

## 서낙동강 유역 해반천의 수질 개선을 위한 비점오염관리대책 효과 분석

김예진<sup>\*</sup>

부산가톨릭대학교

## Assessment of the Non-point Source Pollution Control Strategies for Water Quality Improvement in the Haeban Stream of West Nakdong River Watershed

Yejin Kim<sup>\*</sup>

Catholic University of Pusan

(Received : 24 November 2023, Revised : 4 December 2023, Accepted : 4 December 2023)

### 요약

이 연구에서는 서낙동강을 구성하는 소유역 중 대지면적 비율이 크고 인구밀도가 높은 해반천 유역의 유출 및 수질을 모의하기 위한 HSPF(Hydrological Simulation Program-FORTRAN)모형을 개발하였다. 유역에서 발생하는 비점오염 부하량을 관리하기 위한 세 가지 시나리오가 개발되어 모형에 적용되었고, 오염부하량의 감소와 부하지속곡선에 대비한 수질 기준 초과율이 분석되었다. 시나리오는 비점오염의 발생을 줄이기 위한 도로 청소, 다양한 저영향 개발 기법을 고려한 유출 저감 조치, 그리고 강으로 들어가는 비점오염원을 완화하기 위한 유입 저감 조치로 구성되었다. 첫 번째 시나리오에서는 김해시의 도로 청소 차량 수와 같은 실제 조건이 고려되었으며, 두 번째와 세 번째 시나리오에서는 적용 가능한 토지 이용별 면적의 50%에 저영향 개발 기법을 적용하는 것으로 적용되었다. 모든 세 가지 조치를 적용한 결과, BOD 오염 물질 부하가 58.28%, T-N은 58.49%, T-P는 51.56% 감소할 수 있는 것으로 도출되었다. 또한, 5년간 누적된 수질 측정의 60번째 백분위수를 목표 수질로 설정하고 구축된 유량지속곡선에 의한 초과율 분석 결과, 결과적으로, BOD의 경우 조치 적용 전 41.57%의 초과율이 조치 후 16.32%로 감소하여, 초과율이 25.25% 감소하였다. T-N의 경우 조치 전 40.31%에서 조치 후 22.84%로, T-P의 경우 62.43%에서 27.22%로 감소하였다.

핵심용어 : HSPF 모형, 부하지속곡선, 비점오염원, 부하지속곡선

### Abstract

In this study, a HSPF model was developed to simulate runoff and water quality in the Haebancheon watershed, which has a high land area ratio and population density among the West Nakdong River watersheds. Various non-point source pollution control strategies were applied, and the reduction in pollutant loads and the exceedance rate of water quality standards were analyzed. The scenarios included basic road cleaning for reducing pollutant loads, runoff reduction measures considering extensive low-impact development techniques, and inflow reduction measures to mitigate non-point source pollution entering the river. In the first step, practical conditions such as the number of vehicles for road cleaning in Kimhae City were considered, while for the second and third steps, it was assumed that 50% of the applicable land use area was used to be applicable for the LID techniques. As a result of applying all three measures, it was analyzed that the BOD pollutant load could be reduced by 58.28%, T-N by 58.49%, and T-P by 51.56%. Furthermore, the 60th percentile of water quality measurements accumulated over 5 years was set as the target water quality, and a flow-duration curve was constructed. The exceedance rate of the flow-duration curve before and after applying non-point source pollution reduction measures was analyzed. As a result, for BOD, the exceedance rate decreased from 41.57% before applying the measures to 16.32% after, showing a 25.25% reduction in the exceedance rate. For T-N, the exceedance rate decreased significantly from 40.31% before the measures to 22.84% after, and for T-P, it decreased significantly from 62.43% to 27.22%.

Key words : Dam reservoir, Floodplain, Flooding frequency, Load duration curve

<sup>\*</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Catholic University of Pusan  
E-mail : [yjkim@cup.ac.kr](mailto:yjkim@cup.ac.kr)

• Yejin Kim Catholic University of Pusan / Associate professor ([yjkim@cup.ac.kr](mailto:yjkim@cup.ac.kr))

### 1. 서론

비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지 등 불특정 장소에서 강우 시 발생하는 강우 유출수를 통해 배출되며 기상학적, 수문학적, 인구학적 특성에 따라 유출특성이 변화한다. 점오염원 대비 비점오염원 배출부하량의 비중은 지속해서 증가 추세에 있다. 비점오염원 중 대부분은 강우 시 토지계에서 기인하며, 특히 대규모 택지개발, 산업단지 조성부지에서 발생하는 강우 유출수에 의한 오염이 심각하다. 주로 도시 개발지역에서 발생하는 이러한 비점오염원은 농촌 지역에서 발생하는 비점오염에 비해 중금속, 유해 화학물질 등이 많이 포함되어 있어 하천 생태계에 심각한 위해 요인이 된다. 농업 비점오염원 중 축산계는 축산분뇨의 처리에 따라 그 영향의 정도가 결정되며, 농경지의 비료살포에 의한 비점오염원은 경작유형, 시비량 및 시비법, 용수공급, 배수관리 등 다양한 인자들이 그 영향의 정도를 결정한다. 비점오염원의 관리는 토지이용의 관리에 의하며, 하나의 유역이 하나의 토지이용 유형으로 구성되는 경우가 아닌 경우 유역의 특성을 잘 반영한 비점오염관리대책이 필요하다.

비점오염관리대책을 유역에 적용하는 것은 많은 예산과 시간을 소요할 뿐만 아니라, 비점오염저감대책의 적용 이후 꾸준한 관리를 필요로 하므로 비점오염관리의 목적에 맞는 최적관리기법BMPs(Best Management Practices)를 도출하기 위해 유역 유출 모형을 구축하고 가능한 대책의 효과를 모의하는 접근방법이 사용된다(Shin et al., 2001; Kim et al., 2008). Jeong et al.(2013)은 농업비점 저감을 위해 벧짚 피복에 의한 밭 비점오염원 유출저감효과 분석을 위해 HSPF 및 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 활용한 바 있다. Cho and Kim(2020)은 합천댐 유역의 축산계 비점오염원을 관리하기 위하여 HSPF 모형으로 축산두수를 얼마나 저감해야 하는지를 알아본 바 있다. Lee et al.(2023)은 HSPF 모형을 사용하여 농업비점오염원 최적관리방안을 알아보기 위해 경남 창녕군 계성천 유역 전반에 대해 농업비점관리, 축산비점관리, 생활계오염원제어

등의 비점관리대책을 적용한 효과를 알아보았다. Choi et al.(2023)은 용담댐 유역의 비점오염 부하의 특성 분석과 관리대상 소유역을 선정한 바 있다. 이들 연구에서는 한 가지의 비점오염원 제어를 목표로 모형을 구축하여 대안을 적용한 후 비점오염부하의 발생량 저감을 모형으로 도출하였다. 그러나 하나의 유역은 다양한 종류의 비점오염원을 포함하고 있기 마련이며, 다종의 비점오염원 제어를 목표로 할 경우에도 토지이용 현황에 따라 효율적인 비점오염 저감 대책이 달리 도출될 수 있다.

본 연구에서는 서낙동강 수질에 영향을 미치는 다양한 소유역들 중, Kal et al.(2021)에 의해 우선관리소유역으로 선정된 바 있는 해반천 유역을 선정하여 다양한 비점오염원을 포함하고 있는 유역의 특성을 고려하고, 비점오염의 발생에서부터 유출, 하천으로의 유입 단계를 고려한 다수의 비점오염저감 대책을 설계하고 그의 수질개선효과를 HSPF 모형을 사용하여 모의하였다.

### 2. 연구방법

#### 2.1 해반천 유역

환경부는 2006년부터 비점오염으로 인해 중대한 위해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 지역을 비점오염원 관리지역으로 지정하여 국고보조사업을 우선적으로 지원하고 있다. 김해시는 2018년 11,885 ha 면적에 대해 비점오염관리지역으로 지정받아 비점오염저감을 위한 사업에 국고를 지원받고 있다. 해반천은 경상남도 김해시 삼계동에서 시작하여 봉곡천과 합류하여 조만강으로 유입하는 하천으로, 상류 지역은 도심지의 비점오염 특성을, 하류 지역은 농업비점오염원의 특성을 가진다. 해반천 유역은 행정구역으로는 경상남도 김해시 구산동, 내동, 동상동, 삼계동, 외동, 이동, 전하동, 화목동, 흥동을 거쳐 흐르며 32.57 km<sup>2</sup>의 면적을 가지며, 서쪽으로는 조만강 상류와 접하며 동쪽으로는 신어천 유역과 접하고 있다. 2022년 기준으로, 전체 서낙동강 유역에서 가장 높은 인구밀도(7,637.67 인/km<sup>2</sup>)와 대지면적비율

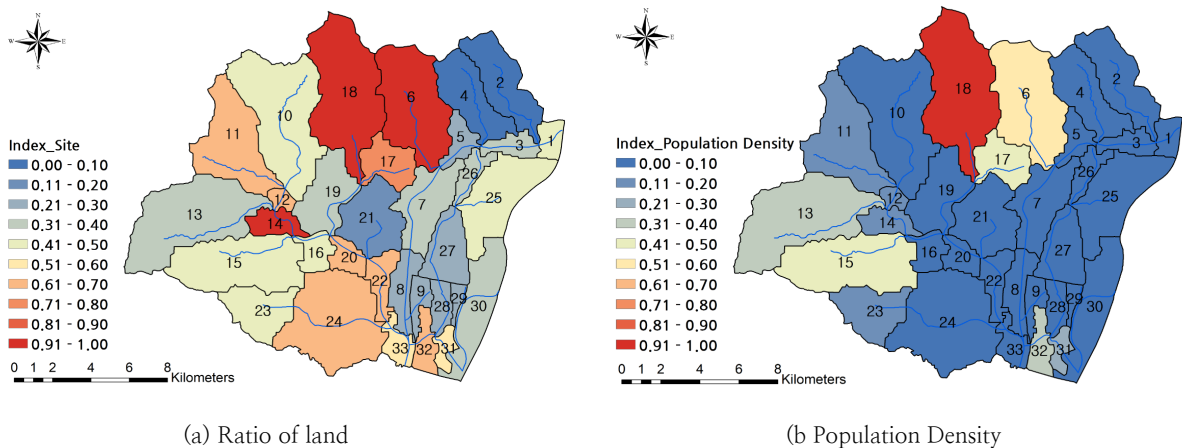


Fig. 1. The characteristics of Haebancheon Watershed.

(35%)을 가지고 있다. 아래 Fig. 1은 서낙동강 전체 유역 중 해반천 유역(18번 표시)의 위치와 대지면적비율 및 인구밀도를 0~1사이로 표준화한 값을 도식화한 것이다.

해반천의 상류지역은 서낙동강 유역의 대표적인 주거 및 상업지가 밀집된 지역으로 주거지역과 대지, 도로 등지에서 발생하는 도시비점오염원이 하천 수질의 주요 오염원으로 파악된다. 도심을 관류하는 하천의 특성상 자연형 하천으로 구성되어 있다. 해반천의 하류지역은 해반천과 호계천이 만나 형성되는데, 호계천과 합류하는 지점의 상류에서 해반천에 대한 김해시 도시지역 비점오염원의 영향이 끝나고 농업지역의 비점오염원의 영향이 시작된다. 타 유역과 달리, 서로 다른 오염원이 영향을 주는 경계가 명확하게 나누어 구분된다는 점이 특징이라고 할 수 있다. 농업계 비점오염원의 영향이 시작되는 하류 구간의 경우 하천 인근 농수로 관리 부실과 농경폐기물 적재 문제 등, 관리 불량으로 인한 오염 발생으로 주민의식의 변화가 요구되고 있다.

해반천의 수질 모니터링을 위해 경상남도에서는 자체측정망을 운영하여 운영 중에 있다. 위치는 해반천1 지점의 경우 경상남도 김해시 감계동(삼계교), 해반천2 지점의 경우 경상남도 김해시 전하동(전하교)에서 수질을 측정하고 있으며, 경남보건환경연구원에 의해 자료가 제공된다. 2016년~2019년 간의 국가수질측정망 자료에 의하면 BOD의 경우 해반천 상류 지점의 5년간 평균은 1.4 mg/L, 하류 지점의 BOD의 평균은 2.1 mg/L의 값을 가지는 것으로 나타났다.

### 2.2 HSPF 모형 구축

비점오염원 관리를 위해 주로 사용되는 모형은 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran, USEPA)와 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)으로 알려져 있다. 본 연구에서는 토지 이용의 변화에 따른 유출수를 모의하기에 적합한 HSPF 모형을 활용하였다. SWAT은 주로 농촌유역의 적용에 가장 적합한 것으로 간주할 수 있고, HSPF 모형은 도시지역과 비도시지역에 모두 적용이 가능하며, 유출량을 포함하여 수질 모의도 가능하다는 특징을 가지고 있다. 본 연구의 대상 유역이 되는 해반천 유역은

도시지역과 농촌지역이 함께 존재하는 특징으로 인해 HSPF 모형을 선정하였다. 모의 모듈이 시계열 자료가 저장된 WDM(Watershed Data Management) 유틸리티의 파일로부터 자료를 입력받고 모의 결과를 다시 WDM 파일에 저장하는 방식으로 자료 관리가 용이한 장점이 있으나, 수문 모의는 단방향 흐름만 가정하므로 조석 등의 영향을 반영하기 어렵고, 조류나 플랑크톤에 관련한 모의는 잘 반영하지 못한다는 한계가 존재한다(Donigian, 2000).

HSPF는 투수층(PERLND 모듈)과 불투수층(IMPLND 모듈)을 구분하여 강우 유출수의 발생을 모의하며, 모의 결과인 유출량과 비점오염원이 하천모듈(RCHRES)의 입력자료로 활용되어 수질을 모의하게 된다. 각각의 모듈에서는 유출량, 토사유출, DO, 수온, BOD, 질산염, 암모니아, 유기질소, 인산염, 유기인, 플랑크톤 등을 모의한다(Bicknell et al., 1996).

### 2.3 부하지속곡선 작성

부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)이란 하천의 전체 유량 조건에서 관측 수질과 목표 수질과의 관계를 나타내는 조건으로 미국에서 TMDLs(Total Maximum Daily Loads) 계획 수립 시 특정 유량 조건이 아닌 전체 유량 조건에서 적절한 수질 기준을 고려하여 오염물질의 문제를 특성화하고 이를 사용하고 있다. TMDL 설정기법, 분석기법, 유량 규모별 점 및 비점 오염부하량 관리기법으로 구분하여 적용하고 있다. 부하지속곡선을 만들기 위해서는 장기간 유량 관측자료 혹은 장기유출모형(HSPF 등)으로부터 산출된 유량으로 유량지속곡선을 우선적으로 구축하고, 대상 유역의 목표 수질을 설정하여 곱하여 작성하게 된다.

### 2.4 비점오염부하량 저감 시나리오

해반천 유역에 개발된 모형에 비점오염 발생량을 저감하기 위한 다양한 대책을 적용할 경우 수질 개선 효과를 알아보기 위한 시나리오를 개발하였다. 해반천 유역의 경우 상류 유역이 주거 및 상업지역으로 구성되어 있어 도로 및 관거 청소 등의 비점오염저감대책이 필요하고, 추가적으로 좀 더 적극적인 비점오염저감대책을 적용한다면 투수성포장 및 침투도랑 등의 저영향개발 기법 적용을 통해 하천으로 유

Table 1. The scenarios of non-point pollution source control for Haebancheon watershed.

Step	Objective	Detailed Strategies
Step 1 Source control	Reducing urban nonpoint source pollution in residential and commercial areas at upper stream	Urban Nonpoint Source Pollution Management - Road Cleaning
Step 2 Discharge control	Active reduction of urban nonpoint source pollution through facility Installations for runoff control	Application of LID techniques for runoff control in impermeable areas - Coagulant-Settlement Process - Subsurface Infiltration (Permeable Pavement, Infiltration Trench) - Retention Basin
Step 3 Input control	Reduction of agricultural nonpoint source pollution load from Downstream	Pre-pollution source remediation before river inflow - Artificial Wetland

하하는 오염부하량의 규모를 저감하는 방안을 고려하였다. 마지막으로 하류에 존재하는 농업비점오염원을 저감하기 위한 인공습지를 추가하는 방안을 고려하였다. 이러한 과정으로 설계된 시나리오는 아래 Table 1과 같다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 HSPF 모형 검증

본 연구에서는 해반천 유역의 토지이용 변화가 유역환경에 미치는 영향을 분석하기 위해 HSPF 모형을 구축하였으며, 배수구역을 기준으로 소유역을 2개(해반1, 해반2)로 구분하였다. HSPF 모형을 구축하기 위해 사용한 자료는 Table 2와 같다. 자연환경자료는 기상자료, 유역도, 하천망도, DEM (Digital Elevation Model) 자료가 있으며 국가수자원관리종합정보시스템과 국가공간정보시스템의 자료를 이용하였다. 모형을 구축하기 위하여 필요한 현장자료인 수량 및 수질 자료는 물환경정보시스템의 일반측정망 자료와 4단계 수질오염총량제 기본계획 수립을 위해 수행한 모니터링 자료를 활용하였다. 해반천 유역 옆 신어천 유역의 유량을 기준으로 해반천 유역과 함께 모형을 구축하였으며, 신어천의 유량, 신어천과 해반천의 수질로 모형의 검보정을 수행하였다. 모형의 검보정은 Donigan(2000)이 제시한 모형 효율의 범위와 신뢰구간을 고려하여 보정과 검정을 수행하였다 (Table 3).

수문 보정 및 검증을 위해, HSPF 모형의 유량 관련 민감도가 높아 비교적 큰 영향을 주는 변수인 PERLND 모듈 PWAT-PARM2 Block의 KVAR, AGWRC, LZSN,

INFILT와 PWAT-PARM3 Block의 UZSN, IRC, INTFW 등의 변수를 우선적으로 수정하여 보정하였다. 수질 보정 및 검증을 위해서는 수질 관련 민감도가 높아 비교적 큰 영향을 주는 변수부터 수정하여 보정하였다. 해당 변수는 해당 변수는 CFSAX, KATRAD, KBO20, TCBOD, KODSET, BRNT(1), BRPO4(1) 등이며 해당 변수의 범위와 보정 후의 계수는 HSPF User manual 12.0(US EPA, 2001)에 제시된 일반 보정 범위 안으로 보정을 실행하였다. 비점오염 부하량의 경우 원단위의 개념을 이용하여 토지계와 축산계로 분리하여 HSPF에 적용하였다. 모형의 보정 결과, % difference는 “Very Good”으로 나타났으며, 실측값과 모의값의 평균값에 대한 농도비율은 1.0으로 신뢰범위 이내의 값으로 도출되었다. BOD, T-N, T-P의 경우 % difference는 “Very Good”을 나타냈으며, RMSE는 0.04~0.86의 범위로 산정되었다. 실측값과 모의값의 평균값에 대한 농도비율은 0.87~1.03으로 신뢰범위 이내의 값으로 산정되었다. Chl-a는 % difference가 “Very Good”으로 모의값이 실측값을 잘 재현하는 것으로 나타났지만 여름철 침투농도에 대한 재현정보다는 저수기 및 갈수기의 농도를 더 잘 반영하는 것으로 분석되었다(Fig. 2).

#### 3.2 부하지속곡선 초과율 분석

부하지속곡선이란 하천의 전체 유량 조건에서 관측 수질과 목표 수질과의 관계를 나타내는 곡선으로 미국에서 TMDLs(Total Maximum Daily Loads) 계획 수립 시 특정 유량 조건이 아닌 전체 유량 조건에서 적절한 수질 기준을 고려하여 오염물질의 문제를 특성화하기 위해 사용하고

Table 2. The scenarios of non-point pollution source control for Haebancheon watershed.

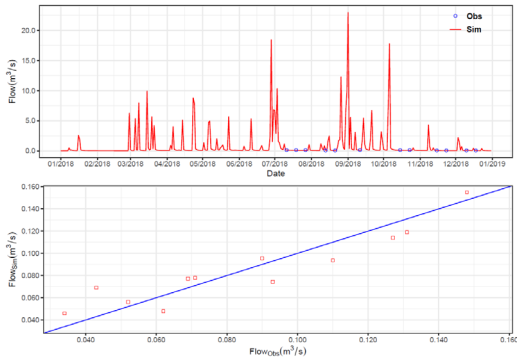
Basic Data	Source
Meteorological data	2004~2018 Meteorological Administration
Watershed map	Water Resource Management Information System (WAMIS)
Map of river network	Water Resource Management Information System (WAMIS)
Digital Elevation Data	1:5,000 digital topographic map converted as 30m×30m
Water quality	Water quality monitoring network data from Water Environment Information System (Ministry of Environment)
Water quantity	Data from Basic Plant for 4th Total Water Pollution Load Management System
Land use map	Subcategory Land Cover Map from Environmental Geographic Information Service (Ministry of Environment)
Environmental basic infrastructure	2004~2018 Water Emission Management Data
Pollution Source	2004~2018년 Water Emission Management Data
Pollution Loads	2004~2018년 Water Emission Management Data

Table 3. The scenarios of non-point pollution source control for Haebancheon watershed.

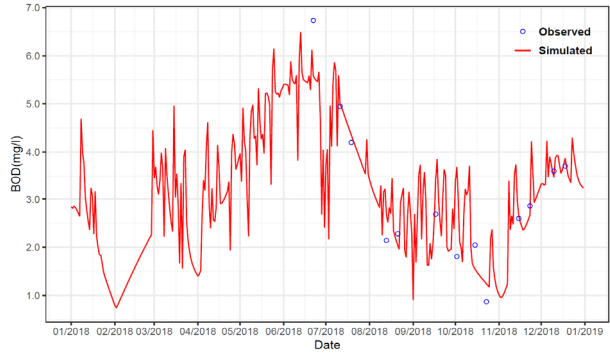
Contents	Very Good	Good	Fair	Poor
Flowrate (% Difference)	Under 10%	10~15%	15~25%	Over 25%
Water Quality	Under 15%	15~25%	25~35%	Over 35%

있다. 부하지속곡선은 TMDL 설정기법, 자료 분석기법, 유량 규모별 점 및 비점 오염부하량 관리기법으로 구분하여 적용되고 있다. 부하지속곡선을 만들기 위해서는 장기간 유

량 관측자료 혹은 장기유출모형(HSPF 등)으로부터 산출된 유량으로 유량지속곡선을 우선적으로 구축하고, 대상 지역의 목표 수질을 설정하여 곱한다. 해반천의 목표 수질은 해



(a) Flow



(b) BOD

Fig. 2. The results of fitting HSPF model for (a) Flow (b) BOD (mg/L).

Table 4. The exceed rate for the load duration curve of Haebancheon

Contents	Exceed rate (%)				
	High Flows	Moist Conditions	Mid-range Flows	Dry Conditions	Low Flows
BOD	26.23	26.46	49.86	54.66	46.45
T-N	61.75	46.72	26.85	33.09	48.09
T-P	86.34	76.64	73.97	40.59	38.25

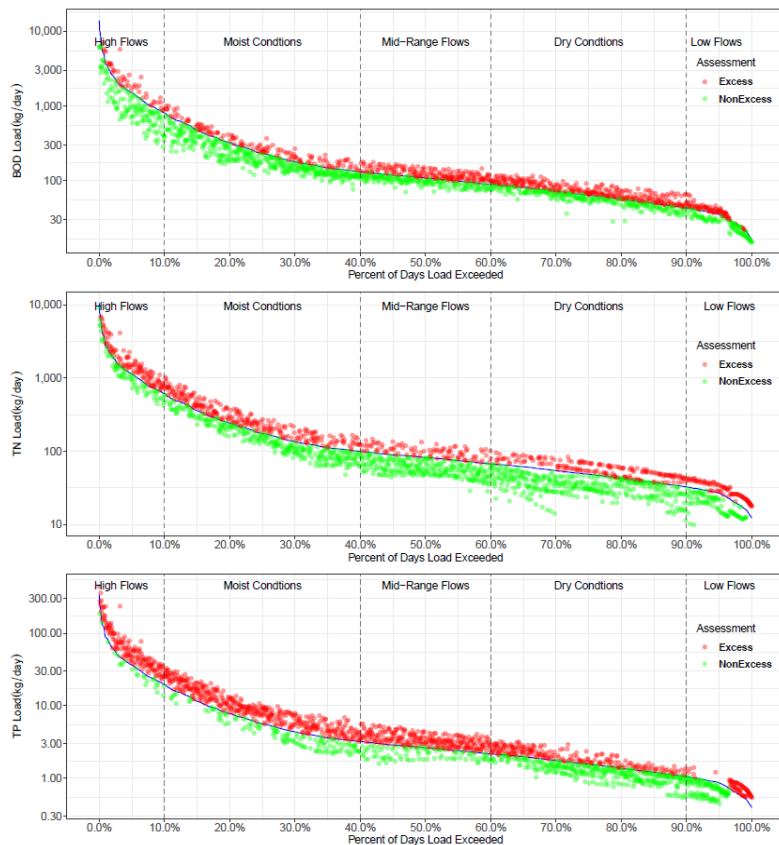


Fig. 3. The exceed rate for BOD (upper), T-N (middle) and T-P (bottom).

반천에서 획득한 누적된 수질 측정값 중 60백분위의 값 (BOD 2.2mg/L, T-N 2.3mg/L, T-P 0.051mg/L)을 선정하였다. 이는 수질오염총량제의 낙분N 지점의 3단계 수질오염총량제 목표수질에 해당하는 BOD 4mg/L, T-P 0.14mg/L을 넘지 않는 값이다. 부하지속곡선을 작성한 후 5년간의 모의 결과를 이용하여 유량구간별 초과율을 아래 표와 같은 초과율이 도출되었다(Table 4 및 Fig. 3).

### 3.3 비점오염 저감 시나리오 적용

해반천 유역의 중분류 토지피복도를 GIS 작업을 통해 산정하고 각 토지피복별 발생 원단위를 이용하여 발생부하량과 삭감대상부하량을 산정하였고, 앞서 설명한 시나리오를 적용하여 모의 결과로 도출된 부하량과 비교하여 삭감량을 산정하였다.

1단계 시나리오의 도로청소에 따른 삭감부하량 산정은 청소차량이 운행 가능하고 연석이 존재하는 진공흡입식 청소차량을 이용하여 도로를 청소하는 경우에 한하여 적용하였다. 해반천유역의 청소구간 도로면적은 총 4.956 km<sup>2</sup>, 그 중 도로청소가 가능한 면적은 0.692 km<sup>2</sup>로 산정되었다. 청소일수는 현재 김해시가 보유한 차량 5대(대당 청소거리 60 km)의 운행 가능성을 고려하여 51일로 산정하였다. 도로청소로 인한 저감율은 실측을 원칙으로 하나 실측자료가 존재하지 않아 BOD 46%, T-N 55%, T-P 56%로 산정하였다.

2단계 및 3단계 시나리오의 토지이용별 저영향개발기술의 저감율은 Table 5와 같이 환경부의 가이드라인을 활용하여 선정(환경부, 2013)하여 적용하였다. 최대한으로 가능한 비점오염효과를 산정해 보기 위해, 저영향개발기법을 적용하는 경우 해반천유역에 존재하는 토지이용 구분별 면적

Table 5. The reduction rate of discharge and pollutant reduction.

Contents	Discharge reduction rate (%)	Pollutant reductoin rate (%)		
		BOD	T-N	T-P
Road Cleaning	-	46	55	56
Retention Basin	-	34	28	36
Coagulant-Settling	-	80	20	85
Permeable Pavement	27	75	83	65
Infiltration Trench	25	77	62	73
Vegetative Residence	40	54	49	65
Artificial Wetland	-	54	49	65

Table 6. The Reduction of Pollutant Emissions and the ratios of the applied scenarios.

Land Use	Reduction (kg/day)			Reduction ratio(%)			비고
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	
Public use	0.81	0.95	0.05	33.22	34.03	32.01	2 <sup>nd</sup> step: Retention Basin
Industrial	0.91	0.26	0.02	33.22	34.03	32.01	2 <sup>nd</sup> step: Coagulant-Settling
Transportation	33.84	18.59	0.90	69.28	63.72	60.56	1 <sup>st</sup> step: Road Cleaning 2 <sup>nd</sup> step: Permeable Pavement
Culture & Sports	0.29	0.19	0.04	33.22	34.03	32.01	2 <sup>nd</sup> step: Infiltration Trench
Commercial	3.61	4.02	0.20	33.22	34.03	32.01	2 <sup>nd</sup> step: Vegetative Residence
Residential	3.53	3.92	0.19	33.22	34.03	32.01	
Orchard	0.19	0.13	0.04	64.61	75.59	59.20	3 <sup>rd</sup> step: Artificial Wetland
Other cultivation	0.02	0.02	0.01	64.61	75.59	59.20	
Field for rice	1.02	0.81	0.10	64.61	75.59	59.20	
Field	1.84	1.65	0.52	64.61	75.59	59.20	
House cultivation	0.14	0.13	0.04	64.61	75.59	59.20	
Artificial grassland	4.82	5.95	0.34	64.61	75.59	59.20	
Artificial meadow	0.56	0.51	0.01	64.61	75.59	59.20	
Natural meadow	0.00	0.00	0.00	64.61	75.59	59.20	
Coniferous forest	3.05	5.94	0.10	64.61	75.59	59.20	
Mixed forest	1.15	2.24	0.04	64.61	75.59	59.20	
Deciduous forest	2.87	5.59	0.10	64.61	75.59	59.20	
Total	58.68	50.89	2.69	58.28	58.49	51.56	-

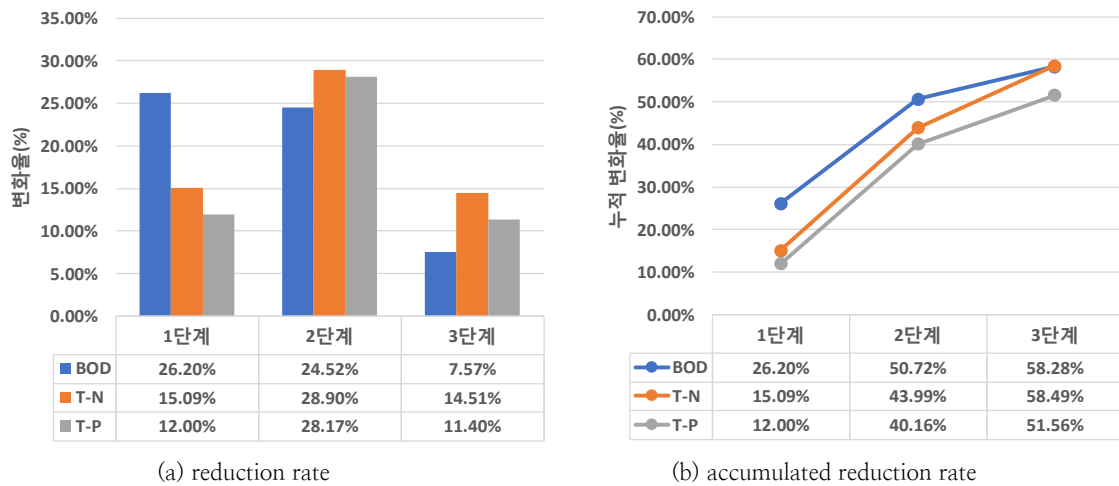


Fig. 4. Change rate of pollutant load of the applied scenarios in the Haebancheon watershed.

의 50%에 해당 기법을 적용하는 것으로 적용(Table 6)하여 삭감가능량을 산정하였다(Table 6).

시나리오 적용에 의한 발생 부하의 변화율(Fig. 4)은 1단계의 경우 BOD가 26.20%, T-N이 15.09%, T-P가 12.00%로 도출되었다. 2단계 시나리오 적용시 BOD가 24.52%로, 해반천 유역에서의 대지 비율이 높아 1단계 시나리오인 도로청소와 2단계 시나리오인 저영향개발기법 적용의 효과가 비슷한 것으로 해석된다. 다만 1단계 시나리오인 도로청소 대책을 적용하였을 때 보다, 2단계 시나리오인 저영향개발 기법이 T-N은 28.90%, T-P는 28.17%로 저감율의 폭이 더 큰 것으로 보아, BOD 및 T-N, T-P를 고루 저감하려면 다양한 저영향개발 기법을 적용하는 것이 효과적임을 보여준다. 3단계 시나리오인 인공습지 건설로는 BOD는 7.57%, T-N은 14.51%, T-P는 11.40%를 저감할 수 있음이 도출되었다. 이러한 결과로 비점오염 저감 대책의 효과를 절대적으로 비교하기는 어렵다. 그 이유는 각 유역의 토지이용별 면적 비율이 다를 것이기 때문이다. 다만 1단계 시나리오와 2단계 시나리오를 비교할 수 있는 것은 그 대책들이 해반천 유역의 도시 지역의 토지용 유형들에 대해 적용되었기 때문이다.

### 3.4 시나리오 적용에 의한 부하지속곡선 초과율 변화

해반천 유역에 시나리오 적용에 따른 저감효과는 HSPF

모형을 이용하여 초과율 변화 검토를 통해 분석하였다. 초과율 분석을 위한 시나리오는 3단계 저감대책을 모두 적용하는 것으로 설정하였다. 분석결과, 초과율은 평균 BOD -25.25%, T-N -17.47%, T-P -35.21% 저감 되는 것으로 나타났다. 유황별 분석결과, 홍수기는 BOD -8.20%, T-N -14.21%, T-P -18.03% 저감 되었고 풍수기는 BOD -15.88%, T-N -22.99%, T-P -36.86% 저감 되는 것으로 나타났다. 평수기는 BOD -25.75%, T-N -13.97%, T-P -50.41% 저감 되었고 저수기는 BOD -33.64%, T-N -15.90%, T-P -35.10% 저감되는 것으로 나타났다. 갈수기는 BOD -44.26%, T-N -15.85%, T-P -17.49% 저감 되는 것으로 나타났다(Table 7, Fig. 5).

오염원별 저감률이 차이가 나는 이유는, BOD는 생활계 및 점오염원 영향이 커 유량의 영향을 많이 받아 저·갈수기 초과율이 높게 나타나며 해당 시기 비점오염원 대책으로 인한 오염원 감소로 초과율 감소가 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 반면, T-P는 토지계가 강우의 영향을 많이 받아 배출되는 오염원으로서 풍·홍수기 초과율이 높게 나타나며 해당 시기 비점오염원 감소로 인해 초과율 감소가 더 큰 것으로 판단된다. T-N은 풍수기 저감률이 타 시기보다 높게 나타나 토지계에서 유출되는 비점오염 저감이 큰 것으로 판단된다.

Table 7. The Reduction of exceed ratio(%) for each range of flows.

Contents	W/O scenarios (%)			With scenarios (%)			Difference (%)		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Average	41.57	40.31	62.43	16.32	22.84	27.22	-25.25	-17.47	-35.21
High Flows	26.23	61.75	86.34	18.03	47.54	68.31	-8.20	-14.21	-18.03
Moist Conditions	26.46	46.72	76.64	10.58	23.72	39.78	-15.88	-22.99	-36.86
Mid-range Flows	49.86	26.85	73.97	24.11	12.88	23.56	-25.75	-13.97	-50.41
Dry Conditions	54.66	33.09	40.59	21.02	17.18	5.48	-33.64	-15.90	-35.10
Low Flows	46.45	48.09	38.25	2.19	32.24	20.77	-44.26	-15.85	-17.49

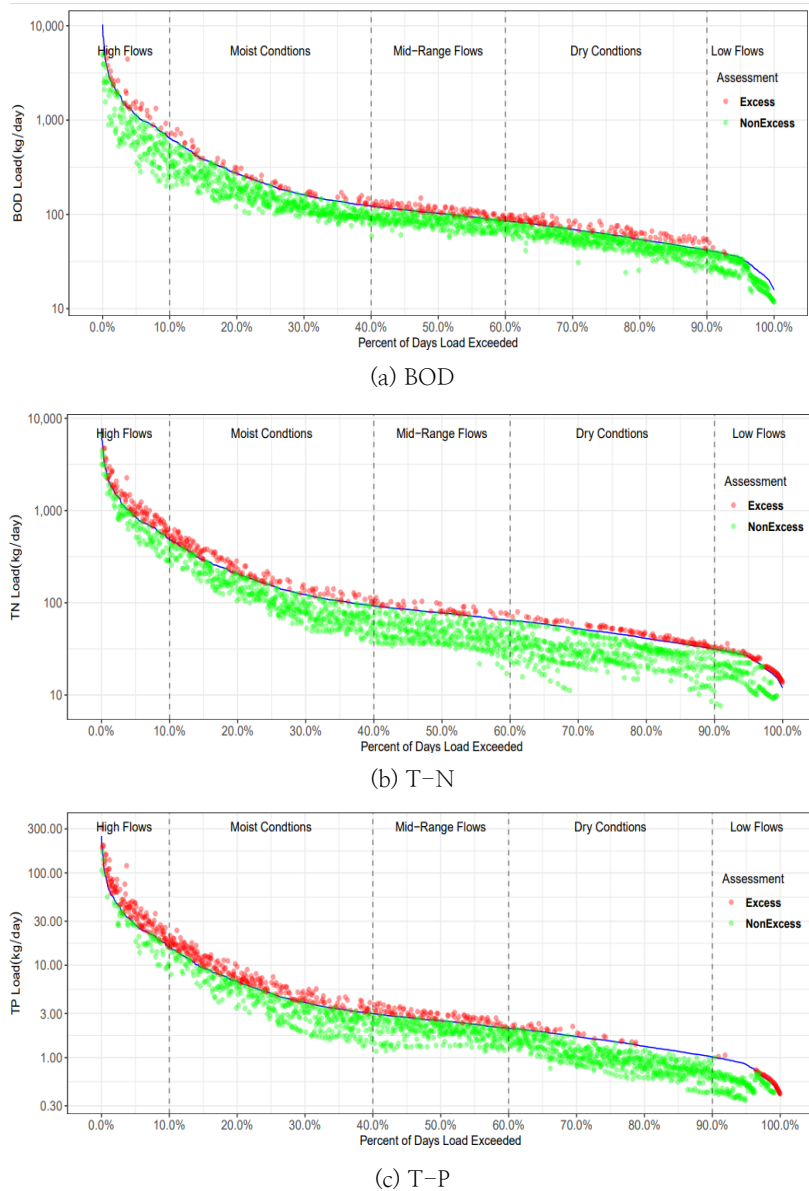


Fig. 5. Change of exceed rate by application of all the scenarios for LDC.

#### 4. 결론

본 연구에서는 서낙동강유역에서 대지면적의 비율과 인구밀도가 가장 높은 소유역이자, 도시비점오염원과 농업비점오염원이 혼합하여 존재하는 해반천 유역에 대한 비점오염관리대책을 세 가지의 시나리오로 수립하고 삭감가능부하량을 산정하고 수질개선 가능성을 분석하였다. 본 연구에서 선정된 비점오염저감관리대책은 1~3단계로 구성되었다.

해반천 상류의 경우 인구밀도가 높고 주거 및 상업지역으로 개발이 완료되어 있어 도로청소가 가장 우선적으로 적용 가능한 대책으로 간주되어 1단계 대책으로 선정되었다. 1단계 대책은 상류 유역의 발생원 관리 대책이라고 할 수 있으며, 이를 통해서 BOD의 발생부하량을 26.20%, T-N의 발생부하량을 15.09%, T-P의 발생부하량을 12.00% 저감

할 수 있는 것으로 도출되었다. 2단계의 대책은 비점오염저감장치형 시설 등을 활용한 비점오염 유출저감대책으로 좀 더 적극적인 비점오염관리대책에 해당하며, 적용 가능한 토지 이용 구분별 면적의 50%에 적용 가능한 비점오염시설을 설치하는 방안으로 설정하였다. 2단계의 적극적 비점오염저감대책으로는 BOD의 발생부하량은 24.52%, T-N을 28.90%, T-P를 28.17% 저감할 수 있는 것으로 도출되었다. 3단계의 경우 해반천 하류, 즉 봉곡천과의 합류 전에 농업비점 관리를 주된 목적으로 한 비점오염관리대책으로 인공습지 설치를 적용하는 것으로 설정하였으며, 이를 통해 BOD는 7.57%, T-N은 14.51%, T-P는 11.40% 발생부하량 삭감이 가능하였다. 이를 통하여 최종적으로 3단계 시나리오를 모두 적용하였을 경우 BOD는 58.28%, T-N은 58.49%, T-P는 51.56% 저감이 가능한 것으로 분석되었다.



부하지속곡선의 초과율 분석을 통한 전반적 수질 개선 효과에 대해서는 BOD의 경우 갈수기의 초과율 감소폭이 가장 컸으며, T-N의 경우 풍수기, T-P의 경우 평수기의 초과율을 가장 큰 폭으로 감소시킬 수 있는 것으로 도출되었다.

본 연구에서 제안한 해반천 유역의 비점오염원 관리 대책은 현실적으로 단기간에 행해지기에는 규모가 큰 편이라고 할 수 있다. 유역 내 거의 모든 토지이용유형에 도로청소를 포함한 광범위한 비점오염저감대책이 적용되며, 특히 저영향개발기법의 경우 각 토지이용유형별 면적의 50%에 해당하는 면적에 비점오염저감을 위한 조치를 취하는 것으로, 상당한 예산과 기간이 소요될 것으로 예상할 수 있다. 또한 이러한 비점오염저감을 위한 대책을 추진하는 동안 발생하게 될 저감시설의 유지관리상의 문제 또한 대응해야 할 것으로, 본 연구는 그러한 부분을 포함하고 있지는 않지만 향후 투수성 포장의 이물질로 인한 막힘현상 등 유지관리상의 문제 또한 고려되어야 한다. 현재로서는, 하천으로 유입되는 점오염원을 더 이상 큰 폭으로 감소시킬 수 없는 상황에서 하천의 수생태 건강성을 회복하기 위해서 어느 정도의 적극적인 대책을 적용해야 하는지를 파악해 보았다는 점에서 연구의 의미를 찾을 수 있다.

## References

- Ministry of Environment. (2013) Guidelines for LID(Low Impact Development) Technology Application.
- Bichnell, B. R., J. C. Imhoff, J. L., Kittle, A. S. Donigan and R. C. Johnson (1996). Hydrologic simulation program-FORTRAN user's manual, v.11, Athens, GA, USEPA.
- Cho, H. K. and Kim, S. M. (2020). Estimation of Livestock Pollutant Sources Reduction Effect on Water Quality in Hapcheon Dam Watershed Using HSPF Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 36(2), 98-108.
- Choi, Y. H., Jeong, Y. H., Nguyen H. H. Thi, Yoon, S. H., Yi, I. G. and Kwak D. H. (2023). Evaluation of Non-point Source Pollution Load Characteristics and Identifying Management Sub-Basin Area and Best Management Practices Using HSPF Model in Yongdam Dam Watershed, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 45(2), 65-80.
- Donigan, Jr., A. S. (2000). HSPF training workshop handbook and CD.
- Jung, C. G., Ahn S. R., Kim, S. J., Yang, H. J., Lee, H. J. and Park, G. A. (2013). HSPF and SWAT Modeling for Identifying Runoff Reduction Effect of Nonpoint Source Pollution by Rice Straw Mulching on Upland Crops, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(2), 47-57.
- Kal B. S., Park, J. B. and Kim, Y. J. (2021) Evaluation of Non-point source Vulnerable Areas In West Nakdong River Watershed Using TOPSIS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 24(1), 1-14.
- Kim, J. H., K. H. Han, and J. S. Lee (2008) Characteristics of agricultural non-point source pollutants by rainfall events in rural watersheds. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24(1), 69-77.
- Lee, K.S., Lee, D.H., Ahn, Y. and Kang, J.H. (2023) Predicting the Effects of Agriculture Non-point Sources Best Management Practices (BMPs) on the Stream Water Quality using HSPF, *Journal of Wetlands Research*, 25(2), 99-110.
- Shin, E. S., J. Y. Choi, and D. H. Lee (2001) Characteristics of non-point source pollutants in surface runoff from rural area. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 17(3): 299-311.