또한, 실제 단면과 추정 단면을 수리모형에 입력하여 동일 홍수량에 의한 홍수위 모의를 각각 수행하고, 선행연구의 홍수위 모의 결과와 비교 및 분석을 통해 개선된 하천 단면 추정 기법의 적용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

Fig. 1은 본 연구의 흐름을 나타내고 있다. 먼저, 6개 하천 (청미천, 복하천, 감천, 지석천, 원평천 및 두월천)의 하천기본계획 단면 측량 자료를 수집하고, 하천별 횡단면의 면적, 폭 및 높이 등의 특성 자료를 추출하였다. 추출한 자료를 이용해 하천의 폭과 횡단면적 및 폭과 높이 사이의 회귀식을 각각 산정하였다. 또한, 하천단면의 위치에 따라 상류, 중류 및 하류로 구분하여 위치별 회귀식을 산정하였다. 6개 하천에 대하여 항공사진을 통해 하천의 폭을 추출하였고, 앞서 산정한 회귀식에 의한 횡단면적 및 높이를 추정하였다. 추정 단면과 측량 단면에 하천기본계획 상의 홍수량을 입력하여 HEC-RAS를 이용해 홍수위를 각각 산정하고, 홍수위 산정 결과를 비교 및 분석하여 개선된 하천 단면 추정 회귀식의 적용성을 분석하였다.

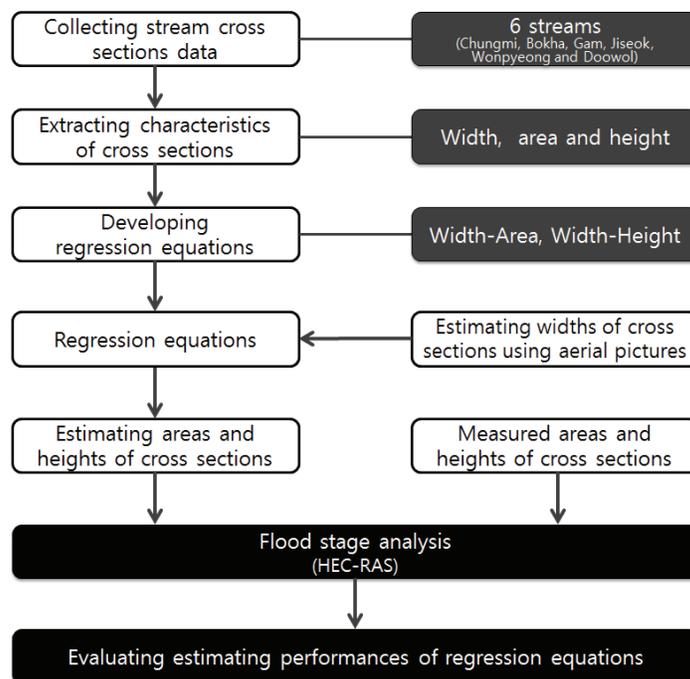


Fig. 1 Schematic diagram of this study

1. 대상하천 선정 및 단면 자료 구축

가. 대상하천 선정

본 연구의 대상하천으로 한강수계 청미천 및 복하천, 금강수계 두월천 및 원평천, 낙동강 수계 감천 및 영산강 수계 지석천 등 6개 하천을 선정하였다. 대상하천은 하천 폭 및 유역 크기의 다양성, 우리나라 주요 하천수계별 분포 등을 고려하여 선정하였다. 대상하천의 위치 및 하천도는 Fig. 2와 같다.

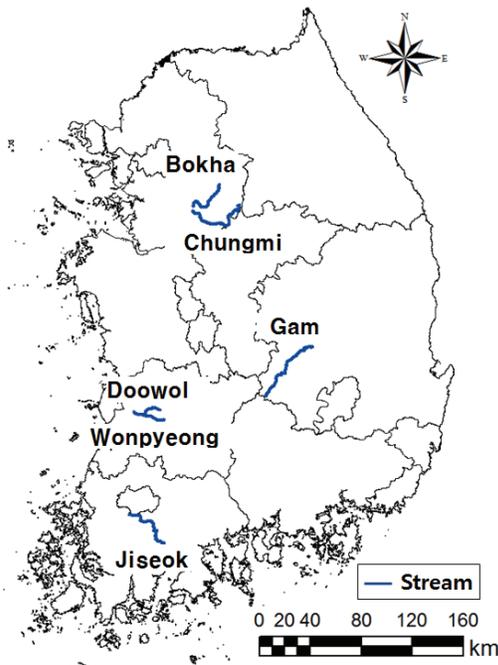


Fig. 2 Locations of selected streams in this study

나. 하천 단면 자료 구축

하천 단면 자료의 구축을 위해 6개 하천의 하천기본계획 보고서를 수집하였다 (MOLIT, 2016; Kim-je-si, 2013; MOLIT, 2011a; MOLIT, 2011b; MOLIT, 2011c; MOLIT, 2009). 하천기

본계획에서는 하천 단면을 하류에서부터 200 m 간격으로 측량하여 단면자료를 제공하고 있으며, 급경사 혹은 만곡부에서는 보다 짧은 간격으로 측량 자료를 제공하고 있다. 각각의 보고서에서 하천 단면 측량자료를 취득하였고, AutoCAD를 이용하여 단면별 횡단면적, 폭, 높이를 각각 추출하였다. 하천 단면의 측량 시기는 2009년에서 2016년까지로 하천별로 상이했으나, 각 하천별로 가장 최근에 수립된 하천기본계획 보고서의 측량 자료를 사용하였다.

본 연구에서 수집한 6개 하천 단면의 총 개수는 615개로 하천 단면의 폭은 최소 30.7 m에서 최대 727.2 m, 하천의 높이는 최소 3.1 m에서 최대 15.9 m의 범위를 나타냈다. 기존 Shin et al. (2016)의 연구에서 수집한 하천 단면의 폭과 높이는 각각 약 80-180 m 및 6.5-9.5 m로, 본 연구에서 회귀식 개발을 위해 수집한 단면 자료의 범위가 기존연구에 비해 넓은 것으로 나타났다. Table 1은 6개 하천의 유역면적, 단면 폭과 높이의 평균, 표준편차, 최댓값 및 최솟값을 나타내고 있다.

2. 하천 단면 추정 기법 개발

가. 하천 단면 추정 기법 개발

하천 단면 형상의 추정을 위해 항공사진, 위성사진 등으로 비교적 쉽게 추정이 가능한 하천의 폭으로 횡단면적 및 높이를 추정할 수 있는 회귀식을 개발하였다. Microsoft Excel을 이용하여 단면의 폭과 횡단면적, 폭과 높이 사이의 회귀식을 추출하였다. 선행연구인 Shin et al. (2016)의 연구에서는 폭과 횡단면적 및 폭과 높이 사이의 회귀식을 각각 1차 선형 회귀식으로 개발하였으나, 본 연구에서는 하천의 폭이 작아지면 횡단면적 및 높이가 음의 값을 가지는 단점을 보완하고자 거듭제곱 형식으로 회귀식을 개발하였다.

단면 형상은 선행연구와 마찬가지로 사다리꼴로 가정하였고, 항공사진을 이용해 하천기본계획의 하천 단면 측량 위치와 동일한 곳에서 하천의 폭을 추출하였다. 하천의 폭은 미측정 하천에 대한 자료 취득의 용이성을 고려하여 NAVER 지도

Table 1 Characteristics of cross-sections in 6 streams

Stream	Water-shed area (km ²)	Width (m)			Height (m)		
		Average ± standard deviation	Maximum value	Minimum value	Average ± standard deviation	Maximum value	Minimum value
Doowol	79.92	84.1 ± 23.6	124.4	30.6	6.3 ± 1.0	9.3	3.7
Chung-mi	595.1	213.3 ± 45.3	356.8	53.7	8.3 ± 1.3	15.9	4.3
Jiseok	662.4	233.2 ± 94.1	727.2	59.7	8.0 ± 1.6	13.2	3.1
Gam	1,004.2	290.7 ± 55.0	416.5	139.7	6.7 ± 1.5	12.9	3.6
Won-pyeong	273.9	151.0 ± 28.1	194.7	92.2	8.2 ± 1.4	11.8	3.8
Bokha	309.5	207.7 ± 60.8	439.3	84.5	7.4 ± 1.6	14.3	5.0

(map.naver.com)의 위성사진 및 항공사진을 통해 제방의 위치를 확인한 후, NAVER 지도에서 제공하는 거리재기 기능을 통해 추출하였다. 하천의 폭을 회귀식에 입력하여 각 단면의 횡단면적과 높이를 각각 추정하였고, 추정 단면의 바닥 표고와 측량 단면의 바닥 표고를 일치시켜 단면 형상을 확정하였다. 회귀식의 추정 정확도 검증을 위해 회귀식으로 추정된 횡단면적과 높이를 측량 자료와 비교 및 분석하였다.

나. 하천 단면의 위치를 고려한 추정 기법 개발

하천의 단면 형상은 유속, 하천경사 등의 영향으로 단면의 위치에 따라 다른 경향을 가질 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 하천을 상류, 중류, 하류로 나누고 하천 단면의 위치에 따른 단면 추정 회귀식을 개발하였다. 6개 하천의 단면을 각각 3등분하여 상류, 중류, 하류로 구분하고 하천상의 위치별로 단면 자료를 구분하였다. 구분된 자료를 바탕으로 상류, 중류 및 하류에서 하천 폭과 횡단면적 및 높이 사이의 회귀식을 각각 추출하고, 3개의 회귀식을 적용하여 하천 단면을 추정하였다. 추정한 단면 형상은 측량 단면과 비교하여 회귀식의 적용성을 평가하였고, 앞서 전체 단면 자료를 이용해 개발한 회귀식에 의한 단면 형상 추정 결과와 비교 및 분석하였다.

3. 하천 단면 추정 기법 적용성 평가

가. 홍수위 모의

하천 단면 추정 기법의 적용성 평가를 위해 추정 단면과 측량 단면을 HEC-RAS에 각각 입력하고, 동일한 유량에 대한 홍수위 해석을 수행하였다. HEC-RAS는 미육군 공병단에서 개발한 하천 해석 시스템으로, 국내외에서 홍수범람 해석에 널리 이용되고 있으며, 하천기본계획 수립 시 하천의 홍수위 모의에도 사용되고 있다 (Jun et al., 2018). HEC-RAS에 하천 단면 형상은 x, y 좌표를 이용하여 입력할 수 있으며, 단면 형상에 의해 통수면적이 결정된다. 하천의 수위는 에너지 방정식을 이용해 축차적으로 계산하도록 구성되어 있다.

본 연구에서는 6개 하천을 대상으로 미측정 단면 추정 회귀식을 이용하여 하천 단면을 생성하고, HEC-RAS의 지형자료로 입력하였다. 하천 유량은 하천기본계획에서 산정한 50년, 100년 및 200년 빈도 홍수량을 사용하였고, 조도계수 등 기타 입력자료 또한 하천기본계획에서 산정한 값을 사용하였다. 동일한 조건으로 측량 단면 및 추정 단면에 대한 정상류 해석을 수행하였고, 홍수위 모의 결과를 비교 및 분석하였다. Table 2는 6개 하천 중 두월천의 단면별 50년, 100년 및 200년 홍수량 입력값을 각각 나타내고 있다.

Table 2 Design floods of different frequency on Doowol stream (m³/s)

Station number	Frequency		
	50-year	100-year	200-year
88	220	247	274
79	254	284	315
57	331	371	410
43	363	407	450
29	439	491	542
16	454	507	560

나. 적용성 평가 방법

본 연구에서는 단면 추정 기법의 적용성을 통계적 변량을 이용하여 평가하였다. 추정 단면과 측량 단면의 폭, 단면적, 높이 사이의 통계적 변량들을 각각 산정하고 그 결과를 비교 및 분석하였다. 또한, 추정 단면과 측량 단면에 의해 각각 모의된 홍수위 사이의 통계적 변량들을 산정하여 하천 단면 추정 기법의 적용성을 평가하였다. 통계적 변량은 결정계수 (Coefficient of determination; R²), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) 및 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error; RMSE)를 사용하였으며, 각각의 식은 Table 3과 같다.

Table 3 Equations for statistical performance measures

Statistic	Equation
R^2	$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$
NSE	$1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right)}{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right)}$
$RMSE$	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2}$

*O and P are observed and simulated values, respectively

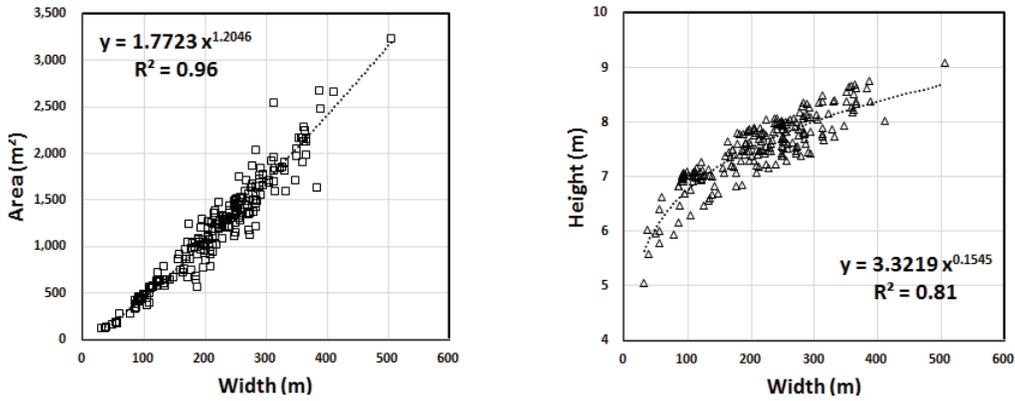
III. 결과 및 고찰

1. 하천 단면 추정

가. 하천 단면 추정

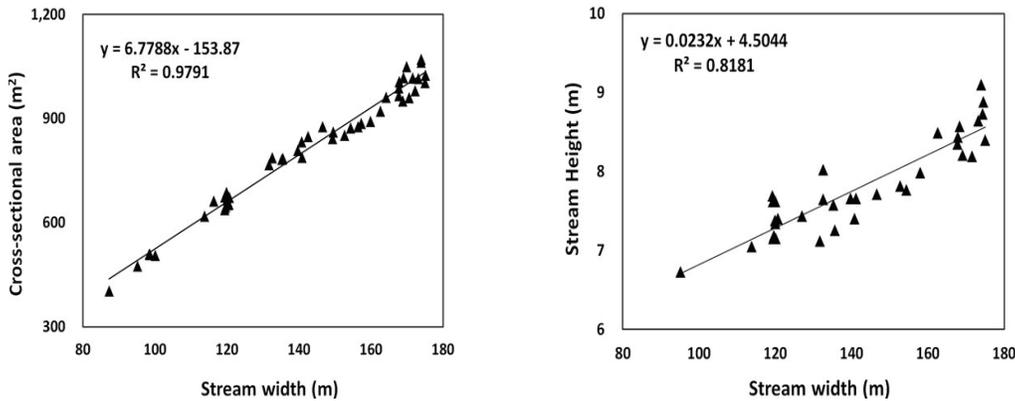
1) 단면 추정 회귀식

Fig. 3은 본 연구에서 6개 하천 전체 단면자료를 이용하여 거듭제곱함수의 형식으로 추출한 하천의 폭과 단면적, 폭과 높이 사이의 회귀식 추정 결과를 나타내고 있다. 하천 폭과



(a) Regression equation between stream width and area (b) Regression equation between stream width and height

Fig. 3 Regression equations between cross-section characteristics



(a) Regression equation between stream width and area (b) Regression equation between stream width and height

Fig. 4 Regression equations between cross-section characteristics (Shin et al., 2016)

단면적 사이의 결정계수는 0.96, 폭과 높이 사이의 결정계수는 0.81로, Fig. 4에 나타난 Shin et al. (2016)의 연구에서 산정한 회귀식의 결정계수와 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 선행 연구와 비교해 넓은 범위의 하천 폭에서도 하천의 폭과 횡단면적, 하천의 폭과 높이 사이의 상관관계는 성립하는 것으로 판단된다. 또한, Fig. 4 (a)의 하천의 폭과 횡단면적 사이 회귀식의 경우 하천 폭이 약 22.6 m 이하일 때 횡단면적이 음의 값을 가지는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 산정한 회귀식은 거듭제곱 형식으로 이러한 문제가 발생하지 않는 것으로 나타났다. Fig. 4 (b)에 도시한 Shin et al. (2016)의 연구에서 사용한 하천 폭의 범위에서는 하천 폭과 높이 사이의 관계가 1차 선형으로 나타났다. 하지만 본 연구에서 하천 폭의 범위를 넓혀서 분석한 결과 하천의 폭과 높이 사이의 거듭제곱함수 회귀식에서 폭의 지수가 0.1545로, 하천의 폭이 증가함에 따라 하천 높이의 증가율은 감소하는 것으로 나타났다.

2) 회귀식을 이용한 단면 추정

두월천, 청미천, 지석천, 감천, 원평천 및 복하천 등 6개 하천을 대상으로 앞서 개발한 회귀식을 이용해 하천 단면 형상을 추정하고, 추정 단면과 측량 단면을 비교 및 분석하였다. 각 하천의 하천기본계획 측량 지점과 동일한 지점에서 위성 및 항공사진을 통해 제방과 제방 사이의 폭을 추출하고, 폭을 회귀식에 대입하여 횡단면적과 높이를 각각 산정하였다. Table 5는 추정 단면과 측량 단면 사이의 통계적 변량을 나타내고 있으며, Fig. 5는 6개 하천 중 두월천에 대한 폭, 횡단면적 및 높이의 추정치와 실측치의 산포도를 나타내고 있다. 하천 폭 추정치와 실측치 사이의 RMSE는 2.73-19.76 m로 평균값의 1.9%-8.4%의 범위를 기록했다. NSE와 R²는 각각 0.80-0.99 및 0.89-0.99로 하천 폭의 추정치와 실측치가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

회귀식에 폭을 대입해 하천의 횡단면적을 산정한 결과, 횡단면적 추정치와 실측치 사이의 RMSE는 56.34-190.70 m²로

Table 5 Statistical variances between measured and estimated cross-section characteristics of 6 streams (Doowol, Chungmi, Jiseok, Gam, Wonpyeong, and Bokha)

Item		Average	RMSE	NSE*	R ² *
Width (m)	Doowol	94.41	7.16	0.92	0.97
	Chungmi	234.95	19.76	0.80	0.89
	Jiseok	223.52	14.97	0.97	0.97
	Gam	270.88	6.23	0.94	0.98
	Wonpyeong	143.83	2.73	0.99	0.99
	Bokha	206.83	7.82	0.98	0.99
Area (m ²)	Doowol	435.45	56.34	0.87	0.89
	Chungmi	1,285.26	156.06	0.65	0.80
	Jiseok	1,251.18	190.70	0.89	0.90
	Gam	1,512.16	115.59	0.64	0.65
	Wonpyeong	707.26	138.10	0.41	0.92
	Bokha	1,100.51	145.62	0.73	0.88
Height (m)	Doowol	6.71	0.31	0.64	0.68
	Chungmi	7.70	0.26	0.48	0.50
	Jiseok	7.60	0.23	0.78	0.78
	Gam	7.89	0.31	0.20	0.32
	Wonpyeong	7.14	0.90	-4.28	0.57
	Bokha	7.53	0.35	0.29	0.52

*There are no units of NSE and R²

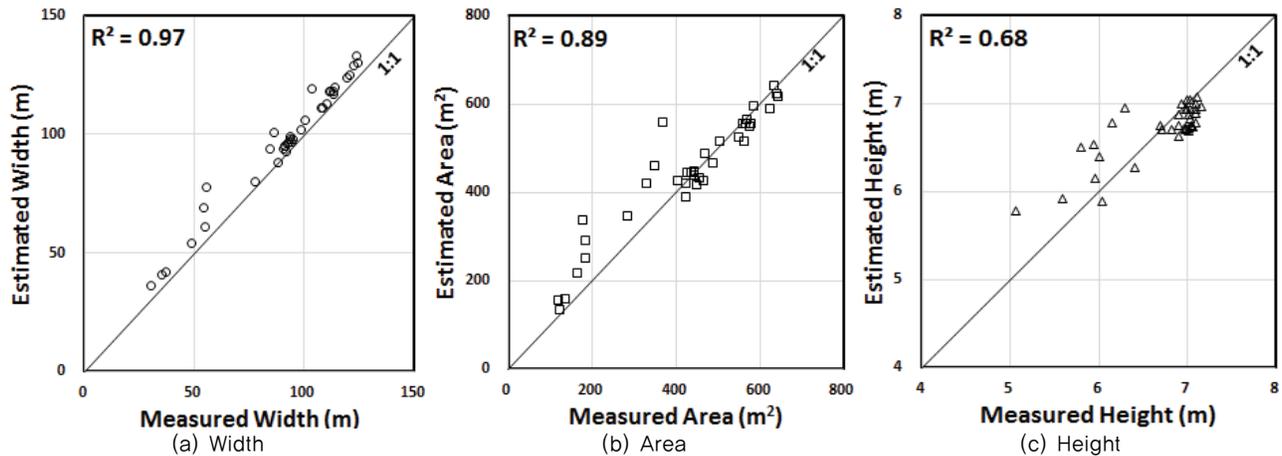


Fig. 5 Scatter plots comparing measured and estimated cross-section characteristics (Doowol stream)

평균값의 7.6-19.5%의 범위를 기록해 하천 폭에 비해 오차율이 큰 것으로 나타났다. NSE와 R²는 각각 0.41-0.89 및 0.65-0.92의 범위를 나타냈다. 특히, 원평천의 경우 횡단면적 추정 결과가 다른 하천에 비해 실측값과 차이가 큰 것으로 나타났다.

하천의 높이를 추정한 결과, 추정치와 실측치 사이의 RMSE는 0.23-0.90 m로 평균값의 3.0-12.6%의 범위를 나타냈

다. NSE와 R²는 각각 -4.28-0.78 및 0.32-0.78의 범위를 나타냈다. 원평천의 경우 횡단면적과 높이 모두 다른 하천에 비해 낮은 NSE 값을 나타냈으며, 이는 Table 1에 기록한 바와 같이 하천 폭에 비해 높이가 다른 하천들의 평균적인 경향과 비교해 큰 값을 가지기 때문으로 사료된다. 감천의 경우 하천 폭에 비해 높이가 낮은 것으로 나타났으며, 이로 인해 원평천과 마찬가지로 단면 횡단면적 및 높이의 추정치와 실측치 사이 통

계치가 낮은 값을 기록한 것으로 판단된다.

하천의 높이는 폭과 횡단면적에 비해 추정치가 실측치의 경향을 비교적 잘 나타내지 못하는 것으로 나타났다. 이는 하천의 횡단면적은 하천 폭에 직접적으로 영향을 받는 데 반해, 하천의 높이는 하천의 폭 이외에 경사, 유속 등의 영향을 복합적으로 받기 때문으로 사료된다. 따라서, 하천의 폭 이외에 단면 형상에 영향을 끼치는 다른 요소들에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 하천 단면을 위치에 따라 상류, 중류 및 하류로 구분하고 각각에 대한 회귀식을 개발 및 적용하였다.

나. 하천 단면의 위치를 고려한 단면 추정

1) 단면 추정 회귀식

Fig. 6과 Fig. 7은 하천을 상류, 중류 및 하류로 위치에 따른 폭-횡단면적, 폭-높이 사이의 회귀식을 각각 나타내고 있다. 하천 폭과 횡단면적 사이 회귀식의 결정계수는 0.86에서 0.91

로 상·중·하류에서 모두 하천의 폭과 횡단면적의 상관성이 높은 것으로 나타났고, 전체 단면 자료를 사용해서 만든 회귀식의 결정계수와 비교해 0.05-0.10 낮은 것으로 나타났다. 하천의 폭과 높이 사이의 회귀식의 결정계수는 상류, 중류 및 하류에서 각각 0.79, 0.82 및 0.92로 전체 단면 자료를 이용해서 만든 회귀식의 결정계수보다 높은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 하천의 폭과 높이 사이의 상관성은 하천을 위치에 따라 상·중·하류로 구분하여 분석하는 경우 전체 단면 자료를 사용하는 방법에 비해 높은 것으로 사료된다.

2) 회귀식을 이용한 단면 추정

두월천, 청미천, 지석천, 감천, 원평천 및 복하천 등 6개 하천을 대상으로 하천 단면의 위치를 고려하여 개발한 회귀식을 이용해 단면 형상을 추정하고, 추정 단면과 측량 단면을 비교 및 분석하였다. 하천의 폭은 앞서 산정한 값을 사용하였고, 단면의 위치에 따라 상류, 중류 및 하류의 회귀식을 각각 적용

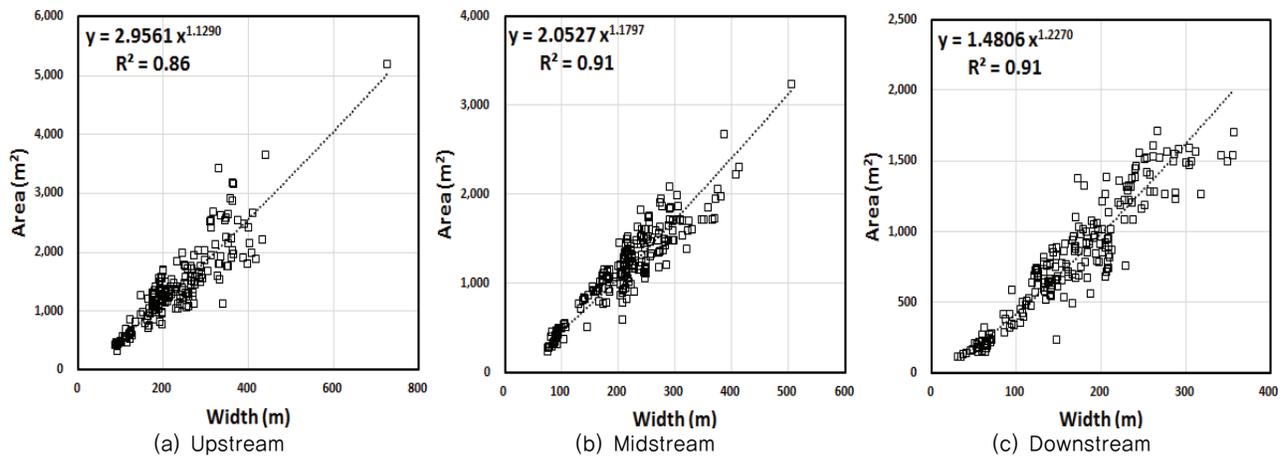


Fig. 6 Regression equation between stream width and cross-sectional area considering locations of cross-sections

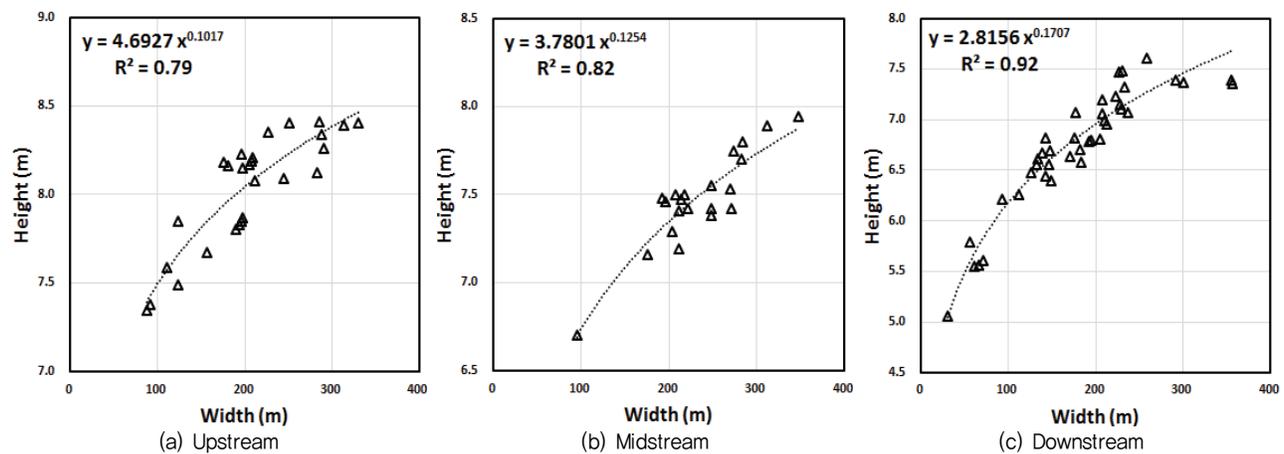


Fig. 7 Regression equation between stream width and height considering locations of cross-sections

Table 6 Statistical variances between measured and estimated cross-section characteristics of 6 streams (Doowol, Chungmi, Jiseok, Gam, Wonpyeong, and Bokha) considering locations of cross-sections

Item		Average	RMSE	NSE*	R ² *
Width (m)	Doowol	94.41	7.16	0.92	0.97
	Chungmi	234.95	19.76	0.80	0.89
	Jiseok	223.52	14.97	0.97	0.97
	Gam	270.88	6.23	0.94	0.98
	Wonpyeong	143.83	2.73	0.99	0.99
	Bokha	206.83	7.82	0.98	0.99
Area (m ²)	Doowol	452.71	61.13	0.84	0.95
	Chungmi	1,179.28	138.34	0.77	0.78
	Jiseok	1,277.33	196.44	0.92	0.92
	Gam	1,562.83	115.53	0.76	0.87
	Wonpyeong	780.40	89.55	0.84	0.92
	Bokha	1,112.13	142.50	0.70	0.89
Height (m)	Doowol	6.77	0.51	0.56	0.65
	Chungmi	7.60	0.59	0.39	0.54
	Jiseok	7.45	0.53	0.68	0.71
	Gam	7.90	0.47	0.22	0.57
	Wonpyeong	7.22	0.52	0.19	0.74
	Bokha	7.30	0.48	0.57	0.59

*There are no units of NSE and R²

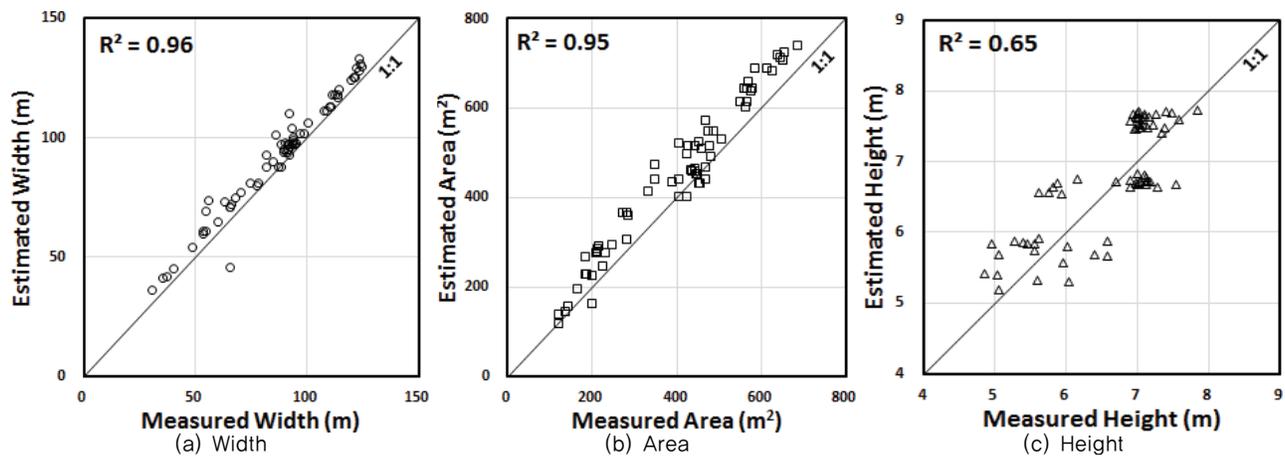


Fig. 8 Scatter plots comparing measured and estimated cross-section characteristics considering locations of cross-sections (Doowol stream)

하여 횡단면적과 높이를 산정하였다. Table 6는 추정 단면과 측량 단면 사이의 통계적 변량을 나타내고 있으며, Fig. 8는 6개 하천 중 두월천에 대한 폭, 횡단면적 및 높이의 추정치와 실측치의 산포도를 나타내고 있다.

하천의 횡단면적 산정 결과, 횡단면적 추정치와 실측치 사이의 RMSE는 61.13-196.44 m²로 평균값의 7.4-15.4%의 범위를 나타냈다. NSE와 R²는 각각 0.70-0.92 및 0.78-0.95의 범위를

를 나타내 전체 자료를 이용한 회귀식의 적용 결과에 비해 추정치가 실측치의 경향을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다.

하천의 높이를 추정한 결과, 추정치와 실측치 사이의 RMSE는 0.47-0.59 m로 평균값의 5.9-7.8%의 범위를 나타냈다. NSE와 R²는 각각 0.19-0.68 및 0.54-0.74의 범위를 나타냈다. 전체 자료를 사용한 회귀식의 적용 결과와 비교해 두월천, 청

미천 및 지석천의 경우 NSE가 소폭 감소하는 경향을 나타냈으나, 감천, 원평천 및 북하천의 NSE는 상승하는 것으로 나타났다. 특히, 원평천과 북하천의 경우 NSE가 크게 상승하는 것으로 나타나 6개 하천의 전체적인 추정 결과는 하천의 위치를 고려한 회귀식이 좋은 성능을 나타내는 것으로 판단된다. 하지만 하천 폭의 경우 여전히 0.5 미만의 낮은 NSE를 나타낸 경우가 많아 향후 하천 경사, 평균 유속 등 단면 형상에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2. 하천 단면 추정 기법 적용성 평가

가. 하천 단면 추정 기법 적용성 평가

6개 하천을 대상으로 전체 단면 자료를 사용해 산정한 회귀식을 이용해 단면을 추정하고, HEC-RAS를 통해 50년, 100년 및 200년 빈도 홍수량에 대한 추정 단면 및 실측 단면의 홍수위를 각각 모의하였다. 홍수량은 하천별 하천기본계획에서 산정한 값을 사용하였다. Table 7은 6개 하천의 추정 단면과 측량 단면에 대한 홍수위 모의 결과 사이의 통계적 변량을 나타내고 있으며, Fig 9는 두월천과 청미천의 추정 단면과 측량 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 산포도를 나타내고 있다.

Table 7 Variances of water surface elevations between measured and estimated cross-sections for 6 streams (Doowol, Chungmi, Jiseok, Gam, Wonpyeong, and Bokha) by 50-year, 100-year and 200-year frequency floods

Stream	Flood frequency	Average (el.m)	RMSE (m)	NSE	R ²
Doowol	50-year	11.04	0.90	0.97	0.99
	100-year	11.27	0.90	0.97	0.99
	200-year	11.47	0.90	0.97	0.99
Chungmi	50-year	57.25	0.12	0.99	0.99
	100-year	57.71	0.12	0.99	0.99
	200-year	58.16	0.12	0.99	0.99
Jiseok	50-year	31.53	1.45	0.99	0.99
	100-year	31.78	1.45	0.99	0.99
	200-year	32.02	1.12	0.99	0.99
Gam	50-year	56.34	1.10	0.99	1.00
	100-year	56.72	1.04	1.00	1.00
	200-year	57.06	1.04	1.00	1.00
Wonpyeong	50-year	6.75	0.77	0.72	0.90
	100-year	7.06	0.72	0.76	0.91
	200-year	7.35	0.68	0.79	0.92
Bokha	50-year	44.15	1.05	0.97	0.99
	100-year	44.55	0.99	0.98	0.99
	200-year	44.95	0.93	0.98	0.99

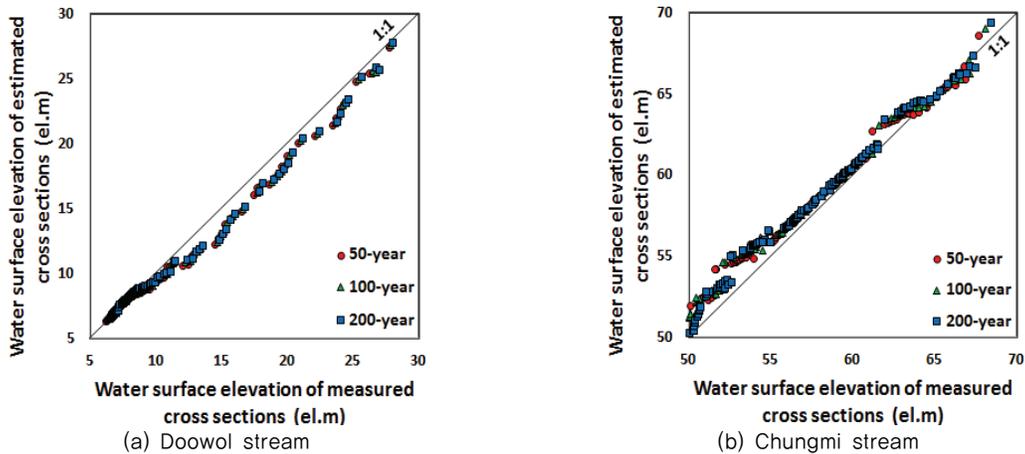


Fig. 9 Scatter plots of water surface elevations between measured and estimated cross-sections by 50-year, 100-year and 200-year frequency floods (Doowol and Chungmi stream)

추정 단면과 실측 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 RMSE, NSE, R²는 각각 0.12-1.45 m, 0.72-1.00 및 0.90-1.00의 범위를 나타냈다. 원평천의 경우 NSE와 R²가 0.72-0.79 및 0.90-0.92로 다른 하천에 비해 낮은 값을 나타냈으며, 이는 Table 5에서 원평천의 단면 추정 결과가 다른 하천에 비해 정확도가 떨어지기 때문으로 판단된다. 다른 하천의 경우 대부분 NSE와 R²가 1에 가까운 값을 나타내 추정 단면과 측량 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 상관성은 높은 것으로 사료된다.

본 연구에서는 추정 단면의 하천 바닥 표고를 실측 단면과 같은 값을 사용했기 때문에 추정 단면과 실측 단면에 의한 홍수위 모의 결과가 유사한 경향을 나타냈으며, NSE와 R² 또한 1에 가까운 값을 나타냈다. 하지만 실제 미계측 지역의 하천 단면을 생성할 경우 수치지도나 DEM (Digital elevation model)을 이용해 하천 바닥의 표고를 추정하는 경우가 대부분으로, 수치지도나 DEM의 정밀도에 따라 표고 추정의 정확도는 크게 달라질 것으로 사료된다. 따라서 정확한 표고 추정을 위해서는 정밀한 지형자료의 구축이 선행되어야 한다.

나. 하천 단면의 위치를 고려한 단면 추정 기법 적용성 평가

두월천, 청미천, 지석천, 감천, 원평천, 복하천의 6개 하천을 대상으로 하천 단면의 위치를 고려해 개발한 회귀식을 이용해 하천 단면을 추정하고, HEC-RAS를 통해 50년, 100년 및 200

년 빈도 홍수량에 대한 추정 단면 및 실측 단면의 홍수위를 각각 모의하였다. Table 8은 추정 단면과 측량 단면에 대한 홍수위 모의 결과 사이의 통계적 변량을 나타내고 있으며, Fig. 9는 두월천과 청미천의 추정 단면과 측량 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 산포도를 나타내고 있다.

하천 단면의 위치를 고려한 추정 단면과 실측 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 RMSE, NSE, R²는 각각 0.31-1.18 m, 0.95-1.00 및 0.96-1.00의 범위를 나타냈다. 원평천의 경우 NSE와 R²가 0.95-0.96 및 0.96-0.97로 전체 자료를 이용한 회귀식을 사용하여 단면을 추정한 경우에 비해 NSE와 R² 모두 증가한 것으로 나타났으며, 이는 하천의 위치를 고려한 회귀식이 전체 자료를 이용한 회귀식에 비해 원평천의 단면 형상 추정에 좋은 성능을 보였기 때문으로 사료된다. 다른 하천의 경우 전체 자료를 사용한 경우와 마찬가지로 대부분 NSE와 R²가 1에 가까운 값을 나타내 추정 단면과 측량 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 상관성은 높은 것으로 사료된다.

따라서, 홍수위 산정을 통한 하천 단면 추정 기법의 적용성 평가 결과, 추정 단면에 의한 홍수위 산정 결과와 측량 단면에 의한 홍수위 산정 결과는 비슷한 경향을 가지는 것으로 나타났으며, 하천의 위치를 고려한 단면 추정 기법이 전체 단면을 사용한 추정 기법에 비해 좋은 성능을 나타내는 것으로 판단된다.

Table 8 Variances of water surface elevations between measured and estimated cross-sections considering locations of cross-sections for 6 streams (Doowol, Chungmi, Jiseok, Gam, Wonpyeong, and Bokha) by 50-year, 100-year and 200-year frequency floods

Stream	Flood frequency	Average (el,m)	RMSE (m)	NSE	R ²
Doowol	50-year	11,11	0.60	0.99	1.00
	100-year	11,35	0.59	0.99	1.00
	200-year	11,56	0.59	0.99	1.00
Chungmi	50-year	57,61	0.92	0.97	0.99
	100-year	58,09	0.89	0.97	0.99
	200-year	58,54	0.86	0.97	0.99
Jiseok	50-year	31,20	1,18	0.99	0.99
	100-year	31,48	1,17	0.99	0.99
	200-year	31,74	0,93	0.99	0.99
Gam	50-year	56,34	1,10	0.99	1.00
	100-year	56,72	1,04	1.00	1.00
	200-year	57,06	1,04	1.00	1.00
Wonpyeong	50-year	6,07	0,31	0.95	0.96
	100-year	6,41	0,31	0.96	0.97
	200-year	6,71	0,31	0.96	0.97
Bokha	50-year	43,96	1,12	0.97	0.99
	100-year	44,40	1,03	0.97	0.99
	200-year	44,84	0,96	0.98	0.99

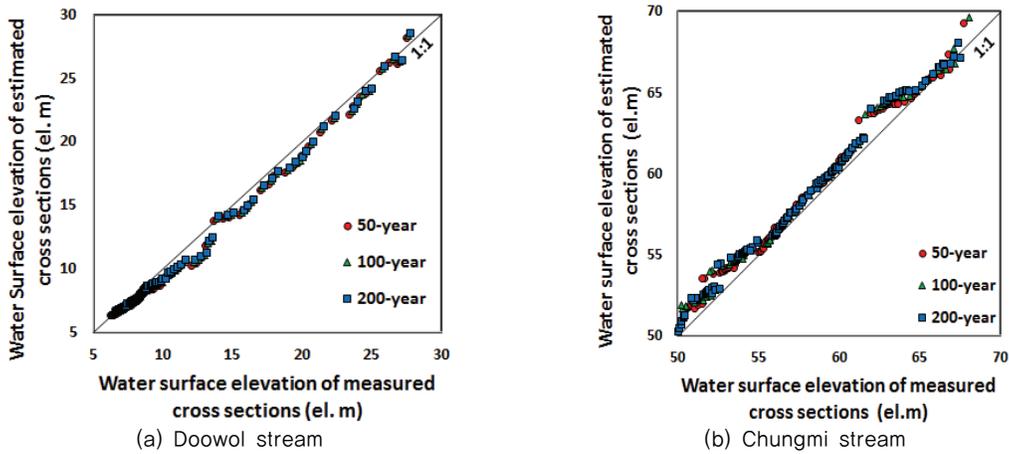


Fig. 10 Scatter plots of water surface elevations between measured and estimated cross-sections considering locations of cross-sections by 50-year, 100-year and 200-year frequency floods (Doowol and Chungmi stream)

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 미측정 하천 단면 추정 기법을 개선하기 위하여 두월천, 청미천, 지식천, 감천, 원평천 및 복하천 등 총 6개 하천의 단면 자료를 수집하고, 하천의 폭을 이용해 횡단면적 및 높이를 추정할 수 있는 회귀식을 개발하였다. 또한, 실제 측량 단면과 추정 단면을 수리모형 HEC-RAS에 입력하여 동일 홍수량에 의한 홍수위 모의를 각각 수행하고, 선행연구의 홍수위 모의 결과와 비교 및 분석을 통해 개선된 하천 단면 추정 기법의 적용성을 평가하였다.

선행연구인 Shin et al. (2016)의 연구의 1차 선형 회귀식에서 하천 폭이 일정값 이하일 경우 횡단면적이 음의 값을 가지는 단점을 개선하고자 본 연구에서는 보다 넓은 범위의 하천 폭을 가지는 단면 자료를 추가하여 거듭제곱 함수의 형식으로 하천의 폭과 단면적, 폭과 높이 사이의 회귀식을 추정하였다. 회귀식 추정 결과, 하천 폭과 단면적 사이의 결정계수는 0.96, 폭과 높이 사이의 결정계수는 0.81로, Shin et al. (2016)의 연구에서 산정한 회귀식의 결정계수와 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 본 연구에서 산정한 회귀식은 선행연구에 비해 넓은 하천 폭의 범위에서 적용이 가능할 것으로 사료된다. 하천 단면의 위치를 고려하여 단면을 상류, 중류 및 하류로 구분하고, 각각의 위치에서 폭-횡단면적, 폭-높이 사이의 회귀식을 산정하였다. 산정 결과, 하천 폭과 횡단면적 사이 회귀식의 결정계수는 0.86-0.91, 폭과 높이 사이의 회귀식의 결정계수는 0.79-0.92로 Shin et al. (2016)의 연구 및 전체 단면을 모두 사용한 회귀식의 결정계수와 큰 차이를 보이지 않았다.

전체 자료를 이용한 회귀식과 하천의 위치를 고려한 회귀식을 이용해 6개 하천의 단면을 각각 추정한 결과, 하천의 위치를 고려한 회귀식이 횡단면적과 높이 추정에 모두 비교적

좋은 성능을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 하천 폭의 경우 횡단면적에 비해 추정 정확도가 낮은 것으로 나타났으며, 향후 하천 경사, 평균 유속 등 단면 형상에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

6개 하천을 대상으로 전체 단면 자료를 사용해 산정한 회귀식 및 단면의 위치를 고려해 산정한 회귀식을 이용해 단면을 각각 추정하고, HEC-RAS를 통해 50년, 100년 및 200년 빈도 홍수량에 대한 추정 단면 및 실제 단면의 홍수위를 각각 모의하였다. 전체 단면을 사용한 추정 기법의 경우, 추정 단면과 측량 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 RMSE, NSE, R²는 각각 0.12-1.45 m, 0.72-1.00 및 0.90-1.00의 범위를 나타냈다. 원평천의 경우 NSE와 R²가 0.72-0.79 및 0.90-0.92로 다른 하천에 비해 낮은 값을 나타냈다. 하천의 위치를 고려한 추정 기법의 경우, 추정 단면과 측량 단면에 의한 홍수위 모의 결과 사이의 RMSE, NSE, R²는 각각 0.31-1.18 m, 0.95-1.00 및 0.96-1.00의 범위를 나타냈다. 원평천의 경우 NSE와 R²가 0.95-0.96 및 0.96-0.97로 전체 자료를 이용한 전체 단면을 사용한 추정 기법에 비해 NSE와 R² 모두 증가한 것으로 나타났다. 따라서, 하천의 위치를 고려한 단면 추정 기법이 전체 단면을 사용한 추정 기법에 비해 좋은 성능을 나타내는 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 하천 단면 추정 기법은 기존 연구가 가지는 단점을 보완하여 다양한 크기의 폭을 가지는 하천에 적용이 가능할 것으로 기대되며, 미세측 소하천에 인접한 농경지의 침수 모의를 위한 하천 수위 모의에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 하천의 표고를 추정하는 기법과 하천의 폭을 추정하는 기법의 정확도 향상을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료되며, 유역 크기, 경사, 유속 등 단면 형상과 관련된 다양한 인자들을 고려한

연구가 추가적으로 이루어진다면 하천 단면 추정의 정확도는 더욱 향상될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ0134142019)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Cho, W. H., K. Y. Han, H. S. Kim, and J. S. Kim, 2015. A Study on inundation analysis considering inland and river flood. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(1): 74-89 (in Korean). doi:10.11108/kagis.2015.18.1.074.
2. Choi, N. I., 2009. GIS based spatial interpolation method for the reconstruction of river channel. Ph. D. Diss., Jeonju, Republic of Korea: Chonbuk National University (in Korean).
3. Choi, N. I., and G. S. Cho, 2008. Generating random cross-section of river channel using bilinear interpolation method. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System* 16(3): 105-110 (in Korean).
4. Gichamo, T. Z., I. Popescu, A. Jonoski, and D. Solomatine, 2012. River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. *Environmental Modelling & Software* 31: 37-46. doi:10.1016/j.envsoft.2011.12.003.
5. Gimje-si, 2013. Master plan reports of Doowol stream (in Korean).
6. Jun, S. M., J. H. Song, S. K. Choi, K. D. Lee, and M. S. Kang, 2018. Combined 1D/2D inundation simulation of riverside farmland using HEC-RAS. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(5): 135-147 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2018.60.5.135.
7. Jun, S. M., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, K. U. Kim, and J. Park, 2013. Effects of agricultural reservoir rehabilitation on their flood control capacities. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 57-68 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.6.057.
8. Kang, M. G., 2014. Modeling system for unsteady flow simulations in drainage channel networks of paddy field districts. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 1-9 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.2.001.
9. Kim, J. J., 2001. Calculating represent river cross section using GIS. Master Diss., Changwon, Republic of Korea: Changwon National University (in Korean).
10. Lee, J. Y., G. S. Lee, and S. R. Ha. 2010. An analysis of changing river sections using GIS spatial analysis - Nonsan river -. *Journal of Environmental Impact Assessment* 19(1): 91-97 (in Korean).
11. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2009. Master plan reports of Youngsan river (in Korean).
12. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2011a. Master plan reports of Bokha stream (in Korean).
13. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2011b. Master plan reports of Cheongmi stream (in Korean).
14. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2011c. Master plan reports of Dongjin river and other 3 national rivers (in Korean).
15. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2016. Master plan reports of Gam stream (in Korean).
16. Mohamoud, Y. M., 2007. Enhancing hydrological simulation program - FORTRAN model channel hydraulic representation. *Journal of the American Water Resources Association* 43(5): 1280-1292. doi:10.1111/j.1752-1688.2007.00113.x.
17. Mohamoud, Y. M., and R. S. Parmar, 2006. Estimating streamflow and associated hydraulic geometry, the Mid-Atlantic Region, USA. *Journal of the American Water Resources Association* 42(3): 755-768. doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb04490.x.
18. Pramanik, N., R. K. Panda, and D. Sen, 2010. One dimensional hydrodynamic modeling of river flow using DEM extracted river cross-sections. *Water Resources Management* 24(5): 835-852. doi:10.1007/s11269-009-9474-6.
19. Shin, S. B., M. S. Kang, S. M. Jun, J. H. Song, K. U. Kim, J. H. Ryu, J. Park, D. G. Lee, and K. D. Lee, 2016. Estimating ungauged river section for flood stage analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(5): 11-18 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.5.011.
20. Zhang, Y., C. Xian, H. Chen, M. L. Grieneisen, J. Liu, and M. Zhang, 2016. Spatial interpolation of river channel topography using the shortest temporal distance. *Journal of Hydrology* 542: 450-462. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.09.022.