Ecology and Resilient Infrastructure (2015) 2(4): 317-323
http://dx.doi.org/10.17820/eri.2015.2.4.317

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

ORIGINAL ARTICLE

댐 하류 하천에서 하상변동 모델을 이용한 어류 물리서식처 변화 모의

Simulation of Change in Physical Habitat of Fish Using the Mobile Bed Model in a Downstream River of Dam

김승기 · 최성욱*

연세대학교 토목환경공학과

Seung Ki Kim and Sung-Uk Choi*
Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

Received 2 December 2015, revised 6 December 2015, accepted 20 December 2015, published online 31 December 2015

ABSTRACT: This study investigated the impact of the morphological change on a physical fish habitat in the downstream reach of a dam using long-term mobile bed simulation. The quasi-steady model was used for hydraulic simulation and the habitat suitability index model was applied for physical habitat simulation. For simulating long-term morphological change of the stream bed, The Exner equation was used. Sorting of bed material was also considered. The results of simulation showed that erosion and armoring process occurred in a reach downstream of the dam and change of physical habitat for *Zacco platypus* followed. These results indicate that channel morphology and substrate conditions effected the physical habitat for considering long-term investigation.

KEYWORDS: Dam, Geomorphological change, Hydropeaking, Physical habitat simulation, Quasi-steady model

요 약: 본 연구는 장기하상변동 모의를 이용하여 댐 하류 하천에서의 하상변동이 어류 물리서식처에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 흐름모형은 준정류 모형을 이용하였으며, 서식처 모형은 서식처 적합도 지수 (HSI) 모형을 이용하였다. 장기하상변동 모의를 위하여 Exner 방정식을 이용하였으며 하상재료 입도분포의 변화를 고려하였다. 내성천 영주댐 하류에서 모의결과 침식과 장갑화가 진행되었으며 이에 따라 피라미의 물리서식처가 변하게 되었다. 지형과 하상재료의 변화가 어류 물리서식처에 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있다.

핵심어: 댐, 지형 변화, 발전 방류, 물리서식처 모의, 준정류 모형

1. 서 론

댐의 건설은 하천의 하류에 단기 및 장기적인 영향을 초래한다. 댐 하류 하천에서의 유황의 변화는 댐의 단기적인 영향으로, 홍수조절효과로 인하여 큰 홍수량의 발생을 줄이는 효과가 있지만 발전방류로 인하여 비정상성이 큰 흐름이 발생이 빈번하게 이루어지게 된다. 또한 댐으로 인해 많은 양의 유사량이 차단이 되어 오직 미량의 유사량이 방출된다 (Brandt 2000). 이는 장기적인 영향으로 댐 하류의 침식 및 장갑화 현상을 초래하게 된다 (Kondolf 1997). 이런 변화는 하천의 평형을 깨트리고 수생태계에 큰 영향

***Corresponding author:** schoi@yonsei.ac.kr

ⓒ 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.

을 미친다.

하천에서의 어류에 대한 서식처평가는 미국 지질조사국 (USGS)에서 개발된 PHABSIM (Physical HABitat SIMulation) 프로그램에서의 방법이 널리 이용되어 왔다. 물리서식처 분석은 대상하천에 대한 어류의 서식처 적합도를 양적으로 산정할 수 있으며, 생태유량을 제시할 수 있다. 산정된 생태유량은 댐 개발 및 운영이나 하천복원과 같은 수자원 의사결정 수단으로 활용되고 있다 (Bovee 1982, Milhous et al. 1989).

국외의 경우 댐의 건설이 수생태계에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구가 많이 진행되어 왔다. 하지만 기존에 수행된 연구들은 댐 건설로 인하여 변화된 유황이 서식처에 미치는 단기적인 영향을 주로 연구하였다 (Bowen et al. 1988, Valentin et al. 1996, Yi et al. 2010a). 하상변동을 고려한 댐 하류에서의 서식처 분석은 아직 미흡한 단계에 있다. Yi et al. (2010b)은 양쯔강에서의 Gezhouba 댐의 건설이 철갑상어의 산란 서식처에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 이 연구에서는 2차원 수리모형을 이용하여 하상변동 모의를 실시하고 실측치와 비교를 통해 검증되었다. 서식처 모형은 서식처 적합도 지수 (habitat suitability index, HSI) 모형을 이용하였으며 댐 건설 전과 건설 후의 하상조건에서 서식처 모의결과 댐의 건설 후 서식처가 악화되는 것을 모의하였으며 실측된 알의 개체 수를 통해 검증되었다.

본 연구의 목적은 댐 하류 하천에서 발전방류로 인한 하상변동이 댐 하류 하도의 어류 물리서식처 적합도에 미치는 영향을 분석해 보는 것이다. 이를 위해 준정류 모형을 이용하여 하상변동을 실시하였으며, 유사량 산정공식은 Wu et al. (2000)의 공식을 사용하였다. 유사량은 유사의 입도를 고려하여 산정되었으며, 장갑화를 모의하기 위해 분급 모형을 이용하였다. 물리서식처 분석은 피라미에 대한 서식처 적합도 지수 (HSI)을 사용하였으며, 수리학적 서식처 적합도 (hydraulic habitat suitability, HHS)를 계산하였다.

2. 연구대상지역

연구대상지역은 낙동강의 지류인 내성천으로 Fig. 1과 같다. 연구대상지역은 영주댐 하류 미림교에서 미호 수위 관측소 약 20 km 구간이다. 내성천의 총 유수면적은 1,806.7 km^2이며 유로면장은 109 km이다. 하상재료는 모래와 자갈로 구성되어있으며, 중앙입경은 D_{50} = 1 mm 이다. 평균 하상경사는 0.011이다. 내성천은 충적하천으로 유사이동으로 인하여 하상변동이 심하게 발생한다 (KICT 2013). 갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량은 각각 0.65, 1.6, 4.1, 12.68 m^3/s과 같다.

영주댐은 2009년 12월부터 건설되기 시작하여 2014년에 완공이 되어 2015년 말에 담수가 예정되어 있다. 영주댐은 내성천의 상류에 위치하고 있으며 높이 55.5 m, 길이 400 m로 콘크리트 여수로가 있는 석괴댐이다. 영주댐의 총 저수용량은 1.8×10^8 m^3이며, 연간 용수 공급량은 2.3×10^8 m^3, 홍수조절량은 7.5×10^7 m^3이다 (KICT 2013).

Kang et al. (2011)은 현장조사 모니터링을 통해 내성천 일대에서 서식하는 담수어류를 조사하였으

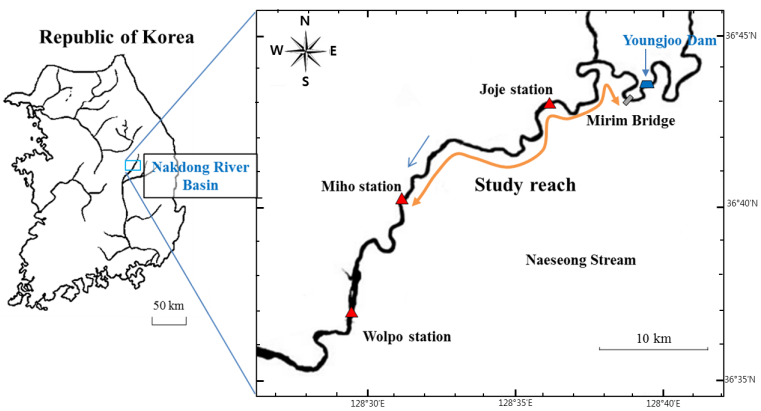

Fig. 1. Map showing the study site.

며, 상대풍부도는 피라미, 참갈겨니, 모래무지, 긴몰개 순으로 각각 43%, 16%, 7%, 7% 로 나타났다. 따라서 본 연구는 연구대상지역인 우점종인 피라미를 대상으로 물리서식처 분석을 실시하였다.

3. 연구방법

3.1 수리 모형

흐름 및 하상변동을 모의하기 위해 준정류 모형 및 하상토 보존 방정식이 사용되었다. 준정류 모형에서의 하상변동은 하도변형과 흐름의 특성시간이 매우 다르므로 타당하게 사용될 수 있다. 준정류 모형에서의 연속방정식, 운동량방정식 그리고 하상토 보존 방정식 (혹은 Exner 방정식)은 다음과 같다.

$$q = UH \qquad \text{(Eq. 1)}$$

$$U\frac{dU}{dx} = -g\frac{d}{dx}(\eta + H) - \frac{\overline{\tau_b}}{\rho H} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{1}{1-\lambda_p}\frac{\partial q_s}{\partial x} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

여기서 x와 t는 각각 흐름 방향 거리 및 시간을 나타내며, q는 단위폭당 유량, U와 H는 단면 평균유속 및 수심이다. g와 η는 각각 중력 가속도와 하상고, $\overline{\tau_b}$는 단면에서 윤변에 의해 평균된 하상 전단응력, q_s는 단위폭당 유사량 발생률이다. 유한차분법을 이용하여 지배방정식을 차분하였으며, Newton-Rhapson 방법으로 수치해를 해석하였다.

3.2 유사량 산정 모형

본 연구에서 사용한 Wu et al. (2000)의 유사량 산정 공식은 하상재료의 입도분포를 고려할 수 있는 공식이며 Eq. 4와 같다.

$$q_{bi} = 0.0053 p_{bi}\sqrt{Rgd_i^3}\left[\left(\frac{n'}{n}\right)^{3/2}\frac{\overline{\tau_b}}{\overline{\tau_{ci}}} - 1\right]^{2.2} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

여기서 q_{bi}는 i번째 입자의 단위 폭 당 유사량 발생률, p_{bi}, d_i는 각각 i번째 유사의 발생비율, 유사의 직경을 의미하며, n'은 유사입자에 대한 Manning의 조도계수 ($= D_{50}^{1/6}/20$), n은 하상에 대한 Manning의 조도계수를 의미한다. 본 모의에서의 조도계수 값은 n= 0.035 값을 적용하였다 (Ji et al. 2013). R은 수중단위중량, $\overline{\tau_{ci}}$는 유사입자 d_i에 대한 한계 전단응력이다.

3.3 분급 모형

본 연구에선 하상재료의 분급을 고려하였다. Hirano (1971)가 제시한 입도 분포를 고려한 하상토 보존 방정식은 Eq. 5와 같다.

$$(1-\lambda_p)\left[f_{li}\frac{\partial}{\partial t}(\eta - L_a) + \frac{\partial}{\partial t}(F_i L_a)\right] = -\frac{\partial q_{bi}}{\partial x} \qquad \text{(Eq. 5)}$$

여기서 L_a는 하상에서의 활성층 (active layer)의 두께, F_i는 활성층에서의 i번째 입자의 구성비율, f_{li}는 하상고의 상승 및 하강에 따라 바뀌는 변수이며 하상고의 하강 및 상승에 따른 f_{li}값은 각각 Eq. 6 및 Eq. 7과 같다.

$$f_{li} = f_i\big|_{z=\eta-L_a} \qquad \text{(Eq. 6)}$$

$$f_{li} = 0.3F_i + 0.7p_{bi} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

여기서 Eq. 6에서의 $f_i|_{z=\eta-La}$는 active layer 아래층에서의 i번째 입자의 구성비율이다. 본 연구에서는 활성층의 두께를 D_{84}의 2배로 사용하였다.

3.4 물리서식처 모형

물리서식처 모의 시스템은 하천의 수생태계를 평가하기 위해 1980년대 초 미국 어류 및 야생동식물 보호국 (US Fish and Wildlife Service)에서 소개한 방법이다. 이 방법은 크게 흐름모의와 서식처모의로 구성이 되며, 서식처모의는 대상어종에 대한 서식처 적합도 지수를 산정하여 구한다. 서식처 적합도 지수는 각 물리적 변수에 대해 0과 1사이의 값을 가지며 1은 최적의 적합도를 0은 최악의 적합도를 의미한다.

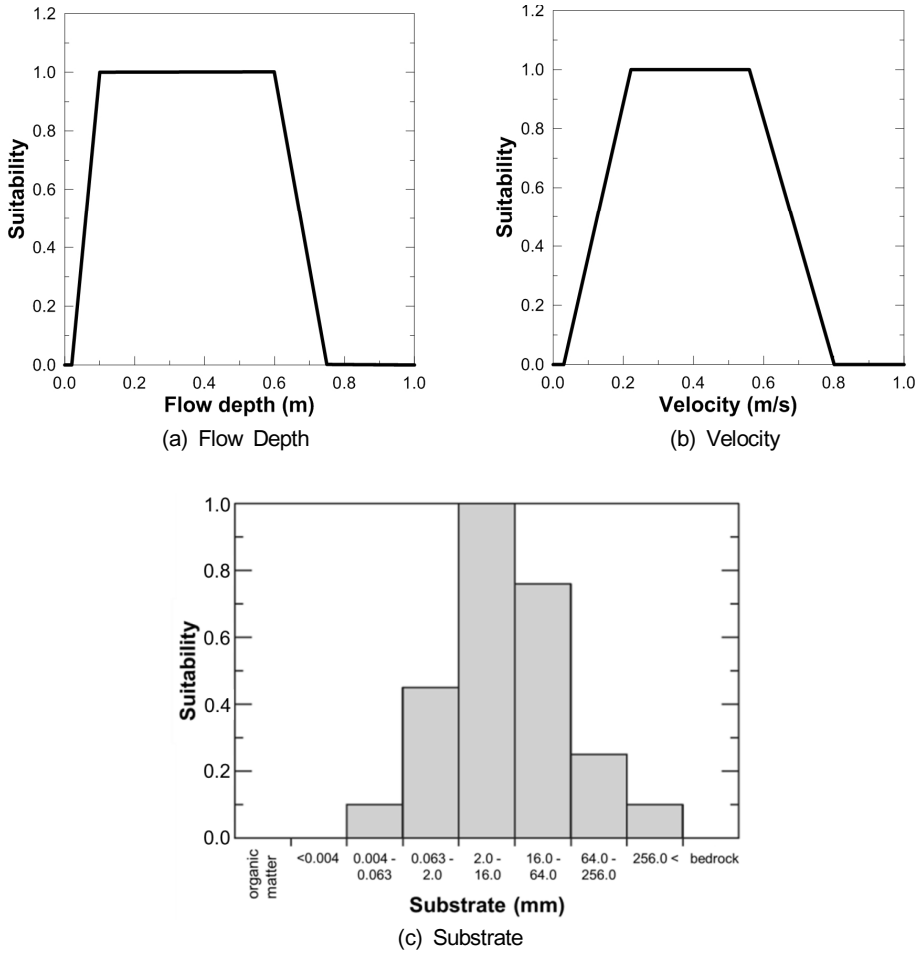

Fig. 2 Habitat suitability curves for *Zacco platypus* used in this study (Kim 1997, Sung et al. 2005).

가중가용면적 (weighted usable area, WUA), 그리고 수리학적 서식처 적합도 (HHS)는 다음과 같다.

$$WUA = \sum_{i=1}^{b} CSI_i A_i \quad \text{(Eq. 8)}$$

$$HHS = \frac{WUA}{A_W} \quad \text{(Eq. 9)}$$

여기서 i와 b는 격자의 순서 및 총 격자의 수를 의미하며, A_i는 i번째 격자의 면적, CSI_i는 i번째 격자에서의 복합서식처적합도 지수 (composite suitability index)를 의미하며, 개별 서식처 적합도 지수를 이용하여 구할 수 있다. 본 모의는 개별 서식처 적합도 지수 값을 서로 곱하는 곱셈법을 사용하였다. A_W는 총 유수면적을 의미한다.

Sung et al. (2005)은 낙동강유역에서 수행된 현장조사 데이터와 Kim (1997)이 제시한 서식처 적합도 지수를 이용하여 Fig. 2와 같은 서식처 적합도 지수를 제시하였다. 피라미는 주로 낮은 수심과 느린 유속을 선호한다.

3.5 유량시나리오

Fig. 3은 장기 하상변동 모의에 사용된 유량시나리오이다. 영주댐의 댐 건설 후 유량 시나리오는 같은 유역에 있는 다목적댐인 임하댐의 2012년 방류량 데이터를 이용하였다. 댐의 월별 방류량은 영주댐의 월별 계획발전용량을 참고하여 수립하였다. 7월과 8월의 경우 홍수기로 인하여 큰 방류량이 산정이 되었으며 약 17 m^3/s 유량이 방류된다.

4. 모의 결과

Fig. 4는 연간 발전방류 시나리오를 이용하여 3 년 동안 장기하상변동 모의를 한 후 초기조건의 하상고를 기준으로 하상변동량을 도시한 것이다. 모의결과 상류로부터 5 km 지점에서 약 0.4 m의 퇴적이 발생하였으며 댐의 직 하류에서 약 0.35 m의 침식이 발생하였다. 상류단의 경계조건은 댐으로 인하여 유입유사량이 없다는 가정을 하였기 때문에 댐의 직하류에서 침식이 직행되었다.

Fig. 5는 시간에 따른 하상재료에서의 D_{50} 값의 변화를 나타낸 것이다. D_{50} 값의 초기조건은 모의구간 전체가 동일하게 약 1 mm로 주어졌다. 3년 후 상류단의 D_{50} 값은 23 mm으로 모의 되었으며, 모의구간 전체에 걸쳐 D_{50} 값의 분포는 증가하는 것을 보여준다. 이는 상류에서 댐으로 인하여 유사량 공급이 차단되었기 때문이며, 상류에서 하류 쪽으로 장갑화가 진행되고 있다는 것을 보여준다. D_{50} 값의 분포는 상대적으로 큰 값과 작은 값이 번갈아 가며 모의되었다. 이는 하상의 지형이 반영된 결과로 소와 여울이 가지는 하상재료의 특성을 나타내고 있다.

Fig. 6는 시간에 따른 평수량의 유량조건에서 수리

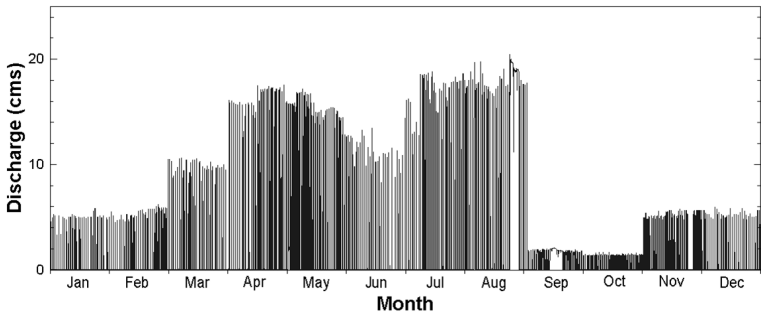

Fig. 3. Discharge scenario for the simulation in the Naeseong Stream.

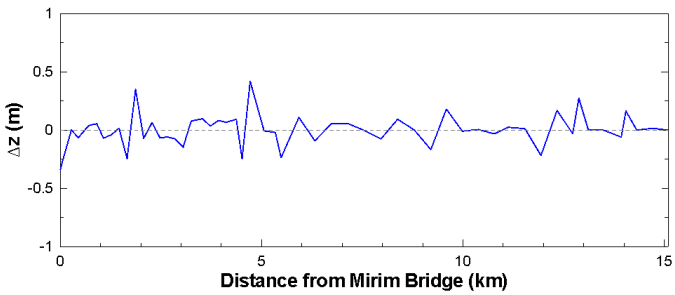

Fig. 4. Bed elevation change (*ΔZ*) with the distance from the Mirim Bridge in the Naeseong Stream after 3 years.

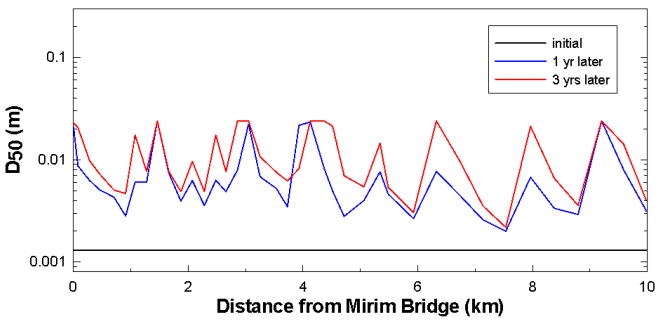

Fig. 5. Longitudinal distributions of the median diameter (D_{50}) of bed materials after the dam construction in the Naeseong Stream.

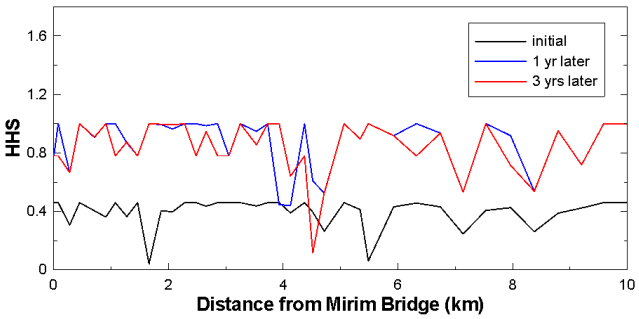

Fig. 6. Longitudinal distributions of hydraulic habitat suitability (HHS) after dam construction in the Naeseong Stream for normal flow condition.

학적 서식처 적합도 (HHS) 값의 변화를 나타낸 것이다. 초기조건의 하상의 경우 HHS 값이 약 0.46에 대부분 분포하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기조건의 하상의 D_{50} 값이 1 mm로 주어져 있기 때문에 이때의 하상재료에 대한 서식처 적합도가 0.46로 매우 낮은 값으로 산정이 되었기 때문이다. 이후 장갑화가 진행이 됨에 따라 하천의 하상재료는 모래에서 자갈로 변하게 되어 하상재료에 대한 서식처적합도가 매우 좋게 평가가 되었다. 이로 인하여 1년과 3년 후의 HHS 값의 분포는 평수량의 조건에서 매우 높게 평가가 되었다. 1년 후와 비교해 보았을 때 3년 후의 경우 서식처가 약간 악화가 되었으며 이는 장갑화가 지속적으로 진행이 됨에 따라 하상재료에 대한 서식처 적합도 역시 떨어지게 되었기 때문이다.

5. 결 론

본 연구는 하상변동 모형을 이용하여 댐 하류에서의 어류서식처의 변화를 모의하였다. 이를 위해 1D 준정류 모형과 Exner 방정식을 이용하였으며, 하상재료의 분급을 고려하였다. 모의결과 댐의 직하류로부터 침식 및 장갑화가 진행되었으며 그 결과 피라미의 서식처가 변화하는 것을 확인하였다. 연구대상지역인 내성천은 모래하천으로 장갑화가 진행됨에 따라 자갈하천으로 진행되어 성어기의 피라미에 좋은 하상재료 조건으로 변화하였다가 지속적인 장갑화 현상으로 인하여 서식처가 서서히 감소하였다. 이는 장기적인 어류 물리서식처 분석 시 하상재료가 영향을 끼칠 수 있다는 것을 보여준다. 본 연구에서는 D_{50} 값을 기준으로 하상재료에 대한 서식처 적합도를 평가했지만 D_{50} 값이 해당 지점에서의 하상재료를 대표하는 지표로서는 한계가 있다. 이는 D_{50} 값은 하상재료에서의 각 입자의 비율을 포함하지 못하기 때문이다. 향후 하상재료에 큰 영향을 받는 산란기의 어류에 대하여 분석할 필요가 있으며, 충분한 실측 데이터와의 비교검증이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014R1A2A1A11054236). 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Bovee, K.D. 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Instream Flow Information Paper No. 12, Fish and Wildlife Service, U.S. FWS/OBS-82/26, Fort Collins, CO, USA.

Bowen, Z.H., Freeman, M.C., and Bovee, K.D. 1988. Evaluation of generalized habitat criteria for assessing impacts of altered flow regimes on warmwater fishes. Transactions of the American Fisheries Society 127: 455-468.

Brandt, S.A. 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. Catena 40: 375-401.

Hirano, M. 1971. River bed degradation with armoring. Proceedings of Japan Society of Civil Engineers 195: 55-65.

Ji, U., Kim, J.S. and Lee, C.J. 2013. Flow resistance analysis for lower Naesung Stream considering grain and bedform roughness. Journal of Korea

Water Resources Association 46: 1209-1220. (in Korean)

Kang, Y.H., Kim, S.K., Hong, G.B., and Kim, H.S. 2011. Change of fish fauna and community structure in the Naeseong Stream around the planned Yeongju Dam. Korean Journal of Limnology 44: 226-238. (in Korean).

KICT. 2013. Analysis of Change in River Morphology and Vegetation Due to Artificial Structures. Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, Korea. (in Korean)

Kim, I.S. 1997. A Pictorial Book of Animals and Plants, Vol. 37. Ministry of Education, Gwacheon, Korea. (in Korean)

Kondolf, G.M. 1997. PROFILE: hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. Environmental Management 21: 533-551.

Milhous, R.T., Updike, M.A. and Schneider, D.M. 1989. Physical Habitat Simulation System Reference Manual-Version II. Information Paper No. 26., U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-89/16, Fort Collins, CO, USA.

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).

Valentin, S., Lauters, F., Sabaton, C., Breil, P. and Souchon, Y. 1996. Modelling temporal variations of physical habitat for brown trout (*Salmo trutta*) in hydropeaking conditions. Regulated Rivers: Research & Management 12: 317-330.

Wu, W., Wang, S.S.Y. and Jia, Y. 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. Journal of Hydraulic Research 38: 427-434.

Yi, Y., Wang, Z. and Yang, Z. 2010a. Impact of the Gezhouba and Three Gorges Dams on habitat suitability of carps in the Yangtze River. Journal of Hydrology 387: 283-291.

Yi, Y., Wang, Z. and Yang, Z. 2010b. Two-dimensional habitat modeling of Chinese sturgeon spawning sites. Ecological Modelling 211: 864-875.