저수지 선택취수에 관한 수치해석 연구

A Study on Numerical Analysis of Selective Withdrawal from Reservoir

김영도*, 김태원**, 이용곤***, 김우구****

Young Do Kim, Tae Won Kim, Yong-Kon Yi, Woo Gu Kim

요 지

여름철의 강우시 저수지에 주로 유입되는 고탁수층은 저수지내의 수체에 대하여 밀도차와 유속차를 가지며, 난류혼합을 일으키면서 주변수를 유입하며 하류방향으로 이송·확산되어 간다. 임하댐과 같은 대형 저수지는 수심이 30 m가 넘는 관계로 여름철에 2개의 수온약층이 존재한다. 따라서 댐체에 도달한 고탁수층은 저수지내의 밀도성층으로 인하여 주로 중층에 분포하게 되며, 가을철에 발생하는 수평확산과 전도현상으로 인해 저수지 전역에 분포하게 되어 탁질입자의 분포에 따라 탁수현상의 장기화를 유발하기도 한다. 이와 같은 탁수문제의 저수지내 대책으로는 홍수기에 고탁수층을 우선적으로 취수하는 방법이 있다. 고탁수층은 이와 같이 수온약층과 밀접한 관계를 가지며, 취수탑 주변의 선택취수 결과에 영향을 받는다. 형성된 탁수층을 효율적으로 선택배제하기 위해서는 취수시설에 접근하는 성층흐름을 정확하게 이해해야 한다.

본 연구에서는 3차원 CFD를 사용하여 밀도성층에 따른 취수탑 주변의 접근흐름을 수치해석하여 방류수심, 방류유속 및 밀도성층구조의 선택배제에 대한 영향을 분석하였다. 임하댐 취수설비에 적용한 결과에 의하면 상층, 중층, 하층에서 취수탑 문비를 개도하였을 경우, 취수탑 주변에서만 유속이 증가하였을 뿐 저수지내에서는 유속이 크게 증가되지 않은 것으로 나타났다. 하지만 문비 개도구간의 변화에 따라 수심별 유속분포는 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 문비를 조절하는 것은 저수지 전체의 유동을 깨뜨리지 않으면서 취수탑 인근에서 선택취수가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서는 정밀한 현장조사를 수행하여 저수지와 방류수의 탁도변화를 모니터링하였으며, 취수탑 개구부 주변의 연직 유속분포를 측정하였다. 3차원 수치모의 결과와 현장에서 관측한 유속장을 비교함으로써 본 연구에서 제시한 실제 탁수배제능력을 검증하였다.

핵심용어 : 고탁수층, 선택취수, 3차원 CFD, 연직 유속분포

* 정회원·인제대학교 환경공학부 조교수·E-mail : ydkim@inje.ac.kr
** 정회원·(주)웹솔루스 수자원부 이사·E-mail : ktw@websolus.co.kr
*** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원·E-mail : yongkon@kwater.or.kr
**** 정회원·한국수자원공사 수자원사업본부장·E-mail : wgkim@kwater.or.kr

1. 서 론

최근 일부 저수지에서 기상이변으로 인한 집중호우시 발생된 고탁수 문제로 인하여 수자원으로서의 가치가 평가절하되고 있어 이에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다(박기영, 2003). 일반적으로 강우시 발생하는 하천에서의 탁수는 하상재료의 침식으로 인한 부유사(suspended load)와 유역으로부터 흘러 들어온 세류사(wash load)로 인해 발생한다(Vanoni, 1975). 이 중 저수지내 탁수 장기화 문제를 유발하는 콜로이드성분의 입자들은 대부분이 입자가 작은 세류사로부터 기인한다. 여름철 집중강우시 유입되는 고탁수층은 저수지의 밀도성층으로 인하여 표수층 하부에 위치하며, 이를 적기에 배제하지 않을 경우에는 수평방향의 확산현상과 연직방향의 전도현상으로 인해 저수지 전역에 분포하게 되어, 탁수현상의 장기화를 유발한다(이용곤 등, 2005).

임하댐의 경우, 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미'로 인해 발생한 탁수가 전도현상을 거치며 저수지내 전수층에 확산됨으로써 댐방류수의 고탁도현상이 장기화된바 있다. 이로 인하여 댐 하류에 위치한 안동시 용상정수장의 동절기 정수처리 장애로 2003년 11월이후 약 160여일동안 댐 방류가 중단된 바 있으며, 저수지내 탁수의 미관상의 문제점으로 인한 인근지역 관광객감소 등으로 경제적 활동이 위축된 댐주변지역 주민들의 민원이 꾸준히 발생하고 있다. 2004년 태풍 '디앤무'와 태풍 '메기'에 의한 탁수발생 현황을 살펴보면, 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미'에 비하여 탁수발생기간이 상당히 짧게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 한국수자원공사 임하댐 관리단에서 취수탑과 수문을 운영함에 있어서 탁도분포를 모니터링하고, 가급적 탁수층이 유입되자마자 여수로와 취수시설을 이용하여 우선 배제한 결과이다. 이와 같이 일정량을 방류할 수 있는 선택적인 취수시설을 이용하면 저수지내 탁도를 최대한 빠른 시일내에 낮춤으로써 방류수로 인한 하류하천의 탁수발생기간을 최소화하여 피해를 저감시킬 수 있으며, 이와 같은 취수시설 운영방안을 탁수우선배제 기법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 최근에 중층 취수가 가능하도록 개량된 임하댐 취수설비의 문비운영에 따른 유체 유동을 3차원 Flow-3D 수치해석 결과를 이용하여 해석하고, 실제 현장에서 문비 조정에 따른 저수지내 유동 변화와 방류 탁도 변화를 조사하고, 수치 해석 결과와 비교·분석함으로써 취수시설 운영방안을 제시하고자 하였다.

2. 수치 모의

비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위해서 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계 (x, y, z) 상에서 다음과 같은 시간적분 레이놀즈방정식이다(Flow Science, 2003).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + f_i + F_i \tag{2}$$

여기서, t는 시간, U_i는 x_i 방향의 유속, ρ는 물의 밀도, P는 압력, f_i는 점성력항, F_i는 중력 전향력 등과 같은 외력이다. 물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 VOF(Volume Of Fluid) 함수를 정의하는데, 함수의 값이 1인 경우는 검사체적에 물이 가득한 상태를 의미하고 함

수의 값이 0인 경우는 검사체적에 물이 없는 경우를 의미하고 자유수면에서는 0과 1 사이의 값을 가진다. 난류모형은 RNG(Renormalized Group) $k-\varepsilon$ 모형을 사용하였다. 지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형은 독립적으로 입력되며, 특히 FAVOR(Factional Area and Volume Obstacle Representation) 기법을 사용함으로써 유한체적법의 접근방법으로 해석된다. 3차원 수치해석을 수행하고자 그림 1은 경계범위를 설정한 그림이며, 그림 2는 완성된 지형의 3차원 Solid 형상을 도시한 그림이다.

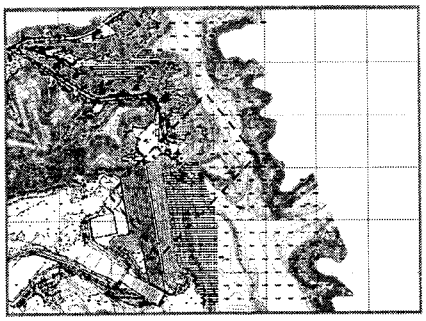


그림 1. 임하호 취수탑 주변 경계범위

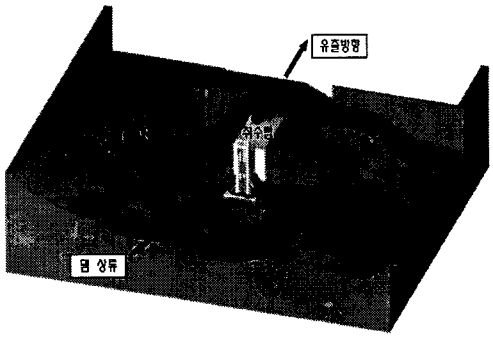
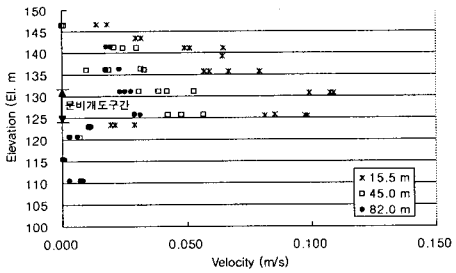


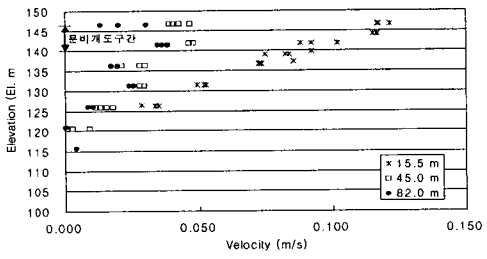
그림 2. 3차원 지형 및 취수탑 3차원 형상

3. 현장 조사

임하댐 취수탑 주변의 지형현황 조사와 문비개도 조건에 따른 저수지 유동형태, 수중 취수문비 개구부 주위의 유동 특성을 관측 조사하여 수치모의에 필요한 입력자료를 구성하고, 해석결과와 비교분석하고자 하였다. 현장조사에서는 임하댐관리단에 문비 조정을 의뢰하여 선택취수(2006년 8월 23일: 그림 3(a) 참조)과 표면취수(2006년 8월 24일: 그림 3(b) 참조)에 대하여 저수지 유동 해석을 위한 연직 유속분포의 측정과 시간에 따른 방류수의 온도 및 탁도 모니터링이 동시에 이루어졌다. 선박에서의 위치확인을 위하여 휴대용 GPS를 사용하였다. 방류수의 온도 및 탁도 모니터링을 위해 다항목 수질모니터링시스템(YSI6600EDS)을 이용하였으며, 임하호 유속을 측정하기 위해서 수자원연구원의 다항목 수질모니터링시스템(YSI6600ADV)를 이용하였다. 현장에서 유속 측정결과는 선박을 이용하여 측정지점은 취수탑 중앙으로부터 상류 15.5m, 45m, 82m지점이다.



(a) 선택 취수

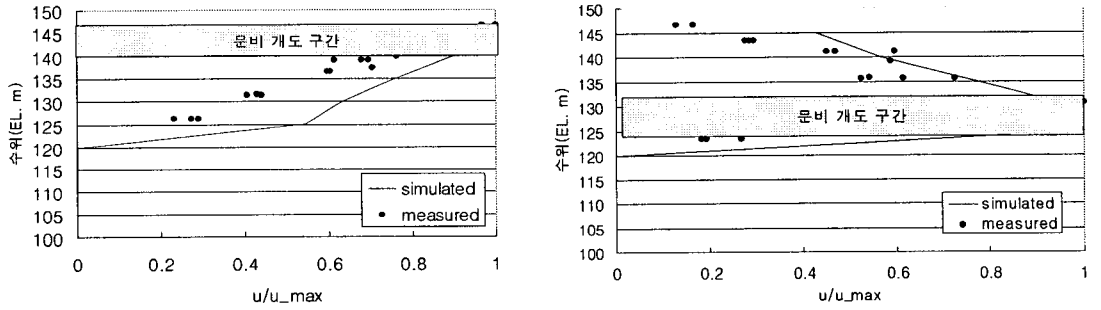


(b) 표면 취수

그림 3. 임하호 취수탑 주위의 연직 유속 분포

4. 결과 분석

임하호 취수설비의 탁수배제능력을 산정하기 위하여 현장조사에서 실제로 운영한 조건에 대하여 3차원 수치모의를 수행하고, 방류량과 현장조사 유속 측정값들과 수치모의 결과 값들을 비교·분석하여 수치모의 결과를 검증하였다. 3차원 수치모의 조건과 방류량 값을 비교분석한 결과, 수치모의 방류량 값과 관측값이 잘 일치함을 보여주고 있다. 그림 4는 3차원 수치모의 결과와 현장에서 관측한 유속장을 비교함으로써 수치모의 결과와 실제 탁수배제능력을 비교한 것으로, 특정 수심에서의 유속값을 최대 유속으로 나눈 상대적인 유속비를 사용하였다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 측정 값 및 계산 값의 연직 유속분포 형태는 잘 일치함을 보여주고 있다. 또한 두 가지 문비 개도조건에서의 저수지 유동변화 현상을 수치모형이 정확하게 구현하고 있음을 보여주고 있으며, 그 분포 형태도 매우 유사하게 나타나고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 유동장의 연직분포를 이용한 유량가중 평균을 통하여 방류수의 탁도를 예측하였다. 표 1는 실제 현장에서 조사된 방류 탁도와의 비교를 나타낸 것으로서, 표면취수(Case 1)에 대한 문비 운영조건 조정에 따른 방류수의 탁도 및 온도에 대한 증감을 함께 나타내었다. 표면취수에 비해 측정결과는 46% 증가된 탁수배제능력을 보이며, 수치모의 결과에서도 30% 증가된 결과를 나타내고 있다.



(a) Case 1 (개도구간 : EL. 140 ~ 147m)　　(b) Case 3 (개도구간 : EL. 124 ~ 132m)

그림 4. 수심별 상대유속에 대한 현장측정 결과의 비교

표 1. 문비 운영조건 조정에 따른 탁수배제 능력 비교

Case	문비 운영조건	탁 도				온 도			
		모의결과		측정결과		모의결과		측정결과	
		값	증감	값	증감	값	증감	값	증감
1	EL. 147m ~ EL.140m	46.0	-	35.8	-	20.5	-	22.7	-
2	EL. 142m ~ EL.131m	50.8	△10%	-	-	19.8	▽3%	-	-
3	EL. 132m ~ EL.124m	59.9	△30%	52.4	△46%	18.5	▽10%	18.8	▽17%

5. 결 론

집중호우로 인해 고탁수가 장기간 지속되고 있는 임하댐 탁수저감대책의 일환으로 기존 표면취수설비를 개선하여 고탁도 분포 수심 층의 탁수에 대해 선택취수가 가능하도록 실시하고자 하였다. 이에 개선된 임하댐 취수설비의 탁수배제 능력에 대한 연구를 실시하여 효과를 검증하고, 전산유체해석(CFD)을 적용하여 댐 취수탑에서 하류로 방류되는 방류수의 수심별 유출량 계산 및 저수지의 유동형태, 수중 취수문비 개구부의 유체유동 특성을 해석하여 실제 탁도 변화량과 비교분석 후 최적의 수문설비 운영방안을 마련하였다. 운전조건에 따른 취수문비 개구부의 유체 유동형태는 취수탑 주변 유속은 증가하며, 취수문비 개구부 주변에서는 유속이 1 m/s이상 분포되었다. 현장관측 동일 지점(취수탑 중앙으로부터 상류 15.5m, 45m, 82m지점)에서 유선형성 및 유동특성 분석한 결과 취수탑으로부터 15.5 m 상류 유역의 경우 유속분포는 거의 0.30 m/s 이내의 유속분포 현상을 보여줌. 취수탑 유입부로부터 15.5 m의 상류방향 경우 최대 유속이 대략 0.27 m/s로 모의 되었다. 취수탑으로 방류되는 방류량은 110 m^3/s이며, 3차원 수치모의 계산 값들은 98.3 m^3/s에서 135.9 m^3/s로 잘 일치함을 보여 주고 있다. 저수지의 유동형태 해석 및 분석을 수행한 결과, EL. 143 m아래에서 1차 수온약층이 존재하고, EL. 125 m아래부터 2차 수온약층이 존재하였으며, 임하댐 저수지는 수심이 30 m가 넘는 관계로 여름철에 이와 같은 2개의 수온약층이 존재하는 것을 알 수 있다. 고탁수층이 이와 같이 수온약층과 밀접한 관계를 가지며, 저수지에 형성되고 취수탑 주변의 선택취수도 이에 영향을 받는 것으로 사료된다. 현장조사를 통한 취수설비 운영에 따른 선택취수 효과 분석한 결과에 의하면 표면취수에 비해 고탁수층 선택취수를 수행한 결과, 방류탁도는 46% 증가하고, 방류수온은 17% 감소하였다. 문비 운영에 따른 3차원 해석결과를 비교해 보면, 표면취수에 비하여 중층취수를 하는 경우에는 방류탁도가 10% 증가하였으며, 저층취수를 하는 경우에는 30% 증가하였다. 취수 시 방류수의 수온 및 탁도의 최적방안이 도출하기 위해 3차원 수치모형을 이용하여 3가지 경우에 대하여 비교분석한 결과 EL. 124 ~ 132 m에서 문비를 개방하는 것이 타당한 것으로 확인되었다.

감 사 의 글

본 연구는 임하댐 취수설비의 탁수배제 능력에 대한 연구용역으로 한국수자원공사의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

박기영(2003). 2차원 수치모형을 활용한 임하댐 탁도 분석 시스템 구축, 경북대학교 석사학위논문.

박기영, 한건연(2003). 2차원 수치모형을 활용한 임하댐 탁도 분석 시스템 구축, 2003년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회(CD-ROM).

이용곤, 김영도, 박기영, 김우구(2005). 임하호 탁도변화 분석을 위한 2차원 수치모의, 대한토목학회논문집문집, 대한토목학회, 제 25권, 제 4B호, pp. 257-266.

한국수자원공사(2006). 임하댐 취수설비의 탁수배제 능력에 대한 연구용역 보고서.

Flow Science(2003). Flow-3D.

Vanoni, V.A.(1975). Sedimentation Engineering, American Society of Civil Engineers, New York N.Y..