

회야호 부영양화 평가 및 준설에 의한 수질개선 효과 분석 연구

서명교¹, 이상현², 서정호^{3*}

¹동의과학대학교 경영정보계열, ²울산발전연구원 환경안전연구실,

³울산과학대학교 환경화학공학과

Study of the Trophic State Assessment and Analysis of Water Quality Improvement by Dredging in Hwoiya Reservoir

Myung-Gyo Suh¹, Sang-Hyeon Lee², Jung-Ho Suh^{3*}

¹Division of Management, Dongeui Institute of Technology

²Environment & Safety Division, Ulsan Development Institute

³Department of Environmental & Chemical Industry, Ulsan College

요약 본 연구는 울산시 상수원인 회야호의 부영양화를 평가하고 WASP7을 이용하여 준설로 인한 호수 내 침전물의 용출 저감에 따른 수질개선 효과를 분석하였다. 회야호의 부영양화 평가는 회야호 2개 지점의 투명도, Chlorophyll-a 및 TP를 이용하여 Carlson과 Aizaki 등에 의한 영양상태지수(TSI)로 수행하였다. 평가결과, 2지점 모두 부영양 상태의 호수로 나타나 부영양에 대한 대책이 필요한 것으로 조사되었다. 또한, TN/TP 비에서 볼 때 인이 제한요인으로 작용하는 호수로 나타나 인을 제거하는 수질개선책을 강구해야 할 것으로 판단되었다. 회야호의 수질개선을 위해 퇴적물을 준설할 경우를 가정하여 WASP7 모형을 이용하여 용출저감 10%, 용출저감 40% 및 용출저감 60%의 세 가지 시나리오로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 준설을 통한 용출저감이 10%일 경우, 회야호 1지점에서는 TN이 0.9%, 2지점에서는 0.6% 저감되었으며, TP의 경우는 1.3%와 0.8%가 저감되는 것으로 예측되었다. 그리고 용출저감 60%를 가정한 시나리오 3의 경우는 TN이 회야호 1지점에서 6.4%, 회야호 2지점에서는 3.9% 저감되는 것으로 예측되었으며, TP의 경우는 각각 9.3%, 5.6% 저감되는 것으로 예측되었다.

Abstract The trophic state assessment of the Hwoiya reservoir was estimated using the Trophic state indices (TSIs) of Carlson and Aizaki using the transparency and concentrations of chlorophyll-a and total phosphorus obtained from two sites of the reservoir. The TSIs assessments showed that eutrophic phenomena occur frequently in the Hwoiya reservoir. In addition, strategies to reduce the phosphorus especially would be prepared because the Hwoiya reservoir exceeded phosphorus-limiting state of $17 < TN/TP$ (total nitrogen/total phosphorus). Three scenarios for a simulation of the dredging effect of sediments on the water quality using the WASP7 model were made at two sites, which were 10% (scenario 1), 40% (scenario 2) and 60% elution of the pollutants from sediments (scenario 3). In the most elution case (60%), scenario 3, it was considered that 6.4% TN and 9.3% TP at site 1, and 3.9% TN and 5.6% TP at site 2 could be reduced.

Key Words : Dredging, Eutrophication, Hwoiya reservoir, Trophic state, TSI

1. 서론

최근 우리나라 대규모 상수원 인공호 댐들은 매년 부

영양화가 심각하고 조류가 과잉 증식함으로 인해 맑은 물 공급이라는 시민들의 요구를 만족시킬 수 없는 상황에 있다. 이에 부영양화에 의한 조류번식을 억제하기 위

본 논문은 2013년도 동의과학대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Jung-Ho Suh(Ulsan College)

Tel: +82-52-279-3177 email:josuh@uc.ac.kr

Received June 16, 2014

Revised (1st October 1, 2014, 2nd October 24, 2014)

Accepted November 6, 2014

한 여러 가지 공학적인 노력과 정책들이 진행되었는데, 대표적인 방법으로는 수중폭기나 준설 등의 물리적인 방법, 철이나 알루미늄 첨가를 통해 호소 내 인을 침전시켜 불활성화시키는 방법이나 황산동(CuSO₄)과 같은 살조제를 살포하는 화학적 방법 등이 있다[1]. 이러한 물리, 화학적 조류제어 기술이 부분적으로는 효과를 거두고 있지만 적용규모, 시설 투자비용 및 유지관리, 부산물생성(by-product) 등 해결해야 할 많은 문제점도 가지고 있다.

본 연구의 대상인 회야호는 유역면적 127 km²의 인공댐으로 울산시의 주요 상수원이며 연 평균 수면적이 2.37 km², 유역면적은 127 km², 유효 저수용량은 1,770만 m³이다. 회야호 상류지역인 양산시 웅상읍과 울주군 웅촌면의 공장 및 인구증가와 개발사업 추진 등의 영향으로 최근 조사에 의하면, COD_{Mn} 4.1 mg/L, DO 농도 9.6 mg/L 수준으로 지속적인 오염관리 및 부영양화에 대한 대책수립이 요구되고 있다[2].

회야호와 같은 인공호는 하천에 비해 유속이 느리고 체류시간이 길어 퇴적에 의한 부영양화의 발생 및 심각성은 제시되고 있지만, 인공호의 수질을 개선하기 위하여 퇴적물에 대한 준설을 실시할 경우 인공호의 수질에 미치는 영향에 관한 연구는 부족한 실정이다. 반면에 해역이나 하천을 대상으로 준설의 수질개선 효과에 대한 연구는 많이 진행되었는데, Lee 등[3]은 전남에 위치한 선소해역을 대상으로 수질개선을 위한 환경준설방안을 제시하기도 하였으며, 하천의 경우에는 준설을 실시할 경우 준설량을 정확히 측정하고 그 활용성에 대한 연구들이 지속적으로 진행되어 왔다[4-7].

호소를 대상으로 한 수질예측 연구는 대부분 수질모형을 통한 연구들이 진행되어 왔는데, Fisher[8]는 하천의 측방향으로 유입하는 오염물질의 혼합에 대한 2차원 모델을 제시하였고, Yang과 Merry[9]는 Kapping River에서 QUAL2E 모형을 통한 수질예측 연구를 보고하였다. 국내에서는 Jun과 Lee[10]가 팔당호를 대상으로 영양염류에 관한 수질예측을 시도하였고, Kim 등[11]은 소류지를 대상으로 WASP 모형을 이용한 영양염류 예측을 연구하였다.

기존에 수행되었던 준설에 관련된 연구들이 하천이나 해역의 경우에는 준설량에 관한 연구에 집중되어 있으며, 인공호의 경우는 유입수의 변동에 따른 영양염류와 부영양화에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있으며, 준설과 연관된 수질예측에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 울산광역시 주요 상수원인 회야호를 대상으로 부영양화를 평가하고, 동시에 준설에 의한 영양염류의 수질개선 효과를 WASP7 모델을 통해 예측하여 회야호의 수질관리를 위한 정책수립에 활용하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 부영양화 평가 및 조류성장 제한 인자

부영양화는 탄소, 질소, 인과 같이 조류(algae)의 번식에 영양분이 되는 물질들이 호수에 축적될 때 일어나는 현상으로 호수에서 부영양화의 발생여부와 진행정도를 평가하는 것은 호수의 수질관리를 위해서는 필수적인 수단이며, 장·단기적인 수질관리계획에 있어서 가장 기초적인 자료가 된다. 평가방법은 크게 정성적 평가방법과 정량적 평가방법이 있다.

정성적 평가방법으로는 부영양화와 빈영양호의 특성을 기초로 하여 다수의 전문가가 부영양화의 발생 여부 및 진행정도를 평가한 결과를 집적하여 종합적으로 부영양화를 평가하는 방법으로 연구자나 관정책임자의 주관에 따라 결과가 달라질 수 있는 결점이 있다. 정량적 평가방법으로는 투명도(degree of clarity), 총인(total phosphorus, TP) 농도, Chlorophyll-a 량 등 단일항목에 의한 평가와 영양상태지수(trophic state index, TSI)에 의한 방법이 있다.

영양상태지수에 의한 수질의 부영양화 평가방법은 투명도, Chlorophyll-a 및 TP 농도 중 어느 한 항목만을 측정하여도 영양상태를 파악할 수 있고, 부영양화와 밀접한 관계를 가진 수질 특성을 종합적으로 고려할 수 있는 장점이 있으므로[12] 본 연구에서는 회야호의 영양상태를 파악하기 위하여 부영양화와 밀접한 관계를 가진 투명도, Chlorophyll-a 및 총인 농도의 수질항목을 Carlson[13]과 Aizaki 등[14]에 의해 제안된 영양상태지수(TSI)에 의해 평가하였다. Carlson[13]이 제시한 투명도, Chlorophyll-a 및 총인 농도의 영양상태지수는 식(1)~(3)에 나타내었다.

$$TSI(SD) = 60 - 14.41 \ln(SD) \quad (1)$$

$$TSI(CHL) = 9.81 \ln(CHL) + 30.6 \quad (2)$$

$$TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15 \quad (3)$$

Aizaki 등[14]이 제시한 수정 영양상태지수(TSI_m)를 식 (4)~(6)에 제시하였다.

$$TSI_m(SD) = 10[2.46 + \frac{3.69 - 1.53 \ln(SD)}{\ln 2.5}] \quad (4)$$

$$TSI_m(CHL) = 10[2.46 + \frac{\ln(CHL)}{\ln 2.5}] \quad (5)$$

$$TSI_m(TP) = 10[2.46 + \frac{6.71 + 1.15 \ln(TP)}{\ln 2.5}] \quad (6)$$

여기서, SD는 secchi disk transparency (m), CHL은 chlorophyll pigment concentration (μg/L), TP는 total phosphorus concentrations (μg/L)를 나타낸다.

영양상태지수(TSI)에 따른 호소의 영양상태 판정은 Kratzer과 Brezonik[15]이 제시한 기준(Table 1)에 따라 판정하였다. 호소의 친수성 및 청정성을 확보하기 위해서는 부영양상태에 도달하지 않은 TSI를 만족하여야 하는데, Table 1에 의하면 청정성 확보를 위해서는 TSI가 50 이하 이어야 함을 나타내고 있다.

[Table 1] Trophic state criteria of reservoir using TSI

Trophic state index (TSI)	Trophic state of reservoirs
< 20	ultra-oligotrophic
30~40	oligotrophic
45~50	mesotrophic
53~60	eutrophic
> 70	hyper-eutrophic

호소의 부영양화에 따른 조류의 발생은 무기인, 무기 질소와 같은 영양염의 농도에 직접적인 영향을 받으며, 제한 영양염의 영향이 절대적인 것으로 알려져 있어 조류 성장에 대한 영양염 제한을 나타내는 간접적인 자료로 무기인과 무기질소의 비를 활용하고 있다[16]. 일반적으로 영양염 제한 상태를 알기 위하여 DIN/DIP 비(dissolved inorganic nitrogen/dissolved inorganic phosphorus ratio)를 적용하기도 하지만, 부영양화 호소의 영양염 비율을 토대로 잠재적 영양염 평가에서 TN/TP 비(total nitrogen/total phosphorus ratio)를 주로 사용하며, TN/TP 비가 10~17의 범위에서는 인과 질소가 동시에 제한 염이 될 수 있으며, 이 이하에서는 질소가 제한 염, 이 이상에서는 인이 조류의 성장에 대한 제한 염이 된다고 알려져 있다[17]. 본 연구에서는 회야호의

부영양화 정도와 조류성장 제한 염을 알기 위하여 TN/TP 비를 조사하였다.

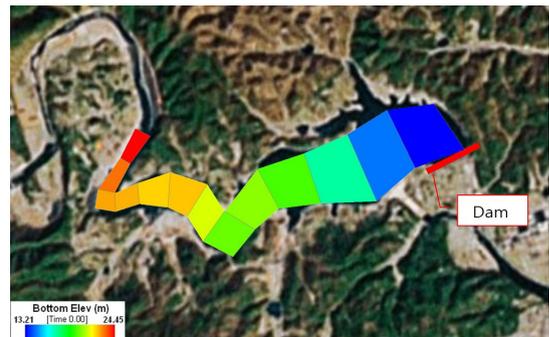
TSI 및 부영양화 정도를 알기 위해 사용된 TN(total nitrogen) 및 TP(total phosphorus)는 standard method[18]의 실험 방법에 준하여 분석하였으며, SD(투명도)는 직경 30 cm의 Secchi disk를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. Chlorophyll-a(CHL)는 일정량의 시료를 GF/C에 여과 후 90% 에탄올로 비등 추출하는 Nusch[19]법으로 분석하였다.

2.2 수질모형 선정 및 보정

2.2.1 WASP7 모형

현재 사용하는 호소의 수질모형은 다양하지만 모형의 기본적인 가정은 물질수지식과 경험적인 반응식을 사용하므로 유사한 특성을 가진다. 최근 사용하는 수질 모형은 WASP, CE-QUAL-R1, CE-QUAL-W2, WQRRS, EFDC 등이 있으며, 국내에서는 부영양화 현상의 수질 모의를 위해 WASP 모형을 주로 사용하고 있다[11]. 기존의 DOS 기반의 WASP 모형은 1차원 유동 모델인 DYNHYD와 연계되어 사용될 수 있으며, 이를 수심이 깊은 호소의 유동모의에 적용하는 것은 한계를 가지고 있다. 따라서 미국 EPA에서는 별도의 유동해석 프로그램과 연계하여 사용할 수 있도록 윈도우 기반 프로그램인 WASP6을 개발하였으며, 최근에는 WASP7로 발전시켜 사용하고 있다.

2.2.2 WASP7 모형 구축 및 보정



[Fig. 1] Grids for simulation of water quality using WASP7 model.

연구에 사용된 WASP7 모형의 모의를 위해서 Fig. 1에 나타난 바와 같이 모의 구간을 설정하였다. 실측된 지

형 및 수심 자료를 이용하여 표층을 13개의 격자로 구성하고, 수직으로 2개의 층으로 구분하여 총 26개의 활성격자로 구성하였다. 수질모의를 위한 회야호의 유입 유량은 회야호 수리자료를 바탕으로 수위-체적 곡선식을 이용하여 산정하였으며, 회야호의 유출유량은 취수에 의한 유출만이 있기 때문에 취수탑 운영자료를 적용하였다. 입력된 경계농도는 환경부수질측정망 자료를 활용하였다[20].

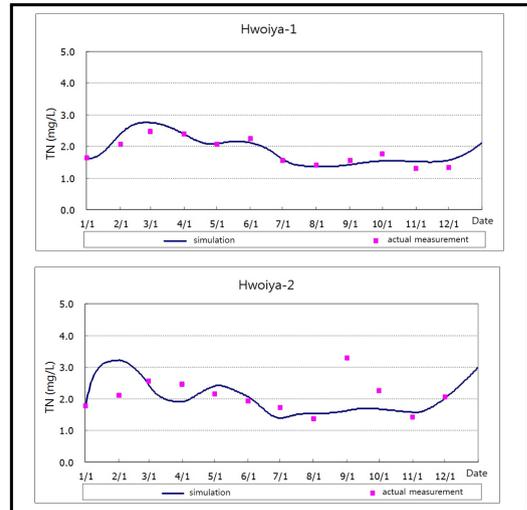


[Fig. 2] Sites for water quality simulations.

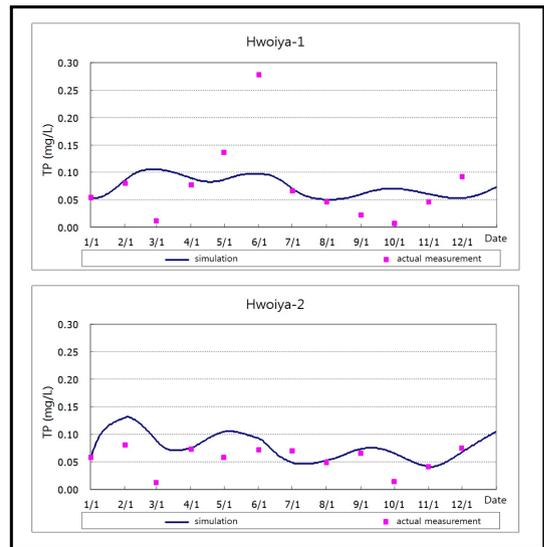
수질 모델을 통한 장래 수질 예측을 위해서는 현재 수질 자료를 이용한 모델의 보정이 선행되어야 한다[5]. 회야호 수질모의의 보정을 위해 Fig. 2에 나타난 것과 같이, 회야강에서 회야호로 유입되는 지점(site 1)과 회야호 내 취수지점(site 2)에서 TN, TP 항목 분석을 위한 시료를 채취하였다.

모델의 보정에 사용된 수질 매개변수는 모의치와 실측치의 오차가 최소화되도록 시행착오법을 이용하여 산정하였다. 회야호 내에 위치한 각 수질측정 지점별 실측농도의 연간 수질변화와 보정된 수질모의의 결과를 비교하여 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

모형의 보정 결과, 일부 시기에 대해서는 실측수질 농도에 비해 높거나 낮은 경향을 나타내고 있으며, 이는 강우 유출에 의한 일시적인 수질 농도를 나타낸 것으로 분석되었다. 즉 한 달에 한번 수질을 측정하는 현재의 수질 측정망 설정상 수질 모델은 유역으로부터 유입되는 오염원이 수체의 수질에 미치는 영향을 일반적인 경향으로만 반영할 수 있으며, 모든 측정치에 대해 정확히 모의하는 것은 한계를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 수질 농도뿐만 아니라 계절별 변화 추이를 반영하도록 보정을 실시하였으며, 보정된 수질 농도는 일부 기간을 제외하고 전반적인 실측 수질농도 변화를 유사하게 따르고 있는 것으로 판단되었다.



[Fig. 3] Calibration curves of water quality model on Hwoiyea reservoir (TN).



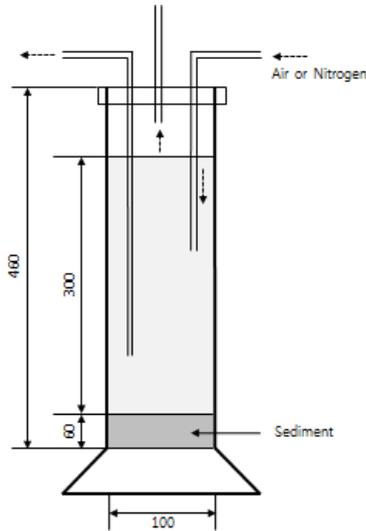
[Fig. 4] Calibration curves of water quality model on Hwoiyea reservoir (TP).

2.3 퇴적물로부터 영양염류의 용출

인공 댐의 오염원으로는 주로 외부로 유입된 점오염원 및 비점오염원에 의한 영향만을 고려하기 쉬우나, 저수지와 같은 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많아 저부에서 슬러지 상태로 쌓이게 되고, 이렇게 퇴적된 오염물은 환경의 변화에 대항하며 수체에 영향을 미치게 된다.

호소의 퇴적물에 포함된 영양염류는 용출을 통하여 수체로 재 유입되어 내부부하를 가중시킬 우려가 있으므로, 퇴적물로부터 용출되는 영양염류의 용출량과 용출조건을 파악하는 것은 호소의 부영양화 관리측면에서 중요하다.

본 연구에서는 회야호 상·하류 두 지점에서 시료를 채취한 후 TN과 TP에 대한 퇴적물의 용출실험을 수행하기 위하여 Fig. 5와 같이 아크릴 재질 반응조를 제작하였으며, 퇴적물이 호기성 조건과 혐기성 조건일 때 영양염류의 용출속도가 달라 내부부하에 미치는 영향이 달라지므로 호기성과 혐기성 조건에서 영양염류의 용출실험을 수행하였다. 용출속도 실험은 조영철 등[21]과 같이 수행하였다.



[Fig. 5] Schematic diagram of apparatus used in nutrient release experiment(unit, mm).

3. 연구결과

3.1 호소의 부영양화 평가 및 조류성장 제한 인자

본 연구의 대상 호소인 회야호의 부영양화평가를 위해 Carlson[13]과 Aizaki 등[14]의 영양상태지수(TSI)를 이용하여 평가한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보면 측정된 두 지점에서의 TSI(SD), TSI(CHL) 및 TSI(TP) 수치가 거의 유사하게 나타났으며, 모두 수치가 53 이상으로 호소 전체가 부영양화 상태인 것을 확인할

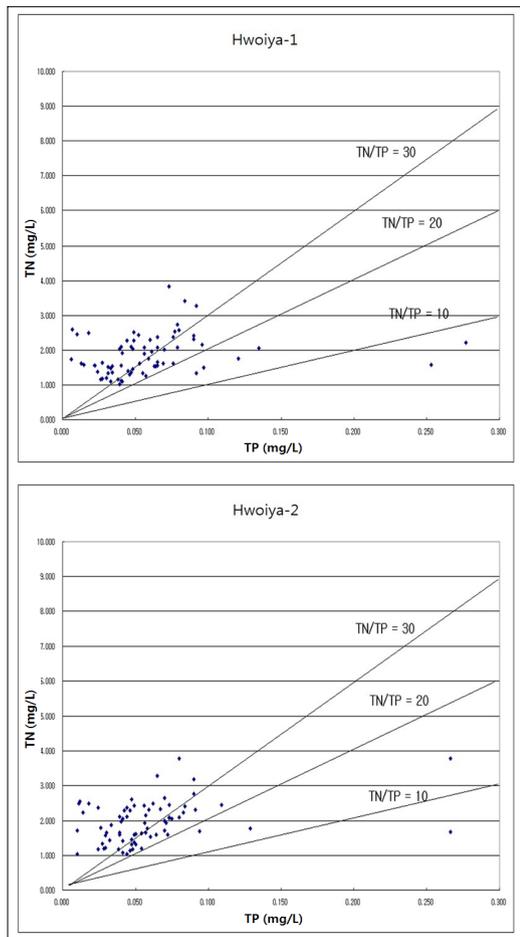
수 있었다. 따라서 부영양화에 따른 조류의 증식 억제와 호소 내 영양염류의 제어를 위한 다양한 방안이 필요할 것으로 생각된다.

TSI의 상호 편차를 이용하여 호소 내 부유물질의 조성과 조류성장을 제한하는 요인들을 평가할 수 있는데 [22], TSI(CHL) 값이 TSI(TP) 값보다 크면 인이 조류성장에 제한 영양염이며, TSI(TP) 값이 TSI(CHL) 값보다 크면 인 이외의 다른 요인이 조류 성장할 제한할 가능성이 큰 것을 의미한다. 또한, TSI(CHL) 값이 TSI(SD) 값보다 크면 부유물질 중 큰 입자의 구성비가 높고 빛이 조류 성장에 제한요인이 될 수 없으며, TSI(SD) 값이 TSI(CHL) 값보다 크면 부유물질 중 작은 크기의 입자들의 구성비가 높으며 빛이 조류성장에 제한요인이 될 가능성이 높음을 의미한다[12]. 이러한 관점에서 Table 2에 나타난 수치를 기준으로 회야호의 조류성장 제한 인자를 평가하면, TSI(CHL) 값과 TSI(TP)의 값이 거의 유사하므로 인과 다른 인자 등이 모두 조류성장 제한 인자로 될 가능성이 크나, TSI(CHL) 값이 TSI(SD) 값보다 크므로 빛은 성장 제한 인자가 될 수 없는 것으로 나타났다. 일반적으로 빛, 온도, 영양염류를 조류의 주요 성장 제한 인자로 생각할 때, 회야호의 경우 빛이 제한 인자에서 제외된다며, 온도는 인위적으로 제어하기 힘든 인자이므로, 최종적으로 영양염류 중 인의 제어가 조류의 성장을 위해 필요한 것이라 판단된다.

[Table 2] Trophic state estimation of Hwoiya reservoir

Hwoiya reservoir	TSI of Carlson			TSI of Aizaki			Trophic state
	SD	CHL	TP	SD	CHL	TP	
Site 1	57.37	61.71	62.98	61.83	59.24	62.31	Eutrophic
Site 2	57.37	62.30	62.22	61.83	59.90	61.65	Eutrophic

또한, 회야호 내 조류의 성장 제한 염을 알기위해 총 질소/총 인(TN/TP) 비를 구하여 호소의 부영양화 정도를 분석하였다. TN/TP 비가 10 이하인 경우에는 질소가 제한인자로 작용하여 인의 중요도가 상대적으로 저하되고 TN/TP 비가 17 이상일 경우에는 인이 제한요인이 된다[17]. 회야호 내 두 지점의 수질분석 결과를 이용하여 TN/TP 비를 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보면, TN/TP 비가 대부분 20 이상으로 나타나 호소 부영양화를 감소시키고 조류 성장을 제한하기 위해서는 인의 제거가 필수적이라는 것을 알 수 있었다.



[Fig. 6] TN/TP Ratios at two sites of Hwoiya reservoir.

3.2 용출실험 결과

준설에 의한 수질개선 및 부영양화 저감 효과를 파악하고 모의실험의 정확도를 높이기 위해서 회야호에서 채취한 퇴적토에 대한 용출시험을 수행하였다. 인 및 질소에 대한 용출실험은 호기성 및 혐기성 조건에서 72시간 동안 수행하였으며, 실험에 의해 도출한 용출속도 값을 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보면 TN과 TP 모두 1 지점에서 높은 용출속도를 나타내었는데, 이는 하천에서 호소로 유입되는 1 지점의 특성상 퇴적물 내 유기물 및 영양물질의 함량이 높아 퇴적물 내 미생물의 활동이 활발하기 때문인 것으로 판단된다.

TN의 경우 두 지점에서 모두 혐기조건 보다는 호기조건에서 용출속도가 빠르게 나타났는데, 저층 퇴적물에 존재하는 입자성 유기질소가 호기성인 질산화 박테리아에 의한 질산화 과정을 거치면서 수중으로 용출되기 때

문이며, TP의 경우에는 두 조건에서 모두 용출속도의 변화가 크지는 않지만, 혐기조건일 때 용출속도가 더 높은 것을 알 수 있었다. 이는 호기조건에서는 미생물의 높은 활성도에 의한 인의 용출 억제제가 생기며 혐기조건에서는 미생물에 의해 흡수되는 인은 적어지고 퇴적물 내 화학적으로 결합되어 있던 인 성분이 수중으로 방출되기 때 문으로 판단된다[23].

[Table 3] Results of elution rates estimation

Elution rates (mg/m ² /day)		TN	TP
Site 1	aerobic	67.50	6.96
	anaerobic	40.32	7.41
Site 2	aerobic	45.18	3.39
	anaerobic	22.92	3.48

3.3 준설에 의한 수질개선 효과

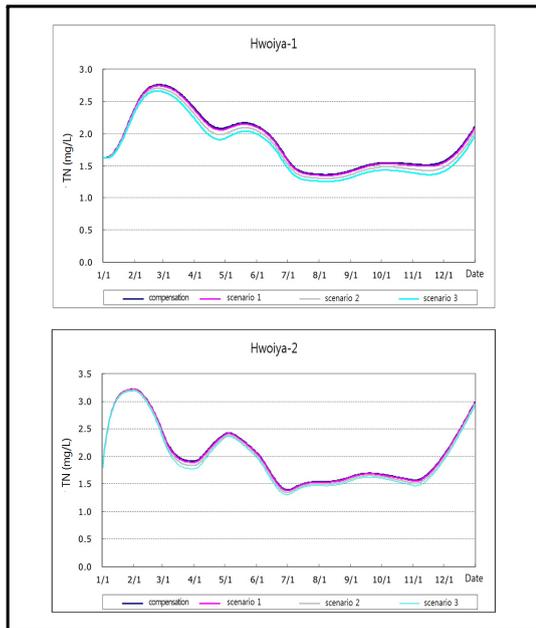
tbh 외부에서 유입되는 오염물질 외에 회야호의 수질 관리에서 가장 중요한 문제는 부영양화에 의해 호소 자체의 생산성이 매우 높고 퇴적토가 심하게 오염되어 있다는 점이다. 따라서 현재 기술적으로 실행 가능한 대책으로 퇴적토 준설을 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서는 퇴적토 준설을 통한 용출의 저감으로 인한 수질개선 효과를 WASP7 모형을 사용하여 예측하였으며, 이를 위하여 Table 4와 같이 현재의 용출과 비교하여 10%에서 60%까지 용출이 저감되는 3가지 시나리오를 구성하였다. 즉 퇴적토 준설이 실시될 때 퇴적토의 준설량이 현재 퇴적되어 있는 퇴적토의 10%에서 60%까지 준설이 실시되었을 때를 가정하여 수질개선 효과를 예측하였다.

[Table 4] Scenarios for simulation of water quality

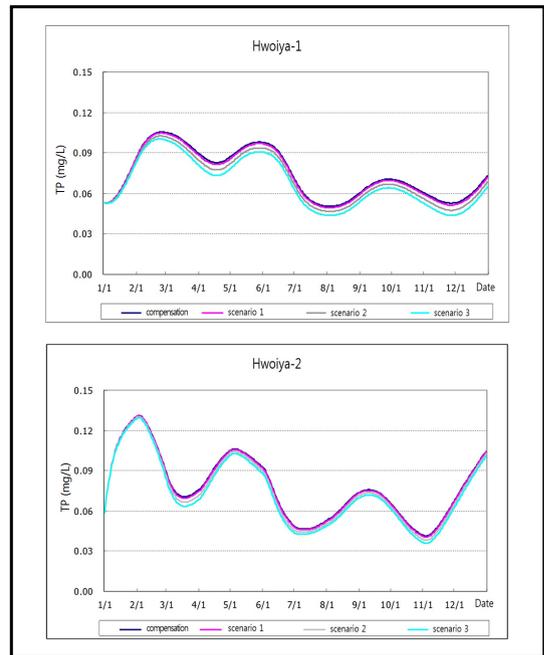
Division	Scenarios
Present	-
Scenarios 1	10% elution down
Scenarios 2	40% elution down
Scenarios 3	60% elution down

퇴적토 준설을 통한 시나리오별 용출 저감 후 수질예측 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었으며, 회야호 내의 수질 예측 결과는 Table 5에 나타내었다. 준설을 통하여 저니층의 용출을 저감시켰을 경우, 회야호 1지점에서는 용출 저감 10%에서 TN이 0.9%, 회야호 2지점에서는 0.6% 저감되었으며, TP의 경우는 1.3%와 0.8%가 저감되

는 것으로 예측되었다. 그리고 용출 저감 40%인 시나리오 2의 경우는 TN이 회야호 1지점에서 용출 저감 3.7%, 회야호 2지점에서는 2.2%로 예측되었으며, TP의 경우는 각각 5.3%, 3.2%로 예측되었다. 그리고 용출 저감 60%를 가정한 시나리오 3의 경우는 회야호 1지점에서 TN이 6.4%, 회야호 2지점에서는 3.9% 저감되는 것으로 예측되었으며, TP의 경우는 각각 9.3%, 5.6% 저감되는 것으로 예측되었다. 따라서 준설을 통한 회야호의 수질을 개선하고 부영양화를 저감하기 위해서는 퇴적도에 의한 인의 용출이 현재에 비해 60% 이상 저감될 수 있도록 준설을 실시하여야 10% 정도의 인 농도 감소가 이루어질 수 있을 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 Shin 등[24]이 WASP5를 이용하여 부남호 내 퇴적토의 준설 시 수질변화를 예측하였을 때, 10년 후 TN은 약 30%, TP는 60%까지 저감될 수 있으며, 소류지에서 WASP7을 이용하여 퇴적토의 준설 효과를 분석한 Kim 등[25]은 TN의 경우 약 35.5%, TP는 약 32.8%의 수질 개선 효과를 나타낼 수 있다고 분석한 결과에 비해 수질개선 효과가 크지는 않지만, 현실적으로 퇴적토의 준설이 100% 이루어지기 힘든 실정에서 60%의 퇴적토 준설을 통해 10%의 부영양화 인자의 제어는 호소 내 조류의 생성에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.



[Fig. 7] Results of simulation of water quality after sediment dredging with 3 scenarios (TN).



[Fig. 8] Results of simulation of water quality after sediment dredging with 3 scenarios (TP).

[Table 5] Simulation results of water quality with three scenarios

Site	Items	Present	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
1	TN (mg/L)	1.872	1.855	1.803	1.751
	Increase	-	0.9 %	3.7 %	6.4 %
	TP (mg/L)	0.074	0.073	0.070	0.067
	Increase	-	1.3 %	5.3 %	9.3 %
2	TN (mg/L)	2.044	2.033	1.998	1.964
	Increase	-	0.6 %	2.2 %	3.9 %
	TP (mg/L)	0.078	0.077	0.075	0.073
	Increase	-	0.8 %	3.2 %	5.6 %

4. 결론

회야호는 울산시의 상수원시설로 상류지역인 양산시 웅상읍과 울주군 웅촌면의 공장 및 인구증가와 축산농가 등의 영향으로 최근 유기물 농도가 증가하고 부영양화가 되고 있어 실태조사와 개선방안이 요구되고 있다. 본 연구는 기존의 지도와 감독위주의 상수원 관리정책 수준으로는 깨끗한 상수원수 확보에 현실적 한계가 존재하므로,

부영양화에 영향을 주는 질소와 인 같은 영양염류의 조사를 통해 과학적인 물질순환 평가가 선행되고 이를 바탕으로 효과적인 정책수립의 기초자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 회야호의 부영양화 평가 그리고 WASP7을 이용하여 준설로 인한 용출저감을 할 경우 회야호의 수질개선 효과를 분석하였다.

회야호의 부영양화 평가는 회야호 2개 지점의 투명도, Chlorophyll-a, 그리고 TP를 이용하여 Carlson과 Aizaki 등에 의한 영양상태지수(TSD)로 평가하였다. 평가결과, 2 지점 모두 부영양 상태의 호소로 나타나 부영양에 대한 대책이 필요한 것으로 조사되었다. 또한, TN/TP 비에서 볼 때 인이 제한요인으로 작용하는 호소로 나타나 인을 제거하는 수질개선책을 우선으로 호소를 정화하는 방안을 강구해야 할 것이다.

또한, 회야호의 수질개선을 위해 준설할 경우를 가정하여 시나리오별 수질개선 정도를 분석하였다. 준설을 통한 수질개선 분석은 WASP7 모형을 이용하여 용출저감 10%(시나리오 1), 용출저감 40%(시나리오 2), 그리고 용출저감 60%(시나리오 3)로 가정하여 시뮬레이션 하였다. 회야호 1지점에서는 준설을 통해 용출저감 10%를 가정할 경우, TN이 0.9%, 회야호 2지점에서는 0.6% 저감되었으며, TP의 경우는 1.3%와 0.8%가 저감되는 것으로 예측되었다. 그리고 용출저감 40%인 시나리오 2의 경우는 TN이 회야호 1지점에서 용출 저감 3.7%, 회야호 2지점에서는 2.2%로 예측되었으며, TP의 경우는 각각 5.3%, 3.2%로 예측되었다. 그리고 용출저감 60%를 가정한 시나리오 3의 경우는 회야호 1지점에서 TN이 6.4%, 회야호 2지점에서는 3.9% 저감되는 것으로 예측되었으며, TP의 경우는 각각 9.3%, 5.6% 저감되는 것으로 예측되었다. 따라서 퇴적토의 준설을 통해 부영양화 인자의 제어 및 조류 생성에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되었다.

References

[1] Cooke, G.D., Welch, E.B., Peterson, S.A., Newroth, P.R. "Restoration and management of lakes and reservoirs", Lewis Publishers and CRC Press, Boca Raton, FL., 1993.
 [2] Ulsan metropolitan city (UMC), Results of water quality analysis, The Office of Waterworks. 2012-2013.
 [3] G. Y. Lee, Y. H. Kang, G. S. Lee, S. N. Lee, J. K. Kim, "A Management tool of marine dredging for water quality improvements using GIS", The Korea Society of Marine

Engineering, 137-138, 2007.

[4] J. H. Seo, D. J. Seo, J.C. Lee, "Calculation of reservoir capacity by combination of GPS and echo sounder", Journal of The Korean Society for Geo-Spatial Information System, 10(1), 27-34, 2002.
 [5] U. Y. Park, Y. B. Kim, K. S. Back, "The study on accuracy improvement of estuary riverbed monitoring", The Korean Society for Geo-Spatial Information System, 11(3), 23-24, 2003.
 [6] G. S. Kang, C. K. Sung, K. J. Cho, "3-Dimensions positioning to combined RTK-GPS and E/S observation", The Korean Society of Cadastre, 20(1), 111-124, 2004.
 [7] S. H. Park, J. G. Park, "Evaluation of river dredging by GPS/ES combination-the case of Nakdong river area", Korean Association of Cadastre Information, 14(1), 95-103, 2012.
 [8] Fisher, H.B. "Transverse mixing in a sand bed channel", U.S. Geological Survey Professional Paper", U.S Department of the Interior, Washington D.C., pp. 267-272, 1967.
 [9] M. D. Yang, C. J. Merry, "Interaction of Water Quality Modeling Remote Sensing and GIS", Water Research, 35, 253-263, 1999.
 [10] Jun, G.S., Lee, G.S., "Water quality modeling of the HAN river by QUAL2E", Korea water Resources Association, pp. 125-132, 1993.
 [11] E. S. Kim, K. B. Sim, B. S. Kal, "Analysis of water quality improvement by lake dredging", Journal of KOSHAM, 3(2), 327-336, 2013.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.2.327>
 [12] H. S. Lee, S. W. Chung, J. K. Choi, S. I. Shin, "Evaluation of trophic state of a small-scale pond (Wonheung) in ecological park", J. Kor. Soc. Water Quality, 24(6), 741-749, 2008.
 [13] R. E. Carlson, "A trophic state index for Lake", Limnol. Oceanogr., 22, 361-369, 1977.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
 [14] M. Aizaki, A. Ostuki, T. Fukushima, T. Kawai, M. Hosomi, K. Muraoka, "Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese and its relationship to other parameters related to trophic stage", Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., 23, 12-31, 1981.
 [15] C. R. Kratzer, P. L. Brezonik, "A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes", Water Research Bulletin, 17, 713-715, 1981.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x>
 [16] S. J. Yu, M. H. Chae, J. Y. Hwang, J. A. Lee, J. G. Park, T. B. Choi, "Analysis of trophic state variation of lake

Yongdam in Dam construction", J. Kor. Soc. Water Quality, 21(4), 360-367, 2005,

[17] V. H. Smith, "The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis", *Limnol Oceaogr.*, 27, 1101-1112, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1982.27.6.1101>

[18] APHA, AWWA and WEF. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th ed., American Public Health Association, Washington DC., USA. 1998.

[19] E. A. Nesch, "Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination", *Arch Hydrobiol Beih.*, 14, 14-36, 1980.

[20] Ministry of Environment, Water quality information, <http://www.me.go.kr/home/web/index.do?menuId=10263>

[21] Y. G. Cho, S. W. Chung, "Sediment release rate of nutrients from Namyang reservoir", *J. of KSEE*, 29(12), 2007.

[22] Carlson, R.E., "Expending the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs, In: Proceedings of a National Conference on Enhancing the States", *Lake Management Programs, Monitoring and Lake Impact Assessment*, Chicago, pp. 59-71, 1992.

[23] I. S. Choi, S. E. Lee, J. M. Oh, "A study of elution characteristics of lake sediment", *Water of Future*, 44(6), 42-48, 2011.

[24] M. C. Shin, D. M. Oh, Y. S. Lee, M. W. Lee, "Prediction of water quality variation at dredging sediments", *Preceeding of KSEE, Ulsan Univ.*, 1012-1022, 2008.

[25] E. S. Kim, K. B. Sim, B. S. Kai, "Analysis of water quality improvement by lake dredging", *J. of KOSHAM*, 13(2), 327-336, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.2.327>

서 명 교(Myung-Gyo Suh)

[정회원]



- 1988년 2월 : 부산대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 부산대학교 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 2009년 8월 : 연세대학교 보건대학원 (보건학석사)
- 1988년 3월 ~ 1990년 2월 : 부산대학교 교육공무원

• 1996년 3월 ~ 현재 : 동의과학대학교 경영정보계열 교수

<관심분야>

의료경영학, 수질오염방지기술,

이 상 현(Sang-Hyeon Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 2000년 6월 : 한국과학기술원 수질환경연구센터 연구원
- 2000년 7월 ~ 2001년 3월 : 한국과학기술원 post-doc.
- 2001년 2월 ~ 현재 : 울산발전연구원 안전환경연구실 선임연구위원

<관심분야>

수질관리, 기후변화, 에너지

서 정 호(Jung-Ho Suh)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부산대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 부산대학교 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 1990년 2월 ~ 1995년 3월 : (주) 서릉재료개발연구소 책임연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 환경화학공학과 교수

<관심분야>

수질환경기술, 토양환경오염방지