FLOW-3D를 이용한 다목적댐 여수로의 흐름해석
(Analysis of Flow In the Spillway of Multipurpose Dam Using the FLOW-3D)

홍기원*, 유성렬*, 황만하**

1. 서론

90년대 들어 급격한 컴퓨터의 발전으로 인해 다양한 산업분야에서 컴퓨터를 이용한 3차원 수치해석이 급속히 보급되고 있다. 또한, 선진국을 중심으로 수리분야에도 본격적인 3차원 수치모형 모사 방법이 보급되어 수리모형결과를 보완하여 공기단축과 원가절감 등에 이용되고 있다. 특히, 수리모형을 할 수 있는 비용과 시간적인 여유가 없을 경우 수치모형을 도입하면 신속한 설계기준의 수립이 가능하고, 1차원 및 2차원에서 볼 수 없는 3차원 유동특성 파악을 통하여 유동현상에 대한 이해를 높여 기술력 향상에도 기여할 수 있다. 하지만, 현재 국내에서는 수치모형의 경험을 가진 인력 및 프로그램의 부재로 인하여 대규모 유동이 발생하는 다목적댐 여수로의 계획 및 관리에 있어서는 기존의 수리모형 이외에 다양한 수리현상을 검토할 수 있는 수치모형의 적용 예는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 다목적댐의 여수로 주위의 다양한 흐름현상을 분석하기 위한 3차원 수치모형의 적용 특성을 분석하였으며 이를 기존의 수리모형 자료와 비교 검토하였다. 이 결과를 기초로 여수로 방류시의 월류 발생 가능성, 여수로 바닥면의 압력 분포, 여수로 낙하시 물의 위치별 속도와 jump거리 등을 해석적으로 검토하였다.

2. FLOW-3D의 개요

본 수치해석에 사용되고있는 FLOW-3D는 미국 뉴멕시코주 산타페에 있는 Flow Science,Inc에서 개발한 범용 유체역학 프로그램(CFD code, Computational Fluid Dynamics)이며 로스알라모스 국립연구소의 수치유체역학 연구실에서 F.Harlow, B.Nichols 및 T.Hirt 등에 의해 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF(Volume of Fluid)방식을 기초로 하고 있다. 그 후 Dr. Hirt가 1980년에 Flow Science사를 설립하여 계속 프로그램을 발전시켰으며 1985년부터 FLOW-3D로 명명하였다. 그 후 난류, shallow water, scalar, 응고 등 다수의 기능이 포함되어 현재의 상용 프로그램이 되었으며 수력학 뿐만 아니라 주조, 잉크젯 등 일반 산업공정 해석에도 널리 사용되고 있다. Solver와 전·후처리기로 구성되어 있고, solver는 Fortran, 전·후처리기는 C언

* STI, **한국수자원공사 수자원연구소

어를 주로 사용하고 있으며 퍼스날컴퓨터, 공학용컴퓨터(EWS, Engineering Workstation), 슈퍼컴퓨터 등 거의 모든 컴퓨터 기종에서 사용이 가능하다.

해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열유동 해석에, 그리고 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체내의 온도는 열전도에 의한 에너지 교환을 에너지 방정식 source term으로 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류 유동에는 기본 대수 모형으로부터 RNG(Renormalized Group Theory) 모형까지의 난류 방정식을 선택할 수가있다.

2.2 사용방정식

● 연속방정식 (Continuity Equation)

- Incompressible Flow

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

A_x, A_y, A_z : Area Fraction, V_f : Open Volume Fraction, ρ : density

RSOR = Mass Source/Sink, RDIF = Turbulent Diffusion

● 운동방정식 (Momentum Equations)

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

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+F_y-\frac{RSOR}{\rho V_f}v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+F_z-\frac{RSOR}{\rho V_f}w$$

Forces --Gravity and non-inertial body acceleration, Viscous stresses, Drag(porous baffles, porous obstacles)

RSOR --Accelerations caused by mass injection at zero velocity

● VOF방정식 (Volume-of-Fluid Advection Equation)

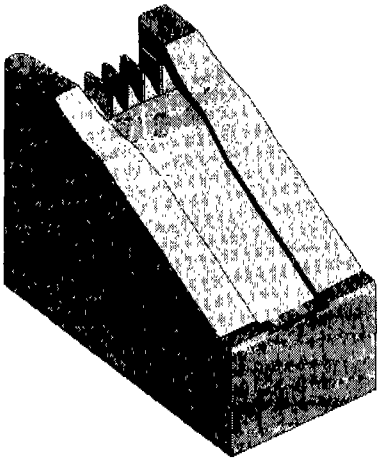
$$\frac{\partial F}{\partial t}+\left\{\frac{\partial}{\partial x}(FuA_x)+\frac{\partial}{\partial y}(FvA_y)+\frac{\partial}{\partial z}(FwA_z)\right\}=FDIF+FSOR$$

FDIF --Diffusion of Fluid Fraction, FSOR--Fluid Source/Sink

3. 해석모델

3.1 3차원 형상정의(geometry modeling) 및 격자분할(meshing)

여수로 방류시의 유동양상 및 수면변화를 알아보기 위하여 <Fig. 1>과 같이 여수로 형상을 3차원으로 모델링하였다. 여수로 해석시에 사용된 격자는 X,Y,Z 방향으로 각각 53개, 152개, 60개의 격자를 사용하였다.



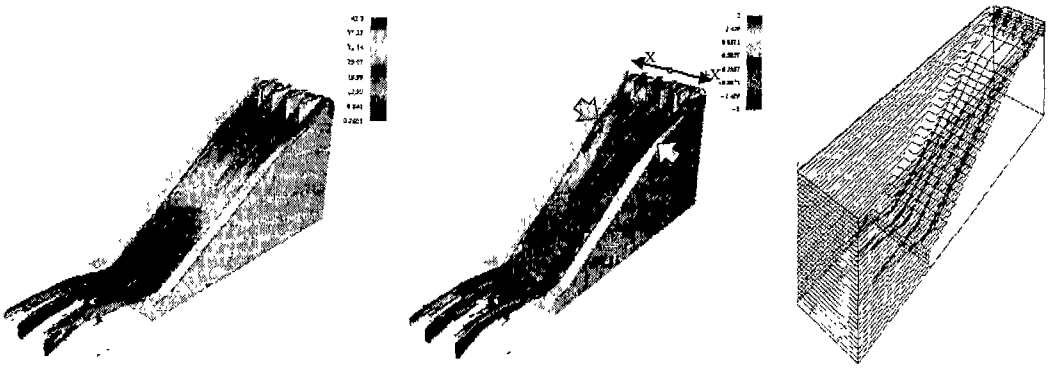
<Fig. 1> 해석모델

3.2 경계조건 및 입력자료

소양댐의 경우 여수로 입구의 지형이 여수로 중심을 기준으로 대칭이 아니기 때문에 각 게이트를 통과하는 유속 및 수위도 동일하지 않다. 따라서, 본 여수로 해석에서는 본 해석 이전에 소양강 저수지의 유동현상 규명을 위해 수행된 소양강댐의 유동 해석 결과로부터 얻어진 각 게이트의 수위 및 속도를 여수로의 유입조건으로 설정하였다. 여수로 하부의 조건은 outflow 경계조건으로 정의하여 마지막 격자에서의 속도변화가 없이 진행하는 조건을 이용하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 여수로 속도분포



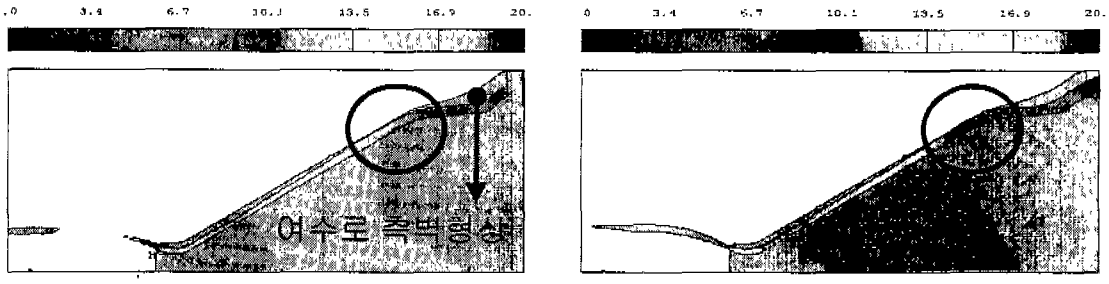
가. 물의 속도분포　　나. 물의 폭방향 속도분포　　다. Stream line

<Fig. 2> 여수로 유속분포 및 stream line

<Fig. 2>는 좌측 그림은 여수로 낙하시 물의 속도분포를 나타낸다. 최대 속도는 여수로 하단부로 나타났고, 이 때의 속도는 약 43m/sec이며 낙하시간은 약 10초로 나타났다. 우측에 보여지는 여수로의 폭방향 속도분포를 보면 게이트가 방사형으로 배치되어 있기 때문에 게이트를 통과한

물이 중앙부로 모였다가 하류로 가면서 평평하게 되는데, 이에 따라 여수로 입구에서 발생한 편향이 완화될 뿐 아니라 측벽의 월류 가능성을 감소시키는 것을 알 수 있다.

4.2 여수로 수면형상 및 속도분포

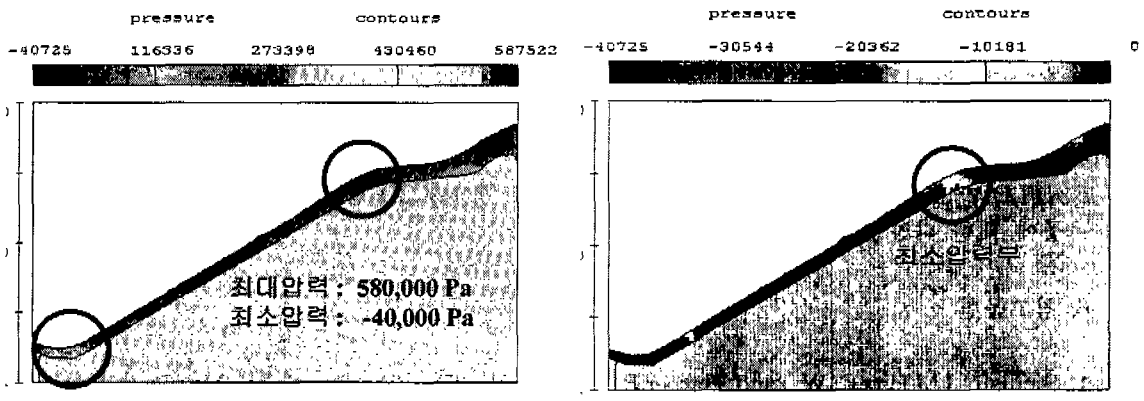


가. 수면형상 및 유속 (여수로 중심에서 25.7m)　나. 수면형상 및 유속 (여수로 중심에서 19.6m)

<Fig. 3> 여수로 수면 형상 및 유속분포 (수위 198m)

<Fig. 3>은 여수로를 낙하하는 물의 수면형상 및 속도분포를 나타낸다. 여수로 측벽에 가까운 쪽의 수위가 중앙부보다 낮은 것으로 나타나는데, 이 결과는 앞서 설명한 바와 같이 방사형의 게이트를 통과한 물이 중앙부로 집중되어 월류 가능성을 감소시키는 것을 설명한다. 또한, 여수로 하류로 갈수록 유속이 증가하므로 수위가 낮아지는 것을 보여준다.

해석결과 낙하하는 물의 최대속도는 방류량에 따라 큰 변화가 없었지만, 여수로 바닥과의 마찰이 발생하므로 표면과 접촉면과의 속도차이가 발생하고, 하단의 chute에 따라 점프하는 수면의 형상이 변화하는 것을 알 수 있다.

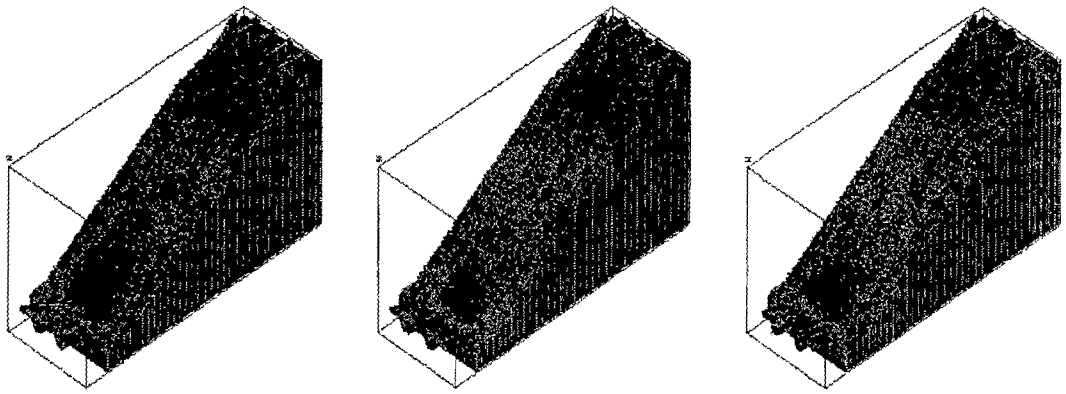


가. 여수로 벽측 단면　　나. 여수로 중앙부 단면

<Fig. 4> 여수로 압력분포

<Fig. 4>는 여수로를 바닥면의 압력분포를 나타낸다. 해석결과 최대압력부는 여수로 하단부로 580,000Pa(1atm=101,300Pa)의 압력을 나타내었고, 최소압력부는 여수로 바닥면의 곡률이 변경하는 위치에서 약 -40,000Pa로 나타났다.

4.3 시간에 따른 여수로 수면의 변화



가. t=0 sec　　나. t=2 sec　　다. t=4 sec

<Fig. 5> 시간에 따른 여수로 수면변화

<Fig. 5>는 시간에 따른 물의 표면 형상 변화를 나타낸다. 여수로를 낙하하는 물의 표면형상은 각 게이트의 방류량과 유속이 동일하지 않으므로 시간에 따라 조금씩 변화하게 된다. 10초간 낙하하는 물의 수면 형상을 관찰한 결과 측벽의 월류는 발생하지 않았다.

5. 결론

5.1 여수로의 낙하시의 물의 최대 속도는 약 43m/sec, 소요시간은 약 10초, 최대 부압은 약 0.4기압 정도로 나타났다.

5.2 게이트가 방사형으로 배치되어 있으므로 여수로 중심부의 수위가 벽측보다 높다가 하부로 내려올수록 평평하게 되고, 측벽에서의 월류 가능성을 감소시킨다.

5.3 FLOW-3D를 이용한 3차원 수리해석은 수리모형이나 2D 분석으로 해석이 불가능한 3차원적 유동에 대한 다양한 분석이 가능하다.

6. 참고문헌

1. Sicilian, J.M,Hirt,C.,W., and Harper,R.,P., "FLOW-3D : Computational Modeling Power for Sicentists and Engineers," Flow Science Report,1987 (FSI-87-00-1)

2. Harlow,F.H.,and Welch,J.E., "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscou Incompressible Flow of Fluid With Free Surface," Phys.Fluids, vol.8,pp.2182-2189, 1965

3. Hirt,C.W., and Nichols,B.D., "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," J.Comp.Physics 39,201, 1981
4. 건설부 국립연구소, "소양강 다목적 댐 수리모형 실험보고서", 1970