

개수로 분류흐름에서의 특성분석

Analysis of Characteristics for a Dividing Flow in Open Channels

박성수* · 이진우** · 조용식***

Park, Seongsoo · Lee, Jin Woo · Cho, Yong-Sik

Abstract

The dividing flow in an open channel has a number of distinctive characteristics. One of these is that the separation zone interacts with a secondary motion along the inner wall of a branch channel, generating sediment accumulation. To investigate this phenomenon, a two-dimensional numerical model based on the shallow-water equations, RMA2, which calculates water surface elevations and horizontal-velocity components, was used to analyze the dividing flow. The obtained numerical results fully coincide with the laboratory measurements reported by Hsu et al. (2002). For the analysis of the numerical results, a separation zone-discharge rate relationship was proposed. To reduce the size of a separation zone, the topographies of diagonal and curved edges were proposed, smoothly connecting the upstream corner to branch channel.

Key words : Dividing flow, Separation zone, RMA2, Shape factor

요 지

개수로에서 발생하게 되는 분류흐름에는 많은 특성들이 나타나게 된다. 특히, 지류부의 내측 벽면을 따라서 이차류 흐름이 나타나 토사나 오염물 등의 퇴적물 침전을 일으키는 분리구역이 발생하게 된다. 분류흐름에서 발생하는 분리구역의 특성을 연구하기 위해 상류흐름에서의 자유수면 및 유속을 계산할 수 있는 이차원 천수방정식 수치모델인 RMA2를 이용하였다. 수치모의 결과는 Hsu 등(2002)의 실험결과와 비교하여 잘 일치함을 알 수 있었다. 수치모의를 통해 유량비에 대한 분리구역의 크기 관계를 제시할 수 있었다. 그리고 분리구역의 크기를 줄이기 위해 본류와 지류가 만나는 모서리 지점을 곡선과 대각선으로 연결하여 유수흐름을 완만하게 만든 지형들을 제안하였다.

핵심용어 : 분류흐름, 분리구역, RMA2, 형상지수

1. 서 론

수리학 및 환경공학에서 분류흐름에 대한 연구는 수치리 시스템과 개수로에서의 관계 및 배수 시스템의 설계에 직접적으로 응용될 수 있다. 그림 1에서는 개수로 분류흐름에서 발생할 수 있는 특성들을 나타내었다. 지류 유입부의 내측에는 통수단면을 축소시키는 분리구역(Separation zone)이 발생하며 지류 유입부의 외측 모서리 부근에서는 정체구역(Stagnation zone)이 발생하게 된다. 지류 내측벽을 따라 발생하는 분리구역에서는 흐름유속이 감소하며 이차류 흐름이 형성되게 되며 수면에서 바닥으로 내려올수록 유속의 크기는 점차 작아지게 된다. 분리구역에 이르러 유속과 난류강도가 약해짐으로 인해 상류로부터 내려온 유사 및 오염물질의 퇴적이 발생하게 되는데 이로 인해 하상변화가 발생하게 되며

통수능 기능을 저하시키게 된다. 이러한 현상은 홍수시나 태풍이 발생할 경우 내측의 홍수범람 및 주변지역의 피해를 가져올 수 있게 된다.

분류부에 관한 연구는 Taylor(1944)의 실험을 통해 처음으로 실시되었으며, Grace 등(1958)은 지류와 본류수로가 접하는 각도 및 하폭비의 변화에 따른 흐름특성을 연구하였다. Law 등(1966)은 상류와 하류에서의 수심이 동일하다는 가정으로 해석해와 실험값을 비교하였으며, Hager(1984)는 지류 유입부에서의 유속분포가 일정하다는 가정 하에 에너지 손실 계수를 구하는 간단한 모형을 제시하였다. Ramamurthy 등(1990)은 에너지 손실이 없다는 가정으로 본류에서부터 지류까지 미치는 운동량 전이 속도를 표현하였다. 그의 논문에서는 Froude수가 0.75보다 작은 경우, 유량비와 Froude수의 변화에 따른 상·하류에서의 수위비 관계를 제시하였다.

*한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정(E-mail : reibun@hanyang.ac.kr)

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

***정회원 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(교신저자)

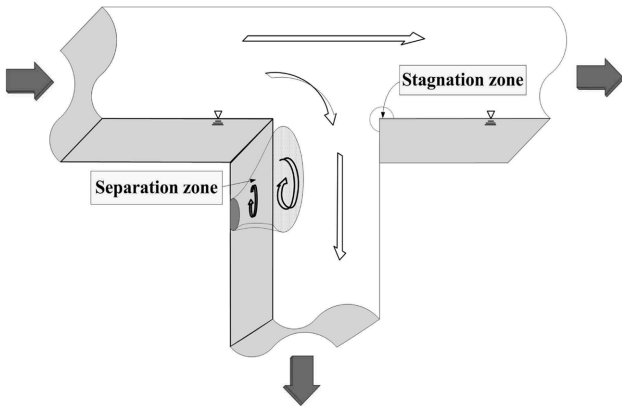


그림 1. 분류흐름에서 발생하는 특성

Neary 등(1993)은 Froude수가 작은 흐름에서 순환영역(Separation zone)에서의 유속벡터를 자세히 묘사하였으며, Hsu 등(2002)은 분류흐름에서 수심-유량 관계와 상류흐름에서 에너지 손실계수변화 등을 제시하였다. Ramammurthy 등(2007)은 실험을 통해 분류흐름에서의 3차원 유속흐름 및 수위분포를 자세히 나타내었으며 수치모의를 통해 관측치와 비교하였다. 반면에 국내에서는 개수로 분류흐름에 관한 연구는 아직까지 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 분류흐름에 대한 수치모의를 이용하여 유량비 변화에 따른 분리구역의 크기관계 및 형상지수를 제시하였다. 또한, 지형변화를 통해 분리구역의 발생을 줄일 수 있는 방법을 제시하여 그 결과를 비교하였다.

2. 지배방정식

RMA2는 2차원 수심 평균한 유한요소 수리동역학적 수치 모델로서 상류(sub-critical) 및 자유수면 흐름의 수위와 수평 방향의 2차원 유속 성분을 계산한다. 마찰력은 Manning 방정식의 조도계수나 Chezy 방정식의 평균유속계수로 계산되며 정상류 뿐만 아니라 부정류에서도 모의가 가능하다. 모형의 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 수심 적분한 식으로서 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g u n^2}{C^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \psi + 2h \omega v \sin \phi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g v n^2}{C^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \psi + 2h \omega u \sin \phi = 0 \quad (3)$$

여기에서, x, y, t 는 흐름좌표와 시간을 나타내며, u, v 는 x, y 방향의 수심평균 유속, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, h 는 수심, a 는 하상표고, E_{xx}, E_{yy} 는 각각 x 와 y 방향평면의 법선 외점성계수, E_{xy}, E_{yx} 는 각각 x 와 y 방향평면의 접선 외 점성계수, n 은 Manning 조도계수이며, C 는 Chezy 계수, V_a 는 풍속을 나타낸다. 수치기법으로는 가중잔차 Galerkin법을 사용하며 해를 구하기 위해서 완전 음해법을 사용한다. 반복 계산법으로는 각 시간단계에서의 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 반복법을 사용하여 계산한다.

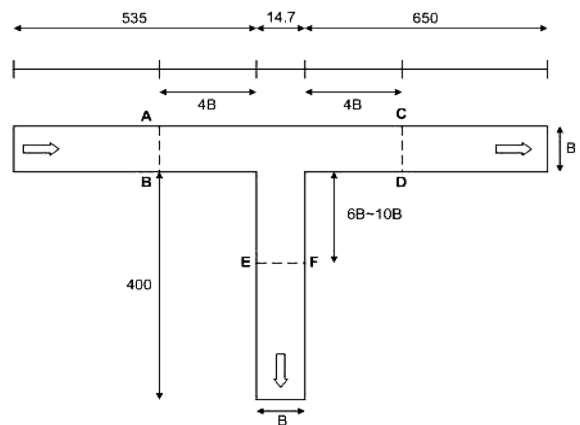
3. 수치모의

3.1 수치실험의 개요

본 연구에서는 Hsu 등(2002)의 실험데이터를 참조하여 수치모의를 실시하였다. 분류 수로는 총 길이 12 m에 하폭 14.7 m인 직선수로이며, 지류 수로는 길이 4.0 m에 하폭은 분류 수로의 하폭과 같다. 분류수로의 상류 및 하류에는 각각 하폭의 4배의 길이에 위치한 지점에서 평균유속 및 수위를 측정하여 실험값과 수치모의 결과를 비교하였다. 그림 2에서는 실험에 사용된 제원을 나타내고 있으며, 여기에서 상류부에서의 유입량은 Q_u , 분류부의 유출량은 Q_d , 지류부에서의 유출량은 Q_b 로 나타내었으며 유량비를 나타내는 Q_r 은 분류 유입량에 대한 유출량의 비(Q_d/Q_u)로 나타내었다. 상류부에서의 유입량은 $0.00463\text{--}0.00537 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위로 유량비를 0.409에서 0.692로 조절하여 수치모의를 실시하였다. 또한, 분류에서의 유입량 조절 및 분류 하류부와 지류 하류부에서의 위어를 이용한 수위조절을 통해 유량비 변화에 따른 분류 흐름부에서의 흐름특성을 분석하였다.

3.2 수치모의 검증

분류흐름에서의 유량비 변화에 따른 유속 및 수위에 대한 수치모의값을 Hsu 등(2002)의 실험값과 비교하였다. 그림 3은 상류부 AB지점에서의 수위와 하류부 CD지점에서의 수위 값을 각각 비교한 것이다. 분류흐름에서는 상류에서부터 분류 지점을 지나 하류로 내려 갈수록 급격한 수위 상승효과가 발



Hue et al. (2002)의 실험제원 참조

그림 2. 수치모의 개요도

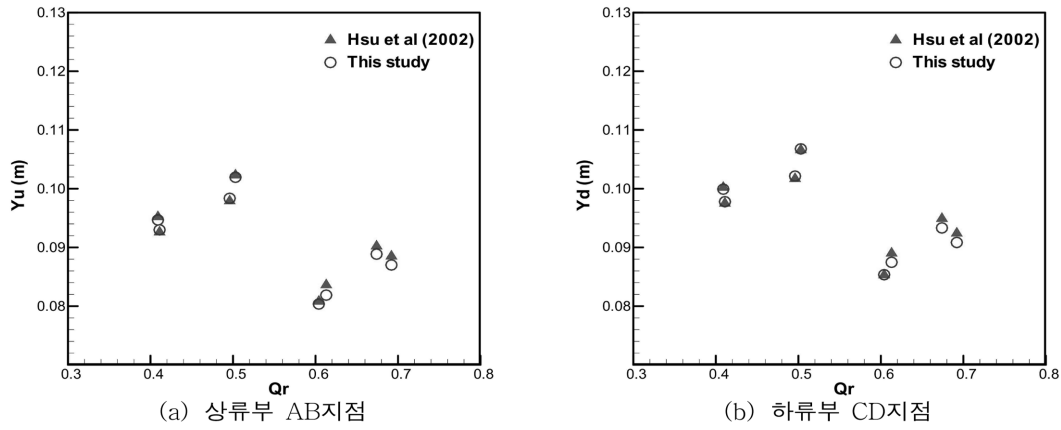


그림 3. 실험값과 수치모의 값의 비교 (수위)

생하는 것을 알 수 있는데 수치모의 결과에서는 그 변화를 잘 나타내고 있으며 실험값과도 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3 지류부에서의 분리구역

지류부에서 발생하는 분리구역으로 인해 지류로 유입되는 유수의 흐름에는 많은 제한이 발생하게 된다. 따라서 분리구역을 산정하여 그 관계를 규명함과 동시에 발생효과를 줄일 수 있는 것이 중요하다. 분리구역은 지금까지 여러 방법으로 그 특성이 정의되어왔지만, 그 중 분리구역의 가장 두드러지는 특성은 앞서 언급한 유속의 감소 및 이차류의 발생으로 특징지어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지류로 유입되는 흐름의 평균유속의 60%이하의 흐름을 분리구역으로 정의하여 그 특성을 알아보도록 하였다. 수치모의 결과에 의해 계산되어진 분리구역은 하폭에 대해 무차원화한 길이 및 하폭의 크기로써 산정하였다. 그림 4에서는 Hsu 등(2002)의 실험에서 구한 분리구역의 하폭크기를 본 수치모의 결과와 비교해 본 것이다. 그의 논문에서는 분리구역의 산정방법에 대해서 제시하진 않았지만, 본 연구에서 구한 결과와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

그림 5에서는 유량비 변화에 따른 분리구역의 하폭(B) 및 길이변화(L) 값을 나타내었으며 유량비가 증가함에 따라 분리구역의 하폭과 길이는 선형에 가깝게 증가함을 알 수 있었

다. 즉, 지류로 유입되는 유량에 비해 본류로 흐르는 유량의 유량비가 커짐으로 분리구역의 크기는 증가함을 알 수 있었다. 그림 6에서는 분리구역의 길이에 대한 하폭비를 나타내는 형상지수(Shape factor)를 합류흐름에서 발생하는 분리구역의 형상지수와 비교해 보았다. 분류흐름에서와 마찬가지로 합류흐름에서도 분리구역은 발생하게 되는데 Best 등(1984)과 윤태훈 등(1998)의 실험과 수치모의 결과를 통해 형상지수 값을 비교하였다. 그래프를 비교해보면 유량비에 따라 분리구역의 하폭 및 길이는 일정하게 증가하게 되는 반면, 형상지수의 값은 유량비가 변화해도 0.1 ~ 0.3의 범위를 벗어

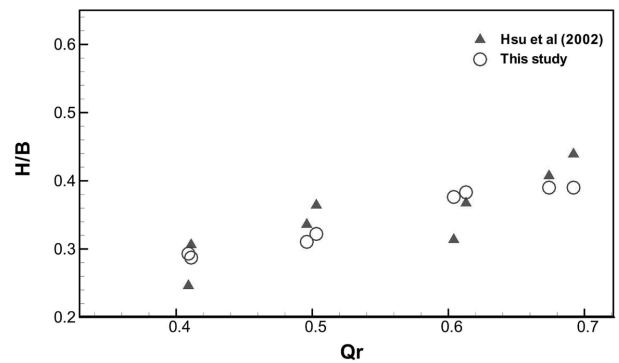


그림 4. 실험값과 수치모의 값의 비교 (분리구역의 하폭)

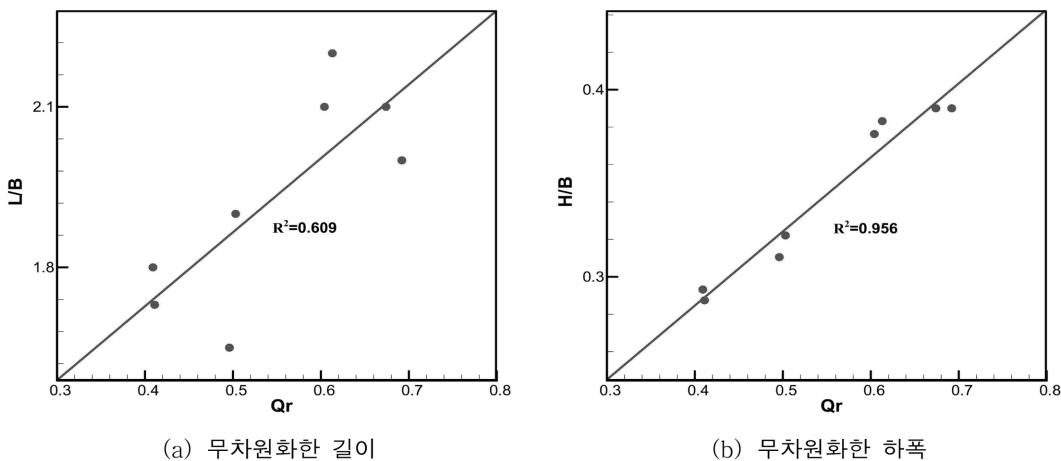


그림 5. 유량비에 따른 무차원화한 길이 및 하폭의 크기

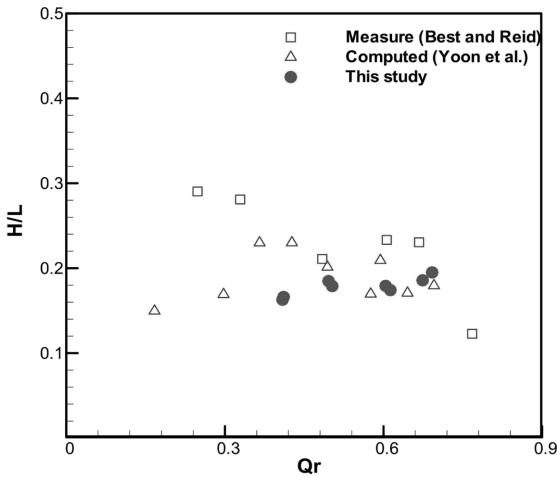


그림 6. 형상지수의 크기

나지 않는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 분리구역의 하폭과 길이는 일정한 비율로 증가함을 알 수 있었다.

4. 분리구역을 경감시키는 개선안

4.1 지형의 제안

분류흐름에서 2가지 지형의 제안을 통해 분리구역의 크기가 감소하는 효과를 각각 비교분석하였다. 각각의 지형은 그림 7과 같이 분류지점에서 분리구역이 발생하는 좌측의 모서리 부분을 곡선과 대각선으로 완만하게 만들어 유수의 흐름이 더 원활해질 수 있도록 만들었다. 또한, 모서리 부분에서부터 분류와 지류부분의 길이 M만큼 변형시켜 하폭(B)에 대해 무차원화한 0.05B에서부터 0.5B까지 0.05B의 간격으로 변형시켜가며 수치모의를 실시하였다.

4.2 수치모의 결과

수치모의는 유량비(Q_r)가 0.604인 경우와 0.409인 두 가지

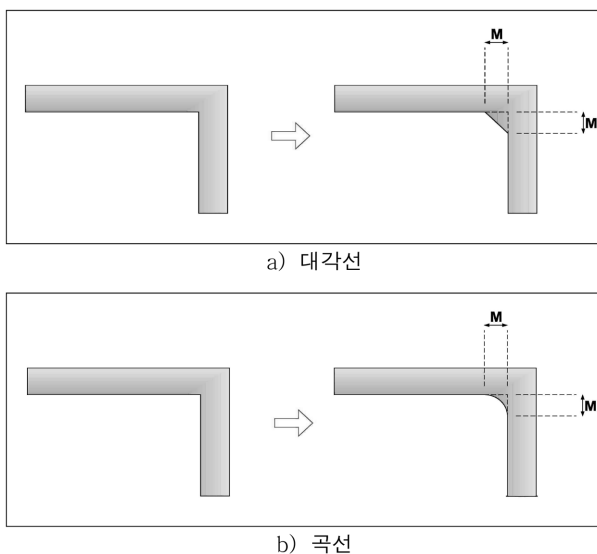


그림 7. 대각선 지형과 곡선 지형의 제안

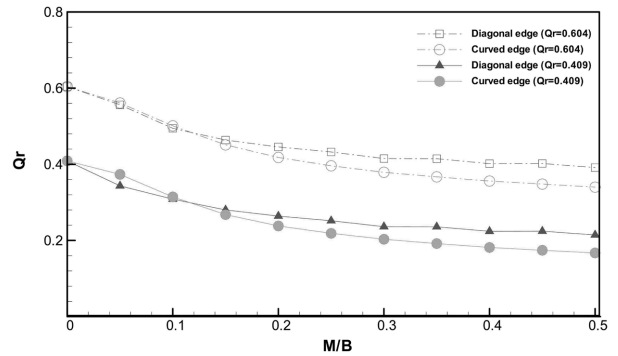


그림 8. 무차원화한 길이 M에 따른 유량비 변화

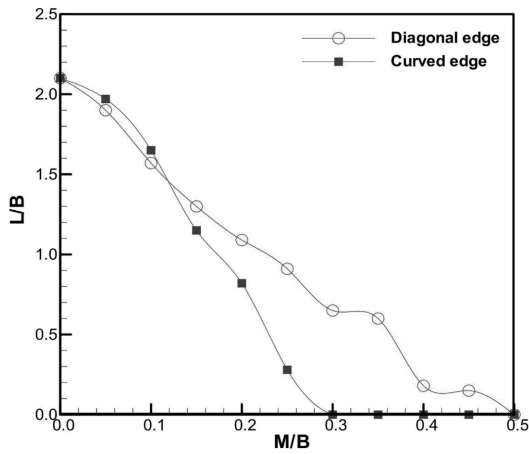
경우에서 실시하여 분리구역의 저감효과 및 지류부에서의 통수능 변화를 알아보았다. 그림 8에서는 무차원화한 길이 M에 따라 지류로 유입되는 유량의 변화를 알아보았는데, 두 개의 지형에서는 0.1B만큼 변화시킬 경우 통수능의 차이는 크게 발생하지 않았지만 대각선인 경우의 통수능이 약간 더 증가함을 알 수 있다. 하지만, 0.1B를 초과하여 지형을 변형하였을 경우는 곡선인 경우가 대각선인 경우보다 지류로 유입되는 유량비가 더 크다는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 그림 9에서의 M의 변화에 따른 분리구역의 크기산정을 보면 쉽게 이해할 수 있다. 길이 M이 0.1B만큼 변화할 때까지는 분리구역의 크기는 대각선의 경우가 더욱 빨리 감소하였지만, 마찬가지로 0.1B를 초과할 경우에는 곡선인 지형에서 분리구역의 크기가 급격하게 감소함을 알 수 있었다. 결국 분리구역이 제거되는 효율이 클수록 지류로 유입되는 유량의 증가속도는 크다는 것을 알 수 있었는데 대각선 지형에서 효율이 더 우수함을 판단할 수 있다.

5. 결 론

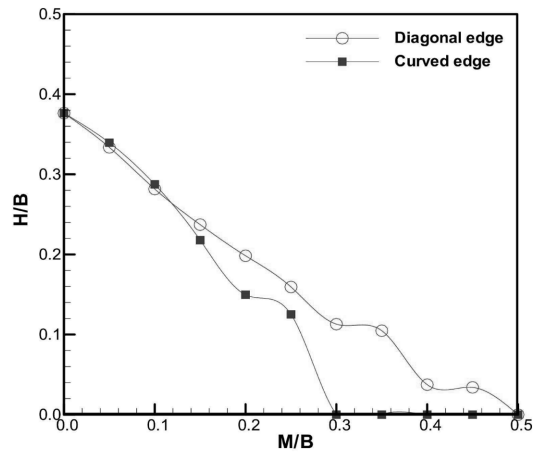
본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 분류흐름에서 발생하는 분리구역의 특성을 분석하였으며 분리구역의 발생을 제한하기 위한 지형을 제안하였다.

분류흐름에서 발생하는 분리구역의 특성을 분석해 본 결과, 분류에서의 유입량에 대한 유출량의 유량비가 커짐에 따라 지류에서 발생하는 분리구역의 길이 및 하폭의 크기는 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한, 분리구역이 나타내는 형상지수는 대체로 0.1~0.3의 타원형의 모양이 나타남을 알 수 있었으며 이러한 특성은 합류흐름에서 발생할 수 있는 분리구역의 특성과 비슷하게 나타났다.

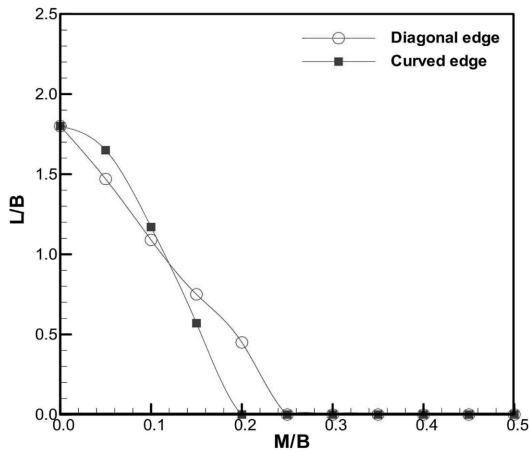
분리구역의 발생을 저감할 수 있는 지형을 분류지점의 좌측 모서리 부분을 각각 곡선화 및 대각선화하여 제안하였다. 수정된 M의 크기가 0.1B이하인 경우는 대각선의 지형에서 분리구역의 크기가 더욱 빨리 줄어든다는 것을 알 수 있었으나, 0.1B를 초과할 경우에는 곡선화한 지형에서 분리구역이 감소하는 효율이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 또한, M의 크기에 따른 유량변화 및 분리구역의 크기변화를 분석해보면 분리구역이 감소되는 속도가 클수록 지류로 유입되는 유량의 증가속도는 더욱 빨라짐을 알 수 있었다.



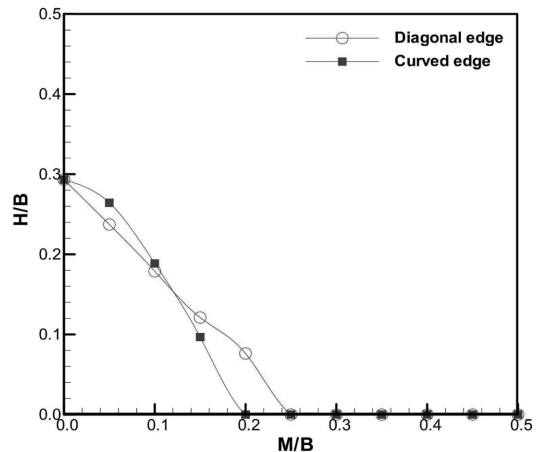
a) 길이변화 ($Q_r=0.604$)



b) 하폭변화 ($Q_r=0.604$)



c) 길이변화 ($Q_r=0.409$)



d) 하폭변화 ($Q_r=0.409$)

그림 9. M의 변화에 따른 분리구역의 길이 및 하폭의 변화

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 윤태훈, 정의택, 박종석 (1998) 2차원 수치모형에 의한 합류흐름 해석. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제31권, 제5호, pp. 529-538.
- Best, J. L. and Reid, I., (1984) Separation zone at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 100, No. 11, pp. 1588-1594.
- Grace, J. L., and Priest, M. S., (1958) Division of flow in open channel junctions. Bulletin No. 31, *Engineering Experimental Station, Alabama*, Polytechnic Institute, Auburn, Ala.
- Hager, W. H., (1984) An approximate treatment of flow in branches and bends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 198C, No. 4, pp. 63-69.

- Hsu, C.-C., Tang, C.-J., Lee, W.-J., and Shieh, M.-Y., (2002) Subcritical 90° equal-width open-channel dividing flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 7, pp. 716-720.
- Law, S. W., and Reynolds, A. J., (1966) Dividing flow in an open channel. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 92, No. 2, pp. 207-231.
- Neary, V. S., and Odgaard, A. J., (1993) Three-dimensional flow structure at open channel diversions. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 11, pp. 1223-1230.
- Ramamurthy, A. S., Qu, J., and Vo, D., (2007) Numerical and experimental study of dividing open-channel flow. *Journal of Hydraulic engineering*, Vol. 133, No. 10, pp. 1135-1144.
- Ramamurthy, A. S., Tran, D. M., and Carballada, L. B., (1990) Dividing flow in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 449-455.
- Taylor, E. H., (1944) Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. *Trans. ASCE*, Vol. 109, pp. 893-902.

- ◎ 논문접수일 : 09년 1월 30일
 ◎ 심사의뢰일 : 09년 2월 04일
 ◎ 심사완료일 : 09년 2월 13일