

하천 제방에 의하여 차단된 홍수터에서 생태적 연결성 회복을 위한 수리분석 및 평가모형 개발

Development of Hydraulic Analysis and Assessment Models for the Restoration of Ecological Connectivity in Floodplains Isolated by Levees

제갈선동* · 조길제 · 김창완

주식회사 에이치투알

Sun Dong Chegal*, Gil Je Cho and Chang Wan Kim

H2R Incorporation, Goyang 10306, Korea

Received 9 December 2016, revised 16 December 2016, accepted 20 December 2016, published online 31 December 2016

ABSTRACT: River restoration has recently been performed not only for the improvement of the artificial parts in the past but also for the restoration of abandoned river reaches which were blocked and isolated. For the restoration of abandoned river reaches, it is important to recover the hydraulic and ecological connectivity in the isolated space by longitudinal structures like levees. But because the assessment tools to determine whether the river restoration is performed properly are so rare at present, we aim to provide a tool for assessing ecological connectivity in a target river in this study. In the first step, one-dimensional numerical model for rainfall-runoff and channel routing was developed and then applied to the watershed of the Cheongmi Stream. In this step, a numerical model was developed to assess the restoration of connectivity. The model consists of two parts: one part is to convert the results of one-dimensional channel routing into two-dimensional spatial distribution. The other is to calculate the habitat suitability index according to time steps by using two-dimensional hydraulic features. The model was applied to a restoration area of the Cheongmi Stream. The advantage of this study is that two-dimensional hydraulic analysis can be easily obtained from one-dimensional hydraulic analysis without a complex and time-consuming two-dimensional analysis. HHS (Hydraulic Habitat Suitability) by sections of target reaches and target species can be easily obtained using the results of this study.

KEYWORDS: Channel routing, Habitat suitability index, Lateral connectivity, Numerical model, River restoration

요 약: 최근 하천복원 사업은 과거 인공적인 부분을 개선하는 범위를 벗어나 격리차단된 구하도까지 복원하는 수준에 이르렀다. 구하도 복원은 하천 제방과 같은 종적 구조물에 의해 차단된 공간의 수리적 연결성 회복이 중요하다. 그러나 하천복원이 적절히 수행되었는지 관한 평가방법이 부족한 상황이기에 본 연구에서는 대상하천에서의 생태적 연결성 평가를 위한 수단을 제공하고자 한다. 이 연구에서 강우에 의한 유역유출 및 하도흐름 해석이 동시에 가능한 1차원 수치모형을 개발하여 청미천 유역에 적용한 바 있다. 특히 이 연구에서 1차원의 홍수추적 결과를 2차원의 공간분포로 변환시키고 시간에 따른 2차원의 수리특성으로부터 서식처적합도 까지 산출하여 연결성 회복정도를 평가하는 수치모형을 개발하였으며, 이를 청미천 구하도 복원지역에 적용하였다. 복잡할 뿐만 아니라 시간도 많이 소요되는 2차원의 분석을 수행하지 않고서도 1차원 수리특성 결과를 확장해서 2차원 수리특성을 쉽게 구할 수 있도록 한 것이 본 연구의 특징이다. 본 연구의 결과를 이용하면 구간별 대상종별 서식처적합도를 용이하게 산정할 수 있다.

핵심어: 홍수추적, 서식처적합도지수, 횡적 연결성, 수치모형, 하천복원

*Corresponding author: chegal@dhanmail.net, ORCID 0000-0002-1006-0790

© 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. 서론

하천은 강수를 통해서 공급된 지표수와 침식을 통해서 공급된 육지의 물질을 운반함으로써 물질의 순환을 돕는 역할을 수행한다. 하천은 물리적인 기능뿐만 아니라 각종 동식물이 생존할 수 있는 공간을 제공하며 인간에게는 용수공급이라는 기능 이외에도 수변 위락 및 감상의 기능을 갖기 때문에 환경, 사회경제 및 문화적으로도 가치가 높다. 그러나 현대사회에서 급격한 산업화와 도시화로 인하여 하천은 재해방지 및 경제적 이용의 대상이 되었다. 이에 따라 하천은 자연상태에서 직강화, 인공화의 과정을 거쳤으며 하천 내 무분별한 시설물의 설치 등으로 황폐화되었다. 하천 내 제방과 같은 구조물은 하천과 제내지의 단절을 초래하였고 그 결과 제내지와 제외기간 생태적, 수리학적 연결성이 차단되어 생물서식처 축소 및 생물 다양성 감소 등의 문제가 발생하였다 (Kim and Kim 2015).

그러나 최근 소득증가에 따라 깨끗한 환경에 대한 욕구가 증가하고 자연하천의 복원에 대한 관심이 높아지면서 자연형 하천공법의 적용을 넘어 자연하천으로의 복원이 시도되었고 우리나라도 하천복원 사업이 여러 지역에서 시험적으로 진행되고 있다. 황폐화된 기존 하천의 복원뿐만 아니라 격리 차단된 하천의 복원까지도 포함한 하천 복원은 사업의 시행 후 하천이 생태학적인 면에서 이전의 하천으로 어느 정도 복원되었는지 또는 복원사업이 시행될 때 하천생태계가 얼마나 복원될 것인지에 대한 연구는 부족할 실정이다. Ickes et al. (2005)은 미국 미시시피 강 유역의 연구를 통해 횡적연결의 역할을 이해하기 위한 이론적 구조를 제시하였다. 특히 수자원 조절 구조에 대한 어류 행동 반응의 이해, 생리적으로 관련된 어류 서식지 변수에 기초한 범람원 서식지 분류 연구의 중요성을 언급하였다. 하천에서 서식하는 어류는 홍수기간 중에는 탁도 등의 부정적 영향에 의하여 이동하는 것을 보이며 홍수터와 수로의 이용면에서 흐름시기에 따라 다른 모습을 보인다 (Ross and Baker 1983). 특히 수위가 높아졌을 때 홍수터로 이동하여 은신하거나 산란 및 성장과 같은 생식 활동을 하고 다시 수위가 낮아지면 분류로 돌아가서 생활을 한다 (Kim et al. 2015). 우리나라의 어류서식처에 대한 연구는 2000년대에 들어서면서 시작되었으며 서식처적합도지수 (habitat suitability index, HSI)가 대표적이다. HSI는 수생물 서식처 모델링에 이용되는 물리적 환경과 생물군의 연결고리 역할을 하는 것으로서, 유속 및 수심 등과 같은 물리적

서식처 특성과 대상 종의 선호도와와의 연계를 정량적으로 나타낸다 (Kang 2012). BaeK and Kim (2015)은 안양천 종류의 피라미를 대상으로 생태하천복원을 위한 물리서식처 모형을 적용하였고, Kim et al. (2015)은 만경강에서 연결성 복원을 위한 어류군집조사를 수행하였다.

본 연구는 하천의 차단된 공간에서 생태적 연결성 회복을 위한 수리수문학적 분석모형 개발 (Lee et al. 2016)의 일부로써 하천 내 종적구조물에 의해 차단된 제내지와 제외기간의 생태적 연결성 회복도의 평가에 대한 연구이며, 하천의 수리적인 변화에 따라 HSI의 변화를 분석할 수 있는 모형을 개발하고 이를 청미천에 적용하였다. 본 평가분석모형은 1차원의 하천정보를 평면적인 분포로 변환한 후, 그 결과로부터 HSI의 평면적 분포를 시간 변화에 따라 관찰할 수 있도록 개발되었다. 또한 해석 결과를 기초자료로 제공함으로써 추후 생태적 연결성 분석에 활용할 수 있도록 하였다.

2. 모형의 개요

하천복원 특히 격리차단된 제내지의 횡적연결은 단순한 지형변화뿐만 아니라 수리적인 변화가 발생하고 그 변화는 공간적인 형태로 나타난다. 따라서 변화된 수리환경에 의한 HSI의 변화를 평가하려면 공간 분포된 수리특성 값이 필요하다. 그러나 HSI의 변화를 공간적으로 확인하기 위하여 2차원 이상의 수리분석모형을 이용하는 것은 경제·시간적인 비용이 너무 크다. 특히 사용자가 환경 및 수리분석 모형을 동시에 구사하기는 어렵다는 점을 고려할 때 1차원모형의 결과를 이용하여 2차원의 수리특성 값을 추출하는 방식이 적절하다고 판단하였다

본 연구는 실무자가 쉽게 사용할 수 있는 평가모형을 개발하는데 목적이 있으며, 현재 사용되고 있는 다양한 수치해석모형의 기능을 고려하여 본 연구에서는 별도의 수리계산 모형을 개발하지 않았다. 수문모형에서 산정된 유출수문곡선으로부터 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)나 FLDWAV 등의 상업모형을 통해 얻어진 수리해석결과를 활용하여 실무자가 필요로 하는 평가자료를 구하는 방식이 본 연구에서 개발하는 모형의 주요 방식이다. 이전 단계의 수문분석이 완료된 후, 생태적 연결성 회복도의 평가지표 중 어류의 서식처 적합도지수를 구하는 방식은 다음과 같다.

- 1) 대상영역의 DEM자료와 횡단자료로부터 입력자료 구성
- 2) 부정류의 수리계산을 통해 수위 및 유량 데이터 생성
- 3) Laplace 방정식을 통한 수위분포의 자료 생성
- 4) Chiu의 유속분포 가정과 Poisson 방정식을 이용한 유속분포의 자료 생성
- 5) HSI 곡선자료를 이용한 각 시간단계별 HSI와 복합 적합도지수 (combined suitability index, CSI) 분포 및 공간 평균 HSI와 CSI 값 산정

3. 지배방정식

3.1 2차원 홍수위 분포

본 모형은 1차원의 수리학적 홍수추적이 종료된 후 횡단지점으로 제공되는 수위를 2차원의 격자 수위로 확장하는 것이다. 2차원 수위분포는 와류, 만곡류 및 지형변화에 따른 국부적인 흐름특성 등을 포함하나 1차원 수리계산결과를 2차원으로 확장할 때는 이러한 영향을 반영할 수 없다. 따라서 2차원 흐름특성이 큰 곳에서는 변환모형의 적용에 주의하여야 한다.

본 모형과 유사한 기능을 하는 경우로 HEC-GeoRAS 모형이 있는데, 이 모형은 1차원으로 계산된 수위를 횡단선을 따라서 동일한 수위를 부여하고 선형 보간을 통해 격자로 확장하는 방법이다. 이에 반해 본 모형은 라플라스 방정식 (Laplace equation)을 이용한 2차원 보간 (interpolation)을 이용한다.

$$\frac{\partial Z^2}{\partial x^2} + \frac{\partial Z^2}{\partial y^2} = c \quad (\text{Eq. 1})$$

Eq. 1에서 c 에 0을 적용하면 각 격자위치에서 구성되는 2차원 평면에서의 라플라스 방정식이 된다. 이 라플라스 방정식이 수위를 구하고자 하는 격자의 수 만큼 이산화된 Eq. 2로 만들어지면 매트릭스 (matrix)를 구성하여 직접 계산하는 방식과 Eq. 3과 같이 구성하여 연속가속이완법 (Successive Over Relaxation, SOR)에 의해 계산하는 방식이 있다.

$$\frac{Z_{i+1,j} - 2Z_{i,j} + Z_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{Z_{i,j+1} - 2Z_{i,j} + Z_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (\text{Eq. 2})$$

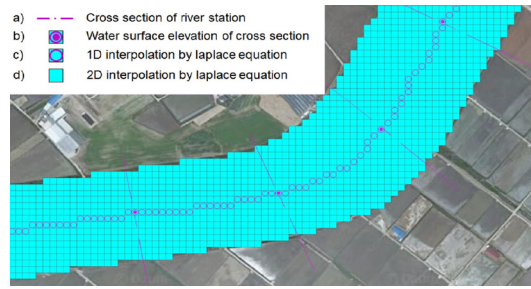


Fig. 1. Conceptual diagram of the process of distributing 2-dimensional water level from 1-dimensional water level. At the first, the cross section of river stations are determined, the position of center point is determined for the second, water surface elevation on the center line of river was interpolated by 1D Laplace equation for the third, and water surface elevation in the remaining area was interpolated by 2D Laplace equation for the last.

$$Z_{i,j}^{K+1} = (1 - \omega)Z_{i,j}^K + \omega$$

$$\left[\frac{\Delta y^2 \times (Z_{i+1,j} + Z_{i-1,j}) + \Delta x^2 \times (Z_{i,j+1} + Z_{i,j-1})}{\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2}} \right]$$

(Eq. 3)

Eq. 3에서 ω 는 가속이완계수로서 1.0 - 2.0를 사용한다. 계산순서는 우선 수리학적 홍수추적모형에서 계산된 결과로부터 각 횡단지점의 중심점을 격자망에서 확인하고, 두 번째로 격자에 그 수위를 부여하며, 세 번째로 1차원 라플라스 방정식에 의하여 하천의 중심선을 따라서 계산을 수행한 후, 마지막으로 2차원 라플라스 방정식에 의하여 전체 영역에서 수위를 계산한다 (Fig. 1). 1차원 라플라스 방정식의 경계조건은 각 횡단지점의 수위 (Dirichlet B.C.)이고, 2차원 라플라스 방정식의 경계조건은 앞서 계산한 하천중심선 격자들의 수위와 계산영역 경계부에서 수면경사는 '0' (Neumann B. C.)이다.

3.2 2차원 유속분포

본 연구의 유속분포 변환모형은 유속의 공간적 분포를 구하기 위해서 단면 전체에서 유속을 계산하지 않고, 지형의 특성을 이용하여 1차원 모형의 단면 평균유속을 단면 전체로 변환하는 방식이다. 기존에는 연직 방향의 주유속 분포를 나타내는 방식으로 로그법칙이나 멱 (power) 법칙이 주로 사용되어 왔으나 이들은 벽면의 영향에 의한 횡방향 유속 변화를 반영할 수 없다. 뿐만 아니라 하상으로부터

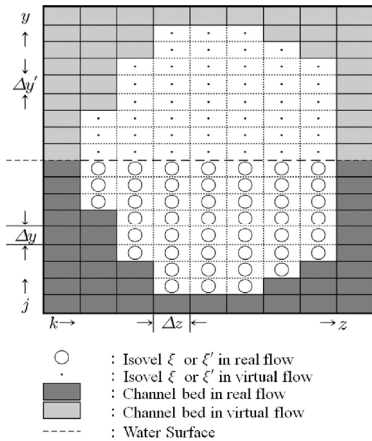


Fig. 2. Cell-diagram showing real and virtual regime. Virtual regime which has the mirrored shape as real regime is assumed over the water surface line. The Poisson equation is calculated in real and virtual regime but only the values of the real regime is output.

수면까지 유속분포가 단순 증가하는 함수 형태로 되어 있어 최대유속이 수면 아래에서 발생하는 물리적인 현상을 나타낼 수 없다는 한계가 있다 (Lee et al. 2007).

Chiu (1987, 1988)는 기존의 결정론적인 흐름방향 유속분포식의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 확률통계에서 사용되는 엔트로피개념을 이용한 2차원 유속분포식을 제안하였다. Chiu의 식은 단면에서 유속이 동일한 점들을 연결하는 등유속선과 유속의 일대일 대응관계를 이용하므로 수면 아래에서 최대유속이 나타나는 실제현상을 이론적으로 재현할 수 있다. 다만 Chiu의 이론을 적용함에 있어서 가장 중요한 가정 중 하나는 주흐름 (primary flow) 방향의 지점유속 u 만 고려한 유속분포 식이라는 점이며, 이차류 (secondary flow)의 발생은 무시가 가능한 것으로 고려한다는 것이다. 따라서 Chiu 식의 적용은 2차류의 발생이 가능한 지점의 경우 상대적으로 큰 오차가 발생할 수 있다 (Park et al. 2012). Chiu의 이론적인 유속분포식을 널리 적용하기 위해서는 매개변수에 대한 추정이 필요할 뿐만 아니라 모의된 유속분포를 검증할 단면전체의 실측 유속분포 자료가 있어야 한다. Chiu and Said (1995)는 다양한 유량과 수심 조건에 대한 분석을 통해 하도 단면의 유속분포를 일정한 엔트로피 계수값으로 나타낼 수 있다고 밝힌 바 있으며 다양한 유량과 수심조건에 대한 분석을 통해 하도단면의 평형상태는 엔트로피 매개변수인 M 값에 일정하게 반영된다는 점을 지적하였다.

Chiu의 유속분포식에서 일반적으로 사용되는 하폭 방

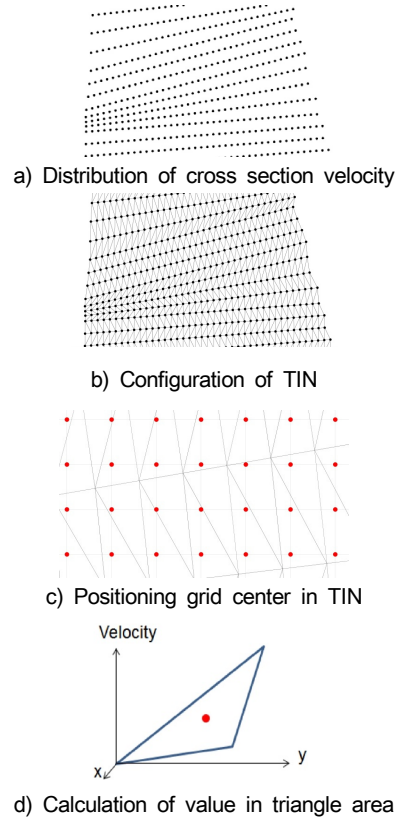


Fig. 3. Conceptual diagram of process showing distributing velocity in all grids. First, triangulated irregular network (TIN) is configured with all 3 dimension points, the center position of each grid in DEM is determined for the second, and value is interpolated from value of nodes in triangle for the last.

향 (y)과 수심 방향 (z)의 성분으로 이루어진 $y-z$ 직교 좌표계를 사용하지 않고 동일한 유속을 가지는 점들을 연결한 등유속선 (isovel curve)의 위치를 보여주는 변환된 연직 및 횡단거리를 이용하는 $\xi-\eta$ 좌표계를 이용한다.

Eq. 4는 M 을 매개변수로 갖는 개수로 단면에서의 2차원 유속분포에 관한 일반 공식이다.

$$\frac{u}{u_{\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

u_{\max} 는 단면내 최대지점유속, M 은 유속분포의 변동성 즉, 불확실성의 정도인 엔트로피를 측정하여 제시해 줄 수 있는 엔트로피 계수 (entropy parameter), ξ_{\max} 와 ξ_0 는 단면내 ξ 값의 최대값과 최소값이다.

Morse et al. (2010)은 Chiu (1987, 1988)가 제시한 등유속선 공식의 ξ 를 구하기 위해 식으로부터 직접 계산하지 않고 Poisson 방정식을 풀어서 등유속분포를 계산하는 방법을 제안하였다.

$$\alpha \frac{\partial \xi^2}{\partial y^2} + \frac{\partial \xi^2}{\partial z^2} = -1 \quad (\text{Eq. 5})$$

Eq. 5에서 α 는 등유속 분포의 형상계수이다. Poisson 방정식의 계산을 위해서 경계조건이 필요한데 Morse et al.은 Fig. 2에서 설명한 바와 같이 수면 아래의 흐름영역과 동일한 가상영역을 수면 위에 설정함으로써 등유속선 분포를 계산하는 방식을 제안하였으며 Cha et al. (2014)은 한강의 유량산정에 이용하여 적용성을 확인하였다. 등유속선 값은 Eq. 4에 의하여 환산되면 횡단면의 유속분포로 변환이 되고, 횡단면의 유속분포로부터 횡단내 지점별 수심평균 유속을 산정하며 해당 위치에서의 유속 값과 좌표를 이용하여 평면 2차원의 유속분포를 산정한다. 상기 과정을 통한 2차원의 유속분포는 각 지점의 좌표에 따라 불규칙 삼각망 (triangulated irregular network, TIN)를 구성하고 삼각형 절점의 유속 값으로부터 각 격자의 중심점에서 유속 값을 보간하여 산정한다 (Fig. 3).

3.3 물리서식처모형

본 모형은 물리서식처모의 (physical habitat simulation)에서 각 물리환경에 대한 서식처적합도지수 (habitat suitability index, HSI) 외에 복합적합도지수 (combined suitability index, CSI)까지 계산할 수 있게 개발되었다. 입력데이터인 대상종별 HSI 곡선은 대상영역에서 각 격자가 가지는 유속과 수심 값에 적용되고 복합적합도지수는 각 물리 환경에 대한 서식처적합도지수의 기본적인 곱셈을 사용한다.

$$C_i = f(v)_i \times f(d)_i \times f(c)_i \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 C_i 는 복합적합도지수이고 $f(v)_i$, $f(d)_i$, $f(c)_i$ 는 각각 유속, 수심 및 하도지수 (channel index)에 대한 서식처적합도이다 (Kim et al. 2015). $f(c)_i$ 는 각 격자의 시간대별 하도지수를 계산할 수 있어야 하나, 본 연구에서 하도지수를 분류하는 기준을 정하지 못하였으므로 $f(c)_i$ 는 고려하지 않았다. 다만 $f(c)_i$ 에 대한 분류기준이 결정되면 개

선할 수 있다. 전 영역에서 격자별로 서식처적합도 값이 결정되면 격자별 서식처적합도지수 값을 합산하고 격자의 개수로 나누어 수리학적 서식처 적합도 (hydraulic habitat suitability, HHS)를 계산하였다 (Kim and Choi 2015).

$$HHS = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (\text{Eq. 6})$$

4. 수치해석적용

4.1 대상지역 설정

본 연구에서는 하천 내 격리차단 공간에서의 생태적 연결성 회복의 평가를 위해 한강의 제 1지류인 청미천 구하도 복원지역을 선정하여 수치해석을 실시하였다. 청미천은 현재 하천정비와 함께 구하도 복원공사가 완료된 구간이 있으며, 여러 연구기관에서 생태 모니터링을 실시하고 있기 때문에 생태적 연결성 평가에 알맞은 지역이다 (Fig. 4).

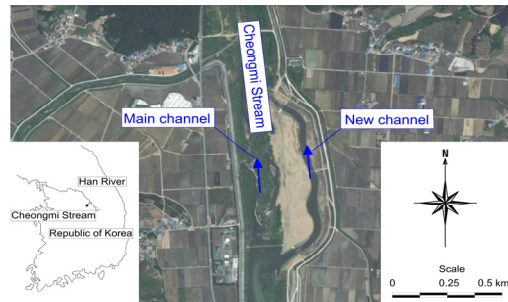


Fig. 4. Map showing study area in the Cheongmi Stream. In this study area, new channel which was used as rice paddies before restoration is included with main channel.

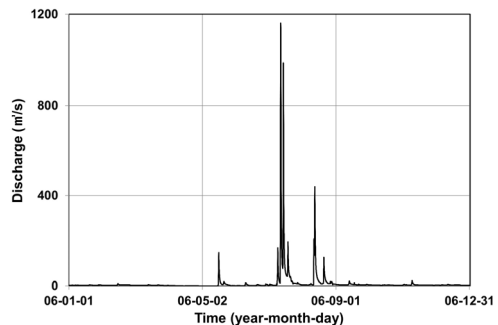


Fig. 5. Input hydrograph of flood channel routing. This is the long term runoff hydrograph in 2006.

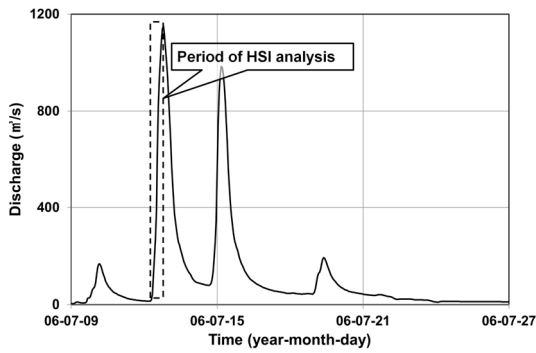


Fig. 6. Hourly hydrograph applied to spatial distribution of water surface elevation and velocity. Only the period from 9:00 to 19:00 on July 12, 2006 is applied to the modeling.

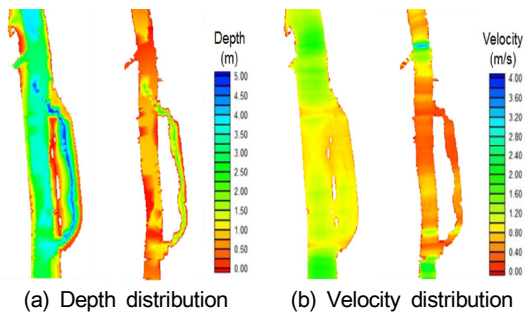


Fig. 7. Results of numerical analysis for depth and velocity distribution at the study area at 9:00 (right) and 19:00 (left) on July 12, 2006.

4.2 1차원 홍수추적

본 연구에서 본류와 구하도의 수리학적 해석을 위하여 1차원 홍수추적모형인 HEC-RAS를 이용하였다. 이 모형은 지형의 변화가 큰 홍수터, 습지 등을 포함하는 하천에 적용될 수 있는 유용한 모형이다. Lee et al. (2016)은 개발 중인 수리수문분석 모형을 청미천 유역에 적용하였고 그 결과를 검증한 바 있다. 장기유출모의 기간은 2006년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년 간으로 총 8,760시간이다 (Fig. 4). 지형자료는 청미천 하천기본계획수립 시 홍수추적에 사용한 HEC-RAS 입력데이터를 사용하되, 현재 격리차단된 구하도의 복원사업이 완료되었으므로 이 구간의 지형이 반영되도록 지형을 수정하여 장기유출량에 따른 하도 홍수 추적을 수행하였다 (Fig. 5).

4.3 수위 및 유속의 공간분포

수리학적 홍수추적 중 대부분의 기간은 저유량이 지속되므로 하도 내의 변화를 관찰하기 어렵다. 따라서 본 모형을 적용은 7월 9일부터 7월 27일 사이에 있었던 홍수기간 중 유량이 가장 크게 증가하던 7월 12일 09시부터 19시 구간을 채택하였다 (Fig. 6). 평면으로 분포된 수위자료는 지형자료의 표고를 이용하여 수심자료로 자동 변환이 되고, 각 시간단계별로 수심자료 및 유속자료가 DEM형식으로 저장된다 (Fig. 7).

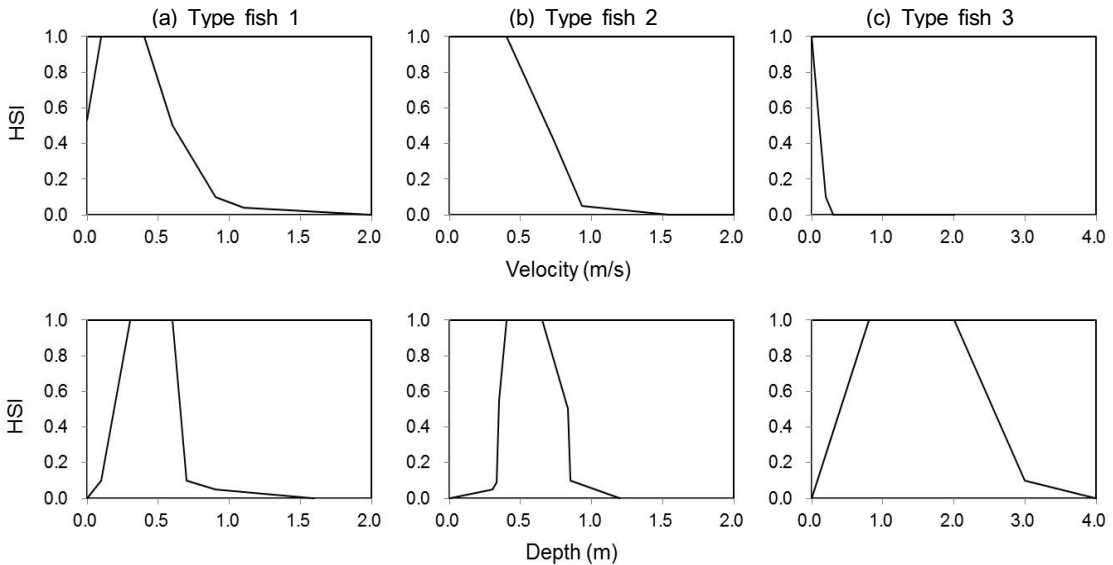


Fig. 8. Arbitrarily assumed to the habitat suitability index (HSI) of the three fish types. Type 1, 2 and 3 are *Carrsius cuveri*, *Sarcocheilichthys variegatus wakiyae* and *Zacco platypus*, respectively.

4.4 물리서식처모의

본 연구에서는 다양한 어종의 서식처적합도곡선을 동시에 적용할 수 있도록 하기 위하여 어종의 수에 상관없이 입력할 수 있도록 개발된 바, 유속과 수심에 대해 각각 서식처적합도곡선 3개를 가정하여 적용하였다. Fig. 8은 Kang (2010)이 국내 어류의 물리적 서식적합도지수를 산정하여 제시한 것 중 떡붕어, 참중고기, 피라미를 본 연구에서 물리서식처모의에 적용한 것이다. Fig. 9는 특정 어종의 시간의 경과에 따른 수심 HSI의 변화를 나타낸 것이다. 수위가 증가함에 따라 서식처적합도가 높아지지만 어느 수준을 넘어서면 오히려 낮아지고 유량이 클 때 전체적으로 저유량보다 훨씬 낮아진 것을 알 수 있다. Table 1은

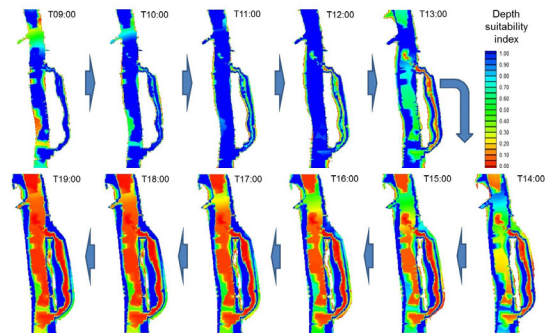


Fig. 9. Hourly change of depth habitat suitability index (HSI) distribution of the fish type 3 at the study area from 9:00 to 19:00 on July 12, 2006.

각 항목별 어종별 수리학적 서식처적합도 (HHS)를 나타낸 것으로 Eq. 6에 의하여 결정하였다. 다만 Table 1에서 수심 HSI와 유속 HSI는 수리학적 서식처적합도 계산방식과 같게 전체 면적에 대하여 평균을 산정한 것이다. Table 1에서 시간에 따른 값의 변화를 보면 유량증가에 따라 유리한 종이 무엇인지를 쉽게 파악할 수 있고, 장기수치모의를 통해서 연결성 회복을 예측할 수 있는 기본 자료를 제공할 수 있다.

5. 결론

하천을 이용의 대상으로만 여기던 인식이 하천과 공존하는 방향으로 변화되었고, 하천관리의 방향도 자연형 하천을 넘어 자연하천의 복원으로 바뀌어가고 있다. 따라서 하도 내 하천환경의 변화뿐만 아니라 하천의 종적구조물에 의해 차단된 제내지와 제외지의 연결을 복원하는 사업이 이루어지고 있는 상황에서 연결성 평가에 대한 연구의 필요성 또한 증대되고 있다. 차단된 제내지와 제외지간의 수리수문 분석을 통해 수리수문 연결성이 회복된 서식처에서의 생태적 연결성을 분석하고 평가할 수 있다면 하천 복원 시, 복원의 방향에 따른 결과를 예측함으로써 생태적 다양성이 보다 증대된 하천으로의 복원이 가능할 것이다.

본 연구에서는 1차원 수치모형의 결과로부터 2차원 모형과 동일한 형태의 수리특성 값을 산정하고 그 결과를 이

Table 1. Hydraulic habitat suitability (HHS) and habitat suitability index (HSI) of three different fish types by hydraulic properties.

Discharge (m ³ /s)	Depth HSI*			Velocity HSI**			HHS		
	Tyep 1	Tyep 2	Tyep 3	Tyep 1	Tyep 2	Tyep 3	Tyep 1	Tyep 2	Tyep 3
118	0.360	0.362	0.760	0.389	0.430	0.008	0.095	0.104	0.002
194	0.222	0.253	0.862	0.228	0.266	0.005	0.052	0.049	0.001
271	0.130	0.154	0.876	0.165	0.190	0.004	0.036	0.033	0.001
393	0.123	0.105	0.855	0.113	0.122	0.004	0.025	0.021	0.001
613	0.130	0.116	0.733	0.065	0.060	0.004	0.016	0.010	0.001
821	0.123	0.106	0.578	0.051	0.044	0.004	0.012	0.006	0.000
933	0.116	0.112	0.511	0.046	0.038	0.001	0.013	0.009	0.000
1,013	0.098	0.103	0.484	0.042	0.034	0.001	0.011	0.008	0.000
1,089	0.086	0.088	0.462	0.040	0.032	0.001	0.009	0.007	0.000
1,139	0.082	0.082	0.447	0.036	0.027	0.001	0.008	0.006	0.000
1,151	0.080	0.079	0.442	0.035	0.027	0.001	0.008	0.006	0.000

* Depth HSI of fish types was calculated as average value of distributed depth HSI.

** Velocity HSI of fish types was calculated as average value of distributed velocity HSI.

용하여 공간 분포된 HSI, CSI 및 HHS를 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 본 모형은 복잡한 2차원 모형을 수행하지 않고 1차원 모형을 이용하기 때문에 수리특성의 정확도는 1차원 모형에 의존하나 비교적 간편하게 생태적 연결성 분석에 필요한 수리학적 자료 및 서식처 적합도 자료를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

추후 연구에서는 장기적인 관점에서의 모형의 적용과 구간별 HSI, CSI 및 HHS를 제공할 수 있는 방안에 대해 연구를 수행할 예정이다. 본 연구의 결과를 바탕으로 진행될 최종적인 연구에서는 폐천 및 구하도가 존재하는 대상 유역에서의 수리수문학적 분석을 통한 수리적 연결성이 회복된 공간에서의 생태적 변화를 예측할 수 있는 기초자료의 제공하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Baek, K.O. and Kim, C.H. 2015. Test of a physical habitat model for stream restoration: a case study on midstream of Anyang-Cheon. *Journal of Korean Society on Water Environment* 31(1): 35-41. (in Korean)
- Cha, J.H., Kim, C.W., and Cho, Y.S. 2014. Development and application of isovel distribution in velocity profile method using Poisson equation. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 14(6): 325-336. (in Korean)
- Chiu, C-L. 1987. Entropy and probability concepts in Hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 113(5): 583-599.
- Chiu, C-L. 1988. Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 114(10): 738-756
- Chiu, C.-L. and Said, C.A.A. 1995. Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(1): 26-35.
- Ickes, B.S., Vallazza, J., Kalas, J., and Knights, B. 2005. River Floodplain Connectivity and Lateral Fish Passage: A Literature Review. U.S. Geological Survey, Upper Midwest Environmental Sciences Center, La Crosse, Wisconsin, USA.
- Kang, H.S. 2010. The Study on Estimate Method of Physical Fish Habitat Suitability Index. Korea Environment Institute. (in Korean)
- Kang, H.S. 2012. Comparison of physical habitat suitability index for fishes in the rivers of Han and Geum River watersheds. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 32: 71-78. (in Korean)
- Kim, J.S. and Kim, K.H. 2015. Sustainable river restoration through enlarging river space. *Magazine of Korea Water Resources Association* 48(4): 39-44. (in Korean)
- Kim, S.H., Cheon, H.T., and Cho, K.H. 2015. Fish community structure of the former channel isolated by channelization in the Mangyeong River, Korea: Implications for connectivity restoration. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2(2): 22-32. (in Korean)
- Kim, S.H., Kim, D.N., and Cho, K.H. 2015. Evaluation of habitat improvement using two-dimensional fish habitat modeling after the connectivity restoration in an isolated former channel. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2(2): 137-146.
- 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(4): 317-323. (in Korean)
- Lee, C.J., Seo, I.W., Kim, C.W., and Kim, W. 2007. Application of Chiu's two dimensional velocity distribution equations to natural rivers. *Journal of Korean Society of Water Environment* 40(12): 957-968. (in Korean)
- Lee, J.W., Chegal, S.D., and Kim, C.W. 2016. Development of a hydraulic and hydrologic analysis model for the recovery of ecological connectivity at an isolated space of a stream. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3(1): 1-7. (in Korean)
- Park, M.K., Uhm, C.S., Song, Y.S., and Park, M.J. 2012. Natural river flow characteristics using velocity distribution. *Journal of Disaster Management*. 12: 209-214
- Ross, S.T. and Baker, J.A. 1983. The response of fishes to periodic spring floods in a Southeastern Stream. *American Midland Naturalist* 109: 1-14.