

RMA-2 모형의 만곡보정을 고려한 만곡 합류부에서의 흐름 특성

○ 정현수* 정재욱** 백창식*** 윤세의****

1. 서론

자연하천은 대부분 만곡하천으로 볼 수 있으며, 만곡부로 유입되는 지류가 존재하기도 한다. 만곡부는 흐름 방향전환으로 인한 소통능력이 문제되는 구간으로 빈번하게 홍수피해를 발생시킨다. 만곡부 합류부에서는 유사 퇴적, 수위 상승, 오염물질의 농도 증가 등의 문제가 발생하는 구간이므로 이 구간에 대한 흐름특성 분석은 하천 설계 및 관리에 있어서 필수적이다.

만곡수로 합류부에서 흐름특성을 구명하기 위하여 수리모형 실험들이 실시되고, 수치해석적 방법에 의한 수치실험을 실시하고 있다.(Helgi Johannesson(1988), Helgi Johannesson and Gary Parker(1989), 윤세의(1996)등)

본 연구에서는 실무에서 많이 사용되고 있는 RMA-2 모형에 포함되어 있는 만곡보정을 고려하여 만곡수로의 합류부에 흐름특성을 분석하고자 한다. 또한 이 결과와 만곡부 합류부에서 흐름의 실측치를 비교 분석하여, 만곡수로 합류부에서 발생하는 문제를 해결하는데 기초 자료를 제공함이 본 연구의 목적이다.

2. 기본이론

일반적으로 RMA-2에서는 사용된 2차원 수심평균 연속방정식 및 운동량방정식은 각각 식(1)과 식(2), 식(3)과 같다.(USACE(1997))

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_o}{\partial x} \right) - \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_o}{\partial y} \right) - \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \tag{3}$$

상기 식들을 유한차분법으로 해석한 일반적인 방법으로는 만곡부에서 나타는 원심력, 2차흐름에 의한 전단응력 등에 관한 영향을 충분히 반영하기 힘들다. 만곡부에서 흐름특성중의 하나인 최대유속분포의 이동경로가 예측되지 못하고 있다. 따라서 이 영향을 고려하는 만곡보정(bendway

* 경기대학교 대학원
 ** 국립방재연구소 위촉연구원
 *** 안양과학대학 토목과 교수
 **** 경기대학교 건설공학부 교수

correction)의 특성을 분석하고 만곡부 합류부에 적용하여 그 사용 가능성에 관하여 검토한다.

수심평균된 유선이 곡선인 경우 원심력은 흐름방향의 토오큐를 발생시키며, 이러한 운동 때문에 발생하는 전단응력이 수심평균 흐름에 영향을 미치게 된다. 따라서 만곡부내의 정확한 수심평균 유속을 계산하기 위해서는 2차 회전류 때문에 발생하는 전단응력을 고려해야 한다.

이는 STREMR 모형을 이용하여 계산되며, 그 내용은 다음과 같다.(Robert S. Bernard, 1993) 수심평균된 2차 전단응력은 식(4)와 같다

$$\tau_s = \rho h \Omega \sqrt{C_f} |\vec{u}| \quad (4)$$

여기서 $\Omega = \frac{C_2 w_s}{12}$, ρ 는 유체밀도, w_s 는 흐름방향 와도, h 는 수심, $\sqrt{C_f}$ 는 유속과 마찰유속의 비례상수, C_2 는 비례상수, \vec{u} 는 유속이다.

흐름방향 유속 $u_s(z)$ 는 식(5)와 같으며 원심 속도 $u_r(z)$ 는 식(6)과 같다.

$$u_s = |\vec{u}| \left[1 + C_2 \frac{z}{h} \sqrt{C_f} \right] \quad (5)$$

$$u_r = w_s z \quad (6)$$

원심가속도, 마찰력을 고려한 검사체적에서 각운동량 보존식은 식(7)로 표시된다.

$$\rho \frac{d}{dt} \int_{-h/2}^{h/2} w_s z^2 dz = -\frac{1}{2} C_1 h^2 \sqrt{C_f} \rho w_s |\vec{u}| + \rho \int_{-h/2}^{h/2} \frac{u_s^2}{r} z dz \quad (7)$$

여기서 C_1 은 비례상수이며, r 은 곡률반경이다.

식(5)를 (7)에 대입하여 적분하고 정리하면 식(8)과 같다.

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{6} C_2^2 \sqrt{C_f} \frac{|\vec{u}|^2}{rh} - 6C_1 \sqrt{C_f} \Omega \frac{|\vec{u}|}{h} \quad (8)$$

식(8)로부터 흐름방향 유속에서 $d\Omega/dt$ 의 변수는 곡률반경, 수심, 마찰계수, 그리고 Ω 자체에 의존함을 알 수 있다. 식(8)의 오른쪽은 Ω 의 생성과 소산에 대하여 경험적으로 유도된 항을 포함하고 난류확산항을 추가하면 식(9)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\Omega}{dt} = A_s \sqrt{C_f} \frac{|\vec{u}|^2}{rh} - D_s \sqrt{C_f} \Omega \frac{|\vec{u}|}{h} + \frac{\nu}{h} \nabla \cdot (h \nabla \Omega) \quad (9)$$

여기서 A_s 와 D_s 는 경험계수이다.

식(9)의 왼쪽항은 2차 회전항을 나타내며 오른쪽항에서 첫번째 항은 만곡에 따른 원심력을 나타내고 두번째 항은 마찰력을 나타내고 있다. 상수 A_s 와 D_s 는 임의 값이므로 식(9)의 경험계수는 경험적 자료로부터 얻어진다. 실험으로서 얻은 자료로부터 A_s 와 D_s 에 대한 적절한 값은 다음과 같다.(Bernard and Schneider, 1992)

$$A_s \approx 5.0 \quad (10)$$

$$D_s \approx 0.5 \quad (11)$$

식(9)는 단지 $h \ll r$ 일때 유효하다. 만약 수심이 만곡 반경과 비슷하면 식(9)의 원심력항의 영향은 매우 크게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 원심력항을 제한하는 기능을 복합하여 식(9)는 식(12)로 수정할 수 있다.

$$\frac{d\Omega}{dt} = A_s \sqrt{C_f} \frac{|\vec{u}|^2}{rh(1+9h^2/r^2)} - D_s \sqrt{C_f} \Omega \frac{|\vec{u}|}{h} + \frac{\nu}{h} \nabla \cdot (h \nabla \Omega) \quad (12)$$

3. 수리실험

본 연구에서는 일반적으로 만곡의 효과가 크고 만곡현상이 뚜렷하게 파악될 수 있는 만곡각 180° 의 만곡수로를 선택하였고, 합류 지점의 위치는 만곡부 중심각 45° 외측제방으로 결정하였다. 지류의 중심선과 본류의 중심선이 이루는 각으로 정의되는 유입각은 90° 이다.

본 연구에서 사용된 실험수로의 제원은 표1과 같다. (국립건설시험소, 1995)

(표 1) 실험수로 제원

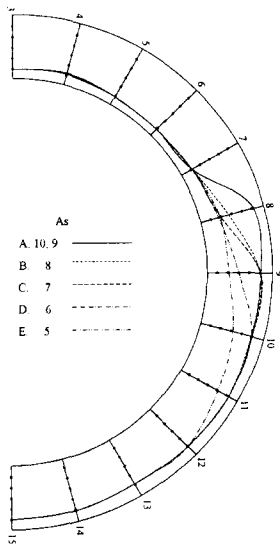
	유량(l/sec)	수로길이(m)	하폭(m)	바닥경사	곡률반경(m)	조도계수
본류	110	32	1.5	1/750	5.5	0.012
지류	22.0	3.4	0.25	1/400	-	0.012

4. 결과 분석

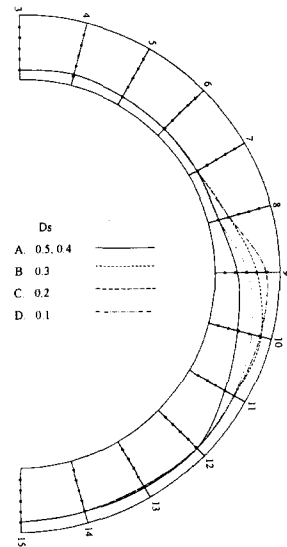
만곡보정을 고려하여 RMA-2 모형을 180° 만곡수로와 180° 만곡수로의 중심각 45° 위치에 유입각 90° 로 합류되는 수로에 적용하였다. 격자망은 8점 사각형요소로 구성하였고, 만곡합류부에서의 격자망은 합류부를 중심으로 상·하류 15° 구간을 더욱 조밀하게 구성하였으며, 격자 간격은 약 $0.4m$, peclct no.는 25~40을 사용하여 확산계수의 값을 계산하였다.

A_s 와 D_s 를 변화 시키면서 180° 만곡수로에서 수치실험한 결과 그림1과 그림2에서와 같이 원심항의 경험계수인 A_s 값이 클수록 또는 마찰항의 경험계수인 D_s 값이 작을수록 점점 외측으로의 최대유속의 편의정도가 큼을 확인할 수 있었고, A_s 값이 D_s 값보다 최대유속선의 변화에 민감하였다.

본 연구에서는 180° 만곡수로의 최대유속선 이동의 실측치와 수치실험을 실시하여 A_s 와 D_s 값을 각각 6.0과 0.5로 결정하였다.



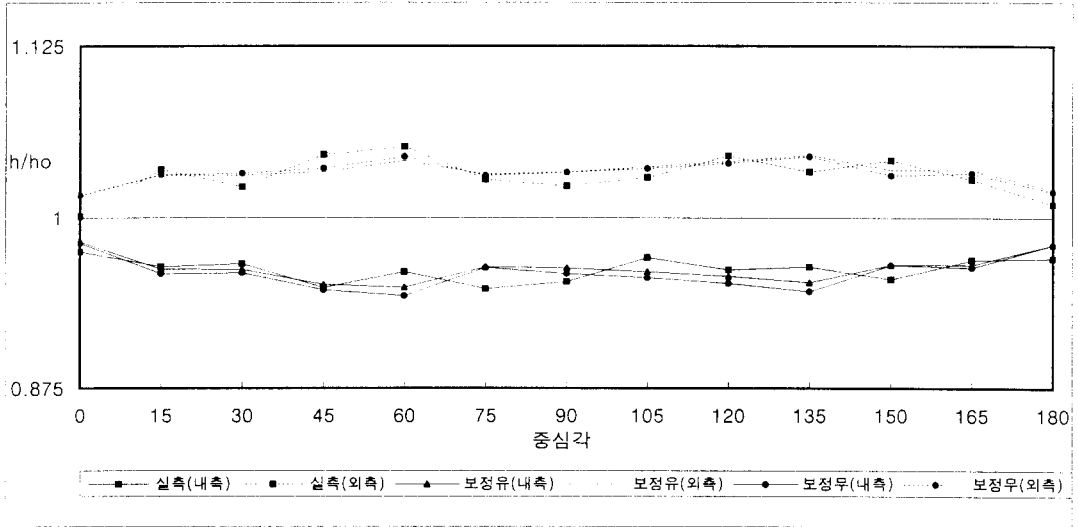
(그림1) A_s 의 변화에 따른 최대유속선분포



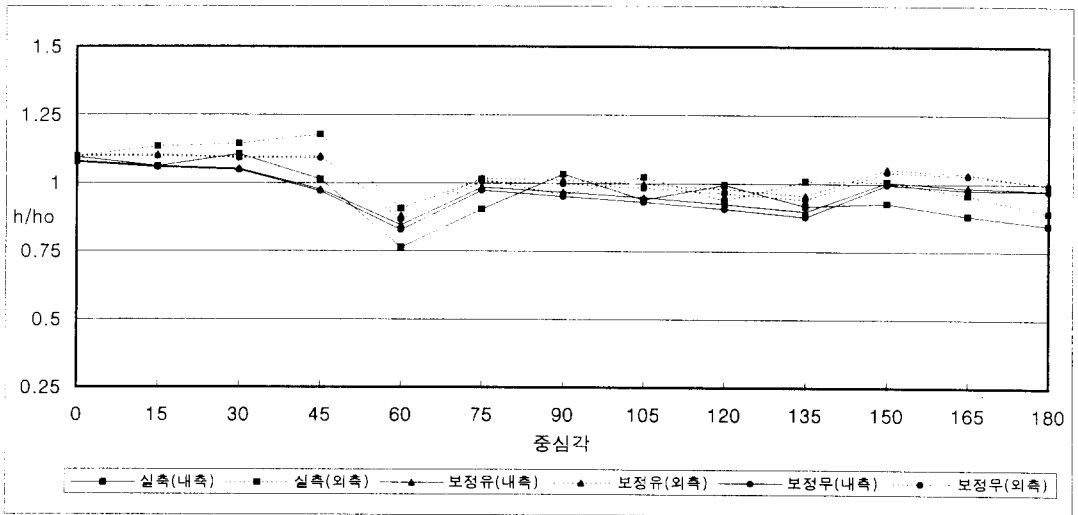
(그림2) D_s 의 변화에 따른 최대유속선분포

4.1 수위

그림3은 180° 만곡수로의 중심부를 기준으로 수심비를 실측치와 계산치의 내·외측으로 구분하여 나타낸것이다. 이 때 h는 횡단면 임의점에서의 수심이고, ho는 수로 중심부 수심을 나타낸것이다. 내·외측 수심비가 실측치의 경우 0.94~1.05의 범위를, 계산치에서는 만곡보정의 유·무에서 모두 0.94~1.04의 범위를 나타냈으며 비교적 일치하고 있음을 알 수 있다. 만곡수로에서의 흐름이 연속방정식을 만족시키기 위해서 만곡수로 입구 내측 흐름에는 가속작용이, 외측 흐름에는 감속작용이 발생됨을 예측할 수 있다. 횡방향 수면경사도 만곡보정과 관계없이 잘 표현되고 있었다.



(그림 3) 180° 만곡수로의 내,외측 수심비



(그림 4) 중심각 45° 에서 지류 합류각 90° 의 수심비

그림4는 지류의 합류각이 90° 인 경우의 수심비에 대해 실측치와 계산치를 비교한 것이다. 이

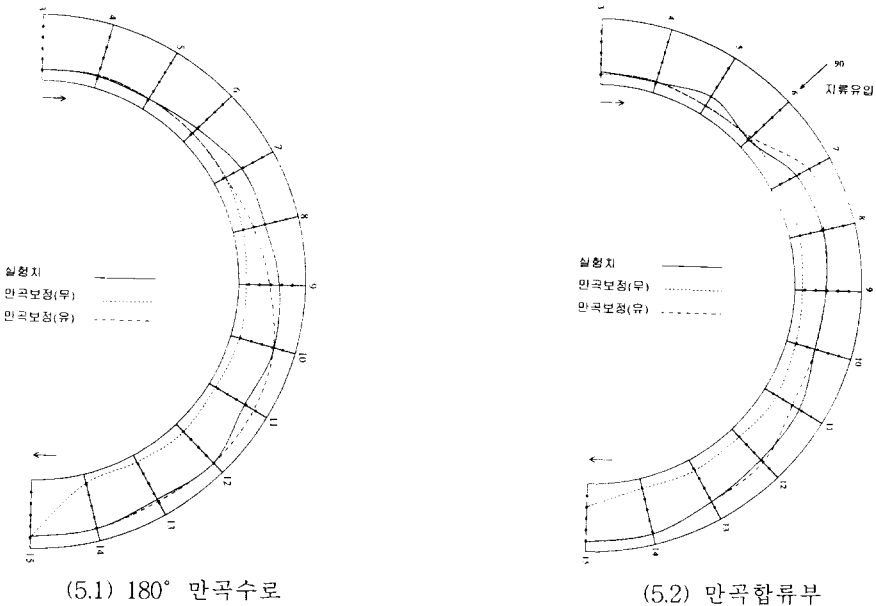
때 h 는 횡단면 입의점에서 수위이고, h_0 는 등류수심을 나타낸 것이다. 합류시 수심비(h/h_0)는 실측치에서는 0.76~1.17, 계산치에서는 만곡보정의 유·무에서 모두 0.84~1.13의 범위로 비교적 유사하게 나타났다.

합류부(중심각 45°)와 합류 직 하류부(중심각 60°)의 수위변동은 지류유량으로 인한 운동량의 변화로서 그 차이는 크게 나타났으며 이후 서서히 안정을 찾아가고 있음을 알 수 있다.

합류지점 직상류에서의 수위는 계산치가 실측치에 비해 작으며 직하류부에서는 외측은 작고 내측은 크게 계산되었다. 이는 합류부 부근에서의 3차원적 흐름현상을 2차원으로 모의하는 데 따른 오차와 확산계수의 선정에 기인한다고 생각된다. 수치실험에 의한 수심은 만곡보정의 유·무에 관계없이 수리실험치와 유사함을 알 수 있다.

4.2 유속

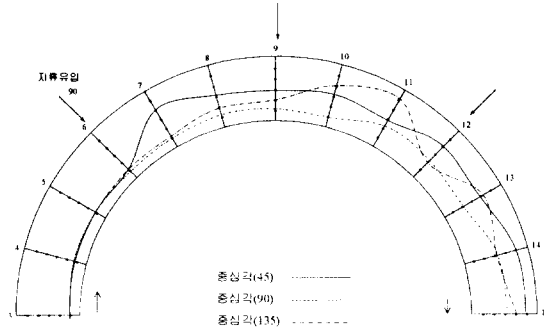
그림5는 180° 만곡수로와 만곡부 중심각 45° 에서의 지류 합류각 90° 에 대한 실측치와 만곡보정의 사용 유·무에 따른 최대 유속선의 이동경로를 나타낸 것이다.



(그림 5) 최대 유속선 이동 경로

그림5.1에서 실측치와 만곡보정을 고려한 계산치는 만곡 유입부에서는 최대 유속의 내측 편의 현상을 비교적 잘 나타내고 있으며, 이후 흐름이 하류로 진행되면서 외측편의 현상을 보여주었다. 반면에 만곡보정을 고려하지 않은 경우는 만곡부내에서 최대유속선이 상·하류에 걸쳐서 계속 내측을 따라 분포되고 있음을 볼 수 있으며, 이는 만곡보정에 의한 원심력과 전단응력을 고려하지 못한 결과이다. 즉 만곡부에 RMA-2모형을 적용한 경우에는 만곡보정을 해주어야만 최대유속의 이동 경로를 얻을 수 있으며, 이때 비교적 정확한 유속의 재분포를 얻을 수 있다.

그림5.2는 만곡부에 유입지류가 있는 경우 실측치와 만곡보정의 유·무에 따른 최대유속의 이동 경로를 나타낸 것이다. 180° 만곡수로에서와 같이 최대유속선의 이동 경로는 실측치와 만곡보정한 결과가 잘 일치하고 있으며 만곡보정을 고려하지 않은 경우는 최대유속선이 내측에 계속 있다.



(그림6) 만곡부 외측 합류

그림6은 지류유입의 위치를 만곡부 중심각 45° , 90° , 135° 로 변화시키면서 만곡보정을 고려하여 최대유속경로를 모의한 것이다. 최대유속선의 이동경로가 지류의 영향으로 내측으로 이동되는 현상은 세 경우 동일하며 특히 중심각 135° 에 위치한 지류의 영향이 가장 크게 계산되었다.

5. 결론

RMA-2 모형의 만곡보정을 고려하여 180° 만곡수로와 만곡 합류부에서 흐름을 계산하고 이 결과치를 실측치와 비교하였다. 만곡보정을 고려하지 않은 경우의 수위는 실측치와 비교적 근접하는 결과를 얻을 수 있었으나 만곡부 흐름특성중 중요한 인자인 최대유속선의 이동경로는 모의 할 수 없었다.

A_s 를 6.0, D_s 를 0.5로 선택하여 만곡보정을 실시한 경우 최대유속선의 이동경로는 실측치와 비교적 잘 일치하고 있었으며 유속의 재분포 현상을 모의 할 수 있었다. 앞으로 만곡하천의 자료를 이용하여 만곡보정에 사용되는 경험계수에 관한 연구를 발전시킨다면 더욱 정확한 계산결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

6. 참고문헌

1. 건설교통부 국립건설시험소(1995). 만곡합류부의 수공구조물 설치시 흐름특성. p. 212
2. 윤세의, 백창식, 정재욱, 윤수인(1996). "만곡수로 합류부에서의 흐름특성". 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 63~68.
3. ECGL(1995). SMS Reference Manual, Engineering Computer Graphics Laboratory, pp.1.1~8.14
4. Helgi Johannesson(1988). "Theory of river meanders". UMI Dissertation Services, pp. 66~111.
5. Helgi Johannesson and Gary Parker(1989). "Secondary flow in mildly sinuous channel". Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 289~308.
6. Robert S. Bernard(1993). "Numerical model for depth-averaged incompressible flow". Technical Report REMR-HY-11, Appendix A1 ~ C6.
7. USACE(1997). RMA2 WES Version 4.3. U.S Army Engineer Waterways Experiment Station, p 90.