J Korean Soc Disaster Secur 14(4): 47-60, 2021
https://doi.org/10.21729/ksds.2021.14.4.47

Print ISSN: 2466-1147 Online ISSN: 2508-285X
www.dssms.org

KSDS

Original Article

여수로 방류에 따른 여수로 바닥슬래브의 손상 발생원인 수치모의 검토

유형주[1] · 신동훈[2] · 김동현[1] · 이승오[3]*

[1]홍익대학교 건설환경공학과 박사과정, [2]K-water연구원 물인프라안전연구소 연구위원, [3]홍익대학교 건설환경공학과 교수

Numerical Examinations of Damage Process on the Chuteway Slabs of Spillway under Various Flow Conditions

Hyung Ju Yoo[1], Dong-Hoon Shin[2], Dong Hyun Kim[1], and Seung Oh Lee[3]*

[1]Ph.D Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hongik University

[2]Research Fellow, Water Energy & Infrastructure Research Center, K-water

[3]Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hongik University

요 약

최근 기후변동성으로 인하여 집중호우의 발생빈도 및 강우강도 증가로 노후화된 여수로 바닥슬래브 표면에서의 손상이 발생하여 잦은 보수·보강이 필요한 실정이다. 이를 위해 현장조사, 수리모형 실험 및 수치모형 실험을 통하여 여수로 방류에 따른 손상발생 원인 검토에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 일반적으로 여수로의 흐름특성 및 압력분포에 대한 검토를 수행하였을 뿐 손상의 근본적인 발생원인 규명에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 여수로 바닥슬래브 손상발생 원인을 도출하기 위해 공동침식 및 수력잭킹(hydraulic jacking)으로 인한 콘크리트 탈락관점에서 3차원 수치모형인 FLOW-3D와 COMSOL Multiphysics를 사용하여 검토하였다. 또한 공동지수를 산정하고 압력분포로 인하여 구조물이 받는 응력과 콘크리트의 인장·굽힘강도를 비교하여 공동침식 및 수력잭킹으로 인한 콘크리트 탈락 발생 가능성을 확인하였다. 수문 완전개도 조건에서 여수로 방류에 따른 공동침식 및 수력잭킹에 대하여 수치모의를 수행한 결과, 여수로 하류부에서 공동지수가 0.3 미만으로 공동침식 발생 가능성을 확인하였고, 공동부 및 균열부에서 압력분포에 따라 콘크리트가 받는 응력은 4.6~5.0 MPa로 콘크리트 인장강도와 굽힘강도와 비교를 통하여 지속적인 압력변동으로 인한 콘크리트의 피로파괴 또는 휨파괴 가능성을 확인하였다. 따라서 여수로 고유속 흐름에 의한 공동현상 및 수력잭킹이 여수로 바닥슬래브 손상발생의 다양한 원인 중 하나로 판단하였다. 그러나 본 연구는 다양한 형상 조건 및 방류 시나리오를 적용하고 유체-구조물 상호작용(Fluid-Structure Interaction, FSI)모의를 수행하지 못하였다는 한계점이 있다. 이에 향후에는 한계점을 보완하여 검토한다면 보다 효율적이고 효과적인 여수로 유지관리 방안 도출이 가능할 것으로 기대한다.

핵심용어: 여수로, FLOW-3D, COMSOL Multiphysics, 공동침식, 수력잭킹

ABSTRACT

Recently, as the occurrence frequency of sudden floods due to climate variability increased, the damage of aging chuteway slabs of spillway are on the rise. Accordingly, a wide array of field survey, hydraulic experiment and numerical simulation have been conducted to find the cause of damage on chuteway slabs. However, these studies generally reviewed the flow characteristics and distribution of pressure on chuteway slabs. Therefore the derivation of damage on chuteway slabs was relatively insufficient in the literature. In this study, the cavitation erosion and hydraulic jacking were assumed to be the causes of damage on chuteway slabs, and the phenomena were reproduced using 3D numerical models, FLOW-3D and COMSOL Multiphysics. In addition, the cavitation index was calculated and the von Mises stress by uplift pressure distribution was compared with tensile and bending strength of concrete to evaluate the possibility of cavitation erosion and hydraulic jacking. As a result of numerical simulation on cavitation erosion and hydraulic jacking under various

***Corresponding author:** Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr

Received: 6 December 2021, **Revised:** 13 December 2021, **Accepted:** 21 December 2021

Ⓒ Korean Society of Disaster & Security. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

flow conditions with complete opening gate, the cavitation index in the downstream of spillway was less than 0.3, and the von Mises stress on concrete was 4.6 to 5.0 MPa. When von Mises stress was compared with tensile and bending strength of concrete, the fatigue failure caused by continuous pressure fluctuation occurred on chuteway slabs . Therefore, the cavitation erosion and hydraulic jacking caused by high speed flow were one of the main causes of damage to the chuteway slabs in spillway. However, this study has limitations in that the various shape conditions of damage(cavity and crack) and flow conditions were not considered and Fluid-Structure Interaction (FSI) was not simulated. If these limitations are supplemented and reviewed, it is expected to derive more efficient utilization of the maintenance plan on spillway in the future.

Keywords: Spillway, FLOW-3D, COMSOL Multiphysics, Cavitation Erosion, Hydraulic Jacking

1. 서 론

최근 기후변동성으로 인하여 집중호우의 발생빈도가 증가하였고, 이로 인해 댐의 유입유량이 설계홍수량보다 증가하는 경우가 빈번히 발생하여 댐 안전성 강화 및 확보가 필요한 실정이다(Office for Government Policy Coordination, 2003). MOLIT & K-water(2004)에서는 기존댐의 수문학적 안정성 검토 및 치수능력증대 기본계획을 수립하였고 비상여수로 신설 및 기존여수로 확장 등을 통해 극한홍수 발생 시 홍수량 배제능력을 증대하여 댐의 안전성을 확보하고 있으나, 댐의 주요 구성요소 중 하나인 여수로의 급경사수로 바닥에서는 댐 방류에 의한 고유속 흐름 발생 및 난류에 의해서 침식이 발생하거나 공동현상(cavitation)으로 인해 구조물의 콘크리트 표면에 손상이 발생할 수 있다(MOLIT, 2016). 또한 노후화된 댐의 경우 콘크리트 설계 강도가 낮아 콘크리트 바닥 표면 손상이 신규 여수로에 비하여 상대적으로 많이 발생될 수 있으며 잦은 보수·보강이 요구되어 유지관리 비용이 증대되고 있다(Shin et al., 2021). 이에 노후화된 여수로의 상태를 파악 및 유지관리 비용 절감을 위해 MOLIT(2017)에서는 정밀안전진단을 통하여 급경사수로 바닥슬래브의 단차, 콘크리트 균열 및 손상 등에 대하여 검토를 통하여 현재의 상태를 평가하고 ME(2020)에서는 40년 이상 경과된 댐에 대하여 댐의 장수명화를 목적으로 4차 산업 기반의 인공지능(AI), 빅데이터 분석 시스템 등 스마트 기술을 도입한 스마트 안전관리체계를 구축하여 댐의 선제적 보수보강, 성능개선 및 자산관리가 가능하도록 추진하고 있다. 그러나 해당 방안은 여수로 바닥의 현재 상태에 대한 검토일 뿐 여수로 바닥 표면 손상의 원인을 규명하는데 한계점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 3차원 수치모형을 통해 여수로 방류에 따른 여수로 바닥 표면손상의 매커니즘을 검토하고자 한다. 기존의 여수로 방류에 따른 바닥 표면손상 원인 검토에 관한 연구는 주로 여수로 방류 후 현장조사를 통하여 수행하고 있으며, 여수로 방류에 따른 흐름특성 검토의 경우, 기존의 연구에서는 수리모형실험을 통하여 흐름특성을 검토하였으나, 최근에는 수치모형 실험결과와 수리모형 실험결과가 근사한 것을 통하여 수치모형 실험이 수리모형 실험의 대안으로 활용되고 있다(Jeon et al., 2006; Kim, 2007; Kim et al., 2008). 국내의 경우, Jang and Kim(2020)은 여수로 방류 후 00댐 여수로 바닥슬래브 현장점검 결과 여러 곳에서 손상을 확인하였고, 수문 방류에 의한 여수로 표면 손상의 원인을 마모(abrasion), 침식(erosion), 공동(cavitation)으로 검토하였고, Shin(2017)은 미국 오로빌 댐붕괴에 대하여 검토한 결과 주여수로와 비상여수로의 손상의 원인으로 수문 방류에 따른 공동현상과 댐 노후화(aging)에 의한 여수로 콘크리트 바닥과 기초 암반 결속력의 열화(deterioration)가 합쳐져 발생한 것으로 검토하였다. 여수로 흐름 검토의 경우, Yoo et al.(2021)은 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여 00댐의 기존 여수로 및 보조 여수로 방류 조건에 따른 흐름특성을 검토하였고, Kim and Kim(2013)은 충주댐의 방류량 변화에 따른 여수로의 흐름특성 변화를 수치모형을 통하여 검토하였다. 국외의 경우, USBR(2007)은 단차(offset joint)가 존재하는 여수로 바닥 슬래브에서 수문 방류에 따른 고유속 흐름 발생 시 흐름특성 및 압력의 변화를 수리실험 및 수치해석을 통하여 검토하였고, Wahl et al.(2019)은 다양한 단차 조건(horizontal or vertical distance of offset)에 따른 바닥슬래브 주변의 흐름특성 변화를 검토하여 수직단차가 수평단차보다 흐름특성에 영향을 주는 것을 확인하였다. Graham et al.(1987)은 여수로를

포함한 수공구조물 표면에서 발생하는 침식의 원인을 마모, 공동현상으로 검토하였고 재료 측면에서 보수·보강 방안을 제시하였다. Li et al.(2011)은 3차원 수치모형 Fluent를 활용하여 가능 최대 홍수량(Probable Maximum Flood, PMF)조건에서 여수로 급경사수로부 주변의 흐름특성을 검토하였다. 그러나 대부분의 여수로 바닥 표면 손상 검토에 대한 연구는 여수로 주변 흐름특성 변화에 대한 검토만을 수행하였고, 표면 손상의 발생 조건 및 원인 규명에 대한 정량적인 검토가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 여수로 방류 조건에 따른 표면 손상 발생 위치 및 단차 조건에 따른 압력변화를 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여 검토하였다. 또한 3차원 수치모형인 COMSOL Multiphysics을 이용하여 압력분포에 따른 구조해석을 수행하여 폰 미세스(Von Mises)등가응력 및 변위를 검토하여 여수로 콘크리트 바닥 슬래브의 탈락가능성을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 여수로 바닥슬래브 표면 손상 원인

미 개척국(USBR, 2007)에서는 일반적으로 여수로 바닥슬래브 표면 손상의 원인을 공동침식(cavitation erosion), 수력잭킹(hydraulic jacking), 마모침식(abrasion erosion)으로 구분하고 있으며, 공동침식은 고유속 흐름에 의한 바닥 슬래브 요철부에서의 공동현상에 의한 침식이 발생하는 현상을 의미하고, 수력잭킹은 바닥슬래브 이음부의 균열 및 공동발생 시 고유속 흐름에 따라 침투수압이 콘크리트 인장강도를 초과하여 콘크리트의 탈락이 발생하는 현상을 의미한다. 마모침식은 고유속 흐름에 포함된 입자, 파편 등에 의한 침식현상으로 본 연구에서는 여수로 바닥슬래브 표면손상 다양한 원인 중 댐 붕괴에 영향을 미칠 수 있는 공동침식 및 수력잭킹에 초점을 두었다(Shin, 2017). Fig. 1은 Holjies 댐에서 공동침식, 수력잭킹 및 마모침식으로 인한 여수로 바닥슬래브의 손상예시를 나타내었다.

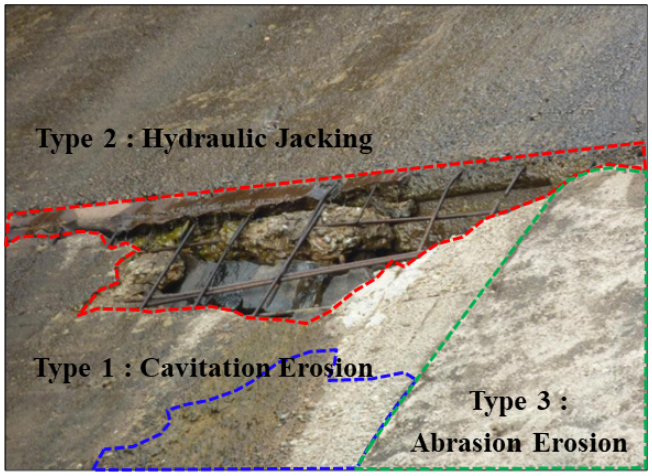


Fig. 1. Damage on the chuteway slabs of Holjes dam (Pettersson, 2012)

2.1.1 공동 현상에 의한 표면손상

공동현상은 유체의 속도변화에 의한 압력변화로 인해 유체 내에 공동이 생기는 현상을 의미하며, 압력이 증기압보다 낮아지면 액체가 기화하거나 또는 녹아 있던 공기 등이 기포로 되기 때문에 공동이 발생한다. 발생한 공동은 흐름과 함께 이동하며, 압력이 높은 곳에 오면 주위의 압력에 의해 압축되고 결국은 파괴되어 국부적으로 높은 압력이 발생하고 기포가 벽에 닿으면 부식이나 소음 등이 발생하는 특징이 있다(MOLIT, 2016). 기포는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 압축되고 결국은 파괴되

어 많은 에너지를 방출하게 되고, 그 에너지는 유체나 경계면에 매우 높은 국부 압력으로 전달되어 최종적으로 공동침식으로 알려진 손상의 원인이 된다.

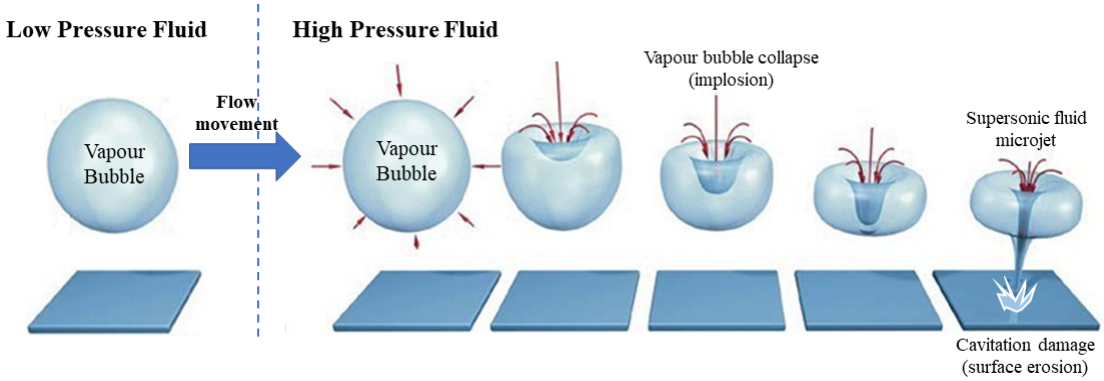


Fig. 2. The process of cavitation damage to chuteway slabs of spillway (K-water, 2020)

공동침식의 발생여부를 검토하기 위하여, Falvey(1983)는 공동지수(Cavitation Index)개념을 제시하였다. 공동지수는 공동현상의 발생가능성을 나타내는 지수로 공동현상 자체를 이해하거나 공동현상을 예측하는데 매우 편리한 지수이며, 유속, 압력, 증기압을 통하여 산정한다. 공동지수 산정은 Eq. (1)과 같다.

$$\sigma = \frac{2 \times (P_0 - P_v)}{\rho V_0^2} \tag{1}$$

여기서, σ은 공동지수, P_0, V_0는 각각 상류부의 한 단면에서 등류상태(uniform flow)의 흐름에서의 압력(Pa) 및 속도(m/s)를 의미하고, P_v는 증기압(Pa), ρ는 물의 밀도(kg/m^3)를 의미한다.

공동지수(σ)의 값이 점차 작아지게 됨에 따라 여수로 바닥슬래브에 미치는 손상의 정도는 증가하게 되며(Lee, 2012), 공동지수에 따라서 공동현상의 발달과정(phase)은 크게 4단계로 나눌 수 있다. 공동현상의 발달과정은 기포가 발생하지 않는 상태(No Cavitation)에서부터 기포가 가끔 발생되는 초기단계(Incipient Cavitation), 작은 기포가 많이 발생되는 발전단계(Developed Cavitation), 큰 공동 및 분리된 공동이 발생하는 위험단계(Super Cavitation)로 진행되며 Table 1 및 Fig. 3에 요약 정리하였다.

Table 1. Phases of Cavitation

Cavitation Index (σ)	Phase of Cavitation	Phenomenon
$\sigma \geq 3.0$	No Cavitation	No cavitation bubbles are formed
$1.8 \leq \sigma < 3.0$	Incipient Cavitation	Occasional cavitation bubbles form in flow
$0.3 \leq \sigma < 1.8$	Developed Cavitation	Many small cavitation bubbles are formed
$\sigma < 0.3$	Super Cavitation	Large vapor cavities are formed from individual cavitation bubbles

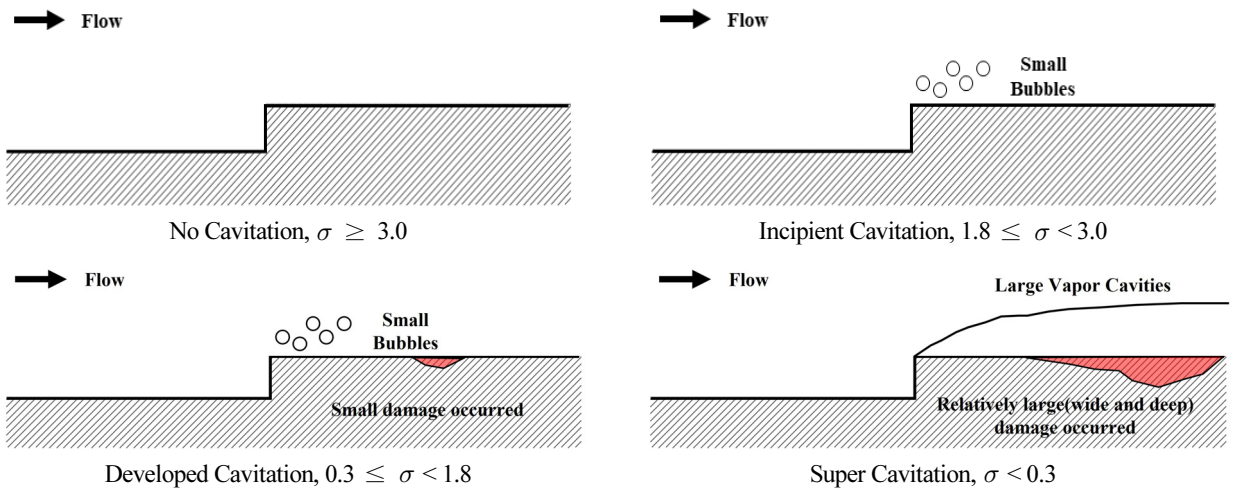


Fig. 3. Conceptual diagram about phase of cavitation

2.1.2 수력잭킹에 의한 표면손상

흐름이 수직면에 부딪치게 되면 흐름의 일부는 상류로 편향되고 나머지는 하류로 편향된다. 그리고 흐름이 부딪친 면은 순간 유속이 0 m/s가 되어 모든 운동에너지(kinetic energy)가 위치에너지로 변환한다. 이때의 압력을 정체압력(stagnation pressure)이라 하며, 정체압력은 모든 흐름에서 가장 압력이 큰 특징이 있다. 여수로 바닥슬래브 아래의 압력은 이음부의 위치, 형상 및 크기에 따라 변하며 침투수압이 콘크리트의 인장강도 또는 부착강도를 초과하게 되면 표층부 콘크리트가 탈락되는 수력잭킹(hydraulic jacking)이 발생하게 된다. 따라서 이음부(joint)에 발생하는 균열 및 공동에서 발생하는 양압력을 파악하는 것이 여수로 안정성 측면에서 중요하다(Fig. 4 참조).

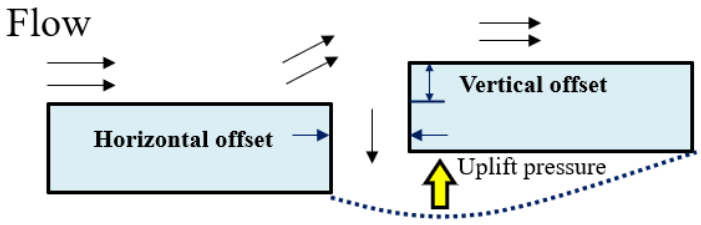


Fig. 4. Conceptual diagram of hydraulic jacking

2.2 FLOW-3D 기본이론

미국 Flow Science, Inc에서 개발한 FLOW-3D는 3차원 범용 유체역학 수치모형(CFD, Computational Fluid Dynamics)으로 자유 수면을 갖는 흐름모의에 사용된다. 다양한 난류모형을 이용하여 난류 해석이 가능하고, 댐 방류에 따른 여수로 흐름 해석에도 많이 사용되어 왔다(Flow Science, 2011). 본 연구에서는 댐 방류 시 여수로 바닥슬래브 손상 원인을 규명하기 위하여 FLOW-3D(version 12.0)을 활용하여 공동지수 및 균열 및 공동부 주변의 압력분포를 검토하였다.

2.2.1 유동해석의 지배방정식

1) 연속 방정식(Continuity Equation)

FLOW-3D는 비압축성 유체에 대하여 연속방정식을 사용하며, 밀도는 상수항으로 적용된다. 연속 방정식은 Eqs. (2) 및

(3)과 같다.

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \tag{3}$$

여기서, ρ는 유체 밀도(kg/m^3), u, v, w는 x, y, z방향의 유속(m/s), A_x, A_y, A_z는 각 방향의 요소면적(m^2), $RSOR$는 질량 생성/소멸(mass source/sink)항을 의미한다.

2) 운동량 방정식(Momentum Equation)

x, y, z 방향 속도성분 u, v, w에 대한 운동방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 다음 Eqs. (4), (5) 및 (6)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(uA_x\frac{\partial u}{\partial x} + vA_y\frac{\partial v}{\partial y} + wA_z\frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F}u \tag{4}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(uA_x\frac{\partial u}{\partial x} + vA_y\frac{\partial v}{\partial y} + wA_z\frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F}v \tag{5}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(uA_x\frac{\partial u}{\partial x} + vA_y\frac{\partial v}{\partial y} + wA_z\frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F}w \tag{6}$$

여기서, G_x, G_y, G_z는 체적력에 의한 가속항, f_x, f_y, f_z는 점성에 의한 가속항, b_x, b_y, b_z는 다공성 매체에서의 흐름손실을 의미한다.

2.3 COMSOL Multiphysics 기본이론

COMSOL Multiphysics는 편미분 방정식으로 구현된 물리현상을 모의 할 수 있는 모델링 패키지 소프트웨어이다. 이·공학 분야의 실제현상에서 일어나는 복잡한 문제를 빠르고 신속하게 풀 수 있는 솔버(solver)기능을 제공하고 있으며, 사용자 편의를 도모하도록 쉽고 간편하게 구성되어 있다.

1999년 FEMLAB이란 이름으로 스웨덴 COMSOL사에서 개발되었으며 하나의 물리현상은 물론, 다중물리 (Multiphysics)가 상호 작용하는 현상에 대한 모델링을 구현할 수 있다. 특히 Structural Mechanics 모듈의 경우 구조해석의 변위, 응력 해석을 위한 모듈로서 솔리드(Solid) 형태뿐만 아니라, 쉘(Shell), 빔(Beam), 트러스(Truss)와 같은 형상의 해석도 지원된다.

2.3.1 구조해석의 지배방정식

COMSOL Multiphysics의 구조해석은 물체의 운동상태가 시간에 따라 변화하지 않고 그대로인 정상상태(stationary state)에서 해석하며 식은 Eqs. (7), (8), (9)와 같다.

$$\nabla\sigma + F_v = 0 \tag{7}$$

$$\epsilon - \nabla s = 0 \tag{8}$$

$$\sigma - D\epsilon = 0 \tag{9}$$

여기서, σ는 응력 벡터, F_v는 체적력 벡터, ϵ은 변형률 벡터, s는 변위 벡터, D는 등방성 요소에서 영률(Young's modulus)과 프와송 비(Poisson's ratio)로 나타낼 수 있는 탄성항을 의미한다.

2.4 여수로 방류에 따른 바닥슬래브 영향분석

2.4.1 모형의 구축 및 경계조건

본 연구에서는 노후화된 여수로에 대하여 다양한 방류조건 시 여수로 흐름특성 및 여수로 바닥슬래브의 손상원인 규명을 위해 FLOW-3D 및 COMSOL Multiphysics모형을 이용하였다. 여수로의 경우, 치수능력 증대사업(MOLIT & K-water, 2004)을 통하여 완공된 ○○댐의 제원을 이용하였다. ○○댐은 200년 빈도로 설계되었으며, 2020년 홍수기 전·후 3D드론 매핑, 육안 조사 및 내구성 조사 등을 통하여 여수로 바닥슬래브의 손상이 발생하여 추후 보수·보강 등 유지관리가 필요한 상태이다(Shin, 2021). 이에 바닥슬래브 손상의 발생원인 검토가 필요한 것으로 판단하여 본 연구의 대상 댐으로 선정하였다. 여수로의 흐름특성을 검토하기 위하여 격자간격을 0.5~2.0 m의 크기로 하여 총 격자수는 56,472,000개로 구성하였으며, 여수로 방류에 따른 여수로 내 흐름해석을 위한 경계조건으로 상류는 수위(water surface elevation), 바닥은 벽면(wall), 하류는 방류(outflow)조건으로 적용하도록 하였다. 또한 바닥슬래브 손상의 상세한 검토를 위하여 균열(crack)부 및 공동(cavity)부를 재현한 단위체 지형을 별도로 구축하였다. 균열부 및 공동부를 재현하기 위하여 격자간격을 0.001~0.002 m의 크기로 하여 총 격자수는 3,220,000개로 구성하였고, 여수로 방류에 따른 균열부 및 공동부 아래의 압력을 검토하기 위한 경계조건으로 상류는 유입유량(inflow), 바닥은 벽면(wall), 하류는 수위(water surface elevation)조건으로 적용하도록 하였다(Table 2, Fig. 5 참조). FLOW-3D는 유체의 난류 해석에 대하여 혼합길이 모형, 난류에너지 모형, $k-\epsilon$ 모형, RNG(Renormalized Group Theory) $k-\epsilon$ 모형, LES(Large Eddy Simulation) 모형 등이 있으며, 본 연구에서는 $k-\epsilon$ 모형 및 RNG $k-\epsilon$ 모형에 비하여 수치모의 계산 시간은 길지만 균열 및 공동부와 같이 격자가 작은 구조에서 복잡한 난류 흐름을 정확하게 모의(Flow Science, 2011)할 수 있는 LES모형을 사용하였다. 최종적으로 COMSOL Multiphysics를 공동 및 균열부에서의 압력에 의한 여수로 바닥슬래브의 구조해석을 수행하기 위하여 FLOW-3D와 동일한 제원의 공동 및 균열부를 재현하였고 격자크기는 0.007~0.090 m의 삼각격자로 격자를 구성하였다. 경계조건은 FLOW-3D 압력분포 결과를 경계조건으로 설정하고 기초부분은 고정경계(fixed constraint)조건으로 설정하였다.

방류조건에 따른 여수로 바닥슬래브의 손상메커니즘을 검토하기 위하여 수치모의 검토 시나리오는 Table 3에 제시한 것과 같이 설정하였다. Case 1~Case 3를 통하여 계획방류량 수위조건 , 홍수기 제한수위 및 2020년 홍수기 방류수위 조건에 대하여 여수로 바닥슬래브의 손상이 발생할 수 있는 위치를 확인하였고, 취약발생지점의 공동부 및 균열부를 재현한 단위체에서 방류조건별 압력분포변화 검토를 수행하였다(Case 4~Case 9). 최종적으로 균열부 및 공동부 최대 압력 발생압력조건에서 구조해석을 통하여 변위 및 응력의 변화를 검토하였다(Case 10 및 Case 11).

수문은 완전개도 조건으로 가정하여 수치모의를 수행하였고, FLOW-3D의 경우, Manning-Strickler 공식(Vanoni, 2006)을 이용하여 조도계수를 조고 값으로 변환하여 사용하기 때문에 콘크리트의 조도계수 값(Chow, 1959)을 채택한 후 조고로 변환하였다. Manning-Strickler 공식은 Eq. (10)과 같으며, FLOW-3D에 적용한 조도계수 및 조고는 각각 0.014와 0.00061 m이다.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8.1g^{1/2}} \tag{10}$$

여기서, k_S는 조고 (m), n은 Manning의 조도계수, g는 중력가속도(m/s^2)를 의미한다.

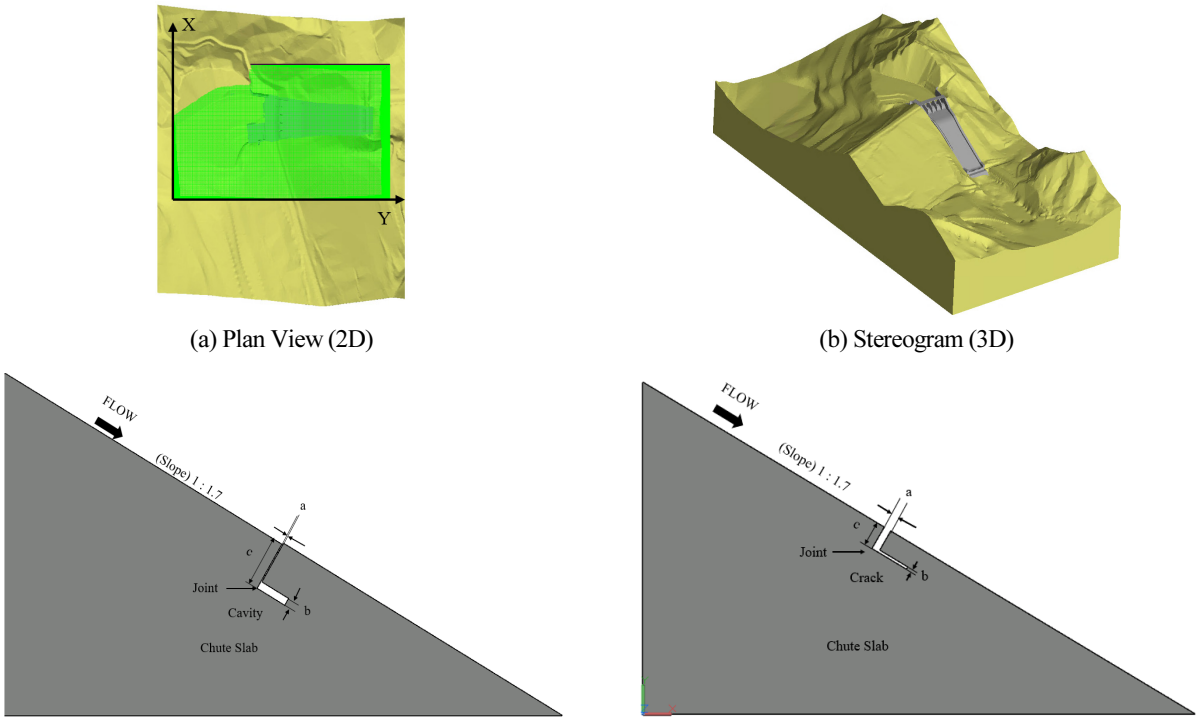
시간에 따라 각 수문별 균등하게 유량이 일정하게 유입되도록 모의를 수행하였으며, 시간간격(time step)은 각각 0.015초(Case 1~Case 3) 0.0001초(Case 4~Case 9), 0.1초(Case 10 및 Case 11)로 설정(CFL number < 1.0) 하였다. 또한 수문을 통한 유량의 변동이 실제 유량 값의 1.0 %이내일 경우는 연속방정식을 만족하고 있다고 가정하였다. 이는, 유량변동이 1.0%이내일 경우 유속변동 역시 1.0%이내이며, FLOW-3D 수치모의 결과 1.0%의 유속변동은 여수로 바닥슬래브 손상에 크게 영향을 미치지 않는다고 판단하였다. 그 결과 모든 수치모의 Case에서 1,000 초 이내에 결과 값이 수렴하는 것을 확인하였다.

Table 2. Mesh sizes and numerical conditions

Case			Global	Cavity & Crack	
Mesh	Numbers		56,472,000 EA	FLOW-3D	3,220,000 EA
				COMSOL	2,585 EA
	Increment (m)	$\triangle X$	0.5~2.0	FLOW-3D	0.001~0.002
				COMSOL	0.007~0.090
		$\triangle Y$	0.5~2.0	FLOW-3D	0.001~0.002
				COMSOL	0.007~0.090
		$\triangle Z$	0.5~2.0	FLOW-3D	0.001~0.002
				COMSOL	0.007~0.090
Boundary Conditions	FLOW-3D		Water Surface Elevation and Outflow	Inflow (Velocity) and Outflow	
	COMSOL		-	Pressure distribution and Fixed Constraint	
Turbulence Model	LES model				

Table 3. Case of numerical simulation (Q_p : Design flood discharge)

Case	Domain	Discharge (m^3/s)	Remarks
1	Global	1.00 Q_p	• Water Level at Design flood discharge
2		0.57 Q_p	• Water Level at flood discharge on 2020 year
3		0.35 Q_p	• Restricted Water Level at flood discharge
4	Cavity	1.00 Q_p	• Ratio of horizontal offset (a) and joint thickness (b) is 25 (a/b) • Depth of cavity and Crack is constant • with vertical offset
5		0.57 Q_p	
6		0.35 Q_p	
7	Crack	1.00 Q_p	• Ratio of horizontal offset (a) and joint thickness (b) is 0.2 (a/b) • Depth of cavity and Crack is constant • with vertical offset
8		0.57 Q_p	
9		0.35 Q_p	
10	Cavity	Maximum Pressure Distribution	• COMSOL Multiphysics structural analysis
11	Crack	Maximum Pressure Distribution	



(a) Plan View (2D)

(b) Stereogram (3D)

(c) Cavity Section (2D)

(d) Crack Section (2D)

Fig. 5. Layout of spillway and unit volume in this study

2.4.2 공동침식 발생 가능성 검토

본 연구에서는 여수로 방류에 따른 공동침식 발생가능성 및 발생위치를 검토하기 위해 수치모의 Case 별 관심구역을 Fig. 6과 같이 설정하였다. 관심구역의 길이(L)는 수평거리로 총 200 m이며 40 m 등간격으로 나누었다. 각 구간별 공동침식 발생가능성을 검토하기 위하여 여수로 방류량에 따른 공동지수 산정 결과를 비교하였다. 공동지수 산정 시 물의 증기압은 2,338 Pa($T = 20℃$)으로 설정하였다. 여수로 하류로 갈수록 최대유속(V_{max})은 증가하는 반면 최대압력(P_{max})은 수심이 감소함에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 공동지수를 산정한 결과, 방류량 조건에 상관없이 $X/L > 0.6$ 구간에서 공동지수(σ) 값이 0.3 미만으로 공동현상 위험단계(super cavitation)에 도달하여 공동침식이 발생할 수 있음을 확인하였다(Fig. 7 참조). 공동침식이 발생할 수 있는 위치는 여수로 하류부($X/L > 0.6$)로 $X/L = 0.2$에서의 유속과 비교하여 60% 이상 증가하는 지점이다. 이를 통하여 공동침식의 가장 중요한 인자는 고유속 흐름으로 판단되며, 여수로의 공동현상으로 인한 급경사 수로의 콘크리트 표면손상을 방지하기 위해서는 적절한 공기혼입장치(air entrainment device)를 설치해야 할 것으로 판단된다. 각 Case 별 FLOW-3D결과와 공동침식 발생여부를 비교한 결과는 Table 4에 제시하였다.

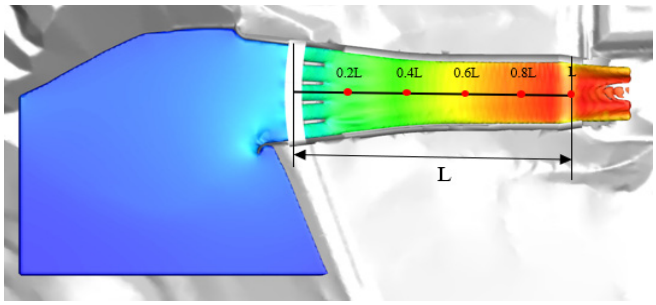


Fig. 6. Region of interest for cavitation index in this study

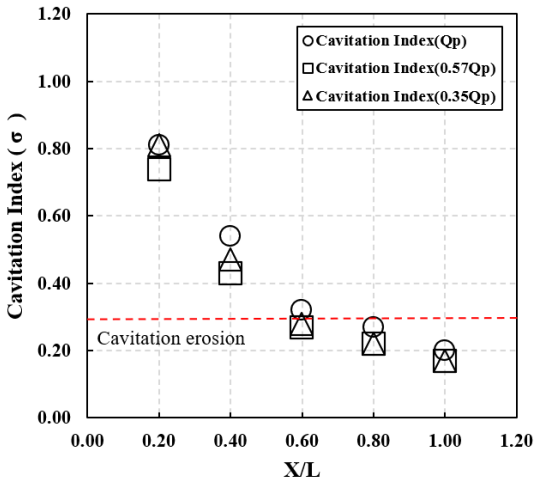


Fig. 7. Cavitation Index according to X/L

Table 4. Numerical results for each cases (Case 1~Case 3)

Case	X/L	Maximum Velocity (V_{max}, m/s)	Maximum Pressure (P_{max}, Pa)	Cavitation Index	Phase of Cavitation
1 ($Q = 1.00Q_p$)	0.20	20	156,499	0.81	Developed Cavitation
	0.40	24	159,439	0.54	Developed Cavitation
	0.60	31	154,147	0.32	Developed Cavitation
	0.80	33	152,579	0.27	Super Cavitation
	1.00	38	148,463	0.20	Super Cavitation
2 ($Q = 0.57Q_p$)	0.20	18	117,120	0.74	Developed Cavitation
	0.40	23	117,973	0.43	Developed Cavitation
	0.60	29	118,280	0.27	Super Cavitation
	0.80	33	118,788	0.22	Super Cavitation
	1.00	37	121,244	0.17	Super Cavitation
3 ($Q = 0.35Q_p$)	0.20	17	115,277	0.81	Developed Cavitation
	0.40	22	115,597	0.47	Developed Cavitation
	0.60	28	112,793	0.28	Super Cavitation
	0.80	31	108,690	0.22	Super Cavitation
	1.00	36	110,900	0.17	Super Cavitation

2.4.3 수력잭킹에 의한 표면손상 발생 가능성 검토

공동 침식 등에 의하여 표면손상이 발생한 취약지점과 이음부(joint)의 단차가 발생 시 수력잭킹에 의한 콘크리트 탈락이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 여수로 방류 시 수력잭킹에 의한 공동부 및 균열부의 표면손상 발생가능성을 검토하기 위해 수치모의 Case 별 관심구역을 Fig. 8과 같이 설정하였다. 총 10개 지점으로 양압력(uplift pressure), 음압력(negative pressure) 및 정체압력(stagnation pressure) 등이 예상되는 지점이다. 각 지점별 압력분포 검토 결과 관심지역 1(ROI 1)에서는 음압력이 발생하였으며, 관심지역 2(ROI 2)에서는 유속의 크기가 0.0 m/s에 가까워 정체압력이 발생하는 것으로 확인하였다. 관심지역 3(ROI 3)에서 관심지역 10(ROI 10)까지는 양압력이 발생하는 것으로 확인되었고, 여수로 방류에 따른 압력분포 변화를 검토하였다. 여수로 방류량이 증가함에 따라 여수로 바닥 슬래브에 작용하는 양압력의 크기는 증가하였고 압력수두(Hu)와 속도수두 비를 통하여 수평단차(horizontal offset)가 커지면 공동부 및 균열부로 유입되는 유량이 증가(유속 발생)하여 상

대적으로 양압력의 크기는 감소하는 것으로 판단되었다(Fig. 9 참조). FLOW-3D 압력분포 결과는 Table 5에 제시하였으며, FLOW-3D 검토결과를 통하여 도출한 압력분포를 이용하여 공동 및 균열부에서의 양압력에 의한 여수로 바닥 슬래브의 손상 메커니즘에 대한 구조해석을 COMSOL Multiphysics을 이용하여 수행하였다(Case 10 및 Case 11). 구조해석 시 여수로의 재질이 콘크리트이기 때문에 콘크리트 특성자료를 입력하였다. 본 연구에서 적용한 콘크리트의 밀도(ρ_{conc})는 2,300 kg/m^3, 영률(Young's modulus)은 2.5×10^{10} Pa, 프와송 비(Poisson's ratio)는 0.2이며, 시간에 따른 응력 및 변위를 검토한 결과, 양압력에 의한 여수로 바닥 슬래브의 최대 폰 미세스(von Mises) 등가응력은 각각 5.0 MPa(공동부), 4.6 MPa(균열부)발생하는 것을 확인하였다. 폰 미세스 등가응력이 재료의 항복응력에 도달하였을 때, 그 재료는 항복(yield)이 일어나게 된다. 본 연구 대상 여수로 바닥슬래브 콘크리트의 설계강도(design strength)는 17 MPa이고, 현장에서의 비파괴측정에 의한 압축강도도 20 MPa정도로 공동부 및 균열부의 양압력 분포에 의해 폰 미세스 등가응력은 항복점에 도달하지 않지만, 콘크리트의 인장강도가 1.6~2.0 MPa, 굽힘강도가 2.5~4.0 MPa임을 미루어 볼 때, 수력잭킹으로 인한 여수로 슬래브 바닥의 손상이 발생할 수 있다, 변위의 경우 이음부에서 세장비(λ)가 0.0005 발생하는 것을 통하여 지속적인 압력변동이 발생하게 되면 콘크리트의 피로파괴 또는 휨파괴가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 각 Case 별 COMSOL Multiphysics의 결과는 Table 6에 제시하였다.

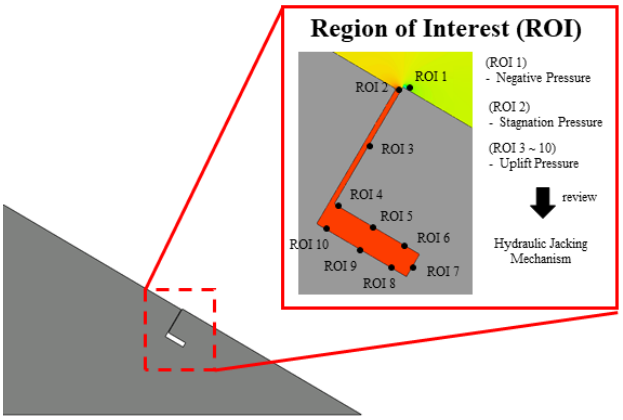


Fig. 8. Region of interest for hydraulic jacking in this study

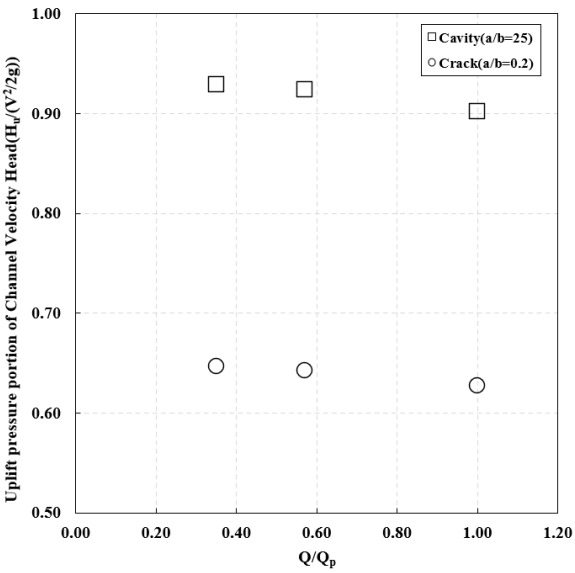


Fig. 9. Uplift pressure portion according to Q/Q_p

Table 5. Numerical results for each cases (Case 4~Case 9)

ROI	Cavity (pressure, Pa)			Crack (pressure, Pa)		
	Case 4 ($Q = 1.00\ Q_p$)	Case 5 ($Q = 0.57\ Q_p$)	Case 6 ($Q = 0.35\ Q_p$)	Case 7 ($Q = 1.00\ Q_p$)	Case 8 ($Q = 0.57\ Q_p$)	Case 9 ($Q = 0.35\ Q_p$)
1	-670,988	-651,445	-620,423	-570,988	-554,357	-527,959
2	667,497	648,055	617,196	485,837	471,686	449,225
3	647,322	628,468	598,541	447,354	434,324	413,642
4	647,933	629,061	599,106	447,949	434,902	414,192
5	648,231	629,350	599,381	448,131	435,079	414,361
6	648,432	629,546	599,567	448,332	435,274	414,546
7	648,583	629,692	599,707	448,484	435,421	414,687
8	648,582	629,691	599,706	448,480	435,417	414,683
9	648,428	629,542	599,564	448,318	435,260	414,534
10	648,231	629,350	599,381	448,121	435,069	414,351

Table 6. Numerical results for each cases (Case 10~Case 11)

Case	von Mises Stress (MPa)	Displacement (mm)	Hydraulic Jacking Damage
10	5.0	0.020	Fatigue failure possible
11	4.6	0.018	Fatigue failure possible

3. 결 론

본 연구에서는 노후화된 여수로에서 수문 방류 시 여수로 바닥 슬래브에 발생하는 표면손상의 원인을 규명하기 위하여 공동침식 및 수력잭킹 측면에서 검토하였다. 여수로 방류로 인한 여수로 내 흐름특성 및 압력분포를 검토하기 위하여 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 활용하였고, 압력분포로 인한 콘크리트의 탈락여부를 검토하기 위하여 구조해석이 가능한 3차원 수치모형인 COMSOL Multiphysics를 활용하였다. 여수로 지형은 치수능력 증대사업을 통하여 완공되었고 2020년 홍수로 인하여 여수로 바닥 슬래브 표면에 손상이 발생한 ○○댐의 제원을 이용하였다. 여수로의 조도계수 및 구조해석을 위한 재료의 특성 값은 여수로의 재질이 콘크리트인 것을 고려하여 적용하였다. 최종적으로 여수로 바닥슬래브에 공동침식 및 수력잭킹으로 인한 손상이 발생하는 지 검토하기 위하여 공동지수를 산정하고 폰 미세스 응력과 콘크리트의 인장·굽힘 강도를 비교·검토하였다.

수문은 완전개도 상태에서 방류한다는 가정으로 계획홍수량 대비 여수로 방류량을 변경하여 유속 및 압력분포를 검토한 결과, 여수로 하류로 갈수록 최대유속은 증가하는 것을 확인하였고 최대압력은 수심이 감소함에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 또한 공동지수 산정 결과 $X/L>0.6$ 구간에서 방류량의 크기의 상관없이 공동지수 값이 0.3 미만으로 공동침식이 발생할 수 있음을 확인하였고 이를 통하여 고유속의 흐름이 공동침식 발생의 중요한 인자 중 하나로 판단되었다. 수력잭킹으로 인한 표면손상 검토의 경우, 공동침식 취약부에서 발생할 수 있는 공동부와 균열부에서 검토를 수행하였으며, 압력분포 결과 공동부와 균열부의 수직단차 지점(ROI 1)에서는 음압력이 발생하고 바닥부(ROI 2~ROI 10)에서는 각각 정체압력과 양압력이 발생하는 것을 확인하였다. 여수로 방류량이 증가함에 따라 양압력의 크기는 증가하였고, 공동부 및 균열부의 수평단차(horizontal offset)가 증가하면 양압력의 크기는 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 수평단차의 크기가 커짐에 따라 공동부 및 균열부로 유입되는 유량이 증가(유속 발생)하여 상대적으로 양압력의 크기가 감소하는 것으로 판단된다. FLOW-3D 압력분포 결과를 이용하여 구조해석(COMSOL Multiphysics)을 수행한 결과 여수로 바닥 슬래브의 폰 미세스 등가응력은 공

동부에서 5.0 MPa, 균열부에서 4.6 MPa로 콘크리트의 설계강도(17 MPa) 및 실측 강도(20 MPa)에는 도달하지 못하였으나, 콘크리트의 인장강도(1.6~2.0 MPa) 및 굽힘강도(2.5~4.0 MPa)와 비교를 통하여 지속적으로 압력변동이 발생하게 된다면 수력잭킹으로 인한 여수로 슬래브 바닥의 손상이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 기후변화 및 여수로의 노후화로 인하여 홍수 시 수문 방류로 인하여 여수로 바닥 슬래브의 표면손상이 발생할 수 있는 현 시점에서 여수로 바닥슬래브의 표면의 손상메커니즘을 확인할 수 있는 기초적인 연구로 여수로 바닥슬래브 보수·보강 및 유지관리의 기초자료로 활용될 수 있다. 다만 본 연구는 유체가 구조물에 작용하는 유체-구조물 상호작용(Fluid-Structure Interaction, FSI)검토를 수행하지 못하였고, 공동부 및 균열부의 다양한 형상조건 및 흐름조건에서 검토하지 못한 한계점은 분명히 있다. 이에 향후에는 다양한 형상 조건 및 방류 시나리오를 적용 및 검토하고 유체-구조물 상호작용 모의를 수행하게 된다면 구조물 노후도 및 잔존수명 평가에 필요한 손상한계함수 도출 등 보다 효율적이고 효과적인 여수로 유지관리 방안 도출이 가능할 것으로 기대한다.

Acknowledgment

본 연구는 K-water연구원 연구과제 『K-water형 댐시설 유지관리 전략 개발 연구』에 대한 자문의 일부로 수행되었습니다.

References

Bureau of Reclamation (2007). Uplift and Crack Flow Resulting from High Velocity Discharges over Open Offset Joints. Report DSO-07-07. Denver Co. Washington, D.C.: United States Bureau of Reclamation.

Falvey, H. T. (1983). Prevention of Cavitation on Chutes and Spillways. In Frontiers in Hydraulic Engineering. ASCE. pp. 432-437.

Flow Science. (2011). Flow3D User Manual. Santa Fe: NM.

Graham, J. R., Creegan, P. J., Hamilton, W. S., Hendrickson, J. G., Kaden, R. A., McDonald, J. E., and Schrader, E. K. (1987). Erosion of Concrete in Hydraulic Structures. ACI Materials Journal. 84(2): 136-156.

Jeon, T. M., Kim, H. I., Park, H. S., and Baek, U. I. (2006). Design of Emergency Spillway Using Hydraulic and Numerical Model-ImHa Multipurpose Dam. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. pp. 1726-1731.

Kim, D. G., Park, S. J., Lee, Y. S., and Hwang, J. H. (2008). Spillway Design by Using Numerical Model Experiment - Case Study of AnDong Multipurpose Dam. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. pp. 1604-1608.

Kim, J. S. (2007). Comparison of Hydraulic Experiment and Numerical Model on Spillway. Water for Future. 40(4): 74-81.

Kim, S. H. and Kim, J. S. (2013). Effect of Chungju Dam Operation for Flood Control in the Upper Han River. Journal of the Korean Society of Civil Engineers. 33(2): 537-548.

Li, S., Cain, S., Wosnik, M., Miller, C., Kocahan, H., and Wyckoff, R. (2011). Numerical Modeling of Probable Maximum Flood Flowing through a System of Spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 137(1): 66-74.

Pettersson, K. (2012). Design of Aerators for Prevention of Cavitation – The Höljes Dam. TRITA LWR Degree Project.

Shin, D. H., Jung, W. S., Yoo, H. J., and Lee, S. O. (2021). Damages of Chuteway Slabs of Spillway by Water Release. In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. Korea Water Resources Association. 64-64.

Vanoni, V. A. (Ed.). (2006). Sedimentation Engineering. American Society of Civil Engineers.

Wahl, T. L., Frizell, K. W., and Falvey, H. T. (2019). Uplift Pressures Below Spillway Chute Slabs at Unvented Open Offset Joints. Journal of Hydraulic Engineering. 145(11): 04019039.

Yoo, H. J., Shin, D. h., and Lee, S. O. (2021). Examinations of Damage Mechanism on the Chuteway Slabs of Spillway under Various Flow Conditions. In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. Korea Water

Resources Association. 251-251.

Korean References Translated from the English

건설교통부·한국수자원공사 (2004). 댐의 수문학적 안정성 검토 및 치수능력증대방안 기본계획 수립 보고서. 세종: 국토교통부(MOLIT).

국무총리실 수해방지대책단 (2003). 수해방지대책 백서. 세종: 국무총리실(OGPCPMS)

국토교통부 (2016). 댐설계기준해설. 세종: 국토교통부(MOLIT)

국토교통부 (2017). 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침. 세종: 국토교통부(MOLIT)

신동훈 (2017). 오로빌댐 여수로 붕괴위기의 지반공학적 검토. 물과 미래. 50(3): 8-20.

이범주, 이재홍, 이은태, 이정규 (2012). 여수로 공동현상 발생방지를 위한 공기혼입장치의 효과분석. 한국수자원학회 학술발표회 논문집. pp. 538-538.

장봉석, 김태민 (2020). 수문 방류에 따른 여수로 손상 상태 및 원인. 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표회 논문집. 24(2): 167-167.

한국수자원공사 (2020). K-water형 댐시설 유지관리 전략 개발 연구. 대전: K-water.

환경부 (2020). 그린뉴딜을 통해 댐 안전관리 강화한다. 세종: 환경부(ME).