



A RANS modeling of backward-facing step turbulent flow in an open channel

Kim, Byungjoo^a · Paik, Joongcheol^{b*}

^aPh.D. Student, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

^bProfessor, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

Paper number: 21-110

Received: 3 November 2021; Revised: 20 December 2021; Accepted: 29 December 2021

Abstract

The backward-facing step (BFS) is a benchmark geometry for analyzing flow separation occurred at the edge and resulting development of shear layer and recirculation zone that are occupied by turbulent flow. It is important to accurately reproduce and analyze the mean flow and turbulence statistics of such flows to design physically stable and performance assurance structure. We carried out 3D RANS computations with widely used, two representative turbulence models, $k-\omega$ SST and RNG $k-\epsilon$, to reproduce BFS flow at the Reynolds number of 23,000 and the Froude number of 0.22. The performance of RANS computations is evaluated by comparing numerical results with an experimental measurement. Both RANS computations with two turbulence models appear to reasonably well reproduce mean flow in the shear layer and recirculation zone, while RNG $k-\epsilon$ computation results in about 5% larger velocity between the outer edge of boundary layer and the free surface above the recirculation zone than $k-\omega$ SST computation and experiment. Both turbulence models underestimate the shear stress distribution experimentally observed just downstream of the sharp edge of BFS, while shear stresses computed in the boundary layer downstream of reattachment point are agree reasonably well with experimental measurement. RNG $k-\epsilon$ modeling reproduces better shear stress distribution along the bottom boundary layer, but overestimates shear stress in the approaching boundary layer and above the bottom boundary layer downstream of the BFS.

Keywords: Backward-facing step, Turbulent flow, RANS modeling, Recirculating flow, Shear stress

개수로에서의 후향단차 난류 흐름 RANS 수치모의

김병주^a · 백중철^{b*}

^a강릉원주대학교 토목공학과 박사과정, ^b강릉원주대학교 토목공학과 교수

요 지

후향단차 수공구조물의 모서리에서는 흐름분리가 발생하며 이로 인해 형성되는 전단층과 재순환 흐름 영역에서의 흐름은 복잡한 난류가 지배적이다. 물리적으로 안정하면서 성능이 보장되는 구조물 설계를 위해서는 이러한 난류 흐름의 거동을 정확하게 예측하고 분석하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 공학적으로 널리 이용되고 있는 대표적인 난류 모형인 $k-\omega$ SST 모형과 RNG $k-\epsilon$ 모형을 이용한 3차원 RANS 계산을 통해서 개수로에 설치된 후향단차를 통과하는 난류 흐름을 레이놀즈 수 23,400과 후르드 수 0.22의 조건에서 수치모의하고, 해석 결과를 기존 실험자료와 비교 분석하여 수치해석의 성능을 평가하고자 한다. 두 가지 난류 모형을 이용하여 구한 평균유속 분포를 보면 모두 경계층에서 관측된 실험값을 양호하게 잘 재현하는 것으로 나타났다. 재순환 영역 상부에서 계산된 평균유속을 보면 RNG $k-\epsilon$ 모형이 $k-\omega$ SST 모형보다 중앙부에서의 유속을 약 5% 정도 크게 계산하는 것으로 나타났다. 난류 통계량 관점에서 보면 두 난류 모형 모두 단차 모서리 직하류에서 흐름 분리로 인해 발생하는 레이놀즈 전단응력을 현저히 과소산정하는 한편, 재부착점 하류에서는 실험값을 상대적으로 양호하게 재현하는 것으로 나타났다. RNG $k-\epsilon$ 모형은 수로 바닥 부근 경계층에서의 전단응력 분포를 $k-\omega$ SST 모형보다는 우수한 정확도로 실험값을 계산하는 반면에 접근수로 경계층에서 그리고 단차 하류부에서는 경계층 상부에서 전단응력을 과대 산정하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 후향단차, 난류 흐름, RANS 수치모의, 재순환 흐름, 전단응력

*Corresponding Author. Tel: +82-33-640-3030

E-mail: paik@gwnu.ac.kr (J. Paik)

1. 서론

후향단차(backward facing step) 흐름은 흐름분리(separation flow)가 지배적이며, 이로 인한 자유 전단층(free shear layer)의 발달과 단차 모서리에서 분리된 흐름이 하상에 재부착(reattachment)하는 현상으로 인한 재순환 흐름(recirculating flow) 영역의 형성과 같은 특징을 가진다(Fujita, 2002). 하천에서는 수문이나 보 하류 하상보호공 또는 낙차공과 같은 수공구조물 직하류에서 깊은 수심이 발생하는 홍수 때에 볼 수 있다. 후향단차 흐름은 단차 하류에서 유동장이 빠르게 변화하며 흐름분리와 바닥 부근에 역행(reverse) 흐름이 발생하기 때문에 하상 세굴과 이에 따른 구조물 안정과 수공구조물 기능 상실 등 부정적 영향을 미친다(Lee and Hwang, 1994; Liriano *et al.*, 2002). 개수로 흐름에서 볼 수 있는 가장 큰 특징 중 하나는, 분리된 흐름과 자유 전단층에서 낮은 발생 주기를 갖는 Kelvin-Helmholtz 형식의 와(eddy)가 형성되어 재부착 지점으로 대류(convection)하게 되며 이들은 재부착 지점에서 큰 규모의 말발굽 와(horseshoe vortex)를 생성한다. 이 말발굽 와는 점차 붕괴(breakdown)되어 떠오르면서 자유수면에 도달하게 되면 실제 하천이나 하구에서 관찰되는 비등 와(boil vortex)로 발전한다(Nezu and Nakagawa, 1989). 이처럼 단차가 존재하는 하천에서의 재순환 흐름 영역의 동적 거동은 수공구조물의 안정성과 기능을 약화할 뿐만 아니라 비등 와는 큰 수면변동을 유발할 수 있으므로 수공구조물 설계를 위해서는 이러한 흐름을 정확하게 예측하는 것이 중요하다.

초기에 후향단차 흐름 거동에 대한 구조적 특성을 이해하기 위해 닫힌 경계 내에서 공기를 사용하는 풍동 실험 연구가 많이 이뤄져 왔다(Bradshaw and Wong, 1972; Armaly *et al.*, 1983). 이러한 연구들은 주로 기계공학 또는 항공과 관련된 연구들이 많았으며(Chen *et al.* 2018), 이에 비해 물을 이용한 개수로에서의 후향단차 흐름에 관한 연구는 상대적으로 많이 이뤄지지 않았었다. 측정 장비와 측정 기술의 발달과 함께 하천에서 큰 규모의 와에 대한 연구 필요성이 대두되면서 일부 개수로 흐름 연구가 활성화되었다(Nezu *et al.*, 1985; Müller and Gyr, 1986). 특히 분리된 흐름이나 역행 흐름의 유속을 측정하는데 적합한 LDA (Laser Doppler Anemometer)의 도입과 입자 추적 방법인 PIV (Particle Image Velocimetry) 기법의 발전으로 후향단차 흐름 유동장과 난류 특성에 대하여 더 정확한 측정을 통한 실험 연구가 이뤄지고 있다(Nakagawa and Nezu, 1987; Xingkui and Fontijn, 1993; Tachie *et al.*, 2001; Agelinchaab and Tachie, 2008; Nguyen and Souad, 2015). 이러한 연구들로 인하여 여러 가지 조건에 대한 후향단

차 흐름의 거동에 대한 실험 결과들이 나와 있으며 특히 난류 구조를 파악하기 위해 측정된 내부 유동장 및 전단층에 대하여 실험 결과들은 높은 정확도를 확보되고 있다. 하지만 이러한 실험 연구들은 대부분 단순화된 지형 조건을 고려하기 때문에 형상이 복잡한 자연하천에서의 흐름을 재현하기에는 한계가 있으며, 수리모형 실험이기 때문에 축척효과(scale effect)에 자유롭기 어렵다.

고성능 컴퓨터의 발달과 함께 난류 모델링 기법들의 발전에 따라 첨단 난류 해석 기법을 이용한 수치해석 연구들이 활발히 이뤄지고 있다. Le *et al.* (1997)은 레이놀즈 수 $Re = 5,100$ 의 조건에서 후향단차 흐름을 DNS (Direct Numerical Simulation)를 통하여 전단층에서 발생하는 와의 주기적 특성과 함께 전반적인 난류 구조의 특성을 제시하였다. Barri *et al.* (2010)은 $Re = 5,600$ 조건에서, Pont-Vilchez *et al.* (2019)은 마찰 레이놀즈 수 $Re_\tau = 395$ 조건 그리고 Oder *et al.* (2019)는 $Re = 7,100$ 조건에서 DNS를 활용하여 수치모의 연구를 수행하였다. 하지만 DNS 기법은 물론이고 DNS보다 상대적으로 현저히 계산량이 적은 LES 기법도 계산영역 내의 높은 격자 해상도가 요구되어 계산 비용이 매우 크기 때문에 하천에서의 흐름과 같이 Reynolds 수가 큰 ($> 1.0 \times 10^4$) 개수로 흐름에 대해서 적용하기에는 한계가 있다. Akselvoll and Moin (1993)는 레이놀즈 수 $Re = 5,100$ 의 조건에서 닫힌 경계 내의 후향단차 흐름을 Smagorinsky 하부-격자 규모(sub-grid scale) 모형을 이용한 LES (Large Eddy Simulation)를 통해 수치모의 연구를 하였다. Yu *et al.* (2004)는 레이놀즈 수 18,400 조건에서 LES를 수행하여 유동장 내에 흐름 및 입자의 거동 특성을 분석하였다. 한편, 합리적인 계산 비용을 요구하는 URANS (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) 계산기법이나 RANS 기법과 LES 기법을 병합하여 사용하는 하이브리드 RANS/LES 기법인 DES (Detached Eddy Simulation) 기법을 사용한 연구들이 많이 이뤄졌다(Sainte-Rose *et al.*, 2009; Probst *et al.*, 2010; Shobayo and Walters, 2018; Smirnov *et al.*, 2018; Bosnyakov *et al.*, 2020). 하지만, 아직 이러한 연구들은 모두 닫힌 경계에서 공기에 의한 흐름에 대하여 수치모의한 연구가 대부분이며, 개수로 흐름에 대해서 적용한 경우는 찾아보기 어렵다.

이 연구에서는 개수로에서의 후향단차 흐름을 분석하기 위해서 공학적으로 널리 이용되고 있는 대표적인 난류모형인 $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) 모형과 RNG $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 RANS 수치모의를 수행하고 수치해석 결과를 Nakagawa and Nezu (1987)가 계측한 유속분포와 난류량에 대한 실험 결과와 비교 분석하여, 개수로 후향단차 흐름 해

석을 위한 RANS 수치해석의 적용성을 평가하고자 한다. 아울러 RANS 수치모의 결과를 초기 및 경계조건으로 설정하여 하이브리드 RANS/LES를 적용할 때 발생할 수 있는 문제점 및 추후 연구방안을 제시하고자 한다.

2. 지배방정식

2.1 흐름 방정식

3차원 난류 흐름을 해석하기 위해서 이 연구에서는 공학 분야에서 널리 사용되는 방법인 통계적 난류모형을 결합한 RANS 기법을 사용한다. RANS 기법은 흐름을 해석하기 위해 비압축 Navier-Stokes 방정식을 레이놀즈 분해(Reynolds decomposition)하여 유체 흐름 인자들의 시간에 대한 평균값을 계산하게 된다. 수치모의에 사용된 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho u_i u_j}) \\ &= -\frac{\partial}{\partial x_i}(p_{rgh}) + \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \mu_t)(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i})] + \rho g + F_b \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, u 는 유체의 유속, ρ 는 유체의 밀도이다. μ 와 μ_t 는 유체의 점성계수(coefficient of dynamic viscosity)와 난류점성계수(coefficient of turbulent viscosity)이다. 그리고 F_b 는 표면장력을 고려하기 위한 외력 항이다. p_{rgh} 는 수정압력(modified pressure)으로 $p - \rho g_j x_j$ 로 정의되며 g_j 는 중력가속도 벡터, x_j 는 위치벡터이다

수치모의에서 적용한 개수로 흐름의 물-공기 유체의 경계면을 포착하기 위해 2상(two-phase) VoF (Volume of Fluid) 기법을 사용하였다. 이 기법은 이송방정식에 인공표면 압축항이 포함되어 있어 이를 해석하여 구한 체적분할(volume fraction) α 의 값에 의해 결정된다. 체적분할은 유체의 성질을 결정하기 위해서 사용되며 α 에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha u) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha(1-\alpha)u_r) = 0 \quad (3)$$

여기서, u_r 은 유속장에서의 최대값을 반영하는 인공 압축 유

속(artificial compression velocity)으로 $\alpha(1-\alpha)$ 에 의해서 자유수면에만 영향을 준다.

2.2 난류 모형

RANS 수치모의를 위해 적용한 첫 번째 난류 모형은 현재 공학적으로 가장 널리 사용되고 있는 $k-\omega$ SST 모형이다. 이 난류 모형은 Wilcox (1988)의 $k-\omega$ 와 표준 $k-\epsilon$ 모형을 결합한 하이브리드 모형이며, 난류 운동에너지(k)와 비소산율(ω)을 종속변수로 사용하며 이 두 개의 변수 k 와 ω 에 대한 수송방정식 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i}] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} &= \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i}] \\ &+ 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, \tilde{P}_k 는 난류에너지 생성 제한자(production limiter)로 정체 영역(stagnation region)에서 난류에너지가 계속해서 생성되어 축적되는 것을 제한하기 위해 사용하는 항으로 정의는 다음과 같다.

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega), \quad P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \quad (6)$$

혼합 함수인 F_1 은 벽 근처에서는 Wilcox (1988)의 $k-\omega$ 모형을 그리고 벽에서 떨어진 자유 흐름 영역에서는 $k-\epsilon$ 모형을 사용하도록 제어하는 함수이다. 다음과 같다.

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_\omega k}{CD_{kw} y^2} \right] \right\} \quad (7)$$

여기서, y 는 가장 가까운 벽과의 거리이며 함수를 통하여 벽에 대한 거리에 따라 활성화할 모형을 결정하게 된다. 기타 매개 변수들의 값은 Menter (1994)를 참고하기 바란다. Wilcox (1988)의 $k-\omega$ 모형은 LRN (Low Reynolds Number) 난류 모형이지만 $k-\omega$ SST 모형은 벽 근처에서 해상도가 낮은 격자를 이용하면 벽 함수와 함께 사용할 수 있다.

이 연구에서 두 번째로 적용한 난류 모형은 작은 규모 운동의

영향(effect of smaller scales of motion)을 고려하고자 Navier-Stokes 방정식을 재정상화(renormalise)하기 위해서 Yakhot *et al.* (1992)가 재-정상화그룹(Re-Normalisation Group, RNG) 기법을 이용하여 개발한 RNG $k-\epsilon$ 이다. 이 모형에서 k 와 ϵ 에 대한 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = P_k - \rho\epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = & C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

이 모형에 이용된 각 매개변수의 정의와 값들은 Yakhot *et al.* (1992)에서 볼 수 있다. 표준 $k-\epsilon$ 모형에서 과점성(eddy viscosity)은 단일 난류 길이 규모에 의해서 결정되어 난류확산(turbulent diffusion)이 특정 규모에서만 발생하게 되지만, 실제로는 모든 길이 규모의 운동이 난류확산에 기여한다. RNG 방법은 ϵ 방정식에서 생성 항의 변화를 통해서 다른 규모의 운동의 영향을 고려한다.

3. 수치모의 방법

이 연구에서 적용한 대상 흐름은 Nakagawa and Nezu (1987)가 하류부에 단차가 있는 개수로에서 실험한 흐름이다. 실험 수로의 제원은 총 길이 8 m, 폭 0.3 m, 높이 0.2 m 수평

수로이며 상류단으로부터 6.8 m 하류 지점에 $H_s = 2$ cm의 단차가 존재한다. 실험에서 유속은 벽 근처에서의 분리 흐름과 역행 흐름 측정에 장점을 보이는 LDA (Laser Doppler Anemometers)로 측정되었다. LDA를 이용한 실험에서 흐름 방향과 연직방향 유속성분(u, v)은 수로 중앙을 따라 16개의 지점과 각 지점에 대하여 연직방향으로 20~27개의 지점을 200 Hz의 주기로 10,000개 값을 측정하여 산정되었다. 적용한 대상의 흐름의 레이놀즈 수는 23,400이며 후르드 수는 0.22로서 하류 수위 10.6 cm 조건에 대한 실험을 대상으로 수치모의를 수행하였다.

대상 흐름을 3차원 수치모의를 통하여 재현하기 위해 적용한 계산영역은 Fig. 1과 같다. 실험 수로 입구에서 후향단차 지점까지 발달한 경계층을 가정 없이 고려하고 단순화된 하류단 경계 조건의 영향을 배제하기 위해서, Fig. 1과 같이, 수치해석 계산 영역의 형상은 실험 수로의 기하학적 형상과 같이 설정하였다.

단차 상단 모서리에서 발생하는 흐름분리와 이로 인한 전단층과 재순환 흐름 영역에서의 흐름 발달을 모의하기 위해서는 이 부분에 세밀한 격자를 적용할 필요가 있다. 이 연구에서는 계산격자의 해상도에 대한 수치해석 결과의 민감도를 평가하기 위해서 Fig. 2에서 보인 직교 형상의 늘림격자(stretched mesh, 이하 ‘meshS’라고 칭함)와 전단층의 형상에 따라 격자 간격을 변형시킨 기형격자(deformed mesh, 이하 ‘meshD’라고 칭함) 2가지를 적용하였다. Fig. 2에 보인 바와 같이, 늘림격자 meshS에서는 속도 경사가 큰 바닥면과 수면 부분 그리고 전단층 부분에 조밀한 격자를 적용하였으며, 기형격자 meshD에서는 흐름분리로 인해 전단층의 폭이 증가하는 부분과 재순환 영역에서 속도 경사가 큰 부분에 조밀한 격자가 적용되도록 격자 해상도를 구성하였다. 두 계산 격자의 총 계산셀 수는

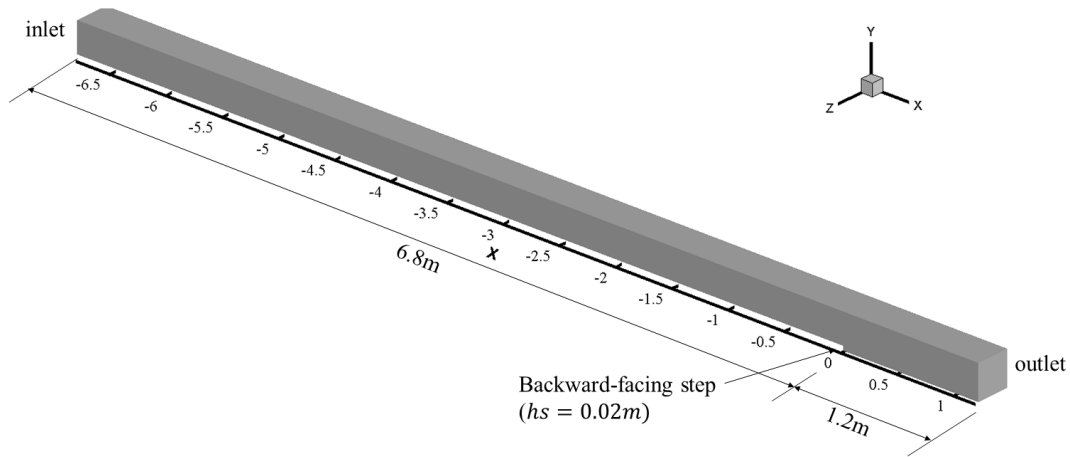


Fig. 1. Computational domain considering full experimental channel configurations

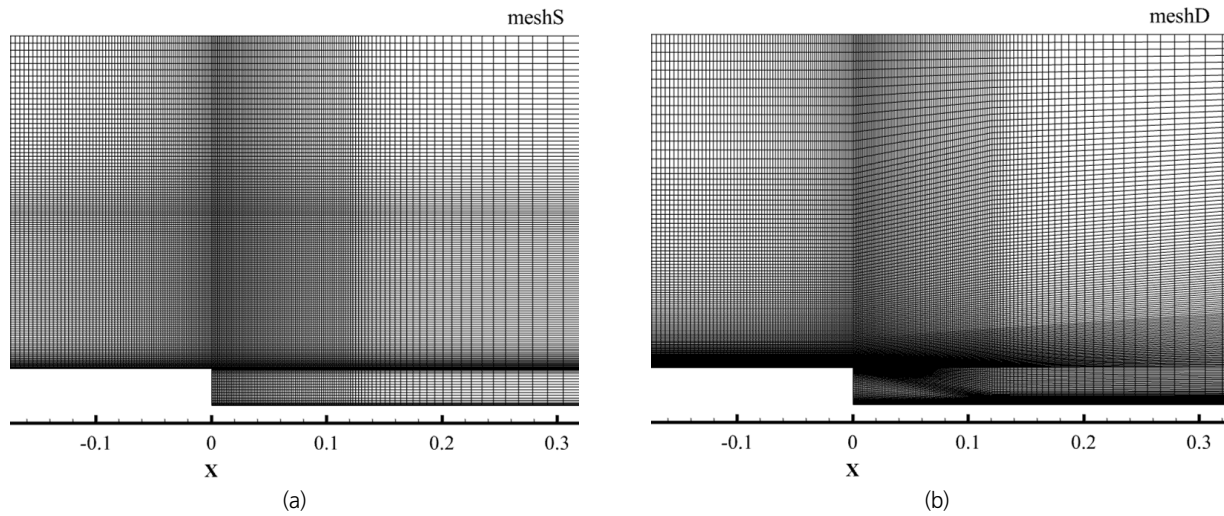


Fig. 2. Magnified view of (a) stretched and (b) deformed computational meshes near the backward-facing step

Table 1. Application cases with different turbulence models and mesh structures

Simulation case	Turbulence model	Computational mesh	
		Mesh type	No. of cells $N_x \times N_y \times N_z$
$k-\omega$ SST on meshS	$k-\omega$ SST	Stretched mesh	480 × 125 × 104 + 136 × 145 × 104
$k-\omega$ SST on meshD	$k-\omega$ SST	Deformed mesh	
RNG $k-\epsilon$ on meshS	RNG $k-\epsilon$	Stretched mesh	
RNG $k-\epsilon$ on meshD	RNG $k-\epsilon$	Deformed mesh	

동일하게 8.3×10^6 개 이다. 이 연구에서 이용한 2가지 난류 모형과 2가지 계산격자를 조합한 4가지 수치해석의 경우에 대해서 요약정리하면 Table 1과 같다.

수치모의는 오픈소스 CFD 소프트웨어인 OpenFOAM 툴박스(OpenFOAM, 2021)에서 ‘interFoam’을 이용하였다. 지배방정식에서 모든 시간항에 대해서는 각 계산격자의 체적에 따라서 별도의 계산시간 간격을 설정하는 LTS (Local Time Stepping) 기법을 적용하였다. 운동량방정식과 수송방정식에서의 모든 이송항에 대해서는 2차 정확도 상향차분(second-order upwind differencing) 기법 그리고 기타 항에 대해서는 중앙차분(central differencing) 기법을 적용하였다. VoF 지배방정식의 이송항은 van Leer 제한자(limiter)를 이용하여 이산화하였다.

4. 결과 및 분석

수치모의 결과의 정확도를 평가하기 위해서 단차 상류 접근수로에서 발달한 경계층에서의 유속분포를 보여줄 수 있는

단차 상류 1개 지점과 단차 시작점 그리고 단차 하류부에서 흐름 방향 등간격으로 10지점을 포함하는 총 12개 지점의 수로 중앙에서 계산된 유속의 연직분포를 실험값과 Fig. 3에서 비교하였다. 그림에서 연직방향과 흐름 방향 거리 모두 단차의 높이 $H_s = 2$ cm로 무차원화하였고 유속값은 단차 상류부 접근 유속 U_a 의 분포에서 최대 유속값 $(U_a)_{max} = 0.292$ m/s로 무차원화하였다. Fig. 3에서 단차 모서리에서 시작해서 수로 바닥과 연결된 실선은 수로 바닥으로부터 연직방향으로 흐름 방향 유속을 적분한 값이 0이 되는 지점을 연결한 것으로서, 일반적으로 재순환 흐름 영역의 바깥 경계선에 해당하여 재순환 흐름 영역의 형태를 보여준다.

Fig. 3은 두 가지 난류 모형과 두 가지 구조의 계산격자를 조합하여 수행한 수치모의 결과가 서로 일부 차이는 있지만, 실험에서 구한 평균유속을 전반적으로 양호하게 예측하는 것으로 나타났다. 단차 하류부 재순환 흐름과 재부착 거리를 정확하게 모의하기 위해서는 접근 유속의 분포를 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 앞서 언급했듯이, 이 연구에서는 실험 수로의 재원 및 형상을 정확하게 계산격자로 구성하였다. 결과적으로 Fig. 3의 단차 상류부에서 보인 바와 같이, Nakagawa and

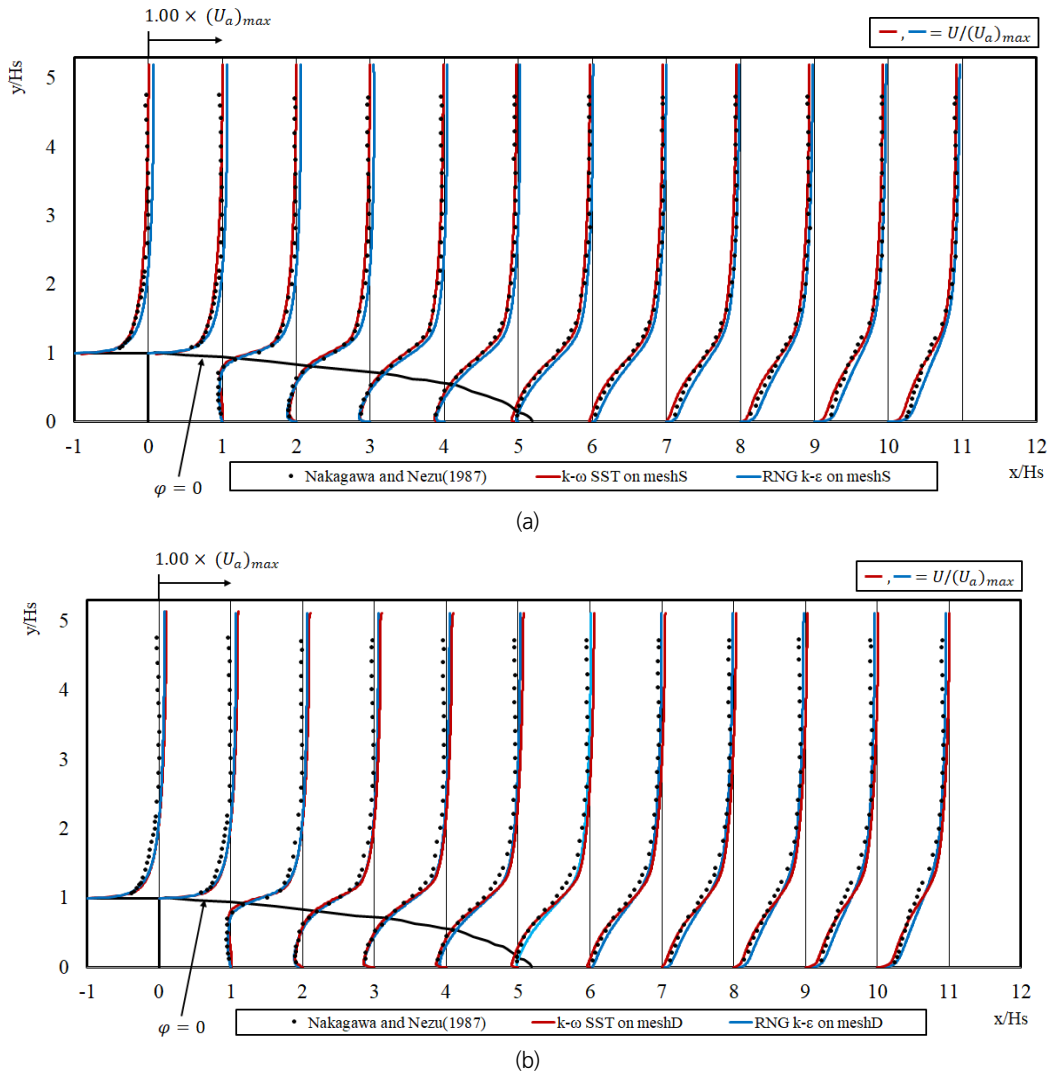


Fig. 3. Comparison of mean velocity profiles computed on (a) meshS and (b) meshD with experimental measurement of Nakagawa and Nezu (1987)

Nezu (1987)가 실험 수로에서 생성한 단차 상류에서의 접근 유속과 경계층의 발달을 양호하게 수치적으로 재현하였음을 알 수 있다.

실험에서 재부착 거리 x_r 은 $5.2H_s$ 로 관측되었으며, $k-\omega$ SST 계산값은 두 계산격자에서 미소하지만 다소 작게 그리고 RNG $k-\epsilon$ 모형은 미소하지만 크게 산정하고 있지만, 전반적으로 두 난류 모형 모두 실험값에서 관측된 재부착 거리를 양호하게 예측하고 있다. 흥미로운 것은 재순환 흐름 영역($x/H_s = 1-4$) 내에서 계산된 모든 유속분포는 실험값과 매우 잘 일치함을 보여준다. 이것은 재순환 영역에서의 유속분포는 적용한 난류 모형의 종류 및 계산격자의 구조에 민감하지 않음을 의미한다. 하지만, 재순환 영역 상부에서의 유속분포와 재부

착 지점(reattachment) 하류의 바닥 경계층 영역에서 계산된 유속분포는 현저하지는 않지만, 실험과 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 유사한 유속분포의 차이를 접근수에서의 유속분포에서도 볼 수 있다.

직교 늘림격자 meshS을 이용하여 계산한 결과는 보면 $k-\omega$ SST 모형은 접근수로를 포함한 모든 영역에서 유속분포를 실험값과 가장 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. RNG $k-\epsilon$ 모형은 접근수로의 바닥 경계층 상부부터 수면 사이의 유속을 약 5% 정도 과대 산정하는 것으로 나타났다. 흥미로운 것은 이처럼 수면 부근에서 과대 산정된 유속분포가 하류로 이동할 수록 실험값과 유사해지는 반면에 재순환 흐름 영역 상부와 수로 바닥 경계층에서 실험값과의 유속차이는 하류부까지 계

속 유지되는 것으로 나타났다.

격자구조를 왜곡시킨 meshD를 이용한 계산 결과를 보면 두 난류 모형 모두 경계층 상부와 수면 사이에서의 유속분포를 meshS를 이용한 RNG $k-\epsilon$ 모형과 유사하게 다소 과대 산정하는 것으로 나타났다. 반면, 두 수치모의를 통해 구한 바닥 경계층에서의 유속분포는 계산격자의 구조에 덜 민감한 것으로 나타났다.

후향단차 모서리에서 흐름이 분리되면서 전단층(shear layer)이 형성되어 강한 난류에너지가 생성된다. 후향단차로 형성되는 전단층에서의 난류 특성을 분석하기 위해 유속 측정 지점과 같은 지점에서의 구한 레이놀즈 전단응력(shear stress) 분포를 Fig. 4과 같이 실험값과 비교하였다. 그림에서 레이놀

즈 응력은 실험에서와 동일하게 $(U_a)_{max}^2$ 으로 무차원화 한 후 가시성을 위해 100배로 척도 변환을 해주었다. 그림을 보면 강한 전단응력이 생성되는 후향단차 직하류에서 계산된 레이놀즈 응력 실험값보다 작게 계산된 것을 볼 수 있다. 하지만 레이놀즈 응력의 분포 양상이나 정점(peak)의 위치는 양호하게 재현하는 것으로 나타났다.

바닥 경계층에서 계산된 전단응력 분포를 보면 RNG $k-\epsilon$ 의 계산은 재순환 영역 후반부부터 하류로 갈수록 실험값과 매우 유사한 것으로 나타났다. 하지만 RNG $k-\epsilon$ 모형은 접근수로 경계층에서부터 전단응력을 과대산정하고 있으며, 하류로 갈수록 경계층 윗부분부터 수면 사이의 구간에서 전단응력을 크게 과대산정하는 것으로 나타났다. $k-\omega$ SST 모형에

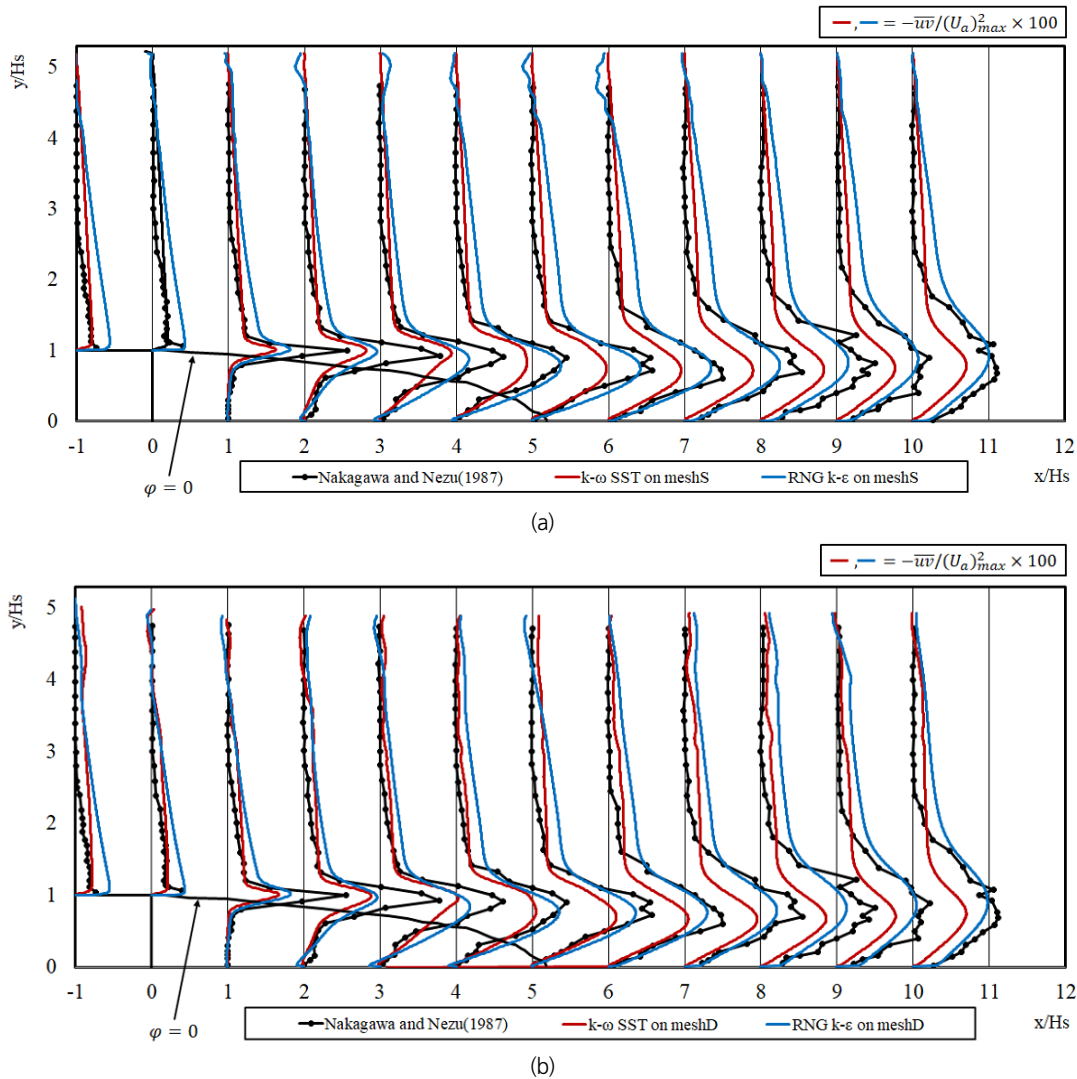


Fig. 4. Comparison of Reynolds shear stress computed on (a) meshS and (b) meshD with experimental measurement of Nakagawa and Nezu (1987)

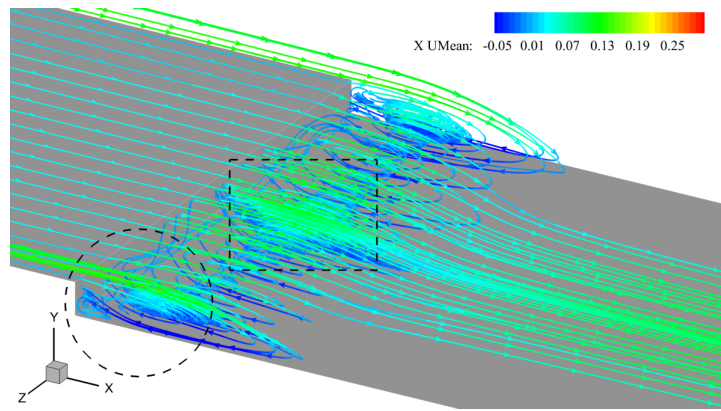


Fig. 5. Streamlines visualized on the mean flow fields computed by $k-\omega$ SST model on meshS

의해서 계산된 전단응력은 접근수로 경계층과 하류부에서 발달한 경계층의 윗부분에서는 실험값과 양호하게 일치하는 반면에 후향단차 하류부 경계층 구간 모든 지점에서 전단응력의 첨두값을 모두 과소산정된 것으로 나타났다.

늘림격자 meshS와 기형격자 meshD에서 계산된 $k-\omega$ SST와 RNG $k-\epsilon$ 모형의 전단응력 결과가 현저한 차이를 보이지 않음으로써, 두 난류 모형 모두 전단응력을 계산 결과는 격자의 형상에 민감하지 않은 것으로 판단된다.

후향단차 하류 재순환 영역에서 평균흐름의 3차원 거동 특성을 파악하기 위해서 유선도를 그리면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보인 유선도는 단차 상부($x=0, y=1.01H_s$)에서 수로 횡방향 균등 간격으로 20개 지점에서 시작한 유선 그리고 재순환 영역 중앙($x=2.5H_s, y=0.5H_s$)와 단차 바닥 모서리 부근($x=0.1H_s, y=0.1H_s$)에서 횡방향 균등 간격으로 각각 10개 지점에서 시작한 유선으로 구성된 것으로 재순환 영역 내부와 주변에서의 전방적인 흐름 양상을 보여준다. 이 유선도를 통해 수로 양 측벽 부근(Fig. 5에서 원형 사선 내부)과 수로 중앙부(Fig. 5에서 사각형 사선 내부)에서 강한 재순환 흐름이 발생함을 알 수 있다. 그리고 단차 직하류 측벽 부근(Fig. 5에서 원형 사선 내부 오른쪽)에 규모는 작지만 3차원 형상의 2차 재순환 흐름 영역이 발생함을 볼 수 있다. 그리고 흥미로운 것은 유선이 재순환 흐름 영역을 벗어나 하류로 이동할 때는 측벽 부근보다는 수로 중앙부로 모여서 하류로 이동한다는 것이다. 이러한 결과는 유한한 폭의 수로에 설치된 후향단차 하류에서의 재순환 흐름은 분명한 3차원 거동 특성을 가짐을 보여준다.

지금까지 언급했듯이 RANS 수치모의를 통해 단차 구조물 주변에서의 평균유속 분포는 어느 정도 합리적으로 재현할 수 있지만, 난류 전단응력을 정확하게 구현하기에는 한계가 있다. 즉, 상류 접근수로에서만뿐만 아니라 단차 직하류부에서 급격히 증가하는 강한 전단응력의 생성을 동시에 모의하는 데는

분명한 한계가 있다. 이러한 RANS 수치모의의 한계를 극복할 수 있는 수치모의 대안으로 LES 또는 하이브리드 LES/RANS 수치모의를 고려할 수 있다. 하지만, 하천에서 홍수시 흐름은 레이놀즈 수가 100만 단위 이상으로 LES를 적용하는 데는 한계가 있으며, 하이브리드 LES/RANS 수치모의가 적용 가능하다. LES나 하이브리드 LES/RANS 기법을 합리적인 수준의 격자해상도와 입구 경계조건 및 정확도 높은 수치기법 등의 기본 조건이 갖춰지지 않은 상태에서 적용하면 오히려 RANS 수치모의 결과보다 부정확한 값이 도출될 수 있다. 이 연구에서는 마지막으로 후향단차 흐름에 하이브리드 LES/RANS 기법 중 가장 발전된 IDDES (Improved Delayed Detached Eddy Simulation) 기법을 단순 적용하여 발생하는 문제점을 제시하고 향후 연구의 방향을 제시하고자 한다.

바닥 부근 흐름은 RANS 기법을 그리고 바닥에서 떨어진 영역에서는 LES 기법을 적용하여 효율적으로 난류 흐름의 동적 거동을 해석할 수 있는 Gritskevich *et al.* (2012)의 IDDES 기법을 이용하였다. 이 IDDES 수치모의에서 적용한 계산영역은 높은 격자해상도를 유지하기 위해서 단차를 기준으로 상류 $4\pi H_s$ 와 하류 $36H_s$ 의 구간만을 대상으로 한다. 계산격자의 전체 계산셀 수는 2.1×10^7 개를 적용하였으며, 입구 경계조건으로는 $2\pi H_s$ 하류에서 계산된 값을 복사해서 이용하는 사상(mapping) 기법을 적용하였다.

동일한 계산격자와 경계조건을 이용하여 RANS 수치모의를 비정상(unsteady) 모드에서 수행하는 URANS 계산 결과와 함께 IDDES 기법에 의해서 계산된 수로 중앙 단면에서의 순간 유속분포를 제시하면 Fig. 6과 같다. 주목할 것은 URANS 수치모의는 IDDES와 같은 해상도 격자에서 동일 기법으로 수행하였지만 해석 결과는 현저한 흐름의 동적 거동을 보이지 않으며 빠른 시간 안에 RANS 결과와 유사하게 수렴한다는 것이다. 한편 IDDES 수치모의의 결과는 Fig. 6에서 보인 바와 같이 단차

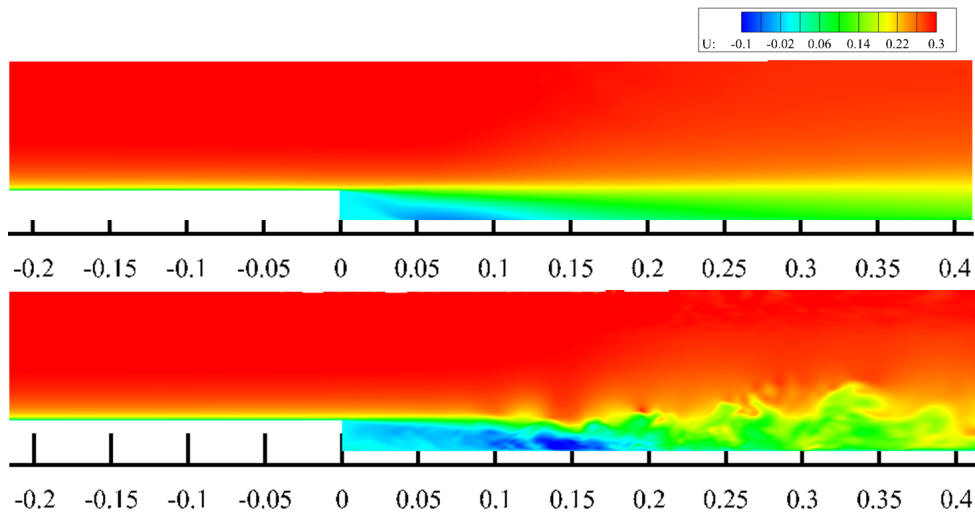


Fig. 6. Instantaneous flow velocity distribution of URANS (up) and IDDES (down) at center section

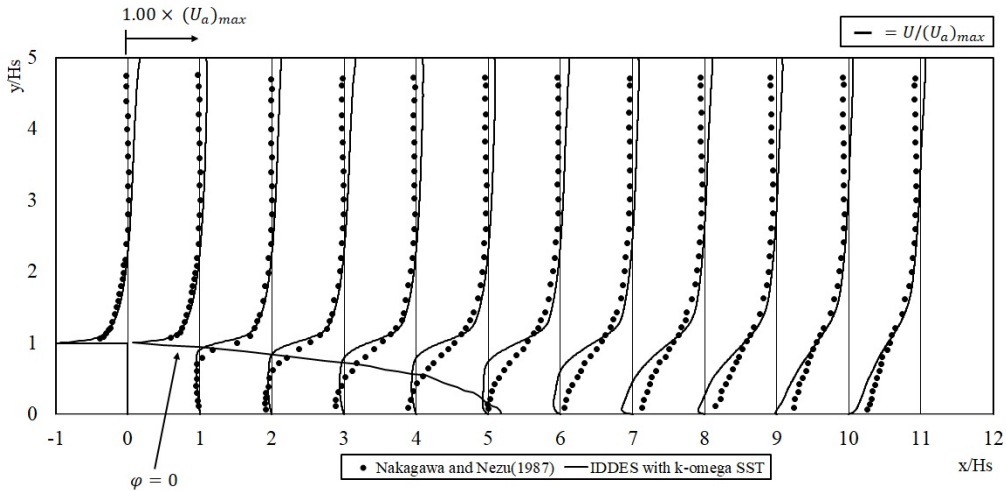


Fig. 7. Comparison of IDDES solution of mean velocity with experimental measurement of Nakagawa and Nezu (1987)

이후에 전단층의 비정상성(unsteadiness)가 활발히 발달하면서 난류의 생성과 정적인 재순환 영역이 아닌 복잡한 형태의 재순환 영역을 모의한다. 하지만 Fig. 7에서와 같이 IDDES 결과의 시간 평균 유속을 실험값과 비교해 보면 RANS 결과보다 정확도가 현저히 떨어진 경계층에서의 유속분포를 볼 수 있다. 이러한 결과는 단차 모서리에서 와류(vortex shedding)가 발생하여 유속 변동성분이 증가하면서 나타나야 하는 흐름의 비정상성이 지연되어 보다 하류에서 발생하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 경계영역 입구에서 사전에 관측 또는 계산된 레이놀즈 응력과 난류의 길이 및 시간 규모에 근거해서 산정된 비정상 난류 유입조건을 만드는 합성과 기법 (Synthetic Eddy Method, SEM)를 추가로 고려해야 한다 (Poletto *et al.*, 2013). 현재 SEM을 고려한 IDDES를 수행하고

있으며, 이를 통해 구한 평균유속과 전단응력을 포함한 난류량 자료를 다음 논문에서 제시하고자 한다.

5. 결론

개수로에서의 후향단차 흐름을 분석하기 위해서 $k-\omega$ SST와 RNG $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 RANS 수치모의를 수행하고 수치해석 결과를 Nakagawa and Nezu (1987)가 관측한 실험결과와 비교 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

두 가지 난류 모형과 두 가지 구조의 계산격자를 조합하여 수행한 수치모의는 모두 실험에서 구한 평균유속을 전반적으로 양호하게 예측하는 것으로 나타났다. $k-\omega$ SST와 RNG

$k-\epsilon$ 모형 모두 미소하게 차이는 있지만, 재부착 거리에 대한 실험값도 양호하게 계산하고 있으며, 재순환 흐름 영역에서 내부에서의 유속분포를 실험값과 매우 유사하게 두 모형 모두 예측하는 것으로 나타났다. 접근수로와 단차 하류부 경계층 영역에서의 유속분포는 늘림격자를 이용하여 수치모의한 $k-\omega$ SST 모형의 결과가 가장 실험값과 유사하면 RNG $k-\epsilon$ 모형은 이 부분에서 경계층에서의 평균흐름을 다소 과대 산정하는 것으로 나타났다.

후향단차 모서리에서 흐름이 분리되면서 전단층(shear layer)이 형성되어 높은 전단응력은 모든 모형이 과소산정하는 것으로 나타났으며, 재순환 흐름 영역 후반부터는 상대적으로 더 양호하게 실험값을 재현하는 것으로 나타났다. RNG $k-\epsilon$ 모형은 접근수로 경계층에서부터 전단응력을 과대산정하고 있으며, 하류로 갈수록 경계층 윗부분부터 수면 사이의 구간에서 전단응력을 과대산정하는 것으로 나타났다. $k-\omega$ SST 모형에 의해서 계산된 전단응력은 접근수로 경계층과 하류부에서 발달한 경계층의 윗부분에서는 실험값과 양호하게 일치하는 반면에 후향단차 하류부 경계층 구간 모든 지점에서 전단응력의 침투값을 모두 과소산정된 것으로 나타났다.

이상의 결과는 공학적으로 가장 널리 사용되는 $k-\omega$ SST와 RNG $k-\epsilon$ 모형 모두 평균유속은 양호하게 예측하는 반면에 난류 전단응력을 정확하게 예측하기에는 한계가 있음을 보여준다. 이러한 RANS 수치모의의 한계를 극복하기 위해서 하이브리드 LES/RANS 수치모의를 레이놀즈 수가 높은 개수로 흐름에 적용할 수 있으나, 신뢰할만한 결과를 구하기 위해서는 비정상 난류 유입 경계조건의 적용이 필요하며, 그렇지 않으면 RANS보다 부정확한 해석 결과를 도출할 수도 있음을 보여주었다. 현재 합성과 생성 기법을 이용한 난류 유입 경계조건을 고려한 하이브리드 LES/RANS 수치모의 연구가 진행 중이다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2019R1A2C1090809).

References

Agelinchaab, M., and Tachie, M.F. (2008). "PIV study of separated and reattached open channel flow over surface mounted blocks."

- Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, No. 6, 061206.
- Akselvoll, K., and Moin, P. (1993). "Large eddy simulation of a backward facing step flow." *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, Elsevier, Florence, Italy, pp. 303-313.
- Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F., and Schönung, B. (1983). "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 127, pp. 473-496.
- Barri, M., El Khoury, G.K., Andersson, H.I., and Pettersen, B. (2010). "DNS of backward-facing step flow with fully turbulent inflow." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 64, No. 7, pp. 777-792.
- Bosnyakov, S.M., Duben, A.P., Zheltovodov, A.A., Kozubskaya, T.K., Matyash, S.V., and Mikhailov, S.V. (2020). "Numerical simulation of supersonic separated flow over inclined backward-facing step using RANS and LES methods." *Mathematical Models and Computer Simulations*, Vol. 12, No 4, pp. 453-463.
- Bradshaw, P., and Wong, F.Y.F. (1972). "The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 52, No. 1, pp. 113-135.
- Chen, L., Asai, K., Nonomura, T., Xi, G., and Liu, T. (2018). "A review of Backward-Facing Step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control." *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 6, pp. 194-216.
- Fujita, I. (2002). "Particle image analysis of open-channel flow at a backward facing step having a trench." *Journal of Visualization*, Vol. 5, No. 4, pp. 335-342.
- Gritskevich, M.S., Garbaruk A.V., Schütze, J. and Menter, F. (2012). "Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model." *Flow, Turbulence and Combustions*, Vol. 88, pp. 431-449.
- Le, H., Moin, P., and Kim, J. (1997). "Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 330, pp. 349-374.
- Lee, H.Y., and Hwang, S.T. (1994). "Migration of backward-facing step." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 6, pp. 693-705.
- Liriano, S.L., Day, R.A., and Rodney White, W. (2002). "Scour at culvert outlets as influenced by the turbulent flow structure." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 3, pp. 367-376.
- Menter, F.R. (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
- Müller, A., and Gyr, A. (1986). "On the vortex formation in the mixing layer behind dunes." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 359-375.
- Nakagawa, H., and Nezu, I. (1987). "Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 67-88.
- Nezu, I., and Nakagawa, H. (1989). "Turbulent structure of backward-facing step flow and coherent vortex shedding from reattachment in open-channel flows." *Turbulent Shear Flows 6*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 313-337.
- Nezu, I., Nakagawa, H., and Tominaga, A. (1985). "Secondary currents

- in a straight channel flow and the relation to its aspect ratio.” *Turbulent shear flows 4*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 246-260.
- Nguyen, T.D., and Souad, H. (2015). “PIV measurements in a turbulent wall jet over a backward-facing step in a three-dimensional, non-confined channel.” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 42, pp. 26-39.
- Oder, J., Shams, A., Cizelj, L., and Tiselj, I. (2019). “Direct numerical simulation of low-Prandtl fluid flow over a confined backward facing step.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 142, 118436.
- OpenFOAM (2021). The open source CFD toolbox, accessed 1 June, 2021, <<https://www.openfoam.com/>>.
- Poletto, R., Craft, T. and Revell, A. (2013). “A new divergence free synthetic eddy method for the reproduction of inlet flow conditions for LES.” *Flow, Turbulence and Combustions*, Vol. 91, pp. 519-539.
- Pont-Vilchez, A., Trias, F.X., Gorobets, A., and Oliva, A. (2019). “Direct numerical simulation of backward-facing step flow at and expansion ratio 2.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 863, pp. 341-363.
- Probst, A., Wolf, C., Radespiel, R., Knopp, T., Schwamborn, D., and Radespiel, R. (2010). “A comparison of detached-eddy simulation and Reynolds-stress modeling applied to the flow over a backward-facing step and an airfoil at stall.” *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, FL, U.S., p. 920.
- Sainte-Rose, B., Bertier, N., Deck, S., and Dupoirieux, F. (2009). “A DES method applied to a backward facing step reactive flow.” *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 337, No. 6-7, pp. 340-351.
- Shobayo, O.O., and Walters, D.K. (2018). “Evaluation of performance and code-to-code variation of a dynamic hybrid RANS/LES model for simulation of backward-facing step flow.” *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, ASME, Montreal, Quebec, Canada, Vol. 51555, V001T08A002.
- Smirnov, E.M., Smirnovsky, A.A., Schur, N.A., Zaitsev, D.K., and Smirnov, P.E. (2018). “Comparison of RANS and IDDES solutions for turbulent flow and heat transfer past a backward-facing step.” *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 8, pp. 2231-2241.
- Tachie, M.F., Balachandar, R., and Bergstrom, D.J. (2001). “Open channel boundary layer relaxation behind a forward facing step at low Reynolds numbers.” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, No. 3, 539-544.
- Wilcox, D.C. (1988). “Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models.” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1310.
- Xingkui, W., and Fontijn, H.L. (1993). “Experimental study of the hydrodynamic forces on a bed element in an open channel with a backward-facing step.” *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 7, No. 3, 299-318.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Catski, T.B. and Speziale, C.G. (1992). “Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique.” *Physics of Fluids*, Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520.
- Yu, K.F., Lau, K.S., and Chan, C.K. (2004). “Numerical simulation of gas-particle flow in a single-side backward-facing step flow.” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 163, No. 1, pp. 319-331.