

## 측면 위어를 넘나드는 천수 흐름에 대한 2차원 수치모의 2D Numerical Simulations for Shallow-water Flows over a Side Weir

황 승 용\*

Hwang, Seung-Yong

### Abstract

It was reviewed for the 2D numerical simulations to evaluate the effects of flood control by detention basin, even if stage-discharge relationships for the side weir were not known. A 2D depth-integrated numerical model was constructed by the application of the finite volume method to the shallow water equations as a numerical method and the introduction of an approximate Riemann solver for the accurate calculation of fluxes. Results by the model were compared with those by the laboratory test for the cases of free overflow and submerged flow over a side weir between the channel and storage. The difference between simulated and measured discharge coefficients for the case of free overflow is very small. In addition, the results by simulations were in good agreement with those by experiments for the submerged flow over a side weir and its mechanism was reproduced well. Through this study the discharge coefficients of side weirs can be accurately determined by the 2D numerical model and a considerable degree of accuracy can be achieved to evaluate the effect of flood defenses by detention basins. Thus, it will be expected to apply this model practically to the plan of detention basins, the evaluation of design alternatives, or the management of the existing ones.

**Keywords** : side weir, detention basin, shallow water equations, Riemann solver, HLLL scheme

### 요 지

측면 위어의 수위-유량 관계가 알려지지 않더라도, 저류지에 의한 홍수 조절 효과를 평가할 수 있는 2차원 수치모의에 대해 검토하였다. 수치해법으로서 천수방정식에 대해 유한체적법을 적용하고, 흐름률의 정확한 계산을 위해 근사 Riemann 해법을 도입하여 수심적분 2차원 수치모형을 구성하였다. 모의 결과를 수로와 저류지에서 자유 월류와 잠긴 흐름이 발생하는 실험실 실험의 결과와 비교하였다. 자유 월류 상태에서 예측된 측면 위어의 유량 계수와 실험에 의한 그것 사이의 차이는 매우 작았다. 또한, 잠긴 흐름에 대한 모의 결과도 측정 결과와 잘 일치하였으며, 그 기구가 잘 재현되었다. 이 연구를 통해 2차원 수치모형으로 측면 위어에 대한 유량 계수를 정확하게 결정할 수 있으며, 저류지에 대한 홍수 방어능력의 검토 또한 상당한 수준의 정확도로 이루어질 수 있음이 확인되었다. 따라서 저류지의 계획, 설계안의 검토, 관리를 위한 기존 저류지의 평가 등에 이 모형의 실용적인 적용이 기대된다.

**핵심용어** : 측면 위어, 저류지, 천수방정식, Riemann 해법, HLLL 기법

### 1. 서 론

측면 위어(side weir)는 수로에서 흐름의 분기를 위해 그

측면에 설치되는 수리 구조물로서 하천, 저수지, 방수로, 상·하수도 등 다양한 시설에 적용된다(May et al., 2003; Hager, 2010). 하천에서 측면 위어의 대표적인 적용 사례

\* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원 (e-mail: syhwang@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0653)  
Senior Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, KICT, Gyeonggi-do, 10223, Republic of Korea

로서 하천시설 중 하천 변에 설치되는 저류지를 들 수 있다. 즉, 홍수의 발생으로 하천의 수위가 어떤 기준보다 높아지면, 측면 위어를 통해 흐름의 일부를 돌려 저류지로 보냄으로써 본류의 부담을 줄이게 된다.

수리 설계에서 측면 위어를 도입할 때, 일반적인 위어와 마찬가지로, 그 형식과 제원에 적합한 유량 계수(discharge coefficient)의 결정을 통해 수위-유량 관계를 수립하는 것이 관건일 것이다. 유량 계수는 측면 위어에 대한 수리학적 해석 이론과 실험 연구를 통한 월류 공식(overflow formula)에 의해 결정되어 저류지 등의 계획과 설계에 이용되며(Henderson, 1966; May et al., 2003; Hager, 2010), 그 개략적인 검토를 위해 월류 공식의 채택이 가능한 1차원 부동류 계산모형이 적용될 수 있다(Brunner, 2010).

그런데 측면 위어는, 일반적인 위어와 달리, 수로의 측면에서 월류가 형성되므로 흐름의 평면적 양상이 비교적 복잡하고 저류지의 용량에 따라 역류가 발생할 수도 있다. 따라서 설계안의 실질적인 검토나 홍수 방어능력 평가, 홍수 경계체계 수립 등 시설의 관리를 위해서는 수위-유량 관계를 정확하게 수립하는 것이 필수적일 것이다. 이를 위한 가장 직접적인 수단은 수리모형 시험이겠으나, 소요되는 시간과 비용이 상당하여 다양한 경우에 대한 시험이 쉽지 않다. 그 대안으로서 3차원 CFD (Computational Fluid Dynamics) 모형의 적용이 제안되나(May et al., 2003), 이것 또한 적지 않은 시간과 비용이 요구된다.

측면 위어는 주로 수로의 바닥에 직각 또는 급경사를 이루어 그 변에 설치되므로 3차원 해석이 자연스럽겠으나, 수심적분 2차원 모형의 적용 사례도 없지 않다(Park, 2002; Fukuoka et al., 2007; Choi and Ahn, 2011; Cho et al., 2014; Lee et al., 2014). 수심적분 2차원 모형으로 직접인 구조물에 대해 직접 해석하는 것이 불가능하므로 경사로 완화하는 것이 불가피한 단점이 있으며, 연직 방향의 흐름 정보를 획득할 수 없는 한계가 있다. 그러나 3차원 수치모의에 비해 소요되는 계산 격자의 수가 현저하게 적으므로 동일한 계산 영역에 대해 계산 시간을 크게 줄이거나 같은 시간 동안 훨씬 넓은 영역에 대해 모의할 수 있는 장점이 있다.

2차원 수치모의를 위해 수심적분된 2차원 천수방정식을 지배방정식으로 두고 수치해법으로 주로 ADI (Alternating Direction Implicit) 기법이 채택되었으나, 최근 들어 근사 Riemann 해법도 적용되고 있다(Lee et al., 2014). 가상의 수로나 저류지에 대해 모의하거나(Park, 2002; Choi and Ahn, 2011) 실제의 저류지에 대해 1차원 모형과 연계하는 경우(Choi and Ahn, 2011; Lee et al., 2014), 대체로 직접 상태인 측면 위어에 대해 월류 공식을 사용하기도

한다. 그러나 실제 현장의 저류지를 대상으로 모의하는 경우, 측면 위어는 대부분 환경사의 월류제 형태이기도 하여 별도의 월류 공식을 이용하지 않고 측면 위어를 지형으로 간주하여 계산 영역에 포함하게 된다(Fukuoka et al., 2007; Cho et al., 2014). 상업용 모형인 CCHE2D를 적용한 Cho et al. (2014)의 연구를 제외하면, 측면 위어에 대한 2차원 수치모의를 위해 개발된 모형이 적용되었다.

월류 공식이 적용된다면, 측면 위어의 월류량에 대한 수치모의의 정확도는 모형 자체의 정확도보다는 월류 공식의 그것에 의존될 가능성이 크다. 그런데 대부분의 월류 공식은 측면 위어의 길이 전체에 단일하게 적용되므로(Henderson, 1966; Hager, 2010) 2차원 해석에서 측면 위어 위의 계산 격자에 일률적으로 적용되기에 미흡한 측면이 있다. 또한, 월류 공식을 사용하지 않고 2차원 수치모형을 적용하더라도, 월류량이 적절하게 계산되는지 확인하기 위해 측면 위어를 지나는 흐름에 대한 수위-유량 관계가 먼저 검토되어야 할 것이다. 그러나 기존의 연구를 살펴보면, 2차원 수치모의의 결과를 실험실 실험이나 현장 관측 성과에 의한 측면 위어의 유량 계수와 비교를 통해 개발된 모형을 검증한 사례를 찾아보기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 측면 위어로 연결된 수로와 저류지에 적용할 수 있는 수심적분 2차원 수치모형을 실험실 실험결과와 비교를 통해 모형을 검증하고자 한다.

## 2. 수치 모형과 검증

### 2.1 수치 모형

지배방정식은 다음과 같이 2차원 평면,  $(x, y)$ 에서 정의되는 천수방정식이다(Weiyan, 1992).

$$\mathbf{U}_t + \mathbf{F}(\mathbf{U})_x + \mathbf{G}(\mathbf{U})_y = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (1a)$$

여기에서, 아래 첨자  $t$  그리고  $x$ 와  $y$ 는 각각 시간과 공간에 대한 편미분을 의미하고, 보존변수(conservative variable)의 벡터,  $\mathbf{U}$ ,  $x$  방향의 흐름률(flux) 벡터,  $\mathbf{F}$ ,  $y$  방향의 흐름률 벡터,  $\mathbf{G}$ , 그리고 생성항 벡터,  $\mathbf{S}$ 는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{U} = [h, hu, hv]^T \quad (1b)$$

$$\mathbf{F} = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv]^T \quad (1c)$$

$$\mathbf{G} = [hv, huv, hv^2 + gh^2/2]^T \quad (1d)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_f \quad (1e)$$

여기에서,  $h$ 는 수심,  $u$ 는  $x$  방향 유속,  $v$ 는  $y$  방향 유속,

$g$ 는 중력가속도, 그리고  $S_0$ 와  $S_f$ 는 각각 바닥 경사와 마찰에 의한 생성항으로 다음과 같다.

$$S_0 = [0, -ghb_x, -ghb_y]^T \quad (1f)$$

$$S_f = [0, -n^2gh^{-1/3}u\sqrt{u^2+v^2}, -n^2gh^{-1/3}v\sqrt{u^2+v^2}]^T \quad (1g)$$

여기에서,  $b$ 는 바닥 표고 그리고  $n$ 은 Manning의 조도계수이다.

Eq. (1)에 대한 수치해법으로 유한체적법(finite volume method)을 적용하고 흐름률을 정확하게 계산하기 위해 근사 Riemann 해법의 일종인 HLLL 기법을 채택하였다. 이 기법은 HLL형(HLL-type) 기법 중에서 가장 최근에 제안되었으며, 그 중에서 가장 효율적인 것으로 알려져 있다(van Leer, 2006). HLLL 기법에 대한 보다 자세한 사항에 대해 Linde (2002), 그 외의 HLL형 기법들과 비교에 대해 Hwang and Lee (2012)의 연구에서 참조할 수 있다. 공간에 대한 2차 정확도의 해를 확보하기 위해 van Leer (1979)가 제안한 MUSCL (Monotonic Upstream-centered Scheme for Conservation Laws)을 이용하였다. 또한, 시간에 대한 2차 정확도의 해를 얻기 위해 2차 Runge-Kutta 방법을 채택하였으며, 계산 시간을 줄이기 위해 수정 단계에서만 근사 Riemann 해법이 적용되는 MUSCL-Hancock 기법을 사용하였다(van Leer, 2006). 계산 시간의 간격은 Batten et al. (1996)의 안정조건에 맞추어 조정되며, 적용된 수치모형에 대한 보다 자세한 사항을 Hwang and Lee (2011)와 Hwang (2013)의 연구에서 참조할 수 있다.

## 2.2 측면 위어로 연결된 수로와 저류지에 대한 실험실 실험

Kim (2013)은 Fig. 1과 같이 2 m 길이의 측면 위어로 연결된 폭, 0.8 m의 사각형 수로와 10 m × 4 m의 사각형 저류지에 대해 부정류 실험을 수행하였다. 실험 수로의

하류 단면, No. 0으로부터 상류 단면, No. 16까지 바닥 경사는 0.0015이고 그 위에 설치된 측면 위어의 마루(crest) 표고는 실험 표고의 기준이 되는 단면, No. 0로부터 0.282 m이다. 저류지의 바닥 표고는 단면, No. 0의 표고와 동일하며, 그 하류에 측면 위어의 월류량을 측정하기 위해 사각 위어가 설치되었다. 그 외의 경우에 대해 저류지 하류로 흐름은 차단되었다. 상류 끝으로 들어오는 유량을 Fig. 2에 유량 수문곡선으로 보였으며, 하류 단면 No. 0으로 나가는 흐름은 Fig. 3의 수위-유량 관계로부터 파악될 수 있다. 실험 수로에서 단면, No. 3의 중앙과 저류지 내에서 4

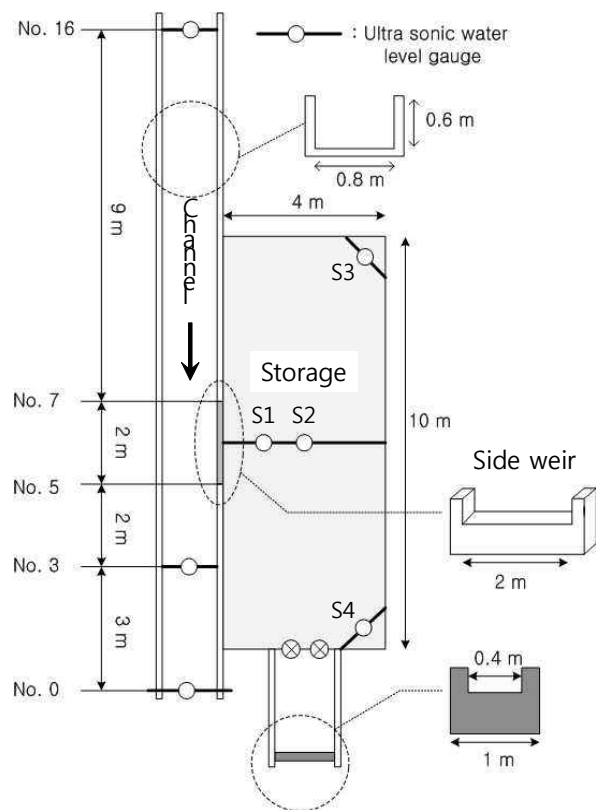


Fig. 1. Experimental Flume with Storage (Kim, 2013)

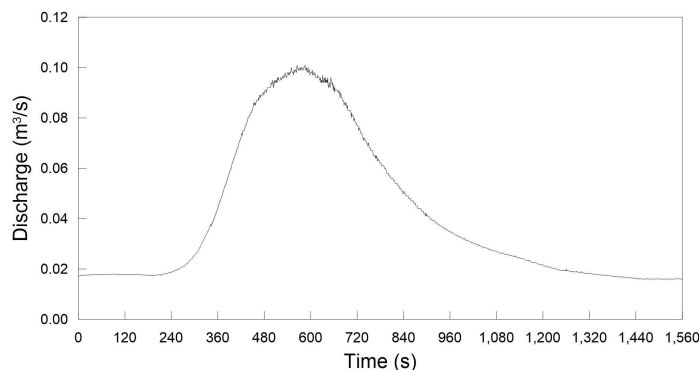


Fig. 2. Inflow Hydrograph at Section No. 16

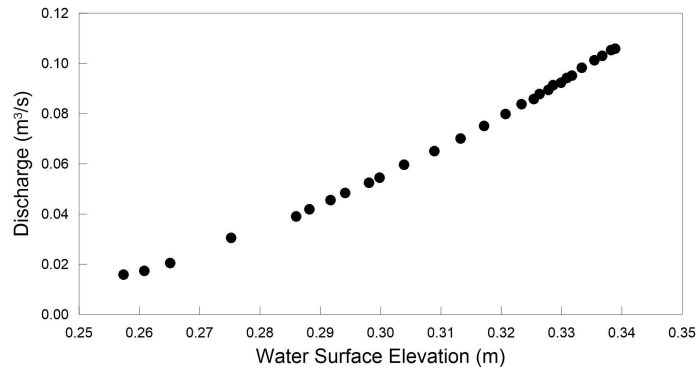


Fig. 3. Outflow Rating Curve at Section No. 0

개 정점, S1, S2, S3, 그리고 S4에 초음파 수위계가 설치되어 수위가 동시에 측정되었다.

측면 위어에 대한 수위-유량 관계는 일반적인 위어와 마찬가지로 유량 계수,  $C_f$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Henderson, 1966; Brunner, 2010).

$$Q = C_f L H^{3/2} \quad (2)$$

여기에서  $Q$ 는 측면 위어를 넘어가는 총유량,  $L$ 은 측면 위어의 길이, 그리고  $H$ 는 위어에서 수두(head)이다. Eq. (2)에서 수두는 측면 위어의 마루 바로 위 또는 그 근방의 값이어야 하나(Henderson, 1966), Kim (2013)은 이것을 수로 단면 No. 6의 중앙에서 측정된 수위로부터 측면 위어의 마루 표고를 뺀 수심( $h$ )으로 대체하였다. 유량 계수를 결정하기 위해 유량의 규모가 0.0034~0.0146 m³/s인 범위에서 12회에 걸쳐 정상상태의 실험이 이루어졌으며, 측면 위어 위의 수심과 저류지 하류의 위어로 빠져나가는 유량이 측정되었다. 측정 자료로부터 선형 회귀분석을 통해 결정된 유량 계수,  $C_f$ 는 1.35이다(Kim, 2013). 또한, Kim (2013)은 실험 수로에서 Manning의 조도계수를 추정하기 위해 세 가지 서로 다른 규모의 유량에 대한 정상상태의 실험을 수행하였으며, 수로 내 6개 단면에서 측정 수위와 부등류 계산에 의한 그것의 비교를 통해  $n$ 을 0.014로 추정하였다. 이어지는 수치모의의 모든 경우에 대해서도 이 값을 그대로 적용한다.

실험은 저류지로 월류가 없는 경우와 더불어 저류지의 저류 용량에 따른 다섯 가지 경우까지 모두 여섯 가지의 실험 경우에 대해 이루어졌으며, 실험의 상세한 조건에 대해서는 Kim (2013)의 연구를 참조할 수 있다. 수치모의의 검증에 대해 그 중에서 두 가지 실험 경우를 선정하였다. 측면 위어의 유량 계수를 검증하기 위해 자유 월류(free overflow) 조건인 실험 경우, Case 2 그리고 수로와 저류지 사이의 복잡한 흐름의 재현을 살펴보기 위해 자유

월류를 통해 저류지의 저류 용량이 초과되면서 역류에 의해 측면 위어가 잠기는 경우(실험 경우, Case 3~Case 6) 중에서 저류 용량이 가장 작은 실험 경우, Case 6이다.

실�험실 실험에서 측면 위어는 수로와 저류지의 바닥에 직각을 이루어 설치되어 있으나, 수심적분 2차원 수치 모의에서는 이를 경사로 완화하는 것이 불가피하다. 그 값은 바닥 표고와 계산 격자의 크기에 따라 다소 차이가 있으나, 저류지가 없는 경우에는 상향으로 약 72°, 저류지가 있는 경우에는 보다 조밀한 계산 격자가 이용되어 상향과 하향으로 약 78°의 경사가 설정된다.

### 2.3 측면 위어의 유량 계수에 대한 검증

실험 경우, Case 2는 저류지의 용량이 충분하여 수로에서 저류지로 한 방향의 자유 월류가 발생하는 조건이다(Kim, 2013). 저류지를 계산 영역에서 제외하더라도 측면 위어의 월류량을 파악하는데 아무런 문제가 없으므로 계산 영역을 수로와 측면 위어로 한정하여 542개의 삼각형 격자로 분할하였다. 수로의 상·하류 끝에서 경계조건을 부여하였는데, 상류 끝인 단면, No. 16에서 Fig. 2의 유량 수문곡선 그리고 하류 끝인 단면, No. 0에서 Fig. 3의 수위-유량 관계를 이용하였다. 또한, 초기조건을 실험조건에 맞추어 0 s에서 수위와 유량으로 두었다.

실험 경우, Case 2의 자유 월류 조건을 재현하려면, 측면 위어의 가장자리에 인접한 가상 격자(ghost cell)에 부여할 경계조건에 대한 검토가 필요하였다. 먼저, 가상 격자에서 항상 물이 없는 상태(dry bed)를 유지하는 조건을 들 수 있다. 가장 단순한 조건이며, 강제 배수를 제외하면, 월류량이 가장 많을 것이다. 그러나 물이 자유 낙하(free fall) 되더라도 가장자리 인접부에 수맥(nappe)이 유지되는 실제 현상(Henderson, 1966)과 괴리가 있을 수 있다. 두 번째 조건은 가장자리에서 수심이 한계 수심의 0.715 배에 해당되는 사실(Henderson, 1966)로부터 그 가장자리

수심(brink depth)을 부여하는 것이다. 이 조건은 마른 바닥 조건보다 다소 완화된 것으로 그에 비해 월류량은 작을 것으로 예상된다.

측면 위어의 가장자리에서 두 가지 경계조건에 의한 모의 결과를 수로의 단면, No. 3의 중앙에서 수위와 측면 위어 위의 흐름에 대한 수위-유량 관계를 함께 Figs. 4 and 5에 보였다. 그림에서 보이듯이, 측면 위어 하류의 단면, No. 3에서 두 가지 경계조건에 의한 모의 수위(그림에서 원)가 실험의 그것(그림에서 실선)에 잘 부합됨을 알 수 있다. 마른 바닥과 가장자리 수심으로 경계조건을 부여했을 때, 측정 수위에 대한 RMS (Root Mean Square) 오차는 각각 1.5 mm와 1.3 mm였다. 두 조건 중에서 가장자리 수심 경계조건을 부여했을 때 유량 계수가 실험에 의한 그것에 가장 근접되었으며, 그 차이는 측정치의 약 4%에 불과하였다. 이로써 측면 위어의 월류량 계산에 수심적분 2차원 수치모형의 성공적인 적용이 확인된다.

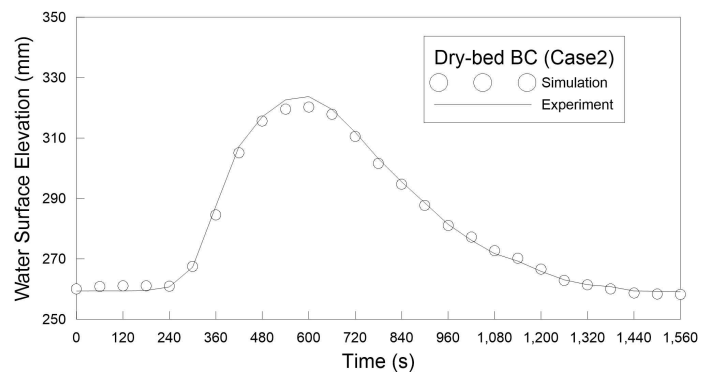
### 3. 적용

#### 3.1 경계조건이 없는 측면 위어의 유량 계수

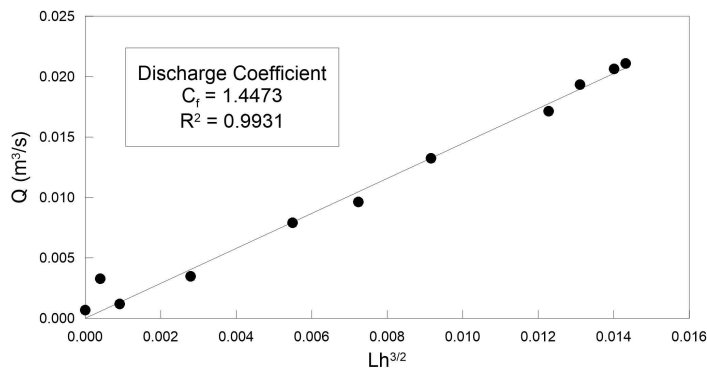
실험 경우, Case 6에서는 저류지로부터 수로로 역류에 의한 잠긴 흐름(submerged flow)이 발생되므로 수로와

저류지, 모두 계산 영역에 포함되어야 한다. 즉, 계산 영역 내에 있는 측면 위어에 대해 별도의 경계조건이 부여되지 않는다. 그러므로 실험 경우, Case 6에 대해 검토하기에 앞서 측면 위어에 아무런 경계조건이 설정되지 않을 때 월류량이 적절한지 따져볼 필요가 있다. 이를 위해 잠긴 흐름 없이 자유 월류만 발생하는 실험 경우, Case 2에서 측면 위어가 지형으로 간주되어 그것에 대해 어떠한 경계조건도 부여되지 않는 경우와 실험 결과를 비교한다.

Fig. 6은, 측면 위어에 대한 경계조건이 없을 때, 단면, No. 3에서 수위의 변화와 유량 계수를 나타낸 그림이다. 그림에서 보이듯이, 모의 수위(그림에서 원)가 실험의 그것(그림에서 실선)과 잘 일치됨을 알 수 있으며, 측정 수위에 대한 RMS 오차는 1.3 mm이다. 또한, 측면 위어를 통해 저류지로 월류되지 않고 흐름이 수로에 한정되는 실험 경우, Case 1에서 측정된 수위(그림에서 점선)도 함께 보였으며, 수문곡선의 첨두가 떨어지는 저류 효과를 확인할 수 있다. 측면 위어에 대한 유량 계수는 1.39로서 실험 결과의 그것보다 약간 더 크나 측정치에 비해 3% 정도 증가된 것에 불과하다. 따라서 저류지를 포함한 모의에서 측면 위어를 통해 저류지로 넘어가는 월류량이 실제보다 약간 더 크겠으나, 그로 인한 흐름의 변화는 미미할 것이다.

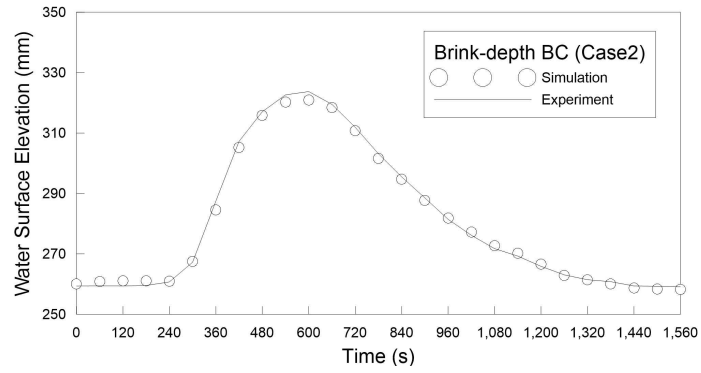


(a) Water surface elevations at Section No. 3

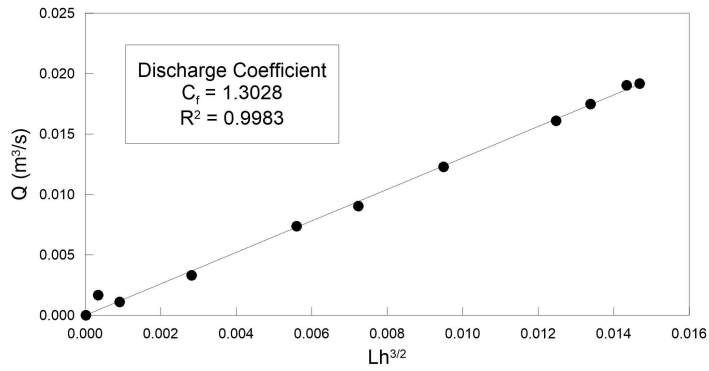


(b) Discharge coefficient of side weir

Fig. 4. Dry-bed Boundary Condition for Side Weir (Case 2)

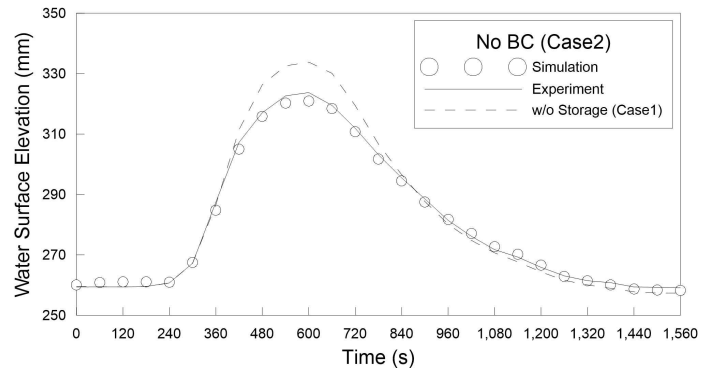


(a) Water surface elevations at Section No. 3

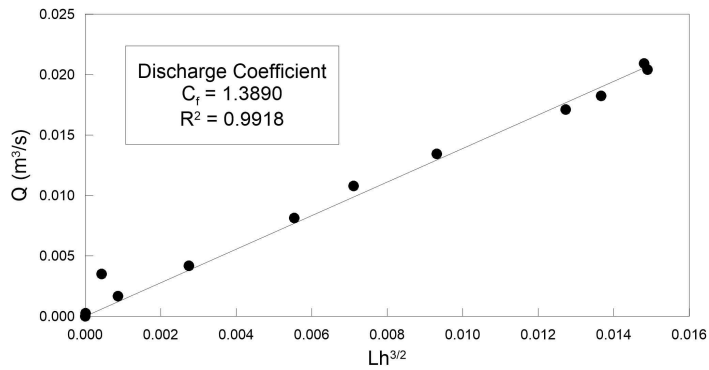


(b) Discharge coefficient of side weir

Fig. 5. Brink-depth Boundary Condition for Side Weir (Case 2)



(a) Water surface elevations at Section No. 3



(b) Discharge coefficient of side weir

Fig. 6. No Boundary Condition for Side Weir (Case 2)

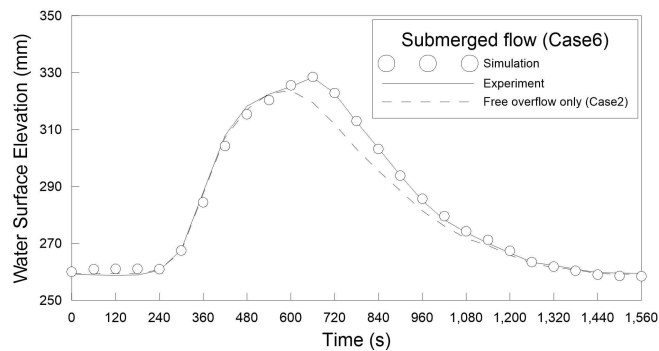
### 3.2 잠긴 흐름에 대한 적용

실험 경우, Case 6에 대해 모의하기 위해 측면 위어로 이어지는 실험 수로와 저류지가 포함된 계산 영역을 1,662개의 삼각형 격자로 분할하였다. 수로의 상·하류 끝에서 경계조건은 실험 경우, Case 2와 동일하게 부여되었다. 수로의 초기조건은 실험 경우, Case 2의 그것과 동일하나, 저류지에서는 실험 경우, Case 6의 저류 용량, 14.4 m<sup>3</sup>에 맞추어 초기 수위를 0.24m로 두었다. 따라서 측면 위어를 통한 월류가 계속되어 저류지의 용량이 초과되면, 실험 경우, Case 2와 달리 Case 6에서는 위어가 잠기면서 수로로 역류가 일어나게 된다(Kim, 2013).

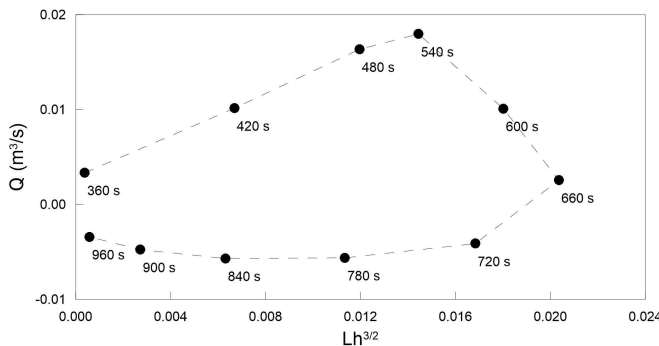
Fig. 7에 모의 수위(그림에서 원)를 실험 경우, Case 2와 Case 6의 측정 수위(그림에서 각각 점선과 실선)와 비교하였으며, 측면 위어 위의 흐름에 대한 수위-유량 관계도 함께 보였다. 모의 결과는 측면 위어의 하류 단면, No. 3에서 측정된 수위에 대한 RMS 오차가 1.5mm로서 실험 결과에 잘 부합됨이 확인된다. 자유 월류 조건인 실험 경우, Case 2와 달리 Case 6에 대한 실험에서 약 600 s 이후에 잠긴 흐름에 의한 영향이 나타나는데, 모의에서도 측면 위어 하류에서 발생하는 수위의 변화가 잘 포착된다(Fig. 7a). 그 영향은 측면 위어 위의 흐름에 대한 수위-유

량 관계에도 크게 미쳐 선형(linear)이 아닌 고리(loop) 모양으로 나타난다(Fig. 7b). 즉, 단일한 유량 계수로 결정되지 않는다. 그림에서 양의 유량 값은 저류지로 유출을, 음의 그것은 수로로 유입을 의미하고 모의 시각도 함께 표시하였다. Fig. 8은 저류지 내 네 곳의 수위 변화를 보인 것으로 모의 결과는 측정치와 잘 일치하며, 측정 수위에 대한 RMS 오차는 2.3~3.3mm의 범위 안에 있었다.

Fig. 9는 수로와 저류지를 측면 위어를 통해 넘나드는 흐름의 변화 양상을 파악하기 위해 시간에 따른 유속 벡터의 분포를 보인 것이다. 그림에서 수로와 저류지에서 유속의 규모가 서로 달라 전반적인 흐름 양상의 파악이 곤란하므로 벡터의 크기(화살표의 길이) 척도(scale)를 서로 다르게 두었다. 또한, 480 s와 840 s에 측면 위어 위의 흐름 양상을 자세히 살펴보기 위해 그 근방만을 확대하여 함께 나타내었다. 그림에서 보이듯이, 수로와 저류지 사이에서 일어나는 흐름의 교환 양상을 잘 파악할 수 있다. 초기에 수로 내 흐름만 이루어지다가(Fig. 9a) 상류에서 유량이 증대되면서 측면 위어를 통해 저류지로 유입된다(Fig. 9b). 월류로 인해 저류지의 용량이 초과되면 측면 위어가 잠기면서 수로로 역류가 일어나(Fig. 9c), 상류의 유량이 감소되고 측면 위어를 통한 역류가 줄어들면서 흐름은 다시 수로 내로 한정된다(Fig. 9d).

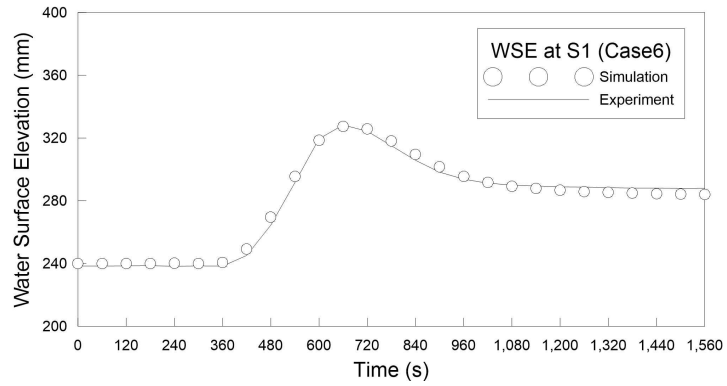


(a) Water surface elevations at Section No. 3

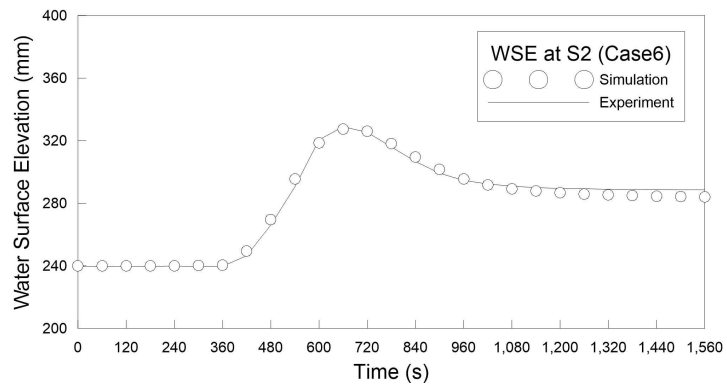


(b) Rating curve over side weir

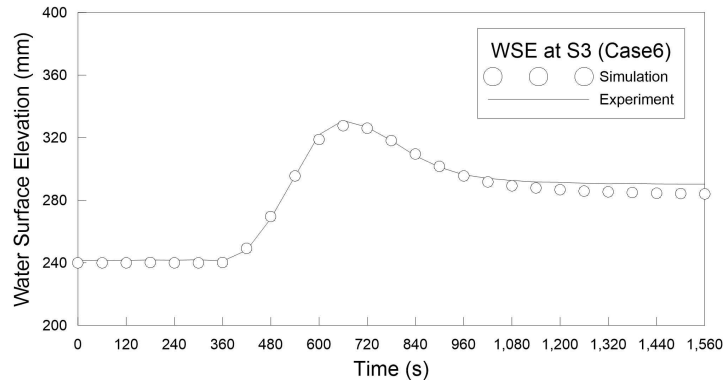
Fig. 7. Water Surface Elevations and Rating Curve (Case 6)



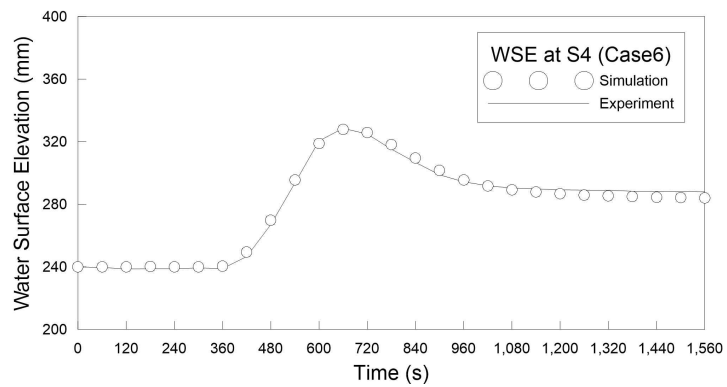
(a) S1



(b) S2



(c) S3



(d) S4

Fig. 8. Water Surface Elevations in Storage (Case 6)



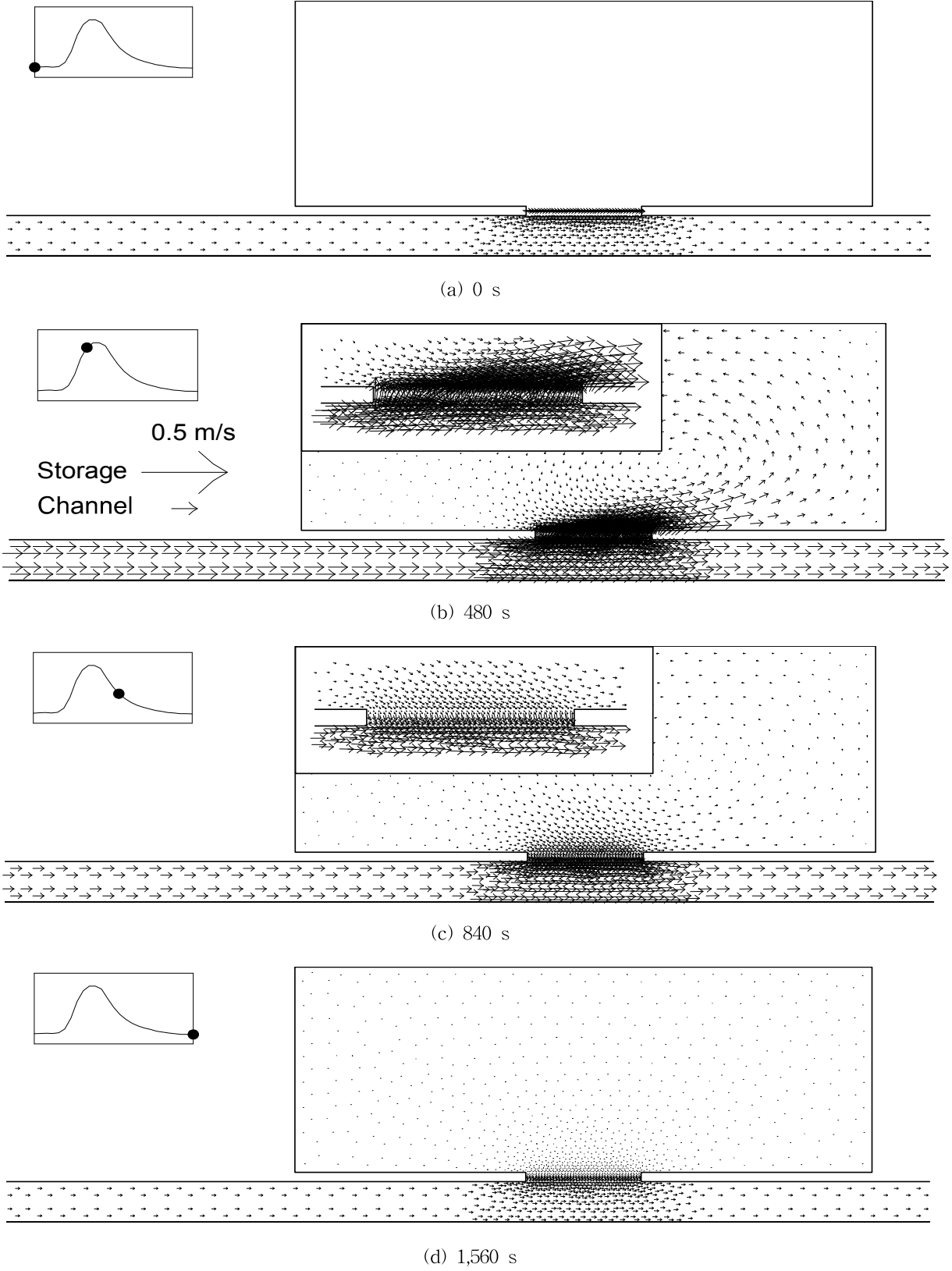


Fig. 9. Velocity Vector Fields in Channel and Storage (Case 6)

#### 4. 결 론

측면 위어를 넘나드는 흐름 양상의 정확한 모의를 위해 천수방정식에 유한체적법에 기반한 근사 Riemann 해법이 적용되는 수심적분 2차원 수치모형을 구성하였다. 공간과 시간에 대해 2차 정확도의 해를 확보하기 위해 각각 MUSCL과 2차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. 이를 측면 위어로 이어진 수로와 저류지에 대한 실험실 실험에 적용하여 자유 월류 상태에서 측면 위어의 유량 계수를 검증하고 잠긴 흐름에서 나타나는 복잡한 흐름 양상에 대해 검토하였다. 이 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 측면 위어의 월류량을 정확하게 모의하기 위해 자유 월류 상태에서 두 가지 경계조건을 시험하였다. 그 중에서 가장자리 수심 경계조건에 의해 결정된 유량 계수가 실험실 실험에 의한 그것에 근접되었으며, 측면 위어 하류의 수로에서 수위도 실험 결과에 잘 부합되었다.
- 2) 자유 월류 조건에서 측면 위어를 지형으로 간주하여 그것에 대해 별도의 경계조건을 부여하지 않고도 모의 결과는 실험에 의한 수위-유량 관계와 잘 일치되었으며, 유량 계수 값의 차이는 측정치의 약 3%에 불과하였다.
- 3) 저류지의 용량 초과로 인해 측면 위어가 잠기는 흐름에 대한 검토에서 수치 모의에 의한 수로와 저류지에서 수위 변화가 측정치와 잘 부합됨을 확인하였으며, 측면 위어를 넘나드는 복잡한 흐름 양상 또한 적절하게 재현되었다.

이 연구를 통해 2차원 수치모형으로 측면 위어의 월류량을 정확하게 계산할 수 있고 저류지에 대한 홍수 방어능력의 검토 또한 상당한 수준의 정확도로 이루어질 수 있음이 확인되었다. 따라서 저류지의 계획, 설계안의 검토, 관리를 위한 기존 저류지의 평가 등에 이 모형이 적절하게 사용된다면, 실험실 실험이나 3차원 CFD의 적용에 따른 수고와 비용을 줄일 수 있을 것이다. 향후, 실험 측정 또는 현장 관측에 의한 유속장과 비교하거나 1차원 모형과 연계하여 유역 내 다수의 저류지를 이용하여 홍수 방어능력을 검토하는 연구가 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원(과제 번호: 14CCII-C063749-03 및 15CTAP-C098446-01)에 의한 것

이다. 실험실 실험에 관한 귀중한 자문에 대해 단국대학교 김서준 교수께 감사드린다.

#### References

- Batten, P., Lambert, C., and Causon, D.M. (1996). "Positively conservative high-resolution convection schemes for unstructured elements." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 39, pp. 1821-1838.
- Brunner, G.W. (2010). *HEC-RAS, river analysis system hydraulic reference manual*. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.
- Cho, G., Rhee, D.S., and Kim, H.-J. (2014). "Numerical model application for analysis of flood level mitigation due to retention-basin." *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 15, pp. 495-505 (in Korean).
- Choi, S., and Ahn, T. (2011). "Development of river-reservoir integrated model for flood reduction capacity analysis of off-stream reservoir." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, pp. 165-174 (in Korean).
- Fukuoka, S., Kon, T., and Okamura, S. (2007). "Assesment of flood control effects of the Tsurumigawa river multi-purpose retarding basin." *Journal of Japan Society of Civil Engineers B*, Vol. 63, pp. 238-248 (in Japanese).
- Hager, W.H. (2010). *Wastewater hydraulics*. Second edition, Springer.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan Publishing Co., Inc.
- Hwang, S.-Y. (2013). "Finite-volume model for shallow-water flow over uneven bottom." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, pp. 139-153 (in Korean).
- Hwang, S.-Y., and Lee, S.H. (2011). "An application of the multi-slope MUSCL to the shallow water equations." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, pp. 819-830 (in Korean).
- Hwang, S.-Y., and Lee, S.H. (2012). "An application of the HLLL approximate Riemann solver to the shallow water equations." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 32, pp. 21-27 (in Korean).

- Kim, S.H. (2013). *Analysis on flood-control effect of side-weir detention basin considering the flow pattern over the weir*. Mater's thesis, Myongji University (in Korean).
- Lee, J.H.W., Wong, K.T.M., Choi, K.W., and Arega, F. (2014). "Postoperation performance of the Tai Hang Tung storage scheme in storm events: 2D hydraulic analysis and field verification." *Journal of Hydraulic Engineering*, 05014001(14) (published online).
- Linde, T. (2002). "A practical, general-purpose, two-state HLL Riemann solver for hyperbolic conservation laws." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 40, pp. 391-402.
- May, R.W.P., Bromwich, B.C., Gasowski, Y., and Rickard, C.E. (2003). *Hydraulic design of side weirs*. Thomas Telford.
- Park, T.S. (2002). "Flow characteristics of a side-weir in rectangular channel." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, pp. 251-259 (in Korean).
- Van Leer, B. (1979). "Towards the ultimate conservative difference scheme V. a second order sequel to Godunov's method." *Journal of Computational Physics*, Vol. 32, pp. 101-136.
- Van Leer, B. (2006). "Upwind and high-resolution method for compressible flow: from donor cell to residual-distribution schemes." *Communications in Computational Physics*, Vol. 1, pp. 192-206.
- Weiyang, T. (1992). *Shallow water hydrodynamics*. Elsevier Science Publishers.

paper number : 15-077 Received : 23 September 2015 Revised : 12 October 2015 Accepted : 12 October 2015
--