

## $k-\omega$ SST 난류모형을 이용한 수중도수의 수치모의

최성욱\*

Choi, Seongwook\*

### Numerical Simulation of Submerged Hydraulic Jump Using $k-\omega$ SST Turbulence Model

#### ABSTRACT

In the case of multi-function weirs installed in Korea, the free hydraulic jump or the submerged hydraulic jump is occurred depending on the height of the gate opening and the tailwater level when the sluice gate of the movable weir is partially opened. In this study, the submerged hydraulic jump for the flows under the sluice gate were simulated and the mean flow, turbulence statistics, and relative water depth are investigated using numerical simulation. For numerical simulation, the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equation, volume of fluid method, and  $k-\omega$  SST turbulence model were used. The numerical model was validated using the results of other researchers' previously performed experiments, and it was investigated that the numerical model appropriately simulates the two-phase flow in the hydraulic jump. In addition, the distribution of mean flow, turbulence statistics, and the length of recirculation region was investigated.

**Keywords :** Movable weir, Submerged hydraulic jump, Mean flows, Turbulence statistics,  $k-\omega$  SST turbulence model

#### 초록

우리나라에 설치된 다기능보의 경우 가동보 구간은 수문의 부분 개방 시 수문 개방 높이와 하류의 관리수위에 의해 자유도수 또는 수중도수 형태의 흐름이 발생한다. 본 연구에서는 수문 아래를 지나 흐르며 발생하는 수중도수를 수치모의하고 평균흐름, 난류량, 그리고 상대수심 등에 대하여 분석하였다. 수치모의를 위하여 unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식과 volume of fluid 기법, 그리고  $k-\omega$  SST 난류모형을 이용하였다. 기존에 수행된 다른 연구자들의 실험 결과를 이용하여 수치모형을 검증하여 수치모형이 도수에서 발생하는 이상흐름을 적절히 모의하는 것을 검토하였다. 또한 내부 평균흐름 및 난류량의 분포에 대하여 모의하여 분포 형태에 대해 분석하고, 자유수면과 재순환영역의 길이 등을 분석하였다.

**검색어 :** 가동보, 수중도수, 평균흐름, 난류량,  $k-\omega$  SST 난류모형

## 1. 서론

도수는 사류가 상류로 천이되며 흐름이 불연속적으로 변하는 현상이다. 국내 4대강 사업으로 건설된 다기능보들의 경우 모두 가동보가 설치되어 있으며, 낙동강 본류의 경우 낙동강하굿둑에서부터 최상류에 위치한 상주보까지 전 구간에서 관리수위에 의해 4 m 이상의 수심을 유지하고 있다. 홍수기가 아닌 경우 상류의 수위 관리를 위해 가동보가 부분적으로 개방되며, 이때 수문에서 발생하는 사류와 하류의 깊은 관리수위가 만나면 자유도수(free jump) 또는 수중도수(submerged jump)가 발생하게 된다. 수중도수의 경우 자유도수에 비해 적은 에너지 손실을 발생시키고 공기 연행 및 자유수면 경사 또한 작아 역압력경사가 작다. 그러나 자유도수의 경우 수문에서

\* 종신회원 · 교신저자 · 연세대학교 건설환경공학과 박사후연구원 (Corresponding Author · Yonsei University · csu1220@yonsei.ac.kr)

Received May 7, 2024/ revised May 10, 2024/ accepted May 12, 2024

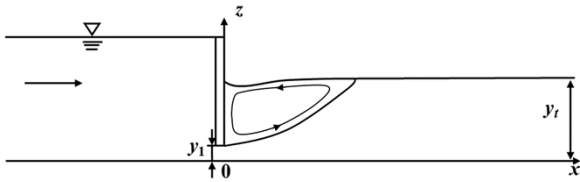


Fig. 1. Submerged Hydraulic Jump

만들어진 사류가 하류로 전파될 수 있고 도수구간에서는 바닥에서의 압력 진동이 수중도수에 비해 크고 음압력을 발생시키기도 한다. 따라서 자유도수가 발생하게 되는 경우 보 하류 바닥보호공 및 하상에 큰 피해를 입히게 되므로, 자유도수의 발생은 피하고 수중도수 상태를 유지하여 보의 수문을 운영할 필요가 있다.

수중도수의 기본적인 형태는 Fig. 1과 같다. 수문이  $y_1$ 만큼 개방되어 상·하류의 정수압의 차이로 인하여 사류가 발생하고,  $y_1$ 의 공액수심  $y_2$ 가 하류 수심  $y_t$ 에 비해 작아 수중도수 형태로 수문 직하류부터 도수가 발생하게 된다. 도수 발생 구간에서는 하부에 벽 제트(wall jet) 형태의 흐름이 발생하고 상부에는 재순환 영역(recirculation zone)이 형성된다. 수중도수의 경우 재순환 영역의 흐름에 의해 공기가 연행되어 물과 공기가 혼합되기 때문에 역압력경사(adverse gradient pressure)가 발생하기 때문에, 벽 제트 형태의 흐름은 일반적인 벽 제트 흐름과는 다른 흐름 변화 양상을 가지게 된다.

일반적으로 도수 구간은 Fig. 2와 같이 크게 네 가지 영역으로 나눌 수 있다. 첫 번째로, 도수가 발생하기 직전에서의 사류구간인 developing zone이 있다. 이 영역에서의 흐름은 벽 제트에서의 포텐셜 코어와 유사한 형태를 보인다. developing zone은 곧 developed zone으로 이어진다. 이 영역에서는 벽 제트 형태 흐름 구간과 재순환흐름 구간으로 나뉘게 된다. 두 구간 사이에서는 강한 전단층이 형성되어 평균흐름 및 난류량에 큰 영향을 미친다. developed zone은 재순환영역이 끝나는 지점부터 흐름 형태가 개수로 흐름 형태로 변이되는 transition zone이 되고, 이후 개수로 흐름이 되는 open-channel flow zone이 된다.

수중도수에 대해서는 실내실험을 통한 연구가 오래전부터 많이 진행되었다. Rajaratnam(1965)은 pitot tube를 이용하여 수문을 통과하며 발생하는 자유도수와 수중도수에서의 평균흐름, 압력,

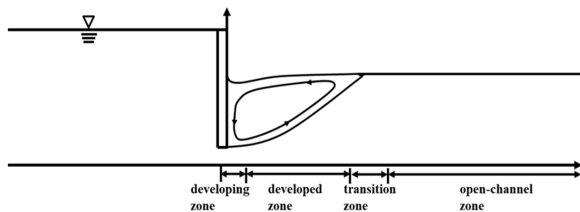


Fig. 2. Four Zones of Submerged Hydraulic Jump

바닥전단응력에 대하여 측정을 수행하였다. Long et al.(1990)은 Laser Dopple Anemometry(LDA)를 이용하여 수중도수에서의 평균 유속과 난류량의 분포를 측정하고 특성을 검토하였다. 여기서 다양한 침수비( $S = (y_t - y_2)/y_2$ )와 수문 개방 구간에서의 Froude number에 대한 실험을 수행하여 여러 가지 관계식을 제시하였다. Wu and Rajaratnam(1995)은 pitch probe와 Prandtl probe를 이용하여 수중도수에서의 평균 유속을 측정하였다. Wu and Rajaratnam은 측정된 자료 및 기존 다른 실험에서 수행한 실험자료를 이용하여 벽 제트, 자유 도수, 그리고 수중 도수에서의 수심평균 유속 감쇄에 대한 관계식을 제시하였다.

수중도수에 관한 수치모의 역시 다수의 연구자들에 의해 연구되었다. Long et al.(1991)은  $k-\epsilon$  난류모형을 자신들의 실험자료(Long et al., 1990)에 적용하였다. Long et al.(1991)은 자유수면은 측정된 자료를 이용한 rigid grid에서 계산을 수행하여 평균흐름 및 난류량을 실험 결과와 비교하였다. Ma et al.(2001)도 Long et al.(1991)과 같은 연구를 수행하였으나, volume of fluid(VOF) 기법을 사용하여 자유수면을 계산하였다. Ma et al.(2001)의 경우 자유수면은 잘 예측한 편이었으나 재순환영역의 크기를 과소 산정한 결과를 보였다. Javan and Eghbalzadeh(2013) 또한 Lagrangian moving-grid method를 사용하여 Ma et al.(2001)과 동일한 수치모의를 수행하였으나, 큰 개선점이 보이지는 않았다. Jesudhas et al.(2017)은 Detached Eddy Simulation(DES)를 사용하여 Long et al.(1990)의 실험자료에 적용하고 평균흐름 및 난류량을 분석하였다. 평균흐름과 대략적인 난류량은 잘 모의하였으나 난류강도 및 레이놀즈 응력에서 크기를 과대 산정하는 문제가 있었다.

수중도수에 관한 기존 연구는 한정적인 실내실험 연구가 일반적이었으며, 이는 공기와 물의 혼합으로 인해 이상흐름(two-phase flow)이 발생하기 때문에 측정 및 계산 모두 좋은 결과를 얻기가 쉽지 않다. 본 연구의 목적은  $k-\omega$  SST 난류모형과 VOF 기법을 이용하여 수문을 통과하며 발생하는 수중도수에서 평균흐름 및 난류량을 검토하는 것이다. 이를 위해 수중도수를 모의할 수 있는 수치모형을 제시하였다. 기존 다른 연구자들의 연구 결과와 비교하여 적용성을 검토하였고, 수치모형을 이용하여 흐름의 감쇄 특성에 대해서도 분석하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1 평균흐름

보를 월류하는 흐름을 계산하기 위하여 다음과 같은 Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes(URANS) 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \rho g_i \quad (2)$$

여기서  $x_i$ 는 정규직교 좌표축(Cartesian axis)이고  $\tilde{u}_i$ 는  $x_i$  방향 앙상블(ensemble) 평균 유속,  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 물과 공기가 혼합된 공간의 밀도,  $\tilde{p}$ 는 앙상블 평균 압력,  $\mu$ 는 물-공기 혼합 점성계수,  $\mu_t$ 는 난류점성계수, 그리고  $g$ 는 중력가속도이다. 본 연구에서는 공기 연행으로 인한 다상흐름(multiphase flows) 및 자유수면은 Volume of Fluid(VOF) 기법을 사용하여 계산하였다(Hirt and Nichols, 1981). VOF 기법에서 물의 체적비( $\alpha$ )에 대한 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

VOF 기법은 다상흐름을 계산하는 방법 중 가장 널리 사용되는 Eulerian 계산기법이다. VOF 기법은 다상흐름을 하나의 운동량방정식으로 계산하기 위해 밀도와 점성계수에 대하여 물의 체적비를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\mu = \alpha \mu_{water} + (1 - \alpha) \mu_{air} \quad (4)$$

$$\rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air} \quad (5)$$

여기서  $\mu_{water}$ 와  $\mu_{air}$ 는 각각 물과 공기의 점성계수이고  $\rho_{water}$ 와  $\rho_{air}$ 는 각각 물과 공기의 밀도이다.

## 2.2 난류모형

난류점성계수는 Menter(1992)가 제시한  $k-\omega$  SST 난류모형을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, \overline{SF}_2)} \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 난류운동에너지,  $\omega$ 는  $k$ 의 소산률,  $\overline{S}$ 는 흐름의 변형률,  $a_1$ 은 모형 상수(= 0.31), 그리고  $F_2$ 는 혼합함수(blending function)다. 본 연구에서 혼합함수는  $k-\omega$  SST 모형에서 일반적으로 사용하는 Menter(1992)가 제시한 것을 사용하였다.  $k$ 와  $\omega$ 는 아래와 같이 각각의 수송방정식을 이용하여 얻는다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \beta^* k \omega \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} &= \frac{1}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} + \alpha_1 \overline{S}^2 \\ &- \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $\nu$ 는 물-공기 혼합 동점성계수,  $\nu_t$ 는 난류 동점성계수,  $P_k$ 는  $k$ 의 생성항,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta^*$ ,  $\beta$ , 그리고  $\sigma_{\omega 2}$ 는 모형계수, 그리고  $F_1$ 은 혼합함수이다. 모형계수  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$ , 그리고  $\beta$ 는  $F_1$ 을 이용하여 아래와 같은 방법으로 얻는다.

$$\phi = \phi_1 F_1 + (1 - \phi_1) F_2 \quad (9)$$

본 연구에서는 각각의 계수에 대하여  $\alpha_1 = 5/9$ ,  $\beta^* = 9/100$ ,  $\beta_1 = 3/40$ ,  $\beta_2 = 0.0828$ ,  $\sigma_{k1} = 0.85$ ,  $\sigma_{k2} = 1$ ,  $\sigma_\omega = 0.5$ , 그리고  $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ 을 사용하였다(Menter, 1992).

## 2.3 계산조건

본 연구에서는 지배방정식과 난류모형을 해석하기 위하여 OpenFOAM(Jasak, 2009)을 사용하였으며 지배방정식의 유속-압력의 상관관계를 계산하기 위하여 PISO 알고리즘과 SIMPLE 알고리즘에 기반한 interFoam을 사용하였다. 시간 미분항은 Euler 기법으로 이산화하였다. 이송과 확산항의 경우 각각 Van Leer 기법(Van Leer, 1974)과 수정된 Gauss 선형 기법으로 이산화하였다. 이산화된 각각의 항들은 generalized geometric-algebraic multi-grid(GAMG) matrix solver를 사용하여 해석하였다. 벽과 인접한 모든 격자는  $z^+$ (=  $u_* z_1 / \nu$ )가 10 이하가 되도록 매우 작은 값을 사용하였으며, 시험모의를 수행하여 적절성을 검토하였다(여기서  $u_*$ 는 전단속도이고  $z_1$ 은 벽과 인접한 격자 중심까지의 수직거리이다). 또한 시간 격자는 Courant number가 0.5 이하가 되도록 설정하였다.

## 2.4 경계조건

본 연구에서 개수로에서 도수를 계산하기 위하여 유입부, 유출부, 바다, 그리고 상단을 경계조건으로 설정하는 것이 필요하다. 유입부 경계조건으로는 Dirichlet 경계조건을 사용하였으며, 유속의 경우 정해진 유량에 맞춰 단면평균유속을 설정하였다. 또한  $k$ 와  $\omega$ 는 임의의 매우 작은 값을 사용하였다. 유출부 경계조건으로는 압력을 0으로 설정하여 자유낙하 조건을 사용하는 대신, 작은 사각형 보를 설치하여 하류단의 수위를 조절하였다. 바다와 유입부 상부의 벽면 경계조건으로는 no-slip 조건을 사용하였다. 공기로 채워진 상단 경계조건으로는 압력을 0으로 설정하였다.

**Table 1.** Experimental Condition in Long et al.(1990)

$y_1$ (m)	$U_1$ (m/s)	$y_2$ (m)	$Fr_1$	$S$	Re
0.015	3.14	0.206	8.19	0.24	47,100

### 3. 적용 대상

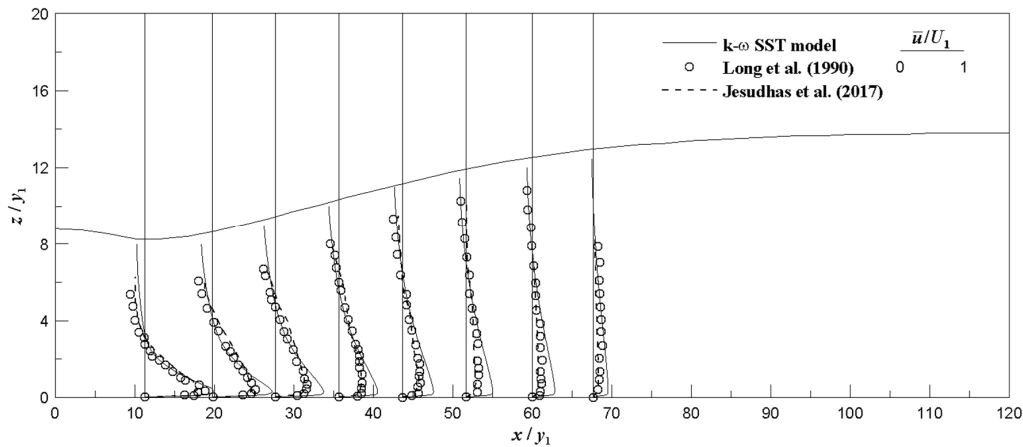
본 연구에서 수중도수를 모의하기 위하여 Long et al.(1990)의 실험결과에 수치모형을 적용하였다. Long et al.(1990)은 수문 아래에서 발생하는 수중도수를 발생시켜, LDA를 이용하여 평균흐름 및 난류량을 측정하였다. Long et al.(1990)은 수중도수가 자유도수에 비해 물과 공기의 혼합이 적어 평균흐름과 난류량을 계측할 수 있었으나 신뢰성을 높이기 위한 후처리 방법에 대한 고민이 포함되어 있다. Long et al.(1990)의 실험을 제외하면 서론에서 언급한 실험의 난해함에 의해 수중도수에 대하여 내부 평균흐름과 난류량을 면밀하게 수행한 사례를 찾아보기 어렵다. 본 연구에서 수치모형을 Long et al.(1990)의 실험 중 침수비가 가장 낮은 실험에 적용하였으며, 수로 및 흐름의 상세한 조건은 Table 1에 제시하였다. 여기서  $U_1$ 과  $Fr_1$ 은 도수가 시작되는 지점에서의 유속 및 Froude number다. 모형의 검증에 위하여 Long et al.(1990)의 실험결과나 같은 대상을 DES로 수치모의한 Jesudhas et al.(2017)의 모의결과, 그리고 다양한 수중도수 실험을 수행한 Nasrabadi et al.(2021)의 실험자료 등을 이용하여 함께 도시하였다. Nasrabadi et al.(2021)은  $Fr_1$ 과 침수비  $S(= y_2/y_1 - 1)$ 를 조절하여 44가지 흐름조건을 가진 수중도수에 대하여 point gauge와 piezometer를 이용하여 자유수면을 측정하였다.

### 4. 모형 적용

Fig. 3은 수중도수 내부의 유속 분포를 보여주고 있다. 각각의

측은  $y_1$ 으로 무차원화 하였으며, 유속의 크기는  $U_1$ 으로 무차원화하였다. 모의 결과를 검토하기 위해 Long et al.(1990)의 측정결과 및 같은 계산조건이 사용된 Jesudhas et al.(2017)의 DES를 이용한 모의결과를 함께 도시하였다. Fig. 3을 보면 흐름이 developed zone에서 재순환영역과 벽 제트 형태의 흐름으로 나누어지는 것을 볼 수 있다. 벽 제트 흐름 영역에서의 매우 빠른 유속은 역압력경사에 의해 점차 감쇄되어 일반적인 개수로 흐름 형태로 천이되는 과정을 보인다. k- $\omega$  SST 모형이 전반적인 유속의 크기는 잘 모의하고 있으나 재순환영역에서 역방향 유속이 과소산정하는데, 이는 2차원 수치모형의 한계로 고려된다. 모의 대상의 경우 폭-수심비( $B/y_1$ )가 2.27로 유속분포가 벽면에 의한 영향을 크게 받을 것을 예상할 수 있다. 일반적으로 도수 실험의 경우 하류의 수심이 클 수밖에 없기 때문에 폭-수심비가 충분히 큰 수로를 만들기는 매우 어렵다. Jesudhas et al.(2017)의 적용 결과의 경우 유속분포가 실험결과와 잘 맞는 편인 것을 볼 수 있는데, 이는 3차원 모형을 활용하면서 폭-수심비에 의한 영향이 잘 적용되었기 때문으로 볼 수 있다.

Fig. 4는 수중도수 내부의 레이놀즈 응력 분포를 도시한 것이다. Fig. 3과 같은 방법으로 각 축을 무차원화하고, 다른 자료를 함께 도시하였다. 단, 레이놀즈 응력의 크기는  $U_1^2$ 으로 무차원화하였다. Fig. 4를 보면 레이놀즈 응력이 developed zone에서는 바닥 근처에서 작은 양수값에서 시작되어 전단층 중심에서는 음값으로 크게 감소되는 것을 볼 수 있다. 여기서 레이놀즈 응력 값이 0이 되는 지점과 음값의 최대치가 되는 지점은 각각 유속 분포의 최대점과 변곡점 위치에서 발생하는 것을 볼 수 있다. k- $\omega$  SST 모형의 모의결과의 경우 Long et al.(1990)의 실험 결과와 매우 잘 맞는 것을 볼 수 있다. Jesudhas et al.(2017)의 모의 결과의 경우 레이놀즈 응력 최소값의 크기가 상대적으로 과다산정되었는데, 이에 대하여 Long et al.(1990)이 사용한 실험장비 LDA의 한계로 공기가 많이 유입되는 구간에서 레이놀즈 응력의 측정 결과가 잘못되었을



**Fig. 3.** Vertical Distribution of Streamwise Mean Velocity

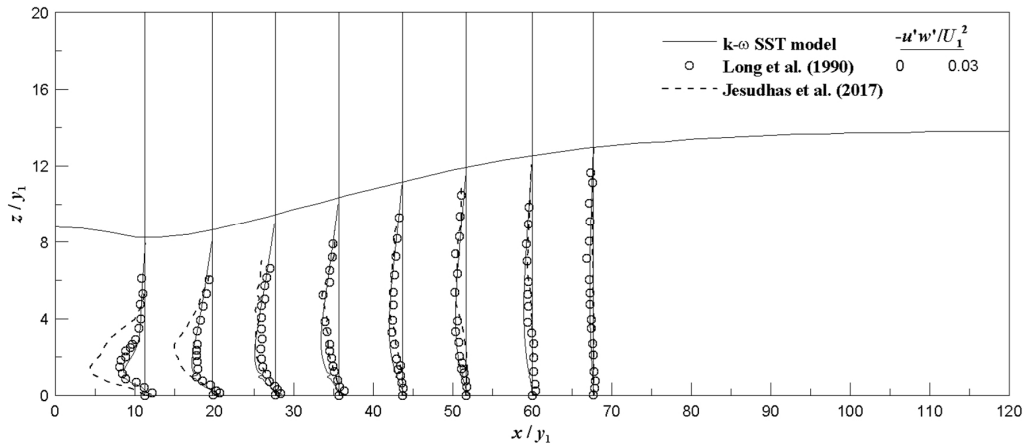


Fig. 4. Vertical Distribution of Reynolds Stress

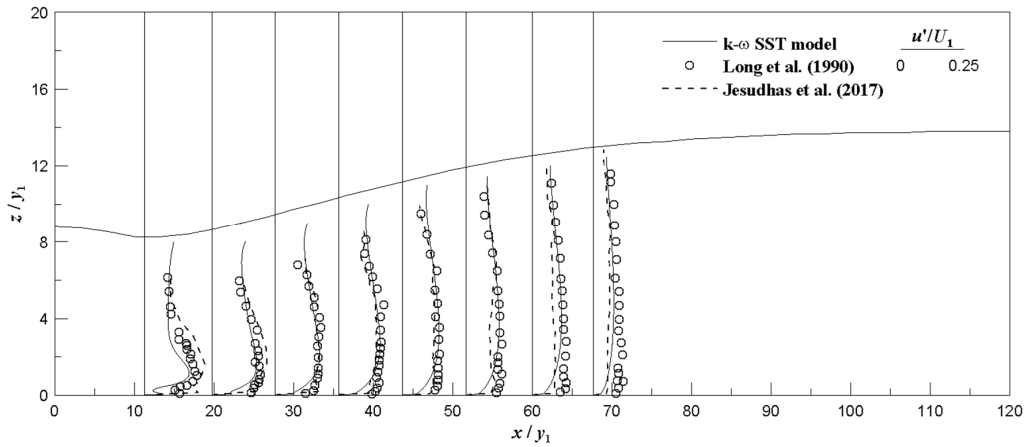


Fig. 5. Vertical Distribution of x-turbulence Intensity

것이라고 설명하고 있다. 그러나 Jesudhas et al.(2017)의 연구에서 와도를 검토했을 때 developing zone에서 발견되었어야 할 헤어핀 와 구조가 보이지 않은 것을 보이며 난류량 재현이 잘 되지 않았음을 설명하여 정밀한 도수 영역 난류 수치모의가 매우 어려움을 보여주었다.

Fig. 5는 수중도수 내부의  $x$  방향 난류강도 분포를 도시한 것이다. Fig. 3과 같은 방법으로 각 축과 난류강도를 무차원화하고, 다른 자료를 함께 도시하였다. Fig. 5를 보면  $k-\omega$  SST 모형의 모의결과가 Long et al.(1990)의 실험 결과와 매우 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 난류강도는 벽 제트와 재순환영역 사이에서 생성되는 강한 전단층 사이에서 최대값을 보이며, 하류로 갈수록 전단층의 위치가 상층으로 이동하며 약해지고 소멸되는 것을 알 수 있다. 바닥에서부터 전단층에서 도달해 최대값이 된 난류강도는 자유수면 근처로 가면서 점차 감소된다.

Fig. 6은 수치모의를 수행하여 계산된 자유수면 분포를 도시한 것이다. 각각의 축은 수문의 개도 높이로 무차원화하였다. Fig.

3과 마찬가지로 Long et al.(1990)의 측정결과와 Jesudhas et al.(2017)의 DES를 이용한 모의결과를 함께 도시하였다. 수중도수에 의하여 재순환영역 상층에서 역방향 흐름이 발생하고, 수문 근처에서 수심이  $y_3$ 까지 상승한 것을 볼 수 있다. 모의된  $y_3/y_1$ 은 8.7로, Long et al.(1990)의 9.1, Jesudhas et al.(2017)의 9.6과 거의 유사하다.  $k-\omega$  SST 모형이 전반적인 수위는 잘 모의하였으나 수심이 작아지는 지점의 위치가 다른 결과에 비해 상류에서 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 도수영역에서 발생하는 역방향 흐름의 최대값을 보여주고 있다. 가로축은  $y_1$ 으로, 세로축은  $U_1$ 으로 무차원화하였다. 그림을 보면 역방향 유속의 최대값은  $x/y_1 = 23$ 인 지점까지 가파르게 증가했다가  $x/y_1 = 85$ 인 지점까지 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 때 역방향 유속의 최대값은  $U_1$ 의 0.18배로 계산되었다. 이것은 Long et al.(1990)의 실험 결과인 0.25배 값에 비해 작은 수치로, 이로 인하여 Fig. 3에서  $y_3/y_1$ 와 수심 최소값 발생 지점의 위치의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

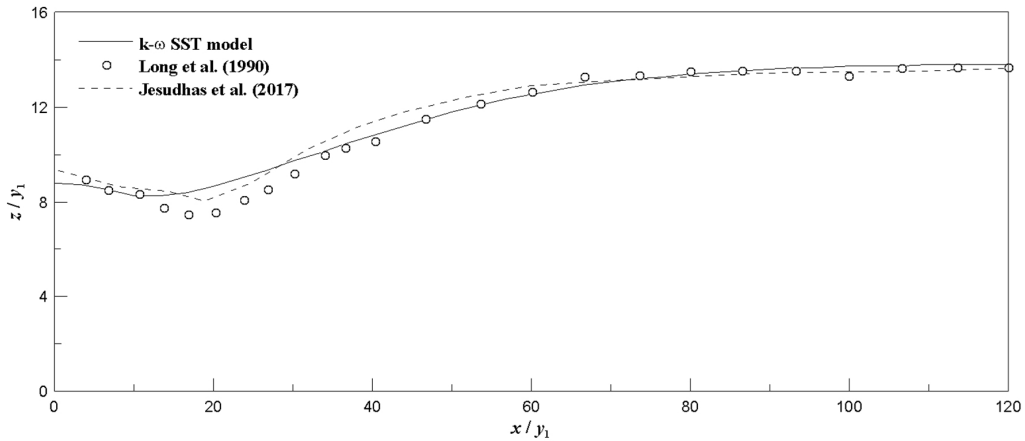


Fig. 6. Free Surface Profile

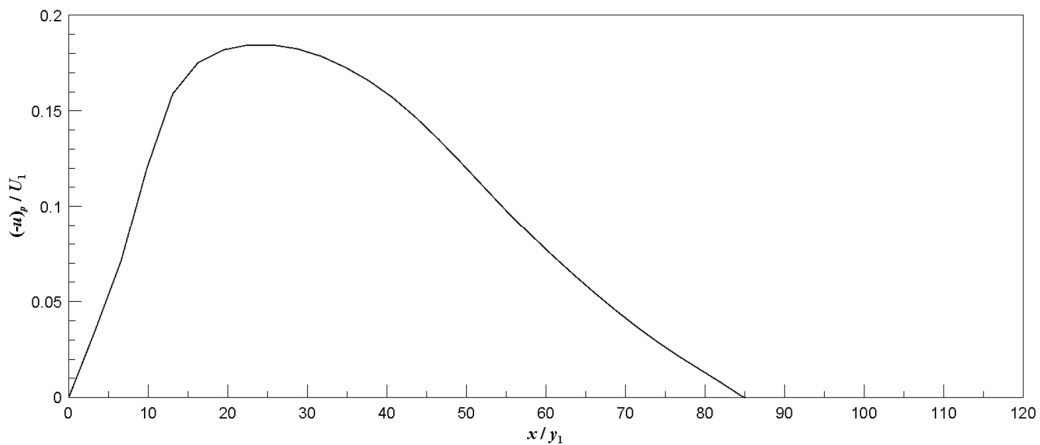


Fig. 7. Longitudinal Distribution of Backward Velocity

Fig. 8은 다양한 침수비에 대한 자유수면의 분포를 보여주고 있다. 각각의 축은 Fig. 6과 같은 방법으로 무차원화 하였다. 비교를 위해 Nasrabadi et al.(2021)의 실험자료 중 본 연구의 모의대상과 유사한 실험조건( $Fr_1 = 8.5$ )의 측정 결과를 함께 도시하였다. Fig. 8을 보면  $k-\omega$  SST 모형의 모의를 통해 계산된 자유수면이 침수비가 유사한 측정결과와 유사하며, 이는 Long et al.(1990)의 실험결과와 거의 같음을 알 수 있다.  $x/y_1 = 0$ 인 지점 근처에서 자유도수를 제외하고 역방향 흐름이 수문 상부 벽에 막혀 수심이 상승하고, 수심이 어느 정도 저하된 후 자유도수와 유사한 수면형을 보이게 된다. 침수비의 증가에 따라  $y_3/y_2$ 과 최소 수심- $y_t$ 의 비 모두 1에 가까워지는 것을 볼 수 있으며, 최소수심의 발생 위치도 하류 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는  $Fr_1 = 8.2-8.5$ 일 때 침수비에 따른 상대수심( $y_3/y_1$ )의 분포를 보여주고 있다. Nasrabadi et al.(2021)의 실험 결과에 따르면 침수비와 상대수심이 선형비례관계를 가진다는 것을 보인다. 이것은  $Fr_1$ 이 일정할 때 침수비가 증가함에 따라  $y_3$ 가  $y_t$ 에

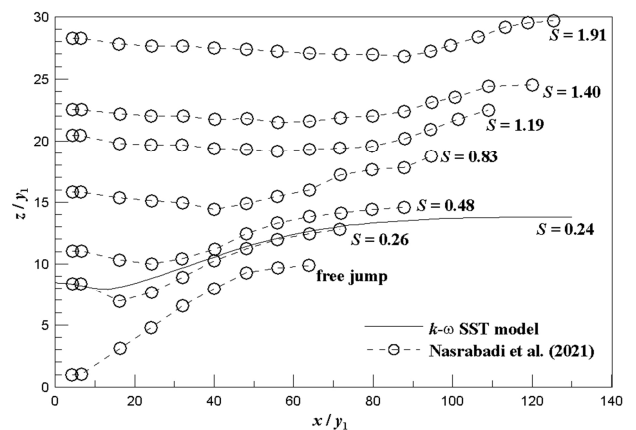


Fig. 8. Free Surface Profile for Different Submergence Factors

거의 비슷한 값을 가지게 되는데, Belanger equation에 의해  $y_2 = f(Fr_1)y_1$ 의 관계를 가지고, 침수비는  $\frac{y_t - y_2}{y_2} = \frac{y_t}{y_2} - 1$ 이

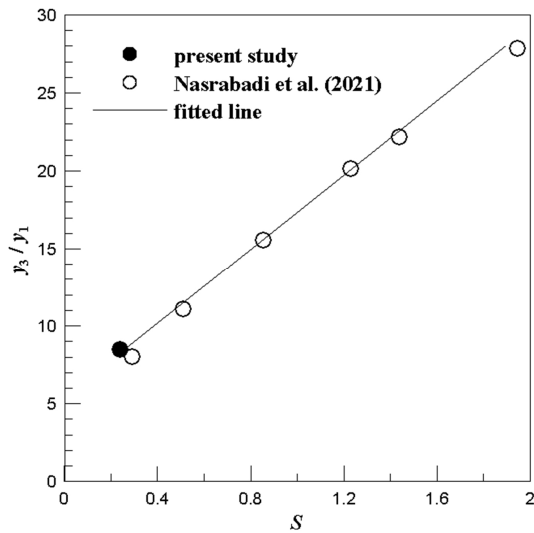


Fig. 9. Relative Submergence Depth Versus Submergence Factor

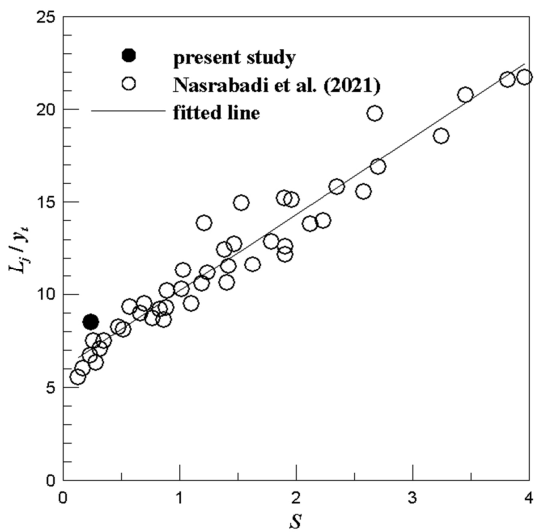


Fig. 10. Relative Roller Length Versus the Submergence Factor

므로 두 값이 선형 관계를 가지는 것은 적절한 것으로 판단된다.  $k-\omega$  SST 모형을 이용한 수치모의 결과 또한 Nasrabadi et al. (2021)의 측정 결과의 범위 안에 잘 맞는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 침수비에 따른 재순환영역 길이 분포를 도시한 것이다. 여기서 재순환영역 길이는 하류 수심으로 무차원화되었다. Nasrabadi et al.(2021)은 측정 결과를 통해서 침수비와 재순환영역 길이에 대한 다음과 같은 선형 관계식을 제시하였다.

$$\frac{L_j}{y_t} = 4.1418S + 6.0521 \quad (10)$$

여기서  $k-\omega$  SST 모형을 이용한 수치모의 결과 또한 Nasrabadi

et al.(2021)이 제시한 범위 안에 들어온 것을 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 URANS 모형 중 하나인  $k-\omega$  SST 모형을 이용하여 수문 아래를 지나 흐르며 발생하는 수중도수를 수치모의하고 평균흐름, 난류량, 그리고 재순환영역 길이나 상대수심에 대하여 분석하였다.

수치모형을 Long et al.(1990)의 실험자료에 적용한 결과 평균흐름과 난류량에 대해 적절하게 모의하는 것을 확인하였다. 도수 영역에서 흐름은 벽 제트 형태 흐름과 재순환영역으로 구분되며 이로 인한 평균 유속 분포 및 두 영역 사이에서 생성되는 전단층에 의한 난류량 분포를 검토하였다. 단,  $k-\omega$  SST 모형은 최대 역방향 흐름의 크기를 실험값의 약 72 % 수준으로 작게 모의하였으며, 자유수면이 감소하는 지점의 위치 역시 실험 결과에 비해 수문쪽에 가깝게 모의하였다. 수중도수의 경우 침수비가 커질수록 자유수면이 수평에 가까운 형태에 수렴하고 상대 재순환영역 길이와 상대수심의 길이는 선형관계로 증가하는 모습을 보였으며, 수치모의의 경우 해당 관계식의 범위 안에 들어가는 것을 확인하였다.

## References

- Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981). "Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries." *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201-225.
- Jasak, H. (2009). "OpenFOAM: Open source CFD in research and industry." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 88-94.
- Javan, M. and Eghbalzadeh, A. (2013). "2D numerical simulation of submerged hydraulic jumps." *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 10-11, pp. 6661-6669.
- Jesudhas, V., Roussinova, V., Balachandar, R. and Barron, R. (2017). "Submerged hydraulic jump study using DES." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 143, No. 3, 04016091.
- Long, D., Steffler, P. M. and Rajaratnam, N. (1990). "LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 437-460.
- Long, D., Steffler, P. M. and Rajaratnam, N. (1991). "A numerical study of submerged hydraulic jumps." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 293-308.
- Ma, F., Hou, Y. and Prinos, P. (2001). "Numerical calculation of submerged hydraulic jumps." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 5, pp. 493-503.
- Menter, F. R. (1992). "Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows." NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA.
- Nasrabadi, M., Mehri, Y., Ghassemi, A. and Omid, M. H. (2021). "Predicting submerged hydraulic jump characteristics using

- machine learning methods.” *Water Supply*, Vol. 21, No. 8, pp. 4180-4194.
- Rajaratnam, N. (1965). “The hydraulic jump as a well jet.” *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 91, No. 5, pp. 107-132.
- Van Leer, B. (1974). “Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second-order scheme.” *Journal of Computational Physics*, Vol. 14, No. 4, pp. 361-370.
- Wu, S. and Rajaratnam, N. (1995). “Free jumps, submerged jumps and wall jets.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 197-212.