Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
DOI : http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2016.58.5.011

Vol. 58, No. 5, pp. 11~18, September 2016
ISSN 1738-3692 | eISSN 2093-7709

홍수위 해석을 위한 미측정 하천 단면 추정

Estimating Ungauged River Section for Flood Stage Analysis

신샛별* · 강문성**† · 전상민* · 송정헌* · 김계웅* · 류정훈* · 박지훈* · 이도길* · 이경도***

Shin, Sat Byeol · Kang, Moon Seong · Jun, Sang Min · Song, Jung Hun · Kim, Kyeung · Ryu, Jeong Hoon · Park, Jihoon · Lee, Do Gil · Lee, Kyeong-Do

Abstract

The objective of this study was to develop the simple method to estimate ungauged river section for flood stage analysis. Damage prediction should be prioritized using hydrological modeling to reduce flood risk. Mostly, the geographical data using hydrological modeling depends on national river cross-section survey. However because of the lack of measured data, it is difficult to apply to many local streams or small watersheds. For this reason, this study suggest the method to estimate unguaged river cross-section. Simple regression equations were derived and used to estimate river cross-section by analyzing the correlation between the river cross-sectional characteristics (width, height and area). The estimated cross-sections were used to simulate flood level by HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System). The applicability of this method was verified by comparing simulated flood level between measured and estimated cross-section. The water surface elevation of the flood stage analysis was 6.56-7.24 m, 5.33-5.95 m and 6.12-6.75 m for measured cross section, for estimated cross section and for estimated cross section based on DEM elevation, respectively. Further study should consider other factors for more accurate flood stage analysis. This study might be used one of the guidelines to estimate ungauged river section for flood stage analysis.

Keywords: Flood; Ungauged watershed; River section; HEC-RAS

Ⅰ. 서 론

우리나라는 연 강수량의 대부분이 여름철에 집중되어 있으며, 이로 인해 해마다 농경지의 침수, 유실, 매몰과 농업 수리 시설물의 파손 등의 피해가 발생하고 있는 실정이다. 농촌 지역은 홍수 피해에 비교적 취약한 편으로, 재해연보에 따르면 1998년부터 2014년까지 농경지의 침수면적은 약 480,000 ha, 피해면적은 1,500,000 ha이며, 피해액은 약 9,000 억 원에 이르는 것으로 나타났다 (NEMA, 1998-2014).

농촌 지역의 홍수 피해에 대한 대책 마련을 위해서는 수리 · 수문 모델링을 이용한 피해 예측이 선행되어야 하며, 모델링의 정확성 향상을 위해서는 실제 지형에 가까운 하천 단면 자료의 취득이 필수적이다. 대부분의 경우 하천의 수리 · 수문 모델링에 활용되는 하천 지형 자료는 하천정비기본계획을 위한 횡단 측량을 통한 자료를 활용하고 있다 (Choi et al., 2008). 하지만 지방 하천과 농촌 소하천은 하천 단면 측량 자료가 존재하지 않는 경우가 많아 해당 지역의 홍수 해석 및 침수 모의에 어려움이 있다. 따라서 측량 자료가 없는 미계측 유역에 대해 하천 단면을 추정할 수 있는 방법이 필요하다.

하천 단면을 추정하는 연구는 GIS (Geographic Information System) 등을 이용해 진행된 바 있다. Kim (2001)은 GIS를 활용하여 특정 구간의 불규칙한 하도를 대표하는 단면을 산출하는 기법을 제시하였고, Choi (2009)는 Bilinear 보간법을 적용하여 하천기본계획 상의 200 m 간격으로 계측된 구간 사이의 임의 하천 단면 생성에 관한 연구를 진행하였다. 이 밖에도 Merwade et al. (2008)은 좌표계를 통합하여 2차원의 하천 단면을 3차원으로 구현하여 주변의 지형을 통합하는 기법을 제시하였으며, Lee et al. (2010)은 GIS의 Overlay 기법을 이용하여 시기별 하천 단면의 변화를 분석하였다.

이와 더불어 최근 항공 레이저 측량자료, 항공사진, 위성사진 등을 활용하여 수치지형모델을 구축하는 등의 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있다 (Woo et al., 2010; Lee et al., 2010; Lee et al., 2014). 한편, Jeong (2013)은 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) M9 센서와 RTK-GPS (Real Time Kinematic-Global

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University
** Association Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University
*** National Academy of Agriculture Science, Rural Development Administration
† **Corresponding author**
Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087
E-mail: mskang@snu.ac.kr
Received: April 4, 2016
Revised: August 23, 2016
Accepted: August 30, 2016

Positioning System)를 탑재한 하천 유량 계측 보트인 R2V2 (River Robot for Velocity & Volume)를 이용하여 2차원 위치와 수심에 대한 정밀한 측정을 수행하고 3차원 하상 단면을 표출하는 등의 연구를 수행한 바 있다.

이상과 같이 하천 단면을 추정하는 연구는 대부분 기측정 된 자료를 기반으로 미계측된 구간 사이를 세밀하게 보간하는 기법 등을 제시하였으나, 유역의 전 구간에 대한 단면을 추정하기에는 한계가 있다. 한편, 항공 레이저 및 항공사진 등을 활용한 연구들은 육상의 건물과 도로 등을 추출하기에는 적합하지만 하천 단면의 추정에는 한계가 있다. 또한 소하천에 고도로 정밀한 측량 기법을 적용하기에는 시간과 비용의 과다한 소모가 우려된다. 따라서 보다 간단한 방법으로 유역의 전 구간에 대한 하천 단면을 추정할 수 있는 방법이 필요하다. 하천의 폭은 항공사진을 이용하여 비교적 쉽게 자료 획득이 가능하고, 이를 통해 하천 단면의 추정이 가능할 것으로 사료된다.

이에 본 연구에서는 미계측 유역에서의 홍수위 예측을 위하여 하천의 횡단면적, 폭, 높이 등 하천 단면 특성 인자들 간의 상관관계를 분석하고, 이를 이용해 하천 단면을 추정하는 기법을 개발하고자 한다. 또한 추정된 단면으로 수리 모델링을 통한 홍수위를 모의하여 단면 추정 기법의 적용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

본 연구의 흐름은 Fig. 1과 같다. 먼저 대상유역의 하천기본계획의 하천 단면 자료를 수집하였다. 이를 통해 단면적, 폭, 높이 등의 인자를 추출하고, 각 인자들 사이의 상관관계를 분석하여 회귀식을 도출하였다. 항공사진을 통해 하천기본계획의 하천 단면 측량 지점에 대한 폭을 추출하였으며, 이를 회귀식에 대입해 단면적과 높이를 산정하여 단면 형상을 추정하였다. 하천 표고를 추정하는 방법은 3가지 경우 (Case 1, Case 2, Case 3)로 나누어 적용하였다. 추정된 단면과 대상 유역의 수문 자료를 바탕으로 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)를 이용해 홍수위를 모의하고, 하천 단면 추정 기법의 적용성을 평가하였다. 본 연구에서는 홍수위 해석에서의 중요 인자인 계획 홍수량 및 조도계수 등의 수리 요소는 동진강 외 국가하천 기본계획 (변경) 보고서 (MLTMA, 2011)에서 기 수립된 자료를 사용하였다.

1. 연구 대상지 선정 및 단면 자료 수집

본 연구의 대상지는 전라북도 김제시 일대에 위치한 원평천 유역으로 선정하였다. Fig. 2는 대상 유역의 위치 및 하천도를 나타내고 있다. 원평천은 금강 권역 동진강의 제 1 지류로, 상류 구간은 지방 하천, 하류 구간은 국가 하천으로 지정되어 있다. 합류하천으로는 주평천, 유각천, 감곡천 등이 있으며, 유역면적은 273.9 km^2, 유로연장은 30 km, 하천연장은 16 km 이다.

원평천의 하천 단면 측량 자료는 동진강 외 3개 국가하천 기본계획 (변경)보고서 (MLTMA, 2011)를 바탕으로 수집하였다. 200 m 간격의 86개 지점의 측량 자료를 취득하였고, Autodesk 사의 AutoCAD를 이용하여 각 지점별 하천 폭, 높이, 횡단면적 등의 인자를 추출하였다.

2. 하천 단면 추정 기법

가. 단면 형상

본 연구에서는 하천 단면 형상을 추정하기 위해 하천의 폭으로 횡단면적과 높이를 추정할 수 있는 회귀식을 개발하였다. 하천기본계획 상의 기 측량된 자료를 바탕으로 폭과 횡단면적, 폭과 높

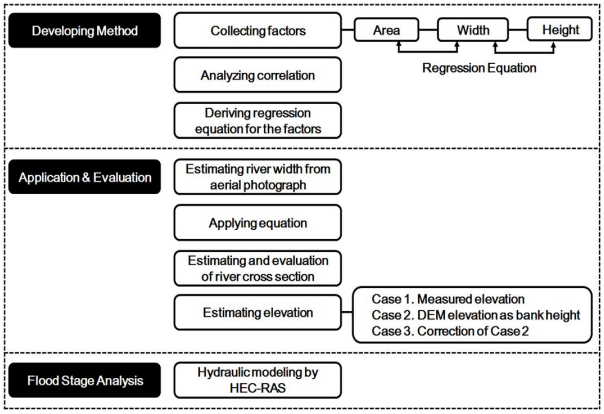

Fig. 1 Flow chart of this study

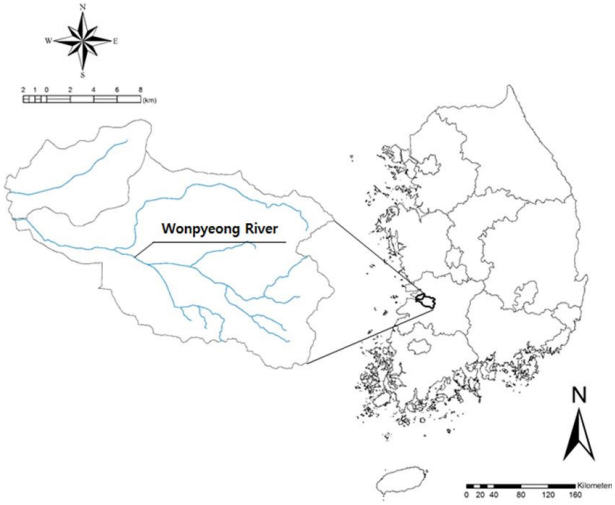

Fig. 2 Stream map of the study watershed

이 사이의 상관관계를 분석하여 단순 선형 회귀식으로 나타냈다. 회귀식을 검증하기 위해 실측값과 회귀식으로 계산한 값을 비교하여 추정치가 실측치를 잘 반영하는지 평가하였다.

하천 단면의 형상은 등변 사다리꼴로 가정하였다. 자연적인 하상은 불규칙하지만 기저유량 등의 흐름을 고려하여 사다리꼴 단면으로 가정하였다. 사다리꼴 단면은 자연 하천 혹은 개수로의 하천 설계 기준으로 사용되고 있으며, 토양의 영향을 고려한 장기 유출 모형인 SWAT, 수질 해석 모델인 QUAL2E 등의 수문 모형에서도 수문 환경 분석 시 단면을 사다리꼴로 가정하여 해석하고 있다. 사다리꼴의 윗변은 하천의 폭에 해당하고 높이는 하천의 바닥에서 제방까지의 길이이다.

나. 단면 표고

단면 표고를 추정하기 위해 국토지리정보원의 1:5,000 축척의 수치지도를 통해 DEM (Digital Elevation Model)자료를 구축하였다. DEM을 이용하여 각 지점의 위치에 해당하는 고도를 추출하였고, 이를 하천 제방의 표고로 가정하였다. 표고는 홍수위 모의 시 유역의 지형 특성을 나타내는 중요한 인자이지만 하천의 폭을 통해 추정하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실측 표고를 적용하는 방법 (Case 1)과 DEM의 고도를 하천의 제방 높이로 추정하여 표고를 산정한 방법 (Case 2), 측량 자료를 이용해 Case 2의 표고를 보정하는 방법 (Case 3) 등 세 가지 방법으로 나누어 표고를 추정하였다.

다. 단면 추정의 적용성 평가 방법

단면 형상 및 표고의 추정치는 실측치와의 상관관계를 나타내는 통계적인 변량을 사용하여 평가하였다. 평가에 사용된 변량은 평균 제곱근 오차 (root mean square error, RMSE), 효율지수 (efficiency index, EI), 결정계수 (coefficient of determination, R^2) 등이다. RMSE와 EI의 식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{n=1}^{n}\left[Q_f(i) - Q_o(i)\right]^2} \quad (1)$$

여기서, Q_o는 실측값, Q_f는 모의값, n은 자료수를 의미한다.

$$EI = \frac{(ST - SE)}{ST},\ ST = \sum_{t=1}^{N}(M_o - Q_o)^2,\ SE = \sum_{t=1}^{N}(Q_o - Q_f)^2 \quad (2)$$

여기서, ST는 실측치의 초기분산, SE는 실측치와 모의치의 불일치, M_o는 실측치의 평균을 의미한다.

결정계수는 모형의 추정오차를 평가하기 위해서 사용되며 0과 1사이의 값으로, 1에 가까울수록 실측치의 경향을 잘 반영함을 의미한다. 그러나 결정계수는 단지 무작위 오차만을 평가하며, 오차의 정도는 RMSE를 통해 나타낼 수 있다. 또한 EI는 추정치와 실측치가 일치하면 1이고, 그 값이 0과 1 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 좋으며, 0보다 작으면 추정결과가 나쁨을 의미한다. RMSE, EI, R^2 등의 식은 Kang et al. (2003)과 Nash and Sutcliffe (1970) 등에 상세히 서술되어 있다.

3. 단면 생성에 따른 홍수위 모의 방법

홍수위 해석을 위해 HEC-RAS를 이용하여 수리학적 모의를 수행하였다. HEC-RAS는 미 육군 공병단의 수문 연구소에서 개발한 수문 곡선 해석 프로그램으로, 자연하천이나 인공 수로 등에서의 수면 곡선의 계산을 수행하는 1차원 수치 해석 모델이다. HEC-RAS의 입력 자료는 단면의 형상과 관련한 기하학적 자료와 대상유역의 수리학적 자료가 필요하다 (Han, 2004; USACE, 2010).

기하학적 자료에는 단면 형상, 앞 단면과의 거리, 좌·우 제방의 위치, 조도계수와 확대·축소계수 등이 있다. 단면 형상은 앞서 기술한 기법을 통해 추정하였으며, 조도계수와 확대·축소계수는 하천기본계획보고서 (MLTMA, 2011)에서 제시한 값을 사용하였다.

수리학적 자료는 하천기본계획보고서 (MLTMA, 2011)에서 산정한 원평천의 50년, 80년, 100년, 200년 빈도 설계홍수량을 적용하였다. 이를 바탕으로 HEC-RAS를 이용하여 추정 단면의 홍수위를 모의한 후 실측 단면으로 모의된 결과와 비교하였다. 홍수위 모의 결과를 평가하기 위해 Moriasi et al. (2015)이 제시한

Table 1 Design flood of different frequency on Wonpyeong river (m^3/s)

Station	50-year	80-year	100-year	200-year
85	472	522	545	614
41	739	806	837	930
35	796	869	903	1,004
1	878	956	991	1,099

Table 2 Performance evaluation criteria for recommended statistical performance measures for watershed-scale models (Moriasi et al., 2015)

Measure	Performance Evaluation Criteria			
	Very Good	Good	Satisfactory	Not Satisfactory
R^2	$R^2 > 0.85$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$R^2 \leq 0.60$
EI	EI > 0.80	$0.70 < EI \leq 0.80$	$0.50 < EI \leq 0.70$	$EI \leq 0.50$

수문·수질 모델링의 통계적 성능평가 기준을 사용하였다. Table 1은 원평천의 설계홍수량을, Table 2는 모델링 성능평가 기준을 나타내고 있다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 하천 단면 추정 기법 개발

Fig. 3과 Fig. 4는 실측된 하천의 폭과 횡단면적, 폭과 높이 사

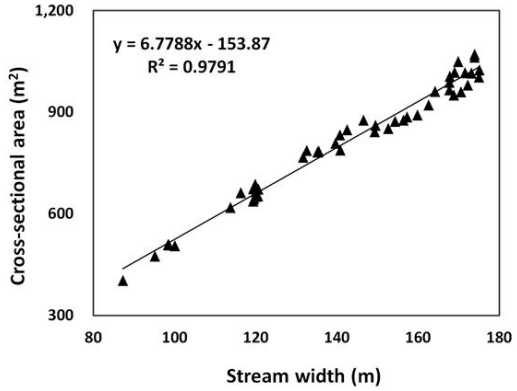

Fig. 3 Regression equation between stream width and cross-sectional area

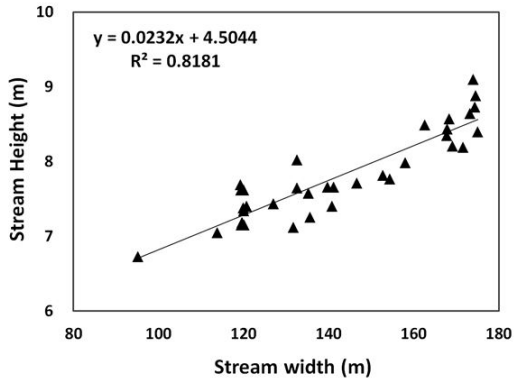

Fig. 4 Regression equation between stream width and measured height

Table 3 Variance between measured and calculated area and height

Item		Average	RMSE	EI	R^2
Area	Measured	811.78*	25.18*	0.98	0.98
	Estimated	811.78*			
Height	Measured	7.81**	0.25**	0.82	0.82
	Estimated	7.81**			

* Average, RMSE of Area (m^2)
** Average, RMSE of Height (m)

이의 회귀식 추정 결과를 보여주고 있다. 하천의 폭과 횡단면적은 1차 선형관계를 가지는 것으로 나타났으며, 두 인자 사이의 결정계수는 0.98로 나타났다. 하천의 폭과 높이의 관계는 앞서 도출한 폭과 횡단면적 사이의 관계에 비해 비교적 상관도가 낮게 나타났다. 하천의 폭은 일정하지만 높이 변화가 상대적으로 큰 폭으로 나타난 지점들이 있었으나, 전반적으로 하천의 폭이 커질수록 단면의 높이도 함께 커지는 경향성을 보였다. 따라서 하천의 폭과 높이를 1차 선형관계로 나타내었으며, 두 인자 사이의 결정계수는 0.82로 나타났다.

Table 3는 회귀식을 이용한 추정치를 실측치와 비교한 통계적인 변량이다. 횡단면적에 대한 회귀식 적용 결과 RMSE는 25.18 m^2, EI는 0.98, R^2은 0.98로 나타났다. 추정치는 실측치와 평균이 같고, 편차가 약 25.18 m^2로 나타나 추정치가 실측치의 경향성을 잘 반영하는 것으로 사료된다. 높이에 대한 회귀식 적용 결과 RMSE는 0.25 m, EI는 0.82, R^2은 0.82로 나타났다. 실측된 하천 폭과 높이의 상관도는 비교적 낮은 편이지만, 도출된 회귀식을 적용하여 산정한 추정치는 평균적으로 약 0.25 m의 편차를 가지고, EI가 0.82로 1과 가까운 수치로 나타나 추정치의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

2. 하천 단면 추정 적용 및 평가

가. 단면 형상 추정

단면형상을 추정하기 위해 항공사진을 이용하여 원평천의 200 m 간격의 하천기본계획 측량 지점의 하천 폭을 추출하였다. 사용된 항공사진은 국토지리정보원의 1:5,000 축척의 항공사진이며, Fig. 5는 원평천의 86개 측량 지점의 위치이다.

각 지점 별로 추출한 하천 폭에 앞서 산정한 회귀식을 적용하여 지점별 단면을 결정하여 단면 형상을 추정하였다. 추정된 단면 형상의 하천 폭, 횡단면적, 높이 등의 기하학적 특성치를 실제 지점에서 측량된 값과 비교하여 추정치와 실측치의 상관관계를 분석하였다. Fig. 6 ~ 8은 각각 하천의 폭, 횡단면적, 높이에 대한 추정치와 실측치를 일대일 비교하여 나타낸 것이다. 폭, 횡단면적, 높이의 추정치와 실측치 간의 결정계수는 각각 0.95, 0.96, 0.82로 나타났다. Fig. 8의 높이 추정에서 실측 높이가 커지지만 추정치는 정체되는 구간이 나타나 단순 회귀식을 통한 높이 추정은 한

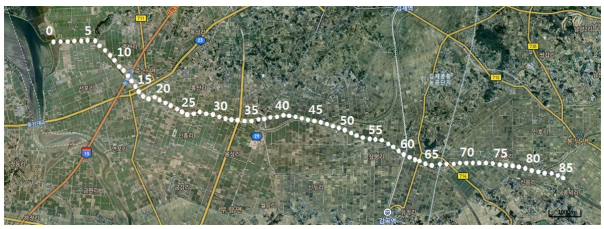

Fig. 5 Location of 86 stations from aerial photograph

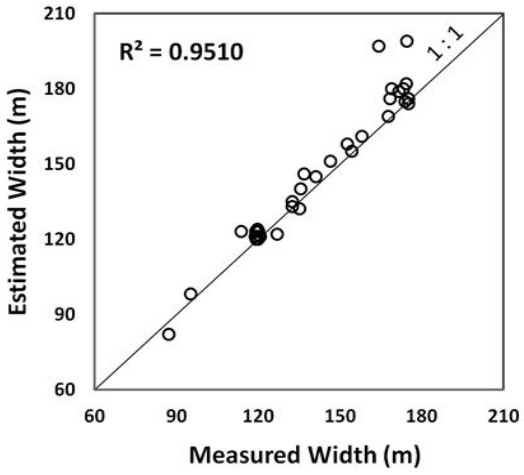

Fig. 6 Scatter plot comparing measured and estimated width

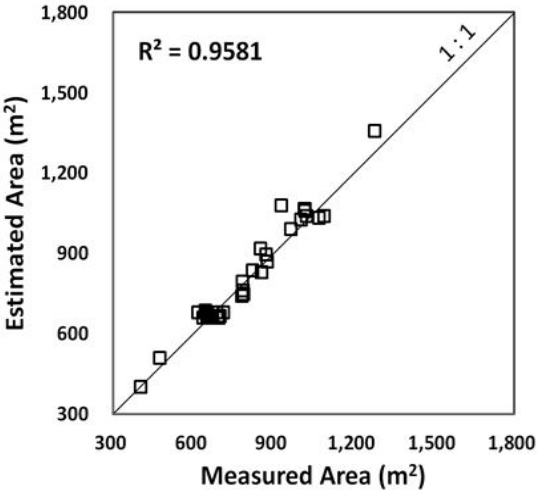

Fig. 7 Scatter plot comparing measured and estimated area

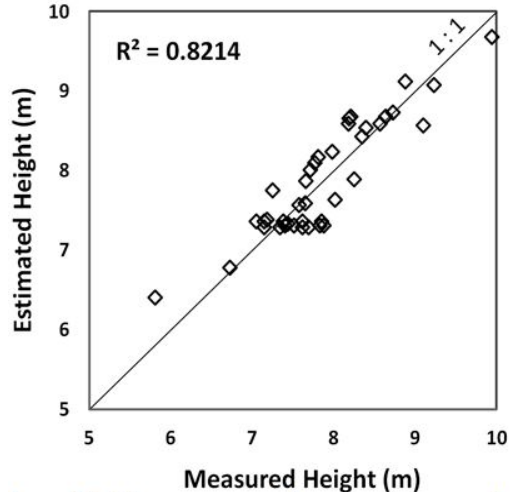

Fig. 8 Scatter plot comparing measured and estimated height

계를 보이는 것으로 사료된다. 그러나 전반적인 경향성은 추정치가 실측치를 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다.

Table 4는 폭, 단면적, 높이의 추정치를 실측치와 비교한 통계적인 변량이다. 항공사진으로 추정한 폭은 실측된 폭 대비 약 7.70 m의 편차를 보였고, 전체적으로 평균이 4.11 m 크게 나타났다. 회귀식을 통해 추정된 횡단면적과 높이는 실측치 대비 각각 38.42 m^2, 0.23 m의 편차를 보였고, 평균이 소폭 크게 산정되었다. 전체적으로 폭의 추정치가 실측치보다 크게 나타났기 때문에, 회귀식을 통해 추정한 횡단면적과 높이 역시 실측치 대비 소폭 큰 수치를 보였다. 그러나 EI (0.85~0.94) 와 R^2 (0.82~0.96) 등의 범위가 실측치의 경향을 비교적 잘 반영하므로 추정치의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

나. 단면 표고 추정

단면 표고는 실측 표고인 Case 1, DEM을 통해 추정한 표고인 Case 2, DEM 추정 표고를 보정한 Case 3으로 구분하여 추정하였다. 실측치인 Case 1 대비 Case 2와 Case 3의 추정 표고를 비교한 산포도는 Fig. 9와 같다. Case 1은 평균 0.84 El., m, Case 2는 평균 −3.06 El., m로 나타났으며, 전체적으로 Case 2가 실측치보다 약 3.90 El., m 낮게 산정되었다. 그러나 전체적인 경향성은 실측치를 비교적 잘 반영하는 편으로, DEM 표고의 수치 보정이 필요하다고 사료되었다. 이에 정밀한 보정기법을 사용하기 보다는 비교적 단순한 방법으로 실측 표고와 DEM 표고 차이의 평균치를 전체적으로 소거시켜 Case 3을 산정하였다.

Table 5는 실측치 (Case 1)에 대한 추정표고 (Case 2, Case 3)의 통계적인 변량이다. Case 2의 RMSE는 2.84 El., m, EI는 −3.41으로 나타났다. EI 값이 음수이므로 추정치의 사용이 적절하지 않음을 의미한다. 따라서 DEM을 통한 표고 추정은 한계를 보이며 표고 추정의 정확도를 향상시키기 위해서는 고도로 정밀한 DEM 혹은 보정 기법 등이 필요할 것으로 사료된다. 그러나 Case 2의 전체적인 경향성은 실측치와 비슷한 양상을 보이며, DEM을 통한 표고 추정에 대한 하나의 가능성으로 단순 보정을 적용한

Table 4 Variance between measured and calculated width, area and height

Item		Average	RMSE	EI	R^2
Width	Measured	139.26*	7.70*	0.85	0.95
	Estimated	143.37*			
Area	Measured	797.81**	38.42**	0.94	0.96
	Estimated	831.84**			
Height	Measured	7.86*	0.23*	0.86	0.82
	Estimated	7.88*			

*Average, RMSE of Width and Height (m)
**Average, RMSE of Area (m^2)

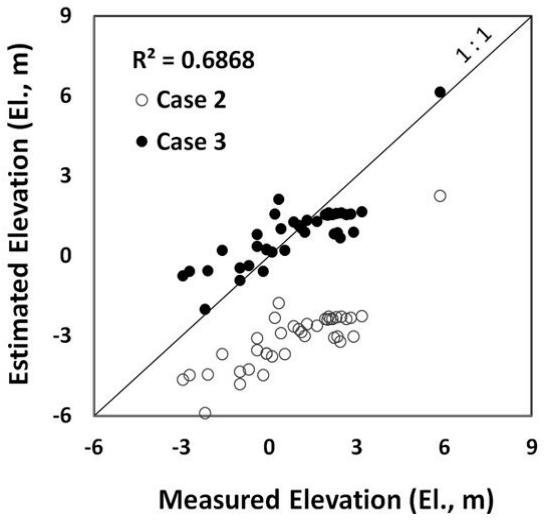

Fig. 9 Scatter plot comparing measured and estimated elevation

Table 5 Variance between measured and estimated DEM value

Item	Average	RMSE	EI	R^2
	(El., m)			
Case 1	0.84	–	–	–
Case 2	−3.06	2.84	−3.41	0.69
Case 3	0.84	0.79	0.66	0.69

Case 3을 산정하였다. Case 3의 RMSE는 0.79 El., m, EI는 0.66으로 나타났다. Case 3은 Case 2 대비 통계적 변량 측면에서 실측치와 가깝게 산정되었다.

3. 실측 단면과 추정 단면의 홍수위 모의

추정된 단면 형상에 Case 1 ~ 3의 표고를 적용하여, HEC-RAS 상에서 홍수위를 모의하였다. 재현기간 50년, 80년, 100년, 200년에 대해 지점별로 모의된 수위는 수면 (water surface elevation)에서의 수위이다. Fig. 10은 추정 단면 (각 Case 별 표고를 적용한 추정 단면)과 실측 단면 (실측 표고를 적용한 실측 단면)으로 모의된 홍수위를 일대일 비교한 것으로 재현기간 50년과 200년에서 모의된 것을 도시하였다. 추정 단면의 홍수위는 실측 단면의 홍수위 대비 전체적으로 Case 1에서 약 1.26 El., m, Case 2에서 약 3.21 El., m, Case 3에서 약 0.47 El.m 낮게 모의되었다. Case 3, Case 1, Case 2의 순서로 실측 단면의 홍수위와 가장 가깝게 모의되었다.

Table 6은 각 재현기간 별로 모의된 홍수위의 평균값을, Table 7은 실측 단면 홍수위에 대한 추정 단면 홍수위의 통계적인 변량을 나타낸다. 실측 단면으로 모의한 홍수위는 재현기간별 평균 6.56~7.24 El., m, Case 1은 5.33~5.95 El., m, Case 2는

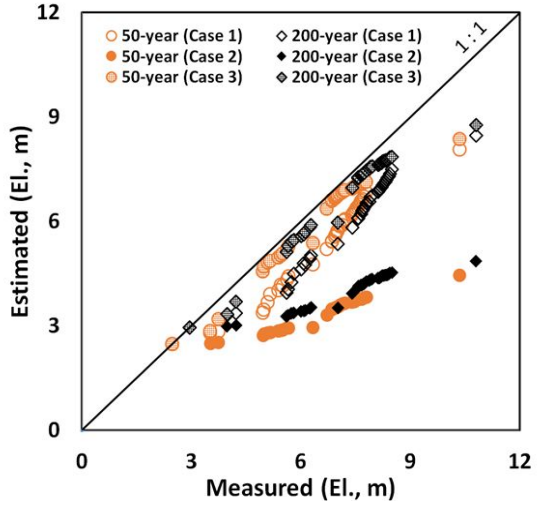

Fig. 10 Scatter plot of water surface elevation between measured and estimated cross section

Table 6 Average water surface elevation (El., m)

Frequency	Measured cross-section	Estimated Cross-section		
		Case 1	Case 2	Case 3
50-year	6.56	5.33	3.38	6.12
80-year	6.80	5.56	3.61	6.35
100-year	6.92	5.66	3.70	6.45
200-year	7.24	5.95	4.00	6.75

Table 7 Variance of water surface elevation between measured and estimated cross-section

Item	Frequency	RMSE (El., m)	EI	R^2
Case 1	50-year	1.27	0.19	0.96
	80-year	1.29	0.18	0.95
	100-year	1.30	0.18	0.95
	200-year	1.33	0.17	0.95
Case 2	50-year	3.33	−4.54	0.94
	80-year	3.34	−4.50	0.93
	100-year	3.36	−4.50	0.93
	200-year	3.38	−4.39	0.92
Case 3	50-year	0.54	0.86	0.96
	80-year	0.55	0.85	0.96
	100-year	0.56	0.85	0.96
	200-year	0.58	0.84	0.96

3.38~4.00 El., m, Case 3는 6.12~6.75 El., m 이다. 모든 Case의 추정 단면 홍수위 값이 실측 단면 홍수위보다 작게 모의되었으며 결정계수는 0.92~0.96 사이로 나타났다.

Case 1의 실측 표고를 적용한 추정 단면에서 RMSE는 약 1.27~1.33 El., m, EI는 약 0.18로 나타났다. Table 2의 기준에 따라 R^2은 Very Good, EI는 Not Satisfactory로 나타났다. 실측 표고를 사용했음에도 이와 같은 차이가 발생한 것은 추정 단면과 실측 단면의 불일치로 인함이며, 이는 본 연구에서 고려하지 않은 하천시설물 등의 영향으로 사료된다. 추후 연구를 통해 비교적 단면 형상이 일정하고 하천의 통수 단면에 큰 영향을 끼치는 보가 포함된 단면을 고려한다면 단면 추정의 정확도가 향상될 것으로 사료된다.

Case 2의 DEM 표고를 적용한 추정 단면에서 RMSE는 약 3.33~3.38 El., m, EI는 0보다 작은 값을 보이는 등 큰 차이가 발생하였다. Table 2의 기준에 따라 R^2은 Very Good, EI는 Not Satisfactory로 나타났다. 이는 DEM을 통한 표고 추정의 한계로 인함으로, 표고 추정의 정확성 향상을 위해서는 정밀한 DEM 자료나 보정 기법 혹은 실제 측량을 통한 조사 등이 필요할 것으로 사료된다.

Case 3의 DEM을 단순 보정한 표고를 적용한 추정 단면에서 RMSE는 약 0.54~0.58 El., m, EI는 약 0.85로 나타났다. Table 2의 기준에 따라 R^2은 Very Good, EI는 Good~Very Good의 범위로 나타났다. 통계적인 변량 측면에서 실측 표고를 사용한 Case 1보다 실측 단면의 홍수위에 가깝게 모의되었다. 그러나 Case 3는 DEM 자료를 실측 표고를 바탕을 보정을 한 것이기 때문에 미계측 유역에의 적용에는 한계가 있다. Case 3는 DEM을 통한 표고 추정의 하나의 가능성으로서 이를 적용하기 위해서는 DEM 자료를 보정할 수 있는 기준이 필요하다.

Ⅳ. 요약 및 결론

본 연구에서는 하천 폭을 이용하여 하천 단면을 추정할 수 있는 방법을 개발하고 적용성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 측량된 하천 폭과 횡단면적 사이의 회귀식을 개발하였고 결정계수는 0.98로 나타났다. 측량된 하천 폭과 높이 사이의 회귀식을 개발하였고 결정계수는 0.82로 나타났다.
2. 항공사진을 이용하여 하천 폭을 조사하고, 개발된 회귀식을 적용하여 하천의 단면을 추정하였다. 하천 폭, 높이, 횡단면적의 추정치와 실측치 사이의 결정계수는 각각 0.95, 0.96, 0.82로 나타나 실제 측량 값과 높은 상관도를 보였다.
3. DEM 추정 표고는 평균 -3.06 El., m로 실측 표고 대비 약 3.90 El., m 낮게 나타났다. DEM을 통한 표고 추정은 한계를 보였으며, 실측 자료를 기반으로 보정을 수행한 후 실측치의 경향성을 잘 반영하였다.
4. 실측 표고와 추정 표고를 추정된 단면 형상에 적용하여 수리 모델링을 실시하였다. 재현기간별 홍수위 모의 결과 실측 단면으로 모의한 홍수위는 6.56~7.24 El., m, Case 1, 2, 3의 표고를 적용한 추정단면으로 모의한 홍수위는 각각 5.33~5.95 El., m, 3.38~4.00 El., m, 6.12~6.75 El., m로 나타났다. 실측 단면 대비 Case 1, 2, 3의 RMSE는 각각 1.27~1.33 El., m, 3.33~3.38 El., m, 0.54~0.58 El., m이며, R^2은 0.92~0.96의 범위로 나타났다.

본 연구에서 제시한 하천의 폭을 이용한 단면 추정 방법은 향후 미측정 하천의 수리모델링을 위한 단면 자료 구축에 활용이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구를 기반으로 단면 형상 추정의 정확도 향상을 위해 유역의 경사, 하천시설물(보) 등의 다른 인자를 고려하는 추가적인 연구가 필요할 것이며, 표고 추정의 정확성 향상을 위해서는 정밀한 DEM 자료가 구축 또는 DEM 자료의 보정과 관련한 연구를 병행해야할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 제시한 방법을 보편적으로 적용하기 위해서는 보다 다양한 하천의 자료를 회귀식 개발에 적용하여 적용성을 검토하는 것이 필요하며, 이를 통해 하천의 크기, 경사 등 특성에 따라 보편적으로 적용할 수 있는 단면 추정 방법을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ01168603 2016)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. 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).
2. 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).
3. Han, G. Y., 2004. HEC-RAS manual, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference* 13: 205-377 (in Korean).
4. Jeong, C. S., 2013. A study on three dimensional expression of river bed cross section considering surrounding topography. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(3): 185-190 (in Korean).

5. Kang, M. S., and S. W. Park, 2003. Development and application of total maximum daily loads simulation system using nonpoint source pollution model. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(1): 117-128 (in Korean).
6. Kang, M. S., S. W. Park, and J. A. Chun, 2003. Estimating pollutant loading using remote sensing and GIS-AGNPS model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(1): 102-114 (in Korean).
7. Kim, J. J., 2001. Calculating represent river cross section using GIS. Master Diss., Changwon, Republic of Korea: Changwon National University (in Korean).
8. Lee, H. J., D. S. Koo, and C. H. Park, 2010. Advanced national base map by using high-resolution digital aerial photograph. *Journal of Korea Society for GeoSpatial Information System* 18(1): 135-143 (in Korean).
9. Lee, J. D., K. J. Bhang, S. H. Kim, and K. D. Lee, 2014. Extracting roof edges of small buildings from digital aerial photographs. *Journal of Korea Contents Association* 14(5): 425-435 (in Korean).
10. Lee, J. I., 2010. Analysis of changing river sections using GIS spatial analysis. *Journal of Environmental Impact Assessment* 19(1): 91-97 (in Korean).
11. Merwade, V., A. Cook, and J. Coonrod, 2008. GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping, *Environmental Modelling & Software* 23(10): 1300-1311.
12. Ministry of Land, Transort and Maritime Affairs (MLTMA), 2011. Report of mater plan(alteration) for Dongjin river and other 3 national rivers. Iksan, Republic of Korea: Iksan Regional Construction and Management Administration (in Korean).
13. Moriasi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati, 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6): 1763-1785.
14. Nash J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models par Ⅰ-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
15. National Emergency Management Agency (NEMA), 1998-2014. Yearbook of disasters (in Korean).
16. U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 2010. HEC-RAS river analysis system user's Manual 4.1.
17. Woo, H. B., and D. H. Jang, 2010. A study on the erosion and retreat of sea-cliff through the multi-temporal aerial photograph data and field survey : The case study of Taean peninsula, Korea. *Journal of Korean Geomorphological association* 17(4): 71-83 (in Korean).