

Research Paper

## 우리나라 수질오염총량관리제도의 목표수질 평가방법에 관한 연구

임상준 · 서동일

충남대학교 환경공학과

### A Study on Target Water Quality Evaluation Methods in the Korean Total Pollution Load Management System

Sangjun Lim · Dongil Seo

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

**요약:** 현재 우리나라 수질오염총량관리에서는 과거 3년간의 평균수질로 목표수질 달성여부를 평가하고 있는데, 이 방법은 유량변화에 따른 수질변화를 반영하지 못하는 한계가 있으며 오염부하량 관리를 통해 목표수질을 달성하고자 하는 오염총량관리 기본 취지에도 맞지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 오염부하량에 근거해서 유량 조건별 목표수질 달성 여부의 평가가 가능한 방법을 제시하고자 하였다. 총량측정망 운영을 통해 확보되고 있는 8일 간격의 수질 및 유량자료를 활용하여 부하지속곡선을 작성할 수 있으며, 부하지속곡선을 이용하면 부하량에 근거한 목표수질 달성여부를 평가할 수 있다. 금강수계 21개 단위유역에 대해서 부하지속곡선 방법을 적용하여 목표수질 달성여부를 유량 조건별로 평가한 결과와 현행 3년 평균수질 산정방법 및 기준유량 조건에서의 3년 평균수질 산정방법으로 평가한 결과를 비교한 결과, 2023년의 BOD 목표수질을 초과한 단위유역의 비율은 평가방법별 각각 47.6%, 23.8%, 19.0%로 나타났으며 T-P의 경우 각각 57.1%, 23.8%, 14.3%로 나타나 부하지속곡선에 방법으로 평가한 목표수질 초과 비율이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 부하지속곡선에 의한 평가방법이 현행 평가방법 보다 목표수질 달성여부를 엄격하게 평가한다는 것을 보여준다. 부하지속곡선에 방법을 이용하면 유량변화를 고려한 목표수질 달성여부 평가가 가능할 뿐만 아니라 할당부하량 산정을 위한 수질예측에 유역모델과 같은 동적모델이 적용되어 시계열 예측이 가능한 경우의 목표수질 평가시에도 매우 유용할 것으로 생각된다.

**주요어:** 수질오염총량관리제, 목표수질평가, 총량측정망, 부하지속곡선, 목표부하량 초과율, 목표부하량 초과 허용률

**Abstract:** In the current Total Pollution Load Management system(TPLMs), the achievement of target water quality is evaluated using the average water quality over the past three years. However, this method has limitations as it does not reflect changes in water quality due to variations in flow rates,

and it is inconsistent with the fundamental objective of TPLMs, which aims to achieve target water quality through pollutant load management. Therefore, this study proposes a method that enables the evaluation of target water quality achievement under various flow conditions based on pollutant loads. Using water quality and flow data, which are collected at eight-day intervals through the TPLM monitoring network, load duration curves (LDC) can be created. By utilizing this method, target water quality achievement can be assessed based on pollutant loads. Comparing evaluations for 21 sub-watersheds within the Geum River basin, target water quality achievement in 2023 was assessed by both the LDC method and the current three-year average method. The proportion of sub-watersheds exceeding the target BOD levels was 47.6%, 23.8%, and 19.0%, and for T-P, it was 57.1%, 23.8%, and 14.3% for each respective method. These results indicate that the LDC method yields relatively higher excess rates, showing that it provides a stricter evaluation of target water quality achievement compared to the current method. The LDC method not only allows for the evaluation of target water quality achievement by considering flow variations but also is expected to be very useful when time-series predictions are required for target water quality assessments using dynamic models like watershed models, which are applied to estimate allocated loads.

**Keywords:** Total Pollution Load Management system (TPLMs), Target Water Quality Assessment, TPLM Monitoring Network, Load Duration Curve (LDC), Excess Rate of Target Load, Allowable Excess Rate of Target Load

## I. 서론

수질오염총량관리제는 과학적 근거를 바탕으로 하천구간별 목표수질을 정하고, 그 목표수질을 달성하기 위한 오염물질의 배출총량을 산정하여 유역에 속한 지자체별로 할당함으로써 배출되는 수질오염물질의 총량을 허용총량 이내로 관리하는 제도로 농도규제 중심의 수질오염원 관리 방식의 한계를 극복하기 위하여 도입된 우리나라 지표수 수질관리의 중요한 정책 수단이다. 금강수계의 경우 2005년 제1단계 오염총량관리 기본계획을 시작으로 현재 제4단계까지 약 20년간 오염총량관리가 시행되고 있다(Ministry of Environment 2024a). 아울러, 국가에서는 오염총량관리 시행지역의 수질현황 등 오염총량관리에 필요한 기초자료를 확보하기 위하여 수질측정망에 총량측정망을 포함하여 운영하고 있는데, 8일 간격으로 연간 40회 가까이 총량관리 대상수질항목인 BOD (Biochemical Oxygen Demand), T-P (Total Phosphorus) 등 여러 수질항목과 수질예측에 필수적인 유량을 함께 측정하고 있다(Ministry of Environment 2023a). 남범식 등은 총량측정망의 시계열 수질 및 유량 자료를 활용하여 한강, 낙

동강, 금강, 영산강·섬진강수계를 대상으로 유량조건별 수체손상율을 분석하였고(Nam et al. 2018), 조용철 등은 총량측정망 자료를 활용하여 임진강 유역 오염물질 총량관리를 위한 유량-수질 자료의 통계분석을 하였다(Cho et al. 2018). 현재 우리나라 오염총량관리에서는 과거 3년간의 평균수질로 목표수질 달성여부를 평가하고 있는데, 이 방법은 유량변화에 따른 수질변화를 반영하지 못하는 한계가 있으며 단순히 수질만을 고려하기 때문에 오염부하량 관리를 통해 목표수질을 달성하고자 하는 오염총량관리 기본 취지에도 맞지 않는다. 목표수질 달성을 위한 오염물질의 배출총량을 허용총량 이내로 관리하는 오염총량관리의 기본 구조에서 부하량에 근거한 목표수질 달성여부의 평가는 매우 중요하다. 수질오염총량관리 목표수질 평가에 부하지속곡선 방법을 적용하는 사례는 과거 여러 연구를 통해 찾아볼 수 있었다(Kim et al. 2015, Cheong et al. 2016, Jung et al. 2017). 본 연구의 목적은 기존 연구에서 제시하고 있는 부하지속곡선을 이용한 목표수질 평가방법을 보완하는 것으로, 유량지속곡선의 유황에 따른 고유량 또는 저유량 조건별 목표수질 달성 여부 평가방법을 제시하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상지역

본 연구는 4대강 수계중 중부지역에 위치한 금강수계 유역 중에서 만경·동진강 수계 유역을 제외한 21개 수질오염총량관리 단위유역(GB-A, GB-B, GB-C, GB-D, CG-A, GB-E, BoC-A, GB-F, YD-A, GC-A, GB-G, MH-A, ByC-A, MH-B, MH-C, GB-H, GB-I, GB-J, NS-A, GB-K, GB-L)을 대상으로 하였다.

### 2. 현행 목표수질 평가방법 및 기준유량 조건에서의 목표수질 평가방법

#### 1) 현행 목표수질 평가방법

현행 금강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률 (Ministry of Environment 2024b) 시행규칙 제16조제2항에 따르면 별표2에 따라 측정된 수질이 2회 연속 목표수질 이하인 지점의 유역에 대해서는 목표수질을 달성한 것으로 간주하여 해당 유역에 대해서는 시행계획을 수립하지 않는다. 시행규칙 별표2에 따른 목표수질 지점의 수질 변동 확인 방법은 다음과 같다.

- ① 목표수질지점별로 연간 30회 이상 측정(측정 주기는 8일 간격)
- ② 수질 측정 결과를 토대로 평균수질을 산정하여 해당 목표수질지점의 수질변동 확인  

$$\text{평균수질} = e^{(\text{변환평균수질} + \text{변환분산}/2)}$$

$$\text{변환평균수질} = \ln(\text{측정수질}) + \ln(\text{측정수질}) + \dots / \text{측정횟수}$$

$$\text{변환분산} = \{[\ln(\text{측정수질}) - \text{변환평균수질}]^2 + \dots / (\text{측정횟수}-1)\}$$
- ③ 측정수질은 산정 시점으로부터 과거 3년간 측정된 것으로 하며, 단위는 mg/L로 표시

#### 2) 기준유량 조건에서의 목표수질 평가방법

오염총량관리 기본방침(Ministry of Environment 2022)에 따라 BOD는 저수구간 평균유량을 기준유량으로 적용하고, T-P의 경우 저수 또는 평수구간 중수질이 악화된 조건의 평균유량을 기준유량으로 적용한다. 본 연구에서는 3년간의 기준유량 ±10% 범위내 수질 평균값으로 목표수질 달성여부를 평가하였다.

### 3. 부하지속곡선(LDC, Load Duration Curve) 방법을 활용한 목표수질 평가방법

#### 1) 부하지속곡선

부하지속곡선 방법은 평균 또는 기준유량과 같은 특정 유량 조건이 아닌 다양한 유량 조건에서 수질기준(허용부하)의 초과 빈도와 크기를 시각적으로 쉽게 표현하는 데 유용하다. 하천의 유량은 허용부하량 결정에 중요한 요소이기 때문에 부하지속곡선 방법은 오염총량관리에 특히 적합하다고 할 수 있다. 미국의 많은 주에서 부하지속곡선 방법을 TMDL (Total Maximum Daily Load)에 활용하고 있으며(Nebraska2002, Nevada 2003, South California 2004), 국내에서도 총량측정망 운영을 통해 유량 및 수질자료가 확보되고 축적됨에 따라 부하지속곡선을 활용한 오염총량관리가 가능하게 되었다. 부하지속곡선 작성 과정은 Figure 2와 같이 유량지속곡선 작성 단계(a)와 부하지속곡선 작성 단계(b), 실측자료를 부하지속곡선 위에 도식화하는 단계(c)로 구분할 수 있다. 10년간(2014~2023년) 실측된 8일 간격의 유량 자료를 최대유량에서 최소유량 순으로



Figure 1. Study Area (Unit Watershed of Geum River Basin for TPLMs)

정렬하고 각 유량 값에 대해 이 값을 초과하는 일수를 백분율(초과유량백분율)로 계산하여 초과유량백분율을 x축, 해당 유량값을 y축으로 하여 유량지속곡선(FDC, FlowDurationCurve)을 작성한다. 유량지속곡선을 이용하면 해당기간의 유량을 유량조건(유황)에 따라 구분할 수 있는데 초과유량백분율 0~10%, 10~40%, 40~60%, 60~90%, 90~100% 구간은 각각 홍수량, 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량으로 구분된다(Cleland 2003). 여기서 홍수량, 풍수량, 평수량은 고유량 조건으로 저수량, 갈수량은 저유량 조건으로 구분할 수 있다(Ministry of Environment 2023b). 유량지속곡선을 바탕으로 각 유량값에 수질기준(목표수질)을 곱하여 부하량을 계산한 후 초과유량백분율에 대응하는 초과부하량백분율을 x축, 해당 부하량값을 y축으로 하여 부하지속곡선을 작성한다. 다음, 실측된 8일간격의 유량 및 수질자료를 이용하여 부하량을 계산하고, 측정된 유량값에 대응하는 초과유량백분율을 확인하여 계산

된 부하량을 도식한다. 이때 부하지속곡선을 초과한 실측부하량의 개수로써 목표수질 초과율을 계산한다.

2) 목표수질 달성여부 평가

부하지속곡선 방법을 적용하여 목표수질을 평가한 기존 연구에서는 과거 3년간의 실측 유량 자료로 작성된 부하지속곡선에 실측부하량을 도식한 후 부하지속곡선을 기준으로 실측부하량 초과율이 50% 이하면 목표수질을 달성하는 것으로 평가하였다(Kim et al. 2015, Cheong et al. 2016, Jung et al. 2017). 본 연구에서는 장기간 유량변화 특성을 반영함으로써 유황의 대표성을 최대한 높이기 위하여 Figure 3과 같이 과거 10년간(2014~2023년) 실측된 유량 자료를 이용하여 작성된 부하지속곡선에 과거 3년간의 실측부하량을 도식하여 부하지속곡선을 기준으로 초과한 실측부하량의 개수로써 목표수질 초과율을 계산하였다. Table 1에 2019년부터 2023년까지 각 년도별, 유량조건별 목표수질 초

**Step.1 : Develop Flow Duration Curve**

Using available daily streamflow data a flow duration curve is developed  
 1) ranking the daily flow data from highest to lowest  
 2) calculating percent of days these flows were exceeded  
 (= rank÷number of data points)

**Step.2 : Develop Load Duration Curve**

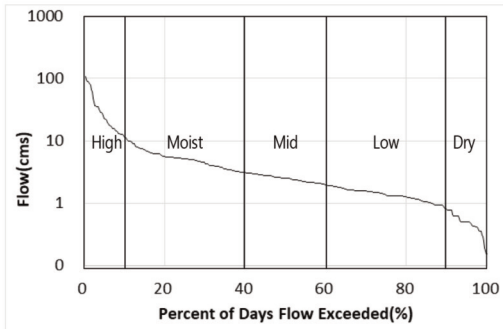
The load duration curve is developed by multiplying the Load by the water quality standard  
 To apply a 10% margin of safety (MOS), the results are divided by 1.1.

**Step.3 : Plot Water Quality Sample Data on Load Duration Curve**

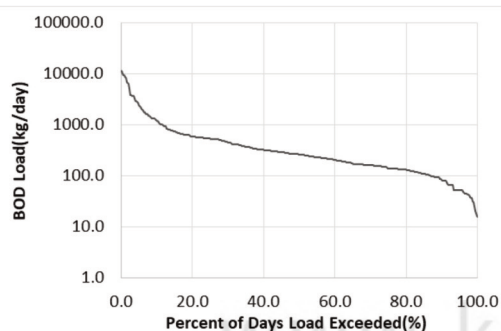
Calculate daily loads for each sample along with the pollutant concentration and streamflow for the particular day

(example)

(a) Step.1



(b) Step.2



(c) Step.3

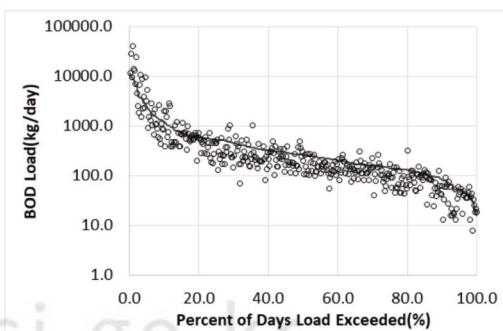
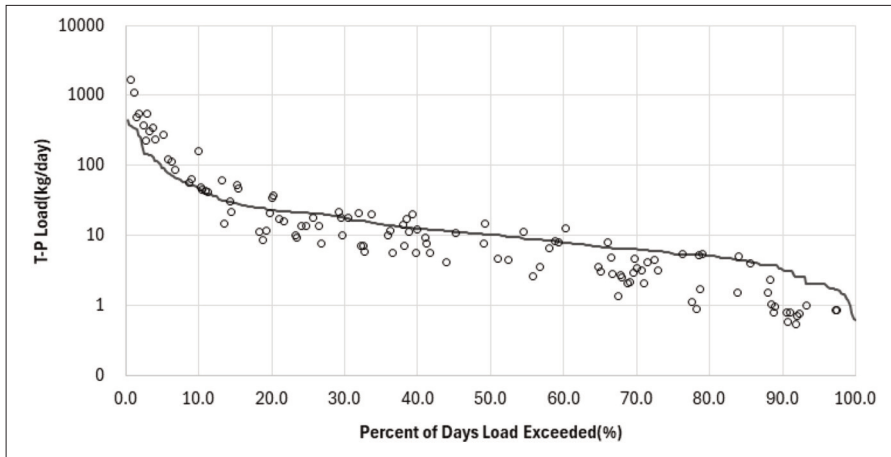
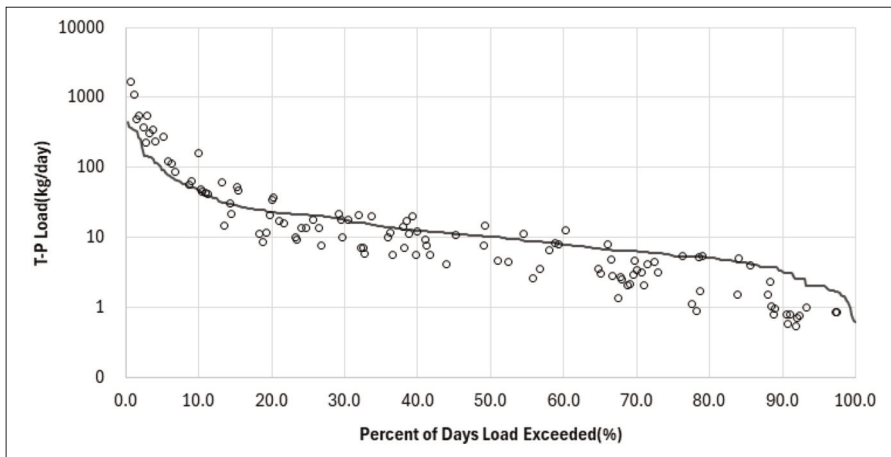


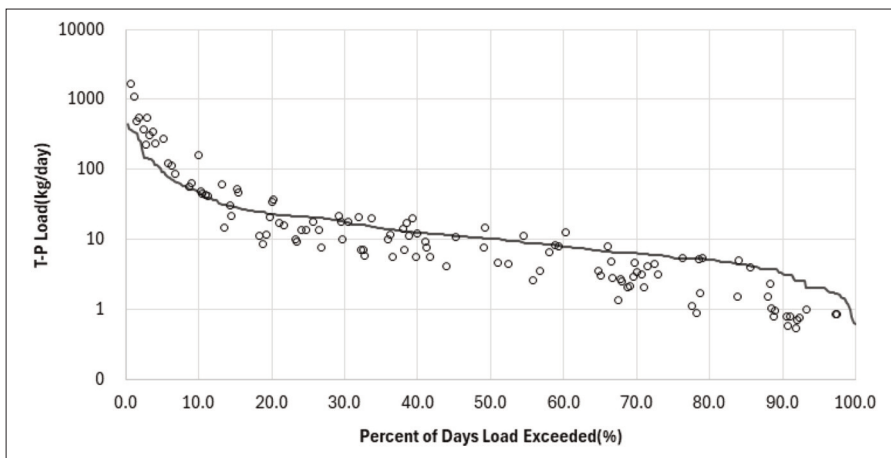
Figure 2. Formulate the Load Duration Curve



(a) 2019~2021



(b) 2020~2022



(c) 2020~2022

\* LDC (Load Duration Curve): 2014~2023

Figure 3. Method for Evaluating the Excess Rate of Target Water Quality using Load Duration Curve (BoC-A) (example)



Table 1. Target Water Quality Excess Rate (2019~2023) (BoC-A, T-P) (example)

		2019	2020	2021	2022	2023
All	Data	41	40	37	37	37
	Excess	17	16	7	3	9
	Rate (%)	41.5	40.0	18.9	8.1	24.3
I .High, II .Moist, III.Mid,	Data	30	28	18	11	11
	Excess	13	16	6	3	6
	Rate (%)	43.3	57.1	33.3	27.3	54.5
IV.Dry, V.Low	Data	11	12	19	26	26
	Excess	4	0	1	0	3
	Rate (%)	36.4	0.0	5.3	0.0	11.5

Table 2. Target Water Quality Achievement Evaluation (BoC-A, T-P) (example)

		2021 (2019~2021)	2022 (2020~2022)	2023 (2021~2023)
All	Data	118	114	111
	Excess	40	26	19
	Rate (%)	33.9	22.8	17.1
Evaluation (LDC ①)		×	○	○
I .High, II .Moist, III.Mid	Data	76	57	40
	Excess	35	25	15
	Rate (%)	46.1	43.9	37.5
	Evaluation	×	×	×
IV.Dry, V.Low	Data	42	57	71
	Excess	5	1	4
	Rate (%)	11.9	1.8	5.6
	Evaluation	○	○	○
Evaluation (LDC ②)		×	×	×

Evaluation Standard : LDC Excess Rate 30%

Achieved the Target Water Quality : ○, Failed to Achieve the Target Water Quality : ×

과율을 나타내었다. 목표수질 달성여부 평가시 실측된 부하량이 모두 기준부하량을 만족하는 것은 현실적으로 불가능하므로 허용률 개념을 도입하는 데, 초과율이 허용률 이하이면 목표수질을 달성하는 것으로 평가한다. 본 연구에서는 Table 6 및 Table 7과 같이 현행 평가방법과 비교했을 때 엄격한 기준 적용 효과가 나타나는 허용률 30%를 목표수질 달성여부의 판단 기준으로 하였다. 전체 유량조건에서 목표수질 초과율이 허용률 보다 크면 목표수질을 달성 하지 못한 것으로 평가하였으며(LDC방법①: 전유량 조건 평가방법, Table 2 상단), 유량조건에 따라 고유량 조건(홍수량, 풍수량, 평수량)과 저유량 조건(저수량, 갈수량) 각각의 실측부하량 초과율이 어느 하나의 조건이라도 허용률 보다 크

면 목표수질을 달성 하지 못하는 것으로 평가하였다 (LDC방법②: 다중 유량조건 평가방법, Table 2 하단).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 부하지속곡선 방법을 활용한 목표수질 평가방법

부하지속곡선 방법을 활용하여 목표수질을 평가한 결과를 Table 3에 나타내었다. 평가 결과는 크게 두 가지로 나누어, 첫 번째는 전체유량 조건에서 평가한 결과(LDC①)이며 두 번째는 유량 조건에 따라 저유량 조건과 고유량 조건에서 평가한 결과(LDC②)이다. LDC ① 평가방법으로는 목표수질을 달성한 것으로 평가되지만 LDC② 평가방법으로는 초과한 것으로 평가되는

Table 3. Target Water Quality Achievement Evaluation (LDC Method)

			GB-A			GB-B			GB-C		
			2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
			('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)
BOD	All	Rate (%)	25.4	21.1	17.1	7.6	7.0	7.2	28.8	18.4	9.0
	Evaluation (LDC①)		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	High Flow	Rate (%)	26.1	21.5	14.3	7.7	9.5	9.2	28.4	20.4	9.3
		Evaluation	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Low Flow	Rate (%)	23.3	20.4	20.0	7.5	0.0	4.3	29.5	6.3	7.1
		Evaluation	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Evaluation (LDC②)		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
T-P	All	Rate (%)	80.5	75.4	69.4	46.6	24.6	18.0	57.6	36.8	30.6
	Evaluation (LDC①)		×	×	×	×	○	○	×	×	×
	High Flow	Rate (%)	83.0	87.7	85.7	47.4	33.3	27.7	55.4	37.8	33.0
		Evaluation	×	×	×	×	×	○	×	×	×
	Low Flow	Rate (%)	73.3	59.2	52.7	45.0	0.0	4.3	61.4	31.3	14.3
		Evaluation	×	×	×	×	○	○	×	×	○
Evaluation (LDC②)		×	×	×	×	×	○	×	×	×	
			GB-D			GB-E			GB-F		
			2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
			('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)
BOD	All	Rate (%)	31.4	21.1	11.7	11.0	8.8	5.4	11.0	12.3	8.9
	Evaluation (LDC①)		×	○	○	○	○	○	○	○	○
	High Flow	Rate (%)	28.6	25.3	11.1	10.0	9.4	7.0	9.5	11.6	10.7
		Evaluation	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Low Flow	Rate (%)	38.2	12.8	12.5	12.1	8.0	3.7	13.6	13.3	7.1
		Evaluation	×	○	○	○	○	○	○	○	○
Evaluation (LDC②)		×	○	○	○	○	○	○	○	○	
T-P	All	Rate (%)	50.0	28.9	20.7	42.4	24.6	18.0	54.2	30.7	25.0
	Evaluation (LDC①)		×	○	○	×	○	○	×	×	○
	High Flow	Rate (%)	84	75	63	60	64	57	74	69	56
		Evaluation	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Low Flow	Rate (%)	44.1	2.6	0.0	36.2	4.0	1.9	47.7	20.0	16.1
		Evaluation	×	○	○	×	○	○	×	○	○
Evaluation (LDC②)		×	×	×	×	×	×	×	×	×	
			GB-G			GB-H			GB-I		
			2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
			('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)
BOD	All	Rate (%)	14.4	9.0	9.8	42.6	35.1	36.9	46.6	40.4	42.6
	Evaluation (LDC①)		○	○	○	×	×	×	×	×	×
	High Flow	Rate (%)	10.5	8.3	10.8	42.0	34.8	27.6	47.7	40.3	41.4
		Evaluation	○	○	○	×	×	○	×	×	×
	Low Flow	Rate (%)	20.0	9.8	8.8	43.4	35.6	48.9	45.3	40.4	43.9
		Evaluation	○	○	○	×	×	×	×	×	×
Evaluation (LDC②)		○	○	○	×	×	×	×	×	×	
T-P	All	Rate (%)	35.6	16.6	14.3	37.7	21.9	19.4	27.1	11.4	7.8
	Evaluation (LDC①)		×	○	○	×	○	○	○	○	○
	High Flow	Rate (%)	37.2	22.6	23.1	47.8	31.9	31.0	30.8	17.7	13.8
		Evaluation	×	○	○	×	×	×	×	○	○
	Low Flow	Rate (%)	33.3	8.2	5.9	24.5	6.7	4.4	22.6	3.8	1.8
		Evaluation	×	○	○	×	○	○	○	○	○
Evaluation (LDC②)		×	○	○	×	×	×	×	○	○	

Table 3. Continued

			GB-J			GB-K			GB-L		
			2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
			('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)
BOD	All	Rate (%)	57.1	51.8	45.0	53.8	48.2	31.5	39.8	31.9	34.2
	Evaluation (LDC①)		×	×	×	×	×	×	×	×	×
	High Flow	Rate (%)	55.6	56.5	48.5	47.7	43.5	26.9	31.3	25.0	23.9
		Evaluation	×	×	×	×	×	○	×	○	○
	Low Flow	Rate (%)	58.9	44.4	39.5	61.1	55.6	38.6	50.0	42.2	50.0
		Evaluation	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Evaluation (LDC②)		×	×	×	×	×	×	×	×	×	
T-P	All	Rate (%)	35.3	15.8	9.0	37.0	21.9	14.4	34.7	15.9	14.4
	Evaluation (LDC①)		×	○	○	×	○	○	×	○	○
	High Flow	Rate (%)	42.9	23.2	14.7	49.2	33.3	23.9	45.3	25.0	23.9
		Evaluation	×	○	○	×	×	○	×	○	○
	Low Flow	Rate (%)	26.8	4.4	0.0	22.2	4.4	0.0	22.2	2.2	0.0
		Evaluation	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Evaluation (LDC②)		×	○	○	×	×	○	×	○	○	
			CG-A			BoC-A			YD-A		
			2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
			('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)
BOD	All	Rate (%)	28.0	21.9	11.7	27.1	22.8	18.0	4.2	4.3	4.5
	Evaluation (LDC①)		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	High Flow	Rate (%)	24.1	20.8	10.3	27.6	24.6	17.5	3.4	3.9	5.3
		Evaluation	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Low Flow	Rate (%)	31.7	23.0	14.0	26.2	21.1	18.3	6.5	5.1	3.7
		Evaluation	×	○	○	○	○	○	○	○	○
Evaluation (LDC②)		×	○	○	○	○	○	○	○	○	
T-P	All	Rate (%)	35.6	22.8	18.0	33.9	22.8	17.1	14.3	4.3	1.8
	Evaluation (LDC①)		×	○	○	×	○	○	○	○	○
	High Flow	Rate (%)	48.3	39.6	23.5	46.1	43.9	37.5	15.9	6.6	3.5
		Evaluation	×	×	○	×	×	×	○	○	○
	Low Flow	Rate (%)	23.3	8.2	9.3	11.9	1.8	5.6	9.7	0.0	0.0
		Evaluation	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Evaluation (LDC②)		×	×	○	×	×	×	○	○	○	
			GC-A			MH-A			ByC-A		
			2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
			('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)
BOD	All	Rate (%)	17.8	13.2	14.3	43.6	37.7	38.4	57.1	47.8	60.4
	Evaluation (LDC①)		○	○	○	×	×	×	×	×	×
	High Flow	Rate (%)	13.3	13.4	14.5	21.6	27.2	31.4	43.8	37.9	49.4
		Evaluation	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	Low Flow	Rate (%)	25.0	12.9	14.1	81.4	63.6	61.5	84.6	78.6	87.5
		Evaluation	○	○	○	×	×	×	×	×	×
Evaluation (LDC②)		○	○	○	×	×	×	×	×	×	
T-P	All	Rate (%)	37.7	27.1	26.3	43.6	31.6	33.9	64.7	60.0	73.9
	Evaluation (LDC①)		×	○	○	×	×	×	×	×	×
	High Flow	Rate (%)	33.3	29.3	24.2	33.8	32.1	37.2	58.8	57.5	72.2
		Evaluation	×	○	○	×	×	×	×	×	×
	Low Flow	Rate (%)	44.6	24.2	28.2	60.5	30.3	23.1	76.9	67.9	78.1
		Evaluation	×	○	○	×	×	○	×	×	×
Evaluation (LDC②)		×	○	○	×	×	×	×	×	×	



Table 3. Continued

			MH-B			MH-C			NS-A		
			2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
			('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)	('19~'21)	('20~'22)	('21~'23)
BOD	All	Rate (%)	52.1	43.5	38.7	44.6	35.4	37.4	49.3	35.2	32.8
		Evaluation (LDC①)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	High Flow	Rate (%)	42.5	36.2	27.7	28.0	24.3	22.9	48.4	38.8	34.3
		Evaluation	×	×	○	○	○	○	×	×	×
	Low Flow	Rate (%)	67.4	76.2	71.4	72.7	61.4	62.5	51.0	30.6	31.3
		Evaluation	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		Evaluation (LDC②)	×	×	×	×	×	×	×	×	
T-P	All	Rate (%)	58.8	43.5	36.9	41.2	28.6	28.2	41.7	32.4	34.3
		Evaluation (LDC①)	×	×	×	×	○	○	×	×	×
	High Flow	Rate (%)	58.9	44.7	41.0	43.0	37.9	41.0	43.2	38.8	38.6
		Evaluation	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Low Flow	Rate (%)	58.7	38.1	25.0	38.2	6.8	6.3	38.8	24.2	29.7
		Evaluation	×	×	○	×	○	○	×	○	○
		Evaluation (LDC②)	×	×	×	×	×	×	×	×	

High Flow (Mid-range Flow, Moist Conditions, High Flow), Low Flow (Low Flow, Dry Conditions)

Excess Rate (%) = Excess/Data, Evaluation Standard : LDC Excess Rate 30%

Achieved the Target Water Quality : ○, Failed to Achieve the Target Water Quality : ×

단위유역은 BOD의 경우 2021년 CG-A, T-P의 경우 2021년 GB-I, 2022년 GB-B, GB-D, GB-E, GB-H, GB-K, CG-A, BoC-A, MH-C, 2023년 GB-D, GB-E, GB-F, BoC-A, MH-C로 나타났다.

## 2. 평가방법별 비교

현행 규정에 의한 평가방법, 부하지속곡선에 의한 평가방법, 기준유량조건에서의 평가방법으로 목표수질 달성여부를 평가하여 비교한 결과 21개 단위유역중 BOD 목표수질을 초과한 단위유역의 비율은 Table 4와 같이 2021년에 현행 평가방법, 부하지속곡선에 의한 평가방법(LDC①, LDC②), 기준유량조건에서의 평가방법 각각 38.1%, 52.4%, 57.1%, 38.1%로 나타났으며, 2022년에 4개 평가방법 각각 28.6%, 47.6%, 47.6%, 19.0%로 나타났으며, 2023년에 4개 평가방법 각각 23.8%, 47.6%, 47.6%, 19.0%로 나타났다. T-P의 경우 Table 5와 같이 2021년에 4개 평가방법 각각 71.4%, 90.5%, 95.2%, 42.9%로 나타났으며, 2022년에 4개 평가방법 각각 28.6%, 33.3%, 71.4%, 19.0%로 나타났으며, 2023년에 4개 평가방법 각각 23.8%, 28.6%, 57.1%, 14.3%로 나타나 부하지속곡선에 방법으로 평가한 목표수질 초과 비율이 상대적으로 높았다. 이는 부하지속곡선에 의한 평가방법이

현행 평가방법 보다 목표수질 달성여부를 엄격하게 평가한다는 것을 보여준다. 2021년 GB-D, GB-H, GB-L, GC-A, 2022년 GB-H, GB-L, MH-C, NS-A, 2023년 GB-H, GB-K, GB-L, MH-C, NS-A의 경우 현행 평가방법으로는 BOD 목표수질을 달성한 것으로 평가되지만 부하지속곡선 방법으로는 초과한 것으로, 2021년 GB-G, GB-I~J, BoC-A, 2022년 GB-B, GB-D~F, GB-H, GB-K, CG-A, BoC-A, MH-C, NS-A, 2023년 GB-D~F, GB-H, BoC-A, MH-C, NS-A의 경우 현행 평가방법으로는 T-P 목표수질을 달성한 것으로 평가되지만 LDC 방법으로는 초과한 것으로 평가되었다.

## 3. 부하지속곡선 방법 적용시 목표수질 달성여부 판단기준(허용률)

부하지속곡선 방법에 의한 목표수질 평가시 실측된 부하량 모두 기준부하량을 만족하는 것은 현실적으로 불가능하므로 허용률 개념을 도입하는 데, 초과율이 허용률(20% 또는 30% 또는 50%)이하 이면 목표수질을 달성하는 것으로 간주한다. 부하지속곡선 평가방법에 각각의 허용률을 적용한 평가 결과와 현행 목표수질 평가 결과를 비교하여 Table 6 및 Table 7에 나타내었다. 허용률을 50%로 적용한 경우 현행 평가방법과 비교하

Table 4. Comparison of Evaluation Results (BOD)

		2021				2022				2023			
		Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method
			①	②			①	②			①	②	
Main Stream	GB-A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GB-B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GB-C	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GB-D	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GB-E	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GB-F	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GB-G	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GB-H	○	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	○
	GB-I	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○
	GB-J	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○
	GB-K	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○
	GB-L	○	×	×	○	○	×	×	○	○	×	×	×
Tributary	CG-A	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	
	BoC-A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	YD-A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	GC-A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	MH-A	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	
	ByC-A	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	
	MH-B	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
	MH-C	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×
NS-A	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	○	
Number of ○	13	10	9	13	15	11	11	17	16	11	11	17	
Number of ×	8	11	12	8	6	10	10	4	5	10	10	4	
Rate (%)	38.1	52.4	57.1	38.1	28.6	47.6	47.6	19.0	23.8	47.6	47.6	19.0	

Current Method : 3 year Average Water Quality

LDC Method (①) : Entire Flow, LDC Method (②) : Hydrologic Flow Condition (High flow, Low flow)

SF Method : 3 year Average WQ at Standard Flow ±10%

Evaluation Standard : LDC Excess Rate 30%

Achieved the Target Water Quality : ○, Failed to Achieve the Target Water Quality : ×

여 느슨한 기준이 적용되는 결과를 나타내며 30%로 적용한 경우 현행 평가방법과 비교하여 엄격한 기준이 적용되는 결과를 나타냈다. 반면 20%로 적용한 경우에는 현행 평가방법과 비교하여 상당히 엄격한 기준이 적용되는 결과를 나타냄에 따라 본 연구에서는 허용률 30%를 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단하였다. 허용률은 목표수질을 정하는 것과 마찬가지로 엄격하게 또는 느슨하게 적용될 수 있으며 수질오염총량관리 기본 계획 수립시 해당 수계의 여건에 따라 정책적으로 결정되어야 할 것이다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 기존 연구에서 제시하고 있는 부하지속곡선을 이용한 목표수질 평가방법을 보완하여 유량 지속곡선의 유량에 따른 고유량 또는 저유량 조건별 목표수질 달성 여부를 평가하는 방법을 제시하였고, 현행 평가방법의 결과와 비교하였다. 전체유량 조건에서 평가방법(LDC①)에서는 목표수질을 달성하는 것으로 평가되지만 저유량 조건 및 고유량 조건에서 평가방법(LDC②)에서 초과 되는 것으로 평가되는 단위유역은 BOD의 경우 2021년에 CG-A, T-P의 경우 2021년에

Table 5. Comparison of Evaluation Results (T-P)

		2021				2022				2023			
		Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method
			①	②			①	②			①	②	
Main Stream	GB-A	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	GB-B	×	×	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○
	GB-C	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
	GB-D	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	○
	GB-E	×	×	×	○	○	○	×	○	○	○	×	○
	GB-F	×	×	×	×	○	×	×	○	○	○	×	○
	GB-G	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	GB-H	×	×	×	○	○	○	×	○	○	○	×	○
	GB-I	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	GB-J	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	GB-K	×	×	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○
	GB-L	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Tributary	CG-A	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○
	BoC-A	○	×	×	○	○	×	○	○	○	×	○	○
	YD-A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	GC-A	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	MH-A	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○
	ByC-A	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	MH-B	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	MH-C	×	×	×	○	○	○	×	○	○	○	×	○
NS-A	×	×	×	○	○	×	×	○	○	×	×	○	
Number of ○	6	2	1	12	15	14	6	17	16	15	9	18	
Number of ×	15	19	20	9	6	7	15	4	5	6	12	3	
Rate (%)	71.4	90.5	95.2	42.9	28.6	33.3	71.4	19.0	23.8	28.6	57.1	14.3	

Current Method : 3 year Average Water Quality  
 LDC Method (①) : Entire Flow, LDC Method (②) : Hydrologic Flow Condition (High flow, Low flow)  
 SF Method : 3 year Average WQ at Standard Flow ±10%  
 Evaluation Standard : LDC Excess Rate 30%  
 Achieved the Target Water Quality : ○, Failed to Achieve the Target Water Quality : ×

GB-I, 2022년에 GB-B, GB-D, GB-E, GB-H, GB-K, CG-A, BoC-A, MH-C, 2023년에 GB-D, GB-E, GB-F, BoC-A, MH-C 등 다수로 나타났다. 금강수계 21개 단위유역에 대해서 유량 조건별 부하지속곡선 방법을 적용하여 평가한 결과와 현행 3년 평균수질 산정방법으로 평가한 결과를 비교한 결과 2023년의 단위유역별 BOD 목표수질 초과 비율은 각각 47.6%, 23.8%, T-P의 경우 각각 57.1%, 23.8%로 나타나 부하지속곡선에 방법으로 평가한 목표수질 초과 비율이 상대적으로 높았다. 이는 부하지속곡선에 의한 평가방법이 현행 평가방법 보다 목표수질 달성여부를 엄격하게 평가한다는 것을 보

여준다. 부하지속곡선 평가방법에서 목표수질 초과여부를 최종 판단하는 허용률은 30%로 적용한 경우가 현행 평가방법과 비교하여 엄격한 기준이 적용되는 결과를 나타냄에 따라, 본 연구에서는 30%를 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단했다. 단, 허용률은 목표수질을 정하는 것과 마찬가지로 수질오염총량관리 기본계획 수립시 해당 수계의 여건에 따라 정책적으로 결정되어야 할 것이다. 이처럼 부하지속곡선에 방법을 이용하면 유량변화를 고려한 목표수질 달성여부 평가가 가능할 뿐만 아니라, 할당부하량 산정을 위한 수질예측에 유역모델과 같은 동적모델이 적용되어 시계열에

Table 6. Comparison of Evaluation Results as Evaluation Standard (BOD)

Evaluation Standard		2021				2022				2023			
		Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method
			①	②			①	②			①	②	
50%	○	13	17	14	13	15	20	15	17	16	20	17	17
	×	8	4	7	8	6	1	6	4	5	1	4	4
	(%)	38.1	19.0	33.3	38.1	28.6	4.8	28.6	19.0	23.8	4.8	19.0	19.0
30%	○	13	10	9	13	15	11	11	17	16	11	11	17
	×	8	11	12	8	6	10	10	4	5	10	10	4
	(%)	38.1	52.4	57.1	38.1	28.6	47.6	47.6	19.0	23.8	47.6	47.6	19.0
20%	○	13	6	5	13	15	7	6	17	16	11	11	17
	×	8	15	16	8	6	14	15	4	5	10	10	4
	(%)	38.1	71.4	76.2	38.1	28.6	66.7	71.4	19.0	23.8	47.6	47.6	19.0

Evaluation Standard : LDC Excess Rate (%)

Achieved the Target Water Quality : ○, Failed to Achieve the Target Water Quality : ×

(%) : Number of × / Number of Unit Basin (21)

Table 7. Comparison of Evaluation Results as Evaluation Standard (T-P)

Evaluation Standard		2021				2022				2023			
		Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method	Current Method	LDC Method		SF Method
			①	②			①	②			①	②	
50%	○	6	16	14	12	15	19	19	17	16	19	19	18
	×	15	5	7	9	6	2	2	4	5	2	2	3
	(%)	71.4	23.8	33.3	42.9	28.6	9.5	9.5	19.0	23.8	9.5	9.5	14.3
30%	○	6	2	1	12	15	14	6	17	16	15	9	18
	×	15	19	20	9	6	7	15	4	5	6	12	3
	(%)	71.4	90.5	95.2	42.9	28.6	33.3	71.4	19.0	23.8	28.6	57.1	14.3
20%	○	6	1	1	12	15	5	2	17	16	11	3	18
	×	15	20	20	9	6	16	19	4	5	10	18	3
	(%)	71.4	95.2	95.2	42.9	28.6	76.2	90.5	19.0	23.8	47.6	85.7	14.3

Evaluation Standard : LDC Excess Rate (%)

Achieved the Target Water Quality : ○, Failed to Achieve the Target Water Quality : ×

(%) : Number of × / Number of Unit Basin (21)

측이 가능한 경우의 목표수질 평가시에도 매우 유용할 것으로 생각된다.

### References

Cho YC, Choi HM, Lee YJ, Ryu IG, Lee MG, Gu DH, Choi KW, Yu SJ. 2018. Statistical Analysis of Water Flow and Water Quality Data in the Imjin River Basin for Total Pollutant Load Management, J. Environ. Impact Assess. 27(4):

353~366. [Korean Literature]

Cheong EJ, Kim HT, Kim YS, Shin DS. 2016. Application of the Load Duration Curve (LDC) to Evaluate the Rate of Achievement of Target Water Quality in the Youngsan-Tamjin River Watersheds. Journal of Korean Society on Water Environment, 32(4): 349-356. [Korean Literature]

Jung KY, Kim HT, Kim SS, Shin DS, Kim GH. 2017. Application of the Load Duration Curve (LDC)

- to Evaluate the Achievement Rate of Target Water Quality in the Nakdong River Unit Watersheds. *Journal of Environmental Science International* 26(4): 433-445. [Korean Literature]
- Kim EK, Ryu JC, Kim HT, Kim YS, Shin DS. 2015. 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. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2022. Basic Policy for Total Pollution Load Control.
- Ministry of Environment. 2023a. Water Environment Monitoring Network Installation and Operation Plan.
- Ministry of Environment. 2023b. Guidelines for the Implementation of Detailed Cause Analysis in Total Pollution Load Management.
- Ministry of Environment. 2024a. 2023 White Paper of Environment.
- Ministry of Environment. 2024b. Act on Water management and resident Support in the Geum River Basin.
- Nebraska. 2002. Nebraska's Approach for Developing TMDLs for Streams using Load Duration Curve.
- Nevada Division of Environment Protection. 2003. Load Duration Curve Methodology for Assessment and TMDL Development.
- Nam BS, Hwang, HS, Cho MH. 2018. Analysis of Impaired Waterbody using Time Series Water Quality and Flow Rate Data for TPLMs. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 40(9): 359-371. [Korean Literature]
- South California. 2004. Total Maximum Daily Load Development for the Upper Broad River Watershed\_Fecal Coliform Bacteria, South California Department of Health and Environmental Control.