

어류 이동용 여수로의 자유수면 수치해석

Numerical Modeling of Free Surface at the Fish Migration Spillways

이해균

단국대학교 천안캠퍼스 토목환경공학과

Haegyun Lee(haegyun@dankook.ac.kr)

요약

두가지 어류이동용 여수로 설계안에 대하여 레벨셋 유한요소법을 이용하여 자유수면을 포함한 흐름을 모의하였다. 댐 상류부에서 여수로 입구 방향으로 직각형 유입부를 갖는 여수로와 곡선형 유입부의 여수로에 대하여 흐름의 형상을 모의, 비교하였으며, 또한, 수치해석 결과를 여수로 바닥면의 압력분포와 자유수면형상에 대하여 수리실험 결과를 통하여 검증하였다. 직각형 여수로가 여수로 유입부에서 자유수면 형상과 압력분포에서 다소 큰 내부 변형율을 보이는 반면, 곡선형 유입부 여수로에서는 작은 변형율을 관찰할 수 있었다. 여수로 정상부의 대기압보다 작은 부압의 존재 형태는 두가지 형상 모두 유사함을 알 수 있었지만, 전반적으로는 곡선형 유입부 여수로가 어류 이동에 유체역학적으로 더 우호적인 환경을 제공할 수 있을 것이다.

■ 중심어 : | 어류관리 | 유한요소법 | 자유수면 | 여수로 |

Abstract

A level-set finite-element method is employed to investigate the free surface flow of two conceptual fish passage designs. While one design has a right-angled entrance from the reservoir to the fish passage chute, the other has a curved-shaped entrance. The numerical results are validated with hydraulic experiments through comparison of the free surface location and the pressure distribution in the spillway. It is observed that the right-angled design yields a curved free surface and pressure distribution in the vicinity of the entrance due to large strains, whereas the curved-shaped design yields a smooth flow transition with small strains. The subatmospheric pressure distributions near the spillway ogee crest for both designs exhibit similar flow patterns. It is concluded that the curved-shaped design is more favorable for fish passage because of the feature of a smooth flow transition with small strains.

■ keyword : | Fish Management | Finite Element Method | Free Surfaces | Spillways |

I. 서론

1. 여수로 흐름 모의

1.1 어류 이동용 여수로

여수로의 댐이나 저수지 제방으로부터 월류 흐름을 조절, 제어하는 중요한 수리 구조물이다. 여수로 내에서

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

접수번호 : #100730-001

접수일자 : 2010년 07월 30일

심사완료일 : 2010년 08월 23일

교신저자 : 이해균, e-mail : haegyun@dankook.ac.kr

흐름은 보통 상류(subcritical flow)에서 사류(supercritical flow)로 급격한 변화를 겪게 되고, 그 후, 다시 도수(hydraulic jump) 등을 통하여 상류 상태로 복귀하게 된다. 이러한 흐름은 매우 복잡하고, 때로는 난류로 인한 주위 공기의 연행(entrainment)을 수반하여, 수질 특성에도 큰 영향을 미치고 있다. 따라서, 이에 대한 연구는 여수로의 기능적인 측면은 물론, 환경공학 적 측면에서도 중요성을 더해 가고 있다.

본 연구에서 대상으로 하는 어류 이동용 여수로는 산란을 위하여 하천의 상류로 이동하는 소하성 어종(anadromous fish)의 치어(juvenile fish)가 다시 하류로 내려올 때, 수력발전용 댐의 터빈 통과를 대신하여 선택할 수 있는 경로로 계획된 것으로서, 미국 Washington 주의 Wanapum 댐 ([그림 1])에 현재 계획 중에 있다.



그림 1. Washington 주에 위치한 Wanapum 댐

1.2 자유수면 모의 기법

수리학에서 다루는 유체 현상은 물과 공기의 경계면인 자유수면을 포함할 때가 많으며 이를 어떤 방식으로 모의할 것인가를 결정하는 것은 물론 문제의 특성에 따라 다르다. 수심에 비하여 수평방향의 규모가 크고, 수표면의 곡률이 작은 경우에는 정수압 가정(hydrostatic assumption)이 적절하지만, 여수로에서의 흐름과 같이 비정수압 분포가 중요한 문제에서는 대체로 수심적분된 천수방정식이 아닌, 네비어-스토크스 방정식(Navier-Stokes equations)에 의존해야 한다.

특성이 다른 두 유체, 예를 들면, 물과 공기, 물과 기름과 같이 섞이지 않는, 특히 기체와 액체가 혼재된 경

우처럼, 상(phase)이 다른 두 유체의 흐름을 이상유동(two-phase flow)이라고 구분하며, 다상 유동(multi-phase flow)의 특별한 예로 분류한다. 자유수면과 같이 경계면을 포함하는 문제는 자연과학 및 공학의 여러 분야에서 나타나며, 이의 해석을 위하여 많은 연구자들이 노력을 기울이고 있다.

이상유동에 대한 전산유체역학(computational fluid dynamics)적인 접근방법에서 경계면인 자유수면의 거동을 해석하는 방법은 오일러식 접근방법(Eulerian approach)과 라그랑지식 접근방법(Lagrangian approach)으로 구분할 수 있다. 라그랑지식 접근방법은 주로 가상적인 유체입자(particle)의 이동에 초점을 맞추고 있다. 대표적인 방법으로 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics, Gómez-Gesteira와 Dalrymple, 2004) 기법이 있다.

최근 많이 사용되고 있는 방법인, 오일러식 접근방법은 다시 계면추적방법(interface tracking method)과 계면포착방법(interface capturing method) 방법으로 구분할 수 있다. 경계일치 좌표계(body fitted coordinate)를 사용하여 자유수면이 해석을 위한 격자의 경계가 되도록 하는 방법이 계면추적방법에 속하는 반면, VOF(Volume of Fluid, Hirt와 Nichols, 1981)와 본 논문에서 소개할 레벨셋 기법(Level Set Method)을 대표적인 계면포착방법으로 분류할 수 있다.

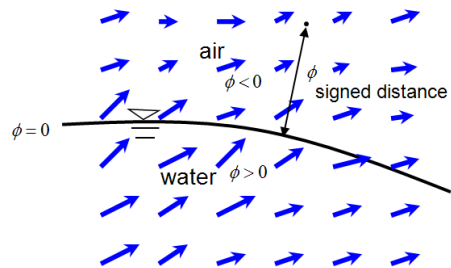


그림 2. 속도장과 레벨셋 함수

VOF 기법의 경우, 국내에서는 오병동 (2004) 등이 상용 CFD(전산유체역학) 코드인 FLOW-3D를 이용하여 파살플룸(Parshall flume)에서의 자유수면을 모의하였으며, 김대근 등 (2004)은 여수로의 흐름 해석에 적용한

바 있다. 본 연구에서 채택하고 있는 레벨셀 (Level set method) 기법은 UCLA의 수학자인 Stanley Osher와 캘리포니아 대학 버클리의 James Sethian 등에 의하여 1980년대에 제안되었다 (Osher와 Sethian, 1988). 레벨셀 방법과 VOF 방법은 기체와 액체의 경계면의 모의를 위하여, 다음과 같이 확산항이 없는 이송방정식 (advection equation)을 의존한다 ([그림 2]).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 레벨셀 함수, \mathbf{u} 는 속도장(velocity field)이다. 레벨셀 함수는 일종의 지시함수(indicator function)로서 자유수면(경계면)으로부터 부호(물에 대하여 (+), 공기에 대하여 (-))가 있는 거리를 나타내는 함수이다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 물과 공기의 경계면처럼, 섞이지 않는 (immiscible) 두 유체의 모의를 위하여 경계면의 번짐(smearing)이 없도록, 확산항이 없다. VOF 기법에서 이를 수치격자내에서 서로 다른 유체의 부피 구성비(volume fraction)를 나타내는 일종의 지시함수의 이송방정식으로 해석하였고, 레벨셀 기법에서는 이를 자유수면에 대한 운동학적(kinematic) 경계조건의 적용이라는 관점에서 출발하였을 뿐이다.

본 연구에서는 어류 이동을 위한 여수로의 바람직한 특성으로서 다음 두가지 흐름 특성에 주목하였다. 첫째, 흐름의 방향과 크기에 큰 변화가 없이 부드럽게 저수지에서 여수로로 연결되어 어류의 유인에 유리하여야 한다. 둘째, 여수로 정상부 (ogee crest) 저면의 부압(subatmospheric pressure) 발생 부위의 크기가 작아 어류의 이동에 저항이 작고, 공동현상(cavitation)의 가능성을 줄여야 한다. 이를 위하여 두가지 설계안, 즉 직선형 유입부 여수로와 곡선형 유입부 여수로에 대하여, 유한요소법 기반의 3차원 Navier-Stokes 방정식 해석 코드와 레벨셀 알고리즘을 이용하여 모델링하고 이를 수리 실험 결과와 비교하였다.

II. 모델의 적용 및 분석

1. 모형의 특성

1.1 유동 모의 기법

레벨셀 함수의 이송방정식의 해를 구하기 위해서는 먼저 속도장을 구하여야 한다. 비압축성 흐름을 기술하는 네비어-스토크스(Navier-Stokes) 방정식과 연속방정식(continuity equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \mathbf{g}_i - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

여기서 \mathbf{u} 는 속도장을, p 는 압력을, \mathbf{g}_i 는 중력을 나타낸다. ρ 와 ν 는 각각 유체의 밀도와 동점성계수이다. 또한, 난류 모의를 위하여 대와류모의 (LES Subgrid Model) 기법(Smagorinsky, 1963)을 적용하였다. 일반적으로 비압축성 네비어-스토크스 방정식인 식 (2)는 쌍곡선형/포물선형 편미분 방정식인 반면, 연속방정식인 식(3)은 타원형 방정식으로서, 두 종류의 방정식이 결합된 연립방정식의 수치해를 구하는 것은 압축성 유동에 비하여 정교한 알고리즘이 필요한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 방정식의 공간적 이산화を 위하여 유한요소법을, 시간적 적분을 위하여 단계적 기법(fractional step method)를 사용하였으며, 개발된 모델의 상세한 특징에 대해서는 Lee (2007)에 설명되어 있다.

1.2 레벨셀 이송방정식

레벨셀 함수(ϕ)의 이송방정식은 식 (1)과 같다. 매 시간 단계(time step)마다 흐름장(velocity field)을 계산하고, 레벨셀 이송방정식을 이용하여 새로운 자유수면의 위치를 계산하여야 한다. 자유수면의 위치가 결정되면, 이에 따라 각 계산 영역에 속한 유체의 밀도, 점성 등 물리적 특성을 갱신(update)하여야 한다.

레벨셀 이송방정식으로 새로운 자유수면의 위치를 포착해 나갈 때, 레벨셀 함수값은 자체 경사(slope)의 완급화(steeptening and flattening)에 의하여 원래의 부호가 있는 거리(signed distance) 값을 유지하지 못한다 (Osher와 Sethian, 1988). 따라서, 유체의 경계면 ($\phi = 0$)을 유지하며, 재초기화(reinitialization) 과정을

통하여, 레벨셀 값을 다시 부호가 있는 거리 값으로 복원할 필요가 있다. 즉, 경계면으로부터의 구배가 1이 되도록, 본 연구에서는 다음과 같은 편미분 방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + s(\psi_0)(|\nabla \psi| - 1) = 0 \quad (4)$$

여기서 $\psi_0(\mathbf{x}, \tau = 0) = \phi(\mathbf{x}, t)$ 이며, $s(\psi_0)$ 는 부호함수(sign function)이다. τ 는 편의상 도입한 유사 시간(pseudo-time)이다. 재초기화 완료 후 다시 $\psi_0(\mathbf{x}, \tau)$ 는 레벨셀 함수 $\phi(\mathbf{x}, t)$ 로 환원된다.

2. 수리 실험 (Hydraulic Experiment)

수리실험은 1:24의 축소 무왜곡 모형(undistorted model)으로 미국 아이오와 대학 수리실험실(IIHR - Hydraulics and Engineering)에서 수행되었다. 정수압이 아닌 비정수압(non-hydrostatic)분포와 관계된 수리 구조물에 대한 실험은 무왜곡 모형으로 수행되어야 하며, 모형의 제원과 유량은 모두 Froude 상사법칙에 따라 정확하게 축소되었다. 실험에 관한 자세한 사항은 Lyons 등(2005)에서 기술하고 있다.

3. 수치모델 적용

3.1 계산 격자

직각형 유입부와 곡선형 유입부를 가진 두 설계안에 대하여 [그림 3]와 같이 격자 생성 상용 프로그램인 GAMBIT (FLUENT, Inc., 2003)을 사용하여 계산 격자를 구성하였다. 직각형 유입부 여수로에 대하여 1,341,680 개의 사면체(tetrahedral element)요소와 246,395 절점(node)을, 곡선형 여수로에 대하여 1,253,449개의 사면체 요소와 230,307 절점을 사용하였다.

3.2 초기조건 및 경계조건

초기조건(initial condition)으로서 계산 격자 영역 내의 모든 유속은 0으로 초기화되었으며, 수조(head box)의 유입 경계조건으로는 자유수면 이하에 균일한 유속을 적용하였다. 여수로 출구의 유출 경계조건으로서 속도와 압력 등 제반 변수의 출구 방향 경사가 0

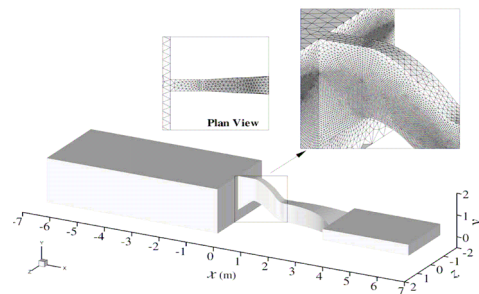
(gradient-free boundary condition)이 되도록 하였으며, 속도 성분은 다시 계산 영역 내의 질량이 보존되도록 크기를 재조정(rescaling)되었다. 다른 모든 계산 영역의 경계에는 유체의 속도가 0인 점착조건(no-slip boundary condition)을 적용하였다.

3.3 수치모델의 적용 및 분석

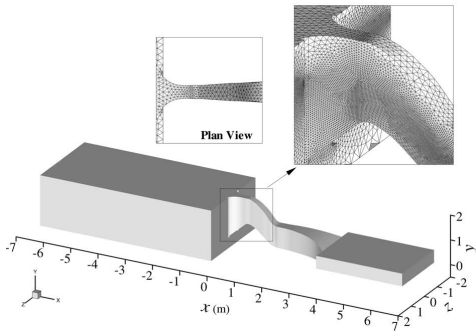
[그림 4]는 직각형 유입부 여수로에서 초기에 가두어진 수체가 여수로 수로(shute)를 통하여 흐르는 과정을 모의한 것이다. 그 후 준정상 상태(quasi-steady state)에 도달할 때까지 계산을 진행한 후 일정 시간동안 평균하여 자유수면의 위치와 압력분포를 구하였다 ([그림 5]). 수리 실험(hydraulic experiment)에 의하여 구한 자유수면의 위치와 비교하여 두가지 형태 여수로 모두 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

[그림 5]에 보인 바와 같이 직각형 유입부 여수로에서는 유입부에서 수위저하를 관찰할 수 있는 반면, 곡선형 여수로에서는 수위저하 없이 부드럽게 흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 두가지 형태 여수로 모두 저수지 내부에서 정수압 형태 압력분포가 여수로 유입부에서 곡면형으로 변화하며, 여수로 정상부(ogee crest)에서는 부압(대기압보다 작은 압력, sub-atmospheric pressure)의 발생 영역을 관찰할 수 있었다. 부압 발생 영역의 크기는 두가지 여수로 설계안에서 대체로 같은 크기를 보이고 있다.

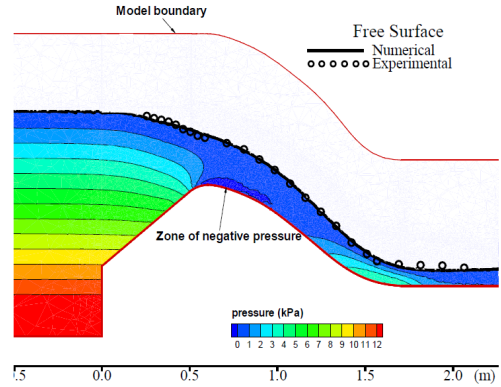
[그림 6]는 직각형 여수로에서 저면(바닥면)의 압력 분포를 수리실험에서 피토 관(Pitot tube)로 구한 압력과 비교한 것이다. 대체로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.



(a) 직각형 유입부 여수로



(b) 곡선형 유입부 여수로
그림 3. 여수로 형상과 수치 격자



(b) 곡선형 유입부 여수로

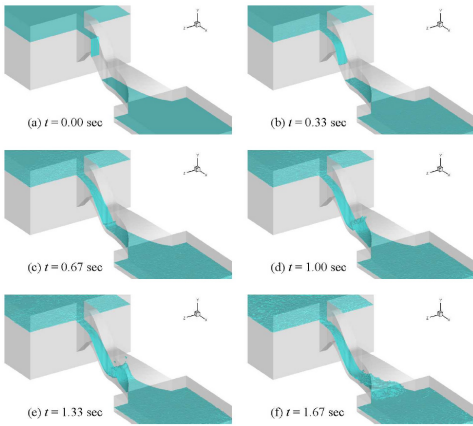


그림 4. 직각형 여수로 내부의 자유수면 변화

그림 5. 여수로 중심선에서의 수직 압력 분포

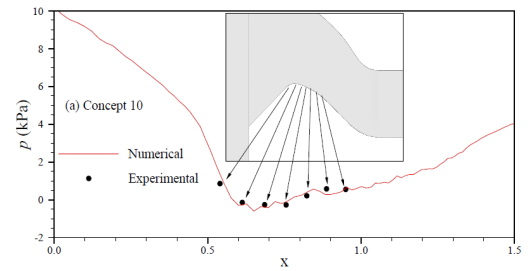
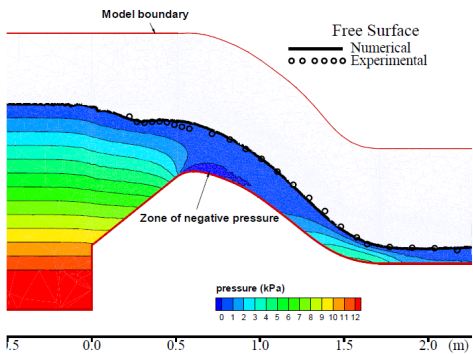
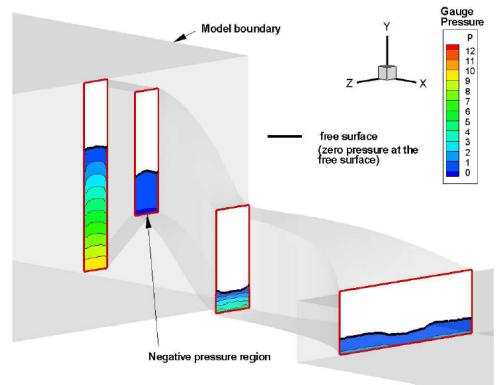


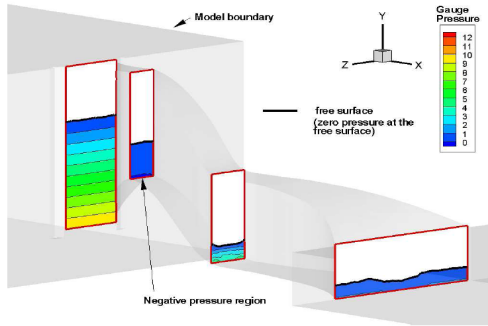
그림 6. 직각형 여수로의 저면 압력 분포 - 수치 모델과 수리 실험에 의한 값의 비교



(a) 직각형 유입부 여수로



(a) 직각형 여수로



(b) 곡선형 여수로

그림 7. 자유수면과 단면 압력분포(kPa) - 단면 위치 (여수로 시작면으로 부터의 거리): (A) $x = 0.01$ m; (B) $x = 0.60$ m; (C) $x = 2.00$ m; and (D) $x = 3.60$ m

[그림 7]은 4개 흐름 단면 (A, B, C, D)에서 자유수면의 위치와 압력의 분포를 나타낸 것이다. [표 1]은 [그림 7]의 각 단면에서 레이놀즈 수(Reynolds number)와 프루드 수(Froude number)를 정리한 것으로서, 매우 큰 레이놀즈 수 (500 이상)로 판단할 때 흐름은 모두 난류 영역에 속함을 알 수 있다. 흐름은 프루드 수가 1보다 작은 상류(subcritical flow)에서 1보다 큰 하류(supercritical flow)로, 다시 상류로 변화하고 있음을 보이고 있다. 직각형 여수로의 단면 A, B 에서 자유수면과 압력분포가 위로 볼록한 곡선을 갖고 있는 반면, 곡선형 여수로 에서는 평행한 선형 형태를 보임을 확인할 수 있다. 이러한 차이를 이해하기 위하여 하나의 지표로서 다음과 같이 유체흐름의 변형율을 비교하였다.

$$|\bar{S}| = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

표 1. 여수로 흐름 단면에서 레이놀즈 수 (Re)와 프루드 수 (Fr) - (수심 기준)

직각형 여수로	Re	Fr
A	7.520E+05	0.240
B	7.520E+05	1.229
C	4.580E+05	3.193
D	1.310E+05	0.994
곡선형 여수로	Re	Fr
A	3.460E+05	0.107
B	7.520E+05	1.284
C	4.580E+05	3.015
D	1.310E+05	1.036

여기서 평균변형율 텐서는 $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 로 정의한다. [그림 8]은 유입부 단면(수조 저면으로부터 1.4 m)의 $|\bar{S}|$ 의 분포를 보인 것이다. 직각형 여수로의 경우 큰 변형율과 이로 인한 흐름 저항, 상향 속도 성분으로 어류 이동에 좋지 않은 흐름 환경을 보이고 있다. 이에 비하여 곡선형 여수로는 어류 이동에 상대적으로 우호적인 조건을 조성하고 있음을 알 수 있다.

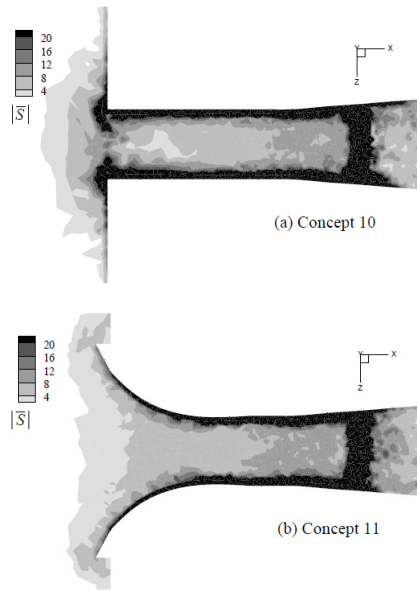


그림 8. 변형율($|\bar{S}|$) 분포 ($y = 1.2$ m), (a) 직각형 여수로; (b) 곡선형 여수로

III. 결론

본 연구에서는 직각형 유입부와 곡선형 유입부를 가진 어류 이동용 여수로의 자유수면 흐름을 레벨셀 유한요소법을 이용하여 모의하였으며, 수치해석 결과는 수리 실험을 통하여 검증되었다.

여수로 저면의 압력분포의 경우 두가지 형태 설계안에 대하여 모두 수치해석 및 실험 결과에서 유사한 양상을 보임을 관찰할 수 있었다. 다만, 직각형 설계안의 유입부에서 다소 큰 변형율과 상향 속도 성분을 관찰할

수 있었다. 따라서, 직각형 유입부 여수로가 제작 측면에서는 용이하지만, 곡선형 유입부 여수로가 댐 상류에서 여수로 방향 흐름에서, 자유수면 형상, 변형을 측면으로 볼 때, 어류 이동에 보다 유체역학적으로 유리한 흐름 환경을 제공함을 알 수 있다.

참고 문헌

[1] 김대근, 이재형, 서일원, “교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의”, 한국수자원학회논문집, 제37권, 제5호, pp.675-685, 2004.

[2] 오병동, 김경호, 이환기, 안상도, “FLOW- 3D에 의한 과살플룸 흐름 해석”, 한국수자원학회논문집, 제37권, 제5호. pp.375-375, 2004.

[3] FLUENT, Inc., *FLUENT 6.3 User's Guide*, 2003.

[4] M. Gómez-Gesteira and R. A. Dalrymple, “Using a 3D SPH method for wave impact on a tall structure, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, Vol.130, No.2, pp.63-69, 2004.

[5] C. W. Hirt and B. D. Nichols, “Volume of fluid (VOF) methods for the dynamics of free boundaries,” J. Comput. Phys., Vol.39, pp.201-225, 1981.

[6] H. Lee, “Level-Set Finite Element Simulation of Free-Surface Flow,” Doctoral dissertation, The University of Iowa, Iowa City, 2007.

[7] T. C. Lyons, P. E. Haug, P. M. Carrica, and L. J. Weber, “Hydraulic model studies for fish diversion at Wanapum/Priest Rapids development. XXII: Model studies of a future unit fish bypass for Wanapum Dam,” Limited Distribution Rep. No.325, IIHR Hydroscience and Engineering, Iowa City, Iowa, 2005.

[8] S. Osher and J. A. Sethian, “Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms

based on Hamilton-Jacobi formulations,” J. Comput. Phys., Vol.79, No.1, pp.12-49, 1988.

[9] J. Smagorinsky, “General circulation experiments with the primitive equations I: The basic equations,” Mon. Weather Rev., Vol.91, pp.99-164, 1963.

저자 소개

이 해 균(Haegyun Lee)

정희원



- 1995년 2월 : 서울대학교 토목공학과(공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과(공학석사)
- 2007년 7월 : 미국 아이오와 대학교 토목공학과(공학박사)

▪ 2009년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 천안캠퍼스 토목환경공학과 전임강사

<관심분야> : 수리학, 전산유체역학, 수자원공학