소하천의 초기계획하폭 산정식 개발에 관한 연구: 강원영서 지역을 대상으로

Development of Initial Design-Width Formulas for Small Streams: Case Study in Western Gangwon Province

방윤현* · 김상호**

Bang, Yoon-Hyun*, and Kim, Sang-Ho**

Abstract

The initial design-width formulas of small streams should be determined differently according to the hydrologic and geographical characteristics of the local area. However, the currently applied design-width formula of the design criteria used in water resource design practices does not consider recent rainfall trends and the characteristics of local small streams. Because the extent of the variation in the flood level of small stream is large according to the calculation of the initial design-width, the optimal design-width should be determined through repeated calculation by the trial and error method. Thus, the initial design-width calculation considering regional characteristics is crucial for efficiency and economic analyses of small stream design. In this study, initial design-width formulas were developed by performing regression analysis through univariate and multivariate analysis of design floods, drainage area, and bed slope considering the characteristics in western Gangwon. The proposed initial design-width formulas will be used as a basic design practice data for determining the initial design-width or for verifying the determined design-width of a small stream in this region.

Key words : Initial Design-Width, Small Stream, Design-Floods, Drainage Area, Bed Slope

요 지

소하천의 초기계획하폭 산정 공식은 지역의 수문학적, 지형적 특성에 따라 다르게 산정되어야 한다. 그러나 현재 수자원 설계실무에서 사용되고 있는 설계기준의 계획하폭 산정 공식은 최근 강우경향 및 지역고유의 소하천 특성이 고려되지 못하는 문제점이 있다. 소하천은 초기계획하폭 산정에 따른 홍수위의 변화폭이 크므로 시행착오법에 의한 반복적인 수리계산을 통해 최적의 계획하폭을 결정하여야 한다. 따라서 지역 특성을 고려한 초기계획하폭 산정은 소하천 설계실무의 효율성 측면과 치수경제성이 높은 계획하폭을 결정하기 위해 매우 중요한 과정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 강원영서 지역 특성을 고려한 초기계획하폭 산정식을 개발하였으며, 계획하폭 결정을 위해 계획홍수량, 유역면적, 하상경사에 대한 단변량 및 다변량 회귀분석을 실시하여 관계식을 제안하였다. 초기계획하폭 산정 제안식은 강원 영서지역 소하천의 초기계획하폭을 산정하거나 결정된 계획하폭을 검증할 수 있는 설계실무 기초자료로의 활용이 가능할 것이다.

핵심용어 : 초기계획하폭, 소하천, 계획홍수량, 유역면적, 하상경사

*정회원, 주식회사 청솔엔지니어링 대표이사(E-mail: byh8189@hanmail.net)

Member, CEO, Chungsol Engineering CO., LTD.

**교신저자, 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-33-730-0476, Fax: +82-33-730-0606, E-mail: kimsh@sangji.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Sangji University

1. 서 론

지역의 고유한 유출특성 및 유역형상을 가지고 있는 소하천의 특성을 고려할 때, 계획과 관리를 위한 초기계획하폭의 산정식은 지역 특성에 따라 다르게 산정되어야 한다. 그러나 현재 실무에서 적용되고 있는 설계기준 상 계획하폭 산정 공식은 최근 이상기후에 따른 국지성 호우 등 강우양상과 토지이용 고도화와 같은 지역특성의 변화를 반영하지 못하고 있는 실정이다. 특히 중·대규모 하천과는 달리 소하천의 경우에는 계획하폭 산정을 위한 매개변수의 지역별 편차가 매우 크기 때문에 지역구분 및 매개변수 조합에 따른 계획하폭 산정식에 대한 연구가 필요하다.

국외 연구 사례로는 Blench (1957)와 Kennedy (1895)가 하상 구성재료에 따라 하폭 산정식을 유도하였고, NEDECO (1959)와 Henderson (1966)은 하상재료의 입경을 고려하여 계획하폭에 대한 연구를 수행하였다. Hack (1957)은 미국의 Virginia 주와 Maryland 주의 유역조사를 통해 유역면적의 변화에 의한 유로연장공식 $L = 1.4A^{0.6}$ 과 Appalachian 산악지역을 대상으로 유역면적, 평균수심 및 유로연장과의 상관식 $L = 1.43Ad^{0.59}$ 를 제시하였고, Stall and Yang (1972)과 Basson and Van Rooyen (2001)은 수리학적 매개변수 관계를 이용하여 계획하폭을 유도할 수 있는 산정식을 제안하였다.

국내에서는 Yoon (1973)이 주요 대하천 21개 지점을 대상으로 홍수량과 유역면적의 관계식을 제시한 이후 Jung (1978), Park (1988), Lee et al. (1991), Ji (1992), Ahn and Kwon (1996), Jeon et al. (1998), Maeng (2007), Lee et al. (2016) 등이 주요 지점 및 지역의 매개변수에 따른 계획하폭 산정식을 제시하였다.

하지만 이러한 연구들이 있었음에도 불구하고 국내에서는 아직 과거 일제강점기 및 1990년에 제시된 경험공식들이 설계기준에 제시되어 있고, 이러한 경험공식을 적용하여 산정된 초기계획하폭은 강우양상의 변화와 지역적 편차로 인해 실제 결정되는 계획하폭과는 큰 차이를 보이고 있다. 또한, 적정 계획하폭을 결정하기 위하여 하도정비계획 대상 구간에 대해 시행착오법에 의한 반복적인 수리계산이 필요하기 때문에, 개수계획 수립 업무의 효율성이 저하될 뿐만 아니라 치수 경제성이 낮은 비합리적 계획하폭이 결정될 가능성이 높다.

본 연구에서는 강원영서 지역 소하천에 적용 가능한 초기 계획하폭 산정을 위한 개발식을 제안하고자 하며, 이를 위해 계획하폭 결정에 직접적인 연관성이 있는 계획홍수량, 유역면적, 하상경사와 같은 매개변수에 대해 단변량 및 다변량 비선형 회귀분석을 실시하여 관계식을 유도하였다.

2. 계획하폭 공식

2.1 하천설계기준

하천설계기준·해설(KWRA, 2009)에서는 대규모 하천

계획하폭 산정 및 중소규모 하천의 계획하폭 산정을 위한 경험공식을 제시하고 있다.

대하천에 대한 계획하폭 경험공식은 Eq. (1)과 같으며, 이는 과거 일정감정기 때 Kanayama (1932)에 의해 산정된 관계식을 그대로 인용하고 있다.

$$B = \alpha Q^{0.73} \quad (1)$$

여기서 B = 계획하폭(m), Q = 계획홍수량(m^3/s), α = 하상경사 계수이며, 하상경사에 따른 α 값은 Table 1과 같다.

Table 1. α for Bed Slope

Bed Slope (S)	1/1000	1/2000	1/3000	1/4000	1/5000
α	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45

중·소규모 하천의 계획하폭 경험공식은 Eqs. (2) ~ (3)과 같으며, 대하천 경험공식과 같이 일제 강점기에 Yamasida (1940, 1941)에 의해 제안된 관계식을 그대로 인용하고 있다.

1) 남부지방(호남·영남)

$$B = 1.698 \times \frac{A^{0.318}}{S^{0.5}} \quad (2)$$

2) 중부지방(경기·강원·충남북)

$$B = 1.303 \times \frac{A^{0.318}}{S^{0.5}} \quad (3)$$

여기서 B = 계획하폭(m), A = 유역면적(km^2), S = 하상경사를 의미한다.

2.2 소하천설계기준

소하천에 대한 계획하폭 산정식은 소하천설계기준(NEMA & NDMI, 2012)에서 Eqs. (4) ~ (5)와 같이 제시되어 있는데, 이는 소규모시설 설계지침(MOCT, 1990)에서 제시한 공식을 그대로 사용하고 있다.

1) 계획홍수량 $Q < 300 \text{ m}^3/s$ 이하

$$B = 1.235 Q^{0.6376} \quad (4)$$

2) 유역면적 $A < 10 \text{ km}^2$ 이하

$$B = 8.794 A^{0.5603} \quad (5)$$

여기서 B = 계획하폭(m), Q = 계획홍수량(m^3/s),
 A = 유역면적이다.

Table 2는 소하천 계획하폭식을 이용하여 계획홍수량 규모별 계획하폭 산정값을 나타내고 있다.

Table 2. Design-Width for Design-Floods of Small Streams

Design-Floods (m^3/s)	Design-Width (m)	Design-Floods (m^3/s)	Design-Width (m)
5	3 ~ 5	50	12 ~ 20
10	4 ~ 7	100	20 ~ 30
20	7 ~ 11	200	30 ~ 45
30	9 ~ 14	300	40 ~ 60

3. 연구 대상 소하천의 선정

태백산맥을 분수령으로 하는 강원도는 영서·영동 지역으로 구분되며, 영서 지역은 대륙성 기후로 전형적인 산지 지형의 특성을 보이고, 영동 지역은 해양성 기후 특성을 보인다. 본 연구에서는 우리나라 대부분의 소하천 특성과 유사하여 폭 넓게 비교·활용할 수 있는 산지 지형의 유역특성을 가진 영서 지역을 연구 대상 지역으로 선정하였다.

강원영서 지역 강우자료의 유의성 및 신뢰성 확보를 위해

30개년 이상 강우자료를 보유하고 있는 기상청 관할 춘천관측소, 원주관측소, 인제관측소, 홍천관측소를 지배관측소로 채택하였다. 또한, 최근 소하천정비종합계획을 수립하여 수문·지형학적 특성, 설계기준·지침을 잘 반영하고 있는 4개 시·군(화천 간동면, 원주 소초면, 양구 양구읍, 홍천 홍천읍) 소하천 중 133개소, 351개 지점들을 연구 대상 범위의 소하천으로 선정하였다.

Table 3은 연구 대상 소하천의 범위의 및 유역특성을 나타내고 있으며, 연구 대상 소하천 위치는 Fig. 1과 같다. 표에서 제시된 계획하폭은 최근에 수립된 소하천정비종합계획 상에서 최종적으로 결정된 계획하폭을 의미하고 있다.

Fig. 1. Location Map of Small Streams

Table 3. Watershed Characteristics of Small Streams for the Study

Small Streams Maintenance Comprehensive Plan		Hwacheon (Gandongmyeon)	Wonju (Sochomyeon)	Yanggu (Yanggueup)	Hongcheon (Hongcheoneup)
Establishment Year		2015	2016	2016	2016
Number of Streams		45	14	53	21
Number of Point		95	44	163	49
Length(km)		66.12	23.84	68.23	44.84
Control Observatory		Chuncheon	Wonju	Inje	Hongcheon
Start Year of Observation		1966	1971	1971	1971
Design Flood (m^3/s)	Min.	5	6	2	15
	Max.	264	199	122	136
	Mean	59	45	23	54
Area (km^2)	Min.	0.17	0.26	0.11	0.53
	Max.	14.70	12.61	8.97	13.28
	Mean	2.50	2.37	1.61	3.10
Bed Slope (m/m)	Min.	1/24.51(0.0408)	1/270.27(0.0037)	1/38.02(0.0263)	1/40.49(0.0247)
	Max.	1/2.88(0.3472)	1/4.50(0.2222)	1/1.93(0.5181)	1/4.93(0.2028)
	Mean	1/6.98(0.1433)	1/14.68(0.0681)	1/7.58(0.1319)	1/12.99(0.0770)
DesignWidth (m)	Min.	3	4	2	7
	Max.	43	27	26	33
	Mean	13	12	10	12

4. 초기계획하폭 산정식의 유도

적정 초기계획하폭은 현재의 하천이용계획 및 하천부지 등을 고려하여 계획홍수량을 충분히 유하시킬 수 있는 통수 단면적이 확보될 수 있도록 결정하여야 한다. 현 하폭의 통수단면이 충분하면 그대로 유지하고, 현 하폭이 부족할 경우에는 하폭을 넓히는 방향으로 계획하폭을 결정하게 된다. 하지만 계획홍수량과 유역면적, 하상경사와 같은 매개 변수 인자에 따라 계획하폭은 달라지게 되며, 제내지 토지이용현황, 용지취득 난이도, 기존의 제방상태 등에 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 최종적인 계획하폭을 결정할 수 있는 초기 자료로 활용할 수 있도록 강원영서 지역 소하천의 일반적 하도단면 및 특성을 보이고 있을 때를 가정하여 초기계획하폭 산정 공식을 유도하고자 하였다.

4.1 소하천 특성인자 상관성 분석

계획하폭에 대한 관계식 유도를 위해 강원영서 지역의 소하천 133개소 351개 지점에 대해 계획홍수량, 유역면적, 하상경사와 같은 인자들을 대상으로 피어슨(Pearson) 상관 계수 분석을 실시하였다.

그 결과 하상경사의 경우에는 -0.359로 계획하폭과 상대적으로 상관성이 낮은 것으로 나타났으며, 계획홍수량 및

유역면적은 각각 0.860, 0.858의 상관계수를 가지는 것으로 나타났다.

또한, 계획하폭에 대한 매개변수별 결정계수는 가장 높은 변수는 유역면적이 $R^2=0.831$, 계획홍수량은 $R^2=0.810$ 으로 비교적 높게 나타났으나, 하상경사는 $R^2=0.173$ 으로 낮게 나타났다. 그 원인으로는 대·중규모의 하천에서는 유량에 따른 유효단면적이 크고 하상경사 변화율이 작아 비교적 하상경사와 계획하폭이 일정한 상관성을 유지하나, 소하천의 경우 하상경사가 급하고 하도 내 횡단시설물(세월교, 보, 낙차공) 등으로 인한 하상급변, 구간별 유속변화에 따른 계획하폭의 편차(분산)가 매우 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

계획하폭과 주요 매개변수들에 대한 회귀분석 결과는 Fig. 2와 같고, 각 매개변수별 피어슨(Pearson) 상관계수와 회귀분석을 통한 결정계수(R^2)는 Table 4와 같다.

Table 4. Result of Correlation Analysis and Regression Analysis

Division	Pearson Correlation Coefficient	Determination Coefficient(R^2)
Design-Flood	0.860	0.810
Area	0.858	0.831
Bed Slope	-0.359	0.173

(a) Design-Flood

(b) Area

(c) Bed Slope

Fig. 2. Regression Analysis of Parameters for Design-Width

4.2 초기계획하폭 산정식의 개발

연구 대상 소하천 133개소의 351개 지점을 대상으로 계획하폭과 매개변수와의 단변량 및 다변량 회귀분석을 통해 초기계획하폭 산정식을 유도하였다.

계획홍수량, 유역면적, 하상경사와 같은 단일 매개변수로 이루어진 회귀식은 Eqs. (6) ~ (8)과 같고, 결정계수(R^2)는 각각 0.810, 0.831, 0.173으로 나타났다. 두 가지 그리고 세 가지 매개변수로 이루어진 회귀식은 Eqs. (9) ~ (12)와 같고, 이에 따른 결정계수는 계획홍수량 및 유역면적을 이용하였을 경우 0.826으로 나타났다. 이러한 결과는 계획홍수량과 하상경사의 경우인 0.794와 유역면적과 하상경사를 적용한 0.819보다 높은 것으로 분석되었다. 또한, 세 가지 매개변수를 모두 이용하여 구성된 Eq. (12)는 결정계수가 0.830으로 가장 높게 나타났다. 여기에서, 하상경사가 적용된 관계식은 하도 전체구간에 대한 평균 하상경사를 사용하여야 하며, 전절에서 언급한 바와 같이 횡단시설물(세월교, 보, 낙차공) 등으로 인한 하상급변 구간에서는 구간별 유속변화에 따른 계획하폭의 편차(분산)가 크므로 주의하여야 한다.

1) 홍수량(Q)

$$B = 2.1134 \times Q^{0.4784} \quad (6)$$

2) 유역면적(A)

$$B = 8.7006 \times A^{0.4757} \quad (7)$$

3) 하상경사(S)

$$B = 5.1746 \times S^{-0.2808} \quad (8)$$

4) 홍수량, 유역면적(Q, A)

$$B = 5.080 \times Q^{0.190} \times A^{0.285} \quad (9)$$

5) 홍수량, 하상경사(Q, S)

$$B = 2.189 \times Q^{0.478} \times S^{0.005} \quad (10)$$

6) 유역면적, 하상경사(A, S)

$$B = 10.072 \times A^{0.477} \times S^{0.051} \quad (11)$$

7) 홍수량, 유역면적, 하상경사(Q, A, S)

$$B = 5.816 \times Q^{0.176} \times A^{0.315} \times S^{0.042} \quad (12)$$

5. 초기계획하폭 산정식 검증과 제안

5.1 산정식의 검증 절차

산정식 개발에 이용되지 않은 다른 지역의 소하천을 대상으로 기존 소하천설계기준(NEMA & NDMI, 2012) 상에 제시된 중소 하천 하폭결정 경험공식 및 소하천 계획하폭 경험공식과의 비교를 통해 본 연구에서 개발된 식에 대한 검증을 실시하였다.

검증을 위한 소하천은 강원영서 지역의 중심에 위치하여 대표성을 부여할 수 있는 지역으로 원주시의 판부면 7개소, 흥업면 8개소, 귀래면 8개소, 신림면 17개소, 동지역 6개소 등 총 46개소 소하천, 110개 지점을 검증 대상으로 하였다. 소하천 현황은 Table 5와 같다.

산정식에 대한 검증은 다음과 같은 절차를 따른다.

- (1) 유역특성 자료 수집(검증 대상 소하천)
- (2) 기존 경험식을 이용한 초기계획하폭
- (3) 산정식을 이용한 초기계획하폭 산정
- (4) 산정식과 기존 경험식과의 비교·검증
- (5) 최종 산정식에 대한 제안·고찰

5.2 산정식의 검증

검증 대상 소하천의 유역특성 자료를 이용하여 본 연구에서 개발된 계산식을 적용하여 계산된 초기계획하폭과 소하천정비종합계획에서 결정된 계획하폭을 비교·검토하여 산정식의 적정성을 검증하였다.

본 연구에서 유도된 초기계획하폭 산정식 (6) ~ (12)를 적용하여 산정된 초기계획하폭과 기존의 중소하천 경험공식인 Eq. (3), 소하천 계획하폭 결정공식인 Eqs. (4) ~ (5)를 적용한 초기계획하폭은 소하천정비종합계획 상 최종적으로 결정된 계획하폭과 비교하였으며, 분석결과의 적정성 평가를

Table 5. Watershed Characteristics of Small Streams for Verification

Division	Panbumeon	Heungeopmyeon	Gwiraemyeon	Sillimyeon	Dong region
Number of Streams	7	8	8	17	6
Number of Points	12	23	21	40	14
Design Flood(m ³ /s)	14 ~ 296	9 ~ 118	30 ~ 212	11 ~ 302	26 ~ 92
Area(km ²)	0.57 ~ 15.32	0.37 ~ 7.44	1.39 ~ 13.38	0.49 ~ 18.82	1.11 ~ 5.28
Bed Slope(m/m)	0.018 ~ 0.088	0.034 ~ 0.115	0.023 ~ 0.059	0.020 ~ 0.085	0.011 ~ 0.047
Design Width(m)	6 ~ 36	8 ~ 32	5 ~ 31	6 ~ 39	7 ~ 23

위하여 RMSE, 표준화된 nRMSE(Normalized RMSE)와 상관계수(Correlation Coefficient, CC), Nash-Sutcliffe 효율계수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE) 등을 적용하였다.

표준화된 nRMSE는 0이 가장 좋고 커질수록 결정된 계획하폭 결과값과 산정된 초기계획하폭 산정값의 차이가 증가함을 의미하며, Eq. (13)과 같다(Yu et al., 2016).

$$nRMSE = \frac{SE}{\bar{y}} \quad (13)$$

Nash-Sutcliffe 효율계수(NSE)는 Eq. (14)와 같이 나타내며, 무차원 값으로 $-\infty \sim 1.0$ 사이의 범위를 갖고 1일 경우 가장 좋은 값을 의미한다(Wilcox et al., 1990; Legates and McCabe, 1999).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (14)$$

Table 6. Error Analysis for the Suggested Equations

Equations	RMSE	nRMSE	CC	NSE
Eqn. (3): A, S	6.99	0.55	0.35	-1.59
Eqn. (4): Q	3.09	0.24	0.88	0.49
Eqn. (5): A	2.91	0.23	0.87	0.55
Eqn. (6): Q	2.05	0.16	0.88	0.78
Eqn. (7): A	2.17	0.17	0.87	0.75
Eqn. (8): S	5.26	0.41	0.08	-0.46
Eqn. (9): Q, A	2.09	0.16	0.88	0.77
Eqn. (10): Q, S	2.19	0.17	0.87	0.75
Eqn. (11): A, S	2.15	0.17	0.87	0.76
Eqn. (12): Q, A, S	2.04	0.16	0.89	0.78

Table 6에는 각 방법들에 대한 오차분석 결과를 나타내고 있는데, 상관계수(CC)는 중소하천 공식인 Eq. (3)과 하상경사 Eq. (8)을 적용한 결과값이 비교적 낮은 것으로 나타났으며, 그 외 공식들은 0.87 ~ 0.89 범위의 값으로 나타났다. NSE와 nRMSE 결과에서는 중소하천 공식인 Eq. (3)과 계획홍수량 Eq. (4), 유역면적을 이용한 Eq. (5)를 사용한 소하천설계기준 공식의 경우 본 연구 산정식 결과보다 NSE는 작게, nRMSE는 다소 큰 값으로 나타났다. 본 연구 산정식의 결과를 살펴보면, 단일변수 회귀식인 Eqs. (6)과 (7)의 결과와 다변수 회귀식인 Eqs. (9) ~ (12)에 대한 NSE는 0.75 ~ 0.78의 계산값을 가지는 것으로 나타났으며, nRMSE는 0.16 ~ 0.17인 것으로 나타났다. 하지만, 하상경사를 이용한 Eq. (8)의 결과는 다른 식에 비해 좋지 않은 것으로

나타났다.

결국, 본 연구 산정식 중에는 NSE와 nRMSE에 대해서는 계획홍수량을 사용한 Eq. (6)과 세 가지 변수를 모두 적용한 Eq. (12)의 초기계획하폭 산정 결과가 결정된 계획하폭에 가장 작은 오차를 보이는 것으로 분석되었다. 상관계수(CC) 또한 변수 모두를 적용한 Eq. (12)을 이용한 경우가 결정된 계획하폭과 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 공식과 기존 계획하폭 경험공식을 이용한 초기계획하폭을 소하천정비종합계획에서 결정된 계획하폭에 대한 도해적 오차범위 검토를 위해 1:1 대응도에 Fig 3과 같이 나타내었다. 결정 계획하폭과 본 연구 산정식을 통한 초기계획하폭과의 이격도를 살펴보기 위해 대청선을 중심으로 오차범위 2.5 m 선과 오차범위 5.0 m 선을 도시하였다.

(a) Eqn. for Medium and Small Streams (Eqn. 3)

(b) Equation for Small Streams with Design Flood (Eqn. 4)

(c) Equation for Small Streams with Area (Eqn. 5)

(f) Bed Slope (Eqn. 8)

(d) Design Flood (Eqn. 6)

(g) Design Flood and Area (Eqn. 9)

(e) Area (Eqn. 7)

(h) Design Flood and Bed Slope (Eqn. 10)

(i) Area and Bed Slope (Eqn. 11)

(j) Design Flood, Area and Bed Slope (Eqn. 12)

Fig. 3. Comparison Results of Design-width in Developed Formulas and Master Plan

그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 유도된 산정식 중에서는 하상경사를 이용한 Eq. (8)이 5.0 m 오차범위를 많이 벗어나고 있었으며, 기존 중소하천 하폭결정 경험공식 및 소하천 계획하폭 결정공식 (3) ~ (5)에서의 결과 또한 5.0 m 이상의 차이가 발생하였으나, Eq. (8)을 제외한 대부분의 본 연구 산정식에서는 양호한 결과를 나타내었다.

5.3 산정식의 제안

본 연구에서 초기계획하폭 산정을 위해 유도된 7개의 산정식에 대한 오차 분석을 수행한 결과 계획홍수량, 유역면적, 하상경사를 모두 사용한 Eq. (12)가 회귀식의 유도에 사용된 자료에 대한 결정계수(R^2)와 여러 가지 오차분석에서 가장 우수한 식으로 나타났다.

그러나 하상경사가 포함된 제안식은 앞에서 기술한 바와 같이 하상급변 구간에서의 오차범위 가변성이 큰 문제점이 있다. 또한, 소하천 설계실무에 있어서 간단하게 적용하여 적정성을 검토할 수 있는 간편식이 유용하므로, 기 산정된 홍수량이 있는 경우 적용할 수 있는 계획홍수량 관계식인 Eq. (15)와 계획홍수량을 알 수 없을 때 적용할 수 있는 유역면적 관계식인 Eq. (16)을 초기계획하폭 산정공식으로 제안하고자 한다.

1) 제안식 1

$$B = 2.1134 \times Q^{0.4784} \quad (15)$$

2) 제안식 2

$$B = 8.7006 \times A^{0.4757} \quad (16)$$

본 연구에서의 제안식은 대부분 유역면적 10 km² 이하, 계획홍수량 300 m³/s 이하 규모의 소하천 유역 특성 자료를 수집하여 관계식을 유도·검증하였으므로, 기존 소하천설계기준(NEMA & NDMI, 2012)의 경험공식과 같이 유역면적 10 km² 이하이고, 계획홍수량 300 m³/s 이하의 소하천에 적용될 수 있다.

중부지방 중·소규모 하천의 계획하폭 경험공식(Eq. (3))과 소하천설계기준(NEMA & NDMI, 2012)에서의 경험공식(Eqs. (4) ~ (5))에 의한 계획하폭과 본 연구의 제안식(Eqs. (6) ~ (7))을 이용한 초기계획하폭 산정결과를 소하천정비종합계획에서 결정된 계획하폭과 비교하기 위해 Fig. 4와 같이 도시하였다.

Fig. 4. Comparison of Initial Design-Width Using the Equations of this Study and Design Standards

그림에서 보는 바와 같이 여러 가지 초기계획하폭 가운데 결정 계획하폭에 가장 유사한 결과를 나타내는 것은 본 연구에서 제시한 Eqs. (6)과 (7)인 것을 확인할 수 있으며,

소하천설계기준에서 제시된 기존 중소하천 경험공식이나 소하천 경험공식의 경우에는 비교적 과대 산정되고 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 기존 경험공식에 의해 과대 산정된 초기계획하폭 산정 결과 값이 실제 소하천 하도단면에 미치는 영향을 검토하기 위해 원주시의 소하천 중 신림면에 위치한 예찬천과 귀래면에 위치한 탑천을 임의로 선정하여 횡단면을 비교·분석하였다.

예찬천의 계획홍수량은 112 m³/s, 유역면적은 7.18 km², 현 하폭은 11 ~ 23 m이며, 탑천 계획홍수량은 65 m³/s, 유역면적은 3.76 km², 현 하폭은 12 ~ 16 m이다.

계획하폭에 대한 제안식의 적정성 검토를 위해 HEC-RAS 모형(HEC, 2016a, 2016b)을 이용하여 수리분석을 실시하였으며, ① 중소하천(중부지방)(Medium and Small Stream Formula, MSSF)의 초기계획하폭, ② 소하천 결정공식(Q)(Small Stream Formula, SSF)의 초기계획하폭, ③ 본 연구 제안식(Q)(This study)을 이용하여 산정된 초기계획하폭을 적용한 단면을 구성하여 각 초기계획하폭별 홍수위 변화를 비교·검토하였다.

Fig. 5는 예찬천과 탑천에서 각 공식별 초기계획하폭 단면 형태에 따른 수리분석 결과를 나타내고 있다.

(a) Section No.7 in Yechan Stream

(b) Section No.4 in Tap Stream

(c) Section No.22 in Tap Stream

Fig. 5. Comparison of Design Cross Section for the Equation

그림에서 보는 바와 같이 기존 소하천설계기준(NEMA & NDMI, 2012)의 중소하천 경험공식을 통해 산정된 초기계획하폭보다 본 연구 제안식에서 산정된 하폭이 5 ~ 8 m 작게 산정되었고, 소하천 경험공식에 비해서는 2 ~ 5 m 정도 초기계획하폭이 작게 산정되어 공사비 대비 치수경제성, 토지이용 효율성에 극대화 효과가 있을 것으로 분석되었다. 또한, 상·하류 간 연계성을 고려하여 수리분석을 실시한 결과, 본 연구 제안식을 통해 산정된 홍수위 대비 중소하천 경험공식의 경우 0.42 ~ 1.16 m 낮은 것으로 분석되었고, 소하천 경험공식의 경우 0.08 ~ 0.47 m 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 홍수기 하도 내 치수적 안정성은 높일 수 있으나, 홍수기와 갈수기의 유량 변화가 매우 크므로 갈수기 시 환경생태 유량 확보가 어려워 수생물 서식처 감소 등의 환경적 측면의 악영향과 하도정비 시 사유토지 확보를 위한 보상비 증가 등의 문제점이 발생할 소지가 높을 것으로 예측된다.

따라서, 본 연구 제안식을 이용한 하도계획은 과도한 하폭 확장 계획을 사전에 방지할 수 있어, 환경 생태유량 분산의 최소화도 치수경제성 측면과 더불어 환경적 측면에서도 유리한 합리적 통수단면이 계획될 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 계획하폭 결정 시에는 제내지 토지이용 계획 및 현황, 하도계획의 여러 가지 방안, 자연하천에서의 하도형성 유량 등 복합적인 조건을 고려한 수리학적 분석을 통하여 결정되며, 최적의 계획하폭 하도단면 형태를 결정하기까지는 시행착오법에 의한 반복적인 수리계산이 필요하다. 따라서 기존 소하천설계기준(NEMA & NDMI, 2012)에 언급되었던 경험공식과 본 연구에서 제안하는 초기계획하폭 산정식은 결정(확정)된 계획하폭을 의미하는 것은 아니며, 계획하폭을 결정하기 위한 과정에서의 실무 효율성 증가 및 계획하폭 적정성 검토를 위한 기초자료로 활용하는데 의의가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 강원도 영서 지역의 소하천 특성을 고려한 초기계획하폭 관계식을 유도하기 위하여 133개 소하천 351개 지점을 대상으로 계획하폭과 상관성이 높은 계획홍수량, 유역면적, 하상경사 등을 매개변수로 하여 단변량 및 다변량 회귀분석을 실시하였다. 초기계획하폭 제안식에 대한 적용성은 현재 실무에서 활용되고 있는 기존 설계기준 경험식과 비교·검토하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 계획하폭에 대한 계획홍수량, 유역면적, 하상경사와 같은 인자에 대해 상관분석(Pearson)을 실시한 결과 하상경사는 -0.359로 상관성이 비교적 낮은 것으로 나타났으며, 계획홍수량과 유역면적에 대한 상관계수는 각각 0.860, 0.858로 분석되어 상관성이 높은 것으로

로 나타났다.

- (2) 소하천 설계기준(NEMA & NDMI, 2012)에 제시된 소하천 계획하폭 결정공식, 중소하천 하폭결정 경험공식 및 본 연구에서 제시된 7개의 관계식에 대해 초기계획하폭을 산정하고, 소하천정비종합계획 상 최종적으로 결정된 계획하폭과의 오차분석을 위해 RMSE, nRMSE, 상관계수(CC), Nash-Sutcliffe 효율계수(NSC) 등을 분석하였다. 그 결과 본 연구에서 제시된 관계식들의 오차 차이는 근소하였으나, 기존 경험식보다는 양호한 것으로 나타났다.
- (3) 여러 제안식 중 소하천 설계실무에 간단하게 적용하여 유용하게 활용할 수 있는 계획홍수량에 따른 회귀식 $B = 2.1134 \times Q^{0.4784}$ 과 홍수량이 산정되지 않은 소하천에 활용할 수 있는 유역면적을 이용한 회귀식 $B = 8.7006 \times A^{0.4757}$ 을 최종 제안식으로 선정하였다.
- (4) 본 연구에서의 제안식은 기존 소하천설계기준(NEMA & NDMI, 2012)의 경험공식과 같이 계획홍수량 300 m³/s 이하, 유역면적 10 km² 이하의 소하천 범위에서 초기계획하폭 산정에 활용될 경우 최적화된 계획하폭을 제시함에 따라 설계실무에서 유용하게 사용될 것으로 기대한다.

본 연구에서 도출된 제안식은 최근 강우경향을 바탕으로 개발된 식으로 향후 기후변화에 따른 강우-유출 관계를 고려하여 초기계획하폭 산정식에 관해 지속적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술 개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-05].

References

- Ahn, S.J., and Kwon, B.H. (1996). Determination of design-width for medium rivers of central area in Korea. *Water for Future*, Korea Water Resources Association, Vol. 29, No. 4, pp. 139-147.
- Basson, M.S., and Van Rooyen, J.A. (2001). Practical application of probabilistic approaches to the management of water resource systems. *Journal of Hydrology*, Vol. 241, No. 1-2, pp. 53-61.
- Blench, T. (1957). *Regime behaviour of canals and rivers* (pp. 32-33). London: Butterworths.
- Hack, J.T. (1957). *Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland*. Geological Survey Professional Paper 294-B, U.S. Government Printing Office, Washington.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel hydraulics*. New York: The Macmillan Co.
- HEC (Hydrologic Engineering Center). (2016a). *HEC-RAS river analysis system: Hydraulic reference manual Version 5.0*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- HEC. (2016b). *HEC-RAS river analysis system: User's manual Version 5.0*. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- Jeon, S.J., Ahn, T.J., and Park, J.E. (1998). Determination of design width for medium streams in the Han River basin, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No. 6, pp. 675-684.
- Ji, J.H. (1992). *Characteristics of hydraulic geometry in Korean Rivers*. Ph.D. dissertation, Konkuk University.
- Jung, C.S. (1978). *Study on the determination of the planned width of small rivers*. Master's thesis, Dong-a University.
- Kanayama, N. (1932). For estimation of design flood level. *The Joseon Civil Research Society*, Vol. 4, No. 5, pp. 71-104.
- Kennedy, R.G. (1895). The prevention of silting in irrigation canals. *Min. Proc., Inst. Civil Engr.*, Vol. 119, pp. 281-290.
- KWRA (Korea Water Resources Association). (2009). *River design standard*.
- Lee, D.R., Lee, J.H., Choi, S.U., and Jeong, S.M. (1991). A study on hydrologic and geographic-characteristics and design- width-determination of small rivers in Korea. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 67-73.
- Lee, T.S., Park, J.S., and Jeong, C.S. (2016). Assessing the adequacy of the existing formula for the design channel width of local small streams: A case study on the Uiryeong province. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 269-276.
- Legates, D.R., and McCabe, G.J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, Vol. 35, No.1, pp. 233-241.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation). (1990). *Report of design guidelines for small scale facilities*.
- Maeng, B.J. (2007). *Determination of design widths with hydraulic geometry characteristics in medium and small rivers*. Ph.D. dissertation, Dankook University.
- NEMA (National Emergency Management Agency) & NDMI

- (National Disaster Management Institute). (2012). *Small stream design code*.
- NEDECO. (1959). *River studies and recommendations on improvement of Niger and Benue*. Amsterdam, Nederland: North-Holland Publishing Co.
- Park, J.H. (1988). *Determination of design channel width in the local rivers of central area in Korea*. Master thesis, Konkuk University.
- Stall, J.B., and Yang, C.T. (1972). Hydraulic geometry and low streamflow regime. *University of Illinois Water Resources Center Research Report*, No. 54.
- Wilcox, B.P., Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Ross Wight, J. (1990). Predicting runoff from rangeland catchments: A comparison of two models. *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2401-2410.
- Yamasida, M. (1940). About design-width for medium-scale river. *The Joseon Civil Research Society*, Vol. 12, No. 5, pp. 43-47.
- Yamasida, M. (1941). About design-width for medium-scale river. *The Joseon Civil Research Society*, Vol. 13, No. 6, pp. 10-13.
- Yoon, T.H. (1973). Regionalized flood frequency analysis. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 3, pp. 43-51.
- Yu, M.S., Lee, Y.M., and Yi, J.E. (2016). Flood inflow forecasting on Hantan River reservoir by using forecasted rainfall. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 4, pp. 327-333.

Received ■ April 17, 2018

Revised ■ April 20, 2018

Accepted ■ September 28, 2018