

자연성기반 홍수완충공간 조성에 따른 홍수위 변화 분석

류지원^{ID*} · 지운^{ID**} · 김상혁^{***} · 장은경^{ID****}

Ryu, Jiwon^{ID*}, Ji, Un^{ID**}, Kim, Sanghyeok^{***}, Jang, Eun-kyung^{ID****}

Analysis of Flood Level Changes by Creating Nature-based Flood Buffering Section

ABSTRACT

In recent times, the sharp increase in extreme flood damages due to climate change has posed a challenge to effectively address flood-related issues solely relying on conventional flood management infrastructure. In response to this problem, this study aims to consider the effectiveness of nature-based flood management approaches, specifically levee retreat and relocation. To achieve this, we utilized a 1D numerical model, HEC-RAS, to analyze the flood reduction effects concerning floodwater levels, flow velocities, and time-dependent responses to a 100-year frequency flood event. The analysis results revealed that the effect of creating a flood buffer zone of the nature-based solution extends from upstream to downstream, reducing flood water levels by up to 30 cm. The selection of the flow roughness coefficient in consideration of the nature-based flood buffer space creation characteristics should be based on precise criteria and scientific evidence because it is sensitive to the flood control effect analysis results. Notably, floodwater levels increased in some expanded floodplain sections, and the reduction in flow velocities varied depending on the ratio of the expanded cross-sectional area. In conclusion, levee retreat and floodplain expansion are viable nature-based alternatives for effective flood management. However, a comprehensive design approach is essential considering flood control effects, flow velocity reduction, and the timing of peak water levels. This study offers insights into addressing the challenges of climate-induced extreme flooding and advancing flood management strategies.

Keywords : Flood buffer zone, Flood level variation, Flood management facility, Levee setback, Nature-based solution

초 록

최근 기후변화로 인한 극한홍수 피해가 급증하고 있어 기존의 홍수관리시설만으로는 홍수피해에 제대로 대응하기 어려운 상황에 직면하고 있다. 이에 본 연구는 이러한 문제에 대처하기 위해 홍수 관리의 자연성 기반 접근 방법 중 하나인 제방 후퇴 및 이설의 효과를 분석하였다. 이를 위해 1차원 수치모델 HEC-RAS를 사용하여 100년 빈도 홍수에 대한 홍수위 및 유속 변화 그리고 최대 홍수위 발생 시점에 대해 분석하였다. 식생 조성 등의 자연성기반 홍수완충공간의 조성 환경 특성을 고려한 조도계수의 선택은 홍수위 변화 분석 결과에 민감하기 때문에 엄격한 기준과 과학적 근거를 기반으로 하였다. 분석결과, 자연기반해법의 홍수완충공간 조성에 따른 홍수위 저감 효과는 상류 구간에서 더 크게 나타났으며, 최대 30 cm의 홍수위가 저감되었다. 일부 홍수터 확장구간에서는 국부적으로 홍수위가 상승하는 현상이 나타나며, 유속 변화는 확장된 통수단면 적의 비율에 따라 다양하게 나타났다. 이를 통해 제방 후퇴와 홍수터 확장은 홍수 관리의 효과적인 대안으로 고려될 수 있을 것으로 기대되며, 홍수위 변화, 유속 변화 및 최고 수위 발생 시점에 대한 종합적인 설계가 필요할 것으로 판단된다.

검색어 : 홍수완충공간, 홍수위변화, 홍수관리시설, 제방후퇴, 자연기반해법

* 과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 석박사통합과정 (University of Science and Technology · jiwonryu@kict.re.kr)

** 중신회원 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원 · 과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 교수 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · University of Science and Technology · jiun@kict.re.kr)

*** (주)이산 수자원부 과장 (Isan Corporation · sh-kim42@daum.net)

**** 중신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 전임연구원 (Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jang@kict.re.kr)

Received September 12, 2023/ revised September 21, 2023/ accepted October 4, 2023

1. 서론

기후변화로 인한 기상 및 강우 특성 변화는 단기간에 유역 유출량을 급격히 증가시켜 하도의 홍수소통능력을 초과하는 유출량으로 인한 홍수범람 피해를 발생시킨다(IPCC, 2014). 전세계적으로 나타나는 이러한 돌발홍수 또는 극한홍수 피해 사례를 살펴보면 기존의 제방위주의 홍수방어에만 의존하여 기후위기 시대를 대응하기에는 한계가 있음을 알 수 있다(Hipple et al., 2005; Pinter, 2006; Dierauer et al., 2012; Collenteur et al., 2015; Knox et al., 2022). 2020년 8월 국내에서 발생한 섬진강 제방 붕괴로 인한 전북 남원 지역의 재산 및 인명 피해(Woo, 2020) 및 2021년 7월 인도 서부 마히라슈트라주에서 발생한 제방 붕괴로 인해 150명 이상이 사망한 홍수 피해 사례(Jadhav and Kumar, 2021)가 이를 뒷받침한다. 유럽 또한 2019년 이탈리아에서 발생한 최악의 홍수피해, 2021년 독일을 포함한 서유럽에서 기록적인 폭우가 발생하는 등 지역과 관계없이 단기간에 발생하는 홍수 범람 피해가 급증하고 있다.

제방을 비롯한 홍수관리시설물의 치수 한계를 보완하고자 네덜란드의 경우 2007년부터 시작된 Room for the River 사업을 통해 하천과 수변의 공간을 홍수완충공간으로 활용하고자 하는 적극적인 노력이 있었다(Room for the River, 2013). Room for the River 사업은 기존의 방어시설 강화보다는 강이 범람할 때 물을 넘칠 수 있는 공간을 마련하여 홍수 피해를 최소화하는 방식으로 진행되었다(Room for the River, 2013). 이러한 제방 후퇴 및 이설을 통한 하천의 홍수소통 공간을 확장하는 방법은 단순한 홍수위 저감 효과만을 위한 것은 아니다. 아울러 직접적인 홍수저감 효과를 위한 구조적인 수단으로 제방 후퇴 및 이설을 통한 홍수저감 효과를 기대하는 것은 비효율적일 수 있다. 하천 수변구역의 제내지 일부 공간을 홍수완충공간으로 활용하고자 하는 목적에는 발생 빈도가 매우 낮은 극한 홍수가 발생했을 경우의 최대 홍수위를 일시적으로 지연 또는 저감시켜 홍수의 피해를 최소화 하는 목적과 외에 근본적인 수환경 개선 목적의 다양한 기능을 누리하고자 하는 목표가 포함되어 있다(KICT, 2021).

기존의 offline 저류지의 한 형태인 강변저류지의 경우 저류공간이 하도 구간 내에 편입되지 않고 횡월류 형태로 홍수량의 일부를 부담하는 형태이나, 제방이설을 통한 홍수완충공간은 홍수터 자체를 제내지까지 확장하여 하도 구간으로 완전히 편입하는 형식이므로 홍수위 변화를 분석하는 수치모델링 방법에도 큰 차이가 있다. 이러한 제방 후퇴 및 이설을 통해 하천 수변공간의 일부를 홍수완충공간으로 활용하기 위해서는 대상 구간을 포함한 상하류로 긴 구간에 대한 홍수위 변화 분석이 반드시 수행되어야 할 것이다. 홍수완충공간을 위해 일부 구간을 계획하고 설계하더라도

홍수위에 미치는 영향은 상하류 상당 구간에 이를 수 있기 때문이다(MOLIT, 2005). 홍수완충공간 조성은 단순히 해당 구간의 홍수위 저감에 영향이 있을 뿐만 아니라 배수효과로 인해 상하류 홍수위 상승 혹은 하강에 영향을 미친다. 상대적으로 긴 구간에서의 홍수위 변화 분석을 위해 Jun et al.(2010), Kim et al.(2012), Kim et al.(2016) 및 Seong et al.(2018) 다수의 연구에서 1차원 수치모델을 활용하였으며, 1차원 수치모델의 경우 흐름저항계수, 즉 조도계수의 영향이 주요 매개변수 중 하나이다. 하도 내 1차원 흐름 분석의 경우 주하도와 좌우안의 홍수터로 구분할 수 있으며, 하도 및 홍수터의 하상 재료가 따라 흐름 저항의 양상은 확연한 차이가 있어 홍수위에 영향을 미친다(Shin et al., 2017). Shin et al.(2017)의 연구에서는 조도계수와 유량의 불확실성이 홍수위 해석에 미치는 영향을 분석하였으며, 강우사상이 클수록 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 자연성기반의 홍수완충공간에 조식생 및 식생패치가 자연적 또는 인위적으로 고려되는 경우 식생의 물리적 특성을 고려하여 식생흐름저항 계수를 추정(Ji et al., 2022; 2023)할 필요가 있으며, 이를 수치모의시 반드시 고려해야 할 것이다. 후퇴 혹은 이설되는 제방으로 인해 조성되는 수변구역은 저유량시 습지형태로 조성되어 흐름 소통이 원활하지 않거나 와류가 형성될 수 있기에 시수역 형성 가능성도 고려되어야 할 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 자연성기반기술의 제방 후퇴 및 이설에 의해 조성되는 홍수완충공간의 조성 특성을 고려하여 상하류 구간에 걸친 1차원 수치 모델링을 기반으로 홍수위변화를 분석하는 것이다. 이를 위해 기존 제내지 구간으로 홍수터가 확장되는 홍수완충공간의 식생분포의 물리적 특성을 흐름저항계수 산정에 고려하여 수치 모델링을 통해 최대 홍수위 저감 효과를 정량적으로 분석하고자 한다. 또한 시수역 형성 가능성을 고려하여 대상 구간의 시수역 형성시 홍수위 변화를 분석함으로써 홍수완충공간 조성의 영향을 다각적으로 분석하고자 한다.

2. 자연성기반기술의 홍수완충공간 및 대상구간의 개요

2.1 자연성기반기술의 홍수완충공간과 홍수관리시설의 유형

하천시설은 하천의 기능을 보전하고 효율을 증진하며 홍수피해를 줄이기 위하여 설치하는 시설을 의미한다. 하천시설에는 제방·호안(護岸)·수제(水制) 등 물길의 안정을 위한 시설, 댐·하구둑·홍수조절지·저류지·지하하천·방수로·배수펌프장·수문(水門) 등 하천수위의 조절을 위한 시설, 운하·안벽(岸壁)·물양장(物揚場)·선착장·갑문 등 선박의 운항과 관련된 시설 및 그밖에 대통령령으로 정하는 시설 등이 있다. 제방은 물이 넘쳐흐르는 것을 막거나 물을 저장하기 위해 쌓은 구조물로 강이 흐르고 주변에

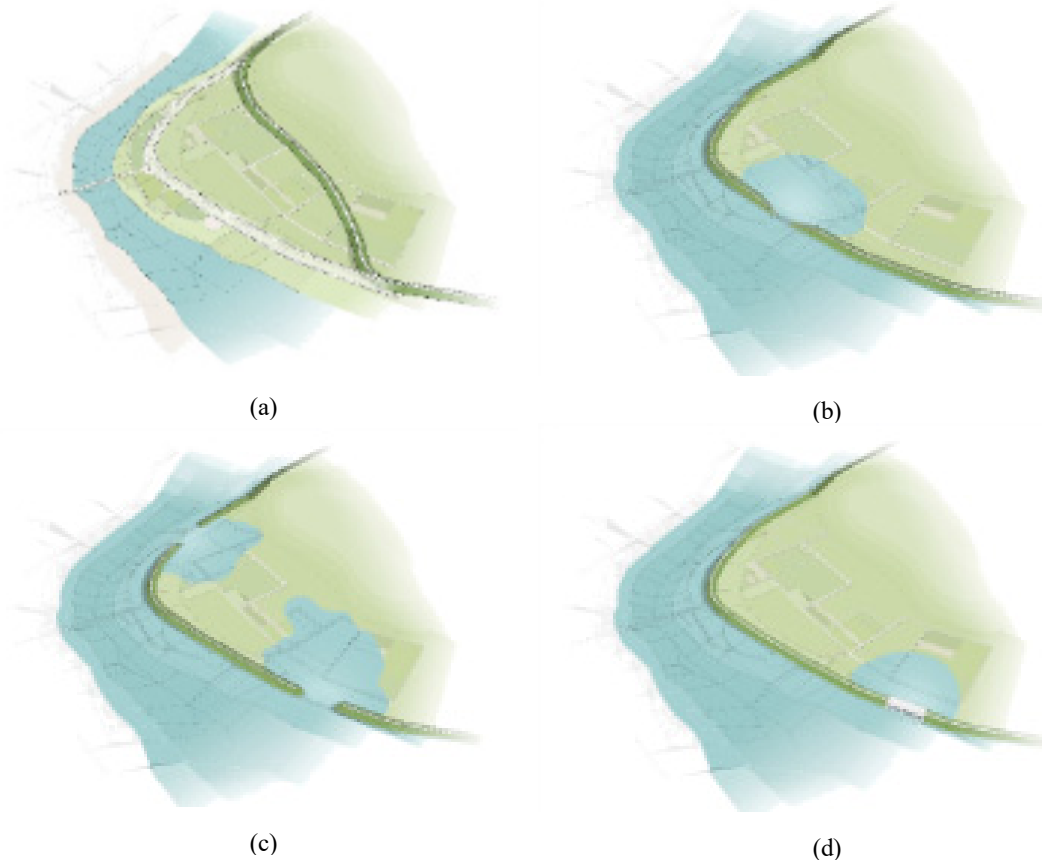


Fig. 1. Types of Natural-based Flood Management Facilities: (a) Levee Setback, (b) Open Levee, Overflow Levee, (c) Bypass, Side Channel, (d) Gate Operation (MOE, 2022)

토사가 퇴적되면 자연스럽게 높아진 고도로 인해 자연 제방이 생성되거나 치수나 이수목적에 의해 인위적으로 쌓아 활용한다. 수문의 경우 홍수 방어, 용수, 배수, 수위 조절 등을 목적으로 수로나 방조제 등에 설치하여 수로를 개폐하는 구조물로 홍수시에는 즉각적인 홍수위 조절을 위해 설치되는 경우가 있다. 따라서 자연성기반 홍수관리시설의 경우 이러한 제방후퇴, 제방이설, 제방 완전개방/일부개방/일시개방, 저류지 포함 여부, 수문과 같은 기타 하천시설물의 활용 등으로 설계 유형이 구분될 수 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 홍수완충공간 조성에 따른 효과를 분석하기 위한 것이며 따라서 자연성기반 홍수관리시설의 유형 중 제방을 후퇴하고 이설하여 홍수완충공간을 확보하는 방안(Fig. 1(a))을 고려하였다.

2.2 홍수완충공간 조성 대상지 및 대상구간의 개요

본 연구에서는 국가하천인 금강의 충북 영동군 심천면 장동리에 위치한 장동지구를 대상구간으로 활용하였다. 해당 구간은 대청댐 수환경 개선을 위한 홍수터 연구(KICT, 2021)를 통해 자연성기

술의 홍수완충공간 조성 대상지로 선정된 바 있으며, 현재는 홍수터 확장을 위한 제방의 후퇴/이설이 계획되어 사업이 진행되고 있다. 또한 Ji et al.(2022)은 대상구간에 대해 홍수관리시설의 유형 분석을 통해 대상 구간에 대한 유형별 특징을 검토한 바 있다. 해당 구간의 홍수터 확장 면적은 약 243,000 m²이며, 금강의 대청댐 상류와 용담댐 하류 사이에 위치한 조절하천 구간으로 홍수완충공간으로 조성하고자 하는 제내지는 주로 농경지 및 특용 작물지로 활용되어 오염원 저감을 위해 매수토지 비율이 높은 지역이다. 또한 장동지구는 금강 우안 제방도로의 표고 보다 약 7 m 낮은 저지대이고 금강 외수위 상승으로 인해 집중 호우시 내수침수 피해가 발생하는 지역이다. 대규모 국유지를 활용한 홍수터 확장을 시행할 경우 장동리 일원의 근본적인 치수개선 목표와 수환경 개선 효과를 모두 기대할 수 있는 구간이다. 또한 현재 지형 특성을 살펴보면 분류 하도 하상고와 약 5~6 m 표고차가 있으며, 제방 후퇴 및 이설시 저류 효과 및 수생태 수변구역 조성 효과가 클 것으로 예상된다.

3. 부정류 모의를 위한 HEC-RAS 모형 구축

HEC-RAS(Hydraulic Engineering Center's River Analysis System)는 미육군공병단이 개발한 1차원 수치모형으로 정상류(steady flow), 부정류(unsteady flow) 및 유사현상 등의 해석이 가능한 종합하천해석시스템이다(Brunner, 2016). 또한 보, 교량 등과 같은 다양한 수공구조물이 설치되어 있는 경우를 해석할 수 있어 현재 실무에서 널리 사용되고 있다. 장동지구 홍수터의 홍수조절효과를 정량적으로 산정하기 위해서는 홍수터 조성 전과 후의 지형이 반영된 하천본류에 대한 부정류 해석이 필요하며, 이에 적용 모델로 HEC-RAS를 선택하였다.

3.1 지형구축

하천 본류의 부정류 해석시 대한 적절한 검토구간의 결정이 필요하다. 치수효과의 검토를 위해서는 홍수터 포함한 충분한 상·하류구역을 포함하여야 한다. 또한 긴 하천구간을 해석 시 지류하천이 유입될 가능성이 높으며, 이 경우 지류하천의 수문 곡선이 추가적으로 필요하다. 이에 일반적으로 지류하천 직하류부터 다음 하류지

역의 지류하천 전까지를 모의구간으로 결정한다. 이 때 지류하천은 지방하천 이상의 주요하천을 말한다. 위와 같은 사항을 종합적으로 고려하여 Fig. 2(a)와 같이 금강 장동지구 No.13.4(이원대교)에서 No.21.4(초강 직하류)까지 총 8 km를 모의구간으로 결정하였으며, 해당 구간에 대한 HEC-RAS 상의 지형자료를 구축하였다(Fig. 2(b)). 장동지구의 현재 하천 제방을 복측으로 이동(setback)하는 경우의 지형은 No.16.2~17.6 구간에 대해 「금강 상류 하천기본 계획(수립중, 환경부)(MOE, 2020)」에서 구축한 “개수후 횡단면”을 적용하였다.

3.2 경계조건

모형 내 구축한 금강 상류단(No.21.4)은 초강 직하류 지점이며, 이에 「금강 상류 하천기본계획(수립 중, 환경부)(MOE, 2020)」에서 산정한 이원수위표 지점(K43)의 홍수 수문곡선을 적용하였다. 이는 용담댐이 고려된 계획홍수량에 대한 홍수 수문곡선이다. 장동지구의 설계빈도는 금강 본류의 계획빈도와 동일하게 100년으로 결정하였다. 적용 홍수 수문곡선은 Fig. 3(a)와 같으며, 첨두 홍수량은 7,930.6 m³/s이다. 장동지구 하류에는 한국수자원공

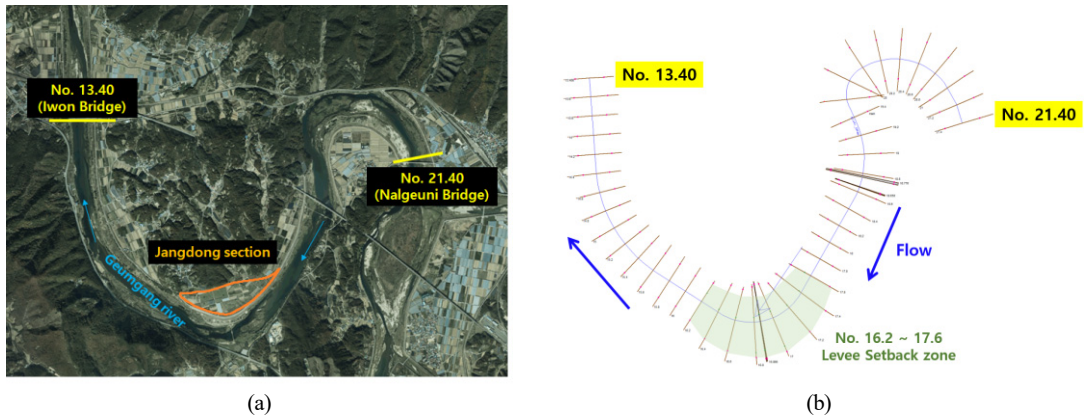


Fig. 2. Study Area: (a) Satellite Image and Location Map of Jangdong Section, (b) Terrain Cross Section of HEC-RAS

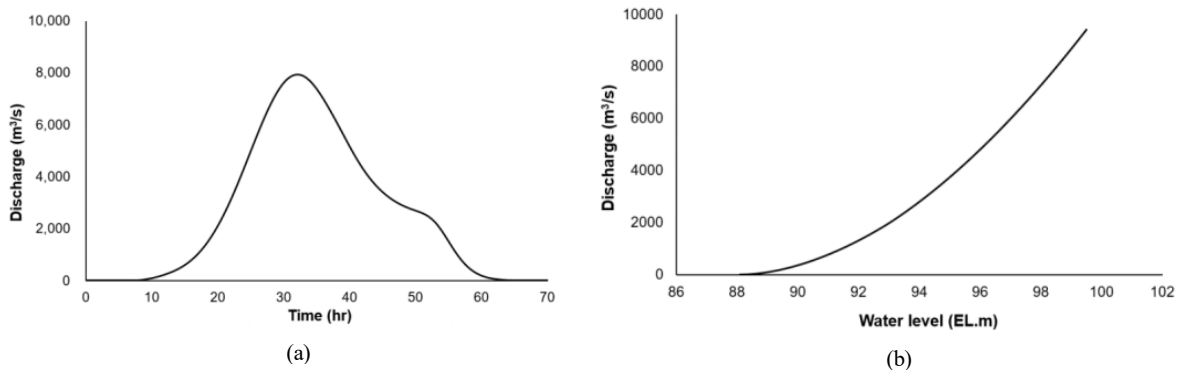


Fig. 3. Modeling Boundary Conditions: (a) Flood Hydrograph, (b) Water Level -Flow Discharge Rating Curve

사에서 이원대교 지점에서 다년간 홍수기 실측을 통해 작성한 수위유량곡선이 있으며, 장동지구로부터 약 3 km 하류지점에 위치하고 있다(Fig. 3(b)).

3.3 매개변수

1차원 수치모델을 활용한 부정류 해석 시 주요 매개변수는 하천의 조도계수(n)이다. 본 연구에서 금강 본류의 조도계수는 「금강상류 하천기본계획(수립중, 환경부)(MOE, 2020)」를 참고하여 채택하였으며, 금회 모의구간 전체에 대해 0.035로 확인되었다. 이 조도계수는 식생이 없는 하도 구간의 하상 조도계수로 적용하였으며, 제방 이설 후 식생이 조성되는 홍수완충공간 확장부지에 대한 식생하도 구간 조도계수는 Baptist et al.(2007)의 정수(emergent) 조건의 해석적 공식을 활용하여 추정하였다(Fig. 4). Baptist et al.(2007)의 공식을 적용하여 산정된 식생하도의 Chezy 흐름저항계수는 Manning 계수로 환산하였으며, 그 값은 0.19이다. Fig. 4의 계산방법과 절치는 식생하도의 흐름이 정수조건인 경우에만 적용 가능하다. 특히 본 연구에서는 Baptist et al.(2007)의

공식에서 식생에 의해 흐름이 차단되는 특성면적의 수심별 분포를 고려하기 위해 식생이 잠기는 높이를 반영한 유효 줄기가 있는 수변식생의 유효 지름(D_{eff})을 산정한 후 흐름저항계수를 산정하였다.

3.4 모의 조건

본 연구에서는 제방 이설에 따른 홍수위 변화를 정량적으로 분석하기 위해 현재 제방선을 그대로 유지한 상태의 조건(Case A)과 제방을 후퇴하여 수변구역을 홍수터 구간으로 포함시켰을 경우(Case B, C, D)로 크게 나누어 수행하였다(Table 1). 그 중, Case B는 새롭게 홍수완충공간으로 조성된 공간에 금강 본류의 조도계수와 동일한 0.035를 적용하였고, Case C는 3.3장에서 언급한 방법을 통해 대상 구간의 현장에 존재하는 식생의 물리적 특성이 반영되어 산정된 조도계수인 0.19를 적용하여 모의하였다. Case D는 제방 이설로 확장된 홍수터 공간에 사수역 설계를 적용하였다. HEC-RAS 상에서 사수역 처리는 교각 전후로 흐름이 없거나 흐름이 있어도 와류가 발생함으로써 유량의 소통에 영향을 주지

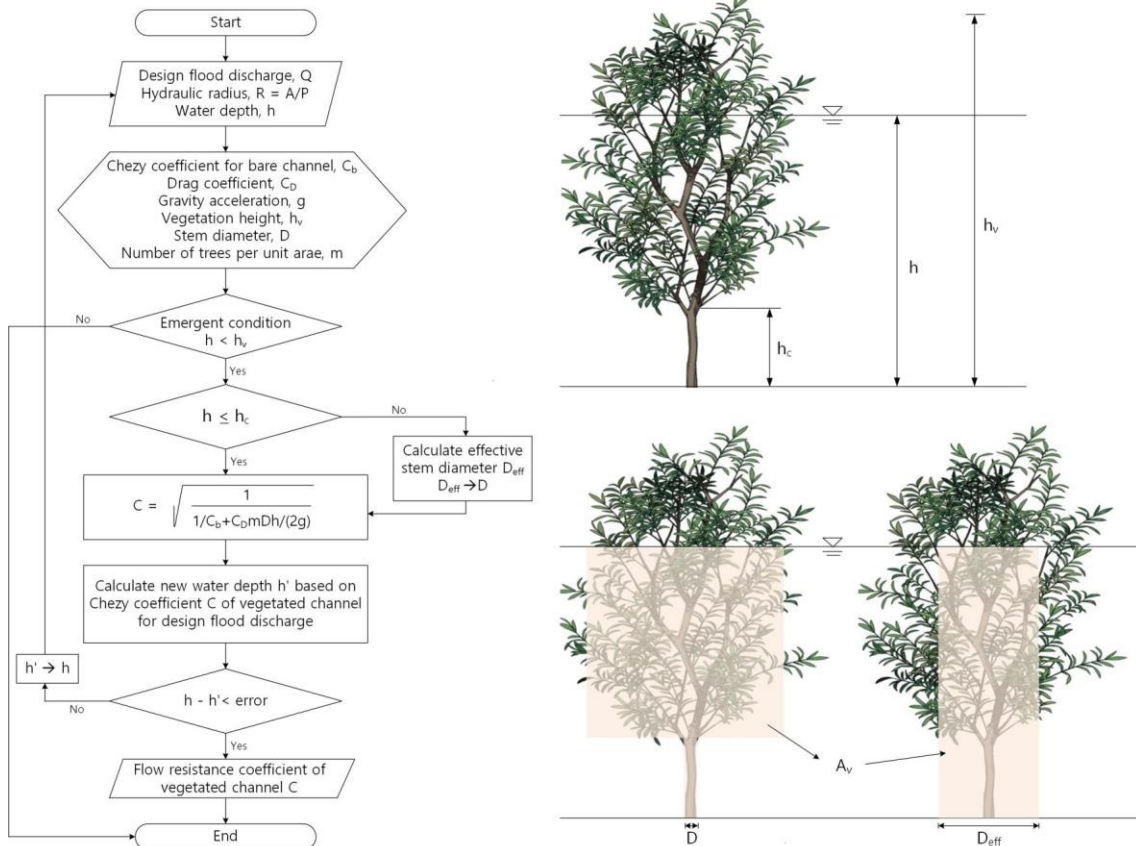


Fig. 4. Flow Chart for Calculating Flow Resistance Coefficient for Vegetated Channels using Baptist et al. (2007) Model for Emergent Condition

Table 1. HEC-RAS Modeling Cases and Conditions

Case	Manning's n value		Levee setback	Ineffective area
	Channel	Flood plain		
Case A (current cond.)	0.035		X	X
Case B (levee retreat)	0.035		O	X
Case C (levee retreat and vegetated floodplain)	0.035	0.19		X
Case D (levee retreat and dead-water region)	0.035	-		O

않는 영역에 적용하는 설계이다(Brunner, 2016). 이에 본 연구에서는 높은 밀도의 식생이 완충공간에 넓게 퍼져 있음으로써 흐름이 거의 존재하지 않음을 가정하여 Case D의 홍수위 영역은 시수역으로 설계하고 모의하였다. 위와 같은 네 가지 모의 조건에 따라 홍수위 변화에 대해 모의를 진행한 후 각각의 효과를 분석하고자 하였다.

4. 모의 결과

4.1 홍수위 변화 분석

본 연구는 HEC-RAS 모형을 이용해 앞서 설정한 모의 조건에 대하여 대상구간 내 100년 빈도의 홍수수문사상이 발생하였을 때, 일부 구간의 제방을 이설하는 자연기반해법을 적용함으로써

기대할 수 있는 홍수조절, 유속 저감 및 시간에 따른 홍수위 변화를 검토하고자 하였다. 해당 연구의 주요 검토내용인 홍수조절 효과는 Table 2와 Fig. 5(a), (b)에서 확인할 수 있으며, 홍수위 조성 전인 Case A(현 상태)의 최대 홍수위와 조성 후(Case B, C, D) 최대 홍수위의 차(Hc)로 정의하였다.

제방을 후퇴시키고 확장된 홍수위 구역에 검토 구간 내 본류의 조도계수(0.035)를 적용한 Case B는 No. 16.2에서 No. 17.6까지의 제방 후퇴 구간 중 No. 16.8에서 수위 저감이 시작되어 상류 방향으로 이어진다. 그 중 No. 18.0 단면(하류단으로부터 약 4.6 km 상류, 제방 이설 구간의 직상류 지점)에서 약 38 cm로 최대 홍수위 변화를 보였다. 이는 같은 단면의 다른 모의 조건의 결과들과 비교해도 가장 큰 수위 저감이었으며, 해당 모의 조건에서 확장된 홍수위에 사용된 조도계수의 값이 모의 조건들 중 가장

Table 2. Comparison of Flood Control Effect for Each Case

River Sta.	Cum. Ch. Len. (km)	Case A	Case B		Case C		Case D	
		Hp (EL.m)	Hp (EL.m)	Hc (EL.m)	Hp (EL.m)	Hc (EL.m)	Hp (EL.m)	Hc (EL.m)
13.4	0.0	98.458	98.454	-0.004	98.453	-0.005	98.457	-0.001
13.6	0.19	98.467	98.463	-0.004	98.463	-0.004	98.467	0.000
13.8	0.39	98.573	98.570	-0.003	98.569	-0.004	98.573	0.000
14.0	0.59	98.841	98.837	-0.004	98.837	-0.004	98.841	0.000
14.2	0.79	99.042	99.039	-0.003	99.038	-0.004	99.042	0.000
14.4	0.99	98.972	98.968	-0.004	98.967	-0.005	98.971	-0.001
14.6	1.19	99.272	99.268	-0.004	99.268	-0.004	99.272	0.000
14.8	1.39	99.348	99.344	-0.004	99.343	-0.005	99.347	-0.001
15.0	1.59	99.600	99.596	-0.004	99.596	-0.004	99.599	-0.001
15.2	1.79	99.704	99.701	-0.003	99.700	-0.004	99.704	0.000
15.4	1.99	99.849	99.845	-0.004	99.844	-0.005	99.848	-0.001
15.6	2.19	99.984	99.980	-0.004	99.980	-0.004	99.984	0.000
15.8	2.39	100.034	100.031	-0.003	100.03	-0.004	100.034	0.000
16.0	2.59	100.160	100.156	-0.004	100.156	-0.004	100.160	0.000

Table 2. Comparison of Flood Control Effect for Each Case (Continued)

River Sta.	Cum. Ch. Len. (km)	Case A	Case B		Case C		Case D	
		Hp (EL.m)	Hp (EL.m)	Hc (EL.m)	Hp (EL.m)	Hc (EL.m)	Hp (EL.m)	Hc (EL.m)
16.2	2.79	100.088	100.325	0.237	100.331	0.243	100.188	0.100
16.4	2.99	100.244	100.514	0.270	100.543	0.299	100.304	0.060
16.6	3.19	100.543	100.605	0.062	100.661	0.118	100.532	-0.011
16.8	3.39	100.674	100.666	-0.008	100.736	0.062	100.643	-0.031
17.0	3.59	100.791	100.716	-0.075	100.800	0.009	100.742	-0.049
17.2	3.79	100.798	100.723	-0.075	100.807	0.009	100.750	-0.048
17.4	3.99	100.924	100.849	-0.075	100.921	-0.003	100.868	-0.056
17.6	4.19	100.868	100.858	-0.010	100.937	0.069	100.833	-0.035
17.8	4.39	100.988	100.723	-0.265	100.815	-0.173	100.917	-0.071
18.0	4.59	101.217	100.834	-0.383	100.919	-0.298	101.014	-0.203
18.2	4.79	101.096	100.786	-0.310	100.872	-0.224	100.967	-0.129
18.4	4.99	101.720	101.467	-0.253	101.536	-0.184	101.614	-0.106
18.6	5.19	101.943	101.710	-0.233	101.773	-0.170	101.845	-0.098
18.8	5.39	102.081	101.860	-0.221	101.920	-0.161	101.988	-0.093
19.0	5.59	102.038	101.817	-0.221	101.877	-0.161	101.945	-0.093
19.2	5.79	102.015	101.794	-0.221	101.854	-0.161	101.922	-0.093
19.4	5.99	102.068	101.857	-0.211	101.914	-0.154	101.979	-0.089
19.6	6.19	102.443	102.253	-0.190	102.304	-0.139	102.363	-0.080
19.8	6.39	102.571	102.39	-0.181	102.438	-0.133	102.495	-0.076
20.0	6.59	102.633	102.455	-0.178	102.503	-0.130	102.558	-0.075
20.2	6.79	102.652	102.476	-0.176	102.523	-0.129	102.577	-0.075
20.4	6.99	102.710	102.540	-0.170	102.585	-0.125	102.638	-0.072
20.6	7.19	102.769	102.602	-0.167	102.646	-0.123	102.698	-0.071
20.8	7.39	102.810	102.647	-0.163	102.690	-0.120	102.741	-0.069
21.0	7.59	102.892	102.735	-0.157	102.776	-0.116	102.826	-0.066
21.2	7.79	102.897	102.744	-0.153	102.785	-0.112	102.833	-0.064
21.4	7.99	103.103	102.966	-0.137	103.002	-0.101	103.045	-0.058

작아 발생하는 저항이 비교적 적기 때문인 것으로 추정된다. 해당 단면 이후 수위 저감은 점차 감소하지만 제방 이설 구간 종료 후 4 km 상류 방향에 위치한 No. 21.4 단면까지도 이어지며 약 14 cm의 조절효과를 확인할 수 있었다. No. 16.2에서 No. 16.6 단면까지 약 400 m 구간에서는 급격한 수위 상승이 발생하였다. 특히 No. 16.4 단면에서는 27 cm의 수위 상승이 발생하였으며, 이는 검토 구간 중 가장 높은 수위 상승 폭이었다. 해당 단면에서의 유속 저감이 가장 컸던 것을 원인으로 추정한다.

제방 이설 후 홍수터에 새롭게 산정된 조도계수인 0.19를 적용한 Case C는 앞서 언급한 Case B와 유사한 수면곡선 경향을 보인다. No. 18.0에서 약 30 cm의 구간 내 최대 홍수위 변화를 보이며, 해당 지점에서 상류 방향으로 수위 저감 현상이 점차 감소하지만

검토 구간의 마지막 상류 단면인 No. 21.4에서도 약 10 cm의 수위 저감을 확인할 수 있다. 해당 모의 조건에서는 No. 16.2부터 No. 17.2 단면까지 수위 상승 현상이 발생하며 Case B와 마찬가지로 제방 이설 구간의 종점에 가까운 No. 16.4에서 약 30 cm의 최대 수위 상승 폭을 보인다.

개수 후 확장된 완충공간에 밀도 높은 식생의 분포로 흐름이 거의 존재하지 않는다고 가정하여 사수역 설계한 Case D는 앞서 언급한 Case B, C와 수위 변화 경향은 유사하나, 변화의 폭이 작다. 이는 다른 모의 조건에 비해 확장된 홍수터가 모의 결과에 미치는 영향이 비교적 적은 것이 원인인 것으로 추정된다. No. 16.6 단면을 기점으로 상류 방향으로 수위가 저감됨을 확인할 수 있다. No. 18.0 단면에서 약 20 cm의 최대 홍수위 저감을

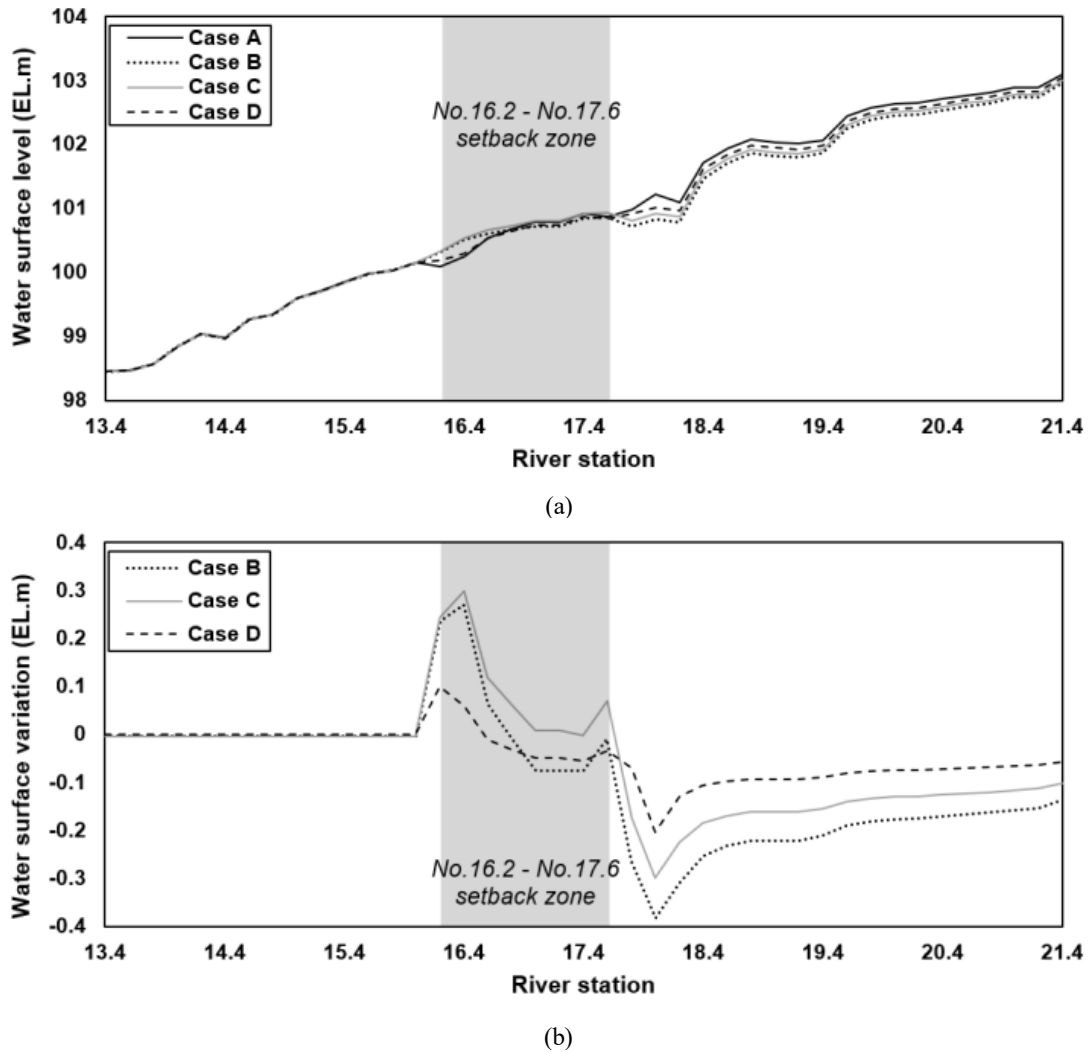


Fig. 5. Flood Level Calculation Results for Study Area: (a) Flood Level, (b) Flood Control Effect

보이며, 적지만 상류단 No. 21.4까지 이어져 약 6 cm의 수위 저감을 확인할 수 있다. 하류 구간에서는 현 상태(Case A)와 거의 동일한 수위값이 확인되었고, 수위 상승 구간은 No. 16.2에서 No. 16.4 단면의 200 m 구간으로 모의 조건 중 가장 짧은 편이며 최대 수위 상승폭은 약 10 cm로 관측되었다.

모의 결과, 상류 접근 하도 구간에서는 홍수위가 저감되는 것으로 나타났으나, 홍수터 확장 구간 내 일부 구간(No. 16.2~No. 17.2)에서 홍수위가 현 상태와 비교했을 때 오히려 상승하는 구간도 보이며 이후 하류 구간에서는 수위 변화가 5 mm 이하로 미미했다. 다차원법을 이용한 천변저류지의 홍수조절효과를 검토한 Kwak et al. (2008)과 본 연구에서 활용한 모형과 동일한 HEC-RAS를 활용해 천변저류지의 홍수위 저감을 효과를 분석한 Park et al.(2007), Rhee et al.(2014)의 연구에서도 저류지의 하류 구간은 수위 감소

폭이 비교적 작은 것으로 확인되었다.

4.2 유속 변화 분석

홍수위 변화 분석에 이어 제방 이설 후 발생한 유속 저감을 확인하였다(Table 3, Fig 6. (a), (b)). 제방 후퇴로 인해 통수단면적이 넓어진 구간인 No. 16.2~No. 17.6 단면 전후로 유속이 저하되며 모든 모의 조건에서 해당 구간의 하류 구간(No. 16.2, 16.4)에서 최대 유속 저감을 확인할 수 있었다. Case B, C에서는 1.4 m/s, Case D 조건에서는 0.36 m/s의 평균유속이 감소했으며 이는 유속 감소 폭이 가장 컸던 결과로, 제방 이설로 넓어진 통수단면적의 비율이 가장 큰 지점이었다는 점을 원인으로 예상할 수 있다. Case B와 C는 전반적으로 유사한 유속값을 보였던 가운데 Case D는 비교적 현 상태(Case A)와 큰 차이가 없는 경향을 보였는데, 추정

Table 3. Comparison of Mean Velocity Reduction Effect for Each Case

River Sta.	Cum. Ch. Len. (km)	Case A	Case B		Case C		Case D	
		V (m/s)	V (m/s)	Vc (m/s)	V (m/s)	Vc (m/s)	V (m/s)	Vc (m/s)
13.4	0.0	2.84	2.84	0.00	2.84	0.00	2.84	0.00
13.6	0.19	3.22	3.22	0.00	3.22	0.00	3.22	0.00
13.8	0.39	3.37	3.37	0.00	3.37	0.00	3.37	0.00
14.0	0.59	3.01	3.01	0.00	3.01	0.00	3.01	0.00
14.2	0.79	2.75	2.75	0.00	2.75	0.00	2.75	0.00
14.4	0.99	3.42	3.42	0.00	3.42	0.00	3.42	0.00
14.6	1.19	2.94	2.94	0.00	2.94	0.00	2.94	0.00
14.8	1.39	3.13	3.13	0.00	3.13	0.00	3.13	0.00
15.0	1.59	2.69	2.69	0.00	2.69	0.00	2.69	0.00
15.2	1.79	2.71	2.71	0.00	2.71	0.00	2.71	0.00
15.4	1.99	2.59	2.59	0.00	2.59	0.00	2.59	0.00
15.6	2.19	2.48	2.47	-0.01	2.47	-0.01	2.48	0.00
15.8	2.39	2.72	2.72	0.00	2.72	0.00	2.72	0.00
16.0	2.59	2.69	2.69	0.00	2.69	0.00	2.69	0.00
16.2	2.79	3.33	2.42	-0.91	2.42	-0.91	2.97	-0.36
16.4	2.99	3.30	1.90	-1.40	1.90	-1.40	2.97	-0.33
16.6	3.19	2.73	1.74	-0.99	1.73	-1.00	2.53	-0.20
16.8	3.39	2.58	1.71	-0.87	1.69	-0.89	2.41	-0.17
17.0	3.59	2.48	1.74	-0.74	1.72	-0.76	2.33	-0.15
17.2	3.79	2.82	2.15	-0.67	2.11	-0.71	2.65	-0.17
17.4	3.99	2.76	2.03	-0.73	2.00	-0.76	2.58	-0.18
17.6	4.19	3.35	2.42	-0.93	2.39	-0.96	3.09	-0.26
17.8	4.39	3.47	3.37	-0.10	3.33	-0.14	3.29	-0.18
18.0	4.59	3.23	3.54	0.31	3.50	0.27	3.47	0.24
18.2	4.79	4.06	4.21	0.15	4.16	0.10	4.12	0.06
18.4	4.99	2.69	2.78	0.09	2.75	0.06	2.73	0.04
18.6	5.19	2.12	2.17	0.05	2.16	0.04	2.14	0.02
18.8	5.39	2.04	2.09	0.05	2.08	0.04	2.06	0.02
19.0	5.59	2.53	2.59	0.06	2.57	0.04	2.55	0.02
19.2	5.79	3.00	3.08	0.08	3.06	0.06	3.03	0.03
19.4	5.99	3.27	3.34	0.07	3.32	0.05	3.30	0.03
19.6	6.19	2.29	2.34	0.05	2.33	0.04	2.31	0.02
19.8	6.39	1.99	2.03	0.04	2.02	0.03	2.01	0.02
20.0	6.59	1.95	1.99	0.04	1.98	0.03	1.97	0.02
20.2	6.79	2.16	2.20	0.04	2.19	0.03	2.18	0.02
20.4	6.99	2.19	2.23	0.04	2.22	0.03	2.20	0.01
20.6	7.19	2.25	2.30	0.05	2.29	0.04	2.27	0.02
20.8	7.39	2.47	2.52	0.05	2.51	0.04	2.49	0.02
21.0	7.59	2.58	2.63	0.05	2.62	0.04	2.60	0.02
21.2	7.79	3.07	3.14	0.07	3.12	0.05	3.10	0.03
21.4	7.99	2.92	2.98	0.06	2.96	0.04	2.95	0.03

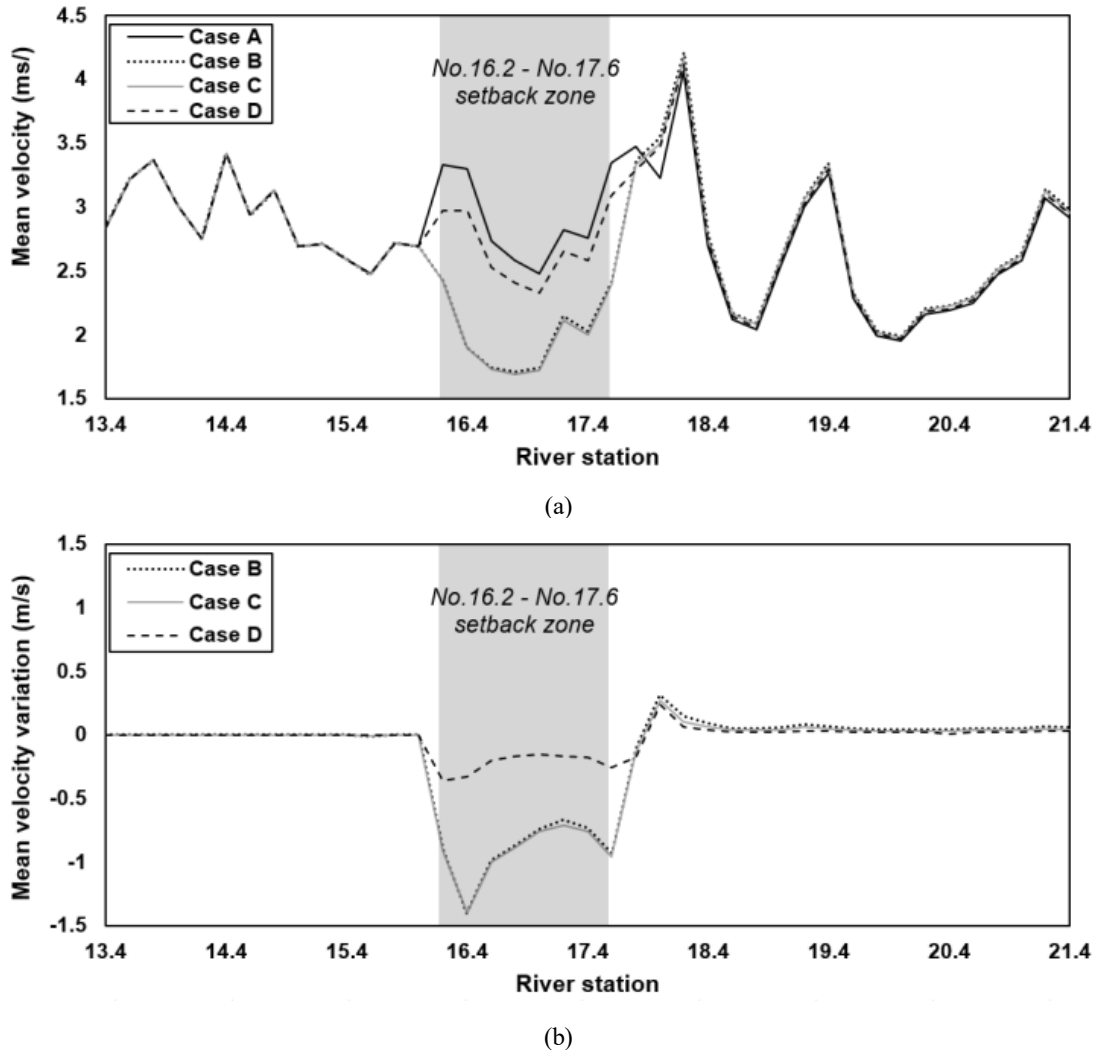


Fig. 6. Predicted Mean Velocity: (a) Mean Velocity for Study Area, (b) Reduction Effect of Mean Velocity

원인으로는 다른 모의 조건에 비해 확장된 홍수완충공간이 모의 결과에 미치는 영향이 비교적 적기 때문이다.

4.3 최대 홍수위 발생 시점 변화

본 절에서는 모의 조건별 최대 홍수위가 발생하는 시점까지의 도달시간을 분석하여 시간에 따른 홍수위 변화를 평가하였다. Fig. 7의 그래프는 모의 구간의 최 상류인 Fig. 7(a) No.16.2를 시작으로 Fig. 7(f) No.18.2까지 이어진다. 지점 별로 최고 수위가 발생하는 시점은 32분대이다. 제방 후퇴 구간이 약 1.4 km임에도 불구하고 최고 수위가 발생하는 시점은 전 구간에 걸쳐 유사하다는 것을 알 수 있다. 또한 Case C와 Case D의 최고 수위 발생 시점이 Case A에 비해 다소 지연되는 것을 확인하였으나 그 차이가 크지 않은 것으로 보아 제방 후퇴 여부는 최고 수위가 발생하는 시점

변화에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 제방 후퇴로 인해 확대되는 홍수완충공간에 대한 조도계수와 시수역 처리의 여부도 최고 수위가 발생하는 시점의 변화에는 민감하지 않다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기후변화로 인한 극한홍수 피해를 완화하고 수환경 및 생태서식환경의 개선을 동시에 도모하기 위한 홍수관리시설의 자연기반해법인 제방 후퇴 및 이설을 통한 홍수완충공간의 조성에 따른 홍수위 변화를 1차원 부정류 수치 모델링을 통해 분석하였다.

1차원 수치모형인 HEC-RAS를 활용하여 100년 빈도 홍수에

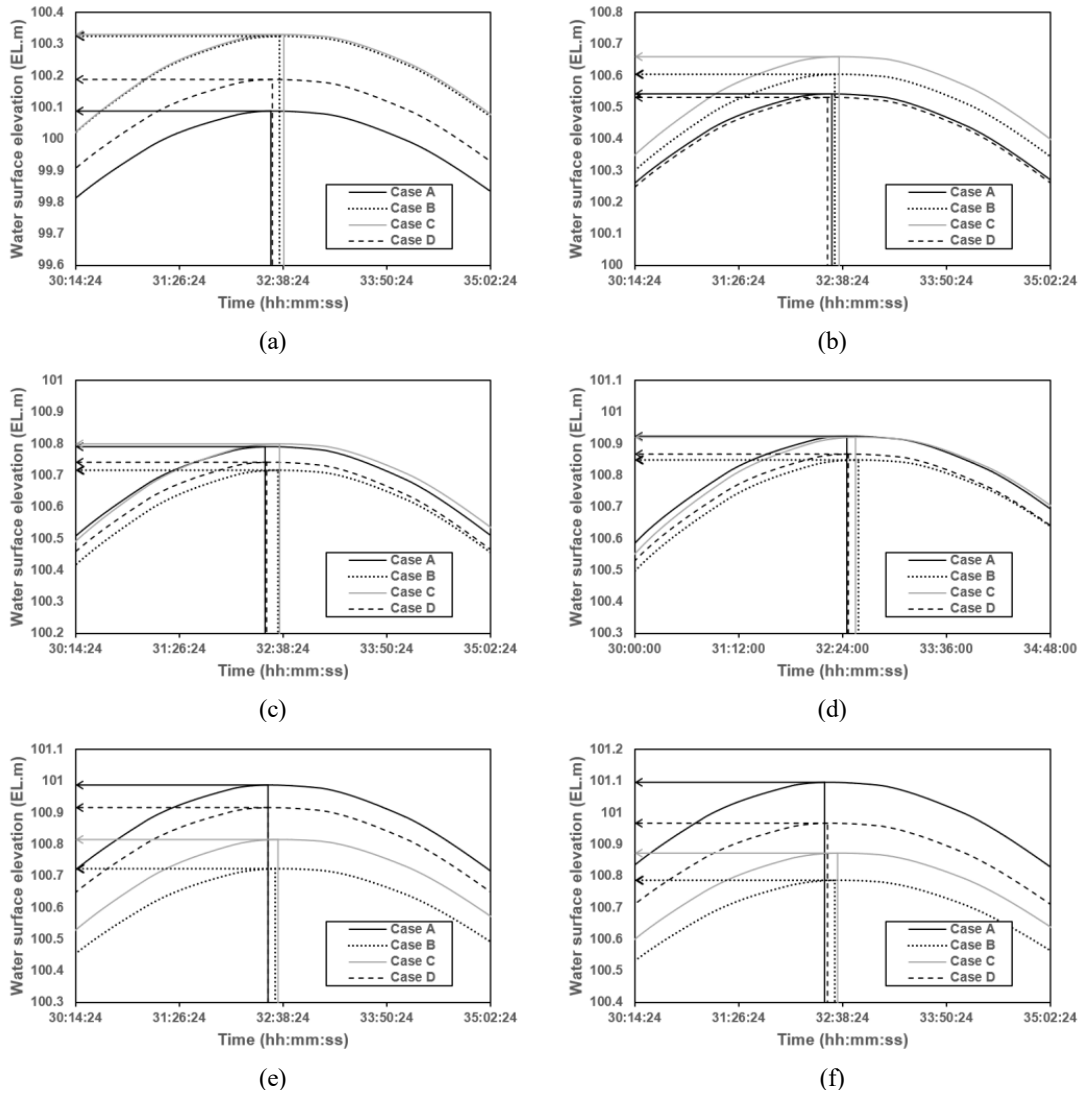


Fig. 7. Time to Reach the Maximum Water Level for Each Simulated Condition at: (a) No.16.2, (b) No.16.6, (c) No.17, (d) No.17.4, (e) No.17.8, (f) No.18.2

대한 홍수위 변화를 분석한 결과, 홍수완충공간의 확장에 따라 홍수위 저감이 상류 지점부터 하류 지점까지 상당 구간 이어지는 것으로 나타났다. 제방 후퇴에 따른 자연기반해법에 의한 홍수완충공간의 확장으로 상류 접근 하도의 특정 단면에서는 기존 대비 약 30 cm의 홍수위가 저감되었다. 또한 기존 하천기본계획에서 제시하고 있는 하상의 조도계수와 제방이설로 인해 확장되는 홍수터 영역을 식생 영역으로 조성하는 것으로 가정했을 때의 조도계수를 다르게 적용한 경우, 홍수위 변화 분석 결과에 차이가 있음을 알 수 있었으며, 이를 통해 식생하도 구간의 흐름저항계수 산정의 중요성을 확인하였다. 상류 접근 하도 구간에서는 홍수위가 감소하였지만 홍수터가 확장된 구간에서는 일부 단면에서 홍수위가 상승하는 것이 확인되었으며, 이러한 분석 결과는 홍수완충공간 조성의

적정 위치 선정이 홍수피해저감 대상구간에서의 홍수위 저감 효과에 중요한 설계 항목임을 제시하고 있다. 또한 제방후퇴 구간에서의 국부적 수위 상승을 반드시 고려하여 제방 여유고를 확보하는 것도 설계에 반영해야 할 부분임을 제시하고 있다.

본 연구에서는 확장된 홍수터의 통수단면적에 따라 유속 변화가 다르게 나타났다. 모의 조건에 따라 유속 저감 폭이 다르며, 가장 큰 저감은 확장된 통수단면적의 비율이 가장 큰 지점에서 나타났다. 시간에 따른 홍수위 변화를 분석한 결과, 수치모의시 제방 후퇴를 반영한 조건과 확장된 홍수터를 사수역으로 처리한 경우 최우수위 발생 시점에는 큰 차이를 보이지 않았다.




제방 후퇴/이설을 통한 자연기반해법의 홍수완충공간 조성은 홍수 관리의 효과적인 대안으로 고려될 수 있으며, 특히 하천사업

목적에 따라 상하류 상당구간의 홍수위 변화와 유속 변화를 종합적으로 고려하여 확장되는 홍수터 공간을 설계해야 할 것이다. 향후 지속 가능한 홍수관리시설 및 홍수완충공간의 설계를 위해 기후변화로 인한 극한홍수 발생을 고려하여 설계빈도 이상의 홍수 조건에서도 홍수위 변화를 적극 검토해 볼 필요가 있다. 이러한 자연기반 홍수관리시설과 홍수완충공간의 대안적 접근법의 과학적, 공학적 검토 결과는 향후 추가적인 사례연구와 현장 모니터링을 기반으로 기후위기 시대의 하천관리 방안의 다변화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

Research for this paper was carried out under the KICT Research Program (project no. 20230115-001, Development of IWRM-Korea Technical Convergence Platform Based on Digital New Deal) funded by the Ministry of Science and ICT.

ORCID

Jiwon Ryu  <https://orcid.org/0009-0001-5272-0179>
 Un Ji  <https://orcid.org/0000-0003-0061-0098>
 Eun-kyung Jang  <https://orcid.org/0000-0002-4925-5018>

References

Baptist, M. J., Babovic, V., Rodríguez Uthurburu, J., Keijzer, M., Uittenbogaard, R. E., Mynett, A. and Verwey, A. (2007). "On inducing equations for vegetation resistance." *Journal of Hydraulic Research*, Taylor & Francis, Vol. 45, No. 4, pp. 435-450, <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521778>.

Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*, Version 5.0. CPD-69, US Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center, CA, USA.

Collenteur, R. A., de Moel, H., Jongman, B. and Di Baldassarre, G. (2015). "The failed-levee effect: Do societies learn from flood disasters?." *Natural Hazards*, Springer, Vol. 76, pp. 373-388, <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1496-6>.

Dierauer, J., Pinter, N. and Remo, J. W. F. (2012). "Evaluation of levee setbacks for flood-loss reduction, Middle Mississippi River, USA." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vols. 450-451, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.044>.

Hipple, J. D., Drakowski, B. and Thorsell, P. M. (2005). "Development in the Upper Mississippi Basin: 10 years after the Great Flood of 1993." *Landscape and Urban Planning*, Elsevier, Vol. 72, No. 4, pp. 313-323, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.012>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014).

Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379>.

Jadhav, R. and Kumar, M. (2021). *Heavy rain in India triggers floods, landslides; at least 125 dead*, REUTERS, Available at: <https://www.reuters.com/world/india/heavy-rain-india-triggers-floods-landslides-least-125-dead-2021-07-24/> (Accessed: July 24, 2021).

Ji, U., Jang, E. K., Bae, I., Ahn, M. and Bae, J. (2022). "A study on the site selection method for the creation of a flood buffer section considering the nature-based solution-case study from upstream of Daecheong Dam to Downstream of Yongdam Dam." *Ecology and Resilient Infrastructure*, KSEIE, Vol. 9, No. 3, pp. 131-140, <https://doi.org/10.17820/eri.2022.9.3.131> (in Korean).

Ji, U., Järvelä, J., Västilä, K. and Bae, I. (2023). "Experimentation and modeling of reach-scale vegetative flow resistance due to willow patches." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 149, No. 7, 04023018, <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13293>.

Jun, K., Kim, J., Kim, W. and Yoon, B. (2010). "Computational model for flow in river systems including storage pockets with side weirs." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 2, pp. 139-151 (in Korean).

Kim, S., Kim, S., Yoon, B. and Ji, U. (2012). "Development and accuracy analysis of the discharge-supply system to generate hydrographs for unsteady flow in the open channel." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 8, pp. 783-794 (in Korean).

Kim, S., Yoon, B., Kim, D. and Kim, S. (2016). "Accuracy analysis of HEC-RAS for unsteady flow simulation considering the flow pattern variations over the side-weir of side-weir detention basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 49, No. 1, pp. 29-39 (in Korean).

Knox, R. L., Wohl, E. E. and Morrison, R. R. (2022). "Levees don't protect, they disconnect: A critical review of how artificial levees impact floodplain functions." *Science of the Total Environment*, Elsevier, Vol. 837, 155773, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155773>.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2021). *Fundamental Investigation Study on Floodplains to Improve Water Environment of Daecheong Dam - Establishment of the floodplain restoration plans of nature-based solutions linking the Geum River's riparian section and stream channel. Final Report for 2021 Geum River Watershed Environmental Basic Investigation Project*, Geum River Watershed Management Committee, Daejeon (in Korean).

Kwak, J. W., Kim, D. G., Yin, S. H. and Kim, H. S. (2008). "Washland constructions and effectiveness analysis of flood control using MD-FDA." *Journal of Wetlands Research*, KWS, Vol. 10, No. 3, pp. 69-78 (in Korean).

Ministry of Environment (MOE) (2020). *Basic plan for management for the waterfront area in Geumgang watershed* (in Korean).

Ministry of Environment (MOE). (2022). *Development of Flood*

- Damage Reduction and Buffering Metrology using Nature-based Solutions* (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2005). *A study on the establishment of a basic plan for riverside reservoirs* (in Korean).
- Park, C. K., Park, J. H. and Lee, J. J. (2007). "Analysis for Flood control in Hwapocheon watershed using WashLand." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, Pyeongchang, Korea, pp. 331-335 (in Korean).
- Pinter, N., van der Ploeg, R. R., Schweigert, P. and Hofer, G. (2006). "Flood magnification on the River Rhine." *Hydrological Processes*, John Wiley & Sons, Vol. 20, No. 1, pp. 147-164, <https://doi.org/10.1002/hyp.5908>.
- Rhee, D. S., Kim, H. J. and Cho, G. (2014). "Analysis of flood level mitigation due to the Naju retention-basin by numerical model application." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, KAIS, Vol. 15, No. 9, pp. 5801-5812, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.9.5801> (in Korean).
- Room for the River (2013). *Brochure*, Available at: http://issuu.com/ruimtevoorderivier/docs/rvdr_corp_brochure_eng_def (Accessed: April 25, 2023).
- Seong, H. J., Park, I. and Rhee, D. S. (2018). "Effects of the water level reduction and the flow distribution according to change of the side weir location in detention reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 7, pp. 555-564, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2018.51.7.555> (in Korean).
- Shin, S. B., Park, J., Song, J. H. and Kang, M. S. (2017). "Flood stage analysis considering the uncertainty of roughness coefficients and discharge for Cheongmicheon watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 50, No. 10, pp. 661-671 (in Korean).
- Woo, H. (2020). "River levee failures due to the floods in August 2020 and their implications." *KSCE Magazine*, KSCE, Vol. 68, No. 12, pp. 78-85 (in Korean).