

## 교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의 A Numerical Simulations on the Flow over Ogee Spillway with Pier

김 대 근\* / 이 재 형\*\* / 서 일 원\*\*\*

Kim, Dae Geun / Lee, Jae Hyung / Seo, Il Won

### Abstract

This study analyzed the hydrodynamic flow behavior on a standard ogee spillway with pier by using FLOW-3D. The simulation results were compared with the experiment data of U.S. Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station (WES) and also compared with 2-dimensional simulation results on a spillway without pier. In particular, the characteristics of the distribution of the overflow nappe and pressure in a spillway with pier were investigated in detail. As for the results of the simulation on the flow rate, overflow nappe, and pressure, although there were a few differences in the experiment results of WES, they were identical in most cases in terms of trend. Summarizing the major flow behavior in a standard ogee spillway with pier, first, the water stage at the center line of the bay was higher than that at the side of the bay along the pier. Second, when the water head was larger than the design head of the spillway, at the upstream area of the weir crest, the absolute magnitude of negative pressure occurred highest at the side of the bay along the pier. On the other hand, at the downstream area of the weir crest, the absolute magnitude of negative pressure occurred highest at the centerline of the bay.

**Keywords** : ogee spillway, FLOW-3D, overflow nappe, negative pressure

### 요 지

본 연구에서는 교각이 설치된 미공병단의 Waterways Experiment Station (WES)의 표준 월류형 여수로에 대한 동수역학적인 흐름거동을 FLOW-3D를 이용하여 해석하였다. 모의 결과는 WES의 실험자료와 비교하였으며, 교각이 없는 월류형 여수로에 대한 2차원 모의결과와도 상호 비교하였다. 특히 교각이 설치된 월류형 여수로에서의 월류수맥과 압력분포에 대한 특성을 상세히 고찰하였다. 유량, 월류수맥 및 압력분포에 대한 모의결과, 부분적으로 WES의 실험결과와 차이가 발생하는 곳이 있으나, 대부분 그 경향이 일치하였다. 교각이 설치된 월류형 여수로에서의 주요 흐름거동을 정리하면, 첫째 교각이 위치하는 여수로 측면부에서의 수위에 비해 여수로 중앙부에서의 수위가 높고, 둘째 실제수두가 여수로의 설계수두보다 높은 경우 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부에서 부압이 크게 발생하며 웨어마루 하류에서는 여수로 중앙부에서 부압이 크게 발생하는 것으로 밝혀졌다.

**핵심용어** : 월류형 여수로, FLOW-3D, 월류수맥, 부압

\* 대불대학교 토목환경공학과 전임강사  
Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Daebul Univ., Chonnam 526-702, Korea  
(E-mail : greatgkim@mail.daebul.ac.kr)

\*\* 현대엔지니어링(주) 수자원부 차장  
Deputy manager, Water Resources Team, Hyundai Engrg., Mok1-dong, Seoul, 158-723 Korea

\*\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수  
Professor, School of Civil & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

## 1. 서 론

댐 여수로와 같은 대규모 수리구조물을 건설하는 경우에는 구조물의 수리학적 안정성과 기능성을 검토하여야 한다. 검토방법은 수리모형실험과 수치모형실험으로 크게 나눌 수 있는데, 흐름이 상류에서 사류로 변하고 정수압이 동수압으로 변환되는 과정에서 부압이 발생하는 등 여수로에서의 동수역학적인 거동이 복잡하기 때문에 지금까지는 수리모형실험이 일반적으로 사용되어 왔다. 수리모형실험은 지형과 구조물의 원형(prototype)을 축소 제작하여 실험적으로 흐름특성을 고찰하는 것으로 모형 제작상의 오류와 축척효과로 인해 발생 가능한 오류에 대한 검토가 충분히 이루어 진다면 좋은 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 수치모형실험은 물의 흐름을 나타내는 지배방정식과 적절한 경계조건을 수치해석 기법을 통해 컴퓨터로 계산하는 것으로, 최근 들어 컴퓨터의 용량 증대와 계산속도의 향상은 수리구조물에서의 복잡한 동수역학적인 거동의 경제적인 해석을 가능케 하고 있다.

국내의 경우, 여수로의 설계기준 홍수량으로 콘크리트댐은 100년 빈도의 유입홍수량, 필댐의 경우 200년 빈도 유입홍수량의 120%를 채택하는 등 빈도홍수량의 개념을 사용해 왔다. 그러나 최근 들어, 댐의 수명기간 동안에 빈도홍수량을 초과할 홍수가 발생할 확률이 크기 때문에 댐의 여수로나 댐 마루표고의 결정은 가능최대홍수량(PMF)을 기준으로 하도록 설계기준을 강화하였다 (한국수자원학회, 2003). 또한 댐 건설 후 강우자료가 점차 축적됨에 따라 더욱이 최근 들어 폭우성 강우가 빈번하게 발생함에 따라 기존 댐의 경우 설계수문량의 재검토가 필요하게 되었다. 즉, 강화된 설계기준과 댐 건설 후 축적된 자료의 분석결과에 따라 기존 댐 여수로의 계획방류량이 변경될 수 있는 것이다. 이 경우 여수로에서의 동수역학적인 흐름거동을 파악하는 데에 수치모형실험은 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 신규 댐의 계획시에도 수리모형실험의 상호 보완적인 검토를 위해 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

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 배

제할 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 WES는 부압이 -5m보다 하강하지 않도록 권장하고 있다 (Chow, 1959; 한국수자원학회, 2003). WES는 USBR과 기존 연구자의 실험자료 등을 이용하여 월류형 여수로의 표준형을 제안하였다. 그리고 이러한 여수로에 대해 접근수로에서의 수리학적 조건, 교각의 유무, 교각 전면부 (pier nose)의 형상 등에 따른 흐름거동을 실험을 통해 제시하였다.

댐의 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; Ho 등, 2001; 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 해석하는데 수치모형이 효과적으로 이용될 수 있음을 보여주는 것이었다. Savage 등 (2001)과 Ho 등 (2001)은 RANS를 지배방정식으로 하는 상업용 전산유체역학 프로그램인 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. 또한 수치모형실험을 통해 모형의 축척으로 인한 결과의 왜곡을 최소화하면서 가장 경제적인 수리모형의 축척비를 도출할 수 있음을 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 WES의 표준 월류형 여수로에 교각이 설치되어 있는 경우에 대한 흐름거동을 FLOW-3D를 이용하여 해석하였다. 모의결과는 WES의 실험자료와

비교하였으며, 본 연구에서는 특히, 교각이 설치되어 있는 월류형 여수로에서의 월류수맥과 압력분포에 대한 특성을 상세히 고찰하였으며, 교각이 없는 경우인 2차원 모의결과와도 상호 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,  $H$ 는 월류수두,  $H_v$ 는 접근유속에 의한 속도수두,  $H_e$ 는 전수두이다.  $P/H_d$ 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.

$$Q = CL_e H_e^{1.5} \quad (1)$$

여기서,  $C$ 는 유량계수이고  $L_e$ 는 웨어마루의 유효길이로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_e = L - 2NK_p H_e \quad (2)$$

여기서,  $L$ 는 웨어마루의 길이,  $N$ 은 교각의 수,  $K_p$ 는 교각수축계수로 원형두부의 경우 0.01의 값을 가진다 (한국수자원학회, 2003). 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.

### 2.2 수치모형

비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계( $x, y, z$ )에서의 다음과 같은 RANS이다 (Flow Science, 2003).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i \quad (4)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $U_i$ 는  $x_i$ 방향의 속도,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $P$ 는 압력,  $F_i$ 는 중력, 점성력 등과 같은 외력이다. 물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 VOF (volume of fluid) 함수를 정의하는데, 함수의 값이

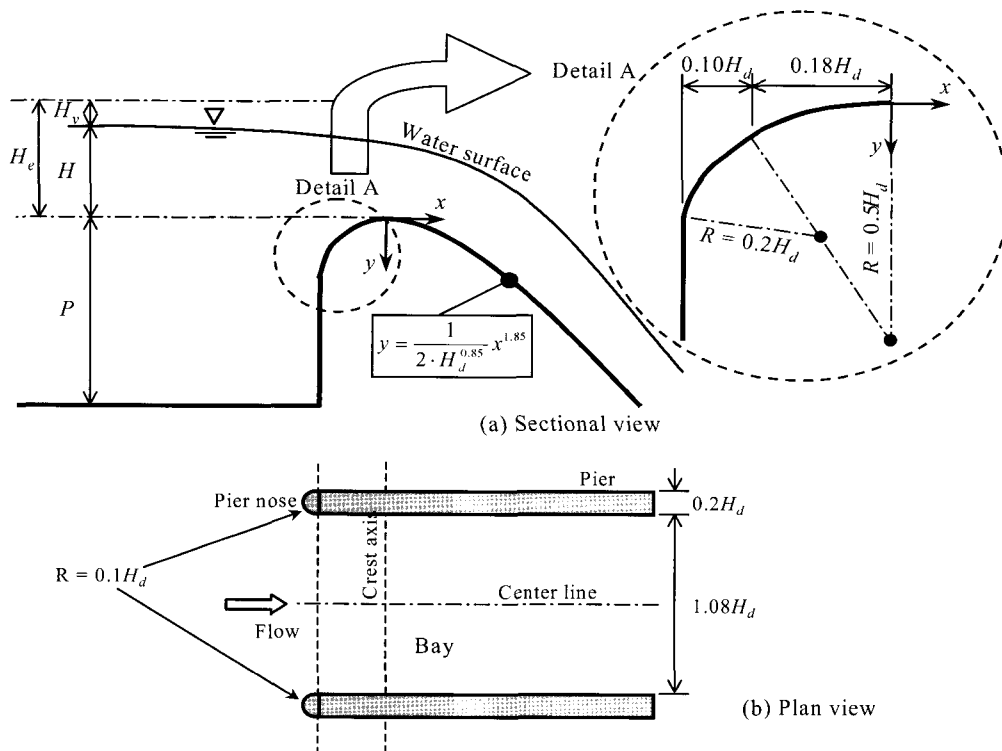


그림 1. 표준 월류형 여수로의 제원

1인 경우는 검사체적에 물이 가득한 상태를 의미하고 함수의 값이 0인 경우는 검사체적에 물이 없는 경우를 의미하고 자유수면에서는 함수의 값이 0과 1사이의 값을 가진다. 난류모형은  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다. 지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형은 독립적으로 입력되며 특히, FAVOR (fractional area and volume obstacle representation) 기법을 사용함으로써 유한체적법의 접근 방법으로 해석된다. 지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 연속방정식을 만족하도록 압력항을 계산하기 위해서는 SOR(successive over relaxation)법과 SADI(special alternating-direction line implicit)법을 사용할 수 있다. 계산절차는 (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, y, z방향 각각에 대해  $7H_d$ ,  $0.64H_d$ ,  $3H_d$ 이다. 단, 그림 2의 좌표축은 계산의 편의를 위하여 그

림 1과 달리 연직상향을 z축으로 하는 직교좌표계를 따랐다.

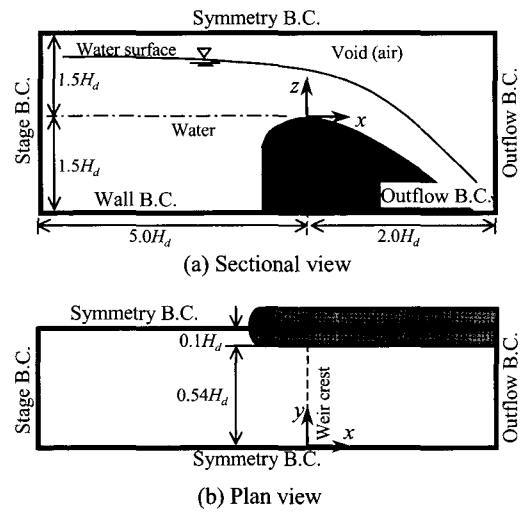


그림 2. 모의구간의 범위와 경계조건

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. 또한 수렴속도를 빠르게 하기 위하여 처음에는 격자를 크게 하여 모의하고, 이를 초기조건으로 하여 세밀한 격자에서 최종 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 격자의 크기와 격자망의 구성은 표 1과 같다.

표 1. 격자의 크기와 격자망의 구성

Coarse grid	0.20	2.68	85	0.33	0.65	13	0.27	0.88	65	71,825
Fine grid	0.10	1.35	169	0.14	0.33	29	0.13	0.41	131	642,031

주) \* : 격자의 최소크기, \*\* : 격자의 최대크기

#### 3.2 경계조건 및 초기조건

그림 2에서 좌측면은 유입경계조건으로 수위조건을 부여하였다. 우측면은 유출경계조건으로 상류에서 유입된 유량이 반사없이 유출되는 조건을 부여하였다. 양측면은 대칭경계조건을 부여하였다. 여수로 하류측 바닥면은 유출경계조건을, 상류측 바닥면은 벽면경계로 무활 (no-slip) 경계조건을 부여하였다. 모의구간의 상부면은 대기경계조건을 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 상당조도는 표면처리 여부에 따라 0.305~3.05 mm의 값을 가진다. 여기에서는 비교적 매끄러운 콘크리트 표면의 상당조도에 해당하는 0.5 mm를 사용하였다.

초기조건으로는 유입부에서 웨어마루까지 유입경계조건과 동일한 수위를 부여하였다. 나머지 조건은 모두 0으로 놓았다. 세밀한 격자를 이용하여 재계산하는 경

우에는 앞의 계산결과를 초기조건으로 부여하였다. 계산결과와 수렴여부는 흐름의 운동에너지, 난류운동에너지, 유입 및 유출유량의 수렴여부를 이용하여 판단하였다. 본 연구에서는 이상의 수렴조건을 만족하도록 초기 격자에서 30초, 세밀한 격자에서 20초 동안 계산한 결과를 이용하여 분석하였다.

본 연구에서는 표 2와 같이 유입경계조건인 수위를 변화시켜가며, 모의결과를 검토하였다. 수위는 설계수두의 0.5배에서 1.33배 사이의 5가지 경우에 대하여 모의하였다. 또한, 교각의 영향을 검토하기 위하여, 교각이 없는 경우에 대해서는 2차원(교각이 없는 경우는 여수로의 형상이 x-z평면의 2차원 형상이므로, 표 1에서 y 방향 격자를 1개로 구성)으로 모의하고 교각이 설치되는 경우에는 3차원으로 모의하였다.

표 2. 모의조건

Case I			
1	0.50	5.0	2차원 모의, 모의결과는 그림 3 ~ 5
2	0.75	7.5	
3	1.00	10.0	
4	1.20	12.0	
5	1.33	13.3	
Case II			
1	0.50	5.0	3차원 모의, 모의결과는 그림 6 ~ 12
2	1.00	10.0	
3	1.33	13.3	

#### 4. 모의결과

##### 4.1 2차원 모의결과

조도가 계산결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 표 2의 Case I-3에 대해 여수로를 포함한 벽면의 상당조도를 0.0, 0.5, 3.0mm로 변화시키며 수위와 여수로 표면의 압력분포를 그림 3에 도시하였다. 상당조도 0.0mm는 수리학적으로 매끄러운 표면을 의미하며,

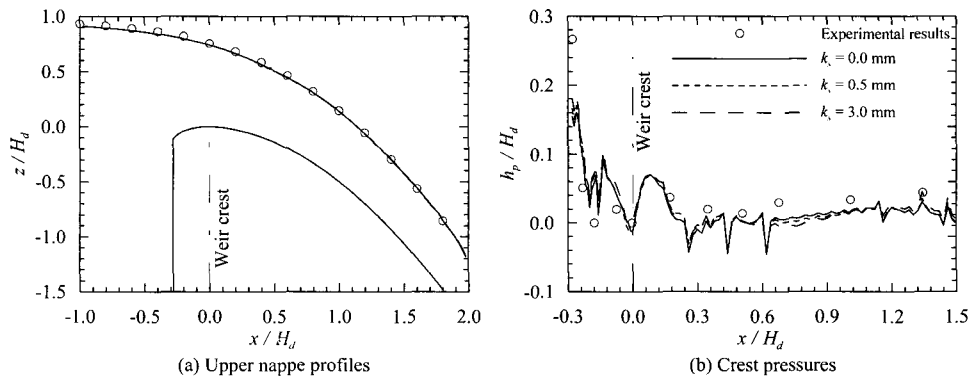


그림 3. 상당조도에 따른 수위와 여수로 표면의 압력분포 (x-z 2차원 모의)

3mm는 거친 콘크리트 표면에 대한 상당조도이다. (a)는 수위를, (b)는 여수로 표면의 압력( $h_p$ )을 설계수두로 무차원화하여 도시한 것인데, 조도의 변화에 따른 수위와 압력의 변화는 미미함을 알 수 있다. 그림 3에서 모의결과와의 비교를 위해 WES의 실험결과를 함께 도시하였다. Case I-3은 실제수두가 여수로의 설계수두와 같은 경우로서 웨어마루를 중심으로 상, 하류의 압력분포가 대기압과 유사함을 알 수 있다. 또한 각 조도별로 단위폭당유량,  $q$ 를 산정한 결과는 표 3과 같다. 상당조도 0.5mm에 대한  $q$ 의 상대오차를 살펴보면 상당조도가 0.0mm인 경우는 0.19%, 상당조도가 3mm인 경우는 1.06%의 오차를 보이고 있다. 이상의 검토결과 여수로 표면의 조도가 여수로에서의 흐름거동에 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 여수로, 교각 및 접근수로 표면의 상당조도를 0.5mm로 고정시키고 계산을 수행하였다.

표 3. 상당조도에 따른 여수로의 단위폭당유량

$k_s$ (mm)	$q$ (m <sup>3</sup> /sec/m)	상대오차 (%)
0.0	70.310	0.19
0.5	70.174	-
3.0	69.428	1.06

그림 4는 2차원 (x-z) 모의결과와 WES의 실험자료를 비교한 그림이다. (a)는 수두에 따른 수위분포를 도시한 것으로 기호로 표시된 실험자료와 실선으로 표시된 모의결과는 잘 일치하고 있다. 단,  $H/H_d$ 가 증가함에 따라 여수로 접근부에서 실험자료와 모의결과의 수위차가 발생하는데, 이는 접근유속으로 인한 수두를 무시하고 모의하였기 때문에 발생하는 현상이다. 즉 동일한 조건에서 유입부의 수두가 상승하면 접근유속으로 인한 속도수두의 크기가 점차 증가하는데 이의 영향을

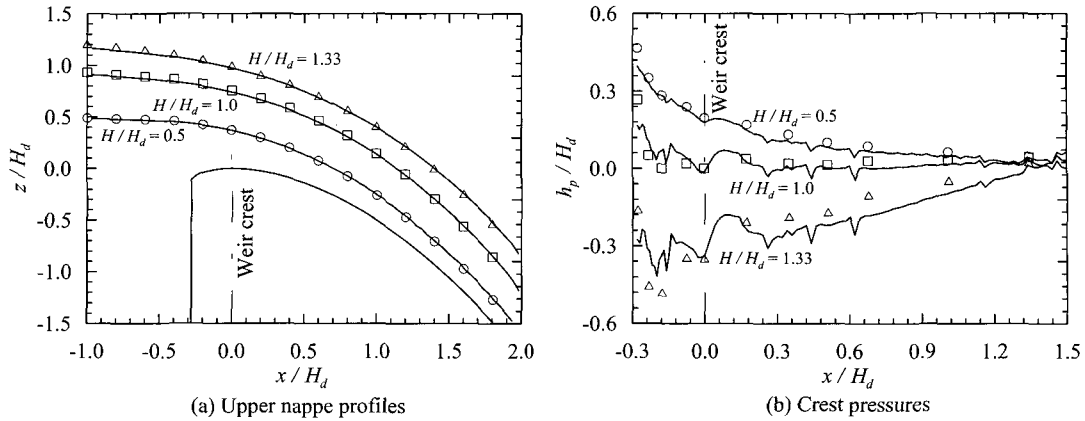


그림 4. 수두에 따른 수위와 여수로 표면의 압력분포 (x-z 2차원 모의)

무시하였기 때문에 발생하는 오차이다. (b)는 수두에 따른 여수로 표면의 압력분포를 도시한 것이다. 실제수두가 설계수두와 같은 경우에는 여수로 상에서 대기압이, 실제수두가 설계수두보다 낮은 경우에는 여수로 상에서 양압이, 실제수두가 설계수두보다 높은 경우에는 여수로 상에서 부압이 발생하는 현상을 잘 모의하고 있다. 하지만 계산결과에서 실제수두가 설계수두 보다 높은 경우에는 웨어마루 상류에서 발생하는 부압의 절대값을 과소 산정하는 경향이 있고, 웨어마루 하류에서 발생하는 부압의 절대값은 과대 산정하는 경향이 있다. 또한 압력분포의 계산결과에서 국부적인 진동현상이 보이는데 이는 여수로의 곡면을 사각형의 격자를 이용하여 분할하기 때문에 발생하는 현상인 것으로 판단된다. 이상과 같은 한계점에도 불구하고 모의결과는 실험결과의 경향을 대체로 잘 재현하고 있다.

그림 5는 경험식 (1)과 본 모의결과를 이용하여 산정한 수두별 단위폭당유량을 비교, 도시한 것이다. 식 (1)의 유량계수는 댐시설기준(2003, 한국수자원학회)의 자료를 이용하였다. 식 (1)을 이용하여 산정한 결과와 본 모의 결과의 상대오차는 최대 4%를 넘지 않고 있다.

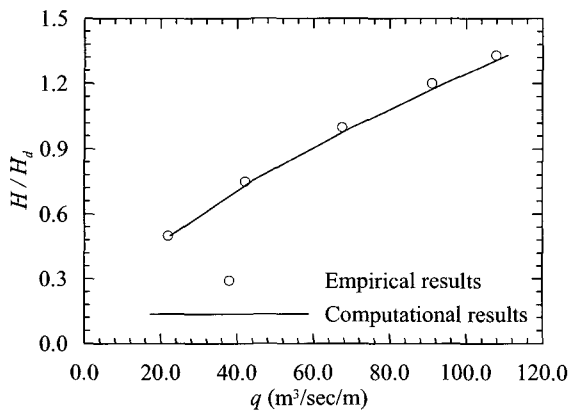


그림 5. 수위-유량관계 곡선 (x-z 2차원 모의)

#### 4.2 3차원 모의결과

그림 6은 Case II-3에 대한 3차원 모의결과를 도시한 것이다. (a)는 흐름의 3차원적인 형상 및 유속의 크기를 도시한 것이다. 교각 전면부에서 발생하는 정체점(stagnation point)으로 인해 국부적인 수위상승이 발생할 수 있으며, 여기서 발생한 수위 상승으로 인한 파랑이 하류로 진행하면서 여수로 중앙부의 수위는 증가시키고 교각을 따르는 여수로 측면부의 수위는 감소시키고 있다. 또한, 여수로를 월류하며 흐름이 가속되는 현상과 유속의 크기를 효과적으로 파악할 수 있다. (b)는 웨어마루와 가장 가까운 x-y평면 ( $z=0.067m$ )에서의 압력과 유속분포이다. 여기서의 압력은 대기압을 0으로 놓은 계기압력이며, 부압을 효과적으로 표현하기 위하여 양압은 모두 0으로 표현되도록 도시하였다. 여수로 중앙부 보다는 측면부에서 부압의 절대값이 다소 크게 나타나고 있다. (c)와 (d)는 여수로 중앙부와 측면부의 압력, 유속분포 및 수면형상을 도시한 것이다. 수면형상은 앞의 (a)에서 설명한 바와 동일하다. 부압이 웨어마루 상류 여수로 표면에서 발생하기 시작하여 웨어마루를 지나 하류로 이동하면서 연직방향으로 확산하며 그 절대크기는 감소하는 현상을 보이고 있다.

그림 7은 여수로의 중앙부와 측면부의 수위를 도시한 것이다. (a)는 여수로 중앙부의 수두에 따른 수위분포로서 비교를 위하여 2차원 모의를 통한 수위분포(점선)를 함께 도시하였다. 실선은 3차원 모의결과로서 전수두가 증가할수록 2차원 모의결과와 큰 차이를 보이고 있다. 이는 기호로 표현된 실험결과와도 잘 일치하고 있다. (b)는 여수로 측면부에서의 수위분포이다. 접근수에서는 모의결과와 실험결과가 잘 일치하고 있다. 하지만 웨어마루를 통과하면서 모의결과가 실험결과를 과소 산정하는 경향을 보이는데, 이는 수위의 횡분포를 도시한 그림 8에서 그 원인을 찾을 수 있다. (a)는 교각

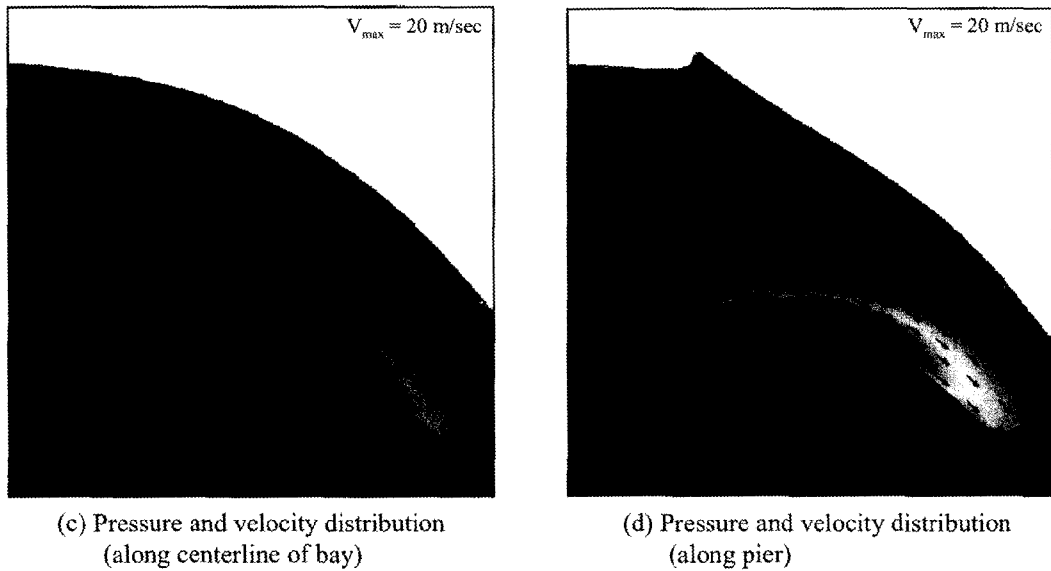
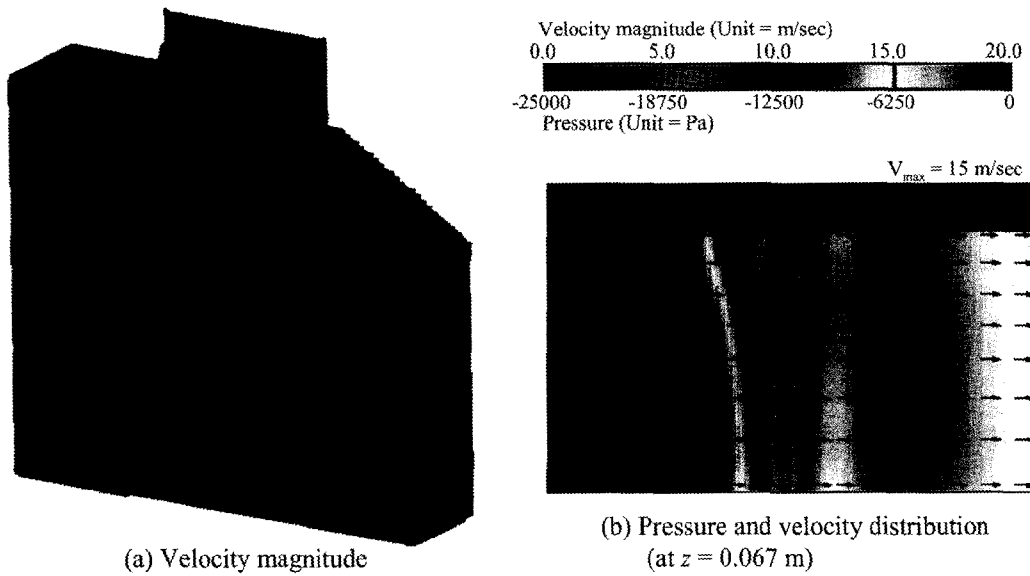


그림 6. 3차원 모의결과에 따른 수면형상, 압력, 유속분포 (3차원 모의, Case 11-3)

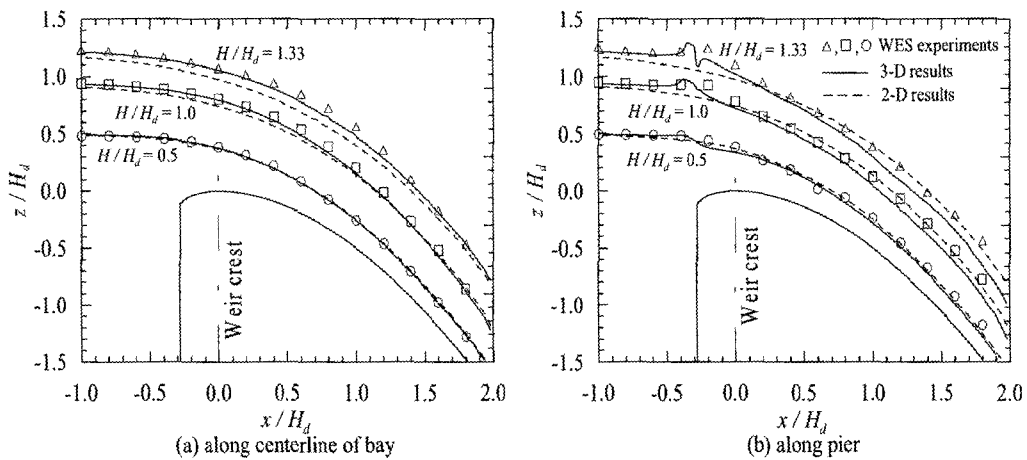


그림 7. 수두에 따른 증방향 수위 분포 (3차원 모의)

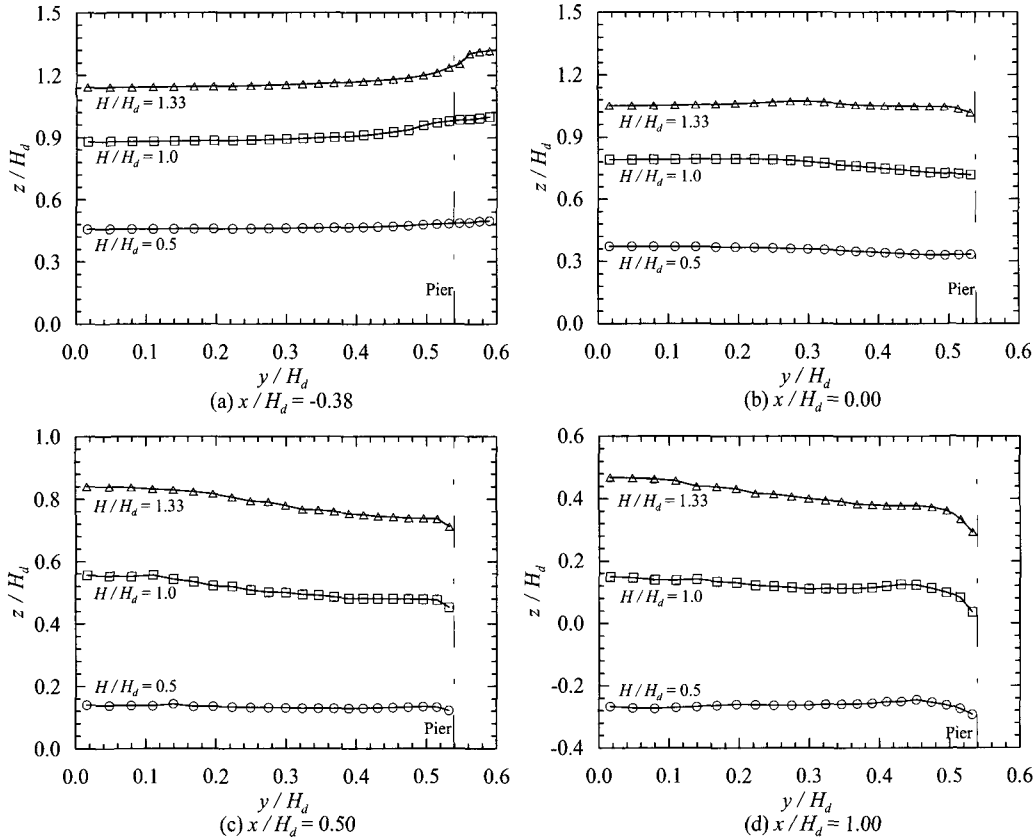


그림 8. 수두에 따른 횡방향 수위 분포 (3차원 모의)

이 시작하는 위치에서의 수위분포로 수두가 높을수록 교각으로 인한 국부적인 수위상승이 크게 발생하고 있다. (b)는 웨어마루에서의 수위분포로 거의 수평임을 알 수 있다. (c)와 (d)는 웨어마루 하류에서의 수위분포인데 하류로 진행할수록 여수로 측면부에서의 수위강하가 크게 발생하고 있다. 이는 수두가 높은 경우에 더 심하게 발생하고 있다. 그림 7(b)에서 3차원 모의결과는 교각의 가장 가까운 지점에서의 수위를 이용하여 도시한 것인데, 이것이 그림 7(b)에서 모의결과가 실험결과를 과소평가하는 하나의 원인인 것으로 판단된다. 즉, 실험에서는 교각에 근접한 위치의 수위를 효과적으로 측정할 수 없기 때문에 상대적으로 높은 수위를 측정했을 가능성이 있는 것이다.

그림 9는 여수로의 중앙부와 여수로 측면부의 압력 분포를 도시한 것이다. (a)는 여수로 중앙부의 수두에 따른 압력분포로서 비교를 위하여 2차원 모의를 통한 압력분포(점선)를 함께 도시하였다. 실선은 3차원 모의 결과인데, 수두가 증가할수록 2차원 모의결과와 큰 차이를 보인다. 그리고 2차원 모의결과에 비해 3차원 모의결과는 전체적으로 압력이 증가하는 양상을 보인다. 즉, 설계수두보다 높은 실제수두에 대해서는 부압의 절대크기가 감소하는데, 기호로 표현된 실험결과와도 일치하는 결과이다. (b)는 여수로 측면부에서의 압력분포

인데, 모의결과는 (a)와 비슷한 형태를 보인다. 실험결과는  $H/H_d$ 가 1.33인 경우에 웨어마루 전면에서 큰 부압이 발생하는 경우를 제외하면 (a)와 비슷한 결과를 보인다. 통상 부압은 고체표면의 흐름이 분리되는 곳에서, 특히 유속이 빠른 곳에서 크게 발생한다. 또한 강한 난류로 인해 국부적으로 부압이 크게 발생할 수도 있는데, 앞의 실험결과에서 큰 부압은 이러한 원인으로 인해 특히 크게 발생한 것으로 사료된다. 그림 10은 압력의 횡분포를 도시한 것이다. (a)는 여수로가 시작하는 위치, (b)는 여수로의 곡률반경이 변하는 지점, (c)는 웨어마루, (d)는 웨어마루 하류에서의 압력의 횡분포이다. 수두가 낮은 경우 압력의 횡분포는 거의 의미가 없으나, 수두가 증가할수록 압력의 횡분포가 점차 의미를 가지게 된다. 특히, 실제수두가 여수로의 설계수두보다 높은 경우 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부에서 부압의 절대크기가 최대로 발생하며 웨어마루 하류에서는 여수로 중앙부에서 부압의 절대크기가 최대로 발생하고 있다. 수리모형실험을 수행하는 경우, 이러한 점을 감안하여 여수로 중앙부 뿐만 아니라 측면부에서도 압력을 측정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

실제수두가 여수로의 설계수두보다 높은 경우, 유선(streamline)의 곡률로 인한 흐름의 원심력에서 기인하는 압력수두가 정수압보다 크기 때문에 부압이 발생



한다. 여수로 표면에서의 압력수두,  $h_p$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h_p = h_s \left( 1 - \frac{V^2}{gR} \right) \quad (5)$$

여기서,  $h_s$ 는 수심,  $V$ 는 유속,  $g$ 는 중력가속도,  $R$ 은 유선의 곡률반경이다. 즉, 부압의 발생여부와 그 크기는 유선의 곡률반경과 유속의 크기에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 그림 11은 각 단면별 유속의 크기를 도시한 것이다. 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부의 유속이 중앙부에 비해 크고, 웨어마루 하류에서는 여수로 중앙부의

유속이 크게 나타난다. 그림 12는 여수로 중앙부와 측면부에서 여수로 표면과 가까운 유선을 비교, 도시한 것이다. 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부의 유선이 중앙부의 유선보다 곡률반경이 작게 나타나고, 웨어마루 하류에서는 거의 동일한 곡률반경을 보이고 있다. 이상과 같은 유속과 유선의 분포특성으로 인해 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부에서 부압이 크게 발생하고, 웨어마루 하류에서는 여수로 중앙부에서 부압이 크게 발생한다.

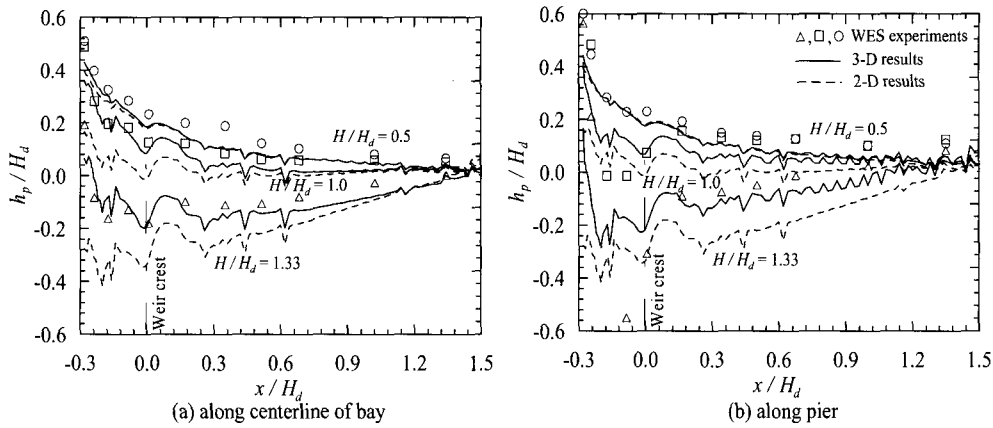


그림 9. 수두에 따른 종방향 압력 분포 (3차원 모의)

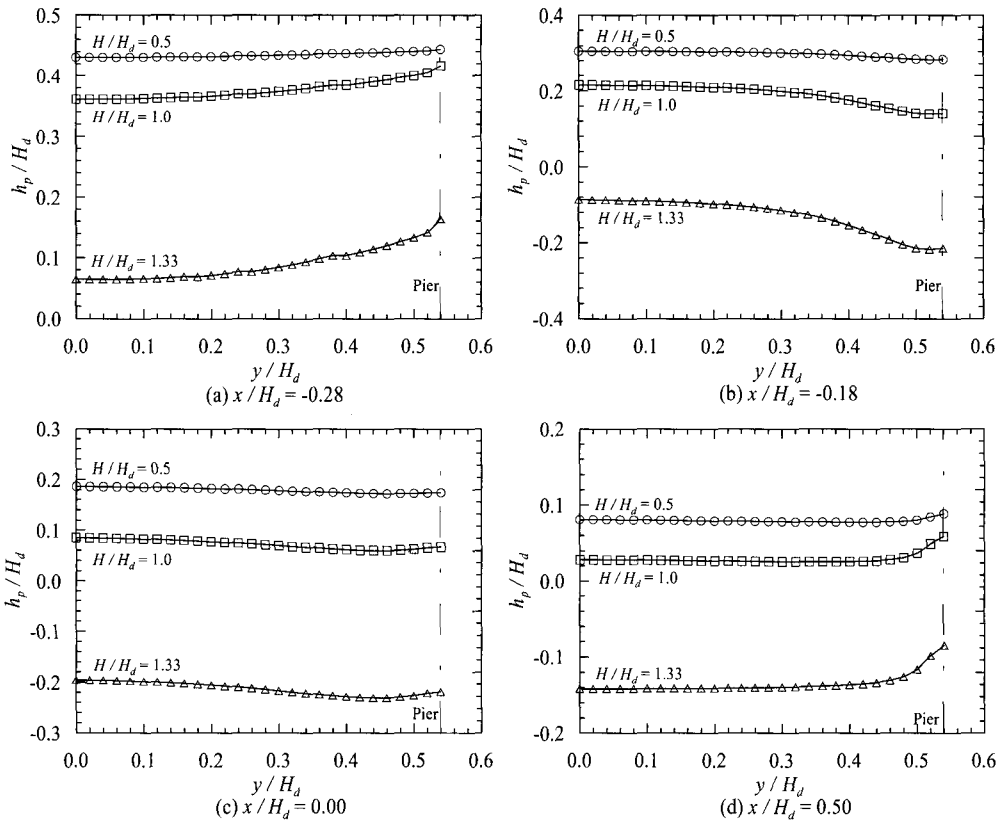


그림 10. 전수두에 따른 횡방향 압력 분포 (3차원 모의)

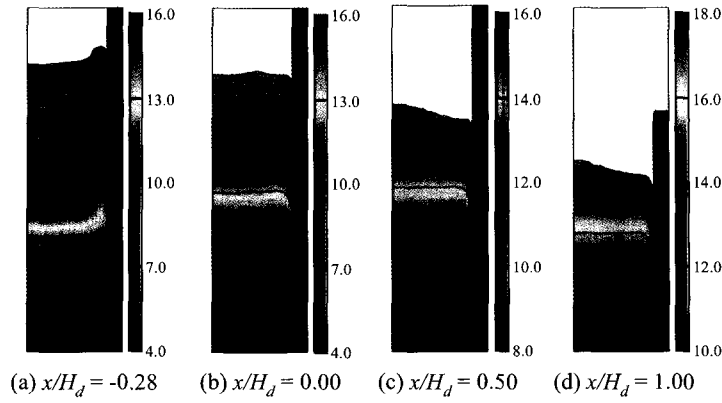


그림 11. 단면별 유속의 크기 분포 (단위 : m/sec)

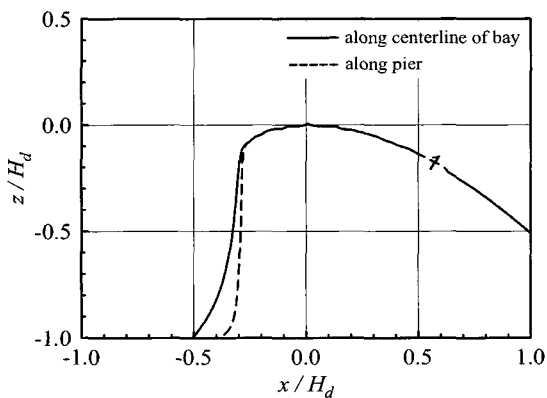


그림 12. 여수로 표면 부근에서의 유선 분포 (단위 : 1,000 kg/m/sec)

## 5. 결 론

본 연구에서는 교각이 설치된 WES의 표준 월류형 여수로에 대한 동수역학적인 흐름거동을 FLOW-3D를 이용하여 해석하였다. 모의 결과는 WES의 실험자료와 비교하였으며, 교각이 없는 월류형 여수로에 대한 2차원 모의결과와도 상호 비교하였다. 특히 교각이 설치된 월류형 여수로에서의 수위와 압력분포에 대한 특성을 상세히 고찰하였다. 유량, 수위 및 압력분포에 대한 모의결과, 부분적으로 WES의 실험결과와 차이가 발생하는 곳이 있으나, 대부분 그 경향이 일치하였다. 따라서 기존 댐 및 신규 댐 여수로의 수리학적 안정성과 기능을 평가할 때, FLOW-3D가 효과적으로 이용될 수 있음이 확인되었다. 또한 수치모델링은 전 모델링 범위의 유속과 압력분포를 구할 수 있기 때문에, 수리모형 실험에 비해 흐름거동을 구체적으로 해석하고 시각화할 수 있는 장점이 있다. 하지만 지배방정식으로 RANS를 사용하는 수치모형은 난류로 인한 국부적인 흐름 및 압력 변동 등은 계산할 수 없기 때문에, 해석하고자 하는 구체적인 문제에 따라 현장관측, 수리모형실험, 수치

모형실험을 상호 보완적으로 사용해야 할 것이다.

교각이 설치된 월류형 여수로에서의 주요 흐름거동을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 교각 전면부 상류의 국부적인 수위상승으로 인한 파랑이 하류로 진행하면서 여수로 중앙부의 수위는 증가시키고, 여수로 측면부에서의 수위는 감소시킨다.
- 2) 수두가 여수로의 설계수두보다 높은 경우 부압이 발생하는데, 부압은 웨어마루 상류 여수로 표면에서 발생하기 시작하여 웨어마루를 지나 하류로 이동하면서 연직방향으로 확산하며 그 절대크기는 감소하는 현상을 보인다.
- 3) 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부의 유속이 중앙부에 비해 크고, 웨어마루 하류에서는 여수로 중앙부의 유속이 크게 나타난다. 그리고 여수로 표면 부근의 유선을 추적한 결과, 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부의 유선이 중앙부의 유선보다 곡률반경이 작고, 웨어마루 하류에서는 거의 동일한 곡률반경을 보이고 있다. 이러한 유속과 유선의 분포특성으로 인해 웨어마루 상류에서는 여수로 측면부에서 부압이 크게 발생하고, 하류에서는 여수로 중앙부에서 부압이 크게 발생한다.

## 참 고 문 헌

- 김남일 (2003). *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model*. 박사 학위논문, 서울대학교.
- 이길성, 이종현 (2003). "CFD 모형을 이용한 여수로 수리모형의 축척효과 조사." 2003년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 2700-2703.
- 김영한, 오정선, 서일원 (2003). "수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석." 한국수자원학회논문집,

- 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 761-776.
- 윤용남 (2002). 수리학 (기초와 응용). 청문각.
- 한국수자원학회 (2003), 댐설계기준.
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company.
- Flow Science (2002). *FLOW-3D (Theory Manual)*, Los Alamos, NM.
- Ho, D.K.H, Boyes, K.M., and Donohoo, S.M. (2001). "Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique." *14th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Adelaide University, Adelaide, Australia.
- 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.
- 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.
- (논문번호:03-108/접수:2003.12.04/심사완료:2004.04.19)