



## 부하지속곡선을 이용한 비점오염원 우선관리 지역 선정 및 관리목표 설정 연구

### Identifying Priority Area for Nonpoint Source Pollution Management and Setting up Load Reduction Goals using the Load Duration Curve

장선숙<sup>a</sup> · 지현서<sup>b</sup> · 김학관<sup>c, †</sup>

Jang, Sun Sook · Ji, Hyun Seo · Kim, Hak Kwan

#### Abstract

The objective of this study is to identify the priority area where the nonpoint source pollution (NPS) management is required and to set up the load reduction goals for the identified priority area. In this study, the load duration curve (LDC) was first developed using the flow and water quality data observed at 286 monitoring stations. Based on the developed LDC, the priority area for the NPS pollution management was determined using a three-step method. The 24 watersheds were finally identified as the priority areas for the NPS pollution management. The water quality parameters of concern in the priority areas were the total phosphorus or chemical oxygen demand. The load reduction goals, which were calculated as the percent reduction from current loading levels needed to meet target water quality, ranged from 67.9% to 97.2% during high flows and from 40.3% to 69.5% during moist conditions, respectively. The results from this study will help to identify critical watersheds for NPS program planning purposes. In addition, the process used in this study can be effectively applied to identify the pollutant of concern as well as the load reduction target.

**Keywords:** Load duration curve; nonpoint pollution source; target water quality; pollutant load reduction goal; flow duration curve

#### 1. 서 론

환경부는 비점오염원 저감을 위한 정책의 일환으로 비점오염원에서 유출되는 강우유출수로 인하여 하천·호소 등의 이용목적, 주민의 건강·재산이나 자연생태계에 중대한 위해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 지역을 비점오염원 관리지역으로 지정하여 관리하는 제도를 시행하고 있다. 「물환경보전법 시행령」 제76조에 따르면 비점오염원 관리지역의 지정기준은 하천 및 호소의 수질 및 수생태계에 관한 환경기준 또는 수계영향권별, 호소별 수질 및 수생태계 목표기준에 미달하는 유역으로 유달부하량 중 비점오염 기여율이 50% 이상인 지역, 비점오염물질에 의해 자연생태계에 중대한 위해 초래

예상지역, 인구 100만 이상 도시로서 비점오염원관리가 필요한 지역, 지질 및 지층구조가 특이한 지역 등이다. 이러한 기준은 비점오염원 현황, 비점오염물질의 발생 특성, 유출경로 및 유출량, 비점오염물질이 수질 및 수생태계에 미치는 영향 등을 평가하기 위한 관측자료 및 정보가 충분하지 않은 경우에는 비점오염원 관리를 위한 포괄적인 의미에서의 기준으로 적용이 가능할 수 있으나 비점오염원 관리지역에서 비점오염원에 의한 수질오염 특성 및 오염의 정도를 파악하는데는 한계가 있다. 이러한 한계로 인해 비점오염원 관리지역의 관리목표의 설정 및 관리목표의 달성을 위한 평가에서도 비점오염원에 의한 수질변화 특성을 반영하고 있지 못하고 연평균 개념의 수질 기준으로 설정되고 관리되는 한계점이 있다 (Kim et al., 2015a).

이러한 한계점을 극복하고 비점오염원 관리지역 지정제도가 효율적으로 추진되기 위해서는 관측 자료를 기반으로 하여 비점오염원에 의해 문제가 발생하고 있는 지역을 선정하고 관리할 수 있는 방법론의 개발이 필요하다. 최근에는 전체 유량조건에서 실측된 수질과 목표로 설정된 수질과의 관계를 나타내는 부하지속곡선 (Load Duration Curve, LDC)을 이용하여 하천의 수질변화 또는 오염부하량의 크기를 고려하여 수질오염문제를 규명하고 대책에 따른 효과 및 목표달성 여부를 평가하는 방법이 사용되고 있다 (NDEP, 2003; USEPA,

<sup>a</sup> Researcher, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

<sup>b</sup> Researcher, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

<sup>c</sup> Assistant Professor, Graduate School of International Agricultural Technology, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† **Corresponding author**

Tel.:+82-33-339-5812 Fax:+82-33-339-5830

E-mail: [hkkimbest@snu.ac.kr](mailto:hkkimbest@snu.ac.kr)

Received: April 9, 2018

Revised: July 17, 2018

Accepted: July 17, 2018

2007; Hwang et al., 2011; Choi et al., 2012). LDC와 관측부하량을 비교하면 특정 유량 구간에서 목표수질 초과현상을 확인할 수 있으며 점오염원과 비점오염원에 의해 나타나는 수질오염문제를 파악할 수 있다 (Cleland, 2002; NDEP, 2003; USEPA, 2007).

Shen and Zhao(2010)는 LDC와 베이지안 통계를 결합하여 비점오염원 부하를 예측하고 저감량을 분석하였으며, Chen et al. (2011)은 비점오염원과 유출량 감소의 시간적 변화를 고려하기 위해 LDC와 역 모델링 접근법을 결합하여 TMDL (Total Maximum Daily Load)을 개발하였다. 국내의 경우, Kang et al. (2011)은 웹기반의 LDC 시스템을 구축하고, 가평천 유역을 대상으로 수질 및 부하량을 평가하여 수질오염총량제도 이행평가에 적용 가능성을 평가하였다. Jung et al. (2012)과 Yun et al. (2013)은 금호강 유역을 대상으로 LDC 분석을 통해 유량조건에 따른 수계 손상을 파악하고, 수질오염 원인 및 관리방안을 제시하였다. Kim et al. (2015b)은 유역 모델과 LDC를 이용하여 새만금 유역을 대상으로 비점오염물질의 배출 특성과 달성 가능성을 고려한 관리목표 설정 및 목표달성도를 평가하였다. 이처럼 기존의 연구는 LDC를 이용하여 목표수질이 정해진 유역에서의 목표수질 초과원인 분석 및 개선방안을 제시하기 위한 연구를 중심으로 이루어져 왔으며, 다양한 유역에서 수집된 관측 자료를 분석하여 목표수질 및 우선관리 지역 선정을 위한 기준을 설정하고 비점오염원 우선관리 지역을 도출하는 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 환경부에서 운영하고 있는 수질측정망에서 관측된 하천 유량 및 수질자료를 이용하여 LDC를 작성하고, 유량조건별 수질특성을 평가하여 비점오염원 관리가 우선적으로 필요한 지역을 도출하고 관리목표를 설정하는 방법을 제안하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 자료구축

LDC 작성을 위해서는 유량 및 수질 자료가 필요하며, 본 연구에서는 국가수질측정망에서 2011년부터 2015년까지 5년 동안 조사된 유량 및 수질자료를 이용하였다. 수질측정지점은 총량측정지점 및 일반측정지점으로 구분되어 운영되고 있다. 총량측정지점은 144지점으로 수질 및 유량이 8일 간격으로 측정된다. 일반측정지점의 경우 699지점 중 유량이 측정되는 지점은 173지점이며, 일정한 주기를 가지지 않고 측정되는 31지점을 제외하고 8일 간격으로 측정되는 142지점의 수질 및 유량자료를 수집하였다. 본 연구에서는 한강 66지점, 낙동강 100지점, 금강 60지점, 영산강·섬진강 60지점 등 총 286지점에 대해 수질 및 유량자료를 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr/>)을 통해 수집하였다.

### 2. 부하지속곡선(Load duration Curve, LDC)

본 연구에서는 각 수질측정지점에 대해 LDC를 작성하기 위해 우선 수집된 유량자료를 이용하여 유량지속곡선 (Flow Duration Curve; FDC)을 작성하였으며, 그 결과에 목표수질을 곱하여 LDC를 작성하였다 (Fig. 1). 작성된 LDC 위에 실측 유량 및 수질자료를 이용하여 실측 결과에 대응하는 부하량을 도식하여 유량변화에 따른 변화특성을 분석하였다. FDC 작성을 위해서는 전 기간 일별 유량자료를 이용하는 것이 바람직하지만 현실적 여건 등으로 인해 수질측정지점과 같이 일별 측정 자료의 확보가 힘든 경우 8일 간격 유량 자료가 다년간 축적될 경우 실측자료가 하천의 전체 유량 빈도를 대변할 수 있어 FDC 작성 및 LDC 분석을 위해 국내의 경우 8일 간격의 실측자료가 이용되고 있다 (Hwang et al., 2011, Kim et al., 2015a).

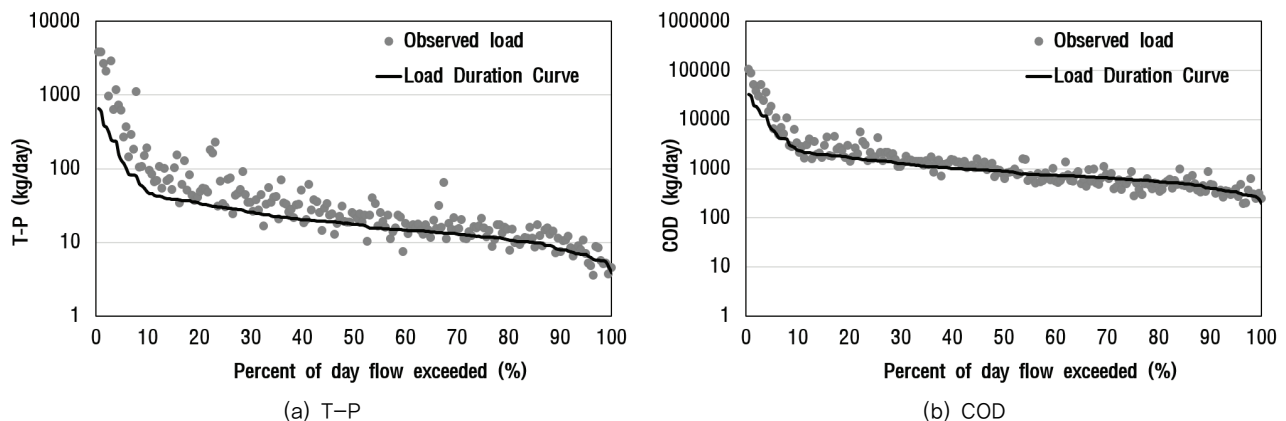


Fig. 1 Example of load duration curve (Yanghwacheon)

Fig. 1에서와 같이 관측부하량이 LDC 위에 있는 경우는 해당 항목의 목표수질 또는 기준 오염부하량을 초과한 경우이며, LDC 아래에 위치하는 경우에는 목표수질이 만족된 경우를 의미 한다 (Choi et al., 2012). 비점오염원에 의한 하천 오염의 경우를 고려하기 위해서는 유량이 상대적으로 많은 경우에서 목표수질을 초과하는지를 평가하여야 한다 (USEPA, 2007; Choi et al., 2012).

### 3. 목표수질 설정

LDC를 작성하기 위해서는 각 지점의 목표수질이 필요하다. 수질오염총량지점 및 주요 수질측정 지점에 대해서는 목표수질이 설정되어 있다. 목표수질이 설정되어 있지 않은 지점의 목표수질을 설정하기 위해서 목표수질이 설정되어 있는 지점의 수질특성을 분석하였다. 수질오염총량관리 및 하천 수질관리를 위한 수질항목인 생물학적 산소요구량 (biochemical oxygen demand, BOD) 및 총인 (total phosphorus, T-P)에 대한 자료 (2011~2015)를 수집하여 백분위 (percentile) 분석을 실시하였다. 한강을 제외한 낙동강, 금강, 영산강·섬진강 권역에서 BOD 및 T-P의 목표수질이 자료수집기간 (2011~2015년) 동안 관측된 수질의 60 percentile~100 percentile에 50% 이상 분포되어있는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 본 연구에서는 설정된 목표수질의 분석결과를 고려하여 관측수질의 60 percentile을 목표수질로 설정하였다.

LDC 분석을 위해 총량측정지점 중 120지점은 수질오염총량관리제도의 목표수질을 이용하였으며, 목표수질이 설정되어 있지 않은 24개의 총량측정지점 및 142개의 일반측정지점의 경우 관측 수질의 60 percentile에 해당하는 값을 목표수질

로 설정하였다. 목표수질이 설정되어 있지 않은 수질항목인 화학적 산소요구량 (chemical oxygen demand, COD)에 대해서도 관측된 수질측정 값의 60 percentile에 해당하는 값을 목표수질로 설정하였다. 설정된 목표수질은 하천 생활환경기준에 따라 매우좋음 (I a)을 최소치로, 약간좋음 (II)을 최대치로 제한하였다. 목표수질은 물이용의 목적과 유역현황, 자연환경의 특성 등 물환경 여건에 따라 다르게 설정되어야 한다. 그러나 제2차 물환경관리기본계획 (2016~2025)에서는 2025년까지 전체 115개 중권역 중 104개 이상을 좋은물 (BOD 3 mg/L 이하)로 개선하는 것을 목표로 하고 있고 (MOE, 2017), 본 연구는 비점오염원의 관리가 우선적으로 필요한 지점 선정을 목적으로 하고 있기 때문에 약간좋음을 목표수질의 최대치로 제한하였다. 매우좋음을 초과하는 목표수질을 설정하는 것은 지속가능한 유역관리를 위해서 필요하지만 비점오염원 관리가 우선적으로 필요한 지점을 선정하는 목적에 벗어날 수 있기 때문에 목표수질의 최소치로 제한하였다. Table 1은 LDC 분석을 위한 목표수질 설정기준을 나타낸다.

### 4. LDC를 이용한 비점오염원 우선관리지점 선정 방법

본 연구에서는 LDC를 이용하여 수질오염 발생 우려지점의 유형 분류 및 비점오염원 우선관리지점 선정을 위해 수집된 수질 및 유량 자료를 기반으로 LDC를 작성하고, LDC 분석결과를 기반으로 하여 3단계로 분석하였다 (Fig. 3). 1단계에서는 설정된 목표수질을 초과하는 지점을 도출하였고, 2단계에서는 1단계에서 도출된 목표수질 초과지점 중에서 목표수질이 하천 생활환경기준 좋음 (II)을 초과하는 수질오염 발생 우려지점을 도출하였다. 3단계에서는 수질오염 발생 우려지

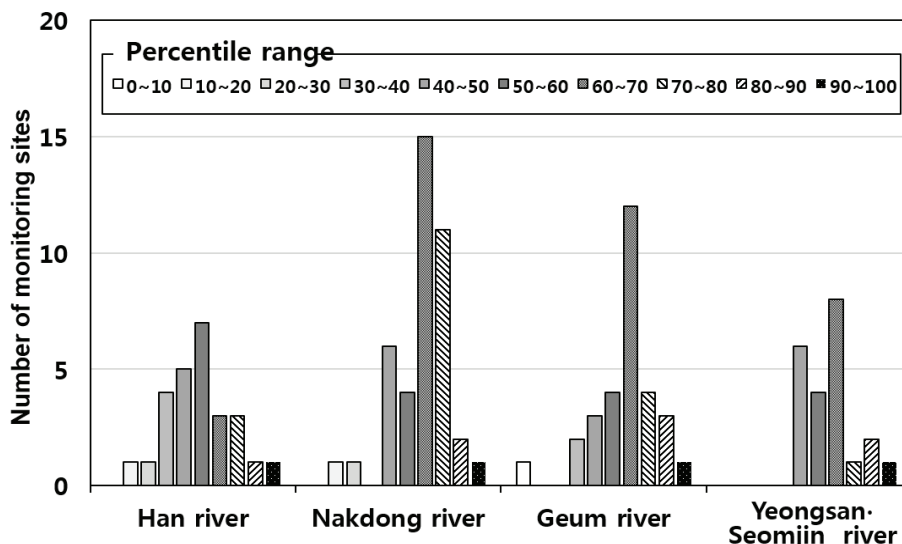


Fig. 2 Distribution of target water quality at the monitoring sites

**Table 1** Target water quality for the load duration curve analysis

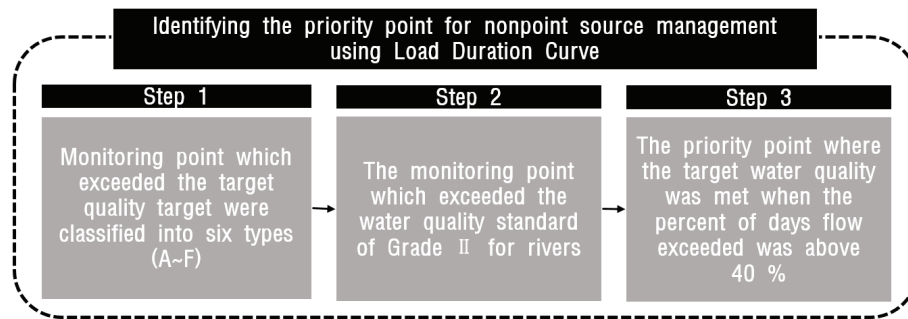
Point		BOD(mg/L)	COD(mg/L)	T-P(mg/L)
TMDL <sup>a</sup>	Standard	Target WQ <sup>b</sup>	60 percentile	Target WQ
	Limit <sup>c</sup>	min	-	-
		max	3.00	5.00
Normal	Standard	60 percentile <sup>d</sup>	60 percentile	60 percentile
	Limit	min	1.00	-
		max	3.00	5.00

<sup>a</sup>Total maximum daily loads

<sup>b</sup>Target water quality in total maximum daily loads system

<sup>c</sup>Limited by water quality standard for living environment in river (max: Fairly good(II), min: Very good(I a))

<sup>d</sup>60 percentile of the observed water quality data (2011~2015).



**Fig. 3** Procedure for identifying the priority area

점을 대상으로 주로 점오염원인지 비점오염원인지 또는 점 및 비점오염원인지 주요 오염발생 원인에 따라 분류하였다.

**가. 목표수질을 초과하는 지점**

본 연구에서는 LDC의 해석 및 유량 구간별 오염원 관리를 위해서 Cleland (2003) 및 미국 환경청 (USEPA, 2007)이 제안한 분류방법 및 유량 구간별 오염원인 해석방법을 이용하였다. LDC에서 유량 구간의 구분은 초과유량확률에서 0%~10%는 홍수기 조건 (high flows), 10%~40%는 풍수기 조건 (moist conditions), 40%~60%는 평수기 조건 (mid-range), 60%~90%는 저수기 조건 (dry conditions), 90%~100%는 갈수기 조건 (low flows) 등 5개로 분류하였다. 갈수기 및 저수기 조건에서 관측부하량이 LDC를 초과하는 경우 공공하수처리 시설의 방류수질 개선 등 점오염원에 대한 관리가 필요하고, 풍수기와 평수기 조건에서는 수변완충식생대 조성과 불투수 지역의 강우유출수 관리가 필요하며, 풍수기 및 홍수기 조건에서는 하천제방 안정화, 농경지에서 발생하는 유출수 및 토양유실 등 비점오염원 관리를 위한 최적관리기법 (Best Management Practices, BMPs) 적용이 필요하다. 이처럼 홍수기, 풍수기 및 평수기 조건 구간 0%~60%의 수질개선을 위해

서는 비점오염원 관리가 필요하다. 그러나 Jung et al.(2011)은 우리나라에서 강우유출이 발생하는 유효강우가 10 mm일 경우 50% 미만의 유량에서는 강우유출수가 발생하지 않는 구간으로 분석하였고, Kim et al.(2015a)은 40%~100% 구간에서 BOD, T-P, SS 부하량 분포변화가 크지 않는 것으로 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 사전연구 결과 (Jung et al., 2011; Kim et al., 2015a)와 최우선 관리 지점 선정의 목적을 위해 비점오염원에 의해 영향을 받는 고유량 구간을 0%~40%로, 점오염원에 의해 영향을 받는 저유량 구간을 40%~100%로 구분하였다.

1단계에서는 목표수질을 초과하는 지역을 선정하기 위해 고유량 (0%~40%) 및 저유량 (40%~100%)에서의 부하량 특성에 따라 Table 2와 같이 유량구간별 6개의 유형 (A~F)으로 구분하였으며, 6개 유형에 해당하는 지역을 목표수질 초과 지역으로 선정하였다.

A 유형은 유량구간 0%~10%, 10%~40%, 0%~40%에서 관측부하량이 기준부하량을 50% 초과하는 유형이며, B 유형은 유량구간 0%~10%, 0%~40%에서 50% 초과, C 유형은 유량구간 10%~40%, 0%~40%에서 50% 초과하는 유형이다. A, B, C 유형은 고유량 구간에서만 50% 초과하는 경우로 비

**Table 2** Classification of the points which exceeded the target water quality

Type	High flow intervals (NPS <sup>a</sup> )			Low flow intervals (PS <sup>b</sup> )		
	0%~10%	10%~40%	0%~40%	40%~60%	60%~90%	90%~100%
A	○	○	○	×	×	×
B	○	×	○	×	×	×
C	×	○	○	×	×	×
D	○	○	○	More than one interval		
E	○	×	○	More than one interval		
F	×	○	○	More than one interval		

<sup>a</sup>NPS: Nonpoint pollution source

<sup>b</sup>PS: Point pollution source

$$\text{초과율(\%)} = \frac{\text{기준부하량(부하지속곡선)을 초과하는 관측자료 개수}}{\text{관측자료 개수}} \times 100 \quad (1)$$

점오염원에 의해 목표수질이 초과된 특성을 가진다.

D, E, F 유형에서 고유량 조건은 A, B, C 유형과 동일하며 동시에 저유량 구간(40%~60%, 60%~90%, 90%~100%) 중 한 구간 이상이 초과되는 유형이다. D, E, F 유형은 고유량과 저유량에서 50% 초과하며 점 및 비점오염원에 의해 목표수질이 초과되는 특성을 가진다. LDC 기준 유량구간별 관측부하량의 초과율은 수식 (1)을 이용하여 계산하였다.

나. 수질오염 발생 우려지점

2단계에서는 수질오염 발생 우려지점을 선정하기 위해서

Table 3과 같이 3가지 기준으로 설정하였다. 수질오염 발생 우려지점은 기준 1 및 기준 2 조건에 해당하는 지점이며, 3단계에서는 기준 3 조건에 따라 2단계에서 도출한 지점을 구분하여 도출하였다. 기준 1은 수질항목 (BOD, T-P, COD)에 대한 5년 (2011~2015) 평균수질이 하천생활환경기준 II등급 (BOD: 3 mg/L, T-P: 0.1 mg/L, COD: 5 mg/L)을 초과하는 조건이다. 기준 2는 Table 2에 제시된 유량구간별 6개 유형에 해당하는 조건이다. 기준 3은 저유량 (40%~100%) 구간에서 관리대상물질에 대한 초과율에 따라 수질오염 발생 우려지역이 두 가지 유형으로 구분하였다. 첫 번째 유형은 저유량 구간

**Table 3** Standard for identifying the water quality pollution areas

Standard 1 <sup>a</sup>	Standard 2 <sup>b</sup>	Standard 3 <sup>c</sup>	
BOD>3.00mg/L, T-P>0.100mg/L, COD>5.00mg/L	A, B, C	PS/NPS <sup>d</sup> : Excess rate in the low flow intervals >50%	NPS : Excess rate in the low flow intervals ≤50%
BOD>3.00mg/L, T-P>0.100mg/L	A, B, C		
BOD>3.00mg/L, COD>5.00mg/L	A, B, C		
T-P>0.100mg/L, COD>5.00mg/L	A, B, C		
BOD>3.00mg/L	A, B, C		
T-P>0.100mg/L	A, B, C		
COD>5.00mg/L	A, B, C		
BOD>3.00mg/L, T-P>0.100mg/L, COD>5.00mg/L	D, E, F		
BOD>3.00mg/L, T-P>0.100mg/L	D, E, F		
BOD>3.00mg/L, COD>5.00mg/L	D, E, F		
T-P>0.100mg/L, COD>5.00mg/L	D, E, F		
BOD>3.00mg/L	D, E, F		
T-P>0.100mg/L	D, E, F		

<sup>a</sup>Standard 1: Average water quality(2011~2015) > Grade II (Fairly good)(water quality standard for the living environment in river)

<sup>b</sup>Standard 2: Six types according to Table 2

<sup>c</sup>Standard 3: Classification of water quality pollution areas by the excess rate during the low flow

<sup>d</sup>PS: Point pollution source, NPS: Nonpoint pollution source

초과율이 50% 초과될 경우에는 점 및 비점오염원에 의한 수질오염 발생 우려지점으로, 두 번째 유형은 저유량 구간 초과율이 50% 이하일 경우에는 비점오염원에 의한 수질오염 발생 우려지점으로 구분하였다.

### 5. LDC를 이용한 비점오염원 우선관리지점의 관리물질 및 관리목표 설정 방법

비점오염원 우선관리 대상지점에서 관리물질은 고유량(0%~40%) 구간에서 관측부하량이 기준부하량 LDC를 50% 초과되는 수질요소를 선정하였으며, 관리목표는 목표저감율을 달성하는 것으로 설정하였다. 유량구간별 목표저감율을 산정하기 위하여 캘리포니아 환경보호청 (California Environmental Protection Agency, Cal-EPA)에서 제시한 방법을 이용하였다. 이 방법은 유량구간별 목표부하량을 만족하기 위한 목표저감율 산정하는 방법으로 부하지속곡선을 이용하여 관리유량 구간에 대하여 수식(2)와 같이 목표부하량 및 기준부하량을 이용하여 목표저감율을 산정할 수 있다 (Cal-EPA, 2012).

$$\text{목표저감률(\%)} = \frac{\text{기준부하량} - \text{목표부하량}}{\text{기준부하량}} \times 100 \quad (2)$$

목표부하량은 유량구간별 중간유량에 목표수질을 곱한 부하량이며, 기준부하량은 유량구간별 관측부하량의 90 percentile에 해당하는 부하량이다. Fig. 4는 LDC 기반 기준부하량, 목표부하량 및 목표저감율의 산정방법의 예를 보여주고 있다.

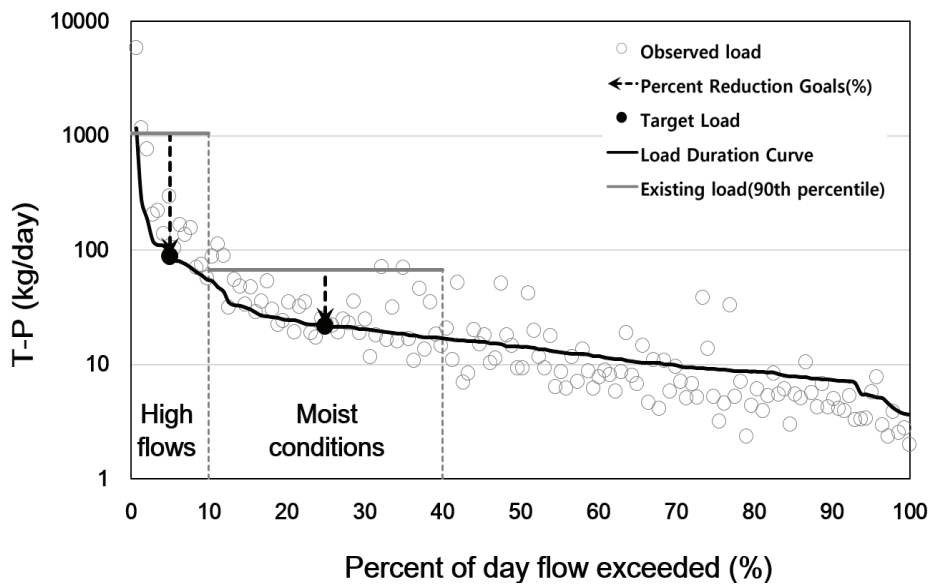


Fig. 4 Example assessment of existing load and percent reduction goal

## III. 결과 및 고찰

### 1. LDC를 이용한 비점오염원 우선관리지점 선정

유량 및 수질이 측정되고 있는 286지점에 대하여 LDC를 작성하였다. 작성된 LDC를 기반으로 1~3단계를 거쳐 비점오염원 관리가 필요한 지점을 선정하였다. Table 4는 단계별 비점오염원 관리를 위한 지점 결과를 나타낸다. 1단계에서는 목표수질을 초과하는 251지점을 도출하였으며, 2단계에서는 수질오염 발생 우려가 있는 75지점이 도출되었다. 3단계에서는 점 및 비점오염원에 의한 수질오염 발생 우려가 있는 55지점, 비점오염원에 의한 수질오염 발생 우려가 있는 21지점을 도출하였다.

Table 4 Number of the priority points for the nonpoint pollution source management in each step

River	LDC <sup>a</sup>	Step 1	Step 2	Step 3	
				PS/NPS <sup>b</sup>	NPS
Han river	66	55	22	21	1
Nakdong river	100	86	13	7	6
Geum river	60	57	22	15	7
Yeongsan · Seomjin river	60	53	18	11	7
Total	286	251	75	54	21

<sup>a</sup>LDC: Load Durationing Curve

<sup>b</sup>PS: Point pollution source, NPS: Nonpoint pollution source

비점오염원 관리를 통하여 수질개선을 위해서는 2단계에서 도출된 모든 지점을 우선관리 대상지점으로 지정하여 관리할 수 있지만, 효율성 및 재원을 고려한다면 점 및 비점오염원에 의한 수질오염 발생 우려지점은 점원 관리가 우선적으로 이루어질 필요가 있으므로, 본 연구에서는 점원오염이 아닌 비점오염원에 의해서 수질오염 발생 우려가 있는 21지점을 최종적으로 우선관리 대상지점으로 선정하였다.

비점오염원에 의한 수질오염 발생 우려지점인 총 21지점을 권역별로 살펴보면, 한강은 1지점으로 양화천2 (YHC2)이 해당하며, 낙동강은 6지점으로 백천1 (BC1), 광산천1 (GSC1), 북계천 (BGC), 금호강2A (GHG2A), 옥수천 (USC), 풍산천 (PSC), 금강 7지점으로 백천2 (BC2), 무심천 (MSC), 성암천 (SAC), 보강천1 (BGC1), 석남천 (SNC), 원평천3 (WPC3), 정읍천4 (JEC4), 영산강·섬진강은 7지점으로 만봉천 (MBC), 고막원천2-1 (GMWC2-1), 진원천 (JWC), 장성천1 (JSC1), 함평 (HP), 풍영정천 (PYJC), 풍영정천-1 (PYJC-1)이 해당한다.

Table 5는 비점오염원 우선관리지점의 평균수질 및 유량구

간별 초과율을 나타낸다. 지점별 관리물질에 대한 평균수질은 하천수질기준의 좋은물 (Ⅱ, 약간 좋음) 기준을 초과하며, 고유량 (0%~40%) 구간에서만 초과율이 50%를 초과하여 비점오염원 원인으로 인한 수질오염 발생 우려지점으로 도출되었다.

비점오염원 우선관리지점에 대한 관리유역은 효과적인 비점오염원 관리를 위하여 한국 수자원단위지도의 최소단위인 표준단위유역을 기준으로 선정하였으며, 21지점에 대한 관리유역은 24개의 표준단위유역으로 분석되었다. Table 6은 비점오염원 우선관리지점에 대한 관리유역 및 토지이용도 현황을 나타낸다. 관리대상유역은 산림을 제외하고 농업 및 시가지 지역으로 분석되었다. 관리대상유역의 농업지역은 대부분 20% 이상으로 농경지에서 발생하는 비점오염물질에 대하여 관리가 필요하며, 10% 이상 해당되는 시가지 지역에서도 불투수면 유출 특성을 고려한 비점오염원 관리가 필요할 것으로 판단된다. Fig 5는 비점오염원 우선관리지점과 관리대상유역을 보여주고 있다.

**Table 5** Excess rate for target water quality at the priority management points

River	Monitoring point	WQP <sup>a</sup>	Target (mg/L)	Average (mg/L)	Excess rate (%)	
					High flow	Low flow
Han river	YHC2	COD	4.0	6.1	90	77
Nakdong river	BC1	T-P	0.02	0.12	100	63
		COD	4.0	5.5	93	58
	GSC1	COD	4.0	5.4	100	60
	BGC	T-P	0.02	0.12	65	75
	GHG2A	T-P	0.09	0.10	100	36
	USC	COD	4.0	5.0	70	50
Geum river	PSC	COD	4.0	5.2	92	63
		T-P	0.02	0.13	100	68
	BC2	COD	4.0	6.1	83	58
		T-P	0.02	0.11	78	42
	SAC	T-P	0.02	0.11	94	53
	BGC1	T-P	0.02	0.10	100	51
	SNC	T-P	0.02	0.12	83	43
WPC3	T-P	0.15	0.13	90	59	
Yeongsan · Seomjin river	JEC4	T-P	0.13	0.14	62	56
	MBC	T-P	0.02	0.11	80	67
	GMWC2-1	T-P	0.02	0.11	72	56
	JWC	T-P	0.02	0.13	90	73
	JSC1	COD	4.0	5.5	95	77
	HP	T-P	0.15	0.14	90	78
	PYJC-1	COD	4.0	6.1	90	71
PYJC	T-P	0.02	0.12	94	65	

<sup>a</sup>WQP: Water quality parameter

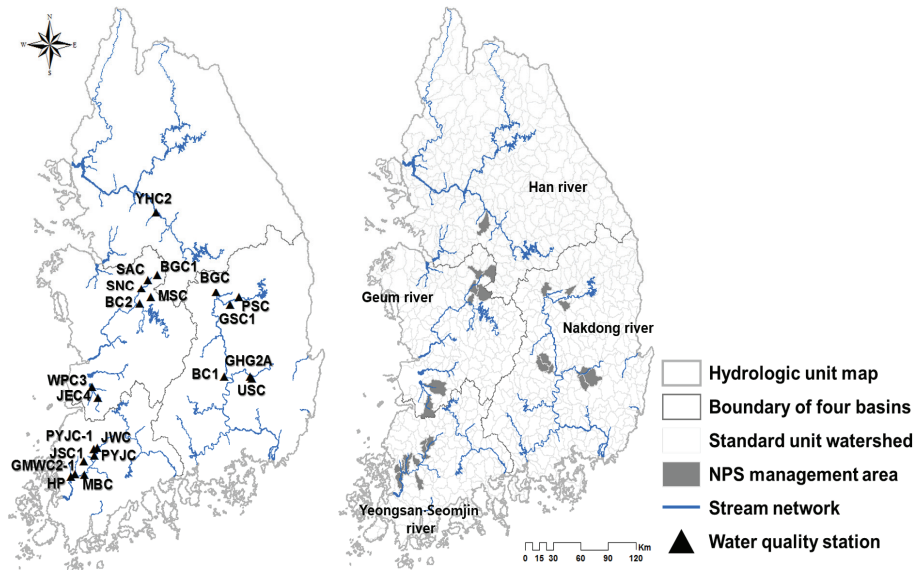


Fig. 5 Priority management points and standard unit watershed

Table 6 Land use at the priority management watersheds

River	Monitoring point	Watershed code <sup>a</sup>	Land use area (%)						
			Urban	Agricultural	Forest	Grass	Wetland	Bare Field	Water
Han river	YHC2	100710	9.1	60.8	21.5	4.3	0.5	1.7	2.0
Nakdong river	BC1	201106 201105 201107	4.2	33.7	58.1	0.9	0.4	2.1	1.2
	GSC1	200307	1.6	16.4	79.3	1.4	0.2	0.1	1.1
	BGC	200416	5.7	47.1	41.0	3.0	1.2	0.6	1.4
	GHG2A	201209 201211	12.0	34.5	43.3	2.6	1.5	2.8	3.0
	USC	201210	11.9	11.6	69.9	2.3	0.4	2.8	1.1
	PSC	200305	4.0	31.7	60.5	1.3	0.4	3.1	1.6
Geum river	BC2	301002	6.9	34.1	44.8	5.5	2.4	3.3	3.0
	MSC	301110	17.1	25.8	46.2	5.9	1.6	2.8	0.6
	SAC	301108	4.3	22.6	59.3	6.5	2.5	3.1	1.6
	BGC1	301107	6.7	40.3	43.3	6.1	1.4	1.3	0.9
	SNC	301113	22.6	40.6	21.7	8.2	1.6	4.0	1.4
	WPC3	330206	5.7	57.3	27.0	5.1	2.0	1.5	1.5
Yeongsan · Seomjin river	JEC4	330203	7.4	39.3	43.9	4.1	2.0	1.8	1.4
	MBC	500404	5.0	45.8	43.1	2.3	1.3	0.7	1.9
	GMWC2-1	500502	4.1	34.4	53.2	4.3	1.2	0.8	2.0
	JWC	500106	16.8	40.2	23.0	10.1	4.4	3.4	2.0
	JSC1	500402	7.1	60.3	22.7	4.4	2.0	1.2	2.4
	HP	500502 500602 500604	5.3	43.2	40.0	3.5	1.1	1.0	6.1
	PYJC-1 PYJC	500108	25.8	41.1	14.8	11.2	1.5	3.7	1.9
Average			9.2	38.0	42.8	4.7	1.5	2.1	1.9

<sup>a</sup>Code of standard unit watershed



## 2. LDC를 이용한 비점오염원 우선관리지점의 관리 물질 및 관리목표 설정

LDC 분석을 통해 선정된 비점오염원 우선관리지점을 대상으로 관리물질에 대한 관리목표를 분석하였다. YHC2, GSC1, USC, PSC, JSC1, PYJC-1 지점의 관리물질은 COD로 분석되었으며, BGC, GHG2A, MSC, SAC, BGC1, SNC, WPC3, JEC4, MBC, GMWC2-1, JWC, HP, PYJC 지점은 T-P, BC1와 BC2 지점의 관리물질은 COD 및 T-P로 분석되었다. 관리목표는 목표저감율을 달성하는 것으로 설정하였으며, 목표저감율은 홍수기 조건 (0%~10%)구간과 풍수기 조건 (10%~40%)구간으로 구분하였다. 홍수기 조건 구간에서의 목표저감율은 67.9%~97.2%, 풍수기 조건 구간은 40.3%~69.5%으로 대부분 지점에서 목표저감율이 50%이상으로 분석되어 비점오염원 관리가 시급한 것으로 분석되었다. Table 7은 비점오염원 우선관리지점의 관리물질에 대한 기존부하량, 목표부하량 및 목표저감율을 나타낸다.

기존부하량 설정 기준에 따라 0%~40% 구간에서 평균 목표저감율을 살펴보면 90, 80, 70, 60, 50 percentile의 경우 각각 73.3%, 62.6%, 50.9%, 39.6%, 28.8%으로 나타났으며, 10~40 percentile 경우 기존부하량이 목표부하량을 만족하는 것으로 분석되었다. 이처럼 관측부하량의 90 percentile을 기존부하량으로 설정하고 목표저감율을 결정하는 것은 비점오염관리를 통해 도달할 수 있는 최종적인 목표이다. 비점오염원관리의 장기적인 측면에서는 90 percentile 기존부하량이 목표부하량을 만족하는 것을 관리목표로 설정할 수 있으나 단기 및 중기적인 측면에서는 기존부하량의 설정 기준을 구분할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 부하지속곡선 (Load Duration Curve; LDC)을 이용하여 비점오염원 관리가 우선적으로 필요한 지점과,

**Table 7** Existing load, target load and reduction rate for the priority management points

River	Monitoring point	WQP <sup>a</sup>	Existing load (kg/day)		Target load (kg/day)		Reduction rate (%)	
			High (0~10%)	moist (10~40%)	High (0~10%)	moist (10~40%)	High (0~10%)	moist (10~40%)
Han river	YHC2	COD	55104	3488	6162	1464	88,8	58,0
Nakdong river	BC1	T-P	1050	68	89	22	91,5	67,6
		COD	39364	2253	4454	1088	88,7	51,7
	GSC1	COD	4617	446	924	136	80,0	69,5
	BGC	T-P	66	12	13	5	80,3	58,3
	GHG2A	T-P	6220	442	655	137	89,5	69,0
	USC	COD	3808	129	316	77	91,7	40,3
	PSC	COD	3909	236	337	89	91,4	62,3
Geum river	BC2	T-P	714	12	20	6	97,2	50,0
		COD	31052	592	1002	289	96,8	51,2
	MSC	T-P	561	29	49	13	91,3	55,2
	SAC	T-P	434	21	48	7	88,9	66,7
	BGC1	T-P	1527	32	57	15	96,3	53,1
	SNC	T-P	626	29	36	11	94,2	62,1
	WPC3	T-P	1025	43	90	16	91,2	62,8
JEC4	T-P	1511	170	142	57	90,6	66,5	
Yeongsan · Seomjin river	MBC	T-P	247	33	51	13	79,4	60,6
	GMWC2-1	T-P	553	98	97	38	82,5	61,2
	JWC	T-P	12	3	3	1	75,0	66,7
	JSC1	COD	1382	331	329	146	76,2	55,9
	HP	T-P	9997	1618	2010	559	79,9	65,5
	PYJC-1	COD	4362	1119	1399	509	67,9	54,5
	PYJC	T-P	116	28	31	14	73,3	50,0

<sup>a</sup>WQP: Water quality parameter

관리물질에 대한 관리목표를 설정하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수질측정지점 286지점 (총량측정지점 144지점 및 일반 측정지점 142지점)을 대상으로 5개년 (2011~2015년) 유량 및 수질 자료와 목표수질을 이용하여 LDC를 작성하였다.
- 2) LDC를 이용하여 비점오염원 관리를 위한 우선관리지점을 도출하기 위해 3단계 방법을 이용하였다. 1단계에서는 6개의 유형 (A~F)에 한 개 이상 해당하는 지점이며, 2단계에서는 하천생활환경기준을 이용하여 수질오염 발생 우려지점을 선정하였고, 3단계에서는 주요 오염발생 원인 (점/비점, 비점)에 따라 분류하였다.
- 3) 비점오염원 우선관리 대상지점은 한강, 낙동강, 금강, 영산강·섬진강유역이 각각 1, 6, 7, 7지점으로 총 21지점이며, 관리대상유역은 24개의 표준단위유역을 선정하였으며, 대부분 시가지 및 농업지역으로 분석되었다.
- 4) 21지점에 대한 관리물질은 T-P와 COD이며, 관리목표는 홍수량 조건 (0%~10%) 구간에서 목표저감을 67.9%~97.2%, 풍수량 조건 (10%~40%) 구간에서 목표저감을 40.3%~69.5%를 달성하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 효과적인 수질오염을 관리하기 위해서 비점오염원이 원인이 되는 지점과 관리대상유역을 우선적으로 선정하였으며, 장기적인 측면에서의 관리대상 물질에 대한 목표저감을 제시하였다. 비점오염원의 관리목표를 달성하기 위해서는 시가지 및 농업지역 특성에 맞는 관리기법을 적용하여 비점오염물질을 효과적으로 관리할 필요가 있다. 본 연구 결과를 이용하여 장기적인 비점오염원 관리목표 뿐만 아니라 단·중기적으로 관리목표를 설정할 수 있으며, 비점오염원관리지역 선정 및 관리대책 마련에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반공공기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (2016000200001).

## REFERENCES

1. Cal-EPA, 2012. Total Maximum Daily Load for Fecal Indicator Bacteria For the Santa Maria Watershed.
2. Chen, D. J., J. Lu, H. L. Wang, Y. N. Shen, and D. Q. Gong, 2011. Combined inverse modeling approach and load duration curve method for variable nitrogen total maximum daily load development in an agricultural watershed. *Environ Sci Pollut Res* 18: 1405-1413. doi:10.1007/s11356-011-0502-8.
3. Choi, K. W., K. Y. Shin, H. J. Lee, and S. H. Jun, 2012. Assessment of the water quality of jungnang stream by flow conditions using load duration curve. *Korean Journal of Environmental Health Sciences* 38(5): 438-447 (in Korean). doi:10.5668/JEHS.2012.38.5.438.
4. Cleland, B., 2002. TMDL Development from the "Bottom up" - Part II: using duration curves to connect the pieces. *National TMDL Science and Policy 2002-WEF Specialty Conference, America's Clean Water Foundation: Washington, D.C.*
5. Cleland, B., 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.*
6. Hwang, H. S., B. K. Park, Y. S. Kim, K. J. Park, S. U. Cheon, and S. J. Lee, 2011. Research on the applicability of the load duration curve to evaluate the achievement of target water quality in the unit watershed for a TMDL. *Journal of Korean Society on Water Environment* 27(6): 885-895 (in Korean).
7. Jung, K. Y., T. H. Im, G. H. Kim, I. J. Lee, J. S. Yoon, and S. N. Heo, 2012. Development and application of coliform load duration curve for the Geumho River. *Journal of Korean Society on Water Environment* 28(6): 890-895 (in Korean).
8. Jung, W. H., S. J. Yi, G. H. Kim, and S. M. Jeong, 2011. Watershed selection for diffuse pollution management based on flow regime alteration and water quality variation analysis. *Journal of Korean Society on Water Quality* 27(2): 228-234 (in Korean).
9. Kang, H. W., J. C. Ryu, M. H. Shin, J. D. Choi, J. W. Choi, D. S. Shin, and K. J. Lim, 2011. Application of web-based load duration curve system to watersheds for evaluation of water quality and pollutant loads. *Journal of Korean Society on Water Quality* 27(5): 689-698 (in Korean).
10. Kim, E. J., B. K. Park, Y. S. Kim, D. H. Rhew, and K. W. Jung, 2015a. A study on development of management targets and evaluation of target achievement for non-point source pollution management in Saemanguem watershed. *Journal of Korean Society Environmental Engineers* 37(8):

- 480-491 (in Korean). doi:10.4491/KSEE.2015.37.8.480.
11. Kim, E. K., J. C. Ryu, H. T. Kim, Y. S. Kim, and D. S. Shin, 2015b. Application of the load duration curve (LDC) to evaluate the achievement rate of target water quality in the Han-River watersheds. *Journal of Korean Society on Water Environment* 31(6): 732-738 (in Korean). doi:10.15681/KSWE.2015.31.6.732.
  12. MOE, 2017. 2017 White Paper of Environment, Ministry of Environment (in Korean).
  13. Nevada Division of Environmental Protection (NDEP), 2003. Load Duration Curve Methodology for Assessment and TMDL Development. Nevada Division of Environmental Protection.
  14. Shen, J., and Y. Zhao, 2010. Combined Bayesian statistics and load duration curve method for bacteria nonpoint source loading estimation. *Water Res* 44: 77-84. doi:10.1016/j.watres.2009.09.002.
  15. USEPA, 2007. An approach for using load duration curves in the development of TMDLs. Office of Wetlands, Oceans and Watersheds, Washington DC.
  16. Yun, S. Y., J. N. Ryu, and J. I. Oh, 2013. Water quality management measures for TMDL unit watershed using load duration curve. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater* 27(4): 429-438 (in Korean). doi:10.11001/jksww.2013.27.4.429.