

CFD 모형을 이용한 홍수조절지 여수로의 흐름해석

Analysis of Flow in the Spillway of Flood Control Reservoir Using CFD Model

이 호 진* / 안 상 도** / 전 계 원*** / 손 용 구****
Lee, Ho-Jin / An, Sang-Do / Jun, Kye-Won / Son, Yong-Koo

Abstract

In this study, the flow in the spillway of Gun-nam flood control reservoir were simulated by using FLOW-3D model. The discharge in the overflow weir and flow stability in approach channel were investigated with the original design plan. The results show that the scale of spillway is unsuitable and the flow in approach channel is unstable. To solve this problem, therefore, the alternative design plan were formulated. The flow in the spillway were simulated with the alternative design plan. The results show that the scale of spillway is suitable and the flow in approach channel is stable.

key words : Flood control channel, FLOW-3D model, Spillway, Approach channel

요 지

본 연구에서는 군남 홍수조절지 여수로의 흐름을 FLOW-3D 모형을 이용하여 모의하였다. 기본계획안에 따라, 월류웨어의 방류능력과 접근수로의 안정성을 검토한 결과 여수로 규모가 적절하지 못하고, 접근수로 내의 흐름은 불안정한 것으로 나타났다. 그래서, 문제점을 해결하기 위한 개선안을 마련하였다. 개선안에 따라 여수로의 흐름을 모의하고, 월류웨어의 방류능력과 접근수로의 안정성을 검토하였다. 그 결과 개선된 여수로의 규모는 적절한 것으로 나타났고, 접근수로의 안정성은 향상되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 홍수조절지, FLOW-3D 모형, 여수로, 접근수로

1. 서 론

대규모 수리구조물을 건설하는 경우에는, 댐 구조물의 안정성 확보를 위해 여수로 및 방류시설 등의 주요 수리구조물에 대한 수리학적 안정성 검토와 함께 댐 상·하류 하천 및 유역에 미치는 수리학적 영향에 대한 검토를 수행하여야 한다. 검토방법은 크게 수리모형실험과 수치모형실험으로 나눌 수 있다. 지금까지는 주로

사류 및 부압이 발생하는 자유수면을 갖는 수리구조물의 동수역학적인 거동을 파악하기 위하여 수리모형실험이 일반적으로 이용되어 왔다. 수리모형실험은 원형의 하천과 구조물의 형상을 축소제작하여 실험적으로 흐름특성을 살펴보는 것으로, 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 장점은 있지만 경제성을 포함하여 제작상의 오류나 축척 오류 등과 같은 단점이 따른다.

수치모형실험은 물의 흐름을 나타내는 지배방정식과 적절한 경계조건을 수치해석 기법을 통해 컴퓨터로

* 정희원 · 강원대학교 소방방재학부 강사 (E-mail : lhjce@hanmail.net)

** 한국수자원공사 설계처 대리

*** 정희원 · 강원대학교 방재기술전문대학원 조교수

**** 한국수자원공사 해외사업처 전문위원

계산하는 것으로, 최근 들어 컴퓨터의 용량 증대와 계산속도의 향상으로 인해 사용빈도가 점차 증가하고 있다. 일반적으로 수치모형실험은 수치모형실험에 비해 시간과 비용이 많이 소요된다. 특히, 댐 상류 수물지구에 대한 유황검토는 모의 구역이 너무 넓어 수치모형실험이 곤란하다. 또한 비용과 시간의 제약 때문에 다양한 경우에 대한 충분한 검토가 불가능하다. 따라서, 수치모형실험에 비해 비용과 시간의 제약을 덜 받는 수치모형실험은 설계자에게 좋은 대안이 될 수 있다 (김대근 등, 2005).

댐 상류 하천에서 댐에 의한 배수곡선을 계산하기 위해서는 HEC-RAS와 같은 1차원 모형이 사용되며, 댐 상류와 하류의 평면적인 유황을 모의할 경우에는 2차원 모형이 사용되어 왔다(김영한 등, 2003). 그러나 댐 여수로의 흐름과 같이 급격히 변하는 흐름에 대해서는 1, 2차원 수치모형으로 해석이 불가능하며, 이 경우에는 3차원적인 흐름 거동을 모의할 수 있는 3차원 동수역학 모형이 적용되어야 한다.

3차원 모형이 사용되기 시작된 것은 비교적 최근에 일이다. Savage 등(2001)과 Ho 등(2001)은 FLOW-3D 모형을 이용하여 월류형 여수로의 수면변위와 압력분포를 계산하였고, 김남일(2003)은 FLOW-3D 모형을 이용하여, 여수로의 수치모형실험시 모형의 축척으로 인한 결과의 왜곡에 대해 검토하였다. 김영한 등(2003)은 FLUENT 모형을 이용하여 여수로 등 방류 구조물의 수리현상을 모의하였으며, 김대근 등(2004 a, b)은 월류형 여수로에 교각이 설치된 경우에 교각으로 인한 월류흐름의 특성과 테인터수문이 설치된 월류형 여수로에서 수문개방에 따른 여수로 흐름 특성을 모의하였다. 댐 이외의 수리구조물에 적용한 예로는 오병동 등(2004)은 용담댐 시험유역에 설치된 파살플롭의 흐름해석에 적용하여, 흐름형상, 유속 분포 및 유량등을 산정하였으며, 안창진(2003)은 정수처리공정에서 접촉조 내의 분말활성탄의 유동을 해석하였다.

본 연구에서는 일반댐과는 달리 여수로 웨어 표고와 상류저수지 표고와의 차이가 작은 특징을 갖는 군남홍수조절지를 대상으로 FLOW-3D모형을 이용하여 3차원 수치모형실험을 수행하였다. 기본계획 설계안의 문제점을 파악하고 개선할 수 있는 대안을 제시함으로써, 경제적이며 안정적인 홍수조절지 구조물 건설을 도모하는 것을 목적으로 하였다.

2. FLOW-3D 모형

FLOW-3D 모형은 많은 연구에서 자연하천과 수리

구조물에 대한 적용의 타당성을 검증받았으며, 특히 자유수면을 가지는 흐름을 잘 모의하는 것으로 알려져 있다.

2.1 지배방정식

지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

여기서, V_F 는 유체의 요소체적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각 방향유속이며, A_x, A_y, A_z 는 각 방향면적 요소이다.

운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 아래와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

여기서, G 는 체적력이고, f 는 점성력을 나타낸다. 자유표면 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF(volume of fluid) 함수, $F(x, y, z, t)$ 로 표현되면, 다음의 연속방정식 식(5)를 만족시킨다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x}(F u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(F v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(F w A_z) \right] = 0 \quad (5)$$

본 연구에서는 난류확산을 산정하기 위해서, 실무적인 관점에서 일반적으로 사용되고 있는 $k-\epsilon$ 난류모형을 사용하였다.

2.2 수치해석 알고리즘

FLOW-3D 모형은 유한차분법에 직육면체 요소로

일반형상을 정의할 수 있는 FAVOR (Fractional Area and Volume Obstacle Representation) 기법을 도입한 유한체적법을 사용한다. 또한, 제트, 비산 등과 같은 복잡한 자유표면 운동을 해석하기 위하여 VOF기법을 사용한다. 일반적인 해석단계로는 해석영역을 작은 격자로 나누는 것으로 시작하여 각 격자에 대해 주어진 조건에 따른 속도, 압력 등의 인자를 계산한다.

지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 연속방정식을 만족하도록 압력항을 계산하기 위해서는 SOR법과 SADI법을 사용할 수 있다. 계산은 (1)운동방정식을 양해법으로 풀어서 각 방향의 유속을 계산 (2)연속방정식을 만족하도록 운동방정식의 압력과 유속을 반복계산 (3)자유수면, 난류특성, 에너지 수송방정식을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

3. 적용대상영역

본 연구의 적용대상은 군남홍수조절지이다. 군남홍수조절지는 임진강 본류의 홍수조절능력 확보 및 북측 댐으로 인한 불규칙한 유황을 개선할 목적으로 계획되었다.

3.1 유역개황

군남홍수조절지는 한탄강 합류점 약 12km 상류의 임진강 본류에 위치한다. 유역면적은 4,190.9km²이며 그 중 남한면적이 108.0km²로 전체유역의 약 2.6%에 불과하며, 나머지 97.4%가 북한지역에 위치하고 있다.

또한, 유역의 형상계수는 0.13으로 장방형의 형상을 갖고 있고, 유역의 평균경사는 17.1%이며, 전체 유역의 28.5%가 10% 이하의 경사를 가지고, 약 1.5%의 지역이 50% 이상의 경사를 가지고 있다.

3.2 주요제원

군남홍수조절지의 주요제원은 표 1에 제시한 바와 같다(한국수자원공사, 2005).

4. 적용 및 고찰

4.1 모의조건

4.1.1 지형 및 여수로

현지측량자료와 1:5,000도의 수치지도를 이용하여

지형과 여수로를 구성하였다. 지형은 모델링 범위를 충분히 포함하도록 댐의 상·하류에 걸쳐 작성하였으며, 연직범위는 가능최대 홍수량(PMF)시 저수지의 최고수위를 초과하는 범위까지 재현하였다. 그림 1은 모의에 사용된 지형 및 여수로의 형태를 도시한 것이다.

표 1. 군남홍수조절지 제원

유역면적	4190.9km ²
총저수용량	71.6백만m ³
계획홍수위	EL. 40.0m (100년빈도)
최고수위	EL. 40.0m (PMF)
형식	콘크리트중력식
마루표고	EL. 45.0m
높이	26m
길이	656m
여수로형식	수문조절형 월류여수로
여수로 폭/수문	297m / 18개
첨두유입량(방류량)	18,640m ³ /s(전량방류)
설계유입량(방류량)	11,800m ³ /s(11,000m ³ /s)

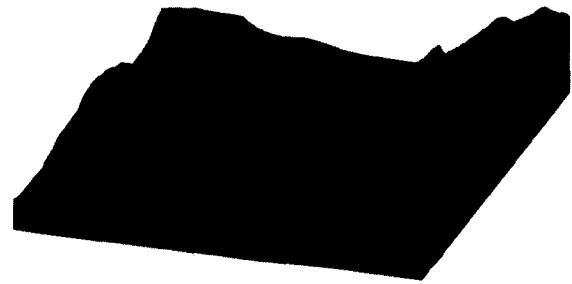


그림 1. 지형 및 여수로

4.1.2 격자구성

모의를 위한 좌표계는 직각좌표계를 사용하였으며, 3차원으로 구성된 지형에 구조물을 합성하였다. 웨어와 같은 구조물 주변에서는 조밀한 격자를 사용하여 정밀한 흐름현상을 재현하였으며, 이외의 부분의 대해서는 느슨한 격자를 적용하여 최종적으로 2가지 격자망으로 모델링 전체범위에 대하여 격자를 구성하였으며, 구성된 격자망은 아래 표 2와 같다.

표 2. 격자망구성

구분	Δx (m)			Δy (m)			Δz (m)			격자 개수
	최소 크기	최대 크기	개수	최소 크기	최대 크기	개수	최소 크기	최대 크기	개수	
격자망	3.20	9.29	150	2.50	13.89	180	0.97	0.97	30	810,000

4.1.3 경계조건 및 초기조건

상류 경계조건으로는 저수지 수위를 경계조건으로 설정하며, 하류경계 조건으로는 군남홍수조절지가 일 반담과 달리 상·하류 표고차가 크지 않아 방류시 하류 하천 수위 상승으로 인하여 통수능에 영향을 줄 것으로 판단되므로, 정확한 방류량 대 하류하천 형성수위 관계식을 산정하여 방류량에 따른 하류하천 수위를 하류 경계조건으로 설정하였다. 나머지는 고체경계이므로 벽면의 조도를 반영할 수 있는 비활(no slip)조건을 부여하였다.

초기조건으로는 상류의 경우 월류마루 상류까지는 상류경계와 동일한 경계를 부여하였으며, 유속과 다른 모든 종속변수는 0의 값을 사용하였다. 하류수위는 수위-유량 관계곡선을 이용하여 초기수위를 부여하였으며, 해석후 방류량에 따라 재조정하여 방수위를 설정 하였다. 계산시간은 모의구간의 운동에너지, 난류운동 에너지 및 유량의 수렴상황을 검토하여 표 3과 같이 결정하였다.

표 3. 계산시간

격자 수	초기 시간간격(Δt)	최소 시간간격(Δt)	총 계산시간
810,000	1.0e-5	1.0e-10	600초

4.2 해석결과

4.2.1 개선 전

군남홍수조절지 기본계획상에 제시된 조건을 이용하여 월류웨어의 방류능력과 접근수로의 안정성을 수치모형을 이용하여 검토하였다.

(1) 월류웨어의 방류능력

여수로 웨어의 방류능력을 검토하기 위하여, 수문을

완전 개방한 상태에서 저수지 수위별 방류량을 검토하였다. 댐설계기준에 제시된 수리계산식을 이용하여 방류량을 산정한 기본계획 상의 결과와 수치모형실험 결과를 비교하였다.

표 4는 저수지 수위별 방류량에 대하여 수리계산결과, 수리모형실험의 관측값, 수치모형실험 결과를 제시한 것이다. 표에 제시된 바와 같이 수치모형실험 결과와 수리모형실험 결과가 거의 일치하고 있어 수치모형실험이 신뢰성 있는 결과를 제시하고 있음을 알 수 있다.

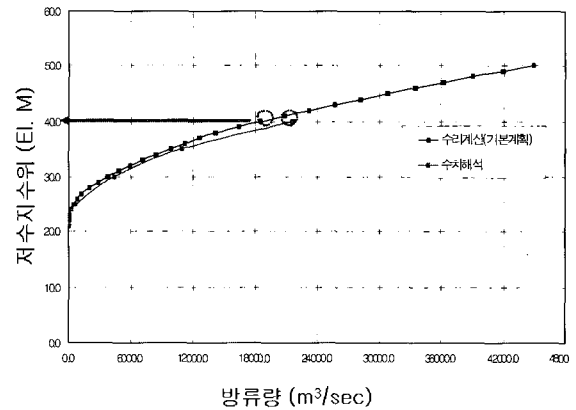


그림 2. 여수로의 수위-방류량 관계곡선

그림 2는 기본계획상의 수리계산 결과와 수치모형 실험에 의한 저수지 수위별 방류량 산정결과를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 저수지 수위가 최고수위 EL. 40m에 도달한 경우 수문전개시 수리계산의 결과는 수치해석에 비해 방류량이 2,610 m^3/s (약 14%정도) 적게 계산되었다. 이것은 수리계산식에서 수정유량계수를 사용하여 하류하천 수위 상승으로 인한 통수능의 저하를 과대하게 반영하였기 때문인 것으로 판단된다.

수치모형실험 결과를 분석할 때 기본계획상의 여수로 규모가 과대 설계되었음을 알 수 있다. 즉, PMF

표 4. 수위 및 수문 개방 조건별 최대 방류량

저수지수위 (EL.m)	수문개방 조건	수리계산 기본계획(m^3/s)	수치해석 결과(m^3/s)	수리모형 관측값(m^3/s)	비고
40.0	PMP유입시 수문전개	18,600	21,250	-	수리모형실험은 저수조의 용량부족으로 18,400 m^3/s 이상은 실험이 불가능하였음.
38.7	수문전개	15,700	18,200	18,400	수리모형실험 저수조의 최대용량
40.0	조절방류를 위해 중앙 권양식 수문 6문만 전개	-	10,135	10,215	

홍수유입에 따른 수문 전개시 계획된 최고수위 EL 40m보다 아래에서 전량 방류가 가능하다. 따라서, 과대 설계된 부분을 조절하여 경제성 있는 구조물 설계가 되도록 여수로 규모를 조절할 필요가 있다.

(2) 접근수로의 안정성

접근수로에서는 불규칙한 수리현상인 홍수를 안정적인 수리현상으로 변환하여 웨어를 월류시킬 수 있도록 하기 위하여 여수로의 접근수로에서 계획방류량 규모에 대한 접근유속이 4m/s 이하가 되도록 안정성을 확보해야 한다(한국수자원학회, 2005).

접근수로의 안정성 검토는 100년 빈도 홍수유입시 조절 방류량에 대하여 유속분포를 검토하였다. 표 4에 제시된 바와 같이 수치모형실험에 의해 얻어진 중앙부 권양식 6문을 전개한 경우의 방류량 10,135m³/s가 기본계획상의 100년 빈도 계획방류량 11,000m³/s에 근접하므로, 이때의 방류량을 이용하여 접근수로의 안정성을 검토하였다.

그림 3은 검토유량에 대한 접근수로의 유황을 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 접근수로의 유황은 교란되지 않고 있으나, 접근유속은 4m/s를 초과하고 있어, 댐설계기준에 제시된 조건을 만족시키지 못하고 있다.

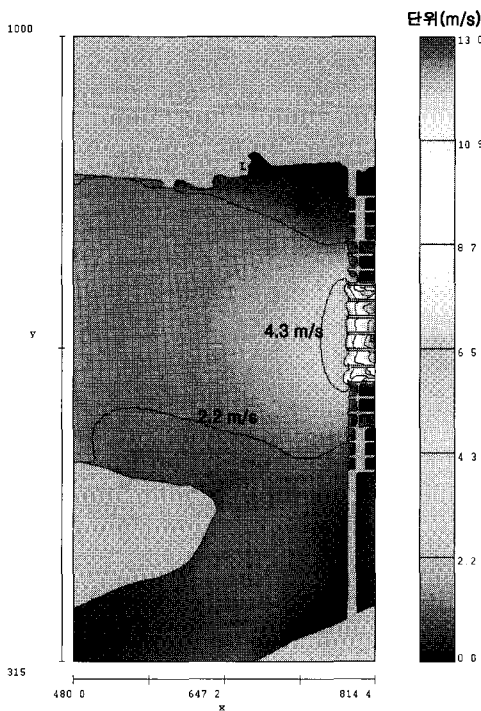


그림 3. 접근수로의 유속분포

4.2.2 개선 후

전절에서 살펴본 바와 같이 기본계획상의 여수로

규모가 과대 설계되어 있고, 100년 빈도 조절방류량에 대하여 접근수로의 안정성을 확보하지 못하는 것으로 판단되므로, 이에 대한 개선이 필요하였다. 본 홍수조절지는 북한지역의 배수영향을 고려하여 PMF 유입시 최대 가능 상승 수위인 EL 40m를 초과하지 않는 범위에서 최대한 여수로 규모를 줄여 공사비를 절감토록 개선안이 제시 되었다. 개선된 여수로는 길이를 기본계획상 297m에서 254m로 축소하고, 중앙수문개수를 6문에서 5문으로, 양안부를 자연월류식으로 변경하여 수치모의를 수행하여 웨어의 방류능력과 접근수로의 안정성을 검토하였다.

그림 4는 기본계획상의 여수로와 개선된 여수로의 형태를 도시한 것이다. 그림 1에 제시된 지형에 개선된 여수를 고려하여 수치모형실험을 수행하였다.

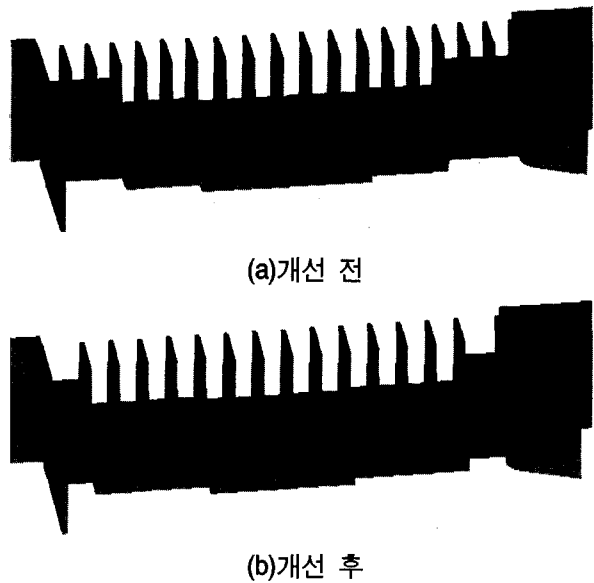


그림 4. 개선 전·후의 여수로

(1) 월류웨어의 방류능력

개선된 여수로 웨어의 방류능력을 검토하기 위하여, 수문을 완전 개방한 상태에서 저수지 수위별 방류량을 수치모의 하였다. 표 5은 기본계획상의 수위별 방류량과 개선된 여수로의 수위별 방류량의 수치모의 결과를 제시한 것이다. 저수지의 최고수위 EL. 40m에 대해 개선된 여수로로는 19,585m³/s의 유량을 방류할 수 있는 것으로 분석되었다. 이것은 기본계획에서 제시된 PMF 방류량인 18,640m³/s에 비해 약 945m³/s(약 5%)의 유량에 대해서 여유가 있다.

그림 5는 수치모의 결과와 기본계획상의 수리계산 결과를 도시한 것이다. 제시된 결과에서 알 수 있는 바와 같이 개선된 여수로의 방류량이 기본계획상의

방류량과 비교하여 약 5%의 오차 범위에 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 종합할 때 개선된 여수로 는 계획된 최고수위 EL 40m에서 가능최대 홍수량 을 적절히 방류할 수 있는 규모로 설계된 것으로 판 단된다.

표 5. 저수지 수위별 방류량

저수지 수위 (EL.m)	기본계획 설계방류량 (m ³ /s)	수치해석 결과 (m ³ /s)	
		개선전	개선후
40.0	18,640	21,250	19,585
39.5	17,467	20,350	18,640
35.5	10,440	11,840	11,000

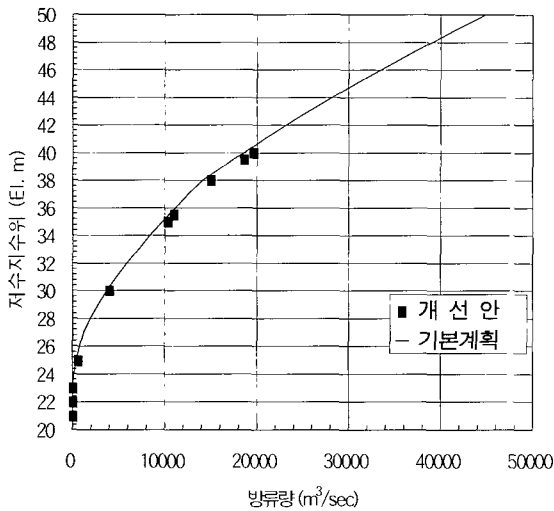


그림 5. 개선된 여수로의 수위-방류량 관계곡선

(2) 접근수로의 안정성

개선된 여수로에서 접근수로의 안정성 검토는 100년 빈도 조절 방류량인 11,000m³/s 와 PMF 방류량인 18,640m³/s에 대해 수행하였다. 상기 유량에 대해 수문을 완전 개방했을 경우의 접근수로에서의 유속분포를 검토하였다.

그림 6은 100년 빈도 조절 방류량인 11,000m³/s를 방류했을 경우의 접근수로에서의 유속분포를 도시한 것이다. 그림에 도시된 바와 같이 접근수로에서 유속은 약 3.4m/s로 설계기준인 4m/s 이하의 양호한 결과를 보이고 있다.

그림 7은 PMF 방류시의 접근수로의 유속분포를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 접근수로에서는 약 4.1m/s의 유속을 나타내고 있어 설계기준에서 제시하고 있는 4m/s를 초과하고 있으나, 그

차이가 미소하여 흐름에 부정적인 영향은 없을 것으로 판단된다.

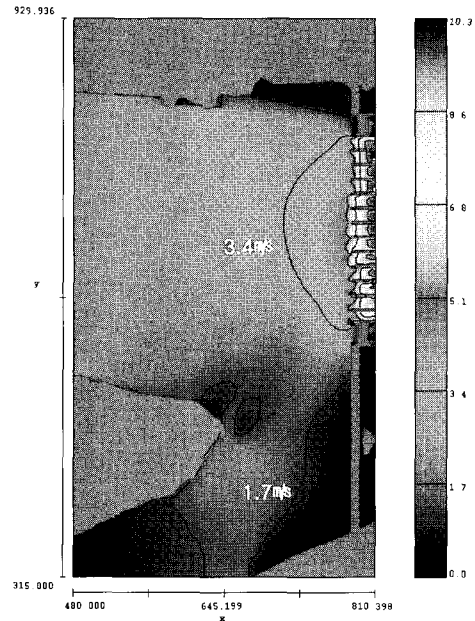


그림 6. 100년 빈도 조절방류시의 접근수로의 유속분포

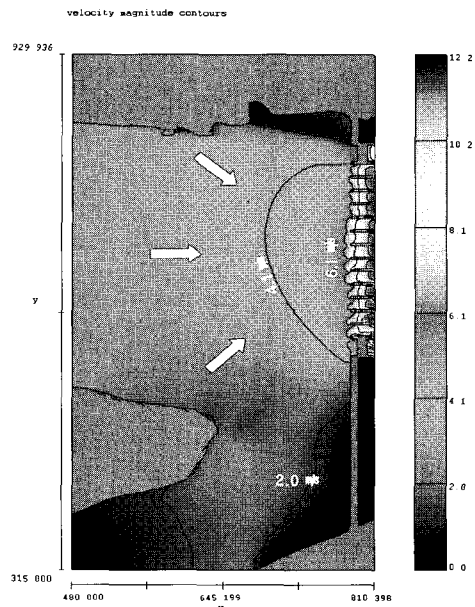


그림 7. PMF 방류시의 접근수로의 유속분포

5. 결 론

최근 들어 사용빈도가 증가하고 있는 3차원 전산유체모형인 FLOW-3D 모형을 이용하여 군남홍수조절지의 기본계획안에 대해 적용하고, 문제점을 파악하

여, 개선안에 대해 수치모의를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

저수지 수위에 따른 방류량의 수치모의 결과가 수리모형실험에서 제시하고 있는 관측값과 유사하므로 수치모형에 의한 모의 결과를 신뢰할 수 있는 것으로 나타났다.

군남홍수조절지 기본계획안에 따라 월류웨어의 방류능력을 모의한 결과 방류량이 21,250m³/s로 설계방류량 18,640m³/s를 약 14% 초과하여 방류되는 것으로 나타났다. 이를 근거로 판단할 때, 기본계획안에 의한 여수로는 과대설계가 되었음을 알 수 있다. 또, 100년 빈도 조절방류량(11,000m³/s)을 기준으로 접근수로의 안정성을 살펴보면, 접근유속이 4.3m/s로 나타났다. 이 값은 댐설계기준에서 제시하고 있는 접근유속 4m/s를 초과하고 있으므로, 접근수로의 안정성을 확보하지 못하는 것으로 판단된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서, 개선안을 마련하고, 개선안에 대하여 수치모의를 수행한 결과 저수지 최고수위 EL. 40m 일 때 여수로가 19,585m³/s의 유량을 방류할 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 설계방류량인 18,640m³/s와 유사한 결과로 개선안의 여수로가 적절한 규모를 설계되었음을 알 수 있다. 또, 접근수로의 안정성을 분석한 결과 100년빈도 조절방류량에 대한 접근유속이 3.4m/s로 댐설계기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또 가능최대 홍수량일 때의 접근 유속은 4.1m/s로 설계기준을 약간 초과하고 있으나 이로 인한 유황에 부정적인 영향은 없으며, 전반적인 통수능에도 영향이 없을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김남일 (2003) *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model*, 박사학위논문, 서울대학교.
김대근, 박재현, 이재형 (2004b) 테인터수문이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의. 한

국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제 8호, pp. 675-685.

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

김대근, 최지웅, 김창시, 이지원 (2005) 수리 및 수치모형실험을 이용한 여수로 설계-화북다목적댐. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제 3호, pp. 179-188.

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

안창진 (2003) 격벽식 분말활성탄 접촉조에 의한 이취미 제거 효율향상, 박사학위논문, 충북대학교.

오병동 (2004) FLOW-3D 모형을 이용한 파살플룸의 흐름 해석, 박사학위논문, 충북대학교.

한국수자원공사 (2005) 군남홍수조절지 기본 및 실시설계-수리모형실험보고서. 한국수자원공사.

한국수자원학회 (2005) 댐시설기준. 한국수자원학회.

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.

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

◎ 논문접수일 : 2007년 04월 30일

◎ 심사의뢰일 : 2007년 05월 03일

◎ 심사완료일 : 2007년 06월 11일