

# 부하함수를 이용한 비점원오염 부하량의 예측

## Estimating Nutrient Loading using Loading Functions

홍 성 구\*, 권 순 국\*\*  
Hong, Seong-gu, Kwun, Soon-kuk

### Abstract

The concept of loading functions was implemented to estimate runoff and nutrient concentrations from nonpoint sources. The model was applied to a sub-watershed of Bokha watershed in Ichon, Kyonggi-Do, to investigate its limitations. Runoff prediction based on SCS-CN method was reasonably good compared to the observed, while the model overestimated rainfall runoff for large storms. Without extensive model calibrations, nutrient concentrations were lower than the observed in dry-days. Based on the analysis of the model prediction results, seasonal or time factors should be taken into account in providing input parameters such as curve numbers and nutrient concentrations from different sources.

### 1. 서 론

하천이나 호소의 수질관리를 위해서는 유역 내에서 발생하는 오염물질량과, 수계에 유입된 오염물질의 물리, 생물, 화학적인 거동을 적절히 파악하는 것이 필요하다. 유역 내에서 발생하는 오염물질량의 파악은 오염원의 배출과정에 따라서 점원과 비점원으로 나누어 수행할 수 있다. 점원과는 달리 비점원의 경우 배출 경로가 복잡하고 강우와 같은 수문현상과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 발생량의 추정이 쉽지 않다. 오염물질이 하천이나 호소 내에 유입된 이후의 변화과정, 즉 수질변화는 수

질예측 모형을 이용하여 추정한다.

하천이나 호소 수질모형의 경우 수계내에서 일어나는 물질의 거동을 중심으로 모형이 구성되어 있기 때문에 유역으로부터 유입되는 오염물질량은 입력자료로 처리하거나 비교적 단순한 방법으로 추정하게 된다. 따라서 수질 모형을 적용하는데 있어서 최근에는 유역으로부터 발생하는 오염물질량을 추정하기 위하여 비점원오염 모형을 수질예측모형과 연계하는 시도가 있어 왔다.

유역에서 발생하는 오염부하량의 추정을 위해 개발, 적용되고 있는 비점원오염모형은 유출량 추정과 관련된 수문계산, 오염물질의 변

\* 한경대학교 농촌공학과

\*\* 서울대학교 농업생명과학대학

환이나 거동을 설명하는 오염물질관련 계산 등으로 구성된다. 예를들어 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)과 같은 모형은 수문 현상을 포함하여 토지이용에 따른 오염물질의 배출량을 추정하는데 주로 이용된다(Srinivasan et al., 1996). AGNPS(Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)는 다른 모형에 비해 비교적 간단한 형태로서 폭우 사상에 대하여 총인, 총질소, COD, 유출 등을 추정할 수 있다(Young et al., 1987). 장단기 모의발생이 가능한 CREAMS(Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)는 토양유실, 유출, 영양염류, 농약 등에 대하여 적용이 가능하다(Knise, 1980). 이와 같은 대다수의 비점원오염 모형은 토지이용별 영양염류나 유기물의 잔류량과 경협식을 이용하여 유역말단에서 배출되는 부하량을 추정하는 방식을 취하고 있다. 한편 모형을 사용하지 않고 오염부하량을 추정하는 방법으로는 배출원별 단위면적당 연평균 발생량을 이용하는 원단위법이 있다. 원단위법의 경우 강우 유출관계가 고려되지 않는 문제점이 있다.

원단위법과 비점원 오염모형의 절충안으로 볼 수 있는 부하함수의 개념은 Haith와 Shoemaker(1987)에 의해서 개발, 소개된 것으로서 유출량 추정은 다른 모형들과 유사하게 미국 농무성 토양보전국의 유출곡선지수법을 이용하나, 오염물질량을 추정하는데 있어서는 토지이용별로 결정된 유출수 혹은 배출수 중의 농도를 이용하는 방법이다. 이 방법은 특히 경지나 산지의 토양 중에 존재하는 오염물질의 양이나, 변환과정을 모형 내부에서 다루지 않고, 유출수 중의 농도를 직접 이용하기 때문에 적용상 간편하다는 장점이 있다. 따라서 토지이용별 유출부하 농도를 알고 있는 경우에는 상대적으로 쉽게 오염부하량이나 오염물질의 농도를 추정할 수 있다.

본 연구에서는 Haith와 Shoemaker(1987)에 의해 소개된 부하함수의 기본 개념을 모형화하여 유역내 비점오염원으로부터 발생하는 오염물질 부하량을 추정하고자 하며, 이 과정을 통해서 부하함수 개념의 적용상 문제점과 개선방향을 제시하고, 궁극적으로 원단위 유출부하농도를 바탕으로하는 비점원오염부하량 예측모형의 개발에 활용할 수 있는 자료를 제시하고자 한다.

## II. 부하함수의 개념과 모형구성

부하함수>Loading functions)의 개념은 유역의 토지이용별로 유출량을 추정하고 대표 오염물질 농도를 고려하여 오염부하량을 계산하는 단순 누적계산법이라고 볼 수 있다. 오염물질은 용존상태와 고형/흡착상태의 두가지로 나누어서 부하량을 추정한다. 초기에 소개된 부하함수의 개념은 강우 사상에 대한 부하량을 추정하는 방법이었으나(Haith and Tubbs, 1981), 이 후에 지하수 유출 등을 고려하여 장기적인 오염부하량을 추정할 수 있도록 수정, 개선되었다(Haith et al., 1992).

모형은 크게 1) 유출곡선지수법을 이용한 유출량의 산정, 2) 토층내 물수지를 이용한 기저 유출량의 산정, 3) USLE식을 이용한 유사량의 산정, 4)오염원별 유출부하농도를 이용한 오염물질량의 산정 등으로 구성되었다.

### 1. 유출량의 산정

미 농무성 토양보전국에서 개발된 CN(유출곡선지수)법은 일 유출량을 추정하기 위한 식으로서 다음과 같이 나타내어진다.

$$Q = \frac{(R - 0.2S)^2}{(R + 0.8S)} \dots\dots\dots (1)$$

여기에서 Q=일유출량(cm)

R=강수량(cm)

S=2540/CN-25.4,

CN=유출곡선지수를 나타낸다.

유출곡선지수는 토지이용 및 토양조건에 따라서 결정되며, 선행강우조건에 따라서 다음과 같은 식에 의해서 수정된다.

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.334 - 0.01334 CN_{II}} \dots\dots\dots (2)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.4036 + 0.059 CN_{II}} \dots\dots\dots (3)$$

2. 기저유출량의 산정

불포화층과 천층대수층에서 일별 토양수분 수지는 다음과 같이 계산된다.

$$U_{t+1} = U_t + R_t - Q_t - E_t - PC_t \dots\dots\dots (4)$$

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 t=시간(일),

U=불포화층의 토양수분(cm)

S=천층대수층의 토양수분(cm)

R=강수량(cm)

Q=유출량(cm)

E=증발산량(cm)

PC=천층대수층으로 유입되는 양(cm)

G=하천으로 배출되는 기저유출량(cm)

D=심층대수층으로의 침투량(cm)

을 나타낸다.

천층대수층으로 유입되는 침투량(PC)는 토양의 보수능(U\*)을 초과하는 경우에 발생한다.

$$PC_t = \text{Max}(0; U_t + R_t - Q_t - E_t - U^*) \dots\dots\dots (6)$$

증발산량은 불포화층의 토양수분량, 피복계수, 잠재증발산량 등에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$e_t = \text{Min}(CV \times PE_t; U_t + R_t - Q_t) \dots\dots\dots (7)$$

$$PE_t = \frac{0.021 H_t^2 e_t}{T_t + 273} \dots\dots\dots (8)$$

$$e_t = 33.8639 [ (0.00738 T_t + 0.8072)^8 - 0.000019 (1.9 T_t + 48) + 0.001316 ]$$

여기에서 T<sub>t</sub> = t일의 평균온도(°C)

H<sub>t</sub> = 일조시간이다.

3. 유사량의 산정

유사량은 USLE(Universal Soil Loss Equation)에 의하여 토양유실량을 추정된 후, 유사운송비를 고려하여 산정된다. 일별 토양유실량을 추정하기 위한 USLE 식은 다음과 같다.

$$X_t = 0.132 \times RE_t \times K \times (LS) \times C \times P \times A \dots\dots (9)$$

여기에서 X<sub>t</sub> = t 일 발생한 토양유실량(ton), K = 토양의 침식성관련 계수, LS = 경사 및 경사장 관련계수, C = 작물관련계수, P = 토양보전공 관련계수, A = 면적(ha) 이다. 일 강우량을 이용한 강우 침식능 관련계수는 다음과 같이 계산된다.

$$RE_t = 64.6 a_t R_t^{1.81} \dots\dots\dots (10)$$

여기에서 a<sub>t</sub>=계절 및 지역특성에 의하여 결정되는 계수, R<sub>t</sub>=강우량(cm) 이다. 이와같은 방법으로 추정된 토양유실량에 유사운송비를 곱하여 유역에서 발생하는 유사량이 산정된다. 유

사운송비는 유역면적의 크기에 의해 결정된다.

#### 4. 오염부하량의 산정

부하함수에서 오염부하량은 용존성 물질과 고형상태의 물질로 나누어 계산하여 산정된다. 용존성 오염부하량(LS<sub>i</sub>)은 오염원별 용존성 오염물질의 농도와 유량을 이용하여 다음과 같은 식 (11)에 의하여 계산된다.

$$LS_i = 0.1 \sum C d_k Q_{kt} A_k \dots\dots\dots (11)$$

여기에서 C<sub>d<sub>k</sub></sub> = 오염원(k)의 유출수 중 용존성 오염물질의 농도(mg/ℓ)  
 Q<sub>kt</sub> = 단위면적당 유출량  
 A<sub>k</sub> = 면적(ha)이다.

고형상태의 오염물질은 토사나 각종 부유물질에 흡착되어 이송되는 것을 말한다. 부하함수에서는 토사에 흡착되어 이송되는 오염물질만을 고려한다. 흡착성 오염부하량(SR<sub>i</sub>)은 유수량(Y)과 토사 중에 흡착된 오염물질의 평균 농도(c<sub>s</sub>)를 고려하여 산정된다.

$$SR_i = 0.001 c_s Y \dots\dots\dots (12)$$

유역 내 영양물질에 대한 오염부하량을 산정하기 위해서는 강우 유출수에 의한 부하량 뿐만 아니라 토층에서 유출되는 기저유출수에 의한 부하량이 포함되어야 한다. 지하수 중의 평균 영양염류 농도와 기저유출수량을 이용하여 기저유출수에 의한 부하량은 식 (13)과 같이 계산된다.

$$DG_i = 0.1 C_g A G_i \dots\dots\dots (13)$$

여기에서 C<sub>g</sub> = 지하수 중 영양염류의 평균 농도(mg/ℓ)이다.

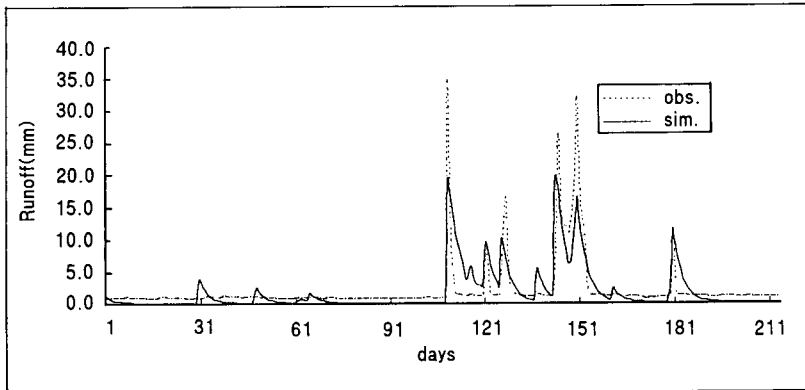
### III. 부하함수의 적용 및 적용성 검토

#### 1. 모형의 검정

앞에서 소개된 바와 같이 모형을 구성한 후 모형의 검정 및 보정 작업을 수행하였다. 모형의 검정은 모형이 산정식에 맞게 프로그래밍되었는지를, 보정은 지하수와 관련된 매개변수만을 대상으로 유역의 특성에 맞는 입력치를 결정하기 위하여 수행하였다. 입력자료를 단순화하여 유출량, 토양 유실량 및 오염부하량을 산정한 결과 프로그래밍에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 모형의 검정을 위하여 경기도 이천시 복하천 유역에 대하여 모형을 적용하였다. 유역의 면적은 76.3km<sup>2</sup>로서 산림이 63%, 논과 밭이 각각 17%, 10%, 도로나 택지 등을 포함하는 기타 지역이 10%를 차지하고 있다. Haith et al.(1992)이 제시한 매개변수의 기초자료와 토지이용현황을 바탕으로 결정한 유역 대표 유출곡선번호 등은 <Table 1>에 나타난 바와 같다. <Fig. 1>은 모형 검정결과 얻어진 유출량에 대한 모의발생치와 실측치를 나타내고 있다. 유출량이 큰 시기에 모의발생치가 다소 작게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 유역을 하나의 대표 평균 토지이용으로 간주하여 다소 작은 유출곡선 지수를 취하였기 때문으로 판단된다. 한편, 이 기간동안의 총 강수량은 973.6mm로서 실측 유량은 총 464.5mm, 모형에 의한 계산결과는 총 388.0mm로 나타났다.

<Table 1> Input parameters for model verification

Input parameters	Values
CN	65
Groundwater recession coefficient	0.2
Moisture content in shallow saturated zone	0.5 cm
Moisture content in unsaturated zone	0.5 cm
Available soil water capacity	10 cm
Cover coefficient	0.9
Daylight hours	9.0



<Fig. 1> Comparison of observed and simulated runoff for model verification.

2. 모형의 적용 및 결과 분석

부하함수의 개발 및 검정작업을 마친 후 복하천 유역 내 점오염원이 거의 없는 소유역에 모형을 적용하였다. 모형을 적용한 소유역은 산림과 논밭이 전체 면적 485.1ha 중 95.5%를 차지한다. 1998년 현재 유역 내에서 거주하는 인구수는 315명, 사육되는 가축은 없으며 산업체로는 전기제품을 생산하는 곳이 1개소로서 일일 용수량이 약 5m<sup>3</sup> 가량 되는 것으로 조사되었다. 유역 수질조사를 통해서 얻은 결과 생활계로부터 하루에 배출되는 질소와 인은 각각 1.5kg, 0.3kg으로 나타났다. 모형적용을 위한 복하천 유역 내 소유역(WS#2)의 기본 특성은 <Table 2>에 나타난 바와 같다(김, 1998; 김 등, 1998).

<Table 2> Sub-watershed of Bokha watershed for model application

Land use	Forest	78.8%
	Paddies	9.1%
	upland	7.6%
	other	4.5%
Domestic loading	BOD	10.1 kg/day
	TN	1.5 kg/day
	TP	0.3 kg/day

가. 입력자료의 구성

유역의 특성 및 검정 결과를 바탕으로 특별한 보정작업 없이 다음 <Table 3>과 같은 입력자료를 이용하여 부하함수를 적용하였다. 피복계수 등에 대한 입력치는 Haith et al.(1992)에서 제시된 자료를 이용하였고, 비점오염원별 영양염류의 농도는 홍과 권(1989), 국립환경연구원(1994)의 자료를 바탕으로 결정하였다.

나. 적용결과 및 분석

1999년도 3월 1일부터 10월 9일까지의 총 강수량은 1,513mm로서 유출량은 761.8mm로 관측되었다. 유출곡선지수법을 이용한 부하함수에 의해 추정된 유출량은 880.1mm로서 실측유량에 비해서 약간 많았다. 집중강우시에 부하함수에 의한 유출량 추정치는 실측치에 비해 매우 높게 나타나는 경향이 있었다. 9월 20일 강수량이 189.5mm일 때, 실측 유량은 59mm인 반면에 추정치는 164mm로 과다하게 나타났다. 비강우시의 유출량은 대체로 큰 차이가 보이지 않으나 강우 이후 실측유량에 비해 모형결과는 유량이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 집중강우시 유량의 과다추정

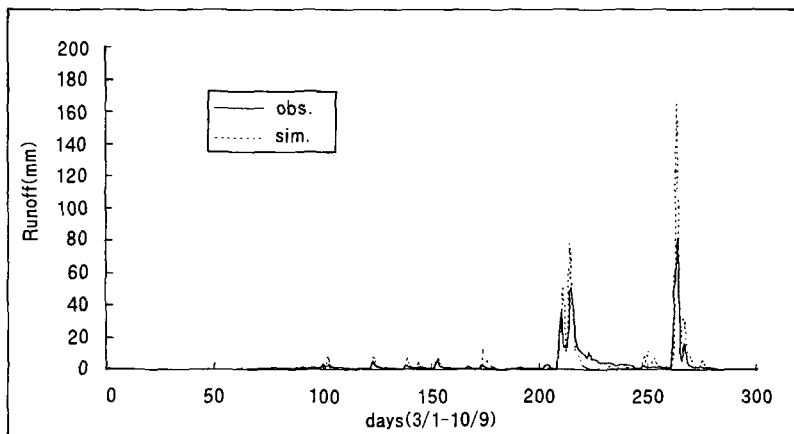
<Table 3> Input values for model application to a sub-watershed

Group	Input parameters	Input values			
		Forest	Paddies	Upland	Others
Runoff	CN	65	75	85	95
	Groundwater recession coefficient	0.2	0.1	0.2	0.01
	Moisture content in unsaturated zone	0.5	0.5	0.1	0.1
	Moisture content in shallow saturated zone	0.5	0.5	0.1	0.1
	Available soil water capacity	10.0	10.0	10.0	10.0
	Cover coefficient	1.0	1.2	0.8	0.2
	Daylight hours	9.0	9.0	9.0	9.0
Soil loss and sediment	a <sub>r</sub> (in rainfall erosivity)	0.76	0.76	0.76	0.76
	USLE K	0.3	0.4	0.25	0.1
	USLE L	0.4	0.01	0.1	0.01
	USLE S	0.4	0.01	0.1	0.01
	USLE C	0.1	0.1	0.2	0.1
	USLE P	0.01	0.1	0.2	0.01
	Area(ha)	382.4	44	36.7	21
	Sediment delivery ratio	0.14	0.3	0.3	0.3
Nutrient loading	soluble N conc. in surface runoff	0.2	1.84	0.186	0.02
	Adsorbed N conc. in surface runoff	2.0	2.0	0.6	0.08
	soluble P conc. in surface runoff	0.01	0.10	0.05	0.002
	Adsorbed P conc. in surface runoff	0.086	0.47	0.149	0.008
	soluble N conc. in ground water	0.2	0.3	0.1	0.01
	Adsorbed N conc. in ground water	0.01	0.1	0.05	0.005
	soluble P conc. in ground water	0.005	0.01	0.01	0.001
	Adsorbed P conc. in ground water	0.001	0.005	0.005	0.001

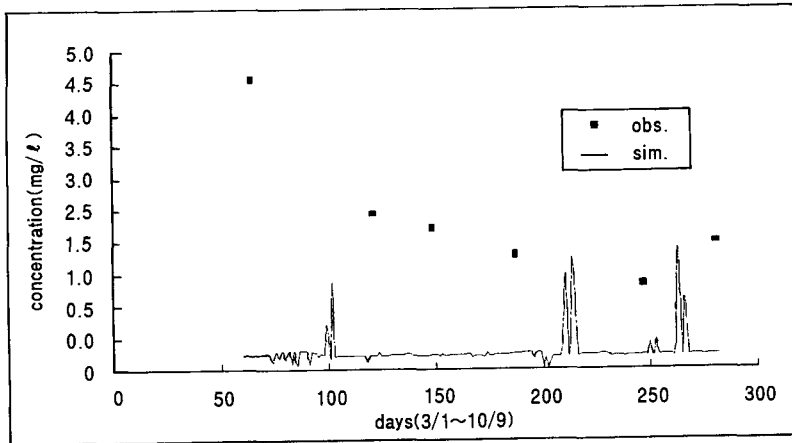
과 강우 후 유량의 급격한 감소는 유출곡선지수와 지하수 유출계수에 대한 적절한 보정으로 수정될 수 있다.

<Fig. 3>과 <Fig. 4>는 총질소와 총인에 대한 실측치와 추정치의 비교를 나타내고 있다. 추정치의 경우 강우유출이 발생하는 시기에 농도변화를 보이고 있으나 총 6회의 실측치는

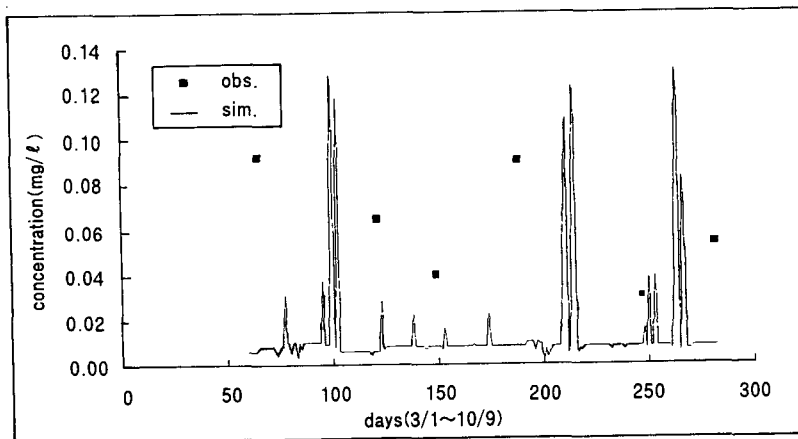
모두 비강우시 수질이기 때문에 적절한 비교는 곤란하였다. 실측된 총질소는 2mg/l 내외, 총인은 0.06mg/l 내외의 농도로써 대체로 큰 변화는 없었다. 반면에 모형에 의해서 추정된 총질소와 총인의 농도는 강우에 의한 유출량과 밀접한 관계를 보이고 있는데, 강우 유출수가 지하수에 비해서 상대적으로 높은 질소와



<Fig. 2> Comparison of observed and simulated runoff



〈Fig. 3〉 Comparison of observed and simulated total nitrogen concentration



〈Fig. 4〉 Comparison of observed and simulated total phosphorus concentration

인의 농도를 가지는 것으로 입력자료가 구성되었기 때문이다. 실측치에서는 시료채취 횟수의 부족으로 강우시 이와 같은 농도변화를 볼 수 없었다.

비강우 시기에 대해 모형이 추정한 질소와 인의 농도는 대체로 낮게 나타났는데 이는 비강우시의 유출이 오직 지하수 유출로만 이루어지고 지하수에 대한 질소와 인의 농도가 아주 낮게 입력자료로서 선정되었기 때문으로 판단된다. 평상시의 수질을 보다 정확하게 예

측하기 위해서는 지하수에 대한 수질이 조사되어 입력자료로서 제공되어야 한다. 또한 현재의 모형에서는 생활계 하수에 대해서 고려하지 않았다.

#### 다. 부하함수의 문제점과 개선방향

Haith와 Shoemaker(1987)에 의해 소개된 부하함수의 기본 개념을 단순 모형화하여 적용한 결과 적용 및 수질예측상 문제점으로는 유

출수량의 추정과 토지이용별 유출수 중의 농도 파악, 두 가지를 들 수 있다. 강우 유출량은 유출곡선지수법을 이용하고, 지하수 유출량은 토양의 보수능과 지하수 유출계수에 의해서 결정되므로 이들에 대한 보정을 통해서 유출수량의 예측은 향상될 수 있다. 토지 이용별 유출수 중의 영양염류의 농도는 용존성과 고형 또는 흡착성으로 구분하여 입력자료로서 제공되어야 하는데 이들에 대한 기초 조사가 선행되어야 부하함수의 수질예측이 보다 개선될 수 있다. 본 연구에서는 토지이용구분을 산림, 논, 밭, 그리고 기타 지역으로 나누어서 하였으나, 보다 세분화하여 자료를 구축하는 것이 바람직하다.

현재 부하함수의 개념에서는 유출곡선지수와 토지 이용별 유출수의 농도를 고정된 입력자료로서 이용하고 있으나 이들의 시간적 변화가 고려되어야 한다. 임과 박(1997)이 논에 대한 시기별로 유출곡선번호를 제시한 바와 같이 토지이용에 따라서는 유출곡선번호를 시기별로 달리해야 할 필요가 있다. 특히 토지이용별 유출수 중 오염물질의 농도는 시간에 따라서 농도가 달라지고, 시기별로 크게 다를 수 있기 때문에 이들 입력자료에 대해서는 시간적 변화가 반드시 고려되어야 한다. 이와 같은 자료를 구성하기 위해서는 토지 이용별로 장기적인 수질조사가 뒷받침되어야 함은 물론이다.

#### IV. 요약 및 결론

부하함수의 기본 개념을 모형화하여 유역내 비점오염원으로부터 발생하는 오염물질 부하량을 추정하고, 부하함수 개념의 적용상 문제점과 개선방향을 살펴보았다. 부하함수에서는 유출곡선지수법을 이용한 유출량, 토층내 물수지를 이용한 기저 유출량, USLE식을 이용한

유사량, 오염원별 유출부하농도를 이용한 오염물질량 등을 산정한다. 특별한 보정작업을 거치지 않고 모형을 적용한 결과, 유출량은 실측치와 추정치가 비교적 유사하게 나타났으나 집중 강우시 유출량 추정치가 다소 과다하게 산정되는 경향을 볼 수 있었다. 영양염류의 농도는 실측자료의 수가 많지 않아 적절한 비교를 할 수 없었으나, 비강우 시기에 질소와 인의 농도가 다소 낮게 계산되었다.

부하함수의 적용상 문제점으로는 토지이용별 유출부하농도와 같은 모형의 입력자료를 들 수 있다. 토지이용별 유출부하농도는 부하함수의 개념에서 가장 중요한 요소 중의 하나이므로 보다 세분화하여 자료를 구축하는 것이 필요하다. 부하함수의 개념을 이용하여 오염부하량을 적절히 예측하기 위한 도구로 활용하기 위해서는 유출곡선번호와 토지이용별 유출부하농도에 대한 시간적 변화를 반드시 고려해야 한다.

#### 참고문헌

1. 국립환경연구원, 1994. 수질개선시스템개발, Nier No. 94-08-423.
2. 김지훈, 홍성구, 권순국, 1998. 지리정보시스템을 이용한 SWAT 모형의 적용, 한국농공학회지 40(4), pp.67~76.
3. 김지훈, 1998. 지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
4. 임상준, 박승우, 1997. 논에 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회지 30(4), pp.379~387.
5. 홍성구, 권순국, 1989. 농경지로부터의 오염물질 유출부하특성, 한국농공학회지 31(3), pp.93~102.
6. Haith, D. A. and L. J. Tubbs, 1981.



- Watershed loading functions for nonpoint sources, ASCE Journal of the Environmental Engineering Division, 107(1), pp.121~137.
7. Haith, D. A. and L. L. Shoemaker, 1987. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients, Water Resources Bulletin 23(3), pp.471~478.
  8. Haith, D. A., R. Mandel, and R. S. Wu, 1992, Generalized watershed loading functions version 2.0 User's manual, Department of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University.
  9. Knisel, W. G. 1980. CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, USDA-ARS Report 26.
  10. Srinivasan, R., B. W. Byars, and J. G. Arnold, 1996, SWAT/GRASS Interface User's Manual, USDA-ARS, Temple, Texas.
  11. Young R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987, AGNPS, Agricultural Non-point Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool, USDA Conservation Research Report 35.