석문호 유역 오염물질 배출특성 분석 및 수질모델링에 기초한 수질개선방안 연구

Water Quality Improvement Plans based on the Analysis of Pollutant Discharge Characteristics and Water Quality Modelling of Seokmun Reservoir Watershed

최무진 · 정우혁 · 최재훈* · 김영일**,*

Moojin Choi · Woohyeuk Jung · Jaehun Choi* · Youngil Kim**,*

공주대학교 건설환경공학과 · *(주)휴먼플래닛 · **충남연구원

Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

*Human Planet · **Chungnam Institute

(Received September 8, 2017; Revised September 18, 2017; Accepted October 17, 2017)

Abstract : For effective improvement of water quality in Seokmun reservoir, this study implemented various analyses including the tributary water quality and flowrate monitoring, contamination of sediment, investigation of pollution source, selection of priority management target tributary by stream grouping method. The COD concentration of the majority of tributaries in Seokmun reservoir watershed was relatively higher than BOD concentration. The concentration of water pollutants regardless of water quality parameters in Yeokcheon, Dangjincheon, Sigokcheon, Baekseokcheon, small stream in Jinkwanri and Janghangri were higher than the other tributaries. The pollution sources in the Seokmun reservoir watershed were mostly distributed in the population, livestock, and industry. The pollutants, which located in Yeokcheon, Dangjincheon, Baekseokcheon, and small stream in Janghangri selected as priority management target tributary, should be preferentially reduced for improving the water quality in Seokmun reservoir. As the evaluation results of water quality in Seokmun reservoir for the effect of water quality improvement according to various scenarios using water quality model, it was found that the water quality in Seokmun reservoir due to the construction of a wastewater treatment plant for management of pollutants in the watershed would be satisfied the class V of water environment standard in reservoir.

Key Words : Seokmun-reservoir Watershed, Pollutant Discharge Characteristic, Priority Management Target Tributary, Water Quality Modelling, Water Quality Improvement Plan

요약 : 석문호 수질을 가장 효율적으로 개선하기 위한 최적의 방안을 마련하기 위해 본 연구에서는 지류하천의 수질 및 유량조사, 퇴적물 조사, 오염원 조사, 하천그룹화를 통한 중점관리 대상유역 선정에 포함한 다양한 분석을 수행하였다. 석문호 유역의 주요 지류하천은 대부분 BOD농도는 낮은 반면 COD농도는 높은 경향을 보였으며, 역천, 당진천, 시곡천, 백석천, 진관소하천, 장항소하천 등은 수질항목에 관계없이 수질농도가 높은 경향을 보였다. 석문호 유역 내 오염원은 생활계, 축산계 및 산업계가 대부분으로 지역에 따라 다양하게 분포하는 것으로 조사되었다. 석문호 수질개선을 위해 중점관리 대상하천으로 선정된 당진천, 역천, 백석천, 장항소하천 유역 내 위치하고 있는 오염원의 우선적인 저감이 필요한 것으로 판단된다. 석문호 수질개선을 위한 다양한 시나리오별 수질개선효과를 수질모델을 이용하여 정량적으로 평가한 결과, 유역 내 오염물질 배출량 관리를 위해 공공하수처리시설을 신설 및 증설만 하여도 호소 수질 V등급을 만족하는 것으로 나타났다.

주제어 : 석문호 유역, 오염물질 배출특성, 중점관리대상하천, 수질모델링, 수질개선방안

1. 서론

간척사업으로 인한 방조제 건설을 통해 조성된 인공담수호는 농업 및 공업용수로의 활용 등 이수 측면 뿐만 아니라 치수 측면에서도 매우 중요한 가치를 가지고 있다. 하지만, 대부분의 인공담수호는 상류유역에서 배출되는 생활하수, 공장폐수, 축산폐수 및 농업용수 등 다양한 오염물질의 유입으로 인해 호소수질이 지속적으로 악화되고 있다. 특히, 호소 내에서는 순환이 거의 이루어지지 않고 자정속도 또한 느려 수질오염이 심화되고 있다.¹⁾ 이와 같이 호소의 수질 악화 문제를 해결하기 위해 중앙정부와 지방자치단체 차원에서 다양한 계획들이 수립된 바가 있으나,²⁻⁶⁾ 실제적으로 수질이 개선된 사례는 보기 드문 실정이다.

한편, 간척사업을 통해 조성된 석문호는 현재 농업용수로 사용되고 있으나, 1991년 최종 물막이 이후 수질농도가 지속적인 증가추세로 COD기준 VI등급 수준을 보이고 있어 친환경농산물 인증을 위한 농업용수 기준에 미달할 뿐만 아니라 생태적 가치도 저하되고 있는 실정이다.⁷⁾ 이러한 문제점을 인식하여 석문호를 관리하고 있는 당진시에서는 석문호 수질개선을 위해 오염원 처리시설 설치 등과 같은 발생원대책과 함께 초기 강우 시 석문호로 유입되는 비점오염물질을 저감하기 위해 침강지와 인공습지 등을 조성하는 대책을 수립한 바가 있다.⁸⁾ 하지만, 실제적으로 석문호를 대상으로 수질개선대책이 시행되지 않아 석문호 수질은 매년 지속적으로 악화되어 양질의 수자원 확보를 위한 효율적인 수질관리대책의 수립이 시급한 실정이다.

* Corresponding author E-mail: yikimenv@cni.re.kr Tel: 041-630-3932 Fax: 041-630-3999

다.^{9,10)} 특히, 대부분 농업용수로 사용하고 있는 석문호의 수질을 개선하여 친환경농산물 인증을 통한 농산물의 가치 향상을 위해서는 석문호를 포함한 해당 유역에 대한 조사 및 분석, 정확한 진단을 통한 개선방안 마련이 무엇보다도 중요하다 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 석문호 및 석문호로 유입되는 지류하천의 유량·수질조사, 석문호 하부 퇴적물 조사, 오염원 및 오염부하량 산정, 오염부하밀도 및 하천그룹화를 통한 중점관리 대상유역 선정 등 다양한 분석을 수행하고, 수질모델링 기법을 활용하여 석문호 수질을 가장 효율적으로 개선하기 위한 최적의 방안을 마련하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 석문호 유역현황

석문호는 당진시 석문면 장고항과 송산면 가곡리를 연결하는 인공담수호로 행정구역상 당진시 석문면, 고대면, 송산면 일원에 위치하고 있으며, 총 저수량은 1,461만톤, 유효저수량은 910만톤이다. 석문호 유역은 충청남도 당진시, 서산시, 예산군 등 3개 시·군 13개 동·면에 걸쳐 있으며, 전체 유역면적은 264.3 km²으로 전체의 80.8%인 213.6 km²가 당진시에 포함되어 있으며, 서산시는 18.9%인 50.0 km², 예산군은 약 0.7 km²가 포함된다.⁸⁾

2.2. 유역현황 조사 및 분석

석문호 유역현황 조사 및 분석을 위해 석문호로 유입되는 하천 가운데 저수기에 일정한 하천유량이 흐르고 지류하천 수계의 오염현황을 파악하기 위해 오염물질 거동분석이 필요한 하천 14개 지점을 선정하여 2015년 6월~12월까지 하천 수질 및 유량을 매월 1회 측정하였다. 하천 수질 및 유량측정은 대표성 있는 수질 및 유량자료를 얻기 위해 오염물질의 거동분석, 수질 및 유량간의 상관성 등을 고려하여 각 하천 말단지점에서 측정하는 것을 원칙으로 ‘수질오염공정시험기준’에 따라 시행하였다.¹¹⁾ 하천유량은 유속 측정이 가능한 유속계(FLOWATCH JDC/SWISS)를 이용하여 유속면적법에 따라 산정하였고, 수질은 총 10개 항목으로 현장 측정항목인 수온, pH, 전기전도도를 포함하여 BOD, COD, SS, T-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P를 측정하였으며, 분석을 위해 시료를 채수하여 냉장 보관한 다음 실험실에서 각 항목을 분석하였다.

석문호와 같은 대형담수호는 내부 오염물질의 퇴적, 용출, 재생산 등 지속적인 순환을 통해 수체에 영향을 미칠 수 있기 때문에 석문호 내 3지점을 선정하여 강우기(7~8월)를 중심으로 강우 전·후 1회씩 총 2회에 걸쳐 퇴적토의 오염물질 함유량을 분석하였다. 퇴적토 분석을 위해 고무보트를 이용하여 대상지점에서 반빈 그래프(Van Veen Grab) 채취기로 대표성 있는 지점에서 시료를 채취하였으며, 동시에

Fig. 1. Monitoring locations for flowrate, water quality and sediment in Seokmun-reservoir watershed.

퇴적토가 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해 동일한 지점에서 반빈 채수기(Van Dorn Sampler; WildCo, FL, USA)를 이용하여 수심 1/3지점과 2/3지점의 석문호 시료도 각각 채취하였다. 퇴적토는 함수율, 완전연소가능량, 화학적산소요구량(COD_{sed}), 총질소(T-N), 총인(T-P), 중금속, 입도분석 등을 포함하여 총 16개 항목을 분석하였으며, 수심별 수질은 하천 수질분석항목과 동일하게 측정하였다. 참고로 Fig. 1에 하천 수질 및 유량 조사지점과 퇴적토 조사지점을 나타내었다.

2.3. 오염부하량 산정

석문호 유역 내 존재하는 오염원을 파악하기 위하여 2015년 전국오염원조사(2014년 말 기준) 자료를 활용하여 오염원 그룹별(인구, 축산, 산업시설, 양식시설, 매립시설, 지목현황)로 조사하였다. 오염부하량은 현행 수질오염총량관리제에서 사용하고 있는 ‘수질오염총량관리기술지침(2014)’을 활용하여 오염원 그룹별로 산정하였다.¹²⁾

2.4. 수질개선 하천유역 선정

하천 수질 및 유량조사결과와 오염원 및 오염부하량 조사결과를 바탕으로 하천그룹화 방법을 이용하여 수질개선이 필요한 하천유역을 선정하였다.^{13,14)} 하천그룹화에 사용

되는 하천 유량 및 수질은 저수량과 저수량 시기의 평균수질을 사용하여야 하나, 측정횟수 부족으로 인해 평균 유량 및 수질자료를 활용하였다. 하천그룹화를 위해 먼저 X-Y 축으로 구성된 그래프에 X축에는 수질항목의 평균농도, Y축에는 평균유량(m^3/sec)을 표시하였다. X-Y축의 교차지점은 수질개선 하천유역을 선정하기 위한 목표수질 및 유량에 따라 얼마든지 변화가 가능하나, 대호방조제 증권역 목표기준이 II등급(BOD 3 mg/L 이하, COD 5 mg/L 이하)인 점과 평·갈수기에 건전한 물 환경관리를 위해 상시적으로 유지되어야 할 최소유량을 $0.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 설정하여 서로 교차하도록 하였다. 추가적으로 하천그룹화를 통해 선정된 수질개선 하천유역의 개선방안 마련을 위해 수질개선 하천유역 내 오염원을 바탕으로 산정된 발생, 배출 및 유달부하량 관계를 분석하였다.

2.5. 수질개선방안별 수질변화 예측

하천 수질 및 유량조사결과, 오염물질 배출특성 분석을 통해 석문호 수질개선을 위한 방안을 마련하고, 제시된 수질개선방안의 조합을 통해 수질개선정도를 평가하기 위해 하천 및 호소 수질변화 예측에 주로 사용되는 수질모델(Environmental Fluid Dynamics Code, EFDC)을 사용하였다.¹⁵⁾ 석문호 수질예측을 위해 우선적으로 모의격자를 구성하고 수위-저수용량 관계곡선 및 한국농어촌공사의 배수갑문 운영자료를 활용하여 유입량 및 유출량을 산정하였으며, 다양한 자료를 활용하여 검·보정을 통해 수질변화 예측을 위한 EFDC 모델을 최종적으로 구성하였다. 최종 구축된 EFDC 모델을 이용하여 수질개선방안(공공하수처리시설 신설 및

증설, 가축분뇨공공처리시설 증설, 인공습지 또는 저류지 조성)의 조합에 따라 구성된 다양한 시나리오별 수질농도를 비교·평가하여 최종적으로 석문호 수질개선에 가장 최적의 방안을 도출하였다.¹⁰⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 하천 수질 및 유량조사결과

석문호 유역에 위치한 주요하천 14개 지점을 대상으로 수질 및 유량을 조사한 결과를 Table 1에 나타내었다. 모든 하천의 BOD농도는 낮은 반면 COD농도는 높은 경향을 보였으며, 역천, 당진천, 시곡천, 백석천, 진관천, 장항천, 무수리 및 가곡리 농수로 등이 대부분 수질항목에 관계없이 농도가 높은 경향을 보였다. 특히, 당진시 시가지역을 통과하는 당진천과 시곡천은 일부지역의 생활하수가 차집되지 않아 당진천 말단으로 갈수록 수질농도가 높았으며, 당진천 유입 이후 역천의 수질농도 또한 높은 경향을 보였다.¹⁶⁾ 반면, 하천유량은 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였고, 조사대상 하천 가운데 역천의 유량이 가장 많은 것으로 나타났다. 참고로 수질분석결과를 바탕으로 석문호 유역에 위치한 하천들의 수질등급을 Fig. 2에 도식화하여 나타내었다.

3.2. 석문호 수심별 수질 및 퇴적토 분석결과

Table 2는 석문호 퇴적물 내 오염물질 함유량을 나타낸 것으로, 석문호 유출부인 석문호1 (R1)지점이 석문호2 (R2) 및 석문호3 (R3) 지점에 비해 퇴적물 내 오염물질 함유량이 대

Table 1. Average water quality and flowrate of tributaries in Seokmun-reservoir watershed

Symbol	Tributary	Flowrate (m^3/s)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	BOD ₅ (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
T1	Baekseokcheon	0.193	18.4	7.6	804	2.6	8.5	12.1	4.126	0.180	0.883	0.079
T2	Dangjincheon1	0.388	21.8	8.0	510	1.9	6.7	4.9	2.981	0.180	1.600	0.200
T3	Dangjincheon2	0.159	21.2	8.1	515	2.2	6.4	19.8	2.799	0.112	0.823	0.036
T4	Sigokcheon	0.055	20.3	7.9	542	2.3	7.3	4.2	3.357	0.172	0.701	0.061
T5	Dangjincheon3	0.052	18.3	7.1	421	1.1	4.7	4.2	3.477	0.113	1.501	0.051
M1	Yeokcheon1	0.978	19.7	7.8	491	2.1	7.9	9.5	1.832	0.108	0.540	0.055
M2	Yeokcheon2	0.615	19.0	7.5	310	2.4	6.2	14.3	2.427	0.062	0.453	0.010
T6	Geomamcheon	0.120	17.6	7.1	351	1.1	3.8	0.4	2.417	0.025	0.786	0.005
M3	Yeokcheon3	0.210	17.0	7.2	222	0.5	2.8	1.0	2.384	0.032	0.759	0.007
T7	Gosancheon	0.046	16.9	7.0	287	1.5	3.6	1.3	2.943	0.033	0.826	0.007
A1	Agricultural drainage in Gagokri	NM*	20.8	8.2	5,914	8.3	16.4	12.3	5.081	0.326	0.500	0.147
A2	Agricultural drainage in Musuri	NM*	20.1	8.1	1,601	3.5	11.8	17.0	3.026	0.172	0.473	0.063
S1	Small Stream in Janghangri	0.319	20.4	8.1	931	2.9	9.6	24.1	3.331	0.138	0.896	0.045
S2	Small Stream in Jinkwanri	0.053	19.0	7.6	624	1.7	7.4	11.4	4.179	0.159	0.713	0.066

* NM : Not Measured

Fig. 2. Water quality classification of tributaries in Seokmun-reservoir watershed.

Table 2. Average pollutant content of sediments in Seokmun reservoir

Parameter \ Site	Seokmun reservoir1 (R1)	Seokmun reservoir2 (R2)	Seokmun reservoir3 (R3)
COD (%)	0.89	0.23	0.38
TOC (%)	1.50	0.59	0.50
T-N (mg/kg)	1,938	1,600	2,110
T-P (mg/kg)	351	377	373
Ignition loss (%)	1.23	0.73	0.93
Soluble reactive phosphorus (mg/kg)	4.4	1.7	3.1
Sand (%)	65.0	89.9	37.4
Silt (%)	32.0	10.2	62.7
Clay (%)	3.1	0.0	0.0
Moisture content (%)	28.4	26.3	30.5
Cd (mg/kg)	1.23	0.83	1.23
Cu (mg/kg)	7.6	3.3	5.4
Pb (mg/kg)	10.2	7.0	8.0
Zn (mg/kg)	33.3	23.1	38.2
Ni (mg/kg)	10.7	7.2	10.0
As (mg/kg)	2.7	1.8	2.0
Hg (mg/kg)	ND*	ND*	ND*
Cr ⁶⁺ (mg/kg)	ND*	ND*	ND*

* ND : Not Detected

부분 많았다.¹⁷⁾ R1 지점은 COD, TOC, 강열감량, 수용성인의 함유량이 많은 반면, 석문호 유입부인 R3 지점은 T-N 함유량, R2 지점은 T-P 함유량이 많은 것으로 나타났다. 하지만, 전체적으로 유기물 및 영양염류 함유량은 하천·호소

Table 3. Average water quality according to depth at sediment sampling locations in Seokmun reservoir

Parameter	Seokmun reservoir1 (R1)		Seokmun reservoir2 (R2)		Seokmun reservoir3 (R3)
	Upper	Lower	Upper	Lower	
Temp (°C)	24.7	24.0	23.4	22.6	24.4
pH	9.0	8.9	8.5	8.5	8.6
EC (μS/cm)	2,810	2,784	2,722	2,728	2,164
Chloride ion (mg/L)	738.6	768.7	731.5	738.6	425.4
DO (mg/L)	12.7	11.9	11.4	8.7	13.8
BOD ₅ (mg/L)	11.0	9.6	6.8	7.0	11.1
COD _{Mn} (mg/L)	15.4	15.3	14.8	14.3	16.7
SS (mg/L)	30.3	28.0	23.7	29.0	46.9
T-N (mg/L)	3,168	3,084	3,144	2,676	3,306
NO ₃ -N (mg/L)	0.210	0.080	0.060	0.075	0.075
T-P (mg/L)	0.190	0.180	0.163	0.188	0.233
PO ₄ -P (mg/L)	0.002	0.002	0.013	0.018	0.005

퇴적물 오염평가기준의 오염기준치보다 상당히 낮아 양호한 수준인 것으로 판단된다.¹⁸⁾ 한편, Table 3은 퇴적토 채취지점의 수심별(수심 1/3지점 및 2/3지점) 수질농도를 나타낸 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 수질항목에 따라 지점별로 약간의 편차를 보였지만, 대부분의 수질항목에서 채취지점별로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 특히, 수심에 따라 수질농도의 차이가 거의 없었는데, 이는 석문호의 수심이 2 m 내외 수준으로 수심이 깊지 않아 상층부와 하층부가 성층을 형성하지 않고 잘 혼합되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 오염물질 배출특성 분석

Fig. 3은 석문호 유역의 오염원 그룹별 배출부하량 분포를 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 생활계 배출부하량은 인구밀도가 상대적으로 높은 당진시 동지역을 중심으로 높은 경향을 보였다. 축산계는 당진낙농축협이 위치한 석문간척지를 중심으로 배출부하량이 큰 값을 보였는데, 특히, 당진낙농축협이 위치한 석문간척지에는 조사료 재배를 위한 액비살포가 집중적으로 이루어지고 있어 강우에 의한 비점오염원 유출 가능성이 상존하여 축산오염원에 대한 세심한 관리가 필요한 지역이다. 산업계는 송산산업단지 및 현대제철이 위치한 지역에서 상대적으로 배출부하량이 높

게 나타났으며, 토지계는 대지지목 비율이 높은 석문국가산업단지 지역의 배출부하량이 높은 것으로 나타났다.

석문호 유역의 오염원 그룹별 배출부하밀도를 나타낸 Fig. 4에서와 같이 대부분 오염원 그룹의 배출부하밀도가 배출부하량 분포특성과 유사한 경향을 보였다. 생활계는 당진 공공하수처리시설이 위치한 동지역의 배출부하밀도가 가장 높은 반면, 축산계는 백석천과 농업용 배수로가 있는 송산면 지역이 가장 높은 것으로 나타났다. 산업계는 배출부하량과 마찬가지로 송산산업단지 및 현대제철이 위치한 유역이 상대적으로 높게 나타났다. 토지계는 대지지목 비율이 높은 동지역이 높게 나타났다.

Fig. 3. Spatial distribution of discharged pollution load in Seokmun-reservoir watershed.

Fig. 4. Spatial distribution of discharged pollution load density in Seokmun-reservoir watershed.

3.4. 석문호 수질개선 하천유역 선정

하천 수질 및 유량조사결과에 의하면, 대부분의 하천이 BOD항목은 하천 수질기준 II등급(BOD 3 mg/L 이하)을 만족한 반면 COD항목은 호소 수질기준 II등급(COD 5 mg/L 이하)을 초과하는 것으로 나타났다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 대호방조제 중권역 목표기준 II등급(COD 5 mg/L 이하)을 초과하여 수질개선이 필요한 중점관리 대상하천은 역천(M1, M2), 당진천(T2, T3), 백석천(T1), 장항소하천(S1)인 것으로 나타났다. 또한, 시곡천(T4), 진관소하천(S2) 등도 목표수질을 초과하나 하천유량이 너무 적어 실제적으로 수질을 개선하더라도 유역의 수질개선효과는 크지 않을 것으로 판단된다.

Table 4는 하천 유량 및 수질결과, 하천그룹화, 오염원 분석결과를 통해 선정된 중점관리 대상하천의 점오염부하량(발생, 배출, 유달) 사이에 상관관계를 분석한 결과이다.^{13,14,19,20)}

Fig. 5. Classification of water quality improving tributaries in Seokmun-reservoir watershed by stream grouping method.

Table 4. Analysis of pollutant characteristics in priority management tributaries

Tributary	Pollutant load (kg/d)	Dis-charge load (kg/d)	Pollutant delivery load (kg/d)	Dis-charge/ Pollutant	Pollutant delivery/ Discharge
Yeokcheon	15,968	2,651	208	0.17	0.08
Dangjincheon	7,619	1,566	48	0.21	0.03
Baekseokcheon	2,060	237	44	0.12	0.18
Small stream in Janghangri	1,930	216	81	0.11	0.37

발생부하량 대비 배출부하량 비는 당진천과 역천이 높은 경향을 보였는데, 이러한 하천들은 수질개선을 위해 유역에 위치하고 있는 오염원 저감이 시급한 하천들이다. 반면, 배출부하량 대비 유달부하량 비가 높은 하천은 장항소하천과 백석천으로 하천의 생태기능이 매우 저조하여 자연형(생태) 하천 조성이 필요한 하천들이다. 따라서 중점관리 대상하천의 효율적인 수질개선을 위해서는 유역 내 오염원 저감을 위한 환경기초시설(공공하수처리시설, 가축분뇨공공처리시설) 확충이나 인공습지 또는 저류지 등의 적극적인 조성이 필요한 것으로 판단된다.

3.5. 석문호 수질개선방안 및 수질변화 예측

목표수질을 초과하여 중점관리 대상하천으로 선정된 당진천, 역천, 백석천, 장항소하천 등은 유역 내 존재하는 생활하수 및 가축분뇨를 처리하는 사업(예를 들면, 공공하수처리시설 또는 가축분뇨공공처리시설의 설치)을 우선적으로 추진하여야 한다. 당진천(시곡천 포함)은 일부지역의 생활하수가 공공하수처리시설로 차집되지 않고 있기 때문에 하수처리구역 확대사업을 적극적으로 추진하여야 한다. 반면, 장항소하천은 유역 내 축산오염원이 많이 분포하고 있기 때문에 기존 가축분뇨공공처리시설의 증설을 통해 축산밀집지역의 가축분뇨를 이송 처리하여야 한다. 이와 더불어 가축사육밀도(단위면적당 한계량) 조정, 가축사육 금지지역 지정, 가축분뇨공동자원화 및 공동처리시설 확대설치 등의 방안도 고려하여야 한다. 특히, 석문간척지에는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 축산 액비가 집중적으로 살포되고 있어 가축분뇨의 투기 또는 무분별한 자원화 등으로 강우 시 비점오염물질이 일시적으로 석문호로 유입되는 것을 방지하기 위해 인공습지 또는 저류지를 조성하는 방안도 필요한 것으로 판단된다.

앞서 언급한 수질개선방안(공공하수처리시설 신설 및 증설, 가축분뇨공공처리시설 증설, 인공습지 또는 저류지 조성) 적용에 따른 석문호 수질변화를 예측하기 위해 각각의 수질개선방안에 대한 오염물질 삭감량을 산정하였다.¹²⁾ 먼저 당진시 하수도정비기본계획에 따라 용두공공하수처리시설(250 m³/일), 정미공공하수처리시설(100 m³/일) 및 상거공공하수처리시설(180 m³/일) 신설과 기존 당진공공하수처리시설을 15,000 m³/일에서 30,000 m³/일로 증설하는 경우에는 유

Fig. 6. Distribution map for spraying of liquid livestock manure in Seokmun-reservoir reclaimed land.

역 내 BOD배출부하량이 1,196.8 kg/일 삭감되는 것으로 산정되었다. 축산오염원 저감을 위해 기존 당진가축분뇨지역 단위통합센터를 95 m³/일에서 245 m³/일로 증설하는 경우에는 BOD배출부하량이 200.0 kg/일, 인공습지 또는 저류지를 장항소하천, 백석천 및 당진천 말단지점에 각각 100,000 m² 규모로 조성하는 경우에는 BOD배출부하량이 220.0 kg/일 삭감되는 것으로 산정되었다.

Table 5는 석문호 수질 V등급(COD 10 mg/L 이하) 달성을

Table 5. Composition of scenarios according to combination of pollutant reduction plans for prediction of water quality in Seokmun reservoir

Case	Pollutant reduction plan		
	Construction of wastewater treatment plant	Construction of livestock manure treatment facility	Construction of Wetland
Scenario1	×	×	×
Scenario2	●	×	×
Scenario3	×	●	×
Scenario4	×	×	●
Scenario5	×	●	●
Scenario6	●	●	×
Scenario7	●	●	●

Fig. 7. Results of water quality prediction according to seven scenarios.

목표로 앞서 제시한 3가지 수질개선방안을 조합하여 석문호의 장래 수질변화를 예측하기 위해 시나리오를 구성한 것이다. 시나리오1은 3가지 수질개선방안을 시행하지 않은 석문호의 현재 수준이며, 시나리오2~시나리오7은 3가지 수질개선방안을 개별 또는 조합하여 구성한 것이다. 장래 공공하수처리시설 신설 및 증설을 적용한 시나리오2에서 석문호의 연평균 수질이 상당히 개선되어 목표수질인 호소수질 V등급(COD 10 mg/L 이하)을 달성하는 것으로 예측되었다. 반면, 가축분뇨공공처리시설 증설, 인공습지 또는 저류지 조성을 개별 또는 조합한 시나리오3~5는 시나리오2에 비해 수질개선효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 수질개선방안 모두를 적용한 시나리오7의 연평균 수질은 시나리오 가운데 가장 좋은 수질개선효과를 보이는 것으로 예측되었다. 결론적으로 시나리오2와 같이 공공하수처리시설 신

설 및 증설만 적용하더라도 호소수질 V등급(COD 10 mg/L 이하)은 만족하는 것으로 예측되었으며, 공공하수처리시설 신설 및 증설, 가축분뇨공공처리시설 증설과 더불어 인공습지 또는 저류지를 조성하는 경우에는 수질이 추가적으로 개선되는 것으로 예측되었다. 하지만, 석문호는 유입하천에 비해 담수면적이 상당히 크기 때문에 유역에서 배출되는 오염원 저감만으로는 수질개선에 한계가 있을 것으로 예상되므로, 최근 연구에서와 같이 배수갑문의 주기적인 개방을 통해 오염물질을 배출시키고 체류시간을 감소한다면 석문호 수질은 더욱 개선될 수 있을 것으로 판단된다.²¹⁾

4. 결론

석문호의 수질개선을 위해 석문호 및 석문호 유역현황

조사, 오염원 및 오염부하량 산정, 하천그룹화에 기초한 중점관리 대상유역 선정 및 분석, 수질모델링 적용을 통한 최적의 수질개선방안 마련을 위한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 석문호 유역에 위치한 주요하천의 유량은 하류로 갈수록 증가하여 역천의 유량이 가장 많았고, 대부분 하천의 BOD농도는 낮은 반면 COD농도는 높았으며, 당진시 시가 지역을 통과하는 당진천과 시곡천 일부지역의 생활하수가 차집되지 않아 당진천 말단 및 역천의 수질농도가 높은 경향을 보였다.

2) 석문호 퇴적물의 오염물질 함유량은 지점에 따라 약간의 차이를 보였으나 전체적으로 유기물 및 영양염류 함유량은 하천·호소 퇴적물 오염평가기준의 오염기준치보다 상당히 낮아 양호한 수준이었으며, 석문호의 상층부와 하층부가 성층을 형성하지 않고 잘 혼합되어 수심별 수질농도 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

3) 석문호 유역의 오염원은 생활계, 축산계 및 산업계가 대부분으로 지역에 따라 다양하게 분포하였으며, 특히 석문간척지를 중심으로 축산계 오염원이 국지적으로 많이 분포하는 것으로 조사되었다.

4) 석문호 유역에 위치한 당진천, 역천, 백석천, 장항소하천이 중점관리 대상하천으로 선정되어 효율적인 수질개선을 위해 하천 유역 내 오염원(생활하수 및 가축분뇨) 저감을 우선적으로 추진하여야 하며, 추가적으로 축산 액비가 집중적으로 살포되고 있는 석문간척지의 비점오염물질 유출을 방지하기 위해 인공습지 또는 저류지를 조성하는 방안도 필요한 것으로 판단된다.

5) 석문호 수질 V등급(COD 10 mg/L 이하) 달성을 목표로 다양한 시나리오별 석문호 수질변화를 수질모델을 이용하여 정량적으로 평가한 결과, 공공하수처리시설을 신설 및 증설만 하여도 호소 수질 V등급은 만족하는 것으로 예측되었으며, 가축분뇨공공처리시설 증설 및 인공습지 또는 저류지를 추가적으로 조성하는 경우에는 수질이 더욱 개선되는 것으로 예측되었다.

Acknowledgement

본 연구는 충남녹색환경지원센터에서 지원한 “석문호 수질개선방안 연구(CN-15-0105)”의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

KSEE

References

1. Kwon, Y. S., Bae, M. J., Kim, J. S., Kim, Y. J., Kim, B. H.

- and Park, Y. S., “Characterizing changes of water quality and relationships with environmental factors in the selected Korean reservoirs,” *Korean J. Ecol. and Environ.*, **47**(3), 146~159(2014).
2. Ministry of Environment, A Study on the establishment of fundamental plan and designation of priority management reservoir(2014).
3. Yesan-gun, Fundamental plan for water quality establishment of Yedang reservoir(2013).
4. Song, M. Y., Jo, E. H. and Lim, D. H., Current status & policy issues on agricultural water quality management in Gyeonggi province, Gyeonggi Research Institute(2012).
5. Song, M. Y., Lee, G. Y., Kim, G. H., Moon, H. I. and Lim, D. H., Water quality management and implementation alternatives for Wangsong reservoir, Gyeonggi Research Institute(2011).
6. Ministry of Environment, A Study on the water quality management alternatives of reservoirs(2009).
7. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Enforcement rules of the act on the promotion of environment-friendly agriculture and fisheries and the management of and support for organic foods, etc.(2015).
8. Dangjin-si, Fundamental investigation report for water quality establishment of Seokmun reservoir(2009).
9. Kim, E. S., Yoon, J. H., Lee, J. W. and Choi, H. I., “Analysis of Long-term trends in lake water quality observations,” *J. Korean Soc. Hazard. Mitig.*, **12**(1), 231~238(2012).
10. Chung Nam Green Environment Center, A Study on the water quality improvement plans of Seokmun reservoir(2015).
11. Ministry of Environment, Official test methods of water quality, Notification No. 2015-76(2015).
12. Ministry of Environment, Technical guidelines of TMDL(2014).
13. Cho, B. W., Chio, J. H., Yi, S. J. and Kim, Y. I., “Selection priority of tributary catchments for improving water quality using stream grouping method,” *J. Korean Soc. Water Environ.*, **28**(1), 18~25(2012).
14. Lim, B. S., Cho, B. W., Kim, Y. I. and Kim, D. Y., “Application of priority order selection technique for water quality improvement in stream watershed by relationship of flow and water quality,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(8), 802~808(2010).
15. Jeon, J., Chung S. W., Park H. S. and Jang J. R., “Evaluation of EFDC for the simulations of water quality in Saemangeum Reservoir,” *J. Korean Soc. Water Environ.*, **27**(4), 445~460(2011).
16. Park, S. H., Moon, E. H., Chio, J. H., Cho, B. W., Kim, H. S., Jeong, W. H., Yi, S. J. and Kim, Y. I., “Analysis of distribution characteristics of flowrate and water quality in tributary at Chungcheongnam-do,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(10), 739~747(2011).
17. Jung, K. W., Yoon, C. G., Lee, I. H., Lee, S. I., Kang, S. M. and Han, J. W., “Pollutants release from sediments in estuarine reservoir,” *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **56**(1), 1~9(2014).

18. National Institute of Environmental Research, The sediment pollution evaluation standard of river and reservoir, Established Rule No. 687(2015).
19. Kim, D. W., Jang, M. J. and Han, I. S., "Determination of focused control pollutant source by analysis of pollutant delivery characteristics in unit watershed upper paldang lake," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(5), 367~377(2014).
20. Han, M. D., Son, J. Y., Ryu, J. C., Ahn, K. H. and Kim, Y. S., "The effects of pollutants into sub-basin on the water quality and loading of receiveing streams," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(9), 648~658(2014).
21. Kim, S. M., Park, Y. K., Lee, D. J. and Chung, M., "Prediction of water quality change in Saemangeum reservoir by floodgate operation at upstream," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **50**(6), 373~386(2017).