creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

유역-호소 연계모형을 이용한 간월호의 배수갑문 운영에 따른 호내 수질 영향 분석

Impact Assessment of Drainage Gate Operations on Water Quality in Ganwol Estuary Reservoir Using Watershed-Estuary Linkage Model

2022년 8월

서울대학교 대학원

생태·조경지역시스템공학부

지역시스템공학전공

김 시 내

유역-호소 연계모형을 이용한 간월호의 배수갑문 운영에 따른 호내 수질 영향 분석

Impact Assessment of Drainage Gate Operations on Water Quality in Ganwol Estuary Reservoir Using Watershed-Estuary Linkage Model

지도교수 강 문 성

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022년 8월

서울대학교 대학원

생태·조경지역시스템공학부

지역시스템공학전공

김 시 내

김시내의 석사 학위논문을 인준함

2022년 8월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

담수호는 우리나라의 주요 수자원 중 하나로, 적정수위의 유지를 통해 이수 목적의 수자원으로 활용되고 있다. 하지만, 최근 다양한 오염원의 유입으로 담수호의 수질오염 문제가 가중되고 있으며, 유역대책뿐만 아니라 담수호의 수량 및 수위 관리를 포함한 추가적인 대책 마련이 필요하다.

담수호의 적절한 관리수위 운영은 담수를 이용하는 농경지 및 해측 어업에 미치는 환경 영향을 최소화할 수 있으나, 기존의 관리수위는 주로 수자원 확보 및 시공의 용이성에 초점이 맞추어져 있으며, 수질에 미치는 영향을 충분히 고려하지 못하여 담수호의 수질악화 문제는 지속되고 있으므로, 관리수위 조절이 담수호의 수질에 미치는 영향을 파악하는 것은 중요하다. 따라서 본 연구에서는 담수호에서의 배수갑문 운영이 호 내부 수질에 미치는 영향을 평가하고자 상류유역 유출 및 호내 수체 특성을 종합적으로 고려하기 위한 유역-호소 연계모델을 구축하고, 관리수위 운영 시나리오를 모델에 반영하여 시나리오별 수질 변화를 분석하고자 하였다.

본 연구에서는 간월호를 대상지구로 선정하여 HSPF-EFDC-WASP 연계 모의 시스템을 구축하였으며, 관리수위 시나리오별 배수갑문 방류량을 연계모형에 반영하여 관리수위가 호내 수질에 미치는 영향을 평가하였다.

지점별 및 시나리오별 오염물질 농도 분석결과, 간월호 상류 유입부 지점 (GW3)에서 갑문 인근 지점 (GW1)으로 갈수록 통수단면적의 변화 및 배수갑문 운영 영향의 증가로 시나리오별 오염물질 농도 차이가 더 크게 나타났다. GW3 및 GW2 지점에서는 관리수위를 높일수록 수체적 증가에 따른 오염물질 농도 희석효과로 호내 수질이 개선되는 경향을 보인 반면, 배수갑문 운영의 영향을 많이 받는 GW1 지점에서는 낮은 관리수위 조건에서 방류 빈도 증가에 따른 호내 흐름 개선으로 수질 개선 효과가 높게 나타났다.

한편, 관리수위 조절을 통해서는 담수호의 관리목표수질을 충족하는 데

한계가 있으므로 상류유역 대책이 병행되어야 하며, 단기간의 홍수유출에 의한 상류유역의 침수 영향 분석을 통해 장기간의 수질 및 단기간의 침수 영향을 모두 고려한 최적 배수갑문 운영방안을 도출할 필요가 있다.

본 연구에서 도출한 관리수위 운영에 따른 수질 영향 분석결과는 향후 수문 및 수질 영향을 종합적으로 고려한 담수호의 최적 수자원 관리방안 마련의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 담수호, 수질, 배수갑문, 관리수위, 유역-호소 연계모형
학 번 : 2020-27521

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 연구사 ····· 4

2.1 수치모형 기반 유역-호소 연계 수질 모의 ····· 4

2.2 담수호 배수갑문 운영 ····· 6

제 3 장 수치모형기반 담수호 수문 및 수질 모의 시스템 구축 8

3.1 유역-호소 연계 모의 시스템 ····· 8

3.1.1 유역-호소 연계 모의 시스템 개요 ····· 8

3.1.2 HSPF 모형 ····· 10

3.1.3 EFDC 모형 ····· 13

3.1.4 WASP 모형 ····· 17

3.2 대상 담수호 및 유역 현황 ····· 19

3.2.1 담수호 현황 ····· 19

3.2.2 유역 현황 및 특성 ····· 21

3.3 유역 수문·수질 및 오염원 자료 구축 ····· 24

3.3.1 수문자료 ····· 25

3.3.2 수질자료 ····· 26

3.3.3 오염원자료 ····· 28

3.4 담수호 수문 및 수질 자료 구축 ····· 29

3.4.1 호내 수위 모의를 위한 수문 자료 ····· 30

3.4.2 호내 수질 모의를 위한 수질 자료 ····· 31

제 4 장 배수갑문 운영에 따른 담수호 수문 및 수질 영향 분석 ····· 33
4.1 HSPF 모형을 이용한 상류유역 수문·수질 모의 ··· 33
4.1.1 유출량 모의 및 보·검정 ····· 36
4.1.2 수질 모의 및 보·검정 ····· 39
4.2 EFDC-WASP 모형을 이용한 담수호 수문·수질 모의 43
4.2.1 EFDC 모형을 이용한 수위 모의 및 보·검정 ····· 43
4.2.2 WASP 모형을 이용한 수질 모의 및 보·검정 ····· 45
4.3 배수갑문 운영 시나리오 ····· 48
4.3.1 유지관리수위 시나리오 ····· 48
4.3.2 유지관리수위를 고려한 배수갑문 방류량 산정 ····· 53
4.3.3 유지관리수위 시나리오별 호내 수문특성 변화 ····· 56
4.4 유지관리수위 시나리오별 호내 수질변화 ····· 65
4.4.1 담수호 구간별 시계열 수질 변화 ····· 65
4.4.2 담수호 구간별 평균 수질 변화 ····· 72
4.4.3 담수호 구간별 월별 평균 수질 변화 ····· 77

제 5 장 요약 및 결론 ····· 83

참 고 문 헌 ····· 85
Abstract ····· 90

표 목 차

Table 3.1. Stream lengths and watershed areas of streams in the Ganwol estuary reservoir watershed ····· 20
Table 4.1. General ranges of statistics for model performance evaluation (adapted from Seong et al. (2017)) ····· 35
Table 4.2. Calibrated values of HSPF parameters for runoff simulation 37
Table 4.3. Results of runoff calibration and validation on flow stations in the Ganwol estuary reservoir watershed ····· 37
Table 4.4. Calibrated values of HSPF parameters for water quality simulation of the Ganwol estuary reservoir watershed ····· 39
Table 4.5. Results of water quality calibration and validation in the Ganwol estuary reservoir watershed ····· 40
Table 4.6. Calibrated values of WASP parameters for water quality simulation of the Ganwol estuary reservoir ····· 46
Table 4.7. Results of water quality calibration and validation in the Gangwol estuary reservoir ····· 46
Table 4.8. Main specifications of the Ganwol estuary reservoir ····· 49
Table 4.9. Cases of the maintenance level ····· 52
Table 4.10. Discharge coefficients by flow types ····· 54
Table 4.11. Discharge characteristics for each water management level scenario for 2015-2020 ····· 61
Table 4.12. Water level characteristics for each water management level scenario for 2015-2020 ····· 62
Table 4.13. T-P concentration changes for each water management level scenario at GW1, GW2 and GW3 ····· 76

그 림 목 차

Fig. 3.1. Diagram of HSPF-EFDC-WASP linkage for water quality simulation in estuary reservoir ····· 9
Fig. 3.2. Overview of HSPF software (adapted from Bicknell et al. (1996) ·· 11
Fig. 3.3. Primary modules of the EFDC model ····· 14
Fig. 3.4. Relationships between simulation component in EFDC (adapted from Craig (2009)) ····· 14
Fig. 3.5. Eutrophication kinetic model for WASP8 (adapted from Martin et al. (2020)) ····· 18
Fig. 3.6. Location and landuse map of the Ganwol estuary reservoir ··· 20
Fig. 3.7. Yearly weather data of Seosan weather station ····· 21
Fig. 3.8. Digital elevation model of the Ganwol estuary reservoir watershed ····· 22
Fig. 3.9. Landuse map of the Ganwol estuary reservoir watershed (data from Environmental Geographic Information Service) ····· 23
Fig. 3.10. Locations of observed points of streamflow and water quality and public owned treatment utilities ····· 24
Fig. 3.11. Streamflow of inflow streams (data from Chungnam Province Institute of Health and Environment) ····· 25
Fig. 3.12. Total nitrogen (T-N) concentration of inflow streams (data from Chungnam Province Institute of Health and Environment) ····· 26
Fig. 3.13. Total phosphorus (T-P) concentration of inflow streams (data from Chungnam Province Institute of Health and Environment) ····· 27
Fig. 3.14. Total nitrogen (T-N) concentration of public owned treatment utilities of the Ganwol estuary reservoir watershed (data from National Institute of Environmental Research) ····· 28

Fig. 3.15. Total phosphorus (T-P) concentration of public owned treatment utilities of the Ganwol estuary reservoir watershed (data from National Institute of Environmental Research) ····· 28
Fig. 3.16. Locations of irrigation water pumping stations and water quality monitoring points ····· 29
Fig. 3.17. Monthly water supply of pumping stations in the Ganwol estuary reservoir ····· 30
Fig. 3.18. Monthly discharge of a sluice in the Ganwol estuary reservoir 30
Fig. 3.19. Total nitrogen (T-N) concentration of the Ganwol estuary reservoir ····· 32
Fig. 3.20. Total phosphorus (T-P) concentration of the Ganwol estuary reservoir ····· 32
Fig. 3.21. Chlorophyll a (Chl-a) concentration of the Ganwol estuary reservoir ····· 32
Fig. 4.1. Spatial distribution of subbasins of the Ganwol estuary reservoir watershed ····· 34
Fig. 4.2. Observed and simulated time series streamflow of flow stations 38
Fig. 4.3. Observed and simulated time series of T-N concentration ····· 41
Fig. 4.4. Observed and simulated time series of T-P concentration ····· 42
Fig. 4.5. Model grids created for Ganwol estuary reservoir in EFDC model 43
Fig. 4.6. Water level simulation result of the Ganwol estuary reservoir44
Fig. 4.7. Observed and simulated water level of the Ganwol estuary reservoir ····· 44
Fig. 4.8. Calibration and validation result of T-N, T-P, and Chl-a in the Ganwol estuary reservoir ····· 47
Fig. 4.9. Maintenance level and tidal stages of the Ganwol estuary reservoir ····· 50
Fig. 4.10. Release discharge of a sluice according to the flow characteristics ····· 53

Fig. 4.11. Tidal stages of the Ganwol embankment ····· 55
Fig. 4.12. Relationship between water level and effective capacity of the Ganwol estuary reservoir ····· 55
Fig. 4.13. Observed discharge, inflow and simulated water level of the Ganwol estuary reservoir ····· 56
Fig. 4.14. Discharges and simulated water levels by scenario ML S0, S1, S2, S3 ····· 58
Fig. 4.15. Discharges and simulated water levels by scenario ML S4, S5, S6, S7 ····· 59
Fig. 4.16. Inflow and simulated water levels by each water management level scenario ····· 60
Fig. 4.17. Monthly discharges and mean water levels by water management level scenarios about S0, S1, S3, S5, S7 ····· 64
Fig. 4.18. Simulated results of T-N, T-P, and Chl-a for each water management level scenario at GW3 ····· 67
Fig. 4.19. Simulated results of T-N, T-P, and Chl-a for each water management level scenario at GW2 ····· 68
Fig. 4.20. Simulated results of T-N, T-P, and Chl-a for each water management level scenario at GW1 ····· 69
Fig. 4.21. Simulated results of T-P concentration by each water management level scenario at GW3 ····· 70
Fig. 4.22. Simulated results of T-P concentration by each water management level scenario at GW1 ····· 70
Fig. 4.23. Results of T-P concentration, water level, gate operation status, and water velocity by scenario S1, S3, S5, S7 at GW1 ····· 71
Fig. 4.24. Boxplots showing the patterns of changes in T-N, T-P, and Chl-a by each water management level scenario at GW3 ···· 73
Fig. 4.25. Boxplots showing the patterns of changes in T-N, T-P, and Chl-a by each water management level scenario at GW2 ···· 74

Fig. 4.26. Boxplots showing the patterns of changes in T-N, T-P, and Chl-a by each water management level scenario at GW1 ···· 75
Fig. 4.27. Monthly mean T-N, T-P, and Chl-a concentration by each water management level scenario for 2015-2020 at GW3 ····· 78
Fig. 4.28. Monthly mean T-N, T-P, and Chl-a concentration by each water management level scenario for 2015-2020 at GW2 ····· 79
Fig. 4.29. Monthly mean T-N, T-P, and Chl-a concentration by each water management level scenario for 2015-2020 at GW1 ····· 80
Fig. 4.30. Results of T-P concentration, water level, gate operation status, and water velocity by scenario S0 and S1 at GW1 ····· 82

제 1 장 서 론

담수호는 하구에 방조제를 축조하여 인위적으로 조성된 저수지로, 배수갑문을 통해 적정수위를 유지하면서 이수 목적의 수자원으로 활용되는 경제적이며 효율적인 수자원이다. 국내 간척사업에 따라 조성된 담수호의 저수량은 약 29억 톤으로, 우리나라 농업용수 이용량 (약 159억 톤)의 약 18%에 해당하며, 5백만 톤 이상의 대규모 농업용 담수호의 저수량은 전체 농업 저수량의 약 45%를 차지하고, 담수호로부터 관개 중이거나 관개계획 중인 논 면적이 123 천 ha에 달할 만큼 담수호는 우리나라의 주요 수자원 중 하나이다 (성충현, 2010; 한국농어촌공사, 2009; 한국농어촌공사, 2021).

하지만, 대규모 농업용 담수호는 최근 다양한 오염원의 유입을 비롯한 농업용수의 반복이용으로 수질오염이 가중되고 있으며, 농어촌공사의 최근 5년 (2016~2020)간 농업용 호소 수질 측정 결과에 따르면, 저수지와 달리 대규모 담수호 (16개)는 농업용수 수질 적합 기준인 4등급을 초과하는 비율이 점차 증가하는 추세로 나타났다.

한편, 그간의 호소관리는 주로 수량 및 수위관리를 중심으로 이루어져 왔으나, 최근에 들어서 농어촌 지역의 용수 수요에 대한 공익적 기능이 강조됨에 따라 수질오염이 심화된 하구호에서의 안정적인 농업 및 공업용수 확보를 위한 효과적인 수질 관리의 필요성이 대두되고 있다 (김일환, 2010; 이상진 외, 2014). 특히 담수호는 물이 부족한 시기에 주요 유입하천의 오염물질 농도가 올라가며, 소량의 오염물질의 유입이라도 쉽게 환경문제로 이어질 수 있으므로, 갈수기를 중심으로 적절한 수질관리를 하는 것이 중요하다 (송인홍과 성충현, 2016).

또한, 담수호는 담수화 이후에도 바다로부터 침입해 오는 염분으로 인해 일정 범위 내에서 호내 염분 농도의 계절적인 변동이 일어나며, 이는

가뭄 시 상류 농경지의 염해 피해를 유발하고 안정적인 관개용수 공급을 저해하는 요인이 되기도 한다 (강필묵 등, 1993; Lee et al., 2014).

이에 '21년 농식품부는 양질의 농업용수 공급기반 확충을 위해 '농업용 담수호 수질개선 사업 추진계획'을 마련하였으며, 농어촌공사는 대규모 담수호 16곳에 대해 '25년까지 수질 개선방안 및 실증연구 추진계획을 밝힌 바 있다.

담수호의 수질 개선을 위한 대책은 상류 유역대책과 호내 대책으로 구분할 수 있다. 유역대책으로는 유역 내 점/비점오염원 관리, 토양침식 관리, 토지이용규제, 유입수 관리 등이 있으며, 호내 대책으로는 호내 환경요인 모니터링, 수질 정화시설 운영, 배수갑문 운영을 통한 오염수의 배제 등이 있다 (장남정, 2018). 그간 유역대책을 중심으로 관련 정책 및 다수의 연구가 추진되어왔으나, 보다 적극적인 호내 수질 개선을 위해서는 상류지역 대책은 물론 담수호의 수량 및 수위관리를 포함한 추가적인 대책 마련이 필요하다 (이상진과 김영일, 2018).

특히, 담수호의 배수갑문 운영에 따른 적절한 수위관리를 통해 오염수의 배제 및 상류유역 침수방지 등이 가능하므로, 담수측 농경지 및 해측 어업에 미치는 환경영향을 최소화할 필요가 있다. 일반적으로 담수호의 유지관리수위는 수자원의 확보 및 홍수배제능력 등을 고려하여 결정되나, 기존의 관리수위는 적정용수확보 및 시공 용이성에 주로 초점이 맞추어져 있으며, 수질 등 환경적인 영향에 대한 충분한 고려가 이루어지지 않아 현재 운영조건으로는 담수호의 수질관리 목표수질을 달성하지 못하는 한계가 있다 (정석일 등, 2018; 최정훈 등, 2013). 따라서 배수갑문 운영에 따른 관리수위 조절이 호내 수체순환 및 수질에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여 환경적 측면을 고려한 담수호의 최적 배수갑문 운영방안을 도출할 필요가 있다.

한편, 유역의 최하류에 위치한 담수호의 특성상, 담수호의 통합적 수자원관리를 위해서는 상류유역 특성과 유입 오염물질 및 수체 특성에 대한 종합적인 이해를 바탕으로 수문, 수질, 염도 등의 다양한 수자원 요소를

고려한 적절한 관리방안을 수립할 필요가 있다. 따라서 유역 및 수역의 기작을 합리적으로 구현할 수 있는 수질예측 모델을 구축하여 운영할 필요가 있으며, 최근에는 유역 수문모형과 수치모형을 연계하여 유역 및 호내 수체를 모의하는 연구들이 수행된 바 있다 (김세민 등, 2017; 박재충 등, 2010; 이영기 등 2018; 황순호, 2020). 특히, 최근에는 3차원 기반의 수리 및 수질 모형들이 개발되어, 담수호에서의 수리 및 수질 특성에 대한 공간적 분포 모의가 가능해졌으며, 수체에서 발생하는 현상들을 더욱 자세하게 모의할 수 있게 되었다 (윤진호와 서동일, 2013).

따라서 본 연구에서는 담수호를 대상으로 배수갑문 운영이 호 내부의 수질에 미치는 영향을 평가하기 위하여, (1) 대상지구 선정 및 입력자료 구축을 수행하고, (2) 유역-호소 연계 모의 시스템을 구축 및 모의하며, (3) 배수갑문 운영 시나리오별 담수호의 수질 변화 분석을 통해 호내 수질 영향을 고려한 최적의 배수갑문 운영방안을 도출하는 데에 목적이 있다.

제 2 장 연구사

2.1 수치모형 기반 유역-호소 연계 수질 모의

담수호의 수체 환경에 대한 수질 및 생태학적 변화 등을 해석하기 위해, 호내 수리 및 수문 특성을 모의할 수 있는 모형을 구축하여 변화된 환경에 대한 이해를 높이고자 하는 연구들이 수행되어왔다 (신유리 등, 2011; 전지혜 등, 2011), 특히 호소의 수리 및 수질 특성에 많은 영향을 미치는 상류 유역의 영향을 반영하기 위해, 유역유출모형을 구축하고 이에 따른 모의결과를 호내의 3차원 수리 및 수질 모의를 위한 경계조건으로 연계하는 작업이 다수의 연구에서 선행된 바 있다 (Liu et al., 2008).

호소의 수질 모의에 있어 호소 내 담수 유입량 모의를 위한 유역유출모형으로 HSPF (Hydrological Simulation Program—Fortran), SWAT (Soil&Water Assessment Tool), SWMM (Storm Water Management Model) 등이 주로 활용되어왔으며, 특히 HSPF 및 SWAT 모형은 다양한 유역특성을 반영하여 장기간의 수문 및 수질 모의가 가능하며, 다양한 수질항목의 모의가 가능하다는 장점이 있다.

또한, 호내의 수리 및 수질 특성 모의를 위해 국내외에서 활용되고 있는 유체 동역학 모형으로는 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) (Hamrick, 1992), CE-QUAL-W2 (USACE, 1986), HSCTM-2D (The Hydrodynamic, Sediment, and Contaminant Transport Model) 등이 있으며, 다차원 호소 수질 모형으로는 WASP (Water Quality Analysis and Simulation Program) (Ambrose et al., 1993), EFDC, Aquatox, CE-QUAL-W2, CE-QUAL-ICM (Cerco and Cole, 1995), AEM3D (Hodges and Dallimore, 2019), Delf3D (Deltares, 2019) 등이 있다. 국내외에서는 호내 수질 모의를 위해 EFDC 및 WASP 모형이 널리 활용되고 있으며, 보다 상세한 수질항목의 모의를 위해 EFDC-hydro와 WASP을 연계한 EFDC-WAS

P 모형이 이용되기도 한다 (노희진 등, 2013; 박재충 등, 2010; 오희상과 이한필, 2017; Seo and Kim, 2011; Seo et al., 2012). EFDC 모형은 CE-QUAL-ICM을 기반으로 하는 수질 모듈을 포함하고 있으나, 주로 수온분포나 탁수 영향 예측을 위해 사용되며, 유기물 간의 상관관계에 있어 BOD가 아닌 TOC로 모의하므로, 국내에서 호소의 수질 변화 및 부영양화 등을 모의하기 위해서는 WASP 모형이 주로 활용되어왔다 (박재충 등, 2010; 윤진호와 서동일, 2013). 또한, WASP 모형은 수체에 대한 동적 분할모형으로, 짧은 시간 간격의 수질 변화를 분석하는데 용이하며 다양한 유동해석 모형 및 유역모형과 연계가 가능하므로, 다양한 기상 및 환경조건을 고려한 장기간의 호소 수질 모의를 위해 널리 이용되고 있다 (USEPA, 2022). WASP 모형 또한 DYNHYD라는 수리학적 모듈을 포함하고 있으나, 1차원 모델로서 다차원 유동해석은 불가능하다는 한계가 있으므로, 3차원 유동해석 모형인 EFDC와 3차원 수질 모의 모형인 WASP 모형을 연계 모의하는 것은 각 모델의 장점을 취해 수리학적 계산의 정확도를 높인 동시에 이를 수질 모델에 활용할 수 있음을 의미한다 (윤진호와 서동일, 2013).

국내외에서는 유역-담수호 및 유역-저수지 연계모델링을 위해 주로 HSPF 및 SWAT 유역유출모형과 EFDC 모형을 연계한 연구가 수행된 바 있다 (김광문, 2012; 성충현, 2014; 신유리 등, 2012; 오찬성 등, 2021; 이영기 등, 2018; 황순호, 2020; Hwang et al., 2021). 박재충 등 (2010)과 황순호 등 (2018)은 각각 다목적댐 저수지 및 농업용 저수지에 대해 유역모형과 EFDC-WASP 연계모형을 적용하여 수질을 모의하는 연구를 수행한 바 있으나, 담수호에 대해 유역모형과 EFDC-WASP 연계모형을 적용하여 담수호의 수질 변화를 모의한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 담수호 상류 유입량 산정을 위한 유역유출모형으로 도시 및 농업 복합지역에 적용이 용이하고 다양한 수질항목의 모의가 가능하며, EFDC 및 WASP 모형과 연계 모의가 가능한 HSPF 모형을 선정하였으며, 호내 수리 및 수질 변화 모의에는 EFDC-WASP 연계모형을 이용하여 HSPF-EFDC-WASP 연계 모의 시스템을 구축하고자 하였다.

2.2 담수호 배수갑문 운영

국내외에서는 방조제 및 배수갑문 운영에 따라 하구호에서의 수질 및 생태환경이 변화되고 있으며, 이로 인한 환경적 문제점들이 보고되고 왔으므로, 이들이 주변 환경에 미치는 영향 분석과 이를 최소화하기 위한 관련 수질개선대책 마련의 필요성이 대두되어왔다 (최정훈 등, 2013). 특히 간척사업에 따라 우리나라 서해안에 조성된 담수호는 지리적 특성으로 인해 유역에서 발생하는 오염물질이 담수호로 집중되어 수질이 악화되기 쉬운 조건을 가지고 있으나, 이에 대한 충분한 대책을 마련하지 못하여 개발과정에서 발생한 다양한 환경문제로 인해 담수호의 수질 문제는 국민적 관심사가 되었다. 이에 국내에서는 호소 수리 수질 모형을 활용하여 배수갑문 운영이 호내 수질에 미치는 영향을 분석한 다수의 연구들이 수행된 바 있다. 이창형 (2002)은 보령호를 대상으로 집중호우시 배수갑문 조작이 호내 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 WASP 모형을 통해 방류시점과 방류량 조건별 수질 변화를 모의하였으며, 서승원 등 (2010)과 전지혜 등 (2011)은 EFDC 모형을 통해 새만금호에서 갑문의 개폐 여부가 호내 수질에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 성충현 (2010)은 HSPF-EFDC 모형을 통해 이원호의 유지관리수위가 호내 염도에 미치는 영향을 분석한 바 있으며, 윤진호와 서동일 (2013)은 EFDC-WASP 연계모델을 통해 경인아라뱃길의 갑문 운영이 호내 수질분포에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 김세민 등 (2017)은 SWAT-EFDC 모형을 통해 만경강 및 동진강 상류에 위치한 제수문의 방류조건을 가정하여 새만금호 수질에 미치는 영향을 평가한 바 있으며, 정석일 등 (2018)은 Delft3D 모형을 활용하여 관리수위 증가에 따른 호내 수질 개선 효과를 모의한 바 있다.

하지만, 기존 담수호의 배수갑문 운영 관련 선행연구들에서는 배수갑문 운영과 관련하여 주로 단일 시나리오를 가정하거나 단순 개폐 여부에 따른 영향을 모의하였으며, 여러 관리수위 시나리오에 따른 배수갑문 운영을 모의한 선행연구에서는 상류 유입량 및 유입수질과 갑문 방류량에 대해

단순한 가정을 적용하여, 호내 수질에 미치는 상류 유역의 영향 및 실제 배수갑문의 조작상황을 현실적으로 반영하지 못한 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 해수/담수측 배수갑문의 여러가지 운영 시나리오를 고려하고, 배수갑문의 내외 수위차에 따른 위치에너지를 고려하여 실제 갑문의 조작상황을 현실적으로 반영하고자 하였으며, 유역유출모형과의 연계를 통한 상류유입량 및 유입수질 산정을 통해 상류유역의 영향을 고려하고자 하였다.

제 3 장 수치모형기반 담수호 수문 및 수질 모의 시스템 구축

3.1 유역-호소 연계 모의 시스템

3.1.1 유역-호소 연계 모의 시스템 개요

본 연구에서는 담수호 상류유역의 유입량 및 수질 모의를 위해 HSPF 모형을 이용하였으며, 담수호의 3차원 수리해석 모형으로 EFDC-hydro 모형을, 담수호의 3차원 수질 모의모형으로 수질 변화 및 오염부하량 모의에 널리 활용되는 WASP 모형을 이용하였다. Fig. 3.1은 유역-호소 연계 모의 시스템의 구성 및 입력자료를 나타내고 있다.

기상자료, 유역특성자료 및 오염원 자료를 기반으로 HSPF 모형을 구축하여 상류유역의 유출량 및 수질을 모의하며, 관측 유량 및 수질 자료를 통해 모형의 보·검정을 수행한다. HSPF 모형을 통한 유출량 및 수질 모의 결과는 각각 EFDC의 상류 유입량과 WASP의 유입 수질 경계조건으로 활용된다. EFDC 모형에서는 HSPF를 통한 담수호 상류 유역유출량 모의결과와 기상자료, 양수장 공급량 자료 및 배수갑문 방류량 자료를 입력자료로 하여 담수호 내 물의 흐름과 관련된 수리적 수치해를 구하며, 이는 WASP 모형의 수질 모듈과 연계된다. WASP 모형에서는 HSPF를 통해 모의한 유입하천의 오염물질 농도를 경계조건으로 하고 EFDC를 통해 모의한 호내 수리특성을 기반으로 호내 수질을 모의하며, 수질해석의 재현성을 높이고자 호소 내 관측 수질 자료를 통해 모형의 보·검정을 수행한다. 구축된 유역-호소 연계 모의 시스템을 기반으로 배수갑문 운영이 호내 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 담수호의 유지관리수위 시나리오를 구성하였으며, 시나리오별 방류량을 EFDC 모형의 입력자료에 반영하여 시나리오별 수질 변화를 모의하고자 하였다.

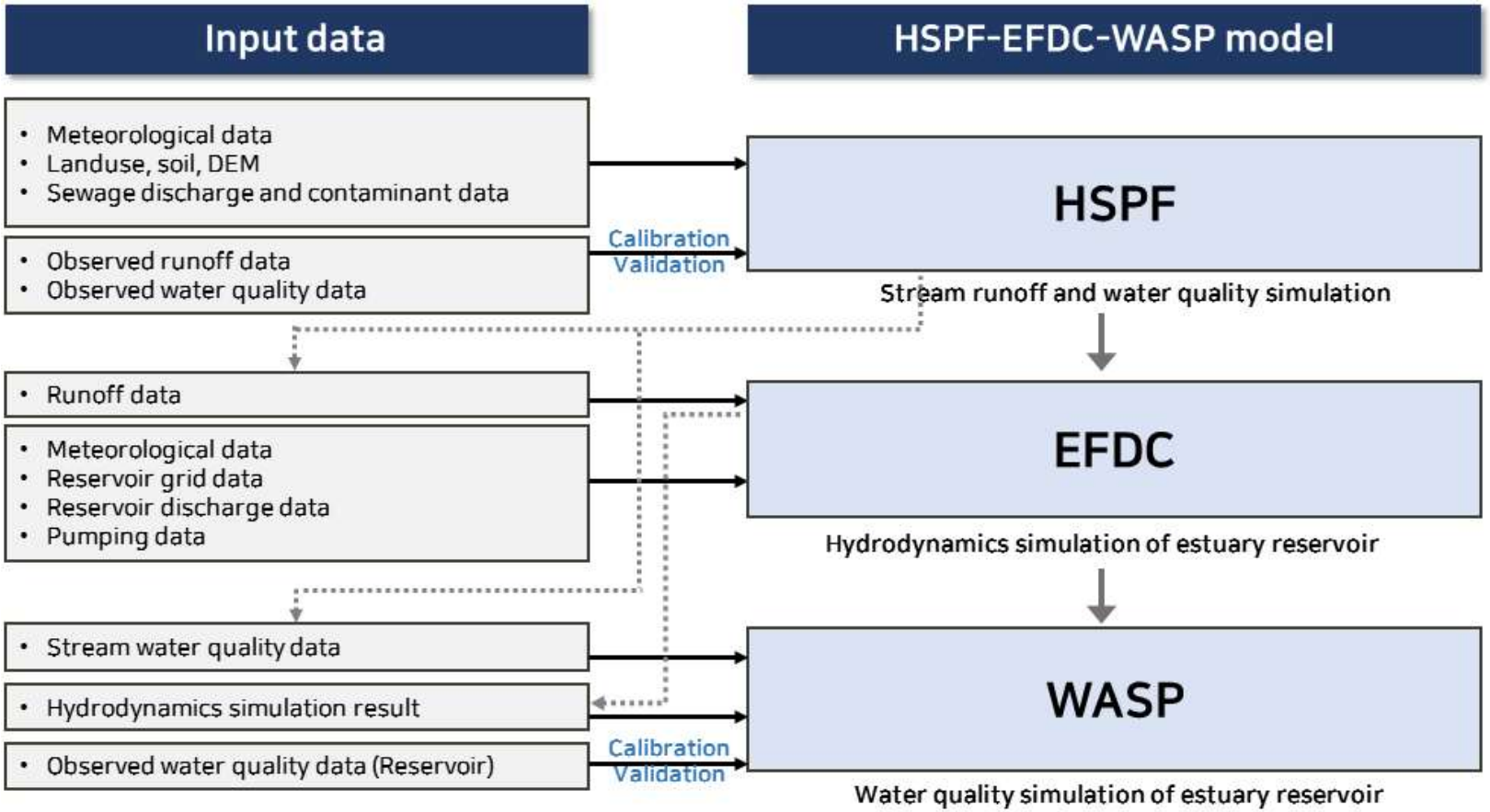


Fig. 3.1. Diagram of HSPF-EFDC-WASP linkage for water quality simulation in estuary reservoir

3.1.2 HSPF 모형

가. 모형의 개요

본 연구에서는 담수호 상류 유역의 장기간에 걸친 유출량 및 수질 모의를 위하여 USEPA (United States Environmental Protection Agency)와 USGS (United States Geological Survey)에서 공동으로 개발한 유역 모델인 HSPF (Hydrological Simulation Program — Fortran) 모형을 이용하였다.

HSPF 모형은 종합적 (comprehensive), 개념적 (conceptual), 연속적 (continuous), 준분포형, 결정론적 유역모형으로, 장기간에 걸친 크고 작은 규모의 복잡한 수리 및 수질 현상들을 모의하기 위해 개발되었으며, 다양한 수질항목의 모의가 가능하며, 타 모형과의 연계성이 좋고, 농촌과 도시지역이 혼재된 복잡한 유역에서 토양 및 토지이용특성을 다양하게 고려하여 연속강우에 의해 발생하는 수량 및 수질예측이 용이하다는 특징이 있다 (정광욱, 2012; Bicknell et al., 1996). 강수차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 적설심, 수분함량, 융설, 증발산, 지하수 충전, 용존산소, 온도, 농약, 대장균, 유사운송, 토립자 크기, 하천 홍수추적, 저수지 홍수추적, 질소, 인, 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤 등의 모의가 가능하며, 입출력 자료의 전후처리 및 통계분석 시스템인 WDM (Watershed Data Management)을 이용하여 수분에서 수백년까지의 기간에 대한 모의가 가능하다 (Bicknell et al., 2001; USGS, 2000).

HSPF 모형은 투수지형에서의 수문 및 수질을 모의하는 PERLND 모듈, 불투수지형의 수문 및 수질을 모의하는 IMPLND 모듈, 하천이나 호소 등 수체에서의 수리 및 수질을 모의하는 RCHRES 모듈로 구성되어 있다. HSPF 모형의 구조는 Fig. 3.2와 같다.

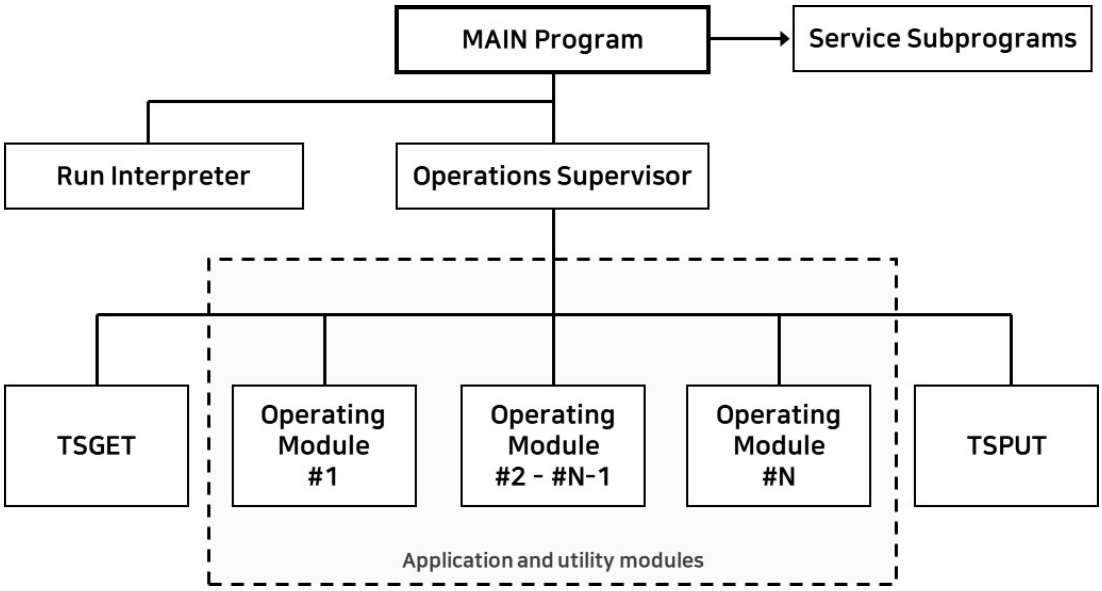


Fig. 3.2. Overview of HSPF software
(adapted from Bicknell et al. (1996))

나. PERLND 모듈 (Pervious Land Segment)

PERLND의 주 모듈로 강설과 융설 모듈 (SNOW), 물수지 모듈 (PWATER), 토양침식에 의한 유사 모듈 (SEDMNT), 다양한 방법에 의한 수질성분 모듈 (PQUAL) 등이 있다. 이 중 PWATER는 물수지 성분을 계산하기 위한 모듈로, 투수지역의 유출량을 추정하며, 해당 모듈에는 차단을 모의하는 ICEPT, 침투 및 유출 가능 수분을 분배하는 SURFAC, 중간유출을 모의하는 INTFLW, 상부층 거동을 모의하는 UZONE, 하부층 거동을 모의하는 LZONE, 지하수 거동을 모의하는 GWATER, 증발산을 모의하는 EVAPT 등의 서브루틴으로 구성되어 있다. 주 모듈 이외에도 농업화학 항목에 질소, 인 등 영양물질 추정을 위한 NITR, PHOS 항목과 농약의 거동을 모의하는 PEST 등의 항목이 포함되어 있다 (김상민, 2004).

다. IMPLND 모듈 (Impervious Land Segment)

불투수지역은 침투가 거의 발생하지 않으나, 지표 유출이 불투수면에서 발생하며, 다양한 수질항목의 축적 및 제거가 발생한다, IMPLND 모듈의 각 항목은 PERLND 모듈의 항목과 거의 유사하나, IMPLND 모듈은 침투가 포함되어 있지 않아 지표하 유출이 없기 때문에 비교적 간단한 구조이다. IMPLND 모듈의 IWATER 항목은 PERLND 모듈의 PWATER 항목과, SOLIDS 항목은 SEDMNT 항목과, IWTGAS 항목은 PWTGAS 항목과, IQUAL 항목은 PQUAL 항목과 유사하다.

라. RCHRES 모듈 (Free-flowing Reach or Mixed Reservoir)

RCHRES 모듈은 하도 구간 및 호소에서의 기작을 모의하는 것으로, RCHRES 모듈로부터 빠져나가는 물질의 양을 산정하고 모듈 내 물질의 농도변화를 모의하는 SINK, 하도구간이나 호소에서 발생하는 수리기작을 모의하는 HYDR, 하도구간과 호소에서의 무기물 유사의 운송, 퇴적, 세굴을 모의하는 SEDTRN, 용존 상태이거나 유사에 흡착된 수질 성분의 거동을 모의하는 GQUAL, DO나 BOD 등 생화학적 변환와 관련된 수질 성분을 모의하는 RQUAL 등으로 구성되어 있다.

3.1.3 EFDC 모형

가. 모형의 개요

본 연구에서는 담수호의 3차원 수리해석을 위해 버지니아 해양연구소(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되어 USEPA에 의해 관리되고 있는 동수역학, 질량수송, 수질의 3차원 통합해석 프로그램인 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 모형을 활용하였다.

EFDC 모형은 하천, 하구, 호소 등 다양한 수체에 적용 가능하며, 수리동역학적 (hydrodynamics) 모듈, 수질 (water quality) 모듈, 유사 운송 (sediment transport) 모듈, 독성물질 (toxic) 모의 모듈의 총 4개의 모듈로 구성되어 유체의 이동과 염분 및 온도 모의 외에도 부유물질의 이동과 독성 오염물질의 이동/반응 등의 모의가 가능하다 (황순호, 2020; USEPA, 2002). EFDC 모형의 구조는 Fig. 3.3과 같으며, EFDC 모델 중 수체 내 유동 해석을 위한 요소 간 관계를 나타낸 모식도는 Fig. 3.4와 같다.

EFDC 모형은 내부에 CE-QUAL-ICM 모형 기반의 수질 모의 모듈을 포함하고 있으나, 주로 수온분포나 탁수 영향 예측을 위해 사용되며, USEPA에서는 수질변화 및 오염부하량 등 부영양화 모의에 주로 활용되는 WASP 모델과 연계사용이 가능하도록 수리학적 계산 부분만 분리한 EFDC-hydro를 제공하고 있다. 본 연구에서는 수온 및 탁수 영향 보다는 호내 오염부하량 변화 분석에 초점을 맞추고 있으므로, EFDC-hydro와 WASP 모형을 연계한 EFDC-WASP 모형을 활용하였다.

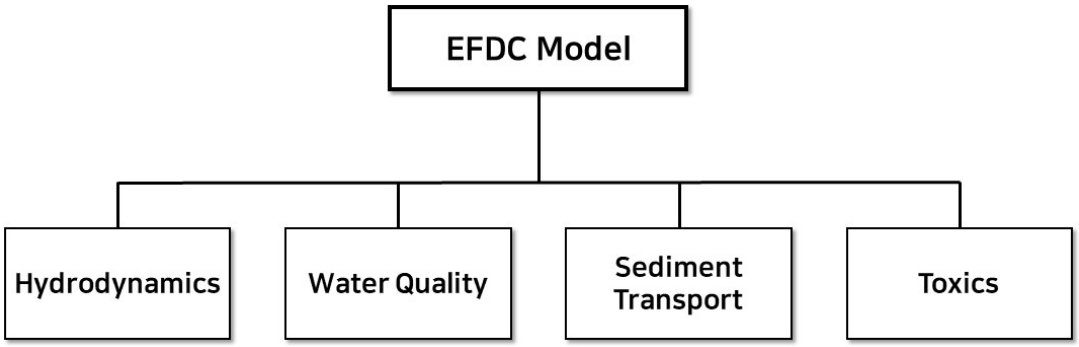


Fig. 3.3. Primary modules of the EFDC model

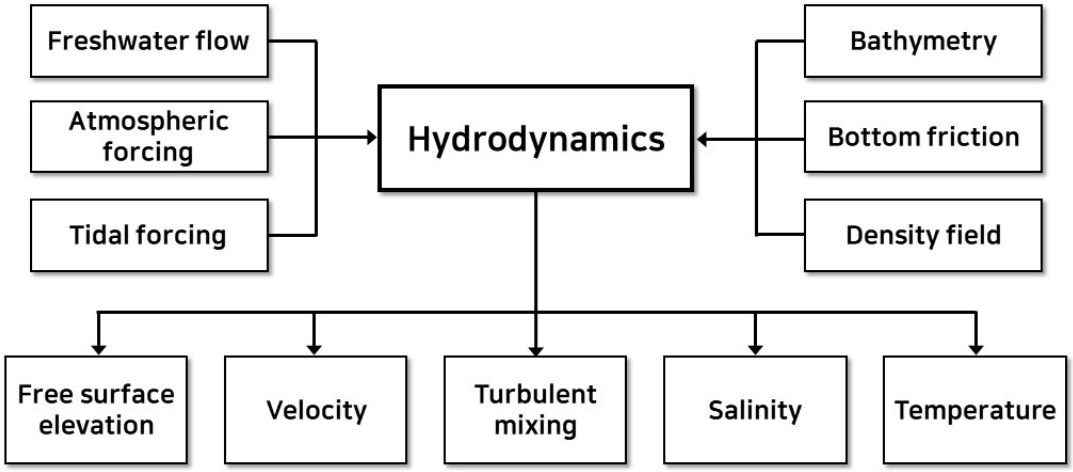


Fig. 3.4. Relationships between simulation component in EFDC (adapted from Craig (2009))

나. 지배방정식

EFDC 모형은 수평방향의 경계조건을 나타내기 위해 직선 또는 직교곡선좌표계가 사용되며, 수심방향으로는 정역학적 해를 얻기 위해 시그마 좌표변환 (sigma transformation)이 사용된다. EFDC 모형은 연속방정식, 운동방정식, 열염보존 방정식 및 물질보존 방정식으로 구성되어 있으며, 동수역학 (hydrodynamic) 모듈의 지배방정식이 되는 연속방정식과 x, y, z 방향 운동방정식은 식 (3-1)~(3-4)와 같다.

1) 연속방정식

$$\frac{\partial m\zeta}{\partial t}+\frac{\partial m_y Hu}{\partial x}+\frac{\partial mxHv}{\partial y}+\frac{\partial m}{\partial z}=0 \qquad (3-1)$$

2) 운동방정식

$$\frac{\partial mHu}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(m_y Huu)+\frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvu)+\frac{\partial}{\partial z}(mwu)-(mf+v\frac{\partial m_y}{\partial x}-u\frac{\partial m_x}{\partial y})$$
$$=-m_y H\frac{\partial}{\partial x}(g\zeta+p)-m_y(\frac{\partial h}{\partial x}-z\frac{\partial H}{\partial x})\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_v\frac{\partial u}{\partial z})+Q_u \qquad (3-2)$$

$$\frac{\partial mHu}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(m_y Huv)+\frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvv)+\frac{\partial}{\partial z}(mwv)-(mf+v\frac{\partial m_y}{\partial x}-u\frac{\partial m_x}{\partial y})$$
$$=-m_x H\frac{\partial}{\partial y}(g\zeta+p)-m_x(\frac{\partial h}{\partial y}-z\frac{\partial H}{\partial y})\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_v\frac{\partial v}{\partial z})+Q_v \qquad (3-3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-gH(\rho-\rho_0)\rho_0^{-1}=-gHb \qquad (3-4)$$

여기서, u, v는 직교하는 곡선좌표계 x, y에서의 수평 유속; m_x, m_y는 곡선좌표계 임의거리 $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근 ($m = m_x m_y$); w는 변환된 무차원 연직좌표계 z에서의 수직 유속성분; H는 총 수심 ($=h+\zeta$); h는 기준면하 수심; ζ는 기준면상 수위, p는 수심 z에서 기준수압 (ρ_0gH(1−z))과의 차를 ρ_0로 나눈 값; f는 Coriolis parameter; A_v는 수직 난류점성계수; A_b는 수직 난류확산계수; Q_u, Q_v는 운동량의 source−sink 항; ρ는 밀도를 나타낸다.

3.1.4 WASP 모형

가. 모형의 개요

WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) 모형은 1983년 USEPA에 의해 개발된 3차원 호소 수질 모의모형으로, 현재 WASP8 버전까지 개발되었으며, WASP6 이후부터는 EFDC와 같은 수리모델 및 SWMM과 같은 유역모델과의 연계사용이 가능하도록 구성되었다 (윤진호와 서동일, 2013). WASP 모형은 자연현상 및 인간의 활동으로 인해 발생하는 다양한 오염물질의 해석 및 예측이 가능하며, 수체와 저니층의 수질을 모의할 수 있는 유동구획모형으로, 유동, 확산, 점오염원 및 경계조건의 시간에 따른 변화를 고려할 수 있다. WASP 모형은 다양한 수질항목의 모의가 가능하고 입력자료가 타 모형에 비해 비교적 간단하며, 3차원 수리동역학 프로그램인 EFDC-hydro와 연동하여 사용 가능한 장점이 있으며, 그간 하천, 호수, 하천의 하구 및 해안 등 다양한 수체에 적용되어 왔다.

WASP 모형은 식물성 플랑크톤, 질소, 인, 유기물 및 용존산소 등이 서로 상호 유기적으로 연결되어 영향을 미치도록 구성되어 있으며, 부영양화를 모의할 수 있는 EUTRO 모듈과 독성물질에 대한 모의가 가능한 TOXI 모듈로 구분할 수 있다. WASP5의 EUTRO 모듈에서는 총 8개의 수질항목 (NH_3-N, NO_3-N, PO_4-P, Chl-a, CBOD, DO, Org-N, Org-P)을 모의할 수 있었으나, WASP7부터는 BOD(2), BOD(3), Detritus, Benthic Algae, Salinity 항목이 추가되어 총 13개의 수질항목을 모의할 수 있으며, 저서 조류 (benthic algal) 모델, 다중 조류 (multi-algal) 모델, pH 및 알칼리도 모델, 퇴적물 속성 (sediment diagenesis) 모델 등의 추가기능이 포함되었다. WASP8 부영양화 모델의 모식도는 Fig. 3.5와 같다.

본 연구에서는 호소 수질관리에 직접적으로 활용되고 있는 T-N, T-P, Chl-a의 3개 수질항목을 모의 대상 항목으로 선정하였다.

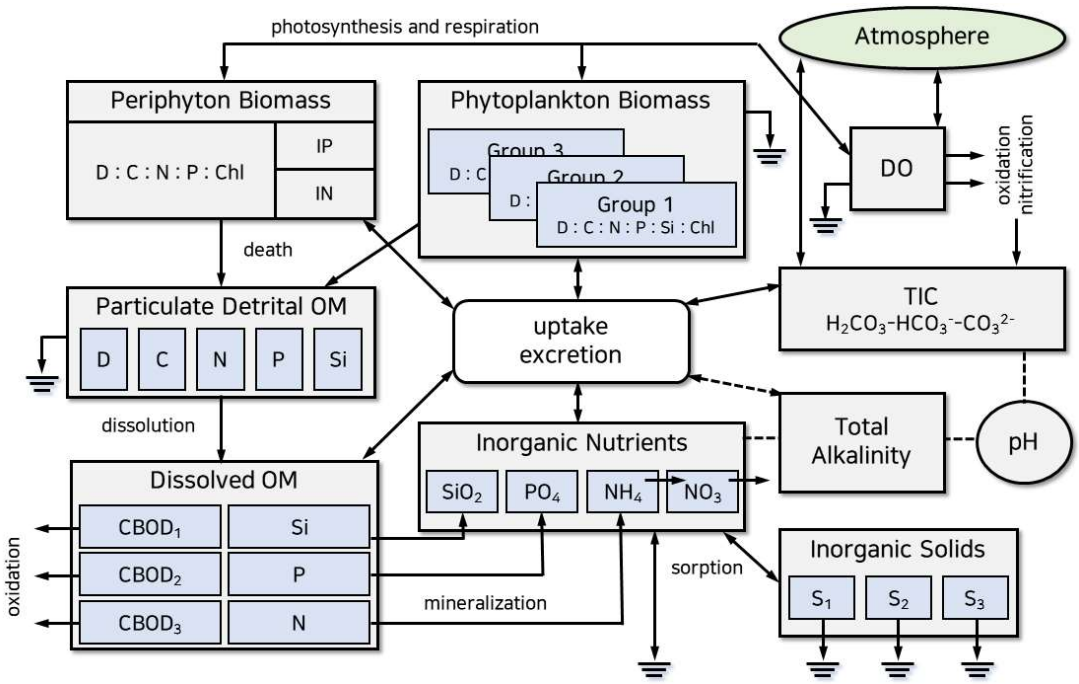


Fig. 3.5. Eutrophication kinetic model for WASP8 (adapted from Martin et al. (2020))

나. 수질항목 물질수지식

수체 내 수질항목에 대한 3차원 물질수지식은 유동, 확산, 외부로부터의 부하 및 생·화학적 변환 항을 포함하고 있으며, 해당 식은 식 (3-5)와 같다.

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} = -\frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial(vC)}{\partial y} - \frac{\partial(wC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial(D_x C)}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\partial(D_y C)}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\partial(D_z C)}{\partial z}\right] \pm \frac{W}{V} + \frac{S_0}{V} \quad (3-5)$$

여기서, C는 수질항목의 농도 (g/m^3); u, v, w는 x, y, z 방향의 유속 (m/day); D_x, D_y, D_z는 난류 확산 계수 (m^2/day); W는 외부로부터의 부하량 (g/day); S_0는 내부 변환량 (g/m^3·day); V는 체적 (m^3)을 나타낸다.

3.2 대상 담수호 및 유역 현황

3.2.1 담수호 현황

본 연구의 대상 담수호로 충청남도 서산시에 위치한 간월호 (천수만)를 선정하였다. 간월호는 서산 A지구 간척사업 (`80. 5~`95. 8)에 의해 1995년 완공된 담수호로, 총 유역면적은 약 49,240 ha, 수혜면적은 약 6,445 ha이다. 간월호 유역 내 주요하천으로는 기포천, 도당천, 둔당천, 소정천, 야당천, 와룡천 및 청지천의 7개 하천이 있으며, 유역 내 총 하천연장 (유로장)은 75.2 km, 유역면적의 합은 321.89 km^2이다. 간월호의 유입하천별 하천연장 및 유역면적 현황은 Table 3.1과 같다.

간월호를 포함한 부남방조제 중권역은 전체 용수 이용량 중 농업용수가 차지하는 비율이 약 90%에 달하여, 대상지역의 담수화된 수자원은 농업용수로써 중요한 역할을 하고 있다. 하지만, 최근 유역 내 점 및 비점오염원의 유입에 따른 수질악화 및 부영양화로 인해 다목적 용수 및 농업용수 공급에 어려움을 겪고 있으며, 생물 서식처로서의 기능을 상실하고 있으므로, 보다 효과적인 용수관리와 적절한 수질 개선 대책 마련이 요구된다. 간월호의 위치 및 토지이용 현황은 Fig. 3.6과 같다.

Table 3.1. Stream lengths and watershed areas of streams in the Ganwol estuary reservoir watershed

Streams	Stream length (km)	Watershed area (km^2)
Gipo	4.8	8.70
Dodang	17.1	120.60
Dundang	13.3	36.56
Sojung	8.4	13.20
Yadang	3.5	15.60
Waryong	17.1	85.00
Chungji	11.0	42.23
Total	75.2	321.89

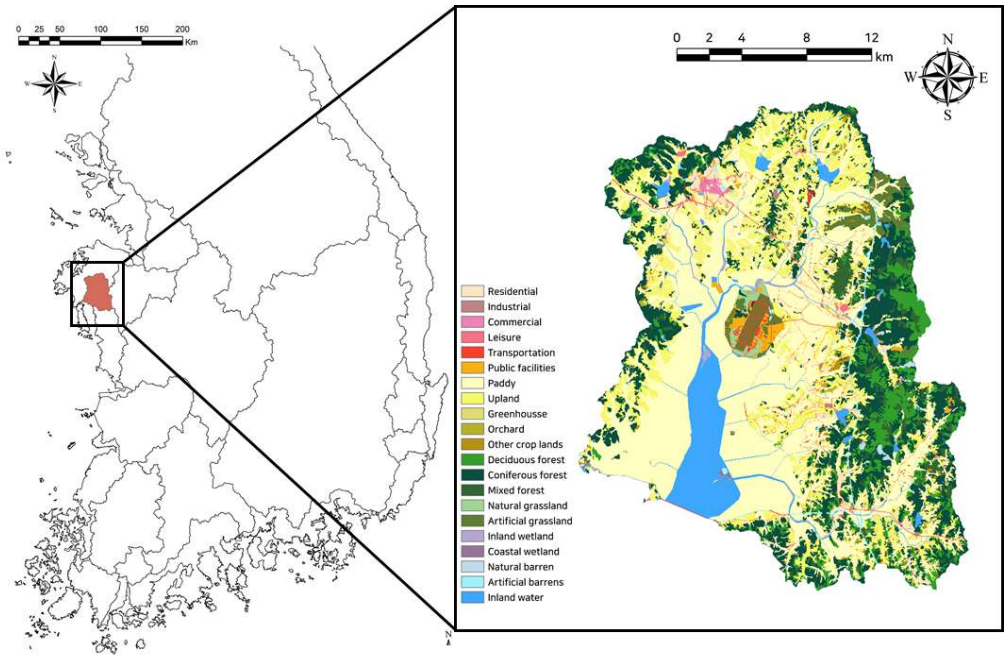
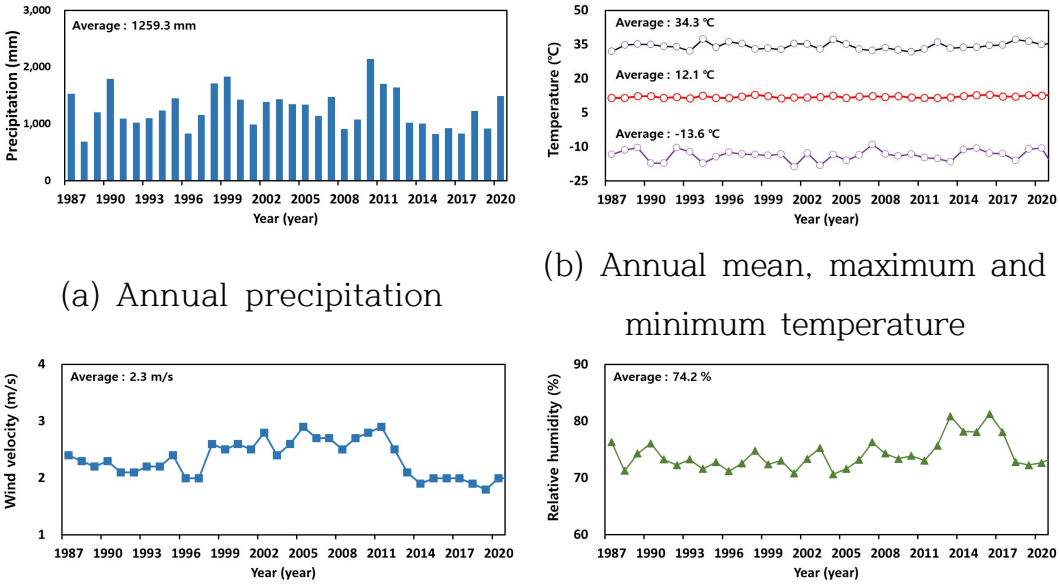


Fig. 3.6. Location and landuse map of the Ganwol estuary reservoir

3.2.2 유역 현황 및 특성

가. 기상

간월호 유역의 지배 기상관측소는 서산 관측소로, 해당 관측소의 1987년부터 2020년까지의 기온, 강수량, 상대습도, 일사량, 전운량, 풍속 등의 자료를 구축하였다 (Fig. 3.7). 대상지구는 해양성 기후의 영향을 받아 바람이 강하게 불며 (연평균 풍속 2.3 m/s), 연평균 기온은 12.1 ℃, 연평균 최고기온은 34.3 ℃, 연평균 최저기온은 -13.6 ℃로 연고차가 크다. 연평균 강수량은 1259.3 mm로 나타났으며, 2015~2017년에는 평균 856 mm의 적은 연 강수량을 기록하였다.



(a) Annual precipitation

(b) Annual mean, maximum and minimum temperature

(c) Annual mean wind velocity

(d) Annual mean relative humidity

Fig. 3.7. Yearly weather data of Seosan weather station

나. 수치표고모델

간월호 유역의 수치표고모델 (Digital elevation model, DEM) 구축을 위해 국가공간정보포털에서 제공하는 1:5,000 수치지도를 활용하였으며, 공간적 해상도는 30 m이다 (Fig. 3.8). 간월호 인근 농경지 표고는 EL. 1~5 m로 나타났다.

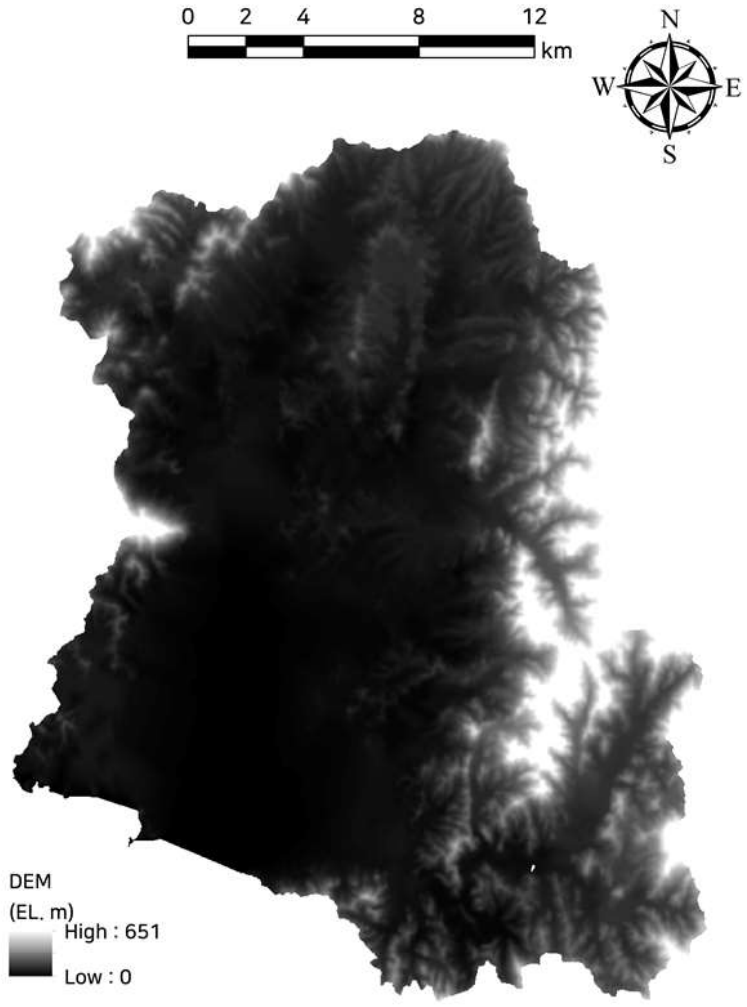


Fig. 3.8. Digital elevation model of the Ganwol estuary reservoir watershed

다. 토지이용도

환경부의 중분류 토지피복도 (2015년)를 활용하여 토지이용자료를 구축하였다 (Fig. 3.9). 간월호 유역은 임야와 전답이 대부분을 차지하고 있으며, 간척개발에 따라 조성된 농경지가 담수호 주변에 넓게 분포하고 있다. 토지이용별 면적 구성비는 논 38.1%, 밭 15.0%, 임야 27.6%, 시가지 7.0%, 초기 3.9%, 대지 1.2%, 수면 7.2%로, 농경지 비율이 매우 높다.

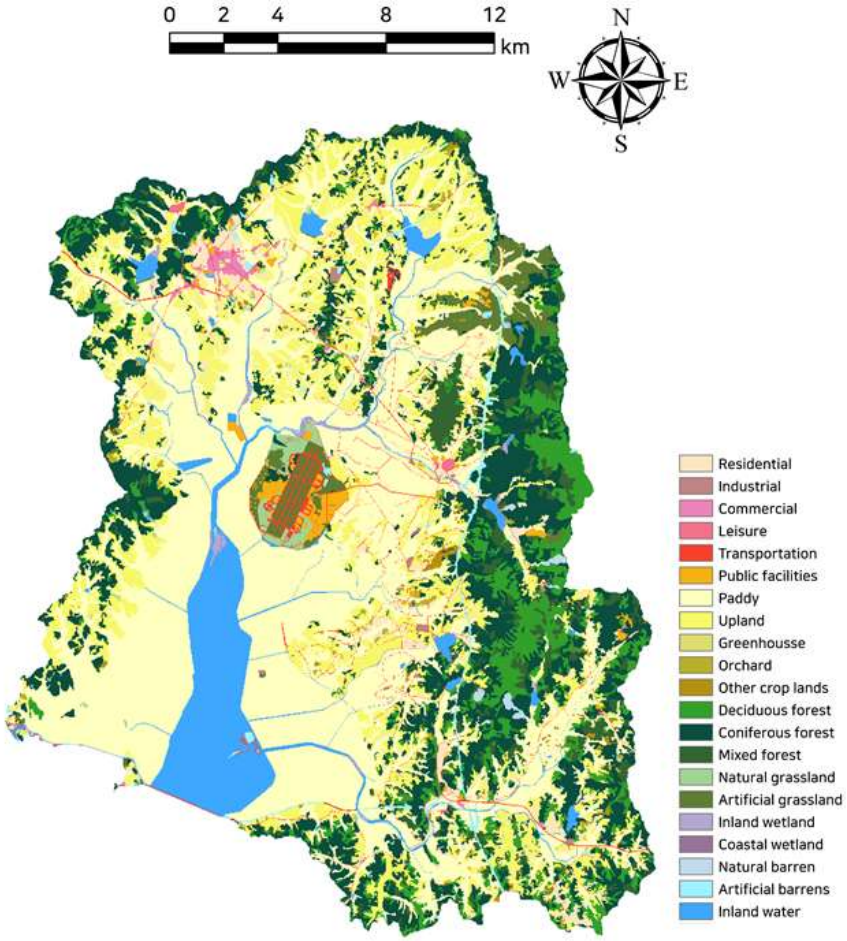


Fig. 3.9. Landuse map of the Ganwol estuary reservoir watershed (data from Environmental Geographic Information Service)

3.3 유역 수문·수질 및 오염원 자료 구축

간월호 유역의 실측 수문 및 수질자료 구축을 위해 충청남도보건환경연구원에서 [충청남도 모니터링 사업]에 의해 2011년부터 2020년까지 월 1회 간격으로 계측한 간월호 유역 내 4개 하천 (도당천, 둔당천, 와룡천 및 청지천)의 일 유량 및 수질 자료를 이용하였다. 또한, 국립환경과학원의 전국오염원조사자료로부터 간월호 유역 내에 위치한 3개의 공공하수처리시설 (서산, 음암, 도당)과 1개의 축산분뇨처리시설 (서산)의 방류량 및 방류수 수질자료를 수집하여 유역 모형의 오염원 자료로 활용하였다. 유량 및 수질 관측지점과 환경기초시설의 위치는 Fig. 3.10과 같다.

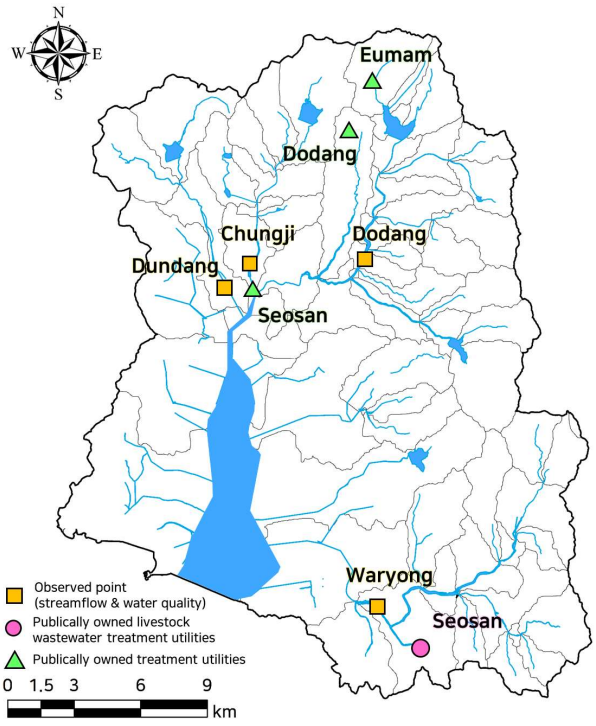
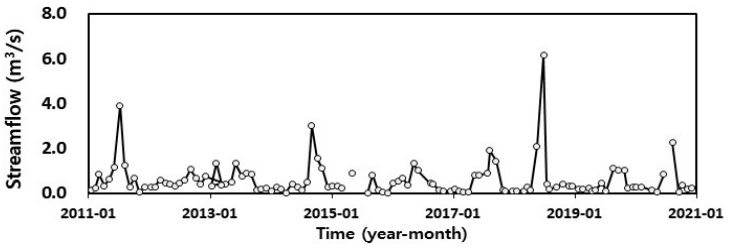


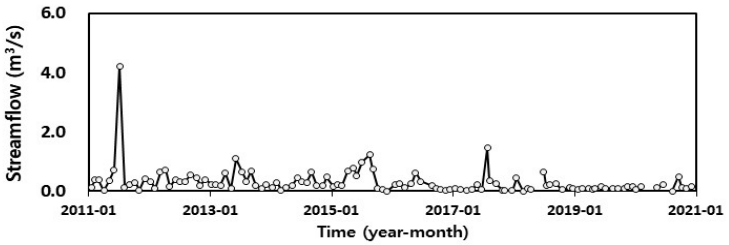
Fig. 3.10. Locations of observed points of streamflow and water quality and public owned treatment utilities

3.3.1 수문자료

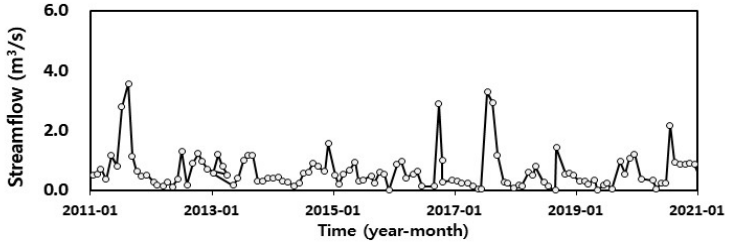
2011년부터 2020년까지 월 1회 간격으로 계측된 일 유량 자료를 이용하여 간월호 4개 유입하천 (도당천, 둔당천, 와룡천 및 청지천)에 대한 실측 유량자료를 구축한 결과는 Fig. 3.11과 같다.



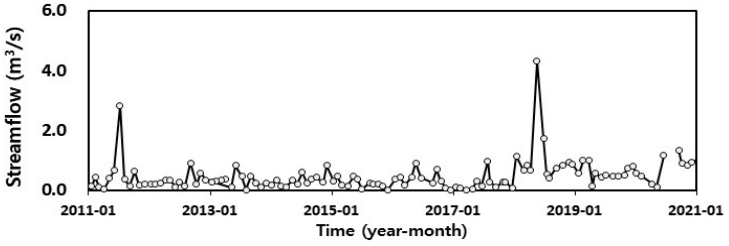
(a) Dodang



(b) Dundang



(c) Waryong

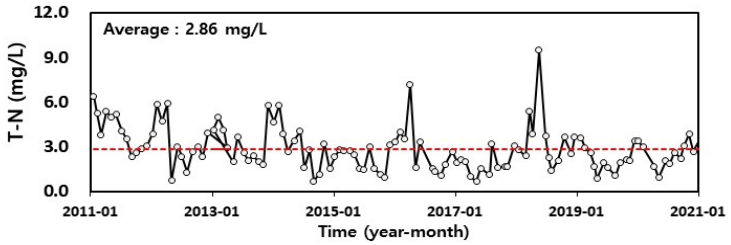


(d) Chungji

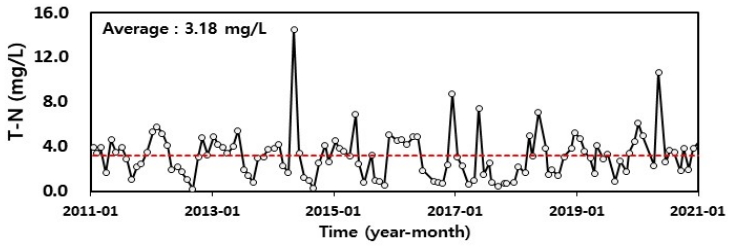
Fig. 3.11. Streamflow of inflow streams (data from Chungnam Province Institute of Health and Environment)

3.3.2 수질자료

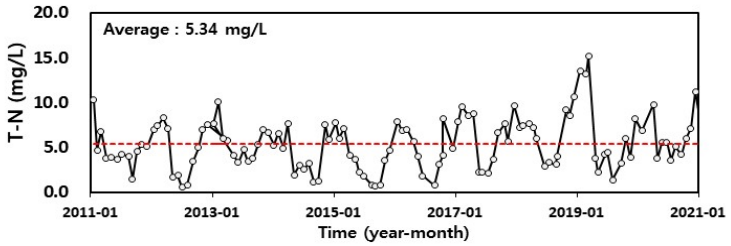
2011년부터 2020년까지 월 1회 간격으로 계측된 일 수질 (T-N, T-P) 자료를 이용하여 간월호 4개 유입하천 (도당천, 둔당천, 와룡천 및 청지천)에 대한 실측 수질자료를 구축한 결과는 Fig. 3.12~3.13과 같다.



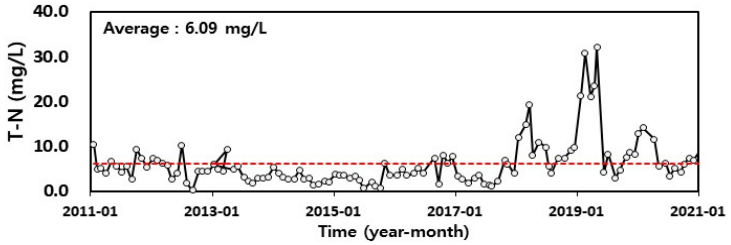
(a) Dodang



(b) Dundang

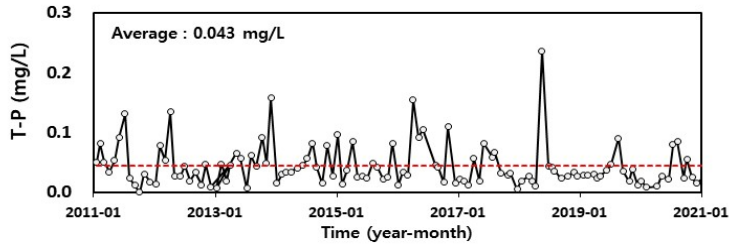


(c) Waryong

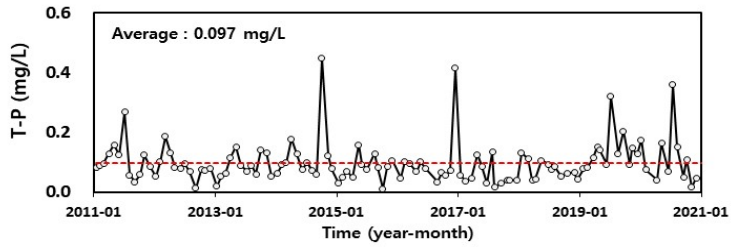


(d) Chungji

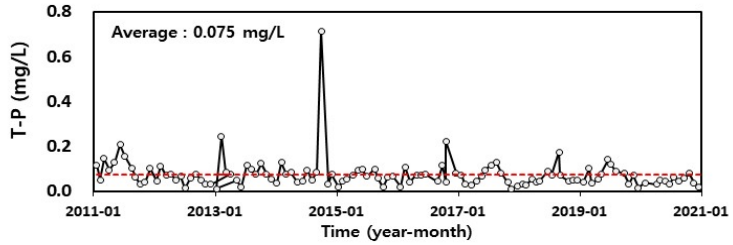
Fig. 3.12. Total nitrogen (T-N) concentration of inflow streams (data from Chungnam Province Institute of Health and Environment)



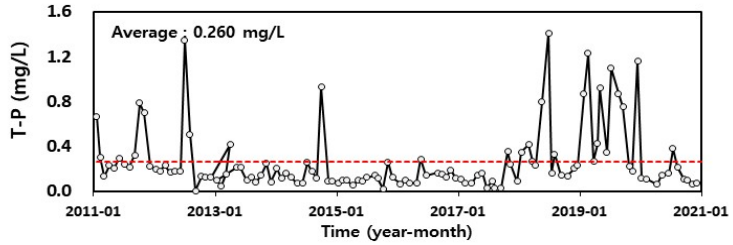
(a) Dodang



(b) Dundang



(c) Waryong



(d) Chungji

Fig. 3.13. Total phosphorus (T-P) concentration of inflow streams (data from Chungnam Province Institute of Health and Environment)

3.3.3 오염원자료

간월호 유역의 점오염원 자료 구축을 위해 전국오염원조사 자료로부터 간월호 유역 내에 위치한 하수처리시설 (서산 공공하수처리시설, 음암 공공하수처리시설, 도당 공공하수처리시설, 서산 분뇨처리시설) 방류수의 일별 유량 및 수질 자료를 수집하였으며, 자료의 기간은 2008년부터 2020년까지이다. 하수처리시설별 연평균 방류 수질 변화는 Fig. 3.14~3.15와 같다.

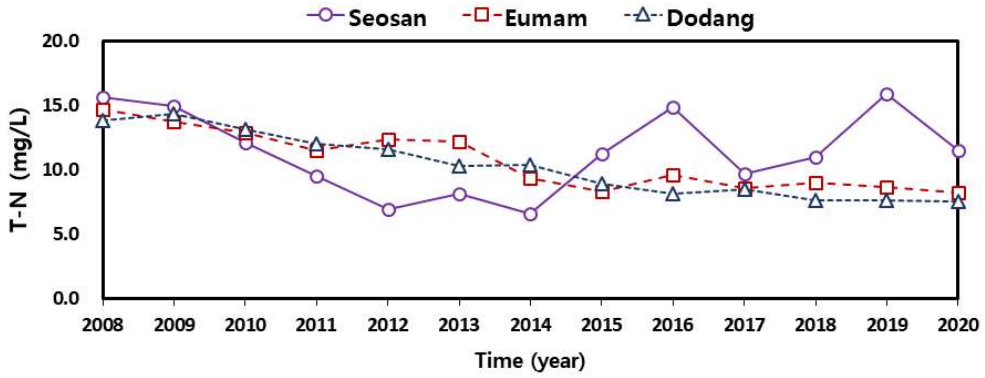


Fig. 3.14. Total nitrogen (T-N) concentration of public owned treatment utilities of the Ganwol estuary reservoir watershed (data from National Institute of Environmental Research)

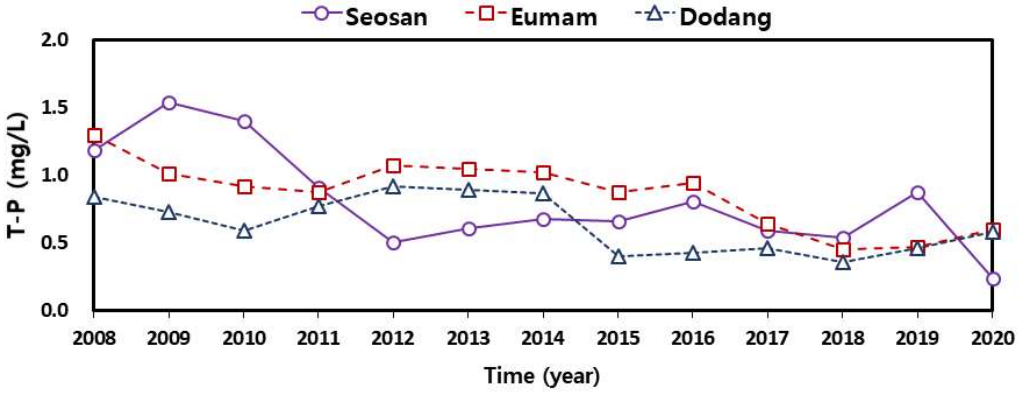


Fig. 3.15. Total phosphorus (T-P) concentration of public owned treatment utilities of the Ganwol estuary reservoir watershed (data from National Institute of Environmental Research)

3.4 담수호 수문 및 수질 자료 구축

간월호의 실측 수문 자료 구축을 위해 배수갑문 운영일지에 따른 호내 수위 및 방류량 자료를 구축하였으며, 양수장 가동현황 자료로부터 간월호 유역 내에 위치한 5개 양수장 (궁리, 사기, 석포, 지산, 간월)의 방류량 자료를 구축하여 호소 수리해석모형의 입력자료로 활용하고자 하였다. 또한, 간월호 내에 위치한 환경부 수질측정망 3개 지점의 월 1회 간격으로 조사된 수질 자료를 구축하여, 호내 수질 모의 및 보·검정에 활용하였다. 간월호에 위치한 5개 양수장과 호내 수질 관측지점 위치는 Fig. 3.16과 같다.

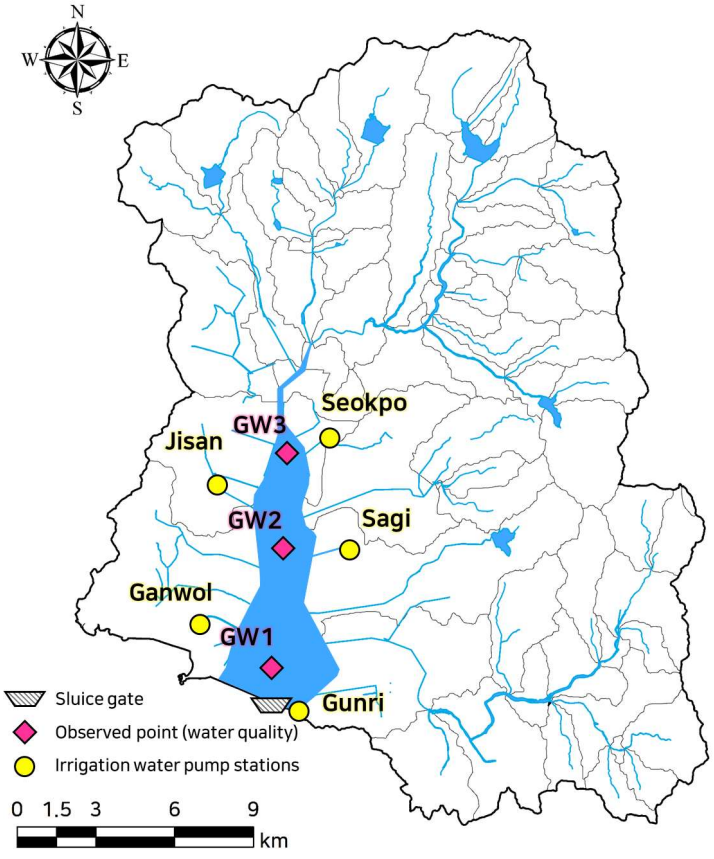


Fig. 3.16. Locations of irrigation water pumping stations and water quality monitoring points

3.4.1 호내 수위 모의를 위한 수문 자료

EFDC 모형을 통한 간월호의 수위 모의를 위해 간월호에 위치한 5개 양수장 (궁리, 사기, 석포, 지산, 간월)의 2015년부터 2020년까지 양수장 방류량 자료를 구축하였으며, 배수갑문 조작일지로부터 2008년부터 2017년까지 간월호의 수위 및 방류량 자료를 구축하여 EFDC 모형의 입력자료로 활용하였다. 월별 양수장 공급량 및 배수갑문 방류량은 Fig. 3.17~3.18과 같다.

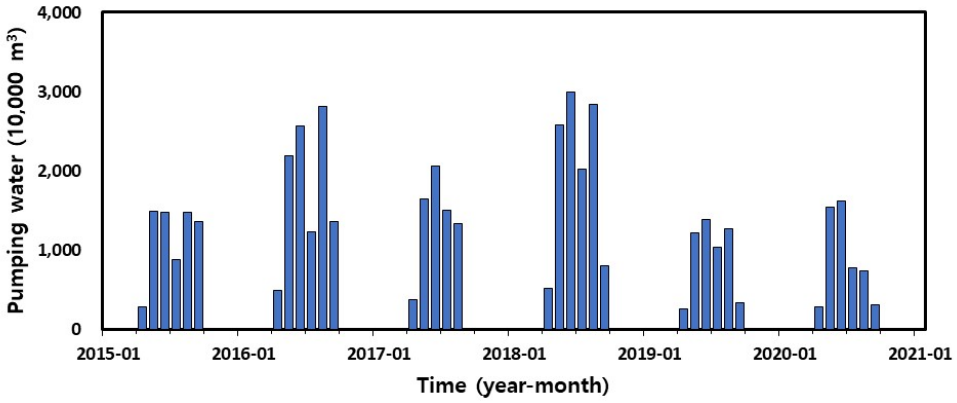


Fig. 3.17. Monthly water supply of pumping stations in the Ganwol estuary reservoir

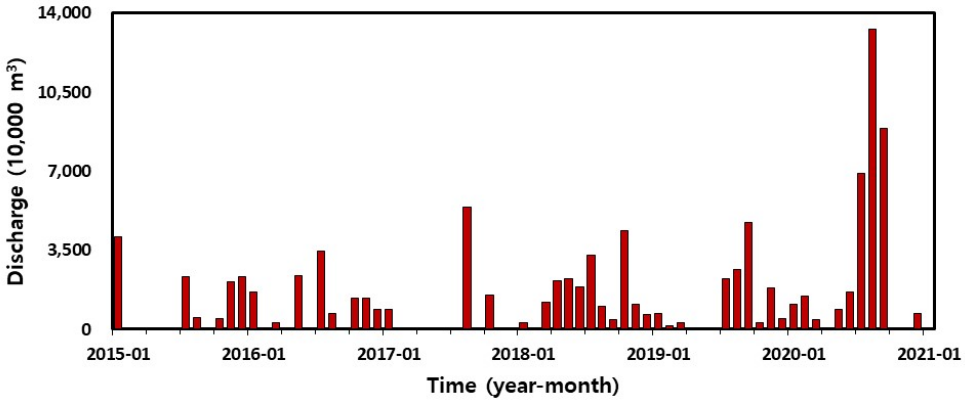


Fig. 3.18. Monthly discharge of a sluice in the Ganwol estuary reservoir

3.4.2 호내 수질 모의를 위한 수질 자료

WASP 모형을 통한 간월호의 수질 모의 및 모형 보·검정을 위해 간월호 내에 위치한 환경부 수질측정망 3개 지점 (간월호 1, 간월호 2, 간월호 3)의 2015년부터 2020년까지 호내 실측 수질자료를 수집하였다. T-N, T-P, Chl-a 항목에 대한 지점별 호내 수질자료 구축 결과는 Fig. 3.19~3.21과 같다. T-N, T-P 농도는 간월호 상류에 위치한 간월호 3지점 (T-N : 5.81 mg/L, T-P : 0.250 mg/L)이 상류유역에서 유입되는 오염물질의 영향을 많이 받아 간월호 1 (T-N : 2.29 mg/L, T-P : 0.134 mg/L) 및 간월호 2지점 (T-N : 2.70 mg/L, T-P : 0.135 mg/L)에 비해 높은 수준으로 나타났으며, Chl-a 농도는 간월호 2 (92.68 mg/m^3), 간월호 1 (86.50 mg/m^3), 간월호 3 (56.15 mg/m^3) 순으로 높게 나타났다.

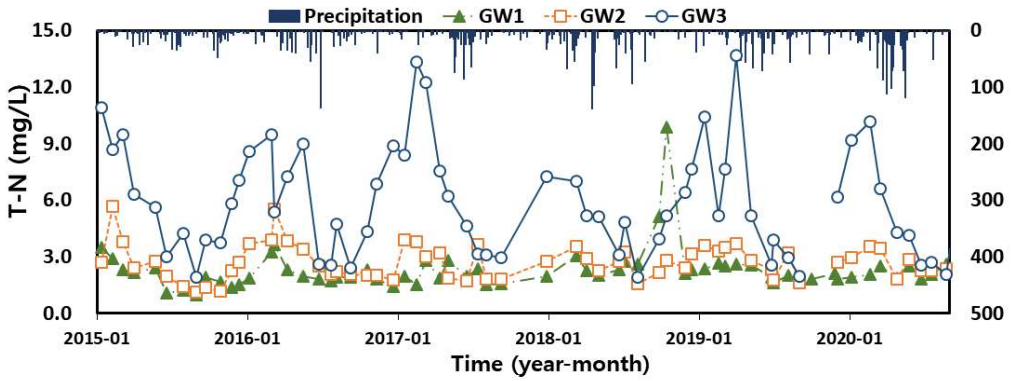


Fig. 3.19. Total nitrogen (T-N) concentration of the Ganwol estuary reservoir

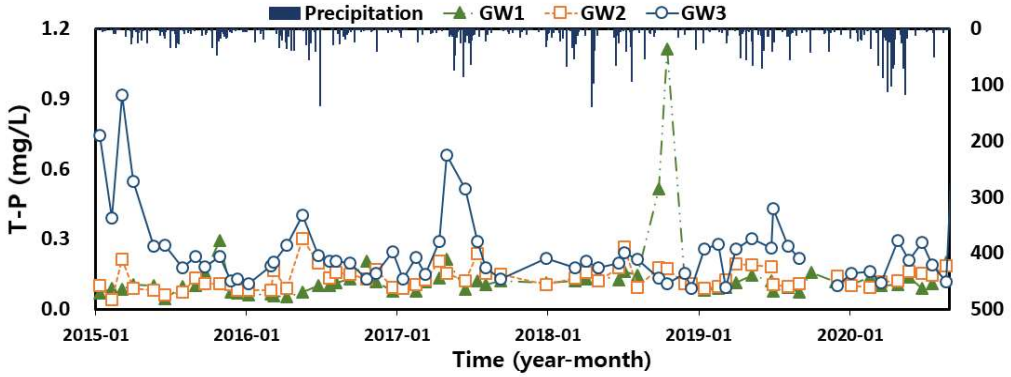


Fig. 3.20. Total phosphorus (T-P) concentration of the Ganwol estuary reservoir

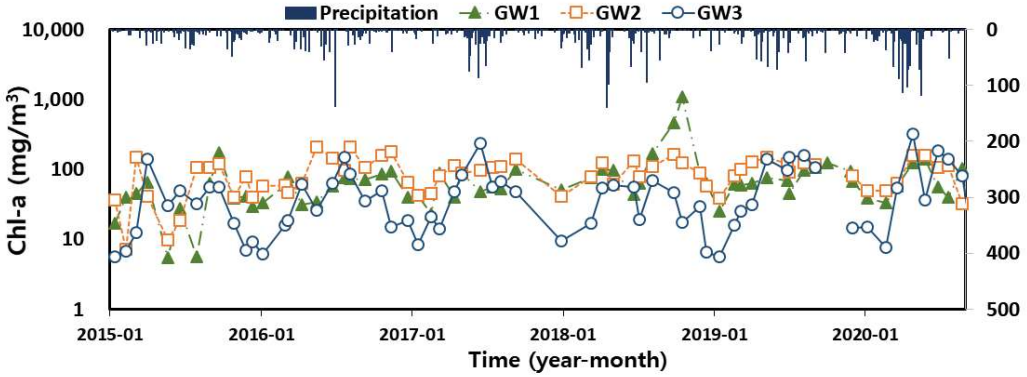


Fig. 3.21. Chlorophyll a (Chl-a) concentration of the Ganwol estuary reservoir

제 4 장 배수갑문 운영에 따른 담수호 수문 및 수질 영향 분석

4.1 HSPF 모형을 이용한 상류유역 수문·수질 모의

HSPF 모형을 이용한 간월호 상류유역의 장기유출량 및 수질 모의를 위해 유량 및 수질 관측지점을 고려하여 간월호 상류유역을 32개의 소유역으로 구분하고, 기상자료, 유역특성자료 (DEM, 토지이용도) 및 환경기초시설 방류량 및 방류 수질자료를 입력자료로 활용하여 모형을 구축하였다. 기상자료는 서산기상관측소의 강우량, 온도, 상대습도, 일사량, 풍속, 전운량, 이슬점온도 자료와 WDMUtil 상에서 계산한 증발산량 및 잠재증발산량 자료를 WDM 형태로 구축하여 모형의 입력자료로 활용하였다. Fig. 4.1은 간월호 유역의 HSPF 모형 구축에 따른 소유역 분할도를 나타내고 있다.

상류유역 유출량 및 수질 보·검정을 위해 충청남도보건환경연구원에서 [충청남도 모니터링 사업]에 따라 월 1회 계측한 일 유출량 및 수질 조사자료를 이용하였으며, 도당천, 둔당천, 와룡천 및 청지천의 간월호 유입 전 지점에 대해 보·검정을 수행하였다. 모형의 평가를 위한 통계변수로 R^2 (coefficient of determination), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), PBIAS (percent bias) 값을 이용하였다. R^2는 실측치와 모의치 간의 상관성을 평가하는 통계지표로, 0~1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 선형관계가 높음을 의미한다. NSE는 실측치와 모의치 간 잔차분산의 상대적 크기를 정규화한 것으로, $-\infty$~1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 모의치가 실측치에 완벽하게 일치함을 의미한다. PBIAS는 실측치로부터의 상대적인 오차를 나타내는 것으로, 양수와 음수인 경우 각각 과소 및 과대 산정된 것을 의미한다. 모형의 평가를 위한 통계변수별 범위는 Table 4.1과 같다.

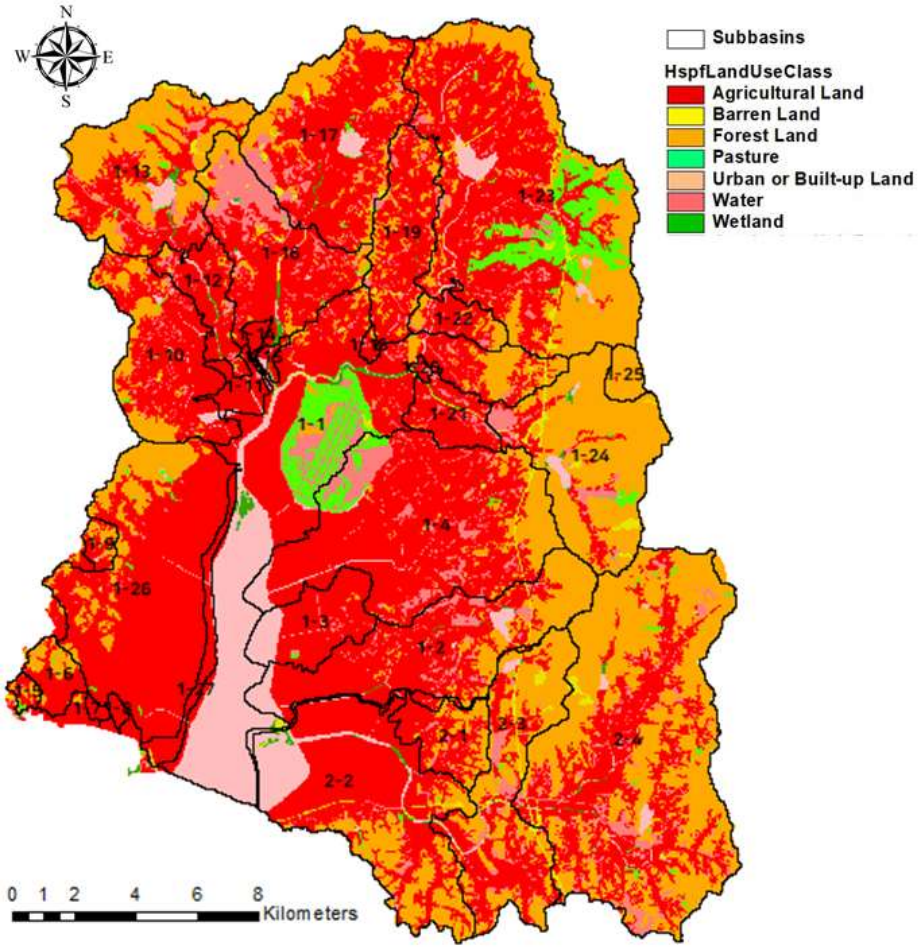


Fig. 4.1. Spatial distribution of subbasins of the Ganwol estuary reservoir watershed

Table 4.1. General ranges of statistics for model performance evaluation (adapted from Seong et al. (2017))

Item	Statistics	Data time period	Very Good	Good	Fair	Poor
Flow	R^2	Daily	$0.80<R^2\leq1.00$	$0.70<R^2\leq0.80$	$0.60<R^2\leq0.70$	$R^2\leq0.60$
	R^2	Monthly	$0.86<R^2\leq1.00$	$0.75<R^2\leq0.86$	$0.65<R^2\leq0.75$	$R^2\leq0.65$
	NSE	Monthly	$0.75<NSE\leq1.00$	$0.65<NSE\leq0.75$	$0.50<NSE\leq0.65$	$NSE\leq0.50$
	PBIAS (%)	Monthly	$PBIAS<\pm10$	$\pm10\leq PBIAS\leq\pm15$	$\pm15\leq PBIAS\leq\pm25$	$PBIAS\geq\pm25$
N, P		Monthly	$PBIAS<\pm25$	$\pm25\leq PBIAS\leq\pm40$	$\pm40\leq PBIAS\leq\pm70$	$PBIAS\geq\pm70$

4.1.1 유출량 모의 및 보·검정

HSPF 모형을 이용하여 2011~2020년 기간에 대해 담수호 상류 유역의 소유역별 유출량 모의를 수행하였다. 본 연구에서는 유출량 보·검정을 위해 다양한 수문사상을 포함하는 최근 5개년 (2016~2020년)을 보정기간, 이전 5개년 (2011~2015년)을 검정기간으로 설정하였으며, 모형의 평가를 위한 통계변수로 R^2, NSE, PBIAS 값을 이용하였다. 유출량 보·검정을 위해 사용된 매개변수는 Table 4.2와 같으며, 모형의 보·검정 결과는 Table 4.3 및 Fig. 4.2와 같다.

유량 보·검정에 따른 통계지표 산정 결과, 둔당천을 제외하고 R^2는 “좋음”~“아주좋음”, PBIAS는 “적절”~“아주좋음” 수준으로 나타나 모형의 보·검정이 적절하게 이루어진 것으로 평가된다. 한편, 둔당천의 경우 보정기간에 대해 NSE가 “부적절”로 나타났으나, R^2와 PBIAS 는 “적절” 수준으로 나타났으며, 검정 기간에 대해서는 R^2, NSE, PBIAS 모두 “아주좋음” 수준으로 나타났다. 전반적으로 모의치가 실측치를 과대산정하는 것으로 나타났으며, 둔당천의 경우 저수위시 유량을 다소 과대산정되는 것을 어느정도 보완했음에도 보정기간에 대한 유량 재현에 한계를 보였으며, 이는 유량측정지점 상류에 위치한 보의 영향 및 강우자료의 불확실성 등에 기인한 것으로 사료된다.

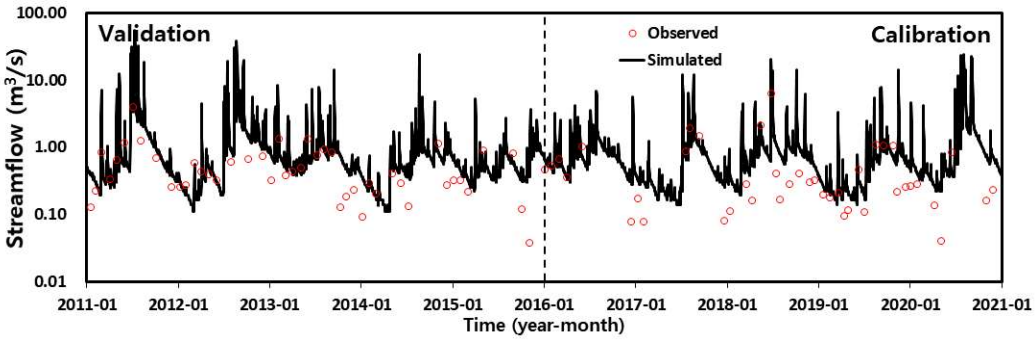
한편, 본 연구에서 모형 보·검정을 위해 사용된 실측 유량자료의 시간간격이 월 1회로, 실측 데이터의 수가 다소 부족하며 주로 저유량에 편중되어있어 통계적 성능평가 결과가 다소 과대 산정되었을 우려가 있으므로, 추후 현장 모니터링을 통해 다양한 수문사상에 대한 충분한 양의 실측 데이터를 확보하여 모형의 유출량 모의 성능을 개선할 필요가 있다.

Table 4.2. Calibrated values of HSPF parameters for runoff simulation

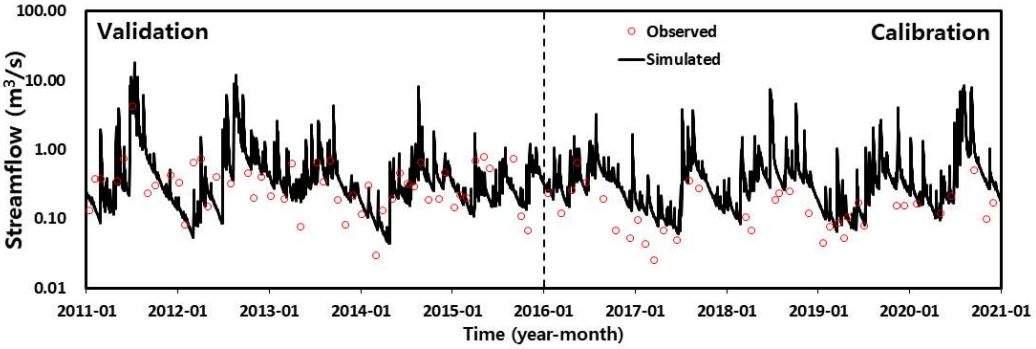
Parameter	Description	Ranges
INFILT	Infiltration capacity of the soil	0.1-0.2
AGWRC	Groundwater recession rate	0.98-0.99
DEEPFR	Fraction of GW inflow to deep recharge	0.1-0.2
UZSN	Upper zone nominal soil moisture storage	0.128-0.328
INTFW	Interflow inflow parameter	1.75-9.75
IRC	Interflow recession parameter	0.4-0.7

Table 4.3. Results of runoff calibration and validation on flow stations in the Ganwol estuary reservoir watershed

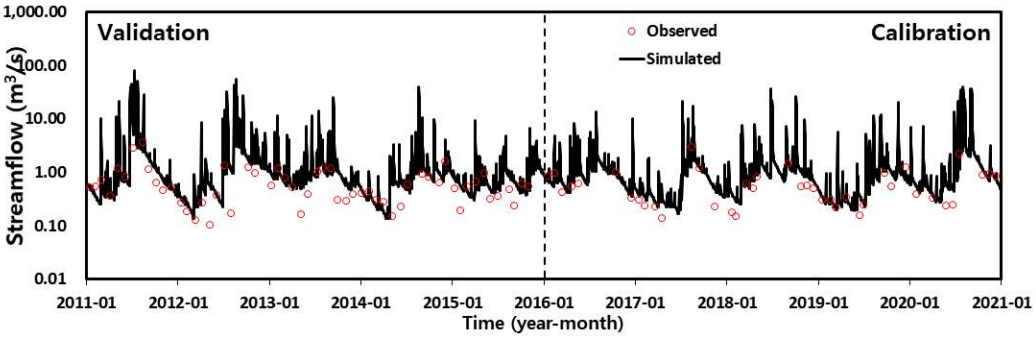
Statistics		Flow stations			
		Dodang	Dundang	Waryong	Chungji
Calibration	R^2	0.87	0.61	0.72	0.73
	NSE	0.78	0.27	0.67	0.52
	PBIAS (%)	-14.79	-66.66	-14.18	21.24
Validation	R^2	0.76	0.83	0.82	0.75
	NSE	0.68	0.83	0.50	0.64
	PBIAS (%)	-26.36	-3.42	-50.47	-35.15



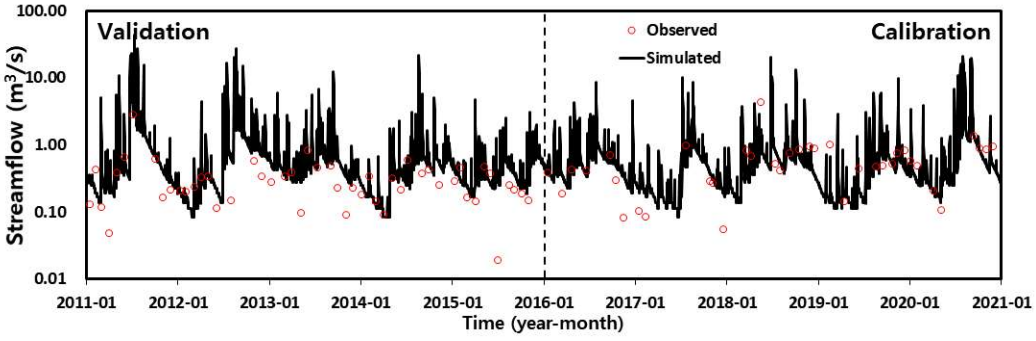
(a) Dodang



(b) Dundang



(c) Waryong



(d) Chungji

Fig. 4.2. Observed and simulated time series streamflow of flow stations

4.1.2 수질 모의 및 보·검정

HSPF 모형을 이용하여 2011~2017년 기간에 대해 담수호 상류 유역의 소유역별 수질 (T-N, T-P) 모의를 수행하였다. 수질 보·검정을 위해 2016~2020년을 보정기간, 2011~2015년을 검정기간으로 설정하였으며, 보·검정을 위한 목적함수로 PBIAS 값을 이용하였다. T-N 및 T-P 수질 항목에 대한 보·검정을 위해 사용된 매개변수는 Table 4.4와 같으며, 모형 보검정 결과는 Table 4.5 및 Fig. 4.3~4.4와 같다.

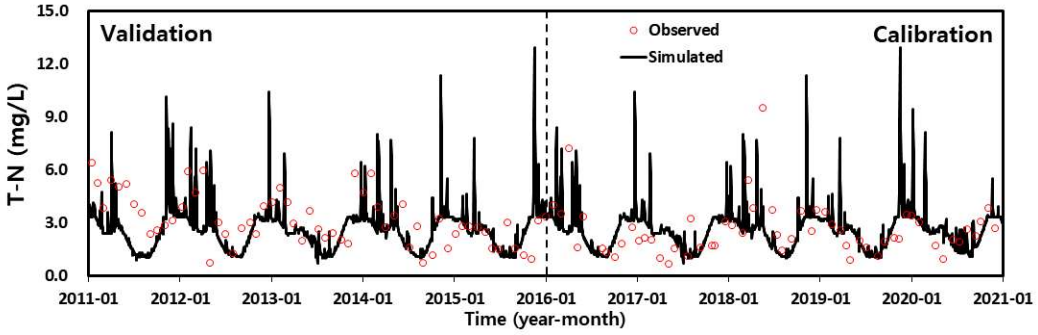
수질 보·검정기간에 대한 통계지표 산정 결과, T-N, T-P 항목 모두 PBIAS 값이 "아주좋음" 수준으로 나타나 모형의 보·검정이 적절하게 이루어진 것으로 평가되며, 시계열 그래프 (Fig. 4.3~4.4)를 통해 모의치가 실측치의 변화 양상과 수질항목별 농도의 범위를 합리적으로 구현하는 것으로 나타났다.

Table 4.4. Calibrated values of HSPF parameters for water quality simulation of the Ganwol estuary reservoir watershed

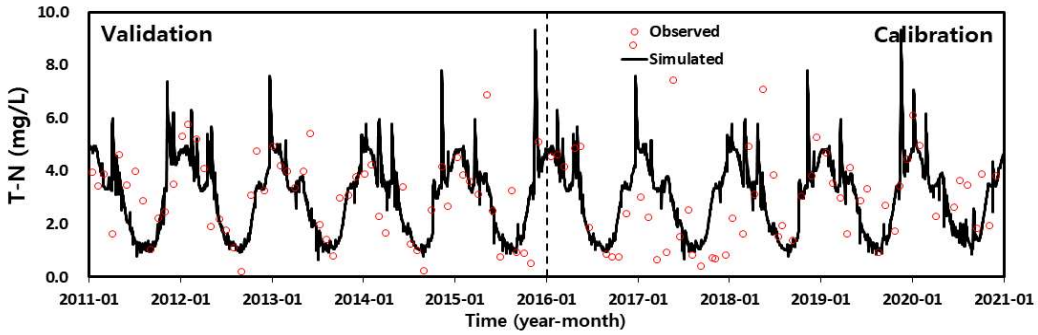
Parameter	Description	Ranges
CVBPC	Conversion from biomass expressed as phosphorus to carbon	50-116
CVBPN	Conversion from biomass expressed as phosphorus to nitrogen	10-50
BRNIT	Benthal release rates of ammonia under aerobic and anaerobic conditions	0-10
BRPO4	Benthal release rates of ortho-phosphorus	0-1.7
KTAM20	Nitrification rates of ammonia at 20°C	0.015-0.945
KNO220	Nitrification rates of nitrite at 20°C (hr^{-1})	0.002-9.302

Table 4.5. Results of water quality calibration and validation in the Ganwol estuary reservoir watershed

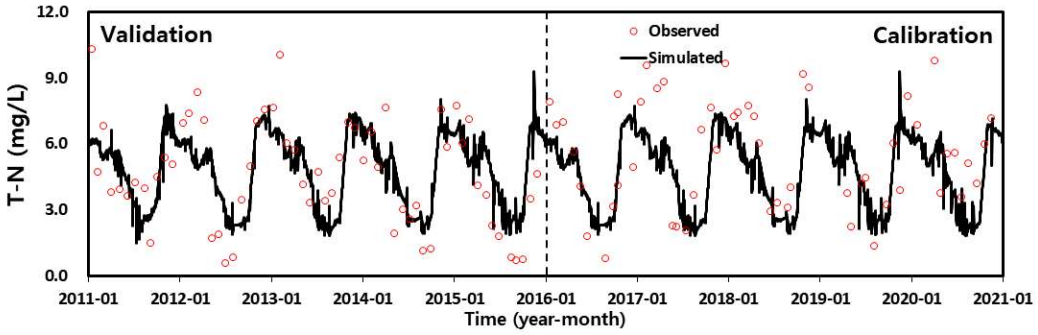
Streams		T-N			T-P		
		Obs. (mg/L)	Sim. (mg/L)	PBIAS (%)	Obs. (mg/L)	Sim. (mg/L)	PBIAS (%)
Calibration	Dodang	2.57	2.65	-0.50	0.041	0.047	-10.25
	Dundang	3.12	3.04	3.14	0.083	0.072	13.01
	Waryong	5.47	4.77	11.96	0.062	0.068	-8.60
	Chungji	5.17	4.40	14.44	0.169	0.156	8.75
Validation	Dodang	3.14	2.68	7.79	0.046	0.046	-7.80
	Dundang	3.02	3.05	-6.12	0.085	0.072	13.57
	Waryong	4.61	4.80	-4.09	0.069	0.069	2.21
	Chungji	4.17	4.39	-11.40	0.160	0.158	-1.71



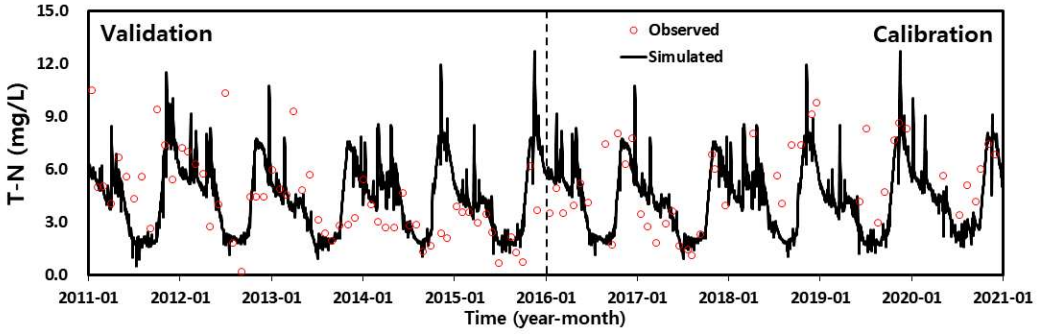
(a) Dodang



(b) Dundang

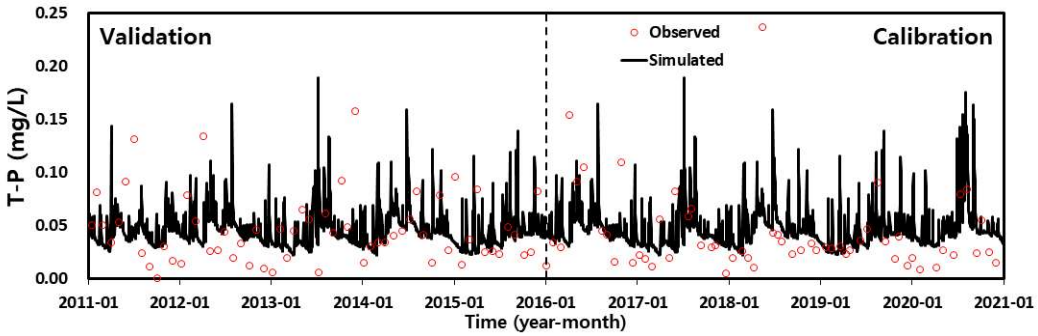


(c) Waryong

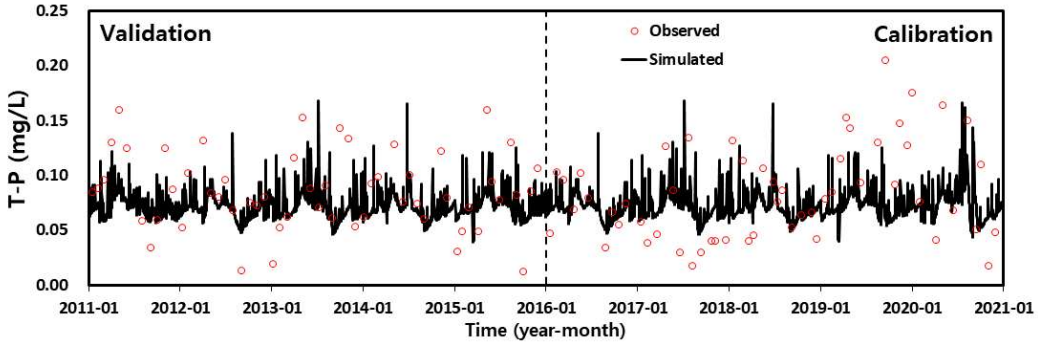


(d) Chungji

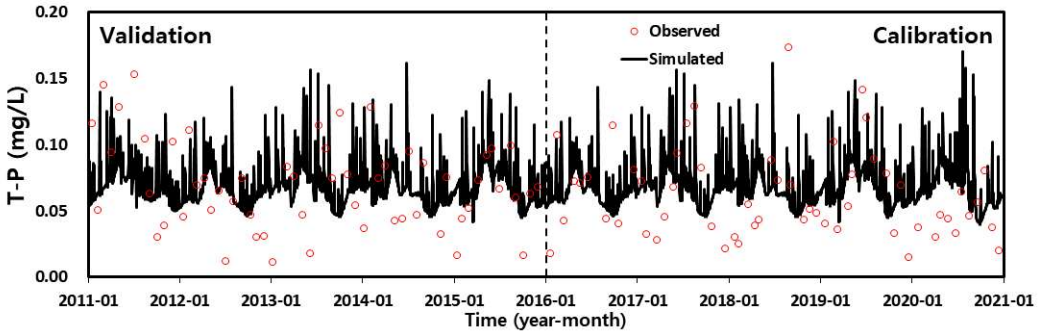
Fig. 4.3. Observed and simulated time series of T-N concentration



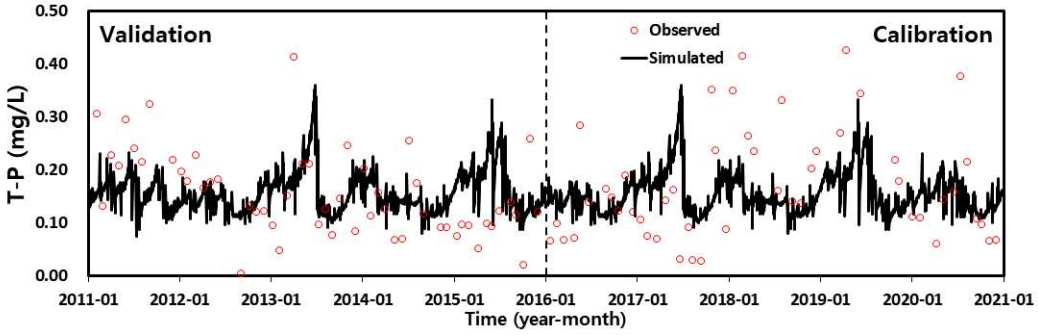
(a) Dodang



(b) Dundang



(c) Waryong



(d) Chungji

Fig. 4.4. Observed and simulated time series of T-P concentration

4.2 EFDC-WASP 모형을 이용한 담수호 수문·수질 모의

4.2.1 EFDC 모형을 이용한 수위 모의 및 보·검정

본 연구에서는 호내 수위 모의를 위해 EFDC 모형을 통해 3차원 격자망을 구성하였다. 한국농어촌공사로부터 제공받은 최신 측량 자료를 이용하여 Fig. 4.5와 같이 총 282개의 격자를 구축하였으며, 수평 방향으로 직교좌표계, 수직 방향으로 시그마 좌표계를 사용하였다.

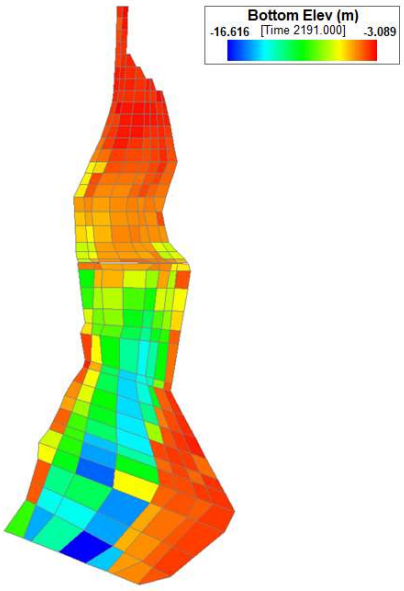


Fig. 4.5. Model grids created for the Ganwol estuary reservoir in EFDC model

HSPF 모형을 통해 모의한 상류 유입하천별 유출량, 배수갑문 조작일지에 따른 방류량, 및 양수장 공급량 자료를 이용하여 2015년부터 2020년까지 호내 수위 모의를 수행한 결과는 Fig. 4.6과 같다. 실측치와 모의치의 상관계수 값이 0.72로 나타나 담수호의 수문 모의 재현성이 높은 것으로 나타났다 (Fig. 4.7).

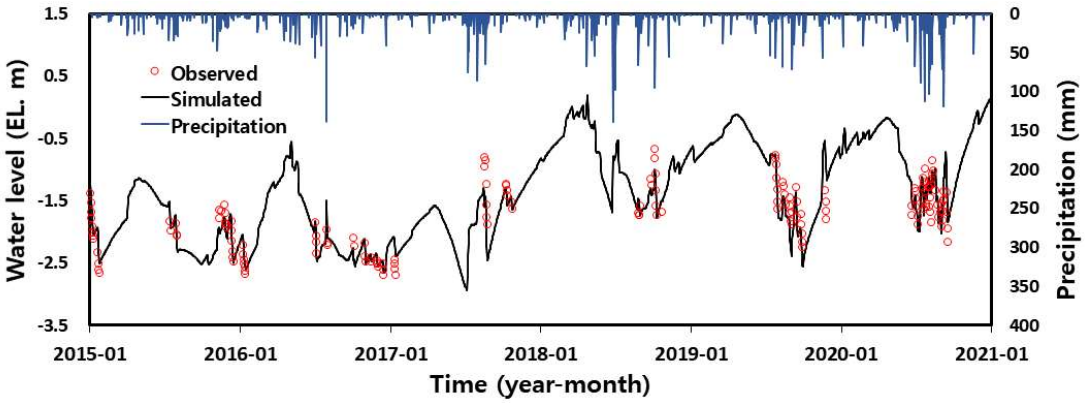


Fig. 4.6. Water level simulation result of the Ganwol estuary reservoir

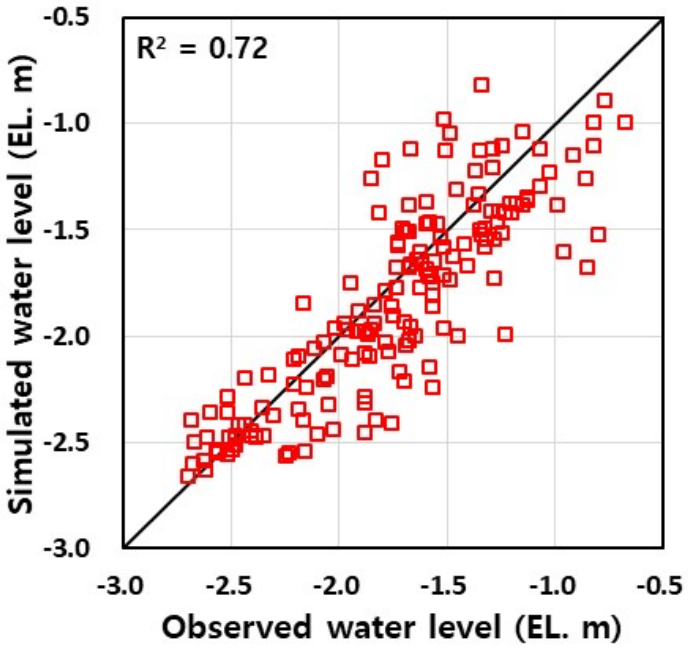


Fig. 4.7. Observed and simulated water level of the Ganwol estuary reservoir

4.2.2 WASP 모형을 이용한 수질 모의 및 보·검정

EFDC-hydro를 통해 모의한 호내 수리해석 결과를 WASP 모형의 hydrodynamics interface 입력자료로 연계하고, HSPF 모의를 통한 상류 유입수 수질을 경계조건으로 입력하여 호내 수질을 모의하였다. 환경부 수질측정망 관측 수질자료를 이용하여 2015~2020년 기간에 대해 수온, DO, T-N, T-P, Chl-a 항목에 대한 모형의 보·검정을 수행하였으며, 2018~2020년을 보정기간, 2015~2017년을 검정기간으로 설정하였다. 매개변수 보정에 사용된 매개변수는 Table 4.6과 같으며, 간월호 상류 (하천 유입부) 지점에서의 T-N, T-P, Chl-a 항목에 대한 수질 보·검정 결과는 Table 4.7 및 Fig. 4.8과 같다.

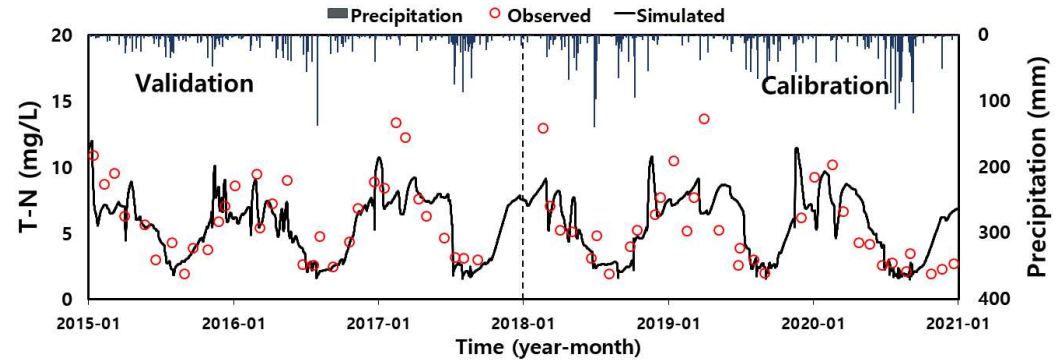
수질 보·검정 기간에 대한 PBIAS 산정 결과, T-N, T-P 항목의 경우 보정 및 검정기간 모두 “아주좋음” 수준으로 나타났으며, Chl-a는 보정기간과 검정기간 각각 “좋음” 및 “아주좋음” 수준으로 나타나 모형의 보·검정이 적절하게 이루어진 것으로 평가된다. 시계열 그래프 (Fig. 4.8)를 통해 모의치가 실측치의 계절적 변동성 및 범위를 합리적으로 구현하는 것으로 판단된다.

Table 4.6. Calibrated values of WASP parameters for water quality simulation of the Ganwol estuary reservoir

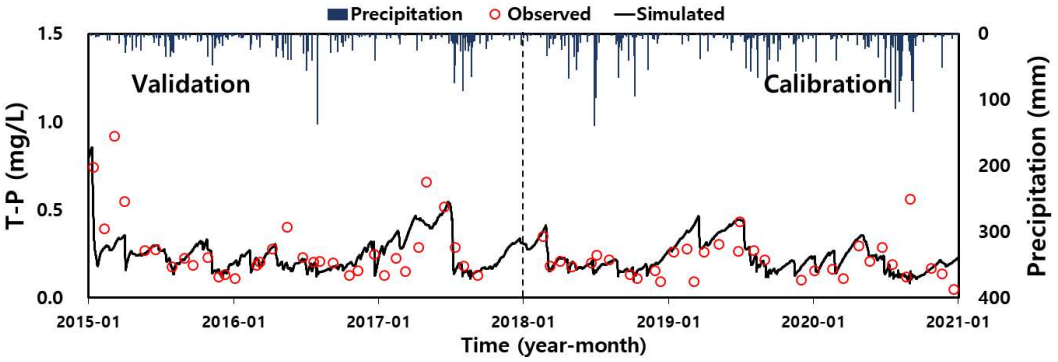
Parameter	Unit	Default	Calibrated
Phytoplankton Maximum Growth Rate Constant @20℃	(day^{-1})	0	3
Phytoplankton Carbon to Chlorophyll Ratio	(mgC/mgChl-a)	50	80
Phytoplankton Respiration Rate Constant @20℃	(day^{-1})	0.1	0
Phytoplankton Detritus to Carbon Ratio	(mgD/mgC)	4	4
Phytoplankton Phosphorus to Carbon Ratio	(mgP/mgC)	0.025	0.025

Table 4.7. Results of water quality calibration and validation in the Gangwol estuary reservoir

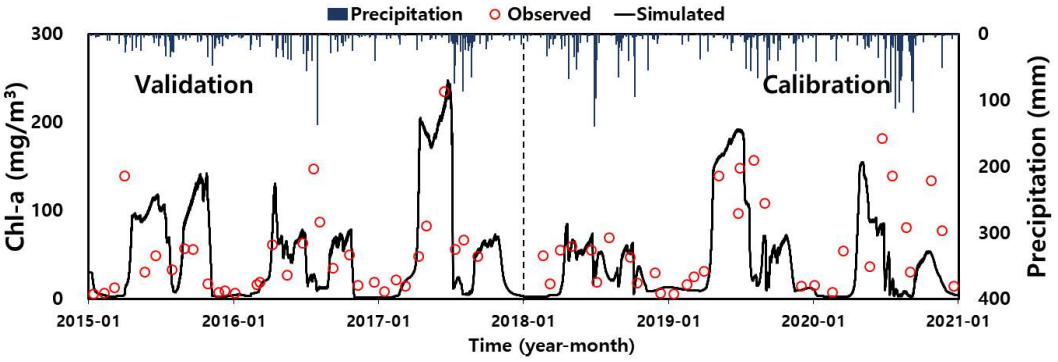
		Calibration	Validation
T-N	Obs. (mg/L)	5.29	6.18
	Sim. (mg/L)	5.75	5.62
	PBIAS (%)	-8.59	9.05
T-P	Obs. (mg/L)	0.211	0.281
	Sim. (mg/L)	0.239	0.260
	PBIAS (%)	-13.47	7.80
Chl-a	Obs. (mg/m^3)	68.44	46.76
	Sim. (mg/m^3)	42.50	48.92
	PBIAS (%)	37.90	-4.61



(a) T-N



(b) T-P



(c) Chl-a

Fig. 4.8. Calibration and validation result of T-N, T-P, and Chl-a in the Ganwol estuary reservoir

4.3 배수갑문 운영 시나리오

EFDC 모델은 하류경계조건을 개방경계조건 (open boundary condition), 육지 (land)조건 또는 유량경계조건으로 순차적으로 적용할 수 있는 기능이 없으므로 (전지혜 등, 2011), 담수호의 배수갑문 운영에 따른 호내 수리특성 변화를 모의하기 위해서는 관리수위 조건별 방류량을 산정하고 이를 EFDC 모형에 반영해야 한다. 본 연구에서는 유지관리수위 시나리오별 방류량 산정을 위해 호 내측 및 외해측의 수위차를 고려하고자 내외수위 조건에 따라 4가지 흐름 (잠긴 오리피스, 수면 오리피스, 잠긴 웨어, 자유유출웨어)으로 구분하여 방류량을 산정하였다.

4.3.1 유지관리수위 시나리오

가. 간월호 관리수위 및 해측 조위 현황

현재 간월호의 주요 제원은 Table 4.8과 같으며, 관리수위 및 해측 조위 특성은 Fig. 4.9와 같다. 현재 간월호의 계획 관리수위는 EL. -1.70 m로, 홍수기 (6/21−8/20)에는 EL. -2.10 m, 비홍수기에는 EL. -1.70 m로 유지관리수위가 운영되고 있다. 간월호의 홍수위 (100년 빈도)는 EL. 1.12 m이며, Sill 표고는 EL. -5.00 m이다. 간월호의 해측 조위 특성의 경우, 대조평균고조위 (high water ordinary spring tide)는 EL. 3.34 m, 소조평균간조위 (low water ordinary neap tide)는 EL. -1.40 m이다.

담수호의 관리수위는 관개기간동안 계획된 관개면적에 용수를 공급하기 위해 유지하여야 할 수위로, 외해의 소조평균간조위를 감안하여 평상시 수위가 유지될 수 있도록 하며, 수자원 확보 및 홍수배제능력, 배후지의 침수분석, 성토제 끝막이 시공조건 등을 고려하여 결정된다 (한국농어촌공사, 2018). 하지만, 기존의 담수호 관리수위는 주로 수자원 확보 및 시

공 용이성에 초점이 맞추어져 있어 환경적인 영향에 대한 충분한 고려가 이루어지지 않았으며, 준설 등 향후 호내 수리특성의 변화와 호내 수질 개선을 위한 근본적 대책 마련 등의 필요성에 따라, 관리수위가 호내 수문 및 수질에 미치는 영향을 파악하여 환경적 측면까지 고려한 최적의 관리수위 운영방안을 도출할 필요가 있다. 특히, 간월호의 설계 당시 계획 관리수위는 EL. −1.00 m로, 설계 당시에 비해 현재 EL. −1.70 m로 관리수위가 낮아진 것은 호내 수질 측면보다는 홍수배제능력의 확보 및 배후지의 침수 영향이 주로 고려된 결과이므로, 설계 당시 관리수위에 비해 현재 관리수위를 적용하는 것이 호내 환경에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다,

Table 4.8. Main specifications of the Ganwol estuary reservoir

Items	Unit	Value
Effective storage	1000 m^3	44,980
Water management level	EL. m	-1.70 (non-flood season)
	EL. m	-2.10 (flood season)
Flood water level	EL. m	+1.12
Dead storage level	EL. m	-3.90
Sill level	EL. m	-5.00
Dike length	m	6,458
Dike height	EL. m	8.50
Sluice gate (B×H×N)	m, n	10×4×8

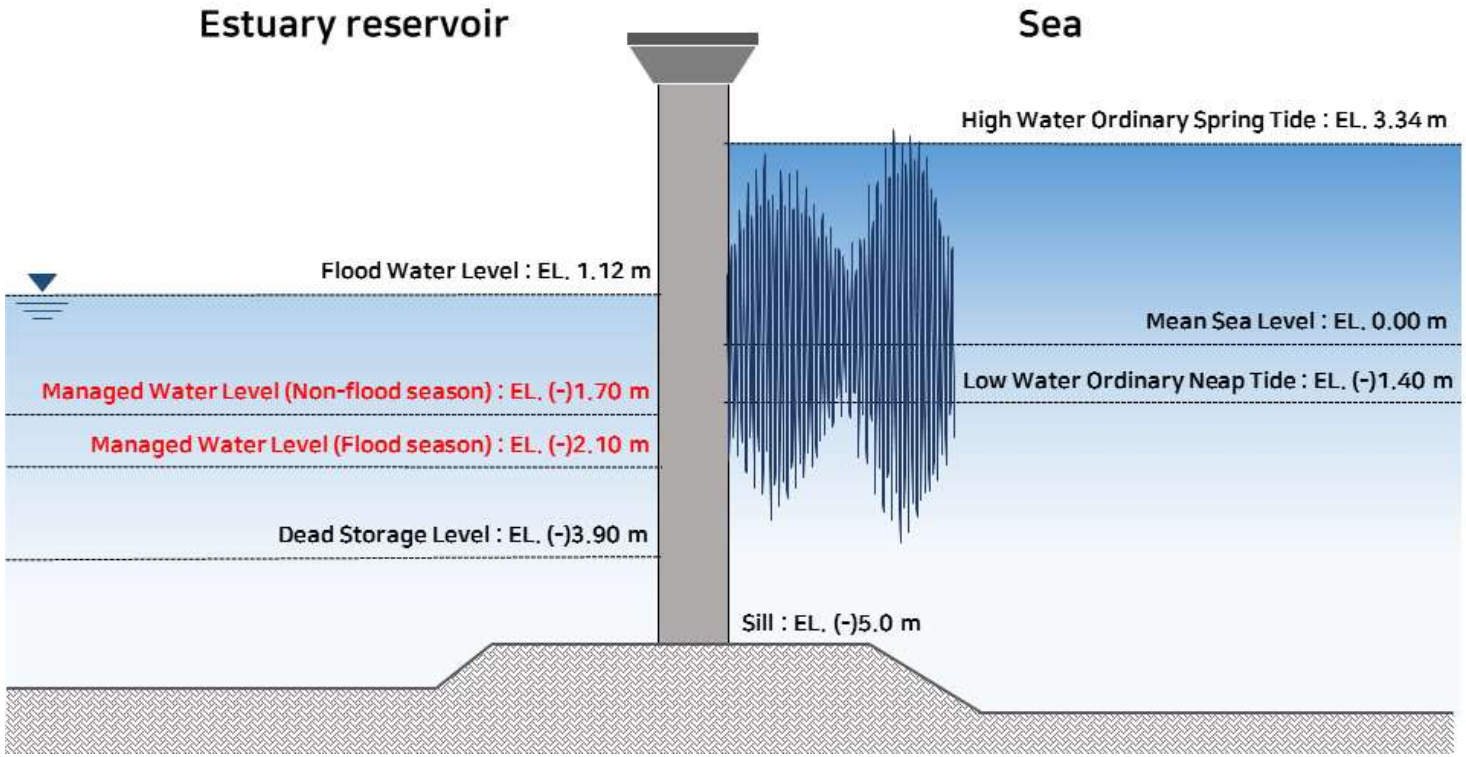


Fig. 4.9. Maintenance level and tidal stages of the Ganwol estuary reservoir

나. 유지관리수위 시나리오

담수호의 관리수위는 내한능력 확보 및 호내 수질 측면에서는 가급적 높게 하는 것이 유리하나, 상류유역의 침수방지 등을 위해서는 낮게 유지하는 것이 유리하며, 담수호에 따라 EL. -1.70 m~EL. 2.50 m 범위에서 설정하고 있다. 또한, 담수호의 관리수위는 유역상황과 관개여건 등에 따라 관개기간과 비 관개기간으로 나누어 수위를 다르게 관리할 수 있다.

본 연구에서는 유지관리수위 변화가 호내 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 총 8가지의 유지관리수위 시나리오를 구성하여 장기간의 호내 수질 변화를 모의하였으며, 본 연구에서 고려한 유지관리수위 시나리오는 Table 4.9와 같다. ML S0은 설계 당시 간월호 (서산 A)의 유지관리수위로, 연중 EL -1.00 m로 유지되는 경우에 해당하며, ML S1은 현재 천수만 물관리협약에서 규정하고 있는 간월호의 계획 유지관리수위 조건으로, 평상시 EL. -1.70 m, 홍수기시 EL. −2.10 m로 관리되는 조건에 해당한다. ML S2부터 ML S6까지는 현재 간월호의 유지관리수위 (EL. −1.70 m)를 기준으로 호내 통수단면적의 변화를 충분히 모의할 수 있도록 0.50 m 간격으로 관리수위를 증가시켜가며 EL. −1.20 m~EL. 0.80 m 범위에서 관리수위 시나리오를 구성하였으며, ML S7은 관리수위가 간월호의 홍수위를 넘지 않도록 평상시 관리수위 조건을 EL. 1.12 m로 설정하였다. 한편, S1부터 S7까지 홍수기시 유지관리수위 조건은 현재 (EL. −2.10 m)와 동일한 것으로 가정하였다.

Table 4.9. Cases of the maintenance level

Scenario	Maintenance level (EL. m)	
	Non-flood season	Flood season
ML S0	-1.00	
ML S1	-1.70	-2.10
ML S2	-1.20	-2.10
ML S3	-0.70	-2.10
ML S4	-0.20	-2.10
ML S5	0.30	-2.10
ML S6	0.80	-2.10
ML S7	1.12	-2.10

4.3.2 유지관리수위를 고려한 배수갑문 방류량 산정

가. 방류량 산정 공식

본 연구에서 설정한 유지관리수위 시나리오별 배수갑문 운영을 모의하기 위해 각 유지관리수위 조건에 따른 방류량을 산정하였다. 배수갑문 방류량은 내외수위 조건에 따라 Fig. 4.10과 같이 잠긴 오리피스 (submerged orifice), 수면 오리피스 (drowned orifice), 잠긴 웨어 (submerged weir), 자유유출웨어 (free weir)의 총 4가지 흐름으로 구분하여 산정하였으며, 흐름 조건별 방류량 공식에 적용된 유량계수 값은 Table 4.10과 같다.

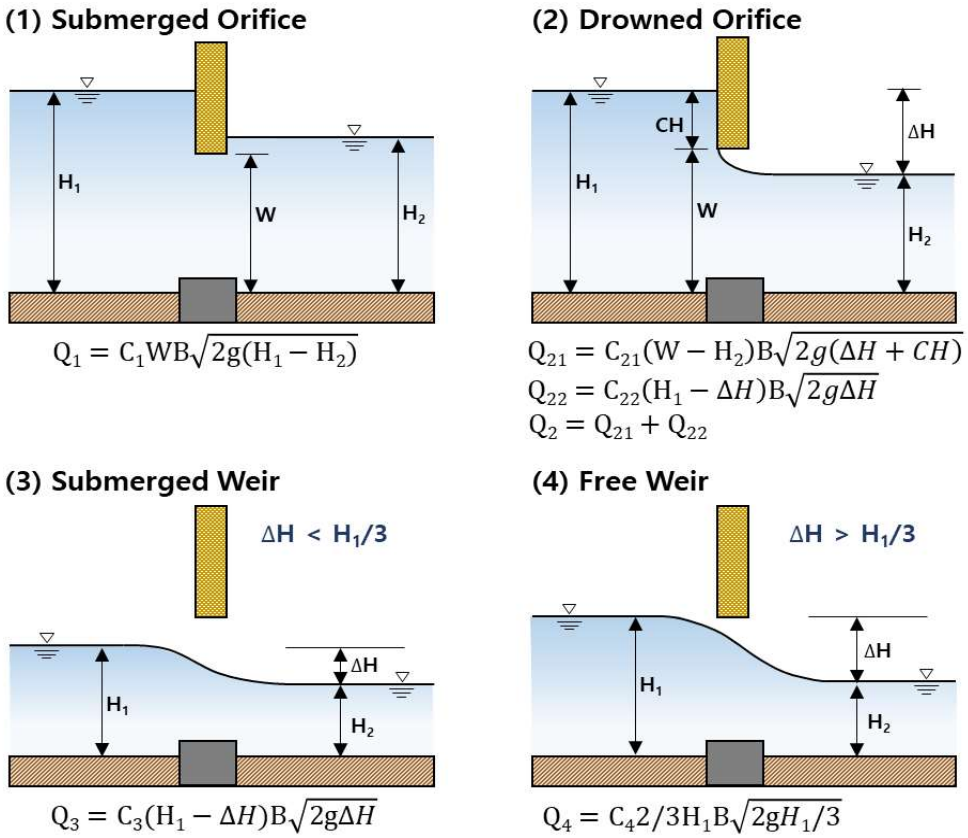


Fig. 4.10. Release discharge of a sluice according to the flow characteristics

Table 4.10. Discharge coefficients by flow types

Flow type	Coefficient	Value
Submerged orifice	C_1	0.7
Drowned orifice	C_{21}	0.6
	C_{22}	0.9
Submerged weir	C_3	0.8
Free weir	C_4	0.8

나. 배수갑문 운영조건

배수갑문 운영조건은 내수위가 유지관리수위 이상이며, 외조위가 내수위 이하가 되면 방류를 시작하며, 밀물 중 외조위가 내수위의 0.5 m이하와 같아지면 방류를 중지하는 것으로 가정하였다. 또한, 배수갑문 조작일지에 따른 1회 방류시 평균 방류시간은 약 184분으로 나타나, 회당 방류시간이 3시간을 넘지 않도록 설정하였다.

간월호의 배수갑문은 10 m (B) × 4 m (H), 수문 8련으로 구성되어 있다. 방류량 산정시 개방 수문 수 및 수문 개방고 (W)는 천수만 물관리 기본 협약에 제시된 방류조건을 고려하여 평상시 전체 수문수의 50% (4련)를 4 m 높이로 개방하는 것을 가정하였으며, 홍수기에는 유입량 조건에 따라 최대 8련까지 개방할 수 있도록 설정하였다.

Fig. 4.11은 간월호의 외조위 변화를 도시한 그래프로, 외조위 자료는 국립해양조사원의 보령조위관측소의 2015년부터 2020년까지 1시간 단위 조위자료를 이용하였으며, 간월도항의 평균 해면을 고려하여 환산 적용하였다. 내수위, 외조위 및 유지관리수위 조건에 따라 1시간 단위 방류량을 산정하였으며, 간월호의 수위-유효저수량 관계 (Fig. 4.12)로부터 내수위의 변화를 추정하였다.

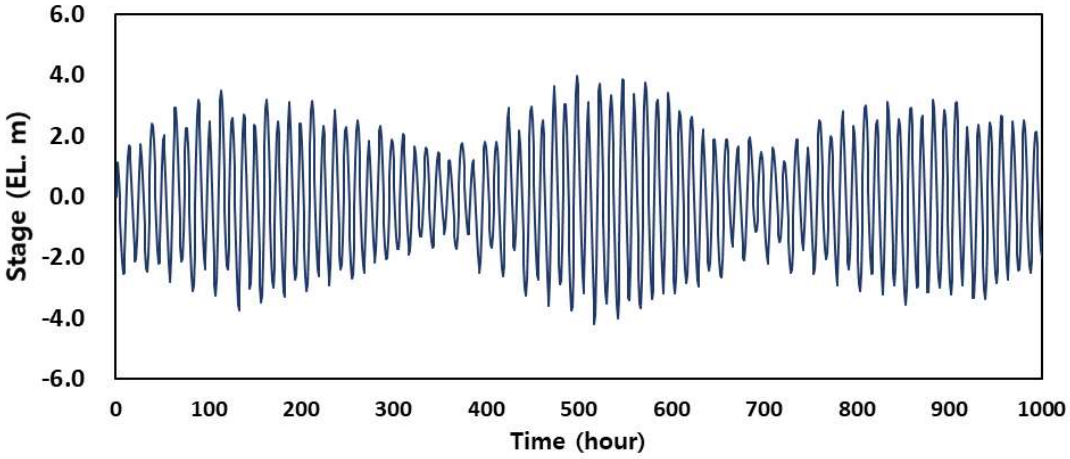


Fig. 4.11. Tidal stages of the Ganwol embankment

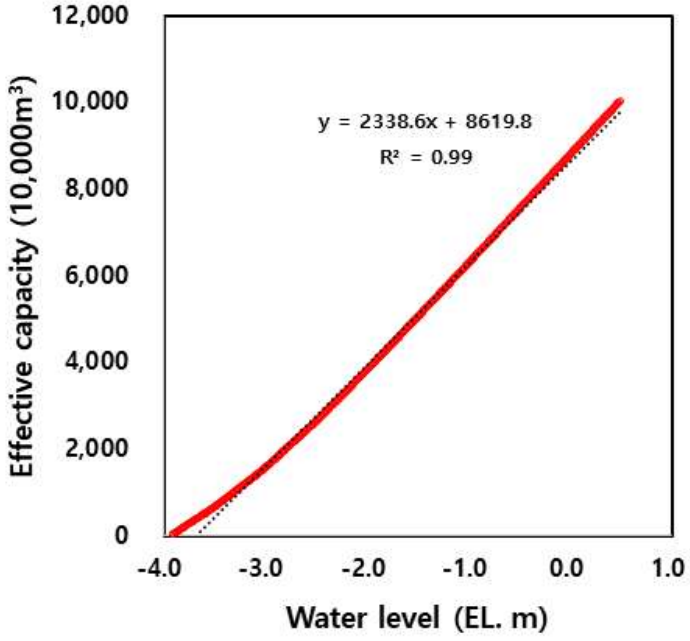


Fig. 4.12. Relationship between water level and effective capacity of the Ganwol estuary reservoir

4.3.3 유지관리수위 시나리오별 호내 수문특성 변화

가. 관측 방류량 및 내수위

배수갑문 조작일지에 따른 관측 방류량, HSPF 모의에 따른 상류 유입량 및 EFDC 모의에 의한 내수위 산정 결과는 Fig. 4.13과 같다. 2015년부터 2020년까지 간월호의 배수갑문 조작일지에 따른 연평균 방류일수는 37일, 연평균 총 방류량은 약 165,243 천 m^3, 연평균 일 방류량은 약 4,331 천 m^3로 나타났으며, 홍수기 상류 유입량 증가에 따라 방류빈도 및 방류량이 높게 나타났다. 현재 간월호는 평상시 EL. -1.70 m, 홍수기 EL. -2.10 m로 관리수위가 운영되고 있으나, 강우량과 강우지속시간, 오염물질 유입 등을 고려하여 현장에서 조작 관리자가 유동적으로 조정 가능함에 따라 내수위의 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. 모의 기간 중 최대 내수위는 EL. 0.19 m, 홍수기 및 비홍수기 평균 내수위는 각각 EL. -1.62 m 및 EL. -1.34 m로 나타났다.

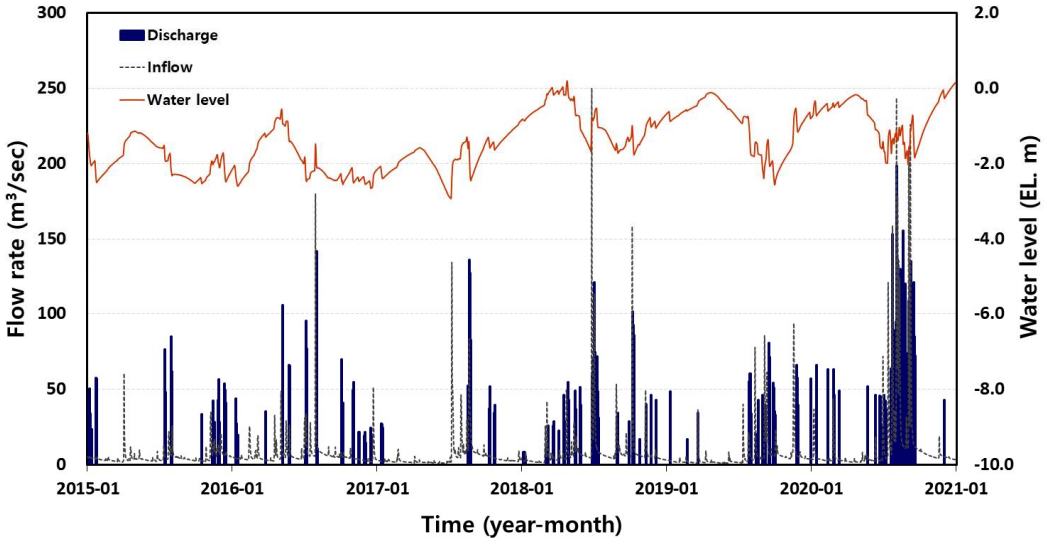


Fig. 4.13. Observed discharge, inflow and simulated water level of the Ganwol estuary reservoir

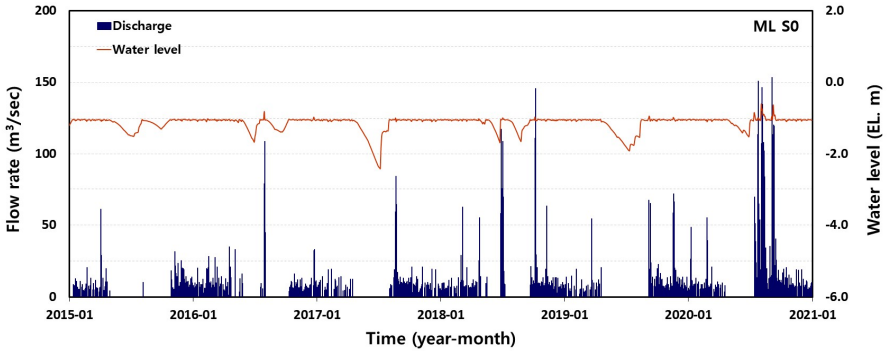
나. 시나리오별 방류량 및 내수위 변화

내외수위차를 고려한 유지관리수위 시나리오별 방류량 산정 결과와 EFDC 모의에 의한 시나리오별 내수위 산정 결과는 Fig. 4.14-4.15와 같으며, 시나리오별 평균 연간 방류량, 총 방류일수 및 평균 일 방류량의 비교 결과는 Table 4.11과 같다.

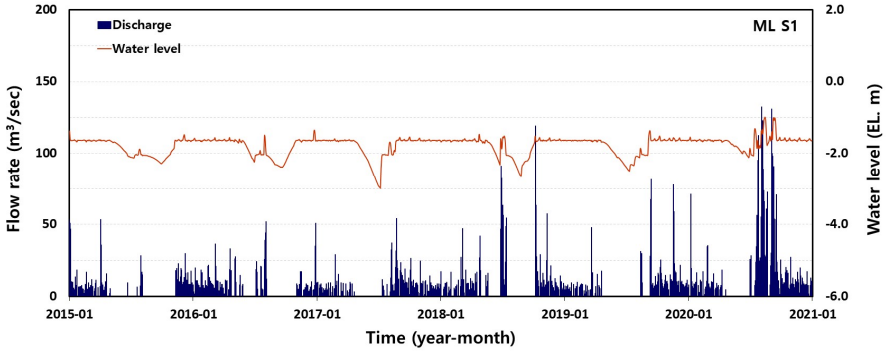
ML S1에서 연평균 총 방류일수는 135일로 나타났으나 ML S7에서 연평균 총 방류일수는 63일로 나타났으며, ML S1에서 연평균 일 방류량은 1,221 천 m^3, ML S7에서 연평균 일 방류량은 2,532 천 m^3으로 나타나, S1에서 S7로 유지관리수위가 증가할수록 방류빈도는 감소하나, 단위 방류당 방류량은 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 연중 일정 관리수위를 유지하는 S0 시나리오에서는 S1~S7 시나리오에 비해 홍수기시 높은 유지관리수위 조건으로 인해 방류빈도가 상대적으로 적은 것으로 나타났으며, 홍수기 이후 방류량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

모의기간 (2015~2020년) 동안 내수위의 변동을 관리수위 시나리오별로 비교한 결과는 Fig. 4.16과 같으며, 시나리오별 최대 내수위, 홍수기 및 비홍수기 평균 내수위를 비교한 결과는 Table. 4.12와 같다. 관리수위 증가에 따라 비홍수기시 내수위가 높게 형성되는 것을 알 수 있으며, 유입량이 크지 않은 2015년과 2017년에는 S5~S7 시나리오 간 내수위의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

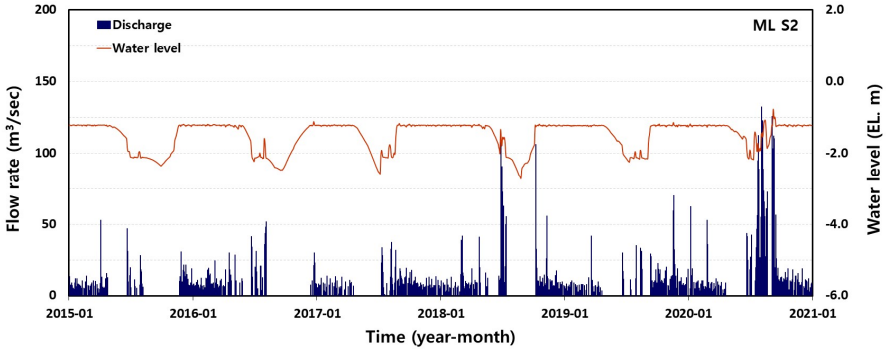
한편, 최대 일별 내수위 산정 결과, 평상시 관리수위를 EL. 1.12 m로 높게 유지하는 S7 시나리오에서도 충분한 홍수배제능력으로 최대 일 내수위가 간월호의 홍수위를 초과하지는 않으나, S5~S7 시나리오의 최대 일 내수위가 과거 (2015~2020) 관측 최대 일 내수위인 EL. 0.19 m를 초과하므로, 추후 EL. 0.3 m 이상의 유지관리수위 조건에서 보다 다양한 유입량 조건에 대한 상류지역 침수 영향 분석을 수행하여, 관리수위의 상향이 상류 저지대 농경지에 미치는 영향을 종합적으로 고려할 필요가 있다.



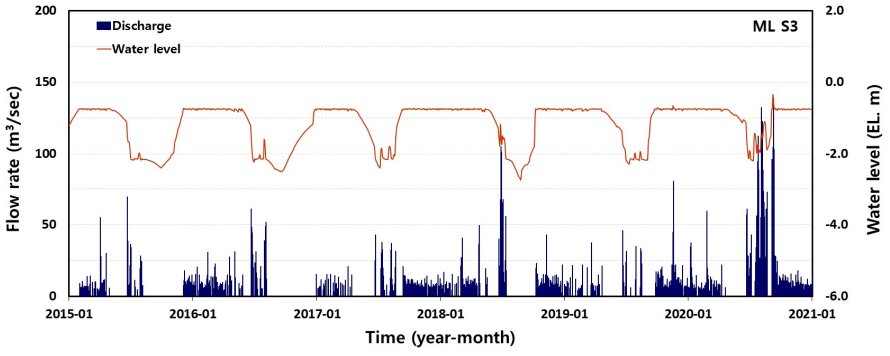
(a) ML S0



(b) ML S1

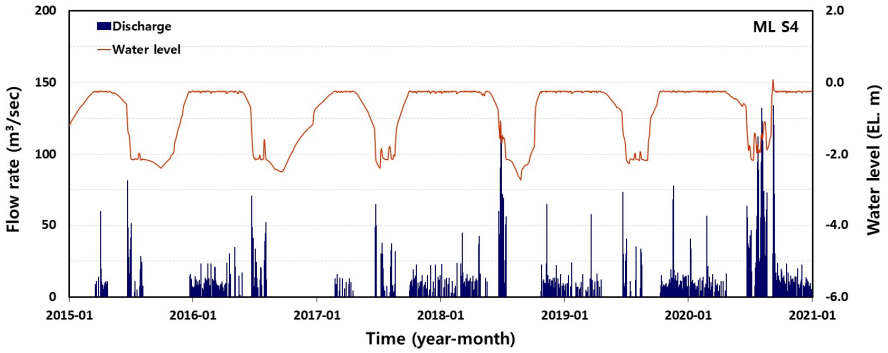


(c) ML S2

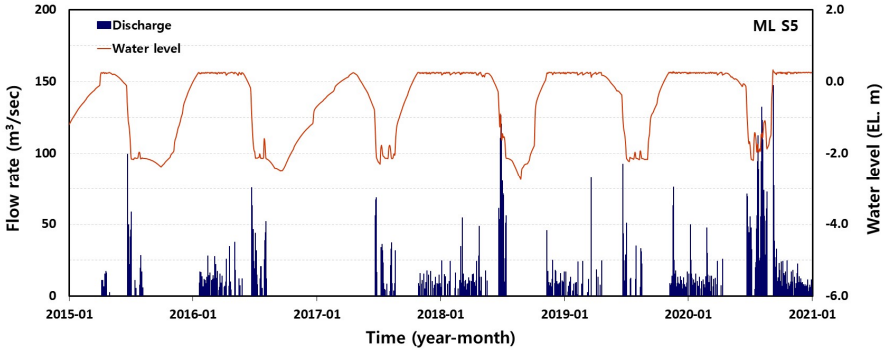


(d) ML S3

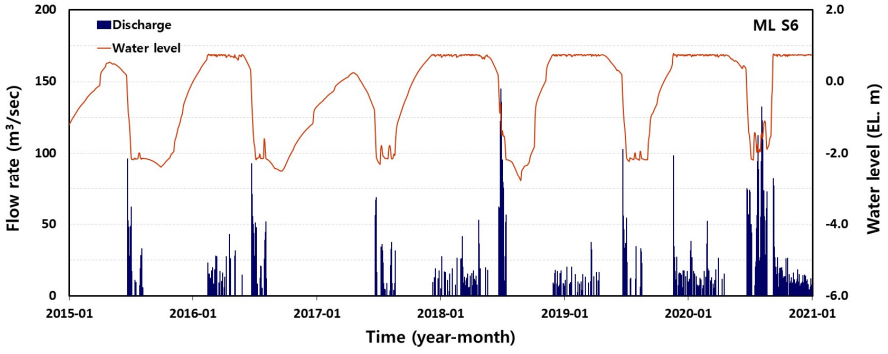
Fig. 4.14. Discharges and simulated water levels by scenario ML S0, S1, S2, S3



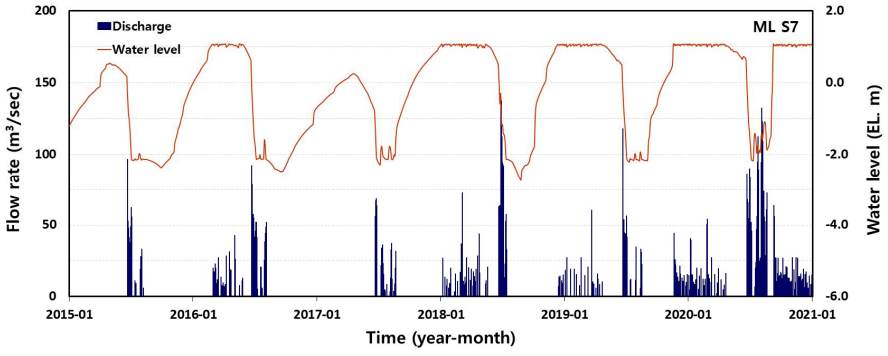
(a) ML S4



(b) ML S5



(c) ML S6



(d) ML S7

Fig. 4.15. Discharges and simulated water levels by scenario ML S4, S5, S6, S7

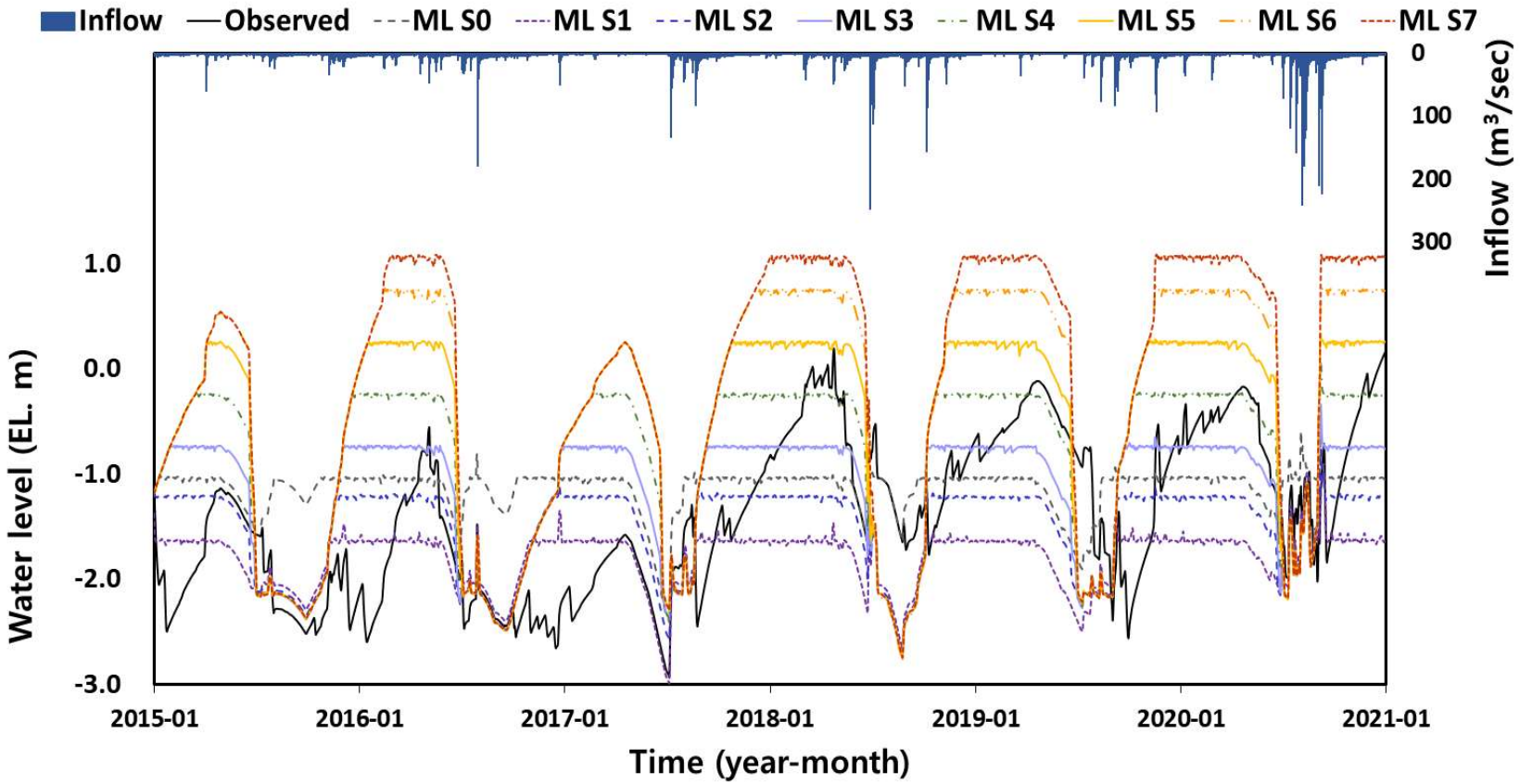


Fig. 4.16. Inflow and simulated water levels by each water management level scenario

Table 4.11. Discharge characteristics for each water management level scenario for 2015-2020

Items	Year	Observed	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Total annual discharge (1000 m^3)	2015	118,423	90,494	107,592	95,262	83,365	71,002	65,971	65,908	65,908
	2016	121,498	121,764	121,934	121,803	122,095	133,136	138,170	138,227	138,253
	2017	78,245	110,439	110,269	110,907	110,187	99,814	87,195	74,918	68,152
	2018	186,191	189,700	189,734	189,420	189,502	189,207	190,637	189,760	188,909
	2019	133,674	131,103	131,242	132,494	131,235	131,141	130,508	131,123	131,132
	2020	353,429	377,417	376,815	375,743	377,931	376,833	376,585	376,956	377,547
	Average	165,243	170,153	172,931	170,938	169,053	166,855	164,844	162,815	161,650
Total annual number of days of discharge (days)	2015	33	98	118	110	77	46	31	23	23
	2016	33	117	119	110	97	93	77	58	56
	2017	16	122	134	139	114	77	53	38	32
	2018	52	145	134	145	126	105	92	77	64
	2019	34	117	124	127	110	100	81	66	62
	2020	56	184	180	188	188	173	164	151	142
	Average	37	131	135	137	119	99	83	69	63
*Average discharge of a day (1000 m^3)	2015	3,589	923	912	866	1,083	1,544	2,128	2,866	2,866
	2016	3,682	1,041	1,025	1,107	1,259	1,432	1,794	2,383	2,469
	2017	4,890	905	823	798	967	1,296	1,645	1,972	2,130
	2018	3,581	1,308	1,416	1,306	1,504	1,802	2,072	2,464	2,952
	2019	3,932	1,121	1,058	1,043	1,193	1,311	1,611	1,987	2,115
	2020	6,311	2,051	2,093	1,999	2,010	2,178	2,296	2,496	2,659
	Average	4,331	1,225	1,221	1,187	1,336	1,594	1,925	2,361	2,532

*divided by the number of days of discharge

Table 4.12. Water level characteristics for each water management level scenario for 2015-2020

Scenario	Maximum water level (EL. m)	Average water level of flood season (EL. m)	Average water level of non-flood season (EL. m)
Observed	0.19	-1.62	-1.34
S0	-0.59	-1.31	-1.10
S1	-0.99	-2.05	-1.73
S2	-0.77	-2.04	-1.38
S3	-0.34	-2.02	-1.00
S4	0.08	-1.98	-0.63
S5	0.33	-1.93	-0.31
S6	0.78	-1.89	-0.05
S7	1.09	-1.85	0.10

유지관리수위 조건 (ML S0, S1, S3, S5, S7)별 월평균 내수위 및 월 합계 방류량 변화를 나타낸 결과는 Fig. 4.17과 같다. 시나리오별 월별 방류량 비교 결과, 홍수기 (6월~9월)에는 일반적으로 유지관리수위를 높일수록 월 방류량이 더 높게 나타났으며, 이는 내수위가 높아짐에 따라 홍수기 내외수위차에 따른 단위방류량이 증가한 결과임을 알 수 있다. 한편, 상류 유입량이 크지 않은 비홍수기 (10월~5월)에는 유지관리수위를 높일수록 월 방류량이 더 낮게 나타났는데, 이는 관리수위 상향에 따라 단위방류량은 증가하나 방류빈도가 크게 감소한 결과로 판단된다.

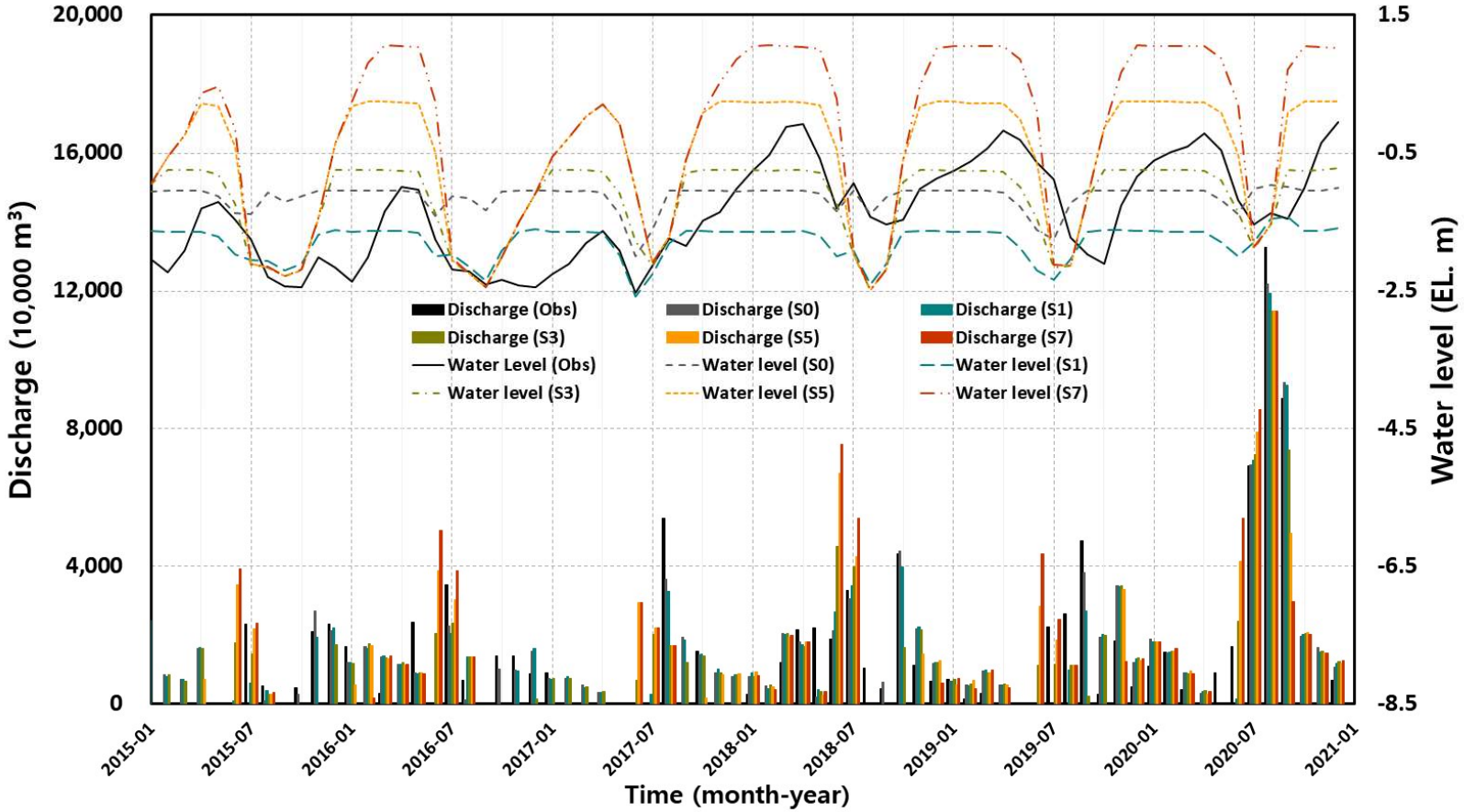


Fig. 4.17. Monthly discharges and mean water levels by water management level scenarios about S0, S1, S3, S5, S7

4.4 유지관리수위 시나리오별 호내 수질변화

4.4.1 담수호 구간별 시계열 수질 변화

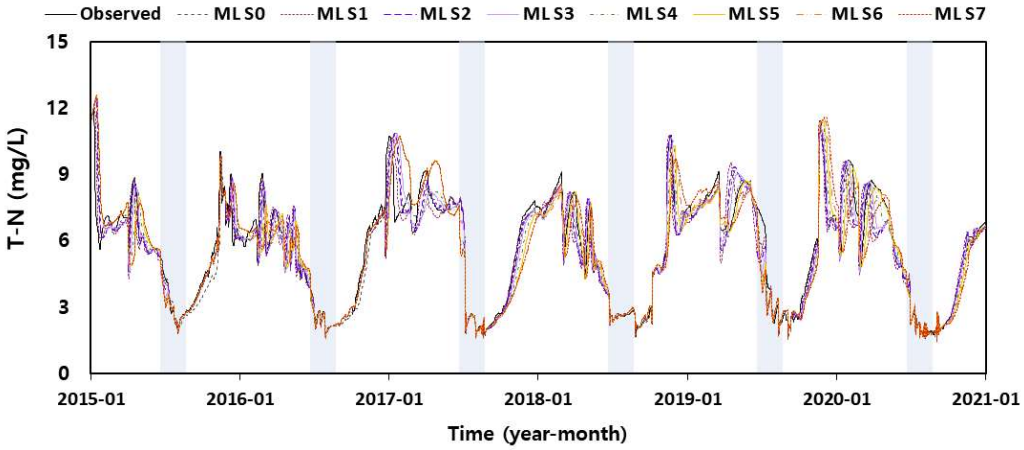
간월호 상류 유입부 (GW3), 호소 중앙부 (GW2) 및 갑문 인근 (GW1) 지점에서의 관리수위 시나리오별 T-N, T-P 및 Chl-a 농도 모의결과는 Fig. 4.18~4.20과 같으며, 하늘색으로 강조 표시한 구간은 홍수기에 해당한다. Fig. 4.21과 Fig. 4.22는 간월호 구간별 수질 모의결과의 비교를 위해 유지관리수위 시나리오별 T-P 변화를 각각 간월호 상류 및 하류 지점에 대해 나타낸 결과이다.

지점별 수질의 분포와 계절적 변동성을 비교한 결과, GW3 지점에서는 상류 유역 유입 오염물질의 영향을 크게 받아 연중 수질 변동폭이 큰 것을 알 수 있으며, GW1 지점으로 갈수록 상류로부터 유입되는 오염물질의 축적으로 호내 상류 지점에 비해 오염물질의 농도가 높게 나타났으며, 연중 수질 변동 폭은 감소하는 것으로 나타났다.

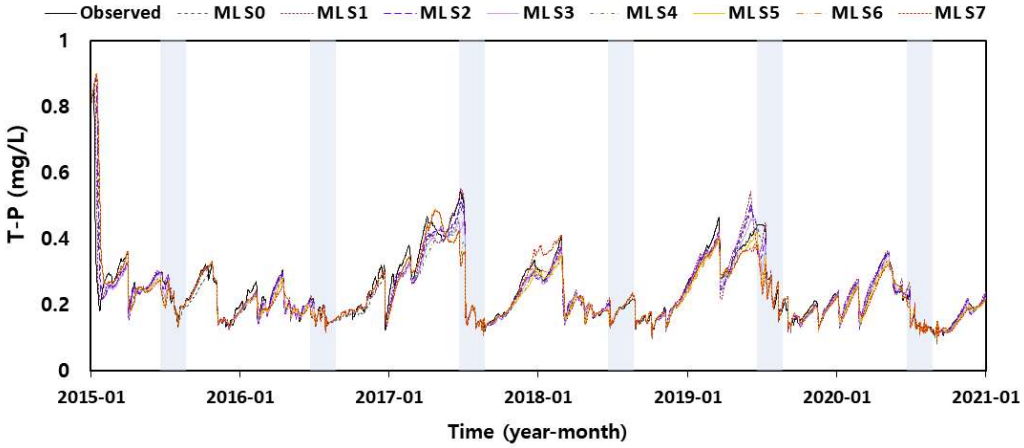
한편, 유지관리수위 시나리오별 호내 수질 변화를 분석한 결과, Fig. 4.21의 A 구간과 같이 일반적으로 관리수위가 높아질수록 호내 수체적 증가에 따른 오염물질 희석효과로 오염물질의 농도가 낮아지는 것으로 나타났으며, 특히 오염물질의 부하량이 높은 갈수기에 수질 개선 효과가 크게 나타났다. 한편, GW3 지점에서는 일부 갈수기를 제외하고는 관리수위 시나리오별 오염물질 농도의 차이가 크지 않은 반면, GW1 지점으로 갈수록 갈수기를 중심으로 시나리오별 오염물질 농도 차이가 커지는 것으로 나타났다. 이는 배수갑문과 인접한 호소 하류 지점으로 갈수록 배수갑문 운영에 따른 호내 흐름 변동의 영향이 크므로, 시나리오에 따른 오염물질 농도 차이가 크게 나타난 것으로 판단된다.

한편, Fig. 4.22의 B 구간과 같이 일부 시기에는 관리수위가 높아짐에도 오염물질 농도가 더 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 배수갑문을 통한 방류가 활발히 일어나는 시기에는 관리수위가 높을수록 호내 통수 단면적이 증

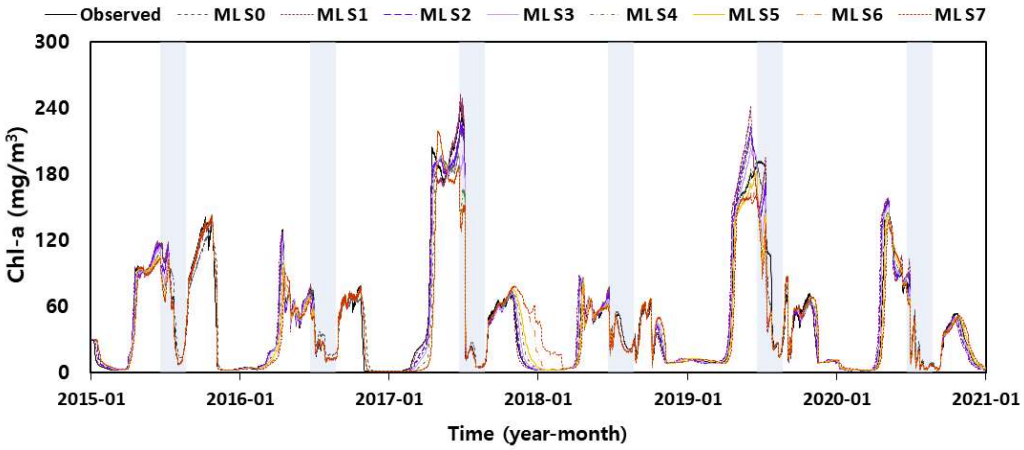
가하여 배수갑문 운영으로부터 받는 영향력이 감소하며, 이는 호내 유속 감소로 이어져 수질회복역량의 저하에 기인한 결과로 판단된다. 이에 Fig. 4.22의 B 기간에 대해 Fig. 4.23과 같이 오염물질 (T-P) 농도, 내수위, 배수갑문을 통한 방류여부 및 호내 유속변화를 비교한 결과, 관리수위가 높아질수록 내수위는 더 높게 형성되나, S1과 같이 낮은 관리수위 조건에서는 방류 빈도가 상대적으로 커 호내 흐름 개선 효과가 크며, 이는 T-P 농도 저하로 이어진 것으로 판단된다. 한편, Fig. 22에서 갈수기 관리수위 시나리오별 오염물질 농도 차이를 비교한 결과, S1부터 S5까지 관리수위가 높아질수록 통수단면적 증가에 따른 배수갑문의 영향 감소 및 오염물질의 배출 및 확산 저하로 오염물질 농도가 더 높게 나타났으며, S5부터 S7까지는 배수갑문의 영향에 비해 내수위의 영향을 크게 받아 S5에서 S7로 관리수위가 높아질수록 호내 수체적의 증가로 오염물질 농도가 낮아지는 것으로 나타났다.



(a) T-N

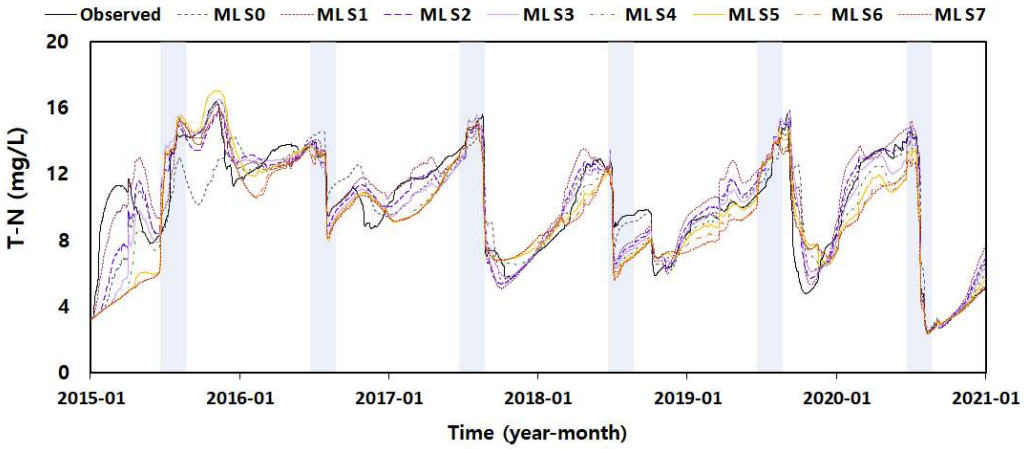


(b) T-P

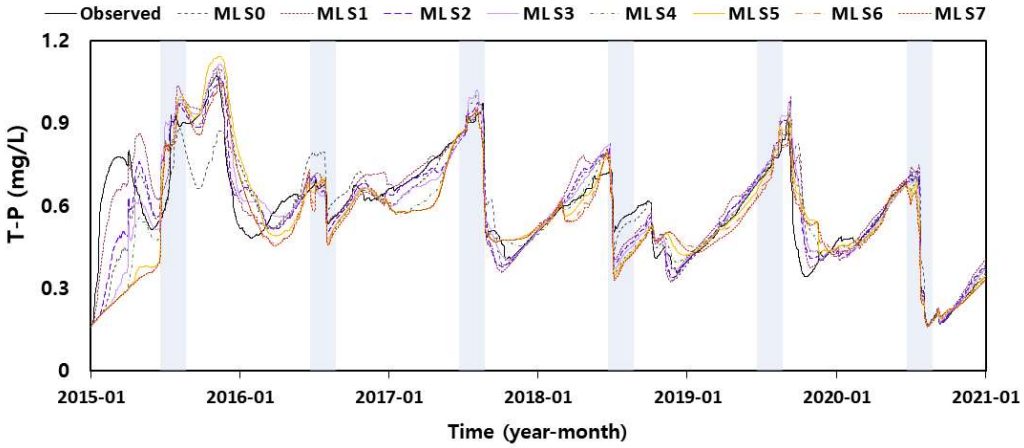


(c) Chl-a

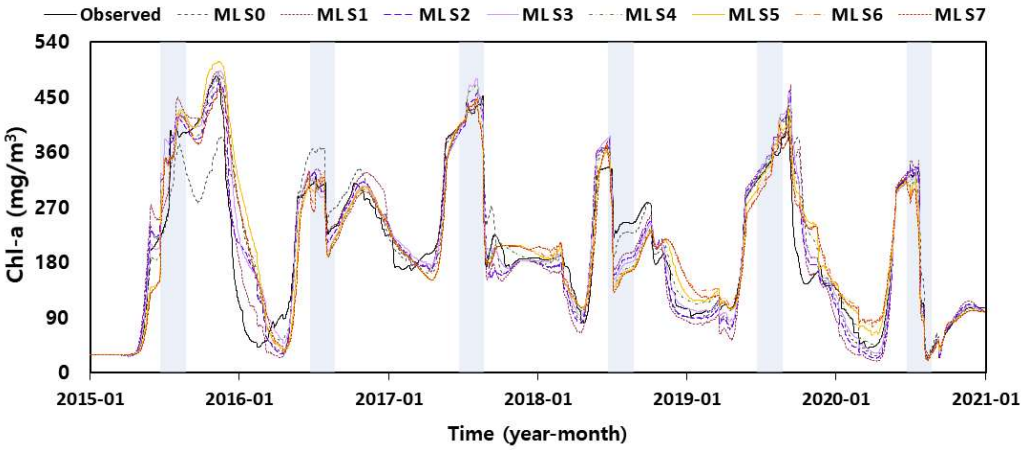
Fig. 4.18. Simulated results of T-N, T-P, and Chl-a for each water management level scenario at GW3



(a) T-N

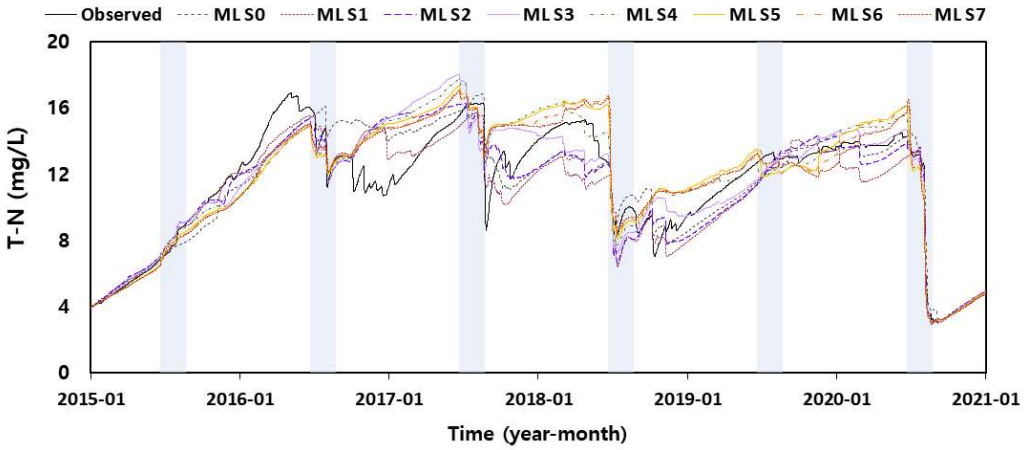


(b) T-P

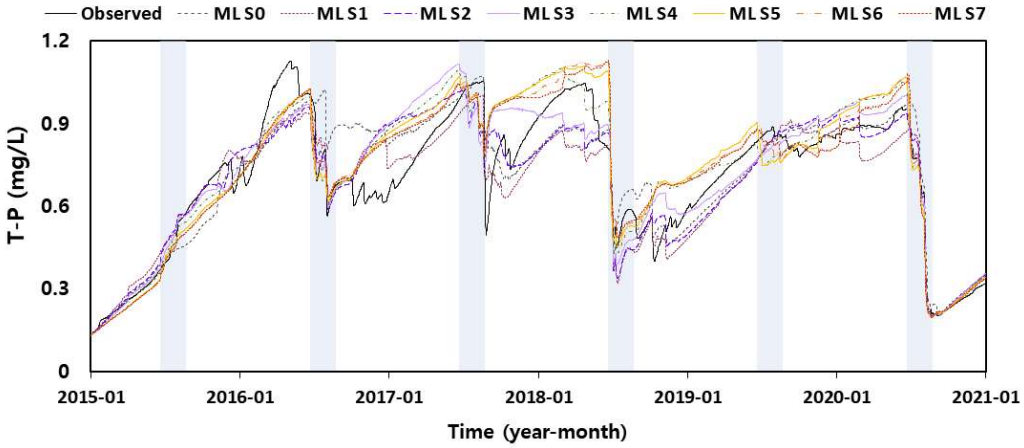


(c) Chl-a

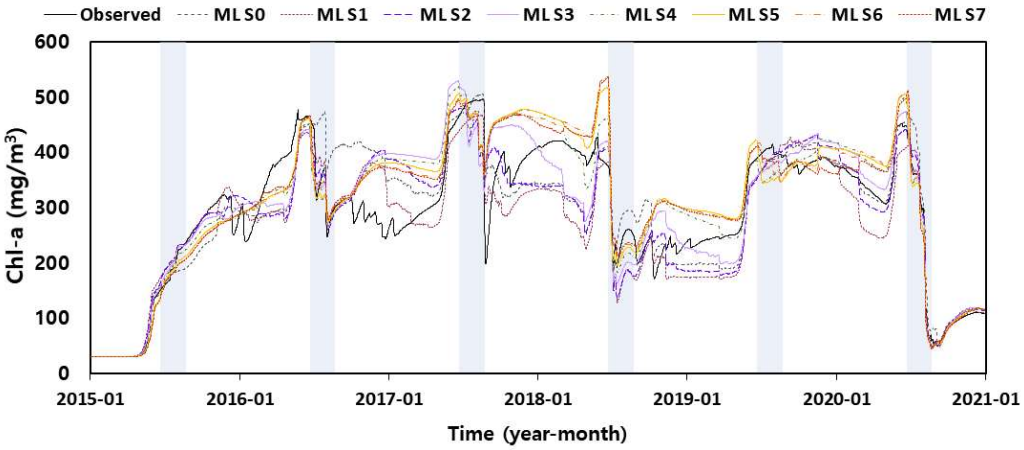
Fig. 4.19. Simulated results of T-N, T-P, and Chl-a for each water management level scenario at GW2



(a) T-N



(b) T-P



(c) Chl-a

Fig. 4.20. Simulated results of T-N, T-P, and Chl-a for each water management level scenario at GW1

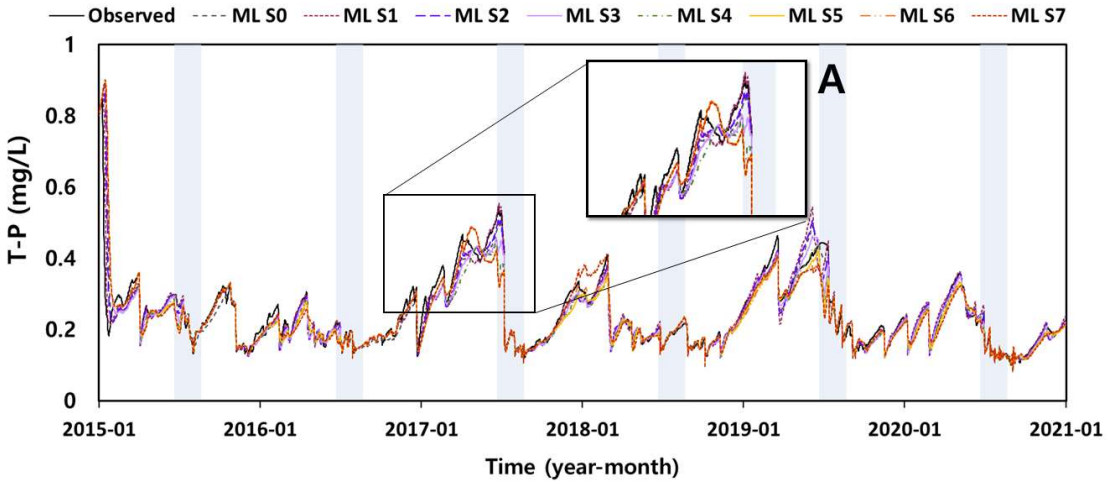


Fig. 4.21. Simulated results of T-P concentration by each water management level scenario at GW3

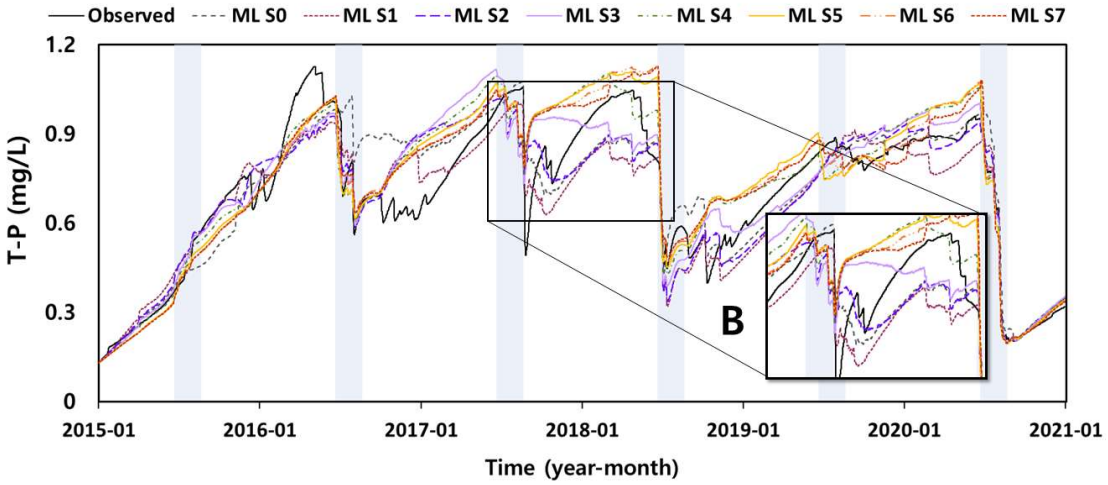


Fig. 4.22. Simulated results of T-P concentration by each water management level scenario at GW1

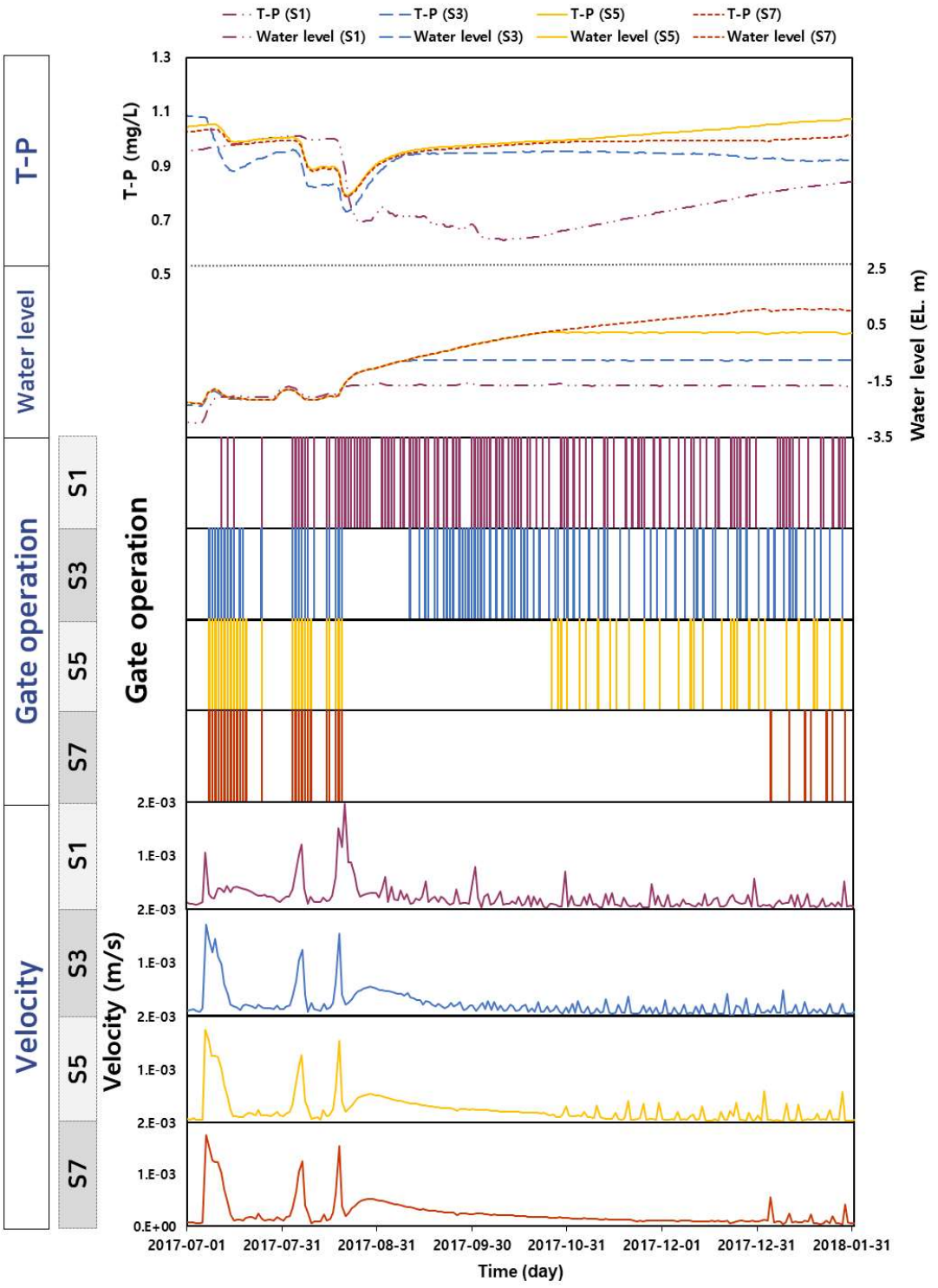
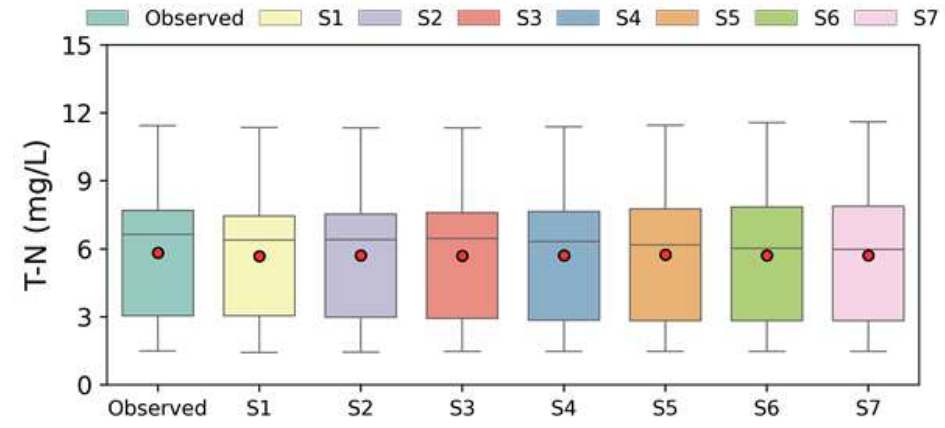


Fig. 4.23. Results of T-P concentration, water level, gate operation status, and water velocity by scenario S1, S3, S5, S7 at GW1

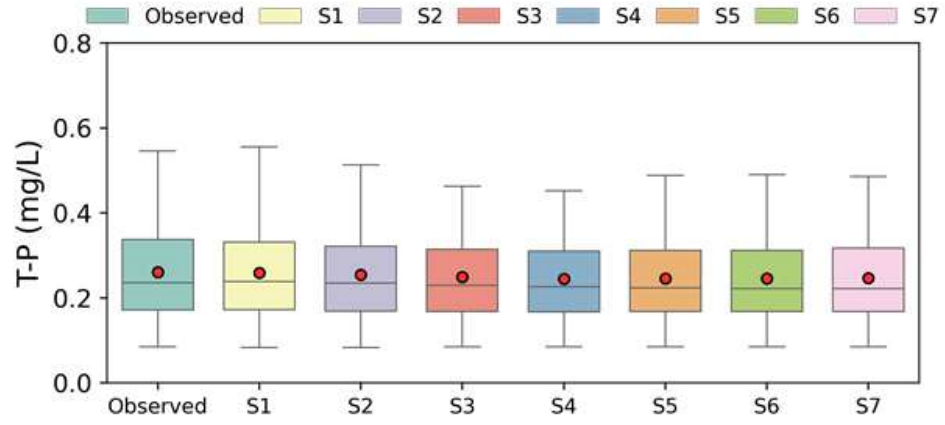
4.4.2 담수호 구간별 평균 수질 변화

간월호 GW3, GW2 및 GW1 지점에서의 관리수위 시나리오 (ML S1~S7)별 T-N, T-P, 및 Chl-a 평균농도를 boxplot으로 도시한 결과는 Fig. 4.24~4.26과 같다. 갑문 인근 하류 지점 (GW1)으로 갈수록 관리수위 시나리오별 수질 변동 폭이 증가하는 것을 알 수 있으며, GW3 지점에서는 시나리오별 평균 오염물질 농도의 차이가 거의 나지 않으나, 관리수위를 높일수록 최대 오염물질 농도는 소폭 저감 되는 것으로 나타났다. GW2 지점에서는 관리수위를 높일수록 호내 수체적 증가에 따른 오염물질 희석효과로 평균 오염물질 농도가 저감되는 것으로 나타났으며, 특히 T-N 항목에서 수질 개선 효과가 높게 나타났다. 한편, 배수갑문 운영의 영향을 크게 받는 GW1 지점에서는 T-N, T-P, Chl-a 항목 모두 S1~S4 시나리오까지는 관리수위 상향에 따라 평균 오염물질 농도가 증가하다가 S4 이후부터는 감소하는 경향을 보였는데, 이는 S1~S4까지는 낮은 관리수위 조건일수록 높은 방류빈도로 오염물질의 배출 및 확산이 원활해진 것에 기인한 결과이며, S4 이상의 관리수위 조건에서는 호내 수체적 증가의 영향을 크게 받은 결과로 판단된다.

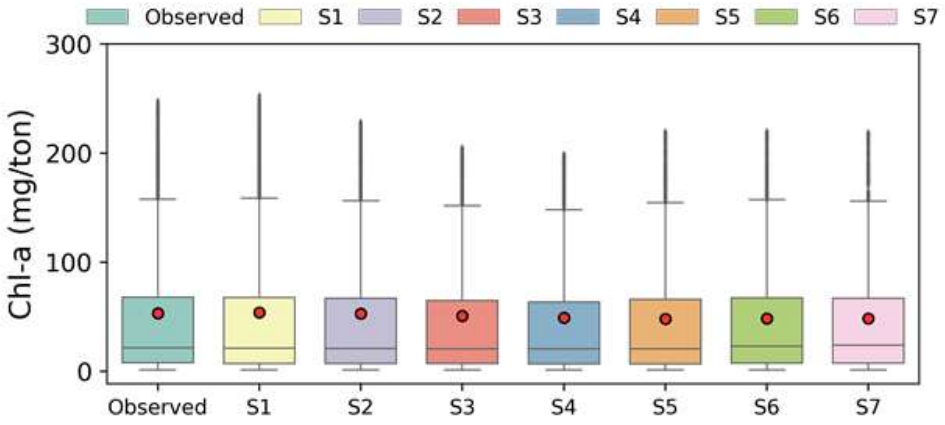
간월호 지점별 및 관리수위 시나리오별 평균 및 최대 오염물질 농도를 T-P 항목에 대해 분석한 결과는 Table 4.13과 같다. GW3 지점에서는 관측 방류조건 (Observed)에 따른 평균 T-P 농도와 비교하여 관리수위 시나리오 적용에 따라 T-P 농도가 최대 5.94% (S6) 저감 되었으며, GW2 지점에서는 최대 3.07% (S7), GW1 지점에서는 최대 4.46% (S1) 저감되는 것으로 나타났다.



(a) T-N

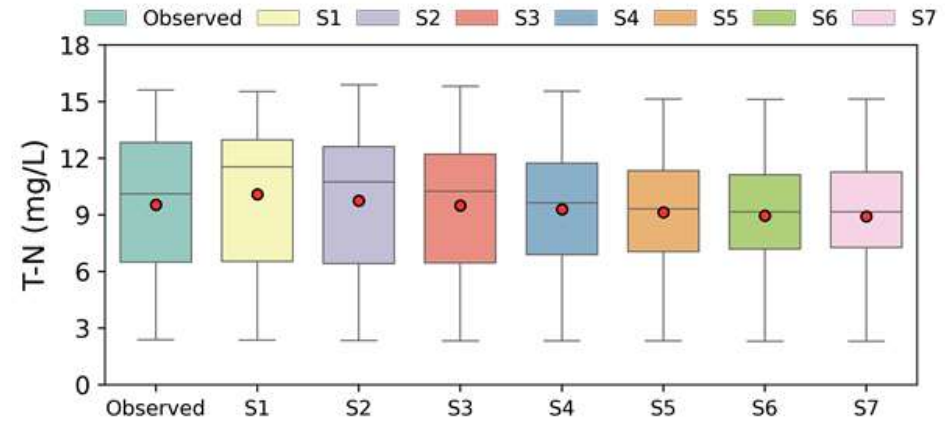


(b) T-P

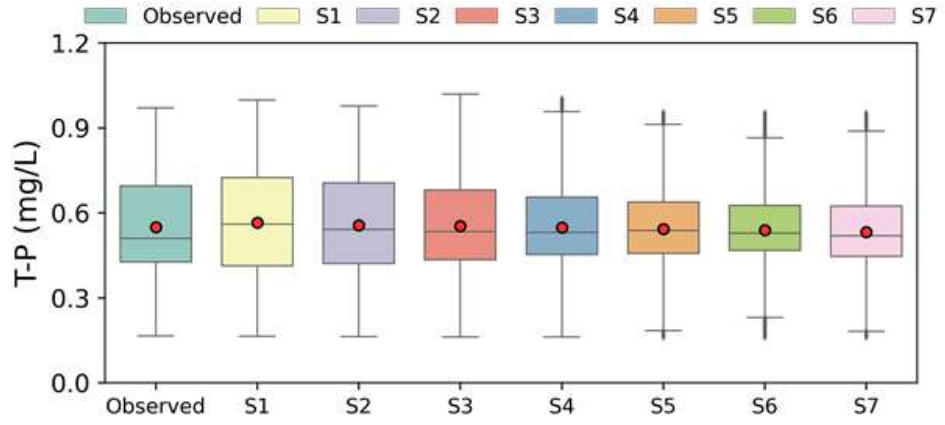


(c) Chl-a

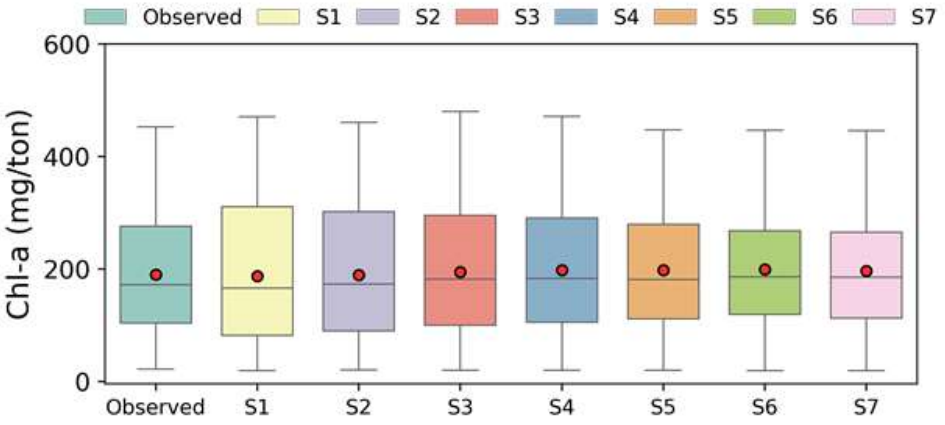
Fig. 4.24. Boxplots showing the patterns of changes in T-N, T-P, and Chl-a by each water management level scenario at GW3



(a) T-N

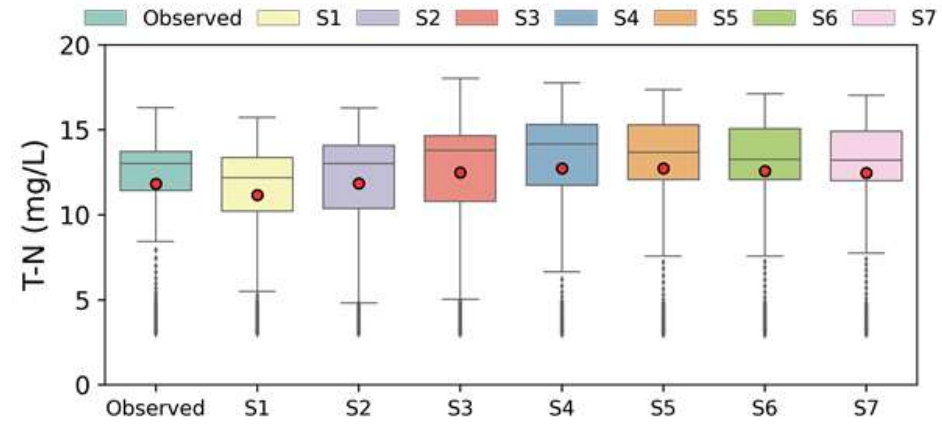


(b) T-P

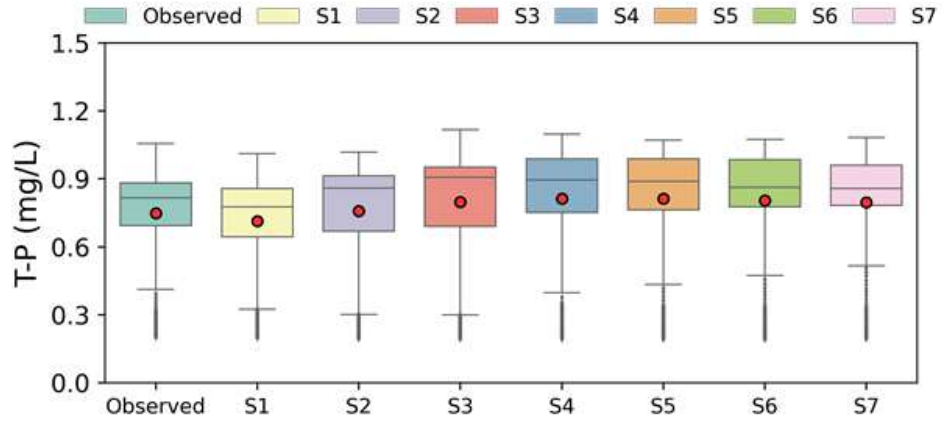


(c) Chl-a

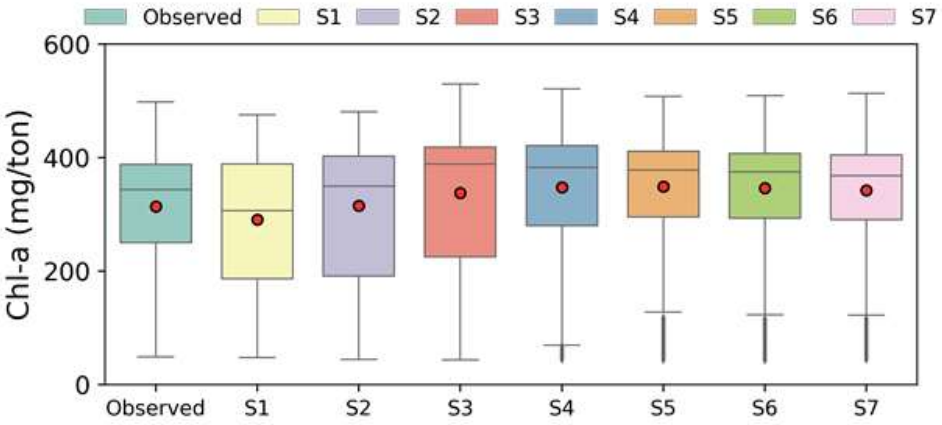
Fig. 4.25. Boxplots showing the patterns of changes in T-N, T-P, and Chl-a by each water management level scenario at GW2



(a) T-N



(b) T-P



(c) Chl-a

Fig. 4.26. Boxplots showing the patterns of changes in T-N, T-P, and Chl-a by each water management level scenario at GW1

Table 4.13. T-P concentration changes for each water management level scenario at GW1, GW2 and GW3

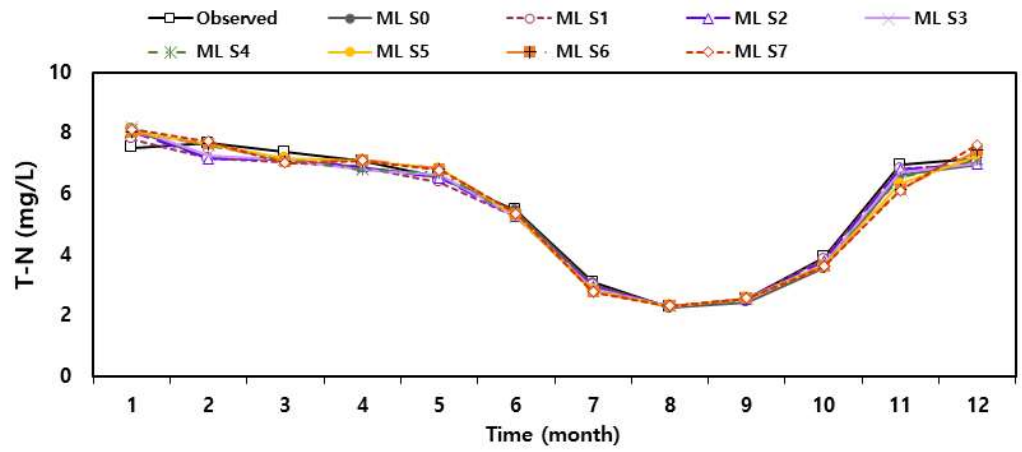
Scenario	GW3 (Upper)		GW2 (Middle)		GW1 (Lower)	
	Average (mg/L)	Maximum (mg/L)	Average (mg/L)	Maximum (mg/L)	Average (mg/L)	Maximum (mg/L)
Observed	0.261 (-)	0.455	0.549 (-)	0.872	0.748 (-)	0.968
S0	0.254 (-2.79%)	0.449	0.559 (1.83%)	0.851	0.760 (1.65%)	0.983
S1	0.259 (-0.72%)	0.487	0.566 (2.96%)	0.907	0.714 (-4.46%)	0.937
S2	0.254 (-2.47%)	0.458	0.556 (1.27%)	0.894	0.759 (1.51%)	0.962
S3	0.249 (-4.65%)	0.423	0.553 (0.73%)	0.905	0.798 (6.74%)	1.020
S4	0.245 (-6.24%)	0.411	0.549 (-0.14%)	0.886	0.814 (8.80%)	1.030
S5	0.245 (-5.91%)	0.415	0.543 (-1.10%)	0.853	0.814 (8.81%)	1.016
S6	0.245 (-5.94%)	0.405	0.539 (-1.81%)	0.838	0.805 (7.72%)	1.007
S7	0.246 (-5.53%)	0.406	0.532 (-3.07%)	0.832	0.796 (6.52%)	1.003

4.4.3 담수호 구간별 월별 평균 수질 변화

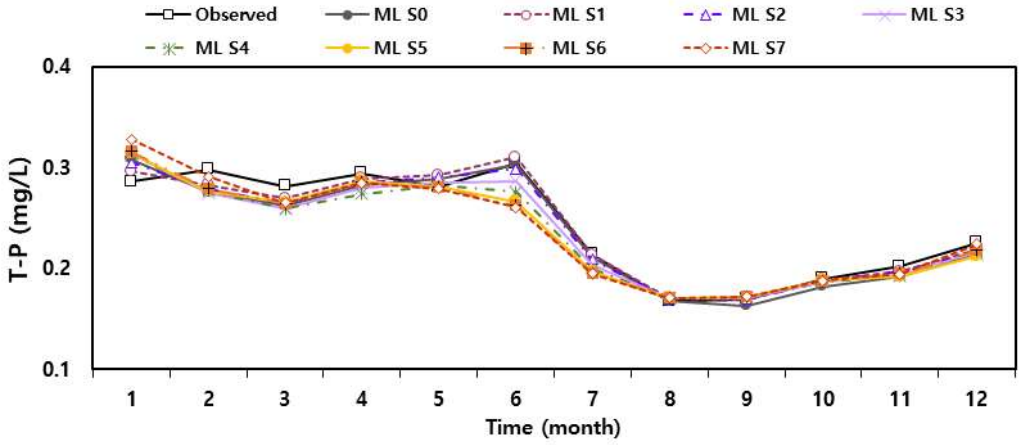
2015~2020년 기간에 대해 GW3, GW2 및 GW1 지점에서의 관리수위 시나리오 (ML S0~S7)별 T-N, T-P, Chl-a의 월별 평균농도 변화를 비교한 결과는 Fig. 4.27~4.29와 같다.

홍수기 (6~8월)에는 ML S0 시나리오를 제외하고 관리수위 시나리오별 오염물질 농도의 차이가 모든 지점 (GW1~GW3)에서 거의 나타나지 않았는데, 이는 홍수기 별도 관리수위 (EL. -2.10 m) 운영에 따라 시나리오별 방류빈도 및 내수위의 차이가 크지 않은 것에 기인한 결과로 판단된다. 한편, 갈수기에는 시나리오별 오염물질 농도 차이가 GW3에서 GW1 지점으로 갈수록 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 갑문 인근 하류 지점으로 갈수록 호내 통수단면적의 변화 및 배수갑문 운영의 영향을 크게 받기 때문으로 사료된다.

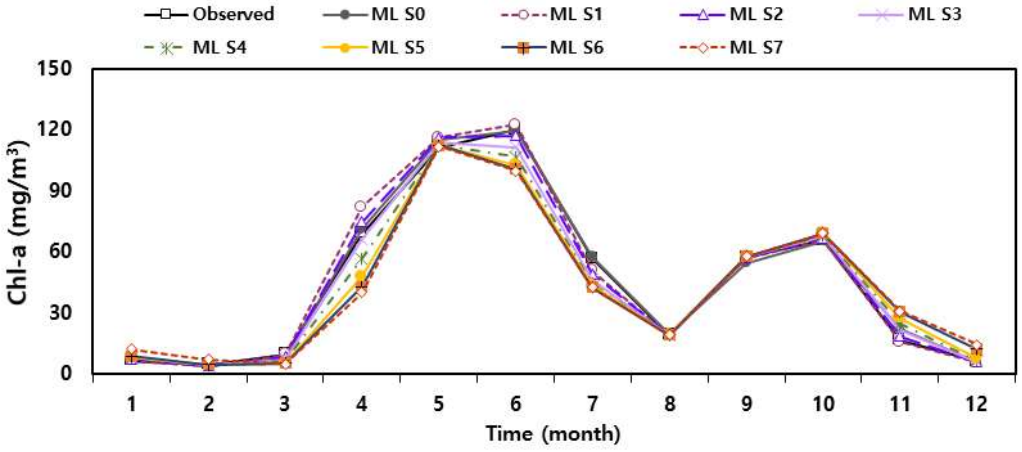
간월호 상류 유입부와 중앙부 지점에서는 갈수기, 특히 오염물질의 농도가 크게 증가하는 봄철 (3~5월)에 관리수위를 높일수록 수질이 개선되는 것으로 나타났으며, 이는 관리수위가 높아질수록 수체적 증가에 따라 오염물질 농도 희석효과가 증가했기 때문으로 판단된다. 갑문 인근 (GW1) 지점에서는 갈수기 오염물질 농도가 S5, S6, S7, S4, S3, S0, S2, S1 순으로 높게 나타나, S1~S4 시나리오에서 배수갑문 운영에 따른 수질개선 효과가 크게 나타났음을 알 수 있다. S5~S7 시나리오에서는 현재 간월호의 계획유지관리수위 (EL. -1.70 m)에 비해 관리수위를 EL. 0.30 m 이상으로 상당히 높임에도 불구하고 수질 개선효과가 나타나지 않았으며, 오히려 호내 흐름 저하 및 오염물질의 퇴적으로 과거 관측 방류조건 (Observed)보다도 오염물질의 농도가 높게 나타났다.



(a) T-N

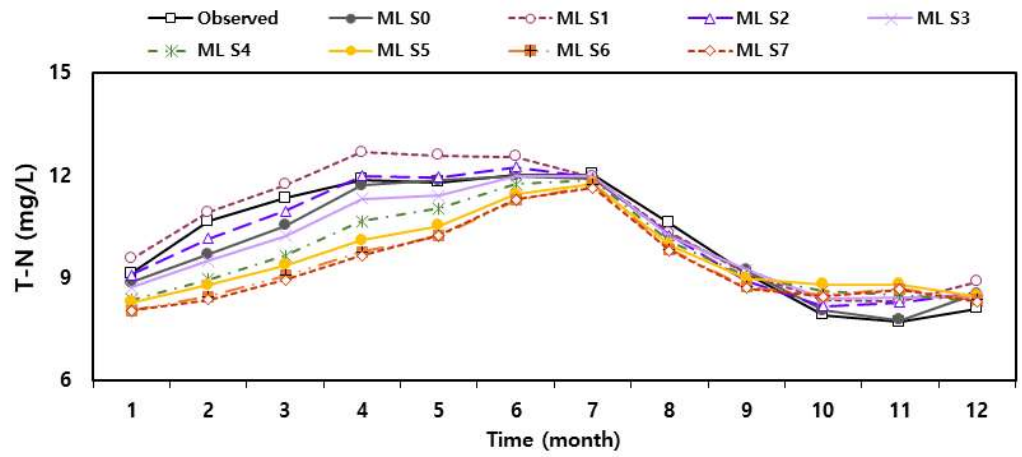


(b) T-P

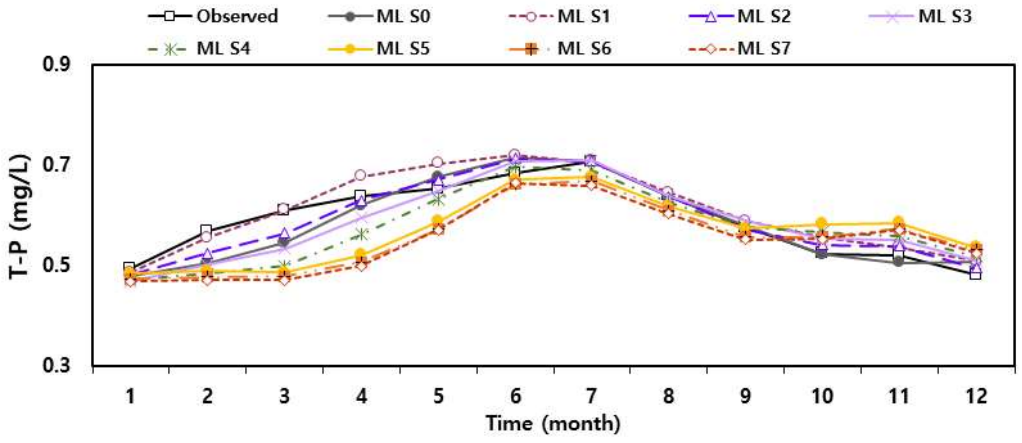


(c) Chl-a

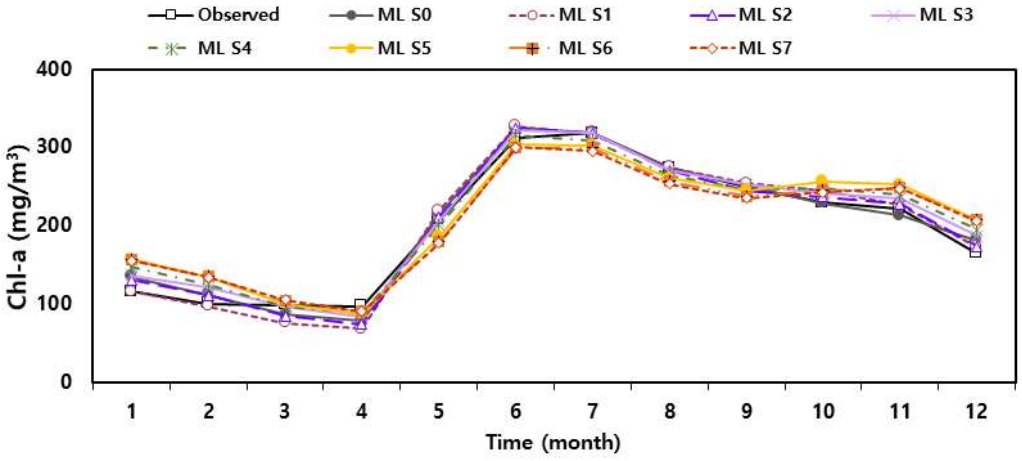
Fig. 4.27. Monthly mean T-N, T-P, and Chl-a concentration by each water management level scenario for 2015-2020 at GW3



(a) T-N

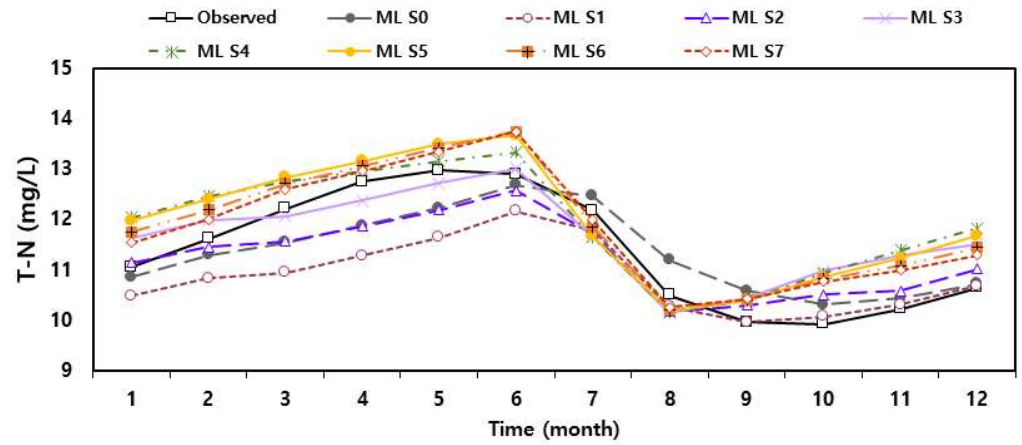


(b) T-P

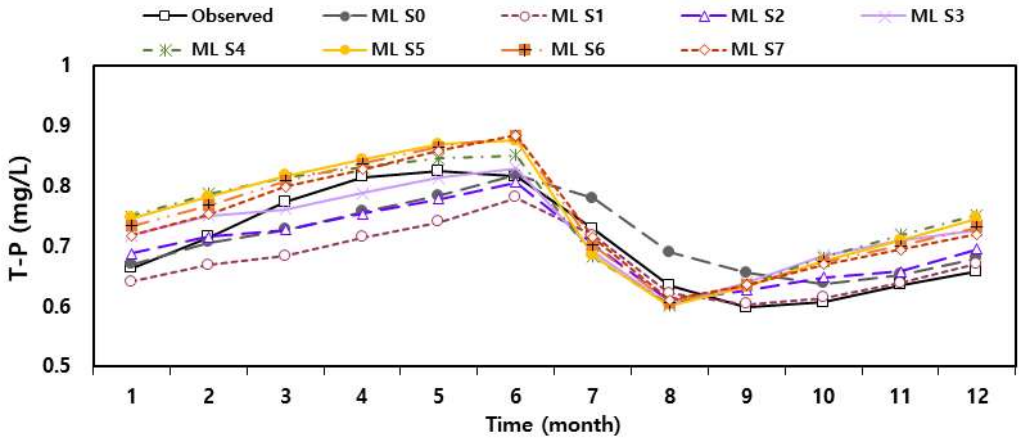


(c) Chl-a

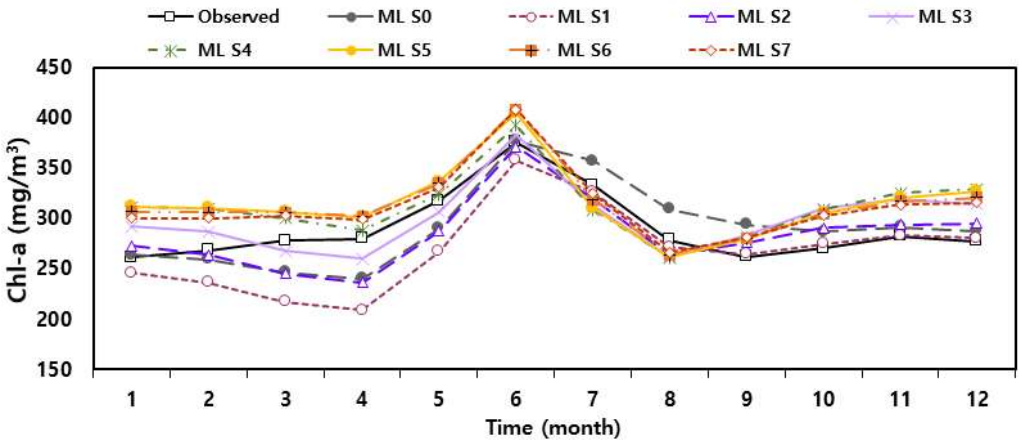
Fig. 4.28. Monthly mean T-N, T-P, and Chl-a concentration by each water management level scenario for 2015-2020 at GW2



(a) T-N



(b) T-P



(c) Chl-a

Fig. 4.29. Monthly mean T-N, T-P, and Chl-a concentration by each water management level scenario for 2015-2020 at GW1

한편, 간월호의 설계 당시 계획관리수위 (연중 EL. -1.0 m)인 S0 시나리오와 현재 간월호의 계획관리수위에 해당하는 S1 시나리오의 수질 비교 결과, GW3 및 GW2 지점에서는 내수위가 더 높게 형성되는 S0 시나리오에서 오염물질 농도가 더 낮으나, 그 차이가 미미한 것으로 나타났으며, 호내 오염부하량이 높은 GW1 지점에서는 S0 시나리오에 비해 S1 시나리오에서 갈수기와 홍수기 모두 내수위가 더 낮게 형성됨에도 불구하고 오염물질의 농도가 더 낮게 나타났다. 이는 Fig. 4.30과 같이 S0 시나리오와 S1 시나리오에서의 오염물질 (T-P) 농도, 내수위, 배수갑문을 통한 방류 여부 및 호내 유속분포를 시계열 그래프로 도시하여 비교한 결과, S1 시나리오에서의 방류 빈도 및 평균적인 호내 유속 분포가 더 크므로, S0 시나리오에 비해 내수위가 더 낮게 형성됨에도 배수갑문을 통한 방류의 영향을 더 크게 받아 홍수기와 갈수기 모두 오염물질의 농도가 더 낮게 나타난 것에 기인한 결과로 판단된다. 따라서, 현재 간월호의 계획관리수위 조건 (S1)은 설계 당시 계획 관리수위 조건 (S0)에 비해 홍수 배재능력 확보뿐만 아니라 호내 수질 측면에서도 더 유리한 것으로 사료된다.

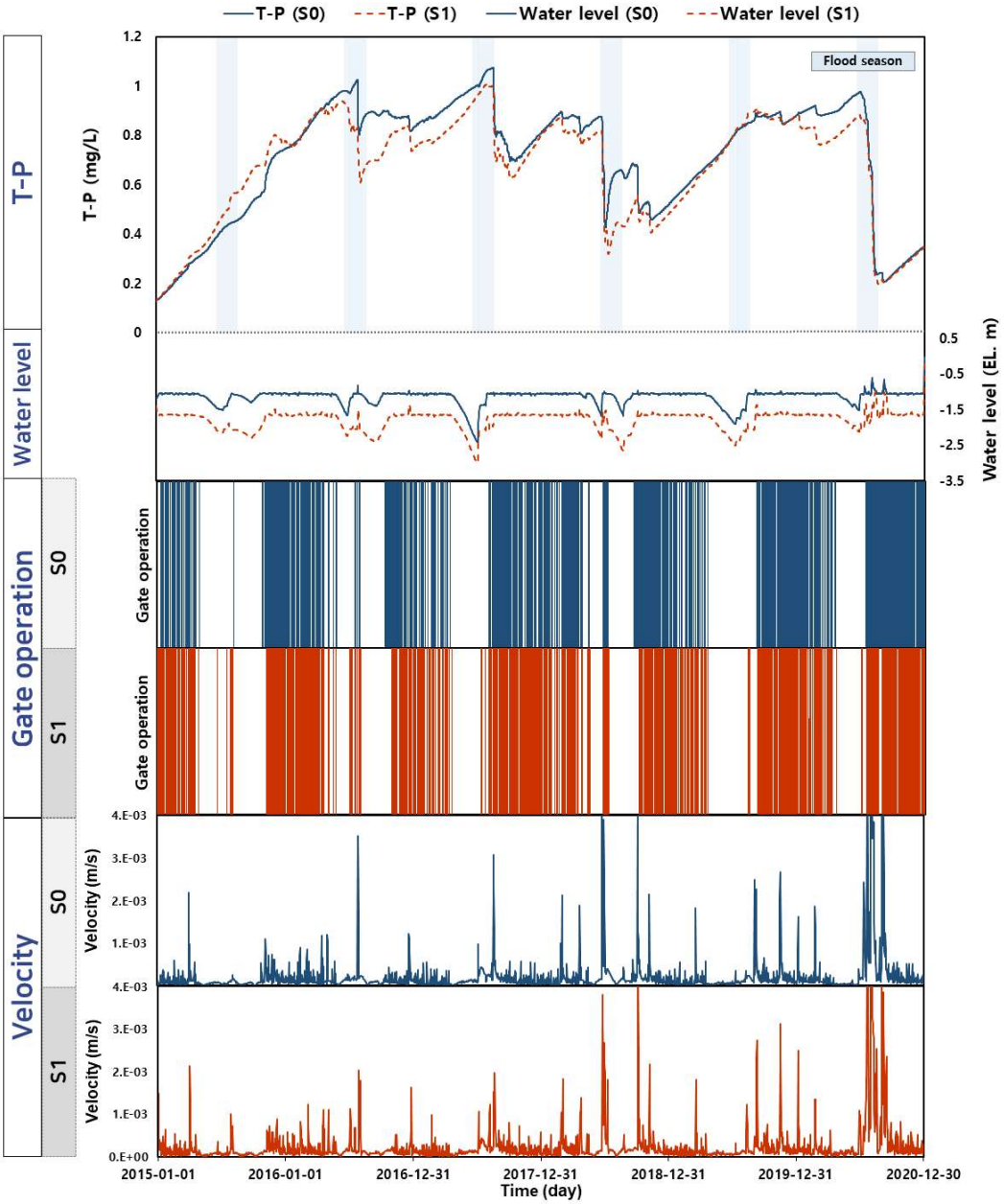


Fig. 4.30. Results of T-P concentration, water level, gate operation status, and water velocity by scenario S0 and S1 at GW1

제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 관리수위 조건에 따른 배수갑문 운영이 담수호 수질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 간월호를 대상지구로 선정하고 HSPF-EFDC-WASP 연계 모의 시스템을 구축하였으며, 해수/담수측 배수갑문의 여러가지 운영시나리오를 고려하고 배수갑문의 조작상황을 현실적으로 반영하고자, 배수갑문의 내외 수위차를 고려한 유지관리수위 시나리오별 방류량을 산정하여 유역-호소 연계모형에 반영하였다.

담수호 구간별 및 관리수위 시나리오별 T-N, T-P, Chl-a 농도 모의결과, GW3 지점에 비해 갑문 인근 GW1 지점에서 관리수위 상향에 따른 수질 변화가 크게 나타났으며, 이는 호소 하류부로 갈수록 호내 통수단면적 변화와 배수갑문 운영의 영향이 증가한 것에 기인한 결과로 판단된다. 한편, GW3 및 GW2 지점에서는 관리수위를 높일수록 오염물질 농도 희석효과의 증가로 호내 수질이 개선되는 경향을 보인 반면, 배수갑문 운영의 영향을 크게 받는 GW1 지점에서는 관리수위를 높일수록 통수단면적 증가에 따른 호내 흐름 저하 및 배수갑문 운영 영향의 감소로 낮은 수질 회복 역량을 보여 S5~S7 시나리오에서 갈수기 오염물질 농도가 높게 나타났으며, S1 시나리오에서 방류빈도 증가에 따른 오염물질의 확산 및 배출이 가장 활발하게 일어나 오염물질 농도가 가장 낮게 나타났다.

오염물질의 평균 농도가 가장 높고, 관리수위 변화의 영향이 가장 크게 나타나는 GW1 지점을 중심으로 간월호의 최적 관리수위 시나리오를 도출한 결과, 홍수배제능력 및 호내 수질 영향 측면 모두 S1 시나리오가 가장 유리한 것으로 판단되며, 특히 설계 당시 간월호의 계획 관리수위에 해당하는 S0 시나리오와의 오염물질 농도 비교 결과, S1 시나리오가 배후지의 침수 영향 뿐만 아니라 호내 수질 측면에서도 더 유리한 것으로 사료된다.

한편, 배수갑문 운영을 통해서는 담수호의 수질 관리 목표수질 (환경정책기본법 시행령 제2조에 규정된 호소수질환경관리기준 IV등급 (T-N :

1 mg/L 이하, T-P : 0.1 mg/L 이하, Chl-a : 35 mg/m^3 이하))을 충족하는 데 한계가 있으므로, 환경기초시설 등 추가적인 상류 수질개선 대책의 병행이 필요하며, 향후 호소 수질 기준을 만족할 수 있도록 하는 적정 관리방안을 도출할 필요가 있다. 특히, 호내 수질의 주요 영향 인자로 염분 성층화에 따른 정체구간 생성 및 저층 퇴적물에 의한 오염물 용출이 있으므로, 염분 성층화로 인한 호내 수질 영향을 파악하고, 저층배수를 위한 암거배수의 활용 등 추가적인 수질개선 대책을 마련할 필요가 있다. 또한, 홍수유출에 따른 호내 수문 및 수질 영향 분석을 병행하여 장기간의 수질 개선 및 상류 유역의 침수 영향을 모두 고려한 최적 관리수위 운영방안을 도출할 필요가 있다.

본 연구의 결과는 수문 및 수질 영향을 종합적으로 고려한 담수호의 최적 수자원 관리방안 수립에 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 강필묵 외, 1993. 간척공학. 향문사, 323-327.
2. 권명준, 권순국, 홍성구, 2003. 농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT모형과 WASP 모형의 연계운영. 한국농공학회지 45(2), 116-125.
3. 김광문, 2012. HSPF와 EFDC를 이용한 보 설치 전·후의 수리 및 수질 변화 분석. 경북대학교 박사학위논문.
4. 김상민, 2004. 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 영향 분석. 서울대학교 박사학위 논문.
5. 김선주, 김성준, 김필식, 이창형, 2003. 배수갑문 방류시점 및 방류량에 따른 담수호의 수질변화. 한국농공학회지 45(1), 91-101.
6. 김세민, 박영기, 이동주, 정만, 2017. 상류제수문 방류조건에 따른 새만금호의 수질변화 예측. 한국수자원학회논문집 50(6), 373-386.
7. 김일환, 2010. 농업용 호소 수질관리 제도. 전원과 자원 52(2), 2-9.
8. 노희진, 김정민, 김영도, 강부식. 2013. 유역유출 변화에 따른 도암댐 저수지수질 영향 예측. 대한토목학회논문집 33(3), 975-985.
9. 박재충, 최재훈, 송영일, 서동일, 송상진, 2010. HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질예측. 환경영향평가 19(5), 465-473.
10. 서승원, 이화영, 유상철, 2010. 방조제 완공에 따른 호내부 수질변화 모의. 한국해안·해양공학회논문집 22(4), 258-271.
11. 성충현, 2010. 유역 및 호소 모형을 이용한 이원 간척담수호의 염도변화모의. 서울대학교 박사학위논문.
12. 성충현, 2014. HSPF 모형과 호소 물수지를 이용한 미계측 간척 담수화호 수문모델링. 한국농공학회논문집 56(6), 129-137.
13. 성충현, 황세운, 오찬성, 조재필, 2017. 오염원 산정단위 수준의 소유

역 세분화를 고려한 새만금유역 수문·수질모델링 적용성 검토. 한국농공학회논문집 59(3), 83-96.
14. 송인홍, 성충현, 2016. 갈수기에 하구 담수호의 수질 대책 수립의 필요성. 한국농공학회지 58(4), 44-51.
15. 신유리, 정지연, 최정훈, 정광욱, 2012. HSPF-EFDC 를 이용한 새만금호와 유역의 수리 변화 모의. 한국물환경학회지 28(3), 384-393.
16. 오찬성, 송용식, 윤재선, 장정렬, 2021. 새만금 담수호 수리동역학적 특성을 고려한 적정 수질관리방안 연구. 한국연안방재학회지 8, 41-50.
17. 오희상, 이한필, 2017. 유역-호소 통합수질예측 기법을 이용한 물왕저수지 수질개선효과 분석. 한국농공학회논문집 59(3), 51-62.
18. 윤진호, 서동일, 2013. 3차원 EFDC-WASP 연계모델을 이용한 경인아라뱃길 수질 예측. 대한환경공학회지 35(2), 101-108.
19. 이상진, 고승희, 김영일, 2014. 충청남도 하구 현황 및 생태복원 방안 연구. 충남발전연구원 전략연구 2014-23.
20. 이상진, 김영일, 2018. 충청남도 천수만의 지속가능발전 정책방안. 충남리포트 329.
21. 이영기, 황상철, 황현동, 나진영, 유나영, 이한진, 2018. HSPF-EFDC 모델을 연계한 홍수조절댐 수질 변화 예측. 환경영향평가 27(3), 251-266.
22. 장남정, 2018. 새만금 수질개선 정책분석 및 추가 대응방안 연구. 전북연구원 정책연구 2018-14.
23. 전지혜, 정세웅, 박형석, 장정렬, 2011. 새만금호 수질예측 모의를 위한 EFDC 모형의 평가. 수질보전 27(4), 445-460.
24. 정광욱, 2012. 유역 수문 및 수질해석을 위한 HSPF모형 소개. 물과미래 45(12), 103-110.
25. 정석일, 류광현, 정영훈, 이승오, 2018. 새만금 호내 수환경 측면에서 최적 관리수위에 대한 수치모의. 한국방재학회논문집 18(5),

301-309.
26. 정세웅, 김성진, 박형석, 서동일, 2020. 국가 물환경관리정책 지원을 위한 수질모델링 기술의 발전방향. 한국물환경학회지 36(6), 621-635.
27. 최정훈, 오찬성, 조영권, 안치호, 2013. 새만금호 방수제 공사에 따른 관리수위 운영과 환경변화에 관한 고찰. 한국해양환경에너지학회지 16(4), 290-298.
28. 한국농어촌공사, 2009. 농업생산기반시설의 단면확대에 따른 공학적 안정성 확보방안 연구(Ⅰ).
29. 한국농어촌공사, 2018. 간척 실무 총람(상권).
30. 한국농어촌공사, 2021. 2020년 저수지 수문조사연보 (담수호).
31. 황순호, 2020. 담수호 수질 관리를 위한 SWAT-EFDC 모형 기반 동적 회복탄력성 평가. 서울대학교 박사학위논문.
32. 황순호, 신샛별, 송정헌, 윤광식, 강문성, 2018. EFDC-WASP 연계모형을 이용한 소규모 농업용 저수지 비소 농도 모의. 한국농공학회논문집 60(5), 29-40.
33. Ambrose, R. B., Wool, T. A.,Martin, J. L., 1993. The water quality analysis simulation program, WASP5, Part A: Model documentation version 5.1, Environmental Research Laboratory, USA. 1-210.
34. Bicknell B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Donigian, A. S., and R. C. Johanson, 1996. Hydrological simulation program - fortran (HSPF): User's Manual Release 11. US Environmental Protection Agency: Athens, GA.
35. Bicknell B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Donigian, A. S., and R. C. Johanson, 2001. Hydrological simulation program - fortran (HSPF): User's Manual Release 12. US Environmental Protection Agency: Athens, GA.

36. Cerco, C. F., Cole, T., 1995. User's guide to the CE-QUAL-ICM three-dimensional eutrophication model, Release Version 1.0, Technical Report EL-95-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
37. Craig, P. M., 2009. User's Manual for EFDC_Explorer, Dynamic Solutions Intl, LLC.
38. Deltares, 2019. D-Water Quality User Manual, https://www.deltares.nl/software.
39. Hamrick, J. M., 1992. A three dimensional environmental fluid dynamics computer code; Theoretical and computational aspects. Special Report, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloceslter Point, VA., USA.
40. Hodges, B., Dallimore, C., 2019. Aquatic ecosystem model: AEM3D v1.0 User manual, Hydronumerics, Victroia, Australia.
41. Hwang, S., Jun, S. M., Song, J. H., Kim, K., Kim, H., Kang, M. S. , 2021. Application of the SWAT-EFDC linkage model for assessing water quality management in an estuarine reservoir separated by levees. Applied Sciences 11(9), 3911.
42. Lee, K. D., Hong, S. Y., Kim, Y. H., Na, S. I., Oh, Y. J., 2014. Evaluation of practical application of the remote monitoring system for water salinity in estuary lake euring farming season. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 47(5), 313-318.
43. Liu, Z., Hashim, N. R., Kingery, W. L., Huddleston, D. H. Xia, M., 2008. Hydrodynamic modeling of St. Louis bay esturay and watershed using EFDC and HSPF. Journal of Coastal Research 52, 107-116.
44. Martin, J. L., Ambrose, R. B., Wool, T. A., 2020. WASP8 macro algae - model theory and user's guide. US Environmental

Protection Agency: Athens, GA.

45. Seo, D. I., Kim, M., 2011. Application of EFDC and WASP7 in series for water quality modeling of the Yongdam Lake, Korea. Journal of Korea Water Resources Association 44 (6), 439-447.
46. Seo, D. I., Kim, M., Ahn, J. H., 2012. Prediction of chlorophyll-a changes due to weir constructions in the Nakdong River using EFDC-WASP modelling. Environmental Engineering Research 17 (2), 95-102.
47. U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 1986. CE-QUAL-W2 user's manual. Instruction report E-86-1,US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. USA.
48. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2002. User's Manual for Environmental Fluid Dynamics Code (Hydro version) Release 1.0. Washington, D.C., USEPA.
49. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2022. 2021 Surface water model maintenance and support status. EPA-600-R-21-268, Washington, D.C., Office of Research and Development, USEPA.
50. U.S. Geological Survey (USGS), 2000. Water resources applications software: HSPF. <https://water.usgs.gov/software/hspf.html>
51. Wool, T. A., Davie, S. R., Rodriguez, H. N., 2003. Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse River Estuary, North Carolina. Journal of water resources planning and management 129(4), 295-306.

Abstract

Impact Assessment of Drainage Gate Operations on Water Quality in Ganwol Estuary Reservoir Using Watershed-Estuary Linkage Model

Sinae Kim
Major in Rural Systems Engineering
Department of Landscape Architecture and
Rural Systems Engineering
The Graduate School
Seoul National University

An estuary reservoir is one of the main water resources for agriculture in Korea and is used for water supply by maintaining an appropriate water level. However, the recent inflow of various pollutants from watersheds aggravates the water pollution problems in estuary reservoirs, and additional measures including the management

of the water body through control of water level as well as basin management measures are needed.

The proper water level management of estuary reservoir can reduce the environmental impact for using freshwater and coastal fishing, but the current water management level is mainly focused on securing water and feasibility of sea-dike construction. Therefore, this study aims to evaluate the effect of the drainage gate operation on the water quality of the estuary reservoir. A watershed-estuary linkage model was established to comprehensively consider the watershed and water body characteristics, and water quality changes were analyzed by reflecting the management level operation scenarios in the model.

In this study, Ganwol estuary reservoir was selected as the target area, and an HSPF-EFDC-WASP linkage simulation system was established. The effect of management water level on the water quality of the estuary reservoir was evaluated by reflecting the discharge of drainage gate for different management water level scenarios in the linkage model.

As a result of the analysis, the difference in water quality for each scenario was larger at the lower point (GW1) of the Ganwol estuary reservoir compared to the upper point (GW3) due to the change in the water passage area and the increase of drainage gate operation influence. At GW3 and GW2 of the Ganwol estuary reservoir, the water quality tended to improve as the management water level increased due to the dilution effect of the pollutants caused by the increase in water volume. Meanwhile, at GW1, which is greatly affected by the operation of the drainage gate, the lower the management level, the higher the water quality improvement effect due to the improvement of the flow in the estuary caused by the

increase in the discharge frequency.

However, since there is a limit to meeting the target water quality of the estuary reservoir through management water level control, watershed measures to improve water quality should be taken together. Furthermore, an optimal drainage gate operation method considering both short- and long-term effects on estuary reservoir and watershed should be developed through the short-term rainfall impact analysis on the watershed.

The results derived in this study can be used as basic data for preparing the optimal water resource management plan for estuary reservoirs that comprehensively consider the impact of hydrology and water quality in the future.

keywords : Estuary reservoir, water quality, drainage gate, management water level, watershed-estuary linkage model

Student Number **: 2020-27521**