

합리적인 유역단위 오염부하량 산정방법 연구

Calculation of Pollutant Load for Prediction of Pollutant Loads to Watershed

장재호*·윤춘경·정광욱·김형철

Jang, Jae Ho*·Yoon, Chun Gyung·Jung, Kwang Wook·Kim, Hyung Chul

Abstract

The purpose of this study is the introduction of pollutant loads's estimation into Saemangeum watershed area with M.E.'s guidebook for TMDL and GIS tool. To estimate reliable pollutants loads, it is necessary to think about characteristic of removal, discharge and runoff as time series. In this study, it was calculated for generation loads which be came from pollutant source, discharge loads which be reduced in the treatment facilities and delivery loads which be considered the self purification parameter and delivery distance. To assess the delivery distance handily, it was particularly estimated using Arc-GIS. It was met with good results that delivery loads of BOD, T-N and T-P was reflected to seasonal precipitation. Lastly to verify the estimated pollutant loads, HSPF developed by USEPA was applied to it. It was showed a relativity of observed to simulated data for flow, Temperature, DO, BOD, NO₃⁻-N TN and TP. Consequently, this delivery loads can make full use of model input data for prediction of pollutant loads.

I. 서론

최근 급격한 인구증가와 산업의 발달로 인하여 유역 내 크고 작은 하천 및 호소들이 심각한 오염 부하에 노출되어 있다. 따라서 수자원의 확보와 유역수질관리가 주요 관심사가 되고 있는 가운데 유역 내 하천이나 저수지의 수질개선을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 수질관리를 위해서는 수계별 물의 용도와 수급현황, 하천의 수질 및 이화학적 특성을 파악하고, 수리와 수문특성, 수환경생태계에 대한 종합적이고 체계적인 오염실태 및 조사자료의 축적이 이루어져야 하며, 유역에서 오염원의 발생규모와 하천, 호소의 오염부하 특성을 조사해야 한다. 유역의 수문·수질영향에 대한 기술적 분석은 최근 환경부에서 시행하고 있는 오염총량관리와 연계하여 고려할 필요가 있으며 오염총량관리제의 시행을 위해서는 개별 배수구역에서 배출되는 오염물질의 양을 정확히 산정하는 것이 무엇보다 중요하고 이를 위해 원단위법 등이 일반적으로 이용되고 있다. 원단위법은 우리나라에서 오염물질의 배출부하량을 산정하기 위해 널리 사용된 방법으로, 각 오염원별 원단위와 배출율을 통해 해당 오염원의 배출부하량을 산정한다. 그러나 과거에 사용된 이러한 원단위법은 개별 오염원의 발생원단위 및 배출원단위에 오염원 수를 곱하는 방식으로 계산되기 때문에 각 오염원의 고유한 처리형태나 처리시설의 제거율, 시기별 배출특성 등은 정확히 반영하지 못하였다. 오염물질의 배출은 오염원의 형태뿐만 아니라 개별 오염원의 발생형태 및 제거시설의 삭감현황에 따라 수역으로 유입되는 물질량이 달라지며, 특히 강우의 영향에 의한 시기별 배출량의 변화가 크다 따라서 정확한 오염부하량을 산정하기 위해서는 오염원마다의 발생유형을 구분하고 개별처리 시설의 제거율, 환경기초시설로의 이송과정에서 하수관거에서의 퇴적, 분해, 침투, 누수, 월류량 등 배출경로를 면밀하게 고려해 주어야만 유역으로 배출되는 오염부하량을 정확히 산정할 수 있다. 현재 우리나라에서는 오염부하량 산정을 위해 환경부에서 제시한 수계오염총량관리기술지침을 이용하고 있으며 (국립환경연구원, 2002), 배출부하량에 유달율을 고려하여 유달부하량을 산정하고 있다. 본 연구에서는 새만금 유역을 대상으로 수계오염총량관리기술지침에 의하여 배출 부하량을

산정하고 유달함수 및 GIS tool을 이용하여 하천수계에 도달하는 유달부하량을 합리적으로 산정하는 방법을 소개하고자 한다.

II. 연구 방법

2.1 기존 연구사례분석

수질 모델링을 위해서는 수계로 유입되는 오염부하량을 산정하여야 하며, 이는 모델의 초기 조건 및 경계조건을 제공한다. 이를 위하여 주로 연구기간 동안 실측을 통해 입력자료를 구성하기도 하며, 원단위 등을 이용하여 부하량을 산정한 후 이를 수질 농도로 환산하여 이용하기도 한다. 원단위법에 의한 오염물질량 산정은 우리나라에서 오염물질의 배출부하량을 산정하기 위해 널리 사용된 방법으로, 각 오염원별 원단위와 배출율 및 오염물질 제거율을 이용하여 해당 오염원의 배출부하량을 산정하는 방법이다. 원단위법에 의한 오염부하 산정을 위한 국내의 체계적인 연구는 미흡한 편이지만 과거 수년 간 여러 방법으로 연구가 진행되어 왔다. 최지용 (1981)은 팔당호로 유입되는 오염부하량을 산정하기 위해 오염원을 인구와 가축, 산업체 및 자연오탁 부하량으로 구분하고 각 오염원별 원단위 적용 및 유달율을 적용하여 부하량을 산정하였다. 박석순 등 (1999)은 모형에 입력되는 부하량을 배수구역별 오염원에 발생원단위를 적용하여 부하량을 산정하였다. 신동석 (2001)은 환경부의 오염총량관리 기준원단위를 사용하여 금강수계의 오염원별 발생 및 배출부하량을 산정하고, 이를 유량·수질 측정망 자료로부터 회귀식을 구성하여 설정한 유달함수를 이용하여 실제 하천수계로 유입되는 오염물질량을 산정하였다. 그러나 지금까지의 연구들은 대부분이 오염원의 시기별 배출특성이 고려되지 못하고 단순히 일원단위만을 적용하여 부하량을 계산하기 때문에, 처리유형별 배출특성이나 강우유출에 따른 부하량의 시기별 변화를 구분할 수 없었다. 최근에 국립환경연구원은 우리나라의 수계별 오염총량제 적용을 위해 오염원별 조사항목 및 조사방식, 배출원별 각종 현황, 오염물질 배출구조 분석을 통한 발생 및 배출부하량 산정방법, 오염부하량당방법 등을 체계적으로 정리한 수계오염총량관리기술지침을 발표하였다. 정확한 오염물질의 부하량을 산정하기 위해서는 유역에서 발생하는 오염물질의 제거 및 배출특성과 강우유출에 따른 부하량의 시기별 배출특성 등이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

2.2 오염물질 배출구조

오염물질은 인간활동에 의한 인위적 배출원만이 아니라 산림이나 강우, 지하수로부터도 유출된다. 오염물질을 최초로 생성하는 원인자를 점 및 비점오염원으로 분류하며 이로 부터 발생하는 오염물질 총량을 발생부하량 (generation load)이라 하고 각각의 처리시설을 통하여 삭감된 후 수계로 배출되는 오염물질량을 배출부하량 (discharge load)이라 한다. 일단 수계로 배출된 오염물질은 희석, 침전, 탈착 등의 물리적 작용, 화학·생물학적 작용 및 취수, 배수 등의 과정에 의해 감소되는데 이러한 자정작용을 거친 후 하천의 특정지점에 도달된 부하량을 유달부하량 (delivery load)이라 하며, 배출부하량 중 유달부하량의 비율을 유달율 (delivery ratio)이라 한다. 유역에서의 오염물질 발생원은 크게 생활계, 축산계, 산업계, 토지이용, 양식계, 온천 등으로 분류되며, 위에서 언급한 자연·인위적 작용을 거친 후 최종적으로 하천으로 유입되게 된다. 본 연구에서는 유역내의 오염물질 발생원에서 생성된 발생부하량과 처리시설에서 삭감된 후 유역으로 배출되는 배출부하량, 유역 내에서의 변화과정을 거친 후 최종적으로 하천수계로 유입되는 유달부하량 산정을 다뤘다.

2.3 오염부하량 산정

새만금 유역의 오염원 자료는 환경부에서 제공하는 인구현황과 축산현황, 배출업소현황, 환경기초 시설현황 등을 1998년도 기초자료를 이용하여 국립환경연구원의 수계오염 총량관리기술 지침을

기초로 각 소유역별 생활계, 산업계, 축산계, 매립계, 양식계, 온천에 대하여 오염물질량이 각각의 처리시설을 거친 후 수역으로 유입되기까지의 모든 과정을 정량적으로 분석하였다.

유달부하량은 해당 유역 출구에서의 유입 오염물질에 의한 부하량으로 정의하며, 배출부하량 중 유달부하량의 비율을 유달율이라 한다. 일반적으로 유달율은 실측자료에 의해 산정하며 식 1)과 같이 계산하였다.

$$L_d = C_o \times Q_s \quad (1)$$

여기서, L_d 는 유달부하량; C_o 는 실측수질농도; Q_s 는 소유역별 유출량이다. 이렇게 결정된 유달부하량은 상류의 모든 오염원에서 배출되는 부하량의 총합이 하천까지 도달하는 부하량을 의미하므로, 개별 오염원으로부터 발생된 부하량이 하천에 도달하는 부하량을 계산하기 위해서는 자정계수에 의한 접근이 필요하다. 이 때, 자정작용의 정도는 오염물질이 유하하는 시간, 즉 유하거리와 하상구배 및 조도, 기타 환경조건 등에 따라서 다르다. 수질실측치가 없는 소유역의 유달부하량은 식 2)와 같이 자정계수와 유달거리 (l)로 구성된 유달함수를 이용하여 구한다. 일반적으로 유달시간 (t)은 산정하기 어렵기 때문에 유달거리의 함수를 사용하였다.

$$\frac{dL}{dl} = -kL, \quad L_d = L_o \times e^{-kl} \quad (2)$$

여기서, L_d 는 유달부하량 (kg/day); L_o 는 배출부하량 (kg/day); k 는 자정계수; l 은 유달거리 (km)로서 소유역 중심에서 출구점까지의 거리이며 Arc-GIS의 SCRIPT 기능을 이용하여 산정하였다. 이 때 유역의 자정계수는 유역면적, 유출량, 유달거리 및 유역형상의 함수이므로 식 3)과 같이 구할 수 있다.

$$k = \alpha \times \sqrt{(A/Q)} \times P^\beta \quad (3)$$

여기서, k 는 자정계수; A 는 유역면적 (km^2); Q 는 유출량 (m^3/day); P 는 유역형상계수; α , β 를 실측 소유역의 자정계수를 이용하여 실측 유달부하량을 산정한 후 예측 유달부하량과의 회귀식을 구성하여 수질항목별 산정하였다. 유역형상계수는 식 4)와 같이 산정하였다.

$$P = A/L^2 \quad (4)$$

여기서, P 는 유역형상계수; A 는 유역면적 (km^2); L 은 유역 주하천 길이 (km)이다. 최종적으로 리동별 자정계수와 유달거리를 이용하여, 리동별로 유달부하량을 산정하였다.

2.4 대상유역

대상지역은 새만금간척지구로서 행정구역상으로 전라북도 군산, 김제, 부안의 18개 읍면동을 포함하고 있으며, 크게 만경유역과 동진유역으로 이루어져 있고 각각의 유역면적은 $1,600 \text{ km}^2$ 과 $1,384 \text{ km}^2$ 이다. 새롭게 조성될 개발면적은 총 401 km^2 로써 토지면적은 약 283 km^2 , 담수호는 약 173 km^2 로써 Fig. 1과 같다.

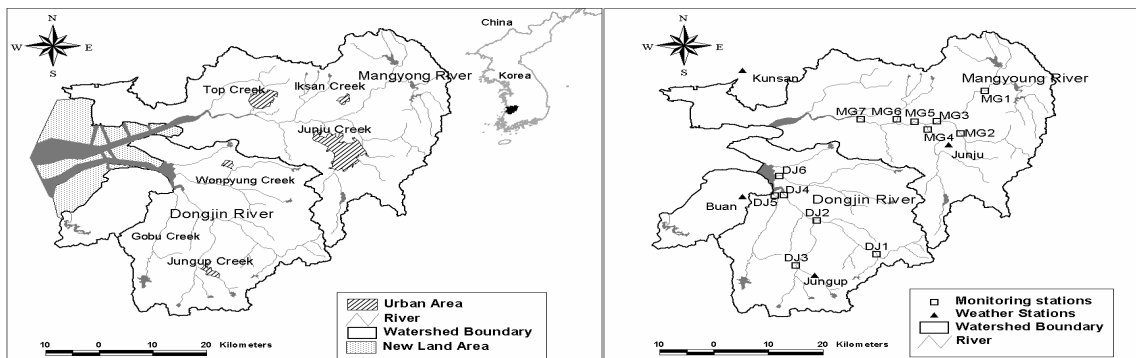


Figure 1. The study area and sampling stations

새만금 간척지구의 토지이용현황은 Table 1과 같으며 농업지역과 산림이 그 대부분을 차지하고 있다. 현재 유역인구는 약 1,400,000명이고 소와 돼지는 각각 약 84,000마리와 1,045,000마리이다. 일반적으로 축산면적은 매우 작은 편이지만 오염원의 많은 부분을 차지하고 있으며 인구는 도시 지역에 밀집되어 있어 이로 인한 오염부하량이 유역 하천 및 담수호 수질에 많은 영향을 미치고 있다. 년평균 강수량은 1,212 mm이고 년평균 강수량의 2/3가량이 여름에 집중되는 아시아의 전형적인 몬순기후를 나타낸다.

Table 1. Land use classification

Watershed	Agriculture		Forest		Urban		Livestock		Others	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Mangyoung	702	43.9	628	39.3	158	9.9	1	0.0	110	6.9
Dongjin	797	57.6	413	29.9	86	6.2	1	0.1	86	6.2

III. 결과 및 고찰

3.1 오염배출 부하량 산정

새만금 유역에 대한 오염배출 부하량을 산정하기 위해 총 826개 리동 단위 마을의 토지, 인구, 축산별 점유율을 산정하여 합산하였다. 각각의 점유율을 고려하여 생활계, 축산계, 산업계, 토지이용, 양식계, 온천에 대하여 리동별 BOD, TN, TP 발생부하량을 산정하였으며 오염물질 배출부하량은 각 오염원별로 배출경로를 바탕으로 개별 및 공공처리장까지의 관거이송, 관거이송 중 침출, 누수, 월류 및 처리장에서의 방류 등의 삭감량을 산정하고 실측자료 및 원단위를 이용하여 소유역별 배출부하량을 산정하였다. 또한 배출부하량이 특정수계지점에 도달하기까지의 자정작용을 고려하여 유달부하량을 산정하였는데 (Table 2), 자정계수는 식 3)에 의해 α , β 를 수질항목별로 구하여 산정하였고 유달거리는 Arc-GIS의 SCRIPT를 이용하여 산정하였다 (Fig. 2).

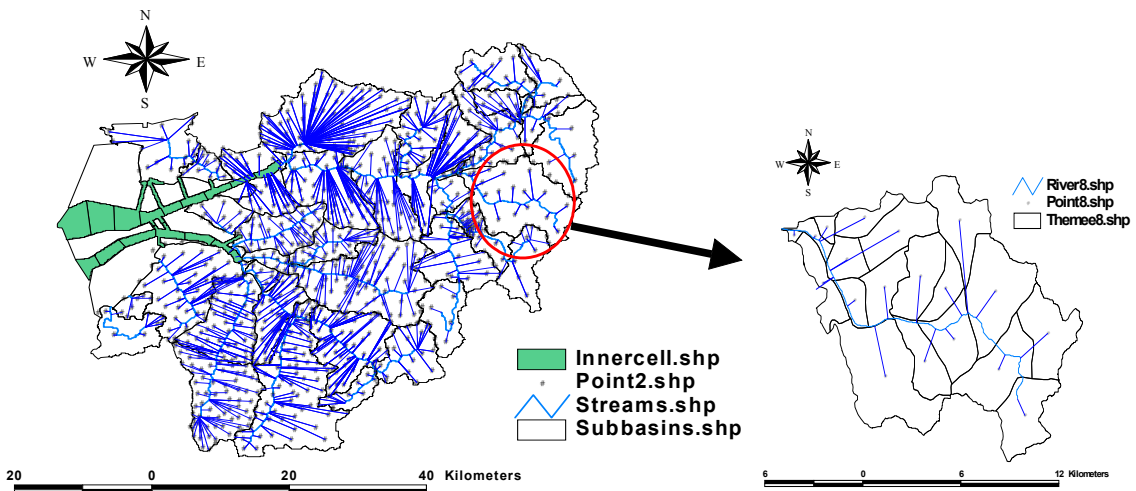


Figure 2. Calculation of the shortest delivery length from the district's center to stream

BOD, TN, TP 배출부하량은 1~5, 10~12월에 작고 6, 7, 8, 9월에 급격히 증가하였다. Table 2의 월별 강수량에서 1~5, 10~12월의 적은 강수량과 6, 7, 8, 9월의 많은 강수량과의 유사한 경향을 보이고 있다. BOD, TN, TP 유달부하량도 배출부하량과의 유사한 추세를 보였으며 시기별 강수량에 따른 오염부하량을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 유달율은 유달부하량이 배출부하량에서 차지하는 비율로서 시기별 큰 차이를 나타내지 못하나 역시 강수량이 급격히 증가한 6, 7, 8, 9월에 다

소 높게 나타났으며 BOD의 경우 배출부하량이 하천수계로 도달하는 과정에서 T-N, T-P보다 자연적, 인위적 요소에 의하여 더 많이 감소하는 것으로 나타났다.

Table 2. Monthly pollutant loads in Saemangeum watershed

Month	Precipitation	BOD			T-N			T-P		
		Dis.L.* (kg)	Del.L.** (kg)	D.R.*** (%)	Dis.L. (kg)	Del.L. (kg)	D.R. (%)	Dis.L. (kg)	Del.L. (kg)	D.R. (%)
Jan.	40.5	54,385	27,973	51	20,696	16,371	79	2,456	2,061	84
Feb.	26.4	57,832	29,075	52	21,385	16,668	78	2,553	2,120	83
Mar.	39.9	61,638	30,863	50	24,529	19,198	78	2,809	2,333	83
Apr.	151.2	81,051	46,482	57	39,033	32,105	82	4,210	3,672	87
May	108.7	79,958	43,208	54	38,906	31,284	80	4,377	3,733	85
Jun.	310.9	142,161	89,141	63	79,141	66,595	84	8,454	7,533	89
Jul.	227.7	117,999	74,241	63	57,901	48,816	84	6,741	6,031	89
Agu.	358.7	157,077	108,078	69	90,292	79,043	88	9,776	8,977	92
Sep.	311.3	116,491	75,106	64	58,242	49,637	85	6,402	5,776	90
Oct.	84.1	73,111	45,289	62	30,298	25,828	85	3,873	3,482	90
Nov.	30.6	61,811	33,873	55	21,050	17,044	81	2,893	2,485	86
Dec.	3.6	49,201	25,941	53	19,573	15,807	81	2,344	1,991	85
Sum	1693.4	87,833	52,536	58	41,838	34,945	82	4,750	4,192	87

* : Discharge Load; ** : Delivery Load; *** : Delivery Ratio

3.2 오염부하량 감증을 위한 수질모형 적용

본 연구에서 산정된 오염부하량의 감증을 위하여 미국 환경청 (U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)에서 개발한 유역모형으로서 장기간에 걸쳐 크고 작은 규모와 복잡한 유역의 수리-수질에 관한 다양한 현상들을 모의하기 위해 개발된 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)에 적용하였다. 새만금 유역 내 수질측정지점 중에 하나인 대천지점을 대상으로 1999년도에서 2002년도까지 연중 일별로 보정이 이루어졌고 보정 항목은 유출량 및 수질항목에 대하여 보정하였고 유출량, 수온, DO, BOD₅, NO₃⁻-N, T-N, T-P 순으로 진행하였다 (Fig. 3, 4).

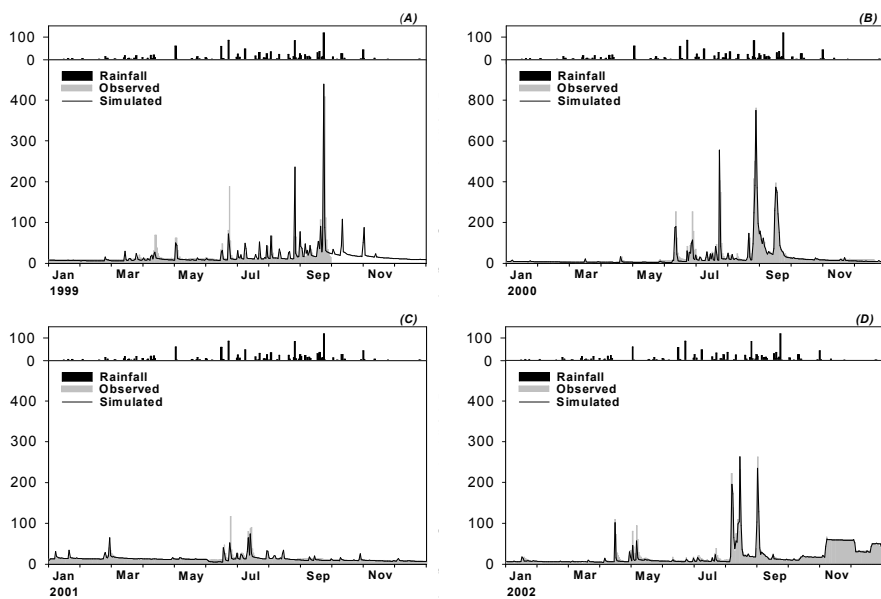


Figure 3. Daily rainfall and observed and simulated daily mean streamflow at Daechun station

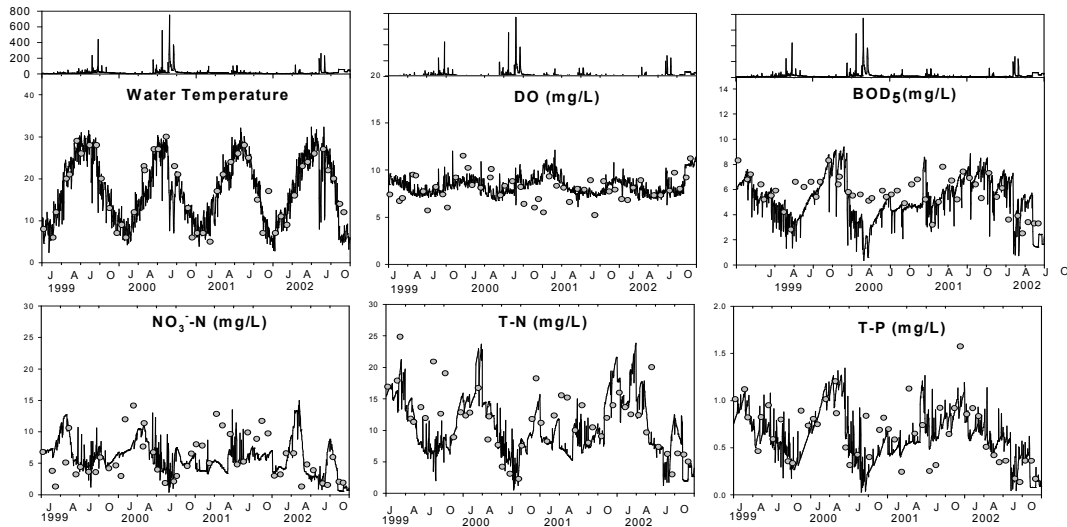


Figure 4. Observed and simulated water quality for Daechun station

보정결과 유량의 경우 실측 4개년도 모두 안정된 유량으로 모의되었으며 수질의 경우 Table 3과 같이 통계적인 변량을 이용하여 실측치와 모의치를 비교하여 평가한 결과를 나타내고 있다. 모형의 적용성을 알아보기 위한 결정계수 (R^2)는 단지 무작위 오차만을 평가하는 것으로서 오차의 정도를 나타내지는 못한다. 따라서 오차의 정도를 나타내기 위해 mean error (ME), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE, %)를 사용하였다. 만일 모든 예측치와 실측치 자료가 일치한다면, 통계치는 ME=0.0; RMSE=0.0를 나타낼 것이며 보정에 사용된 모든 수질항목에서 상관성을 나타내었다.

Table 3. Model performances in Daechun stations calibrated with monitoring data

Constituents	Mean absolute error (mg/L)	Root mean square error (mg/L)	Mean error (mg/L)
Temperature	2.47	3.27	0.54
DO	2.98	11.63	1.33
BOD ₅	1.28	1.55	0.23
T-N	3.74	4.99	0.83
T-P	0.21	0.26	0.04

IV. 결론

새만금 유역을 대상으로 수계오염총량관리기술지침에 의하여 오염 배출부하량을 산정하고 유달함수 및 GIS tool을 이용하여 유달 부하량을 합리적으로 분석하였다. 산정된 유달 부하량을 미국 환경청 (USEPA)에서 개발한 유역모형인 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)에 적용하여 유달 부하량 산정결과를 검증하였다. 산정된 유달부하량에 대한 분석결과 오염물질의 제거 및 배출특성과 강우유출에 따른 부하량의 시기별 배출특성 등이 고려되었고 유달 부하량 산정과 정에서 자정계수 및 유달거리를 유달함수 및 Arc-GIS를 이용하여 손쉽게 산정할 수 있었다. 새만금유역 내 유달부하량은 BOD 52,536 kg/day, 34,945 T-N kg/day, 4,192 T-P kg/day으로 나타났다. BOD산정된 오염부하량의 검증차원에서 HSPF 유역모형에 적용하였고 유량 및 수질보정 결과, 실측치와 모의치 간의 높은 상관성이 있었으며 유역의 장래 오염부하량 예측을 위한 모형의 입력 자료로서 활용가치가 높음을 확인하였다.