



Analysis of the vegetation effects on the flow in Chopyeong Island of the Imjin River using a HEC-RAS 2D model

Lee, Du Han^{a*} · Rhee, Dong Sop^b

^aResearch Fellow, Department of Hydro Sciencer and Engineering Research, Korea Institute of Civll Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^bResearch Fellow, Department of Hydro Sciencer and Engineering Research, Korea Institute of Civll Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 23-046

Received: 16 August 2023; Revised: 8 September 2023; Accepted: 8 September 2023

Abstract

River vegetation has important functions such as providing a habitat for the river ecosystem and physical stability of the river bank. It also has adverse effects such as aggravating flood damages due to the increase in roughness coefficient and drag forces. River vegetation management is very important in finding a balance between flood and ecological management. There are still many uncertainties about the effect of vegetation on rivers. In this study, in order to analyze the effect of vegetated flow, the flow patterns according to the vegetation roughness are analyzed through a two-dimensional unsteady flow model for Chopyeong island of the Imjin River. According to the results of the 2D flow analysis using the HEC-RAS 2D model, the velocity distribution in the bend of the Imjin River was greatly affected by the vegetation roughness of Chopyeong Island. The formation of the main flow outside the bend of Chopyeong Island during flooding is presumed due to the influence of tree and grass on Chopyeong Island. If tree are distributed throughout Chopyeong Island, the velocity outside the bend is expected to be higher. River vegetation causes the effect of raising the water level, and could cause a change in the velocity distribution.

Keywords: River vegetation roughness, Imjin river, Chopyeong island, 2D unsteady model, HEC-RAS 2D

HEC-RAS 2D 모형을 이용한 임진강 초평도 식생이 흐름에 미치는 영향 분석

이두한^{a*} · 이동섭^b

^a한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원, ^b한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원

요 지

하천 식생은 하천 생태계의 서식처 제공과 하안의 물리적 안정 등의 중요한 기능을 한다. 그러나 조도계수와 항력의 증가로 홍수 피해 가중 등의 악 영향을 미치기도 한다. 하천 식생 관리는 홍수와 생태 관리의 균형점을 찾는다는 점에서 매우 중요하다. 그러나 식생이 하천에 미치는 영향에 대해서는 아직도 불확실한 것이 많다. 본 연구에서는 식생이 흐름이 미치는 영향을 분석하기 위하여 임진강 초평도 구간을 대상으로 식생 조도 설정에 따른 흐름 양상을 2차원 부정류 모형을 통해 분석하였다. HEC-RAS 2D 모형에 의한 2차원 흐름 해석 결과에 의하면 초평도 식생 조도에 따라 임진강 만곡부의 유속 분포가 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 현재와 같이 초평도 만곡부 외측에 홍수시에 주흐름이 형성되는 것은 초평도의 목본과 초본의 영향으로 판단된다. 초평도 전체에 목본류가 분포하면 만곡부 외측의 유속이 더욱 강하게 나타날 것으로 예상된다. 하천의 식생은 단순히 수위를 상승시키는 영향만 발생시키는 것이 아니라 유속 분포 변화를 유발할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어: 하천 식생 조도, 임진강, 초평도, 2차원 부정류 모형, HEC-RAS 2D

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0269
E-mail: dhlee@kict.re.kr (Lee, Du Han)

1. 서론

수리학적 관점에서 하천 식생은 평균 또는 홍수시 하천 흐름에 영향을 미치는 식생으로 일반적으로 주기적인 침수가 발생하는 홍수터 또는 하중도에 분포한다. 하천 식생이 분포하는 홍수터는 다양한 생태 기능을 제공하는 중요한 요소로 보존 가치가 높으나, 기후 변화로 인한 연중 및 계절별 유출량 변화, 침수 강도와 빈도의 변화 등으로 많은 영향을 받는다 (James *et al.*, 2016). 홍수터 식생은 단기적으로는 홍수시의 일시적인 침수로 발생하는 건조 상태에서 침수 상태로의 변화에 큰 영향을 받으며, 장기적으로는 홍수 빈도와 규모의 경년 변화 또는 수십 년간의 변화에도 큰 영향을 받는다.

하천 식생은 하천 생태계의 서식처 제공과 하안의 물리적 안정 등의 중요한 기능을 하나, 조도계수와 항력의 증가로 홍수 피해 가중 등의 악영향을 미치기도 한다. 하천 식생과 하천 흐름의 관계는 서로 연관되어 있어 매우 복잡한 구조를 보인다 (Sukhodolov, 2015). 식생에 의해 발생하는 항력은 흐름 저항을 상승시켜 유속을 저하시키며 수위 상승을 유발한다. 2000년대 하천환경을 고려하는 하천정비가 도입된 이후로 하천환경의 주요 요소 중 하나인 하천 식생에 대한 다양한 논의가 현재도 진행 중이다. 하천 식생 관리는 홍수와 생태 관리의 균형을 찾는다는 점에서 매우 중요하나 식생이 하천에 미치는 영향에 대해서는 아직도 불확실한 것이 많다.

특히, 최근에는 하천 공간을 탄소흡수원으로 활용하고자 하는 방안이 제시되면서 하천 내에 식생구간 또는 수변림 조성 등이 검토되고 있다. 하천 식생은 국부적으로 조도계수를 증가시켜 수위를 상승시키는 효과가 있는 것은 이미 잘 알려져 있으나, 식생에 의해 국부적으로 느려진 유속은 상대적으로 조도계수가 낮은 곳으로 집중하여 흐름 양상 자체가 변화할 것으로 예상할 수 있으나 이에 관한 분석 사례는 드물며, 실제 홍수사상과 같은 비정상류에서 하천식생의 영향에 관한 분석 사례 또한 드물다. Ji *et al.* (2021)은 금강 상류의 홍수터 흐름에 대한 2차원 해석을 통해 홍수터 식생의 흐름저항은 홍수터의 수리특성뿐만 아니라 주하도의 유속 저하에도 영향을 미치며, 홍수터 구간에 식생이 일부 존재하는 경우와 전 구간에 걸쳐 분포하는 경우의 국부적인 유속 분포 차이도 크게 나타나는 것을 확인하기도 하였다.

본 연구에서는 광범위한 하천 식생 구역이 하천 흐름에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 임진강 초평도 구간을 대상 구간으로 선정하여 2020년 홍수 사상에 대해 다양한 식생 조도 조건을 설정하여 2차원 부정류 해석을 수행하였다. 이를 통해 하천 식생이 유속, 수위, 유황 등 흐름에 미치는 영향을 구체적으로 분석하고자 하였다.

2. 연구 방법 및 대상

2.1 적용 모형

홍수터 식생에 의한 하천 흐름 해석을 위해서는 침수모의 가능한 2차원 천수방정식 모형의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 미공병단에서 개발된 HEC-RAS 2D 모형을 적용하였다. 현재까지 천수방정식을 해석하는 다양한 2차원 흐름 해석 모형이 제시되어 있지만 상업용 또는 연구용 모형은 일반적인 적용에 제한이 있다. 미공병단에서 개발한 HEC-RAS 모형은 당초에는 1차원 부정류 모형이지만, 2016년 5.0 버전부터 천수방정식 해석에 기반한 2차원 모형인 HEC-RAS 2D 모형을 제공하고 있다. HEC-RAS 2D 모형은 비상업용 모형으로 다양한 적용을 통해 검증되었다는 면에서 장점을 가지며, DEM (Digital elevation map)과 구글 위성영상 등과의 연동이 간편하다는 점에서 사용성도 우수하다.

Quiroga *et al.* (2016)은 HEC-RAS 2D 모형을 볼리비아의 2014년 홍수 해석에 적용하여 위성 영상에 의한 침수 양상과 비교하여 정확성을 검증하였으며, Ghimire *et al.* (2020)은 홍수파 및 침수 해석에 적용하여 검증하였다. Shrestha *et al.* (2020)은 MIKE21과 HEC-RAS 2D 모형을 홍수터 침수 해석에 적용하여 두 모형 모두 우수한 결과를 나타냄을 확인하였다. 그 외 다수의 연구를 통해 HEC-RAS 2D 모형의 적용성은 확인되고 있다 (Marko *et al.*, 2019; Rangari *et al.*, 2019; Syafri *et al.*, 2020; Szydłowski, 2019).

HEC-RAS 2D 모형은 천수방정식에 유한체적법을 적용하여 음해법으로 해석하며 격자구조는 구조적 격자와 비구조적 격자를 모두 지원한다. HEC-RAS 2D 모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (3)$$

여기서 t 는 시간, u 와 v 는 각각 x , y 방향의 수심평균 유속, q 는 생성/소멸 항, H 는 수위, h 는 수심, g 는 중력가속도, ν_t 는 수평 와점성계수, c_f 는 바닥 마찰계수, f 는 코리올리 매개변수 등을 나타낸다.

2차원 모형에서는 일반적으로 하천 흐름의 난류 특성과 유속의 연직 및 수평 방향의 불균일한 분포로 발생하는 운동량 확산을 와점성계수를 통해 고려한다. 본 연구에서 적용된 HEC-RAS ver. 6.4는 와점성계수를 다음과 같이 parabolic-Smagorinsky 모형으로 계산한다.

$$\nu_t = D_{us}h + (C_s\Delta)^2|\bar{S}| \quad (4)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{xx} & 0 \\ 0 & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$D_{xx} = D_L \cos^2\theta + D_T \sin^2\theta \quad (7)$$

$$D_{yy} = D_L \sin^2\theta + D_T \cos^2\theta \quad (8)$$

여기서 C_s 는 Smagorinsky 계수, D_L 은 종방향 혼합계수, D_T 는 횡방향 혼합계수, Δ 는 격자 크기, θ 는 흐름방향과의 각도 등을 나타낸다.

이 모형은 종방향 및 횡방향 운동량 확산의 비등방성과 평면 유속 구배로 발생하는 난류 효과를 고려하고 있다. C_s , D_L , D_T 등의 계수는 값이 클수록 에너지 소산을 크게 산정하여 결과적으로 수위를 증가시키는 효과를 나타낸다. HEC-RAS 매뉴얼(Brunner, 2016)에서는 C_s 는 0.05-0.2, D_L 은 0.1-3, D_T 는

0.04-1 등의 범위를 추천하는데 본 연구에서는 적용대상이 자연하도이고 비교적 상세한 측량 결과를 이용하여 하도 지형을 구성하였으므로 C_s 는 0.05, D_L 은 0.3, D_T 는 0.1 등으로 가정하여 계산을 수행하였다.

바닥 마찰계수는 매닝 조도계수 n 과는 다음의 관계로 표현되며 조도계수와 수심으로부터 계산된다.

$$c_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (9)$$

본 연구에서는 코리올리 힘은 고려하지 않았으며, HEC-RAS 2D 모형의 지배방정식과 해석방법에 대한 보다 자세한 내용은 HEC-RAS 매뉴얼(Brunner, 2016)을 참고할 수 있다.

2.2 적용 대상

본 연구에서는 식생이 하천 흐름에 미치는 영향을 분석하기 위하여 임진강 초평도 구간을 대상으로 선정하였다. 초평도는 임진강의 하류인 경기도 문산읍의 임진강 만곡부에 위치하는 면적 1.765 km²의 섬으로 길이는 약 1.7 km이며 폭은 넓은 지점이 약 1.6 km에 이른다(Fig. 1(a)). 초평도 직상류는 하상경사가 급하나 초평도 구간에서는 하폭이 크게 넓어지면서 하상경사가 완만해지며 초평도 직하류에서는 다시 하폭이 좁아지는 구조를 형성하고 있고, 홍수시에는 초평도 전체가 침수되므로 넓게 형성된 식생구역에 의한 흐름 영향을 파악하기에 적합하다. 초평도에는 Fig. 1의 위성사진과 현장사진에서 보는 것 같이 섬 중하류에 수목이 번성하고 있으며 나머지 지역에는 초본이 번성하고 있다.



(a) Map of Chopyeong Island in the Imjin River (Google earth)



(b) Vegetation in Chopyeong Island (www.ktsketch.co.kr)

Fig. 1. Map and photo of the study area



Fig. 2. Historical changes of Chopyeong Island

초평도 구간의 변화 이력은 Fig. 2와 같은데, 1930년대 지도에서 식생 상황을 확인할 수 없으나 초본류 이상의 식생이 분포했을 것으로 추정되며 임진강 본류 수로와 초평도 형상은 현재와 매우 유사함을 확인할 수 있다. 구글어스 영상에서 2004년, 2013년, 2023년 영상을 비교하면, 2004년에 비해 현재 목본류가 분포가 다소 확장된 것을 확인할 수 있는데, 2013년과 비교하면 현재 목본류 분포가 유사하게 나타난다.

3. 적용 및 결과 분석

3.1 모형 적용

2차원 모형 구성을 위한 지형자료는 2011년 임진강 하천기

본계획 자료(MLTM, 2011) 상의 측량 결과(No.45~No.65)를 이용하여 구축하였으며 구축된 지형자료는 Fig. 3과 같다. 2차원 모의를 위한 계산영역과 초평도의 조도계수 구역은 Fig. 4와 같이 구성하였다. 계산영역의 격자 간격은 10 m 간격으로 설정하여 HEC-RAS 내 모듈인 RAS Mapper를 이용하여 자동생성하였으며 생성된 셀 개수는 총 45,279개이다.

하도의 조도계수는 하상재료에 의한 흐름저항이 주로 발생한다고 가정하여 0.025로 설정하였으며 초평도는 구글영상을 참고하여 목본류가 밀집하여 분포하는 구역 Zone1과 초본류가 분포하는 구역 Zone2로 구분하였다. 초평도 식생에 의한 흐름영향을 분석하기 위해 Zone1과 Zone2의 조도를 Table 1과 같이 4가지 조건으로 설정하여 모의를 수행하였다. Case1은 초평도에 식생이 없는 상태로 조도계수는 모두 0.025

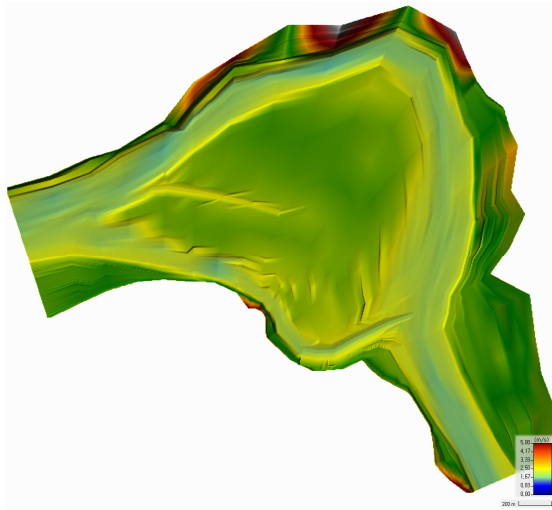


Fig. 3. 2D geometry data of the study area

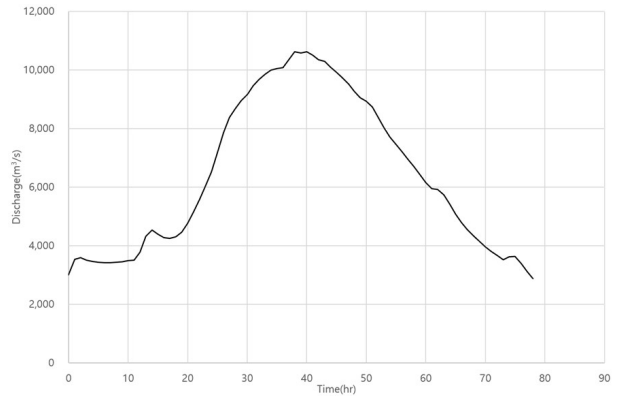


Fig. 5. Upstream discharge condition



Fig. 4. Computational domain and roughness zones

Table 1. Roughness conditions of Chopyoeng island

Zone	Case1	Case2	Case3	Case4
Zone1	0.025	0.04	0.08	0.08
Zone2	0.025	0.04	0.04	0.04

로 하도와 같은 상태로 가정하였으며, Case2는 초평도 전체가 목본이 없는 초본만으로 구성된 가상 상태로 조도계수는 모두 0.04로 가정하였다. Case3는 현재 초평도의 상태를 모의하는 것으로 구글영상과 같이 Zone1에는 목본으로 구성하고 Zone2는 초본으로 구성하여 조도계수를 각각 0.08과 0.04로 설정하였다. Case4는 초평도 전체가 목본으로 밀생하는 상황을 가정한 것으로 조도계수는 모두 0.08로 가정하였다.

모의 수문조건은 임진강 홍수로 초평도 침수가 발생한 2020년 8월4일 19시~8월8일 0시까지의 파주시 통일대교 유량을 적용하였는데, 통일대교는 계산영역 하류경계에서 약 1.8 km 하류에 위치한다. 계산영역과 통일대교 사이에는 큰 지류가 없으므로 상류경계의 유입유량은 통일대교 수위표의 유량자료를 그대로 적용하였다(Fig. 5). 하류경계는 통일대교 수위표 지점의 수위-유량 관계 곡선으로부터 HEC-RAS 1차원 부정류 모의 결과를 이용하여 통일대교 지점과 하류경계 단면의 유량별 수위차를 보정하여 하류경계 단면의 수위-유량 관계를 생성하여 설정하였다. 계산시간 간격은 1분으로 설정하였으며 총 모의 시간은 78시간이다.

3.2 평면 유속 분포 분석

케이스별로 주요 시간별 평면 유속분포 결과는 Fig. 6과 같은데 전체적으로 초평도 침수양상은 유사한 형태를 나타내고 있으나 초평도 침수 유속분포와 초평도 우안측 수로의 유속분포는 케이스별로 상이한 결과를 나타내고 있다. 초평도 침수 초기에는 초평도 좌안측 수로 상류에서 초평도 측으로 침수 유속이 다소 크게 발생하나 나머지 케이스는 전체적으로 유사한 유속분포를 나타내고 있다. 본격적인 침수가 발생하는 모의 14시간 후에는 Case1에서 초평도 좌안측 수로 상류에서 침수 유속이 크게 나타나며, Case2와 Case3에서는 상대적으로 약한 침수 유속을 보이며, Case4에서는 초평도 침수 유속이 매우 약하게 나타나고 있다. 이 시점에서 침수면적은 Case4가 미세하게 넓게 나타난다. 초평도 우안측 수로 중간부에서 Case1은 상대적으로 유속이 작게 나타나며 Case2와 Case3는 거의 동일하며, Case4는 다소 유속이 높게 나타난다.

초평도 침수가 상당히 진행된 모의 28시간 후에는 케이스별로 상이한 유속분포를 나타낸다. Case1에서는 주흐름이 초평도 좌안쪽에 발생하여 초평도 좌안측 수로 및 초평도 좌안

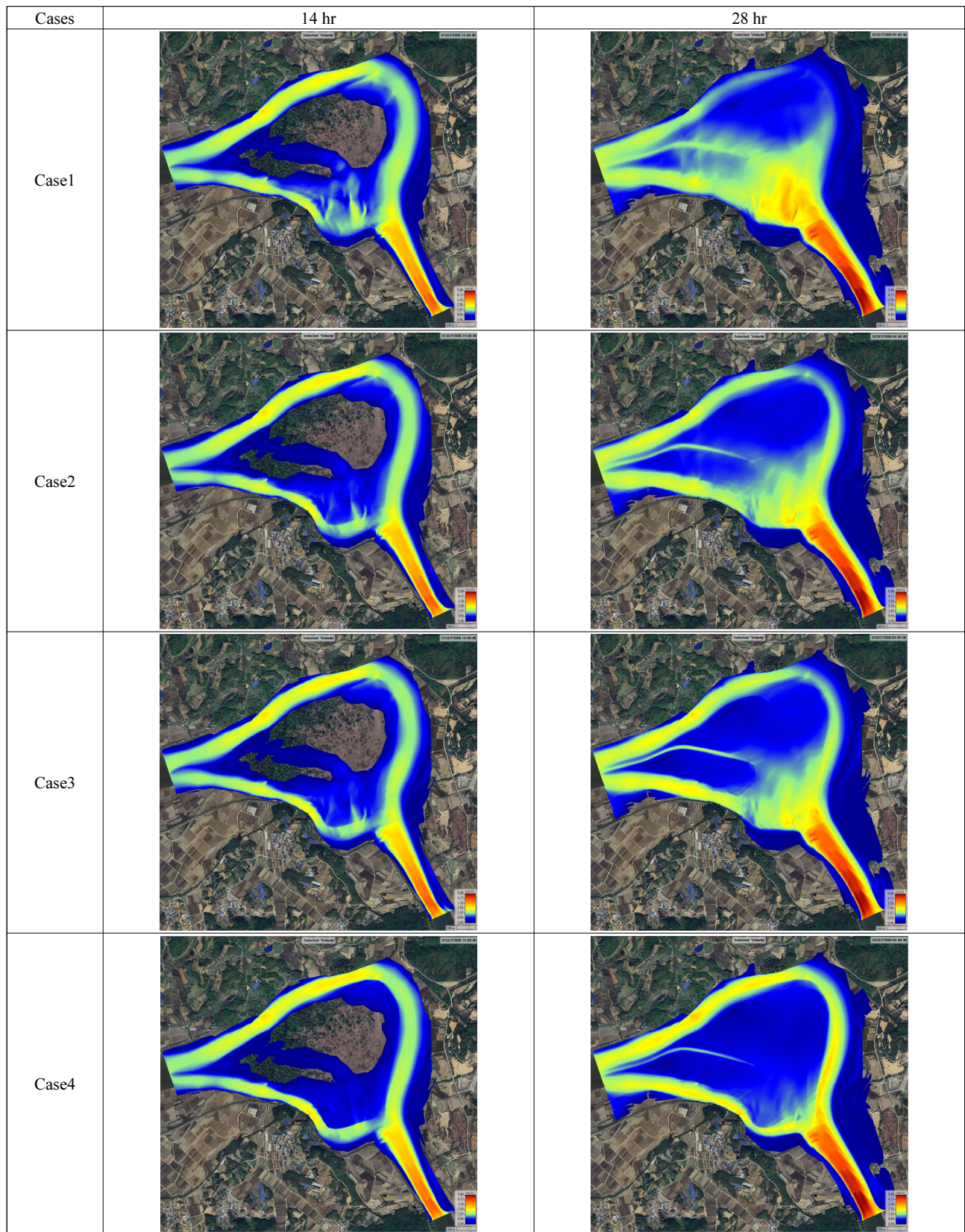


Fig. 6. 2D velocity distribution with time

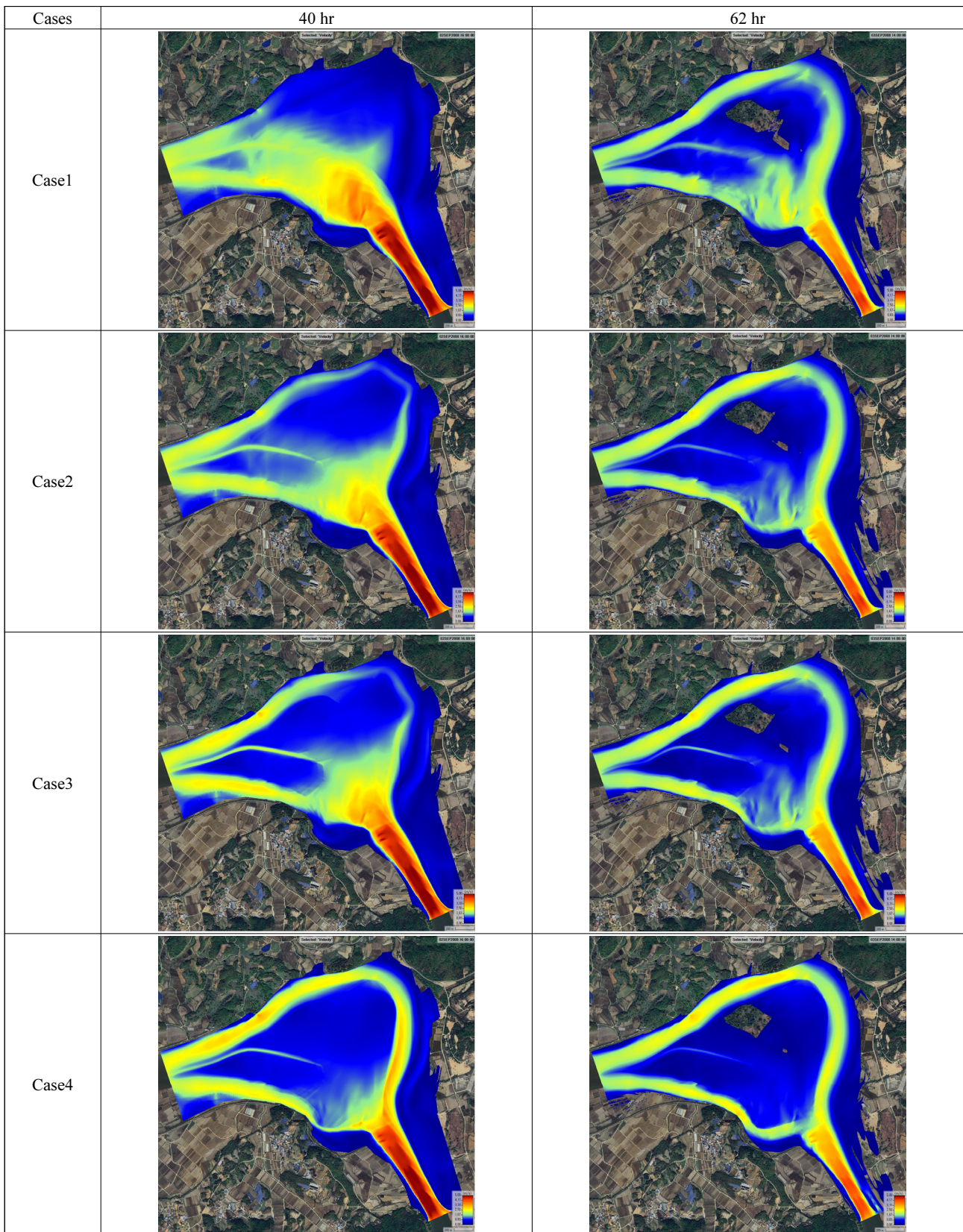


Fig. 6. 2D velocity distribution with time (Continued)

에 흐름이 집중되는 유속분포를 보이며 초평도 우안 및 우안 측수로에서는 유속이 약하게 분포하고 있다. 반면에 Case2와 Case3에서는 초평도 우안측의 유속이 일정 정도 유지되고 있으며 초평도 좌안측에서 유속 분포가 크게 나타나고 있다. 이 시점에서 Case2와 Case3의 차이는 초평도 하류 쪽 수로에서 나타나는데 좌우안 수로 모두 Case3의 유속이 크게 나타나고 있다. Case4의 경우에는 초평도 우안의 유속이 크게 나타나고 있어 초평도 우안과 좌안 수로의 유속이 거의 비슷하게 나타나고 있다.

위와 같은 유속분포의 차이는 임진강 유량이 증가하면서 그 경향이 더 강하게 나타난다. 최대유량이 발생하는 모의 40시간 후의 경우, Case1에서는 임진강 만곡부 내측인 초평도 좌측 및 좌안 수로에서만 주흐름이 형성되고 초평도 우안 측은 사수역을 형성하고 있다. 반면에 Case2에서는 초평도 상류 일부에서는 유속이 높은 곳이 나타나 초평도 중하류에서는 침수에 의한 흐름이 약하게 발생하며, 초평도 우안 수로에서 흐름이 나타난다. Case3에서는 Case2에 비해 초평도의 침수 흐름이 약해지며 초평도 우안 수로 보다 높은 유속이 나타난다. Case4에서는 초평도 상류의 침수 유속이 거의 없으며 초평도 우안 수로의 흐름이 초평도 좌안보다 강하게 나타난다.

모의 62시간 후에는 침수 초기와 유사한 유속분포를 나타내며 케이스별로 초평도의 조도계수가 증가함에 따라 초평도 우안 수로의 유속이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 침수면적은 다소 차이가 나는데 Case1이 가장 작으며 Case4가 가장 크게 나타난다.

3.3 참조점 수위 및 유속 변화

식생 조도에 의한 임진강 하도와 초평도 침수지역의 수위와 유속의 변화를 상세하게 분석하기 위하여 참조점과 참조선(Fig. 7)을 설정하였으며 모의시간 동안의 수위와 유속의 시간적 변화를 도시하면 Figs. 8 and 9와 같다.

초평도 하류 우안측 수로에 위치한 Ch1 지점의 경우에는, 조도계수 설정 케이스에 따른 수위 변화는 거의 없으나, 초평도 조도계수가 증가함에 따라 초평도 침수 시에 수위가 증가하는 것으로 나타났다. 초평도 좌안측 수로 중앙에 위치한 Ch3 지점의 경우에는, 케이스별로 초평도의 조도계수가 증가함에 따라 수위와 유속이 상승하는 경향을 뚜렷이 나타내고 있다. 특히, 최고 유량이 발생하는 40시간 부근에서 Case1의 유속은 0.2 m/s로 거의 정체된 양상을 보이거나 Case2와 Case3은 1 m/s 이상의 유속을 나타내며, Case4의 경우에는 1.4 m/s 이상의 유속을 나타낸다. 초평도 좌안측 수로 중앙인 Ch6의 경우에는 다소 특이한 거동을 보이는데, 조도계수가 증가함에 따라

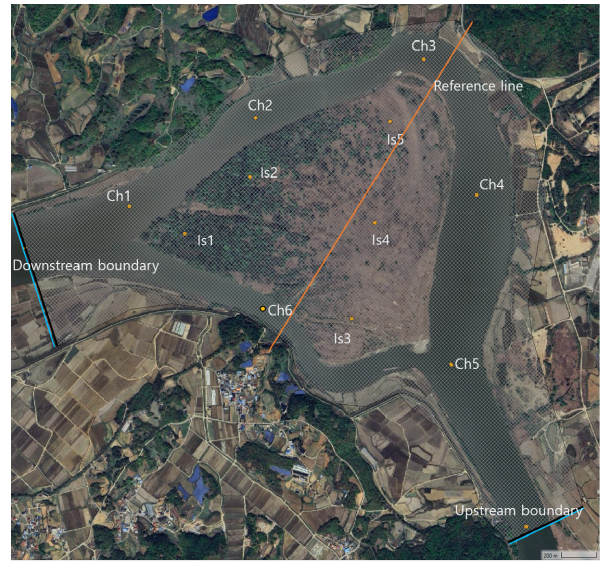


Fig. 7. Reference points and line in the study area

수위와 유속이 증가하나, Case3에서 최고수위와 최고유속을 나타내며 Case4에서는 오히려 수위와 유속이 Case3에 비해서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 초평도 식생 조도에 따라 좌안측 수로 및 우안측 수로로 분류되는 흐름이 변하게 되며, 또한 초평도 상류 지역의 침수흐름이 Ch6 지점으로 유입되는 양상이 조도계수 설정에 따라 변화는 복잡한 과정의 결과로 판단된다.

초평도 직상류 임진강 본류 지점인 Ch5 지점의 경우에는, 초평도 조도계수 증가에 따라 수위와 유속이 다소 증가하는 양상을 나타낸다. 특히, 최대 유량 상승기인 30시간~40시간 사이에는 Case4의 유속이 급격히 증가하는데 이는 Case4의 경우 초평도 전체의 조도계수가 높아 초평도 상류 구역의 침수흐름 유속이 낮아지고 좌우안 수로로 분류하는 흐름이 집중되어 나타나는 현상이다.

초평도 하류 우안의 수목지역인 Is2 지점의 경우에는, 수위는 케이스별로 거의 유사하게 나타나나 유속은 조도계수의 증가에 따라 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내고 있다. 특히, Is2 지점은 Case3과 Case4에서 동일한 조도계수를 설정하였으나, 초평도 상류 지역의 조도계수 차이의 영향으로 유속이 작아지는 경향을 뚜렷하게 나타내고 있다.

초평도 상류 중앙의 초본지역인 Is4 지점의 경우에는 조도계수 증가에 따라 수위가 상승하는 경향을 나타내는데, Case3과 Case4에서는 거의 동일한 수위를 나타내고 있다. 즉, Is4 지점이 속한 Zone2의 조도계수에 따른 수위 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 유속도 조도계수 증가에 따라 유속이 감소하는 경향을 나타내나 Case3과 Case4의 유속 차이는 미미하게

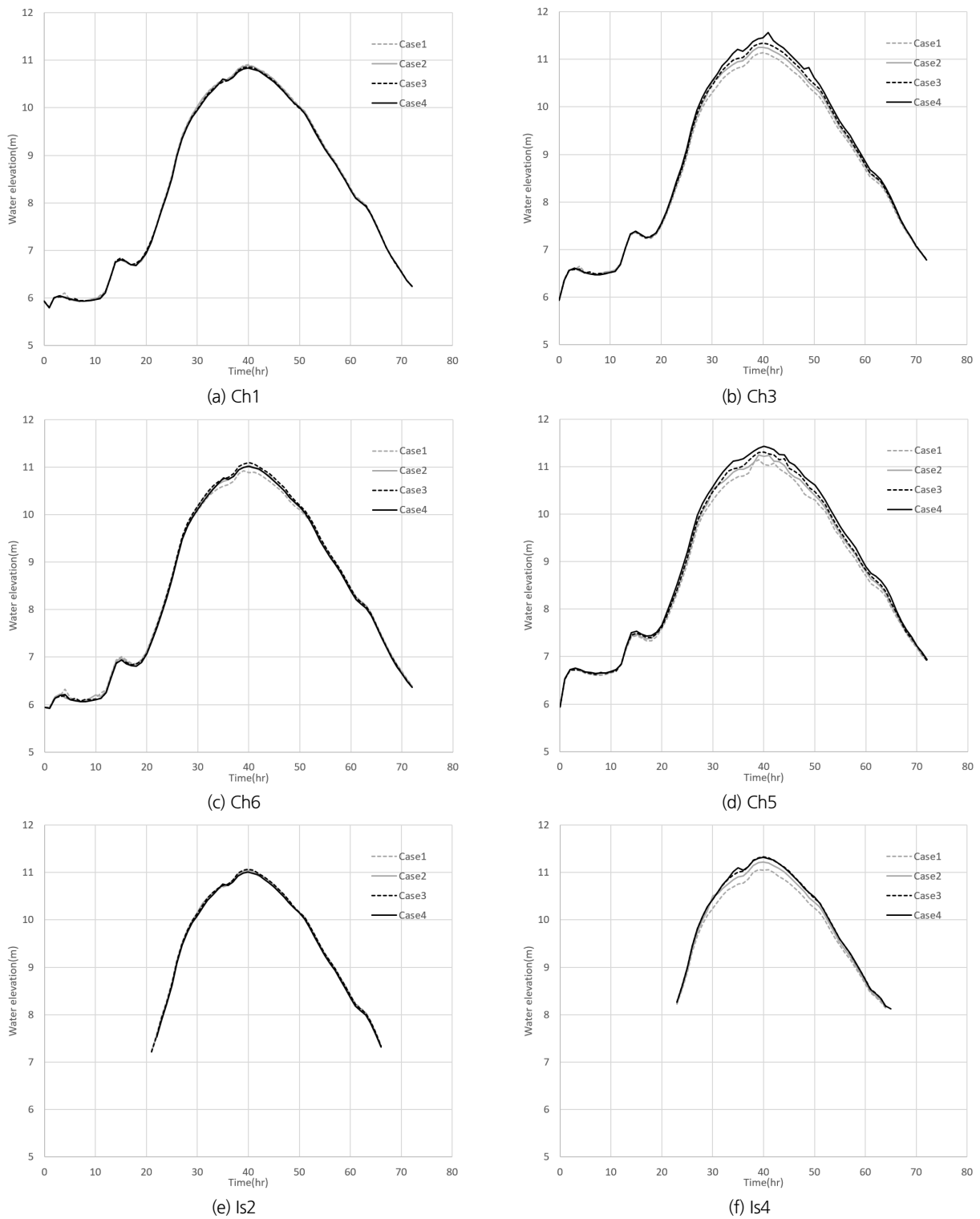


Fig. 8. Water stage hydrographs at reference points

나타난다. 즉, 이 지점 자체에서의 수위와 유속은 식생이 초본 이나 목본이냐에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

초평도 중앙을 가로지르는 참조선에 따른 횡단면 수위 분 포를 모의 40시간에 대해 도시하면 Fig. 10과 같은데, 만곡부

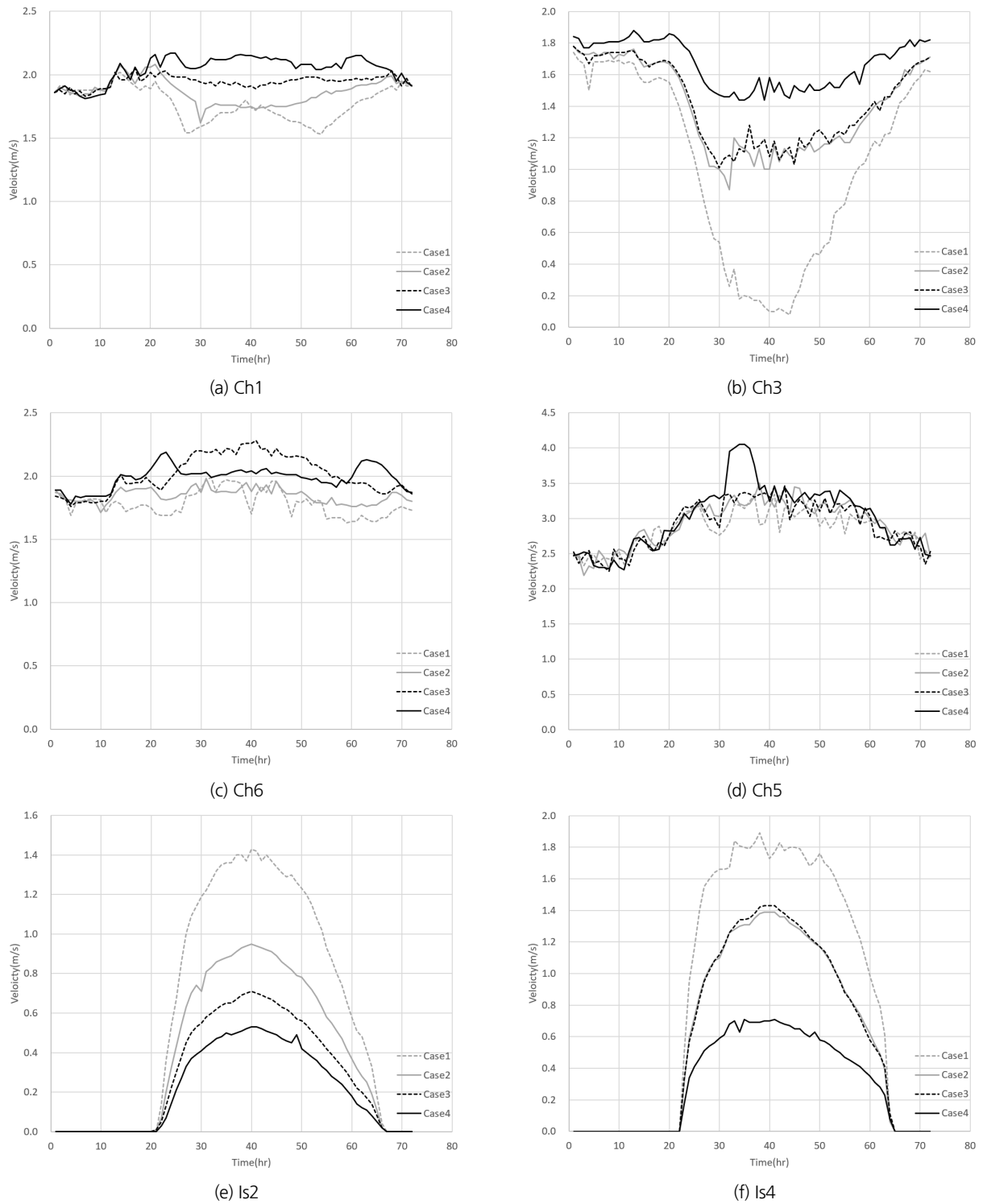


Fig. 9. Temporal variations of velocities at reference points

내측의 수위 하강과 만곡부 외측의 수위 상승이 뚜렷하게 표현되고 있다. 만곡부 내측과 외측의 편수위는 Case1, Case2, Case3에서는 유사한 수준으로 나타나나, 초평도 조도계수가

가장 높은 Case4의 경우에는 편수위가 보다 극심하게 나타나고 있는데 이는 초평도 우안 수로로의 흐름 집중에 의한 것으로 판단된다.

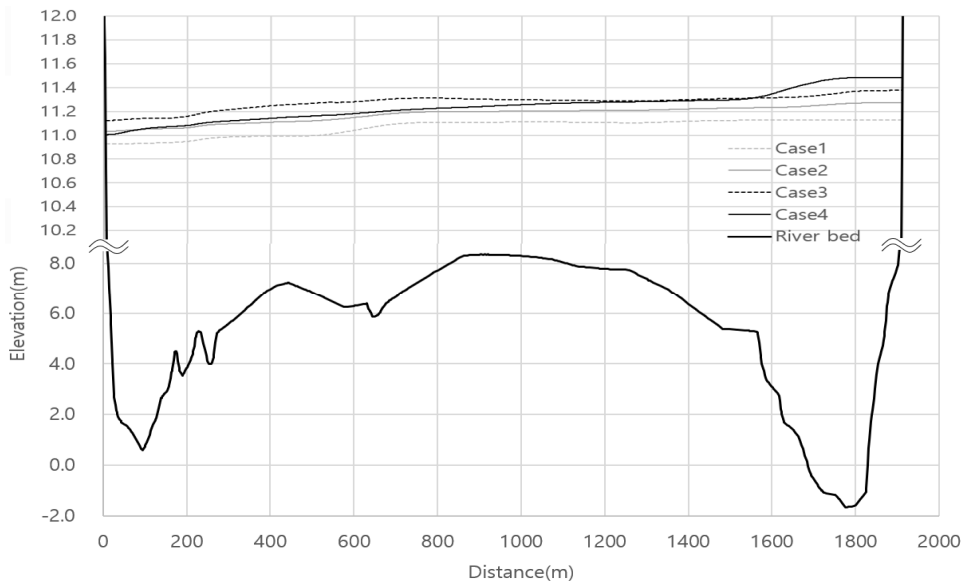


Fig. 10. Cross sectional distributions of water elevation

5. 결론

본 논문에서는 식생이 흐름에 미치는 영향을 분석하기 위하여 임진강 초평도 구간을 대상으로 식생 조도 설정에 따른 흐름 양상을 2차원 부정류 모형을 통해 분석하였다. HEC-RAS 2D 모형에 의한 2차원 흐름 해석 결과에 따르면 초평도에 식생이 없는 경우에는 홍수시 흐름이 초평도 좌안, 즉, 만곡부 내측에 집중하고 만곡부 외측은 큰 사수역의 형성이 예상된다. 초평도 전체가 초본류만 있는 경우에는 만곡부 외측의 흐름이 형성되며, 현재와 같이 목본과 초본류가 있는 경우에는 만곡부 외측의 흐름이 보다 강하게 발생함을 확인하였다. 초평도 전체에 목본류가 형성되면 이 양상은 더욱 심화되어 홍수시 만곡부 외측의 흐름이 매우 강하게 발생함을 확인하였다. 이상과 같이 임진강 초평도 구간은 지형적 특성으로 인해 초평도의 식생 상황에 따라 홍수시의 평면 유속 분포가 크게 영향을 받음을 확인할 수 있다. 하천의 식생 상황은 단순히 수위를 상승시키는 영향만 발생시키는 것이 아니라 유속 분포 변화를 유발한다. 이에 따라 흐름의 집중으로 인한 하도 세굴 양상의 변화뿐만 아니라, 자연적인 수로의 형성에도 영향을 미칠 가능성이 있다.

임진강 초평도 구간은 지형적으로 특수성이 있는 구간으로 만곡부에 넓게 형성된 하중도의 식생이 홍수시 임진강 본류의 흐름에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 국내 대부분의 정비된 직선 하도 구간에서 고수부지 식생이 수위 상승 외의 주흐름에 영향을 미치는 사례가 많지는 않을 것으로 예상되나, 넓은 홍수터에 식생이 밀생하는 경우에는 홍수시 주흐름의 유황과

유속에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다. 그러므로 지형적 특수성으로 인해 식생의 영향이 우려될 때는 2차원 해석에 의한 홍수시 흐름 해석이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 최근에는 기후변화와 개발로 인해 하천 유량의 특성이 변화되고 있으며 이에 따라 하천 식생의 변화도 이슈로 제기되고 있다. 특히, 수목 번무에 의한 육역화가 진행되는 경우에는 수목에 의한 흐름 저항 증가로 홍수시 주흐름이 기존과 다른 지점에서 형성될 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.

하천식생의 영향을 고려하는 연구에는 여전히 한계가 존재한다. 본 연구에서 적용한 2차원 수치모형은 식생의 영향을 바닥 마찰계수로만 고려할 수 있고, 식생에 의한 난류 특성과 운동량 확산 효과를 와점성계수를 통해 고려하는 것은 여전히 한계가 있다. 따라서 본 연구의 결과는 식생에 의한 국부적인 유속 지체 효과만을 제시하고 있으며, 식생의 난류 특성과 이로 인한 유속분포의 변화에 의한 운동량 확산 효과를 충분히 고려하기 힘든 한계가 있다. 식생의 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는 실험과 관측을 통해 식생 흐름의 유속 분포와 수위에 대한 정밀한 자료 구축이 선행되어야 하며 이를 이용한 수치모형의 검보정이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 환경부 재원으로 환경시설 재난재해 대응기술개발사업(2022002850001)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS river analysis system, 2D hydraulic reference manual, Version 5.0*. US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, U.S.
- Ghimire, E., Sharma, S., and Lamichhane, N. (2020). "Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models to predict flood travel time and inundation area for flood warning system." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 110-126. doi: 10.1080/09715010.2020.1824621.
- James, C.S., Reid, M.A., and Capon, S. (2016). "Climate change and the future of Australian riverine vegetation." *The vegetation of australian riverine landscapes*, Edited by Capon, S., James, C.S., and Reid, M.A., CSIRO Publishing, Victoria, Australia, pp. 387-406.
- Ji, U., Jang, E.-k., Ahn, M., and Bae, I. (2021). "Evaluation of flow resistance coefficient based on physical properties of vegetation in floodplains and numerical simulation of the changes in flow characteristics." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 8, No. 4, pp. 212-222.
- Marko, K., Elfeki, A., Alamri, N., and Chaabani, A. (2019). "Two dimensional flood inundation modelling in urban areas using WMS, HEC-RAS and GIS (Case study in Jeddah City, Saudi Arabia)." *Advances in remote sensing and geo informatics applications*, Edited by El-Askary, H., Lee, S., Heggy, E., and Pradhan, B., Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-01440-7_62.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Imjin River basic plan*.
- Quiroga, V.M., Kurea, S., Udoa, K., and Manoa, A. (2016). "Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5." *Ribagua*, Vol. 3, No. 1, pp. 25-33. doi: 10.1016/j.riba.2015.12.001.
- Rangari, V.A., Umamahesh, N., and Bhatt, C. (2019). "Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D." *Modeling Earth Systems and Environment*, Vol. 5, No. 4, pp. 1839-1851. doi: 10.1007/s40808-019-00641-8.
- Shrestha, A., Bhattacharjee, L., Baral, S., Thakur, B., Joshi, N., Kalra, A., and Gupta, R. (2020). "Understanding suitability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D floodplain modeling." *World Environmental and Water Resources Congress 2020*, ASCE, Henderson, NV, U.S. (Conference Cancelled), pp. 237-253.
- Sukhodolov, A.N. (2015). "Field-based research in fluvial hydraulics: Potential, paradigms and challenges." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-19. doi: 10.1080/00221686.2015.1012126.
- Syafri, R.R., Hadi, M.P., and Suprayogi, S. (2020). "Hydrodynamic modelling of Juwana River flooding using HEC-RAS 2D." *2020 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, East Java, Indonesia. doi: 10.1088/1755-1315/412/1/012028.
- Szydłowski, M. (2019). "Hydraulic analysis of causes of washout of Gdynia-Orłowo sea-shore during the flood in the Kacza River estuary." *Polish Maritime Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 174-182. doi: 10.2478/pomr-2019-0019.