



Numerical simulation of submerged jump and washed-out jump using the $k-\omega$ SST model

Choi, Seongwook^a · Choi, Sung-Uk^{b*}

^aPh.D. student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^bProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

Paper number: 21-082

Received: 29 September 2021; Revised: 19 November 2021; Accepted: 19 November 2021

Abstract

This study presents numerical simulations of submerged jump and washed-out jump resulted from the flow over the embankment type weir. Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) equations are solved with the $k-\omega$ SST turbulence model. Validations are carried out using the experimental results in the literature, revealing that computed roller shape, free surface, and mean velocity are in good agreement with measured data. The volume fractions of water of the submerged jump and washed-out jump are compared, and the characteristics of the two flows from the double-averaged volume fractions of water are presented. The condition under which the transition occurs from the submerged jump to washed-out jump is presented by the relation between the relative embankment length and submergence factor via numerical simulations by changing the weir length, discharge, and tailwater depth.

Keywords: Submerged jump, Washed-out jump, Mean flow, Turbulence statistics, Transition

$k-\omega$ SST 모형을 이용한 수중도수와 잠긴흐름의 수치모의

최성욱^a · 최성욱^{b*}

^a연세대학교 건설환경공학과 석박사 통합과정, ^b연세대학교 건설환경공학과 교수

요 지

본 연구에서는 제방 형태의 보를 월류하는 수중도수와 잠긴흐름을 수치모의 하였다. 수치모의를 위하여 URANS 방정식을 해석하였으며, 난류폐합식으로 $k-\omega$ SST 모형을 사용하였다. 기존의 실험결과를 이용하여 수치모형을 검증하였는데, 모의된 롤러의 형상, 자유수면, 그리고 평균유속 분포가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 수중도수와 잠긴흐름에서 물의 체적비 분포를 비교하였으며, 각 흐름에 대한 2중 평균된 체적비의 특성을 제시하였다. 수치모의를 이용하여 보의 길이, 유량, 그리고 하류 수위에 따라 수중도수에서 잠긴흐름으로 천이되는 조건을 검토하였으며, 천이가 발생할 때의 상대 월류수심을 침수비의 함수로 제시하였다.

핵심용어: 수중도수, 잠긴흐름, 평균흐름, 난류 통계량, 천이

1. 서 론

제방형식의 보를 월류하는 흐름은 하류 수위에 따라 다양한 형태를 보인다. 하류 수위가 낮을 때 쓸린도수(swept out jump) 발생하는데, 하류 수위가 증가하면 도수의 시작점(toe of the

jump)이 상류로 이동하면서 완전도수(optimum jump)가 형성된다. 하류 수위가 계속해서 증가하는 경우 수중도수(submerged jump)와 잠긴흐름(washed out jump)으로 천이된다.

수위조절용 또는 조류의 역류방지용 수중보와 같은 시설의 경우, 큰 홍수가 발생하여 하류 수심이 보 월류 후 수심의 공액수심보다 큰 경우 수중도수 또는 잠긴흐름을 발생시킨다. 수중도수는 Fig. 1(a)와 같이 보 마루를 지나 보의 사면을

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2123-2797
E-mail: schoi@yonsei.ac.kr (S.-U. Choi)

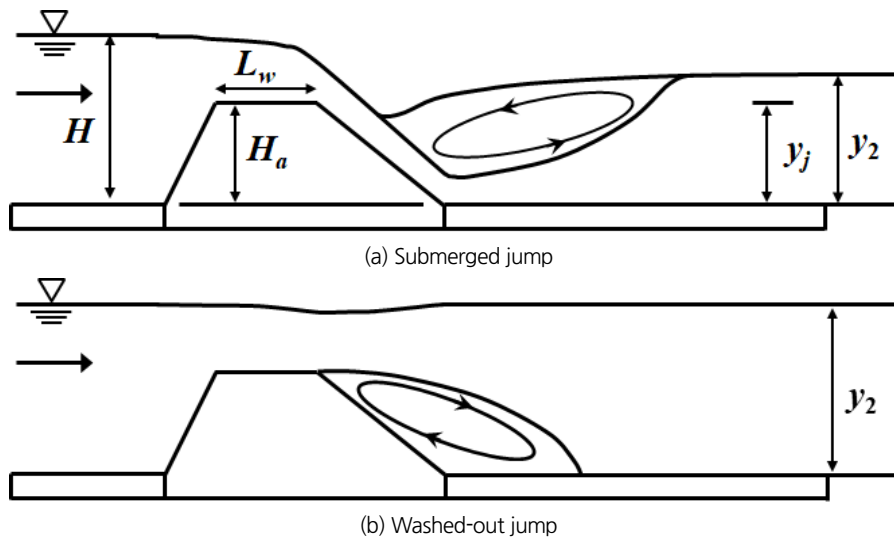


Fig. 1. Transition from submerged jump to washed-out jump

따라 침강(plunging) 후 도수가 발생하는 것으로, 도수 발생 구간에서는 하부에 벽 제트(wall jet) 형태의 흐름이 발생하고 상부에는 재순환영역(recirculation zone)이 형성된다. 잠긴 흐름은 Fig. 1(b)와 같이 보 마루를 지나 자유수면을 따라 하류로 흐르며, 보 마루 하부에는 재순환영역이 생성되어 흐름 구조가 수중도수와는 위아래가 뒤집힌 형태를 보이게 된다.

수중도수의 경우 보의 침강점에서 공기가 연행되어 재순환영역에서 물과 공기가 혼합되고, 자유수면에서는 매우 잔잔한 흐름이 발생한다. 그러나 공기가 혼합된 재순환영역에서는 부력이 작고 역방향 흐름이 발생하기 때문에 이 구간에서 사람이 들어갈 경우 빠져나오지 못하고 인명피해를 초래하게 된다. 이러한 현상을 일으키는 보에 대하여 외국에서는 drowning machine라고 부른다.

우리나라 한강의 신곡수중보에서도 수중도수와 잠긴흐름의 천이가 빈번하게 문제가 되곤 한다. 신곡수중보에서 2013년 이후 총 12건의 선박 안전사고가 발생하였는데 대부분이 흥수기가 아닌 평수기에 발생하였다(Kim, 2020). 2018년 8월 12일에는 현장에 출동한 수난구조대가 신곡수중보 하류에서 수중도수로 인한 보트의 전복 및 인명사고가 발생하였다. Kim (2020)에 따르면, 상하류 경계수위차 1 m에 대하여 수중도수가 발생하여 와류 발생구간의 최대유속이 5.6 m/s 이고, 역방향 유속이 1.5 m/s에 달하였던 것으로 계산되었다. 이는 수중보에서 잠긴흐름 및 수중도수 발생시 선박의 통과와 사고 발생시 구조활동에 각별한 유의 또는 제한이 필요한 것을 의미한다. 따라서 실제 하천 시설물 주위에서 발생하는 수중도수와 잠긴흐름에 대한 수리학적 이해가 매우 중요하다고 할 수 있다.

수중도수와 잠긴흐름에 대해서는 실내실험을 통한 연구가 많이 진행되었다. 제방 형태의 보에서 수중도수를 직접 실험을 수행한 경우는 드물지만, 급경사에서 완경사로 변형되는 하도에서 발생하는 도수에 대한 실내실험은 많이 수행되었다(Hager, 1988; Ohtsu and Yasuda, 1991; Gunal and Narayanan, 1996). Hager (1988)는 수중도수에서 대응수심, 에너지 소산, 재순환영역의 길이 등에 대하여 측정하고 결과를 제시하였다. Azimi *et al.* (2016)은 실내실험을 통해 잠긴흐름에서 유량과 하류 수위에 따라 보 윗류 후 수면의 변화에 대하여 분석하였다. Azimi *et al.* (2016)은 하류 수위가 낮을 경우 유량, 상류 수위, 그리고 보의 높이에 따라 발생하는 파형에 대하여 분석하였고 수중도수로 천이되는 조건에 대해서도 검토하였다. 수중도수와 잠긴흐름의 천이 또한 많은 실내실험을 통한 연구가 수행되었다. Kindsvater (1964)는 제방 형태 광정보에서 발생하는 수중도수와 잠긴흐름에 대해 실험 연구를 수행하였다. 피토 정압관을 이용해 보 마루에서의 유속을 측정하고 보의 조도를 증가시켰을 때 수중도수에서 잠긴흐름으로 천이조건 변화에 대하여 검토하였다. Wu and Rajaratnam (1996, 1998)은 예연위어와 낙차공에서 수중도수와 잠긴흐름의 천이가 발생하는 조건에 대하여 실내실험을 수행하였다. Wu and Rajaratnam (1996, 1998)은 예연위어와 낙차공에서 천이조건에 영향을 주는 변수로 상하류 수심과 보의 높이를 제시하였고, 천이가 발생하는 조건에 대한 관계식을 제안하였다. Fritz and Hager (1998)는 다양한 크기의 제방 형태 보와 수리조건에 대하여 실내실험을 수행하였다. Fritz and Hager (1998)는 하류 수위 조건에 따라 발생하는 자유도수(free hydraulic jump), 수중도수, 그리고 잠긴흐름에 대하여 유속을 측정하고 각각

의 천이조건에 대하여 보 마루의 크기와 보의 상·하류 수위가 미치는 영향을 검토하였다.

수중도수와 잠긴흐름의 천이에 관한 기존 연구는 실내 실험이 일반적이며 평균흐름을 주로 측정하였다. 수치모의를 수행하여 천이가 발생하는 두 흐름의 복잡한 평균흐름 및 난류량에 대한 검토를 수행한 사례는 거의 없다. 따라서 본 연구는 수치모의를 통해 제방 형식의 보를 월류하는 흐름에서 수중도수와 잠긴흐름의 평균흐름 및 난류량을 검토하고 천이하는 조건을 검토하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 보 월류 흐름의 천이현상을 모의할 수 있는 수치모형을 제시하였다. 기존 다른 연구자들의 연구 결과와 비교하여 적용성을 검토하였고, 수치모형을 이용하여 수중도수에서 잠긴흐름으로의 천이를 모의하였다.

2. 수치모형

2.1 지배방정식

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

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

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

여기서 x_i 는 정규직교 좌표축(Cartesian axis)이고 \tilde{u}_i 는 x_i 방향 앙상블(ensemble) 평균 유속, t 는 시간, ρ 는 물과 공기가 혼합된 공간의 밀도, \tilde{p} 는 앙상블 평균 압력, μ 는 물-공기 혼합 점성계수, μ_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(α)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 μ_{water} 와 μ_{air} 는 각각 물과 공기의 점성계수이고 ρ_{water} 와 ρ_{air} 는 각각 물과 공기의 밀도이다.

2.2 난류모형

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

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, \bar{S} F_2)} \quad (6)$$

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

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

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

여기서 ν 는 물-공기 혼합 동점성계수, ν_t 는 난류 동점성계수, P_k 는 k 의 생성항, σ_k , σ_ω , α_1 , β^* , β , 그리고 $\sigma_{\omega 2}$ 는 모형계수, 그리고 F_1 은 혼합함수이다. 모형계수 σ_k , σ_ω , 그리고 β 는 F_1 을 이용하여 아래와 같은 방법으로 얻는다.

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

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 알고리즘에 기초한 pisoFoam을 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

개수로에서 도수를 계산하기 위하여 유입부, 유출부, 바닥, 그리고 상단을 경계조건으로 설정하는 것이 필요하다. 유입부 경계조건으로는 Dirichlet 경계조건을 사용하였으며, 유속의 경우 정해진 유량에 맞춰 log-law를 적용하여 설정하였다. 또한 유입부에서 정수압을 설정하고 k 와 ω 는 임의의 매우 작은 값을 사용하였다. 유출부 경계조건으로는 압력을 0으로 설정하여 자유낙하 조건을 사용하는 대신, 작은 사각형 보를 설치하여 하류단의 수위를 조절하였다. 바닥 경계조건으로는 수리적으로 매끄러운 하상조건을 사용하였고, k 와 ω 에 대해서는 벽법칙을 사용하였다(Menter and Esch, 2001). 공기로 채워진 상단 경계조건으로는 압력을 0으로 설정하였다.

3. 모형의 적용

3.1 계산 조건

본 연구에서는 수치모형을 Fritz and Hager (1998)의 실내 실험 자료에 적용하였다. Fritz and Hager (1998)는 다양한 크기의 보에 대하여 수중도수와 잠긴흐름에 대한 평균흐름을 측정하였는데, 본 연구에서 계산에 활용한 조건은 Table 1과

Table 1. Computational conditions for numerical simulation of Fritz and Hager's (1998) experiment

q (m ² /s)	H (m)	H_a (m)	L_w (m)	ξ	y_2 (m)	y_T
0.055	0.4	0.3	0.3	0.25	0.30	0
					0.36	0.6

같다. Table에서 q 는 단위 폭 당 유량, L_w 는 보 마루의 길이, H_a 는 보의 높이, H 는 상류 수심, y_1 은 수중도수의 침강 발생지점 또는 잠긴흐름의 보 마루 끝에서의 수심, 그리고 y_2 는 하류 수심이다(Fig. 1). 보를 월류하는 흐름의 천이현상을 검토하기 위하여 하류 수심과 보 마루의 길이를 변화시켜 계산을 수행하였다. 이를 위하여 침수비(submergence factor) y_T 와 상대 월류수심(relative embankment length) ξ 을 아래와 같이 정의하여 사용하였다.

$$y_T = \frac{y_2 - H_a}{H - H_a} \tag{10}$$

$$\xi = \frac{H - H_a}{H - H_a + L_w} \tag{11}$$

3.2 모의결과

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 수중도수와 잠긴흐름에 대한 물의 체적비 α 의 양상불평균의 등고선도를 도시한 것이다. 그림에서 $\alpha > 0.5$ 인 범위를 도시하였으며, 보의 직하류 지점을 $x = 0$ 으로 설정하였다. 수중도수와 잠긴흐름은 각각 자유수면과 바닥면 쪽에 재순환영역이 형성되며 이로 인한 자유수면의 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 수중도수의 경우 침강점에서 공기가 연행되어 경사면의 사류 윗면으로 이루어지며 재순환영역을 따라 공기가 물과 혼합되는 모습을 보인다. 이로 인하여 재순환영역에서는 수체의 밀도가 작아 압력분포가 정수압을 따르지 않게 되며 자유수면이 수평에 가깝더라도 역압력 경사(adverse pressure gradient)가 발생하게 된다. 잠긴흐름의 경우 공기가 연행되지 않아 전 구간에 공기와의 혼합은 진행되지 않는다.

Fig. 3은 수중도수와 잠긴흐름에 대하여 2중평균된 물의 체적비 $\langle \bar{\alpha} \rangle$ 의 종방향 분포를 도시한 것이다(여기서 $-$ 와 $\langle \rangle$ 은 각각 시간평균과 수심평균을 의미한다). 수중도수의 경우 물의 체적비는 침강점에서($x = 0.1$ m) 최소값 $\langle \bar{\alpha} \rangle = 0.66$ 을 보이며 물러가 시작되는 지점에서부터 다시 증가하여 1에 근접해 가는 것을 알 수 있다. 반면에 잠긴흐름의 경우 물의 체적비는 보 마루 하류단에서 수위진동으로 인하여 최소값 $\langle \bar{\alpha} \rangle = 0.99$ 를 보이지만 이후 거의 1에 가까운 값으로 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 각각 수중도수와 잠긴흐름에 대한 시간평균된 자유수면고와 재순환영역을 도시한 것이다. 모의 결과와의 비교를 위하여 Fritz and Hager (1998)의 측정 결과 및 같은 계산조건이 사용된 $k-\epsilon$ 모형의 적용 결과를 함께

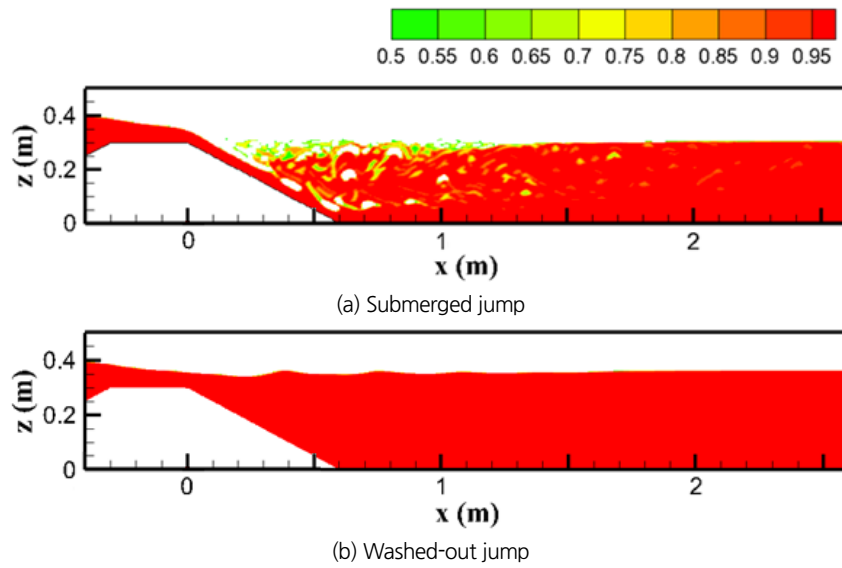


Fig. 2. Instantaneous contours of volume fraction

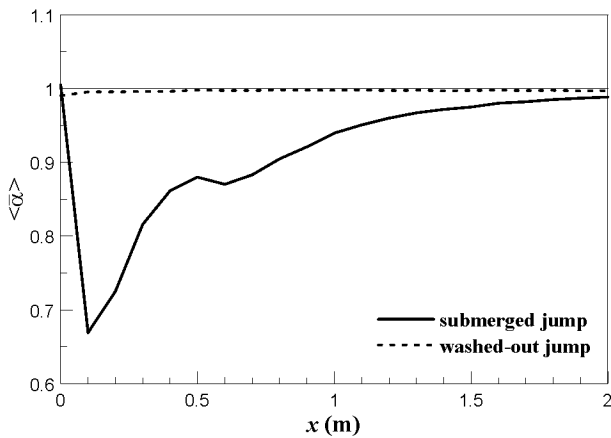


Fig. 3. Double-averaged volume fraction of water

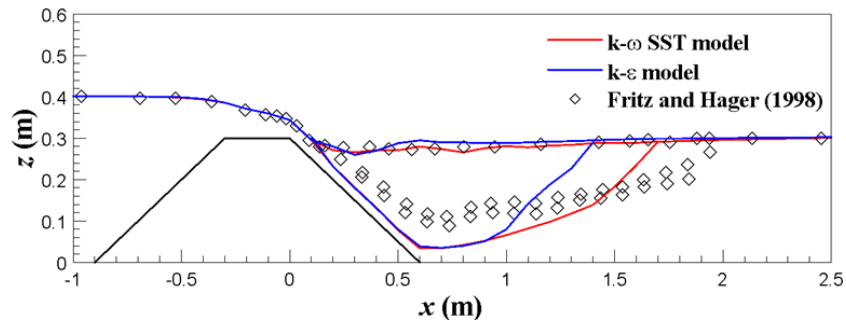
도시하였다. 자유수면고는 $\alpha = 0.5$ 인 선을 따라 결정하였고, 재순환영역의 경계면은 각각 침강점과 보 마루의 끝에서 유선을 따라 도시하였다. Fig. 4(a)를 보면 두 모형 모두 자유수면을 잘 모의한 것을 볼 수 있으나 $k-\epsilon$ 모형이 약간 높게 산정하는 모습을 보인다. 보 마루 위에서 한계수심이 발생하고 침강점에서 수심이 최소가 되며 경사면을 따라 수심이 증가한다. 수중도수의 경우 재순환영역에서 수면이 진동하는 모습을 보이나 매우 작은 수준인 것을 알 수 있다. $k-\omega$ SST 모형의 경우 모의된 재순환영역의 길이는 하류 수심의 약 6배이며, 이는 Fritz and Hager (1998)의 실측결과인 6.5배와 유사한 것으로 $k-\epsilon$ 모형의 결과인 5배에 비해 잘 맞는다고 할 수 있다.

Fig. 4(b)를 보면 두 모형 역시 잠긴흐름 발생 시 자유수면을 잘 모의하는 것을 알 수 있다. 보 마루에서부터 수위가 낮아지

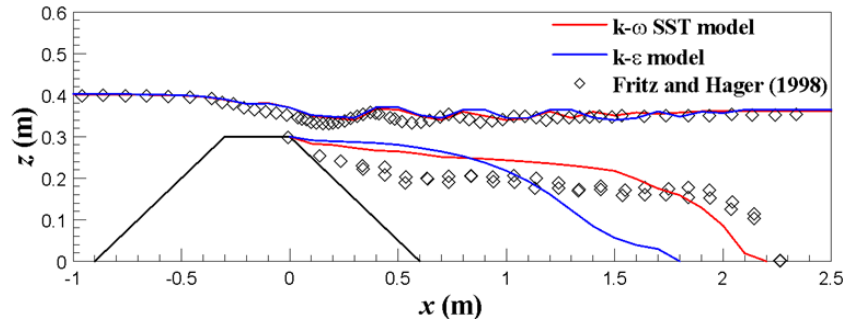
며 보 마루 하류에서 최저수위가 발생한 후 수면이 진동하며 하류로 전파되는 것을 볼 수 있다. 이는 보 마루 하류부터 생성되는 재순환영역과 보 마루를 따라 수평으로 흐르는 주 흐름이 만나면서 생성된 전단층(shear layer)의 영향으로 자유수면에서 수중도수에 비해 더 큰 진동이 발생하게 된다. 잠긴흐름에 대한 재순환영역의 길이는 수중도수와 마찬가지로 $k-\omega$ SST 모형이 Fritz and Hager (1998)의 측정 결과와 비교해볼 때 조금 더 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 이것은 $k-\omega$ SST 모형이 역압력경사를 가지는 흐름에 대하여 보다 높은 민감도를 얻을 수 있도록 개선된 모형이기 때문이다(Paik and Lee, 2015).

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각각 수중도수와 잠긴흐름에 대한 주흐름 방향 시간평균 유속을 종방향 거리에 따라 도시한 것이다. 비교를 위하여 Fritz and Hager (1998)의 측정 결과와 $k-\epsilon$ 모형의 적용 결과를 함께 도시하였다. Fig. 5(a)에 따르면 $k-\omega$ SST 모형과 $k-\epsilon$ 모형 모두 수중도수에서 흐름이 재순환영역(위)과 벽 제트 형태의 흐름(아래)으로 나누어지는 것을 볼 수 있다. 두 모형 모두 벽 제트 형태의 유속분포는 Fritz and Hager (1998)의 측정결과와 잘 일치하나 재순환영역의 역방향 흐름의 유속은 약간 작게 모의하는 것을 볼 수 있다. 두 흐름 모두 전반적인 유속분포는 하류로 진행하면서 개수로 흐름 형태로 천이되나, $k-\epsilon$ 모형에 의한 결과가 $k-\omega$ SST 모형에 비해 조금 더 빠르게 천이되는 것을 보인다. 이는 $k-\epsilon$ 모형이 재순환영역의 길이를 짧게 산정하는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)에 의하면 두 모형 모두 보의 직하류에서 최대 유속과 최대 역방향 유속을 어느 정도 잘 모의하는 것을 볼 수 있다.

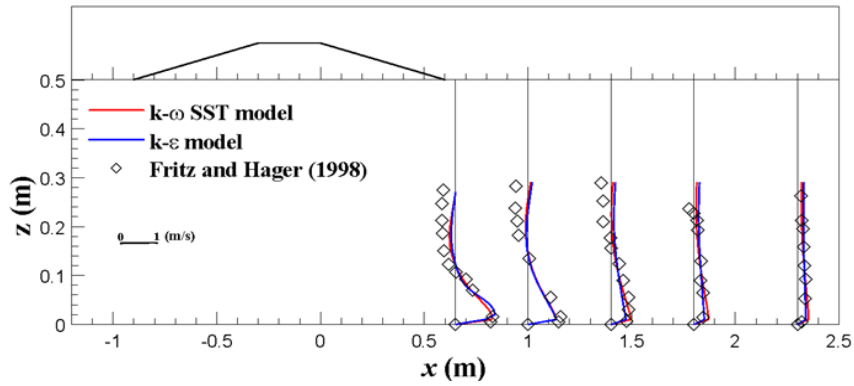


(a) For submerged jump

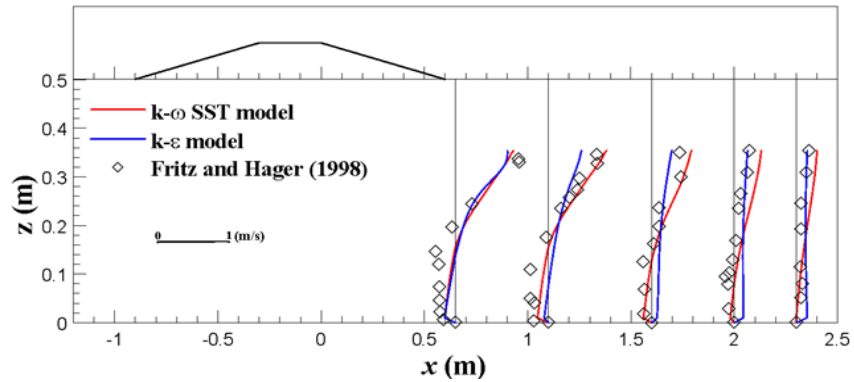


(b) For washed-out jump

Fig. 4. Recirculation zone



(a) For submerged jump



(b) For washed-out jump

Fig. 5. Streamwise mean velocity

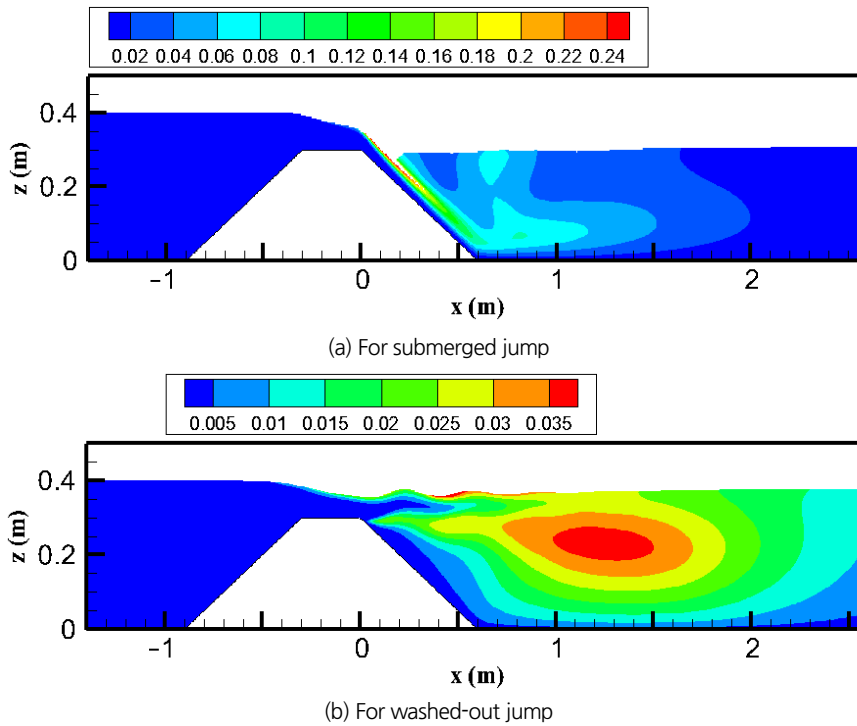


Fig. 6. Turbulence kinetic energy

$k-\epsilon$ 모형의 모의결과에 따르면 흐름이 하류로 진행하면서 빠르게 개수로 흐름 형태로 천이되는데, 이는 Fig. 4(b)에서와 같이 $k-\epsilon$ 모형이 재순환영역의 길이를 과소 산정하기 때문이다. 보 하류의 유속분포는 전반적으로 $k-\omega$ SST 모형에 의한 결과가 $k-\epsilon$ 모형보다 실측결과와 잘 일치한다. 하류에서는 $k-\omega$ SST 모형이 Fritz and Hager (1998)의 측정결과에 비해 최대 유속을 과대 산정하는 것처럼 보이는데, 실측 유속의 오차를 고려하면 두 모형의 정확도를 비교하기는 어려울 것으로 판단된다.

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 각각 수중도수와 잠긴흐름에 대한 난류운동에너지(turbulence kinetic energy)의 등고선도를 도시한 것이다. Fig. 6(a)를 보면 수중도수의 경우 재순환영역이 시작되는 침강점에서 난류운동에너지의 최대값이 발생하며, 난류운동에너지의 최대값이 전단층을 따라 하류로 전파되는 것을 볼 수 있다. 보 월류 흐름이 보의 직하류에 도달하면 난류운동에너지의 최대값이 침강점에서 발생한 값의 절반으로 감소되며, 하류로 더 진행하면서 완전히 소산되는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)를 보면 잠긴흐름의 경우 난류운동에너지의 최대값이 보 마루 하류 자유수면과 보 하류 재순환영역 경계면 근처로 나누어져 발생하는 것을 볼 수 있다. 각각의 최대값은 자유수면의 진동과 보 마루 하류에 형성된 전단층으로 인하여 발생한다. 수중도수와 잠긴흐름에 대하여 난류운동에너지의 크기

를 비교하면 동일 유량조건에서 수중도수의 난류운동에너지 최대값이 잠긴흐름에 비해 약 7배 정도 큰 것을 확인할 수 있다.

3.3 천이조건

Kindsvater (1964)는 실험을 통하여 제방 형식의 보를 월류하는 흐름이 수중도수에서 잠긴흐름으로 천이하는 현상에 대해 연구하였다. Kindsvater (1964)의 연구에 따르면, 보를 월류하는 흐름의 유량이 작아 상대 월류수심이 작을 때, 침수비가 작음에도 천이가 발생한다(Fig. 7(a)). 유량이 증가하고 상대 월류수심이 증가하면, 천이가 발생하는 침수비도 증가한다(Fig. 7(b)). 즉, 수중도수에서 잠긴흐름으로의 천이는 침수비와 상대 월류수심의 관계로 나타낼 수 있으며 서로 비례 관계에 있다(Fritz and Hager, 1998).

본 절에서는 제방 형식의 보를 월류하는 흐름의 천이조건을 검토하기 위한 수치모의를 수행하였다. 천이를 검토하기 위해 사용한 자세한 계산조건은 Table 2에 제시하였다. 천이가 발생하는 상대 월류수심과 침수비의 관계를 검토하기 위하여, 보의 길이와 유량을 변화시켜 상대 월류수심을 결정하고, 수치모의를 통하여 천이가 발생하는 침수비를 검토하였다. 즉, 단위 폭당 유량 $q = 0.055 \text{ m}^2/\text{s}$ 에 대하여 보 마루의 길이를 변화시키거나 고정된 보 마루 길이(L_w)에 대하여 유량을 변화시켜 상대 월류수심(ξ)의 변화를 유도하였다. 초기에는 수위

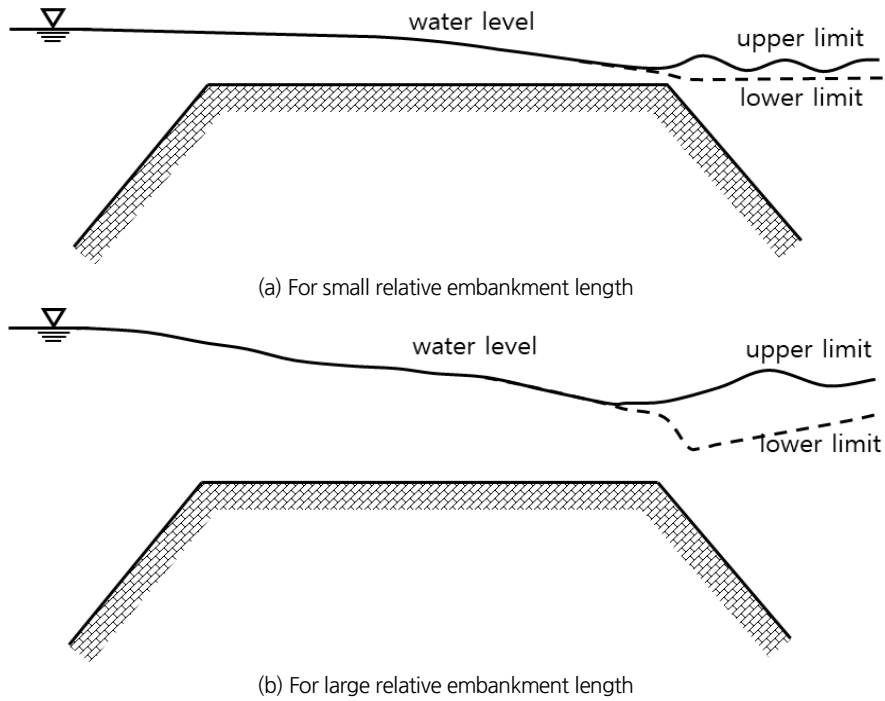


Fig. 7. Transition for small and large relative embankment lengths

Table 2. Computational conditions for numerical simulation of transition

q (m ² /s)	H (m)	H_a (m)	L_w (m)	ξ	y_2 (m)	y_T	
0.055	0.4	0.3	0.3	0.25	0.3 ~ 0.4	0 ~ 1	
			0.1	0.5			
			0.025	0.68			
0.055	0.4		0.3	0.3	0.25		0.3 ~ 0.4
0.282	0.6			0.3	0.5		0.3 ~ 0.6
0.621	0.9			0.3	0.68		0.3 ~ 0.9

를 낮게하여 수중도수가 발생하게 하였고, 이후 수위를 상승시켜 잠긴흐름으로 천이가 진행하는가를 검토하였다.

Fig. 8은 상대 월류수심에 따라 수중도수에서 잠긴흐름으로 천이될 때의 침수비를 구하고 이를 도시한 것이다. 계산 결과의 검증에 위해 Fritz and Hager (1998)의 측정 결과를 함께 도시하였다. 그림에서 $k-\omega$ SST 모형에 의한 모의된 결과는 기호로 나타내었는데, 보 마루 길이와 유량을 변화시킨 경우 각각 검은색과 흰색의 원으로 표시하였다. 모의된 결과에 따르면 천이현상이 발생할 때 상대 월류수심에 따라 침수비도 증가하며 Fritz and Hager의 측정 범위 안에 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 작은 유량에 대해 상대 월류수심이 작을 때 침수비가 작더라도 천이가 발생하지만, 유량이 증가하여 상대 월류수심이 커지면 침수비가 큰 경우에 천이가 발생한다는 것이다. 이는 Kindsvater (1964)의 실험성과를 설명한 Fig. 7의 내용

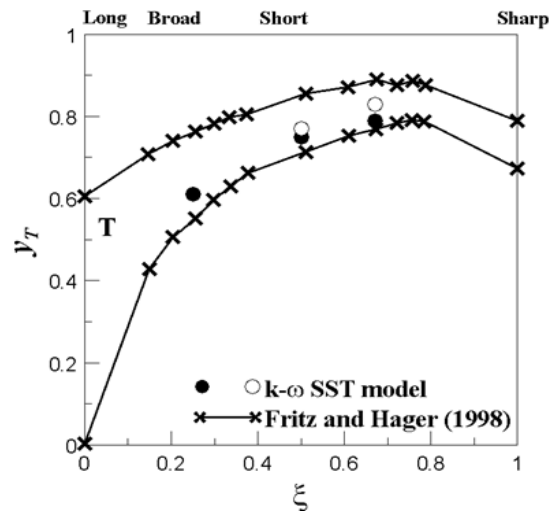


Fig. 8. Submergence factor versus relative embankment length

과 일치한다. Fritz and Hager (1998)에 따르면, 수중도수와 잠긴흐름의 천이는 이력현상(hysteresis pattern)을 보인다고 설명하였다. 수치모의를 통하여 잠긴흐름에서 수중도수로의 천이조건을 구하면, Fritz and Hager (1998)가 제시한 범위에서 침수비가 큰 쪽으로 이동할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 URANS 모형을 해석하여 제방 형식의 보를 월류하는 흐름에서 수중도수와 잠긴흐름을 수치모의 하였고 천이현상의 수리적 특성을 검토하였다. 지배방정식의 난류 폐합식으로 $k-\omega$ SST 모형을 사용하였다.

먼저, 수치모의를 통하여 수중도수 및 잠긴흐름에 대한 물의 체적비, 재순환영역의 형성, 평균유속, 그리고 난류운동에너지 분포를 제시하였다. 수중도수의 경우 공기가 침강점에서 경사면을 따라 연행되어 재순환영역을 형성하며 하류 자유수면을 따라 배출된다. 이로 인하여 수중도수의 물의 체적비는 0.66-1 사이에 분포하게 되며 이는 물의 체적비를 거의 1로 유지하는 잠긴흐름과 구별되는 특성을 보였다. 그리고 $k-\omega$ SST 모형이 $k-\epsilon$ 모형에 비해 자유수면의 진동과 재순환영역의 크기를 잘 모의하는 것을 확인하였다. 모의된 평균유속 분포에 따르면, 보의 하류에서 유속분포는 벽 제트와 재순환영역으로 구성되며 하류로 진행하면서 개수로 흐름 형태로 복원되었다. 난류운동에너지의 경우, 수중도수와 잠긴흐름 모두 벽 제트와 재순환영역의 경계면에서 형성된 전단층에서 최대값을 보였다. 잠긴흐름에서는 전단층에 의해 수면의 진동이 발생하며 자유수면에서도 난류운동에너지가 최대값을 보이는 것으로 나타났다. 수중도수에서 난류운동에너지의 최대값은 잠긴흐름에 비해 약 7배 큰 것으로 확인되었다.

그리고 수치모의를 통하여 수중도수에서 잠긴흐름으로 천이가 발생하는 수리학적 조건을 검토하였다. 천이현상은 상대 월류수심이 증가함에 따라 침수비가 증가하는 조건에서 발생하였으며 이는 기존 연구자들이 제시한 범위 안에 들어오는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF2020R1A2B5B01098937)을 받아 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

References

- Azimi, A.H., Rajaratnam, N., and Zhu, D.Z. (2016). "Water surface characteristics of submerged rectangular sharp-crested weirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142, No. 5, 06016001.
- Fritz, H.M., and Hager, W.H. (1998). "Hydraulics of embankment weirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 9, pp. 963-971.
- Gunal, M., and Narayanan, R. (1996). "Hydraulic jump in sloping channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 8, pp. 436-442.
- Hager, W.H. (1988). "B-jump in sloping channel." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 539-558.
- 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.
- Kim, S. (2020). *Operation and management methods for improving the flow safety of Singok-submerged weir*. Seoul Institute of Technology.
- Kindsvater, C.E. (1964). *Discharge characteristics of embankment-shaped weirs*. Geological Survey Water-Supply Paper, No. 1617, US Government Printing Office, Washington, D.C., U.S.
- Menter, F.R. (1992). *Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows*. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, U.S.
- Menter, F.R., and Esch, T. (2001). "Elements of industrial heat transfer predictions." *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Uberlândia, Brazil, Vol. 109, p. 650.
- Ohtsu, I., and Yasuda, Y. (1991). "Hydraulic jump in sloping channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 7, pp. 905-921.
- Paik, J., and Lee, N.J. (2015). "Numerical modeling of free surface flow over a broad-crested rectangular weir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 4, pp. 281-290.
- 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. (1996). "Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weir." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 7, pp. 412-414.
- Wu, S., and Rajaratnam, N. (1998). "Impinging jet and surface flow regimes at drop." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 69-74.