



Flume experiments for studying the effects of submergence on three-dimensional flow structure around a spur dike

Lee, Jiyong^a · Jeon, Jeongsook^a · Kim, Youngkyu^a · Kang, Seokkoo^{a*}

^aDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

Paper number: 17-089

Received: 19 October 2017; Revised: 17 November 2017 / 24 November 2017; Accepted: 24 November 2017

Abstract

In this study, we conducted flume experiments to investigate the three-dimensional flow structures around a half-submerged spur dike in a straight open channel flume. The experiments were carried out under the two different Froude numbers, 0.10 and 0.18. The results were compared with the previous experimental result conducted for non-submerged spur dike. Three-dimensional instantaneous velocities were measured using Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) and water elevation data were collected using ultra sonic distance sensor. The results show that submergence conditions of the spur dike largely influence the three-dimensional flow structures around a spur dike.

Keywords: Spur dike, Open channel, Three-dimensional flow, Secondary flow, ADV

수제의 잠김 정도에 따른 3차원 흐름 구조 변화에 관한 실험 연구

이지용^a · 전정숙^a · 김영규^a · 강석구^{a*}

^a한양대학교 공과대학 건설환경공학과

요 지

본 연구에서는 직선 개수로 내 설치된 50% 잠김 수제 모형 주위에서 발생하는 3차원 흐름 현상 연구를 위한 수리모형실험이 수행되었다. 수리 모형실험은 두 가지 Froude 수($Fr \approx 0.10$ 와 $Fr \approx 0.18$)에서 수행되었다. 그리고 본 실험 결과를 잠기지 않은 수제 실험결과(Jeon and Kang, 2016)와 비교하여 수제의 잠김 흐름 발생에 따른 흐름 변화를 관찰하였다. 시간평균유속과 난류에너지를 구하기 위해 초음파 유속계를 이용해 3차원 실시간 유속을 측정하였고 시간평균 수위를 측정하기 위해 초음파 거리 센서를 이용해 실시간 수위를 측정하였다. 수제의 잠김 흐름 발생은 3차원 유속분포에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심용어: 수제, 개수로, 3차원 흐름, 이차류, 초음파 유속계

1. 서 론

수제는 하천의 흐름으로부터 제방과 하안을 보호하는 치수 목적뿐 아니라 주운을 위한 수심 확보나 취수문 지점에서 유량 확보를 위한 이수 목적으로도 사용될 수 있다. 또한 수제는 하천 내 웅덩이(pool)를 생성해 생물 서식지 확보에도 이용될

수 있어 하천의 환경 기능 향상을 위한 목적으로도 적용 가능한 다용도 구조물이다. 수제는 하천 관리 측면에서 여러 장점을 가진 구조물이지만 국내 하천에 적용된 사례는 많지 않다. 이는 현재 국내의 수제 설치에 관한 설계 기준이 정립되어 있지 않기 때문이다. 현재 국내에서 이용되는 수제 설치 기준은 유럽이나 일본에서 제안된 경험공식에 근거하고 있으나 이러한 공식들에 대한 검증이 제대로 이루어지지 않았다는 문제점이 존재하며, 향후 신뢰도 높은 수제설계방법을 개발하기 위해서는 다양한 흐름조건과 수제형상 변화에 따른 수제 하류

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2220-4305
E-mail: kangsk78@hanyang.ac.kr (S. Kang)

3차원 흐름현상의 규명에 대한 연구가 필요하다.

기존 국내의 수제 관련 연구를 살펴보면, Kang *et al.* (2005)은 수제길이와 수제의 투과율변화에 따른 수제 선단부 유속 (tip velocity)과 재순환영역(recirculation)의 변화를 관찰하여 투과율에 대한 수제선단 유속과 수제길이의 관계식을 도출하였고, Yeo *et al.* (2006)은 수제길이와 유입흐름조건(Froude 수)변화에 따라 흐름중심선(thalweg line)과 흐름분리영역(separation area)이 변화하는 양상을 분석하였다. Kang *et al.* (2009)은 경사수제 주변에서 발생하는 흐름 특성을 관찰하기 위해 바닥길이가 일정하고 높이가 다른 경사수제를 적용하여 수리모형실험을 수행하였다. 이 실험에서 주흐름 영역의 최대 유속은 접근 유속의 1.45~2.1배로 수제의 경사에 따라 변화가 크지 않았다. 하지만 수제의 경사에 따른 제방부 최대 유속은 접근 유속의 -0.1~0.6배로 변하며 경사수제 하류의 역류 속도가 눈에 띄게 감소하였다. 또한 Kim *et al.* (2014)는 상향수제의 설치간격과 유입 흐름조건에 따라 변하는 수제 선단부의 최대 유속과 재순환영역의 변화양상을 관찰하였다. 그 결과, 적절한 수제 간격이 수제길이비의 4~6배 사이라는 결과를 도출하였다. 앞서 언급한 수리모형실험들은 Large Scale Particle Image Velocimeter (LSPIV)기법을 이용해 수제 주위 흐름의 수면에서 2차원 유속 분포 측정에 초점을 맞추었다. 그리고 Kang *et al.* (2005)과 Yeo *et al.* (2006)은 접근 단면 등의 제한된 지점에서 ADV를 이용한 3차원 유속 측정을 추가적으로 수행하였다. 위와 같은 실험 방법은 수면에서 넓은 범위의 2차원 유속분포를 관찰하기에는 용이하지만 수제 하류에서 발생하는 복잡한 3차원 흐름구조를 규명하기에는 한계가 있다. 이를 극복하고자 최근에는 수제 주변에서 발생하는 흐름의 3차원적 특성을 규명하기 위한 연구가 수행되고 있다. Lee *et al.* (2015)은 ADV를 이용해 만곡수로 내 설치된 수제가 흐름방향 유속 및 난류에너지 분포에 미치는 영향을 조사하였고, 수제 설치로 인해 최대 유속과 이차류(secondary flow)의 발생위치가 변한다는 것을 확인하였다. 또한 Jeon and Kang (2016)은 ADV를 사용해 잠기지 않은 수제 주위의 난류흐름 특성을 관찰하였다. 연구결과, 유입흐름의 Froude 수는 무차원 유속 및 난류성분의 분포에는 큰 영향을 미치지 못하였지만 그 크기에는 영향을 준다는 것을 밝혀냈다.

국외에서 수행된 연구의 경우, Rajaratnam *et al.* (1983)은 직선수로 내 잠기지 않은 수제를 설치하고 피토크를 이용해 수제길, 유입흐름의 Froude 수, 바닥 거칠기(roughness)에 따른 수제 하류 흐름변화를 관찰하였다. 이 실험 연구를 통해 최대 전단속도($u^* = \text{shear velocity}$)는 수제 상류의 선단부에서 발생하고, 이는 접근 흐름의 바닥전단응력에 3~5배라는 사

실을 밝혔다. Kuhnle *et al.* (1999)는 직선수로 내 사다리꼴 모양의 잠긴 수제를 설치하고 수제길, 유입흐름의 바닥전단응력과 수심/수제높이 비를 변화시키며 피토크를 이용해 수제 하류 유속을 측정하였다. 이 실험에서 유입흐름의 바닥전단응력은 유입흐름의 유속분포 변화를 통해 달리 할 수 있었고 이는 유입흐름의 유량조건과 유입수심을 조절하여 이루어졌다. 이 실험은 수심/수제높이 비가 클수록 최대 세굴 영역이 수제 하류로 이동되고 최대 세굴 깊이는 증가한다는 결론을 도출했다. Duan (2009)과 Duan *et al.* (2009)는 고정상 및 이동상의 직선수로 내 잠기지 않은 수제모형을 설치하고 ADV를 이용해 수제 상하류 3차원 유속을 측정하였다. 측정된 자료를 바탕으로 수제 하류의 평균 유속, 레이놀즈 응력, 그리고 난류에너지 및 바닥전단응력 분포를 검토하였으며, 레이놀즈 응력 값을 바탕으로 최대바닥전단응력을 추산하였다. 실험연구 결과, Duan (2009)는 고정상의 직선수로내 설치된 수제로 인해 수제 선단부에서 최대 바닥전단응력이 나타나고 그 크기는 유입흐름에서 관찰되는 바닥전단응력의 3배가 된다는 것을 밝혔다. 또한 Duan *et al.* (2009)은 고정상 및 이동상의 직선수로내 설치된 수제로 인한 바닥전단응력분포 양상이 서로 다르다는 것을 증명하였다.

실험연구 이외에 수치해석적 방법을 이용하여 수제 주위의 흐름 현상을 연구한 사례도 존재한다. Nagata *et al.* (2005)는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)방정식과 $k-\epsilon$ 난류모델이 결합된 3차원 수치모형을 이용해 직선수로 내 잠기지 않은 수제 하류에서 관찰되는 흐름을 계산하였고, 흡입자들의 운동방정식을 이용해 수제 주위 바닥형상 변화를 묘사하였다. 또한 Jia *et al.* (2005)와 Kuhnle *et al.* (2008)는 3차원 수치모형인 CCE3D 모델을 이용하여 만곡수로와 직선수로 내 설치된 잠긴 수제 하류에서 발생하는 3차원 흐름 현상을 해석하였다. Jia *et al.* (2005)는 만곡수로 내 만곡의 정점에 설치된 잠긴 수제로 인해 만곡수로 내 이차류의 회전방향이 바뀌는 현상을 관찰하였고, 이는 주운 시 선박의 운항을 돕는데 적용될 수 있다고 주장하였다. 또한 Kuhnle *et al.* (2008)는 직선수로 내 잠긴 수제에서 흐름방향 재순환영역이 6L까지 관찰되고 최대바닥전단응력은 접근 유속의 바닥전단응력의 2.7배로 나타난다는 것을 보여주었다. McCoy *et al.* (2006, 2007, 2008)는 Large Eddy Simulation (LES) 해석을 이용해 잠기지 않은 군수제와 잠긴 군수제에서 나타나는 3차원 재순환영역(recirculation)의 발생영역을 관찰하였다. 이 연구들을 통해 잠긴 군수제에서 관찰되는 하류 재순환영역의 길이(수제 길이의 2배)가 잠기지 않은 군수제의 하류 재순환영역의 길이(수제 길이의 6.5배)보다 짧다는 것을 확인할 수 있었다.

그리고 Koken (2008a, 2008b)은 잠기지 않은 단일 횡수제가 설치된 직선수로에서 발생하는 3차원 흐름 특성을 LES모형을 이용하여 분석하였는데, 평평한 고정상의 바닥 조건과 세굴로 침식된 후 평형을 이룬 바닥 조건을 적용하였다. 이들 연구에서는 수제 상류에서 연직방향으로 하강하여 수제 선단부 하단을 지나는 말발굽와(horseshoe vortex)를 시각화 하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 기존의 사례들은 잠기지 않은 상태의 수제 하류 흐름구조 변화에 주안점을 두었다. 하지만 수제는 하천의 수위 변화에 따라 평균기에는 잠기지 않고, 홍수기에는 잠기는 수공구조물이며 잠긴 상태의 수제는 잠기지 않은 상태의 수제와 비교했을 때 여러 다른 특성을 보인다. 우선, 잠기지 않은 수제는 잠긴 수제보다 구조물 주변에 큰 전단응력을 유발하고 증가된 전단응력은 수제의 안정성을 저해한다. 그리고 잠기지 않은 수제는 하천 내 큰 압력구배를 유발하여 수제 하류 흐름의 회복을 방해하고 하천 흐름에 큰 영향을 미친다. 따라서 효과적인 수제 설치를 위해서는 잠긴 상태의 수제 하류 3차원 흐름변화에 대한 연구가 필수적이다. 하지만 잠긴 수제와 관련된 기존의 실험 연구(Kuhnle et al., 1999)는 피토크를 이용해 수로 중심에서만 유속을 측정하였다는 점에서 제한적이고, 수치해석적 방법을 이용한 기존의 연구(Kuhnle et al., 2008) 또한 수치해석 모델의 검증에 위해 다양한 수제 설치조건에 따른 측정 유속자료가 필요하다.

본 연구에서는 수면 아래 50% 잠긴 수제 상하류 지점에서의 3차원 유속측정을 통해 Froude 수($Fr \approx 0.10$ 와 $Fr \approx 0.18$)가 수제 상하류 흐름에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 본 실험 결과를 잠기지 않은 수제 실험결과(Jeon and Kang, 2016)와 비교하여 수제의 잠김 흐름 발생에 따른 흐름 변화를 관찰하였다. 흐름 분석에는 시간평균 유속분포 및 이차류 흐름의 양상, 난류에너지 분포, 그리고 수제 설치로 인한 하천 내 수위 변화 양상이 포함되었다.

2. 실험조건

본 실험은 길이 18 m, 폭 0.900 m의 실험용 개수로에서 수행되었다. 수제 모형은 두께 4 cm, 길이 0.300 m의 아크릴로 제작하였으며, 잠기지 않은 수제와 수면 아래로 50% 잠긴 수제 모형은 0.216 m, 0.108 m의 잠긴 높이(submerged-height)를 갖는다. 수제모형은 수로 하류 끝단으로부터 9 m 상류 지점에 설치하였다. Figs. 1 and 2는 수로 내 설치된 수제 모형을 3차원, 그리고 평면도와 측면도를 포함하는 2차원으로 도식화 하여 본 연구의 실험 조건을 명시하였다.

유속은 Nortek사의 Vectrino- II 초음파 유속계(Acoustic Doppler Velocimetry, ADV)를 이용하여 측정하였다. Vectrino- II는 기기 끝단 중심부로부터 5.0~5.5 cm 떨어진 지점에서 가장 신뢰도 높은 유속을 얻으므로 이를 고려하여 100 Hz의

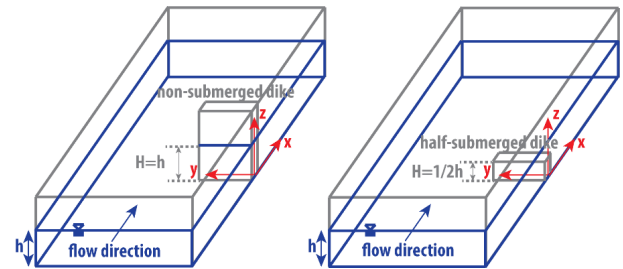


Fig. 1. Three-dimensional view of the experiments: non-submerged dike (left) and half-submerged dike (right)

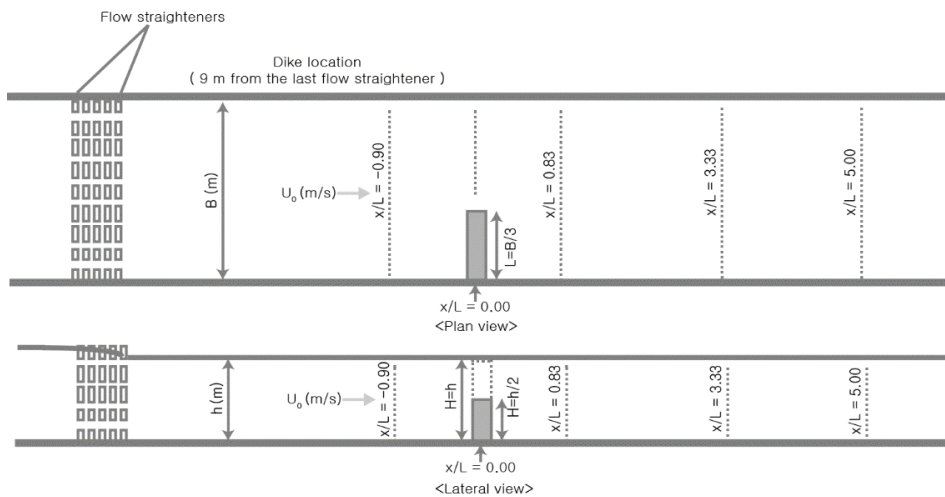


Fig. 2. Two-dimensional view of the experiments



Fig. 3. ADV (left) and ultrasonic distance sensor (right)

주기로 측정하였으며, 각 측정점의 흐름 특성을 감안하여 5~10 분 동안 약 3~6만개의 3차원 유속자료를 시간변화에 따라 저장하였다. ADV를 이용한 유속 측정 시 발생하는 노이즈는 Parshes *et al.* (2010)이 제안한 방법으로 제거하여 분석에 사용한 유속 측정값의 정확도와 신뢰도를 높였다. 수위는 Microsonic사의 mic+130 초음파 거리센서(ultrasonic distance sensor)를 이용하여 25 Hz의 주기로 1분 동안 측정하였으며, 각 측정점에서 1분 동안 1500개의 실시간 수위자료를 시간변화에 따라 수집하였다. 초음파수위계의 퍼짐 현상을 고려하여 수위계는 접근 단면 ($x = -2.00$ m, $y = 0.45$ m)의 수면으로부터 약 0.40 m 떨어진 지점에서 측정하였다(mic+130의 작동 범위 = 0.20~1.30 m). 수위 측정 시 발생한 노이즈는 상자그림(boxplot)을 이용한 이상점(outlier) 제거로 처리하였다. 여기서 상자그림은 측정자료의 중앙값(median)을 기준으로 ± 1.5 IQR를 벗어나는 값들을 이상점으로 취급하는 방법(IQR = 자료의 3사분위값 - 1사분위값)이다. Fig. 3은 본 실험에서 이용

한 ADV와 초음파 거리센서를 나타낸다.

본 실험에서는 수로 내 50% 잠긴 수제를 설치하고 Froude 수를 조절($Fr \approx 0.10$ 와 $Fr \approx 0.18$)하여 두 가지 조건(case 3, case 4)에서 유속과 수위를 측정하였다. 이를 통해 Froude 수에 따른 수제 주위의 흐름 현상 차이를 관찰하였다. 이와 더불어, 잠기지 않은 수제를 이용한 Jeon and Kang (2016)의 연구 결과(case 1, case 2)와 비교 분석을 했고, 이 분석 자료를 바탕으로 수제의 잠김 흐름이 수제 하류에 미치는 영향을 알아보 고자 하였다. 이와 같은 실험 조건은 Tables 1 and 2를 통해 명료하게 정리하였다. 또한, 본 실험 과정과 결과를 효율적으로 나타내기 위해 Fig. 1과 같이 좌표계를 설정하였다. 수제 모형이 수로에 부착된 위치에서 수제 모형과 수로 바닥, 수로 벽면이 만나는 지점을 기준 원점($x = 0, y = 0, z = 0$)으로 선정하고 흐름 방향을 x축, 수로 횡단 방향을 y축, 연직 방향을 z축으로 지정하였다. 본 연구에서 수행한 잠긴 수제의 경우(case 3, case 4), 유속 측정은 흐름 방향에 대해 $x = -0.270 \sim 1.500$ m 구간에서 총 5개 횡단면에서 이루어졌으며, Jeon and Kang (2016)의 연구에서 관찰된 말발굽와(horseshoe vortex), 이차류(secondary flow) 등의 흐름 특성이 발생하는 위치를 고려하여 선정하였다. 각 횡단면에서 횡방향 유속 측정 지점은 $y = 0.100 \sim 0.800$ m 구간에서 0.100 m 간격으로 8개 지점을 채택하였다. 연직 방향에 대한 유속 측정점의 경우 $z = 0.020 \sim 0.140$ m의 범위에서 5개 지점을 채택하였다. Fig. 4는 잠긴 수제의 경우에 대한 측정점을 x-y평면과 y-z평면에서 명료하게 표시하였으며, 이전 연구에 관한 실험 조건 및 결과는 Jeon

Table 1. Geometrical parameters of the experiments

Cases	Spur dike				Flume			
	Condition	Submerged -height (H) [m]	Length (L) [m]	Thickness (t) [m]	Length (L_f) [m]	Width (B) [m]	Height (H_f) [m]	Tail gate depth (H_t) [m]
Case 1	Non-submerged	0.216	0.3	0.04	18	0.9	0.4	0.156
Case 2		0.216	0.3	0.04				0.122
Case 3	Half-submerged	0.108	0.3	0.04				0.156
Case 4		0.108	0.3	0.04				0.122

Table 2. Flow parameters of the experiments

Cases	Froude number (Fr)	Discharge (Q) [m^3/s]	Mean velocity (U_0) [m/s]	Approaching flow depth (h) [m]
Case 1	0.10	0.0278	0.144	0.215
Case 2	0.18	0.0528	0.267	0.220
Case 3	0.10	0.0278	0.144	0.215
Case 4	0.18	0.0528	0.270	0.217

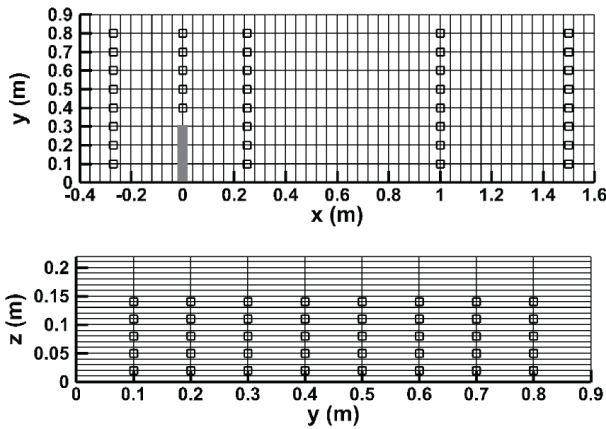


Fig. 4. Velocity measurement locations

and Kang (2016)의 논문을 참고하기 바란다. 한편, 수위는 $\frac{y}{B} = 0.33$ (the spur dike tip)를 따라 흐름방향으로 이동하면서 개별 측정하였고, $x = -2 \sim 6$ m의 구간에서 총 62개 횡단면을 대상으로 측정하였다. x방향 수위 측정점의 간격은 각 지점의 수위 변화 양상을 고려하여 결정하였다.

유속과 수위 측정 시간을 검증하기 위해 주요 측정점에서 t초 동안의 유속 및 수위 특성 값의 누적 평균 변화를 관찰하였다. 유속의 경우, 수제 직하류 횡단면에서 가장 복잡한 흐름이 발생될 것으로 예상되어 case 1, case 2는 $x = 0.250$ m, $y = 0.400$ m, $z = 0.005$ m에서 측정된 자료를, case 3, case 4는 $x = 0.250$ m, $y = 0.400$ m, $z = 0.020$ m에서 측정된 자료를 이용해 분석하였다. Figs. 5(a) and 5(b)는 흐름 방향 유속과 난류에너지의 시간에 따른 누적 평균 변화를 나타낸다. Figs. 5(a) and 5(b)에서 알 수 있듯이, 모든 유속 특성 값의 누적평균은 case 1, case 2의 경우 600초, case 3, case 4의 경우, 300초에서 일정한 값을 갖는다. 따라서 본 실험의 유속 측정시간은 수제 하류에서 관찰되는 복잡한 3차원 흐름의 평균값을 측정하기에 충분한 시간

이라고 결론지을 수 있다. 또한, 수위는 수제 직하류 횡단면에서 가장 큰 변화를 보일 것으로 기대되어 모든 경우 $x = 0.050$ m, $y = 0.300$ m인 지점의 자료를 이용해 분석하였다. Fig. 5(c)는 시간에 따른 측정 수위의 누적 평균 변화이다. Fig. 5(c)에서 확인할 수 있듯이, 모든 경우 60초에서 일정한 수위 값을 갖는 것으로 보아 본 실험의 수위 측정시간은 수제 주변의 평균 수위를 측정하기에 충분한 시간이라는 것을 알 수 있었다.

3. 실험결과

3.1 시간평균유속

각 지점에서 5~10분 간 측정된 순간 유속을 시간에 대해 평균하여 시간평균유속(U, V, W)을 산정하였다. 시간 평균 유속은 각 지점에서 5~10분 간 측정된 순간 유속을 시간에 대해 평균하여 산정하였으며, 접근 단면($x = -2$ m)의 수심과 수로 너비, 그리고 유량조건으로 계산한 접근 단면 평균 유속(U_0)을 이용해 무차원화 하였다. 실험 결과를 효율적으로 나타내기 위하여 공간좌표(x, y, z)는 각각 수제 길이(L), 수로 너비(B), 접근 단면의 평균 수심(h)으로 무차원화 하였다.

Fig. 6은 흐름 방향에 대한 무차원 시간평균 유속($\frac{U}{U_0}$)의 분포이다. Fig. 6에서 수제 하류부 $\frac{U}{U_0}$ 값은 수제의 잠김 흐름 발생에 따라 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. 재순환영역은 수제 설치로 인한 압력 변화에 의해 수제 하류에서 발생하는 역방향 흐름 유속($\frac{U}{U_0} \leq 0$)이 관찰되는 구간으로 Fig. 6에서 파란색 영역으로 표시된다. 잠기지 않은 수제에 대한 경우 (case 1, case 2), $\frac{U}{U_0} \leq 0$ 인 흐름이 수제 하류의 모든 유속 측정

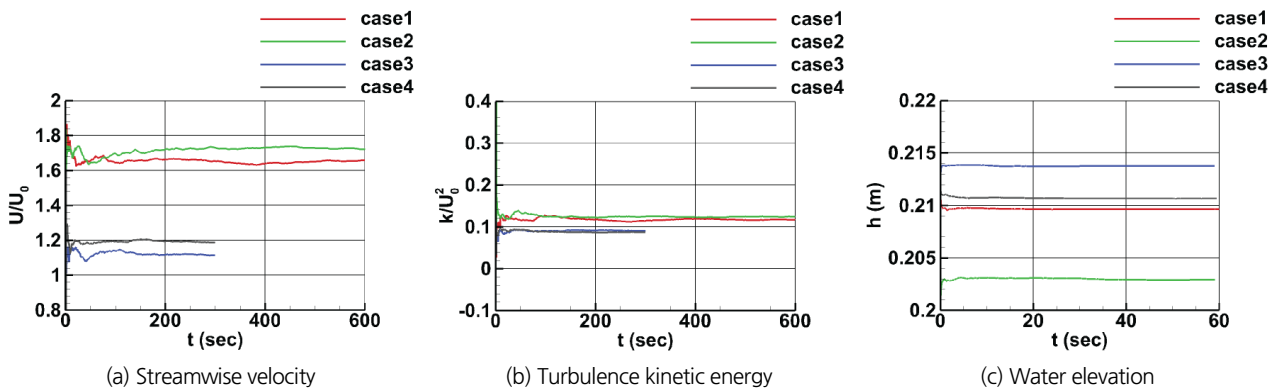


Fig. 5. Convergence of velocity and water depth measurements

횡단면에서 관찰되었다. 반면, 잠긴 수제에 대한 경우(case 3, case 4)에는 이러한 흐름이 수제 직하류부 횡단면인 $\frac{x}{L} = 0.83$ 에서만 관찰되고 그 이상의 하류 횡단면에서는 관찰되지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 잠긴 수제의 경우, 수제를 월류하는 흐름과 수제 선단부를 돌아나가는 흐름이 상호작용하면서 흐름의 혼합(mixing)을 촉진시켜 수제가 잠기지 않은 경우에 비해 수제 하류부 재순환영역이 짧게 나타나는 것으로 보인다.

Fig. 7은 횡방향에 대한 무차원 시간평균유속($\frac{V}{U_0}$)의 분포이다. 앞서 본 $\frac{U}{U_0}$ 의 경우와 마찬가지로 Froude 수보다 수제의 잠김 흐름이 횡방향 흐름 구조에 미치는 영향이 훨씬 크다는 것을 확인할 수 있다. 특히, 수제 설치 단면($\frac{x}{L} = 0.00$)을 비롯하여 수제에 인접한 상하류 단면($\frac{x}{L} = -0.90, 0.83$)에서의 분포가 수제의 잠김 흐름의 발생에 따라 매우 큰 차이를 보이는

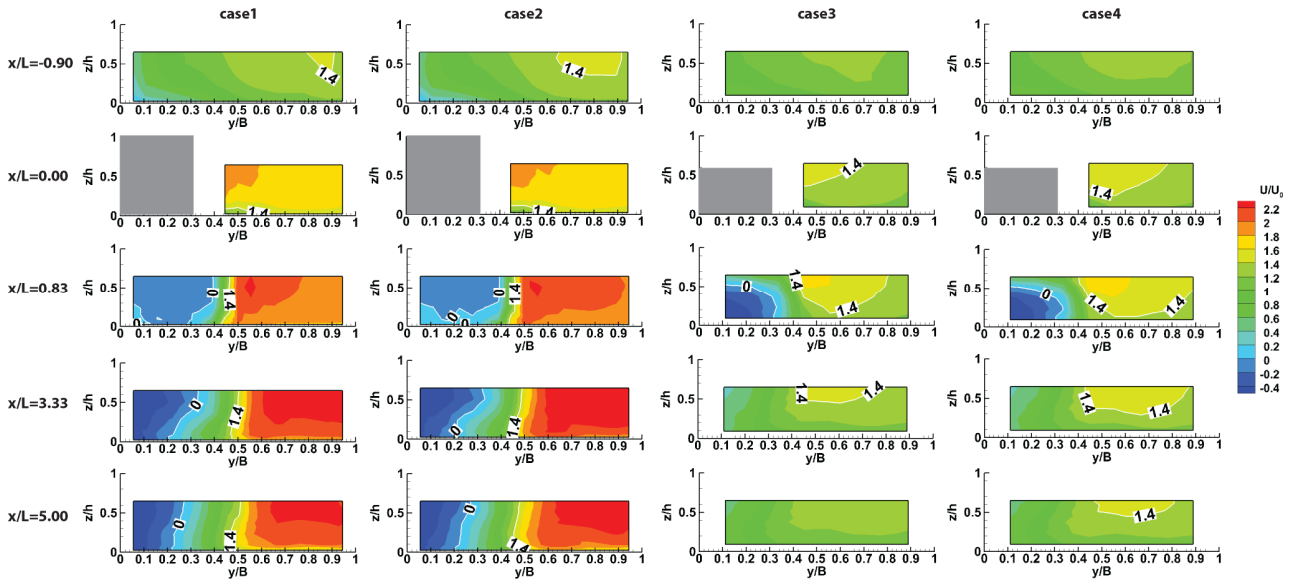


Fig. 6. Time-averaged streamwise velocity contours

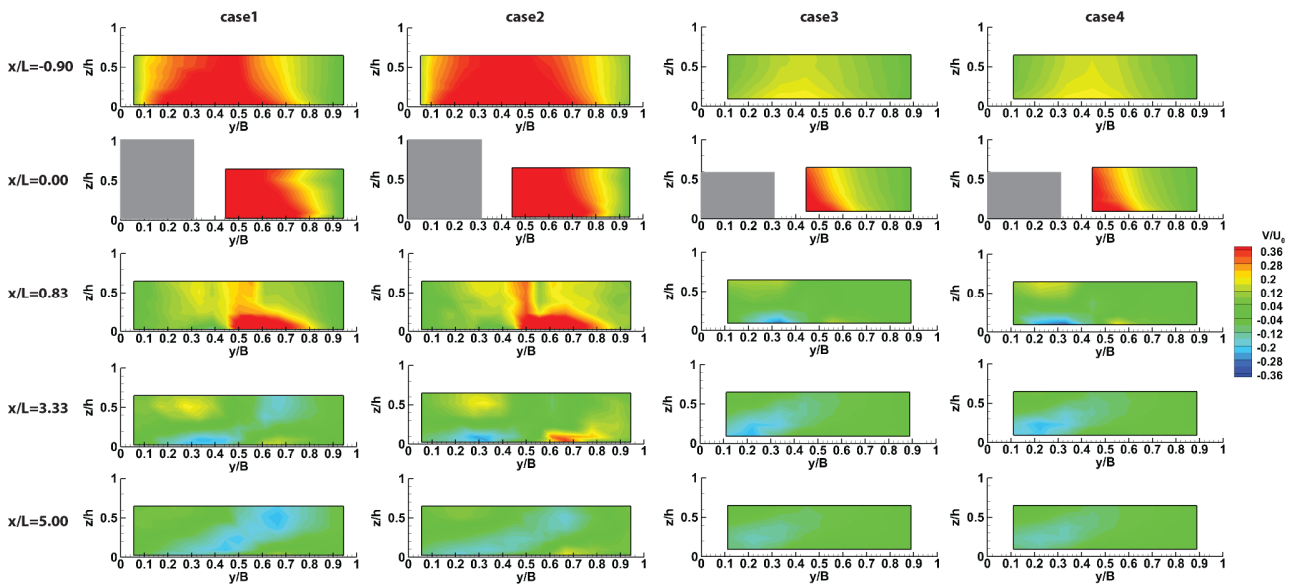


Fig. 7. Time-averaged spanwise velocity contours

데, 이는 수제에 의해 감소하는 흐름 단면적의 차이와 흐름이 지나는 열린 공간(open area)의 위치 차이 때문이다. 수제가 잠기지 않은 경우(case 1, case 2), 모든 흐름이 수제 선단부를 횡방향으로 돌아나간다. 그러나 잠긴 수제의 경우(case 3, case 4), 수제 선단부를 횡방향으로 돌아나가는 흐름과 수제를 월류하는 종방향 흐름이 공존한다. 이로 인해 두 흐름이 상호작용하여 수제 선단부를 돌아나가는 횡방향 흐름이 상쇄되는 효과가 발생하므로 Fig. 7과 같이 수제의 잠김 흐름의 발생에 따라 $\frac{V}{U_0}$ 의 값이 크게 차이 나는 것을 볼 수 있다. $\frac{V}{U_0}$ 분포에서 발견되는 흥미로운 점은 수제 하류 측 단면에서 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 이차류가 나타나는 것이다 (Fig. 9). 이차류는 수제가 잠기지 않은 경우(case 1, case 2),

$\frac{x}{L} = 3.33$ 횡단면에서 발생하였고 잠긴 수제의 경우(case 3, case 4), $\frac{x}{L} = 0.83$ 횡단면에서 관찰되었다. 본 연구에서는 흐름방향 측점이 충분치 않아 이차류의 발생시점을 정확히 알 수는 없었지만 잠기지 않은 수제의 경우 이차류가 더욱 하류 측 단면에 존재한다는 사실을 확인할 수 있었다. 자세한 사항은 Fig. 9에서 설명하고자 한다.

Fig. 8은 연직방향에 대한 무차원 시간평균유속($\frac{W}{U_0}$)의 분포이다. Fig. 8에서 가장 눈에 띄는 차이는 수제의 잠김 여부에 따라 수제 선단부에서 발생하는 반대 방향의 연직 유속이다. 잠기지 않은 수제의 경우(case 1, case 2), 수제 설치 단면($\frac{x}{L} = 0.00$)에서 수면에서 바닥으로 향하는 흐름($\frac{W}{U_0} < 0$)이

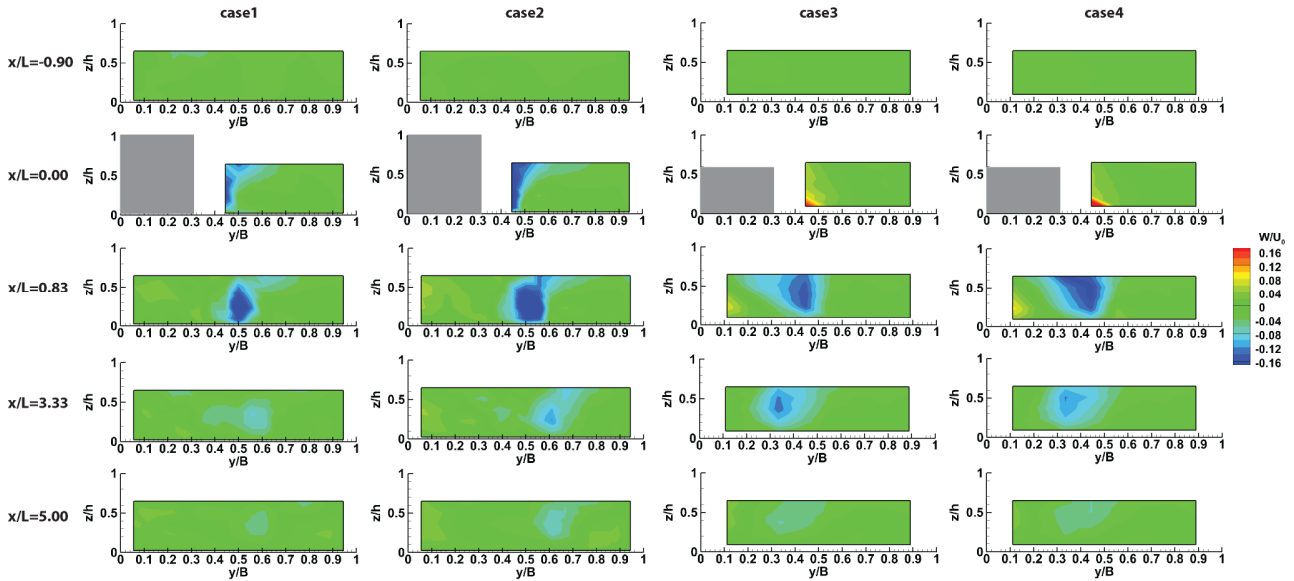


Fig. 8. Time-averaged vertical velocity contours

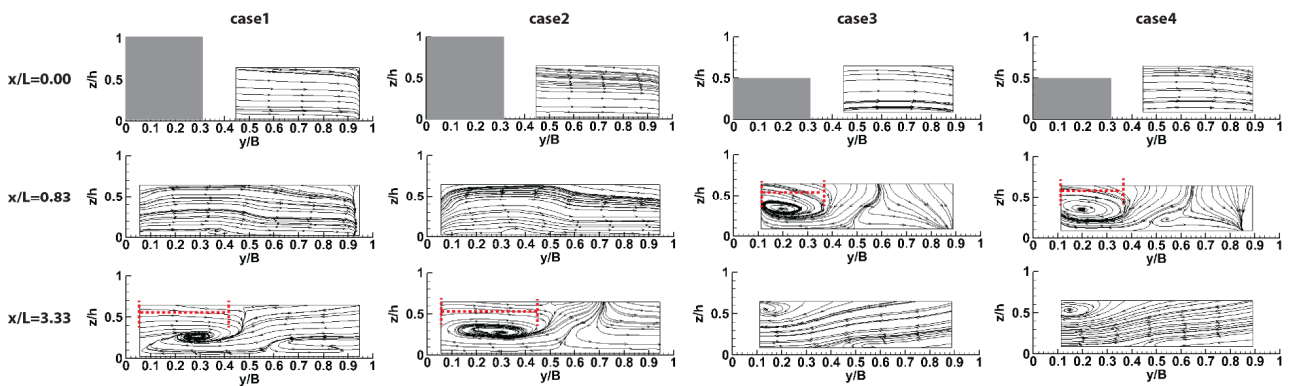


Fig. 9. Streamlines on the yz plane

발생한다. 반면 잠긴 수제의 경우(case 3, case 4), 수제 설치 단면 하단부에서 위로 솟아오르는 흐름($\frac{W}{U_0} > 0$)이 발생한다. 이는 수제 상류에서 발달하여 연직 방향으로 하강한 후 수제 선단부 하단을 돌아나가는 말발굽와(horseshoe vortex)가 수제의 잠김 여부에 따라 다르게 발생되기 때문으로 추측된다. 하지만 흐름방향 축점의 수가 충분치 않아 수제 설치 단면에서 관찰되는 반대 방향 연직 유속에 대한 정확한 원인을 규명하기 어려웠다. 따라서 추후 추가 유속측정을 통해 이에 대한 정확한 원인을 규명할 필요가 있다. Fig. 8에서 보이는 또 다른 흐름 특징은 하강 흐름 중심부(core)의 이동이다. 잠기지 않은 수제의 경우, 수제 하류($\frac{x}{L} = 0.83 \sim 5.00$)에서 관찰되는 하강흐름은 제방 외측($\frac{y}{B} = 1.00$ 을 향하는 방향)으로 이동한다. 반면, 잠긴 수제의 경우, 수제 하류에서 관찰되는 하강흐름은 제방 내측($\frac{y}{B} = 0.00$ 을 향하는 방향)으로 이동한다.

Fig. 9는 유속 측정 횡단면(y-z평면)에서 V 와 W 가 이루는 유선(streamline)을 나타낸다. 수제 하류부, 수제 모형이 부착된 수로 측($\frac{y}{B} = 0.00$ 측)에서 반시계방향(흐름방향을 회전축의 양의 방향으로 가정)으로 회전하는 이차류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이차류 흐름이 재순환 영역에서 관찰되는 것으로 미루어 보았을 때, 재순환영역에서는 재순환 흐름과 이차류가 함께 발생하여 복잡한 3차원 회전 흐름이

형성되는 것을 유추할 수 있다. Fig. 9에서 Froude 수의 차이로 인한 이차류 특성 변화는 찾을 수 없다. 반면, 수제의 잠김 흐름 발생에 따라 이차류의 발생 위치가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 잠기지 않은 수제의 경우, 잠긴 수제의 경우보다 이차류가 수제에서 더 먼 하류 측에서 관찰되고 이차류의 횡방향 범위가 더욱 크다. 이는 잠긴 수제의 경우, 수제를 월류하는 흐름이 재순환영역에서 강한 흐름의 혼합을 유발하기 때문이다. 따라서 수제의 잠김 흐름이 수제 하류에서 발생하는 이차류의 위치 및 범위에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2 난류 운동에너지

Fig. 10은 난류 운동에너지를 접근 단면의 단면평균유속(U_0)을 이용하여 무차원한 난류 운동에너지($\frac{k}{U_0^2}$) 분포이다.

Fig. 10을 통해 수제의 잠김 흐름 발생에 관계없이 수제의 선단부 바닥 부근($\frac{x}{L} = 0.00, \frac{y}{B} = 0.44 \sim 0.56$)에서 난류 운동에너지가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 수제 상류에서 발달하여 수제 선단부 하단을 돌아나가는 말발굽와(horseshoe vortex)와 수제 선단부에서 발달하는 분리전단층(detached shear layer)으로 설명할 수 있다. 말발굽와는 개수로 흐름에서 연직방향의 구조물을 설치하였을 때 구조물 상류 밑바닥에서 발생해 구조물 선단부 하단을 돌아나가는 와류인데, 이 때 말발굽와는 강한 난류에너지를 포함한다(Koken 2008b). 그리고 수제 선단부 하단에서 시작되는 분리전단층

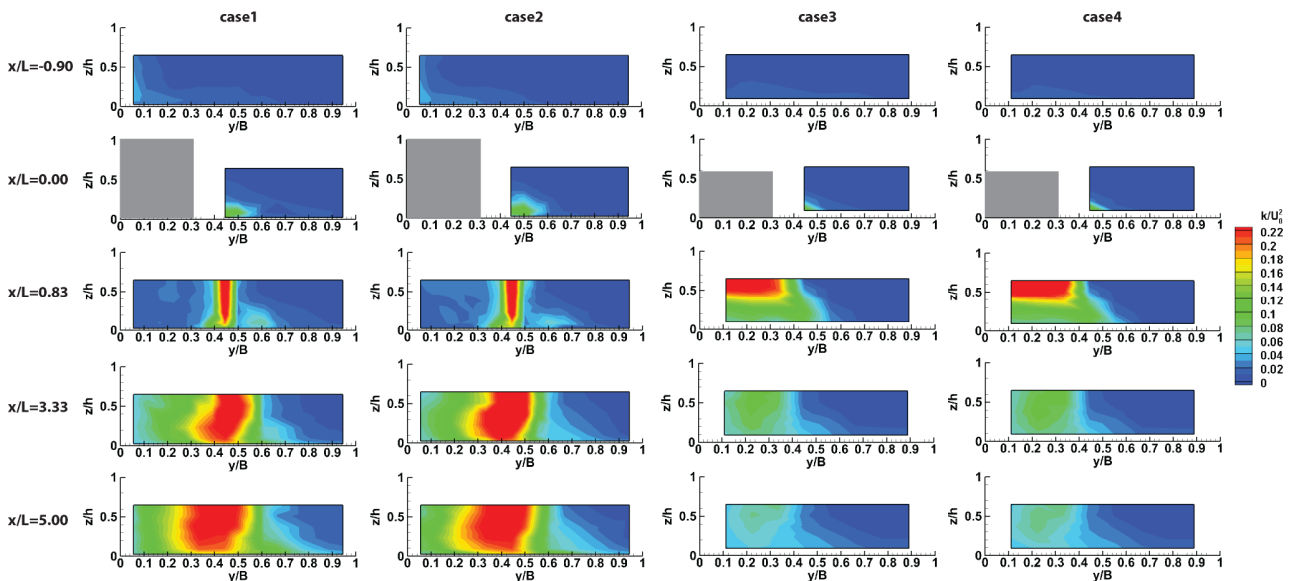


Fig. 10. Turbulence kinetic energy ($\frac{k}{U_0^2}$) contours

은 수제와 상호작용을 하며 시간에 따라 움직이는데, 이러한 움직임으로 수제 설치 단면에서 난류에너지가 증가하게 된다 (Koken 2008a).

또한 난류 운동에너지 분포를 통해 수제 하류에서 흐름의 혼합이 어떻게 일어나는지 유추해 볼 수 있다. 일반적으로 수제 하류에서 흐름은 수제 선단부로부터 발생하는 전단층에 의해 강한 난류에너지를 얻는다. 그리고 이 난류에너지는 수제 하류로 흐름이 진행하면서 운동량교환(momentum exchange)을 통해 주변 흐름으로 에너지를 전달한다 (Duan 2009, Duan et al. 2009). 잠기지 않은 수제의 경우, 수제 하류 흐름은 $\frac{x}{L}=0.83$ 에서 수제 선단부로부터 발생하는 전단층 ($\frac{y}{B}=0.40 \sim 0.50$, $\frac{z}{h}=0.00 \sim 0.67$)에 의해 강한 난류에너지를 얻는다. 그리고 수제 하류로 흐름이 진행함에 따라 횡방향의 운동량교환이 주로 이루어지며, 주흐름영역방향 ($\frac{y}{B}=1.00$ 을 향하는 방향)보다 재순환영역방향($\frac{y}{B}=0.00$ 을 향하는 방향)으로 운동량교환이 활발히 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 10 (case 1, case 2)의 $\frac{y}{B}=0.40 \sim 0.50$ 에서 관찰되는 빨간색 영역이 $\frac{x}{L}=3.33$ 에서 $\frac{x}{L}=5.00$ 으로 진행하며 좌안보다 우안으로 더욱 빠르게 퍼지는 것을 통해 확인할 수 있다 (좌안 및 우안은 흐름방향을 기준으로 함). 반면, 잠긴 수제의 경우, 수제 하류 흐름은 수제를 월류하는 흐름으로부터 발생하는 전단층($\frac{y}{B}=0.00 \sim 0.30$)에 의해 강한 난류에너지를 얻는다. 그리고 수제 하류로 흐름이 진행함에 따라 연직 방향의 운동량교환이 주로 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 10 (case 3, case 4)에서 큰 난류에너지를 갖는

영역이 $\frac{y}{B}=0 \sim 0.3$ 에서만 관찰되는 것으로부터 알 수 있다.

Fig. 10에서 유추할 수 있는 또 한가지 사실은 수제의 잠김 흐름 발생에 따른 하류 단면에서의 흐름 회복(recovery)이다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 잠기지 않은 수제의 경우, 수제 하류 전 범위($\frac{x}{L}=0.83 \sim 5.00$)에서 강한 난류에너지 영역(빨간색 영역)이 관찰된다. 이와는 다르게, 잠긴 수제의 경우, $\frac{x}{L}=0.83$ 에서만 강한 난류에너지 영역이 관찰된다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 잠긴 수제의 경우, 수제를 월류하는 흐름이 수제 선단부를 돌아나가는 흐름과 상호작용을 하며 흐름의 혼합을 촉진하고, 그 결과 잠긴 수제에서 보다 빠른 흐름의 회복이 이루어지는 것을 나타낸다.

본 실험결과, Froude 수는 수제 하류에서 관찰되는 흐름의 혼합 양상에 큰 영향을 끼치지 못했다. 하지만 수제의 잠김 흐름에 따라 운동량교환이 일어나는 방향과 혼합의 정도가 변할 수 있다는 사실을 알 수 있게 되었다.

3.3 단면별 최대 유속 특성의 변화

Fig. 11은 측정 단면별 유속 특성의 최댓값에 대한 흐름방향 변화를 나타낸다. Fig. 11(a)에서 관찰할 수 있듯이, 단면별 최대 흐름방향 유속은 Froude 수에 관계없이 수제의 잠김 흐름에 큰 영향을 받는다. 잠기지 않은 수제의 경우(case 1, case 2), $\frac{x}{L}=5.00$ 단면에서 $\frac{U_{max}}{U_0} \approx 2.30$ 의 값을 갖고 잠긴 수제의 경우(case 3, case 4), 동일한 횡단면에서 $\frac{U_{max}}{U_0} \approx 1.42$ 의 값을 갖는다. 따라서 잠김 흐름의 발생 영향으로 $\frac{x}{L}=5.00$ 단면에서 $\frac{U_{max}}{U_0}$ 값이 60% 감소하였다고 결론 내릴 수 있다.

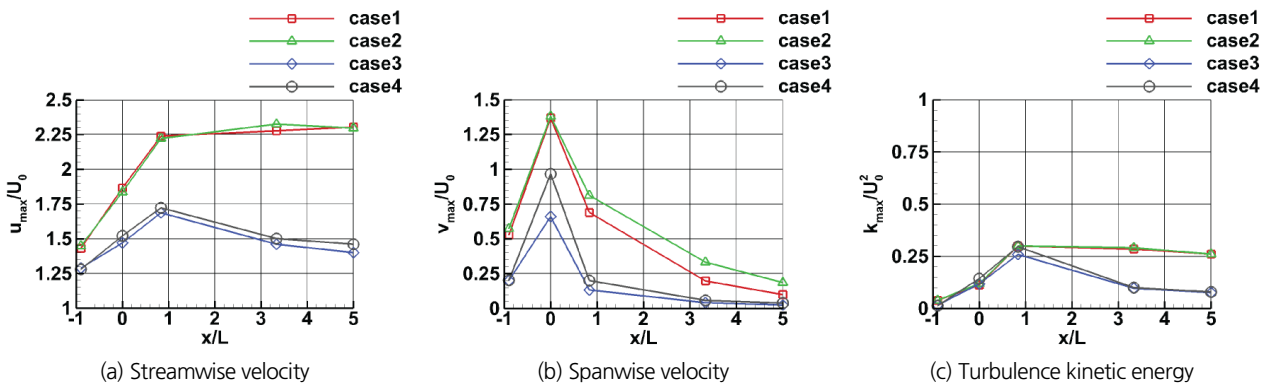


Fig. 11. Streamwise profiles of mean velocities and turbulence kinetic energy at the spur dike tip

Fig. 11(b)는 단면별 최대 횡방향 유속을 나타낸다. $\frac{x}{L} = 0.00$ 에서의 $\frac{V_{max}}{U_0}$ 는 앞서 언급한 수제를 돌아 나가는 흐름과 밀접한 관련이 있다. Fig. 11(b)에서 알 수 있는 사실은 잠기지 않은 수제(case 1, case 2)는 $\frac{x}{L} = 0.00$ 단면에서 Froude 수에 관계없이 $\frac{V_{max}}{U_0} \approx 1.37$ 의 값을 갖는다. 반면 잠긴 수제의 경우, Froude수가 0.10일 때(case 3) $\frac{V_{max}}{U_0} = 0.66$ 의 값을 갖고 Froude수가 0.18일 때(case 4) $\frac{V_{max}}{U_0} = 0.97$ 의 값을 갖는다. 결과적으로 잠긴 수제의 경우 Froude 수가 커짐에 따라 $\frac{V_{max}}{U_0}$ 값이 32% 증가한다. 이는 잠긴 수제에서 Froude 수 변화에 의해 수제를 돌아 나가는 흐름과 수제를 월류하는 흐름의 발생 양상이 달라지기 때문이라고 추측한다.

Fig. 11(c)는 단면별 최대 난류에너지의 변화 양상을 나타낸다. $\frac{U_{max}}{U_0}$ 의 변화 양상과 마찬가지로 $\frac{k_{max}}{U_0^2}$ 는 Froude 수에 관계없이 수제의 잠김 흐름에 큰 영향을 받는다. 잠기지 않은 수제의 경우(case 1, case 2), $\frac{x}{L} = 5.00$ 에서 $\frac{k_{max}}{U_0^2} \approx 0.26$ 의 값을 갖고, 잠긴 수제의 경우(case 3, case 4), 동일한 횡단면에서 $\frac{k_{max}}{U_0^2} \approx 0.08$ 의 값을 갖는다. 따라서 잠김 흐름의 발생 영향으로 $\frac{x}{L} = 5.00$ 에서 $\frac{k_{max}}{U_0^2}$ 값이 69% 감소한다. 이러한 수제 하류 단면에서의 난류에너지 감소는 Fig. 10에서 설명한 바와 같다.

3.4 수 위

Fig. 12는 수제의 잠김 흐름 발생과 유입흐름조건에 따라 수위가 변화는 양상을 보여준다. Fig. 12에서 Δh_{max} 는 case별 최대 수위와 최소 수위의 차이이다. 수위 변화 양상은 수제의 잠김 흐름 발생에 큰 영향을 받는 유속 흐름 특성과는 달리 유입 흐름 조건과 수제의 잠김 흐름 발생에 모두 큰 영향을 받는다. 우선 case 1과 case 2의 비교 그리고 case 3과 case 4의 비교로 큰 Froude수를 갖는 유입흐름은 수제 하류에서 수위 변화 ($\frac{\Delta h_{max}}{H}$)가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 case 1과 case 3의 비교 그리고 case 2와 case 4의 비교를 통해 수제의 잠김 흐름 발생에 따른 수위 변화 양상을 유추할 수 있다. 종합적으로 수위는 수제의 잠김 흐름보다는 유입흐름의 Froude수에 의해 크게 변하는 것을 알 수 있고 유입흐름이 큰 Froude수를 갖을 때 수제의 잠김 흐름이 수위 변화에 크게 영향을 미친다고 말할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수제 하류 3차원 흐름 구조의 변화를 관찰하기 위해 직선 수로의 우안(흐름방향기준)에 50% 잠긴 수제를 설치하였다. 그리고 두 가지 흐름 조건($Fr \approx 0.10$ 와 $Fr \approx 0.18$)에서 초음파 유속계를 이용해 u, v, w 에 대한 실시간 유속을 측정하였다. 측정된 유속자료를 통해 수제 상하류의 3차원 시간평균 유속 및 난류 운동에너지의 공간적인 변화 양상을 검토하였다. 이와 더불어, 잠기지 않은 수제를 이용한 Jeon and Kang (2016)의 연구 결과와 비교 분석하였고, 이를 통해 수제의 잠김 흐름 발생이 수제 하류에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 또한 초음파 수위계를 이용해 실시간 수위 자료를 측

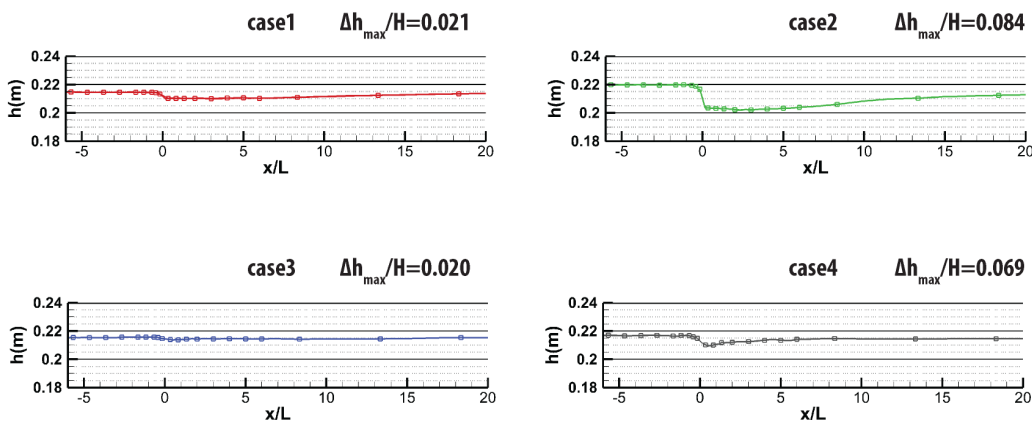


Fig. 12. Streamwise profiles of mean water depth at the spur dike tip

정하고 수제 주위 흐름의 수위 변화 양상도 관찰하였다. 그 결과, 수제 하류에서 발생하는 이차류 흐름 및 수제 설치로 인한 흐름의 혼합 패턴을 예측할 수 있었고 수위 변화 양상도 함께 검토할 수 있었다.

수제 하류 U, V, W의 분포를 통해 잠긴 수제의 경우 흐름방향 유속이 더욱 빨리 회복되는 것을 알 수 있었다. 또한 횡방향 및 연직방향 시간평균 유속의 분포와 y-z 평면상에서 관찰되는 유선을 바탕으로 수제 하류에서 반시계방향(흐름방향기준)으로 회전하는 이차류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 발생하는 이차류는 Froude 수에는 크게 영향을 받지 않으며 수제 높이가 낮아짐에 따라 흐름방향으로 수제 근처에서 발생하였다. 그리고 잠긴 수제의 경우 이차류의 횡방향 범위가 줄어들고 이차류의 중심 또한 $y = 0.00$ 을 향하는 방향으로 이동한다는 사실을 확인할 수 있었다.

수제 하류 난류에너지의 분포를 통해 수제 주위 흐름의 혼합이 수제의 잠김 흐름에 의해 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 잠기지 않은 수제의 경우, 수제 선단부를 돌아나가는 흐름에서 발달하는 전단층에 의한 강한 난류에너지 영역이 주로 횡방향으로 퍼지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 수제 하류에서 흐름의 혼합이 주로 횡방향으로 이루어진다고 볼 수 있다. 반면 잠긴 수제의 경우, 수제를 율류하는 흐름에서 발달하는 전단층으로부터 발생하는 강한 난류에너지 영역이 주로 연직 방향으로 퍼지는 것을 볼 수 있다. 그러므로 수제 하류에서 흐름의 혼합이 주로 연직 방향으로 이루어진다고 판단할 수 있다. 또한 흐름방향의 최하류 측정점($\frac{x}{L} = 5.00$)에서 난류에너지 크기가 잠긴 수제의 경우에 잠기지 않은 수제의 경우보다 작은 것을 관찰할 수 있었다. 이는 수제 설치로 인해 변화된 수제 하류 흐름의 압력 분포가 잠기지 않은 수제보다 잠긴 수제의 경우에 더 빠르게 회복되는 것을 보여준다. 따라서 잠긴 수제가 잠기지 않은 수제보다 수제 하류 흐름에 미치는 영향이 더 작다고 결론 낼 수 있었다.

수제 주위의 수위 변화 양상은 Froude 수와 수제의 잠김 흐름에 모두 크게 영향을 미쳤다. 특히 Froude 수가 높을수록 그리고 수제의 잠김 흐름이 발생하지 않았을 때 수제 상류와 하류에서의 수위 변화가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Froude 수가 작을 경우 수제의 잠김 흐름 발생에 따른 수위변화가 크지 않았고 Froude 수가 클 경우 수제의 잠김 흐름이 수위변화에 미치는 영향이 컸다. 따라서 수제 주위 수위는 수제의 잠김 흐름보다 접근흐름의 Froude 수에 더욱 큰 영향을 받다고 판단할 수 있다.

본 연구에서 흐름 분석은 수제 상하류 흐름방향의 5개 지점에서 측정된 3차원 유속을 바탕으로 이루어졌다. 하지만 이렇

게 제한된 3차원 유속장만을 가지고 수제 하류에서 관찰되는 복잡한 3차원 흐름구조 전체를 규명하기에는 한계가 있다. 따라서 추후 추가 단면 유속 측정을 통해 수제 주변과 수제 하류 넓은 범위에서 3차원 유속을 측정하고 흐름 특성을 분석한다면, 수제 설치로 인한 하천 내 흐름 변화에 대한 자세한 원인 규명을 할 수 있을 것이다. 이와 같은 연구 결과는 효과적인 수제 설계 기술에 필요한 정보를 제공해줄 수 있을 것이고 이를 통해 긍정적인 사회적, 경제적 효과를 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구개발사업의 연구비 지원(17CTAP-C133094-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Duan, J. G. (2009). "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 803-811.
- Duan, J. G., He, L., Fu, X., and Wang, Q. (2009). "Mean flow and turbulence around experimental spur dike." *Advances in Water Resources*, Vol. 32, No. 12, pp. 1717-1725.
- Jeon, J. S., and Kang, S. K. (2016). "Flume experiments for turbulent flow around a spur dike." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 8, pp. 707-717.
- Jia, Y. F., Scott, S., Xu, Y. C. Huang, S. L. (2005). "Three-dimensional numerical simulation and analysis of flows around a submerged weir in a channel bendway." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 8, pp. 682-693.
- Kang, J. G., Kim, S. J., and Yeo, H. K. (2009). "An experimental study on flow characteristic around inclined crest groyne." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 9, pp. 715-724.
- Kang, J. G., Yeo, H. K., and Kim, S. J. (2005). "An experimental study on tip velocity and downstream recirculation zone of single groyne conditions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 2, pp. 143-153.
- Kim, S. J., Kang, J. G., and Yeo, H. K. (2014). "An experimental study on flow characteristics for optimal spacing suggestion of 45° upward groynes." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 5, pp. 459-468.
- Koken, M., and Constantinescu, G. (2008a). "An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 1. Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 1-19.

- Koken, M., and Constantinescu, G. (2008b). "An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 2. Conditions corresponding to the final stage of the erosion and deposition process." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 1-16.
- Kunhnle, R. A., Alonso, C. V., and Shields, F. D. (1999). "Geometry of scour holes associated with 90° spur dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 9, pp. 972-978.
- Kunhnle, R. A., Jia, Y., and Alonso, C. V. (2008). "Measured and simulated flow near a submerged spur dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 7, pp. 916-924.
- Lee, D. H., Kim, S. J., and Kang, S. K. (2015). "An experimental study on the effect of a hydraulic structure on the three-dimensional flow in a meandering channel." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 635-645.
- McCoy, A., Constantinescu, G., and Weber, L. (2006). "Exchange processes in a channel with two vertical emerged obstructions." *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 77, No. 1-4, pp. 97-126.
- McCoy, A., Constantinescu, G., and Weber, L. (2007). "A numerical investigation of coherent structures and mass exchange processes in channel flow with two lateral submerged groynes." *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 5, pp. 1-26.
- McCoy, A., Constantinescu, G., and Weber, L. (2008). "Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 2, pp. 157-172.
- Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T., and Muramoto, Y. (2005). "Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 12, pp. 1074-1087.
- Parsheh, M., Sotiropoulos, F., and Porte-Agel, F. (2010). "Estimation of power spectra of acoustic-doppler velocimetry data contaminated with intermittent spikes." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 6, pp. 368-378.
- Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B. A. (1983). "Flow near groin-like structures." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 463-480.
- Yeo, H. K., Roh, Y. S., Kang, J. G., and Kim, S. J. (2006). "Variations of flow thalweg alignment and separation region around a groyne." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 4, pp. 313-320.