

## 무계측 소옥천 유역에서의 오염부하량 추정방법

### Estimation Methods for Inflow Pollutant Loads in Ungaged So-okcheon Watershed

김 태 철\*, 박 종 봉\*\*, 김 대 식\*  
Kim, Tai-cheol, Park, Jong-bong, Kim, Dae-sik

#### Abstract

Considering complexity of industry and environmental surroundings of Geum river basin, factors of environmental pollution are very complicated and multi-changed. It is very needed to survey the discharge, water quality change and pollutant loading from upstream watershed. The relationships between the discharge and the inflow pollutant loads of BOD, TN, and TP in So-okcheon of the upper Geum river in 2000 were investigated in this study. Daily streamflow of So-okcheon needed to compute the pollutant loads was estimated by the DAWAST model, because there is no measured data of the discharge. From the flow functions of the inflow pollutant loads using the DAWAST model, the inflow pollutant loads of 258,200kg/yr for BOD, 878,127kg/yr for TN, and 54,496kg/yr for TP were estimated, respectively.

#### 1. 서 론

소옥천 유역을 포함한 상류유역으로부터 유입되는 오염물질로 인하여 대청호의 부영양화 현상과 조류발생이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 환경정보 시스템과 연계한 유역하천의 종합수질관리기법의 개발이 요구되며 하천 유출량과 오염부하량 측정은 필연적이지만 지금까지는 유량조사와 수질조사가 별개로 진행되어 비효율성이 문제점으로 지적되어 왔다.

오염부하-유량과의 관계는 최근 급격히 대두되고 있는 수질오염문제로 연구대상이 되고 있다. 신과 윤(1993)은 도시 소유역에서 유출과 비

점오염물질 배출간의 상관관계를 수립하여 오염물 배출량을 산정하였고, 엄과 권(1996)은 탱크모형을 이용한 일별 오염부하량 산정 연구에서 오염부하량 산정식을 이용하여 탱크모형으로부터 구한 표면 유출, 중간 유출, 지하수 유출에 각각 축적되어 있는 오염물질이 유출과 함께 배출된다는 개념을 적용한 바 있다. 전과 윤(1999)은 SWMM(Storm Water Management Model) 모형을 이용하여 유역의 오염부하량을 산정하였고, 김 등(2000)은 농촌유역 하천에서 관개기와 비관개기의 유출과 오염부하량의 관계에 대한 연구를 하였다.

그러나, 소옥천 유역에 대한 유달 오염부하량의 추정 (금강수질검사소, 1996)에서는 오염물

\* 충남대학교 농업생명과학대학 (dawast@cnu.ac.kr)  
\*\* (주) 삼육 엔지니어링

키워드 : 비점오염, 무계측하천, 오염부하량, 대청댐유역

질 원 단위 방법 또는 월별로 수차례 유량과 수질을 측정하고 이를 산술 평균하는 방법으로 대청호로 유입되는 유달 오염부하량을 추정하고 있지만 합리적이지 못한 것으로 생각된다.

따라서, 이 연구에서는 지금까지 무계측 소하천에서 관행적으로 행해지는 평균 개념의 문제점을 개선하기 위하여, 수질과 유량과의 관계식과 DAWAST(DAILY Watershed Streamflow) 모형으로 추정된 일 유출자료를 이용함으로써 유달 오염부하량을 보다 합리적으로 추정하고자 하였다.

## II. 대상 유역 및 분석 방법

### 1. 대상유역의 개요

충북 옥천군에 위치한 소옥천은 Fig. 1과 같이 금강상류에 위치하며 옥천이라는 농촌 소도시를 관통하여 대청호로 유입되고 있다. 실측한 수질과 유량자료로 소옥천 유역의 유달 오염부하량-유량관계식을 유도하였고, 수집한 수문, 지형 및 강우량 자료로부터 일 유출량을 추정하였다.

### 2. 분석 방법

#### 가. 유달오염부하량 산정방법

일정 수역에서 유달 오염부하량을 산정하기

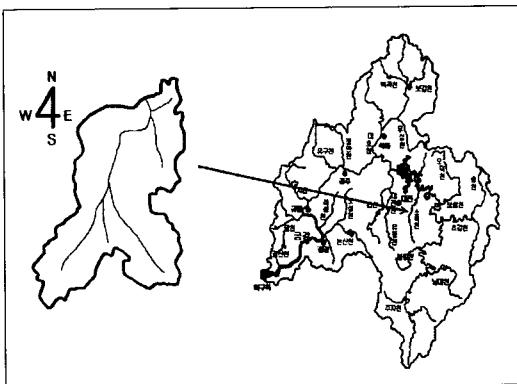


Fig. 1. Location map of So-okcheon watershed

위하여 사용되는 방법에는 오염원별 오염물질 원 단위 방법, 유량과 수질을 실측하여 직접 산정하는 방법, 평균유량과 평균수질을 이용한 방법 등이 있다. 실측자료를 이용한 직접비교 방법은 많은 인력과 시간을 요하기 때문에, 환경부나 공공기관에서는 유역에서의 유달 오염부하량을 산정할 때, 오염원별 오염물질 원 단위 방법을 적용하거나, 또는 간단하게 매월 수 차례 유량과 수질을 측정하여 평균 유량과 평균 수질로 연간 유달 오염부하량을 관행적으로 산정하고 있다. 특히 대부분 소하천에서 실제로 많이 적용되고 있는 방법이다.

#### 1) 원 단위 방법

오염원별 오염물질 원단위는 단위시간 당 위오염인자 (인구수, 가축수, 토지면적 등)가 발생하는 오염물질량을 말한다. 원 단위는 동일한 오염원이라도 생활양식, 축산형태, 경작방법, 지리적 특성 및 기상특성 등에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있으므로 정확한 현지조사를 통하여 원 단위를 산정하는 것이 바람직 하지만 많은 시간과 인력이 소모되기 때문에, 보통 간단히 오염원별 오염물질 원 단위를 적용한다.

#### 2) 일평균 수질과 일평균 유량을 이용한 방법

평균 개념으로 유량과 수질로부터 구할 경우 측정회수가 많은 경우에는 실측자료를 이용한 직접 비교하는 방법과 유사한 모의치가 나올 수 있다. 그러나 월 2~3회 측정으로 월·일 평균 개념을 적용할 경우 오차가 커진다는 단점이 있다. 각 월의 유달오염부하량식은 식 (1) 과 같다.

$$\text{월 유달 오염부하량(kg/month)} = \text{월 일평균 수질(mg/l)} \times \text{월 일평균유량(m}^3\text{/day)} \times \text{월 일수} \times 10^3 \quad (1)$$

#### 3) 유달 오염부하-유량 관계식을 이용한 방법

실측자료로 유달오염부하량-유량의 관계식을 유도하고 추정한 일 유출량 자료를 통해 대상유

역에서의 유달 오염부하량을 추정한다. 유달 오염부하량과 유량의 관계식은 식(2)와 같다.

$$Y = aQ^b \quad (2)$$

여기서, Y = 유달오염부하량 (kg/day)

Q = 유량 (m<sup>3</sup>/s), a, b = 상수이다.

나. 일 유출량 추정 모형

일유출량 추정에 DAWAST 모형을 적용하였으며, 기본개념은 다음과 같다. 토양층을 지표면, 불포화층과 포화층의 3개 저수층으로 단순화하고 유역에 강우가 있으면 지표면 저류에 의한 초기손실이 이루어지고, 강우가 계속되어 초기손실량보다 크게 되면 침투와 함께 표면유출이 일어난다. 침투된 토양수분으로 상부 불포화 토양층의 토양수분은 증가하고 침투가 계속되어 토양수분이 불포화층의 포장용수량을 초과하면, 중력에 의하여 하부 포화 토양층으로 심층 침투가 이루어져 하부 포화층의 토양수분도 증가하게 된다.

이 포화층의 토양수분이 일정한 값 이상이면 불포화층과 포화층 사이에서 중간유출이 일어난게 된다. 무강수기에는 불포화층에서는 증발산에 의하여 토양수분이 감소하고, 포화층에서는 기저유출로 토양 수분이 누출되는 것으로 강우-유출의 유역 수문반응을 Fig. 2와 같이 개념화하였다.

유출자료가 있는 대상지점에서는 DAWAST 모형의 기본모형인 최적화 모형을 적용하고, 무계측 수문지점에서는 50여개 수문지점에서 적용하여 매개변수를 결정하고 지형인자, 토양인자, 토지이용인자, 수문지질인자 등 유역특성인자로부터 구한 매개변수로 예측방정식을 유도한 일반화 모형을 적용한다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 대상유역의 오염원 현황

소옥천 유역의 토지이용 현황은 Table 1, 점오염원 현황은 Table 2와 같다. 오염부하량 원 단위는 단위시간 당 단위오염인자가 발생하는 오

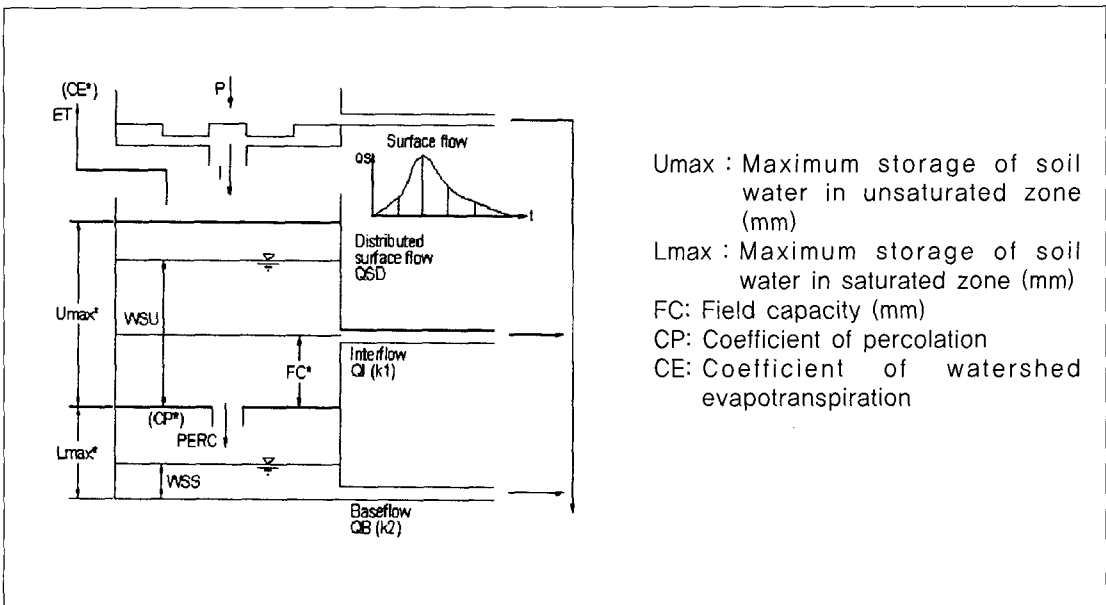


Fig. 2. Conceptual structure of the DAWAST model

염물질량을 말하며, 현지조사를 통하여 원 단위를 산정하는 것이 바람직하지만 시간과 인력 등 많은 비용이 소요된다.

유입량이 대청호 부영양화에 영향이 큰 소옥천에서의 BOD, TN, TP 유달 부하량과 유량의 관계를 구명하기 위해 필요한 수질자료는 국립환경연구원 금강수질검사소와 공동으로 측정하여 분석한 수질자료를 사용하였다. Fig.3과 Table

4 는 옥천군 소옥천 지점의 2000년 3월~11월 사이에 매월 평균 3회씩 측정한 수질자료이다.

## 2. 소옥천의 일 유출량 추정

대상지점 소옥천에서 관측된 유출자료가 없기 때문에 DAWAST 일반화 모형을 적용하여 일 유출량을 추정하였다. 14개 매개변수인 유역특성인

Table 1. Land use in So-okcheon watershed (unit : km<sup>2</sup>)

Dry field	Paddy field	Forest	Ground plot	Others	Total
18.55	17.81	120.02	14.86	14.26	185.5

Table 2. Point pollution source of So-okcheon watershed (1998)

Items		Content
Population (person)		44,873
Livestock (head)	Cattle · Horse	4,187
	Pig	3,531
	Poultry	9,866
	Others	564
Factory	Waste water (m <sup>3</sup> )	2,773

Table 3. Unit loading factor of pollution source

Pollution source		Item	BOD	TN	TP
Population (g/person · day)			51	7.75	1.63
Livestock (g/head · day)	Cattle · Horse		517.15	112.07	37.92
	Pig		109	27.7	12.24
	Poultry		5.23	1.088	0.406
	Others		16.72	9.49	1.43
Land (kg/km <sup>2</sup> · day)	Dry field		2.3	9.44	0.24
	Paddy field		1.59	6.56	0.61
	Ground plot		8.59	13.69	2.1
	Forest		0.93	2.2	0.14
	Others		0.96	0.759	0.027
Waste water (g/m <sup>3</sup> )	Application by unit loading factor of a type of industry				
Fish farm (g/m <sup>2</sup> · day)	Flowing water		15.31	2.99	0.83
	Enclosed		86.0	10.52	5.37

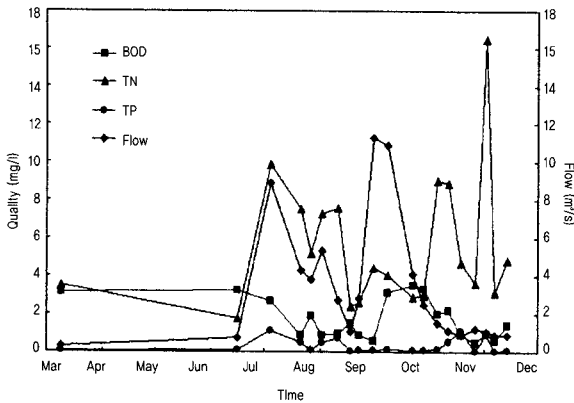


Fig. 3. Change of Water quality during the observed period (2000, So-okcheon)

불연속으로 20회 걸쳐 측정된 실측치를 비교한 것이고, 이를 실측치가 있는 날짜의 실측치와 추정치에 대하여 산포도로 나타낸 것이 Fig. 5(b)이다. 관측 일 유출량과 추정 유출량의 비교는 Table 5와 같고 무계측 하천에서 DAWAST 일반화 모형을 적용한 결과가 R<sup>2</sup>로 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 유량자료가 없는 소옥천 유역에서 유달오염부하량 산정에 DAWAST 일반화 모형을 적용하는 것이 가능함을 알 수 있다.

### 3. 소옥천 유역의 유달 오염부하량

오염부하량을 추정하는 방법에는 소옥천 유역

Table 4. Observed water quality in So-okcheon in 2000

Date	Flow mm	mg/l			Date	Flow mm	mg/l		
		BOD	TN	TP			BOD	TN	TP
Mar. 9	0.31	3.10	3.49	0.06	Sep. 8	6.00	3.10	4.04	0.15
Jun. 16	0.30	3.20	1.74	0.10	Sep. 22	1.90	3.50	2.86	0.11
Jul. 4	2.19	2.70	9.83	1.14	Sep. 28	1.10	3.30	2.99	0.11
Jul. 21	3.20	0.90	7.50	0.49	Oct. 6	1.21	2.00	9.04	0.17
Jul. 27	4.30	1.90	5.18	0.12	Oct. 12	0.50	2.20	8.86	0.55
Aug. 2	3.20	0.90	7.28	0.51	Oct. 19	0.62	0.90	4.67	1.10
Aug. 11	1.65	1.00	7.57	0.71	Oct. 27	0.30	0.50	3.59	0.03
Aug. 18	0.50	1.50	2.38	0.06	Nov. 2	0.66	1.00	16.47	0.91
Aug. 23	1.40	0.90	2.60	0.12	Nov. 7	0.20	0.60	3.11	0.03
Aug. 31	6.00	0.60	4.46	0.10	Nov. 14	0.28	1.40	4.84	0.08

자는 유역면적 185.5 km<sup>2</sup>, 하천장 26 km, 주변장 74.5 km, 유역평균기울기 4.4%, 토양 A군 0.3%, 토양 B군 30%, 토양 C군 65%, 토양 D군 4.7%, 논면적 10%, 밭면적 9.6%, 산림면적 65%, 화성암지질 75.2%, 퇴적암지질 2.8% 변성암지질 22%이다. 이로부터 예측한 매개변수 값은 UMAX 336mm, LMAX 25mm, FC 132mm, CP 0.017, CE 0.009 였다. 이 추정된 매개변수를 적용하여 추정한 2000년도의 소옥천 유역의 수문곡선은 Fig. 4와 같다. Fig. 5(a)는 일반화 모형으로 추정한 소옥천 지점의 2000년 일 유출량을

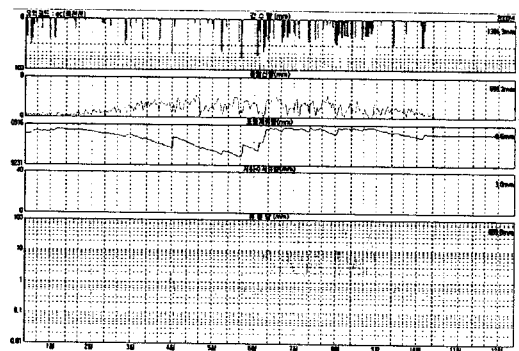


Fig. 4. Daily runoff hydrograph by DAWAST model (2000, So-okcheon)

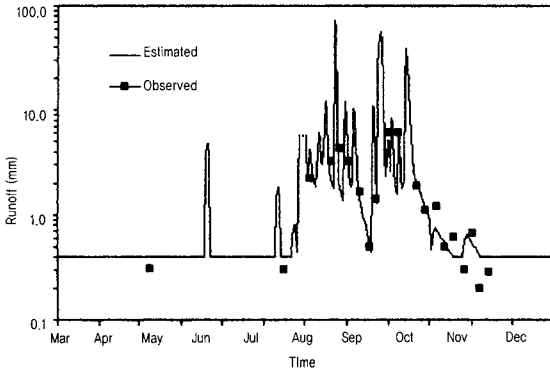


Fig. 5(a). Comparison between observed and estimated daily runoff

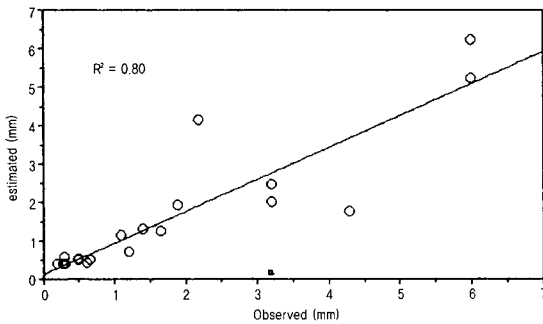


Fig. 5(b). Comparison between observed and estimated daily runoff

과 같이 수질-유량 측정자료가 없는 경우에 주로 사용되는 원 단위 방법, 측정자료가 부족한 경우 관행적으로 사용하고 있는 당월의 일 평균 수질과 평균 유량을 이용한 방법과 이 연구에서 적용한 유달 오염부하량-유량과의 관계식과 유출량 추정에 의한 방법을 적용한 결과를 비교 분석하였다.

가. 오염원별 오염물질 원 단위 방법

소옥천 유역의 오염부하량을 산정하기 위한 오염원별 오염물질 원단위는 “호수의 조류 대발생 예측기법에 관한 연구 -대청호를 중심으로- (금강수질검사소, 1997)”와 “대청호 영양염류 오염부하량 관리방안에 관한 연구 (금강수질검사소, 1999)”에서 적용한 원 단위를 적용하였으며 결과는 Table 6과 같다. 오염원별 오염물질 원 단위에 의한 소옥천유역 2000년도 유달오염부하량을 산정한 결과는 BOD 3,087,535kg/yr, TN 660,285kg/yr, TP 132,495kg/yr 으로 추산되었다.

나. 평균 수질과 평균 유량에 의한 관행의 방법

일 평균수질과 일 평균유량 개념으로 분석하

Table 5. Comparison between observed and estimated daily runoff

Date	observed	estimated	Date	observed	estimated
	mm			mm	
Mar. 9	0.31	0.40	Sep. 8	6.00	6.24
Jun. 16	0.30	0.40	Sep. 22	1.90	1.92
Jul. 4	2.19	4.14	Sep. 28	1.10	1.15
Jul. 21	3.20	2.00	Oct. 6	1.21	0.71
Jul. 27	4.30	1.77	Oct. 12	0.50	0.53
Aug. 2	3.20	2.48	Oct. 19	0.62	0.40
Aug. 11	1.65	1.27	Oct. 27	0.30	0.57
Aug. 18	0.50	0.50	Nov. 2	0.66	0.51
Aug. 23	1.40	1.31	Nov. 7	0.20	0.40
Aug. 31	6.00	5.24	Nov. 14	0.28	0.40

Table 6. Pollutant loads of So-okcheon watershed by Unit loading factor

Item	Pollutant load (kg/day)						Annual load (kg/yr)
	Population	Land	Live stock	Fish farm	Waste water	Total	
BOD	2,288	324	2,595	0	3,252	8,459	3,087,535
TN	348	770	580	0	111	1,809	660,285
TP	73	64	206	0	20	363	132,495

Table 7. Daily average of water quality and discharge

Month	BOD	TN	TP	Discharge m <sup>3</sup> / day
	mg/ℓ			
July	1.83	7.50	0.58	848,448
August	1.63	4.86	0.30	406,080
September	3.3	3.30	0.12	667,008
October	1.40	6.54	1.85	153,792
November	1.00	8.14	0.34	59,616

Table 8. The monthly inflow pollutant loads in So-okcheon

Month	BOD	TN	TP
	kg/month		
July	48,132	197,264	15,255
August	12,337	61,180	3,777
September	26,013	66,034	2,401
October	6,675	31,180	1,001
November	1,788	14,559	608
Total	94,945	370,217	23,042

Table 9. The inflow pollutant loads by a customary method in So-okcheon (2000)

	Inflow pollutant loads of daily average	Inflow pollutant loads during a year
	kg/day	kg/yr
BOD	618.5	225,762
TN	2,405.8	878,127
TP	149.3	54,496

기 위하여 수질 및 유량자료는 Fig. 3과 Table 4의 실측자료 중에서 측정회수가 적은 3월~6월 자료를 제외하고 7월~11월의 자료만을 사용하였다. 이로부터 계산한 각 월의 평균 BOD, TN, TP의 결과는 Table 7과 같다. 이 결과에 의한 평균수질과 평균유량 개념으로 구한 오염부하와

유량을 통해 얻어진 소옥천의 7~11월 유달부하량은 Table 8과 같다. 월별로 구한 Table 8 값을 일 평균으로 환산한 후, 2000년도의 연간 총 유달 오염부하량을 산정한 결과는 Table 9와 같다 (금강수질검사소, 2000).

이와 같이 관행적으로 적용하는 평균수질과 평균

유량 개념으로 소옥천 유역 2000년도 유달오염부하량을 산정한 결과는 BOD 225,762kg/yr, TN 878,127kg/yr, TP 54,496kg/yr 으로 추산되었다.

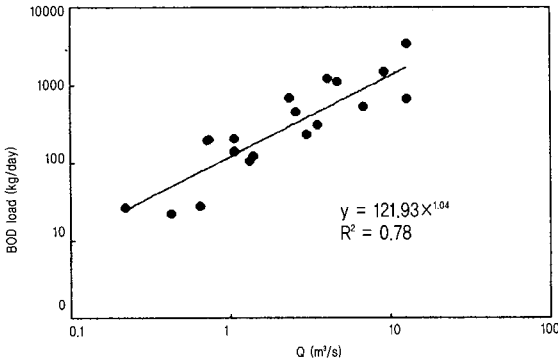


Fig. 6. Relationship between discharge and the inflow pollutant loads of BOD

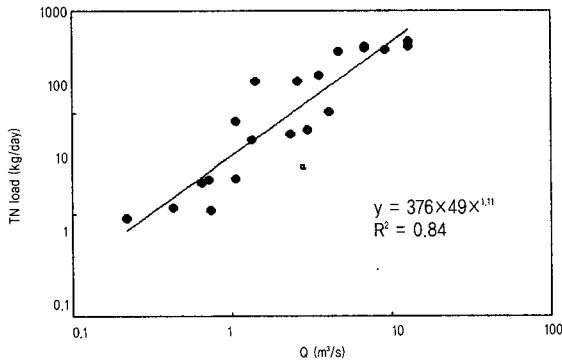


Fig. 7. Relationship between discharge and the inflow pollutant loads of TN

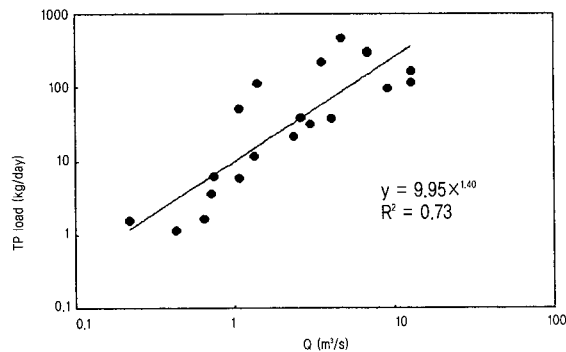


Fig. 8. Relationship between discharge and the inflow pollutant loads of TP

#### 다. 유달오염부하량-유량에 의한 방법

실측한 수질과 유량을 이용하여 구한 오염부하량과 유량의 관계식에 DAWAST 일반화 모형으로 추정된 일 유출량을 적용하여 산정하였다. Fig. 6~Fig. 8은 소옥천의 실측 수질-실측 유량을 이용한 유달오염부하량-유량 관계식을 나타낸 것이다. 유달오염부하량-유량 관계식은 BOD는  $Y=121.93Q^{1.04}$ , TN  $Y=376.49Q^{1.11}$ , TP은  $Y=9.956Q^{1.40}$ 로 나타났다. 신뢰도 95%로 회귀 분석한 결과 결정계수 $R^2$ 가 BOD 0.78, TN 0.84, TP 0.73의 양호한 값을 나타내고 있다.

DAWAST 모형에서 추정된 일 유출량을 유달오염부하량-유량의 관계식에 적용하여 산정한 소옥천 2000년도 유달오염부하량은 BOD 258,200kg/yr, TN 1,003,551kg/yr, TP 77,130kg/yr 이었다.

관행적으로 적용하고 있는 평균수질과 평균유량 개념에 의한 유달오염부하량은 유달오염부하량-유량관계식과 DAWAST모형으로 구한 유달오염부하량보다 BOD는 87%, TN는 88%, TP는 71% 수준으로 과소하게 추정되고 있다.

#### IV. 요약 및 결론

2000년도 소옥천 유역에서 수질-유량자료가 부족한 지점에서 유달오염부하량을 추정하기 위하여 적용하고 있는 오염원별 오염물질 원 단위 방법, 평균수질과 평균유량 개념의 관행적 방법과 유달오염부하량-유량관계식과 DAWAST모형에 의한 유량을 적용하는 방법을 비교하여 그 적용성을 검토하였다.

1. 오염원별 오염물질 원 단위에 의한 소옥천 유역 2000년도 유달오염부하량을 산정한 결과는 BOD 3,087,535kg/yr, TN 660,285kg/yr, TP 132,495kg/yr 으로 추산되었다.

2. 관행의 일 평균수질과 평균유량 개념을 이용하여 소옥천유역 2000년도 유달 오염부하량을 산정한 결과는 BOD 225,762kg/yr, TN



878,127kg/yr, TP 54,496kg/yr 으로 나타났다.

3. 유달 오염부하량-유량 관계식은 BOD는  $Y=121.93^{1.04}$ , TN은  $Y=376.49Q^{1.11}$ , TP는  $Y=9.956Q^{1.40}$ 이었다. DAWAST모형에서 추정된 일 유출량을 유달 오염부하량-유량의 관계식에 적용하여 산정한 소옥천의 유달 오염부하량은 BOD 258,200kg/yr, TN 1,003,551kg/yr, TP 77,130kg/yr 으로 나타났다.

5. 관행적인 평균수질과 평균유량 개념에 의한 유달 오염부하량은 유달 오염부하량-유량관계식과 DAWAST모형으로 구한 유달 오염부하량보다 BOD는 87%, TN는 88%, TP는 71 % 수준으로 과소하게 추정되고 있다. 특히, 오염원별 오염물질 원 단위에 의한 BOD 부하량은 다른 두 방법에 의한 BOD 부하량과 현격한 차이를 보였다.

11. 신현숙, 윤용남, 1993, 도시소유역에서의 유출과 비점오염물 배출 간의 상관관계 수립에 의한 NPS 오염물 배출량의 추정, 한국수문학회지, 26(4), pp. 85-95.
12. 엄명철, 권순국, 1996, 탱크모형을 이용한 일별 오염부하량의 산정, 한국농공학회지, 38(3), pp. 92-100.
13. 전지홍, 윤춘경, 1999, SWMM모형을 이용한 유역의 오염부하량 산정, 1999년도 한국농공학회 학술발표논문집, pp. 689-694.
14. Steven C. Chapra, 1997, Surface Water-Quality Modeling, McGraw-Hill.
15. Vladimir Novotny, 1995, Nonpoint pollution and urban stormwater management, pp. 293-336.

**참고문헌**

1. 환경부, 1997, 수질오염공정시험방법, pp. 199-204, pp. 208-209
2. 국립환경연구원, 2000, 환경정보시스템과 연계한 금강수계 수질관리기법개발.
3. 금강수질검사소, 1996, 금강수계 수질오염 현황과 대책.
4. 금강수질검사소, 1997, 호수의 조류 대발생 예측기법에 관한 연구, -대청호를 중심으로-.
5. 금강수질검사소, 1997-98, 금강수계 상수원 수질조사.
6. 금강수질검사소, 1998~99, 대청호 영양염류 오염부하량 관리방안에 관한 연구(I, II).
7. 금강수질검사소, 2000, 금강수계에 대한 일 유출량 모형 개발.
8. 김태철, 노재경, 박승기, 1991, 유역토양수분 추적에 의한 유출모형, 한국농공학회지, 33(4), pp. 61-72.
9. 김진수, 오승영, 김규승, 1999, 광역 논에서의 질소, 인의 농도와 오염부하량 특성, 한국농공학회지, 41(4), pp. 47-50.
10. 신동석, 권순국, 1990, 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입, 한국환경농학회지, 9(2), pp. 133-141.