

갈수기 수질오염부하 특성 및 기여율 분석: 충주댐 하류 남한강 주요 유입하천을 대상으로 Analysis of Water Pollutant Load Characteristics and Its Contributions During Dry Season: Focusing on Major Streams Inflow into South-Han River of Chungju-dam Downstream

이서로 · 신재영* · 이관재 · 성윤수 · 김기성 · 임경재 · 김종건[†]
Seoro Lee · Jae Young Shin* · Gwanjae Lee · Yunsoo Sung ·
Ki-sung Kim · Kyoung Jae Lim · Jonggun Kim[†]

강원대학교 지역건설공학과 · *한국수계환경연구소
Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon University
*Korea Research Institute of Water Environment

(Received April 6, 2018; Revised June 15, 2018; Accepted June 18, 2018)

Abstract : Water pollution in the South-Han River located downstream of Chungju Dam during dry season is getting worse due to the deteriorating water quality and reduced flow rates. Thus, the objectives of this study were to analyze the pollutant load characteristics in the main streams inflow into the South-Han river and to evaluate its contribution to the water pollution in the river during dry season for selecting the priority major stream and pollution sources. the greatest pollutant loads and the contribution ratio to water pollution in the South-Han river were analyzed in the Seomgang. Also, the largest proportion of total pollutant loads occurred by the point source and baseflow during monitoring periods was also analyzed in the Seomgang. In addition, the results of analysis of the Nationwide water pollution source survey showed that the total pollutant loads discharged from the Seomgang was the greatest, and the high proportion of pollution sources was found in the order of Landfill, Domestic, Livestock. As the result of this study, it is necessary to manage the pollutant loads occurred by the point source and baseflow in the Seomgang for water quality improvement in the South-Han river during dry season.

Key Words : Dry Season, Water Pollution, Pollutant Load Characteristics, Water Quality Management

요약 : 최근 지속되는 봄철 가뭄으로 인한 유량감소와 오염물질 유입량 증가로 인해 충주댐 하류에 위치한 남한강 갈수기 수질오염이 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 남한강 본류로 유입되는 주요 하천을 대상으로 중점관리가 필요한 우심하천 및 주요 오염원을 선별하고자 갈수기 오염부하 특성 및 남한강 본류에 대한 기여율을 분석하였다. 분석 결과, 갈수기 조건에서의 오염부하 및 기여율은 섬강에서 가장 높게 나타났으며, 유량 및 수질 모니터링 기간 내 발생한 점·기저비점 오염부하가 남한강 본류에 미치는 기여율 또한 섬강에서 가장 높게 나타났다. 그리고 전국오염원조사 자료를 바탕으로 산정된 수질 항목에 대한 오염원별 전체 배출부하 또한 섬강에서 가장 높게 나타났으며, 토지계, 생활계, 축산계 오염원 순으로 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과를 통해 충주댐 하류 남한강 본류 갈수기 수질을 효율적으로 개선하기 위해서는 섬강을 중점적으로 점오염원 관리뿐만 아니라, 기저비점을 통합적으로 관리하기 위한 대책 마련이 필요할 것으로 사료된다.

주제어 : 갈수기, 수질오염, 오염부하 특성, 수질관리

1. 서론

한강수계에는 팔당호를 비롯한 주요 상수원들이 위치하고 있으나, 최근 질소와 인 등 영양염류의 과다한 유입으로 조류 및 기타 수질오염문제가 빈번히 발생하고 있다.^{1,2)} 이에 정부는 한강수계를 대상으로 2013년부터 BOD₅, T-P를 대상물질로 정하여 목표수질 한도에서 오염물질 배출량을 총체적으로 관리하는 수질오염총량관리제를 시행하고 있다.³⁾ 그러나 매년 봄철 갈수기에 팔당호에서의 부영양화 및 조류발생 문제는 여전히 호전되지 못하고 있다.⁴⁾ 팔당호로 유입되는 북한강, 남한강, 경안천 중 남한강에서 발생하는 오염부하량은 다른 하천에 비해 상대적으로 크기 때문에 팔당호 수질에 가장 큰 영향을 미치고 있다.⁵⁾ 특히 충주댐 하

류에 위치한 남한강 본류에서는 최근 지속되는 가뭄으로 인한 유입하천 유량 감소와 오염물질 유입량 증가 등 수질 영향 요인이 복합적으로 작용하면서 갈수기 수질오염이 증가하고 있다.⁶⁾ 또한 가뭄은 기후변화가 심화됨에 따라 더욱 극심해질 것으로 전망되고 있다.⁷⁾ 이에 갈수기 수질악화에 대비하여 남한강 본류의 갈수기 수질오염 관리 대책이 필요한 실정이다.

우리나라는 강우 특성상 강우의 영향이 큰 시기에는 직접 유출에 의한 오염물질 유입이 상대적으로 크지만 강우의 영향이 적은 건기시 대부분 오염물질은 점오염원과 기저유출에 의해 유입된다.⁸⁾ 특히 갈수기는 가뭄으로 인해 하천의 유량이 가장 적어지는 시기로 Fig. 1과 같이 전체 1년 365일 중 대부분을 차지하고 있으며, 소량의 오염물질 유입만으로도

[†] Corresponding author E-mail: kimjg23@gmail.com Tel: 033-241-6468 Fax: 033-259-5560

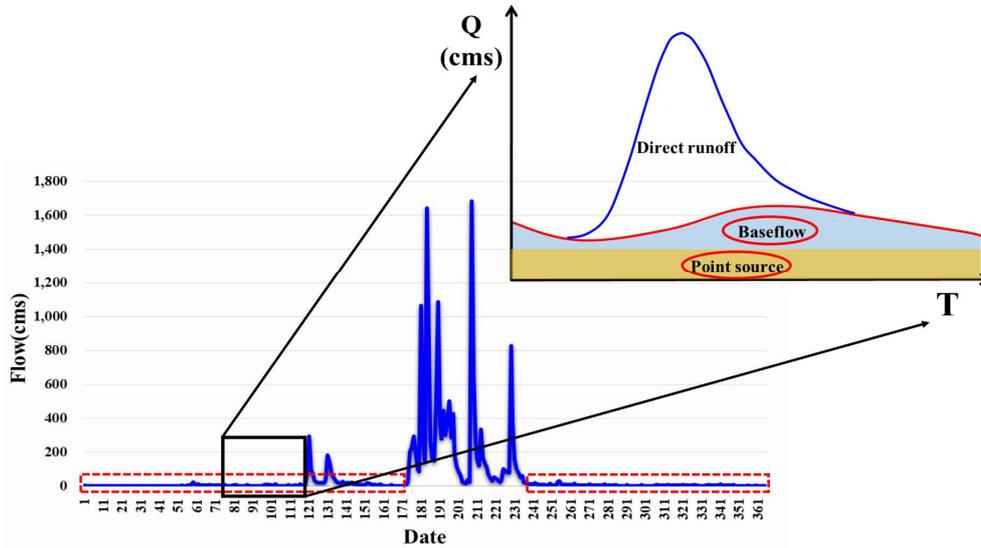


Fig. 1. Hydrograph separation of streams during dry season.

수질이 악화될 수 있다. 충주댐 하류 남한강 유입하천에는 비점오염원뿐만 아니라, 도시화와 인구밀집 현상으로 점오염원 등 다양한 오염원이 고밀도로 분포하고 있다.⁹⁾ 이러한 여건에서 각 유입하천으로부터 점오염원 및 기저유출에 의해 배출되는 각종 오염물질들이 남한강 본류 구간에 축적된다면 갈수기 수질오염은 더욱 악화될 수 있다. 갈수기 수질오염은 상류댐의 인위적인 수문조작을 통해 갈수기 유량을 확보함으로써 개선될 수 있다.¹⁰⁾ 그러나 이는 공급 유량의 양적인 한계가 있어 근본적인 해결책으로 보기에 어려움이 있다.⁹⁾ 하천 수질은 근본적으로 하천에 유입되는 오염물질의 양과 종류에 의해 결정된다. 따라서 남한강 본류 주변으로부터 배출되는 오염물질을 파악하고 차단하는 것이 남한강 본류 갈수기 수질오염 관리에 있어서 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 우선적으로 본류 하천환경의 근원이 되는 주요 유입하천을 대상으로 갈수기 오염부하 특성 및 남한강 본류 기여율에 대한 체계적인 분석이 필요하다. 이를 통해 본류 하천 수질의 오염기여도가 높은 우심하천 선별과 주요 오염원 파악이 가능하여 남한강 본류 갈수기 수질오염 관리를 위한 합리적이고 효과적인 정책 및 수질 개선 방안이 수립될 수 있다. 그동안 우리나라에서는 유역 내 비점오염 관리의 중요성에 따라 강우시 유출 및 오염부하 특성 분석에 관한 연구는 다수 진행되어왔다.¹¹⁻¹³⁾ 그러나 아직까지 갈수기 수질오염을 관리하고자 갈수기 수질오염 원인과 현황을 정량적으로 파악하고 오염부하 특성 분석을 위해 정밀조사를 수행한 연구는 미흡한 실정이다. 앞서 언급하였듯이 충주댐 하류 남한강 본류 갈수기 수질오염을 효율적으로 관리하기 위한 정책 및 방안이 수립되기 위해서는 우선적으로 주요 유입하천에 대한 정밀조사를 통한 우심하천 선별, 오염원 파악 등에 대한 기초자료 확보가 매우 중요하다.

이에 본 연구의 목적은 충주댐 하류 남한강 주요 유입하천을 대상으로 갈수기 오염부하 특성 및 남한강 본류 기여

율 분석을 통해 중점관리가 필요한 우심하천 및 주요 오염원을 선별하는 것이다. 본 연구의 결과는 향후 충주댐 하류 남한강 본류 갈수기 수질오염 관리 및 개선을 위한 관련 연구에 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

본 연구에서는 충주댐 하류 남한강 본류로 유입되는 주요 하천의 갈수기 오염부하 특성과 남한강 본류에 대한 기여율을 분석하기 위해서 섬강, 청미천, 양화천, 복하천을 연구대상하천으로 선정하였다(Fig. 2). 각 하천 말단을 기준으로 섬강은 유역면적이 1,491 km²이고 입야 비율이 74.0%로 전

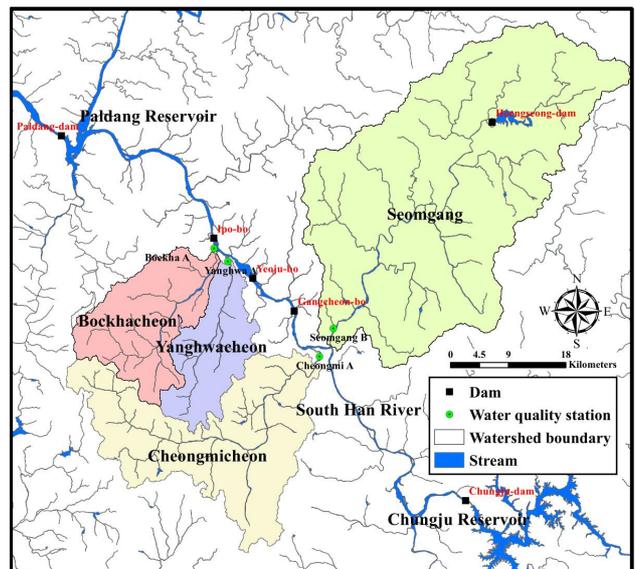


Fig. 2. Map of main streams flowing into South Han River.

Table 1. Characteristics of land use in the main streams (unit: km², %)

Stream	Urban	Agriculture	Forest	Bare ground	Water	Etc.	Total
S.G.	59.6 (4.0)	227.6 (15.2)	1,103.3 (74.0)	25.3 (1.7)	20.9 (1.4)	55.2 (3.7)	1,491 (100)
C.C.	40.4 (6.8)	207.3 (34.9)	251.3 (42.3)	16.0 (2.7)	9.5 (1.6)	69.5 (11.7)	594 (100)
Y.C.	16.5 (9.1)	85.4 (47.2)	43.1 (23.8)	5.6 (3.1)	1.6 (0.9)	28.8 (15.6)	181 (100)
B.C.	31.8 (10.4)	100.7 (32.9)	113.8 (37.2)	15.3 (5.0)	2.8 (0.9)	41.6 (13.6)	306 (100)

*S.G.: Seomgang, C.C.: Cheongmicheon, Y.C.: Yanghwacheon, B.C.: Bockhacheon

형적인 산지 유역 특성을 보이고 있다. 청미천, 양화천, 북하천은 유역면적이 594 km², 181 km², 306 km²이고 농경지 비율이 34.9%, 47.2%, 32.9%로 전형적인 농촌 유역 특성을 보이고 있다(Table 1). 각 하천 말단에는 수질오염총량제가 시행되고 있으며 환경부 총량측정 지점이 위치해 있다. 본 연구에서는 유입하천별 총량측정 지점에 대해 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서 제공하는 8일 유량 및 수질자료를 수집하여 갈수기 오염부하 특성 및 남한강 본류에 대한 기여율 분석에 활용하였다. 또한 평시 유량 및 수질조사를 위해 유입하천별 총량측정 지점을 모니터링 지점으로 선정하였으며, 양화천의 경우 유량 측정이 용이하다고 판단되는 지점을 고려하여 말단으로부터 상류 약 1.6 km 거리에 위치한 율곡교를 모니터링 지점으로 선정하였다.

2.2. 연구방법 개요도

본 연구에서는 연구대상하천으로 선정된 섬강, 청미천, 양화천, 북하천을 대상으로 갈수기 오염부하 특성 및 남한강 본류에 대한 기여율을 분석하고 이를 통해 충주댐 하류 남한강 본류 갈수기 수질오염의 효율적인 관리 및 개선을 위해 중점관리가 필요한 우심하천 및 주요 오염원을 선별하였다. 각 하천에서 기 측정된 과거 유량 및 수질자료는 부하지속곡선을 통한 갈수기 기준유량 조건에서의 오염부하 특성 및 기여율 분석에 사용하였다. 또한 평시 유량 및 수질 모니터링 수행으로 측정된 자료는 WAPLE (<http://www.EnvSys.co.kr/~waple2>) 시스템을 통한 점·기저비점 오염부하 특성 및 기여율 분석에 사용하였다. 그리고 전국오염원조사 자료는 오염원별 배출부하 특성 및 오염원별 기여율을

분석하는데 활용하였다. Fig. 3은 본 연구의 방법 개요도를 보여주고 있다.

2.3. 부하지속곡선을 통한 갈수기 오염부하 특성 및 기여율 분석

2.3.1. 유황곡선(Flow Duration Curve: FDC)

유입하천별 갈수기 오염부하 특성 및 기여율을 분석하기 위해서는 우선적으로 유황곡선 작성을 통해 갈수기 기준유량 조건을 파악하는 것이 필요하다. 유황곡선은 하천의 전체 유량 조건에 대한 유황변화 분석이 가능한 곡선이다. 이는 부하지속곡선과 함께 분석되어 하천의 장단기 유량변화 및 수질변화 요인규명 등을 파악하는데 주로 사용된다.¹⁴⁾ 유황곡선을 작성하기 위해서는 365일 연속적인 유량자료가 필요하지만 정기적인 실측 유량자료 또한 다년간 축적될 경우 하천의 전체 누적유량빈도를 대변할 수 있다.¹⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 유입하천별 총량측정 지점의 유량자료를 고유량에서 저유량 순으로 정렬하고 식 (1)을 이용하여 유황곡선을 작성하였다. 유황 구분은 누적 유량 크기에 따라 Table 2와

Table 2. 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: Cleland, 2003, USEPA, 2007

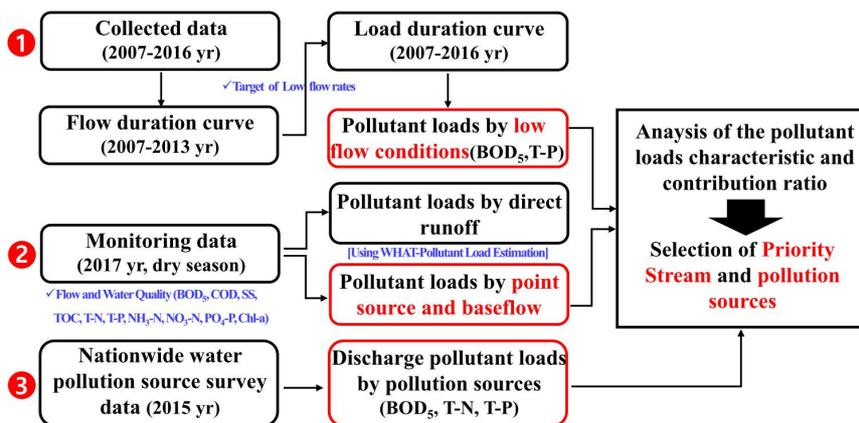


Fig. 3. Outline map of research method.

같이 0~10%(홍수기), 10~40%(풍수기), 40~60% (평수기), 60~90%는 (저수기), 90~100%(갈수기)로 구분하였다.^{16,17)} 본 연구에서는 유황곡선 작성 시 극심한 가뭄으로 하천유량이 급격히 감소한 기간을 제외한 2007년부터 2013년까지의 유량자료를 이용하였으며, 갈수기 조건의 90% 유량초과확률에 해당하는 유량 값을 갈수기 기준유량으로 설정하였다.

$$\text{Percent of Days Flow Exceeded (\%)} = \text{Rank/Number of data} * 100 \quad (1)$$

2.3.2. 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)

우리나라는 특정 유량조건(기준유량 조건)에서 목표수질을 달성·유지하기 위해 목표수질 한도에서 유역의 오염물질 배출량을 총체적으로 관리하는 수질오염총량관리제를 시행하고 있다. 그러나 총량계획만으로 유역의 특성, 강우량에 따른 유역의 배출특성 등이 고려된 수체의 손상 정도에 대한 평가가 어렵기 때문에 부하지속곡선의 활용이 증가하고 있다.^{18,19)} 부하지속곡선은 다양한 유량 조건의 수질자료를 바탕으로 오염부하량을 산정하여 유황 구간별 목표수질 대비 관측 부하량을 도식화 한 곡선이다. Kim 등¹⁹⁾은 Web 기반의 부하지속곡선 시스템을 개발하고 이를 이용하여 국내 유역 및 미국 유역을 대상으로 수질 평가 및 오염부하 특성을 분석한 바 있다. 부하지속곡선을 기준으로 위쪽에 위치한 부하량 자료는 목표수질이 초과된 경우를 나타내고, 아래쪽에 위치한 부하량 자료는 목표수질이 만족된 경우를 나타낸다.¹⁹⁾ Nevada 주 환경청 보고서²⁰⁾에 의하면 부하량 자료가 저수기 이하 범위에서 부하지속곡선 위쪽에 위치하였을 경우는 주로 점오염원, 평수기 이상 범위에서 부하지속곡선 위쪽에 위치하였을 경우는 주로 비점오염원 영향에 의해 목표수질이 초과된 것이라 볼 수 있다. 이처럼 부하지속곡선을 통해서 하천의 유량 조건에 따른 현재 오염부하 및 삭감부하 크기와 목표수질 초과 빈도 등 파악이 가능하여 하천 수질문제의 특성을 쉽게 규명할 수 있다.¹⁷⁾ 이에 본 연구에서는 유입하천별 2007년부터 2016년까지의 총량측정 지점의 유량자료와 총량관리 대상물질별(BOD₅, T-P) 기준 목표수질을 이용하여 부하지속곡선을 작성하고, 앞서

7년간 유량자료를 통해 파악한 갈수기 기준유량 조건에 대해서 오염부하 특성 및 기여율을 분석하였다. 부하지속곡선 작성 방법은 아래 식 (2)와 같다.

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

2.4. 모니터링 자료를 이용한 점·기저비점 오염부하 특성 및 기여율 분석

2.4.1. 유량 및 수질 모니터링 조사

본 연구에서는 유입하천별 모니터링 지점을 대상으로 유량 및 수질변화가 적은 기간을 고려하여 2017년 3월부터 11월까지 매월 2회 평시 유량 및 수질을 조사하였다. 하천 유량은 유속 면적법을 이용하여 측정하였다. 청미천, 양화천, 복하천에 대해 유량자료를 확보하기 위해 모니터링으로 측정된 유량과 인근 한강홍수통제소에서 운영하는 수위 관측소(삼합교, 울극교, 흥천대교)의 수위 자료를 이용하여 수위-유량 관계곡선을 도출하였다. 유량 환산시 수위-유량 관계곡선은 일정 수위 이하일 경우에만 이용하고, 수위 상승으로 유량 측정이 불가능한 경우에는 수위관측소 유량자료를 활용하였다. 심강 경우 유량자료를 확보하기 위해 하천 말단에 위치한 섬강교의 수위표 자료를 통해 수위-유량 관계곡선을 도출하였다. 수위 상승으로 유량 측정이 불가능한 경우에는 인근 수위관측소(문막교)에서 측정된 유량자료를 면적비를 고려하여 산정하였다. 수질조사 항목은 현장조사 항목(수온, DO, pH, 전기전도도, 탁도)을 포함하여 10개 항목(BOD₅, COD, SS, TOC, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, Chl-a)을 조사하였다. 수질시료 분석은 7개(BOD₅, COD, SS, TOC, T-N, T-P, Chl-a) 항목을 위주로 수질오염공정시험법²¹⁾과 Standard method²²⁾에 준하여 분석하였다.

2.4.2. WAPLE (WHAT-Pollutant Load Estimation) 시스템

갈수기에 하천 유량은 하수처리장 방류량과 같은 점오염원과 기저유출량으로 구성된다. 점오염원 방류량은 연중 일정하게 배출되며 기저유출 또한 장시간에 걸쳐 농경지 토양 내 영양염류와 함께 하천으로 유출된다. 특히 충주댐 하

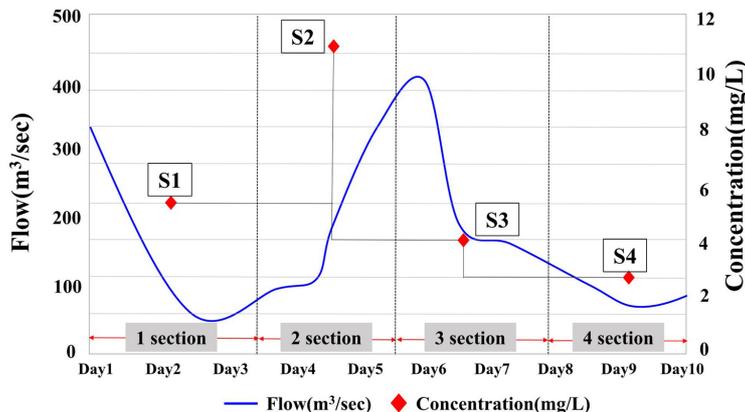


Fig. 4. Estimation of pollutant loading using the NI method.

류 남한강 유입하천에는 점오염원과 축산단지 및 농경지 등 비점오염원이 산재되어 있기 때문에 점오염원과 기저유출에 의해 발생하는 오염부하는 남한강 본류 갈수기 수질에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 유입하천별 모니터링 조사로 측정된 유량 및 수질자료와 WAPLE 시스템을 이용하여 유입하천별 점오염원 및 기저유출에 의한 오염부하량을 산정하고 이를 통해 남한강 본류 기여율을 분석하였다. WAPLE 시스템은 Eckhardt filter 방법과 오염부하 산정 방법인 NI (Numeric Integration) 방법을 활용하여 직접 및 기저유출 분리뿐만 아니라 유출사상에 따른 오염부하를 정량적으로 평가할 수 있다.⁸⁾ WAPLE 시스템에 활용된 NI 방법은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. NI 방법을 이용하여 오염부하 산정 시 각 구간은 실측 수질농도 샘플의 이전 및 이후 기간 사이 중간지점을 기준으로 구분되며 해당 구간의 실측 수질농도가 전체의 대표농도로 가정되어 오염부하가 산정된다(Fig. 4). 여기서 c_i 는 i 번째 샘플의 농도이고 q_i 는 i 번째 유량이다. 그리고 t_i 는 i 번째 샘플로서 표현되는 시간 구간으로 $0.5(t_{i+1} - t_{i-1})$ 이다.

$$\text{Load} = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \quad (3)$$

2.5. 전국오염원조사 자료를 통한 배출부하 특성 및 오염원 기여율 분석

일반적으로 본류로 유입되는 하천은 다양한 오염원이 인접한 경우가 많고 상대적으로 유량이 부족하기 때문에 오염원에 영향을 크게 받는다. 또한 각 유입하천에서의 수질

은 유역 내 편중된 오염원의 종류와 규모에 따라 다르게 나타날 수 있다. 따라서 남한강 본류 갈수기 수질오염을 효율적으로 관리하고 개선하기 위해서는 각 유입하천으로부터 배출되는 주요 오염원 파악뿐만 아니라, 오염원별 남한강 본류 기여율 분석을 통한 중점관리 오염원 선별이 중요하다. 이에 본 연구에서는 2015년 국립환경과학원 전국오염원조사 자료를 바탕으로 각 유입하천에 대해 오염원별 배출부하량을 산정하고 이를 통해 오염원별 남한강 본류 기여율을 분석하였다. 오염원은 국립환경과학원의 수질오염총량관리기술지침²³⁾에서 제시한 오염원을 생활계, 축산계, 토지계 등 유형별로 구분하였으며, 오염원별 배출부하량은 오염원별 부하량 산정방법과 원단위를 적용하여 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부하지속곡선을 통한 갈수기 오염부하 특성 및 기여율 분석 결과

본 연구에서는 유입하천별 갈수기 기준유량 조건을 파악하기 위해 총량측정 지점의 과거 7년치 유량자료를 이용하여 유황곡선을 작성하였다. 유입하천별 갈수기 기준유량은 섬강 6.33 m³/sec, 청미천 1.85 m³/sec, 양화천 0.96 m³/sec, 복하천 1.98 m³/sec로 분석됐다(Fig. 5). 일반적으로 유역면적은 유량 크기에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 유역면적이 가장 큰 섬강에서 갈수기 기준유량이 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 유입하천별 2007년부터 2016년까지 총량측정 지점의 과거 10년치

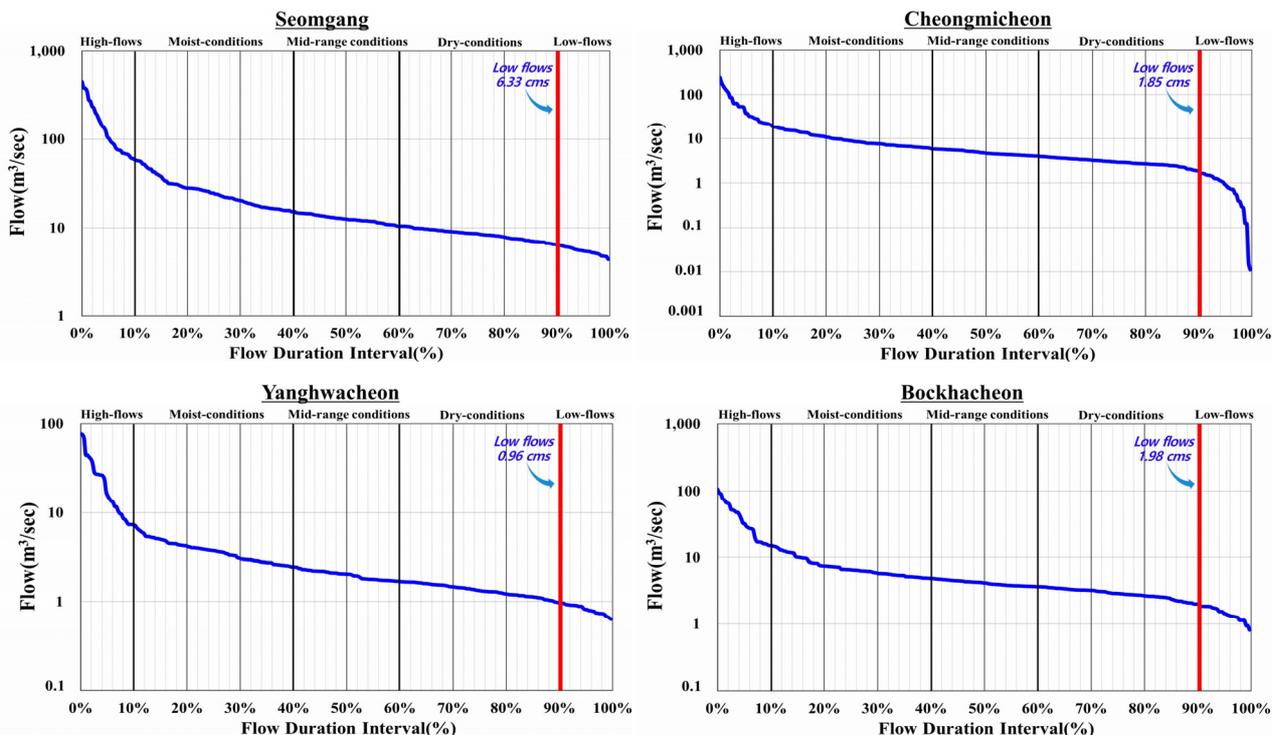


Fig. 5. Flow duration interval of main streams flowing into South Han River.

유량자료와 총량관리 대상물질별(BOD₅, T-P) 기준 목표수질을 이용하여 Fig. 6과 같이 부하지속곡선을 작성하고 앞서 산정된 갈수기 기준유량을 바탕으로 갈수기 오염부하 및 초과율과 남한강 본류 기여율을 분석하였다. Table 3은 유입하천별 갈수기 오염부하 및 초과율 분석 결과를 보여주고

있다. 갈수기 오염부하량은 섬강에서 BOD₅ 852.0 kg/day, T-P 59.0 kg/day로 가장 높게 나타났으며, 목표수질 대비 초과부하량은 북하천에서 BOD₅ 370.8 kg/day, 섬강에서 T-P 27.4 kg/day로 가장 높게 나타났다. 섬강은 유역 내 환경기초시설이 가장 많이 밀집되어 있으며, 농경지 면적 및 유출

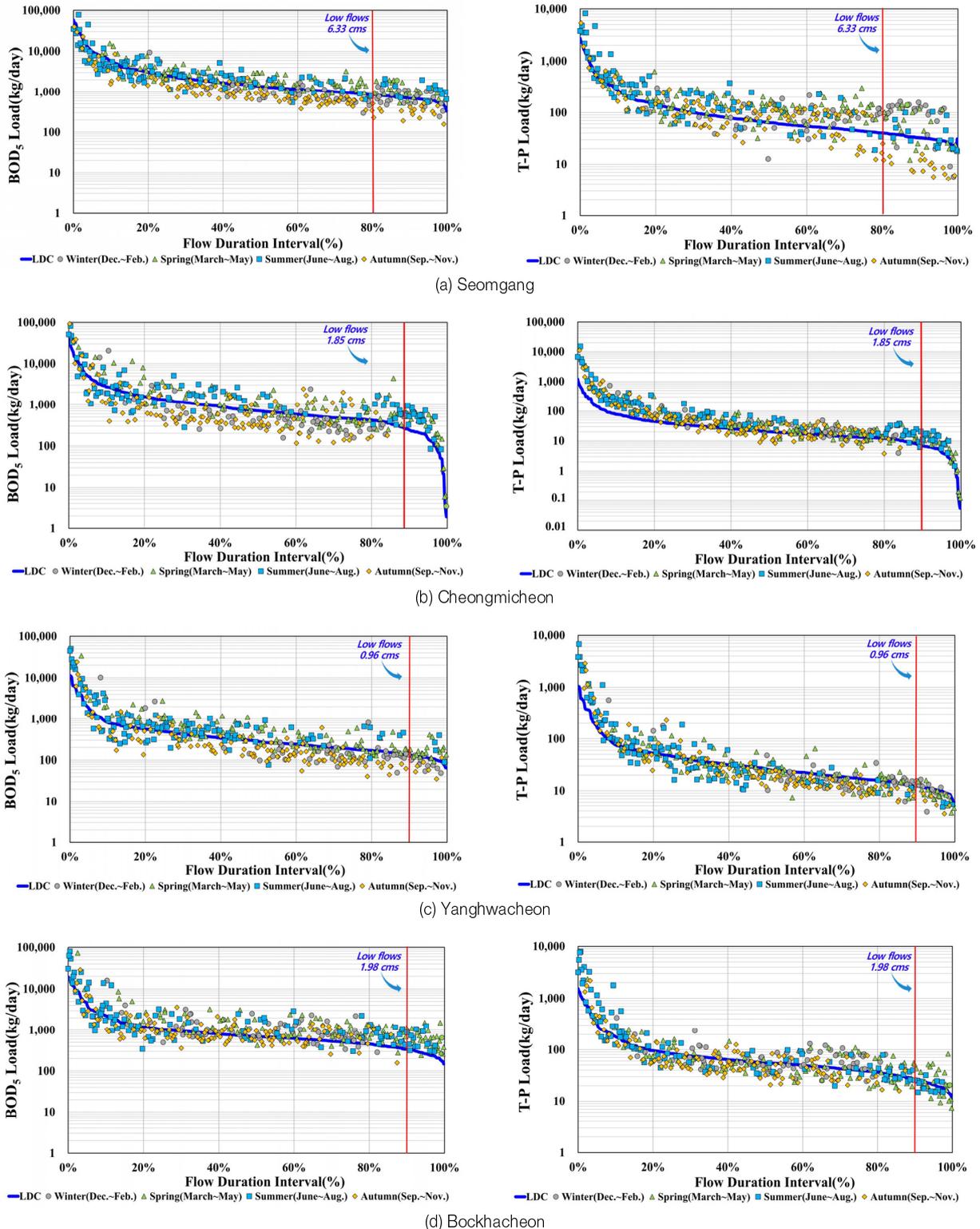


Fig. 6. Load duration curves of main streams flowing into South Han River.

Table 3. The pollutant loads at low flow conditions (unit: kg/day)

Stream	Pollutant loads (kg/day)						Number of data	Number of excess data	Excess ratio (%)			
	Observed		Target		Excess				BOD5		TP	
	BOD5	TP	BOD5	TP	BOD5	TP			BOD5	TP	BOD5	TP
S.G.	852.0	59.0	673.5	31.6	178.5	27.4	78	78	44	41	56.4	52.6
C.C.	420.9	9.9	176.2	5.0	244.7	4.9	57	57	56	54	98.2	94.7
Y.C.	147.8	9.1	115.3	10.7	32.6	0.0	55	55	29	13	52.7	23.6
B.C.	640.0	25.9	269.1	21.5	370.8	4.4	49	49	47	22	95.9	44.9

*S.G.: Seomgang, C.C.: Cheongmicheon, Y.C.: Yanghwacheon, B.C.: Bockhacheon

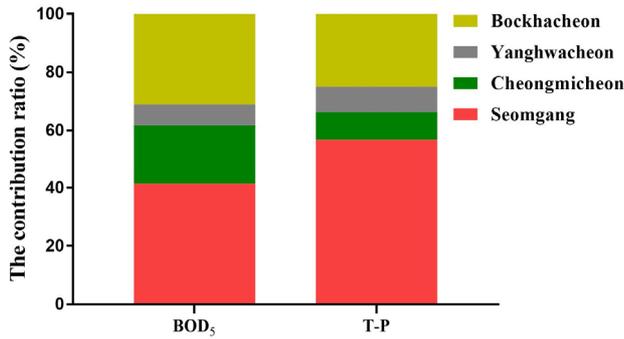


Fig. 7. The contribution ratio of pollutant loads to the South Han River.

량이 상대적으로 크기 때문에 시가지와 농업지역에서 발생하는 오염부하량이 가장 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 남한강 본류 기여율은 섬강에서 BOD₅ 41.3%, T-P 56.8%로 가장 높게 나타났으며, 복하천, 청미천, 양화천 순으로 높게 나타났다(Fig. 7). 유입하천별 목표수질 대비 갈수기 오염부하 초과율은 BOD₅ 52.7~98.2%, T-P 23.6~94.7% 범위로 나타났다. 초과율 50% 기준으로 갈수기 목표수질 달성 여부를 평가하였을 때,¹⁵⁾ 대체로 유입하천은 목표수질을 달성하지 못하는 것으로 나타났다. 유입하천별 초과된 부하량 자료를 계절별로 분석한 결과, 초과된 부하량 자료는 일부 하천에서 겨울(12~2월)에도 많이 해당되는 것으로 나타났지만 전반적으로 봄(3~5월)에 가장 많이 해당되는 것으로 나

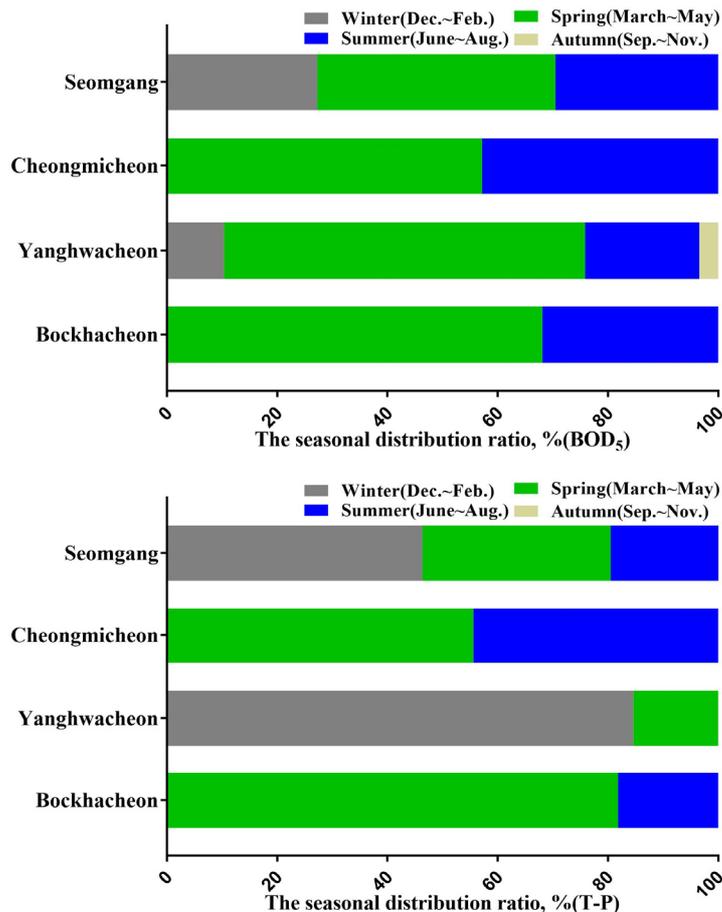


Fig. 8. The seasonal distribution ratio of excess pollutant loads data at low flow conditions.

타났다(Fig. 8). 이는 봄철 가뭄으로 인한 하천 유량의 감소와 점오염원 방류량의 복합적인 영향에 기인한 것으로 판단되며, 동절기 토양 내 결빙되었던 비점오염물질들이 해빙되면서 기저유출과 함께 하천으로 유입되어 수질에 큰 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

3.2. 모니터링 자료를 이용한 점·기저비점 오염부하 특성 및 기여율 분석 결과

본 연구에서는 유입하천별 모니터링 조사로 측정된 유량 및 수질자료와 유출사상에 따른 정량적인 오염부하 산정이 가능한 WAPLE 시스템을 이용하여 점오염원 및 기저유출에 의한 점·기저비점 오염부하량을 산정하고 이를 통해 남한강 본류 기여율을 분석하였다. 분석 결과, Table 4에서 볼 수 있듯이 점·기저비점 오염부하량은 모든 수질항목에 대해 섬강에서 가장 높게 나타났으며, 남한강 본류 기여율은 BOD₅ 52.8%, COD 52.1%, TOC 53.0%, SS 41.3%, T-N 47.7%, T-P 30.0%, Chl-a 47.8%로 나타났다(Fig. 9). 청미천에서의 점·기저비점 오염부하량 및 남한강 본류 기여율 또한 양화천,

북하천에 비해 대체로 높게 나타났다. 특히 섬강, 청미천은 생분해성 유기물질의 지표가 되는 BOD₅ 뿐만 아니라 난분해성, 고 난분해성 물질에 해당하는 COD, TOC 항목에 대해서도 남한강 본류로의 높은 기여율을 보이는 것으로 나타났다. 섬강, 청미천 유역에는 축산계 오염원이 다른 하천에 비해 고밀도로 산재되어 있으며, 축산폐수의 경우 고농도의 유기성 폐수이기 때문에 난분해성 유기물질을 많이 포함하고 있다.²⁴⁾ 따라서 강우의 영향이 적은 갈수기에는 축산폐수와 농경지에 과잉으로 축적되었던 가축분뇨 퇴비·액비가 기저유출과 함께 하천으로 유입되면서 오염부하 기여율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 반면 T-N 항목에 대한 점·기저비점 오염부하량은 섬강 다음으로 북하천에서 높게 나타났는데 이는 북하천 중·하류에 위치한 대규모 하·폐수처리시설에서 배출되는 방류량이 하천 유량의 상당 부분을 차지하고 있기에²⁵⁾ 점오염원 영향이 매우 큰 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

3.3. 전국오염원조사 자료를 통한 배출부하 특성 및 기여율 분석 결과

본 연구에서는 유입하천별 주요 오염원을 파악하고 오염원별 남한강 본류 기여율을 분석하고자 2015년 국립환경과학원 전국오염원조사 자료를 바탕으로 BOD₅, T-N, T-P에 대한 배출부하량을 산정하였다(Table 5). BOD₅, T-N에 대한 배출부하량은 섬강에서 17,198.1 kg/day, 10,365.6 kg/day로 가장 많이 배출되는 것으로 나타났으며, 오염원별 배출부하량은 토지계, 축산계, 생활계 순으로 높은 비중을 차지하는 것으로 분석됐다. 반면 T-P에 대한 배출부하량은 청미천에서 893.4 kg/day로 가장 많이 배출되는 것으로 나타났으며, 섬강 또한 851.5 kg/day로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 청미천 경우 T-P에 대한 배출부하량 중 축산계 오염원 비중이 64.4%로 월등히 높게 나타났다. 또한 본 연구에서는 오염원별 산정된 배출부하량을 통해 남한강 본류 기여율을 분석하였다(Fig. 10). 분석 결과, 생활계와 토지계 오염원 기여율은 섬강에서 46.6%, 44.9%로 가장 높게 나타났다. 섬강은 유역 내 인구 비율이 높고 하수미처리 인구 또한 상대적으로 높기 때문에 생활계 오염원 기여율이 높

Table 4. The pollutant loads by point source and baseflow (unit: kg, %)

Water quality	Stream				Total
	Seomgang	Cheongmicheon	Yanghwacheon	Bockhacheon	
BOD ₅	989,485 (52.8)	388,898 (20.8)	161,488 (8.6)	332,408 (17.8)	1,872,279 (100)
COD	2,801,978 (52.1)	1,215,272 (22.6)	570,020 (10.6)	792,370 (14.7)	5,379,640 (100)
TOC	1,751,648 (53.0)	641,257 (19.4)	400,784 (12.1)	514,003 (15.5)	3,307,692 (100)
SS	11,759,308 (41.3)	9,580,984 (33.7)	4,283,277 (15.1)	2,831,404 (10.0)	28,454,973 (100)
T-N	1,479,611 (47.7)	609,849 (19.7)	288,587 (9.3)	721,732 (23.3)	3,099,779 (100)
T-P	25,255 (30.0)	24,888 (29.6)	16,685 (19.9)	17,221 (20.5)	84,049 (100)
Chl-a	1,197,620 (47.8)	609,943 (24.4)	235,577 (9.4)	459,986 (18.4)	2,503,126 (100)

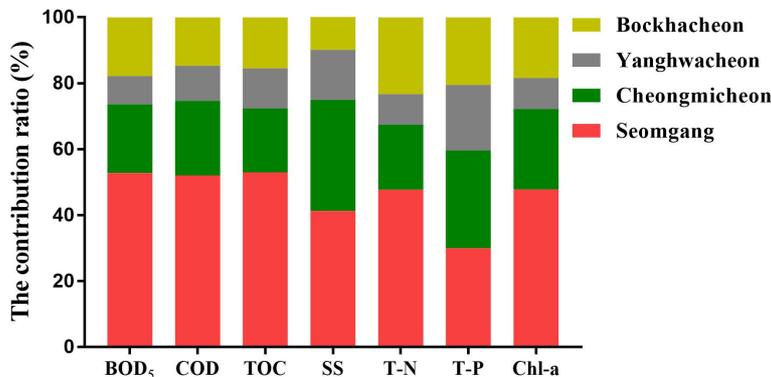


Fig. 9. The contribution ratio of pollutant loads by point source and baseflow flowing into South Han River.

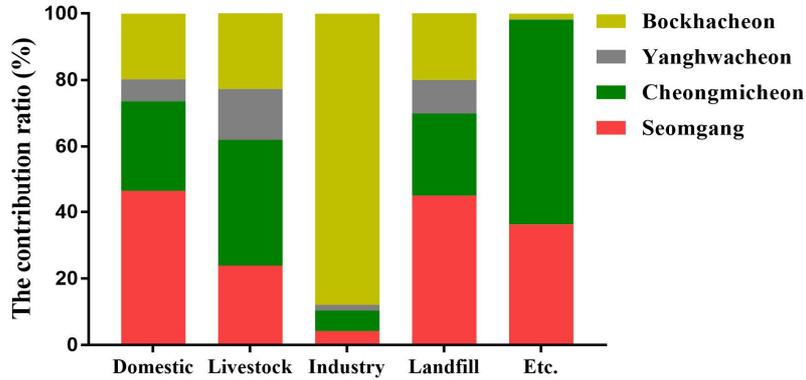


Fig. 10. The contribution ratio of pollutant loads by pollution sources flowing into the South Han River.

Table 5. The pollutant loads by point source and baseflow (unit: kg/day, %)

Water quality	Pollution source	Stream			
		Seomgang	Cheongmicheon	Yanghwacheon	Bockhacheon
BOD ₅	Domestic	2467.2 (14.4)	1322.6 (8.9)	367.3 (6.4)	957.2 (9.1)
	Livestock	4934.8 (28.7)	7664.6 (51.6)	2937.6 (51.5)	4514.2 (42.7)
	Industry	40.8 (0.2)	36.6 (0.3)	14.6 (0.3)	200.1 (1.9)
	Landfill	9682.3 (56.3)	5702.0 (38.4)	2385.0 (41.8)	4902.5 (46.3)
	Etc.	73.0 (0.4)	124.9 (0.8)	0.2 (0.0)	1.0 (0.0)
	Total	17198.1 (100)	14850.7 (100)	5704.7 (100)	10575.0 (100)
T-N	Domestic	1771.7 (17.1)	1131.7 (13.1)	222.8 (6.9)	829.9 (11.9)
	Livestock	2751.1 (26.5)	4482.1 (52.0)	1909.0 (58.8)	2711.3 (39.0)
	Industry	32.5 (0.3)	73.0 (0.8)	14.6 (0.5)	1368.7 (19.7)
	Landfill	5795.8 (55.9)	2910.8 (33.8)	1098.3 (33.8)	2038.0 (29.3)
	Etc.	14.5 (0.1)	24.5 (0.3)	0.0 (0.0)	3.3 (0.1)
	Total	10365.6 (100)	8622.1 (100)	3244.7 (100)	6951.2 (100)
T-P	Domestic	101.5 (11.9)	60.7 (6.8)	23.2 (6.1)	52.4 (8.0)
	Livestock	296.5 (34.8)	575.2 (64.4)	259.1 (67.9)	385.6 (59.0)
	Industry	3.6 (0.4)	3.1 (0.4)	2.2 (0.6)	31.2 (4.8)
	Landfill	446.0 (52.4)	247.7 (27.7)	97.1 (25.4)	184.3 (28.2)
	Etc.	3.9 (0.5)	6.7 (0.7)	0.0 (0)	0.0 (0.0)
	Total	851.5 (100)	893.4 (100)	381.6 (100)	653.5 (100)

게 나타난 것으로 판단된다. 또한 섬강은 다른 하천에 비해 유역 내 농경지 면적이 가장 크기 때문에 강우시 농경지에서 배출되는 토사와, 질소나 인과 같은 비점오염물질들이 상대적으로 수계에 많이 유입되기 때문에 토지계 오염원 기여율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 축산계 오염원 기여율은 유입하천 중 대규모 축산단지 및 축산농가가 가장 많이 산재되어 있는 청미천에서 38.1%로 가장 높게 나타났으며, 섬강, 북하천, 양화천 순으로 높게 나타났다. 산업계 오염원 기여율은 다수의 환경기초시설과 1종 사업장이 산재되어 있는 북하천에서 87.9%로 월등히 높게 나타났다. 본 연구 결과에 의하면 유입하천별 중점적으로 관리해야 할 오염원은 오염원 분포 특성에 따라 상이하게 나타났지만 충주댐 하류 남한강 갈수기 수질을 효율적으로 개선하기 위해

서는 전체 배출부하가 월등히 높은 섬강을 대상으로 토지계, 생활계, 축산계 오염원에 대한 중점관리가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 충주댐 하류 남한강 주요 유입하천(섬강, 청미천, 양화천, 북하천)을 대상으로 기 측정된 과거 유량 및 수질자료와 평시 모니터링을 통해 측정된 유량 및 수질자료 그리고 전국오염원조사 자료를 바탕으로 갈수기 오염부하 특성 및 남한강 본류 기여율을 분석하였다. 이를 통해 남한강 본류 갈수기 수질오염 관리 및 개선을 위해 중점관리가 필요한 유입하천 및 주요 오염원을 선별하여 충주댐 하류 남한강 본류 갈수기 수질오염 관리 및 개선을 위한 관련 연구에 활용될 기초자료를 구축하고자 하였다. 본 연구에서 도출된 주요 결과 및 결론은 다음과 같다.

1) 기 측정된 과거 유량 및 수질자료와 부하지속곡선(LDC)을 이용하여 유입하천별 갈수기 기준유량 조건에서의 오염부하 특성 및 기여율을 분석한 결과, 섬강에서 BOD₅ 852.0 kg/day (41.3%), T-P 59.0 kg/day (56.8%)로 가장 높게 나타났으며, 북하천, 청미천, 양화천 순으로 높게 나타났다. 목표수질 대비 초과율은 BOD₅ 52.7~98.2%, T-P 23.6~94.7% 범위로 대체로 모든 유입하천에서 목표수질을 달성하지 못하는 것으로 나타났으며, 초과된 오염부하량 자료는 봄, 겨울(12~5월)에 많이 해당되는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 부하지속곡선(LDC) 작성 시 총량 기준유량 조건인 저수량 및 평수량 기반으로 수립된 목표수질을 이용하였기에 점오염원의 큰 영향을 받는 갈수기 조건에서의 목표수질 달성 평가는 다소 불확실성을 내포할 수 있다. 따라서 향후 추가적인 연구를 통해 검토되어야 할 필요성이 있다고 판단된다.

2) 평시 모니터링으로 측정된 유량 및 수질자료와 WAPLE 시스템을 이용하여 유입하천별 점·기저비점 오염부하 특성 및 기여율을 분석한 결과, 섬강에서 모든 수질항목에 대한

점 · 기저비점 오염부하량이 가장 높게 나타났으며, 남한강 본류 기여율은 BOD₅ 52.8%, COD 52.1%, TOC 53.0%, SS 41.3%, T-N 47.7%, T-P 30.0%, Chl-a 47.8%로 나타났다. 이를 통해 섬강에서 배출되는 생분해성 유기물질 오염부하 뿐만 아니라 난분해성 유기물질 오염부하 또한 남한강 본류에서의 조류 증식 및 부영양화 발생에 큰 영향을 미치는 것을 파악할 수 있었다.

3) 전국오염원조사 자료를 바탕으로 산정된 오염원별 배출부하량을 통해 주요 오염원을 파악하고 오염원별 남한강 본류 기여율을 분석한 결과, 수질항목에 대한 전체 배출부하량은 섬강에서 가장 높게 나타났으며, 토지계, 축산계, 생활계 오염원 순으로 가장 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 유입하천별 오염원에 대한 남한강 본류 기여율은 생활계, 토지계 경우 섬강에서 46.6%, 44.9%, 축산계 경우 청미천에서 38.1%, 산업계 경우 북하천에서 87.9%로 가장 높게 나타났다.

최종적으로 본 연구의 종합적인 결과에 의해 유입하천 중 섬강에서 배출되는 오염부하가 충주댐 하류 남한강 본류 갈수기 수질에 큰 영향을 미치는 것으로 분석됐다. 따라서 남한강 본류 갈수기 수질을 효율적으로 개선하기 위해서는 섬강을 대상으로 하수처리장 확충 및 방류수 수질 개선 등과 같은 점오염원 관리뿐만 아니라, 기저유출로 인한 기저 비점오염을 통합적으로 관리하기 위한 기저 BMPs, 가축분뇨 관리 강화, 갈수기 유량확보 방안의 대책 등이 중점적으로 강구되어야 할 것으로 판단된다.

향후 본 연구의 결과는 극한 가뭄이 지속되는 상황을 고려한다면, 충주댐 하류 남한강 본류갈수기 수질오염 개선에 활용될 실효성 있는 대책 및 유역관리 정책 수립에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 또한 남한강 본류의 수질오염 우심하천과 오염원 기여순위 파악을 통해 남한강 본류의 근본적인 갈수기 수질오염 개선을 위한 합리적이고 체계적인 관리 시행이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한강수계관리위원회의 환경기초조사사업(충주댐 하류 남한강 유입하천에 대한 갈수기 수질오염특성 및 오염저감방안 연구)의 지원으로 수행되었음.

KSEE

References

- Deok, D. H., Kim, J. S. and Jung Y.H., "Management Plan for the Control of Eutrophication in the Paldang Lake," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **23**(6), 693~699(2009).
- Yim, H. S., "Institutional Approach to Water Quality Policies of South Korea Focusing on the Han-river Basin," *Public Policy Rev.*, **31**(2), 103~128(2017).
- Ministry of Environment, Act on the Improvement of Water Quality and Support for Residents of the Riverhead of the Han River System, Act No. 10335(2010).
- Kong, D. S., "Water Quality Modeling of the Eutrophic Transition Zone in a River-Type Reservoir Paldang," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **30**(4), 429~440(2014).
- Lee, H. J., Kong, D. S., Kim, S. H., Shin, K. S., Park, J. H., Kim, B. I., Kim, S. M., Jang, S. H. and Cheon, S. U., "Investigation on Water Quality Variation Characteristics during Dry Season in Namhan River Drainage Basin," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **23**(6), 889~896(2007).
- Han-River Basin Environmental Office, Water Environmental Management Plans for the Middle Network of the Downstream of Namhan-river(2013-2015).
- Kim, Y. W. and Shim, C. S., "Towards an Integrated Drought Monitoring with Multi satellite Data Products Over Korean Peninsular," *J. Korean Soc. Remote Sensing*, **33**(6-1), 993~1001(2017).
- Choi, Y. H., Kum, D. H., Ryu, J. C., Jung, Y. H., Kim, Y. S., Jeon, J. H., Kim, K. S. and Lim, K. J., "A study of total nitrogen pollutant load through baseflow analysis at the watershed," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **31**(1), 55~66(2015).
- Hwang, S. J., Kim, K. H., Park, C. H., Seo, W. B., Choi, B. G., Eum, H. S., Park, M. H., Noh, H. R., Sim, Y. B. and Shin, J. K., "Hydro-meteorological Effects on Water Quality Variability in Paldang Reservoir, Confluent Area of the South-Han River-North-Han River-Gyeongang Stream, Korea," *J. Korean Soc. Limnol.*, **49**(4), 354~374(2016).
- Kim, Y. K., Choi, G. W., Ham, M. S. and Kim, N. W., "The Analysis of Potential Discharge by Dam in Han River Basin at Dry Season," *J. Korean Soc. Water Resour. Assoc.*, **41**(11), 1143~1152(2008).
- Yang, H. K., "Runoff Characteristics of Non-Point Source Pollutants in Storm Event: Case Study on the Upstream and Downstream of Kokseong River, Korea," *J. Korean Soc. Geograph.*, **41**(4), 418~434(2006).
- Won, C. H., Shin, M. H., Shin, H. J., Lim, K. J. and Choi, J. D., "Application of BMP for Reduction of Runoff and NPS Pollutions," *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **55**(5), 1~7(2013).
- Choi, D. H., Jeon, J. H. and Kim, T. D., "Delivery Analysis of Nonpoint Source Pollutants at Imha Lake Basin : SS Load Characteristics," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **15**(2), 109~116(2015).
- Vogel, R. M. and Fennessey, N. M., "Flow-Duration Curves I: New Interpretation and Confidence Intervals," *J. Water Resour. Planning and Manage.*, **120**(4), 485~504(1994).
- Hwang, H. S., Park, B. Y., Kim, Y. S., Park, K. J., Cheon, S. U. and Lee, S. J., "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(2011).
- Cleland, B. R., "TMDL Development from the "bottom up"-Part III: Duration Curves and Wet-Weather Assessments," Proceedings of the Water Environment Federation, National

- TMDL Science and Policy 2003, Water Environment Federation, pp. 1740~1766(2003).
17. United States Environmental protection Agency, "An Approach for Using Load Duration Curves in the Development of TMDLs," 841-B-07-006, United States Environmental Protection Agency, 1-68(2007).
 18. Hwang, H. S., Yoon, C. G. and Kim, J. T., "Application Load Duration Curve for evaluation of impaired watershed at TMDL unit watershed in Korea," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **26**(6), 903~909(2010).
 19. Kim, J. G., Engel, B. A., Park, Y. S., Theller, L., Chaubey, I., Kong, D. S. and Lim, K. J., "Development of Web-based Load Duration Curve System for Analysis of Total Maximum Daily Load and Water Quality Characteristics in a Waterbody," *J. Environ. Manage.*, **97**, 46~55(2012).
 20. Nevada, Load Duration Curve Methodology for Assessment and TMDL Development, Nevada Division of Environmental Protection(2003).
 21. Ministry of Environment, Standard methods of water sampling and analysis(2014).
 22. American Public Health Association, Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater 20th edition(1998).
 23. National Institute of Environmental Research, Technical Guidelines for TMDLs(2014).
 24. Cho, C. W., Kim, B. Y., Chae, S. C. and Chung, P. G., "Applicable Feasibility of Fenton Oxidation and Zeolite Ion Exchange Processes for Removal of Non-Biodegradable Matters and Ammonia in Livestock Wastewater," *J. Korean Soc. Water Quality*, **23**(5), 600~606(2007).
 25. Nam, W. K., Choi, I. W., Kim, Y. Y., Lim, H. S., Kim, M. J., Lim, C. K., Kim, S. H. and Kim, T. H., "A plan to improve bokha stream quality using water quality and pollution source analyses," *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **20**(3), 174~182(2017).