

# CFD 모형을 이용한 여수로 월류흐름의 동수역학적 거동 해석

## Hydrodynamic Behavior Analysis of Flow over Ogee-Spillway by Using CFD Model

김 대 근\*, 박 재 현\*\*  
Dae Geun Kim, Jae Hyun Park

### 요 지

본 연구에서는 WES의 표준 월류형 여수로에 대한 동수역학적인 흐름거동을 FLOW-3D 모형을 이용하여 해석하였다. 월류수두에 따른 월류유량, 월류흐름의 수면곡선, 여수로 표면에서의 압력분포와 같은 모의결과는 WES의 실험자료와 잘 일치하였다. 그리고 월류수두가 여수로 설계수두의 1.33배인 경우의 유속과 압력의 연직분포를 검토하였다. 검토결과, 웨어마루를 통과하면서 저층의 유속이 먼저 가속되며 점차 하류로 이동하면서 수표면의 유속이 가속되어 거의 균일한 유속분포를 보였으며, 압력의 연직분포는 웨어마루 상류에서는 수표면에서 대기압을 보이고 점차 수심이 깊어짐에 따라 정수압분포와 유사한 분포를 보이나, 여수로 표면에 접근함에 따라 급격하게 압력이 감소하면서 부압이 발생하였다. 웨어마루 하류에서는 여수로 표면에서의 압력이 점차 대기압으로 접근함에 따라, 거의 전 수심에 걸쳐 대기압과 유사한 분포를 보였다.

**핵심용어** : 월류형 여수로, FLOW-3D, 월류수두, 월류유량, 부압

### 1. 서 론

월류형 여수로 (Ogee spillway)의 경우, 설계수두( $H_d$ )에 대해 여수로 표면에서의 압력이 대기압이 되도록 설계한다. 즉, 예연웨어 (sharp-crested weir) 월류수맥의 하부경계면과 일치하도록 여수로의 종단형을 설계하는 것이다. 이 경우 설계수두에 비해 실제수두가 낮은 경우에는 여수로 표면에 양압이, 실제수두가 높은 경우에는 여수로 표면에 부압이 발생한다. 여수로에 부압이 발생하면 흡입효과로 인해 유량을 효과적으로 배제할 수 있으나, 과도한 부압은 공동현상을 유발하는 등 구조물에 악영향을 줄 수 있으므로 주의해야 한다. 공동현상의 발생을 방지하기 위하여 미국의 USBR (United States Bureau of Reclamation)은 실제수두가 여수로 설계수두의 1.33배를 초과하지 않도록, 미공병단의 Waterway Engineering Service(WES)는 부압이 -5m보다 하강하지 않도록 권장하고 있다 (Chow, 1959; 한국수자원학회, 2003).

월류형 여수로에서의 동수역학적인 해석을 위하여 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation)를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모형을 이용하기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다 (김남일, 2003; 김영한 등, 2003; 이길성과 이종현, 2003; Olsen과 Kjellesvig, 1998; Savage 등, 2001). Olsen과 Kjellesvig (1998)은 여수로에서의 흐름을 해석하기 위하여 RANS와  $k-\epsilon$  난류모델을 지배방정식으로 하여 수치모의 하였다. 수면변위와 유량계수에 대한 적절한 수치모의 결과는 여수로에서의 흐름을 해석하는 데에 수치모형이 효과적으로 이용될 수 있음을 보여주는 것이었다. Savage 등 (2001)은 RANS를 지배방정식으로 하는 상업용 전산유체역학 프로그램인

\* 정회원 · 대불대학교 토목환경공학과 전임강사 · E-mail : greatkim@mail.daebul.ac.kr

\*\* 정회원 · 인제대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : jhpark@inje.ac.kr

FLOW-3D를 이용하여 월류형 여수로의 수면변위와 압력분포를 계산하였다. 특히, 여수로의 설계수두에서 벗어난 저수지 수위에 대한 여수로에서의 흐름 해석시, 수치모형을 이용하는 것이 경제성과 정확성의 측면에서 합리적인 검토방법이 될 수 있음을 보여주었다. 김남일 (2003), 이길성과 이종현 (2003)은 FLOW-3D 모형을 이용하여, 여수로의 수리모형실험시 모형의 축척으로 인한 결과의 왜곡에 대해 검토하였다. 검토결과, 대축척에서의 유량 및 유속이 소축척에서의 값보다 일반적으로 크게 나타남을 보였다. 김영한 등 (2003)은 FLUENT 모형을 이용하여 여수로 등 방류구조물에서의 수리현상을 모의한 바 있다. 이상의 국내연구는 모두 한탄강댐의 여수로를 적용 예로 하고 있으며, 주로 여수로를 월류하는 유량의 관점에서 흐름거동을 고찰하고 있다.

본 연구에서는 월류형 여수로에서의 월류수맥, 유속 및 압력분포에 대한 특성을 상세히 고찰하였으며 모의결과는 WES의 실험자료와 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 월류형 여수로

WES의 표준 월류형 여수로의 제원은 그림 1과 같다. 여기서  $P$ 는 접근수로 바닥에서 웨어마루까지의 높이,  $H_d$ 는 여수로의 설계수두,  $H_o$ 는 월류수두,  $H_v$ 는 접근유속에 의한 속도수두,  $H_e$ 는 전수두이다.  $h_o$ 는 여수로면에서 연직으로 측정한 월류수맥의 위치별 수심이다.  $P/H_d$ 가 1.33 이상이면 전수두에서 접근유속으로 인한 속도수두의 크기는 무시할 정도이나, 1.33 이하이면 속도수두의 크기를 무시할 수 없는 것으로 알려져 있다 (Chow, 1959).

여수로의 월류유량,  $Q$ 는 다음과 같다.

$$Q = CL_e H_c^{1.5} \tag{1}$$

여기서  $C$ 는 유량계수이고  $L_e$ 는 웨어마루의 유효길이다. 식 (1)의 유량계수는 일정한 상수가 아니고 접근수로의 형상 및 수심, 여수로의 형상, 하류수위 등의 영향을 받는데, 약 1.6에서 2.3 사이의 값을 가진다.

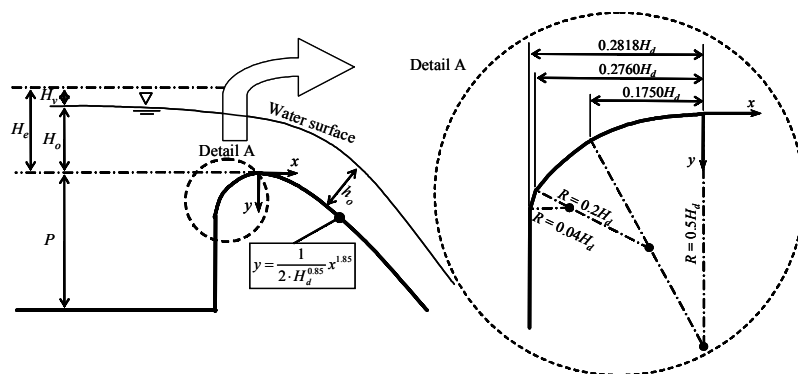


그림 1. 표준 월류형 여수로의 제원

### 2.2 수치모형

비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계  $(x, y, z)$ 에서의 다음과 같은 RANS(Reynolds Averaging Navier-Stokes)방정식이다 (Flow

Science, 2003). 물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 VOF (volume of fluid) 함수를 정의하는데, 함수의 값이 1인 경우는 검사체적에 물이 가득한 상태를 의미하고 함수의 값이 0인 경우는 검사체적에 물이 없는 경우를 의미하고 자유수면에서는 함수의 값이 0과 1사이의 값을 가진다. 난류모형은  $k-\epsilon$  난류모형을 사용하였다. 지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형은 독립적으로 입력되며 특히, FAVOR (fractional area and volume obstacle representation) 기법을 사용함으로써 유한체적법의 접근방법으로 해석된다. 계산 절차는 (1) 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각 방향의 유속을 계산 (2) 연속방정식을 만족하도록 운동방정식의 압력과 유속을 반복 계산 (3) 자유수면, 난류특성을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 모의구간 및 격자생성

그림 2는 모의구간의 범위와 경계조건을 도시한 것이다. 웨어마루 (weir crest)를 원점으로 하고, 모의구간의 범위는  $x, z$ 방향 각각에 대해  $7H_d, 3H_d$ 이다. 단, 그림 2의 좌표축은 계산의 편의를 위하여 그림 1과 달리 연직상향을  $z$ 축으로 하는 직교좌표계를 따랐다.

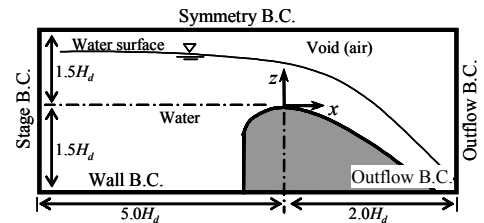


그림 2. 모의구간의 범위와 경계조건

본 연구에서 여수로의 설계수두,  $H_d$ 는 10.0 m를 사용하였으며  $P/H_d$ 는 1.5를 사용하였다. 계산격자는 여수로 부근의 흐름이 급변하는 곳은 격자크기를 작게, 흐름의 변화가 완만한 곳은 격자크기를 크게 하였다.

#### 3.2 경계조건 및 초기조건

그림 2에서 좌측면은 유입경계조건으로 수위조건을 부여하였다. 우측면은 유출경계조건으로 상류에서 유입된 유량이 반사없이 유출되는 조건을 부여하였다. 양 측면은 대칭경계조건을 부여하였다. 여수로 하류측 바닥면은 유출경계조건을, 상류측 바닥면은 벽면경계로 무활 (no-slip) 경계조건을 부여하였다. 모의구간의 상부면은 대칭경계조건을 부여하였으나, 경계면과 물 사이에는 대기압의 공기층이 존재하고 있어, 물의 흐름은 경계조건의 영향을 받지 않는다. 여수로를 포함한 벽면에서는 무활 경계조건을 부여하였으며, 벽면에서의 난류경계치를 산정하기 위해서는 벽함수를 사용하였다. 윤용남 (2002)에 의하면 콘크리트 표면의 상대조도는 표면처리 여부에 따라 0.305~3.05 mm의 값을 가진다. 여기에서는 비교적 매끄러운 콘크리트 표면의 상대조도에 해당하는 0.5 mm를 사용하였다.

초기조건으로는 유입부에서 웨어마루까지 유입경계조건과 동일한 수위를 부여하였다. 나머지 조건은 모두 0으로 놓았다. 본 연구에서는 표 2와 같이 유입경계조건인 수위를 변화시켜가며, 모의결과를 검토하였다. 수위는 설계수두의 0.5배, 1.0배 1.33배의 3가지 경우에 대하여 모의하였다.

#### 4. 적용결과

표 1은 식 (1)의 수위-유량관계식과 모델링을 통하여 각각 산정한 월류유량을 비교, 정리한 것이다. 2.5% 이내의 상대오차를 보이는 보이고 있다. 그림 3은 월류수맥과 여수로 표면에 작용하는 압력을 도시한 것이다. 비교를 위하여 WES의 실험자료를 함께 도시하였다. 실제수두가 여수로의 설계수두보다 큰 경우에는 여수로 표면에 부압이 발생하는 등 실제현상을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 월류수두가 여수로 설계수두의 1.33배인 경우의 유속과 압력의 여수로 표면에 대한 연직분포이다. (a)는 각 단면의 최대유속으로 무차원화하여 도시한 것이다. 웨어마루를 통과하면서 저층의 유속이 먼저 가속되며, 점차 하류로 이동하면서 수표면의 유속이 가속되어 거의 균일한 유속분포를 보인다. (b)는 압력의 연직분포를 도시한 것으로 웨어마루 상류에서는 수표면에서 대기압을 보이고 점차 수심이 깊어짐에 따라 정수압분포와 유사한 분포를 보이나, 여수로 표면에 접근함에 따라 급격하게 압력이 감소하면서 부압이 발생한다. 웨어마루 하류에서는 여수로 표면에서의 압력이 점차 대기압으로 접근함에 따라, 거의 전 수심에 걸쳐 대기압과 유사한 분포를 보인다.

표 3. 수위-유량관계식과 모델링을 통한 월류유량 산정결과

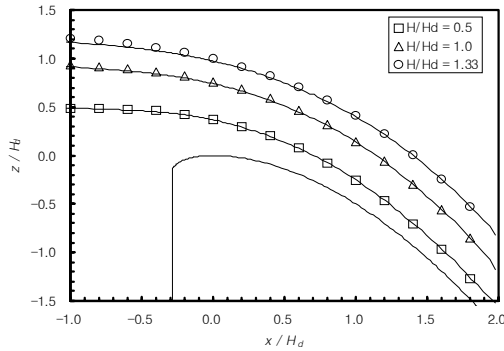
$H_c/H_d$	수위-유량관계식 (1)		모의결과, $q$ ( $m^3/sec/m$ )	상대오차 (%)
	유량계수, $C$	단위폭당유량, $q$ ( $m^3/sec/m$ )		
0.50	1.991050	22.261	22.552	1.31
1.00	2.164175	68.437	70.174	2.54
1.33	2.251864	109.224	110.886	1.52

#### 5. 결론 및 향후 연구과제

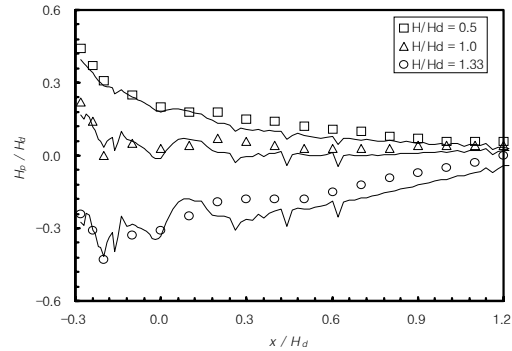
본 연구는 WES의 표준 월류형 여수로에 대한 동수역학적인 흐름거동을 FLOW-3D 모델을 이용하여 해석한 것으로 다음과 같은 해석결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 월류수두에 따른 월류유량, 월류흐름의 수면곡선, 여수로 표면에서의 압력분포와 같은 모의결과는 WES의 실험자료와 잘 일치하였다.
- 2) 월류수두가 여수로 설계수두의 1.33배인 경우의 유속과 압력의 연직분포를 검토한 결과, 웨어마루를 통과하면서 저층의 유속이 먼저 가속되며 점차 하류로 이동하면서 수표면의 유속이 가속되어 거의 균일한 유속분포를 보이게 된다. 압력의 연직분포는 웨어마루 상류에서는 수표면에서 대기압을 보이고 점차 수심이 깊어짐에 따라 정수압분포와 유사한 분포를 보이나, 여수로 표면에 접근함에 따라 급격하게 압력이 감소하면서 부압이 발생한다. 웨어마루 하류에서는 여수로 표면에서의 압력이 점차 대기압으로 접근함에 따라, 거의 전 수심에 걸쳐 대기압과 유사한 분포를 보인다.

향후 연구로는 여수로에서의 속도와 압력의 연직분포를 정량화 할 수 있도록 다양한 경우에 대한 연직분포의 상사법칙에 대한 연구를 수행할 예정이며, 이의 검정을 위한 수리실험을 수행할 예정이다.

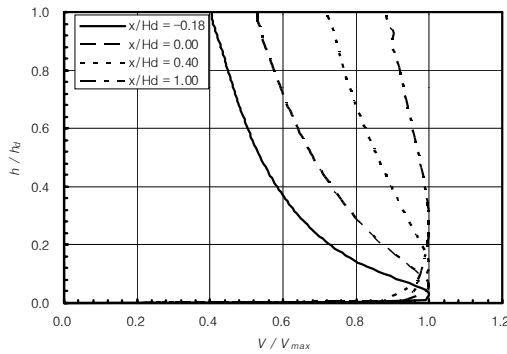


(a) 수위분포

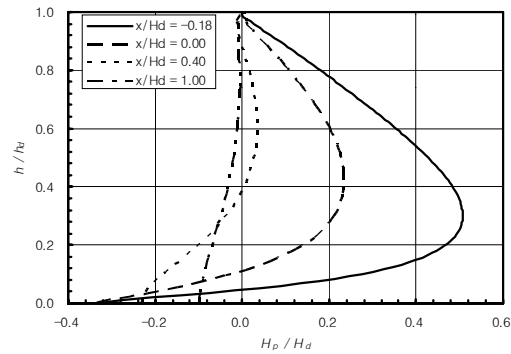


(b) 압력분포

그림 3. 수두에 따른 월류수맥의 수위와 여수로 표면에서의 압력분포



(a) 유속분포



(b) 압력분포

그림 3. 유속과 압력의 연직분포

### 참고문헌

1. 김남일 (2003). *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model*. 박사학위논문, 서울대학교.
2. 이길성, 이종현 (2003). "CFD 모형을 이용한 여수로 수리모형의 축척효과 조사." 2003년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 2700-2703.
3. 김영한, 오정선, 서일원 (2003). "수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, Vol. 36, No. 5, pp. 761-776.
4. 윤용남 (2002). 수리학 (기초와 응용). 청문각.
5. 한국수자원학회 (2003), 댐설계기준.
6. Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company.
7. Flow Science (2002). *FLOW-3D (Theory Manual)*, Los Alamos, NM.
8. Olsen, N.R., and Kjellesvig, H.M. (1998). "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 5, pp. 775-784.
9. Savage, B.M., and Johnson, M.C. (2001). "Flow over ogee spillway : Physical and numerical model case study." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 8, pp. 640-649.