



소유역 유달을 추정공식 개발 -보청A유역을 중심으로-

Estimating Nutrients Delivery Ratios at the Subwatershed Scale -A Case Study at the Bochung-A Watershed-

전지홍* · 최동혁* · 임경재** · 김태동*†

Jeon, Ji-Hong · Choi, Donghyuk · Lim, Kyung Jae · Kim, Tae-Dong

ABSTRACT

The characteristics of delivered nutrient loads were analyzed and the regression equations to estimate delivery ratios of nutrients (TN and TP) were developed using HSPF simulation results at six subwatersheds within the Bochung A unit watershed during 1998-2007. TN delivery ratio was higher than TP delivery ratio because significant amounts of TP was considered to be attached at soil as PO_4^- during delivery process from discharged point of nutrient source to main stream. As a results of correlation analysis, factors related to geomorphic characteristics had not statistical correlation with TN and TP delivery ratios. TN loading rate from living and specific stream flow had statistical negative and positive correlation, respectively, with TN delivery ratio. TP loading rates from all sources and from land cover and specific stream flow had statistical negative, negative and positive correlation, respectively. The specific stream flow represents the most strong correlation with nutrient delivery ratios. The regression equations to estimate delivery ratios for TN and TP were developed by including statistical correlated factors and showed high efficiency of 0.98 and 0.95 of coefficient of determination for TN and TP, respectively.

Keywords: Delivery ratio; delivery ratio duration curve; regression equation; TN; TP

1. 서 론

오염물질은 유출되는 경로에 따라 점오염원과 비점오염원으로 구분되며 점오염원은 오염물질이 특정한 지점에서 배출되는 오염원을 말하며 오염원을 정량화하기에는 상대적으로 용이하다. 이에 반해 비점오염원은 광범위한 지역에 걸쳐 발생하는 오염물질로 대표적인 비점오염원은 강우시 토지에서 발생하는 오염물질이다. 따라서, 비점오염물질은 수문학적인 현상에 크게 영향을 받으며 그 양을 정량화하는데 많은 어려움이 있다. 오염원 중 비점오염원이 차지하는 비중이 점차 증가함에 따라 비점오염원 관리의 중요성이 대두되었다.

우리나라의 수질오염총량제도에서도 점오염과 비점오염부하량

을 산정하여 수질을 예측하고 있다. 정적수질모델인 QUAL2E 계열의 수질모델을 이용하여 수질을 예측하기 때문에 수질오염 총량제도에서는 기본계획 및 시행계획의 수립시 과거 10년 평균 저수량 및 평수량을 기준유량으로 하고 있다 (National Institute of Environmental Research, 2008). 그러나 부하량 산정의 경우에는 원단위를 이용하여 발생 및 배출부하량을 계산한 후 측정지점에서의 연평균 수질농도에 기준유량을 곱하여 유달부하량을 계산한다. 이렇게 계산된 배출부하량과 유달부하량의 비율을 유달율이라고 한다. 그러나 실측에 의해 계산된 유달부하량은 점오염원과 비점오염원의 구별이 어렵기 때문에 점오염원과 비점오염원의 유달율은 동일한 값으로 간주하여 적용하고 있을 뿐만 아니라 미측정 지점에서의 유달율은 인근지점의 유달율을 준용하여 사용하고 있다. 그러나 비점오염부하량은 수문현상에 크게 영향을 받기 때문에 산정된 기준유량에 대응하는 유달율을 산정하여야 유역에서의 점오염 혹은 비점오염 저감대책에 따른 정확한 수질예측이 가능하리라 생각된다. 이러한 한계점을 보완하고자 몇몇 연구자들에 의해 유황에 따른 오염물질 유달율을 산정에 대한 연구가 수행되었는데, Choi et al. (2009)은 낙동강 수계에 존재하는 병성천 유역을 대상으로

* 안동대학교 환경공학과

** 강원대학교 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: 054-820-5895

Fax: 054-820-6187

E-mail: tdkim@andong.ac.kr

2010년 7월 28일 투고

2010년 8월 13일 심사완료

2010년 8월 13일 게재확정

SWAT 모델을 이용하여 영양물질에 대한 유황별 유달을 산정한 바 있다. Kim and Kim (2009)는 SWAT-K 모델을 충주댐 유역에 적용하여 토양유실량과 영양물질 부하특성을 다양한 각도에서 분석한 바 있다. Yoon et al. (2006)은 낙동강 수계를 대상으로 하여 수질 실측지점 34개소와 유량실측지점 25개소에서 측정된 실측자료를 이용하여 유달 부하량을 산정한 후 소수계별 유달부하 특성을 분석하고, 유량과 유역 면적과 같은 물리적 인자와 유달 및 유달부하량과의 관계식을 도출한 바 있다. 그 결과 TN의 유달이 가장 높게 나타났으며 유량과 유달부하량과는 높은 상관성을 나타내었으나 유량과 수질농도와는 유의한 상관성이 없는 것으로 보고되었다. Shon et al. (2009)은 SWAT 모델을 이용하여 4개의 시범소유역에 유황별 유달을 산정하여 제시한 결과 TN 부하량은 BOD, TP 부하량에 비해서 높은 유달을 나타내는 것으로 보고하였다.

본 연구에서는 보청A단위유역내에 존재하는 6개의 소유역을 대상으로 검토정이 완료된 HSPF의 과거 10년간의 모의자료를 이용하여 소유역별 유황별 영양물질 유달특성을 분석하였으며, 유역특성인자, 부하인자, 수문인자와 유달과의 상관분석을 실시한 후 통계적으로 상관성을 갖는 인자를 추출하여 TN과 TP 유달을 추정 회귀식을 도출하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

연구대상지역은 보청A단위유역에 존재하는 17개의 소유역 중, HSPF에서 나누어진 소유역과 정확하게 일치하는 유역을 선택하였으며 그 결과 총 6개의 소유역이 선정되었다 (Fig. 1). 소유역별 토지이용상태는 Table 1과 같다. 도시지역은 A01, 논지역은 A05, 밭지역은 A05, 산림유역은 A15유역에서 각각 다

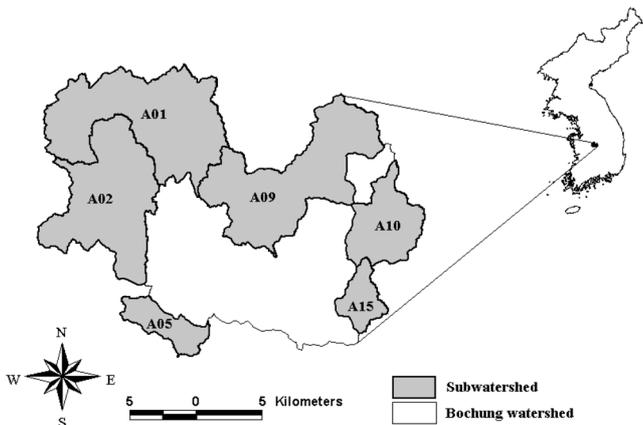


Fig. 1 Study area

Table 1 Land use at each subwatershed

Sub-watershed	Urban	Paddy	Upland	Forest	Pasture	Barren	Water	Total area (km ²)
A01	4 %	15 %	10 %	70 %	0 %	0 %	2 %	76.3
A02	3 %	17 %	9 %	68 %	1 %	1 %	1 %	62.9
A05	3 %	19 %	23 %	55 %	0 %	1 %	0 %	13.7
A09	1 %	13 %	6 %	75 %	0 %	2 %	1 %	70.8
A10	1 %	7 %	7 %	83 %	0 %	1 %	0 %	27.5
A15	1 %	5 %	5 %	88 %	0 %	0 %	0 %	11.4

Table 2 Geomorphic characteristics by subwatersheds

Geomorphic factor	A01	A02	A05	A09	A10	A15
Area (km ²)	76.9	63.2	13.7	71.0	27.5	11.4
Basin length (km)	18.5	9.1	4.2	10.6	8.9	4.7
Basin perimeter (km)	80.3	68.0	26.3	76.6	33.1	20.4
Effective basin width (km)	4.1	6.9	3.3	6.7	3.1	2.4
Form factor	0.224	0.756	0.779	0.629	0.347	0.521
Shape factor	1.874	1.019	1.004	1.117	1.503	1.228
Unit shape factor	2.115	1.150	1.133	1.260	1.697	1.386
Circularity ratio	0.150	0.172	0.250	0.152	0.315	0.344
Elongation ratio	0.534	0.982	0.996	0.895	0.665	0.814
Drainage density	0.0002	0.0001	0.0003	0.0002	0.0003	0.0004

른 소유역에 비해 높은 비율을 나타내었으며, 그 외 초지와 나지, 물은 매우 낮은 비율을 나타내었다.

연구대상유역의 지형학적 특성은 Table 2와 같다. 유역 및 하천특성 명칭 및 의미, 산정방법은 국가수자원관리종합정보시스템 (http://www.wamis.go.kr/wkb/wkb_anlst_lst.aspx)를 참조하였다. 최원유로연장 (Basin length)은 유역분수계부터 출구점까지 하천본류의 길이를 의미하며, 유역면적이 가장 큰 A01이 가장 긴 것으로 나타났으며 A05가 가장 짧은 것으로 나타났다. 유역둘레 (Basin perimeter)는 유역을 평면에 투영시 둘레를 의미하며 유역평균폭 (Effective basin width)은 최원유로연장에 대한 유역면적의 비를 말하는데 A02가 가장 크고 A15가 가장 작은 것으로 나타났다. 형상인자 (Form factor)는 최원유로연장의 제곱에 대한 유역면적의 비로 정의되며 형상계수 (Shape factor)는 유역면적과 동일한 면적을 가지는 원의 직경에 대한 유역의 주하천길이의 비로 정의되며 두 계수 모두 무차원 매개변수이다. 형상인자는 A05에서 가장 크고, A01에서 가장 작은 것으로 나타났다. 단일형상계수는 유역면적의 제곱근에 대한 최원유로연장의 비로 정의되며, 원형비는 유역둘레와 동일한 길이의 원주를 갖는 원의 면적에 대한 유역면적의 비로 정의되며 두 계수 모두 무차원 매개변수이다. 세장률은 최원유로연장에 대한 유역면적과 동일한 면적을 가진 원의

직경의 비로 정의되며, 수계밀도는 유역면적에 대한 유역내 하천총길이의 비로 정의되며, 단위면적당 하천의 길이를 의미한다.

2. 연구방법

보청A단위유역을 대상으로 감보정이 완료된 HSPF (Jeon et al., 2010)의 연구대상지역 소유역별 과거 10년(1998~2007년)의 TN과 TP의 모의결과를 추출하여 유달부하량을 산정하였다. 유량유황곡선 (Flow Duration Curve; FDC)은 대상기간 동안 발생한 각각의 유량에 대하여 발생할 수 있는 확률을 의미하는데, 대상기간동안 발생한 유량을 높은 유량에서 낮은 유량 순으로 등수를 매긴 후 각각의 등수에 총 유량갯수에 1을 더하여 나눈 값을 발생확률로 산정하여 X축을 발생확율, Y축을 해당유량의 그래프를 유량유황곡선이라 한다. 일년 365일 중 95일, 185일, 275일, 355일 미만으로 발생하는 유량을 갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량이라 하며 Q95, Q185, Q275, Q355로 표현하였다. 부하량유황곡선 (Load Duration Curve; LDC)은 대상기간동안 유량 발생확율에 대응하는 유달부하량을 의미하는데, X축을 유량 발생확율, Y축을 이에 해당하는 부하량을 그려 도시화함으로써 유황에 따라 얼마만큼의 부하량이 유달되는지 파악할 수 있다. 본 연구에서는 과거 10년동안의 소유역별 모의결과를 이용하여 부하량유황곡선을 작성하여 비교분석하였다. 유달율유황곡선 (Delivery Ratio Duration Curve)은 대상기간 동안의 유량발생확률에 대응하는 유달율을 도시화한 그래프인데, 유달율은 주하천에 유입되기 직전의 유달부하량을 원단위에 의해서 계산된 배출부하량으로 나눈 값을 의미한다. 본 연구에서는 소유역별 유달율유황곡선 작성하여 유황별 유달

특성을 분석하였다.

TN과 TP 유달율 산정을 위한 회귀식 도출을 위해서 다양한 인자별 상관분석을 실시하였다. 소유역별 지형인자, 부하인자 (계별 부하량 및 계별 단위면적당부하량), 수문학적 인자 (유출량발생확률별 하천유량 및 비유량) 등과 TN과 TP 유달율과의 상관분석을 통계프로그램인 SPSS (PASW Statistics 18)를 이용하여 분석하였다. 유의수준 5 % 내의 상관분석결과를 통계적으로 유의하게 상관성이 있는 것으로 간주하여 인자들을 추출한 후 SPSS로 회귀분석을 실시하여 유달율 산정을 위한 회귀식을 도출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유황별 유출특성

가. 유량유황곡선

보청A단위유역내 소유역별 유량유황곡선과 유황조건별 하천 유량 및 비유량은 Fig. 2와 Table 3과 같다. 유량유황분석결과 A09 소유역에서 모든 조건에서 가장 높은 비유량을 나타내었으며, A05 소유역에서 가장 낮은 비유량을 나타내었다.

Table 3 Flow durations by subwatersheds

Flow duration	A01		A02		A05		A09		A10		A15	
	cms	mm										
Q95	1.75	1.97	1.43	1.96	0.27	1.70	1.85	2.25	0.59	1.85	0.25	1.89
Q185	0.86	0.97	0.70	0.96	0.13	0.82	0.90	1.10	0.29	0.91	0.12	0.91
Q275	0.52	0.58	0.42	0.57	0.08	0.50	0.55	0.67	0.17	0.53	0.08	0.61
Q355	0.25	0.28	0.20	0.27	0.04	0.25	0.26	0.32	0.08	0.25	0.04	0.30

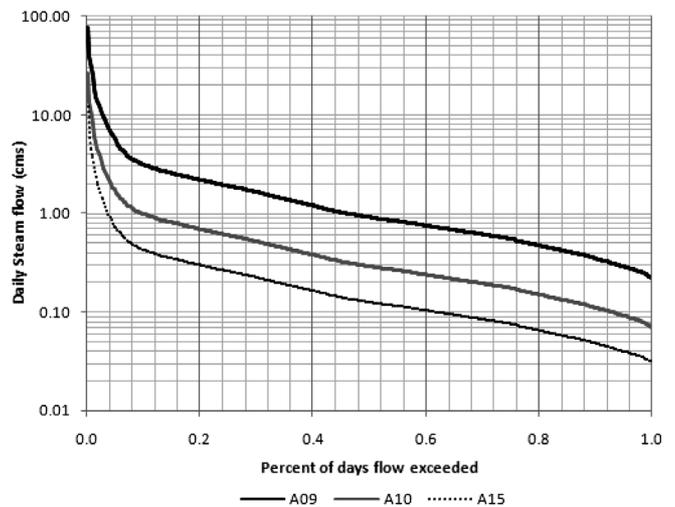
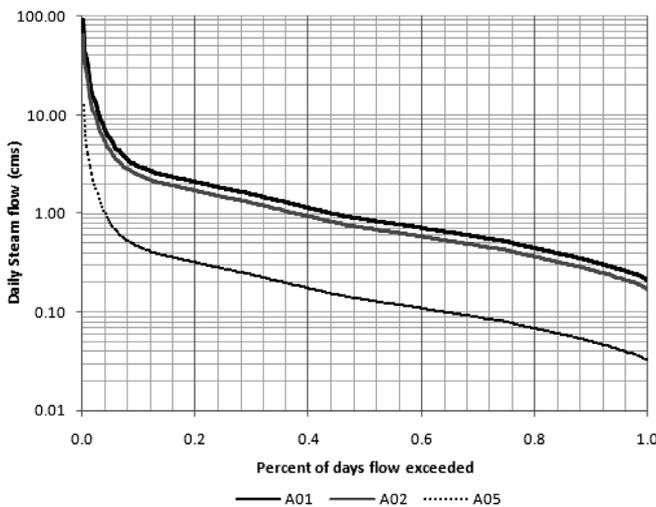


Fig. 2 Flow duration curve by subwatersheds

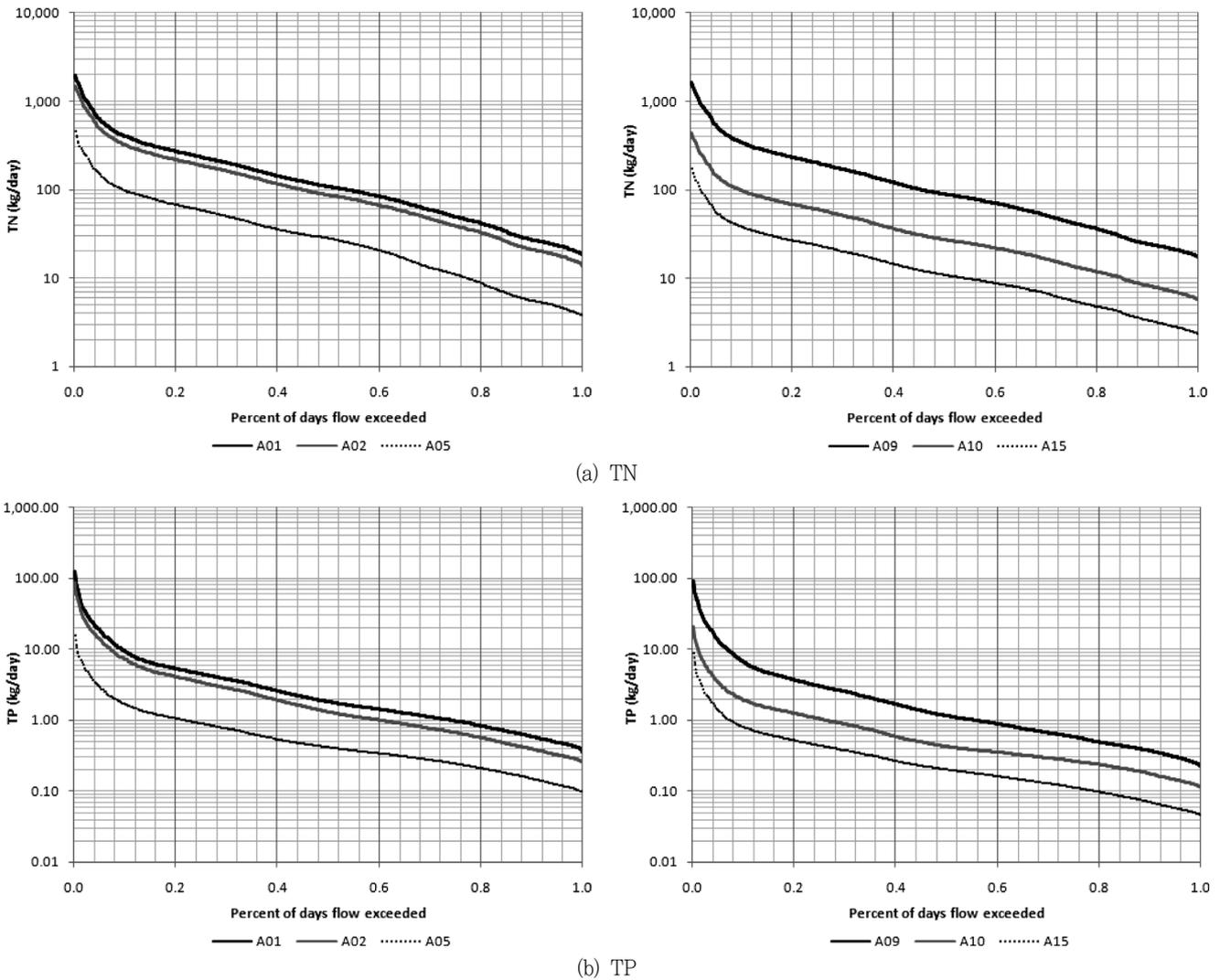


Fig. 3 Load duration curve for study areas

Table 4 Delivery nutrient loads for days flow exceeded

Load		A01		A02		A05		A09		A10		A15	
		TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
kg/d	Q95	225.5	4.38	182.1	3.29	56.7	0.87	194.4	2.90	58.2	1.00	22.8	0.43
	Q185	106.5	1.80	85.4	1.29	27.7	0.41	87.9	1.14	27.0	0.42	10.8	0.20
	Q275	49.1	0.96	38.5	0.67	10.9	0.24	42.2	0.58	13.7	0.26	5.5	0.11
	Q355	21.3	0.45	16.5	0.30	4.3	0.11	19.8	0.28	6.6	0.13	2.7	0.05
kg/d/km ²	Q95	2.95	0.057	2.89	0.052	4.14	0.064	2.74	0.041	2.12	0.036	2.00	0.038
	Q185	1.40	0.024	1.36	0.020	2.02	0.030	1.24	0.016	0.98	0.015	0.95	0.018
	Q275	0.64	0.013	0.61	0.011	0.80	0.018	0.60	0.008	0.50	0.009	0.48	0.010
	Q355	0.28	0.006	0.26	0.005	0.31	0.008	0.28	0.004	0.24	0.005	0.24	0.004

나. 부하량 유향곡선
 소유역별 TN, TP에 대한 부하량유향곡선과 유량발생확률별

단위면적당 유달부하량은 각각 Fig. 3과 Table 4와 같다. 유향
 별 일부하량의 경우에는 TN, TP 항목 모두 A01에서 가장 높

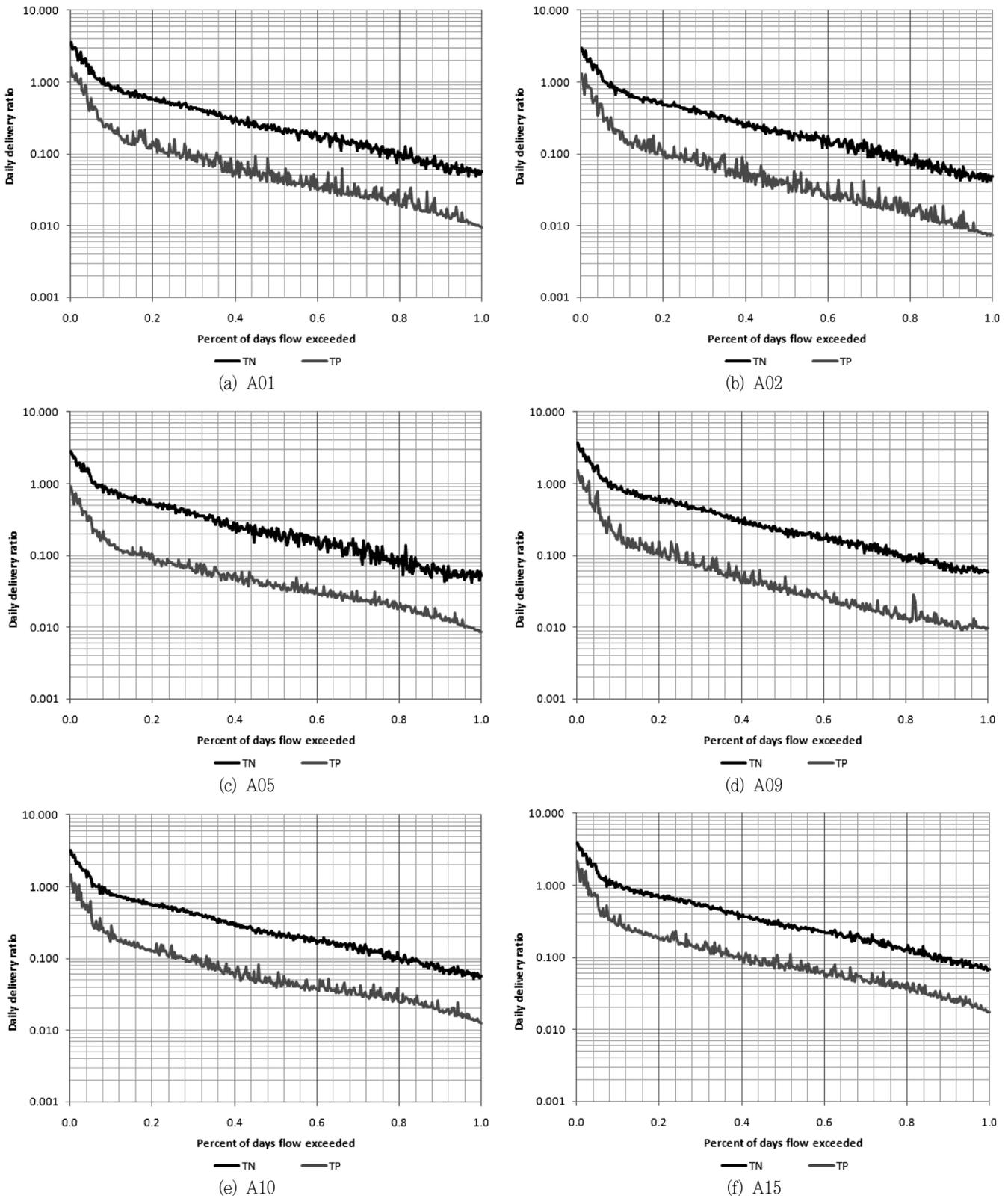


Fig. 4 Delivery ratio duration curve by subwatersheds

은 부하량을 나타내었으며, A15에서 가장 낮은 부하량을 나타내었다. 단위면적당 부하량을 살펴보면, A05에서 TN, TP 항목 모두 높은 부하율을 나타내었으며 다음이 A01이었다. A05 유역은 대표적인 농업유역으로 논 19 %, 밭 23 %를 차지하고 있는 것으로 나타났다 (Table 1). 또한 갈수기 (Q355)조건에서는 다른 소유역과의 영양물질 부하율은 큰 차이가 없으나 유량조건이 증가할수록 영양물질 부하량의 차이가 높은 것으로 나타나 영양물질의 높은 부하율은 농경지에 시비된 비료성분이 강우시 유출에 기인하는 것으로 판단된다. 다음으로 높은 부하율을 나타낸 A01유역은 타 소유역에 비해 높은 도시지역을 차지하고 있으며, 도시지역이 상대적으로 밀집되어 있는 곳이다 (Jeon et al., 2010). 가장 낮은 부하율을 나타내고 있는 A15 유역은 도시와 농업지역이 타 소유역에 비해 가장 낮고 산림지역이 가장 높은 유역으로 산림유역에서의 낮은 영양물질 부하율을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

다. 유달율 유향곡선

소유역별 유달율 유향곡선과 유량발생빈도별 유달율은 각각 Fig. 4와 Table 5와 같다. 연구대상지역 모든 소유역에 있어서 TN 유달율은 TP 유달율에 비해 높은 것으로 나타났다.

이는 오염물질이 유역으로 배출된 후 하천으로 유달되는 과정에서 이화학적 특성의 차이로 인해 오염물질에 따라 유달율의 차이를 나타낸다. 인의 경우 특히 인산염은 점토질 입자나 토양유기물에 대한 흡착성이 매우 커 일단 토양에 흡착되면 잘 용출되지 않는 특징을 가지고 있다 (Ryden et al., 1972). 따라서 인의 경우에는 오염원에서 배출된 후 하천으로 유달하는 과정에서 많은 양의 인이 토양에 흡착되어 낮은 유달율을 보이는 것으로 판단된다. 이에 반해 질소의 경우에는 질소의 형태에 따라 토양에 흡착될 수도 있고 혹은 용해상태로 존재하여 지하수까지 침투될 수도 있다. 자연상태에서 질소의 많은 부분을 차지하는 질산성 질소는 용존상태로 존재하기 때문에 토양에 흡착되지 않고 수계로 유달되거나 일부는 혐기성 상태에서 탈질이 일어난다 (Jeon, et al., 2001). Jeon et al. (2001)의 연구결과에 따르면 질소와 인의 유달과정이 상이한 것으로 나타났는데, 질소의 경우에는 비강우시 높은 농도를 나타내고 다른 수질항목에 비해 강우유출에 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며 인의 경우에는 강우유출에 민감하게 반응하는 하는 것으로 나타났다. Yoon et al. (2006)은 낙동강의 소수계별 유달 부하량에 대하여 고찰한 결과 TN의 유달율이 TP의 유달율에 비해 높은 것으로 보고되어 본 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다.

Table 6은 소유역별 배출부하량과 단위면적당 부하율을 나타내고 있는데, 배출부하율이 높은 A02, A05에서 상대적으로

Table 5 Delivery ratio duration for days flow exceeded

Flow duration	A01		A02		A05		A09		A10		A15	
	TN	TP										
Q95	0.48	0.10	0.41	0.08	0.43	0.07	0.49	0.08	0.46	0.11	0.57	0.15
Q185	0.24	0.06	0.21	0.04	0.23	0.04	0.20	0.05	0.21	0.06	0.27	0.08
Q275	0.12	0.02	0.09	0.02	0.10	0.02	0.10	0.02	0.12	0.04	0.17	0.05
Q355	0.06	0.01	0.05	0.01	0.06	0.01	0.07	0.01	0.06	0.01	0.07	0.02

Table 6 Discharged nutrient loads from each subwatershed

Load	A01		A02		A05		A09		A10		A15	
	TN	TP										
kg/d	465	42	463	39	130	11	391	35	122	9	38	3
kg/d/km ²	6.1	0.55	7.4	0.62	9.5	0.80	5.5	0.49	4.4	0.33	3.3	0.26

낮은 유달율을 나타내었으며 배출부하율이 낮은 A15에서 상대적으로 높은 유달율을 나타내었다. 이는 오염물질이 배출되는 양이 많을수록 그만큼 유역내에서 저감되는 양이 많다는 것을 의미한다. 부하량과 수질농도와는 차이가 있지만 A15 유역의 대부분이 산림인 것을 감안할 때 유출되는 영양물질의 농도가 다른 소유역보다 낮다고 가정한다면 오염물질의 저감을 나타내는 1차 이상의 반응식에서 수질농도가 낮을수록 저감되는 오염물질의 양이 상대적으로 적은 것과 일치한다.

2. 유향별 유달율 산정을 위한 회귀식 도출

가. 상관관계 분석

유역특성인자와 영양물질 유달율과의 상관분석 결과는 Table 7과 같다. 저수기 (Q275)에서 수계밀도와 영양물질 유달율과는 유의수준 5 % 내에서 0.8 이상의 상관관계를 나타내었다. 즉 수계밀도가 높다는 의미는 동일한 유역면적내에 하천의 매우 잘 발달해 있다는 의미이므로 그만큼 오염물질이 짧은 거리를 거쳐 하천으로 유입되어 유달되기 때문에 수계밀도가 높을수록 유달율이 높게 나올 수 있으나 본 연구에서는 유의수준 5 %를 기준으로 했을 경우에는 모든 유량조건에서 유의한 상관성을 찾기 힘들었다. 그 외 유역특성인자 모두 유달율과는 유의한 수준에서의 상관성을 나타내지 않았다. Keem et al. (2009) 낙동강 수계 단위유역을 대상으로 유달율 경험공식을 도출하였는데, 유역특성인자중 유역면적과 최장하천길이, 유역평균경사, CN, 하천유량을 포함시켰을 경우 유역특성인자 중 유역면적만 포함시켰을 경우 회귀식에 의한 결정계수를 비교한 결과 큰 차이점이 없는 것으로 보고하고 있어 유역특성인자가 유달율에 미치는 영향은 통계학적으로 없는 것으로 나타났다. 비록 Keem et al. (2009)이 유역면적을 포함하여 유달율을 계산하는 회귀식을 도출하였으나, Yoon et al. (2006)에 따르면 유역면적과

Table 7 Correlation analysis between factors of watershed characteristics and delivery ratios

Geomorphic Factor	TN				TP			
	Q95	Q185	Q275	Q355	Q95	Q185	Q275	Q355
Area (km ²)	-0.246	-0.484	-0.505	-0.223	-0.420	-0.315	-0.663	-0.543
Basin length (km)	-0.058	-0.179	-0.200	-0.163	-0.138	0.003	-0.432	-0.440
Basin perimeter (km)	-0.258	-0.481	-0.529	-0.214	-0.459	-0.350	-0.702	-0.549
Effective basin width (km)	-0.459	-0.699	-0.711	-0.307	-0.616	-0.612	-0.676	-0.507
Form factor	-0.404	-0.243	-0.434	-0.177	-0.494	-0.608	-0.308	-0.048
Shape factor	0.255	0.222	0.292	0.028	0.332	0.453	0.105	-0.091
Unit shape factor	0.255	0.222	0.292	0.027	0.333	0.453	0.105	-0.091
Circularity ratio	0.437	0.505	0.701	0.291	0.694	0.592	0.898*	0.651
Elongation ratio	-0.355	-0.236	-0.390	-0.126	-0.444	-0.560	-0.246	-0.001
Drainage density	0.577	0.759	0.820*	0.389	0.740	0.703	0.814*	0.694

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
 **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Table 8 Correlation analysis between factors of pollutant loads and delivery ratios

Source		TN				TP			
		Q95	Q185	Q275	Q355	Q95	Q185	Q275	Q355
Loads from	All sources	-0.392	-0.473	-0.590	-0.530	-0.496	-0.527	-0.744	-0.742
	Living	-0.446	-0.596	-0.644	-0.560	-0.587	-0.639	-0.769	-0.817*
	Livestock	-0.471	-0.379	-0.627	-0.607	-0.551	-0.621	-0.784	-0.792
	Land	-0.327	-0.492	-0.534	-0.472	-0.425	-0.414	-0.666	-0.662
Loading rates from	All sources	-0.754	-0.288	-0.778	-0.582	-0.858*	-0.914*	-0.787	-0.812*
	Living	-0.880*	-0.542	-0.879*	-0.671	-0.807	-0.882*	-0.339	-0.548
	Livestock	-0.677	-0.199	-0.727	-0.531	-0.856	-0.878	-0.630	-0.699
	Land	-0.802	-0.327	-0.718	-0.604	-0.935**	-0.905*	-0.753	-0.893*

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
 **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

오염물질 유달율과는 상관성이 없는 것으로 보고하고 있어 본 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다.

오염부하량과 유달율과의 상관분석결과는 Table 8과 같다. 부하량과 유달율과의 관계는 음의 상관성을 나타내고 있으며 수질항목에 따라서 다소 차이를 나타내고 있는데 TN의 경우에는 갈수기와 평수기 조건에서 TN 유달율과 생활계 부하율이 유의수준 5 % 이내에서 상관계수 -0.88을 나타내었으며, TP 유달율은 총부하량과 토지부하율에서 유의수준 5 % 이내에 평수기 조건을 제외한 모든 유량조건에서 -0.89 이상의 상관계수를 나타내었다. 이는 앞에서 서술한바와 같이 부하율이 높을수록 저감되는 양이 상대적으로 많아져서 유달율이 낮게 나오며, TN과 TP 배출부하량이 유달되는 과정에서 저감되는 양은 각각 생활계에서 저감되는 양과 토지계에서 저감되는 양과 직접적인 관련이 있는 것으로 판단된다.

수문학적 특성과 영양물질 유달율과의 상관분석결과는 Table

Table 9 Correlation analysis between hydrological factors and delivery ratios

Hydrological factor	TN	TP
Stream flow (cms)	0.441*	0.594**
Specific stream flow (mm)	0.879**	0.971**

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
 **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

9과 같다. Keem et al. (2009)은 2변수 유달율 경험공식을 하천유량(cms)을 포함시켜 도출하였으며, Yoon et al. (2006)은 유달율과 하천유량(cms)과의 높은 상관성을 도출한바 있다. 그러나 두 연구모두 비유량에 대한 상관분석 혹은 회귀분석을 수행하지 않아 비유량이 유달율에 미치는 영향은 비교 분석하지 못하였다. 한편 Park et al. (2007)이 개발한 경험론적 유달부하식에서는 비유량을 포함시켜 예측한 결과 높은 결정계수를 나타내었으며, Jung et al. (2009) 또한 회귀식을 이용한 유달

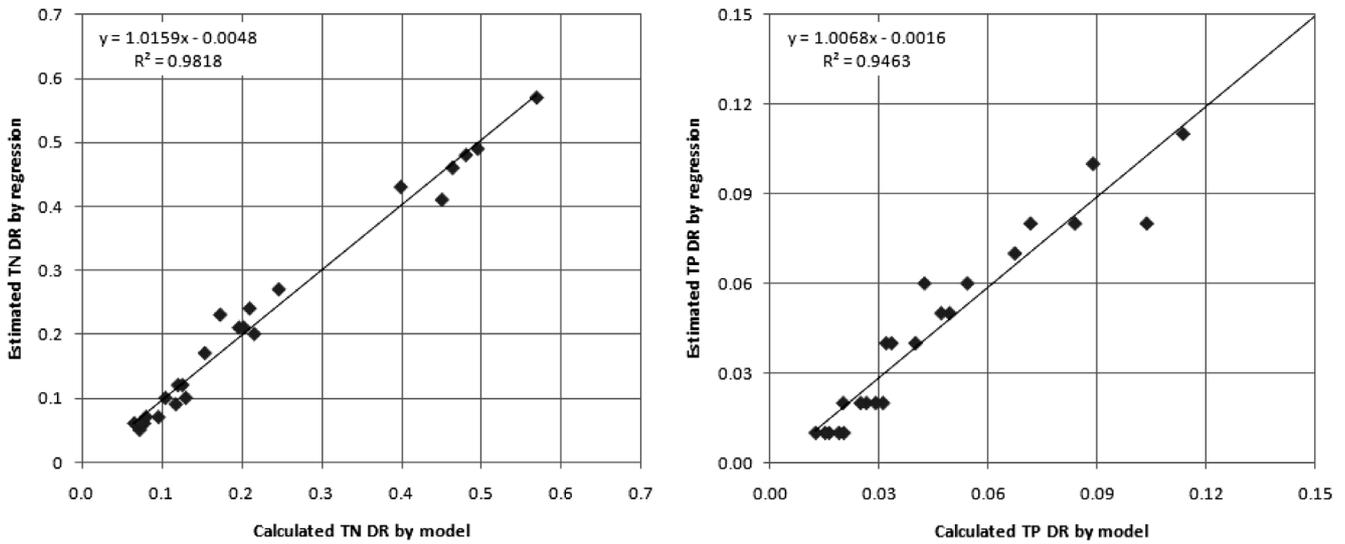


Fig. 5 1:1 scatter plots of estimated delivery ratios (DR) between regression method and model simulation

을 산정식에서 비유량을 포함시켜 예측한바 있다. 본 연구에서 영양물질 유달율과 하천유량·비유량과의 상관분석을 실시한 결과 두 인자 모두 유의확률 5 % 내의 상관성을 나타내었으며, 비유량이 유의확률 1 % 이내에서 하천유량보다 높은 상관성을 나타내었다.

나. 유달율 산정 회귀식 도출

TN과 TP 유달율과 유역특성인자와 부하특성인자, 수문특성인자와의 상관분석결과 통계학적으로 유의한 상관성을 가진 인자를 추출한 회귀모형은 식 (1)과 식 (2)와 같다. TN 유달율 모형에는 생활계부하율과 비유량이 사용되었으며, TP 유달율 모형에는 총부하율, 토지부하율, 비유량이 사용되었다.

$$DR_{TN} = a \cdot Fq^b \cdot LD_{Living}^d \cdot Q^e \quad (1)$$

$$DR_{TP} = a \cdot Fq^b \cdot LD_{Total}^c \cdot LD_{Land}^d \cdot Q^e \quad (2)$$

여기서, DR_{TN}, DR_{TP}는 각각 TN, TP 유달율, Fq는 유출량발생빈도, LD_{Total}, LD_{Land}, LD_{Living}은 각각 총부하율, 토지계부하율, 생활계부하율, Q는 비유량을 의미하며, a, b, c, d, e는 계수이다.

통계프로그램인 SPSS를 이용하여 유출량 발생빈도별 유달율 산정을 위한 계수는 Table 10과 같으며, 본 연구에서 개발된 회귀식을 이용하여 예측된 유달율과 모델에 의해 산정된 회귀식과의 1:1 분산도는 Fig. 5와 같다. 그 결과 회귀식에 의해 예측된 유달율과 모델에 의해 예측된 유달율은 결정계수 0.95 이상의 값을 나타내었으며, 1:1 라인에도 밀집해 있는 것으로

Table 10 Regression coefficients for estimating TN and TP delivery ratios and coefficient of determination

Coefficient	a	b	c	d	e	R ²
TN	0.094	-0.849	-	-0.247	0.366	0.98
TP	0.011	-0.615	-0.462	-0.513	0.460	0.95

나타나 본 연구에서 개발된 회귀식의 적용 가능성이 있는 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 보청A단위유역 내 존재하는 6개의 소유역을 대상으로 감보정이 완료된 HSPF 모형에 의해 과거 10년 (1998 ~ 2007년)동안의 모의된 결과를 이용하여 10년 평균 유출유량곡선, 부하량유량곡선, 유달율유량곡선을 작성하여 유황별 영양물질 부하특성을 파악하고, 유달율과 유역특성인자, 부하특성인자, 수문특성인자와의 상관분석을 실시한 후 유달율산정 회귀식을 도출하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 토지이용특성에 따라서 유황별 영양물질 부하특성이 다르게 나타났는데, 농업지역이 가장 높은 비율을 차지하는 소유역에서 상대적으로 높은 영양물질 부하율을 나타내었으며, 유출량 발생빈도가 낮을수록 그 차이가 큰 것으로 나타나 농경지에 시비된 비료성분이 강우시 유출되는 것으로 판단된다. 유황별 가장 낮은 영양물질 부하율을 나타내는 소유역은 도시지역과 농업지역의 비율이 가장 낮고 산림의 비율이 가장 높은 자연상태의 유역인 것으로 나타났다.

2. 부하율 정도에 따라서 유달율에 영향을 주었는데, 영양물질 부하량이 높을수록 낮은 유달율을 나타내었다. 이는 많은 양

의 오염물질이 유역으로 배출되면 그 만큼 많은 양의 오염물질이 하천으로 유달되는 과정에서 유역내에서 제거되는 것으로 나타났다. 또한 TP 유달을 보다는 TN 유달율이 더 높은 것으로 나타났는데 이는 인의 많은 양이 토양에 흡착되어 잘 용탈되지 않는 반면에 질소 특히 자연계에서 많은 양의 질소를 차지하는 질산성 질소의 경우에는 토양에 흡착되지 않고 수계로 유출되기 때문인 것으로 판단된다.

3. 유달율과 다양한 인자들과의 상관분석을 실시한 결과 TN·TP 유달율과 유역특성인자간에는 통계학적으로 상관성을 나타내지 않았으며, 부하특성인자의 경우에는 TN 유달율에는 생활계부하율이, TP 유달율에는 총부하율과 토지계부하율이 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 나타내었다. 수문학적 인자와의 상관분석결과 하천유량과 비유량 모두 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 나타내었는데, 하천유량보다는 비유량이 보다 높은 상관계수를 나타내었다.

4. 상관분석결과를 토대로 통계적으로 유의한 인자를 추출하여 회귀식을 도출한 결과, TN 유달을 추정공식에서는 생활계부하율, 비유량 인자가 사용되었으며, TP 유달을 추정공식에서는 총부하율, 토지계부하율, 비유량 인자가 사용되었다. 본 연구에서 도출된 회귀식에 의해 추정된 유달율은 결정계수 0.95 이상을 나타내어 회귀식의 적용가능성이 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 보청A유역내 소유역의 모의자료를 이용하여 유달을 추정공식을 개발하였기 때문에 타유역으로의 확대 적용에는 한계점을 가진다. 그러나 추후 타지역의 연구결과를 추가하여 유달을 산정 회귀식을 도출한다면 미세측지역에 대한 보다 신뢰성 있는 유달을 도출이 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Choi, D., H. S. Shin, Y. S. Yoon, and S. Kim, 2009. The simulation of nutrients using SWAT model and its application to estimate delivery ratio. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(3): 375-385 (in Korean).
2. Jeon, J. H., D. Choi, K. J. Lim, and T. D. Kim, 2010. Automatic calibration of stream flow and nutrient loads using HSPF-PEST at the Bochung A Watershed. *Korean Society of Agricultural Engineers* 52(5): 77-86 (in Korean).
3. Jeon, J. H., C. G. Yoon, and J. H. Han, 2001. Analysis of relationships among the pollutant concentrations in non-urban area. *Korean Journal of Limnology* 34(3): 215-222 (in Korean).
4. Jung, J. W., K. S. Yoon, S. H. Joo, W. Y. Choi, Y. W. Lee, D. H. Rhew, S. W. Lee, and N. I. Chang, 2009. Estimation of pollutant loads delivery ratio by flow duration using regression equation in Hwangryong A Watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(6): 25-31 (in Korean).
5. Kim, C. G. and N. W. Kim, 2009. Investigation on the pollutant delivery characteristics using physically based watershed model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(2): 256-267 (in Korean).
6. Keem, M. S., H. S. Shin, J. H. Park, and S. Kim, 2009. Empirical equation for pollutant loads delivery ratio in Nakdong River TMDL unit watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(4): 580-588 (in Korean).
7. National Institute of Environmental Research, 2008. Guideline of total maximum daily load. *National Institute of Environmental Research* (in Korean)
8. Park, J. H., D. S. Kong, and K. S. Min, 2007. Development of the empirical model for estimating the delivered pollutant loads considering geomorphic and hydraulic characteristics. *Journal of Korean Society on Water Quality* 23(6): 913-919 (in Korean).
9. Ryden, J. C., J. K. Syers and R. F. Harris, 1972. Potential of an eroding urban soil for the phosphorous enrichment of streams: I. Evaluation of methods. *Journal of Environmental Quality* 1: 430-434.
10. Shon, T. S., J. B. Park, and H. S. Shin, 2009. A study on estimation of the delivery ratio by flow duration in a small-scale test bed for Managing TMDL in Nakdong River. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(5): 792-802 (in Korean).
11. Yoon, Y. S., J. J. Yu, M. S. Kim, and H. J. Lee, 2006. Computation and assessment of delivery pollutant loads for the streams in the Nakdong River Basin. *Journal of Korean Society on Water Quality* 22(2): 580-588 (in Korean).