

## 수질오염총량제도 유역의 수질 및 부하량 평가를 위한 웹기반 LDC 시스템의 적용

강현우 · 류지철 · 신민환 · 최중대 · 최재완\* · 신동석\* · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과  
\*국립환경과학원 수질총량연구과

### Application of Web-based Load Duration Curve System to TMDL Watersheds for Evaluation of Water Quality and Pollutant Loads

Hyunwoo Kang · Jichul Ryu · Minhwan Shin · Joongdae Choi · Jaewan Choi\* · Dong Seok Shin\* · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

\*National Institute of Environmental Research

(Received 16 August 2011, Revised 5 September 2011, Accepted 7 September 2011)

#### Abstract

In South Korea, Total Maximum Daily Load (TMDL) has been enforced since 2004 to restore and manage water quality in the watersheds. However, the appraisal of TMDL in South Korea has lots of weaknesses to establish the plan for recovery of water quality because it just evaluates the target water quality during the particular flow duration interval. In the United States, Load Duration Curve (LDC) method has been widely used in the TMDL to evaluate the water quality and pollutant loads considering variation of stream flow. In a recent study, web-based Load Duration Curve system was developed to create the LDC automatically and provide the convenience of use. In this study, web-based Load Duration Curve system was applied in the Gapyeongcheon watershed using the daily flow and 8-day interval water quality data, and Q-L Rating Curve was used to evaluate the water quality and pollutant load in the watershed, also. As a result of study, water quality and pollutant load in Gapyeongcheon watershed were met with water quality standard and allocated load in the all flow durations. Web-based Load Duration Curve system could be applied to the appraisal of South Korean TMDL because it can be used to judge the impaired flow duration and build up the plan of load reduction, and it could enhance the publicity. But, web-based Load Duration Curve system should be enhanced through addition of load assessment tools such as Q-L rating curve to evaluate water quality and pollutant load objectively.

**keywords** : Pollutant load, Q-L rating curve, TMDL, Water quality, Web-based load duration curve

## 1. 서론

기상변화와 지구온난화, 도시화와 급격한 인구증가는 무분별한 수자원의 오용과 남용, 심각한 수질오염을 가져왔고, 이는 하천의 자정능력을 상실시키고 하·폐수처리장의 건설을 통한 수질개선능력까지 넘어서 수질관리에 어려움을 가중시키고 있다. 이에 정부는 유역의 수질 회복 및 관리를 위해 목표수질 한도에서 유역의 오염물질을 관리하는 수질오염총량관리제도를 도입하여 수자원 이용과 수질 회복 및 관리에 사용하고 있다(환경부, 2004). 우리나라는 2010년 초 한강 유역은 임의제로, 그 외 3대강 유역(낙동강, 금강, 영산강)은 의무제로 수질오염총량제도를 수행하고 있다(김경섭, 2010). 수질오염총량관리제도는 대상수계에 유입되는 오염물질의 총량이 허용부하량 이내로 배출되도록 유역의 오염원, 유량 및 수질을 종합적으로 관리하는

유역관리제도이다.

하지만 우리나라의 수질오염총량제도의 이행평가는 단순히 기준유량에서의 목표수질을 유지할 수 있는 부하량에 관리를 통해 이루어지고 있다(환경부, 2004). 이는 목표수질 유지라는 관리측면에서는 상당한 편의성을 가지고 있으나, 유역별 배출 특성을 고려한 수체의 건전성 회복과 근본적인 유역관리의 목표를 수행하기에는 많은 문제점을 노출하고 있다(박준호, 2010). 또한 기준유량에서의 부하량 관리는 유량의 변화에 따른 수질 및 부하량 특성을 고려할 수 없으며, 이는 우리나라와 같이 계절별 유량 편차가 심한 유역의 수질관리에 더 큰 어려움을 줄 수 있다.

현재 미국에서는 유역의 수질 회복과 점오염원, 비점오염원에 의한 부하량 삭감을 목적으로 Total Maximum Daily Load(TMDL)이 여러 주에서 시행되고 있는데(Mostaghimi et al., 2003), 이행평가와 삭감계획에 있어 부하지속곡선(Load Duration Curve: LDC) 방법이 널리 이용되고 있다(NDEP, 2003). 부하지속곡선은 유역의 유황 변화에 따른 수질 특성을 눈으로 쉽게 파악할 수 있고, 목표수질 초과

† To whom correspondence should be addressed.  
kjlim@kangwon.ac.kr

빈도 및 삭감 부하량에 대한 정보를 파악하기 용이한 장점을 가지고 있으며, 점오염원 및 비점오염원 부하량 관리 기법으로 적용되고 있다(Cleland, 2006). 미국의 Kansas, Nebraska, Nevada, South Calolina 등의 주에서는 유량조건에 따른 수질 및 오염물질의 거동 특성을 분석하기 위하여 부하지속곡선 방법을 TMDL에 적용하고 있으며 최근 그 활용이 급증하고 있다(Cleland, 2003). 최근 우리나라에서도 수질오염총량제도의 개선과 보안을 위하여 부하지속곡선의 수질오염총량제 적용에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 이에 관한 연구가 활발히 진행 중이다(김상수 등, 2011; 박준호, 2010; 황하선 등, 2010).

그러나 기존의 부하지속곡선 방법은 사용자에게 충분한 교육이 필요하고 부하지속곡선 생성을 위한 데이터 구축이 수동적으로 이루어지는 등, 유역의 유황 특성을 분석하기까지 많은 시간이 소비되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Kim 등(2011)은 Perl/CGI, GNUPLOT, Javascript 그리고 Google Map API 등을 이용하여 웹기반의 LDC 시스템을 개발하였다(<https://engineering.purdue.edu/~ldc/JG/duration>). 웹기반 LDC 시스템은 미국 지질 조사국(USGS)이나 한국 환경부 서버 등을 통해 구축된 자료를 이용하여 부하지속곡선을 자동 산정할 수 있기 때문에 기존 수작업에 의한 방법의 단점을 보완할 수 있다.

본 연구에서는 이렇게 개발된 웹기반 LDC 시스템을 이용하여 우리나라 북한강 수질오염총량제 단위 유역 중 가평천 유역에 적용, 수질오염총량제 적용 전·후를 비교하여 유황에 따른 수질 특성을 파악하고, 유황-부하량 곡선식(Q-L Rating Curve) 분석을 통하여 가평천 유역의 부하량 평가를 통해 적절한 수질 회복 및 관리대안을 수립하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 문헌 연구

#### 2.1.1. 부하지속곡선 자동 작성

미국은 1972년 청정수법(Clean Water Act)에 따라 배출 수 기준을 준수하는 것만으로 목표수질을 달성 할 수 없는 경우, 기간별 오염원 유출의 변화를 고려한 수질기준을 달성 할 수 있는 TMDL을 설정하도록 규정하였다. TMDL의 성공적인 실현을 위해서는 수질과 허용부하량에 대한 정확한 측정과 BMPs 등의 적절한 삭감 계획이 필요한데, 부하지속곡선 방법은 이를 실현하는데 유용한 기술로 사용되고 있다. 부하지속곡선의 작성은 유량지속곡선(Flow Duration Curve: FDC)의 작성, 부하지속곡선 작성, 수질 관측 자료 도식화 등 복잡하고 많은 수작업으로 이루어져 있어 환경정책 담당 공무원이나 일반인들이 이용하기에 어려움이 있었다. 이에 Johnson 등(2009)은 Microsoft Excel의 Visual Basic Editor를 이용하여 자동으로 부하지속곡선을 작성하는 Automated LDC Tool을 개발하였고, 이 기능을 이용하면 간단한 포맷의 유황 및 수질자료의 입력으로 부하지속곡선을 작성할 수 있다. 또한 Kim 등(2011)은 Perl/CGI,

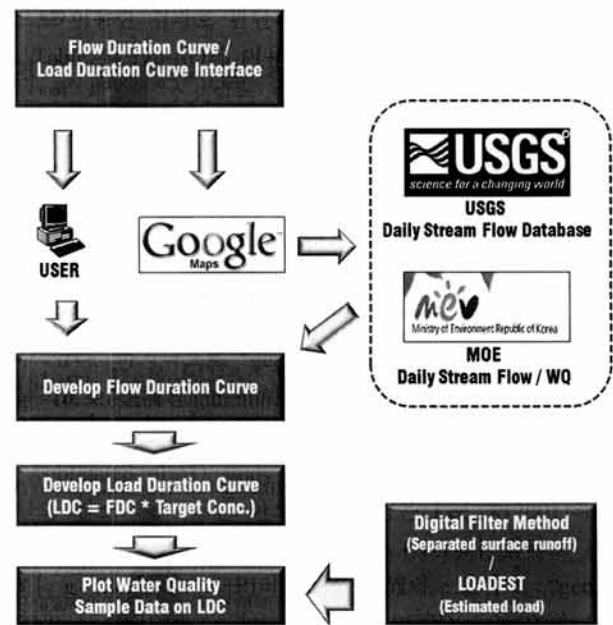


Fig. 1. Overview of the web based LDC system (Kim et al., 2011).

GNUPLOT, Javascript 그리고 Google Map API 등을 이용하여 웹기반 LDC 시스템을 개발하였다. 웹기반 LDC 시스템은 유역에서 실제 측정된 수질과 유황 자료를 입력하여 유량지속곡선(Flow Duration Curve: FDC)과 부하지속곡선(Load Duration Curve: LDC)을 생성한다. 그리고 웹기반 LDC 시스템에는 직접유출을 전체 유황으로부터 분리하기 위하여 digital filter method (Eckhardt, 2005)가, 일별 오염 부하량 산정을 위하여 LOADEST (Load Estimator; Runkel et al., 2004) 모형이 추가되었다(Fig. 1).

### 2.1.2. 웹기반 LDC 시스템에서의 부하지속곡선 작성

웹기반 LDC 시스템에서는 유황 및 수질 자료를 활용하여 유량지속곡선, 부하지속곡선 작성 및 부하량 데이터 도식화, 유황 분포에 따른 목표수질 농도와 실측 농도 비교 도식화의 과정을 자동으로 수행하며, 또한 이를 통하여 유역의 수질 및 부하량 현황을 나타낸다. Fig. 2는 유황, 측정된 수질자료 및 기준수질 데이터가 입력되는 웹기반 LDC 시스템의 인터페이스를 나타낸다.

#### 2.1.2.1. 유량지속곡선 작성

웹기반 LDC 시스템의 입력 창에 특정 기간 유역의 유황 자료를 입력하면 자동으로 최대 유황에서 최소유황 순으로 정렬하고 식 (1)을 이용하여 특정 유황을 초과하는 일수를 백분율로 계산하며, 이를 그림으로 도식화 한다(Fig. 3).

$$\text{Percent of Days Flow Exceeded (\%)} = \frac{\text{rank/number of data} \times 100}{\quad} \quad (1)$$

#### 2.1.2.2. 부하지속곡선 작성 및 부하량 데이터 도식화

유량지속곡선 작성 후, 웹기반 LDC 시스템에 목표수질, 실측수질 데이터를 입력하면 식 (2)를 이용하여 자동으로

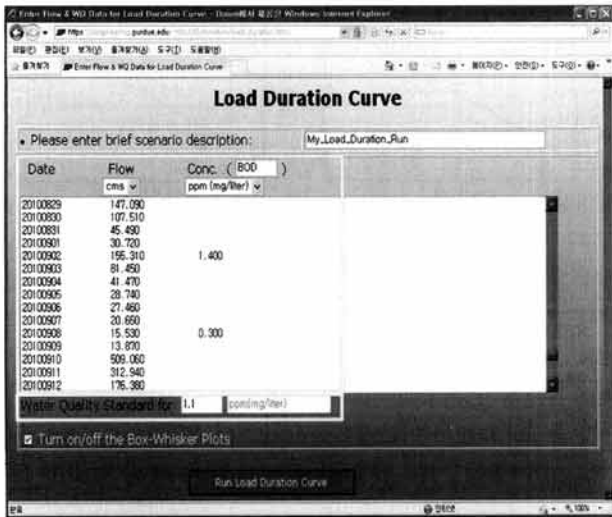


Fig. 2. Interface of the web based LDC system (Kim et al., 2011).

부하지속곡선이 생성되고 부하량 데이터가 점으로 표시된다(Fig. 4).

$$\text{Load (kg/day)} = \text{Flow(m}^3\text{/sec)} \times \text{WQS(mg/L)} \times 86.4 \quad (2)$$

WQS: Water Quality Standard

또한 웹기반 LDC 시스템에서는 유량지속곡선과 부하지속곡선을 자동으로 나타낼 뿐만 아니라 유량에 따른 목표 수질과 실측수질 데이터와의 비교를 자동으로 수행하고 이를 그래프로 나타내어 유역의 유량변화에 따른 수질 현황을 눈으로 쉽게 파악할 수 있으며(Fig. 5), 모든 데이터를 엑셀시트로 다운로드 받을 수 있다.

### 2.1.3. 유량-부하량 곡선(Q-L Rating Curve)을 이용한 부하량 평가

#### 2.1.3.1. 유량-부하량 곡선의 개요

부하지속곡선이 수질오염총량제의 이행평가에 적용되기 위해서는 객관화되고 정량화된 평가 방법이 필요한데, 이때 유량-부하량 곡선(Q-L Rating Curve)이 유용하게 적용될 수 있다. 유량-부하량 곡선을 이용한 부하량 평가는 유역의

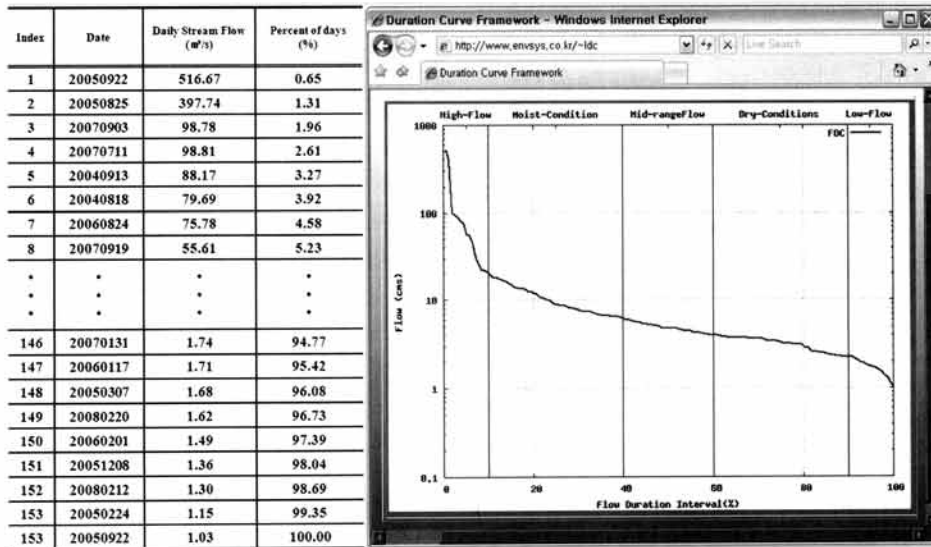


Fig. 3. Flow duration curve using the web based LDC system (Kim et al., 2011).

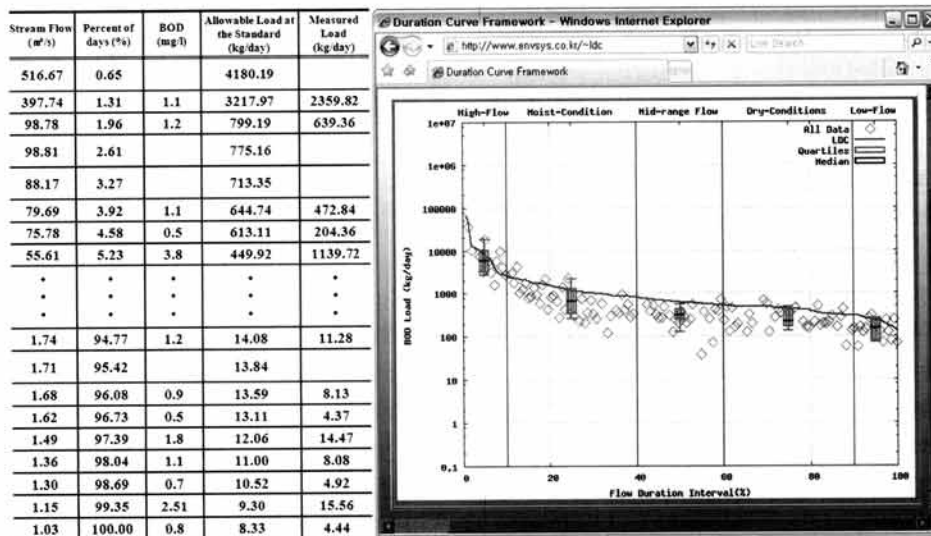


Fig. 4. Flow duration curve using the web based LDC system (Kim et al., 2011).

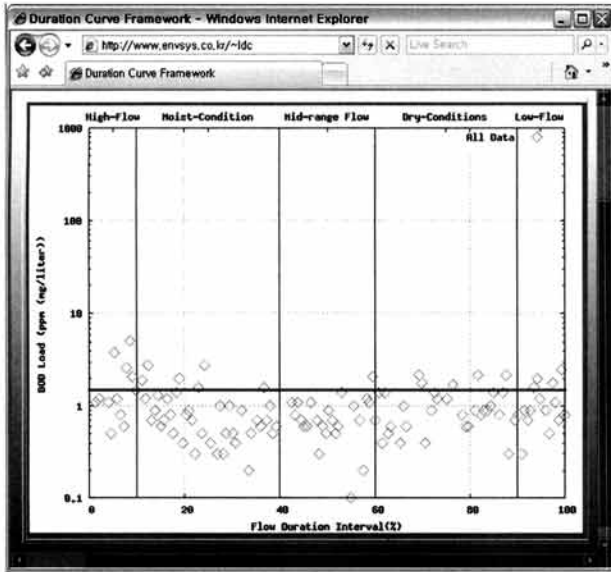


Fig. 5. Comparison of target water quality with observed concentration data (Kim et al., 2011).

유량지속곡선과 목표수질로 도식화된 표준부하지속곡선(Standard Load Duration Curve)과 실제 측정된 수질자료로 도식화된 관측 부하지속곡선(Observed Load Duration Curve)의 비교를 통하여 이루어지는데, 이때 표준화된 기준 설정을 위해 식 (3)을 이용한 비선형 상관관계 분석을 통해 유량-부하량 곡선식인 유량-부하량 곡선(Q-L Rating Curve)을 작성하여 평가를 수행한다. 표준 부하지속곡선은 일 유량과 목표 수질을, 관측부하지속곡선은 일 유량과 실측된 수질자료를 이용하여 분석된 비선형곡선이다(낙동강물환경연구소, 2010).

$$L = aQ^b \quad (3)$$

$L$  = Pollutant Load (kg/day)  
 $Q$  = Daily Streamflow ( $m^3/s$ )  
 $a, b$  = Coefficient

유량-부하량 곡선(Q-L Rating Curve)을 이용하면 유역의 배출 특성을 부하량 발생원의 유형과 정도에 따라 CASE I, CASE II, CASE III, CASE IV로 분류할 수 있고 각각의 경우에 따라 유역의 문제점을 파악하여 유역의 수질보전 및 부하량 삭감 계획을 세울 수 있다(박준호, 2010). 각각의 경우를 도식화하면 Fig. 6과 같다.

일반적으로 고유량시 목표수질 및 허용부하량을 초과하는 경우 비점오염원에 의한 영향이며, 저유량 기간 동안 발생하는 목표수질 및 허용부하량을 초과하는 점오염원에 의한 영향일 가능성이 크다고 하였다(황하선 등, 2010). 유량-부하량 곡선의 CASE 별 분석 결과는 해당 유역의 삭감 부하량 대상 및 크기에 대해 쉽게 이해할 수 있도록 해준다. CASE I의 경우 전체 유량 범위에서 모두 부하량 기준을 만족하기 때문에 ‘청정지역’이라 하고 CASE II의 경우 전체 유량 범위에서 모두 부하량 기준을 초과하기 때문에 모든 유량에 대해 전체적인 관리가 필요하여 ‘오염지역’이라 한다. 또한 CASE III의 경우 저유량시 부하량 기준을 초과

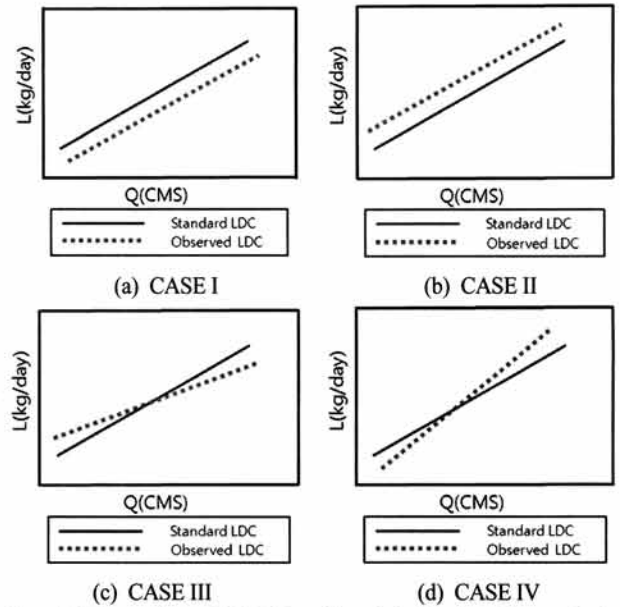


Fig. 6. Evaluation of TMDL using Q-L Rating Curve (Park, 2010).

하기 때문에 ‘점관리지역’이라 하며 CASE IV의 경우 고유량시 부하량 기준을 초과하기 때문에 ‘비점관리지역’이라 한다(박준호, 2010).

### 2.1.3.2. 유량-부하량 곡선의 부하량 평가 및 이행평가

유량-부하량 곡선을 이용한 부하량 평가는 Fig. 7과 같이 표준부하지속곡선과 관측부하지속곡선의 비교를 통하여 이루어진다. 표준부하지속곡선식을  $L_s$ , 관측부하지속곡선식을  $L_o$  라고 하면, Fig. 7에서 직선 AD 아래의 면적( $L_{st}$ )과 직선 BE 아래의 면적( $L_{ot}$ )은 각각 식 (4)와 식 (5)으로 나타낼 수 있다.

$$L_{st} = \int_1^{365} L_s(t) dt \quad (4)$$

$$L_{ot} = \int_1^{365} L_o(t) dt \quad (5)$$

$$DL = DL_1 - DL_2 = L_{st} - L_{ot} \quad (6)$$

$L_s(t)$  = Standard Load Duration Curve  
 $L_o(t)$  = Observed Load Duration Curve  
 $DL_1$  = Excess load  
 $DL_2$  = Surplus load

여기서  $L_{st}$ 는 해당 지점에서의 목표수질을 만족할 수 있는 할당부하량이며,  $L_{ot}$ 는 실제 관측된 유달부하량이다. 유량-부하량 곡선을 이용한 부하량 평가 방법은 식 (6)과 같으며,  $DL_1$ 은 삼각형 ABC의 면적이며 초과부하량을 뜻하고,  $DL_2$ 는 삼각형 CDE의 면적으로 개발 가능량 혹은 여유 부하량을 뜻한다.  $DL$ 의 값이 양의 값이면 배출 부하량이 허용부하량을 초과하지 않은 경우로 부하량 관리가 잘

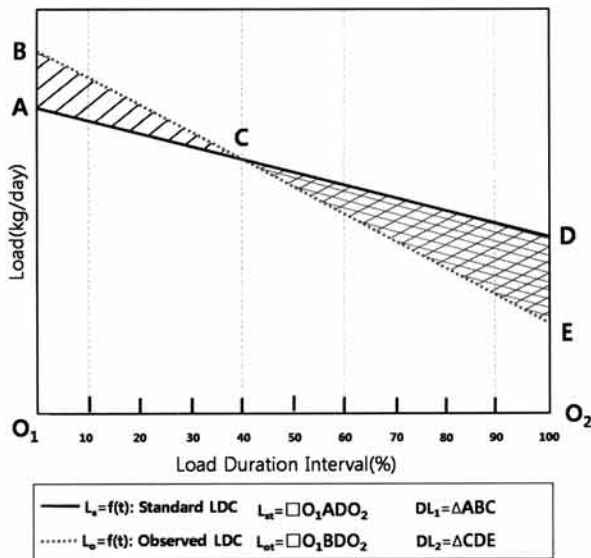


Fig. 7. Appraisal of pollutant load using Q-L Rating Curve (Park, 2010).

이루어지고 있음을 뜻하고, DL의 값이 음의 값이면 허용 부하량을 초과했다는 것을 의미하며 유역의 부하량 삭감이 필요하다는 것을 판단할 수 있다(박준호, 2010).

### 2.2. 연구대상유역

웹기반 LDC 시스템에 적용하기 위한 본 연구의 대상유역은 경기도 가평군 가평천 유역이며 해당 유역은 지방하천으로 화악천, 홍적천, 경덕천 등을 포함하고 있다(Fig. 8). 가평천 유역의 유역면적은 305.38 km<sup>2</sup>, 하천연장은 35.44 km, 연평균 강우량은 1,342.75 mm이다(경기도, 2009). 토지이용현황은 산림이 89%, 농경지가 6%로 산림과 농경지가 대부분을 차지한다(이태진, 2005).

가평천의 경우 북한강 수계에 속해 있으며 수질오염총량관리 가평A 단위유역으로 2008년 7월 총량관리계획이 제정되어 2009년 12월 8일 승인받아 현재 운영 중이며 기준유량(10년 평균 저수량)은 2.208 m<sup>3</sup>/sec, 목표수질은 BOD 1.1 mg/L로 설정되어 있다(경기개발연구원 등, 2010).

### 2.3. 웹기반 LDC 시스템 적용

#### 2.3.1. 유량 및 수질자료 구축

본 연구에서는 기존의 연구에서 개발된 웹기반 LDC 시스템을 가평천 유역에 적용하고자 해당 유역의 유량 및 수질 자료를 구축하였다. 가평천 유역은 현재 수질오염총량관리 가평A 단위유역으로 지정되어 있으며, 수질유량측정망 시스템(2011)에서는 8일 간격으로 가평A 지점에서 실제 측정된 수질 및 유량 자료를 제공하고 있다. 그러나 8일 간격의 유량자료만으로는 우리나라와 같이 모든 유량조건을 대변하기가 힘들고(황하선 등, 2010), 정확한 유황분석을 위해서는 일 유량 자료가 필수적이다(권형중 등, 2007). 박준호(2010), 황하선 등(2010) 등 부하지속곡선을 적용한 기존의 연구들에서는 8일 간격으로 측정된 수질자료(수질유량측정망시스템, 2011)와 유역 모델인 SWAT (Soil and

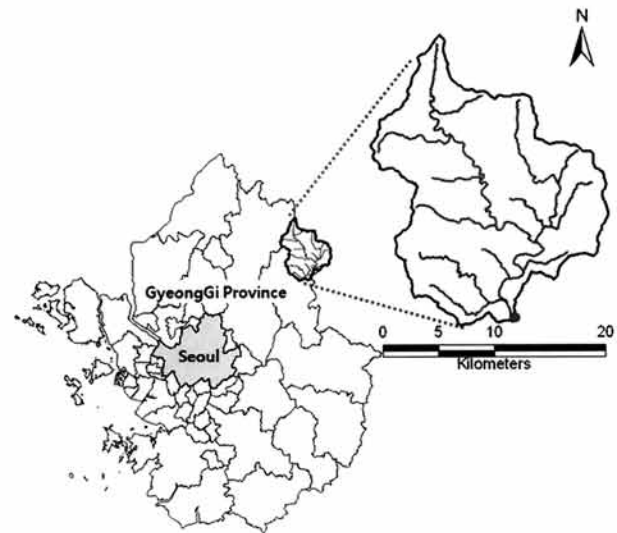


Fig. 8. Location of Gapyeongcheon watershed.

Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998) 모형과 HSPF (Hydrological Simulation Program in Fortran; Bicknell et al., 2001) 모형을 이용하여 산정된 해당 유역의 일 유량 자료를 사용하였다. 하지만 유역 모형의 경우 유역의 특성을 나타내는 매개변수에 대한 불확실성 문제로 인하여 산정된 유량에 대한 불확실성이 존재하고(이정은, 2002), SWAT 모형의 경우 본류를 유하하는 하천유량의 매우 큰 불확실성을 내포할 수 있다고 하였으며(김상단 등, 2007), 특히 저수기·갈수기 유량자료는 그 신뢰도가 매우 떨어진다고 하였다. 그리하여 본 연구에서는 보다 정확한 부하지속곡선 작성을 위하여 국가수자원관리종합정보시스템(2011)에서 제공하는 가평(경) 지점의 실측 일 유량 자료와 수질유량측정망시스템(2011)에서 제공하는 가평A 지점의 8일 간격으로 측정된 BOD 자료를 이용하여 웹기반 LDC 시스템에 적용하였다. 두 지점의 위치는 Fig. 9, Table 1과 같으며 실제 이격거리는 약 330 m로 인접해있다. 유량 자료의 보다 정확한 검증을 위하여 가평 A 지점에서의 8일 간격 유량자료와 가평(경) 지점의 일 유량 자료 중 유량측정 일자가 일치하는 자료를 선별하여 결정계수(R<sup>2</sup>)와 Nash and Sutcliffe efficiency coefficient (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970)로 비교·검증 하였다.

#### 2.3.2. 웹기반 LDC 시스템에 적용

본 연구에서는 가평천 유역의 실측된 일 유량 자료와 8일 간격으로 측정된 BOD 자료를 이용하여 웹기반 LDC 시스템에 적용하고 부하지속곡선을 작성하여 유량변동에 따른 수질 및 부하량 특성을 파악하였다. 연구 기간은 2008년 1월~12월과 2010년 3월~2011년 6월 두 기간으로 나누어 수질오염총량제 재착수 시행 전·후를 비교하였다.

#### 2.3.3. 유량-부하량 곡선을 이용한 부하량 평가

웹기반 LDC 시스템을 이용하여 부하지속곡선을 작성한 후, 객관화·정량화된 수질 및 부하량 평가를 위하여 본 연구에서는 유량-부하량 곡선을 이용하였다. 부하지속곡선 작

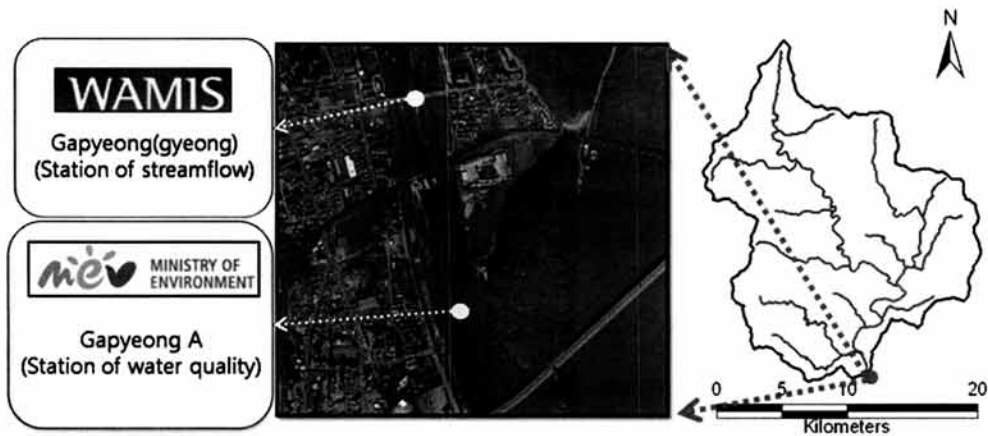


Fig. 9. Location of monitoring station.

Table 1. Location of monitoring station

Monitoring station	Longitude	Latitude
Gapeong A (Station of water quality)	127-31-09	37-49-43
Gapeong (gyeong) (Station of streamflow)	127-31-05	37-49-53

성과 마찬가지로 두 기간으로 나누어 유량-부하량 곡선을 작성하였으며, 웹기반 LDC 시스템에는 유량-부하량 곡선을 작성하는 기능이 없기 때문에, 해당 작업은 수작업으로 진행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유량자료의 비교·검증

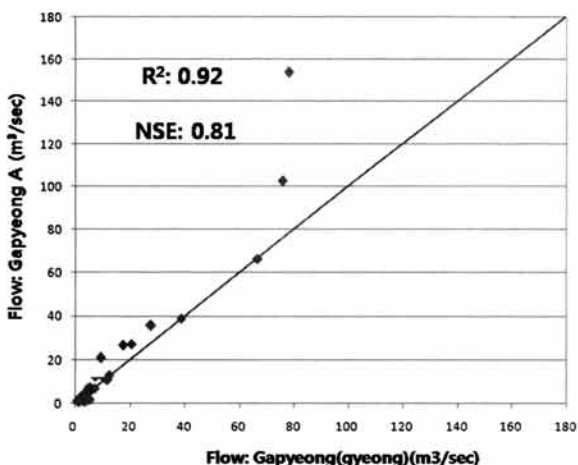
가평 A 지점과 가평(경) 지점의 유량자료 중 일자가 같은 자료를 선별하여 수질오염총량제 시행 전(기간 I : 2008년 1월~12월)과 시행 후(기간 II : 2010년 3월~2011년 6월)의 기간을 나누어 각각 비교·검증하였다(Fig. 10).

비교 결과 기간 I의 경우  $R^2 = 0.92$ ,  $NSE = 0.81$ , 기간 II의 경우  $R^2 = 0.95$ ,  $NSE = 0.83$ 으로 기간 I, II 모두 가평 A 지점의 유량과 가평(경) 지점의 유량이 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

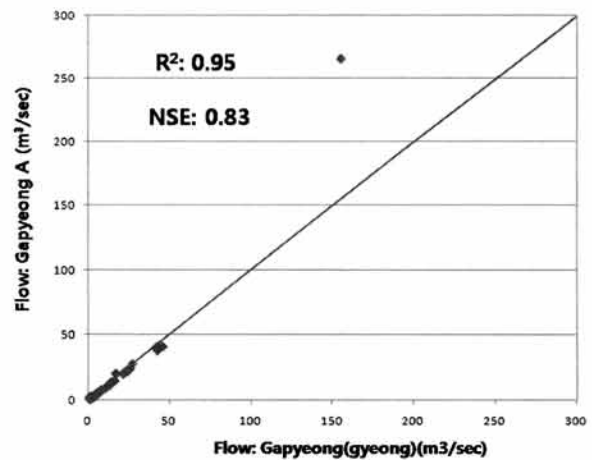
#### 3.2. 유량·부하 지속곡선 비교 및 평가

##### 3.2.1. 유량지속곡선 비교 작성

구축된 가평천 유역의 일 유량 및 BOD 자료를 이용하여 기간 I와 기간 II의 유량지속곡선을 웹기반 LDC 시스템을 이용하여 작성하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다. Cleland (2003)에 따르면 누적 유량은 유량크기에 따라 0~10%는 홍수량 조건(High Flow), 10~40%는 풍수량 조건(Moist conditions), 40~60%는 평수량 조건(Mid-Range conditions), 60~90%는 저수량 조건(Dry conditions), 90~100%는 갈수량 조건(Low flow)으로 분류되며, 기간 I과 기간 II의 각각의 유량조건은 Table 2와 같다. Table 2에서 전체적으로 기간 II의 유량이 기간 I 보다 높게 나타나는데, 이는 해당기간의 강수량의 차이에서 비롯되었다고 판단된다. 가평(경) 강우 관측지점(국가수자원관리종합정보시스템, 2011)의 해당 기간의 강수량 비교 결과, 기간 I의 월평균 강수량은 127.33 mm 인 것에 비하여 기간 II의 월평균 강수량은 141.81 mm 로 높게 나타났다.



(a) Period I



(b) Period II

Fig. 10. Comparison of streamflow for two monitoring stations.

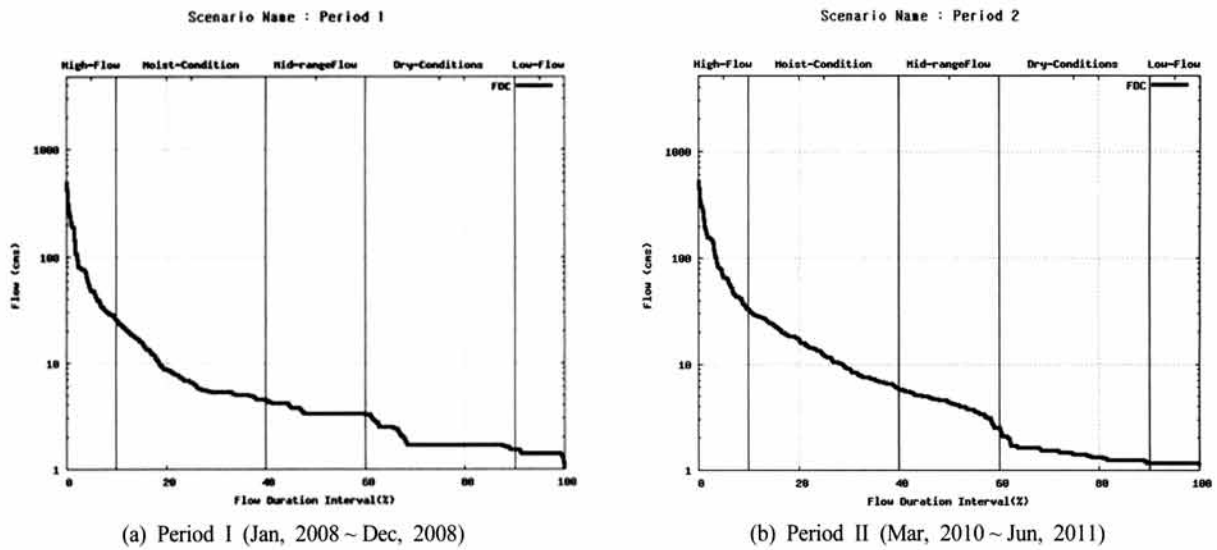


Fig. 11. Comparison of flow duration curve.

Table 2. Hydrologic conditions of period I and Period II

Hydrologic condition	Period I (m <sup>3</sup> /s)	Period II (m <sup>3</sup> /s)
High flow (0~10%)	480.12~25.03	509.06~53.79
Moist conditions (10~40%)	25.03~4.51	53.79~10.33
Mid-Range conditions (40~60%)	4.51~3.29	10.33~5.32
Dry conditions (60~90%)	3.29~1.52	5.32~1.60
Low flow (90~100%)	1.52~1.03	1.60~1.14

3.2.2. 부하지속곡선 비교 및 평가

본 연구에서는 유량지속곡선과 가평 A 지점의 BOD 기준 수질(1.1 mg/L)을 웹기반 LDC 시스템에 입력하여 부하지속곡선을 작성하고 실측수질 및 부하량 자료를 도식화 하였으며 그 결과는 Fig. 12와 같고, 또한 유량에 따른 목표수질과 실측수질 데이터와의 비교도 수행하였으며 그 결과는 Fig. 13과 같다.

기간 I의 경우 저수량 조건(60~90%), 평수량 조건(40~60%) 그리고 풍수량 조건(10~40%) 등 일부 구간에서 허용부하량을 초과하였으나 대체적으로 모든 조건에서 허용부하량을 만족하는 것으로 나타났다. 기간 II의 경우도 극히 일부 구간을 제외하고는 거의 모든 조건에서 허용부하량을 만족시키는 것으로 나타났다.

3.3. 유량-부하량 곡선을 이용한 부하량 평가

본 연구에서는 부하지속곡선을 작성하여 계절별 유량 변화에 따른 유역의 수질 영향을 평가하였고, 또한 표준유황곡선과 부하지속곡선, 일유량 자료와 8일 간격으로 측정된 수질 자료를 이용하여 유량-부하량 곡선을 작성하고 가평천유역의 BOD에 대한 부하량 할당 및 건전도 평가를 수행하였다. 분석 대상 지역의 표준유황곡선과 관측유황곡선의 비선형 상관 분석을 실시하여 각각의 곡선식과 상관계수를 산정하였다.

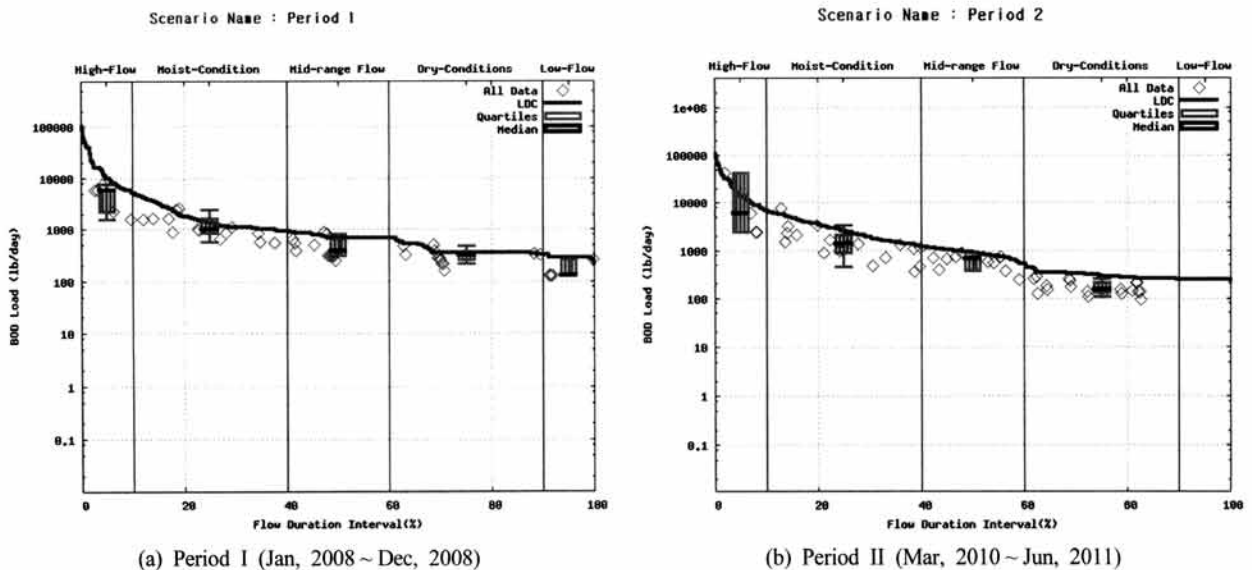


Fig. 12. Comparison of load duration curve.

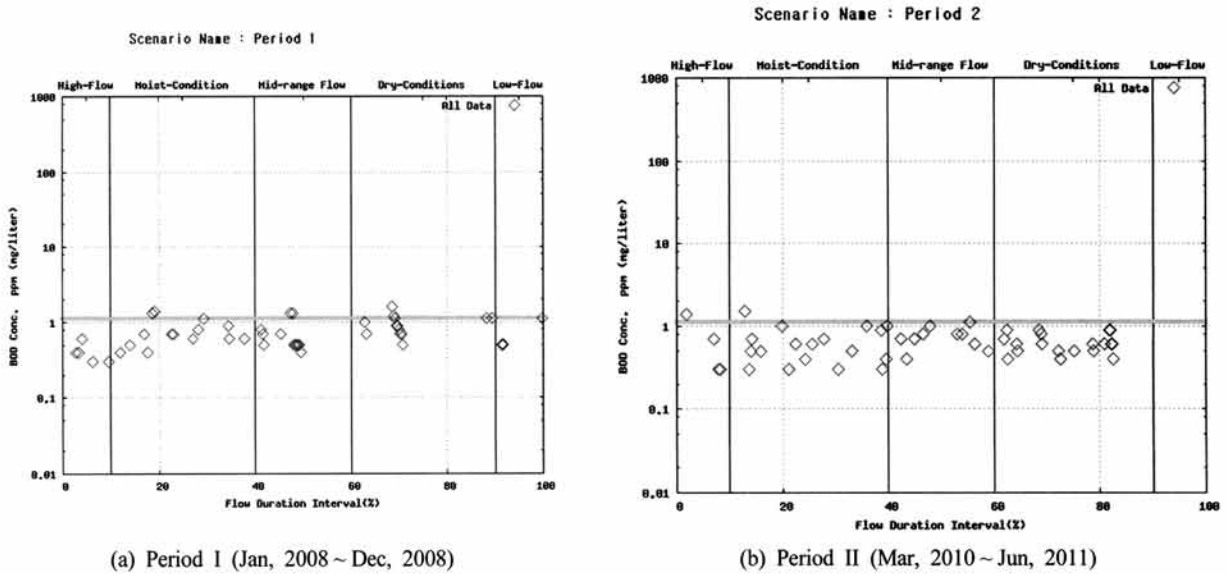


Fig. 13. Comparison of target water quality with observed concentration data.

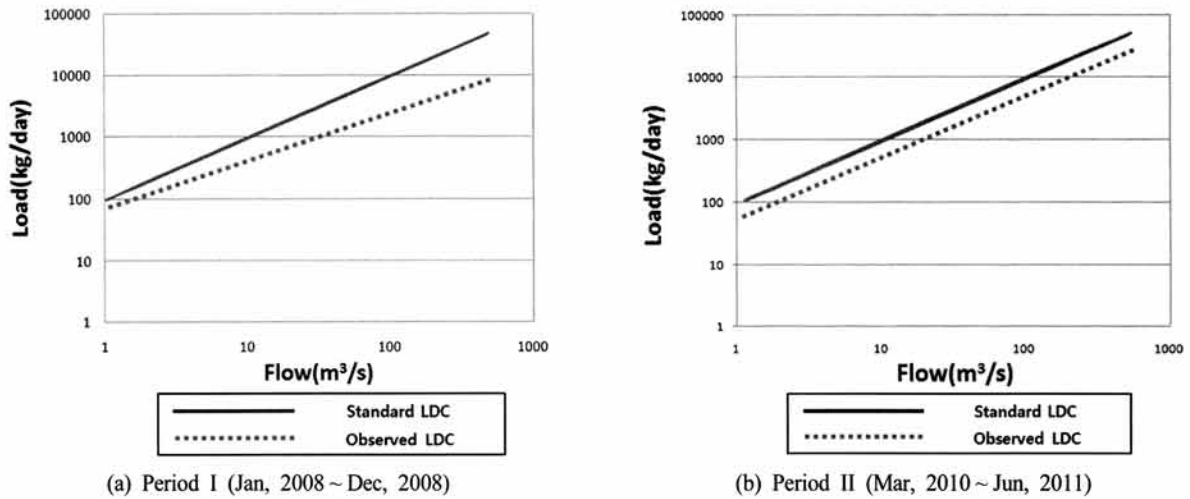


Fig. 14. Comparison of Q-L rating curve.

Table 3. The equation of Q-R rating curve for period I and period II

	The equation of Q-R rating curve		Correlation coefficient
Period I	Standard load duration curve	$L = 95.01Q^1$	1
	Observed load duration curve	$L = 76.78Q^{0.827}$	0.857
Period II	Standard load duration curve	$L = 95.01Q^1$	1
	Observed load duration curve	$L = 53.20Q^{0.989}$	0.899

기간 I과 기간 II의 유량 및 수질자료를 이용하여 작성된 유량-부하량 곡선은 Fig. 14와 같으며, 각각의 표준유황곡선과 관측유황곡선의 식과 상관계수는 Table 3에 나타내었다.

Fig. 14에서 보이는 결과와 같이, 유량-부하량 곡선 비교 결과 기간 I과 기간 II 모두 모든 유량 구간에서 허용부하량을 만족하는 것으로 나타났으며, 이는 유량-부하량 곡선의 4가지 유형 중 CASE I (청정지역)에 해당된다.

### 3.4. 수질오염총량제에서의 웹기반 LDC 적용성 검토

우리나라의 수질오염총량제는 단순히 기준유량을 목표수

질과 곱하여 관리되고 있으며, 이는 변동하는 유량에 따른 수질 및 부하량을 고려하기에 많은 어려움이 있다. 일정한 수질 농도를 유지하고 관리하기 위해서는 시간 혹은 일별로 변하는 유량을 고려한 부하량 관리를 통하여 이루어질 수 있을 것이며, 부하지속곡선 방법은 이에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 특히 본 연구에서 활용된 웹기반 LDC 시스템의 경우 부하지속곡선의 전 과정을 웹을 통하여 자동으로 작성하기 때문에 환경 전문가나 정책 실무자 등 누구나 쉽게 수체의 수질 상태를 파악할 수 있다. 또한 부하지속곡선의 가장 큰 장점 중에 하나는 유역의 배출 특성에 따른 오염원 삭감 및 관리에 대한 방향을 제시해 줄 수 있다는 점이다. US EPA (2006)에 따르면 갈수량(Low flow) 및 저수량(Dry conditions) 조건 등 저유량 발생 기간에 허용부하량을 초과한 경우 환경기초 시설 등 점오염원에 대한 관리가 필요하고, 평수량(Mid-Range conditions) 및 풍수량(Moist conditions) 조건 기간의 경우는 수변림 조성, 불투수 지역의 강우 유출수 관리 등이 필요하며, 풍수량(Moist conditions) 및 홍수량 조건(High Flow)에 허용부하



**Table 4.** Example source area/Hydrologic condition considerations (US EPA, 2006)

Contributing source area	Duration curve zone				
	High flow	Moist	Mid-range	Dry	Low flow
Point source				M	H
On-site wastewater systems			H	M	
Riparian areas		H	H	H	
Storm water: Impervious areas		H	H	H	
Combined sewer overflows	H	H	H		
Storm water: Upland	H	H	M		
Bank erosion	H	M			

Note: Potential relative importance of source area to contribute loads under given hydrologic condition (H: High; M: Medium)

량을 초과한 경우는 하안 침식, 농경지에서 발생하는 유출수 및 토양 유실 등 비점오염원 관리를 위한 BMPs 적용이 필요하다고 하였다(Table 4).

본 연구의 결과 가평천 유역은 비교적 수질 및 부하량 관리가 잘 이루어지고 있는 것으로 나타났지만, 기존의 부하지속곡선을 적용한 연구들(박준호, 2010; 황하선 등, 2010; Kim et al., 2011)에서는 특정 유량 구간에서 허용 부하량을 초과하는 결과를 보였고, 이는 수질오염총량제도가 운영되고 있는 다른 여러 유역에서 특정 유량조건에서의 허용부하량 초과가 실제로 발생되고 있음을 의미한다. 그러므로 웹기반 LDC 시스템의 부하지속곡선방법 적용을 통한 유량 변화에 따른 오염원 발생 빈도 분석 및 수질 평가와, 위에서 나타난 유량 변화에 따른 부하량 삭감 계획은 우리나라 수질오염총량제도에 매우 유용하게 적용되어 수질 개선 및 부하량 삭감에 크게 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 우리나라 수질오염총량제도의 이행평가에 웹기반 LDC 시스템의 적용 가능성을 판단하고자 가평천 유역을 대상으로 부하지속곡선과 유량-부하량 곡선을 작성하고 다양한 유량 조건에 따른 수질 및 부하량을 평가하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 환경부 수질유량측정망시스템(<http://water.nier.go.kr/>)에서 제공하는 가평 A 단위 유역의 8일 간격 BOD 자료와 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공하는 가평(경) 지점의 일 유량 자료와 기준수질 자료(BOD 1.1 mg/L)를 웹기반 LDC에 적용하여 작성된 부하지속곡선과 유량-부하량 곡선을 이용하여 수질 및 부하량을 평가한 결과 가평천 유역은 수질오염총량 적용 전·후 모든 유량조건에서 수질 및 부하량 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 2) 수질오염총량제도 적용에 있어 웹기반 LDC 시스템은 유역의 오염원 특성 파악을 용이하게 하고, 계절별·유역별 수질 및 부하량 평가를 가능하게 하여 특정 유량 구간에 대한 부하량 규제기준을 마련할 수 있는 근거가 될 수 있다. 무엇보다 웹기반 LDC 시스템은 접근이 쉽고, 인터페이스가 간단하며, 다소 복잡한 부하지속곡선 작성 과정을 자동으로 수행하기 때문에 사용자가 이용

하기에 많은 이점이 있고, 일반 시민들에 대한 홍보 효과도 매우 클 것이라 판단된다.

- 3) 부하지속곡선 방법이 수질오염총량제도에 보다 객관적으로 적용되기 위해서, 향후 웹기반 LDC 시스템에 유량-부하량 곡선 작성 기능을 추가할 예정이다.
- 4) 부하지속곡선을 이용하여 유역의 수질 및 부하량을 평가하기 위해서는 최소 일 유량 이상의 연속적인 유량자료가 필요하다. 하지만 우리나라의 경우 같은 지점에서 일 유량 및 수질자료를 모니터링하는 경우는 흔치 않고, 많은 유역에서 모형을 이용하여 일 유량을 산정하고 있다. 하지만 유역 모형의 정확성에 대해서는 아직 의문이 많고, 부하지속곡선 및 웹기반 LDC 시스템이 실제 수질오염총량제도에 적용되기 위해서는 많은 일 유량 모니터링 자료가 필요하며, 더불어 유량 및 수질 자료가 같은 지점에서 측정되어야 한다.
- 5) 또한 우리나라의 경우 미계측 유역의 유량을 측정하는데 있어 단순히 유역의 강우량비와 면적비를 고려한 비유량법을 이용하는데, 이는 유역의 지형, 토지이용 및 토양 특성을 제대로 고려하기에 많은 한계가 있기 때문에, 회귀식을 이용한 방법 등 다른 방법에 대한 연구가 필요한 실정이다.

#### 사 사

본 연구는 Eco-STAR Project (과제번호 EW07-II-06, 농촌 비점오염원 제어를 위한 효율적인 관리기술 개발)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 경기개발연구원, 강원발전연구원, 충북개발연구원(2010). 한강수계 수질오염총량의 관리 및 제도 시행 방안. 경기도(2009). 경기도보.
- 국가수자원관리종합정보시스템(2011). <http://www.wamis.go.kr/>.
- 권형중, 박지형, 이형진, 공동수(2007). PRMS 모형을 이용한 8일간격 유량측정자료의 일유량 확장 가능성 검토. 공동 추계 학술발표회 논문집, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. D1-D2.
- 김경섭(2010). 우리나라 수질오염총량관리계획에 대하여. 한국수자원학회지, 43(5), pp. 43-48.

- 김상단, 강두기, 김문수, 신현석(2007). 유역모형 구축을 위한 8일간격 유량 측정자료의 일유량 확장 가능성. *수질보전 한국물환경학회지*, 23(1), pp. 64-71.
- 김상수, 이동윤, 한현진, 문병현(2011). 하천의 수질오염도 평가를 위한 부하지속곡선 적용성 연구. *공동 춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. P-91.
- 낙동강 물환경연구소(2010). 2009년 낙동강수계 유량측정사업운영결과 보고서.
- 박준호(2010). 부하지속곡선을 활용한 수체건강성 평가에 관한 연구. 석사학위논문, 경북대학교.
- 수질유량측정망시스템(2011). <http://water.nier.go.kr/>.
- 이정은(2002). 빈도해석과 강우-유출 모형에 의한 확률홍수량의 비교연구. 석사학위논문, 연세대학교.
- 이태진(2005). 토지이용 패턴에 따른 유역환경 오염도 조사. 석사학위논문, 서울산업대 산업대학원.
- 환경부(2004). 수질오염총량관리 업무편람.
- 황하선, 윤준경, 김지태(2010). 수질오염총량 단위유역의 유량조건별 수체 손상 평가를 위한 부하지속곡선 적용성 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, 26(6), pp. 903-909.
- Arnold, J. G., Srubvasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, Jr., J. L., Jobes, T. H., and Donigan, Jr., A. S. (2001). Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, G.A.
- Cleland, B. R. (2003). TMDL Development From the "Bottom Up" - Part III: Duration Curve and Wet Weather Assessment. *National TMDL Science and Policy 2003-WEF Specialty Conference*, Chicago, IL.
- Cleland, B. R. (2006). TMDL Development From the "Bottom Up" - Part IV: Connecting to Storm Water Management Programs. *U.S. National TMDL Science and Policy 2007*. Seattle, WA.
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), pp. 507- 515.
- Johnson, S., Whiteaker, T., and Maidment, D. (2009). Automated load duration curve creation for the state of Texas. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(3), pp. 654-663.
- Kim, J., Engel, B. A., Park, Y. S., Theller, L., Chaubey, I., Kong, D. S., and Lim, K. J. (2011). Development of web based load duration curve system for analysis of total maximum daily load and water quality characteristic in a waterbody. In revision.
- Mostaghimi, S., Benham, B., Brannan, K., Dillaha, T., Wynn, J., Yagow, G., and Zeckoski, R. (2003). Total Maximum Daily Load Development for Lincille Creek: Bacteria and General Standard (Benthic) Impairments. Biological Systems Engineering Department, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia. ([www.deq.state.va.us/tmdl/tmdlreports.html](http://www.deq.state.va.us/tmdl/tmdlreports.html)).
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- Nevada Division of Environmental Protection (NDEP) (2003). *Load Duration Curve Methodology for Assessment and TMDL Development*. April 2003.
- Runkel, R. L., Charles, G. C., and Timothy, A. C. (2004). Load Estimator (LOADEST): A Fortran Program for Estimating Constituent Loads in Streams and Rivers. *Techniques and Methods Book 4*, Chapter A5.
- U.S. EPA Office of Wetlands, Oceans, & Watershed (2006). *An Approach for using Load Duration Curves in the development of TMDLs*.