아이스하버식 어도 내 수리특성에 관한 수치해석연구

고 선 호,¹ 최 학 규,¹ 이 희 범,^{*2} 이 신 형¹

¹서울대학교 조선해양공학과 ²서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

NUMERICAL ANALYSIS OF THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF ICE-HARBOR TYPE FISHWAY

S.H. Ko, H.K. Choi, H.B. Lee*2 and S.H. Rhee1

¹Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National Univ.

²Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National Univ.

A fishway is a structure on or around artificial and natural barriers, such as dams, locks and waterfalls, to help fishes' natural migration. In this paper, a computational fluid dynamics (CFD) code, termed SNUFOAM is used to analyze vertical hydraulic characteristic of rollway of fishway. Volume-of-fluid (VOF) method was used to handle free-surface. It is important to determine the factors influencing flow characteristics in fishway because fish use directional information from the flow characteristics to navigate through fishway. Fishway was modeled in 2-D and the influence of the stream velocity, slope, and weir height of fishway was tested. In results, the transition Reynolds number was $2 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$.

Key Words: 전산유체역학(CFD), 아이스하버식 어도(Ice-Harbor Type Fishway), 어도 내 흐름특성(flow characteristics in fishway), 스누폼(SNUFOAM)

1. 서 론

어도는 하천을 가로막는 수리구조물에 의하여 이동이 차단 또는 억제된 경우에 물고기를 포함한 동물의 소상을 목적으로 만들어진 수로 또는 장치를 총괄한다. 어도의 형식은 크게 풀 형식, 수로 형식, 조작 형식으로 나뉘며, 비교적 최근까지 격벽식 어도가 많이 설치되었고, 최근에는 아이스하버식 어도 가 많이 설치되고 있다(Fig. 1). 그러나 국내에 기 설치된 어 도의 경우 다양한 어류가 소상하기 어렵게 설계된 경우가 다 수 나타나고 있다. 어도를 이용하는 목표어종에 대한 연구가 부족하고 어도를 이용하는 어종들의 도약력과 유영력에 대한 정보가 부족하여 목표어종의 소상능력을 고려하지 못하고 설 계가 되었고, 어도 설계에 관한 수리학적인 연구가 미흡하여 어도 내 수리특성 분석 자료 및 설계기준이 명확히 제시되어

Received: June 5, 2015, Revised: August 21, 2015, Accepted: August 25, 2015.

* Corresponding author, E-mail: claid1@snu.ac.kr DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.3.15 © KSCFE 2015

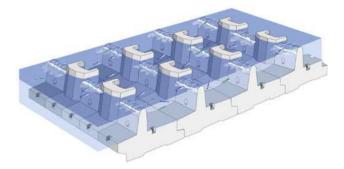


Fig. 1 Ice-Harbor type fishway

있지 않다[1]. 어도의 기능을 원활히 유지 및 수행하기 위해서는 어도 내의 수리학적 특성을 대상 어류 종에 대해 적합하도록 설계하는 것이 가장 중요하며, 어류가 어도를 통하여상류로 소상함에 있어 적절한 흐름구조가 형성되어야 한다. Baek[2]은 낙동강 달성보에 설치된 아이스하버식 어도를 모델 링하여 유량이 변화함에 따라 어도 내 흐름특성이 어떻게 변화하는지를 전산유체역학을 이용하여 분석하였으며, Lee and Ahn[3]은 금호강 안심습지에 위치한 아이스하버를 모델로, 어

도의 기울기가 2%에서 5%로 변화함에 따라 수평흐름특성이어떻게 변화하는지를 분석하였다. 이 때 어도의 기울기는 월류부(rollway) 격벽간 거리 대비 월류부의 높이를 백분율로 나타낸 것이다. 하지만 Lee and Ahn[3]의 논문에서는 어도의 기울기 변화와 수직흐름특성의 관계에 대한 분석은 수행되지않았다. 따라서 본 연구에서는 어도의 기울기가 변화함에 따라 어도 내의 수직흐름특성이 어떻게 변화하는지 파악하고,더 나아가 월류부 높이와 유속이 어도의 수직흐름특성에 어떤 영향을 미치는지에 대해 분석할 것이다. 계산 기법은 선행연구를 참고하여 VOF 기법을 사용해 자유수면을 처리하였다.

2. 계산 방법

2.1 자유수면 기법

본 연구에서는 Volume-Of-Fluid(VOF) 기법을 이용하여 자유수면을 처리하였다. VOF 기법은 경계면포착기법으로 검사체적 내에서 액상이 차지하고 있는 비율을 0에서 1 사이의체적분율로 표현하는 기법이며 기본적으로 질량보존을 만족한다는 장점을 가지고 있다. 체적분율 α 는 물의 경우에는 1, 공기의 경우에는 0을 가지게 된다. 자유수면의 유동은 식 (1)의 이송방정식을 통해 구할 수 있다[4].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla \alpha + \nabla \cdot (\underline{u}_{c}\alpha(1 - \alpha)) = 0 \tag{1}$$

좌변의 세 번째 항은 경계면 압축 기법을 적용한 것으로 자유수면에서 발생하는 오류확산을 줄이기 위하여 도입하였다. 이 항은 상경계면이 존재한다고 판단되는 $0<\alpha<1$ 에서만 작동하며 식 (2)로 주어진다.

$$\underline{u_c} = C_a |\underline{u}| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \tag{2}$$

여기서 $\underline{u_c}$ 는 artificial velocity로 상경계면의 법선 방향으로 오류확산이 발생한다고 가정했을 때 확산 속도를 의미한다. 본 연구에서는 Rusche[5]의 선행 연구를 참고하여 C_a 를 0과 1 사이의 상수로 놓아 계산 영역 전체에 같은 수준의 경계면 압축을 사용하였다.

3. 문제 정의

3.1 어도 내 흐름 특성

어류는 소상과 강하 시에 흐름에 대한 지향성을 가지므로

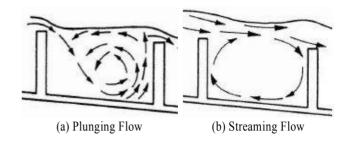


Fig. 2 Hydraulic Characteristics in Fishways

어도 내 흐름특성에 영향을 주는 요인을 파악하는 것은 중요하다. Clay[6]는 어도 내 흐름특성을 표면류(streaming flow)와 잠입류(plunging flow) 두 가지로 구분하였다(Fig. 2). 표면류의경우 유영력이 강한 어종에게 더 적합하며, 잠입류는 낙하하는 흐름이므로 도약력이 약한 어종에게는 부적합하다. 국내에는 유영력과 도약력이 약한 잉어, 붕어, 메기, 미꾸라지에서부터, 유영력과 도약력이 상대적으로 강한 은어, 연어, 황어 등이 있다. 표면류의 경우 어류는 종종 상류방향을 잃어버리고소상을 실패하지만, 잠입류의 경우 어류는 보다 쉽게 소상할수 있어 어도 내의 적절한 흐름구조라고 할 수 있다.

3.2 어도 내 유동 해석 조건

본 연구에서는 국토해양부의 하천설계기준[7]에서 제시한 표준 아이스하버식 모델의 규격을 따랐으며, 월류부 유속과 어도의 기울기 또한 국토교통부에서 제정한 하천설계기준을 따랐다. 하천설계기준에는 어도내의 유속은 0.5 ~ 1.0 m/s로 하고(29장 1절 4조)[7], 모든 어도의 기울기는 5%보다 완만하게 조성해야 하며(29장 3절 3조)[7], 월류수심은 0.1 m으로 유지(29장 3절 3조)[7]하라고 명시되어 있다. 여기서 어도의 기울기란 어도의 입구와 출구의 높이 차이와 어도의 길이의 비로 한다(29장 3절 3조)[7].

월류부 높이 h와 흐름특성간의 관계를 분석할 때는 표준 높이인 0.5 m에서 0.1 m 씩을 줄이며 0.2 m에서 0.5 m 사이를 0.1 m 간격으로 시뮬레이션을 수행하였고, 유속은 0.5 m/s와 1.0 m/s 사이에서 0.1 m/s 간격으로 시뮬레이션을 수행하였다. 어도 내 기울기의 변화에 따른 어도 내 흐름특성 변화를 분석할 때는 국토해양부의 기준을 따르면서 Rajaratnam[9]의 선행연구와 실험결과를 비교하기 위해 월류부 높이를 0.5 m로 고정하였다. 유속은 규정대로 0.5 m/s와 1.0 m/s 사이에서 0.1 m/s 간격을 두었다. 그리고 기울기는 기울기와 흐름특성 사이의 뚜렷한 경향성을 확인하기 위해 규정 내의 2%, 5%와 규정을 초과한 7%, 10%의 조건하에서 수행하였다. 또 물이 월류부를 넘어갈 때의 수심인 월류수심을 0.1 m 이하로 유지(29장 3절 3조)하기 위해서 초기조건을 평형 상태에 도달했을 때 월류수심의 높이가 0.1 m가 되게끔 하였다. 모든 시뮬레이션에

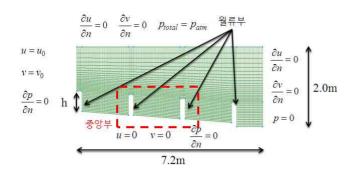


Fig. 3 Computational domain and grid

서 중앙 칸이 평형 상태에 도달하였음을 확인하였다.

본 연구에서는 자유수면을 처리하기 위하여 SNUFOAMedWAVE2d를 이용하였다. 이 해석자는 오픈소스 CFD 라이브 러리인 OpenFOAM을 기반으로 개발되었으며 VOF법을 이용 하여 다상유동을 해석할 수 있다. 해석에 사용된 격자는 정렬 격자를 사용하였으며 상용 격자 생성 프로그램인 그리드젠 (Gridgen)을 이용하였다. Lee and Ahn[3]의 선행연구를 참고하 여 유체가 유입되는 부분에서 유출되는 부분까지 일정 간격 으로 길이방향 184개, 높이방향 41개로 총 7544개의 격자로 구성하였다(Fig. 3). 해석에 사용된 속도 경계조건으로는 유입 부에서 Dirichlet 타입, 유출부에서 Neumann 타입의 경계조건 을 사용하였고 압력 경계조건으로는 유입부에서 Neumann 타 입, 유출부에서 Dirichlet 타입의 경계조건을 사용하였다. 외부 공기와 연결된 상부는 전압조건을 사용하여 대기압을 맞추었 으며 벽면은 점착조건, 그리고 어도를 자른 단면은 대칭조건 으로 설정하였다. 어도 내의 흐름특성은 벽 주위의 복잡한 난 류유동을 수반하므로 SST k-w 난류모델을 적용하였다[8]. 무 차원값 계산을 위한 특성 길이로는 월류부 높이 h를 사용하 였다. 분석에 사용한 격자와 해석자에서 사용한 물리량은 Table 1, 2에 나타나 있다. 월류부의 길이는 1.8 m 이고 두께 는 0.2 m를 사용하였다.

Table 1 Comparing River Design Criteria and quantities used in test

	River design criteria	Simulation	
Slope	less than 5%	2% ~ 10%	
Rollway height	less than 0.5 m	$0.2 \text{ m} \sim 0.5 \text{ m}$	
Flow velocity	$0.5 \text{ m/s} \sim 1.0 \text{ m/s}$	$0.5 \text{ m/s} \sim 1.0 \text{ m/s}$	

Table 2 Test condition in fishway

Fluid type	Density (kg/m^3)	Viscosity $(N \cdot s/m^2)$	Gravity (m/s^2)
Water	1,000	0.001	0.0
Air	1	1.48×10^{-5}	9.8

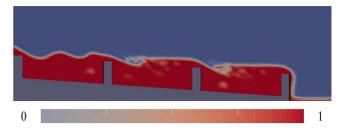


Fig. 4 Free-surface flow around fishway(top) and Volume fraction bar(bottom)

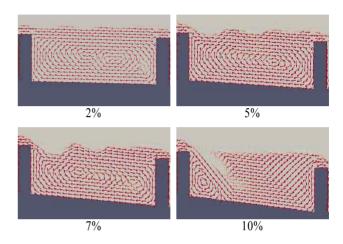


Fig. 5 Comparison of the flow characteristics in fishway with different slope

4. 해석 결과 및 토의

4.1 어도의 기울기 변화에 따른 어도 내 흐름특성 변화 및 선행 연구와의 비교

Fig. 4는 어도 내 물의 흐름을 나타내고 있으며 체적분율로 표현하였다. 상류에서 하류로 물이 흘러가는 과정에서 어도 내 물의 흐름에 따라 물속에 공기상이 일부 남아있으며점차 사라지게 된다.

Rajaratnam[9]은 다발격자법과 물감투입방법(Dye-injection method)를 이용하여 풀 형식 어도에서 기울기를 2% 5% 10% 15%로 변화시키며 어도 내 흐름특성을 실험적으로 관찰하였다. Rajaratnam[9]은 어도의 기울기가 증가할수록 잠입류에서 표면류로 천이가 일어나는 속도가 커졌으며, 특히 15%에서는 상대적으로 큰 속도에서도 잠입류의 흐름특성을 띠었다고 언급하였다. 본 연구에서는 유속을 0.5 m/s로 고정시킨 후 기울기 2%, 5%, 7%, 10%에서 시뮬레이션을 수행하였다(Fig. 5).

결과 파일은 공개 소프트웨어인 파라뷰(Paraview) 4.2.0를 사용하여 분석하였다. Fig. 5는 Fig. 3의 중앙부에서의 모습이 며 기울기가 증가할수록 중앙 칸 내 와류의 중심이 점점 유입부로 이동하며 7%에서는 표면류와 잠입류의 중간 상태가

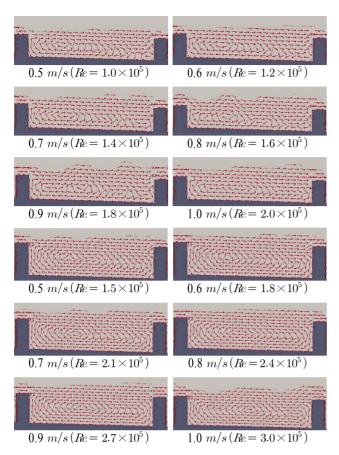


Fig. 6 Comparison of the flow characteristics in fishway with different weir-height h. h = 0.2 m(top). h = 0.3 m(bottom)

되고, 10%에서는 완전한 잠입류의 흐름 특성을 띤다. 기울기 10%일 때는 속도를 0.1 m/s 간격으로 0.5 m/s에서 1.0 m/s 사이에서 시뮬레이션을 수행하였는데, 모두 잠입류의 흐름특성을 띠었다. 이는 Rajaratmam[9]의 실험결과와 같은 경향성을 가지며, 특정 기울기 이상에서는 상대적으로 큰 속도에서도 잠입류의 흐름특성을 띤다는 점 또한 유사하다. 이는 본 연구의 해석결과가 실제 어도 내 흐름특성을 잘 모사하고 있음을 의미한다.

4.2 어도의 월류부 높이와 유속의 변화에 따른 어도 내 흐름특성 변화

유속과 월류부 높이 h를 변화시키며 총 24가지의 유동 케이스를 해석하였으며 중앙부에서의 결과를 기준으로 하였다. 각각의 화살표의 방향은 해당 지점에서 유체의 속도를 의미하며, 화살표의 색은 체적분율 수치를 의미한다. 색에 따른 체적분율 수치는 Fig. 4에 나타나 있다. 여기서 화살표의 길이는 유속과는 무관하다. 레이놀즈수 계산을 위한 특성 길이로는 월류부 높이 h를 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 6와

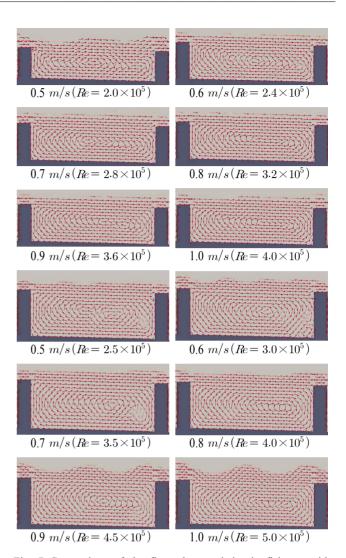


Fig. 7 Comparison of the flow characteristics in fishway with different weir-height h. h = 0.4 m(top). h = 0.5 m(bottom)

Fig. 7에 나타나 있다.

h = 0.2 m일 때는 속도가 증가할수록 점점 수면의 파고와 파장이 커지고 어도 내 흐름이 불안정해졌으며, 0.5 m/s ~ 1.0 m/s에서 모두 잠입류의 흐름특성을 띤다. 속도가 증가할수록 와류의 중심이 오른쪽으로 이동하는 것으로 보아 1.0 m/s 이 상의 속도에서 표면류로의 천이가 일어날 것이라고 예상된다.

h = 0.3 m일 때는 잠입류에서 표면류로 천이가 일어나고 있다. 속도 1.0 m/s부터는 표면류로 완전히 천이가 일어났다. h = 0.3 m일 때 흐름특성은 속도변화에 민감한데, 이유는 천이구간이기 때문이라고 생각한다. 역시 속도가 증가할수록 점점 수면의 파고와 파장이 커지고 어도 내 흐름이 불안정해지며, 와류의 중심이 조금씩 우측으로 움직인다. 그러나 수면 아래 1.0 m/s 이상의 속도에서는 잠입류보다는 표면류의 흐름특성이 명확하게 나타나고 있다.

h = 0.4 m와 0.5 m일 때는 완전한 표면류의 흐름특성을 띠며 속도에 따른 흐름특성의 변화가 미미하다. 마찬가지로 속도가 증가할수록 점점 수면의 파고와 파장이 커지고 어도 내 흐름이 불안정해지며, 와류의 중심이 조금씩 우측으로 움 직인다.

이상의 결과를 종합해 보았을 때, 어도 내 흐름 특성은 레이놀즈수와 밀접한 관련이 있음을 확인하였고, 천이는 레이놀즈수 $2.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ 범위에서 일어난다고 볼 수있으며, 레이놀즈수가 3.0×10^5 이상일 때는 깨끗한 표면류의 흐름특성을 가짐을 확인했다. 이러한 레이놀즈수의 영역은 완연한 난류의 영역은 아니지만 월류부에 의해 다소 높은 난류강도를 가지는 상태이므로 난류 모델의 고려는 타당할 것으로 생각된다[10]. 또한, 어도 내 흐름특성이 레이놀즈수의 영향을 받는다는 것은 어도의 각 칸이 월류부 벽으로 막혀있어 수면파의 영향을 받지 않기 때문이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 아이스하버식 어도의 월류부를 2차원으로 모델링하여 월류부 높이, 유속, 어도의 기울기가 어도 내 흐 름특성에 미치는 영향을 분석하였고 잠입류에서 표면류로 천 이가 일어나는 레이놀즈수를 구하였다. 이에 대한 자세한 내 용은 다음과 같다.

- (1) 어도의 기울기가 증가함에 따라 어도 내 흐름특성은 표면 류에서 잠입류로 천이가 일어남을 확인하였고, 경향성과 수치는 선행연구에 부합하는 수준이었다.
- (2) 고정된 월류부 높이에서 유속이 빨라질수록 잠입류에서 표면류로 천이가 일어남을 확인하였다.
- (3) 월류부 높이가 높아질수록 잠입류에서 표면류로 천이가 일어나는 속도가 줄어든다는 것을 확인하였다.
- (4) 잠입류에서 표면류로의 천이구간은 다음과 같다 : 레이놀 ${
 m Z} \leftarrow 2.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$

후 기

본 논문은 2015년도 미래창조과학부의 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업(No. NRF-2011-0020563), 한국 연구재단의 다중현상 CFD 연구센터(2009-0083510)의 과제로 수행된 연구임.

Note

This paper is a revised version of the paper "Numerical Analysis of the Hydraulic Characteristics of Ice-Harbor Type Fishway" presented at the KSCFE 2015 Spring Annual meeting, Jeju, May 14-15, 2015.

References

- [1] 2009, Choi, S.H., "Flow analysis in the baffled fishway using FLOW-3D.," *Proc. of Korea Water Resources Association*, KWRA, pp.1847-1840.
- [2] 2013, Baek, K.O., "Analysis of Hydraulic Passage Efficiency of Ice-Harbor Type Fishway for Flowrate Change," *Journal* of the Korean Society of civil Engineers, Vol.30, No.5, pp.1841-1850.
- [3] 2012, Lee, Z.S. and Ahn, S.S., "Analysis of Hydraulic Characteristics in Ice-Harbor Fishway," 2013 Korean Geo-Environmental Society Conference, September 21, Seoul, pp.295-298.
- [4] 2014, Lee, H.B., "Dynamic interface compression method for reducing numerical interface smearing on free-surface and its application to prismatic body," 2014 KSCFE Sping Conference, May 22, Jeju, pp.123-128.
- [5] 2002, Rusche, H., "Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions," *PhD thesis*, Imperial College, London.
- [6] 1995, Clay, C.H., "Design of Fishways and Other Fish Facilities," *CRC Press*, Florida, pp.106-111.
- [7] 2009, Korea Water Resource Association, River design criteria, KWRA, Seoul.
- [8] 2007, Versteeg, H.K., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method," *Prentice Hall*, London, pp.57-61.
- [9] 1988, Rajaratnam N., "Plunging and Streaming Flows in Pool and Weir Fishways," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.114, No.8, pp.939-944.
- [10] 2012, Park, I.R. and Jung, K.H., "Study on the Effect of Surface Roughness and Turbulence Intensity on Dam-break Flows," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.49, No.3, pp.247-253.