

배수갑문 주위의 흐름현상에 대한 3차원 난류 수치모형과 수리모형실험의 비교

Comparison between a 3 Dimensional Turbulent Numerical Model and Hydraulic Experiment Model for the flow phenomenon around a Lock Gate

이상화* · 장은철* · 하재율*

Sang Hwa Lee*, Eun Cheul Jang* and Jae Yul Ha*

요 지 : 본 연구는 갑문 개방시 유출부의 흐름 현상을 수리모형실험 결과와 3차원 수치모형실험을 비교 분석하는데 역점을 두고 있다. 대상 갑문은 군장(군산-장항)국가산업단지내의 솔리천에서 유입되는 홍수량 $218 \text{ m}^3/\text{s}$ 을 배제하기 위해서 설계된 배수갑문이다. 수치실험에 사용된 모형은 상용 전산유체역학 프로그램인 ANSYS CFX-10의 $\kappa\text{-}\epsilon$ 난류모형이다. CFX-10의 장점은 난류 흐름에 대해 현상을 양호하게 시뮬레이션 할 수 있으며 특히 물과 공기 접촉면(two phase interface)인 경계층에서 흐름 분리현상을 비교적 뚜렷하게 해석할 수 있다. 수치실험에서 해석된 유속 및 수면의 흐름 형태는 수리모형실험과 유사하게 나타났다.

핵심용어 : 수리모형실험, 3차원 수치모형, 배수갑문, 홍수량, $\kappa\text{-}\epsilon$ 난류모형, ANSYS CFX-10

Abstract : This study is focused on the comparison of a 3 dimensional numerical and hydraulic model experiment for the flow phenomenon when a lock gate is opened. The lock gate is designed to discharge the flood flow rate at $218 \text{ m}^3/\text{s}$ of Solicheon at the Kun Jang national industry complex. The three dimensional $\kappa\text{-}\epsilon$ turbulent model of ANSYS CFX-10 of the computational fluid dynamics(CFD) program was used. The characteristics of CFX-10 are able to be simulated effectively for turbulent flow, especially the flow separation of the boundary layer of the two phase interface of air and water. The velocity and the flow pattern of the numerical model was showed to be similar to the results of the hydraulic model experiment.

Keywords : hydraulic model experiment, 3 dimensional numerical model, a lock gate, flood flow rate, $\kappa\text{-}\epsilon$ turbulent model, ANSYS CFX-10

1. 서 론

외해에 접하는 배수갑문과 같은 대규모 수공 구조물을 건설하는 경우에는 수리학적 현상에 따른 구조물의 안정성이 검토되어야 한다. 특히 유출부에서는 사류현상이 나타나 도수가 발생되므로 설계시 외해측 바닥 보호공의 검토가 반드시 수반되어야한다. 따라서 본 연구는 배수갑문 개방시 유출부의 흐름 현상을 파악하기위해서 수리모형실험과 3차원 수치모형 실험결과를 비교 분석하였다. 수공구조물의 수리학적 해석을 위해 3차원 수치모형을 이용하기 시작한 것

은 비교적 최근의 일이다(김남일, 2003; 이상화 등, 2006; 정진원, 2007). 수리 실험 및 3차원 수치모형에 적용된 대상 갑문은 군장(군산-장항)국가산업단지내의 솔리천에서 유입되는 홍수량 $218 \text{ m}^3/\text{s}$ 을 배제하기위해서 설계된 배수갑문이다. 이 구조물에 대한 수리 모형실험은 Froude 상사율이 적용된 수평 및 연직 축척 1/50으로 흐름 현상을 재현 하도록 하였으며 3차원 수치실험에 사용된 모형은 실제 크기의 배수갑문과 주변 영역에 대해 상용 프로그램인 ANSYS CFX-10의 $\kappa\text{-}\epsilon$ 난류모형으로 수치모의 하였다. CFX-10의 장점은 3차원 난류 흐름에 대해 현상을 양호하게 시뮬레이

*동아대학교 토목공학과(Corresponding author: Sang Hwa Lee, Dept. of Civil Engineering, Donga National University, Busan 604-714, Korea, shlee@dau.ac.kr)

선 할 수 있으며 물과 공기 접촉면(two phase interface)의 경계층에서 흐름 분리가 뚜렷하여 도수로 인한 유속의 급격한 변화와 이에 따른 수위, 수면의 흐름 상태를 재현할 수가 있다.

2. 수리모형 실험

2.1 실험장치

본 실험은 동아대학교 하천 및 항만 공학 연구실의 3차원 수조(10m(폭)×25m(길이)×0.8m(높이))에서 수행하였으며, 연구대상 지역은 군장국가산업단지(장항지구)에 설치될 배수갑문 계획안 중 하나를 모델로 하였다. 실험유량은 7.0m(길이)*1.5m(높이)*1.0m(폭) 규모의 약 10 ton까지 저장 가능한 옥외수조로부터 30 kw(40마력) 출력의 펌프를 이용하여 디지털 전자기 유량계를 거쳐 공급되도록 하였다. 배수갑문 주위의 유속 측정은 3차원 유량유속계(KENEK사)를 이용하여 20초 동안 계측하여 평균하였다. 실제 시간은 $20 \text{ sec} \times \sqrt{50} = 141.4 \text{ sec}$ 로 배수갑문 배후에 유황이 일정하게 유지 되었을 때, 약 2분 동안 측정할 것이다.

2.2 모형 제작

수리모형의 축척과 제작은 실험의 목적, 실험수조, 실험시설 및 실험장비 등의 규모와 성능을 종합적으로 고려하여 선택되지만 가장 중요한 것은 실험의 목적에 따라 원형에서의 수리현상이 모형에서 재현될 수 있어야 한다.

유체에 작용하는 힘으로는 표면장력, 탄성변형 등이 있으나 일반적으로 축척이 클 경우, 즉 모형이 작을 경우에는 표면장력에 의한 영향이 커지므로 주의해야 한다. 배수갑문 모형실험의 경우 자유표면을 갖는 흐름으로 이러한 흐름은 중력이 유체의 운동을 지배하며, 모형과 원형사이의 상사관계는 Froude 상사율에 의한다. 모형제작 영역, 실험수조의 크기 및 하천 수심 등을 종합적으로 고려하여, 수

평 축척(N_L) 1/50, 연직 축척(N_H) 1/50의 정상 모형을 사용하였다.

실험대상 배수갑문은 5.50×5.0@4련으로 이루어져 있으며 바닥표고는 EL(-)2.5 m이다. 배수문의 길이는 74.6 m의 배수통문 형태이며, 이중 수문으로 인양식 수문이 설치되는 것으로 설계되었다.

실험 모형은 아래와 같은 순서로 제작하였다.

수조바닥에 50 cm 간격의 격자를 도시한 후 모형축척(1/50)을 고려하여 솔리천 배수로를 재현하였다.

모형의 범위는 배수갑문을 기준으로 하여 상류부 300 m까지 재현하였다.

배수갑문의 상류 수로 부분은 모래를 포설하여 물다짐을 한 후 시멘트 몰탈로 처리하였다.

솔리천 배수갑문 모형은 아크릴로 제작하여 물을 흡수함으로써 생기는 체적변화가 없도록 하고, 갑문 내 흐름을 관찰하는데 용이하도록 제작하였다.

2.3 실험 조건 및 방법

배수갑문의 수문은 홍수량을 전량 배수할 수 있는 완전 개방(Full open)상태로 설정하였으며, 수리모형실험에서의 경계조건은 상류측(호측) 경계를 홍수위로 설정하고 하류측(해측) 경계는 상류측(호측) 수위에 영향을 미치지 않는 간조시의 약 최저 간조위로 설정하여 수위가 유지되고 있는 상태에서, 배수갑문에서의 배수가 이루어지도록 설정하였다.

실험은 배수갑문을 기준으로 하여 상류부 300m 지점의 홍수량인 218 m³/sec(모형 유량 : 0.012 m³/sec)을 공급하고 배수갑문의 외해측 유출부에서 125m까지 25 m 간격으로 총 15개의 관측점을 중앙부, 우측부, 좌측부로 설정하여 0.6 H(수심)에서의 유속을 측정하였다. 또한, 배수갑문에서의 홍수량 유출로 인한 외해측의 흐름 유황은 디지털 카메라를 통해 관측하였다. 아래의 Fig. 2에 유속측정 관측점을 도시하였다.

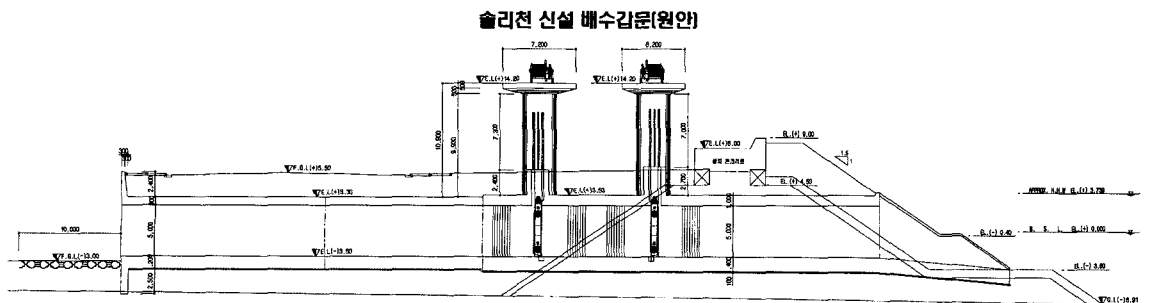


Fig. 1. Cross section of the lock gate.

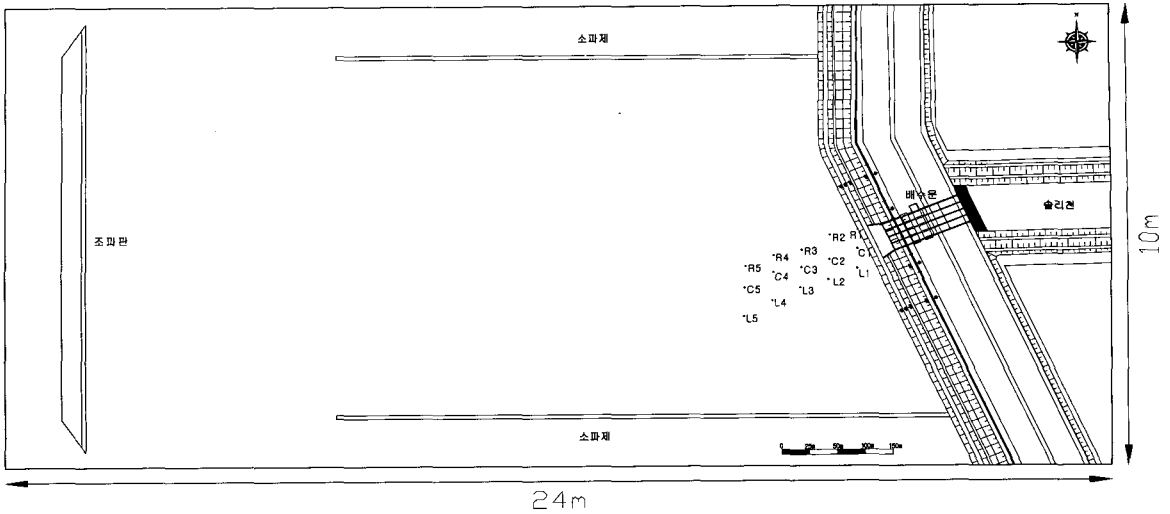


Fig. 2. Map of hydraulic model and observation points.

3. 수치모형 실험

본 연구에서의 3차원 수치모형실험은 배수갑문을 축소하지 않은 원형(prototype) 상태에 대하여 ANSYS CFX 10.0 프로그램을 이용하여 수행하였다.

ANSYS CFX 10.0는 복잡한 형상 주위의 층류 및 난류 유동과 열전달 문제를 해석하기 위해 개발된 범용 프로그램이다. 비 직교 경계 접합격자(Non Orthogonal Body Fitted Grid)를 사용하여 일반적인 압축성 층류 및 난류 유동장 해석이 가능하다. 유동장 해석능력의 중요한 인자가 되는 난류 모형으로는 k 모형을 비롯하여 Algebraic Stress 모형과 미분 레이놀즈 스트레스 모형 등을 사용자가 정의하여 이용할 수 있다. 확산효과를 줄이기 위한 다양한 차분기법이 제공되며, 이차원 Adaptive Gridding 기법을 사용하여 보다 정확한 해석을 이룰 수 있다. ANSYS CFX 10.0는 공학문제 해석에 폭넓게 적용될 수 있는데, 자동차 엔진 유동해석, 생체 내 유동, 항공기 날개 주위의 유동장 해석, 선박 스튜류의 유동해석 및 토목 분야의 댐, 배수갑문, 하천 등 유동 해석등에 이용할 수 있다. 또한 자유수면의 경우 물, 공기를 2개의 유체로 해석하여 공기와 물의 접촉면에서의 흐름을 정확하게 표현할 수 있는 장점이 있다. 본 실험에서는 ANSYS CFX 10.0 프로그램의 $\kappa\text{-}\epsilon$ 난류모형으로 배수갑문 유출부의 유동현상을 수치모의 하였다.

3.1 ANSYS CFX 10.0 프로그램에 응용된 $\kappa\text{-}\epsilon$ 난류 모형

본 연구에 이용된 $\kappa\text{-}\epsilon$ 모형은 2-방정식의 난류모형이며

수치해석에 소요되는 시간에 비해 정확성이 뛰어나므로 널리 사용된다. 2-방정식 모형은 0-방정식모형보다 훨씬 복잡한 형태를 가지고 있으며, 속도와 길이 스케일에 대해 추가적인 2개의 서로 다른 수송방정식을 풀어야 하므로 2-방정식모형이라고 불린다.

κ 는 난류운동에너지로서 속도변동의 분산으로 정의되고, 차원은 $[L^2T^{-2}]$ 이며, 단위는 m^2/s^2 이다. ϵ 은 Turbulence eddy dissipation rate이고, 단위시간당 κ 의 차원을 가지며, 단위는 m^2/s^3 이다.

$\kappa\text{-}\epsilon$ 모형은 기본방정식에 2개의 변수가 추가된다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) \\ = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, ρ 는 유체밀도, U 는 유체속도벡터, t 는 시간, T 는 Transpose, B 는 Body force vector의 합, μ_{eff} 는 난류를 고려한 유효점성이다. 그리고 p' 은 다음과 같이 표현되는 수정된 압력항이다.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho \kappa$$

0-방정식모형과 같이, $\kappa\text{-}\epsilon$ 모형은 와점성 개념에 기초한다. 따라서 다음과 같이 고려된다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

여기서, μ 는 분자점성, μ_t 는 난류점성이다. κ - ϵ 모형은 난류점성을 난류운동에너지 지와 소산율을 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

여기서, C_μ 는 상수이다.

k 와 ϵ 는 난류운동에너지와 난류 소산율에 대한 식 (3), (4)로부터 산정된다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) \\ = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k 는 모형상수이다.

P_k 는 점성과 부력에 따른 난류 생성항이며, 식 (5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \Delta U^T) \\ - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 P_{kb} 는 Buoyancy turbulence이고, 식 (6)으로 표현된다.

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{\rho P_{rt}} g \cdot \nabla \rho \quad (6)$$

여기서, P_{kb} 는 Turbulent prandtl number이다. 비압축성 유동에 대해 식 (5)의 $\nabla \cdot U$ 는 작고, 오른쪽 두 번째 항은 생성에 크게 기여하지 않는다. 압축성유동의 경우 $\nabla \cdot U$ 는 Shock가 발생하는 구역에서만 큰 값을 가지며, 3μ 항은 “Frozen stress” 가정에 기초한다. 이 값은 k 와 ϵ 값이 Shock을 지나면서 매우 크게 변하는 현상을 막아준다.

3.2 수치실험 방법

수치해석은 수리모형실험과 동일한 조건(Table 1)을 부여

하여 수행하였으며, 경계조건으로 구조물 상, 하류에서 수위경계를 부여하고, 나머지는 고체경계이므로 벽면의 조도를 반영할 수 있는 무활(no slip)조건을 부여하였다. 수리모형실험 및 수치해석의 결과를 비교검토 하는 방법으로 연구를 진행하였다. 수치해석을 수행하기 위해서는 배수갑문의 Geometry 및 Mesh를 생성하는 과정이 선행되어야 하며, 이 과정은 ANSYS ICEM CFD 10.0(ANSYS Integrated Computational Engineering and Manufacturing Computational Fluid Dynamics 10.0)이라는 상용 프로그램을 사용하였다. Geometry 및 Mesh를 생성하는 과정을 거친 후 ANSYS CFX 10.0 난류해석 프로그램으로 해석하였다.

3.2.1 Geometry의 구성

Geometry는 Point, Curve, Surface 3가지로 구성되며, 수리실험 모형제작에 사용되었던 CAD 도면을 토대로 종단도와 횡단도를 분석하여, Point와 Curve의 설정 후 구조물과 유체를 구분할 surface를 생성하는 순서로 geometry를 생성하였다. 완성된 배수갑문의 모습을 Fig. 3에 제시하였다.

3.2.2 Mesh의 구성

Mesh의 구성은 구조물의 크기를 고려하여 Hexa Mesh 크기를 구성하였다. 본 연구에서는 물과 접촉하게 되는 바닥과 구조물 벽 부분에 Mesh가 크게 설정 되면 Mesh간의 흐름에 대한 정보 전달이 연속해서 이루어지기 어렵고 특정 부위에 Mesh들이 겹치는 현상이 일어나 유동해석에 장



Fig. 3. Geometry.

Table 1. Boundary condition of experiment

실험 안	홍수량	호측 수위	해측 수위	비고
홍수 위	218 m ³ /sec	E.L. + 1.70 m	E.L. -3.739 m	약 최저 간조위

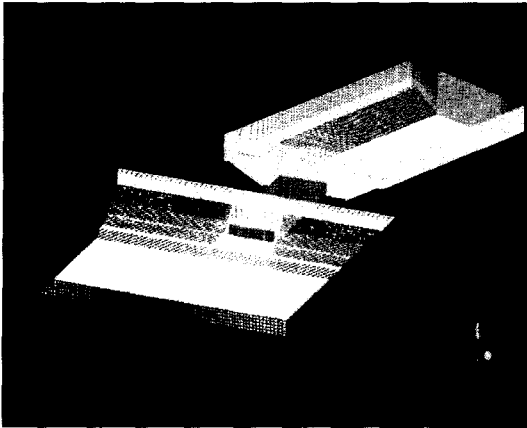


Fig. 4. Mesh.

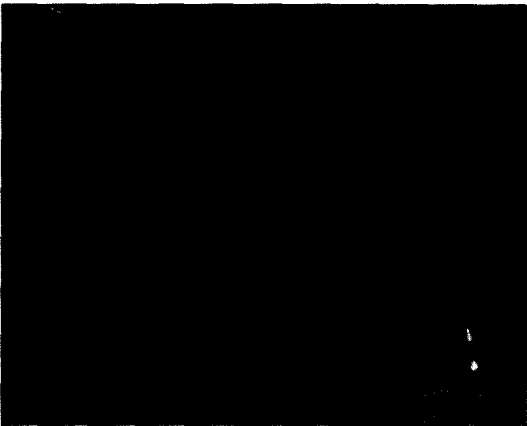


Fig. 5. Detailed Mesh.

애를 일으킬 수 있으므로 Mesh 크기를 조밀하게 구성하였다. Mesh의 개수는 2백만개가 넘는 2,306,768개 이고, Mesh의 크기는 수평격자 0.4m~1.6m, 연직(수심방향)격자 0.1m~1.0m의 가변격자로 구성되었다(Fig. 4~5).

Table 2. Velocity of experiment and simulation

측점	유속 결과 (m/s)	수리실험 결과(A) (m/s)	수치실험결과(B) (m/s)	차이 (A-B)
L1	1.32	1.45	1.45	0.13
L2	1.31	1.78	1.78	0.47
L3	2.81	3.12	3.12	0.31
L4	0.91	1.63	1.63	0.72
L5	2.85	2.97	2.97	0.12
C1	12.08	10.95	10.95	1.13
C2	8.95	8.74	8.74	0.21
C3	10.95	9.62	9.62	1.33
C4	7.67	7.21	7.21	0.46
C5	9.54	8.74	8.74	0.80
R1	6.69	6.36	6.36	0.33
R2	0.71	1.79	1.79	1.08
R3	2.26	2.31	2.31	0.05
R4	1.55	2.08	2.08	0.53
R5	4.02	3.63	3.63	0.39
평균	4.91	4.83	4.83	0.54

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유속 결과 비교

수리모형실험의 경우 배수갑문 유출부 중앙부분의 유속이 해측방향으로 약 125 m 까지 7.67~12.08 m/s 정도의 유속이 관측되었고, 좌측부분에서는 0.91~2.85 m/s 정도의 유속을 보이고, 우측부분에서는 1.78~6.36 m/s의 유속분포를 보였다.

수치모형실험의 경우는 중앙부분의 유속이 7.21~10.95 m/s 이고, 좌측부분은 1.45~3.12 m/s, 우측부분에서는 1.79~6.39 m/s의 유속분포 결과를 보이고 있다.

수리모형과 수치모형실험의 결과는 Table 2와 Fig. 6-8에 제시하였다.

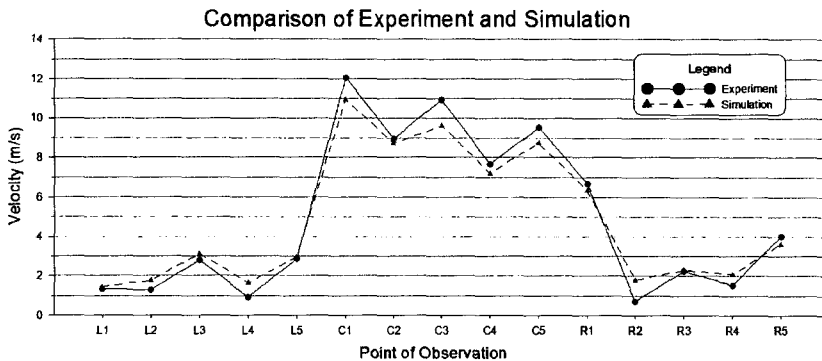


Fig. 6. Comparison of experiment and numerical model.

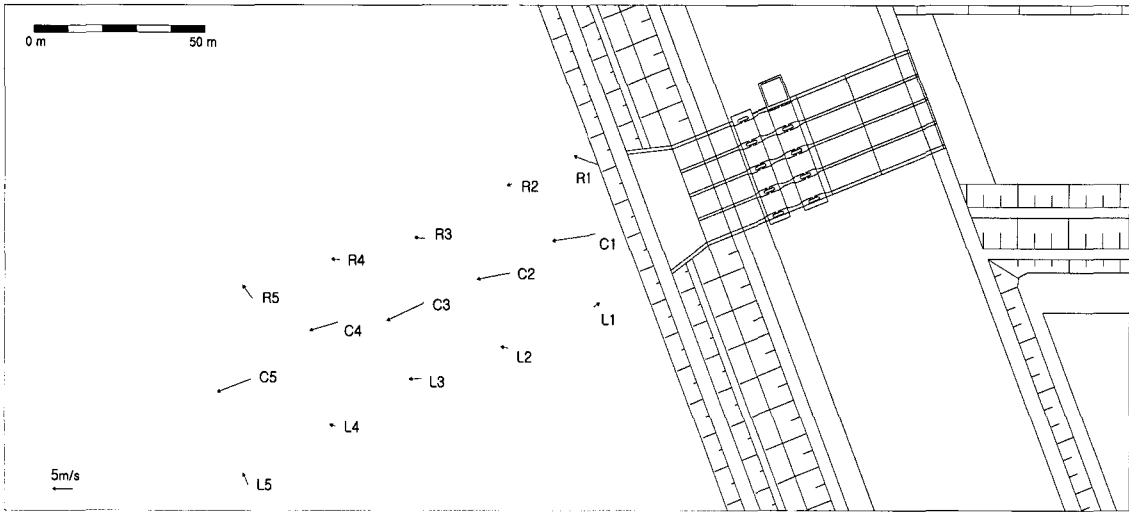


Fig. 7. Velocity vector of experiment.

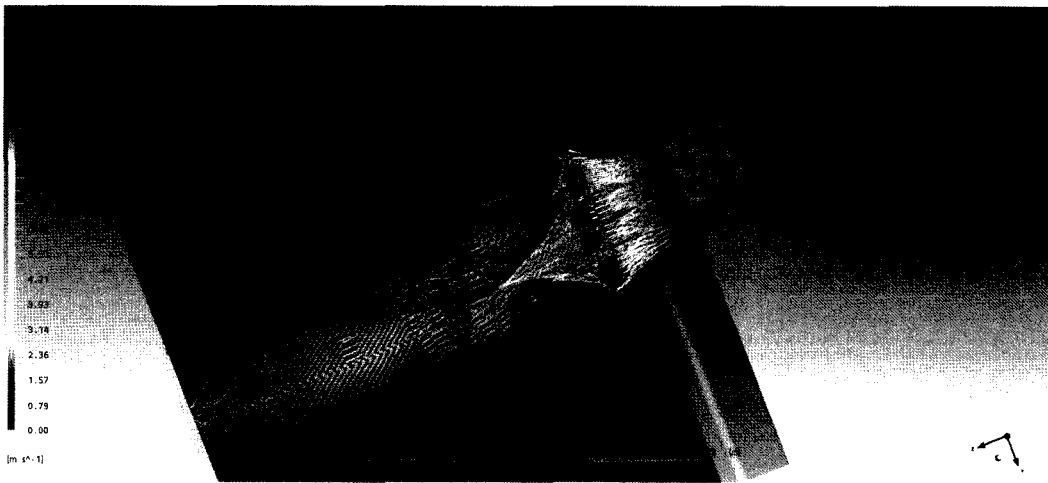


Fig. 8. Velocity vector of simulation.

수치모형실험의 유속이 작게 나타나는 이유는 수치모형 실험에서는 실제와 같은 조건하에서 배수갑문 벽면의 처리를 콘크리트 조도계수를 적용하였으나, 수리모형실험에서는 배수갑문에서의 흐름특성을 확인하기 위해 매끄러운 아크릴 모형으로 제작하였기 때문에 조도계수의 영향으로 인해 수치모형실험에 비해 유속이 다소 크게 나타난 것으로 판단된다.

4.2 배수갑문 유출부 유황 비교

수리모형실험과 수치모형실험에서 배수갑문 유출부의 수위는 삼각형 제트류 부분에서 약 6 cm 정도 나타났지만, 그

외 부분은 수리모형실험 시 도수로 인해 정확한 수위 측정에 어려움이 있었다. 이로 인해 사진촬영으로 수리모형실험과 수치모형실험의 유황을 비교 하였다. 수리모형실험의 경우, 배수갑문 유출부에서 외해방향으로 약 25 m까지 삼각형 모양의 제트류가 나타나고 있으며, 그 이후 도수가 발생하여 배수갑문으로부터 외해측 약 150 m까지 진행되었다. 수치실험의 유황은 수리모형실험과 매우 유사하게 나타나고 있으며, 삼각형 모양의 제트류 부분은 외해방향으로 24.5 m까지 나타나고 있고, Fig. 9~12에서 확인할 수 있듯이 도수현상을 잘 재현하고 있다.

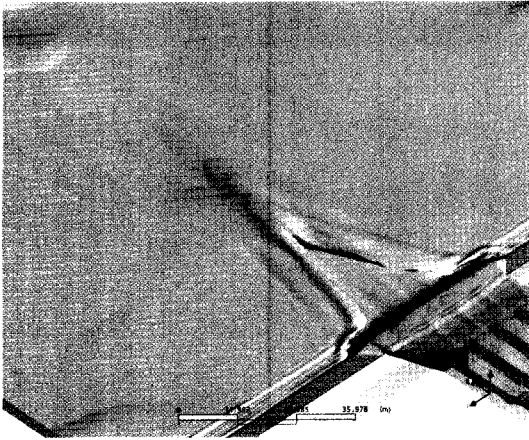


Fig. 9. Flow shape of simulation (1).



Fig. 12. Flow shape of experiment (2).

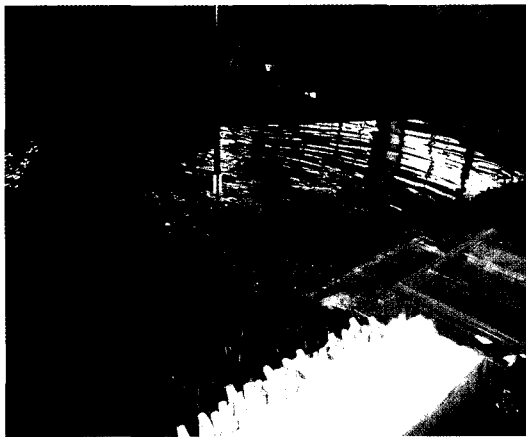


Fig. 10. Flow shape of experiment (1).

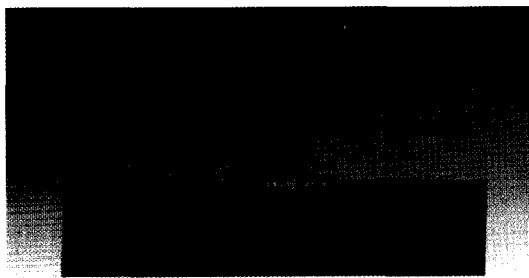


Fig. 11. Flow shape of simulation (2).

5. 결 론

본 논문은 군장국가산업단지(장항지구)에 설치될 배수갑문 계획안 중 하나를 모델로 하여, 수리모형실험과 3차원 CFD 프로그램인 ANSYS CFX 10.0을 이용하여 배수갑문 유출구 부근의 유속 및 유행을 비교 검토하였다.

검토 결과, 평균 유속은 수리모형실험 4.91 m/s, 수치모형실험 4.83 m/s 정도의 분포로 나타났으며, 중앙부분에서는 수리 및 수치실험 모두 10 m/s 이상의 유속이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 측정별로 수리 및 수치실험의 유속의 차이는 평균 0.54 m/s 정도가 발생하고 있지만, 수리 실험의 측정 오차 및 조도계수의 차이를 감안하면, 수치모형실험이 수리현상을 비교적 만족스럽게 재현하였다고 판단할 수 있다. 또한 배수갑문 유출부의 체트류 및 와류등의 수면형은 수리 및 수치모형 실험이 거의 흡사하게 나타나고 있다. 이는 ANSYS CFX 10.0 프로그램의 특성상 물과 공기를 각각의 유체로 해석함에 있어 두 유체의 접촉면인 경계층에서 흐름 분리 현상을 비교적 뚜렷하게 해석할 수 있는 장점에서 비롯된 것으로 판단된다. 따라서 배수갑문의 설계시 수리학적 검토에서 ANSYS CFX 10.0을 이용한 수치모형실험을 유용한 해석 도구로 이용될 수 있을 것으로 사료되며, 자유 수면을 갖는 수리구조물(댐, 하천)의 난류해석에 있어 ANSYS CFX 10.0 프로그램을 적용함으로써 댐 감세지에서의 사류 및 도수의 해석에 이용할 수 있으며 하천의 와류 현상의 파악에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구결과를 비추어 배수갑문 유출구에서의 유속이 중앙부근에서 외해측으로 약 125 m 범위까지 10 m/s 정도의 유속이 발생하기 때문에 외해측 해저면의 세굴이 크

게 발생할 우려가 있음을 확인할 수 있다. 이에 바닥 보호공의 필요성이 요구되며, 향후 추가적으로 바닥보호공의 길이에 따른 유속의 감소 효과에 대해 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2004학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

정진원 (2007). CFX 수치해석 프로그램을 이용한 댐 여수로의 유동현상에 대한 고찰. 석사학위논문, 동아대학교.
 이상화, 박정호 (2006). 수치모형을 이용한 다원주 주위의 유동 해석. 한국해양공학회지, **20**(2), 29-35.

이상화, 장은철 (2004). 다원주 주위의 유동에 관한 실험적 연구(I). 대한토목학회논문집, **24**(2-B), 131-136.
 김남일 (2003). Investigation of Scale Effects of Hydraulic Model for Dam Spillway Using 3-D CFD Model. 박사학위논문, 서울대학교.
 CFX-5(2002). CFX-5 User's Guide.
 권속국, 나정우 (1986). 배수갑문의 유량계수 결정에 대한 실험적 연구. 한국농공학회지, **28**(1), 51-59.
 Berg, J.R. (2006). Three-dimensional analysis of airflow and temperature in a thyristor valve hall. M.Sc., University of Manitoba, Canada.
 Al-Suhaibani, Z.A. (2005). Flow analysis and modeling of centrifugal compressor impellers. Ph.D., Michigan State University, USA.

Received April 3, 2007

Accepted April 20, 2007