

# 만곡수로 내 수리구조물 설치에 따른 3차원 흐름 특성변화 실험 연구

## An Experimental Study on the Effect of a Hydraulic Structure on the Three-dimensional Flow in a Meandering Channel

이 동 훈\* / 김 수 진\*\* / 강 석 구\*\*\*

Lee, Dong Hun / Kim, Su Jin / Kang, Seokkoo

### Abstract

The objective of this study is to examine the three-dimensional turbulent flows occurring in the meandering channel with presence of a groyne. A series of laboratory experiments are carried out in a meandering channel with trapezoidal cross sections. The channel is a 24.4 m long, 1.5 m wide, and the bottom slope in the longitudinal direction is 0.02. Two cases with and without the groyne are considered in the experiment. Three-dimensional velocity fields are measured using an acoustic Doppler velocimetry (ADV) at approximately sixty locations in each cross section. The measured velocity fields are averaged in time, and the time-averaged flow revealed that the mean velocity magnitude along the outer bank of the channel was reduced significantly and the direction of the primary flow was directed toward the center of the channel due to the presence of the groyne.

**Keywords** : Groyne, Meandering channel, Bank erosion, Acoustic Doppler velocimeter (ADV), Turbulent flow, Secondary flow

### 요 지

본 연구에서는 하도 내 수제 형 수리구조물을 설치하였을 때, 만곡수로와 수충부에서의 흐름 양상 변화를 3차원 유속 측정을 통해 확인하였다. 연구를 위해 길이 24.4 m, 폭 1.5 m, 하상경사 2%의 만곡수로에서 실험을 수행하였다. 실험은 단일 수제의 설치 여부에 따라 크게 두 가지 경우로 나누어 수행하였다. 유속의 측정에는 3차원 초음파 유속계(Acoustic Doppler velocimeter, ADV)를 사용하였으며 각 단면 당 약 60개의 측정점을 선정하여 일정한 시간 동안 측정하였다. 측정된 유속들은 시간 평균하였으며, 각 단면에서의 측정결과를 연결하여 만곡수로의 수면유속을 파악하였다. 그 결과, 수제 설치로 인해 구조물 하류에 위치한 만곡부 외측에서의 유속이 현저하게 감소하였고 제방을 향했던 흐름의 방향이 내측으로 변화하였음을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 수리구조물, 만곡수로, 수충부 보호, 초음파유속계, 난류, 이차류

\* 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석사과정 (e-mail: leekddr@hanyang.ac.kr)

Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

\*\* 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 BK21+ 연구조교수 (e-mail: greensjk@hanyang.ac.kr)

BK21+ Research Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

\*\*\* 교신저자, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 조교수 (e-mail: kangsk78@hanyang.ac.kr, Tel: 82-10-6460-4875)

Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

## 1. 연구 배경

하천을 구성하는 하상과 제방 등에서는 유수의 영향으로 인해 침식과 퇴적 작용이 끊임없이 발생한다. 특히 만곡하천의 경우 원심력과 횡단하상형상, 사행하폭 등의 다양한 인자로 인해 이차류가 발생하는데, 이는 하천 내에서의 침식 및 퇴적의 원인이 되어, 하천 지형의 변형과 유사 이동 등에 영향을 끼친다(Wormleaton et al., 2005). 이와 같이 하천형상의 영향으로 유속이 상대적으로 상승하는 구간을 수층부라 하며, 제방유실 등의 사고에 대비하여 수층부를 보호하고 안전하게 유지·관리 하는 것은 하천관리 및 정비에 있어 매우 중요한 요소이다. 제방 및 하안 보호를 위해 기존에 널리 사용되는 공법은 콘크리트와 사석을 이용하여 수층부를 피복하는 방법인데, 이러한 방법은 유지비용이 높고 수변 및 수생 서식지 파괴를 초래하는 단점을 가진다. 최근 하천환경과 생태계 보전에 대한 사회적 인식이 높아지면서 자연하천의 생태적인 측면을 고려함과 동시에 하천관리의 효율성을 제공하는 친환경적 공법이 각광받고 있는데, 하천 내 수제와 같은 수공구조물 설치 공법이 그 대표적인 예라 할 수 있다.

수제는 하상과 제방의 연결지점에 설치되는 구조물로 주변 흐름의 방향과 크기를 변화시킴으로써 하천 형상 변화를 방지하는 역할을 한다. 우리나라 하천설계기준(KWRA, 2009)의 수제 설계 일반사항에는 ‘하천에 가장 적합한 형태의 수제를 가장 효율적인 위치에 배치하되, 수제에 의해 기존 하도 또는 계획하도가 수리학적, 생태학적 그리고 친수환경 측면에서 역효과를 발생시키지 않도록 계획하여야 하며, 수제설치로 인하여 대안에 미치는 영향이 크므로 수제 설치 시 가능한 한 수리모형실험 등을 실시하여 그 크기와 간격 등을 정하여 악영향이 미치지 않도록 해야 한다’고 명시하고 있다. 이렇듯 수제는 설계 위치와 방법에 따라 하천 수층부의 보호 및 생태적 측면에서 다양한 장점을 나타내기도 하지만 적절하지 못한 시공으로 인해 부작용을 초래할 수도 있기 때문에, 설계 시 설치되는 지역의 하천지형과 수제역 유수의 흐름 간의 상호관계에 대한 체계적인 이해와 해석이 선행되어야 한다.

수제와 관련한 국내 연구를 살펴보면 Kang et al. (2004)은 투과율과 수제군의 설치 간격 조절로 인한 선단유속과 선단흐름각의 변화를 실험을 통하여 관찰하였으며 Kim et al. (2004)은 수로폭 대 수제의 길이 변화와 투과율에 대한 수제 선단 유속과 흐름각, 수제 설치 시 나타나는 박리영역 길이(Separation Length)와 선단유속에 대한 실험

식을 제안하였다. 이후 Yeo et al. (2004)은 수제의 길이 및 투과율 변화에 따른 최심하상고와 박리흐름 영역의 크기 및 유속의 변화를 비교하였다. 국외의 연구사례를 살펴보면, Duan (2009)은 직선수로에서 측정된 3차원 평균 유속과 레이놀즈 전단응력의 분석을 통해 수제 주변에서의 흐름을 관찰하였다. 해당 연구에서는 시간평균한 레이놀즈 전단응력 분포값이 국부세굴과 세굴심을 판단하기에 효과적인 인자임을 입증하였다. Yossef and de Vriend (2010)는 월류 조건에 따른 수제역에서의 2차원 흐름을 분석하고 혼합층(mixing layer) 길이의 주요 인자에 대한 연구를 수행하였다. 이후 Sukhodolov (2014)는 슈프레(Spree) 강에서 수제 길이 대비 수제군의 설치 간격(aspect ratio) 조건과 월류 조건에 따른 흐름 특성과 난류 강도를 파악하였으며 이를 통해 수제역 내, 세굴 발생의 메커니즘과 수제군으로 인해 주수로의 하상전단강도가 증가하는 것을 실험도 실험을 통해 관찰하였다. 그러나 앞서 언급한 연구 사례들은 직선 수로에만 국한되어, 하천의 형상에 의해 발생하는 이차류 효과를 고려하지 않았기 때문에 자연형 만곡하천에 적용하기가 쉽지 않다는 한계점을 안고 있다.

하천의 사행도를 고려한 실험연구도 존재하는데, 예를 들어 Islam et al. (2000)은 하도와 제방의 30° 위상차인 이중만곡수로에서 이차류 조건 내, 천수(shallow water)와 심층수(deep water)에 따른 수리학적 특성을 파악하였으며 흐름방향 유속 벡터는 천수의 경우 내외측에서 주수로로 혹은 주수로에서 내외측으로 향하는 성질이 더 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 Sharma and Mohapatra (2012)는 실험을 통해 만곡수로 내 수제 설치 위치와 수제 길이에 따른 박리흐름영역의 크기의 주요 인자를 연구하였다. 수제 실험의 경우 수제의 위치, 길이, 설치 각도 및 수제군의 간격 등을 주요 인자로 이로 인한 흐름 변화와 세굴 양상 등에 관한 연구인 반면, 만곡수로 실험의 경우 만곡도, 만곡 개수 등에 따른 이차류 분석과 박리영역 길이 산정 등에 대한 실험이 주를 이룬다. 이처럼 두 분야에 대한 실험 연구는 독립적으로 수행되었으며 Bhuiyan et al. (2010)은 Wormleaton et al. (2004, 2005)의 만곡수로 내 세굴과 흐름 특성에 대한 실험에 대한 연구를 발전시켜 동일 수로에 수제의 한 종류인 베인(vane)의 높이와 각도, 베인의 개수를 대조군으로 한 연구를 수행하였다.

여러 선행 연구들에서 조도의 변화에 따른 이차류의 변화에 대하여 분석하였다. Tominaga et al. (1989)은 직선수로에서 하상과 수로 벽 조도의 변화에 따른 이차류 구조의 변화에 대해 분석하였다. 그 결과, 조도가 증가함에

따라 이차류의 속력을 증가시키고 와(eddy)의 크기를 변화시키지만 이차류의 구조를 변화시키지는 않았다. Toninaga and Nezu (1991)은 복단면수로 홍수터 내 조도 변화에 관한 실험에서 이차류 구조 변화는 발생하지 않았다는 것을 다시 한 번 확인하였다. 반면, 사행수로 내에서는 직선수로나 복단면수로와는 달리 조도가 이차류의 구조에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(Shiono et al., 2009). Demuren and Rodi (1986)는 이전에 연구한 만곡수로 실험에 대해 수치모의를 수행하여 그 결과를 비교하였다. 이를 통해 하상의 조도계수가 높은 경우, 이차류의 강도가 증가하고 이차류 구조에 변화를 일으킨다는 것을 관찰하였다. Back et al. (2006)은 Odgaard (1986) 및 Chang (1988)의 제안을 기반으로 직사각형 단면의 매끈한 사행수로에서 이차류 거동을 해석하기 위한 새로운 방정식을 수립하고 조도의 변화에 따른 2차류 구조의 변화에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과, 조도가 낮을 경우 이차류가 만곡이 끝나는 단면까지 꾸준히 증가하고 있는 반면, 조도계수가 클 경우 만곡의 정점부에서 이차류의 최대치에 도달한 것을 알 수 있었다. 또한, Kim (2007)은 180° 실험수로의 모든 단면에 지름 2mm 여과사를 부착한 거친 수로와 아크릴로 제작된 매끈한 수로에서의 이차류를 분석하였다. 매끈한 수로에서는 이차류의 최대 유속이 90°단면에서 발생한 반면 거친 수로에서는 60° 단면에서 최대 이차류 유속이 관측되었다. 또한, 유속의 크기는 거친 수로에서의 유속이 매끈한 수로에서의 유속에 비해 높게 관측되었다.

본 연구의 목적은 단일 만곡수로 내 만곡의 정점부에 수제 형 수리구조물 설치 시, 유속구조의 변화를 분석하는 데 있다. 중심각이 120°인 단일 만곡수로에서 3차원 흐름과 유속계(Acoustic Doppler velocimeter, ADV)를 이

용하여 유속을 측정하였다. 설치 전, 선정된 단면들의 유속값을 바탕으로 3차원 흐름특성을 분석하고 이를 대조군으로 수리구조물을 만곡부 정점에 설치했을 때, 이차류의 변화를 난류특성과 연관하여 분석하고 중방향 유속벡터를 통해 흐름 방향의 변화를 알아보려고 하였다.

## 2. 만곡수로에서의 3차원 유속실험

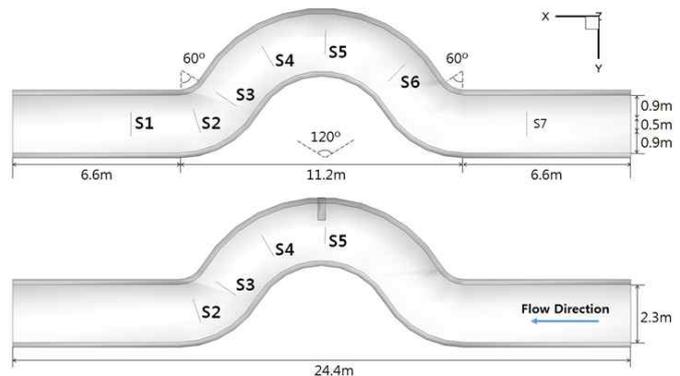
### 2.1 실험 수로 및 조건

본 연구에서 사용된 실험 수로는 한국건설기술연구원에 위치한 전체 하폭 2.3m, 흐름 방향 길이 24.4m, 수로 경사 2%인 콘크리트 만곡수로이다. 주 흐름방향에 수직인 단면은 저면 폭 0.5m 비탈면 폭 각각 0.9m인 사다리꼴 형상으로 연직방향과 수평방향 비탈경사는 1:2로 제작하였다(Fig. 1). 수로의 만곡부는 총 길이 11.2m로 상·하류의 직선부와 60°로 연결되며, 중심각은 120°, 중심부의 곡률반경은 3.5m로, 이는 사행도 1.11에 해당되는 값이다.

만곡부 수제 설치 유무에 따른 두 가지의 경우에 대한 수리모형실험을 수행하였으며 수제가 설치되지 않은 경우를 Case 1, 설치된 경우를 Case 2로 표기하였다. 이와 더불어, 조도에 따른 이차류의 영향을 배제하기 위해 콘크리트 표면으로 이루어진 매끄러운 만곡수로에서 유속 측정을 수행하였다. 수리구조물은 Fig. 1(b)에서와 같이 단면 S5의 우안에 설치되었다. 실험 측정 단면은 Case1을 기준으로 상·하류 직선부에 각각 1 단면, 만곡부에 5 단면을 선정하였으며, 하류 단면부터 시작하여 S1~S7로 명명하였다. Case 2의 경우, 수제 형 수리구조물 설치에 따른 흐름변화가 예상되는 S2~S5의 4개 단면에 대해서만



(a) The meandering channel in Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology



(b) Schematic showing the coordinate system for the Case I and II

Fig. 1. Meandering Channel Used for the Experiment

측정을 실시하였다. 실험은  $0.13\text{ m}^3/\text{s}$ 의 단일 유량조건에 대해 실시하였으며 상류에 위치한 단면 S7에서 측정된 유속값을 흐름단면적에 관하여 적분하여 측정된 유량값을 재검증하였다. 단면 S1이후에 위치한 수로 하단에는 포인트게이지를 설치하여 하류수위를 측정하였다. 하류수심은  $0.25\text{ m}$ 로 유지하였으며, 이를 기준으로 산정된 Case 1의 수면기울기는  $S_f=7.85 \times 10^{-4}$ , 평균 유속은  $U=0.53\text{ m/s}$ , 평균 전단유속은  $u_*=3.5 \times 10^{-2}$ 이며 이는 Eq. (1)을 이용하여 산정하였다. 평균수심과 평균유속에 근거하여 산정한 프루드수( $F$ )와 레이놀즈수( $Re$ )는 각각  $0.34$ ,  $1.24 \times 10^5$ 이다.

$$u_* = \sqrt{gRS_f} \quad (1)$$

전행된 이차류 연구에 따르면 수로와 직각이 되는 임의의 단면에서 측정된 횡방향 유속(주흐름의 횡방향 요소)과 주흐름과 직각이 되는 횡방향 유속은 같지 않으며 이를 구분하는 것이 필요하다(Chang (1988); Blanckaert and Vriend (2003)). 주흐름과 직각이 되는 횡방향이 이차류의 횡방향 요소이며 이를 측정하기 위해서는 주흐름 방향과 직각인 단면에서 유속 측정이 이루어져야 한다. 하지만 이상화된 이차류 모델이 아닌 실측 단면에서 주 흐름 방향을 정의하는 것이 쉽지 않으며 Johannesson and Parker (1989)의 연구에서는 주수로 흐름을 하천의 중심축 방향으로 정의하고 그 방향에 대한 수직단면에서의 유속성분을 이차류로 정의하였다. 따라서 본 연구에서는 Johannesson and Parker (1989)가 정의한 수직단면에서의 유속성분을 이차류로 정의하여 결과를 분석하였다.

Case 2에서 설치한 수제형 수리구조물의 경우, 높이  $0.45\text{ m}$  두께  $0.3\text{ cm}$  하폭 방향 길이  $0.9\text{ m}$ 로 사면에서의 굴곡을 고려하여 목재로 제작하였으며 만곡부 우안에 설

치하였다(Fig. 1). 실험에서 사용한 평균수심  $0.250\text{ m}$ 에 대한 수면에서의 하폭은  $1.5\text{ m}$ 이며, 이에 대한 수제길이 비는 약  $0.33$ 이다(Fig. 2).

## 2.2 3차원 유속 측정

Nortek사의 Vectrino-II 초음파유속계(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 3차원 유속을 측정하였다. Vectrino-II는 중앙으로부터  $30^\circ$ 씩 기울어져 있는 4개의 탐침(probe)으로 구성되어 있으며 기기 중심부로부터  $40\text{ mm}$ 를 기점으로 하향  $30\text{ mm}$  구간( $40\text{ mm}$  부터  $70\text{ mm}$ 의 범위 내)에서 실험자가 설정한 간격으로 유속을 측정한다. Rusello et al. (2006)의 연구에 따르면 Vectrino-II는 기기 중심부로부터  $50\sim 55\text{ mm}$  떨어진 구간에서 점 유속에 대한 가장 높은 정확도를 보이며 이를 제외한 구간에서는 이에 멀어질수록 오차가 점점 더 크게 발생한다. 따라서 본 실험에서는 정확도를 높이고자  $1\text{ mm}$  간격을 설정하여 총 31개의 측정점 중 위에서부터 16번째 측정점에 해당하는, 즉 유속계의 하단부로부터  $55\text{ mm}$  아래에 위치한 유속을 이용하였다. 이때, 각각의 탐침을 통해  $10\text{ MHz}$ 의 반사된 신호를 최대  $100\text{ Hz}$ 의 샘플링 주파수로 데이터를 수집한다. Vectrino-II는 4개의 탐침을 통해 흐름방향, 하폭방향, 수심방향의 유속 데이터인  $u$ ,  $v$ ,  $w$  값을 측정하는데, 특히 수심방향에 대해서는  $w_1$ 과  $w_2$ 의 서로 독립적인 두 가지 유속을 측정하여 난류 측정에 정확도를 높일 수 있다는 장점을 갖는다(Blanckaert and Lemmin, 2006). Rusello et al. (2006)이 기술한 Vectrino-II의 또 다른 장점으로는 반사된 신호강도와 SNR (signal to noise ratio)에 대한 반응이 탁월하여 높은 유속범위에서도 비교적 정확한 난류측정이 가능하다는 것이다. 유속 측정의 범위는

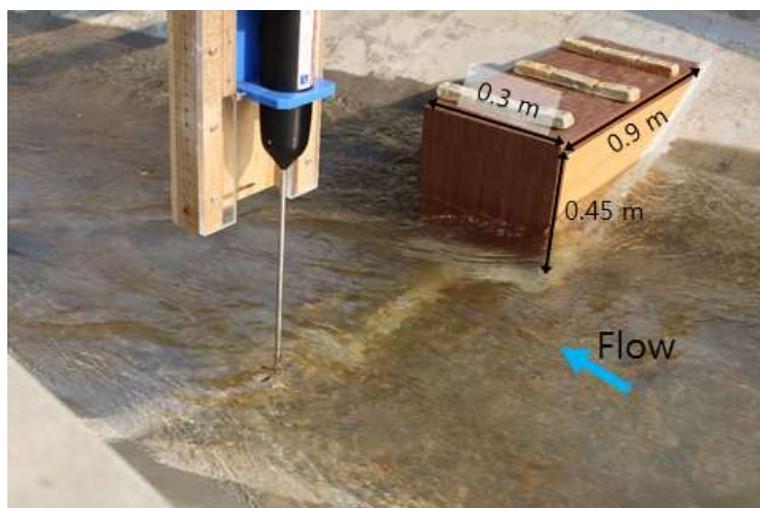


Fig. 2. The Groyne Installed Near the Apex of the Meandering Channel

0.1~3.0 m/s으로 오차 범위  $\pm 0.00005$  m/s의 정밀한 유속 측정을 수행하며 동시에 유속계와 바닥 간 거리(bottom distance) 데이터를 수집하므로, 수심 방향 내 목표 지점을 모니터링하며 유속 측정이 가능하다.

유속계는 수면에 수직으로 고정된 상태에서 단면을 측정할 수 있도록 Fig. 2와 같이 거치대를 이용하여 설치하였으며, 거치대는 하폭방향(y) 및 수심방향(z)으로 위치를 조정할 수 있게 하였다. Fig. 3과 같이 측정된 횡방향과 수심방향은 각각 주수로폭(B=0.5 m)과 평균수심(H=0.25 m)으로 무차원화하여 나타냈다. 각 단면의 횡방향에 대해서는 중심(y/B=0.0 지점)을 기점으로 하여 6 cm 간격으로 좌우 48 cm까지(y/B= $\pm 0.96$  지점) 측정하였으며 수심방향은 수심의 변화에 따라 3~4 cm 간격으로 나누어, 총 65개 지점의 유속을 측정하였다.

이때, 수심방향의 간격은 수면에서부터 하상까지 측정 가능한 범위를 모두 포함하는 z/H=0.28~0.84를 고려하여 등간격으로 나눈 것이며, Fig. 3에서 나타낸 65개의 점은 측정점에 해당하는 곳을 표시한 것이다. 유속계의 샘플링 주파수를 100 Hz로 설정하여 5분간 약 30,000개의 유속 데이터를 각 지점에서 취득하였고, 수층부에 해당하는 사면 흐름(단면의 양 끝단)에 대해서는 와류 및 이차류의 영향을 고려하여 약 6~7분간 자료를 수집하였다. 일반적으로 유속계를 이용한 측정에서는 기기의 측정 유속 범위를 초과하거나 하상 및 벽면으로부터 반사된 과거의 신호

(pulse)로 인해 간헐적인 스파이크(spike)가 생기는데 (Nikora and Goring, 1998), 이러한 스파이크를 줄이기 위해 Parsheh et al. (2010)이 제안한 PST (phase-space-thresholding) 기법을 후처리과정에 이용하여 데이터의 정확도와 신뢰도를 높였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 수면에서의 종방향 유속분포

만곡수로에서 흐름이 하류방향으로 진행함에 따라 수면에서의 유속벡터의 분포양상(Case 1)과, 수리구조물로 인해 그 특성이 어떻게 변화하였는지(Case 2) Fig. 4에 도시하였다. 3차원 유속계로 측정된 측정점 중 수면에 가장 근접했던 수심의 90% 지점에서 측정된 17개 측정점의 유속벡터도를 단면 S2~S5에 대해 나타내었다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 수리구조물 설치 전(Case 1)과 후(Case 2)의 유속분포를 나타낸 것이며, (c)는 수리구조물의 설치로 인해 흐름 분포 변화가 가장 뚜렷한 단면 S4(파란색 타원으로 표시된 부분)에서 수면유속벡터의 방향과 크기의 변화를 비교할 수 있도록 도시한 것이다. 두 실험 모두 단면 S5의 내측(이때, 만곡부 상에서 중심부 곡률반경인 3.5 m보다 큰 곡률반경을 갖는 우안을 외측, 반대인 좌안을 내측이라 한다(Figs. 1 and 3))에서 발생한 최대 종방향 유속이 흐름이 하류로 진행함에 따라 그 위치를 외측으로 이동하

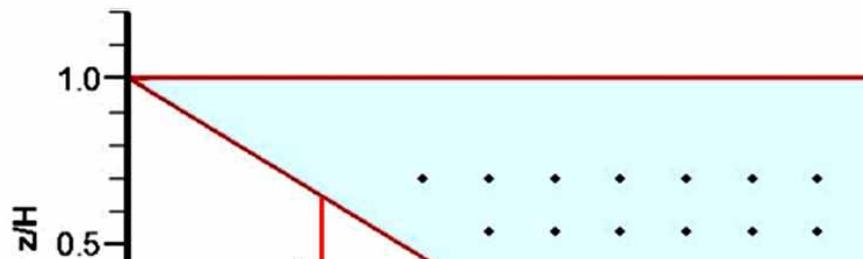


Fig. 3. Cross Section and Measurement Locations

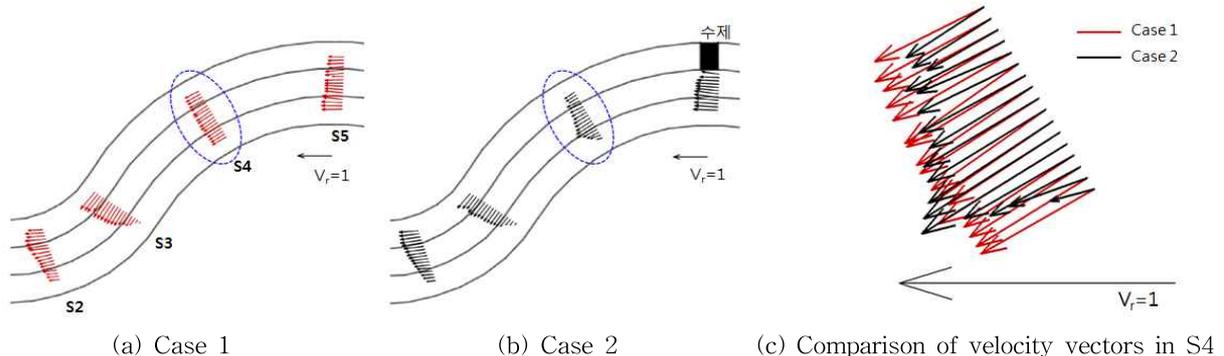


Fig. 4. Plan View of the Measured Velocity Vectors (unit: m/s)

있음을 볼 수 있으며 이러한 변화는 원심력에 의해 급변 곡선수로에서 발행하는 것으로 Islam et al. (2000) 등의 기존 연구에서도 확인할 수 있다. 이러한 최대 종방향 유속 위치의 이동경로는 만곡수로의 지형학적 원인에 의한 이차류 발생 및 이송모멘텀 전달과 함께 만곡수로 내에서 발생하는 주요한 메커니즘으로 사료된다. 특히, 사면 측에서 발생하는 최대 종방향 유속은 수층부에서 일어나는 제방 침식 및 파괴에 밀접한 관련을 갖는다. 그러나 수제 형 수리구조물을 설치한 Case 2의 경우, 단면 S3와 S4에서 양측 사면에서 발생하였던 유속의 크기가 감소하고 방향이 변화하여, 특히 단면 S4에서는 최대 유속의 위치가 만곡부 내측으로 이동하였다. 이와 같은 경향은 Fig. 4(c)에서 보다 명확하게 확인할 수 있다.

### 3.2 수심평균유속

단면(S2~S5)에서의 종방향 유속분포를 수심평균( $\bar{u}$ )한 후 Case 1과 2에 대해 도시하여, 만곡부에 설치한 수제로 인한 흐름변화를 정량적으로 비교하였다(Fig. 5). Fig. 5의 가로축에서  $y < 0$  구간이 우안측,  $y > 0$  구간이 좌안측을 의미한다. 수심평균유속은 전체평균유속( $U$ )으로 무차원화하여 세로축에 나타내었다. Fig. 5(d)의 S5는 수리구조물이 설치되는 단면으로서, 수리구조물이 설치되기 전(Case 1)에는 수심평균유속분포가 외측보다는 내측 사면에서 높은 분포를 보이고 있다. 수리구조물이 설치되기 전(Case 1) 단면 S3와 S4의 양측 사면경계( $y/B > \pm 0.5$ ) 전반에 걸쳐 평균유속 50% 이상의 비교적 높은 유속이 관측되었는데, 이는 수층부 피해의 직접적 원인이 된다고 할 수 있다.

수리구조물의 설치 후(Case 2), S5는 줄어드는 흐름단면적으로 인해 전반적으로 유속이 증가하였지만 만곡부 정점을 지난 단면 S4에서 수심평균유속분포가 변화하였음을 확인할 수 있었다. 주수로의 최대 유속이 약 13% 증가하였고 최대유속 발생지점이 중심부로 이동하였으며, 사면에서의 유속은 최대 20% 감소함을 볼 수 있다. 수제 설치로 인한 후류효과는 S5 이후, 흐름 변화의 영향이 점점 줄어들어, S3의 수심평균유속 변화는 외측(우안)에서만 나타났으며 우안에서의 평균유속이 Case 1과 비교하여 최대 약 15%정도 감소하였음을 확인할 수 있었다. 이후 도시한 S2에서 흐름의 변화가 미미한데, 이는 수제 설치로 인한 후류효과가 S2까지 미치지 않음을 의미한다.

### 3.3 이차류 속력

Table 1은 만곡부 내 단면에서의 최대 이차류 속력과 최대 종방향 유속의 측정값을 나타낸 것이다. 이차류 속력은  $s = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$ 이며  $u_{max}$ 는 단면 내 최대 종방향 유속을 나타낸다. 이전의 연구(Shiono and Muto, 1998; Kim, 2007)에서 최대 이차류 속력은 유출부 단면에서 발생하며 그 크기는 종방향유속의 약 10~20% 정도라고 보고된 바가 있다. 본 연구에서는 Case 1과 Case 2 모두 유출부인 S2에서 최대 이차류 속력이 발생했으며 이는 기존의 연구들과 일치하는 것을 보여준다.

수제 설치로 인해 최대 종방향 유속 대비 최대 이차류 속력이 감소하였음을 알 수 있고 이는 수제의 설치가 수로 전반에 걸쳐 이차류의 최대 속력을 감소시키는 경향이 있음을 의미한다.

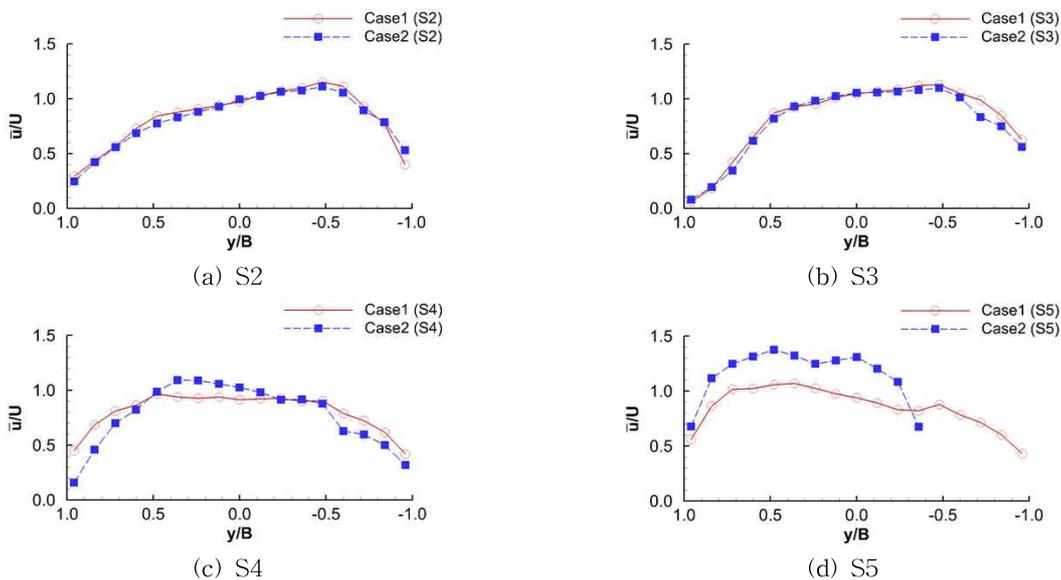


Fig. 5. Comparison of the Depth-averaged Streamwise Velocity after the Groyne Was Installed

### 3.4 난류에너지와 벡터도

Fig. 6은 Case 1의 각 단면 난류운동에너지와 유선도를 도시한 것이다. Fig. 6에서 청색과 흑색 실선은 수면과 하천 단면 경계를 의미하며 난류운동에너지는 평균 전단유

속( $u_*^2$ )으로 무차원화 하였다. 단면 가장자리 부근에서 관찰되는 높은 난류운동에너지는 국부적인 박리흐름으로 인해 발생한 전단층(shear layer)으로 인한 것이다. 최하류 단면을 제외한 모든 단면에서 회전 셀(center region cell, outer bank cell)이 관찰됨을 알 수 있다. S6의 반시

Table 1. Maximum Streamwise Velocity and Secondary Flow Speed in the Cross Sections

Section	Case 1		$\frac{S_{\max}}{u_{\max}}$ (%)	Case 2		$\frac{S_{\max}}{u_{\max}}$ (%)
	$S_{\max}$ (cm/s)	$u_{\max}$ (cm/s)		$S_{\max}$ (cm/s)	$u_{\max}$ (cm/s)	
S2	17.82	68.04	26.19	15.41	64.18	24.01
S3	9.92	66.58	14.89	6.58	65.19	10.09
S4	13.94	56.96	24.48	10.04	65.93	15.23
S5	9.80	66.61	14.72	32.42	81.65	39.70

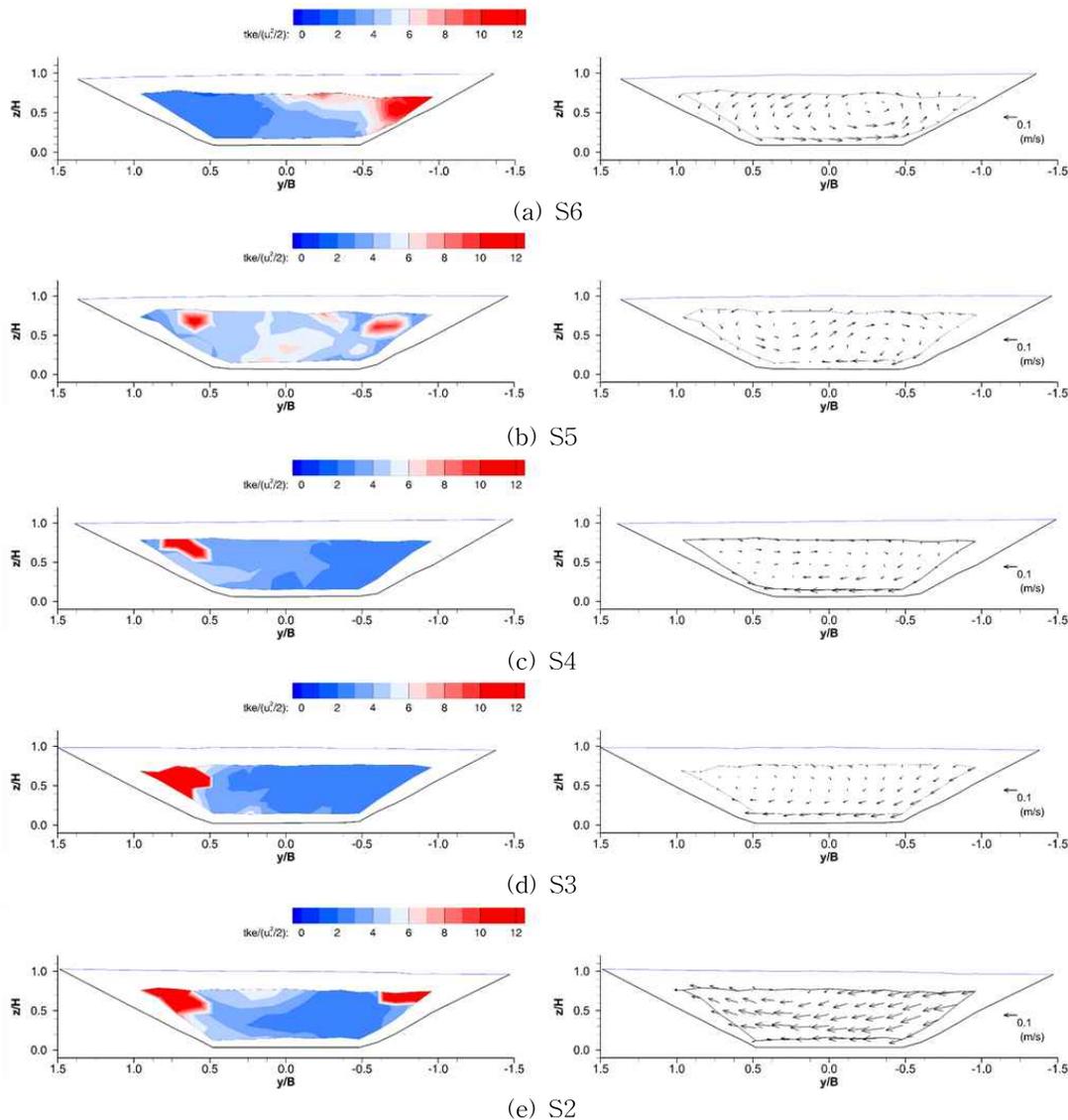


Fig. 6. Turbulence Kinetic Energy Contours and Velocity Vector Plots for the Case 1

계방향의 회전 셀은 S5으로 진행하면서 곡률방향의 전환으로 역방향으로 방향이 바뀌게 된다. S5 단면에서 관찰되는 시계방향 회전 셀은 횡방향 압력구배와 원심력의 불균형으로 인해 발생하는 것으로 알려져 있는데(Kang and Sotiropoulos, 2011) 이러한 회전 셀은 이동상 조건일 경우 만곡수로 외측바닥의 유사를 내측으로 밀어내는 작용을 하여 내측에는 침식을 외측에는 퇴적을 일으키는 것으로 알려져 있다. 만곡부의 정점(S6)을 지난 외안 회전류(outer bank cell)는 S4에서 가장 크게 발달한 후 점점 제방 내측으로 이동하며 S2에 도달하여 소멸하게 된다.

Fig. 7을 통하여 수제 설치 후(Case 2)의 경우를 살펴보면, 수제 설치 전에 비하여 하류 방향으로 이동할수록 회전 셀이 급격히 소멸함을 알 수 있다. 한 가지 중요한 사항은 수제 설치 후 S4 단면의 시계방향 회전 셀이 내측으로 밀려나고 외안 회전류가 발생한 것이다. 수제의 설치로 인한 만곡수로 외안 회전류의 생성은 기존의 연구에서도 보고된 바가 있다(Duan, 2009). Kang and Sotiropoulos (2011)의 연구에서 밝혀진 바와 같이, 외안 회전류는 이동상 조건

에서 외측 하상 및 제방구간의 세굴 및 침식 저감과 밀접한 연관이 있으며 이로부터 만곡수로 정점에 설치된 수제는 외안 회전류를 발생시킴으로써 하천 외측의 침식을 저감하는 역할을 함을 알 수 있다. 이는 추후 이동상 실험을 수행하여 확인할 예정이다.

### 3.5 단면 S4에서의 종방향 유속분포 및 유속(v, w) 벡터도

수리구조물의 설치 시 가장 뚜렷한 유속변화를 보인 단면 S4에 대한 종방향 유속등고선과 유속 벡터도 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 유속값은 전체평균유속( $U=0.53$  m/s)으로 나누어 무차원화하였다. Figs. 8(a) and 8(b)의 비교를 통하여 알 수 있듯이, 수제의 설치로 인해 양측 사면에서 유속의 크기가 평균유속의 60% 정도로 급격히 감소하였음을 확인할 수 있다. 한편, 유속벡터를 통해 횡방향 및 연직방향 유속을 비교하였을 때, Case 1의 경우 단면 전 반에 걸쳐 하상 근처에서 좌안(내측)방향으로 강하게 발생하는 횡방향 흐름이 Case 2에서는 그 크기가 감소하고

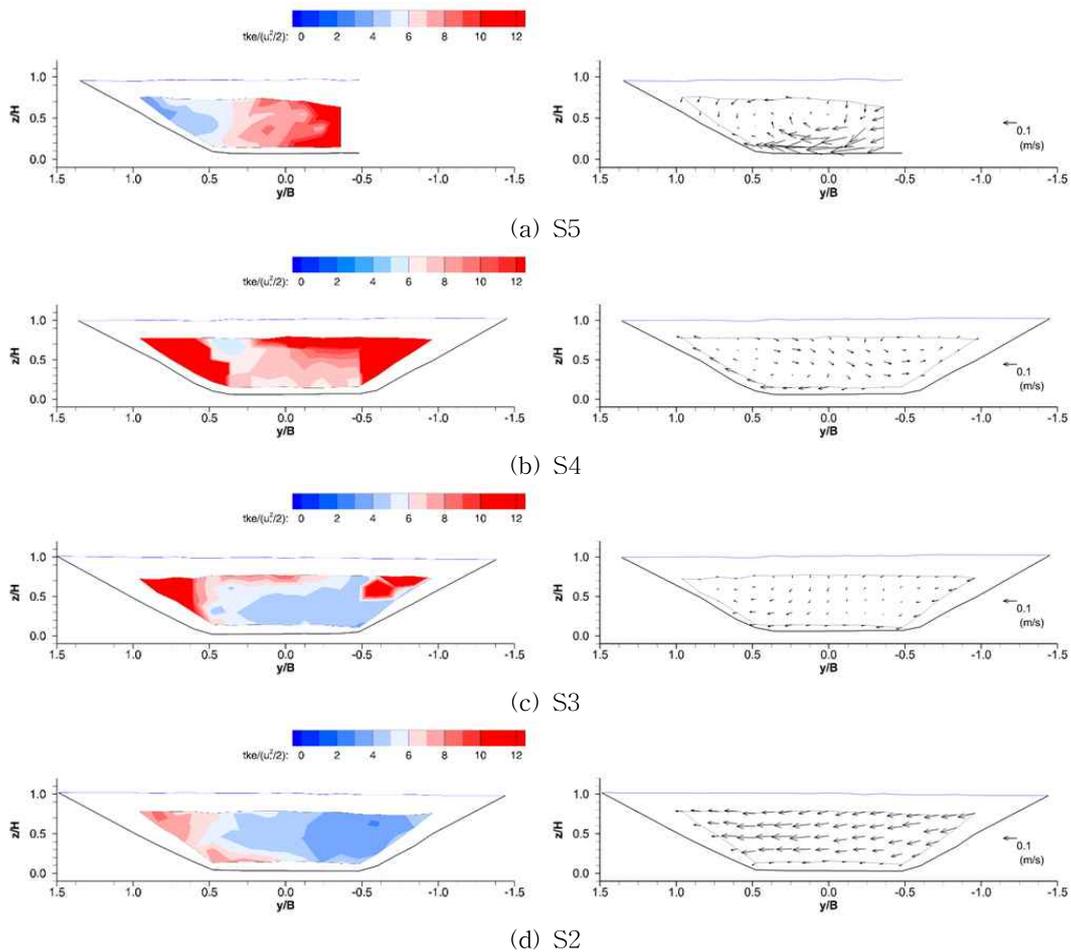


Fig. 7. Turbulence Kinetic Energy Contours and Velocity Vector Plots for the Case 2

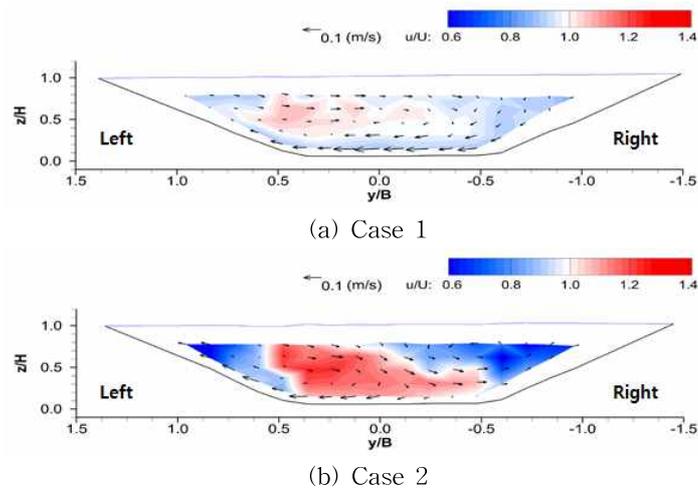


Fig. 8. Contours of the Normalized Streamwise Velocity Component with the Secondary Flow Velocity Vectors in the Section S4

방향도 주수로의 우측을 기준으로 분리되는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 수제의 설치로 인해 만곡수로 내 종방향 유속 분포는 물론 횡방향 및 연직방향 유속의 연직분포의 변화가 발생되었음을 확인할 수 있다. 이러한 변화를 종합적으로 살펴보았을 때, 이동상 조건에서 수제 설치 시 외측 제방 영역의 세굴 감소 및 하천유심선의 단면 중앙부 이동을 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 만곡수로 내 수제 형 수리구조물의 설치로 인한 흐름특성의 변화를 분석하기 위하여 만곡수로에서 3차원 유속장을 측정 및 분석하였다. 특히, 수로의 만곡부에 위치한 4개의 단면에 대하여 수면에서의 종방향 유속분포 및 수심평균유속분포를 수리구조물 설치 전·후에 대해 각각 비교하고, 변화가 뚜렷한 단면에 대해서는 단면유속분포 및 유속벡터를 통해 종방향, 횡방향, 연직방향의 3차원적 분석을 하였다.

Case 1의 경우 S6에서 시계방향의 회전 셀이 만곡부를 지나면서 점점 발달하여 S4에서 그 크기가 최대가 되며 점점 내측 제방으로 이동하여 S2에서 완전히 사라지게 된다. 이는 Wormleaton et al. (2004, 2005) 연구의 흐름 양상에서도 확인할 수 있다. Case 1에서 회전 셀이 가장 크게 발달한 S4에서는 이로 인해 제방 내측에 유사의 퇴적이 발생된다. 외안 회전류는 Case 1과 Case 2에서 모두 발생하지만 기존의 연구 (Bhuiyan et al., 2010)와 유사하게 관측되는 단면이 다르며(Case1 : S6, Case2 : S4) 이는 수리구조물의 설치로 인해 흐름이 왜곡되어 변화한 것이다.

이후 수제를 설치하여 만곡부 내 단면에 대한 흐름 양상의 변화를 분석한 결과, 수층부에 해당하는 사면의 양측에 작용하는 종방향 흐름의 크기가 감소하고 단면 내 최대 유속발생지점이 주수로 쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 수면유속 뿐만 아니라 수심평균 유속 값의 비교를 통해서도 확인할 수 있었으며 수층부에 해당하는 사면(S3) 양측에 작용하는 수심평균 유속 값이 10~15% 감소하였고, 수층부 이전 단면(S4)에서는 14~20%까지 감소하였다. 최대 종방향 유속이 주수로로 이동하면서(Fig. 5) 단면 내 횡방향 및 연직방향 유속의 연직분포도 함께 변화하였다(Figs. 6 and 7). 또한 수리구조물 설치로 인해 변화된 회전 셀로 인해 S4에서 전단층을 형성하게 되며 내측 제방에서는 퇴적을, 외측 제방에서는 침식을 방지할 수 있다.

실험을 통해, 만곡수로에서 흐름이 진행됨에 따라 발생하는 단면 내 최대 종방향 유속의 크기 및 위치가 수리구조물의 설치로 인해 3차원적인 특성을 갖고 변화하는 것을 확인하였으며, 결과적으로 수층부에 해당하는 사면의 침식 방지 및 보호를 유도 할 수 있지만 주수로의 단면 중심부에서 유속의 증가로 인한 하상에서 세굴 가능성을 예측할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구개발사업의 연구비지원(14CTAP-C077530-01-000000)에 의해 수행되었습니다. 만곡수로 사용을 지원해 주신 한국건설기술연구원 윤광석 연구위원님께 감사드립니다.

## References

- Baek, K.O., Seo, I.W. and Lee, K.W. (2006). "New Equation on Streamwise Variation of Secondary Flow in Meandering Channels." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. B 26, No. 4B, pp. 371-378.
- Bhuiyan, F., Hey, R.D., and Wormleaton, P.R. (2010). "Bank-attached vanes for bank erosion control and restoration of river meanders." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 9, pp. 583-596.
- Blanckaert, K., and de Vriend, H.J. (2003). "Nonlinear modeling of mean flow redistribution in curved open channels." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 12, pp. 1375.
- Blanckaert, K., and Lemmin, U. (2006). "Means of noise reduction in acoustic turbulence measurements." *Journal of Hydraulic Research*, IAHER, Vol. 44, No. 1, pp. 3-17.
- Chang, H.H. (1988), *Fluvial processes in river engineering*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
- Demuren, A.O., and Rodi, W. (1986). "Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 172, pp. 63-92.
- Duan, J.G. (2009). "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 803-811.
- Islam, G.M., Tamai, N., and Kobayashi, K. (2000). "Hydraulic characteristics of a doubly meandering compound channel." *Building Partnerships*, 1-9.
- Johannesson, H., and Parker, G. (1989). "Secondary flow in mildly sinuous channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 3, pp. 289-308.
- Kang, J.G., Kim, S.J., and Yeo, H.K. (2004). "An Experimental Study on Flow Pattern at Regime of Impermeability and Permeability Groynes Series." *Proceeding of KSCE Annual Conference & Civil Exposition*, KSCE, 3337-3342.
- Kang, S., and Sotiropoulos, F. (2011). "Flow phenomena and mechanisms in a field-scale experimental meandering channel with a pool-riffle sequence: Insights gained via numerical simulation." *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 116, F03011.
- Kim, S.J., Kang, J.G., and Yeo, H.K. (2004). "An Experimental Study on Tip Velocity and Downstream Separation Layer at Single Groynes of Permeability Change." *Proceeding of KSCE Annual Conference & Civil Exposition*, KSCE, 934-939.
- Kim, T.W. (2007). *Evolution of Velocity Distribution due to Secondary Currents in Sharp Open Channel Bend*, Ph.D dissertation, Seoul national university.
- Korea Water Resources Association (2009), *Design Standard of River*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 422-433
- Nikora, V.I., and Goring, D.G. (1998). "ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 6, pp. 630-634.
- Odgaard, A.J. (1986), "Meander flow model. I: Development." *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 112, No. 12, pp. 1117-1135.
- 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, pp. 368-378.
- Rusello, P.J., Lohrmann, A., Siegel, E., and Maddux, T. (2006). "Improvements in acoustic doppler velocimetry." In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Hydrosience and Engineering, ICHE-2006*, September 10-13.
- Sharma, K., and Mohapatra, P. (2012). "Separation zone in flow past a spur dyke on rigid bed meandering channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No. 10, pp. 897-901.
- Shiono, K., and Muto, Y. (1998). "Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 376, pp. 221-261.
- Shiono, K., Chan, T.L., Spooner, J., Rameshwaran, P., and Chandler, J.H. (2009). "The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part I." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 5-19.
- Sukhodolov, A.N. (2014). "Hydrodynamics of groyne

- fields in a straight river reach: Insight from field experiments." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 52, No. 1, pp. 105-120.
- Tominaga, A., and Nezu, I. (1991). "Turbulent structure in compound open-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 21-41.
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K., and Nakagawa, H. (1989). "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 149-173.
- Wormleaton, P.R., Hey, R.D., Sellin, H.J., Brynat, T., Loveless, J., and Catmur, S.E. (2005). "Behavior of meandering overbank channels with graded sand beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, pp. 665-681.
- Wormleaton, P.R., Sellin, H.J., Bryant, T., Loveless, J., Hey, R.D., and Catmur, S.E. (2004). "Flow structures in a two-stage channel with a mobile bed." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 2, pp. 145-162.
- Yeo, H.K., Kim, S.J., Kang, J.G., and Yoon, B.M. (2004). "An Experimental Study on Scour around Single Groynes." *Proceeding of KSCE Annual Conference & Civil Exposition*, KSCE, 2108-2113.
- Yossef, M.F., and de Vriend, H.J. (2010). "Flow details near river groynes: experimental investigation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, No. 5, pp. 504-516.

paper number : 15-031 Received : 7 April 2015 Revised : 11 June 2015 / 19 June 2015 Accepted : 19 June 2015
--