

Research Paper

장기간 유량측정 자료를 이용한 경안천의 부하지속곡선 특성

노창완 · 권필상 · 정우석 · 이명구 · 조용철 · 유순주

국립환경과학원 한강물환경연구소

Analysis of Load Duration Curve Using Long Time Flow Measurement Data of Kyeongancheon

Changwan Noh · Phil-Sang Kwon · Woo-Seok Jung ·
Myung-Gu Lee · Yong-Chul Cho · Soonju Yu

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

요약: 장기간 유량측정과 수질분석은 수질오염총량관리제도 유역의 목표수질과 허용 부하량을 결정하기 위하여 필요하다. 목표수질 달성여부를 평가하는데 사용되는 부하지속곡선은 유량과 수질간의 관계를 설명하고, 유량조건별 오염부하량 특성을 평가한다. 경안천의 부하지속곡선은 경안천 목표수질과 2006년부터 2015년까지 연평균 8일 간격으로 측정된 유량자료를 이용한 유량지속곡선에 의해서 작성되었다. 연구 결과 경안천은 갈수량 구간에서 목표수질을 초과하여 점오염원에 대한 관리가 필요한 것으로 분석되었다. 또한, 연중 3월에서 6월 사이의 기간 동안에만 목표수질을 초과하는 것으로 나타나 이 기간 동안 경안천의 목표수질을 달성하기 위한 체계적인 유역 관리가 필요한 것으로 판단된다.

주요어: 수질오염총량관리제도, 부하지속곡선, 유량지속곡선, 목표수질

Abstract: Long term flow measurement and water quality analysis data need to determine the target and allowable load for each basin in Total Water Pollution Load Management System (TWPLMS). The Load Duration Curve (LDC) is analyzed the relationship between flow data and water quality, and evaluates the pollutant load characterization by flow conditions. LDC of Kyeongancheon is created by the Flow Duration Curve (FDC) that was analyzed 8-day interval

First Author: Changwan Noh, Han River Environment Research Center, Gyeonggi-do, 12585, Korea, Tel: +82-31-770-7242, E-mail: acewany@korea.kr, ORCID: 0000-0001-5357-2617

Corresponding Author: Yong-Chul Cho, Han River Environment Research Center, Gyeonggi-do, 12585, Korea, Tel: +82-31-770-7238, E-mail: yc800222@korea.kr, ORCID: 0000-0002-4145-8929

Co-Authors: Phil-Sang Kwon, Han River Environment Research Center, Gyeonggi-do, 12585, Korea, Tel: +82-31-770-7225, E-mail: kps1982@korea.kr, ORCID: 0000-0003-4603-9755

Woo-Seok Jung, Han River Environment Research Center, Gyeonggi-do, 12585, Korea, Tel: +82-31-770-7233, E-mail: ws3065@naver.com, ORCID: 0000-0003-3526-325X

Myung-Gu Lee, Han River Environment Research Center, Gyeonggi-do, 12585, Korea, Tel: +82-31-770-7241, E-mail: ucul@naver.com, ORCID: 0000-0002-3505-3730

Soonju Yu, Han River Environment Research Center, Gyeonggi-do 12585, Korea, Tel: +82-31-770-7201, E-mail: ysu1221@korea.kr, ORCID : 0000-0002-1860-131X

Received: 2 November, 2018. Revised: 11 January, 2019. Accepted: 15 January, 2019.

measured flow data from 2006 to 2015 and numeric water quality target in Kyeongancheon. As a result of this study, it is necessary to manage the point source pollutant because the numeric water quality target is not satisfied in the low flows. Also the numeric water quality target has been exceeded for four months from March to June of the year and continuous and systematic watershed management is required to satisfy the numeric water quality target.

Keywords : TWPLMS, LDC, FDC, Numeric water quality target

I. 서론

수질오염총량관리제도는 장기간 측정된 유량 자료를 이용한 유황분석을 통하여 수질오염총량관리 목표 수질 설정의 기본이 되는 기준유량을 설정하고 수질자료와 연계시켜 목표수질을 관리해야 하며, 체계적이고 신뢰성 있는 자료를 확보하기 위해서 단위 유역에 대한 장기간의 유량측정 및 수질분석 자료가 축적되어야 한다(Yang et al. 2005).

수질오염총량관리제도는 4대강의 수질 개선을 위하여 배출농도 규제가 아니라 부하량을 관리하여 개별 오염원보다 단위 유역을 중점적으로 관리하기 위하여 도입되었다(Ministry of Environment 2004). 한강수계를 제외한 3대강 수계(낙동강수계, 금강수계, 영산강·섬진강수계)는 2004년에 수질오염총량관리제도를 도입하여 2015년까지 1~2단계 수질오염총량관리가 완료되었고, 2016년부터 3단계 수질오염총량관리가 시행되고 있다. 한강수계는 『한강수계 상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률』 제 8조 1항에 따라 2013년 6월부터 충청북도와 강원도를 제외한 서울·경기지역에 위치한 26개 단위 유역에 목표수질이 설정되어 수질오염총량관리제도가 시행되고 있다.

3대강 수계는 1~2단계를 거쳐 3단계 수질오염총량관리가 실시되는 동안 설정된 목표수질과 장기간 측정된 유량 자료를 이용하여 목표수질 달성을 위한 지점별 부하지속곡선을 활용한 다양한 연구가 진행되었다(Hwang et al. 2011; Park & Oh 2012). 3대강 수계보다 늦게 수질오염총량관리제도가 시행된 한강수계는 부하지속곡선을 이용한 연구에서 기준부하지속곡선을 작성할 때 단위 유역에 설정된 목표수질이 아닌 연평균 수질법이나 과거 3년 평균 수질법

에 의한 평균 수질로 목표수질을 대신하였으며 단기간 유량자료를 가지고 작성한 부하지속곡선 연구가 이루어졌다(Choi et al. 2012). 따라서 1단계 수질오염총량관리가 시행되고 있는 한강수계의 목표수질을 달성하기 위해서 설정된 목표수질과 장기간 측정된 유량자료를 이용한 부하지속곡선 연구가 필요한 실정이다(Kim et al. 2015).

본 연구에서는 경안천의 유량자료와 목표수질을 이용하여 경안천의 부하지속곡선을 작성하고 수질오염특성을 분석하였다. 경안천은 남한강과 북한강에 비해 매우 적은 수량으로 팔당호로 유입되는 국가하천이지만 팔당호 수질에 미치는 영향은 큰 하천이다(Jang et al. 2009). 연구 대상 지점은 팔당호로 유입되기 전 경안천 말단에 위치한 환경부 수질오염총량관리 지점인 경안 B 지점으로 2004년부터 연속적으로 유량측정 및 수질분석을 실시하고 있는 지점이다.

2006년부터 2015년까지 10년 동안 연평균 8일 간격으로 직접 측정된 장기간의 유량 자료를 이용한 경안천의 유량지속곡선과 경안천 목표수질 대상 항목인 BOD 2.7 mg/L, T-P 0.164 mg/L(한강수계 경기도관할 수계구간별 목표수질 고시, 2013. 6.)를 이용하여 부하지속곡선을 작성하였다. 작성된 부하지속곡선을 분석하여 특정 유량 조건에서의 수질분석이 아닌 모든 유량 조건에서의 수질 기준을 고려하여 경안천의 유출 특성을 분석 하였다. 본 연구를 바탕으로 1단계 수질오염총량관리가 시행되고 있는 한강수계의 단위 유역에서 측정된 유량 자료와 목표수질을 이용하면 지점별 부하지속곡선 작성 및 목표수질 달성을 위한 자료로 활용될 것으로 판단된다.

II. 연구방법

1. 조사지점 현황

경기도 용인시 호동 문수봉에서 발원하는 경안천 (Figure 1)은 용인시를 관통하면서 고산천, 직리천, 중대천, 목현천의 지류 하천이 유입되고 광주시를 관통하면서 경안천 최대 지류인 곤지암천이 합류한 후 수도권권의 상수원인 팔당호로 유입되는 국가하천이다 (Han River Basin Environmental Office 2014).

경안천 유역의 행정구역은 경기도 용인시와 광주시로 구성되어 있으며, 전체 단위 유역면적은 465.9 km²로 이루어져있다. 경안천 유역은 1990년 이후 경안천 수변을 중심으로 급격한 도시화를 위한 개발과 지속적인 인구 유입으로 인하여 오염도가 증가하고 있다.

2. 유역 평균 강수량 환산

경안천 유역의 정확한 강수량을 산정하기 위해서 전 유역면적에 대한 각 관측점의 지배면적과 티센 계수를 이용하여 면적 평균 강수량을 산정하는 Thiessen의 가중법을 이용하였다. 이 방법은 유역 면적에 대한 관측점의 지배 면적 비를 가중인자로 잡아 이를 각 강수량을 곱하여 합산한 후 유역면적으로 나누어 평균 강수량을 산정하는 방법이다(Choi et al. 2015). 경안천 유역의 평균 강수량과 한강수계의

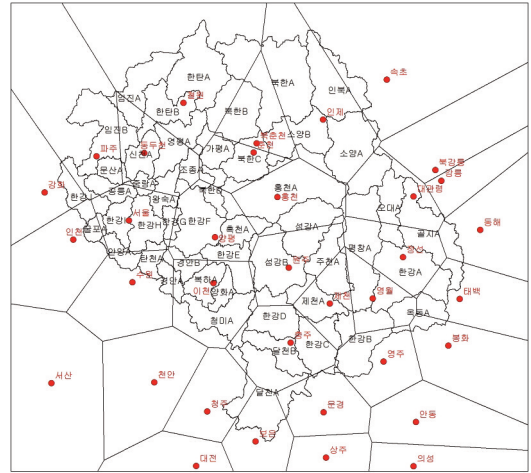


Figure 2. Thiessen of Thiessen of Han River basin

평균 강수량을 비교하기 위해서 경안천 유역과 한강수계 전체의 티센계수를 산정하여 Figure 2에 나타냈다. 티센계수 산정은 ArcGIS를 이용하여 기상청의 기상 관측소 좌표와 물환경정보시스템의 한강수계 유역 자료를 입력하여 산정하였다.

3. 유량조사

경안천 유역의 유량측정은 연평균 8일 간격으로 수질조사와 동일한 날에 유량을 측정하였으며, 한강수계 수질오염총량관리 유량측정 지점인 경안B 지점으로서 곤지암천 합류후 경안천 말단에 위치한 서하



Figure 1. Map of Kyeongancheon watershed

교에서 경안천 본류 유량과 지천인 무갑천의 유량을 합산하여 유량을 산출하였다. 저수위에서는 도플러 효과를 이용한 초음파 유속계인 Flow Tacker ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)를 사용하여 유황이 일정하고 하상의 상태가 고른 지점을 선정하여 각 구간에서의 유량이 최대 10%를 초과하지 않는 범위에서 도섭법으로 유속을 측정하였다. 고수위에서는 도플러 효과를 이용하는 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 동일수위에서 유량 편차가 5% 이하일 경우에는 4회 측정, 5% 이상일 경우에는 8회를 측정하여 단면의 유속분포와 유량을 측정하였다. 유량측정과 관련된 세부 방법은 수질오염 공정시험기준의 하천 유량측정방법과 국토교통부 수문관측매뉴얼의 유량측정방법을 준용하였다(Han River Environment Research Center 2017).

4. 수질조사

경안천의 수질오염총량관리제도 목표수질 대상 항목인 BOD와 T-P 항목에 대하여 유량측정과 동일한 날에 채수한 시료를 분석하였다. 목표수질 대상 항목인 BOD 분석은 BOD Incubator를 이용하여 5일간 배양 후 YSI DO meter(격막전극법)을 이용하여 초기 DO 농도와 5일 후의 DO 농도를 측정하여 산출하였으며, T-P는 Spectrophotometry 자동분석법을 적용하여 BLTEC AACSR로 분석하였다. 수질조사를 위한 시료의 채취 방법과 실험 방법은 수질오염공정시험기준에 준하여 실시하였다(Ministry of Environment 2011).

5. 유량지속곡선(Flow Duration Curve, FDC) 작성

목표수질을 이용한 부하지속곡선 작성을 위해서는 유량지속곡선 작성이 선행되어야 한다. 유량지속곡선을 작성하는 방법으로는 실측한 유량자료를 SWAT이나 TANK 모형을 적용하여 일유량을 산정하거나 유역 모형에 적용한 일유량을 산정하는 방법으로 유량지속곡선을 작성할 수 있다(Baek 2014; Kim et al, 2017). 또한 유량지속곡선(FDC)은 수위와 유량과의 상관관계를 이용한 수위-유량관계 곡선

을 개발하고 연속적으로 측정되는 실시간 수위자료를 이용하여 측정지점의 일유량 산정을 통하여 작성할 수도 있지만 실시간 수위자료를 이용하여 일유량 자료를 획득하지 못할 경우에는 주기적으로 장기간 측정된 유량 자료가 전체 하천의 누적 유량빈도를 대변할 수 있는 것으로 판단하여 유량지속곡선을 작성할 수 있다(Hwang et al, 2011). 본 연구에서는 10년 동안 주기적으로 측정된 유량자료를 이용하여 경안천의 유량지속곡선을 작성하기 위해서 식 (1)에 의한 초과유량백분율을 적용하였다. 초과유량백분율(Percent of Flow Exceed)은 측정 유량을 최대유량에서 최소유량으로 나열한 후 각각의 유량 값의 순위를 전체 측정 유량 횟수로 나뉜 다음 백분율로 계산하면 y축에는 유량, x축에는 y축 유량보다 큰 유량이 나타나는 빈도인 초과백분율을 축으로 하는 유량지속곡선이 작성된다.

$$\text{Percent of flow exceed (\%)} = \frac{\text{Rank}}{\text{Number of data}} \times 100 \quad (1)$$

6. 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC) 작성

부하지속곡선은 목표수질과 관측수질에 대한 관계를 쉽게 알 수 있는 그래프로서 부하지속곡선을 사용하여 다양한 크기의 유량조건에서 오염물질의 목표수질 달성여부 및 오염물질의 다양한 오염 특성을 알 수 있게 해준다. 또한 부하지속곡선을 통한 유량 조건별 분류에 따라 구간별 관측부하량이 초과할 경우 발생오염원의 종류(점오염원-비점오염원)와 그에 따른 오염원 저감 대책도 제시할 수 있다(U.S. EPA 2007). 부하지속곡선 작성은 선행된 유량지속곡선에 목표수질을 곱하여 기준부하지속곡선을 작성할 수 있으며, 작성된 기준부하지속곡선에 측정유량과 관측 수질을 곱하여 산정된 관측부하량을 부하지속곡선에 함께 도시하면 하천의 오염 특성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 직접 측정된 유량 자료를 이용하여 작성한 유량지속곡선(FDC)에 경안천의 목표수질 대상항목인 BOD 2.7 mg/L, T-P 0.164 mg/L를 이용하여 각각의 기준부하지속곡선을 작성하고 기준부하

지속곡선 위에 관측 수질 부하량 자료를 도시하여 경안천의 오염 특성을 파악하였다.

III. 연구 결과 및 고찰

1. 경안천 유역의 환산 강수량

경안천 유역의 강수량을 산출하기 위하여 현재 홍수 예·경보 시스템에서 사용하고 있는 티센법을 이용하였다. 또한 경안천 유역의 강우 특성을 비교하기 위해서 한강수계 전체의 강수량도 티센법을 이용하여 산출하였다. 티센법을 이용한 한강수계 환산 강수량은 ArcGIS를 이용하여 한강수계 단위 유역에 영향을 주는 25개의 기상관측소 좌표와 물환경정보시스템의 한강수계 유역자료를 입력하여 단위 유역별 티센계수를 산정하고 25개 기상관측소 10년 자료를 이용하여 환산강수량을 산출하였다. 경안천 유역의 환산 강수량 산정에 영향을 주는 기상관측소는 서울관측소, 수원관측소, 양평관측소, 이천관측소가 있으며, 경안천 유역의 티센계수 산정 결과 서울의 지배면적은 2.7 km², 티센계수 0.01, 수원의 지배면적은 147.3 km², 티센계수 0.32, 양평의 지배면적은

64.3 km², 티센계수 0.13, 이천의 지배면적은 251.6 km², 티센계수 0.54로 산정되었다. 티센법을 이용한 한강수계 환산 강수량과 경안천 유역의 환산 강수량을 Table 1에 나타내었다.

한강수계와 경안천 유역의 환산 강수량을 비교한 결과 2006년~2007년, 2014년~2015년을 제외하고 경안천 유역의 누적강수량이 한강수계 누적강수량보다 많은 것으로 나타났다. 경안천 유역의 10년 평균 강수량은 1,379.3 mm로 한강수계 10년 평균 강수량 1,332.4 mm와 비슷한 수준으로 나타났다.

연도별 환산 강수량 분석 결과 경안천 유역의 2011년 누적강수량이 2043.9 mm로 가장 많았으며, 2014년과 2015년 누적강수량은 866.6 mm와 806.3 mm로 경안천 유역 10년 평균 강수량 1,379.3 mm보다 40% 감소하였다.

경안천 유역의 티센계수를 이용한 월별 환산 강수량 변화를 Figure 3에 나타내었다. 경안천 유역의 강우 특성은 여름에 강우가 집중되는 우리나라 계절적 특성처럼 7월과 8월에 강우 집중도가 높았으며, 2014년과 2015년에는 가뭄으로 인하여 강우 집중도가 평균 강수량보다 적은 것으로 나타났다.

Table 1. Precipitation by Thiessen weights method

Precipitation (mm)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Average
K.A Pre. ^(a)	1,461.9	1,383.3	1,260.4	1,471.0	1,511.4	2,043.9	1,616.4	1,371.9	866.6	806.3	1,379.3
H.W. Pre. ^(b)	1,617.6	1,458.9	1,154.3	1,317.7	1,468.6	1,914.6	1,383.0	1,295.6	904.5	808.7	1,332.4

(a) Kyeongancheon precipitation

(b) Han-River watershed average precipitation

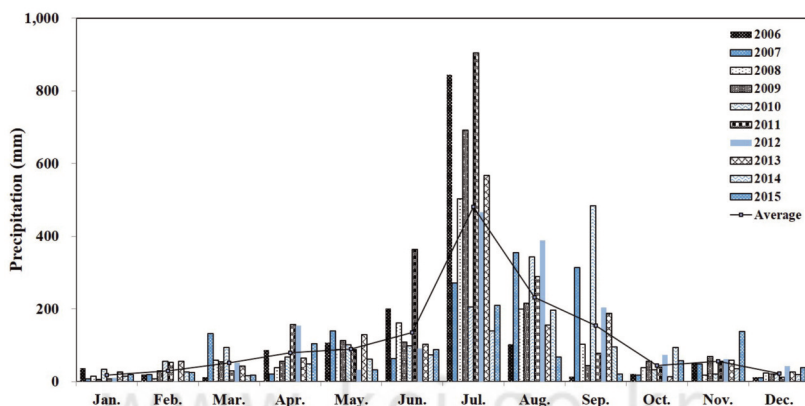


Figure 3. Monthly precipitation by Thiessen weight method on the watershed

2. 유량지속곡선 작성 결과

경안천의 유량지속곡선을 작성하기 위해서 경안B 지점에서 2006년부터 2015년까지 10년 동안 측정된 자료를 이용하였다. 환경부 오염총량관리 기본방침에서 기준유량 산정을 위한 기간을 과거 10년 동안의 평균 저수량을 기준유량으로 산정하고 있으며(Park et al, 2012; Kim et al, 2017), 하천의 전체 누적 유량 빈도를 대변하기 위해서 10년 동안의 유량자료를 적용하는 것이 타당한 것으로 판단하였다.

연구 기간 동안(2006년~2015년)에 연평균 8일 간격으로 유량을 직접 측정하였으며 전체 471개의 유량 자료를 확보하였다. 수질오염총량관리를 위한 8일 간격의 유량측정은 부분계측으로 미 측정일의 유량은 산정할 수 없으며 순간 측정으로 강우로 인한 유량 변동이 발생하는 시기에는 측정일의 대표 유량 값을 산정할 수 없고, 고수량과 갈수량 구간에서의 유량이 측정되지 않는 구간이 발생하기도 하지만(Park et al, 2012; Baek 2014) 주기적으로 직접 측정된 유량 자료가 다년간 축적될 경우 하천의 전체 유량 구간을 대변할 수 있으며 실측 유량 자료만을 이용한 유량지속곡선 작성이 가능하다(Hwang et al, 2011).

본 연구 기간(2006년~2015년)중 유량측정은 강우시와 저·갈수량 시기에도 지속적으로 유량을 측정하여 다양한 유량 조건에서의 유량 자료가 확보되었

Table 2. Flow rate in Kyeongancheon (2006-2015)

Year	Flow rate (m ³ /s)		
	Maximum	Minimum	Average
2006	87.146	3.430	11.524
2007	99.085	1.766	13.879
2008	244.590	1.581	13.545
2009	212.263	1.850	13.285
2010	59.664	3.581	13.151
2011	370.228	3.127	25.170
2012	118.759	1.798	14.641
2013	163.064	3.020	14.652
2014	58.355	2.223	6.777
2015	36.856	1.710	6.131

으며, 10년 동안 축적된 유량 자료가 하천의 전체 유량 구간을 대변할 수 있는 유량지속곡선 작성이 가능한 것으로 판단되었다.

경안천의 유량지속곡선은 2006년부터 2015년까지 10년 동안 연평균 8일 간격으로 측정된 471회의 유량 측정 자료를 Table 2에 제시하였다. 분석 결과 경안천의 최소 측정 유량은 1.581 m³/s이었으며, 최대 측정 유량은 370.228 m³/s였다. 2014년과 2015년에는 경안천 평균 유량이 6.777 m³/s와 6.131 m³/s로 강수량 감소로 인하여 평균 유량이 감소하였다.

경안천의 유량지속곡선은 초과유량백분율을 적용하였으며 Figure 4와 같은 유량지속곡선이 작성되었다. 초과유량백분율을 적용하기 위해서 471회 측정 유량을 최대유량에서 최소유량으로 나열한 후 각

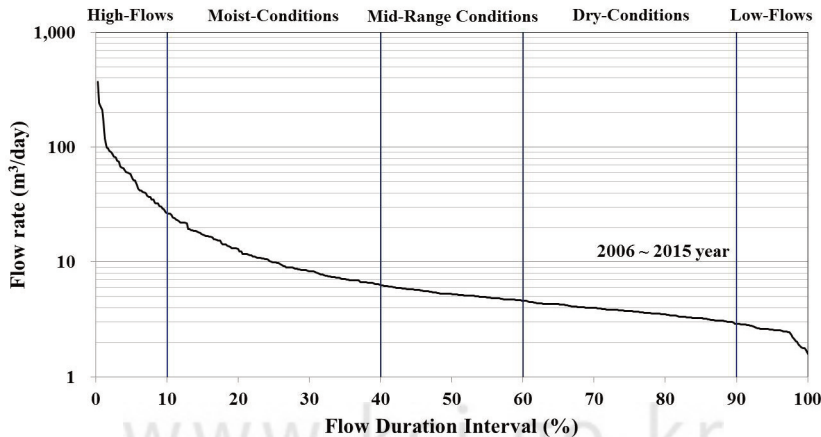


Figure 4. Flow duration curve of Kyeongancheon

각의 유량 값의 순위를 전체 측정 유량 횟수로 나눠 준 후 백분율로 계산하였다. 백분율 계산 결과 y축에는 경안천의 측정 유량이, x축에는 y축 측정유량보다 큰 유량이 나타나는 빈도인 초과유량백분율을 축으로 하는 경안천의 유량지속곡선을 작성할 수 있었다. 작성된 경안천의 유량지속곡선은 일반적인 유량지속곡선에서 보여 지는 S자 곡선 형태가 작성되었으며 U.S. EPA.에서 제시한 유량조건별 분류가 가능한 것으로 나타났다. 경안천의 누적유량을 유량조건별 분류에 따라 0~10%는 홍수량조건(High Flows), 10~40%는 풍수량조건(Moist Conditions), 40~60%는 평수량조건(Mid Range Conditions), 60~90%는 저수량조건(Dry Conditions), 90~100%는 갈수량조건(Low Flows)으로 구분하여 Table 3에 제시하였다(U.S. EPA. 2007).

3. 부하지속곡선 적용 및 분석

1) 유량조건별 분석

경안천 유량자료를 이용하여 작성한 유량지속곡선

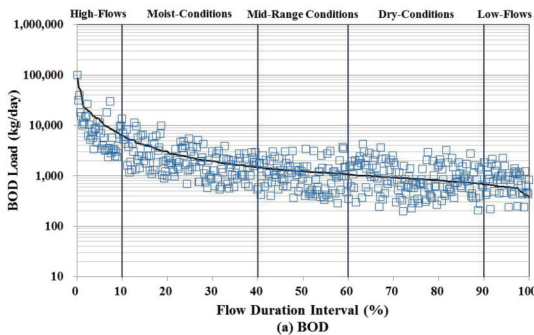


Table 3. Classifications of hydrologic condition

Flow Duration Interval	Hydrologic Condition Class
0 ~ 10%	High Flows
10 ~ 40%	Moist Conditions
40 ~ 60%	Mid Range Conditions
60 ~ 90%	Dry Conditions
90 ~ 100%	Low Flows

Source: U.S. EPA. 2007

에 경안천의 목표수질 BOD 2.7 mg/L, T-P 0.164 mg/L를 적용하여 기준부하지속곡선을 작성하였다. 또한 유량측정과 동일한 날에 채취한 471회의 BOD, T-P 수질자료를 적용한 관측부하량을 부하지속곡선에 도시하여 유량 조건별 분류방법(Table 3)에 따라 경안천의 오염부하 특성을 분석하였다(Choi et al. 2015). 경안천 연구기간(2006년~2015년)의 전체 부하지속곡선에 관측부하량을 도시한 결과는 Figure 5과 같으며, BOD와 T-P의 목표수질을 적용한 유량조건별 오염부하 달성율과 초과율을 분석한 자료를 Table 4와 Table 5에 정리하였다.

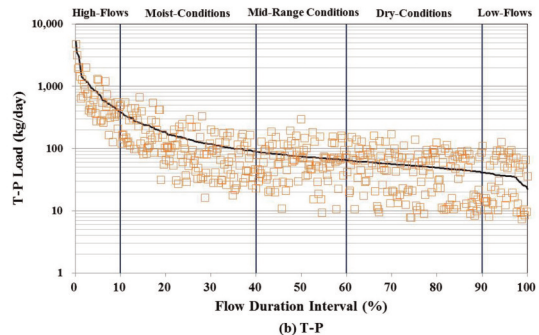


Figure 5. Load duration curve of Kyeongancheon

Table 4. The number of measurement and excess rate by hydrologic conditions (BOD)

Year	Evaluation	Average		Hydrologic condition									
				High		Moist		Mid-range		Dry		Low	
		NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio
2006	achievement	16	32%	4	67%	1	9%	5	28%	6	40%	0	—
	excess	34	68%	2	33%	10	91%	13	72%	9	60%	0	—
2007	achievement	27	53%	6	86%	12	67%	6	100%	2	20%	1	10%
	excess	24	47%	1	14%	6	33%	0	—	8	80%	9	90%
2008	achievement	33	65%	5	100%	6	55%	8	89%	14	64%	0	—
	excess	18	35%	0	—	5	45%	1	11%	8	36%	4	100%

Table 4. Continued

Year	Evaluation	Average		Hydrologic condition									
				High		Moist		Mid-range		Dry		Low	
		NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio
2009	achievement	24	49%	3	100%	4	44%	2	22%	10	50%	5	62%
	excess	25	51%	0	–	5	56%	7	78%	10	50%	3	38%
2010	achievement	35	74%	5	100%	16	64%	13	87%	1	50%	0	–
	excess	12	26%	0	–	9	36%	2	13%	1	50%	0	–
2011	achievement	32	70%	5	62%	9	64%	6	86%	12	71%	0	–
	excess	14	30%	3	38%	5	36%	1	14%	5	29%	0	–
2012	achievement	31	62%	6	100%	13	81%	5	62%	2	17%	5	62%
	excess	19	38%	0	–	3	19%	3	38%	10	83%	3	38%
2013	achievement	36	78%	4	100%	19	83%	7	64%	6	75%	0	–
	excess	10	22%	0	–	4	17%	4	36%	2	25%	0	–
2014	achievement	19	46%	2	100%	3	75%	3	43%	11	52%	0	–
	excess	22	54%	0	–	1	25%	4	57%	10	48%	7	100%
2015	achievement	20	50%	0	–	8	80%	1	25%	9	60%	2	20%
	excess	20	50%	1	100%	2	20%	3	75%	6	40%	8	80%
2006-2015	achievement	273	58%	40	85%	91	65%	56	60%	73	51%	13	28%
	excess	198	42%	7	15%	50	35%	38	40%	69	49%	34	72%

Table 5. The number of measurement and excess rate by hydrologic conditions (T-P)

Year	Evaluation	Average		Hydrologic condition									
				High		Moist		Mid-range		Dry		Low	
		NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio	NO.	ratio
2006	achievement	4	8%	3	50%	1	9%	0	–	0	–	0	–
	excess	46	92%	3	50%	10	91%	18	100%	15	100%	0	–
2007	achievement	13	25%	6	86%	7	8%	0	–	0	–	0	–
	excess	38	75%	1	14%	11	92%	6	100%	10	100%	10	100%
2008	achievement	15	29%	2	40%	5	45%	4	44%	4	18%	0	–
	excess	36	71%	3	60%	6	55%	5	56%	18	82%	4	100%
2009	achievement	15	31%	3	100%	5	56%	5	56%	2	10%	0	–
	excess	34	69%	0	–	4	44%	4	44%	18	90%	8	100%
2010	achievement	39	83%	5	100%	21	84%	12	80%	1	50%	0	–
	excess	8	17%	0	–	4	16%	3	20%	1	50%	0	–
2011	achievement	38	83%	7	87%	14	100%	6	86%	11	65%	0	–
	excess	8	17%	1	13%	0	–	1	14%	6	35%	0	–
2012	achievement	50	100%	6	100%	16	100%	8	100%	12	100%	8	100%
	excess	0	–	0	–	0	–	0	–	0	–	0	–
2013	achievement	45	98%	3	75%	23	100%	11	100%	8	100%	0	–
	excess	1	2%	1	25%	0	–	0	–	0	–	0	–
2014	achievement	40	98%	1	50%	4	100%	7	100%	21	100%	7	100%
	excess	1	2%	1	50%	0	–	0	–	0	–	0	–
2015	achievement	38	95%	1	100%	8	80%	4	100%	15	100%	10	100%
	excess	2	5%	0	–	2	20%	0	–	0	–	0	–
2006-2015	achievement	297	63%	37	79%	104	74%	57	61%	74	52%	25	53%
	excess	174	37%	10	21%	37	26%	37	39%	68	48%	22	47%

Table 6. Hydrologic condition considerations (H : High, M : Middle)

Contributing Source Area	Duration Curve Zone				
	High flows	Moist Conditions	Mid Range Conditions	Dry Conditions	Low Flows
Point Source				M	H
On-site wastewater systems			H	M	
Riparian Areas		H	H	H	
Storm water : Impervious Area		H	H	H	
Combined sewer overflows	H	H	H		
Storm water : Upland	H	H	M		
Bank erosion	H	M			

Source : U.S. EPA. 2007

부하지속곡선을 이용하여 목표수질을 평가하는 방법으로는 기준부하지속곡선 위에 관측부하량이 도시 될 경우 목표수질을 초과하고, 기준부하지속곡선 아래에 관측부하량이 도시 될 경우 목표수질을 만족하는 것으로 판단한다(U.S. EPA, 2007). 목표수질 달성과 미달성 평가는 관측부하량이 기준부하량을 초과한 횟수를 분석하여 기준부하지속곡선을 기준으로 초과율 50% 이하면 달성, 50% 이상은 미달성으로 평가한다(Hwang et al, 2011; Choi et al, 2015).

경안천 목표수질 대상항목인 BOD의 471회 관측 부하량 중에 기준부하량 초과 횟수는 198회로 기준 부하량 초과율은 42%로 경안천의 목표수질을 만족하는 것으로 나타났다. 유량 조건별(홍수량, 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량)로 분류하여 분석한 결과에서는 홍수량 조건에서 15%, 풍수량 조건에서 35%, 평수량 조건에서 40%, 저수량 조건에서 49%, 갈수량 조건에서 72%로 초과하는 것으로 나타났다.

T-P 분석 결과 전체 관측부하량 중에 174회 초과 하였으며, 기준부하량 초과율은 37%로 목표수질을 달성하는 것으로 나타났다. 유량 조건별 분석에서도 홍수량 조건에서 21%, 풍수량 조건에서 26%, 평수량 조건에서 39%, 저수량 조건에서 48%, 갈수량 조건에서 47%로 전 유량 구간에서 목표수질을 만족하는 것으로 나타났다.

경안천은 유량 조건별 부하지속곡선 분석 결과 T-P는 전 유량 구간에서 목표수질을 만족하는 것으로 나타났으며, BOD는 홍수량 조건~평수량 조건에서

는 경안천의 기준부하량 초과율이 40% 이하로 안정적으로 목표수질을 만족하지만 전체 누적유량 구간 중 유일하게 갈수량 조건에서만 목표수질을 초과하는 것으로 나타났다. 또한 저수량 조건에서의 초과율은 49%로 목표수질은 만족하지만 초과할 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

U.S. EPA.(2007)에서 제시한 수문학적 상태에 따른 오염원 관리방안을 제시한 Table 6에 따르면 경안천 유역의 BOD 유량 조건별 분류 분석 결과처럼 갈수량 조건(Low Flow)에서의 오염도가 크고 저수량 조건(Dry Conditions)에서 중간 정도의 오염도가 발생하는 기준부하량 초과 원인은 점오염원에 의한 영향을 많이 받는 것이라고 하였다. 따라서 경안천의 BOD 목표수질을 만족하기 위해서는 환경기초시설 방류수 개선과 같은 점오염원에 대한 저감 대책을 세워야 할 것으로 판단된다.

2) 연도별 변동 특성

경안천의 기준부하지속곡선에 BOD와 T-P의 연도별 관측 수질자료를 도시화한 결과를 Figure 6과 Figure 7에 정리하였다. 연도별 BOD 분석 결과 수질오염총량관리제도 시행 초기인 2006년에는 단위 유역의 오염원 관리가 제대로 이루어지지 않아 기준 부하량 초과율이 68%로 가장 높게 나타났다. 홍수량 조건을 제외한 풍수량 조건, 평수량 조건, 저수량 조건에서 목표수질을 초과하였으며, 갈수량 조건에서는 부하량이 관측되지 않았다. 2007년과 2008년에

는 기준부하량 초과율이 47%와 35%로 감소하여 목표수질을 달성한 것으로 분석되었다. 2009년에는 평수량 조건에서의 초과율이 78%로 증가하면서 연평균 초과율이 51%로 증가하여 목표수질을 만족하지 못하였다. 2010년부터 2013년 까지 목표수질 초과율은 22%~38%로 다시 감소하여 목표수질을 달성하는 것

으로 나타났다. 2014년과 2015년에는 평수량 조건과 갈수량 조건에서의 관측부하량 초과율 증가로 목표수질 초과율이 54%와 50%로 증가하였다. 특히, 갈수량 조건에서의 관측부하량이 크게 증가하여 2014년에는 모든 관측부하량이 기준부하량을 초과하였으며 2015년에도 초과율이 80%로 높게 나타났다.

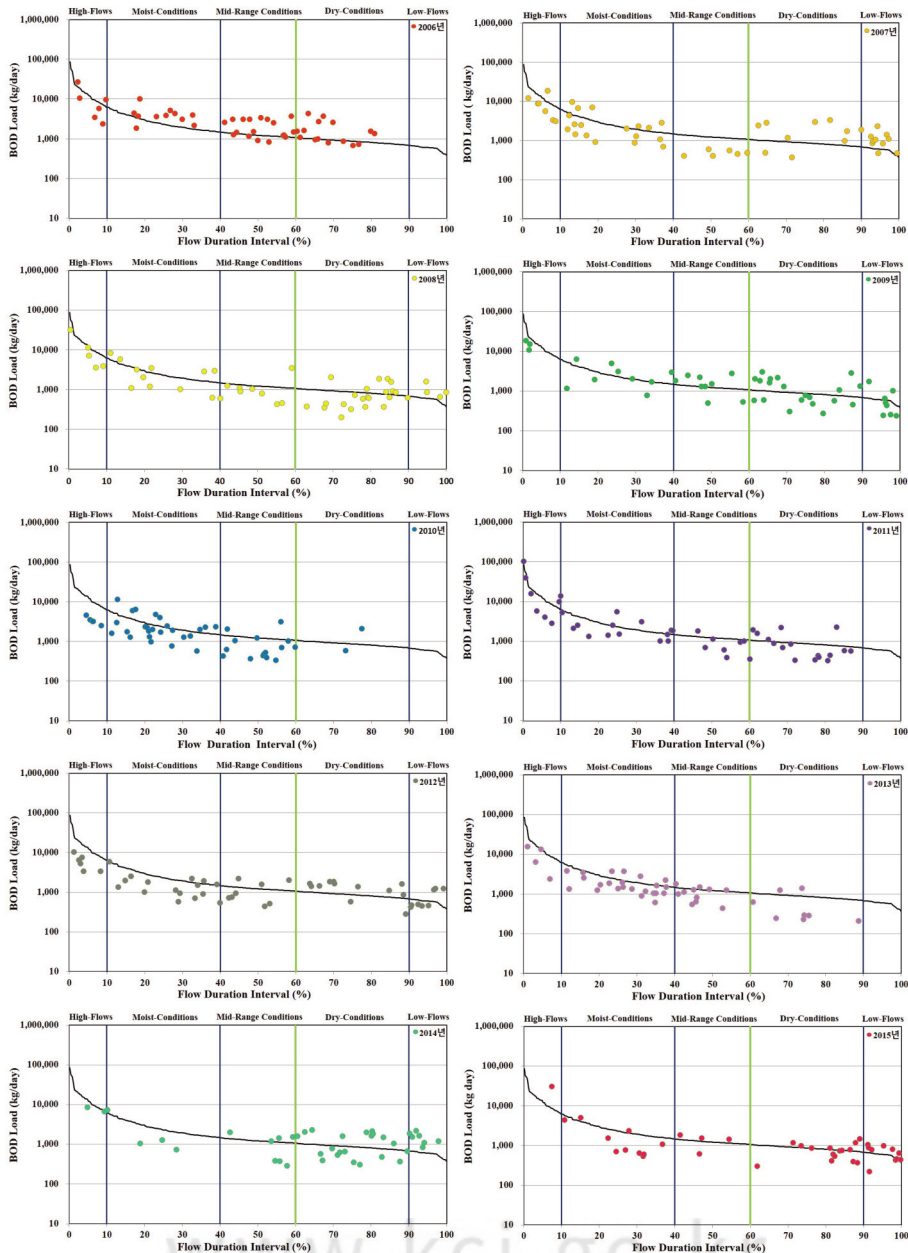


Figure 6. BOD Yearly load duration curve (2006-2015)

연도별 T-P 초과율은 2006년부터 2009년까지 92%, 75%, 71%, 69%로 목표수질을 초과하는 것으로 분석되었으나 감소하는 경향으로 나타났다. 2010년과 2011년부터 17%로 목표수질을 만족하는 것으로 분석되었으며, 2012년~2015년에는 초과율이 0%~5% 이하로 2010년 이후부터 목표수질을 달성하

는 것으로 나타났다.

경안천 유역은 수질오염총량관리제도 시행으로 환경기초시설 확충 및 상·하류 협력체계 구축, 수변구역 지정 등의 물환경관리계획을 추진하였다(Han River Basin Environmental Office 2014). 물환경관리계획에 의한 체계적인 유역관리로 경안천의 목

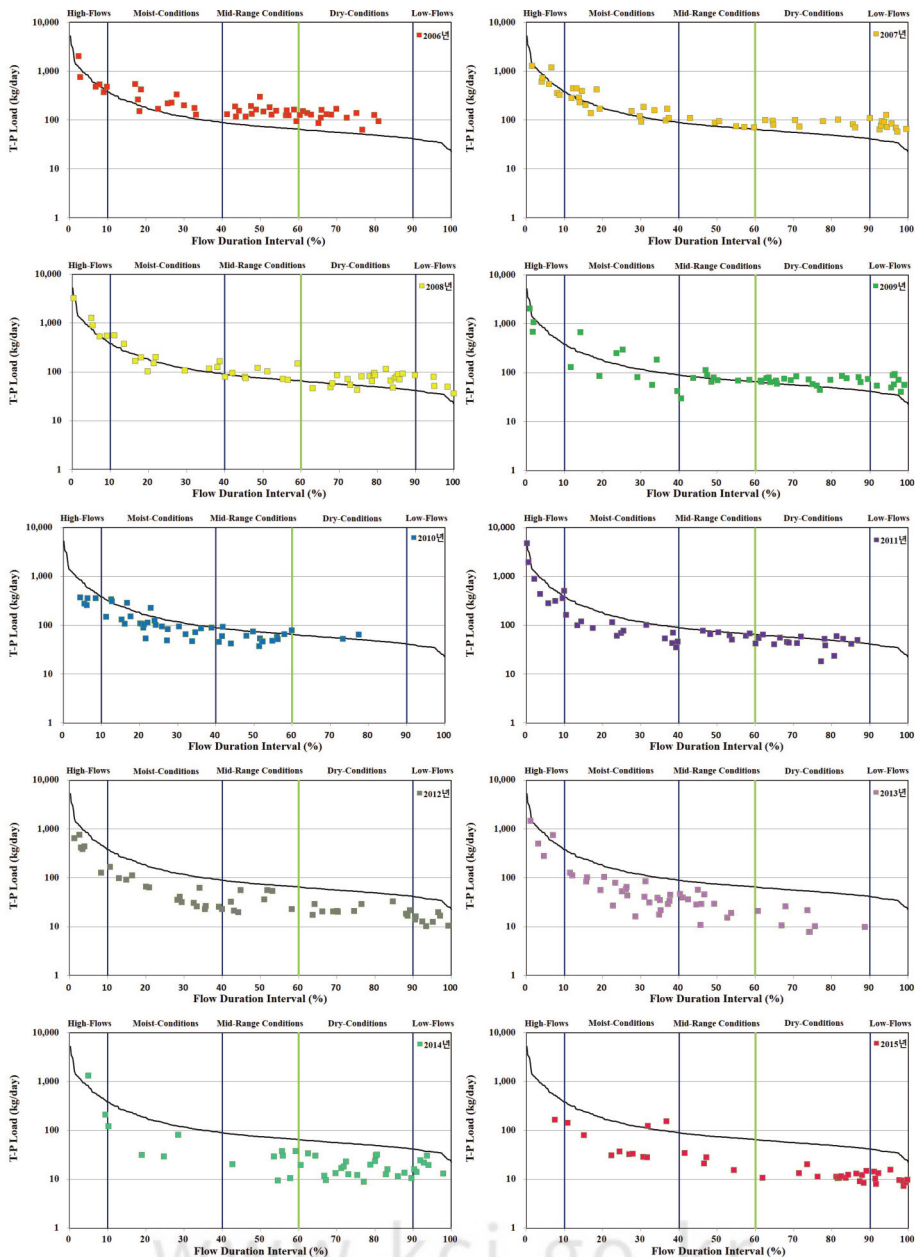


Figure 7. T-P Yearly load duration curve (2006-2015)

Table 7. The number of LDC exceeded and excess rate by monthly conditions

Classification		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
BOD	Number of Measurement	27	36	43	44	42	42	43	42	40	42	41	29
	Number of LDC Exceeded	7	12	24	34	34	35	15	9	18	7	1	2
	Percent of LDC Exceeded	26%	33%	56%	77%	81%	83%	35%	21%	45%	17%	2%	7%
T-P	Number of Measurement	27	36	43	44	42	42	43	42	40	42	41	29
	Number of LDC Exceeded	19	19	16	21	16	18	11	6	8	14	14	11
	Percent of LDC Exceeded	70%	53%	37%	48%	38%	43%	26%	14%	20%	33%	34%	38%

표수질 초과율이 2006년 이후 지속적으로 감소한 것으로 판단되며, 특히 T-P의 경우 수질오염총량관리제 시행이후 환경기초시설에 총인 시설 도입과 2012년 환경기초시설의 방류수 기준강화로 목표수질을 안정적으로 달성하는 것으로 나타났다. 따라서 경안천의 수질관리를 위해서는 T-P 보다 BOD를 중심으로 수질 관리가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3) 월별 변동 특성

경안천의 부하지속곡선에 월별 관측부하량을 도시하여 BOD와 T-P의 변동 특성을 분석한 결과를 Table 7에 정리하였다. 월별 BOD 분석 결과 기준부하지속곡선을 초과하는 월별 관측부하량이 특정 연도에 집중되지 않고 연구기간동안 지속적으로 발생되었다. 월별 초과율은 전반기인 1월과 2월의 기준부하량 초과율은 26%와 33%로 목표수질을 만족하는 것으로 나타났지만 3월부터 기준부하량 초과율이 56%로 증가하여 목표수질을 초과하였으며 4월 77%,

5월 81%, 6월 83%로 3월부터 6월까지의 기준부하량 초과율이 목표수질을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 하반기가 시작하는 7월의 기준부하량 초과율은 35%로 감소하였으며, 11월과 12월에는 기준부하량 초과율이 2%와 7%로 감소하여 7월부터 12월사이의 기간에는 목표수질을 만족하는 것으로 나타났다.

월별 BOD 변동 분석 결과 경안천은 연중 3월에서 6월까지 4개월 동안에만 목표수질을 만족하지 못하는 것으로 나타났으며 전체 목표수질 초과율 중 64%가 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 3월에서 6월 사이 기간의 관측부하량을 부하지속곡선에 도시한 결과(Figure 8) 특정 유량 구간에서 목표수질을 초과하는 관측부하량이 발생하는 것이 아니라 전체 누적 유량 구간에서 초과하는 것으로 나타났다. 경안천 유역은 유량조건별 분석 결과 점오염원에 의한 관리가 우선적으로 필요 하지만 월별 BOD 분석 결과 3월~6월동안 특정 기간에서만 전체 유량 구간에서 관측

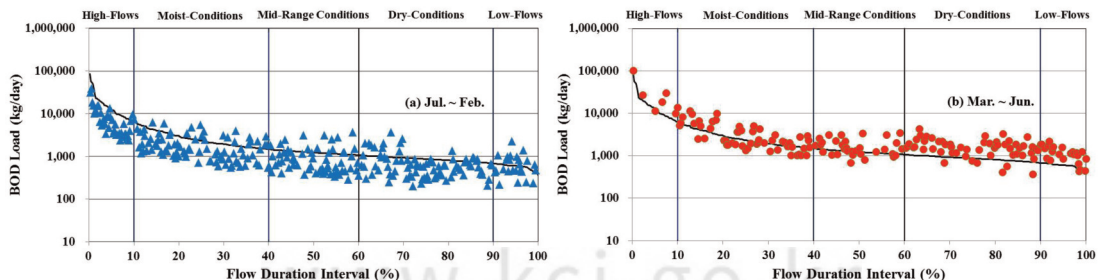


Figure 8. BOD Monthly load duration curve (a) Jul.-Feb. (b) Mar.-Jun.

부하량이 목표수질을 만족하지 못하므로 이 기간 동안에 점오염원 관리와 함께 집중적인 유역관리가 이루어지면 효과적으로 목표수질을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

월별 T-P 분석 결과 월별 초과율은 1월과 2월에 만 기준부하량 초과율이 70%와 53%로 목표수질을 초과하는 것으로 나타났으며, 3월부터 12월에는 목표수질 초과율이 14%~48%로 목표수질을 만족하는 것으로 나타났다. 목표수질을 초과하는 1월과 2월 관측부하량은 2011년 이전 관측부하량에 의해서 목표수질을 초과하는 것으로 분석되었으며 2012년 이후에는 목표수질을 초과하는 관측부하량이 발생하지 않았다. 월별 분석에서도 연도별 분석 결과와 같이 환경기초시설 총인 도입과 방류수 기준 강화 이전인 2006년부터 2010년에 기준부하지속곡선을 초과하는 관측부하량이 집중되었으며 방류수 기준 강화 이후에는 목표수질을 달성하는 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 한강수계 수질오염총량관리 대상 지점인 경안B 지점에서 10년 동안 측정된 471회의 유량 자료와 목표수질 항목인 BOD와 T-P를 적용한 경안천의 부하지속곡선을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

경안천의 T-P 유량 조건별 분류에 따르면 전체 목표수질 초과율은 37%로 목표수질을 달성하는 것으로 나타났다. 연도별 분석 결과에서는 2006년부터 2009년까지는 목표수질을 초과하였지만 2010년 이후부터 목표수질을 달성하는 것으로 평가되었으며, 월별 분석에서도 2010년 이전 관측부하량에 의한 초과율이 집중적으로 발생하였다. 따라서 경안천의 목표수질을 달성하기 위해서 T-P보다 BOD 중심의 수질 관리가 필요한 것으로 나타났다.

경안천의 BOD 전체 기준부하량 초과율은 42%로 목표수질을 만족하는 것으로 나타났지만 유량조건별 분류에서 갈수량 조건에서의 기준부하량 초과율이 72%로 목표수질을 초과하였다. 또한 연도별 분석 결과 2014년과 2015년에도 갈수량 조건에서의 초과율

이 증가하여 목표수질을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 경안천의 BOD 목표수질을 달성하기 위해서는 점오염원에 대한 저감 대책이 우선적으로 세워져야 할 것으로 판단된다.

월별 BOD 특성 결과 연중 3월~6월 사이의 기간 동안에만 전체 누적 유량 구간에서 관측부하량이 목표수질을 초과하는 것으로 나타났다. 경안천은 유량 조건별 분석결과 점오염원에 대한 대책이 세워져야 하지만 이 기간 동안에 점오염원 관리와 함께 집중적인 유역 관리가 이루어지면 효과적으로 경안천의 BOD 목표수질을 달성 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서처럼 10년 동안 주기적으로 측정된 경안천의 유량 자료가 하천의 전체 누적 유량 빈도를 대변하여 유량 지속곡선을 작성할 수 있었으며 목표수질을 적용하여 작성된 부하지속곡선은 유량조건별 분류가 가능한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 장기간의 유량 자료와 목표 수질을 적용한 부하지속곡선 연구는 한강수계 수질오염총량관리제도 목표수질 달성을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(2018-03-03-002).

References

- Baek KO. 2014. Comparative Study on Evaluating Low-Flow in Ungauged Watershed. Journal of Korean Society of Safety. 29(1): 31-36. [Korean Literature]
- Choi KW, Shin KY, Lee HJ, Jun SH. 2012. Assessment of the Water Quality of Jungnang Stream by Flow Conditions Using Load Duration Curve. Journal of Environmental Health Sciences. 38(5):438-447. [Korean Literature]
- Choi KW, Lee SW, Noh CW, Lee JK, Lee YJ.

2015. Pollutant Load Characterization with Flow Conditions in Heukcheon Stream. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*. 29(5): 551-557. [Korean Literature]
- Han River Basin Environmental Office (HRBEO). 2014. Water Environmental Management Plan for the Kyeongancheon Mid-watershed (2013-2015).
- Han River Environment Research Center (HRERC). 2017. Operation and Evaluation for Stream flow Monitoring Network in Han River Basin.
- Hwang HS, Park BK, Kim YS, Park KJ, Cheon SU, Lee SJ. 2011. Research on the Applicability of the Load Duration Curve to Evaluate the Achievement of Target Water Quality in the Watershed for a TMDL. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 27(6): 885-895. [Korean Literature]
- Jang JH, Yoon CG, Jung KW, Lee SB. 2009. Characteristics of Pollution Loading from Kyongan Stream Watershed by BASINS/SWAT. *Korean Journal of Limnology*. 42(2): 200-211. [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]
- Kim GH, Kwon HG, Ahn JM, Kim SH, Im TH, Shin DS, Jung KY. 2017. Development of Long Term Flow Duration Curve for the Management of Total Maximum Daily Loads-in the Nakdong River Basin. *Journal of Environmental Science International*. 26(8): 939-953. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). 2004. Total Water Pollution Load Management System.
- Ministry of Environment (MOE). 2011. Standard Method for Examination of Water.
- Park JD, Oh SY. 2012. Methodology for the Identification of Impaired Waters Using LDC for the Management of Total Maximum Daily Loads. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 28(5): 693-703 [Korean Literature]
- Park JD, Oh SY, Choi YH. 2012. Development of Flow Duration Curve with Unit Watershed Flow Data for the Management of Total Maximum Daily Loads. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 28(2): 224-231. [Korean Literature]
- U.S. EPA. Office of Wetlands, Oceans and Watersheds. 2007. An Approach for Using Load Duration Curves in the Development of TMDLs.
- Yang HK, Choi HC, Kim JH. 2005. River Discharge Estimation By Specific Discharge Measurement. *Journal of the Korean Geographical Society*. 40(3), pp.274-284. [Korean Literature]