

수질모델링을 위한 유달부하량의 수리·수문학적 산정

Estimation of Pollutant Delivery Load in Hydraulic and Hydrologic Aspects for Water Quality Modeling

김 상 단* / 송 미 영** / 김 형 수***

Kim, Sang dan / Song, Mee Young / Kim, Hung Soo

:: Abstract ::

A hydraulically and hydrologically based estimation method of pollutant delivery load for water quality modeling is proposed. The proposed method works on grid basis and routes overland flows from one cell to the next following the maximum downslope directions. The method is able to consider spatially-varied data of source pollutant, topography, land slopes, soil characteristics, land use and aspects, which can be extracted from geographic information systems (GIS) and from digital elevation models (DEMs). Because of this feature, the proposed method can be expected to be used for evaluating the impacts of various practices on watershed management for water quality.

Keywords: Hydraulics, Hydrology, Pollutant Delivery Load, Water Quality Modeling

:: 요 지 ::

본 연구에서는 수리·수문학적인 이론을 근거로 수질모델링을 위한 유달 오염부하량 산정방법을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 방법은 격자기반으로 구성되어 있으며, 최대 경사 방향으로 일어나는 지표면 유출을 추적함으로써 유달부하량을 계산하게 된다. 또한 GIS 및 DEM 자료를 이용함으로써 공간적으로 분포된 배출 오염부하량, 지형, 경사, 토양특성, 토지이용 등을 고려할 수 있다. 이를 통하여 수질에 영향을 미치는 다양한 토지이용방법 및 유역관리방식의 대안에 대한 평가가 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어: 수리학, 수문학, 유달부하량, 수질모델링

1. 서 론

수질모델링의 목적은 해당 유역의 수질을

공간적으로 그리고 시간적으로 기술하기 위한 것이며, 또한 현재의 수질에 영향을 미치는 주요 인자들과 주된 물리적 메커니즘을 밝히

* 경기개발연구원·환경정책연구부 책임연구원·Department of Environmental Policy, Gyeonggi Research Institute Corresponding Author-440-290 경기도 수원시 장안구 파장동 179·E-mail: skim@gri.re.kr

** 경기개발연구원·환경정책연구부 연구위원·Department of Environmental Policy, Gyeonggi Research Institute

*** 인하대학교·토목공학과 교수·Department of Civil and Environmental Engineering, Inha University

고자 하는 것이다(Mueller 등, 1997). 미국의 TMDL(Total Maximum Daily Load)이나 최근 우리나라에서도 시행계획에 들어간 혹은 시행계획을 준비중인 수질오염총량제 또한 상기 목적을 수행하기 위하여 해당 지역의 주요 하천에 대한 수질모델링을 필수적으로 요구하고 있다. 우리나라의 환경 전문가들도 이러한 사회적 요구에 부응하기 위하여 그동안 이와 관련된 많은 연구가 이미 이루어져오고 있다(전과 이, 1993; 오 등, 1996; 서와 이, 2002; 이와 서, 2002; 안 등, 2003). 또한, 각 시군에서 수립하고 있는 환경보존종합계획이나 기타 국가단위 또는 지자체 단위의 여러 가지 수질개선사업을 위한 기본계획들에도 수질모델링은 이제 필수적인 도구로 자리를 잡아나가고 있는 상황이다.

이러한 수질모델링 사용빈도의 양적인 성장에도 불구하고 하천 또는 유역의 수질을 모형화하는데는 아직까지 해결하지 못한 많은 문제점들이 있다. 물론 현재 보유하고 있는 관측자료의 양적 질적 수준의 문제가 가장 큰 문제점으로 부각되고 있으나, 그 외의 다른 측면에서의 문제 역시 간과할 수는 없을 것이다. 그 중 하나가 바로 수질모델링 과정에서의 수리·수문학적 이론의 부족을 들 수 있다. 아무래도 “수질” 모델링이다보니 발생 오염부하량의 산정이나 발생된 오염원의 배출 오염부하량의 산정에만 지나치게 관심을 집중하는 경향을 보임에 따라 수질의 또 다른 축인 유량 산정이나 배출 오염부하량이 실제 관심지점까지 유달되는 이송 메커니즘에는 많은 허점을 보이고 있는 실정이다.

앞으로 우리나라 대부분의 유역에 시행될 예정으로 있는 수질오염총량제를 위한 기본 보고서들(환경부, 2000; 광주시, 2004)을 살펴

보면 대략적으로 발생 오염부하량 산정, 배출 오염부하량 산정, 유달 오염부하량 산정, 기준 유량 산정 등의 과정을 거쳐서 최종적으로 이러한 입력자료를 이용한 수질모델링을 통하여 어떤 유역의 일일 배출 허용총량(TMDL)이 결정되게 된다. 앞서 언급하였듯이 발생 및 배출 오염부하량을 산정하는 방법은 비교적 잘 짜여진 프로세스를 가지고 객관적으로 산정할 수 있는 것으로 보여진다. 그러나 유달 오염부하량 산정 부분으로 가면 일반적으로 하천에서 직접 관측한 수질과 유량의 곱인 관측 오염부하량과 위에서 기 계산된 배출 오염부하량의 비를 유달계수라 정의하고 이를 미계측 지점으로까지 확대하여 사용하고 있는 실정이다. 수질모델링을 위해 필요한 관측지점들의 수보다 훨씬 작은 수의 관측망을 갖고 있는 현재 상황으로 볼 때, 유달계수의 전용문제는 수질모델링의 신뢰도에 좋지 않은 영향을 준다고 할 수 있다. 또한 기준 유량의 산정의 측면에서 살펴보면 일반적으로 한강 본류나 낙동강 본류와 같은 대형하천에서의 관측자료를 이용한 외삽법(즉, 비유량)에 의해 관심 지점의 유량이 산정됨을 알 수 있을 것이다. 한강이나 낙동강과 같은 대형하천의 유역면적과 실제 계획수립을 위한 대상유역의 유역면적은 열배 이상 차이가 나기 때문에 이들의 비유량이 서로 같다는 가정은 전혀 논리적이지 못한 가정이 된다. 따라서 이러한 유달 오염부하량을 기준 유량으로 나눈 값을 근거로 목표수질을 결정하는 것에는 비교적 큰 불확실성이 내재되어 있다고 보아야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 상기 두 가지 문제(유달 오염부하량 산정과 기준유량 설정) 중 첫 번째 문제를 해결하기 위한 과정의 일부로 수질모델링을 위한 수리·수문학적인 이론에 기

반한 유달 오염부하량 산정방법이 제안된다. 배출 오염부하량이 어떤 지점까지 이송된 후의 부하량인 유달 오염부하량은 강우유출과 더불어 오염물질의 유출에 영향을 주는 일종의 유역 특성계수로서, 강우의 형태, 강우강도, 강우량, 강우지속시간, 무강수 기간 등 기상학적인 인자와 토지이용, 토양특성, 유역면적, 경사, 하천길이 등 지표면에서의 물리적인 인자들에 영향을 받는다(Wanielista 등, 2003; 배명순, 2003). 따라서 기존의 일부 지점에서의 관측 오염부하량과 배출부하량과의 유달비(즉, 유달계수)를 이용한 산정방법으로는 유역 내 개발 등으로 인한 자연적인 유출 환경의 변화를 반영하지 못할 뿐만 아니라, 미계측 유역에 대하여서는 유달계수를 산정하지 못하는 문제점이 발생하는 것이다.

이에 본 연구에서는 기존의 유달계수의 산정을 통한 유달 오염부하량 산정방법의 문제점을 해결하기 위해 지표면에서의 물리적인 특성을 고려한 유달 오염부하량 산정방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 제안된 방법은 격자기반으로 구성되어 있으며, 최대 경사방향으로 일어나는 지표면 유출을 추적함으로써 유달부하량을 계산하게 된다. 또한 GIS 및 DEM 자료를 이용함으로써 공간적으로 분포된 배출 오염부하량, 지형, 경사, 토양특성, 토지이용 등을 고려할 수 있다는 장점을 가지게 된다.

2. 모형의 구성

수질 모델링을 위해 수리·수문학적으로 타당한 오염원 유출 거동을 파악하기 위해서는 먼저 오염원의 주된 발생원을 구체적으로 식별 및 정량화하여야 하며, 지표면에서 발생

및 배출된 오염원이 유출시작점까지 운송되어 운송된 오염원이 유출경로를 따라 유하하면서 최종적으로 관심지점까지 도달하게 되는 이송 과정을 모의하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 제안한 유달 오염부하량 추정방법을 기술하면 다음과 같다.

2.1 격자기반 오염원 배출부하량 산정

연구를 위한 대상지역은 팔당댐 상류 경기도 지역으로 하였으며, 해상도 1km×1km의 격자로 전체 지역을 분할한 후, GIS를 이용하여 각 격자별로 점오염원 배출부하량, 비점 오염원 배출부하량을 각각 산정하였다. 산정된 점오염원 및 비점오염원 배출부하량을 Fig. 1과 Fig. 2에 표시하였다.

2.2 팔방흐름모형 작성

해상도 1km×1km의 격자들 각각에서 배출되는 오염부하량이 지표면 유출을 통하여 운송되는 과정을 모의하기 위하여 DEM 자료를 이용하여 각 격자마다 대표고도를 취하여 수치고도자료를 구성하였다. 일단 수치고도자료가 작성되고 나면 이를 바탕으로 Fig. 3의 예와 같이 팔방흐름모형을 통하여 해당 유역 내 격자들의 흐름방향을 결정할 수 있다.

팔방흐름모형은 어떤 특정 격자에서 근방 8개 격자(상하좌우 및 대각선) 중에서 하나의 격자로 흐름방향을 정의하는 역할을 한다(김상단, 2001). 어떤 격자에서 배출된 오염부하량의 이동거리는 흐름경로도을 구축함으로써 결정된다. 이것은 특정 격자가 유역출구 격자로 배수되기까지 통과해야하는 격자들을 모두 고려함으로써 구성될 수 있다.

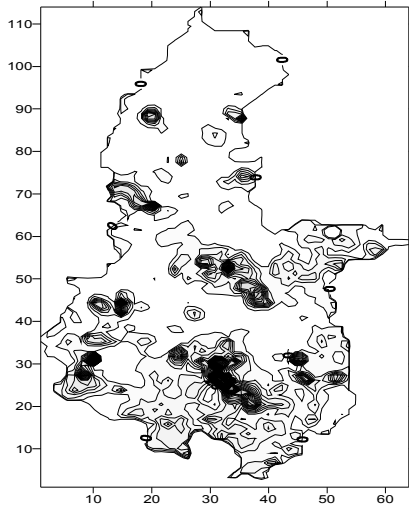


Figure 1. Point Discharge Load (Unit: kg/day)

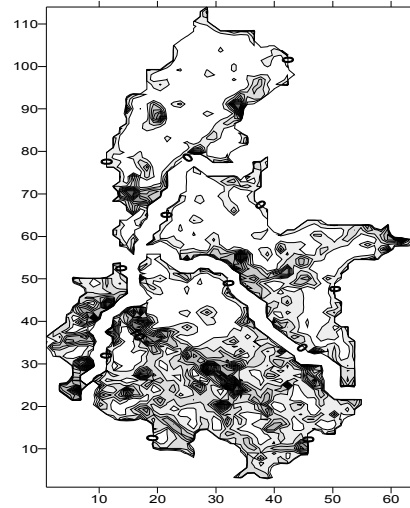


Figure 2. Non-Point Discharge Load (Unit: kg/day)

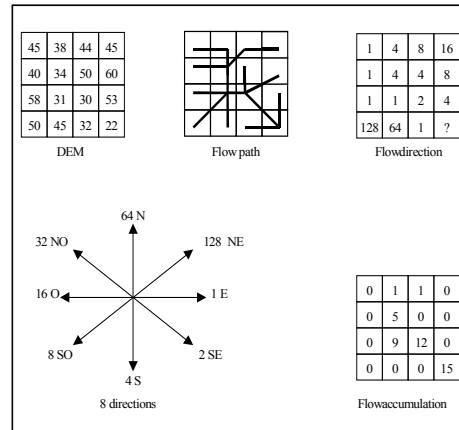
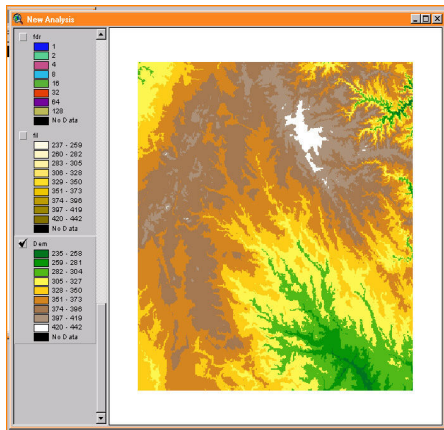


Figure 3. Eight-Point Flow Model

2.3 토양도 및 토지이용도를 이용한 격자별 CN값 산정

한 유역의 토양특성은 오염원의 유출과정에 직접적인 영향을 미친다. 즉, 토양의 성질에 따라 침투능이 상이하기 때문이다. 그런데, 토양의 성질을 양적으로 표시하기란 힘들므로 미국 토양보존국(U.S. SCS)는 토양의 침투능을 기준으로 A, B, C, D 4개의 토양군으로 분류하고 있다. 우리나라 유역의 토양에 대한

성질은 개략토양도로부터 입수할 수 있으며, 개략토양도의 토양명칭과 SCS 4개 토양군에 대한 관계는 Table 1와 같다.

또한, 오염원과 유출과의 관계는 유역의 토양종류 뿐만 아니라 유역의 토지이용상태에 따라서도 크게 좌우된다. Table 2는 토양-피복형별 CN값을 나타내며, 여기서 CN값이란 토양형, 토지이용상태 등에 따른 유출정도를 나타내는 지수이다. 본 연구의 대상유역에 대한 CN값의 분포를 Fig. 4에 도시하였다.

Table 1. Soil Names in the SCS Soil Type

토양형(SCS)	개략토양도에서의 토양명
Type A	Fba, Fbb, Lta, Lfb, Lf, Rea, Rsa, Mab, Mac, Mja, Mia, Mlb, Mma, Mmb, Msa, Msb, Mub, Mva, Mvb
Type B	Afa, Afc, Afd, Apb, Apc, Apg, Ana, Anb, Anc, And, Lpa, Lpb, Raa, Rab, Rac, Rad, Rla, Rlb, Rsb, Rsc, Rva, Rvb, Rvc, Rvd, Rxa, Maa, Mua
Type C	Fma, Fmb, Fmc, Fmg, Fmk, Afb, Apa, Apd
Type C	Fta, Fmd, Fml, Ro

Table 2. CN Number

토지이용상태	토양형			
	A	B	C	D
논	66	74	80	82
밭	62	71	78	81
초지	68	79	86	89
임야	57	73	82	86
나대지	49	69	79	84
시가화 지역	상업	85	90	93
	공업	77	85	90
	주거	57	71	86
	기타	77	86	91
수역	98	98	98	98

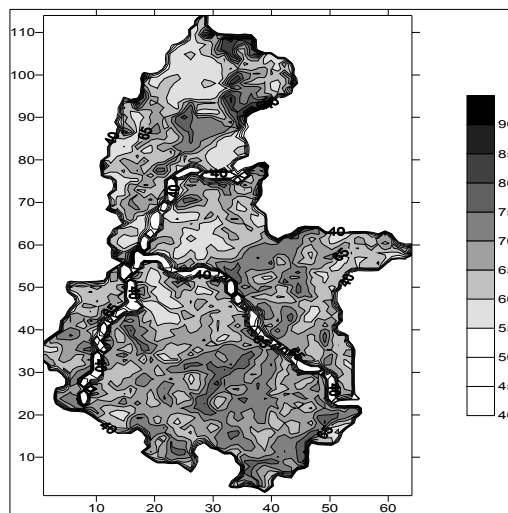


Figure 4. CN for the Study Area

2.4 지표면 유출을 통한 오염부하량을 운송과정 모형화

본 연구에서 제안된 유달 오염부하량 산정 방법은 유역 상류에서 발생한 배출 오염부하

량이 유역의 지형학적 특성에 따라 어떻게 유달되는 지에 대한 관계를 경험적으로 나타내는 일종의 통계모형이라 할 수 있다. 제안된 모형의 수학적인 형태는 비선형 회귀모형의

구조를 나타내며, 격자별 배출 오염부하량은 아래와 같이 지형학적 특성 및 지표면 특성, 지표면 유출의 오염원 이송특성 등으로부터 하류방향으로 이송되면서 저감되는 형태를 갖고 있다.

$$\hat{Y}_j = \sum_{i,j}^{N_j} B_{i,j} \cdot e^{-a \cdot L_{i,j}^b \cdot S_{i,j}^{-c}} \cdot d \cdot CN \cdot \left(\frac{L_{i,j}}{Lmax_j} \right)^{-e} \quad (1)$$

여기서, 아래첨자 j 는 소유역을 의미하고 i 는 소유역 j 가 포함하고 있는 개개 격자이며, N_j 는 소유역 j 에 포함되어 있는 격자들의 총 수를 지칭한다. 또한, $B_{i,j}$ 는 소유역 j 의 격자 i 에서 배출되는 오염부하량(점+비점, kg/day)이며, \hat{Y}_j 는 소유역 j 의 모두 격자들에서 배출되는 오염부하량이 유달과정을 거쳐 소유역 출구에서 추정된 유달 오염부하량이다. $L_{i,j}$ 는 소유역 j 의 격자 i 에서 배출되는 오염부하량이 소유역 j 의 출구까지 가는데 이동하는 거리(km), $S_{i,j}$ 는 소유역 j 의 격자 i 에서 배출되는 오염부하량이 소유역 j 의 출구까지 이송되는 경로의 평균 경사(%), CN 은 앞서 설명한 CN값, $Lmax_j$ 는 소유역 j 의 $L_{i,j}$ 값들중 최대값이다. 이 때, 이동 경로의 평균 경사 S 는 다음과 같이 구간별 경사를 고려하는 등가경사로 계산된다.

$$S = \left(\frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{S_i^{1/2}}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, L_i 는 구간별 거리이며, S_i 는 구간

별 경사이다.

따라서, 제안된 모형의 추정해야할 매개변수는 a, b, c, d, e 모두 5개이다. 이들 매개변수들은 실측자료로부터 비선형 최적화 기법을 통하여 추정할 수 있다. 식 (1)의 각 항목별로 물리적인 의미를 부여하자면, 식 (1)의 우변 첫 번째 항은 배출 오염부하량으로 모형의 기본적인 source의 역할을 하며, 두 번째 항은 배출 오염부하량이 유출되면서 저감되는 자정계수로서의 역할이며, 세 번째 항은 유출률 개념을 적용할 수 있고, 마지막 항은 소유역의 크기에 따른 일종의 보정항으로 의미를 둘 수 있다.

3. 적용결과

먼저 제안된 모형의 매개변수를 추정하기 위해 유량과 수질의 실측자료가 있는 43개 지점을 선택하였으며, 그 위치는 Fig. 5와 같다. 관측자료가 있는 43개 지점은 2001년부터 2004년까지 시기별로 다양하게 분포되어 있으나 대략적으로 모두 1년 정도의 관측기간을 보유하고 있으며, 관측주기는 짧게는 7일 길게는 1개월 정도의 수준을 보이고 있다. 문제는 어떤 한 관측지점의 결과일 지라도 흐르는 유량과 수질이 매 시기별로 다르기 때문에 유량과 수질의 곱으로 표현되는 유달부하량이 매 시기별로 다르다는데 있다. 즉, 어떤 시기에 측정한 유달부하량을 매개변수 추정을 위한 유달부하량으로 사용해야 하는가에 대한 문제가 생기게 되는 것이다. 따라서 본 연구에서는 북한강 본류의 청평지점과 남한강 본류의 여주 지점의 상류 댐 건설 이전의 일 유량자료를 바탕으로 비유량을 산정한 후, 이를 각 지점의 면적을 고려하여 관측 지점을 흐

은 관계가 있는 것으로 가정하였다.

$$Y_j = \alpha_j Q_j^{\beta_j} \quad (3)$$

여기서, Y_j 는 관측지점 j 에서의 유달부하량, Q_j 는 유량이며, α_j 와 β_j 는 회귀분석을 통해 구해지는 계수값이다. 이와 같이 관측지점별로 유달부하량-유량과의 관계를 맺은 후, 평수기 유량이 흘렀을 경우의 유달부하량을 기준 유달 오염부하량으로 산정하여 이후 과정을 수행하였다.

이와 같이 관측자료에 대한 정리과정을 수행한 후, 제안된 유달 오염부하량 산정 모형의 매개변수 추정은 다음과 같은 목적함수를 가진 비선형 최적화 기법으로 설명될 수 있다.

$$\text{Minimize } Z = \sum_{j=1}^{43} \left(\frac{Y_j}{\hat{Y}_j} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

위의 추정과정을 거쳐 최종적으로 Table 3와 같이 유달부하량 산정모형을 구축하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

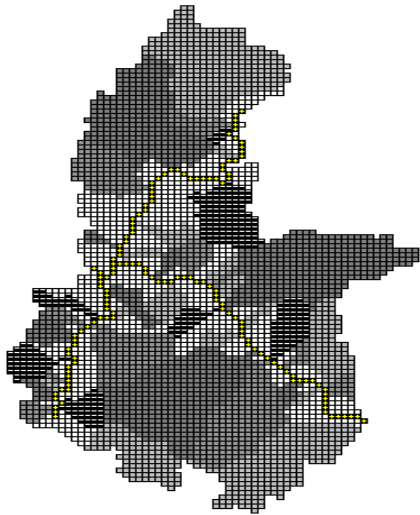


Figure 5. Sub-Basins for Callibraton

르는 평수량을 산정하는 방법을 취하였다. 즉, 평수량에 해당하는 유량규모가 관측지점에 흘렀을 경우의 유달부하량을 기준으로 하여 매개변수를 추정한 것을 의미한다. 물론 같은 유량규모의 유량이 관측지점에 흐른다 하더라도 그에 따른 수질이 항상 같은 것이 아니므로 반드시 유달부하량이 같다고는 볼 수 없기 때문에, 본 연구에서는 유량과 유달부하량을 다음과 같

Table 3. Result of Patermater Estimation

Parameters	a	b	c	d	e
Value	1.0307	0.0000	0.9349	0.0043	0.4220

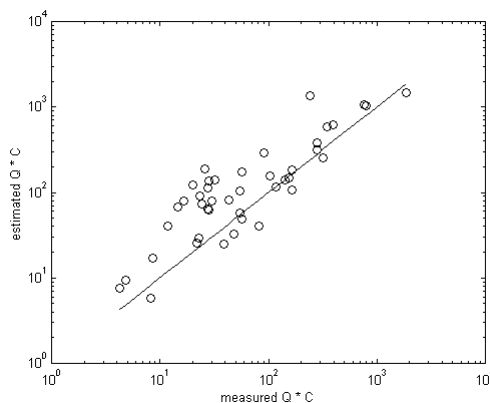


Figure 6. Estimation Result

4. 결 론

본 연구에서는 수질모델링을 위한 수리·수문학적인 이론에 기반한 유달 오염부하량 산정방법을 제안하였다. 기존 유달계수의 산정을 통한 유달 오염부하량 산정방법의 문제점을 해결하기 위해 지표면에서의 물리적인 특성을 고려한 유달 오염부하량 산정방법을 제안하였으며, 이를 위하여 제안된 방법은 격자기반으로 구성되어 있고, 최대 경사방향으로 일어나는 지표면 유출을 추적함으로써 유달부하량을 계산하게 된다. 또한 GIS 및 DEM 자료를 이용함으로써 공간적으로 분포된 배출 오염부하량, 지형, 경사, 토양특성, 토지이용 등을 고려할 수 있다는 장점을 가지게 된다. 이를 통하여 수질에 영향을 미치는 다양한 토지이용방법 및 유역관리방식의 대안에 대한 평가가 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

광주시 (2004) 경기도 광주시 오염총량관리계획, 경기도 광주시.
김상단 (2001) 다차원강우를 사용한 유출모의 및 강우오차가 유출계산에 미치는 영향분석, 석사학위논문, 고려대학교

배명순 (2003) 지형정보학을 이용한 오염부하 유달계수의 산정, 석사학위논문, 충북대학교.
안상진, 김건홍, 연인성, 김기석 (2003) 남한강 유역관리를 위한 수질 분석 및 모의, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 365-368.
오경두, 전병호, 이흥근, 백도현, (1996) 북한강 수역 수질관리를 위한 QUAL2E 모형의 적용, 대한토목학회 논문집, 16, pp. 209-217.
서동일, 이은형 (2002) 용담댐의 영향분석을 위한 대청호의 수질모델링, 한국수자원학회 논문집, 35, pp. 737-751.
이은형, 서동일 (2002) 용담댐의 영향분석을 위한 금강의 수질모델링, 한국수자원학회 논문집, 35, pp. 525-539.
전경수, 이길성 (1993) 영향계수를 이용한 Qual2E 모형의 반응계수 추정, 대한토목학회 논문집, 13, pp. 163-176.
환경부 (2000) 한강수계 오염총량관리제 시행방안 연구, 환경부.
Mueller, D.K., Ruddy, B.C. and Battaglin, W.A. (1997) Logistic model of nitrate in streams of the upper-midwestern United States, J. Environ. Qual., 26, pp. 1223-1230.
Wanielista, M., Kersten, R. and Eaglin, R. (1997) Hydrology: Water quantity and quality control, John Wiley & Sons.