

# 만곡수로 합류부에서의 흐름 특성

정재욱\*·윤수인\*·백창식\*\*·윤세희\*\*\*

## 1. 서론

자연상태의 하천은 그 규모의 차이는 있으나 대부분 만곡하천이다. 만곡부 하천에서는 원심력의 영향으로 외측의 수위가 내측의 수위보다 높아지는 편구배(superlevation)와 2차류 등이 존재하고 있어서 직선수로와는 그 특성상 큰 차이가 있다. 만곡하천 자체에도 소용의 문제가 발생되지만 지류 유입으로 인한 수위상승 효과는 내수처리 및 치수기능을 저하시키고 있다. 만곡하천 합류부에서는 흐름의 혼합, 분리 등의 현상으로 인하여 이론적으로 해석하기가 쉽지 않다. 직선수로 합류부에 관한 연구로는 최계운(1993), 윤태훈(1993), Best(1984), Hager(1989 a, b), Ramamuthy(1988), Rodi(1993) 등이 있으나 만곡수로 합류부에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 만곡수로에서 흐름에 장애요인이 될 수 있는 합류부에서의 흐름 특성 변화를 실험을 통하여 연구하였으며, 아울러 직선수로에서 제안된 관계식들과 비교·검토하였다. 만곡수로 합류부 수치모형 개발에 기초자료를 제공할 뿐만 아니라 도시하천 유역의 내수처리 및 홍수소통의 문제를 해결하는데 필요한 자료를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 수리 실험

만곡수로 합류부에서의 흐름을 실험을 통하여 분석하려면 실제 지역을 상사법칙에 맞게 축소하여 모형을 제작하는 것이 필요하지만 본 연구에서는 어느 특정의 만곡수로 합류부에서의 흐름특성을 검토하기 위한 것이 아니므로 만곡현상이 뚜렷이 파악될 수 있으며 실무에서 비교적 안전 측면에서 검토할 수 있는 만곡각 180° 만곡수로를 선택하였다. 지류의 영향은 만곡부 하천의 합류지점에 따라서도 흐름 특성이 변화될 것이나, 지류의 영향이 비교적 크다고 판단되는 만곡각 45° 단면의 외측에 위치시켰다. 표 1. 에서와 같이 본류 유량 2개, 지류 유량 3개, 지류경사 2개를 선택하여 실험하였다. Froude 상사법칙을 적용하여 축척비를 1/25로 가정하고 실제하천으로 환산하면 본류 유량은 250, 350CMS, 하폭은 37.5m 가 되며, 지류 유량은 20, 50, 70 CMS, 지류 하폭은 6.25m 에 해당된다. 본류 유량은 직사각형웨어를 이용하여 측정하였으며, 지류의 유입 유량은 아크릴로 제작된 삼각웨어를 이용하였다. 수로의 유속과 수심의 측정을 위하여 본류 만곡부를 만곡각 15° 씩, 13 개 단면으로 구분하고, 만곡부

\* 경기대학교 대학원 토목공학과

\*\* 안양전문대학 토목과 교수

\*\*\* 경기대학교 토목공학과 교수

표 1. 수리 모형의 제원

수로	유량(l/sec)	하폭(m)	경사	조도
본류	80, 112	1.5	1/750	0.012
지류	6.4, 16, 22.4	0.25	1/200, 1/400	0.01

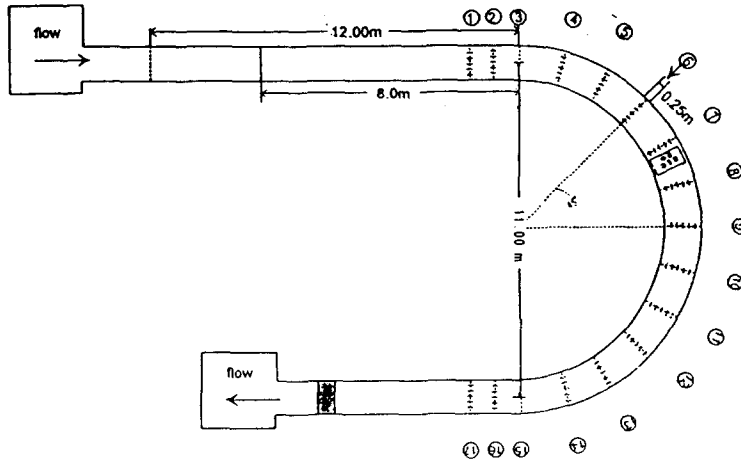


그림 1. 실험 수로의 제원 및 관측점 위치도

입구로 부터 상류로 하폭의 2 배 정도까지, 출구로부터는 하폭 만큼의 구역을 분활하였다(그림 1). 각 단면마다 5 개의 관측점을 설정하였으며, 벽면의 효과를 무시하기 위하여 벽면에 가까운 측정점은 벽면으로 부터 평균수심 정도를 이격시켰다. 격점간의 간격은 30cm 이다. 수심측정은 포인트 게이지를 사용하였으며, 3 회 측정하여 평균하였다. 유속측정에 사용된 계기는 1차원 유속계와 2 차원 유속계(Model 명 : VM-201) 를 함께 사용하였다. 또한 지류와 본류가 합류하는 구간에서의 유향변화를 확인하기 위하여 과망간산칼리와 관측단면에 실을 설치하여 각 관측점에서의 유향을 파악하였다. 수로의 하류단에는 하류단의 수위를 조절하기 위하여 하류 수위 조절장치를 부착하였다.

### 3. 결과 및 분석

합류부가 없는 순수 만곡수로에서는 만곡각 30 °~ 45 ° 부근에서 최대 횡방향 수면차가 발생되고 있으며, 그림 2. 와 같이 만곡수로 입구에서는 내측에서 최대유속이 발생하다가 만곡수로 정점부근에서는 단면 중앙부근으로 이동되면서 만곡부 출구에서는 외측에서 최대유속이 발생된다. 즉, 최대 유속선은 내측으로 부터 서서히 외측으로 이동되고 있다. 또한 유량이 증가하면 최대 유속선이 더욱 외측으로 편이되는 현상이 관측되었다. 본 실험조건에서 만곡수로 외측에 지류가 유입되면 순수 만곡수로에 비하여 수위상승은 8%~30% 정도이며, 수위상승의 비율은 외측보다 오히려 내측이 크게 관측되었다. 이는 지류가 내측벽면까지 영향을

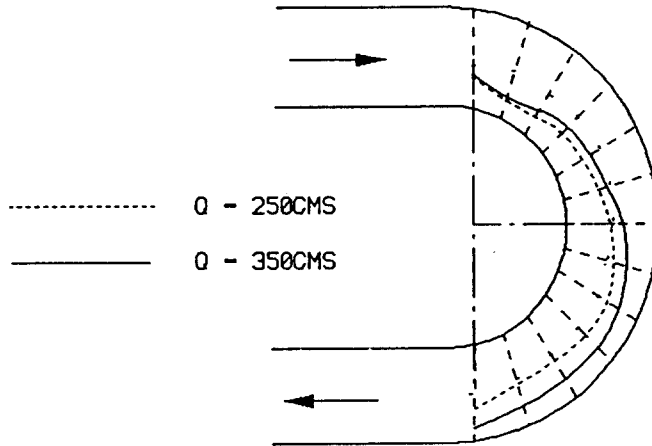


그림 2. 종단면 최대유속 분포도

미쳐서 배수효과가 크게 관측되었다고 생각된다. 본 연구에서 사용된 유량비( $Q/Q_0$ )는 지류 유량에 대한 본류 유량과 지류 유량의 합의 비로 정의된다. 이 값의 범위는 5~22% 정도이다. 그림 3 에서  $H_0$  는 동일 조건의 순수 만곡수로에서의 수심이며,  $H$  는 합류후 임의지점의 수심이다. 합류점( $45^\circ$ ) 상류부와 직하류부( $60^\circ$ )에서의 수위변동이 크게 관측되었다. 만곡각  $100^\circ$  하류부부터는 서서히 안정을 유지하여 수위는 평균적으로 23% 증가하고 있는데, 본류 유량에 대한 지류 유량의 크기가 약 27% 정도임을 생각하면 합리적인 결과로 판단된다.

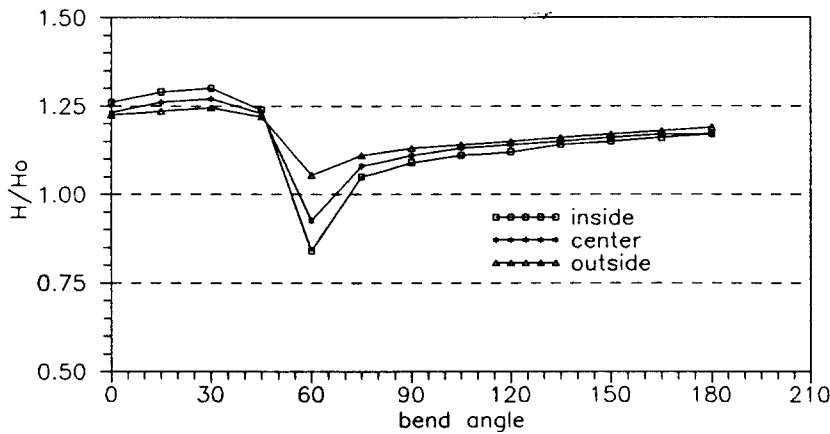


그림 3. 종단면 수위 분포도

합류부 상류구간에서는 내측, 하류구간에서는 외측에서 무차원 수심비( $H/H_0$ )가 크다. 또한 만곡부 내측에 지류가 위치된다면 반대현상도 예측할 수 있다. 만곡부 하천에 지류를 계획 설계시에 수위의 내, 외측 상승비를 고려해야 되고, 지류 유량이 반대편 제방에 영향을 미치는 가를 세밀히 분석해야 한다. 그림 4. 에 나타난 바와 같이 유량비가 증가할 수록 무차원 수심비도 증가하고 있으며, 외측보다는 내측이 더욱 크게 증가하고 있다. 본 실험조건에서는 유량비가 최대 22% 일때 수심은 약 30% 증가되는 것으로 관측되었다. 동일한 유량비에 대해

서 지류 유입각이 증가할수록 비례하여 수심비가 증가하며, 유량비가 커질수록 각도에 대한 수심비가 더욱 민감함을 알 수 있다(그림 5).

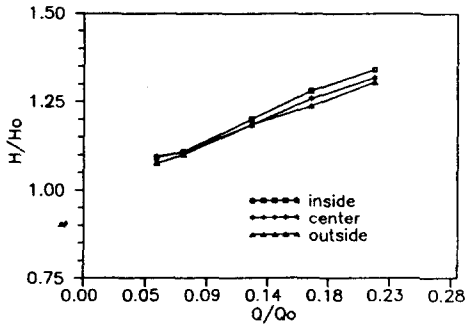


그림 4. 유량비에 따른 횡단면 수위분포

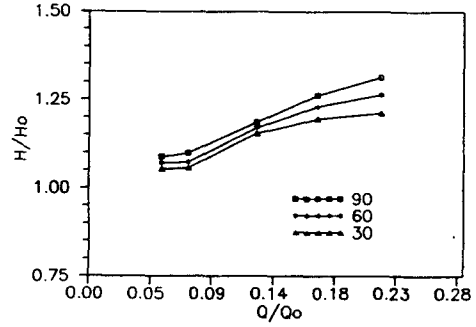


그림 5. 유입각에 따른 수위 증가율

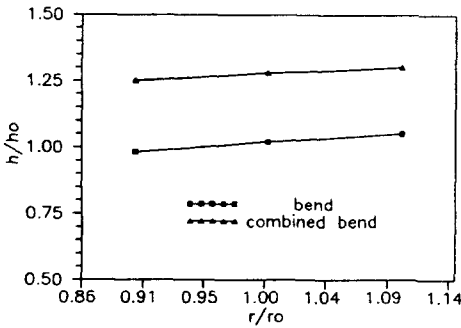


그림 6. 횡단면 수위 분포(만곡각 30°)

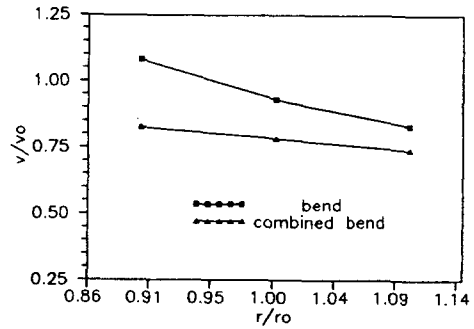


그림 7. 횡단면 유속 분포(만곡각 30°)

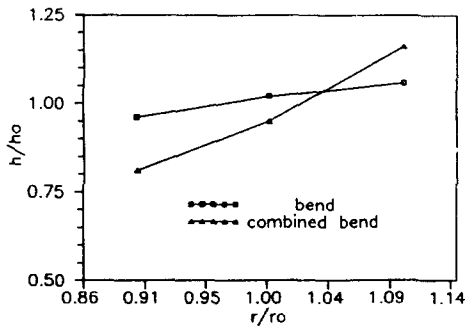


그림 8. 횡단면 수위 분포(만곡각 60°)

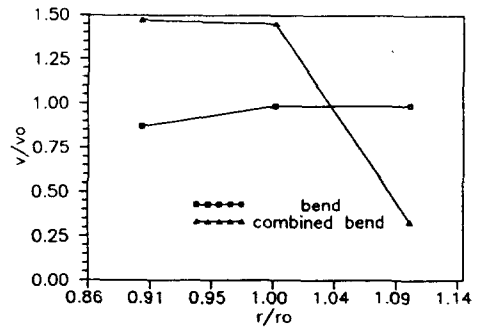


그림 9. 횡단면 유속 분포(만곡각 60°)

그림 6~9는 직선수로를 기준으로 순수 및 합류 만곡부에서의 무차원 수위( $h/h_o$ )와 유속( $v/v_o$ )을 나타낸 것이다. 만곡각 30° 단면에서의 배수효과는 내, 외측이 거의 유사하게 나타나고 있으며 횡방향 수면경사의 형태도 변화되지 않았다. 속도는 내측이 벽면의 영향을 더욱 받아 급격히 감소한다. 만곡각 60° 단면 내측에서는 합류만곡부 보다 순수만곡부의 수위가 크게 관측되고 있다. 즉, 만곡부 합류부 직하류에서는 횡방향 수면 경사가 급증하고 있다. 외측부에서는 와류가 발생하여 속도가 급격히 감소하고 있는데, 지류 유입으로 인한 운동량의 변화 때문에 흐름특성이 달라지고 있으며, 와류대가 합류부 직하류 외측제방을 따라 길게 형

성되고 있다. 유량비가 커짐에 따라 Froude No. 가 1 을 초과하여 합류부 하류에 한계수심이 존재하는 조건에서 합류부 상류의 수위상승량을 직선수로 합류부에서의 계산식을 이용하여 계산하고 실측치와 비교하였다. 합류부 상류에서는 흐름이 상류(常流)로 흐르다가 합류부 하류에서는 사류로 변화되는 천이구간이 발생한다. 대부분의 연구자들은 직선수로 합류부 하류에 한계수심( $Y_c$ )이 발생된다는 가정하에 합류부 상, 하류의 수심비( $Y/Y_c$ )를 계산하였다. 표 2. 에서는 직선 합류부의 수위상승 예측식의 결과를 만곡부 실험치와 비교한 것이다.

표 2. 상류부 수위변화 비교(합류각 :  $90^\circ$ )

유량비 (지류/본류+지류)	Froude No.	$Y_c$ (한계수심)	$Y^*$ (계산치)	$Y$ (실험치)
0.218	1.18	8.6 cm	12.55 cm	12.98 cm
0.17	1.07	10.3 cm	14.78 cm	14.33 cm

Ramamurthy(1988) 가 적용한 유량비는 0.23~0.6 의 범위로 실험조건과는 다소 차이가 있지만, 본 실험의 적용 유량비(6가지)를 분석한 결과 유량비 0.17, 0.218 의 경우에 합류부 하류에서 뚜렷한 한계수심을 발견할 수 있었다. 그러므로 실험 조건 중 이 2 가지 유량을 선택하여 비교하였다. 이는 유량비가 15% 이상되면 합류부 하류에 한계수심이 발생됨을 알 수 있었으며, 이러한 조건에서는 만곡수로에서도 Ramamurthy(1988) 의 결과와 동일하게 수심의 증가율은 유량비에 관계없이 개략적으로 1.5 로 관측되었다.

표 3. 은 직선수로의 흐름특성으로 부터 순수 만곡수로, 합류부 존재시의 최대 수위상승효과를 단계적으로 추정해 볼 수 있도록 나타내었다.

표 3. 최대수위 증가율 비교(본류 유량 : 350 CMS)

수로형태	직선수로	만곡수로	합류시
수위(cm)	10.85	11.55	14.33
증가율(%)	0	6.45	24.07

산정된 최대 수위 증가율은 실험조건외의 제한 등으로 실제하천에 그대로 적용시킨다는 것은 무리가 따를 수 있지만 전체적인 경향은 어느 정도 파악되리라 생각된다.

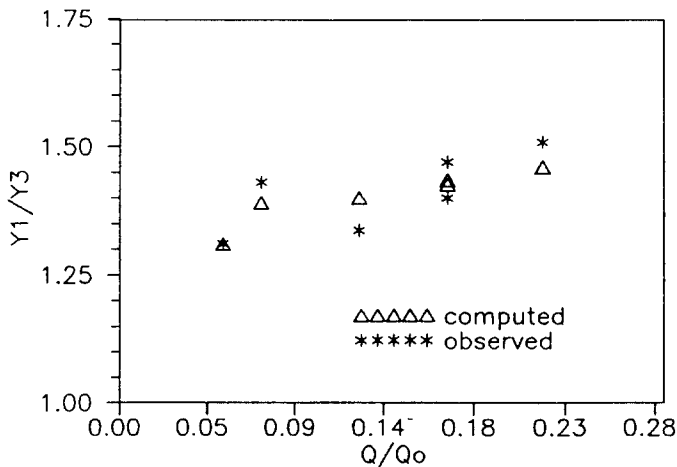


그림 10. 유량비에 따른 합류부 상, 하류 수심비

그림 10. 에 합류부 상류 최대수심과 하류 최저수심의 비( $Y_1/Y_3$ )를 유량비와 비교하였다. 유량비가 감소하면 수심비( $Y_1/Y_3$ )는 감소하였다. 본 실험 조건에서 유량비가 0.17 이상이면 만곡수로에서도 한계수심이 발생되며, 수심비가 1.5 정도로 관측되었고, 유량비가 0.05~0.23의 범위에서는 합류부 하류에 한계수심이 발생되지 않았을 때에도 수심비는 1.4 정도가 된다.

#### 4. 결 론

실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 합류부가 없는 순수 만곡수로에서는 만곡각 30° 부근에서 최대 횡방향 수면차가 발생되고 있었으며, 동일조건인 직선수로에 비해 최대 수위증가율은 외측제방 부근에서 약 4% 정도로 측정되었다.
- (2) 만곡수로에 지류 유입이 있는 경우는 순수 만곡수로에 비하여 합류부 상류에서 최고 30% 정도까지 수위가 증가되었고, 만곡수로의 지류유입에 의한 수위상승율에 미치는 영향은 유량비, 지류 유입각, 지류 경사의 순으로 크게 관측되었다.
- (3) 만곡수로 합류부 하류에 한계수심이 발생하는 경우에는 합류부 상, 하류 수심비 ( $Y_1/Y_3$ )가 1.5 정도로, 한계수심이 발생되지 않는 경우( $Q/Q_0 < 0.17$ )에는 1.4 정도로 관측되었다.
- (4) 만곡부 합류부에서의 흐름특성은 하폭의 비, 수공구조물의 종류, 지류의 유입위치, 유량비, 유입각 등에 따라서 크게 변화될 수 있다고 판단되며 앞으로 수리실험과 수치 실험을 병행하면서 이에 대한 정확한 분석이 요망된다.

#### 참고 문헌

1. 윤태훈, 박종석(1993). "합류수로부 흐름의 수치해석" 제 35 회 수공학 연구 발표회 논문집, pp. 57-64.
2. 최계운, 강관원(1993). "하천 합류점에서 합류각도에 따른 흐름해석" 대한토목학회 학술 발표 개요집(2), pp. 127-130.
3. Best James L. and Reid Ian(1984). "Separation Zone at Open-Channel Junctions", J. of Hydraulic Div., ASCE, Vol. 110, No.11, Nov. pp. 1588-1594.
4. Hager, W.H.(1989, a). "Supercritical Flow in Channel Junction", J. of Hydraulic Eng., Vol. 115, No. 5, ASCE, pp. 595-615.
5. Hager, W.H.(1989, b). "Transitional Flow in Channel Junction", J. of Hydraulic Eng., Vol. 115, No. 2, ASCE, pp. 243-259.
6. Ramamurthy, A.S., Carballada, R. and Tran, D.M.(1988). "Combining Open Channel Flow at Right Angled Junctions", J. of Hydraulic Eng., Vol. 114, No. 12, ASCE, pp 1449-1460.
7. Rodi, W. and Demuren, A.O.(1993). "Side Discharge into Open Channels : Mathematical Model", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 109, No. 12, pp. 1707-1722.