

만곡수로의 에너지손실 산정에 관한 실험적 연구

○심우배*, 이용환*, 노섭**, 송재우***

1. 서 론

하천의 사행현상은 유로만곡부의 곡률, 소류력 및 횡방향 하상경사 등에 변화를 주어 홍수시 하도의 불안정, 취수구의 유지관리 및 기능저하, 제방의 파괴, 수공구조물의 국부세굴에 따른 하천제해 등을 일으킨다. 만곡수로에서는 외측에서 수면의 상승과 세굴이 발생되고 내측에서 수면의 하강과 퇴적이 발생되므로 유로 이동과 범람의 피해를 입기 쉽다. 또한 흐름방향 및 횡방향으로의 방향전환으로 인한 에너지손실로 소류능력이 문제가 되는 구간이므로 에너지손실의 정확한 구명은 수공구조물 설계 및 유지관리에 효율적으로 대처할 수 있음에도 불구하고 국내의 연구는 미흡한 실정이다. 만곡수로에서의 에너지손실에 관한 연구로는 Humphreys과 Abbot³⁾가 속도, 곡률반경, 중심각, 하폭 등을 포함하는 에너지손실에 관한 경험식을 발표하였으며, Yen⁶⁾은 에너지손실을 속도의 함수로 나타내었다. Mockmore³⁾는 90° 와 180° 의 만곡각을 갖는 인공수로와 자연하천의 자료로부터 에너지손실을 경험적으로 계산하였으며 Shukry⁶⁾는 나선류의 강도를 제한하고 다양한 실험을 통하여 에너지손실을 계산하였다. Raul⁴⁾은 Shukry의 실험자료를 이용하여 에너지손실을 계산하는 방법을 제안하였다. Chang¹⁾은 Froude수의 변화에 따른 횡방향 에너지경사를 구하였다. 국내의 연구로 윤 등¹¹⁾은 만곡수로에서 Raul의 식을 이용하여 에너지손실을 구하고 Shukry의 실측자료와 비교분석하였다.

본 연구의 목적은 하폭에 비해 수심이 작은 직사각형 단면의 만곡수로에서 수심-하폭비(y/b)를 달리한 수리모형실험을 통하여 내측의 수위가 최저가 되는 단면에서 만곡으로 인한 에너지손실량과 횡방향으로의 에너지 변화를 구명하는데 있다.

2. 수리모형실험

본 연구에서는 하폭에 비해 수심이 작은 직사각형 단면을 갖는 만곡수로에서 수리모형실험을 실시하여 만곡부의 에너지손실을 산정하였다. 수리모형실험의 제원으로 만곡각(θ)은 180°, 하폭(b)은 0.90m, 수로중심선을 따른 곡률반경(r_c)은 2.5m, 유입, 유출부의 직유로부의 길이는 8.0m, 조도계수(n)는 0.012이다. 또한 곡률반경-하폭비(r_c/b)는 2.78이며 수심-하폭비(y/b)는 0.08, 0.07, 0.06이다. 만곡수로에서 두 단면사이의 마찰손실은 y/b=0.08인 경우 1.143mm이며, y/b=0.07인 경우 0.795mm, y/b=0.06인 경우에는 0.607mm이다. 표1은 수리모형실험제원을 나타내며, 그림1은 수리모형실험장치와 관측지점을 나타낸다.

표1 수리모형 실험제원

하폭(b)	곡률반경(r_c)	r_c/b	조도계수(n)	y(cm)	y/b	수면경사(S)	마찰손실(h_f)
0.9m	2.5m	2.78	0.012	7.6	0.08	0.00058	1.143mm
				6.4	0.07	0.00055	0.795mm
				5.7	0.06	0.00051	0.607mm

* 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 여주전문대학교 조교수

*** 홍익대학교 토목공학과 교수

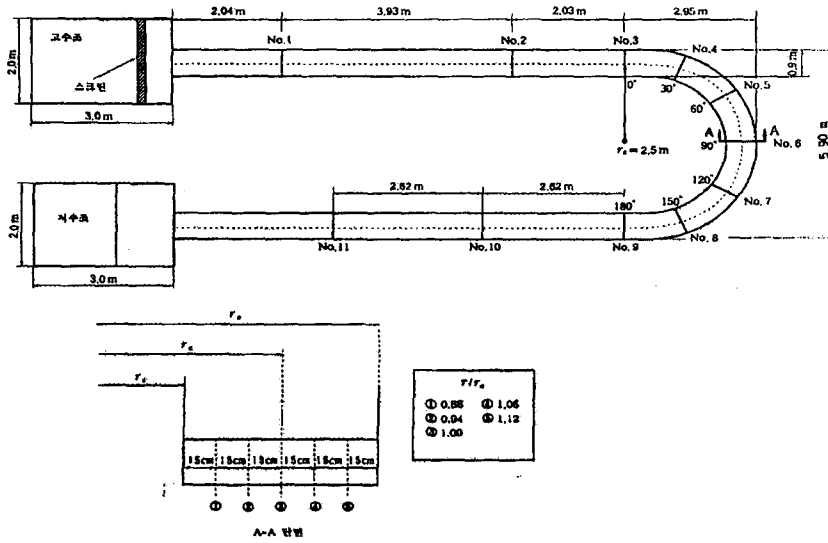


그림1 수리모형 실험장치 및 관측지점

모형수로의 재질은 철이며 벽면효과를 줄이기 위해 각 단면의 양안으로부터 15cm 떨어져서 측정의 위치를 설정하였다. 그림1에서 보는바와 같이 횡방향으로 r/c 를 기준으로 증상으로로부터 내측과 외측으로 2개지점을 선정하여 총 5개지점에서 유속과 수위를 측정하였으며, 횡방향 측정간의 거리는 15cm이다. 흐름방향으로는 유입, 유출부의 직유로부를 2개지점, 만곡부를 30° 간격으로 7개지점, 총 11개지점을 선정하여 직유로부, 만곡부의 흐름특성을 분석하였다. No.1단면과 No.2단면간의 거리는 3.93m이며 이는 만곡부 전길이의 1/2이고 만곡부의 단면간 유로중심선을 따른 거리는 1.31m이다. No.1단면과 No.2단면의 설정은 직유로부의 마찰손실 수두를 측정하기 위해서이며 흐름의 영향을 감소하기 위해 고수조와 만곡유입부로부터 약 2.04m의 거리를 두었다.

(1) 유속분포

최대유속의 경로는 그림2에서 보는바와 같이 y/b 에 관계없이 만곡부 입구에서 내측으로 편기되다가 서서히 외측벽 부근으로 이동하였으며 y/b 가 증가할수록 최대유속선은 외측으로 더욱 편기되었다.

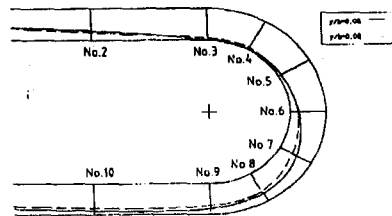


그림2 최대유속선의 이동경로

또한 y/b 가 증가할수록 유로만곡부 내, 외측의 유속의 변화폭이 증가하였다. 그림 4.2는 y/b 에 따른 흐름방향의 내측, 중앙, 외측의 유속분포를 나타낸다.

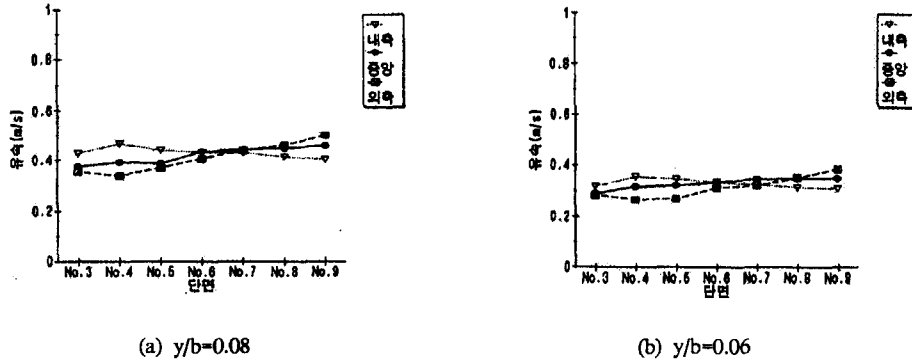


그림3 흐름방향 유속분포

윤 등¹²⁾의 연구에서 최대유속의 발생지점은 정점에서 하폭의 4배 정도 하류지점에서 관측되었다. 본 연구에서는 그림3에서 보는바와 같이 유로만곡부 최대유속은 No.4(30°)단면에서 발생하였으며, 만곡부 정점부인 No.6(90°)단면부터 유속분포가 균일하다가 유출부인 No.9(180°)단면의 외측에서 최대유속이 측정되었다.

(2) 수위분포

그림4는 만곡각에 따른 내측, 중심 및 외측의 수위변화를 나타내고 있다. 여기서 y_0 는 직선수로의 수위이다. 그림4에서 보는바와 같이 y/b 에 관계없이 만곡부의 내측수위가 저하되고 외측수위가 상승하였으며, y/b 가 클수록 수위증가량 및 변화폭이 증가하였다. 또한 y/b 가 클수록 수위변화폭이 만곡유출부까지 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

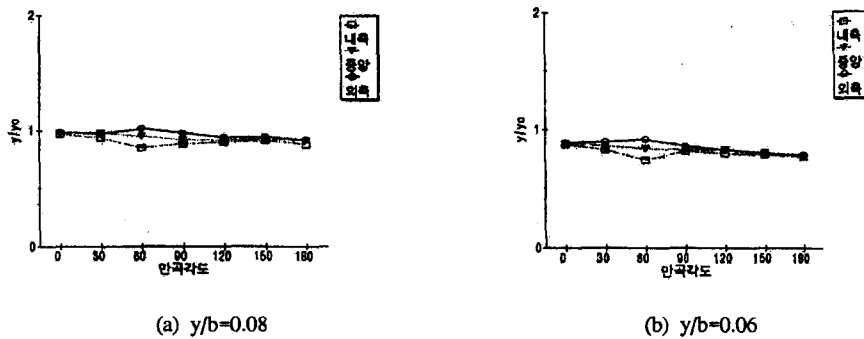


그림4 만곡각에 따른 수위변화도

Yen⁹⁾의 90° 만곡수로 실험에서는 최대수위하강이 만곡수로 유입부로부터 25° 단면의 내측벽 부근에서 발생하였고 최대수위상승은 외측벽 80° 단면에서 발생하였으며 최대 횡방향 수면경사는 45° 단면에서 발생하였다. 윤 등¹²⁾의 180° 만곡수로의 연구에서는 최대수위상승이 30° 단면 외측제방에서 발생하였고 최대 횡방향 수면경사는 30° 단면에서 발생하였다. 본 연구에서는 그림4에서 보는바와 같이 내측의 수위가 최저가 되는 단면은 만곡부의 유입부로부터 60° 인 No.5단면의 내측지점이며 또한 이 단면에서 최대 횡방향 수면경사가 발생하였다. 이것은 30° 단면에서 발생한 최대유속의 영향을 받은 것으로 생각되며, 최대 횡방향 수면경

사의 발생위치 및 크기는 중심가의 크기, y/b , r_c/b , 마찰계수 등에 영향을 받지만 이전의 연구와 비교해 볼 때 만곡유입부로부터 30°에서 60° 사이의 단면에서 발생하는 것으로 사료된다. 직선수로에서는 횡방향 수면경사가 거의 없다가 만곡수로에서는 원심력의 작용으로 인하여 횡방향 수면경사가 발생하며, 이 횡방향 수면경사는 만곡수로를 지나 직선수로에 도달하면서 서서히 소멸되어진다.

3. 에너지 손실수두 산정 및 비교 검토

내측의 수위가 최저인 No.5단면에서 내, 외측의 에너지 변화가 가장 크고 뚜렷이 나타났으며 본 연구에서는 이 단면의 수위와 유속자료를 이용하여 흐름방향 및 횡방향 에너지손실을 분석하였다. 그림5는 No.3단면과 내측수위가 최저가 되는 No.5단면간에서 r/r_c 에 따른 측정별 비에너지의 증감을 나타낸다.

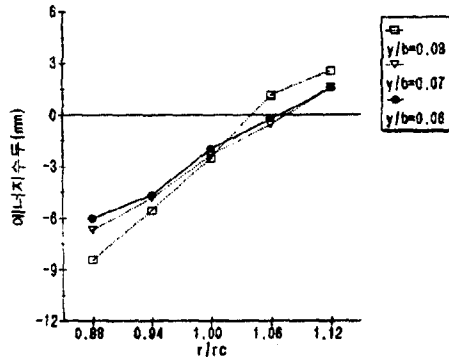


그림5 No.3단면과 No.5단면간의 측정별 비에너지의 증감

그림5에 나타난 것처럼 내측지점에서 에너지손실이 가장 크게 발생하며 외측지점에서는 에너지가 증가함을 알 수 있다. 그림5에서 내, 외측 에너지변화를 보면 내측지점 에너지손실량의 1/3은 외측지점에 영향을 주었으며 나머지는 횡방향수면 및 하상에 영향을 준것으로 사료된다. 또한 이러한 내, 외측의 에너지 차이에 의해 나선류의 운동방향을 예측할 수 있다. 표2는 No.3단면부터 No.5단면 사이에서 만곡으로 인한 에너지 손실수두 및 에너지손실의 증가율을 나타낸다.

표2 만곡으로 인한 에너지 손실수두 및 증가율

y/b	비에너지차	마찰손실	만곡손실	손실증가율
0.08	3.157mm	2.014mm	1.143mm	36.21%
0.07	2.551mm	1.756mm	0.795mm	31.16%
0.06	2.315mm	1.708mm	0.607mm	26.22%

만곡유입부로부터 No.5단면까지 흐름방향으로 에너지손실이 직선수로와 비교하여 y/b 가 0.08인 경우에는 약 36%, y/b 가 0.07인 경우에는 약 31%, y/b 가 0.06인 경우에는 약 26%가 증가하였다. y/b 가 0.01, 0.02 증가함에 따라 만곡손실은 5, 10%씩 선형적인 증가를 보였으며 y/b 가 감소함에 따라 에너지손실이 감소하였다. 또한 만곡유입부로부터 No.5단면까지의 만곡에 의한 에너지손실량은 y/b 에 관계없이 유로만곡부 전체에서 발생하는 에너지손실량의 약 20%정도로 측정되었다.

본 연구의 만곡에 따른 에너지손실의 실측값을 이전의 예측모형과 비교하였다. 표3은 예측모형을 나타내고 있다.

표3 만곡부 에너지 손실수두 모형

계산자	모형
Boussinesq (이하 BOU모형)	$h_s = i_0(1 + \frac{3}{4}\sqrt{\frac{b}{r_c}})L'$
Rozovskii (이하 ROZ모형)	$i_s = (24\frac{K^{1/2}}{C} + 60\frac{K}{C})\left(\frac{H}{r_c}\right)^2\left(\frac{L'}{H}\right)\frac{V_{0m}^2}{2g}$
Chang (이하 CHA모형)	$h_s = \left(\frac{5.72f^{1/2} + 4.14f}{0.565 + f^{1/2}}\right)\left(\frac{H}{r_c}\right)^2\left(\frac{L'}{H}\right)\frac{V_{0m}^2}{2g}$
Raul (이하 RAU모형)	$h_s = y_1 - y_m + \frac{V_1^2}{2g} - N\frac{y_1^2 V_0^2}{y_m^2 2g}$

모형에 사용된 수리인자값은 Chezy계수(C)는 51.21, 마찰손실계수(f)는 0.03, 직선수로의 수면경사(i₀)는 0.00025, 그리고 단면간 거리는 2.62m이다. 또한 y_m은 내측 수위가 최저인 단면(No.5단면)의 평균수위이다. 그림6은 No.3단면과 No.5단면사이에서 모형에 의한 만곡손실수두 계산값과 실측값을 나타낸다.

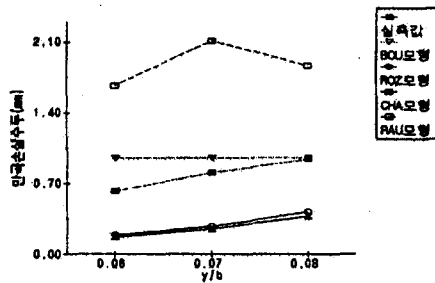


그림6 만곡에 의한 에너지 손실수두

그림6에서, RAU의 모형은 실측값에 비해 2배정도 큰 값을 보였으며 ROZ모형과 CHA모형은 실측값보다는 2~3배 정도 작게 나타났다. RAU모형은 유속보다는 두 단면간의 수위차의 영향을 많이 받은 것으로 생각되며, BOU모형은 직선수로의 수면경사만 같으면 하폭과 곡률반경이 일정한 실험수로에서는 수심-하폭비에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. ROZ모형과 CHA모형은 유속뿐만아니라 Chezy계수와 마찰손실계수의 영향을 많이 받은 것으로 분석되나 본 연구의 실측값에 가장 비례하는 경향을 보였다.

4. 결 론

180° 만곡수로에서 수리모형실험을 실시한 결과와 기존의 에너지 손실수두 모형을 비교분석한 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 최대유속은 No.4단면에서 발생하였으며 만곡의 정점부인 No.6단면부터 흐름방향으로 유속분포가 균일하다가 유출부인 No.9단면의 외측에서 유속이 증가하였다. 또한 No.5단면의 내측지점에서 수위가 최저로 되었으며 이 단면에서 최대 횡방향 수면경사가 발생하여 내, 외측의 에너지차가 최대값을 보였다.
- (2) No.5단면에서 내측지점 에너지손실량의 1/3이 외측지점에 영향을 주었으며 나머지는 횡방향수면 및 하상에 영향을 주는 것으로 관측되었다.
- (3) 만곡유입부로부터 No.5단면까지 흐름방향으로 에너지손실이 직선수로와 비교하여 수심-하폭비에 따라 26~36% 정도 증가되었으며, 수심-하폭비의 감소에 따라 에너지손실이 감소되었다.

- (4) 만곡유입부로부터 No.5단면까지의 만곡에 의한 에너지손실량은 수심-하폭비에 관계없이 180° 전체 만곡부에서 발생하는 에너지손실량의 약 20%였다.
 - (5) 만곡유입부로부터 No.5단면 사이에서 만곡에 따른 에너지 손실수두의 실측값을 기존의 모형에 의한 계산값과 비교해 본 결과 본 연구의 실측값은 RAU모형과 ROZ모형, CHA모형 계산값의 중간값을 보였으며 ROZ모형, CHA모형이 실측값에 가장 비례하는 경향을 보였다.
- 수심-하폭비 이외에 곡률반경-하폭비, 만곡각 등을 달리한 다양한 실험을 통하여 정확한 에너지손실 예측을 위한 새로운 모형의 개발이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) Chang H. H., "Energy expenditure in curved open channels", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 109 No. 7, pp.1012~1022, 1983.
- 2) Chow, V. T., "Flow in Channels of Nonlinear Alignment", Open Channel Hydraulics, 1st ed., McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., pp.443~447, 1959.
- 3) Mockmore, C. A., "Flow Around Bends in Stable Channels", Transactions, ASCE, Vol. 109, Proc. Paper No. 2217, pp.593~628, 1944.
- 4) Raul P. C., "Energy losses and shear stresses in channel bends", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 109 No. 6, June, 1983.
- 5) Rozovskii, I. L., "Flow of Water in Bends of Open Channels", translated from Russian by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, 1961.
- 6) Shukry, A., "Flow Around Bends in Open Flumes", Transaction, ASCE, Vol. 115, pp.751~779, 1950.
- 7) Soliman, M., and R. Tinney, "Flow Around 180° Bends in Open Rectangular Channels", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 94, No. HY4, pp.893~907, July, 1968.
- 8) Yen, B. C., "Characteristics of Subcritical Flow in a Meandering Channel", Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, 1965.
- 9) 김윤태, 김지호, 박영진, 송재우, "만곡수로에서의 횡방향 수면경사 산정모형의 비교 연구", 대한토목학회논문집, Vol. 17, No. II-2, pp.129~135, 1997.
- 10) 송재우, "우리나라 하천의 사행특성에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1980.
- 11) 윤세의, 이종태, 이정식, "만곡수로에서의 ENERGY 손실에 관한 연구", 경기대학논문집, 제 15집 제 2호, pp.105~114, 1984.
- 12) 정재욱, 윤수인, 백창식, 윤세의, "만곡수로 합류부에서의 흐름 특성", 한국수자원학회 학술발표회논문집, pp.63~68, 1996.