

CE-QUAL-W2를 이용한 진양호 취수량 변화에 따른 수질영향 분석 Analysis of Water Quality Impact for Water Intake in Jinyang Reservoir Using CE-QUAL-W2

탁 용 훈* / 김 영 도** / 정 선 아*** / 정 세 웅****

Tak, Yong Hun / Kim, Young Do / Chong, Sun-a / Chung, Se Woong

Abstract

Hydraulic and water quality models with high reliability are necessary for the efficient management of water quality in the reservoir. The model capacity can be demonstrated by the application for the various hydrological conditions. CE-QUAL-W2 model is laterally averaged two-dimensional hydraulic and water quality model. The W2 model, which is suitable for the narrow reservoir like the Jinyang reservoir as compared with the depth and length of waterbody, has been frequently used by many researchers. Namgang watershed is expected to increase the water demand. In this study, the W2 model is validated under two different hydrological conditions; wet year (2011) and normal year (2009). Using hydrological and water quality condition for calibration, 2011, the effect of water intake increase was simulated. The simulation results showed that the increase of water intake led to increase the concentrations in total nitrogen, total phosphorus and Chlorophyll-a concentration. Especially the concentration increase was appeared during the dry season in each of up to 62.53% (Total nitrogen), 39.07% (Total phosphorus) and 232.19% (Chlorophyll-a). The changes of chlorophyll-a is similar to those of total phosphorus concentration.

Keywords : CE-QUAL-W2, Namgang dam, Jinyang reservoir, water intake, Chlorophyll-a

요 지

저수지의 효과적인 수질관리를 위해서는 신뢰도 높은 수리 및 수질모형이 필요하며, 이러한 모형의 성능은 다양한 수문사상에 대하여 적용함으로써 검증할 수 있다. CE-QUAL-W2 모형은 횡방향 평균 2차원 수리 및 수질 모형으로써 진양호와 같이 수체의 수심과 길이에 비해 폭이 좁은 저수지에 적합한 모형으로 앞선 연구자들에서 많이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 용수수요가 증가할 것으로 예상되는 남강댐 유역에 대하여 풍수년인 2011년과 평수년인 2009년의 수문사상에 대하여 검보정을 실시하였고, 보정년도인 2011년의 수문사상과 수질 조건을 이용하여 취수량 증가에 대한 영향을 모의하였다. 모의 결과 취수량을 변화시킴에 따라 T-N, T-P 및 Chlorophyll-a 농도는 증가하는 것으로 나타났고, 특히 갈수기에 각각 최대 62.53%, 39.07%, 232.19% 증가하는 것으로 나타났으며, Chlorophyll-a 농도의 변화는 T-P의 변화특성과 비슷한 추세를 보였다.

핵심용어 : CE-QUAL-W2, 남강댐, 진양호, 취수량, Chlorophyll-a

* 인제대학교 환경공학과 박사과정 (e-mail: takyh87@hotmail.com)

Ph.D Candidate, Department of Environmental Engineering, Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea

** 교신저자, 인제대학교 환경공학과(낙동강유역환경연구소) 부교수 (e-mail: ydkim@inje.ac.kr, Tel: 82-55-320-3252)

Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Environmental Engineering, Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea

*** 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 (e-mail: jsa@kwater.or.kr)

Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 306-711, Korea,

**** 충북대학교 환경공학과 교수 (e-mail: chung@chungbuk.ac.kr)

Prof., Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

1. 서론

다목적댐은 하천의 흐름을 막아 생활용수, 공업용수, 농업용수의 공급과 함께 홍수 조절 및 발전 등 다각적으로 활용하는 댐으로서 국내의 경우 한강의 소양강, 충주, 횡성댐, 낙동강의 안동, 남강, 합천, 임하, 밀양댐, 금강의 대청, 용담댐, 섬진강의 섬진강, 주암댐 등 총 14개의 댐이 있다. 이와 같은 다목적댐의 설치로 인한 인공 저수지는 유속이 느리고 수심이 깊어 일반적으로 하류부쪽으로의 이송을 계산하는 하천에서의 1차원 해석과 달리 기상 및 수문조건, 지형, 밀도차에 의한 성층화 등 저수지 유체운동 조건에 의해 매우 큰 영향을 받게 되므로 이에 대한 해석과 하상과 수체와의 내부반응 등에 대한 고려가 필요하다. 그리고 기후변화로 인해 증대되는 대형탁수 피해, 조류대발생 등을 정확히 예측하고 유역 오염원 저감대책을 적절히 평가할 수 있는 객관적인 도구의 확보가 절실한 상황이다(Ahn et al., 2010). 생공용수 및 농업용수의 공급과 홍수조절, 발전 등의 다양한 목적으로 인공저수지를 건설하여 용수를 공급하고 있지만 인구의 증가와 산업의 발달로 인한 용수수요의 증가는 계속되고 있으며, 이와 같은 물부족 현상에 따른 여러 가지 문제점을 해소하기 위해 많은 노력을 하고 있다.

남강댐은 진주시 및 사천시에 용수공급 및 전력생산 등을 목적으로 건설된 다목적댐으로 지리산을 중심으로 경호강과 덕천천이 진양호에서 합류하여 방류에 의해 남강하류의 수량 확보 및 홍수량 조절에 기여한다. Fig. 1은 한

국수자원공사에서 제공하는 남강댐 운영 자료를 분석한 것으로서 남강댐 유역에서는 2001년부터 2011년 사이에 지속적으로 취수량이 증가한 것으로 나타났다. 이는 인구 증가와 산업 발달의 영향으로 용수수요의 증가 현상이 나타난 것으로 판단되며, 향후에도 이와 같은 용수수요는 지속적으로 증가할 것으로 판단된다. 환경부 남강댐1 지점에서의 수질농도를 분석한 결과, T-P와 Chlorophyll-a는 감소하는 것으로 나타났고, T-N은 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 2(a)). 남강댐1 지점에서의 수질농도는 남강댐 제1지류인 경호강2 지점의 수질농도와 비슷한 경향을 보이며, 이는 유역의 오염부하량 저감 효과가 저수지의 수질 개선에 영향을 준 것으로 판단된다(Fig. 2(b)). 하지만 Fig. 3(a)에 나타낸 홍수기(5~9월) Chlorophyll-a 농도의 변화추세와 Fig. 3(b)에 나타낸 갈수기(1~4월, 10~12월) Chlorophyll-a 농도의 변화추세를 비교하여 보았을 때, 갈수기에서 홍수기보다 완만하게 감소하는 것으로 나타나며, 이는 지속적인 취수량 증가도 일정 부분 영향을 준 것

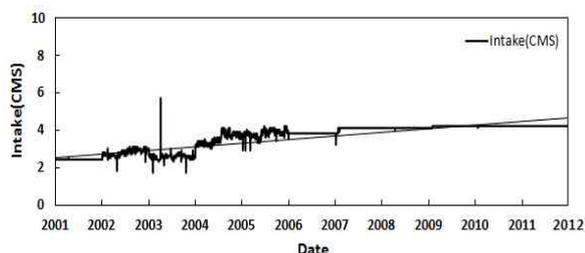
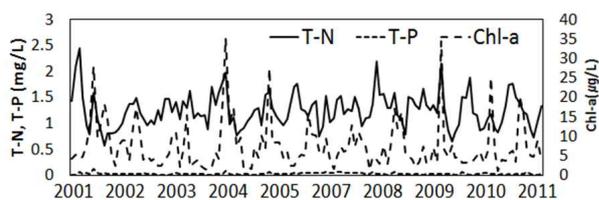
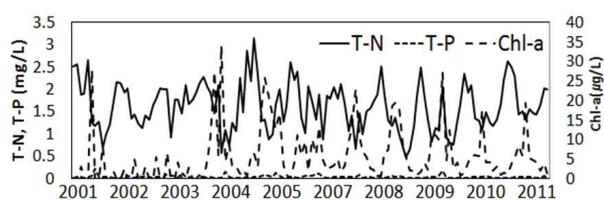


Fig. 1. Intake Increase in Namgang Nam (2001~2011)

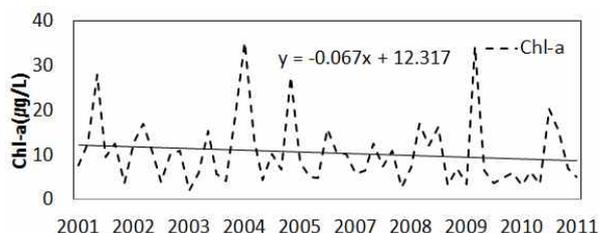


(a) Water Quality of Namgang Dam 1

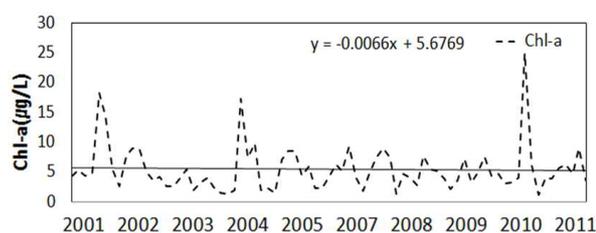


(b) Water Quality of Kyongho 2

Fig. 2. Water Quality of Namgang Watershed



(a) Chl-a of Namgang Dam 1 (Rainy Season)



(b) Chl-a of Namgang Dam 1 (Dry Season)

Fig. 3. Comparison of Chl-a between Rainy and Dry Seasons

으로 사료된다.

본 연구에서는 남강댐 저수지에 대하여 2009년과 2011년 수문사상을 바탕으로 2차원 횡방향 평균 수치모형인 CE-QUAL-W2 모형(이하 W2 모형)을 이용하여 수리 및 수질에 대한 검토정을 실시하고, 2011년 수문사상에 대하여 취수량이 변화할 때 남강댐 조류발생량의 변화를 알아보기 위하여 취수량 변화에 따른 저수지 수위 변화 및 T-N, T-P, Chlorophyll-a 등 수질 변화를 분석하였다.

Lee et al. (2003)의 연구에서는 W2 모형을 이용하여 유입수온자료에 대하여 수온자료의 형태에 따른 대청호의 수온성층현상에 대하여 연구하였고, Chung et al. (2004, 2005, 2007)의 연구에서는 임하댐과 대청댐 등 국내 주요 다목적댐에 대하여 W2 모형을 이용하여 SS 및 부영양화의 영향을 연구하여 W2 모형의 국내 적용성에 대하여 입증하였으며, Ahn et al. (2010)의 연구에서는 남강댐에 대하여 3차원 EFDC 모델의 적용성을 검토하였다.

본 논문에서는 강우시 비점오염원에서 기인한 T-P의 증가로 인한 Chlorophyll-a의 변화 및 인위적 취수 등 댐내 수량변화에 따른 조류의 변화를 W2 모형을 이용하여 알아보려 한다.

2. 연구방법

2.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 남강댐 상류유역으로 낙동강 합

류점으로부터 80.0 km 상류지점에 남강댐이 위치하고 있고, 남강댐 상류 유역의 유역면적은 2,285 km²이고, 유역 중앙부의 지리산을 경계로 우측의 남강 본류인 경호강(1,535 km²)과 좌측의 덕천천(450 km²)이 댐 지점에서 합류한다. 진양호 저수면적은 28.2 km²이며, 계획홍수위는 46.0 m이다(Fig. 4). 유역내 연평균 강우량은 우리나라 연평균강우량인 1,274 mm보다 많은 1,417 mm로 다우지역에 속한다. 총 저수용량은 309.2 백만m³이며, 고유량 유입시 제수문을 통해 사천만으로 방류하여 남강 하류와 낙동강 본류의 홍수위를 유지한다. 남강댐 유역은 면적이 2,293 km²로서 8개 시·군이 포함되며, 이중 하수도시설 확충사업이 시행되고 있는 지역은 제1권역 남원시, 함양군 2개 시·군과 제2권역 산청군, 사천시, 하동군, 의령군 4개 시·군으로 구분할 수 있다(K-water, 1992). 현재 남강댐의 유출입 시스템은 크게 경호강 본류와 주요 지천인 덕천천을 통해 유입이 이루어지고, 소수력 발전과, 여수로 및 제수문을 통한 방류, 진주시 및 남강광역 취수를 통한 방류가 이루어지고 있다.

2.2 CE-QUAL-W2 모형 개요

W2 모형은 미육군공병단에 의해 개발된 폭방향 평균화 2차원 수리 및 수질 모형으로써 하천 저수지 하구 또는 이들이 결합된 시스템에 적용가능하며 폭방향의 수질이 균일하다고 가정하므로 상대적으로 길이방향과 수심방향으로 수질변화가 크고 폭이 좁은 긴 수체에 적합하다. 점·

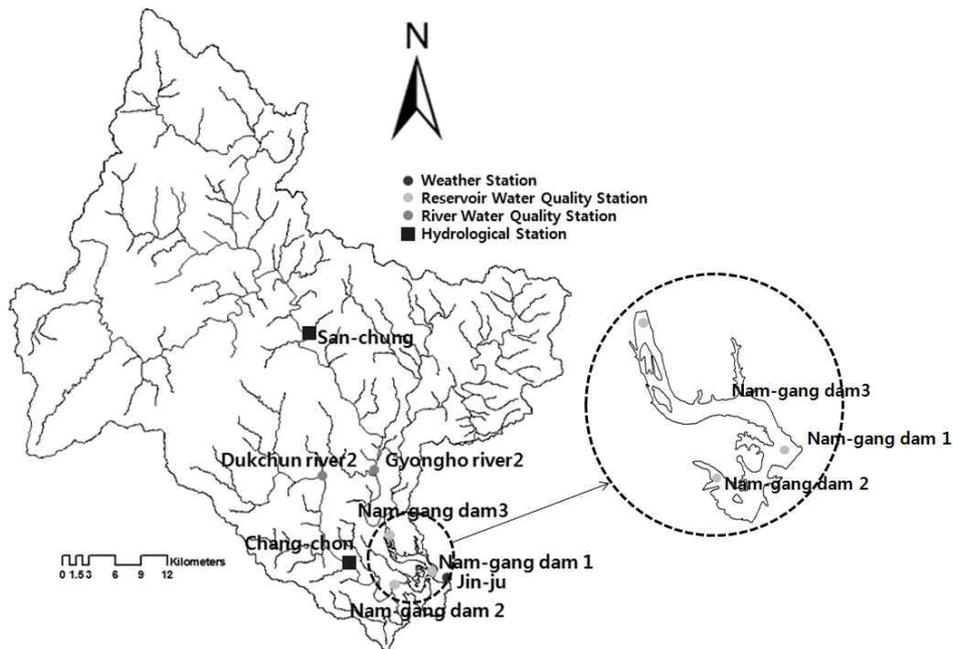


Fig. 4. Observation Point in Namgang Dam Watershed

비점원 등에 의한 유입을 고려 할 수 있고, 선택취수를 고려할 수 있으며, 장기간 동안의 시변화모의가 가능하여 수지형 인공호의 수리 및 수질현상 예측에 널리 이용되고 있다(Chung et al., 2004; Lee et al., 2003).

W2 모형은 횡방향으로 완전혼합을 가정하기 때문에 가지형의 우리나라 저수지 수체에 매우 적합하고, 성층화 현상 및 밀도류 유동해석이 용이하다.(Chung et al., 2005, Cole and Wells, 2003). W2 모형은 연속방정식(Eq. (1))과 x-방향(Eq. (2)) 및 z-방향 운동량 방정식(Eq. (3)), 자유수면 방정식(Eq. (4)), 밀도 상태방정식(Eq. (5)), 물질수지방정식(Eq. (6))의 6개 지배방정식으로 구성되며, 6개의 미지수 즉, x-방향유속(u), z-방향 유속(w), 수압(P), 밀도(ρ), 저수지 수위(η), 수질농도(C)를 유한차분 수치해석기법을 사용하여 푼다. x-방향과 z-방향 유속을 y-방향(횡방향)에 대하여 평균화하기 때문에 운동량방정식은 확산항을 갖게 되며, 확산항의 크기는 횡방향 유속분포의 불균등성의 정도에 좌우된다. 흐름의 난류성분 때문에 발생하는 응력항들은 난류폐합식을 이용하여 해석하는데, W2 모형에서는 Prantl의 혼합길이 이론에 의한 와확산계수(eddy viscosity)를 사용한다(Chung et al., 2005).

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = qB \quad (1)$$

$$\frac{\partial Bu}{\partial t} = -\frac{\partial(Buu)}{\partial x} - \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} + Bg \frac{\rho_\xi}{\rho} \frac{\partial \xi}{\partial x} - B \frac{g}{\rho} \int_\xi^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} (BA_x \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BA_z \frac{\partial U}{\partial z}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial B\xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\xi^H uBdz - \int_\xi^H qBdz \quad (4)$$

$$\rho = f(C_{TDS}, T) \quad (5)$$

$$\frac{\partial BC}{\partial t} = -\frac{\partial(BuC)}{\partial x} - \frac{\partial(BwC)}{\partial z} + Bk_s + \frac{\partial}{\partial x} (BE_x \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (BE_z \frac{\partial U}{\partial z}) \quad (6)$$

여기서, B=저수지 폭 (m), u=x방향 유속 (m/s), w=z방향 유속 (m/s), q=측방 유입량(m^3/sec), P=압력(N/m^2), ρ =밀도(kg/m^3), τ =전단응력(m^2/sec^2), A=와점성계수(m^2/sec), H=저수지 수심(m), ξ =자유수면 위치(m), C=물질의 농도(mg/L), C_{TDS} =총용존부유물질농도(mg/L), T=수온($^{\circ}C$), E=와확산계수(m^2/sec)이다(Chung et al., 2005).

W2 모형에서 조류에 대한 반응기작은 Fig. 5와 같으며

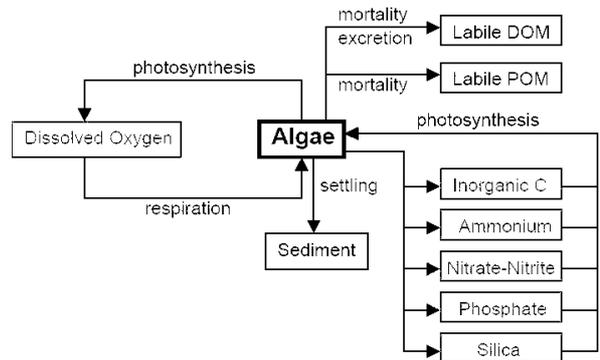


Fig. 5. Reaction Mechanism of Algae and Water Quality (Cole and Wells, 2003)

조류의 성장과 소멸은 Eq. (7)에 따른다.

$$S_a = K_{ag}\Phi_a - K_{ar}\Phi_a - K_{ac}\Phi_a - K_{am}\Phi_a - \omega_a \frac{\partial \Phi_a}{\partial z} \quad (7)$$

여기서, S_a =시간에 따른 조류 농도의 변화, K_{ag} =조류의 성장률(1/sec), K_{ar} =조류의 호흡율, K_{ac} =조류의 배설률(1/sec), K_{am} =조류의 사멸률(1/sec), ω_a =조류의 침강속도(m/sec), z =조류 세포의 크기(m)이다. 일반적으로 W2 모형에서의 조류모의는 조류의 성장률에 관련한 매개변수가 가장 민감하여, 본 연구에서 조류모의를 위해 조류성장률을 조절하였다.

2.3 입력 자료의 구성

W2 모형의 주요 입력 자료는 저수지 지형 및 단면자료와 상류와 하류의 유량 및 수질 경계조건, 기상자료, 수온자료, 초기조건 등이 있다. 본 연구에서는 유입수 수질경계조건 중 SS (Suspended Solid)에 대해서는 2011년 산청지점과 장춘 지점의 부유물질 농도와 유량의 관계식을 산출하여 사용하였고, SS 입력자료 구성시 SS 그룹을 크기별로 3개의 그룹으로 나누어 입력하였다. 유기물그룹을 구하기 위해 제한된 저수지 수질측정망 자료를 이용하여 Eq. (8)에서 Eq. (12)에 나타난 바와 같이 마찬가지로 측정된 화학적 산소 요구량(COD_{Mn})과 총유기탄소(TOC)비를 이용하였다(Choi et al., 2000). 환경부 월간 수질 측정망 자료인 COD_{Mn} 으로부터 TOC를 구한 후 Yu et al. (2005)의 실험결과를 근거로 Eq. (8)에서 Eq. (11)에 나타난 바와 같이 이를 다시 L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM으로 구분하였다(Chung et al., 2007). 그리고 나머지 경계조건 수질항목인 NO_3-N , NH_4-N , PO_4-P , Algae (Chlorophyll-a)와 DO 등의 항목은 환경부 월간 측정망 자료를 사용하였다.

모형에 입력된 초기조건은 환경부에서 제공하는 각각 보정과 검증년도의 1월 1일 수질 농도를 사용하였다.

$$TOM = (CODMn \div 1.09) \quad (8)$$

$$L-DOM = \{(TOM - \text{algae}) \times 0.75\} \times 0.30 \quad (9)$$

$$R-DOM = \{(TOM - \text{algae}) \times 0.75\} \times 0.70 \quad (10)$$

$$L-POM = \{(TOM - \text{algae}) \times 0.25\} \times 0.30 \quad (11)$$

$$R-POM = \{(TOM - \text{algae}) \times 0.25\} \times 0.70 \quad (12)$$

진양호의 유한차분 격자 구성은 Fig. 6과 같이 경호강 본류와 주요 지류인 덕천천을 고려하여 2개의 Branch로 구분하고, 흐름방향으로는 댐 축으로부터 약 24 km 상류 지점까지 32개의 요소(segment), 수심방향으로는 1 m 간격으로 22개의 층(layer)으로 구성하였다. 지형자료의 신뢰도를 평가하기 위해 모의된 저수용량과 수위-저수용량곡선식으로부터 산정된 저수용량을 비교한 결과 AME는 5.516 백만 m^3 , RMSE는 9.047 백만 m^3 로 나왔으며, R^2 는 0.9986으로 나타나 신뢰도가 높은 것으로 판단된다(Fig. 7).

W2 모형의 보정과 검증 과정에서 유량 경계조건은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 한국수자원공사 남강댐 운영 자료를 이용하였다. 남강댐의 총 일유입량과 유역면적

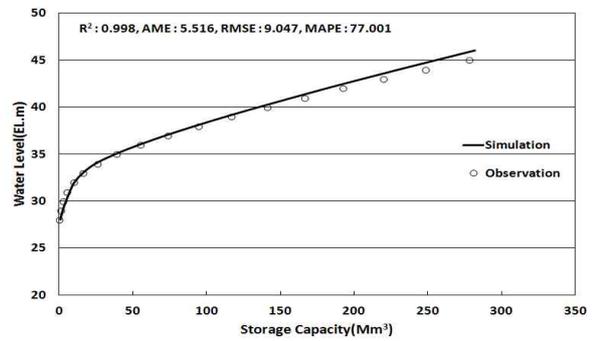


Fig. 7. Comparison of Storage Capacity in Jinyang Reservoir

비를 이용하여 경호강 및 덕천천의 일유입량을 산정하였다. 방류량은 소수력 발전량, 여수로 및 제수문 방류량, 진주 및 남강광역 취수량을 사용하였다. Fig. 9는 모의에 사용한 수온 회귀식을 나타낸 것이며, 수온 경계조건은 산청지점의 2011년 실측 유량과 수온 및 진주기상대의 대기기온과 이슬점온도를 수집하여 이상치를 제거한 후 수온 회귀식을 산정하여 사용하였다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 기상 경계조건은 대기기온과 이슬점온도, 운도는 기상청에서 제공하는 기상월보의 진주기상대의 자료를 사용하였고, 풍향과 풍속은 진주 AWS의 자료를 사용하였다.

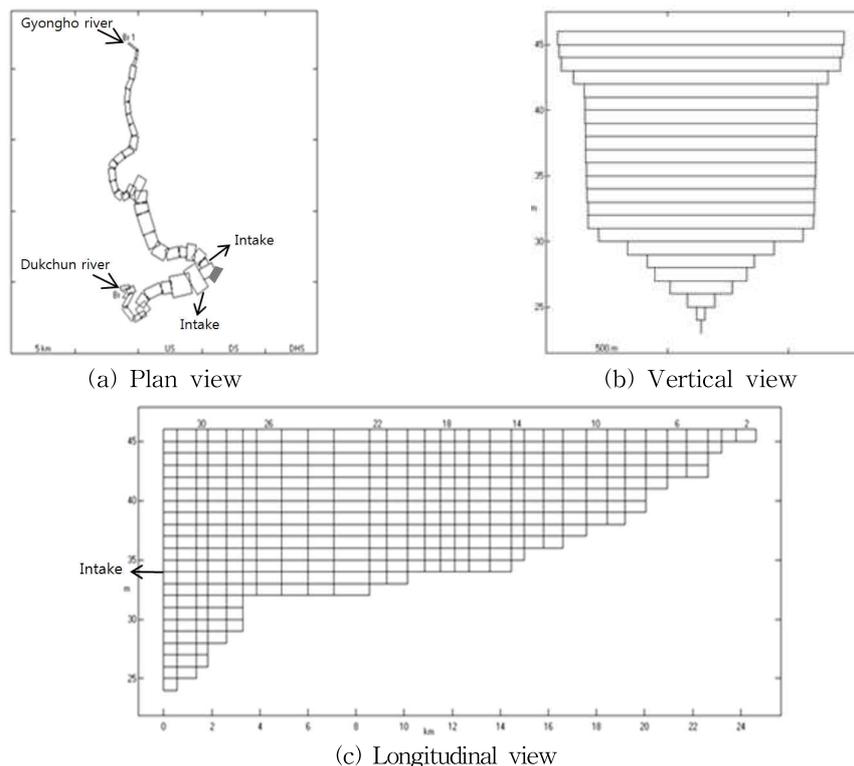
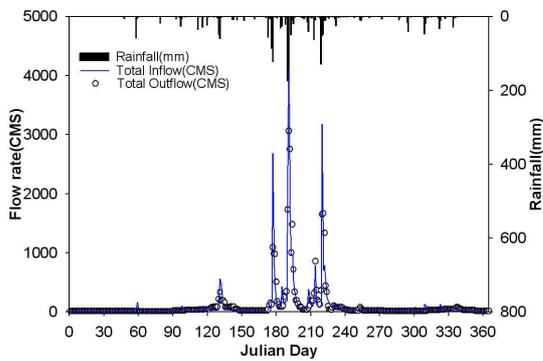


Fig. 6. Horizontal and Vertical Grid for Jinyang Reservoir

3. 모의결과 및 취수영향 분석

3.1 모형의 검보정

구성한 입력자료를 바탕으로 W2 모형을 사용하여 남강댐유역의 수리 및 수질항목에 대해 보정(2011년) 및 검증(2009년)을 실시하였다. 모형의 예측성능을 평가하기 위하여 Table 1에 나타난 바와 같이 실측값과 모의값의 결정계수(Coefficient of determination, R^2), 절대평균오차(Absolute Mean Error, AME)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였다.



(a) 2011 (Calibration)

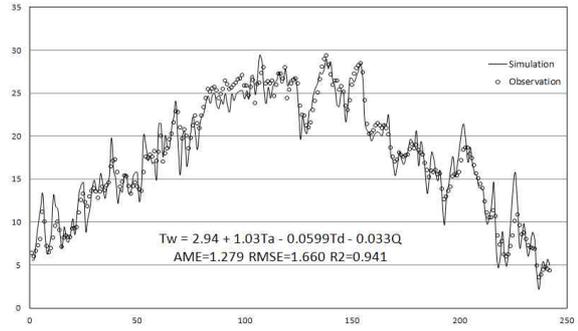
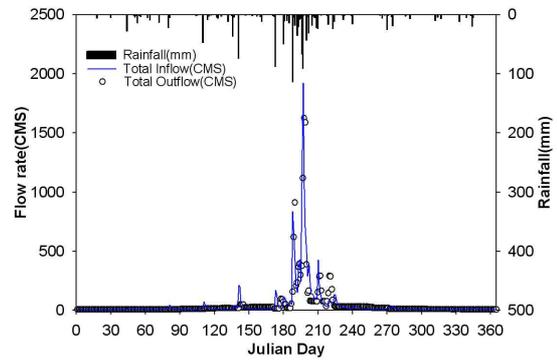
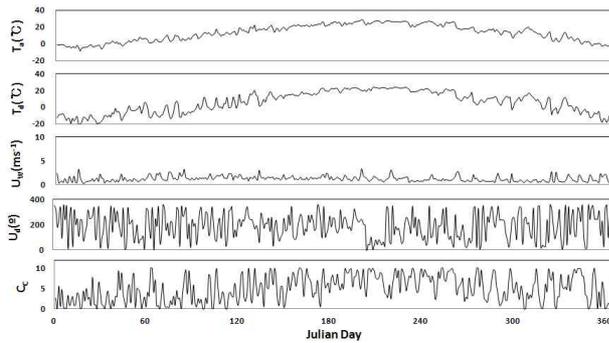


Fig. 9. Regression Curve of Inflow Temperature for Jinyang Reservoir

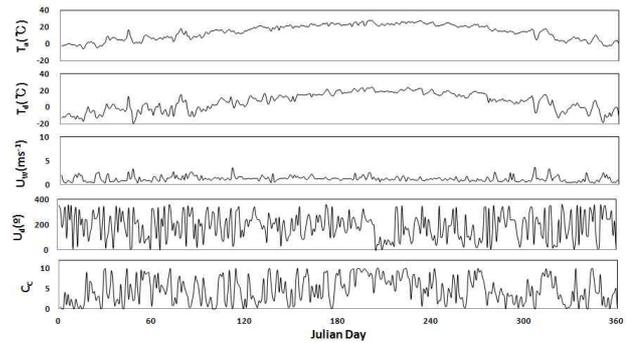


(b) 2009 (Verification)

Fig. 8. Hydrological Data in Namgang Dam



(a) Calibration (2011)



(b) Verification (2009)

Fig. 10. Meteorological Data in Namgang Dam (Jin-ju)

Table 1. Statistical Indices Used to Evaluate the Model Accuracy

Statistical Index	Equation	Desired value
Coefficient of Determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_o - y_f)^2}{\sum_{i=1}^N (y_o - y_{ave})^2}$	1
Absolute Mean Error	$AME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_f - y_o $	0
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_f - y_o]^2}$	0

* y_o =observations, y_f =simulations, y_{ave} =mean of observations, N =Total number of observations

남강댐의 물수지 비교 결과 모의값과 실측값의 비교 결과는 Fig. 11과 같으며 모형은 저수지 물수지 변화를 적절히 나타낸 것으로 판단되었다. 저수지에서는 수온의 분포에 따라 밀도류가 형성되어 유입수가 유입되는 위치가 달라지고 유입수와 함께 들어온 수질영향인자들의 거동 위치도 다르게 분포한다. 남강댐1 지점에서의 수온 및 SS 모의결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었으며, 보정 및 검증은 댐 관리단에서 제공받은 저수지 실측 수온 및 SS 농도와 비교하였다. 수온 수직분포 모의 결과 보정년도인 2011년의 수온 예측 오차는 AME 0.498~1.943°C, RMSE는 0.615~2.240°C, 검증년도인 2009년의 수온 예측 오차

는 AME 0.042~2.678°C, RMSE 0.052~2.680°C로 나타났다. 모의결과 온도 오차는 수심이 깊지 않고 체수문으로 수량을 배제하는 남강댐의 특성상 성층의 형태가 뚜렷하게 나타나지 않은 것으로 판단된다. SS 모의결과 검증년도에서 7월 17일 다소 과대평가하는 것으로 나타났다. 이것은 실측자료의 부족으로 SS 그룹간의 비율을 하나의 비율로 통일하였고, 수질경계조건으로 사용한 산청과 창촌의 위치가 모의범위로 설정한 진양호의 경호강과 덕천천의 유입부보다 먼 곳에 위치하고 있어 체류시간의 차이에 의해 실측치에서 측정되지 않는 무거운 입자들이 모의 결과에 나타난 것으로 판단된다.

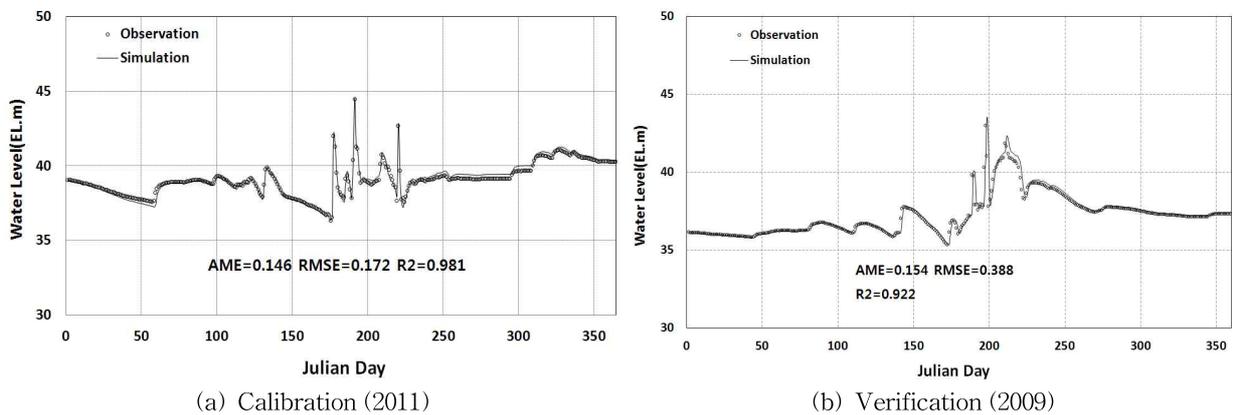


Fig. 11. Calibration and Verification of Water balance in Jinyang Reservoir

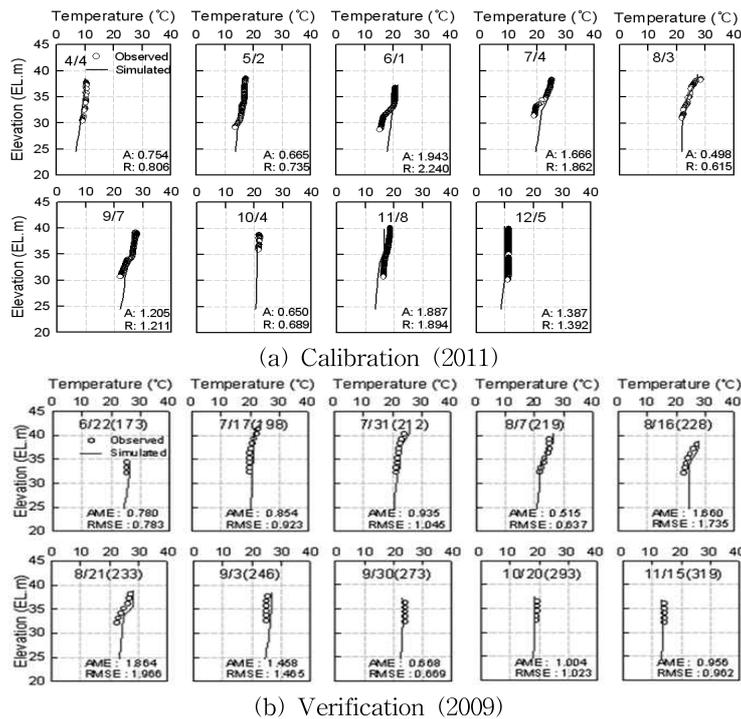


Fig. 12. Comparison of Vertical Temperature Distribution in Jinyang Reservoir

수리 및 수질의 보정 및 검증에 사용된 매개변수는 Table 2와 같다.

보정년도와 검증년도인 2011년과 2009년 남강댐 1지점에서 실측한 상층의 T-N, T-P 및 Chlorophyll-a 농도에

대한 모의값과 실측값의 시계열 변화를 Fig. 14에 나타내었다. T-N과 T-P의 경우 증감패턴을 잘 반영한 것으로 나타났고, T-N의 경우 검증년도인 2009년 다소 과소평가하는 것으로 나타났지만 홍수의 유입에 따른 증감 추세를 비

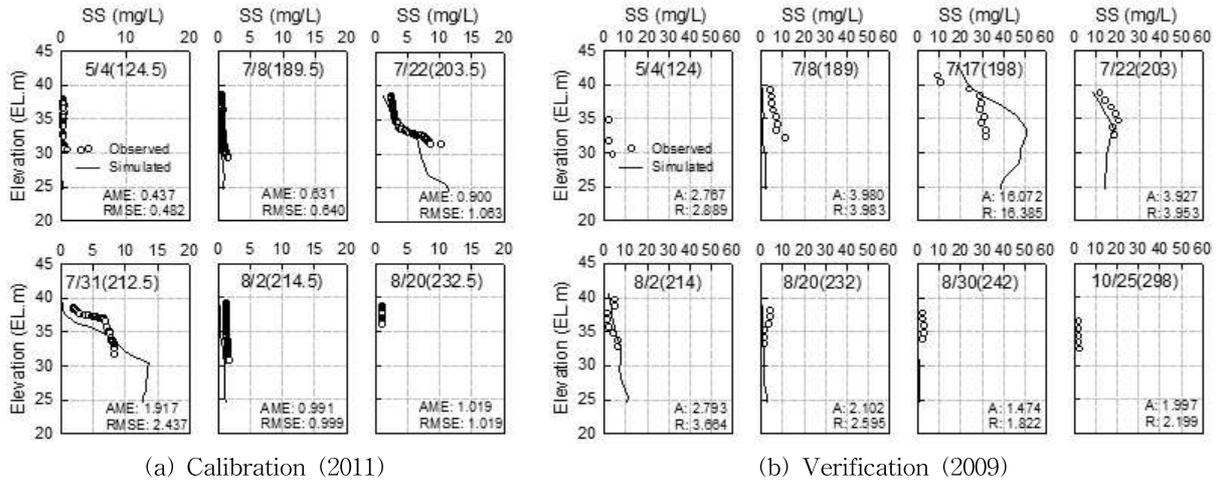


Fig. 13. Comparison of Vertical SS Distribution in Jinyang Reservoir

Table 2. Hydraulic and Water Quality Parameters which is Used to Model

Parameters	Variable	Unit	Default	Calibrated
Horizontal eddy viscosity	AX	m ² s ⁻¹	1.0	1.0
Horizontal eddy diffusivity	DX	m ² s ⁻¹	1.0	1.0
Chezy bottom friction factor	CHEZY	m ^{1/2} s ⁻¹	70	70
Wind-sheltering	WSC	-	0.85	0.65
Fraction solar radiation absorbed at water surface	BETA	-	0.45	0.30
Light extinction for pure water	EXH20	m ⁻¹	0.45	0.35
Coefficient of bottom heat exchange	CBHE	W m ² s ⁻¹	0.3	0.80
Algae				
Growth rate	AG	day ⁻¹	2.0	5.0
Mortality rate	AM	day ⁻¹	0.1	0.1
Excretion rate	AE	day ⁻¹	0.04	0.04
Respiration rate	AR	day ⁻¹	0.04	0.04
Settling rate	AS	m day ⁻¹	0.1	0.001
Phosphorous half-saturation for algal growth	AHSP	gm ⁻³	0.003	0.002
Nitrogen half-saturation for algal growth	AHSN	gm ⁻³	0.014	0.014
Light saturation intensity	ASAT	W m ⁻²	75	75
Fraction of algae to POM	APOM	-	0.8	0.8
Phosphorous to biomass ratio	BIOP	-	0.005	0.005
Nitrogen to biomass ratio	BION	-	0.08	0.15
Carbon to biomass ratio	BIOC	-	0.45	0.45
Algae to chlorophyll a ratio	ACHLA	-	145.0	145.0
Phosphorous				
Sediment release rate (fraction of SOD)	PO4R	day ⁻¹	0.001	0
Ammonium				
Ammonium decay rate	NH4DR	day ⁻¹	0.12	0.1
Sediment release rate (fraction of SOD)	NH4R	-	0.001	0
Nitrate				
Nitrate decay rate	NO3DK	day ⁻¹	0.03	0.3

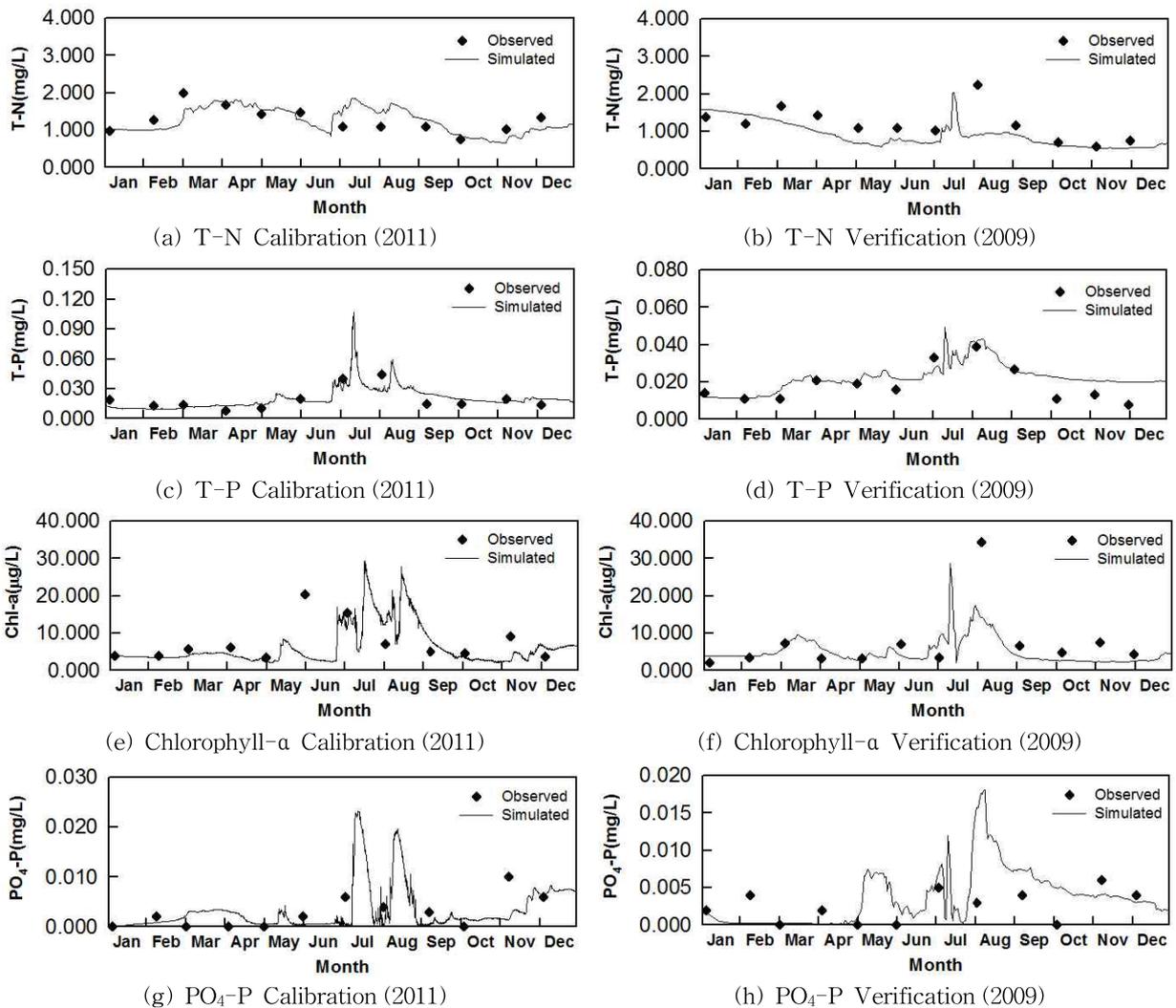


Fig. 14. Comparison of T-N, T-P, Chlorophyll-a, PO₄-P in Jinyang Reservoir

교적 잘 반영하였고, Chlorophyll-a 의 경우 보정년도인 6월 모의값과, 검증년도에는 8월의 모의값이 실측값에 비해 다소 낮게 모의되었으나, 전반적으로 성장패턴을 나타내었다. 이러한 오류는 입력자료 구성시 실측자료의 부족으로 우점종별로 구분하여 입력하지 못하여 계절별 우점종을 적절히 고려하지 못한 것과 횡방향 농도 평균화 특성상 실제 측정지점에서의 국지적 조류 직접현상을 제대로 반영하지 못한 것으로 판단된다. 하지만 여름철 Chlorophyll-a 농도는 2011년 7, 8월과 2009년 8월 조류주의보 기준농도인 15 mg/L 이상으로 나타나 조류의 생물량 증가에 따른 영향이 심한 것으로 나타났다. PO₄-P의 경우 다소 낮은 농도가 나타난 부분이 있지만 Chlorophyll-a의 상승구간과 비슷한 형태로 나타났으며, 수질항목 모두 상승구간의 시기가 비슷한 것으로 나타났다.

3.2 취수량 증가에 따른 수질변화 예측

본 연구에서는 남강댐에서 취수량이 증가 할 경우를 예상시나리오로 적용하여 취수량 증가에 따른 T-N, T-P 및 Chlorophyll-a 모의를 실시하였다. 남강댐은 남강 하류로 소수력 발전량, 여수로 방류를 실시하고, 사천만으로 연결되는 제수문 방류를 통해 댐 수위 및 낙동강 본류 홍수위를 유지하고 있으며, 진주 및 남강광역 취수량 등의 형태로 방류가 이루어지고 있다. 취수량 변화에 따른 수질변화를 알아보기 위해 보정년도인 2011년 수문사상과 동일한 유입량 조건에 대하여 취수량 변화 시나리오를 적용하였으며, 2011년 연간 남강광역 취수량은 2.4 m³/s, 진주 취수량은 1.6 m³/s이다. 취수량 증가량은 남강광역 취수량과 진주 취수량 증가량을 각각 25%, 50%, 100%의 비율로 설정하였으며 Fig. 15에 나타내었다.

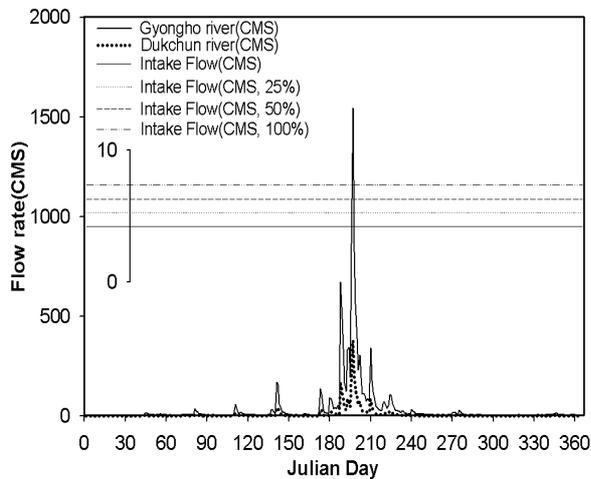
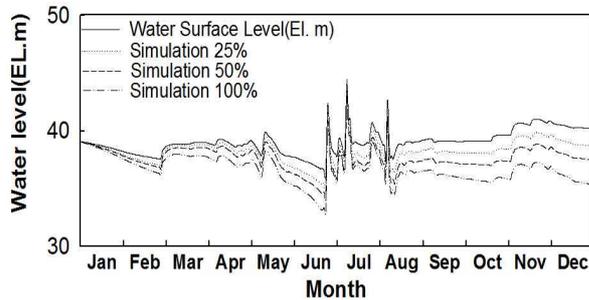
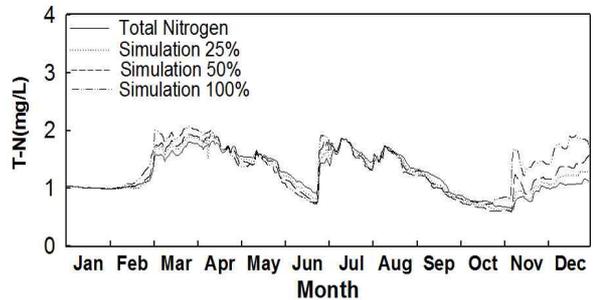


Fig. 15. Inflow Flow Rate and Increase Intake Flow

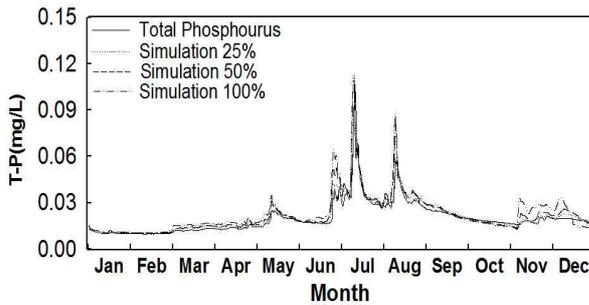
취수량을 증가시켰을 때의 남강댐1지점의 수위와 상층 T-N, T-P 및 Chlorophyll-a 월평균 농도를 Fig. 16과 Table 3에서 Table 6에 각각 나타내었다. 수위 모의 결과 취수량을 증가시키에 따라 감소하는 것으로 나타났고, T-N 모의 결과 취수량을 증가시키에 따라 T-N 농도는 상승한 것으로 나타났으나 5~6월, 8~10월 감소의 형태로 나타났다. 농도가 감소의 형태로 나타난 구간은 유입 유량이 줄어들어 댐 수위가 낮아지면서 T-N 농도 또한 감소하는 구간으로 유입 부하량이 적어 농도가 감소한 것으로 판단된다. T-P모의 결과 10월을 제외한 전 구간에서 T-P 농도는 상승한 것으로 나타났으나 1월과 9월에는 총량은 늘어났지만 농도는 취수량과 반비례관계를 나타내었다. 그 이유는 두 구간 모두 T-P 농도가 감소하는 구간으로 T-N과 같이 유입 유량이 적고, 그에 따른 부하량도 적



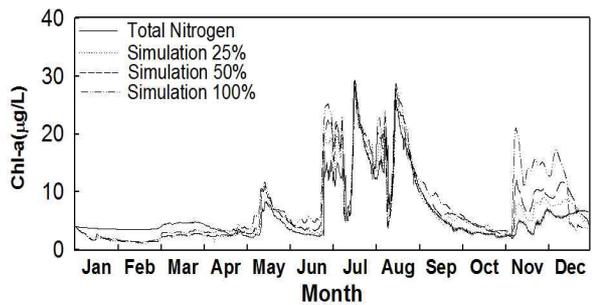
(a) Water level



(b) T-N



(c) T-P



(d) Chl-a

Fig. 16. Daily Change of Water Level and Water Quality by Intake Increase

Table 3. Monthly Water Level Change Rate by Intake Increase

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Obs.	38.68	37.86	38.89	38.92	38.64	37.64	39.40	38.93	39.15	39.28	40.58	40.43
25%	38.55 (-0.36%)	37.42 (-1.15%)	38.70 (-0.49%)	38.56 (-0.91%)	38.11 (-1.37%)	36.61 (-2.75%)	38.54 (-2.19%)	38.00 (-2.39%)	38.24 (-2.34%)	38.18 (-2.80%)	39.41 (-2.87%)	39.05 (-3.40%)
50%	38.50 (-0.47%)	37.27 (-1.55%)	38.47 (-1.08%)	38.23 (-1.77%)	37.66 (-2.53%)	35.97 (-4.44%)	37.91 (-3.80%)	37.20 (-4.44%)	37.35 (-4.61%)	37.18 (-5.34%)	38.39 (-5.39%)	37.91 (-6.22%)
100%	38.37 (-0.80%)	36.86 (-2.63%)	37.85 (-2.67%)	37.41 (-3.88%)	36.79 (-4.79%)	34.94 (-7.17%)	37.53 (-4.75%)	36.42 (-6.44%)	36.28 (-7.35%)	35.78 (-8.91%)	36.85 (-9.19%)	35.99 (-10.99%)

Table 4. Monthly T-N Change Rate by Intake Increase

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Obs.	1.013	1.046	1.609	1.712	1.513	1.145	1.643	1.537	1.146	0.776	0.824	1.068
25%	1.012 (-0.11%)	1.029 (-1.66%)	1.725 (7.20%)	1.754 (2.42%)	1.478 (-2.35%)	1.096 (-5.12%)	1.652 (0.61%)	1.497 (-2.68%)	1.070 (-6.66%)	0.712 (-8.26%)	0.869 (4.93%)	1.199 (12.20%)
50%	1.012 (-0.10%)	1.062 (1.52%)	1.769 (9.95%)	1.781 (3.91%)	1.443 (-4.69%)	1.073 (-7.58%)	1.647 (0.38%)	1.464 (-4.91%)	1.021 (-10.93%)	0.669 (-13.75%)	0.974 (17.53%)	1.353 (26.43%)
100%	1.014 (0.14%)	1.130 (7.78%)	1.930 (20.17%)	1.798 (4.82%)	1.397 (-7.77%)	1.066 (-8.29%)	1.651 (0.67%)	1.502 (-2.40%)	1.065 (-7.00%)	0.780 (1.06%)	1.323 (61.33%)	1.738 (62.53%)

Table 5. Monthly T-P Change Rate by Intake Increase

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Obs.	0.010	0.009	0.012	0.013	0.019	0.019	0.041	0.033	0.023	0.018	0.017	0.019
25%	0.011 (7.67%)	0.010 (3.02%)	0.013 (11.38%)	0.014 (9.42%)	0.020 (9.18%)	0.021 (7.19%)	0.043 (7.11%)	0.036 (8.96%)	0.025 (7.36%)	0.018 (-1.06%)	0.018 (2.01%)	0.020 (6.95%)
50%	0.011 (7.36%)	0.010 (4.21%)	0.014 (15.17%)	0.015 (13.91%)	0.021 (11.32%)	0.023 (17.28%)	0.044 (8.55%)	0.038 (14.14%)	0.024 (6.15%)	0.017 (-5.56%)	0.019 (10.15%)	0.021 (11.97%)
100%	0.011 (6.13%)	0.010 (6.42%)	0.015 (27.40%)	0.016 (25.08%)	0.022 (17.61%)	0.026 (31.68%)	0.044 (7.70%)	0.039 (18.48%)	0.024 (5.82%)	0.016 (-8.79%)	0.024 (39.07%)	0.021 (11.77%)

Table 6. Monthly Chl-a Change Rate by Intake Increase

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Obs.	3.721	3.536	4.546	3.355	4.686	4.589	15.549	16.412	6.283	2.833	3.768	6.254
25%	2.346 (-36.94%)	1.395 (-60.54%)	2.390 (-47.42%)	2.447 (-27.04%)	5.814 (24.08%)	6.156 (34.15%)	17.116 (10.08%)	17.006 (3.62%)	6.379 (1.53%)	4.221 (48.99%)	5.975 (58.56%)	7.310 (16.88%)
50%	2.320 (-37.64%)	1.447 (-59.05%)	2.531 (-44.32%)	2.655 (-20.85%)	6.076 (29.66%)	7.014 (52.83%)	17.495 (12.51%)	17.170 (4.61%)	7.216 (14.85%)	4.120 (45.43%)	7.550 (100.34%)	8.681 (38.79%)
100%	2.207 (-40.69%)	1.489 (-57.88%)	3.014 (-33.70%)	3.346 (-0.24%)	6.924 (47.77%)	8.688 (89.32%)	17.228 (10.80%)	17.608 (7.28%)	8.774 (39.64%)	3.984 (40.60%)	12.519 (232.19%)	9.286 (48.47%)

어 취수에 의한 배제의 효과가 크게 작용한 것으로 판단되며, 10월 감소세는 9월의 감소세가 이어진 것으로 판단된다. Chlorophyll-a 모의결과 1~4월에는 Observation 농도보다 낮게 모의되었는데 이것은 갈수기 강우량이 적고 유입 유량이 적어 취수량의 변화가 영향을 크게 주는 것으로 판단되며, 유입수 수질 경계조건으로 월간측정자료를 사용함으로써 유출에 의한 유입특성을 정확히 반영하지 못한 것으로 판단된다. 1월을 제외한 나머지 2~12월 모의결과 취수량을 증가시킴에 따라 농도는 증가하는 것으로 나타났고, 7월과 8월 증가량이 작은 것은 체적이 작은 남강댐의 특성상 강우시 많은 유량이 유입됨에 따라 여수로 및 체수문으로의 방류가 많아져 체류시간이 짧아지고 조류의 번식이 크게 일어나지 않은 것으로 판단된다.

4. 결 론

남강댐은 지리산을 중심으로 우측의 본류인 경호강과 좌측의 덕천천이 댐 지점에서 합류하며, 8개의 시·군이 유역에 포함되어 있으며, 댐 체적이 상대적으로 작아 고유량 유입시 체수문 방류를 통하여 유량을 배제하여 짧은 체류시간이 특징이다. 용수의 수요가 증가를 가정하여 취수량 변화에 대한 남강댐의 수리·수질 변화를 비교하였다.

- 1) 취수량을 증가함에 따라 T-N, T-P 및 Chlorophyll-a 농도를 비교한 결과 전체적으로 상승하는 것으로 나타났으며, 각각 최대 62.53%, 39.07%, 232.19% 높아지는 것으로 나타났고, 풍수시보다 갈수시 농도의 변화가 더 큰 것으로 나타났다.
- 2) Chlorophyll-a의 최대값이 나타났던 7월과 8월의 상

승폭은 크지 않았으며 이것은 큰 강우에 의해 많은 양의 유량이 유입되고, 체류문을 통해 많은 양의 유량을 방류하는 시기이므로 체류시간이 짧은 남강댐의 특성상 수질변화가 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

3) 취수량에 따른 수질항목에 대한 Chlorophyll-a 농도의 변화 상관성은 T-N 보다 T-P 농도의 변화와 비슷한 추세를 보였으며, 취수량이 증가함에 따라 Chlorophyll-a 농도는 증가하는 것으로 나타났다.

남강댐에서 취수량을 증가시킴에 따른 수질항목의 변화를 살펴본 결과 큰 강우에 의해 많은 양의 유량이 유입되는 시기에는 그 변화가 크지 않았지만 갈수기 취수량을 변화시킬 경우 수질변화에 영향은 크게 작용할 것으로 판단되며, 8개의 시·군이 유역에 포함되어 향후 용수수요량이 증가할 것으로 예상되는 남강댐 유역의 조류저감 대책과 수량 확보대책이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것이며(No. 2010-0024119), 본 연구에서 사용한 W2 모형은 한국수자원공사 K-water 연구원의 기후변화 대응 기후시나리오 및 모델구축 용역의 일환으로 구축된 것입니다.

References

Ahn, K.H., Lee, K.T., Ban, Y.J., and Son, B.Y. (2010). "Evaluation for Hydraulic Application of EFDC model in Namsang Dam Reservoir." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 724-728.

Choi, K.S., Kim, B.C., Kim, H.B., and Sa, S.H. (2000). "Relationships Between Organic Carbon and CODMn in a Deep Reservoir, Lake Soyang, Korea." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 33, No. 4, pp. 328-335.

Chung, S.W., Oh, J.K., and Park, J.H. (2005). "Simulations of Temporal and Spatial Distributions of Rain-

fall-Induced Turbidity Flow in a Reservoir Using CE-QUAL-W2." *Proceedings of Korean Society of Environ. Engineers*, pp. 448-455.

Chung, S.W., Park, K.Y., Han, K.Y., and Jun, H.J. (2004). "Applications of CE-QUAL-W2 Model for the Analysis of Turbidity Flow Characteristics in Imha Lake." *Proceedings of Korean Society of Environ. Engineers*, pp. 1220-1225.

Chung, S.W., Park, J.H., Kim, Y., and Yoon, S.W. (2007). "Application of CE-QUAL-W2 to Daecheong Reservoir for Eutrophication Simulation." *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 23, No. 1, pp. 52-63.

Cole, T.M., and Wells, S.A. (2003) CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.1 user's manual, Instruction Report EL-03-1, U.S. Army Engineers, Washington, DC.

K-water. (1992). "Namsang Multipurpose Dam Management Annual Report" Technical Report.

Lee, S.W., Seo, D.I., and Chung, S.W. (2003). "Modeling of Thermal Stratification in Daecheong Reservoir using 2-D Hydrodynamic Water Quality Model, CE-QUAL-W2." *Proceedings of Korean Society of Environ. Engineers*, pp. 676-678.

Park, Y.H., Huh, J.S., Kim, N.I., Kim, G.H., and Ahn, S.H. (2006). "Prediction of River and Reservoir Water Quality by the Integrated Sewage System in the Upper Basin of Namsang Dam." *Proceedings of Korean Society Of Water Environment*, pp. 1222-1230.

Yu, S.J., Kim, C.S., Ha, S.R., Hwang, J.Y., and Chae, M.H. (2005). "Analysis of Natural Organic Matter (NOM) Characteristics in the Geum River." *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 21, No. 2, pp. 125-131.

paper number : 13-029

Received : 5 March 2013

Revised : 17 March 2015 / 11 September 2015

Accepted : 11 September 2015