

River2D를 이용한 낙동강-금호강 합류부의 생태유량 산정

서일원* · 박인환**

Seo, Il Won*, Park, Inhwan**

Determination of Ecological Flow at the Confluence of Nakdong River and Gumho River Using River2D

ABSTRACT

In this study, WUA (Weighted Usable Area) was calculated to determine ecological flow at the confluence of Nakdong River and Gumho River by using River2D. To calibrate River2D, simulation results of River2D were compared with calibrated HEC-RAS simulation results and the optimum parameters were determined. After parameter calibration, WUA of Zacco platypus and Zacco temmincki which are dominant species in Nakdong River was calculated with changing upstream flowrate. From the result, WUA is changed according to flowrate and growth stage. In the flowrate-WUA/A graph, ecological flow can be determined as $33.3 \text{ m}^3/\text{s} \sim 39.96 \text{ m}^3/\text{s}$ in Nakdong River and $3.6 \text{ m}^3/\text{s} \sim 4.32 \text{ m}^3/\text{s}$ in Gumho River. After dredging for Four major rivers restoration project, WUA of Zacco platypus and Zacco temmincki were calculated by using the ecological flow. The results show that WUA after dredging are decreased when compared with undredged condition. WUA of Common carp is 2 ~ 3 times bigger than WUA of Zacco platypus and Zacco temmincki at the dredged condition in Nakdong River.

Key words : River confluence, River dredging, Ecological flow, River2D, WUA

초 록

본 연구에서는 낙동강-금호강 합류부의 생태유량을 산정하기 위해 2차원 수치모형 River2D를 이용하여 가중가용면적(WUA, Weighted Usable Area)을 계산했다. River2D 모형의 검증을 위해 HEC-RAS모의결과와 비교하여 최적 매개변수를 결정했다. 그리고 낙동강의 우점종인 피라미와 갈겨니를 대상으로 낙동강과 금호강의 유량을 변화시키며 가중가용면적을 모의했다. 유량-WUA/A의 그래프로부터 생태유량을 산정한 결과, 낙동강의 경우 $33.3 \text{ m}^3/\text{s} \sim 40.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 금호강의 경우 $3.60 \text{ m}^3/\text{s} \sim 4.32 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 낙동강-금호강 합류부의 생태유량으로 결정하였다. 결정된 생태유량을 적용하여 낙동강 본류의 하상준설 이후 피라미와 갈겨니의 가중가용면적을 계산한 결과, 가중가용면적이 약 1/9로 감소했다. 그리고 준설 이후에 잉어에 대한 가중가용면적은 피라미와 갈겨니에 대한 것보다 2 ~ 3배 더 큰 것으로 계산됐다.

검색어 : 지천합류부, 하도준설, 생태유량, River2D, 가중가용면적

1. 서론

우리나라의 연 평균 강수량은 1,283 mm로 전 세계 평균, 973 mm와 비교해 약 1.3 배 더 높은 수준이나 강수량의 대부분이 홍수기에 집중되어 있기 때문에, 평상시에 하천에 흐르는 유량이 작아서 하천환경의 관리가 어려운 실정이다. 따라서 하천환경을 보존하며 수자원을 효율적으로 이용하기 위한 하천관리유량을 결정하는 것이 중요한 문제로 대두되었다. 하천관리유량 중 하천유자유량은 하천수질보

* 정희원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Corresponding Author · Seoul National University · seoilwon@snu.ac.kr)

** 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (pih02@snu.ac.kr)

Received September 18 2012, Revised November 12 2012, Accepted March 6 2013

진, 생태계 보호, 하천경관 보전 등을 종합적으로 고려하여 결정해야 한다. 또한 하천유지유량은 수자원관리 측면에서 수리 및 수문학적 환경이 크게 변화하지 않는 한 변화하지 않기 때문에 적절한 기준에 의해 산정하면 이후 지속적인 하천의 유지관리에 도움이 될 수 있다. 하천유지유량에 대한 연구는 1970년 이후 미국과 유럽에서 시작되었고 하천유지유량의 결정방법에 대한 가이드라인이 개발되어 수자원관리를 위해 이용되고 있다. 하천유지유량에 대한 연구로서 Bovee(1986)가 개발한 IFIM(Instream Flow Incremental Methodology)은 하천유지유량 산정방법으로 국내·외에서 널리 이용되고 있다. 국내에서는 Kim 등(1996)이 하천유역특성, 수질, 생태계 등을 고려한 하천유지유량 결정방법을 제시한 이후 Woo 등(1998)이 우리나라의 하천환경에 맞는 유지유량 산정법을 개발하여 금강에 적용하였고 Lee 등(2006b)은 SWAT 모형을 이용하여 안양천 유역에서의 하천유지유량을 산정한 바 있다.

최근에는 하천생태계에 대한 관심이 높아짐에 따라 하천유지유량 중 생태유량의 결정에 대한 연구가 다수의 연구자들에 의해 이뤄지고 있다. 생태유량결정에 대한 국내 연구는 주로 지천에서 이뤄지고 있으며 1차원 모형을 이용해 주요 어종의 서식가능면적으로부터 생태유량을 산정하는 연구가 주를 이루고 있다. Kang 등(2004)은 서식처 적합도 기준을 산정하고, 1차원 모형 물리적 서식처 모의시스템인, PHABSIM(Physical HABitat SIMulation system)을 이용하여 남한강의 생태유량을 산정하였고, Sung 등(2005)은 낙동강의 주요어종을 조사하여 서식처 적합도기준을 작성하고 PHABSIM을 이용하여 주요 지천의 생태유량을 결정한 바 있다. 그리고 Lee 등(2006a)은 IFIM에 따라 PHABSIM을 이용하여 한강 대표어종의 어류서식 환경에 적합한 필요유량을 산정했고, Hur와 Kim(2009)은 금강의 용담댐 하류지역에서 생태 모니터링을 통해 하천 건강성을 평가하고 PHABSIM을 이용해 최적 생태유량을 산정했다.

국외에서는 2000년대 이후 하천의 구조물, 지천의 유입 등에 따른 어류의 서식가능 면적의 모의를 위해 2차원 모형 River2D를 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Scruton 등, 2002; Diego와 Javier, 2007; Yi 등, 2010). Wu와 Mao(2007)는 River2D의 우수성을 검토하기 위해 PHABSIM과 River2D의 모의결과를 비교하여 단구간에서는 River2D가 더 나은 결과를 도출할 수 있음을 주장했다. 또한 River2D는 수공구조물이 설치된 지형에서 어류의 서식가능면적을 모의할 수 있기 때문에 이 모형을 이용하여 수제, 인공여울, 위어와 같은 하천구조물이 생태 서식처에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되었다(Lacey와 Millar, 2004; Lee 등, 2010; Chou와 Chuang, 2011; Im 등, 2011).

2000년대 후반에는 국내에서도 2차원 서식처 모형을 통한 어류서식처 모의에 대한 연구가 진행되고 있다. Oh 등(2008)은

PHABSIM과 River2D를 이용해 피라미의 서식처면적을 모의하여 생태유량산정 결과를 비교하였으며 Kang 등(2011)은 댐 운영 상황에 따른 어류 서식처 면적의 변화를 River2D를 이용해 모의하여 최적 방류량을 결정했다. 이와 같이 최근 국내에서도 2차원 모형을 이용한 생태서식처 모의에 대한 연구가 진행되고 있으나 이를 생태유량의 산정에 적용하는 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 낙동강-금호강 합류부에서 IFIM에 따라 생태유량을 산정하기 위하여 유량변화에 따른 가중가용면적을 계산했다. 모의영역에서는 금호강이 합류하며 취수보 및 강정고령보의 건설에 따른 흐름변화가 발생한다. 따라서 하천흐름의 하폭방향 변화와 가중가용면적의 공간적 변화를 반영하기 위해 1차원 모형 PHABSIM을 대신하여 2차원 수치모형 River2D를 이용하였다. 낙동강-금호강 합류부에 적합한 River2D의 매개변수를 결정하기 위해 동점성계수(eddy viscosity)와 유효조고(effective roughness height)를 보정하였다. 그리고 낙동강의 대표어종인 피라미와 갈겨니에 대해 낙동강 본류와 금호강의 유량변화에 따른 가중가용면적을 모의하여 IFIM에 따라 낙동강-금호강 합류부에서의 생태유량을 산정했다. 산정된 생태유량을 준설 이후의 낙동강 유역에 적용하여, 피라미, 갈겨니와 낙동강 서식 어종 중 유속이 낮은 지역에서 서식하는 모래무지, 돌고기, 잉어에 대한 가중가용면적을 비교하여 준설에 의한 영향을 검토하였다.

2. River2D 모형

River2D는 캐나다 Alberta 대학에서 개발한 2차원 수치모형으로서 2차원 동수역학모듈과 생태서식처 모듈을 갖고 있다. River2D는 SU/PG(Streamwise Upwind Petrov-Galerkin)기법을 이용한 유한요소모형으로서 비선형 항을 풀기 위한 반복해법으로 Newton Rhapsion법을 이용하고 있다. 동수역학모듈의 연속방정식과 운동방정식은 각각 Eq. (1), Eq. (2)와 같다(Steffler와 Blackburn, 2002).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (q_i u_j) + \frac{g}{2} \frac{\partial H^2}{\partial x_i} = gH (S_{oi} - S_{\beta i}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (H \tau_{ij}) \quad (i, j = 1, 2) \quad (2)$$

여기서 H 는 수심, u_j 는 수심평균 유속, $q_i = Hu_i$ 는 단위유량, S_{oi} 는 하상경사, $S_{\beta i}$ 는 마찰경사, g 는 중력가속도, τ_{ij} 는 난류전단응력, ρ 는 밀도이다.

River2D의 생태서식처 모듈은 1차원 모형인 PHABSIM과 동일한 가중가용면적개념을 이용하며 Eq. (3)과 같다.

$$WUA = \sum_{i=1}^n S_i A_i \quad (3)$$

여기서 A_i 는 셀 i 에 해당하는 유한요소의 면적이고, S_i 는 셀 i 에서의 서식처적합도지수이다. Eq. (3)의 서식처 적합도 지수, S_i 는 물리적 서식처 특성과 대상어종의 선호도와의 연계성을 정량적으로 표현한 것을 의미한다. 각 물리적 서식처 특성에 대한 서식처 적합도 지수의 값이 1에 가까울수록 대상어종이 서식하기에 적합한 환경이 된다. 어류의 서식처 적합도 지수는 조사영역에서 출현한 어종의 개체 수를 기준으로 작성되며 조사영역 내 최대 개체 수를 1로 하고 이에 대한 상대적 비율로 적합도 지수를 산정한다. 서식처 적합도지수를 결정하기 위한 기준으로는 이분법(Binary method), 단일변량곡선법(Univariate curve method), 다변량응답평면법(Multivariate response surface method)이 있다(USGS, 2001). 이들 기준에 의해 산정된 수심적합도(S_d), 유속적합도(S_v), 하상재료의 종류 및 크기(S_{ci})로부터 S_i 를 계산하며 Eq. (4)와 같이 다양한 공식이 제시되어 있다.

$$S_i = s_d \times s_v \times s_{ci} \quad (4a)$$

$$S_i = [s_d \times s_v \times s_{ci}]^{1/3} \quad (4b)$$

$$S_i = \text{Min}[s_d \times s_v \times s_{ci}] \quad (4c)$$

$$S_i = s_d^a \times s_v^b \times s_{ci}^c \quad (a + b + c = 1) \quad (4d)$$

Eq. (4a)의 곱셈법은 각 인자 간 적합도가 최상인 상호작용을 의미하며 최적서식처는 모든 인자가 최적일 때 존재한다. Eq. (4b)는 기하평균법으로서 각 인자 간 적합도를 보정하는 효과를 가지며, Eq. (4c)는 적합도가 최악인 조건을 고려하여 각 인자 중 적합도가 최소인 인자를 반영하는 방법이다. 그리고 Eq. (4d)는 가중치법으로 각 인자에 대한 중요도를 분석하여 적합도 지수에 가중치를 부여하는 방법이다. River2D에서는 서식처 적합도 지수 계산방법으로 곱셈법, 기하평균법, 최소치법 중 하나를 선택하여 계산할 수 있으며 본 연구에서는 기존 연구에서 많이 사용되고 있는 곱셈법을 적용하였다.

3. 모형의 매개변수 보정

3.1 모의 영역 및 서식처 적합도 지수

생태유량을 산정하기 위한 대상영역은 낙동강-금호강 합류부이다. 금호강은 낙동강의 제 1지류로서 총 길이 114.6 km이고 유역면적은 2,088 km²로 낙동강 전체 유역면적의 9%에 달하는 주요지천 중 하나이다. 금호강의 유역형상은 대체로 수지상이며 상류에서 남서쪽으로 형성되어 있다. 하상물질은 유로연장이 상당히 긴 하천이므로 상류 구간은 호박돌, 자갈, 굵은 모래로 구성되어 있고 중류부는 잔자갈 및 모래, 하류부는 잔모래 및 실트로 형성되어 있다(Ministry of construction and transportation, 1997). 낙동강-금호강 합류부는 퇴적부에 의한 대규모 시추가 발달하고 식생역이 왕성하게 발달되어 있어서 홍수소동을 저해하는 문제점을 안고 있다. 또한 하천의 유량, 유속, 유사량 등의 변동에 의해 하천 지형이 변화하는 현상이 발생하는 등 하천생태계에 변화를 주는 요인들이 많기 때문에 적합한 생태유량을 산정하여 이를 하천환경 관리에 활용하는 것이 필요하다.

모의 대상구간은 Fig. 1과 같이 강정고령보가 위치한 낙동강-금호강 합류부이다. 낙동강 상류에는 성주수위관측소, 하류에는 화원수위관측소가 있고 금호강의 상류에는 성서수위관측소가 위치해 있다. 모의영역의 지형고는 Fig. 2와 같다. 그리고 합류부 하류구간에서는 여울과 소가 반복하여 발생하고 있다. 낙동강-금호강 합류부의 수위관측소로부터 조사된 유황과 수위통계자료는 Table 1과 같다.

낙동강-금호강 합류부에서 생태유량을 산정하기 위해서는 이 지역의 주요어종의 선정과 서식처적합도지수의 산정이 중요하다.

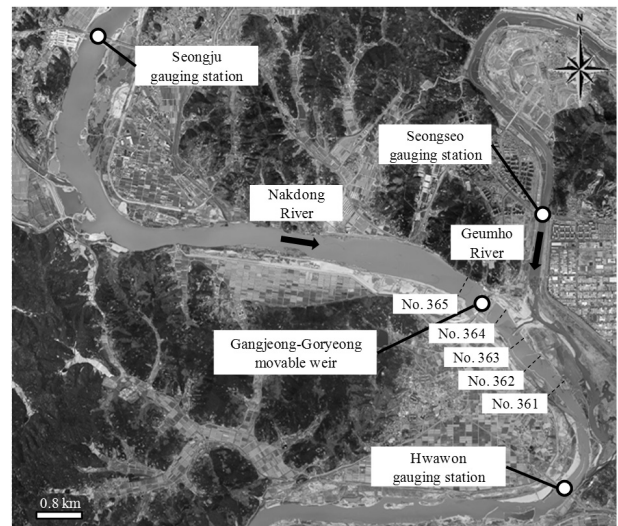


Fig. 1. Status of the Nakdong River and Geumho River confluence (Ref.: NAVER satellite map)

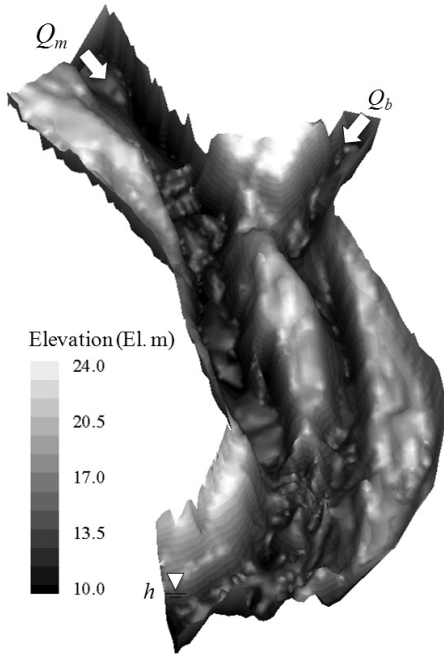


Fig. 2. Bed elevation of the Nakdong River and Geumho River confluence

Table 1. Flow regime and water elevation of the Nakdong and Geumho Rivers (Ministry of land, transport and maritime affairs, 2010)

Flow regime	Seongju gauging station Q (m ³ /s)	Seongseo gauging station Q (m ³ /s)	Hwawon gauging station h (El. m)
Drought flow	33.3	3.60	9.31
Low flow	53.61	11.33	10.57
Median flow	92.38	15.59	10.89
High flow	145.45	26.27	11.11

낙동강에는 긴물개, 버들치, 갈겨니, 피라미 등 9종의 어류가 주종을 이루고 있다고 알려져 있다. Sung 등(2005)은 2003년부터 2004년까지 영강, 위천, 청도천 등 낙동강의 지천에서 주요 서식어종을 조사했고 이들 중 피라미와 갈겨니를 대표어종으로 선정하였다. 피라미와 갈겨니는 계류성 어종과 유수역에 서식하며 갈겨니가 피라미에 비해 2 cm 가량 더 큰 어종으로 조사되었다. WUA의 계산에 사용되는 피라미와 갈겨니의 서식처 적합도 지수는 Sung 등(2005)의 연구결과를 이용했다. 성어기 피라미의 서식가능 최적유속은 0.25 ~ 0.55 m/s, 산란기는 0.30 ~ 0.55 m/s이다. 그리고 1.2 m 이하의 수심에서 서식가능하며 성어기 피라미의 서식에 필요한 최적 수심은 0.25 ~ 0.55 m, 산란기에는 0.3 ~ 0.55 m의 수심이 적합하다. 갈겨니의 경우, 서식처 조건이 피라미와 유사하며 성어기에는 0.35 ~ 0.7 m/s의 유속에서 최적 서식처 적합도를 보

Table 2. Comparison results of measured water level and HEC-RAS simulation results

Gauging station	Measured water level h (El. m)	HEC-RAS simulation results h (El. m)	Error (m)
Waegwan	17.58	17.69	0.11
Seongju	14.72	14.77	0.05
Hwawon	10.06	10.02	0.04

며 산란기에는 0.3 ~ 0.55 m/s의 유속이 가장 적합하다. 그리고 성어기 갈겨니는 0.36 ~ 0.55 m수심의 하천에서 주로 서식하며 산란기에는 0.3 ~ 0.55 m의 수심이 서식에 가장 적합한 것으로 조사되었다.

3.2 River2D 모형의 매개변수 보정

신뢰성 있는 수치모의 결과를 얻기 위해서는 River2D의 매개변수 민감도분석과 함께 매개변수의 보정이 필요하다. River2D의 주요 매개변수는 유효조고(k_s)와 동점성계수(ν_i)이다. k_s 는 Eq. (5)에 의해 Manning의 조도계수로 표현할 수 있다.

$$k_s = \frac{12H}{\exp\left(\frac{H^{1/6}}{2.5n\sqrt{g}}\right)} \quad (5)$$

여기서 n 은 Manning의 조도계수이다. 따라서 본 연구에서는 Manning의 조도계수를 변화시키며 유효조고의 변화에 따른 유속 및 수심 모의결과를 분석하였다. 그리고 Eq. (6)의 동점성계수를 변화시키며 최적값을 결정했다.

$$\nu_i = \epsilon_1 + \epsilon_2 \frac{H\sqrt{u_k}}{C_s} + \epsilon_3 H^2 \sqrt{2 \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)^2} \quad (i, j, k = 1, 2) \quad (6)$$

여기서 ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 는 매개변수이다. 자연하천에서는 Eq. (6)의 두 번째 항이 수치모의결과에 중요한 영향을 미치지 때문에 ϵ_2 를 변화시키며 매개변수를 보정했다.

River2D의 매개변수 보정을 위해 모의구간을 포함하는 왜관, 성주, 화원수위표에서 HEC-RAS의 수위 모의결과를 검정한 후, Fig. 1의 측선 No.361 ~ No.365에서 HEC-RAS와 River2D의 최대수심과 단면평균유속을 비교했다. River2D와 HEC-RAS는 낙동강수계 하천기본계획(Ministry of land, transport and maritime affairs, 2009)에 따른 낙동강 지형을 이용했고 낙동강의 유량이 41.2 m³/s인 갈수기 조건에서 수치모의를 수행했다. 갈수기

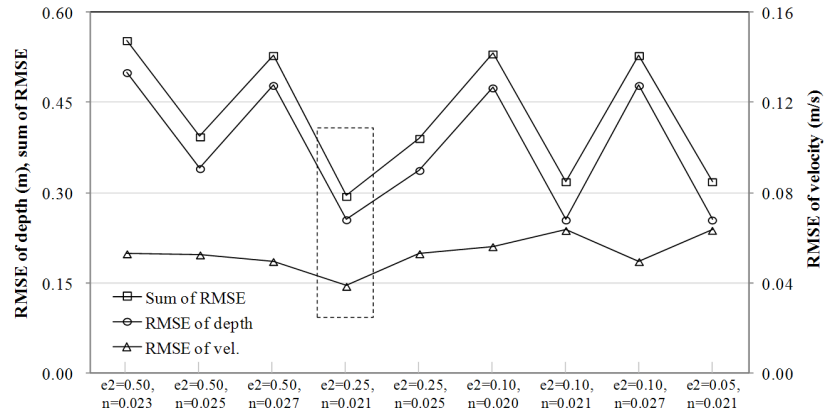


Fig. 3. Comparison results of HEC-RAS and River2D simulation results with changing parameters

유량이 발생한 2009년 2월 20일의 수위관측결과와 HEC-RAS 모의결과를 Table 2에 비교했다. HEC-RAS의 조도계수를 구간 별로 변화시켜 수위를 모의한 결과, 오차가 약 0.1 m 이하로 나타나 갈수기 수위변화를 거의 정확히 모의하고 있었다. 검증된 HEC-RAS모의결과를 측선 No.361 ~ No.365에서 River2D 모의결과와 비교했다. Fig. 3은 매개변수의 변화에 따른 River2D와 HEC-RAS 유속, 수심모의결과의 RMSE(Root Mean Square Error)를 도시한 그래프이다. 그 결과 $n = 0.021$, $\epsilon_2 = 0.25$ 일 때 유속의 RMSE가 0.04 m/s, 수심의 RMSE가 0.26 m로 RMSE의 합이 가장 낮게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 낙동강-금호강 합류부에 대한 River2D 모형의 매개변수 값으로 $n = 0.021$ ($k_s = 0.027$ m)와 $\epsilon_2 = 0.25$ 를 입력하여 대상영역의 생태유량을 산정하였다.

4. 낙동강-금호강 합류부의 서식처 모의

4.1 4대강 사업 이전의 생태유량 산정

매개변수의 보정을 통해 결정한 ϵ_2 와 n 값을 이용하여 낙동강-금호강 합류부에 대한 생태유량을 산정했다. Fig. 4는 Table 1의 갈수기 수위, 유량 경계조건을 이용해 흐름모의를 수행한 결과이다. 준설이전에 낙동강 본류에는 취수보가 위치해있고 갈수기 모의 조건 하에서는 물의 흐름이 취수보를 월류하지 못하여 우안쪽으로 빠른 흐름이 발생하고 있다. 이로 인해 취수보의 하류 좌안에서는 사수역(recirculation zone)이 형성되고 있다.

유속 및 수심모의결과를 바탕으로 낙동강의 주요 어종인 피라미와 갈겨니의 가중가용면적을 모의했다. 피라미와 갈겨니는 성장 단계에 따라 성어기와 산란기로 나눌 수 있으며 단계에 따라 서식처 적합도가 변화하기 때문에 두 시기로 나누어 가중가용면적을 계산했고 그 결과는 Fig. 5, 6과 같다. 모의구간에서 흐름영역의 면적은 약 2,039,873 m^2 이며 이중 성어기 피라미가 서식 가능한 면적은

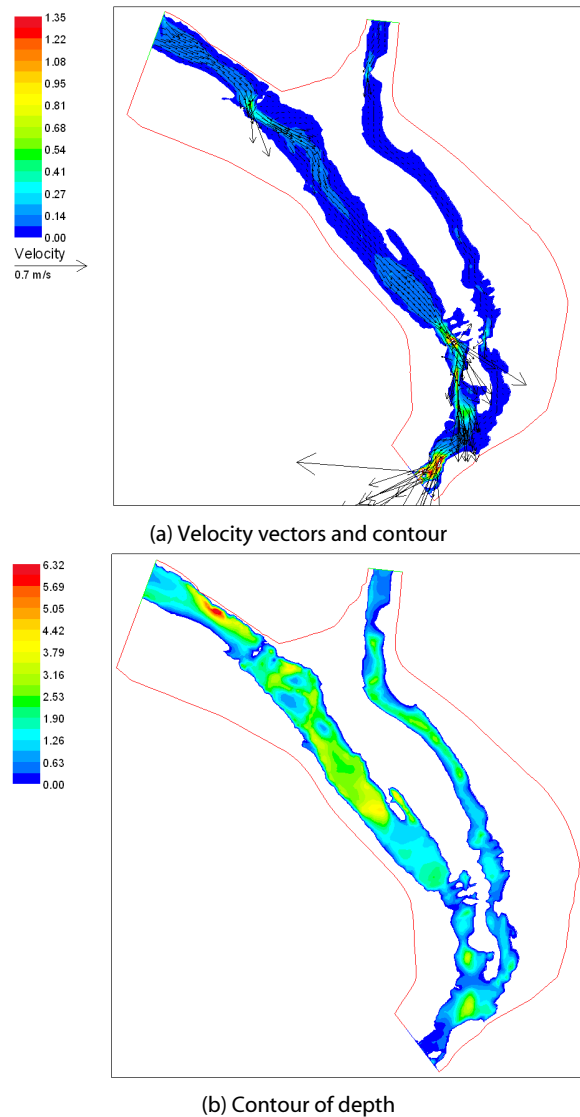
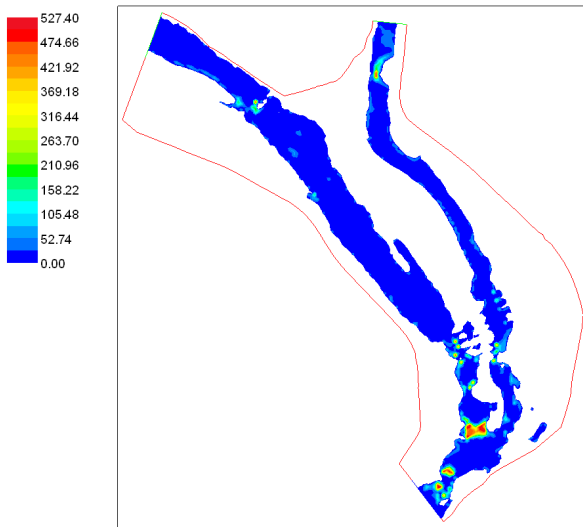
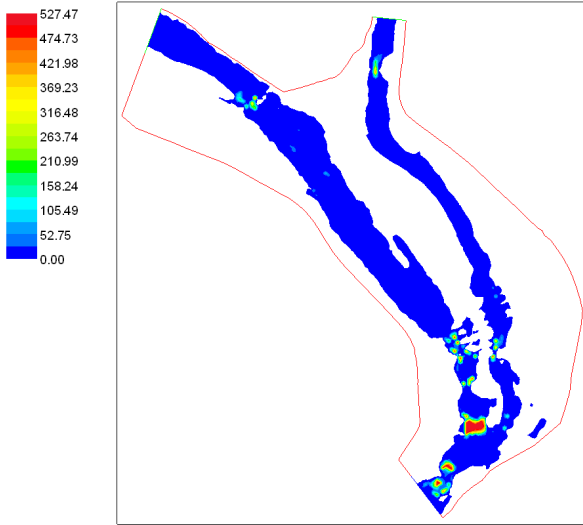


Fig. 4. Simulation results of velocity and water depth in drought flow before dredging



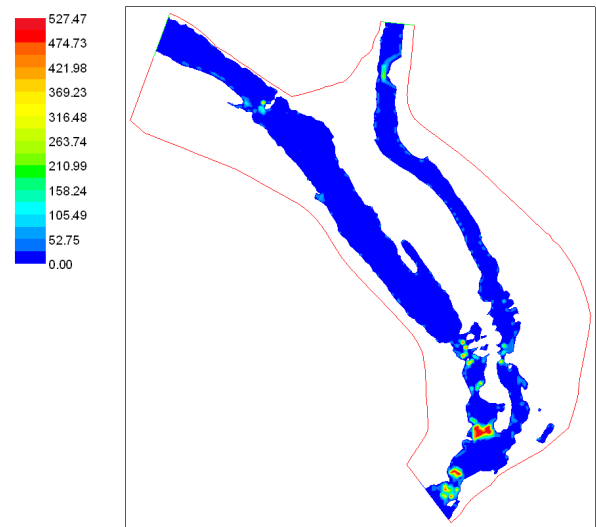
(a) Adult stage (WUA = 63,643 m²)



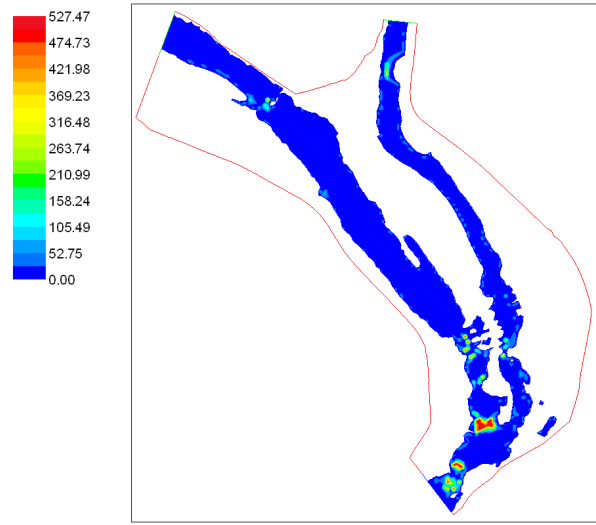
(b) Spawning stage (WUA = 44,529 m²)

Fig. 5. WUA calculation results of *Zacco platypus* in drought flow before dredging

63,643 m²(전체면적 대비 3.12%) 산란기 피라미가 서식 가능한 면적은 44,529 m²(전체면적 대비 2.18%)이다. 모의결과로부터 피라미는 유속이 빠르고 수심이 낮은 취수보 주변과 금호강 합류점 부근에서 주로 서식 가능한 것으로 나타났다. 그리고 갈겨니의 가중가용면적 계산결과 성어기 갈겨니는 49,728 m², 산란기 갈겨니는 44,529 m²로 계산되었다. 갈겨니의 경우에도 유속이 증가하고 수심이 감소하는 지역에서 주로 서식 가능하며 취수보 주변과 금호강과의 합류점 부근에서 가중가용면적이 높게 계산되었다. 그리고 성장 단계별로 볼 때 피라미와 갈겨니 모두 산란기보다 성어기에서 더 넓은 서식 가능 면적을 갖는 것으로 계산되었다.



(a) Adult stage (WUA = 49,728 m²)



(b) Spawning stage (WUA = 44,293 m²)

Fig. 6. WUA calculation results of *Zacco temmincki* in drought flow before dredging

가중가용면적 계산결과에 근거하여 생태유량을 결정하기 위해 낙동강, 금호강의 유량과 하류단 수위 경계조건을 증감시키며 피라미와 갈겨니의 가중가용면적을 모의했다. 낙동강과 금호강의 유량 변화에 따른 하류 경계단의 수위 변화를 계산하기 위해 Eq. (7)과 같이 화원 수위관측소의 수위-유량곡선을 이용했다.

$$Q = 0.0034(h + 6.2286)^{5.6863} \quad (7)$$

낙동강의 유량을 27.25 m³/s ~ 74.93 m³/s, 금호강의 유량을 2.95 m³/s ~ 8.10 m³/s로 변화시키며 피라미와 갈겨니의 가중가용면적을 모의했다. Fig. 7은 유량변화에 따른 피라미와 갈겨니의

전체면적 대비 가중가용면적 비의 변화를 도시한 결과이다. 유량변화에 의해 흐름영역의 면적이 변화하기 때문에 가중가용면적 모의

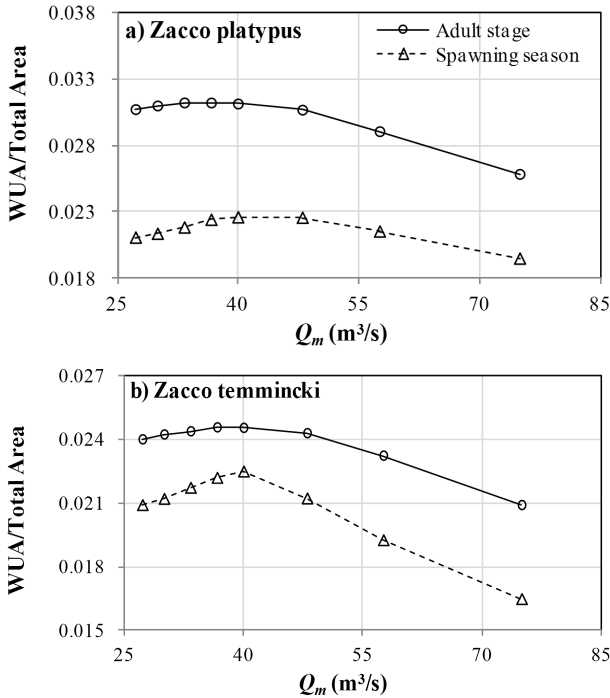


Fig. 7. WUA of Zacco platypus and Zacco temmincki with flowrate change before dredging

결과를 물의 흐름이 발생한 전체 하도면적(A)으로 나누어 총면적에 대한 가중가용면적의 비율을 그래프의 y축에, 낙동강의 유량을 그래프의 x축에 나타냈다. 그 결과 성어기 피라미의 경우 WUA/A의 최대값이 산란기보다 더 높게 나타났으며, 낙동강의 유량이 33.3 m³/s, 금호강의 유량이 3.60 m³/s 인 경우 WUA/A의 최대값이 나타났으며 그 값은 0.0312로 계산됐다. 산란기 피라미의 경우에는 낙동강의 유량이 40.0 m³/s, 금호강의 유량이 4.32 m³/s일 때 WUA/A의 최대값이 0.0226으로 나타났다. 갈겨니도 피라미와 같이 성어기의 WUA/A가 더 높게 나타났으며 성어기에는 낙동강의 유량이 36.6 m³/s, 금호강의 유량이 3.96 m³/s일 때 WUA/A의 최대값이 0.0246으로 계산됐다. 그리고 산란기 갈겨니의 최대 WUA/A는 낙동강 유량이 40.0 m³/s, 금호강의 유량이 4.32 m³/s일 때 0.0225로 계산됐다.

Table 3은 그래프의 결과를 정리한 표이다. 유량증가에 따라 총 흐름면적은 증가하며 피라미와 갈겨니의 가중가용면적은 일정 유량까지 증가하다가 다시 감소하는 결과를 보여준다. 그리고 성장단계 별로 최대 WUA/A가 나타나는 유량이 변화하기 때문에 각 단계별로 다른 생태유량을 산정할 필요가 있다. 따라서 성어기 피라미의 생태유량은 낙동강유량 33.3 m³/s, 금호강유량 3.60 m³/s으로, 산란기에는 낙동강유량 40.0 m³/s, 금호강유량 4.32 m³/s으로 결정할 수 있다. 그리고 갈겨니의 생태유량은 성어기의 경우에는 낙동강유량 36.6 m³/s, 금호강유량 3.96 m³/s으로, 산란기는 낙동강유량 40.0 m³/s, 금호강유량 4.32 m³/s으로 결정할 수 있다.

Table 3. WUA calculation results of Zacco platypus and Zacco temmincki before dredging

Fish	Nakdong River Q (m ³ /s)	Geumho River Q (m ³ /s)	WUA (m ²)		WUA/A	
			Adult	Spawning	Adult	Spawning
Zacco Platypus	27.25	2.95	62,959	42,505	0.0309	0.0211
	29.97	3.24	63,072	43,486	0.0310	0.0214
	33.30	3.60	63,643	44,529	0.0312	0.0218
	36.63	3.96	64,151	46,088	0.0312	0.0224
	39.96	4.32	64,258	46,656	0.0311	0.0226
	47.95	5.18	63,729	46,902	0.0307	0.0226
	57.54	6.22	61,312	45,454	0.0290	0.0215
	74.93	8.10	55,830	42,144	0.0258	0.0195
Zacco temmincki	27.25	2.95	49,041	42,448	0.0241	0.0210
	29.97	3.24	49,339	43,153	0.0242	0.0212
	33.30	3.60	49,728	44,293	0.0244	0.0217
	36.63	3.96	50,516	45,618	0.0246	0.0222
	39.96	4.32	50,670	46,421	0.0245	0.0225
	47.95	5.18	50,488	44,091	0.0243	0.0212
	57.54	6.22	49,045	40,631	0.0232	0.0192
	74.93	8.10	45,186	35,606	0.0209	0.0165

4.2 준설 이후 낙동강-금호강 합류부의 어류상 변화

4대강 살리기 사업 이후 하상준설과 가동보 설치에 따라 낙동강 본류에서 급격한 수리학적 변화가 발생되고 있다. 모의대상 구간인 낙동강-금호강 합류지점의 상류에는 강정고령보가 건설되었고 하류에는 달성보가 건설되어 운영되고 있다. 평시에 강정고령보 하류부터 달성보 구간은 일정한 관리수위로 유지됨에 따라 수심은 6 m 이상으로, 수위는 14 El. m로 유지되어 준설 전보다 수심이 증가하고 유속은 감소되었다. 이러한 상황에서 낙동강 본류에서 수심이 낮고 빠른 유속에서 서식하는 피라미, 갈겨니와 같은 어류의 서식처는 감소할 것이라 예상된다. 따라서 본 연구에서는 River2D를 이용하여 준설 전, 후의 유속, 수심 모의결과를 비교하고 준설

전 지형에서 결정된 생태유량 조건에서 피라미와 갈겨니의 준설 전, 후 가중가용면적의 변화를 평가하였다. 그리고 낙동강 서식 어종 중 유속이 낮은 곳에서 주로 서식하는 모래무지, 돌고기, 잉어의 가중가용면적을 계산하여 준설 이후 피라미와 갈겨니의 가중가용면적과 비교하여 준설의 영향을 분석하였다.

Fig. 8은 낙동강 본류의 준설 이후, 낙동강 유량 33.3 m³/s, 금호강 유량이 3.60 m³/s인 갈수기 유량조건에서 하류수위가 14 El. m인 경우 유속과 수심을 모의한 결과이다. 강정고령보의 가동보가 모두 개방됐을 경우, 가동보 하류에서 사수역이 발생하고 본류의 유속이 준설 전과 비교하여 1/2 이하로 감소되었다. 강정고령보 하류 0.5 km와 1.0 km 하류에서 준설 전, 후의 수심과 유속모의결과를 비교한 결과, 준설 이후에 수심이 6.0 m 정도로 상, 하류에 고르게 분포하고 있으며 준설 전과 비교하여 수심이 2~3배 증가했다. 반면 하폭방향을 따라 발생하는 최대유속은 0.03 m/s ~ 0.04 m/s이며 준설 전에 비해 1/4 ~ 1/2 정도로 감소했다. 따라서 준설 이후에는 수심이 깊고 유속이 느린 곳에서 서식할 수 있는 어류가 낙동강 본류의 우점종이 될 것이라 예상된다.

낙동강에 서식하며 완만한 유속에서 발견되는 모래무지(Pseudogobio esocinus), 돌고기(Pungtungia herzi), 잉어(Common carp)의 서식처적합도지수는 Kang 등(2011), Conklin 등(1996)의 연구결과를 이용했다. 피라미, 갈겨니의 유속, 수심 적합도와 비교하여 모래무지, 돌고기, 잉어는 낮은 유속과 깊은 수심에 적합한 것으로 조사되었다. 준설 전 지형에서 결정된 낙동강의 생태유

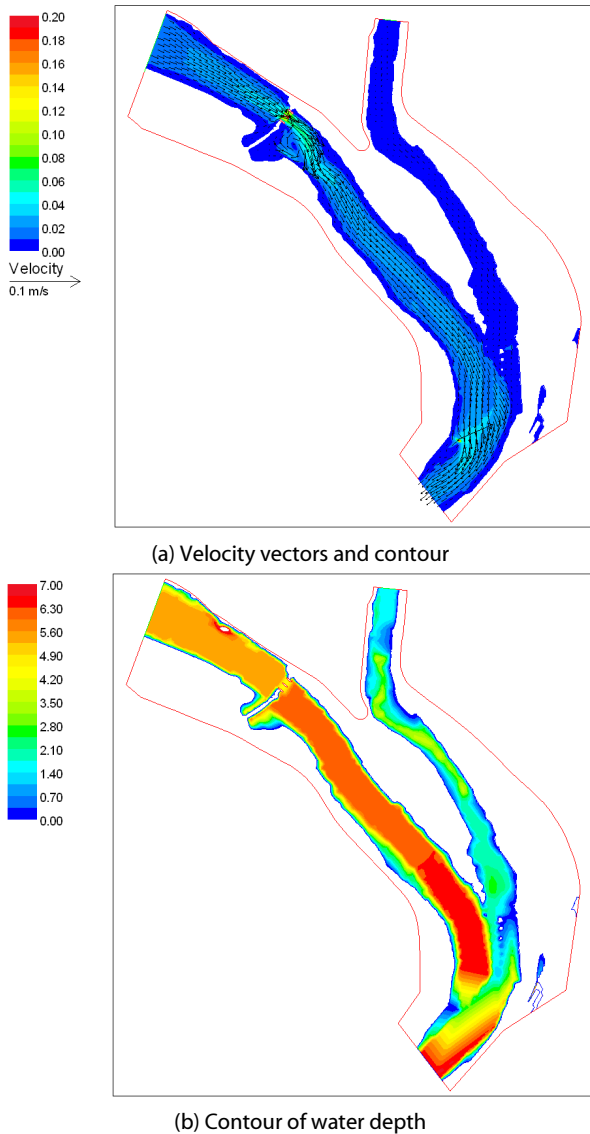


Fig. 8. Simulation results of velocity and water depth after dredging

Table 4. WUA calculation results of adult stage fish in Nakdong River after dredging

Fish	Nakdong River Q (m ³ /s)	Geumho River Q (m ³ /s)	WUA (m ²)	WUA/A
Zacco platypus	33.30	3.60	9,968	0.00357
	36.63	3.96	10,029	0.00359
	39.96	4.32	10,095	0.00361
Zacco temmincki	33.30	3.60	7,671	0.00275
	36.63	3.96	7,682	0.00275
	39.96	4.32	7,694	0.00275
Pseudogobio esocinus	33.30	3.60	5,774	0.00207
	36.63	3.96	6,299	0.00225
	39.96	4.32	6,877	0.00246
Pungtungia herzi	33.30	3.60	2,734	0.00098
	36.63	3.96	2,986	0.00107
	39.96	4.32	3,264	0.00117
Common carp	33.30	3.60	22,263	0.00797
	36.63	3.96	22,307	0.00798
	39.96	4.32	22,372	0.00801

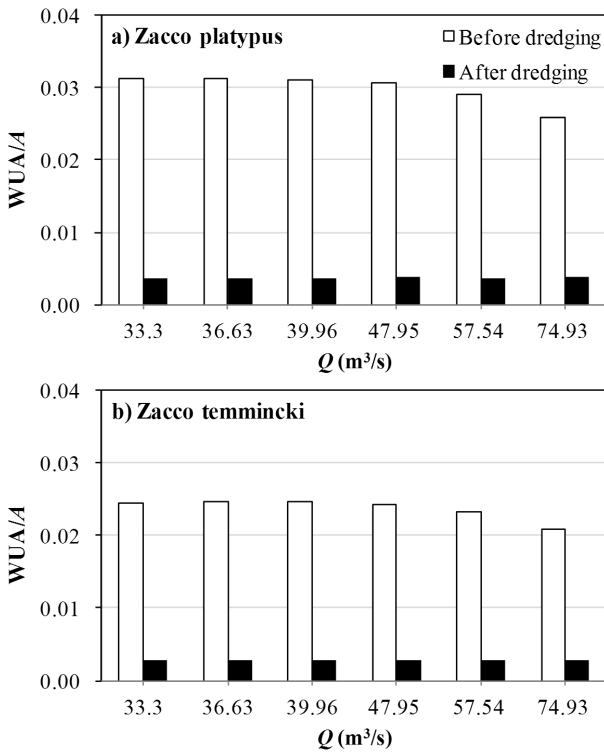


Fig. 9. Comparison of WUA/A before dredging and after dredging

량 33.3 m³/s ~ 40.0 m³/s 과 금호강의 생태유량 3.96 m³/s ~ 4.32 m³/s를 상류단 경계조건으로 하여 피라미, 갈겨니, 모래무지, 돌고기, 그리고 잉어의 가중가용면적을 계산한 결과 Table 4와 같다. 준설 후에는 낙동강의 우점종이었던 피라미와 갈겨니의 가중가용면적이 준설 전에 비해 크게 감소했다. 그리고 유속이 완만한 곳에서 서식 가능하지만 피라미, 갈겨니와 같이 크기가 작은 모래무지와 돌고기의 경우 가중가용면적이 낮게 계산됐다. 이에 비해 비교적 크기가 크고 큰 강과 호수에서 주로 서식하는 잉어의 경우, 가중가용면적이 피라미, 갈겨니보다 2~3 배 더 큰 것으로 나타났다. Fig. 9는 유량 별로 피라미와 갈겨니의 WUA/A를 비교한 그래프이다. 그 결과, 피라미와 갈겨니 모두 준설 이후에 단위 면적당 가중가용면적의 비율이 약 1/9로 감소했다. 따라서 준설 이후에는 수심이 깊고 유속이 낮은 곳에 주로 서식하는 잉어와 같은 어종으로 낙동강 본류의 우점종이 변화할 것이라 예상된다.

5. 결론

낙동강-금호강 합류부의 생태유량을 산정하기 위해 IFIM에 따라 유량을 변화시키며 가중가용면적을 계산했다. 지류의 합류와 수공구조물을 포함하는 지형에서 생태유량을 산정하고 서식처의 공간적 분포를 알아보기 위해 2차원 수치모형 River2D를 이용했다.

먼저 River2D를 이용한 수치모의결과의 타당성을 검증하기 위해 수위관측결과를 통해 검증된 HEC-RAS 모의결과를 River2D의 유속, 수심 모의결과와 비교하여 동점성계수와 유효조고를 보정했다. 그 결과, $k_s=0.027$ m, $\epsilon_2=0.1$ 일 때 River2D의 유속과 수심모의 결과에서 가장 작은 오차가 발생했다.

결정된 매개변수를 이용하여 준설 전 낙동강-금호강 합류부에 대한 생태유량을 산정했다. 유량변화에 따라 총 흐름면적이 변화하기 때문에 흐름면적 대비 가중가용면적의 비율을 이용해 서식처 면적을 비교했다. 그 결과, 피라미와 갈겨니의 생태유량은 낙동강 유량 33.3 m³/s ~ 40.0 m³/s, 금호강유량 3.6 m³/s ~ 4.32 m³/s로 결정할 수 있었다. 4대강 사업 이후 낙동강 본류에 하상준설과 가동보의 설치에 따라 수심이 깊어지고 유속이 낮아지는 수리학적 변화가 발생하고 있다. 따라서 낙동강-금호강 합류부에서 결정한 생태유량을 이용하여 유속이 낮은 곳에서 서식하는 어류인 잉어등과 피라미, 갈겨니의 가중가용면적을 계산하여 비교했다. 그 결과 준설 이후 피라미, 갈겨니의 가중가용면적이 약 1/9로 감소했고 큰 강에 주로 서식하는 잉어의 가중가용면적이 낙동강의 우점종으로 알려진 피라미, 갈겨니에 비해 2~3 배 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과에 의거하여 준설 이후 낙동강 본류에 서식 가능한 어종이 변화할 것이라 예상할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 POSCO 건설의 연구비 지원(하천 준설에 따른 수리학 및 생태학적 영향 검토)과 국토교통부 물관리연구사업 연구비 지원(11기술혁신C06), 서울대학교 공학 연구소 및 건설환경종합 연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bovee, K. D. (1986). *Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology*, Washington, DC: USDI Fish and Wildlife Service Instream Flow Information Paper No. 21. FWS/OBS-86/7.
- Chou, W. C. and Chuang, M. D. (2011). "Habitat evaluation using suitability index and habitat type diversity : A Case Study Involving A Shallow Forest Stream in Central Taiwan." *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 172, pp. 689-704.
- Conklin, D. J., Canton, S. P., Chadwick, J. W., and Miller, W. J. (1996). "Habitat suitability curves for selected fish species in the Central Platte River, Nebraska." *Rivers*, Vol. 5, No. 4, pp. 250-266.
- Diego, G. J. and Javier, G. (2007). "Evaluation of instream habitat enhancement options using fish habitat simulation : Case-Studies in the River Pas (Spain)." *Aquatic Ecology*, Vol. 41, pp.461-474.
- Hur, J. W. and Kim, J. (2009). "Assessment of riverine health con-

- dition and estimation of optimal ecological flowrate considering fish habitat in downstream of Yongdam dam.” *Journal of Korea water resources association*, Vol. 42, No. 6, pp. 481-491 (in Korean).
- Im, D., Kang, H., Kim, K. H. and Choi, S. U. (2011). “Changes of river morphology and physical fish habitat following weir removal.” *Ecological Engineering*, Vol. 37, pp. 883-892.
- Kang, H., Im, D., Hur, J. W. and Kim, K. (2011). “Estimation of habitat suitability index of fish species in the Geum River watershed.” *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 31, No. 2B, pp. 193-203 (in Korean).
- Kang, J. H., Lee, E. T., Lee, J. H., and Lee, D. H. (2004). “Estimation of river instream flow considering fish habitat conditions.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 11, pp. 915-927 (in Korean).
- Kim, K., Lee, J., Hong, I., and Woo, H. (1996). “Development of a method for determining the instream flow and its application: I. Estimation method.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 29, No. 4, pp. 161-176 (in Korean).
- Lacey, R. W. J. and Millar, R. G. (2004). “Reach scale hydraulic assessment of instream salmonid habitat restoration.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 40, No. 6, pp. 1631-1644.
- Lee, J. H., Jeong, S. M., Lee, M. H., and Lee, Y. S. (2006a). “Estimation of instream flow for fish habitat using instream flow incremental methodology (IFIM) for major tributaries in Han River basin.” *Journal of Korea society of civil engineers*, Vol. 18, No. II-1, pp. 1-11 (in Korean).
- 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, pp. 1251-1259.
- Lee, K. S., Chung, E., Shin, M., and Kim, Y. (2006b). “Determination of instreamflow requirement for upstream urban watershed using SWAT model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 8, pp. 703-716 (in Korean).
- Ministry of construction and transportation (1997). *Basic plan for river maintenance of Geumho River* (in Korean).
- Ministry of land, transport and maritime affairs (2009). *Basic plan for river maintenance of Nakdong River* (in Korean).
- Ministry of land, transport and maritime affairs (2010). *Hydrological annual report in Korea* (in Korean).
- Oh, K., Jeong, S., Lee, J., Choi, G., and Kim, D. (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*, Vol. 8, No. 1, pp. 117-123 (in Korean).
- Scruton, D. A., Clarke, K. D., Ollerhead, L. M. N., Perry, D., and Mckinley, R. S. (2002). “Use of telemetry in the development and application of biological criteria for habitat hydraulic modeling.” *Hydrobiologia*, Vol. 483, pp.71-82.
- Steffler, P. and Blackburn, J. (2002). “River 2D, two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat: Introduction to Depth Averaged Modeling and User’s Manual,” University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- 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*, Vol. 38, No. 7, pp. 545-554 (in Korean).
- USGS (2001). *PHABSIM for windows – user’s manual and exercise*, Midcontinent Ecological Science Center.
- Woo, H., Lee, J. W., and Kim, K. H. (1998). “Development of a method for determination of instream flow needs required for fish habitat conservation.” *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. II-4, pp. 339-350 (in Korean).
- Wu, R. S. and Mao, C. T. (2007). “The assessment of river ecology and habitat using a two-dimensional hydrodynamic and habitat model.” *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 322-330.
- Yi, Y., Wang, Z., and Yang, Z. (2010). “Two-dimensional habitat modeling of Chinese sturgeon spawning sites.” *Ecological Modeling*, Vol. 221, pp. 864-875.