



수치모의를 이용한 원형위어의 월류흐름 특성 해석

Analysis of Overflow Characteristics around a Circular-Crested Weir by Using Numerical Model

김대근*
Kim, Dae-Geun*

목포대학교 공과대학 토목공학과
Department of Civil Engineering, College of Engineering, Mokpo National University

ABSTRACT

The present study used the hydrodynamic numerical model, with the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) as its governing equations, to analyze overflow characteristics such as the discharge coefficient of circular-crested weir and the flow velocity and pressure distribution of weir crest. The simulation results well reproduced the overflow characteristics of the overfall of circular-crested weir both qualitatively and quantitatively. As for the discharge coefficient, rational results were yielded by the discharge coefficient equation proposed by Hager(1985) in the $H_1/R_b < 0.58$ and by the discharge coefficient equation proposed by Samani and Bagheri(2014) in the $H_1/R_b > 0.58$, respectively. Because most existing discharge coefficient equations were developed by disregarding the effects of the approach velocity, when they are applied, it is necessary to evaluate the effects of the approach velocity on the overflow head beforehand.

Key words: circular-crested weir, discharge coefficient, overflow head, RANS, weir crest

주제어: 원형위어, 유량계수, 월류수두, RANS, 위어마루

1. 서 론

상·하수관거 및 농업용수로에 흐르는 유량을 측정하기 위한 수리학적 방법 중의 하나가 위어(weir)를 이용하는 것이다. 위어는 수로의 상류 수위를 상승시킴과 동시에 월류수위만을 측정함으로써 유량을 효율적으로 측정할 수 있는 수리구조물이다. 위어구조물은 단면의 형상에 따라 사각형, 삼각형 및 사다리꼴 및 원형 위어로 구분할 수 있으며, 흐름방향의 종단 형상에 따라 예연위어(sharp-crested weir), 광정위어(broad-crested weir), 수맥형위어(ogee-crested weir) 및 원형위어(circular-crested weir)로 구분할 수 있다. Fig. 1은 원형위어의 개념도이다.

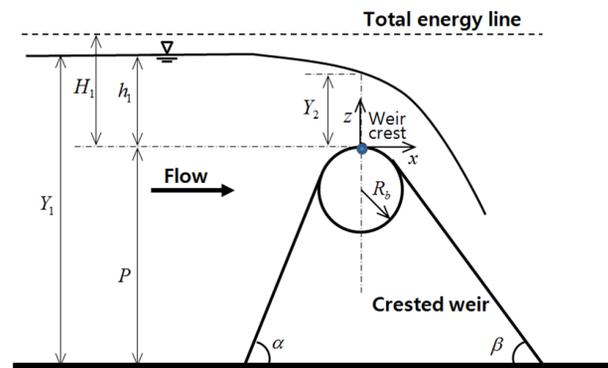


Fig. 1. Flow around a circular-crested weir (adapted from Samani and Bagheri, 2014)

원형위어는 예연위어에 비해 흐름이 안정적이며, 수맥형위어에 비해 설계 및 시공이 용이하며, 부유잡물의 소통이 원활하면서 경제적인 시공이 가능한 장점이 있다.

Received 3 December 2014, revised 29 February 2016, accepted 2 March 2016
*Corresponding author: Kim, Dae Geun (E-mail: kdg05@mokpo.ac.kr)

원형위어는 반경 R_b 인 위어마루(weir crest)와 상류와 하류부의 지면과 이루는 경사 α , β 그리고 위어의 높이 P 로 설명할 수 있다. 원형위어의 수위-유량관계식은 일반 광정위어의 수위-유량관계식과 같이 다음과 같다 (Samani and Bagheri, 2014; Bos, 1976).

$$q = C_d \sqrt{g \left(\frac{2}{3} H_1 \right)^3} \quad (1)$$

위에서 q 는 단위폭당유량(m^2/s), C_d 는 유량계수, g 는 중력가속도(m/s^2)이며, H_1 은 접근유속을 고려한 월류수두(m)이다. Bijankhan et al.(2014)에 의하면 광정위어의 종단길이(L_c)와 월류수두의 비인 H_1/L_c 가 2 이상이면 흐름의 유선이 흐름에 영향을 강하게 미치는 예연위어의 범주에 들어가는 것으로 분류하고 있다. 따라서 원형위어의 경우에는 H_1/R_b 가 4이상이면 예연위어의 흐름특성이 점차 나타나는 구간에 들어간다고 해석할 수 있을 것이다.

Bos(1976)는 기존의 실험자료를 분석하여 유량계수 C_d 가 H_1/R_b 의 함수이며, $0.05 < H_1/R_b < 5.5$ 의 범위에서 유량계수는 0.64에서 1.48의 범위를 가지며, H_1/R_b 가 5.5이상에서는 흐름의 모멘텀이 증가하면서 원형위어가 예연위어와 같은 거동을 보이며 유량계수 또한 일정한 값을 가지는 것으로 분석하였다. Ramamurthy and Vo(1993)는 $P/H_1 > 3$ 인 조건에서 즉, 접근유속이 월류수두에서 차지하는 비중이 미미한 조건에서 실험을 하였다($h_1 \approx H_1$). 그리고 점성과 표면장력의 영향을 무시할 수 있도록, h_1 이 5 cm 이상인 조건에서 실험을 수행하였다. 실험결과 유량계수 C_d 는 H_1/R_b 의 영향을 주로 받는 함수이며, β 가 45° 인 경우에 H_1/R_b 가 약 5.5에서 유량계수는 최대값을 가지며 β 가 60° 인 경우에는 H_1/R_b 가 약 7에서 유량계수는 최대값을 가지고, 그 이후에는 점차 감소하는 것으로 분석하였다. 그리고 α 는 유량계수에 미치는 영향이 거의 없으며, β 는 $H_1/R_b > 3.5$ 에서는 β 가 클수록 유량계수가 어느 정도 증가하는 경향을 보였다.

Hager(1985)는 기존의 실험자료를 정리하여, $H_1/R_b < 5$ 인 범위에서 다음과 같은 유량계수의 회귀식을 제시하였다.

$$C_d = 1 + \frac{3(H_1/R_b)}{11 + 4.5(H_1/R_b)} \quad (2)$$

Heidapour and Chamani(2006)는 원형위어에 대한 기존의 연구들을 정리하고, 위어마루에서의 흐름은 비회전류라는 가정하에 유량계수와 위어마루에서의 속도분포식을 제안하였으며, Bagheri and Heidapour(2010)는 $0.58 < H_1/R_b < 2$ 의 범위에서 유량계수와 위어마루에서의 속도분포식을 제안하였는데, 유량계수는 식 (3)과 같이 오직 H_1/R_b 의 함수형태로 표현되었다. 특히, $H_1/R_b < 0.58$ 인 범위에서는 모형실험의 월류수두가 3 cm 이하인 경우에 해당되어 점성과 표면장력의 영향으로 유량계수가 급격히 감소하는 결과를 보이므로, 공식의 사용에 주의해야 함을 지적하였다.

$$C_d = 2.326 \left(\frac{H_1}{R_b} \right)^{-0.644} \ln \left(\frac{R_b + 0.7H_1}{R_b} \right) \quad (3)$$

Heidapour and Chamani(2006)의 유량계수는 미지의 계수를 포함하고 있고, Bagheri and Heidapour(2010)의 유량계수는 적용범위가 $0.58 < H_1/R_b < 2$ 로 한정되어 있는 단점이 있다. Samani and Bagheri(2014)는 이상의 단점을 보완하기 위하여, 이론적으로 원형위어의 회전(circulation)을 고려한 비회전류(potential flow) 이론을 이용하여 유량계수와 위어마루에서의 속도분포를 제안하였다. 이들이 사용한 실험자료는 Bagheri and Heidapour(2010)와 Vo(1992)의 실험결과이다. Samani and Bagheri(2014)가 제안한 유량계수는 식 (4)와 같다. 이들의 공식 유도과 유도된 공식의 검증에는 Bagheri and Heidapour(2010)의 실험자료가 사용되었는데, 상기 식 (3)과 같은 이유로 $H_1/R_b < 0.58$ 인 구간에서는 공식의 적용에 주의가 필요할 것으로 판단된다. 3장에 제시된 Fig. 4에서, 앞에서 언급한 연구자들의 유량계수 산정식의 결과를 확인할 수 있다. H_1/R_b 의 범위에 따라 각 산정식의 거동에 차이가 있음을 확인할 수 있다. 특히, $H_1/R_b < 0.58$ 인 구간에서는 Bagheri and Heidapour(2010)와 Samani and Bagheri(2014)의 유량계수 산정식의 경우, 다른 연구자들의 결과와 달리 유량계수가 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다.

$$C_d = \frac{3\sqrt{3}}{4} \left\{ \frac{R_s^2 - R_b^2}{H_1 R_s} + K' \left[\frac{R_s^2 - R_b^2}{R_b R_s} + 2 \ln \left(\frac{R_s}{R_b} \right) \right] \right\} \quad (4)$$



위에서,

$$K' = -0.14 \left(\frac{H_1}{R_b} \right)^{-1.46} + 0.056 \quad (5)$$

$$R_s = R_b + Y_2 = R_b + 0.7H_1 \quad (6)$$

위어마루에서의 주흐름방향인 x 방향유속, u 의 연직분포식은 다음과 같다(Samani and Bagheri, 2014).

$$\frac{u}{\sqrt{2gH_1}} = \frac{1}{2} \left(1 + K' \frac{H_1}{R_b} \right) \left(1 + \frac{R_b^2}{r^2} \right) + K' \frac{H_1}{r} \quad (7)$$

위에서, $r = R_b + z$ 이다. 이상의 식을 유도하면서 기본가정은 1) 위어에 접근하는 흐름은 정상상태의 상류흐름(subcritical flow), 2) 접근유속은 무시할 수 있어 $h_1 \approx H_1$, 3) Y_2 는 충분히 커서 표면장력이나 점성의 영향은 무시할 수 있음이다. Hager(1999)에 의하면 Y_2 가 3 ~ 5 cm 이상이면 표면장력이나 점성의 영향을 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 Bagheri and Heidapour(2010)의 실험은 이상의 조건을 만족하지 못하는 경우가 있으므로 자료의 사용에 주의가 필요하다. Samani and Bagheri(2014)에 의하면 유량계수에 영향을 미치는 주요 인자는 H_1/R_b 이며, 다른 영향 즉, H_1/P , α , β 는 다른 연구자들과 마찬가지로 그 영향이 미미한 것으로 분석하고 있다.

원형위어와 관련된 초기연구는 실험실 실험이 주를 이루고 있다. 이들 실험연구는 주로 수위-유량관계의 해석에 주안점을 두고 있다. 하지만 이들 연구결과를 실무적으로 적용하는 데에 있어 한계점은 H_1/R_b 의 범위에 따라 각 연구자별 유량계수 산정값에 차이가 있어 어떤 공식을 사용할 것인지에 대한 의문이 있을 수 있으며, 접근유속이 유량계수에 미치는 영향을 무시하고 있다는 것이다. Ramamurthy and Vo(1993)는 유량계수의 H_1/R_b 에 따른 변동성의 원인을 분석하기 위하여 위어마루에서의 압력을 측정하고, 압력과 유량계수의 상관관계를 제시하기도 하였다. 최근 들어서는 비회전류이론을 바탕으로 유량계수와 위어마루에서의 유속분포식을 제시하고, 기존 연구자의 실험자료와 보충실험을 통해 제시된 이론식을 검증하는 연구가 제시되기도 하였다.

최근 들어 수리구조물에서의 동수역학적인 흐름 해

석을 위하여, RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes equation)를 지배방정식으로 하는 수치모형을 국내·외에서 적극적으로 활용하고 있다(Kim, 2013; Kim et al., 2004; Kim et al., 2010; Ho et al., 2001; Savage and Johnson, 2001). 이 들은 RANS를 지배방정식으로 하며, 자유수면은 VOF(volume of fluid)기법으로 추적하는 방법을 이용하여 수리구조물에서의 월류유량, 수면변위, 압력분포 등을 계산하고 수리실험 결과와 비교함으로써, 그 적용성을 검증하였다. 더 나아가 실제 지형과 구조물을 재현하여 모의를 수행하고 그 결과를 수리모형실험 결과와 함께 구체적인 설계과정에 활용하고 있는 단계에 있다(Kim et al., 2005).

본 연구에서는 RANS를 지배방정식으로 하는 동수역학 수치모형을 이용하여 광정위어의 흐름특성이 강하게 나타나는 H_1/R_b 가 6.0 이하의 범위에서 원형위어의 유량계수, 위어마루에서의 유속과 압력분포 등 흐름특성을 해석하였다. 해석결과는 기존 연구자의 실험자료와 이론식을 이용하여 검증하였다. 그리고 위어마루에 작용하는 압력이 위어마루에서의 유속분포와 유량계수에 미치는 영향을 해석하였다. 나아가 유량계수와 관련된 기존 실험식과 이론식의 적용한계를 검토하여, H_1/R_b 의 범위에 따라 가장 적절하게 유량계수를 추정할 수 있는 산정식을 제안하였다. 또한 접근유속의 고려 여부에 따라 발생할 수 있는 유량계수 추정의 오차에 대해서도 검토하였다.

2. 연구방법

2.1 수학적 모형

질량의 sink/source가 없는 비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계(x, y, z)에서의 다음과 같은 RANS이다(Flow science, 2007).

$$\frac{\partial(AU_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} AU_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i \quad (9)$$

여기서 t 는 시간(s), U_i 는 x_i 방향의 속도(m/s), ρ 는 물의 밀도(kg/m³), P 는 압력(N/m²), F_i 는 중력, 점성력

등과 같은 외력(N)이다. 그리고 V_f 는 계산격자의 체적 중 유체가 차지하는 점유율이며, A 는 계산격자 각 방향의 유체가 흐를 수 있는 면적의 점유율이다.

물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 VOF함수, $F(x, y, z, t)$ 를 정의하여 사용하는데, 함수의 값이 1인 경우는 검사체적에 물이 가득한 상태를 의미하고 자유수면에서는 함수의 값이 0과 1사이의 값을 가진다. $F(x, y, z, t)$ 의 계산을 위하여 다음 식이 사용된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \frac{\partial (FAU_i)}{\partial x_i} = F_{DIF} \quad (10)$$

여기서 F_{DIF} 는 VOF함수의 확산항이다. 난류운동 에너지와 소산율을 계산하기 위한 난류모형으로 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다(Yakhot, 1992). 난류모형의 각종 매개변수는 모형의 기본값을 사용하였다. 벽면에서의 난류운동에너지와 소산율과 같은 난류경계를 계산하기 위해 필요한 벽면에서의 전단속도(shear velocity)를 산정하기 위해서는 모형에서 제공하는 벽함수(wall function)를 이용하였다.

모형에서 사용하는 지배방정식은 유한차분법으로 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형을 독립적으로 입력함으로써, 직육면체의 격자를 유지하며 격자내부의 경계면을 정의함으로써 각 격자에서 유체가 차지하는 체적비를 정의하는 방법인 FAVOR (fractional area and volume obstacle representation) 기법을 사용한다. FAVOR 기법은 격자계의 구성을 쉽게 할 수 있고, 각 격자에서의 물리량이 보존되는 장점이 있다. 지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 계산절차는 (1) 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각방향의 초기유속을 계산 (2) 연속방정식과 운동방정식을 연계하여 압력과 유속을 계산 및 보정 (3) 자유수면, 난류 및 유사의 특성을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

2.2 모의조건

Fig. 2는 본 연구에서 설정한 모의영역과 경계조건을 도시한 것이다. 원형위어의 반경 R_b 는 0.1m, 위어마루와 상류와 하류부의 지면과 이루는 경사 α, β 는

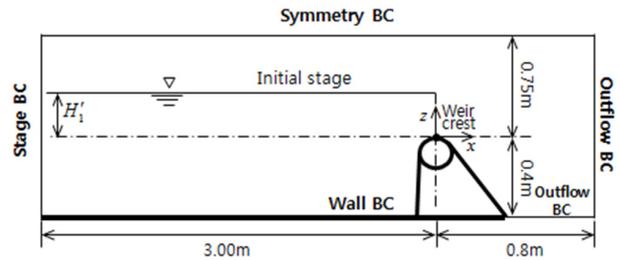


Fig. 2. Numerical experiment setup and boundary conditions for the modeling (no scale).

각각 90°와 60°이며, 위어의 높이 P 는 0.4m이다. 모의 영역 설정은 실험수로의 길이는 3.8m, 높이는 1.15m이다. 본 모의실험은 x-z방향의 2차원적인 현상이므로 실험수로의 폭은 0.03m만을 재현하였다. 격자망은 x방향은 150개($0.005m \leq \Delta x \leq 0.077m$), z방향은 130개($0.0025m \leq \Delta z \leq 0.0267m$), y방향은 3개($\Delta y \leq 0.01m$)의 가변격자를 배치하여, 전체 격자의 개수는 58,500개이다. 흐름이 급변하는 위어마루 부근에서는 세밀한 격자를 사용하고, 흐름의 변화가 크지 않은 구간에는 격자를 느슨하게 배치하였다.

모의영역의 유입부는 일정수위 조건을 그리고 유출부는 흐름이 반사 없이 유출되는 조건을 이용하였다. 실험수로와 원형위어의 표면은 벽면경계로 무활(no-slip) 경계조건을 부여하였으며, 표면의 조도높이는 Hager (1999)의 자료를 기초로 실험수로 바닥은 0.10mm(스테인레스 스틸 적용), 원형위어는 0.0015mm(플라스틱 적용)를 적용하였다. 모의구간의 상부면은 대칭경계조건을 부여하였으나, 경계면과 물 사이에는 대기압의 공기층이 존재하고 있어, 물의 흐름은 경계조건 영향을 받지 않는다. 초기조건으로 $x < 0.0m$ 인 영역은 상류경계조건과 동일하게, 나머지 변수는 모두 0으로 놓았다. 본 연구에서는 정상상태의 모의결과를 분석에 이용하므로, 모의구간의 평균 운동에너지, 난류에너지 및 월류유량 등이 충분히 정상상태에 도달한 것으로 판단되는 20초 후의 모의결과를 자료의 분석에 이용하였다.

본 연구에서는 광정위어의 흐름특성이 강하게 나타나는 H_1/R_b 가 6.0 이하의 범위에서 모의조건을 설정하였다(Table 1 참조). 단, Table 1의 H_1' 은 실험수로 상류 경계에서의 전월류수두이다. 본 연구에서는 원형위어의 위어마루를 기준으로 상류 1.0m 지점($x = -1.0m$)에서 접근유속을 고려한 전월류수두 H_1 을 측정



Table 1. Modeling cases

Case No.	H_1' (m)	H_1'/R_b	H_1/R_b (simulated)
HRb_03	0.03	0.30	0.30
HRb_05	0.05	0.50	0.50
HRb_07	0.07	0.70	0.70
HRb_10	0.10	1.00	1.00
HRb_15	0.15	1.50	1.50
HRb_20	0.20	2.00	2.00
HRb_30	0.30	3.00	3.00
HRb_40	0.40	4.00	3.98
HRb_50	0.50	5.00	4.95
HRb_55	0.55	5.50	5.43
HRb_60	0.60	6.00	5.93

하였으며, 이 값은 에너지손실로 인해 Table 1과 같이 H_1' 과는 미소한 차이가 있다. 하지만 그 차이가 미미하므로 이후에는 H_1'/R_b 과 H_1/R_b 을 구분하지 않고

같은 값으로 간주하고 내용을 기술하였다.

3. 모의결과

Fig. 3은 H_1/R_b 에 따른 유황을 도시한 것이다. H_1/R_b 가 증가하며 월류유량이 점차 증가하고 있다. 월류유량의 증가와 함께 흐름의 운동량도 증가하는데, 이는 위어마루의 곡률부에서 위어마루를 통과하는 흐름의 원심력을 증가시키게 된다. 원심력의 증가는 위어마루에 작용하는 압력의 강하를 유발하며, 압력강하로 인한 흡입효과는 위어마루 저면부의 유속을 증가시키게 된다. 본 모의결과는 이러한 원형위어 월류부의 흐름특성을 잘 재현하고 있다.

Fig. 4는 Table 1의 모의조건에 대한 모의결과를 이용하여 유량계수를 산정한 결과이다. 유량계수는 H_1/R_b 가 0.3인 경우에 1.095로 최소값을, H_1/R_b 가 6.0인 경우에 1.551로 최대값을 보이고 있다. 비교를

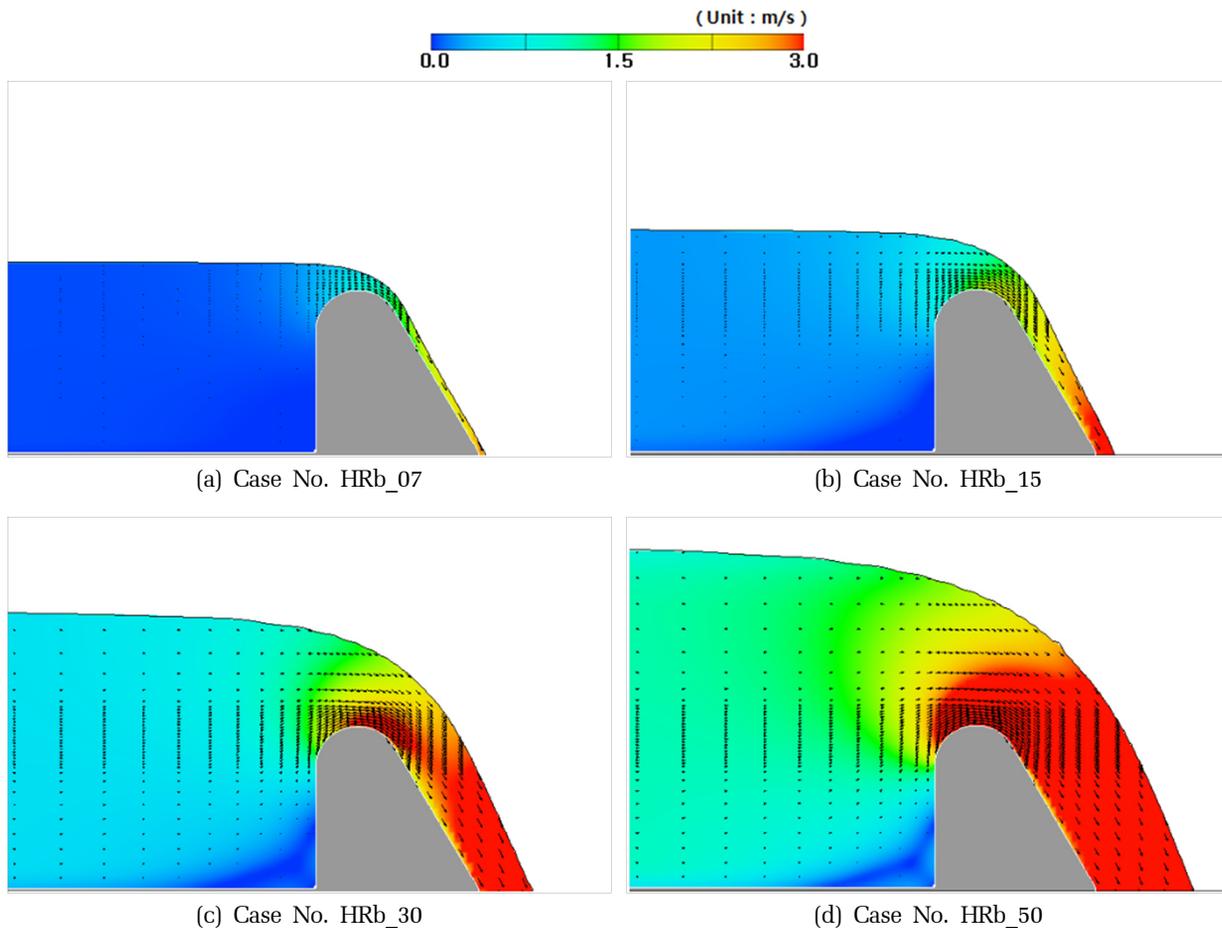


Fig. 3. Flow behaviors around a circular-crested weir with H_1/R_b .

pp. 123-130
pp. 131-137
pp. 139-145
pp. 147-154
pp. 155-165
pp. 167-177
pp. 179-185
pp. 187-196
pp. 197-206
pp. 207-213

위하여 Ramamurthy and Vo(1993)의 실험자료를 함께 도시하였다. 이들의 실험은 점성력과 표면장력을 무시할 수 있는 구간에서 시행한 실험으로 자료의 객관성을 확보할 수 있는 실험인 것으로 판단된다. 본 연구의 모의결과와 비교했을 때 전체적인 모의결과가 거의 잘 일치하고 있다. Hager(1985)가 제안한 $H_1/R_b < 5$ 범위에서 적용 가능한 유량계수 산정식은 본 연구의 결과와 대체로 그 경향이 잘 일치하고 있다. 다만, $H_1/R_b < 1$ 의 범위에서는 본 연구결과와 잘 일치하나, $H_1/R_b > 1$ 의 범위에서는 약 5% 내외로 유량계수를 과소 산정하고 있다. Hager(1985)의 산정식은 Bagheri and Heidapour(2010)와 Samini and Bagheri(2014)의 산정식과 비교했을 때, $H_1/R_b < 0.5$ 인 범위에서 유량계수가 급감하는 경향은 보이지 않고 있다. 본 연구의 결과도 $0.3 < H_1/R_b < 0.5$ 의 범위에서 Hager(1985)의 결과와 부합하고 있음을 확인할 수 있다. Bagheri and Heidapour(2010)의 $0.58 < H_1/R_b < 2$ 의 범위에서의 유량계수 산정식은 본 연구의 모의결과와 거의 비슷한 산정결과를 보이고 있다. Samani and Bagheri(2014)의 유량계수 산정식은 $H_1/R_b < 0.58$ 의 범위에서 Bagheri and Heidapour(2010)의 유량계수 산정식과 마찬가지로 유량계수를 과소 산정하는 경향을 보이며, $H_1/R_b > 0.58$ 의 범위에서는 Ramamurthy and Vo(1993)의 실험결과와 본 연구의 모의결과와 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 이상의 검토결과에서 광정위어의 흐름특징을 보이는 원형위어에서의 유량계수는 $H_1/R_b < 0.58$ 의 구간에서는 Hager(1985)가 제안한 수식이 합리적인 결과를 보이며, $H_1/R_b > 0.58$ 의 구간에서는 Samani and Bagheri(2014)의 유량계수 산정식이 합리적인 결과를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 원형위어 상류에서 접근유속의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 유량계수를 비교, 도시한 것이다. 비교를 위하여 Ramamurthy and Vo(1993)의 실험자료를 함께 도시하였다. 본 연구와 같은 모의조건에서, 특히 $H_1/R_b > 5.0$ 인 경우에 접근유속의 영향을 무시하면 약 20% 이상의 오차가 발생하고 있다. Ramamurthy and Vo(1993)는 $P/H_1 > 3$ 인 경우(본 연구의 조건에서는 $H_1/R_b < 1.3$ 이내인 경우)에 대해서만 실험을 수행하였으므로 접근유속의 영향은 거의 무시할만한 수준의 실험이었다. 따라서

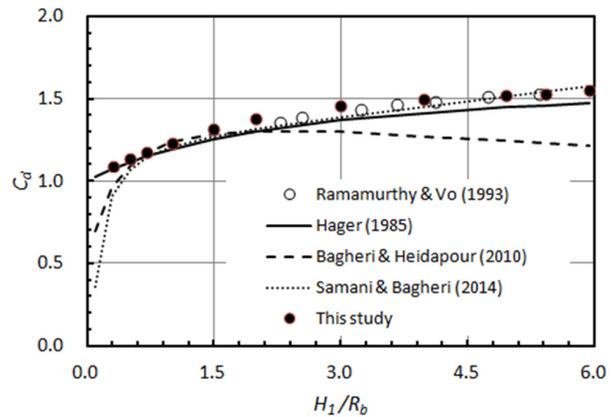


Fig. 4. Variation of C_d with H_1/R_b

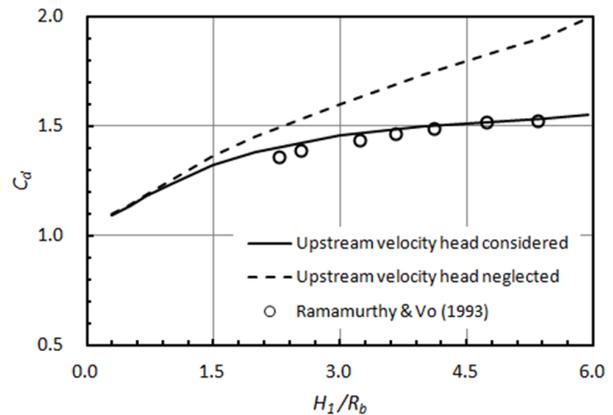


Fig. 5. Effect of upstream velocity head on C_d

접근유속의 영향을 고려한 본 연구의 결과와 유사한 결과를 보이고 있다. 특히 본 연구의 모의조건에서는 $P/H_1 < 2.0$ 인 경우($H_1/R_b > 2.0$)에 접근유속의 고려 여부에 따라 유량계수는 5% 이상의 차이가 발생하며, H_1/R_b 가 증가하며 그 차이 역시 점차 증가하는데 H_1/R_b 가 6.0인 경우에는 최대 29%까지 차이가 발생하고 있다. 따라서 이러한 경우에는 반드시 접근유속을 고려하여 유량계수를 산정하는 것이 필요하다.

Fig. 6은 H_1/R_b 에 따른 원형위어의 위어마루 정점 부에서의 압력을 도시한 것이다. 압력은 γH_1 으로 무차원화하였다. γ 는 물의 단위중량이다. 비교를 위하여 Ramamurthy and Vo(1993)의 실험결과와 Bos(1976)의 실험결과를 함께 도시하였다. 월류수두와 함께 원심력이 증가하며 위어마루에 작용하는 압력은 부압이 크게 작용하는데, 이는 위어마루 저면부에서 압력의 흡입효과로 작용하여 유속을 가속시키는 원인이 된다.



즉, 위어마루에 작용하는 부압이 클수록 월류유량이 증가하는 현상을 수반하게 되어 유량계수 역시 점차 증가하게 되어 월류위어의 기능성을 증대시키는 요인으로 작용하게 된다. 본 연구의 결과는 Ramamurthy and Vo(1993)의 실험결과와 잘 일치하고 있으나, Bos(1976)의 결과는 부압의 절대적인 크기를 과소 산정하는 경향이 있다.

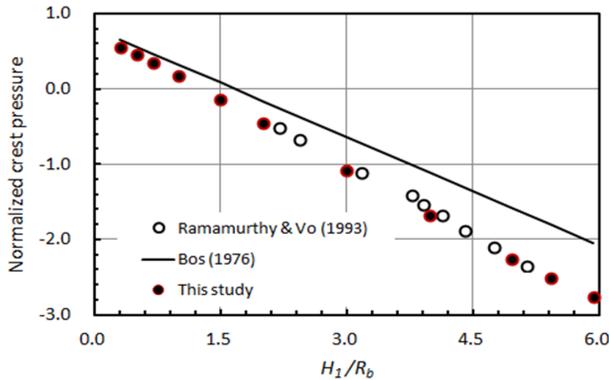
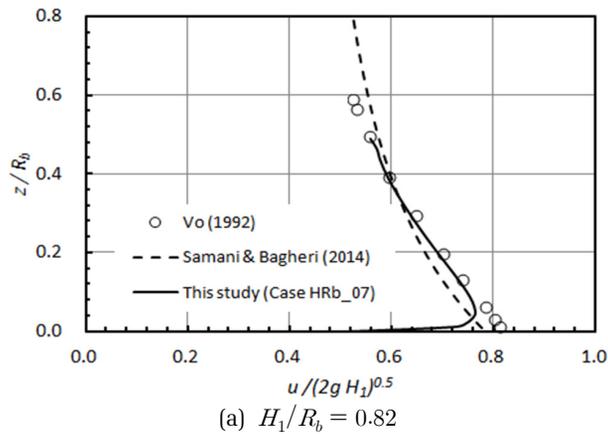
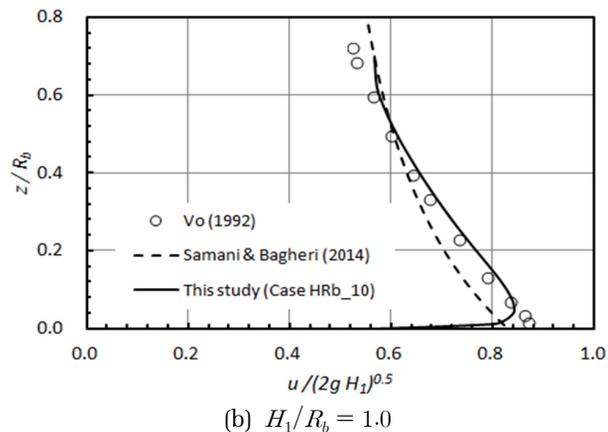


Fig. 6. Variation of normalized crest pressure with H_1/R_b



(a) $H_1/R_b = 0.82$



(b) $H_1/R_b = 1.0$

Fig. 7. Dimensionless velocity profiles on the weir crest

Fig. 7은 원형위어의 위어마루에서의 주흐름방향인 x방향유속의 연직분포이다. 비교를 위하여 Vo(1992)의 실험결과와 Samani and Bagheri(2014)의 유속분포식 (7)을 함께 도시하였다. (a)의 경우 Vo(1992)의 실험결과와 Samani and Bagheri(2014)의 유속분포식은 H_1/R_b 가 0.82인 경우이나, 본 연구의 모의조건은 0.7인 경우를 비교하였다. 월류흐름의 원심력은 위어마루 저면부에서 압력강하를 유발하고 이로 인해 저면부의 유속이 증가하는 전형적인 유속분포를 잘 재현하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수리학적인 방법 중의 하나인 원형위어를 이용하여 월류유량을 측정하는 이론적/실험적 연구와 관련된 기존 연구를 조사, 분석하였다. 그리고 RANS를 지배방정식으로 하는 동수역학 수치모형을 이용하여 광정위어의 흐름특성이 강하게 나타나는 H_1/R_b 가 6.0 이하의 범위에서 원형위어의 유량계수, 위어마루에서의 유속과 압력분포 등 흐름특성을 해석하였다. 해석결과와 기존 연구자의 실험자료와 이론식을 비교, 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 연구의 모의결과는 월류수두의 증가와 함께 위어마루에 작용하는 원심력으로 인한 압력 강하, 위어마루 저면부의 유속 증가 등 원형위어 월류부의 흐름특성을 잘 재현하고 있다. 그리고 유량계수, 위어마루에 작용하는 압력과 위어마루에서의 연직유속분포 등을 기존 연구자의 실험자료 및 이론식과 비교했을 때, 본 연구의 모의결과는 원형위어의 흐름특성을 정량적으로 잘 재현하고 있다.

2) 본 연구의 모의결과와 Bagheri and Heidapour(2010)의 표면장력이나 점성력의 영향과 관련된 실험자료의 유의성에 대한 고찰에 근거해 보았을 때, 원형위어의 유량계수는 $H_1/R_b < 0.58$ 의 구간에서는 Hager(1985)가 제안한 유량계수 산정식이, $H_1/R_b > 0.58$ 의 구간에서는 Samani and Bagheri(2014)의 유량계수 산정식이 합리적인 결과를 보이는 것으로 판단된다.

3) 기존 유량계수 산정식은 대부분 점근유속의 영향을 무시한다는 전제하에 개발되었다. 본 연구의 모의조건에서는 $P/H_1 < 2.0$ 인 경우($H_1/R_b > 2.0$)에

접근유속의 고려 여부에 따라 유량계수는 5% 이상의 차이가 발생하며, H_1/R_0 가 6.0인 경우에는 최대 29% 까지 차이가 발생하는데, 이는 무시할 수 없는 크기의 오차이다. 따라서 기존 유량계수 산정식을 이용하여 월류유량을 산정하는 경우에는 접근유속이 월류수두에 미치는 영향에 대한 평가를 사전에 수행하는 것이 필요하다.

4) 원형위어의 월류흐름 특성의 규명에 있어 이론적, 실험적 연구와 더불어 본 연구와 같은 수치모의를 이용하는 경우의 타당성을 확인할 수 있었다. 더 나아가 이론적, 실험적으로 접근하기 어려운 원형위어 상류 및 하류 지형 등 다양한 인자의 영향을 고려한 원형위어의 월류흐름 특성 등의 규명에 본 연구와 같은 수치모의의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- Bagheri, S., Heidarpour, M. (2010). Velocity distribution over cylindrical weirs, *J. Hydraulic Res.*, 48(4), 515-520.
- Bijankhan, M., Stefano, C.D., Ferro, V., Kouchankzadeh, S. (2014). New stage-discharge relationship of weirs of finite crest length, *J. Irrig. Drain. Eng.* 140(3), 06013006(6)
- Bos, M.G. (1976). Discharge measurement structures, Report No. 4, ILRI, Wageningen, Netherlands.
- Flow Science (2007). *Flow-3D (Theory Manual)*, Los Alamos, NM.
- Hager, W.H. (1985). Critical flow condition in open channel hydraulics, *Acta Mech.*, 54(3-4), 157-179.
- Hager, W.H. (1999). *Wastewater hydraulics*, Springer, Berlin.
- Heidarpour, M., Chamani, M.R. (2006). Velocity distribution over cylindrical weirs, *J. Hydraulic Res.*, 44(5), 708-711.
- Ho, D.K.H., Boyes, K.M., Donohoo, S.M. (2001). "Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique", 14th *Australasian Fluid Mechanics Conference*, Adelaide University, Adelaide, Australia.
- Kim, D.G. (2013). Hydraulic characteristics in the movable venturi flume with circular cone, *J. of Korean Society of Water and Wastewater*, 27(2), 177-184.
- Kim, D.G., Kim, S.M., Park, W.C. (2010). Numerical analysis of flow and settling efficiency in a sedimentation basin, *J. of Korean Society of Water and Wastewater*, 24(6), 713-722.
- Kim, D.G., Lee, J.H., Seo, I.W. (2004). A numerical simulations on the flow over ogee spillway with pier, *J. of Korea Water Resources Association*, 37(5), 363-373.
- Kim, D.G., Choi, J.U., Kim, C.S., Lee, J.W. (2005). Design by using hydraulic and numerical model experiment - Case study of HwaBuk multipurpose dam, *J. of Korea Water Resources Association*, 38(3), 179-188.
- Ramamurthy, A.S., Vo, N.D. (1993). Characteristics of curcular-crested weir, *J. Hydraulic Eng.*, 119(9), 1055-1062.
- Samani, A.K., Bagheri, S. (2014). Discharge coefficient of circular-crested weirs based on a combination of flow around a cylinder and circulation, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 140(5), pp. 04014010(6).
- Savage, B.M., Johnson, M.C. (2001). Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study, *J. Hydraulic Eng.*, 127(8), 640-649.
- Vo, N.D. (1992). Characteristics of curvilinear flow past circular-crested weirs, Ph. D Thesis, Concordia Univ., Montreal, Canada.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., Speziale, C.G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Phys. Fluids*, 4(7), 1510-1520.