

연구논문

강우유출오염부하를 고려한 호수수질모델링

조재현 · 강성호

관동대학교 보건환경위생학과

(2008년 12월 10일 접수, 2008년 12월 29일 승인)

Lake Water Quality Modelling Considering Rainfall-Runoff Pollution Loads

Jae-Heon Cho · Sung-Hyo Kang

Department of Health and Environmental Hygiene, Kwandong University

(Manuscript received 10 December 2008; accepted 29 December 2008)

Abstract

Water quality of the Lake Youngrang in the Sokcho City is eutrophic. Jangcheon is the largest inflow source to the lake. Major pollutant sources are stormwater runoff from resort areas and various land uses in the Jangcheon watershed. A storm sewer on the southern end of the lake is also an important pollution source. In this study, water quality modelling for Lake Youngrang was carried out considering the rainfall-runoff pollution loads from the watershed. The rainfall-runoff curves and the rainfall-runoff pollutant load curves were derived from the rainfall-runoff survey data during the recent 4 years. The rainfall-runoff pollution loads and flow from the Jangcheon watershed and the storm sewer were estimated using the two kinds of curves, and they were used as the flow and the boundary data of the WASP model. With the measured water quality data of the year 2005 and 2006, WASP model was calibrated. Non-point pollution control measures such as wet pond and infiltration trench were considered as the alternative for water quality management of the lake. The predicted water quality were compared with those under the present condition, and the improvement effect of the lake water quality were analyzed.

Keywords : Rainfall-runoff pollution loads, WASP, calibration, non-point pollution control measures, water quality management

1. 서론

속초 영랑호는 과거에 하수처리장이 없었던 때에는 호수수질이 심각하게 오염된 상태였고, 하수처리장이 완공된 이후에는 수질이 크게 개선되었으나, 주변의 리조트와 농경지 그리고 우수관거로부터의 하수유입 등으로 인해 여전히 부영양상태에 있다(조재현·서형준, 2007). 이것은 유역내 리조트와 농경지 등으로부터의 강우시 유출되는 오염부하가 호수수질에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 근래 들어 이와 같은 강우에 의한 오염부하의 유출특성에 관한 다수의 연구가 진행된 바 있다(김진하 등, 2003; 방기용 등, 2000; 윤승진·조재현, 2005; 이준호 등, 2000; Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998). 특히 도시지역에서는 초기강우의 세척효과(First flushing)가 두드러져서 전체 유출오염부하량 중 큰 비중을 차지하기 때문에 이에 대한 분석도 활발하게 진행된 바 있다(김성수 등, 2002; 신창민 등, 2004; Bedient *et al.*, 1978; Lee and Bang, 2000; Lee *et al.*, 2003; Novotny, 2003). 조재현·서형준(2007)은 영랑호수유역에 대한 강우유출조사 결과를 바탕으로 누적유량비-누적오염부하량비 곡선을 작성하였고, 보다 정량적으로 초기세척을 평가할 수 있는 수단을 개발하기 위해 멱함수, 2차 및 3차 다항식곡선을 대상으로 누적유량-부하량비 곡선을 회귀분석하였다. 영랑호 유입하천수의 대부분을 차지하는 장천과 강우시 유출량이 큰 우수관로를 대상으로 강우유출조사를 하여 각 강우사상별 유출량과 유출오염부하량을 산정하고 이로부터 강우량-유출량곡선과 강우량-유출오염부하량곡선을 도출한 바 있다.

호수에서의 수질과 phytoplakton 등을 계산하는 모형으로는 US EPA에서 개발한 WASP모형(Ambrose, 1987; James *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2004; Lung *et al.*, 1993; Lung and Larson, 1995; Tufford and McKellar, 1999; Wool *et al.*, 2001)이 국내외를 막론하고 널리 사용되고 있다. 최근에는 Zhang *et al.*(2008)이 WASP 모형을 기반으로 PCB 농도를 계산하는

LM2-Toxic model을 개발하여 Michigan호에 적용한 바 있고, Canu *et al.*(2004)은 WASP의 생태모듈인 EUTRO와 2차원 유한요소 hydrodynamic model을 결합해서 Venice의 Lagoon에 적용한 바 있다. 본 연구에서는 수질이 악화되어 있는 영랑호의 수질관리를 위해서 이 WASP모형을 적용한다. 강우량-유출량곡선과 강우량-유출오염부하량곡선을 이용해서 WASP7(서동일·이정우, 2005; 안승섭 등, 2007; 안승섭 등, 2008; US EPA 2006) 적용 대상기간에 대한 호수유역의 강우유출량과 강우유출부하량을 산정하였고, 동일기간에 대한 영랑호 유입수의 전기수질조사 결과와 호수수질 조사 결과를 이용해서 WASP7모형을 보정하였다. 또한 영랑호에 대해서 적정수질을 유지하기 위한 수질관리방안에 대해서 고찰하였다.

II. 연구방법

1. WASP7모형의 구조와 특성

WASP모형은 수자원에 있어서 자연현상 및 인위적인 오염에 의한 수질에 대한 반응을 해석하고 예측하는데 널리 이용되고 있다. WASP는 저질을 포함한 수체에 대한 동적인 모형으로서 1, 2, 3차원의 계산이 가능하고, 그림 1과 같이 13가지 수질변수에 대한 계산이 가능한 Eutrophication module, Toxicant module, Mercury module, Heat module 등으로 구성되어 있다. Pre-processor를 이용해서 SWMM, HSPF, NPSM 등의 외부 모형으로부터 계산된 오염부하를 연계하여 사용될 수 있고, EFDC, DYNHYD와 같은 수리동역학 모형과도 연계하여 입력자료를 구성할 수 있다. 그외에도 각종 상수와 매개변수, 구획(Segment), 부하, 경계수질, 유량 등의 입력자료를 손쉽게 구성할 수 있다. 시간 변화에 따른 이송(advection), 확산(dispersion), 점오염 및 분산오염부하의 변동도 고려할 수 있다. Post-processor에서는 계산된 수질을 실측결과와 함께 도시하여 쉽게 보정할 수 있도록 하였고, 공간격자와 x/y 좌표의 두가지로 도시 가능하다.

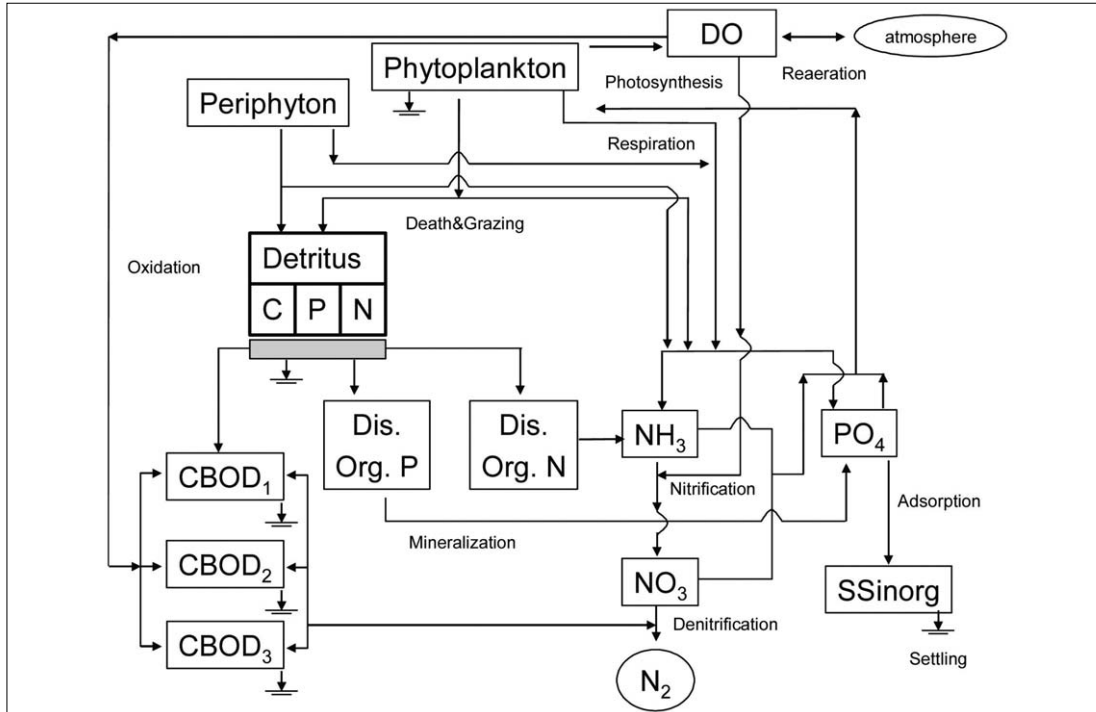


그림 1. WASP7의 부영양화 과정

2. 적용대상지역 개관과 수질조사

영랑호는 동해안의 석호로서 속초시가지와 인접하여 시민의 휴식공간으로서 큰 역할을 하고 있다. 영랑호의 유역면적은 7.8 km², 수표면적이 1.02 km²이다. 본 연구자가 조사한 2006년의 영랑호 표층 평균수질이 COD 22.9 mg/L, TP 0.050 mg/L, Chl-a 41.68 mg/m³으로 부영양상태이다. 영랑호의 가장 큰 유입수는 호수 서쪽의 장천이고, 배수면적이 4.7 km²이다. 장천 상류부에는 골프장과 콘도

를 포함한 리조트시설이 들어서 있고, 장천배수구역 토지이용의 대부분은 임야와 농경지이며, 일부 지역에 주거지역이 분포하고 있다. 영랑호 남쪽의 우수토구로부터도 강우시 상당량의 배수가 호수로 흘러 들고 있다. 이 우수토구의 배수구역내에 골프장의 일부가 들어서 있고, 주거지역도 약 13 %를 차지하고 있다. 영랑호 전체로는 임야가 약 66 %, 주거지역 약 12 %를 차지한다(조재현 · 서형준, 2007).

영랑호수내 5개지점의 수심별 수질과 장천을 비

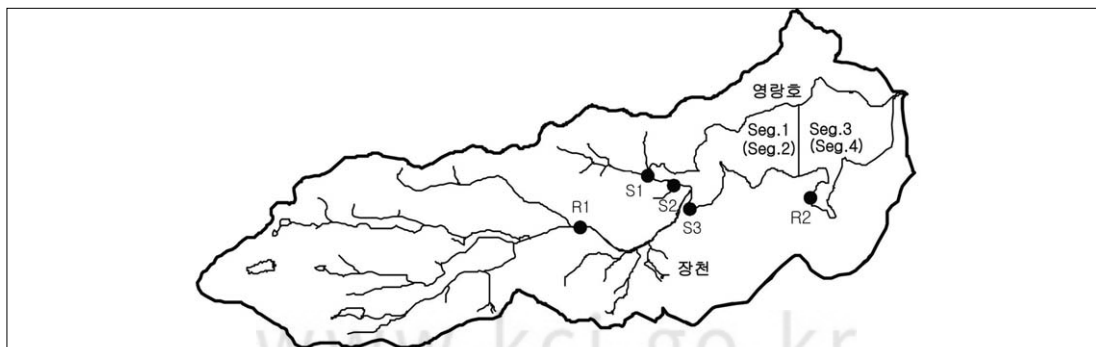


그림 2. 영랑호유역도와 수질조사지점

못해서 호수로 유입되는 5개 지점에 대한 건기시의 유량과 수질을 조사하였다. 조사시기는 유입수 조사의 경우 2005년 6월부터 2006년 12월까지 매주 유량 및 수질을 조사하였으며 호수내의 경우 2005년에 6회, 2006년에 6회 총 12회에 걸쳐 수질을 조사하였다. 수질조사 항목은 BOD, COD, SS, TN, TP, NO₃-N, NH₃-N, PO₄-P, Chl-a 등이다. 영양호유역도와 수질조사지점은 그림 2와 같다.

3. 강우량-유출량곡선과 강우량-유출오염부하량곡선

영랑호 유역의 장천(R1)과 우수관거(R2)의 2개 지점에서 2004년부터 2007년까지 10회의 강우사상을 대상으로 강우시 유출량과 BOD, COD, SS, TN, TP, NO₃-N, PO₄-P 등의 유출수질을 조사하였고, 기상관측기를 현지에 설치해서 조사기간 동안의 10분 단위의 강우량을 관측하였다. 이 강우유출조사 결과를 이용해서 장천본류와 우수관거지점에 대한 강우량-유출량곡선과 강우량-유출부하량곡선을 도출하였다. 이들 관계곡선을 기상관측기에 의해 관측된 2005년과 2006년 강우자료에 적용해서 영양호로 유입되는 각 강우사상별 강우유출에 의한 오염부하량을 산정하였다.

4. WASP7모형의 보정과 입력자료

영랑호는 동서방향으로 길게 위치해 있고, 최심수심이 약 6.5 m, 평균수심이 약 3.1 m이다. 표층과 심층에서 일반 수질은 비슷한 분포를 보이지만 DO농도가 상당한 차이를 보이기 때문에 WASP7에 적용시 수심방향으로 2개의 층으로 나뉘고, 동서방향으로도 2개의 구획으로 분할하여 그림 2와 같이 총 4개의 구획으로 구성하였다. 영양호의 주된 유입수는 장천(R1)과 호수 남쪽의 우수관거(R2)이고, 장천 주변의 S1, S2 그리고 S3에서도 소량의 배수가 흘러들고 있다. 호수의 유출부는 동해로 연결되어 있다. 장천과 호수유출부를 경계(Boundary)로 우선 고려하고, 우수관거(R2)와 장천 주변 소량의 유입수 유입부에 가상의 구획을 두어서 경계로 설정하였다. 이 경계 들의 유량과 수질자료로 건기에는

매주 실측된 건기 유량및 수질조사 자료를 입력하였다. 강우시에는 앞 절에서 도출된 장천본류와 우수관거에 대한 강우량-유출량곡선과 강우량-유출부하량곡선을 2005년과 2006년에 현장에서 기상관측기로 실측한 강우량 자료에 적용해서 각 강우사상의 강우유출량과 강우유출부하량을 구하고, 이로부터 강우시 유량과 각 수질의 EMC 값을 계산해서 유량(Flow)과 경계 자료로 입력하였다. 별도의 Load로 입력된 부하는 없었다. 시간함수(Time function)으로 입력한 자료는 표층과 심층수온, 풍속, 일사량, 일조시간 등의 자료이다. 이와 같은 입력자료를 이용해서 2005년 6월 1일부터 2006년 12월 31일까지의 수질을 계산하고 동일 기간내 실측된 호수수질과 비교하여 WASP7의 부영양화모듈(Eutrophication module)을 보정하였다.

5. 비점원 오염부하의 통제

영랑호 주변의 생활하수는 현재는 하수처리장으로 수송되기 때문에 호수수질이 과거보다 상당히 개선되었지만 여전히 부영양상태이므로 수질보전대책이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 영양호로 들어오는 오염부하 중 큰 비중을 차지하는 강우유출수의 오염부하를 통제하기 위한 대책으로 장천하류부의 현재 농지인 곳에 연못(Wet pond)를 설치하고 호수 남쪽의 우수관거 유출부에는 침투트렌치(Infiltration trench)의 설치를 검토하였다. Novotny(2003)에 의하면 연못의 경우 BOD 20-40 %, TP 50-60 %, TN 30-40 %, 침투트렌치의 경우 BOD 70-80 %, TP 50-70 %, TN 45-60 %의 처리효율을 보고하고 있다. 본 연구에서는 이 효율을 고려해서 Case 1에서는 연못의 경우 BOD 30 %, TP 50 %, TN 30 %의 처리효율을 적용하고, 침투트렌치의 경우 BOD 70 %, TP 60 %, TN 50 %의 처리효율을 적용하였다. Case 2에서는 연못과 침투트렌치가 정상 가동되지 못할 경우를 가정해서 연못의 경우 BOD 15 %, TP 25 %, TN 15 %의 처리효율을 적용하고, 침투트렌치의 경우 BOD 35 %, TP 30 %, TN 25 %의 처리효율을 적용하여 호수수질을 계

산하여 수질관리대책시의 효과를 검토하였다.

III. 결과토의

2004년부터 2007년까지의 강우조사결과로부터 도출된 강우량-유출량곡선, 강우량-유출오염부하량곡선은 표 1과 같다. 자료간의 r^2 값이 대체로 높은 것으로 나타났고, 이 곡선들을 이용해서 호수수질모델링이 수행된 2005년과 2006년의 강우량 자료로부터 각 강우사상의 강우유출량과 유출오염부하량을 산출하였다. 이 강우유출량과 유출오염부하량은 WASP 입력자료의 유량과 경계조건 부분에 호수 유입수로서 적용되었다.

WASP7의 보정에서는 CBOD, DO, TP, TN, Chl-a 등의 수질항목을 대상으로 하였다. 표층과 심층 그리고 동쪽과 서쪽의 구획 간의 수질의 차이가 거의 없었으나 DO의 경우는 표층과 심층간의 농도 차이가 크게 나타났다. 호수 서쪽의 표층인 구획 1에서의 보정 결과는 그림 3 - 그림 7과 같다. 그림의 실측치는 구획 1에 포함된 2개 지점의 실측치이다. TN의 계산 결과가 실측치보다 다소 높은 것으로 나타났지만 대체로 수질계산 결과가 실측수질을 잘 반영하고 있다. 전반적으로 2006년 7, 8월의 TP, TN, Chl-a, BOD 등의 농도가 높게 나타났는데 이것은 여름철에 큰 강우가 집중되어서 장천유역과 호수남쪽의 우수관거로부터의 강우유출에 의

표 1. 장천분류와 우수관거지점에 대한 강우량-유출량곡선과 강우량-유출부하량곡선

구 분		관 계 곡 선	r^2
장천분류	강우량-유출량	$Q = 0.2254P^{1.303}$	0.8059
	강우량-BOD유출부하	$W = 1.036P^{1.1744}$	0.6707
	강우량-TP유출부하	$W = 0.0262P^{1.5167}$	0.8059
	강우량-TN유출부하	$W = 0.3261P^{1.4866}$	0.7351
우수관거	강우량-유출량	$Q = 0.1319P^{1.2096}$	0.9356
	강우량-BOD유출부하	$W = 0.2452P^{1.1949}$	0.9267
	강우량-TP유출부하	$W = 0.0191P^{1.0354}$	0.7258
	강우량-TN유출부하	$W = 0.1455P^{1.2167}$	0.9865

* P: 강우량(mm), Q: 유출량(10^3m^3), W: 유출오염부하량(kg)

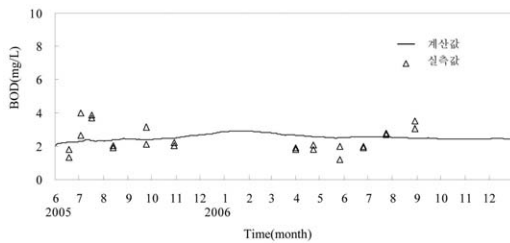


그림 3. BOD 보정결과

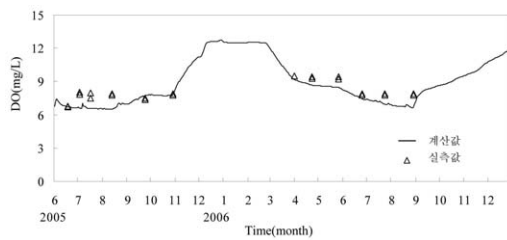


그림 4. DO 보정결과

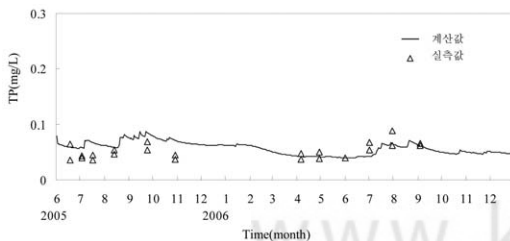


그림 5. TP 보정결과

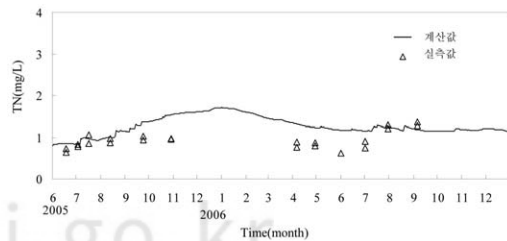


그림 6. TN 보정결과

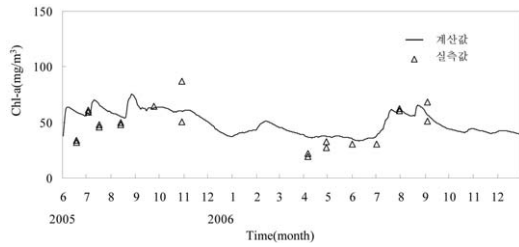


그림 7. Chl-a 보정결과

한 오염부하유입이 많았기 때문에 판단된다. 수질 매개변수의 범위와 보정된 수질매개변수는 표 2와 같다.

앞서 언급한 바와 같이 장천하류부에 연못(Wet pond)를 설치하고 호수 남쪽의 우수관거 유출부에는 침투트렌치(Infiltration trench)를 설치하는

Case 1과 Case 2의 수질관리방안이 정상적으로 실행되었을 경우에 호수 수질계산결과를 수질관리방안 실행전과 비교하였다. 이 계산에서는 연못과 침투트렌치를 설치했을 때의 두가지 처리시설의 처리효율이 건기나 강우 때나 동일한 것으로 가정하였다. 구획 1에서 수질관리방안 실행 전과 실행 후를 비교한 것은 그림 8 - 그림 12와 같다. 실측조사가 수행됐던 2006년 7월 23일에 Case 1의 수질관리방안이 실행되었을 때는 수질관리방안 실행 전과 비교해서 호수의 BOD, TP, TN, Chl-a 가 각각 17%, 31%, 25%, 32% 감소하였고, Case 2에서는 수질관리방안 실행전과 비교해서 BOD, TP, TN, Chl-a가 각각 8%, 16%, 13%, 16% 감소하였다. 강우유출에 의한 오염부하를 두가지 방안으로 삭감

표 2. 보정된 영양호의 수질매개변수

Constants			
Organic Phosphorus	Value	Min.	Max.
Mineralization Rate Constant for Dissolved Organic P @20°C (per day)	0.20	0	0.22
Dissolved Organic Phosphorus Mineralization Temperature Coefficient	1.08	0	1.08
Fraction of Phytoplankton Death Recycled to Organic Phosphorus	0.5	0	1
Ammonia			
Nitrification Rate Constant @20°C (per day)	10	0	10
Nitrification Temperature Coefficient	1.08	0	1.07
Half Saturation Constant for Nitrification Oxygen Limit (mg O/L)	2	0	2
Nitrate			
Denitrification Rate Constant @20°C (per day)	0.09	0	0.09
Denitrification Temperature Coefficient	1.045	0	1.04
Half Saturation Constant for Denitrification Oxygen Limit (mg O/L)	0.1	0	0
Organic Nitrogen			
Dissolved Organic Nitrogen Mineralization Rate Constant @20°C (per day)	1.0	0	1.08
Dissolved Organic Nitrogen Mineralization Temperature Coefficient	1.08	0	1.08
Chlorophyll-a			
Phytoplankton Maximum Growth Rate Constant @20°C (per day)	4	0	3
Phytoplankton Growth Temperature Coefficient	1.07	0	1.07
Phytoplankton Half-Saturation Constant for Nitrogen Uptake (mg N/L)	0.025	0	0.05
Phytoplankton Half-Saturation Constant for Phosphorus Uptake (mg P/L)	0.001	0	0.05
Phytoplankton Endogenous Respiration Rate Constant @20°C (per day)	0.1	0	0.5
Phytoplankton Respiration Temperature Coefficient	1.07	0	1.08
BOD1(ultimate)			
BOD (1) Decay Rate Constant @20°C (per day)	0.0001	0	5.6
BOD (1) Decay Rate Temperature Correction Coefficient	1.047	0	1.07
BOD (1) Half Saturation Oxygen Limit (mg O/L)	0.5	0	0.5

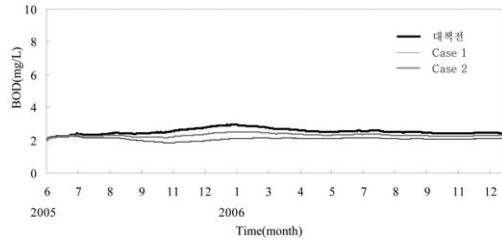


그림 8. 수질관리방안 실행전과 실행후의 BOD 계산 결과

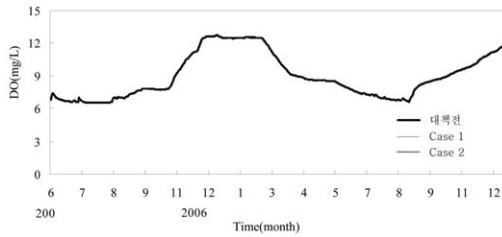


그림 9. 수질관리방안 실행전과 실행후의 DO 계산 결과

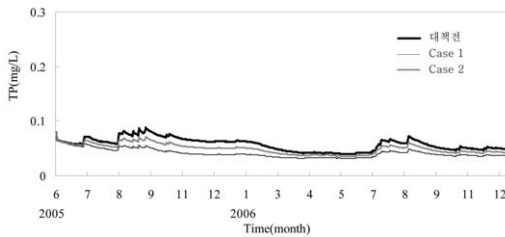


그림 10. 수질관리방안 실행전과 실행후의 TP 계산 결과

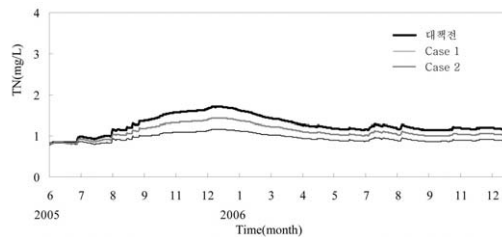


그림 11. 수질관리방안 실행전과 실행후의 TN 계산 결과

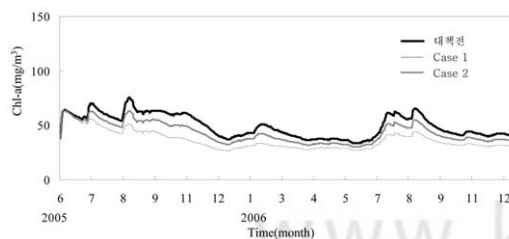


그림 12. 수질관리방안 실행전과 실행후의 Chl-a 계산 결과

했을 때 상당한 폭으로 호수수질이 개선되었고, 특히 TP농도의 개선효과가 큰 것으로 나타났다. 그러나 Case 1의 수질관리방안이 실행되었을 때 2006년 7월 23일에 구획 1의 TP가 0.045 mg/L, TN이 0.941 mg/L, Chl-a가 42.4 mg/m³으로 계산되어서 여전히 호수수질은 부영양상태에 있다. 추가적인 수질개선을 위해서는 영양호유역의 하수도를 정비해서 건기시 유역 내에서 배출되는 하수량을 줄여주고 리조트로부터의 배수를 엄격히 관리할 필요가 있다.

IV. 결론

1. 영양호유역의 강우유출조사로부터 강우량-유출량곡선, 강우량-유출오염부하량곡선을 도출하고, 이로부터 각 강우사상에 대한 유출량과 유출부하량을 산출해서 강우시에 WASP모형에 입력되는 유량과 경계조건 자료를 구성하였다.

2. CBOD, DO, TP, TN, Chl-a 등의 수질항목을 대상으로 WASP모형의 수질매개변수를 보정하였다. 영양호에 대한 TN의 계산 결과가 실측치보다 다소 높은 것으로 나타났지만 대체로 수질계산 결과가 실측수질을 잘 반영하고 있어서 강우유출량과 유출오염부하량을 고려한 WASP모형의 보정은 적절하게 수행된 것으로 판단된다.

3. 장천하류부에 연못을 설치하고 호수 남쪽의 우수관거 유출부에는 침투트렌치를 설치하는 수질관리방안을 검토하였다. Case 1의 방안이 실행되었을 때 수질관리방안 실행전과 비교해서 BOD, TP, TN, Chl-a 가 각각 17%, 31%, 25%, 32% 감소하여서 큰 폭으로 영양호 수질이 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-521-D00265)

참고문헌

- 김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 영중현, 2003, 우리나라 농지-임야유역으로부터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정, 대한환경공학회지, 25(6), 760-770.
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진, 2002, 경안천유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사, 대한환경공학회지, 24(11), 2019-2027.
- 방기웅, 이준호, 최종수, 2000, 강우시 산업단지에서의 오염물질 유출특성, 대한환경공학회지, 22(2), 341-353.
- 서동일, 이정우, WASP7.0을 위한 3차원 수리모델, EFDC-Hydro의 활용에 관한 연구, 대한환경공학회 2005 춘계학술연구발표회, 2005년 4월 28-30일, 431-436.
- 신창민, 최지용, 박철휘, 2004, 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성, 대한환경공학회지, 26(7), 729-735.
- 안승섭, 서명준, 정도준, 박노삼, 2007, 수질예측을 위한 WASP7 모형 매개변수의 추정 연구, 한국환경과학회지, 16(5), 623-632.
- 안승섭, 서명준, 정도준, 박노삼, 2008, WASP7 모형을 이용한 임화호 수질모의에 관한 연구, 한국환경과학회지, 17(6), 611-621.
- 윤승진, 조재현, 2005, 영랑호유역의 강우시 오염물질 유출 특성, 대한상하수도학회 한국물환경학회 2005년도 공동추계학술발표회 논문집, 광주 김대중컨벤션센터, 2005년 11월 11일, 442-448.
- 이준호, 방기웅, 최종수, 2000, 강우시 산업단지에서의 유출오염부하량 원단위 산정, 대한환경공학회지, 22(2), 355-362.
- 조재현, 서형준, 2007, 부영양상태 호수유역의 강우유출수에 의한 초기세척효과 분석, 환경영향평가, 16(5), 341-350.
- Ambrose, R. B., 1987, Modeling volatile organics in the Delaware Estuary, *Journal of Environmental Engineering*, 113(4), 703-721.
- Bedient, P. B., Harned D. A., and Characklis W. G., 1978, Stormwater analysis and prediction in Houston, *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, 104(EE6), 1087-1100.
- Bertrand-Krajewski, J.-L., Chebbo G., and Saget A., 1998, Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharge and the first flush phenomenon, *Water Research*, 32(8), 2341-2356.
- Canu, D. M., Solidoro, C., and Umgiesser, G., 2004, Erratum to modelling the response of the Lagoon of Venice ecosystem to variations in physical forcings, *Ecological Modelling*, 175, 197-216.
- James, R. T. and Bierman, V. J., Jr., 1995, A preliminary modeling analysis of water quality in Lake Okeechobee, Florida: calibration results, *Water Research*, 29(12), 2755-2766.
- Kim, D., Wang, Q., Sorial, G. A., Dionysiou, D. D., and Timberlake, D., 2004, A Model approach for evaluating effects of remedial actions on mercury speciation and transport in a lake system, *Science of Total Environment*, 327, 1-15.
- Lee, J. H. and Bang, K. W., 2000, Characterization of urban stormwater runoff, *Water Research*, 34(6), 1773-1780.
- Lee, J. H., Yu, M. J., Bang, K. W., and Choe, J. S., 2003, Evaluation of the methods for first flush analysis in urban watersheds, *Water Science and Technology*, 48(10), 167-176.
- Lung, W.-S., Martin, J. L., and McCutcheon, S. C., 1993, Eutrophication and mixing analysis of embayments in Prince

- William Sound, Alaska., *Journal of Environmental Engineering*, 119(5), 811-824.
- Lung, W.-S., Larson, C. E., 1995, Water quality modeling of the upper Mississippi River and Lake Pepin., *Journal of Environmental Engineering*, 121(10), 691-699.
- Novotny, V., 2003, Water quality: diffuse pollution and watershed management. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Tufford, D. L. and McKellar, H. N., 1999, Spatial and temporal hydrodynamics and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South carolina (USA) coastal plan, *Ecological Modelling*, 114, 137-173.
- Watershed and Water Quality Modeling Technical Support Center US EPA, 2006, Water Quality Analysis Simulation (WASP) Version 7.1.
- Wool, T. A., Ambrose, R. B., Martin, J. L., and Comer, E. A., 2001, Water Quality Analysis Simulation(WASP) Version 6.0 Draft: User's Manual, US EPA.
- Zhang, X., Rygwelski, K. R., Rossmann, R., Pauer, J. J., and Kreis, R. G. Jr., 2008, Model construct and calibration of an integrated water quality model(LM2-Toxic) for the Lake Michigan Mass Balance Project, *Ecological Modelling*, 219, 92-106.

최종원고채택 09. 01. 03