

## 발전소 해수방수로의 수력개발에 따른 수리특성 분석

김 지영<sup>1)</sup>, 이 대수<sup>2)</sup>, 강 금석<sup>3)</sup>

### Flow Analysis of Thermal Discharge Channel due to Development of Hydropower

Ji-Young Kim, Dae-Soo Lee, Keum-Seok Kang

Key words : Discharge channel(방수로), Hydropower(수력), Discharged cooling water(방류수), Numerical analysis(수치해석)

Abstract : 삼천포 등 국내 대형 화력발전단지에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 약 150 cms로 (100 MWe당 약 5 cms) 약 3,000 kW 이상의 수력에너지를 보유하고 있으나, 현재 활용되지 못하고 그대로 해양으로 방류되고 있어 이 수력에너지의 개발을 추진하고 있다. 온배수를 이용한 수력 개발시에는 기존 발전소의 배수로를 변경하여 이용하는 것으로 기존 발전소에 미치는 영향을 최소화하는 것이 중요하다. 본 검토에서는 삼천포화력에 댐식 수력발전소를 건설할 경우 기존 배수로의 수리특성 변화를 3차원 유동해석 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 해석한 결과를 소개하였다. 수치해석 결과를 이용하여 수력에너지의 최적 개발을 도모하였고, 다양한 운전조건을 설계에 반영할 수 있었다.

#### Nomenclature

$A_x, A_y, A_z$  : fractional area open to flow  
 $CDIS1, 2, 3$  : constants  
 $Diff, DDif$  : diffusion term  
 $F$  : volume of fraction  
 $FDIF$  : turbulent diffusion term  
 $FSOR$  : time rate of change of the volume fraction associated the mass source  
 $G$  : buoyancy production term  
 $P$  : shear production term  
 $u, v, w$  : velocity components  
 $V_F$  : fractional volume open to flow

#### subscript

VOF : volume of fluid  
FAVOR : fractional area and volume obstacle representation

#### 1. 서론

삼천포 등 국내 대형 화력발전단지에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 약 150 cms로 (100 MWe당 약 5 cms) 약 3,000 kW 이상의 수력에

너지를 보유하고 있으나, 현재 활용되지 못하고 그대로 해양으로 방류되고 있어 이 수력에너지의 개발을 추진하고 있다. 발전소 온배수의 원활한 배수를 위한 설계 낙차와 함께 남서해안의 조위 변화에 따른 낙차를 이용하는 것으로 소수력발전 방식과 조력발전 방식의 특징을 동시에 활용하는 것이다. 온배수를 이용한 수력 개발시에는 기존 발전소의 배수로를 변경하여 이용하는 것으로 기존 발전소에 미치는 영향을 최소화하는 것이 중요하다. 삼천포화력에 댐식 소수력발전소를 건설할 경우 기존 배수로의 수리특성 변화를 3차원 유동해석 프로그램인 FLOW-3D와 수면변화해석 프로그램인 HEC-RAS를 이용하여 해석한 결과를 소개하고자 한다.

- 
- 1) 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : jykim77@kepri.re.kr  
Tel : (02)865-5772 Fax : (02)865-5725
  - 2) 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : dslee@kepri.re.kr  
Tel : (02)865-5760 Fax : (02)865-5725
  - 3) 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : gldstn@kepri.re.kr  
Tel : (02)865-5762 Fax : (02)865-5725

## 2. 수치모형

대규모 수리구조물을 건설하는 경우에는, 담 구조물의 안정성 확보를 위한 주요 수리구조물(여수로 및 방류 시설)의 수리학적 안전성 검토와 함께 댐 상하류 하천 및 유역에 미치는 수리학적 영향 검토를 수행하여야 한다. 검토 방법은 수리모형실험과 수치모형실험의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 지금까지는 사류 및 부압이 발생하는 자유수면을 가진 수리구조물의 동수역학적인 거동을 파악하기 위하여 수리모형실험이 일반적으로 사용되어 왔다. 수치모형실험은 원형의 하천과 구조물의 형상을 축소 제작하여 실험적으로 흐름 특성을 살펴보는 것이므로, 신빙성 있는 결과를 얻을 수 있는 장점이 있지만 경제성을 포함하여 제작상의 오류나 축척 오류 등과 같은 단점이 따른다. 수치모형실험은 실험적 방법의 제약을 극복할 수 있는 방법으로 물의 흐름을 나타내는 지배방정식을 적절한 수치 방법을 통해 전산 해석하는 방법이다.

댐 상류 하천에서 댐에 의한 배수곡선을 계산하기 위한 HEC-RAS와 같은 1차원 수치모의는 사용이 간편하고 지형자료의 준비가 용이하여 널리 사용되고 있다. 그리고 댐 상류 하천의 경우 좌우안 간의 수위 및 유속 편차가 거의 없어 1차원 모형의 사용에 적합하므로 계획의 초기단계에서 통상 사용되고 있다. 댐 상류와 하류의 평면적인 유향을 모의할 필요성이 있는 경우에는 수심적분 2차원 수치모형이 필요하다.

댐 여수로 등 수리구조물에서의 3차원적인 흐름 거동을 모의하기 위해서는 3차원 CFD 모형이 사용되어야 한다. 3차원 CFD 모형으로 상용화된 모형은 FLOW-3D, FLUENT, FIDAP, STAR-CD, CFD2000 등이 있다. 이 중에서 FLOW-3D 모형은 자유수면을 가지는 흐름을 잘 모의하는 것으로 알려져 있으며, 국내에 적용사례가 있어 그 결과를 가장 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.1 지배방정식

물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 다음과 같은 지배방정식을 만족하는 VOF (Volume Of Fluid) 함수를 정의한다.  $F$ 는 유체가 점유하고 있는 체적비율을 의미하며,  $F$ 가 1인 경우는 검사체적에 유체가 가득한 상태를, 0인 경우는 검사체적에 유체가 없는 경우를 나타내는 것으로 자유수면에서는  $F$ 가 0과 1사이의 값을 가진다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right\} = FDI\!F + FSOR \quad (1)$$

여기서,

$(u, v, w)$  :  $(x, y, z)$  방향으로의 속도성분  
 $(A_x, A_y, A_z)$  :  $(x, y, z)$  방향으로의 유체가 접하는 면적비

$V_F$  : 유체가 접하는 체적비

$FDIF$  : 난류 확산항

$FSOR$  : 유체의 질량생성으로 인한 시간에 따른 체적변화율

운동량방정식, 에너지, VOF함수의 수송방정식에 사용되는 확산항은 난류확산과 분자확산으로 구분할 수 있다. FLOW-3D에서 난류확산을 산정하기 위하여 제공하는 난류모형은  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , LES(Large Eddy Simulation)모형이다. 본 과업에서는 실무적인 관점에서 가장 일반적으로 사용되고 있는  $k-\epsilon$  난류모형을 사용하였다. 난류확산을 산정하기 위한 난류운동에너지와 난류확산의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial k}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P + G + Diff - \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) = \frac{CDIS1}{k} \cdot \epsilon (P + CDIS3 \cdot G) + DDif - CDIS2 \cdot \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

여기서,

$P$  : 전단 생성항

$G$  : 부력 생성항

$Diff, DDif$  : 확산항

$CDIS1, 2, 3$  : 상수

### 2.2 수치모의 알고리즘

지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되는데, FLOW-3D는 유한차분법에 FAVOR기법을 도입한 유한체적법의 접근법을 사용한다. 해석 영역을 격자로 나눈 후, 이 격자 단위로 계산이 이루어지는데, 각 격자에 대해서 주어진 압력에 대해 다음 시간에서의 속도를 구하며 이 속도를 이용하여 Poisson 방정식 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정하고 그 후에 자유수면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어나가는 방법을 이용한다.

격자계(grid system)의 구성시 격자망(mesh)과 지형(geometry)은 독립적으로 입력된다. 이는 FAVOR(Fractional Area and Volume Obstacle Representation)기법을 사용하는 것으로 육면체 격자망에 구조물, 벽체 등의 지형정보가 포함된다.

제트, 비산, 파랑 등과 같은 자유수면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지안(Lagrangian)방법보다 고정 오일러리안(Eulerian)방법을 사용하는 VOF 방법이 일반적이다. FLOW-3D에 사용하는 VOF 방법은 정확한 압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 유한차분시 경계면의 Smearing을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유수면으로 가정함)사이의 운동을 기술할 수 있는 수치해석 방법이다.

지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 연속방정식을 만족하도록 압력항을 계산하기 위해서는 SOR (successive over relaxation)법과 SADI (special alternation-direction, line implicit)법을 사용할 수 있다. 계산은 (1) 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각 방향의 유속을 계산 (2) 연속방정식을 만족하도록 운동방정식의 압력과 유속을 반복 계산 (3) 자유수면, 난류특성, 에너지 수송방정식을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

### 3. 수치모형의 적용

#### 3.1 모의조건

##### 3.1.1 기본자료

모의조건은 그림 1~3의 기본자료 등을 바탕으로 구성하였다.

##### 3.1.2 경계조건

- 조위는 HHWL(고극조위) 2.219 m 이용
- “정지상태”란 가동보, 비상문비 모두 고장상태(가동보, 및 비상문비 상단고는 E1.(+) 3.0 m)로 가동보와 비상문비 위로 월류가 일어날 때
- “정상상태”란 소수력발전소 수위가 E1.(+) 3.0 m를 유지하며 가동하고 있는 상태
- 현상태 방류수 개수로 위에 상류부의 수위는 4.3 m
- 위에 상류 유속계산: 1.288 m/s
  - 단면적(m<sup>2</sup>)=수심(4.3 m)×수로의 폭(28.2 m)
  - 유속(m/s)=유량(156.2 m<sup>3</sup>/s)/단면적(121.26 m<sup>2</sup>)
- 가동보의 높이를 E1.(+)+3.0 m로 모의함 (2.4, 2.6, 2.8 m 추가 모의)
- 상류부는 교량기점 232 m 지점임

(Unit : cm)

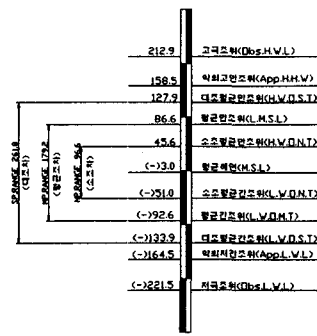


그림 1 조석조건

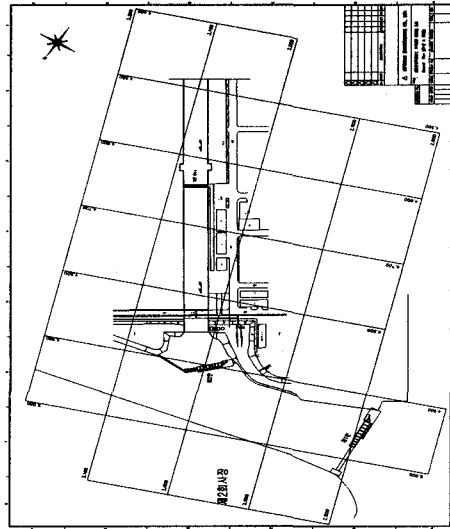


그림 3 계획평면도

#### 3.2 해석결과

##### 3.2.1 현상태 재현

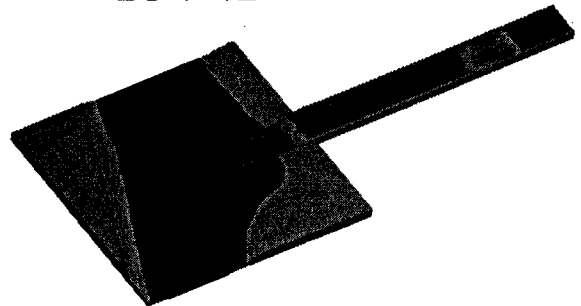


그림 4 현상태 유속분포도 (3차원)

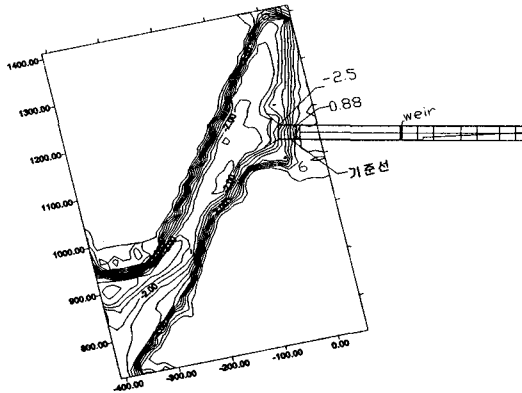


그림 2 삼천포 측량성과도

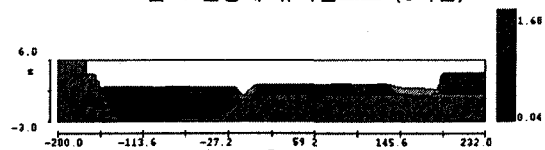


그림 5 현상태 유속 분포도 (개수로 중간부 y=3.0m)

### 3.2.1 계획안 (가동보 E1. +3.0 m) - 정지상태

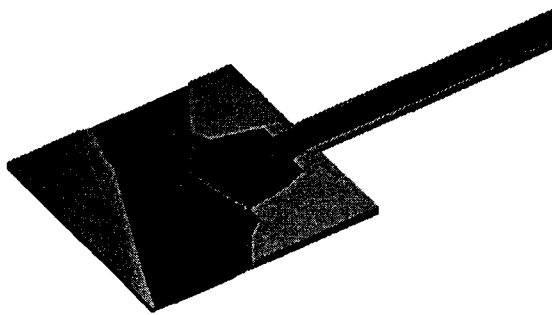


그림 6 계획안(가동보 E1. +3.0 m) 정지상태 유속분포 (3차원)

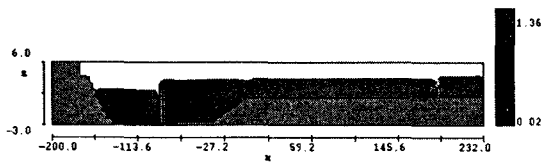


그림 7 계획안(가동보 E1. +3.0 m) 정지상태 유속 분포도 (개수로 중간부 y=3.0 m)

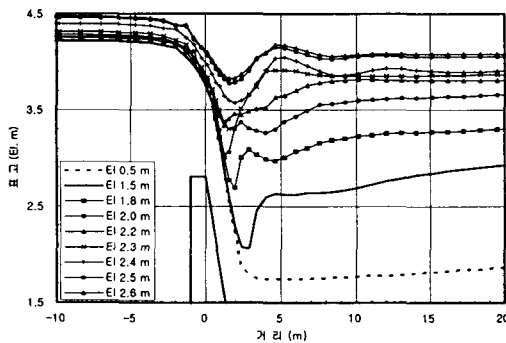
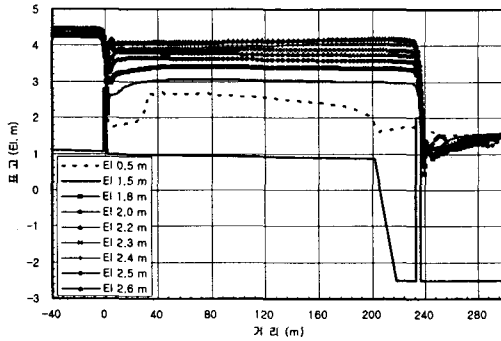
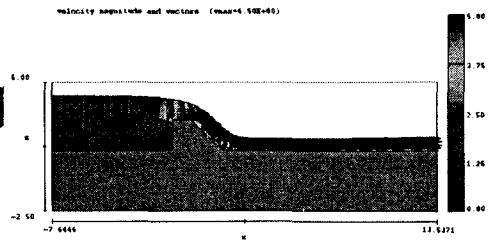
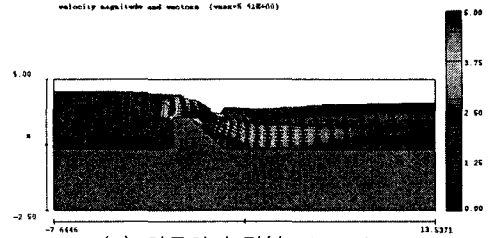


그림 8 하류보에 따른 위어의 수위변화



(a) 하류위어 정부 E1. 0.5 m



(b) 하류위어 정부 E1. 2.0 m

그림 9 하류보의 높이에 따른 흐름구조

## 4. 온배수 소수력발전소 설계

수치실험을 통하여 소수력발전용 댐의 높이를 검토한 결과, 하류댐의 높이가 E1.(+3.8 m) 이하인 경우는 소수력발전소의 수차, 수문 등 모든 발전 및 방류설비들의 기능이 완전 정지하는 경우에도 댐으로 월류가 일어나 기존 발전소의 온배수는 정상적으로 방류가 가능한 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 삼천포 화력발전소에는 다음과 같이 소수력발전소를 설계하였다.

- 최대유량 : 156.2 cms
- 평균유량 : 130 cms
- 수차대수 : 8 대
- 출력 : 3,000 kW급
- 낙차범위
  - 평균/최대 유효낙차 : 3.26 m/4.78 m
- 수차직경 : 약 2.3 m
- 수차형식 : 입축 Propeller

## 5. 결론

삼천포화력을 대상으로 댐식 소수력발전소를 건설할 경우 기존 배수로의 수리특성 변화를 3차원 유동해석 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 해석한 결과를 소개하였다. 적정 댐 높이를 산정하여 소수력의 최적 개발을 도모하였고, 다양한 운전조건을 설계에 반영할 수 있었다.

## References

- [1] 김남일(2003). Investigation of Scale Effects of Hydraulic Model for Dam Spillway Using 3-D CFD Model, 박사학위논문, 서울대학교.
- [2] 산자부(2005). 발전소 온배수를 이용한 1,500 kW급 수력발전 상용기술 개발(중간보고서).
- [3] 산자부(2004). 화력발전소의 해수방류수를 이용한 수력발전시스템 타당성 조사 연구.
- [4] 電力土木技術協會(1995). 火力原子力發電所土木構造物의 設計.