

OpenFOAM[®]을 이용한 댐 여수로의 3차원 수치모의 적용성 검토

Applicability Investigation for 3-D Numerical Simulation of Dam Spillway using OpenFOAM[®]

박병준* · 김병윤** · 정요한*** · 김민균****

Park, Byong Jun · Kim, Byoung Yun · Jung, Yo Han · Kim, Min Kyun

1. 서 론

수 년 전만 하여도 여러가지 수리현상들을 수치기법으로 모사하기 위해서는 해당 과업 종사자가 필요에 의해 직접 개발한 코드(in-house code)를 사용하는 것이 일반적이었으나, 직관적인 전·후처리 등 편리한 사용자 환경을 제공하며 꾸준한 개발이 진행된 상용 소프트웨어들의 약진으로, 최근 국내 대부분의 산·학·연에서는 전산유체역학을 수행하기 위한 도구로 CFX, FLUENT, FLOW-3D[®] 등으로 잘 알려진 상용 소프트웨어를 사용하고 있는 상황이다. 상용 소프트웨어들은 지속적인 유지관리와 개발을 위한 체계가 갖추어져 기하자료 및 격자를 생성하기 위한 모듈과 솔버, 결과물을 분석하고 도시하기 위한 툴들이 수치모의를 위한 흐름 과정에 맞도록 하나의 패키지로 제공하고 있으며, 사용자가 이용하다 발생하는 문제점에 대한 지원이 장점이라 할 수 있다. 그러나 비교적 고가의 라이선스 비용을 부담스러워 하는 사용자들도 적지 않은 실정이고, 더구나 최근 멀티코어 CPU의 보급과 컴퓨터 가격 하락으로 병렬연산이 보편화 되고 있으나, CPU 코어의 개수에 따라 사용료가 책정되는 라이선스 적용 방식은 효율적인 연구에 장애가 되고 있는 점도 있다. 반면, 공개 소프트웨어들은 대부분 솔버 코드만 제공되고, 전·후처리는 타 소프트웨어들을 사용해야 하는 경우가 대부분이라 과업을 수행하며 발생하는 문제점은 사용자가 해결해야 하기 때문에 사용자가 기본 지식을 보유하고 있지 않거나 경험이 숙련되지 않으면 접근하기가 어려운 점도 있다. 그러나 이러한 점은 오히려 제한적 기능을 제공하는 상용 소프트웨어와는 달리 솔버의 자유도가 높아 사용자가 자유롭게 솔버를 수정하거나 새로운 솔버를 생성할 수 있으며, 다수의 사용자가 즉시 코드를 개선하여 재배포 할 수 있다는 장점으로 부각되기도 한다. 지배방정식이 바뀌지 않는 한 어떤 CFD 툴을 사용하더라도 물리량의 계산 결과에는 큰 차이가 없고, 적용 수치기법에 따른 계산시간의 차이는 상대적으로 미묘하므로 사용료가 무료인 오픈 소스 CFD는 학계로부터 관심을 받을 자격이 충분하고, 경쟁력이 있다고 판단되어, 본 연구에서는 오픈 소스 CFD 코드인 OpenFOAM[®]을 이용한 수공구조물(댐 여수로)의 3차원 수치모의 적용성을 검토해 보았다.

2. 기본이론

2.1 코드소개

OpenFOAM[®](Open Field Operation and Manipulation)은 OpenCFD Ltd.에서 개발한 범용 3차원 전산유체역학 코드로서, GNU GPL(General Public License)를 사용하기 때문에 누구나 무료로 내려 받아 사용할 수 있다. 원래 OpenFOAM[®]은 1993년 영국의 Imperial College의 Gosman 교수 연구실에서 FOAM이라는 이름으로 Henry Weller와 Hrvoje Jasak에 의하여 CFD 코드의 재활용성을 위한 C++ 언어 기반의 CFD 솔버를 목적으로 개발이 시작되었고, 2004년 OpenFOAM[®]으로 개명하고 소스를 공개함으로써 전 세계의 많은 연구자들이 참여하여 지속적인 보완이 진행되어 2011년 6월 16일 버전 2.0이 발표되었다.

* 정회원 · 한국농어촌공사 농어촌연구원 수리시험연구팀 연구원 · 공학박사 · E-mail : jwhaja1@ekr.or.kr

** 비회원 · (주)넥스트폼 대표이사 · 공학석사 · E-mail : bykim@nextfoam.co.kr

*** 비회원 · (주)대우엔지니어링 해양수력사업그룹 대리 · 공학석사 · E-mail : john01@dweng.co.kr

**** 정회원 · (주)GS건설 기술연구소 인프라연구팀 선임연구원 · 공학박사 · E-mail : mkkim03@gsconst.co.kr

OpenFOAM[®]은 라이브러리 형태로 개발되며 실제 특정 문제를 해결하기 위한 솔버는 독자적으로 개발할 수 있는 환경을 제공한다. 이 라이브러리들은 우리가 해석하고자 하는 편미분 방정식과 최대한 유사하게 만들어져 있어 지배방정식을 잘 이해하고 있다면 C++ 언어에 대해 자세히 알지 못하더라도 쉽게 소스 코드를 만들 수 있는데, 표 1과 같이 넣어주면 된다.

표 1. OpenFOAM[®]에서의 편미분 방정식 코딩예

수 학 식	$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \phi \mathbf{U} - \nabla \mu \nabla \mathbf{U} = -\nabla p$
삽 입 코 드	<pre>solve (fvM::dd t (rho,U) + fvM::div(phi,U) - fvM::laplacian(mu,U) == -fvC::grad(p));</pre>

2.2 지배방정식

유체부에서의 지배방정식은 Navier-Stokes 식이다.

$$\nabla \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla (\mu \mathbf{S}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \sigma K \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (2)$$

여기서, \mathbf{U} 는 속도벡터장, p 는 압력장, α 는 두 가지의 유체로 정의되는 체적과편함수로 다음과 같다.

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{: volume occupied by air} \\ 1 & \text{: volume occupied by water} \end{cases} \quad (3)$$

\mathbf{S} 는 변형률텐서로 $\mathbf{S} = 1/2(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)$ 이고, σ 는 표면장력, K 는 표면곡률이다. 표면장력 문제는 그렇게 중요하지 않지만 식의 완성을 위하여 삽입되었다. 도메인에서의 밀도 ρ 와 점성계수 μ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (4)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (5)$$

체적과편 α 는 유체 속도장에 의해 이동되며, 체적과편 스칼라(scalar) α 는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla (\mathbf{U} \alpha) = 0 \quad (6)$$

수치확산은 물과 공기 사이에 명확한 계면으로 표현된다. 압축성 계면을 정의하는 기법인 CICSAM은 그 계면에 대해 재정립 해왔는데, 최근의 자유표면 모형과 CICSAM 기법의 상세한 내용은 Ubbink와 Issa(1999)에 의하여 찾을 수 있다.

유체부에서의 식은 전통적인 $k-\epsilon$ 모형(Lauder와 Spalding, 1973)으로 구해진다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla (\mathbf{U} k) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2 \frac{\mu_t}{\rho} |\nabla \mathbf{U}|^2 - \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nabla (\mathbf{U} \epsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + 2 \frac{C_1 \mu_t}{\rho} |\nabla \mathbf{U}|^2 - \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

여기서, μ_t 는 난류와동점성계수, k 는 난류운동에너지, ϵ 는 난류에너지소산률이다. 식 (7), (8), (9)에 나타난 상수들은 Lauder와 Spalding(1973)이 제시한 값을 취한다.

3. 모형구축

3.1 기하자료 및 격자의 구성

본 연구의 수행을 위한 수공구조물 모형은 경상북도 군위군에 소재한 화북댐 여수로로 채택하였다. 기하자료는 Solid Edge ST3에서 작성하고, Ansys Meshing 13.0에서 FLUENT용 격자를 생성 후 내장된 변환 도구인 fluent3DmeshToFoam을 사용하였다. 작성된 격자의 크기는 최소 0.333m, 최대 1.000m로 총 314,111개의 형상최적화 된 직육면체(body-fitted cut cell) 체적격자(volume mesh)로 이루어졌다.

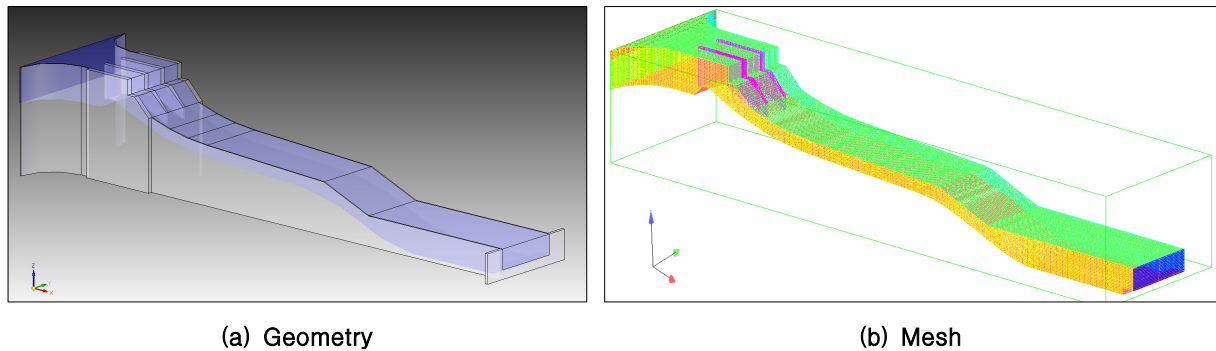


그림 1. 기하자료 및 격자의 구성

3.2 경계조건

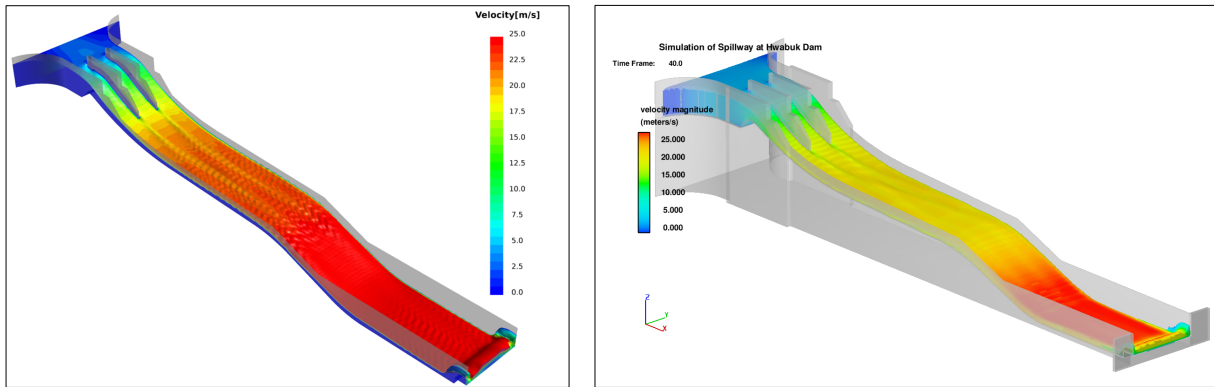
유입부는 수위를 고정(200년 빈도 수위, EL.205.10m)하고, 유출부는 자유유출이 되도록 경계조건을 적용하였다. 그 외 여수로 측벽과 바닥, 교각 등은 콘크리트 라이닝을 고려하여 절대조도 1mm를 적용하였으며, 대기압 및 표면장력이 작용하도록 처리하였다. 상세한 내용은 표 2와 같다.

표 2. 경계조건의 적용

	inlet_air	inlet_water	outlet	open_atmosphere	wall_right/left wall_pier wall_chute_bed
type	patch	patch	patch	patch	wall
U	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	pressureInletOutletVelocity	fixedValue
p_rgh	buoyantPressure	FixedValue	zeroGradient	totalPressure	buoyantPressure
k	zeroGradient	zeroGradient	inletOutlet	inletOutlet	kqRWallFunction
epsilon	zeroGradient	zeroGradient	inletOutlet	inletOutlet	epsilonWallFunction
alpha1	fixedValue	fixedValue	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient

4. 모의결과 및 분석

구축된 모형에서 현상을 모사하기 위한 물리시간은 40초, 200년 빈도 홍수를 배제하는 조건에서 계산을 수행하고, FLOW-3D[®]로 계산한 결과를 Y=0m 지점에서 물넘이 정점부를 원점으로 하여 160m 구간을 20m 간격으로 물리량 비교를 해 보았다. 그 결과 OpenFOAM[®]으로 계산된 결과를 근거로 하면 그림 2, 표 3과 같이 여수로에 형성된 수면형태는 비교적 현상을 잘 모사하는 것으로 나타났다. 방류량의 경우 OpenFOAM[®]으로 얻은 결과가 큰 것으로 나타났고, 수면고와 압력수두의 경우 100m까지는 OpenFOAM[®]의 결과가 크게 나오고, 그 이후부터는 FLOW-3D[®]로 얻은 결과가 크게 나타났지만, 그 차이는 미미하여 수면고와 압력수두의 경우에서도 상용 CFD 코드인 FLOW-3D[®]로 계산한 결과와도 유사한 것으로 판단된다.



(a) OpenFOAM®

(b) FLOW-3D®

그림 2. 수치모의로 얻어진 결과의 도시

표 3. 수치모의로 얻어진 물리량 비교 (수로의 중앙부, Y=0m)

구분	누가거리 (m)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
	지반고(EL.m)	197.20	188.74	183.02	180.59	179.59	178.59	177.54	172.77	164.77
수면고 (EL.m)	OpenFOAM®	203.44	192.52	185.22	182.74	182.53	180.81	179.57	174.53	166.47
	FLOW-3D®	202.69	192.25	185.18	183.00	182.25	180.88	179.64	174.82	166.56
압력수두 (EL.m)	OpenFOAM®	196.88	192.54	185.07	183.18	181.94	179.25	178.29	173.73	165.83
	FLOW-3D®	196.90	192.24	185.65	183.02	181.99	180.74	178.38	173.79	166.06
방류량 (m³/s)	OpenFOAM®	1,455								
	FLOW-3D®	1,319								

5. 결론

오픈 소스 CFD 코드인 OpenFOAM®을 이용한 수공구조물의 3차원 수치모의 적용성을 검토해 보기 위하여 화북댐 여수로를 모형으로 구축하고, 200년 빈도 홍수를 배제하는 조건으로 계산을 수행하여 상용 CFD 코드인 FLOW-3D®로 계산한 결과와도 비교를 해 보았다. 그 결과 OpenFOAM®으로 계산된 결과는 여수로의 물넘이부와 조절부, 급경사 수로부, 정수지 등에서의 수리현상을 잘 재현하는 것으로 확인되었으며, 상용 CFD 코드로 얻은 물리량과 유사한 양상을 나타내었다. 그러나, 본 연구는 CFD 코드별 계산 결과에 대한 비교분석에 국한되기 때문에 연구를 연장하여 수리모형실험 결과와 비교할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위하여 Harpoon, FieldView 등으로 격자작성과 결과물 도시에 도움을 주신 (주)넥스트이엔에스의 박기호 대리님께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

1. 박준권, 강관형 (2001). Source 공개 코드 OpenFOAM에 대한 리뷰, *한국전산유체공학회지*, 제15권, 제3호, pp.46-53.
2. 日本工營株式會社. (2004). 華北ダム洪水吐き水理模型實驗報告書.
3. Franz Jacobsen (2009). Application of OpenFOAM for designing hydraulic water structures. *Open Source CFD International Conference 2009*.
4. Xiaofeng Liu, Marcelo H. Garcia (2006). Numerical Simulation of Local Scour with Free Surface and Automatic Mesh Deformation. *World Environmental and Water Resource Congress 2006, ASCE*.