

난류모델을 이용한 개수로 급축소부 흐름의 수치해석

A Numerical Analysis of Flow through Open-Channel Constrictions using Turbulence Model

최 흥 식 *

Choi, Hung Sik

Abstract

To analyze the flow through open-channel constrictions using $k-\epsilon$ turbulence model, a numerical model is developed. The simulated results agree well with existing experimental data which attributes to the adequate input of turbulent eddy-viscosity by turbulence model. A stream function and velocity distributions enable the analysis of flow characteristics at the downstream of constriction. Turbulent eddy viscosities over channel are spatially varied with stream pattern. For the evaluation of rapidly varied flow, the eddy-viscosity input by turbulence model is required instead of the empirical effective viscosity to solve a shallow water equation.

요 지

$k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 개수로 급축소부 흐름의 해석을 위한 수치모델을 개발하였고, 그 수치실험결과는 실험 결과와 잘 일치하였다. 이는 난류모델에 의한 적절한 난류 와점성계수의 산정이라 생각된다. 유함수 및 유속분포의 분석을 통한 축소부 통과후 급변화 흐름의 수리특성을 분석하였고, 또한 난류 와점성계수의 분포를 분석하였다. 따라서 천수방정식의 점성항에 경험적인 유효점성계수의 도입보다는 흐름의 양상과 장소에 따라서 변화하는 난류 와점성계수의 산정에 의한 급변화흐름의 해석이 필요하다.

keywords : constriction, eddy-viscosity, $k-\epsilon$ turbulence model, numerical analysis, rapidly varied flow

* 상지대학교 이공과대학 토목공학과 조교수

1. 서 론

산업의 급격한 성장과 더불어 하천에서 여러가지 목적의 구조물 설치와 하구 및 연해에서 임해공업단지 조성을 위한 하구둑 및 방조제 축조 등이 활발히 진행되어 왔다. 이에따른 환경변화의 예로는 교각 등의 장애물로 인한 하천단면 축소, 하구에서 배수문 설치시 단면의 급격한 변화, 하구연 및 방조제 축조시 최종제철 단계에서의 급격한 단면축소 등이 있다. 이러한 단면의 축소에 따른 수리특성의 변화는 수리학적으로 단면축소에 의한 급변류로 구별되며, 수리모형실험, 현장관측 및 조사에 의한 경험적 해석방법에 의해 분석되어 온 것이 대부분이고, 그 중요성에도 불구하고 수치적 접근에 의한 해석은 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 천수방정식을 지배방정식으로 선정하고, 개수로 급축소부의 수리특성을 규명하기 위하여 제트 흐름의 해석에 자주 쓰이는 난류모델을 이용하여 난류 와점성항을 해석하는 수치모형을 개발하고, 기존의 해석방법과 비교분석하였다. 급변류의 해석에서 흐름의 양상과 장소에 따라 그 값을 달리하여 상수로의 취급이 불가능한 난류 와점성계수의 산정을 위하여는 난류모델의 도입이 필요하다. 천수방정식에 의한 점변류의 해석시 경험적인 유효점성계수의 사용에는 모의해석 대상 해석 또는 하천에 따라서 그 값을 달리하여 수치모형에 입력해야 하는 불편한 점이 따른다. 따라서 본 연구에서 개발되는 수치모형에서는 난류모델의 사용을 통해 산정된 난류점성계수 값을 천수방정식의 점성항에 바로 적용함으로써 앞서 언급한 경험적 유효점성계수의 입력에 따른 불편함을 제거하여 모형의 사용성을 제고시키는데 또한 그 목적이 있다.

급변류에 대한 국내의 연구로는 서승원 등(1983)이 유한요소법을, 조용준 등(1985)이 유한차분법을 이용하여 교각 등의 장애물로 인한 하천단면 축소에 따른 배수곡선 등의 수리특성의 분석을 목적으로 시도되었고, 방조제 제철시 통수단면의 축소에 의한 큰 조석량의 유출입에 따른 체절구간에서의 수리특성분석(최홍식과 이길성, 1993)이 시도된 바 있다. 또한 박상현과 박영욱(1994)은 폭이 3 m인 개수로에서 단면 수축부의 수리특성과 축조제(석재)의 유실에 관한 실험적 연구를 하였다. 이진희 등(1996)은 유한체적법을 이용하여 개수로 축소부의 수리특성을 연구하였다. 외국의 경우 Barrett와 Skogerboe(1973) 및 Fiuzat과 Skogerboe(1983)는 하천단면 축소시 수리특성을 해석적, 실험적

으로 규명하였다. Das와 Townsend(1981)은 하천단면 축소에 따른 전단응력의 실험적 분석에 의한 하상의 안정성 분석을 하였다.

천수방정식의 해석은 여러가지 목적과 방법으로 하천 및 연해에서 수리특성의 규명에 많이 이용되어 왔고 국내·외적으로도 많은 연구가 있다(Vreugdenhil과 Wjibenga, 1982; Fennema와 Chaudhry, 1989). 특히 이길성과 강주환(1989)은 천수방정식의 유한차분 특성을 체계있게 정리한 바 있고, Praggman(1982)은 천수방정식에 대한 여러가지 차분방법에 대한 특성을 비교분석한 바 있다.

대부분 천수방정식의 해석은 점변류에 대한 적용이고, 급변화흐름의 해석에 대해서 적용성을 제시한 예는 많지 않다. Reynolds 수 및 Froude 수가 상당히 큰 급변류에서의 천수방정식에 나타나는 난류 와점성계수는 흐름의 양상과 더불어 시간과 장소에 따라 변화하는 값으로서 상수로 취급하기가 어렵고, 난류운동에너지 및 그 감쇠율에 지배되는 값으로 $k-\epsilon$ 난류전달방정식의 해석에 의한 정확한 값의 입력이 요구된다. 난류모델은 온배수제트(최홍식과 이길성, 1990; 이남주 등, 1994), 연안 해수유동(정태성, 1996), 하천으로 운동량이 큰 제트의 유입(McGuirk와 Rodi, 1978) 등의 해석에 사용되어 왔다. 근래에 미국 토목학회에서는 난류모델이 자유수면을 가지는 흐름의 해석에 도입되어야 한다는 중요성의 인식하에 난류모델 연구위원회(ASCE Task Committee, 1988)가 구성되어 활발한 연구가 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 난류모델의 도입에 따른 급변류의 수리 및 난류특성의 분석과 기존의 수치해석 방법과 비교를 실시하였다.

2. 수학모형의 구성

2.1 천수방정식

수심이 얇은 개수로에서의 흐름은 바닥조도에 따른 강한 연직방향 혼합특성에 의해 수심방향의 흐름분포는 거의 균일하다. 이에 따른 수심적분 2차원 연속 및 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(\eta+h)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(\eta+h)v]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} =$$

$$-g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right]$$

$$-\frac{n^2 g u (u^2 + v^2)^{1/2}}{(\eta + h)^{4/3}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ - \frac{n^2 g v (u^2 + v^2)^{1/2}}{(\eta + h)^{4/3}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 et 는 수면변위, h 는 수심, u, v 는 x 및 y 방향의 수심평균 유속이고, g 는 중력가속도, n 은 Manning의 조도계수, ν_t 는 난류 와점성계수로 난류운동에너지(k)와 이의 감쇠율(ϵ)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서 C_μ 는 0.09이다.

2.2 $k-\epsilon$ 난류 전달방정식

운동량방정식에서의 난류 와점성계수의 결정을 위한 수심평균 난류 운동에너지 및 이의 감쇠율에 대한 전달방정식은 다음과 같다(Rastogi와 Rodi, 1978).

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G + P_{kv} - \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G + P_{\epsilon v} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$G = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (7)$$

G 는 수평방향 유속성분의 상호작용에 의한 난류 운동에너지 생성항이고, P_{kv} 및 $P_{\epsilon v}$ 는 G 외에 수심평균시지면의 바다조도에 의한 유속경사와 연직방향 유속성분의 불균일성에 의한 난류 운동에너지 생성에 관한 항으로 다음과 같다.

$$P_{kv} = C_k \frac{u_*^3}{h} \quad (8)$$

$$P_{\epsilon v} = C_\epsilon \frac{u_*^4}{h^2} \quad (9)$$

여기서

$$u_* = [C_f(u^2 + v^2)]^{1/2} \quad (10)$$

$$C_k = C_f^{-0.5} \quad (11)$$

$$C_\epsilon = 3.6 C_2 C_\mu^{0.5} / C_f^{3/4} \quad (12)$$

이 때 C_f 는 마찰계수로 0.003을 적용하였다. 난류모델 상수는 $C_1 = 1.43$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 이다.

3. 수치해석

3.1 유한차분법

본 연구에서는 유한차분법은 시간간격 Δt 를 절반으로 나누어 부분적인 양해법과 음해법을 사용하는 ADI 형태의 다중법을 사용한다. 연속방정식과 운동량방정식에서 미지수 u, v 및 η 를 구하기 위해 음해법을 사용하면 x, y 방향의 모든 격자에서 동시에 해석하므로 계산과정에서 복잡한 형태의 행렬식을 해석해야 하나, 다중법은 양해법과 음해법을 동시에 사용하므로써 계산과정에서 3중대각행렬 또는 반복항을 이용한 2중변수소거(Double-sweep)방법으로 쉽게 해석할 수 있다. 차분의 형태는 시간에 대해서는 후방차분을 사용하고 이송항, 점성항 및 중력항에 대해서는 중앙차분하였다. 해석은 초기조건, 경계조건 또는 계산결과로부터 t 시각에서의 u, v 및 η 가 주어진 경우 $t + \Delta t$ 시각의 u', v' 및 η'' 를 구할 때 우선 $t + \Delta t/2$ 시각에서 u', v' 및 η' 를 구하기 위해 x 방향으로는 음해법에 의해 동시에 u' 및 η' 를 순차적으로 구하고 y 방향에 대한 운동량방정식으로부터 양해법으로 v' 를 구한다. 비슷한 방법으로 $t + \Delta t$ 시각에서는 y 방향으로는 음해법에 의해 동시에 v'' 및 η'' 를 순차적으로 구하고 x 방향에 대한 운동량방정식으로부터 양해법으로 u'' 를 구한다. 이같은 방법을 순차적으로 반복하여 원하는 시간까지의 계산을 수행한다.

난류 전달방정식 역시 자유수면을 가진 흐름해석에서와 같이 시간간격 Δt 를 절반으로 나누어 x 방향 및 y 방향에 대해서 각각 음해법으로 시간에 대해서는 후방차분, 공간에 대해서는 중앙차분하고, 유속 플럭스의 진행방향에 따라 전방차분의 형태로 전환되는 Hybrid scheme을 사용한다.

3.2 수치안정성 분석

천수방정식의 수치해석시 불안정한 결과가 야기되는 원인은 시간간격을 CFL 조건보다 큰 값으로 선택하였을 때 발생하는 경우와 이송항, 마찰항 등 비선형항의 차분에 따른 부적절한 선형화에 의한 경우가 있다. 이는 일반적으로 유효점성항의 도입으로 다소 극복될 수 있다. 이송항과 마찰항을 모두 생략한 경우는 시간에 따른 불안정성만 발생되며, 이때 음해법은 무조건 안정하지만 본 모형은 다음 식과 같이 정의되는 Courant 수에 의해 안정성의 제약을 받는다.

$$C_r = \Delta t [gH(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2)]^{1/2} \quad (13)$$

이때 H는 $H = h + \eta$ 이다. 본 모형에 사용된 안정성 한계는 경험적으로 대략 $C_r < 5$ 로 알려져 있으며(이길성과 강주환, 1989), 차분형태의 차이와 적용대상에 따라 다소 증감되기도 한다.

3.3 초기 및 경계조건

천수방정식의 해가 존재하려면 적절한 초기조건과 경계조건이 필요하다. 초기조건으로는 계산영역내의 흐름이 전혀 존재하지 않는다는 조건(Cold start)으로 이 경우 초기조건의 영향은 계산이 진행됨에 따라 점차 감소하여 주기를 거듭하면서 거의 사라져 해에 영향을 미치지 못한다. 경계조건은 계산이 진행되며 변할 수 있고, 폐경계조건과 개경계조건으로 대별된다. 개경계조건으로는 수위 또는 유속이 시간의 함수로 명시되어야 하

며 폐경계조건은 경계에 연직방향으로 흐름이 없다는 조건(Kinematic boundary condition)이 일반적으로 사용되고 접선방향으로는 완전미끄럼(Perfect slip) 조건을 사용한다.

Fig.1에서와 같이 개경계로는 수로 상류측에서 의 균일한 x 방향 유속 u_r 과 하류측에서는 수심 h_r 이 정의된다. 수로 상류에서의 난류에너지 및 그 감쇠율은 다음과 같이 주어진다(Gosman과 Ideriah, 1983).

$$k_r = 0.03 u_r^2 \quad (14)$$

$$\epsilon_r = \frac{2 k_r^{3/2}}{0.005 H_r} \quad (15)$$

여기서 H_r 은 흐름의 양상에 의한 특성길이이다.

폐경계의 벽면근처에서는 흐름성질이 급격하게 변화하므로 선형차분에 의한 수치오차를 줄이기 위하여 계산격자를 세밀하게 구성해야만 하나, 이 경우는 로그 법칙(Log-law) 유속분포와 난류의 국소평형(Local equilibrium)조건을 이용한 벽면함수(Wall function)를 사용하여 난류성질 분포의 비선형성을 고려할 수 있다. 자세한 내용은 이남주 등(1994)이 언급한 바 있다.

4. 모형의 적용 및 고찰

4.1 개수로 모형

본연구에서는 Fig. 1에서와 같이 하폭 $B=5.0$ m, 길이 20 m인 수로에 폭이 0.4 m인 돌출체를 양단에 설치하여 급속소 구간의 폭 b 가 각각 1.4 및 2.2 m인

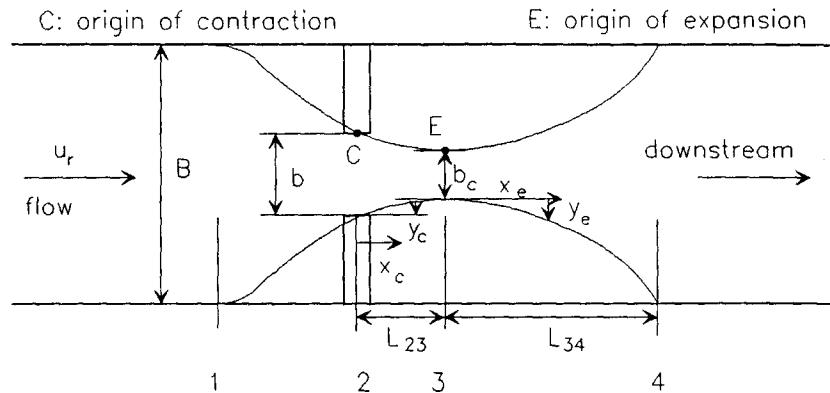


Fig. 1. Definition Sketch of Flow Contraction and Expansion (Das and Townsend, 1981).

개수로에 대해서 수치실험을 실시하였다. Fig. 1에서 b_c 는 축소부 통과후 수축단면의 폭이고, x_c 및 y_c 는 축소부 정점, C를 통과하여 수축단면, E까지 이르는 구간, L_{23} 에서의 종 및 횡방향의 수축에따른 유선의 좌표이고, x_c 및 y_c 는 E점 통과후 부착점까지의 팽창구간, L_{34} 에서의 종 및 횡방향의 팽창에따른 유선의 좌표이다. 그에 따른 축소비 $m = (B-b)/B$ 은 각각 0.72 및 0.56이다. 수심을 0.27 m로 하여 축소율이 0.72인 단면에는 상류방향에서의 유속을 0.1543 m/s, 축소율이 0.56인 단면에는 상류방향의 유속을 0.7715 m/s로 하여 각각 초기 Froude 수는 약 0.1 및 0.5이다. 전자의 수치실험을 Case 1이라 하고, 후자를 Case 2 라 한다. 수치계산격자는 $\Delta x = \Delta y = 0.2m$ 의 100 x 25의 등격자로 구성하였다.

4.2 급축소에 따른 수리특성

Fig. 2는 초기 Froude 수가 0.1인 흐름에 대해서 Das와 Townsend(1981)이 제시한 수리 모형실험 결과에 의한 개수로 급축소부 통과후 수류의 축소 및 확장에 대한 무차원 값과 본 연구에 의한 수치실험결과를 나타낸 것이다. 난류모형을 사용한 수치실험결과 급축소부 통과후의 단면 수축현상(Vena contracta)은 Fig. 2의 (a)에서와 같이 실험값과 잘 일치함을 보여 주는 반면 난류모형을 사용하지 않은 천수방정식만의 해석에서는 Fig. 3의 유희수(stream function, Ψ)에서도 보듯이 축소부류통과하면서 수축현상이 없이 곧바로 확장되는 양상을 보여주고 있다. 또한 수축이후의 수류의 팽창은 Fig. 2의 (b)에서와 같이 난류모형을 이용한 수치실험결과는 이용하지 않은 경우보다 실험치와 근사하게 나타났다. 천수방정식만의 해석에 의한 결과 역시 Izbash의 계산결과와 비교할 때 실험치에 보다 근사함을 보여준다.

Fig. 3은 다음 식에 의해 산정되는 유희수에 의한 Case 1에 대한 유선(streamline)의 분포로 단면 축소부 통과후의 흐름 재순환(flow recirculation)에 따른 부착거리 및 재순환양상을 쉽게 파악할 수 있다. 그림은 개수로 중앙부를 중심으로하여 양단 대칭이므로 중심축 이하 부분만을 그렸다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = \rho u \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = -\rho v \quad (17)$$

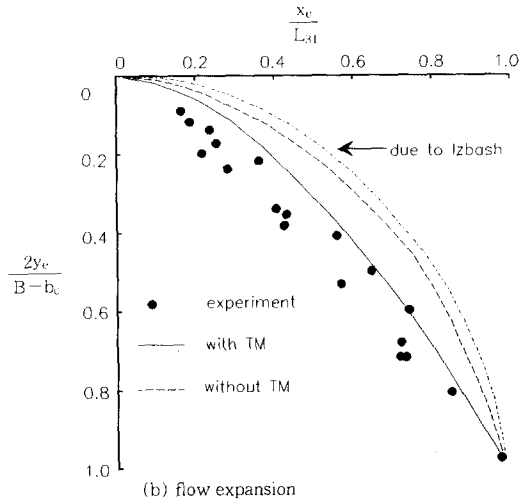
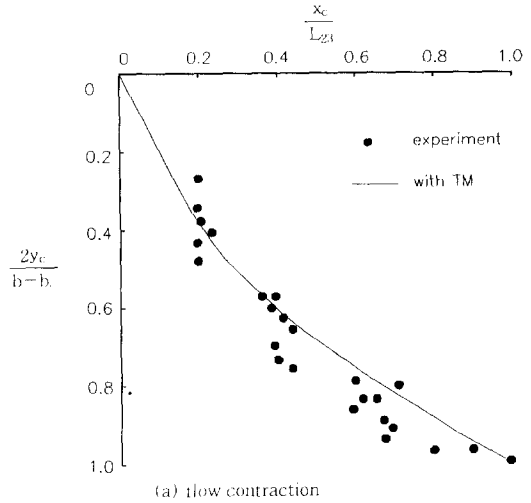
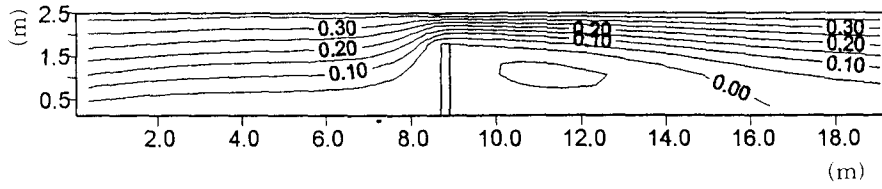


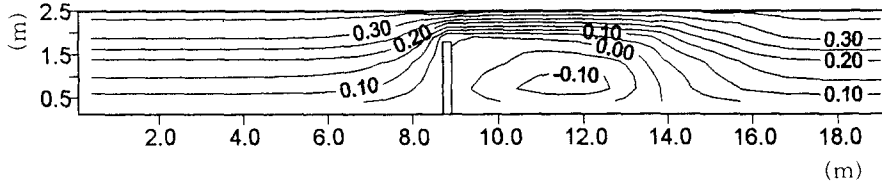
Fig. 2. Non-Dimensional Profiles of Livestream Boundary

일반적으로 난류모형을 사용한 수치실험결과에 의한 재순환 양상이 급축단면 후부에 완연하게 나타남을 보여 준다. 유희수 값의 분석을 통한 단면축소에 따른 수축계수의 산정은 Case 1의 경우에는 약 0.80, Case 2의 경우에는 0.66으로 계산되었다. 이값은 기존의 지속적인 해석과 관측 또는 수리모형실험을 통해 분석한 결과 단면 축소에 따른 수축계수 0.6 ~ 0.9 사이의 값으로 나타났다.

Fig. 4는 Case 1의 경우에 대한 유속분포를 나타낸 것이다. 유희수 분석에서와 같이 난류모형을 사용한 경우 급축소부 통과후 흐름은 강한 재순환 현상이 하류지점에 바로 나타났으나, 난류모형을 사용하지 않은 천수방정식에

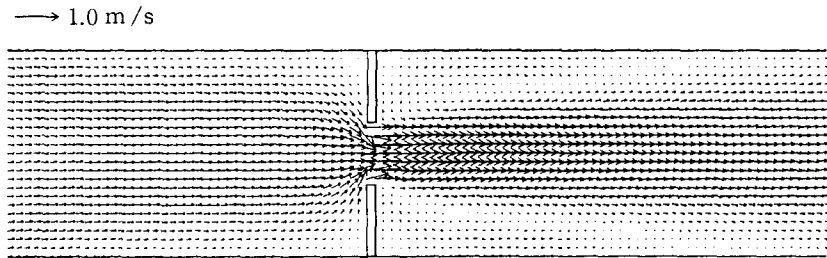


(a) without turbulence model

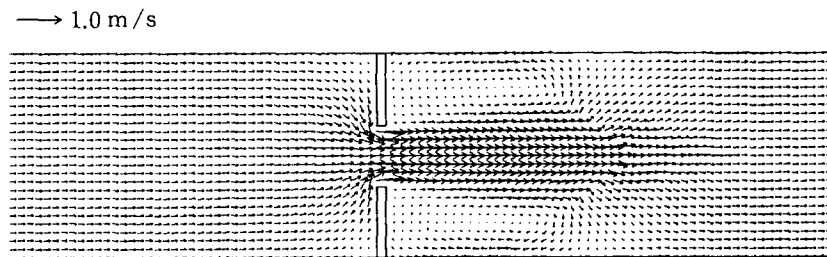


(b) with turbulence model

Fig. 3. Computed Stream Lines(case1)

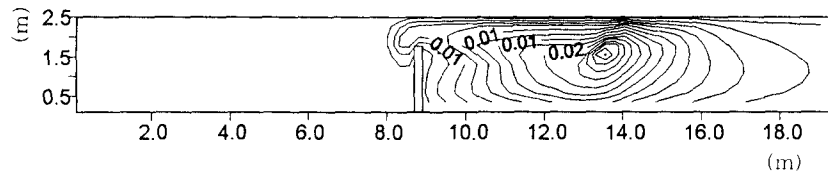


(a) without turbulence model

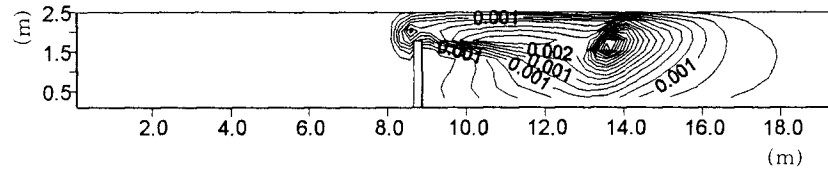


(b) with turbulence model

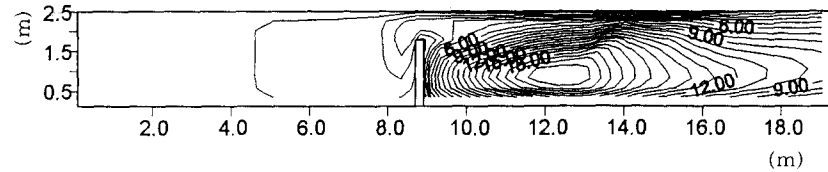
Fig. 4. Computed Flow Patterns (Case 1)



(a) kinetic energy(m^2/s^2)

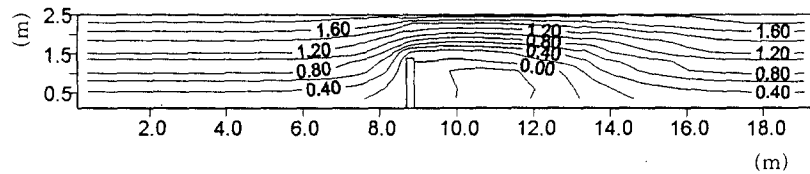


(b) kinetic energy dissipation(m^2/s^2)

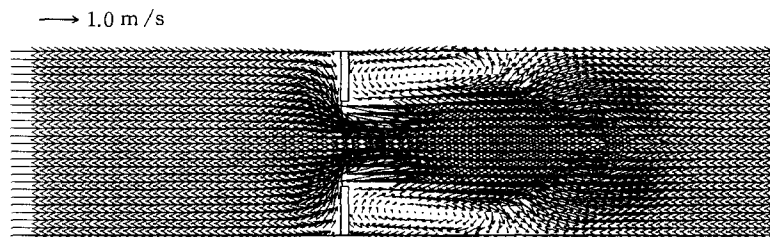


(c) corresponding kinematic viscosity(m^2/s)

Fig. 5. Computed Turbulence Properties and Corresponding Kinematic Viscosity Distributions (Case 1)



(a) stream lines



(b) flow field

Fig. 6. Computed Stream Line and Flow Patterns (Case 2)

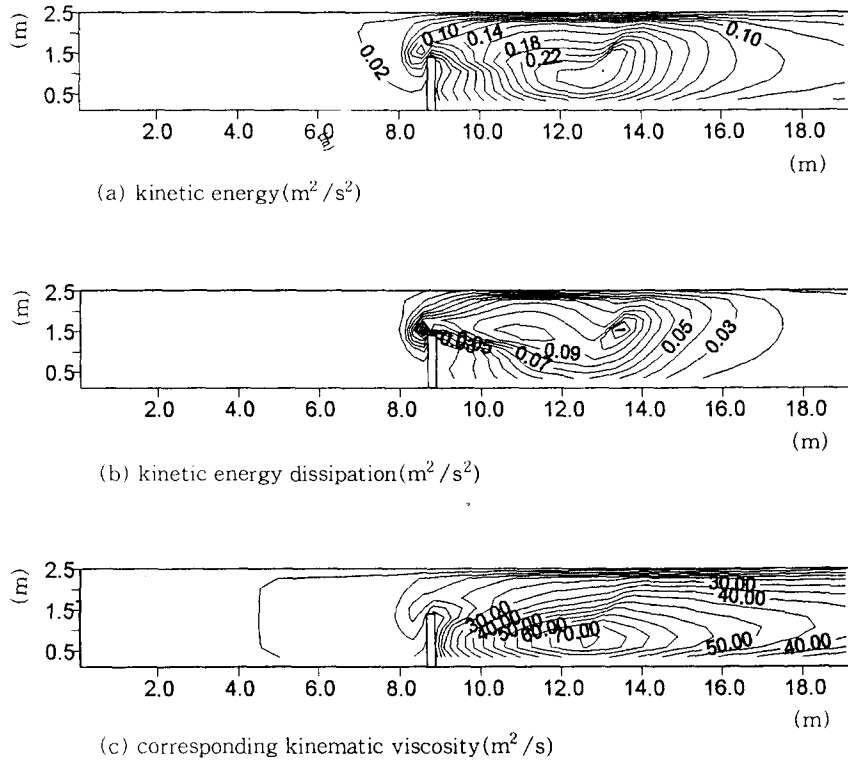


Fig. 7. Computed Turbulence Properties and Corresponding Kinematic Viscosity Distributions (Case 2)

의한 해석결과는 완전한 재순환 현상을 보여주어 해석 결과가 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 이 흐름에서 초기 유입 Froude 수는 0.1이나, 급축소부 통과시 최대 유속은 약 0.59 m/s로 Froude수가 약 6배 정도 커지나 상류 형태의 흐름이다.

Fig. 5는 난류모델의 사용에 따른 난류운동에너지 및 감쇠율과 그에 따른 동점성계수의 분포를 나타낸 것이다. 천수방정식에서의 경험적 유효점성항의 계수는 $\alpha \Delta x \Delta y / \Delta t$ 의 값으로 정의하는 것이 보편적이며 이 값은 0.16 m^2/s 으로 계산하였다. 난류모델의 사용에 따른 난류 와점성계수는 약 0.02에서 22 m^2/s 까지로 경험적인 계수값보다 약 140배 이상 큰 값까지 나타나고 있다. 따라서 난류 와점성계수는 흐름의 양상과 장소에 따라서 그 값을 매우 달리함을 보여주어 급축소부 흐름해석시 경험적인 유효점성계수의 사용은 해석의 정확성을 기하기는 다소 어렵다고 사료된다.

개발된 난류모델의 사용성을 평가하기 위하여 Case 2에 대한 수치실험을 실시하였다. Fig. 6은 Case 2에 대한 유선 및 유속분포도이다. 유함수 및 유속분포에서

보듯이 급축소부 하류부에 강한 재순환 현상이 나타남을 알 수 있다. 이때 초기 유입 Froude 수는 0.5 이고 급축소부에서의 최대유속은 약 2.1 m/s로 Froude 수가 약 1.3인 사류상태의 흐름이다.

Fig. 7은 Case 2에 대한 난류모델의 사용에 따른 난류운동에너지 및 감쇠율과 그에 따른 동점성계수의 분포를 나타낸 것이다. Case 1의 경우보다 흐름의 유속이 5배 빨라짐에 따라 큰 값의 난류 와점성계수 값을 가지게 된다. 그 크기는 약 0.04에서 78 m^2/s 까지의 값을 가진다.

5. 결 론

$k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 개수로 급축소부 흐름의 해석을 위한 수치모형을 개발하였다. 실험결과와 비교를 통하여 난류모델을 사용한 수치 실험결과는 개수로 축소부 통과후의 유수단면 수축 및 팽창현상을 잘 나타내 줌을 확인하였다. 이는 난류모델에 의한 정확한 난류 와점성계수의 산정이라 생각된다. 난류모델을 사용하지 않은 천수방정식의 해석결과와 비교하여볼 때 급축소부

흐름의 해석을 위해서는 난류모델의 도입에 의한 해석이 보다 정확하게 급축소부 수리특성을 규명할 수 있음을 보여준다. 유함수의 분석을 통하여 축소부 단면이후의 수축계수를 산정함이 가능하며 이에 의한 해석결과는 기존의 해석결과와 잘 부합되었다. 난류모델의 사용에 따른 난류 와점성계수의 분포는 수치해석에서 경험적으로 사용하는 유효 점성계수값보다 약 0.13에서 140배까지 흐름의 양상 및 장소에 따라 달리함을 보여 주어 이 값이 상수로 취급되어서는 보다 정확한 흐름특성을 규명하기 어려운 것으로 제기된다. 특히 오염물질의 이송확산과 같은 식의 해석시는 정확한 외확산계수의 산정이 요구된다. 또한 개발된 모델의 사용성을 평가하기 위하여 급축소부에서의 흐름이 사류로 변화하는 경우에 대한 수치실험을 실시하여 유함수 및 유속분포의 분석으로부터 흐름의 특성을 분석하였다. 흐름의 양상과 더불어 난류 와점성계수의 분포 역시 규명하였다.

감사의 글

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

박상현, 박영옥 (1994). "방조제 축조중 식재 유실에 관한 수리시험 연구." 농공기술, 농어촌진흥공사, 제45호, pp. 35-45.

서승원, 박정용, 윤태훈 (1983). "흐름단면의 급변화에 의한 순환의 수치모형." 대한토목학회논문집, 제3권, 제4호, pp. 21-31.

이길성, 강주환 (1989). "천수방정식의 유한차분 특성." 대한토목학회논문집, 제9권, 제1호, pp. 41-52.

이남주, 최홍식, 이길성 (1994). "가로흐름 수역으로 방출되는 표면온배수 수치모형 비교 연구." 한국해안·해양공학회지, 제6권, 제1호, pp. 40-50.

이진희, 김경택, 심명필 (1996). "개수로에서의 2차원 부정류 해석을 위한 유한체적법." 한국수자원학회지, 제29권, 제5호, pp. 173-184.

정태성 (1996). "연안 해수유동에 관한 3차원 난류모형의 비교평가." 한국해안·해양공학회지, 제8권, 제3호, pp. 256-267.

조용준, 차영기, 윤태훈 (1985). "개수로의 단면축소로 인한 수면변화." 한국수문학회지, 제18권, 제4호,

pp. 361-367.

최홍식, 이길성 (1990). "온배수 난류모형." 한국수문학회지, 제23권, 제3호, pp. 445-457.

최홍식, 이길성 (1993). "방조제 축조시 수리특성 및 조건대의 모의해석." 한국해안·해양공학회지, 제5권, 제2호, pp. 99-106.

ASCE Task Committee on Turbulence Model in Hydraulic Computation(1988). "Turbulence modeling of surface water flow and transport, Part I-V." *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 9, pp. 970-1073.

Barrett, J.W., and Skogerboe, G.V. (1973). "Computing backwater at open channel constrictions." *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 99, No. HY7, pp. 1043-1056.

Das, B.P., and Townsend, R.D. (1981). "Shear stress distribution of channel constriction." *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 107, No. HY12, pp. 1695-1711.

Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H. (1989). "Implicit methods for two-dimensional unsteady free surface flows." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 321-332.

Fiuzat, A.A., and Skogerboe, G.V. (1983). "Comparison of open channel con- riction ratings." *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 109, No. 12, pp. 1589-1602.

Gosman, A.D., and Ideriah, F.J.K. (1983). *TEACH-2E: A general computer program for 2-dimensional, turbulent, recirculating flows.* Dept. of Mech. Eng., Imperial College, London, 1976, Revised by Arnal, M.P., Dept. of Mech. Eng., Univ. of California, Berkeley.

McGuirk, J.J., and Roaf, W.(1978). "A depth-averaged mathematical model for the near field of side discharge into openchannel flow." *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, Part 4, pp. 761-781.

Praagman, N. (1982). "A comparison of discretization methods for the shallow water equation." *Int. J. of Num. Meth. Eng.*,

- Vol. 18, pp. 981-995.
- Rastogi, A.K., and Rodi, W. (1978). "Prediction of heat and mass transfer in open channels." *J. Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 204, No. HY3, pp. 397-420.
- Vreugdenhil, C.B., and Wjibenga, H.A. (1982). "Computation of flow patterns in rivers." *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 108, No. HY11, pp. 1296-1310.
- 〈최종본 도착일 : 1997년 4월 19일〉