

연직수문에서 개방도와 상하류 수심에 따른 유량계수에 관한 연구

A Study on Discharge Coefficient for Sluice Gate by Ratio of Gate Opening and Water Depth

김건우*, 이경지**, 조원철***,
Kun Woo Kim, Kyung Ji Lee, Won Cheol Cho

요 지

본 연구는 연직수문을 통과하는 흐름의 유량계수에 대한 연구이다. 개수로에서 널리 쓰이는 연직수문에서의 흐름 거동을 개방도와 상류수심 및 유량을 조절하여 이를 수리실험과 FLOW-3D에 적용시켜 이에 따른 결과를 비교·분석 하였다. 수리실험결과 자유흐름의 경우 개방도와 상류수심비에 따라 유량계수의 값이 0.5~0.6 사이에 분포함을 확인할 수 있었다. 수리실험과 FLOW-3D, 0.611법, Swamee 식의 유량계수 값들을 비교하였을 때 기존의 연구와 마찬가지로 Swamee의 식은 현저히 떨어지는 값을 보임을 확인할 수 있었다. 수치모의결과 수리실험과 비슷한 양상을 보이며 수문에서의 흐름을 잘 구현함을 확인할 수 있었다. 수로의 폭에는 큰 영향을 받지 않으며 개방된 수문의 개수에 대한 변화에 따라 약간의 차이가 있으나 대체적으로 유량계수의 값이 0.4~0.6에 분포됨을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 연직수문, 유량계수, FLOW-3D, 개방도, 상하류수심

1. 서론

최근 예측하기 어려운 호우로 인하여 인명피해 및 재산피해가 늘고 있다. 이러한 피해를 방지하기 위하여 댐이나 저수조의 안전한 관리를 위해 수문의 방류능력을 정확하게 평가할 필요성이 있다. 수문에서의 유량은 수로의 폭, 수문의 개방도, 상·하류수심의 영향을 받는다. 개방도와 상·하류수심에 대한 연구는 활발하나 수로의 폭에 따른 유량계수에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이를 위한 최근의 연구로써 Sepúlveda(2009)은 수중흐름조건에서 연직수문의 유량 산정식들과 HEC-RAS 프로그램을 이용하여 유량산정식의 정확성을 비교하였고, 김대근(2007)은 연직수문의 자유흐름을 FLOW-3D 상용 프로그램을 사용하여 해석하였다. Henry(1950)는 각 수문의 형태에 따른 경험적인 유량계수 및 수축계수 등을 제시하였다. 본 연구에서는 수리실험과 기존 연구결과와의 비교를 통해 유량과 수심, 개방도, 유속 등 여러 인자와의 상관관계를 분석하여 기존의 유량산정식을 검토하고 적합한 관계의 식을 산정하고자 한다. 또한 수치모의를 수리실험과 비교하여 타당성을 검증하고 수로의 폭 및 수문의 개수에 대한 연구를 수행하여 보다 넓은 범위에 수문에 관한 연구를 진행하여 중·소규모의 수문 설계에 도움이 되는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

* 연세대학교 토목환경공학과 석사과정-E-mail : freeman2ya@naver.com
** 동부엔지니어링 수자원환경부-E-mail : kjlee1966@dbeng.co.kr
*** 연세대학교 토목환경공학과 교수-E-mail : woncheol@yonsei.ac.kr

2.1 수리모형을 이용한 물리적 실험

본 연구에서 사용된 수리실험은 폭 0.9m, 총 길이 11m, 높이 0.6m인 사각형 수로에서 수행되어졌다. 수문은 흐름의 안정화를 위하여 물이 공급되는 수조로부터 6m지점에 설치하여 수문의 개방도(), 상류수심(z_1), 하류수심(z_2) 측정하였다. 개방도에 따라 상류수심 및 유량을 변화시켜 하류수심의 변화를 살펴보았다. 수문의 개방도는 자유흐름의 경우 1cm, 2cm, 3cm 그리고 5cm, 6cm, 8cm에서 수행되었다. 유속측정은 ADV방식을 사용하는 Sontek의 Flow Tracker를 사용하여 유속을 측정하였다. 평균유속을 구하는 방법으로는 본 실험에서의 최대 수심이 20cm가 되지 않음을 고려하여 1점법으로 관측하여 평균유속을 계산하였으며, 유량계수 측정을 위해 물받이를 통해서 유량(m)을 측정하였다. 또한 FLOW-3D와의 비교를 위해 상·하류 및 수문 부근에서 유속을 측정하였다.

2.2 FLOW-3D를 이용한 수치모의 실험

FLOW-3D에 사용되는 수로의 설계는 Solid Edge 프로그램을 이용하여 폭 0.9m, 높이 0.6m, 총길이 11m로 실제 수로와 같은 크기로 제작하였다. 수로의 바닥에 샌드 페이퍼가 깔려있음을 고려하여 조도계수는 0.01을 적용하였다. 수리실험비교를 위하여 자유흐름의 경우 개방도가 3cm, 5cm 그리고 8cm인 경우를 실험하였고 수중흐름의 경우 개방도가 8cm인 경우를 실험하여 비교하였다. 수로의 폭과 수문의 개수 두 가지의 경우를 매개변수로 하여 유량계수를 살펴보았다. 첫 번째 매개변수로 수로의 폭 0.5m, 0.7m, 0.9m, 1.2m, 1.5m에 대하여 개방도 5cm, 10cm일 때의 수문을 통과하는 유량에 대한 유량계수를 산정하였다. 두 번째 매개변수로 수문의 개수를 달리 하여 1.5m 수로 폭에 총 다섯 개의 수문을 설치하여 수문의 개수를 1개, 3개 그리고 전체를 다 개방시켰을 때의 수문을 통과하는 유량의 유량계수를 살펴보았다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 수리실험 결과

상·하류 수심비와 유량의 관계를 그림 1에 나타내었다. 각 개방도에 따라 자유흐름과 수중흐름으로 나누어 유량을 측정하였는데 $a \geq 5cm$ 인 경우에는 이론식으로 산출된 곡선에 잘 부합함을 확인할 수 있었다.(Roth, 1999) 또한 $Q^2/b^2z_1^3g$ 의 값이 최대가 되는 z_2/z_1 이 0.67이 되는 지점을 기준으로 수문의 통과하는 흐름의 상태가 변하게 됨을 확인하였다.(Janna, 1993) 상·하류 수심비가 $z_2/z_1 < 0.67$ 일 경우 자유흐름을 나타내고 $z_2/z_1 > 0.67$ 을 넘어가면 수중흐름으로 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과 값과 회귀분석으로 얻어진 Power 형태, Harris Model 형태, 그리고 Reciprocal Logarithm 형태의 식을 도식화 시켰을 때 세 식의 곡선과 상관계수의 값이 거의 같기 때문에 어떤 식이 더 적합하다는 판정을 하기가 어렵다. 그러나 식의 간편성을 고려하였을 때, 그림 2와 같이 간단한 형태의 식을 사용하는 것이 용이하다고 판단하였다. Power식의 형태는 $y = ax^b$, $C = 0.5235 a/z_1)^{-0.0742}$ 이며, 상관계수는 0.8713이다.

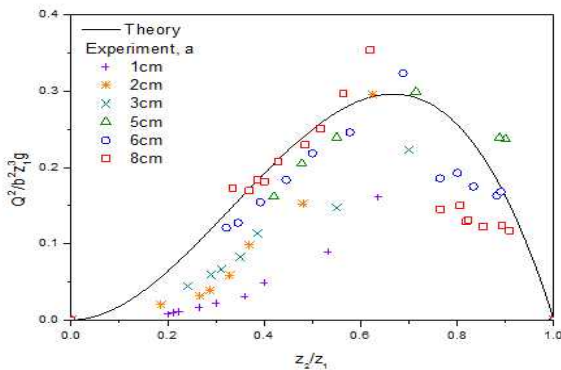


그림 1. 상·하류 수심비대 유랑간의 관계

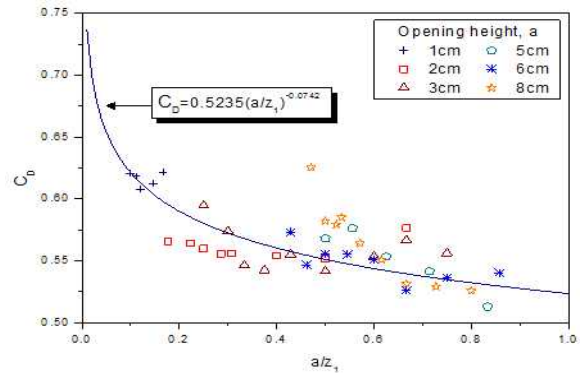
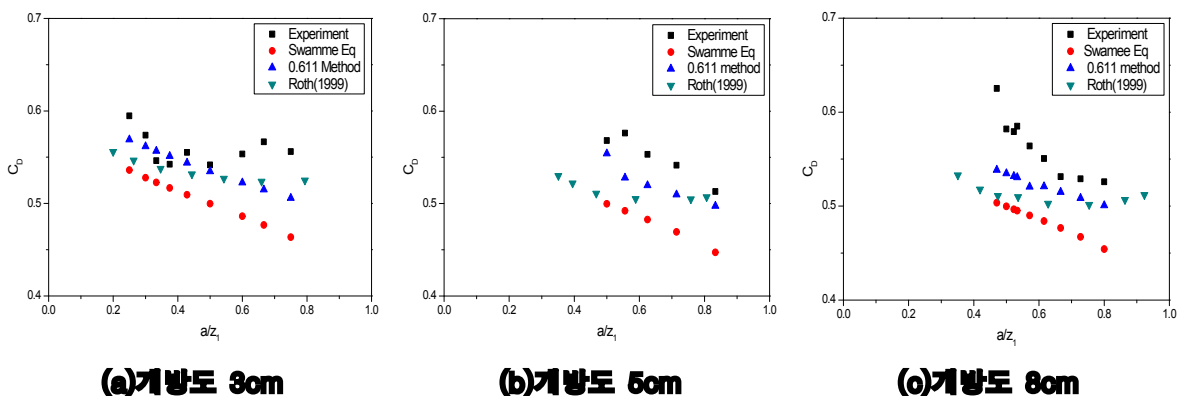


그림 2. 회귀곡선과 유랑계수의 분포(Power)

3.2 수치모의 결과

3.2.1 수리실험과의 비교 및 검증

그림 3은 개방도에 따른 상류 수심비대 유랑계수를 도식화 한 결과로 그림 4와 비교를 위하여 도시하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 개방도가 낮은 $< 5cm$ 인 상태에서는 두 이론식의 값과 실험값이 비슷한 범위내에 위치했지만 $a \geq 5cm$ 인 경우 다른 양상을 나타내었다. Swamee의 이론식의 결과가 가장 낮은 값을 나타내는데 실제 실험에서는 Swamee의 이론식에서는 고려하지 못한 에너지 손실이 포함되어 있기 때문이라 생각된다. 기존 연구 결과에서 Swamee의 식이 개방도가 작은 경우 관측된 유랑계수값과 잘 맞으나 개방도가 커질수록 잘 맞지 않는다고 밝혀졌다.(Swamee, 1992) 그림 4는 본 연구의 수리실험을 기준으로 Swamee의 이론식, 유속관측법, 0.611 방법, 그리고 FLOW-3D를 통해 구해진 유속계수 값을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 상·하 경계조건으로 10%의 오차범위를 주어 정확성을 확인해보았다. 수리실험에서의 개방도에 따른 상류 수심비대 유랑계수를 도식화 한 결과 그림 3과 마찬가지로 대부분의 경우는 오차범위내에 포함되어 비슷한 값을 가지나 Swamee의 이론식의 경우 오차범위가 10% 이상이 되는 큰 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 이는 과거 Sepúlveda(2009)의 연구를 통해서도 Swamee의 유랑계수 산정법이 적합하지 않음을 지적하고 있다. 아래의 그림 4의 분석을 통해 실제 측정을 할 수 없는 경우 0.611 방법이나 FLOW-3D의 사용이 적합한 것으로 나타났다.



(a)개방도 30m

(b)개방도 50m

(c)개방도 80m

그림 3. 개방도에 따른 상류수심비대 유랑계수

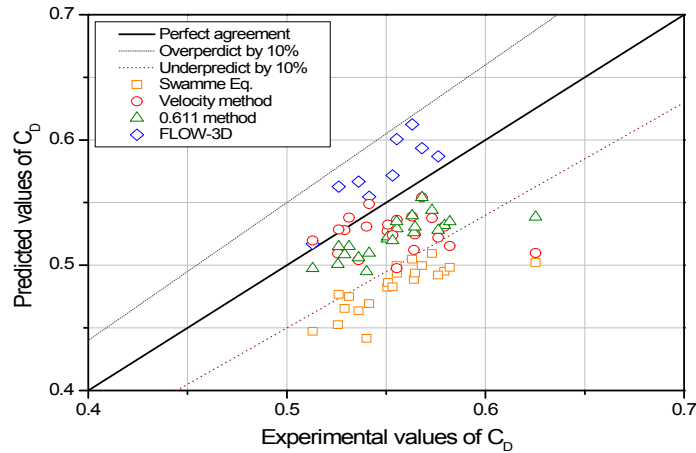
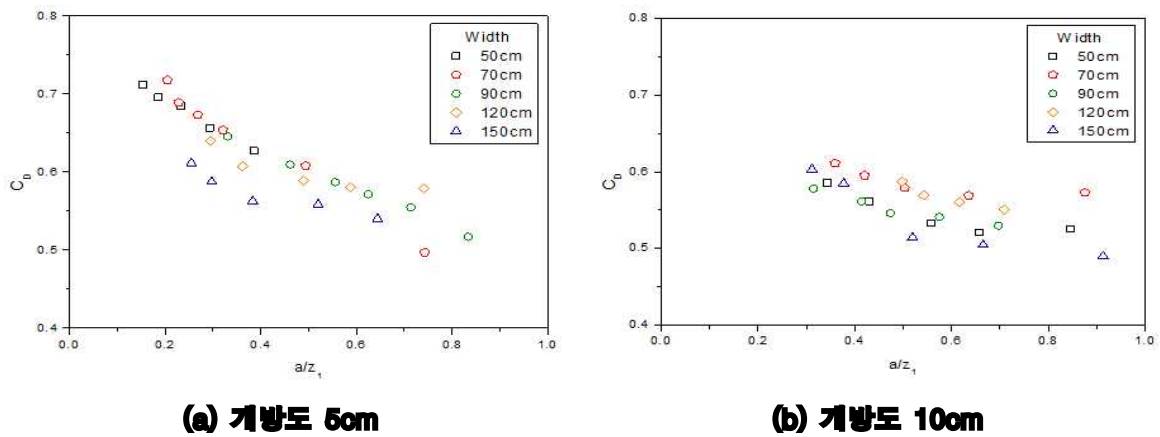


그림 4. 실험 관측과 예측된 유량계수의 정확성 비교

3.2.2 수로의 폭

수로의 폭이 유량계수에 영향을 미친다는 가정 하에 수치모의를 진행한 결과 아래의 그림 5와 같이 나타났다. 그림 5의 (a), (b)는 개방도 5cm, 10cm일 때 각 폭에 따른 유량계수값을 나타낸 것이다. 폭이 좁은 수로에 경우 같은 a/z_1 값에서 유량계수가 0.6~0.7 사이의 값으로 비교적 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 개방도에 따라서도 차이를 나타내었는데 개방도가 클수록 유량계수의 값이 0.5~0.6 사이에 분포되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 폭이 커짐에 따라 에너지 손실이 커짐으로 나타나는 결과라 판단되어진다. 그러나 결과적으로 가정했던 수로의 폭이 유량계수에 미치는 영향은 미미하였다.



(a) 개방도 5cm

(b) 개방도 10cm

그림 5. 각 폭에 따른 유량계수

3.2.3 수문의 개수

수문의 부분개방시의 유량계수를 살펴보기 위해서 수치모의를 수행하였다. 그림 4.15는 5개의 수문 중에서 1개, 3개, 5개를 개방하였을 때 각 개방도에 따른 유량계수 값을 나타낸 것이다. 개방된 수문의 개수에 따라 유량계수의 값이 차이를 가지나 그 차이가 크지 않고 과거의 연구와 본 연구의 유량계수 값의 범위인 0.4~0.6 사이의 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 수문을 1개 개방하였을 때보다 3개 개방하였을 때 유량계수 값이 작은 이유로는 수문의 상호간섭 등으로 인한 영향이 있을 것으로 판단되어진다. 이를 통해 개방도가 커질수록 개방된 수문의 개수에 따른 유량계수 값의 차이가 생길 것으로 예측된다.

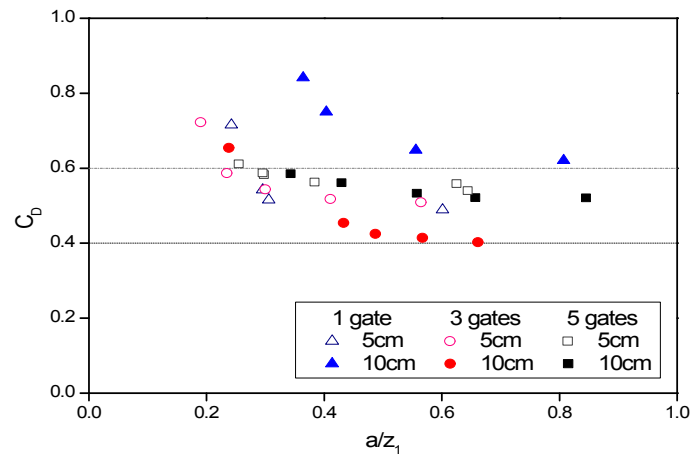


그림 6. 수문 개방 개수에 따른 유량계수

4. 결론

본 연구에서는 수리실험과 수치모의를 통하여 수문을 통과하는 흐름에 대한 거동을 해석하였다. 그 중에서 유량을 조절하는 인자 중 하나인 유량계수에 대한 연구를 수행하였다. 기존 연구결과와의 비교를 위하여 수리실험을 수행하여 과거 연구의 수리실험 값과 이론식을 통한 유량계수 값을 비교하였다. 수치모의를 사용하여 수리실험에 타당성을 부여하였으며 그 결과 유량계수 산정식을 도출하였다. 또한 매개변수로써 수로의 폭, 조도계수, 수문의 개수를 변화시켜 연구를 수행하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 전폭 연직수문의 수리실험 결과 자유흐름의 경우 개방도와 상류수심비를 유량계수와 도시하였을 때 유량계수의 값이 0.5~0.6사이에 분포하며 a/z_2 가 증가하면 C_D 의 값이 감소하는 경향을 보였다. 반면 개방도와 하류수심간의 관계에서는 a/z_2 의 값이 증가하면 C_D 의 값도 함께 증가하는 경향을 보였으나 하류수심에 영향을 크게 받지 않음을 확인하였다.

2. 수리실험과 FLOW-3D, 0.611법, Swamee 식의 유량계수 값들을 비교하였을 때 기존의 연구와 마찬가지로 Swamee의 식은 현저히 떨어지는 값을 보임을 확인할 수 있었다. 10%의 상·하 경계조건내에 포함되는 FLOW-3D와 0.611법은 실제로 측정할 수 없는 경우 수치모의로써 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

3. 수로의 폭을 매개변수로 적용하여 수치모의를 수행한 결과 수로의 폭에 변화에 따라 유량에 영향을 미치므로 수문을 통과하는 흐름의 유량계수가 달라짐을 확인할 수 있었다. 그러나 그 차이가 미비하여 수로의 폭이 유량계수에 큰 영향을 끼친다고 보기는 어렵다.

4. 수문의 개수를 매개변수로 적용하여 수치모의를 수행한 결과 개방된 수문의 개수에 따라 유량계수의 값이 차이를 가지나 그 차이가 크지 않고 과거의 연구와 본 연구의 유량계수 값의 범위인 0.4~0.6 사이의 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 그러나 개방도가 커질수록 개방된 수문의 개수에 따른 차이가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Sepúlveda, C., Gómez, M., and Rodellar, J. (2009). "Benchmark of discharge calibration methods for submerged sluice gates.", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 135, No. 5, pp. 676-682.
2. Kim, D. G. (2007). "Numerical analysis of free flow past a sluice Gate.", *KSCE Journal of Civil*

- Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 127-132.
3. Henry, H. R. (1950). "Discussion: Diffusion of submerged jet.", Trans. American Society of Civil Engineers, Vol. 115, pp. 687-697.
 4. Janna W. S. (1993). Introduction to fluid mechanics, PWS-KENT.
 5. Roth, A. and Hager, W. H. (1999). "Underflow of standard sluice gate.", Experiments in Fluids, vol. 27, pp. 339-350.
 6. Swamee, P. K. (1992). "Sluice-gate discharge equations", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, No. 1, pp. 56-60.