

파살플룸의 규모 결정을 위한 수치모의에 대한 연구

Numerical Simulation for Determining Scale of Parshall Flume

김수영*, 이지훈**, 홍녕교***, 이승오****

Soo Young Kim, Ji Hun Lee, Nyung Kyo Hong, Seung Oh Lee

요 지

일반적으로 유량측정방법 중에서 파살플룸은 유속이 매우 느리거나 토사유입이 많은 지점에서 위어에 비해 상대적으로 유리한 유량 계측기이다. 국제표준화기구(ISO : International Organization for Standardization)에서 파살플룸의 규모별 규격화된 경험식을 제안하고 있으나 수치모형실험이나 수치모의를 통한 체계적인 연구는 다소 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 ISO 규격 파살플룸에 대하여 경험식과 수치모의를 비교하여 파살플룸에 대한 수치모의의 적정성을 검토하였고 ISO 규격을 따르지 않는 임의규격의 파살플룸에 대하여 동일 조건의 수치모형실험 및 수치모의 결과로 비교 검토하였다. 수치모형실험에서는 다양한 유량 유입조건 및 수심조건에 따른 파살플룸 내 상·하류 수심을 측정하였으며, 수치모의를 통해 측정된 값과 비교한 결과 오차는 평균 4% 내외로 나타났다. 수치모의결과를 이용하여 유량산정공식을 도출한 후, 실험값과 비교하였다. 그 결과 오차는 최대 2.3%로 나타났으며 이에 따라 파살플룸의 규모를 결정하기 위한 수치모의는 타당한 것으로 판단된다. 파살플룸의 규모결정시 실제 지형과 유입부 형상 등을 고려한 수치모의를 수행하고 본 연구에서 배제했던 잠수월류에 대해서도 추후 연구를 수행한다면 1차원적인 경험식이나 측정시 오차가 발생하기 쉽고 수행 과정이 까다로운 수치모형실험을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 파살플룸, FLOW-3D, 수치모형실험

1. 서 론

유량을 측정하는 다양한 방법 중 가장 보편화된 방법은 위어를 이용하는 것이다. 하지만 위어를 이용한 유량 측정은 에너지 손실이 크며 직상류에 토사가 퇴적된다는 단점이 있다. 반면 20세기 초 Ralph Parshall에 의해 제안된 파살플룸은 수두손실이 위어의 약 1/4에 불과하며 유사를 그대로 통과시키므로 상대적으로 유지 관리가 용이하다. 이러한 파살플룸에 대하여 국제표준규격(ISO9826)에서는 규모별 규격화된 경험식을 제안하고 있으나 수치모형실험이나 수치모의를 통한 체계적인 연구가 다소 부족하고 현장 여건 등으로 인해 규격에 없는 경우가 발생하는 것에 대한 제언은 부족한 실정이다. Steven 등(1994)은 적은 유량에 대한 파살플룸의 유량공식을 다양한 조건의 수치모형실험을 이용하여 검증하였다. Zytner 등(1998)은 파살플룸을 통과한 물의 용존산소

* 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : freedance80@nate.com
** 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : jihunlee77@nate.com
*** 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 학부과정 · E-mail : hun85@nate.com
**** 정회원 · 교신저자 · 홍익대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr

을 상승에 대한 연구를 수행하였다. FLOW-3D를 이용한 3차원 수치모의에 관한 연구는 오병동 등(2004)에 의해 이루어졌으며 FLOW-3D와 경험식 및 수심-유량관계식을 비교하였다. 본 연구에서는 FLOW-3D를 이용한 3차원 수치모의와 제안된 경험식을 비교하였으며, 보다 다각적으로 접근하기 위해 ISO기준을 따르지 않은 파살플룸에 대하여 수치모의와 수리모형실험을 비교하였다. 이를 통하여 임의 형상의 파살플룸의 설계 및 시공이 필요한 경우 FLOW-3D를 이용한 3차원 수치모의의 결과를 활용하는 것이 신뢰성이 있음을 보이는데 그 목적이 있다. 따라서 본 연구를 통하여 외부 경계조건에 따른 파살플룸의 규모를 수치모의를 활용하여 결정할 수 있는 근거를 제시하고자 한다.

2. 기본이론

2.1 FLOW-3D 개요

FLOW-3D는 연속방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 사용하고 있으며 지배방정식인 연속방정식은 다음과 같다(Flow Science, 2003).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

여기서, V_F 는 유체의 요소체적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각 방향의 유속, A_x, A_y, A_z 는 각 방향 요소면적 이다. 운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 다음 식(2)~(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

여기서, G 는 체적력이고 f 는 점성력을 나타낸다. 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위 체적당 유체의 체적은 VOF(Volume of Fluid)함수, $F(x, y, z, t)$ 로 표현되며, 식(5)는 일반적인 VOF함수를 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(Fu) + \frac{\partial}{\partial y}(Fv) + \frac{\partial}{\partial z}(Fw) \right\} = FDIF + FSOR \quad (5)$$

여기서, $FDIF$ 는 Diffusion of Fluid Fraction이고, $FSOR$ 은 Fluid Source와 Sink 이다.

2.2 수리모형실험 및 측정 방법

수리모형실험은 ISO 규격을 따르지 않은 파살플룸에 대하여 수리모형실험 및 수치모의를 수행하여 수치모의를 통한 유량산정공식의 도출에 대한 적정성을 분석하였다. 파살플룸의 상·하류 수심을 변수로 하여 파살플룸내 수심 변화와 유량을 측정하였다.

2.2.1 수리모형실험수로 제원

본 연구에서는 폭 0.8m의 수로를 사용하였으며, 유량조건으로는 상류의 삼각위어를 통해 넘어오는 유량을 유입유량으로 하였고, 월류고를 측정하여 산정한다. 자세한 파살플룸 및 수로의 형상은 그림 2 및 표 1에 나타내었다.

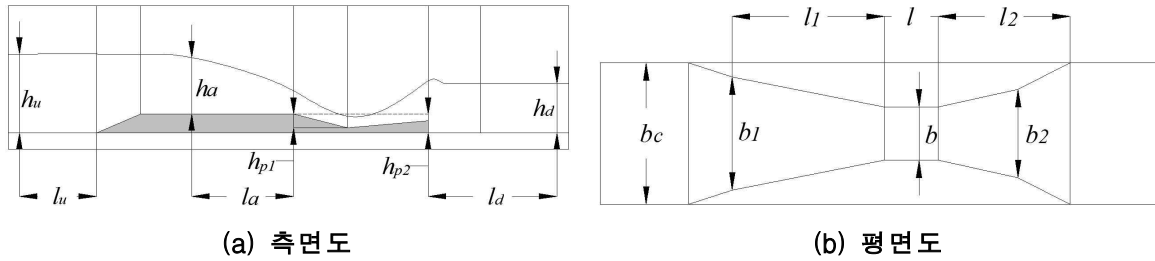


그림 2. 파살플룸의 형상

표 1 수리모형실험 및 ISO 규격 No.1 파살플룸의 제원

(단위:m)

구분	l_u	l_a	h_{p1}	h_{p2}	l_d	l_1	l_2	l	b_c	b_1	b	b_2
실험모형	2.4	0.576	0.084	0.114	2.4	0.863	0.749	0.305	0.8	0.64	0.3	0.5
ISO No.1	2.4	0.393	0.120	0.160	2.4	0.610	0.61	0.305	0.8	0.40	0.152	0.39

2.2.2 수심측정방법

수리모형실험에 대한 수심의 측정은 캠코더로 수로의 측면을 찍어 이미지 작업을 통하여 수심을 측정하였다. 캠코더에 의한 측정은 후처리 과정이 필요하다는 단점이 있지만 시간에 따라 연속적인 값을 측정할 수 있으므로 본 연구에 수심을 측정하는 방법으로 적용하였다.

2.3 수치모의 경계조건

수치모의는 상류 경계조건으로 수리모형실험과 동일한 유량과 상류수심을 적용하였고, 하류경계조건으로 상류수심의 0.5, 0.8, 0.9배를 설정하였다. 파살플룸의 상·하류 조건을 수리모형실험과 동일하게 적용한 후 파살플룸 내의 수심변화를 실험값과 비교하였다.

3. 결과

3.1 ISO 유량 산정식의 검증

본 연구에서 선정한 ISO 규격의 파살플룸은 No.1 이다. 유량산정공식은 식(6)에 나타내었으며, 그 규격은 표 1에 나타내었다. 상류수심은 h_u , 하류수심은 h_d 로 표현하였다.

$$Q = 0.381 h_a^{1.58} \quad (6)$$

유량 산정공식과 FLOW-3D를 이용한 수치모의를 통해 산정한 유량결과는 표 2 나타내었으며, 오차는 0~8%의 범위를 가진다. 8% 오차의 경우는 완전월류가 이루어지지 않아 발생한 것으로 예상되며, 따라서 추후 연구에서 잠수월류에 관해서도 규명이 필요할 것으로 판단된다.

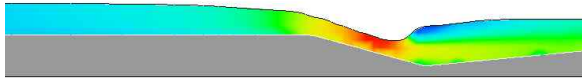
표 2. ISO 산정공식 및 수치모의에 의한 유량의 비교

h_u	h_d	유량(경험식)	h_a	유량(수치모의)	수치모의 대비 오차율
0.20	0.10	0.0022	0.0380	0.0022	3%
	0.16	0.0022	0.0379	0.0022	3%
	0.18	0.0022	0.0379	0.0022	4%
0.30	0.15	0.0155	0.1318	0.0161	4%
	0.24	0.0155	0.1320	0.0161	3%
	0.27	0.0156	0.1325	0.0156	0%
0.40	0.20	0.0363	0.2260	0.0371	2%
	0.32	0.0363	0.2260	0.0366	1%
	0.36	0.0369	0.2280	0.0341	8%

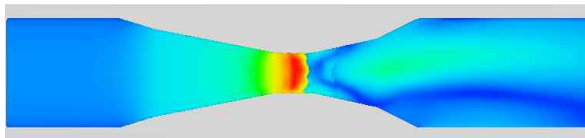
3.2 수리모형실험과 수치모의결과의 비교



(a) 수리모형실험결과

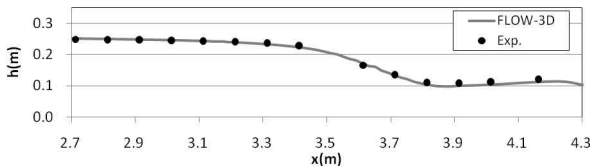


(b) 수치모의 결과 x-z 평면

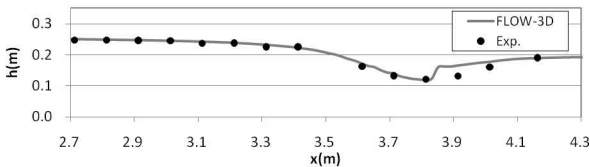


(c) 수치모의 결과 x-y 평면

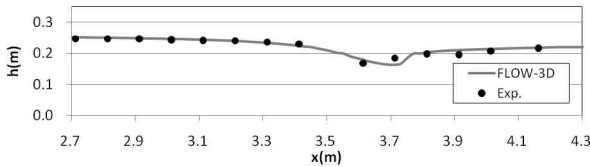
그림 3. 수리모형실험 및 수치모의 결과($h_u=0.20m$, $h_u=0.16m$)



(a) $h_d = 0.125m$

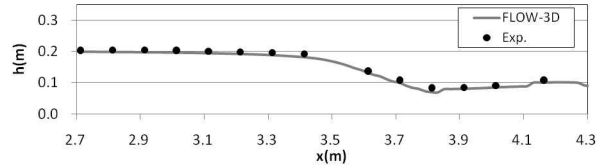


(b) $h_d = 0.20m$

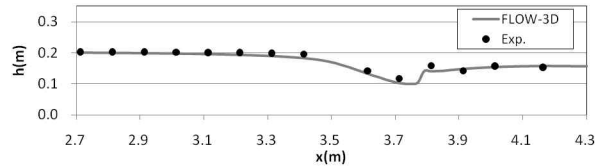


(c) $h_d = 0.225m$

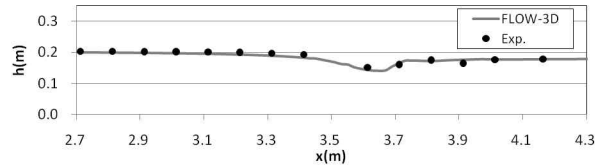
그림 5. 하류부 수심에 따른 수심형상 ($h_u = 0.25m$)



(a) $h_d=0.10m$

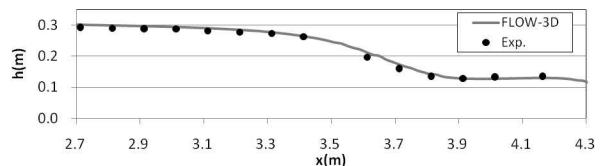


(b) $h_d=0.16m$

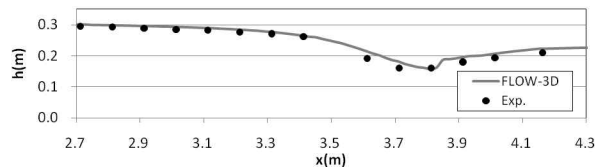


(c) $h_d=0.18m$

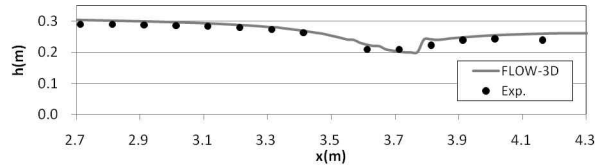
그림 4. 하류부 수심에 따른 수심형상 ($h_u = 0.20m$)



(a) $h_d = 0.15m$



(b) $h_d = 0.24m$



(c) $h_d = 0.27m$

그림 6. 하류부 수심에 따른 수심형상 ($h_u = 0.30m$)

수리모형실험 및 수치모의 결과는 그림 3~6에 도시하였으며 9가지 경우 모두 수리모형실험과 수치모의결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 수리모형실험 및 수치모의를 통해 산정한 h_a 및 실험값 대비 수치모의 값의 오차율은 표 3에 나타내었다.

표 3. 수리모형실험과 FLOW-3D로 산정된 h_a 및 오차율

$Q(m^3/s)$	h_u (m)	실험 h_a (m)	FLOW-3D h_a (m)	실험값 대비 오차율
0.0150	0.20	0.087	0.085	2.30%
0.0313	0.25	0.133	0.133	0.27%
0.0505	0.30	0.178	0.182	-2.25%

※ h_a 는 h_d 가 각각 $0.5h_u$, $0.8h_u$, $0.9h_u$ 일 때의 값을 평균하여 산정하였다.

3.3 유량산정공식 도출

FLOW-3D로 산정된 h_a 와 Q 의 관계를 식으로 표현하면 식(7)과 같다. 또한 식(7)과 실험값 및 수치모의 결과를 그림 7에 함께 도시하였다. 거의 일치하는 경향을 나타내는 것으로 보아 본 연구의 목적인 수치모의를 통한 유량산정공식의 도출은 타당한 것으로 판단되었다 .

$$Q = 0.7767 h_a^{1.5987} \quad (7)$$

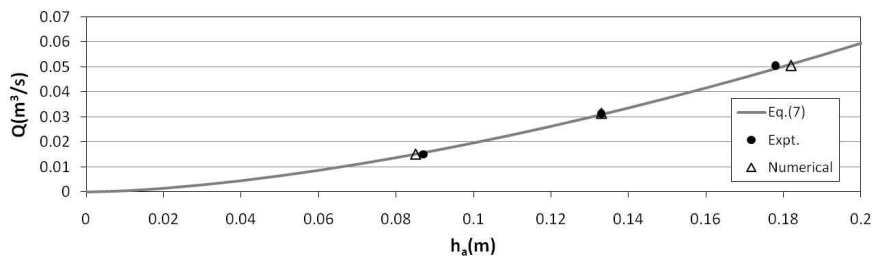


그림 7. 산정된 유량산정공식 및 실험값

4. 결 론

파살플룸은 가장 간단하게 유량을 검정할 수 있는 계측기기이다. 그러나 ISO에서 수리모형실험에 의한 경험식을 제시한 것만 수십만으로 유량을 구할 수 있다는 한계가 있었다. 또한 실제수로에서 규격화된 파살플룸만으로는 적용하기 힘든 경우도 있다. 그러나 파살플룸의 규격을 바꾸어 제작하기 위해서는 수리모형실험을 통하여 수심-유량 관계식을 도출하여야 했지만, 본 연구에서의 결과와 같이 파살플룸의 수리모형실험결과와 수치모의 결과가 거의 일치하므로 제작에 시간과 비용이 많이 드는 수리모형실험을 수치모의로 대체 하여 수행한다면 규격을 바꾸더라도 쉽게 수심-유량 관계곡선을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어 기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 오병동, 김경호, 이환기, 안상도(2004). "Flow-3D에 의한 파살플룸 흐름 해석". *한국수자원학회 논문집*. Vol.37(5). pp. 375~386.
- Flow Science, Inc. (2003). *FLOW-3D User's Manual*, Los Alamos, New Mexico.
- ISO-9826(1992). *Measurement of liquid flow in open chammels-Parshall and SANIIRO flumes*. pp. 1-10.
- Parshall, R. L.(1926). "The improved Venturi flume." *Trans.*, ASCE, Vol.89, 841-851.
- Zytner, R.G., Rahme. Z.G., Labocha, M.(1998). "Oxygen uptake at parshall flumes", *Can. J. Civ. Eng.* 25. pp.769~776.
- Steven, R., Wright, J.(1994). "Recalibration of parshall flumes at low discharge". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol 120, No. 2