

3차원 수치모형을 이용한 소양강댐 여수로 주위의 유동현상 연구 (A Study of Flow Dynamics Around the Spillway of Soyang Dam Using a 3-D Numerical Simulation)

홍기원*, 유성렬*, 황만하**

1. 서론

90년대 들어 급격한 컴퓨터의 발전으로 다양한 산업분야에서 3차원 수치해석이 급속히 보급되고 있다. 최근 들어 구미 선진국을 중심으로 수리분야에도 본격적인 3차원 수치모형이 보급되어 댐 설계시 기존의 수리모형을 보완하거나 공기단축 및 원가절감 등을 위하여 이용되고 있다. 국내에서도 최근 소양강댐의 여수로 주위의 흐름현상을 규명하기 위하여 3차원 수치모형의 필요성이 제기되었는데, 본 연구에서는 소양강댐 여수로 주위의 유동 현상과 특히 여수로 상류의 Forebay 굴착이 방류량에 미치는 영향등을 3차원 수치모형을 적용하여 분석하였다.

2. 이론적배경

2.1 FLOW-3D

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 수리학 뿐만 아니라 주조, 잉크젯 등 일반 산업공정 해석에도 널리 사용되고 있다. Solver와 전·후처리기로 구성되어 있고, solver는 Fortran, 전·후처리는 C언어를 주로 사용하고 있으며 퍼스널컴퓨터, 공학용컴퓨터(EWS, Engineering Workstation), 슈퍼컴퓨터 등 거의 모든 컴퓨터 기종에서 사용이 가능하다.

* STI, **한국수자원공사 수자원연구소

해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열유동 해석에 사용하고 있으며 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 여러 가지 난류 방정식을 선택할 수 있다.

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,

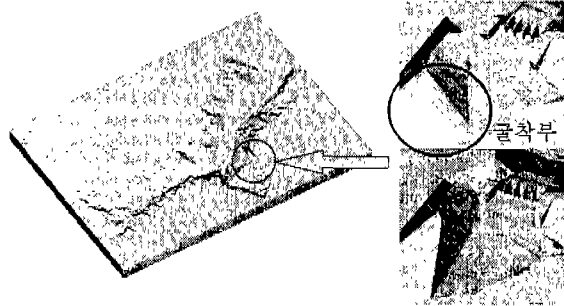
FSOR--Fluid Source/Sink

3. 해석모델

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

3차원 수치모형을 위해서는 대상물을 실제와 동일한 크기와 형상으로 표현해야 한다. 이를 위

하여 소양댐을 기준으로 상류와 하류 각 2km의 수심과 지형 측량을 실시하였고, 여수로 및 댐은 도면을 기초로 형상을 표현하여 두 가지를 결합하였다. 또한, 접근수로를 굴착한 경우의 해석을 실시하여 결과를 비교하였다. <Fig. 1>에 수치모형의 3차원 형상을 나타내었고, X,Y,Z 방향으로 각각 210개, 93개, 31개의 격자를 사용하였다.



<Fig. 1> 해석모델 (상: 기존, 하:굴착후)

3.2 경계조건 및 입력자료

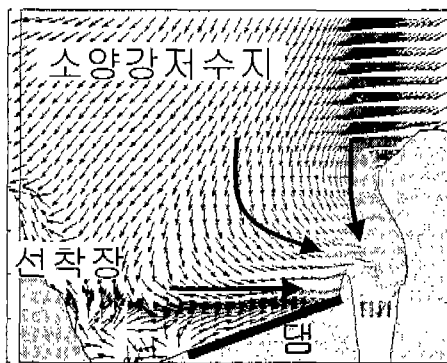
해석의 경계조건으로는 상류에서의 수위를 가정하였고, 상류에서 유입된 물이 여수로를 통하여 방류되므로 여수로측의 경계조건으로 월류 하류의 조건이 영향을 미치지 않는 outflow 경계조건을 정의하였다. <표 1>은 해석에 사용된 물성 및 물리적인 적용조건을 나타내었다.

<표 1> 입력물성

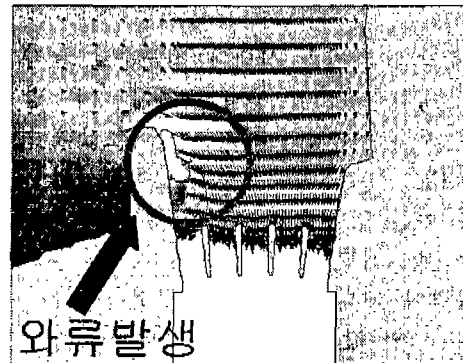
| 구 분 | 입력값 | 설 명 |
|------------|-----------------------|------------------------|
| 점도 | 0.001 Pa/s | - |
| 밀도 | 1000Kg/m ³ | - |
| wall shear | - | 유체와 지형의 저항 고려 |
| 난류모델 | RNG | k-epsilon의 advanced 방식 |

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 소양댐 저수지의 유동양상



가. 댐 전방의 유동양상

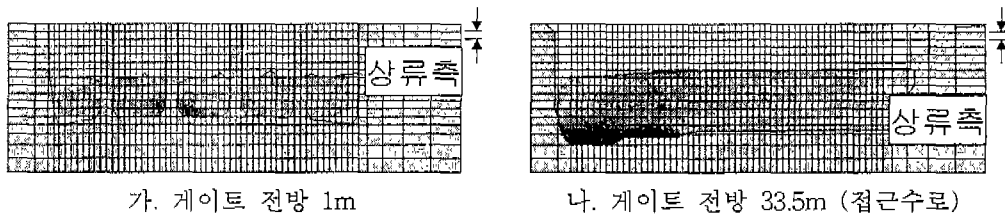


나. 접근수로의 유동양상

<Fig. 2> 여수로 부근 유동양상 (수위 198m)

<Fig. 2>는 여수로 입구부근의 유동양상을 나타낸다. 결과에 보여지는 같이 상류에서 유입된 물이 선착장측에 부딪친 후 회전하여 댐전면을 거쳐 여수로로 방류되게 된다. 이같은 흐름은 저수지 본류의 흐름방향과 여수로의 방류방향이 일치하지 않기 때문에 발생한다. 또한, 이와 같은 흐름과 여수로 입구의 구조에 의해 우측 그림에 보여지는 바와 같이 게이트 전방에 와류가 발행하게 되는데, 와류의 세기는 수위가 상승할수록(방류량이 증가할수록) 심화된다. 이 현상은 소양댐의 방류시 뚜렷하게 관찰되는 현상이지만 수리모형실험에서는 뚜렷하게 관찰되지 않은 현상이다.

4.2 접근수로 및 게이트 수면변화



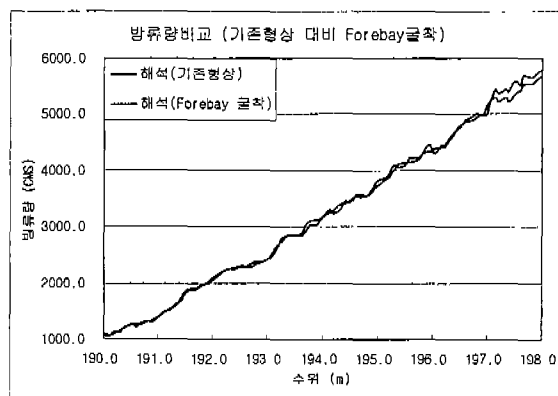
<Fig. 3> 게이트 전방 수면변화

<Fig. 3>에 여수로 율류부 및 여수로 접근수로 단면의 수면변화를 나타내었다. 현재 소양댐 운영기준은 모든 게이트에서 동일한 유량이 방류된다는 가정하에서 작성되었으나 해석결과에서는 각 수분별 방류량이 같지 않은 것으로 나타나고 있다. 또한, 게이트 전방 33.5m단면에서 접근수로의 수면 높이를 관찰하면 상류측 수위가 높은 것을 볼 수 있는데, 이것은 앞서 설명한 바와 같이 상류에서 유입된 물이 댐을 거쳐 선착장 쪽으로부터 유입되기 때문이다. 접근수로부의 흐름이 여수로와 평행하지 않기 때문에 속도 수두에 의해 상류측의 수위가 상승하게 된다.

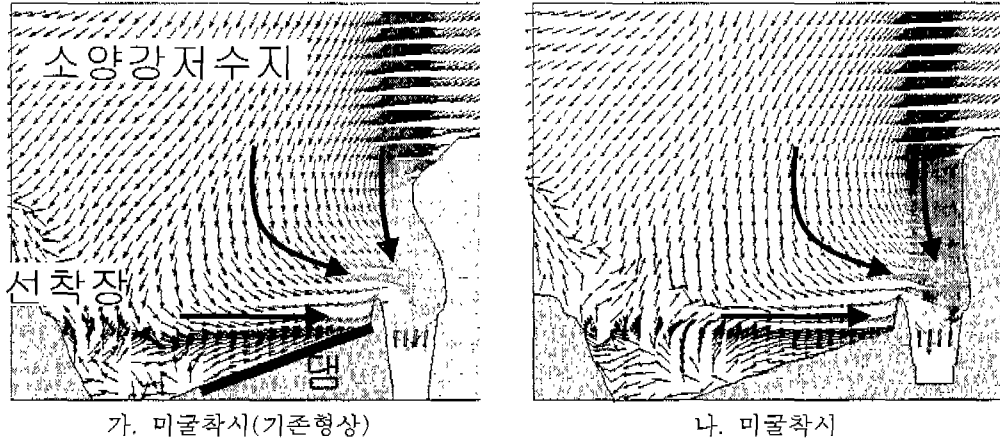
4.3 접근수로 굴착에 따른 유동양상 및 방류량 비교

소양댐의 기존 상태와 접근수로 굴착시의 방류량을 비교하여 굴착에 따른 방류량 및 유동현상의 변화를 알아보았다.

<Fig. 4>는 기존형상과 굴착형상의 수위에 따른 방류량을 비교한 결과이다. 결과를 비교하면 접근수로부를 굴착하여도 방류량이 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같이 굴착시에도 방류량이 증가하지 않는 것은 전술한 바와 같이 여수로 입구의 유동 양상에 기인한다.

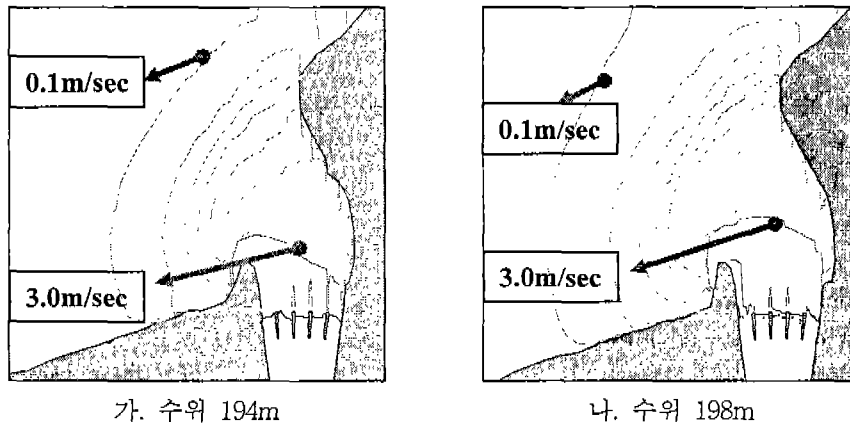


<Fig. 4> 접근수로 굴착에 따른 방류량비교



<Fig. 5> 접근수로 미굴착 및 굴착시의 유동양상 비교

<Fig.5>는 기존형상과 접근수로 굴착시의 유동양상 비교이다. 전술한 바와 같이 저수지의 흐름 방향과 여수로의 위치가 일치하지 않으므로 접근수로를 굴착하여도 굴착하지 않은 경우와 동일하게 선착장부근을 거쳐 댐 앞을 흐른 후 여수로로 방류된다. 따라서, 이번 경우와 같은 접근수로의 부분적인 굴착은 방류량 변화에 영향을 주지 못한다. 즉, 접근수로 부근을 저수지 흐름을 변경시킬 정도로 대규모 굴착을 한다면 유량 변동이 발생할 수 있으나, 이번 해석 경우와 같은 정도의 굴착은 방류량에 영향을 주지 못한다. 이와 같은 결과는 현재 소양댐 저수지와 같은 지형과 유량 조건에서는 물의 흐름속도보다 여수로에서의 수위가 방류량을 결정하는 주요한 요인이라는 것을 의미한다.



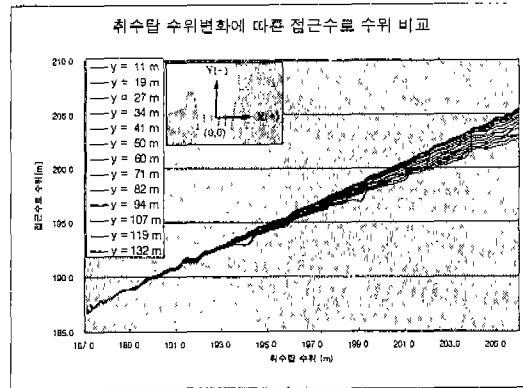
<Fig. 6> 수위에 따른 유속분포

<Fig. 6>은 저수지 수위에 따른 유속분포를 나타낸다. 결과에서 수위가 상승할수록 동일 위치에서의 유속이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 여수로 입구의 등속선이 대칭이 되지 않는 것은

여수로 입구의 유속이 균일하지 않은 것을 나타낸다.

4.4 방류량에 따른 접근수로의 수위변화

<Fig. 7>은 소양댐 수위 변화(방류량 변화)에 따른 접근수로부의 수위 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 방류량이 증가할수록 기울기가 증가하는데 이것은 방류량에 증가에 따라 접근수로부에서 월류에 의한 낙차가 커지는 것을 나타낸다.



<Fig. 7> 방류량에 따른 접근수로 수위변화

5. 결론

5.1 소양댐 저수지는 상류에서 유입된 물이 선착장 측을 거쳐 댐 앞을 평행으로 흐르다가 여수로로 유입된다. 이로 인하여 게이트 전방에서 와류가 발생하게 되고 게이트 별로 수위차 및 방류량차가 발생한다. 또한, 이와 같은 와류 및 수위차는 방류량 증가에 따라 증가한다.

5.2 소양댐 여수로 앞을 막고 있는 접근수로를 굴착으로 확대하면 약간의 방류량 증대는 있지만, 대규모로 시행되지 않는 한 방류량 증가에는 효과가 없을 것으로 판단된다.

5.3 소양감댐의 방류량은 지형과 유동속도를 고려할 때 물의 유입속도보다 수위에 영향을 받게 된다.

5.4 3차원 수치해석을 통하여 소양댐 부근에서 발생하는 유동현상에 대한 이해를 넓히고, 향후 수리모형실험 등과 상호 보완하여 기술력 축적에 도움이 될 수 있는 기반을 확보하였다.

6. 참고문헌

1. Sicilian, J.M., Hirt, C.W., and Harper, R.P., "FLOW-3D : Computational Modeling Power for Scientists and Engineers," Flow Science Report, 1987 (FSI-87-00-1)
2. Harlow, F.H., and Welch, J.E., "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous 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