

낙동강수계 수질오염총량관리를 위한 시범소유역 유황별 유달율 산정방법 연구

손태석 · 박재범 · 신현석[†]

부산대학교 사회환경시스템공학과

A Study on Estimation of the Delivery Ratio by Flow Duration in a Small-Scale Test Bed for Managing TMDL in Nakdong River

Tae-Seok Shon · Jae-Bum Park · Hyun-Suk Shin[†]

School of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University
(Received 24 April 2009, Revised 1 September 2009, Accepted 7 September 2009)

Abstract

The objective of this study is to construct the watershed management system with link of the non-point sources model and to estimate delivery ratio duration curves for various pollutants. For the total water pollution load management system, non-point source model should be performed with the study of the characteristic about non-point sources and loadings of non-point source and the allotment of pollutant in each area. In this study, daily flow rates and delivered pollutant loads of Nakdong river basin are simulated with modified TANK model and minimum variance unbiased estimator and SWAT model. Based on the simulation results, flow duration curves, load duration curves, and delivery ratio duration curves have been established. Then GIS analysis is performed to obtain several hydrological geomorphic characteristics such as watershed area, stream length, watershed slope and runoff curve number. As a result, the SWAT simulation results show good agreements in terms of discharge, BOD, TN, TP but for more exact simulation should be kept studying about variables and parameters which are needed for simulation. And as a result of the characteristic discharges, pollutants loading with the runoff and delivery ratios, non-point sources effects were higher than point sources effects in the small-scale test bed of Nakdong river basin.

keywords : Delivery Rate Duration Curve (DRDC), Deliverly ratio, Flow Duration Curve (FDC), Load Duration Curve (LDC), Soil Water Assessment Tool (SWAT)

1. 서론

유달율은 유역의 유출특성 지표로서 총량관리 목표수질 설정 및 할당부하량을 결정하는 중요한 요소이나, 실측자료의 부족과 적용 방법론 부재 등으로 유황별 유달율 산정에 어려움이 많은 실정이다. 이에 유황별 유달율 산정방법을 정립하여 목표수질 달성을 위한 보다 과학적이고 합리적인 할당부하량 산정의 기반 마련이 시급하다. 또한 장기적인 관점에서 비점오염원이 총량관리에서 차지하는 비중이 점차 증가될 것으로 예측되는 바, 총량관리에 유역모델을 적용할 수 있는 방안 연구가 필요하다. 비점오염원은 토지이용 형태에 따라 오염원이 광역적으로 산재하여 오염물질의 발생이 어느 특정지점이 아닌 면적으로 분포되고, 오염물질의 유출은 강우 및 강설 시에 발생하는 오염원이다. 점오염원과는 달리 처리시설에서의 처리가 곤란하고, 강우-유출과 밀접한 관련이 있어 전체 비점오염물질의 약 80%가 5월~9월 사이에 유출되며, 건기인 10월에서 4월까지의 연간 총량의 약 20%가 유출되고 있다(국립환경연구원, 2001).

강우 시 유출되기 때문에 일간, 계절간 배출량 변화가 크고, 기후, 지형, 토지이용형태, 토양 등 지역적인 특성과 유역의 형상에 따라 변화되므로 오염물질의 정량화를 위해서는 강우지속시간 동안의 정확한 유량과 수질에 대한 실측자료가 요구된다. 최근까지 정부에서는 하수처리시설 등 환경기초시설의 확충으로 점오염원에 대한 관리는 지속적으로 추진해 왔으나 비점오염원에 대한 관리는 미흡한 실정이고 강우 시에 비점오염물질에 대한 실측자료를 수집하기 위해서는 강우지속시간 동안 유량-수질을 측정해야 하기 때문에 막대한 예산과 인원이 소요되는 어려움으로 심층적인 실측자료가 거의 없는 실정이다. 또한 점오염원에 대한 지속적인 투자에도 불구하고 수계의 수질이 향상되지 않는 이유는 점오염원의 관리가 엄격히 수행되고 있는 현실에 비추어 볼 때 비점오염원의 영향이 큰 것으로 판단된다. 미국 등 일부 선진국에서는 비점오염원의 적극적 규제 및 처리를 실시하고 있으며, 우리나라도 최근에 와서 공공수역의 수질관리를 위해서는 비점오염원 제어가 중요하다는 사실을 점차 인식하고 있다. 국가의 경제력이 신장될수록 점오염원 관리에 투자비용이 증가하여 점오염물질은 점차 감소하지만, 토지이용의 고밀도화를 초래하여 비점오염물질이 수질오염에 미치는 기여도는 증가할 것이다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
hsshin@pusan.ac.kr

유역모델은 유역의 지형적인 특성과 수리·수문학적 특성 및 오염원의 공간적인 분포를 적용시켜 일별 오염물질 유출량을 모의할 수 있다. 점 및 비점오염물질의 유출량 및 하천의 목표지점에서의 유달부하량에 대한 거동규명을 위해서는 비강우시 및 강우 시에 항상 현지에서 유량과 수질을 실측해야 가장 정확한 자료를 얻을 수 있다. 그러나 수질·유량 자료의 실측은 작업여건이 힘들고 많은 경비와 인력이 필요하기 때문에 비효율적이므로 수계의 실측자료로부터 유역모델을 보정 및 검증하여 오염물질의 유출해석에 이용하는 방법이 바람직하다(류덕희 등, 2008). 유역모델은 기후나 토지이용 혹은 유역 관리 상태와 같은 모델의 변수나 계수를 변화시킴으로써 향후 발생될 수 있는 결과를 모의할 수 있고, 수변구역과 같은 비점오염 저감시설의 처리효율 산정에도 적용 가능하다. 또한 실측자료의 부족으로 인한 유달을 산정의 어려움에 대한 보완이 가능하고 하천과 호소의 수질모델과 통합하여 유역통합관리시스템과 연계운영하면 보다 과학적인 유역관리를 시행할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 예측수질을 전망해야 하는데 예측수질의 전망을 위한 수질모델링의 중요한 부분은 유달부하량의 산정이며, 유달부하량은 유달율에 의해 산정되므로 이에 본 연구의 의의가 있다.

본 연구는 낙동강수계 특성을 고려한 연구대상 지역에서 실시간 자동모니터링으로 수질·유량자료를 확보하여 실측법과 유역모델법을 통해 유형별, 유역특성별 합리적인 유달을 산정방법을 제시하고 연구대상 지역에 적용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구내용 및 범위

본 연구는 영남권 최대 상수원으로서 매우 중요한 역할을 하고 있으나 부영양화, 수질오염사고 등으로 용수이용에 위협을 받고 있는 낙동강수계를 연구 대상지역으로 선정하였다. 이에 따라 유형·유역특성·오염물질별 유달을 산정방법을 비교·분석하여 문제점 및 개선방안을 제시하고 유역특성별 시범지역을 선정하여 수질·유량 실시간 자동모니터링을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 낙동강수계 오염물질 배출 및 유달특성을 조사·분석하여 유형별, 유역특성별 합리적인 유달을 산정방법을 제시하고 적용성을 평가하여 총량관리 배출부하량 산정에 이용 가능한 유역모델 적용방안을 제시하는데 있다.

이를 위해 환경부 8일 간격 유량·수질 자료를 유역모형과 통계적 방법을 이용하여 일 단위의 유량·수질 자료로 확장·모의하였다. 또한, 유황곡선(Flow Duration Curve, FDC)과 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC) 및 유달율포락곡선(Delivery Ratio Duration Curve, DRDC)을 작성하여 유황에 따른 유달율의 변화를 분석하였다.

2.2. 유달을 산정기법 조사 및 개발

2.2.1. 유달을 산정기법 비교 및 분석

실측기반 유달을 산정에서, 유달율은 오염원으로부터 배출된 오염물질이 수체의 특정지점에 도달하는 비율을 의미하며 소유역별 또는 오염원별로 산정한다. 기준년도 기준으로 배출량 산정방법을 통해 산출된 월 또는 일별 배출부하량(이하 ‘일평균배출부하량’이라 한다)과 해당 시기에 대하여 수계환경자료 조사를 통해 산출된 유달부하량(=유량×수질)으로부터 산정하는 방법이다. 실측자료가 있는 경우 수질관측지점의 수질과 유량자료를 기초로 산정한 유달부하량을 배출부하량으로 나누어 산정하는 방식으로 식 (1)과 같다.

$$K = \frac{P_M}{P_T} \tag{1}$$

여기서, K : 오염부하 유달계수

P_M : 수질측정지점에서의 실측 오염부하량

P_T : 유역에서 발생한 총 배출부하량

실측자료가 없는 경우 실측자료가 없는 소유역의 기준유량 시점의 유달율은 실측자료가 있는 소유역의 월별로 산정한 유달율과 유량·면적비의 관계를 지수형태로 회귀하여 도출한 유달함수식을 적용하고 식 (2)와 같다.

$$\text{유달율} = a \left(\frac{\text{유량}}{\text{소유역면적}} \right)^b \text{ (단, } a, b \text{는 상수)} \tag{2}$$

실측기반 유달을 산정기법의 특징은, 적용성이 뛰어나나 유달특성에 영향을 미치는 기상요소, 유역의 물리적인 유달 특성 반영 못하고 질소의 배농도를 고려하지 못하며(유달율 1이상 발생) 수질 미측정 유역에 적용 시 유역의 자정능력과 수리·수문학적 특성 반영하지 못한다.

유역모형을 이용한 유달을 산정은 기준년도 기준으로 산정한 배출부하량과 해당시기에 수계환경조사자료를 모형의 입력자료로 하여 생성한 모의부하량의 비를 이용하여 유달율을 산정하는 방법이다. 지표에서 수계로의 오염물질의 이동을 예측하기위해 설계된 기법으로 부하량이 토지 사용의 유형만을 사용하는 간단한 부하량 평가 모델에서부터 강우, 유출수, 퇴적물 이탈 및 운반과정을 보다 명시적으로 설명해 주는 복잡한 시뮬레이션 기법에 이르기까지 다양한 종류로 구분할 수 있다. 또한 수계내의 모든 부하량을 통합 계산하는 방식과 오염 발생 단위 분지로 구분하여 계산하는 방식이 있다. Field Scale Model은 전통적으로 농업 시스템에 특화된 모델로서 규모가 작고 보다 국지화된 규모에서 작동하도록 설계된 부하량 모델로 관리 조치 및 기법의 선택을 돕기 위한 용도로 흔히 사용된다. 유입수계 모델은 수체가 오염물질부하량, 유량 및 주변 상태에 대해 보이는 반응을 중요하게 취급하고 생태학적 모델은 오염물질과 서식처 변화와 같은 환경과 피요인에 대한 생물 군집 및 생물 군집의 반응을 시뮬레이션 한다. 통합 모델링 시스템은 하나의 시스템에 포함

된 모델, 데이터 및 사용자 인터페이스를 연결하는 방식을 사용하는 방법이다. 단순 모델, 중급 모델 및 상세 모델이라는 3개의 일반적인 범주로 구분할 수 있으며 모든 모델은 절차의 단순화 수준(그리고 시스템의 복잡성 수준) 및 분석과 출력 정보의 표시에 사용되는 시간의 길이에 기초하여 그 특성을 구분할 수 있다. 단순화된 방법은 수계에 위치한 중요한 오염물질 발생원을 빠르고 손쉽게 식별하기 위한 수단으로 사용하고 상세한 수계 모델은 이와는 달리 수많은 관리방안으로부터 오염물질 부하량을 계량적으로 추정하는 방식을 취하며, 극단적 비용과 시간이 많은 드는 방법이다. 또한 중급 수계 모델은 비용, 복잡성 및 정확성 면에서 단순 모델과 상세 수계 모델의 중간 정도의 위치에 있다. 유역모형 기반 유달을 산정기법의 특징은 유역의 지형적 특성과 수리·수문학적인 특성을 고려하는 것이 가능하고 오염원의 공간적인 분포 특성 및 비점오염원 유출 구조를 반영하는 것이 가능하다. 강우, 유출수, 퇴적물 이탈 및 운반과정을 보다 명시적이며 수질 미측정 유역 적용 시 유역의 자정능력과 수리·수문학적 특성을 반영하여 정확성은 뛰어나나 복잡하고 전문성을 필요로 하고 비용과 시간이 많이 드는 단점이 있다.

기타 유달을 산정 방법으로 일반토양방정식 이용법, ASCE 이용법, 합리식 이용법, 통계식 이용법 등이 있다. 일반토양방정식 이용법은 토양을 구성하는 성분의 상대적인 양에 따라 오염물질이 흡착 또는 탈착되는 정도는 매우 다르기 때문에 오염물질이 수계로 전달되는 유달을 구하기 위하여 위의 방법을 적용하기는 매우 곤란하다. ASCE 이용법은 유역의 지형적 특성만을 고려하고 있으며, 침식 토양의 침식에 관계하는 여타의 요소는 포함되지 않은 단점이 있다. 합리식 이용법은 합리식의 유출계수를 오염물질이 수계로 유입되는 유달효과를 산정하는 대략적인 지표로 사용하는 방법이다. 오염물질의 유달율은 침식량의 유달율과 반드시 일치한다고 볼 수 없으며, 토양이 함유하고 있는 오염물질에 따라 다르다. 통계식 이용법은 유달율을 산정하기 위하여 인구수, 유역면적과의 관계식을 다중회귀분석을 통하여 도출하는 방식으로 일반적인 유달을 범위는 0.017~0.070이다. 회귀방정식은 회귀분석에 사용된 자료의 정확도와 고려된 독립변수의 합리성 등이 충분히 설명되지 않고 실측에 의한 값이 보여주는 범위와 큰 차이가 있는 점에서 효과적이지 못하다.

2.2.2. 유역모형 선정

다양한 선행 연구에 대한 검토와 모형별 비교, 검토 과정을 거쳐 적정 유역모형으로 미국 ARS의 SWAT(Soil Water Assessment Tool) 모형을 선정하였다. 유역모형 선정기준은 효율적인 연산기능, 비교적 세밀한 지형공간 분석 가능, 입력자료 구축이 용이, 시간적으로 연속형 모의 가능, 토지관리 시나리오 모의 가능, 적절한 모의 결과를 도출 가능, 해당 유역에의 적용 가능성, 신뢰성·가용성 및 예측 가능성 등이다. SWAT 모형은 단순하고, 효율적이지만, 추적성분과의 연계가 실제와 유사하게 고려되고 있는 장기유출 모의

가 가능한 대규모 하천유역의 농업관리를 위한 모델이다. 또한 대규모 유역에서의 물공급 및 비점오염 평가 등 수자원 관리자를 위해 개발된 operational 또는 conceptual 모델이므로 적절한 유역모형을 선정했다고 판단된다.

대상 유역을 기준으로 SWAT 모형에서 소유역을 분할하고 대상 수계의 오염총량 기본계획을 바탕으로 점오염원 방류량 자료와 취수원 자료를 입력한다. 낙동강 수계의 기상자료 관측 지점을 입력하여 각 단위유역의 기상자료(최고기온, 최저기온, 강수량, 상대습도, 평균풍속, 일사량)를 구축하여 입력한다. 또한 대상 수계의 토양도와 토지이용도를 입력하고 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 수문학적 반응단위(HRUs)를 생성한다. 그리고 모형을 보다 현실성 있게 구축하기 위하여 필요할 경우 대상 수계 내의 경작 자료를 입력하여 모형의 수질 분석부분에서 정확도를 향상시키고 최종적으로 구축된 자료를 바탕으로 SWAT 모형을 실행하여 분석을 수행한다. 시험유역으로 선정된 대상 수계에 해당하는 단위유역에 대한 국립환경과학원 8일 간격 수질과 유량 자료를 바탕으로 TANK 모형을 이용하여 8일 간격 관측 데이터를 확장하여 일 데이터로 생성 후 TANK 모형을 이용해 생성한 일 자료를 이용하여 모형의 보정 및 검증을 수행한다. 본 연구에서 SWAT 모형의 보정 및 검증을 위한 일 자료를 생성하기 위해 선정된 TANK 모형은 대상 유역을 오리피스형의 유출공을 가진 몇 개의 저류형의 가상용기(TANK)를 조합하여 유량을 유량으로 변환하는 유출계산법으로 장기유출해석에서 비교적 높은 평가를 받고 있는 모형이다. TANK 모형을 통해 생성한 일 유량자료를 이용하여 유량부분에 대한 검토를 수행하고 최소분산 비편향 추정기법을 이용하여 생성한 유량-수질농도 관계곡선식을 생성한다. 이를 이용하여 생성한 일 부하량 자료를 이용해 모형의 수질 부분에 대한 보정 및 검증을 수행한다.

2.2.3. 유형별 유달을 산정 기법 개발

실측기반 유달을 산정을 위해서 유역특성별 모니터링 지점의 8일 간격 수질과 유량을 이용하여 8일 간격 유달부하량을 생성하고 TANK 모형 또는 Rating Curve을 이용하여 일 유량 생성을 통해 유황곡선을 작성한다. 그리고 유황곡선과 유량-유달부하량 관계곡선을 이용하여 부하지속곡선을 작성하고 해당 유역의 배출부하량과 부하지속곡선을 이용하여 유달을 포락곡선(Ferguson, 1986)을 작성한다.

유역모형을 이용한 유달을 산정을 위해서 유역특성별 모니터링 지점의 8일 간격 수질과 유량을 이용하여 8일 간격 유량을 생성하고 TANK모형 또는 Rating Curve를 이용하여 일 유량 자료와 유황곡선을 작성한다. 작성한 유황곡선과 유량-유달부하량 관계곡선식을 이용하여 미계측일의 일 부하량 자료와 부하지속곡선을 생성한다. 최종적으로 보정과 검증 지점에서 생성된 일 유량 및 부하량 자료를 이용하여 SWAT모형의 보정 및 검증을 수행하고 모형에서 생성한 유달부하량과 배출부하량을 이용하여 오염원별 유형별 유달율과 유달을 포락곡선 작성을 작성한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시범 소유역 선정

밀양강수계 내 기존 오염총량관리 소유역과 주요 토지이용특성(산림, 농지, 도시)을 대표할 수 있는 지점을 현장조사를 통해 주요 유역분할지점을 선정하고 해당 소유역에 대한 토지이용특성 대분류 7개 항목을 조사한 후 대상 토지이용특성인 3개(도시, 농지, 산림) 토지특성으로 재분류하여 3개 토지이용특성별 시범 소유역을 선정하였다. 시범 소유역에 대한 적정 유역규모 선정을 위해 기존 낙동강수계 오염총량 소유역에 대한 유역규모 검토를 수행하였다. 검토 결과 오염총량제 수행을 위한 수질모델링 시 유달을 적용하는 유역규모는 약 20~50 km²로 판단되며, 향후 GIS를 이용한 소유역분할 시 이 값은 유역분할을 위한 한계유역면적으로 적용할 것이다. 유역의 대표성, 관측용이성, 기존자료 활용 용이성 등의 선정기준으로 토지이용특성별 각 지점을 검토하였다. 최종적으로 농지대표 소유역으로 신기교, 산지대표 소유역으로 대리수위표, 도시 대표유역으로 전하교, 단위유역 대표유역으로 상동교를 모니터링 지점으로 선정하였다.

도시, 산지, 농지, 단위 시범 소유역에 대한 유역 및 하천

특성 분석을 실행하였다. 해당 시범 소유역에 대한 유역면적, 평균경사, 하천길이, 유출곡선지수 등에 대한 지형특성 변수는 Table 1과 같고 대상유역은 Fig. 1과 같다. 단위시범 소유역으로 선정한 밀양A 지점을 제외한 시범 소유역에 대한 평균 유역면적, 평균경사, 평균하천길이, 평균유출곡선지수의 값은 47.88 km², 0.0455 (m/m), 11.79 km, 74.22의 특성을 나타내고 있다.

시범 소유역의 배출부하량은 2단계 수계오염총량관리기술지침에서 규정한 방법들에 따라 대구경북발전연구원에서 산정한 2006년 기준 시범 소유역에 대한 배출부하량은 Table 2와 같다.

3.2. 시범 소유역 모니터링

시범 소유역 모니터링은 기존의 자료 조사와 더불어 실측기반의 유달을 산정을 위한 자료를 수집하고 분석하여 제시하는데 기본 목적이 있다. 또한 모니터링을 통해 생성한 유량, 수질, 강우자료는 유역 모형의 보정과 검증에 위한 기초적인 항목이다.

모니터링 지점은 농지, 산림, 도시, 단위유역 시범 소유역으로 선정된 신기교, 대리수위표, 전하교, 상동교 지점이다. 신기교 지점은 유역면적 49.36 km², 토지이용은 농지 33%,

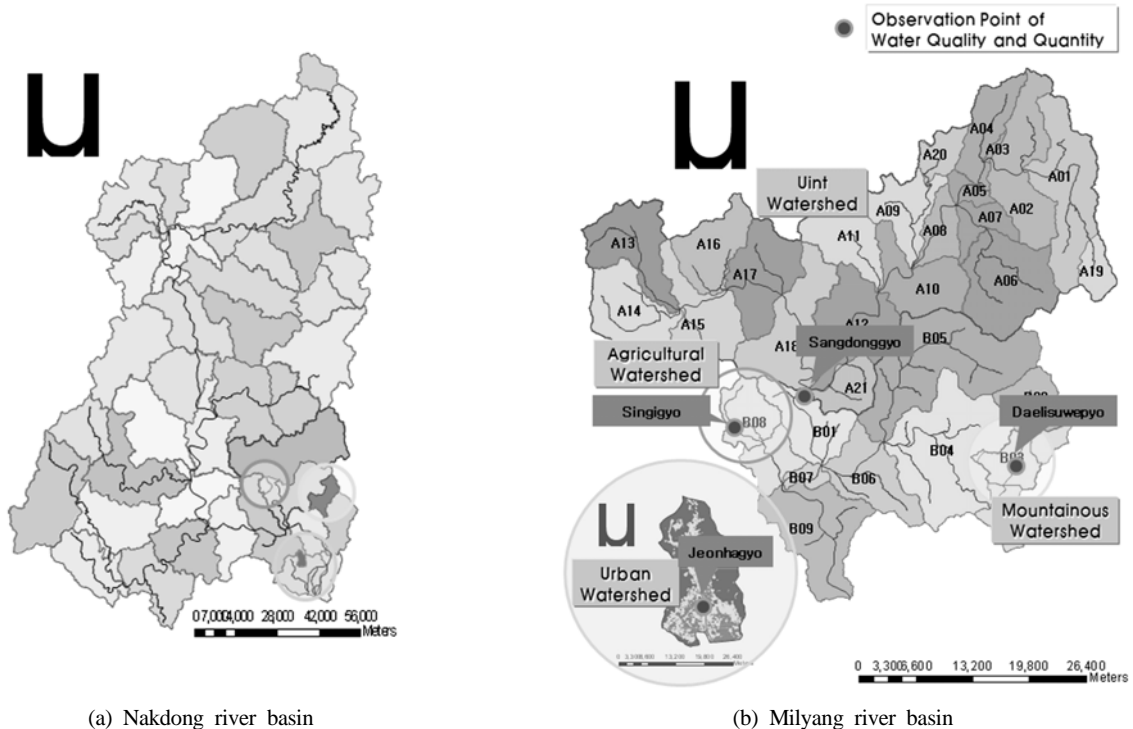


Fig. 1. Objective basins and observation point.

Table 1. Characteristics of watershed and river

Watershed	Area (km ²)	Slope (m/m)	Length (km)	CN Number
Urban watershed	17.66	0.0150	7.61	83.20
Agricultural watershed	49.36	0.0615	11.69	75.71
Mountainous watershed	76.62	0.0570	16.07	63.75
Unit watershed	883.24	0.0143	68.80	73.21

Table 2. Waste loads of the small-scale test beds

Watershed	Area (km ²)	BOD (kg/day)	TN (kg/day)	TP (kg/day)
Urban watershed	17.66	119.955	29.711	3.736
Agricultural watershed	49.36	549.506	323.833	29.148
Mountainous watershed	76.62	181.208	184.603	14.048
Unit watershed	883.24	7582.568	4722.711	428.204

산림 64%, 도시 1%인 농지 소유역이다. 대리수위표 지점은 유역면적 76.62 km², 토지이용은 농지 6%, 산림 93%, 도시 1%인 산지 소유역이다. 전하교 지점은 유역면적 17.66 km², 토지이용은 농지 15%, 산림 50%, 도시 35%인 도시 소유역이다. 상동교 지점은 유역면적 888.24 km², 토지이용은 농지 18%, 산림 82%, 도시 0%인 단위유역이다.

모니터링은 자동측정과 수동측정으로 구분하여 수행하였다. 수리·수문 자동 모니터링의 공통적인 계측요소는 수위와 강우량이라 할 수 있다. 특히, 유역의 수문 순환과 하천의 흐름을 실시간으로 파악하고자 할 때 강우와 수위의 실시간 계측은 필수적인 요소이며, 이를 위해 강우 및 수위 자료를 실시간으로 확보할 수 있는 모니터링 시스템을 농지, 산지, 도시, 단위유역 시범 소유역에 설치하였다. 수동 유량 및 수질 모니터링은 “수질오염공정시험법”에 따라 수계 내 수리 및 수문의 변동을 반영하기 위해 8일 간격으로 측정하였으며, 통계적으로 유의한 유황곡선과 부하지속곡선을 산정할 수 있도록 15회 측정하였고 비점오염원 유출특성 파악을 위해 강우 시 모니터링도 산지 시범유역을 제외한 도시, 농지, 단위 시범유역은 각각 2회 측정을 수행하였다.

3.3. 시범 소유역 모형화

시범 소유역의 SWAT 모형 구축 과정은 GIS 데이터베이스를 이용한 자료의 구축과정과 유역의 유출모의 과정으로 구분할 수 있다. 세부적인 구축 과정은 우선, 출구점을 지정하여 유역분할과 하천망도의 생성, 토지이용도 구축, 토양도 구축, 강우관측소 좌표 및 강우자료의 입력, 저류시설물의 위치 및 제원 입력, 수문학적 반응단위(HRU) 생성의 과정을 거치며, 최종적으로 모형을 실행하면서 해당 소유역 출구지점에서 모니터링 자료를 이용한 검보정이 수행된다. 도시 소유역의 강우 및 기상자료는 유역 내 기상관측소인 부산기상대의 2000년 1월 1일부터 2008년까지의 관측 일별 기상관측 자료를 수집하여 입력하였으며 오염부하량 자료는 경상남도의 오염총량관리 기본계획 수립 시 조사된 오염원으로부터 산정된 오폐수발생량과 배출부하량 자료를 입력 자료로 사용하였다. 도시 소유역을 제외한 산지, 농지, 단위 소유역의 강우 및 기상자료는 유역 내 기상관측소인 밀양기상대의 2000년 1월 1일부터 2008년까지의 관측 일별 기상관측 자료를 수집하여 입력하였으며 오염부하량 자료는 경상남도 및 경상북도의 오염총량관리 기본계획 수립 시 조사된 오염원으로부터 산정된 오폐수발생량과 배출부하량 자료를 입력 자료로 사용하였다.

시범 소유역의 유량 보정은 농지(신기교), 산지(대리수위표), 전하교(도시), 단위(상동교) 지점에서 15회 관측 자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 4개 소유역에서 전반적으

로 양호한 결과를 얻었으며 관측한 8일 간격 자료는 홍수기 모형 검증 시 과대 또는 과소평가되는 불확실성을 내포할 수 있으므로 평수량 이하의 자료의 신뢰도 중심으로 보정을 실시하였다. 농지, 산지, 도시, 단위 지점에서의 상관계수는 0.81, 0.82, 0.78, 0.84로 나타났으며 농지와 산지의 경우 약간 과대평가되고 도시와 단위의 경우 약간 과소평가되는 경향이 있으나 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 유량보정을 통해 모의된 유량자료는 부하지속곡선 산정을 위한 입력 자료로 사용한다.

시범 소유역의 수질 보정은 농지(신기교), 산지(대리수위표), 전하교(도시), 단위(상동교) 지점에서 유량 보정과 최소분산 비편향 추정기법을 통해 생성한 오염원별 부하지속곡선을 이용하여 모의 실시하였다. 4개 소유역에서 전반적으로 양호한 결과를 얻었으며 유량 보정 시와 같이 평수량 이하의 자료의 신뢰도 중심으로 보정을 실시하였다. 농지, 산지, 도시, 단위 지점에서의 상관계수는 BOD의 경우 0.88, 0.42, 0.82, 0.86으로 TN의 경우 0.82, 0.55, 0.76, 0.87으로 TP의 경우 0.81, 0.40, 0.69, 0.64로 나타났으며 농지와 도시의 경우 약간 과대평가되고 산지 및 단위의 경우 약간 과소평가되는 경향이 있으나 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 실측된 수질 자료의 부족과 토양유실에 따른 오염물질의 유출기작에 대한 자료의 부족에서 기인한 것으로 판단된다.

3.4. 시범 소유역 유달을 산정

3.4.1. 관측자료를 통한 유달을 산정

토지이용별 시범 소유역을 선정하고 모니터링을 통한 실측기반 유달을 토지이용특성별로 산정하였다. 실측기반 유달의 경우 지형적인 특성에 따라서 유달의 경향이 다소 차이를 보이고 있으나 전체적으로 오염물의 경우 TN, TP, BOD 순으로 높은 유달특성을 나타내고 있으나 TP, BOD의 경우 그 차이는 무시할 정도로 작다. TN의 경우 다른 오염원에 비해 유달의 큰 변동성을 보이고 있으며 이러한 이유는 지하수 등 기저유출에서 기인하는 질소의 배경농도가 높음에도 불구하고 현행 오염부하량 산정방식에는 오염물질의 배경농도를 고려할 수 없고 또한 TN의 발생부하 원단위 등이 자연환경을 충분히 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다.

토지이용별 유달 특성은 도시, 단위, 산지, 농지의 순으로 높은 유달특성을 나타내고 있다. 이는 토지이용 특성에 따라 하천 유속이 변화하고 이로부터 오염 물질의 이송을 변동과 하상 영양 물질의 재부상, 강우 시 비점오염 물질과 자연 영양 물질의 하천 유입 등에 기인한 것으로 판단된다.

Table 3. Estimation delivery ratio based on observation data

Watershed	BOD		TN		TP		Rank
	Delivery ratio	Rank	Delivery ratio	Rank	Delivery ratio	Rank	
Urban watershed	0.240	1	0.468	1	0.286	1	1
Agricultural watershed	0.030	4	0.122	4	0.032	4	4
Mountainous watershed	0.203	2	0.332	3	0.177	3	3
Unit watershed	0.147	3	0.468	2	0.190	2	2

3.4.2. 모형기반 유달율 산정

모니터링결과를 이용해 보정한 SWAT 모의결과를 이용하여 4개 시범 소유역에 대한 3개년(2005~2007년) 평균 유황곡선(Flow Duration Curve, FDC)을 산정하였다. 4개 시범 소유역의 3개년 평균유황곡선은 Fig. 2와 같다.

모니터링결과를 이용해 보정한 SWAT 모의결과를 이용하여 4개 시범 소유역에 대한 오염원별 3개년(2005~2007년) 평균부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)을 산정하였다. 4개 시범 소유역의 3개년 평균부하지속곡선은 Fig. 3과 같다.

모니터링결과를 이용해 산정한 SWAT 부하량 모의결과와 배출부하량 자료를 이용하여 4개 시범 소유역에 대한 3개년(2005~2007년) 평균 유달율포락곡선(Delivery Rate Duration Curve, DRDC)을 산정하였다. 4개 시범 소유역의 3개년 평균부하지속곡선은 Fig. 4와 같다.

본 연구에서는 SWAT를 이용하여 생성한 부하지속곡선상의 유형별 유달부하량 자료와 배출부하량 자료를 이용하여 4개 시범 소유역에 대한 오염원별 유형별 유달율을 산정하였다. 각 유역마다 지형적인 특성에 따라서 유달율의 경향이 다소 차이를 보이고 있으나 전체적으로 비점오염물

질이 유입되는 강우 시에 유달율이 증가하는 것으로 나타났다. 모의 결과 중 도시 소유역의 BOD의 경우 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량에 대한 유달율 결과가 각각 0.44, 0.23, 0.10, 0.03으로 유량이 감소하면서 유달율 또한 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 TN, TP의 경우에도 동일하게 나타났으며 다른 소유역에서도 같은 경향성을 나타내는 것으로 분석되었다.

모형기반 유달율의 경우 지형적인 특성에 따라서 유달율의 경향이 다소 차이를 보이고 있으나 전체적으로 오염물의 경우 TN, TP, BOD 순으로 높은 유달특성을 나타내고 있으며 TP, BOD의 경우 그 차이는 무시할 정도로 작다. TN의 경우 다른 오염원에 비해 유달율의 큰 변동율을 보이고 있으며 이러한 이유는 지하수 등 기저유출에서 기인하는 질소의 배경농도가 높음에도 불구하고 현행 오염부하량 산정방식에는 오염물질의 배경농도를 고려할 수 없고, 또한 TN의 발생부하 원단위 등이 자연환경을 충분히 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다.

토지이용별 유달 특성을 살펴보면 BOD의 경우 도시, 단위, 산지, 농지의 순으로 높은 유달특성을 나타내고 있으며 TN의 경우는 도시 지역을 제외한 나머지 소유역은 비슷한

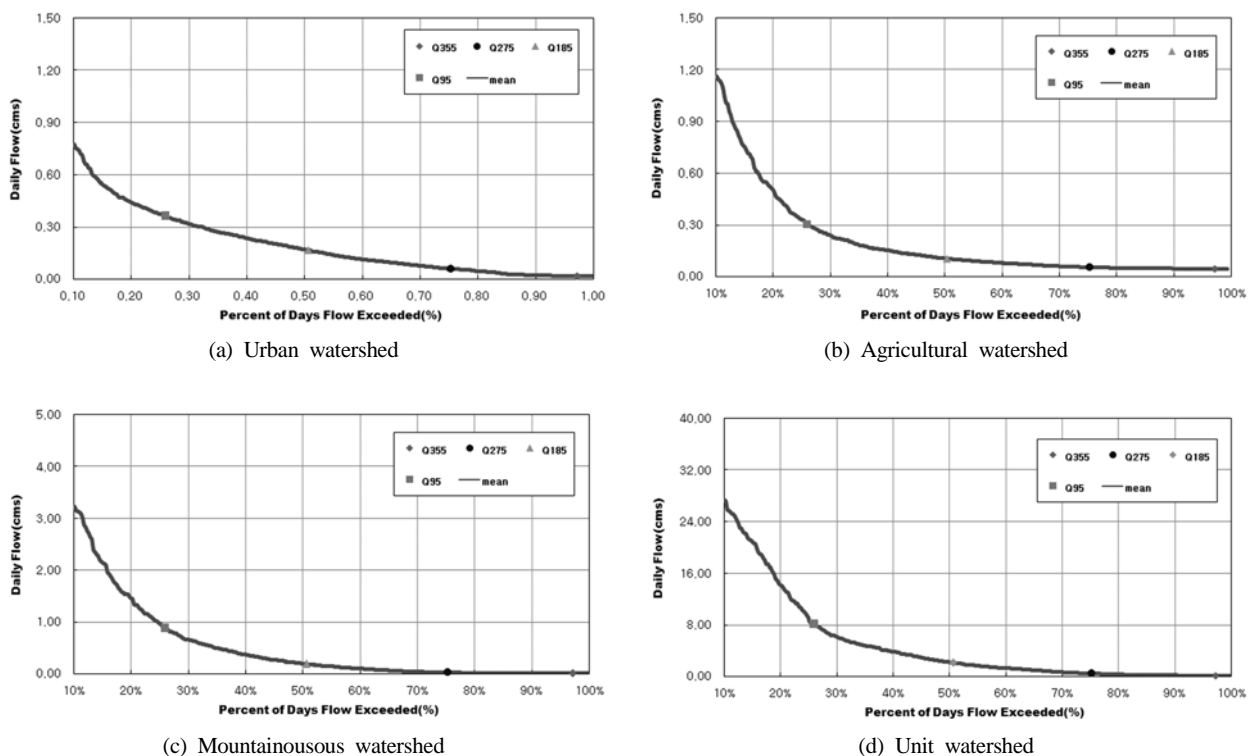
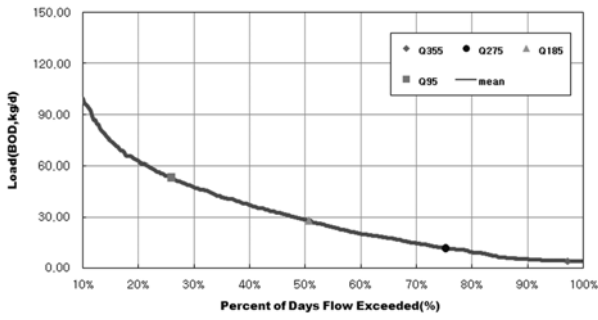
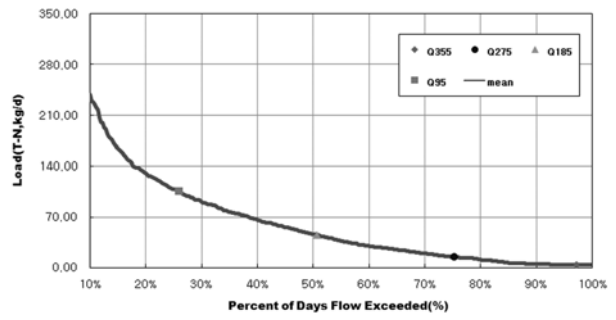


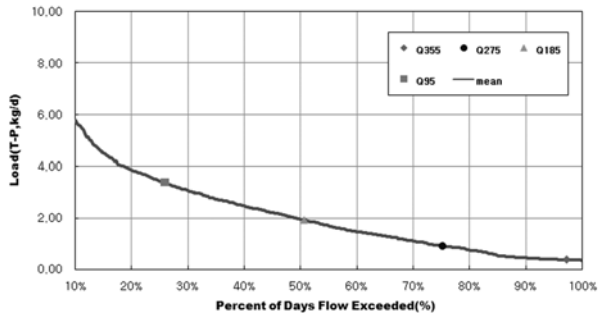
Fig. 2. Flow Duration Curve (FDC).



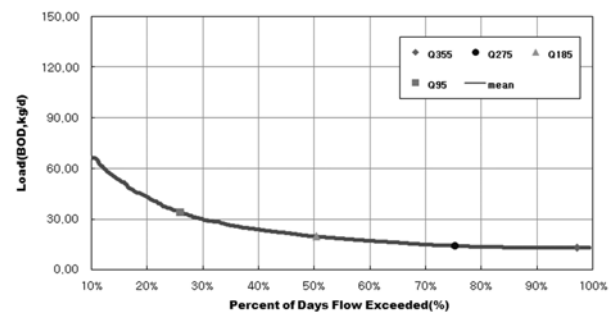
(a) Urban watershed-BOD



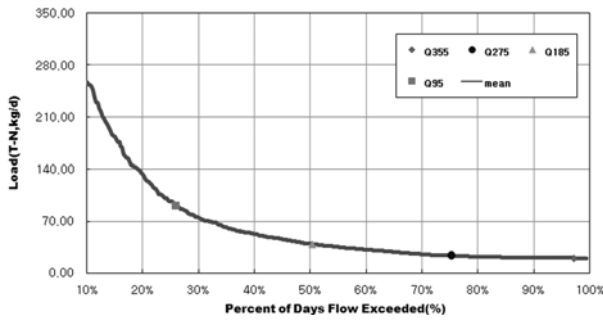
(b) Urban watershed- TN



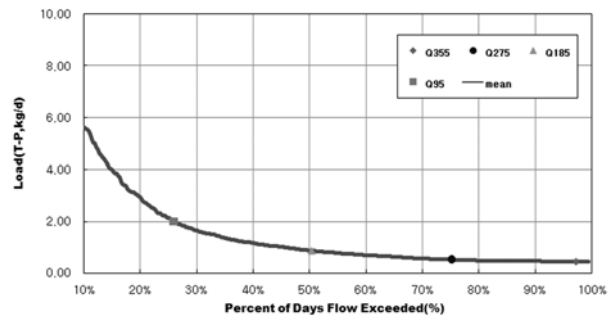
(c) Urban watershed-TP



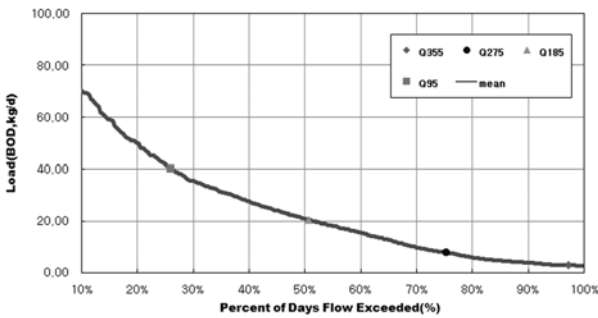
(d) Agricultural watershed-BOD



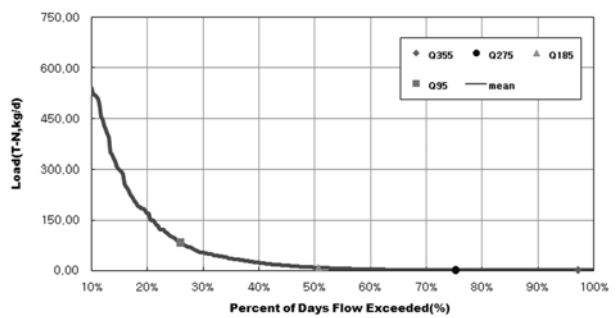
(e) Agricultural watershed-TN



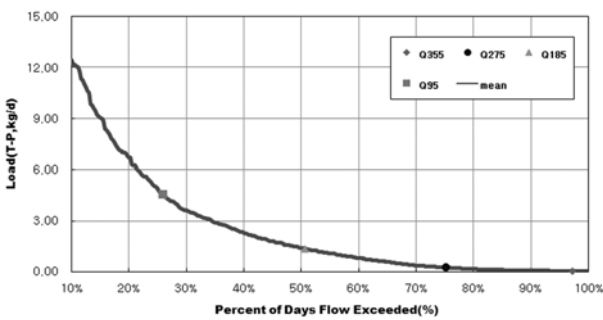
(f) Agricultural watershed-TP



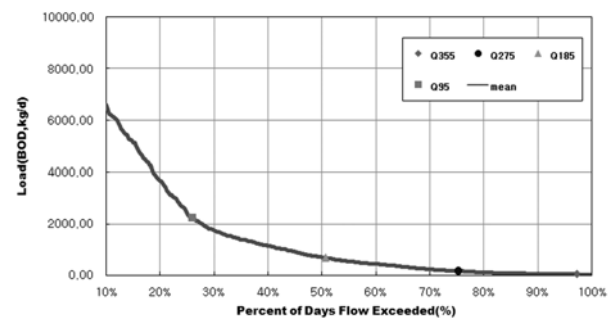
(g) Mountainous watershed-BOD



(h) Mountainous watershed-TN

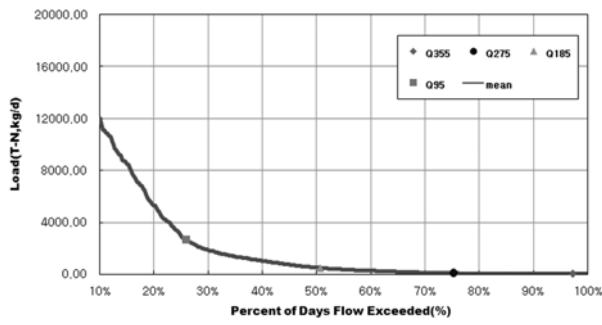


(i) Mountainous watershed-TP

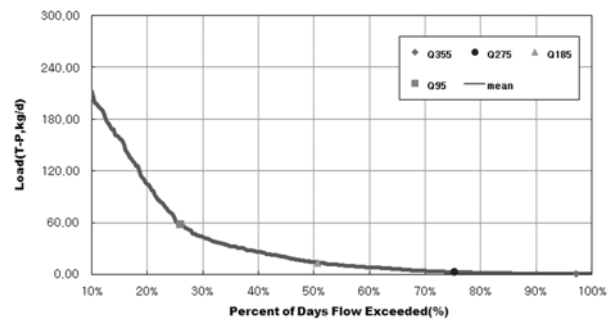


(j) Unit watershed-BOD

Fig. 3. Load Duration Curve (LDC).



(k) Unit watershed-TN

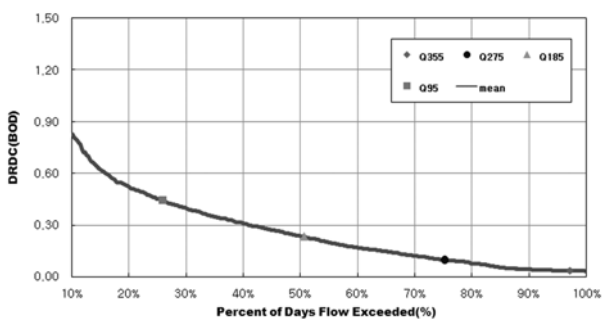


(l) Unit watershed-TP

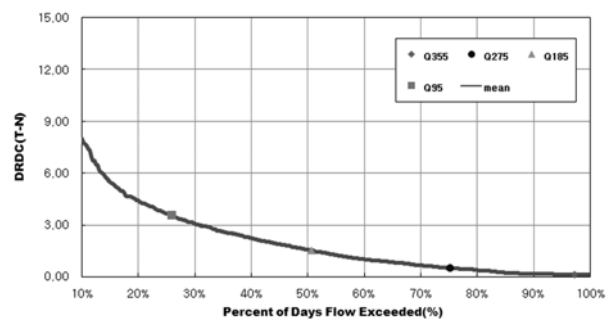
Fig. 3. Load Duration Curve (LDC) (continued).

Table 4. Delivery ratio considering flow duration for urban watershed

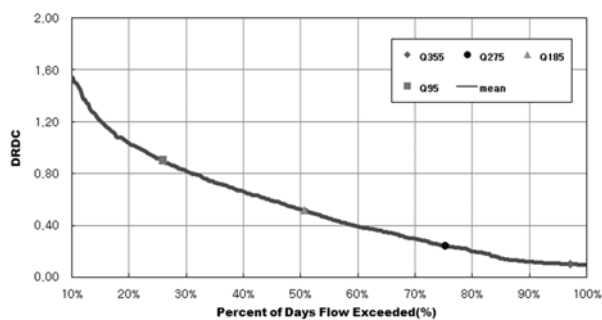
Pollutants	Flow duration	Flow (CMS)	Waste loads (kg/day)	Delivery loads (kg/day)	Delivery ratio
BOD	Q ₉₅	0.36	119.995	53.150	0.44
	Q ₁₈₅	0.17	119.995	27.788	0.23
	Q ₂₇₅	0.06	119.995	11.468	0.10
	Q ₃₅₅	0.02	119.995	4.046	0.03
TN	Q ₉₅	0.36	29.711	105.334	3.55
	Q ₁₈₅	0.17	29.711	45.268	1.52
	Q ₂₇₅	0.06	29.711	14.347	0.48
	Q ₃₅₅	0.02	29.711	3.594	0.12
TP	Q ₉₅	0.36	3.736	3.37	0.90
	Q ₁₈₅	0.17	3.736	1.93	0.52
	Q ₂₇₅	0.06	3.736	0.90	0.24
	Q ₃₅₅	0.02	3.736	0.37	0.10



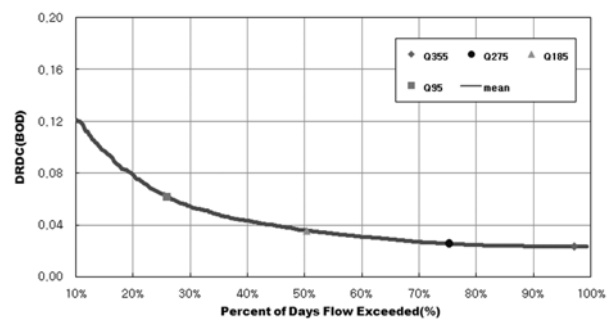
(a) Urban watershed-BOD



(b) Urban watershed- TN

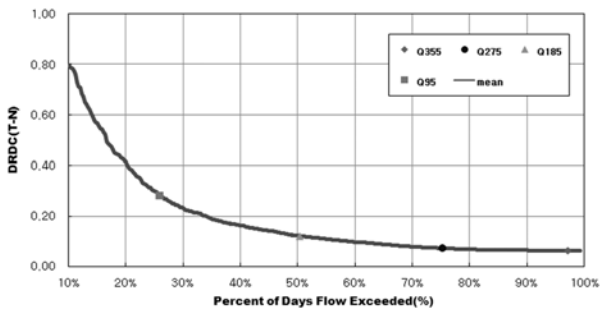


(c) Urban watershed-TP

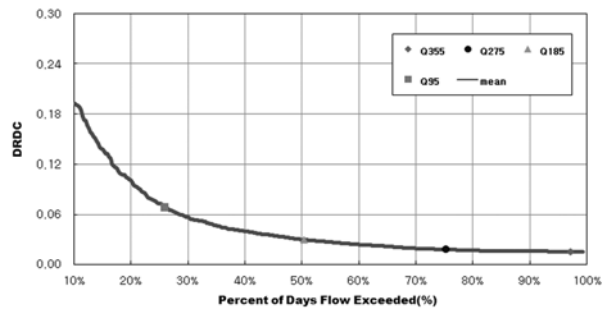


(d) agricultural watershed-BOD

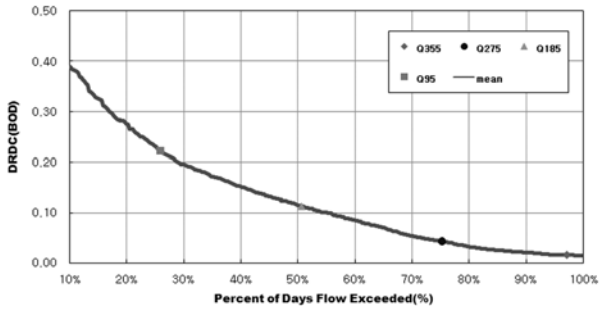
Fig. 4. Delivery Rate Duration Curve (DRDC).



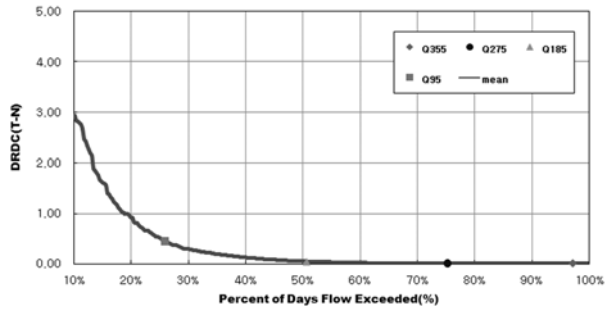
(e) agricultural watershed-TN



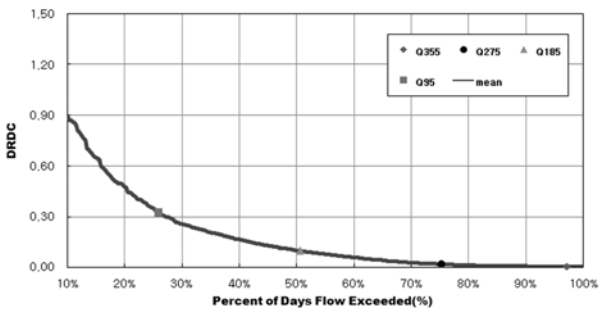
(f) agricultural watershed-TP



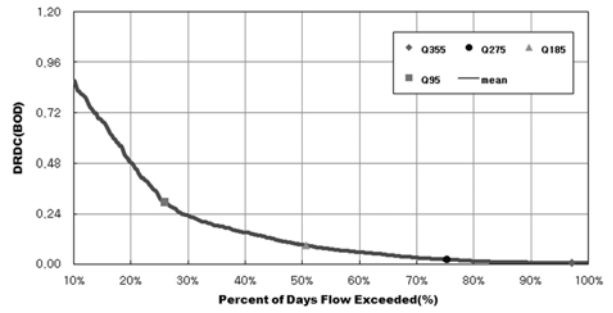
(g) Mountainous watershed-BOD



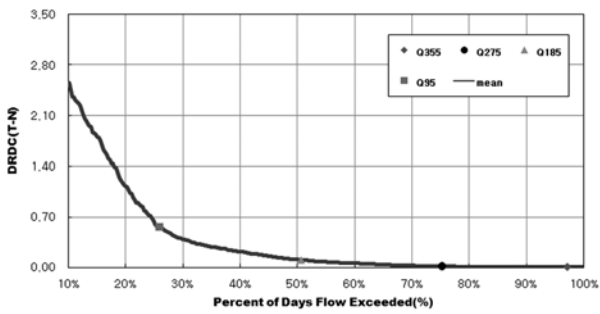
(h) Mountainous watershed-TN



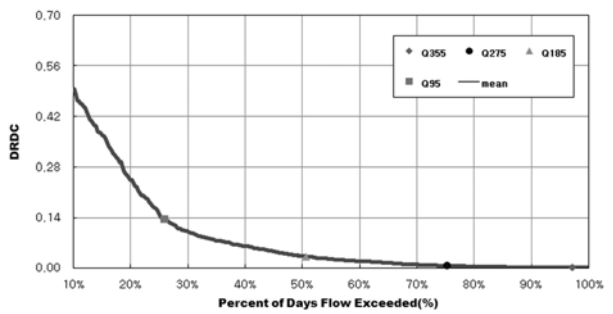
(i) Mountainous watershed-TP



(j) Unit watershed-BOD

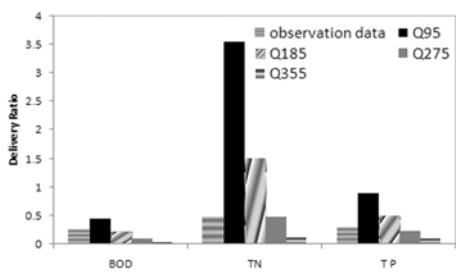


(k) Unit watershed-TN

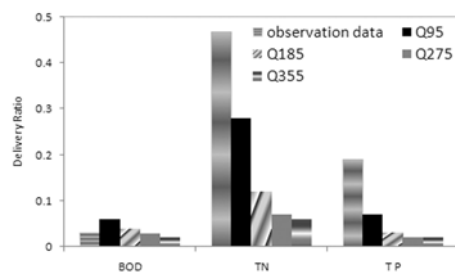


(l) Unit watershed-TP

Fig. 4. Delivery Rate Duration Curve (DRDC) (continued).



(a) Urban watershed



(b) Agricultural watershed

Fig. 5. Comparison of each estimation methods.

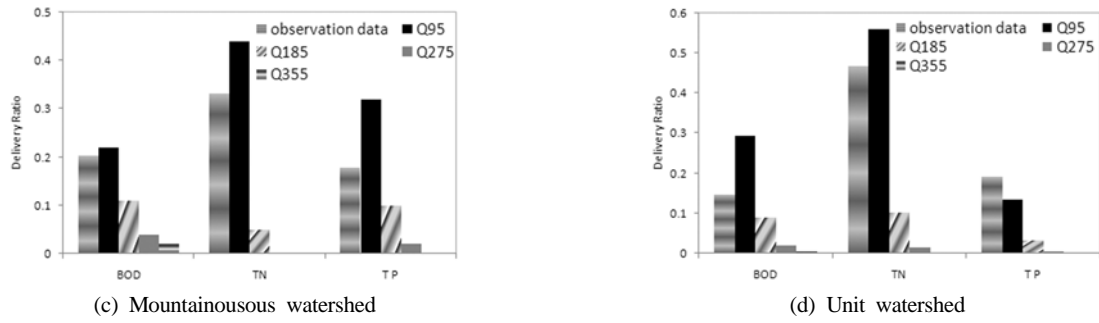


Fig. 5. Comparison of each estimation methods (continued).

Table 5. Delivery ratio considering flow duration for agricultural watershed

Pollutants	Flow duration	Flow (CMS)	Waste loads (kg/day)	Delivery loads (kg/day)	Delivery ratio
BOD	Q ₉₅	0.30	549.506	33.751	0.06
	Q ₁₈₅	0.10	549.506	19.499	0.04
	Q ₂₇₅	0.05	549.506	13.977	0.03
	Q ₃₅₅	0.04	549.506	12.701	0.02
TN	Q ₉₅	0.30	323.833	90.552	0.28
	Q ₁₈₅	0.10	323.833	38.877	0.12
	Q ₂₇₅	0.05	323.833	23.289	0.07
	Q ₃₅₅	0.04	323.833	20.087	0.06
TP	Q ₉₅	0.30	29.148	1.99	0.07
	Q ₁₈₅	0.10	29.148	0.86	0.03
	Q ₂₇₅	0.05	29.148	0.51	0.02
	Q ₃₅₅	0.04	29.148	0.44	0.02

Table 6. Delivery ratio considering flow duration for Mountainous watershed

Pollutants	Flow duration	Flow (CMS)	Waste loads (kg/day)	Delivery loads (kg/day)	Delivery ratio
BOD	Q ₉₅	0.88	181.208	40.165	0.22
	Q ₁₈₅	0.18	181.208	20.458	0.11
	Q ₂₇₅	0.02	181.208	7.689	0.04
	Q ₃₅₅	0.00	181.208	2.782	0.02
TN	Q ₉₅	0.88	184.603	81.713	0.44
	Q ₁₈₅	0.18	184.603	8.357	0.05
	Q ₂₇₅	0.02	184.603	0.364	0.00
	Q ₃₅₅	0.00	184.603	0.010	0.00
TP	Q ₉₅	0.88	14.048	4.53	0.32
	Q ₁₈₅	0.18	14.048	1.34	0.10
	Q ₂₇₅	0.02	14.048	0.24	0.02
	Q ₃₅₅	0.00	14.048	0.04	0.00

Table 7. Delivery ratio considering flow duration for unit watershed

Pollutants	Flow duration	Flow (CMS)	Waste loads (kg/day)	Delivery loads (kg/day)	Delivery ratio
BOD	Q ₉₅	8.114	7582.568	2234.076	0.295
	Q ₁₈₅	2.091	7582.568	670.973	0.088
	Q ₂₇₅	0.413	7582.568	157.865	0.021
	Q ₃₅₅	0.064	7582.568	30.265	0.004
TN	Q ₉₅	8.114	4722.711	2645.279	0.560
	Q ₁₈₅	2.091	4722.711	481.603	0.102
	Q ₂₇₅	0.413	4722.711	63.998	0.014
	Q ₃₅₅	0.064	4722.711	6.150	0.001
TP	Q ₉₅	8.114	428.204	57.93	0.135
	Q ₁₈₅	2.091	428.204	13.58	0.032
	Q ₂₇₅	0.413	428.204	2.40	0.006
	Q ₃₅₅	0.064	428.204	0.33	0.001

유달특성을 보이고 TP의 경우는 도시, 산지, 단위, 농지의 순으로 높은 유달특성을 보이고 있다. 전체적으로 도시 소유역이 높은 유달특성을 농지 지역은 낮은 유달특성을 보이고 있다. 이는 토지이용 특성과 배수구조에 따른 유량 변화로 인하여 하천 유속이 변화하고 이로부터 오염 물질의 이송을 증가와 하상 영양 물질의 재부상, 강우 시 비점 오염물질과 자연 영양 물질의 하천 유입 등에 기인한 것으로 판단된다.

유황곡선과 부하지속곡선 산정 결과에 따르면 모의된 유량과 유달부하량의 일 변동성이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 단일 유량과 유달부하량을 토대로 해당 단위유역의 유달율을 추정하기에는 무리가 있으며 전체적인 유량·수질의 변동성을 고려할 필요가 있음을 보여주는 결과이다.

3.4.3. 고찰

Fig. 5에 실측자료를 이용하여 산정한 유달율과 유역기반 모형을 이용하여 산정한 유달율을 비교하여 도시하였다. 관측자료에서 구한 유달율은 모형에서 산정한 유달율과 비교할 경우 도시소유역에서는 저수기의 유달율과 비슷한 경향을 보이고 농지소유역에서는 BOD의 경우는 저수기의 유달율, TN과 TP의 유달율은 풍수기의 유달율과 비슷하나 다소 과대 산정된 양상을 보였다. 산지소유역과 단위유역은 홍수기의 유달율과 비슷하나 각 항목에서 홍수기와 풍수기 사이의 유량에 근접한 값을 보인다.

우수혜 등(2006)의 연구에서 산정한 화성호의 BOD 유달율은 0.021로 관측자료에서 구한 도시소유역과 산지유역 유달율과 비슷하고, TN 유달율은 0.058로 농지소유역의 유달율, TP 유달율은 0.045로 농지소유역의 유달율과 비슷한 양상을 보였다. 화성호 유역이 농지와 산지가 섞인 유역임을 고려할 때 산지소유역과 농지소유역과 비슷한 유달율을 보이므로 본 연구에서 산정한 유달율은 타 연구에서 산정한 유달율과 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 제안한 유달율 산정기법은 유역규모적인 측

면에서는 소규모 유역으로 기법적인 측면에서는 실측기반 유달율 산정기법, 모형기반 유달율 산정기법이다. 유달율 산정기법의 적용을 위해 소규모 유역으로 도시(전하교), 농지(신기교), 산지(대리수위표), 단위(상동교)의 4개 지점을 선정하고 모니터링을 수행하여 실측자료를 수집하고 SWAT 모형을 이용하여 통합수문모형을 구축하고 그 결과로 유역 규모별 오염물질 배출 및 유달특성을 조사 및 분석하였다. 최종적으로 유황별, 유역특성별 합리적인 유달율 산정방법 제시를 위해 유달율포락곡선(Delivery Rate Duration Curve, DRDC) 기법을 소개하고 적용하였다.

토지이용별 모니터링 자료와 유역모형 모의자료를 기반으로 시범지역 내 토지이용별 오염물질 유출특성, 오염물질 유달특성을 분석하여 유역특성별 유출 및 유달 특성 종합 분석을 수행하였다. 지형적인 특성에 따라서 유달특성의 경향이 다소 차이를 보이고 있으나 오염물의 경우 TN, TP, BOD 순으로 높은 유달특성을 나타내고 있으나 TP, BOD의 경우 그 차이는 무시할 정도로 작다. 토지이용별 유달특성을 살펴보면 도시, 단위, 산지, 농지의 순으로 높은 유달특성을 나타내고 있다.

전체적으로 도시 소유역이 높은 유달특성을 보이고 농지 소유역은 낮은 유달특성을 보이고 있다. 이는 토지이용 특성과 배수구조에 따른 유량 변화로 인하여 하천 유속이 변화하고 이로부터 오염 물질의 이송을 증가와 하상 영양 물질의 재부상, 강우 시 비점오염물질과 자연 영양 물질의 하천 유입 등에 기인한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립환경연구원(2001). 낙동강 수계별 오염부하량 조사연구. 류덕희, 박주현, 황하선, 신대윤, 강제홍, 김세림(2008). 유역 모형을 이용한 유달율 산정기법 연구(I). 공동출판 학술발표회 논문집, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회, pp. 385-386.
- 우수혜, 최이송, 최준혁, 오종민(2006). 화성호 비점오염물질 저감을 위한 유입하천의 오염부하량 유달율 산정. 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1047-1051.
- Ferguson, R. I. (1986). River Loads Underestimated by Rating Curves. *Water Resour. Res.*, 22(1), pp. 74-76.