



Accuracy Analysis of HEC-RAS for Unsteady Flow Simulation considering the Flow Pattern Variations over the Side-weir of Side-Weir Detention Basin

Kim, Sanghyuk^a · Yoon, Byungman^a · Kim, Dongsu^b · Kim, Seojun^{b*}

^aDept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-Do 449-728, Korea

^bDept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

Paper number: 15-078

Received: 23 September 2015; Revised: 11 November 2015 / 16 November 2015; Accepted: 16 November 2015

Abstract

Accurate quantitative assessment of flood control effect of side-weir detention basin as a flood countermeasure was highly required, in which one-dimensional HEC-RAS model has been widely utilized in practice. When the submerged overflow occurred particularly driven by limited storage capacity of a given detention basin, HEC-RAS model could not be sufficiently applicable by guaranteeing acceptable accuracy without reliable benchmark dataset. From this perspective, a dedicated unsteady experiment was planned and carried out to physically realize such submerged overflow for accommodating better accuracy. Subsequently, the experimental results were applied to validate and calibrate HEC-RAS unsteady modeling to provide flood control effect of the detention basin for various inflow scenarios. After following this procedure, the modelled results indicated that there appeared within -5% of difference in stage height and maximum 2.4% accuracy to assess the flood control effect, thereby ensuring the calibrated HEC-RAS unsteady model to be accurate with practically acceptable error range.

Keywords: HEC-RAS, unsteady flow experiment, side-weir detention basin, submerged overflow, error analysis

강변저류지 횡월류부의 흐름 형태 변화를 고려한 HEC-RAS의 하도 내 부정류 모의 정확도 분석

김상혁^a · 윤병만^a · 김동수^b · 김서준^{b*}

^a명지대학교 토목환경공학과, ^b단국대학교 토목환경공학과

요 지

강변저류지를 홍수방어대책에 포함시키기 위해서는 정확한 홍수조절효과 산정이 필요하며, 이를 위해 현재 실무에서는 1차원 부정류 수치모형인 HEC-RAS를 사용하고 있다. 그러나 강변저류지의 저류용량이 부족한 경우에 발생하는 잠긴 횡월류 흐름에 대해서는 HEC-RAS 부정류 수치모의의 정확도 분석이 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 직선수로에 강변저류지를 설치한 경우에 대하여 횡월류부의 다양한 흐름 형태를 재현할 수 있는 부정류 수리실험을 수행하였다. 또한 부정류 수리실험 결과를 이용하여 HEC-RAS 모형의 부정류 수치모의 결과의 정확도를 분석하여 하도 내 수위 오차 및 강변저류지의 홍수조절효과 산정 오차를 제시하였다. 분석 결과 횡월류부에서 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 경우에 대한 HEC-RAS의 수위 계산 결과는 최대 -5% 오차를 보였으며, 홍수조절효과 오차는 최대 2.4%로 나타나 HEC-RAS의 부정류 모의 결과가 비교적 정확한 것을 확인하였다.

핵심용어: HEC-RAS, 부정류 수리실험, 강변저류지, 잠긴 횡월류 흐름, 오차 분석

*Corresponding Author. Tel: +82-31-322-4971

E-mail: seojuny@paran.com (S. Kim)

1. 서론

최근 도시화와 집중호우 등으로 인해 유출량이 증가함에 따라 갑작스런 홍수가 발생할 경우 기존의 제방 위주의 홍수 방어는 외수위를 증가시켜 내수침수를 초래하는 등의 한계를 보이고 있다. 이에 유역 전반에 걸친 홍수방어대책으로 평수 시에는 다양한 목적으로 활용 가능하고, 홍수 시에는 홍수량의 일부를 저류하여 치수능력을 증대시킬 수 있는 강변저류지에 대한 관심이 높아지고 있다(Kim et al., 2012a). 강변저류지는 하천 또는 수로에 접한 제방의 일부를 낮추어 홍수량의 일부를 저류하는 방식으로 하도 내 흐름에 직접적인 영향을 미치므로 침투 홍수량 조절효과가 우수하고 그 효과가 즉시 나타나는 장점이 있다. 또한 비 홍수기에는 습지, 농경지, 생태공원 및 스포츠 시설 등으로 활용할 수 있어 여름철에 대부분의 강수가 집중되는 국내의 경우 비홍수기 강변저류지의 활용도는 충분한 가치가 있다고 할 수 있다(Baek et al., 2010). 이와 같이 강변저류지는 부지만 확보 된다면 큰 시설부담 없이 홍수방어 및 친환경적 목적의 공간으로 활용할 수 있는 시설로 알려져 있음에도 불구하고 홍수조절효과에 대한 정량적 평가 시 발생하는 불확실성 때문에 계획 단계에 머무르는 경우가 많았다. 따라서 강변저류지를 홍수방어대책에 적극적으로 포함시키기 위해서는 홍수조절효과에 대한 정량적 평가 방법의 수립이 반드시 필요하다(Kim et al., 2012a).

강변저류지 홍수조절효과를 분석하기 위한 연구는 크게 수치모의를 이용한 방법, 수리실험을 이용한 방법 그리고 현장 모니터링을 통한 방법으로 나눌 수 있다. 수치모의를 이용한 연구로는 Jun et al. (2010)이 준 2차원 부정류 계산모형을 개발하여 유량계수와 조도계수 변화에 따른 강변저류지 홍수 조절효과의 민감도 분석을 수행하였고, Ahn et al. (2008)은 수문학적 접근방법을 이용하여 강변저류지의 홍수조절효과를 산정하는 방법을 제시하고, 최적화 기법인 유전자 알고리즘과 연계하여 강변저류지의 최적 위치 결정을 위한 모형을 개발한 사례가 있다. 그리고 Baek et al. (2009)은 강변저류지의 홍수조절효과를 최대화 할 수 있는 최적 위치 및 최적 월류고를 동시에 결정할 수 있는 모형을 개발하였다. 이와 같이 수치모의를 통해 강변저류지의 홍수조절효과를 분석한 연구들이 다수 있었지만 분석 결과에 대한 검증이 이루어지지 않았다는 한계가 있다. 이에 수치모형의 검보정 자료 제공 등을 목적으로 최근 부정류 수리실험을 이용한 강변저류지 홍수조절효과 산정 연구들이 수행되었다. Kim et al. (2012b)은 부정류 수문곡선을 수리실험에서 재현할 수 있는 유량공급장치를 개발하였고, 이를 이용하여 부정류 수리실험을 수행하고, 하도

내 시간 변화에 따른 유량 변화를 확인하였다. 특히 강변저류지의 월류부에서 완전 월류류 흐름만 발생하는 경우를 재현한 후 강변저류지 직하류의 수문곡선을 측정하였고, 그 결과를 이용하여 실무에서 널리 사용하고 있는 1차원 부정류 수치모형인 HEC-RAS의 적용성을 검토하였다(Kim et al., 2012a). 또한 Kim et al. (2011)은 전동식 밸브의 개폐율을 조절하여 부정류 흐름을 재현하고, 강변저류지 설계 시 고려하여야 할 저류지 위치, 월류부 마루높이 및 저류지 면적 등을 고려한 홍수저감효과 변화를 관측하였다. 한편 현장 모니터링을 통한 실측자료 기반의 강변저류지 홍수조절효과 산정 연구로는 Fukuoka et al. (2007)이 일본의 대표적인 강변저류지인 Tsumigawa 유수지의 상류와 하류 지점에서 수위 및 유량 모니터링 결과를 활용하여 2004년 발생한 홍수사상에 대한 Tsumigawa 유수지의 홍수조절효과를 관측하였다.

이와 같이 수리실험과 실측자료를 바탕으로 수행된 강변저류지의 홍수조절효과 산정 연구들은 강변저류지의 저류용량이 충분하여 월류부에서 완전 월류류 흐름만 발생하는 경우에 대하여 수행된 연구가 대부분이었다. 하지만 강변저류지는 부지 확보의 어려움으로 인해 저류용량에 제한이 많은 수리구조물이기 때문에 홍수 시 저류용량이 가득차게 되어 본류 수위와 저류지 수위가 같아지는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 강변저류지의 월류부 흐름 형태가 완전 월류류만 발생하는 것이 아니라 잠긴 월류류 형태도 발생할 수 있기 때문에 강변저류지 설계 시 이를 고려하여 설계하여야 한다. 하지만 잠긴 월류류 흐름에 대한 연구가 부족하다보니 지금까지 국내에 설치된 강변저류지의 경우 완전 월류류만 발생하도록 저류지 내 수위가 월류부 높이를 초과하지 않도록 설계하고 있다. 만약 월류부 높이를 초과하여 잠긴 월류류 흐름이 발생하는 상황을 고려하여 강변저류지를 설계한다면 좀 더 저류용량을 확보할 수 있기 때문에 강변저류지를 효율적으로 설계할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 강변저류지의 월류부에서 잠긴 월류류 흐름이 발생할 경우에 대한 홍수조절효과 분석 방법의 검증과 관련한 연구가 필요할 것이다.

이에 본 연구에서는 강변저류지 월류부의 흐름 형태가 다양하게 변화하는 경우를 대상으로 하도 내 부정류 흐름을 실무에서 강변저류지 설계 시 주로 사용하고 있는 HEC-RAS 수치모형이 얼마나 정확하게 모의하는지를 확인하고자 한다. 이를 위해 강변저류지를 포함한 직선수로에 대한 부정류 수리실험을 실시하여 하도 내 수위 변화를 측정하였고, 부정류 수리실험 결과를 기초로 HEC-RAS 수치모의 결과의 정확도를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 강변저류지의 횡월류부 흐름 형태

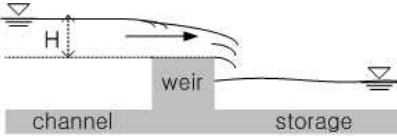
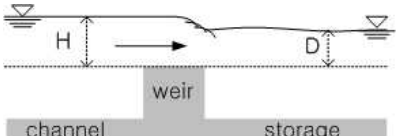
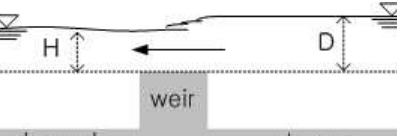
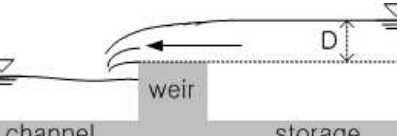
Lee and Holley (2002)와 Ji et al. (2013)는 강변저류지 월류부에서 발생할 수 있는 흐름 형태를 수문곡선의 상승구간과 하강구간에 따라 Table 1과 같이 제시하였다. 우선 수문곡선의 상승구간에서는 홍수량이 증가하여 하도의 수위가 횡월류부의 월류턱보다 높게 형성되면 Table 1(a)와 같은 완전 횡월류 흐름이 발생한다. 즉, 횡월류부의 월류턱을 기준으로 한 하도내 수위를 H라 하고, 횡월류부의 월류턱을 기준으로 한 저류지의 수위를 D라 하였을 때, 완전 횡월류 흐름은 $H > 0 > D$ 일 때 발생한다. 그리고 하도의 홍수량이 계속 증가하여 저류지로의 횡월류량이 많아지면 저류지의 저류용량이 가득 차게 되어 하도내 수위(H)와 저류지의 수위(D)가 월류턱 높이 이상으로 형성됨에 따라 Table 1(b)와 같이 하도에서 저류지 방향으로 잠긴 횡월류 흐름이 발생한다. 수문곡선의 하강구간에서는 하도의 수위가 낮아지면서 저류지의 수위보다 낮게 형성된다. 이 때, 초기에는 Table 1(c)와 같이 저류지에서 하도 방향으로 잠긴 횡월류 흐름이 발생하고, 하도의 수위가 월류

턱 보다 낮아지면 Table 1(d)와 같이 저류지에서 하도 방향으로 완전 횡월류 흐름이 발생한다. 이와 같이 하나의 홍수사상에 대해서 하도내 수위와 저류지내 수위 변화에 따라 강변저류지의 횡월류부 흐름이 다양하게 발생하기 때문에 횡월류부의 수리학적 특성을 정확하게 이해하고, 수위 변화에 따른 횡월류량 변화를 정확하게 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다.

2.2 HEC-RAS 모형의 횡월류량 산정 방법

완전 횡월류 흐름과 잠긴 횡월류 흐름의 가장 큰 차이점은 횡월류량 산정에 있어 유량계수가 달라진다는 것이다. 완전 횡월류량은 월류수심 변화에 따라 하나의 유량계수를 적용하여 예측이 가능하지만 잠긴 횡월류 흐름의 경우는 하도와 저류지의 수위 변화도 변수에 포함되기 때문에 완전 횡월류 흐름에 비해 횡월류량 산정의 불확실성이 큰 것이 사실이다. 이에 과거 연구들에서도 잠긴 월류 흐름에 대한 연구는 대부분 횡월류위어가 아닌 종방향위어(plane weir)에 대해서만 수행되었다. Bradley (1978)는 Kindvaster (1964)의 종방향위어에 대한 유량계수 산정 결과를 기초로 Fig. 1과 같은 유량감소

Table 1. Type of Side-Weir Flow

Hydrograph	Flow Type	Relationship between H and D
Rising limb	 <p>(a) Free overflow (F1)</p>	$H > 0 > D$
	 <p>(b) Submerged overflow (S1)</p>	$H > D > 0$
Receding limb	 <p>(c) Submerged overflow (S2)</p>	$D > H > 0$
	 <p>(d) Free overflow (F2)</p>	$D > 0 > H$

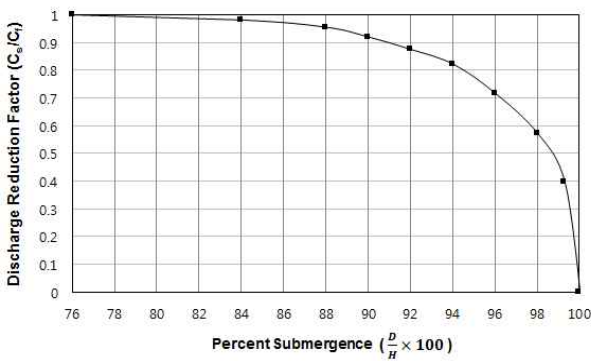


Fig. 1. Discharge Reduction Factor for Submerged Flow (Bradley, 1978)

계수(discharge reduction factor, C_f)를 제안하였고, 이를 적용할 수 있도록 표준위어식을 변형시킨 Eq. (1)을 제시하였다.

$$Q_w = C_f L H^{3/2} \frac{C_s}{C_f} \quad (1)$$

여기서, Q_w 는 월류량, C_f 는 완전 월류 유량계수, C_s 는 잠긴 월류 유량계수, 및 L 은 횡월류부의 흐름방향 길이이다.

HEC-RAS 모형의 횡월류량 산정 방법은 Bradley (1978)의 Eq. (1)을 적용하고 있다(Brunner, 2010). 구체적으로 잠긴 횡월류 흐름이 발생할 경우 횡월류량 산정식에 유량감소계수 (Fig. 1, C_s/C_f)를 적용하여 횡월류량을 산정한다. 유량감소계수는 잠김 비율(D/H)이 0.76보다 커질 경우에 적용된다. 즉, HEC-RAS 모형에서는 잠긴 횡월류 흐름이 발생할 경우 유량감소계수를 사용하여 완전 횡월류 흐름이 발생할 때보다 횡월류량을 작게 산정하도록 한다. 그러나 Fig. 1의 유량감소계수는 중방향위어의 실험 결과를 활용하여 제안되었기 때문에 잠긴 횡월류 흐름에 대한 횡월류량 산정에 적용하기에는 한계가 있을 수 있다. 따라서 잠긴 횡월류 흐름 모의에 Bradley (1978)의 유량감소계수를 적용하면 HEC-RAS 부정류 모의 결과의 정확도에 영향을 미칠 수 있다.

3. 부정류 수리실험 및 수치모의 조건

3.1 부정류 수리실험 개요

강변저류지의 홍수조절효과는 특정 홍수사상 즉, 유입 수문곡선에 대하여 강변저류지 설치 전과 후에 대한 침투 유량

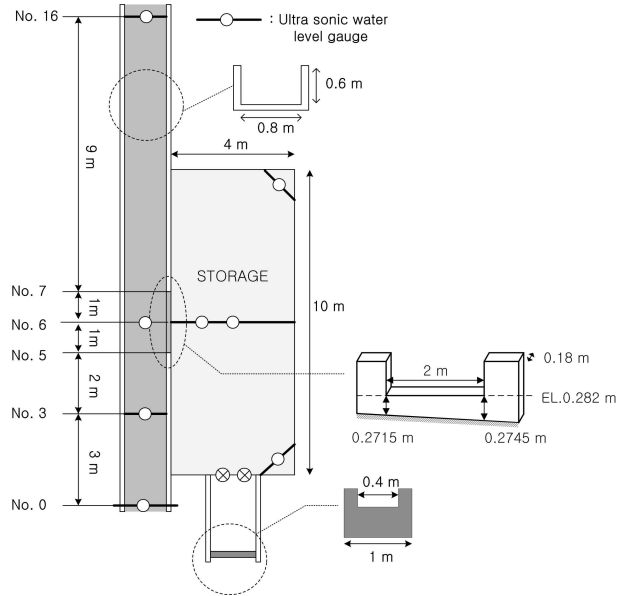


Fig. 2. Experimental Flume with Storage

또는 수위의 차이를 말한다. 그러므로 강변저류지의 홍수조절효과를 분석하기 위해서는 하도 내 부정류 흐름 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Kim et al. (2012b)이 개발한 부정류 유량공급장치를 이용하여 실험수로에서 수문곡선을 재현하였고 이에 대한 강변저류지의 홍수조절효과를 측정하였다.

부정류 수리실험은 Fig. 2와 같이 폭 0.8 m, 길이 16 m 및 하상경사 0.0015인 직사각형 단면의 직선수로에서 수행하였다. 실험수로 좌안에 설치된 강변저류지의 면적은 40 m²이고, 횡월류부는 흐름방향 길이 2 m, 폭 0.18 m인 광정위어로 No. 5에서 No. 7에 위치하도록 하였으며, No.0의 하상고를 EL.0 m를 기준으로 횡월류위어의 정부표고는 EL.0.282 m이다.

수리실험에 사용된 실험 장비는 앞서 설명한 부정류 유량공급장치와 초음파수위계이다. 부정류 유량공급장치에 사용된 유량조절밸브는 KOPECS사에서 제조된 Pneumatic Butterfly Control Valve로 초단위로 밸브의 개폐율 조절이 가능하다. 유량 공급관에 설치되어 공급되는 유량을 계측하는 전자유량계의 모델은 M1500이며, 이 장치는 만관상태 흐름의 유속을 계측하여 유량으로 환산시켜주는 방식으로 정확도는 ± 0.5%이다. 또한 하도와 저류지에 설치되어 수위를 계측하는 초음파수위계의 모델명은 UC500-30GM-IUR2-V15이며, 이 장비의 측정 거리 범위는 센서로부터 50 mm ~ 500 mm 이다. 이 초음파수위계는 최대 측정 거리 500 mm일 때, 100 mm × 100 mm의 면적을 측정하고 평균하여 센서로부터 수면까지의 거리를 측

정하며 정확도는 0.1%로 정확도가 높다.

3.2 HEC-RAS 부정류 수치모의의 경계조건 및 매개변수

본 연구에서는 부정류 수치실험의 측정결과를 바탕으로 HEC-RAS 부정류 수치모의의 경계조건을 결정하였다. 상류 경계 조건은 Fig. 3(a)와 같이 No. 16 단면의 수문곡선을 적용하였고, 하류경계 조건은 Fig. 3(b)와 같이 No. 0 단면의 수위-유량 관계를 사용하였다.

HEC-RAS 모형의 매개변수인 하도 내 조도계수는 HEC-

RAS 수치모의와 수치실험의 수위 결과를 비교하여 가장 잘 일치하는 조도계수를 찾는 방법으로 결정하였다. 본 연구에서는 Chow (1973)가 제시한 콘크리트 조도계수 범위를 참고하여 0.012, 0.014 그리고 0.016에 대해 6개 단면에서의 실험에서 측정된 수위와 계산된 수위를 비교하였다. 또한 유량 크기 변화에 따라 조도계수가 변화할 수 있기 때문에 유입 수문곡선의 유량 범위 중에서 중유량(59.6 L/s)과 고유량(95.1 L/s)에 대해 모두 검토하였다. 비교 결과, Fig. 4와 같이 조도계수가 0.014일 때, 실험으로 측정된 수면경사와 HEC-RAS로

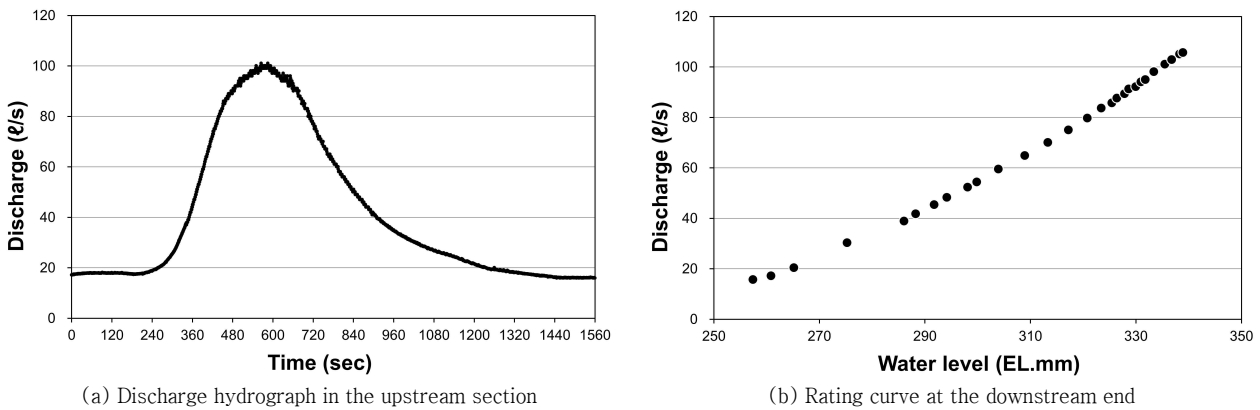


Fig. 3. Upstream and Downstream Boundary Conditions

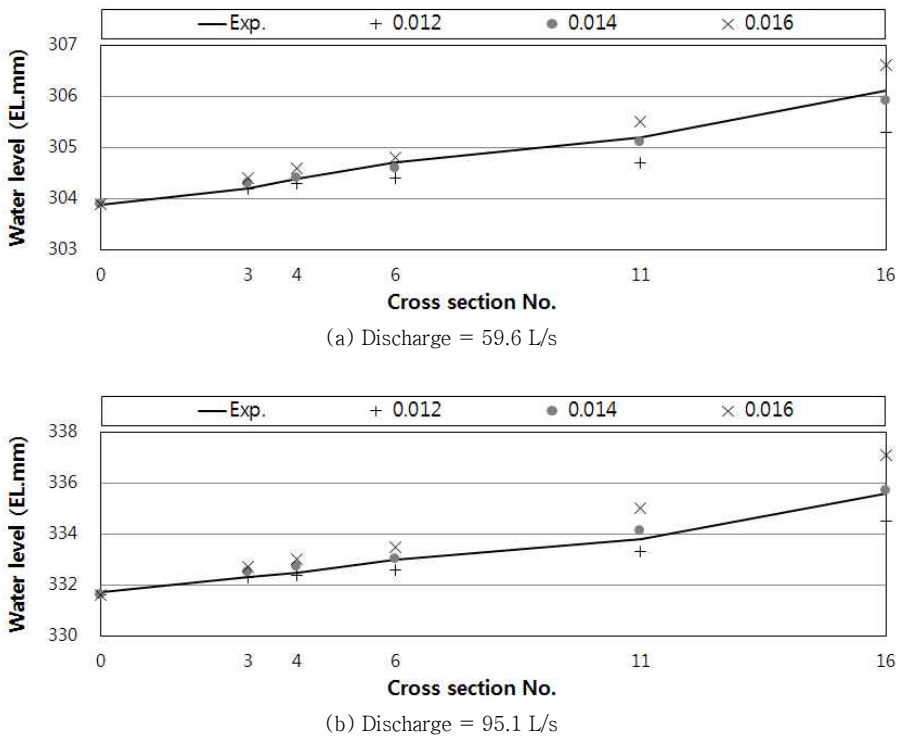


Fig. 4. Comparison of Water Level according to Variation of Manning's n and Flow Discharge

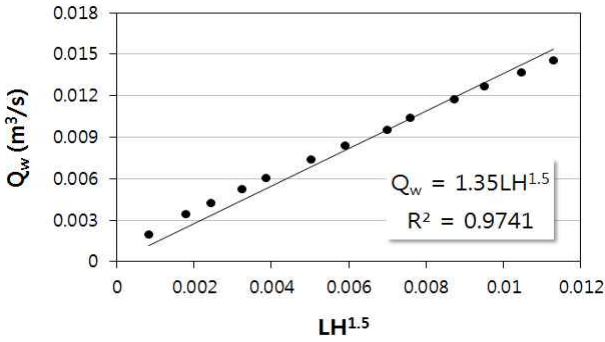


Fig. 5. Experimental Results for the Side-Weir Discharge Coefficient

계산한 수면경사가 가장 일치하는 결과를 나타냈다.

완전 횡월류 유량계수()도 수리실험을 수행하여 결정하였다. Fig. 2와 같이 저류지에 유출부를 만들고 사각위어를 설치하여 횡월류량을 측정하였고, No. 6 단면의 하도 중앙에서 횡월류 수심을 측정하여 Fig. 5와 같이 완전 횡월류 흐름에 대한 유량계수를 산정하였다. 이와 같이 산정된 완전 횡월류 유량계수(C_p)는 1.35이다.

4. 횡월류부 흐름 형태 변화에 따른 HEC-RAS 부정류 모형의 정확도 분석

4.1 HEC-RAS 부정류 모형의 정확도 분석 방법

HEC-RAS의 표준위어식을 이용하여 산정한 강변저류지 홍수조절효과의 정확도를 검토하기 위해 시간 변화에 따른 수위 오차 및 홍수조절효과 오차를 산정하였다. 수위 오차는 부정류 수리실험으로 측정한 수위와 HEC-RAS로 계산한 수위의 차이를 고려하여 Eq. (2)와 같이 산정하였다. 강변저류지의 홍수조절효과 오차는 부정류 수리실험으로 측정한 홍수조절효과와 HEC-RAS 수치모의로 산정한 홍수조절효과를 비교하여 Eq. (3)과 같이 산정하였다.

$$\text{Error of water level} = \frac{h_c - h_e}{e_{\max} - h_{e\min}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, h_c 는 HEC-RAS로 계산한 수위, h_e 는 부정류 수리 실험에서 측정한 수위 그리고 $h_{e\max}$ 와 $h_{e\min}$ 는 부정류 수리 실험에서 측정한 최대 수위와 최소 수위이다.

$$\text{Error of flood-control effect} = \left(\frac{h_{e\max} - h_{e\max}}{h_{o\max} - h_{o\min}} \right) \times 100(\%) \quad (3)$$

Table 2. Case of Storage Condition for Generation Various Flow Type of Side-Weir

Case	Storage volume	Flow type of side-weir
1	without storage	-
2	3.20 m ³	Free and submerged flow (single peak)
3	2.56 m ³	Free and submerged flow (double peak)

여기서, $h_{o\max}$ 와 $h_{o\min}$ 는 강변저류지 설치 전 부정류 수리 실험에서 측정한 최대수위와 최소수위 그리고 $h_{e\max}$ 는 HEC-RAS로 계산한 최대 수위이다.

4.2 HEC-RAS 부정류 모형의 정확도 분석 결과

본 연구에서는 강변저류지 홍수조절효과 분석을 수행한 단면은 횡월류부 하류방향 끝단에서 3 m 떨어진 지점인 No. 3으로 선정하였다. 그리고 횡월류부에서 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 경우에 대한 홍수조절효과 분석을 위해 저류용량을 Table 2와 같이 변화시키면서 부정류 수리실험을 수행하였다. Table 2의 저류용량은 저류지 바닥으로부터 횡월류위어의 정부표고까지의 부피를 의미한다. case 1은 강변저류지가 설치되지 않은 경우이고, case 2와 case 3은 횡월류부에서 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 경우이다. 또한 홍수조절효과 분석과 더불어 Lee and Holley (2002)가 제시한 횡월류부 흐름 분류(Table 1) 기준을 적용하여 수문곡선 지속시간 동안 강변저류지 횡월류부에서 발생하는 흐름 형태와 지속시간을 살펴 보았다.

Case 1과 같이 강변저류지 설치 전에 대한 수문곡선 비교 결과는 Fig. 6과 Table 3과 같다. 전체 수문곡선에서 최대 수위 오차는 약 3% 정도로 나타났다. 이는 1200초 이후에 발생한 것으로 홍수조절효과 산정에 중요한 수문곡선의 침두부에 대한 HEC-RAS 계산 수위는 부정류 수리실험과 약 1 mm의 차이를 보여 약 1% 정도의 오차를 나타냈다. 따라서 강변저류지가 없는 경우 직선수로 내 부정류 흐름을 HEC-RAS가 정확하게 모의하는 것을 확인하였다.

Case 2와 같이 강변저류지 설치 후에 대한 수문곡선이 하나의 침두를 갖는 경우의 No. 3에서의 수위 예측 결과와 홍수조절효과를 비교한 결과는 Fig. 7과 Table 4와 같다. 횡월류부의 흐름형태를 살펴보면 약 346초 이후부터 횡월류량이 유입되어 595초까지 하도에서 저류지 방향으로 완전 횡월류 흐름(F1)이 발생하였고, 저류지의 수위가 월류부 정부표고 이상으로 증가하여 690초까지 하도에서 저류지 방향으로 잠긴 횡월류 흐름(S1)이 발생하였다. HEC-RAS로 계산한 수위의 최대 오차는 F1흐름이 발생하는 구간에서 약 -4%, 횡월류부에

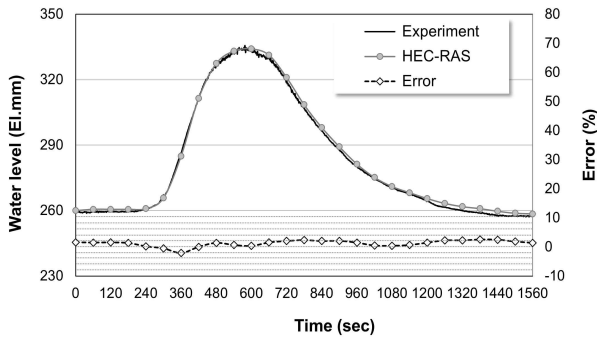


Fig. 6. Comparison of Water-Level Change for Case 1

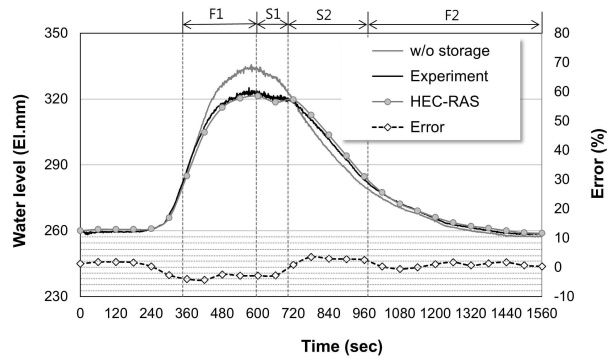


Fig. 7. Comparison of Water-Level Change for Case 2

Table 3. Comparison of Water Levels of Experimental and Numerical Calculation for Case 1

Time (sec)	No. 3		Difference (mm)	Error (%)
	Experiment (mm)	HEC-RAS (mm)		
0	259	261	1	2
60	259	261	1	2
120	259	261	1	2
180	260	261	1	1
240	261	261	0	0
300	266	266	0	0
360	287	285	-2	-2
420	311	312	0	0
480	326	327	1	1
540	332	333	1	1
600	333	334	1	1
660	330	331	1	2
720	319	321	2	2
780	307	309	2	2
840	297	298	2	2
900	288	289	2	2
960	280	281	1	1
1020	275	275	0	0
1080	271	271	0	0
1140	268	268	1	1
1200	264	266	1	1
1260	262	263	2	2
1320	260	262	2	2
1380	259	261	2	3
1440	258	260	2	3
1500	257	259	1	2
1560	257	259	1	1

서 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 S1 구간에서는 약 -3%로 나타났다. 또한 690초 이후에는 침투홍수위를 지나 하도 수위가 낮아짐에 따라 하도 내 수위가 저류지 수위보다 낮아져 973초까지 저류지에서 하도 방향으로 잠긴 횡월류 흐름(S2)이 발생하였다. S2 흐름이 발생하는 동안의 최대 수위오차는 약 4%로 나타났다. 마지막으로 저류지에서 하도 방향으로 잠긴 횡월류 흐름(F2)이 발생하는 구간에서는 약 2%의 수위오차가 발생하였다. 특히 부정류 수리실험과 HEC-RAS 수치모의로 산정된 강변저류지의 홍수조절효과는 각각 11 mm, 12 mm로 차이는 1 mm로 나타나 강변저류지의 홍수조절효과 오차는 약 2.4%로 HEC-RAS의 부정류 모의 결과가 비교적 정확한 것으로 나타났다.

또한 횡월류위의 중앙 단면인 No. 6의 수위 변화를 비교한 결과 횡월류부 흐름이 F1과 S1인 구간에서 HEC-RAS 모의 결과가 최대 약 5% 작게 모의하였고, 저류지 내 수위 변화를 비교한 결과 횡월류부 흐름이 F1, S1 및 S2인 구간에서는 매우 정확하게 모의하는 것으로 나타났으나, F2 흐름이 발생하는 구간에서는 최대 5% 작게 모의하는 것으로 나타났다. 그 이유는 앞서 No. 6의 수위를 작게 모의하였거나 유량계수가 크게 결정되어 HEC-RAS 부정류 모형이 횡월류량을 크게 계산하였기 때문으로 판단된다.

Case 3은 앞서 살펴본 Case 2와 비교하여 저류용량을 작게 결정하여 횡월류부의 잠긴 횡월류 흐름 발생시간이 더 길게 발생하도록 하였으며 결과적으로 강변저류지 설치 후 수문곡선이 이중 침투 형태로 나타나는 경우이다. 이 경우에 대하여 No. 3에서의 수위 예측 결과와 홍수조절효과를 비교한 결과는 Fig. 8과 Table 5과 같다. 우선 수문곡선 상승구간의 약 343초 이후부터 횡월류량이 저류지로 월류되어 563초까지 하도에서 저류지 방향으로 완전 횡월류 흐름(F1)이 발생하였고, 그 이후부터 저류지의 수위가 월류턱 높이가 이상으로 증가하여

Table 4. Comparison of Water Levels of Experimental and Numerical Calculation for Case 2

Time (sec)	Experiment (mm)			HEC-RAS (mm)			Difference (mm)			Error (%)		
	No. 3	No. 6	Storage	No. 3	No. 6	Storage	No. 3	No. 6	Storage	No. 3	No. 6	Storage
0	260	261	202	261	261	202	1	0	0	1	0	0
60	259	261	202	261	262	202	1	1	0	2	1	0
120	259	261	202	261	262	202	1	1	0	2	1	0
180	260	261	201	261	262	202	1	0	1	2	1	1
240	261	261	202	261	262	202	0	1	0	0	1	0
300	268	268	202	266	268	202	-2	-1	0	-3	-1	0
360	288	288	202	285	286	202	-3	-2	0	-4	-3	0
420	308	307	208	305	304	210	-3	-2	1	-4	-4	1
480	318	316	228	316	314	230	-2	-2	2	-2	-3	1
540	322	320	255	320	318	255	-2	-3	1	-3	-5	1
600	323	320	284	321	319	284	-2	-2	1	-3	-2	0
660	320	318	312	319	316	311	-2	-2	-1	-3	-2	-1
720	319	320	321	320	321	321	1	1	0	1	1	0
780	310	312	314	313	314	315	2	2	1	4	3	0
840	302	303	305	304	304	305	2	1	0	3	2	0
900	292	294	298	294	295	297	2	1	-1	3	2	-1
960	283	284	294	285	286	291	2	2	-3	3	3	-2
1020	277	278	292	277	279	288	0	1	-4	0	2	-3
1080	273	273	291	272	273	287	0	0	-4	-1	0	-3
1140	269	270	290	269	270	285	0	1	-5	0	1	-4
1200	265	266	290	266	267	285	1	1	-5	1	1	-4
1260	263	263	290	264	264	284	1	0	-5	2	1	-4
1320	262	262	289	262	262	284	0	0	-6	1	0	-5
1380	260	261	289	261	261	283	1	0	-6	1	0	-5
1440	259	260	289	260	260	283	1	0	-6	2	0	-5
1500	259	259	289	259	259	283	0	-1	-6	1	-1	-5
1560	259	259	289	259	258	283	0	-2	-6	0	-2	-5

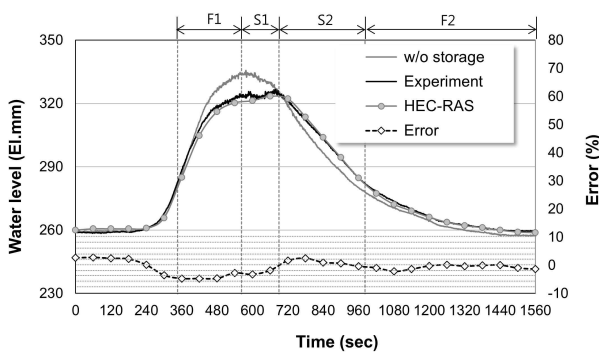


Fig. 8. Comparison of Water-Level Change for Case 3

665초까지 하도에서 저류지 방향으로 잠긴 횡월류 흐름(S1)이 발생하였다. HEC-RAS로 모의한 수위의 최대 오차는 F1

흐름이 발생하는 구간에서 약 -5%, 월류부에서 잠긴흐름이 발생하는 S1 구간에서 약 -3%로 나타났다. 또한 690초 이후 부터는 저류지의 수위가 하도의 수위보다 높아짐에 따라 982 초까지 저류지에서 하도 방향으로 잠긴 횡월류 흐름(S2)이 발생하였으며, 이때의 최대 수위오차는 약 3%로 나타났다. 그 이후 저류지에서 하도 방향으로 완전 횡월류 흐름(F2)이 발생하는 구간에서는 약 -2%의 수위오차가 발생하는 것을 확인 하였다. 부정류 수리실험과 HEC-RAS를 이용하여 산정한 강변저류지의 홍수조절효과는 각각 9 mm, 10 mm로 두 경우의 차이는 1 mm로 나타났고, 홍수조절효과 오차는 약 1.6%로 나타났다.

또한 횡월류위어의 중앙 단면인 No. 6의 수위 변화를 비교한 결과 앞서 case 2와 마찬가지로 횡월류부 흐름이 F1과 S1인

Table 5. Comparison of Water Levels of Experimental and Numerical Calculation for Case 3

Time (sec)	Experiment (mm)			HEC-RAS (mm)			Difference (mm)			Error (%)		
	No. 3	No. 6	Storage	No. 3	No. 6	Storage	No. 3	No. 6	Storage	No. 3	No. 6	Storage
0	259	260	218	261	261	218	2	1	0	3	2	0
60	259	260	218	261	262	218	2	1	0	3	2	0
120	259	260	218	261	262	218	2	2	0	2	3	0
180	259	260	218	261	262	218	1	1	0	2	2	0
240	261	261	218	261	262	218	0	1	0	0	2	0
300	268	268	218	266	268	218	-2	-1	0	-4	-1	0
360	288	287	218	285	286	218	-3	-1	0	-5	-2	0
420	308	305	224	305	304	225	-3	-1	1	-5	-2	1
480	319	316	244	316	314	245	-3	-2	0	-5	-2	0
540	322	319	271	320	318	270	-2	-2	0	-3	-2	0
600	323	321	301	321	319	299	-2	-3	-2	-3	-4	-2
660	325	325	323	323	322	322	-1	-3	-2	-2	-4	-2
720	321	322	324	322	323	323	1	1	-1	2	1	-1
780	312	315	316	314	315	315	2	0	0	3	0	0
840	303	305	307	304	305	305	1	0	-1	1	0	-1
900	294	295	299	294	295	297	0	0	-2	1	-1	-2
960	285	285	295	285	286	292	0	0	-3	0	1	-3
1020	278	279	292	277	279	289	-1	0	-4	-1	0	-3
1080	274	274	291	272	273	287	-1	-1	-4	-2	-1	-4
1140	270	271	290	269	270	286	-1	0	-4	-1	0	-4
1200	266	267	290	266	267	285	0	0	-5	0	0	-5
1260	264	264	290	264	264	284	0	-1	-5	0	-1	-5
1320	262	263	289	262	262	284	0	0	-5	0	-1	-5
1380	261	262	289	261	261	284	0	0	-5	0	-1	-5
1440	260	261	289	260	260	283	0	-1	-5	0	-1	-5
1500	260	260	289	259	259	283	-1	-2	-6	-1	-3	-5
1560	260	260	289	259	258	283	-1	-2	-6	-1	-3	-5

구간에서 HEC-RAS 모의 결과가 최대 약 4% 정도 작게 모의하였고, 저류지 내 수위 변화는 비교한 결과 횡월류부 흐름이 F1, S1 및 S2인 구간에서는 앞서 case 2와 마찬가지로 매우 정확하게 모의하는 것으로 나타났으나, F2 흐름이 발생하는 구간에서는 최대 5% 작게 모의하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 강변저류지가 설치되지 않은 경우와 강변저류지의 저류용량을 2가지로 변화시킨 경우에 대하여 횡월류위의 직하류 단면에서의 수위 변화를 부정류 수리실험을 통해 측정 후 HEC-RAS 부정류 수치모의 결과의 정확도를 평가하였다. 강변저류지가 없는 경우(case 1)는 수문곡선의 상승부와 하강부에서 -2 ~ 2%의 수위 오차가 발생하는 것으로 나타났고, 수문곡선의 첨두부에서는 약 1%의 오차를 보여 HEC-RAS 부정류 모형이 하도 내 수위 변화를 비교적 정확

하게 산정하는 것으로 나타났다. 또한 강변저류지를 설치한 후 직하류에서 하나의 첨두를 갖는 수문곡선이 발생하는 경우(case 2)는 수문곡선의 상승부와 하강부에서 -4 ~ 4%의 수위 오차가 발생하는 것으로 나타났고, 수문곡선의 첨두부에서는 약 -3%의 오차를 보였다. 마지막으로 강변저류지를 설치한 후 직하류에서 두 개의 첨두를 갖는 수문곡선이 발생하는 경우(case 3)는 수문곡선의 상승부와 하강부에서 -5 ~ 3%의 수위 오차가 발생하는 것으로 나타났고, 수문곡선의 첨두부에서는 약 -3%의 오차를 보였다. 이와 같이 강변저류지가 설치되기 전보다 설치한 후의 오차가 조금 크게 나타난 원인은 HEC-RAS 모형이 횡월류위의 유량계수를 실제보다 크게 결정하여 횡월류량을 크게 모의하는 것이 원인일 수 있기 때문에 향후 잠긴 횡월류 흐름에 대한 횡월류위 유량

계수 산정에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

횡월류부에서 잠긴 흐름이 발생하는 경우에 HEC-RAS를 이용한 강변저류지의 홍수조절효과오차는 Case 2와 Case 3 조건에서 각각 약 2.4%, 약 1.6%로 유사하게 나타났다. Case 2의 경우 최대 수위 오차는 F1 및 S2 흐름에서 발생하였으며, case 3의 경우 F1 흐름에서 발생하였다. 이와 같이 직선수로에 설치된 강변저류지의 홍수조절효과 분석에 있어서 HEC-RAS에서 사용하는 Bradley (1978)의 유량 감소계수 곡선이 반영된 표준위어식이 횡월류부의 흐름 형태가 변하더라도 횡월류량을 비교적 정확하게 계산하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 강변저류지 횡월류부의 흐름 형태가 다양하게 변화하는 경우에 대하여 HEC-RAS 부정류 모의의 정확도를 분석하였다. 이를 위해 강변저류지를 포함한 직선수로에 대한 부정류 수리실험을 실시하여 하도 내 수위 변화를 측정하였고, 부정류 수리실험 결과를 기초로 HEC-RAS 수치모의 결과의 정확도를 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부정류 수리실험 결과 저류용량 변화에 따라 Lee and Holley (2002)과 Ji et al. (2013)이 제시한 바와 같이 횡월류부에서 다양한 흐름 형태가 나타났으며, 횡월류부의 흐름 형태 변화에 따라 하도 내 수위 변화에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이와 같은 부정류 수리실험 결과는 향후 다양한 수치모의 결과의 검증 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.
- 2) 강변저류지가 설치되지 않은 경우의 HEC-RAS 부정류 흐름 모의 결과에 대한 정확도를 분석한 결과 전체 수문사상에 대하여 최대 약 3% 정도의 수위 계산 오차를 나타냈고, 홍수조절효과에 직접적으로 영향을 미치는 침투부에서는 약 1%의 수위 오차를 나타내어 HEC-RAS 부정류 수치모형이 매우 정확하게 수위를 계산함을 확인하였다.
- 3) 완전 횡월류 흐름과 잠긴 횡월류 흐름이 모두 발생하는 경우의 HEC-RAS 부정류 흐름 모의 결과에 대한 정확도를 분석한 결과 우선 하나의 침투를 갖는 경우에는 전체 수문사상에 대하여 최대 약 4% 정도의 수위 계산 오차를 나타냈고, 이중 침투를 갖는 경우에는 최대 약 5% 정도의 수위 계산 오차를 나타냈다. 강변저류지가 설치되지 않은 경우와 비교하여 수위 계산 오차가 조금 커지는 경향을 나타냈으나, HEC-RAS

부정류 수치모형이 비교적 복잡한 횡월류부의 흐름 형태의 경향을 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

- 4) 저류지 내 수위 변화를 비교한 결과 횡월류부 흐름이 F1, S1 및 S2인 구간에서는 매우 정확하게 모의하는 것으로 나타났다. F2 흐름이 발생하는 구간에서는 최대 5% 작게 모의하는 것으로 나타났다. 즉, HEC-RAS 부정류 모형이 F1, S1 및 S2인 구간에서는 횡월류량을 어느 정도 정확하게 예측하고 있으나 저류지에서 하도로 자유 율류하는 흐름에 대해서는 정확도가 다소 부족한 것으로 나타났다.
- 5) HEC-RAS 부정류 수치모의를 이용한 강변저류지의 홍수조절효과 분석에 대한 정확도를 분석한 결과 저류용량이 부족하여 횡월류부에서 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 경우에 최대 3% 이내의 비교적 정확한 홍수조절효과 오차를 나타냄을 확인하였다. 즉, HEC-RAS에서 사용하고 있는 Bradley (1978)의 감소계수곡선이 반영된 표준위어식이 잠긴 횡월류 흐름이 발생하더라도 신뢰할 수 있는 횡월류량을 산정할 수 있음을 확인하였다.

이와 같이 본 연구에서 도출한 강변저류지를 포함한 부정류 수리실험을 통해 HEC-RAS의 부정류 수치모의 결과의 정확도를 분석한 결과는 향후 강변저류지 설계에 있어 홍수조절효과를 좀 더 정확하게 예측할 수 있는 기초 자료가 될 것으로 기대한다. 다만 본 연구에서는 직선수로에 설치된 강변저류지의 홍수조절효과에 대한 정확도 분석을 수행한 결과라는 한계가 있다. 즉, 실제 하천에 설치되는 강변저류지의 경우 만곡부 내측에 설치되는 경우가 많으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(15RDRP-B076272-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, T. J., Kang, I. W., Kim, B. C., and Baek, C. W. (2008). "Development of Decision Making Model for Optimal Location of Washland." 2008 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, KWRA, pp. 1409-1413. (in Korean)

- Baek, C. W., Byeon, C. I., Kim, D. H., and Ahn, T. J. (2010). "Study on a Scheme to Increase Flood Reduction Effect of Washlands." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 2, pp. 123-133. (in Korean)
- Baek, C. W., Kim, B. C., and Ahn, T. J. (2009). "Analysis of Flood Reduction Effect of Washlands based on Variation of Rollway Characteristic." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 1, pp. 145-150. (in Korean)
- Bradley, J. N. (1978). *Hydraulics of bridge waterways*. Hydraulic Design Series No. 1, Federal Highway Administration, 2nd Ed., Washington, D.C., U.S.
- Brunner, G. W. (2010). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. CPD-69, January, Version 4.1. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Chow, V. T. (1973) *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Fukuoka, S., Kon, T., and Okamura, S. (2007). "Assesment of flood control effects of the Tsurumigawa river multi-purpose retarding basin." *Doboku Gakkai Ronbunshuu B*, Vol. 63, No. 3, pp. 238-248.
- Ji, U., Kim, S., Yoon, B., Kim, S. (2013). Analytical and Experimental Investigation of a Side-Weir Detention Basin in Flood-Level Reduction in the Main Channel, *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, Vol. 139, No. 8, pp. 663-671.
- Jun, K. S., Kim, J. S., Kim, W., and Yoon, B. M. (2010). "Computaional 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, H. J., Bae, D. W., and Yoon, K. S. (2011). "Experimental Study for Anlaysia of Flood Mitigation Effect by Detention Basin." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 6, pp. 281-291. (in Korean)
- Kim, S. J., Hong, S. J., Yoon, B. M., and Ji, U. (2012a). "Feasibility Analysis of HEC-RAS for Unsteady Flow Simulation in the Open Channel with a Side-Weir Detention Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 5, pp. 495-503. (in Korean)
- Kim, S. J., Kim, S. H., and Yoon, B. M., and Ji, U. (2012b). "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)
- Kindvaster, C. E. (1964). *Discharge characteristics of embankment-shaped weirs*. Water supply paper 1617-A. Washington, D.C, U.S Geological Survey.
- Lee, K. L., and Holley, E. R. (2002). *Physical modeling for side-channel weirs*. CRWR Online Report 02-2, houston, TX, USA.