

사행수로에서 흐름 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Flow Characteristics in Meandering Channel

서 일 원* / 성 기 훈** / 백 경 오*** / 정 성 진****

Seo, Il Won / Sung, Ki Hoon / Baek, Kyong Oh / Jeong, Seong Jin

Abstract

In order to investigate characteristics of the primary flow and the secondary currents in the meandering channel, laboratory experiments were conducted in the meandering channel made up of alterative bends having 120° arc angle. Experiments were performed in two types of cross-sections, a rectangular cross-section and a curved cross-section which was made to adopt a beta probability function. Three-dimensional velocity fields were measured using a micro-ADV. As the result of experiments, in case of the rectangular cross-section, the primary flow occurred taking the shortest course, which is similar to the result of previous researches. In case of the curved cross-section, the primary flow was expected to occur along the thalweg, but it occurred almost along the shortest way. This is considered due to effects of bottom roughness and sinuosity. Not only a main cell but also a secondary cell of secondary currents were clearly shown by mean of the stream function. The secondary current intensity has the maximum value near the apex of the second bend for cases of both rectangular and curved cross-sections. However, the value of the secondary current intensity for the curved section is slightly larger than that for the rectangular cross-section. Also, in case of the rectangular cross-section, the higher the ratio of width to depth is, the larger the secondary current intensity is.

Keywords : Flow Characteristics, Meandering Channel, Laboratory Experiments, Secondary Current Intensity

요 지

다중 만곡부에서의 주흐름과 이차류의 흐름 특성을 분석하기 위하여 중심각 120° 인 두 개의 만곡부로 이루어진 사행수로에서 실험을 수행하였다. 실험수로의 횡단면은 직사각형과 곡선형 두 가지 형태로 제작하였으며, 곡선형 단

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수

Prof., School of Civil, Urban, Geosystem Engrg., Seoul National Univ., San 56-1 Shinlim-dong, Gwanak-Gu, Seoul, 151-742, Korea

(E-mail : seoilwon@plaza.snu.ac.kr)

** 동부엔지니어링(주) 수자원연구실

Water Resources Lab., Dongbu Engineering Co., Ltd., DongbuSamsungDong Bldg., 154-17, Samsung-Dong, Gangnam-Gu, Seoul, Korea, 135-090

(E-mail : soccersung@dongbueng.co.kr)

*** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 박사 후 과정

Post Dr., School of Civil, Urban, Geosystem Engrg., Seoul National Univ., San 56-1 Shinlim-dong, Gwanak-Gu, Seoul, 151-742, Korea

(E-mail : kopaek1@snu.ac.kr)

**** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 석사과정

Master's Course, School of Civil, Urban, Geosystem Engrg., Seoul National Univ., San 56-1 Shinlim-dong, Gwanak-Gu, Seoul, 151 742, Korea

(E-mail : cvi97@hanmail.net)

면 형상 결정에는 베타함수를 이용하였다. 3차원 유속장의 측정은 micro-ADV를 이용하였다. 실험결과, 직사각형 수로에서 주흐름은 수로의 가장 짧은 경로를 따라 발생하였으며, 이는 기존 연구자들의 결과와 일치한다. 곡선형 수로에서도 주흐름이 직사각형 수로에서의 주흐름의 거동과 비슷한 양상을 보이는 것으로 밝혀졌다. 곡선형 수로에서의 실험결과가 실제 자연하천의 만곡부에서의 주흐름 거동(최심선을 따라 발생)과 상이하게 나타나는 이유는 실험수로의 바닥 조도와 사행도에 기인한 것으로 사료된다. 이차류의 정량적인 분석을 위하여 흐름함수를 도입한 결과, 만곡부에서 주 셀 뿐만 아니라 바깥제방 셀의 위치 및 형태를 확인할 수 있었다. 또한 이차류 강도를 계산한 결과, 직사각형 및 곡선형 수로에서 최대값은 두 번째 만곡부의 정점 부근에서 가장 크게 나타나며 곡선형 수로의 이차류의 강도가 직사각형 수로의 값보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 직사각형 수로의 경우, 하폭 대 수심비가 커질수록 이차류의 강도가 증가하고 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 흐름 특성, 사행수로, 실험실 실험, 이차류 강도

1. 서 론

만곡부가 교호적으로 나타나는 사행하천의 흐름구조는 매우 복잡하다. 이러한 사행하천에서는 회전방향이 교호적으로 바뀌는 나선형의 흐름이 3차원적으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 즉, 하천의 하류방향으로 발생하는 주흐름(primary flow)에 중첩하여 주흐름 방향에 수직인 단면에 이차류(secondary current)가 발생한다. 이러한 이차류에는 두 가지의 종류가 있는데, 하나는 난류의 비등방성과 경계전단력의 불규칙한 분포로 인해 발생하는 것으로서 이는 직선수로와 사행수로에 모두에서 발생한다. 다른 하나는 사행수로에서 원심력에 의해서 발생하는 것으로 본 논문에서는 두 번째의 이차류를 중점적으로 다루고자 한다. 사행수로에서 발생하는 이차류는 직선수로에서 예상되는 흐름 분포를 왜곡시킴으로써, 유사 이동, 하상과 제방 침식, 그리고 하천 지형 변형 등에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 또한 이차류는 주흐름의 방향에 수직으로 발생하기 때문에 자연 하천에 유입된 오염물의 횡방향 혼합에 지대한 역할을 한다.

곡선수로의 만곡부에서 발생하는 이차류의 구조는 그림 1에 도시한 바와 같으며, 이의 발생과정은 다음과

같이 유도된다(Henderson, 1966). 우선 그림 1에서 바깥 제방에서 안쪽 제방으로 향하는 방향의 좌표축을 s (n 의 음의 방향)라고 잡으면 오일러 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial s}(p + \gamma z) + \rho a_s = 0 \quad (1)$$

여기서, p 는 압력, γ 는 무게중량, z 는 연직 위치, ρ 는 밀도 그리고 a_s 는 s 방향 가속도이다. 동역학 이론에 의해 $a_s = V^2/r$ 가 되며, 정수역학적 압력분포를 가정하면 AB 위의 모든 점에서 $p + \gamma z = \gamma h$ 이기 때문에, $\partial(p + \gamma z)/\partial s = -\gamma \partial h/\partial n$ 가 되고, 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dh}{dn} = \frac{V^2}{gr} \quad (2)$$

여기서, h 는 수심, V 는 주흐름 방향의 유속, g 는 중력가속도 그리고 r 은 곡률중심에서 수직 단면 AB까지의 거리이다. 식 (2)에서 압력 분포는 정수역학적이기

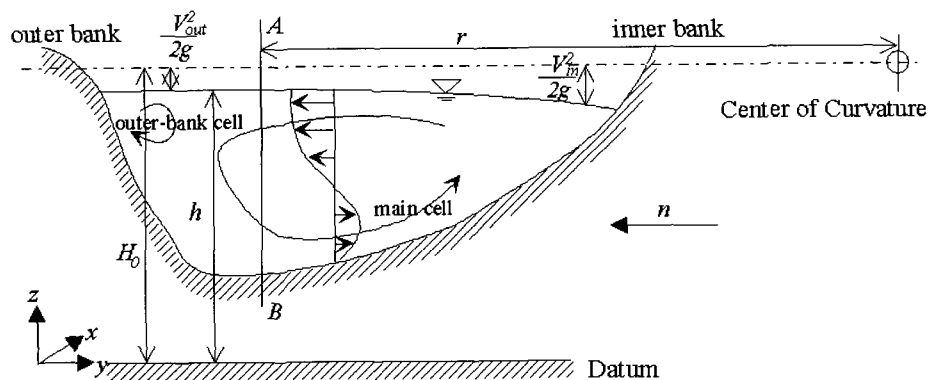


그림 1. 만곡부에서의 흐름 거동

때문에 수표면 경사 dh/dn 가 제공하는 횡압력 경사는 수직 단면 AB의 모든 점에서 거의 같다. 그러나 유속 V 는 상수가 아니고 바닥에서 훨씬 작은 값을 갖는다. 결과적으로 식 (2)가 내포하는 균형은 AB의 모든 점에서 존재하는 것은 아니다. 따라서 바닥 근처에서는 안쪽제방 방향으로의 압력 경사가 지배적이어서, 바닥을 따라 안쪽제방으로 흐르는 흐름을 만들어낸다. 이번에는 이것이 위쪽에서 바깥제방 쪽으로 흐르는 흐름에 의해 상쇄되어, 최종적인 효과는 반시계방향으로 회전하는 이차류가 발생하게 되는 것이다 (Henderson, 1966).

사행수로에서 발생하는 나선형 흐름이 Thomson (1876)에 의해 최초로 발견된 이후, 이차류에 관한 연구는 활발하게 이루어져 왔다. Rozovskii (1961)는 사행하천에서의 이차류에 관한 이론적 연구 및 실험 연구를 요약한 바 있다. 이차류에 관한 정량적인 분석을 위하여 Shukry (1950)는 만곡부에서 흐름의 전체 운동 에너지와 이차류의 운동 에너지의 비로 정의된 회전 운동의 강도를 제안하였는데, 이는 후에 Blanckaert (2002) 등에 의해 수정된 형태로 제시된다. Blanckaert (2002)는 주흐름 유속과 횡방향 유속을 이용하여 회전 운동의 강도를 제안하였고, 또한 Naot와 Rodi (1982)와 마찬가지로 흐름함수를 회전 운동의 강도를 제안하기도 하였다.

바깥 제방의 경사가 심한 만곡부에서의 이차류의 구조는 그림 1에 도시한 바와 같이 다중 셀 형태로 나타나는 데, 단면전체에 발생하는 주 셀(main cell)과 이와 반대 방향으로 회전하는 바깥 제방 셀(outer-bank cell) 또는 이차 셀(secondary cell)로 구성된다(Bathurst 등, 1979). Blanckaert와 Graf (2001)는 실험을 통하여 수로 단면 중앙 부근의 주 셀과 이와 반대로 회전하는 더 약한 셀을 관찰하고, 이 두 개의 이차류 셀의 사이에 수표면 훨씬 아래쪽에서 주흐름의 최대 유속이 발생함을 보여주었다. 그들은 바깥 제방부근에 생성되는 이차 셀이 주흐름의 최대유속의 중심을 안쪽제방으로 이동시키기 때문에 바깥 제방과 부근 하상을 침식 및 세굴로부터 보호 효과를 갖는다고 주장하였다. Blanckaert (2002)는 이차류의 강도가 만곡부를 따라 평형상태에 도달하지 않고, 흐름이 만곡부에 들어서는 순간 빠르게 증가하다가 최대값에 이르고, 이어서 빠르게 감소한다고 하였다. Boxall 등 (2003)은 거의 자연형에 가까운 수로 경계를 만들어 실험하였다. 그들은 바닥뿐만 아니라 측벽까지 침식 가능하게 사다리꼴 단면을 만들어 이차류를 관찰하고 이차류가 오염물질의 혼합에 미치는 영향을 언급하였다.

사행수로에서 이차류의 생성과 소멸과정을 구명하기 위해서 Leschziner와 Rodi (1979)는 흐름이 하류 방향

으로 진행할 때 이차류의 생성과정을 수치해석 모형을 이용하여 예측하였다. 그들이 계산한 횡방향유속의 연직 분포와 종방향 유속분포를 Rozovskii (1961)의 실험치와 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. Booij (2002)는 LES(Large Eddy Simulations)가 RANS (Reynolds Averaged Numerical Simulations)보다 이차류의 바깥제방 셀을 모의하는데 더 좋은 결과를 제공한다고 제시한 바 있으며, 나아가서 그는 바깥 제방경사가 매우 급한 경우에는 Blanckaert와 Graf (2001)가 주장한 바깥 제방 셀의 보호 효과는 없다고 언급하고 바깥 제방 셀은 최대유속선을 바깥 제방의 아래쪽 방향으로 옮겨놓고 이는 하부 침식을 강화시키는 원인이 된다고 주장하였다.

본 연구에서는 만곡부가 교호적으로 나타나는 사행하천의 흐름구조를 실험을 통하여 구명하고자 한다. 중심각이 120°인 두 개의 만곡부로 이루어진 사행수로를 제작하여 다중 만곡부에서의 주흐름과 이차류의 흐름 특성을 분석하고, 나아가서 단면형상에 따른 즉, 직사각형 단면 수로(이하 직사각형 수로) 및 곡선형 단면 수로(이하 곡선형 수로)에서의 흐름 특성을 비교하고자 한다. 흐름함수 및 이차류의 강도 해석을 통하여 이차류의 구조 및 특성을 심도있게 분석하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 이차류 해석

2.1 흐름함수

본 연구에서는 만곡부가 교호적으로 나타나는 사행수로에서 발생하는 복잡한 이차류의 구조를 보다 정량적으로 분석하기 위해서 Naot와 Rodi (1982)와 Blanckaert (2002) 등이 이용한 흐름함수(stream function)를 이용한다. 그림 1에 도시한 바와 같이 횡방향 유속(v_n)과 연직 방향 유속(v_z)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_n = - \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3a)$$

$$v_z = \frac{\partial \psi}{\partial n} \quad (3b)$$

여기서 $-W/2 < n < W/2$ (W 는 수로 폭), ψ 은 흐름함수이다. 식 (3)을 흐름함수에 대해 정리하면 다음과 같이 유도된다.

$$\psi = - \int_{z_i}^z v_n dz = \int_n^{W/2} v_z dn \quad (4)$$

여기서, z_b 는 바닥의 연직 위치이다. 본 연구에서는 식 (4)를 이용하여 각 점에서 흐름함수를 계산하여 등흐름 함수선도를 도시하여 각 단면에서 이차류의 주셀과 바깥 제방 셀의 형태 등을 정확하게 분석할 수 있게 하였다.

2.2 이차류 강도

Shukry (1950)는 만곡부에서 흐름의 전체 운동 에너지와 이차류의 운동 에너지의 비로 정의된 회전 운동의 강도식을 다음과 같이 제안한 바 있다.

$$S_{yz} = \frac{V_{yz}^2}{U^2} \times 100 \quad (5)$$

여기서 y, z 는 각각 횡방향좌표축과 연직방향좌표축, V_{yz} 는 y - z 평면에서의 평균유속이고 U 는 단면평균유속이다. Shukry (1950)에 의해 제안된 식은 각 단면에서의 평균값을 이용하여 이차류의 강도를 나타내기 때문에 단면 평균 강도를 표시하는데 용이하나 자연하천의 불규칙한 단면에 적용하는데 부정확하다는 단점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 이차류의 강도 산정에 Blanckaert (2002)가 제안한 방법을 사용하였다. 그는 수로의 중심선을 따라서 이차류의 강도(secondary current intensity, SCI)를 다음 식과 같이 제시하였다.

$$SCI = \langle f_n^2 \rangle = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} f_n^2 dz \quad (6)$$

여기서 z_s 는 수표면의 위치이다. f_n 은 다음 식을 통해서 계산한다.

$$\begin{aligned} v_s &= U_s f_s \\ v_n &= U_n f_s + v_n^* = U_n f_s + U_s \frac{H}{R_c} f_n \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 v_n^* 은 이차류의 횡방향 성분이고, v_s 는 중심선에서의 흐름방향 유속, U_s 는 v_s 의 수심평균유속, v_n 은 중심선에서의 횡방향 유속, U_n 은 v_n 의 수심평균유속, H 는 평균수심, R_c 은 곡률반경이며, f_s 와 f_n 은 각각 v_s 와 v_n^* 의 무차원값이다.

Blanckaert (2002)가 제안한 식에서 문제가 되는 것은 수로 단면의 중심선을 따라서 강도를 정의하면서 이차류의 횡방향 성분만을 사용하였다는 점이다. 그는 중

심선에서는 이차류의 회전류가 대칭을 이루어 수심방향 성분은 무시할 수 있다고 하였다. 그러나 이러한 가정은 단일 만곡부에서만 적합하고, 만곡부가 교호적으로 나타나는 사행수로에서는 이차류의 회전류가 중심선을 기준으로 대칭을 이루지 않기 때문에 연직방향의 유속 성분(v_z)이 횡방향 유속(v_n)에 비교해 무시할 만한 수준으로 볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이차류 강도를 산정하기 위하여 식 (7)을 수정하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} SCI &= \langle f_n^2 \rangle + \langle f_z^2 \rangle = \\ &= \frac{1}{A} \int_A (f_n^2 + f_z^2) dA = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (f_n^2 + f_z^2) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 m 은 단면에서의 측정점의 수, f_z 는 수심방향 유속 v_z^* 의 무차원값으로 식 (7)에서 n 대신 z 를 대입해 다음과 같이 계산한다. 본 연구에서는 이차류의 강도를 중심선을 따라 계산하지 않고 단면 전체에 대해서 계산하기 때문에, 식 (7)에서 중심선에서의 흐름방향 수심평균유속 U_s 를 사용하지 않고, 단면평균유속을 이용하여 계산하였다.

3. 실험 장치 및 조건

3.1 실험 수로 및 계측기기

실험 수로는 직선 길이가 18.8 m이고 폭이 4.9 m이며 높이가 0.6 m인 강재 플랫폼 위에 강재로 제작되었다. 다중 만곡수로의 사행특성은 국내·외 자연하천의 사행특성 및 기존에 수행된 실험의 수로 특성을 고려하여 재현하였다. 제작된 사행수로는 그림 2에 도시한 바와 같이 곡률 반경이 2.4 m이고 중심각이 120°인 만곡부 2개를 포함하고 있다. 유입부에는 흐름을 안정하게 하기 위하여 3개의 스크린을 설치하였다. 수로의 폭은 1 m이고, 높이는 0.6 m이며, 수조의 단면은 직사각형과 곡선형, 2가지 형태로 실험을 수행하였다. 실험용수는 실험 수조의 밑에 위치한 직경 300 mm인 파이프를 통해 공급된다. 세 개의 펌프를 포함한 급수 시스템은 최대 0.50 m³/s의 물을 공급할 수 있다. 실험 유량은 측정 범위가 0.53 ~ 117 l/sec인 전자기 유량계를 이용하여 측정하였다. 수심을 정확하게 조정하기 위해 기계적으로 작동하는 테일게이트를 이용하였으며, 수로의 수심은 포인트게이지를 이용하여 측정하였다.

직사각형에서 실험을 완료한 후 곡선형 수로로 개조하여 유속구조를 측정하였다. 본 연구에서는 곡선형 수

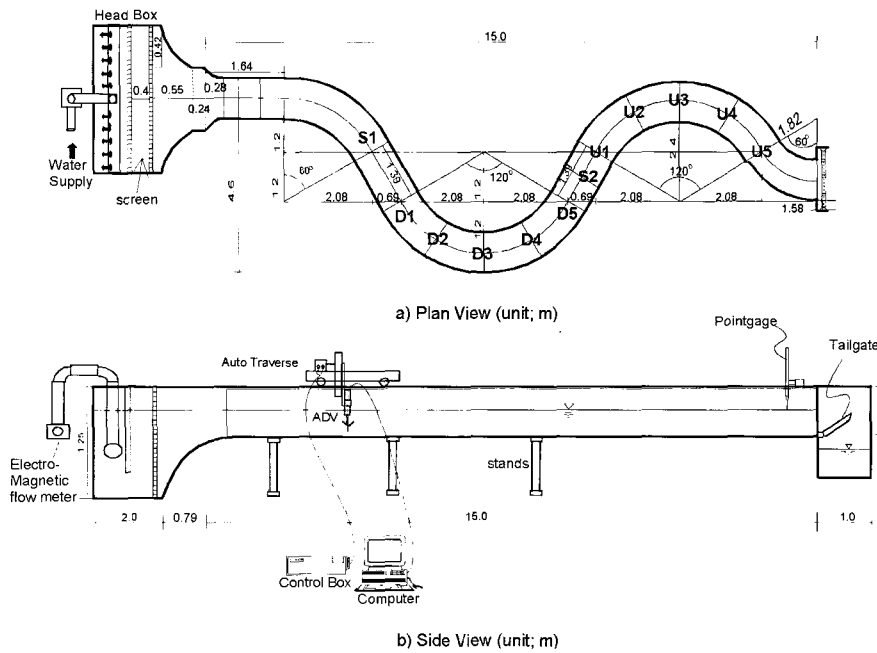


그림 2. 실험 수로

표 1. 곡선형 단면 수로의 최대 수심과 위치 및 해당 단면

제작도면 (그림 4 참조)	최대 수심 (h_T/H)	최대 수심의 횡위치 (cm) (좌안으로부터)	해당 단면
1	1.20	50	C1, D1, U1
2a	1.28	44	C2, C3, C9, C13
3a	1.36	38	S1, U2, U5
4a	1.44	32	C10, C12
5a	1.52	26	U3, U4
6a	1.60	20	C11
2b	1.28	56	C4, C8
3b	1.36	62	D2, D5
4b	1.44	68	C5, C7
5b	1.52	74	D3, D4
6b	1.60	80	C6

표 2. 실험 케이스별 수리량

Case	W/H	Fr	H (cm)	V (cm/s)	
직사각형수로	R070	14.3	0.34	7	28.6
	R101	10.0	0.30	10	30.0
	R151	6.7	0.16	15	20.0
	R201	4.8	0.11	21	14.3
	R203	4.8	0.32	21	42.9
	R301	3.3	0.06	30	10.0
	R303	3.3	0.17	30	30.0
	R402	2.5	0.08	40	15.0
곡선형 수로	N301	3.3	0.06	30	10.0
	N302	3.3	0.12	30	20.0

로를 구현하기 위하여 Almquist와 Holley (1985)가 제안한 방법을 적용하였다. 그들에 따르면 그림 3에 도시한 바와 같이 최심선이 가장 수로 바깥쪽으로 접근할 때 수로의 바깥쪽으로부터 폭의 20%의 지점에 이르게 되고, 이 때 최대수심과 그 횡위치의 관계식은 $h_T/H = 1.6$ (h_T : 최대수심, H : 평균수심)이며, 이는 만곡의 정점에서 조금 하류로 내려간 지점에서 이루어진다. 또한 최심선이 폭의 중앙에 위치할 때, 최대수심과 횡위치의 관계식은 $h_T/H = 1.2$ 이고, 이는 두 굴곡부의 사이의 중점보다 조금 하류에서 발생한다. 그러나 Almquist와 Holley (1985)는 전체 단면의 형태를 묘사하는 관계식을 제시하지 않았기 때문에 본 연구에서는 곡선형 수로의 형상을 결정하기 위해 Seo와 Baek (2004)에 의해 제안된 식을 이용하였다. 그들은 통계적 확률함수인 베타 분포(beta distribution)를 적용하여 자연하천의 수심 및 유속의 횡분포를 묘사하였는데, 연구결과 이 식이 자연하천에 적합함을 밝힌 바 있다. 베타 분포의 범위는 0에서 1이고, 최대값을 특정점에 배정할 수 있다. 특히 베타함수의 0에서 1까지의 영역 넓이가 1인 성질은 모든 단면이 같은 면적을 가짐을 의미한다. 이것이 베타 분포를 채택한 이유이다. 본 연구에서 적용한 베타 분포식은 다음과 같다.

$$f(y) = \frac{h(y)}{H} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} y^{\alpha-1} (1-y)^{\beta-1}, (0 < y < 1) \quad (9)$$

여기서, $h(y)$ 는 y 에서의 수심이고, Γ 는 감마 분포이고, α 와 β 는 베타 분포의 매개변수이다.

본 연구에서는 자연 하천의 단면 형상을 보다 잘 나타내기 위해서 기존의 단면의 사이사이에 부단면들을 삽입하여, 유입부 단면을 C1, C1과 S1 사이에 C2, 이와 같은 방식으로 부단면들을 삽입하여 U5와 테일게이트 사이 단면을 C13이라 하였다. 그리하여 각 단면의 형상은 표 1과 같으며, 이를 도시하면 그림 4과 같다. 각 단면에 단면별 형상의 판자를 삽입한 후 어느 정도 모래를 채우고, 그 위에서 몰타르(mortar)로 부드럽게 곡선형 수로의 형상을 제작한 후 표면에 흰색 페인트를 두 차례 칠하였다.

주흐름 및 이차류의 특성을 알아내기 위한 유속 측정은 micro-ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하였다. 이 micro-ADV는 3차원 유속장을 측정하는 고정밀 유속계로서 초당 50개의 유속값을 측정하며, 탐침으로부터 센서에서 5 cm 떨어져 있는 지점의 3차

원 유속을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 측방향 탐침을 가진 micro-ADV를 이용하였다.

3.2 실험 조건

본 연구는 어떤 특정하천을 대상으로 한 수리모형 실험이 아니므로, 국내·외 하천의 사행특성 및 흐름특성을 대표할 수 있는 조건을 감안하여 실험수로, 실험 유량 등을 결정하였다. 본 연구에서는 표2에 요약한 바와 같이 하폭 대 수심비 2.5 - 14.3, Fr 은 0.06 - 0.34의 범위에서 실험을 수행하였다.

표 2에서 Case R151 등의 R은 직사각형 단면을 의미하고, Case N301과 N302의 N은 곡선형 단면을 의미한다. 만곡수로의 유속장을 관찰하기 위해 그림 2에 도시한 11 지점의 3차원 단면유속을 ADV를 이용하여 측정하였고, Case R151과 R301에서는 이차 셀을 보다 명확하게 확인하기 위해서 단면 D5와 U1의 중간지점에 단면 S2를 추가하여 유속 측정을 하였다. 직사각형 수로에서는 한 단면에 횡방향으로 15~19 지점을, 수심방향으로 4~6 지점을, 곡선형 수로에서는 한 단면에 횡방향으로 19 지점을, 수심방향으로는 8~10 지점을 측정하였다.

4. 실험결과 분석

4.1 주흐름 분포

본 연구에서 측정한 유속장은 u, v, w 로서 이들 유속값을 초당 50개씩 20초간 측정하여 우선 난류 요동을 평활하기 위해서 시간에 대한 평균값을 계산하였다. 이렇게 구한 단면 각 측정에서의 시간 평균 유속값, \bar{u}, \bar{v} 를 수심평균을 하여 주흐름의 분포를 분석하였다. 직사각형 및 곡선형 수로에 대한 대표적인 실험케이스의 결과를 그림 5-6에 도시하였다. 그림 5에서 보면 주흐름은 대체적으로 직선부(S1~D1, D5~U1)에서는 좌우 대칭적인 유속분포를 보이고 있으나, 만곡부에서는 만곡의 내측 제방쪽에서 최대유속이 발생하고 외측 제방쪽에서 최소유속이 발생하고 있음이 밝혀졌다. 따라서 그림 5에 도시한 최대유속선을 분석하면 직선부(S1)에서는 수로 중앙에 위치하다가 첫 번째 만곡부의 시점에서 안쪽 제방에 바짝 접근하며 만곡의 정점을 지나면서 다시 수로 중앙쪽으로 이동하여 이어지는 두 번째 만곡부에서는 다시 안쪽 제방에 위치함을 알 수 있다. 이는 직사각형 수로에서는 주흐름의 최대유속선이 가장 짧은 경로를 통해서 수로를 지나감을 의미한다. 이러한 형태로 최대유속선이 발생하는 것은 여러 연구자들 (Almquist 와 Holley,

1985; Demuren 과 Rodi, 1986; Shiono 와 Muto, 1998; Baek, 2004; 등)에 의해 수행된 실험 결과와 일치하는 것이다.

그림 6에 도시한 곡선형 수로의 경우 주흐름의 분포가 직사각형 수로의 결과와 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 만곡부의 내측 제방쪽에서 최대유속이 발생하고 외측 제방쪽에서 최소유속이 발생하고 있는데, 이는 자연하천의 만곡부에서 최대유속선이 중심선을 따라 발생하는 현상과는 상이한 결과를 보여준다. 그 이유는 다음과 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 하폭 전체에 걸쳐 모든 유선의 총수두는 같다. 만곡부에서는 원심력에 의해 외측의 수면이 높고, 내측이 낮은 편수위가 발생하여 외측의 속도수두($=V_{out}^2/2g$)에 비해 내측의 속도수두($=V_m^2/2g$)가 크다. 따라서 바닥마찰에 의한 손실수두가 없다고 가정하면 단면형상에 관계없이 만곡부에서는 내측의 유속이 외측의 유속에 비해 커지게 된다. 그러나 실제 자연하천에서는 바닥 마찰과 사행도에 따른 편수위의 다변성으로 인해 이러한 현상이 발생하지 않고 최대유속선의 발생 위치가 다양해진다 (Henderson, 1966). 그리고 Krishnappan 과 Lau (1977)는 자연형 단면을 갖는 다양한 사행수로에서 사행도에 따라 최대유속선의 발생 위치가 다변화됨을 실험실 실험을 통해 확인한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 직사각형 뿐만 아니라 곡선형 단면에도 작은 조도와 사행도의 영향으로 인해 내측에 큰 유속이 발생하고 있다.

4.2 이차류 특성

(1) 이차류 유속장

본 연구에서 측정된 이차류 유속장 중에서 대표적인 실험케이스에 대한 \bar{v} , \bar{w} 를 그림 7에 도시하였다. 그림 8은 직사각형 수로에서의 이차류의 생성과 소멸 과정을 보여준다. 이 그림들에서 황좌표 y 는 하류를 보고 좌측 제방을 기준점(영점)으로 설정하여 도시한 것이다. 그림 7을 분석해 보면, 첫 번째 만곡부의 시점인 D1단면에서 반시계방향으로 회전하는 이차류가 생성되다가 직선부에서 이러한 회전류가 소멸하고 일방향으로 흐르는 흐름이 지배적인 단계를 거쳐서 두 번째 만곡부(U1, U3)에서는 시계방향으로 회전하는 이차류가 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 시계방향의 이차류는 다시 단면 U5에 이르러서는 일방향 흐름으로 바뀌게 된다. 여기서 중요한 점은 만곡부에서의 이차류의 회전방향이 자연하천의 만곡부에서 생성되는 이차류와 반대로 나타나고 있다는 점이다. 이는 직사각형 수로에서의 주흐름의 분포 특성이 자연하천의 만곡부에서의 특성과 상이

한 결과를 보이는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다. 그러나 그림 8에 도시한 이차류에 대한 흐름함수도를 분석해 보면, 첫 번째 만곡부의 시점인 D1단면에서 회전 방향이 반대인 두개의 이차류 셀이 존재함을 알 수 있는데, 이러한 두 개의 이차류 셀은 직선부에 접근하면 소멸되었다가 두 번째 만곡부의 시점인 U1단면에 이르러 다시 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Rozovskii (1961)가 교호적으로 만곡의 방향이 바뀌는 사행수로 실험에서 관찰한 바 있는 기존의 회전셀과 새로이 발생하는 회전셀의 거동과 일치한다. 그러나 본 연구의 결과에서는 보다 큰 규모의 셀의 회전방향은 전술한 바와 같이 자연하천의 만곡부에서 생성되는 이차류와 반대로 나타나고 있다.

그림 9는 회전 방향이 반대인 두개의 이차류 셀이 생성되는 단면 중 가장 명확하게 확인할 수 있는 단면 U1에서의 흐름함수도를 각 실험케이스에 대해 도시한 것이다. 이 그림에서 모든 실험케이스에서 단면 U1에서는 이차류 주셀뿐 아니라 이차 셀을 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 수심이 커질수록 (즉 하폭 대 수심비가 작아질수록) 이차 셀이 미약하게 나타나고 있음을 발견할 수 있다.

곡선형 수로에서의 이차류 거동을 그림 10-11에 도시하였다. 직사각형 수로와는 상이하게 대부분의 단면에서 서로 다른 방향으로 회전하는 이차류 셀들을 보다 명확하게 확인할 수 있다. 여기서 주목할 만한 점은 이차류의 생성과 소멸이 활발하게 발생하고, 직선부에서도 두개의 이차류 셀이 생성되고 있다는 점이다. 만곡부에서는 주셀보다 바깥 제방 셀의 규모가 매우 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 곡선형 단면 수로의 경우, 만곡부에서의 이차류 주셀의 회전방향이 자연하천의 만곡부에서 생성되는 이차류와 동일하게 나타나고 있으나, 그 규모가 미약하고 전반적으로 바깥 제방 셀이 지배적으로 생성된다는 점이 자연하천에서의 이차류 특성과 상이한 점이다. 이는, 전술한 바와 같이, 본 연구에서 실험한 곡선형 수로의 경우 수로 바닥 경계면의 조도가 전체적으로 작기 때문인 것으로 사료된다.

(2) 이차류 강도

본 연구에서는 식 (8)을 이용하여 단면 평균 이차류 강도를 계산하여 표 3에 수록하였다. 직사각형 및 곡선형 수로에 대하여 이차류 강도 변화를 그림 12에 도시하였다. 그림 12에서 이차류강도는 직사각형 수로의 경우 전체 구간을 통해 작게 나타나다가 두 번째 만곡부의 정점인 단면 U2-U3에서 가장 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 곡선형 수로에서는 수로의 직선구간에서는 작게 나타나나 만곡부에서는 크게 나타나는

표 3. 단면별 이차류의 강도

지점 case	S1	D1	D2	D3	D4	D5	U1	U2	U3	U4	U5
R151	0.3301	0.2658	0.1991	0.1906	0.4038	0.4362	0.4143	1.0017	0.6398	0.2917	0.3418
R201	0.3591	0.2057	0.2905	0.2164	0.3548	0.4219	0.4439	0.7585	0.5904	0.4216	0.3258
R203	0.2756	0.1548	0.1576	0.2466	0.3710	0.3687	0.4379	0.8945	0.8591	0.5414	0.2929
R301	0.4069	0.2121	0.1726	0.1467	0.2792	0.3169	0.3504	0.6771	0.7075	0.4165	0.2109
R303	0.3257	0.2066	0.1512	0.1745	0.3202	0.3235	0.2649	0.5401	0.6242	0.4090	0.2171
R402	0.3980	0.2578	0.1948	0.1868	0.2501	0.2887	0.2387	0.5060	0.6095	0.5766	0.3518
N301	0.4375	0.2445	0.1664	0.8824	0.6571	0.4519	0.2141	0.3811	1.3423	0.7343	0.3448
N302	0.4708	0.2786	0.1817	0.7668	0.4824	0.4179	0.2408	0.4710	1.2771	0.7172	0.3494

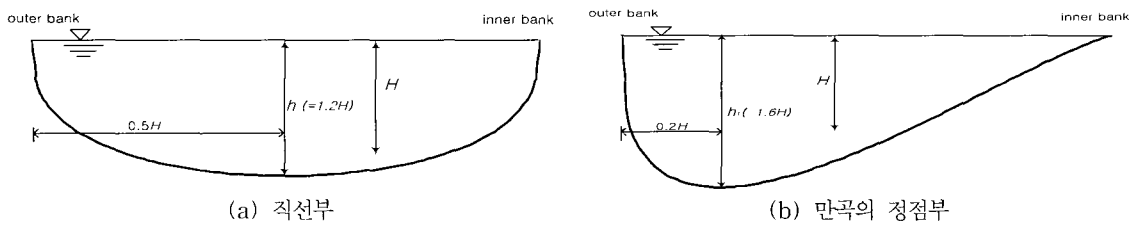


그림 3. 곡선형 수로의 개념도 (Almquist와 Holley, 1985)

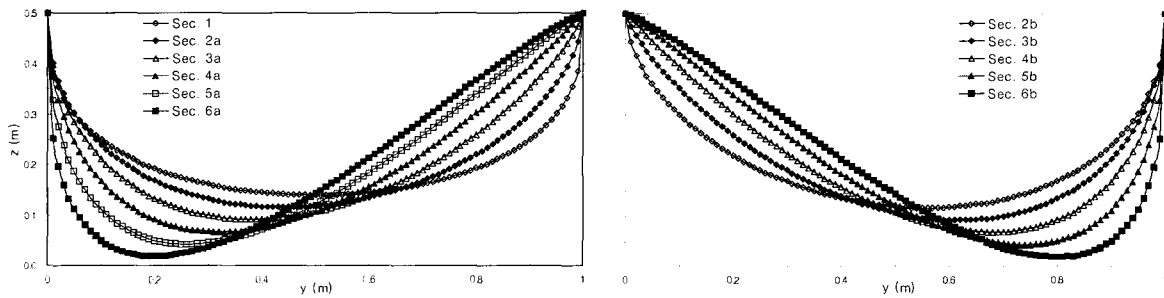


그림 4. 곡선형 수로 형상

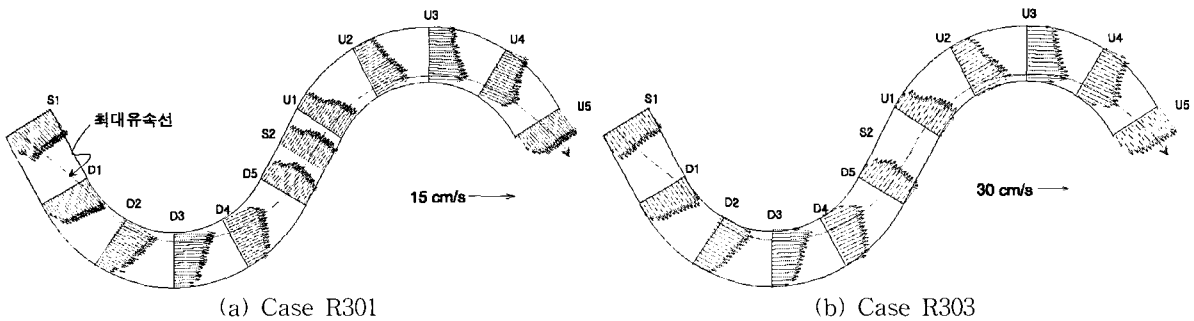


그림 5. 직사각형 수로에서의 수심평균 흐름방향 유속 벡터도

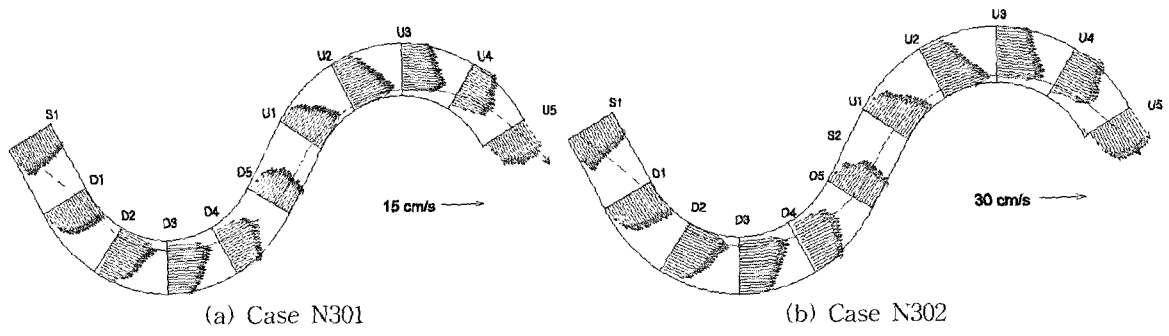


그림 6. 곡선형 수로에서의 수심평균 흐름방향 유속 벡터도

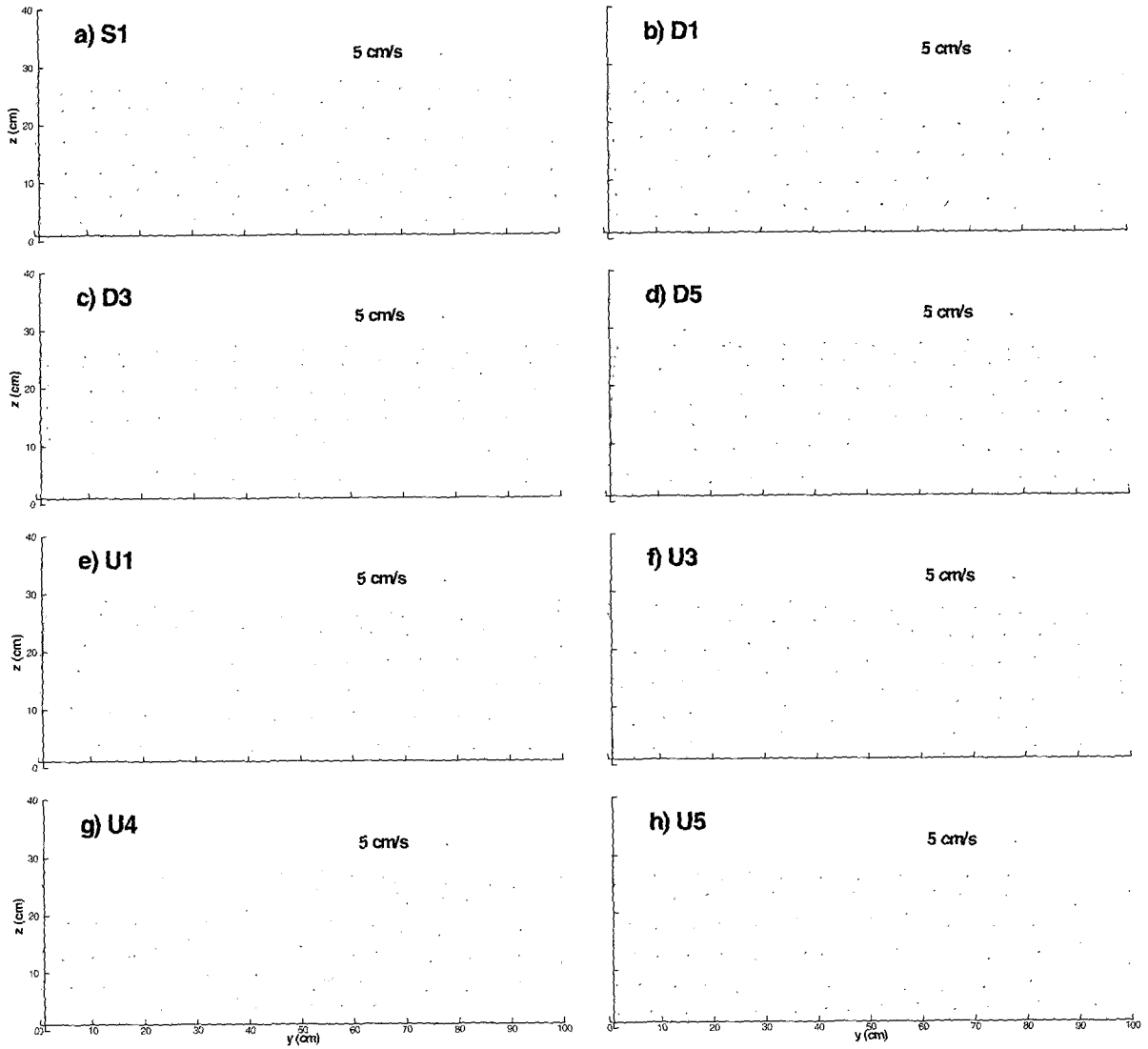


그림 7. 직사각형 수로의 지점별 횡단면 이차류 벡터도 (Case R303)

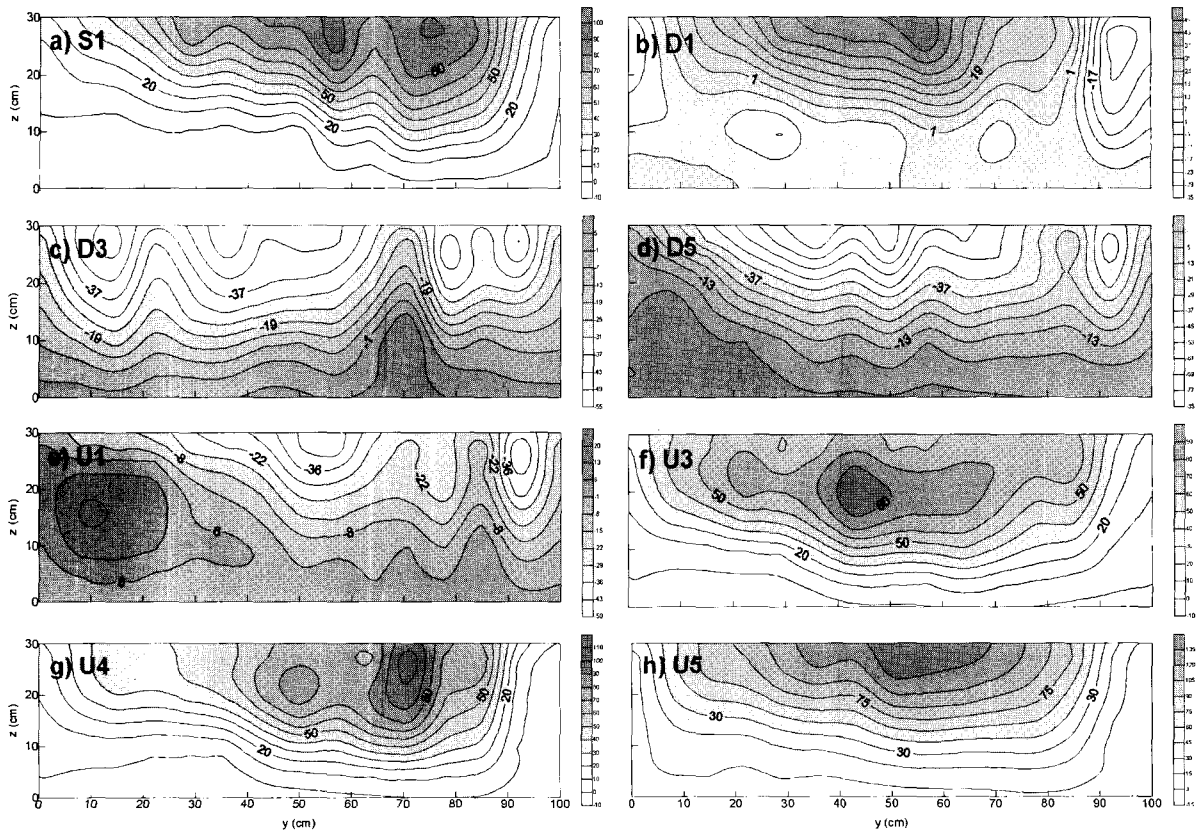


그림 8. 직사각형 수로의 지점별 횡단면 이차류 흐름함수선도 (Case R303)

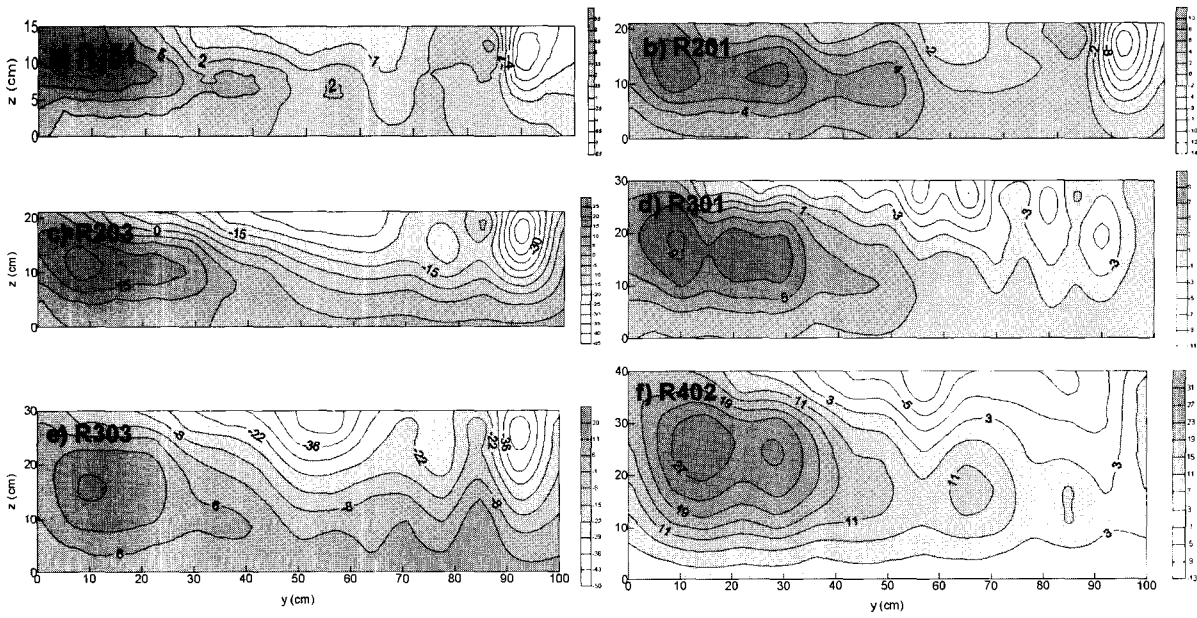


그림 9. 직사각형 수로의 case별 U1지점 횡단면 흐름함수도 비교 (직사각형 단면; U1)

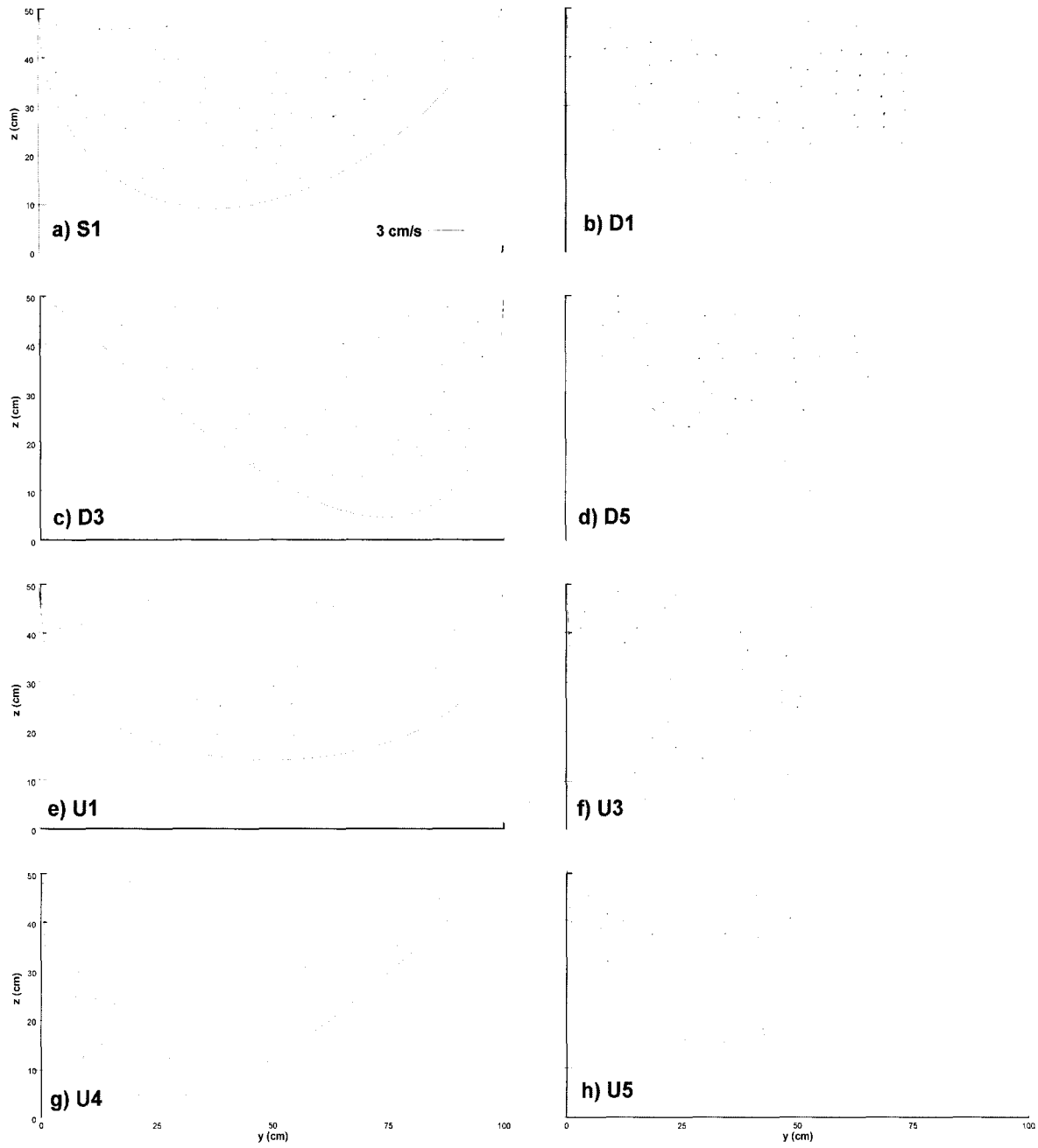


그림 10. 곡선형 수로의 지점별 횡단면 이차류 벡터도 (Case N301)

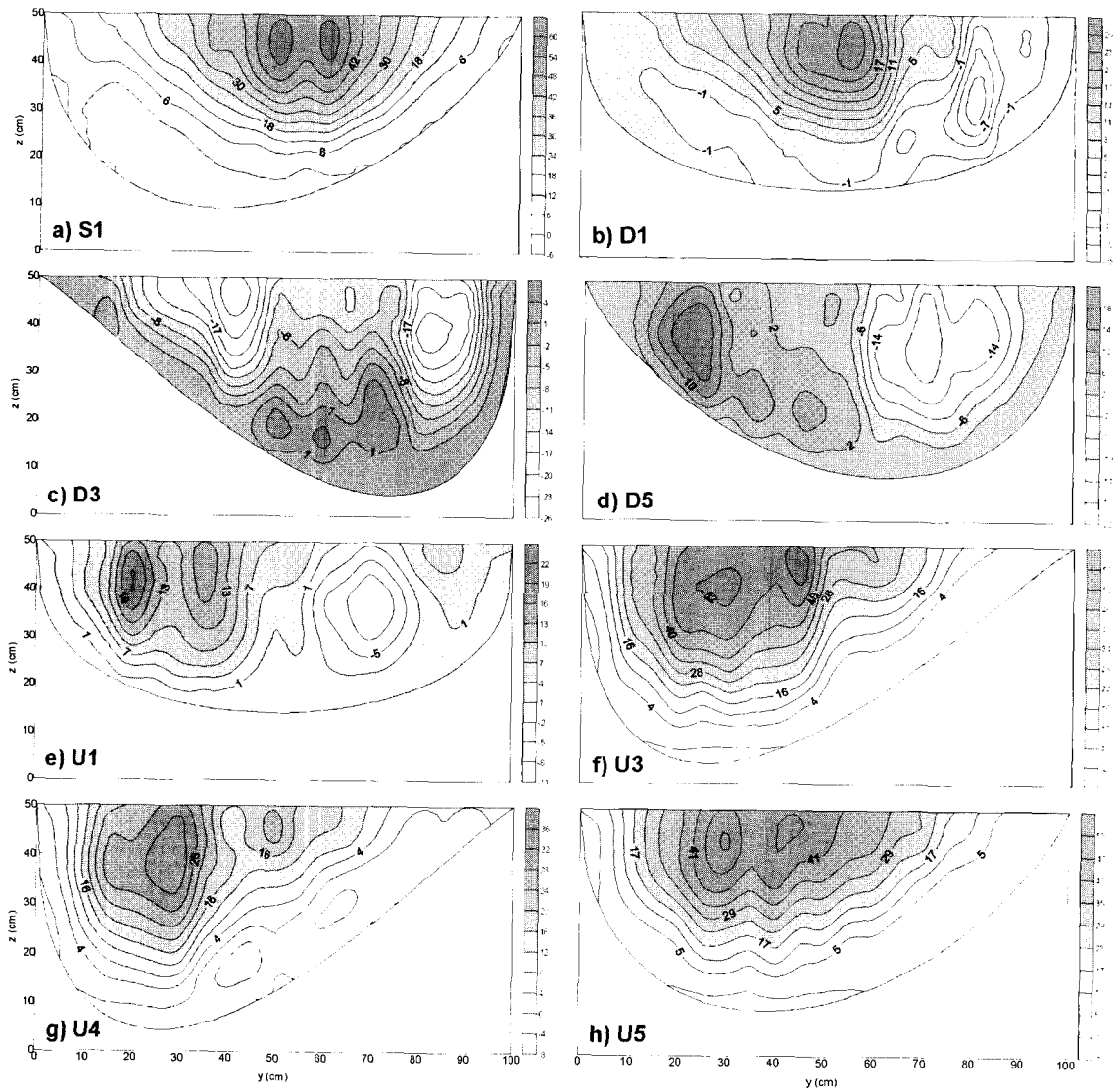


그림 11. 곡선형 수로의 지점별 횡단면 이차류 흐름함수선도 (Case N301)

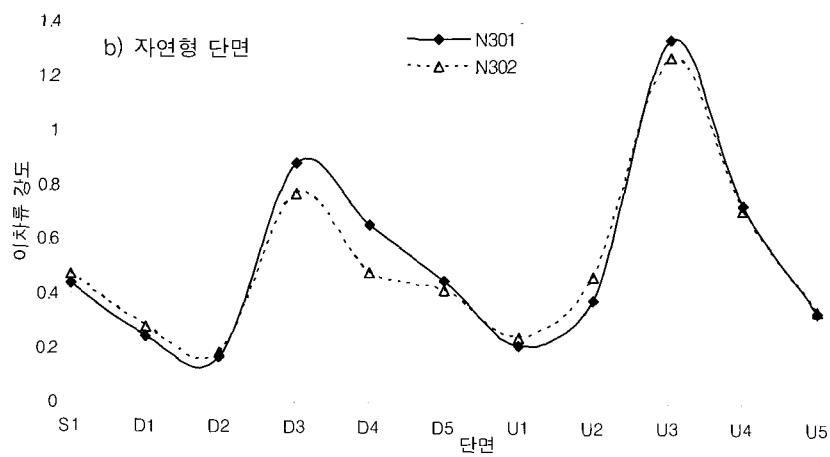


그림 12. 지점에 따른 이차류 강도의 변화

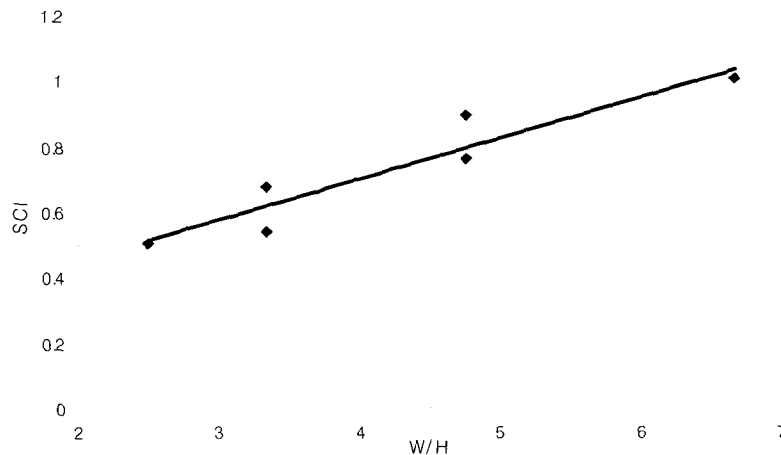


그림 13. 하폭대 수심비에 대한 이차류 강도의 변화(U2 단면)

주기적인 현상을 보이고 있다. 또한 첫 번째 만곡부보다는 두 번째 만곡부에서 더 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 직사각형 단면의 경우와 비교하여 곡선형 단면의 이차류 강도의 최대값이 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 이차류 유속장 특성에서도 밝혀진 바와 같이 곡선형 단면의 경우 서로 다른 방향으로 회전하는 두개의 이차류 셀이 보다 강하게 생성되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

직사각형 수로에 대한 이차류 강도의 최대값(U2 단면에서 값)과 하폭 대 수심비(W/H)와의 관계를 그림 13에 도시하였다. 그림 13를 통하여 하폭 대 수심비가 커질수록 이차류 강도가 증가함을 알 수 있다. 이는, 그림 9에서 볼 수 있듯이, 하폭 대 수심비가 증가할수록 이차 셀이 강하게 나타나고 있기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 만곡부가 교호적으로 나타나는 사행 하천의 흐름구조를 구명하기 위하여 두 개의 만곡부로 이루어진 사행수로에서 실험을 수행하여 주흐름과 이차류의 흐름 특성을 분석하였다. 실험 결과 다음과 같은 사실을 발견하였다.

직사각형 수로의 경우, 주흐름은 직선부에서는 좌우 대칭적인 유속분포를 보이고 있으나, 만곡부에서는 만곡의 내측 제방쪽에서 최대유속이 발생하고 외측 제방쪽에서 최소유속이 발생하고 있음이 밝혀졌다. 이는 직사각형 수로에서는 주흐름의 최대유속선이 가장 짧은 경로를 통해서 수로를 지나감을 의미한다. 이러한 형태로 최대 유속선이 발생하는 것은 사행하는 자연하천의 만곡부에서 최대유속선이 최심선을 따라 발생하는 현상과는 상이한 결과이다.

곡선형 수로의 경우 주흐름의 분포가 직사각형 수로의

결과와 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 만곡부에서 만곡의 내측 제방쪽에서 최대유속이 발생하고 외측 제방쪽에서 최소유속이 발생하고 있는 데, 이는 자연하천의 만곡부에서 최대유속선이 최심선을 따라 발생하는 현상과는 상이한 결과이다. 이는 본 연구에서 실험한 곡선형 수로의 경우, 수로 바닥 경계면의 조도가 전체적으로 작아 수심이 얇은 만곡의 내측 제방에서 유속이 크게 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

이차류의 경우, 직사각형 단면의 결과는 첫 번째 만곡부의 시점에서 반시계방향으로 회전하는 이차류가 생성되다가 직선부에서 이러한 회전류가 소멸하고 일방향으로 흐르는 흐름이 지배적인 단계를 거쳐서 두 번째 만곡부에서는 시계방향으로 회전하는 이차류가 생성되고 있음을 보여 주고 있다. 만곡부에서의 이차류의 회전방향이 자연하천의 만곡부에서 생성되는 이차류와 반대로 나타나고 있는 데, 이는 직사각형 수로에서의 주흐름의 분포 특성이 자연하천의 만곡부에서의 특성과 상이한 결과를 보이는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다.

직사각형 단면의 경우 이차류에 대한 흐름함수도를 분석한 결과, 첫 번째 만곡부의 시점에서 회전 방향이 반대인 두개의 이차류 셀이 존재함을 알 수 있는데, 이러한 두 개의 이차류 셀은 직선부에 접근하면 소멸되었다가 두 번째 만곡부의 시점인 U1단면에 이르면 다시 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 단면 U1에서는 모든 실험케이스에서 이차류 주셀뿐만 아니라 이차 셀이 생성되고 있으며, 하폭 대 수심비가 작아질수록 이차 셀이 미약하게 생성되고 있음이 밝혀졌다.

곡선형 수로에서의 이차류 거동을 분석한 결과, 직사각형 수로와는 상이하게 대부분의 단면에서 서로 다른 방향으로 회전하는 이차류 셀들이 보다 강하게 생성되고 있음이 밝혀졌다. 곡선형 수로의 경우, 만곡부에서의 이차류 주셀의 회전방향이 자연하천의 만곡부에서 생성되

는 이차류와 동일하게 나타나고 있으나, 그 규모가 미약하고 전반적으로 바깥 제방 셀이 지배적으로 생성된다는 점이 자연하천의 이차류 특성과 상이한 점이다. 이는 본 연구에서 실험한 곡선형 수로의 수로 바닥 경계면의 조도가 전체적으로 작기 때문인 것으로 사료된다.

이차류강도는 직사각형 단면의 경우 전체 구간을 통해 작게 나타나다가 두 번째 만곡부의 정점에서 가장 크게 나타나고 있음이 밝혀졌다. 그러나 곡선형 단면인 경우 수로의 직선구간에서는 작게 나타나나 만곡부에서는 크게 나타나는 주기적인 현상을 보이고 있다. 직사각형 단면의 경우와 비교하여 곡선형 단면의 이차류 강도의 최대값이 다소 크게 나타나고 있음이 밝혀졌다.

직사각형 수로에 대한 이차류 강도의 최대값과 하폭 대 수심비와의 관계를 분석한 결과, 하폭 대 수심비가 커질수록 이차류 강도가 증가하고 있음이 밝혀졌는데, 이는 하폭 대 수심비가 증가할수록 주셀뿐만 아니라 이차셀이 강하게 생성되고 있기 때문인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업 수자원의 지속적 개발 기술사업단의 연구비 지원(과제명: 하천흐름 및 하상변동 해석기술 개발)과 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

Almquist, C. W., Holley, E. R. (1985). *Transverse mixing in meandering laboratory channels with rectangular and naturally varying cross sections*. Univ. of Texas at Austin, Austin, Texas.

Baek (2004). *Transverse mixing in meandering channels with unsteady pollutant source*. PhD thesis, Seoul National Univ., Korea.

Bathurst, J. C., Thorne, C. R., and Hey, R. D. (1979). "Secondary flow and shear stress at river bends." *J. Hydr. Div.*, Vol. 105, No. 10, pp. 1277-1295.

Blanckaert, K., Graf, W. H. (2001). "Mean flow and turbulence in open-channel bend." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 835-847.

Blanckaert, K. (2002). "Secondary currents measured in sharp open-channel bends." *Proc. of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2002*, Louvain-la-Neuve, Belgium, Vol. 1, pp. 117-125.

Booij, R. (2002). "Modelling of the secondary flow

structure in river bends." *Proc. of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2002*, Louvain-la-Neuve, Belgium, Vol. 1 pp. 127-133.

Boxall, J. B., Guymer, I. and Marion, A. (2003). "Transverse mixing in sinuous natural open channel flows." *J. Hydr. Res.*, Vol. 41, No.2, pp. 153-165.

Demuren, A. O., Rodi, W. (1986). "Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels." *J. Fluid Mech.*, Vol. 172, pp. 63-92.

De Vriend, H. J. (1981). "Velocity redistribution in curved rectangular channels." *J. Fluid Mech.*, Vol. 107, pp. 423-439.

Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press.

Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan Publishing Co., New York.

Krishnappan, B. G., Lau, Y. L. (1977). "Transverse mixing in meandering channels with varying bottom topography." *J. Hydr. Res.*, Vol. 15, No. 4, 351-371.

Leschziner, M. A., Rodi, W. (1979). "Calculation of strongly curved open channel flow." *J. Hydr. Div.*, Vol. 105, pp. 1297-1314.

Naot, D., Rodi, W. (1982). "Calculation of secondary currents in channel flow." *J. Hydr. Div.*, Vol. 108, pp. 948-968.

Rozovskii, I. L. (1961). *Flow of water in bends of open channels*. Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem (in Russian, 1957).

Seo, I. W. and Baek, K. O. (2004). "Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 227-236.

Shiono, K., Muto, Y. (1998). "Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow." *J. Fluid Mech.*, Vol. 376, pp. 221-261.

Shukry, A. (1950). "Flow around bends in an open flume." *Transactions*, ASCE, Vol. 115, pp. 751-779.

Thomson, J. (1876). "On the origin and winding of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow around bends in pipes." *Proceedings, Royal Society of London*, Vol. 25, pp. 5-8.

(논문번호:04-28/접수:2004.02.10/심사완료:2004.06.07)