

SWMM과 WASP5 모형을 사용한 하구담수호의 수질 예측

윤 춘 경 · 함 종 화

전국대학교 농공학과

Prediction of water quality in estuarine reservoir using SWMM and WASP5

Chun-Gyeong Yoon · Jong-Hwa Ham (Department of Agricultural Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea)

ABSTRACT : SWMM and WASP5 were applied for pollutant loading estimate from watershed and reservoir water quality simulation, respectively, to predict estuarine reservoir water quality. Application of natural systems to improve estuarine reservoir water quality was reviewed, and its effect was predicted by WASP5. Study area was the Hwa-Ong reservoir in Hwasung-Gun, Kyonggi-Do. Procedures for estimation of pollutant loading from watershed and simulation of corresponding reservoir water quality were reviewed. In this study, SWMM was proved to be an appropriate watershed model to the nonurban area, and it could evaluate land use effects and many hydrological characteristics of catchment. WASP5 is a well known lake water quality model and its application to the estuarine reservoir was proved to be suitable. These models are both dynamic and the output of SWMM can be linked to the WASP5 with little effort, therefore, use of these models for reservoir water quality prediction in connection was appropriate. Further efforts to develop more logical and practical measures to predict reservoir water quality are necessary for proper management of estuarine reservoirs.

Keywords : SWMM, WASP5, SWMM-WASP5 link, diffuse pollution loading, water quality simulation

서 론

물은 생명의 근원이며, 지구상에 존재하는 인간을 포함한 모든 생명체의 생존에 없어서는 안될 중요한 자연의 구성요소이다. 뿐만 아니라 인간의 생활수준 향상과 경제활동이 활성화됨에 따라 국민생활과 경제활동에 있어서 물의 의존도가 점점 높아지기 때문에 갈수시 물 공급이 용수수요에 따르지 못할 경우에는 용수 부족에 따라 사회적으로 많은 문제를 가져올 수 있다. 인간은 물을 확보하기 위하여 지표수 또는 지하수를 개발·이용해 왔으며, 장래에 늘어나게 될 용수수요에 대비하기 위해서 항상 새로운 수자원의 개발에 심혈을 기울여 왔다.^{1,2)}

우리 나라의 강우는 계절적 변동이 커서, 강우기에 전체 강수량의 약 60%가 집중되므로, 갈수기에는 상대적으로 수질오염도가 높아지고, 각종 용수의 이용에 지장을 초래할 것이 우려되고 있다. 또한 우리 나라의 수계는 지형적으로 산맥에 의하여 분리되어져 있고, 기후 특성상 여름철에 집중적인 강우로 인하여 물의 유출속도가 높아, 점증하는 용수수요에 부응하는 수자원을 확보하기 위하여 하천에 대형 댐을 건설하거나, 하구에 담수호를 조성하여 많은 물을 저류하고 있다. 그러나 물의 양적인 층족을 위

하여 건설된 인공호소에서는 물의 체류시간이 길어지게 되고, 또 상류유역에서의 수질관리가 충분하지 않으면 다량의 영양염류의 유입으로 부영양화가 일어날 우려가 있다.^{1,3)}

하구에 조성되는 하구담수호는 조석의 유출입이 자유로운 하구지역을 방조제 체결에 의하여 수질보전상 불리한 폐쇄성 수역으로 변경시키며, 또한 하구담수호 주변에 도시화와 공업화의 급진전에 따라 유역으로부터의 오폐수의 유입량 및 부하량이 급증하여 수질관리에 불리한 상황을 맞게 된다. 하구담수호의 수질오염으로 생태계변화까지 초래한 경우에는 이를 원상복구하기에 많은 노력과 비용이 요구된다. 시화호 사례에서 우리는 하구담수호 환경문제의 중요성을 절실히 깨달았는데, 반면에 이미 조성되어 오랫동안 큰 문제없이 유용하게 사용되고 있는 우리나라와 외국 하구담수호의 사례들을 살펴보면, 수자원의 양적인면 뿐만 아니라 질적인 면에서도 노력여하에 따라 만족할 수 있는 수자원으로 활용할 수 있다.³⁾ 그러므로, 담수호가 오염되기 전에 미리 정확히 수질을 예측하여, 그에 적합한 대책을 수립하는 과정이 담수호 수질관리에 중요하다.

호소의 수질관리를 위한 수질예측과정은 호소로 유입되는 유입부하량의 산정단계와 산정된 부하량을 이용한 호소수질예측단

계로 나눌 수 있다. 이 두가지 단계가 유기적으로 이루어질 때 대상호소의 수질을 보다 정확하게 예측할 수 있다. 유입부하량 산정에는 원단위법, 회귀분석법 그리고 STORM, SWMM, HSPF, ANSWERS, AGNPS, CREAMS/GLEAMS등의 유역모형을 이용하는 방법 등이 있다. 현재 우리 나라에서는 많이 사용되고 있는 원단위법은 장래의 오염원단위 변화 및 최적관리기법(Best Management Practice: BMP) 적용에 따른 오염원 감소효과를 단위 부하량을 감소시켜 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 지역적 변동성이 매우 커서 특정 유역에 대해 조사된 값을 다른 유역에 적용하기에는 어렵고 오염원 및 오염배출구조의 조사에 많은 시간과 노력이 소요된다는 단점이 있다. 유역모형 중에 SWMM(Storm Water Management Model)은 세계적으로 널리 사용되고 있는 수문모형으로써 최소의 보정으로 비교적 정확한 유출유량을 산정할 수 있고, 다양한 오염물질 모의 방법들을 적용할 수 있으며 소유역별 토지이용상태를 고려할 수 있기 때문에 강우시 유역에서 유출되는 유량 및 수질의 예측에 사용되고 있다.

호수수질예측모형으로는 WQRSS, CE-QUAL-W2, WASP5 등이 비교적 잘 알려져 있다. WQRSS모형은 댐에 의해 생성된

인공호수내의 수생태계 변화를 수심방향에 대하여 해석할 수 있는 모형으로써 비교적 많이 보급되어 있고 정확도도 인정을 받고 있다. CE-QUAL-W2모형은 2차원이며 호수의 장축에 직각방향으로 균일하다고 가정하기 때문에, 수평 및 수직적 수질변화가 있는 길고 좁은 수체에 적당한 모형으로써, 각 수질항목간의 다양한 결합도 모의 가능하며, segment길이와 layer의 두께를 다양하게 줄 수 있고, 나뭇가지모양의 복잡한 수체에도 적용이 가능한 장점이 있다. 비교적 최근에 개발된 WASP5(Water Quality Analysis Simulation Program Version 5)모형은 지금까지 개발되어온 수질 예측 모형들을 종합, 보완한 것으로써 시간에 따른 입력치의 변화를 고려할 수 있어서, 연중변화는 물론 짧은 시간간격 사이의 수질성분변화를 분석하는 데에도 대단히 유용해 현재 우리 나라에서도 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 유역에서 발생하는 유량 및 부하량 예측은 SWMM 그리고 호수의 수질예측은 WASP5를 각각 이용하는 SWMM과 WASP5와의 연계적용을 통하여 담수호의 수질을 예측하는 방법을 연구하여 담수호 수질관리에 도움을 주고자 한다.

재료 및 방법

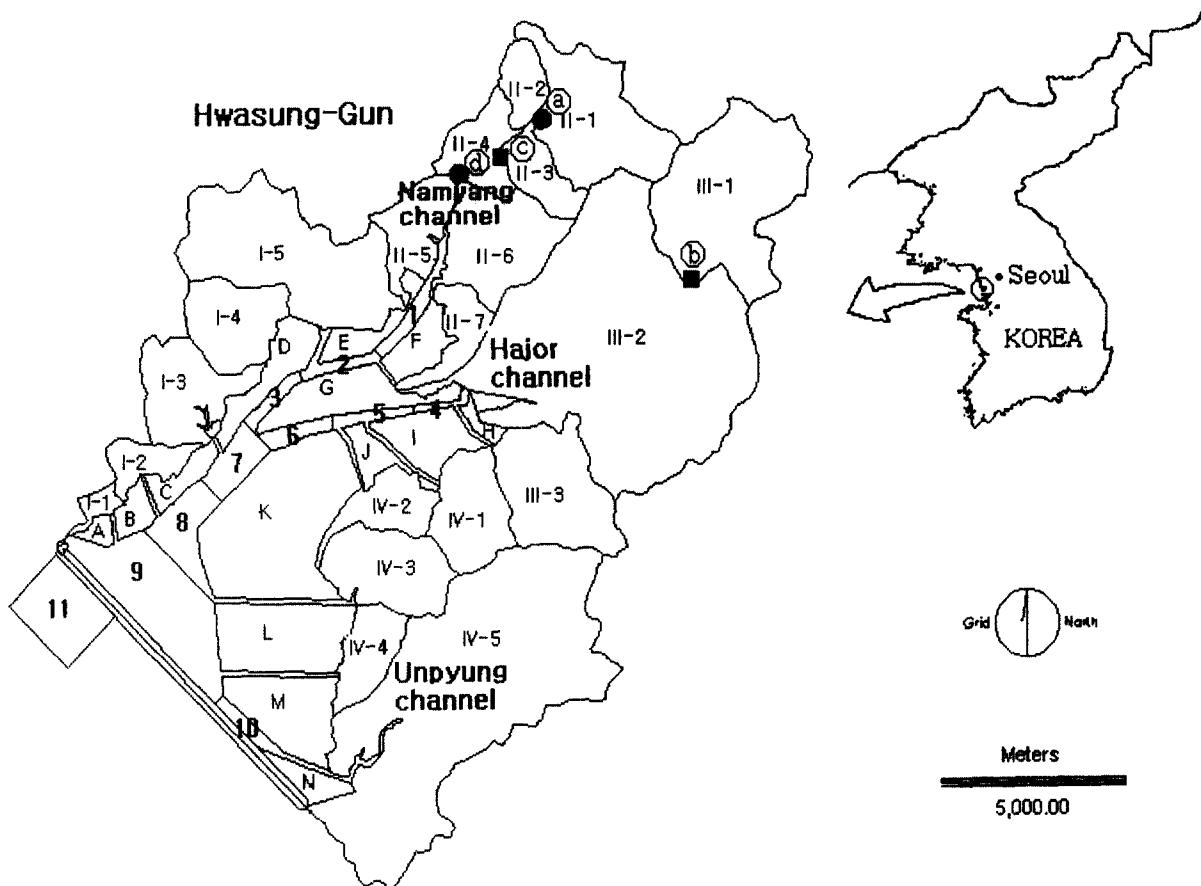


Fig. 1. Study Area

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 하구담수호로써, 1999년 말 현재 방조제 축조사업이 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 농촌지역이다. 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.

유량 및 수질측정

월 평균 유량 및 수질자료 그리고 모형의 보정 및 검증 자료를 얻기 위해 다음과 같은 방법으로 담수호로 유입되는 유입수의 유량 및 수질을 실측하였다.

유역에서 유입되는 수질 및 유량을 평상시에는 Fig. 1에 나타나 있는 ④, ⑤, ⑥, ⑦지점에서 1998년 9월에서 1999년 11월까지 15개월간 2주 간격으로 측정하였으며, 강우시에는 ⑥와 ⑦지점에서 3회에 걸쳐 1주기조사를 실시하였다. 평상시 유량은 유속과 단면적을 실측하여 구하였다. 유속계에 의한 유속측정은 수심의 변화가 있는 곳을 중심으로 하되, 수면폭의 10~15% 간격을 원칙으로 수심의 60%지점의 유속을 평균유속으로 하는 1점법에 의해 측정하였으며, 측점지점간의 중심거리를 기준으로 단면을 계산하여 유속과 단면적을 곱해 유량을 계산하였다. 강우시 유량은 압력식 수위계에 의하여 연속 측정된 수위를 rating curve를 이용하여 유량으로 환산하였다.^{4,5)}

강우시 수질분석용 시료채취는 유량의 변화에 따라 1~4시간 간격으로 이루어졌다. 이렇게 현장에서 측정한 유량과 수질을 곱하여 강우시 오염부하량으로 환산하였으며, 평상시의 월평균 오염부하량은 평상시 측정한 유량과 수질의 월별평균값을 곱하여 계산하였다. 강우시 유량 및 수질 측정치는 SWMM모형의 보정 및 검증에 활용하였다.

수질측정 항목은 온도, pH, EC, DO, BOD₅, COD, SS, React-P, T-P, Org-N, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, T-N, Chl-a 등 총 15개 항목이었다. COD의 경우는 현재 국내 수질기준에서 망간법이 기준이기 때문에 크롬법보다 산화력이 약한 망간법으로 실시하였으며, 나머지 항목은 Standard Methods⁶⁾에 의해 분석하였다. T-N의 경우는 Org-N, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N을 각각 구하여 합한 값으로 하였다.

SWMM과 WASP5

대상유역으로부터 강우로 인해 발생하여 담수호로 유입되는 유량 및 오염부하량은 SWMM모형에 의하여 산정하였다. SWMM

은 1971년 U.S.EPA의 지원아래 Metcalf & Eddy사와 Florida 대학의 공동연구에 의해 개발된 모형으로써, 유역에서 강우시 발생하는 유량과 수질을 모의할 수 있고, 가장 널리 이용되며 범용적으로 적용할 수 있는 수질모형중의 하나이다(Huber and Dickenson, 1988).⁷⁾ SWMM을 이용한 유역에서의 유량 및 오염부하량을 산정하기 위해서는 강수 자료, 유역 면적 및 토지이용, 유역 경사, 유역폭 등과 같은 입력자료가 필요하다.

WASP5는 U.S.EPA의 Great Lake Program의 일부로 Di Toro(1993) 등에 의해 처음 개발된 모형으로 저수지, 하천, 하구, 해양 등에서 수체의 이동과 BOD, DO 등 주요 수질항목, 그리고 부영양화 관련 항목과 동성물질의 이동, 상호 반응에 대한 모의가 가능하며, 수계에 대해 요소별(element)로 구획(segment)분할이 가능한 box형 모형으로써, 각 요소를 하나의 box로 간주하는 요소분할모형이다. 이 모형은 시간에 따른 변화를 고려할 수 있으므로, 연중 변화는 물론 짧은 시간 간격의 수질변화의 분석이 가능하며, 필요에 따라 1, 2, 3차원 분석이 가능한 모형이다. WASP5 모형은 크게 유체의 거동을 모의하는 DYNHYD부분과 수질성분의 거동과 상호작용을 모의하는 WASP부분으로 나누어진다. DYNHYD모형은 수질예측모형의 수행을 위한 수리학적 입력자료인 수위, 유속, 유량 등을 제공하는 모형으로 개발되어 왔으며, 수질예측부분은 다시 부영양화, BOD, DO의 변화 등 보편적인 수질오염을 분석하는 EUTRO모형과 유기화합물, 중금속, 퇴적물 등에 의한 독성오염을 분석하는 TOXI모형으로 구성되어 있다.⁸⁾

본 연구에서는 위에서 언급한 두 모형을 연계적용하여 호소의 수질을 예측하고자 하였다. SWMM과 WASP5는 모두 U.S.EPA에서 개발한 모형으로 SWMM의 결과자료가 WASP5의 입력자료로 사용하기 쉬운 형태로 되어 있어서, 유역모형으로써 SWMM을 이용하여 대상유역에서 발생하는 유출량 및 오염부하량 자료를 월별로 생성한 후, 이를 WASP5의 입력자료로 이용하였다. 이와 같은 SWMM모형과 WASP5모형간의 연계는 외국의 다른 연구자에 의해서도 시도된 적이 있다. Karkowski, R(1994)등은 GIS-SWMM-WASP5를 연계하여 연간 오염부하량을 산정하고 호소의 수질을 모의하였으며, Walter, Michael O(1998)등은 SWMM모형과 WASP5모형을 연계하는 Linked Watershed Waterbody Model(LWWM)을 개발하여 연간 부하량을 산정하여 호소에 끼치는 영향을 조사하였다.^{9,10)}

모형의 적용

SWMM입력자료

강수 자료는 수원기상대에서 1989년에서 1998년 사이에 1시간 간격으로 측정된 10mm이상의 연속강수자료를 적용하였다. 10년 동안 10mm이상의 강우 event는 총 237개이었으며 이들을 모두 적용하여 모의하였다. 소유역별 면적과 토지이용자료(논, 밭, 주거지, 축산농가, 기타)는 인공위성 영상자료(LANDSAT, SPOT), 1:25,000의 지형도, 그리고 통계자료를 이용하여 구하였다. 유역경

사는 Arc/Info와 Idrisi 소프트웨어를 이용해 지도상의 소유역별 경계를 digitizing하여 화옹지구의 유역경계 vector file을 생성하였다. Vector file과 화옹지구의 DEM을 중첩시켜 화옹지구의 소유역별 DEM file을 생성하였으며 DEM file을 유역 경사도로 변환시켰다. 경사도내의 각각의 셀(100m × 100m)이 갖는 경사를 조화평균을 이용하여 소유역별 평균 경사를 산정하였다. 각 수로별 경사는 소유역별 경사도에서 수로가 갖는 경사범위만 선별하여 이용하여 구하였다. 유역폭은 개념화된 직사각형 짐수유역 수로에 대해 수직하게 흐르는 것으로 가정하였다. 유역의 폭은 유출수문곡선의 형태를 변화시킬 수 있는 중요한 인자인데 유역의 폭이 증가하면 유출은 보다 신속하게 평행상태에 도달하게 되고 지면저류량을 감소시키게 된다.

유량 및 오염부하량 산정

본 연구에서는 유량 및 부하량을 강우시 유역에서의 강우유출로 인한 유량 및 부하량, 평상시 유량 및 부하량, 그리고 새로 조성될 간척농지에서의 농지배수 유량 및 부하량으로 구분하여 산정한 후 이들을 합하여 담수호로 유입되는 월평균 유량 및 부하량을 구하였다.

강우시 유역에서 담수호로 유입되는 유량 및 부하량은 SWMM을 이용하여 구하였다. 강우시 유출량 보정은 1999년 5월 3일 실측한 유출량을 이용하였으며, 연중 최대 강우량을 기록한 1999년 8월 1일 측정된 유출량으로 검증하였다. 오염물질부하량 보정에 있어서는 1999년 5월 3일 측정된 수질 자료를 이용하였다. 민감도 분석결과에 의하면 오염물질의 축적량과 오염물질 유출형태, 오염물질 유출계수에 의해 민감하게 반응하므로, 토지이용에 따른 오염물질 유출형태를 결정하고 단위면적당 COD, T-N, T-P의 한계축적량과 오염물질 유출계수를 변화시켜 실측된 오염물질 농도에 맞도록 보정하였다. Fig. 1의 ⑥와 ⑦지점에서 강우시 측정자료를 이용하여 관련소유역의 유량 및 부하량을 SWMM모형에 보정 및 검증과정을 수행하였으며, 이 과정에서 사용한 인자들을 유역내 나머지 전체 소유역들에 대해서도 적용하였다. 모의에 사용한 강수자료는 1989년 1월에서 1998년 12월까지의 10mm이상의 강우에 모두 적용하여 매 강우시 유역에서 발생하는 유출량과 오염부하량을 구하였다. 이렇게 산정한 매 강우별 유출량 및 오염부하량을 월별로 평균하여 강우에 의한 월평균 유량 및 부하량으로 환산하였다.

평상시 유역에서 담수호로 유입되는 유량 및 부하량은 Fig. 1의 ⑧, ⑨, ⑩, ⑪지점에서 2주 간격으로 실측한 자료를 이용하여 월 평균 유량 및 월 평균 수질을 구하고, 이를 서로 곱하여 평상시 월 평균 오염부하량으로 계산하였다. 평상시 미측정 지점의 유량추정은 ⑧, ⑩지점에서 실측된 월별 평상시 유량과 실질적으로 유량이 발생되리라 생각되는 논, 주거지, 축산농가, 임야의 면적의 합으로 나누어 비례식에 의하여 단위 면적당 유량발생량을 월별로 구하였다. 그리고 각 소유역별로 논, 주거지, 축산농가, 임야의 면적을 더한 값에 월별 단위면적당 유량 발생량을 곱하여

유량 미측정 지점의 평상시 유량을 추정하였다. 오염물질 부하량 추정은 SWMM모형에서 구한 논, 주거지, 축산농가로부터의 단위 면적당 오염물질 배출계수와 소유역의 토지이용별 면적을 곱하여 구하였다.

모델링 입력자료에서 새로 조성될 간척농지에서의 물 관리는 논의 필요수량에서 강우로 인해 공급되는 양을 제외한 양만큼을 담수호에서 pumping하여 간척농지에 공급하고, 강우와 담수호에서 공급된 양(=논의 필요수량)이 다시 담수호로 유입된다고 가정하였다(논의필요수량 = (강우량 - 증발량 - 침투수량) + 담수호에서 pumping량). 강우량은 최근 10년간의 이 지역 월별 평균 강우량을 사용하였고, 증발량은 최근 5년간의 월별 평균 증발량을 사용하였다. 또한 논에서의 필요수량은 단위면적당 월별 필요수량을 사용하였다. 비 영농기의 유출유량은 강우량에서 증발량과 침투수량을 제외한 유량이 유출된다고 가정하였다. 간척농지에서 발생하는 부하량은 김 등¹¹⁾(1998)과 오 등¹²⁾(1999)이 연구한 농경지로부터의 질소와 인의 유출자료와 화옹지구내에서 실측한 자료를 이용하여 월별 오염물질의 농도를 추정하였다. 위의 방법으로 산정한 간척농지에서의 유량 및 오염물질의 농도는 Table 1과 같다.

전체 유역(유역 및 간척농지)에서 담수호로 유입되는 유량 및 부하량을 구하기 위해 Fig. 1과 같이 분할한 구획별로 유역 및 간척농지에서 유입되는 월별 평균 유량 및 유입농도를 구하였다. 즉, 월별 평균 유량은 강우기에 발생하는 유량, 평상시 유역에서 발생하는 유량, 그리고 간척농지에서 발생하는 유량을 합하여 분할된 담수호의 구획으로 들어오는 월별 평균 유량으로 하였다. 유입농도는 완전회석을 가정하여 강우기의 유입농도, 평상시 유역에서의 유입농도 및 간척농지에서의 유입농도에 각각에서 발생하는 유량을 곱하여 부하량을 산정한 후 이를 다시 앞에서 구한 담수호의 분할된 구획으로 들어오는 월별 평균 유량으로 나누어 분할된 구획별로 유입하는 월별 평균 유입농도를 구하였다.

WASP5입력자료

WASP5 모형을 조성예정인 화옹담수호에 적용하기 위하여 대상담수호를 모식화하였는데, 실측된 수질자료의 가용성을 고려하여 유로연장 12.4km에 대하여 Fig. 1과 같이 11개의 구획(segment)으로 분할하였고, 침전을 고려하기 위해 퇴적층의 저면 표층(upper bed) 1개를 추가하여 총 12개의 구획으로 설정하였다. 기존 유역에서의 오염부하는 물론, 새로 조성될 간척농지의 농지 배수도 각 구획으로 부하시키는 것으로 고려하였다. 구획설정은 가능하면 각 소유역의 부하량이 미치는 영향을 파악할 수 있도록 분할하였으며, 구획간의 완전혼합도 동시에 고려하여 분할하였다. 위에서 분할한 각 segment에 대한 제원은 1:5,000의 수심도를 이용하여 구하였다. 기온과 풍속, 일조시간 및 일사량은 수원 기상관측소의 월별 평균 기상자료를 사용하여 입력자료를 구성하였다.

본 연구에서는 WASP5의 적용에서 이용 가능한 입력자료를 고려하여 비선형 효과 및 탈질소화 과정이 포함된 복잡도 5단계를 적용하였으며, 1년을 주기로 호소 수질이 어떻게 변하는지를

Table 1. Estimated monthly flow and concentration of drainage water from polder paddy field

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Flow (mm/ha/day)	0.15	0.22	0.49	2.67	9.00	11.00	9.00	10.67	9.00	2.50	0.97	0.12
NH ₃ -N(mg/L)	0.25	0.25	0.25	0.69	1.13	1.06	0.74	0.62	0.29	0.27	0.26	0.25
NO ₃ -N(mg/L)	0.44	0.44	0.44	1.22	2.01	1.88	1.31	1.10	0.51	0.49	0.46	0.44
PO ₄ -P(mg/L)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
BOD (mg/L)	4.0	5.0	6.0	8.4	7.0	6.5	7.0	8.0	6.0	4.5	4.5	4.4
O-N (mg/L)	0.11	0.11	0.11	0.31	0.51	0.48	0.33	0.28	0.13	0.12	0.12	0.11
O-P (mg/L)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.09	0.04	0.08	0.04	0.03	0.03	0.03

Table 2. Values of major input parameters for WASP5 simulation

Code	K1320C	K1320T	KNIT	K140C	K140T	KNO3	K1C	K1T	CCHL
Const.	0.1	1.08	2	0.15	1.045	0.1	2	1	30
Code	IS1	KMNG1	KMPG1	K1RC	K1RT	K1D	KPZDC	KPZDT	PCRB
Const.	300	0.025	0.001	0.125	1.045	0.02	0.02	1.08	0.025
Code	NCRB	KDC	KDT	OCRB	K1013C	K1013T	K58C	K58T	
Const.	0.25	0.16	1.05	2.67	0.075	1.08	0.22	1.08	

알기 위해 1년 동안 모의를 하였다. 화옹지구에 사용한 주요매개변수는 Table 2와 같다. 매개변수는 국내 다른 호소에 사용한 자료 및 다른 문헌에 발표된 자료 등을 참고로 하여 결정하였으며 WASP5 manual상의 default값도 일부 사용하였다.

WASP5에 의한 수질예측

위의 입력자료와 매개변수를 이용하여 모의 시험한 결과는 다음과 같다. 담수호가 아직 조성중이기 때문에 실측치와 모의치를 직접 비교할 수 없어서 이미 담수호가 조성되어 있는 남양호와 해남호의 1996년도 수질자료를 참고하여 모의치를 비교·분석하였다.

모의시험결과 DO는 Fig. 2와 같이 호내에서 겨울철에 약 14mg/L까지 높은 농도를 나타내다가 여름철에는 높은 온도로 인해 DO의 농도가 약 8mg/L까지 낮아졌다. 담수호내부의 BOD 연평균농도는 10.3mg/L로써 농업용수 수질기준과 비교하기 위하여, 화옹지구에서 현장 측정한 BOD와 COD사이의 환산계수 1.72를 곱하면 17.5mg/L로써 수질기준인 8mg/L를 크게 초과하였다. 여름철 상대적으로 높은 BOD를 유지하는 것은 장우로 인해 부유물질이 다량 담수호로 유입되었기 때문으로 판단된다.

T-N의 모의 결과 담수호내부의 연평균농도는 3.4mg/L로 농업용수수질기준인 1.0mg/L를 크게 상회하고 있으며, 기존의 담수호와 비교해 볼 때에도 높은 농도를 나타냄을 알 수 있다. 담수호내부의 T-P 연평균농도는 0.27mg/L로 농업용수 수질기준 0.100mg/L를 상회하였다. 인은 부영양화에 직접적인 제한인자이므로 유입수가 담수호로 유입되기 전에 충분히 감소시켜야 할 것

으로 판단된다. 남양호 및 해남호와 비교해 볼 때 거의 대부분의 항목에서 높은 농도를 나타내었는데, 이는 어떠한 수질보전대책도 적용되지 않은 상황하에서 모의한 결과이기 때문이며, 다양한 수질보전대책이 적용된다면 남양호 및 해남호와 비슷하거나 또는 더 좋은 수질을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 전체 수질항목의 호소내 농도분포는 유입구쪽이 높고, 호소본체(방조제)쪽으로 이동하면서 농도가 낮아지는 현상을 나타내며, 시기에 따라 호소본체는 여름철에 높은 경향을 나타내었다.

고 찰

국내에서 호소수질을 예측하기 위해 필요한 유역으로부터 유입되는 외부오염부하량은 일반적으로 원단위법에 의하여 발생부하량, 산감부하량, 그리고 배출부하량을 계산하고, 제한된 측정지점으로부터의 수질분석자료를 이용하여 유달율을 구하여 유역 전체에 적용해서 최종적으로 호소에 유입되는 유입부하량을 산정하는 방법을 주로 사용하고 있다. 이러한 방법은 유달율이 유역특성에 따라 크게 차이가 있으며 측정한 유역의 특성과 다른 비측정 유역에 외삽(extrapolate)할 경우에 유역내 토지이용이나 지형에 따른 수문인자를 제대로 고려할 수 없기 때문에 심한 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서와 같이 SWMM모형을 사용하여 외부오염부하량을 산정하는 방법은 모형내에 다양한 기능이 갖추어져 있으므로, 원단위법으로 고려하기 어려운 토지이용과 수문인자 등의 영향을 반영할 수 있고, 측정한 자료에 의한 보정과 검증과정을 거치면

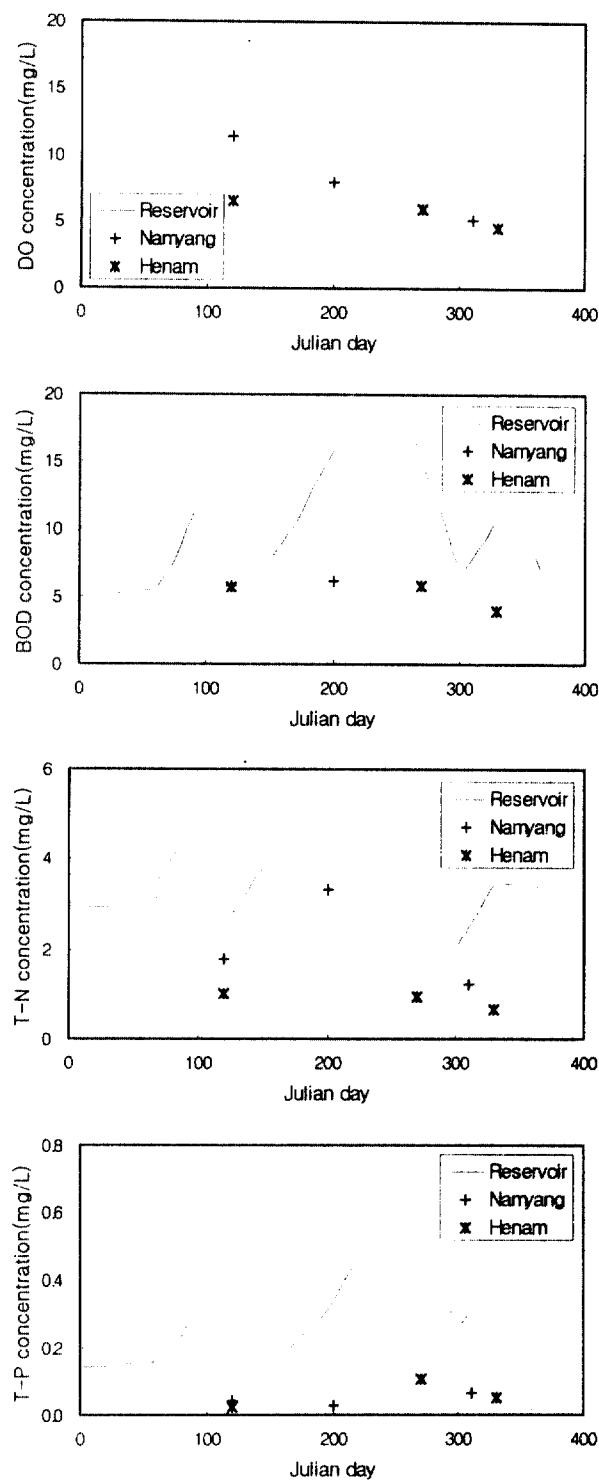


Fig. 2. Prediction of Hwa-Ong reservoir after sea-dike completed

서 유역의 수문특성이 고려되어 강우시 유역으로부터 유입되는 오염부하량 산정을 비교적 정밀하게 수행할 수 있다.

우리나라는 강우의 특성 때문에 일년동안 호소로 유입되는 연간 총부하량의 80~90% 정도가 강우유출에 의하여 유입

되고 있다. 따라서, 강우시 오염부하량의 산정오차는 총부하량 산정에 큰 영향을 미치게 된다. 그런데, 원단위법은 측정한 유역에 대해서는 모형에 의한 방법보다 더 정확하게 산정할 수 있으나, 비측정지역에 적용하는 과정에서 오차 가능성이 큰 단점이 있다. 반면에, 다양한 수문기작을 잘 반영할 수 있는 SWMM모형의 경우에는 보정과 검증과정을 거치면서 모형의 입력인자들이 어느 정도 현실에 가깝게 조정되어 비측정지역에 적용해도 비교적 강우시 외부오염부하량의 산정에 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다.

SWMM모형은 약 30년 전에 개발되어 지구촌의 많은 지역에서 널리 적용되어 온 수문모형이다. 이 모형은 유량면에서는 그 적용성이 충분히 검증이 되었다고 할 수 있고, 수질면의 기능도 현장측정자료의 정도에 따라 어느 정도 검증이 된 모형이다. 따라서, 적용하고자 하는 유역내에 주요 측정지점을 선정하고 강우시와 비강우시 유량과 수질을 측정하여 모형의 보정과 검증을 거쳐서 전체 유역에 적용하면, 유역전체에서 발생하는 현실적인 부하량의 산정이 가능할 것으로 판단된다. 이 모형은 도시지역과 비도시지역에 모두 적용이 용이하도록 기능을 다양하게 만든 범용적인 모형이기 때문에 비도시지역인 본 연구의 대상유역에서도 적용에 무리가 없었다.

또한, SWMM모형의 출력형태가 WASP5의 입력자료로 활용하기에 편리하도록 구성되어 있어서 SWMM-WASP5의 연계적 용이 용이하며, 두 모형이 모두 dynamic model로써 시간에 따른 유량 및 수질의 변화 예측이 가능한 특징을 공유하고 있다. 그러므로, 이 두 모형 사이에는 무리가 없는 자연스러운 연계적용이 가능하다. 이 연구에서도 SWMM-WASP5를 연계적용하여 호소수질을 예측하였는데, 그 예측치들이 현실적인 범위내에 있으며 수질항목들의 연중 시기에 따른 변화도 이해가 가능한 형태로 예측되었다.

요약 및 결론

본 연구에서는 경기도 화성군에 위치한 화옹간척지구에 조성될 화옹담수호의 수질예측을 위하여 유역으로부터의 외부부하량 산정에는 SWMM 그리고 호내 수질예측에는 WASP5를 사용하여 담수호의 연간 수질변화를 추정하였다. 수질예측결과에 의하면 화옹담수호의 수질은 대체로 현실적인 범위에서 변화할 것으로 나타났으며, 유역에 환경기초시설이 설치되지 않을 경우에는 기존의 유사한 다른 하구담수호에 비하여 상대적으로 수질이 낫을 것으로 예측되었다. 그러나, 이러한 예측은 수질개선방안들이 전혀 고려되지 않은 상태에서 예측한 결과이고, 현재 계획 중인 유역의 환경기초시설이나 담수호 수질개선방안들이 적용되면 수질이 크게 개선되어 다른 담수호보다 오히려 좋은 수질의 유지가 가능할 것으로 생각된다.

하구담수호 수질의 정확한 예측은 호수관리대책을 수립하는데 중요한 조건이다. 그런데, 유역에서의 외부오염부하량 산정에서

오차가 크면 정확한 호소수질예측이 어렵고, 그에 따라 수립한 호소수질관리대책도 심각한 오류를 범할 수 있다. 우리나라에는 서남해안에 하구담수호가 많이 조성되어 있고 현재에도 공사가 진행중인데, 조성된 하구담수호 수자원들의 합리적인 관리와 사용목적에 적합한 수질유지를 위해서는 유역으로부터 외부오염부하량의 정확한 산정과 그에 따른 합리적인 호소수질 예측기법에 대한 표준화된 방법의 개발이 요구된다.

본 연구에서 적용한 SWMM-WASP5의 연계사용은 이러한 노력의 일부분이며, 이 방법을 포함한 다양한 방법들에 대한 적극적인 연구를 통하여, 우리나라 유역 및 하구담수호의 여건에 적합한 표준화된 수질예측기법을 정립해야 한다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. Rural Development Corporation (1997) Water in the Year 2000's-Efficient Management of Fresh Water Reservoir and Environmental Considerations on the Reservoir Watershed, p.286~306
2. Federation of Farmland Improvement Associations (1997) Irrigation Water Management and Water Quality Conservation in the 21st Century, p.187~247
3. The Korean Society of Agricultural Engineers (1999) The Assessment of land reclamation project, p.58~73
4. Ministry of Agriculture and Forestry (1997) Guideline manual for management of agricultural water quality, 51332-680, p.40~55
5. Rural Development Corporation (1994) Technical guideline manual for hydrologic research, 94-14-05, p.89~114
6. APHA (1995) Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th Edition, American Public Health Association, p.4-65~4-114, 5-2~5-15
7. Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1988) Storm Water Management Model Users Manual, Version 4, EPA/600/3-88/00a, U.S. EPA, p.1~569
8. Ambrose,R.B. (1993) WASP5.x, A hydrodynamic and water quality model theory, user's manual, and programmer's guide, U.S.EPA, p.1~181
9. Karkowski, R, Walters, M (1994) Application of linked model to Winter Haven chain of lakes, Lake and Reservoir Management, Vol. 9, No. 2, p.86
10. Walters, Michael O, Thomas (1998) Application of a linked watershed waterbody model to Kingston Harbour in Jamaica, IAHS Publication, No. 253, p.137~146
11. Kim, Jin Soo, Oh, Seung Young and Kim, Kye Sung (1998) Characteristics of Nitrogen and Phosphorous Loading from a Paddy Field Area, Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers, p.527~532
12. Oh, Seung Young, Kim, Jin Soo, Lee, Jong Jin and Oh, Kwang Young (1999) Characteristics of Storm Runoff Loadings from a Paddy Field Area, Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers, p.753~758