

# 강변저류지 홍수저감능력 평가를 위한 동역학적 1-2차원 연계모형의 개발



최 성 열 |

(주)한국방재안전기술원 대표이사  
ceo@dpsi.or.kr



마 성 호 |

(주)경화엔지니어링 수자원부 상무  
shmah01@naver.com

## 1. 강변저류지를 둘러싼 현황

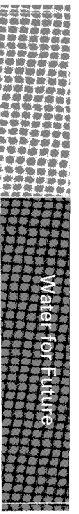
본 원고는 2006년도부터 시작된 “자연과 함께하는 하천복원 기술개발단(에코리버21 연구사업단)”의 연구과제 중, 제2세부과제인 “생태강변저류지 조성기술개발”의 일환으로 강변저류지의 홍수저감능력을 평가할 수 있는 하도, 월류제, 강변저류지, 유입구 및 유출구를 연계모형을 개발하고, 강변저류지의 월류제 및 저류지를 설계·시공하기 위한 기술기준을 제공하는 연구성과 중, 일부를 발췌한 것이다.

우리나라에서 “강변저류지”란 단어가 알려지기 시작한 것은 유역종합치수계획이었으며, 해당 계획의 홍수분담계획에 있어서 강변저류지는 유역의 중상류지역에서 기존의 홍수터를 활용하여 홍수의 침

투를 저류시킴으로서 큰 시설부담 없이 일정 홍수 조절효과를 얻을 수 있는 매우 자연친화적 시설로서 큰 조명을 받았었으나, 그 효과에 대한 정량적 평가가 어려웠던 이유로, 강변저류지가 갖는 장점이 크게 부각되지 못했었다. 그러한 예로서 한탄강 홍수조절 문제, 낙동강살리기사업 등에서 당초 계획했던 강변저류지 계획이 백지화 되는 것 등을 들 수 있을 것이다.

그리고 강변저류지의 설계에 있어 가장 중요한 것은 홍수저감능력에 대한 평가이며, 이는 전적으로 월류제의 위치, 길이, 높이에 의존하게 되나, 현재 우리나라에서 이에 대한 정확한 평가를 수행한 후에 설계에 임하는 것은 에코리버21 사업단에서 지원하는 시범저류지인 청미천 강변저류지가 유일한 것으로 알려져 있으며, 그 외에 서너 군데에서 강변저류지의 설계가 계획/진행되고 있는 것은 설계에 대해서는 정확한 정량적 평가가 수행되었는지에 대해서는 확신할 수 없는 실정이다.

그렇다면 기술자들이 왜 강변저류지가 갖는 홍수 조절능력 평가에 대해 확신을 갖지 못하는가? 라는 점을 살펴보아야 하며, 후술하겠지만 결론을 말하자면 하천-월류제-저류지를 연계하는 물의 흐름을 현실성 있게 모의할 수 있는 방법이 현재로서는 없기 때문이라 할 수 있다. 현재 설계현장에서는 단지 하천 수위에 따른 제내지로의 범람가능량을 수위-저류량곡선에 대응시켜 결정하는 매우 단순한 방법



으로 접근하고 있으나, 이는 하도-월류제-제내지 상호간의 물의 이동에 대한 명확한 근거를 제시하지 못하는 한계성을 갖고 있기 때문이라 할 수 있다.

따라서 2006년 당시, 이러한 문제를 극복하고, 저비용-친환경적 강변저류지 설계 및 시공에 필요한 기술기준을 제공하고, 강변저류지의 홍수저감능력을 수리동역학적으로 평가할 수 있는 모형의 개발을 목표로 본 연구가 개시되었으며, 현재 4차 연도를 맞이하고 있으며, 해당 연구는 현재 연계모형은 거의 완성단계에 있으며 앞으로는 해당 연계모형의 GUI 개발이 최종과제로 남아 있는 실정이다.

## 2. 일본 강변저류지 현황

본 연구에서 대상이 되는 강변저류지는 하천 제방의 일부를 낮춰서 하도의 홍수를 저감시키는 형식의 저류지로서 이러한 저류지가 많이 운영되고 있는 사례로는 일본의 저류지를 들 수 있다. 그런 관계로 주로 일본의 저류지에 대한 현황조사가 실시되었으며, 이를 위해 2007. 2. 21에서 2007. 2. 24까지 3박 4일간의 일본 현지조사를 실시했으며, 아래는 이에 대해 요약 정리한 내용이다.

특히 주목해 볼 만한 특기사항으로서 저류지 규모 및 월류제의 피복 및 천단고 결정방식을 들 수 있으며, 저류규모로서는 작게는 100만톤에서 많게는 2억톤의 규모를 갖고 있다는 것이다. 이것은 거의 중규모 댐의 저류능력과 맞먹는 것으로 우리나라에서 그와 같은 규모의 강변저류지를 건설할 수 있는 가능성에 대해서는 많은 이견이 있을 수 있지만, 강변저류지가 홍수조절 능력이 약하다라는 명제는 맞지 않는다는 것을 반증할 수 있는 내용이기도 하다.

또한 홍수저감능력에 가장 직접적으로 영향을 미치는 인자가 월류제의 천단이라 할 수 있으며, 이러한 천단의 높이를 어떻게 결정하는가를 정리한 것

이 표1.이며, 해당 표를 살펴보면 알 수 있듯이, 특별한 결정기준이 있는 것이 아니라 여러 가지 수리적 분석을 통하여 해당 지형과 월류제의 특성에 가장 적합한 높이를 결정하고 있다는 점이다.

- 방문지: 아라카와(荒川) 제1조절지  
요코하마(横浜)국립경기장 조절지  
와타라세(渡良瀬) 우수지  
다나카(田中) 조절지

## 3. 홍수저감효과 평가를 위한 수리동역학적 1-2차원연계모형의 개발

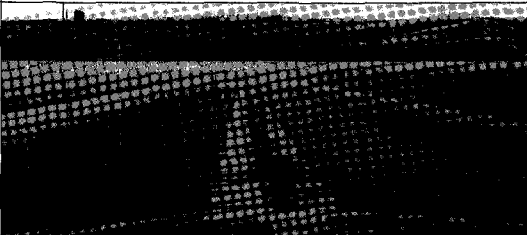
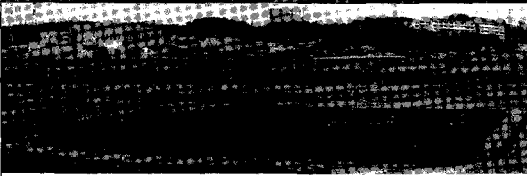
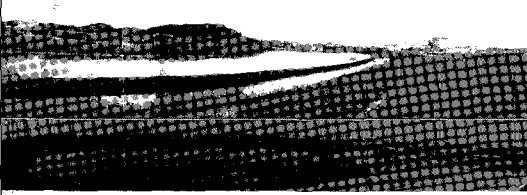
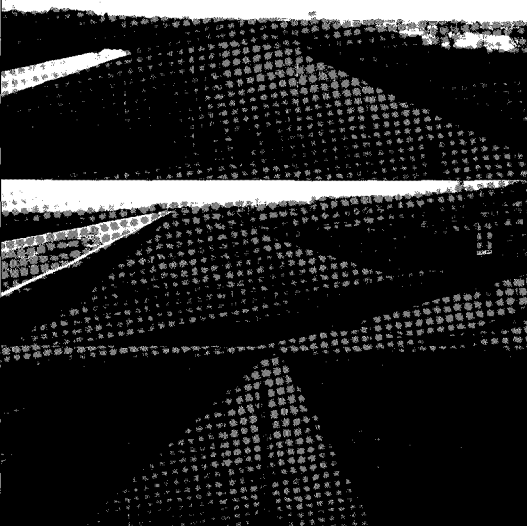
강변저류지의 입지 선정 뿐 만아니라 저류지의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 저류지가 갖는 홍수조절능력에 대한 정량적인 파악이라 할 수 있다. 이러한 능력검토를 위해서는 수문학적·수리학적 다양한 방법을 적용할 수 있으며, 홍수시 하천유황의 변화에 기여하는 정도를 파악하도록 하는 것이나, 궁극적으로는 저류지에의 저류로 인한 홍수시 침투유량의 저감효과가 가장 중요한 검토 사항이 될 것이다.

홍수시 침투유량의 저감효과를 분석하기 위해 검토해야 할 중요한 2가지 사항은 본천과 저류지를 동시에 연계하는 모형 종류의 선택과 월류부에 있어서의 월류량 산정식의 선택이라 할 수 있다.

표 1. 일본의 강변저류지의 현황조사

유수지명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	하천연장 (km)	저류지 규모	공사기간
와타라세 우수지	2,621	107	2280 ha, 2억톤	1963 - 1990
요코하마 국립경기장 조절지	235	42	100 ha, 390만톤	1985 - 2003
아라카와 제1조절지	2,940	173	118 ha, 111만톤	1977 - 1996
다나카 조절지	16,840	32.2	1175ha, 6100만톤	1946 - 1965

표 2. 월류부 피복형식 및 월류제 천단고 결정 방법

유수지명	월류부 피복형식	월류제 천단고 결정법
와타라세 유수지		하류부의 토네가와 합류에 영향을 전혀 주지 않도록 하여, 합류부의 홍수위에 대한 배수위를 끌고 올라와서 월류제의 천단고를 결정
요코하마 국립경기장 조절지		유역종합치수계획에서의 할당량을 적용하여 월류제 높이를 결정
아라카와 제1조절지		하류 10km 지점의 경계수위 수면을 상류로 연장시켜 월류제 높이를 결정
다나가 조절지		저류지의 홍수조절용량을 얻을 수 있는 높이를 기준으로 월류제 천단고 결정

### 3.1 홍수저감 분석을 위한 모형의 비교분석

본천에서의 홍수침투의 저감 상황을 파악하기 위해서는 시간적으로 변하는 하천유황에 대한 검토가 필요하며, 이를 위해서는 본천과 이에 연한 저류지의 부정류적인 해석방법의 도입이 필수불가결하다.

따라서 본 연구에서는 본천과 이에 연한 저류지를 모형적으로 연계하여 해석하여야 하며, 이를 위한 수리학적인 방법을 열거하면 다음과 같다.

- ① 1차원 하도 모형과 저류지 수심-저류량 관계식 적용 모형 (HEC-RAS 등)
- ② 1차원 하도 부정류 모형에 연계된 2차원 저류지 유동모형 (본 연구에서의 개발)



표 3. 저류지 능력검토 및 유동해석을 위한 모형의 구분

구분	1차원 범용모형	1-2차원 연계모형	3차원 범용모형내용
내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>강변저류지 수리분석을 HEC-RAS의 Storage area 기능을 이용하여 평가하는 방법으로,</li> <li>하천단면의 측량자료를 이용하여 대상지역의 지형데이터를 구축한 후, 적지분석 결과,</li> <li>타당하다고 판단된 지역에 저류지 즉, Storage Area를 설치,</li> <li>강변저류지로 홍수량을 배분하기 위한 웨어나 수문 등을 적절히 가정하여 부정류해석을 실시하여 홍수량 배분을 유도</li> <li>저류지가 위주가 아닌 하도의 홍수량 저감에 초점</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>하도에 관한 1차원 부정류 모형과 제내지 범람원(저류지)에 관한 2차원 부정류 모형을 횡월류 모듈로서 연계하여 분석모형을 구축,</li> <li>저류지에 적합하다고 판단되는 지역에 저류지를 지형으로 묘사,</li> <li>하도로부터 저류지로의 월류현상을 물리적으로 묘사함으로써,</li> <li>상호 영향을 미치는 하도와 저류지 유형의 시간적 변화를 동시에 분석할 수 있는 방법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>하도 및 이에 연계된 저류지를 일괄하여 모의할 수 있도록 3차원 범용 모형을 적용장점</li> </ul>
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>설계용역에 가장 많이 사용되고 있는 범용 프로그램</li> <li>기존 하도자료 구축의 용이성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>하도 및 이에 연계된 저류지 유형을 비교적 상세히 파악 가능</li> <li>기존 하도자료 구축의 용이성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>저류지 유형을 매우 정확히 모의 가능</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>하도와 저류지 간의 유량배분이 물리적이 아님</li> <li>저류지내 유동해석을 할 수 없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>현재까지 범용화 된 프로그램이 거의 없어, 개발과 검증을 통한 범용화 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>계산을 위한 격자구성에 많은 시간이 소요</li> <li>계산 격자 및 연산 시간의 한계 등으로 긴 구간의 하도에는 적용 할 수 없음</li> </ul>

③ 3차원 유동모형 (FLOW3D 등)

3.2 수리동역학적 1-2차원연계모형의 구성

표 3.은 위에서 언급한 3가지 모형에 대한 비교 표로서 해당 표에서 알 수 있듯이 본 연구의 개발 취지 상, 저류지의 설치로 인한 하도 홍수량 저감효과 분석 및 저류지 내 유동 특성 파악 등이 가능하여야 하므로, 모형의 선택에 있어서는 상당 길이의 하도를 구축하여야 하며, 이 구간에 단일 또는 다중의 저류지를 구축하여야 하는 등의 조건을 감안한다면, 하기의 방법들에서 가장 적합하다고 판단되는 방법은 제2안인 1-2차원 연계모형이라 할 수 있다.

따라서 해당 연구에서는 하도 및 저류지 평가의 수리적 접근방법으로 하도에 관해서는 1차원 부정류 모형을 선택하고 저류지내 유동해석에 관해서는 2차원 부정류 모형을 그리고 이 둘 간의 연계를 위해서는 횡월류 모듈로 구성된 연계모형을 개발하기로 했다.

해당 연구에서 개발한 연계모형에 대한 구성을 정리하면 다음과 같다.

■ 월류부 유량산정식의 채택

산정식	적용변수	비고
Murita Akira 실험공식	수로폭, 위어길이, 월류수심	공식 적용한계 있음
De Marchi 유량계수공식	유량계수, 분류수심, 월류부 높이	다양한 유량계수식 제시
광정 횡월류공식	유량계수, 월류폭, 월류부 높이	측벽의 유무 구분
혼마 횡월류공식	월류폭, 상하류 수위, 유량계수	완전월류, 불안전월류
홍수재해지도 작성지침 공식	월류폭, 상하류 수위, 유량계수, 하상경사	월류 또는 파제 구분

■ 하도 및 강변저류지 부정류 모형의 구축

구분	하도 1차원 부정류 모형	저류지 2차원 부정류 모형
기초방정식	연속방정식 $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$	유체 연속방정식 $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\Delta t} M \Big _x^{x^{i+1}} + \frac{1}{\Delta y} N \Big _y^{y^{j+1}} = 0$
	운동방정식 $\frac{\beta}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha v^2}{2g} + \lambda h \cos \theta \right) = S_o - S_f$	2차원 Euler 운동방정식 $\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{\Delta x} u M \Big _x^{x^{i+1}} + \frac{1}{\Delta y} v M \Big _y^{y^{j+1}} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau x b}{\rho}$
이산화 방법	특성곡선표시를 사용하여 고정격자점법에 의한 차분식을 구성	공간에 대한 staggered 격자체제 및 시간에 대한 leap-frog 이산화 방법을 적용

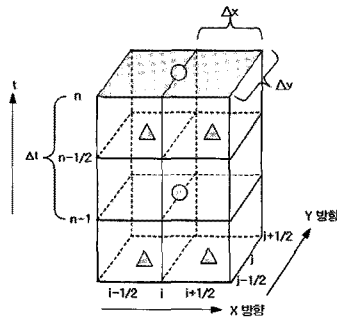


그림 1. 연속방정식의 이산화 격자 정의

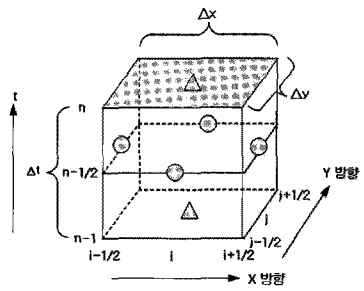


그림 2. 운동량방정식의 이산화 격자 정의

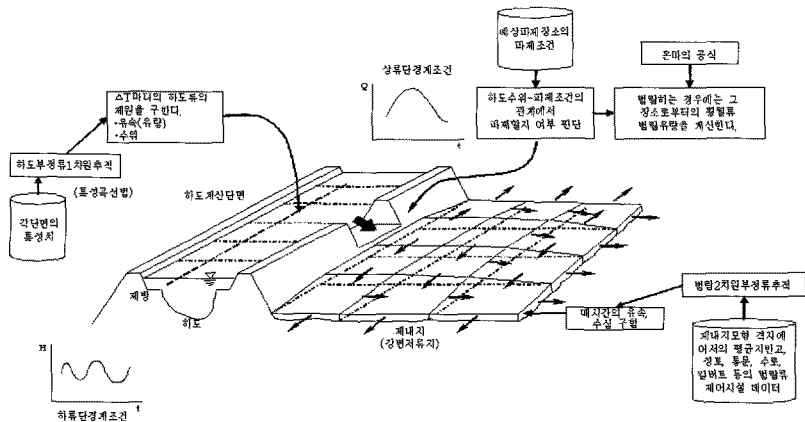


그림 3. 강변저류지 의사결정지원모형의 개념도

3.2 동역학적 1-2차원 연계모형의 적용

1-2차원 연계모형의 검증은 위하여 가상 하도 및 강변저류지를 설정, 이에 대한 하도 홍수와 및 저류지 범람유동 분석을 통해, 본 연구에서 개발하는 1-2 연계모형의 검증 수행하였으며, 세부 사항은 해당 연구단 기말 보고서를 통하여 확인할 수 있으며, 여

기서는 그 중 몇몇 주요 결과들만 기술하였다.

1) 월류량의 산정 및 방향성

그림 4.은 가상 월류부에 인접된 하도단면과 저류지 범람격자 사이의 수위변화와 이에 따른 범람 유 유동을 나타내는 것으로, 하도의 수위(노란색)가 제방고(푸른색)를 넘는 순간 제내지로서의 범람유량

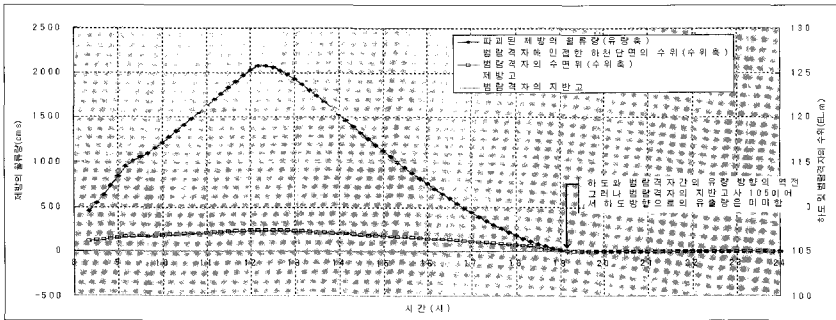
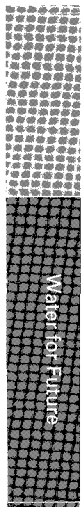


그림 4. 월류에 따른 월류량 거동 특성

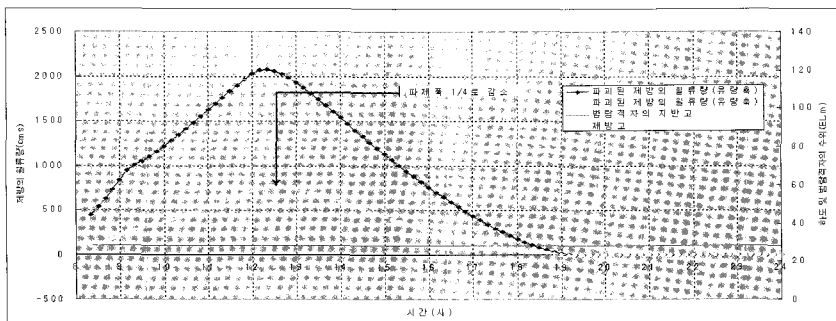


그림 5. 월류 길이 변화에 의한 월류량 변화 특성

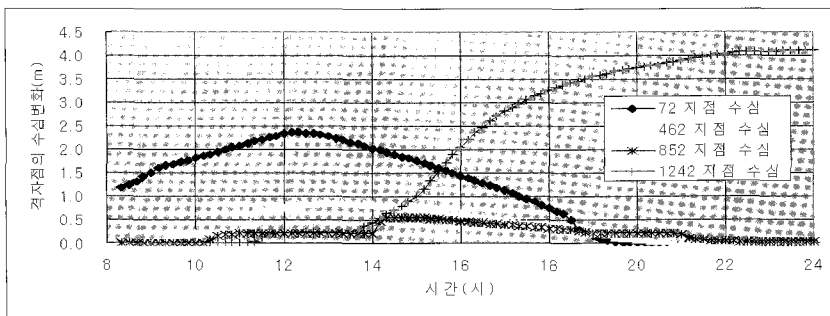


그림 6. 저류지 내 상하류 지점에 있어서의 침수심 시간변화

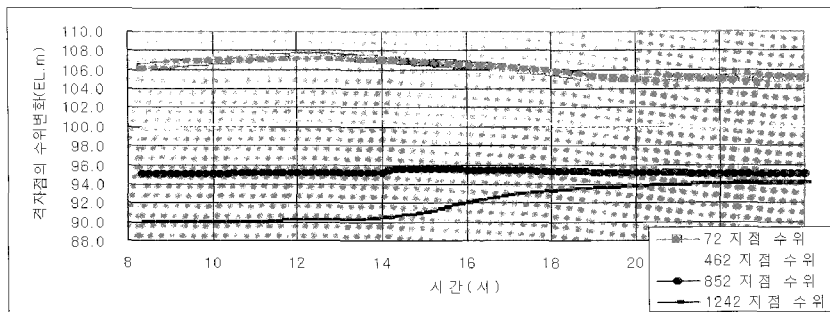


그림 7. 저류지 내 상하류 지점에 있어서의 침수위 시간변화

(파란색)이 발생하며, 범람격자의 지반고가 하도 및 주위의 범람격자 보다 높은 관계로 해당 범람격자에서의 수심이 크게 증가하지는 않으며, 하도의 수위와 해당 범람격자의 수위가 19시를 전후해서 역전(제내지에서 하도로 유출이 발생하는 현상)하나, 수위차가 미미한 관계로 눈에 띄는 현상은 보이지 않는다. 그러나 값으로서는 “-” 값을 나타내고 있어, 하도 수위- 저류지 격자 수위 간의 차에 의한 월류부 월류량의 거동특성이 매우 잘 나타나고 있어, 월류부 월류량 산정을 위한 모듈이 제 기능을 하고 있다고 할 수 있다.

### 2) 월류길이의 대소에 의한 월류량의 변화

또한 그림 5.에서 알 수 있듯이 모형을 수행하기 위한 기타 모든 제원을 동일하게하고, 단지 월류연 길이를 1/4로 줄여서 월류량을 산정해 본 결과, 유량의 첨두가 월류길이의 경감비율과 유사하게 1/3으로 줄어들었으며, 첨두발생이 약간 지체되는 현상을 보이고 있으나, 전반적인 경향은 만족할 만한 것으로 판단된다.

### 3) 저류지의 범람유동 특성

저류지에서의 일반적인 유동특성은 범람수가 높은 표고에서 낮은 표고로 이동해 가면서 발생하는 제현상, 즉 월류부에서 멀리 있는 범람격자의 침수는 늦게 발생하며, 하류 지형이 계속적으로 낮은 폰

드형 지형에 있어서는 하류로 갈수록 최대침수심이 커진다는 점 등을 들 수 있다. 다음 그림은 이러한 범람 특성이 정확히 반영된 것으로 이들의 그림에서 본 연구에서의 개발 모형의 적정성을 파악할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 하도와 강변저류지 및 월류제 상호에서 연동되는 수리적 거동을 연계하여 모의할 수 있는 모형을 개발하는 것으로서, 본 모형을 설계하고자 하는 강변저류지에 적용함으로써 강변저류지 설계의 핵심인 월류제의 위치, 길이, 높이 및 형식을 결정할 수 있도록 하기 위한 것이다.

전술한 바와 같이 동일한 대상을 가상한 수리모형실험자료 등이 없어 아직 본 모형의 검증이 확인되지는 못했으나, 하도 내 수위 및 유량의 변화, 월류제 상의 유량의 변화, 그리고 강변저류지 내 범람수의 거동 특성 등에 대한 분석 결과, 어느 정도 모형의 신빙성이 확보된 것으로 사료되며, 이를 설계에 적용함으로써 저류지 설계에 유익한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되는 바이다. 🌀