

GIS 홍수범람 경계 영향인자 선정 및 경계 조정방법에 관한 연구

심규성^{1*}, 정순찬², 임동화², 신희재¹

¹동부엔지니어링 기술연구소, ²동부엔지니어링 수자원본부

A Study on The Development of GIS Flood Inundation Boundary Influencing Factors and Boundary Adjustment Method

Gyoo-Seong Sim^{1*}, Sun-Chan Jung², Dong-Hwa Lim², Hee-Jae Shin¹

¹Technology Reserch Center, Dongbu Engineering Co., Ltd.

²Water Resources Dept, Dongbu Engineering Co., Ltd.

요약 현재 홍수방어 대응기관인 환경부 및 행정안전부에서는 비구조적 대책방안으로써 다양한 형태의 홍수지도가 제작되어 활용되고 있다. 이러한 홍수지도의 홍수범람경계는 하천주변 제내지의 특성 및 중요도에 따라 2차원 홍수범람해석으로 결정하기도 하지만 대부분의 지역은 계획홍수위를 기준으로 그 이하의 지형을 모두 홍수범람경계로 결정한다. 이러한 방법은 GIS 홍수범람 해석방법이라 칭하고 있으며 홍수지도 작성 외에 다차원 홍수 피해 분석에 의한 치수경제성 평가에도 활용되고 있다. 일반적으로 GIS 홍수범람 해석 방법은 홍수범람경계를 비교적 손쉽게 결정하는 장점이 있으나 홍수범람경계가 과도하게 나타나는 구조적 한계가 있으며 이는 홍수피해규모의 왜곡, 풍수해 보험료의 과다산정 등 다양한 문제를 야기 시킨다. 본 연구는 이러한 GIS 홍수범람 해석방법에 의한 홍수범람 경계의 과다산정 문제를 해결하기 위해 기존 홍수지도가 작성된 지역에 대해 2차원 홍수범람 해석(HEC-RAS 5.0)을 수행하였다. 또한 홍수범람 해석 시 사용되는 일반적인 수리적 인자 외에 「월류단면적비」와 「월류체적 감소율」 인자를 새로 고안하였으며 이를 홍수범람 경계에 영향을 미치는 독립변수와 종속변수로 정의하여 통계분석을(다중 선형회귀분석) 실시하였다. 이를 통해 GIS 홍수범람 해석으로 작성된 홍수범람경계의 월류체적을 2차원 홍수해석에 의해 작성된 월류체적을 기준으로 적절히 조정할 수 있는 산식을 개발하였다. 또한 이 산식을 만봉천에 적용하여 그 적용성을 검증하였다. 향후 대상하천의 범위를 확대하여 조정산식을 보완한다면 기존 GIS 홍수범람 해석으로 작성된 홍수범람경계의 합리적 조정이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Currently, various types of flood maps are produced and used as non-structural countermeasures by the Ministry of Environment and the Ministry of the Interior and Safety, which are flood defense response agencies. The flood inundation boundary of a flood map is determined by 2D flood inundation analysis according to the characteristics and importance of the inland around the river, but most areas determine all topographies below that based on the design flood level. The GIS flood inundation analysis has the advantage of determining the flood inundation boundary relatively easily, but there is a structural limitation in that the flood inundation boundary appears excessive. To solve the problem of overestimating the flood inundation boundary of the GIS flood inundation analysis, this study conducted a 2D flood inundation analysis (HEC-RAS 5.0) for areas where flood maps were prepared by the existing GIS flood inundation analysis. In addition to the general hydraulic factors used in the analysis of flood inundation, factors called "Overflow Cross Section Area Ratio" and "overflow volume Decrease Ratio" were newly devised. This was defined as an independent variable and a dependent variable affecting the flood inundation boundary, and statistical analysis (multi-linear regression analysis) was conducted. Through this, an equation was developed that can appropriately adjust the overflow volume of the flood inundation boundary prepared by the GIS flood inundation analysis based on the overflow volume prepared by the two-dimensional flood analysis. In the future, if the number of target rivers is expanded and verified to supplement the equation, rational adjustment of the flood inundation boundary prepared by GIS flood inundation analysis is possible.

Keywords : Elevation Buffering, GIS Flood Inundation Analysis, 2D Flood Inundation Analysis, HEC-RAS 5.0, Floodmap, Flood Protection Plan, Flood Inundation Boundary

본 논문은 환경부/한국환경산업기술원 물관리연구사업의 지원을 받아 수행되었음(과제번호 21AWMP-B121100-06).

*Corresponding Author : Gyoo-Seong Sim(Dongbu Engineering Co., Ltd.)

email: kssim@dbeng.co.kr

Received February 10, 2023

Revised March 2, 2023

Accepted March 3, 2023

Published March 31, 2023

1. 서론

최근 기록적인 폭우에 의해 서울 서남권 일원지역의 강남역, 도림천 등에 심각한 국지적 홍수피해가 발생하여 많은 인명 및 재산 피해가 발생하였다. 특히 도림천은 구조적 홍수방어 대책이 적극적으로 수행되었음에도 계획빈도를 초과하는 강수량과 능동적 홍수 대응체계의 미흡 등으로 홍수를 피할 수 없었다. 따라서 이러한 홍수피해 발생은 구조적 대책만으로는 해결이 어려우며 비구조적 대책으로써의 홍수지도의 작성 및 활용이 무엇보다 중요함을 일깨워 주고 있다. 즉, 홍수지도의 활용을 통해 평상시 지역별 홍수 대응능력을 점검 및 강화하고 하천 주변에 대한 선제적 홍수방어 대책을 수립할 수 있는 기 때문이다. 현재 홍수지도 작성 시 가장 많이 사용되는 방법은 GIS 홍수범람해석 방법으로써 하천기본계획에 의해 결정된 축점별 계획홍수위를 제내지(제방선을 기준으로 토지이용 및 인구가 거주하는 지역) 방향으로 연장하여, 그 연장선과 지형이 만나는 지점까지를 GIS로 분석하여 이를 실제 계획빈도 강우에 대한 홍수범람 경계로 결정하고 있다. 이러한 GIS에 의해 홍수범람 경계를 결정하는 방법(이하 GIS 홍수범람해석)은 분석의 신속성, 경제성 등의 장점으로 인해 제내지의 지형적 특성이 저류형이며 저류하천이 없는 지역에 한해 광범위하게 사용하고 있다. GIS 홍수범람해석에 대한 작업 방법은 2008년 「풍수해보험지도 작성방안 연구(소방방재청:11-1660000-000196-01)」에 구체적으로 제시되었으며[1], 2017년 한강홍수통제소에서는 「홍수위험지도 기본계획 보완용역」을 통해 2차원 홍수범람해석과 GIS 홍수범람해석의 결과를 비교·분석하여 지역의 중요도에 따른 홍수 해석 기법의 적용 범위를 구체적으로 명시하였다[2]. 현재 홍수지도 제작에 따른 홍수범람경계 결정 방법은 표준 작업절차가 정립되어 있으며 이를 기반으로 각 기관마다 별도의 세부 지침을 보완하여 활용하고 있다. 이러한 지침에 의해 환경부의 국가하천, 지방하천 등의 홍수지도가 제작되어 다양한 분야에 활용되고 있으며 행정안전부의 풍수해보험지도, 홍수범람예상지도(지방 및 소하천) 등 전국 단위 홍수범람 경계 활용 사업에도 적용되고 있다. 이러한 GIS 홍수범람해석은 비교적 단시간에 최소의 비용으로 홍수범람 경계를 결정하는 장점이 있는 반면 다음과 같은 구조적인 문제가 있다. 첫째, 일반적으로 제방이 붕괴되는 양상은 하도의 양쪽제방이 동시 붕괴되는 경우(양안파제)가 아닌 한쪽 제방만 부분적으로 붕괴(편안파제)되는 경우가 대부분이나 GIS 홍수범

람해석은 양안의 제방이 일시에 부존재가 되는 실제 자연적으로 발생되지 않은 극한의 상황을 가정한 것으로 한쪽제방이 부분적으로 붕괴되어 제내지로 유하되는 유수의 물리적 특성을 전혀 고려하지 않는다. 둘째, 제방의 부존재에 따른 통수단면의 확대 및 유속의 변화 등에 대한 유수의 수리적 특성을 고려하지 않는다. 일반적으로 홍수지도는 유수의 물리적 특성을 정밀하게 모의하여 나타내는 지도가 아니고 단지 재난대응계획 수립을 위한 극한의 강우상황을 고려한 방재지도의 특징을 갖고 있기도 하며 또한 홍수모의 시 제방의 파제 위치를 특정할 수 없으므로 이러한 GIS 홍수범람해석에 의한 방법이 비교적 유효한 방법이기도 하다. 그럼에도 불구하고 이러한 홍수의 자연적 현상을 정확하게 고려하지 못하는 한계로 홍수범람 경계가 지나치게 과다하게 결정되는 것은 불가피한 사실이며 이러한 홍수범람경계의 과다 산정 문제는 하천기본계획의 치수경제성 분석, 손실손상합수에 의한 피해 평가, 풍수해 보험요율 등에 있어 왜곡된 분석 결과를 초래하여 이로 하여금 합리적 의사결정을 어렵게 하고 있다. 본 연구에서는 이러한 GIS 홍수범람해석에 의해 과다 산정된 홍수범람경계를 합리적으로 조정하는 방법을 개발하는 것을 연구목표로 한다.

본 연구를 위한 선행연구를 살펴보면 다음과 같다. 이응섭(2016)은 대부분의 자연 상태의 하천은 만곡이 형성되어 있으며 이러한 만곡부에서는 원심력의 영향으로 외측의 수위가 내측의 수위보다 높아지는 편구배, 외측제방으로 흐르는 2차류가 생성되는 등 직선수로와 흐름 특성이 변화하지만 우리나라에서 많이 사용하고 있는 1차원 모형인 HEC-RAS 모형은 횡단면 전체가 균일하게 상승 또는 하강하는 것으로 가정하기 때문에 만곡부가 많은 하천에 대하여 흐름 특성 분석이 적합하지 않다고 판단하였다. 이에 1차원 HEC-RAS 모형과 2차원 모형인 TELEMAC을 활용한 수치해석 결과를 비교 분석을 하여 모형의 적합성을 검토하였다[3]. 이춘호 등(2016)은 2차원 모형인 HEC-RAS 5.0과 기존에 가장 많이 사용되는 2차원 모형인 FLUMEN과 비교하고 그 사용성 및 적용성을 평가하기 위해 곡교천을 대상으로 100년, 200년, 500년 빈도 홍수량을 적용하여 2차원 홍수범람해석을 수행하였다. 분석 결과 일부 침수심 영역에서 홍수범람 면적의 차이가 있었으나 전체 홍수범람 면적의 차이가 크지 않은 것을 확인하였다[4]. 전상민(2018)은 하천변의 농경지를 대상으로 HEC-RAS 모형의 1, 2차원을 연계한 침수 모의를 실시하였고, 1차원만을 활용한 침수 모의 결과와 연계 모의 결과를 비교 및 분석을 통해 1,

2차원 연계 침수 모의의 특성 및 적용성을 제시하였다 [5]. 이러한 연구들에 의하면 하천기본계획 및 홍수예보 등에 사용되는 주로 범용적 수리 모형의 비교 및 하천의 지형 공간적 특성에 따른 모형의 적용성에 대한 연구가 주를 이루어 왔으며 현재 홍수지도 작성 지침의 표준작업 규정의 하나로써 가장 많이 사용되고 있는 GIS 홍수범람해석에 의한 홍수범람경계의 과다 산정문제를 해결하는 방법에 대한 연구는 전무한 실정이다. 이에 따라 GIS 홍수범람해석에 의해 결정되는 홍수범람 경계를 합리적으로 조정하는 방법에 대한 실증적 연구가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 국가 및 지방하천을 대상으로 GIS 홍수범람해석으로 홍수범람 경계가 결정된 지역에 대해 2차원 홍수범람해석(HEC-RAS 5.0을 이용)을 수행하여 그 결과(홍수범람 경계와 월류체적)를 각각의 특성인자 별로 비교분석하여 적절한 조정산식을 제안하였다.

2. 개요

2.1 연구방법

홍수지도의 홍수범람경계 결정은 2017년 한강홍수통제소에서 수행한 「홍수위험지도 기본계획 보완용역」 보고서에 구체적인 작업방법이 정립되어 있으며 대표적인 작업 방법은 다음과 같이 크게 두가지 방법이 있다. 첫째, 1차원 홍수범람해석 방법은 하도의 유효유출량을 하천의 종단고를 기준으로 상하류 경계조건을 부여하여 1차원 부등류 해석을 통해 지점별 홍수위를 결정하는 방법으로써 일반적으로 저류형 제내지의 범람해석에 주로 사용된다. 둘째, 2차원 부등류 해석은 유수의 흐름을 3차원 지형공간에 대비하여 2차원적 운동 특성을 시간대별 유입량과 유출량의 특성을 고려하여 해석하는 방식으로 도심하천과 확산형 제내지 등 정밀한 지역의 홍수범람경계 결정에 주로 사용된다. 일반적으로 2차원 홍수범람해석결과가 비교적 제내지로 범람하는 유수의 흐름을 잘 모의한다고 가정했을 때 GIS 홍수범람해석으로 홍수범람 경계가 결정된 지역을 선정하여 동일지역에 대해 2차원 홍수범람해석을 해서 그 경계 및 월류체적의 차이를 비교분석하는 과정이 필요하다. 본 연구는 이러한 배경에 따라 다음과 같은 절차로 연구를 수행하였다(Fig. 1).

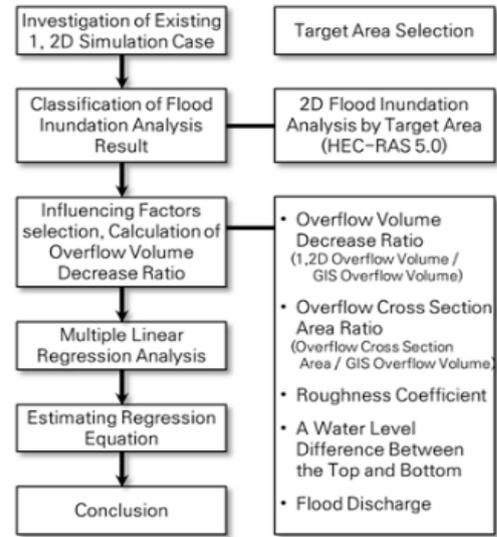


Fig. 1. Procedure

첫째, GIS 홍수범람해석에 의한 홍수지도 중 하천의 형상이 비교적 직선형이고 제내지의 특성이 저류형인 범람경계를 선정하여 월류체적, 제내지 지반고, 구간 연장, 계획홍수위, 비유량 등의 특성 인자를 목록화 하였다. 둘째, 동일한 위치의 범람 경계에 대해 편안 무체부 조건에 의한 2차원 홍수범람해석(HEC-RAS 5.0)을 실시하여 이를 GIS 홍수범람해석에 의해 결정된 월류체적과 비교하여 그 변화율(이하 월류체적 감소율)을 분석하였다. 셋째, 각 구간의 홍수범람경계별로 상하류의 수위차, 조도계수, 월류단면적 비 등을 독립변수로 월류체적 감소율을 종속변수로 하는 통계분석(다중선형회귀분석)을 수행하였다. 넷째, 다중선형 회귀분석결과에 따른 홍수범람 경계 조정 산식을 도출하였고 이를 만봉천의 2개 지역에 적용하여 검증하였다. 이러한 방법을 통해 기존 GIS 홍수범람해석으로 작성된 범람경계의 조정 시 2차원 홍수범람해석을 직접수행하지 않고서도 하천기본계획에 제공되어 있는 특성인자만으로도 월류체적 감소율을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2.2 홍수범람 경계 결정방법

국내에서는 1차원 홍수범람해석은 HEC-RAS, FLDWAV 등의 홍수예측모형을 주로 활용하며, 하도의 유효유출량을 하천의 종단의 종단고를 기준으로 상하류 경계조건을 부여하고 1차원 부등류 해석을 통해 지점별 홍수위를 결정하며 주로 저류형 제내지(제방을 기준으로 사람이 거주하는 지역)의 홍수범람해석에 사용된다. 2차원 홍수범

람해석은 HEC-RAS 5.0, FLUMEN 등의 홍수예측모형을 주로 사용하며 유수의 흐름을 3차원 지형공간에 적용해 2차원적 운동특성을 시간대별 유입량과 유출량의 특성을 고려하여 해석하는 방식으로 도심지와 확산형 제내지 등 정밀한 지역의 홍수범람경계 결정에 사용된다. 본 연구에서는 2차원 홍수범람해석 시 HEC-RAS 5.0을 사용하였다. GIS 홍수범람해석은 하천기본계획 등에서 수행한 1차원 부등류 해석 결과를 이용하여 각 기점별 홍수위를 제내지 방향 축선으로 연장하여 구조화 한 후 이를 보간하여 3차원 수표면을 작성하고 이를 하도 및 제내지의 지형정보와 3차원 공간 중첩하여 최종 홍수범람 경계를 결정한다(Fig. 2).

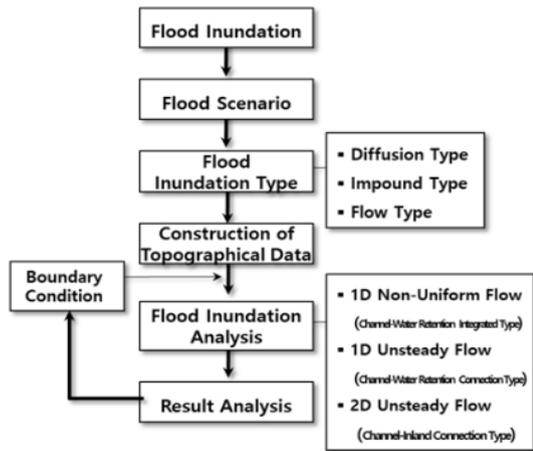


Fig. 2. Methods for Estimating Flood Inundation Area

2.3 홍수범람 경계비교를 위한 특성인자 정의

홍수범람 해석 방법에 따른 홍수범람 경계의 차이를 조정하기 위해서는 각 해석방법에 따른 결과를 구체적으로 구분 할 수 있는 인자가 필요하다. 기존 홍수범람 경계는 2차원 평면 값으로 지형의 특성에 따라 경계의 차이가 발생 되므로 이를 대표인자로 사용 할 수는 없다. 즉, 동일한 유수가 월류가 되더라도 제내지 지형에 따라 면적의 차이가 나타나게 되므로 홍수범람 해석 방법에 의한 결과차이를 상호 비교 할 수 없기 때문이다. 따라서 제내지로 월류되는 유수의 총량을 월류체적(V_n)으로 정의하여 사용할 필요가 있다. 월류체적은 GIS 홍수범람해석 또는 2차원 홍수범람 해석에 월류된 유수의 총량을 의미하며 홍수범람경계의 3차원 체적을 나타낸다. 이때 GIS 홍수범람 해석에 의해 작성된 월류체적을 GIS 월류체적 (V_g)으로, 2차원 홍수범람 해석에 의해 작성된 월

류체적을 2차원 월류체적으로 정의하였다(V_n). 월류체적 감소율은 GIS 월류체적을 2차원 월류체적으로 나눈 값으로 각 구간별 홍수범람 해석 결과의 비교를 위해 정의하였다. 제내지 월류표고(H_n)는 제방의 제내지 방향 제체 끝선에서 계획홍수위까지의 표고를 말한다. 월류단면적(S_n)은 제방의 제내지 방향 제체 끝선과 계획홍수위 사이의 면적을 나타낸다. 월류단면적 비(FS_n)는 월류단면적(S_n)을 월류체적(V_n)으로 나눈값으로 제내지 월류체적에 직접적 영향을 미치는 인자이다. 이와 같은 특성인자들의 기하관계는 Fig. 3과 같다.

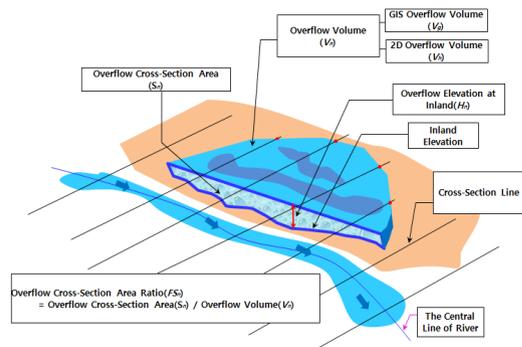


Fig. 3. Geometric Relations of Influencing Factor

월류단면적 비는 GIS 홍수범람 해석에 의한 월류체적을 각 구간에 대한 독립적인 홍수범람 특성을 나타내는 값으로 정의하기 위해 본 연구에서 고안된 지표로서 실제 하천의 제내지 범람 시 각 구간에 월류되는 유량이 그 구간의 월류체적에 직접적으로 영향력을 나타내는 지표임을 의미한다. 월류단면적비의 인자들의 기하학적 특성 및 구성은 Fig. 4와 같다.

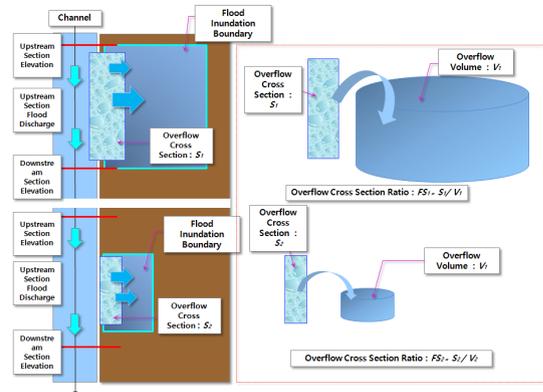


Fig. 4. Characteristic of Overflow Cross Section Ratio

예를 들면 월류단면적 S_1 은 S_2 보다 크고 월류체적 V_1 이 V_2 에 비해서 크더라도 월류단면적 비 FS_1 은 FS_2 보다 크다. 이것은 월류단면적 S_2 가 S_1 에 비해 월류체적에 미치는 영향이 더 크다는 것을 의미한다.

2.4 월류체적 영향인자 회귀분석 모형 정립

본 연구에서는 월류체적의 변화에 영향을 미치는 독립변수들을 다음과 같이 선정하였다. 첫째, 상류단 유입부의 계획홍수위와 하류단 유출부의 계획홍수위. 둘째, 홍수범람경계의 제내지 표고. 셋째, 홍수범람 경계의 측점간 하도연장. 넷째, 상류단, 하류단에 적용된 조도계수. 다섯째, 상하류 유속차. 여섯째, 상하류 하상경사. 일곱째, 계획홍수위에 의한 월류단면적비 등이다. 여기서 독립변수로 선정된 인자 중 첫째부터 여섯째까지는 2차원 홍수범람 해석(HEC-RAS 5.0) 시기본적으로 사용되는 인자 값이며 일곱째 월류단면적비는 2.2 절에서 새로 제안된 변수이다. 종속변수는 월류체적의 감소율로 결정하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 공학적 판단에 의해 변수 간에 상호 영향요소가 있는 변수들을 모두 배제하여 최종 독립변수를 선정하였다. 대표적으로 유로경사는 유속에 영향을 미치고, 이는 상하류 수위차에 영향을 미치므로 독립변수에서 제외하였다. 이를 통해 최종 독립변수는 조도계수, 상하류 수위차, 월류단면적 비, 홍수량, 비유량으로 선정하였다(Fig. 5).

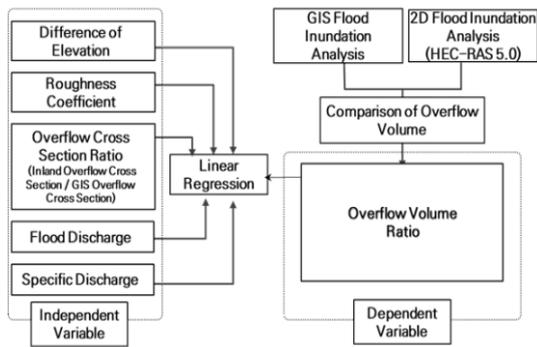


Fig. 5. Regression Model

2.5 2차원 홍수해석 대상 하천 선정

본 연구에서는 기존 연구(2017년 「홍수위험지도 기본 계획 보완용역」)를 통해서 GIS 홍수범람해석과 2차원 홍수범람해석 결과를 비교한 사례(곡교천, 무한천)를 수집하였다(Fig. 6, Fig. 7).



Fig. 6. Gokgyo-River(Asan District)

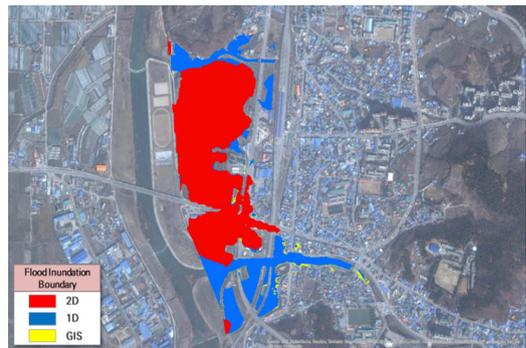


Fig. 7. Muhan-River(Yesan District)

또한 추가적으로 기존 홍수지도 작성 구간 중 21개 하천의 홍수지도 경계(저류형 제내지)를 선정하여 선정된 홍수지도 경계의 계획홍수위에 부합되는 상하류 경계조건을 부여하여 2차원 홍수범람해석 (HEC-RAS 5.0 : 부정류해석)을 실시하였다. 2차원 홍수범람해석을 위해 대상지 선정에 적용한 조건은 다음과 같다. 첫째, 유제부 구간의 2차원 홍수범람해석 시 월류조건은 편안 무제부 조건을 적용하였다. 둘째, 제내지의 형상은 저류형 제내지로 한정한다. 셋째, 2차원 홍수범람해석 시 상류의 제내지 유입량이 하류의 제내지 유입량에 영향을 최소화하기 위해 유로형상이 비교적 직선인 구간을 선정하였다. 넷째, 배수위 영향구간 및 합류구간은 제외하였다. 각 구간의 2차원 홍수범람해석 결과는 GIS 홍수범람해석 결과와 중첩하여 도면으로 표시하였으며(Fig. 8), 각각의 월류체적은 각각의 제내지 월류면적과 제내지 지형정보를 이용하여 별도로 산정하여 표로 정리 하였다.

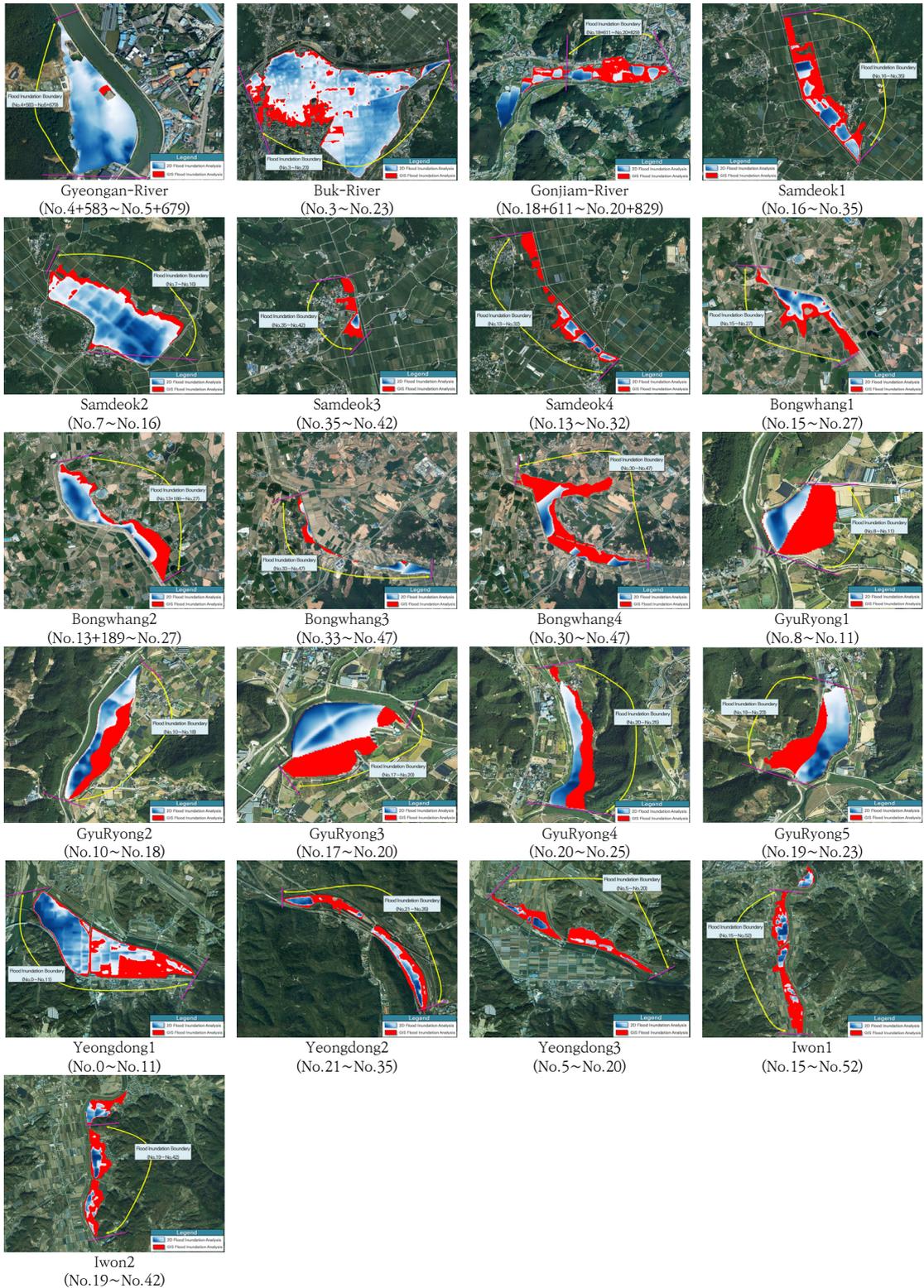


Fig. 8. 2D Analysis Result by Target Area

3. 연구결과 및 고찰

3.1 월류체적 영향인자 정리 및 월류체적 감소율 산정

각 구간의 GIS 홍수범람해석에 의한 방법과 2차원 홍수범람해석에 의해 산출된 홍수범람 경계의 월류체적을 QGIS(Ver 3.12 Bucuresti)를 이용하여 산정하고 각 구간의 월류체적 감소율을 계산하였다(Table 1) Table 1의 결과에 의하면 2차원 홍수범람 해석에 의한 월류체적이 GIS 홍수범람해석에 의한 결과에 비해 낮게 나타났으며 이에 따라 월류체적 감소율은 최소 5.9%에서 최대 64.8% 범위로 나타났다. 이러한 월류체적 감소율이 차이가 나는 원인은 다양한 요인이 있으나 기본적으로 제내지의 지형특성 및 상하류단 경계조건 등에 따라 시간에 따른 유수의 2차원 흐름이 작게 확산될 경우 월류체적 감소율을 크게 나타나고 유수의 흐름이 크게 확산될 경우는 그 값은 작게 나타나기 때문에 판단된다. 월류체적 영향인자(상하류 수위차, 조도계수, 월류단면적비, 설계홍수량, 비유량)정리한 표는 Table 2와 같다.

Table 1. 2D Inundation Analysis Comparative Result

No	River Section	GIS Overflow Volume (m ³)	2D Overflow Volume (m ³)	Overflow Volume Decrease Ratio (%)
1	Gokgyo	2,717,376	1,972,698	27.40
2	Muhan	567,466	217,175	61.73
3	Gyungan	199,207	187,426	5.91
4	Buk	7,087,047	5,701,121	19.56
5	Gonjiam	410,980	155,595	62.14
6	Samdeok1	463,614	379,330	18.18
7	Samdeok2	2,497,211	1,881,582	24.65
8	Samdeok3	41,877	20,815	50.30
9	Samdeok4	206,954	115,838	44.03
10	Bongwhang1	363,577	283,748	21.96
11	Bongwhang2	563,768	395,435	29.86
12	Bongwhang3	276,109	204,531	25.92
13	Bongwhang4	897,207	608,021	32.23
14	GyuRyong1	107,364	46,826	56.39
15	GyuRyong2	428,076	245,077	42.75
16	GyuRyong3	144,204	105,006	27.18
17	GyuRyong4	325,551	162,124	50.20
18	GyuRyong5	369,263	248,512	32.70
19	GyuRyong1	1,946,728	977,548	49.79
20	GyuRyong2	473,403	319,647	32.48
21	GyuRyong3	482,177	294,653	38.89
22	Iwon1	652,313	306,587	53.00
23	Iwon 2	314,253	141,954	64.83

Table 2. Analysis of Influencing Factor

No	River Section	Independent Variable					Dependent variable Overflow Volume Decrease Ratio (%)
		Difference of Elevation (m)	Roughness Coefficient	Overflow Cross Section Ratio	Design Flood Discharge (m ³ /s)	Specific Discharge (m ³ /s)	
1	Gokgyo	3.66	0.033	0.0051	1,860	3.80	27.40
2	Muhan	0.98	0.033	0.0024	1,785	4.09	61.73
3	gyungan	2.00	0.030	0.0087	1,790	8.50	5.91
4	buk	8.85	0.031	0.0098	760	6.08	19.56
5	Gonjiam	13.89	0.036	0.0022	510	13.25	62.14
6	Samduk1	2.07	0.031	0.0064	63	8.29	18.18
7	Samduk2	0.59	0.031	0.0088	77	13.21	8.63
8	Samduk3	3.94	0.031	0.0011	63	8.29	50.30
9	Samduk4	1.76	0.031	0.0041	63	8.29	44.03
10	Bongwhang1	3.16	0.030	0.0058	1,245	5.06	21.96
11	Bongwhang2	3.41	0.030	0.0059	1,245	5.06	29.86
12	Bongwhang3	22.30	0.030	0.0052	950	6.11	25.92
13	Bongwhang4	24.93	0.030	0.0050	950	6.11	32.23
14	GyuRyong1	3.74	0.032	0.0040	340	9.78	56.39
15	GyuRyong2	10.18	0.032	0.0008	340	9.78	42.75
16	GyuRyong3	6.20	0.032	0.0050	340	10.92	27.18
17	GyuRyong4	6.47	0.032	0.0022	340	10.92	50.20
18	GyuRyong5	5.47	0.032	0.0042	340	10.92	32.70
19	GyuRyong1	3.97	0.030	0.0043	260	7.06	49.79
20	GyuRyong2	7.73	0.030	0.0048	209	8.04	32.48
21	GyuRyong3	9.93	0.030	0.0034	260	7.06	38.89
22	Iwon1	20.59	0.033	0.0037	258	11.31	53.00
23	Iwon2	12.30	0.033	0.0018	258	11.31	64.37

3.2 홍수범람해석 결과 분석

본 연구에서는 월류체적 영향인자를 이용하여 홍수범람해석결과를 다음과 같이 분석하였다. 첫째, GIS 홍수범람해석 당시의 제내지의 표고와 구간연장에 대한 월류단면적, 상하류 계획홍수위간의 차이, 조도계수, 해당지점을 포함하는 설계홍수량, 비유량 등을 독립변수로 월류체적의 감소율을 종속변수로 한 다중선형회귀분석을 수행하였다. 둘째, 다중회귀분석에 의해 독립변수와 종속변수 간의 상관계수를 유의확률을 이용하여 통계적으로 의미 있는 변수를 선정하였다(Table 3). 셋째, 선정된 변수를 이용하여 단일 선형회귀분석을 수행한 후, 유의확률을 고려하여 선형회귀식을 산정하였다. 월류체적 영향인자 간의 통계분석은 SPSS(Statistics 22.0)을 사용하였다.

Table 3. Correlation Coefficient

Coefficient		①	②	③	④	⑤	⑥
Person	①	1.000	-0.827	0.135	0.579	-0.300	0.287
	②	-0.827	1.000	-0.191	-0.454	0.275	-0.190
	③	0.135	-0.191	1.000	0.095	-0.074	0.087
	④	0.584	-0.454	0.095	1.000	-0.029	0.466
	⑤	-0.300	0.275	-0.74	-0.029	1.000	-0.656
	⑥	0.287	-0.190	0.087	0.466	-0.656	1.000
P	①	-	0.000	0.270	0.002	0.082	0.092
	②	0.000	-	0.192	0.015	0.102	0.193
	③	0.270	0.192	-	0.333	0.368	0.346
	④	0.002	0.015	0.333	-	0.448	0.013
	⑤	0.082	0.102	0.368	0.448	-	0.000
	⑥	0.092	0.193	0.346	0.013	0.000	-

① Overflow Volume Decrease Ratio
 ② Overflow Cross Section Ratio
 ③ Difference of Elevation (m)
 ④ Roughness Coefficient
 ⑤ Design Flood Discharge (m³/s)
 ⑥ Specific Discharge (m³/sec/km²)
 ※ p : Significance Probability

다수의 독립변수와 단일 종속변수 간의 다중회귀분석을 수행한 결과는 다음과 같다(Table 4).

Table 4. Multiple Linear Regression Analysis

Statistical Model	Unstandardized coefficient		p	Multicollinearity	
	B	Stand error		Tolerance	VIF
Constant	-0.476	0.547	0.397		
Overflow Cross section Ratio	-42.872	10.229	0.001	0.612	1.635
Difference of Elevation	-0.001	0.003	0.844	0.960	1.042
Roughness Coef.	36.217	18.966	0.073	0.440	2.274
Design Flood Discharge (m ³ /s)	-5.216	0.000	0.336	0.373	2.684
Specific Discharge (m ³ /s/km ²)	-0.007	0.012	0.574	0.318	3.140

※ B : Standardized Regression Coefficient
 ※ VIF : variance inflation factors

Table 5. Summary of Statistical Model

Statistical Model	R ²	Modified R ²	Stand error
1	0.683	0.668	0.090

※ R² : coefficient of determination

Table 6. Linear Regression of Overflow Cross Section Ratio and Overflow Volume Decrease Ratio

Statistical Model	B	Standardized coefficient	p
		Stand error	
Constant	0.623	0.048	0.000
Overflow Cross section Ratio	-55.031	8.176	0.000

Table 4에 의해 공차 값은 0.612, 0.960, 0.440, 0.373, 0.318로 나타났으며 이는 모두 공차한계인 0.1보다 높고 VIF는 모두 10보다 작으므로 다중공선성 문제가 없는 것으로 나타났다. 즉 각 독립변수들 간에는 상호 영향력이 없으므로 다중선형회귀 분석 결과는 통계적으로 신뢰할 수 있다. 또한 월류단면적 비와 조도계수가 월류체적 감소율과 상관성을 가지는 것이 통계적으로 유의미한 것으로 나타났으며(p<0.05), 각각의 상관계수는 -0.827과 0.579로 나타났다. 또한 선형회귀 분석 결과 상하류 수위차는 0.844, 조도계수는 0.073, 홍수량은 0.336, 비유량은 0.574가 나왔으므로 이는 유의확률 조건(p<0.05)을 초과하므로 이 독립변수들은 통계적으로 의미가 없으므로 선형회귀식에서 모두 배제하였다(Table 3). 통계적으로 의미 있는 변수들인 월류단면적 비와 월류체적 감소율을 각각 독립변수 및 종속변수로 하는 단일 선형회귀분석을 수행하면 Table 5와 Table 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. Table 5(모형 요약 표)에 의하면 모형의 결정계수(R²)는 0.668로 분석되었다. 선형회귀 분석결과 선형 회귀식은 Y축 절편이 0.623이고 기울기 계수는 -55.031으로 아래의 식과 같다(Table 6).

$$V_r = 0.623 - (55.031 \times F_s) \quad (1)$$

여기서 V_r : 월류체적 감소율(추정), F_s : 월류단면적 비

즉 위와 같은 회귀식에 의해 GIS 홍수범람해석에 의해 작성된 홍수범람구역의 월류단면적 비를 알면 그 구간의 월류체적의 감소율을 추정할 수 있으며 이 감소율을 기존의 GIS 월류체적에 적용할 경우 월류체적을 조정할 수 있다. 월류단면적 비와 월류체적 감소율의 선형회귀관계를 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다.

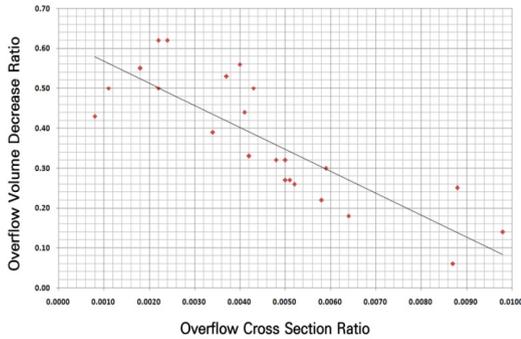


Fig. 9. Graph of Overflow Cross Section Ratio and Overflow Volume Decrease Ratio

이에 따라 하천기본계획 수립 보고서에서 구간별 계획 홍수위와 제내지 표고를 이용해 월류단면적 비를 구한 후 선형회귀식(이하 조정산식)에 적용하면 해당 구간의 월류체적 감소율을 추정할 수 있다. 즉, GIS 홍수범람해석에 의해 작성한 홍수범람 경계를 2차원 홍수범람해석 해석을 수행하지 않고서도 2차원 홍수범람해석을 수행한 것과 유사한 결과를 얻을 수 있다.

3.3 조정산식의 검증

3.2절에서 산출된 조정산식을 검증하기 위해 기존 GIS 홍수범람해석으로 홍수지도가 작성된 하천에 조정산식을 적용하여 그 결과를 검증하였다. 검증 절차는 다음과 같다. 첫째, 홍수지도 제작구간의 동일하천에 대한 두개의 구간을 선정하였다(Fig. 10). 둘째, 각 구간에 대한 GIS 월류체적과 구간연장에 대한 월류단면적을 지형도면에서 추출하였다(Table 7). 셋째, 동일 강우시나리오를 적용하여 각각에 대한 2차원 홍수범람해석을 개별로 실시하여 각각의 월류체적을 산정하였다(조도계수 0.03 적용). 넷째, 3.2절에서 산정한 조정산식을 이용하여 추정 월류체적 감소율을 계산하였다. 다섯째, 추정 월류체적 감소율과 계산된 월류체적 감소율을 비교하였다.

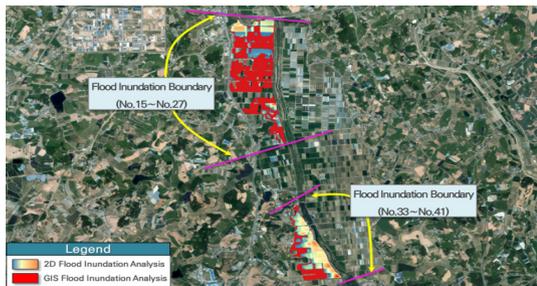


Fig. 10. Target Area for Linear Regression Verification

검증을 위한 대상구간은 전라남도 나주시에 위치한 만봉천 구간으로써 설계빈도 80년 빈도의 홍수지도가 제작된 지방하천 구간이다. 대상 구간 1은 좌안부 No.15~No.27사이 구간이며 구간연장은 1,200 m이고 월류단면적 비는 0.00121 이다. 대상 구간 2는 좌안부 No.33~No.41 사이 구간이며 구간연장은 800 m이고 월류단면적 비는 0.00454이다(Table 7).

Table 7. Characteristic Factor of Verification Section

Verification Section	length (m)	Overflow Cross section Ratio	Overflow Volume(m ³)		Overflow Volume Decrease Ratio (%)
			GIS Overflow Volume	2D Overflow Volume	
Manbong1	1,200	0.00121	376,548	71,904	81
Manbong2	800	0.00454	425,460	224,561	47

특성인자(월류단면적비, 월류체적 감소율)를 조정산식에 적용하여 추정된 월류체적 감소율과 2차원 홍수범람해석에 의해 계산된 월류체적 감소율을 비교한 결과는 Table 8과 같다. 여기서 추정 월류체적 감소율은 조정산식에 의해서 산정된 결과이다.

Table 8. Comparison of Overflow Volume Decrease Ratio

Verification Section	Difference of Elevation (m)	Overflow Cross section Ratio	Estimate Overflow Volume Decrease Ratio (%)	Measured Overflow Volume Decrease Ratio (%)	Deviation (%)
Manbong1	2.31	0.00121	76	81	5
Manbong2	5.02	0.00454	32	47	15

조정산식을 적용한 결과 만봉천 구간1의 추정 월류체적 감소율은 76%이며 2차원 홍수범람해석을 통해 계산된 월류체적 감소율은 81%이다. 만봉천 구간2의 월류체적 감소율은 32%이며 2차원 홍수범람해석을 통해 계산된 월류체적 감소율은 47%이다. Table 8에서와 같이 조정산식을 통해 산출된 월류단면적비(추정 월류체적 감소율)와 2차원 홍수범람해석을 통해 계산된 월류체적 감소율의 차이는 5%~15% 정도로 나타나고 이는 조정산식을 통해 추정된 월류체적 감소율이 계산된 월류체적 감소율과 크게 편차가 나지 않는 것으로써 향후 분석사례를 좀 더 확대하여 조정산식을 보완하면 해결될 수 있을

것으로 판단된다. 또한 상하류 수위차에 따라 편차가 다소 높아지는 결과가 나타났는데 이것도 조정산식의 분석 사례가 23개 정도이므로 이에 따른 국소적 오류라고 판단되며 수리학적으로는 상하류 수위차에 의해 발생하는 유속편차가 월류체적 감소율에 직접적 영향을 미치지 않으나 추정값과 계산값의 편차에는 부분적으로 영향을 미치는 인자로 해석될 수 있다.

3.4 분석 결과의 해석

3.3절에서 도출된 결과를 종합하여 볼 때 월류단면적 비가 클수록 월류체적 감소율이 작아지는 결과가 나타났다. 이는 다음 두 가지 요인으로 해석이 가능하다. 첫째, 월류단면적의 크기에 따라 제내지로 월류되는 유량이 증가되거나 또는 감소됨으로써 전체적인 홍수범람경계가 변동하게 되는 공간적 요인, 두 번째, 하도 내 유하량이 배제되고 제내지 월류시간 간격(수위가 상승하여 제내지 월류가 발생하는 시간과 수위가 하강하여 월류가 종료되는 시간의 차이)의 차이에 의한 시간적 요인 등이다. 즉 Fig. 11과 같이 월류 단면적 높이 H_1 이 H_2 보다 높으므로 제내지 월류량 Q_1 이 Q_2 보다 크게 되고 제내지 월류시간 간격 T_{delta1} 이 T_{delta2} 보다 크게 됨으로써 전체적으로 제내지에 저류되는 총 유량이 증가되는 결과로 해석할 수 있다. 즉 월류단면적 비가 클수록 월류량이 많아지고 이는 2차원 홍수범람해석 시 제내지의 월류 유량이 증가되는 결과와 동일하게 해석이 가능하다. 2차원 홍수범람해석의 월류체적이 크다는 것은 상대적으로 GIS 월류체적에 비해 감소율이 작다는 것을 의미한다.

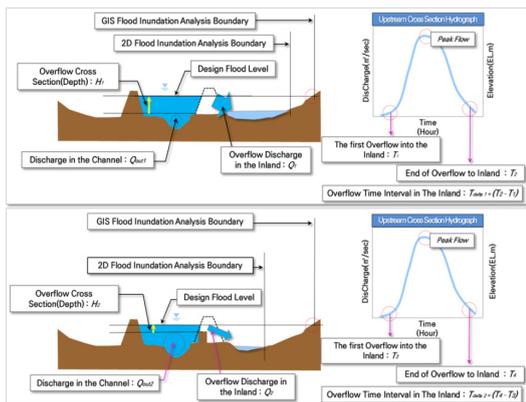


Fig. 11. Analysis of Overflow Cross Section Ratio and Overflow Volume Decrease Ratio

4. 결론

본 연구에서는 기존 GIS 홍수범람해석으로 결정된 계획홍수위 기반의 홍수범람경계를 개선하기 위해 기존 GIS 홍수범람해석으로 결정된 GIS 월류체적과 2차원 홍수범람해석으로 결정된 월류체적을 비교하여 그 변화율에 영향을 미치는 특성인자와 인자간의 관계를 정립하였으며 23개 대상 지구에 대한 각각의 홍수범람해석 결과를 비교분석하여 월류체적의 감소율에 영향을 미치는 조정산식을 산출하였다. 또한 산출된 조정산식을 만봉천의 2개 지구에 대해 검증하였다. 이러한 연구수행 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 기존 GIS 홍수범람해석에 의한 해석결과와 2차원 홍수범람해석을 비교하기 위해서 기존 홍수지도 제작 사업을 통해 수행된 홍수범람경계에 대한 비교사례를 수집(2개 지점)하였으며 또한 21개 지점에 대한 2차원 홍수범람해석을 실시하여 기존의 GIS 홍수범람해석에 의해 작성된 홍수범람경계의 월류체적과 비교한 결과 2차원 홍수범람해석에 의한 방법이 GIS 홍수범람해석에 의한 결과보다 낮게 나타났으며 월류체적 감소율의 범위는 5.9~64.8% 정도로 나타났다.
2. 홍수범람경계와 직접적 관계를 갖는 월류체적에 영향을 미치는 인자를 선정하여 이에 대한 기하학적인 특성을 정의하였으며 월류체적과의 상관관계를 분석하기 위해 상하류 수위차, 조도계수, 월류단면적비, 홍수량, 비유량을 독립변수로 월류단면적 감소율을 종속변수로 정의하였다. 또한 홍수범람경계의 월류체적 감소율에 영향을 미치는 인자 값을 이용하여 다중선형회귀분석을 한 결과 여러 독립변수 중에서 월류단면적비가 월류체적 감소율에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이를 통해 GIS 홍수범람해석으로 작성된 홍수범람 경계의 월류체적을 조정하는 조정산식을 도출하였다.
3. 도출된 조정산식을 검증하기 위해 GIS 홍수범람에 의해 홍수지도가 작성된 하천에 적용한 결과 만봉천 구간1의 추정 월류체적 감소율은 76%, 2차원 홍수범람해석을 통해 계산된 월류체적 감소율은 81%로 약 5%정도의 차이가 나타났고, 만봉천 구간2의 추정 월류체적 감소율은 32%, 2차원 홍수범람해석을 통해 계산된 월류체적 감소율은 47%로 약 15%의 편차가 나타났다. 이러한 편차는 추정된

월류체적 감소율이 계산된 월류체적 감소율에 대체로 부합됨을 의미한다.

이러한 결과를 종합하여 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다. 기존 GIS 홍수범람해석에 의해 결정된 홍수범람 경계의 월류체적은 2차원 홍수범람해석에 의한 결과와 비교할 때 대부분 축소되는 방향으로 조정이 되어야 하는데 이러한 문제에 대해 본 연구에서 제시된 조정산식을 적용하는 할 경우 기존 홍수범람 경계가 과다 산정됨으로써 발생되었던 재난대응의 부담증가, 풍수해 보험료의 증가 등의 문제에 합리적인 대처가 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서 분석한 홍수범람 경계의 사례가 23개로 제한되었으므로 이를 통해 산출된 조정산식을 일반화하기에는 많은 한계가 존재 한다. 둘째, 제내지의 다양한 유수의 흐름특성(유하형, 확산형 저류형)중 본 연구에서는 저류형 제내지만을 적용하였으며 하천 본류의 유수의 흐름도 비교적 선형인 구간만을 선정하였다. 이를 보완하기 위해서는 홍수범람 경계의 비교사례수집 및 2차원 홍수범람해석을 확대 하여 조정산식의 조정이 필요하며, 홍수범람 제내지의 선형특성, 지형특성, 유수의 흐름특성 등을 모두 유형화 한 후 각 유형에 대한 세부적인 분석을 할 필요가 있다.

References

- [1] Ministry of Environment, Flood Risk Map Basic Plan Report, Korea, 2017.
- [2] National Emergency Management Agency, A Study on How to Create Storm And Flood Damage Insurance Management Map, Korea, 2008.
- [3] E. S. Lee, *1D, 2D interpretation of stream flooding by HEC-RAS and TELEMAR-2D*, Kyungpook National University, Ph.D Dissertation, Korea, 2016.
- [4] C. H. Lee, T. G. Lee, "Evaluation of an Applicability of HEC-RAS 5.0 for 2-D Flood Inundation Analysis", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.17, No. 4, pp.726-733, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.726>
- [5] S. M. Jun, J. H. Song, S. K. Choi, K. D. Lee, M. S. Kang, "Combined 1D/2D Inundation Simulation of Riverside Farmland using HEC-RAS", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol.60, No. 5, pp.135-147, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.5.135>

심 규 성(Gyoo-Seong Sim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 성균관대학교 물리학과 학사
- 2015년 8월 : 아주대학교 건설교통공학과 석사 (수자원공학)
- 2021년 8월 : 아주대학교 건설교통공학과 박사 (수자원공학)
- 1994년 6월 ~ 현재 : 동부엔지니어링(주) 기술연구소 전무

<관심분야>

수자원공학, 하천공학, GIS, 홍수예보

정 순 찬(Soon-Chan Jung)

[정회원]



- 1994년 2월 : 경희대학교 토목공학과 학사
- 2015년 8월 : 아주대학교 건설교통공학과 석사 (수자원공학)
- 2022년 8월 : 아주대학교 건설교통공학과 박사 (수자원공학)
- 1994년 6월 ~ 현재 : 동부엔지니어링(주) 수자원본부 전무

<관심분야>

수자원공학, 하천공학

임 동 화(Dong-Hwa Lim)

[정회원]



- 2014년 8월 : 아주대학교 건설시스템공학과 학사
- 2016년 8월 : 아주대학교 건설교통공학과 석사 (수자원공학)
- 2015년 8월 ~ 현재 : 동부엔지니어링(주) 수자원본부 과장

<관심분야>

수자원공학, 하천공학, GIS

신 희 재(Hee-Jae Shin)

[정회원]



- 2017년 2월 : 아주대학교 건설시스템공학과 학사
- 2019년 2월 : 아주대학교 건설교통공학과 석사 (수자원공학)
- 2021년 2월 ~ 현재 : 동부엔지니어링(주) 기술연구소 대리

〈관심분야〉

수자원공학, 하천공학, GIS