Ecology and Resilient Infrastructure (2016) 3(2): 134-142
http://dx.doi.org/10.17820/eri.2016.3.2.134

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

REVIEW ARTICLE

어류 분포에 미치는 기후변화 영향 평가를 위한 서식적합성 모형 적용

Application of Habitat Suitability Models for Assessing Climate Change Effects on Fish Distribution

심태용 · 배은혜 · 정진호*

고려대학교 환경생태공학과

Taeyong Shim, Eunhye Bae and Jinho Jung*

Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02854, Korea

Received 23 May 2016, revised 1 June 2016, accepted 20 June 2016, published online 30 June 2016

ABSTRACT: Temperature increase and precipitation changes caused by change alter aquatic environments including water quantity and quality that eventually affects the habitat of aquatic organisms. Such changes in habitat lead to changes in habitat suitability of the organisms, which eventually determines species distribution. Therefore, conventional habitat suitability models were investigated to evaluate habitat suitability changes of freshwater fish cause by change. Habitat suitability models can be divided into habitat-hydraulic (PHABSIM, CCHE2D, CASiMiR, RHABSIM, RHYHABSIM, and River2D) and habitat-physiologic (CLIMEX) models. Habitat-hydraulic models use hydraulic variables (velocity, depth, substrate) to assess habitat suitability, but lack the ability to evaluate the effect of water quality, including temperature. On the contrary, CLIMEX evaluates the physiological response against climatic variables, but lacks the ability to interpret the effects of physical habitat (hydraulic variables). A new concept of ecological habitat suitability modeling (EHSM) is proposed to overcome such limitations by combining the habitat-hydraulic model (PHABSIM) and the habitat-physiologic model (CLIMEX), which is able to evaluate the effect of more environmental variables than each conventional model. This model is expected to predict fish habitat suitability according to climate change more accurately.

KEYWORDS: Climate change, Habitat-hydraulic model, Habitat-physiologic model, Habitat suitability, Fish

요 약: 기후변화에 의한 온도 상승 및 강수량 변화는 수량 및 수질을 포함한 수환경의 변화로 이어져 결과적으로 수생생물의 서식지에 영향을 미친다. 이와 같은 서식지 변화는 생물종의 서식적합도 변화로 이어지고, 서식적합도에 의해 종분포가 결정된다. 따라서 기후변화에 의한 담수 어류의 서식적합성 변화를 예측하기 위하여 기존의 서식적합성 모형을 비교 및 분석하였다. 서식적합성 모형은 PHABSIM, CCHE2D, CASiMiR, RHABSIM, RHYHABSIM, River2D과 같은 서식지-수리 모형과 CLIMEX와 같은 서식지-생리 모형으로 구분하여 조사하였다. 서식지-수리 모형들은 수리학적 인자 (유속, 수심, 기질)를 이용하여 서식적합도를 예측하기 때문에, 수온을 포함한 수질의 영향을 평가할 수 없다. 반면, CLIMEX는 기후 인자에 대한 생물의 생리학적 반응을 평가하기 때문에, 물리적 서식지 (수리학적 인자)의 영향을 평가할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 서식지-수리 모형인 PHABSIM과 서식지-생리 모형인 CLIMEX의 구동 원리를 융합하여 기존의 모형들보다 다양한 환경 인자에 대한 영향을 예측할 수 있는 새로운 모형인 생태학적 서식적합성 모형 (EHSM)의 개념을 제안하였다. 이 모형은 기후변화에 의한 어류의 서식적합도 변화를 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어: 기후변화, 서식지-수리 모형, 서식지-생리 모형, 서식적합성, 어류

***Corresponding author:** jjung@korea.ac.kr, ORCID 0000-0002-7772-4141

ⓒ Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

IPCC 5차 보고서는 기후변화로 인하여 지난 130년간 지구 평균 기온이 약 0.85°C 상승하였다고 발표하였다 (IPCC 2013). 이러한 기온 상승은 단기적으로 극단 기후 현상의 빈도와 강도에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 장기적으로 온도 상승, 강수량 변화, 강수 패턴의 변화 등을 일으킨다. 특히, 하천의 경우에는 수온, 유량, 유속, 용존 산소, 영양물질 농도 등과 같은 수리 및 수질 인자의 변화가 발생하며 (Kim 2011), 이러한 변화가 일정 수준을 넘어가면 생물종의 서식적합도가 변하게 된다 (Fig. 1). 그리고, 서식적합도 변화에 따라 기존에 서식하던 생물종은 사라지거나 새로운 생물종이 유입되어 종분포가 변하게 된다 (Hooper et al. 2013). 일례로, Rose et al. (2000)과 Joo et al. (2008)은 다양한 연구를 통해 환경 변화에 따라 어류 종분포 변화가 일어나는 것을 확인하였다. 따라서, 기후변화에 의한 종분포 변화를 예측하고 서식지를 관리하기 위한 수단이 필요하며, 이러한 수단으로 종분포 모형 (species distribution model), 서식지 모형 (habitat model), 서식적합성 모형 (habitat suitability model), 생태지위 모형 (ecological niche model) 또는 지위 모형 (niche model) 등이 사용되고 있다 (Kearney 2006, Franklin 2009, Kearney and Porter 2009, Gallien et al. 2010, Bradley et al. 2012).

이 중에서 서식적합성 모형은 서식지를 묘사하는 환경 인자와 대상 생물종의 상관관계 분석을 통해 대상종의 서식지에 대한 적합도 혹은 대상종의 출현 확률을 산출하는 모형으로 (Hirzel and Lay 2008), 모형 구동 과정에서 생물종의 생활사에 대한 상세한 기작 (성장, 번식, 사망 등)을 포함하지 않는다 (Kearney 2006). 특히, 서식적합성 모형은 모니터링 자료와 실험 자료를 사용하여 환경 인자의 서식적합도 곡선 또는 함수를 개발하고 이를 이용하여 서식적합도 지수 (habitat suitability index, HSI)를 산정한다. 이를 통하여 생물종의 환경에 대한 서식적합도와 그에 따른 종분포를 묘사할 수 있고, 미래 기후변화 조건에서 서식적합도 변화와 그에 따른 종분포 변화를 예측할 수 있다. 따라서, 본 총설에서는 기존 연구에 사용된 서식적합성 모형을 비교 분석하고 기후변화에 의한 어류 서식적합성 변화를 예측하기 위한 모형을 제시하고자 한다.

2. 서식적합성 모형 특성과 적용성 검토

본 총설에서 비교 분석한 서식적합성 모형은 Table 1과 같으며, 크게 서식지-수리 (habitathydraulic) 모형 (PHABSIM, CCHE2D, CASiMiR, RHABSIM, RHYHABSIM, River2D)과 서식지-생리 (habitatphysiologic) 모형 (CLIMEX)으로 구분할 수 있다. PHABSIM은 미국에서 하천 관리를 위해 개발된 결정 시스템인 유지유량 증분법 (instream flow incremental methodology)에서 중간 (meso) 그리고 미소 (micro) 서식지를 모의하는 모형이다. 이 모형은 생물학적 요구에 맞춘 수리 조건을 통해 서식적합성을 평가하고 최종적으로 서식지 유지를 위해 요구되는 유량을 결정한다 (Bovee et al. 1998, MOE 2013). 따라서, PHABSIM은 수리 모의와 서식적합성 모의로 구성되어 있다. 수리 모의는 서식적합성 모의에 사용될 인자를 계산하는 과정으로, 하천의 수위, 유량 그리고 지형 등의 특성을 이용해 유속과 수심을 예측한다. 서식적합성 모의는 앞서 산출된 유속과 수심 그리고 현장 조사를 통해 얻을 수 있는 기질 (하도 구조)에 대한 대상 어종의 서식적합도를 평가하여 가중가용면적 (weighted usable area, WUA)을 산출하고, 이를 유량과의 관계식 (flow-WUA curve)으로 나타낸다. 그리고, 최종적으로 가중가용면적과 유량간의 관계를 통하여 적정 유량을 찾는 것이 주된 목적이다.

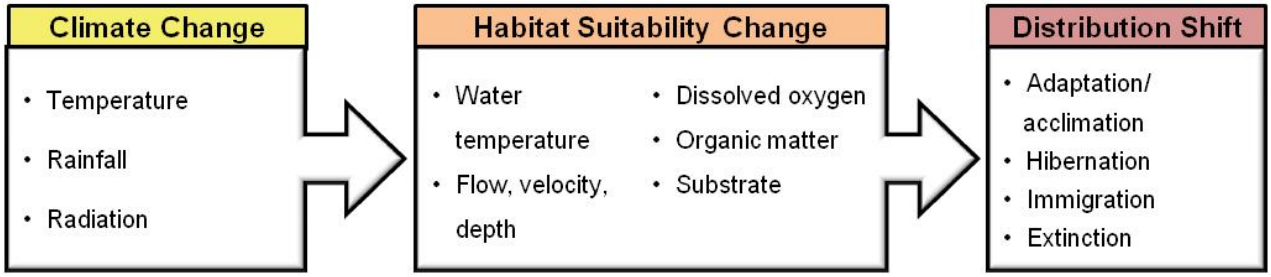

Fig. 1. Outcome pathways from climate change to ecological effects (modified from Hooper et al. (2013)).

Table 1. Characteristics of habitat suitability models considered in this study.

Model	Description	Country Developed	Year	Developer	Reference
PHABSIM	- It uses 1D hydraulic equations - Water velocity, depth, substrate are the only environmental variables that describes stream habitats	USA	1984	Milhous	Bovee et al. (1998)
CCHE2D	- It uses 2D depth-averaged hydraulic equations - Habitat suitability model is equal to PHABSIM - It is available to simulate sediment transfer.	USA	1999	Jia and Wang	Wu et al. (2006)
CASiMiR	- It uses 1D or 2D hydraulic models depending on input data - Habitat suitability model is equal to PHABSIM - It applies fuzzy logic to offer flexibility to the suitability curves	Germany	1997	University of Stuttgart	Schneider et al. (2010)
RHABSIM	- It is an improved version of PHABSIM - Time series analysis is available	USA	1998	Payne	Macura et al. (2016)
RHYHABSIM	- It was developed based on PHABSIM - Simplified variables are used in hydraulic calculation	New Zealand	1989	Jowett	Thorn and Conallin (2006)
River2D	- It solves 2D depth-averaged hydraulic equations - Habitat suitability model is equal to PHABSIM	Canada	2002	Steffler and Blackburn	Gard (2009)
CLIMEX	- It uses climatic variables to describe the growth and stress of species - Ecoclimatic index represents habitat suitability	Australia	2007 (ver. 3)	Hearne Software	Kirticos et al. (2015)

CCHE2D는 1차원 수치 모형인 PHABSIM과 달리 2차원 수치 모형으로 (Wu et al. 2006), 유사 이동을 모의할 수 있기 때문에 수심 또는 기질의 변화에 대한 서식적합도 변화를 예측할 수 있다 (Ahn and Lyu 2013, Lee et al. 2014). 그리고, CASiMiR는 fuzzy logic (fuzzy rules, fuzzy sets)을 이용하여 각 인자 (수심, 유속, 기질)들의 서식적합도 곡선을 산정한다. 일반적으로 정성적인 수생태 조사 자료는 전문가 의견을 기반으로 제작된 fuzzy rule을 통해 수치로 나타낼 수 있다. 특히, 이 모형은 환경 인자간의 상호작용도 반영할 수 있다는 장점이 있다 (Schneider et al. 2010, Jung et al. 2012). RHABSIM (riverine habitat simulation model)은 PHABSIM을 개량한 모형으로, 시계열 분석을 수행할 수 있다. RHYHABSIM (river hydraulic habitat simulation)도 PHABSIM을 기반으로 개발된 모형으로, PHABSIM에 비하여 수리 모의 입력 자료가 적어 모의 능력은 감소하지만, 사용이 편리하고 재현성이 높은 정확한 자료를 출력할 수 있도록 개발되었다 (Hudson et al. 2003, Thorn and Conallin 2006). River2D는 하천의 수심을 평균화한 유한요소모형을 사용하는 2차원 모형으로, 1차원 모형에 비하여 동일 공간에서 서식지를 더욱 현실적으로 묘사할 수 있다 (Oh et al. 2008, Gard 2009).

CLIMEX는 기후 인자를 기반으로 대상 생물종의 서식적합성을 예측하는 모형으로, 기후환경인자에 따른 성장 및 스트레스 함수를 이용하여 생태기후지수 (ecoclimatic index, EI)를 산출한다. EI는 사용자의 정의에 따라 구분할 수 있으나, 일반적으로 0은 단기간에도 생물종이 생존하기 힘든 부적합한 서식지, 20 – 30은 큰 개체군을 유지할 수 있는 매우 적합한 서식지, 그리고, 100에 근접할수록 실험실 조건과 같은 이상적인 서식지로 구분한다 (Taylor and Kumar 2013, Kirticos et al. 2015). 성장에 이용되는 기후 인자는 온도, 습도, 조도 (light), 복사 (radiation), 기질 (substrate)이며, 생물종에 따라 휴면기

도 입력할 수 있다. 그리고, 이들 모형에 사용되는 스트레스 인자는 저온 (cold), 고온 (heat), 건조 (dry), 수분 (wet)이 있다.

상기에서 살펴본 바와 같이, 서식지-수리 모형은 생물이 수리학적 환경 변동에 따라 반응하는 것을 가정한다. 특히, 어류는 선호하는 조건에 따라 서식지를 선택하기 때문에 하천의 물리적 서식지 조건이 악화되면 서식지에 대한 선호도, 즉 서식적합도가 감소하게 된다 (Park 2010). 한편, 서식지-생리 모형인 CLIMEX는 물리적 환경 (이 경우에는 수리학적 환경)보다 기후 인자에 대한 생물의 생리학적 내성을 반영한다 (Kriticos et al. 2015). 기후변화에 따른 기온과 강수량 변화는 유량을 비롯한 수리학적 변화와 수온, DO, TN, TP 등의 수질 인자들의 변화를 야기하며, 이것은 수생생물의 서식지를 변화시키고 궁극적으로 이들의 종분포를 변화시킨다 (Dyer et al. 2013, Hooper et al. 2013). 그러나 서식지-수리 모형은 수리 인자 외의 환경 인자가 어류에 미치는 영향을 평가할 수 없으며, 결과적으로 기후변화에 의한 영향을 제대로 반영하기 어렵다. 따라서, 어류의 서식적합성에 미치는 기후변화의 영향을 평가하기 위해서는 서식지-수리 모형과 서식지-생리 모형의 융합이 필요하다.

3. 어류 서식적합성 평가 사례

일반적으로 서식지-수리 모형은 어류의 하천 유지유량 (instream flow) 또는 생태유량 (ecological flow, instream ecological flow) 산정을 위하여 이용되었다 (Table 2). 국내의 경우, Sung et al. (2005)은 PHABSIM을 이용하여 낙동강 유역의 6 개 하천을 대상으로 피라미와 갈겨니의 서식적합도 기준 (서식적합도 곡선)을 작성하였고, 11 개 하천의 생태유량을 산정하였다. 11 개 지점 중 4 개 지점은 기존 생태유량 혹은 유지유량과 비교하여 위천, 황강, 밀양강은 유지유량을 높여야 한다고 주장하였다. Lee et al. (2006)은 PHABSIM을 이용하여 한강 수계의 주요 하천 9 지점에 서식하는 대표 어종인 피라미 (*Zacco platypus*)의 필요 유량을 산정하였다. 대상 지점의 수리학적 특성 (유량, 유속, 수심)과 하상재료 (기질)

Table 2. Case study of habitat suitability models considered in this study.

Model	Target species	Input variables	Region	Reference
PHABSIM	*Zacco platypus*	Depth, flow, cross section characteristics, suitability curve, velocity, water level	Korea	Lee et al. (2006)
CCHE2D	*Zacco platypus*	Bed elevation, depth, flow, cross section characteristics, substrate, suitability curve, velocity, water level	Korea	Lee et al. (2014)
CASiMiR	*Cottus gobio*	Bed elevation, depth, flow, cross section characteristics, substrate, suitability curve, velocity, water level	Belgium	Mouton et al. (2007)
RHABSIM	*Salmo trutta*	Depth, flow, cross section characteristics, suitability curve, velocity	Slovakia	Macura et al. (2016)
RHYHABSIM	*Salmo trutta*	Depth, flow, cross section characteristics, substrate, suitability curve, velocity	Denmark	Thorn and Conallin (2006)
River2D	*Coreoleuciscus splendidus, Iksookimia koreensis, Odontobutis platycephala, Pungtungia herzi, Zacco koreanus, Z. platypus*	Depth, flow, cross section characteristics, suitability curve, geomorphologic characteristics, velocity, water level	Korea	Kim (2015)
CLIMEX	*Cyprinus carpio*	Temperature (air), thermal tolerance (growth and stress)	Australia	Koehn (2004)

및 어류 분포는 현장조사를 통해 수집하였고, 이 자료들을 이용하여 Washington Department of Fish and Wildlife (WDFW)에서 제시된 방법에 따라 서식적합도 곡선을 작성하였다 (WDFW 1996). Choi (2008)는 원주천에서 갈겨니의 서식환경 개선을 위하여 PHABSIM을 사용해서 유지유량을 산정하고, 유지유량을 맞추기 위해 하수도시스템 개선을 통한 두 가지 방안을 제시하였다. 그리고 유량 확보에 따른 BOD 수질 개선 효과를 QUAL2E 모형을 사용하여 확인하였다. Park (2010)은 하천 내에 자연복원력을 위해 하천환경시설물 설치한 성환천에서 서식하는 우점종인 붕어의 성장 단계별로 PHABSIM을 사용하여 생태유량을 산정하였고, QUAL2E를 사용하여 수질 인자 (온도, 용존 산소, BOD)를 예측하고 생태유량 산정 과정에 이를 고려하였다. Kim and Choi (2015)는 내성천에서 댐 하류의 하상변동이 어류의 서식적합성에 미치는 영향을 분석하였다. 그들은 1D 준정류 모형과 Exner 방정식을 이용하여 방류 시나리오에 따른 하상 구조의 변화 (기질 입도)를 예측하였고, PHABSIM을 사용하여 서식적합도를 분석하였다.

그리고, Lee et al. (2014)은 CCHE2D를 사용하여 달천 유역을 대상으로 홍수기에 관측된 유량 및 수위 자료를 이용하여 하상구조의 변동 (침식 및 퇴적)과 피라미의 서식적합성을 예측하였다. 그 결과, 하천 상류와 하류에서 수심 및 유속 변화로 인하여 피라미의 서식적합도가 증가한 것으로 나타났다. Kim (2015)는 River2D를 사용하여 전주천 상류의 수리 조건을 모의하고 HEC-RAS를 사용하여 보정을 수행한 후, 하천에 서식하는 여섯 종의 어류 (쉬리 *Coreoleuciscus splendidus*, 참종개 *Iksookimia koreensis*, 동사리 *Odontobutis platycephala*, 돌고기 *Pungtungia herzi*, 참갈겨니 *Zacco koreanus*, 피라미 *Z. platypus*)의 서식적합도를 분석하고 각 어종의 생태유량을 산정하였다. 이와 같이 국내에서 이루어진 연구들은 하천 관리 차원에서 유지유량 혹은 생태유량을 산정하는 연구 (Lee et al. 2006, Park 2010, Sung et al. 2005) 위주로 이루어지다가, 이후 기질의 변화 (Kim and Choi 2015, Lee et al. 2014)나 하천 구조의 변화 (Im et al. 2011) 그리고 기후변화 (Kim 2015)와 같은 환경적인 변화에 의한 서식적합성 변화를 모의 또는 예측하는 연구가 늘고 있는 추세이다.

국외의 경우, Li et al. (2013)은 PHABSIM의 서식적합성 평가 알고리즘을 응용하여 거저우바 및 삼협댐 건설이 양자강에 서식하는 네 잉어 종의 서식적합도에 미친 영향을 분석하였고, 최소와 최적 그리고 최대 생태유량을 제시하였다. 이들은 댐 시공과 함께 WUA의 감소를 확인하였으나, 댐 건설 전후로 유량 변화에 의해 서식적합도가 유의한 영향을 보이지 않았다. 이러한 결과는 부유물질 유입 감소에 따른 하천 기질 변화에 의한 영향으로 분석되었다. Viganó et al. (2015)는 PHABSIM을 이용해서 이탈리아에 위치한 Serio 강을 대상으로 기후변화 시나리오 별로 수리학적 변화에 따른 *Salmo trutta* (brown trout)의 성장 단계별 서식적합도 변화를 모의하였다. 그 결과, 미래에는 유어와 성어의 연간 서식적합도는 증가하는 경향을 보였지만, 성장 단계에 따라 계절의 제약을 받게 될 것으로 예측되었다.

Mouton et al. (2007)은 CASiMiR를 이용하여 벨기에의 Zwalm 강의 하천 구조 변화가 *Cottus gobio*의 서식적합도에 미치는 영향을 예측하였다. 그들은 수리모형으로 1 차원 모형인 HEC-RAS를 사용하였고, 기존 연구를 바탕으로 한 전문 지식을 기반으로 fuzzy logic을 이용하여 서식적합도를 계산하였다. 한편, 이들은 fuzzy logic이 수리 모형으로 설명하지 못하는 부분을 보충할 수 있다는 점에서 CASiMiR가 앞으로 이용할 가치가 높은 모형이라 주장하였다. Macura et al. (2016)은 RHABSIM을 사용하여 슬로바키아의 바흐강 유역 외 총 6개 유역을 대상으로 *Salmo trutta*의 생태유량 산정 연구를 수행하였다. 이들은 현장 조사를 통해 대상 지점의 유속, 수심, 기질 등을 기록하고 어류 채집도 수행한 다음, RHABSIM을 이용하여 현재 및 두 미래 시나리오에 따른 서식적합도를 예측하였다. 그 결과, 기후변화에 의해 *Salmo trutta*의 서식적합도가 감소할 것으로 예측되었다. Thorn and Conallin (2006)은 RHYHABSIM을 이용하여 덴마크의 세 하천에 서식하는 지표종인 *S. trutta*의 서식적합도를 평가하고 최적유량을 산정하였다. 이들은 선행된 *S. trutta* 연구를 통해 성장 단계별 (산란, 치어) 서식적합도 곡선을 산정한 후, 대상 지점의 수심, 유속, 유량, 기질과 하천 단면 등의 자료를 조사 및 수집하였다. 모형 구동 결과, 두 하천은 *S. trutta* 유지를 위해 적절한 유량을 유지했지만, 한 하천은 일시적으로 그러지 못하였다는

것을 알아냈고, 하천 관리 차원에서 RHYHABSIM과 같은 모형이 유용하다고 평가하였다.

이상의 서식지-수리 모형들은 수심, 유속, 기질 등의 물리적 (수리학적) 서식지 변화만을 고려하고 있기 때문에 수온 및 수질 등이 생물종 분포에 미치는 영향을 충분히 반영하지 못한다는 단점이 제시되어 왔다 (Milhous 1999, Mouton et al. 2007, Park 2012, Li et al. 2013). 한편, Koehn (2004)는 서식지-생리 모형인 CLIMEX을 이용하여 침입종인 잉어 (*Cyprinus carpio*)의 EI를 계산하고, 기존의 출현 정보와 비교하였다. 그 결과, CLIMEX가 현재 잉어의 종분포를 잘 설명하며, 대부분의 지점들이 잉어 침입에 취약한 것을 알아내었다. 따라서, CLIMEX는 기후변화에 따른 생물의 성장과 스트레스 예측이 가능한 점에서 어류 서식적합성 평가에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 어류 서식적합성 평가 모형 제안

기후변화에 따른 수리 및 수질 인자의 변화가 어류의 서식적합성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 서식지-수리 모형인 PHABSIM과 서식지-생리 모형인 CLIMEX을 융합한 모형을 제안하고자 한다 (Fig. 2). 수리학적 서식적합성 모의는 PHABSIM의 구동 원리와 일치하며, 입력 자료는 유량, 유속, 수심, 수위 등의 수리 수문 자료 등이다. 현재 유량 및 미래 기후변화 시나리오에 따른 유량은 강우-유출 모형 또는 통계 모형을 적용하여 계산할 수 있다. 수리 모의 과정은 기존의 서식지-수리 모형에서 사용되는 STGQ (stagedischarge analysis using regression)를 통한 유량과 수위의 관계식 산출과 상관 회귀분석을 통한 유속 모의가 있다. 기후변화에 의한 영향은 중간 혹은 미소 서식지가 아닌 큰 (macro, landscape 등) 공간적인 규모에 걸쳐 일어나고 그에 대한 해석을 수행하기 위해 수리 모의 과정을 단순화

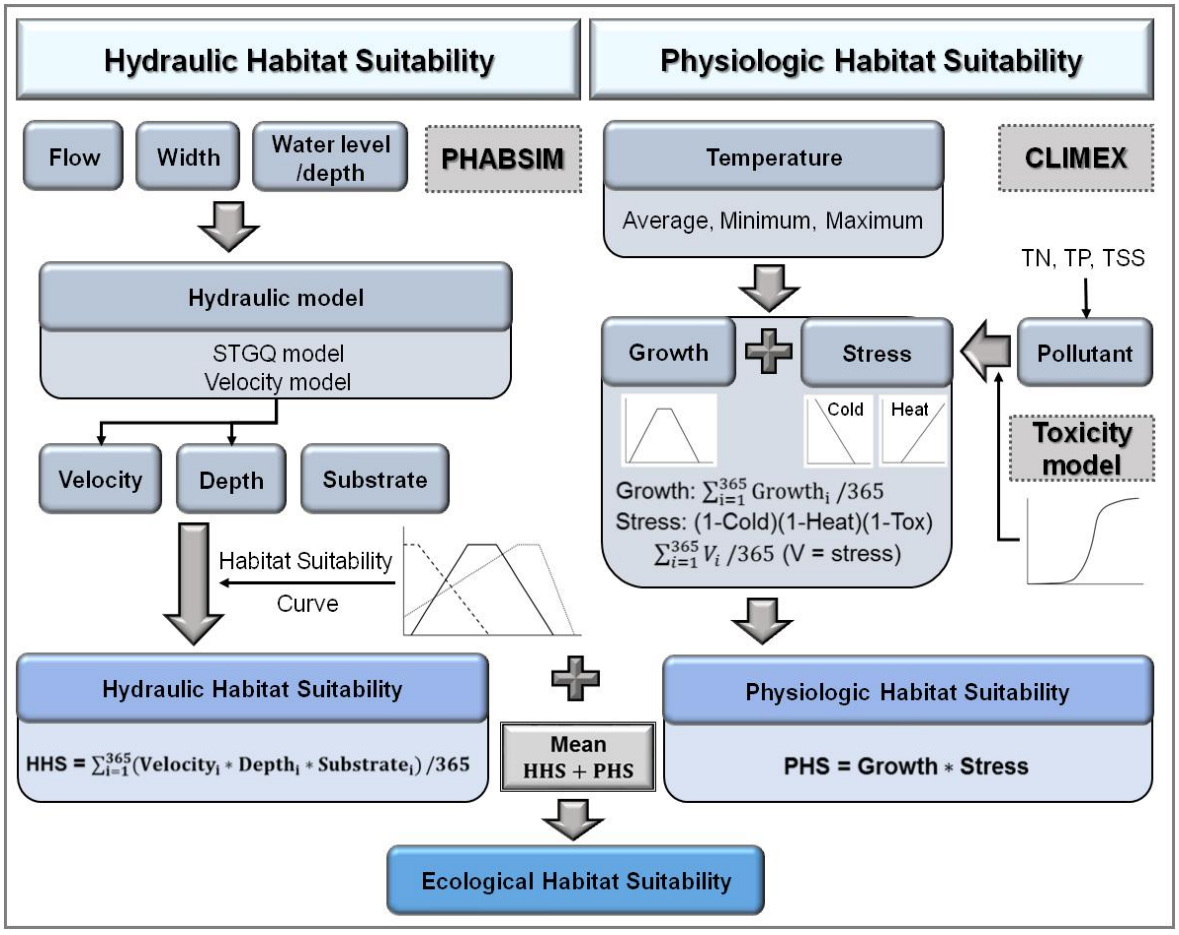

Fig. 2. An ecological habitat suitability model that integrates the conventional habitat-hydraulic model (PHABSIM) and the habitat-physiologic model (CLIMEX) (HHS, hydraulic habitat suitability; PHS, physiologic habitat suitability; STGQ, stage-discharge model; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; TSS, total suspended solids).

하고자 한다. 수리 모의를 통하여 계산되는 유속과 수심은 PHABSIM과 같은 원리로 서식적합성 평가에 이용되고, PHABSIM의 HSI 또는 CSI (composite habitat suitability index)와 유사한 수리학적 서식적합도 (hydraulic habitat suitability, HHS)가 계산된다.

생리학적 서식적합성 모의에 사용되는 CLIMEX는 일반적으로 온도와 습도를 서식적합도 예측에 사용한다. 입력되는 온도, 즉 수온은 관찰된 기온과 수온의 관계식을 통해 계산할 수 있는데, 미래 기후변화 시나리오에 따른 기온을 이용하여 미래 수온을 같은 관계식을 이용하여 예측할 수 있다. 한편, 습도는 수환경에서 거의 영향이 없기 때문에 생리학적 서식적합성 모의는 온도에 대한 생물종의 성장 및 스트레스를 예측한다 (Fig. 2). 이와 같은 온도에 따른 성장과 스트레스는 각 개체군이 생존에 적합한 계절과 부적합한 계절에서 일어나는 것으로 가정하며, 생활 단계나 세대에 따른 영향은 고려하지 않고 개체군의 평균적인 반응만을 고려한다 (Kriticos et al. 2015). 성장 및 스트레스 함수는 실험 자료와 관찰 자료를 통해 산정할 수 있고, CLIMEX의 EI에 해당하는 생리학적 서식적합도 (physiologic habitat suitability, PHS)는 성장과 스트레스 각각의 연간 평균을 곱하여 계산할 수 있다. 한편, 생리학적 서식적합성 모의 과정에서 스트레스 함수의 일종으로 독성 모형을 추가하여 오염물질 (TN, TP, TSS 등)이 생물종에 미치는 영향을 예측한다.

상기의 HHS와 PHS는 각각 연평균 수리학적 및 생리학적 서식적합도를 나타내는 지수이다. 따라서, 수리학적 및 생리학적 서식적합성을 모두 고려한 생태학적 서식적합성 (ecological habitat suitability, EHS)은 HHS와 PHS을 평균 (산술 평균, 기하 평균, 조화 평균 등)하여 계산한다 (Fig. 2). 그리고, 사용자 정의에 따라 각 적합도지수 (HHS, PHS)에 가중치를 부여하여 영향력을 차별화할 수 있다 (예, EHS = (8*HHS+2*PHS)/10). 결과적으로, EHS는 수리학적 그리고 생리학적 적합성을 모두 모의할 수 있기 때문에, 기후변화에 따른 어류의 서식적합성 변화의 미래 예측 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대된다. 본 총설에서는 서식적합성 융합 모형의 개념만을 제시하고 있으며, 추후 모델 개발 과정에서 모의 대상 규모, 모의 입력 인자, 인자의 시변성 및 상호연관성 등에 대한 구체적인 검토가 필요하다.

5. 결론

기존의 서식적합성 모형을 분석한 결과, 어류를 대상으로 적용된 모형은 대부분 서식지-수리 모형이라는 사실을 알 수 있었다. 하지만, 이러한 모형들은 온도와 수질 인자와 같은 수리 외의 환경 인자에 대한 해석이 부족하고, 어류의 생리적인 반응을 반영하고 있지 않기 때문에 기후변화에 따른 어류 서식적합도 예측에 적절하지 않은 것으로 평가되었다. 따라서 본 총설에서는 기존의 서식지-수리 모형인 PHABSIM과 서식지-생리 모형으로 정의될 수 있는 CLIMEX를 융합한 모형의 개념을 제안하였다. 이 모형은 수리학적 및 생리학적 인자들이 어류의 서식적합성에 미치는 영향을 반영하기 때문에, 기후변화에 따른 어류의 서식적합도 변화를 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업 (2014001310008)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Ahn, J.M. and Lyu, S. 2013. Analysis of flow bed change on hydraulic structure using CCHE2D: Focusing on Changnyong-Haman. Journal of Korea Water Resources Association 46: 707-717. (in Korean)

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, Fort Collins, CO, USA.

Bradley, B.A., Olsson, A.D., Wang, O., Dickson, B.G., Pelech, L., Sesnie, S.E. and Zachmann, L.J. 2012. Species detection vs. habitat suitability: Are we biasing habitat suitability models with remotely sensed data? Ecological Modelling 244: 57-64.

Choi, H.S., 2008. Effect on water quality and fish habitat improvement of Wonju cheon by instream flow increasing. Journal of Wetlands Research 10: 57-68. (in Korean)

Dyer, F., Sawah, S.E., Lucena-Moya, P., Harrison, E., Croke, B., Tschierschke, A., Griffiths, R., Brawata, R., Kath, J., Reynoldson, T. and Jakeman, T. 2013. Predicting Water Quality and Ecological Responses. National Climate Change Adaption Research Facility, Gold Coast, Australia.

Franklin, J. 2009. Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Gallien, L., Münkemüller, T., Albert, C.H., Boulangeat, I. and Thuiller, W. 2010. Predicting potential distributions of invasive species: where to go from here? Diversity and Distributions 16: 331-342.

Gard, M. 2009. Comparison of spawning habitat predictions of PHABSIM and River2D models. International Journal of River Basin Management 7: 55-71.

Hirzel, A.H. and Lay, G.L. 2008. Habitat suitability modelling and niche theory. Journal of Applied Ecology 45: 1372-1381.

Hooper, M.J., Andley, G.T., Cristol, D.A., and Maryoung, L.A., Noyes, P.D. and Pinkerton, K.E. 2013. Interactions between chemical and climate stressors: A role for mechanistic toxicology in assessing climate change risk. Environmental Toxicology and Chemistry 32: 32-48.

Hudson, H.R., Byrom, A.E. and Chadderton, L. 2003. A Critique of IFIM – Instream Habitat Simulation in the New Zealand Context. Science for Conservation 231, Department of Conservation, Wellington, New Zealand.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Joo, G.J., Kim, D.H., Yoon, J.D. and Jeong, K.S. 2008. Climate changes and freshwater ecosystems in South Korea. Korean Society of Environmental Engineers 30: 1190-1196. (in Korean)

Jung, S., Jang, J. and Choi, S-U. 2012. Physical habitat modeling in Dalcheon stream using fuzzy logic. Journal of Korea Water Resources Association 45: 229-242. (in Korean)

Kearney, M. 2006. Habitat, environment and niche: what are we modelling? Oikos 115: 186-191.

Kearney, M. and Porter, W. 2009. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species ranges. Ecology Letters 12: 334-350.

Kim, K-O. 2015. Estimation of Ecological Flow and Habitat Suitability Index for Species at Jeoju-cheon upstream. Master Thesis, Chonbuk National University, Jeonju, Korea. (in Korean)

Kim, S.J. 2011. Impact of Climate Change on Water Resources and Ecological Habitat in a River Basin. Ph.D. Dissertation, Inha University, Incheon, Korea. (in Korean)

Kim, S.K., and Choi, S-U. 2015. Simulation of change in physical habitat of fish using the mobile bed model in a downstream river of dam. Ecology and Resilient Infrastructure 2: 317-323. (in Korean)

Koehn, J.D. 2004. Carp (Cyprinus carpio) as a powerful invader in Australian waterways. Freshwater Biology 49: 882-894.

Kriticos, D.J., Maywald, G.F., Yonow, T., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I. and Sutherst, R.W. 2015. CLIMEX Version 4: Exploring the Effects of Climate on Plants, Animals and Diseases. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Canberra, Australia.

Lee, J.H., Jeong, S.M., Lee, M.H. and Lee, Y.S. 2006. Estimation of instream flow for fish habitat using instream flow incremental methodology (IFIM) for major tributaries in Han river basin. Journal of the Korean Society of Civil Engineers B 26: 153-160. (in Korean)

Lee, S., Kim, S.K. and Choi, S-U. 2014. Physical habitat simulation considering stream morphology change due to flood. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 34: 805-812. (in Korean)

Li, J., Xia, Z. and Wang, Y. 2013. A time-series model for assessing instantaneous physical conditions in carp habitats. Ecohydrology 6: 393-401.

Macura, V., Štefunková, Z. and Škrinár, A. 2016. Determination of the effect of water depth and flow velocity on the quality of an in-stream habitat in terms of climate change. Advances in Meteorology doi:10.1155/2016/4560378.

Milhous, R. 1999. History, Theory, Use, and Limitations of the Physical Habitat Simulation System. Proceedings of the 3rd International Symposium on Ecohydraulics, Utah, USA.

MOE. 2013. Development of Integrated Prediction Model in Aquatic Ecosystem (I). Ministry of Environment, Sejong, Korea. (in Korean)

Mouton, A.M., Schneider, M., Depestele, J., Goethals, P.L.M. and Pauw, N.D. 2007. Fish habitat modelling

as a tool for river management. Ecological Engineering 29: 305-315.

Oh, K.R., Jeong, S.M., Lee, J.H., Choi, G.W. and Kim, D.H. 2008. Estimation of optimum flow needed for fish habitat by application of one and two dimensional physical habitat simulation model focused on Zacco Platypus. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation 8: 117-123. (in Korean)

Park, C-S. 2010. Evaluation of Instreamflow for Fish Habitat and Water Quality in the Seonghwan Stream. Master Thesis. Kongju National University, Kongju, Korea. (in Korean)

Park, M.O. 2012. Study on Physical Characteristics Variation of Fish Habitat by Influence of Climate Change. Ph.D. Dissertation. Dong-Shin University, Naju, Korea. (in Korean)

Rose, G.A., Young, B., Kulka, D.W., Goddard, S.V. and Fletcher, G.L. 2000. Distribution shifts and overfishing the northern cod (*Gadus morhua*): a view from the ocean. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 57: 644-663.

Schneider, M., Noack, M., Gebler, T. and Kopecki, I. 2010. Handbook for the Habitat Simulation Model CASiMiR. Translated by Tuhtan, J., Schneider & Jorde Ecological Engineering GmbH and University of Stuttgart Institute of Hydraulic Engineering, Stuttgart, Germany.

Sung, Y.D., Park, B.J., Joo, G.J. and Jung, K.S. 2005. The estimation of ecological flow recommendations for fish habitat. Journal of Korea Water Resources Association 38: 545-554. (in Korean)

Taylor, S. and Kumar, L. 2013. Potential distribution of an invasive species under climate change scenarios using CLIMEX and soil drainage: A case study of Lantana carnara L. in Queensland, Australia. Journal of Environmental Management 114: 414-422.

Thorn, P. and Conallin, J. 2006. RHYHABSIM as a stream management tool: Case study in the river Kornerup catchment, Denmark. The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies 5: 1-18.

Viganó, G., Confortola, G., Fornaroli, R., Cabrini, R., Canobbio, S., Mezzanotte, V. and Bocchiola, D. 2015. Effects of future climate change on a river habitat in an Italian alpine catchment. Journal of Hydrologic Engineering 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001293, 04015063.

WDFW. 1996. Instream Flow Study Guidelines. Washington Department of Fish and Wildlife, Olympia, WA, USA.

Wu, W., Inthasaro, P., He, Z. and Wang, S.S.Y. 2006. Comparison of 1-D and depth-averaged 2-D fish habitat suitability models. Proceedings of the Seventh International Conference on Hydroscience and Engineering. Philadelphia, USA. pp. 1-10.