

성층화된 저수지의 방류수 수질예측을 위한 SELECT 모델의 적용성 검토

이흥수 · 정세웅[†] · 신상일 · 최정규 · 김유경

충북대학교 환경공학과

Evaluation of SELECT Model for the Quality Prediction of Water Released from Stratified Reservoir

Heung Soo Lee · Se Woong Chung[†] · Sang Il Shin · Jung Kyu Choi · Yu Kyung Kim

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 18 April 2007, Accepted 22 August 2007)

Abstract

The quality of water released from a stratified reservoir is dependent on various factors such as the location and shape of intake facility, structure of reservoir stratification, profile of water quality constituent, and withdrawal flux. Sometimes, selective withdrawal capabilities can provide the operational flexibility to meet the water quality demands both in-reservoir and downstream. The objective of this study was to evaluate the performance of a one-dimensional reservoir selective withdrawal model (SELECT) as a tool for supporting downstream water quality management for Daecheong and Imha reservoirs. The simulated water quality variables including water temperature, dissolved oxygen (DO), conductivity, turbidity were compared with the field data measured in tailwater. The model showed fairly satisfactory results and high reliability in simulating observations. The coefficients of determinant between simulated and observed turbidity values were 0.93 and 0.95 for Daecheong and Imha reservoirs, respectively. The outflow water quality was significantly influenced by water intake level under fully stratified condition, while the effect of intake amount was minor. In conclusion, the SELECT is simple but effective tool for supporting downstream water quality prediction and management for both reservoirs.

keywords : Daecheong reservoir, Imha reservoir, Outflow water quality, Selective withdrawal model, Stratification

1. 서론

선택취수(selective withdrawal)란 저수지나 호수와 같이 수심이 깊은 성층화된 수체에서 특정한 수심구간으로부터 물을 취수하는 방법을 말하며, 취수 원수와 방류수의 수질 관리를 위해 사용된다(Fischer et al., 1979; Martin et al., 1999). 일반적으로 선택취수설비를 갖춘 댐은 그렇지 않은 댐에 비해 저수지 수질관리와 하류 하천의 수질요구 사항에 좀 더 유연하게 대응할 수 있다.

미공병단은 1973년부터 저수지 수질관리를 위해 선택취수설비를 운용하였으며, 현재 70개 이상의 저수지가 선택취수 설비를 갖추고 있다(Michael et al., 2004). 일부 댐에서는 댐 방류수 수질개선을 위해 기존 시설을 다양한 형식으로 개량하여 취수구 위치를 바꾼 사례도 있다(Price, 1990). 호주의 수도특별지역(ACT)에 있는 주요 댐인 Corin, Bendora, Cotter, Googong 댐들은 모두 댐 하류의 어류 서식환경 보호를 위해 유입수 수온과 유사하게 방류수 수온을 조절할 수 있는 선택취수 설비를 갖추고 있다(Australian Capital Territory, 2006). 이들 대부분의 댐에서는 하류 하

천의 수환경과 생태계 보호를 위한 수온, 탁도, 용존산소 농도 등의 방류수 수질목표를 설정하고 있으며, 저수지 운영을 통해 이러한 목표를 달성할 수 있도록 취수 위치를 결정하고 있다.

저수지가 성층화된 경우, 댐 방류수의 수질은 수체의 성층구조, 취수량과 취수구 위치, 저수지 지형 등 다양한 변수에 의해 지배된다(Imberger et al., 1990). 이들 변수 중 어떤 하나에 변화가 일어나도 접근유속이 형성되는 취수영역과 방류수 수질은 영향을 받을 수 있다. 일반적으로 저수지에서 취수량이 취수영역에 미치는 영향은 비교적 적은 것으로 알려져 있다. 이론식에 의하면, 성층화된 저수지의 취수영역은 취수량의 1/3승에 비례하므로 유량이 8배 증가 하여야 취수영역이 2배가 되는 것이다. 반면에 성층강도가 큰 경우에는 수심방향의 밀도경사 때문에 취수영역은 좁아지게 된다. 취수구의 각도도 취수영역에 영향을 미친다(Smith et al., 1987). 그 밖에도 저수지내에서 바람에 의해 형성되는 seich와 같은 내부파도 수직 성층구조를 변화시켜, 결과적으로 저수지 방류수 수질에 영향을 줄 수 있다(Martin et al., 1999). 따라서 하류 생태계와 수질을 고려하여 저수지를 운영하기 위해서는 복잡한 저수지 수리현상과 방류수 혼합이론에 대한 깊은 이해가 필요하다. 성층화된

[†] To whom correspondence should be addressed.
schung@chungbuk.ac.kr

저수지의 방류수 수질관리는 이러한 변수들을 고려하여 수온, 용존산소, 탁도 등 하류 수질을 예측하고 가급적 댐 하류 생태계와 서식환경의 피해를 최소화하도록 취수위치와 취수량을 결정하는 것이다(Australian Capital Territory, 2006; Dyson et al., 2003).

국제대담회(ICOLD)의 통계에 따르면 우리나라는 대담으로 분류되는 댐이 765개로써 세계에서 7번째로 댐이 많은 나라이다(WCD, 2000). 대형 댐은 하천의 흐름상태와 생태계 서식환경에 가장 많은 영향을 미치는 수리구조물이다(Tharme, 2003). 그리고 댐 저수지는 하천과 달리 정체수역을 형성하여 흐름의 체류시간이 길어져 성층화, 탁수의 장기화, 영양염류의 축적, 조류의 과잉 성장과 같은 수질문제가 발생된다. 수심이 깊은 성층화된 저수지에서 심층수는 표층수에 비해 훨씬 낮은 수온과 용존산소 농도를 가진다. 그러나 국내에서 댐 방류수의 수질관리에 대한 관심과 연구는 그동안 매우 드물었다. 최근 대형 다목적댐의 탁수문제가 심각해지면서 방류수 탁도 관리에 관한 연구가 시작되었다(정, 2004; 정 등, 2006). 정 등(2005)은 저수지 탁수 조절을 위한 의사결정지원시스템으로써 실시간 저수지 탁수감시 및 예측시스템을 개발한 바 있으며, 선택취수와 내부웨어 설치 등 다양한 탁수조절 대책의 효과를 평가하는데 사용하였다. 김 등(2006)은 취수조건에 따른 하류하천의 수질변화를 연구한 바 있다.

저수지의 탁수 방류 장기화는 하류 하천의 용수이용뿐만 아니라, 어업, 관광, 생태계에도 영향을 미친다. 또한, 가을철 수직혼합과 전도현상에 의해 미쳐 가라앉지 않은 탁질 입자가 상승하여 표층수와 혼합되면 저수지와 하류하천의 경관축면에서도 지역사회에 심미적인 피해를 줄 수 있다. 따라서 저수지 운영자는 하류하천과 저수지의 수질, 경관, 어업보호 등을 위해 저수지 방류수 탁도 관리에 보다 세심한 노력을 기울여야 한다. 우리나라와 유사한 수자원 부존 여건을 가진 일본의 많은 댐 저수지에서는 탁수조절 대책으로 선택취수 설비를 활용하고 있다(구주전자, 2007). 저수지내의 탁수 영향을 최소화하기 위한 단기대책으로, 고탁수가 유입되면 선택취수 설비를 이용하여 빠른 기간 내에 선택적으로 방류함으로써 탁수의 체류시간을 줄이는 선택배제 개념이 제안되었다(한국수자원공사, 2004). 그러나 댐 운영자가 선택취수설비를 이용하여 방류수 목표수질을 만족하면서 일별 저수지 운영계획을 수립하기 위해서는 성층화된 저수지의 방류수 수질을 손쉽게 예측할 수 있는 모델이 필요하다.

미국공병단에서 개발한 SELECT는 성층화된 저수지에서 선택취수에 의한 방류수 수질을 예측하는 1차원 정상상태 모델이다(Michael et al., 2004). SELECT 모델은 성층화된 저수지에서 일별 방류계획을 수립할 때 취수위치와 취수량에 따른 댐 방류수의 수질을 검토하기 위해 사용되고 있다. 본 연구의 목적은 대청호와 임하호에서 실측한 자료를 이용하여 다양한 취수조건에서 SELECT 모델의 방류수 수질 예측 성능을 분석하고, 일별 저수지 운영계획 수립에서 방류수 수질관리를 위한 모델로써 활용가능성을 평가하는데

있다. 대청호는 댐 하류 조정지내에 대전권과 청주권 용수 공급을 위한 취수시설이 위치하고 있어 앞으로 댐 방류수 수질관리가 매우 중요할 것으로 예상된다. 그리고 임하호는 탁수 장기화로 인한 문제가 가장 심각한 저수지이므로 적극적인 방류수 수질관리가 필요하다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상

대청호는 금강유역의 최대 상수원으로써 댐 하류지역의 홍수피해 경감, 용수공급 및 수력발전을 목적으로 1975년 3월에 착공하여 1981년 6월에 준공되었다. 만수위가 EL. 83.0 m로서 금강 하구로부터 약 135.0 km 상류지점인 대전광역시 동북방 16.0 km, 청주시 남방 16.0 km의 대전광역시와 충청북도가 만나는 지점에 위치하고 있다(Fig. 1(a)). 총 유역 면적은 4,134.0 km²이고 저수지의 표면적은 72.8 km²로서 유역면적/저수면적의 비는 56.8이다. 연평균 강수량과 유입량은 각각 1,230.0 mm, 95.6 m³/s이고, 총 저수량은 1,490×10⁶ m³이며, 유효저수량은 790×10⁶ m³에 해당한다(한국수자원공사, 2005). 대청호의 취수를 위한 수리구조물은 2개의 취수탑(EL. 57.0 m)과 댐의 발전 방류구(EL. 52.0 m), 6개의 수문을 가진 여수로(EL. 64.5 m)가 있어 용수공급, 수력발전 및 평상시와 홍수 시 유량을 조절하고 있다. 우리나라 대부분의 기존 댐들과 마찬가지로 대청호도 선택취수 설비를 갖추고 있지 않아 평상시 하류 용수공급은 발전 방류구를 통해서만 이루어지고 있다.

임하호는 낙동강 하구로부터 약 356.0 km 상류, 낙동강 주요지류인 반변천 합류점으로부터 약 16.0 km 상류에 위치하고 있다(Fig. 1(b)). 정상표고가 EL. 168.0 m이고, 높이 73.0 m, 길이 515.0 m로 1984년 12월에 착공하여 1993년 12월에 다목적댐으로 준공되었다. 총 유역면적이 1,361.0 km²이고 저수 표면적은 26.4 km²이다. 연평균 강수량과 유입량은 각각 987.1 mm, 17.3 m³/s이고, 최대저수량은 595×10⁶ m³, 유효저수량은 424×10⁶ m³이다(국가수자원관리종합정보시스템, 2007). 기존에 임하호의 취수설비는 취수위치의 수심까지 상층수문을 내리거나 하층수문을 올리는 구조를 가진 다단식 접이 표면취수설비를 갖추고 있었다. 이러한 수문 구조

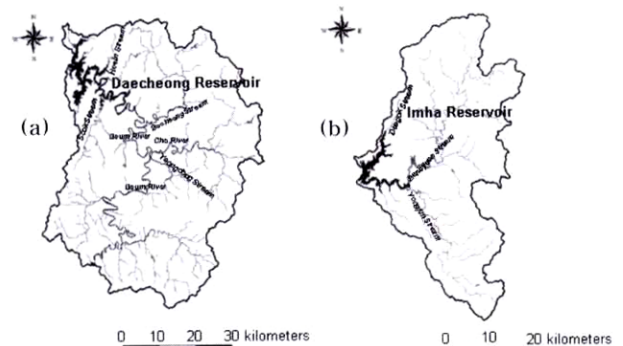


Fig. 1. Watersheds and river systems of Daecheong Reservoir (a) and Imha Reservoir (b).

는 중층 탁수를 조기 배제할 수 없는 단점이 있어, 2006년부터 중층 취수가 가능하도록 취수 설비를 개선하였다.

2.2. 모델의 개요

미국공병단에 의해 개발된 SELECT 모델은 댐 방류수 수질관리를 위한 선택취수 수치모델로 Microsoft Excel 환경에서 구동된다. 이 모델은 Bohan 등(1973)과 Smith 등(1987)의 선택취수 이론을 사용하며, 선택취수 시설의 설계 시 적합한 취수구의 위치 및 선택취수 시설의 효율적인 운영에 유용하게 사용되고 있다(Davis et al., 1987; Michael et al., 2004). 취수구는 점유출구(point sink) 형태로 가정하고, 취수영역은 경험적으로 유도된 밀도 Froude Number 관계식에 의해 결정된다. 모델의 입력 변수는 수심별 저수지 수질, 취수구 위치, 취수량 및 취수구 각도이다. 접근유속 형성 영역과 성층강도는 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산되며, 방류 수질은 취수영역의 유량 가중 농도로 결정된다.

$$d = C \left(\frac{Q}{N} \right)^{1/3} \tag{1}$$

$$N = \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{g}{\rho_0} \right)^{1/2} \tag{2}$$

여기서,

- d = half-thickness of the withdrawal zone, ft or m
- C = proportionality coefficient
- Q = total flow rate per radial angle, cu ft/sec or cu m/sec
- N = Brunt-Vaisala frequency, L/sec
- ∂ = gradient operator
- ρ = density, g/m³
- g = acceleration of gravity, ft/sec² or m/sec²
- z = vertical dimension, m or ft
- ρ_0 = reference density, g/m³

2.3. 모델의 적용 및 평가

대청호와 임하호에서 취수위치와 취수량 변동에 따른 방류수 수질 변화를 모의하기 위해 모델을 적용하였으며, 예측 성능을 평가하기 위해 댐 하류에서 실측한 값과 모의결과를 비교하였다. 대청호의 성층구조와 수심별 수질자료는 대청댐관리단에서 2003년부터 2006년까지 6~9월 하절기 동안 댐 앞 지점에서 주간 간격으로 실측한 자료를 이용하였다. 저수지내 수심별 수질은 YSI6000을 사용하여 실측하였으며, 측정항목은 수온과 DO, 탁도, 전기전도도를 포함한다. 현재 선택취수 설비가 설치되어 있지 않아 중층에서 고정 취수하는 대청호는 취수위치를 EL. 52.0 m에 고정하여 방류수 수질을 모의하였다. 모의결과는 대청댐 직 하류에 위치한 대청교에서 동일한 날짜에 실측한 수질자료와 비교하였다.

임하호 취수설비는 그 동안 표층과 심층 취수만 가능했으나, 2006년 홍수기부터 탁수배제를 원활히 하기 위해 중층 취수가 가능하도록 취수 설비를 개선하여 운영하고 있다. 2006년 7~9월 동안 댐 앞 지점에서 YSI6000을 이용

하여 실측한 수심별 수온과 탁도를 입력자료로 사용하였으며, 방류수 수질 모의결과는 댐으로부터 약 4.7 km 하류에 위치한 임하조정지에서 실측한 탁도 자료를 이용하여 비교하였다. 모델의 입력변수인 일별 취수위치는 취수설비 운영 자료를 취득하여 취수구의 높이(EL. 124.0~149.0 m 범위)를 입력하였다.

모의결과의 적합성 비교·평가는 RMSE(Root Mean Square Error) 및 EI(Efficiency Index)를 이용하였다(식 (3), (4)). RMSE(평균제곱오차의 평방근)는 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균제곱오차를 구하여 제곱근을 구한 것으로 모의결과의 평균오차를 나타내는 지표이다. RMSE는 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 0에 가까울수록 모델의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다.

EI(효율지수)는 실측값과 모의값의 양적 정확도(효율)를 보여주는 지표이다(Nash et al., 1970). EI는 실측값과 모의값이 일치하면 1.0이고, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 모의값을 사용하는 것이 실측값의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 계산된 EI가 0보다 작으면 모델의 모의결과가 나쁘거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \tag{3}$$

$$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{4}$$

여기서, O_i = 실측값, P_i = 모의값, N = 실측 및 모의값 데이터 쌍의 개수, \bar{O} = 실측값의 평균을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수문 환경

연구기간 동안 대청댐과 임하댐 유역의 강수량(Fig. 2(a), (d)), 유입량, 방류량(Fig. 2(b),(e)) 및 저수위(Fig. 2(c),(f))의 일 변동을 Fig. 2에 나타내었다. 대청호와 임하호의 강수일은 각각 293일(60.0%), 250일(51.2%)로 차이가 있었다. 이 중에서 무강수일을 제외한 강수량의 평균값과 범위는 대청호에서 각각 14.4 mm, 0.1~112.6 mm 범위이었고, 임하호에서 14.0 mm, 0.1~155.5 mm 범위이었다. 유입 및 방류량의 변동에서 대청호의 경우 일 최대 유입량과 방류량은 2006년 7월에 높았고, 임하호에서는 각각 2003년 9월과 2006년 7월에 높았다.

2003~2006년까지 6~9월 동안에 대청호와 임하호에서 유입량의 평균값과 최대값 및 최소값의 범위는 각각 257.8 m³/s, 4,059.7~0.1 m³/s 범위, 79.6 m³/s, 2,115.7~0.1 m³/s 범위이었고, 방류량은 각각 235.9 m³/s, 1,902.8~47.8 m³/s

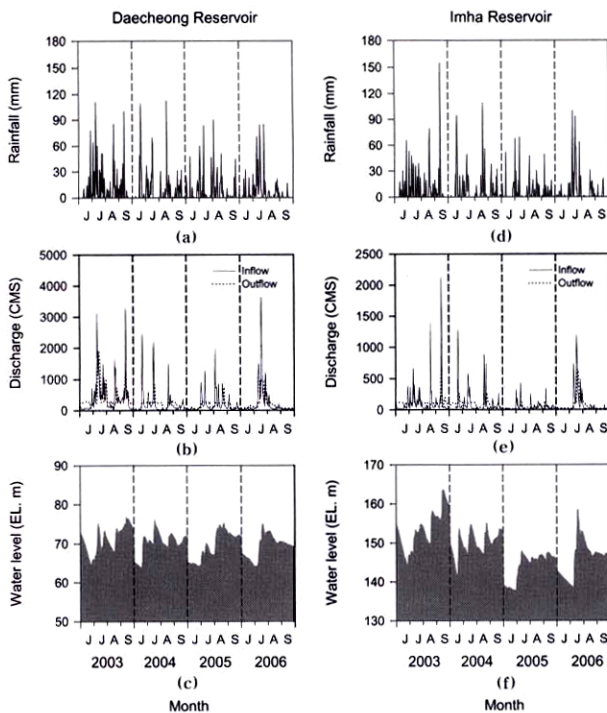


Fig. 2. Daily variations of hydrological factors in the Daecheong Reservoir (a) Rainfall, (b) Discharge, (c) Water level, and Imha Reservoir (d) Rainfall, (e) Discharge, (f) Water level during the study period from June to September, 2003~2006.

범위, 73.3 m³/s, 643.8~0.1 m³/s 범위이었다. 또한, 대청호와 임하호의 저수위는 유입량과 방류량에 따라 변화하였다. 대청호의 경우 2003년 9월에 최고 EL. 76.9 m, 2004년 6월에 최저인 EL. 63.9 m로서 13.0 m의 수위변동을 보였고, 임하호는 2003년 9월과 2005년 6월에 최대값과 최소값이 각각 EL. 163.6 m, EL. 137.7 m로 25.9 m의 수위변동이 관찰되었다.

3.2. 대청호 모의결과

SELECT 모델을 사용하여 모의한 방류수 수온, DO, 탁도 및 전기전도도를 실측값과 비교한 통계분석결과는 Table 1과 같으며, 모의값과 실측값의 선형회귀 분석결과는 Fig. 3에 제시하였다. 수온의 경우 실측치의 평균값(범위)은 19.2°C(12.2~23.6°C)이었고, 모의결과의 평균값(범위)은

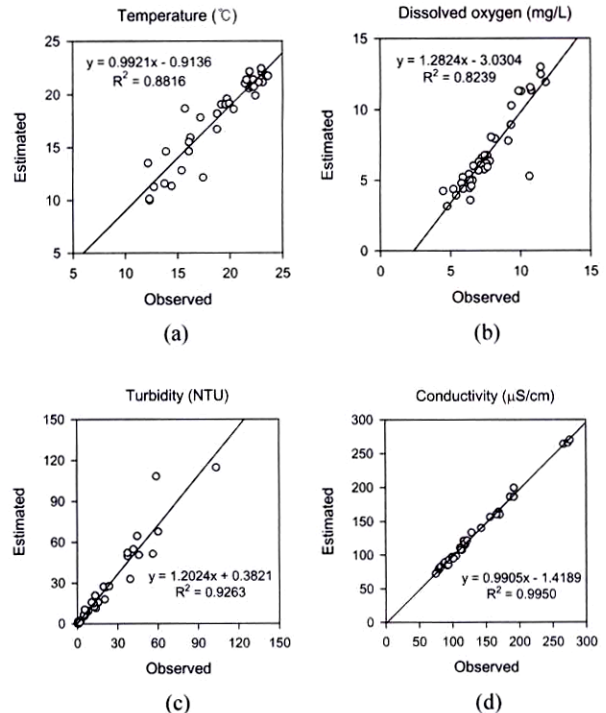


Fig. 3. Linear relationships between observed and estimated outflow water quality in Daecheong Reservoir: (a) Temperature, (b) Dissolved oxygen, (c) Turbidity, (d) Conductivity.

18.1°C(10.0~22.5°C)이었다. 실측치와 모의치의 평균오차인 RMSE는 1.7°C로 작았으며, EI 값은 0.78로써 비교적 높은 효율을 보였다. 선형회귀 분석결과 모의치와 실측치의 비례상수는 0.99였으며, 결정계수(coefficient of determination)가 0.88로 나타나 모델은 방류수 수온을 매우 정확히 예측하는 것으로 평가된다(Fig. 3(a)).

DO는 실측치와 모의치의 평균값(범위)이 각각 7.7 mg/L(4.5~11.8 mg/L), 6.9 mg/L(3.2~13.0 mg/L)이었다(Table 1). 댐 방류수의 DO 농도가 6.0 mg/L 이하로 나타난 것은 저니층과 중층의 유기물 분해에 필요한 산소요구량 때문인 것으로 판단된다. 실측치와 모의치의 평균오차는 1.52 mg/L로 작았으나, EI 값은 0.37로써 다른 항목에 비해 상대적으로 낮은 값을 보였다. 두 변량의 선형회귀분석 결정계수는 0.82로써, 모델은 댐 방류수의 DO 농도를 대체로 잘 예측하는 것으로 평가된다(Fig. 3(b)).

Table 1. Statistics of observed and estimated water quality parameters in Daecheong Reservoir

Factors	Observed	Estimated	RMSE	EI
Temperature (°C)	19.2±3.7 [*] (23.6/12.2) ^{**}	18.1±3.9 (22.5/10.0)	1.70	0.78
Dissolved oxygen (mg/L)	7.7±1.9 (11.8/4.5)	6.9±2.7 (13.0/3.2)	1.52	0.37
Turbidity (NTU)	18.5±23.0 (103.5/0.1)	22.7±28.7 (114.6/0.1)	9.86	0.81
Conductivity (µS/cm)	128.4±52.3 (275.8/74.8)	125.7±52.0 (270.2/72.3)	4.52	0.99

^{*} standard deviation
^{**} maximum and minimum

방류수 탁도는 실측치와 모의치의 평균값(범위)이 각각 18.5 NTU(0.1~103.5 NTU), 22.7 NTU(0.1~114.6 NTU)이었다. 실측치와 모의치를 평균 탁도로 비교할 때 모의값이 4.1 NTU 정도 높게 산정되었으나, 이는 탁도의 변동 범위를 고려할 때 매우 작은 값이다. 선형회귀 결정계수와 EI 값이 각각 0.93, 0.81로 높게 나타나, 모델의 담 방류수 탁도 예측 신뢰도가 매우 높은 것으로 평가되었다(Fig. 3(c)).

전기전도도는 실측치, 모의치의 평균값(범위)이 각각 128.4 $\mu\text{S/cm}$ (74.8~275.8 $\mu\text{S/cm}$)와 125.7 $\mu\text{S/cm}$ (72.3~270.2 $\mu\text{S/cm}$)이었다. 실측치와 모의치의 평균값이 매우 근사하였으며, 모델의 결정계수와 EI 값이 모두 0.99이상으로 매우 높은 신뢰도를 보였다(Fig. 3(d)).

3.3. 임하호 모의결과

임하조정지 댐에서 측정된 탁도의 실측치와 SELECT 모델로 모의한 방류수 수질을 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다. 방류구의 높이를 선택취수로 모의한 수온의 평균값(범위)은 20.1°C(16.3~25.7°C)이었다(Table 2, Fig. 4). 방류구의 높이(EL. 139.0~149.0 m 범위)가 표층에 가까워질수록 하류하천에서 평균 수온은 높아지는 경향을 보였다(Fig. 4). 또한, 방류구 취수분비를 EL. 124.0~131.0 m 범위에서 선택적으로 운영한 9월 19, 24일의 수온 모의치는 각각 16.4°C, 16.3°C로써 크게 낮아지는 양상을 보였다(Fig. 4).

임하조정지 댐에서 측정된 탁도의 실측치와 SELECT 모델로 모의한 방류수 탁도의 선형회귀 분석결과는 Fig. 5와 같다. 탁도는 실측치와 모의치의 평균값(범위)이 각각 77.6 NTU(13.5~312.1 NTU), 86.0 NTU(5.5~428.5 NTU)이었고,

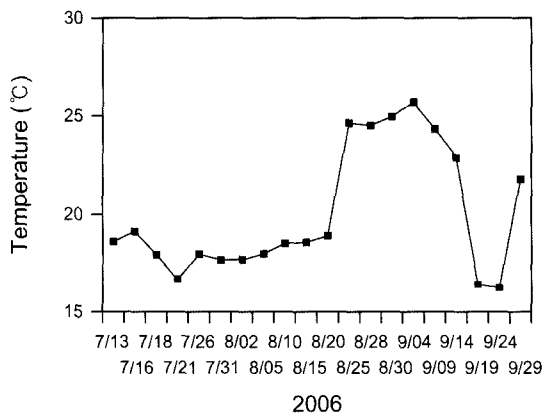


Fig. 4. Simulated temporal variations of outflow water temperature in Imha Reservoir.

Table 2. Statistics of observed and estimated water quality parameters in Imha Reservoir

Factors	Observed	Estimated	RMSE	EI
Temperature (°C)	-	20.1±3.2* (25.7/16.3)**	-	-
Turbidity (NTU)	77.6±80.9 (312.1/13.5)	86.0±104.4 (428.5/5.5)	32.16	0.83

* standard deviation
** maximum and minimum

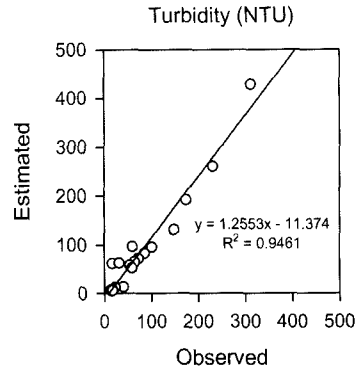


Fig. 5. Linear relationships between observed and estimated outflow turbidity in Imha Reservoir.

RMSE값은 32.16 NTU이었으며, EI값은 0.83으로 계산되었다(Table 2). 또한, 선형회귀 분석결과 결정계수는 0.95로 나타나 만족할 만한 예측 성능을 보였다(Fig. 5).

3.4. 대청호 및 임하호 취수위치에 따른 방류수질 민감도 분석

대청호와 임하호에서 취수위치에 따른 방류수질 민감도 분석을 위해 저수지내 성층현상이 뚜렷하고 방류수 탁도가 가장 높았던 2004년 7월 26일(대청호)과 2006년 7월 13일(임하호)을 선택하고, 취수위치에 따른 방류수 수질 변화를 비교하였다(Fig. 6). 모의 대상 날짜에 대청호와 임하호의 부력빈도 값 N은 각각 0.031 /sec과 0.030 /sec이었으며, 방류량은 각각 227.3, 113.5 m³/sec이었다. 대청호에서 취수구의 위치는 EL. 32.0~72.0 m까지 2 m 간격(n=21)으로 모의하였고, 임하호는 EL. 114.0~46.0 m까지 2 m 간격(n=17)으로 모의하였다.

대청호에서 수온, DO, 탁도 및 전기전도도의 방류수 모의치 평균값(범위)은 각각 18.6°C(8.9~25.4°C), 6.1 mg/L (3.5~9.2 mg/L), 75.4 NTU(13.0~118.1 NTU), 및 99.7 $\mu\text{S/cm}$ (87.5~125.8 $\mu\text{S/cm}$)이었다(Fig. 6(a)~(d)). 또한 임하호의 수온과 탁도의 방류수 모의치 평균값(범위)은 각각 14.1°C(7.0~21.7°C)와 254.0 NTU(20.9~447.4 NTU)이었다(Fig. 6(e)~(f)). 대청호와 임하호에서 수온과 DO의 방류수 모의치는 각각 EL. 32.0 m와 EL. 114.0 m에서 가장 낮았고 EL. 72.0 m와 EL. 146.0 m에서 상대적으로 가장 높게 모의되어 취수위치가 심층에서 표층으로 가까워질수록 방류수의 수온과 DO는 높아지는 경향을 보였다. 방류수 탁도는 대청호에서 EL. 48.0 m, 임하호는 EL. 136.0 m의 중층에서 가장 높았고 심층과 표층에서 상대적으로 낮았다. 반면, 대청호에서 방류수의 전기전도도는 EL. 50.0 m의 중층에서 가장 낮았고 심층과 표층에서 상대적으로 높았다. 두 댐 모두에서 성층강도가 큰 경우 취수구의 위치는 방류수 수질에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

대청호와 임하호에서 취수위치 변화에 따라 접근 유속이 형성되는 영역의 변화를 Fig. 7에 제시하였다. 대청호에서는 취수구의 위치를 EL. 40.0~68.0 m까지 4 m 간격(n=8)으로 구분하여 모의하였고(Fig. 7(a)~(h)), 임하호에서는

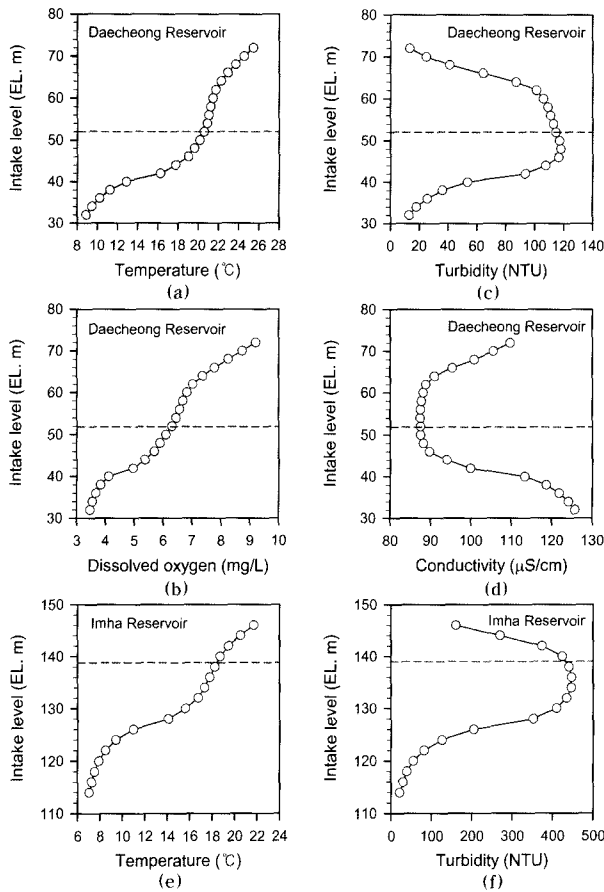


Fig. 6. Variations of outflow water quality according to different intake elevations in Daecheong Reservoir (July 26, 2004) and Imha Reservoir (July 13, 2006): (a) Temperature, (b) Dissolved oxygen, (c) Turbidity, (d) Conductivity in Daecheong Reservoir, (e) Temperature, (f) Turbidity in Imha Reservoir.

EL. 124.0~144.0 m까지 4 m 간격(n=6)으로 모의하였다 (Fig. 7(i)~(n)). 저수지가 충분히 성층화된 상태에서 취수위치가 변함에 따라 취수영역에 큰 차이를 보였다. 대체로 심층과 표층에서 취수하는 것보다 중층에서 취수하는 경우 접근 유속이 형성되는 취수영역이 넓어졌다.

취수구 위치 변화에 따른 취수영역의 변화를 이해하는 것은 방류수 수질뿐만 아니라 저수지 수질관리에도 큰 도움이 된다. 특히 중층에 고농도의 인을 포함한 탁수가 위치하고 있을 경우, 저수지의 조류 성장을 억제하기 위해서는 가급적 신속히 하류로 배제하는 것이 유리하다. 탁수의 하류 장기 방류를 방지하기 위해 표층수를 취수하는 경우, 저수지 운영자는 탁수층의 교란 여부를 판단하여야 한다. 취수구 위치와 취수량에 따라 탁수층 교란이 발생할 수 있으며, 이때 중층 탁수가 표층으로 확산되면 저수지 표면이 탁해지고 조류성장이 촉진될 수 있다.

대청호에서는 EL. 52 m 이하에서 취수할 경우에는 취수영역이 저수지 표면을 포함하지 않았지만, EL. 56 m 이상 취수에서는 다소 많은 양의 표층수가 유입되기 시작하였다. 반면에 EL. 64 m 이상의 표층수를 취수한 경우, 20 NTU 이상의 탁수층이 취수영역에 포함되어 중층의 탁수를 유광

대(photic zone)인 표층으로 상승시키는 결과를 초래했다. 따라서 대청호에서 표층수 취수는 높은 인 농도를 가진 탁수층을 일부 교란하여 저수지 수질관리에 불리할 수 있을 것으로 판단된다. 대청호에는 여수로 문비가 EL. 64.5 m에 위치하고 있어 저수지 수문방류가 있을 때 수질관리에 주의가 필요할 것으로 보인다.

임하호는 대청호와 달리 부영양화와 조류이상 증식으로 인한 수질문제보다는 탁도 자체가 큰 수질관리 목표이다. 따라서 저수지 수질관리는 취수구 위치를 조절하여 하류 탁수 피해를 최소화하는 반면, 과잉 표층수 취수에 따른 탁수층 교란을 방지하도록 해야 한다. 임하호에서는 주어진 모의조건에서 취수구 위치가 EL. 136 m 이하일 때까지 취수영역에 저수지 표면이 포함되지 않았다. 그러나 EL. 140 m 이상의 취수조건에서는 저수지 수면까지 취수영역이 확장되어 표층수 유입이 발생하였다. 따라서 저수지 운영자는 표층수 과잉 유입에 따른 탁수층의 상승을 염두에 두고 취수운영 계획을 수립해야 한다.

임하호에서 취수량 변화에 따른 방류수 탁도의 민감도 분석을 위해 취수량을 각각 60.0, 80.0, 100.0, 그리고 실제 방류량인 113.5 m³/s까지 변화시켜 가며 방류수 탁도를 비교하였다(Fig. 8). 각각의 취수량에 대하여 방류수 탁도의 평균값(범위)은 각각 247.0 NTU(11.1~480.7 NTU), 251.0 NTU(14.5~463.8 NTU), 251.8 NTU(17.7~453.7 NTU) 및 254.0 NTU(20.9~447.4 NTU)로 나타났으나, 평균값의 편차는 7.0 NTU로 매우 미미하였다. 그러나 EL. 130.0~140.0 m의 중층 구간에서는 취수량이 방류수의 최고 탁도에 다소 영향을 미치고 있다. 방류량이 감소할수록 방류수의 탁도는 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 방류량의 증가와 더불어 접근 유속이 형성되는 취수영역이 상대적으로 탁도가 낮은 표층과 심층으로 넓어졌고, 주변 수체와의 혼합(entrainment)에 따른 희석효과 때문이다.

이상의 결과에서 댐 방류수의 취수영역과 수질은 성층강도, 취수위치, 취수량에 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며, 저수지 성층강도별 취수위치와 취수량에 따른 방류수 탁도 민감도 분석 도표는 댐 운영자들이 손쉽게 방류수 탁도를 예측할 수 있는 운영 매뉴얼로 활용가능할 것으로 생각된다.

3.5. 임하호 방류수 탁도의 시계열 비교

임하호는 2006년 홍수기부터 선택취수 설비를 갖추고 방류수 탁도 조절을 위해 취수위치를 조정하고 있다. 일별 저수지 운영에서 선택취수에 의한 방류수 탁도 관리를 지원하기 위한 모델의 적용 가능성을 검증하고자 모의한 탁도 시계열값을 실측자료와 비교하였다(Fig. 9). 2006년 7월에 300 NTU이상의 높은 탁도가 방류되었으나, 그 이후 취수문비를 EL. 124.0~149.0 m 범위 내에서 변경하여 선택 취수를 함으로써 방류수 탁도를 크게 저감하였다.

7, 8, 9월에 방류수 실측 탁도의 평균값(범위)은 각각 171.1 NTU(60.1~312.1 NTU), 51.9 NTU(16.8~85.7 NTU) 및 18.1 NTU(13.5~31.7 NTU)이었다. 동일한 기간

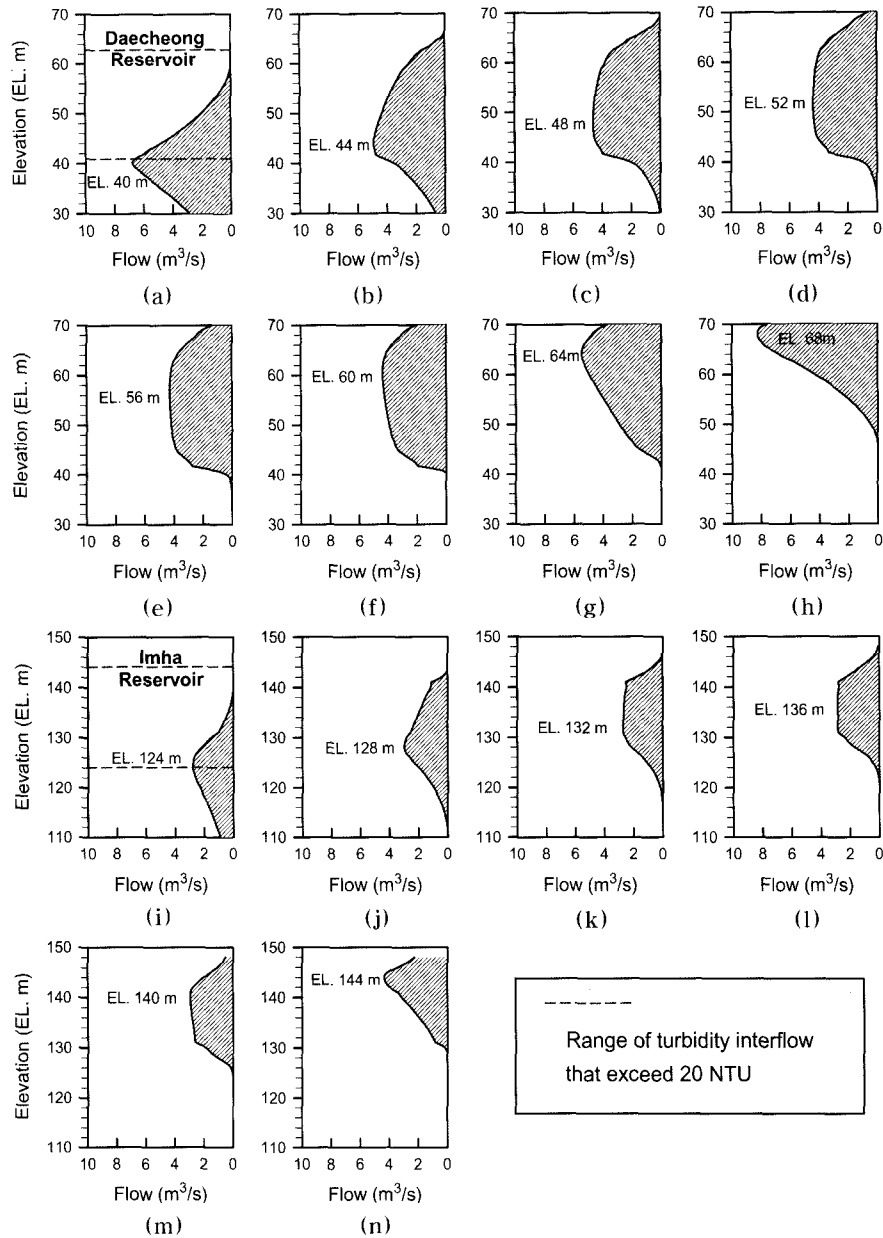


Fig. 7. Variations of withdrawal zone according to different intake levels: total withdrawal flow rates were 227.3 m³/sec and 113.5 m³/sec for Daecheong and Imha reservoirs, respectively: (a) EL. 40 m, (b) EL. 44 m, (c) EL. 48 m, (d) EL. 52 m, (e) EL. 56 m, (f) EL. 60 m, (g) EL. 64 m, (h) EL. 68 m in Daecheong Reservoir, (i) EL. 124 m, (j) EL. 128 m, (k) EL. 132 m, (l) EL. 136 m, (m) EL. 140 m, (n) EL. 144 m in Imha Reservoir.

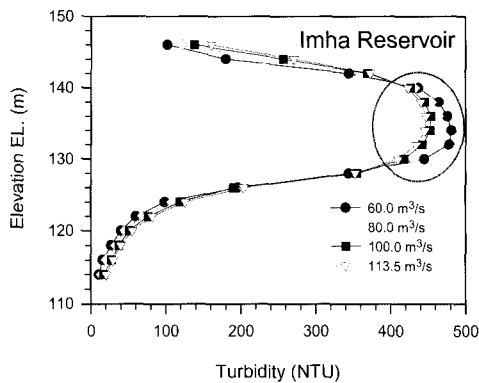


Fig. 8. Variations of outflow turbidity according to different amounts of withdrawal from Imha Reservoir (Intake level = EL. 139.5 m).

동안 SELECT 모델의 예측 탁도 평균값(범위)은 각각 200.8 NTU(95.5~428.5 NTU), 45.7 NTU(8.2~83.3 NTU) 및 24.9 NTU(5.5~62.8 NTU)로 나타나, 모델의 일별 방류수 탁도 예측신뢰도는 비교적 높은 것을 확인할 수 있다. 모의값과 실측값의 표준오차인 RMSE는 7, 8, 9월에 각각 52.28 NTU, 10.91 NTU 및 23.57 NTU로 나타나 큰 홍수가 유입하여 탁도가 높게 발생했던 7월에 상대적으로 오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 7월 초에 모의값은 실측 탁도를 100 NTU 이상 과다 산정하였다. 모델의 효율성 계수 EI값도 각각 0.82, 0.90 및 0.84로 나타나, 1차원 정상상태 모델은 홍수가 유입하여 저수지 수리현상이 급격히 변하는 시기에 상대적으로 오차를 크게 발생시키는 경향을 보였다. 따라서 SELECT는 하루 동안 저수지의 수온과 수질의 성

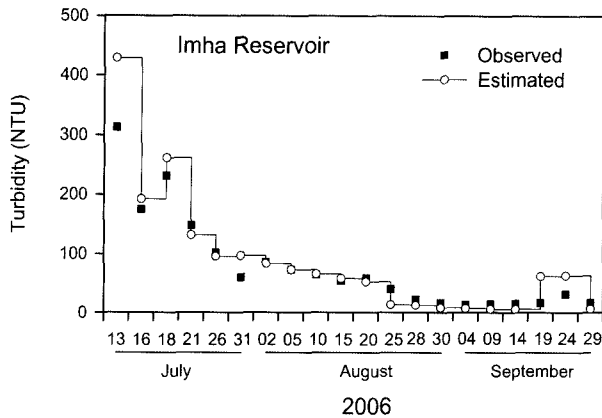


Fig. 9. Comparisons between observed and estimated time series of turbidity in Imha Reservoir.

성구조가 급격히 변하지 않는 조건에서 댐 방류수의 일별 수질예측에 적합한 모델로 평가된다. 큰 홍수의 유입과 내부파 등의 영향으로 저수지의 성층구조와 수질이 시공간적으로 급격히 변하는 경우에는, 시간단위로 변하는 댐 방류수의 수질을 예측할 필요가 있다. 이를 위해서는 저수지의 길이 방향과 깊이 방향의 수질변화를 모두 해석할 수 있는 다차원 동적 수리 및 수질 예측모델의 도입이 필요하다.

4. 결론

선택취수는 성층화된 저수지에서 댐 방류수 수질관리와 하류하천의 생태계 서식환경 보호를 위한 주요한 공학적 대안이다. 최근 우리나라의 일부 댐에서는 하절기 탁수방류장기화 문제를 완화하기 위해 선택취수 설비가 도입되었다. 선택취수 설비의 효율적 운영을 위해서는 저수지 성층상태, 취수구 위치, 취수량 등에 따라 변하는 댐 방류수의 수질을 정확히 예측할 필요가 있다.

본 논문에서는 그 동안 국내에서 연구가 미흡했던 성층화된 저수지의 방류수 수질관리와 선택취수설비의 운영을 지원하기 위한 수질예측 도구로써 SELECT 모델의 적용성을 평가·제시하였다. 대청호와 임하호에서 실측한 자료를 사용하여 SELECT 모델의 적용성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 대청호에서 2003~2006년 하절기 동안 방류수의 수온, DO, 탁도 및 전기전도도 모의값은 실측치와 결정계수가 각각 0.88, 0.82, 0.93 및 0.99로써 모델의 예측 신뢰도가 매우 높았고, 실측치와 모의치의 RMSE값은 각각 1.70°C, 1.52 mg/L, 9.86 NTU 및 4.52 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었으며, EI값은 각각 0.78, 0.37, 0.81 및 0.99로 계산되었다.
- 2) 임하호에서 2006년 하절기 방류수 탁도 실측치와 모의치의 평균값(범위)은 각각 77.6 NTU(13.5~312.1 NTU), 86.0 NTU(5.5~428.5 NTU)이었고, 결정계수는 0.95로써 역시 높은 예측 성능을 보였다. 그러나 모델은 높은 탁도값에서 실측값을 다소 과대평가하는 경향을 보였고, RMSE값이 32.16 NTU로써 대청호에서 보다 크게 나타났으며, EI값은 0.83으로 계산되었다.

- 3) 취수위치와 취수량에 따른 방류수 수질의 민감도를 분석한 결과, 두 댐 모두에서 취수구의 위치는 방류수 수질에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면에, 취수량의 증가는 취수영역의 변화에 큰 영향을 주지 않았으며, 방류수 수질 변화도 미미하였다.
- 4) 대청호에서 표층취수는 높은 인 농도를 가진 중층의 탁수를 표층의 유광대로 확산시켜 저수지 수질관리에 불리할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 5) 연구결과를 종합해 볼 때, SELECT 모델은 성층화된 저수지의 방류수 수온, 탁도, DO 등을 잘 예측하는 것으로 평가되었으며, 댐 운영자가 방류수 수질을 신속히 검토하는데 충분히 활용 가능할 것으로 평가된다.
- 6) 그러나 SELECT 모델은 1차원 정상상태의 모의조건을 가정하므로 큰 홍수가 유입되어 저수지의 성층구조와 수질이 시공간적으로 급격히 변하는 경우에는 예측 성능이 떨어지는 경향을 보인다.
- 7) 따라서, SELECT는 하루 동안 저수지의 수온과 수질의 성층구조가 급격히 변하지 않는 조건에서 저수지 방류수 수질관리를 위한 일별 취수시설 운영모델로 국한하여 사용할 것을 권고한다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 본 연구를 위해 실측자료를 제공해주신 한국수자원공사 대청댐관리단과 임하댐관리단 관계자 분들께 감사를 표합니다.

참고문헌

- 구주전자, http://m.kyuden.co.jp/dam_dakusui_index (accessed Apr. 2007).
- 국가수자원관리종합정보시스템, <http://www.wamis.go.kr> (accessed Apr. 2007).
- 김영도, 권재현, 박재현, 신찬기, 서낙동강에서의 수문운영에 따른 유량 및 수질 변화, *대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 903-908 (2006).
- 정선아, 이혜숙, 민병환, 탁수배제를 위한 선택 취수설비의 효과 분석 연구, *대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 693-698 (2006).
- 정세웅, 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링, *대한환경공학회지*, **26**(9), pp. 970-978 (2004).
- 정세웅, 오정국, 고익환, CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁류의 시공간분포 모의, *한국수자원학회논문집*, **38**(8), pp. 655-664 (2005).
- 한국수자원공사, *댐운영 실무편람* (2005).
- 한국수자원공사, *임하호 탁수저감 방안 수립 보고서* (2004).
- Australian Capital Territory, *Water Resources Environmental Flow Guidelines 2006* (2006).
- Bohan, J. P. and Grace, J. L., Jr., Selective withdrawal from man-made lakes; Hydraulic laboratory investigation, *U.S.*

- Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Technical Report H-73-4 (1973).*
- Davis, J. E., Holland, J. P., Schneider, M. L. and Wilhelms, S. C., *SELECT: A numerical one-dimensional model for selective withdrawal*, Instruction Report E-87-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. (1987).
- Dyson, M., Bergkamp, G. and Scanlon, J. (eds). *Flow. The Essentials of Environmental Flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. (2003).
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H., *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York, NY. (1979).
- Imberger, J. and Patterson, J. C. *Physical limnology, Advances in Applied Mechanics*, **27**, pp. 303-475 (1990).
- Martin, J. L. and McCutcheon, S. C., *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, CRC Press, Inc. (1999).
- Michael, L. S., Steven, C. W. and Laurin, I. Y., *SELECT Version 1.0 Beta: A One-Dimensional Reservoir Selective Withdrawal Model Spreadsheet, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, ERDC/EL SR-04-1 (2004).*
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., *River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles, Journal of Hydrology*, **10**, pp. 282-290 (1970).
- Price, R. E., *Water quality enhancement techniques used within the Corps of Engineers*, Miscellaneous Paper W-90-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. (1990).
- Smith, D. R., Wilhelms, S. C., Holland, J. P., Dortch, M. S. and Davis, J. E., *Improved description of selective withdrawal through point sinks, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Technical Report E-87-2 (1987).*
- Tharme, R. E., *A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trend in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers, River Res. Applic.*, **19**, pp. 397-441 (2003).
- World Commission on Dams, *Dams and Development*, Earthscan, London (2000).