

# 개수로 만곡부에서의 중심각 변화에 따른 흐름특성

## Flow Characteristics for the Variation of Total Angles in Open Channel Bends

李	鍾	泰*
Lee,	Jong	Tae
尹	世	儀**
Yoon,	Sei	Eui

### Abstract

The flow characteristics in the shallow open channel bends are investigated, whose total angles were 30, 60, 90, 120, 150 and 180 in degree, and whose bed frictions were relatively rough ( $C=30$ ) and smooth ( $C=60$ ), respectively. The terms analyzed in this study are the water surface profile, the distribution of velocity and the flow direction, relating to the various total angles in the bends.

The maximum depth in the bends could be found at the outside section of the location of  $15^\circ$  local angle from the bend inlet, having no relation to the total angle and bed friction.

It is supposed that the path of maximum velocities is especially influenced by the bottom friction when the total angles are bigger than 150 in degree, approximately.

The ratio of the superelevation to the velocity head seems to increase as the total angle of the bends increases.

The flow direction is skewed to the inner side at the bend inlet, and skewed to the outside at the bend outlet, regardless of their total angles.

### 요 지

본 연구는 수심이 작은 만곡수로에서 중심각과 저면마찰의 변화에 따른 흐름특성을 분석하기 위하여 만곡부의 중심각이  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ 인 수로모형을 선택하였으며, 저면마찰이 비교적 클 경우 ( $C=30$ )와 작은 경우 ( $C=60$ )로 구분하였다. 만곡수로내의 중심각 변화에 따른 수면형, 유속분포 및 유향 등에 관하여 검토하였다.

만곡수로내의 최대수위 발생지점은 중심각에 관계없이 만곡수로 입구로부터  $15^\circ$  하류단면부근의 외측하단에서 발생된다.

저면마찰조건이 최대유속선의 이동경로에 미치는 영향은 만곡수로의 중심각이 약  $150^\circ$  이상인 경우에서 뚜렷하다.

속도수두에 대한 횡방향 수면차의 비는 만곡수로의 중심각이 증가할수록 커지는 경향을 보여

\* 正會員 · 京畿大學校 工科學 副教授, 土木工學科

\*\* 正會員 · 京畿大學校 工科學 助教授

주었다.

중심각에 관계없이 만곡부 시점에서의 유향은 내측으로 중점에서는 외측으로 편기된다.

### 1. 서 론

만곡성향은 자연하천에서의 대표적인 흐름특성중의 하나이며 이러한 성향은 하도만곡부에서 각종 수공학적 문제들을 야기시키고 있다. 따라서 안정하도유지, 홍수소통, 취수, 관개용수로 주운수로 계획수립 등과 관련하여 만곡부의 위치, 단면, 곡률반경 등의 적절한 선정은 매우 신중히 고려되어야 한다.

일반적으로 대부분의 자연하천은 수심에 비해 하폭이 넓고 완만한 곡률을 나타내고 있다. 이 경우에서의 물입자의 연직방향의 운동성분은 충분히 작다고 가정할 수 있으며 따라서 수평방향의 운동성분이 전체흐름의 특성을 지배하는 경우로 볼 수 있으므로, 2차원 부정류의 흐름으로 간주하여 해석한 결과는 비교적 실제현상에 접근된 결과치를 보여줄 것으로 예측된다.

하폭에 비해 수심이 작고( $B/D \geq 10$ ), 곡률반경이 하폭에 비해 큰( $B/R_c \geq 0.5$ ) 만곡수로에서는 박리현상(separation)이나 jump 현상이 발생되지 않으며 2차 흐름성분의 크기는 주방향성분에 비해 매우 작다.<sup>(1)</sup> 이러한 조건의 수로에서 I.L. Rosovskii 는 만곡부 종횡단면의 유속분포, 2차류의 생성과 소멸, 에너지손실 등을 분석하고, 실측치와 비교함으로써 만곡수로의 흐름특성 분석에 큰 공헌을 하였다.<sup>(2)</sup> 한편 C.L. Yen, B.C. Yen 등은 하상조건을 고정하상과 이동하상으로 구분하여 흐름특성을 분석하였다.<sup>(3,4)</sup> 또한 흐름함수를 도입한 Frank Engeland, Ikeda 등의 연구가 있었으며, 전자계산기의 대형화에 힘입어 수치해석적 방법에 의한 많은 연구가 계속하여 이루어졌는바 J.R.D. Francis, H.J. Vriend, Wolfgang Rodi, J.P. Kalkwijk 등은 운동방정식과 연속방정식 등으로부터 수면형, 유속분포 등을 계산하였고, Rosovskii의 실측치와 비교하여 비교적 만족할 만한 결과를 얻었다<sup>(5,6,7,8)</sup>. N. Struiksmas 는 2차원 흐름해석의 결과치로부터 하상변동해석을 시도하였으며, 최근

A.S.A. Hussein 는 하상편차각(*bed deviation angle*)에 관하여 연구 발표하였고, J.P.TH. Kalkwijk 는 Coriolis 가속도의 영향을 고려하여 흐름특성을 연구한 바 있다<sup>(9,10,11)</sup>.

상기한 바와 같이 만곡수로에서의 흐름특성을 분석한 연구들은 비교적 많았으나, 중심각의 변화에 따른 흐름특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 수심이 작은 만곡수로에서의 2차원 부정류의 운동 및 연속방정식을 기본방정식으로 하고, 만곡수로의 중심각과 저면마찰의 변화에 따른 흐름의 특성을 분석하기 위하여 중심각이 서로 다른 각종 수로모형들을 선택하였으며, 에너지 손실에 관하여는 수로의 바닥이 비교적 평탄한 경우( $C=60m^{1/2}/s$ )와 거치른 경우( $C=30m^{1/2}/s$ )의 두가지로 구분하여 각각의 경우에 대하여 수치모형을 통하여 수면형, 유속분포 및 유향 등의 특성을 검토하였다.

### 2. 기본방정식

수심이 하폭에 비해 작고 곡률반경이 하폭에 비해 큰 만곡수로에서의 깊이 방향의 수압은 정수압 분포로 볼 수 있으며, 대기압은 일정하고, 바람의 영향을 무시하면, 유효용력의 크기는 저면마찰에 비해 매우 작다. 상기 조건을 고려하여 구성된 2차원 부정류에 대한 운동방정식과 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + P \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{D+H} \right) + Q \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q}{D+H} \right) - fQ + g(D+H) \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{P \sqrt{P^2 + Q^2}}{C^2(D+H)^2} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + P \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{D+H} \right) + Q \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q}{D+H} \right) + fP + g(D+H) \frac{\partial H}{\partial y} + g \frac{Q \sqrt{P^2 + Q^2}}{C^2(D+H)^2} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

여기서,  $P, Q : x, y$  방향의 성분유량

$D$  : 수심(기준수위)

$H$  : 변동수위

$f$  : Coriolis 가속도

$C$  : Chezy 계수

식 (1), (2), (3)을 일련의 차분 방정식으로 구성하기 위하여 Abbott의 차분형식을 기본구조로 하였으며, 이들의 해를 구하기 위하여 double sweep 알고리즘을 적용하였다<sup>(12)</sup>.

본 수치해석 모형에 관하여서는 L.F.M.(Laboratory of Fluid Mechanics of Delft University of Technology) 및 I.I.H.R.(Iowa Institute of Hydraulics Research) 실험수로에서의 수리실험 결과치와의 비교를 통하여 그 적용성을 검토한 바 있다<sup>(13)</sup>.

본 수치실험에서의 초기조건은 기준수위,  $D$ 인 수평수면으로서, 그 유속은 0.0이다. 시간이 경과함에 따라 상류단에서의 수위를 서서히 일정수위까지 상승시키며, 부정류의 흐름은 점차로 정류 상태에 이르게 되어, 수위, 유속 및 유량은 일정한 값을 나타낸다. 벽면에서의 법선방향 유속성분은 0.0으로 하였으며, 하류 개방단에서의 격점은 수위점으로 배열하였다.

### 3. 중심각의 변화에 따른 흐름특성

개수로 만곡부에서 중심각의 변화에 따른 흐름특성을 분석하기 위하여 중심각을  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ 로 각각 구분하였다. 입구와 출구에는 하폭의 3배되는 직선수로를 배치하여 직류부에서 곡류부로 연결되는 천이구간으로 하였다. 수로들의 폭, 곡률반경, 수면경사 등은 모든 수로에서 동일하게 유지시킴으로서 같은 흐름조건하에서, 중심각과 마찰의 크기만을 변화시키면서 이로 인한 영향을 추적할 수 있도록 하였다. 본 수치실험에서 사용된 수로의 수심은  $D=0.18m$ , 폭  $B=1.7m$ , 반경  $R_c=4.25m$ , 하상은 수평이며 정상상태에서의 유량은  $0.187m^3/sec$ , 평균유속은  $0.61m/sec$ , Froude 수는 약 0.46이다. 따라서,  $B/D$ 의 값은 9.4이고  $B/R_c$ 의 값은 0.4이다. 하도의 거치른 정도와 흐름의 양상에 따른 각종 에너지 손실의 영향을 고려하기 위하여, 비교적 마찰이 큰 경우 ( $C=30$ )와 작은 경우( $C=60$ )의 두가지로 구분

하였다.

#### 3.1 수 위

만곡부의 중심각과 내외측 수면형태의 관계를 그림 1과 2에 표시하였다. 그림 1은 저면마찰이 작은 경우이고 그림 2는 큰 경우이다. 여기서,  $H/H_0$ 는 직선수로 시점에서의 기준수면고( $D$ )로부터의 상승수위  $H_0$ 에 대한 임의의 지점 상승수위  $H$ 의 비이다. 만곡수로 입구 상하류 부분의 직선수로에서의 수면형태는 그 변화의 정도가 작으므로 만곡부내에서의 수면형태만을 표시하였다. 그림 1과 그림 2로부터 만곡부 외측에 발생하는 최대 수위의 발생단면은 중심각과 저면마찰의 변화와 관계없이 만곡수로 입구로부터  $15^\circ$ 하류부근임을 발견할 수 있었으며 이 지점을 기점으로 하여 외측 흐름 주방향의 수면경사도는 역경사에서 하향경사로 변환된다. 이때 내측 경사도는 외측과는 달리 하향 경사수면을 지속적으로 보여 주므로 이러한 상태에서 연속방정식을 만족시키기 위해서는 만곡수로 입구 내측흐름에서 가속 작용이, 외측흐름에는 감속작용이 발생됨을 알 수 있다. 만곡수로내에서는 원심력의 영향으로 횡방향 수면경사가 발생되다가 하류부 직선수로에 도달하면 서서히 소멸된다. 흐름이 상류의 직선수로로부터 만곡부로 진행되면서 외측 수위가 역경사로 상승되는 현상은 중심

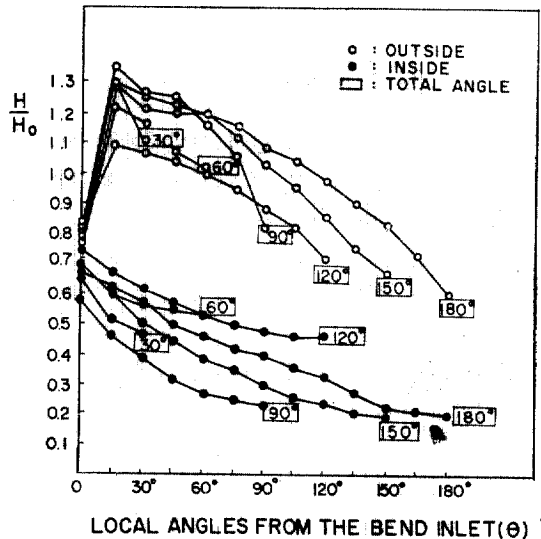


그림 1. 중심각과 수로 내외측에서의 수위상승비  $H/H_0$ ( $C=60$ )

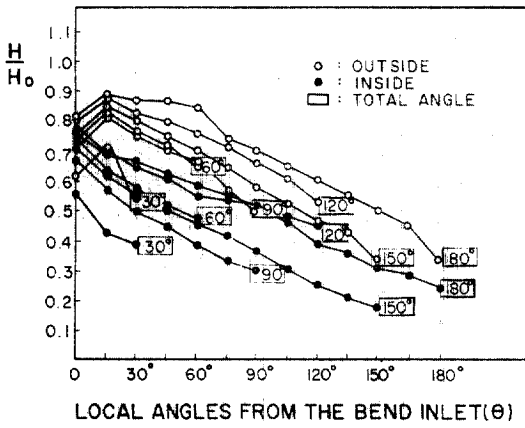


그림 2. 중심각과 수로 내외측에서의 수위상승비  $H/H_0$  ( $C=30$ )

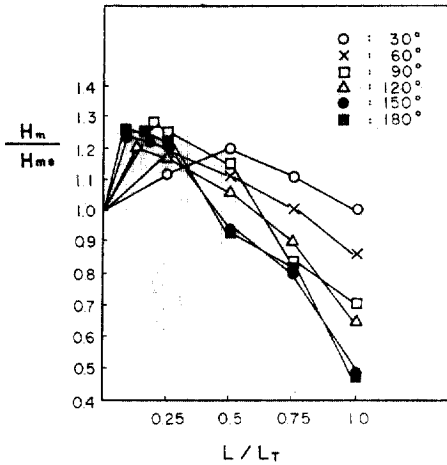


그림 3.  $L/L_t$ 와  $H_m/H_{m0}$  ( $C=60$ )

각과 Chezy 계수에 관계없이 동일하게 나타나나 그 수위 상승고 및 횡 경사도는 Chezy 계수가 클수록 크다. 즉, 저면마찰이 작은 만곡수로에서는  $H/H_0$ 가 1.0보다 큰 부분이 존재하나 저면마찰이 큰 경우에는 그 값이 모든 지점에서 1.0보다 작다.

그림 3에 만곡부 전체길이( $L_t$ )에 대한 만곡부 입구로부터 임의 지점까지의 거리( $L$ )의 비,  $L/L_t$ 와 만곡부 시점의 중심점 수위,  $H_{m0}$ 에 대한 임의 위치에서의 중심수위,  $H_m$ 과의 비,  $H_m/H_{m0}$ 와의 관계를 표시하였다. 대체로 중심수위는  $L/L_t$ 가 증가됨에 따라 역경사로 상승하다가  $L/L_t$ 가 약 0.5를 넘으면 수위는 급히 하강하

여 대개 0.75 정도에서는  $H_m/H_{m0} < 1.0$ 에 이른다. 그러나, 중심각이 매우 작은 경우( $\theta=30^\circ$ )에는 만곡부에서의 중심수위는 항상 만곡부 시점 수위보다 높음을 보여 주었다. 전체적으로는 중심각이  $90^\circ$ 일때  $H_m/H_{m0}$ 는 가장 큰 값을 나타내고 있다.  $L/L_t \geq 0.75$  이후의 지점에서의  $H_m/H_{m0}$ 는 중심각에 반비례하는 경향을 보여 주었으며 이러한 현상은 흐름의 재분포 구간 및 벽면의 반사, 수로의 길이 등의 조건이 상이함으로써 나타나는 결과로 생각된다.

### 3.2 유속

유속의 크기와 그 분포상황은 수위와 더불어 만곡부의 흐름특성을 나타내는 주요인자로서 하상변동, 하천지형에도 큰 영향을 준다. 그림 4에는 중심각 변화에 따른 최대 유속선의 이동경로를 나타내었다. 최대유속선은 중심각과 저면마찰에 관계없이 전반적으로 만곡수로 시점근처에서는 내측으로 편倚되다가 출구부분에서는 외측으로 편倚된다. 중심각이  $30^\circ \sim 120^\circ$ 사이인 만

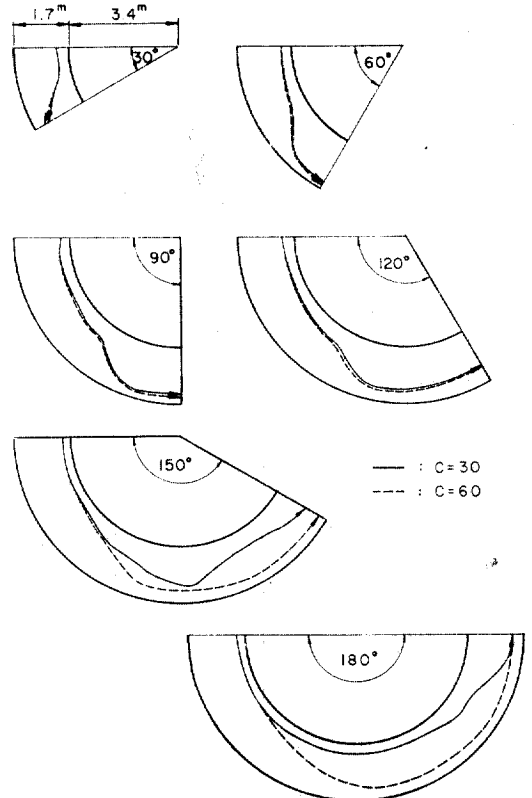


그림 4. 최대 유속선의 경로

곡수로에서는 저면마찰의 영향이 최대유속선의 이동 경로에 주는 영향은 매우 작았으나, 150° 이상인 만곡수로에서는 그 영향이 뚜렷하여 최대유속선은 큰 폭으로 변화되는 바, 저면마찰이 작을수록 최대유속선은 외측벽면에 가깝게 이동된다. 중심각 30°~120° 인 수로에의 최대유속선은 정점 부근까지 내측에 편되었다가 정점 부근을 기점으로 하여 하류부에서는 급격히 외측으로 위치를 바꾸는 현상을 보여 주었다. 한편, 중심각이 150°와 180° 인 수로에서는 최대유속선의 위치가 정점에 도달되기 이전에 이미 외측으로 편이가 시작된다. 그림 5에 중심각별 유속(깊이평균) 분포를 만곡부 시점의 중심에서의 유속( $U_m$ )에 대한 임의 지점의 유속비( $U/U_m$ )로 표현하였으며, 앞에서 검토한 최대유속선의 경로와 더불어 만곡수로내에서의 유속분포의 변화양상을 보여 주었다. 입구단면의 내측지점에서  $U/U_m$  값은 중심각이 클수록 대체로 증가되는 바, 그 차이는 매우 미소하였다. 또한 저면마찰이 클수록  $U/U_m$  값은 감소됨을 보여

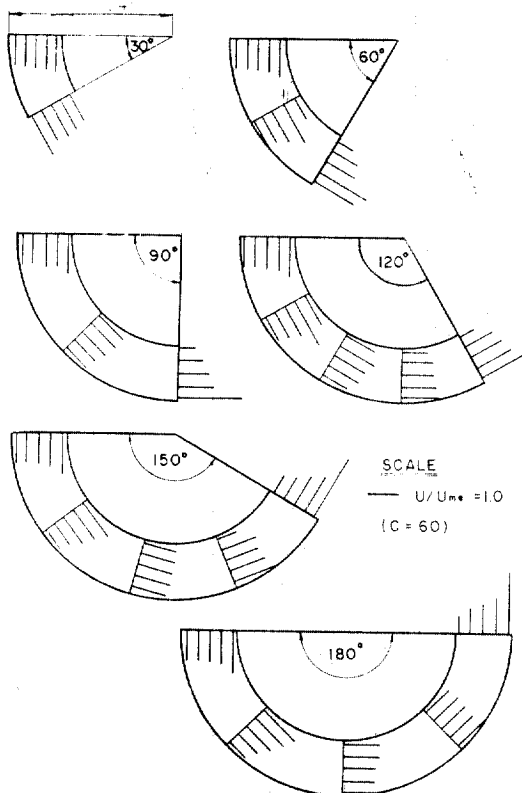


그림 5. 중심각 유속분포( $C=60$ )

주었다. 180° 정점부근 단면에서는 양측벽면의 부근에서의 속도가 크게 증가되었는데, 이는 이 구간이 속도의 재분포지역 이면서, 비교적 직선 구간이 존재하는 결과로 생각된다.

### 3.3 유향

중심각 변화에 따른 만곡수로 중심부에서 유향의 변화양상을 검토하기 위하여 수로의 접선 방향에 대한 偏向角을  $\Delta\theta$ 로 표시하였다. 편향각이 (+)이면 유향은 그 각도만큼 내측벽면을 향하고 그 값이 (-)이면 외측벽면으로 향함을 뜻한다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 만곡부 시점에서  $\Delta\theta$ 의 값은 중심각에 관계없이 모두 내측으로 향하며 그 편향각의 범위는 3°~5° 사이이다. 만곡부 시점으로부터 약 60° 하류까지는 외측으로 향하는 편향각이 점점 증가하다가, 이 위치를 기점으로 다시 내측으로 향하는 경향이 증대되어 100°~130°에서는 (+)  $\Delta\theta$ 의 값을 나타낸다. 더 하류부로 흐름이 진행되면 편향각은 (-)  $\Delta\theta$ 의 값으로서 다시 외측으로 향한다. 약 60°~130°의 범위는 결국 속도의 재분포가 발생하는 구간으로서 최대 유속선이 내측에서 외측으로 이동되는 천이구역으로서 자유와(free vortex)가 강제와(forced vortex)로 변화되는 과정으로 볼 수 있다. 중심각이 120° 이하인 만곡수로에서는 입구부근을 제외하고는 편향각이 모두 외측을 향하고 있음을 보여주었다. 출구에서의 유향은 모든 수로에서 외측으로 향하는 유향을 공통적으로 보여주었다.

### 4. 비교 및 검토

다양한 중심각에 대한 본 수치실험의 결과치를 적절히 대비할 수 있는 다른 수리·수치실험 결과치들을 모든 중심각에 대하여 구하는 것은 불가능하였으나 기존의 소개된 이론치와 실험치와의 부분적인 비교 검토는 가능하였다.

정점( $L/L_t=0.5$ )에서의 횡방향 수면차(super-elevation)에 대한 본수치실험 결과와 Rosovskii의 근사 이론치와를 비교하여 보았는데, 전반적으로 수치실험 결과치는 이론치보다 다소 작게 계산되었으며 중심각이 90° 이상이 되면 그 편차는 줄어드는 경향을 보인다<sup>(2)</sup>. 이는 수심이 얇은 만곡수로에서의 실제적인 원심력의 발달은

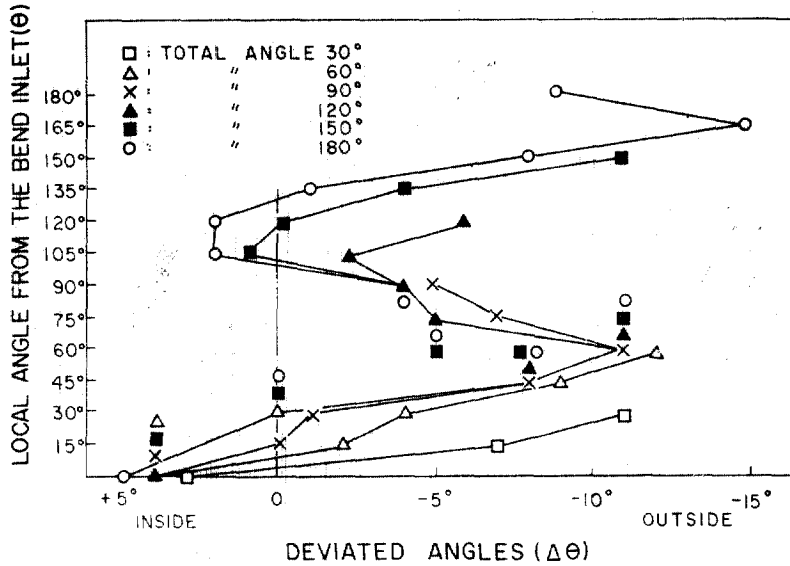


그림 6. 중심각과 수로 중심선에서의 편향각의 변화(C=60)

만곡부 시점으로부터 상당구간의 진행이 있을 후, 비로서 충분히 이루어진다고 생각되므로 전 구간에서 고르게 원심력의 영향을 고려한 이론치와는 차이가 있을 것으로 여겨진다. J. Kupier의 실측치(180°)도 본 계산치와 비슷한 결과를 보여주었다.<sup>(14)</sup> 횡방향 수면차  $\Delta H$ 를 속도수두  $V^2/2g$ 에 대한 비로 표현(표 1)하였는 바 수로 중심각의 증가에 따라 이 값은 증가되는 경향을 보여주었다.

표 1. 중심각별  $L/L_0$ 와  $\Delta H/(V^2/2g)$ 의 관계(C=60)

$\theta$	$L/L_0$	0.25	0.5	0.75	1.0
30°		0.24	0.36	0.33	0.3
60°		0.41	0.41	0.37	0.3
90°		0.49	0.53	0.51	0.33
120°		0.53	0.54	0.48	0.33
150°		0.57	0.57	0.47	0.37
180°		0.58	0.58	0.51	0.28

만곡부 외측에서의 최고수위 발생위치가 중심각과 무관하게 만곡부 시점으로부터 15° 하류부근으로 예측된 본 수치실험 결과치는 A. Shucky, Rosovskii의 이론 및 실험치와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다<sup>(2,15)</sup>. 흐름이 직선수로에서 만곡부로 진행되면 내측의 유체에는 가속작

용이 외측에는 감속작용이 발생한다. 따라서 내측으로부터 외측으로 이동되는 운동량 이송현상이 발생되므로 나선운동의 원인이 되면서 증대되었던 횡방향 수면경사도는 다시 감소되는 현상으로 나타난다. Vriend의 실험에 의하면 180°만곡수로에서의 속도 재분포구간은 45°~135°로 추정되었는 바, 본 연구의 결과(60°~130°)도 비슷한 구간내에서 속도의 재분포가 발생되고 있다고 볼 수 있어 실험치와 비교적 일치되는 결과를 보여주었다<sup>(16)</sup>.

Smith는  $B/D=11$ 인 만곡수로에서 중심각 대신 만곡도(sinuosity)를 곡률로 표현하고 그 속도 분포를 단면별로 표시하였다.<sup>(17)</sup> 만곡도와 본 연구에서의 중심각  $\theta$ 와는 그 개념이 약간 다를지라도 개략적인 비교는 가능하리라고 판단된다. Smith의 계산 결과치에 의하면 유속이 0.38m/s로 본 연구에서 마찰저항이 큰 경우의 유속과 비슷하므로  $C=30$ 인 경우와 비교하였는 바, 정점부근까지 최대유속선이 내측으로 편되는 현상은 대체로 일치하나, 다시 출구지점에서 외측으로 편되는 현상은 Smith의 연구결과는 본 연구의 계산치보다는 뚜렷하지 못하였다. 이는 만곡부의 형상 및 상하류의 접속수로 형태의 차이로 인한 영향으로 생각된다. 본 연구에서는 만

곡부 상하류지점에 직선수로 구간을 설치하므로서 직선구간에서의 흐름이 충분히 발달된 상태에서 만곡부로 진행시켰다. 이러한 모습은 자연 및 인공하도의 보편적인 형태라고 볼 수 있는바 만곡부 상하류 접속부의 수로형상은 만곡부의 흐름에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 그림 7은 만곡수로 정점과 출구 중심부에서의 유향을 편향각으로 표시하였다. 정점에서는 중심각이 60°와 150°인 만곡수로에서 외측으로 향하는 편향각이 약 11°로 최대치가 추정되었으며 저면마찰이 작은 경우에는 그 편향각이 작게 계산되었다. 출구에서는 중심각 120°에서 최대치를 나타냈으며 그 값은 약 11° 정도이다.  $L/L_T=1.0$ 에서 공통적으로 보여주는 (-)값의 편향각은 만곡수로의 설계시 출구부근의 외측 하안에 특히 유의해야 됨을 의미한다. 또한, 정점과 출구에서의 편향각  $\Delta\theta$ 는 중심각에 따라 다양한 값을 보여 주었는데 그 변화 양상은 상호 증감의 대응 관계에 있음을 알 수 있었다. 저면마찰이 큰 경우에는 작은 경우보다 중심각에 관계없이 편향각은 작게 계산되었으며 이는 에너지 손실의 영향 때문으로 생각된다.

실제로, 만곡부에서의 흐름은 비정상적인 경우가 대부분이며, 이러한 경우에서의 만곡부의 반응을 예측하는 것도 긴요한 과제이다. 상류단에서, 기준수로로부터 일정한 수위까지 도달되는 과정에서의 수위의 변화로 인하여 발생하는 비정상적 운동은 시간의 경과와 더불어 정류상태에 도달된다. 비정상적 흐름에서 정상상태의

도달순서는 유향, 유속, 수위이며 저면마찰이 크면 수위 및 유속 등이 정상상태로 도달되는 시간은 짧아지게 되는데 이를 만곡부 경계면에서의 반사에너지가 신속히 발산되는 감쇠현상 때문인 것으로 짐작된다. 비정상운동 과정에서 만곡부 시점의 유향은 시간 및 마찰계수에 관계없이 거의 동일하나 출구지점에서 유향은 다소의 차이를 보였다. 상류단에서의 수위상승에 따른 만곡수로 내부에서의 진동은 만곡부의 곡률, 폭, 수심, 반사율 등을 포함하는 경계면의 영향과 상류단에 작용하는 파동의 성격에 따라 그 반응양상이 다르게 나타난다. 강우 또는 수문의 조작으로 인한 유입 수문곡선의 다양한 형태로부터 주어지는 입사파에 의한 각종 만곡부에서의 반응도 추적 가능할 것으로 짐작된다.

### 5. 결 론

본 연구는 수심이 얇은 만곡수로에서 만곡부의 중심각을 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°로 변화시키고 이에 따른 흐름의 특성을 분석한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 만곡수로내의 최대수위 발생지점은 중심각에 관계없이 만곡수로 입구로부터 15° 하류단면부근의 외측 하안에서 발생함을 알 수 있다.
2. 저면 마찰조건이 최대 유속선의 이동경로에 미치는 영향은 만곡수로의 중심각이 약 150° 이상인 경우에서 뚜렷하였다.
3. 횡방향 수위차의 속도수두에 대한 비  $\Delta H/V^2/2g$ 는 만곡수로의 중심각이 증가할수록 증가되는 경향을 보여주었다.
4. 중심각의 변화에 관계없이 만곡부 시점에서의 유향은 내측으로 종점에서는 외측으로 편 의됨을 보여주었다.

### 감사의 글

본 논문은 문교부 1986년도 자유과제 학술연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 당국의 배려에 감사드립니다.

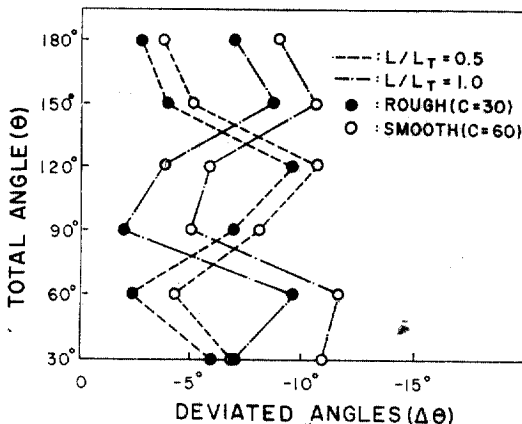


그림 7. 정점과 출구에서의 편향각의 비교

## 참 고 문 헌

1. Chang, H.H., "Variation of Flow Resistance Through Curved Channel," *J. Hydr. Div., ASCE*, vol. 110, NO. 12, 1984, pp.1772~1782.
2. Rosovskii, I.L., "Flow of Water in Bends of Open Channel," Academy of Science of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulics Eng., 1957.
3. Yen, C.L., "Bed Topography Effect on Flow in Meander," *J. Hydr. Div., ASCE*, vol. 96, NO. 1, 1970, pp.57~73.
4. Yen, C.L. and Yen, B.C., "Water Surface Configuration in Channel Bends," *J. Hydr. Div., ASCE*, vol. 97, NO. 2, 1971, pp.303~321.
5. Francis, J.R.D., "Velocity Distribution in Wide, Curved Open Channel Flows," *J. Hydr. Res.*, NO. 1, 1971, pp.73~87.
6. De Vriend, "A Mathematical Model of Steady Flow in Curved Shallow Channels," *J. Hydr. Res.*, vol. 15, NO. 1, 1977, pp.37~52.
7. Leschziner, M.A. and Wolfgang Rodi, "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow," *J. Hydr. Div., ASCE*, vol. 105, NO. 10, 1979, pp.1297~1314.
8. Kalkwijk, J.P.TH. and De Vriend, "Computation of the Flow in Shallow River Bends," *J. Hydr. Res.*, vol. 18, NO. 4, 1980, pp.327~343.
9. Struiksmá, N., Flokstra, C., De Vriend and Olesen, K.W., "Bed Deformation in Curved Alluvial Channels," *J. Hydr. Res.*, vol. 23, NO. 1, 1985, pp.57~79.
10. Hussein, A.S.A. and Smith, K.V.H., "Flow and Bed Deviation Angle in Curved Open Channels," *J. Hydr. Res.*, vol. 24, NO. 2, 1986, pp.93~108.
11. Kalkwijk, J.P.TH. and Robert Booij, "Adaption of Secondary Flow in Nearly-Horizontal Flow," *J. Hydr. Res.*, vol. 24, NO. 1, 1986, pp.19~37.
12. Abbott, M.B., *Computational Hydraulics*, Pitman, 1979, pp.117~219.
13. 윤 세익, 이 종태, 이 원환, "만곡수로에서 2차원 흐름해석", 대한토목학회지, 제 6 권 제 1 호, 1986, pp.87~94.
14. Kuiper, J. and Vreugdenhill, C.B., *Calculation of Two Dimensional Horizontal Flow*, Delft Hydraulics Laboratory Report, S. 163, Part I, 1973, pp.1~44.
15. Shucky, A., "Flow Around Bends in an Open Flumes," *Trans., ASCE*, Paper NO. 2411, 1950, pp.751~788.
16. De Vriend, "Steady Flow in Shallow Channel Bends," Prosefschrift, 1981.
17. Smith, J.D. and Mclean, S.R., "A Model Flow in Meandering Streams," *WRR*, vol. 20, NO. 9, 1984, pp.1301~1315.

(접수 : 1987. 7. 6)