

사각형 광정위어를 통과하는 자유수면 흐름 수치모의

Numerical Modeling of Free Surface Flow over a Broad-Crested Rectangular Weir

백 중 철* / 이 남 주**

Paik, Joongcheol / Lee, Nam Joo

Abstract

Numerical simulations of free surface flow over a broad-crested rectangular weir are conducted by using the volume of fraction (VOF) method and three different turbulence models, the $k-\epsilon$, RNG $k-\omega$ and $k-\omega$ SST models. The governing equations are solved by a second-order accurate finite volume method and the grid sensitivity study of solutions is carried out. The numerical results are evaluated by comparing the solutions with experimental and numerical results of Kirkgoz et al. (2008) and some non-dimensionalized experimental results obtained by Moss (1972) and Zachoval et al. (2012). The results show that the present numerical model can reasonably reproduce the experimental results, while three turbulent models yield different numerical predictions of two distinct zones of flow separation, the first zone is in front of the upstream edge of the weir and the second is created immediately behind the upstream edge of the weir where the flow is separated to form the separation bubble. The standard $k-\epsilon$ model appears to significantly underestimate the size of both separation zones and the $k-\omega$ SST model slightly over-estimates the first separation zone in front of the weir. The RNG $k-\epsilon$ model predicts both separation zones in overall good agreement with the experimental measurement, while the $k-\omega$ SST model yields the best numerical prediction of separation bubble at the upstream edge of the weir.

Keywords : Broad-crest weir, Free surface, Turbulent flow, VOF, Numerical simulation

요 지

표준 $k-\epsilon$, RNG $k-\omega$ 그리고 $k-\omega$ SST 난류 모형과 VOF (volume of fluid) 기법을 이용하여 사각형 광정위어를 통과하는 난류 흐름의 수면 변화와 유속분포를 수치모의 하였다. 지배방정식은 2차 정확도의 유한체적기법을 이용하여 해석하였으며, 두 개의 서로 다른 격자해상도에서 계산을 수행하여 수치해석 결과의 격자 민감도를 분석하였다. 계산 결과를 Kirkgoz et al. (2008)의 실험 결과 그리고 Moss (1972) 및 Zachoval et al. (2012) 무차원화된 실험값과 비교 분석하여 적용한 수치모형의 정확도를 평가하였다. 수치모의 결과는 사각형 개수로에 설치된 광정위어 흐름의 실험결과들을 합리적으로 예측하고 있으면 적용한 난류모형에 따라서 두 개의 주요 흐름분리 영역에서 계산 결과에 차이가 있는 것으로 나타났다. 표준 $k-\epsilon$ 모형은 이들 두 개의 흐름분리 영역의 크기를 과소산정하고 있으며, $k-\omega$ SST 모형은 위어 전면부에서 발생하는 흐름분리 영역을 다소 과대 산정하는 것으로 나타났다. RNG $k-\epsilon$ 모형은 전반적으로 양호하게 두 흐름분리 영역을 예측하는 한편, $k-\omega$ SST 모형은 위어 상류부 모서리에서 발생하는 박리거품의 발생 형태를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 광정위어, 자유수면, 난류흐름, VOF, 수치해석

* 교신저자, 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: paik@gwnu.ac.kr, Tel: 033-640-3030)

Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon, Korea

** 경성대학교 토목공학과 교수 (e-mail: mjlee@ks.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Kyungshung University, Nam-gu, Busan, Korea

1. 서론

수공구조물을 이용한 흐름관측은 수두(hydraulic head)에 근거한 방법과 유속-면적법으로 분류할 수 있다. 전자는 흐름구간에서의 수두차를 계측하여 유량을 결정하는 방법이고, 후자는 단면에서의 국부 유속들을 계측하여 유량을 결정하는 방법이다. 개수로나 하천에서 유량관측을 위해서 가장 널리 사용되는 수리구조물 중 하나가 사각형 광정위어(broad-crested weir)이다. 광정위어(broad-crested weir)는 표준 유량측정장치중의 하나로 사용되며, 사각형 광정위어는 길이 L_w 과 높이 H 의 기하학적으로 단순한 형태이다. 접근하는 월류 흐름의 에너지 수두(energy overflow head) H 와 위어 길이 L_w 의 비로 표현되는 위어의 상대 월류 수심 $\zeta_w (=H/L_w)$ 의 값에 따라서 다양한 형태의 흐름이 발생한다. 상대 월류 수심이 $0.1 < \zeta_w < 0.4$ 범위인 광정위어 흐름의 경우, 거의 일정한 유량계수 값을 가지며, 위어의 상류부 상단 모서리 부근에서의 수면곡선(surface profile), 바닥 압력 분포, 경계층 분리(boundary separation) 형태 그리고 유속분포는 자기 유사성(self-similarity)을 갖는다(Hager and Schwalt, 1994). 전면부가 90° 인 사각형 광정위어의 주요 이점은 최적의 흐름조건에서 일정한 유량계수 값을 가지며, 하류부의 잠김도(submergence)에 민감하지 않으며, 단순한 설계와 구조, 그리고 낮은 건설 및 유지비용이다(USBR, 2001).

광정위어에 관한 연구는 수십 년 전부터 많은 연구자들의 관심사였다. Ippen (1950)은 Bernoulli식과 경계층 식을 이용하여 경계층 두께의 함수로서 유량계수에 대한 관계식을 개발하였다. Lewith (1978)는 위어 상부의 수두(head of water), 위어의 길이와 폭 그리고 유속의 함수로서 유량계수를 유도하였다. Sarker and Rhodes (2004)는 실험실 규모의 사각형 광정위어 상부에서의 수면분포를 계측하였으며, 상용소프트웨어를 이용하여 계산한 수위 결과와 비교하였다. 이 비교는 계산결과가 위어 상부에서의 수위를 다소 과대 산정하는 것으로 나타났다. Gonzalez and Chanson (2007)은 거의 실제 규모의 광정위어를 통과하는 흐름을 계측하여, 자세한 유속 및 압력분포를 계측한 바 있다. 이 결과는 위어 상류단에서 빠른 유속이 발생하며, 위어 상부의 형상이 흐름장에 영향을 미치는 것을 보여준다.

광정위어의 각진 모서리에서 발생하는 박리거품(separation bubble)내의 공동(cavity) 흐름은 난류 혼합 지역으로 경계가 이루어지고 재부착(re-attachment)지점 부근에서 압력이 증가하게 된다. Moss (1972)는 박리거품은

일정한 정수두(static head)로 처리하고, 거품 바깥의 주 흐름은 비회전류로 보고 하나의 자유 유선(streamline)으로 거품과 분리하여 계략적으로 설명한 바 있다. Kirkgoz et al. (2008)은 PIV (particle image velocimetry) 기법을 이용하여 사각형 광정위어 전면부와 상부에서 유속벡터를 계측하고 수치해석결과와 실험값을 비교 분석하였다. Zachoval et al. (2012)은 PIV기법을 이용하여 유속장을 관측하여 사각형 광정위어 위의 상류부 선단에서 발생하는 흐름분리의 특성을 분석하였다. 국내에서도 최근 위어 흐름에 대한 실험적 연구가 있었으니 대부분 경사위어(Im et al., 2009)나 횡월류 위어(Park and Rhee, 2010; Cho and Kang, 2011)에 대한 실험연구이고 횡월류 위어 흐름에 대한 수치해석(Kim and Kim, 2007)연구가 있다.

국내외에서 사각형 광정위어 주변에서의 유속분포에 대한 수치해석 연구는 표준 $k-\epsilon$ 및 $k-\omega$ 난류모형을 이용한 Kirkgoz et al. (2008)의 연구 이외에 별다른 연구가 없다. 앞서 기술한 바와 같이 사각형 광정위어 주변의 흐름은 역압력 경사의 의해서 발생하는 전면부의 흐름분리(flow separation) 그리고 위어 상부 모서리에서 박리거품 현상이 발생하는 것이 특징이며, 위어의 형상은 단순하지만 그 주변의 난류흐름은 복잡한 흐름 구조를 갖는다. 특히 후자의 박리거품 발생은 위어의 성능 관점에서 매우 중요하다. 이 연구에서는 2차원 계산 유체 동역학(computational fluid dynamics, CFD) 수치모형을 이용하여 사각형 광정위어를 통과하는 난류 흐름의 자유수면 변화와 유속분포를 해석하고자 한다. 난류 해석을 위해서는 표준 $k-\epsilon$ 모형 이외에 보다 진보된 RNG $k-\epsilon$ 모형과 $k-\omega$ SST (shear stress transport)모형을 이용하여 이들 난류모형의 정확도를 평가하고, 기존 광정위어 흐름에 대한 실험 자료들과 비교 분석함으로써 실제현상에 대한 수치모형의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 수치해석 방법

이 연구에서 적용하는 지배방정식은 흐름방정식, 자유수면방정식 그리고 난류 해석을 위한 3가지 난류모형 방정식이다. 이 논문에서는 지면의 제약으로 인해서 지배방정식을 가능한 간략한 벡터형식으로 표현하고, 이미 잘 알려져 있는 난류방정식들은 지배방정식의 기술 없이 간략한 설명만을 포함하기로 한다.

2.1 흐름 지배방정식

흐름에 대한 지배방정식은 비정상, 비압축성 레이놀즈

-평균 나비에-스톡스(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 방정식이다. 벡터형태로 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p_{rgh} + \nabla \cdot (\mu + \mu_t) \nabla \bar{u} + \rho \bar{g} + F_b \quad (2)$$

여기서, \bar{u} 는 유체의 유속, ρ 는 유체의 밀도, μ 와 μ_t 는 유체의 점성계수(dynamic viscosity)와 난류점성계수이다. 그리고 F_b 는 표면장력을 고려한 외력항이다. 이 식과 일반적인 RANS 방정식과 차이는 압력대신에 피에조압력(piezometric pressure), $p_{rgh} = p - \rho \bar{g}$ 를 계산한다는 것이다. 따라서 벡터 형식의 운동량방정식에서 $-\rho \nabla + \rho \bar{g}$ 는 $-\nabla p_{rgh} - \bar{g} \rho$ 로 다시 표현된다.

물-공기 유체의 경계면은 2상 VOF (two-phase volume of fluid) 기법으로 포착하였다. 자유수면의 위치는 인공표면 압축항을 포함하는 이송방정식을 해석하여 구한 체적분할(volume fraction) α 의 값으로 결정된다. 체적분할은 유체의 성질을 결정하기 위해서 이용된다.

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (4)$$

여기서, ρ_1 과 μ_1 은 유체 1(예를들면 물)의 성질들이며, ρ_2 와 μ_2 는 유체 2(즉, 공기)의 성질이다. 체적분할 α 에 대한 지배미분방정식은 다음과 같다(Weller, 2008).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \bar{u}) - \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha) \bar{u}_r) = 0 \quad (5)$$

위 식에서 \bar{u}_r 는 유속장에서의 최대 값을 반영하는 인공압축유속(artificial compression velocity)이며 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{u}_r = \min(C_\alpha |\bar{u}|, \max G |\bar{u}|) \bar{n} \quad (6)$$

여기서, \bar{n} 은 경계면에 수직인 단위벡터이며 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{n} = \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (7)$$

이 식은 $\alpha(1 - \alpha)$ 에 의해서 자유수면에만 영향을 주며, 여기서 $\max G |\bar{u}|$ 는 전체 유속장에서의 최대값이다. 이 추가적인 대류항(convective term)은 수치분산(numerical diffusion)에 의해서 자유수면의 급한 경사가 감소되는 것을

막기 위해서 도입된다. 계수 C_α 는 압축의 강도를 결정하며 일반적으로 0과 2 사이의 값을 갖는다. 이 연구에서는 자유수면 압축의 강도를 제어하는 압축계수 값으로 보존형 압축(conservative compression)에 해당하는 1.0을 적용하였다.

2.2 난류 모형

이 연구에서는 공학적 문제에서 가장 널리 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모형 이외에 $k-\omega$ SST (shear stress transport) 모형과 RNG $k-\epsilon$ 모형을 적용하고 해석결과를 비교함으로써 적용모형의 적합성을 평가하였다. Menter (1994)가 개발한 $k-\omega$ SST 모형은 역 압력경사(adverse pressure gradient)를 가지는 흐름에 대해서 보다 높은 민감도를 얻을 수 있도록 Wilcox (1988)의 모형을 개선한 것이다. SST 모형은 벽면 근처에서의 흐름에 대해서는 $k-\omega$ 모형을 그리고 벽면에서 멀리 떨어진 흐름에 대해서는 $k-\epsilon$ 모형을 적용하도록 두 모형을 혼합한 것이다. 이 모형은 여러 대상 문제들에 대해서 문제없이 사용할 수 있으며, 일반적으로 벽면 경계부근에서 양호한 해석결과를 만들어 낸다. 아울러 비슷한 수준의 다른 모형보다 위어 전면부의 흐름분리 영역을 보다 양호하게 재현할 수 있는 것으로 알려져 있다(Menter, 1994).

표준 $k-\epsilon$ 모형에서 와점성(eddy viscosity)은 단일 난류 길이규모(turbulence length scale)에 의해서 결정되므로 계산된 난류분산(turbulent diffusion)은 특정규모에서만 발생하게 된다. 하지만, 실제로는 모든 규모의 유체 운동이 난류분산에 기여하게 된다. RNG $k-\epsilon$ model (Yakhot et al., 1992)은 보다 작은 규모의 운동 효과를 고려하기 위해서 RNG (Re-Normalization Group) 기법을 이용하여 Navier-Stokes 방정식을 재규격화(renormalize)함으로써 개발된 것이다.

2.3 수치 기법

지배방정식은 공개 프로그램 도구인 OpenFOAM toolbox (Jasak, 2009)를 활용하여 2차정확도의 유한체적법(finite volume method)을 이용하였다. 운동량방정식에서의 이송항은 유계중앙차분(bounded central differencing)의 일종인 Gamma 기법(Jasak et al., 1999) 그리고 시간항은 2차 정도의 후방차분(backward difference) 기법을 이용하여 이산화하였다. VOF 지배방정식의 이송항은 Van Leer의 TVD (total variation diminishing) 기법을 이용하여 이산화 하였으며, 기타의 항들은 중앙차분기법을 이용하여 해석하였다.

3. 모형의 적용

3.1 적용 실험자료 소개

Kirkgoz et al. (2008)은 길이 2.4 m, 깊이 0.2 m 그리고 폭 0.2 m의 사각형, 수평 직선수로에서 사각형 광정위어를 통과하는 흐름을 대상으로 수치실험을 실시하였다. 이 실험에서 수로의 바닥은 수리학적으로 매끄러우며, 수로 벽면은 유리로 제작되었다. 이 연구에서는 수로 유입부로부터 1 m 떨어진 하류부에 설치된 폭 0.2 m, 높이 0.088 m, 길이 0.23 m의 사각형 광정위어를 통과하는 흐름을 대상으로 한다. 유량은 $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 상류부 접근수심 h_0 은 0.127 m이다. 결과적으로 접근수심과 접근 유속에 근거한 후르드수(Fr)는 0.078이고 접근유속과 동수반경에 근거한 레이놀즈 수(Re)는 19,200이다.

Kirkgoz et al. (2008)은 PIV (particle image velocimetry)를 이용하여 4각형 위어 상류부의 접근흐름 유속과 전면부 흐름분리 영역 내에서의 유속을 계측하였다. 수로의 중앙을 가로지르는 대칭면에서 순간 유속 벡터장을 Dantec PIV 흐름 계측 시스템을 이용하여 관측하였다. 수로의 물에는 중립부력의 은으로 표면 처리한 $14 \mu\text{m}$ 의 구형입자를 뿌리고 한 쌍의 이중펄스(double pulse) Nd:YAG 레이저 기기로부터 532 nm 파장의 2 mm 두께의 아르곤 녹색광으로 이뤄진 레이저시트를 이용하여 구형입자를 비췌다. 두 펄스의 시간간격, 즉 입자위치 계측 시간간격은 2.5 ms이며, 60 mm 렌즈를 장착한 1024픽셀 x 1024픽셀 해상도의 카메라장비를 이용하여 입자의 이동을 기록하였다. 각 픽셀은 관측영역에서 $0.065 \text{ mm} \times 0.065 \text{ mm}$ 의 사각 범위를 담당한다. 이미지 처리에는 32픽셀 x 32픽셀이 사각형윈도

우를 이용하였으며 50%를 중첩시켜서 총 1953개의 유속 벡터를 만들었다. 보다 자세한 PIV 계측, 이미지 처리 그리고 후처리(post-processing)에 대해서는 Kirkgoz et al. (2008)의 논문을 참고하기 바란다.

3.2 계산 격자 및 경계조건

수치해석에서는 Kirkgoz et al. (2008)의 수치실험 수로 전체를 수치적으로 재현하였으며, 계산에 사용한 격자는 Fig. 1과 보인 바와 같다. 높이 0.088 m 그리고 길이 0.23 m의 사각형 광정위어는 수로 상류단으로부터 1 m 하류 지점에 설치되어 있다. 계산영역의 전체 크기는 흐름방향으로 2.4 m이고 연직방향으로 0.24 m이다. 계산영역의 상류단 경계조건으로 일정한 수심($h=0.127 \text{ m}$)을 설정하고 물 흐름에 대해서 균일한 연직유속분포 조건을 부여했다. 하류단에서는 자유낙하(free-fall)조건을 그리고 계산영역의 상부경계에서는 대기압 조건을 설정하였다. 이러한 경계조건들은 실험에서 적용한 것과 일치한다. 바닥면과 위어 벽면에 대해서는 벽법칙(wall functions)을 적용하였다. 계산격자의 해상도에 대한 수치해석 결과의 민감도(sensitivity)를 분석하기 위해서 Fig. 1에서 보인 바와 같이 성긴격자(coarse mesh, cm)와 조밀격자(fine mesh, fm)로 명명된 두 개의 서로 다른 격자해상도를 이 연구에서는 고려하였다. 두 격자 구성에 이용된 계산 셀의 수는 각각 18,400개와 40,520개이다.

4. 해석 결과

수치해석 결과 중에서 자유수면의 흐름변화와 순간

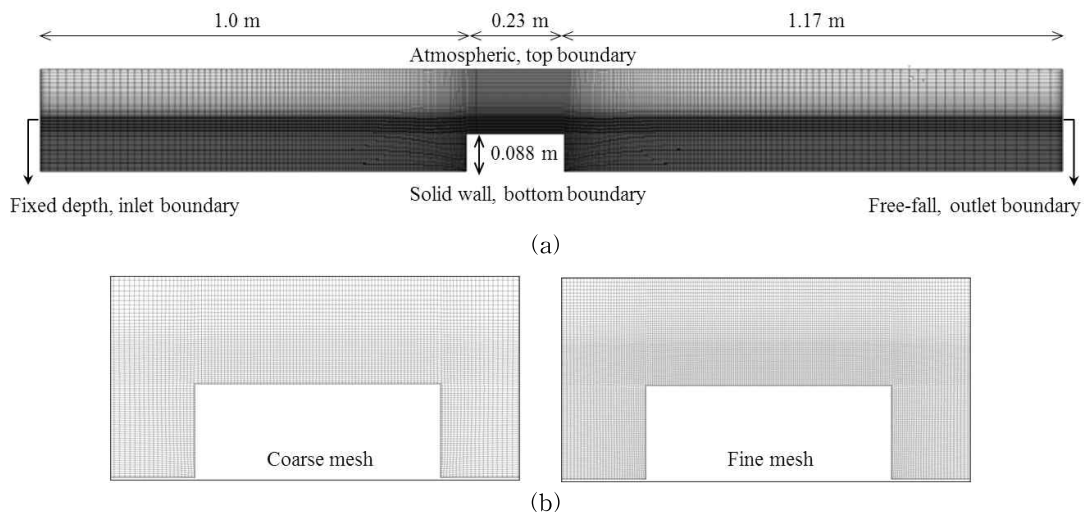


Fig. 1 Geometrical Configurations, Boundary Conditions, (a) Computational Mesh and (b) Magnified View of Two Coarse and Fine Meshes Around the Weir Used for Grid Sensitivity Study

(instantaneous) 유속 벡터장(vector field)을 Fig. 2에 나타냈다. 자유수면 높이는 광정위어 상류 선단부로 접근하면서 감소하고, 위어 전면부와 상부모서리에서 흐름분리(flow separation)가 발생한다. 특히 위어 상류부 모서리 위에서 흐름분리가 발생하여 생성된 공동(cavity)을 박리거품(separation bubble)이라 하며, 이는 위어의 성능에 중요한 영향을 미친다. 이 절에서는 이러한 흐름 특성을 중심으로 Kirkgoz et al. (2008)의 실험자료, 본 연구에서 수행한 수치해석 자료 그리고 기준에 다른 연구자들에 의해서 제시된 실험자료를 이용하여 비교 분석하기로 한다.

위어 상류부 두 지점($X=0.905\text{ m}$ 와 0.995 m 그리고 $Y=0.1\text{ m}$, 여기서 X 는 수로 유입부를 기준으로 흐름방향 거리이고 Y 는 수로 바닥을 기준으로 연직방향 거리)에서 계산된 흐름방향 유속의 시간적 변동을 도시하면 Fig. 3과 같다. 이들 두 지점에서 계산된 흐름방향유속들은 약 $t=120\text{ s}$ 이후부터는 특정 값으로 수렴하면서 완전 발달한(fully developed) 것으로 나타났다. 하지만, 위어 상단부와 하류부에서의 흐름도 완전 발달해야 하므로, 이 연구에서는 $t=200\text{ s}$ 까지 흐름이 발달하도록 계산을 수행하고, 이 시간

이후 $t=300\text{ s}$ 까지 계산된 100 s 동안의 순간 흐름장(flow field)을 시간 평균하여, 통계적으로 수렴된 평균 흐름장들을 비교 분석하였다. 흐름을 시간 평균하는 100 s 동안, 흐름 박리가 발생한 이후인 위어 하류부에서는 현저한 흐름 변동이 발생하며, 위어 상부에서는 특히 하류부 구간에서 미소한 수면변동이 발생하는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 서로 다른 해상도를 갖는 두 개의 격자를 이용하여 수치해석 결과의 격자 민감도를 분석하였다. Fig. 4에서는 표준 $k-\epsilon$ 모형, RNG $k-\epsilon$ 그리고 $k-\omega$ SST 모형을 이용해서 두 격자에서 계산된 흐름 중 $X=0.995\text{ m}$ 지점에서의 시간평균 연직 유속분포를 비교하였다. 이 그림에서 보여진 바와 같이 바닥부근에서는 성긴격자(cm)와 조밀격자(fm)에서 계산된 유속분포는 모든 난류모형에 대해서 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며, 수면부근에서는 RNG $k-\epsilon$ 그리고 $k-\epsilon$ SST 모형의 경우 아주 미소한 변화만 있는 것으로 나타났다. 이들 결과는 이 연구에서 적용한 격자의 해상도는 충분히 높으며, 모든 수치해석 결과는 주어진 격자 해상도 조건에 민감하지 않으므로, 더 이상 해상도를 높여더라도 해석결과에는 변화가

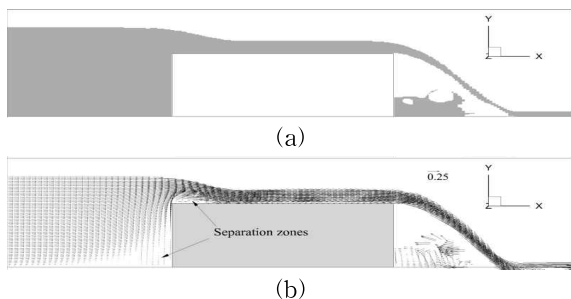


Fig. 2. Instantaneous Free Surface Flow Computed using $k-\omega$ SST Model: (a) Free Surface Variation, (b) Velocity Vectors Around the Rectangular Weir. Velocity Vectors Show the Formation of Two Separation Zones in Front of the Weir and at the Upstream Edge of the Weir

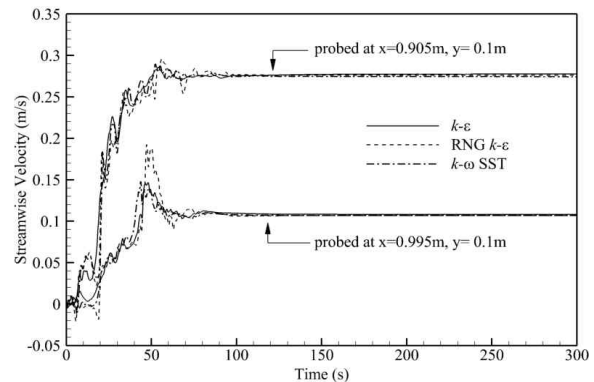


Fig. 3 Time Evolution of Streamwise Velocity Vectors Computed by using Three Different Turbulence Models at $X=0.905\text{ m}$ and 0.995 m and $Y=0.1\text{ m}$

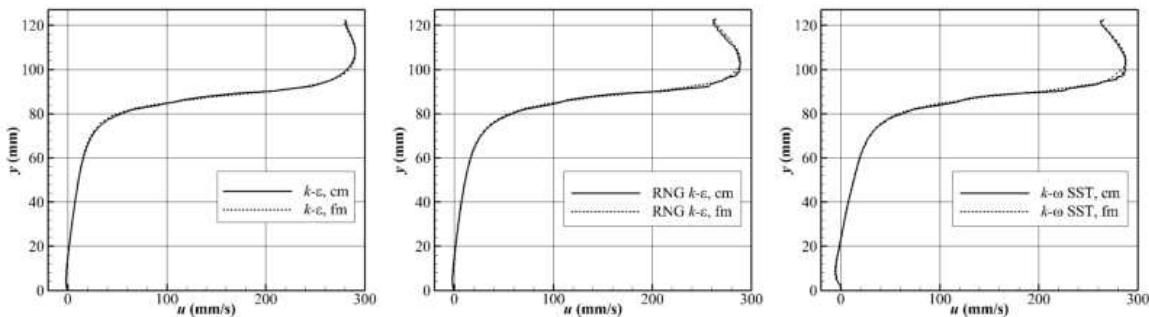


Fig. 4. Sensitivity of Streamwise Velocity Profiles Computed at $x=0.995\text{ m}$ on the Grid Resolution: cm and fm Stand for Coarse and Fine Meshes, Respectively

없음을 알 수 있다.

Kirkgoz et al. (2008)은 위어 상류부 두 개의 지점($X=0.905\text{ m}$ 와 0.995 m)에서 PIV 장치를 이용하여 연직방향 유속분포를 측정하였다. Fig. 5에서는 Kirkgoz et al. 실험자료와 이들이 표준 $k-\varepsilon$ 모형과 Wilcox (1988)의 $k-\omega$ 모형을 이용하여 계산한 수치해석 결과를 비교하였고, Fig. 6에서는 Kirkgoz et al. (2008) 실험자료와 이 연구에서 적용한 3개 난류모형을 이용하여 계산된 시간평균 유속분포와 비교하였다. 먼저, 이 두 그림들에서 분명하게 구별되는 특징 중의 하나는 Kirkgoz et al. (2008)이 표준 $k-\varepsilon$ 모형을 이용하여 계산한 결과와 본 연구에서 표준 $k-\varepsilon$ 모형을 이용하여 계산한 결과가 다르다는 것이다. 접근흐름 지역($X=0.905$)에서의 연직방향 유속분포를 보면 Kirkgoz et al.의 $k-\varepsilon$ 모형에 의한 결과는 바닥 경계층에서의 유속을 현저히 과대 산정하는 한편, 수면부근에서의 유속을 약 10~15%정도 과소산정하고 있다. 이 지점은 위어 설치로 인한 역압력 경사의 발달에 의한 바닥 경계층의 분리가 발생하지 않는 지점이므로, 이들의 해석오류는 수치해석에서 바닥면에 적용한 벽법칙(wall function) 또는 경계조건이 적절히 적용되지 않았기 때문으로 판단된다. Fig. 5에서의 왼쪽 그림을 보면 표준 $k-\varepsilon$ 모형과 RNS $k-\varepsilon$ 모형은 거의 동일하게 접근흐름의 경계층 발달을 양호하게 예측하는 것으로 나타났다. 이 지점에서는 위어 설치의 영향이 미미하며 평면위에서의 접근 경계층의 발달만이 흐름을 지배하므로 두 모형의 결과가 거의 일치하는 것은 당연하다. 한편, $k-\omega$ SST 모형 결과를 보면 위어 설치에 따른 역압력 경사를 민감하게 반영하여 위어 전면부의 흐

름분리 영역을 과대 산정하는 것으로 나타났다.

위어 상류부 바닥부근에서 발생하는 흐름분리 영역 중심 부근(Figs. 5 and 6에서 오른쪽 그림)에서의 유속분포는 $k-\omega$ SST 모형이 가장 정확하게 실험값을 재현하는 반면에 표준 $k-\varepsilon$ 모형은 흐름분리 영역내의 역방향흐름을 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 수면부근에서 계산된 유속분포를 보면 Kirkgoz et al.의 수치해석 결과는 상류부에서는 과소평가하는 반면 위어 직상류부에서는 실험값을 양호하게 예측하는 것으로 나타났다. 한편, 이 연구에서 적용한 3개 난류모형들은 상류부에서 관측된 유속분포를 매우 잘 예측하는 반면에 위어 직상류부 수면부근에서는 과대 산정하는 것으로 나타났다. Figs. 5 and 6의 오른쪽 그림들을 비교해보면 이 연구에서 수행한 수치해석들은 단위폭당 유량을 과대 산정하는 것같이 보일 수도 있다. 하지만, 흐름분리의 영향이 없는 접근흐름 영역과 위어 상부에서 시간 평균한 수치해석 결과의 연속방정식 만족 여부를 분석한 결과, 이 연구에서 수행한 모든 수치해석 결과는 무시할 수 있는 정도의 오차로 거의 완벽하게 연속방정식을 만족하는 것으로 나타났다.

이상에서 언급된 계산결과들의 오차 원인을 분석하기 위해서 Fig. 7에서는 실험값과 수치해석 결과를 이용하여 도시한 유선과 유속 벡터도를 비교하였다. Kirkgoz et al. (2008)의 관측 값을 보면 관측해상도가 낮은 관계로 위어 전면부에서의 흐름분리 영역이 적절히 재현되지 못하였다. 보다 흥미로운 것은, 이미 여러 연구들(예를 들면, Moss, 1972; Ramamurthy et al., 1988; Zachoval et al., 2012)에서 잘 알려진, 사각형 광정위어 윗면의 상류단 모서리에

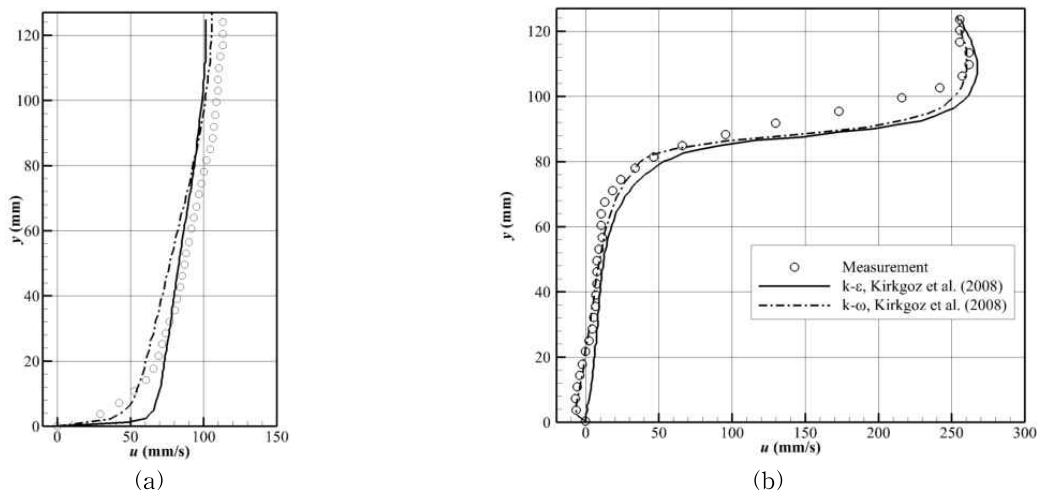


Fig. 5. Comparison of Vertical Profiles of Time-averaged Streamwise Velocity Components Obtained by Numerical Predictions of Kirkgoz et al. (2008) using the Standard $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ Models and Experimental Measurement of Kirkgoz et al. (2008) at (a) $X=0.905\text{ m}$ and (b) $X=0.995$

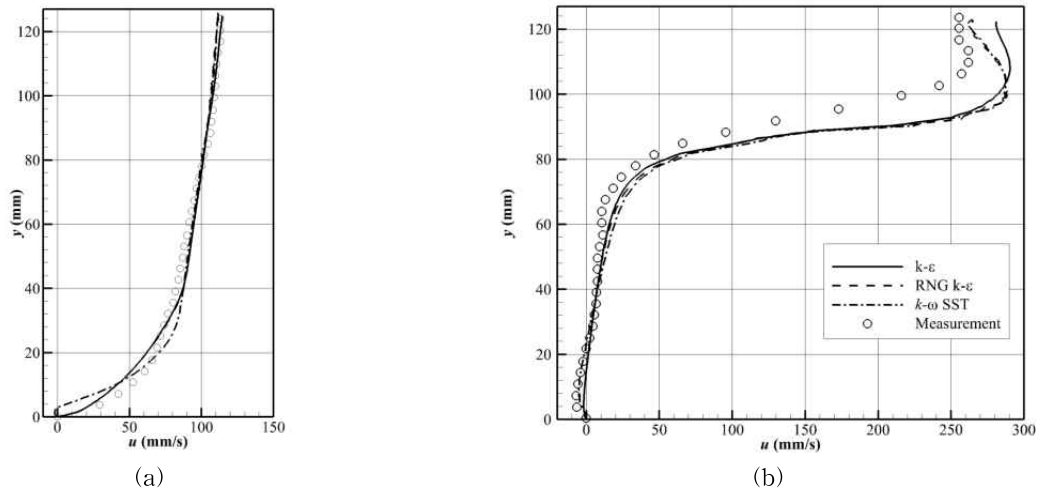


Fig. 6. Comparison of Vertical Profiles of Time-averaged Streamwise Velocity Component Computed by the Present Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ and $k-\omega$ SST Models with Experimental Measurement of Kirkgoz et al. (2008) at (a) $X=0.905$ m and (b) $X=0.995$

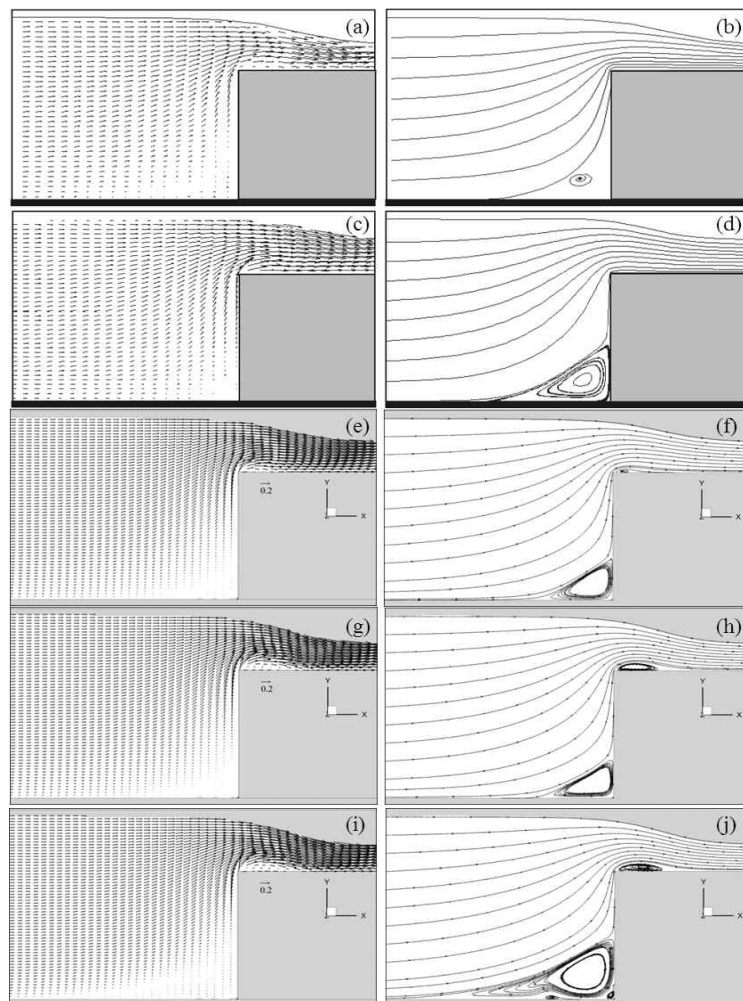


Fig. 7. Time-averaged [left] Velocity Vectors and [right] Stream Lines: (a) & (b) Measurements, (c) & (d) Solutions Obtained by $k-\omega$ Model of Kirkgoz et al.(2008), (e) & (f) Solutions by Present Standard $k-\epsilon$ Model, (g) & (h) Solutions by RNS $k-\epsilon$ Model, and (i) & (j) Solution by SST $k-\omega$ Model

서 발생하는 박리거품을 Kirkgoz et al. (2008)의 실험에서는 재현하지 못하고 있다는 것이다. 이러한 원인은 PIV 관측 해상도가 낮거나 벽면 근처의 작은 와류 영역에서의 관측오차 때문으로 판단할 수 있다. 아울러 Wilcox (1998)의 $k-\omega$ 모형을 이용한 Kirkgoz et al. (2008)의 수치해석 결과도 박리거품을 재현하지 못하고 있다. Kirkgoz et al. (2008)은 그들의 계산에서 위어 상부에서의 흐름방향 격자간격을 $\Delta x=11.5\text{ mm}$ 로 설정한 반면에 이 연구에서는 성긴격자와 조밀격자에서 각각 $\Delta x=3.06\text{ mm}$ 와 2.0 mm 의 격자간격을 적용하였다. 그리고 위어 상부 벽면 부근에서 연직방향의 격자간격은 두 수치해석 모두에서 유사한 Δy 값(약 0.8 mm 와 0.975 mm)을 적용하였다. 즉, 이 연구의 경우 박리거품이 발생하는 영역에서 흐름방향 계산 셀은 성긴격자와 조밀격자의 경우 각각 약 12개와 18개가 이용된 반면에 Kirkgoz et al. (2008)의 계산의 경우 3개의 격자만이 이용되고 있다. 따라서, 이들의 수치해석에서 박리거품을 재현하지 못한 것은 박리거품 발생지역에서 흐름방향 격자간격을 너무 크게 구성하였기 때문으로 판단된다. 결과적으로 위어 상류부 모서리에서 발생하는 박리거품을 수치해석적으로 재현하기 위해서는 충분한 수의 격자 셀을 이용해야 하는 것으로 판단된다.

이 연구에서 이용한 표준 $k-\epsilon$ 모형과 RNS $k-\epsilon$ 모형은 거의 동일하게 위어 위어 전면부에서 유사한 크기의 흐름분리 영역을 재현시키는 반면에 $k-\omega$ SST 모형 상대적으로 다소 크게 이 영역을 계산하는 것으로 나타났다. 그리고 위어 위의 모서리에서 발생하는 박리거품을 표준 $k-\epsilon$ 모형은 가장 작게 그리고 $k-\omega$ SST 모형은 가장 크게 재현하는 것으로 나타났다.

이상의 비교 분석 결과를 보면, 위어 상류부와 위어 윗면 두 지점 모두에서 일관성 있게 실험값을 양호한 해석하는 난류모형이 없는 것 같으며, 그 이유는 불분명하다. 따라서 아래에서는 기존에 이미 저명한 논문에서 제시되어 있는 사각형 광정위어를 통과하는 흐름 중 박리거품에 대한 두 개의 실험연구 결과를 이용하여 수치해석 결과의 정확도를 추가로 분석하였다. 앞서 제시된 바와 같이 Kirkgoz et al. (2008)의 실험결과와 수치해석결과는 박리거품 재현을 실패하였으므로 이하의 결과 분석에서는 이들의 결과를 제외하기로 한다.

Moss (1972)는 사각형 광정위어 상류부 모서리 부근에서 발생하는 박리거품의 특성과 주변 흐름을 실험과 수학적 모형을 이용하여 연구하였다. Fig. 8에서는 3개 난류모형을 이용하여 계산한 결과와 Moss의 수학적 모형 및 실험 자료를 중첩하여 작성한 유선 및 유속벡터와 비교하였다.

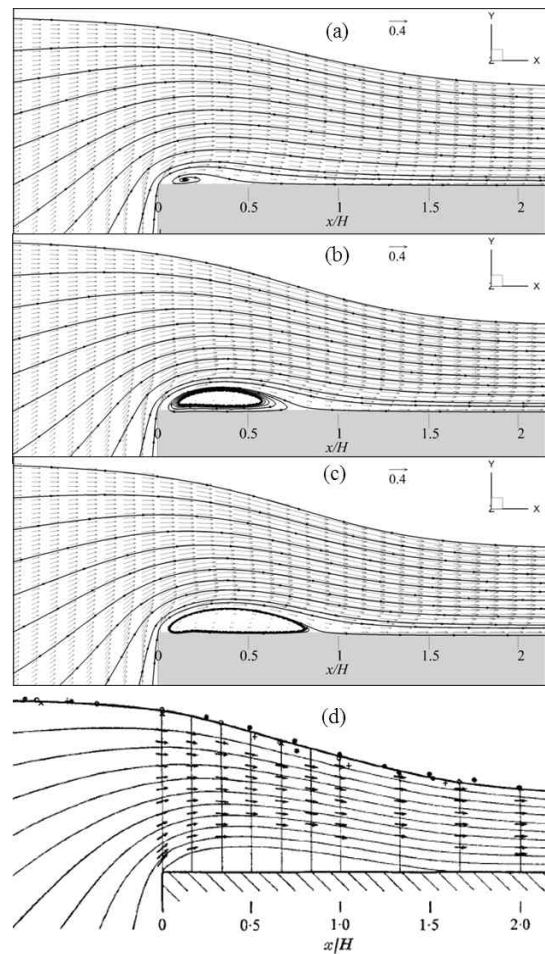


Fig. 8. Separation Bubbles Bounded by Turbulent Mixing Zone over the uPstream Top of the Rectangular Weir Computed by (a) the Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$ and (c) $k-\omega$ SST Models. (d) Measurement of Moss(1972) Obtained in Similar Experimental Configurations is Included for Comparison

그림에서 H는 월류 에너지 수두(energy overflow head)로서 접근흐름(approaching flow)에 대한 위어 바닥면으로부터의 수심과 평균 접근유속에 근거한 속도수두의 합이다. 이 그림에서 Moss의 실험결과를 보면 박리거품의 종방향 길이는 약 $x/H=1.5$ 인 것으로 나타났다. 이 연구에서 적용한 $k-\omega$ SST 모형이 박리거품의 크기를 가장 양호하게 예측하고 있으며, 표준 $k-\epsilon$ 는 상당히 과소평가하는 것으로 나타났다. 아울러 이 그림에서 볼 수 있듯이, 박리거품의 발생은 거품 위를 통과하는 흐름의 가속에 영향을 미친다. 즉 RNG $k-\epsilon$ 모형과 $k-\omega$ SST 모형에 의해서 계산된 결과를 보면 박리거품 상부에서 흐름 단면의 축소로 흐름이 가속됨을 볼 수 있다. 이러한 특성은 다음의 Zachoval et al. (2008)의 연구결과에서도 볼 수 있다.

Zachoval et al. (2012)은 레이놀즈 수 약 10,000에서 100,000 사이의 조건에서 사각형 광정위어 위의 흐름에 대해서 수리실험을 수행하고, 에너지 수두(head)를 이용하여 무차원화된 유속분포($u^2/[2gH]$)를 제시하였다. 이 연구에서 적용한 3개 난류모형을 이용하여 위어 상류 선단부 부근에서 계산한 시간평균 유속 분포를 Zachoval et al.의 무차원화한 유속분포와 Fig. 9에서 비교하였다. Fig. 9에서 표준 $k-\epsilon$ 모형에 의해 계산된 유속분포를 보면, 위어 상류부의 수면부근에서는 Zachoval et al.의 결과와 유사하게 유속을 계산하고 있지만 위어 모서리 직상부(그림에서 약 $x/H < 0$, x 는 위어 선단부를 기준으로 하는 하류방향 거리 좌표)에서는 유속을 과소평가하고 있으며, 박리거품의 상부(그림에서 약 $x/H=0.5$)와 그 하류부에서는 유속을 과소 산정하는 것으로 나타났다. 위어 상부 모서리(그림에서 $x/H=0$)

에서는 3개 난류모형 모두 유사한 유속분포를 계산하고 있으며, Zachoval et al.의 결과 보다 다소 작게 유속을 산정하는 것으로 나타났다. 하지만 박리거품 상부와 하류부(그림에서 약 $x/H=0.5$ 하류부)에서는 RNG $k-\epsilon$ 모형과 $k-\omega$ SST 모형이 보다 실험값과 유사하게 유속분포를 계산하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 RNG $k-\epsilon$ 모형과 $k-\omega$ SST 모형이 표준 $k-\epsilon$ 모형 보다는 위어 모서리에서의 박리거품의 형태를 보다 잘 재현하고 있으며, 거품 위에서의 흐름 가속을 양호하게 해석할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

이 연구에서는 표준 $k-\epsilon$, RNG $k-\omega$ 그리고 $k-\omega$ SST 난류 모형과 VOF기법을 이용하여 사각형 광정위어를 통과하는 난류 흐름의 유속분포를 계산하였으며, 계산 결과를 Kirkgoz et al. (2008)의 실험 결과 그리고 Moss (1972) 및 Zachoval et al. (2012) 실험값과 비교 분석하여 적용한 수치모형의 정확도를 평가하였으며, 그 결과는 요약하면 다음과 같다.

VOF 기법과 2차 정확도의 유한체적기법을 이용한 수치모형은 사각형 개수로에 설치된 광정위어 흐름에 대한 실험결과들을 합리적으로 예측하고 있으면, 흐름분리 영역에 대해서는 적용한 난류모형에 따라서 계산 결과에 차이가 있는 것으로 나타났다.

표준 $k-\epsilon$ 모형과 RNG $k-\epsilon$ 모형은 접근 흐름 영역에서의 경계층 발달을 거의 유사하게 모의하는 반면에 위어의 영향을 받는 위어 전면부 흐름분리 영역과 위어 상부 흐름분리 영역에서는 RNG 모형이 상대적으로 우수한 정확도로 유속분포를 계산하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 RNG 모형이 원래의 개발 의도에 맞게 위어 전면부의 흐름분리와 상부 모서리에서의 박리거품과 같이 상대적으로 접근 경계층의 발달 규모보다 작은 규모의 유체 운동의 영향을 잘 재현하기 때문으로 판단된다.

위어 상류부 모서리에서 발생하는 박리거품을 재현하기 위해서는 흐름방향으로 충분한 수(이 연구의 경우 약 12개 이상)의 격자 셀을 이용하여야 하는 것으로 나타났다. Moss (1972) and Zachoval et al. (2012)의 실험결과를 기준으로 박리거품의 규모와 형상 측면에서 비교해 보면 표준 $k-\epsilon$ 모형보다는 RNG $k-\epsilon$ 모형이 상대적으로 양호하게 예측하며, $k-\omega$ SST 모형이 이들 실험결과를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

실험자료와 수치해석 결과의 보다 광범위하고 자세한 분석을 위해서는 평균유속뿐만 아니라 난류량(turbulent

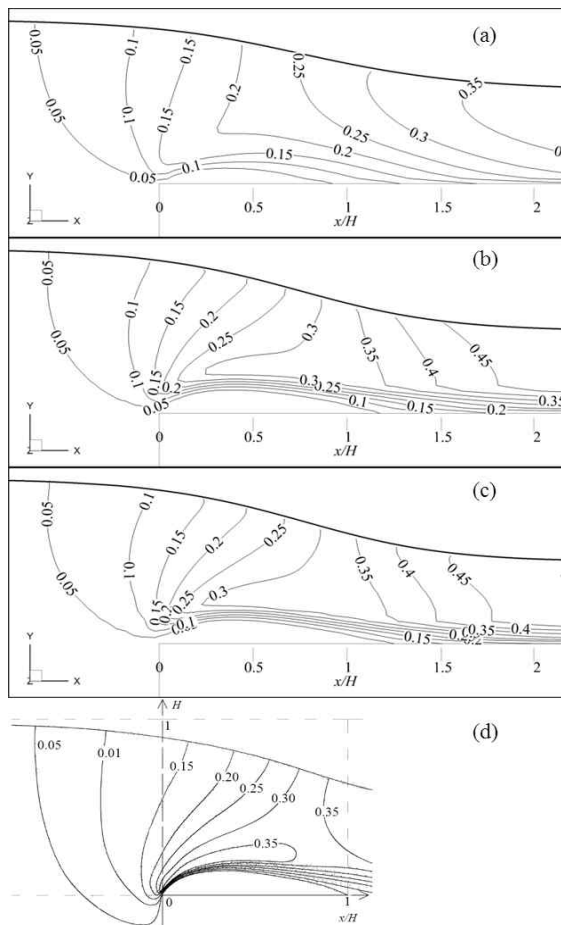


Fig. 9. Distributions of the Dimensionless Velocity Head, $U^2/(2gH)$, of Flow Computed by (a) the Standard $k-\epsilon$, (b) RNG $k-\epsilon$ and (c) $k-\omega$ SST models. (d) Measurement of Zachoval et al. (2012) Obtained in Similar Experimental Configurations is Included for Comparison

quantities)을 계측한 고해상도의 실험자료가 필요하다고 본다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Cho, H.J., and Kang, H.S. (2011). "An estimation of discharge coefficient considering the geometrical shape of broad crested side weir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 955-965.
- Gonzalez, C.A., and Chanson, H. (2007). "Experimental measurements of velocity and pressure distribution on a large broad-crested weir." *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 18, No. 3-4, pp. 107-113.
- Hager, W.H., and Schwalt, M. (1994). "Broad-crest weir." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 13-26.
- Im, J.H., Jin, S.W., and Song, J.W. (2009). "Study on estimation for discharge coefficient of diagonal weir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 5, pp. 375-383.
- Ippen, A.T. (1950). *Engineering Hydraulics*, New York, John Wiley and Sons, Inc, p. 526-527.
- Jasak, H., Weller, H.G., and Gosman, A.D. (1999). "High resolution NVD differencing scheme for arbitrarily unstructured meshes." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 31, pp. 431-449.
- Jasak, H. (2009). "OpenFOAM: Open source CFD in research and industry." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 89-94.
- Kirkgoz, M.S., Akoz M.S., and Oner, A.A. (2008). "Experimental and theoretical analyses of two-dimensional flows upstream of broad-crested weirs." *Can. J. Civil Engineering*, Vol. 35, pp. 975-986.
- Kim, D.G., and Kim, Y.G. (2007) "Analysis of the flow over broad crested side weir by using three-dimensional numerical simulation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 3, pp. 277-286.
- Lewith, E.H. (1978). *Hydraulics ad Fluid Mechanics*, 10th Edition, London, 1978.
- Menter, F.R. (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA Journal*. Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
- Moss, W.D. (1972). "Flow separation at the upstream edge of a square-edge broad-crested weir." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 52, pp. 307-320.
- Park, M., and Rhee, D.S. (2010). "Development of discharge formula for broad crested side weir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 6, pp. 525-531.
- Sarkar, M.A., and Rhodes, D.G. (2004). "Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir." *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 15, pp. 215-219.
- USBR (2001). Water measurement manual. A water resources technical publication. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Third edition revised, p. 485.
- Weller, H.G. (2008). "A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flows. Technical Report No. TR/HGW/04.
- Wilcox, D.C. (1988). "Reassessment of the scale-determining equations for advanced turbulence models." *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1310.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., and Speziale, C.G. (1992). "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique." *Physics of Fluids A*. Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520.
- Zachoval Z., Mistrová, I., Roušar, Šulc, J., and Zubík, P. (2012). "Zone of flow separation at the upstream edge of a rectangular broad-crested weir." *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Vol. 40, No. 4, pp. 288-298.

paper number : 15-007

Received : 26 January 2015

Revised : 3 March 2015

Accepted : 3 March 2015