

연구논문

유역형상과 오염부하배출 특성을 고려한 유달계수 산정*

하성룡** · 박정하** · 배명순***

충북대학교 도시공학과**, 국립환경과학원 수질총량관리센터***

(2007년 1월 29일 접수, 2007년 2월 5일 승인)

Estimating the Pollution Delivery Coefficient with Consideration of Characteristics Watershed Form and Pollution Load Washoff*

Sung-Ryong Ha** · Jung-Ha Park** · Myung-Soon Bae***

Department of Urban Engineering, Chungbuk National University**

Watershed Management Research Center, National Institute of Environmental Research***

(Manuscript received 29 January 2007; accepted 5 February 2006)

Abstract

The performance of a stream water quality analysis model depends upon many factors attributed to the geological characteristics of a watershed as well as the distribution behaviors of pollutant itself on a surface of watershed.

Because the model run has to import the pollution load from the watershed as a boundary condition along an interface between a stream water body and a watershed, it has been used to introduce a pollution delivery coefficient to behalf of the boundary condition of load importation.

Although a nonlinear regression model (NRM) was developed to cope with the limitation of a conventional empirical way, this an up-to-date study has also a limitation that it can't be applied where the pollution load washed off (assumed at a source) is less than that delivered (observed) in a stream.

The objective of this study is to identify what causes the limitation of NRM and to suggest how we can purify the process to evaluate a pollution delivery coefficient using many field observed cases. As a major result, it was found what causes the pollution load delivered to becomes bigger than that assumed at the source. In addition, the pollution load discharged to a stream water body from a specific watershed was calculated more accurately.

* 이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2005).

Corresponding Author: Sung-Ryong Ha, Department of Urban Engineering, Chungbuk National University, 12 Gaeshin-dong, Heungduk-gu, Chungbuk, Korea, 361-763 Tel: 82-43-261-2497 Fax: 82-43-261-2497 E-mail: simplet@chungbuk.ac.kr

Key words : Delivery coefficient, Nonlinear regression model (NRM), Water Pollution, Watershed, Washoff

I. 서론

우리나라의 수질오염총량관리제는 유역단위 수질관리를 기본으로 하고 있다. 이 제도의 시행은 먼저 해당수계의 환경자료조사를 통해 수질 및 유량을 실측하고 해당 수계내의 오염원 현황을 조사하여 오염부하량 산정을 한다. 조사된 유역환경자료 및 오염원 자료를 바탕으로 발생부하량 및 배출부하량, 유달부하량을 산정하고 수질모델을 통한 모의 및 예측이 이루어져 해당 수계의 목표수질 달성여부를 결정짓고 초과오염부하량에 대한 할당이 이루어진다. 이 제도의 가장 핵심적인 업무 중의 하나인 오염부하량 산정은 오염원 특성에 대한 충분한 분석과 더불어 유역이 가지는 환경적 역량에 맞춰져서 이루어져야 한다. 오염부하량 산정에 있어서 하천으로 유입되는 배출부하량과 유달부하량의 관계를 나타내는 유달계수가 유역의 환경용량지표로서 사용되고 있는데, 일반적인 유달계수 산정방법으로 유달부하량을 배출부하량으로 나누는 단순부하량비 기법이 널리 사용되어져 왔다(손 등, 1995). 단순부하량비에 의한 유달계수는 유역 내 자연적 환경용량의 변화를 반영하지 못할 뿐만 아니라 미세측 유역에 대한 유달부하량 산정에도 그 한계점을 가지고 있다. 단순부하량비에 의한 유달계수 산정방법의 한계점을 극복하기 위한 대안으로 Ha *et al.*(1998)와 이(1998)는 몬테카를로의 시뮬레이션 방법을 이용한 오염부하의 저감계수 산정방법을 제안하였다. Ha *et al.*(2001, 2003, 2004, 2005)과 배(2003)는 수질실측지점이 존재하는 유역의 오염부하 유달계수와 유역이 지닌 오염유출특성계수와와의 비선형방정식을 이용한 오염부하 유달함수 산정방법을 제안하였다. 이 방법은 수문학에서 유역지형학적 특성인자로 사용되어온 하천형상계수를 이용하여 임의 지점의 유달계수를 정의하고 있다. 하지만 오염부하 유달함수 산정방법은 수질 미세측지점의 유달계수를 산정하기 위하여 수질측정지점의 실측부하량과 해

당 유역의 배출부하량의 관계에서 비선형방정식을 산정하게 되는데, 해당 유역내에서 발생된 배출부하량보다 수질실측지점에서 실측된 실측부하량이 클 경우에는 비선형방정식을 산정할 수 없는 한계점을 지니고 있다(Bae *et. al.*, 2006).

본 연구는 전술한 오염부하 유달함수 산정방법을 실제하천에 적용하였을 때 어떤 요인으로 하천수질 실측부하량이 배출부하량보다 크게 되는지를 규명하고, 이를 개선할 수 있는 합리적인 유달계수의 산정방안을 제시하고자 한다.

II. 오염부하 유달계수 산정방법

1. 대상 유역 및 수질오염 배출부하

연구 대상유역으로 금강수계의 미호천 유역을 선정하였다. 미호천 유역은 경기도 안성시와 충청북도 음성군, 진천군, 괴산군에 걸쳐 위치하는 상류유역과 충청남도 천안시, 연기군과 충청북도 청주시, 청원군에 걸쳐 위치한 하류유역으로 구성되어 있으며, 유역면적은 약 1,856km²이며 15개의 표준유역, 87개의 소유역으로 구성되어있다. 발생부하량 및 배출부하량 산정을 위한 오염원 자료는 금강 수질오염총량관리 기본계획 수립(충청북도, 2003)에서 제시된 것이고, 수질 및 유량 실측자료는 2003년 9월부터 2004년 5월까지 계속한 자료이다. 배출부하량과 실측부하량 자료의 시간적인 차이는 있지만 실측자료의 한계로 인하여 비교적 최근에 가까운 2003년을 기준년도로 선택하여 두 자료를 수용하였다. 본 연구에서 대상물질로 설정한 수질지표는 5일 생물학적 산소요구량(BOD₅)과 총질소(T-N), 총인(T-P)으로 하였다.

2. 수질 오염부하 유달계수 산정

기존의 오염부하 유달계수의 산정(손 등, 1995)은 다음 식(1)로 정의된다.

$$P_m = P_o \times K \quad (1)$$

P_m : 관측지점에서의 실측 오염부하량(Kg/day)

P_o : 유역에서 발생한 총 배출부하량(Kg/day)

K : 오염부하 유달계수(-)

식(1)에서 알 수 있듯이, 기존 방법에 의한 유달계수는 수질측정지점의 집수역에서 배출 가능량을 나타내는 배출부하량과 그 지점을 통하여 유출되어 하천관측지점에서 실측되는 부하량과의 산술적 비율로써 추정된다.

한편, Ha *et. al.*(2001)은 식(2)로 정의된 Horton의 무차원적 유역형상계수(S_f)(Horton *et. al.*, 1945)와 유역으로부터 하천으로 배출되는 오염부하량을 고려한 오염부하 유달함수를 제안하였다.

$$S_f = \frac{A}{(\sum L_i)^2} \quad (2)$$

여기서, L 은 유역 내에 존재하는 지천을 포함한 모든 하천의 누적길이, A 는 유역면적이다.

특히, 하천유역이 지나는 오염부하의 하천유입을 억제하고 기능을 나타내는 오염부하 유달지체계수(ψ)를 도입하였다. 식(3)은 Horton의 유역형상계수(S_f)와 오염부하 유달지체계수(ψ)와의 비선형 함수로 정의된 유달함수이다.

$$K = e^{\psi/S_f} \quad (3)$$

또, 식(3)을 식(1)에 대입하면 배출부하량과 하천 유달부하량간의 관계는 식(4)와 같이 정의된다.

$$P_m = P_o \times e^{\psi/S_f} \quad (4)$$

식(4)를 유달지체계수(ψ)를 중심으로 재정리하면 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\psi = -\ln\left(\frac{P_m}{P_o}\right) \times S_f \quad (5)$$

여기서 P_m 과 P_o 는 각각 해당유역에서 배출되는 부하량과 해당 하천 수질관측지점에서의 유달부하량이다.

Figure 1 (a)는 실험유역에 산출된 자료를 이용하여 유역형상계수(S_f)와 유달지체계수(ψ)의 관계를 산정한 예를 제시한 것(Ha *et. al.*, 2003)이다. 예로, 그림에서 점 A는 해당 관측지점의 배수유역이 지닌 S_f 값 0.1을 식(5)에 대입하여 산출된 ψ 값 0.195를

나타낸 것이다. 이와 같은 과정을 통해 Figure 1 (a)에 모든 산포점들은 구한다. 여기서 산출된 다수의 (S_f, ψ)의 쌍 자료 모두를 이용하여 이들 간의 최소자승오차를 만족하는 비선형회귀방정식을 도출한 것이 Figure 1 (a)에 실선으로 나타낸 곡선이다. 식 (6)은 도출된 회귀식을 일반함수로 나타낸 것이다. 계수 a 와 b 는 경험상수로 각 유역의 오염부하 유달 특성상수에 해당하고, $a>0, b>0$ 의 값을 가진다.

$$\psi = a\left(\frac{1}{S_f}\right)^b \quad (6)$$

3. 오염부하 유달계수 개선 절차

오염부하 유달계수의 개선 절차는 ①오염부하 유달함수의 한계점 요인분석, ②개선방안의 모색, ③개선된 유달계수 산정방법의 정립, ④유달계수(K)의 산정, ⑤유달계수(K) 산정결과의 비교분석, ⑥결과 토의로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 오염부하 유달함수의 한계점 요인

Bae *et. al.*(2006)이 지정한 바와 같이 배출부하량(P_o)이 실측부하량(P_m)보다 적은 경우, 즉 유달계수(K)가 1보다 큰 값을 나타내는 경우에 유달지체계수(ψ)는 음수의 값을 가지게 된다. 이러한 현상이 나타나게 되면 수질미계측 유역의 K 값을 산정하기 위한 S_f 와 ψ 의 비선형회귀방정식을 유도해 낼 수가 없다.

Figure 1 (b), (c), (d)는 본 연구의 대상지인 금강지류 미호천 유역의 유역형상계수(S_f)와 유달지체계수(ψ)의 관계를 통해 비선형방정식을 유추해낼 때 나타나는 한계점 요인을 보여주고 있는 그래프이다. BOD₅와 T-N, T-P 모두 유역형상계수(S_f)가 작은 유역임에도 불구하고 유달지체계수(ψ)가 낮은 값을 가지거나 음수를 나타내는 지점이 존재하며, 특히 유량규모가 큰시기에도 유달지체계수(ψ)가 음수를 나타내는 지점이 나타났다.

이상에서의 기존 비선형회귀곡선 유달함수 산정 방법이 가지는 한계점 요인을 정리하면 다음과 같다.

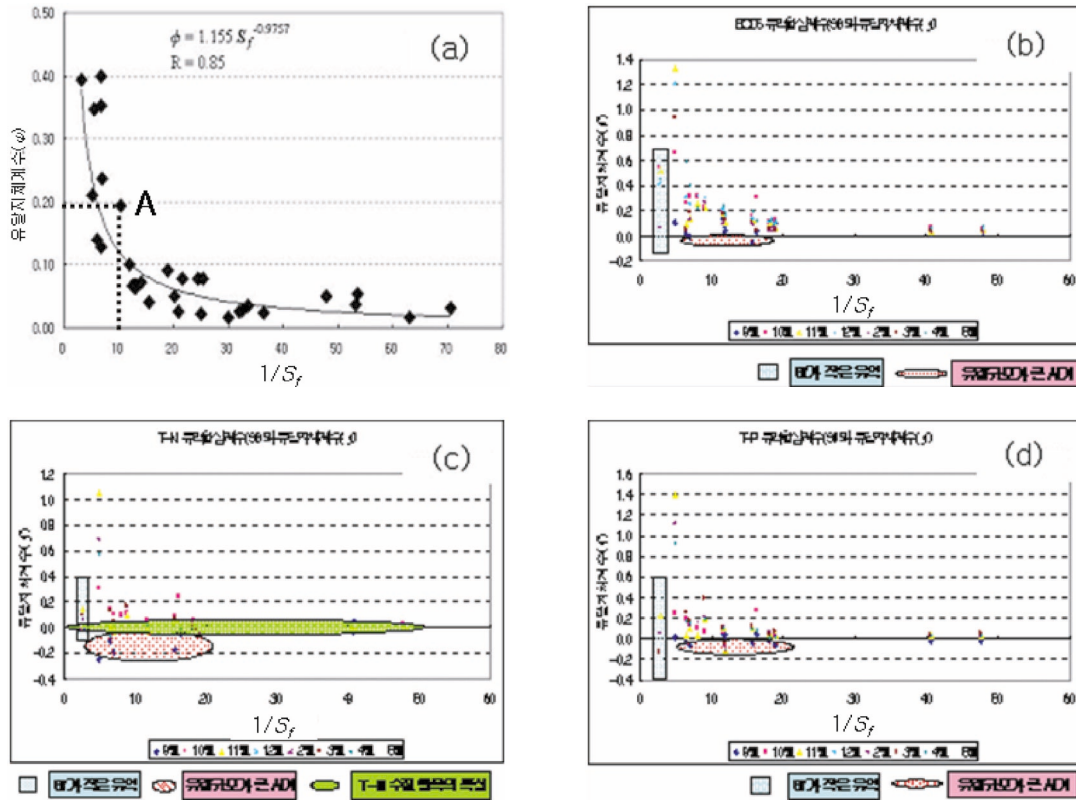


Figure 1. Relationship between S_f and ψ on BOD₅, T-N, T-P

- ① 유역형상계수(S_f)가 작은 유역임에도 불구하고 유달지체계수(ψ)가 낮은 값을 가지거나 음수를 나타내는 유역이 존재한다.
- ② 유량규모가 큰 시기의 유달지체계수(ψ)가 여러 유역에 걸쳐서 음수를 나타내고 있다.
- ③ T-N 수질항목이 BOD₅, T-P 수질항목에 비하여 많은 유역에서 유달지체계수(ψ)가 음수의 값을 나타내고 있다.

2. 유달함수 산정방법의 개선

1) 월류부하량(P_h)의 적용

유역내에 환경기초시설인 하수처리장이 있는 경우, 관거를 통해 하수처리장으로 유입되는 유입배출부하량 중 하수처리장으로 유입되지 않고 월류되는 부하량을 산정(식(7))하여 식(5)의 배출부하량(P_o)에 적용하였다(식(8)).

$$P_h = P_i \times \text{월류비} \quad (7)$$

$$\psi = -\ln\left(\frac{P_m}{P_o + P_h}\right) \times S_f \quad (8)$$

여기서, P_h : 월류부하량, P_i : 하수처리장으로 유입되는 배출부하량, 월류비는 금강 수질오염총량관리기본계획 수립(충청북도, 2003)에서 제시된 자료이다.

2) 누수부하량(P_k)의 적용

하수관거처리구역이 포함된 유역에서 유달지체계수(ψ)가 음수의 값을 나타내는 현상을 보이는 것은 하수가 관거를 통해 하수처리장으로 이송되면서 누수부하량이 발생할 경우, 손실량으로 인해 배출부하량(P_o)이 적게 산정되어 유역말단부의 실측부하량(P_m)보다 작은 값을 나타내기 때문이다.

하수처리장으로 이송되는 관거에서의 누수부하량(P_k)을 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{누수부하량}(P_k) = \text{하수처리구역 총배출부하량} - \text{하수처리장총유입량} \quad (9)$$

3) 유량가중치의 적용

기존연구에서는 유량규모가 큰 시기에 유달지체 계수(ψ)가 음수의 값을 나타내는 현상이 나타났는데, 이는 청천시 지표에 누적되었던 오염물질이 집중호우와 더불어 유출되기 때문에 유역에서 발생된 부하량보다 많은 오염물질이 유역말단부에 유입되기 때문으로 볼 수 있고 이는 강우시기에 산정된 유역별 배출부하량(P_o)이 과소하게 계산되어진 경우에 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

Figure 2는 미호천 상류의 월별 실측부하량(P_m)과 배출부하량(P_o)을 비교한 그래프이다. 유량규모가 큰 9월의 BOD₅, T-N, T-P의 배출부하량(P_o)이 실측부하량(P_m)에 비해 적게 산정된 것을 알 수 있다. 이를 개선하기 위하여 측정지점별 연평균 유량과 월평균 유량을 산정하여 식(10)과 같이 유량가중치를 산정하고 식(11)에 대입하여 개선후 월평균배

출부하량을 산정하였다. 개선후 월평균배출부하량을 식(5)의 배출부하량(P_o)에 적용하였다(식(12)).

$$\text{유량가중치} = \frac{\text{월평균유량}}{\text{연평균유량}} \quad (10)$$

$$P_{q1} = P_{q0} \times \text{유량가중치} \quad (11)$$

$$\psi = -\ln \left(\frac{P_m}{P_o + (P_{q1} - P_{q0})} \right) \times S_f \quad (12)$$

P_{q1} : 개선후 월평균배출부하량(kg/day)

P_{q0} : 개선전 월평균배출부하량(kg/day)

4) 질소(Nitrogen)의 배출특성 가중치 적용

T-N 수질항목이 BOD₅, T-P 수질항목에 비하여 유달지체계수(ψ)가 음수를 나타내는 지점이 많은 것은 질소(Nitrogen)의 배출특성에 기인한다. 농경 유역에 있어서 주된 공간분포를 지닌 경지(논·밭)에서의 시비는 유역 배출부하량에 영향을 미친다(이 등, 1993). 또한 질소(Nitrogen)의 경우 하천의 퇴적물 농도가 주변 토양의 농도보다 현저하게 작았으며 이러한 경향은 하절기에 특히 두드러지게 나타났다. 이는 강우량이 많은 하절기에는 유량에너지가 증가하여 질소 성분이 다량 탈착되어 나올 수 있기 때문인 것으로 분석된다. 반면에 인 성분은 토양의 하상 퇴적물에서 농도의 차이를 뚜렷하게 발견할 수 없었는데, 이는 인성분이 토양에 잘 흡착되는 특성을 가졌기 때문인 것으로 판단된다(강 등, 1997). 질소(Nitrogen)는 대부분 침윤으로 밭에서 이동한다. NO₃⁻와 NH₄⁺은 토양 내에서 유동성을 가지므로 침투수와 함께 쉽게 이동되며 지표유실은 시비 후 폭우가 있는 경우를 제외하면 크지 않다. 질소와는 달리 인의 경우에는 토양 속에서 유동성이 적기 때문에 인산이온들은 토양 속으로 쉽게 스며들지 않고, 토립자에 이온형태로 흡착되어 토양간극수에 용해될 수 있는 양이 항상 적다. 따라서 인의 대부분은 식물 등에 의해 소모되거나 토양침식에 의해 유사에 흡착된 상태로 하천으로 이동하게 된다. 질소(Nitrogen) 항목의 배출특성을 살펴보면 논·밭의 농경지에서의 침투수와 밀접한 연관성이 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 논에서의 침투수는 강우로 인한 지표유실이 아니면 밭에 비하여 그 유동성이 적다. 따라서 해당유역의 토지이용현황을 분석하여 밭

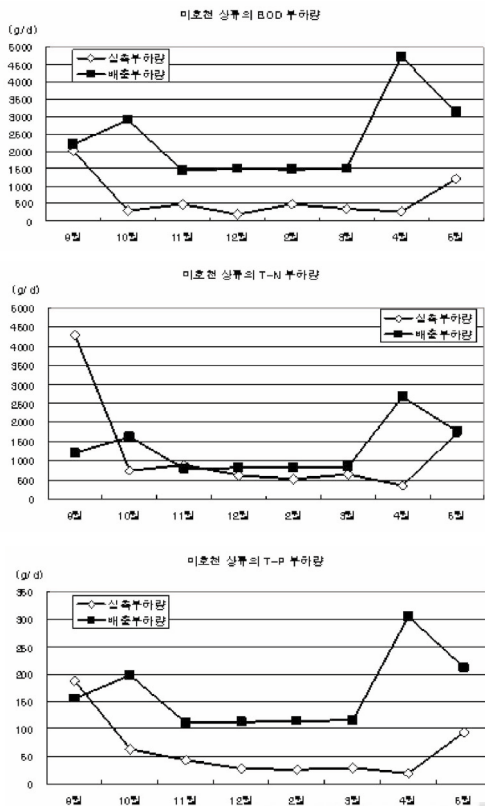


Figure 2. The pollution load observed and discharged of Miho stream

으로 이용되는 토지의 배출부하량을 산정하였다. 또 침투수에 의해 이동되는 질소의 가중치를 산정하기 위해 기저유량을 이용하였다. 미호천 유역의 3년(2001~2003년)간의 월평균 기저유량은 HSPF 유역모델의 모의 결과를 사용하였고(박, 2005), 각 월의 기저유량비는 연평균 최소 기저유량을 기준으로 2003년 월평균 기저유량을 나누어 산정하였다(식(13)). 기저유량비를 식(14)에 대입하여 개선후 발에서 배출되는 부하량을 산정하여 식(5)의 배출부하량(P_o)에 적용하였다(식(15)).

$$\text{기저유량비} = \text{월평균기저유량}/\text{연평균기저유량} \quad (13)$$

$$P_{f1} = P_{f0} \times \text{기저유량비} \quad (14)$$

$$\psi = -\ln\left(\frac{P_m}{P_o + (P_{f1} - P_{f0})}\right) \times S_f \quad (15)$$

P_{f1} : 개선후 발의 배출부하량(kg/day)

P_{f0} : 개선전 발의 배출부하량(kg/day)

5) 개선된 오염부하 유달함수 산정방법의 정립

Figure 3은 기존의 오염부하 유달함수 산정방법의 한계점 요인을 해결하기 위한 방안으로 제안된 4

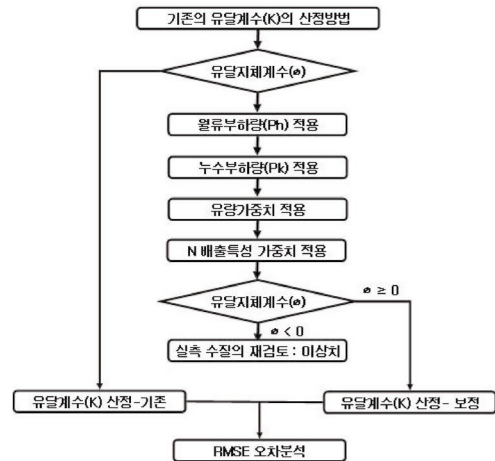


Figure 3. Innovation process for estimating K

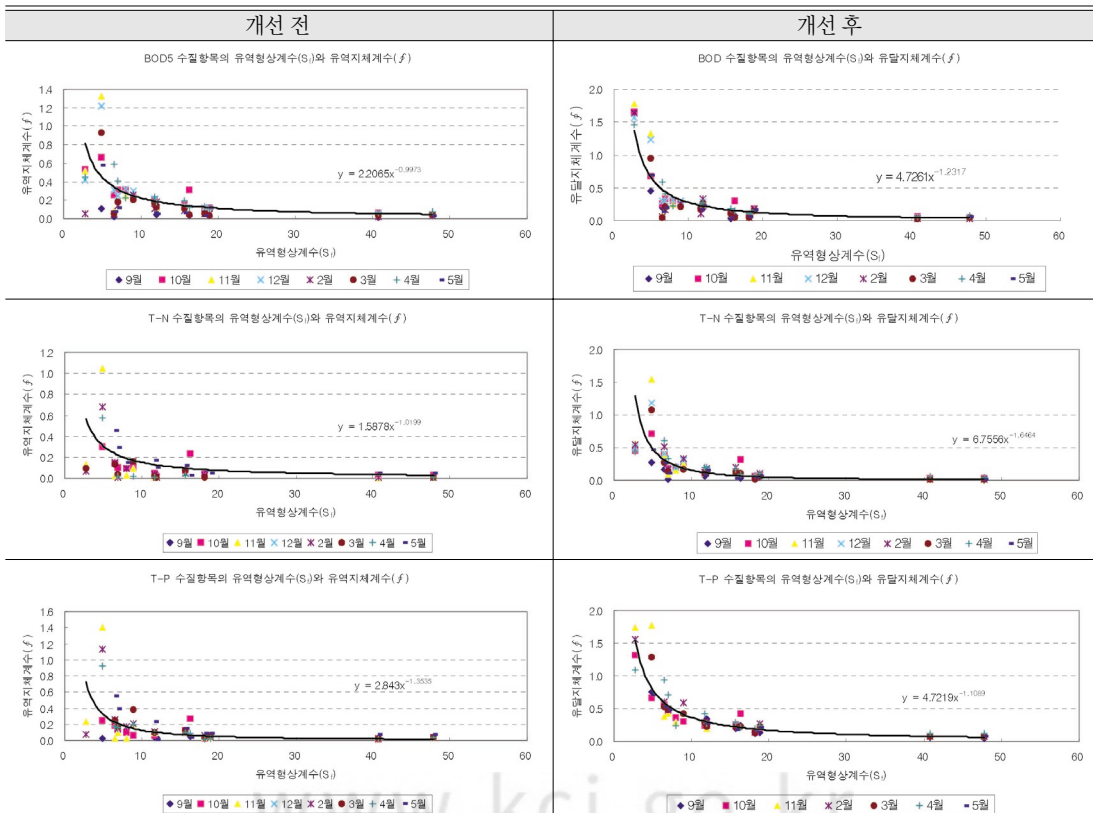


Figure 4. Relationship between S_f and ψ

가지 개선방안을 순차적인 일련의 과정을 통하여 적용시키는 것을 보여주고 있다.

3. 유달계수(K) 산정 결과의 비교

1) 비선형회귀곡선의 비교

Figure 4는 기존의 오염부하 유달함수 산정방법과 개선된 오염부하 유달함수 산정방법을 이용하여 산정

된 유달지체계수(ψ)와 유역형상계수(S_f)의 관계그래프를 보여주고 있다. 기존의 오염부하 유달함수 산정방법이 가지고 있던 한계점, 즉 유달지체계수가 음수의 값을 가지는 경우가 개선된 것을 보여주고 있다.

2) 유달계수(K)의 확률분포 분석

Figure 5는 수질항목별 유달계수의 비초과 확률 분포를 나타낸 그림이다. 좌측은 기존의 오염부하

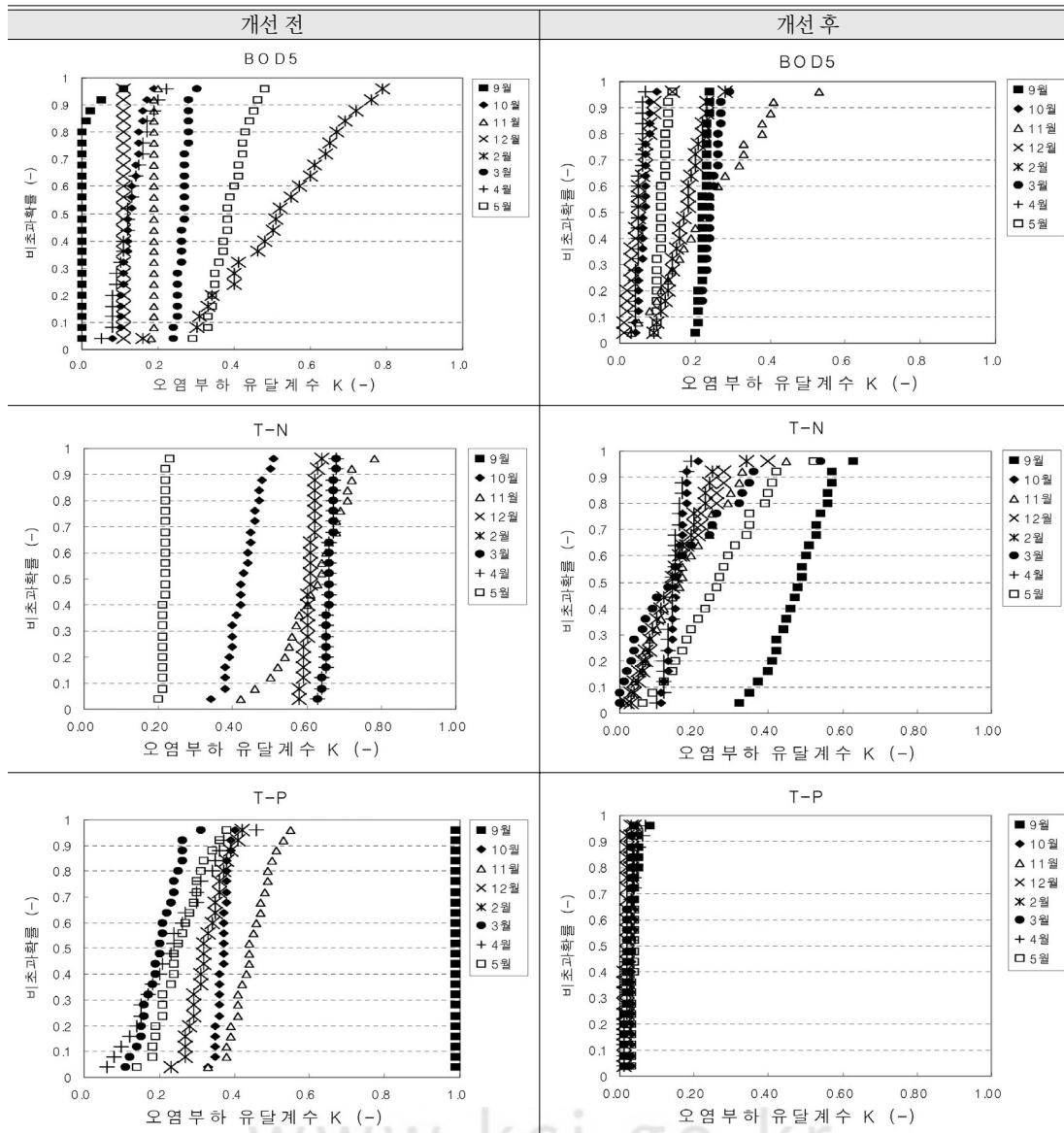


Figure 5. Non-exceedance probability of K

Table 1. RMSE of delivery coefficient (K)

지 점	BOD		T-N		T-P	
	개선전	개선후	개선전	개선후	개선전	개선후
9월	0.268	0.252	0.878	0.836	0.993	0.674
10월	0.067	0.066	0.252	0.218	0.331	0.228
11월	0.150	0.171	0.476	0.406	0.391	0.272
12월	0.067	0.066	0.447	0.357	0.288	0.191
2월	0.365	0.304	0.500	0.386	0.292	0.194
3월	0.245	0.244	0.473	0.342	0.212	0.164
4월	0.081	0.067	0.558	0.402	0.296	0.237
5월	0.292	0.250	0.230	0.216	0.209	0.133
RMSE 합	1.535	1.42	3.814	3.163	3.012	2.093

유달함수 산정방법, 우측은 개선된 오염부하 유달함수 산정방법에 의해 구해진 유달계수(K)이다. 개선전의 유달계수보다 개선후의 유달계수가 보다 안정적인 범위 내에 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

3) RMSE 비교 분석

기존의 오염부하 유달함수 산정방법을 이용한 유달계수 산정결과와 개선된 오염부하 유달계수 산정방법을 이용한 유달계수 산정결과를 비교하기 위해 수질실측지점의 실측 유달계수와의 RMSE 분석을 하였다.

$$RMSE = \sqrt{(e_1 + e_2 + \dots + e_n)/(n-1)} \quad (16)$$

e : 오차의 제곱

Table 1은 BOD₅, T-N, T-P 수질항목에 대해서 8개월동안의 RMSE 오차분석 결과를 나타낸 것이다. 개선전의 유달계수보다 개선후의 유달계수가 보다 정확한 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 오염부하 유달함수 산정방법을 실제하천에 적용하였을 때 나타나는 한계점 요인을 도출하고, 개선된 오염부하 유달계수 산정방법을 정립함으로써, 보다 정확한 유달부하량 산정 및 수질예측모형의 구축·운용을 할 수 있게 하였다. 오염부하 유달함수 산정방법이 가지는 한계점 요인을 분석하기 위해 금강수계의 지류인 미호천에 실제 적용하여 그

현상을 파악하였다. 그 한계점은 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫째, 유역형상계수(S_p)가 작은 유역임에도 불구하고 유달지체계수(ψ)가 낮은 값을 가지거나 음수를 나타내었다. 둘째, 유량규모가 큰 시기에 있어서 유달지체계수(ψ)가 음수의 값을 나타내었다. 셋째, T-N 수질항목이 BOD₅, T-P 수질항목에 비하여 전체적으로 많은 유달지체계수(ψ)가 음수의 값을 보여주었다. 이러한 한계점이 나타나는 요인은 기존의 오염부하 유달함수 산정방법이 유달계수 $K > 1$, 즉 배출부하량 < 실측부하량인 현상을 해석할 수 없기 때문에 나타난다. 한계점 요인 3가지를 해결하기 위한 방안으로 월류부하량(P_H)의 적용, 누수부하량(P_k)의 적용, 유량가중치의 적용, 질소(Nitrogen)의 배출특성 가중치를 적용하는 개선된 오염부하 유달계수 산정방법을 정립하였다. 개선된 오염부하 유달계수 산정방법을 미호천 유역에 적용한 결과 산정된 유달계수가 실제 하천에서 실측한 유달계수에 보다 가깝다는 것을 RMSE 오차분석과 확률분포분석을 통하여 증명하였다.

참고문헌

- 강선홍, 서동일, 1997, 초강천의 퇴적물 분석을 이용한 총인 및 질소의 유달특성평가, 대한상하수도학회지, 11(4), 99-109.
- 박대희, 2005, GIS-HSPF 기반 유역 오염유출 해석을 통한 하천 수질오염 영향도 평가, 충북

- 대학교 박사학위 논문.
- 배명순, 2003, 지형정보학을 이용한 오염부하유출 계수 산정, 충북대학교 박사학위 논문.
- 손명기, 서수용, 서동일, 1995, 금강 하류부의 오염 물질 발생현황과 유달율을 고려한 유입오염 부하량 산정, 대한환경공학회, 401-404.
- 이광호, 하성룡, 1993, 농경유역으로부터의 오염부하 장기유출해석, 한국수자원학회, 501-508.
- 이은실, 1998, 하천 수질 보전을 고려한 토지이용 적지분석, 충북대학교 석사학위 논문.
- 충청북도, 2005, 충청북도 금강 오염총량관리 기본 계획.
- EPA, 1987, The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E.
- ESRI, 1994, Using ARC/INFO Network/TIN/COGO/ArcStorm/ArcScan.
- ESRI, 1995, Using GRID with ARC/INFO.
- Horton, R. E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins : Hydrophysical approach to quantitative morphology, Geol. Soc. Am. Bull., 56, 275-370.
- S. R. Ha, D. I. Jung, and C. H. Yoon, 1998, A renovated model for spatial analysis of pollutant runoff loads in agricultural watershed, Water Science and Technology, 38(10), 207-214.
- S. R. Ha and M. S. Bae, 2001, Effects of land use and municipal wastewater treatment changes on stream water quality, J of Environmental Monitoring and Assessment System, 70(1-2), 135-151.
- S. R. Ha and M. S. Bae, 2003, Nonlinear regression approach to Evaluate Nutrient Delivery coefficient in Trans-Boundary Watershed with Observation Data Limited, J. of Environmental Science and Engineering, 5, 65-71.
- S. R. Ha and M. S. Bae, 2004, D.S. Kong, Nonlinear regression approach to evaluate nutrient delivery coefficient, 8th International Conference on Diffuse Pollution.
- S. R. Ha and M. S. Bae, 2005, GIS-based influence analysis of geomorphological properties on pollutant wash-off in agricultural area, Water Science and Technology, 51(3), 301-307.
- M. S. Bae and S. R. Ha, 2006, Nonlinear regression approach to Evaluate Nutrient Delivery coefficient, Water Science and Technology, 53(2), 271-279.

최종원고채택 07. 02. 13