

물리적 기반의 유역모형을 이용한 오염물질 유달 특성 규명

김철겸[†] · 김남원

한국건설기술연구원 수자원연구실

Investigation on the Pollutant Delivery Characteristics using Physically Based Watershed Model

Chul-Gyum Kim[†] · Nam-Won Kim

Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology
(Received 24 December 2008, Revised 14 January 2009, Accepted 23 January 2009)

Abstract

A method of estimating pollutant delivery ratios considering watershed physical and meteorological characteristics and flow conditions using SWAT-K watershed model was described, and pollutant delivery characteristics during dry and rainy seasons, for monthly and seasonally, and with flow regimes were investigated for the Chungju dam watershed. Delivery ratios for sediment, T-N, and T-P showed higher values over 100% during dry and winter seasons with low pollutant loads and flows, and showed relatively uniform ones under 100% during rainy and summer seasons with concentrated loads and flows. It was found that mainly wet flows during summer seasons played very important roles in investigating the delivery characteristics of total or nonpoint pollutant loads, because more than 90% of total loads were influenced by nonpoint source, and discharged with the flows. From the results, we could find out the delivery characteristics with various watershed and flow conditions which are difficult to consider by actual measurement, and could get a foothold of estimating more reasonable and scientific allocated loads for water quality standard using the reliable method of estimating delivery ratios with a watershed model.

keywords : Chungju dam, Pollutant delivery ratio, SWAT-K, Watershed model

1. 서론

유달율은 오염원으로부터 배출된 오염물질이 하천으로 유입되어 하류의 어느 특정 지점에 도달하는 비율로서 일반적으로 배출부하량과 유달부하량의 함수로 산정되며, 환경용량지표로서 사용되고 있다(정종태 등, 2002).

수질오염의 원인은 크게 생활하수, 축산폐수, 산업폐수와 같이 일정한 지점으로 배출되는 점오염원과 도시·도로·농지·산지 등에서 불특정하게 배출되는 비점오염원으로 나눌 수 있다. 비점오염의 경우 강우시 유출과 함께 이동하여 유역 전반에 걸쳐 많은 오염 현상을 일으키고 있으며(김철겸과 김남원, 2008), 이 중에서 약 80% 정도는 5월에서 9월 사이에 유출되고 있고(국립환경과학원·금강물환경연구소, 2006), 한강의 경우 전체 오염부하량의 30% 정도를 차지하고 있어, 비점오염 부하량의 관리와 저감대책에 많은 관심이 집중되고 있다.

우리보다 훨씬 이전부터 비점오염에 관심을 가지고 관련 대책을 수립해 온 미국의 경우는 1970년대 이후부터 많은 유역단위의 연구가 수행되어 왔다. 그 결과 비점오염의 특성인 시공간적인 변화를 고려하기 위해 유역내 오염원으로

부터 수체에 유입하는 단계까지의 복잡한 역학적인 기작들을 고려하기 위해 다양한 방법들을 고려하고 있다. 따라서, 미국의 경우 유달율의 개념이 오염총량관리제의 전체 과정 속에 내포되어 있는 특징이 있다. 즉, 국내의 경우는 다양한 토지이용 특성 및 유황을 고려한 유달율의 도출이 모델링의 목적이 될 수 있는 반면에, 미국에서는 시공간적으로 다양하게 변화하는 비점오염의 특성을 최대한 고려하여 오염원의 발생에서부터 관심유역의 출구까지 거동을 고려하는 것 자체가 모델링의 목적이 되는 것이다. 이를 위해 HSPF나 SWAT과 같은 유역단위 모형이 오염총량관리제의 평가를 위해 많이 적용되고 있으며, 국내에서도 최근에 이러한 유역모형을 통한 수질 모의 및 평가에 관한 연구가 시도되고 있다.

국내에서는 2004년 낙동강 수계를 시작으로 금강·영산강·섬진강 수계와 한강의 일부 시범 지역에 대해 오염총량관리제를 수행하고 있으며, 발생원단위에 저감율을 고려하여 계산된 배출부하량을 수질모형의 입력자료로 사용하여 수체내에서의 오염물질의 거동을 모의하고 있고, 질소와 인을 포함한 다양한 오염물질의 총체적 거동의 결과인 BOD를 1차 오염총량관리기간(2004~2010년)의 대상물질로 사용하고 있다.

따라서, 오염총량관리기술지침에서는 수질모델링을 통해

[†] To whom correspondence should be addressed.
cgkim@kict.re.kr

산정된 총량관리단위유역별 유달부하량이 할당부하량을 만족할 수 있도록, 각 소유역별 배출부하량(기준배출부하량)에 안전율(통상 0.1)을 적용하여 소유역별 할당부하량을 산정하고 있다. 즉, 각 토지이용별, 유역특성별, 유황별 유달율에 대한 명확한 기술은 되어 있지 않으며, 현재로서는 유달부하량과 할당부하량의 비교를 통해 총량제를 수행하고 있다.

그러나, 이러한 방법으로는 유달 특성, 즉 배출부하량이 하천에서의 자정작용에 의해 어느 정도 감소하는 영향, 또는 반대로 하천에서의 오염물질 유입에 의해 오히려 유달부하량이 배출부하량보다 더 크게 나타나는 영향 등을 고려할 수 없으며, 단순히 배출부하량과 유달부하량의 관계만으로서 총량관리를 할 수밖에 없는 한계가 있다. 일부 연구자들에 의해 각 수질오염인자별로 토지이용별, 유역특성별 유달율을 추정하여 하천 하류 지점에서의 유달부하량을 산정하고 있지만, 유하거리·유량·유속 등 여러 영향인자에 따라 변화하는 유달율 특성을 고려하지 못하는 문제점이 있어 실질적인 유달 특성에 대한 연구가 많이 부족한 상황이며, 이에 대한 검증 또한 매우 미약한 수준이다.

국내에서 현재 유달율은 오염총량관리 목표수질 설정 및 할당부하량 결정에 있어 중요한 요소이나, 실측자료의 부족과 적용방법론의 부재 등으로 오염원별 유역특성별 유달율의 정량적인 제시가 매우 미흡한 상황이며, 실측에 의한 유달율 산정은 지역적인 특성, 하도내 특성, 기상학적 특성 등 많은 인자들에 의해 좌우되기 때문에, 기존의 모니터링 자료만으로는 충분히 대표성을 가지는 유달 특성을 도출하기 쉽지 않다.

이에 대한 해결책이 유역모형을 이용하는 방법이며, 본 연구에서는 국내 유역 특성에 적합하도록 개발된 SWAT-K(한국건설기술연구원, 2007)를 이용하여 신뢰성 높은 유량 및 수질 모의자료를 기반으로 한 유달율 산정방법을 제안하고, 이에 기준하여 강우시와 비강우시의 유달 특성, 월별/계절별 유달 특성, 그리고 마지막으로 유황에 따른 유달 특성을 규명하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 유달율 산정 방법

유달율 산정을 위한 국내의 연구는 크게 토양유실량 산정에 의한 방법과 대상지점의 수문·수질을 실측하여 산정하는 법, 그리고 유역모형에 의하여 예측된 부하량으로부터 산정하는 법과 기존의 측정된 자료와 유달율에 영향을 미치는 인자로부터 경험론적 수식을 개발하여 산정하는 방법 등을 중심으로 진행되어 왔으며, 국외에서는 유사량 산정 및 유역모형에 의한 방법 등을 이용한 유달율 산정에 관한 연구가 과거부터 이어져 왔으며, 유달율 산정에 관한 이론적인 고찰 및 기존 산정방법의 한계를 인식하고 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

이러한 방법들 중에서 유역모형을 이용한 연구로서는 국내의 경우 신동석과 권순국(1997)이 복하천 주미교 상류에

대해 원단위를 통한 발생부하량과 배출부하량을 산정하고 WASP5 모형에 의한 유달부하량으로부터 월별/연평균 유달율을 산정한 바 있으며, 송대우(2004)와 송해중(2005)이 각각 영산강 본류 구간과 금강 지류 유구천을 대상으로 QUAL2E를 적용하고 원단위법에 의해 발생 및 배출부하량을 산정하여 수질항목별 유달율을 추정한 바 있다. 또한, 김만식과 정승권(2007)과 유혜은(2007)은 SWAT 모형을 이용하여 각각 서산A지구 간월호 유역과 대청호 유역을 대상으로 유달율을 산정한 바 있다.

국외의 경우는 좀 더 다양한 모형들이 적용되어 왔는데, Ebisemiju(1990)가 나이지리아 경사지에 유달율에 영향을 미치는 경사도, 경사길이, 토양 침투, 침식성 등의 4가지 요소를 식생별로 다단회귀모형을 통해 분석하였으며, Young 등(2001)은 호주 전역에 대해 ANNEX 모형과 SedNet 모형을 연계하여 유사와 영양물질 운송 특성을 검토하였고, Bartley 등(2003)은 호주 Queensland의 Herbert강 유역에 대해, SedNet 모형을 이용해 유사 및 영양물질에 대한 유달 특성을 분석한 바 있다. 또한, Birkinshaw and Bathurst(2006)는 SHETRAN의 적용을 통해 유역면적과 유사량의 반비례관계가 유역 특성에 따라 달리 나타날 수 있음을 입증하였으며, Post 등(2006)은 기존 경사지에서의 유사전달비를 산정하는 방법에 대한 개선안을 제시하였고, Alexander 등(2008)은 SPARROW라는 수질모형을 개발하여 미시시피(Mississippi)와 에캐펠레야(Atchafalaya) 강 유역으로부터 멕시코만으로 유입되는 오염원의 유달 특성을 규명한 바 있다.

본 연구에서 제안하는 유달 특성 규명을 위한 연구방법은 Fig. 1에 나타난 것과 같이, 우선 유역모형인 SWAT-K를 이용하여 유량에 대한 보정 및 검증을 통해 신뢰성 있는 장기간의 유량자료를 확보하고, 이를 기반으로 유역내 각 소유역별로 유황곡선(flow duration curve, FDC)를 도출한 후, 2004년부터 환경부(Ministry of Environment, MOE)에서 관측하고 있는 8일 간격 유량자료를 유황곡선과 비교하여 관측자료의 유황, 즉 대표성을 검증한다. 그리고, 8일 간격 관측 유량-수질 사이의 관계식(L-Q 회귀식)을 도출하여, 대표성이 검증된 지점에 대해 L-Q 회귀식을 이용하여 수문곡선과 같은 연속 수질부하량 곡선을 유도한다.

유도된 연속 수질부하량과 SWAT-K에 의한 모의부하량과의 비교로부터 수질 관련 매개변수를 보정함으로써, 모의 결과의 정확성 및 L-Q 회귀식의 활용성을 평가할 수 있으며, 최종적으로 모델링 결과를 이용하여 강우/비강우시, 월별/계절별, 유황별 유달 특성을 규명하고자 하며, 이는 관측자료에 기반한 L-Q식에 의해 도출된 수질부하량에 대해서도 같은 방법으로 유달 특성을 규명할 수 있다.

위에서 제시한 방법론에서 SWAT-K 모형의 유량 모의 신뢰성 평가 및 L-Q식에 의한 오염부하곡선의 유도에 대해서는 김남원 등(2008)의 연구에서 수행되었으므로, 간단히 일부 결과만 제시하고, 이 연구에서는 방법론적 측면에서 모델링에 의한 유달 특성 규명과 그 결과에 대해서 주로 언급하고자 한다.

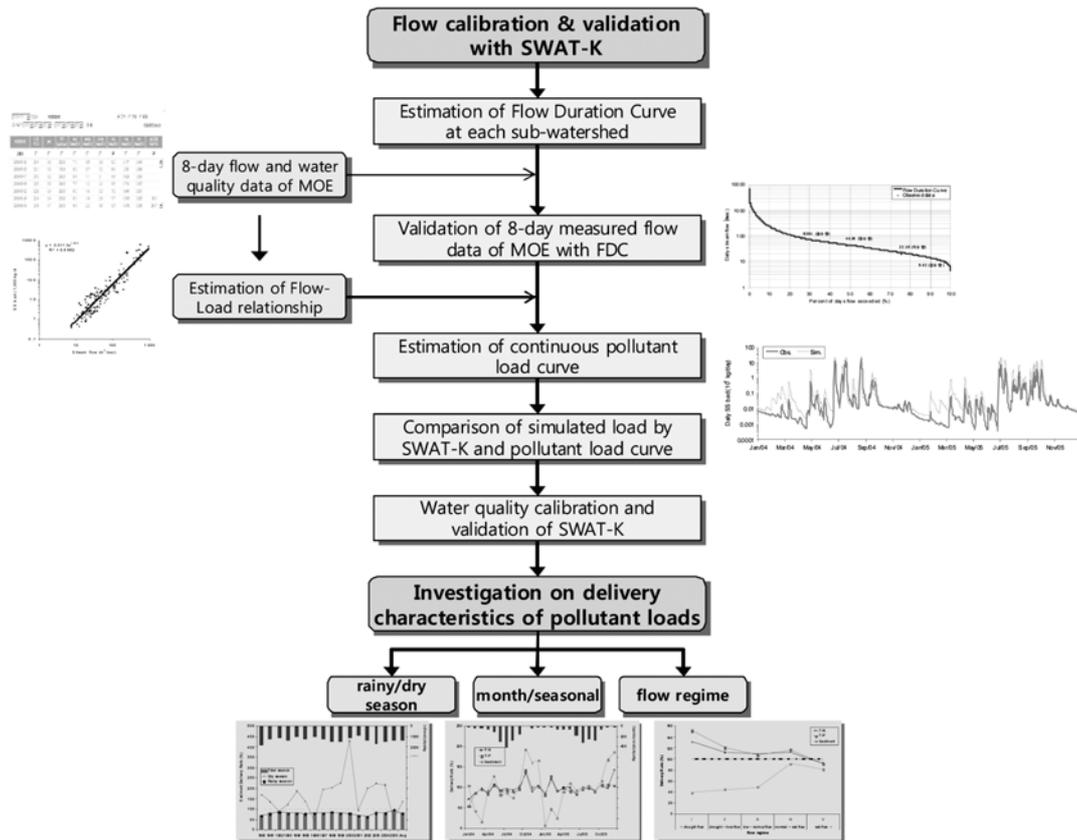


Fig. 1. Diagram of estimating pollutant delivery ratio using SWAT-K model.

2.2. 대상유역 및 SWAT-K 모형 구축

SWAT-K 모형 적용 및 유달 특성 규명을 위한 대상유역으로서, 그간 김남원 등(2006, 2007a, 2007b, 2007c), 김철겸 등(2007), 김철겸과 김남원(2008), 이정은 등(2008)의 연구자들에 의해 SWAT-K로부터의 유량과 유사 및 질소, 인 등의 수질 모의에서 높은 적용성이 입증된 충주댐 유역을 선정하였다.

대상유역의 최종 출구점은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 충

주댐 지점으로, 상류에 8개 오염총량관리 단위유역의 말단에서 2004년 이후 8일 간격으로 유량·수질 측정이 수행되고 있으며, 이를 기준으로 모형 적용을 위한 소유역을 구분하였다.

모형의 공간적인 입력자료로서, 환경부 DEM과 토지피복도, 국립농업과학원의 정밀토양도를 이용하였으며, 기상자료는 1990~2005년의 국토해양부와 기상청 자료를 소유역별로 면적평균하여 적용하였다. 모형 입력자료로부터 분석

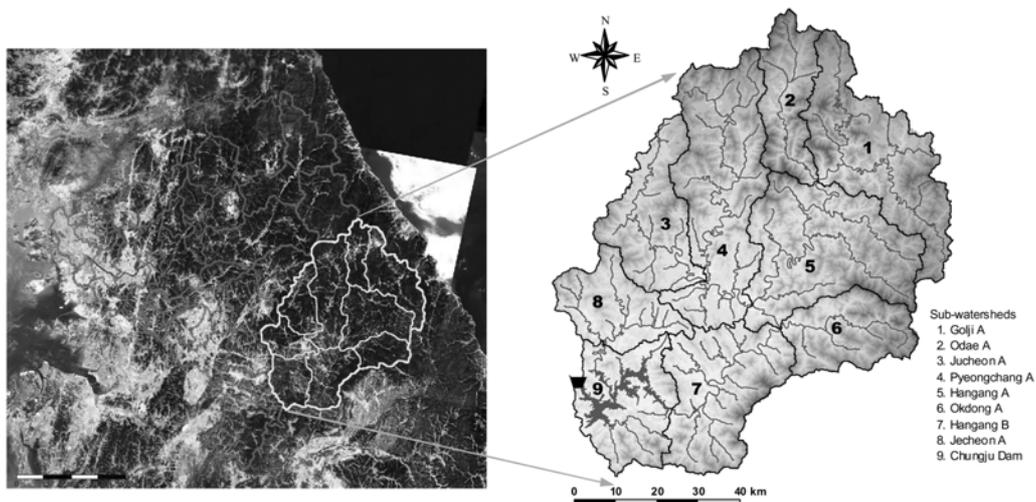


Fig. 2. Han River basin and Chungju Dam watershed.

Table 1. Area, slope, and land use of sub-watersheds

Sub-watershed	Outlet	Area (km ²)	Slope (m/m)	% of land use			
				Forest	Upland	Paddy	Others
1	Golji A	964	0.317	88	12	-	-
2	Odae A	451	0.343	94	6	-	-
3	Jucheon A	606	0.273	85	9	6	-
4	Pyeongchang A	1,161	0.294	87	10	3	-
5	Hangang A	1,079	0.372	90	10	-	-
6	Okdong A	490	0.376	95	5	-	-
7	Hangang B	807	0.330	91	9	-	-
8	Jecheon A	463	0.243	82	7	11	-
9	Chungju Dam	612	0.297	80	10	-	10

된 소유역별 면적 및 경사도, 토지이용 현황은 Table 1에 나타난 바와 같다.

우선, 모형에 의한 유량 모의는, 김남원 등(2007a), 김철겸 등(2007), 김철겸과 김남원(2008) 등이 언급한 바와 같이, 상류측에 양질의 관측자료가 충분하지 않아 최종 출구점인 충주댐 지점의 유입량 자료를 활용하여 보정을 수행하였으며, 분포형 모형의 특성상 각 유역내 소유역별 기상 및 토양, 토지이용 등의 물리적인 입력자료와 매개변수를 바탕으로 유량을 모의하기 때문에 시공간적 유량 모의의 신뢰성 확보에 충분한 것으로 판단된다. Fig. 3은 모의기간 중 2000~2005년에 대한 비교 결과를 나타낸 것이며, 일부 강우시, 그리고 갈수시에 차이가 있지만, 전반적인 모의 결과는 관측치와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 이는 Table 2의 통계치 분석 결과로부터 충분히 정교한 유량을 모의하는 것으로 판단할 수 있다.

따라서, 이로부터 각 소유역별 유황곡선을 도출할 수 있으며, Fig. 4의 한강A 지점의 예처럼 8일 간격 관측 유량과 비교한 결과, 8일 간격의 유량 및 수질 관측이 비교적 각 지점에서 나타날 수 있는 모든 유황조건을 충분히 고려

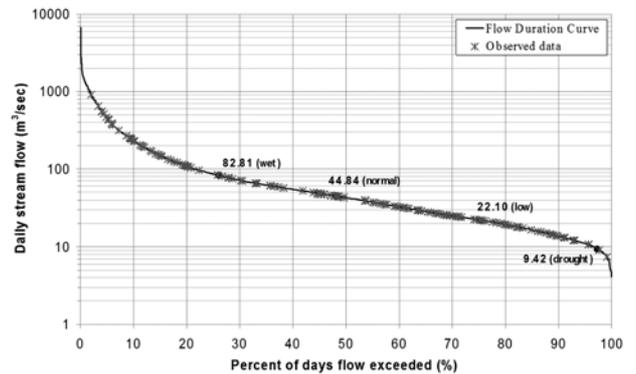


Fig. 4. Flow duration curve and observed flow data at Hangang A.

하여 수행되고 있고, 관측 유량과 수질부하량을 통해 분석한 상관성 높은 L-Q식과 신뢰성 있는 모의유량으로부터, 연속적인 수질부하량을 산정할 수 있음을 알 수 있다(김남원 등, 2008).

Fig. 5와 Fig. 6은 한강A 지점을 대상으로 L-Q식과 모의 유량으로부터 산정된 연속오염부하량과 SWAT-K 모형에

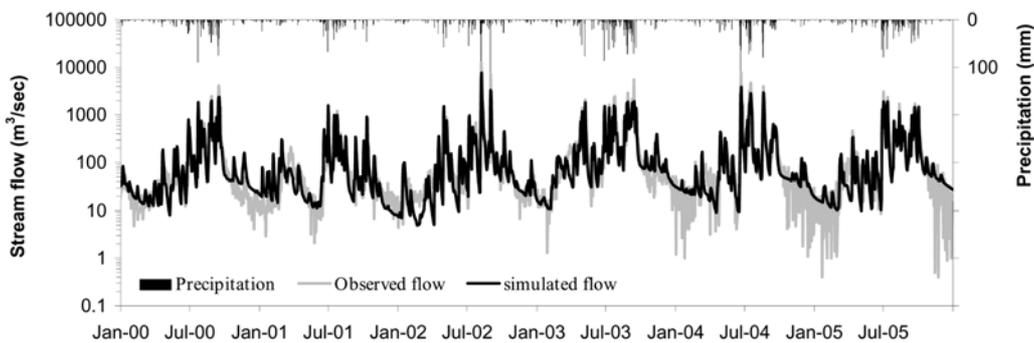


Fig. 3. Observed and simulated flows at Chungju Dam during 2000~2005.

Table 2. Model simulation results for daily stream flows

Year	Avg. annual precipitation (mm)	Avg. annual flow (mm)		RB ¹⁾ (%)	R ²⁾	MAE ³⁾ (mm)	ME ⁴⁾	Remark
		Obs.	Sim.					
1990~1997	1,253	739	758	2.65	0.77	0.92	0.76	Calibration
1998~2005	1,365	880	853	-3.13	0.76	1.01	0.74	Validation

1) RB: relative bias
 2) R²: coefficient of determination
 3) MAE: mean absolute error
 4) ME: Nash and Sutcliffe (1970) model efficiency

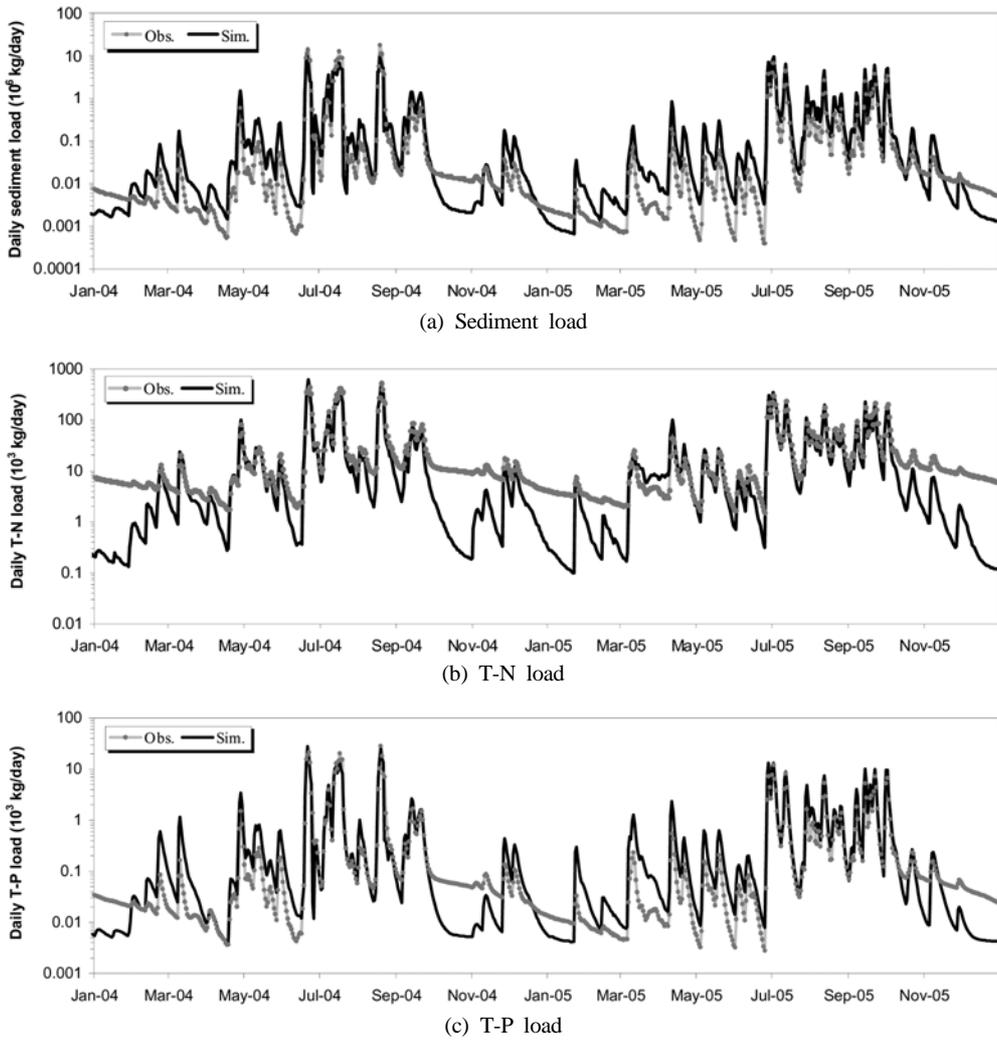


Fig. 5. Observed and simulated pollutant load curve at Hangang A.

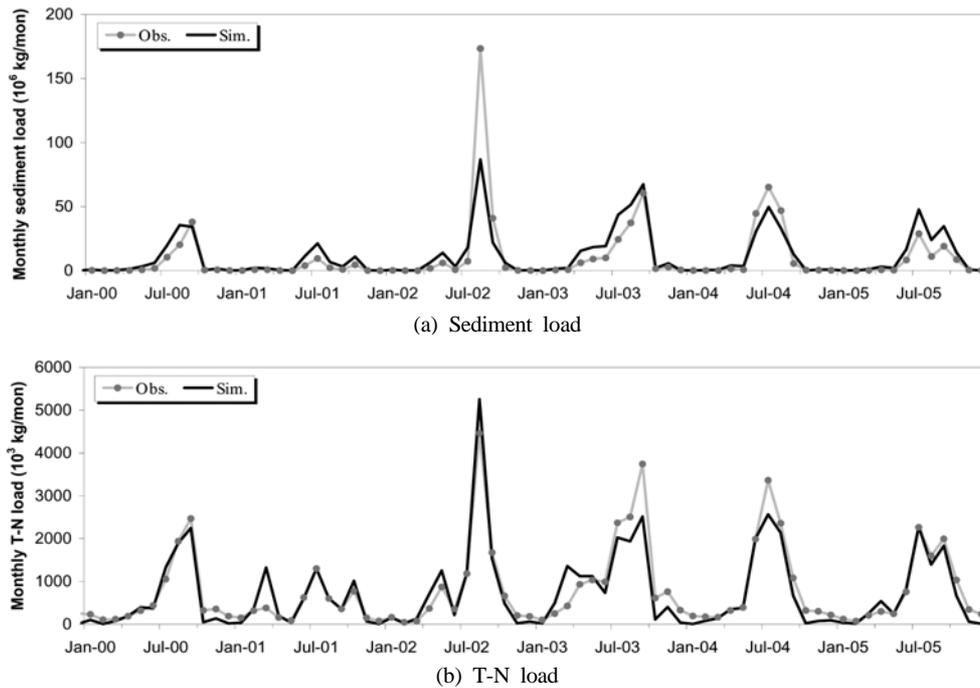


Fig. 6. Observed and simulated monthly pollutant loads at Hangang A.

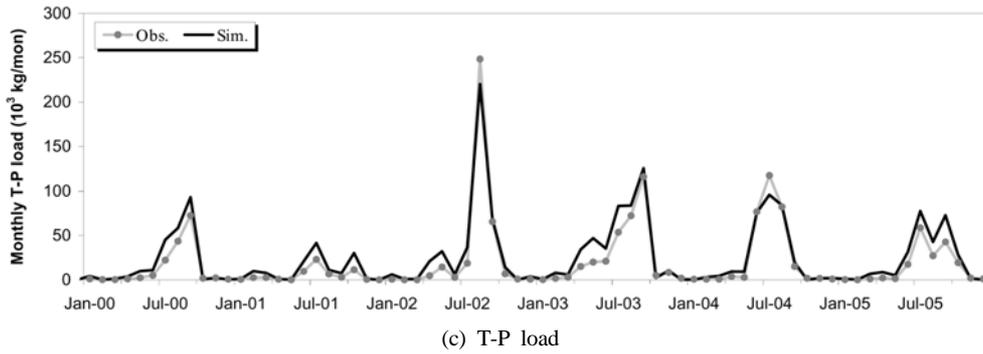


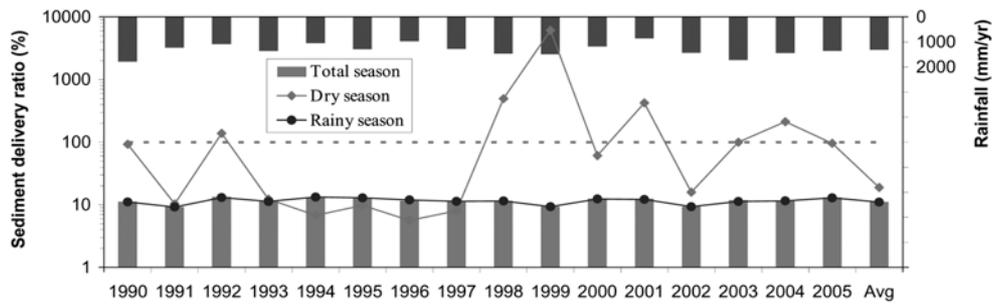
Fig. 6. Observed and simulated monthly pollutant loads at Hangang A (continued).

의한 부하량을 비교한 예로서, 각각 일 부하량과 월 부하량을 비교한 결과이다. 일부 갈수기 및 홍수기에 차이가 있지만, 제천A 지점의 T-P, 옥동A 지점의 유사와 T-P, 그리고 하류부인 한강B 지점의 유사와 T-P를 제외하고는 모두 Nash and Sutcliffe(1970) 모형 효율지수(ME)가 0.35 이상으로, Motovilov 등(1999)의 평가에 따르면, 만족 또는 양호한 수준의 모의 특성을 가지는 것으로 나타났다.

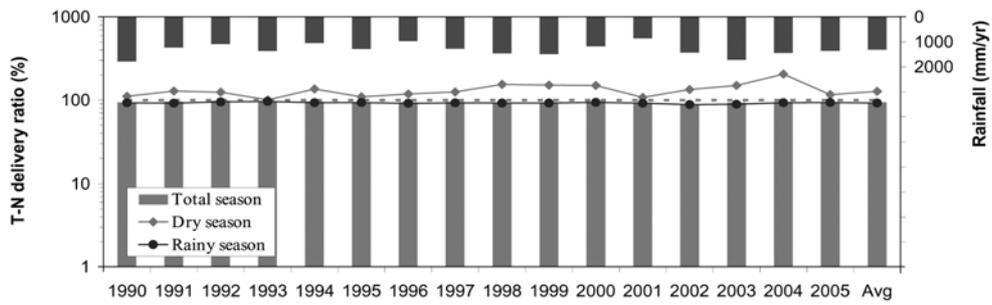
3. 결과 및 고찰

3.1. 강우시 비강우시 유달 특성

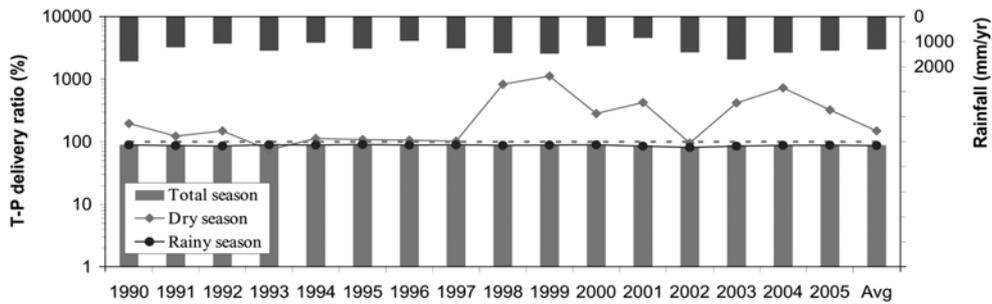
강우시 비강우시의 유달 특성을 검토하기 위해, 1990~2005년의 16년간 모의 자료를 바탕으로, 연도별 강우시의 유달율과 비강우시의 유달율을 각각 산정하였으며, 또한 강우시와 비강우시를 모두 포함하는 연간 부하량에 대한 유



(a) Sediment



(b) T-N



(c) T-P

Fig. 7. Pollutant delivery ratio during rainy and dry seasons at Golji A.

달율을 산정하여 비교하였다.

Fig. 7은 대상유역의 상류측에 위치한 골지A 지점에서의 유사, T-N, T-P에 대한 연도별 유달율을 산정한 것으로, 점선은 유달율 100%를 나타낸 것이다. 유사와 강우시의 경우 비강우시에는 연도별 많은 차이를 보이며(6~6,126%), 일부 연도에는 100% 이상의 높은 유달 특성을 보인 반면, 강우시에는 9~13%의 비교적 일정한 유달율을 나타내었다. T-N과 T-P의 경우도 비강우시에는 거의 100% 이상의 높은 유달율을 나타내고, 강우시에는 각각 88~96%, 81~91%의 일정한 유달율 결과를 보였다. 전 기간에 대한 연평균 유달율은 유사 11%, T-N 94%, T-P 88%로 나타났다.

비교적 하류측인 한강A 지점에 대해서도 Fig. 8에 나타난 것처럼, 유사의 경우 비강우시 33~320%로 연도별 큰 차이가 나타났으며 강우시에는 28~39%의 일정한 유달율을 보였다. T-N과 T-P의 경우도 비강우시에는 모두 100% 이상의 값을, 강우시에는 각각 89~95%, 87~94%의 값을 나타내었으며, 전 기간에 대한 연평균 유달율은 유사 33%, T-N

96%, T-P 94%로 나타났다.

다른 지점들에서도 마찬가지로 비강우시에는 100% 이상의 높은 유달 특성을 보이는 것으로 나타났으며, 강우시에 100% 이하의 일정한 유달율을 나타내었다. 비강우시의 유달율이 100% 이상이라는 것은 하천으로 유입되는 배출부하량보다 하천 하류 지점에서 나타나는 유달부하량이 훨씬 크다는 것을 의미하며, 이는 비강우시에는 하천 유량이 충분하지 못하기 때문에 유입되는 오염부하량에 대한 자정이 제대로 이루어지지 않거나 하천내 이미 축적된 부하량이 상대적으로 커서 유입 부하량보다 유출되는 부하량이 크게 나타난 이유로 판단된다. 하지만, Fig. 9에서 알 수 있듯이 비강우시의 유달부하량은 강우시의 부하량보다 상대적으로 매우 작기 때문에 전체 유달 특성에는 큰 영향을 주지 못하며, 주로 배출부하량의 크기에 따라 그 변화가 크게 좌우되는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 지점별로 연평균 유달율을 산정한 결과로서, 강우시나 전 기간에 대한 유달율을 보면 상류에서 하류로

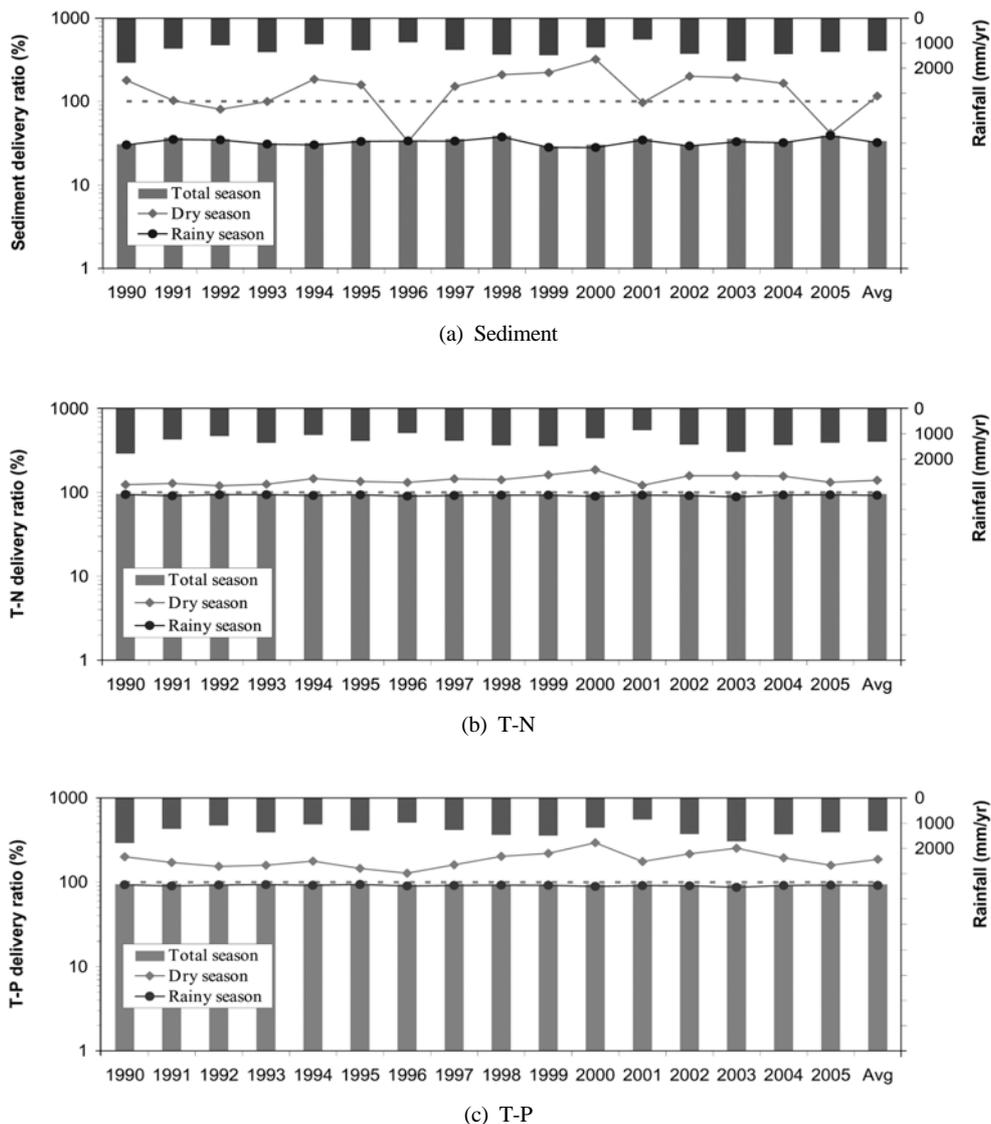


Fig. 8. Pollutant delivery ratio during rainy and dry seasons at Hangang A.

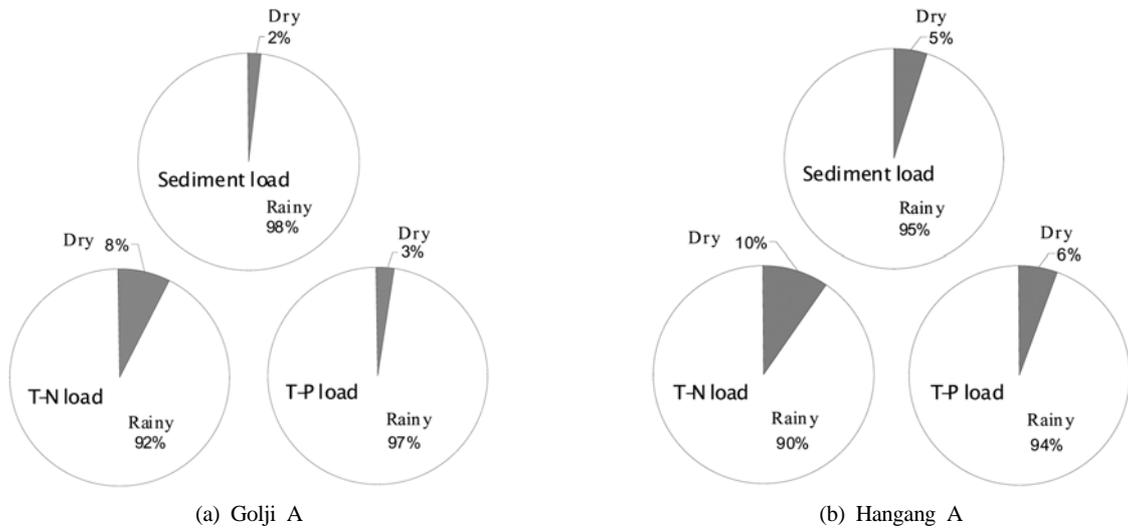
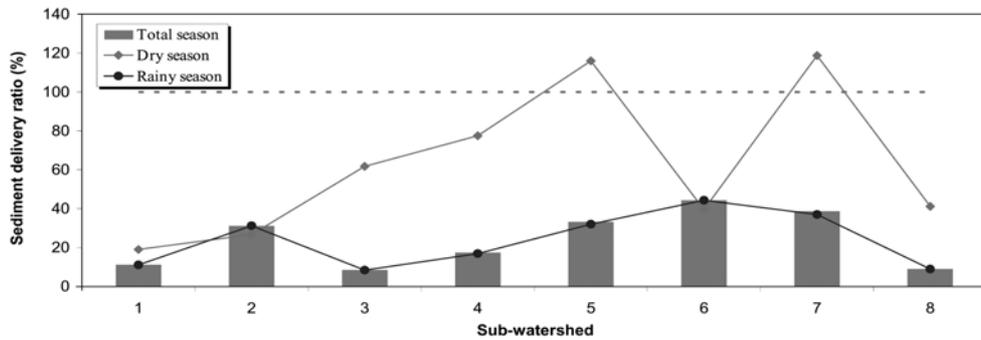
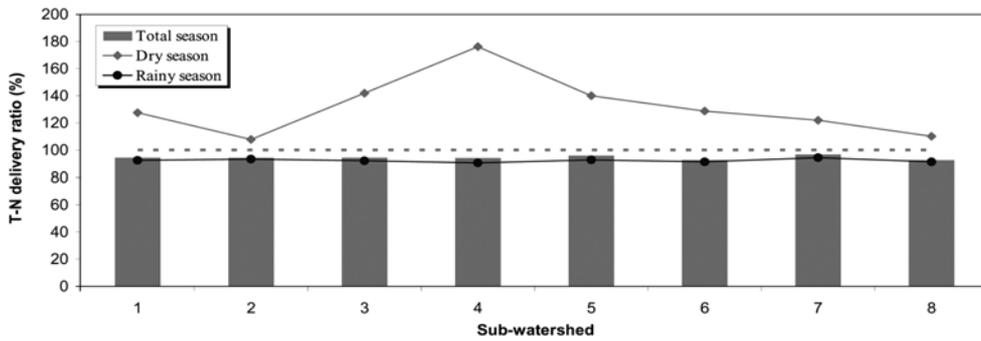


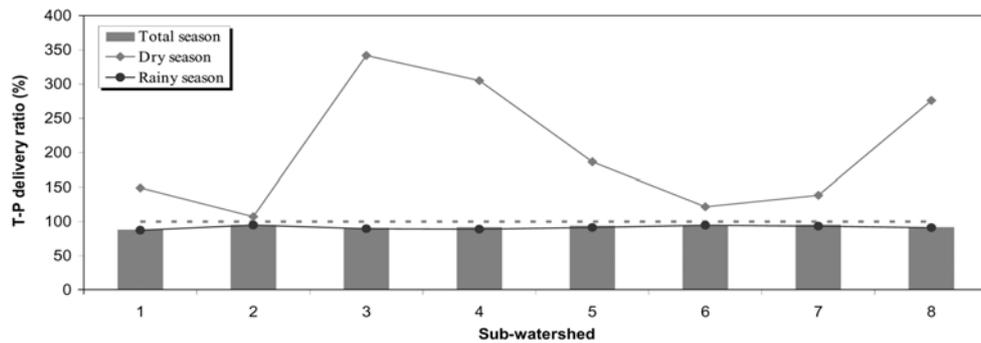
Fig. 9. Fraction of annual loads during dry and rainy seasons.



(a) Sediment



(b) T-N



(c) T-P

Fig. 10. Pollutant delivery ratio at each sub-watershed.

이어지는 주천A, 평창A, 한강A를 비교할 때 하류측에서의 유사에 대한 유달율이 점차 높게 나타났으며, T-N과 T-P는 지점별 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 비강우 시에는 앞서 기술한 바와 같이 배출부하량의 크기에 따라 지점별 차이가 큰 것으로 나타났다.

3.2. 월별 계절별 유달 특성

Fig. 11(a),(b)는 각각 골지A 지점과 한강A 지점을 대상으로 1990~2005년 모의 자료를 이용하여 월평균 유달율을 산정한 결과이다. 두 지점 모두 T-N과 T-P가 비슷한 값의 변화를 보이고 있으며, 2월에 가장 낮은 유달 특성을 나타내고 12월에 상대적으로 높은 유달율을 나타내고 있다. 12월은 대체적으로 강우량도 다른 시기보다 적고 이에 따른 유달부하량도 많지 않지만, 유입되는 배출부하량이 더 적기 때문에 상대적으로 100% 이상의 높은 유달율 수치를 보인 것으로 판단된다. 유사는 T-N, T-P의 유달율에 비해 상대적으로 낮은 값의 변화를 보이고 있으며, 유달부하량이 상대적으로 적은 겨울철(12월에서 2월)에 낮은 유달 특성을 나타내고 있다.

좀 더 자세한 월별 경향을 파악하기 위해 2000~2005년 사이의 월별 유달율을 Fig. 12와 같이 골지A 지점과 한강A 지점에 대해 살펴보았으며, 월별 차이가 매우 심하기 때문에 이해를 위해 로그 그래프로 비교해 보았다. T-N과 T-P의 경우 강우량이 적은 겨울철에 각 항목별 유달율이 높게 나타났고, 그 외 기간에서는 비교적 일정한 유달 특성을 보였으며, 유사의 경우도 일부 겨울철에 상대적으로 높은 유달율 값을 보이는 것으로 나타났다. 골지A 지점과 같은 경우는 상류측이어서 유량이 매우 적어 12월이나 1월

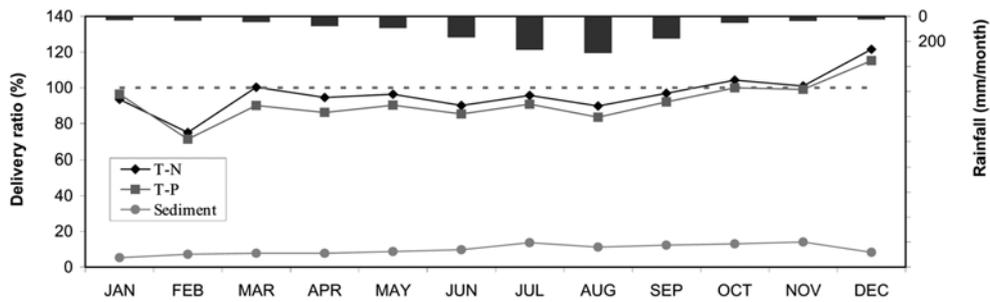
처럼 강우가 매우 적은 월에는 1,000% 이상의 유달율 값을 보이기도 하였다. 유사는 다른 항목들에 비해 강우-유출에 의한 영향이 매우 크게 작용하기 때문에 월별 유출 경향에 따라 많은 변화를 보이는 것으로 판단된다.

위와 같이 월별 유달율에 많은 차이를 나타내고 있으나, 실제 유역내 유달부하량의 대부분은 6~9월에 발생하기 때문에(김철겸 등, 2007; 김철겸과 김남원, 2008), 유역에서의 오염부하량 발생 및 배출 특성과 유달 특성을 나타내는 유달율은 이 기간 동안의 유달율에 의해 좌우된다고 볼 수 있다.

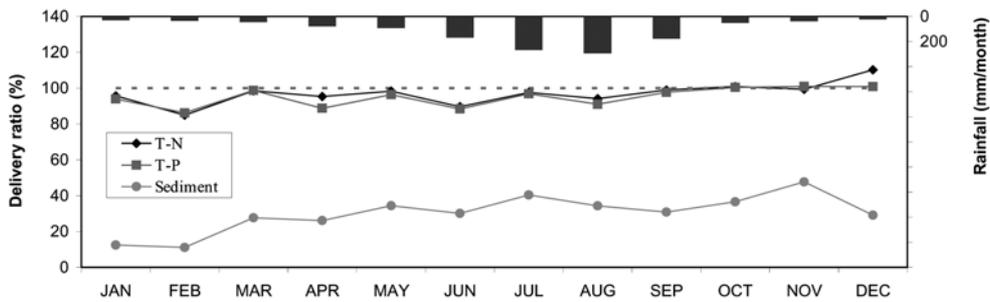
3.3. 유황별 유달 특성

기존에 유혜은(2007)과 허진석(2006)이, 각각 2월(저수기)와 6월(평수기), 8월(풍수기)과 10월(갈수기)의 월 유달율을 각 유황별 유달율로 추정한 바 있으나, 이는 평균 월 유달에 대한 평균 유달율의 개념으로서, 실질적인 유황, 즉 유량의 정도에 따른 유달율을 고려하기에는 많은 한계가 있다. 따라서, 이에 대한 해결책으로 모형 결과를 기반으로 비강우시 및 각 강우사상에 따른 총 유량과 총 배출 및 유달부하량 분석을 통해 갈수기, 저수기, 평수기, 풍수기 등의 유황에 따른 유달율을 도출하였다.

앞선 다른 분석과 마찬가지로 1990~2005년의 모의 자료를 이용하여, Fig. 13(a),(b)와 같이 유황별 유달율을 산정하였다. 그림에서 나타난 것과 같이 대체로 갈수기에 높은 유달율을 나타내고, 풍수량 이상에 대해 유달율이 낮게 나타나는 것으로 분석되었다. 특히 갈수량 이하에서 100% 이상의 유달율이 나타난 이유로는 비강우시에 높은 유달율이 나타난 이유와 마찬가지로 유입된 오염부하량에 대한 하천



(a) Golji A



(b) Hangang A

Fig. 11. Averaged monthly pollutant delivery ratio.

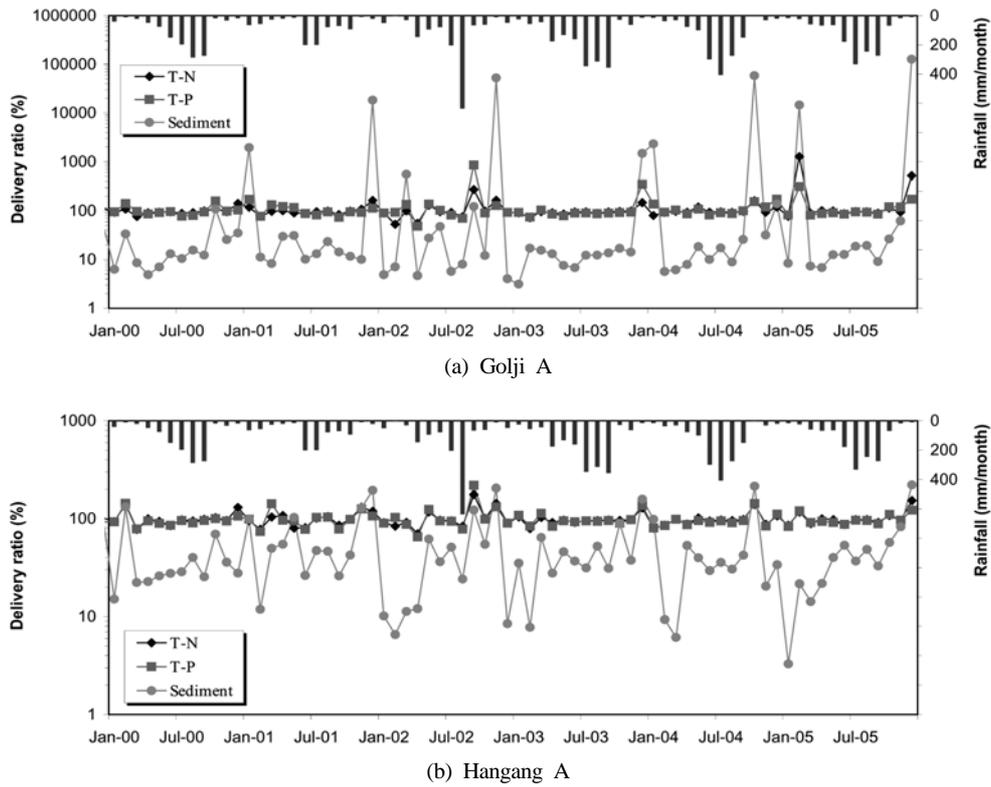


Fig. 12. Monthly pollutant delivery ratio during 2000~2005.

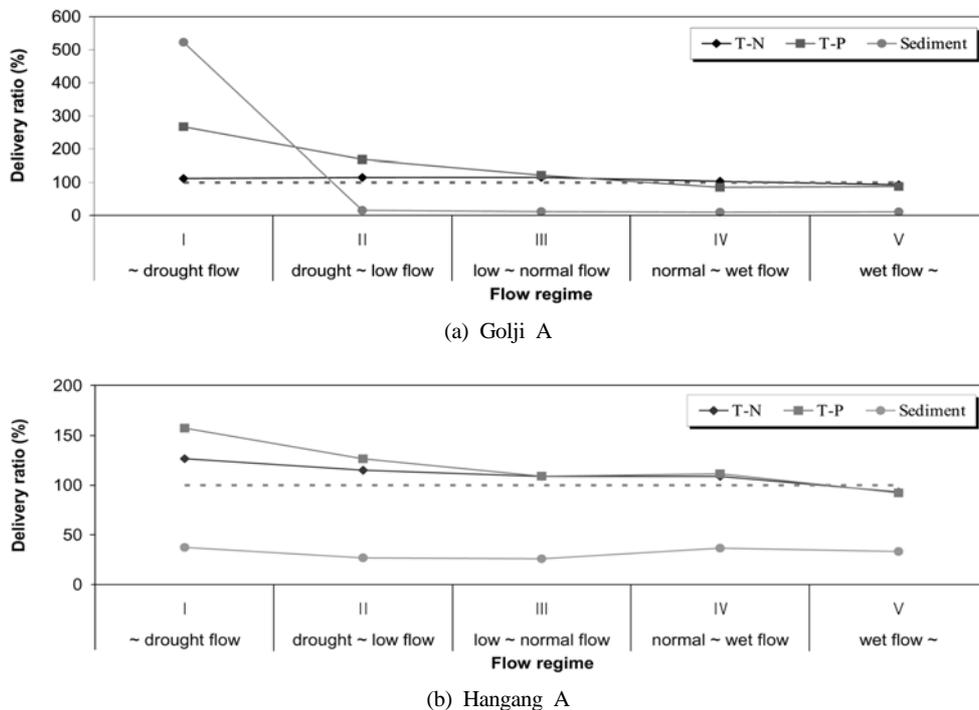


Fig. 13. Pollutant delivery ratio with flow regime.

의 자정능력이 충분하지 못하거나, 하천내 축적된 부하량이 상대적으로 커서 오히려 유입된 부하량보다 유출되는 부하량이 크게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

각 유황별 오염부하량의 분포를 살펴보면 Fig. 14와 같이 골지A 지점의 경우 풍수량 이상에서의 부하량이 전체 부

하량의 97%(유사), 88%(T-N), 97%(T-P)를 차지하고 있으며, 한강A 지점에서는 각각 92%(유사), 81%(T-N), 90%(T-P)의 부하량이 풍수량 이상에서 나타나고 있는 것으로 분석되었다. 다른 지점들에서도 비슷한 결과가 나타났으며, 김철겸과 김남원(2008)에 의해 충주댐 유역의 오염부하량 중 비

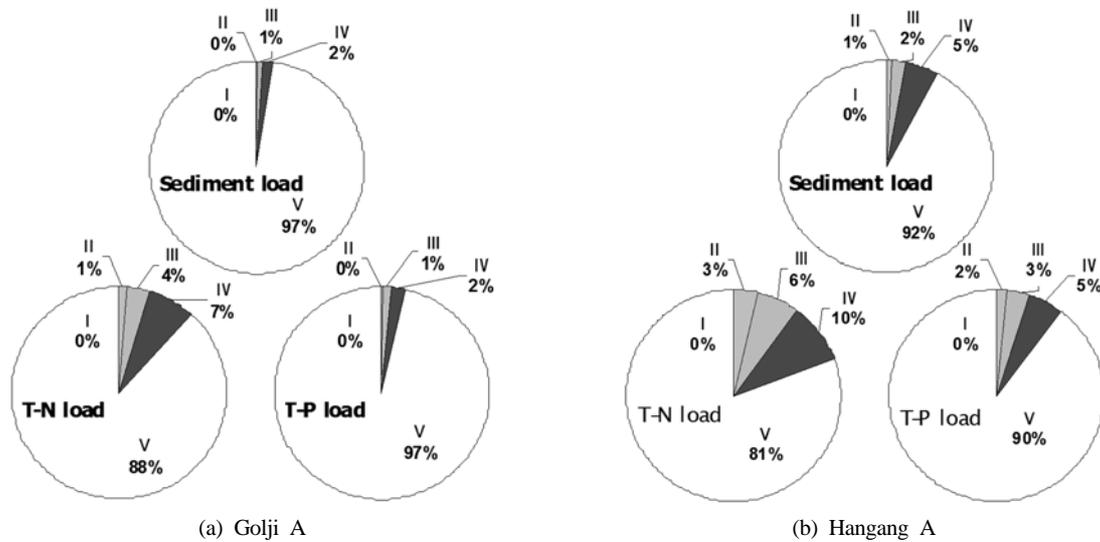


Fig. 14. Fraction of pollutant loads with flow regime.

점오염원이 90% 이상의 높은 비율을 차지하는 것으로 분석되고 있어, 대상유역의 전체 오염부하량 및 비점오염 부하량의 유달 특성을 규명하는데 있어 풍수량 이상의 유황이 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

배출부하량에 대한 유달부하량으로 정의되는 유달율은 유역의 유출특성지표로서 현재 시행중인 수질오염총량관리제의 목표수질 설정 및 할당부하량을 결정하는 중요한 요소이나, 실측자료의 부족과 적용 방법론의 부재 등으로 오염원별 유역특성별 유달율의 정량적인 제시가 매우 미흡한 상황이며, 강우-유출에 의해 발생하는 비점오염물질의 유황별 유달율 산정에 어려움이 많다. 따라서, 최근 활용도가 높은 유역모형들 중 유량 및 수질 모의의 정확성을 개선시킨 SWAT-K 모형을 이용하여 한강수계 충주댐 유역을 대상으로, 유역의 물리적 특성 및 기상학적 특성과 다양한 유황조건을 고려한 오염물질 유달율 산정방안을 제시하고, 이에 따라 강우시 및 비강우시, 월별 및 계절별, 유황별 오염부하 유달 특성을 분석하였다.

우선, 모의 수질부하량의 정확성에 대한 평가를 위해 각 소유역 지점별로 실측자료에 기반한 L-Q식을 통해 얻어진 오염부하량과 비교한 결과, 체천A 지점의 T-P, 옥동A 지점의 유사와 T-P, 한강B 지점의 유사와 T-P를 제외하고는 모형효율지수가 만족 또는 양호한 값을 보여, 장기 수질모의에 있어 충분한 신뢰성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

강우시 및 비강우시 유달 특성은, 상류인 골지A나 하류측의 한강A 지점을 비롯한 모든 지점에서 비강우시에는 100%가 넘는 유달율을 보이며 매우 큰 변화를 나타내는 반면, 강우시에는 100% 이하의 비교적 일정한 유달율 결과를 보이는 것으로 나타났다. 하지만, 비강우시의 유달부하량이 강우시의 부하량에 비해 매우 작기 때문에 전체 유달율에는 큰 영향을 미치지 못하며, 주로 유입되는 배출부하

량의 크기에 따라 비강우시의 유달율이 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 또한 지점별로는 상류측에서 하류측으로 갈수록 강우시 및 전기간의 유사에 대한 유달율이 높게 나타났으며, T-N과 T-P는 지점별 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

월별 및 계절별 유달 특성은, T-N과 T-P의 월평균 유달율 변화가 비슷하게 나타났으며, 강우량이 적고 유입되는 배출부하량이 상대적으로 적은 12월에 높은 유달율이 나타난 반면, 유사는 이에 비해 낮은 값의 변화를 보이며, 유달부하량이 상대적으로 적은 겨울철에 다소 낮은 유달 특성을 나타내는 것으로 분석되었다. 그러나, 실제 유역내 유달부하량의 대부분이 6~9월에 집중되고 있기 때문에, 이 기간 동안의 유달율이 유역의 전체 오염부하량 발생 및 배출특성과 유달 특성을 좌우하는 것으로 나타났다.

유황에 따른 유달 특성 분석 결과, 대체로 갈수기에 100% 이상의 높은 유달율을 나타내었는데 이는 비강우시에 높은 유달율이 나타난 것처럼, 유입된 오염부하량에 대한 하천의 자정능력이 충분하지 못하거나, 하천내 축적된 부하량이 상대적으로 커서 오히려 유입된 부하량보다 유출되는 부하량이 크게 나타났기 때문인 것으로 판단되었다. 반면 풍수량 이상에 대해서는 유달율이 100% 이하로 상대적으로 낮게 나타나고 있는데, 전체 오염부하량 중 약 90% 이상이 풍수량 이상에서 나타나고 있고, 비점오염원에 의한 영향이 90% 이상의 높은 비중을 차지하고 있기 때문에, 대상유역의 전체 오염부하량 및 비점오염 부하량의 유달 특성을 규명하는데 있어 풍수량 이상의 유황이 매우 중요한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 통해, 실측에 의해 고려하기 힘든 다양한 유역 및 기상특성과 유황조건에 따른 유달 특성을 규명할 수 있으며, 유역모형을 이용한 합리적인 유달율 산정방법을 이용하여 목표수질 달성을 위한 보다 과학적이고 합리적인 할당부하량 산정기반을 마련할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 하천구간별로 유역 특성 및 기상학적 특성에 따른 하

천의 자정능력에 대한 검토와 하천으로 유입되는 점·비점 오염원의 규명, 하천내 발생하는 오염부하량 특성에 대한 평가도 수행하고자 한다.

아울러, 이러한 방법론을 뒷받침하고, 이에 따른 분석 및 평가 결과의 정확성을 제고시키기 위해서는 현재 관측·수집되고 있는 유량 및 수질 자료의 지속적인 관측과 확충을 통해 양적·질적 신뢰성이 확보되어야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 3단계 연구비(과제번호 2-2-3) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 국립환경과학원·금강물환경연구소(2006). *비점오염모델링 기술을 이용한 유역 오염물질 배출해석 최종보고서*. 금강수계관리위원회.
- 김남원, 신아현, 김철겸(2008). 8일간격 관측수질자료를 이용한 연속오염부하곡선의 유도 및 검증. *공동 추계 학술 발표회 논문집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 504-505.
- 김남원, 이병주, 이정은(2006). SWAT을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가. *한국수자원학회논문집*, **39**(10), pp. 833-844.
- 김남원, 이병주, 이정은(2007a). 공간모의유량을 이용한 갈수량 거동 특성에 관한 연구. *대한토목학회논문집*, **27**(4B), pp. 431-440.
- 김남원, 이정우, 이병주, 이정은(2007b). 비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도추적법. *대한토목학회논문집*, **27**(5B), pp. 533-542.
- 김남원, 이정은, 이병주(2007c). 한강유역의 다목적댐 운영에 따른 유황변동 특성 분석 및 평가. *대한토목학회논문집*, **27**(1B), pp. 53-63.
- 김만식, 정승권(2007). SWAT 모형을 이용한 농촌 소하천 유역의 오염부하량 유달을 산정. *학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 1517-1521.
- 김철겸, 김남원(2008). 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(4), pp. 465-472.
- 김철겸, 이정은, 김남원(2007). 충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성. *한국수자원학회논문집*, **40**(11), pp. 887-898.
- 송대우(2004). 영산강 수질보전을 위한 필요유량 및 허용오염부하량 산정. 석사학위논문, 전남대학교.
- 송해중(2005). 유구천 유역의 수질예측 및 최적관리방안에 관한 연구. 석사학위논문, 한밭대학교.
- 신동석, 권순국(1997). WASP5 모형을 적용한 복하천의 수질 예측. *한국환경농학회지*, **16**(3), pp. 233-238.
- 유혜은(2007). SWAT 모형을 이용한 대청호 유역의 오염물질 유달을 산정. 석사학위논문, 청주대학교.
- 이정은, 김남원, 정일문, 이정우(2008). 유역수문모형과 빈도 해석을 이용한 충주댐 상류유역 지하수 개발가능량의 평가. *자원환경지질*, **41**(4), pp. 443-451.
- 정종태, 김진한, 박수영, 박정환(2002). 유달을 이용한 소하천의 수질환경용량 평가에 관한 연구. *환경관리학회지*, **8**(2), pp. 145-150.
- 한국건설기술연구원(2007). *수자원의 지속적 확보 기술 개발 사업: 지표수 수문성분 해석시스템 개발*. 과학기술부.
- 허진석(2006). GIS를 활용한 동천 상류유역 생태계의 특성에 관한 연구. 석사학위논문, 대구한의대학교.
- Alexander, R. B., Smith R. A., Schwarz, G. E., Boyer, E. W., Nolan J. V., and Brakebill, J. W. (2008). Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin. *Environmental Science & Technology*, **42**, pp. 822-830.
- Bartley, R., Henderson, A., Prosser, I. P., Hughes, A. O., McKergow, L., Lu, H., Brodie, J., Bainbridge, Z., and Roth, C. H. (2003). *Patterns of erosion and sediment and nutrient transport in the Herbert River Catchment, Queensland*. CSIRO Land and Water Consultancy Report, CSIRO Land and Water, Canberra, Australia.
- Birkinshaw, S. J. and Bathurst, J. C. (2006). Model study of the relationship between sediment yield and river basin area. *Earth Surface Processes and Landforms*, **31**(6), pp. 750-761.
- Ebisemiju, F. S. (1990). Sediment delivery ratio prediction equations for short catchment slopes in a humid tropical enrichment. *Journal of Hydrology*, **114**, pp. 191-208.
- Motovilov, Yu. G., Gottschalk, L., Engeland, K., and Rodhe, A. (1999). Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99, pp. 257-277.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I-A: Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290.
- Post, D. A., Kinsey-Henderson, A. E., Bartley, R., and Hawdon, A. (2006). Deriving a spatially-explicit hillslope sediment delivery ratio model based on the travel time of water across a hillslope. *iEMSs 2006 Summit on Environmental Modelling and Software*, 9-13 July 2006, Burlington, VT.
- Young, W. J., Prosser, I. P., and Hughes, A. O. (2001). *Modelling nutrient loads in large-scale river networks for the National Land and Water Resources Audit*. CSIRO Land and Water Technical Report 12/01, CSIRO Land and Water, Canberra, Australia.