

퍼지논리를 이용한 달천의 물리서식처 모의

Physical Habitat Modeling in Dalcheon Stream Using Fuzzy Logic

정 상 화* / 장 지 연** / 최 성 욱***

Jung, Sanghwa / Jang, Jiyeon / Choi, Sung-Uk

Abstract

This study presents a physical habitat modeling of adult *Zacco platypus* in a reach of the Dalcheon Stream located downstream of the Goesaan Dam. CASiMiR model is used to estimate habitat suitability index based on the fuzzy logic. Results are compared with those from River2D model, which uses habitat preference curve for habitat suitability index. Hydraulic data simulated by River2D are used as input data for CASiMiR model after verification against field measurements. The result shows that the habitat suitability of the adult *Zacco platypus* is maximum around the riffle area located upstream of the bend. CASiMiR and River2D estimate the maximum weighted usable areas at the discharge rates of 7.23 m³/s and 9.0 m³/s, respectively. Overall comparison of the two models employed in this study indicates that CASiMiR model overestimates the weighted usable area by 0.3~25.3% compared with River2D model in condition of drought flow (Q355), low flow (Q275), normal flow (Q185), and average-wet flow (Q95).

Keywords : physical habitat modeling, fuzzy logic, habitat suitability curve, habitat suitability index, weighted usable area

요 지

본 연구에서는 괴산댐 하류 달천에서 성어기 피라미에 대한 물리 서식처 모의를 수행하였다. 이를 위하여 퍼지논리에 의한 서식처 적합도 지수를 산정하는 CASiMiR 모형을 이용하였다. 또한 모의결과를 서식처 선호도 곡선을 이용하여 서식처 적합도 지수를 산정할 수 있는 수리모형인 River2D 모형의 결과와 비교, 분석하였다. CASiMiR 모형의 수위 자료는 River2D 모형을 통한 수위계산결과를 활용하였으며 현장측정자료와 비교한 결과 잘 반영하는 것을 확인하였다. 대상구간의 만곡부 상류 직선구간에 있는 여울에서 성어기 피라미의 서식처가 가장 적합한 것으로 나타났다. CASiMiR 모형의 경우 7.23 m³/s의 유량조건에서 가장가용면적이 최대값을 보였고, River2D 모형은 9 m³/s의 유량에서 최대 가장가용면적을 예측하였다. 또한 갈수량(Q355), 저수량(Q275), 평수량(Q185), 풍수량(Q95) 유량조건에서 CASiMiR 모형은 River2D 모형에 비해 가장가용면적을 0.3~25.3% 정도 과대 추정하는 결과를 보였다.

핵심용어 : 물리 서식처 모의, 퍼지논리, 서식처 선호도 곡선, 서식처 적합도 지수, 가장가용면적

* 한국건설기술연구원 수석연구원(e-mail: kikumorah@kict.re.kr)

Senior Researcher, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea.

** 교신저자, 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(e-mail: jiyeon83@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Graduate Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul, Korea.

*** 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수(e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul, Korea.

1. 서론

하천은 자연상태에서 물의 정화, 홍수 및 가뭄의 완화, 어류를 비롯한 야생생물 서식처의 유지 등 다양한 기능을 수행하고, 하천을 포함한 담수생태계는 인간의 사회환경과 조화를 이루는 자연의 기능을 수행한다(Poster and Richter, 2003). 이러한 하천은 살아있는 유기체와 같아 하천 내 인위적인 구조물이 건설되면 주로 수리현상이 변화되고, 침식 및 퇴적 양상이 바뀌게 되며 이로 인해 하천 모습이 변화되고 이는 다시 하천 주변 환경을 변화시키는 원인이 된다(Ligon et al., 1995; McCully, 1996; Wu et al., 2003; 강형식 등, 2010).

최근 하천의 환경기능을 부각하여 다양하게 진행되는 하천복원사업이나 하천 생태조성사업 등과 같은 하천사업은 오랜 기간 기존 환경에 적응해온 하천생태계에 또 다른 변화요인을 제공하여 하천의 변화를 발생시킨다. 또한 인간의 이·치수 목적으로 활용하기 위하여 다양하게 건설된 하천 시설물은 하천 흐름 변화를 야기시켜 이로 인해 우점종의 변화와 종의 멸종 발생 등 생물 서식처에 큰 영향을 미친다. 따라서 하천복원사업을 포함한 다양한 하천사업을 수행할 경우 생태계의 변화를 최소화할 수 있는 연구가 활발하게 수행되고 있다.

하천사업에 의해 변화된 수생생태계를 예측하기 위해 주로 유량점증방법론(IFIM: Instream Flow Incremental Methodology) 개념을 도입한 어류에 대한 물리서식처 모의를 적용하고 있다(Bovee et al., 1998). 어류는 생태계의 먹이사슬에서 높은 단계에 위치하는 생물로 인간에 미치는 영향을 검토할 수 있다. 또한 수생생태계의 변화에 대해 빠르게 반응하며 이동 및 이주가 빠른 기간에 나타나며 모니터링을 하기에 상대적으로 용이한 생물로 서식처 모의를 통한 서식조건 평가에 적합하다.

국내에서는 김규호(1999)가 어류 서식환경을 고려한 최적유량산정에 관한 연구를 수행하였고, 강정훈 등(2004)은 어류 서식처 적합도 기준을 결정하기 위하여 단일변량곡선법(univariate curve)을 적용하였으며, 성영두 등(2005)은 PHABSIM (Physical HABitat SIMulation system)을 이용하여 어류의 성장주기에 따라 서식처 적합도 기준을 산정하고 생태학적 추천유량을 산정하였다. 임동균 등(2007)은 PHABSIM을 이용하여 보철거 후의 서식조건 변화에 대해 연구하였으며, 강형식 등(2010)은 댐 발전 방류가 하류 하천에서 성장단계별 어류 서식처에 미치는 영향을 연구하였다. 그러나 대부분의 연구가 다양한 수리해석기법을 적용하고 있으나 서식처 적합도 지수(Habitat

Suitability Index)를 산정하기 위한 선호도 기준의 경우 전문가 판단에 따른 서식처 선호도 곡선(Habitat Suitability Curve)을 활용하고 있는 실정이다. 보다 현상에 맞는 서식처 적합도 지수의 경우 어류 모니터링 자료를 기반으로 산정하는 것이 바람직하므로 전문가 판단에 따른 서식처 선호도 곡선의 경우 전문가의 주관적인 판단이 포함되어 실측자료를 통한 검증과는 차이가 발생할 가능성이 있다. 따라서 전문가 판단이라는 주관적 영향을 감소시키기 위하여 모니터링 자료를 기반으로 한 서식처 적합도 지수 산정방법을 국외에서는 활발하게 연구하고 있다. Vadas and Orth (2001)는 다중선행회귀모형을 이용하여 서식처 적합도 지수를 산정하였으며, Fladung et al. (2003)은 로지스틱 회귀, Labonne et al. (2003)은 일반화선형모형, Milner et al. (2001)은 일반화가법모형, Ibarra et al. (2003)은 인공신경망, 그리고 Grift et al. (2003)은 정준상관분석을 서식처 모델링에 적용한 바 있다. Jorde et al. (2001)은 퍼지논리(fuzzy logic)를 적용하여 서식처 적합도 지수를 산정하였다. 최근 Garcia et al. (2011)은 댐 하류지역에 서식하는 어류에 대해 현장 조사 자료를 토대로 퍼지 규칙을 정립하고 CASiMiR 모형을 이용하여 댐 방류량 변화에 따른 가중가용면적, 서식처 적합도 지수를 산정하여 서식처 분석을 실시하였다.

본 연구의 목적은 피산댐 하류 달천구간에 퍼지논리를 적용하여 댐 하류 하천에서 유량 변화에 따른 어류 서식처의 변화를 분석하고, 기존 서식처 모의기법과 비교하는데 있다. 이를 위하여 다양한 연구에서 서식처 적합도 지수 산정을 위한 적용가능성을 높게 평가받고 있는 퍼지논리를 적용한 CASiMiR 모형을 이용하여 물리서식처 분석을 수행하였으며, 서식처 선호도 곡선을 이용한 서식처 적합도 지수 산정 기법으로 서식처 분석을 수행할 수 있는 수리해석 모형인 River2D 모형과의 비교를 통하여 서식처 적합도 지수를 산정함에 있어 퍼지논리에 대한 적용성을 검토하였다.

2. 물리서식처 모의와 퍼지 논리

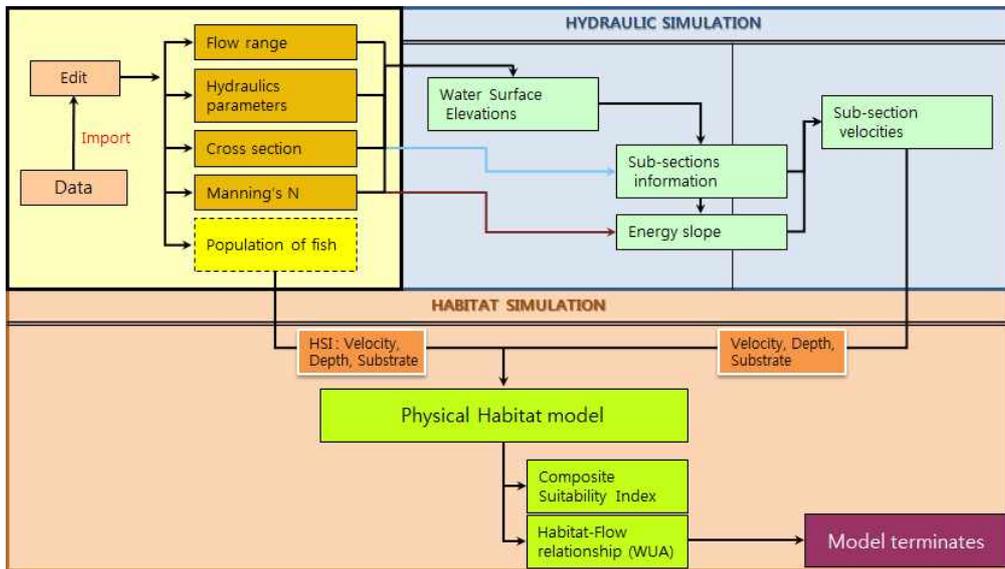
2.1 물리서식처 모의기법

물리서식처 모형은 흐름 또는 유량의 변화에 따른 하천의 물리서식처의 영향을 분석할 수 있는 생태수리해석 모형이며 수리학적 방법과 하천의 어류 서식처 분포 특성을 고려한 생태학적 방법을 통합한 것이라 할 수 있다. 일반적으로 물리서식처 모의의 결과는 유량에 따른 물리서식처의 수용능력을 제시함으로써, 하천 유지 유량의 필요성

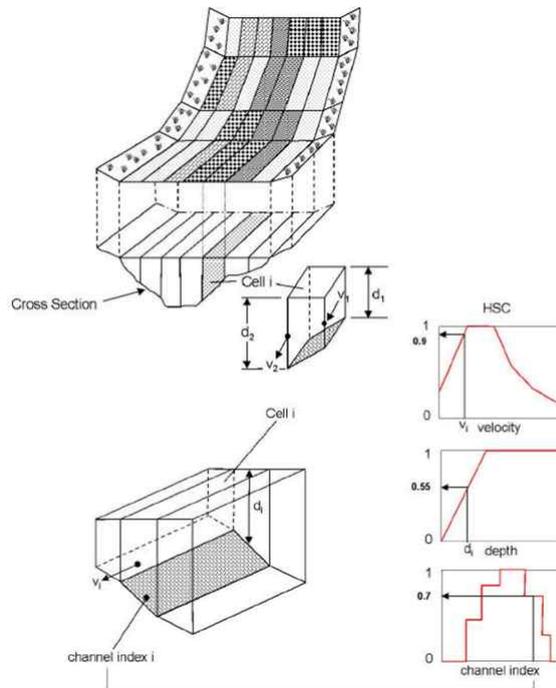
과 연관된 연구 또는 유량 및 하천변화가 하천 생태에 미치는 영향을 분석하는 연구에 활용되어 하천개선 사업이나 하천 지형을 변화시키는 사업의 영향이나 효과를 분석하는데 활용할 수 있다.

물리서식처 모형에는 기본적인 두 가지 성분, 즉 수리모의(hydraulic simulation) 성분과 서식처 모의(habitat simulation) 성분이 있다(Fig. 1(a)). 수리모의의 경우 1D, 2D, 3D 모형을 적용하여 모의할 수 있으며 서식처 모의

경우 서식처 적합도 지수를 산정하는 방법에 따라 선호도 기준(전문가 판단, 서식처 이용 곡선, 서식처 선호도 곡선), 통계적 분석법, 로지스틱 회귀법, 인공신경망, 퍼지논리 등을 이용한 인공지능을 이용한 산정으로 분류할 수 있다(강형식 등, 2008). 각 방법으로 산정된 서식처 적합도 지수를 바탕으로 곱셈법, 기하평균법, 최소치법, 가중치법 등을 통해 복합 서식처 적합도 지수(combined habitat suitability)를 산정한다(Bovee, 1982). 또한 수리



(a) Procedure of physical habitat modeling



(b) Calculation of weighted usable area in cell

Fig. 1. Physical Habitat Modeling (after Bovee et al., 1998)

모의에 의해 획득한 수리량 자료를 기반으로 서식처 모의가 이루어지며 각각의 결과는 Eq. (1)과 Fig. 1(b)와 같이 각 셀의 면적에 대한 복합 서식처 적합도 지수를 곱하여 물리서식처의 양적 결과인 가중가용면적(Weighted Usable Area: WUA)으로 표현하게 된다.

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

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

2.2 수리해석

본 연구에서는 수리해석을 위하여 서식처 평가에 널리 활용되고 있는 River2D를 함께 고려하였다. Steffler and Blackburn (2002)이 개발한 River2D 모형은 2차원 흐름 해석 및 서식처 분석이 가능하며, 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) \right\} + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}) \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2 = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) \right\} + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \right\} \quad (4)$$

여기서, H 는 수심, U 와 V 는 각각 x , y 방향으로의 수심 평균된 유속, q_x 와 q_y 는 유속과 관련된 흐름량($q_x = HU$, $q_y = HV$), g 는 중력가속도, ρ 는 물의 밀도, S_{0x} 와 S_{0y} 는 각 방향의 하상경사, S_{fx} 와 S_{fy} 는 각 방향의 마찰경사, 그리고 τ_{ij} 는 전단응력 텐서이다.

River2D 모형은 유량점증방법론에 입각하여 개발된 서식처 모의 시스템을 포함한다. 서식처 모의 시스템은 하천의 수생생물의 서식처 분포나 질을 평가하고 생태유량을 산정할 수 있다(Moir et al, 2005). River2D 모형은 주어진 유량에 대한 수심 및 유속을 계산하고, 각 수심 및 유속 등에 대한 선호도 기준(preference criteria)을 바탕으로 각 공간의 개별 서식처 적합도를 모의한다.

2.3 퍼지논리를 이용한 서식처 적합도 지수의 산정

퍼지논리는 자연현상을 분석할 때 발생하는 인간의 언어나 판단 등과 관련된 모호함을 수학적으로 해석하기 위

해 Zadeh(1965)에 의해 개발된 이론이다. 퍼지논리는 각 대상이 어떤 집합에 소속 또는 소속하지 않는다는 기존의 이분법적 집합논리를 각 대상이 어떠한 집합에 소속하는 정도를 소속함수(membership function)로 나타낼 수 있다. 퍼지논리의 장점은 수학적으로 정량화시키기 어려운 서식처의 규모나 질을 수치적으로 제시하며, 각 인자의 상호작용을 고려할 수 있다. 또한 추가적으로 고려되어야 하는 인자에 대해서도 상대적으로 쉽게 추가할 수 있다 (Schneider et al., 2010).

퍼지논리를 이용한 서식처 모의를 수행하기 위하여, Schneider (2001)가 개발한 전문가 지식기반의 퍼지모형인 CASiMiR(Computer Aided Simulation Model for Instream flow Requirements)를 이용하였다. CASiMiR 모형은 어류(Fish module), 저서동물(benthos module)에 대한 서식처 모의 모듈과 수력발전소의 경제성 평가를 위한 수력발전 모듈(hydropower module) 등 각 특성에 적합하도록 개발된 3가지 모듈이 있는데, 각 모듈은 서로 연결되어 사용될 수 있다(Jorde et al., 2000). 즉, 수력발전 모듈을 서식처 모의 결과와 결합하여 수력발전소의 경제적 영향을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 3가지 모듈 중 어류와 관련된 모듈만을 사용하였다.

서식처 모의를 위해 고려된 인자는 수심, 유속, 그리고 하상재료이며, 각 인자는 확정론적 경계를 가지는 기존의 방법론과 다르게 퍼지집합(fuzzy set)으로 구성되었다. 퍼지집합은 각 인자들의 소속정도를 표현하여주는 소속함수로 구성된다. 이러한 소속함수로 구성된 퍼지집합 사이의 경계가 중복되기 때문에 어떠한 요소는 몇 가지의 퍼지집합에 동시에 소속될 수 있다. 전문가 지식기반의 퍼지논리에서는 소속함수와 함께 퍼지추론(fuzzy reasoning)을 위한 퍼지규칙(fuzzy rule)이 필요하다. 퍼지규칙은 각각의 인자를 결합하는 규칙을 포함하고 있으며, IF-THEN의 형태로 구성된다. 퍼지규칙은 “IF 수심→중간 AND 유속→중간 AND 하상재료→작은 THEN 서식처 적합도→보통”과 같이 표현될 수 있다. 즉, IF 부분에서는 대상공간의 상태를 정의하며, THEN 부분에서 서식처의 적합도 정도를 도출하여 준다. Fig. 2는 퍼지논리를 이용한 서식처 적합도 지수 산정에 대한 과정 및 기본 방법을 나타냈다.

각 인자의 퍼지집합에 대응되는 소속정도를 바탕으로 각각의 규칙의 이행도(degree of fulfillment)가 퍼지추론 연산에 의해 설정된다. 이행도는 개별 규칙에 대응하는 서식처 적합도 소속함수의 범위에 대한 결과를 나타낸다. 개별 규칙에 의한 결과는 다양한 통합법을 이용하여 통합

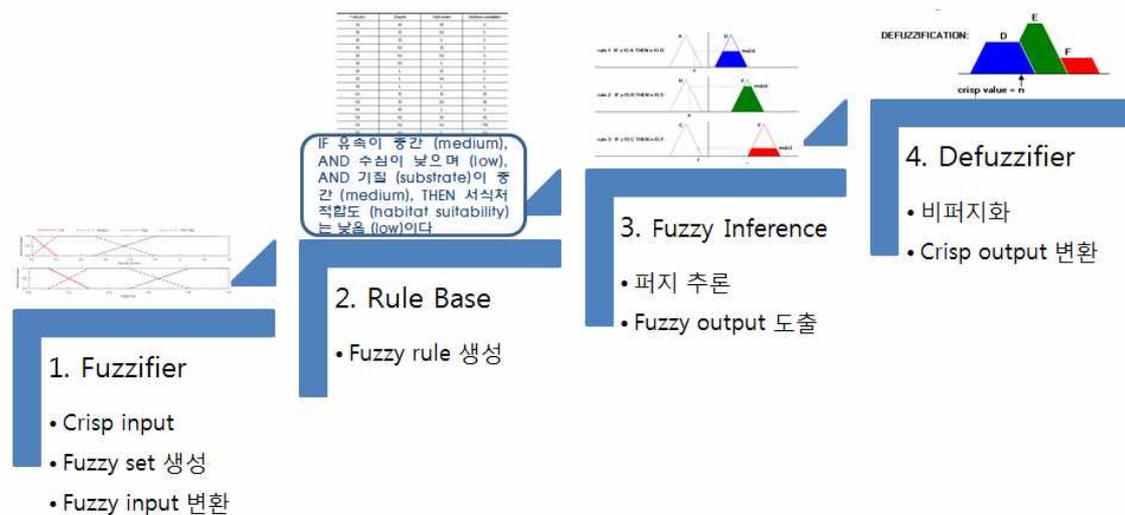


Fig. 2. Fuzzy Logic Concept

할 수 있으며, CASiMiR에서는 표준 가중치 통합법(normalized weighted sum combination)을 이용한다. 마지막으로 퍼지화되어 있는 결과를 인간이 익숙한 특정 값으로 변환하여 주는 비퍼지화(defuzzifier) 작업이 필요하다. 이러한 비퍼지화 방법은 MOM(mean of maximum), COG(center of gravity), 그리고 COA(center of area) 등이 사용되며 CASiMiR는 COG 방법을 적용하였다.

3. 모형의 적용

3.1 대상구간과 자료구축

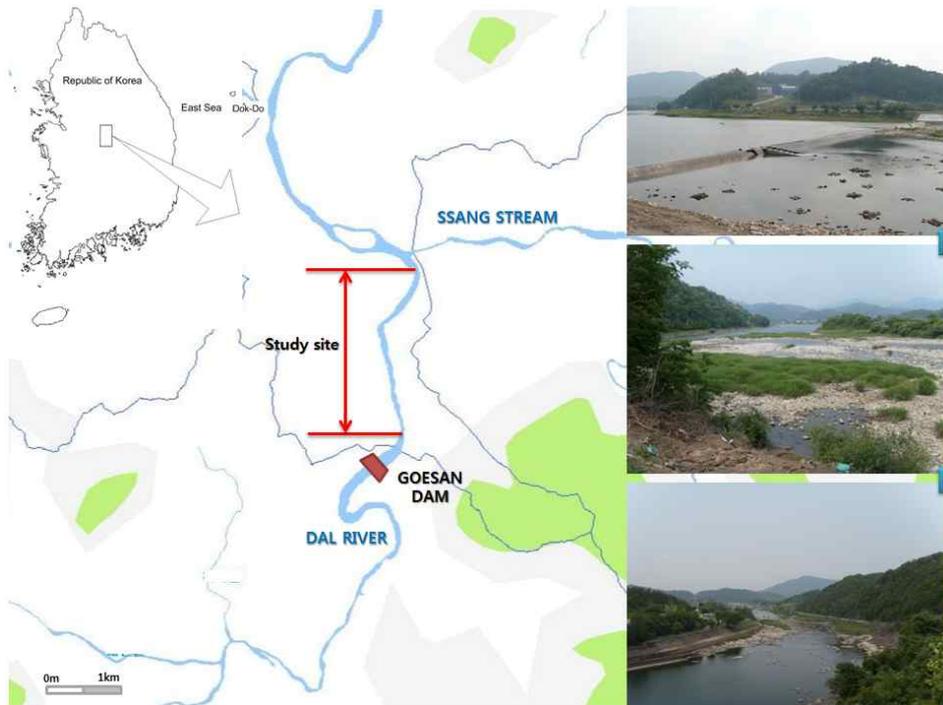
본 연구에서 모의하는 구간은 달천 피산댐 하류의 수전 교에서 대수보까지 약 2.5 km 이다(Fig. 3). 피산댐의 유역면적은 675.2 km²이고, 대상구간의 계획홍수량(50년 빈도)과 갈수량은 각각 1,750 m³/s와 1.82 m³/s이며, 저수량 4.02 m³/s, 평수량 7.23 m³/s, 풍수량은 17.13 m³/s이다(건설교통부, 1995). 대상구간의 하상경사는 1/650 정도이며 하상재료는 주로 자갈과 호박돌로서, 김지성 등(2007)이 제시한 Fig. 4의 입도분포곡선에서 보여진 바와 같이 일반적인 자갈하천의 양상을 보이고 있다. 대상구간에는 하도 만곡부가 존재하며, 만곡부 상류 직선구간에는 여울이 있으며 만곡부 하류에 소가 존재하는 지형학적 특성을 보인다. 또한 평상시에 대상구간은 피산댐의 방류량에 영향을 받는 것으로 판단되는 구간으로 무방류 상황에서는 하류단 대수보에 의해 수공간이 유지되고 있으며, 부정기적으로 이루어지는 5~20 m³/s의 발전방류에 의해 서식처의 물리특성이 급변하는 것으로 보고되고 있다(김지성 등, 2007; 강형식 등, 2010).

대상구간은 몇몇 수문자료와 생태자료가 구축되고 있는 구간이다(과학기술부, 2007; 국토해양부, 2008). 과학기술부(2007)는 유량 측정과 관련된 기술 확보를 위하여 수문자료를 구축하고 있으며, 김지성 등(2007)은 이러한 자료를 활용하여 유량과 조도계수의 관계를 분석하고 조도계수 산정 경험식의 적용성을 검토하였다. Fig. 3에 제시된 지형자료는 흐름방향으로 50 m 간격으로 이루어진 44 개의 횡방향 자료가 활용되었으며(과학기술부, 2007), 하상재료는 김지성 등(2007)이 제시한 12지점의 자료를 정리하여 도시한 것이다.

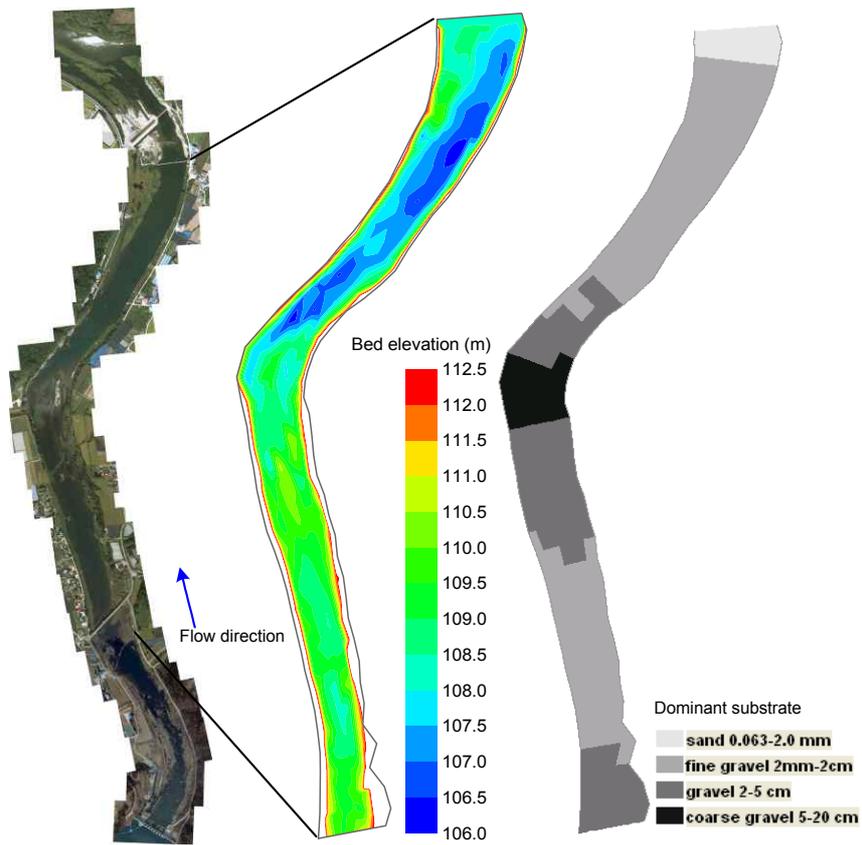
대상구간의 우점종은 피라미(Zacco platypus)로 확인되었으며, 그 뒤를 이어 갈겨니(Zacco temmincki) 및 쉬리(Coreoleuciscus splendidus)가 우점하는 것으로 조사되었다(국토해양부, 2008). 또한, 퍼지논리를 이용한 서식처 모의에는 대상종에 대한 소속함수와 규칙이 필요하나, 현재 가용한 자료는 피라미에 대해서만 구축되어 있다. 따라서 본 연구에서는 대상하천에 우점하고 있는 피라미를 대상으로 서식처 모의를 시행하였다.

3.2 서식처 적합도 지수 선정

피라미에 대한 선호도 기준 설정에 관한 연구는 국내에서 김규호(1999), 허준욱과 김정근(2009), Lee et al. (2009) 그리고 강형식 등(2011)이 연구를 수행하였다. 김규호(1999)는 달천 유역의 탄금교~쌍천 합류구간에서 모니터링한 결과로 선호도 기준을 제시하였다. 허준욱과 김정근(2009)은 용담댐 하류 약 30 km지점으로 5 km 상류 지점에서 무주남대천이 유입되는 무주군 오산리에 위치한 앞섬에서 모니터링한 자료를 기초로 제시하였다. 그리고



(a) Location of the study reach



(b) aerial photo

(c) bed elevation

(d) bed materials

Fig. 3. Schematic View of the Study Reach in Dalcheon Stream

Lee et al. (2009)은 허준욱과 김정곤(2009)의 피라미 선호도 기준 결과를 적용하여 대전천 내 어류 서식처의 질을 제고하기위한 연구를 수행한 바 있다.

강형식 등(2011)은 금강수계 지류의 17개 지점에서 4월에서 11월까지 조사한 자료(국토해양부, 2008)를 활용하

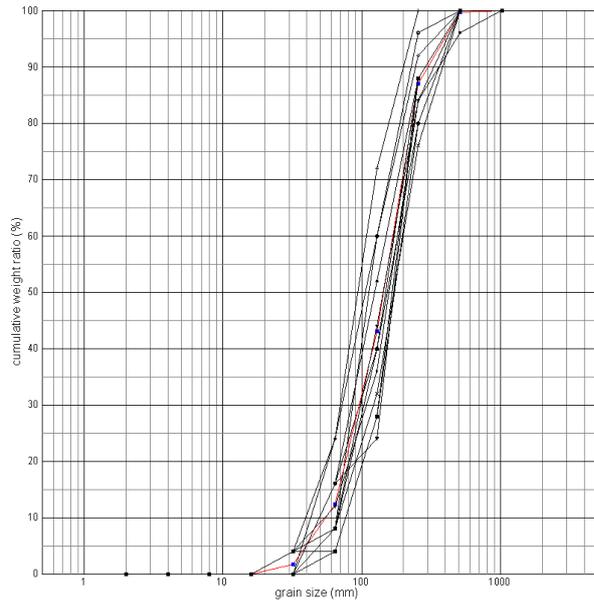
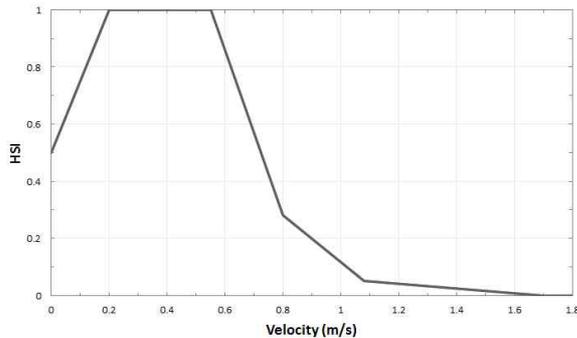


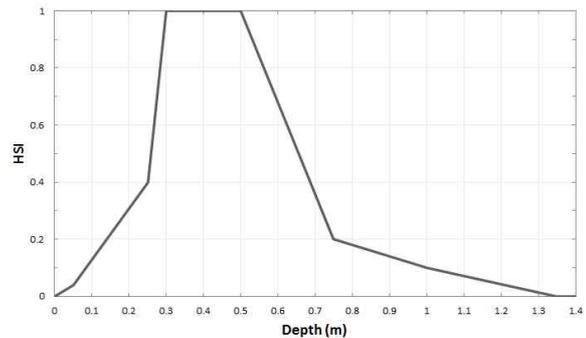
Fig. 4. Distribution of Bed Materials in the Dalcheon Stream(김지성 등, 2007)

여 서식처 적합도 기준을 산정하였다. 본 연구에서는 퍼지논리를 적용한 서식처 분석결과와 비교하기 위해 강형식 등(2011)이 제시한 서식처 선호도 곡선을 River2D 모형에 적용하여 서식처 분석을 수행하였다. Fig. 5는 강형식 등(2011)이 제시한 유속, 수심, 하상재료에 대한 서식처 선호도 곡선을 도시한 것이다.

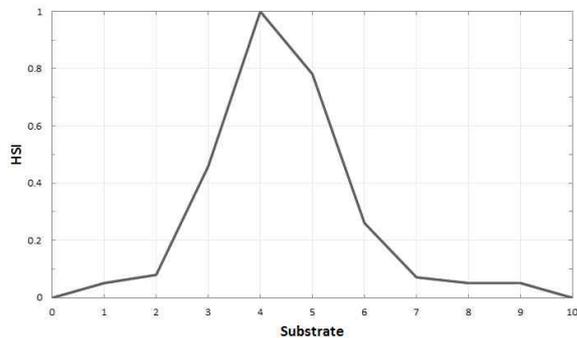
퍼지규칙은 현장모니터링을 통해 획득한 자료를 클러스터링을 통해 설정하거나 어류 전문가에 의해 결정된다. 그리고 소속함수는 0과 1사이의 값을 가져야 하며 자료특성에 따라 부분선형 함수, 가우스 분포 함수, 그리고 시그모이드 함수 등의 형태로 결정되어 진다. Fig. 6과 Table 1은 강형식 등(2011)이 피라미에 대한 서식처 선호도 곡선을 설정하기 위해 사용한 현장조사 자료를 바탕으로 퍼지규칙과 소속함수를 설정한 것이다(Jorde, 2010). 소속함수는 소속정도에 따른 최대값, 최소값, 그리고 평균값 등의 특성에 따라 삼각 및 부등4변형 형태로 구성되고 유속, 수심, 하상재료, 그리고 서식처 적합도에 대해 설정하였다. 하상재료 구분은 Wentworth (1922)가 제시한 9가지 분류 기준을 적용하였다. Table 2는 강형식 등(2011)과 Jorde (2010)가 이용한 현장조사 자료의 일부를 나타낸 것이다. 이 자료에는 어종, 전장, 개체수, 유속, 수심, 하상재료, 구조특성, 수온, pH, DO 등의 정보가 구축되어 있다.



(a) velocity



(b) flow depth



(c) substrate

Fig. 5. Habitat Preference Curve for Adult-stage *Zacco Platypus*(강형식 등, 2011)

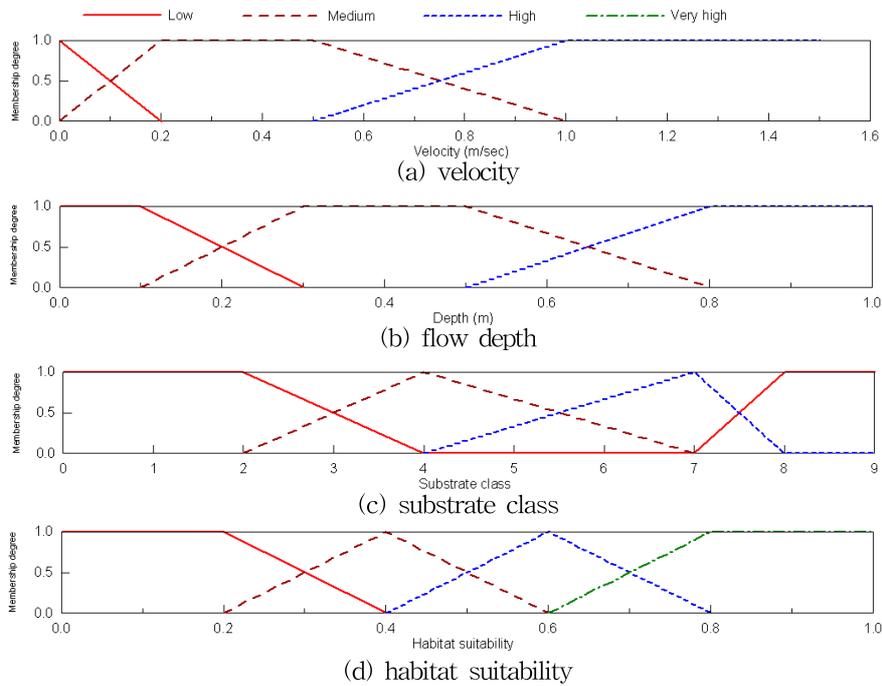


Fig. 6. Membership Function of Fuzzy Logic for *Zacco Platypus*

Table 1. Fuzzy Rule for *Zacco Platypus*

Velocity	Depth	Substrate	Habitat suitability
H	H	H	L
H	H	M	L
H	H	L	L
H	M	H	L
H	M	M	L
H	M	L	L
H	L	H	L
H	L	M	L
H	L	L	L
M	H	H	M
M	H	M	L
M	H	L	L
M	M	H	H
M	M	M	VH
M	M	L	M
M	L	H	H
M	L	M	L
M	L	L	L
L	H	H	M
L	H	M	M
L	H	L	L
L	M	H	L
L	M	M	L
L	M	L	L
L	L	H	L
L	L	M	L
L	L	L	L

L, low; M, medium; H, high; VH, very high.

Table 2. Fish Monitoring Data Used for Building Membership Function and Fuzzy Rule

Species	Length (cm)	Number	Velocity (m/s)	Depth (m)	Substrate	Type	Temperature (°C)	pH	DO
<i>Zacco platypus</i>	12	1	0.05	0.95	sand	pool	16.7	6.84	10.21
<i>Zacco platypus</i>	11	1	0.02	0.06	coarse gravel	run	16.7	6.84	10.21
<i>Zacco platypus</i>	9	1	0.41	0.60	boulder	run	16.7	6.84	10.21
<i>Zacco platypus</i>	8	1	0.45	0.45	fine gravel	run	21.1	7.23	10.78
<i>Zacco platypus</i>	12	5	0.65	0.40	fine gravel	run	21.1	7.23	10.78
⋮									

3.3 수리모형 검토

본 연구에서는 서식처 적합도 지수를 산정하기 위하여 퍼지논리와 서식처 선호도 곡선을 이용한 2가지 방법을 적용하였다. 2가지 서식처 모형은 물리특성을 반영하기 위해 수리해석이 선행되어야 한다. 따라서 적용하는 수리모형의 해석 결과가 적정한지에 대한 검토가 필요하며, CASiMiR 모형은 River2D 모형의 수위자료를 입력자료로 활용가능하므로 모형 검증을 위하여 River2D 모형의 수치모의 결과와 현장 측정 자료를 비교하였다. 현장 측정 자료는 김지성 등(2007)이 대상구간 내에 위치하는 7개 지점에서 유량과 수위에 대해 측정한 자료를 이용하였다. 하류단 경계조건은 모형 보정을 통해 $Q=1.7h^{1.667}$ 을 적용하였다. Fig. 7은 유량 37에서 수위에 대한 수치모의와 현장 측정 자료 결과를 도시한 것이다. Fig. 7을 살펴보면 상류로부터 수위는 거의 일정하게 유지되다가 피산댐으로부터 하류 약 1.5km 지점에 형성되어 있는 만곡지점 이후 급격히 감소되며, 다시 하류단 방향으로 완만히 감소되는 것으로 나타났다. 또한 측정 자료와 모의 결과가 잘 일치하고 있으므로 구축된 수치모형이 타당함을 확인할 수 있다. CASiMiR 모형에 의한 수리해석은 River2D 모형의 수위자료를 입력자료로 활용하며 유속은 다음 Eq. (5)에 의해 계산된다(Jorde, 2010).

$$V_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8gR_{hy}I_E} \quad (5)$$

여기서, V_m 은 평균유속, λ 는 Darch-Weissbach 마찰계수, g 는 중력가속도, R_{hy} 는 동수반경, I_E 는 에너지 경사를 나타낸다.

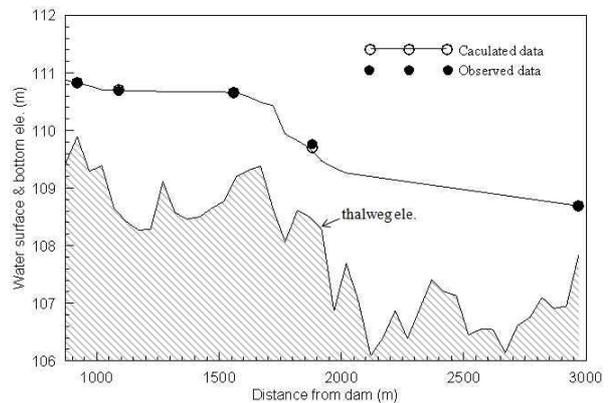


Fig. 7. Comparison Result of Water Surface for $Q=37.0 \text{ m}^3/\text{s}$ in Study Reach

4. 서식처적합도 분석

4.1 수위, 유속 분포

본 연구에서는 물리서식처 모의를 위하여 유량 조건을 갈수량 $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$, 저수량 $4.02 \text{ m}^3/\text{s}$, 평수량 $7.23 \text{ m}^3/\text{s}$, 풍수량 $17.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 대해서 모의하였다. Fig. 8의 유량별 수심 분포를 살펴보면, 만곡부를 중심으로 상·하류측에서 상대적으로 수심이 깊은 웅덩이 구간이 형성되며, 만곡 입구에서 수심이 얇고 유속이 빠른 여울이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 갈수량 $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 경우 만곡부 부근에서 사주가 형성되며, 유량이 증가함에 따라 수심은 약 0.3 m 상승하였으며, 만곡부에 존재하는 사주의 크기는 작아졌음을 확인할 수 있었다. 또한 하류단에서도 갈수량의 경우 사주가 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 앞의 Fig. 5에서 성어기 피라미의 최적 수심 구간은 약 0.25~0.6 m이다. 따라서 갈수량 $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 경우 만곡부의 상·

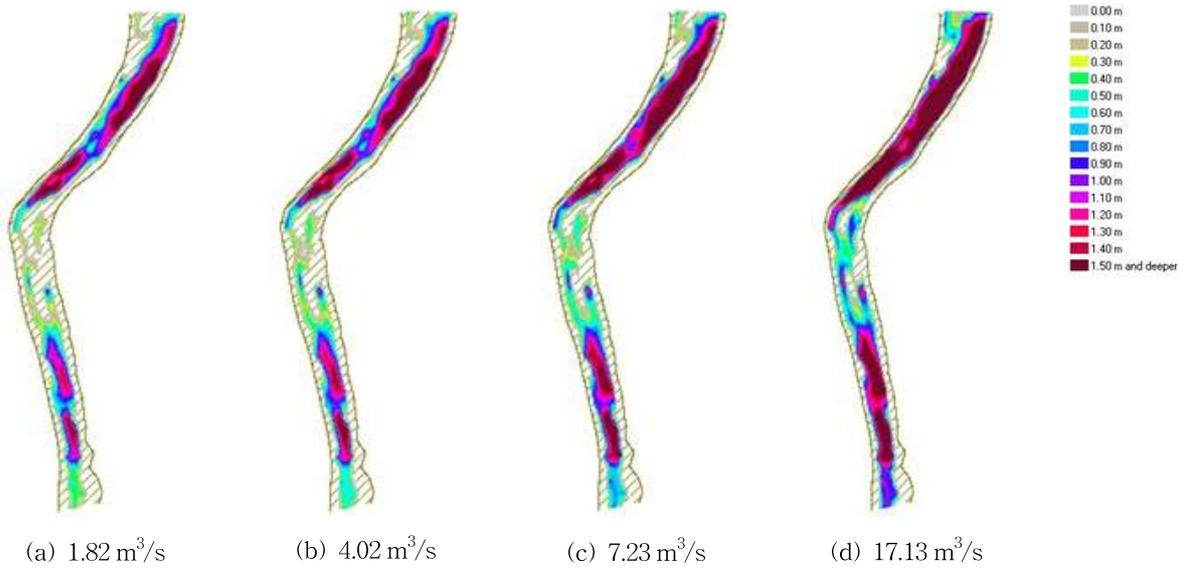


Fig. 8. Flow Depth Contour

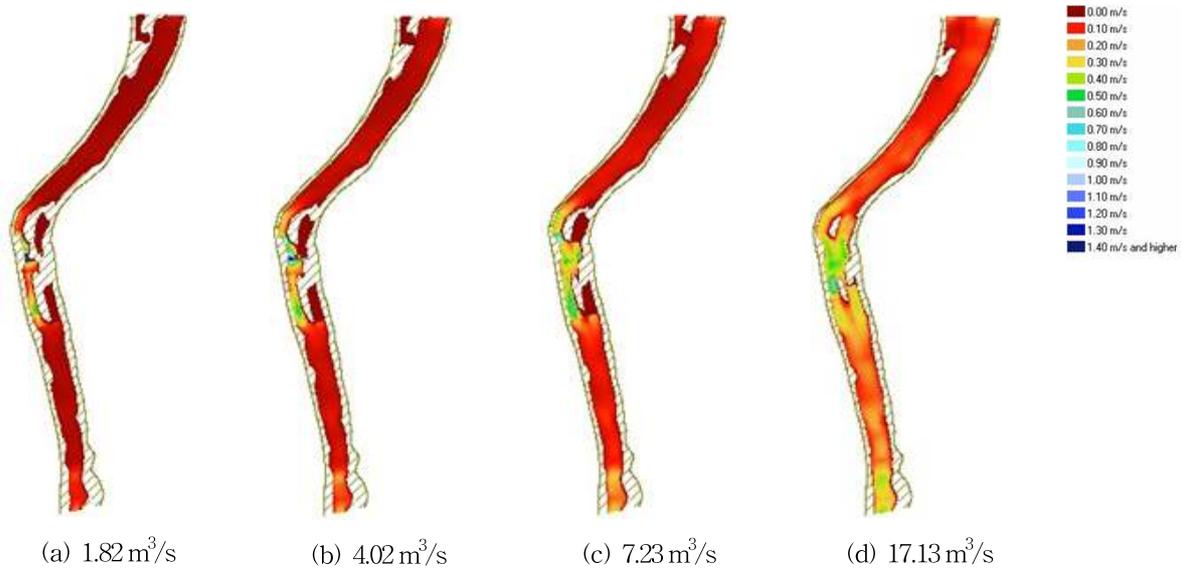


Fig. 9. Depth-averaged Velocity Contour

하류단에 존재하는 웅덩이 구간을 제외한 만곡부 부근과 상류단과 하류단 부근이 서식에 적합한 곳으로 판단된다. 또한 유량이 증가함에 따라 만곡부의 일부 지역과 하류단을 제외하고는 성어기 피라미가 서식하기에 부적합한 구간이 대부분임을 알 수 있다.

Fig. 9는 유량별 유속 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면, 만곡부에 존재하는 여울구간이 웅덩이 구간보다 상대적으로 빠른 유속이 형성됨을 확인하였다. 갈수량 1.82 m³/s의 경우 만곡부 이외의 전 구간에 걸쳐 뚜렷한 유속 차이가 나타나지 않았으며 유량이 증가함에 따라 약

0.1 m/s 향상되었다. 그러나 여울이 존재하는 만곡부에서는 유량이 증가함에 따라 유속이 증가하는 범위는 증가하나 구간 내 유속 최대값은 약 60% 감소하였다. 또한 Fig. 5의 유속과 관련된 서식처 선호도 곡선으로부터 최적의 유속이 약 0.2~0.4 m/s이며, 본 연구에서 모의한 유량조건의 경우 여울에서 성어기 피라미의 서식처에 적합한 유속이 형성됨을 확인할 수 있다.

4.2 복합 서식처 적합도 분포 및 가중가용면적

Fig. 10은 CASiMiR 모형을 이용하여 유량에 따른 성

어기 피라미의 복합 서식처 적합도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 서식처 적합도 1.0은 그 구간이 성어기 피라미에게 가장 적합한 수심 및 유속을 갖는다는 것을 의미한다. 먼저 갈수량 $1.82\text{ m}^3/\text{s}$ 조건에서 서식처 적합도를 살펴보면, 상·하류단에 존재하는 웅덩이 구간에서는 약 0.2~0.4 정도의 서식처 적합도를 갖으며, 여울이 존재하는 만곡부에서는 서식처 적합도 약 0.7을 갖고 일부지점에서는 0.8 이상의 서식처 적합도를 보인다. 한편, 유량이 증가함에 따라 상·하류단과 만곡부에서는 서식처 적합도가 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 만곡부에서 최대 서식처 적합도 약 0.9가 산정됨을 확인하였다. 그러나 이외의 구간에서는 유량이 증가할수록 서식처 적합도는

감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 River2D 모형을 이용하여 유량에 따른 성어기 피라미의 복합 서식처 적합도 분포를 나타낸 그림이다. 먼저 갈수량 $1.82\text{ m}^3/\text{s}$ 조건에서 서식처 적합도를 살펴보면, 상·하류단과 만곡부를 제외하고 낮은 서식처 적합도를 나타내어 CASiMiR 모형과 유사한 결과를 보였다. 만곡부 일부영역에서는 약 0.8 정도의 서식처 적합도가 산정되나, 전반적으로 약 0.3 정도의 낮은 서식처 적합도를 갖는 것을 확인할 수 있다. 한편 유량이 증가함에 따라 만곡부와 하류단에서는 피라미에게 적합한 서식처가 증가하여 0.9 이상의 서식처 적합도를 보이지만 이외의 구간에서는 서식처가 악화되는 것을 알 수 있다. Figs. 10

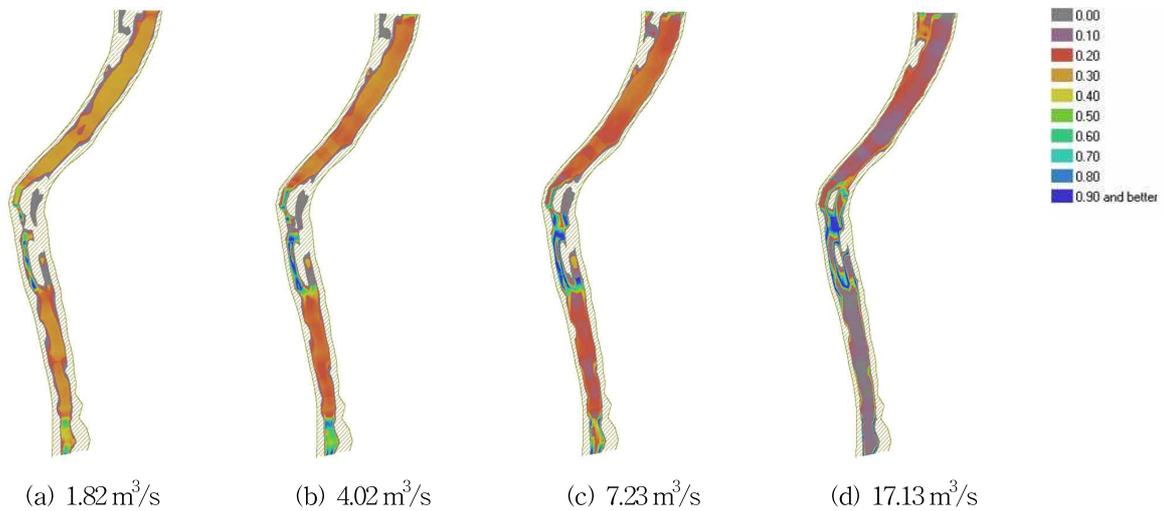


Fig. 10. Contour of Combined Habitat Suitability (fuzzy logic used)

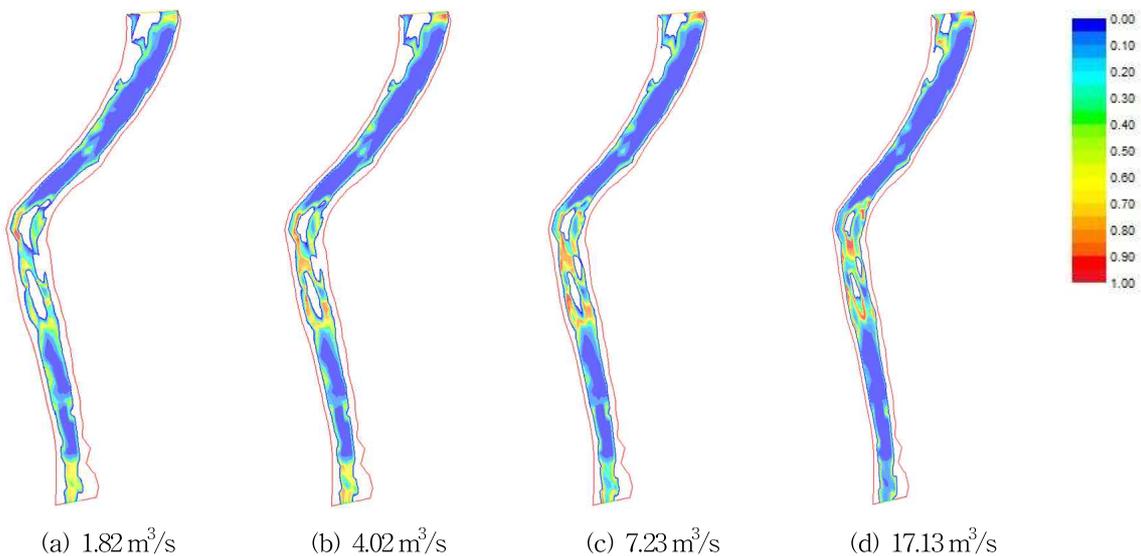


Fig. 11. Contour of Combined Habitat Suitability (habitat preference curve used)

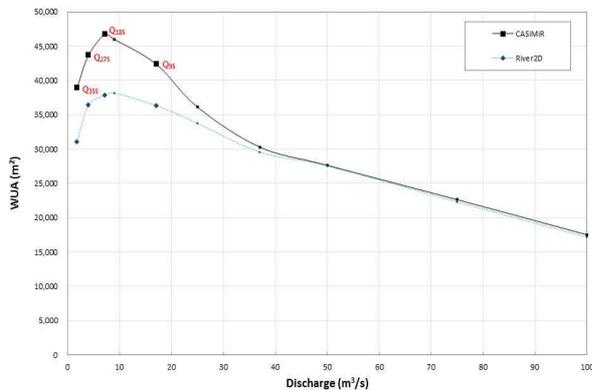


Fig. 12. Variation of Weighted Usable Area as a Function of Discharge

and 11에 따른 서식처 적합도 분포결과를 비교할 경우 두 모형에 의한 복합 서식처 적합도의 분포양상은 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 CASiMiR 모형과 River2D 모형을 이용하여 산정한 유량별 가중가용면적을 나타낸다. 그림을 살펴보면 25 m³/s 이하 유량조건에서 CASiMiR 모형이 River2D 모형보다 가중가용면적을 약 0.3~25.3% 정도 크게 산정하는 것으로 확인되었다. 이러한 가중가용면적의 차이는 갈수량, 저수량 등 낮은 유량에서는 크지만, 유량이 증가할수록 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 CASiMiR 모형이 River2D 모형의 수위자료를 활용하나 Eq. (5)에 따라 자체적으로 유속계산을 수행하므로 River2D 모형의 유속 결과와 차이가 발생하였다. Hauer et al. (2008)은 CASiMiR 모형과 River2D 모형의 유속 모의 결과에 대한 평균 편차(mean deviation)는 0.037 m/s를 보였으며 여울 구간에서 차이가 크게 발생한다고 제시한 바 있다. 본 연구 결과에서도 여울의 발생가능성이 높은 저(底)유량조건에서는 가중가용면적의 차이가 큰 반면, 유량이 증가하여 여울이 나타날 가능성이 낮은 고(高)유량조건에서는 가중가용면적의 차이가 줄어드는 결과를 보였다. 또한 두 모형 간 유속차이와 더불어 서식처 적합도 지수 산정 방법에 따른 차이가 발생한 것으로 보인다. 즉, 퍼지논리의 경우 모니터링 자료를 기반으로 퍼지규칙과 소속함수를 통해 서식처 적합도 지수를 산정하는 반면, 서식처 선호도 곡선의 경우 전문가 판단에 의해 가중치를 고려한 서식처 적합도 지수를 산정한다. 따라서 전문가 판단에 의한 서식처 선호도 곡선의 경우 전문가의 주관성이 포함되어 어류 모니터링 자료를 통한 퍼지논리 결과와 차이가 발생할 가능성이 있다.

5. 결론

본 연구에서는 퍼지논리를 적용한 서식처 적합도 지수 산정과 이를 기반으로 한 서식처 분석의 적용성을 검토하기 위하여 달천 유역(수전교~대수보 구간)에서 성어기 피라미에 대한 물리서식처 분석을 실시하였다. 물리서식처 모의를 위하여 퍼지논리를 적용한 CASiMiR 모형을 이용하였으며, 퍼지논리는 퍼지규칙 및 소속함수를 통해 서식처적합도 지수를 산정한다. 대상구간의 수리해석은 River2D를 이용하였고, River2D와 CASiMiR 모형에 의한 물리서식처 모의결과를 비교하였다.

River2D 모형을 이용하여 수리해석을 실시하고 산정된 유량별 수위자료는 CASiMiR 모형의 입력자료로 활용하여 대상 하천의 수리해석을 실시하였다. 대상구간의 현장측정자료와 비교한 결과 흐름 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

복합 서식처 적합도 분석 결과 퍼지논리와 서식처 선호도 곡선에 의한 분포양상이 유사하게 나타났다. 즉, 상하류단과 만곡부에서 성어기 피라미가 서식하기 적합한 수리조건(유속, 수심, 하상재료)을 갖고 있으며, 만곡부 지점에서 서식처 적합도가 최대값을 보였다. 그러나 유량이 증가할수록 하류단 일부와 만곡부 지점에서만 서식처 적합도가 증가하며, 상류단과 나머지 구간에서는 대부분 수심이 0.8 m 이상으로 성어기 피라미에게 적합하지 않은 서식조건을 보였다. 따라서 만곡부 상류 직선구간에 존재하는 여울이 성어기 피라미에게 적합한 서식지점으로 확인되었다.

CASiMiR 모형과 River2D 모형을 이용하여 산정된 가중가용면적을 비교한 결과, CASiMiR 모형은 7.23 m³/s에서 최대 가중가용면적이 산정되었으며 River2D 모형은 9 m³/s에서 나타났다. 또한 CASiMiR 모형이 가중가용면적을 약 0.3~25.3% 범위에서 과대 추정하는 결과를 보였다. 이는 두 모형 간의 유속과 서식처 적합도 지수 산정 방법의 차이에서 발생하는 것으로 보인다.

추후 지속적인 현장 모니터링을 통하여 현재 구축된 퍼지규칙과 소속함수의 개선작업이 필요하며, 퍼지논리를 이용한 CASiMiR 모형의 적용성을 평가하기 위하여 다양한 어종에 대한 퍼지규칙 및 소속함수의 구축이 필요하다. 또한 CASiMiR 모형은 유속, 수심, 하상재료 이외의 서식처 적합도 기준 산정을 위한 커버(피난처), 응달(그림자가 드리우는 정도), 공극공간(하상재료의 물함 정도), 응덩이의 유형에 관한 지수가 포함되어 있으며, 저서생물의 서식처 모형화를 위한 FST-반구 계산 등이 포함되어

있어 국내 하천의 적용성에 대한 연구를 통해 보다 다양한 인자를 반영한 면밀한 서식처 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 “하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발(11기술혁신C04)”과 “자연과 함께하는 하천복원 기술 개발(06기술핵심B01)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강정훈, 이은태, 이주현, 이도훈(2004). “어류의 서식처 조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 915-927.
- 강형식, 임동균, 정상화, 김규호(2008). “하천 어류의 서식처 적합도 기준 및 물리 서식처 해석.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제42권, 제9호, pp. 47-61.
- 강형식, 임동균, 김규호(2010). “댐 하류 하천에서 발전방류로 인한 어류 물리서식처 변화 수치모의.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제2B호, pp. 211-217.
- 강형식, 임동균, 허준욱, 김규호(2011). “금강수계 하천에서의 어류 서식처적합도지수 산정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제31권, 제2B호, pp. 193-203.
- 건설교통부(1995). 달천 하천정비기본계획회고서(준용하천). 건설교통부 하천계획과.
- 과학기술부(2007). 지표수 조사 시스템 적용. 21세기 프론티어 연구개발 사업. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업 연구보고서.
- 국토해양부(2008). 생물 서식환경 조성기술 개발 연구 보고서. 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구단.
- 김규호(1999). 하천 어류 서식 환경의 평가와 최적유량 산정. 박사학위논문, 연세대학교.
- 김지성, 이찬주, 김원(2007). “실측 수위에 의한 자갈하천의 조도계수 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 755-768.
- 성영두, 박봉진, 주기재, 정관수(2005). “하천의 어류 서식 환경을 고려한 생태학적 추천유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제7호, pp. 545-554.
- 임동균, 정상화, 안홍규, 김규호(2007). “피라미에 대한 보철거 구간에서의 물리서식처 모의(PHABSIM) 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제11호, pp. 909-920.
- 허준욱, 김정곤(2009). “용담댐 하류의 하천건강성 평가 및 어류 서식처를 고려한 최적 생태유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제6호, pp. 481-491.
- Bovee, K.D. (1982). *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Instream Flow Information Paper No. 12, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-82/26, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- Bovee, K.D., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J., and Henriksen, 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.
- Fladung, M., Scolten, M., and Thiel, R. (2003). “Modelling the habitat preferences of preadult and adult fishes on the shoreline of the large, lowland Elbe River.” *Journal of Applied Ichthyology*, Vol. 19, pp. 303-314.
- Garcia, A., Jorde, K., Habit, E., Caamano, D., and Parra, O. (2011). “Downstream Environmental Effects of Dam Operations: Changes in Habitat Quality for Native Fish Species.” *River Research and Applications*, Vol. 27, No. 3, pp. 312-327.
- Grift, R.E., Buijse, A.D., Van Densen, W.L.T., Machiels, M.A.M., Kranenbarg, J., Klein Breteler, J.G.P., and Backx, J.J.G.M. (2003). “Suitable habitats for 0-group fish in rehabilitated floodplains along the River Rhine.” *River Research and Applications*, Vol. 19, pp. 353-374.
- Hauer, C., Unfer, G., Schmutz, S., and Habersack, H. (2008). “Morphodynamic Effects on the Habitat of Juvenile Cyprinids (*Chondrostoma nasus*) in a Restored Austrian Lowland River.” *Environmental Management*, Vol. 42, pp. 279-296.
- Ibarra, A.A., Gevrey, M., Park, Y.S., Lim, P., and Lek, S. (2003). “Modelling the factors that influence fish guilds composition using a back-propagation network.”

- Ecological Modelling*, Vol. 160, pp. 281-290.
- Instream Flow and Aquatic Systems Group(IFASG) (1986). *Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology: Biologic report*. Instream flow information paper No. 21, National Ecology Center.
- Jorde, K. (2010). *Interim report of Investigations on physical habitat for Zacco Platypus in Dal River using modeling techniques*. sje, Stuttgart, Germany.
- Jorde, K., Schneider, M., and Zöllner, F. (2000). "Analysis of instream habitat quality-preference functions and fuzzy models." In: Wang, Hu(Eds.), *Stochastic Hydraulics*. Balkema, Rotterdam, pp. 671-680.
- Jorde, K., Schneider, M., Peter, A., and Zoellner, F. (2001). "Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment." *Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics*, Tempe, Arizona, U.S.A.
- Labonne, J., Allouche, S., and Gaudin, P. (2003). "Use of a generalised linear model to test habitat preferences: the example of Zingel asper, an endemic endangered percid of the River Rhône." *Freshwater Biology*, Vol. 48, pp. 687-697.
- Lee, J.H, Kil, J.T., and Jeong, S. (2010). "Evaluation of physical fish habitat quality enhancement designs in urban streams using a 2D hydrodynamic model." *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 10, pp. 1251-1259.
- Ligon, F.K., Dietrich, W.E., and Trush, W.J. (1995). "Downstream Ecological Effects of Dams." *Bioscience*, Vol. 45, No. 3, pp. 183-192.
- McCully, P. (1996). *Silenced Rivers-the Ecology and Politics of Large Dam*. Zed Books, London.
- Milner, A.M., Brittain, J.E., Castella, E., and Petts, G.E. (2001). "Trends of macroinvertebrate community structure in glacier-fed rivers in relation to environmental conditions: a synthesis." *Freshwater Biology*, Vol. 46, pp. 1833-1847.
- Moir, H.J., Gibbins, C.N., Soulsby, C., and Youngson A.F. (2005). "PHABSIM modelling of atlantic salmon spawning habitat in an upland stream: testing the influence of habitat suitability indices on model output." *River Research and Applications*, Vol. 21, No. 9, pp. 1021-1034.
- Poster, S., and Richter, B. (2003). *RIVERS FOR LIFE : Managing water for people and nature*. Island press, Washington DC, USA.
- Schneider, M. (2001). *Habitat-und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unschar-fen Berechnungsansätzen*, *Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau*, Heft 108, Universität Stuttgart, Eigenverlag, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Schneider, M., Noack, M., Gebler, T., and Kopecki, L. (2010). *Handbook for the habitat simulation model CASiMiR*. Schneider & Jorde Ecological Engineering GmbH and University of Stuttgart Institute of Hydraulic Engineering, Germany.
- Steffler, P., and Blackburn, J. (2002). *River2D: Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat*. Univesity of Alberta, Canada.
- Vadas, R.L., and Orth, D.J. (2001). "Formulation of habitat suitability models for stream fish guilds: do the standard methods work?" *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 130, pp. 217-235.
- Wentworth, C.K. (1922). "A scale of grade and class terms for classifying sediments." *Journal of Geology*, Vol. 30, No. 5, pp. 377-392.
- Wu, J.G., Huang, J.H., Han, X.G., Xie, Z.Q., and Gao, X.M. (2003). "Three-Gorges Dam-experiment in habitat fragmentation?" *Science*, Vol. 300, pp. 1239-1240.
- Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets." *Information and Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353.

논문번호: 11-131	접수: 2011.12.14
수정일자: 2012.01.10/01.12	심사완료: 2012.01.12