

선택취수에 따른 대청호 탁수 조절효과 및 수질영향 분석

Effect of Selective Withdrawal on the Control of Turbidity Flow and Its Water Quality Impact in Deacheong Reservoir

정용락* / 류환** / 김유경*** / 예령**** / 정세웅*****

Jung, Yong-rak / Liu, Huan / Kim, Yu-Kyung / Ye, Lyeong / Chung, Se-Woong

Abstract

A selective withdrawal method has been widely used to control the quality of water released from a stratified reservoir and to improve downstream ecosystem habitats. Recently, several existing reservoir withdrawal facilities have been modified to accommodate multi-level water intake capabilities in order to adapt the impact of long-term discharge of high turbidity flow. The purpose of this study was to assess the effect of selective withdrawal method on the control of downstream turbidity and its impact on water quality in Daecheong Reservoir. A laterally integrated two-dimensional hydrodynamic and eutrophication model, which was calibrated and validated in the previous studies, was applied to simulate the temporal variations of outflow turbidity with various hypothetical selective withdrawal scenarios. In addition, their impacts on the algal growth as well as water quality constituents were analyzed in three different spatial domains of the reservoir. The results showed that the costly selective withdrawal method would provide very limited benefits for downstream turbidity control during two years of consecutive simulations for 2004-2005. In particular, an excessive withdrawal from the epilimnion zone for supplying upper layer clean water resulted in movement of turbidity plume that contained high phosphorus concentrations upward photic zone, and in turn increased algal growth in the lacustrine zone.

keywords : Selective withdrawal, Turbidity control, Water quality management, Daecheong Reservoir, Algal growth

요 지

선택취수 방법은 성층화된 저수지로부터 공급되는 방류수의 수온, 용존산소농도, 탁도 등의 수질을 제어하고, 하천의 생태계 서식환경을 개선하기 위해 널리 사용되고 있다. 최근 우리나라에서도 하류의 탁수피해 저감을 위해 다단 취수가 가능하도록 기존의 취수시설을 개량하였거나 계획하고 있는 댐들이 늘고 있다. 이 연구의 목적은 대청댐에

* 충북대학교 환경공학과 석사과정, 충북 청주시 흥덕구 개산동 12 (e-mail: jjangj98@nate.com)
Graduate student, Dept. of Envir. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
** 충북대학교 환경공학과 석사과정
Graduate student, Dept. of Envir. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
*** 충북대학교 환경공학과 박사과정
Doctoral student, Dept. of Envir. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
**** 충북대학교 환경공학과 석사과정
Graduate student, Dept. of Envir. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
***** 충북대학교 환경공학과 부교수, 교신저자
Associate Professor, Dept. of Envir. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
Corresponding Author (e-mail: chung@chungbuk.ac.kr)

선택취수 시설을 도입하였을 경우 하류의 탁수 제어 효과와 저수지 수질에 미칠 영향을 평가하는데 있다. 다양한 선택취수 조건이 방류수 탁도와 저수지 수질 변화에 미치는 영향을 모의하기 위해 선행연구에서 보정·검증한 2차원 폭 방향 평균 수리 및 부영양화 모델을 사용하였다. 연구결과, 2년 연속(2004~2005) 수문조건에서 표층수의 선택취수를 통한 댐 하류의 탁수 장기화 저감 효과는 미미한 것으로 평가되었다. 또한 하류에 깨끗한 물을 공급하기 위해 표층수를 과다하게 취수 할 경우, 높은 농도의 인을 포함하고 있는 중층 탁수를 유광대로 유입하게 하는 결과를 초래하여 호수역의 조류 성장을 증가시킬 우려가 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 선택취수, 탁도 제어, 저수지 수질관리, 대청호, 조류성장

1. 서 론

비록 대형 댐이 하천환경에 미치는 다양한 영향이 보고(World Commission on Dam, 2000)되고 있지만, 우리나라와 같이 강우의 계절적 편차가 심한 수문환경에서 유역의 안정적인 용수공급과 홍수조절, 그리고 전력생산을 위해 다목적댐은 여전히 유용한 수리시설물이다. 1960대 이후 경제발전을 위해 수자원 개발이 본격화 되면서 소양강댐, 충주댐, 대청댐을 비롯한 많은 인공 댐이 건설되어 왔다. 현재 전국에는 15개의 다목적댐이 운영 중에 있으며, 이들 댐의 총 용수공급 능력은 107.5억 m^3 으로서 우리나라 연간 총 용수 이용량의 30% 이상을 담당하고 있다(한국수자원공사, 2006).

자연 상태의 하천을 가로지르는 거대한 댐 시설은 하천의 유황(Flow regime)에 변화를 가져왔으며, 이것은 하천의 지형과 생태계의 변화뿐만 아니라 탁수의 장기화와 부영양화와 같이 하천의 물리·화학적 특성에 큰 영향을 미치고 있다(Dyson et al., 2003; World Commission on Dam, 2000; 서동일, 1998; 정세웅 등, 2004a; 한국수자원공사, 2000). 특히 최근 들어 이상강우 현상과 기록적인 집중호우가 잦아져 탁수의 발생빈도가 점점 증가함에 따라, 저수지 탁수 장기화가 중요한 수질문제로 인식되고 있으며 사회적인 관심도 함께 증가하였다. 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미로 인해 연속하여 발생한 임하댐 탁수의 장기화는 탁수에 대한 적절한 조절기술 없이는 지속가능한 수자원 이용도 불가능하다는 교훈을 남겨 주었다(정세웅, 2004b; 박기영, 2003).

저수지로 유입한 탁수의 이동 경로는 일반적으로 유입수와 주변 수체의 온도차에 의해 결정된다(Wunderlich et al, 1973; Gordon et al, 1977; Kim et al, 1984). 홍수시 유입하는 탁수는 저수지 전이구간(Transition zone)에서 운동에너지가 소멸되면서 침강류(Plunge flow)와 저층 밀도류(Underflow)를 형성하고, 최종적으로 저수지 내의 동일 밀도층을 따라 이동

한다(Fischer et al., 1979; Ford and Johnson, 1981; Kennedy et al., 1982; Alavian et al., 1992; Chung and Gu, 1998). 이 과정에서 많은 양의 토사와 입자상 오염물질들이 저수지 바닥에 침강한다(Romero and Imberger, 2003). 탁수 층의 두께, 이동속도, 그리고 저수지내 체류시간은 저수지 성층구조와 유입 홍수량, 취수위치와 방류량, 침강속도, 부유물질의 물리화학적 특성, 그리고 바람에 의한 혼합 정도에 따라 결정된다.

수심이 깊고 길이방향에 비해 상대적으로 폭이 좁은 성층화된 저수지에서 방류수 취수 수심은 저수지의 성층구조에 직접적인 영향을 미치며, 이것은 다시 탁수의 이동 경로와 방류수 탁도에 영향을 준다. 따라서 하류의 탁수 방류 장기화를 완화하기 위해 종종 선택취수(Selective withdrawal) 설비가 이용된다. 선택취수 설비란 저수지나 호수와 같이 수심이 깊은 성층화된 수체에서 특정한 수심구간으로부터 물을 취수하는 시설을 말하며, 취수 원수와 방류수의 수질관리를 위해 자주 사용된다(Fischer et. al, 1979; Martin and McCutcheon, 1999). 선택취수설비를 갖춘 댐은 그렇지 않은 댐에 비해 방류수의 수온, 용존산소농도, 탁도를 하류 생태계 서식과 용수이용 목적에 보다 적합하게 관리할 수 있다는 장점 때문에 미국공병단은 1973년부터 저수지 수질관리를 위해 선택취수설비를 도입하였으며, 현재 70개 이상의 저수지가 선택취수 설비를 운영하고 있다(Michael et al., 2004).

홍수기에 수자원을 확보하여 평·갈수기에 용수를 공급해야 하는 우리나라의 수자원 부존 여건상 댐으로 인한 탁수의 장기화 문제는 피할 수 없는 현실이다. 하지만 댐 운영자는 수자원의 지속적 이용, 지역주민들의 피해 최소화, 그리고 수질과 생태계 서식환경 보전을 위해 다양한 구조적 및 비구조적 탁수조절대책을 수립할 필요가 있다. 저수지 탁수 피해를 줄이기 위한 저수지내 대책으로는 선택취수 설비, 배사터널, 분획펜스, 우회수로 등의 설비를 이용한 방법을 사용할 수 있으나, 그 중 가장 널리 이용되는 방법은 선택취수 시설이

다. 비록 선택취수가 방류수 탁도와 수질을 제어하는 대안이지만, 그 효과는 저수지의 지형 및 수문조건, 탁수발생량, 시설의 위치와 구조, 운영방법에 좌우되며 종종 제한된 효과를 보이기도 한다. 특히, 취수 수심 변화에 따른 수체의 수리학적 물 순환 변화는 영양염류의 이송·확산에도 영향을 미치며, 이것은 다시 조류성장과 저수지 수질에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 기존 수자원시설의 취수설비 개선사업은 시설투자에 앞서 수치모델링을 이용한 효과 평가와 수질에 미치는 부작용 등을 면밀히 검토할 필요가 있다(Gelda and Effler, 2007). 또한 취수시설의 효과적인 운영을 위해서도 탁수의 실시간 감시와 저수지내에서의 거동에 대한 정확한 예측 기술이 필요하다(정세웅 등, 2005).

본 연구의 목적은 현재 EL. 52 m에 위치한 발전취수구(penstock)를 통해 하류에 용수를 공급하고 있는 대청댐의 방류설비를 표층수 취수가 가능한 선택취수 설비로 개조할 경우, 탁수 방류 장기화의 저감 효과와 이로 인한 저수지내 조류성장에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 다양한 선택취수 시나리오의 효과에 대한 수치해석은 선행연구에서 연구대상 저수지의 실측자료를 이용하여 보정·검증을 마친 2차원 폭 방향 평균 수리 및 수질 모델인 CE-QUAL-W2(이후 W2)를 적용하였다. 선택취수설비의 운영 시나리오는 2년(2004~2005) 연속 수문조건에서 중층 탁수의 선택배제와 표층수의 선택취수 기간을 달리하여 구성하였으며, 시나리오별 방류수 탁도의 변화와 저수지내 3개 구간, 즉 하천구간(Riverine zone), 천이구간(Transition zone), 호수역구간(Lacustrine zone)에서 조류발생 농도 변화를 비교 분석 하였다.

2. 연구방법

2.1 대청호 취수설비 현황 및 수질특성

모의 대상지역인 대청댐은 금강 본류 중상류에 위치하고 있으며 금강 하구언으로부터 150 km 상류지점에 위치하고 있다. 댐의 총 저수량은 15억 m³이고, 용담댐 유역을 제외한 유역면적은 3,204 km²이다. 대청댐은 다목적댐으로 수력발전뿐만 아니라 청주시, 대전시 및 금강 유역에 용수를 공급하고 있으며, 금강 중·하류지역의 홍수조절 역할을 하고 있다. 유역은 행정적으로 충청북도, 충청남도, 전라북도와 경상북도 일부지역 등 총 1개 광역시, 4개 시·도, 11개 군·구를 포함한다(한국수자원공사, 2004).

저수지내 주요 수리시설물은 대전과 청주에 용수를 공급하는 2개의 취수탑(EL. 57 m), 수력발전과 댐 하류

용수공급을 위한 발전 방류구(EL. 52 m), 그리고 6개의 수문을 갖춘 홍수조절용 여수로(EL. 64.5 m)가 있다. 우리나라 대부분의 기존 댐들과 마찬가지로 대청댐도 선택취수 설비를 갖추고 있지 않아 평상시 하류 용수공급은 발전 방류구를 통해서만 이루어지고 있다. 이러한 고정 취수 방식은 종종 저수지뿐만 아니라, 하류 하천 수질관리에 어려움을 줄 수 있다.

유역의 토양과 토지이용 특성 차이 때문에 대청호는 입하호와 소양호 같이 탁수문제가 매우 심각하지는 않지만, 결코 탁수로부터 자유로운 것은 아니다(정세웅, 2006). 여름철 몇 차례의 홍수유입으로 연중 30 NTU 이상의 고탁도 방류가 50일 이상 지속되기도 하며, 탁수는 댐 하류 지역에 위치한 취수시설의 운영과 하천 이용에 적지 않은 어려움을 준다(정세웅, 2004b; 최지용 등, 2005). 대청호 탁수발생 강도와 장기화는 강우강도와 강우량에 따라 다르지만, 대체로 일강우량이 100 mm 이상이면 탁수가 중층을 따라 이동하여 댐 앞까지 3~5일 이내에 도달한다. 저수지내로 유입하는 탁수유발 물질의 구성성분은 석영, 백운모, 일라이트, 알바이트 등 일반적인 무기 부유물질(tripton)이며, 유효입경은 높은 탁도를 유발하는 5~10 μm의 범위이다(윤성완 등, 2006). 탁수는 저수지내에서 하루에 0.1~0.5 m 내외의 침강속도로 가라앉지만, 댐까지 도달한 대부분의 탁수는 중층(EL. 52.0m)에 위치한 발전방류구를 통해 하류로 장기간 방류된다.

대청호에서 탁수의 장기화는 용수이용과 댐 하류 어업, 관광 효과 저하에 영향을 미친다. 특히 댐 직 하류 조정지에 청주권과 대전권 용수공급을 위한 취수장이 설치되어 있어 탁수발생은 물이용에 직접적인 영향을 미친다. 아직까지 이들 취수장의 가동률이 매우 낮기 때문에 탁수가 발생하는 동안에는 댐 저수지내에 위치한 문의 취수탑에서 추가 취수를 하고 있어 문제가 대두되지 않고 있으나, 장기적으로 용수수요가 늘어날 경우 장기간 탁수 방류 문제는 심각해 질 수 있다.

대청호내의 정기적인 수질 측정은 환경부 측정망인 장계교(Sta.4), 대정리(Sta.6), 회남대교(Sta.5), 댐앞(Sta.2)과 추동 취수탑(Sta.1), 문의 취수탑(Sta.3)에서 한국수자원공사가 월간측정을 하고 있으며, 탁수와 조류발생이 우려되는 여름철에는 주간측정(Sta.4, 6 제외)을 하고 있다(Fig. 1). 환경부의 대청호 수질 관리목표는 COD를 기준으로 상수원수 II급수이나, 매년 여름 부영양화 상태가 반복되고 남조류인 *Anabaena*와 *Microcystis* 등의 출현빈도가 증가하고 있는 실정이다(국립환경연구원, 2003; 천세억 등, 2006).

2.2 모델 입력자료 구성

W2 모델의 주요 입력자료는 지형 및 단면자료, 저수지 유입부분의 유량과 수질 경계조건, 기상조건, 초기조건, 그리고 수리와 수질해석을 위한 각종 매개변수 등이다(Cole and Buchak, 2006). 본 연구의 지형과 단면자료는 선행연구(정세웅, 2004a)를 통해 구축된 값을 사용하였다. 대청호의 유한차분 격자구성은 금강본류와 주요 지류하천을 5개의 구획(Branch)으로 구분하였다(Fig. 2). Br1은 댐으로 유입되는 금강본류, Br2는 회인천, Br3는 주원천, Br4는 삼산천이 유입하는 저수지내 정체수역, Br5는 품곡천 유입부를 나타내고 있다. 소옥천은 유입수역의 폭이 비교적 좁고 수체가 작기 때문에 저수지로 직접 유입하는 지류로 고려하였다. 흐름방향으로는 저수지의 형상과 수리 및 수질변화 등을 종합적으로 고려하여 장계교 지점에서 댐까지 31개의 요소($\Delta x = 0.5 \sim 1.9$ km), 수심방향으로는 0.5~1.0 m 간격으로 69개 수층(Layer)으로 구분하였다. 저수지의 지형자료는 대청댐의 퇴사량측정보고서(한국수자원공사, 1991)에서 종단 및 횡단측량 자료로부터 추출하였으며, 모형에서 계산된 저수지 수위별 용량곡선을 실측수위와 비교함으로써 그 신뢰도를 검증하였다.

기상자료는 기온, 이슬점 온도, 운도는 저수지에서 20 km 떨어진 대전 기상청에서 측정된 자료를 사용하였으나, 풍향과 풍속은 문의면사무소에 위치한 대청 자동기상관측소(AWS)에서 실측한 시간별 자료를 사용하였다. 경계조건으로 사용된 저수지 유입량과 방류량은 수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)의 자료를 사용하였다. 유량은 2004~2005년의 대청댐 수문자료의 일별 유입량과 방류량을 사용하였다. 유입량 자료

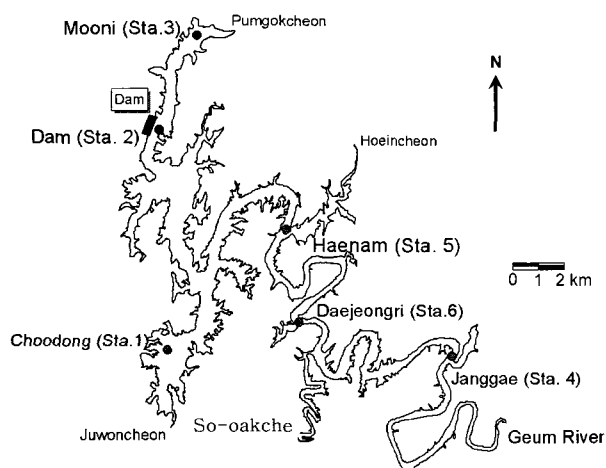


Fig. 1. Locations of water quality monitoring stations

는 대청댐 유역 전체의 유입유량이기 때문에 각 지류하천의 유입량은 유역면적비를 이용하여 산정하였다.

탁수의 밀도류 거동에 영향을 많이 미치는 유입수온자료는 2004년 6월부터 실측한 실시간 자료를 사용하였다. 그러나 실측 자료가 없는 기간에 대하여는 동일 하천에서 개발한 다중회귀모형을 사용하여 기상자료로부터 유입수온을 산정하였다(정세웅 등, 2006). 경계조건인 유입수 탁도는 실시간 현장측정 장치를 이용하여 실측한 시간별 탁도 자료를 사용하였다. 탁도는 독립침강 특성을 갖는 부유물질로 모의하였으며, 침강속도는 주간측정에서 얻어진 탁수층의 시간에 따른 수직분포로부터 산정한 0.30 m/day를 적용하였다.

부영양화 해석에 필요한 유기물과 관련된 수질 자료는 일별 실측자료가 없기 때문에 저수지의 유량-부하량 관계식(한국수자원공사, 2004)을 이용하여 계산된 부하량으로부터 일별 수질농도를 구하였다. W2 모델에서는 유기물을 용존상(DOM)과 입자상(POM) 그리고 분해속도에 따라 생분해성(Labile)과 난분해성(Refractory)로 구분하며, L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM의 4개 형태로 모의한다. 그러나 국내 대부분의 호소에서 유기물 측정 항목은 COD_{Mn} 으로 한정되어 있기 때문에, 선행 연구(유순주 등, 1999, 2005; 최광순 등, 2000)에서 제시한 실험결과를 근거로 COD_{Mn} 를 TOC로 환산하고, 다시 L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM으로 나누었다. COD_{Mn}/TOC 의 비는 국내 8개 저수지에서 측정된 자료의 평균을 사용하였다(최광순 등, 2000). TOC를 유기물량으로 환산하기 위해서, 유기물중 탄소가 차지하는 비율인 0.45를 나누어 TOM을 산정하였다.

$$TOM = (COD_{Mn} + 1.09) \div 0.45 \quad (1)$$

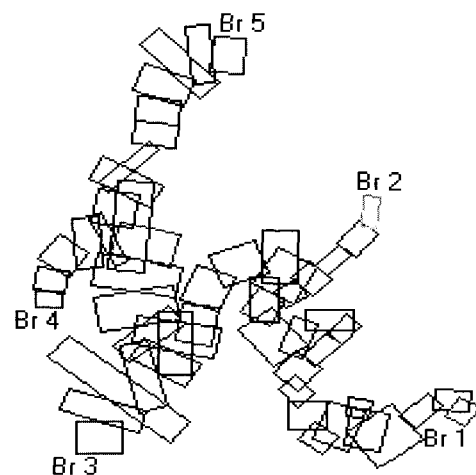


Fig. 2. Computational segments of Deacheong Reservoir in longitudinal view

자연수계에서 유기물은 대부분 용존상(DOM)으로 존재하며 입자상(POM)은 용존상에 비해 그 양이 매우 작고(김범철 등, 1998), 용존상유기물의 구성은 생분해성보다는 난분해성의 유기물이 대부분을 차지하고 있다(Thurman, 1985). 국내 하천과 호소에서 조사한 실험결과에서도 TOM의 대부분이 용존상유기물(DOM)로 나타났다(유순주 등, 1999; 전성식 등, 2005). 본 연구에서는 대청댐의 POM과 DOM을 각각 25%와 75%로 나누었다. 미국의 Monroe, Allatoona, West Point 저수지에서도 W2모형의 입력자료 구성을 위해 POM과 DOM의 분율을 각각 25%와 75%로 적용한 결과 만족할 만한 결과를 얻은 바 있다(Cole et al., 1999, 2001). 그러나 이들 구성비는 강우-유출에 영향을 받아 동적으로 변화하기 때문에 보다 정확한 입력자료 구성을 위해서는 향후 실험적 연구를 통한 검증과 개선이 필요하다.

유기물의 구성을 다시 분해성과 난분해성으로 나누어야 하는데, 대청호에서 실험결과 분해성과 난분해성 유기물의 비는 각각 30%와 70%로 조사되었다(유순주 등, 2005). 본 실험에서는 TOM을 입자상과 용존상(25 : 75)으로 나누고, 이를 각각 분해성과 난분해성(30 : 70)으로 나누어 R-DOM, L-DOM, R-POM 및 L-POM을 각각 구하였다.

$$L-DOM = \{(TOM - algae) \times 0.75\} \times 0.30 \quad (2)$$

$$R-DOM = \{(TOM - algae) \times 0.75\} \times 0.70 \quad (3)$$

$$L-POM = \{(TOM - algae) \times 0.25\} \times 0.30 \quad (4)$$

$$R-POM = \{(TOM - algae) \times 0.25\} \times 0.70 \quad (5)$$

나머지 수질항목인 NO_3-N , NH_3-N , PO_4-P , $Chl.a$ 와 DO 등은 한국수자원공사와 금강물환경연구소의 수질측정망 실측자료를 이용하였다.

2.3 모의 시나리오 구성

취수방법에 따른 대청호 탁수조절 효과와 수질에 미치는 영향 분석은 (1)고정취수와 (2)탁수층 선택배제 후 표층수를 선택취수 하는 두 가지 방법으로 나누어 실시하였다. 고정취수 방법은 2004년 단일 수문사항에 대해 취수구 위치에 따른 방류수 탁도 변화와 저수지내 수질 변화를 모의하였다(Table 1). 선택배제 후 표층수를 취수하는 방법은 2004~2005년 연속 수문사항에 대하여 평상시는 중층(Middle depth)으로 취수하고 탁수가 댐 축에 도달한 후에는 일정기간 선택배제를 한 후 상층(Upper depth)으로 취수하는 시나리오를 사용하였다(Table 2). 또한 선택배제 기간과 상층 취수구의 위치에 따라 시나리오를 나누어 방류수와 저수지내 수질의 변화를 모의하였다.

고정 취수구의 위치는 여수호가 있는 EL. 64.5 m 보다 약간 낮은 EL. 62 m를 상층취수, 그리고 취수에 따른 바닥 퇴적물의 부상을 고려하여 현재 취수구 보다 10 m 아래인 EL. 42 m를 하층취수로 구분 하였다. 2004~2005년 선택배제 후 상층취수 시나리오는 탁수가 유입한 후 선택배제의 기간을 달리하였다. 2004년과 2005년 홍수기 동안 발생한 탁수층이 댐 축에 도달한 시점은 Julian day로 각각 173일과 553일이었으며, 탁수층의 선택배제 후 상층수를 취수하는 시나리오에서는 이 시점을 기준으로 이전은 중층으로부터 물을 취수하

Table 1. Withdrawal scenarios depending on the fixed intake elevations (2004)

Scenario	Intake elevation
S2004-1	Middle depth (EL. 52 m)
S2004-2	Upper depth (EL. 62 m)
S2004-3	Lower depth (EL. 42 m)

Table 2. Selective withdrawal scenarios for different upper depth withdrawal timings and elevations (2004~2005)

Scenario	Description
S-1	Continuous middle depth(EL. 52m) intake
S-2	Continuous upper depth(EL. 62m) intake
S-3	Upper depth(EL. 62m) intake starts as soon as plume arrived
S-4	Upper depth(EL. 62m) intake starts after 7 days of plume arrival
S-5	Upper depth(EL. 62m) intake starts after 14 days of plume arrival
S-6	Upper depth(EL. 70m) intake starts after 7 days of plume arrival

고, 이후에는 일정기간 탁수를 선택배제한 후 표층수를 취수 하도록 시나리오를 구성하였다.

탁수층 선택배제 후 표층수를 선택취수 하는 시나리오에서 S-1과 S-2는 S2004-1, S2004-2와 같이 각각 중층과 상층에서 고정취수를 하였고, S-3는 탁수가 댐측에 도달하는 시점을 기점으로 이전은 중층취수를 하고, 이후는 곧 바로 상층 취수를 하도록 모의하였다. S-1의 모의결과 2004년에는 300일부터 방류수 탁도가 10 NTU이하로 떨어졌기 때문에 그 이후부터 2005년 탁수 도달 시기인 553일 까지는 표층수를 보호하기 위해 다시 중층 취수를 하는 것으로 가정하였으며, 533일 이후에 다시 상층 취수하였다. S-4와 5는 일정기간 중층의 탁수층을 선택배제한 후 표층수를 취수하는 시나리오이며, 선택배제 기간은 S-3을 기준으로 각각 7일과 14일로 늘렸다. S-6은 상층 취수구의 위치를 여수로 바닥표고 보다 높은 EL. 70 m로 높이고 7일간 선택배제 후 표층수를 취수하는 시나리오이다.

각각의 취수시나리오가 저수지내 조류성장에 미치는 영향을 평가하기 위해 저수지 영역을 수역의 물리화학적 특성에 따라 Lacustrine Zone(댐으로부터 0.5 km), Transition Zone(15 km), Riverine Zone(25 km)의 3개 구간으로 구분하고, Chl.a의 농도 변화를 비교 분석하였다. 또한, 댐 측에서의 수온과 용존 인(PO_4-P), Chl.a의 농도를 수심에 따라 탁수 유입 시기와 유입 후 시기로 나누어 각각 비교함으로써 취수방법이 수질에 미치는 영향을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델의 보정 및 검증

저수지 수온과 탁수의 거동 특성에 영향을 미치는 모델의 수리학적 매개변수인 와점성계수(AX), 난류 확산계수(DX), 바닥 조도계수(CHEZY), 바람차폐계수(WSC), 표층광흡수계수(BETA), 광소멸계수(EXH20),

바닥열교환계수(CBHE)는 Chung 등(2006)이 실측한 수온과 탁도 자료를 이용하여 보정한 값을 사용하였다. 부영영화 모의와 관련된 각종 수질반응과 조류 관련 매개변수는 정세웅 등(2007)이 2001년과 2004년의 서로 다른 수문사상에 대하여 보정하고 검증한 값들을 적용하였다. 따라서 지면절약과 중복기술을 피하기 위해 모델의 보정과 검증에 대한 상세한 내용은 본 논문에 제시하지 않았으므로 관심 있는 독자는 이들 논문을 참고할 수 있다.

성층화된 저수지의 선택취수에 따른 방류수 탁도 계산의 정확도는 선택취수 시나리오 효과 평가에 매우 중요한 영향을 미치므로, 모델의 선택취수 수질 예측 알고리즘을 검증할 필요가 있다. W2 모델의 선택취수 알고리즘은 Bohan and Grace(1973)가 제시한 방법을 사용하며, 저수지의 수심별 수온 및 수질농도, 취수수심 및 형식, 취수량의 함수로 취수 영역과 방류수 수질을 계산한다. 모델의 방류수 수질예측 성능을 검증하기 위해 2003-2006년 동안 대청댐 하류 대청교에서 실측한 수온, 탁도, DO 농도, 전기전도도 자료와 모의결과를 비교·검증한 결과는 Table 3과 Fig. 3과 같다. 댐 방류수 탁도의 경우 모의값과 실측값의 결정계수는 0.93, 선형회귀분석의 기울기 값은 1.2024로써, 모델이 다소 과대평가 하는 경향을 보이지만 비교적 실측치와 잘 일치하는 것으로 평가되었다. 수온, DO, 전기전도도에 대한 예측결과도 매우 높은 결정계수값을 보이고 있어 모델의 선택취수 방류수 수질예측 성능은 신뢰할 만한 것으로 평가하였다.

3.2 취수구 위치변경에 따른 효과평가

고정취수 시나리오별 방류수 탁도의 시계열 변화 모의결과를 목표탁도 10, 20, 30 NTU와 함께 Fig. 4에 나타내었다. 2004년 6월 18일에 발생한 1차 홍수에서 중층과 심층에서 취수하는 S2004-1과 S2004-3 시나리오는 방류수 탁도가 서서히 증가한 반면, 상층에서 취수

Table 3. Evaluations of model performance in simulating outflow water quality by selective withdrawal in Daecheong Reservoir

Parameters	Observed*	Estimated**	R ²
Temperature (°C)	19.2±3.7***	18.1±3.9	0.88
Dissolved oxygen (mg/L)	7.7±1.9	6.9±2.7	0.82
Turbidity (NTU)	18.5±23.0	22.7±28.7	0.93
Conductivity (µS/cm)	128.4±52.3	125.7±52.0	0.99

* Observed water quality at Daecheong bridge between June to September of 2003-2006.

** Estimated outflow water quality by selective withdrawal equations of the model.

*** Standard deviation.

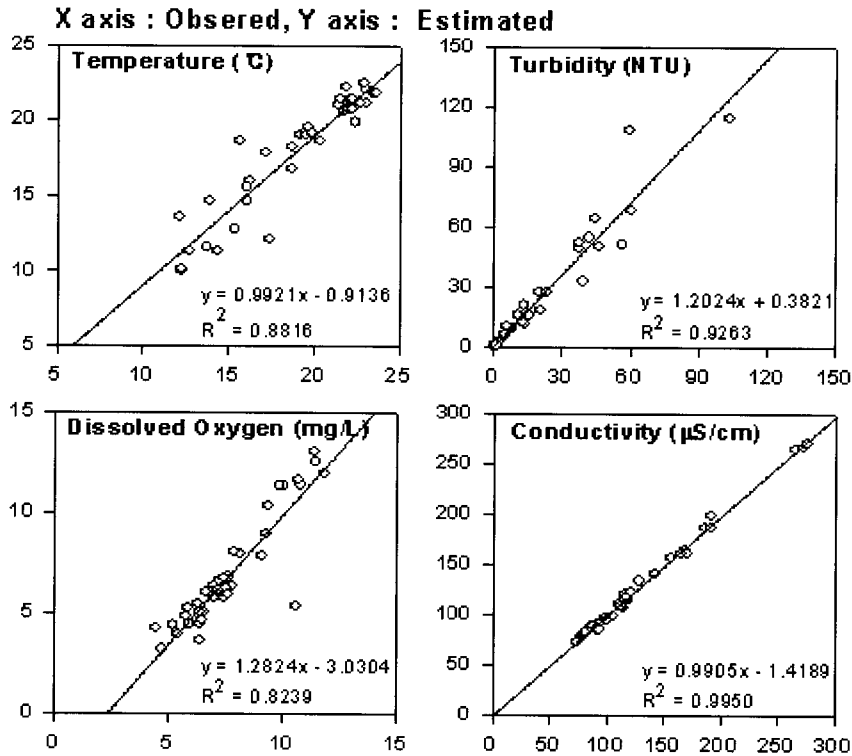


Fig. 3. Linear relationships between observed and estimated outflow water quality in Daechong Reservoir

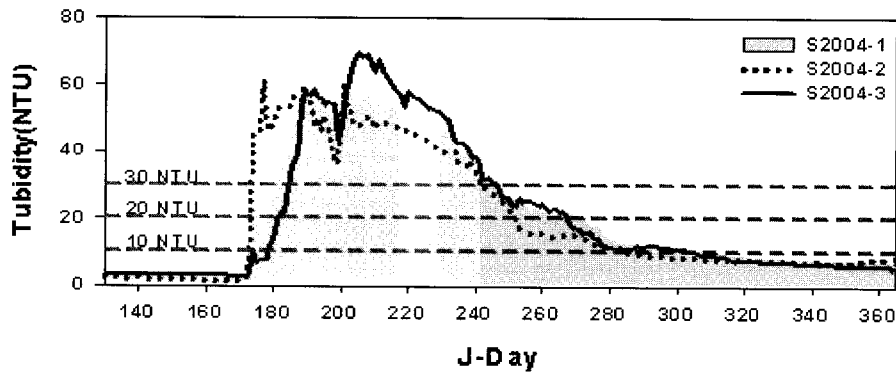


Fig. 4. Comparisons of dam outflow turbidity for different fixed intake scenarios(2004)

하는 S2004-2에서 방류수 탁도는 급격히 증가하는 양상을 보인다. 또한, 중층취수(S2004-1)에 비해 상층취수(S2004-2)는 방류 초기에 고탁도가 나타났으며, 20 NTU 이하로 탁도가 떨어지는 시기도 약 20일 정도 빠르게 나타났다. 반면 심층취수(S2004-3)의 경우 탁도의 변화는 중층취수와 비슷한 경향을 보이고 있으나, 70 NTU 이상의 고탁도가 발생되기도 하였다. 이러한 결과는 홍수시 유입한 탁수가 밀도류를 형성하며 수온 전이층 위로 유입되었고, 수위상승과 함께 탁수의 중심이 EL. 60 m 부근에 위치하였다가 시간이 경과하면서 탁수층이 하강한 때문으로 판단된다.

댐 방류수의 수질관리를 위한 목표 탁도를 10, 20, 30 NTU로 가정 하였을 때, 중층취수(S2004-1)의 목표탁

도 초과일수는 각각 129일, 93일, 66일로 산정되었다. 상층취수(S2004-2)는 중층취수와 비교했을 경우 목표탁도 10, 20 NTU에 대해서는 16일, 14일이 적었으며 30 NTU는 오히려 2일이 늘었다. 심층취수(S2004-3)의 경우는 중층취수와 크게 차이나지 않았으나 20 NTU와 30 NTU에서 각각 7일, 4일이 적게 나타났다(Table 4).

고정취수에 대한 모의결과를 종합해 볼 때, 현재 중층에 위치한 발전취수구의 위치를 심층과 상층으로 변경하는 대안은 탁수의 침강(plunging), 분리(separation), 관입(intrusion) 등 밀도류 흐름특성과 댐 앞 도달시간에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 방류수 목표탁도의 초과일수를 기준으로 평가할 때 중층취수에 비해 탁수의 장기 방류 일수를 다소 줄일 수 있을 것으로 평가되었다.

Table 4. Number of dates that outflow turbidity exceeded the designated target turbidity for different intake elevations(2004). (unit: days)

Scenario	Target turbidity		
	10 NTU	20 NTU	30 NTU
S2004-1	129	93	66
S2004-2	113(-16)	79(-14)	68(2)
S2004-3	129(0)	86(-7)	62(-4)

() : Difference with the number of S2004-1

취수위치 변화가 저수지내 조류 성장에 미치는 영향을 평가하기 위해 각 시나리오별 Chl.a 농도 모의결과를 저수지내 수심 1 m 지점에서 비교하였다(Fig. 5). 상층취수는 중층 취수에 비해 저수지 Lacustrine zone(0.5 km)과 Transition zone(15 km)에서 조류농도를 약간 증가시킨 반면, 심층취수는 다소 감소시키는 효과를 보였다. 상층취수의 경우 탁수층이 형성되는 수심이 중층 취수에 비해 높아지고, 반대로 심층취수의 경우 더 낮아진다. 취수구의 위치 변화에 의해 탁수층의 교란이 일어나 저수지내 수질이 변한 것으로 판단된다. 저수지의 영역에 따라서 그 영향은 다르지만 유입부분인 Riverine zone(25 km)은 상대적으로 취수구의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

취수위치 변화에 따른 저수지내 Lacustrine zone의 수심별 수질의 변화를 알아보았다(Fig. 6). Chl.a의 농도는 전반적으로 수심에 따라 상층취수를 하였을 때 가장 높게 나타났으며, 심층취수를 하였을 때 가장 낮게 나타났다. 수심에 따른 수온은 표층에서는 크게 차이가

없었으나 취수위치가 높을수록 수온 약층의 위치가 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 180일과 250일의 결과를 보면 취수구 위치에 따른 수심별 수질분포는 탁수의 유입이 진행될수록 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 표층에서 용존 인 농도는 시간이 지남에 따라 변화가 적고 오히려 유입초기에 차이가 더 크게 나타났다. 이는 탁수의 유입초기 상층취수에 의해 높아진 표층수의 용존 인 농도가 조류 성장에 소모되어 다시 감소된 것으로 해석된다. 즉 취수구의 위치가 높아짐에 따라 탁수층의 유입경로가 상승하여 표층에 제한영양염인 용존 인이 더 많이 공급되고, 그 결과로써 조류의 농도가 상대적으로 증가한 것으로 보인다.

3.3 선택배제 후 선택취수에 따른 탁수조절 효과 및 수질영향

상층취수는 댐 하류 탁수 장기화 일수를 줄이는데 다소 효과가 있을 수 있으나, 표층수를 과다하게 취수하여 탁수층이 교란될 경우 오히려 탁수 장기화를 악화

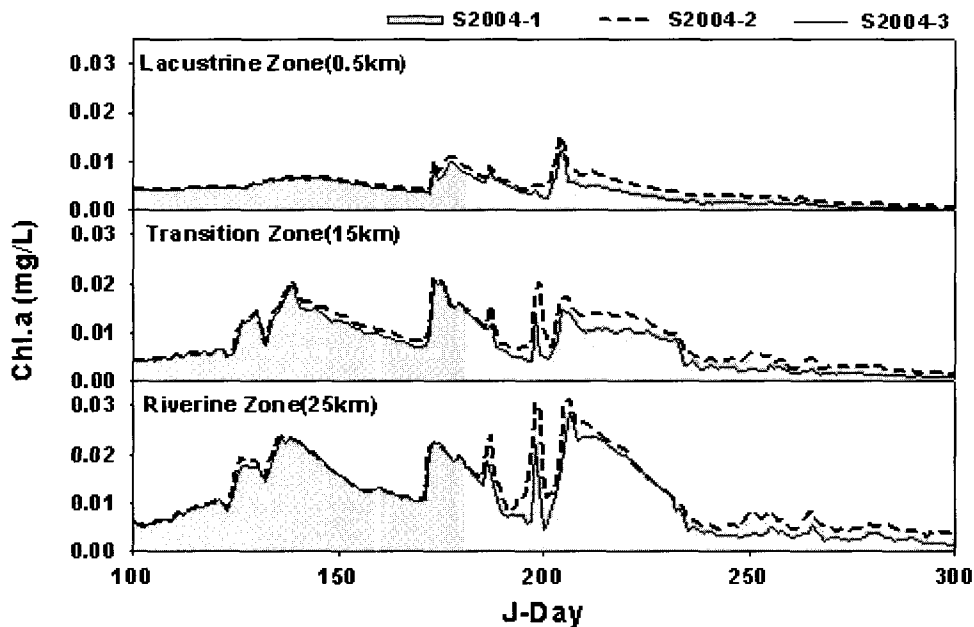


Fig. 5. Comparisons of Chl.a concentrations in different zones of the reservoir for different withdrawal scenarios(2004)

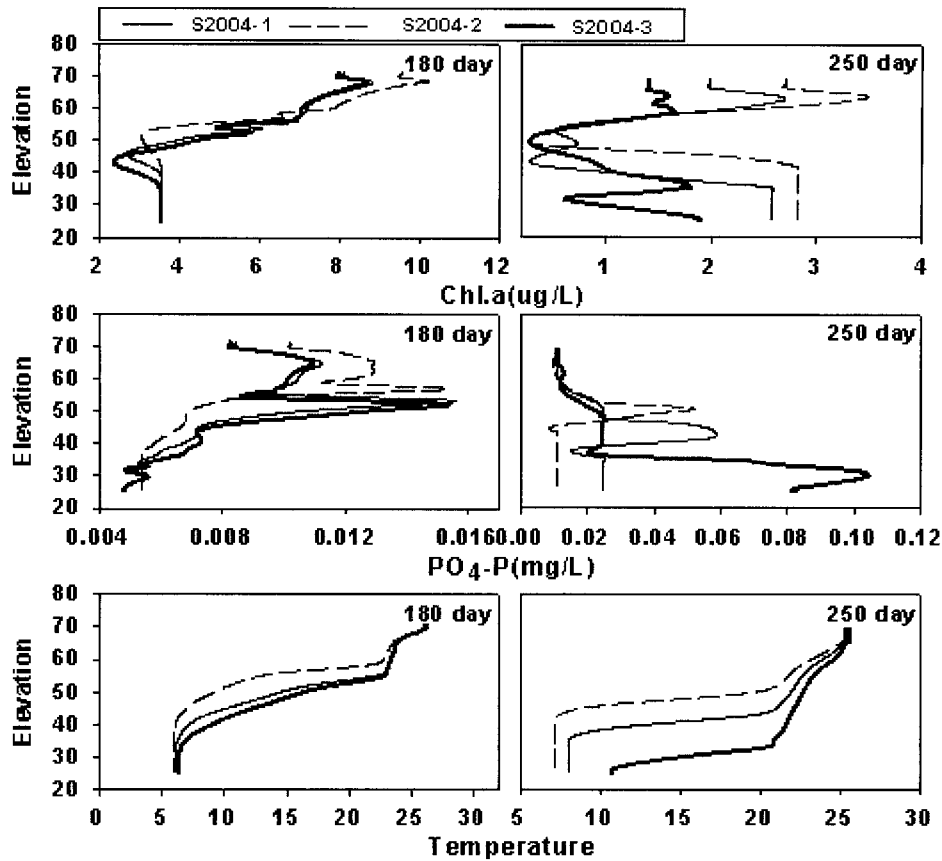


Fig. 6. Comparisons of reservoir water quality profile for different selective withdrawal scenarios(2004)

시키고 저수지내 조류의 농도를 증가시킬 우려가 있다. 따라서 서로 다른 선택취수 조건이 탁수조절과 조류성장에 미치는 영향을 평가하기 위해 2년 연속모의(2004~2005년)를 실시하였다. Fig. 7은 선택배제 후

상층취수 시나리오별 방류수 탁도의 시계열변화와 목표 탁도를 함께 비교하여 나타낸 것이다. 각 시나리오별 목표탁도 초과일수를 정리한 자료는 Table 5에 나타내었다.

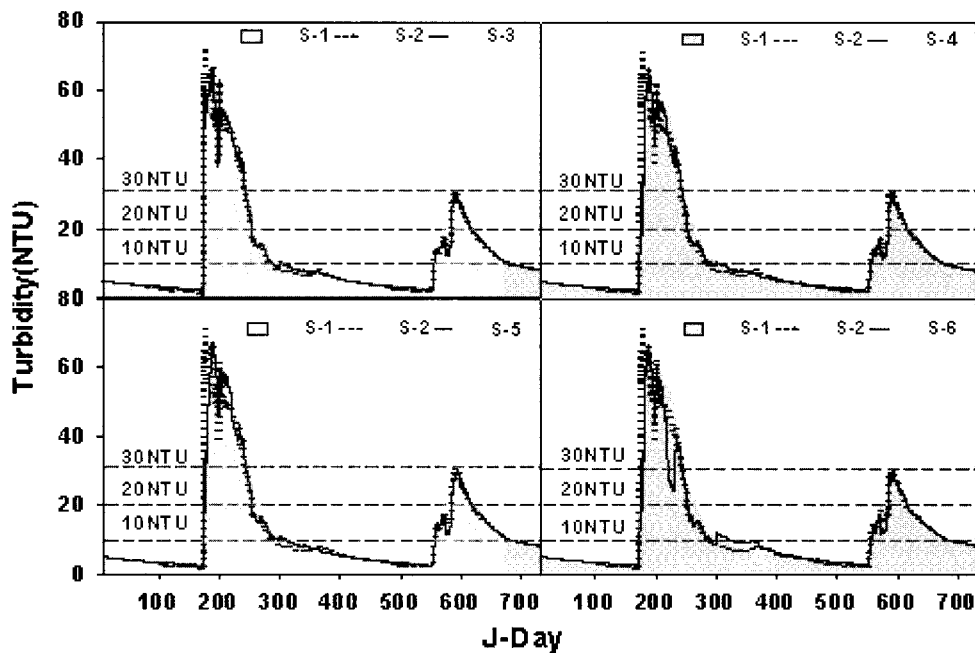


Fig. 7. Comparisons of dam outflow turbidity for different selective withdrawal scenarios(2004-2005)

Table 5. Number of dates that outflow turbidity exceeded the designated target turbidity for different selective withdrawal scenarios(2004-2005)

Scenario	Target turbidity		
	10 NTU	20 NTU	30 NTU
S-1	251	132	69
S-2	238(-13)	111(-21)	72(3)
S-3	243(-8)	113(-19)	72(3)
S-4	249(-2)	112(-20)	68(-1)
S-5	255(4)	112(-20)	67(-2)
S-6	255(9)	113(-21)	67(-14)

() : Difference with the number of S-1

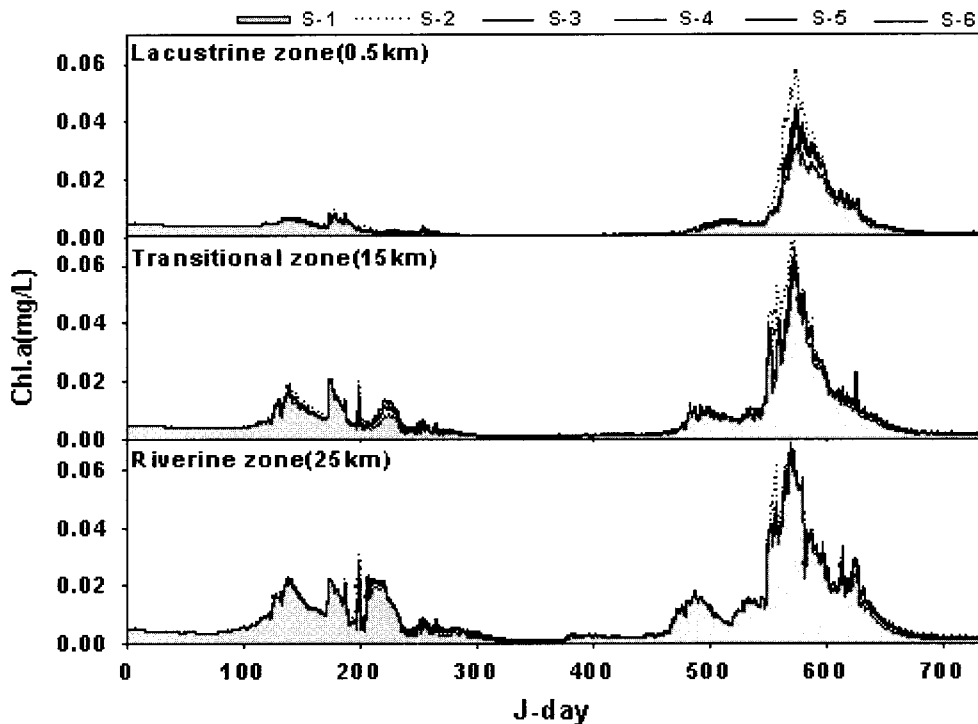


Fig. 8. Comparisons of Chl.a concentrations in different zones of the reservoir for different selective withdrawal scenarios(2004-2005)

중층취수의 경우(S-1) 목표 탁도인 10, 20, 30 NTU에 대해 각각의 방류수 탁도 초과일수는 251일, 132일, 69일로 모의되었다. 상층취수(S-2)의 경우 중층취수와 비교하였을 때, 목표탁도 10, 20 NTU 초과일수는 13일, 21일 감소한 반면, 30 NTU 초과일수는 3일이 증가하였다. 탁수 도달 후 선택배제 없이 상층취수를 실시한 경우(S-3) 각각의 목표탁도에서 8일, 19일 감소하였고 3일이 증가하여 표층 고정취수(S-2)보다는 탁수의 장기화 개선효과가 약간 떨어졌다. 7일간 선택배제 후 표층수를 취수한 경우(S-4), 탁도 초과일수가 각각 2일, 20일, 1일 감소하여 탁수의 개선효과가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 14일간 선택배제 후 표층수를 취수한 경우(S-5) 목표탁도에 대하여 각각의 탁도 초과일수가 4일 증가하였고 20일, 2일 감소하였다. 탁수의 선택배제

후 표층수를 취수한 경우(S-4, 5), 표층 고정취수에 비해 저탁도의 초과일수는 증가하였고 고탁도의 초과일수는 감소하는 결과가 나타났다. 반면에 상층취수구의 위치를 EL. 70.0 m까지 상향 조정된 경우(S-6)에는 20, 30 NTU 초과일수가 가장 크게 감소하였으나, 10 NTU 목표에서는 오히려 9일이 증가하였다. 결국 20 NTU를 목표 탁도로 운영 할 경우, 선택취수 시나리오에 따른 탁수조절 효과의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

각각의 시나리오에 따른 취수가 이루어 질 때 저수지내의 조류의 성장에 대해 알아보기 위해 저수지내 표층의 Chl.a의 농도의 시계열 변화를 비교하였다(Fig. 8). Lacustrine zone(0.5 km)에서는 상층취수를 하는 시기가 빠를수록 조류 농도가 높게 나타난 반면, Transition zone(15 km)에서 상층취수에 따른 영향은 미미하였다.

Riverine zone(25 km)에서 농도의 변화는 거의 일어나지 않았다.

각각의 취수 시나리오에 대한 수심별 수질 변화를 알아보기 위해, Lacustrine zone의 Chl.a와 PO4-P, 온도, 탁도의 수심별 분포를 비교하였다(Fig. 9). Chl.a의 농도는 표층에서 S-2가 가장 높았으며 S-3, S-4순으로 낮아졌고 S-1이 가장 낮았다. S-5와 S-6는 S-4와 거의 같은 농도를 나타내었다. PO4-P의 경우도 마찬가지로 최고 농도가 나타나는 수심이 상층취수 시기가 빠를수록 전반적으로 높게 나타났다. 온도의 경우도 마찬가지로 상층취수가 이루어진 시기가 빠를수록 변온층이 나타나는 수심이 높아졌는데, 동일한 수심에서 수온은 S-2가 가장 낮았고 S-1이 가장 높게 나타났다. 탁도 또한 선택취수 시기가 빨라질수록 탁수층이 나타나는 수

심이 상승하였고, 상층취수 시기가 같은 S-5와 S-6의 경우 탁수층의 분포가 거의 일치하였다. 즉, 상층취수에 의해 탁수층이 상승했음을 보여주고 있다.

모의결과는 과도한 상층취수가 저수지 수질악화를 야기할 수 있다는 것을 시사한다. 즉, 과도한 표층수 취수는 수온 전이층의 상승을 가져왔으며, 이로 인해 탁수층의 상승과 함께 표층에 인을 공급하게 되어 Chl.a의 농도가 상승한 것으로 보인다. 강우시 유입하는 탁수는 일반적으로 높은 인 농도를 포함하며, 인이 제한 영양인자로 작용하는 유광대로 탁수층이 상승하면 조류 성장을 촉진할 수 있다. 중층 취수가 이루어진 후 표층수를 취수한 S-3~6은 S-1과 S-2의 사이에 그 값이 존재하나 크게 차이를 보이지는 않는다.

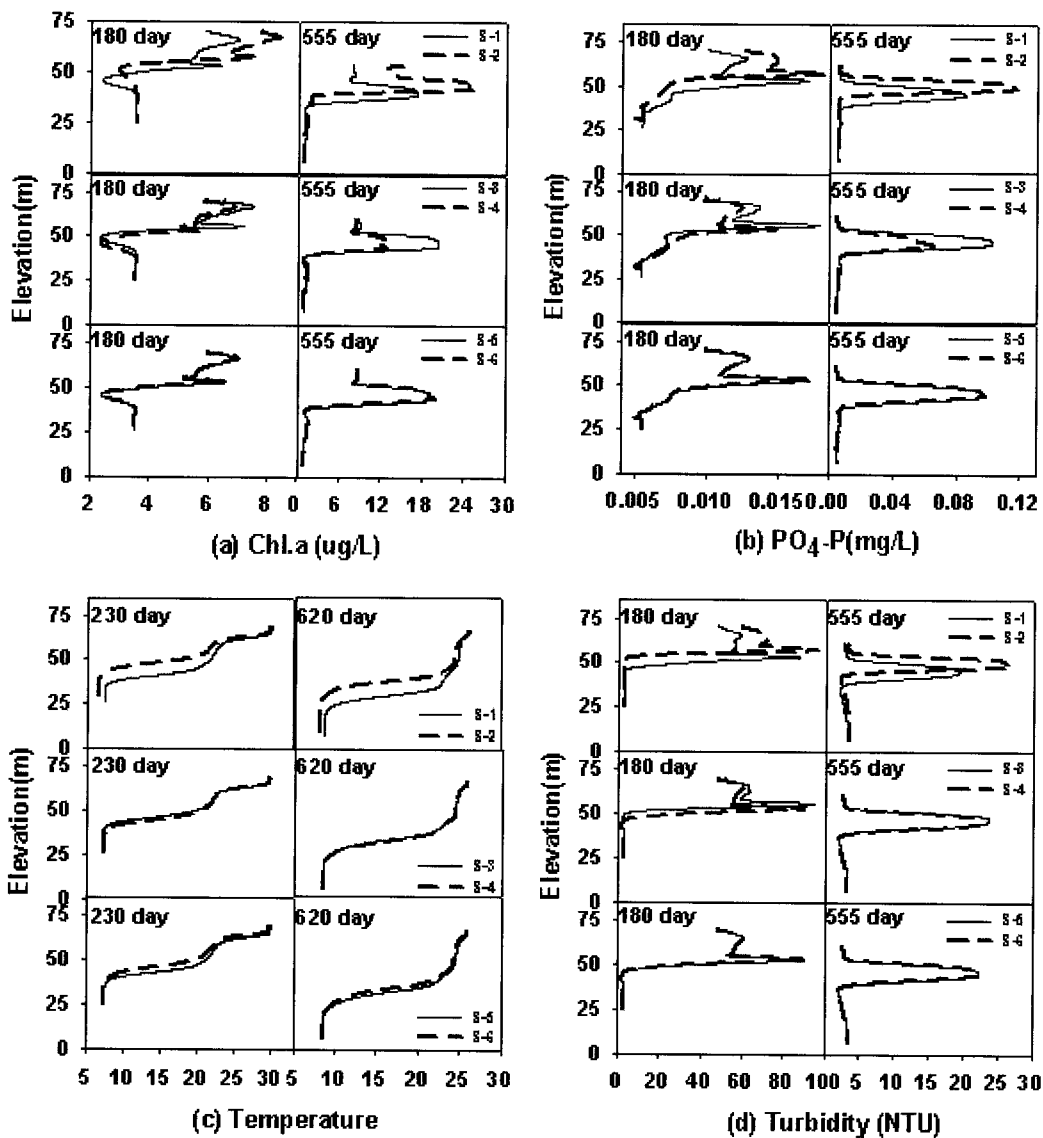


Fig. 9. Comparisons of reservoir water quality profile for different selective withdrawal scenarios(2004-2005)

3.3 선택취수에 따른 탁수조절 효과 평가

댐 방류수 수질개선을 위한 선택취수의 설치 효과는 단일 수문사상에 대한 평가는 불확실성이 크므로 장기간 수문사상에 대한 모의결과를 이용하여 수질개선 효과를 통계적으로 평가하는 것이 유리하다(Gelda and Effler, 2007). 선택취수에 의한 댐 방류수 탁도 조절 효과를 정량적으로 평가하기 위해 누적확률분포와 탁도의 관계를 검토하였다(Fig. 10). 2004-2005년 연속 모의 결과를 이용하여 탁도를 X축에 두고 해당 탁도 이상의 값이 발생하지 않을 확률을 Y축에 나타내었다. 탁도의 누적확률분포를 보면 S-1과 S-2~6의 그래프가 거의

일치하는 것을 확인할 수 있다. 현재 EL. 52 m에서 고정 취수하는 S-1에 비해 선택취수시나리오인 20 NTU 목표에서 약 2.6%의 개선효과를 보이고 있으나, 전반적으로 선택취수에 의한 탁수조절 효과는 매우 작은 것으로 판단된다.

선택취수시설에 의한 탁수조절 효과가 미미한 원인을 알아보기 위해 취수위치에 따른 저수지내 취수구역(Withdrawal zone)을 비교하였다(Fig. 11). 취수구 위치에 따라 형성되는 취수구역은 모의된 접근 유속의 속도 벡터를 사용하여 확인하였다. 최대발전 방류조건(240 m³/sec)에서 중층취수(EL. 52 m)의 접근유속은 EL. 40~68 m 부근에서 형성되었으며, 상층취수(EL. 62 m)

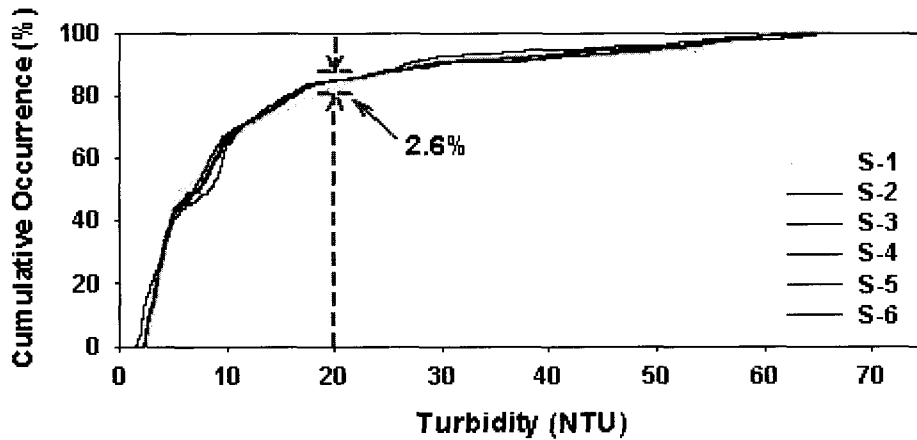


Fig. 10. Cumulative frequency curves of turbidity that showing the performance of selective withdrawal scenarios.

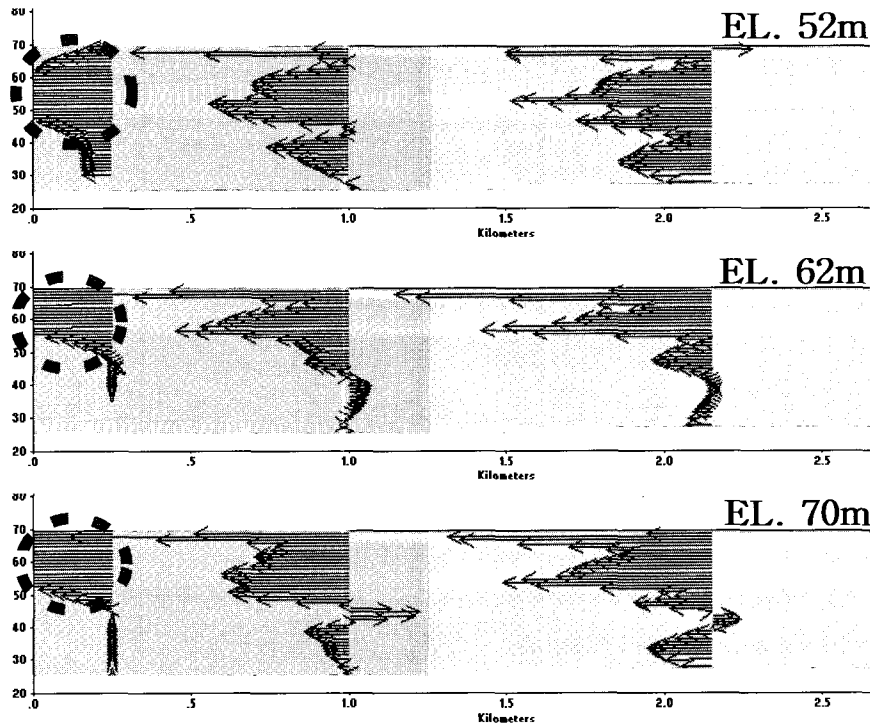


Fig 11. Comparison of flow velocity vectors to define the withdrawal zones for different selective withdrawal scenarios

에서는 EL. 45 m~표층 부근에서 나타나 취수위치 변화에 의한 접근유속 형성 영역 범위는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 취수구의 위치를 EL. 70 m까지 상승시킨 경우에도 취수구역의 하부경계는 비슷하게 나타났다. 이것은 홍수조절을 위해 최대발전 방류를 할 경우, 현재의 발전 취수구의 위치를 상향 조정하여도 중층 탁수층이 취수구역에 포함되는 결과를 보여준다. 결과적으로 대청호에서 표층수 취수 설비의 설치는 방류수 탁도의 장기화 일수를 조절하는데 크게 도움이 되지 않을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대청댐 저수지 방류수 탁수 장기화 제어 대책의 일환으로 2004년과 2005년을 대상으로 현재의 발전용수 취수설비를 저층 또는 상층취수가 가능한 취수설비로 개선할 경우, 탁수조절 효과와 저수지 수질에 미치는 영향을 수치모델링을 통해 분석하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 2004년 수문사상의 경우, 현재 발전방류구가 위치한 중층 취수에 비해 상층(2004S-2)과 심층(2004S-3)에서 취수 하는 대안은 저수지내 탁수의 흐름특성과 댐 앞 도달시간에 영향을 미침으로써 댐 하류 탁수의 장기화 일수를 단축하는데 다소 효과가 있었으나, 저수지 표층의 조류 농도를 증가시키는 경향을 보였다.
- 2) 댐에 도달한 탁수를 일정량 선택배제 한 후 표층수를 취수한 경우(S-4, 5), 표층수만을 계속 취수 하는 경우에 비해 고탁도(30 NTU)의 초과일수는 감소한 반면 저탁도(10 NTU)의 초과일수는 증가하였다.
- 3) 댐 방류수 목표 탁도를 20 NTU로 저수지를 운영 할 경우, 선택취수 시나리오에 따른 탁수조절 효과의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.
- 4) 상층취수구의 위치를 EL. 70.0 m까지 상향 조정 한 경우(S-6)에는 20, 30 NTU 초과일수는 각각 21일과 14일이 감소하였으나, 10 NTU 목표 초과일수는 오히려 9일이 증가하였다.
- 5) 성층화된 저수지에서 과도한 표층수 취수는 수온 전이층의 상승을 가져오며, 이로 인한 탁수층의 상승과 함께 고농도의 인이 유광대로 전달되어 조류성장을 촉진하는 결과를 가져왔다.

- 6) 2004-2005년 연속모의 결과, 대청호에서 표층수 선택취수 설비 운영은 방류수 탁도가 20 NTU를 초과할 확률을 2.6% 낮추는데 그쳐 탁수조절 효과가 매우 작은 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원 (2003). **금강수계 상수원 수질조사**
 김범철, 최광순, 김철구, 이윤희, 김동섭, 박제철 (1998).
 “소양호의 DOC와 POC 분포.” *Korea J. Limnol*,
 제31권, 제1호, pp. 17~24.
- 박기영 (2003). 2차원 수치모형을 활용한 임하댐 탁도 분석 시스템 구축. 석사학위논문, 경북대학교
- 서동일 (1998). “대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구.” **대한환경공학 회지**, 제20권, 제9호, pp. 1219-1234.
- 유순주, 김창수, 하성룡, 황종연, 채미희 (2005). “금강 수계 자연유기물 특성 분석.” **한국물환경학회지**, 제21권, 제2호, pp. 125~131
- 유순주, 황종연, 윤영삼, 천세억, 한의정 (1999). “하천·호소의 유기물 지표 평가.” **환경영향평가**, 제8 권, 제1호, pp. 81~92
- 윤성완, 정용락, 예령, 김유경, 정세웅(2006). “대청호 유역의 탁수 발생 특성.” **2006년 대한상하수도학 회·한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집**, 한국물환경학회, pp. 304
- 전성식, 오인영, 강태구, 서정미, 한인섭 (2005). “강우에 따른 팔당호 수질변화 특성에 관한 연구.” **대한환경공학회 2005 춘계학술발표회논문집**, 대한환경공학회, pp. 437~444
- 정세웅 (2004a). “성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링.” **대한환경공 회지**, 제26권, 제9호, pp. 970-978.
- 정세웅 (2004b). “저수지 장기간 탁수발생의 원인과 대안.” **수자원정보**, 한국수자원공사, 제31권, pp. 88-93.
- 정세웅 (2006). “중부권의 생명수 대청호의 수질오염 현황과 개선방안.” **수자원정보**, 한국수자원공사, 제 40호, pp. 6~15.

- 정세웅, 오정국 (2006). "대청호 상류 하천에서 강우시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모형 개발." **한국수자원학회지**, 제39권, 제1호, pp. 79~88
- 정세웅, 오정국, 고익환 (2005). "CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의." **한국수자원학회 논문집**, 제38권, 제8호, pp. 655-664.
- 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완 (2007). "대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL W2 모델의 적용." *Journal of Korea Society on Water Quality*, 제23권, 제1호, pp. 52~63.
- 천세억, 이재안, 이재정, 유영복, 방규철, 이열재 (2006). "대청호 유입유량 변동과 수질 및 조류증식의 관계." **한국물환경학회지**, 제22권, 제2호, pp. 342~348.
- 최광순, 김범철, 김형봉, 사승환 (2000). "소양호에서 유기탄소와 COD_{Mn}과의 상관관계." *Korea J. Limnol*, 제33권, 제4호, pp. 328~335.
- 최지용, 이기종, 이지현 (2005). **유역관리를 통한 다목적댐 저수지의 효율적인 탁수관리방안**, 한국수자원공사.
- 한국수자원공사 (2000). **댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발**.
- 한국수자원공사 (2004). **대청댐 일원 수문기초조사 보고서**, pp. 7.
- 한국수자원공사 (2006). **다목적댐 실무편람**.
- Alavian, V., Jirka, G.H., Denton, R.A., Johnson, M.C., and Stefan, H.G. (1992). "Density currents entering lakes and reservoirs." *J. Hydr. Eng.*, Vol.118, No.11, pp. 1464 ~ 1489.
- Bohan, J. P., and Grace, J. L., Jr. (1973). Selective withdrawal from man-made lakes; Hydraulic laboratory investigation, *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS*, Technical Report H-73-4.
- Chung, S.W., and Gu, R. (1998). "Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 124, No.7, pp. 704~711.
- Chung, S.W., Oh, J.K., Ko, I.H. (2006). "Calibration of CE-QUAL-W2 for a Monomictic Reservoir in Monsoon Climate Area." *Water Sci. & Tech.*, Vol. 54, No.12, pp.29-37.
- Cole, T.M., and Buchak, E.M. (2006). *CE-QUAL W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.5 user's manual*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (2001). *Water Quality Modeling of Allatoona and West Point Reservoirs using CE-QUAL-W2*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Cole, T.M., and Tillman, D.H. (1999) *Water Quality Modeling of Lake Monroe Using CE-QUAL-W2*, January 1999, Miscellaneous Paper EL-99-1 .
- Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, J. (2003). *Flow. The Essentials of Environmental Flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C. Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York, NY.
- Ford, D.E. and Jhonson, L.S. (1981). "Field observations of density currents in impoundments." *In Proceedings of Symposium on Surface Water Impoundments*, Stefan, H. G.(Eds), Am. Soc. of Civil Eng., NY.
- Gelda, R.K. and Effler, S.W. (2007). "Simulations of Operations and Water Quality Performance of Reservoir Multilevel Intake Configurations." *J. of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 1, pp. 78~86.
- Gordon, J.A., and Morris, J.W. (1977). "Reservoir metalimnion oxygen demands." *J. Environ. Eng.*, Vol. 133, No. E66, p. 1001.
- Kennedy, R.H., Thornton, K.W., and Gunkel, R.C. Jr. (1982). "The establishment of water quality gradients in reservoirs." *J. of Can. Wat. Res.*, Vol. 7, pp. 71~87 (1982).
- Kim, B.R., J.M. Higgins, and D.J. Bruggink (1984). "Reservoir Circulation Patterns and Water Quality." *J. Environ. Eng.* Vol. 109, No. 6, pp. 1284~1294.
- Martin, J.L., and McCutcheon, S.C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, CRC Press, Inc.
- Michael L.S., Steven C.W., and Laurin I.Y. (2004). *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.

- Romero, J. and Imberger, J. (2003), "Effect of a Flood Underflow on Reservoir Water Quality: Data and Three-Dimensional Modelling." *Arch Hydrobiol.*, Vol. 157, pp. 1-25.
- Thurman, E, M. (1985). *Organic Geochemistry of Natural Water*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- World Commission on Dams (2000). *Dams and Development*, Earthscan, London .
- Wunderlich, W.O. and Elder, R.A. (1973). *Mechanics of flow through man-made lakes, Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effents*, Ackermann, W.C., White, G.F., and Worthington, E.B(Eds.), Am. Geop. Union, DC.
- (논문번호:07-39/접수:2007.04.23/심사완료:2007.07.26)