



Estimation of ecological flow rate for *Zacco platypus* based on habitat suitability index considering probability density function

Jang, Kyeung Ho^a · Park, Young Ki^{a*} · Kang, Jae Il^a · Kim, Min Hwan^b

^aDepartment of Civil Engineering, Chonbuk National University

^bDepartment of Civil and Environmental Engineering, Honam University

Paper number: 17-081

Received: 28 September 2017; Revised: 12 December 2017; Accepted: 12 December 2017

Abstract

In this study, the ecological flow rate of the *Zacco platypus* habitat was simulated based on the Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) in reaches of urban and natural stream using the habitat suitability index (HSI) of the probability density function (PDF). To apply this method, PHABSIM model was used in this study. However, in this study, the HSI of the probability density function was developed by adjusting the parameters of the PDF based on Kang (2010) HSI. As a result, the normal distribution is closest to the ecological flow rate of the Kang (2010) in the urban stream. However, the two-parameter log-pearson distribution tended to be the closest in the natural stream. The ecological flow rate was simulated by the HSI and the reach of stream with the PDF. Based on the comparison of simulation results, we propose an ecological flow rate estimation method using probabilistic method.

Keywords: Probability density function (PDF), Habitat suitability index (HSI), Ecological flow rate, PHABSIM model

확률밀도함수를 고려한 서식처 적합도 지수에 의한 피라미 생태유량 산정

장경호^a · 박영기^{a*} · 강재일^a · 김민환^b

^a전북대학교 토목공학과, ^b호남대학교 토목환경공학과

요 지

본 연구에서는 확률밀도함수의 서식처 적합도 지수를 사용하여 도심하천구간과 자연하천구간에서 유량점증방법론(Instream flow Incremental Methodology, IFIM)을 토대로 피라미 서식처의 생태유량을 모의하였다. 이와 같은 방법을 적용하기 위하여 본 연구에서는 PHABSIM 모형을 사용하였다. 본 연구에서는 서식처 적합도 지수(Kang, 2010)를 기초로 확률밀도함수의 매개변수를 조정하여 확률밀도함수의 서식처 적합도 지수를 개발하여 생태유량을 분석하였다. 그 결과, 도심하천구간에서는 정규분포가 자연하천구간에서는 2변수 log-pearson 분포가 Kang (2010)의 생태유량에 가장 근접하는 경향을 보였다. 확률밀도함수에 의한 서식처 적합도 지수와 하천구간별로 생태유량을 모의하여 확률론적 방법을 적용한 생태유량 산정기법을 제안하였다.

핵심용어: 확률밀도함수, 서식처 적합도 지수, 생태유량, PHABSIM 모형

1. 서 론

물은 우리 인류와 지구상의 생물이 공존하는데 있어 없어서는 안 될 가장 중요한 요소들 중 하나다. 물은 그 동안 생활·

공업·농업·발전용수로 다양하게 이용되어 왔고, 하천의 자원 활용의 공간으로 큰 역할을 담당하고 있다. 하천은 생태계의 고유 공간뿐만 아니라 인간의 정서함양 공간으로 인식되어 개발의 영향으로 불균형한 수생태계 서식환경을 조성했다는 것은 부정할 수 없는 사실이다. 특히 도시를 관통하는 하천은 공원이나 각종 시설물 등이 배치되어 있고 주변은 교통, 주거 시설들로 인하여 도심을 가로지르는 하천은 대부분 직강화

*Corresponding Author. Tel: +82-63-270-4790
E-mail: parkyk@jbnu.ac.kr (Y. K. Park)

되어 있다. 이로 인한 생태계에서 서식하는 동·식물들의 종 다양성의 감소가 초래되었다(Kim, 1999).

최근 들어서 하천의 생태계 서식공간을 가능한 한 자연 상태로 보전하고자 하는 노력이 점차 늘어나고 있다. 특히 하천 생태계의 보존 지표로서 다른 대상에 비해 비교적 인간이 접하기 쉬운 어류의 서식처 보전을 위한 적정 흐름 영역을 확보 즉, 생태계를 고려한 생태유량 산정에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다.

이런 하천 현실에서 변화된 수생 생태계를 예측하기 위해 주로 유량증증방법론(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM) 개념을 도입한 어류에 대한 물리 서식처 모의를 적용하고 있다. 어류는 생태계의 먹이사슬에서 높은 단계에 위치하는 생물로 인간에 미치는 영향을 검토할 수 있다.

미국은 1980년대부터 USGS (United States Geological Survey)에서 IFIM에 근거한 1차원 물리 서식처 모의 시스템 (Physical Habitat Simulation System, PHABSIM)를 개발하였다. 어류 서식처 공간에서 수리조건에 적합한 가중가용면적(Weighted Usable Area, WUA) - 유량관계를 구해 하천 서식처의 적합도를 평가하고 있다. 어류를 포함한 약 160여 동물에 대한 서식처 적합도 지수를 산정하여 생태유량을 결정하고 있다(Jung, 2012).

국내의 경우, 서식처 적합도 지수 관련 연구는 1995년 K-water가 최초로 하천유지유량에 하천 생태계 개념을 도입하여 담수성 어류 서식처 제공 및 이동에 필요한 유량을 산정하였다. Kim (1999)은 유량증증방법론인 물리적 서식처 모의 시스템에서 한계 여울 구간을 고려하여 어류 서식 환경을 평가하고, 성장단계별(life stage) 서식 환경요구에 따른 최적 유량 산정 과정을 수립하였다.

그 이후, Sung *et al.* (2005)은 낙동강 유역의 주요지류 하천에 PHABSIM을 적용하여 어류서식 환경을 고려한 생태학적 추천유량을 산정하였다. 또한 부족한 현장조사로 인하여 발생하는 서식처 적합도 지수에 대한 신뢰성 개선 방안으로 낙동강 유역의 어류 현장조사를 실시하여 적합도 지수를 산정하였다. Kang (2010)은 하천에서의 어류 서식처 및 생태유량을 산정하기 위하여 다양한 어종을 고려하고 정확한 서식처 해석 및 생태유량 산정을 위해서는 지속적인 모니터링과 더불어 서식처 적합도 지수 구축의 필요성을 논했다. 그는 K-water가 4년간 한강수계 및 금강수계에서 모니터링 한 어종 개체수를 사용하여 서식처 적합도 지수 산정에 관한 연구를 수행하였다. 최근에는 Kim (2012)은 국내의 서식처 적합도 지수 산정에 있어 전문가의 의견과 판단이 없이도 객관성을 가질 수 있는 좀 더 표준화된 방법론을 제시하기 위하여 장기간의 현장

모니터링 자료를 이용하여 체계학적 방법을 적용한 서식처 적합도 지수를 산정하였다. Jung (2012)은 댐 하류 하천에서 유량 변화에 따른 어류 서식처의 변화를 분석하고 서식처 선호도 곡선을 이용한 서식처 적합도 지수로 서식처 분석을 수행하였다. 또한 국내에 서식하고 있는 주요 담수어종을 대상으로 물리적 및 이화학적 서식특성을 DB화 하였다.

이와 같이 서식처 적합도 지수는 하천의 기능을 평가하기 위한 중요한 요소 중 하나이다. 하지만 국내의 경우 장기간 현장조사를 바탕으로 구축된 어류별 적합도 지수에 대한 DB가 현저하게 부족한 실정이다. 따라서, 기존 서식처 적합도 지수는 유속, 수심별로 개체수 분포를 파악하여 가중값을 부여하는 방법으로 적합도 지수를 산정한다.

본 연구에서는 대상하천인 남대천의 도심하천구간과 자연하천구간의 유속별, 수심별 피라미의 개체수 파악이 어려워 금강수계에 기구축되어 있는 Kang (2010) 서식처 적합도 지수를 기준으로 확률밀도함수의 평균(average), 표준편차(standard deviation), 축척변수(scale parameter), 그리고 모양변수(shape parameter)등을 사용하여 구성된 확률밀도함수 서식처 적합도 지수를 구축하였다. 따라서, 확률밀도함수를 이용한 서식처 적합도 지수를 남대천 도심하천구간과 자연하천구간을 대상으로 물리적 서식처 모델인 PHABSIM을 사용하여 피라미의 서식처 생태유량을 산정하였다.

본 연구의 목적은 서식처 적합도 지수에 객관성을 부여하고, 좀 더 일반적인 방법론을 제시하기 위하여 전문가의 주관적인 판단이 배제된 확률밀도함수를 이용한 서식처 적합도 지수를 사용하고, 이를 모델에 적용시켜 생태유량을 산정하여 그 방법에 대한 적용성을 평가하고자 한다.

2. PHABSIM 모형

담수성 어류를 포함한 하천 동·식물은 유량의 영향을 많이 받고 있다. 하천 생태계가 서식하는 기반은 물 자체와 유량에 따라 형성되는 하상 및 물가 흐름 영역과 하천에 서식하는 동·식물간의 관계, 즉 생태계 구조와 상호작용 두 가지로 구분되어지며 그 중 하천개발 및 유지관리 측면에서 중요한 관심사는 유량 측면에서의 수심, 유속조건, 수온, 오염도 등을 포함한 수질조건, 먹이섭취, 은신처 등의 확보를 위해 필요한 하상재료 분포와 같은 물고기 서식처 환경에 기반을 이루고 있으며 생태계를 보호하기 위해서는 하천에 최소한의 유량을 제공하여 인간과 더불어 생태도 생존하는 개념이다.

1차원 물리적 서식처 모의 모형인 PHABSIM (Physical

Habitat Simulation System)은 IFIM의 실행과정에서 물리적 서식처 모의를 실시하는 주요 성분으로서 수중생물(어류)이 수리학적 환경의 변동에 따라 즉각적인 반응을 보인다는 점을 주된 가정으로 하고 있다. 개별 유기체는 각각의 유기체 별로 최상의 선호유지 조건을 선택하는 경향이 있어서 유지조건이 나빠짐에 따라 서식처 선호도가 감소하고 이에 따라 이용할 수 있는 서식처가 점차 좁아진다고 하는 전제를 배경으로 하고 있다.

어류가 이용하기에 적합한 물리적 서식처의 공간적 범위는 유량에 따라 변화되는데 PHABSIM 모형에서는 유량에 따른 수위와 유속의 변동을 수리학적으로 모형화한다. 그리고, 서식처 적합도 곡선과 이 관계를 결합함으로써 서식처 조건의 조합에 하도 평면적을 곱하여 얻어지는 가중가용면적(Weight Usable Area, WUA) - 유량 간의 관계를 얻는다(Roh, 2011).

PHABSIM 모형의 전체적인 계산과정을 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1(a)는 모델 수행을 위한 하천단면자료, 위상자료 및 적합도 곡선 자료를 수집하여 모델의 입력자료를 구성하는 단계, Fig. 1(b)는 구축된 모델의 수리 모의 과정으로 수위, 유속의 검정과 모의 과정, Figs. 1(c) and 1(d)는 이렇게 구축된 자료를 이용하여 서식처 모의를 실행하는 단계, 이 과정을 통해 서식처 - 흐름간의 관계를 산정하고 최종적인 서식처 모의 과정이 완료된다. 각각의 방법으로 산정된 서식처 적합도 지수를 바탕으로 곱셈법, 기하 평균법, 최소치법, 가중치법 등을 통해 복합 서식처 적합도 지수(combined habitat suitability)를 산정한다(Bovee, 1982). 또한 수리모의에 의해 획득한 수리량 자료를 기반으로 서식처 모의가 이루어지며 각각의 결과는 각 셀의 면적에 대한 복합 서식처 적합도 지수를 물리서식처의 양적 결과인 가중가용면적(WUA)으로 표현하게 된다.

$$WUA = \sum_{i=1}^n A_i \times SI_i = f(Q) \tag{1}$$

여기서, SI_i 는 i 번째 셀의 서식처 적합도 지수, A_i 는 분할된 i 번째의 셀의 면적, Q 는 유량이다.

3. 이론적 배경

3.1 서식처 적합도 지수

HSI (Habitat Suitability Index)는 어떤 생명체가 해당 서식처에서 살아갈 수 있는 능력을 나타낼 수 있는 하나의 수치적인 지표이다. 이에 따른 결과는 서식처 특성에 따른 상호 작용과 각 서식처가 주어진 종과 어떻게 관련되는지를 나타낸다. 또한 종 서식처 관계에 대한 의사 결정과 이해 증진을 위한 기반으로 작용할 것이다. 서식처 적합도 지수는 포괄적인 문헌 검토, 목표의 정의 및 지리적 정의 등이 필요하며 포괄적인 자료와 계절별 서식처, 유량, 하상재료 등으로 정의된다.

일반적인 서식처 적합도 지수 작성 방법은 크게 3가지 범주, 즉 전문가의 판단 또는 현장 조사 분석, 그리고 서식 환경의 이용도를 고려하여 편의성을 제거하는 방법이 통용되고 있다 (USGS, 2001).

Fig. 2는 주어진 종에 대한 서식지 변수의 적합성을 설명해 줄 수 있는 하나의 곡선이며 현재까지 사용되고 있는 곡선의 종류는 3가지이며 (a) 이분법, (b) 단변량, (c) 다변량 곡선의 형태로 구성되어 있다.

(a) 이분법은 대상 어종에 대한 물리적 변수(수심, 유속, 하상재료)에 대한 최적의 구간의 적합도가 1, 부적합인 나머지

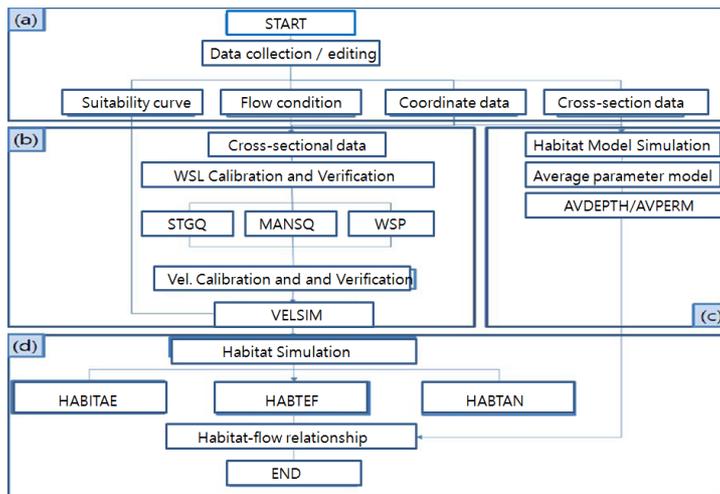


Fig. 1. The calculation procedure of the PHABSIM model (Roh, 2011)

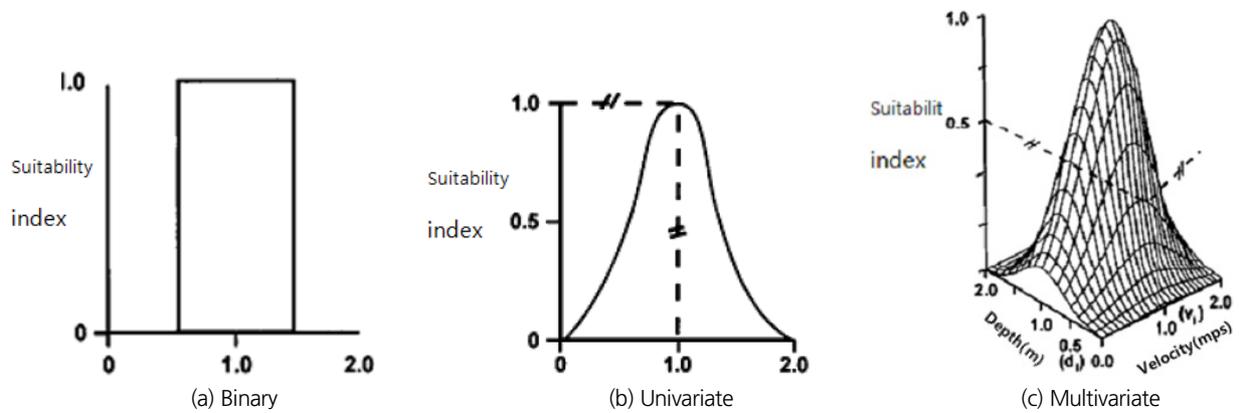


Fig. 2. The form of habitat suitability index (Kang, 2010)

구간을 0인 경우에만 형성되는 지수이다. 이러한 이분법은 현장자료가 거의 없고 문헌에만 의존할 경우 전문가의 판단에 의해 산정된다. (b)의 단변량 곡선은 비교적 풍부한 현장 조사를 바탕으로 각 물리적 변수별 서식처 범위 전체 내에서 해당 어종별 출현빈도를 통하여 가장 많이 출현하는 범위를 최적의 구간인 1로 놓고 나머지는 출현 빈도가 가장 적은 구간까지 연장하는 방식이다. 위와 같은 두 방법은 단일 물리적 변수에 대한 적합도를 제시하는 것으로 단변량 적합도지수라 한다. 반면, (c) 다변량 곡선은 두 물리적 변수를 동시에 제시하는 것으로 다변량 적합도지수라 한다. 이는 단일변량의 문제점을 극복하기 위해 제시된 방법이나 충분한 자료조사, 기존문헌 그리고 전문가의 판단 등이 필요하다.

4. 연구 방법

4.1 대상어종의 자료

본 연구에서 사용된 자료는 금강수계 지점(Fig. 3)에서 2007~2010년 4년간 K-water가 출현빈도를 모니터링 한 것이다. Fig. 4는 금강 수계에 대한 모니터링 현장조사 위치도이다. 금강수계 자료는 어류생태 모니터링 가이드라인(안)에 준하여 구축한 DB를 바탕으로 적합도 지수 곡선 산출방법 중 하나인 Instream flow aquatic systems group를 이용하여 Fig. 4와 같이 산출하였다. 이 방법은 수심 및 유속 범위별 출현 개체수 분포를 작성한 후, 전체 개체수에 대한 50%, 75%, 90%, 95% 범위에 대하여 각각 적합도지수를 1.0, 0.5, 0.1, 0.05의 값을 부여하는 방식이다.

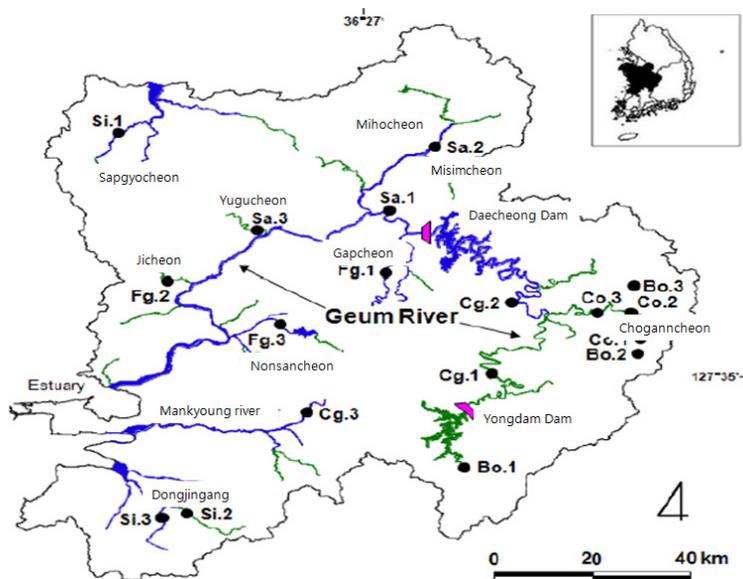


Fig. 3. The location of monitoring in Geum-river

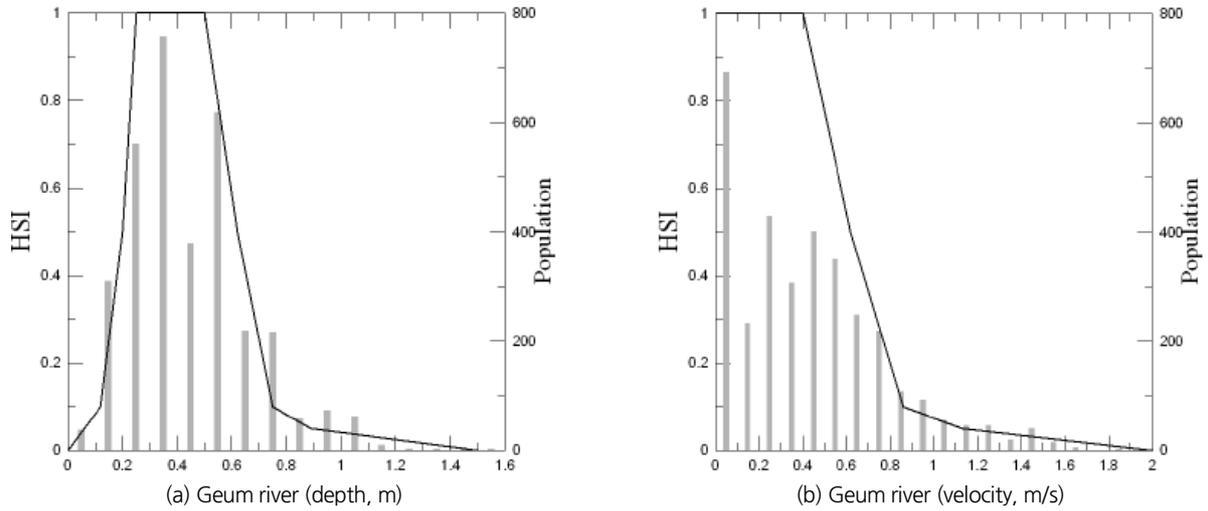


Fig. 4. The habitat suitable index of *Zacco platypus* (Kang, 2010)

Table 1은 금강수계에서 피라미의 각 수심과 유속 범위에 대한 개체수의 분포를 나타낸다. 수심과 유속은 PHABSIM에서 서식처 적합도 지수를 적용하기 쉽도록 각각 0.1 m, 0.1 m/s의 간격으로 나누었다(Kim, 2012).

Table 1. The distribution of *Zacco platypus* species in Geum-river (Kang, 2010)

Depth (m)	Population	Velocity (m/s)	Population
0-0.1	0	0-0.1	315
0.1-0.2	84	0.1-0.2	128
0.2-0.3	364	0.2-0.3	221
0.3-0.4	460	0.3-0.4	220
0.4-0.5	329	0.4-0.5	274
0.5-0.6	327	0.5-0.6	202
0.6-0.7	184	0.6-0.7	198
0.7-0.8	84	0.7-0.8	122
0.8-0.9	47	0.8-0.9	93
0.9-1.0	36	0.9-1.0	50
1.0-1.1	12	1.0-1.1	15
1.1-1.2	5	1.1-1.2	29
1.2-1.3	0	1.2-1.3	33
1.3-1.4	0	1.3-1.4	9
		1.4-1.5	8
		1.5-1.6	3
		1.6-1.7	8
		1.7-1.8	1
		1.8-1.9	2
		1.9-2.0	1
Total	1932	Total	1932

Fig. 4는 금강수계에서 수심과 유속에 대하여 Table 1의 자료를 토대로 Kang (2010)이 서식처 적합도 지수를 산정한 것이다.

서식처 적합도 지수는 서식처 모의 모형을 모의하는데 중요한 요소이다. 생태학적 생태유량의 산정을 위해서는 어류에 대한 신뢰성 있는 자료 수집을 통하여 실제 어류 서식 환경을 반영할 수 있는 서식처 적합도 지수를 마련하여 적용하는 것이 가장 중요하다. 그러나 대상하천 남대천에는 어종의 개체수의 모니터링 자료가 없어서 Kang (2010) 서식처 적합도 지수를 기준으로 5가지의 확률밀도함수를 최대한 근접시키는 방법을 적용시켜 서식처 적합도 지수를 만들었다. Figs. 5 and 6은 유속과 수심에 대하여 구축한 확률분포함수 HSI이다.

Fig. 5는 금강수계의 서식처 적합도 지수에 대한 5가지 확률밀도함수를 최대한 Kang (2010) HSI에 근접시킨 유속에 대한 적합도 지수이다. 금강수계의 경우 최적구간은 0~0.4 m/s 이며 0.9 m/s 까지 급격한 감소를 보인다. 가장 비슷한 분포는 정규분포이며 최적구간은 0~0.3 m/s 이고, 그 외의 분포는 0~0.2 m/s의 범위에서 최적구간이 형성되어 있다.

Fig. 6은 수심에 대한 적합도 지수이다. 금강수계의 최적구간은 0.3 m이고 그 외의 분포는 0.1~0.2 m로 형성되어 있다. Log-Pearson 분포의 적합도 지수 값이 가장 작고 Gamma 분포와 Gumbel 분포가 수심 1.4 m까지 다른 분포에 비하여 감소 경사가 완만하게 분포되어 있다.

Table 2는 확률밀도함수를 Kang (2010) 서식처 적합도 지수에 최대한 근접시킬 때 결정된 평균과 표준편차 값이고 Scale parameter와 shape parameter는 축척과 형상 매개변수이다.

적합도 지수 산정에 있어서 개체수의 부재로 인하여 부득이하게 금강수계 자료인 Kang (2010) HSI를 기준으로 확률밀도함수를 적용하여 확률밀도함수 HSI를 구축했다. Kang (2010)은 금강수계 어종 피라미를 K-water가 모니터링 한 개

체수를 근거로 유속, 수심에 대하여 서식처 적합도 지수를 구축했다. Kang (2010) HSI를 기준으로 최대한 근접시킨 확률밀도함수 서식처 적합도 지수를 연구에서 PHABSIM 모형에 적용하였다.

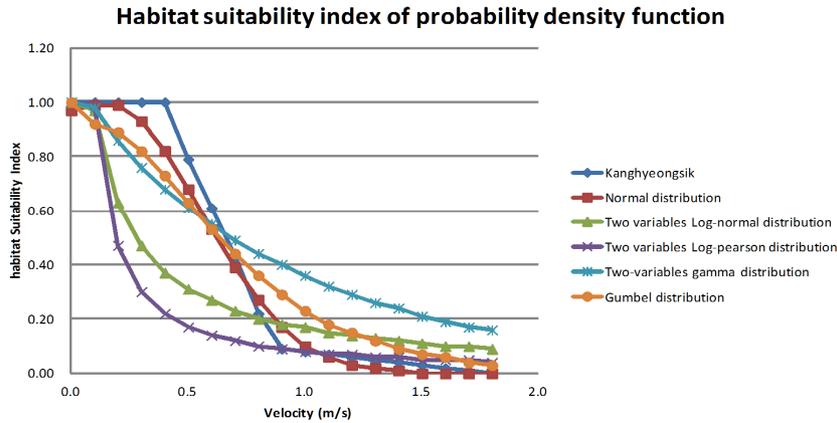


Fig. 5. The habitat suitability index of probability density function (velocity)

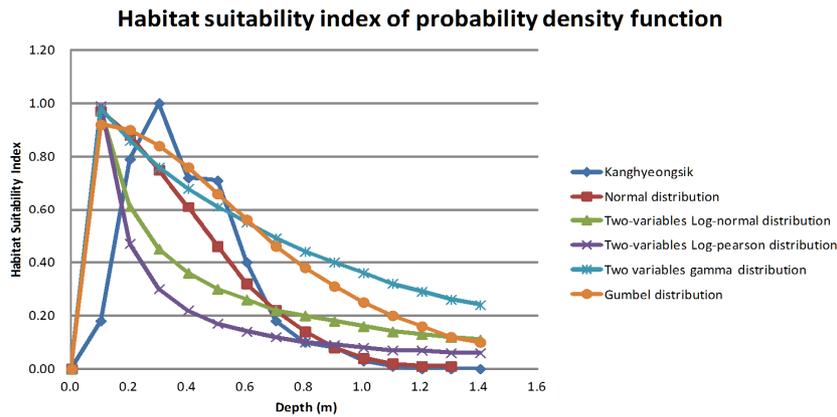


Fig. 6. The habitat suitability index of probability density function (depth)

Table 2. The parameters of the probability density function

Probability density function	Parameter	Mean (μ)	Standard deviation (σ)
Normal distribution	Velocity	0.1	0.4
	Depth	0.3	0.4
Two parameter log-normal distribution	Velocity	0.18	2.4
	Depth	0.2	2.5
Probability density function	Variables	σ (scale factor)	β (shape factor)
Two parameter log-Pearson distribution	Velocity	0.3	3.17
	Depth	1.0	0.95
Two parameter gamma distribution	Velocity	12.8	1.0
	Depth	12.2	1.1
Gumbel distribution	Velocity	0.4	0.09
	Depth	0.4	0.12

5. 모형의 적용

5.1 대상구간

남대천은 무주군 설천면 삼공리 지내 덕유산(향적봉, EL. 1,590)에서 발원하여 북측으로 유하하다가 금평천과 합류하고, 이후 서측으로 우하하면서 미대천, 여의천, 대왕천, 상곡천, 울곡천 및 당산천과 합류하며, 무주읍을 통과한 후 적상천과 합류하여 분류인 금강 우안으로 합류하는 금강의 제 1지류 하천이다.

도심하천구간은 무주대교에서 무주교까지 1.0 km이다. 수로의 형태가 직선적이고 하상경사는 1/234 이며 하폭이 63~116 m 정도이다. 하상은 비교적 깨끗하고 대부분 잔자갈로 구성되어 있다. 자연하천구간은 하장백교에서 하류방향으로 약 2.3 km으로 친수공간으로 활용되고 하폭은 40~93 m 정도이며 하상경사는 1/116이다. 하상은 대부분 잔자갈로 이루어져 있으나 압노출이 존재한다. 또한 하상경사가 급하고 폭이 일정하지 않은 형태를 가지며 만곡부에서 여울(riffle), 소(pool) 등이 형성되어 복합적인 하상재료와 함께 다양한 흐름이 나타나는 하천구간이다. 이런 하천의 특징을 고려하기 위하여 구간을 2개로 구분하여 모의에 적용하였다. 그 대상하천구간들의 위치도는 Fig. 7과 같다.

5.2 대상어종 선정

수리·수문학적으로 하천생태유량을 결정할 때에는 어류뿐만 아니라 먹이사슬에 연관이 되는 모든 생물의 생태적 현상을 고려하여야 한다. 그러나 그 생태계 속에 생활하고 있는

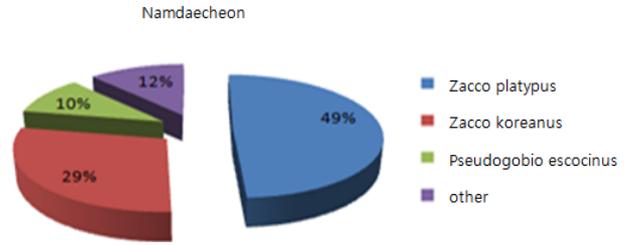


Fig. 8. The distribution of population species for Namdaechon (MLTMA, 2011)

모든 생물종의 개별적 특성과 상호 관련성을 조사 확인하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이에 대표어종을 선정하여 관리함으로써 해당 수계의 서식환경의 변화에 대처하고 하천 생태계가 가능한 범위 내에서 보존될 수 있도록 하여야 할 것이다.

대상어종이란 주어진 생태계에 서식하고 있는 단일어종 또는 어류 군집(guilds)을 선정할 수 있다. 대상어종이란 주어진 생태계에 서식하고 있는 단일어종 또는 어류 군집(guilds)을 선정할 수 있다.

Fig. 8은 2011년 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA)에서 조사한 남대천 유역에서의 어류 출현율을 보여준다. 대상구간에서 출현한 어종 중 개체수 비율은 Zacco platypus가 개체수 구성비 49%로 가장 높게 나타나 대상어종으로 선정하였다.

5.3 수리모형 검토

수리모의의 검·보정을 하기 위해서는 해당 모의구간에 관측값이 필요하고 부득이한 경우 수위관측소의 관측값을 이용

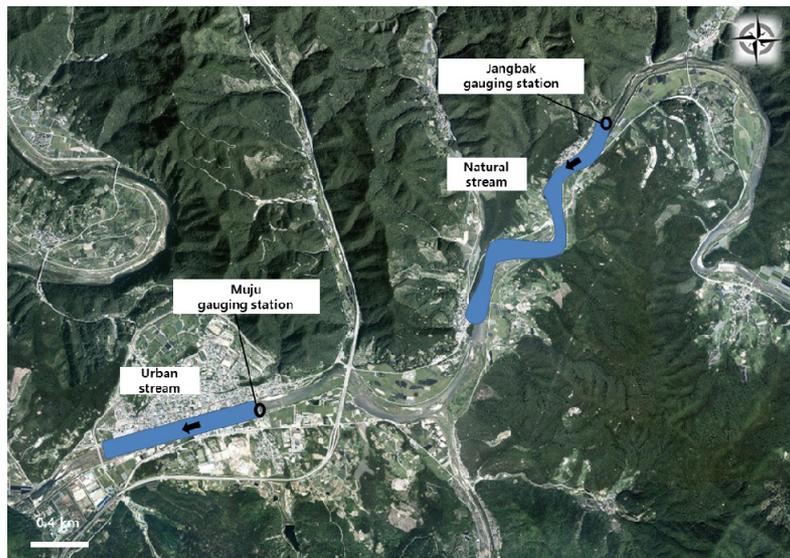


Fig. 7. The study site

하여 검·보정을 실시하여야 한다. 하지만 남대천 도심하천구간과 자연하천구간은 대상구간 하천에 수위관측소가 포함되어 있지 않다. 그러나 구간 밖에 남대천의 칠리대교의 무주 수위관측소와 하장백교의 장백 수위관측소가 있다. 이 2개 수위관측소의 2013년 수위-유량곡선식을 사용했다. 하상재료 또한 남대천 하천기본계획(변경)의 하상재료 입도분석편을 참고하였다. 유량 규모는 하천기본계획(변경)의 유형인 갈수량(1.33 m³/s)~푹수량(10.25 m³/s)까지를 대상으로 했다.

HEC-RAS를 검증하기 위하여 무주, 장백 수위관측소의 Rating curve를 이용하여 HEC-RAS 모형과 두 수위관측소의 수위값을 Table 2에 비교 평가하였다. Table 2에 대한 도심하천구간의 수위의 검증은 HEC-RAS 모형의 결과와 비교하여 7 cm 이내이며 수리모의 결과가 합리적으로 평가되었다. 자연하천구간은 23 cm 이내의 범위로 나타났다.

그 결과 Table 3에서 보는 바와 같이 수위차가 0.01~0.23 m의 차이를 보였으며 대부분 0.07 m 이내이기 때문에 적합하다고 판단하여 HEC-RAS 수위자료를 이용하여 PHABSIM의 유량에 따른 수위 입력자료로 사용하였다.

Table 3. The comparison results of measured water level and HEC-RAS simulation results

Gauging station	Measured water level (WSL, m)	HEC-RAS simulation results (WSL, m)	Error (m)
Muju	184.45	184.44	0.01
	184.20	184.16	0.04
	184.22	184.19	0.03
	184.24	184.23	0.01
	182.51	182.45	0.06
	182.53	182.46	0.07
	182.54	182.47	0.07
	182.48	182.42	0.06
Changbak	182.52	182.48	0.04
	203.27	203.23	0.04
	202.94	202.75	0.19
	202.35	202.12	0.23
	201.25	201.14	0.11
	200.09	200.01	0.08
	199.53	199.49	0.05
	199.60	199.55	0.05
	200.00	199.60	0.04
199.65	199.61	0.04	

5.4 수리모의 보정 및 검증

도심하천구간과 자연하천구간에서 PHABSIM과 4.3장에서 검증된 HEC-RAS 모형의 결과와 잘 반영되는지 평가하

Table 4. The criteria for method of error assessment (Kim, 2011)

Criteria	RMSE	NSE
Very good	0 < RMSE ≤ 0.5	0.75 < NSE ≤ 1
Good	0.5 < RMSE ≤ 0.6	0.65 < NSE ≤ 0.75
Well	0.6 < RMSE ≤ 0.7	0.5 < NSE ≤ 0.65
Pool	0.7 ≤ RMSE	NSE ≤ 0.5
Equation	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})^2}$

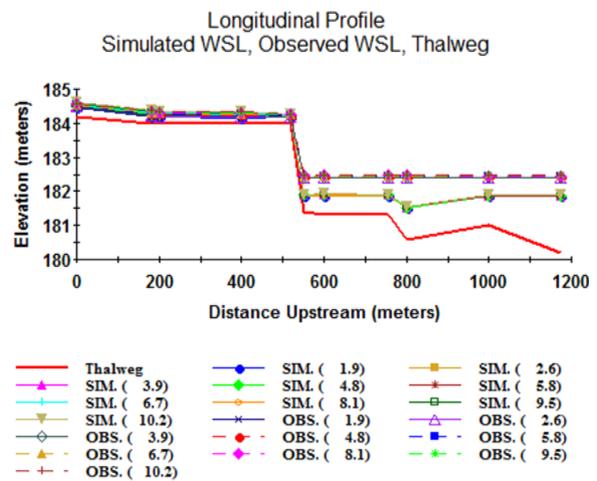


Fig. 9. The comparison of simulated water surface elevation for HEC-RAS and PHABSIM WSL (reach of urban stream)

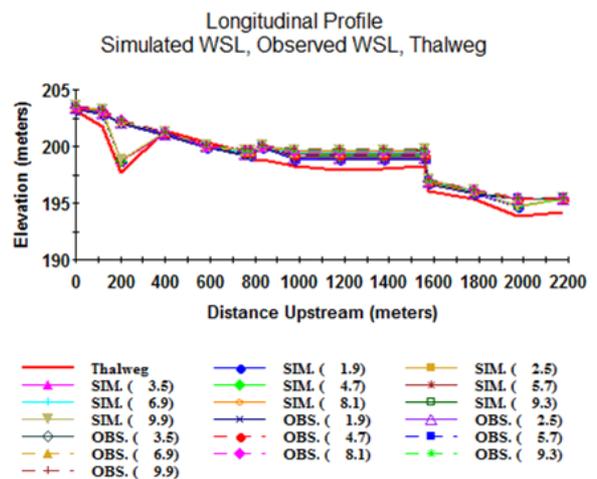


Fig. 10. The comparison of simulated water surface elevation for HEC-RAS and PHABSIM WSL (reach of natural stream)

기 위해 Table 4에서 보는바와 같이 오차통계지표를 이용하였다. 유속과 수심의 결과에 대한 통계지표로서 관측값의 불일치도를 나타내기 위해 오차의 제곱을 산술평균한 값의 제곱근인 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 표준편차와 관측값 오차의 제곱을 관측값과 평균 오차의 제곱으로 나누는 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)를 이용하였다 (Kim, 2011).

Fig. 9는 HEC-RAS와 PHABSIM 모형의 모의 결과를 각각의 도심하천구간의 수심에 대하여 수리모의한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10은 자연하천구간의 수위에 대한 HEC-RAS와 PHABSIM의 수리모의이다. Fig. 11은 도심하천구간과 자연하천구간에 대하여 유속의 수리모의이다.

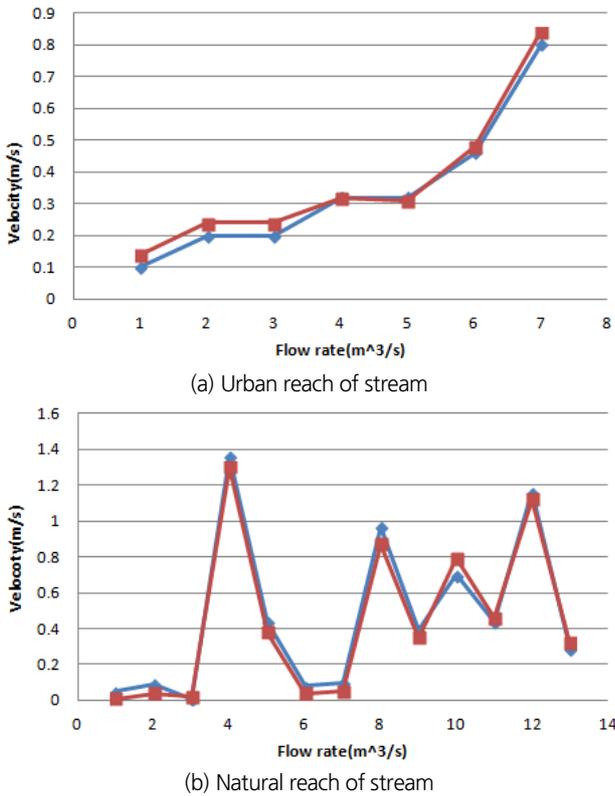


Fig. 11. The comparison between HEC-RAS and PHABSIM simulation results

Table 5. Assessing error of depth and velocity (Kim, 2011)

Assessment result		RMSE	NSE
		PHABSIM	PHABSIM
Velocity (m/s)	Urban reach of stream	0.01	0.54
	Natural reach of stream	0.02	0.52
Depth (m)	Urban reach of stream	0.02	0.56
	Natural reach of stream	0.01	0.53

Table 5를 살펴보면 도심하천구간, 자연구간하천에서 RMSE 값이 유속, 수심에서 0.01 m/s, 0.02 m로 오차평가 기준이 매우 양호로 만족할만한 결과를 나타냈다. 그러나 NSE 경우는 도심하천구간에서 0.54 m/s, 0.56 m 그리고 자연하천구간에서 0.52 m/s, 0.53 m로 보통으로 평가됐다. Rating을 통한 HEC-RAS 검증과 검증된 HEC-RAS와 연구의 모형인 PHABSIM의 검증이 Table 4에서와 같이 매우 양호와 보통으로 평가되어 수리모의 보정 및 검증이 잘 됐다고 생각된다.

6. 서식처적합도지수와 생태유량의 고찰

6.1 확률밀도함수 도입에 따른 생태유량의 변화

서식처 적합도 지수를 산정하기 위해서는 유속별, 수심별로 관측한 개체수 자료가 필요하다. 그러나 현실적으로 이러한 자료를 획득하는 것은 용이하지 않다. 오랜 기간 동안의 현장 측정자료와 기존 문헌, 전문가의 판단 등이 필요하다. 따라서, 유속별, 수심별로 어류 개체수를 관측하는 작업이 어렵다. 따라서, 장기간의 현장 측정 자료가 부재시, 서식처 적합도 지수를 대체할 수 있는 방안으로 확률밀도함수를 고려하였다. 이를 위해서는 확률분포함수의 적합을 알아봐야 한다. 따라서, Kang (2010)의 유속, 수심 HSI에서 확률분포함수의 유속, 수심값의 차이를 냈다. 또한 Kang (2010)의 생태유량에서 확률밀도함수의 생태유량을 제외하였다. 그 차이들의 합으로 된 값을 가지고 기준으로 삼은 Kang (2010)과 확률밀도함수의 생태유량을 비교하여 생태유량의 적합성을 파악하였다. 이와같은 과정과 절차는 생태유량의 변화를 분석하였다.

Fig. 12는 도심하천구간에서 Kang (2010) 유속 적합도 지수와 확률밀도함수별 유속 서식처 적합도 지수의 편차합계를 이용하여 유속에 대하여 생태유량의 변화의 분석을 실시하였다. 가로축은 Kang (2010)의 서식처 적합도 지수에서 확률밀도함수별로 유속 서식처 적합도 지수를 뺀 편차합계이다. 세로축은 Kang (2010)과 확률밀도함수의 생태유량 값 차이이다. 따라서, 편차 합계에 대한 생태유량 값 차이의 관계이다.

유속 서식처 적합도 지수에 대한 편차를 보면 0.54 m/s로 정규분포가 가장 편차가 적고 생태유량 차이가 0.32 m³/s로 제일 작다. 2 변수 Log-Pearson 분포, 2 변수 대수정규분포, 2 변수 Gamma 분포는 비슷한 3.5 편차의 합을 보이나 생태유량은 0.34 m³/s, 0.71 m³/s, 0.97 m³/s 등으로 다른 값으로 평가되었다. 편차합에 대한 생태유량 차이의 회귀분석식을 Fig. 12에 도시하였고 R²은 0.76으로 나타났다.

도심하천구간에서 수심 서식처 적합도 지수에 대한 편차 합계과 생태유량 차이의 관계를 Fig. 13에 나타냈다. 수심 서식처 적합도 지수에 대한 편차를 보면 정규분포가 1.69로 제일 편차가 적고 생태유량 차이가 작다. 2 변수 Gamma 분포가 3.8로 가장 큰 편차의 합을 나타냈고, 생태유량 차이는 Gumbel

분포가 1.19 m³/s로 가장 많은 생태유량의 편차를 보였다. 수심 서식처 적합도 지수 편차합에 대한 생태유량 차이의 회귀 분석식을 Fig. 13에 도시하였고 R²은 0.28으로 평가되었다.

Fig. 14는 자연하천구간에서 Kang (2010) 유속 서식처 적합도 지수와 확률밀도함수 서식처 적합도 지수의 유속 서식처

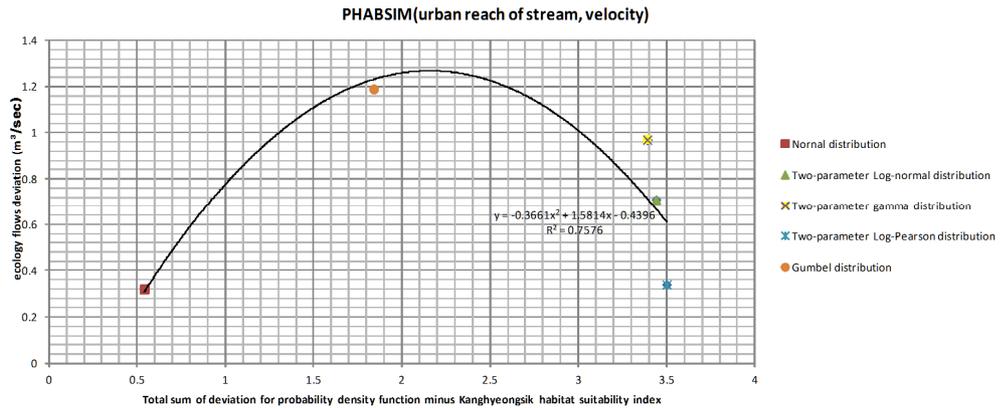


Fig. 12. The variation of ecological flows by probability density function (reach of urban stream, velocity)

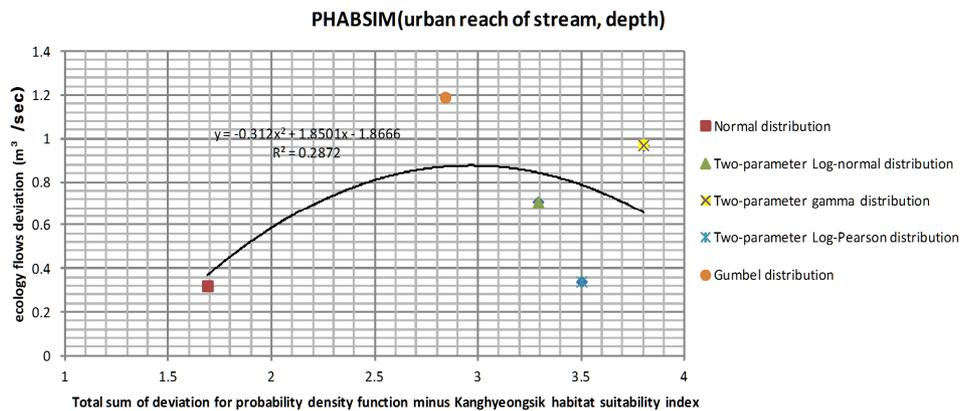


Fig. 13. The variation of ecological flows by probability density function (reach of urban stream, depth)

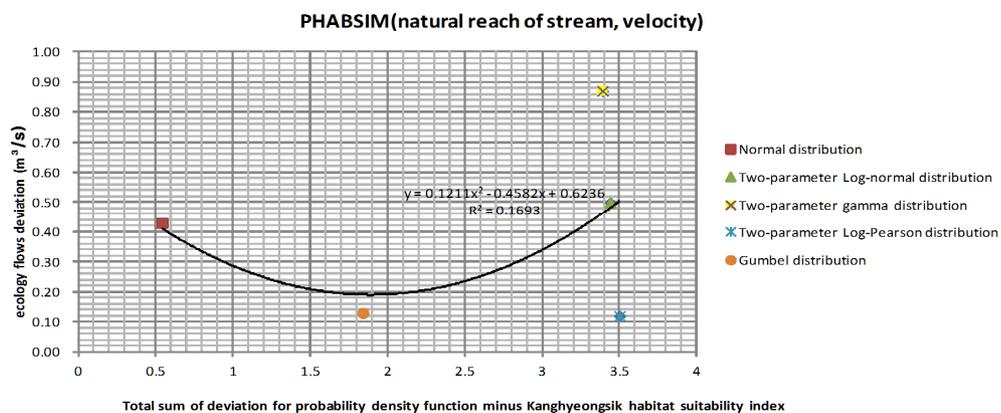


Fig. 14. The variation of ecological flows by probability density function (reach of natural stream, velocity)

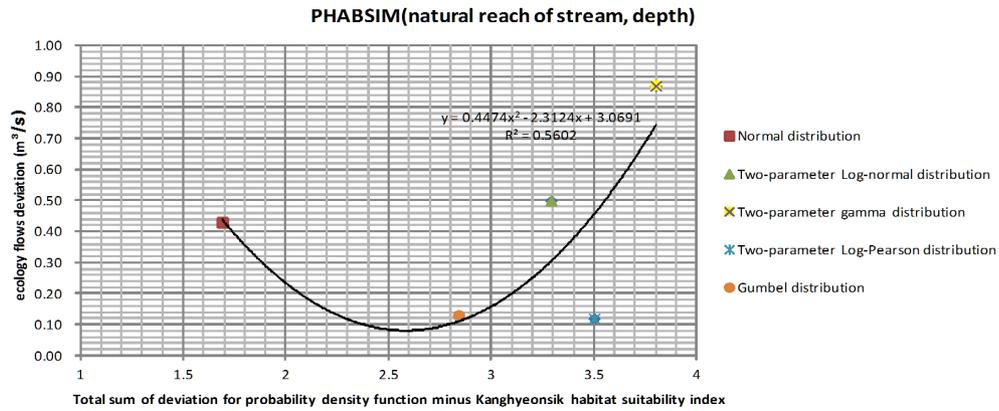


Fig. 15. The variation of ecological flows by probability density function (reach of natural stream, Depth)

적합도 지수 편차합계를 기준으로 비교하였다. 유속 서식처 적합도 지수에 대한 편차를 보면 정규분포가 0.54로 제일 편차가 적고 생태유량 차이는 이에 비례하지 않았다. 2 변수 Log-Pearson 분포, 2 변수 대수정규분포, 2 변수 Gamma 분포는 비슷한 유속 서식처 적합도 지수 편차합계를 보이나 생태유량은 다른 값으로 평가되었다. 가장 많은 생태유량의 편차를 보이는 것은 0.87 m³/s로 2 변수 Gamma 분포이다. 가장 적은 생태유량의 편차를 보이는 것은 0.12 m³/s인 2 변수 Log-Pearson 분포함수이다. 유속 서식처 적합도 지수 편차합계에 대한 생태유량 차이의 회귀분석식을 Fig. 13에 도시하였고 R²은 0.17으로 나타났다.

자연하천구간에서 수심 서식처 적합도 지수에 대한 편차합계과 생태유량 차이의 관계를 Fig. 15에 나타냈다. 수심 서식처 적합도 지수에 대한 편차합계를 보면 1.69 m값으로 정규분포가 제일 적다. 생태유량의 차이는 2 변수 Log-Pearson 분포가 0.12 m³/s값으로 제일 적었다. 2 변수 Gamma 분포가 0.8 m로 가장 큰 편차의 합을 나타냈고, 생태유량 차이는 2 변수 Gamma 분포가 0.87 m³/s 값으로 가장 많은 생태유량의 편차를 보였다. 수심 서식처 적합도 지수의 편차합계에 대한 생태

유량 차이의 회귀분석식을 Fig. 14에 도시하였고 R²은 0.56으로 평가되었다.

PHABSIM 모형에서 유속 서식처 적합도 지수, 수심 서식처 적합도 지수별 편차합계에 의한 민감도 분석 결과 도심이나 자연하천구간에서 정규분포가 가장 적은 편차합계를 보였다. 도심하천구간에서는 정규분포가 가장 적은 편차합계를 나타냈다. 그러나 자연하천구간에서 가장 적은 생태유량의 차이를 보이는 것은 2 변수 Log-Pearson 분포이다. 따라서, 도심하천구간에서는 정규분포가 자연하천구간에서는 2 변수 Log-Pearson 분포가 Kang (2010) 서식처 적합도 지수에 가장 적합하다는 것을 알 수 있다.

6.2 PHABSIM 모형에 적용

Table 6은 PHABSIM 모형을 사용하여 확률밀도함수 형태에 따라 서식처 적합도 지수를 적용하여 산정한 생태유량과 가중가용면적(WUA)을 비교한 것이다. 유량에 따라 변화하는 물리적 요소에 따라 변하기 때문에 적절한 유량 범위를 선정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 유황분석에 의한 갈수량(1.33 m³/s)~풍수량(10.25 m³/s)까지를 모의했다.

Table 6. The ecological flows-weighted usable area for PHABSIM model

Probability density function	Classes	Urban reach of stream		Natural reach of stream	
		Ecological flows (m³/s)	WUA (m²/1000 m)	Ecological flows (m³/s)	WUA (m²/1000 m)
	Kang (2010)	3.03	28,930	2.58	28,475
	Normal distribution	2.71	25,323	2.15	23,322
	Two variables log-normal distribution	3.74	11,370	2.08	23,527
	Two variables log-Pearson distribution	2.69	20,930	2.46	27,475
	Two variables gamma distribution	2.06	20,134	1.71	20,661
	Gumbel distribution	3.47	23,360	2.71	26,668

수리 모의된 결과와 확률밀도함수를 적용한 5가지 서식처 적합도지수를 사용하였고, 이를 생태유량을 산정하는 PHABSIM 모형에 적용하였다. Table 5는 PHABSIM 모형에 확률밀도 함수 서식처적합도지수를 적용하여 산정한 생태유량과 가중 가용면적을 나타낸 것이다.

금강수계 생태유량과 비교하여 볼 때 도심하천구간에서는 정규분포가 가장 근사하게 접근하였다. 도심하천구간은 물리적 변화량이 비교적 일정하기 때문에 금강수계의 적합도 지수와 비슷한 형태를 가진 정규분포와 가장 근사했다. 하지만 자연하천구간의 경우 폭이 좁고, 여울과 소가 반복되기 때문에 특정 물리적 범위에 편향되는 경향을 나타낸 2 변수 Log-Pearson 분포에서 가장 근접한 값이 산정되었다. 전체적인 관점에서 살펴보면 도심하천구간의 생태유량은 2.06~3.47 m³/s, 자연하천구간의 생태유량은 1.71~2.71 m³/s 로 산정되어, 하천 폭과 수심이 비교적 높은 도심하천구간에서 좀 더 많은 유량이 필요한 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 어류의 물리적 서식 특성에 적합한 하천의 생태유량 산정 모형을 모의하기 위해 확률밀도함수 서식처 적합도지수를 구축하였다. 그 지수는 유역 특성과 공간적인 특성을 잘 반영하는 것으로 추정되었다. 따라서, 금강수계 남대천 도심하천구간과 자연하천구간에 PHABSIM 모형을 적용하였다. 확률밀도함수별 가중가용면적과 생태유량을 산정하여 모의, 분석하였고 그 결과는 다음 내용과 같다.

- 1) 금강수계의 서식처 적합도 지수를 토대로 5가지 확률밀도 함수를 최적화한 결과, 유속에 가장 비슷한 분포는 정규분포이며 최적구간은 0.0~0.3 m/s 이었다. 그 외의 분포는 0.0~0.2 m/s의 범위에서 최적구간이 형성되었다. 수심에 대한 적합도 지수 분포는 0.1~0.2 m로 형성되었고, 2 변수 Log-Pearson 분포의 적합도 지수 값이 가장 작고, Gamma 분포와 Gumbel 분포가 수심 1.4 m까지 다른 분포에 비하여 감소 경사가 완만하게 분포되었다.
- 2) 수위관측소와 HEC-RAS 모의값의 수위차를 비교한 결과 0.1~0.23 m의 차이를 보였다. 따라서 HEC-RAS 수위자료를 모의에 사용하였으며, PHABSIM 수리모의 결과를 가지고 HEC-RAS와 오차평가한 결과 RMSE의 경우 0.01~0.02, NSE는 0.52~0.56로 만족할만한 결과를 나타냈다.
- 3) 1차원 모형인 PHABSIM을 이용하여 확률밀도함수별 서

식처 적합도 지수를 남대천 도심하천구간과 자연하천구간에 적용하여 생태유량의 결과를 분석하면, 도심하천구간의 경우가 2.06~3.74 m³/s로 모의됐으며, 정규분포가 가장 근접한 결과를 도출하였다. 자연하천구간은 생태유량이 1.71~2.71 m³/s 로 산정되었으며, 2 변수 Log-Pearson 분포가 가장 근접한 결과를 보였다.

- 4) 생태유량은 남대천 유황의 갈수량에서 평수량 범위로 나타났다. 향후 어류의 미시서식 조건을 고려한 생태유량 산정에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대해본다.

References

- Booker, D. J., and Dunbar, M. J. (2004). "Application of physical habitat at simulation (PHABSIM) modeling to modified urban river." *River Research and Applications*, Vol. 20, No. 2, 167-183.
- Bovee, K. D. (1982). "A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology." *Instream Flow Information Paper*, Vol. 12, U.S. Fish and Wildlife Service Office of Biological Services, FWS/OBS 82/26, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- Bovee, K. D. (1986). "Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology." *Instream Flow Information Paper*, Vol. 21, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-86/07, Fort Collins, Colorado.
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J., and Henrikson, J. (1998). *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004, Fort Collins, Colorado.
- Jung, S. W. (2012). "Physical habitat modeling in Dalcheon stream using fuzzy logic." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 229-242.
- Kang, H. S. (2010). *Development of physical fish habitat suitability index*. Korea Environment Institute, Working Paper-05, pp. 38-47.
- Kim, H. C. (2012). *A suggestion of new estimating method for habitat suitability index to decide environmental flow*. Master's Thesis, Korea University, pp. 28-30.
- Kim, K. H. (1999). *Evaluation of habitat conditions and estimation of optimum flow for the freshwater fish*. Doctor's Thesis, Yonsei University, pp. 77-80.
- Kim, K. O. (2016). "Estimation of ecological flow and habitat suitability index at Jeonju-cheon upstream." *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, Vol. 38, No. 2, pp. 47-55.
- Kim, T. Y., and Yoon, H. S. (2011). "Skill assessments for evaluating the performance of the hydrodynamic model." *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 14, No. 2, pp. 107-113.

- Milhous, R. T., Updike, M. A., Schneider, D. M. (1989). "Physical habitat simulation system reference manual-version." *Information Paper*, Vol. 26. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services program, FWS/OBS-89/16, Fort Collins, Colorado.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). *The final technology report for creation of habitat environment*. Construction Technology Innovation Project 5th Year Final Report, pp. 733-739.
- Roh, K. B. (2011), *Study on habitat conservation fish and management using ecological model in Seomjin river*. Doctor's Thesis, Graduate School Dong-shin University, pp. 7-13.
- Sung, Y. D., Park, B. J., Joo, G. J., Jung, L. S. (2005). "The estimation of ecological flow recommendations for fish habitat." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No.7, pp. 545-554.
- USGS (2001). *PHABSIM for windows, user manual and exercises*. Midcontinent Ecological Science Center.