

2차원 수치모형에 의한 합류흐름 해석

Junction Flow Analyses by Two-Dimensional Numerical Model

윤 태 훈* / 정 의 택** / 박 종 석***

Yoon, Tae Hoon / Jung, Eui Teak / Park, Jong Suk

Abstract

The flow configurations at open channel junctions are analyzed by 2-D depth averaged mathematical model. The governing factors of the flow at the junction are found to be discharge ratio between tributary flow and the post confluence combined flow, and confluence angle. Analyzed by these two factors are flow patterns and flow depth variation at the confluence, discharge ratio above which the flow upstream from the junction is affected by the tributary flow and the geometries of a recirculation region. Further, the flow contraction in the downstream region and the deflection of the tributary flow in the main channel were investigated. The numerical results are compared with the existing experimental data fairly well.

Keywords: junction, recirculation region, flow contraction, discharge ratio, confluence angle

요 지

개수로 합류부의 흐름양상이 2차원 수심적분 수학적 모형에 의하여 해석된다. 합류부 흐름에 지배적인 매개변수는 지류와 합류후 유량의 비와 합류각으로 나타났다. 이들 인자의 향으로 해석되는 대상은 합류부에서 흐름양상과 수심의 변화, 본류에서 합류부 상류흐름이 영향을 받기 시작하는 유량비 및 순환영역의 기하특성이다. 또한 합류하류에서 흐름수축과 지류의 굽음각이 조사되었다. 수치해석결과는 기존 실험자료와 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 합류, 순환영역, 흐름수축, 유량비, 합류각

* 한양대학교 토목공학과 교수

Prof. Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

** 한국수자원공사 설계계획처 과장

Section Chief, Project Design and Planning Dept., Korea Water Resources Corporation, Taejeon 306-711, Korea

*** 금호엔지니어링(주) 수자원부 대리

Deputy Section Chief, Water Resources Team, Kumho Engineering Co., Ltd., Anyang, Kyonggi 431-060, Korea

1. 서 론

두 개의 수로가 만나는 合流部에서의 흐름현상은 매우 복잡하고 다양하다. 합류수로의 흐름해석은 하천 공학과 환경공학은 합류흐름구조의 이해를 필요로 한다. 합류부흐름은 두 흐름이 만나는 각도와 유량에 따라 다르게 된다. 일반적으로 두 수로가 만나거나 또는 지류가 본류에 유입되면 유입부하류 지류측 하한에 循環領域이 유발되어 정체성 흐름영역이 형성된다. 순환영역의 유속과 난류강도는 매우 약해서 흐름에 수반된 물질 즉 토사 또는 오염물이 포착 침전된다. 따라서 순환영역은 오염물의 경우 오염물 농도가 심해지거나 토사의 경우 퇴적을 야기하여 본류의 반대측에서는 세굴이 발생한다. 이러한 세굴은 본류의 흐름을 변화시키고 제방의 안전을 위협한다. 순환영역은 정체성 흐름영역이므로 본류의 흐름단면적을 감소시키고 常流의 경우 이 영향은 상류로 전파되어 背水를 유발한다.

따라서 합류부 흐름해석은 수면곡선의 계산, 하천의 흐름과 제방의 관리 및 수질관리에 필요한 사항이 된다. 그럼에도 불구하고 합류부 흐름에 관한 연구는 미흡한 실정이다. Best와 Reid(1984)는 상이한 합류각도에 대한 순환영역의 규모를 실험에 의하여 해석하였으며 Ramamurthy 등(1988)은 직각합류의 경우 횡단면 유속분포와 에너지 보정계수, 수면변화를 실험에 의하여 해석하였다. Ponce와 Yabusaki(1981)는 직각유입에 관한 흐름을 유한차분기법을 이용한 2차원 수심평균모형으로 해석하였다. Hager(1989)는 동일한 폭을 갖는 두 수로의 합류흐름에 관한 수심변화와 지류의 유입각도의 해석을 위한 실험을 수행하였다. 수치해석에 의한 합류부해석은 횡유입흐름에 관한 흐름구조를 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 McGuirk과 Rodi(1978), Demuren과 Rodi(1983)에 의하여 수행된 바 있다. 본 연구가 수행된 후 최근에 에너지와 운동량 보정계수,

유량비에 대한 상류수심변화, 흐름수축율 등에 관한 연구가 Gurram 등(1997)과 Hsu 등(1998)에 의하여 발표되었다.

본 연구의 목적은 합류하는 지류의 상이한 유량, 합류각 및 수로폭에 대하여 합류부와 상하류의 흐름양상, 수면의 변화, 합류후 흐름수축, 횡방향 수면변화, 순환영역의 기하특성 및 지류흐름의 합류부에서의 굽음각등을 2차원 수심적분 수학적 모형을 이용하여 해석하기 위함이다.

2. 지배방정식

2차원 수심평균 방정식은 Navier-Stokes식을 하상에서 수면까지 적분을 통하여 유도된다. 이 과정에서 다음과 같은 가정이 적용된다. 연직방향에서 균일한 유속분포, 물은 비압축성, 정수압분포, 작은 하상경사, 수면에서 무시할 정도로 작은 비압전단 및 무시할 정도의 코리올리수 가속성분등이다.

2차원 수심평균 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다(Kuipers와 Vrengdenhil, 1973; Falconer, 1994).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial y} + g\frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{g\bar{u}}{C^2H} \sqrt{u^2 + v^2} = \epsilon \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial y} + g\frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{g\bar{v}}{C^2H} \sqrt{u^2 + v^2} = \epsilon \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

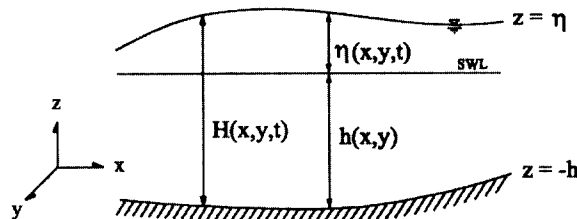


그림 1. 수심 정의도

여기서 t 는 시간, x 와 y 는 평면직각좌표, H 는 수심, \bar{u}, \bar{v} 는 각각 x, y 방향의 수심평균유속, ε 는 와점성계수, C 는 Chezy 상수이다(그림 1 참조). 주어진 경계조건에 대한 식 (1), (2) 및 (3)의 수치해는 시간과 공간에 대한 η, \bar{u}, \bar{v} 의 값을 제공한다.

3. 지배방정식의 차분화

지배방정식에 대한 유한차분식은 시간증분 구간을 두 개의 가상구간으로 나누어 두 번의 계산과정이 수행되는 교호방향음해법(Alternating Direction Implicit, ADI)방법을 이용하였다. 이 방법의 장점은 x 방향 운동량 방정식과 y 방향 운동량 방정식을 따로 따로 계산하는 과정에 있다. 그것은 일련의 두 개의 1차원 문제해석으로 2차원 문제의 해석을 가능케 해준다. 즉, 첫번째 시간구간 $n\Delta t$ 부터 $(n+1/2)\Delta t$ 구간에서는 U, η 를 포함하는 항을 음해법으로, V 를 포함하는 항을 양해법으로 표현한다. 이를 그림 2의 격자망을 이용하여 차분식으로 나타내면 다음과 같다. 연속방정식과 x 방향의 운동량 방정식을 차분하면

$$A1_i U_{i-1,j}^{n+1/2} + B1_i \eta_{i,j}^{n+1/2} + C1_i U_{i,j}^{n+1/2} = D1_i \quad (4)$$

$$A1_i^* \eta_{i,j}^{n+1/2} + B1_i^* U_{i,j}^{n+1/2} + C1_i^* \eta_{i+1,j}^{n+1/2} = D1_i^* \quad (5)$$

여기서

$$\lambda_x = \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad \lambda_y = \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

$$A1_i = \frac{\lambda_x}{2} (\eta_{i,j}^n + \eta_{i-1,j}^n + h_{i,j} + h_{i-1,j})$$

$$B1_i = 2$$

$$C1_i = \frac{\lambda_x}{2} (\eta_{i+1,j}^n + \eta_{i,j}^n + h_{i+1,j} + h_{i,j})$$

$$D1_i = 2\eta_{i,j}^n - \frac{\lambda_y}{4} \{ (\eta_{i,j+1}^n + \eta_{i,j}^n + h_{i,j+1} + h_{i,j}) V_{i,j+1}^n - (\eta_{i,j}^n + \eta_{i,j-1}^n + h_{i,j} + h_{i,j-1}) V_{i,j-1}^n \}$$

$$A1_i^* = -g\lambda_x,$$

$$B1_i^* = 2 + \frac{\lambda_x}{2} (U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n) + \frac{2g\Delta t \left\{ (U_{i,j}^n)^2 + \left(\frac{V_{i,j-1}^n + V_{i+1,j-1}^n + V_{i,j}^n + V_{i+1,j}^n}{4} \right)^2 \right\}^{1/2}}{C^2 (\eta_{i+1,j}^n + \eta_{i,j}^n + h_{i+1,j} + h_{i,j})}$$

$$C1_i^* = -g\lambda_x,$$

$$D1_i^* = 2U_{i,j}^n - \frac{\lambda_y}{8} (V_{i,j-1}^n + V_{i+1,j-1}^n V_{i,j}^n + V_{i+1,j}^n) (U_{i,j+1}^n - U_{i,j-1}^n) + \varepsilon \left\{ \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (V_{i+1,j}^n - 2V_{i,j}^n + V_{i-1,j}^n) + \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} (V_{i,j+1}^n - 2V_{i,j}^n + V_{i,j-1}^n) \right\}$$

여기서 각식의 계수 $A1_i, B1_i, C1_i, D1_i, A1_i^*, B1_i^*, C1_i^*, D1_i^*$ 는 기지의 값이며 x 방향을 따라 각 격자점에 U, η 를 구하기 위해 연속방정식과 운동량 방정식의 차분식을 삼중대각행렬의 꼴로 나타내어 Thomas 알고리즘으로 해석한다. y 방향의 운동량 방정식을 차분하면 다음과 같다.

$$V_{i,j}^{n+1/2} = \frac{YB(i)}{YAI(i)} \quad (6)$$

여기서

$$YB(i) = V_{i,j}^n - \frac{\lambda_x}{16} (U_{i,j}^{n+1/2} + U_{i,j+1}^{n+1/2} + U_{i-1,j+1}^{n+1/2} + U_{i-1,j}^{n+1/2}) (V_{i+1,j}^n - V_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta t}{2} f U_{i,j}^{n+1/2} - \frac{g}{2} \lambda_x (\eta_{i,j+1}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n+1/2}) + \frac{\varepsilon}{2} \left\{ \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (V_{i+1,j}^n - 2V_{i,j}^n + V_{i-1,j}^n) + \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} (V_{i,j+1}^n - 2V_{i,j}^n + V_{i,j-1}^n) \right\} \quad (7)$$

$$YA1(i) = \frac{g\Delta t}{C^2} \frac{\{ (V_{i,j}^n)^2 + (\frac{U_{i,j}^n + U_{i,j+1}^n + U_{i-1,j}^n + U_{i-1,j-1}^n}{4})^2 \}^{1/2}}{(\eta_{i,j+1}^{n+1/2} + \eta_{i,j}^{n+1/2} + h_{i,j+1} + h_{i,j})} + 1 + \frac{\lambda_y}{4} (V_{i,j+1}^n - V_{i,j-1}^n) \quad (8)$$

두번째 시간구간 $(n+1/2)\Delta t$ 부터 $(n+1)\Delta t$ 구간에서는 V, η 를 포함하는 항을 음해법으로, U 를 포함하는 항을 양해법으로 표현한다. 또한 각 격자점에서 모든 변수가 정의되는 것이 일반적이지만 계산상의 편의와 경계조건의 대입이 용이한 공간교호격자망을 이용하여 각기 다른 격자점에서 U, V, h, η 값을 결정하였다.

연속방정식과 y 방향의 운동량 방정식을 차분하면

$$A2_j V_{i,j-1}^{n+1} + B2_j \eta_{i,j}^{n+1} + C2_j V_{i,j}^{n+1} = D2_j \quad (9)$$

$$A2_j^* \eta_{i,j}^{n+1} + B2_j^* V_{i,j}^{n+1} + C2_j^* \eta_{i,j+1}^{n+1} = D2_j^* \quad (10)$$

여기서

$$A2_j = -\frac{\lambda_y}{2} (\eta_{i,j}^{n+1/2} + \eta_{i,j-1}^{n+1/2} + h_{i,j} + h_{i,j-1})$$

$$B2_j = 2.0$$

$$C2_j = -\frac{\lambda_y}{2} (\eta_{i,j+1}^{n+1/2} + \eta_{i,j}^{n+1/2} + h_{i,j+1} + h_{i,j})$$

$$D2_j = 2\eta_{i,j}^{n+1/2} - \frac{\lambda_x}{4} \{ (\eta_{i+1,j}^{n+1/2} + \eta_{i,j}^{n+1/2} + h_{i+1,j} + h_{i,j}) U_{i+1,j}^{n+1/2} - (\eta_{i,j}^{n+1/2} + \eta_{i-1,j}^{n+1/2} + h_{i,j} + h_{i-1,j}) U_{i-1,j}^{n+1/2} \}$$

$$A2_j^* = -g\lambda_y$$

$$B2_j^* = 2 + \frac{\lambda_y}{2} (V_{i,j+1}^{n+1/2} - V_{i,j-1}^{n+1/2}) + \frac{2g\Delta t \left\{ (V_{i,j}^{n+1/2})^2 + \left(\frac{U_{i,j-1}^{n+1/2} + U_{i+1,j-1}^{n+1/2} + U_{i,j}^{n+1/2} + U_{i+1,j}^{n+1/2}}{4} \right)^2 \right\}^{1/2}}{C^2 (\eta_{i+1,j}^{n+1/2} + \eta_{i,j}^{n+1/2} + h_{i+1,j} + h_{i,j})}$$

$$C2_j^* = g\lambda_y$$

$$D2_j^* = 2V_{i,j}^{n+1/2} - \frac{\lambda_x}{8} (U_{i,j-1}^{n+1/2} + U_{i+1,j-1}^{n+1/2} + U_{i,j}^{n+1/2} + U_{i+1,j}^{n+1/2}) (V_{i+1,j}^{n+1/2} - V_{i-1,j}^{n+1/2}) + \epsilon \left\{ \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (V_{i+1,j}^{n+1/2} - 2V_{i,j}^{n+1/2} + V_{i-1,j}^{n+1/2}) + \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} (V_{i,j+1}^{n+1/2} - 2V_{i,j}^{n+1/2} + V_{i,j-1}^{n+1/2}) \right\}$$

x 방향의 운동량 방정식을 차분하면 다음과 같다.

$$U_{i,j}^{n+1} = \frac{XB(i)}{XA1(i)} \quad (11)$$

$$XB(i) = U_{i,j}^{n+1/2} - \frac{\lambda_x}{16} (V_{i,j}^{n+1} + V_{i,j+1}^{n+1} + V_{i-1,j+1}^{n+1} + V_{i-1,j}^{n+1}) (U_{i,j+1}^{n+1/2} - U_{i,j-1}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{2} fV_{i,j}^{n+1} - \frac{g}{2} \lambda_x (\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) + \frac{\epsilon}{2} \left\{ \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (U_{i+1,j}^{n+1/2} - 2U_{i,j}^{n+1/2} + U_{i-1,j}^{n+1/2}) + \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} (U_{i,j+1}^{n+1/2} - 2U_{i,j}^{n+1/2} + U_{i,j-1}^{n+1/2}) \right\} \quad (12)$$

$$XAI(i) = \frac{g\Delta t}{C^2} \frac{\{ (U_{i,j}^{n+1/2})^2 + (\frac{V_{i,j}^{n+1,2} + V_{i,j+1}^{n+1/2} + V_{i-1,j}^{n+1/2} + V_{i-1,j-1}^{n+1/2}}{4})^2 \}^{1/2}}{(\eta_{i+1,j}^{n+1} + \eta_{i,j}^{n+1} + h_{i+1,j} + h_{i,j})} + 1 + \frac{\lambda_x}{4} (U_{i+1,j}^{n+1/2} - U_{i-1,j}^{n+1/2}) \quad (13)$$

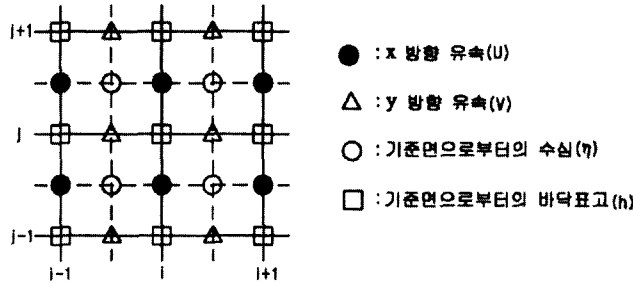


그림 2. 공간교호격자망

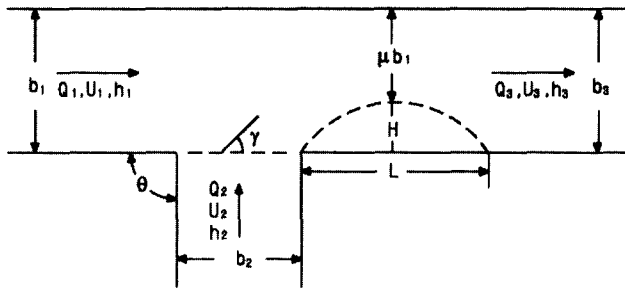


그림 3. 합류흐름 정의도

그리고 수치모형의 검증은 정확해가 알려진 1차원 구형수로에 본 수치모형을 적용하여 결과를 비교하였다. 이와 같은 모형의 검증을 위하여 본 연구의 모형을 1차원으로 수정하고 이로부터 구한 수치해를 정확해와 비교하여 검증을 수행하였다(정의택, 1992). 또한 본 수치모형에 타당한 바닥마찰계수와 유효전단응력을 수치모형에 도입하는 속도의 공간평균과정에 쓰이는 α 의 값은 검증과정을 통하여 0.1로 결정하였고 바닥마찰항의 마찰계수인 Chezy 계수는 25.37을 사용하였다.

4. 수치실험결과

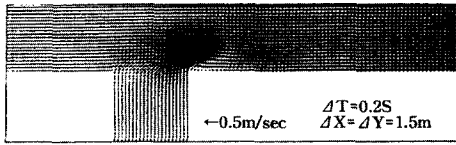
수치실험이 적용된 수로는 길이가 180 m, 폭이 30 m인 직선수로이고 이에 합류되는 지류의 폭은 30 m에서 변화를 갖는다. 해석을 위한 공간중분은 x, y 방향에서 다같이 $\Delta x = \Delta y = 1.5$ m가 사용되었다. 합류

흐름의 정의도는 그림 3과 같다.

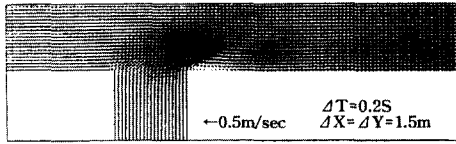
전반적인 합류흐름양상은 두 흐름의 만남으로 인하여 혼합이 일어나고 합류 하류 지류측하안에 본류로부터 흐름이 분리되어 순환영역이 형성된다. 순환영역의 형성으로 본류흐름은 수축되고 이의 영향은 상류 수면 상승으로 나타난다.

4.1 유량비에 따른 흐름양상

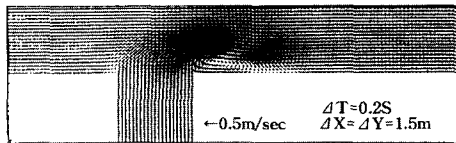
합류수로부에서의 흐름현상을 규명하기 위한 방안으로 먼저 길이 180 m, 폭 30 m의 본류로 동일폭의 지류가 90°로 유입되는 상태에서 Best와 Reid(1984)의 실험에서 사용된 동일한 Froude수 0.1~0.3에서의 흐름특성이 고찰된다. 지류의 유량 Q_2 에 대한 합류후의 총유량 Q_3 의 비로 정의되는 유량비, $Q_R = \text{지류/합류 후} = Q_2 / Q_3$ 가 0.26(그림 4)일 때 지류 직하류에 작



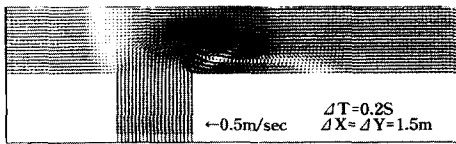
(a) 유량비(Q_R) = 0.26



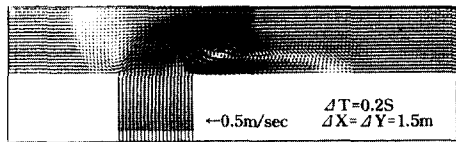
(b) 유량비(Q_R) = 0.34



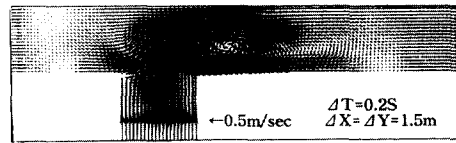
(c) 유량비(Q_R) = 0.50



(d) 유량비(Q_R) = 0.61



(e) 유량비(Q_R) = 0.68



(f) 유량비(Q_R) = 0.77

그림 4. 상이한 유량비 $Q_R = Q_2/Q_3$ 에 대한 흐름양상

은 분리영역이 형성되어 본류흐름의 폭이 좁아지고 유속의 증가를 가져오며 지류유입량이 증가됨에 따라 즉, 유량비가 커짐에 따라 합류수로 하류부에는 뚜렷한 분리영역이 형성되며 귀환거리와 귀환두께가 증가하는 것

을 알 수 있다. 그러나 지류유입유량이 본류유량보다 상당히 큰 즉, 유량비(Q_R)가 0.7 이상일 때는 지류유입유량이 합류수로 하류뿐만 아니라 상류수로의 흐름에 까지 심한 영향을 주어 상류부에서도 와(eddy)가 형성되어 심한 흐름의 변화가 일어남을 알 수 있다. 다음으로 지류수로의 폭을 본류수로폭의 3/4, 1/2, 1/4(22.5 m, 15 m, 7.5 m)로 축소하여 합류수로부에서의 흐름 현상을 고찰한 결과 동일수로폭의 경우와 흐름특성이 비슷함을 알 수 있으며 다만 지류수로폭이 작을수록 동일 유량비에서 분리영역의 폭과 길이가 다소 증가함을 알 수 있다. 이는 동일 유량비에서의 수로폭이 작을수록 지류의 유속이 크므로 본류수로에 더 큰 흐름변화 발생요인으로 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

4.2 유량비와 수로폭비에 따른 순환영역

합류수로부에서 형성되는 분리영역의 크기 즉, 귀환거리 및 순환영역의 폭에 대한 유량비(Q_2/Q_3)와의 관계를 규명하고자 본류수로와 지류수로의 폭이 동일한 경우에 대하여 유량비에 따른 귀환거리와 순환영역의 폭이 그림 5와 그림 6에 도시되었으며 이로부터 유량비가 증가 즉 지류유량이 증가함에 따라 귀환거리와 순환영역폭이 증가함을 알 수 있으며, 이는 Best와 Reid(1984)가 실험한 결과와 대체로 근사하게 됨을 알 수 있다. 그리고 그림 7로부터 귀환거리와 폭의 비로 정의되는 순환영역 형상지수는 유량비(Q_2/Q_3)가 변화여도 영향을 받지않고 0.15~0.25 범위에 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 순환영역의 귀환거리가 증가하면 폭도 동일한 비율로 증가함을 의미하는 것이다. 지류수로의 폭을 75%(22.5 m), 50%(15 m) 및 25%(7.5 m)로 축소하여 실험한 경우 순환영역의 크기와 유량비(Q_2/Q_3)와의 관계를 고찰한 결과 수로폭비(b_2/b_3)에 따른 유량비(Q_2/Q_3)와 귀환거리 및 순환영역폭의 관계는 수로폭비가 작을때 귀환거리와 순환영역폭은 다소 커짐을 알 수 있다. 그러나 순환영역 형상지수는 수로폭비와 유량비가 변화여도 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 결국 순환영역폭과 귀환거리의 비는 동일한 비율로 증가함을 알 수 있다.

4.3 유량비의 변화에 따른 수면곡선의 변화

본 연구에서 유량비에 따른 본류와 지류의 수면변화는 본류와 지류가 만나는 합류수로부에서 본류와 지류의 운동량에 의해 합류부의 흐름에 변화가 생기게 된

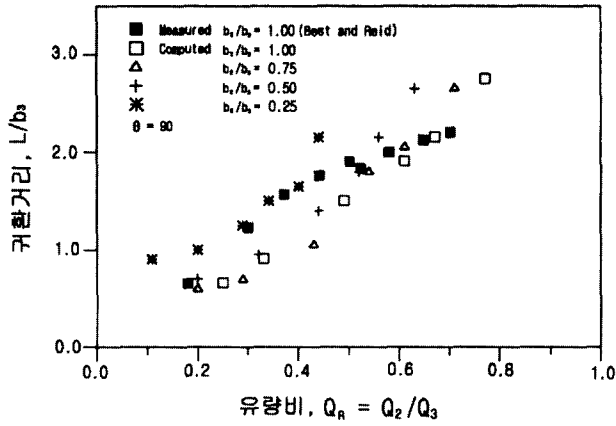


그림 5. 유량비에 대한 귀환거리

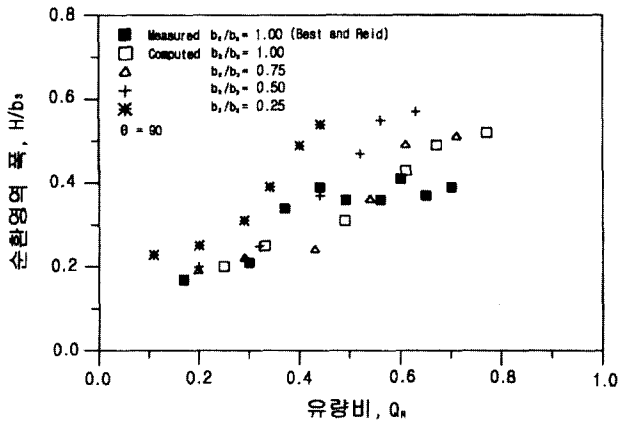


그림 6. 유량비에 대한 순환영역의 두께

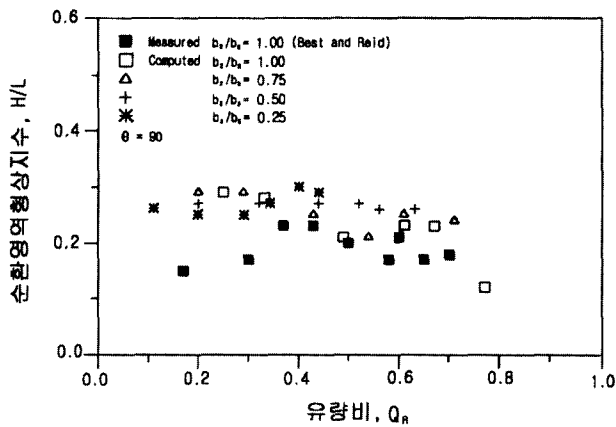


그림 7. 유량비에 대한 순환영역의 형상지수

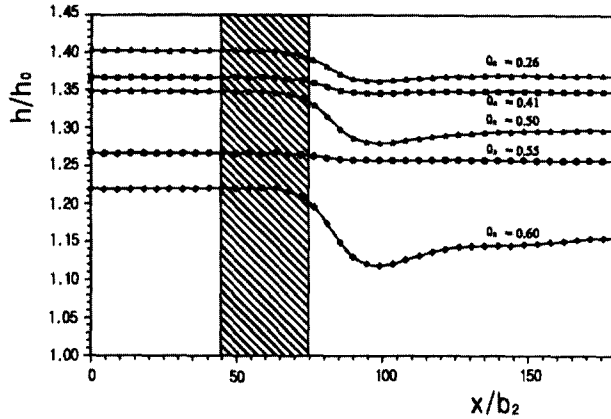


그림 8. 지류유량 변화에 따른 본류수면곡선의 변화

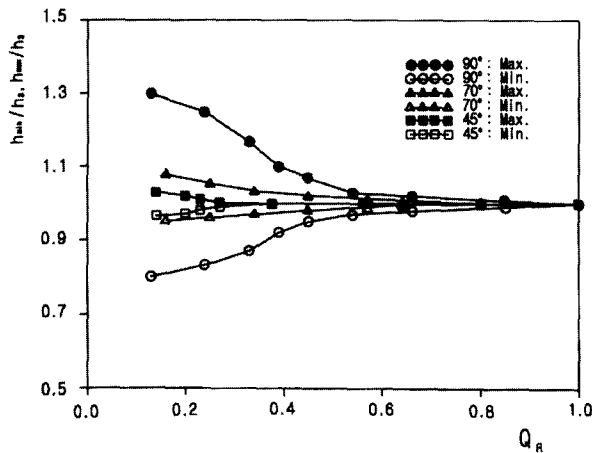


그림 9. 지류 유입량에 따른 합류수로 상류부의 최대수심과 순환영역의 최소수심의 관계

다. 본류의 운동량에 비해 지류의 운동량이 작은 경우에는 본류와 지류의 수면변화가 거의 없다. 반면에 지류의 운동량이 큰 경우 합류부 하류에 운동량의 소산인 순환영역이 형성된다. 그림 8은 지류의 유량 변화에 따른 본류 수면곡선의 변화를 나타낸 것이다. 그림 8에서 y 는 수심, y_0 는 지류가 유입되지 않는 흐름의 등류수심이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 최대수면상승은 유량비 0.5에서 일어나고 이는 Hager(1989)와 Ramamurthy 등(1988)의 결과와 같은 경향을 나타낼 수 있다.

지류수로의 유입량에 따른 합류수로 본류 상류부에서의 최대수심(h_{max})과 순환영역에서의 최소수심

(h_{min})을 하류부의 등류수심(y_3)에 대한 비로 나타낸 것이 그림 9이다. 최대수심은 본류와 지류가 합류되는 지점에서 본류쪽 상류부분에 위치하였고 최소수심은 순환영역이 발생하는 본류 하류부분의 중심지점에 위치함을 알 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 유량비가 작은 경우 즉, 지류유입량이 작은 경우 최대수심과 최소수심의 차이가 많이 나타남을 알 수 있다. 최소수심이 작은 것은 압력이 낮은 것이며 이로 인하여 지류의 유선은 안쪽벽(지류측 하안)으로 굽어지게 되고 결국에는 안쪽 벽에 도달하게 되는 순환현상을 일으키게 되는 것이다. 그리고 합류각이 45°인 경우 유량비가 0.5보다 큰 경우에는 최대수심과 최소수심의 차이가 거의 나타나지

않았다

지류 유입부로부터 하류로 순환영역의 중심지점($L/2$)에서 유량비가 약 0.3인 경우 합류후 단면 B-B에서의 수심의 변화는 그림 10과 같다. 단면 B-B는 와가 발생하는 지점으로서 수심이 감소하고 유속이 증가하게 되고 합류부에서 멀어질수록 수심은 증가한다. 그림에서 알 수 있듯이 유량비가 약 0.3인 경우에 합류각에 따른 합류부 전후의 수심은 45° 의 경우보다는 90° 의 경우가 운동량의 소산이 크게 되어 하류부의 수면변화가 크게 나타났다.

4.4 유량비에 따른 흐름수축계수와 평균유입방향과 유량비와의 관계

그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 본류와 지류의 상대적인 흐름특성에 따라 합류수로부 직하류 지류축

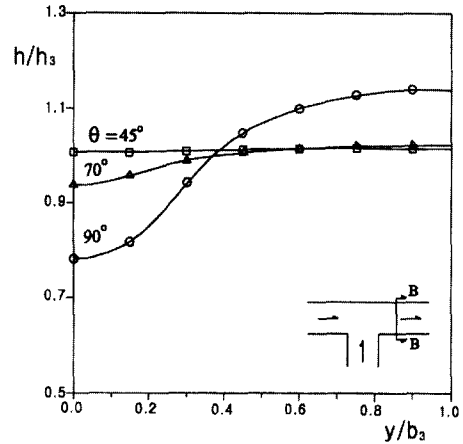


그림 10. 유량비 $Q_R = 0.3$ 에 대한 합류후 단면 B-B에서의 수심변화

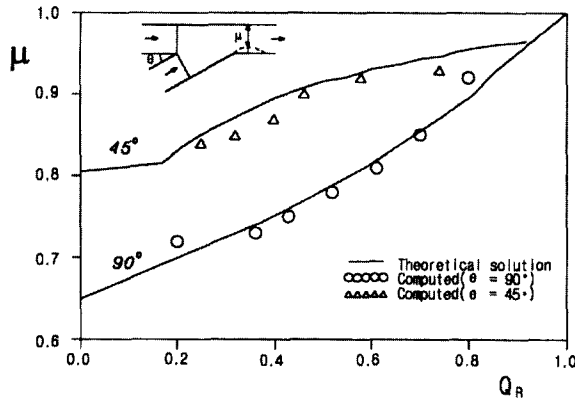


그림 11. 흐름수축계수 μ 와 유량비 Q_R 와의 관계

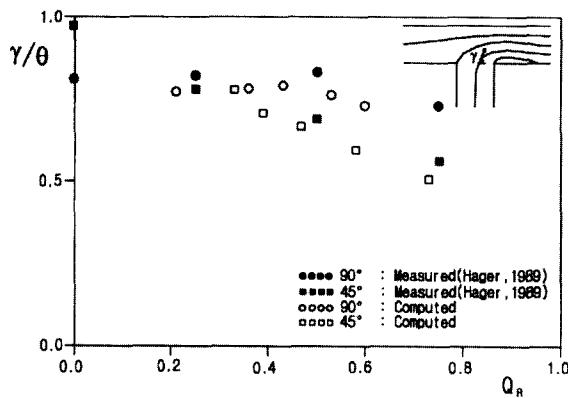


그림 12. 유량비에 대한 지류의 굽음각 γ 와 합류각 θ 의 비와의 관계

하안에 유속과 난류강도가 약한 시수역에 가까운 순환 영역을 형성하게 되고 이는 상류배수증가의 원인이 되기도 한다. 그림에서 분류폭에 대한 순환영역의 폭을 흐름수축계수라 하고 유량비와 합류각에 따른 순환영역의 폭을 제시해 준다. 또한 합류각이 주어진 경우, 흐름수축계수는 유량비가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 그리고 같은 유량비의 경우 합류각이 작을 수록 수축계수는 커짐을 알 수 있다.

그림 12는 유량비에 대한 분류에 의한 지류의 굽음각 γ 와 합류각 θ 의 비의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 γ 는 지류로부터의 유선의 흐름방향이 분류와 합쳐지면서 분류흐름방향으로 바뀌어 지는데 분류흐름방향에 대한 지류흐름방향으로의 유선의 각도를 나타낸다. Hager(1989)는 γ/θ 를 흐름이 상류인 경우에 유량의 함수로 나타냈다.

5. 결 론

개수로 합류부 흐름양상이 2차원 수심적분 수학적모형을 이용하여 해석되었다. 흐름해석을 지배하는 매개변수는 지류에 대한 합류수로의 유량비와 합류각으로 나타났다. 합류로 인한 상류흐름은 유량비 0.7에서 영향을 받기 시작하는 것으로 나타났으며 합류부의 상류최대수심(배수)과 하류최소수심은 작은 유량비에서 크게 되는 경향을 갖는다. 합류부 지류측 하안에 형성되는 순환영역의 길이와 폭은 유량비에 거의 선형으로 증가하고 길이와 폭의 비인 형상지수는 거의 일정한 값으로 유량비에 관계없이 형상이 거의 일정하게 유지한다. 합류 후 흐름수축계수는 유량비에 따라 증가하고 이는 큰 합류각에서 현저하게 나타났다. 지류흐름의 굽음각은 유량비 증가에 따라 감소경향을 갖는다. 이와 같은 합류흐름의 수치해석결과는 기존의 실험결과와 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

정의택 (1992). 합류수로부에서의 흐름 해석. 석사학위논문, 한양대학교, pp. 23-27.
 Best J.L. and Reid I. (1984). "Separation zone at open-channel junctions." *J. of Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 100, No. 11, pp. 1588-1594.
 Demuren A.O. and Rodi W. (1983). "Side discharge

Into open channels: Mathematical model." *J. of Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 109, No. 12, pp. 1709-1722.
 Falconer, R.A. (1994). "An introduction to nearly horizontal flows." *Coastal, estuarial and harbor engineers, reference book*, Edited by Abbott, M.B. and Price, W.A., E&FN SPON, pp. 27-36.
 Gurrarn, S.K., Karki, K.S. and Hager, W.H. (1997). "Subcritical junction flow." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 447-455.
 Hager W.H. (1989). "Transitional flow in channel junctions." *J. of Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp. 243-259.
 Hsu, C.-C., Wu, F.-S. and Lee, W.-J. (1998). "Flow at equal-width open-channel junction." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 186-191.
 Kuipers, J. and Vruedghil, C.B. (1973). *Calculations of two-dimensional horizontal flows*. Research Report SI63-1, Delft Hydraulics Laboratory.
 McGuirk, J.J. and Rodi, W. (1978). "A depth-averaged mathematical model for the near field of side discharge into open-channel flow." *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, part 4, pp. 761-781.
 Ponce V.M. and Yabusaki S.B. (1983). "Modeling circulation in depth-averaged flow." *J. of Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 107, No. 11, pp. 1501-1518.
 Ramamurthy A.S., Carballada L.B. and Tran D.M. (1988). "Combining open channel flow at right angled junctions." *J. of Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 114, No. 12, pp. 1449-1460.
 (논문번호:98-001/집수:1998.01.09/심사완료:1998.08.05)