

습지-저류지에 의한 하구 담수호 수질개선효과 예측

Prediction of Water Quality Improvement for Estuarine Reservoir using Wetland-Detention Pond System

윤 춘 경* · 함 종 화**
Yoon, Chun Gyeong · Ham, Jong Hwa

Abstract

Investigated was the effectiveness of a constructed wetland system on water quality in Hwa-Ong estuarine reservoir, located in Hwasung-Gun, Kyunggi-Do. Procedures for estimation of pollutant loading from watershed and required area for natural systems, and simulation of corresponding reservoir water quality were reviewed.

Generally, simulated reservoir water quality was within the reasonable range, and about 15% of total polder farmland was required to meet the agricultural water quality standards. The model was applied based on the current loading condition without additional treatment systems. Wetland system is an ecologically sound treatment system. Therefore, natural systems can be an alternative measure for water quality improvement in polder projects.

The area for natural systems was estimated using literature value which might be acceptable at the planning stage. However, pilot system and its experimental data are requisite for large scale field application, WASP5 was proved to be a useful and versatile model, and its application to estuarine reservoir water quality simulation was thought to be appropriate.

I. 서 론

우리나라에서는 1970년대 이후부터 주로 하구 또는 해면을 체절하여 간척지 조성과 더불어 필요한 수자원확보를 위하여 하구담수호를 조성해 오고 있다. 아산호를 비롯하여 삼교, 영산, 대호, 해남 등 각종 간척사업을 거쳐서 현재 진행중인 새

만금지구를 비롯하여 여러 간척개발지구에 대규모 하구담수호가 조성될 예정이다. 이렇게 조성된 담수호는 수자원 확보차원에서 국가적인 유익을 준 것은 사실이나, 한편으로는 자연지형을 인공적으로 변형시킴으로서 수질문제를 비롯한 여러 환경문제를 유발시키고 있다.⁷⁾

농촌지역에 있는 담수호를 오염시키는 물질은

* 건국대학교 농업생명과학대학

** 건국대학교 대학원

키워드 : 자연정화시설, 유역환경기초시설, 하구담수호, 수질개선, WASP5

간척농지와 담수호 유역내 농경지인 논과 밭, 그리고 방목지와 비육장 등에서 배출되는 유사(流砂)·영양염류·유기물 등이 있다. 이들은 대부분 지표수 유출에 의하여 배출되는데, 지표면의 관리상태에 따라 크게 영향을 받으며, 경지의 경사, 토양, 재배방식, 강우의 특성 등과 같이 다양한 인자들에 의하여 영향을 받는다.

지금까지의 부영양화 저감을 위한 수질개선의 노력은 주로 점오염원을 중심으로 이루어져, 폐수처리장과 하수처리장 건설에 따른 고농도 유기물 제거에 치중해 왔다. 그러나 이러한 환경처리 시설의 확충에도 불구하고 호소와 하천의 수질은 가시적인 개선의 기미를 보이지 않고 있는 상황이다. 이렇게 수질개선이 미비한 원인은 호소, 하천 유역에 산재해 있는 비점오염원의 유출 때문인 것으로 추정된다.¹⁾

담수호의 수질개선을 위해서는 오염부하량을 저감시켜야하며, 이를 위해서는 점원오염과 비점원오염을 동시에 고려해야 하는데, 비점원 오염부하량을 삭감시키는 뚜렷한 방법이 개발되지 못한 상황에서 유역으로부터 발생하여 운송되는 오염물질은 하천을 통하여 담수호로 유입된다. 담수호에 일단 유입된 후에는 수질관리가 더욱 어려워지므로 유입하기 전에 담수호입구에서 처리할 수 있는 방안에 대하여 관심을 가질 필요가 있다. 즉, 오염된 하천수를 담수호에 유입되기 전에 처리하는 방안이다. 수질개선을 위해서는 하수종말처리장과 같은 시설을 이용하여 처리할 수도 있으나, 하천수의 유량을 고려할 때 그 방법보다는 담수호 주변에 사용 가능한 토양이나 식물과 같은 자연자원을 이용하는 자연정화방법이 더 현실적인 방법으로 생각된다. 근래에 이 분야에 많은 나라들이 관심을 가지고 활발히 연구하고 있는데, 원하는 수질을 달성하기 위하여 소요되는 면적의 산정이 설계인자로서 중요한 역할을 하게 된다.^{5,7)}

본 연구에서는 간척사업으로 조성되는 하구담수호의 수질보전을 위하여, 하구담수호로 유입되는 외부부하량을 자연정화기법 중 습지와 저류지를 이용하여 저감시키고자 할 때 소요되는 면적의 산

정방법과 습지와 저류지 도입시 수질개선효과를 수질모형에 의해서 예측하는 관리기법을 연구하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상유역

모형의 적용대상 유역은 경기도 화성군 남양면, 마도면, 서신면, 비봉면, 팔탄면, 우정면, 장안면 등의 7개 면과 127개 리를 포함하는 화옹담수호 유역이다. 화옹담수호는 화옹지구간척사업이 완료되면 조성될 하구담수호이며, 1999년말 현재 방조제 축조작업이 길이로 환산할 때 약 85%의 공정을 나타내고 있다. 유역면적은 매립면적 6,212ha를 제외하면 17,368ha이다. 유역의 특성은 하천연변에 농경지가 집중되어 있고, 유역전반에 축산농가가 산재한 전형적인 농촌지역으로 볼 수 있다. 토지이용상태를 보면 유역전체에 대해서 임야가 43.6%, 논이 27.6%, 밭이 12.8%, 대지가 2.3%, 기타가 13.6%를 점유하고 있다. Fig. 1에서 I-1, I-2, I-3 등은 소유역을, A, B, C 등은 새로 조성될 간척농지를 1, 2, 3 등은 분할된 담수호의 구획을 의미한다.

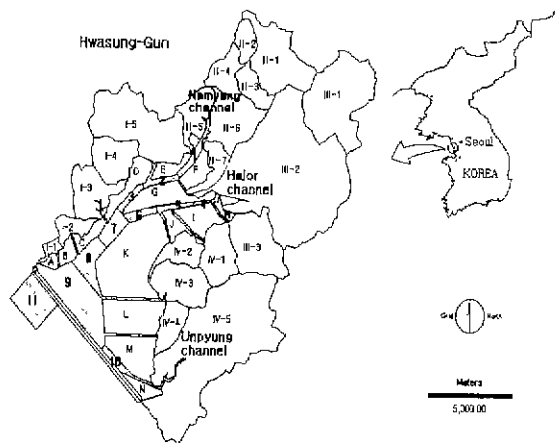


Fig. 1. Study area

2 부하량 산정

본 연구에서는 유량 및 부하량을 3가지로 나누어서 직접 구하여 입력하였다. 즉, 평상시 유량 및 부하량, 강우시 유역에서의 강우유출로 인한 유량 및 부하량, 그리고 새로 조성될 간척농지에서의 농지배수 유량 및 부하량으로 나누어서 구하였다.

평상시 유역에서 화용담수호로 유입되는 유량 및 부하량은 4지점에서 2주 간격으로 실측한 자료를 이용하여 월 평균 유량 및 월 평균 수질을 구하고 이들을 서로 곱하여 평상시 월 평균 부하량으로 계산하였다. 평상시 미측정 지점의 부하량추정은 측정한 2지점에서 실측된 월별 평상시 부하량을 실질적으로 오염부하가 발생할것으로 예상되는 논, 주거지, 축산농가, 임야의 면적의 합으로 나누어 단위 면적당 부하량을 월별로 구하였다. 그리고 각 소유역별로 논, 주거지, 축산농가, 임야의 면적을 더한 값에 월별 단위면적당 부하량을 곱하여 미측정 지점의 평상시 부하량을 추정하였다. 강우시 유역에서 화용담수호로 유입되는 유량 및 부하량은 SWMM을 이용하여 구하였다. SWMM은 1971년 USEPA의 지원아래 Metcalf & Eddy사와 Florida 대학의 공동연구에 의해 개발된 모델로서, 유역에서 강우시 발생하는 유량과 수질을 시뮬레이션 할 수 있고, 가장 널리 이용되며 범용적으로 적용할 수 있는 수질모형중의 하나이다.¹¹⁾ 간척농지에서 발생하는 유량 및 부하량은 김 등(1998)과 오 등(1999)이 연구한 농경지로부터의 질소와 인의 유출자료와 화용지구내에서 실측한 자료를 이용하여 월별 오염물질의 농도를 구하였다.

3 담수호 수질예측

호소수질예측에 사용되는 모형중에서 USEPA에서 1993년도에 개발하여 널리 사용되고 있는 WASP5를 이용하였다. WASP5 모형은 저수지, 하천, 하구, 해양 등에서 수체의 이동과 BOD, DO 등 주요 수질항목, 그리고 부영양화 관련 항목과 독성물질의 이동, 상호 반응에 대한 모의가 가능

하며, 수계에 대해 요소별(element)로 구획(segment)분할이 가능한 box형 모델로서, 각 요소를 하나의 box로 간주하는 요소분할모델이다. 이 모델은 시간에 따른 변화를 고려할 수 있으므로, 연중 변화는 물론 짧은 시간 간격의 수질변화의 분석이 가능하며, 필요에 따라 1, 2, 3차원 분석이 가능한 모델이다. 모형의 주된 구성은 예측 및 조절, 모형의 구획 구성, 이류 및 확산, 경계조건 농도, 점오염원과 외부 오염부하, 반응계수, 환경자료 및 초기 농도로 되어 있다.^{8,9,10)} 모형에서 시간에 따른 농도의 변화는 전 구획으로부터의 이류와 확산, 그리고 외부부하로 계산되며, WASP5 모형에서 모의 발생하는 수질항목은 NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P, Chl-a, CBOD, DO, Org-N, Org-P의 8개 항목을 기준으로 34개 파생 수질항목이 관련된다.^{8,9,10)}

본 연구에서 여러 호소수질모형 중 WASP5를 선택한 이유는 많은 연구자들에 의해 검증되어 많은 자료를 이용하기 쉽고, 모형이 범용성이 좋아 다양한 조건하에서의 수질예측이 가능하기 때문이다. WASP5의 입력자료를 생성하기 위해 1:5,000의 수심도를 이용하여 단면 제원을 구했으며, 유량 및 부하량자료는 앞에서 언급한바와 같이 구하였고, time function 구성을 위한 기상자료는 수원 기상대에서 수집하였다. 또한, 보정과 검증을 위한 수질자료는 담수호가 아직 조성되어 있지 않아 기존에 조성된 해남호와 남양호의 자료를 참고로 하였으며, 매개변수는 국내의 다른 연구자의 자료와 WASP5 manual상의 초기값을 일부 이용하였다. 본 연구에서는 이용 가능한 입력자료를 고려하여 비선형 효과 및 탈질소화 과정이 포함된 복잡도 5 단계를 적용하였으며, 자연정화방법의 적용 전과 적용 후 모두 동일한 입력자료를 사용하였다. 유입되는 오염물질의 부하량은 수질개선 대책으로 고려하고 있는 습지와 저류지를 통하여 농도가 저감된 후 호소로 유입하는 것으로 수질을 예측하였다.

4. 수질개선용 습지 면적산정

현재 외국의 여러 곳에서 습지를 이용해 호수

및 저수지로 유입하는 유입수를 처리하여 수질 개선을 시도하고 있으며, 실제적으로 많은 수질개선 효과를 얻고 있다. 아직 우리 나라의 경우 하수처리장의 고도처리용으로 이용한 경우는 있어도 하천유입수의 수질을 개선시킬 목적으로 시도되었던 경우는 없었다. 면적산정을 위한 관련자료는 현재 활발히 인공습지나 저류지를 활용 중인 미국이나 유럽에서 얻은 자료를 이용하여 습지 및 저류지를 설계하고자 한다.

수질개선용 습지에서의 유출수 농도 추정 관계식은 USEPA와 WPCF 등에의해서 제시된 바 있다. USEPA¹⁵⁾에서는 유출수의 BOD₅ 농도 추정을 위해 BOD₅ 제거는 first-order를 따르며 처리조 내의 흐름은 plug-flow라는 가정 하에 유입수 농도, 기온, 체류기간 등을 고려한 설계용 관계식을 만들었으며 식(1)과 같다.

$$BOD_5 = \frac{C_e}{C_i} = e^{K_T \cdot t} \dots\dots\dots(1)$$

$$K_T = K_{20}(1.1)^{T-20} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, C_e =유출수 BOD₅ 농도 (mg/L), C_i = 유입수 BOD₅ 농도 (mg/L), K_T =감소계수 (day-1), T = 수온 (°C), t = 수리학적 체류기간 (day), K_{20} = 수온 20°C에서의 감소계수이다.

WPCF¹⁶⁾에서는 유입수 농도와 수리학적 부하율을 독립변수로 하여 다중회귀분석에 의해 유출수 T-N 농도를 추정하는 관계식을 식(3)와 같이 유도하였으며, BOD₅에 관한 공식은 USEPA공식과 동일한 공식을 사용하였다.

T-N .
 $C_e = 0.193 \cdot C_i + 1.55 \cdot H_L - 1.75 \quad (R^2 = 0.79, n = 34)$
(3)

$$12.2 < C_e < 122 \text{ mg/L}$$

여기서, C_e = 유출수 T-N 농도 (mg/L), C_i = 유입수 T-N 농도 (mg/L), H_L = 수리적 부하율

(m³/m²/day)이다.

USEPA에서 제시한 설계용 관계식 (1)은 수온 인자가 포함되어 있어 설계시 습지내의 수온자료가 필요하고, WPCF에서 제시한 설계용 관계식 (3)은 유입수의 농도와 수리학적 부하율, 혹은 유입수 농도만을 고려한 관계식으로 배경농도 (background concentration) 이하를 나타내는 유입수에 대해서도 습지 내에서 처리가 되어 배경농도 이하의 낮은 유출수의 농도 나타나는 것으로 계산이 된다. 하천수의 수질은 경우에 따라서 배경농도 이하를 나타낼 수도 있어서, 본 연구에서는 배경농도까지 고려한 Kadlec and Knight (1996)에 의해 소개된 관계식인 식(4)를 이용하였다. 이 관계식은 북미 전역에 걸쳐 있는 습지처리 시설에 대한 위치, 종류, 규모, 유입, 유출수의 농도, 수위 및 식물종까지 다양한 1,293개의 자료를 이용하여 구한 회귀식이며 본 연구지역과 유사한 조건의 자료도 포함되어 있어 적용하는데 무리가 없을 것으로 판단된다. 이때 사용한 각 수질 항목별 parameter의 값은 Table 1과 같다.

$$\ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*}\right) = -\frac{k}{q} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, C_i = 유입수농도 (mg/L), C_o = 유출수 농도 (mg/L), C^* = 배경농도(mg/L), k = first-order areal rate constant (m/yr), 그리고 q = 수리부하율 (m/yr)이다.

습지의 면적산정 과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저 WASP5를 이용하여 호소의 수질을 예측하고 각 오염물질 항목별로 목표수질을 달성하기 위하여 필요한 처리율을 선정한 후, 유역에서 습지

Table 1. The parameter value used in calculating wetland area¹³⁾

| Parameter | BOD | SS | T-N | T-P |
|--------------|-----------------|----------------|------|------|
| k (m/yr) | 34 | 1,000 | 22 | 12 |
| C^* (mg/L) | $3.5+0.053 C_i$ | $5.1+0.16 C_i$ | 1.50 | 0.02 |

로 들어가는 유입수의 농도(C_i)를 segment 별 월별로 구한 후, 여기에 처리율을 곱해서 월별, segment별로 습지유출수 농도(C_o)를 구한다. 그 후 식(4)를 이용하여 수리부하율 $q(m/yr)$ 를 구하였다. 각 월별 segment별 유입되는 유량을 위에서 구한 수리부하율 q 로 나누어 소요 면적을 구하였으며, 수심은 0.6m로 하였다. 유량이 많은 여름철에 많은 면적이 필요한 것으로 나타났다. 이를 연평균하여 segment별로 소요 습지 면적을 산출하였으며, 이렇게 구한 습지유출수를 저류지에서 추가로 개선하여 WASP5로 모의하면서 최적의 면적과 설치위치를 결정하였다.

5. 저류지 면적 산정

저류지는 습지에서 처리된 물이 머물면서 추가로 수질이 개선되도록 하기 위해 설치하고자 도입한 방법이다. 저류지에서는 유입된 물중에서 고형물질에 결합되어 있는 인성분은 침강을 통해 제거되고, 질소성분은 질산화 및 탈질화 등의 과정을 거치면서 제거된다. 그러므로, 저류지를 설치하여 이곳에서 일정기간 체류하도록 함으로써 유기물의 분해는 물론 침강과 질산화 및 탈질화를 유도하고자 하였다. Wanilista and Yousef(1993)에 의하면 저류지를 이용한 농업비점원오염의 처리실험에서 3일간 체류기간의 경우에 SS는 95% 이상, 그리고 영양물질과 중금속류는 30~70%까지 제거가 가능하다고 발표한바 있다.

본 연구에서는 저류지면적계산에서 채택한 평균 처리율은 BOD와 T-N (30%), T-P (25%)로 보수적인 처리율을 적용하였다. 이러한 수치는 문헌상¹³⁾에 나타나 있는 처리율보다 낮은 수치로서 이 수치를 사용하여 안전하게 예측하였다. 저류지 면적계산에서는 연평균 유입유량으로 환산하였을 경우에 체류기간이 약 4일 정도로 산출하였으며, 강우규모로 환산하면 25mm 정도의 강우가 왔을 때 발생하는 총유출량의 약 3배 정도로서, 이 정도 규모의 저류지이면 초기세척효과는 충분히 고려된 상태이다. 실제로 1년여의 측정자료에 의하면 강

우시에 화용유역은 도시의 경우와 달리 유량과 오염물질의 농도변화가 유사하여 초기세척효과는 거의 나타나지 않았다. 저류지의 깊이는 시간이 경과함에 따라 부유물질의 침전으로 인하여 수심이 알아지는 것을 고려하여 적정수심을 2m로 계산하였다.

6. 인공습지와 저류지의 연계시스템

담수호의 수질을 개선시키기 위해서는 현재 여러 가지 방법들이 시도되고 있는데, 본 연구에서는 담수호로 유입되는 유입수의 수질을 개선시키기 위해 담수호 유입부에 조성되는 간척지를 이용하여 인공습지를 설치하고, 인공습지에서 처리된 물을 추가로 개선 할 수 있도록 저류지를 설치하는 방안을 선택하였다. 습지에서 물리적인 침전, 여과기능과 뿌리 주변의 호기성 미생물에 의한 오염물질의 분해 등에 의해 수질을 개선시킨 후, 이를 다시 저류지에 일정기간 체류시키면서 제거가 더 필요한 성분(영양물질)들을 추가로 제거하여 수질을 개선시키는 방안이다.

이와 같이 인공습지-저류지의 배치는 ① 하천수를 활용하여 증력흐름으로 인공습지에 물을 공급함으로써 펌핑과 관련된 에너지 및 유지관리를 줄이고, ② 실제 인공습지의 운영에서 습지로의 원활한 물 공급이 매우 중요함을 감안하면 유입되는 물을 먼저 습지에 공급하여 습지를 건강한 상태로 유지하고, ③ 인공습지에서 처리된 물이 담수호로 직접 유입되기 전에 저류지에서 체류하여 물의 유출입을 통제할 수 있고 추가로 개선되어 처리의 안전성을 높이며, ④ 이러한 형태의 배치는 수질 개선뿐만 아니라 건강한 인공습지의 유지를 통하여 생태계보전에 유리하고, ⑤ 저류지를 담수호 인접하여 배치함으로써 습지-저류지-담수호의 친자연적 배치를 통하여 생물들의 이동 및 서식에도 유익할 것으로 판단된다.

이렇게 해서 구한 습지와 저류지에서 처리된 물이 호수로 유입되었을 경우의 호수수질 변화는 WASP5를 이용하여 모의하였고, 원하는 담수호의

수질을 얻을 때까지 반복하여 모의하면서 습지 및 저류지의 소요면적을 조정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 습지 및 저류지의 설계

앞에서 언급한 방법으로 각 화옹지구 소유역별로 필요한 습지 및 저류지의 면적을 산정한 결과는 Table 2에 요약되어 있다. 습지소요면적의 대부분은 남양수로, 하저수로, 운평수로에서 유입되는 물을 처리하기 위해 설치되는 습지의 면적이다 이들의 면적은 전체 소요습지면적의 약 70%를 차지한다. 예를 들면, 소요습지면적을 보면 III-1, III-2, 그리고 III-3유역의 하천수가 하저수로

를 통해서 화옹담수호의 4번 segment로 유입되는데 이를 처리하기 위해 G 간척농지에 192ha를 조성한다. 유역의 모델링을 위한 소유역과 화옹담수호, 그리고 간척지의 구분은 Fig. 1에 나타나 있다.

이상의 결과에 의하면 총 소요면적은 습지 569ha와 저류지 107.6ha를 포함하여 총 676.6ha으로써, 이것은 화옹지구 총 간척농지면적(4,482ha)의 약 15%를 차지하는 면적이다. Table 2에 나타난 각 소요면적은 현재상태를 기준으로 계산한 결과이며, 유역에 오염처리대책을 전혀 적용하지 않은 상태의 결과이므로 유역에 환경기초시설 등 오염방지대책을 적용하면 소요면적은 현저히 감소할 수 있을 것으로 생각된다. 자연정화시설만으로 전체 외부오염부하량을 저감시키려는 방안은 비현실적일 수 있으므로 유역에서의 수질개선, 생활환경

Table 2. Required wetland and detention pond areas in Hwa-Ong watershed

| Segment | Location | Wetland area (ha) | Average flow (m ³ /day) | Pond area (ha) | Constituent | Initial concentration (mg/L) | Removal rate (%) | Effluent from wetland (mg/L) | Removal rate (%) | Effluent from pond (mg/L) | Remark |
|---------|----------|-------------------|------------------------------------|----------------|-------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| 1 | F | 108 | 49,221 | 15.1 | BOD | 18.10 | 66 | 6.22 | 30 | 4.35 | Nam-yang channel |
| | | | | | T-N | 8.64 | 61 | 3.39 | 30 | 2.37 | |
| | | | | | T-P | 0.69 | 50 | 0.35 | 25 | 0.26 | |
| 2 | E | 60 | 51,605 | 9.8 | BOD | 12.15 | 44 | 6.84 | 30 | 4.78 | |
| | | | | | T-N | 4.65 | 34 | 3.05 | 30 | 2.14 | |
| | | | | | T-P | 0.34 | 30 | 0.24 | 25 | 0.18 | |
| 4 | G | 192 | 101,180 | 29.2 | BOD | 15.02 | 59 | 6.10 | 30 | 4.27 | Hajor channel |
| | | | | | T-N | 6.58 | 53 | 3.09 | 30 | 2.17 | |
| | | | | | T-P | 0.60 | 45 | 0.33 | 25 | 0.25 | |
| 5 | J | 42 | 34,045 | 7.0 | BOD | 10.25 | 41 | 6.05 | 30 | 4.24 | |
| | | | | | T-N | 4.20 | 33 | 2.81 | 30 | 1.96 | |
| | | | | | T-P | 0.24 | 30 | 0.17 | 25 | 0.13 | |
| 7 | D | 70 | 58,018 | 8.1 | BOD | 10.35 | 41 | 6.11 | 30 | 4.28 | Reservoir |
| | | | | | T-N | 4.24 | 33 | 2.83 | 30 | 1.98 | |
| | | | | | T-P | 0.27 | 30 | 0.19 | 25 | 0.14 | |
| 8 | K | 0 | 82,726 | 10.8 | BOD | 8.30 | 0 | 8.30 | 30 | 5.81 | Reservoir |
| | | | | | T-N | 3.16 | 0 | 3.16 | 30 | 2.21 | |
| | | | | | T-P | 0.14 | 0 | 0.14 | 25 | 0.10 | |
| 9 | L | 0 | 70,010 | 10.1 | BOD | 8.00 | 0 | 8.00 | 30 | 5.60 | Reservoir |
| | | | | | T-N | 2.88 | 0 | 2.88 | 30 | 2.01 | |
| | | | | | T-P | 0.14 | 0 | 0.14 | 25 | 0.11 | |
| 10 | N | 97 | 63,074 | 17.5 | BOD | 14.78 | 54 | 6.75 | 30 | 4.73 | Unpyung channel |
| | | | | | T-N | 5.77 | 45 | 3.17 | 30 | 2.22 | |
| | | | | | T-P | 0.59 | 39 | 0.36 | 25 | 0.27 | |
| Total | | 569 | 509,879 | 107.6 | | | | | | | |

개선, 공중위생 등을 위하여 환경기초시설을 설치해야하며, 비점원오염저감을 위하여 BMP(Best Management Practice)를 보다 적극적으로 개발·적용해야 할 것으로 판단된다.

조성하는 인공습지와 저류지의 일반적인 형태는 Fig. 2와 같다. 인공습지는 지표유출형으로 설계를 하였으며, Fig. 2와 같이 구역에서 유입하는 하천수를 처리하기 위하여 간척농지에 습지와 저류지를 배치하였다. 구역에서 흘러오는 하천수는 중력 흐름으로 인공습지로 유도하였다. 유입지천의 말단부에 보를 설치하여 평상시에는 이 보에 의하여 대부분의 하천수가 습지로 유입하고, 강우기에는 과다한 유량이 습지로 유입되어 습지가 훼손되는 것을 방지하기 위하여 보의 높이를 계산하여 일정량의 하천수만 습지로 유입되도록 하였다. 이렇게 유도된 하천수는 폭 5m의 분배수로를 통해 습지 전체에 걸쳐 고루 분배되도록 하였으며, 또한 간척농지에서 발생하는 농지배수도 분배수로로 유입된 후 인공습지로 이동하도록 설계하였다.

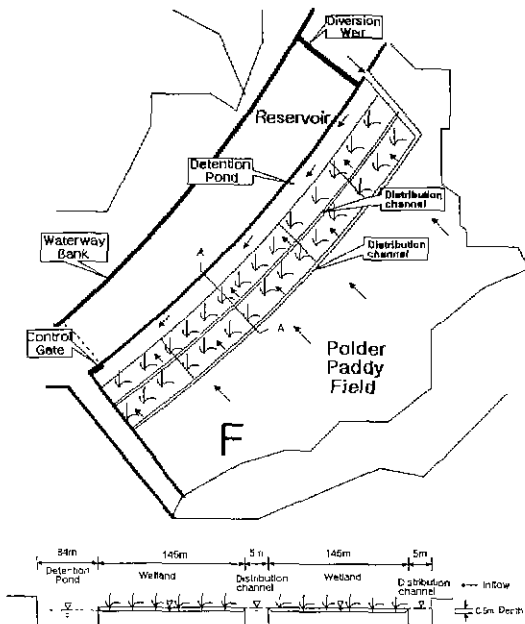


Fig. 2. Constructed wetland and detention pond layout in polder paddy field F

2. 습지 및 저류지 적용전후의 수질변화

위와 같이 인공습지와 저류지를 설치할 경우 화옹담수호의 수질변화는 WASP5를 이용하여 예측하였다. 자연정화방법의 적용 전과 적용 후 모두 동일한 WASP5의 입력자료를 사용하였으며, 유입되는 오염물질의 부하량만 습지와 저류지에서 처리된 농도를 적용하였다. 자연정화방법의 적용전과 적용후의 수질변화를 예측한 결과는 Fig. 3~5와 같다. 수질 예측 결과는 아직 화옹담수호가 조성되지 않아서 실측치와 비교가 어려우므로 이미 담수호가 조성되어 있는 남양호와 해남호의 1996년도 수질자료를 참고하여 비교하였다. 7, 8, 9번 구획은 실질적인 화옹담수호내를 나타내며, before는 자연정화방법의 적용 전을, after는 적용 후를 나타낸다.

BOD₅의 모의시험결과는 Fig. 3에 요약되어 있다. 개선방안적용 전에는 유입수로인 남양수로와 하저수로에서 40 mg/L 이상까지 높아지다가, 겨울철에는 다시 낮아져 15 mg/L 정도를 유지하였다. 개선방안적용 후에는 유입수로에서 최고 12 mg/L를 나타내고 겨울철에는 약 5 mg/L의 농도를 나타내어 뚜렷한 수질개선효과가 있음을 확인할 수 있다. 또한, 화옹담수호내의 총평균농도도 10.2 mg/L로써 수질기준을 초과하던 수질이 개선방안 적용 후에는 4.3 mg/L까지 크게 감소하여, 실측을 통해 얻은 환산계수 1.72를 곱하여 COD로 환산하여도 7.4 mg/L로써 농업용수수질기준 8.0 mg/L를 만족하는 수준이었다. 따라서, 유기물에 관한 수질기준은 Table 2에 표기된 규모의 자연정화시설의 수질

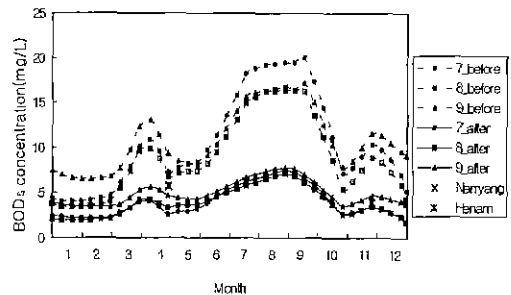


Fig. 3. BOD₅ variation in Hwa-Ong reservoir

개선방안을 적용한 후에는 대체적으로 문제가 없을 것으로 생각된다.

T-N의 모의 결과는 Fig. 4와 같다. T-N의 농도는 4월경에 약간 감소하다가 그 이후 계속적으로 증가하였고 8월 이후에는 다시 감소하였다. 개선방안 적용 전에는 남양수로, 하저수로, 운평수로에서 유입되는 유입수의 농도가 연평균 5.8 mg/L로 매우 높은 농도를 나타내던 것이, 개선방안 적용 후에는 유입수의 농도가 년 평균 1.76 mg/L로 크게 감소하여 자연정화시설의 처리효과를 추정할 수 있다. 그 결과 화옹담수호내의 총평균농도는 3.4 mg/L에서 1.39 mg/L로 현저히 감소하였다. 그러나, 이 농도는 아직 농업용수 수질기준(1.0 mg/L)을 약간 초과하는 상태이다. 이러한 수질예측은 유역내의 환경기초시설을 전혀 고려하지 않은 농도로써 환경기초시설이 도입된 후에는 앞에서 언급한 습지 및 저류지의 면적을 적용할 때 수질기준 이하로 유지가 가능할 것으로 판단된다.

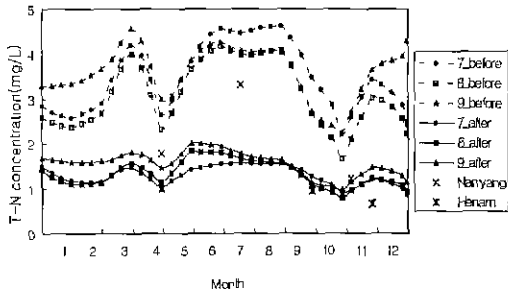


Fig. 4. T-N variation in Hwa-Ong reservoir

T-P의 농도 변화는 Fig. 5와 같이 예측되었다. 화옹담수호내의 총평균농도는 개선방안을 적용시키기 전에 0.27 mg/L를 나타내던 것이 다른 수질 항목과 같이 개선방안 적용 후에는 0.13 mg/L로 크게 개선되었다. 이 정도의 수질이면 T-N과 마찬가지로 유역에 환경기초시설을 설치한다면 농업용수 수질기준 0.1 mg/L이하로 농도를 낮추는 데에 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 화옹담수호내의 T-P농도는 5월 이후부터 계속적으로 증가하다가 7월 이후에 피크를 나타낸 후 9월 이후에 감소하기 시작하였다. 이는 T-P가 부유물질과 결

합하여 이동하기 때문에 여름철에 많은 강우로 인해 높은 농도를 나타낸 것으로 판단된다.

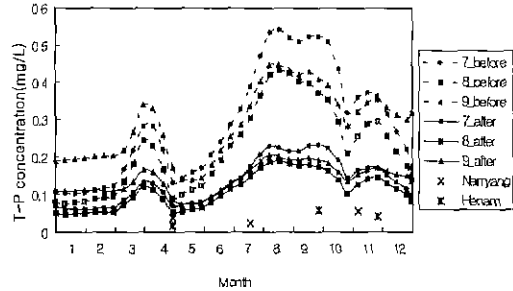


Fig. 5. T-P variation in Hwa-Ong reservoir

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 담수호에 유입되는 부하량을 자연정화기법중의 하나인 습지와 저류지의 연계 시스템 적용하여 저감시키고, WASP5에 의한 호소수질의 개선변화로써 그 저감효과를 예측하며, 원하는 수질을 달성하기 위해서 소요되는 자연정화시설의 면적을 산정하는 과정들을 화옹담수호에 적용하면서 검토하였다.

자연정화시설에 의한 부하량저감이 호소의 수질 개선에 미치는 효과는 수질모형으로 예측이 가능한데, 본 연구에서는 WASP5를 사용하였고 모형의 적용결과에 의하면 WASP5는 다양한 조건을 모의할 수 있는 범용적인 모형으로써 담수호의 수질예측에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단되었다. 수질개선목적을 달성하기 위하여 소요되는 자연정화시설의 면적은 문헌상의 연구발표자료를 사용하여 산정하였으며, 문헌상에 발표된 관계식들은 다양한 조건에서 실험연구한 자료들을 모아서 도출한 공식이므로 아직 자료가 부족한 계획단계에서는 사용하여도 무리가 없을 것으로 생각되었다.

총 간척농지면적의 약 15%에 해당하는 면적을 자연정화시설로 적용하기 전·후의 예측된 수질변화는 적용 전에 BOD, T-N, T-P의 총평균농도가 각각 10.2mg/L, 3.40mg/L, 0.27mg/L로 농업용수 수질기준을 모두 초과하던 것이 적용 후에는 각각 4.3mg/L, 1.39mg/L, 0.13mg/L로 농업용수수질기

준에 근접한 수준으로 예측되었다. 자연정화시설만으로 전체 외부오염부하량을 저감시키려는 방안은 비현실적이므로 유역에서 수질개선, 생활환경개선, 공중위생 등을 위하여 환경기초시설을 설치해야하며, 비점원오염저감을 위하여 BMP(Best Management Practice)를 보다 적극적으로 개발·적용해야 한다.

하천을 통하여 유입되는 유역의 오염부하량을 담수호 유입직전에 하류에서 자연정화시설을 이용하여 저감시키는 방안은 간척지와 같이 사용가능한 대지가 있는 지역에서 적용할 수 있는 대책으로서 가시적인 수질개선효과가 기대되는 친자연적 수질개선방안으로 나타났다. 특히, 간척지내에 자연정화시설을 설치하여 수질을 개선하는 방안은 수질개선효과뿐만 아니라 자연정화시설이 가지는 친자연적 특성이 생태계보전에 미치는 긍정적인 효과, 그리고 간척사업에 대한 부정적인 시각을 완화시키는 데에도 크게 기여할 수 있다고 생각된다.

담수호수질개선용 자연정화시설의 설치와 그에 따르는 호소수질의 개선정도를 모형을 이용하여 예측하는 기법 등은 유역에서의 부하량산정과 함께 담수호수질관리에 필요한 연구분야이다. 수자원의 양적인 확보단계를 넘어서 수질보전이 중요시되는 상황에서 앞으로 이 분야에 보다 적극적인 관심과 연구가 필요하며, 특히 본격적인 하구담수호의 수질개선용 자연정화시설 설치를 위해서는 시범사업을 통한 지역 특성에 맞는 설계인자 및 조성방법의 개발이 절실히 요구된다.

참 고 문 헌

1. 권오병, 1999, 인공 식물섬을 설치한 호소의 수질개선 및 생태계 변화에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교 환경대학원, pp. 1~55.
2. 김진수, 오승영, 김규성, 1998, 광역논에서의 질소와 인의 오염부하량 특성, 한국농공학회 학술발표회 발표논문집, pp. 529~532.
3. 농어촌진흥공사, 1997, 물(水)2000년-담수호의 효율적인 관리와 수계환경, pp. 286~306.
4. 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 1999, 자연정화 기법에 의한 화용지구 담수호 수질개선 방안, pp. 1~223.
5. 오승영, 김진수, 이종진, 오광영, 1999, 강우시 광역논으로부터의 유출부하 특성, 한국농공학회 학술발표회 발표논문집, pp. 755~758.
6. 최동환, 김태섭, 1999, 인공습지의 수질정화, 농공기술, 16, pp. 78~85.
7. 한국농공학회, 1999, 간척사업의 평가-이대로 좋은가, pp. 58~73.
8. 한국수자원공사, 1994, 대하천에서의 오염물질 이송·확산예측과 저감대책에 관한 연구, pp. 1~187.
9. 한국수자원학회, 1999, 수공학학습 교재, pp. 89~129.
10. Ambrose, R. B., 1993, WASP5. x, A hydrodynamic and water quality model theory, user's manual, and programmer's guide, USEPA, pp. 1~181.
11. Huber, W. C. and Dickinson, R. E., 1988, Storm Water Management Model Users Manual, Version 4, EPA/600/3-88/00a, USEPA, pp. 1~569.
12. Kadlec, R. H., Knight, R.H., 1996, Treatment wetlands, Lewis publishers, pp. 600~640.
13. Martin P. Wanielista, Yousef A. Yousef, 1992, Stormwater management, John Wiley & Sons, Inc, pp. 262~292.
14. Richard K. Olson, 1993, Created and natural wetlands for controlling nonpoint source pollution, USEPA, pp. 1~216.
15. USEPA, 1988, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, pp. 2, 18~22
16. WPCF, 1990, Natural Systems for Wastewater Treatment, Water Pollution Control Federation, Manual of Practice FD-16, pp. 241~248.