

하천 수위 예측의 불확실성을 고려한 강변저류지 횡월류부 길이 결정 기법

Determine the Length of the Side-Weir of Side-Weir Detention Basin Considering the Uncertainty of the Water Level in River

김 서 준* / 김 상 혁** / 윤 병 만***

Kim, Seojun / Kim, Sanghyuk / Yoon, Byungman

Abstract

The existing flood protection in rivers has shown the limitation due to the urbanization around rivers and the abnormal climate. Thus, the demand for the constructions of side-weir detention basin are being increased as a part of integrated watershed flood protection plan. It is necessary to estimate the quantitative flood-control effect for including the side-weir detention basin in flood-control measures. For the determination, it is required to reduce the uncertainty of the design factors which can affect the flood-control effect of side-weir detention basin. Among the factors, however, the water level in river always contains uncertainty. Therefore, the design method considering the uncertainty is required. For the reasons, the design method considering uncertainty of the water level in river is suggested in this study with using the length of side-weir which is relatively easy-determinable by designers. Therefore, it is examined how the variation of the length of side-weir can affect the flood-control effect, using HEC-RAS, and then the method to determine the side-weir length considering the uncertainty of the water level in river through results from analyses. Since the uncertainty of the water level in river can be taken into account in the suggested design method, it is evaluated that the design method is more effective to suggest the flood-control effect of the side-weir type detention basin with higher safety side.

Keywords : side-weir detention basin, flood-control effect, water level in river, length of side-weir

요 지

하천 주변의 도시화와 이상기후 등으로 인해 기존의 하천 위주의 홍수방어는 한계를 보이고 있으며, 이에 따라 유역통합적인 홍수방어대책의 하나로 강변저류지 설치에 대한 요구가 증대되고 있다. 강변저류지를 치수대책에 포함시키기 위해서는 정량적인 홍수조절효과 산정이 필요하며, 이를 위해서는 강변저류지 홍수조절효과에 영향을 미치는 인자들의 불확실성을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 특히 하천 수위 예측의 중요 변수인 하천 조도계수는 항상 불확실성을 포함하고 있으므로, 이를 고려한 설계방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 설계자가 자유롭게 결정할 수 있는 설계인자인 강변저류지의 횡월류부 길이를 이용하여 하천 조도계수의 불확실성을 고려한 강변저류지 설계 기법을 제안하고자 한다. 이를 위해 HEC-RAS 부정류 수치모형을 이용하여 하천 조도계수와 횡월류부 길이 변화가 홍수조절효과에 미치는 영향을 검토하였고, 분석결과를 이용하여 하천의 수위 예측 불확실성을 고려한 횡월류부 길이를 결정하는 기법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 횡월류부 길이 결정 기법은 하천 수위 예측의 불확실성을 해결할 수 있기 때문에 강변저류지의 홍수조절효과를 좀 더 안전측으로 제시하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

핵심용어 : 강변저류지, 홍수조절효과, 하천 수위, 횡월류부 길이

* 교신저자, 단국대학교 토목환경공학과 연구전담조교수 (e-mail: seojuny@paran.com, Tel: 82-31-8005-5240)

Corresponding Author, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

** 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: peterkim43@gmail.com)

Ph. D Candidate, Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

*** 명지대학교 토목환경공학과 교수 (e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

1. 서 론

강변저류지(side-weir detention basin)는 하천변에 위치한 off-line형 저류지로 제방의 일부 구간을 절개한 형태의 횡월류위어를 포함하며, 홍수시 횡월류를 통해 하도의 홍수량 일부를 저류하여 침투 유량의 저감을 목적으로 하는 홍수대응 구조물이다(May et al. 2003). 강변저류지를 홍수방어 목적으로 사용하기 위해서는 홍수로부터 방어하고자 하는 직하류 지역의 유량 저감량 즉, 홍수조절효과를 정확하게 예측할 필요가 있다.

강변저류지의 홍수조절효과는 시간 변화에 따른 횡월류량 변화에 따라 결정된다. 따라서 횡월류량을 정확하게 산정하는 것이 홍수조절효과의 예측 정확도를 높이는 데 매우 중요하다고 할 수 있다. 횡월류량 산정에 대한 이론적 연구는 De Marchi (1934)에 의해 최초로 이루어졌으며, 횡월류위어부에서 비에너지(specific energy)가 일정하다는 가정 하에 횡월류량을 구하는 식과 횡월류위의 유량계수 식을 제시하였다. De Marchi (1934)의 연구를 바탕으로 지금까지 횡월류위의 다양한 폭과 높이 등의 기하학적 특성과 하천의 수심과 Froude 수 등의 흐름 특성을 고려하여 횡월류위의 수리학적 거동과 유량계수 산정에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다(Frazer, 1957; Subramanya and Awasthy, 1972; El-Khashab and Smith, 1976; Uyumaz and Muslu, 1985; Hager, 1987; Cheong, 1991; Singh et al., 1994; Borghei et al., 1999; Ranga Raju et al., 1979; Lee and Holly, 2002). 이와 같은 연구들에 따르면 횡월류량은 하천의 Froude 수, 하천 폭, 횡월류위의 폭과 높이, 횡월류위의 상류 수심 등에 영향을 받는다고 하였다. 따라서 강변저류지의 홍수조절효과를 정확하게 제시하기 위해서는 횡월류량 산정에 영향을 미치는 각각의 인자들을 합리적으로 결정하여야 하고, 이에 따른 영향을 정확하게 분석하는 것이 필요하다.

강변저류지의 홍수조절효과 분석 방법에 대한 연구로는 Fukuoka et al. (2007)이 Tsumigawa 유수지의 모니터링 자료를 이용하여 강변저류지 홍수조절효과를 분석할 수 있는 2차원 수치모형을 개발하였고, Kim et al. (2012)이 부정류 수문곡선 재현을 위한 유량공급장치(discharge-supply system to generate hydrographs for unsteady flow)를 이용한 부정류 수리실험을 통해 강변저류지의 홍수조절효과를 측정하여 HEC-RAS 모형의 적용성을 검토하여 완전 횡월류 흐름이 발생하는 경우에는 HEC-RAS 모형의 하도내 부정류 모의 결과를 신뢰할 수 있음을 밝혀냈다. 강변저류지 설계인자들에 대한 수리학

적 영향을 검토한 연구로는 Ahn et al. (2008)이 하천의 유입수문곡선, 강변저류지의 저류용량 및 횡월류부 형상에 따라 홍수조절효과가 민감하게 영향을 받기 때문에 모두 인자들을 고려하여 홍수조절효과를 안전측으로 제시하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 따른다고 하였고, Jun et al. (2010)은 횡월류부 유량계수와 하천 조도계수 변화에 따른 강변저류지 홍수조절효과의 민감도를 분석한 결과 하천 조도계수에 따라 홍수조절효과가 크게 차이가 나며, 횡월류위의 정부표고가 높을수록 하천 조도계수에 따른 홍수조절효과의 불확실성은 커진다고 하였다.

이와 같이 하천 조도계수를 어떻게 결정하느냐에 따라 강변저류지 횡월류부의 하천 수위 결정에 영향을 미치므로 강변저류지의 횡월류량과 홍수조절효과를 정확하게 예측하는데 있어 하천의 수위 즉, 하천 조도계수 결정이 무엇보다 중요할 것이다. 하지만 강변저류지 설계에 있어 하천 수위를 하천정비기본계획 수립 시 제시한 하나의 조도계수만으로 산정하여 결정하기 때문에 하천 수위의 불확실성을 고려하지 못하고 있다. 따라서 강변저류지의 홍수조절효과를 안전측으로 설계하기 위해서는 하천 조도계수의 적절한 범위를 추정하는 것이 선행되어야 함은 물론이고 추정된 하천 조도계수의 불확실성을 고려한 강변저류지의 설계 및 홍수조절효과 제시가 필요하다.

이에 본 연구에서는 하천 수위 결정의 불확실성에 고려한 강변저류지의 설계를 위해서 설계 인자로 상대적으로 자유롭게 결정할 수 있는 횡월류부 길이를 선택하였고, 하천 조도계수와 횡월류부 길이 변화가 강변저류지 홍수조절효과에 미치는 영향을 확인하기 위한 민감도 분석을 실시하였다. 또한 그 결과를 이용하여 최종적으로 하천 수위 결정의 불확실성을 고려한 강변저류지의 횡월류부 길이와 홍수조절효과 결정 기법을 제시하고자 한다.

2. 강변저류지의 홍수조절효과 산정 방법

강변저류지의 홍수조절효과를 산정하기 위해서는 정확한 횡월류량 산정이 필요하다. 이를 위해서는 횡월류위의 지형학적 형상과 흐름조건 등을 고려한 횡월류위의 유량계수를 정확하게 산정하는 것이 중요하기 때문에 현장 상황을 고려한 수리모형실험을 통해 횡월류위의 유량계수를 산정하는 것이 바람직하다. 하지만 본 연구에서는 하천 수위 결정의 불확실성을 고려한 강변저류지의 횡월류부 길이 결정 기법 제시가 목적이기 때문에 횡월류위의 유량계수를 실험을 통해 산정하지 않고, 정확도가 조금 떨어지기는 하겠지만 실무에서 가장 많이 사용하고

있는 HEC-RAS에 포함되어 있는 Hager (1987)의 횡월류량 산정식(Eq. (1))을 이용하여 횡월류량을 산정하였다. Hager (1987)의 횡월류량 산정식은 Ji et al. (2013)이 부정류 수리실험 결과와 비교하여 검증을 수행한 결과 비교적 정확하게 횡월류량을 산정함을 밝힌바 있다.

$$Q_w = \frac{3}{5} n^* c L \sqrt{g H^3} (y - W)^{1.5} \left[\frac{1 - W}{3 - 2y - W} \right]^{0.5} \left\{ 1 - (\theta + S_0) \left[\frac{3(1 - y)}{y - W} \right]^{0.5} \right\} \quad (1)$$

여기서, $W = \frac{h_w}{H_t + h_w}$, $y = \frac{H + h_w}{H_t + h_w}$, h_w 는 위어의 높이,

H_t 는 횡월류턱 높이를 기준으로 한 에너지수두, S_0 는 평균 하도경사, θ 는 하도의 수축각 그리고 c 는 위어 형상을 고려한 유량계수이다. 예연위어일 경우에 c 는 1.0이고, 광정위어일 경우에 c 는 Eq. (2)와 같다.

$$c = 1 - \frac{2}{9 \left[1 + \left(\frac{H_t}{b} \right)^4 \right]} \quad (2)$$

일반적으로 강변저류지 횡월류부의 흐름 형태는 Fig. 1

과 같이 크게 다섯 가지로 나눌 수 있다. 저류용량이 충분한 경우에는 Fig. 1(a)와 같이 하천에서 저류지로 완전 횡월류(free overflow) 흐름이 발생하고, 저류지 수위가 횡월류부 높이 이상으로 증가하게 되면 Fig. 1(b)와 같이 하천에서 저류지로 잠긴 횡월류(submerged overflow) 흐름이 발생하게 된다. 그리고 하천의 유량이 침투를 지나 유량이 감소하게 되면 하천 수위가 낮아지게 되어 Fig. 1(c)와 같이 하천수위와 저류지 수위가 어느 순간 같아지게 된다. 그리고 나서 하천 수위가 저류지 수위보다 더 낮아지게 되면 Fig. 1(d)와 같이 저류지에서 하천으로 잠긴 횡월류 흐름이 발생하게 되고, 횡월류부 높이보다 하천 수위가 낮아지게 되어 Fig. 1(e)와 같이 저류지에서 하천으로 완전 횡월류 흐름이 발생하게 된다. 이와 같이 강변저류지의 횡월류부 흐름 형태는 하천과 저류지의 수위 변화에 따라 다양한 형태로 나타나고, 이에 따라 횡월류량도 변하기 때문에 강변저류지의 홍수조절효과를 정확하게 산정하기 위해서는 횡월류부의 흐름 형태를 고려할 필요가 있다.

잠긴 횡월류 흐름이 발생할 경우의 횡월류량은 완전 횡

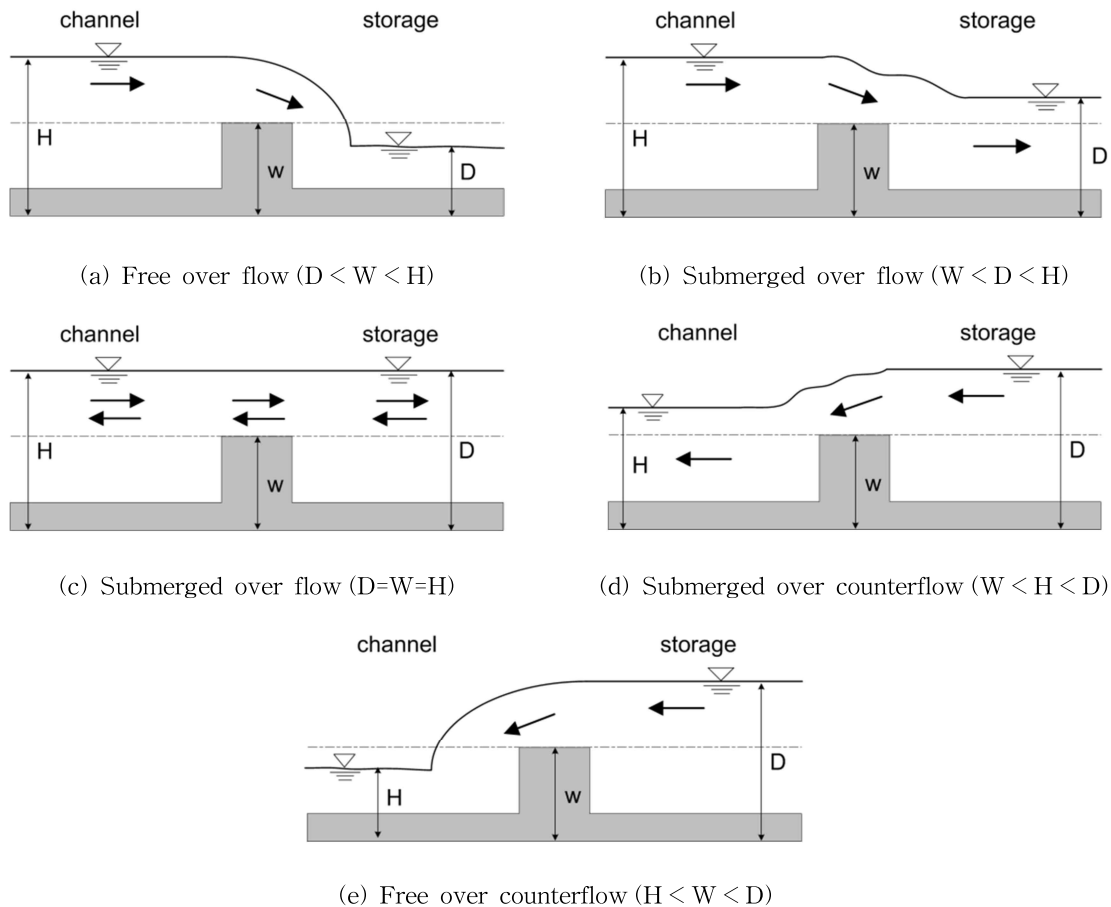


Fig. 1. Type of Side-weir Flow (Ji et al., 2013)

월류가 발생할 경우의 횡월류량보다 감소하게 된다. 따라서 강변저류지 횡월류부 흐름이 완전 횡월류일 경우는 완전 횡월류위어 유량계수(C_f)로 횡월류량을 계산하고, 잠긴 횡월류일 경우는 Eq. (3)의 감소계수(C_s/C_f)를 적용하여 횡월류량을 계산하였다. 감소계수는 Fig. 2와 같이 저류지와 하도의 수위 관계에 따라 결정된다(Bradley, 1978).

$$Q_w = C_f \cdot L \cdot (h-w)^{1.5} \cdot \frac{C_s}{C_f} \quad (3)$$

여기서, C_f 는 완전 횡월류 유량계수이고, C_s 는 잠긴 횡월류 유량계수이다.

본 연구에서는 강변저류지 홍수조절효과를 산정하기 위해 Fig. 3과 같은 가상하도에 대해 수치모의를 수행하였다. 가상하도는 흐름방향 길이 10 km, 하상경사 0.001인 사다리꼴 형태의 복단면을 갖는 직선수로로 결정하였다. 하도의 횡단형상은 수로바닥 폭을 70 m이고 수로 폭을 200 m, 제방고를 10 m로 하였다. 하도 좌안에 설치된 강변저류지의 횡월류부 높이는 하도 바닥면 보다 4 m 높게 설치하였고, 저류면적을 0.04 km²로 결정하여 월류턱 높이를 기준으로 한 저류용량은 0.016 km³로 결정하였다. 상류 유량조건은 Fig. 4와 같이 첨두유량 2,500 m³/s를 갖는

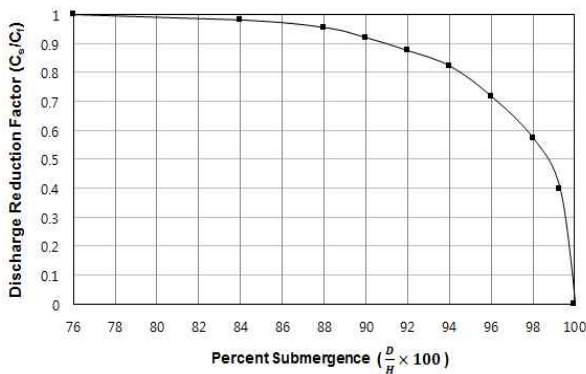


Fig. 2. Discharge Reduction for Submerged Flow (Bradley, 1978)

수문곡선으로 결정하였고, 하류경계는 등류 수심으로 설정하였다. 일반적으로 부정류 흐름 모의 시 하류경계는 수위-유량곡선으로 설정하는 것이 바람직하다. 하지만 강변저류지가 설치된 지점에서 하류단까지의 거리가 총 7 km로 충분히 길게 설정하였기 때문에 횡월류부 주변의 수위 변화가 하류경계 수위까지 영향을 미치지 않는다고 판단하여 하류 경계 조건을 등류수심으로 모의하였다.

한편 강변저류지의 홍수조절효과는 횡월류부가 끝나는 No. 70 단면에서 직하류 방향으로 1 km 떨어진 No. 60 단면에서 시간 변화에 따른 유량을 계산하여 Eq. (4)와 같이 산정하였다.

$$Flood\ Control\ Effect = (Q_{peak})_{w/o\ storage} - (Q_{peak})_{w/\ storage} \quad (4)$$

여기서, $(Q_{peak})_{w/o\ storage}$ 는 강변저류지 설치 전 직하류의 첨두 유량이고, $(Q_{peak})_{w/\ storage}$ 는 강변저류지 설치 후 직하류의 첨두 유량이다.

3. 하천 조도계수와 횡월류부 길이 변화에 따른 강변저류지 홍수조절효과 분석

강변저류지의 홍수조절효과에 영향을 미치는 대표적인

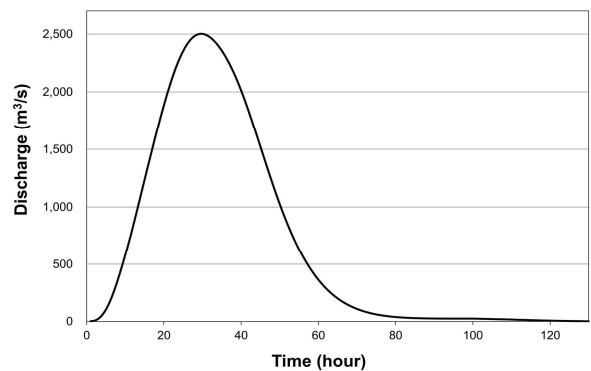


Fig. 4. Discharge Condition of Upstream

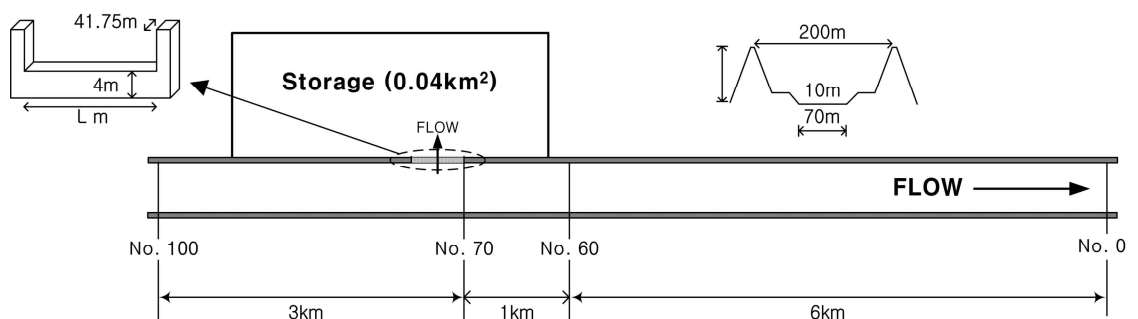


Fig. 3. Experimental Flume

인자들은 강변저류지 횡월류부 형상, 저류용량, 유입 수문 곡선 및 하천 수위 등이다. 그 중에서 강변저류지의 설계해야 할 인자들을 살펴보면 우선 강변저류지 저류용량은 토지 이용 계획과 건설에 따른 경제적인 이유 등으로 설계자가 결정하는데 있어서 제한적인 경우가 많다. 따라서 강변저류지 설계 시 다양한 사전 검토를 통해 저류용량은 어느 정도 결정된다고 할 수 있다. 또한 강변저류지 상류의 유입수문곡선과 하류 수위조건은 발생 가능한 강우특성과 유역특성들을 고려하여 결정하면 되기 때문에 설계자가 자유롭게 결정할 수 없는 인자이다. 또한 강변저류지의 횡월류부 형상 중에서 횡월류부 높이도 강변저류지의 활용방안을 고려하여 침수빈도가 결정되기 때문에 설계자가 자유롭게 결정할 수 있는 인자가 아니다. 예를 들어 강변저류지를 습지로 이용하고자 하는 경우에는 침수빈도를 작게 결정해야 하고, 경기장과 공원 등과 같이 시민들의 사용빈도가 높은 경우에는 침수빈도를 크게 결정해야 할 것이다. 이와 같이 강변저류지 설계에 있어서 저류용량, 상류부 유입수문곡선, 하류 수위조건 및 횡월류부 높이는 설계자가 선택할 수 있는 것이 아니라 주어진

조건에 맞도록 적절하게 결정하는 인자들이다. 그러나 강변저류지의 횡월류부 길이는 다른 어떠한 제약도 받지 않고 설계자가 자유롭게 결정할 수 있는 설계 인자이다. 즉, 설계자는 횡월류부 길이를 조절하면서 강변저류지로 들어가는 횡월류량을 자유롭게 조절할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 설계가 자유로운 강변저류지 횡월류부 길이와 하천 조도계수를 변화시키면서 강변저류지 홍수조절효과에 미치는 영향을 살펴보았다.

하천 수위 예측의 불확실성을 고려하기 위해 Manning의 조도계수를 0.025, 0.030, 0.035, 0.040로 변화시켰고, 강변저류지의 횡월류부 길이는 50 m, 70 m, 90 m, 110 m, 130 m, 150 m, 170 m, 190 m, 210 m, 230 m 및 250 m로 변화시키면서 강변저류지 직하류 지점의 홍수조절효과를 분석하였다. 하천 조도계수와 강변저류지 횡월류부 길이 변화에 따른 강변저류지 홍수조절효과 분석 결과는 Fig. 5와 Table 1과 같았다.

우선 하천 조도계수를 동일하게 결정한 상태에서 횡월류부 길이만 변화시켰을 때 횡월류부의 흐름 형태와 홍수조절효과의 양상을 살펴보면 다음과 같았다. 첫 번째로

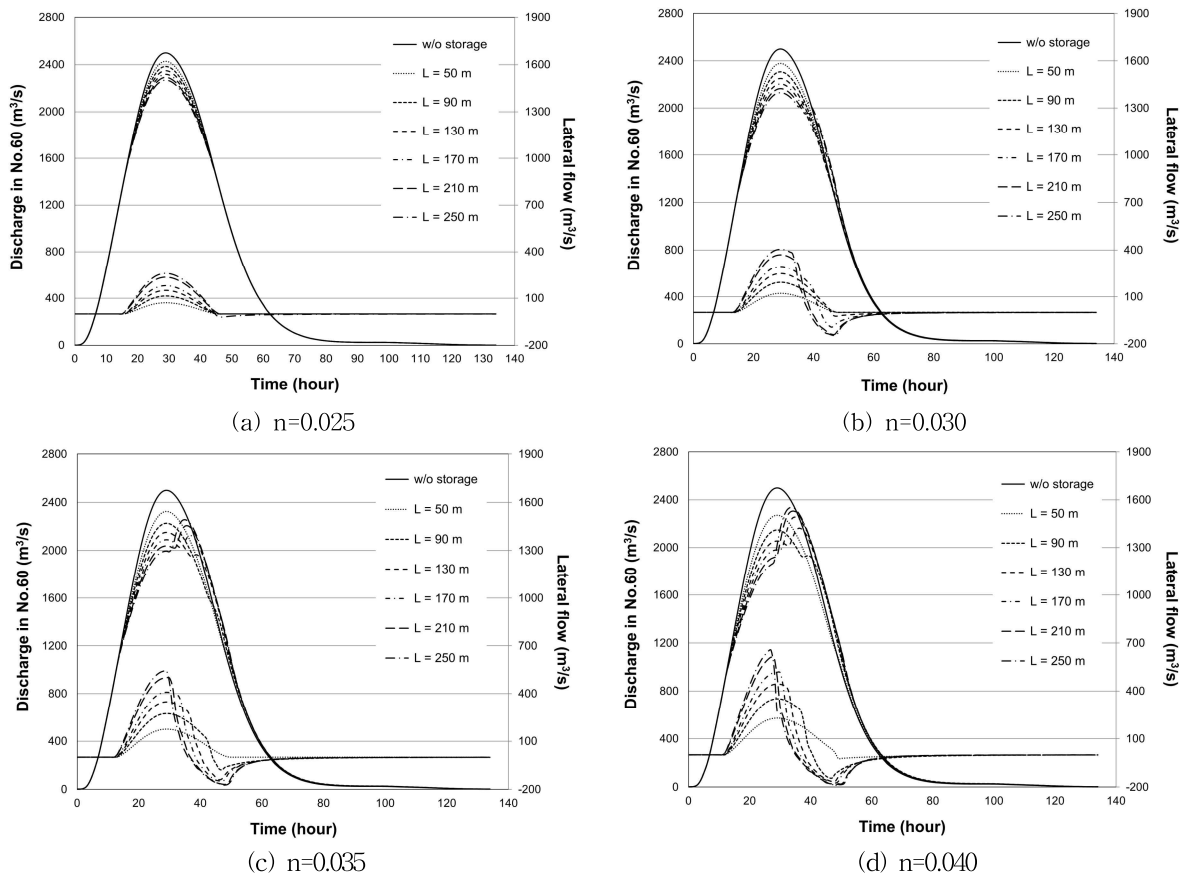


Fig. 5. Hydrograph accordingly with the Variation of the Length of the Side-weir

하천 조도계수가 0.025인 경우는 Fig. 5(a)와 Table 1과 같이 강변저류지의 횡월류부 길이를 50m에서 250m까지 증가시켜도 저류지가 가득차지 않아 횡월류부에서 Fig. 5(a)와 같은 완전 횡월류 흐름만 발생하였다. 즉, 완전 횡월류 흐름만 발생하는 경우는 횡월류부 길이가 길어질수록 홍수조절효과도 증가하는 것으로 나타났다.

두 번째로 하천 조도계수가 0.030인 경우에는 Fig. 5(b)와 Table 1과 같이 강변저류지의 횡월류부 길이가 50m에서 110m까지는 변화시켜도 저류지가 가득차지 않아 하천에서 저류지로 들어가는 흐름 형태가 완전 횡월류 흐름만 발생하였으나, 횡월류부 길이가 130m 이상 길어지게 되면 저류지에서 하천으로 빠져나오는 흐름이 생기는 것을 확인하였다. 즉, 하천 조도계수가 0.025인 경우보다 수위도 높게 결정되었고, 횡월류부 길이가 길어지게 되면서 하천에서 저류지로 들어가는 횡월류량이 많아지기 때문에 저류지가 급속히 채워져 횡월류부에서 Fig. 5(b)와 같은 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 잠긴 횡월류 흐름이 발생한 후 하천의 유량이 침두를 지나면서 하천 수위가 횡월류부 높이보다 낮아지게 되면 횡월류부 높이보다 높았던 저류지 내 유량이 다시 하천으로 빠져나오게 되어 횡월류부 흐름 형태가 Fig. 1(c) → Fig. 1(d) → Fig. 1(e)와 같은 순서로 발생하게 되었다. 즉, Fig. 5(b)와 같이 저류지 유량이 하천으로 나오게 되어 (-)유량이 발생하게 되어 하천의 유량을 증가시키는 역할을 하게 된다. 다만 하천 조도계수가 0.030의 경우에는 저류지에서 (-)유량이 발생하여 하천의 유량이 증가하더라도 침두 유량 발생 이후이기 때문에 하천 조도계수가 0.025인 경우와 마찬가지로 횡월류부 길이가 증가함에 따

라 홍수조절효과도 증가하는 경향을 나타냈다.

세 번째로 하천 조도계수가 0.035인 경우는 Fig. 5(c)와 Table 1과 같이 횡월류부 길이가 50m일 때만 저류용량이 충분하여 완전 횡월류 흐름이 발생하였고, 횡월류부 길이가 70m에서 250m까지는 저류용량이 부족하여 Fig. 1(a) → Fig. 1(b) → Fig. 1(c) → Fig. 1(d) → Fig. 1(e)와 같은 순서로 횡월류부 흐름이 발생하였다. 특히 앞서 하천 조도계수가 0.025와 0.035인 경우와 달리 횡월류부 길이가 50m에서 150m까지는 홍수조절효과가 점점 증가하다가 170m 이상에서는 저류지가 급속히 채워져 홍수조절효과가 점점 감소하는 경향을 나타냈다. 즉, 횡월류부 길이가 무조건 길다고 해서 강변저류지의 홍수조절효과가 크게 발생하는 것이 아님을 확인할 수 있었다.

네 번째로 하천 조도계수가 0.040인 경우는 Fig. 5(d)와 Table 1과 같이 횡월류부 길이가 50m일 때만 완전 횡월류 흐름이 발생하였고, 횡월류부 길이가 90m에서 250m까지는 Fig. 5(c)와 마찬가지로 Fig. 1(a) → Fig. 1(b) → Fig. 1(c) → Fig. 1(d) → Fig. 1(e)와 같은 순서로 횡월류부 흐름이 발생하였다. 또한 횡월류부 길이가 50m에서 110m까지는 홍수조절효과가 점점 증가하다가 130m 이상에서는 저류지가 급속히 채워져 홍수조절효과가 점점 감소하는 경향을 나타냈다.

이와 같이 하천 조도계수가 동일하다 하더라도 횡월류부 길이가 변함에 따라 강변저류지의 홍수조절효과에 영향을 많이 미침을 확인할 있었고, 횡월류부에서 잠긴 횡월류 흐름이 발생할 경우 최대 홍수조절효과를 확보하기 위해서는 적절한 횡월류부의 길이 결정이 필요함을 확인하였다.

Table 1. Flood-Control Effect according to the Variation of the Length of Side-weir and Manning' n

Length of Side-weir (m)	Flood-Control Effect (m ³ /s)			
	n=0.025	n=0.030	n=0.035	n=0.040
50	71.44	121.85	174.78	228.45
70	94.40	159.54	227.31	294.86
90	115.02	192.73	272.79	351.61
110	133.72	222.34	312.72	400.84
130	150.79	249.02	348.30	337.80
150	166.51	273.30	380.34	284.47
170	181.04	295.51	375.34	243.56
190	194.55	315.99	327.90	216.63
210	207.22	335.03	294.84	193.86
230	219.11	352.77	266.14	176.01
250	230.37	369.43	243.38	163.16

한편 강변저류지의 횡월류부 길이가 동일한 상태에서 하천 조도계수의 변화가 강변저류지의 홍수조절효과에 미치는 영향을 분석하였다. 우선 횡월류부 길이가 50 m에서 11 m까지는 하천 조도계수가 0.025에서 0.040까지 증가할수록 강변저류지의 홍수조절효과도 같이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 횡월류부의 길이가 130 m에서 190 m까지는 하천 조도계수가 0.035일 때 최대 홍수조절효과를 보였고, 조도계수가 0.040일 때는 홍수조절효과가 오히려 작아지는 경향을 나타냈다. 또한 횡월류부의 길이가 210 m에서 250 m까지는 하천 조도계수가 0.030일 때 최대 홍수조절효과를 보였고, 조도계수가 0.035보다 큰 경우는 홍수조절효과가 작아지는 경향을 나타냈다. 즉, 하천 조도계수를 크게 결정하여 하천 수위가 높게 산정된 경우에는 횡월류부의 길이가 길어질수록 횡월류량이 많아져서 하천의 침투 유량이 발생하기도 전에 저류지가 가득차게 되어 홍수조절효과가 작아지는 결과를 나타냈다. 이와 같이 하천 수위를 어떻게 결정하느냐에 따라 강변저류지의 홍수조절효과를 산정한 결과가 크게 달라질 수 있음을 확인하였다.

국내 하천 설계에 있어 홍수위는 현장 상황을 고려하여 하나의 조도계수를 결정하고, 이를 이용하여 1차원 부등류 계산을 통해 산정하도록 하고 있다. 하지만 앞서 분석한 결과에서와 같이 강변저류지의 홍수조절효과는 하천 수위 변화에 따라 영향을 크게 받기 때문에 하나의 조도계수만을 고려하여 강변저류지의 홍수조절효과를 산정하게 되면 불확실성이 클 수밖에 없다. 만약 하나의 하천 조도계수에 대해서만 강변저류지의 홍수조절효과를 산정한다면 실제 현상과 비교하여 과다 산정될 확률이 높기 때문에 강변저류지의 홍수조절효과를 치수 대책에 반영하는데 문제가 될 수 있을 것이다. 이와 같이 강변저류지의 홍수조절효과는 치수 대책에 직접적으로 반영을 해야 하는 중요한 자료이기 때문에 안전측으로 제시하는 것이 바람직하다. 따라서 발생 가능한 다양한 하천 조도계수에 대하여 강변저류지의 홍수조절효과를 충분히 검토한 후에 홍수조절효과들 중에서 최소값을 제시하는 것이 바람직 할 것이다.

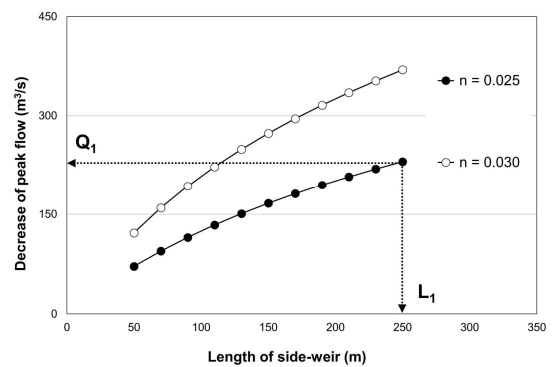
4. 강변저류지 횡월류부 길이 결정 기법

앞서 살펴본 발생 가능한 하천 조도계수와 횡월류부 길이 변화에 따른 강변저류지의 홍수조절효과 분석 결과는 Fig. 6과 같이 크게 세 가지 경우로 나누어 볼 수 있다.

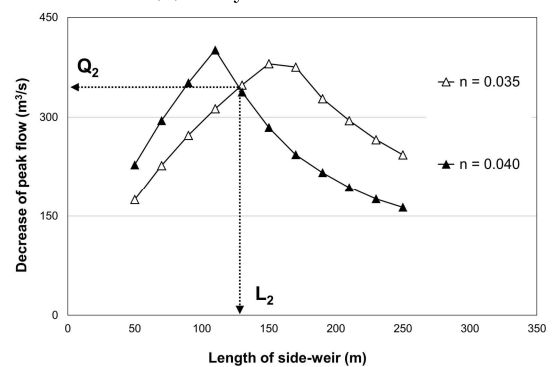
첫 번째는 Fig. 6(a)와 같이 하천 조도계수와 횡월류부

길이가 아무리 증가하여도 저류용량이 충분하여 강변저류지의 횡월류부에서 완전 횡월류 흐름만 발생하는 경우이다. 이와 같은 경우는 발생 가능한 최소 조도계수를 기준으로 산정한 홍수조절효과를 안전측으로 제시할 수 있다. 특히 최소 조도계수에 대한 횡월류부 길이 중에서 설계 가능한 최대 횡월류부 길이(L_1)로 강변저류지 설계하게 되면 최대 홍수조절효과(Q_1)를 확보할 수 있다.

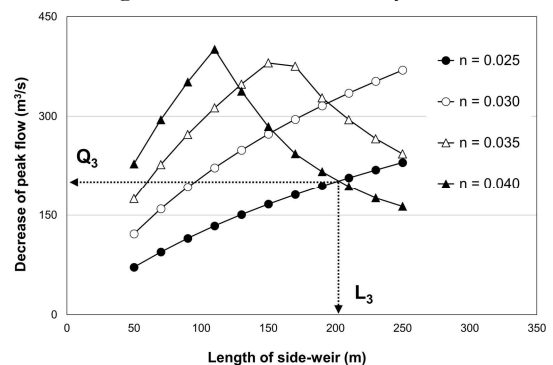
두 번째는 Fig. 6(b)와 같이 처음에는 완전 횡월류 흐름이 발생하다가 저류용량이 부족하여 잠긴 횡월류 흐름이



(a) Only free overflow



(b) Submerged overflow followed by free overflow



(c) Only free overflow and submerged overflow followed by free overflow

Fig. 6. Types of the Relationship between Length of the Side-Weir and Flood-Control Effect

발생하는 경우이다. 이 경우에는 Fig. 6(b)와 같이 동일한 횡월류부 길이에 대하여 하천 조도계수에 따라 홍수조절 효과가 각각 다르게 산정되기 때문에 홍수조절 효과 중에서 작은 값을 제시하여야 안전측으로 제시할 수 있고, 그 중에서 가장 큰 홍수조절효과(Q_2)를 확보할 수 있는 횡월류부 길이(L_2)를 결정하면 된다. 즉, Fig. 6(b)와 같이 횡월류부 길이를 변화시키면서 하천 조도계수가 0.035와 0.040인 경우에 대하여 산정한 홍수조절효과가 동일하게 발생하는 횡월류부 길이(L_2)로 설계를 하면 하천 조도계수의 불확실성을 고려한 최대 홍수조절효과(Q_2)를 확보할 수 있다.

세 번째는 Fig. 6(c)와 같이 하천 조도계수와 횡월류부 길이 변화에 따라 강변저류지의 횡월류부에서 완전 횡월류 흐름만 발생하는 경우와 완전 횡월류 흐름이 발생한 후에 잠긴 횡월류 흐름도 발생하는 경우가 모두 포함되는 경우이다. 이 경우도 앞서와 마찬가지로 횡월류부 길이 변화에 따라 산정한 홍수조절효과 중에서 작은 값을 선택하면 된다. 즉, 네 가지 하천 조도계수들 중에서 횡월류부 길이가 200m보다 작은 경우에는 하천 조도계수가 0.025로 산정한 홍수조절효과를 안전측으로 제시하면 되고, 횡월류부 길이가 200m보다 큰 경우에는 하천 조도계수가 0.040으로 산정한 홍수조절효과를 안전측으로 제시하면 된다. 또한 강변저류지를 가장 효율적으로 사용하기 위한 횡월류부 길이는 안전측으로 제시 가능한 홍수조절효과 중에서 가장 큰 값이 발생하는 횡월류부 길이로 결정할 수 있다. 즉, 최소 조도계수와 최대 조도계수의 횡월류부 길이와 홍수조절효과의 관계가 일치하는 200m를 최적의 횡월류부 길이로 결정할 수 있다.

앞서 세 가지 경우를 살펴보면 발생 가능한 최소 하천 조도계수와 최대 하천 조도계수에 대하여 횡월류부 길이를 다양하게 변화시키면서 홍수조절효과를 산정한 결과를 이용하면 하천 수위 예측의 불확실성을 고려한 강변저류지 설계가 가능한 것으로 나타났다. 즉, 완전 횡월류 흐름만 발생하는 경우는 최소 하천 조도계수로 산정한 홍수조절효과가 가장 작은 값을 나타낼 것이고, 잠긴 횡월류

흐름이 발생하는 경우는 최대 하천 조도계수로 산정한 홍수조절효과가 가장 작은 값을 나타내기 때문에 최소와 최대 하천 조도계수로 산정한 홍수조절효과가 일치하는 횡월류부 길이로 설계하게 되면 하천 조도계수의 불확실성을 해결할 수 있었다. 또한 이때의 홍수조절효과는 안전측으로 제시할 수 있는 최대값이 되기 때문에 강변저류지를 가장 효율적으로 사용할 수 있는 횡월류부 길이가 됨을 확인하였다.

한편 강변저류지 횡월류부 길이를 앞서 결정한대로 200m로 결정하고 발생 가능한 조도계수 범위에 대하여 강변저류지 직하류 No. 60 수문곡선의 홍수조절효과를 비교한 결과 Fig. 7과 Table 2와 같이 나타났다. 침투 홍수량을 비교하면 하천 조도계수가 0.025와 0.040일 때 가장 크게 나타났고, 하천 조도계수가 0.025보다 크고 0.040보다 작은 경우에는 앞선 경우 보다는 침투 홍수량이 작게 나타났다. 따라서 최소 조도계수와 최대 조도계수로 산정한 홍수조절효과가 동일하게 발생하는 횡월류부 길이로 강변저류지 설계하면 하천 조도계수의 불확실성을 고려하여 강변저류지의 홍수조절효과를 안전 측으로 제시할 수 있음을 확인할 수 있었다.

하천 조도계수의 불확실성을 고려한 강변저류지 횡월류부 길이 결정 기법을 정리하면 Fig. 8과 같이 총 5단계

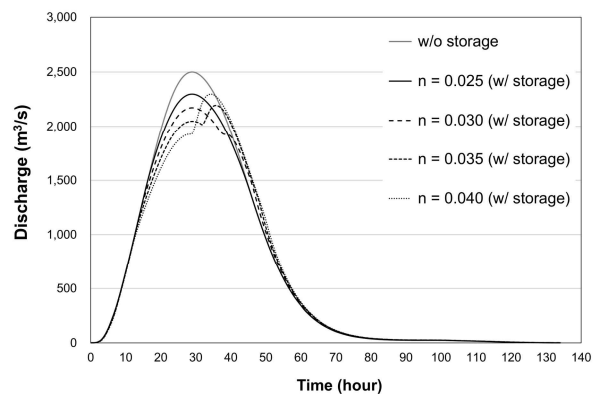


Fig. 7. Hydrograph accordingly with the Variation of Manning's n (Length of the Side-Weir=200 m)

Table 2. Change of Peak Discharge with Storage and Flood-Control Effect (Length of the Side-weir=200 m)

Manning's roughness coefficient	Peak discharge with storage (m ³ /s) ①	Flood-Control Effect (m ³ /s) ②	Rate (=②/2,500 m ³ /s) (%)
0.025	2298.18	202.42	8.1
0.030	2172.60	327.58	13.1
0.035	2193.19	306.63	12.3
0.040	2296.54	203.04	8.1

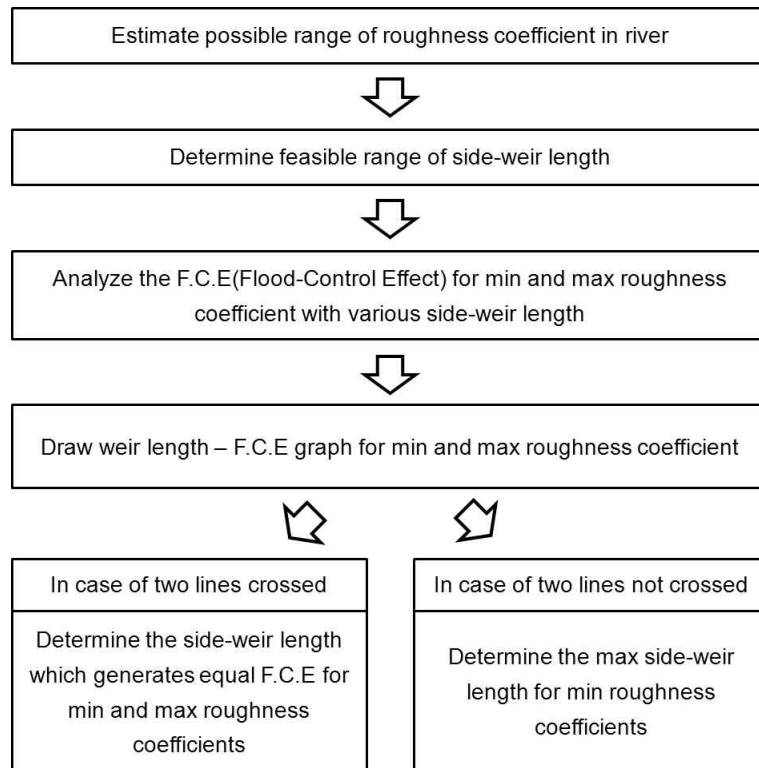


Fig. 8. Steps to Designing of the Side-Weir Length

로 설명할 수 있다. 첫 번째, 강변저류지를 설치하고자 하는 하천의 발생 가능한 조도계수 범위를 결정한다. 두 번째, 지형학적 환경을 고려하여 설계 가능한 강변저류지 횡월류부 길이의 범위를 결정한다. 세 번째, 하천의 발생 가능한 최대 조도계수와 최소 조도계수에 대하여 강변저류지의 횡월류부 길이를 변화시키면서 강변저류지의 홍수조절효과를 산정한다. 단, 횡월류부 길이의 변화 폭을 가능한 짧게 하는 것이 적정 횡월류부 길이를 찾는 데 도움이 된다. 네 번째, 최대 조도계수와 최소 조도계수에 대하여 횡월류부 길이 변화에 따른 홍수조절효과 관계를 도표로 작성한다. 다섯 번째, 작성한 도표에서 최대 조도계수와 최소 조도계수에 대한 홍수조절효과를 연결한 선이 만나게 되면 그 때의 횡월류부 길이를 강변저류지 횡월류부 길이로 결정한다. 하지만 횡월류부 길이 변화에 따른 최대 조도계수와 최소 조도계수에 대한 홍수조절효과를 연결한 선이 만나지 않는 경우에는 최소 조도계수에 대한 최대 횡월류부 길이를 선택하면 안전측으로 홍수조절효과를 제시할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천 조도계수의 불확실성을 고려한 강

변저류지 설계를 위하여 하천 조도계수와 횡월류부 길이 변화가 강변저류지 홍수조절효과에 미치는 영향을 분석한 결과를 이용하여 하천 조도계수의 불확실성을 고려한 강변저류지의 횡월류부 길이와 홍수조절효과 결정 기법을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 하천 조도계수와 강변저류지 횡월류부 길이 변화가 강변저류지 홍수조절효과에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 강변저류지의 저류용량이 충분히 커서 완전 횡월류 흐름만 발생할 경우는 하천 조도계수와 횡월류부 길이가 증가함에 따라 횡월류량이 증가하여 홍수조절효과가 커지는 것으로 나타났다. 하지만 강변저류지 횡월류부의 용량이 충분치 않아 횡월류부에서 잠긴 횡월류 흐름이 발생할 경우는 하천 조도계수와 횡월류부 길이가 증가함에 따라 횡월류량이 감소하여 강변저류지의 홍수조절효과도 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 저류용량이 부족한 경우는 강변저류지의 횡월류부 길이가 무조건 길다고 해서 홍수조절효과가 크게 발생하는 것이 아님을 확인하였다.
- 2) 대상 하천의 발생 가능한 하천 조도계수와 횡월류부 길이 변화에 따른 홍수조절효과 양상을 크게 세 가

지 경우로 나누어 제시하였다. 첫 번째는 강변저류지의 저류용량이 충분하여 최대 조도계수와 최대 횡월류부 길이에서도 횡월류부에서 완전 횡월류 흐름만 발생하는 경우이다. 이와 같은 경우에는 발생 가능한 최소 조도계수를 기준으로 완전 횡월류 흐름이 발생하는 최대 횡월류부 길이로 설계를 하면 안전측 이면서 최대의 홍수조절효과를 제시할 수 있는 것으로 나타났다. 두 번째는 최소 조도계수와 최대 조도계수에 대하여 횡월류부 길이 변화에 따라 모두 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 경우이다. 이와 같은 경우에는 최대 조도계수와 최소 조도계수의 홍수조절 효과가 동일하게 발생하는 횡월류부 길이로 설계하게 되면 하천 조도계수의 불확실성을 해결하면서 최대 홍수조절효과를 제시할 수 있는 것으로 나타났다. 세 번째는 최소 조도계수에서는 저류용량이 충분하여 강변저류지의 횡월류부에서 완전 횡월류 흐름만 발생하고, 최대 조도계수에서는 저류용량이 부족하여 강변저류지의 횡월류부에서 잠긴 횡월류 흐름이 발생하는 경우이다. 이 경우에도 마찬가지로 최대 조도계수와 최소 조도계수의 홍수조절효과가 동일하게 발생하는 횡월류부 길이로 설계하면 하천 수위 예측의 불확실성을 해결하면서 강변저류지를 가장 효율적으로 설계할 수 있는 것으로 나타났다.

- 3) 하천의 수위 예측 불확실성을 고려한 강변저류지 횡월류부 길이 결정 기법을 총 5단계로 제시하였다. 첫째, 강변저류지가 설치되는 하천의 발생 가능한 최소 조도계수와 최대 조도계수를 결정한다. 둘째, 설계 가능한 강변저류지의 횡월류부 길이의 범위를 결정한다. 셋째, 이들 조도계수에 대하여 강변저류지 횡월류부 길이를 변화시키면서 홍수조절효과를 산정한다. 넷째, 최대 조도계수와 최소 조도계수에 대한 횡월류부 길이 변화에 따른 강변저류지 홍수조절효과를 도표로 작성한다. 마지막으로 최대 조도계수와 최소 조도계수에 대한 홍수조절효과가 동일한 횡월류부 길이로 강변저류지를 설계하고 그 때의 홍수조절효과를 제시한다. 단, 모든 횡월류부 길이에서 완전 횡월류 흐름이 발생할 경우에는 최소 조도계수에 대한 최대 횡월류부 길이를 결정하도록 한다.

본 연구를 통해 강변저류지를 설계함에 있어 하천 수위 예측의 불확실성을 해결할 수 있는 횡월류부 길이 결정 기법을 제시하였다. 따라서 본 연구 결과는 강변저류지의 홍수조절효과를 좀 더 안전측으로 제시할 수 있을 뿐만 아니라 강변저류지를 가장 효율적으로 활용할 수 있기 때문에

강변저류지 설계 실무에 직접 활용 가능할 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서 제시한 강변저류지의 설계 인자들에 대한 민감도 분석 방법은 다른 인자들의 불확실성을 해결하기 위한 방법으로도 적용 가능할 것으로 생각한다.

감사의 글

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

References

- Ahn, T.J., Kang, I.W., and Baek, C.W. (2008). "Development of decision making model for optimal location of washland based on flood control effect estimated by hydrologic approach." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 7, pp. 725-735. (in Korean)
- Borghesi, M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. (1999). "Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 1051-1056.
- Bradley, J.N. (1978). *Hydraulics of bridge waterways*. Hydraulic Design Series No. 1, Federal Highway Administration, 2ndEd., Washington, D.C., U.S.
- Cheong, H.F. (1991). "Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel." *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 461-475.
- De Marchi, G. (1934). "Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali." *L'Energia Elettrica, Milano*, Vol. 11, Nov. 849-860.
- El-Khashab, A., and Smith, K.H. (1976). "Experimental investigation of flow over side weirs." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, No. 9, pp. 1255-1268.
- Frazer, W. (1957). "The behavior of side weirs in prismatic rectangular channels." London, England. Proceedings of Institute of Civil Engineers, 6, pp. 305-600.
- Fukuoka, S., Kon, T., and Okamura, S. (2007). "Assessment of flood control effects of the Tsurunigawa river multi-purpose retarding basin." *Doboku Gakkai Ron-*

- bunshuu B*, Vol. 63, No. 3, pp. 238-248. (in Japanese)
- Hager, W.H. (1987). "Lateral outflow over side weirs." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 4, pp. 491-504.
- Ji, U., Kim, S.J., Yoon, B.M., and Kim, S.H. (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 Y, B.M. (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.J., Hong, S.J., Yoon, B.M., and Ji, U. (2012). "Feasibility analysis of HEC-RAS for unsteady flow simulation in the stream channel with a side-weir detention basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 5, pp. 495-503. (in Korean)
- Lee, K.L., and Holley, E.R. (2002). Physical modeling for side-channel weirs. CRWR Online Report 02-2, houston, TX, USA.
- May, R.W.P., Bromwich, B.C., Gasowski, Y., Rickard, C.E. (2003). Hydraulic design of side weirs. Thomas Telford Publishing, London.
- Ranga Raju, K.G., Parasad, B., and Gupta, S.K. (1979). "Side weir in rectangular channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 105, No. 5, pp. 547-554.
- Singh, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T. (1994). "Spatially varied flow over side-weirs." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 4, pp. 814-819.
- Subramanya, K., and Awasthy, S.C. (1972). "Spatially varied flow over side weirs." *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 98, No. 1, pp. 1-10.
- Uyumaz, A., and Muslu, Y. (1985). "Flow over side weirs in circular channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 1, pp. 144-160.

paper number : 15-048

Received : 20 June 2015

Revised : 8 July 2015

Accepted : 8 July 2015