여수로에서 자유수면 모의

Modeling of Free Surface in Spillways

이해균*

Haegyun Lee*

요 지

두 가지 어류 이동용 여수로 설계안에 대하여 유한요소법 기반의 레블셀 기법을 이용하여 흐름을 모의하고 적용성을 검토하였다. 첫 번째 설계안은 저수지에서 여수로로 직각 형태의 유입부를 가지고 있으며, 두 번째 설계안은 부드러운 곡면 형태의 유입부를 가지고 있다. 수치해석 결과를 자유수면의 위치, 압력분포 등의 특성을 중심으로 여수로 수리모형 실험 결과와 비교하였다. 그 결과, 직각 형태의 유입부를 갖는 설계안의 경우, 유입부의 응력분포의 영향으로, 평탄하지 않은 자유수면형과 압력분포를 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 반면에 곡선형태의 유입부를 갖는 여수로의 경우에는 수면형과 압력분포에서 완만한 변화를 보이는 것이 관측되었다. 여수로 정상부에서 대기압보다 작은 부압의 분포는 두 가지 설계안 모두 비슷한 분포를 보였다. 여수로의 출구부에서는 측면부에서는 와류의 영향으로 인하여 수면의 상승을 관찰할 수 있었다. 결론으로서 곡면 유입부 형태의 여수로가 완만한 천이역을 갖고 있으며, 어류이동측면에서 유리함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 유한요소법, 자유수면, 여수로

1. 서론

여수로(spillway)는 댐, 저수지 등으로 부터 월류 흐름을 제어하고 조절하는 중요한 수리구조물이다. 여수로 유입부에서 상류상태(subcritical flow)흐름은 여수로 내부에서 사류(supercritical flow)가 되며 그 후 여수로 하단을 지나 도수(hydraulic jump)를 통하여 에너지를 발산시키며 사류흐름으로 환원되게 된다. 내부의 흐름은 레이놀즈 수가 매우 큰, 복잡한 모습을 보이며, 대체로 수심적분 형태의 천수방정식을 이용한 해석이 아닌 비정수압 분포를 고려한 Navier-Stokes 방정식이 필요한 경우가 많다.

수리구조물에 대한 연구는 주로 실험을 통하여 수행되어 왔으나, 비용이나 상사 법칙을 통한 스케일링 등의 어려움이 항상 지적되어 왔다. 최근 컴퓨터의 속도 및 기억용량의 증가에 따라 상용 전산유체해석(CFD) 코드와 연구용 프로그램의 적용이 계속 보고되는 등 (예를 들면, 김남일 등, 2005), 수치모델에 의한 연구가 이에 대한 대안으로 제시되고 있다.

본 연구에서는 상류에서 하류로의 어류이동을 위한 댐 여수로의, 직각 형상 유입부 (Concept 10) 와 곡면 형상 유입부 (Concept 11)를 갖는 두가지 설계안에 대하여 흐름을 검토하였으며 이를 수리실험 결과와 비교하였다.

2. 수치해석 기법

본 연구에서는 비압축성 이상유동(two-phase)을 위하여 개발된 유한요소법(FEM) 기반의 레블셀 기법 코드를 사용하였다. 비압축성 흐름의 모의는 타원형(elliptic) 연속방정식과 쌍곡선형(hyperbolic) Navier-Stokes 방정식의 결합으로서, 두 방정식을 연결하는 변수가 존재하지 않기 때

* 정회원 · 단국대학교 (천안) 토목환경공학과 전임강사 · E-mail : haegyun@dankook.ac.kr

문에 그 자체로서 어려움이 있으며, 이를 위하여 Fractional Step Method를 사용하였다.

이상유동에 대한 전산유체역학적인 접근방법에서 경계면인 자유수면의 거동을 해석하는 방법으로는, 고전적인 유체역학의 연구 방법 분류와 같이, 크게 오일러식 접근방법(Eulerian approach)과 라그란지식 접근방법(Lagrangian approach)으로 구분할 수 있다. 레블셑 (Level set method) 기법은 UCLA의 Osher와 UC 버클리의 Sethian 등에 의하여 1980년대에 제안되었다 (Osher and Sethian, 1988). 레블셑 기법에서는 확산이 없는 이송방정식의 지시함수(레블셑 함수, ϕ)를 경계면으로 부터 부호가 부여된 최단거리(signed distance)로 정의한다. 물과 공기의 경계면($\phi = 0$)에서 물이 있는 영역은 경계면으로 부터의 거리에 양(+)의 부호를, 공기가 있는 영역은 음(-)의 부호를 부여하는 것이 일반적이다. 초기조건과 경계조건이 주어진 Navier-Stokes 방정식에 의하여 먼저 속도장(velocity field)을 계산하고, 이 속도장으로 레블셑 함수값을 이송시킨다. 이후 이송된 레블셑 함수값이 물과 공기의 경계면으로부터의 거리가 되도록 재구성하는 과정을 재초기화(reinitialization) 또는 재거리화(redistancing)라고 부르며, 각 시간 단계마다 수행하는 것이 보통이다. 적용 모델에 대한 자세한 설명은 Lin et al. (2005)에 기술되어 있다.

3. 모형의 적용

본 연구에서는 개발된 수치모델을 그림 1의 두 여수로 설계안에 대하여 적용하였다. 직각 형상 유입부 여수로 모의에는 1,341,680개 직각형사면체(tetrahedral) 요소와 246,395 노드를 사용하였으며, 곡면 형상 유입부 여수로에는 1,253,449 사면체 요소와 230,307 노드를 사용하였다. 특히 관심영역인 여수로 유입부에는 작은 격자를 사용하였다. 모든 계산은 수리실험의 모형 스케일에 맞게 수행되었으며, 이와 같은 규모에서 보통 그러하듯이 표면장력의 효과를 무시하였다. 계산의 시간간격(Δt)은 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 조건에 맞추어 조정되었다. 두 설계안 모두 유량은 0.191 m^3/s로, 저수조의 수위는 1.8 m에 맞추었다. 계산은 quasi-steady (유사 정상상태)에 이를 때까지 수행되었다.

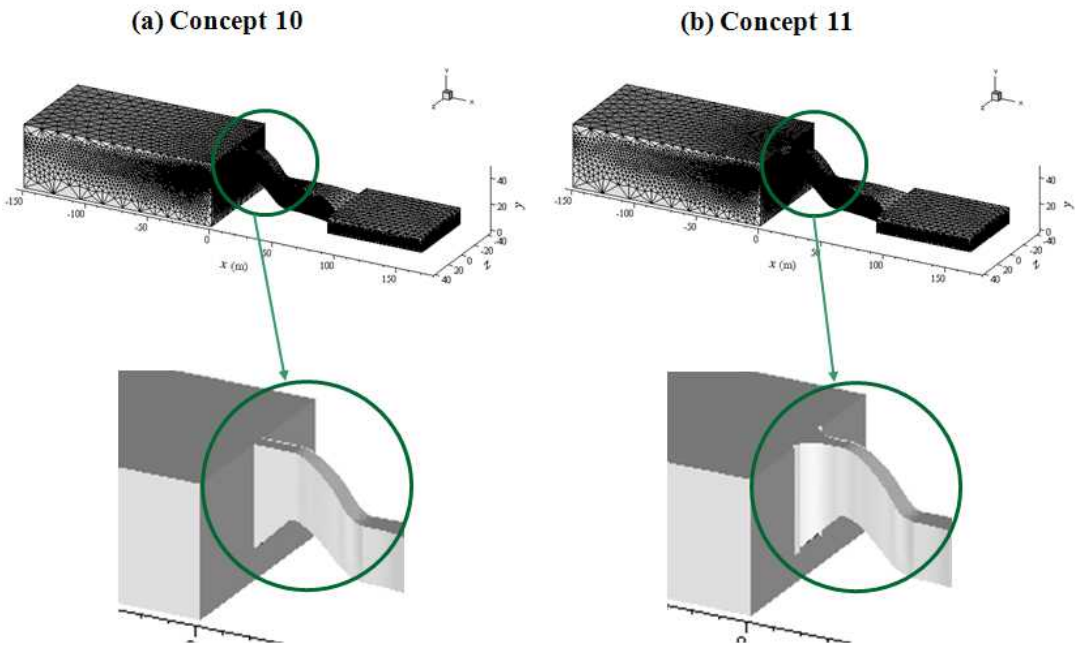

그림 1. 여수로 유입구 형태와 수치해석을 위한 격자

4. 해석 결과 및 검증

4.1 자유수면의 위치와 압력분포

개발된 모형의 검증을 위하여 미국 Iowa 대학 수리실험실 (IIHR-Hydroscience & Engineering)에서 수행한 실험결과(Lee, 2007)와 비교하였다. 그림 2는 여수로 중심선에서 자유수면의 위치를 수치모델의 결과와 수리실험의 결과를 비교한 것이다. 단면의 압력분포는 수치모델에 의한 결과이다. 두 경우 모두 여수로의 정점부에서 대기압 보다 작은 부압(subatmospheric pressure)의 존재를 확인할 수 있다. 그림 3은 저수로 저면의 압력분포를 보인 것이다. 피토 튜브(Pitot tube)에 의한 압력계측은 주로 여수로의 정점을 중심으로 이루어졌으며, 수치모의에 의한 결과와 잘 일치하는 것으로 보인다.

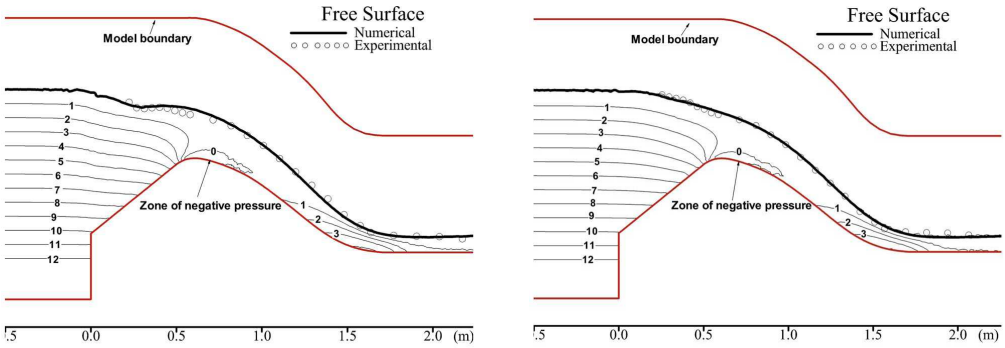

그림 2. 자유수면의 위치와 단면 압력(kPa)분포

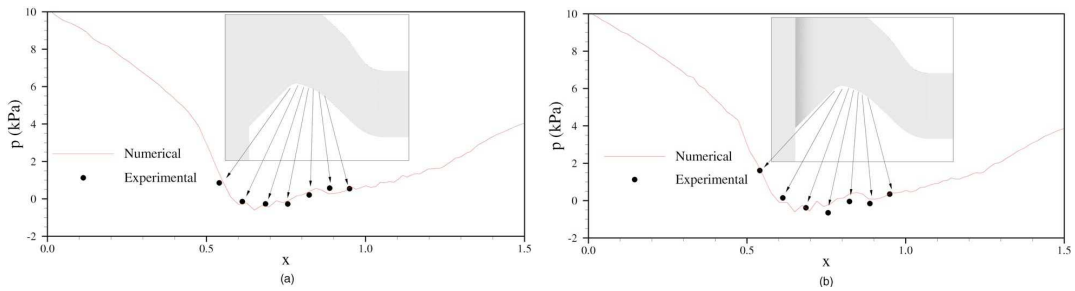

그림 3. 여수로 저면의 압력 분포 비교

4.2 흐름의 변화 및 유입부의 특성

그림 4는 A, B, C, D의 네 단면에서의 자유수면의 위치와 압력분포를 보인 것이다. 각각의단면은 저수조 전면에서 흐름방향으로 (A) 0.01 m, (B) 0.60 m, (C) 2.00 m, (D) 3.60 m 위치에 있다. 단면 C와 D에서는 유입부의 형태와 관계없이 유사한 자유수면의 형태와 압력분포를 보이는 데 비하여, 단면 A와 B에서는 직각 형태 유입구의 경우 다소 큰 곡률을 보임을 확인할 수 있다. 표 1은 그림 4의 각 단면에서의 레이놀즈 수(Reynolds Number)와 프루드 수(Froude Number)를 계산한 것이다. 프루드 수의 변화는 상류(Fr<1)상태에서 사류(Fr>1)상태로, 다시 D 단면 이후의 사류상태로의 변화를 잘 보여준다.

표 1. 각 단면에서의 레이놀즈 수(Re)와 프루드 수(Fr) (평균유속과 연직단면 기준)

Concept 10	Re	Fr	Concept 11	Re	Fr
A	7.520E+05	0.240	A	3.460E+05	0.107
B	7.520E+05	1.229	B	7.520E+05	1.284
C	4.580E+05	3.193	C	4.580E+05	3.015
D	1.310E+05	0.994	D	1.310E+05	1.036

그림 5은 여수로의 유입부의 수평단면에서 두 가지 설계안에 대하여 평균 변형률 $|\overline{S}|$ $(=\sqrt{\overline{S_{ij}}\,\overline{S_{ij}}})$의 크기를 보인 것이다. $\overline{S_{ij}}(=(\partial\overline{u_i}/\partial x_j+\partial\overline{u_j}/\partial x_i)/2)$는 평균변형율 텐서(mean strain rate tensor) 이다. 직각단면 유입부에서 다소 큰 변형률은 바로 흐름으로 인한 저항, 연직방향으로의 속도성분, 압력분포의 급격한 변화, 자유수면의 곡률변화 등의 결과라고 해석될 수 있다. 반면 곡면유입부 여수로는 작은 변형률의 분포를 보이며 저수지에서 여수로 내부로 완만한 천이과정을 보임을 알 수 있다.

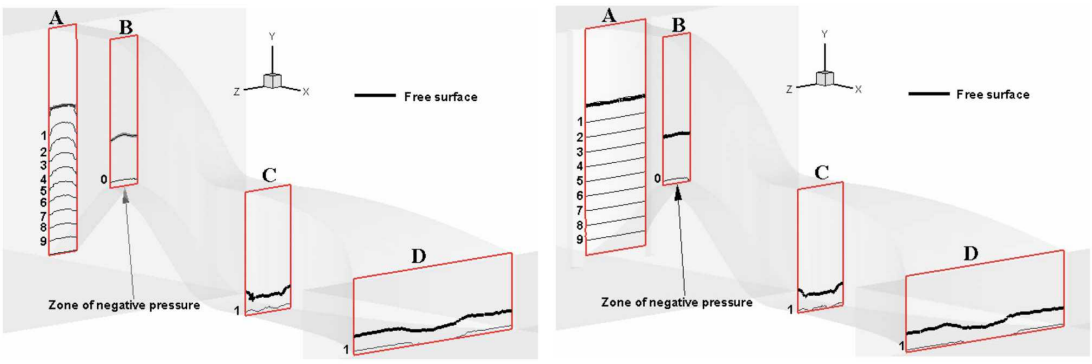

그림 4. 단면(A,B,C,D)별 자유수면 위치와 압력 분포(kP)

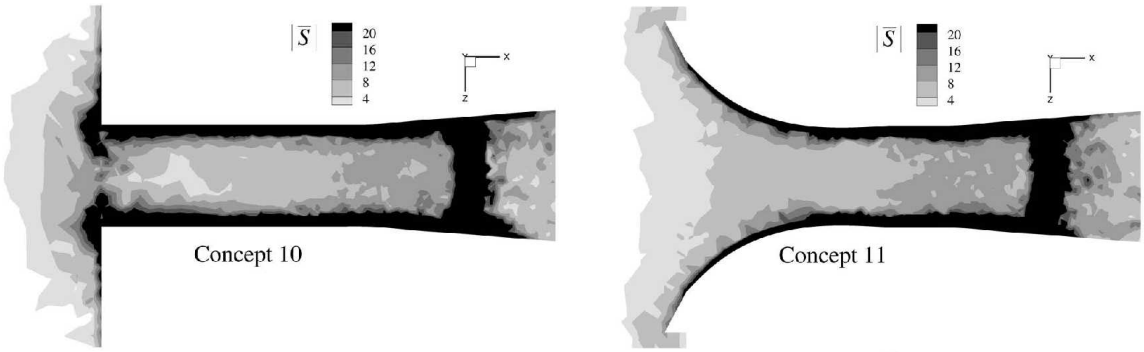

그림 5. 여수로 유입구의 변형률 $|\bar{S}|$ $(=\sqrt{\overline{S_{ij}}\overline{S_{ij}}})$ 비교

5. 결론

직각 유입부와 곡면 유입부를 갖는 두 여수로에 대하여 유한요소법 기반의 레블셑 기법을 이용하여 수치모의를 수행하였다. 여수로 저면의 압력분포, 내부의 자유수면의 위치 등에서 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 내부의 흐름 상태는 두 설계안에서 유사한 결과를 보였지만, 유입부에서는 직각 유입부 여수로에서 다소 큰 응력과 연직방향 속도성분 등, 곡면 유입부 여수로에 비하여 바람직하지 않은 천이과정을 보였다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김남일, 김대근, 이길성, 김달선 (2005). “3차원 수치모의를 이용한 배수갑문의 방류능력 개선효과 분석“, 한국수자원학회논문집, Vol. 38, No. 3, pp.189-198.
2. Lee, H. (2007). “Level-set finite element simulation of free-surface flow”, Ph.D. Dissertation, The University of Iowa, Iowa City, IA.
3. Lin, C.-L., Lee, H., Lee, T., and Weber, L. J. 2005. “A level set characteristic Galerkin finite element method for free surface flows.”″ *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 495, 521 - 547.
4. Osher, S. and Sethian, J. A. (1988). “Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 79, No. 1, pp. 12-49.