

이상홍수에 의한 댐체 월류시 댐의 구조적 안전성 검토 Structural Safety Analysis on Overflowing Dam by Extreme Flood

최홍석*, 신철식**, 배석중***, 류근준****

Hong-Suk Choi, Cheol-Shik Shin, Suk-Joong Bai, Keun-Joon Ryu

요 지

일부 콘크리트댐들의 경우 이상홍수 발생시 상·하류부 수위차가 크지 않은 상태로 월류가 발생하는 특징이 있으며, 치수능력 증대사업을 수행하여 안전성을 확보하기에는 지리적, 경제적인 문제로 어려움이 많아 현실적인 대책 수립이 어려우므로 월류가 발생한 상태에서도 안전성이 확보될 수 있는가에 대한 검토가 필요하다. 한국시설안전공단(2007)에서는 기존 댐의 수문학적 안전성 평가를 필댐과 콘크리트댐으로 구분 적용할 필요성과, 콘크리트댐의 경우 상태에 따라 일부 월류를 허용할 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였으며, 본 연구는 콘크리트 댐의 구조적 안전성 검토의 평가방법으로 수행하게 되었다.

핵심용어 : 3차원, 수치모형, 구조해석, 월류

1. 개요

월류시 구조해석의 수행 절차 및 방법은 아래의 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 댐체 월류시 구조적 안정성 평가 절차 및 방법

댐체 구조해석은 이상홍수가 유입되어 월류가 발생할 때 댐체에 작용하는 유수압을 외력조건으로 사용하게 되며, 수문 및 댐체에 작용하는 유수압을 계산하기 위하여 3차원 유동해석을 통하여 계산하였다. 유동해석에 필요한 경계조건은 수문분석과 저수지 홍수추적을 실시하여 상류부 경계조건을 계산하고, 1차원 수리해석 모형인 HEC-RAS를 이용하여 하류 경계조건을 계산하였다.

* 정회원·한국시설안전공단 진단2본부 수리시설실 직원·공학석사·E-mail : hschoi@kistec.or.kr

** 정회원·한국시설안전기술공단 진단2본부 수리시설실 부장·공학박사·E-mail : csshin@kistec.or.kr

*** 정회원·한국시설안전기술공단 진단2본부 수리시설실 부장·공학석사·E-mail : sjbai@kistec.or.kr

**** 정회원·한국시설안전기술공단 진단2본부 수리시설실 실장·공학석사·E-mail : ryukj@kistec.or.kr

3차원 유동해석에 FVM기법을 사용하는 FLOW-3D모형을 사용하였다. FLOW-3D모형은 자유수면을 가지는 3차원 수리해석에서 FLUENT 등의 CFD 프로그램보다 해석 결과의 신뢰도가 우수하며, 소양강댐, 영천댐 등 댐의 여수로 모의에서 수리모형실험과 비교하였을 때 유사한 결과를 보여주고 있어 본 과업과 같이 댐의 월류상황을 모의하기에 가장 적합한 것으로 판단된다.

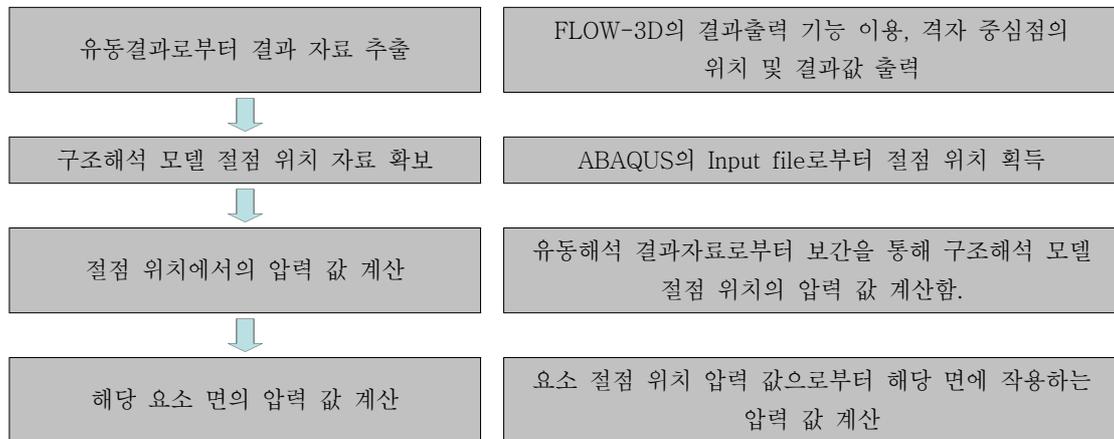
3차원 구조해석에는 FEM기법을 사용하는 ABAQUS 모형을 사용하였다. 3차원 유동해석 결과를 구조해석 데이터로 활용하기 위해서는 모델링한 지형데이터가 일치하여야하므로 수리해석에서 모델링한 CAD 데이터를 변환하여 사용할 수 있어야 한다. ABAQUS 모형은 선형 및 비선형 유한요소해석에서 뛰어난 기능을 가지고 있는 범용 구조해석프로그램으로 본 과업에 가장 적합한 것으로 판단되었다.

2. 유동-구조 연계해석 방법

유동해석과 구조해석을 연계한 해석을 수행하기 위해서는 유동해석 결과를 구조해석의 하중조건으로 변환하는 것이 필요한데 유동해석과 구조해석은 특성상 서로 다른 격자체계를 사용하고 해석모델의 격자 분포도 서로 다르므로 이를 반영하여 유동해석의 결과를 구조해석의 하중조건으로 변환하는 것이 중요하다.

서로 다른 격자체계 및 격자 분포로부터 물리량을 교환하기 위해서는 각각의 해석에서 사용하는 격자 내에서의 변수 분포의 가정을 이해하고 이를 바탕으로 보간(interpolation)을 수행하여 일치하지 않는 격자 또는 격자점으로 물리량을 전달해야 한다. 또한 전달하고자 하는 물리량의 선택에 있어서도 올바른 물리량을 선택하여 적절한 값이 용이하게 전달할 수 있도록 다음의 <표 1>과 같은 과정의 프로그램을 개발하였다.

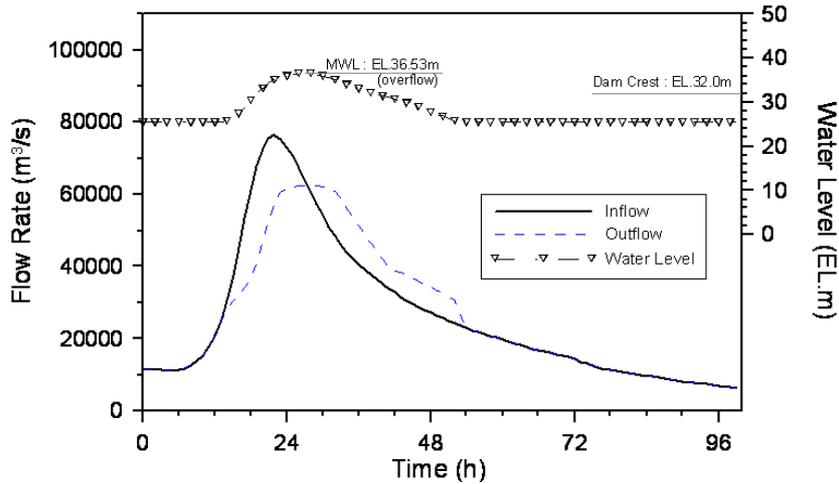
<표 2-1> FLOW-3D 유동해석 결과의 처리 절차



3. 3차원 유동해석

본 과제에 적용된 댐은 한강계에 위치하고 있으며, 상류지역에 발생한 PMP(가능최대강수량, Probable Maximum precipitation)에 대한 수문분석을 수행하고 댐에 발생한 PMF(가능최대홍수량, Probable Maximum Flood)를 저수지 홍수추적한 결과 <그림 3-1>과 같이 월류가 발생하는 것으로 분석되었다. PMF 유입시 댐에 발생하는 최고 수위는 EL. 36.53m이며, 이때의 방류량으로 하류부 수위를 계산하였을 때 EL. 30.23m로 계산되어 <표 3-1>과 같이 상·하류 경계조건으로 사용하였다.

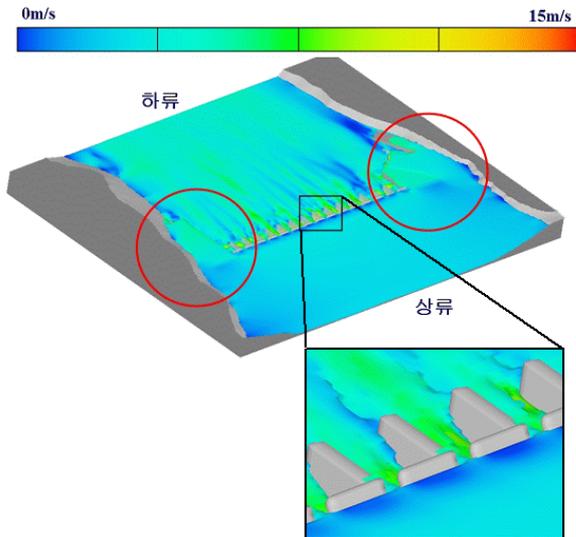
모의에 필요한 3차원 지형모델링은 Solid Edge와 GIS를 이용하여 완성하였으며, 초기조건은 사하류부 수위차를 고려하여 가장 빨리 수렴할 수 있는 가상 수면형상을 입력하고, 계산시간은 정상상태의 유동을 얻기 위해 400초 이상 해석을 실시하였다.



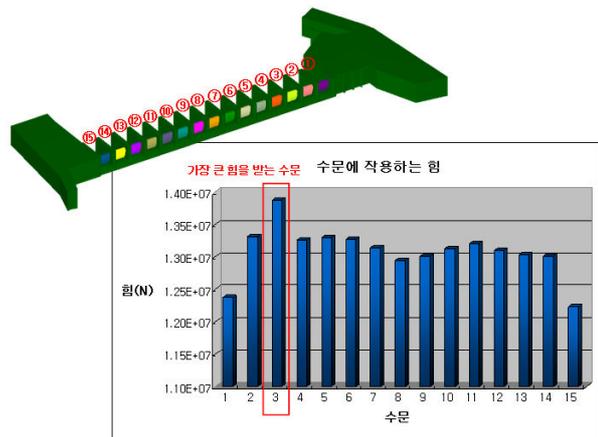
<그림 2> PMF 유입시 저수지 홍수추적 결과

유동해석을 수행한 결과 댐 및 주변의 유형은 <그림 3>과 같으며, 붉은 원으로 표시된 댐 양안의 비월류부 영역과 댐의 피어를 넘어가는 월류가 발생하는 것을 볼 수 있다. PMF시 유입되는 상류수위가 36.53m로 댐 마루 높이 32m보다 높고 상하류 수위차가 6.3m로 유입되는 유량을 수문을 통하여 배출할 수 있을 만큼 충분히 크지 않아 댐체를 월류하는 유동이 발생하는 것으로 나타났다. 비월류부에서 발생하는 월류흐름의 유속은 3~6 m/s로 분포하며 발전소쪽의 월류수심은 2.2~3.5m, 좌안 비월류부의 월류수심은 2.1~3.7m로 나타났다. 양안쪽으로 갈수록 유속이 느려지며 수위는 높아지는 것을 볼 수 있다.

<그림 4>는 각 수문이 받는 힘을 나타내고 있다. 1번, 15번 수문이 작은 힘을 받고 3번 수문은 가장 큰 힘을 받는 것으로 나타났다. 이는 양안의 비월류부 형상의 영향으로 3번 수문으로 유동이 집중되어 나타나며 수문에 작용되는 가장 큰 힘의 크기는 $1,388 \times 10^7 N$ (1,416 ton)으로 나타나 수문구조해석에 적용되었다.



<그림 3> PMF시 댐 및 주변 유속 분포

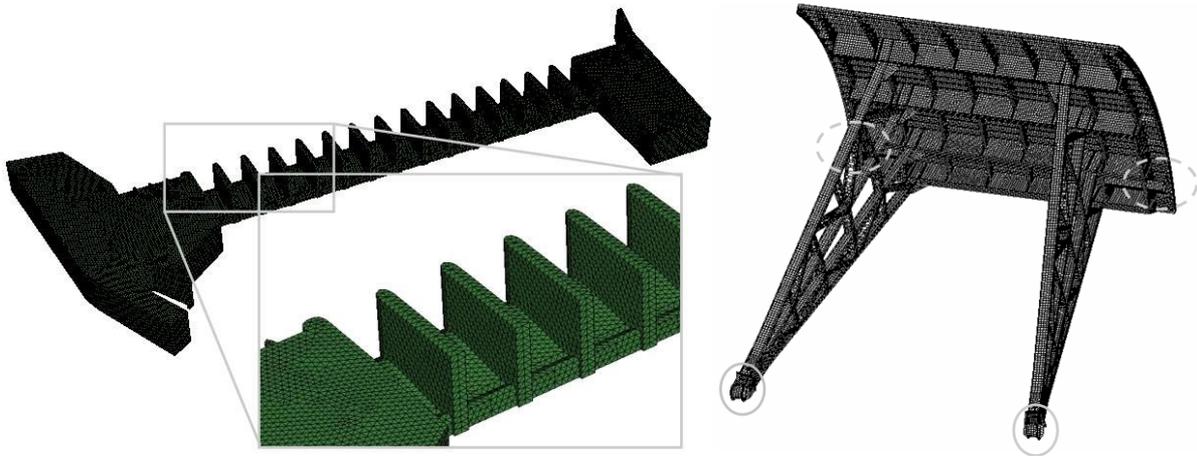


<그림 4> 수문에 작용하는 힘

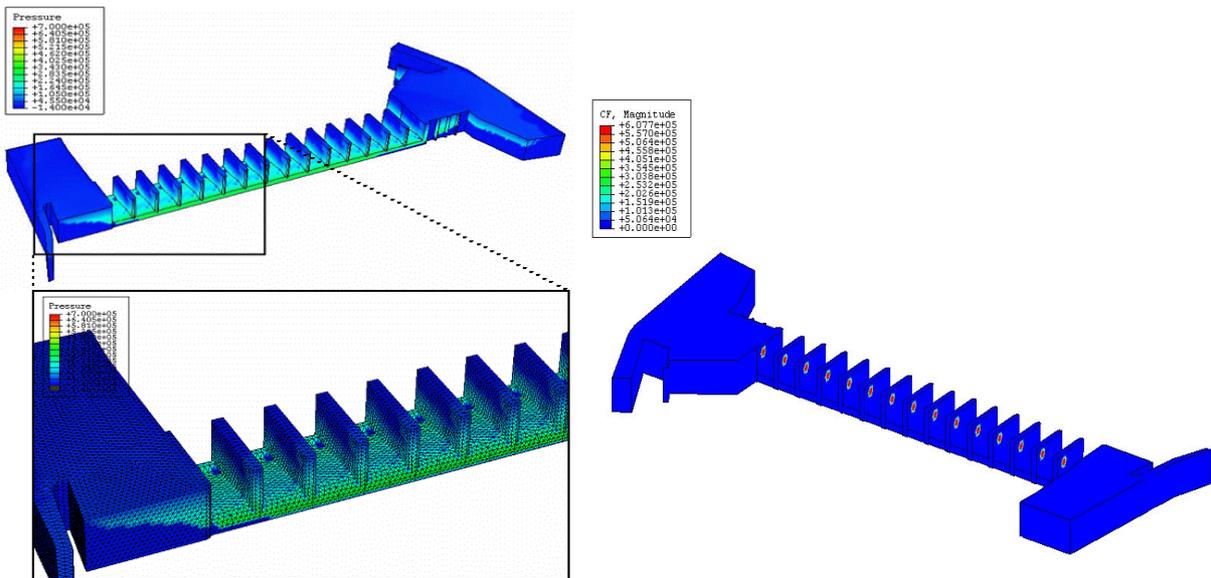
4. 3차원 구조해석

구조해석은 댐체 구조해석과 수문 구조해석을 각각 수행하였으며, 구조해석을 수행하기 위하여 설계도면을 기초로 <그림 5>와 같이 각각의 구조해석 모델을 작성했다. 구조해석에 필요한 물성치는 현장측정자료와 설

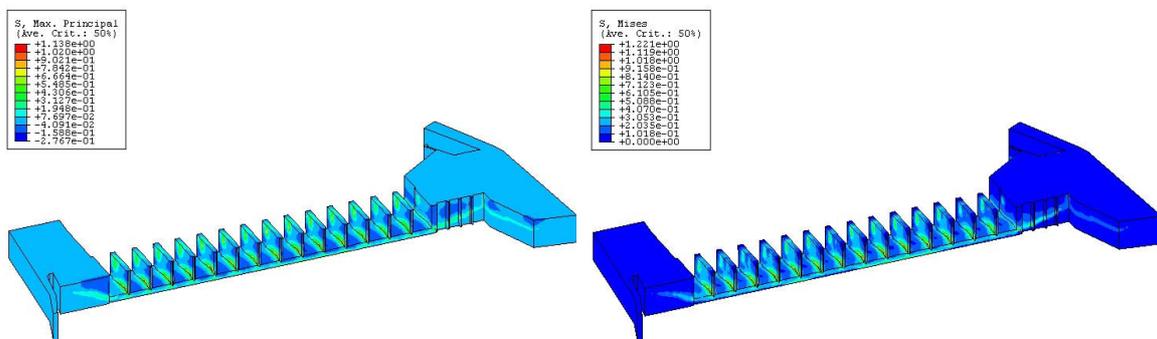
계자료를 이용하였으며, 하중조건은 <그림 6>에서 보는 바와 같이 유체의 압력하중과 수문에 의해 피어에 전달되는 힘의 하중조건을 구조해석 요소에 직접 작용하중으로 적용하였다.



<그림 5> 댐체 및 수문의 구조해석 모델



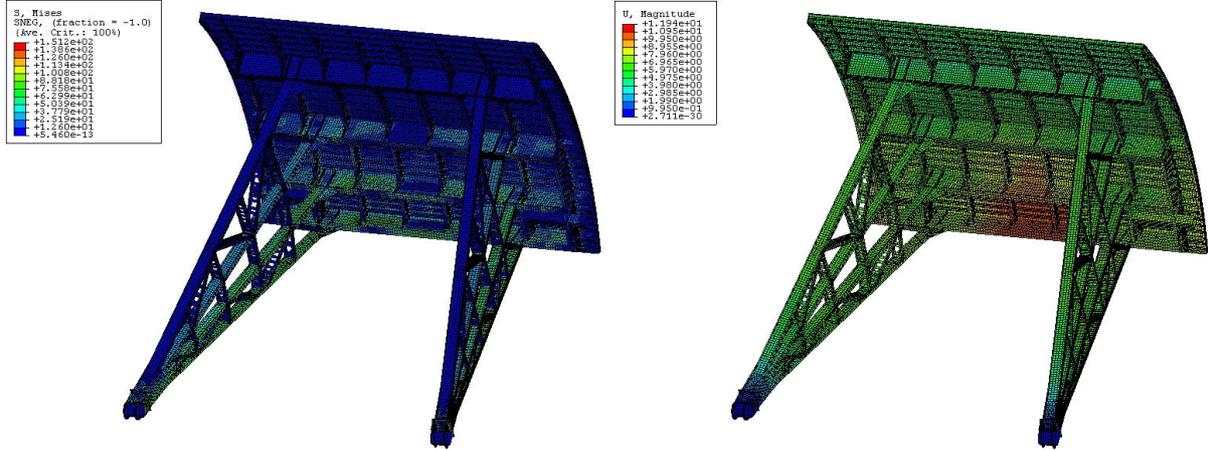
<그림 6> 댐체 구조해석 하중조건



<그림 7> 댐체에 작용하는 최대주응력과 조합응력

<그림 7>은 최대주응력과 조합응력 분포를 나타낸 그림이다. 피어 하단부와 댐체의 연결부분에서 응력이

높게 나타나며 그 값은 최대주응력의 경우 인장으로 1.138 MPa이다. 이 값은 허용인장응력인 0.577 MPa 보다 높게 나타나지만 균열응력인 2.804 MPa 의 40.6%수준이고 PMF 수준의 하중이 담체에 상시 작용하는 것이 아니므로 파괴가능성은 없다고 판단한다.



<그림 8> 수문 구조해석 결과 - 조합응력과 변형량

수문구조해석을 수행하기 위하여 PMF 시 수문개도 18m 조건의 유동해석을 별도로 수행하였으며, 그 결과로부터 수문의 스킨플레이트에 작용하는 압력을 구하여 구조해석을 수행하였다. 모의 결과는 <그림 8>과 같으며, 응력분포 및 변형량 분포를 나타내는 것으로 하류에서 바라본 그림을 나타낸다.

수문하단부의 열려진 공간이 커서, 흘러들어 오는 유동이 오리피스 상태로 대부분이 빠져나가고 그 일부가 수문 하부 영역에서 정체되는 것을 볼 수 있다. 이때 유속의 감소는 수문에 작용하는 외력으로 나타나며 수문의 구조상 형으로 가로지르는 보를 지지하는 구조물이 없어 이 영역에 가장 많은 변형이 나타난 것으로 판단된다. 수문의 하부에 힘이 걸리므로 수문 하부를 구성하는 암 및 수평보, 수직보가 힘을 받게 되고 이에 따라 응력이 발생하는 데 이러한 결과를 잘 나타내고 있다.

최대 Mises 조합응력은 151.2 MPa 로 허용조합응력 값인 194 MPa 보다 작고, 최대주응력은 84.6 MPa 로 허용응력 176.4 MPa 보다 낮게 나타나 PMF 유입시 수문은 안전성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 과업에서 수행한 대상 댐은 PMF가 유입되는 경우 월류가 발생하여 발전시설 및 권양시설의 침수와 양안부 사면의 침식이 예상되지만 월류부 및 비월류부의 콘크리트 댐체는 구조적으로 안전성을 확보하는 것으로 나타났으며, Full 개도(18m)에서는 수문 역시 PMF 방류 상황에서도 구조적으로 정적 및 동적 안전성을 확보하는 것으로 분석되었다.

이미 1980년 7월 22일, 괴산댐이 상류부에서 발생한 호우에 의해 댐체의 2.5m 월류가 발생한 바 있으나 양안부의 침식만 발생하였을 뿐 콘크리트 댐체는 큰 손상이 없었으며, 현재까지 발전 기능을 수행하고 있다. 이는 콘크리트 댐이 단 기간의 월류 상황에 대해서는 구조적인 안전성을 확보할 수 있는 사례를 단적으로 보여주는 것이며, 국내에서도 외국과 같이 댐의 현재 상태를 과학적으로 평가하고 월류를 허용할 수 있는 한계월류수심에 대한 연구를 수행하여, 댐체의 상태, 하류부 피해에 대한 중요도, 치수능력 증대사업 수행의 경제성 등을 분석하여 일부 월류를 허용할 수 있는 방안 마련이 필요하지 않나 판단된다.

월류 상황을 수치모형으로 평가하는 방법은 모형의 한계, 경계조건의 가정 등의 문제가 있으나 월류가 발생한 상태의 댐체 안전성을 현실적으로 평가할 수 있는 대안이 없는 상태에서 3차원 유동해석과 3차원 구조

해석을 연계하고, 댐체 및 수문의 구조안전성을 구분하여 수행함으로써 발생할 수 있는 오차를 최소화 하고, 붕괴가 발생할 수 있는 상황을 가장 유사한 상태로 재현할 수 있는 것으로 평가된다.

참고문헌

1. 건설교통부, “댐설계기준”, 2005.
2. 한국수력원자력(주) 발전처, “수력운영 실무자료집”, 2004.
3. 한국시설안전기술공단, 정밀안전진단 보고서 다수.
4. ABAQUS V6.5.1 Users Manual
5. Abbott, M. B., Basco, D. R., "Computational Fluid Dynamics - An Introduction for Engineers", Longman Scientific & Technical, 1989.
6. Arakawa, C., "Computational Fluid Dynamics for Engineering", University of Tokyo Press, 1994.
7. FLOW-3D V9.2.1 Users Manual
8. Humar, J. L., "Dynamics of Structures", A.A. Balkema Publishers, 2002.
9. Robert D. Blevins, "Flow-Induced Vibration, 2nd ed.", Krieger Publishing Company, 2001.
10. Tancev, L., "Dams and Appurtenant Hydraulic Structures", A.A. Balkema Publishers, 2005.
11. United States Department Of the Interior Bureau Of Reclamation, "Design Of Small Dams", A Water Resources Technical Publication, 1987.
12. Visher, D. L., Hager, W. H., "Dam Hydraulics", John Wiley & Sons, 1999.
13. Wenzel, H., Pichler, D., "Ambient Vibration Monitoring", John Wiley & Sons, 2005.