

ORIGINAL ARTICLE

부하지속곡선(LDC ; Load Duration Curve)을 활용한 낙동강수계 오염총량 단위유역 목표수질 평가방법 적용 방안

정강영 · 김홍태¹⁾ · 김상수¹⁾ · 김신 · 신동석 · 김경훈*

국립환경과학원 낙동강물환경연구소, ¹⁾국립환경과학원 유역총량연구과

Application of the Load Duration Curve (LDC) to Evaluate the Achievement Rate of Target Water Quality in the Nakdong River Unit Watersheds

Kang-Young Jung, Hong Tae Kim¹⁾, Sang Soo Kim¹⁾, Shin Kim, Dong Seok Shin,
Gyeong Hoon Kim*

Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong 40438, Korea

¹⁾Watershed Pollution Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea

Abstract

In recent years, the United States has used the Load Duration Curve (LDC) method to identify water pollution problems, considering the size of the pollutant load in the entire stream flow condition to effectively evaluate Total Maximum Daily Loads (TMDLs). A study on the improvement of the target water quality evaluation method was carried out by comparing evaluations of two consecutive years of water quality and LDC data for 41 unit watersheds (14 main streams and 27 tributaries). As a result, the achievement rate of the target water quality evaluation method, according to current regulations, was 68-93%, and that by the LDC method was 82-93%. Evaluating the target water quality using the LDC method results in a reduction in the administrative burden and the total amount of planning as compared to the current method.

Key words : Nakdong-river, LDC, Target water quality, TMDLs

1. 서론

과거 우리나라의 수질관리 대책은 환경기초시설의 설치를 중심으로 한 농도규제방식으로 농도기준 규제

결과, 규제미만 배출시설의 난립과 오염원의 증가에 따른 오염물질의 증가로 수질개선에 한계를 드러냈다. 배출허용기준 중심의 농도규제는 오염부하의 양 적증가를 통제할 수 없을 뿐만 아니라 수체가 가지는

Received 10 January, 2017; **Revised** 13 March, 2017;

Accepted 15 March, 2017

***Corresponding author:** Gyeong Hoon Kim, Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, NIER, Goryeong 40438, Korea
Phone : +82-54-950-9780
E-mail: dahong@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

자정용량과 배출자가 불분명한 비점오염원을 고려하지 않았기 때문에 효과적인 수질관리방법으로 고려되기 어렵다(Ryu et al., 2006). 이러한 농도규제의 단점을 보완하여 수체의 환경용량을 고려한 사전 예방적 수질관리 제도의 필요성이 대두되었다. 이에 정부에서는 안정적인 수질관리를 위해 수계별 분류 및 주요지천을 몇 개의 구간(단위구역)으로 구분하고, 광역자치단체 경계지점에 대하여 목표수질(Target Water Quality, TWQ)을 설정하여, 이를 달성 할 수 있도록 관리하는 수질오염총량관리제도(Total Maximum Daily Loads, TMDLs)를 시행하였다. 수질오염총량관리제도(이하 총량관리)는 90년대부터 도입이 검토되었으나 지방자치단체들의 반발 등 진통 끝에 2002년 4대강 수계법이 제정되면서 낙동강, 금강, 영산강 수계에 처음 도입되었다(MOE, 2013a). 현재 총량관리제는 2004년~2010년까지 제1단계가 종료되었고, 2011년~2015년까지 2단계가 종료되었으며 제3단계부터는 10년 단위로 계획을 수립 시행 중이다. 지난 2004년부터 총량제가 시행된 3대강 수계에서는 1단계 수질오염총량관리 기간(2004~2010년)에 Biochemical Oxygen Demand (BOD)를 관리 대상으로 선정하여 시행하였으며, 2단계(2011~2015년)에는 Biochemical Oxygen Demand (BOD)에 Total Phosphorus (T-P) 항목을 추가하여 시행하였다. 또한, 3단계(2016~2025) 및 4단계 이후의 총량제도에서는 보다 적극적인 수질오염의 원인물질 관리를 위해 총량관리항목 확대 타당성이 검토되고 있다(Kim et al., 2014). 총량관리는 목표수질 범위 내에서 지역과 배출원에 오염물질 배출 총량을 할당하여 개발을 추진하는데 환경을 함께 고려한 핵심적인 유역관리제도이다. 총량관리는 도입 후 단위유역 말단에서 유량과 수질을 동시에 측정함으로써 해당 유역의 오염원으로부터 배출되어 목표지점에 실제 도달하는 오염물질 양(유달 부하량)의 정량화가 가능하게 되었으며, 공공수역의 수질 보전은 물론 수자원의 이용에도 큰 공헌을 해왔다(Park and Oh, 2012). 하지만 현행 기준유량 기반의 계획수립이나 기준유량에 대한 고려가 없이 측정된 수질결과의 변환평균을 이용한 목표수질 평가방법은 계절별·연도별 유량과 수질의 변동성을 제대로 반영할 수 없다. 이는 목표수질 유지·달성이라는 관리측

면에서는 편리성은 있으나 수체의 건전한 회복과 근본적인 유역관리의 문제점을 도출하여 해결하기에는 미흡한 실정이며, 우리나라와 같이 계절별 유량편차가 심한 유역의 수질관리에 더 큰 어려움을 줄 수 있다(Park, 2010; Kang et al., 2011). 미국 유럽 등에서는 하천의 전체 유량 조건에서 수질변화 또는 오염부하의 크기를 고려하여 수질오염문제를 규명하고, TMDL을 효과적으로 평가하기 위하여 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)방법을 이용하고 있다(USEPA, 2007; Hwang et al., 2011). 우리나라에서도 총량관리의 개선과 보완을 위하여 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, Hwang et al.(2011)이 부하지속곡선(LDC)을 이용하여 목표수질 달성 평가에 대한 적정성을 비교 검토한바 있지만, 이는 부하지속곡선(LDC)평가방법의 기술적 타당성 검토 정도이고, 검토 대상 항목이 BOD에 한정되어있다. 한편 수질오염총량관리제도 시행성과평가를 통해 최종년도 달성 여부 평가 시 할당부하량은 만족하지만 단위유역 말단 목표수질은 만족하지 못하는 현상과 반대로 할당부하량은 초과하지만 단위유역 말단 목표수질은 만족하는 현상이 나타나고 있어, 이에 대한 명확한 원인을 찾고 현행 평가 방법의 문제점을 보완하여 제도의 안정성을 유지해 나가기 위한 연구사례가 최근 한강과 영산강·탐진강 수계 일부 단위유역을 대상으로 연구되고 있다(Kim et al., 2015; Cheong et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 현재 총량관리 시행중인 낙동강 수계 41개 단위유역(분류 14개, 지류 27개)을 대상으로 FDC 및 LDC를 분석하고 분석된 자료를 바탕으로 현행방법인 최근 3년 수질 연속 2회 평가 및 LDC방법과 비교분석하여 유량 특성을 고려한 목표수질 평가 방법 개선방안을 제시하고 총량제도 유연성 확대에 기여하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상유역

본 연구 대상유역은 낙동강 수계 총량관리 지역으로 유역면적은 남한면적의 약 1/4인 23,817.3 km², 유로연장은 521.5 km, 유역둘레는 1,097.13 km이고, 유역평균 폭은 46.03 km, 유역평균 표고는 EL.291.2 m,

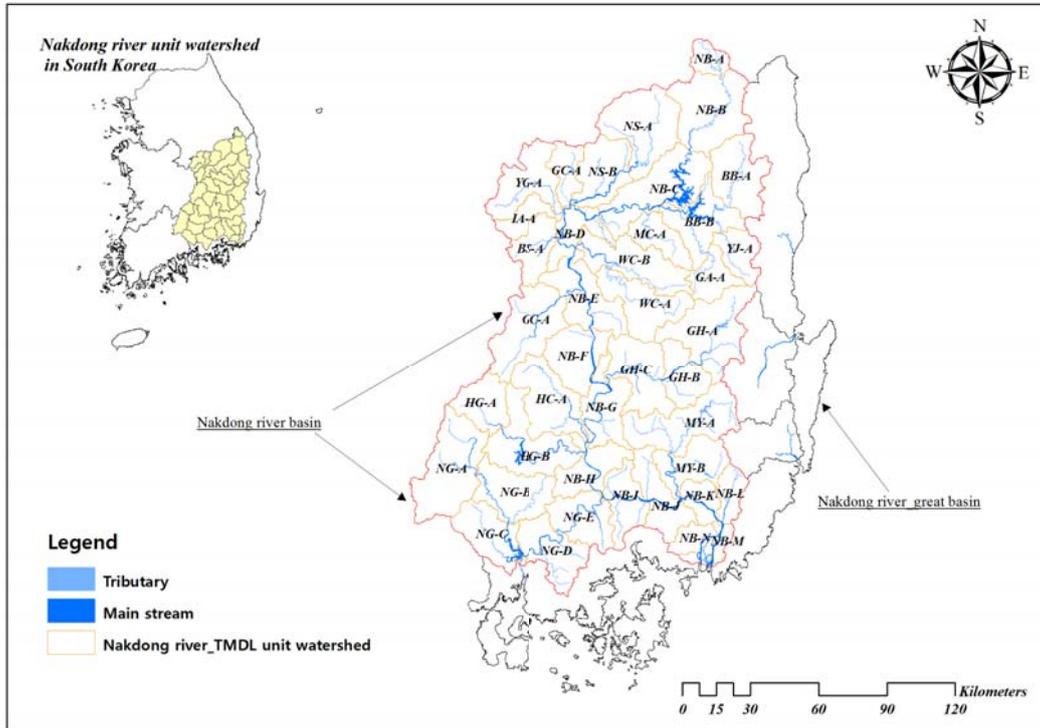


Fig. 1. Forty-one unit watershed map of Nakdong river basin.

유역평균 경사는 32.26%이다. 또한 유역 내 안동, 구미, 대구, 부산 등 우리나라 주요 도시를 비롯하여 각종 산업이 발달해 있으며, 유역에 생활하고 있는 1,300 여만 명의 식수원인 각종 생·공업용수(21.6%), 농업용수(51.0%) 및 하천유지용수(27.4%) 등으로 활용되고 있다. 낙동강수계는 41개 단위유역(분류 14개, 지류 27개)으로 구성되어 있으며(Fig. 1), 총량관리 목표수질이 고시된 전체 단위유역을 대상으로 연구를 수행하였고, BOD 및 T-P를 대상물질로 선정하였다.

2.2. BOD, T-P 및 유량 자료

BOD, T-P와 유량자료는 국립환경과학원 낙동강물 환경연구소에서 2011년부터~2014년까지 4년간 낙동강 수계에 있는 41개 단위유역에서 실측한 조사 자료(환경부 물환경정보시스템)를 본 연구에 사용하였다. 모니터링지점은 2004년부터 유량 및 수질 조사를 8일 간격으로 연간 30회 이상 동시에 측정해오고 있다. 유량은 ‘하천유량측정지침’(SWRRC, 2004)에 있

는 유량측정방법을 준용하여 현장에서 실측되었고, 시료의 채취방법과 채취 시료의 보존, 그리고 생물화학적산소요구량(BOD)과 총인(T-P)은 수질오염공정시험법(MOE, 2008)을 준용하여 분석되었으며 분석방법은 다음과 같다. BOD의 경우 수중에 존재하는 호기성 박테리아가 수중 유기물을 산화시키는데 소요되는 용존산소의 양을 측정하여 유기물의 농도를 산정하는 것으로 20℃ 항온기에서 5일간 배양하여 소비된 산소량으로 정량화하여 나타내는 분석법이고, T-P 총인 측정법은 시료 중에 포함되어 있는 무기, 유기 형태의 인 화합물을 과황산칼륨 분해법이나 질산-황산 분해법으로 유기물을 산화 분해하여 모든 인 화합물을 인산염(PO₄)형태로 변화시킨 다음 인산염을 아스코르빈산 환원 흡광광도법으로 정량하여 총인의 농도를 구하는 방법이다. 낙동강 수계 연구대상 기간(2011~2014년)동안 단위유역 41개 지점의 BOD, T-P 및 유량 자료의 세부내용을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Observed biochemical oxygen demand, total phosphorus and discharge in Nakdong river unit watersheds from 2011 to 2014

Site No.	Unit watershed	BOD(mg/L)			T-P(mg/L)			Discharge(m ³ /sec)		
		Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
1	NB-A	5.3	0.3	1.2	0.128	0.013	0.048	89.722	0.872	6.858
2	NB-B	3.6	0.3	0.9	0.321	0.006	0.028	605.746	1.056	24.794
3	NB-C	3.3	0.4	1.1	0.279	0.013	0.037	595.185	6.129	60.549
4	NB-D	3.8	0.3	1.4	0.270	0.016	0.048	1646.863	3.144	149.414
5	NB-E	8.4	0.4	1.9	0.348	0.024	0.080	2494.969	11.608	183.247
6	NB-F	8.4	0.5	2.1	0.310	0.022	0.082	3250.331	1.342	260.866
7	NB-G	6.0	0.8	2.4	0.315	0.029	0.105	2921.216	5.157	201.345
8	NB-H	7.4	0.7	2.3	0.325	0.018	0.090	3613.877	27.997	259.100
9	NB-I	4.9	0.5	2.1	0.238	0.023	0.079	4221.010	41.671	375.596
10	NB-J	8.3	0.8	2.2	0.299	0.023	0.077	4265.801	20.505	363.053
11	NB-K	6.7	0.7	2.1	0.350	0.023	0.077	6102.576	7.373	370.518
12	NB-L	8.8	0.7	2.3	0.335	0.026	0.084	6171.550	8.087	386.551
13	NB-M	7.8	0.3	2.0	0.548	0.022	0.081	6965.500	3.100	578.397
14	NB-N	8.3	1.3	4.0	0.284	0.050	0.122	96.875	0.637	36.153
15	BB-A	2.1	0.3	0.9	0.155	0.003	0.021	453.235	0.385	10.952
16	YJ-A	4.5	0.3	1.2	0.183	0.010	0.030	349.474	0.170	6.002
17	GA-A	3.0	0.3	0.7	0.098	0.002	0.018	195.007	0.111	5.614
18	BB-B	4.4	0.3	1.1	0.105	0.006	0.025	133.544	0.188	15.789
19	MC-A	3.2	0.3	1.2	0.153	0.007	0.035	79.390	0.030	3.282
20	NS-A	6.5	0.3	1.0	0.448	0.027	0.081	268.283	1.420	18.801
21	NS-B	8.5	0.3	0.9	0.684	0.015	0.083	354.346	2.385	26.895
22	GC-A	7.9	0.3	1.4	0.460	0.011	0.064	154.782	0.315	4.965
23	YG-A	5.3	0.3	1.3	0.216	0.009	0.033	300.054	1.121	16.597
24	IA-A	7.5	0.3	1.2	0.371	0.006	0.037	70.896	0.213	3.575
25	BS-A	7.2	0.3	1.6	0.502	0.018	0.106	76.027	0.646	6.531
26	WC-A	3.6	0.3	1.1	0.250	0.005	0.030	143.225	0.295	7.555
27	WC-B	6.8	0.4	1.9	0.174	0.011	0.049	276.549	0.320	14.903
28	GC-A	8.4	0.3	1.5	0.567	0.042	0.106	230.703	0.666	10.596
29	GH-A	8.6	0.5	1.8	0.291	0.014	0.066	132.011	1.901	10.260
30	GH-B	9.0	0.5	3.0	1.809	0.018	0.115	1192.984	2.829	31.111
31	GH-C	8.5	0.7	3.5	0.767	0.041	0.231	648.760	6.390	44.777
32	HC-A	3.9	0.3	1.4	0.221	0.010	0.045	666.459	0.666	20.878
33	HG-A	5.5	0.4	1.4	0.509	0.021	0.085	569.138	0.826	13.437
34	HG-B	3.9	0.3	0.7	0.206	0.015	0.042	147.652	11.680	37.289
35	NG-A	5.9	0.3	1.3	0.384	0.010	0.050	755.998	2.362	27.483
36	NG-B	5.4	0.3	1.4	0.449	0.008	0.041	1259.566	2.428	44.371
37	NG-C	2.1	0.4	1.2	0.097	0.010	0.027	336.400	6.700	43.580
38	NG-D	5.2	0.4	2.0	0.183	0.025	0.067	535.661	10.181	63.945
39	NG-E	6.9	0.6	2.5	0.205	0.026	0.073	835.277	9.270	76.805
40	MY-A	5.2	0.3	1.2	0.217	0.012	0.039	547.492	1.367	15.628
41	MY-B	5.3	0.5	1.9	0.200	0.022	0.058	359.946	1.042	20.420

2.3. 목표수질 평가방법

2.3.1. 현행 목표수질 평가방법

우리나라 총량관리에서는 단위유역 목표수질 설정 지점별로 8일 간격으로 연간 30회 이상 생산된 수질 분석자료를 사용하여 3년 단위로 다음 식(1)~(3)에 의해 평가수질을 산정하고 있다. 여기서, 평균수질평가방법은 4대강 수계법(시행규칙 제12조)에 따라 오염총량관리 시행계획 수립대상을 결정하기 위하여 평가하는 방법으로 측정수질은 산정시점으로부터 과거 3년간 측정된 것으로 하며, 2회 연속 목표수질을 초과하는 지역에서는 오염총량관리 시행계획을 수립하여 시행한다(MOE, 2013b). 본 연구에서는 현행 규정에 따라 평가 수질을 산정하여 목표수질과 비교 후 달성 여부를 평가하였다.

$$Estimated\ concentration = \frac{(Transformed\ average\ concentration + \frac{Transformed\ variance}{2})}{e} \tag{1}$$

$$Transformed\ average\ concentration = \frac{\ln(C_n) + \ln(C_{n+1}) + \dots}{n} \tag{2}$$

$$Transformed\ variance = \frac{(\ln(C_n) - Transformed\ average\ concentration)^2 + \dots}{n - 1} \tag{3}$$

2.3.2. 부하지속곡선(LDC)을 이용한 목표수질 평가방법

부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)은 총량 관리에 여러 가지로 이용 될 수 있다. 우선 수질기준을 만족하기 위한 허용량 초과 시기와 정도 및 오염원 규명에 활용이 가능하고, 수질기준을 만족하기 위해 요구되는 TMDL 및 삭감 부하량 산정에도 이용할 수 있다. 또한 이행평가 시에 수질기준에 따른 부하지속곡선에 현재의 부하량을 도식화하여 허용량 만족 여부를 평가하는데 활용할 수 있다. 그리고 부하지속곡선은 환경전문가나 정책 실무자 누구나 쉽게 수체의 수질 상태를 파악 할 수 있도록 시각적인 자료를 제공한다(Cleland, 2006; Jung, 2009). 부하지속곡선의 작성

을 위해서는 목표수질 설정지점에 대한 일 유량자료를 높은 값에서 낮은 값 순으로 정렬하고, 각 유량 값에 대해 이 값을 초과하는 일수를 백분율(초과유량백분율)로 계산 한다(식(4)).

$$Percent\ of\ days\ flow\ exceed\ (\%) = \frac{Rank}{Number\ of\ data} \times 100 \tag{4}$$

그리고 초과유량백분율을 x축, 해당 유량값을 y축으로 하여 유량지속곡선(Flow Duration Curve, FDC)을 우선 작성한다. 위의 과정에서 작성된 유량지속곡선을 바탕으로 각 유량값에 수질기준(목표수질)을 곱하여 부하량을 계산한다. 초과유량백분율에 대응하는 초과 부하량 백분율을 x축, 해당 부하량값을 y축으로 하여 부하지속곡선을 작성하게 된다(식(5)).

$$Load(kg/day) = Flow(m^3/sec) \times Water\ quality\ standard(mg/l) \times 86.4 \tag{5}$$

목표수질 설정지점에서 측정된 유량 및 수질자료를 이용하여 일부하량을 계산하고, 측정된 유량값에 대응하는 초과유량백분율을 확인하여, 이에 해당하는 지점에 계산된 부하량을 도식화한다. 부하지속곡선의 결과를 해석 할 때 유형구분은 초과 유량 확률에서 0% ~ 10%는 홍수기 조건, 10% ~ 40%는 풍수기 조건, 40% ~ 60%는 평수기 조건, 60% ~ 90%은 저수기 조건, 90% ~ 100%는 갈수기 조건이며, 유량 구간 등급별 원인 해석에 Table 2를 참조하였다(Cleland, 2003; US EPA, 2007). 부하지속곡선을 이용하면 유량 규모를 고려한 점오염원 및 비점오염원 특성을 파악할 수 있다(Fig. 2). 일반적으로, 고유량 기간 동안에 발생하는 수질기준 초과인 경우는 비점오염원으로 인한 영향이며, 저유량 기간 동안 발생하는 수질기준 초과인 경우는 점오염원으로 인한 영향일 가능성이 크다고 할 수 있다(Nevada, 2003; Park and Oh, 2012). 부하지속곡선 작성 후 실측 부하량을 도시하여 초과율 50%를 기준으로 이하이면 목표수질을 달성하는 것으로 평가 하였다(Hwang et al., 2011; Park et al., 2013;

Table 2. Hydrologic condition class / duration curve zone (U. S. EPA, 2007)

Hydrologic condition class	High flows	Moist conditions	Mid-rang flows	Dry conditions	Low flows
Flow duration interval	0% ~ 10%	10% ~ 40%	40% ~ 60%	60% ~ 90%	90% ~ 100%
* Contributing source area					
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	H	H	M		
Bank erosion	H	M			

Source : Cleland 2003

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

Kim et al., 2015; Cheong et al., 2016).

3. 결과 및 토의

3.1. 적용결과

목표수질 달성도 평가를 위해서 2단계 총량과업을 위해 사용된 '94~'04년까지 기준유량 설정 자료로 유량지속곡선(FDC)을 작성하였으며, 낙동강 수계 전체

41개 단위유역 중 그 예로 (a)내성A(NS-A)와 (b)낙분B(NB-B)를 Fig. 3에 나타내었다. 여기에 2단계 목표수질을 곱한 부하지속곡선에 '11년~'13년(1회), '12년~'14년(2회) 두 기간으로 나누어 도식화하여 목표수질 2회 연속 달성여부를 평가하였다.

작성된 일유량 자료와 총량관리 대상물질별(BOD, T-P) 목표수질을 이용하여 부하지속곡선을 작성한 후

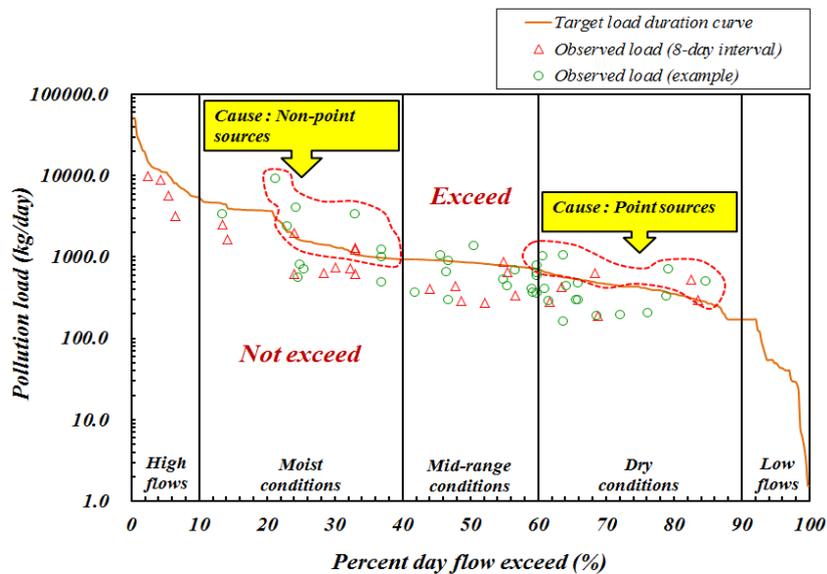


Fig. 2. Load duration curve graphing.

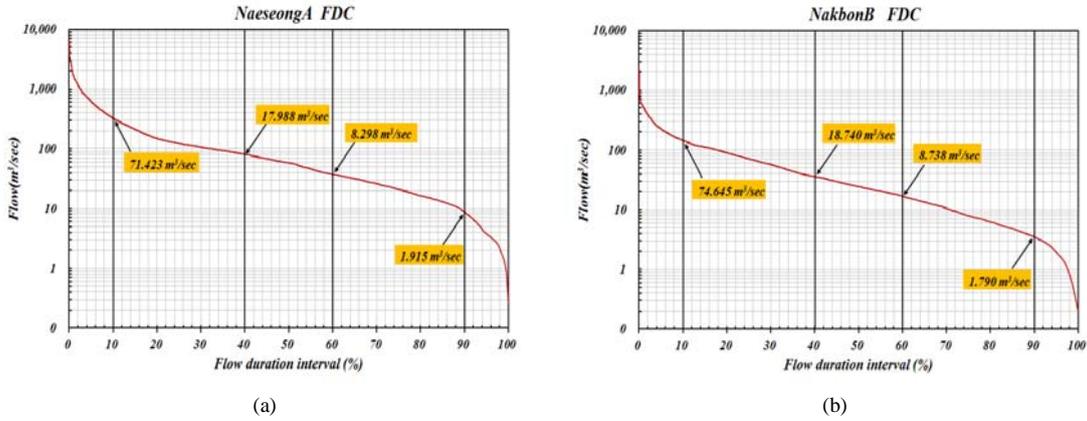


Fig. 3. Results of FDC (example). (a) NS-A FDC (b) NB-B FDC.

목표수질 초과여부를 평가하기 위해 실측한 유량 및 수질 자료로부터 산정된 실측 부하량을 실측유량에 대응하는 초과 유량 백분율 값을 결정하여 낙동강 수계 전체 41개 단위유역(분류 14개, 지류 27개)에 대해 도식화 하였으며 그 중 4개의 단위유역을 그 예로 Fig. 4에 나타내었다. 앞서 Table 2에서는 갈수기 및 저수기 조건에서 저유량 발생 기간에 허용부하량을 초과한 경우 환경기초시설 등 점오염원에 대한 관리가 필요하고, 풍수기와 평수기에 손상된 경우는 수변식생대 조성, 불 투수 지역의 강우 유출수 관리 등이 필요하며, 풍수량 및 홍수량 조건에 허용부하량을 초과한 경우는 하천제방안정화, 농경지에서 발생하는 유출수 및 토양 유실 등 비점관리를 위한 BMPs 적용이 필요하다고 정의하고 있다. 이러한 정의에 따라 본 연구대상 유역에서 부하지속곡선에 유량·수질 실측자료 도식화를 통해 유량변화에 따른 오염원별 수체 손상정도를 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다. Fig. 4에서 분류 단위유역 중 (a)낙본E(NB-E)의 경우를 보면 하천에 유량이 적은 저유량 구간부터 홍수기인 고유량 구간까지 전체유량구간에서 목표수질을 초과하는 특성을 나타내고 있다. 이러한 현상은 점오염원과 비점오염원 모두가 목표수질 초과에 영향을 미치고 있음을 잘 보여준다. 따라서 이 단위유역은 수질개선을 위해 비점오염관리와 하·폐수처리 시설 등 점오염원에 대한 관리가 함께 필요할 것으로 판단된다. 지류 단위유역인 (d)내성B(NS-B)의 경우 역시 전 유량구간

에서 목표수질을 초과하는 현상이 나타났으며, 특히 풍수기와 평수기 구간에 그 현상이 두드러지게 나타났다. 그러므로 이 지역의 경우 비점오염원을 중점적으로 관리하는 대책을 강구함과 동시에 점오염원에 관한 대책도 함께 고려해야 할 것으로 판단된다. (b)내성A(NS-A)의 경우는 홍수기인 고유량 구간에서 목표수질을 초과하는 현상이 나타나 비점오염원이 수질오염의 원인인 것으로 해석할 수 있으며, 수질개선을 위해 비점오염원 관리 대책이 필요한 것으로 사료된다. 또한 (c)밀양B(MY-B)의 경우를 살펴보면 저유량 구간에서 목표수질이 초과하는 특성을 나타내고 있는데, 이는 점오염원에 의해 수질이 악화되고 있음을 의미하는 것으로, 저유량 조건에서 초기 강우 시 유역으로부터 오염원의 유입을 줄이는 것과 환경기초시설에 대해 방류수 수질을 개선하는 등의 삭감대책이 필요한 것으로 판단된다. 이와 같이 Fig. 4의 LDC결과 예를 활용하면 목표수질이 어느 유량구간에서 초과하는지 시간적으로 파악이 가능하기 때문에 총량관리에서 중점관리유량구간 및 대상(점/비점오염원)의 선택이 가능해져 총량에서 삭감계획의 수립이나 이행평가 시 할당부하량 초과원인 분석 등에 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

3.2. 평가방법별 결과비교

현행 평가방법인 변환평균법과 실측한 수질 및 유량자료를 활용한 FDC 및 LDC 평가방법에 의한 목표

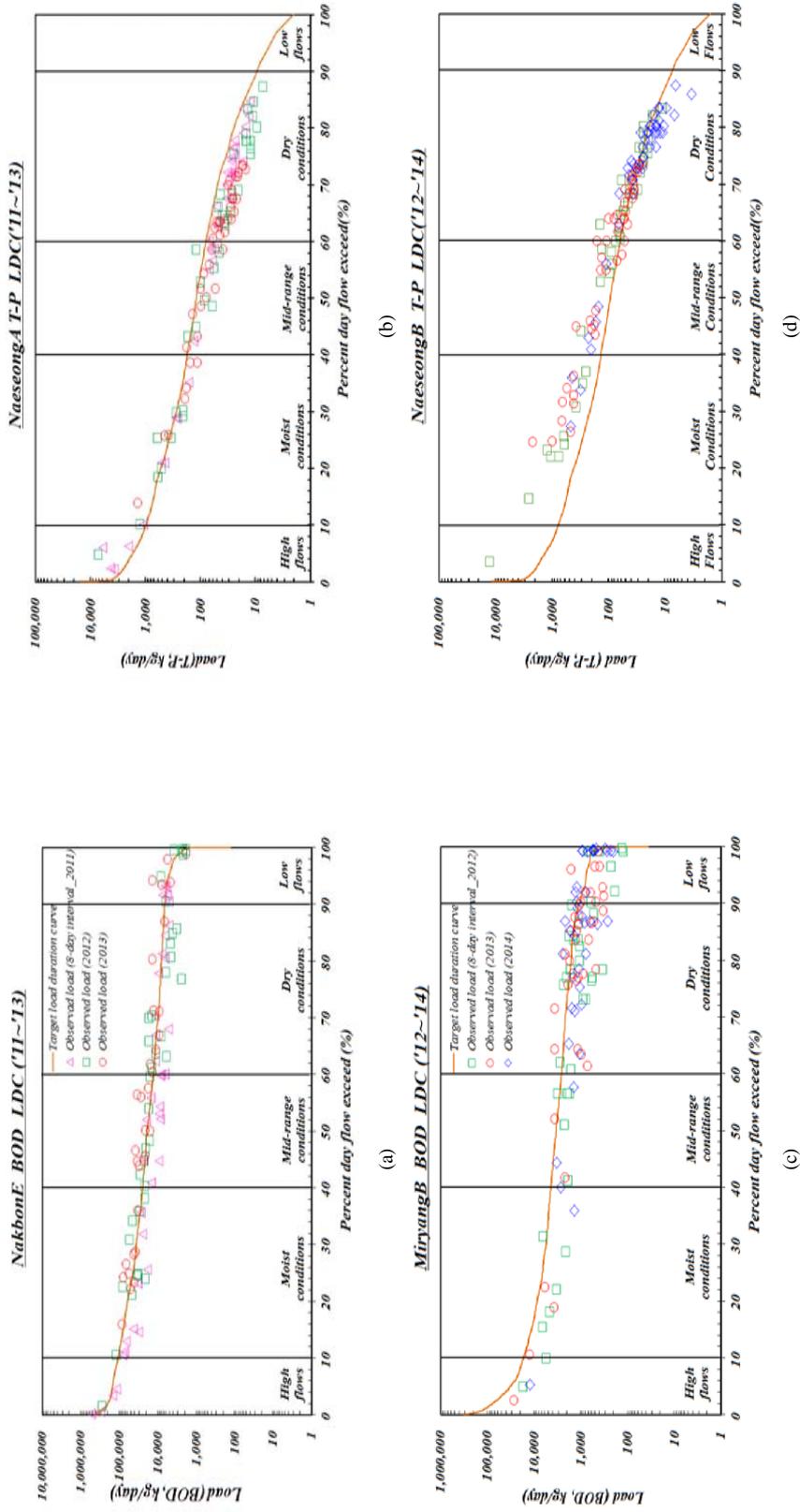


Fig. 4. Results of LDC('11~'13, '12~'14 Example). (a) NB-E BOD LDC (b) NS-A T-P LDC (c) MY-B BOD LDC (d) NS-B T-P LDC.

Table 3. Results evaluated water quality by current method and LDC method (BOD)

Unit	TWQ watershed (mg/L)	EWQ(current)		EWQ(LDC)		EWQ(current)		EWQ(LDC)	
		'11~'13(mg/L)	Evaluation	Excess rate	Evaluation	'12~'14(mg/L)	Evaluation	Excess rate	Evaluation
NB-A	1.5	1.2	○	24.1%	○	1.2	○	27.6%	○
NB-B	1.4	0.9	○	8.9%	○	1.0	○	20.3%	○
NB-C	1.5	1.1	○	17.6%	○	1.1	○	16.0%	○
NB-D	1.5	1.4	○	46.1%	○	1.5	○	57.4%	×
NB-E	1.8	1.7	○	40.2%	○	2.1	×	54.5%	×
NB-F	2.0	2.1	×	46.5%	○	2.4	×	63.2%	×
NB-G	2.9	2.3	○	24.1%	○	2.5	○	32.5%	○
NB-H	2.7	2.1	○	22.0%	○	2.5	○	33.6%	○
NB-I	3.1	2.1	○	13.8%	○	2.3	○	18.3%	○
NB-J	2.9	2.2	○	17.9%	○	2.4	○	23.7%	○
NB-K	3.0	2.0	○	16.0%	○	2.3	○	19.4%	○
NB-L	3.1	2.3	○	23.1%	○	2.5	○	28.3%	○
NB-M	2.5	1.9	○	25.5%	○	2.0	○	25.5%	○
NB-N	4.3	3.9	○	41.1%	○	4.1	○	41.8%	○
BB-A	1.4	0.9	○	11.3%	○	0.9	○	17.4%	○
YJ-A	1.4	1.2	○	36.8%	○	1.4	○	43.6%	○
GA-A	1.5	0.7	○	2.6%	○	0.7	○	6.1%	○
BB-B	1.4	1.1	○	26.9%	○	1.3	○	41.4%	○
MC-A	1.5	1.2	○	31.5%	○	1.3	○	39.2%	○
NS-A	1.5	0.9	○	10.1%	○	1.1	○	18.5%	○
NS-B	1.5	0.9	○	13.2%	○	0.9	○	14.7%	○
GC-A	1.5	1.3	○	33.0%	○	1.4	○	54.3%	×
YG-A	1.5	1.4	○	39.5%	○	1.4	○	40.4%	○
IA-A	2.0	1.0	○	5.8%	○	1.3	○	16.7%	○
BS-A	2.0	1.6	○	26.0%	○	1.7	○	30.0%	○
WC-A	1.5	1.2	○	28.4%	○	1.0	○	21.6%	○
WC-B	1.5	1.8	×	63.6%	×	2.1	×	75.4%	×
GC-A	1.8	1.5	○	23.9%	○	1.5	○	19.7%	○
GH-A	1.9	1.8	○	35.9%	○	1.7	○	36.8%	○
GH-B	3.8	3.1	○	31.0%	○	3.0	○	29.3%	○
GH-C	4.0	3.5	○	36.1%	○	3.6	○	37.5%	○
HC-A	1.5	1.3	○	34.1%	○	1.6	×	45.4%	○
HG-A	1.5	1.3	○	29.1%	○	1.4	○	35.9%	○
HG-B	1.0	0.7	○	16.9%	○	0.8	○	29.2%	○
NG-A	1.5	1.2	○	21.4%	○	1.4	○	28.2%	○
NG-B	1.6	1.3	○	27.1%	○	1.5	○	31.4%	○
NG-C	1.2	1.1	○	48.3%	○	1.1	○	37.1%	○
NG-D	2.5	2.0	○	27.4%	○	1.8	○	17.1%	○
NG-E	3.1	2.5	○	26.4%	○	2.4	○	22.9%	○
MY-A	1.4	1.1	○	30.8%	○	1.2	○	36.8%	○
MY-B	2.5	1.9	○	24.4%	○	1.9	○	27.7%	○

TWQ : Target Water Quality

EWQ : Estimation Water Quality

Evaluation : Evaluation of the TWQ (Achieve is "○", Not achieve is "×")

Table 4. Results evaluated water quality by current method and LDC method (T-P)

Unit watershed	TWQ (mg/L)	EWQ(current)		EWQ(LDC)		EWQ(current)		EWQ(LDC)	
		'11~'13(mg/L)	Evaluation	Excess rate	Evaluation	'12~'14(mg/L)	Evaluation	Excess rate	Evaluation
NB-A	0.057	0.047	○	28.4%	○	0.046	○	29.3%	○
NB-B	0.022	0.025	×	30.1%	○	0.025	×	30.9%	○
NB-C	0.033	0.040	×	48.8%	○	0.030	○	29.6%	○
NB-D	0.045	0.051	×	44.0%	○	0.040	○	26.2%	○
NB-E	0.053	0.086	×	65.0%	×	0.061	×	44.5%	○
NB-F	0.060	0.083	×	69.3%	×	0.064	×	47.4%	○
NB-G	0.137	0.121	○	31.9%	○	0.080	○	9.6%	○
NB-H	0.094	0.101	×	50.8%	×	0.072	○	24.1%	○
NB-I	0.093	0.087	○	43.1%	○	0.068	○	19.2%	○
NB-J	0.078	0.084	×	49.6%	○	0.066	○	24.6%	○
NB-K	0.074	0.083	×	54.9%	×	0.069	○	33.3%	○
NB-L	0.074	0.093	×	63.6%	×	0.072	○	38.3%	○
NB-M	0.069	0.090	×	60.9%	×	0.062	○	33.6%	○
NB-N	0.115	0.136	×	55.4%	×	0.126	×	45.5%	○
BB-A	0.025	0.020	○	26.1%	○	0.021	○	27.8%	○
YJ-A	0.046	0.031	○	12.0%	○	0.031	○	14.5%	○
GA-A	0.023	0.015	○	14.8%	○	0.018	○	20.0%	○
BB-B	0.034	0.026	○	23.7%	○	0.025	○	18.3%	○
MC-A	0.032	0.036	×	52.8%	×	0.034	×	56.3%	×
NS-A	0.110	0.086	○	13.4%	○	0.073	○	10.9%	○
NS-B	0.053	0.087	×	77.2%	×	0.073	×	63.2%	×
GC-A	0.067	0.054	○	31.9%	○	0.059	○	41.5%	○
YG-A	0.050	0.034	○	16.0%	○	0.031	○	11.3%	○
IA-A	0.047	0.031	○	17.5%	○	0.039	○	24.2%	○
BS-A	0.130	0.111	○	27.6%	○	0.088	○	15.8%	○
WC-A	0.045	0.029	○	11.2%	○	0.028	○	9.5%	○
WC-B	0.045	0.050	×	45.5%	○	0.044	○	38.8%	○
GC-A	0.110	0.114	×	45.3%	○	0.096	○	23.9%	○
GH-A	0.104	0.068	○	12.0%	○	0.061	○	10.3%	○
GH-B	0.236	0.113	○	5.2%	○	0.093	○	2.6%	○
GH-C	0.254	0.276	×	47.2%	○	0.164	○	17.4%	○
HC-A	0.060	0.047	○	22.8%	○	0.040	○	12.6%	○
HG-A	0.100	0.089	○	31.6%	○	0.076	○	20.5%	○
HG-B	0.034	0.043	×	58.9%	×	0.043	×	60.0%	×
NG-A	0.052	0.046	○	28.2%	○	0.051	○	30.8%	○
NG-B	0.043	0.037	○	26.3%	○	0.041	○	29.7%	○
NG-C	0.034	0.026	○	18.1%	○	0.027	○	18.1%	○
NG-D	0.112	0.071	○	13.7%	○	0.057	○	6.0%	○
NG-E	0.109	0.076	○	15.0%	○	0.064	○	7.1%	○
MY-A	0.031	0.036	×	50.4%	×	0.039	×	56.4%	×
MY-B	0.074	0.063	○	29.3%	○	0.046	○	9.2%	○

TWQ : Target Water Quality

EWQ : Estimation Water Quality

Evaluation : Evaluation of the TWQ (Achieve is "○", Not achieve is "×")

Table 5. Each evaluation method result of achievement rate of TWO

Method	EWQ(current)				EWQ(LDC)			
	BOD		T-P		BOD		T-P	
Target materials	BOD		T-P		BOD		T-P	
Evaluated year	'11~'13	'12~'14	'11~'13	'12~'14	'11~'13	'12~'14	'11~'13	'12~'14
Achievement rate(%)	95.1	90.2	56.1	80.5	97.6	87.8	73.2	90.2
Average	92.7		68.3		92.7		81.7	
Rate1(%)	92.7		68.3		92.7		81.7	
Rate2(%)	7.3		31.7		7.3		18.3	

Rate1(%) : Consecutive achievement-rate for two times
 Rate2(%) : Consecutive excess-rate for two times

수질 달성도를 대상물질별(BOD, T-P)로 구분하여 상호 비교 분석하였다(Table 3, 4). 결과는 각 방법별로 서로 상이하게 나타났으며, LDC평가에 의한 방법이 현행평가방법보다 목표수질 달성률이 높은 것으로 나타났다. 낙본B(NB-B) 단위유역에서 T-P의 경우 Table 4에서 보면 현행평가방법에 의한 평가수질이 '11~'13년 0.025 mg/L, '12~'14년 0.025 mg/L로 평가되어 목표수질인 0.022 mg/L를 2회 연속 초과하여 T-P 시행계획을 추가 수립해야 한다. 하지만, LDC 방법으로 평가할 경우 목표수질을 '11~'13년 초과율 30.1%와 '12~'14년 초과율 30.9%로 2회 연속 만족하여 추가수립이 불필요해진다. 따라서 추가 시행계획 수립에 따른 각종 행정사항 및 비용 등을 고려한다면 LDC 평가방법 도입이 총량관리제도에 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

3.2.1. 전체단위유역의 평가방법별 목표수질 달성률
 2단계 총량관리 시행기간 중 최근 3년간의 수질분

석자료를 이용하여 2회 연속으로 2011~2013년(1회)와 2012~2014년(2회)에 대하여 각각 평가하였으며, 2회 연속 달성률 및 초과율에 대해서도 평가한 후 Table 5에 정리하였다. 먼저 BOD에 대해 살펴보면 현행방법인 변환평균법에 의해 평가한 달성률은 2회 평균 92.7%, 부하지속곡선을 활용한 LDC평가 달성률은 2회 평균 92.7%로 두 방법 모두 달성률이 같게 나타났다. 반면, T-P의 경우는 현행방법에 의해 평가한 달성률이 2회 평균 68.3%, LDC평가 달성률은 2회 평균 81.7%로 각각 다르게 나타났고, BOD의 결과와는 다르게 LDC평가에 의한 달성률이 높은 것으로 나타났다. 2회 연속 달성률도 두 가지 방법 모두 부하지속곡선을 활용한 LDC평가에 의한 방법이 높게 나타났으며, 2회 연속 초과율은 BOD는 같고 T-P는 LDC 평가방법이 적게 나타났다.

3.2.2. 본류 및 지류의 평가방법별 목표수질 달성률
 낙동강 수계는 본류에 14개, 지류에 27개를 합하여

Table 6. Each evaluation method result of achievement rate of TWO (Main stream and tributary)

Method	EWQ(current)				EWQ(LDC)			
	BOD		T-P		BOD		T-P	
Target materials	BOD		T-P		BOD		T-P	
Conditions	Main	Tri	Main	Tri	Main	Tri	Main	Tri
Achievement rate(%)	89.3	94.4	46.4	79.6	89.3	94.4	75.0	85.2
Rate1(%)	89.3	94.4	46.4	79.6	89.3	94.4	75.0	85.2
Rate2(%)	10.7	5.6	53.6	20.4	10.7	5.6	25.0	14.8

Rate1(%) : Consecutive achievement-rate for two times
 Rate2(%) : Consecutive excess-rate for two times
 Main stream : 14 unit watersheds_Nakdong river
 Tributary : 27 unit watersheds_Nakdong river

전체 41개의 단위유역으로 나뉘어져 있다. 따라서 본류와 지류를 구분하여 평가방법별 목표수질 달성률을 비교분석하여 결과를 정리하였다(Table 6). 평가결과 BOD의 경우 본류의 달성률은 현행평가수질이 89.3%, LDC평가는 89.3%로 두 방법 모두 달성률이 같게 나타났다. 지류의 달성률도 현행평가수질이 94.4%, LDC평가는 94.4%로 이 역시 두 방법 모두 달성률이 같게 나타났다. 반면 T-P의 경우 본류의 달성률은 현행평가수질이 46.4%, LDC평가 75.0%로 LDC평가가 달성률이 높게 나타났으며, 지류의 달성률도 현행평가수질이 79.6%, LDC평가 85.2%로 LDC평가에 의한 결과가 달성률이 높게 나타났다. 2회 연속 달성률은 BOD의 경우 본류 및 지류에서 두 방법 모두 달성률이 같고, T-P의 경우는 부하지속곡선을 이용한 LDC평가 방법이 달성률이 높게 나타났다. 2회 연속 초과율은 본류 및 지류에서 BOD는 같았으며, T-P는 모두 LDC평가에서 낮게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 총량관리제 시행으로 축적된 8일 간격의 유량 및 수질자료를 이용하여 현행 목표수질 평가방법과 LDC를 이용한 목표수질 평가방법 등을 비교하여 그 적정성을 검토하고자 낙동강수계의 총량시행 41개 단위유역에 적용하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 현행규정에 의한 목표수질 평가방법은 달성률이 68~93%로 나타났으며, LDC에 의한 목표수질 평가방법은 달성률이 82~93%로 나타났다.

2) 목표수질 달성여부를 평가한 결과 현행규정에 의한 방법보다 LDC에 의한 평가방법이 달성률이 높게 나타났으며, 그 까닭은 현행평가방법이 유량변화에 따른 수질의 변화를 잘 고려하지 못한 것으로 보인다.

3) LDC 방법을 이용하여 목표수질을 평가할 경우 낙본B와 같이 T-P 추가 시행계획 수립이 불필요한 단위유역이 나타나므로 총량 계획 수립에 따른 행정소요를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이처럼 시행대상 지역이 감소되는 효과는 총량관리발전부분으로 주목 받고 있고, 소유역 관리로 지역현안을 해결하기 위한

방안인 지류 총량제 도입 등 제도개선을 통한 총량관리제도의 유연성 확대에도 기여 할 것으로 판단된다.

4) 또한 이 방법은 수체 손상 파악을 월과 계절에 초점을 두고 수질문제를 개선하기 위한 분석도구로도 활용이 가능할 것으로 보이나, 유량이 주요지배인자가 아닌 경우 적용에 한계가 있을 것으로 보인다.

5) 본 연구는 낙동강 수계 총량 시행 단위유역인 41개 단위유역을 대상으로 현행 목표수질 평가방법과 LDC를 이용한 목표수질 평가방법을 적용하여 비교 평가한 결과로 향후 한강이나 영산강을 제외한 타 수계에서도 LDC평가방법을 적용하여 기존방법과 비교 분석을 통해 LDC방법 적용의 타당성을 추가 검토해야 할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Cheong, E. J., Kim, H. T., Kim, Y. S., Shin, D. S., 2016, Application of the Load Duration Curve (LDC) to evaluate the achievement rate of target water quality in the Youngsan · Tamjin river watersheds, J. Korean Soc. Water Environ., 32(4), 349-356.
- 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 : Connection to storm water management programs, U.S. National TMDL science and policy 2007, Seattle, WA.
- Hwang, H. S., Park, B. K., Kim, Y. S., Park, K. J., Cheon, S. U., Lee, S. J., 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, J. Korean Soc. Water Environ., 27(6), 885-895.
- Jung, K. Y., 2009 Advanced control strategies on water quality management in Nakdong river, Kyungpook national university, Korea, 94-100.
- Kang, H. W., Ryu, J. C., Shin, M. H., Chol, J. D., Chol, J. W., Shin, D. S., Lim, K. J., 2011, Application of web-based load duration curve system to TMDL watersheds for evaluation of water quality and pollutant loads, J. Korean Soc. Water Environ., 27(5), 689-698.

- Kim, E. J., Kim, Y. S., Rhew, D. H., Ryu, J. C., Park, B. K., 2014, A Study on the water quality changes of TMDL unit watershed in Guem river basin using a Nonparametric trend analysis, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 30(2), 148-158.
- Kim, E. K., Ryu, J. C., Kim, H. T., Kim, Y. S., Shin, D. S., 2015, Application of the Load Duration Curve (LDC) to evaluate the achievement rate of target water quality in the Han-river watersheds, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 31(6), 732-738.
- Ministry of Environment (MOE), 2008, Official test methods of water quality, Ministry of Environment, Notification No. 2008-99, 29-35.
- Ministry of Environment (MOE), 2013a, Basic policy on the total pollution load control, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (MOE), 2013b, Standard policy of TMDLs, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment, Water information system, [http:// water.nier.go.kr/](http://water.nier.go.kr/)
- Nevada, 2003, Load duration curve methodology for assessment and total maximum daily loads development, Nevada Division of Environmental Protection, 1-3.
- Park, J. D., Oh, S. Y., 2012, Methodology for the identification of impaired waters using LDC for the management of total maximum daily loads, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 28(5), 693-703.
- Park, J. H., 2010, A Study of waterbody health diagnosis method using load duration curve, Master's Thesis, Kyungpook National University, Korea, 1-10.
- Park, J. H., Kim, K. S., Jung, J. W., Hwang, K. S., Moon, M. J., Ham, S. I., Lim, B. J., 2013, Water quality characteristics evaluation by flow conditions using load duration curve - in Youngbon a watershed-, *J. Environ. Impact Assess.*, 22(4), 319-327.
- Ryu, D. K., Bae, S. D., Jang, J. Y., Park, J. C., Ryu, J. K., 2006, A Study on the water quality indicators of total maximum daily load management in Nakdong river - Focused TOC organic-, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 2006(0), 1181-1188.
- Sustainable Water Resources Research Center (SWRRC), 2004, Streamflow measurement manual, Sustainable Water Resources Research Center, Technical report TR 2004-01, 1-84.
- U.S. EPA Office of Wetlands, Oceans and Watersheds, 2007, An Approach for using load duration curves in the development of TMDLs.