

# Hydraulic Characteristics in the Movable Venturi Flume with Circular Cone

원뿔형 벤츄리수로의 수리특성

Kim, Dae Geun\*

김대근\*

목포대학교 공과대학 토목공학과

**Abstract :** This study analyzed the hydraulic characteristics of a venturi flume with a circular cone using a 3-D numerical model which uses RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation) as the governing equation. The venturi flume with the circular cone efficiently measures the discharge in the low-flow to high-flow range and offers the advantage of accurate discharge measurements in the case of a low flow. With no influence of the tail-water depth, the stage-discharge relationship and the flow behaviors were analyzed to verify the numerical simulation results. Additionally, this study reviewed the effect of the tail-water depth on the flow. The stage-discharge relationship resulting from a numerical simulation in the absence of an effect by the tail-water depth showed a maximum margin of error of 4 % in comparison to the result of a hydraulic experiment. The simulation results reproduced the overall flow behaviors observed in the hydraulic experiment well. The flow starts to become influenced by the tail-water depth when the ratio of the tail-water depth to the total head exceeds approximately 0.7. As the ratio increases, the effect on the flow tends to grow dramatically. As shown in this study, a numerical simulation is effective for identifying the stage-discharge relationship of a venturi flume with various types of venturi bodies, including a venturi flume with a circular cone.

**Key words :** 3-D numerical model, RANS, venturi flume with a circular cone, tail-water depth, stage-discharge relationship

**주제어 :** 3차원 수치모형, RANS, 원뿔형 벤츄리수로, 하류수심, 수위-유량관계

## 1. 서론

하수관거 또는 농업용수로에 흐르는 유량은 수로의 설계뿐 아니라 하수처리장 등의 규모결정에 중요한 설계인자일 뿐 아니라, 오염부하량 산정에 필요한 정보이기도 하다. 이러한 인공수로에 흐르는 유량은 처음부터 계획적으로 영구적인 측정장비를 설치하여 유량을 안정적으로 측정하는 것이 바람직하나, 사전에 계획하지 않은 지점에서 단

기적인 유량정보를 필요로 하는 경우에는 별도의 간편한 유량측정 방법이 필요하다. 유량을 측정하기 위한 가장 효율적인 방법은 수리학적으로 한계류(critical flow)를 만드는 것이다. 통상 상류(subcritical flow) 흐름조건에서 한계류를 인위적으로 만드는 방법은 수로의 폭을 축소시키는 것인데 이러한 형태의 수로를 벤츄리수로(venturi flume)라 한다. 수로의 폭을 축소시키는 방법은 다양한데, 수로의 벽면에 흐름축소부를 부착시키는 것이 일반적인 형태이다. 이동식 벤츄리수로는 수로의 중앙부에 원통형(circular cylinder) 또

\* Received 13 March 2012, revised 29 March 2013, accepted 1 April 2013.

\* Corresponding author: Tel : +82-61-450-2476 Fax : +82-61-450-2476 E-mail : kdg05@mokpo.ac.kr

는 원뿔형(circular cone)의 벤츄리바디(venturi body)를 설치하여 수로의 폭을 축소시켜 한계류를 발생시킨다(Hager, 1999). 벤츄리수로에 한계류가 발생하면 벤츄리바디에 접근하는 수위만을 측정하면 쉽게 유량을 산정할 수 있다. 즉, 벤츄리수로에 한계류가 발생하면 유량은 오직 상류수위만의 함수가 되며 하류흐름의 영향을 받지 않는다. 점차 하류수위가 상승하게 되어 일정수위 이상이 되면 한계류조건이 소멸되며 유량은 하류의 영향을 받게 된다. 이러한 벤츄리수로를 이용한 유량측정과 관련된 실험연구는 몇몇 연구자에 의해 수행된 바 있다(Hager, 1988; Kohler and Hager, 1997; Samani et al., 1991). 이들의 연구는 대부분 벤츄리수로에서 한계류조건이 발생하는 경우의 상류수위와 유량과의 관계를 규명하는 연구에 집중되어 있으며 하류수위의 영향으로 유량이 감소하는 경우에 대한 연구는 거의 찾아보기 힘들다.

최근 들어 댐의 월류형 여수로 등 수리구조물에서의 동수역학적인 해석을 위하여 RANS를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모형을 국내외에서 적극적으로 활용하고 있다(Kim, 2003; Kim et al., 2004; Ho et al., 2001; Savage and Johnson, 2001). 이들은 RANS를 지배방정식으로 하며, 자유수면은 VOF(volume of fluid) 기법으로 추적하는 방법을 이용하여 월류형 여수로에서의 월류유량, 수면변위, 압력분포 등을 계산하고 수리실험 결과와 비교하였으며 그 적용성을 검증하였다. 더 나아가 실제 지형과 구조물을 재현하여 모의를 수행하고 그 결과를 수리

모형실험 결과와 함께 구체적인 설계과정에 활용하고 있는 단계에 있다. Kim et al.(2010)은 침사지의 적정 설계에 수치모형을 적용하는 등 RANS를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모형의 적용범위는 점차 확대되고 있다.

본 연구에서는 RANS를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모형을 이용하여 원뿔형 벤츄리수로의 흐름특성을 해석하였다. 한계류조건에서 수위-유량관계의 해석 및 흐름양상의 분석을 통해 수치모형의 적용성을 검증하고, 나아가 하류수심이 벤츄리수로의 흐름에 미치는 영향을 해석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 원뿔형 벤츄리수로의 이론적 고찰

벤츄리수로에서 벤츄리바디로 원형실린더 또는 원뿔을 주로 사용하는데, 원뿔형 벤츄리바디는 상대적으로 가볍고 저유량을 정확히 측정할 수 있는 장점이 있다. 즉 원뿔형 벤츄리바디는 저수위시 흐름축소부가 상대적으로 크기 때문에, 저유량 측정시에 작은 유량의 변화에 대해 큰 수위변화가 야기되므로 저유량을 정확히 측정할 수 있다. 또한 원뿔형 벤츄리바디의 경우 수위가 증가하면 통수단면의 잠식이 감소하므로 상대적으로 고유량의 측정이 가능한 장점이 있다. 이러한 이동식 원뿔형 벤츄리수로에 대한 실험연구는 Hager(1986)에 의해 수행되어 한계류 조건에서의 수위-유량관계를 제시하고 있다.

Fig. 1은 원뿔형 벤츄리수로의 개념도이다.

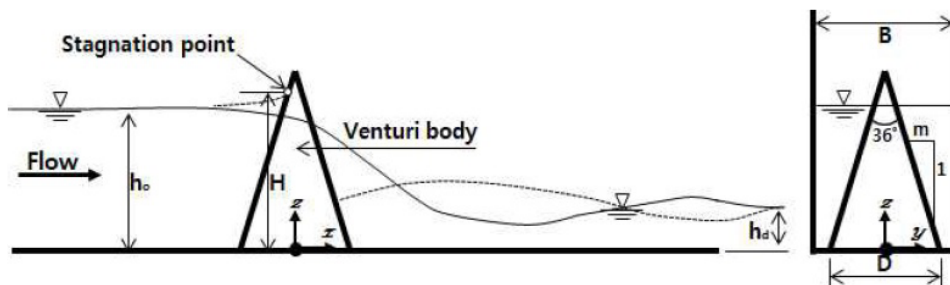


Fig. 1. Schematic diagram of venturi flume with a circular cone

Fig. 1에서  $B$ 와  $D$ 는 직사각형수로의 폭과 원뿔형 벤츄리바디 바닥면의 직경이다.  $h_o$ 와  $h_d$ 는 벤츄리바디의 영향을 벗어난 상류 및 하류 수심이며,  $H$ 는 벤츄리바디 직상류의 정체수심 또는 전수두로 접근유속이 0가 되면서 속도수두만큼 수위가 상승하게 된다. 그리고  $m$ 은 원뿔형 벤츄리바디의 측면경사이다. 이 경우 하류수심의 영향을 받지 않는 상태에 대한 벤츄리수로에서의 유량  $Q(m^3/s)$ 는 다음과 같이 산정할 수 있다 (Hager, 1986).

$$Q = k \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_3} \quad (1)$$

여기서  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $k$ 는 각각 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \left[ \frac{2}{3} \frac{mH}{(B-D)} \right]^{3/2} \quad (2a)$$

$$\alpha_2 = \left[ 1 + 0.7 \frac{mH}{(B-D)} \right] \quad (2b)$$

$$\alpha_3 = \left[ \frac{m^3}{g(B-D)^5} \right]^{1/2} \quad (2c)$$

$$k = 1 + \frac{0.037 U}{1 + 0.037 U} \quad (2d)$$

$$U = \frac{2H^2}{(B-D)D} \quad (2e)$$

위에서  $g$ 는 중력가속도이다.

## 2.2 수학적모형

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

$$\frac{\partial(AU_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} AU_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i \quad (4)$$

여기서  $t$ 는 시간,  $U_i$ 는  $x_i$ 방향의 속도,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $P$ 는 압력,  $F_i$ 는 중력, 점성력 등과 같은 외력이다. 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 VOF(volume of fluid)함수,  $F(x,y,z,t)$ 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.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \frac{\partial (FAU_i)}{\partial x_i} = F_{DIF} \quad (5)$$

여기서  $F_{DIF}$ 는 VOF함수의 확산항이다. 난류 운동에너지와 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. FAVOR기법은 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.

### 2.3 모의조건

Fig. 2는 Hager(1986)의 수리실험을 모의하기 위하여, 본 연구에서 설정한 모의영역과 경계조건을 도시한 것이다. 벤츄리수로의 단면폭  $B$ 는 0.5 m이고, 벤츄리바디의  $m$ 과  $D$ 는 각각 0.325와 0.425 m이다. Fig. 1에서 단면의 중심선을 따라 좌우대칭이므로 모의영역은 중심선을 기준으로 한쪽만을 모의영역으로 설정하였으며 중심선은 대칭경계조건을 부여하였다. 유입부는 주수로에 비해 폭과 깊이를 크게 하여 경계에서 접근유속의 영향이 크지 않도록 하였으며, 유출부 역시 주수로에 비해 폭과 깊이를 크게 하여 모형의 검증시 하류수위의 영향이 상류에 미치지 않도록 하였다. 실험수로 및 벤츄리바디의 표면은 벽면경계로 무활(no-slip)경계조건을 부여하였으며 표면은 수리학적으로 매끄러운 것으로 간주하였다. 유입부는 일정수위 경계조건을 유출부는 상류의 흐름이 반사 없이 유출되는 조건 또는 일정수위 경계조건을 이용하였다. 모의

구간의 상부면은 대칭경계조건을 부여하였으나, 경계면과 물 사이에는 대기압의 공기층이 존재하고 있어, 물의 흐름은 경계조건의 영향을 받지 않는다. 초기조건으로  $x < 1.5$  m인 영역은 상류경계조건의 수위와 동일하게, 그 하류영역은 하류경계조건의 수위와 동일하게 하였으며, 나머지 변수는 모두 0으로 놓았다. 계산격자의 크기는 흐름이 급변하는 벤츄리바디 주변부는 세밀하게 그 이외의 영역은 느슨하게 배치하는 가변격자망을 이용하였으며 전체 격자의 개수는 322,560개이다. 본 연구에서는 Hager(1986)의 실험결과 및 식 (1)을 이용하여 모의결과를 검증하기 위하여 하류수위의 영향을 받지 않는 상태에서 유입부 경계수심,  $h_{abc}$ 를 0.10 ~ 0.52 m로 변화시키며 모의하였으며, 나아가 하류수심의 영향을 고려하기 위하여 유입부 경계수심 0.3m, 0.5m에 대해 유출부 경계수심,  $h_{dbc}$ 를 변화시키며 수치모의를 수행하였다.

### 3. 모의결과

#### 3.1 모의결과의 검증

Fig. 3은 모의결과의 검증을 위한 벤츄리수로의 수위-유량관계이다. Fig. 1에서 전수두(total head)는 벤츄리수로에 접근하는 수심에 속

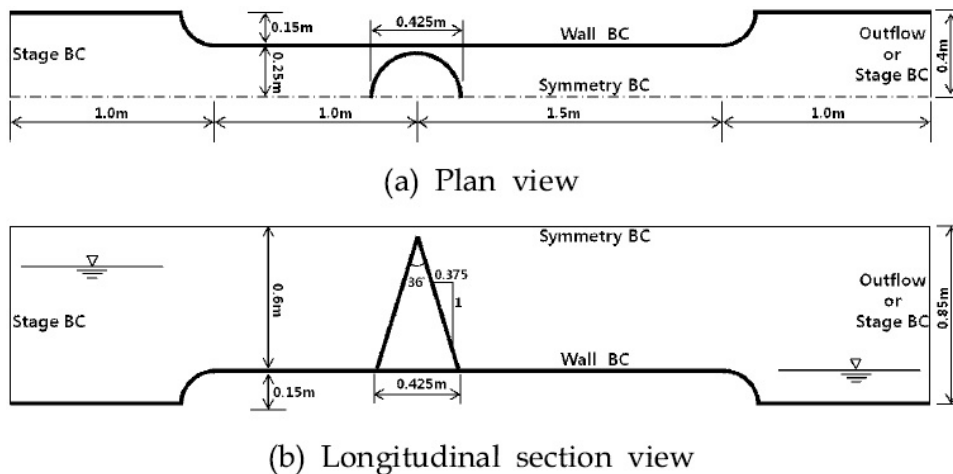


Fig. 2. Venturi flume layout and boundary conditions for the modeling

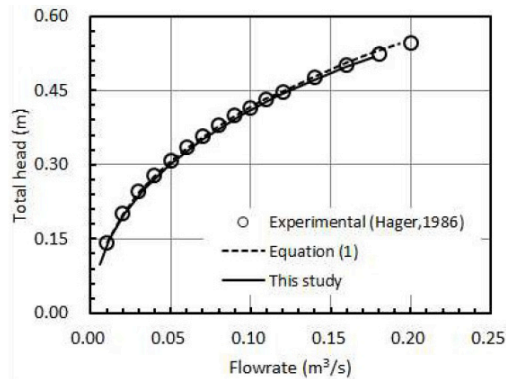


Fig. 3. Stage-discharge relationship of a venturi flume with no influence of the tail-water depth

도수두를 더하여 산정하였다. 그리고 원형부호는 Hager(1986)의 수리실험결과이며 점선은 수리실험의 결과를 식 (1)의 실험식으로 표현한 것이다. 실선은 본 연구의 모의결과로 모든 경우에 대해 식 (1)의 결과와 비교했을 때 4% 이내의 오차를 보여주고 있다. 즉, 원뿔형 벤츄리수로의 수위-유량관계의 규명에 있어 본 연구와 같이 수치모의를 이용하는 경우의 타당성을 확인할 수 있다. Fig. 4는 유입부 경계수심이 0.2 m, 0.3 m, 0.5 m인 경우의 원뿔형 벤츄리수

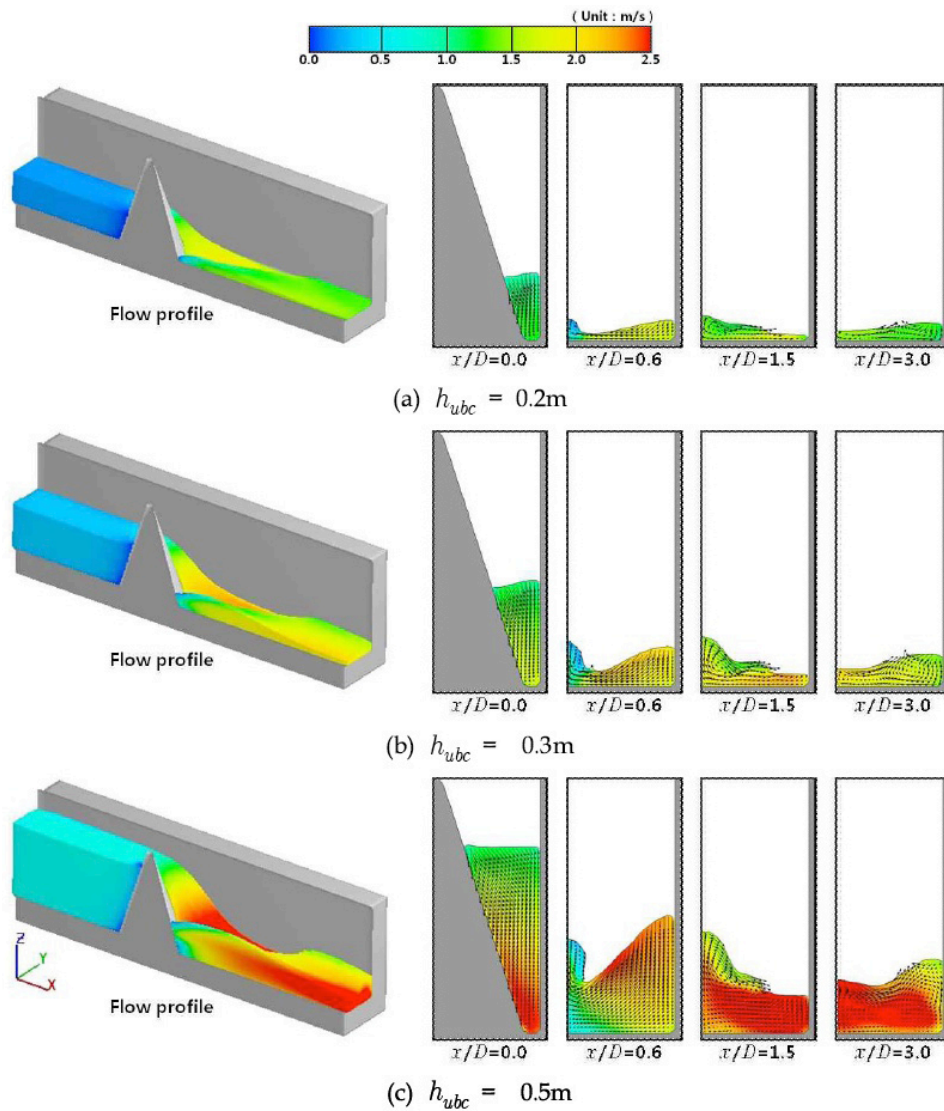


Fig. 4. Flow behaviors in a venturi flume according to upstream stage boundary conditions

로에서의 흐름을 도시한 것이다. Fig. 4에서 컬러는 속도의 크기를 나타낸다. 전반적인 흐름양상은 Fig. 1의 흐름양상과 대체로 비슷한 거동을 보이는데, 벤츄리바디에 접근하는 흐름은 그 변화가 완만한 반면에 벤츄리바디로 인해 통수 단면이 축소되며 수위가 낮아지면서 유속이 빨라지는 등 흐름이 급격히 가속되는 양상을 보인다. 벤츄리바디를 통과한 흐름은 흐름의 중앙부( $y = 0$ )에서 주흐름방향을 따라 수위가 상승했다가 하강하는 특징을 보이며, 흐름의 중앙부를 벗어난 벽면측에서는 수위가 하강했다가 다시 상승하는 특징을 보이고 있다. 이러한 수위와 유속의 변화는 수표면과 바닥면에 재순환영역을 형성하는 원인이 되고 있다. 벤츄리바디를 통과하면서( $x = 0$ ) 단면에서의 유속분포는 벤츄리바디측의 바닥면에 가까운 곳에 고속의 흐름이 형성되며 수표면에 가까울수록 유속은 작아지는 것으로 나타나고 있다. 이러한 흐름양상은 Hager(1986)의 실험에서 관찰된 흐름 특징으로 본 연구의 모의결과는 이러한 현상을 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2 하류수심의 영향

하류수심이 벤츄리수로의 수위-유량관계에 미치는 영향을 해석하기 위하여 유입부 경계수심 0.3 m, 0.5 m에 대해 유출부 경계수심,  $h_{dbc}$ 를 변화시키며 수치모의를 수행하였다. 즉, 유입부 경계수심과 유출부 경계수심의 비인,  $h_{dbc}/h_{ubc}$ 가 0.65 ~ 0.99의 범위에 대해 유입부 경계수심이 0.3 m인 경우와 0.5 m인 경우 각각 12가지 조건에 대해 수치모의를 수행하였다. Fig. 5는 유입부 경계수심이 0.5 m인 경우에 대해  $h_{dbc}/h_{ubc}$ 가 각각 0.65, 0.80, 0.99인 경우에 대한 흐름을 도시한 것이다. (a)의 경우  $h_{dbc}/h_{ubc}$ 가 0.65인 경우로 Fig. 4(c)와 비교하여  $x/D$ 가 0.0, 0.6까지는 거의 동일한 흐름양상을 보이고 있다. 단,  $x/D$ 가 1.5, 3.0인 경우에는 하류수심의 영향으로 흐름양상이 달라진다. 즉,  $h_{dbc}/$

$h_{ubc}$ 가 0.65인 경우에는 하류수심에 관계없이 벤츄리바디를 지나면서 흐름은 한계류를 형성하기 때문에 Fig. 4(c)와 같이 하류수심의 영향을 받지 않는 경우와 동일한 유량이 흐르게 된다. 하지만 Fig. 5의 (b), (c)와 같이  $h_{dbc}/h_{ubc}$ 가 0.8, 0.99로 증가함에 따라 하류수심은 벤츄리바디 상류측의 흐름에 영향을 미치게 되어 점차 유량은 감소하게 된다.

Fig. 6은 하류수심의 영향을 고려한 수위-유량 관계이다. 여기서  $Q_0$ 는 Fig. 3의 하류수심의 영향을 받지 않는 유량이며,  $Q$ 는 하류수심의 영향을 고려한 유량이다. 즉, 유량비( $Q/Q_0$ )가 1이면 하류수심의 영향을 받지 않음을 의미하며, 1보다 작으면 하류수심의 영향을 받아 유량이 감소함을 의미한다.  $H$ 는 전수두이며  $h_{dbc}$ 는 유출부 경계수심으로, Hager(1999)에 의하면 원통형 벤츄리수로의 경우 전수두 대비 하류부의 수심인 수심비( $h_{dbc}/H$ )가 약 0.7 이상에서 유량은 하류수심의 영향을 받기 시작한다. 본 연구에서도 수심비가 0.7에서 약 0.98 정도의 유량비를 보이고 있으며, 수심비가 증가하면서 유량비는 급격히 감소하는 양상을 보이고 있다. 또한 상류부 경계수심이 증가함에 따라 수심비의 증가에 따른 유량비의 감소가 다소 급하게 진행되는 양상을 보이고 있다. 즉, 벤츄리수로를 이용하여 유량을 측정하는 경우, 하류수심의 영향을 받지 않는 조건에서는 벤츄리바디의 전면에서 전수두를 측정하면 Fig. 3과 같은 수위-유량 관계에서 유량을 산정할 수 있으며, 하류수심의 영향을 받는 경우에는 벤츄리바디 전면에서 전수두를 후면에서 하류수심을 측정함으로써 Fig. 6과 같은 수위-유량 관계에서 유량을 산정할 수 있다. 실무적으로는 유량비와 수심비의 회귀식을 구성하여 활용할 수도 있을 것이다. 그리고 다양한 형태의 벤츄리바디를 가진 벤츄리수로에 대해 다양한 흐름조건에 대한 수위-유량 관계를 수리실험을 거치지 않고 본 연구와 같은 수치모의를 통해 유도할 수 있다.

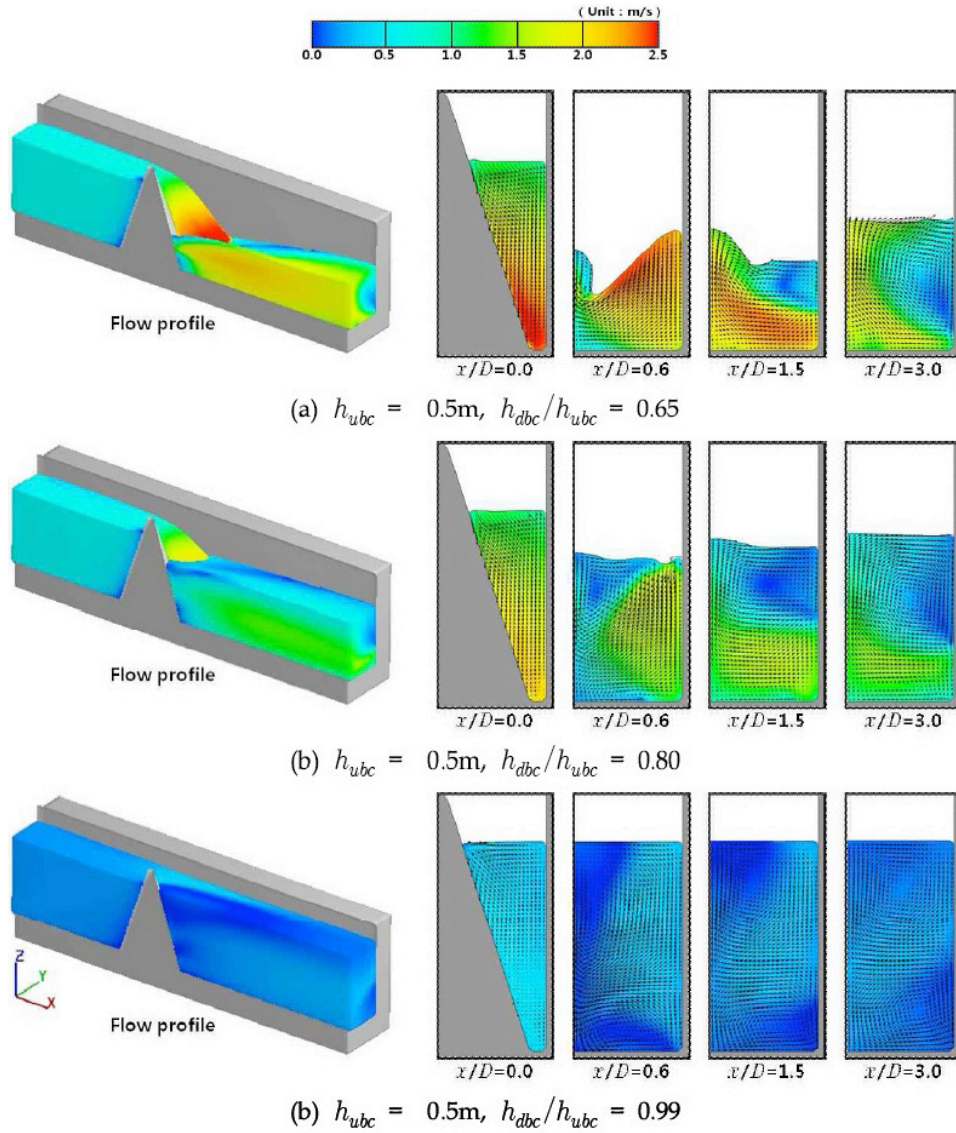


Fig. 5. Flow behaviors in a venturi flume according to downstream stage boundary conditions

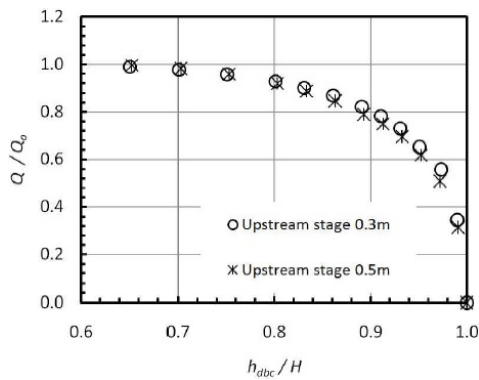


Fig. 6. Stage-discharge relationship of a venturi flume with influence of the tail-water depth

#### 4. 결론

본 연구에서는 RANS를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모형을 이용하여 원뿔형 벤츄리 수로의 흐름특성을 해석하였다. 원뿔형 벤츄리 바디를 가진 벤츄리수로는 저유량에서 고유량까지 효율적으로 유량을 측정할 수 있으며 특히 저유량에서의 유량을 정확히 측정할 수 있는 장점이 있다. 하류수심의 영향이 없는 한계류조건에서 수위-유량관계의 해석 및 흐름양상의 분석

을 통해 수치모형의 적용성을 검증하였으며, 나아가 하류수심이 유량에 미치는 영향을 해석하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수치모의결과의 검증을 위하여 하류수심의 영향이 없는 조건에 대한 벤츄리수로의 수위-유량관계를 유도하였으며, 그 결과를 Hager(1986)의 수리실험결과와 비교하였다. 본 연구의 모의결과는 모든 경우에 대해 4 % 이내의 오차를 보여주었다. 또한 Hager(1989)의 실험에서 관찰된 벤츄리바디를 통과하면서 형성되는 전반적인 흐름양상을 본 연구의 모의결과는 잘 재현하고 있음을 확인하였다.
- 2) 전수두 대비 하류부의 수심인 수심비 ( $h_{abc}/H$ )가 약 0.7 이상에서 흐름은 하류수심의 영향을 받기 시작한다. 본 연구에서도 수심비가 0.7에서 약 0.98 정도의 유량비를 보이고 있으며, 수심비가 증가하면서 유량비는 급격히 감소하는 양상을 보이고 있다. 또한 상류부 경계수심이 증가함에 따라 수심비의 증가에 따른 유량비의 감소가 다소 급하게 진행되는 양상을 보이고 있다.
- 3) 원뿔형 벤츄리수로의 수위-유량관계의 규명에 있어 본 연구와 같은 수치모의를 이용하는 경우의 타당성을 확인할 수 있었다. 더 나아가 다양한 형태의 벤츄리바디를 가진 벤츄리수로의 수위-유량관계의 규명에 본 연구와 같은 수치모의의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

Kim, D.G., Kim, S.M., and 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), pp. 713-722.

Kim, D.G., Lee, J.H., and Seo, I.W. (2004) A numerical simulations on the flow over ogee spillway with pier, *J. of Korea Water Resources Association*, 37(5), pp. 363-373.

Kim, N.I. (2003) *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model*, Ph.D dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.

Flow Science (2007) *Flow-3D (Theory Manual)*, Los Alamos, NM.

Hager, W.H. (1986) Modified, trapezoidal venturi channel, *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(3), pp. 225-241.

Hager, W.H. (1988) Venturi flume of minimum space requirements, *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(2), pp. 226-243.

Hager, W.H. (1999) *Wastewater hydraulics*, Springer, Berlin.

Ho, D.K.H., Boyes, K.M. and 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.

Kohler, A. and Hager, W.H. (1997) Mobile flume for pipe flow, *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(1), pp. 19-23.

Samani, Z., Jorat, S. and Yousaf, M. (1991) Hydraulic characteristics of circular flume, *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(5), pp. 558-566.

Savage, B.M. and Johnson, M.C. (2001) Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study, *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(8), pp. 640-649.

Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G. (1992) Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Physics of Fluids*, 4(7), pp. 1510-1520.