韓國水資源學會論文集
第37卷 第8號 · 2004年 8月
pp. 675~685

테인터수문이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의

A Numerical Simulations on the Flow over Ogee Spillway with Tainter Gate

김 대 근* / 박 재 현** / 이 재 형***
Kim, Dae Geun / Park, Jae Hyun / Lee, Jae Hyung

Abstract

In this study, overflow behaviors through a partially open tainter gate mounted on a standard ogee spillway were investigated by using the FLOW-3D. The results indicated that the discharge coefficient is in the range of 0.685 to 0.723. A relation of gate-controlled discharge to free discharge was proposed and a reasonable correlation between the free and controlled discharge was obtained. Pressures on the spillway crest and the gate were also investigated. As the gate opening rate decreases with a fixed gate opening height and the gate opening height increases at a fixed gate opening rate, negative pressures on the spillway crest and the dimensionless maximum pressures on the gate increase.

keywords : ogee spillway, tainter gate, FLOW-3D, discharge coefficient, negative pressure

요 지

본 연구에서는 FLOW-3D를 이용하여, 테인터수문이 설치된 표준 월류형 여수로에서 수문을 부분 개방했을 경우에 대한 월류흐름 거동을 해석하였다. 모의결과, 유량계수는 약 0.685에서 0.723의 범위를 가지는 것으로 분석되었다. 수문을 완전 개방한 경우의 월류유량을 이용하여 수문을 부분 개방한 경우의 월류유량을 효과적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 수문의 개방고와 개방도에 따라 여수로면과 수문에 작용하는 압력분포의 특성을 분석하였다. 일정한 수문 개방고에 대해 수문의 개방도가 감소할수록 그리고 일정한 개방도에 대해 수문의 개방고가 높을수록, 여수로면에서 부압은 크게 발생하며 수문에 작용하는 무차원 최대압력은 증가하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 월류형 여수로, 테이터수문, FLOW-3D, 유량계수, 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 (Chow, 1959; 한국수자원학회, 2003).

* 대불대학교 토목환경공학과 전임강사
Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Daebul Univ., Chonnam 526-702, Korea
(E-mail : greatgkim@mail.daebul.ac.kr)
** 인제대학교 토목공학과 조교수
Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Inje Univ., Kyongnam, 621-749, Korea
*** 현대엔지니어링(주) 수자원부 차장
Deputy manager, Water Resources Team, Hyundai Engrg., Mok1-dong, Seoul, 158-723, Korea

수문 (gate)은 방류유량을 조절함으로써 상류 저수지의 수위와 하류 하천의 유량을 조절하는 수리구조물이다. 수문의 종류 중 테인터수문 (tainter gate)은 수압이 작용하는 수문의 전면을 원호상으로 제작하고 수문의 곡률중심에 위치한 트러니온핀 (trunnion pin)을 중심으로 회전시켜 개폐하는 구조이다. 수문의 전면에 작용하는 정수압은 트러니온핀에 집중되기 때문에 인양식수문 (lift gate)에 비해 권양하중이 작고 조작이 쉬운 장점이 있다. 이에 국내·외 대규모 댐의 여수로에 가장 널리 설치되어 사용되고 있는 수문 형식이다. 가능최대홍수량 (PMF)과 같은 극한 홍수량의 방류를 제외한 대부분의 경우에, 수문은 완전 개방이 아닌 부분 개방 상태로 운영되기 때문에 안정적인 유량의 배제 및 수자원의 효율적인 관리를 위해서는 수문의 개방도에 따른 정확한 유량계수의 산정이 매우 중요한 문제이다.

수문을 통과한 흐름과 관련된 지금까지의 연구는 대부분 인양식수문 (lift gate)과 관련된 연구이다. 이와 관련된 실험연구는 비교적 최근까지 수행되고 있으며, 주된 관심은 수문의 개방도에 따른 흐름의 수축계수와 유량계수, 수문 상·하류에서의 유속분포와 같은 흐름특성 및 바닥면의 압력분포이다 (Rajaratnam과 Subramanya, 1967; Rajaratnam, 1977; Noutsopoulos와 Frnariotis, 1978; Rajaratnam과 Humphries, 1982; Montes, 1997; Roth와 Hager, 1999). 인양식수문과 관련된 수치해석적인 연구로 Chan 등 (1973)은 유한요소법으로, Masliyah 등 (1985)은 경계고정좌표계에서 비점성유체에 대한 수치모의를 수행한 바 있으며, Montes (1997)는 등각사상 (conformal mapping)을 이용하여 2차원적인 흐름거동을 해석한 바 있다. 이와 관련된 국내 연구는 이정렬 (1994)에 의해 이루어진 바 있으며, 경계고정좌표계에서 와도 (vorticity)를 해석함으로써 흐름의 수축계수가 바닥면보다는 수문에 의한 영향을 보다 많이 받는 것으로 분석하였다. 이상의 연구들은 유량계수로 수문의 개방도에 따라 0.5에서 0.65 사이의 값을 제시하고 있는데, 각 연구자의 실험조건에 따라 서로 다른 결과를 제시하고 있다. Speerli와 Hager (1999), Roth와 Hager (1999)는 이러한 차이가 발생하는 이유로 첫째, 모형실험의 축척으로 인한 점성, 표면장력 및 경계면에서의 상대조도 영향 둘째, 수문형상의 정확한 재현과 관련되어 있음을 제시하였다. Roth와 Hager (1999)는 이러한 영향을 감안하여 실험을 수행하고, 그 결과로 수문 개방도에 따라 약 0.5에서 0.6사이의 값을 유량계수로 제안하였다.

수평 개수로에 설치된 테인터수문에서의 수축계수와 관련된 연구는 Isaacs와 Allen (1994)의 연구가 있는데, 수문의 개방도와 수문의 하단 원호에서의 접선이 바닥면과 이루는 각도 (gate lip angle)에 따라 약 0.6에서 0.73 사이의 수축계수를 제안하였다. 또한 이들은 현장에 기 시공된 수문에서 유량과 수위를 관측함으로써 수축계수를 산정하였는데, 그 값은 약 0.62에서 0.71의 값을 나타내었다.

여수로 상에 설치된 테인터수문에서의 유량계수와 관련된 연구는 USACE(1988)의 연구가 있는데, 이들은 실험 및 현장 실측결과에 근거하여 수문의 개방도에 따라 약 0.65에서 0.73 사이의 값을 제시하고 있다. 국내의 유량계수 관련 기준은 댐설계기준 (2003)에서 제시하고 있는데, 수문의 개방도에 따라 약 0.64에서 0.73 사이의 값을 제시하고 있다.

월류형 여수로에서의 유량계수 및 흐름거동 해석을 위하여 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation)를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모형을 이용하기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다 (김남일, 2003; 김영한 등, 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 해석하는 데에 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)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 최소화 하면서 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.

실험 및 수치해석적인 접근이 상대적으로 쉬워, 상대적으로 많은 연구성과가 제시된 인양식수문의 경우에도 정확한 유량계수 및 이에 영향을 미치는 흐름특성과 관

련된 연구가 진행 중인 점을 감안한다면, 테인터수문이 설치된 여수로에서 수문을 부분 개방하는 경우에 대한 유량계수 및 흐름특성에 관한 연구는 그 중요성에 비추어 연구가 미미한 상태에 머물러 있다. 본 연구에서는 USACE (1988)의 표준 월류형 여수로에 테인터수문이 설치되어 있는 경우, 수문을 부분 개방하는 경우에 대한 흐름거동을 FLOW-3D를 이용하여 해석하였다. 모의결과는 USACE (1988)의 자료와 비교하였으며, 특히 수문 개방도에 따른 유량계수, 여수로 바닥면 및 수문에 작용하는 압력분포의 해석에 주안점을 두었다.

2. 이론적 배경

2.1 월류형 여수로

테인터수문이 설치된 USACE (1988)의 표준 월류형 여수로의 형태는 그림 1과 같다. 여기서 P는 접근수로 바닥에서 웨어마루까지의 높이, H_d는 여수로의 설계수두, H_o는 위치수두, H_v는 접근유속에 의한 속도수두, H_e는 전수두이며, H_1은 수문 하단부 (gate lip)를 기준으로 산정한 전수두이다. R은 수문의 반경, B는 트러니온핀의 설치높이, G_o, G_v와 G_o'은 각각 수문턱 (gate seat)에서 연직으로 산정한 수문개방고, 웨어마루 (crest axis)에서 연직으로 산정한 수문개방고와 수문 하단부를 시점으로 측정한 최단 수문개방고이다. 최단 수문개방고 양 끝점은 여수로면과 수문의 원호면에서 만나는데, 이 점들을 접점으로 하는 접선을 그렸을 때 이 두 접선이 이루는 각이 β이다. x_G는 수문턱의 수평위치이다.

수문을 완전 개방한 경우, 여수로의 월류유량, Q는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q = CL_eH_e^{1.5} \tag{1}$$

여기서 C는 유량계수이고 L_e는 웨어마루의 유효길이이다. 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 (한국수자원학회, 2003).

수문을 부분 개방한 경우, USACE (1988)에서 제시하는 월류유량은 다음과 같은 일반적인 오리피스 공식이다.

$$Q_u = C_uG_o'L_e\sqrt{2g\left(H_e - \frac{G_v}{2}\right)} \tag{2}$$

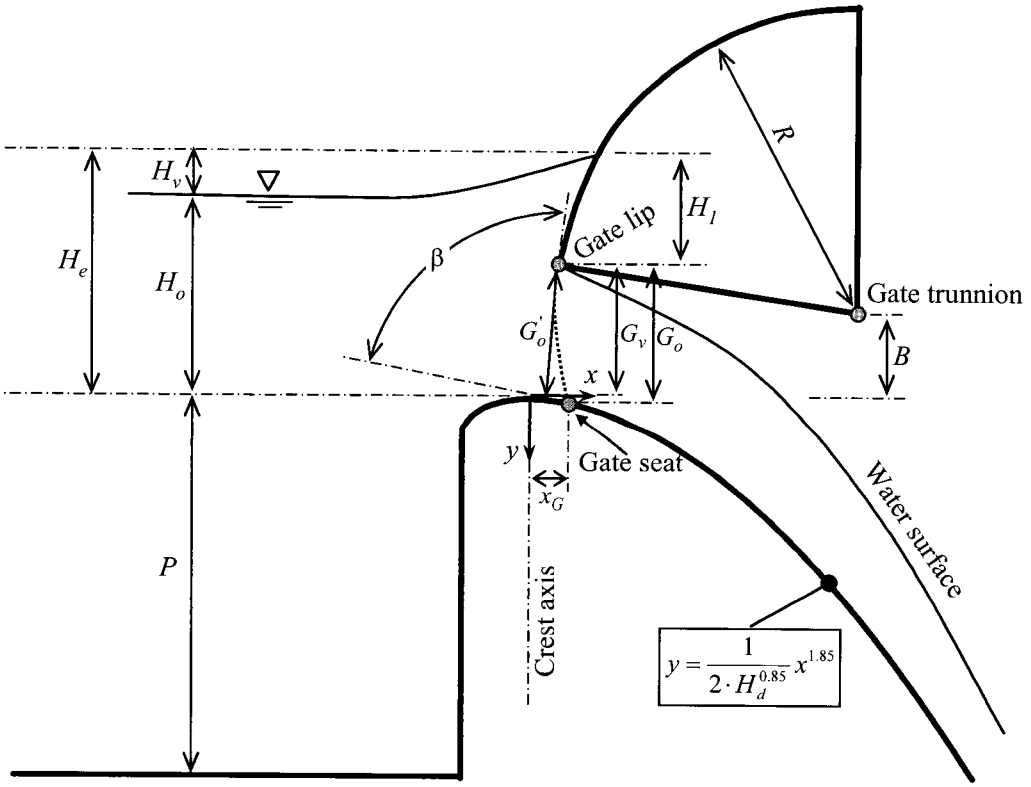


그림 1. 테인터수문이 설치된 표준 월류형 여수로

여기서 C_u는 유량계수로, 수문턱의 위치와 β에 따라 약 0.65에서 0.73의 값을 가진다. 그림 2는 식 (2)에서 사용하는 수문의 개방고에 따른 유량계수를 도시한 것이다. 수문을 개방함에 따라 점차 유량계수가 증가하는 경향을 보이나, 자료의 분산이 크게 발생하고 있다. 특히, 수문을 조금 개방한 경우에 유량계수의 분산이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

수문을 부분 개방한 경우, 국내에서 사용하는 월류유량 산정공식은 다음과 같은 자유오리피스 (free orifice) 흐름에 대한 공식이다 (한국수자원학회, 2003).

$$Q_d = \frac{2}{3}\sqrt{2g}C_d L_e \left(H_e^{1.5} - H_1^{1.5}\right) \tag{3}$$

여기서 C_d는 유량계수로, 수문의 개방도 (= G_v/H_e)에 따라 약 0.64에서 0.73의 값을 가진다.

수문을 부분 개방한 경우에 여수로 표면에 작용하는 압력분포에 대한 연구는 거의 이루어진 바 없으며, 단지 USACE (1988)에서 1950년대 및 1960년대의 일부 실험 및 현장계측 결과를 정리한 도표가 제시되어 있을 뿐이다. 상기 자료에는 수문을 부분 개방한 경우, 저수지의 수두가 설계수두와 같은 경우 및 설계수두의 1.33배인 경우에 대해 여수로 표면에 작용하는 압력분포를 제시하고 있다.

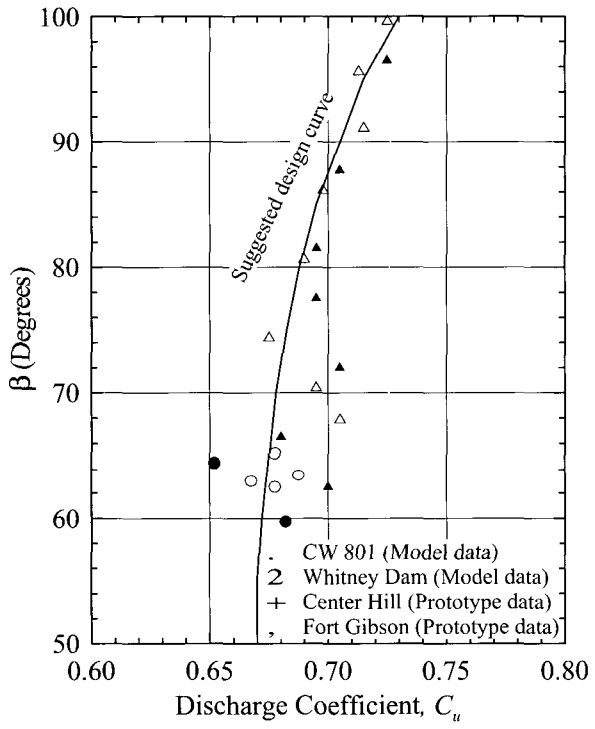


그림 2. 수문 개방고에 따른 유량계수
(adapted by USACE (1988))

2.2 수치모형

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i \tag{5}$$

여기서 t는 시간, U_i는 x_i방향의 속도, ρ는 물의 밀도, P는 압력, F_i는 중력, 점성력 등과 같은 외력이다. 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 RNG $k-\epsilon$난류모델을 사용하였다 (Yakhot, 1992). 지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형은 독립적으로 입력되며 특히, FAVOR (fractional area and volume obstacle representation) 기법을 사용함으로써 유한체적법의 접근방법으로 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 3은 모의구간의 범위와 경계조건을 도시한 것이다. 웨어마루 (weir crest)를 원점으로 하고, 모의구간의 범위는 x, z방향 각각에 대해 $7H_d$, $3.2H_d$이다. 단, 그림 3의 좌표축은 계산의 편의를 위하여 그림 1과

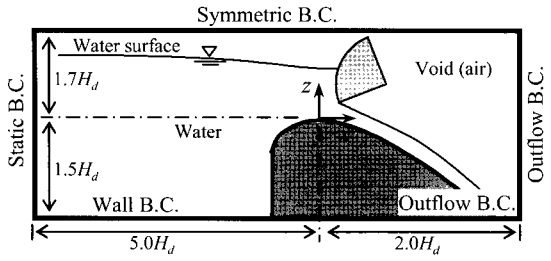


그림 3. 모의구간의 범위와 경계조건

달리 연직상향을 z축으로 하는 직교좌표계를 따랐다.

본 연구에서 여수로의 설계수두, H_d는 10.0 m를 사용하였으며 P/H_d는 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.

3.2 경계조건 및 초기조건

그림 3에서 좌측면은 유입경계조건으로 수위조건을 부여하였다. 우측면은 유출경계조건으로 상류에서 유입된 유량이 반사없이 유출되는 조건을 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. 여수로와 테인터수문을 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 가지고 상업용 강철은 0.05 mm의 값을 가진다. 본 연구에서는 접근수로와 여수로에 대해서 비교적 매끄러운 콘크리트 표면의 상당조도에 해당하는 0.5 mm를 사용하였으며, 테인터수문에 대해서는 0.05 mm의 상당조도를 이용하였다.

초기조건으로는 유입부에서 자유수면이 테인터수문과 만나는 지점까지 유입경계조건과 동일한 수위를 부여하였다. 나머지 조건은 모두 0으로 놓았다. 세밀한 격자를 이용하여 재계산하는 경우에는 앞의 계산결과를 초기조건으로 부여하였다. 계산결과의 수렴여부는 흐름의 운동에너지, 난류운동에너지, 유입 및 유출유량의 수렴여부를 이용하여 판단하였다. 본 연구에서는 이상의 수렴조건을 만족하도록 초기격자에서 200초, 세밀한 격자에서 20초 동안 계산한 결과를 이용하여 분석하였다.

본 연구에서는 표 2와 같이 수문의 개방고와 저수지의 수위를 변화시켜가며, 28가지 조건에 대해 모의결과를 검토하였다.

표 1. 격자의 크기와 격자망의 구성

구 분	Δx			Δz			격자의 개 수
	최소	최대	개수	최소	최대	개수	
Coarse grid	$0.02H_d$	$0.26H_d$	102	$0.02H_d$	$0.09H_d$	95	9690
Fine grid	$0.01H_d$	$0.13H_d$	204	$0.01H_d$	$0.04H_d$	190	38760

표 2. 모의조건

H_e/H_d \ G_o/H_d	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
0.6	G3H06				
0.7	G3H07	G4H07			
0.8	G3H08	G4H08	G5H08		
0.9	G3H09	G4H09	G5H09		
1.0	G3H10	G4H10	G5H10	G6H10	
1.1	G3H11	G4H11	G5H11	G6H11	G7H11
1.2	G3H12	G4H12	G5H12	G6H12	G7H12
1.33	G3H13	G4H13	G5H13	G6H13	G7H13

4. 모의결과

4.1 월류유량

그림 4는 H_e/H_d가 1.0인 경우, 수문개방고에 따른 월류흐름의 유황을 도시한 것이다. 색깔분포는 유속의 크기를 나타낸다. 수문의 개방고가 증가함에 따라 접근유속은 증가한다. 이러한 접근유속은 부분 개방된 수문으로 인해 흐름이 정체되면서 국부적인 수위상승을 유발하는데, 모의결과는 이러한 현상을 잘 재현하고 있다. 또한 월류흐름이 수문을 통과하면서 발생하는 흐름축소 현상을 잘 재현하고 있다.

표 3은 월류유량의 모의결과를 정리한 것이다. 비교를 위하여 식 (2)와 (3)의 결과를 함께 정리하였다. 그림 2에서 유량계수, C_u를 산정하기 위해서는 β를 구해야 하는데, 이는 USACE (1988)에서 표준형여수로에 대해 제시하고 있는 방법을 이용하였다. 그림 2에서 β가 100° 이상인 경우에는 외삽이 필요한데, 본 연구에서는 기존 연구자들이 유량계수의 상한치로 주로 제안하고 있는 0.73을 이용하였다. 식 (3)의 유량계수, C_d는 한국수자원학회 (2003)에서 제시하고 있는 그래프를 이용하였다. 모의결과와 유량산정식 (2)와 (3)의 결과를 비교하면, 식 (2)는 대체로 모의결과를 과대 산정하고 있으며 식 (3)은 모의결과를 과소 산정하고 있다. 그리고 식 (2)와 (3)을 비교하면, 조건에 따라 10% 이상 월류유량의 차이가 발생하고 있다. 수치모의를 통해 산정된 유량에 대해 식 (2)를 이용하여 유량계수를 산정하면 약 0.685에서 0.709의 값을, 식 (3)을 이용하여 유량계수를 산정하면 약 0.697에서 0.723의 값을 보이는데 이는 대체로 합리적인 결과인 것으로 사료된다.

식 (2)와 (3)을 각각 식 (1)로 나누면, 다음과 같은 수문의 조절이 없는 완전 월류유량에 대한 수문의 부분개방시의 월류유량비를 얻을 수 있다.

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{\sqrt{2g}C_u}{C}\frac{G_o'\sqrt{H_e - G_v/2}}{H_e^{1.5}} = \alpha_u \frac{G_o'\sqrt{H_e - G_v/2}}{H_e^{1.5}} \quad (6)$$

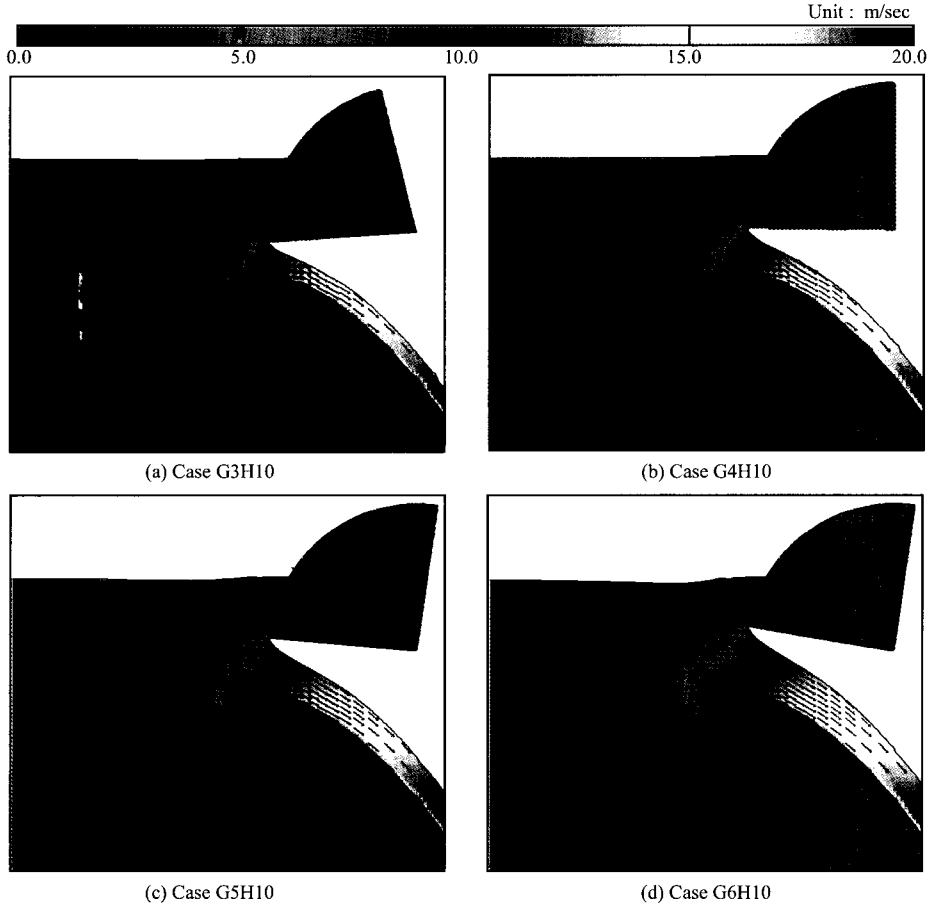


그림 4. 수문개방고에 따른 월류흐름의 유황 (H_e/H_d = 1.0)

$$\frac{Q_d}{Q} = \frac{2\sqrt{2g}\,C_d}{3C}\,\frac{(H_e^{1.5} - H_1^{1.5})}{H_e^{1.5}} = \alpha_d \frac{(H_e^{1.5} - H_1^{1.5})}{H_e^{1.5}} \quad (7)$$

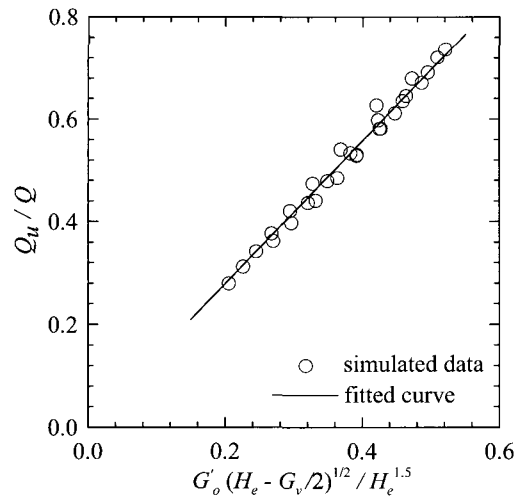
위에서 α_u와 α_d는 수문 개방도와 관련된 유량계수의 비이다. 그림 5는 표 3의 모의결과를 이용하여, 식 (6)과 (7)을 도시한 것이다. 그림 5에서 완전 월류유량은 김대근 등 (2004)에서 기 수행된 모의결과를 이용하였다. 그림 5에서 α_u와 α_d는 각각 1.3922와 0.9467, 결정계수는 각각 0.986과 0.983의 값을 보이고 있다. 식 (6)과 (7)의 우변은 α_u와 α_d를 제외하면 저수지 수위, 여수로 및 테인터수문의 제원에 의하여 결정된다. 따라서 수문의 조절이 없는 완전 월류유량을 산정한 후, 식 (6)과 (7)을 이용하면 수문을 부분 개방한 경우의 월류유량을 산정할 수 있다. 그림 2에서 확인할 수 있는 유량계수의 분산과 식 (2)와 (3)을 이용하여 월류유량을 산정할 때 그 산정결과의 차이를 감안하면, 이상과 같은 접근방법은 유용한 것으로 사료된다.

4.2 여수로면에 작용하는 압력분포

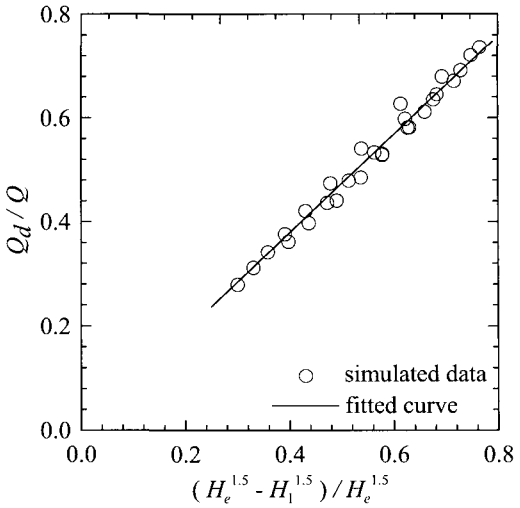
그림 6은 여수로면에 작용하는 압력분포이다. 비교를 위하여 USACE (1988)의 실험자료를 함께 도시하였다. 그림 6에서 h_p는 여수로면에 작용하는 압력수두이다. 모의결과는 수문의 하류에서 부압의 크기를 과대산정하는 경향이 있으나, 대체로 실험결과와 비슷한 분포를 보이고 있다.

표 3. 월류유량 모의결과

G_o/H_d	G_o'/H_d	β (Deg.)	C_u	H_e/H_d	G_v/H_e	C_d	단위폭당 월류유량 (m^3/sec/m)				상대오차 (%)	
							실 험 식		모의결과		식 (2)	식 (3)
							식 (2)	식 (3)	부분개방	완전개방		
0.3	0.2886	86.15	0.6973	0.60	0.47	0.6698	19.15	17.84	19.05	30.40	-0.2	6.4
				0.70	0.40	0.6774	21.12	19.93	21.14	39.10	0.3	5.7
				0.80	0.35	0.6829	22.93	21.83	23.03	48.62	0.6	5.2
				0.90	0.31	0.6870	24.60	23.58	24.79	58.92	0.9	4.9
				1.00	0.28	0.6902	26.16	25.21	26.41	70.17	1.1	4.5
				1.10	0.26	0.6927	27.64	26.75	27.93	81.74	1.1	4.2
				1.20	0.23	0.6949	29.04	28.20	29.47	94.51	1.5	4.3
				1.33	0.21	0.6973	30.77	29.99	30.95	110.89	0.7	3.1
0.4	0.3879	90.66	0.7063	0.70	0.55	0.6615	27.43	25.08	26.57	39.10	-3.1	5.6
				0.80	0.48	0.6689	30.00	27.80	29.07	48.62	-3.0	4.4
				0.90	0.42	0.6749	32.36	30.29	31.42	58.92	-2.9	3.6
				1.00	0.38	0.6797	34.56	32.61	33.61	70.17	-2.7	3.0
				1.10	0.35	0.6835	36.63	34.78	35.67	81.74	-2.6	2.5
				1.20	0.32	0.6865	38.59	36.82	37.55	94.51	-2.7	2.0
				1.33	0.29	0.6897	40.99	39.31	40.12	110.89	-2.1	2.0
0.5	0.4880	95.18	0.7154	0.80	0.60	0.6557	36.62	32.82	35.05	48.62	-4.3	6.4
				0.90	0.54	0.6625	39.75	36.09	38.00	58.92	-4.5	5.0
				1.00	0.48	0.6684	42.65	39.12	40.79	70.17	-4.4	4.1
				1.10	0.44	0.6733	45.37	41.97	43.34	81.74	-4.6	3.2
				1.20	0.40	0.6775	47.93	44.65	45.83	94.51	-4.5	2.6
				1.33	0.36	0.6818	51.07	47.91	48.86	110.89	-4.4	1.9
0.6	0.5887	99.73	0.7289	1.00	0.58	0.6577	50.68	44.80	48.53	70.17	-4.3	7.7
				1.10	0.53	0.6632	54.13	48.34	51.91	81.74	-4.2	6.9
				1.20	0.48	0.6680	57.37	51.67	55.00	94.51	-4.2	6.0
				1.33	0.44	0.6734	61.33	55.75	58.60	110.89	-4.6	4.9
0.7	0.6903	104.35	0.7300	1.10	0.62	0.6539	61.59	53.93	60.21	81.74	-2.1	10.4
				1.20	0.57	0.6591	65.51	57.94	63.42	94.51	-3.2	8.6
				1.33	0.51	0.6650	70.28	62.83	67.80	110.89	-3.5	7.3



(a) USACE (1988)



(b) 한국수자원학회 (2003)

그림 5. 수문을 부분 개방한 경우의 월류유량

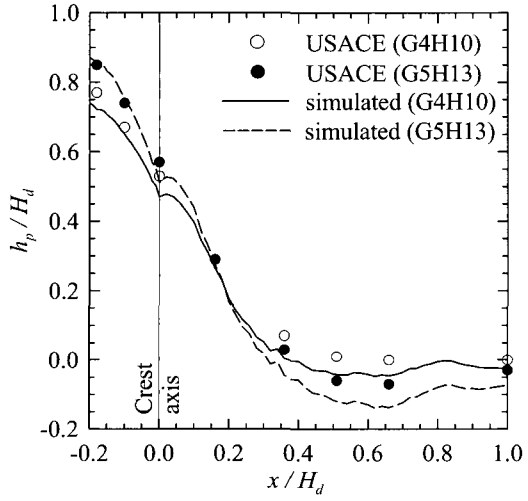


그림 6. 여수로면에 작용하는 압력분포 검증

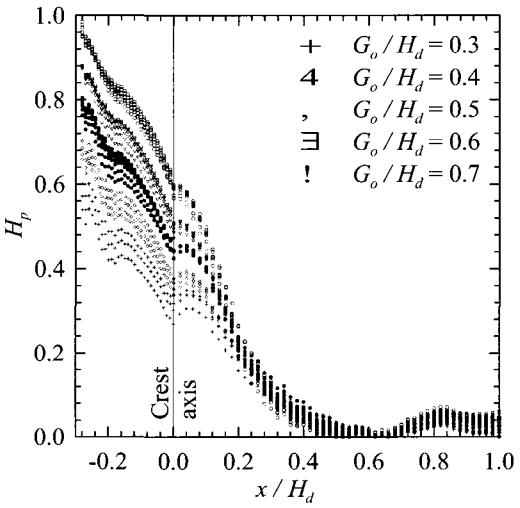


그림 7. 여수로면에 작용하는 압력분포검증

그림 7은 여수로면에 작용하는 무차원 압력분포로, H_p는 다음과 같다.

$$H_p = \frac{h_p - h_{\min}}{H_e - h_{\min}} \tag{8}$$

식 (8)에서 $h_{\min}$은 여수로면에 작용하는 최소압력이다. 그림 7에서 최소압력은 x/H_d = 0.6을 전, 후하여 발생하고 있다. 그리고 x/H_d = 0.2 하류에서 압력분포의 변동이 작은데, 이는 수문턱의 위치 (x_G/H_d = 0.167)와 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, 월류흐름이 수문을 통과하면서 상류에서 사류로 변하는데, 사류 구간에서의 압력분포, H_p는 수문의 개방고와 관계없이 거의 일정한 분포를 보이고 있다. 특히, 식 (8)에는 수문의 개방고에 관한 변수가 없는데도 수문 하류에서의 압력분포는 거의 일정하게 나타나고 있다. 반면에 수문 상류에서는 수문의 개방고에 따라 여수로면에 작용하는 압력분포가 변하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 수문의 개방고 (G_o/H_d)와 개방도

(G_v/H_e)에 따라 여수로면에 작용하는 최소압력을 도시한 것이다. 수문을 일정하게 개방한 상태에서 저수지의 수위가 상승하면 수문의 개방도는 감소하는데, 이 경우 여수로면에 작용하는 압력은 점차 감소하여 부압이 발생한다. 최소압력은 수문의 개방고에 따라 조금씩 상이하나 약 $-0.12H_d$에서 $-0.15H_d$의 범위에서 발생하고 있다. 이는 USACE (1988)에서 제시하는 부압의 크기와 대체로 일치하는 결과이며, 수문을 완전 개방한 경우에 여수로면에 발생하는 부압보다는 작은 값이다. 수문을 완전 개방한 경우, H_e/H_d가 1.33이면 부압은 약 $-0.5H_d$까지 발생한다 (Chow, 1959). 또한 동일한 개방도에 대해 수문의 개방고가 높을수록 부압이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

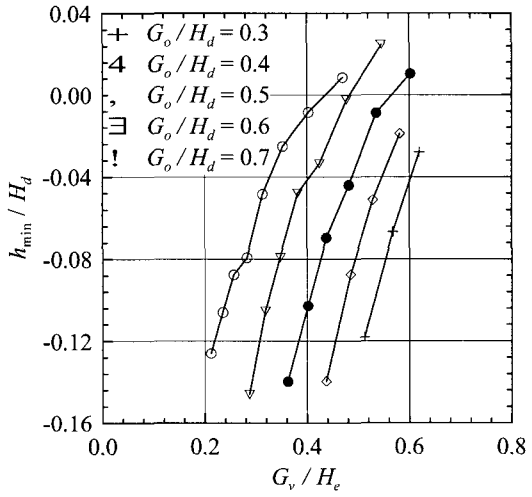


그림 8. 여수로면에 작용하는 최소압력

4.3 수문에 작용하는 압력분포

그림 9은 수문에 작용하는 압력분포로, Z와 H_{pg}는 다음과 같다.

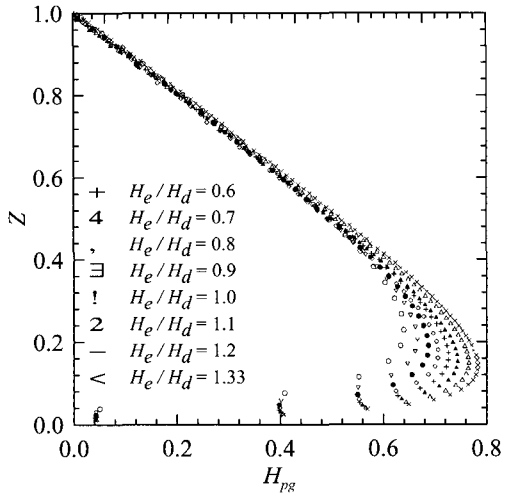
$$Z = \frac{z - G_v}{H_e - G_v} \tag{9}$$

$$H_{pg} = \frac{h_{pg}}{H_e - G_v} \tag{10}$$

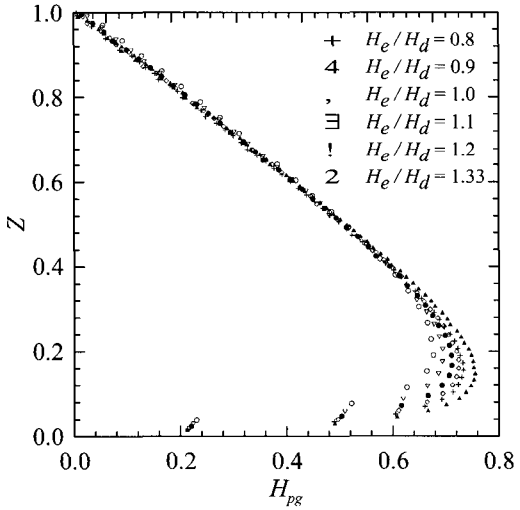
위에서 h_{pg}는 수문에 작용하는 압력수두이다. 자유수면에서 Z = 0.4 부근까지 수심에 따라 압력이 선형으로 증가하는 정수압분포를 나타내며, Z = 0.15~0.2 부근에서 최대의 압력이 발생하고 있다. 여기서부터 압력은 급격히 감소하여 수문 하단부에서 대기압이 발생한다. 그림 10은 수문의 개방고 및 개방도에 따른 무차원 압력수두, H_{pg}의 최대값, H_{pgM}을 도시한 것이다. 수문의 개방고가 일정한 경우, 저수지의 수위가 증가할수록 (수문의 개방도가 감소할수록) H_{pgM}은 증가하는 경향을 보인다. 그리고 동일한 개방도에 대해 수문의 개방고가 높을수록 수문에 작용하는 H_{pgM}은 증가하는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

테인터수문은 국내·외 대규모 댐의 방류유량 조절을 위해 널리 사용되고 있다. PMF 방류를 제외한 대



(a) G_o/H_d = 0.3



(b) G_o/H_d = 0.5

그림 9. 수문에 작용하는 압력분포

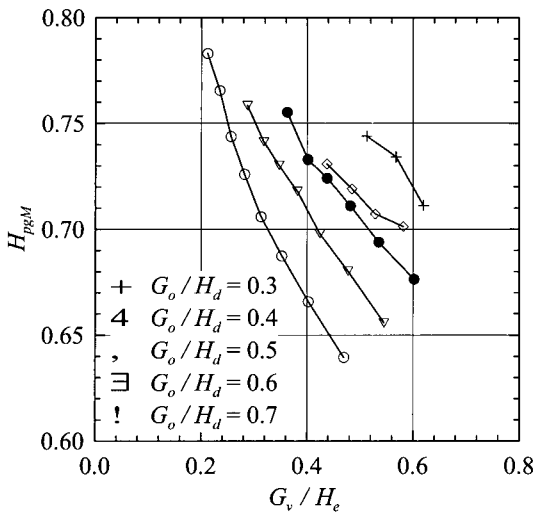


그림 10. 수문에 작용하는 최대압력

부분의 경우에 수문은 완전 개방이 아닌 부분 개방 상태로 운영되기 때문에 홍수량의 안정적인 배제 및 수자원의 효율적인 관리를 위해서는 수문의 개방고 및 개방도에 따른 수리학적 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 USACE (1988)의 표준 월류형 여수로에 테인터수문이 설치되어 있는 경우, 수문을 부분 개방하는 경우에 대한 흐름거동을 FLOW-3D를 이용하여 해석하였다. 특히 수문 개방도에 따른 유량계수, 여수로 바닥면 및 수문에 작용하는 압력분포의 해석에 주안점을 두었다. 테인터수문이 설치된 월류형 여수로에서 수문이 부분 개방된 경우의 월류흐름 특성을 정리하면 다음과 같다.

1) 모의결과, 유량계수는 모의조건 및 월류유량 산정방법에 따라 차이가 있으나 약 0.685에서 0.723의 범위를 가지는 것으로 나타났는데, 기존 실험결과와 비교할 때 대체로 합리적인 값인 것으로 판단된다. 이러한 모의결과를 바탕으로 완전 월류유량을 이용하여 수문을 부분 개방한 경우의 월류유량을 산정할 수 있는 식 (6)과 (7)을 제안하였다.
2) 여수로면에 작용하는 무차원 압력, H_p는 수문 하류에서는 수문의 개방고와 무관한 분포를 보이나 수문 상류에서는 수문의 개방고에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 동일한 수문 개방고에 대해 수문의 개방도가 감소할수록 그리고 동일한 개방도에 대해 수문의 개방고가 높을수록 여수로면에 부압이 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 하지만 이 경우에 발생하는 부압은 수문을 완전 개방한 경우에 발생하는 부압을 초과하지 않는 것으로 나타났다.
3) 수문에 작용하는 압력은 자유수면에서 Z = 0.4 부근까지 정수압분포를 보이며, Z = 0.15~0.2 부근에서 최대 압력이 발생한다. 여기서부터 압력은 급격히 감소하여 수문 하단부에서 대기압이 발생한다. 동일한 수문 개방고에 대해 수문의 개방도가 감소할수록 그리고 동일한 개방도에 대해 수문의 개방고가 높을수록 무차원 압력수두의 최대값, H_{pgM}은 증가하는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

김남일 (2003). *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model.* 박사학위논문, 서울대학교.

김대근, 이재형, 서일원 (2004). "교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 363-373.

김영한, 오정선, 서일원 (2003). "수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 761-776.

이정렬 (1994). "연직수문하의 경계층 흐름." **한국수문학회지**, 제 27권, 제 3호, pp. 95-105.

윤용남 (2002). 수리학 (기초와 응용). 청문각. 한국수자원학회 (2003), 댐설계기준.

Chan, S.T.K., Larock, B.E., and Herrmann, L.R. (1973), "Free surface ideal fluid flow." *Journal of Hydraulics Div.,* ASCE, Vol. 99, No. 6, pp. 959-974.

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.

Isaacs, L.T. and Allen, P.H. (1994). "Contraction coefficients for radial sluice gates." *Proceedings 1994 International Conference on Hydraulics in Civil Engineering, National Conference Publish No. 94/1,* Institution of Engineers, Barton, ACT,

Australia, pp. 262-265.

Masliyah, J.H., Nandakumar, K., Hemphill, F., and Fung, L. (1985). "Body-fitted coordinates for flow under sluice gates." *Journal of Hydraulics Div.,* ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 922-933.

Montes, J.S. (1997). "Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 219-232.

Noutsopoulos, G.K. and Frnariotis, S. (1978). "Discussion to free flow immediately below sluice gates." *Journal of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 104, pp. 451-454.

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.

Rajaratnam, N. (1977). "Free flow immediately below sluice gates." *Journal of Hydraulics Div.,* ASCE, Vol. 103, pp. 345-351.

Rajaratnam, N. and Humphries, J.A. (1982). "Free flow upstream of vertical sluice gates." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 20, pp. 427-436.

Rajaratnam, N. and Subramanya, K. (1967). "Free flow upstream of vertical sluice gates." *Journal of Irrigation Drainage Div.*, ASCE, Vol. 93, pp. 167-168.

Roth, A. and Hager, W.H. (1999). "Underflow of standard sluice gate." *Experiments in Fluids*, Vol. 27, pp. 339-350.

Savage, B.M. and Johnson, M.C. (2001). "Flow over ogee spillway : Physical and numerical model case study." *Journal of Hydraulics Engineering,* ASCE, Vol. 127, No. 8, pp. 640-649.

Speerli, J. and Hager, W.H. (1999). "Discussion to irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 125, pp. 208-210.

US Army Corps of Engineers (USACE) (1988). *Hydraulic design criteria*, Mississippi, USA.

Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., and Speziale, C.G. (1992)

Development of turbulence models for shear flows by a double expansion

technique, *Physics of Fluids*, Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520.

(논문번호:04-63/접수:2004.06.22/심사완료:2004.07.27)