

FLOW-3D를 이용한 교각주변 흐름의 수치해석

Numerical Analysis of Flow around Bridge Pier using FLOW-3D

김창성* , 강준구** , 여운광***

Chang Sung Kim, Joon Gu Kang, Woon Kwang Yeo

요 지

최근 들어 다양한 산업에서 3차원 수치해석을 이용하는 영역이 넓혀지고 있다. 국내에서도 3차원 수치해석을 이용하여 댐이나 정수처리시설 설계 등 수리분야에 적용하였고, 점점 그 이용이 확대되고 있다. 특히 교량 및 수제 등의 수공구조물로 인한 주변 흐름형상은 2차원 해석이 불가능하여 현재 수리모형실험을 통한 해석이 주를 이루고 있다. 이에 본 연구에서는 현재 3차원 수치해석에 많이 이용되는 상용모델인 FLOW-3D를 이용하여 3차원 흐름에 대한 수치해석을 수행하였으며 수리모형 결과와 비교하여 적용성을 검토하였다. 그 결과 모의 및 실험결과 수리모형과 수치모의 결과는 서로 비슷한 흐름양상을 보이고 있었다. 또한 조도계수(Roughness)를 매개변수로 하여 다양한 상태에서의 FLOW-3D의 민감도를 검토하였으나 실제 흐름과는 상이함을 보였다. 또한 다양한 난류모형을 적용하여 그 결과를 실제 흐름과 비교해보았다. 그 결과 3차원모형에서는 교각 후면부와 좌, 우측면부에서의 흐름이 실제 수리 모형과는 상이한 결과를 보이는데 이는 FLOW-3D의 벽 경계 및 와류에 대한 난류모델에 따른 수치해석적인 차이로 사료된다.

핵심용어 : 3차원모형, CFD, 난류모형, FLOW-3D

1. 서론

최근 3차원수치해석을 이용하여 해석하는 경향이 점차 전 공학적인 분야로 발전해 나가고 있는 추세이다. 수리분야에서도 3차원 수치해석을 이용하여 댐이나 정수처리시설 등을 분석하였고 그 적용범위를 넓혀가고 있는 실정이다. 특히 교량 및 수제 등의 수공구조물의 설치로 인한 구조물 주변의 흐름현상은 2차원해석이 불가능하여 현재 수리모형실험을 통한 해석이 주를 이루고 있다. 이에 본 연구에서는 현재 상용화된 수치모형을 이용하여 교각주변에서의 흐름을 3차원으로 분석하였고 실제 수리모형실험과 연계하여 그 적용성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

본 논문에서 사용된 수치해석인 FLOW-3D는 미국 뉴멕시코주 산타페에 있는 FLOW SCIENCE, Inc에서 개발한 상용 유체역학프로그램(CFD)이며 로스알라모스 국립연구소의 수치유체역학 연구실에서 개발된 MAC방법과 SOLA-VOF(Volume Of Fluid)방식을 기초로 하고 있다. 그 후 난류, Shallow water, scalar, 응고 등 다수의 model이 포함되어 현재의 상용프로그램의 형태를 갖추게 되었다.

* 정회원명지대학교 토목·환경공학과 박사과정E-mail : cskim@mju.ac.kr

** 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원E-mail : jgkang02@kict.re.kr

*** 명지대학교 토목·환경공학과 교수E-mail : yeo@mju.ac.kr

해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지방정식을 유체 및 열유동 해석에 사용하고 있으며 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체내의 온도는 열전도에 의한 에너지 교환을 에너지방정식 source term으로 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류유동에는 기본 대수모형으로부터 RNG (Renormalized Group Theory) 모형까지의 난류방정식을 선택할 수 있으며 자유표면해석을 위한 VOF 방정식이 사용되고 있다. 직각 형상의 격자계에서는 일반형상을 정의해 줄 수 있도록 FAVOR 방법이 각 방정식에 적용되고 있으며, 비압축성 및 압축성의 계산시 해석속도를 높이기 위해 별도의 보조 방정식 등을 사용하고 있다.

모형에 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식이며, 식(1)과 식(2)에 나타냈다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{P} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_s} u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_s} v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_s} w \end{aligned} \quad (2)$$

3. 수리모형실험

수리모형 실험의 경우 앞서 언급한 수치모형과 동일한 조건을 개수로실험장치를 이용하여 실험을 실시하였으며 각각의 경우 3차원 유속계 및 Point-gage를 이용하여 일정간격으로 유속 및 수위를 측정하였다. 또한 수심방향으로 유속을 측정하여 그 결과를 이후의 수치모의의 결과와 비교분석하였다. 실험 안 및 제원은 다음 표 1.과 그림 1.에 나타난 바와 같다.

표 1. 실험 안 및 제원

Case	Discharge	Mean Vel.	Water Depth	Pier Type
Case 1	72l/s	0.3m/s	30cm	Circle (8cm)
Case 2				Circle (10cm)
Case 3				Rectangular

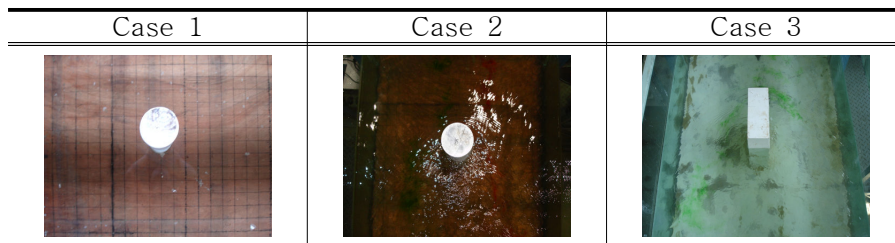


그림 1. 교각 형상별 사진

4. 수치모형실험

4.1 수치모형 적용성 검토

수치모의는 상용프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 앞서 실험한 실제 개수로 실험과 동일한 조건을 주어 모의를 실시하였으며 수치모의와 수치모형실험을 병행하여 그 적용성을 우선 확인해 보았다. 아래의 표 2.는 수행한 수치모의조건이다.

FLOW-3D에서의 계산격자 및 모의시간은 아래 표 3.과 같다. 3차원 모의를 수행한 모의시간은 100sec로서 모든 Case에 동일하게 적용하였으며 100sec이후에도 등류의 형태가 나오지 않을 경우 좀 더 모의를 실시하였다. 또한 수평(x-y)의 Cell의 크기를 동일하게 설정하고 연직방향(z) Cell의 크기를 최소화하여 교각 주변에서의 흐름(특히 접근부분에서의 하강류 등)을 정밀하게 모의 가능케 설정하였다. 또한 난류모델의 선택은 FLOW-3D에서 권장하고 있는 RNG(Re- Normalization Group)모델을 이용하여 우선적으로 실시하였다.

표 2. 실험 안 및 제원

Case	Discharge	Mean Vel.	Water Depth	Pier Type
Case 1	72ℓ/s	0.3m/s	0.3m	Circle (8cm)
Case 2				Circle (10cm)
Case 3				Rectangular

표 3. 격자 및 모의 계산시간

Case	Mesh Size	Total No. of Cell	Calculated Time	Elapsed Time
Case 1	80×16×36 (46080)	57456	100sec	1129sec
Case 2				1409sec
Case 3				1647sec

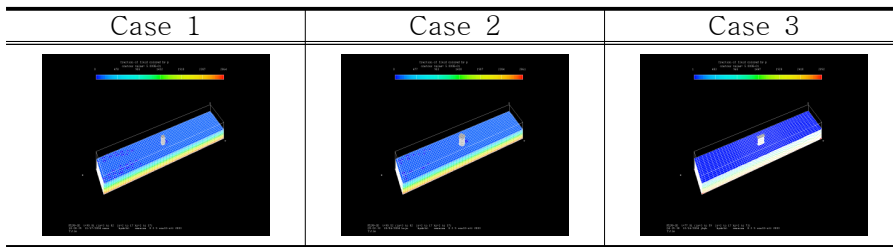


그림 2. 교각 형상별 사진

각각의 실험조건에서 모의한 결과를 선행 실험한 수치모형과 비교하였다. 비교 방법은 각 지점의 유속을 측정치와 계산결과를 비교하여 각 지점에서의 흐름변화를 검토하였다. 여기서 계산된 유속과 측정된 유속은 접근평균유속으로 나누어 무차원화하였다. 측정지점은 다음 그림 3.과 그림 4.와 같다.

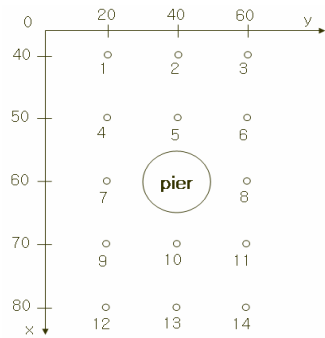


그림 3. 수평방향 측정지점 (x-y)

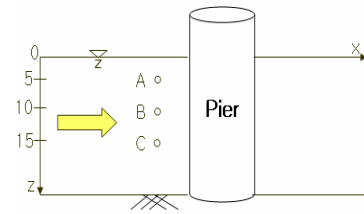


그림 4. 연직방향 측정지점(x-z)

아래의 그림 5.~7.은 각각의 실험조건별 측정지점 중 교각 전면부(4, 5, 6)지점에서의 유속분포를 수치모형실험에서의 결과와 수치모의를 통해 계산된 유속을 접근유속으로 무화원화한 후 비교한 그림이다. 비교한 결과 일부 지점에서 반대로 나오는 경우도 있었으나 전반적인 경향이나 크기는 거의 비슷하게 나타났다.

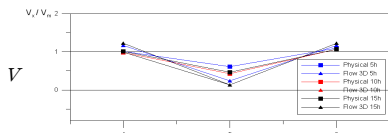


그림 5. Case 1(4~6)

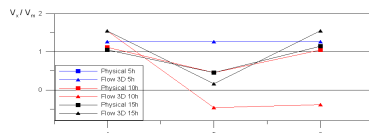


그림 6. Case 2(4~6)

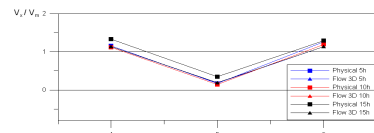


그림 7. Case 3(4~6)

4.2 난류모델별 민감도 분석

난류모델에 따른 민감도를 분석하기 위하여 다음 표 4.와 같은 조건으로 모의를 실시하였다. 각각의 모의조건은 RNG모델로 모의한 이전의 실험조건과 동일한 조건으로 난류모델만 변화시켜 그 민감도를 검토하였다. 모의에 적용한 난류모델은 혼합거리 모델, 난류에너지 모델, k-ε 모델, RNG 모델, LES(Large Eddy Simulation) 모델이며 각각의 비교대상은 교각 주변에서의 연직방향 유속분포, 동점성계수, 난류에너지, 그리고 난류에너지 소산률에 대해 비교해 보았다. 하지만 동점

성계수의 비교인 경우 모든 난류모델에서 비교 가능하였으나 난류에너지 분포인 경우 혼합거리 모델과 LES 모델의 경우 모델자체의 가정으로 인하여 난류에너지를 고려하지 못함으로 비교가 불가능하였다. 또한 난류에너지 소산률에 대해서도 k-ε 모델과 RNG 모델만이 비교 가능하였으며 이는 앞서 모델의 기본 가정과 기본식의 차이로 인해 난류에너지를 표현하지 못함에 기인함으로 판단된다.

표 4. 난류모델별 수치모의조건

Case	Discharge	Mean Velocity	Water Depth	Pier Type	Turbulence Model
Case 1	72ℓ/s	0.3m/s	0.3m	Circle (8cm)	Mixing-Length
Case 2					Turbulence Energy
Case 3					k-ε
Case 4					RNG
Case 5					LES

다음의 그림 8.~ 11.은 교각 전면부에서의 동점성계수, 난류에너지, 난류에너지 소산률, 연직방향 유속분포를 모의 가능한 모델별로 비교한 그림이다.

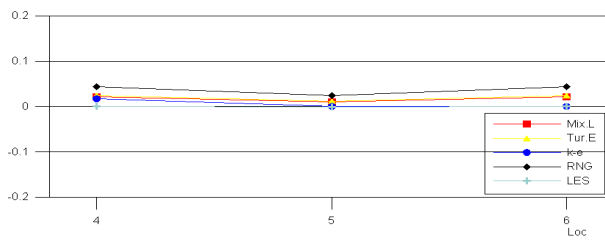


그림 8. 동점성계수 ($kg/m/s$)

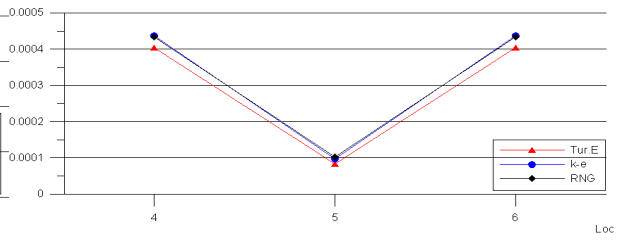


그림 9. 난류에너지 (m^2/s^2)

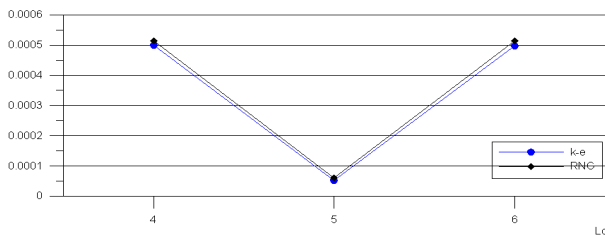


그림 10. 난류에너지 소산률 (m^2/s^3)

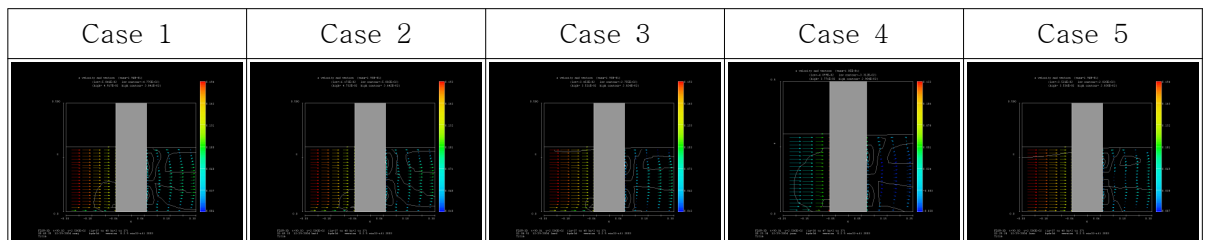


그림 11. 연직방향 유속분포(교각전면부)

4.3 조도계수(Roughness)에 대한 민감도 분석

조도계수에 따른 민감도를 분석하기 위하여 하상의 조도를 일정비율로 나누어 모의하였다. 아래의 그림 12.는 조도계수에 대한 평균유속을 산출하여 모의한 결과이다.

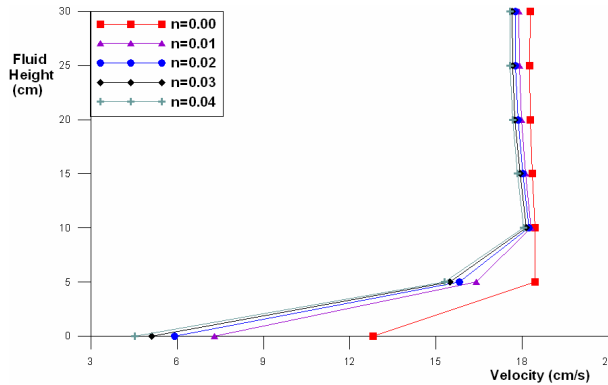


그림 12. 평균유속분포(p.2)

5. 결론 및 분석

본 연구에서는 3차원수치모형과 수리모형실험을 이용하여 수공구조물 주변의 흐름해석을 수행하여 비교하였다. 수리모형과 수치모형 결과 비슷한 흐름양상을 보이고 있으며 그 적용이 매우 우수한 것으로 나타났다. 하지만 난류 모델별 비교에서는 모든 난류모델이 흡사하게 나타났으나 각각의 모델의 특징에 따라 상대적인 크기의 차이가 있었다. 이는 난류모델이 갖고있는 기본가정과 식의 차이로 보인다. 또한 조도계수를 변수로 한 모의에서는 조도가 0일 경우를 제외하고는 실제 유속분포와 비슷함을 보였다. 하지만 3차원모형에서는 교각 후면부와 좌, 우측면부에서의 흐름이 실제 수리 모형과는 상이한 결과를 보이는데 이는 FLOW-3D의 벽 경계 조도 및 교각 조도 그리고 와류에 대한 정밀도의 차이로 보인다.

참고문헌

1. Flow Science, Inc. (2000). FLOW 3D User's Manuals.
2. Hirt, C.W. and Amsden, A.A., and Cook, J.L. (1974). "An arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for all Flow speeds." J. comp. phys. 14,227
3. 최성욱 등, 2004, "3차원 수치모형을 이용한 수계주변 림의 수치모의" 한국수자원학회 학술 발표논문집, 한국수자원학회.
4. 오병동 등, 2004, "Flow 3D에 의한 파살플룸 흐름해석" 한국수자원학회논문집, 37권 5호, pp 375 ~ 386.
(일부 생략)