

수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석 Analysis of Hydraulic Characteristics Upstream of Dam and in Spillway Using Numerical Models

김영한 / 오정선** / 서일원***

Kim, Young Han / Oh, Jung Sun / Seo, Il Won

Abstract

Numerical models were employed to investigate the hydrodynamics of water flow in the lake behind a dam and the spillway where supercritical flows and negative pressures are likely to occur. In this study, 2-D model, RMA2 was employed to examine the upstream flow pattern and 3-D CFD model, FLUENT was used to evaluate the three-dimensional flow in the approaching region and flow distributions in the spillways and discharge culverts. The bathymetry and the details of structures were carefully taken into consideration in building the models. The results from applying the 2-D model for the planned Hantan River Dam show that large eddies, the velocity of which reaches up to 1 m/s are occurring in several places upstream of the dam. That means that the 2-D numerical model could be utilized to investigate the two-dimensional flow patterns after the construction of a dam. Three-dimensional numerical results show that the approach flow varies depending on stages and discharge conditions, and velocities at spillways, discharge culverts, and sediment flushing tunnels are differently distributed. The velocity distributions obtained from the numerical model and a hydraulic model at the centerline of spillways 100 m upstream of the dam show reasonably similar results. It is expected that 2-D and 3-D numerical models are useful tools to help optimize the dam design through investigating the flow patterns in the spillway and at the upstream of the dam, which is not always feasible in hydraulic modeling.

Keywords : spillway, flow pattern, numerical modeling, flow distribution, eddy

요 지

본 연구에서는 사류 및 부압이 발생하는 자유수면을 가진 댐 상류 및 여수로에서 물의 흐름의 동수역학적인 거동을 파악하기 위하여 수치모형을 적용하였다. 댐 건설시, 댐 상류에서의 유동을 알아보기 위하여 2차원 수치모형인 RMA2를 이용하였고, 접근부에서의 3차원적 흐름과 여수로, 방류관 등에서의 흐름분포를 평가하기 위하여 3차원

* 서울대학교 공학연구소 연구원, 공학박사

Researcher, Research Institute of Engineering Studies, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil, Urban & Geo-systems Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사

Professor, Dept. of Civil, Urban & Geo-systems Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

CFD 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 수치모의에서는 지형 및 구조물에 관한 세부인자들이 수치모형을 구성하는 데 사용되었다. 한탄강 댐에 적용한 2차원 수치모의 결과, 댐 상류부 여러 지점에서 최대 유속이 1 m/s에 이르는 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 2차원 수치모형이 댐 건설 후 상류하천의 2차원적 유황을 규명하는 데 유용하게 활용될 수 있음을 의미한다. 3차원 수치모의 결과, 수위와 방류조건에 따라서 댐 직상류의 3차원 접근 흐름의 변화가 발생하고 있으며, 여수로, 방류관, 배사관으로 배출되는 유속이 상이하게 나타나고 있음이 밝혀졌다. 댐 상류 100 m 지점에서 댐 여수로 중심선에 대한 유속 분포 모의치를 수리모형실험에서의 측정치와 비교한 결과, 두 값이 비슷하게 나타났다. 본 연구 결과, 2, 3 차원 수치모형이 댐 상류부 및 여수로의 흐름을 해석하는 데 있어서 수리모형실험에서 쉽게 수행하기 어려운 다양한 조건을 모의함으로써 댐 설계 최적화에 기여할 수 있으리라 판단된다.

핵심용어 : 댐 여수로, 수리현상, 수치모형, 유속 분포, 와류

1. 서론

댐과 같은 거대한 수리구조물을 건설하는 경우, 댐 구조물의 안정성 확보를 위한 주요 구조물(여수로 및 방류 시설)의 수리학적 안전도 검토와 함께 건설된 후에 상·하류 하천 및 유역에 미치는 수리학적 영향 검토를 수행하여야 한다. 검토 방법은 수리모형실험과 수치모의로 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 지금까지는 사류 및 부압이 발생하는 자유수면을 가진 수리구조물의 동수역학적인 거동을 파악하기 위하여 수리모형실험이 일반적으로 사용되어 왔다. 수리모형실험은 실제로 하천 모양을 축소제작 하여 실험적으로 흐름 특성을 살펴보는 것이므로, 어느 정도 신빙성 있는 결과를 얻을 수는 있지만 제작상의 오류나 축척 오류 등의 여러 가지 단점이 따른다. 수치모의 방법은 실험적 방법의 제약을 극복할 수 있는 방법으로 물의 흐름을 나타내는 지배방정식을 적절한 수치 방법을 통해 컴퓨터로 계산하는 방법이다.

댐 상류 하천에서 댐에 의한 배수곡선을 계산하기 위해서 HEC-2같은 1차원 수치모의는 사용이 간편하고 지형자료의 준비가 용이하여 널리 사용되고 있다. 그리고 댐 상류 하천의 경우 좌·우안 간의 유속 편차가 거의 없어 1차원 모형의 사용에 적합하며 계획의 초기 단계에서 모의되는 것이 보통이다. 그러나 경제적, 기술적 문제로 대상구역을 제한할 수밖에 없는 수리모형 실험과 3차원 수치모형실험의 상류경계조건을 제공한다는 의미에서 2차원 수치모의의 필요성이 제기될 수 있다. 그러나 이보다 더 중요한 것은, 댐 상류의 호수 주위에 시민의 접근 필요성이 대두되기도 하고 평상시 체육 오락 시설 등이 고려되고 있는 점을 감안하면 홍수 시에만 침수되는 고수부지에 발생하는 와류 등의 2차원

적 흐름 상황을 파악하는 것이 필요하다. 일반적으로 댐 상류 하천의 흐름 거동을 2차원적으로 해석하는 데에는 유체의 움직임을 잘 모의해주는 상용 프로그램인 RMA2가 사용되어 왔다. 유한요소법을 사용한 수치기법은 유한차분법에 비해 경계처리가 용이하므로 상용 모형의 개발에 널리 사용되고 있다. 범용 2차원 흐름모형으로는 RMA2와 FESWMS-DH 등이 있으며, 두 모형 모두가 SMS를 이용하여 전·후처리가 가능하다. FESWMS-DH는 사류를 모의할 수 있고, 수공구조물 주변의 국부적인 흐름에 적용성이 높지만, 찌름과 마름을 모의할 수 없는 단점이 있으므로, 남한강 수리모형 실험(건설교통부, 1997)과 영월댐 수리모형실험(한국수자원공사, 1997) 등의 연구에 RMA2가 해석모형으로 선정된 바 있다.

댐 여수로 등 구조물에서의 3차원적인 흐름 거동을 규명하기 위해서는 3차원 동수역학 모형이 적용되어야 한다. 3차원 유체유동해석 모형으로는 고정수면법을 사용하여 자유수면 흐름을 해석하는 FLUENT, FIDAP, FLOW-3D, STAR-CD 등이 있으며, 이 중에서 FLUENT는 유체역학 및 열전달, 화학반응 등을 계산하는 패키지로 FVM을 사용한다. FLUENT는 GUI환경이 뛰어나고, 주기조건을 사용할 수 있으며, 다양한 난류모형을 포함하고 있다. FLUENT는 월성방파제(김대근과 서일원, 1997)의 온배수 방류공 주변흐름에 적용된 바 있다.

본 연구에서는 댐 건설시 상류 하천에서의 유동을 규명하기 위해서 2차원 수치모형인 RMA2를 이용하였고, 댐 여수로 등에서의 3차원적인 흐름 해석을 위하여 3차원 CFD 모형인 FLUENT를 적용하였다. 대상 구간에서 2, 3차원 수치모형을 이용하여 댐 상류구간의 유황 해석, 여수로 및 댐 방류관부의 유동 해석을 모의하였

다. 본 연구에서는 수리모형실험의 계획단계에서 요구되는 계산들을 수행하며 아울러 수리모형실험의 측정결과를 이용하여 모의 결과를 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 2차원 수치모형(SMS)

2.1.1 SMS의 개요

SMS(Surface-water Modeling System)를 사용하여 수위 및 유속 분포 등의 2차원 흐름특성을 계산하였다. SMS는 미국 Brigham Young 대학의 환경모형연구소(Environmental Modeling Research Laboratory)와 미공병단(USACE) 내 수로실험국(Waterway Experiment Station ; WES), 그리고 미연방고속도로청 (Federal Highways Administration, FHWA) 등에서 개발한 프로그램으로 현재 7.0버전이 상용화되어 있다. SMS는 지표수의 수리 모델링 및 해석을 위한 일종의 전·후처리 시스템으로서 모형의 수행을 위한 입력파일의 작성이나 결과 해석을 위한 그래픽 가시화작업을 수행한다. SMS는 TABS-MD (GFGEN, RMA2, RMA4, RMA10, SED2D-WES), ADCIRC, CGWAVE, STWAVE, HIVE2D 등과, FHWA에서 제공하는 FESWMS, WSPRO 등을 포함하는데, 각각의 프로그램에 적합하게 만들어진 사용자 인터페이스들로 SMS의 모듈이 구성된다.

각 부모형에서 해석에 필요한 경계조건들을 비롯하여 유한요소망이나 유한차분망, 또는 단면자료 등은 SMS 내에서 생성되며, 각각의 프로그램에 적합한 파일 형식으로 저장된다. 이러한 입력파일은 수리동역학, 파랑역학, 오염물 확산, 유사이동 등을 각각 다루는 여러 모형 중 적합한 모형 내에서 해석에 쓰인다. 또한, SMS는 각각의 해석모형에서 출력하는 자료들을 읽고 그래픽 가시화작업을 수행한다.

2.1.2 RMA2의 지배방정식 및 수치기법

RMA2는 미공병단에서 1973년에 처음 개발된 이래로, 하중도를 포함한 하천 수로구간의 흐름, 교각 부근의 흐름, 유수단면 확대 및 축소부를 포함한 하천구간의 흐름 등, 하천, 저수지, 하구의 수리동역학적 해석에 널리 쓰여 왔다. 모형의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 수심방향으로 적분한 2차원 천수방정식으로서 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g \omega n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \Psi - 2h \omega v \sin \phi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g \omega n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \Psi + 2h \omega u \sin \phi = 0 \quad (3)$$

여기서, h 는 수심, u , v 는 직교좌표계에서의 유속, x , y , t 는 직교좌표계와 시간, ρ 는 유체의 밀도, E_{xx} 는 x방향평면의 법선 와점성계수, E_{yy} 는 y방향평면의 법선 와점성계수, E_{yx} 는 x방향평면의 접선 와점성계수, E_{xy} 는 y방향평면의 접선 와점성계수, g 는 중력가속도, a 는 하상표고, n 는 Manning의 조도계수, ζ 는 바람 응력계수, V_a 는 풍속, Ψ 는 풍향, ω 는 지구자전각속도, ϕ 는 위도이다.

RMA2는 비정상 모의를 위하여 이전 시간단계의 해석결과를 사용하여 연속적인 모의가 가능한 재시작 기능이 있고, 또한 젖음(wetting)과 마름(drying)과정, 지구전향력(Coriolis force), 바람 응력을 고려할 수 있다. 와점성계수, Manning 계수, 온도 등 모형 매개변수의 부여방법이 다양하게 제공되며, 수공구조물을 고려할 수 있고, 임의 단면에 대한 통과유량을 계산하여 수량 보존여부를 검사할 수 있다. 수렴조건 설정 등과 같은 수치해석을 위한 사용자 입력이 가능하며, 경계조건을 다양하게 부여할 수 있다.

RMA2에서 사용하는 수치기법은 가중잔차 Galerkin 방법을 이용한 유한해석법으로서, 요소는 1차원 선요소 혹은 삼각형이나 사변형 요소를 사용할 수 있으며, 포물선형 곡선이 한 변으로 사용될 수 있다. 형상함수는 유속에 대해서는 2차함수이며, 수위에 대해서는 1차함수이다. 공간적분방법으로는 Gauss 적분법이 사용되며, 시간미분항은 비선형 유한차분 근사법이 사용된다. 수치기법은 완전음해법으로서, 각 시간 단계에서의 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 반복계산법을 사용하여 해를 구한다.

2.2 3차원 수치모형(FLUENT)

2.2.1 지배방정식

유체의 흐름을 모의하는 3차원 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모형은 초기에는 압력항을 미지수로 설정하여 계산된 압력으로부터 수위를 계산하는 고정수면방법을 주로 사용하였으며, 점차 수위를 직접 계산하는 자유수면 방법으로 전환하였다. 현재는 관로 흐름을 다루는 기계공학분야의 유체역학에서 고정수면방법을 사용하는 상용모형들이 많이 개발되어 사용되고 있다. 이러한 모형으로는 FLUENT, FIDAP, FLOW-3D, STAR-CD 등이 있다.

본 연구에서 사용한 FLUENT는 Fluent사에 의해 개발된 모형으로서 유체역학 및 열전달, 화학반응 등을 해석할 수 있는 범용 3차원 프로그램이다. FLUENT는 비구조적 격자망에서 유한체적법(FVM)을 사용하여 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종의 보존방정식을 푸는 CFD 코드로서 다양한 범위의 유체유동해석을 수행하는 프로그램이다. 유사이송 모의는 입자 추적을 통하여 수행하며, 난류 모형으로 $k-\epsilon$ 모형, LES(Large Eddy Simulation) 등을 사용한다. FLUENT에서 사용하는 지배방정식은 연속방정식과 3차원 Navier-Stokes 방정식을 시간적분한 Reynolds 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + b_i \quad (5)$$

여기서 p = 압력(pressure), ν = 동점성계수(kinematic viscosity), $u_i, u_j = i, j$ 방향의 변동 유속 성분(fluctuating velocity component), $b_i = i$ 방향의 체적력(body force)이다.

2.2.2 수치해석기법 및 해석절차

FLUENT 모형은 지배방정식을 유한체적에 대해서 적분하여 이산화하는 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)을 사용하며, 자유수면 해석은 다상 유체의 거동을 해석하는 방법인 VOF(volume of fluid) 방법을 사용한다. 이는 셀 내에서의 유체를 단위 체적당 각각의 유체 체적으로 나타내는 체적분할방정식(volume fraction equation)을 통해 계산된다.

FLUENT 모형을 이용하여 수치모의하려면 격자 생성 프로그램을 이용하여 격자망을 만들고 경계조건을 입력해야 한다. FLUENT 모형의 격자 생성 프로그램에는 GAMBIT, GeoMesh, Fgrid 등이 있는데, 본

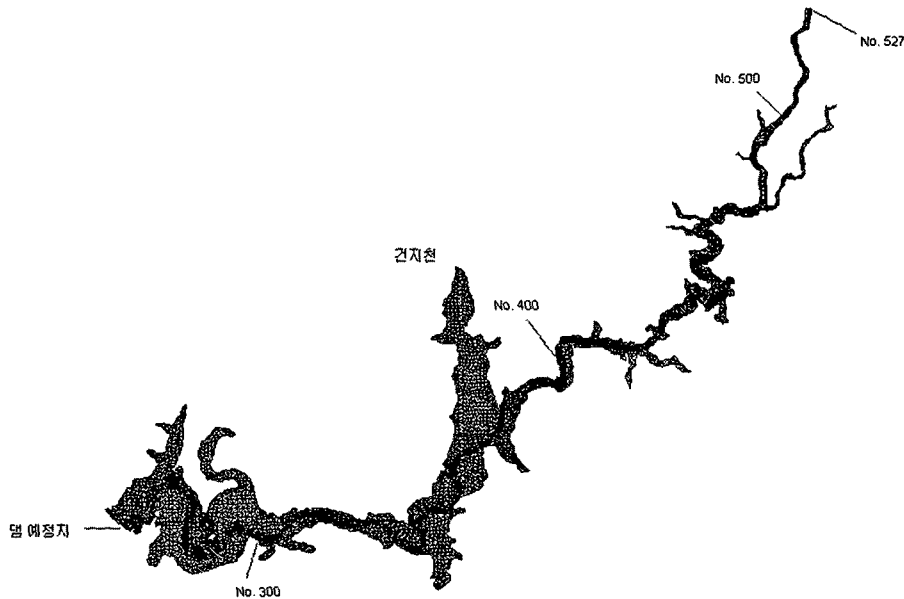


그림 1. 유한요소망 (RMA2)

연구에서는 GAMBIT을 채택하여 격자를 생성하였다. 격자를 형성하는 방법은 하강(Top-Down) 방식과 상승(Bottom-Up) 방식으로 크게 두 가지 방법이 있다. 전자는 격자를 형성해야할 지형의 큰 틀을 만든 후, 세부적으로 나누어 가는 방식을 말하며 주로 3차원 격자를 형성할 때 사용되며, 후자는 점을 먼저 생성한 후, 선이나 면, 부피로 확대해 나가는 방식을 말하며, 주로 2차원 격자를 형성할 때 사용된다. GAMBIT을 통해 격자를 형성한 후에는 FLUENT에서 수행하고자 하는 조건에 맞도록 수치모형을 구성하고 이를 수행하게 된다. 수행 중에 특정 지점에서의 특정항의 수렴 여부 등을 모니터링하여 사용자가 해석결과를 분석할 수 있으며, 수행 도중 프로그램을 종료시킬 수도 있다. 수치 계산을 수행한 후에는 FLUENT의 다양한 후처리 기법에 의해 결과 분석을 할 수 있다.

3. 모형의 적용

3.1 2차원 수치해석

3.1.1 대상 구간 및 유한요소망

RMA2 모형을 적용하여 2차원적 흐름상황을 파악하기 위한 후보지로서 실제 댐 예정지인 한탄강을 선정하였다 (그림 1 참조). 댐 상류부의 유동을 모의하기 위하여 대상구간으로 댐 축을 기점(No. 248과 No. 249사이)으로 상류방향으로 수로를 따라 27.5Km 정도 거슬러 올라간 No. 527까지로 결정하였다. 이 구간은 수물 지역은 물론 협곡을 지나는 상류구간을 상당부분 포함한다. 대상영역내의 저면 표고를 모형에 입력하기 위하여 하천 측량 자료와 수물현황을 나타낸 수치지도(1/1000축적)상의 등고선 및 측량점 위치 및 표고, 설계도상의 구조물 위치를 수치화 하였다. 본 작업을 통하여 수치모형에 입력한 표고값은 52,306개에 이르는 막대한 양이며 이를 토대로 구성된 유한요소망은 그림 1에 나타나 있다.

지표면이 수면과 가까울수록 수심이 작아져서 수치 안정성 문제를 야기할 수 있으므로 매우 세심한 주의를 요한다. 양안 쪽을 상당부분 단순화하여 생략하면 쉽게

해를 구할 수 있으나 200년 빈도 홍수의 수몰지역을 최대한 포함시키려 노력하였다. 요소망의 경계에서 수심 2~3m (200년 빈도와 PMF 시 수위차)는 수평적으로 수 m에 이르나 이는 전체적인 유한요소망의 규모에 비해 미미하므로 PMF에서도 같은 유한요소망을 사용하기로 하였다. 또한 하천 측량 자료는 측선을 그대로 살려 위치의 확인을 용이하게 하고 하도의 형상을 그대로 재현하였다. 이 유한요소망은 8196개의 요소와 20,509의 절점으로 PC용 RMA2 모형의 한계에 근접하고 있는 크기이다.

3.1.2 경계조건

본 연구에서는 정상류 상태 모의에 국한되며, 상류에 유량경계조건, 하류에 수위경계조건이 주어진다. 댐 설계를 위한 기본계획안의 상류 경계조건으로는 200년과 최대홍수량에 대한 최대방류량을, 하류 경계조건으로는 최대 저수위를 사용하였다. 상류 유량조건은 침투 유입량이 되어야하나 수리모형실험이 정상류로 시행되고 최대 방류량을 유량으로 사용하므로 수치모의에서도 이를 그대로 따랐다. 이를 표 1에 표시하였다.

상류 경계단에서의 유량조건은 단순히 상술한 유량을 수심에 따른 기중치를 준 포물선형 유속 분포를 경계면에 수직으로 줌으로써 간단히 해결된다. 그러나 하류 경계조건은 2차원 수치모의의 근본적인 제약으로 주의가 요한다. 본 계획안은 접근 수로 등의 수평적 2차원 흐름은 없는 대신 여수로, 방류관, 배사관의 수직으로 분포된 방류 형태를 보이고 있다. 이는 2차원 모형이 다룰 수 없는 문제로서 어떤 형태로는 단순화가 이뤄져야 한다. 본 과업에서는 PMF 일 때 여수로로 흐르는 유량의 유속과 모든 유량이 여수로로 대신한 위어로 흐른다고 가정했을 때의 유속을 같다고 가정하고 위어(여수로)의 높이를 결정하였다. 이 결과 여수로의 실제 정점고가 101.5m에서 91.23m로 낮춰지는 결과를 가져왔다. 이것은 결과적으로 여수로, 방류관, 배사관으로 흐르는 유량이 매우 깊은 위어 하나로 집중되어 흐르는 것으로 모의되었음을 의미한다.

하류 경계조건에서 중요하게 취급하여야 할 것은 저

표 1. 계획홍수량에 따른 최대방류량과 최대저수위 (건설교통부, 2002)

홍수량	침투방류량(CMS)	최대저수위(EI. m)
200년빈도	1970.0	116.80
PMF	9145.3	119.10

수지 수위 입력 자료이다. 표 1에 제시된 저수위는 여수로 위에서의 수위가 아니고 댐 상류의 저수 수위이므로 실제 수치 모형에서 하류 경계단인 여수로 위어에 주는 하류 경계 수위는 여러 차례의 시산에 의해 200년 빈도 홍수시 116.5m, PMF시 113.98m로서 PMF시 약간 낮게 입력하게 되었다. 이는 PMF 시 저수위는 2m 정도 높으나 유량은 4.5배 정도 많아 매우 큰 속도 수두로 인한 급격한 수면경사 때문으로 판단된다. 위의 두 가지 경우 모두 급격하게 저수위로 접근한다. 이는 모든 2차원 수심적분 모형의 근본 가정에는 흐름의 연직 방향의 변화(가속도)가 무시할 수 있어야 한다는 것이지만, 여수로 근처에서의 흐름은 3차원 적인 거동을 보이기 때문에 2차원 수심적분 모형인 RMA2를 적용하게 되면 계산결과와 신뢰도가 떨어지기 때문으로 판단된다. 그러나 여수로 주위의 흐름은 2차원 모의의 주관심사가 아니므로 큰 문제는 아니라고 생각된다.

3.1.3 매개변수 결정

RMA2 모형에서 가장 중요한 두 가지 매개변수는 Manning 조도계수 n 과 와점성계수 E_{ij} 이다. 본 연구에서 조도계수의 경우, 댐 상류 구간 유역을 하도와 홍수터로 나누어 그 값을 결정하였다. 하도의 경우 환탄강수계 하천정비기본계획(1998)에서 제시한 값인 0.033으로 결정하였다. 홍수터의 경우 댐이 만수위가 될 때까지의 식생 상태에 따라 크게 달라질 수 있다. Chow(1959)를 참조하여 다음의 3가지 경우를 가지고 민감도 분석을 실시하였다. 첫째는 관목이 자라지 않는 경우에는 $n=0.03$, 둘째는 관목이 보통정도 있는 경우에는 $n=0.05$, 마지막으로 수목이 무성한 경우에는 $n=0.10$ 으로 잡았다.

조도계수의 영향을 알아보기 위해 민감도 분석을 수행한 결과, 호수 형태를 이루는 댐 상류 4km까지의 유속이 작은 곳에서는 조도 계수의 영향은 미미하게 나타나고 있다. 배수곡선의 영향을 벗어나는 것으로 판단되는 건지천 상류에서 $n=0.03$ 과 $n=0.05$ 에 의한 수위 차이는 1cm정도, $n=0.03$ 과 $n=0.10$ 에 의한 차이는 4cm 정도로서 매우 큰 편은 아니다. 결과 분석에서는 홍수터 조도계수를 0.03, 즉 관목이 제거된 상태를 가정하였다.

RMA2 모형에서 중요한 조도 계수와 함께 매개변수가 와점성계수(eddy viscosity) E_{ij} 이다. 이것은 Peclet 수와 다음과 같이 연관지어진다.

$$P = \frac{\rho V \Delta x}{E_{ij}} \quad (6)$$

여기서 P 는 Peclet 수, V 는 속도, Δx 는 격자의 크기이다.

E_{ij} 가 작으면 흐름의 분리 등이 잘 재현되어 대규모 와류의 모의가 용이한 반면 수치 안정성이 떨어진다. 그러므로 본 모형과 같이 복잡하고 유속의 변화가 심한 경우 Peclet 수를 고정하여 모의하는 경우가 일반적이다. 수치적으로 안정하려면 Peclet 수를 50이하로 할 것을 권고하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 $P=20$ 과 40을 가지고 민감도 분석을 실시하였으며 예상대로 수위계산 결과에 거의 영향을 미치지 않고 있다. 그러나 식(6)에서 보듯이 Peclet 수가 큰 경우(40)가 작은 E_{ij} 를 입력하게 되어 와류의 모의가 용이하므로 Peclet 수를 40으로 결정하였다.

3.1.4 결과분석

200년 빈도와 PMF 경우 모두 곧바로 정상류 해(steady state solution)를 구할 수 없었다. 이는 모의 대상구간이 커서 상류의 하상이 하류 여수로의 수위(경계수위)보다 높아 예상되는 결과였고, 먼저 여러 차례의 수정을 통한 "hotstart" 해를 구하여 이것으로부터 정상해를 구하였다. 최종적으로 정상해를 구할 때 수렴 조건으로는 모든 절점에서의 수위변화가 0.01cm 이하로 매우 엄격한 기준을 적용하였다.

댐 건설에 따른 수위변동을 분석한 결과 다음과 같이 나타났다. 200년 빈도 홍수의 경우 댐 직상류부터 상류 15 km 정도 (No. 400)까지의 구간에서는 배수곡선이 형성되어 3 cm 정도의 수위 상승이 발생하고 있으나, 그보다 상류 구간은 배수곡선의 영향을 벗어나 하상 경사를 따라 수위 상승이 발생하여 상류 경계단에서 117.7m에 이른다. PMF 경우에는 댐 직상류부터 No. 390 정도까지의 구간에서 배수곡선이 형성되어 약 16 cm 정도의 수위상승이 발생한다. 이 경우 배수곡선이 형성되는 구간이 200년 홍수시보다 짧은 것으로 나타나는데, 이는 건지천의 상류 좁은 수로에서 유속의 증가로 인한 것이다. 상류경계에서의 수위는 약 125.1m로 하류와의 수위 차는 6m이상이다. 200빈도의 경우보다 수위의 상승이 큰 이유는 유량이 4.5배 정도 늘어난데 따른 큰 유속에 의한 수두 손실도 크기 때문이다. 수위의 경우 양안의 수위편기 등 2차원적인 특징이 두드러지지 않는다. 이는 댐 상류의 심한 만곡부(댐 건설 전)에서 댐 건설 후 호수화로 유속이 작아진 탓이다.

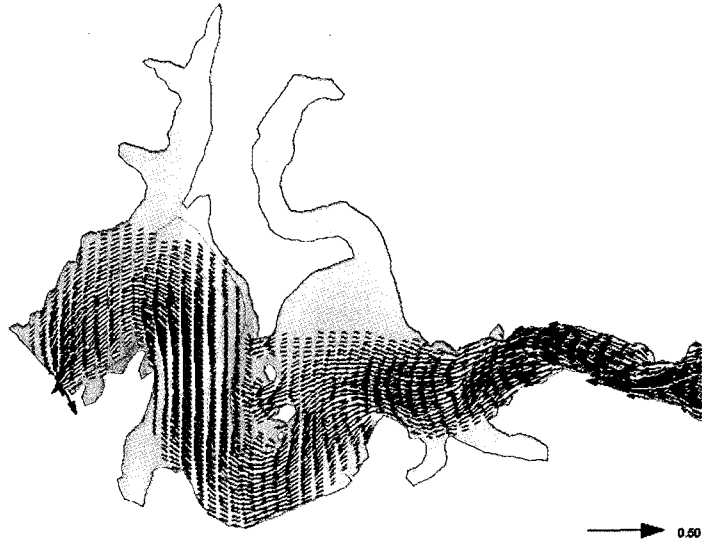
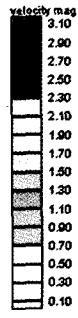


그림 2. 유속 벡터도 (200년 빈도 홍수)

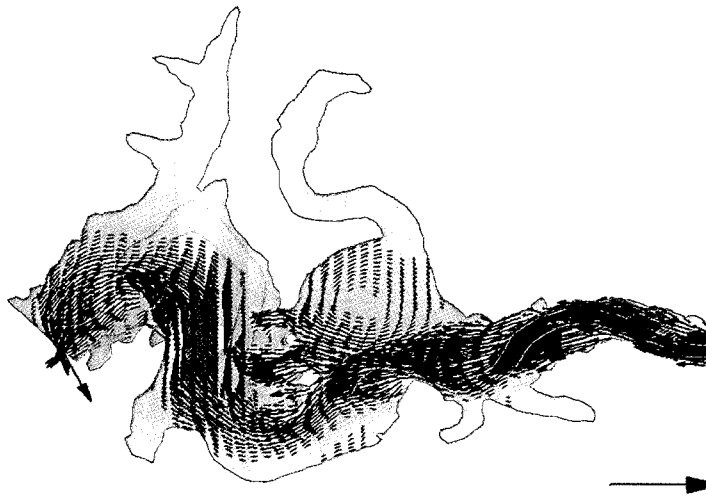
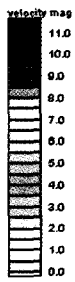


그림 3. 유속 벡터도 (PMF)

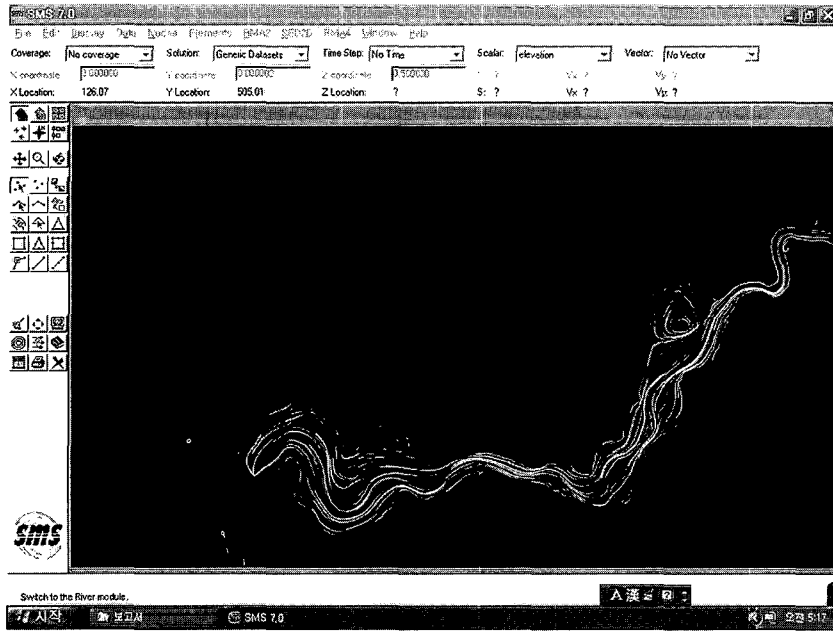


그림 4. 흐름 추적도 (200년 빈도 홍수)

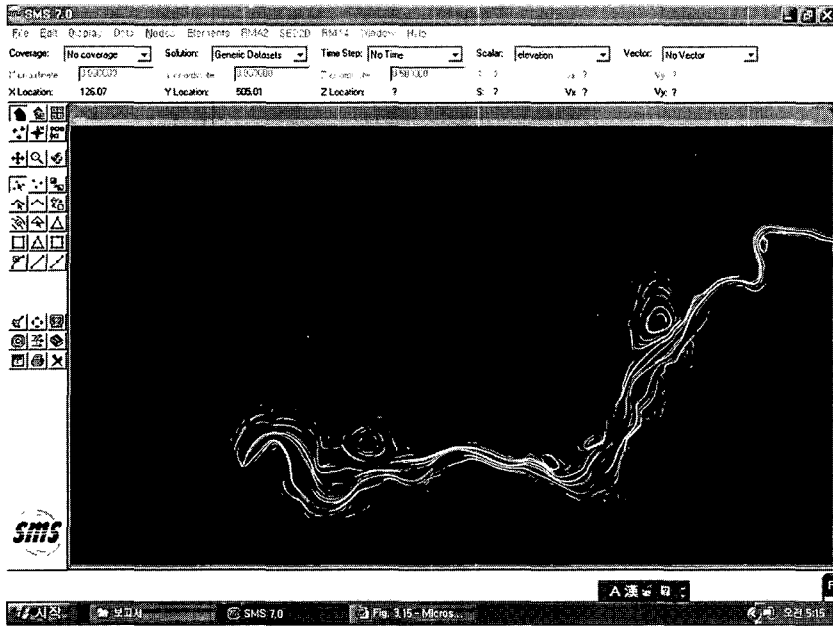


그림 5. 흐름 추적도 (PMF)

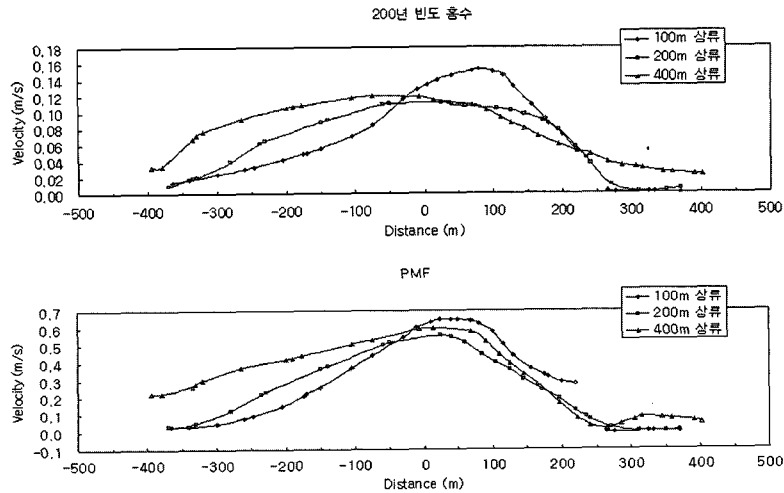


그림 6. 횡단 유속 분포도

유속 분포는 200년 빈도 홍수의 경우 0~3.11 m/sec로 No. 521 부근의 협곡에서 최대 유속이 발생한다. PMF의 경우는 0~11.5 m/sec에 이른다. 최대 유속은 역시 200년 빈도의 경우가 같은 지점에서 발생한다. 2차원적 유속 분포가 확연히 드러나는 댐 상류 부근에서 유속 벡터를 그림 2~3에 도시하였다. 여기에서 특징적인 것은 댐 상류구간에서 최대 유속이 댐 축조전의 수로에서 벗어나 좌안 쪽에 편중하여 발생한다는 사실이다. 이러한 현상은 상대적으로 PMF의 경우가 더 심한 것으로 나타났다.

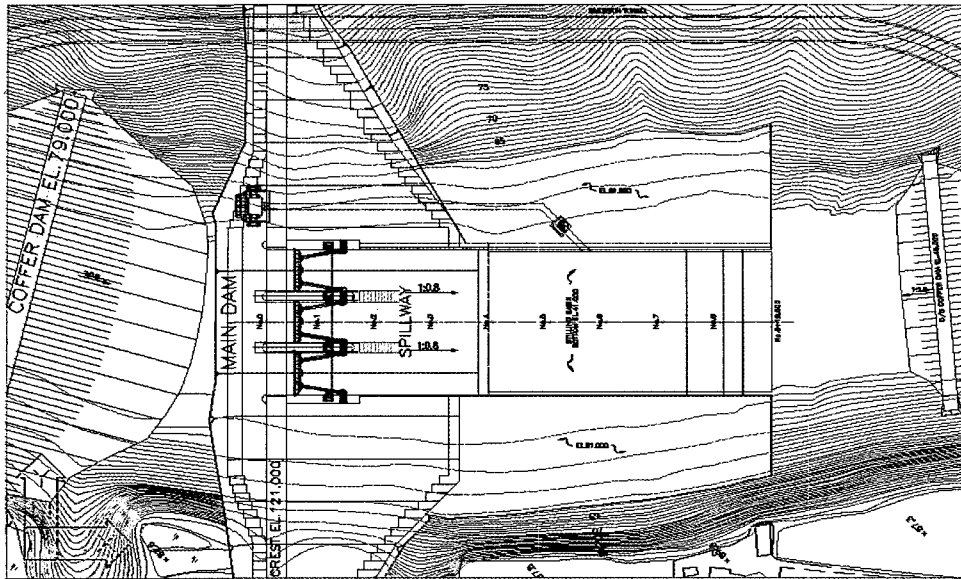
댐 상류 하천의 홍수터에 홍수시가 아닌 시기에는 생태공원 등으로서 이용할 계획이 수립된 경우, 상류하천에서 흐름이 정체되거나 느린 대규모 와류가 형성되는 구간의 속도를 아는 것이 필요하다. 그림 2~3의 유속 벡터도에서도 이러한 곳을 발견할 수 있다. 즉 PMF시 댐 상류 우안(No. 300부근)에 발생하는 대규모 와류를 볼 수 있다. 그러나 일반적으로 와류의 속도가 작으므로 본 흐름과 같이 벡터로 표시할 경우 잘 표시되지 않는다.

그림 4~5는 200년 빈도 홍수와 PMF시 동영상 흐름추적도(flow trace)의 부분 정지화면이다. 여기에서는 와류의 존재를 명확히 규명할 수 있다. 200년 빈도와 PMF시 모두 우안의 두 개의 대규모 와류를 발견할 수 있다. 두 개 중 보다 상류에 있는 건지천 합류부의 것은 최대 와류 유속이 PMF시에는 0.93m/sec 이고 200년 빈도 홍수의 경우 0.12 m/sec로 급격히 줄어든

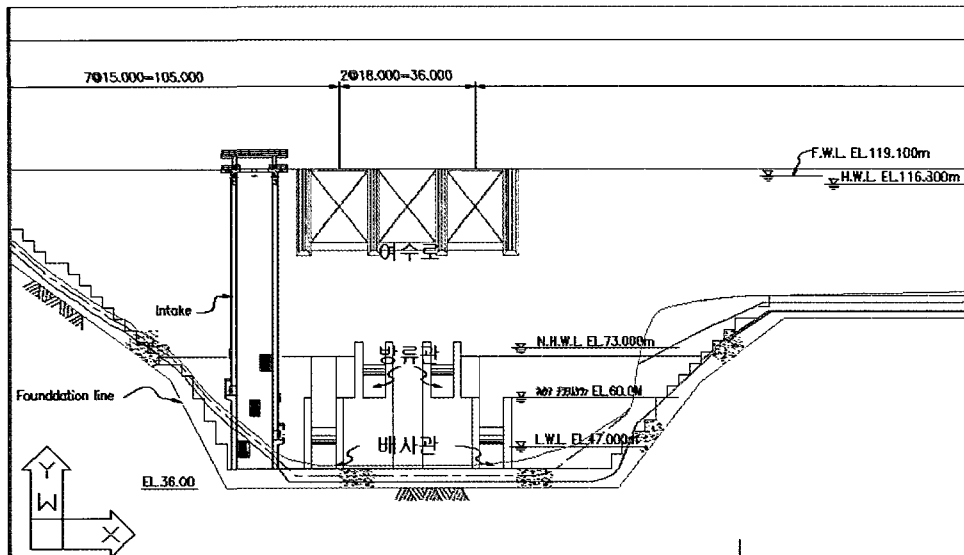
다. 댐 상류 우안의 와류는 PMF시 유속 0.17m/sec이다. 200년 빈도 홍수시 0.005m/sec로서 거의 정체되어 있는 구간이라 볼 수 있고 이 때문에 이 경우의 벡터도에서는 이를 쉽게 발견할 수 없다.

하천의 만곡부에 발생하는 와류의 경우 흥미 있는 사실을 발견할 수 있다. 건지천 합류부 상류 No. 400부근 하도가 심하게 만곡 흐름이 있는 곳에서 좌안에 작지만 매우 빠른 유속의 와류가 발생한다. 그 유속은 PMF시 0.93m/sec, 200년 빈도 홍수시 0.12m/sec로 줄어든다. 그러나 두 개의 대규모 와류대 사이에 위치하는 만곡부(No. 340부근)에 PMF시에 두 개의 인접한 와류가 발생하며 그 유속은 하류 0.41m/sec, 상류 0.21m/sec이다. 이 인접한 두 개의 와류는 200년 빈도 시에는 완전히 사라짐을 알 수 있었다. 이상 언급한 것 말고도 곳곳의 시수역에 소규모 약한 와류를 발견할 수 있다.

본 연구에서는 댐 축으로부터 100m, 200m 및 400m 횡단면의 수위와 유속을 실행된 모의 결과로부터 추출하여, 그 중에서 유속 분포 결과를 그림 6에 도시하였다. 이들 자료는 모형실험과 3차원 수치모의의 상류 경계조건으로부터 활용될 수 있다. 전술하였듯이 수위는 200년 빈도와 PMF시 모두 편기 현상은 거의 없다. 그림 6에서는 100m, 200m 및 400m에서 평균유속의 횡단 분포가 대체적으로 포물선 형태로 나타나고 있다.



a) 대상구간 평면도



b) 대상구간 연직도

그림 7. 한탄강 댐 기본계획 설계도면 (건설교통부, 2002)

3.2 3차원 수치해석

3.2.1 대상구간 및 격자생성

댐 여수로의 접근 흐름과 방류관 및 배사관의 유황을 해석하기 위하여 건설 계획이 수립된 한탄강 댐의 댐 축을 기점으로 상류 측으로 약 200m 지점까지를 대상 구간으로 선정하였다. 2차원 모의 결과 (그림 6)가 나타 내듯 유속 분포가 400m 와 조금 차이를 보여 유속분포 에 영향을 미치는 구간이 200m 보다 긴 것으로 판단되 나, 수리모형 실험 결과와 비교하기 위하여 수리실험과 구간과 같은 200m까지로 제한하였다. 그림 7은 한탄강 댐 기본계획안에 의한 댐 여수로, 방류관 및 배사관을 나타낸 것이다. 기본계획안의 경우, 홍수 배제를 위한 월류형 여수로(3문)와 상용 여수 배제를 위한 방류관(2 문) 및 배사관(2문)으로 설계되어 있다. 대상구간이 길 어지면 수치해석적으로 보다 더 안정적인 결과를 얻을 수 있지만, 실제 지형을 재현하는 것이 쉽지 않고 격자 수가 과다하게 늘어나면 수치모델의 용량 제한에 걸리 므로 상류 측 200m까지로 정했다.

하천 지형은 균일수로(prismatic channel)와 유사 한 각기둥 형태로서 간략화 시켜 대상 수체를 구현하였 다. 구성격자는 기본적으로 직육면체 격자로 구성하였으 며, 격자 개수는 수위에 따라 다르지만 약 20,000 개 안팎으로 하였다. 그림 8은 대상구간에 대하여 직육면 체 격자를 구성한 것을 보여준다.

3.2.2 수치모의 방법

본 수치모의에서는 전체 영역에 대해서 정수(still water) 조건, 연직방향으로는 정수압을 가정하였다. 또 한 비압축성을 가정하여 바닥과 벽에는 무활동(no slip) 조건, 유입부 조건으로는 유량 또는 유속 조건, 수표면 경계는 자유수면(free surface) 조건, 그리고 유출부는 불투과(no-flux) 조건을 부여하였다. 난류모 델로는 일반적으로 사용되는 2-방정식 모형인 표준 $k-\epsilon$ 모형을 선택하여 수치모의를 수행하였다.

FLUENT에서는 순차적 연산방법(segreated so- lution method)과 통합적 연산방법(coupled solution method)을 제공한다. 본 수치모의에서는 다상유동

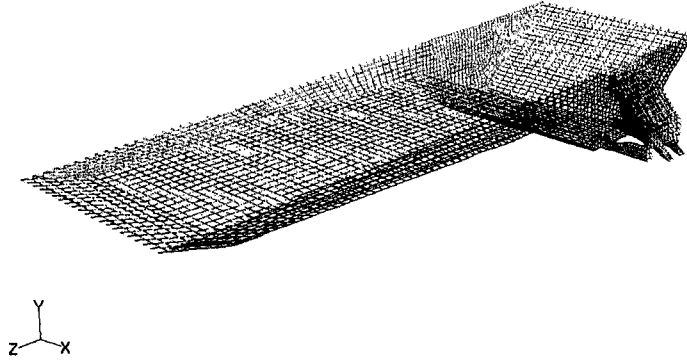
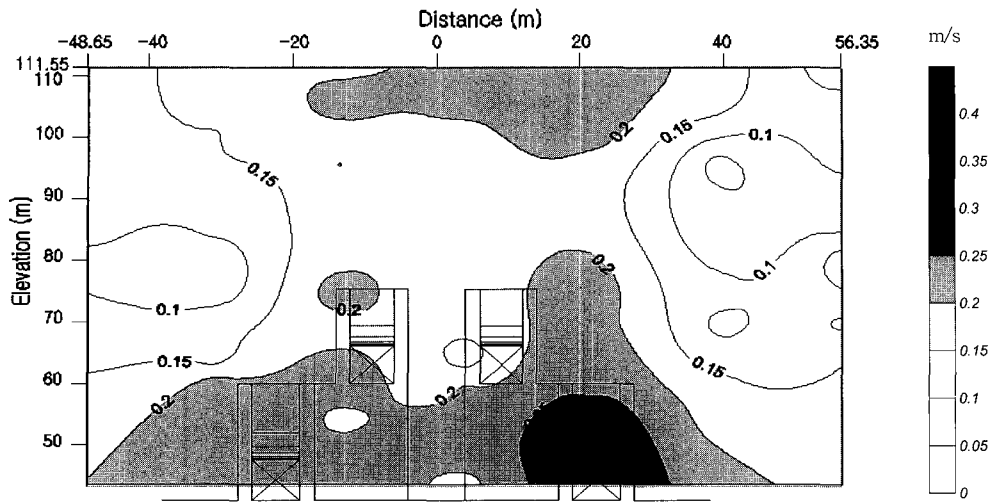


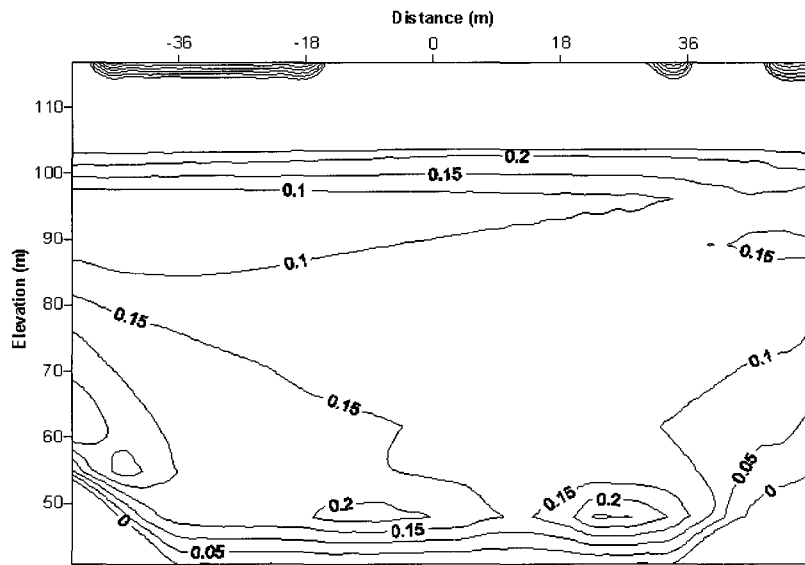
그림 8. 기본계획안의 경우 3차원 격자 생성

표 2. 기본 계획안에 대한 3차원 수치모의 조건

Case	홍수량	첨두방류량(CMS)	저수지수위(EL. m)	방류조건
B1-1	200년	1970.0	116.80	여수로 폐쇄 방류관 폐쇄 배사관 5m 개방
B1-2	200년	1970.0	69.10	여수로 폐쇄 방류관 완전 개방 배사관 완전 개방
B2-1	PMF	9145.3	119.10	여수로 완전 개방 방류관 완전 개방 배사관 완전 개방



a) 실험치



b) 수치모의치

그림 9. 200년 빈도 홍수시 방류관, 배사관 접근수로의 유속분포 (Case B1-1)

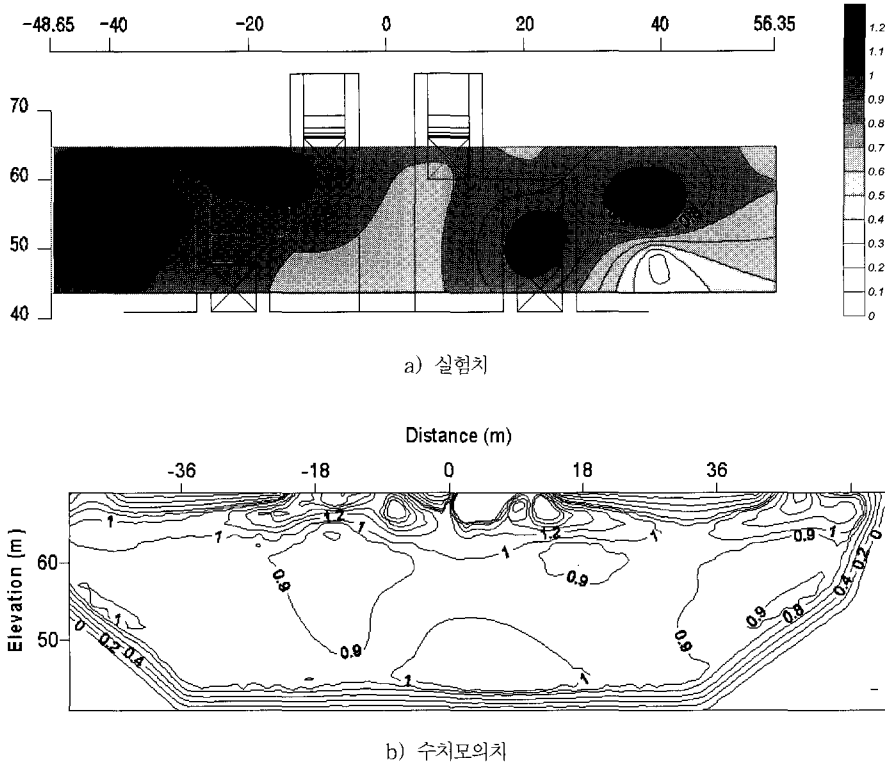


그림 10. 200년 빈도 홍수시 방류관, 배사관 접근수로의 유속분포 (Case B1-2)

(multi-phase flow)을 지원할 수 있는 순차적 연산방법을 선택하였다. 또한 지배방정식의 차분법으로서 음해법을 선택하였다. 본 수치모의는 서울대학교 중앙전산원의 슈퍼컴퓨터에서 수행하였다.

본 수치모의의 경계조건으로서 수위는 계획 홍수량에 따른 최대저수위를 사용하였다. 유입부 조건으로서 댐 상류 200m 지점에 유량조건 및 2차원 모의 결과에서 도출한 유속 분포를 사용하였다. 이 둘에 의한 예비 수치모의를 비교한 결과, 유량조건이 보다 적합한 결과를 얻을 수 있는 것으로 밝혀졌기 때문에 주로 유량 유입 조건을 이용하였다. 유출부 조건으로는 압력조건을 입력하였는데 여수로, 방류관, 배사관의 유출부에서의 압

력을 대기압으로 입력하였다.

3.2.3 수치모의 결과

본 연구에서 수행한 기본계획안에 대한 3차원 수치모의 조건은 다음과 같다. 3차원 수치모의에서는 유량 및 수위조건뿐만 아니라 여수로 등 각종 방류시설의 방류조건들도 완벽하게 재현하여 모의를 수행하였다.

댐 여수로 직상류 구간의 유황을 분석하기 위하여, 댐 상류 100m 지점의 xy 단면상의 유속 분포의 실험치와 계산치를 비교하여 그림 9~10에 도시하였다. 그림 9~10은 Case B1-1 및 B1-2에 대한 것으로서, 여기서 실험치는 농업기반공사 수리시험장에서 수행한 수

표 3. 댐 상류 100m지점 댐 여수로 중심선에서 유속 값 비교

Case	유속(m/s)	
	측정치	계산치
B1-1	0.12-0.24	0.15-0.25
B1-2	0.75-1.10	0.60-1.20



그림 11. 200년 빈도시 수위 116.8m의 경우 확대유속벡터도(Case B1-1)

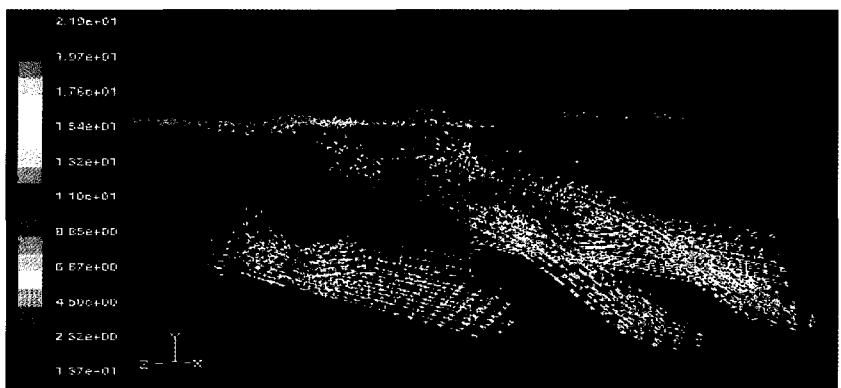


그림 12. 200년 빈도시 수위 69.1m의 경우 확대유속벡터도(Case B1-2)

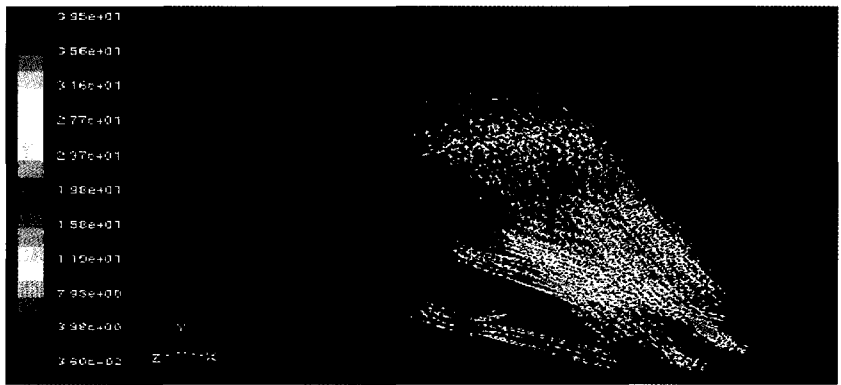


그림 13. PMF시 수위 119.1m의 경우 확대유속벡터도(Case B2-1)

리모형실험(한국수자원공사, 2002)에 의한 결과이다. 대체적으로 등유속선의 분포가 유사하게 나타나고 있다. 여수로 중심선에서의 유속 값을 비교하여 표 3에 제시하였다. 측정치와 계산치가 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 Case B1-1에 대한 댐 근역에서의 3차원 유속 벡터도이다. 그림 9 및 표 3에 나타난 바와 같이, 댐 상류 저수지의 유속은 0.1~0.2m/s 로서 미미하나 배사관 입구로 접근하는 접근 흐름의 유속은 4~7.5m/s 정도로 급격히 증가하여 배사관을 통하여 배출되는 유속은 16~20 m/s로서 매우 높은 유속을 보이고 있다. 특히 배사관 유입부에 위치한 단면축소구간(배사관 게이트가 위치한 부분)에서는 약 38m/s의 유속을 보이고 있다.

Case B1-2에 대한 방류시설 근역에서의 3차원 유속 벡터도를 그림 12에 도시하였다. 수치모의 결과 유속 분포는 댐 상류 저수지의 유속은 약 0.6m/s 로서 작은 편이지만 방류관 및 배사관 입구로 접근하는 접근 흐름의 유속은 각각 2m/s 와 4.5~5.5m/s로 증가한다. 최종적으로 배사관을 통하여 배출되는 유속은 13~15m/s이고, 방류관을 통하여 배출되는 흐름은 10~19m/s로서 높은 유속을 보이고 있다. 특히 배사관 유입부에 위치한 단면축소구간(게이트가 위치한 부분)에서는 약 22m/s의 큰 유속을 보이고 있다.

PMF의 경우(Case B2-1) 방류시설 근역에서의 3차원 유속 벡터도를 그림 13에 도시하였다. PMF의 경우 여수로, 방류관, 배사관을 모두 완전 개방하기 때문에 이들 모두를 통하여 방류되는 흐름의 거동을 나타내고 있다. 이 경우 200년 빈도보다 유량이 커 댐 상류 저수지 유속도 0.4m/s 정도로 조금 크게 나타나고 있으나, 방류 유속에 비하면 작은 편이다. 우선 여수로의 경우, 월류부를 유하하는 유속은 7.9~9.9m/s이며 월류부 전 폭에 걸쳐 일정한 분포를 유지하고 있음을 알 수 있다. 여수로 도류부에서는 말단부로 갈수록 흐름이 가속화됨을 알 수 있는데, 정수지에 도달하는 유속은 약 31.6~33.6m/s 정도이다. 이는 한탄강 댐 기본설계보고서(건설교통부, 2002)에서 제시한 도류부 말단구간의 설계유속인 34.1~36.3m/s 보다 약간 작은 유속이다. 건설교통부(1993)의 댐 시설 기준 및 미국 개척국(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1987)에 의하면 도류부 중간지점에서의 유속이 20m/s 이상인 경우 공동현상(cavitation)이 발생할 수 있다고 제시하고 있다. 따라서 적절한 공기 혼입 장치(aerator)의 설치를 고려하는 것이 바람직한 것으로

로 사료된다(U.S. Army Corps of Engineers, 1973).

방류관 및 배사관을 통하여 배출되는 흐름의 유속은 각각 14~28m/s, 16~29m/s정도이다. 방류관 유입부에 위치한 단면축소구간에서는 약 35.6~37.5m/s의 유속을 보이고 있다. 이때 상대적으로 유량이 많은 쪽의 배사관 유속이 높은 것으로 나타났다. 배사관의 유입부에 위치한 단면축소구간에서는 방류관보다 조금 높은 약 39.5m/s의 유속을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구의 결과, 댐 건설시 수리모형실험에서 규명할 수 없는 댐 상류의 전체적 흐름 및 댐 홍수 배제 시설에서의 고 유속 흐름을 파악하는데 2차원과 3차원 수치모의가 매우 유용함을 확인할 수 있었다. 2차원 수치모의의 경우, 대상구간은 수몰지역 전체를 포함하는 대규모 영역을 설정하였다. 여수로, 방류관 등의 위치, 규모 변경을 2차원 모형에 구현하지 못하는 제약은 있었으나, 전체적 흐름 및 사수역 특성 파악 등 2차원 모의 결과를 정리하면 다음과 같다. 2차원 해석에서 댐 상류 부근에서 유속이 작아 수위의 편기 등 2차원적인 현상여거의 발견되지 않아 수위만 생각한다면 1차원 모형에 비해 큰 장점이 없다고 할 수 있지만, 유속의 경우 홍수시 2차원적 유속 분포, 특히 흐름추적도에 의한 와류 발생 영역의 확인은 2차원 수치모형이 댐 설계시 상류 하천의 유동을 규명하는데 매우 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

3차원 수치모의에서는 FLUENT를 이용하여 2차원 모형에서 구현하지 못한 여수로, 방류관, 배사관에서의 흐름거동을 모의하기 위하여 댐 축 ~ 댐 상류 200 m의 영역에 대하여 수치모의를 수행하였다. 3차원 모의 결과를 정리하면 다음과 같다. 댐과 같이 자유수면을 가진 수리구조물의 동수역학적인 거동을 FLUENT를 이용하여 효율적으로 묘사할 수 있었다. 방류 조건에 따른 수치모의 결과를 분석한 결과, 수위에 따라 배사관, 방류관, 여수로로 배출되는 유속이 상이하게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 유속차이는 주로 저수지 수위의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 댐 상류 100m지점에서 댐 여수로 중심선에 대한 유속 분포 모의치를 수리모형실험에서의 측정치와 비교해 본 결과, 수리모형실험에서의 측정치와 수치모의에 의한 계산치가 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 건설부 (1993). 댐시설기준.
건설교통부, 국립건설시험소 (1997). 남한강 수리모형실험.
건설교통부, 한국수자원공사 (2002). 한탄강 댐 기본설계보고서.
경기도 (1998). 한탄강 수계 하천 정비기본계획.
김대근, 서일원 (1997). “원형바닥젤의 유속구조 해석.” 한국수자원학회논문집, 제 30권, 제 5호, pp. 467-475.

한국수자원공사, 서울대학교 공학연구소 (1997). 영월다목적댐 건설사업 수리모형실험.

한국수자원공사 (2002). 한탄강 댐 본댐 및 부대시설공사 기본설계보고서.

Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York.

U.S. Army Corps of Engineers, 1973, Hydraulic Design Criteria, Washington, D.C.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (1987). Design of Small Dams, 3rd Ed., A Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado.

(논문번호:03-37/접수:2003.04.03/심사완료:2003.08.13)