한국해안·해양공학회 학술발표논문집 (2009)
2009년 11월 5일-11월 6일
제18권, pp. 65-68

후류 수치모의에 의한 와동점성계수형 상수들의 적용성

Applicability of constants for eddy viscosity type by wakes numerical simulation

박일흠[1], 조영준[2], 김태윤[3]
Il Heum Park[1], Young Jun Cho[2] and Taeyun Kim[3]

1. 서　론

하천, 연안 및 항만에 설치된 교량의 교각, 돌핀 부두의 말뚝 및 기타물체 등의 저항물체들은 유수 중에서 급격한 유속 및 수위변화를 일으키며, 이러한 유속장의 변화에 의해 후류(wake)가 발생하게 된다. 그리고 후류의 크기는 저항물체가 받는 항력과 난류 특성에 따라 변하게 되므로 하천, 연안 및 항만에 설치되는 교각·말뚝 등의 구조물 설계를 위해 정확한 항력계수 산정이 필요하며, 난류특성에 따른 구조물 주변에서 후류의 크기를 파악해야 한다.

본 연구에서는 3차원 흐름과 여러 난류모형을 재현할 수 있는 FLOW-3D® 프로그램을 사용하여 수치실험하였다. 후류역의 크기는 항력계수의 크기 뿐 만 아니라 난류의 특성에 따라 변하기 때문에 실내실험을 통해 이미 알려진 말뚝구조물의 항력계수 $C_D = 2.2$ 값(Blevins, 1984)을 사용하였다. 사용된 난류모형은 혼합거리, One- equation, $k-\varepsilon$, 그리고 RNG $k-\varepsilon$의 네 가지를 사용하였다. 난류현상에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수인 와동점성계수(eddy viscosity) 값을 변화시켜, 민감도 분석을 실시하여 매개변수 값의 사용범위를 제시하였으며, 층별 후류역의 크기를 해석해와 비교·분석하였다.

2. 수치모형

2.1 지배방정식

본 연구에서 후류를 재현하기 위하여 FLOW-3D 수치모형(Flow Science, 1993)을 사용하였으며, 기본방정식을 간단히 소개하면 다음과 같다. 비압축성 유체로 가정했을 때 일반적인 연속방정식은 식(1)이다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x)+\frac{\partial}{\partial y}(vA_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\omega A_z)=\frac{RSOR}{\rho} \qquad (1)$$

여기서, A_x, A_y, A_z는 각 방향에 대한 유체가 차지하는 셀의 면적, ρ는 유체의 밀도, u, v, w는 각각 x, y, z방향의 유속성분이다. 그리고 $RSOR$은 질량소스에 대한 항이다. 그리고 운동방정식은 Navier-Stokes 방정식에 다음과 같이 몇 개의 항이 추가된 식(2), 식(3), 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+F_x-\frac{RSOR}{\rho V_f}u \qquad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+\omega A_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+F_y-\frac{RSOR}{\rho V_f}v \qquad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+\omega A_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\}= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+F_z-\frac{RSOR}{\rho V_f}w \qquad (4)$$

여기서 F_i는 물체와 점성에 대한 가속도항이고, $RSOR$항은 밀도소스 항이다.

2.2 난류모형

일반적으로 난류모형에서 Reynolds 응력은

1 발표자: 전남대학교 해양기술학부 교수
2 전남대학교 해양공학과 대학원
3 PNNL(Pacific Northwest National Laboratory) 연구원

Boussinesq 근사하여 나타내며, 와동점성계수 ν_t는 특성속도와 특성길이의 곱으로 표현된다. ν_t의 간단한 표현인 영방정식의 혼합거리모형(Mixing Length Model)은 Prandtl이 평균속도경사와 혼합거리를 곱한 것이 특성속도와 같다고 가정하여 ν_t를 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$\nu_t = l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \tag{5}$$

여기서, l은 혼합거리이다. 이 혼합거리모형은 속도경사가 0인 경우, ν_t가 0이므로 난류에너지의 생성과 소멸은 서로 평형을 이루어 난류수송이 다른 곳에 영향을 미치지 못하는 문제가 있으며, 복잡한 흐름에서 l을 결정하기 어려운 단점이 있다.

일방정식모형(One-equation Model)은 혼합거리모형의 단점을 보완하기 위해, 난류운동에너지 k에 대한 수송방정식으로부터 특성속도를 구하는 것이다. 난류속도규모가 $\sqrt{k}$이라면, ν_t는 식 (6)과 같이 Kolmogorov-Prandtl 식으로 나타낼 수 있다.

$$\nu_t = \sqrt{\frac{2k}{3}}\, L \tag{6}$$

여기서, L은 특성길이로서 경험식으로 구해진다. 그리고 k는 수송방정식으로 구할 수 있다.

일방정식모형에서는 ν_t를 결정하기 위해 특성속도만을 고려하였으나, 난류모형이 범용성을 갖기 위해서는 특성길이도 규명되어야 한다. 이에 따라 난류에너지감쇠 $\epsilon \sim k^{2/3}/L$이므로, 이것과 식 (6)을 조합하면, ν_t를 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\nu_t = C_\nu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{7}$$

여기서, C_ν는 사용자정의상수로서 표준 $k-\varepsilon$ 모형에서 0.09가 쓰인다.

Orszag et al. (1992)에 의해 개발된 RNG (Renormalization Group) $k-\varepsilon$ 모형은 $k-\varepsilon$ 모형의 계수들을 통계적인 기법을 통해 조정한 것으로 작은 규모의 난류운동을 가지는 유체의 움직임을 제거하고 제거된 유체가 큰 크기의 유체 움직임과 점성에 영향을 미치는 영향을 계수조정과 수정된 점성력을 사용하여 표현하는 것이다. 이 모형에서는 $k-\varepsilon$ 모형의 ν_t 대신 유효점성계수 ν_{eff}를 도입하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\nu_{eff} = \nu \left[1 + \sqrt{\frac{C_\nu}{\nu}}\, \frac{k}{\sqrt{\varepsilon}} \right]^2 \tag{8}$$

여기서, ν는 동점성계수, C_ν는 상수로서 $k-\varepsilon$ 모형에서 보다 약간 작은 0.085값을 일반적으로 사용한다. 그리고 RNG $k-\varepsilon$ 모형의 방정식은 $k-\varepsilon$ 모형과 유사하며, 다른 점은 ε의 수송방정식에 다음과 같은 변형율 R항이 추가되어 있다.

$$R = \frac{C_\nu \eta^3 (1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{9}$$

여기서, $\eta = \sqrt{P}\, k/\epsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$, 그리고 P는 전단생성항이다. RNG $k-\varepsilon$ 모형은 $k-\varepsilon$ 모형에 비해 수치모의시간은 길지만 복잡한 유동을 정확하게 모의할 수 있으며, 저 Reynolds 수와 고전단 흐름의 수치모의에 적합하다고 알려져 있다(Versteeg and Malalasekera, 1995; Pope, 2000).

3. 수치모형실험 및 결과

항력계수 C_D와 유하방향 거리 x, 저항물체의 대표길이 D에 따라 해석해의 유속크기 및 후류폭의 크기가 달라지므로 적용영역은 해석해 조건에 맞게 유하거리 x을 충분히 길게 하였으며 저항물체는 사각형 격자에 유리한 말뚝구조물을 사용하여 3차원 항력계수 C_D가 2.2로 알려져 있는 조건(Blevins, 1984)에 대해 수치모의 하였다.

계산격자망은 말뚝구조물 부분을 더욱 정확하게 표현하기 위해 가변격자망을 사용하여 조밀 하게 구성하였다. 그리고 경계조건은 유입부 경계에서 유속과 수위가 일정하게 지속되도록 하였으며, 하류단 경계에서는 유입되는 유량만큼 바로 유출되는 연속경계조건을 부여하였다. 또한, 수조의 상하측은 아무런 구속이 없는 상태로 만들었다.

난류모형 선택에 있어서 와동점성계수형 상수의 변화에 따른 후류의 크기와 유속 변화를 알아보기 위해, 혼합거리모형은 혼합거리 l, One-equation 모형은 경험상수 C을 포함한 특성길이 L 그리고 Two-equation 모형인 $k-\varepsilon$과 RNG $k-\varepsilon$ 모형은 C_μ, $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$를 각각 알려져 있는 값의 4

~8배수로 설정하여 층별에 따른 후류의 크기와 유속의 변화를 수심 평균하여 해석해와 비교하였으며, 이때 Reynolds 수는 항력계수가 변하지 않는 1×10^5 범위에서 정상상태에 도달할 때까지 수치모의 하였다.

Fig.1~4는 수치실험한 결과로서, 여러 난류모형의 와동점성계수형 상수의 변화에 따른 민감도 해석을 수행한 후의 후류 크기와 유속을 나타내었다. Fig.1은 혼합거리 상수 l을 후류의 반치반폭($b_{1/2}$)의 0.6배만큼 사용한 혼합거리모형 수치실험 결과로서, 해석해와 비교하여 후류폭은 일치하지만, 층별 유속의 크기가 과대평가되었다. Fig.2는 One- equation 모형의 결과이며, $L=0.6b_{1/2}$일 때, 후류폭과 유속의 크기가 해석해와 비교하

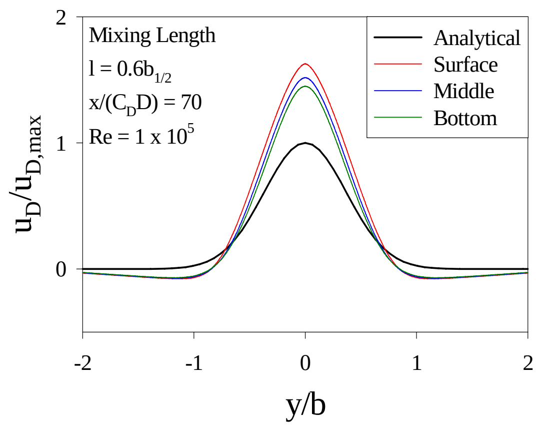

Fig. 1. Comparison between analytical and numerical solutions by the Mixing Length model.

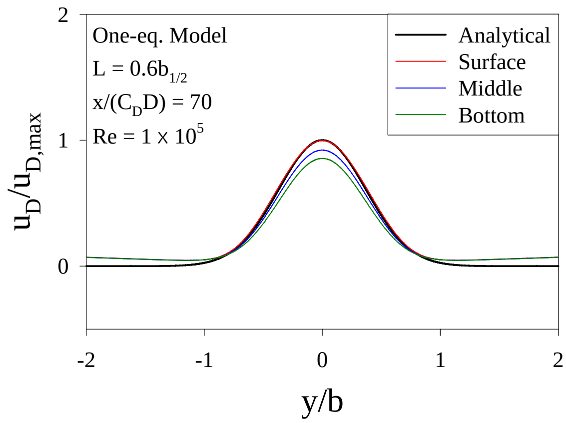

Fig. 2. Comparison between analytical and numerical solutions by the One-equation model.

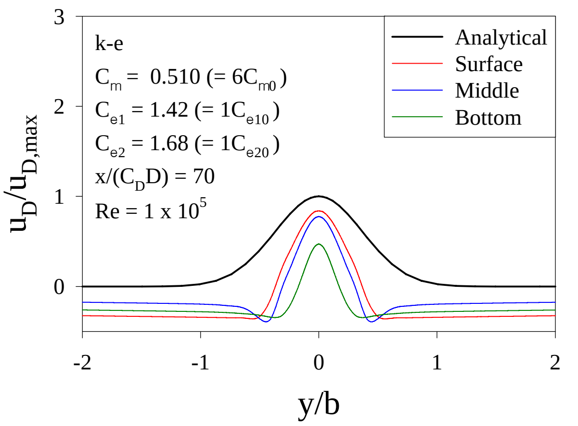

Fig. 3. Comparison between analytical and numerical solutions by the $k-\varepsilon$ model.

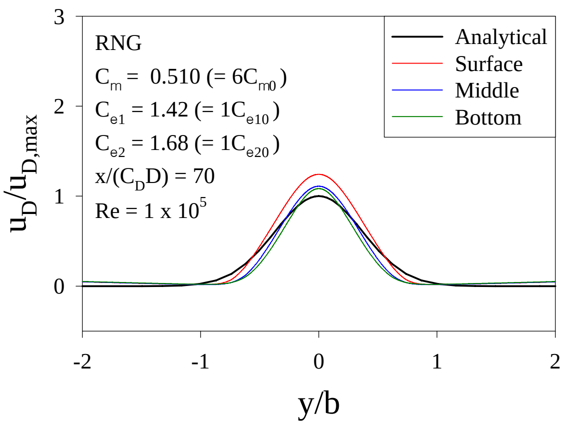

Fig. 4. Comparison between analytical and numerical solutions by the RNG $k-\varepsilon$ model.

여 거의 일치하였다. Universal 상수로 알려진 C_μ, $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ 변화에 따른 $k-\varepsilon$ 모형의 결과인 Fig.3은 해석해와 비교하여 전반적으로 후류폭과 유속의 크기가 과소평가되었다. Fig.4는 RNG $k-\varepsilon$ 모형의 결과로서 각 상수값이 $k-\varepsilon$모형과 동일하지만 후류폭과 유속의 크기가 해석해와 비교하여 거의 일치하였다.

4. 결 론

본 연구는 후류재현을 3차원적으로 산정할 수 있는 FLOW-3D® 프로그램을 사용하여 난류를 결정짓는 각 난류모형의 매개변수 범위를 민감도 분석을 수행한 후에 제시하였으며, 해석해와 비교·검증하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

혼합거리 상수 l의 변화에 따른 혼합거리모형의 수치실험 결과는 해석해와 비교하여 후류폭은 일치하지만, 층별 유속의 크기가 과대평가되었다. One-equation 모형은 혼합거리 모형과 같은 조건에서 후류폭과 유속의 크기가 해석해와 비교하여 거의 일치하였다. Universal 상수 C_μ, $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ 변화에 따른 $k-\varepsilon$ 모형의 결과는 해석해와 비교하여 전반적으로 후류폭과 유속의 크기가 과소평가되었으며, RNG $k-\varepsilon$ 모형은 $k-\varepsilon$모형과 같은 조건에서 후류폭과 유속의 크기가 해석해와 비교하여 거의 일치하였다.

이상의 결과를 볼 때, One-equation 모형과 RNG $k-\varepsilon$ 모형이 말뚝구조물의 후류재현에 있어 더 유리하다고 판단된다. 하지만, 정확한 후류를 재현하기 위해서는 와동점성계수형 상수 뿐만 다양한 매개변수의 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

Blevins, Robert D. (1984). Applied fluid dynamics handbook, Chapter 10, pp 279-311.

Flow Science Inc. (1993). FLOW-3D: Quick reference manual, Los Alamos, NM.

Orszag, S.A., Yakhot, D.B., Thangam, S. and Gatski, T.B. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion, technique phys. Fluid, A, 4(7).

Pope, S.B. (2000). Turbulent Flows, 1st Edition, Cambridge University Press.

Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, 3rd Edition , Longman Group Ltd.