

## 유역형상과 수리특성을 고려한 경험론적 유달부하식 개발

박지형<sup>†</sup> · 공동수 · 민경석<sup>\*</sup>

국립환경과학원 한강물환경연구소

<sup>\*</sup>경북대학교 환경공학과

## Development of the Empirical Model for Estimating the Delivered Pollutant Loads Considering Geomorphic and Hydraulic Characteristics

Ji Hyoung, Park<sup>†</sup> · Dong Soo, Kong · Kyung Sok, Min<sup>\*</sup>

Han River Environment Research Center, National Institute of Environment Research

<sup>\*</sup>Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

(Received 2 October 2007, Accepted 8 November 2007)

### Abstract

This study was conducted to develop a model equation to estimate the delivered point and nonpoint pollutant loads, which are critical factor to determine the water quality of watersheds. The model equation was developed by considering various factors such as biological removal and delivered distance of pollutants, basin shape and geomorphic runoff condition. The parameters for the model equation were estimated in 3 periods, which are October to March, April to June, and July to September. As a parameter,  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ,  $\beta$ ,  $a$  and  $b$  for BOD<sub>5</sub>-delivered pollutant loads were estimated to be 0.010~0.0155, 0.051, -0.033, 0.018~0.050 and 0.93, respectively. For T-N,  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ,  $\beta$ ,  $a$  and  $b$  were estimated to be 0.0060~0.0140, 0.014, -0.02, 0.044~0.079 and 0.93, respectively. The same parameters for T-P were estimated to be 0.0160, 0.014, -0.0250, 0.015 and 1.21, respectively. The relationship,  $E^2$  (Model efficiency), between observed and calculated delivered pollutant loads showed 0.65 for BOD<sub>5</sub>, 0.81 for T-N, and 0.66 for T-P, respectively. Consequently, the model equation is effective to estimate delivered pollutant loads for TMDL.

**keywords** : Delivered pollutant loads, Empirical model equation, TMDL

## 1. 서론

하천 수질은 근본적으로 하천에 유입되는 오염물질의 양에 의해 결정됨으로 효율적인 수질관리를 위해서는 하천으로 유입되는 오염물질 부하량의 정확한 산정과 오염물질의 유출특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

하천으로 유입되는 오염물질의 양을 나타내는 지표인 배출부하량은 대체로 오염원에 대한 정보로부터 원단위 계산법으로 산출하게 되는데, 동일한 배출부하량을 갖는 지역이라도 오염물질의 유출경로, 지형조건, 시기별 수문조건 등에 따라 하천에 유입되는 부하량은 다르게 나타난다. 따라서 오염물질의 유출특성을 고려하여 하천에 유입되는 부하량을 정확하게 산출해낼 수 있는 기법이 요구된다(하 등, 2003).

한편 이러한 기법으로 실측 수질·유량조사에 의한 방법, HSPF, SWAT, AGNPS, SWMM 등 각종 전문 유역모델 적용에 의한 정량화 방법 등 다양한 방법이 제시되어 활용되어 왔다. 전(2000)은 SWMM과 유량-부하량 회귀법을 이

용한 유역의 비점오염원 산정에 관한 비교연구에서 SWMM 모델에 의한 방법이 보다 합리적이라고 제안하였으며, 임(2000)은 HSPF를 이용한 비점오염원을 산정한 바 있다. 이외에도 Mostaghini 등(1997)은 AGNPS, Tshirintzis 등(1998), Burian 등(2001)이 SWMM을 이용한 연구 등이 있다. 하지만 이러한 모형들을 이용한 오염부하량 산정 연구에서는 모델에 대한 전문적이고 고도화된 지식이 요구되고, 또한 매개변수가 복잡하고 고려할 수 있는 입력자료의 제한성 때문에 모의결과의 불확실성 등 실질적으로 적용하는 데는 보편적이지 못한 한계를 보여 왔다.

따라서 제한된 자료를 이용하여 가장 중요한 반응기작과 상수를 가지고 경험론적 유달관계식을 개발하여 이용하는 것이 간편하고 활용도를 높일 수 있을 것으로 기대된다. 그 중에는 유역에서의 배출부하량과 유달부하량과의 관계를 나타내는 유달계수 또는 자정계수를 이용하는 방법이 있다. 유달계수는 유역의 지형적 조건, 수리·수문학적 조건, 기후, 계절 등 매우 다양하고 복잡한 변수들에 의해 결정되기 때문에 수학적 해법으로 계산하기가 어렵다. 이러한 이유로 일반적인 유달계수 산정방법으로 유달부하량을 배출부하량으로 나누는 단순 부하량비 기법이 널리 사용되어 왔다(손 등, 1995).

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jpark01@me.go.kr

그러나 이러한 단순부하량비에 의한 유달계수는 유역내 자연적 환경용량 변화를 반영하지 못할 뿐만 아니라 지형 특성이 상이한 미계측 유역에 대한 유달부하량 산정에도 그 한계점을 가지고 있다.

최근에는 이러한 한계점을 극복하기 위하여 지형특성정보를 이용하여 유달계수를 산정하는 기법이 연구되기 시작하였는데, Ha 등(1998)은 몬테카를로의 시뮬레이션 방법을 이용한 오염부하의 저감계수 산정방법을 제안하였으며, 배(2003)는 유역의 토지피복 및 지형경사를 고려한 지형가중정보와 하천밀도, 평균 유달거리 및 하천형상계수의 지형특성지표를 이용하여 오염부하 유달특성함수를 개발하였고, 산정된 지형특성지표와 오염부하의 유달지체계수와와의 비선형방정식을 이용한 유달함수 산정방법을 제안하기도 하였다. 하지만 이들 방법들은 단일 유량 값만 고려하고 있어 유출량 변동에 따른 유달부하량의 변화를 파악할 수 없는 한계를 지니고 있다.

이에 본 연구에서는 현재까지 제안된 유달부하량 산정 경험식들에서 파악된 한계점을 수정 보완한 경험론적 유달부하량 산정식 개발 및 적용 가능성을 평가하였다. 즉, 자정작용의 정도는 오염물질 자체의 생물학적 분해 요인 뿐만 아니라 오염물질이 유하하는 시간에 영향을 주는 유하거리, 유역경사, 유역폭 등 유역형상, 지형적 유출조건에 따른 유속변화, 수문조건 등에 따라 달라짐으로 이들 인자를 충분히 고려한 경험식을 개발하고자 하였다. 또한 점오염원과 비점오염원의 배출경로와 배출특성이 다르고 시기별로도 달라 이에 관여하는 인자특성도 다를 것으로 예상하여 이도 함께 고려하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상 유역 개요

유달부하량 산정을 위한 경험론적 유달관계식 개발을 위해 요구되는 유역경사도, 하천연장 등 유역특성인자 및 유량, 수질 모니터링 자료를 획득하기 위한 표본유역은 팔당호 상류 유역중 남한강 및 경안천 유역으로 선정하였다. 남한강 유역면적은 12,355 km<sup>2</sup>로 팔당호 유역면적 23,618 km<sup>2</sup>의 52.3%이며, 팔당호로의 유입 유량은 57.0%로 북한강 40.5%, 경안천 2.5%에 비해 유량이 많고, BOD<sub>5</sub> 오염부하량이 62%를 상회하고 있어 팔당호의 수질에 가장 큰 영향을 미친다(공 등, 2006). 또한 유량은 적지만 수질오염도가 심하여 팔당호 수질에 역시 영향을 줄 정도의 오염부하량을 가진 경안천 유역도 함께 고려하였다. 따라서 남한강 본류로 유입되는 지천 중 오염부하량 기여율이 큰 제 1지천의 소유역, 즉 골지천, 오대천, 주천강, 평창강, 옥동천, 체천천, 달천, 섬강, 청미천, 양화천, 북하천, 흑천과 경안천 등 13개 소유역을 연구대상 표본유역으로 정하였다(Fig. 1).

### 2.2. 수질 및 유량조사

수질 및 유량조사 시기는 2004년 8월부터 2006년 12월 까지 연중 8일 간격으로 조사지점별로 평균 95회 조사하였



Fig. 1. Overview of the study watershed.

으며, 조사 위치는 상기 13개 지류 유역 출구지점에서 동시 조사하였다. 조사항목은 유량, BOD<sub>5</sub>, TN, TP이며, BOD<sub>5</sub> 등 수질항목은 수질오염공정시험방법(환경부, 2004)에 따라 분석하였다. 유량조사는 ISO 2425의 단일측정방법 중 유속-면적법(velocity-area method)을 따랐다.

### 2.3. 유역 지형인자 추출

유역의 경사도를 구하기 위해서 2000년도에 제작된 30 m × 30 m 격자 크기를 가진 전국 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하였으며 이 DEM자료를 각 유역에 적용하기 위하여 ESRI사의 ArcGIS 8.3 툴을 사용하였다. 이 연구에서 필요한 경사도와 표고분석은 ArcGIS 8.3의 Spatial Analyst 기능을 이용하여 DEM에서 추출하였다.

하천 길이는 DEM에서부터 값을 보정(Fill Sinks), 하천의 흐름 방향을 잡기위해 Flow Direction기능을 수행하고, 하

Table 1. Length, area and mean width of watershed

Watershed <sup>1)</sup>	Length (km)	Area (km <sup>2</sup> )	Mean width (km)	Slope of watershed(°)
G.J.	103.3	973	9.4	19.7
O.D.	59.6	452	7.6	20.9
J.C.	95.4	608	6.4	17.1
P.C.	149.4	1,774	11.9	18.4
Ok.D.	54.5	495	9.1	23.7
Je.C.	65.0	475	7.3	15.4
D.C.	123.0	1,614	13.1	15.0
S.G.	92.6	1,490	16.1	15.0
C.M.	60.8	596	9.8	7.3
Y.H.	32.0	182	5.7	2.8
B.H.	38.5	309	8.0	5.8
H.C.	39.2	314	8.0	15.2
G.A.	49.6	565	11.4	12.6

1) G.J. : Golljcheon; O.D. : Odeacheon; J.C. : Jucheongang; P.C. : Pyeongchanggang; Ok.D. : Okdongcheon; Je.C. : Jecheoncheon; D.C. : Dalcheon; S.G. : Seomgang; C.M. : Cheongmicheon; Y.H. : Yanghwacheon; B.H. : Bokhacheon; H.C. : Heukcheon; G.A. : Gyeonggancheon

천의 흐름 방향을 따른 하천의 누적량을 나타내는 Flow Accumulation 단계를 수행한 후에 Stream Definition, Stream Segmentation 등의 벡터화 과정을 거쳐 하천망을 추출하였다. 이러한 하천망을 추출하는데 사용한 툴은 ArcGIS의 ArcHydro이었으며, 이렇게 추출한 하천망을 지형도와의 중첩을 통해 각 수계별 대표되는 하천의 길이를 추출하였다.

### 2.4. 오염부하량 산정

오염원 및 오염부하량 산정을 위한 소유역은 물관리정보 공통유역도의 표준유역을 기준으로 구분하되 유입하천별 유량·수질측정 지점을 고려하여 재분류하였다.

오염원은 환경부의 2004년도 전국오염원조사자료를 활용하였으며, 리·동별로 조사된 오염원자료를 근간으로 8개의 공통유역(103개 표준유역)의 13개 수역별로 구분하여 산정하였다. 발생부하량 및 배출부하량은 수계오염총량관리 계획수립지침(국립환경과학원, 2006)에 따라 오염원의 유형을 생활계, 산업계, 축산계, 토지계, 양식계 등으로 구분하여 각 오염원에 발생 및 배출원단위를 적용하여 오염부하량을 산정하였다. 여기서 산정한 배출부하량을 토대로 수계오염총량관리기술지침에 따라 점·비점오염원을 재분류하여 소유역별로 각각의 배출부하량을 산정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 경험론적 유달관계식 개발

오염원으로부터 배출된 부하량이 복잡한 유달 과정을 거치면서 최종적인 목표 지점에 얼마만큼의 양이 도달되었는지를 단순화된 수식으로 표현하기 위하여, 유달과정에서 일어나는 다양한 자정작용을 개념화하여 수학적 수식으로 표현하고자 하였다. 이때 자정작용의 정도는 오염물질이 유하하는 시간, 즉 유하거리와 유역경사 및 수문조건 등에 따라 다르다. 또한 점·비점오염원별 자정계수를 이용하여 오염부하량을 산정하게 되면 목표수질 달성을 위한 오염물질 삭감량 산정시 효과적으로 활용할 수 있으므로 오염물질 삭감에 따른 하천수질 예측과정에서 점·비점오염원별 자정계수에 의한 부하량 예측은 필수적인 요소라 할 수 있다. 따라서 유달부하량은 점 및 비점오염원으로 각각 구분하여 산정할 수 있도록 하였다.

먼저, 유달시간에 영향을 미치는 인자들 중 유역경사도와 유량과의 관계로부터 아래와 같은 식을 도출하였다.

#### 3.1.1. 유역경사도 및 유량과 유달시간의 관계 유도

하천의 최대유로에 대한 등고선상의 최대 수평연장을  $l$ , 유역의 평균 경사각을  $\theta$ 라 할 때, 실제의 최대 유로연장  $l'$ 는 다음과 같다.

$$l' = \frac{l}{\cos \theta} \quad (1)$$

유역의 지도상 수평면적을  $A$ , 평균폭을  $B(=A/l)$ , 유역

말단부의 유량을  $Q$ , 유역의 단위폭당 유량을  $q(=Q/B)$ , 유역의 도상 수평면에서의 단위폭당 유량을  $q \cos \theta$ , 유역의 평균경사를  $S_0$ 라 하고, 하천의 동수반경  $R$ 과 에너지 경사  $S$ 가 각각  $q \cos \theta$ 와  $S_0$ 에 비례한다고 가정하면, Chezy의 공식 식 (2)로 부터 평균유속( $\bar{\mu}$ )은 식 (3)으로 변환될 수 있다.

$$v = C\sqrt{R \cdot S} \quad (2)$$

여기서,  $R$ : 동수반경,  $S$ : 에너지 경사

$$\bar{\mu} = c' \sqrt{qS_0} = c' \sqrt{q \cos \theta \tan \theta} = c' \sqrt{q \sin \theta} \quad (3)$$

유달부하량을  $L$ , 배출부하량을  $L_0$ , 유달시간을  $t$ 라 하고 유달과정의 물질변화가 침전, 분해, 재부상 등을 포함한 덩어리인자(lumped parameter)인 비시간유달계수  $k$ 에 의한 1차 반응을 따른다고 가정하면, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$L = L_0 e^{-kt} \quad (4)$$

유달시간  $t$ 와 하천길이  $l'$ , 평균유속  $\bar{\mu}$ 과의 관계에서 식 (1)과 식 (3)를 적용하면, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{l'_m}{\bar{\mu}} = \frac{l_m}{c' \sqrt{q \sin \theta} \cos \theta} \quad (l'_m = \frac{l'}{2} = \frac{l}{2 \cos \theta}) \quad (5)$$

여기서, 유달시간  $t$ 를 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6)으로 되고,

$$L = L_0 e^{-kt} = L_0 e^{-\frac{k/c'}{\sqrt{q \sin \theta} \cos \theta} l_m} = L_0 e^{-\frac{\alpha}{\sqrt{q \sin \theta} \cos \theta} l_m} \quad (6)$$

이를 단순화하여 정리하면 식 (7), 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$L = L_0 e^{-k' l_m} \quad (7)$$

$$k' = \frac{\alpha}{\sqrt{q \sin \theta} \cos \theta} \quad (8)$$

#### 3.1.2. 배출유형별 유달관계식

유역의 배출원은 크게 점배출원과 비점배출원으로 구분된다. 점배출부하량은 연중 일정하게 배출되는 것으로 볼 수 있으나 비점배출부하량은 유량의존성이다. 또한 점배출부하량이 연중 일정하다할지라도 이로부터 유달되는 점오염유달부하량은 유량에 따라 유속이 달라지기 때문에 유달물이 변화되므로 역시 유량의존성이다. 이와같은 전제로부터 첫째로 점오염유달부하량 산정을 위하여 점오염유달부하량을  $L_p$ , 점배출부하량을  $L_{p0}$ , 점배출물질의 비거리유달계수를  $k'_p$ 라 하면, 점유달관계식은 식 (7), 식 (8)로부터

식 (9)와 식 (10)로 같이 바꾸어 정리할 수 있다.

$$L_p = L_{po} e^{-k'_p l_m} \tag{9}$$

$$k'_p = \frac{\alpha_p}{\sqrt{qs \sin \theta \cos \theta}} \tag{10}$$

둘째로, 강우시 주로 배출되는 비점오염물질은 비점배출 원으로부터 배출된 후 분해 및 침전을 통하여 감소하지만 그 외 강우시 강수 그 자체에 포함된 오염물질, 지하수두가 올라간 상태에서 지하수로부터 유입되는 오염물질, 하도에서 재부상되는 오염물질로 인하여 증가될 수 있다. 이러한 불특정 비점오염원의 유입이 거리에 따라 1차 반응을 하고 그 계수를  $\beta$ 라 하면 식 (11)와 같이 나타낼 수 있으며, 비점오염유달부하량을  $L_n$ , 비점배출부하량을  $L_{no}$ , 비점배출물질의 반응계수를  $k'_n$ 이라 하면, 비점유달관계식은 식 (12)과 식 (13)로 정리되어 진다.

$$\frac{dL_n}{dl} = -(k'_n - \beta) L_n \tag{11}$$

$$L_n = L_{no} e^{-(k'_n - \beta) l_m} \tag{12}$$

$$k'_n = \frac{\alpha_n}{\sqrt{qs \sin \theta \cos \theta}} \tag{13}$$

이때, 비점배출부하량  $L_{no}$ 는 유량의존성이다. 즉 비가 많이 내리 유량이 증가할수록 비점배출부하량은 증가한다. 우리가 사용하고 있는 유역의 비점오염 원단위는 연평균 값이다. 연평균 비점배출부하량을  $L_{nm}$ 이라 하고, 비점배출부하량이 유역의 단위면적당 유량에 따라 대수적으로 증가한다고 가정하면 식 (14)와 같이 나타낼 수 있고, 최종적으로 비점배출부하량의 관계식은 식 (15)와 같이 정리되어 진다.

$$L_{no} = a L_{nm} \left(\frac{Q}{A}\right)^b \tag{14}$$

$$L_n = a L_{nm} \left(\frac{Q}{A}\right)^b e^{-(k'_n - \beta) l_m} \tag{15}$$

이상으로부터 유역의 말단부에 도달하는 총 유달부하량의 관계식은 식 (16)로 나타낼 수 있다.

$$L = L_{po} e^{-k'_p l_m} + a L_{nm} \rho^b e^{-(k'_n - \beta) l_m} \tag{16}$$

- $L$  : delivery load (kg/day)
- $L_{po}$  : discharged load from point source (kg/day)
- $k'_p$  : length-reaction coefficient for point load (/km)
- $l_m$  : mean length of watershed (km)

- $a$  : flow multiplier to discharged load from nonpoint source (-)
- $L_{nm}$  : annual average discharged load from nonpoint source (kg/day)
- $\rho$  : hydraulic load of watershed ( $m^3/day/ha$ )
- $b$  : flow exponent of discharged load from nonpoint source (-)
- $k'_n$  : length-reaction coefficient for nonpoint load (/km)
- $\beta$  : length-reaction coefficient for uncertain load (/km)

$$l'_m = \frac{l}{2 \cos \theta} \tag{17}$$

- $l'_m$  : real mean length of watershed (km)
- $l$  : horizontal length at contour map (km)
- $\theta$  : mean slope of watershed (-)

$$k'_p = \frac{\alpha_p}{\sqrt{qs \sin \theta \cos \theta}} \tag{18}$$

$$k'_n = \frac{\alpha_n}{\sqrt{qs \sin \theta \cos \theta}} \tag{19}$$

- $\alpha_p$  : time-reaction coefficient for point load (/day)
- $\alpha_n$  : time-reaction coefficient for nonpoint load (/day)

$$q = \frac{Q}{B} \quad (Q : m^3/s, B : km),$$

$$B = \frac{A}{l} \quad (A : km^2, l : km) \tag{20}$$

- $q$  : flowrate to unit watershed width ( $m^3/s/km$ )
- $Q$  : flowrate at the terminal of watershed ( $m^3/s$ )
- $B$  : mean width of watershed (km)
- $A$  : watershed area at contour map ( $km^2$ )

$$\rho = \frac{Q \cos \theta}{A} \quad (Q : m^3/day, A : ha) \tag{21}$$

### 3.2. 매개변수 추정

3.1절에서 제안한 경험식인 식 (16)을 이용하여, 유달부하량 산정을 위한 각각의 매개변수  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ,  $\beta$ ,  $a$ , 및  $b$ 를 다음과 같은 사항을 고려하여 산정하였다.

강우시 산림 등에서 배출되는 비점오염물질인 입자상 물질 및 부식물질(humic substance) 등은 주로 난분해성 물질들로, 이들 물질이 증가함에 따라 생분해성은 낮아지게 된다(김 등, 2005). 따라서 비점오염물질의 변화는 유달과정에 주로 침전에 의해 좌우되며, 물질의 침전에 대한 온도 의존성은 낮다. 따라서 비점오염물질의 반응계수  $\alpha_n$ 과  $\beta$ 는 연중 일정한 것으로 가정한다. 또한 비점배출부하량의 유량

계수  $b$ 는 같은 오염물질에 대해서는 동일한 것으로 가정한다. 그러나 비점배출부하량의 유량승수  $a$ 는 시기에 따라 다를 수 있다. 일반적으로 동일한 유량이라도 여름철 몬순기 이전 봄철의 오염물질 농도는 몬순기 이후 가을철의 오염물질 농도와 큰 차이를 보인다. 이는 같은 유량이라도 가을철에는 여름철 집중강우 이후 지하수두가 높아진 상태에서 지하수의 하천유입으로 희석효과가 나타날 뿐만 아니라, 유역의 비점오염원에서 여름철 집중강우시 오염물질이 많이 세척(washout)되었기 때문이라 할 수 있다.

이러한 가정으로부터, 점 및 비점오염 유달부하량 산정을 위한 매개변수  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ,  $\beta$ ,  $a$  및  $b$ 의 추정치는 각 유역에서의 유량자료, 실측 유달부하량, 점·비점 배출부하량, 유역면적, 유역폭, 하천연장, 유역경사 등의 변수를 이용하여 각각 선형회귀를 통하여 구하였다(Table 2~4).

**Table 2.** Parameter for estimation of delivery load on BOD<sub>5</sub>

Season	$\alpha_p$	$\alpha_n$	$\beta$	$a$	$b$
Oct -Mar	0.0155	0.051	-0.033	0.043	0.93
Apr-Jun	0.0100	0.051	-0.033	0.050	0.93
Jul -Aug	0.0112	0.051	-0.033	0.018	0.93

**Table 3.** Parameter for estimation of delivery load on on T-N

Season	$\alpha_p$	$\alpha_n$	$\beta$	$a$	$b$
Oct-Mar	0.0068	0.014	-0.02	0.076	0.93
Apr-Jun	0.0140	0.014	-0.02	0.079	0.93
Jul-Aug	0.0060	0.014	-0.02	0.044	0.93

**Table 4.** Parameter for estimation of delivery load on T-P

Season	$\alpha_p$	$\alpha_n$	$\beta$	$a$	$b$
Oct-Mar	0.0160	0.0330	-0.0250	0.015	1.21
Apr-Jun	0.0160	0.0330	-0.0250	0.015	1.21
Jul-Aug	0.0160	0.0330	-0.0250	0.005	1.21

### 3.3. 유달부하량 적합도 분석

실측 유달부하량과 유달관계식에 의해 산정한 유달부하량의 적합도 평가를 위하여 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 다음의 모델검정계수식을 적용하여 판단하였다.

$$E^2 = \frac{\sum(\bar{C}_o - C_o)^2 - \sum(C_s - C_o)^2}{\sum(\bar{C}_o - C_o)^2} = 1 - \frac{\sum(C_s - C_o)^2}{\sum(\bar{C}_o - C_o)^2} \quad (22)$$

$E^2$  : Model efficiency

$\bar{C}_o$  : Mean of observed value

$C_o$  : Observed value

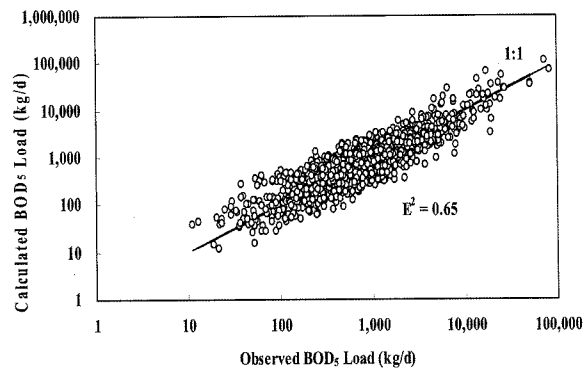
$C_s$  : Simulated value

위 식은 모의치와 실측치간 차의 평방합과 실측치와 산술평균 실측치간 차의 평방합을 고려한 것으로, 분모와 분자의 차수가 같기 때문에  $\chi^2$ 법처럼 단위에 따른 차이가

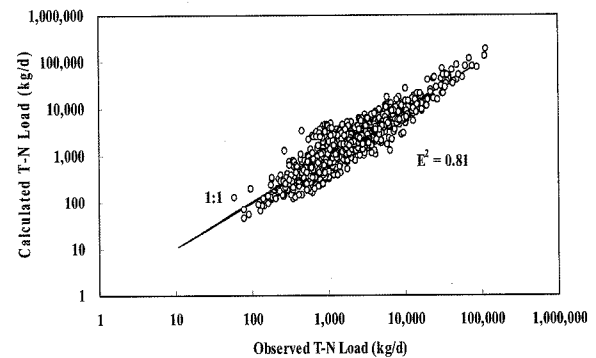
발생하지 않을 뿐만 아니라 모의치와 실측치가 1:1로 대응하지 않는 경우 결정계수( $R^2$ )가 높더라도 낮은 값을 보이기 때문에 모의치와 실측치의 적합도를 검정하는데 효과적이다. 즉 결정계수( $R^2$ )는 단지 무작위 오차만을 평가하는 것으로서 오차의 정도를 나타내지는 못한다.

실측 유달부하량과 유달관계식에 의해 산정한 유달부하량의 관계를 검토한 결과  $E^2$ 값은 BOD<sub>5</sub> 0.65, T-N 0.81, T-P 0.66으로 전반적으로 모의치와 실측치의 적합도는 만족할만한 수준을 보였다(Fig. 2).

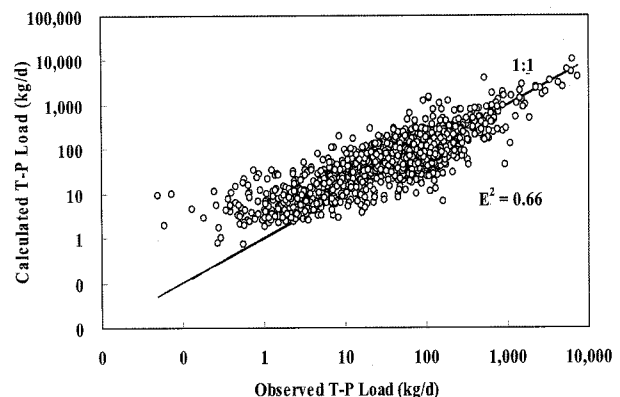
앞서의 오염물질별 실측 유달부하량과 계산된 유달부하량의 적합도를 검토 후, 달천 등 13개 소유역의 실측 유달부하량과 유달관계식을 통해 모의한 결과값을 나타내었다(Table 5, Fig. 3~5).



(a) BOD<sub>5</sub>



(b) T-N

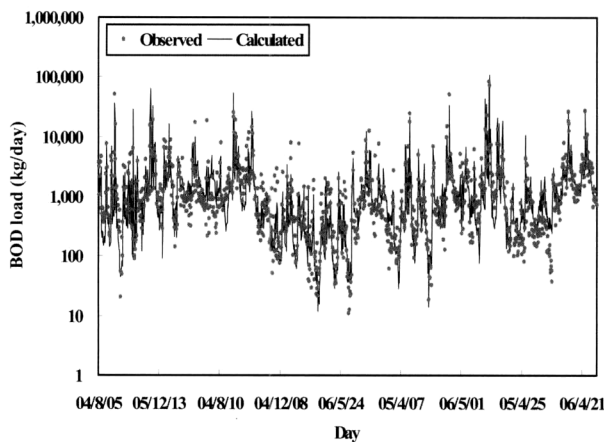


(c) T-P

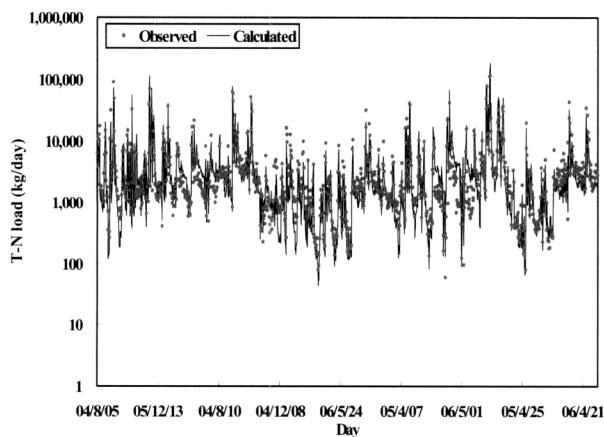
**Fig. 2.** Comparison between observed and calculated BOD<sub>5</sub>, T-N and T-P load.

**Table 5.** Observed and calculated delivery loads on watershed

Water shed	Observed load (kg/d)			Calculated load (kg/d)		
	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P
G.J.	2,155	6,004	234	1,734	5,035	172
O.D.	793	2,741	67	420	1,368	33
J.C.	1,150	3,353	84	1,118	2,945	105
P.C.	4,458	11,122	237	5,096	13,170	429
Ok.D.	423	1,149	10	262	962	25
Je.C.	1,259	3,384	132	1,392	2,550	92
D.C.	2,681	4,952	149	3,026	6,791	205
S.G.	3,254	6,984	282	3,013	6,876	255
C.M.	2,127	2,816	157	1,970	5,316	221
Y.H.	628	962	45	428	1,209	41
B.H.	1,585	3,032	157	2,008	3,897	188
H.C.	511	1,256	15	769	1,102	42
G.A.	3,221	4,964	241	2,911	3,593	187

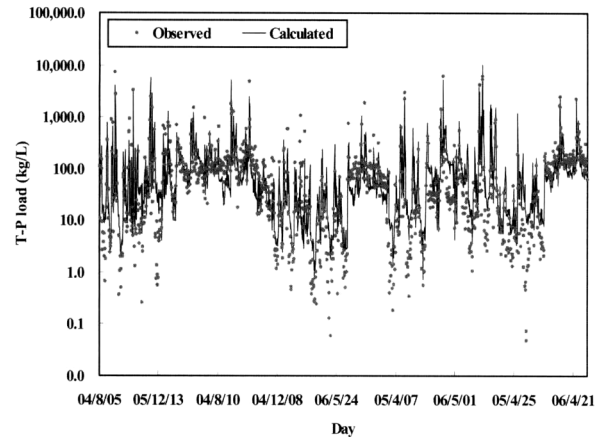


**Fig. 3.** Observed vs. calculated BOD<sub>5</sub> load in the calibration period.



**Fig. 4.** Observed vs. calculated T-N load in the calibration period.

오염물질별 유달부하량은 실측값과 대체로 유사한 결과를 나타내고 있으며, 연간 유달부하량 변화도 일치하는 경향을 나타내고 있어 계산값이 실측값을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.



**Fig. 5.** Observed vs. calculated T-P load in the calibration period.

### 4. 결론

본 연구는 오염원, 유역형상, 기상·수문현황 등 유역 특성이 서로 다른 유역에서의 제한된 정보자료로부터 하천에 유입되는 오염부하량을 정확하게 산출해 낼 수 있는 경험론적 유달관계식 산정 및 그 적용을 목적으로 수행하였다.

연구대상 범위는 팔당호의 수질, 수리, 수문 등 수환경에 가장 큰 영향을 미치는 팔당호 상류 남한강 유역의 달천 등 12개 하천과 경안천 등 13개 주요 유입하천으로 하였으며, 이는 남한강 및 경안천 수계 전체 유역면적의 80%에 해당한다. 연구기간은 2004년 8월부터 2006년 12월까지 2년 5월에 걸쳐 남한강 수계 12개 주요 유입하천 및 경안천 등 13개 소유역에 대해 유역 출구에서 유량 및 수질조사를 연중 8일 주기로, 지점당 평균 95회 조사 분석하고 유달부하량 산정을 위한 유달관계식 개발과정에서 얻어진 각각의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하천 수질변화를 정량적 측면에서 파악하기 위하여 본 연구에서 제안한 유달부하량 산정 예측 수식은 자연 현상을 개념화하여 단순화된 수학적인 수식으로 표현하였으며, 아래와 같은 고려인자와 이론 및 가정을 포함하고 있다.
  - 자정작용의 정도는 오염물질 자체의 생물학적 분해 요인 뿐만 아니라 오염물질이 유하하는 시간에 영향을 주는 유하거리, 유역경사, 유역폭 등 유역형상, 지형적 유출조건의 변화에 따른 유속, 수문조건 등에 따라 달라짐으로 이들 인자를 고려하였으며, 점오염원과 비점오염원의 배출경로와 배출특성이 다르고 시기별로도 달라 이에 관여하는 인자특성도 함께 고려하여 점 및 비점유달부하량을 각각 산정할 수 있도록 하였다.
  - 유역경사도와 유량에 따른 유달시간과의 관계를 정의하기 위하여 Chezy의 공식에 의한 평균유속( $\bar{u}$ ) 인자를 이용하여 실제 계산하기 어려운 비시간유달계수  $k$  대신에, 적용하기 쉬운 비거리유달계수  $k'$ 로 변환 사용하였다.
  - 비점오염물질은 분해성이 매우 낮아 유달과정에서 주

로 침전에 의해 좌우되며, 물질의 침전에 대한 온도의존성은 낮다. 따라서 비점오염물질의 반응계수  $\alpha_n$ 과  $\beta$ 는 연중 일정한 것으로 가정하였다.

- 비점배출부하량의 유량계수  $b$ 는 같은 오염물질에 대해서는 동일한 것으로 가정하였다.
  - 비점배출부하량의 유량승수  $a$ 는 시기에 따라 다를 수 있다. 즉, 일반적으로 동일한 유량이라도 여름철 몬순기 이전 봄철의 오염물질 농도는 몬순기 이후 가을철의 오염물질 농도와 큰 차이를 보이는 현상을 고려하였다.
- 2) 이에 따라 유달관계식 매개변수는 10월에서 3월, 4월에서 6월, 7월에서 9월로 각각 나누어 시기별로 산정한 결과, BOD<sub>5</sub> 유달관계식은  $\alpha_p$ 가 0.010~0.0155,  $\alpha_n$ 는 0.051,  $\beta$ 는 -0.033,  $a$ 는 0.018~0.050,  $b$ 는 0.93, T-N 유달관계식 매개변수는  $\alpha_p$ 가 0.0060~0.0140,  $\alpha_n$ 이 0.014,  $\beta$ 는 -0.02,  $a$ 는 0.044~0.079,  $b$ 는 0.93, T-P 유달관계식 매개변수는  $\alpha_p$ 가 0.0160,  $\alpha_n$ 이 0.0330,  $\beta$ 는 -0.0250,  $a$ 는 0.015,  $b$ 는 1.21로 각각 산정되었다.
  - 3) 실측 유달부하량과 회귀식에 의해 산정한 유달부하량의 관계를 검토한 결과, E<sup>2</sup>(Model efficiency)값은 BOD<sub>5</sub> 0.65, T-N 0.81, T-P 0.66의 적합도를 나타내어 오염물질별 유달부하량은 실측값과 대체로 유사한 결과를 나타내었으며, 연간 유달부하량 변화도 일치하는 경향을 나타내고 있어 모의값이 실측값을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.
  - 4) 이상과 같이 유달부하량 산정을 위해 개발한 유달관계식은 유역특성 및 배출특성에 따른 시기별 유달 오염부하량 변동에 대해 합리적으로 산정하고 있으며, 현재 오염총량관리를 위한 유달오염부하량 산정에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

공동수, 박지형, 이형진, 강태구, 김병익, 수역별 수질/수량 관측망 운영 및 평가, 한강물환경연구소 (2006).

국립환경과학원, 수계오염총량관리기술지침 (2006).

김범철, 탁수로 인한 수중생태계 영향조사 및 저감대책 제시, 한강수계관리위원회 (2005).

배명순, 지형정보학을 이용한 오염부하 유달계수 산정, 박사학위논문, 충북대학교 (2003).

손명기, 서수용, 서동일, 금강 하류부의 오염물질 발생현황과 유달을 고려한 유입오염부하량 산정, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회논문집, pp. 401-404 (1995).

임상준, HSPF 모델을 이용한 비점오염부하량 산정에 관한 연구, 석사학위논문, 충남대학교 (2000).

전지홍, SWMM과 회귀법에 의한 유역의 오염부하량 산정 비교, 석사학위논문, 건국대학교 (2000).

하성룡, 배명순, 수질모델링을 위한 수리·수문 인자분석, 한강수계관리위원회 (2003).

환경부, 수질오염공정시험방법 (2004).

Burian, S. J., Streit, G. E. and Brown, M. J., Modeling the Atmospheric Deposition and Stormwater Washoff of Nitrogen Compounds, *Environmental Modeling & Software*, **16**, pp. 467-479 (2001).

Ha, S. R., Jung, D. I. and Yoon, C. H., A renovated model for spatial analysis of pollutant runoff loads in agricultural watershed, *Water Science and Technology*, **38**(10), pp. 207-214 (1998).

Mostaghini, S., Park, S. W., Cook, R. A. and Wang, S. Y., Assesment of Management Alternative on a Small Agricultural Watershed, *Water Research*, **31**(8), pp. 1867-1878 (1997).

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, **10**, pp. 282-290 (1970).

Tshihrintizis, V. A. and Hamid, R., Runoff Quality Prediction of Small Urban Catchments Using SWMM, *Hydrological Processes*, **12**(2), pp. 311-329 (1998).