

Jeonbuk State Institute

기초연구

2025-06

전북 수자원의 효율적 활용을 위한 물발자국 산정과 도입방향 연구

Water Footprint Assessment and Policy Roadmaps for Efficient Water
Resource Management in Jeonbuk State

김보국 정 용 윤승현



설립목적

전북특별자치도 및 전북지역 시·군의 지역발전 등에 관련된 체계적인 조사·연구 활동을 통하여 지역단위의 정책개발 기능을 수행함으로써 지역발전에 기여

주요기능

- 도정에 관한 중장기 개발계획 및 주요 현안에 대한 조사·연구
- 지역경제, 지역발전에 관한 연구 및 정책대안의 모색
- 정부, 지방자치단체, 국내외 연구기관 및 민간단체의 연구 용역 수탁
- 연구관련 도서 및 간행물 발간
- 연구기관 간 공동연구·학술대회 및 정보교류 협력
- 국내외 각종 정보자료의 수집·관리 및 제공

연구진 소개

김보국

전북대학교 공학박사(환경공학)
전북연구원 수석연구위원

정용

North Carolina State University Civil Engineering Hydrology
박사
원광대학교 건설환경공학과 교수

윤승현

전북대학교 토목공학과 석사
전북연구원 연구원

Jeonbuk State Institute

기초연구

2025-06

전북 수자원의 효율적 활용을 위한 물발자국 산정과 도입방향 연구

Water Footprint Assessment and Policy Roadmaps for Efficient Water Resource Management in Jeonbuk State

김보국 정 용 윤승현

연구진 및 연구 세부 분담

연구 책임 김보국 | 수석연구위원 | 연구총괄, 제1장 ~ 4장
공동 연구 정 용 | 초빙연구위원 | 제3장 일부
윤승현 | 연구원 | 제3장 일부

자문위원 서찬양 | 한경국립대학교 산학협력단 연구교수

연구관리 코드 : 25GI02

이 보고서의 내용은 연구자의 의견으로서
전북연구원의 공식 입장과는 다를 수 있습니다.

1. 연구목적 및 방법

1) 연구 배경 및 목적

- 기후변화에 따른 계절적 변동성 심화와 디지털 산업 및 스마트팜 확대에 따른 농업용수 수요 증가는 수자원 관리의 효율화를 요구하고 있다. 기존의 물관리 정책은 인구 통계에 기반한 공급과 배분, 단순 수량 및 수질 관리에 치중해 왔으나, 이제는 제품의 생산과 소비 전 과정에 내재된 물의 흐름을 파악하고 제어할 수 있는 통합적 물이용 관리 체계로의 전환이 필요하다.
- 이러한 정책적 도구로 활용되는 '물발자국(Water Footprint)'은 인간 활동이 환경에 미치는 영향을 측정하는 지표로서, 특정 제품이나 서비스의 원료 채취부터 생산, 유통, 사용, 폐기에 이르는 전 과정(Life Cycle)에서 투입되는 직접수와 간접수의 총합으로 정의된다. 이는 담수 소비량뿐만 아니라 수질 오염 부하까지 정량화할 수 있는 지표이다.
- 물발자국은 수자원의 성격에 따라 세 가지로 구분된다. 빗물의 소비량을 의미하는 녹색물발자국, 지표수와 지하수를 포함한 가용 수자원 소비량인 청색물발자국, 그리고 발생한 오염수를 기준 수질로 정화하는 데 필요한 담수량을 산정한 회색물발자국이 이에 해당한다. 이러한 통합 분석 체계는 수자원 분석의 범위를 개인과 기업을 넘어 지역 및 사업장 전체로 확장하며, 가상수(Virtual Water) 개념을 포함한 정밀한 수급 분석을 가능하게 한다.
- 현재 전북특별자치도는 물발자국 정책 도입을 위한 기초 단계에 있으며, 실효성 있는 정책 수립을 위해 지역 특성에 적합한 산정 방법론 정립과 분석 범위 설정이 요구된다. 또한 관련 기초 데이터의 수집 가능성을 진단하고 체계적인 수집 방안을 마련해야 한다. 본 연구는 이를 바탕으로 행정단위별 물발자국을 평가하고, 기후변화 대응 및

물 재이용 활성화를 위한 전북특별자치도 맞춤형 지속가능 물관리 정책 방안을 도출하는 것을 목적으로 한다.

2. 결론 및 정책제언

■ 개념과 특성

- 본 연구는 전북자치도와 산하 시군의 물발자국 평가 체계를 구축하기 위해 기초자료의 수집 가능성을 진단하고 정책적 활용 방향을 설정하는 데 목적이 있다. 연구의 기준 연도는 2023년으로 설정하였으며, 환경부의 지역 물발자국 산정 방법론을 준용하여 기초 행정단위별 평가를 수행함으로써 데이터 기반 물관리의 지속가능성을 검토하였다.
- 수자원 기초 현황 분석을 위해 도내 기상관측소 자료를 수집한 결과, 2023년 연평균 강수량은 1,987.4mm로 집계되었으며 이를 면적 대비 체적으로 환산한 총 수자원 강수량은 연간 16,052백만 톤으로 분석되었다. 녹색물발자국은 5,365.4백만톤/년으로 인공위성 MODIS 자료를 활용하여 분석한 총 증발산량을 활용하였다.
- 용수 공급 측면에서 도내 주요 댐(용담·섬진강·부안댐)을 통한 연간 공급량은 1,120.5백만 톤이며, 이 중 생활 및 공업용수가 586.2백만 톤으로 가장 큰 비중을 차지한다. 지하수와 하천수 취수량을 포함한 용도별 소비량을 분석하여 산정한 청색물발자국은 농업계 1,495.2백만 톤/년, 생활계 81.9백만 톤/년(전주시 제외), 산업계 63.2백만 톤으로 나타났다. 회색물발자국은 7.3백만톤/년으로 분석되었다.
- 청색물발자국에서 농업계가 큰 비중을 차지하고 있어 농경지 비율이 높은 전북의 특성이 잘 반영된 결과임을 알 수 있었으나 기후 위기 시대에 농업계의 높은 물소비는 전북지역의 취약점이 될 수 있으므로 농업용수의 이용 효율을 극대화 할 수 있는 물관리 전략이 필요한 것으로 판단 되었다.

차 례

CONTENTS

요 약 i

제1장 연구 개요

1. 연구 배경 및 목적 3

2. 연구 범위 및 주요 연구 내용 5

3. 연구 방법 6

4. 연구 추진체계 7

5. 연구 기대효과 8

제2장 물발자국 정책동향 및 산정방법

1. 국내외 물발자국 정책 및 선행 연구 동향 11

2. 국내외 물발자국 산정방법 29

제3장 전북자치도 지자체별 물발자국

1. 전북자치도 물발자국 산정을 위한 기초현황 41

2. 전북자치도 물발자국 산정방법 69

3. 전북자치도 지자체별 물발자국 80

제4장 결론 및 정책제언

1. 결론 119

2. 정책제언 및 한계점 121

참고문헌 127

영문요약 (Summary) 128

표 차례

LIST OF TABLES

〈표 1-1〉 물·생태·탄소발자국의 비교	3
〈표 2-1〉 서울시 물관련계획별 물발자국 도입계획 검토	23
〈표 2-2〉 물발자국 산정 방법론 비교분석	25
〈표 2-3〉 물발자국 정책활용 방안	27
〈표 2-4〉 물·생태·탄소발자국의 비교	29
〈표 2-5〉 다른 종류의 물발자국 간 연관관계	32
〈표 2-6〉 물발자국 종류별 지속가능성평가 기준	34
〈표 3-1〉 전북특별자치도 기상관측소 및 강수량 현황	42
〈표 3-2〉 전북자치도 지자체별 강수량 현황	44
〈표 3-3〉 지자체별 증발산량 현황	46
〈표 3-4〉 지자체별 댐 용수별 현황	48
〈표 3-5〉 전북자치도 지자체별 저수지 유효저수량	49
〈표 3-6〉 전북자치도 지자체별 용도별 지하수 현황	51
〈표 3-7〉 지자체별 하천수 사용현황	53
〈표 3-8〉 전북자치도 지자체별 하천수 이용현황	54
〈표 3-9〉 지자체별 상수도 공급현황	62
〈표 3-10〉 지자체별 공업용수 공급 현황	64
〈표 3-11〉 지자체별 공공하수처리시설 현황	66
〈표 3-12〉 지자체별 공업용수 사용량 및 폐수발생량 현황	68
〈표 3-13〉 2023년 전북 시군별 저수지 유효저수량	73
〈표 3-14〉 물발자국 산정방법(총괄)	79
〈표 3-15〉 녹색 물발자국 산정결과	81
〈표 3-16〉 각 시군별 10년간 증발산량 변화	86
〈표 3-17〉 청색 물발자국(생활계) 공급량 산정	87
〈표 3-18〉 청색 물발자국(생활계) 방류량 산정	88

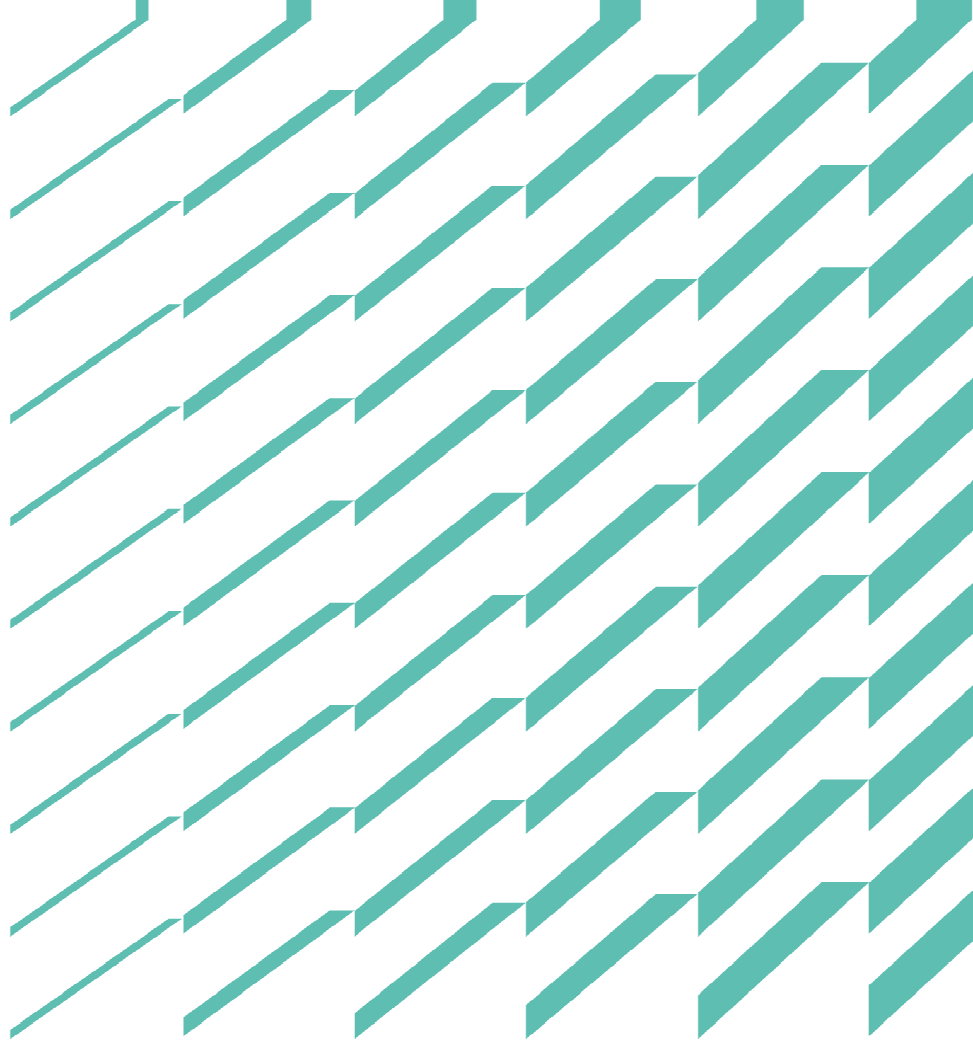
〈표 3-19〉 청색 물발자국(생활계) 산정	90
〈표 3-20〉 논 작물별 CWR값	91
〈표 3-21〉 밭 작물별 CWR값	92
〈표 3-22〉 과수 작물별 CWR값	93
〈표 3-23〉 시설재배 작물별 CWR값	93
〈표 3-24〉 2023년 시군별 농업용수 필요수량	98
〈표 3-25〉 2022년 시군별 농업용수 필요수량	103
〈표 3-26〉 2023년과 2022년 총 물 필요수량 비교	103
〈표 3-27〉 청색 물발자국(농업계) 산정	104
〈표 3-28〉 청색 물발자국(산업계) 산정	106
〈표 3-29〉 청색 물발자국(산업계) 공급량 산정	107
〈표 3-30〉 청색 물발자국(산업계) 산정	108
〈표 3-31〉 지자체별 대표 하수처리장 방류량 및 수질농도 현황	110
〈표 3-32〉 폐수배출허용 법적기준치 현황	110
〈표 3-33〉 청색 물발자국(공업용수) 산정	111
〈표 3-34〉 지자체별 회색 물발자국 현황	112
〈표 3-35〉 전북특별자치도 물발자국 산정결과	114
〈표 3-36〉 전북특별자치도 1인당 물발자국 산정결과	115

그림 차례

LIST OF FIGURES

〈그림 1-1〉 물발자국의 종류 및 개념도	4
〈그림 2-1〉 저수조 및 배수구역 위치	16
〈그림 2-2〉 도시화 사업에 따른 물발자국 흐름도	17
〈그림 2-3〉 유럽 도시물발자국 프로젝트 이탈리아 비첸차 연구소의 연구수행도	19
〈그림 2-4〉 비첸차 도시 개요	19
〈그림 2-5〉 브로츠와프 도시 개요	20
〈그림 2-6〉 인스브루크 도시 개요	21
〈그림 2-7〉 서울시 직접수와 간접수 물발자국 비교	22
〈그림 2-8〉 서울시 각 자치구별 물발자국(직접수) 비교	22
〈그림 2-9〉 단계별 지역 물발자국 산정	27
〈그림 2-10〉 물발자국의 종류 및 개념도 2)	30
〈그림 2-11〉 공정발자국을 기초로한 다양한 물발자국의 산정 및 연관성	32
〈그림 2-12〉 물발자국평가의 단계	35
〈그림 2-13〉 물발자국 영향평가 단계 흐름도(ISO 14046)	38
〈그림 3-1〉 전북특별자치도 기상관측소 현황	43
〈그림 3-2〉 지자체별 평균 강수량 현황	45
〈그림 3-3〉 지자체별 총 강수량 현황	45
〈그림 3-4〉 지자체별 평균 증발산량 현황	47
〈그림 3-5〉 지자체별 총 증발산량 현황	47
〈그림 3-6〉 지하수 이용량 현황(합계)	51
〈그림 3-7〉 지자체별 하천수 취수지점	60
〈그림 3-8〉 2023년 전북 댐의 유효저수량 (자료: kwater.or.kr)	71
〈그림 3-9〉 2023년 전북 시군별 저수지 유효저수량 (자료: 전북연구원)	72
〈그림 3-10〉 2023년 전북 시군별 지하수 저수량 (자료: 지하수조사연보2023)	74
〈그림 3-11〉 2023년 전북 농업용수 공급량	75

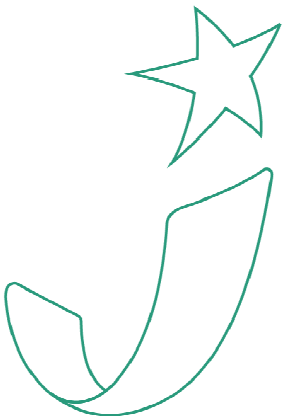
〈그림 3-12〉 2023년 전북 농업용수 공급량에 대한 비율	75
〈그림 3-13〉 전북 논벼 증발산량	84
〈그림 3-14〉 전체 총 증발산 중 논벼의 비율(%)	84
〈그림 3-15〉 각 시군별 10년간 증발산량 변화	85
〈그림 3-16〉 2023년 시군 및 작물별 물 필요수량	94
〈그림 3-17〉 2023년 작물별 총 물 필요수량	95
〈그림 3-18〉 2023년 작물별 총 물 필요수량 비율	96
〈그림 3-19〉 2023년 시군별 총 물 필요수량	97
〈그림 3-20〉 2022년 시군 및 작물별 물 필요수량	99
〈그림 3-21〉 2022년 총 물 필요수량	100
〈그림 3-22〉 2022년 총 물 필요수량 비율	101
〈그림 3-23〉 2022년 시군별 총 물 필요수량	102



제 1 장

연구 개요

1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구 범위 및 주요 연구 내용
3. 연구 방법
4. 연구 추진체계
5. 연구 기대효과



제 1 장 연구 개요

1. 연구 배경 및 목적

가. 연구 배경

기후변화에 따른 계절적 변화 심화, 디지털 산업의 성장, 스마트 팜 등 사계절 농업용수 필요 요인 증가 등 물수요량 증가 요인이 지속적으로 등장하고 있어 물의 공급과 이용과정을 효율화할 수 있는 물관리 정책 도입이 필요하다.

현재 인구산정에 근거한 공급 및 배분 위주의 수량과 수질관리에 초점을 맞춘 물이용관리정책을 생산 및 소비과정에 숨어있는 물의 흐름을 파악하고 효과적으로 제어 관리할 수 있는 통합적 물이용관리 정책으로 전환하기 위한 정책도구로 물발자국이 활용되고 있다¹⁾.

생태발자국, 탄소발자국과 함께 인간활동이 환경에 미치는 영향을 측정하기 위한 지표로 활용되고 있음. 생태발자국은 인간 집단이 유지되는 데 필요한 생물학적 생산가능 면적을 의미하며 탄소발자국은 인간 활동에 필요한 상품이 생산과 소비과정에 발생하는 이산화탄소 총량을 의미하다.

[표 1-1] 물·생태·탄소발자국의 비교²⁾

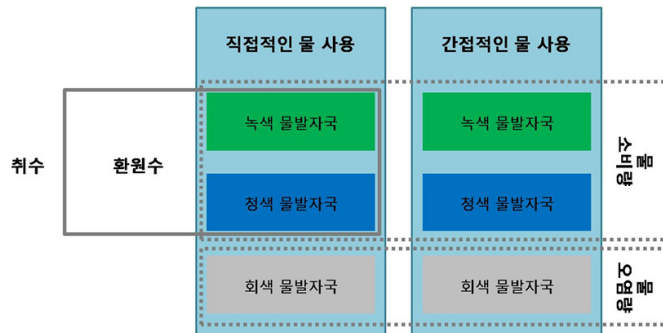
구분	단위	설명	특성	비고
물발자국	L/kg, L/L 또는 m ³ /yr	담수의 이용을 나타내는 양	물의 지역·시간 한정성	수자원
생태발자국	gha	생태 생산 공간의 이용을 나타내는 양	토지의 고정성	토지자원
탄소발자국	ton	이산화탄소의 양으로 나타낸 온실가스의 양	공기의 유동성	대기자원

인구집단을 유지하는 데 필요한 담수의 양을 의미하며 “하나의 제품이나 서비스 전 과정에 이용되는 물 사용량으로서, 제품이나 서비스를 생산하는 데 필요한 원재료인 직접 수 사용량과 생산·유통·사용·폐기의 각 단계에서 투입되는 제품이나 서비스를 생산하는

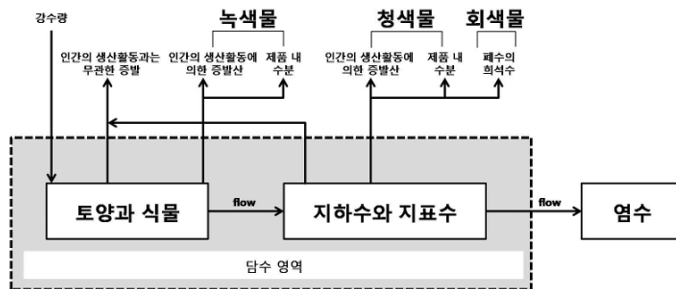
1) 서울특별시의회, 물발자국 도입을 통한 지속가능한 서울시 물환경시스템 조성, 2015.2.

데 필요 간접수 사용량을 합산한 값”의 정의 할 수 있다²⁾.

물발자국은 녹색, 청색, 회색 물자국으로 구분되고 있으며 녹색물자국은 녹색 수자원 (흐르는 상태가 되지 않는 빗물)의 소비, 청색물자국은 한 생산물의 공급 사슬을 따라 소비된 청색 수자원(지표수와 지하수), 회색물자국은 오염수를 천연 농도와 주변 수질 기준에 맞게 정화하기 위해 필요한 담수의 양으로 정의하고 있음²⁾



자료: The Water Footprint Assessment Manual을 재구성.



[그림 1-1] 물발자국의 종류 및 개념도

물발자국(Water footprint)은 수량과 수질에 한정되었던 수자원 분석을 개인, 기업, 지역, 사업장 전(全)과정에서 사용되고 소비되는 가상수, 직접수, 간접수, 정화수 등으로 통합분석으로 전환시킴으로써 기후변화 대응, 물 공급체계 개선, 물 재이용 등에 대응하는 전북의 지속가능한 물관리 정책 수립에 활용될 수 있을 것이다.

2) 노태호 외, 물발자국(Water Footprint) 개념의 정책적 도입과 활용방안, 한국환경정책연구원, 2012.10.

나. 연구목적

전북은 물발자국 도입을 위한 초기단계로 물발자국 평가를 위한 적정 방법 및 정책적 활용을 위한 적정 산정 범위의 설정이 필요하며 관련 기초자료의 현재 수집 가능성 및 수집 방법에 대한 현황 진단이 필요한 상황임. 따라서 물발자국 산정방법 및 범위 설정, 행정단위 물발자국 평가, 정책적 활용 방안 도출 등을 연구목적으로 설정하여 추진하고자 한다.

2. 연구 범위 및 주요 연구 내용

가. 연구 범위

공간적 범위는 전북특별자치도내 14개 시군을 대상으로 설정하여 물발자국 및 지속가능성 평가의 도입방향에 대한 연구할 수행할 계획이며, 내용적 범위는 지방자치단체, 지방 또는 다른 행정단위를 위한 물발자국 산정에 준하여 녹색, 청색, 회색물발자국의 산정을 위한 관련 데이터의 확보 가능성과 산정 가능한 범위를 판단해 볼 계획이다. 시간적 범위는 수집된 데이터가 녹색, 청색, 회색물발자국을 연계하여 종합분석이 가능한 특정시점 또는 시계열 범위를 설정하여 추진할 계획이다.

나. 주요 연구 내용

1) 국내외 물발자국 정책활용 동향 분석

스페인과 유럽최초 물발자국 평가를 채택한 국가이며 미국, 호주 등은 제품에 물발자국 인증 제도를 운영하고 있다. 이와 같이 물발자국을 국가정책으로 활용하고 있는 국가들의 정책동향을 분석하고자 한다.

‘물발자국을 활용한 물환경시스템 조성 연구(2015.2)’와 같은 연구를 수행하여 강남북 중심부의 물사용량을 조절하는 것이 중요하다는 연구결과를 도출한 서울시처럼 물발자국을 정책수단으로 활용하고 연구된 국내 지자체 대상 연구결과들을 조사 분석하고자 한다.

2) 국내외 물발자국 산정방법 검토

물발자국 평가방법으로 WFN Guideline과 ISO 14046를 제시할 수 있다. WFN Guideline은 환경, 경제, 사회적 측면에서 ISO 14046은 환경적 영향 측면을 기준으로 평가가 이루어지고 있다.

국내외에서 물발자국 산정을 위해 사용되고 있는 산정방법들을 검토하여 전북자치도의 물발자국 산정방법을 검토하고자 한다.

3) 전북자치도 물발자국 산정 및 정책적용 방안

■ 전북자치도 물발자국 산정을 위한 기초현황 분석

전북자치도 물발자국 산정을 위해 필요한 용수이용 자원들에 대한 기초 현황자료를 수집하고 분석을 추진하고자 한다.

■ 전북자치도 물발자국 산정

WFN Guideline과 ISO 14046 중 적절한 방법을 선정하거나 혼용하여 전북자치도에 적절한 물발자국 산정방법을 산정하고 행정구역별 물발자국을 산정할 계획이다.

■ 전북자치도 물발자국 정책활용 방안

농업용수로 다량 활용되고 재이용수 이용이 적은 전북자치도의 수자원 활용여건을 개선할 수 있는 지속가능한 물관리정책을 제안할 계획이다.

3. 연구 방법

1) 정보조사 및 분석방법

한국환경연구원, 산업통상자원부, 국가기술표준원, 한국농촌경제연구원 등 정부기관에서 물발자국의 친환경 지표도입과 ESG 경영 유도를 위해 수행된 선행 연구자료를 조사 및 분석을 수행하고자 한다.

서울시 및 지자체, 지방 연구원 차원에서 지역의 지속가능한 발전을 위해 물발자국 도입 방안을 모색하기 위하여 수행된 선행 연구자료에 대한 조사 및 분석을 수행하고자 한다.

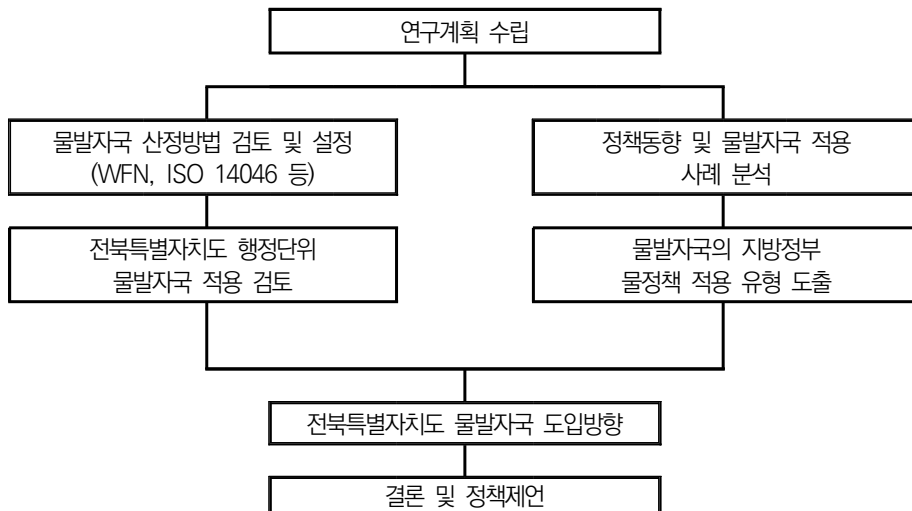
2) 조사 및 위탁계획

물환경정보시스템(NIER), 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS), 물정보포털(My Water) 등을 활용하여 기초자료를 수집과 분석을 수행할 계획이다.

3) 전문가 자문방법

착수 및 최종연구심의회와의 비 정기적 세미나를 통하여 관련 전문가들의 자문을 진행할 계획이다.

4. 연구 추진체계



5. 연구 기대효과

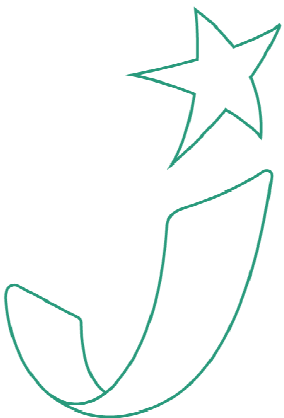
공급과 양적 관리 중심의 물관리정책을 환경·경제·사회적으로 보다 광의적 차원으로 전환될 수 있을 것으로 예상되며 전북자치도 내외의 물이용체계의 연계해석으로 타 지자체와 물갈등 요인을 분석할 수 있을 것으로 기대된다.



제 2 장

물발자국 정책동향 및 산정방법

1. 국내외 물발자국 정책 및 선행 연구 동향
2. 국내외 물발자국 산정방법



제2장 물발자국 정책동향 및 산정방법

1. 국내외 물발자국 정책 및 선행 연구 동향

가. 국외 물발자국 정책동향

1) 스페인 물발자국(Huella Hídrica)

국제적으로 통용되는 물발자국 지표에 대한 정의는 Hoekstra와 Hung(2002)이 제시하였다. 두 과학자는 한 국가의 물 발자국을 그 나라 국민들이 소비하는 제품과 서비스를 생산하기 위해 직간접적으로 사용된 물의 양으로 정의하였다.

스페인은 EU에서 물발자국을 정부 정책으로 채택한 최초 국가이다. 2008년 9월 물 집행위원회 총국은 환경 및 농수산부의 권한 하에서 유역관리계획의 개발을 위한 기술적 표준으로서 다양한 사회경제 분야의 물발자국 분석을 포함하는 규제를 승인했다.³⁾

2012년에는 스페인의 물발자국(Huella Hídrica de España)를 발표하였으며 국가차원과 유역 경계에서 물 발자국을 결정하기 위한 산정방법을 제시하고 있다. 또한 물 사용 및 소비의 지속 가능성을 평가하고 수질보전을 위한 적절한 정책 및 조치를 선택하는데 활용될 수 있도록 구성되어 있다.⁴⁾

2) 네덜란드 물발자국 정책 활용⁵⁾

2012년 4월 12일, 네덜란드 하원은 다량의 '가상수(virtual water)'가 네덜란드로 수입되는 문제와 관련하여 하원의원 Hachchi와 Ferrier가 제출한 결의안을 승인하였다. 이 결의안은 네덜란드 정부가 경제 정책에서 네덜란드 기업들이 자신들의 물 발자국을 공개하고 물 부족 국가에서 이를 줄이도록 장려할 것을 제안하고 있다.

3) 노태호외, 물발자국(Water Footprint) 개념의 정책적 도입과 활용방안, 2012.10., 한국환경연구원

4) Confederación Hidrográfica del Duero O.A. , Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero Revisión de tercer ciclo (2022-2027), 2022.3.

5) PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, PBL Note_Water Footprint: Useful forsustainability policies?, 2012.12

이에 네덜란드 외무부 장관은 PBL 네덜란드 환경영향평가국(Netherlands Environmental Assessment Agency)에 물 발자국이 네덜란드 정책 수립에 얼마나 적합한 도구가 될 수 있는지 조사해 달라고 요청했다.

PBL 네덜란드 환경영향평가국은 2012년 8월에 네덜란드의 생태 발자국과 네덜란드 정책 수립을 위한 발자국 접근 방식의 유용성에 대한 연구(Van Oorschot et al., 2012)를 발표했으며 물 발자국에 대해 간략하게 다루었다. 보고서는 물발자국 개념, 개념에 대한 비판점, 네덜란드의 물발자국, 물 발자국과 관련된 환경적 영향을 줄이기 위한 전략, 인증 및 라벨링을 위한 물 발자국 지표의 유용성 등이 포함되어 있다.

3) 콜롬비아 물발자국 정책 활용⁶⁾

콜롬비아는 주기적으로 국립 수문 및 기상 연구소(IDEAM)를 통해 국가 수자원 현황(ENA)을 분석해왔으며, 2014년 국가 수자원 연구(ENA 2014)에서 청색 및 녹색 물발자국 평가를 처음으로 통합하였다. ENA 2014는 전 세계적으로 공식 기관이 주도하여 국가의 모든 유역에 물발자국 평가를 통합한 최초의 국가 수자원 연구이다. IDEAM과 스위스 개발협력청(SDC-GPWT), 안티오키아 과학 기술 센터(CTA) 등의 협력을 통해 진행되었다.

연구는 물발자국 네트워크(WFN) 방법론을 사용하여 농업, 국내, 산업, 에너지, 석유 추출 등 5개 경제 부문과 콜롬비아의 316개 하천 유역을 대상으로 청색 및 녹색 물발자국을 평가했다. 지속가능성 평가의 일환으로 청색 물 부족은 "유역 미회귀수 지수(IARC)"로, 녹색 물 부족은 "생태계 물 압력 지수(IPHE)"로 정의하였다.

물 발자국 분석은 콜롬비아가 가진 주요 경제적 이점을 부각시키고 있다. 주요 수출 작물의 청색 및 녹색 가상수 흐름을 분석한 결과, 콜롬비아 농업은 90%가 녹색 물을 기반으로 한다는 점에서 비교 우위를 보여준다. 이러한 지속 가능한 농업 방식은 세계의 증가하는 식량 수요를 충족하는 데 기여할 수 있는 방법으로 제시될 수 있다.

그러나 이러한 성장의 동력은 미래에 영향을 미칠 수 있다. 현재의 지역 경제 정책이 추진하는 바이오 연료의 내부 수요와 자유 무역 협정은 사탕수수, 팜유, 코코아 등의 농산업 성장을 촉진하고 있습니다. 2022년 성장이 예상되는 이러한 동인들은 지역 수자원에 대한 영향뿐만 아니라 토지 이용의 갈등을 초래할 것이다.

6) The Water Footprint of COLOMBIA Result of the National Water Study

또한, 물의 양 외에도 수질문제는 국가의 해결 과제로 남아 있다. 현재의 상황은 개선된 모니터링 및 통제, 정보에 대한 자유로운 접근, 그리고 처리 및 오염 감소를 위한 투자 결정을 요구하고 있다

나. 국외 물발자국 정책 적용 사례

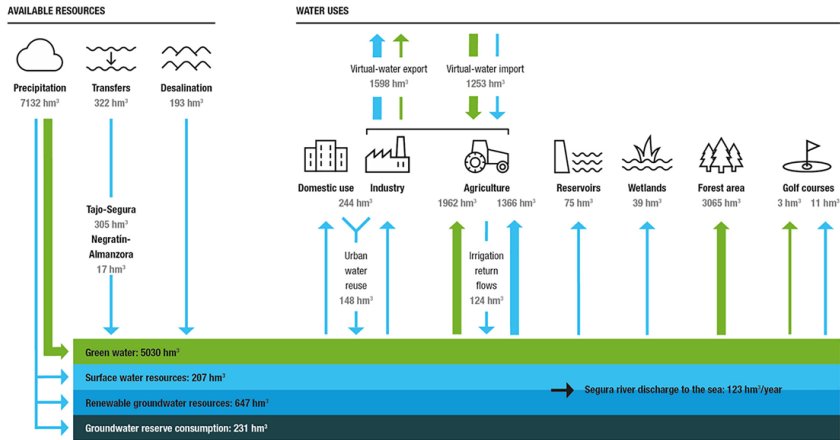
1) 수자원 관리·계획 분야 활용사례

스페인 환경 담당 부처는 물 계획 지침(Water Planning Instruction)을 통해 물발자국(Water Footprint) 및 가상수 무역(Virtual Water Trade)을 분석하도록 요구하는 사항을 도입했다. (BOE, 2008). 그러나 결과적으로 계획에 미치는 영향이 미미하여 (Aldaya and Llamas, 2012) 현재 유럽연합에서는 2000년의 현행 지침을 2027년에 대체할 새로운 규정을 마련하기 위한 물 기본 지침의 개정 기간이 시작되었습니다.

가) 스페인 세구라 강 유역 : 물 부족 관리 및 통합 계획 분석

세구라 강 유역에서 농업은 물 사용의 핵심적인 부분을 차지하며, 전체 물 균형에 큰 영향을 미치고 있었다. 농업 부문은 연간 약 1,366 hm³를 사용하였으며 이는 전체 청색 물 사용량의 80%를 차지하는 양이다. 토양내 수분으로 존재하는 녹색 물의 사용량도 상당하였다. 산림 및 농경지에서의 토양 물 사용량은 각각 3,065hm³/년 및 1,962hm³/년 정도이다. 지하수 매장량은 연간 231hm³의 속도로 계속해서 고갈되고 있다.

농가에서는 우물물이 현재 담수 처리수보다 저렴하고 담수 처리수가 야기하는 붕소 관련 수질 문제가 없기 때문에 지하수를 계속 사용하였다. 사회적 비용이 들더라도 행정적인 조치가 취해지지 않는 한, 지하수 매장량 고갈은 계속될 것이다.



유역 내에서 이용 가능한 재생 가능한 청색 물 자원은 약 1,319hm³/년으로, 약 1,870hm³/년을 필요로 하는 현재의 생산 모델을 유지하기에는 충분하지 않다. 물 수요와 공급 간의 적절한 균형을 달성하기 위한 단일 해결책은 없으며, 여러 가능성의 조합이 필요하다. 담수화 처리수사용, 지역 공동체 기반 관리와 연계된 지하수 양수, 외부 물 이송, 관개 용수 재분배, 더 큰 사회경제적 및 환경적 가치 창출, 가뭄의 영향을 완화하기 위한 옵션으로서의 가상수 수입 등이 고려될 수 있다.

나) 과디아나 상류 분지 : 물 갈등과 통합 수자원 관리의 전환

과디아나 상류 분지 사례는 반건조 지역에서 지하수 집약적 이용이 가져온 경제적 번영과 심각한 환경 갈등을 동시에 보여줍니다. 1960년대 이후 민간 주도로 이루어진 지하수 개발은 가난했던 농촌 지역을 번성하는 농업 중심지로 탈바꿈시켰으나, 지하수위를 최대 50m까지 하락시키고 하천과 습지를 황폐화시키는 재앙을 초래했습니다. 이는 농민, 정부, 환경보호론자 간의 심각한 갈등으로 이어졌다.

갈등 해결을 위해 스페인 중앙 정부는 2008년부터 55억 유로규모의 상부 과디아나 지역 개발 계획을 승인하고, EU 기금으로 지원되는 NeWater 프로젝트를 통해 통합 수자원 관리(IWRM)를 도입했다. 이 과정에서 대규모·소규모 농가 등 다양한 이해관계자가 참여하는 참여형 프로세스를 확대하였다.

핵심적으로, 이 프로젝트는 물 발자국(Water Footprint) 추정과 농업-경제-수문 통합 모델링 프레임워크와 같은 과학적 방법론을 적용하여 물 사용 현황과 정책 시나리오의 영향을 객관적으로 분석하였다. 분석 결과, 관개가 물 사용량의 90% 이상을 차지하는 핵심 문제임이 확인되었다.

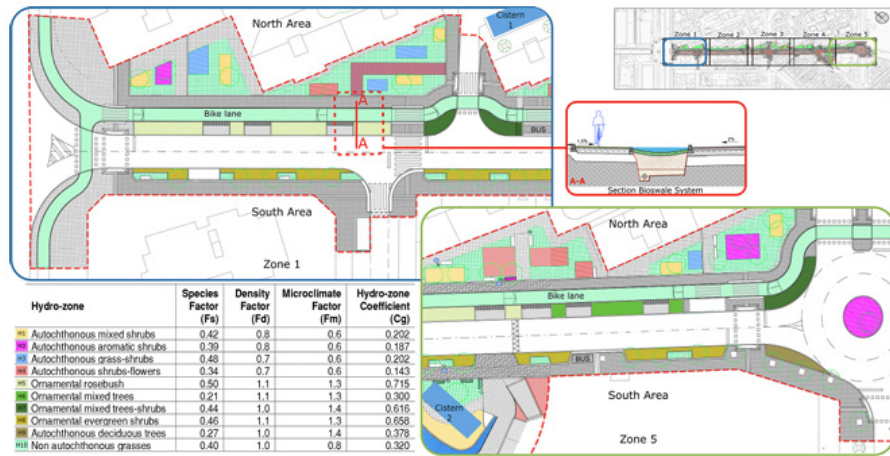
이러한 과학적 접근은 스페인 국가 정책에 실질적인 영향을 미쳤는데, 중앙 정부는 수자원 당국에 모든 하천 유역 관리 계획 수립 시 물 발자국 방법을 사용하도록 공식적으로 요구하였다. 이 사례는 성공적인 물 관리를 위해서는 연구팀의 중립성을 통한 신뢰 구축과 함께, 적절한 데이터 수집 및 투명성, 그리고 물 교육 캠페인이 필수적임을 보여주는 중요한 교훈을 제공하였다.

2) 도시계획 및 지속가능한 도시전략 분야

가) 스페인 세비야시 : 물발자국 기반 도시계획 구성

세비야시의 El Greco 거리 도시재생사업은 도시 내 물순환 회복과 지속가능한 물관리를 실현하기 위한 전략적 시범사업으로 추진되었다. 기존 도시 물관리 체계는 강우 시 유출수를 가능한 한 빠르게 배출하는 방식에 집중되어 있었으며, 이에 따라 수자원의 순환 이용이나 생태계 회복력 확보에는 한계가 있었다. 이에 반해 본 사업은 도시 공간 내에서의 물 흐름을 자연의 순환 구조에 가깝게 복원하려는 시도로, 물의 저장, 침투, 재이용을 중심으로 한 수문 감응 도시 설계(water-sensitive urban design, UWSD)와 지속가능한 도시배수시스템(SUDS)을 도입하였다.

El Greco 프로젝트는 총 11,441m² 면적의 도시가로를 대상으로 진행되었으며, 기존 아스팔트와 콘크리트 중심의 도로 및 보도를 개편하고, 투수 포장, 침투 도랑, 우수저류조, 정원 및 식생구역을 통합적으로 재구성하였다. 특히, 두 개의 지하 저장조(총 용량 75m³)를 포함한 SUDS 체계를 통해 강우 시 유출수의 약 32%를 침투 및 재이용할 수 있도록 설계하였고, 이는 도시 내 지하수 함양 및 하천 유출량 완화에도 기여한다.



자료 : Evaluation of water footprint of urban renewal projects. Case study in Seville, Andalusia, M.R. Ruiz-Perez, M.D. Alba-Rodriguez, M. Marrero, Water Research(2022)

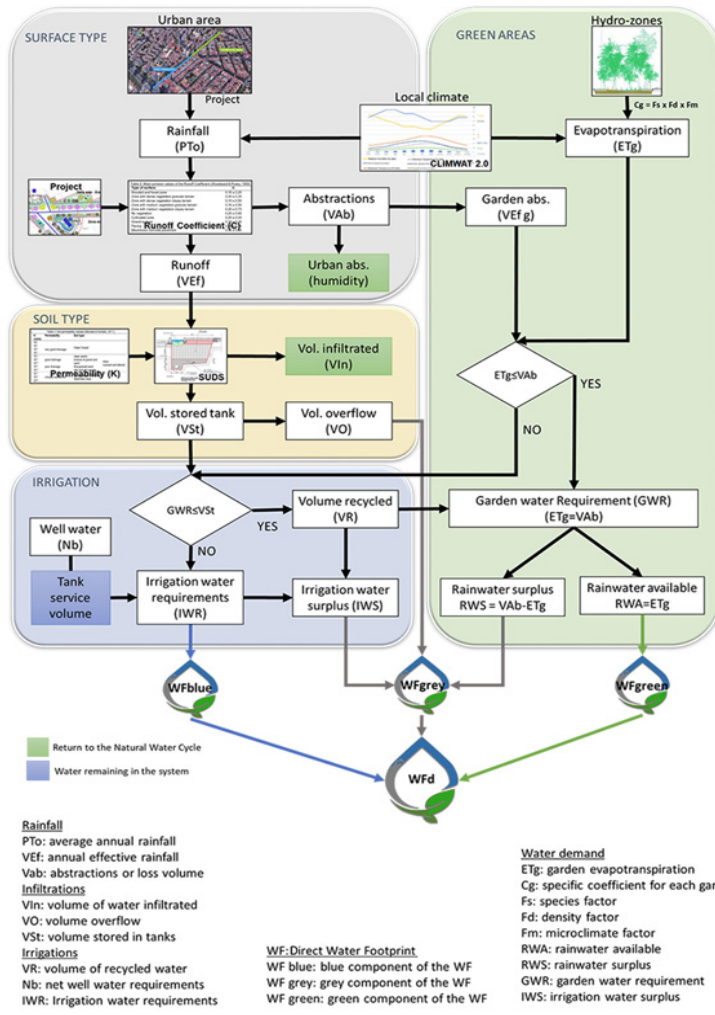
[그림 2-1] 저수조 및 배수구역 위치

정원 공간은 물 수요에 따라 10개 hydro-zone으로 나뉘며, 각 구역의 식생종, 밀도, 미기후 특성 등을 고려하여 수요 기반 관개 시스템이 구축되었다. FAO의 CROPWAT 모델과 Penman-Monteith 증발산 방정식을 활용하여 연간 증발산량을 계산하고, 필요 시 우물수와 저장된 우수를 조합해 자동 관개하는 방식으로 청수 사용을 최소화하였다.

이 프로젝트에서 가장 주목할 부분은 물발자국(Water Footprint, WF) 개념을 도시계획 수립의 실질적 기준으로 반영했다는 점이다.

물발자국은 자재 생산·운송 등에서 발생하는 간접 물발자국(iWF) 과, 정원 유지관리, 관개, 유출수 배출 등에서 발생하는 직접 물발자국(dWF) 으로 구분되어 전 과정을 정량화하였다. 그 결과, 사업 초기 자재 사용에 따른 iWF는 기존 방식보다 약 2.6배 높았으나, 연간 물사용량 절감을 통해 10년 내 손익분기점을 달성할 수 있었다. 이는 도시 인프라 계획에서 장기 수명주기 기반 자원 효율성 평가가 중요함을 실증한 것이다.

특히 회색 물발자국(Grey WF) 은 정책적 시사점이 크다. 유기농 비료를 사용할 경우 오염수가 거의 발생하지 않지만, 화학비료 사용 시 연간 회색 물발자국이 약 8배까지 증가하였다. 이는 향후 도시정원 및 공공녹지의 비료 사용 기준 설정, 도시 수질기준 연계 정책 마련 시 중요한 판단근거가 될 수 있다.



[그림 2-2] 도시화 사업에 따른 물발자국 흐름도

물발자국 개념이 단순히 학술적 지표에 그치지 않고, 실제로 도시 수자원 정책과 물순환형 공간계획에 통합적으로 활용될 수 있음을 보여주는 대표적 사례로 평가된다. 물의 흐름을 기반으로 도로와 정원, 배수시설의 설계를 통합하고, 수요 기반 관개 시스템과 자연 유출처리를 결합함으로써 물의 소비뿐 아니라 수질·수량 측면에서 전반적인 물환경의 질을 향상시켰다.

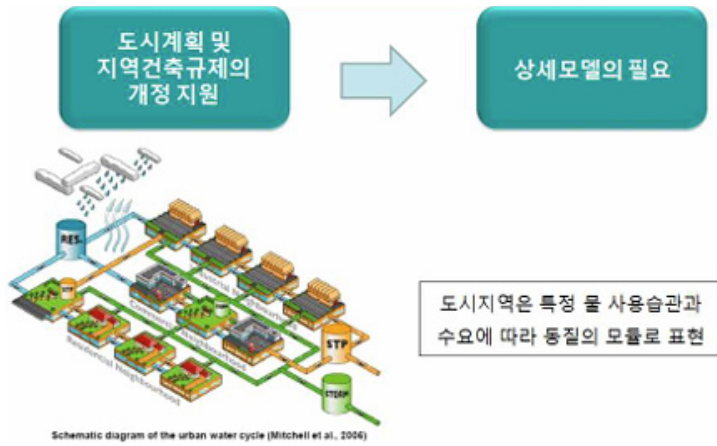
El Greco 프로젝트는 도시의 물이 단순한 소비 자원이 아니라, 도시 생태계의 일환으로서 계획되고 관리되어야 함을 보여주며, 도시 단위 물관리에서 물발자국 평가를 활용한 사례이다.

나) 도시 물관리를 위한 도시 물발자국 접근 사례

유럽중부 도시들을 대상으로 한 'URBAN_WFTP' 프로젝트는 도시 단위의 수자원 관리 전략을 개선하고, 물발자국(Water Footprint, WF) 개념을 도시정책의 실질적 관리 도구로 확립하기 위해 추진된 국제 공동연구이다. 본 프로젝트는 2012년부터 2014년까지 유럽 5개국 9개 기관이 참여하여 수행되었으며, 비첸차(Vicenza), 브로츠와프(Wrocław), 인스브루크(Innsbruck) 3개 도시를 실험대상으로 삼아 도시의 물이용을 계량화하고 지속가능한 수자원 전략을 수립하는 데 기여하였다.

이 프로젝트는 기존의 '공급 중심' 도시 물정책에서 벗어나, 도시 내 직접 물사용뿐 아니라 외부 물이용(가상수 포함), 오염부하(회색 WF), 토지이용과의 상호작용까지 고려한 도시 전 생애주기 기반의 수문 분석 체계를 수립하였다는 점에서 중요한 전환점으로 평가된다.

비첸차의 사례에서는 도시계획 수립 시 물발자국 지표를 정책적 기준으로 도입하는 것을 주요 과제로 삼았다. 도시 내 건물 유형별 물사용 실태를 모델 C를 통해 상세하게 분석하고, 가정용 관개·세정·급수 등의 사용량을 기반으로 주거구역 단위 물발자국을 공간적으로 시각화하였다. 또한 지하수 사용량, 사유 우물 정보 부족 등으로 인한 청색 물발자국(blue WF) 불확실성을 지적하며, 사유 지하수 사용의 실태조사와 그에 따른 지속가능한 취수정책의 필요성을 강조하였다. 회색 물발자국의 경우 하수 배출과 강우유출이 분리되지 않아 오염부하가 커지고 있어, 이를 줄이기 위한 우수와 오수 분리배관 투자가 최우선 과제로 제시되었다. 시민들의 수자원 인식 제고를 위한 설문조사와 워크숍도 실시되었으며, 향후 도시개발계획에 WF 지표를 직접 반영하는 것을 목표로 설정하였다.



[그림 2-3] 유럽 도시물발자국 프로젝트 이탈리아 비첸차 연구소의 연구수행도



[그림 2-4] 비첸차 도시 개요

브로츠와프에서는 도시 내 물 소비와 오염 발생의 지역별 차이를 시각화하고, 각 구간별 대응 전략을 수립하는 데 초점을 맞추었다. GIS 기반의 모델 B를 통해 불투수면 비율이 높은 도심 지역에서 급속한 유출 및 오염이 발생하고 있음을 확인하였고, 지표수 및 지하수 취수량이 지역 물가용성에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 인구밀도가 높은 구역일수록 회색 WF가 집중되었으며, 이는 지표오염 및 하천환경 질 저하의 원인으로 분석되었다. 브로츠와프는 향후 투자사업이나 인프라 갱신 시 물발자국 정보를 연계하여

의사결정을 지원하고자 하였으며, 청소년층의 수자원 인식이 낮음을 지적하며 교육 커리큘럼과 미디어 캠페인을 통한 인식제고를 제안하였다.



[그림 2-5] 브로츠와프 도시 개요

인스브루크의 사례는 다른 도시들과 달리 간접적 물발자국(External WF, 가상수)에 주목하였다. 이 도시는 도시 외부에서 생산된 식량, 생활재, 산업재를 대량 소비함에 따라 실질적인 물발자국의 대부분이 도시 외부에서 발생한다는 점을 인식하였다. 이에 따라 소비자 행동 개선이 물발자국 저감에 가장 효과적일 수 있음을 밝혔으며, 식품 소비 패턴의 전환, 음식물 쓰레기 감소, 육류 소비 축소 등을 주요 전략으로 제시하였다. 회색 WF는 주로 가정 내 발생하므로, 시민의 수세·세탁·하수배출에 대한 교육이 필요하다는 점도 언급되었다. 학생을 대상으로 한 4단계 교육 워크숍을 통해 행동 변화 유도를 시도하였으며, 향후 시민 전반을 대상으로 인식 확산을 목표로 하고 있다.



[그림 2-6] 인스브루크 도시 개요

이러한 도시별 사례는 물발자국 개념이 단순한 수자원 계량 도구가 아니라, 도시계획, 인프라 구축, 시민 행동 유도 등 다차원적 정책 도구로 활용될 수 있음을 실증한 것이다. 각 도시의 물 이슈가 서로 다르더라도, 도시 내부(blue·grey WF)와 도시 외부(external WF)의 통합적 분석, GIS 기반 공간화, 행동 변화 유도과 인프라 개선의 병행 전략, 그리고 데이터 기반 의사결정 지원 체계라는 공통된 방향성을 확인할 수 있었다.

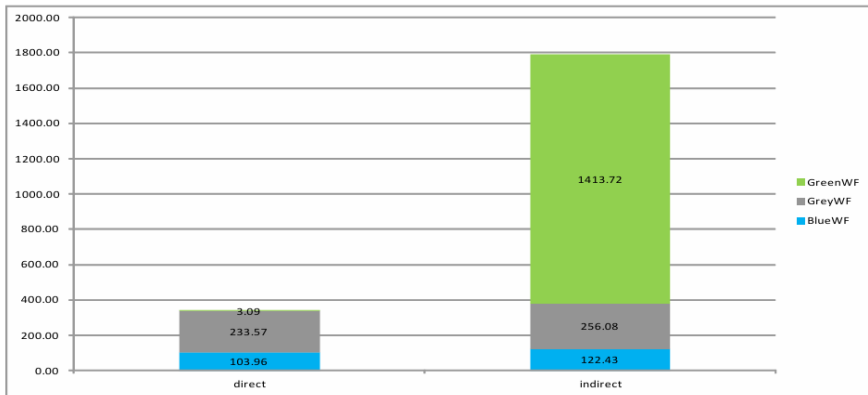
다. 국내 물발자국 선행 연구 동향

1) 서울시 : 물발자국 도입을 통한 지속가능한 시스템 조성

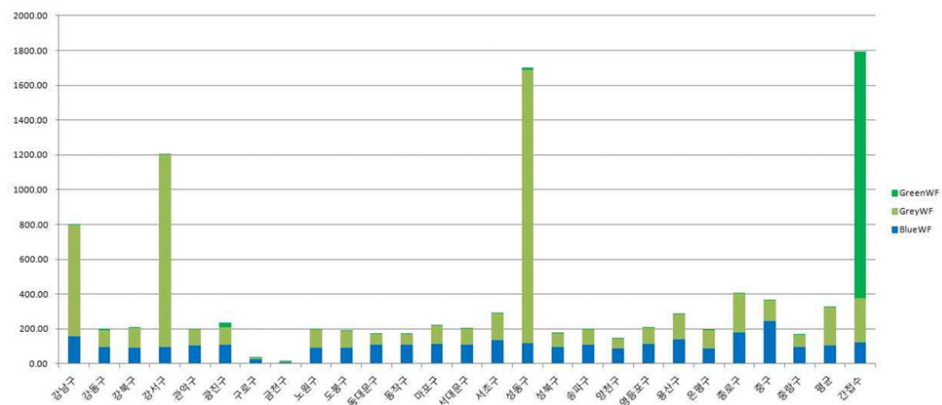
서울특별시시는 도시 공간구조상 외부에서 유입되는 수자원에 크게 의존하는 소비도시 특성을 보인다. 물발자국 개념은 소비하는 직접적인 물 뿐만 아니라 간접적인 물 사용도 고려하는 지표로서 효과적인 측정과 관리를 위한 다양한 연구와 정책개발을 이루고자 하였다. 물발자국을 통해 서울시의 물관련 정책 문제점과 한계를 보완하고 기후변화, 물부족 등 문제에 적극적으로 대응하기 위한 연구를 진행하였다.

물발자국의 개념을 서울시 물환경 정책에 접목하여 기존 물환경 관리체계의 문제 및

한계 분석을 바탕으로 행정자치구에 대한 물발자국 현황을 분석하고 도입 및 활용방안을 도출하고자 하였다. ‘물발자국 평가 매뉴얼’을 기반으로 개념과 방법론을 정립하고, 서울시 25개 자치구를 대상으로 한 청색 및 회색 물발자국 시뮬레이션 분석을 통해 지역별 물이용 현황을 파악하였다.



[그림 2-7] 서울시 직접수와 간접수 물발자국 비교



[그림 2-8] 서울시 각 자치구별 물발자국(직접수) 비교

서울특별시는 물환경 관리정책 및 관련 제도, 관리체계 심층분석을 위해 물환경종합관리계획, 수질오염총량관리기본계획, 하수도정비기본계획, 물재이용관리계획을 중심으로 물발자국과 연관된 계획현황 및 문제점과 한계를 검토하였다.

물환경 관리정책의 현안분석 및 물발자국 제도의 지원기능 강화를 위해 물 사용량의 정량적 지표 도입 및 정책수립과 상호 연동되는 통합적 관리체계 수립이 필요할 것으로 판단하였다. 서울시의 물관련 법정계획의 목표 및 방향에 대해 물발자국 제도를 도입하여 물소비량 산정, 물발자국 저감을 위한 방안 등을 위해 각 법정계획에 따른 타당성을 검토하였다.

[표 2-1] 서울시 물관련계획별 물발자국 도입계획 검토

물관련계획 (법정계획)	주요내용 (방향,범위,목표)	물발자국 도입을 통한 계획의 타당성 (물발자국 제도를 통한 지원)
물환경종합 관리계획	<p>■ 주요목표의내용</p> <ol style="list-style-type: none"> 1)물환경관리방향전환 2)비전에대한새로운실행계획설 정및우선 순위로재배치 3)물환경정책의선진화 4)권역별물환경조성지침개발 5)시민,민간,행정의역할 <p>■ 종합계획수립방향</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 3개물환경관리방향, 10개물 환경목표제시. 계속해나가는시 책,확충발전시키는시책, 새롭게 진행하는시책을 마련 2)시민,기업,행정의협동의의한관 리체계 구축 3)시민,기업의의견고려및목표나 시책의재 검토실시 4)권역별물환경관리계획수립 	<ul style="list-style-type: none"> •권역별 담수총량산정.생산 및 소비물발자국 산정(정량 화DB구축) •주변기업(산업체), 주거단지파악(생산제품군,소비제품군 파악), 주민들의 소비행태 등을 파악하여 물발자국 산정 •제품생산및사용에따른물발자국산정 •시민,민간,행정의홍보기능강화 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> •도시개발에 따른 오염총량, 담수 사용량 파악 •도시개발에 따른 제품군의 회색물발자국 산정 (수질정화에필요한수량) •물소비량이 큰 기업에 대한 물중립 및 물발자국 저 감정책 수립 유도(코카콜라교훈)-물소비량이 큰 기업에 대한 모니터링 •시민은감시,행정은인센티브,패널티부여 등의 집행 ▶조정기능 •가정용수 사용에 대한 물발자국 파악으로 회색물발자 국 원인파악 및 절수형 시설교체 등의 저감방안에 기여 •권역별 오염부하량→차이의원인→물발자국 산정을 통 한 정량화(DB)→물소비량 파악 및 오염원 제거 수량파 악으로 수질관리 효율성 증대
수질오염총량 관리기본계획	<ol style="list-style-type: none"> 1)단위유역별,지자체별오염물질 할당부하량산정.배출부하량을할 당부하량내로관리 2)연평균산업폐수방류량증가(한 강유역) 3)관리대상오염물질(BOD,T-P) 	<ul style="list-style-type: none"> •단위유역별,지자체별 직접 및 간접 물발자국 산정으로 오염물질 배출부하량 및 할당부하량의 정량화가 가능 •산업폐수 방출기업에 대한 물소비세 할증 부가 및 자 체정수처리장 설치 및 지속적인 저감 노력 모니터링 •BOD, T-P외에 TSS(총부유물질), pH(수소이온농도), TDS(총용존고형물), COD, DO등을 관리대상으로하여 회색물발자국(GWF)의 원인 분석

물관련계획 (법정계획)	주요내용 (방향, 범위, 목표)	물발자국 도입을 통한 계획의 타당성 (물발자국 제도를 통한 지원)
하수도정비기본계획	1)하수배제방식 2)하수처리장고도처리시설도입 3)노후불량관거개량정비지속적추진 4)하수처리장현대화사업검토	<ul style="list-style-type: none"> •수질오염증가요인에따른분류식하수관거설치(우수에의한침수방지및공공수역수질오염방지)-물소비량측정및BWF/GWF산정을통해수질오염증가요인및방지대책계량화 •기업및지자체의물발자국용량산정(물소비량)을통한하수처리장규모및효율적처리방식의검토
수도정비기본계획	1)장래급수원단위, 유수율, 침투부하율산정하여장래급수량계획설정 2)정수장시설용량부족으로기존정수장확장, 노후관개량, 송배수로관로신설	<ul style="list-style-type: none"> •높은인구밀도및산업화에따른물부족현상및회색물발자국증가추세-물발자국분석을통한침투부하율산정등을통해장래유수량계획산정가능-회색물발자국산정을통한정수용량파악으로기존정수장확장에계량적data제공
물재이용관리기본계획	1)물재이용시설설치▶운영현황2)물수급현황및물이용전망3)물재이용수요량전망4)물재이용촉진위한단계별사업계획5)물재이용재정/홍보6)빗물이용의활성화-2020년6배향상목표(2010년대)	<ul style="list-style-type: none"> •지역물공급계획과연관성있는재사용계획마련•빗물수집프로젝트추진및이용활성화•실행가능한재정지원프로그램•물재이용/재처리시설도입(지자체, 기업) •10년동안빗물이용을6배증가시키기위해타당성으로물발자국분석활용
빗물관리기본계획	1)빗물관리시설설치추진2)서울시조례및지침개정/정책개선3)통합관리방안-시설배치적정성, 빗물분담량의형평성원칙4)현재빗물용도에따라관리부서가분산되어통합관리가어려움	<ul style="list-style-type: none"> •서울시조례및지침개정시녹색및청색물확보를위한물발자국정책을반영하는방안검토 •관리주체를일원화하여통합적인빗물관리계획수립 •빗물침투시설및저류시설의설치로물소비량증가에대비(물발자국분석) •소비물발자국분석을통한물소비량산정을통해빗물사용의적극적인유도

물환경관리에 대한 서울시의 여러 가지 계획들은 해당 계획을 추진함에 따라 지속가능한 도시 물환경조성을 유도하고 있다. 그러나 해당 계획들의 경우 대상 물관리 분야와 범위가 한정되어 효과적인 업무 수행과 연계성이 부족한 측면을 한계점으로 판단하였다.

이러한 측면에서 물발자국 개념을 도입한 서울시의 정책제안은 다음과 같다. 서울특별시는 연구를 통해 물발자국 산정과 데이터베이스 구축을 통한 도시계획 개선과 환경영향평가 개선, 물발자국 저감을 위한 방안 검토, 기업과 시민들에 대한 물발자국 교육강화 및 인센티브 지원, 물발자국 라벨링을 통한 시설물 및 제품평가 등 정책적 제안을 하였다

2) 보령시 : 지역 물발자국 산정 및 제도화 방안 연구

물발자국을 활용한 물이용 측면의 비효율적인 요소를 도출하고 물발자국을 활용한 제도 도입과 수자원 확보 등 기반을 마련하고자 연구가 진행되었다.

연구의 범위로는 지역 물발자국 산정 방법론 마련 및 시범산정, 물관리 정책 고도화를 위한 기존 정책과의 연계방안 도출, 물발자국 제도화를 위한 중장기 추진방안을 마련하고자 하였다. 연구의 방법으로는 국내 물 관리 및 사용실태를 파악하고 기초 통계자료를 이용하여 흐름통계를 분석하였다. 시범지역인 보령시를 비롯한 5개의 지자체의 수자원 사용 및 관리현황을 조사하였다.

한국형 지역 물발자국 산정 방법을 마련하고 산정결과를 토대로 물을 저감할 수 있는 방안을 제시하고 물발자국의 정책적 활용방안을 도출하고 중장기 추진방안을 수립하고자 하였다.

보령시는 물발자국을 산정하기 위해 ISO 14046, WFN, EU WFTP 방법론을 분석하여 비교하였다.

[표 2-2] 물발자국 산정 방법론 비교분석

구분	ISO 14046	WFN Guideline	WFTP Project
개발기관	국제표준화기구	Water Footprint Network	EU WFTP
개발년도	2014.7.	2009	2012
개발목적	· 물발자국 산정요건 제시 · 인증에 활용할 목적 없음	· 물발자국 산정방법 제시 · 인증용으로 개발하지 않음	· 물발자국 산정방법 제시 · 도시 물 사용 관리 및 개선
평가대상	제품, 공정, 조직	제품, 조직, 지역, 국가	지역(비첸차, 인스부르크, 브로프와프)
평가범위	전과정	전과정	전과정(WFN)
수자원종류	지하수, 지표수, 화석수, 해수 등으로 구분	그린워터, 블루워터, 그레이워터 등으로 구분	그린워터, 블루워터, 그레이워터 등으로 구분
평가지표	수자원고갈과 수질오염을 다른 환경영향으로 표기	수자원고갈과 수질오염 고려하되 최중은 수량으로 표기	WFN의 방법론을 준용
특징 및 주지사항	· EU의 PEF/OEF제도에서 활용하는 물발자국 산정법으로 활용될 가능성이 큼	· 대부분의 연구논문이 WFN 방법을 준용하고 있어 ISO 표준보다 많은 활용 기대	· 유럽 3개 지역에서 시범적용 · 지역 물발자국 국내 적용 예정 모델 · 거주자와 전체면적으로 나누어 산정
한계점	· 수량과 수질을 통합하여 구분 불가 - 수량 : 물 이용기능량으로 평가 - 수질 : 물 분해량으로 평가	· 영향평가 방법론에 대해 개념의 설명 수준으로 실제 적용을 위한 구체적인 평가항목 및 지표는 부재함	· 토지 여건 및 지형, 제도적으로 국내와 상이하여 적용시 차이 발생 가능함

국내의 수자원 흐름을 체계적으로 파악하기 위해 ISO 14051의 원칙을 바탕으로 한 Water Flow Accounting 기법을 적용하였다. 이 과정에서는 생활용수를 중심으로 수자원의 취수부터 방류까지의 흐름을 상하수도 통계와 지하수 조사연보 등을 활용하여 정량적으로 분석하였다. 특히, 단계별 물질수지를 고려하여 물의 흐름량을 보정함으로써 보다 신뢰성 높은 데이터 기반을 마련하였다.

분석 결과, 연간 정수로 공급되기 위해 취수된 물은 총 88.1억 톤이며, 이 중 정수장 유효수량은 67.1억 톤, 무효수량은 8.5억 톤으로 산출되었다. 실제 생활에 사용된 상수는 65.9억 톤, 지하수는 18.2억 톤이며, 하수처리량은 총 71.7억 톤에 달하였다. 용도별로는 가정용수가 48.7억 톤으로 가장 많았고, 비가정용수와 기타용수가 그 뒤를 이었다.

아울러 충청남도 내 6개 지자체(충청남도청, 당진시, 천안시, 보령시, 논산시, 공주시)를 대상으로 진행한 인터뷰를 통해 실질적인 물 관리 현황을 파악하였다. 대부분의 지자체는 가뭄과 같은 물 부족 상황을 겪고 있었으며, 물 재이용 시스템의 부재와 예산 부족으로 인해 물 재이용 활동이 미비한 실정이었다. 또한, 지하수의 수질은 관리되고 있으나 수량 관리에는 한계가 있었다. 이는 향후 법적·제도적 보완의 필요성을 보여주었다.

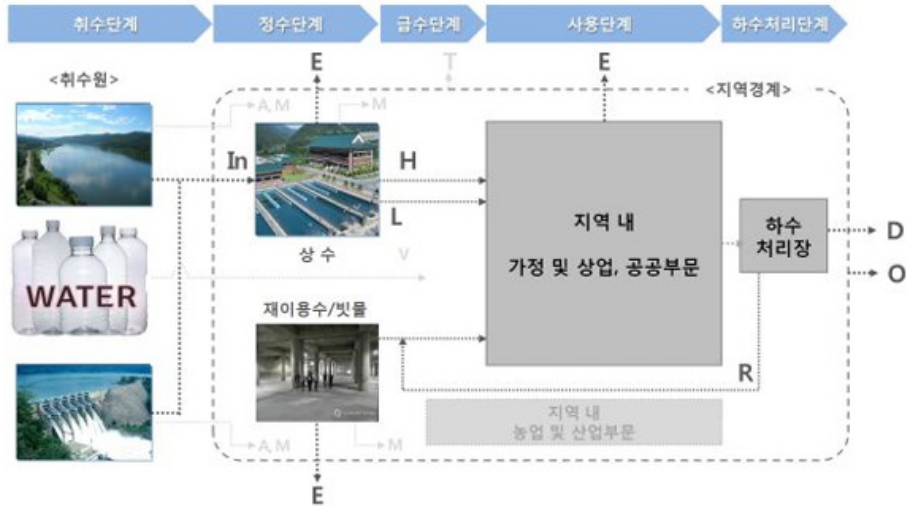
기존의 물 사용량 단순 계측 방식에서 벗어나 도시 단위의 물 고갈 가능성까지 고려하는 ‘물 소비(Water Consumption)’ 기반의 지역 물발자국 산정 방법이 필요하다. 본 연구에서는 기존 WFN(Water Footprint Network) 방법론을 준용하되, 한국의 상황에 맞게 지역 물발자국 산정 범위와 방법을 재정의하였다.

산정 범위는 도시로 들어오는 물의 흐름(취수)과 도시 외부로 배출되는 흐름(방류)을 포함하였으며, 농업 및 공업 부문은 제외하였다. 물의 가상수는 고려는 하되 산정값에는 포함하지 않았다. 물발자국은 청색 물발자국과 회색 물발자국으로 나누어 산정하였으며, 각각 다음과 같은 방식으로 계산되었다

- 청색 물발자국 = 취수량 + 증발량 - (방류량 + 재이용량)
- 회색 물발자국 = 오염물질 배출량 / (법적 기준 농도 - 자연 배경 농도)

이 방법을 충청남도 보령시에 시범 적용한 결과, 보령시의 1인당 연간 청색 물발자국은 265.5 m³, 회색 물발자국은 6.5 m³로, 총 물발자국은 272 m³로 산출되었다. 이는 국가 전체 평균과 비교해 현저히 낮으며, 특히 절수기기 설치와 생활 패턴 변화만으로도

연간 2.6백만 톤의 생활용수 절감이 가능하다는 점에서 정책적 가치가 큰 것으로 분석되었다.



[그림 2-9] 단계별 지역 물발자국 산정

이를 활용한 물발자국을 정책적으로 활용하기 위해 국내외의 물 관련 정책 현황 파악과 연계할 수 있는 7가지 방안을 제시하였다.

[표 2-3] 물발자국 정책활용 방안

1. 제품 물발자국 연계	물발자국 인증제품에 대한 보조금 또는 지원프로그램 마련
2. 물 재이용 정책 수립 근거로 활용	물 재이용 효과를 물발자국 저감 예상량으로 제시하고 정책 수립 근거로 활용
3. 물 포인트 제도 도입	가정 내 생활용수 개별 사용량을 절감 시 에코머니 포인트 적립
4. 환경정보공개시스템 연계	환경정보공개시스템의 환경성정보공개 지표 내 물발자국 항목 추가
5. 중수도 시설 의무 설치 기준 강화	중수도 시설 설치 기준인 폐수배출량과 건축 연면적 하향 적용하여 물발자국 저감
6. 물·에너지 넥서스 개념 연계	물·에너지 상호연관성을 고려한 수자원 및 에너지 관련 정책 수립
7. 물 이용부담금의 확대 적용	상·하류지역 구분을 세분화하여 지역별 물발자국 산정값에 따라 물이용부담금 산정 및 적용

다. 시사점

기후위기와 수자원 고갈 문제가 전 지구적으로 부각되는 가운데, 물발자국(Water Footprint) 개념은 기존의 수량 중심 수자원 관리에서 나아가 정성적이고 종합적인 물 관리 전략의 필요성을 강조한다. 우리나라도 점점 더 빈번해지는 가뭄과 홍수 등 물리적 기후위기에 직면하고 있으며, 산업 구조의 변화와 생활양식의 다변화에 따라 물 수요 역시 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 현실 속에서 단순한 물 사용량의 관리만으로는 한계가 있으며, 물 사용이 환경과 사회에 미치는 영향을 종합적으로 평가하고 대응할 수 있는 새로운 관리 체계의 도입이 절실하다.

물발자국은 이러한 문제의식에 대응할 수 있는 실효적인 도구로서, 국내의 다양한 수자원 정책 및 환경 관련 법령과의 연계 가능성이 높다. 『국가 물관리 기본계획』, 『물환경관리기본계획』, 『기후변화 적응대책』 등은 모두 지속가능한 물순환과 자원의 효율적 이용을 주요 목표로 삼고 있으며, 물발자국은 이들 계획의 실현 가능성을 높이는 정량적·전략적 수단으로 작용할 수 있다.

국내외의 다양한 사례를 종합해볼 때, 물발자국은 단순한 수자원 계량 지표를 넘어서, 보다 넓은 관점에서 지속가능한 전략 수립을 위한 핵심 기초자료로 활용될 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 지역의 물 사용 특성과 수급 불균형을 정량적으로 파악하고 이를 바탕으로 한 지역 맞춤형 대응 전략 수립에 기여할 수 있으며, 기후변화 적응 전략과도 유기적으로 연계될 수 있다. 나아가 도시계획, 도시설계, 그린인프라스트럭처, 생태환경 조성 등 다양한 분야로의 확장 가능성도 존재한다.

이러한 시사점은 ESG 경영체계와 LCA(전과정평가) 접근법과도 밀접한 관련을 가진다. 환경(E) 측면에서는, 물발자국을 통해 물 소비 전 과정에서 발생하는 환경 영향을 정량화할 수 있으며, 이를 통해 기업과 지자체는 보다 책임 있는 자원관리를 실현할 수 있다. 예를 들어, 농업용수, 생활용수, 산업용수의 사용량과 오염도를 평가하고 개선하는 과정은 LCA의 핵심인 자원 투입-산출 구조 분석과 직접적으로 연결된다.

사회(S) 측면에서는, 시민 참여 기반의 물 절약 실천과 공동체 중심의 물순환 회복이 ESG의 사회적 책임 이행 요소와 맞닿아 있다. 실제로 일부 지자체에서 추진한 절수 기기 보급, 주민 참여형 교육 프로그램 등은 자발적 참여를 통한 실질적 성과를 창출한 사회적 ESG의 성공 사례로 평가될 수 있다.

2. 국내외 물발자국 산정방법

가. 물발자국네트워크(WFN : Water Footprint Network)

1) 개요

인간의 활동이 환경에 미치는 영향을 계량화한 개념이 생태발자국, 탄소발자국, 물발자국이다. 생태발자국은 인간 집단이 유지되는 데 필요한 생물학적 생산가능 면적을 의미하며 탄소발자국은 인간 활동에 필요한 상품이 생산과 소비과정에 발생하는 이산화탄소 총량을 의미한다.

[표 2-4] 물·생태·탄소발자국의 비교 2)

구분	단위	설명	특성	비고
물발자국	L/kg, L/L 또는 m ³ /yr	담수의 이용을 나타내는 양	물의 지역·시간 한정성	수자원
생태발자국	gha	생태 생산 공간의 이용을 나타내는 양	토지의 고정성	토지자원
탄소발자국	ton	이산화탄소의 양으로 나타낸 온실가스의 양	공기의 유동성	대기자원

물발자국은 인구집단을 유지하는 데 필요한 담수의 양을 의미하며 “하나의 제품이나 서비스 전 과정에 이용되는 물 사용량으로서, 제품이나 서비스를 생산하는 데 필요한 원재료인 직접수 사용량과 생산·유통·사용·폐기의 각 단계에서 투입되는 제품이나 서비스를 생산하는 데 필요 간접수 사용량을 합산한 값”의 정의 할 수 있다⁷⁾.

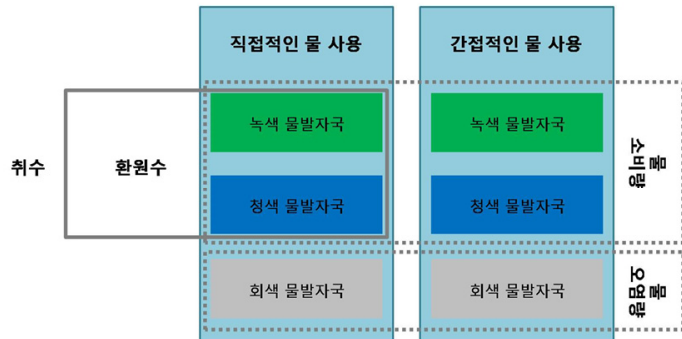
UNESCO-IHE 물교육연구소에 근무하던 Arjen Hoekstra가 물발자국 개념을 처음으로 제안하였으며 2005년부터 네덜란드 트벤트 대학교에 교수로 재직중 기업, 시민사회, 다자간 기구, 학계의 글로벌 석학들과 2008년 WFN(Water Footprint Network)를 설립하였다.

WFN은 물발자국(녹색/청색/회색) ISO 14046 개발을 위한 초기 개념과 방법론을 제공하였으며 평가방법을 제공하고 있다.

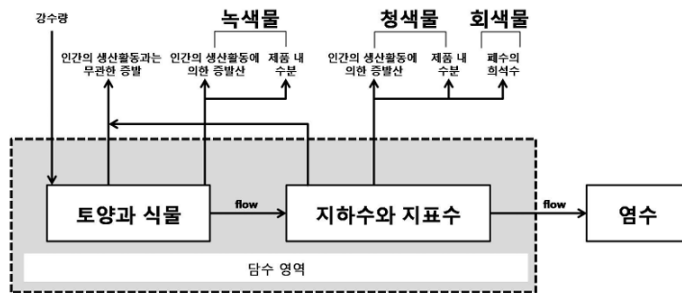
물발자국은 녹색, 청색, 회색 물자국으로 구분되고 있으며 녹색물자국은 녹색 수자원

7) 노태호 외, 물발자국(Water Footprint) 개념의 정책적 도입과 활용방안, 한국환경정책연구원, 2012.10.

(흐르는 상태가 되지 않는 빗물)의 소비, 청색물자국은 한 생산물의 공급 사슬을 따라 소비된 청색 수자원(지표수와 지하수), 회색물자국은 오염수를 천연 농도와 주변 수질 기준에 맞게 정화하기 위해 필요한 담수의 양으로 정의하고 있다²⁾



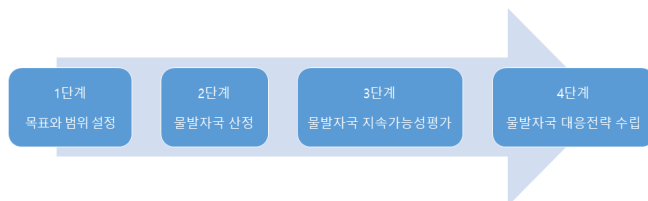
자료: The Water Footprint Assessment Manual을 재구성.



[그림 2-10] 물발자국의 종류 및 개념도 2)

2) 평가단계

물발자국의 평가는 1단계 목표와 범위 설정, 2단계 물발자국 산정, 3단계 물발자국 지속가능성 평가, 4단계 물발자국 대응전략 수립으로 4단계로 구성되어 있다.



가) 목표와 범위설정

물발자국의 목표는 일반적으로 최종 목적, 특정단계, 관심범위, 기간으로 설정하며 공정, 제품, 소비자 또는 공동체, 지리적으로 세분화된 지역, 국가내외 국가소비, 비즈니스 등을 관심 대상으로 평가를 수행한다.

물발자국 산정범위는 청색·녹색·회색물발자국 중 고려 대상, 공급사슬의 분석 제외 대상, 시공간적 포함 정도, 데이터 기간의 설정 정도, 직·간접적 물발자국의 분석 포함 여부, 국가내외 국가소비 물발자국의 포괄적 고려여부로 설정할 수 있다.

나) 물발자국 산정

단일 공정단계는 모든 물발자국의 기본 구성요소이며 청색물발자국, 녹색물발자국, 회색물발자국으로 구분할 수 있다. 중간과 최종 물발자국은 다양한 공정단계 물발자국의 합이다.

청색물발자국은 지표수와 지하수의 소비적 사용을 나타내는 지표로 증발 물, 제품에 융합된 물, 집수역이나 대양에 유출된 물, 동일한 시기에 환원되지 않는 물중 하나이다. 청색물발자국($WF_{proc, blue}$)의 공정단계 산출식은 다음과 같다.

$$WF_{proc, blue} = \text{청색물 증발량} + \text{청색물 융합량} + \text{유실 환원수 [volume/time]}$$

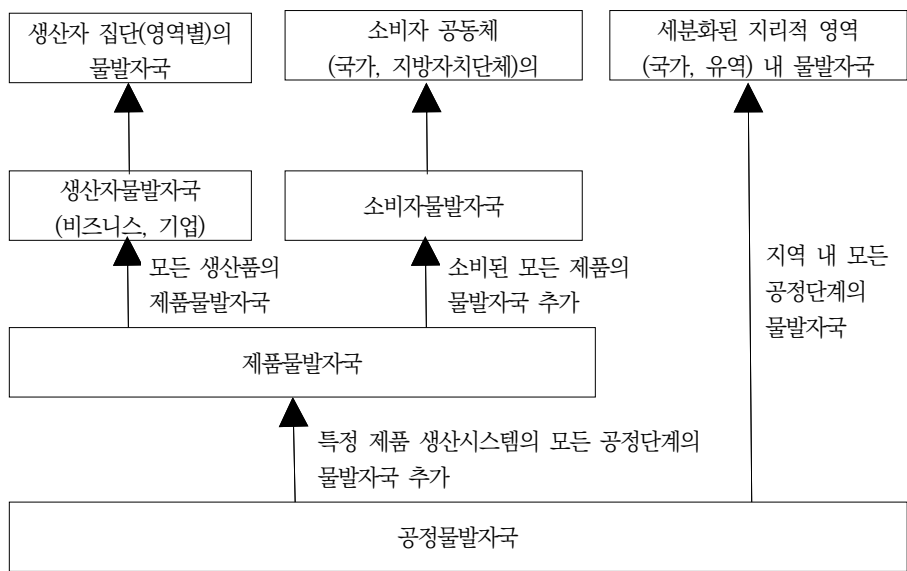
녹색물발자국은 대지에 내린 빗물이 토양에 저장되거나 일시적으로 토양과 식물에 머무는 물로 생산과정에서 소비는 빗물의 양을 말한다. 특히 임업과 농업에서 생산되는 제품에 융합된 물의 합을 나타낸다. 녹색물발자국($WF_{proc, green}$)의 공정단계 산출식은 다음과 같다.

$$WF_{proc, green} = \text{녹색물 증발량} + \text{녹색물 융합량 [volume/time]}$$

회색물발자국은 공정단계에서 발생하는 담수의 오염정도를 나타내는 지표로 오폐수를 자연 배경농도와 주변 수질기준까지 정화하기 위해 필요한 담수의 양을 말한다. 회색물발자국의 공정단계 산출식은 다음과 같다.

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} [volume/time]$$

L (질량/시간)은 오염원의 양, C_{max} 는 오염원 주변 수질기준, C_{nat} 는 오염원 유출 수역의 자연배경농도를 나타낸다.



[그림 2-11] 공정발자국을 기초로한 다양한 물발자국의 산정 및 연관성

물발자국 종류간 연관관계를 살펴보면 다음표와 같다.

[표 2-5] 다른 종류의 물발자국 간 연관관계

구분	정의	산정법
제품물발자국	제품을 생산하는 데 직접적이거나 간접적으로 사용된 담수의 총량	제품 생산 공정단계 물발자국 합
소비자물발자국	소비자가 사용한 제품이나 서비스의 생산을 위해 소비되거나 오염된 담수의 총량	소비자가 소모한 전체 제품의 물발자국 합
공동체의 물발자국	-	구성원들의 물발자국 합
국가소비 물발자국	국민이 소비하는 제품과 서비스를 생산하는 데 사용된 내부적 물발자국과 다른 국가에서 사용된 외부적 물발자국으로 구성됨	거주자들의 물발자국 합
비즈니스 물발자국	기업을 운영하고 지원하는 데 있어 직간접적으로 사용된 담수의 총량	기업이 생산한 최종 제품의 물발자국 합
지역내 물발자국 (시, 도, 국가, 집수역 또는 유역)	그 지역 경계선 안에서의 총 담수 소비와 오염으로 정의	지역에서 발생한 전체 공정의 물발자국 합

다) 물발자국 지속가능성 평가

물발자국 지속가능성은 특정 집수역이나 유역내 물발자국 지속성, 공정물발자국의 지속성, 제품물발자국의 지속성, 비즈니스물발자국의 지속성, 소비자 물발자국의 지속성 등의 종류로 구분하여 평가할 수 있다.

본 연구에서는 지리적 지속성 즉 특정 집수역이나 유역내 물발자국 지속가능성을 주로 다루고자 하며 이러한 경우 환경적, 사회적, 경제적측면이 고려되어야 한다.

환경적 지속가능성은 합의된 특정 수질기준 이하로 관리되어야 하며 사회적 지속가능성은 마시고, 씻고, 요리를 위한 최소한의 가정내 물공급과 식량공급 보장을 위한 식량 생산의 최소 물 할당량이 기본적인 인간 수요로 할당되어야 하고 경제적 지속가능성은 경제적으로 효율적인 방법에 의해 물이 할당되어야 함을 나타낸다.

집수역의 지속가능성을 평가하고 환경적으로 지속불가능한 핫스팟을 도출하고 규명하기 위해서는 녹색, 청색, 회색물발자국 평가를 통하여 물수요, 오염량, 폐수 정화능력 등이 초과하는 지를 평가하여야 한다. 각 물발자국의 지속가능성평가는 다음표와 같이 산출할 수 있다.

[표 2-6] 물발자국 종류별 지속가능성평가 기준

종류	지속가능성평가 산정식
녹색물발자국	$WS_{green}[x,t] = \frac{\sum WF_{green}[x,t]}{WA_{green}[x,t]}$ $WA_{green} = ET_{green}[x,t] - ET_{env}[x,t] - ET_{unprod}[x,t] [volume/time]$ <p> $WS_{green}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 녹색물부족수준 $\sum WF_{green}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 총 녹색물발자국 $WA_{green}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 녹색물가용성 $ET_{green}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 땅으로부터 증발산한 빗물의 총량 $ET_{env}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 자연식생 보호된 지역으로 부터의 증발산량 $ET_{unprod}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 작물생산에서 생산적으로 쓰일 수 없는 증발산량 </p>
청색물발자국	$WS_{blue}[x,t] = \frac{\sum WF_{blue}[x,t]}{WA_{blue}[x,t]}$ $WA_{blue}[x,t] = R_{nat}[x,t] - EFR[x,t] [volume/time]$ <p> $WS_{blue}[x,t]$: 특정기간 t동안 특정 집수역 x의 청색물부족수준 $\sum WF_{blue}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 총 청색물발자국 $WA_{blue}[x,t]$: 특정기간 t동안 특정 집수역 x의 청색물가용성 $R_{nat}[x,t]$: 특정기간 t동안 특정 집수역 x의 자연적 방출유량 $EFR[x,t]$: 특정기간 t동안 특정 집수역 x의 환경유지용량 </p>
회색물발자국	$WPL[x,t] = \frac{\sum WF_{grey}[x,t]}{R_{act}[x,t]}$ <p> $WPL_{grey}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 수질오염수준 $\sum WF_{grey}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 총 회색물발자국 $R_{act}[x,t]$: 특정기간 t에서 집수역 x의 실제방출유량 </p>

4) 물발자국 대응전략 수립

물발자국 평가결과에 따라 정부, 생산자, 소비자, 투자자는 물발자국을 줄이거나 영향을 최소화할 수 있는 대응전략을 수립함이 타당하다.

국가나 지방정부 차원에서는 물발자국 감축이나 완화를 위하여 국가, 유역, 지역 수준의 물정책, 환경정책, 농업정책, 산업/경제정책, 에너지정책, 무역정책, 외교정책과 국제협력 등이 고려되어야 할 것이다.

나. KS I ISO 14046

1) 개요

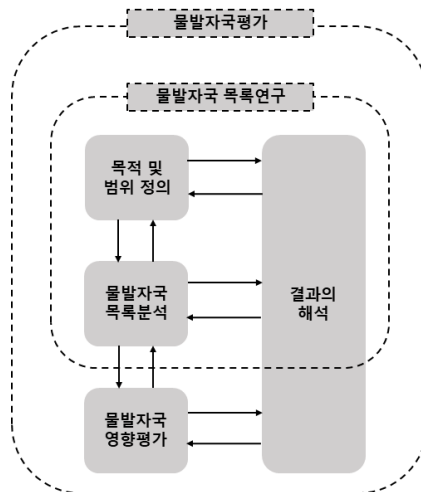
2009년 6월 물발자국 표준화에 대한 NWP(New Work Item Proposal)제안이 가결됨에 따라 스웨덴 IVL연구소에서 2009년 11월부터 전문가 모임을 3차례 진행한 후 2011년 6월 ISO 14046 초안이 오슬로회의에서 채택되었다.

2012년 6월 2차 버전이 태국회의에서 결정되었으며 이탈리아에서 2012년 12월 추가 회의를 통해 마련된 문서를 기반으로 2013년 2월 국제표준초안이 채택된 후 2014년 7월 공식 국제표준이 정식 발행되었다.

정식명칭은 ISO 14046 : 2014-Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines이며 한국은 이를 기반으로 2015년 4월에 KS I ISO 14046이 제정되었다.

2) 평가단계

물발자국 평가는 반드시 전과정평가의 4단계인 목적 및 범위 정의, 물발자국 목록분석, 물발자국 영향평가, 해석을 포함해야 한다.



[그림 2-12] 물발자국평가의 단계

가) 목적 및 범위 정의

물발자국 평가 목적은 용도, 평가를 수행하는 이유, 대상청중, 독립형 평가인지 아니면 전과정평가의 부분인지의 여부, 비교주장을 하고자 할 때 연구가 전과정평가의 부분인지 여부가 명확하여야 한다.

평가범위는 목적과 일치해야 하며 다음의 사항들이 고려되어야 한다.

1. 평가시스템, 시스템 경계 그리고 관련 있는 경우, 조직 경계
2. 기능단위
3. 평가의 시간적 및 지리적 범위 및 해상도
4. 데이터 및 데이터 품질 요구사항
5. 제외 기준
6. 할당 절차
7. 가정, 가치 선택 및 선택 요소
8. 물발자국 영향평가 방법론과 영향유형
9. 물발자국평가 결과가 하나의 영향지표 결과(하나를 구체적으로 지정), 물발자국 프로필 그리고/또는 가중치 적용 후의 물발자국을 포함할 것인지 여부
10. 물발자국평가가 포괄적인지
11. 어느 인과관계 및 영향이 물발자국평가에 포함되고, 제외된 영향의 예상 결과를 규명하는지
12. 불확실성 및 제한사항
13. 평가 제외사항에 대한 타당성
14. 적용 가능하다면, 활동도에 따른 현재 조건과 비교할 수 있는 기준 조건
15. 보고
16. 만약 있다면, 정밀 검토 유형

시스템 경계는 어떤 단위공정들이 물발자국평가에 포함되어야 하는지 결정하여야 하며 연구목적에 부합해야 한다. 단위공정을 선택할 때에는 국지적 물부족 및 국지적 수질에 따른 물이슈를 고려해야 한다.

데이터 수집시 고려되어야 할 물과 관련된 데이터는 다음과 같으며 데이터 품질을 위해서 시간적범위, 지리적범위, 기술적범위, 정밀성, 완전성, 대표성, 일관성, 재현성, 사용된 모델을 포함한 데이터 출처, 정보의 불확실성 등이 요구된다.

1. 사용된 물의 양 : 취수와 배수를 포함
2. 사용된 물 자원의 유형 : 취수와 집수를 포함
3. 수질을 나타내는 데이터 : 취수, 배출 및 집수를 포함
4. 물 사용의 형태
5. 수행하고 있는 평가 목적 및 범위와 관련 있는 경우의 배수, 하천유량, 지하수 유량 혹은 토지이용 변화로부터 발생한 물의 증발, 토지관리 활동, 다른 형태의 물 차단 등의 변화
6. 물을 사용하는 경우, 그 지역의 관련 환경 조건지표를 결정하기 위해 필요한 물 사용 장소(취수, 배수 혹은 수질 영향을 포함)
7. 관련 있는 경우, 유량, 취수 및 배수의 계절적 변화 또는 수질변화
8. 관련 있는 경우, 물 사용 시기 및 물저장 시간을 포함한 물사용의 시간적 측면

나) 물발자국 목록분석

목록 계산은 KS I ISO 14044에서 기술된 절차를 따라야 한다. 데이터 계산, 데이터 검증, 단위공정으로의 데이터 연결, 기준 흐름과 기능단위 계산, 시스템 경계의 수정은 KS I ISO 14044:2011에 부합하여야 한다.

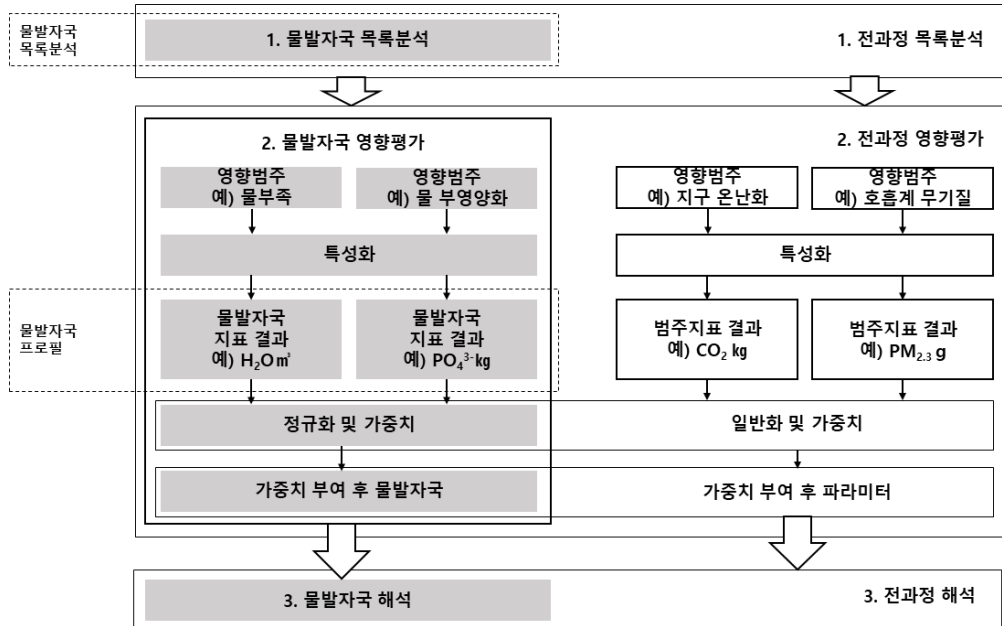
물발자국 목록은 평가대상이 되는 시스템을 구성하는 단위공정의 투입물과 산출물을 포함하여야 하며 기본 흐름에 대한 정보는 다음이 포함되어야 한다.

1. 물 사용량 : 질량 혹은 부피
2. 사용된 물 자원 유형 : 강우, 지표수, 해수, 기수, 지하수, 화석지하수
3. 수질 파라미터와 특징 : 물리적, 화학적 특성, 혹은 기능적 수질 기술어
4. 물 사용의 형태 : 증발, 증산, 제품 통합, 다른 유역 혹은 바다로 배출, 유역내 하나의 물자원 형태에서 다른 물자원 형태로 이동
5. 물이 사용되거나 영향을 받은 지리적 위치
6. 물 사용의 시간적 측면 : 시스템 경계 내에서 물이 체류하는 경우, 사용 및 배출 시간
7. 수질에 영향을 주는 대기, 물, 토양으로의 배출

물발자국 목록 분석에는 그 외에 할당을 위한 할당절차, 재사용과 재활용에 대한 할당 절차를 포함하고 있다.

다) 물발자국 영향평가

물발자국 영향평가는 영향 범주와 특성화 모델 선택, 분류화, 특성화(지리적, 시간적 문제), 가용용 물발자국, 수자원 고갈을 해결하는 물발자국, 물발자국 프로파일을 포함하고 있다.



[그림 2-13] 물발자국 영향평가 단계 흐름도(ISO 14046)

라) 물발자국 결과 해석

물발자국평가에 대한 해석단계는 다음과 같다.

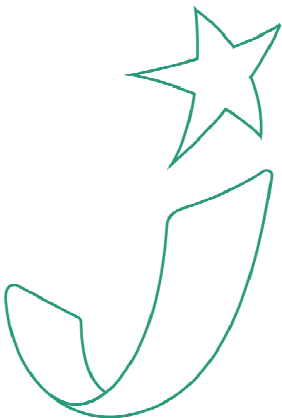
1. 중요 문제의 정의는 물발자국평가 결과에 기초한다.
2. 완결성, 민감성, 일관성 검사를 고려한 평가
3. 지리적, 시간적 측면의 고려
4. 물발자국평가의 결론과 한계점
5. 불확실성의 정량 혹은 정성적 평가
6. 보고된 결과에 입각하여 범위를 제공하기 위한 민감도 분석 고려



제3장

전북자치도 지자체별 물발자국

1. 전북자치도 물발자국 산정을 위한 기초현황
2. 전북자치도 물발자국 산정방법
3. 전북자치도 지자체별 물발자국



제3장 전북자치도 지자체별 물발자국

1. 전북자치도 물발자국 산정을 위한 기초현황

가. 전북자치도 기상 및 수자원 현황

1) 기상 및 수문기후 현황

가) 강수량 현황

■ 전북자치도 기상관측소 및 강수량 현황

전북특별자치도 강수 특성을 파악하기 위해 기상청 종관기상관측소(ASOS)와 자동기관 관측시스템 방재관측소(AWS) 자료를 함께 활용하였다. 관측지점은 종관기상관측소(ASOS) 10개 지점과 방재관측소 33개 지점으로 이루어져 있으며, 서해 도서부와 해안지역, 내륙평야지, 산악지역에 고루 분포하고 있다. 각 관측소의 위치와 연 강수량은 표에 정리하였다.

조사된 관측자료는 2023년 기준으로 작성하였으며, 전북지역 연 강수량은 1,200 ~ 2,600mm 사이의 범위를 보였다. 연 강수량이 가장 적게 관측된 지점은 고창으로 약 1,232mm 으로 조사되었으며, 서해 도서에 위치한 어청도 1,350mm, 말도 1,502.5mm, 새만금 1,558.5mm, 줄포 1,560mm 순으로 상대적으로 낮은 강수량을 기록하였다. 내륙 산악 지역에 위치한 관측소에서는 연 강수량이 뚜렷하게 증가하는 양상을 보인다. 뱀사골의 연강수량은 약 2,680mm로 관측소 중 가장 높은 값을 나타내고 있으며, 임실강진 2,442.5mm, 함라 2,367mm, 내장산 2,246mm, 덕유산 2,221mm, 북흥 2,222mm, 여산 2,183.5mm, 설천봉 2,187mm 지점에서 모두 2,200mm 안팎의 높은 강수량을 기록하고 있다. 장수, 완주, 구이, 진안, 진안주천, 순창군 등 내륙·산지 인접 지점 역시 1,900~2,100mm 내외의 비교적 많은 비가 내리는 것으로 나타났다.

[표 3-1] 전북특별자치도 기상관측소 및 강수량 현황

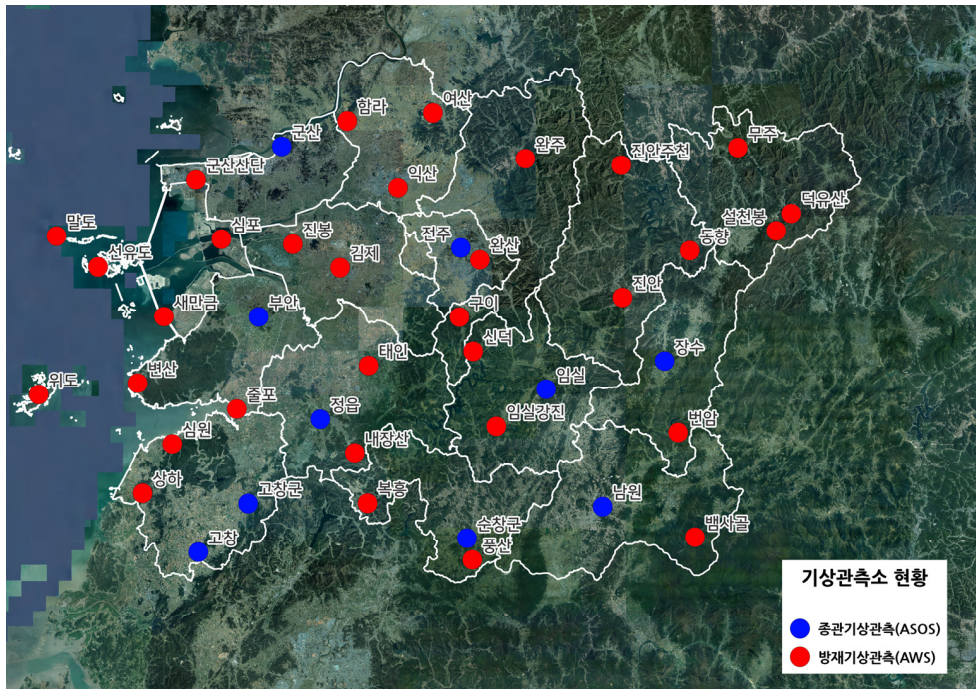
(단위 : mm/년)

지점명	지점주소	위도	경도	강수량
군산	전북특별자치도 군산시 금동	36.0053	126.7614	2120.8
전주	전북특별자치도 전주시 덕진구 덕진동2가	35.8409	127.1172	1986.6
고창	전북특별자치도 고창군 대신면 매산리	35.3482	126.599	1232
부안	전북특별자치도 부안군 행안면 역리	35.7296	126.7166	1853.6
임실	전북특별자치도 임실군 임실읍 이도리	35.612	127.2856	1984.4
정읍	전북특별자치도 정읍시 상평동	35.5634	126.839	1937.7
남원	전북특별자치도 남원시 도동동	35.4213	127.3965	1805.7
장수	전북특별자치도 장수군 장수읍 선창리	35.657	127.5203	2168.1
고창군	전북특별자치도 고창군 고창읍 덕산리	35.4266	126.697	1513.3
순창군	전북특별자치도 순창군 순창읍 교성리	35.3713	127.1286	2097.3
말도	전북특별자치도 군산시 옥도면 말도리	35.858	126.3151	1502.5
설천봉	전북특별자치도 무주군 무주읍 당산리	35.8662	127.7431	2187
구이	전북특별자치도 완주군 구이면 원기리	35.7295	127.1142	2029
번암	전북특별자치도 장수군 번암면 노단리	35.5405	127.5463	2039.5
상하	전북특별자치도 고창군 상하면 장산리	35.4424	126.4884	1870.5
풍산	전북특별자치도 순창군 풍산면 반월리	35.3362	127.1392	2026.5
어청도	전북특별자치도 군산시 옥도면	36.1251	125.9682	1350
무주	전북특별자치도 무주군 무주읍 당산리	36.0017	127.6684	1610
익산	전북특별자치도 익산시 용동면 화배리	35.9381	126.9925	2081.7
진안	전북특별자치도 진안군 진안읍 반월리	35.7604	127.4374	1967
변산	전북특별자치도 부안군 변산면 격포리	35.621	126.4776	1807.5
선유도	전북특별자치도 군산시 옥도면 장자도리	35.8088	126.3977	1614
함라	전북특별자치도 익산시 함라면 신등리	36.0461	126.8917	2367
완주	전북특별자치도 완주군 고산면 소항리	35.9855	127.2457	2119.9
덕유산	전북특별자치도 무주군 설천면 삼공리	35.8942	127.7731	2221
진봉	전북특별자치도 김제시 진봉면 고사리	35.8468	126.784	1825
김제	전북특별자치도 김제시 서암동	35.8091	126.8777	1825
줄포	전북특별자치도 부안군 줄포면 우포리	35.5795	126.6739	1560
심원	전북특별자치도 고창군 심원면 도천리	35.5225	126.5467	1941.5
위도	전북특별자치도 부안군 위도면 진리	35.6015	126.282	1648

[계속] 전북특별자치도 기상관측소 및 강수량 현황

지점명	지점주소	위도	경도	강수량
진안주천	전북특별자치도 진안군 주천면 신양리	35.9744	127.436	2017
동향	전북특별자치도 진안군 동향면 대량리	35.8352	127.5712	1879.5
뱀사골	전북특별자치도 남원시 산내면	35.3716	127.5783	2680
복흥	전북특별자치도 순창군 복흥면 정산리	35.4274	126.9327	2222
태인	전북특별자치도 정읍시 태인면 태창리	35.6508	126.9346	1875
임실강진	전북특별자치도 임실군 강진면	35.5517	127.187	2442.5
여산	전북특별자치도 익산시 여산면	36.0592	127.062	2183.5
신덕	전북특별자치도 임실군 신덕면 삼길리	35.6736	127.1414	1900.5
완산	전북특별자치도 전주시 완산구 남노송동	35.8215	127.155	1964
새만금	전북특별자치도 부안군 변산면 대항리	35.7295	126.5289	1558.5
군산산단	전북특별자치도 군산시 내초동	35.9505	126.5912	1866
내장산	전북특별자치도 정읍시 내장동	35.5087	126.9073	2246
심포	전북특별자치도 김제시 진봉면	35.8545	126.6421	1828

자료: 기상청



[그림 3-1] 전북특별자치도 기상관측소 현황

■ 전북특별자치도 지자체별 강수량 현황

전북특별자치도 지자체별 강수량을 산정하기 위해 기상관측소 강우자료를 이용하여 티센망을 구축하였다. 전북지역 기상관측소를 대상으로 관측소별 연 강수량을 기반으로 관측소 지점을 대표로 하는 다각형을 생성하여 전북 행정구역에 해당하는 면적을 티센 다각형 면적을 가중치로 사용하여 지자체별 평균 강수량을 산정하였다.

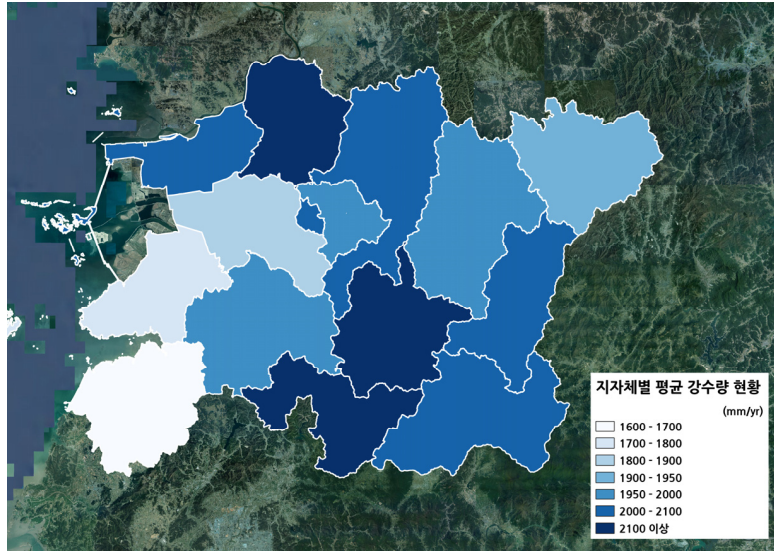
2023년 전북특별자치도 전체 시·군 면적은 8,077.2km²이며, 티센망 기반 면적가중 평균강수량은 약 1,987.4mm/년으로 산정되었다. 평균 강수량에 면적을 곱하여 지자체별 총 강수량을 계산결과, 완주군이 1,695백만톤으로 가장 높은 것으로 분석되었고 전주시는 407백만톤으로 가장 적은 것으로 분석되었다.

[표 3-2] 전북자치도 지자체별 강수량 현황

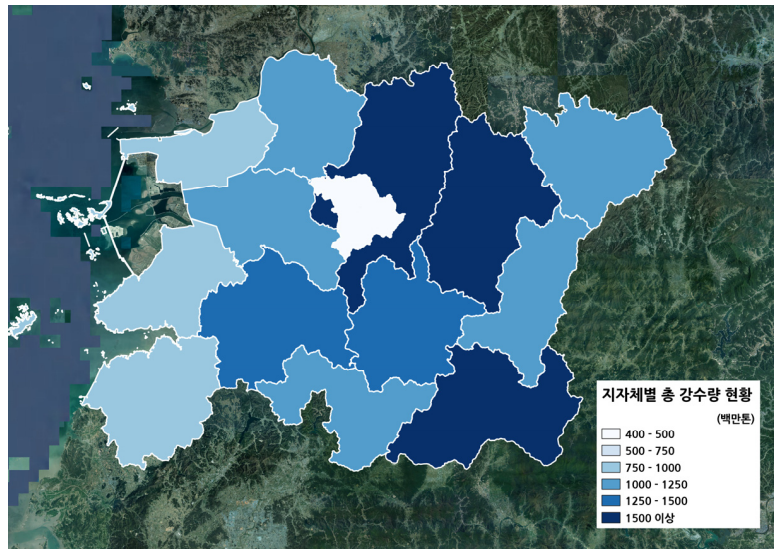
(단위 : km², mm/년, ton)

행정구역	면적(km ²)	평균 강수량(mm/년)	총 강수량(ton)
전주시	204.9	1,990.8	407,840,393
군산시	397.4	2,005.5	796,974,314
익산시	507.6	2,198.1	1,115,699,944
정읍시	697.3	1,965.3	1,370,426,765
남원시	750.3	2,085.1	1,564,393,481
김제시	546.4	1,877.2	1,025,701,539
완주군	822.5	2,061.3	1,695,326,079
진안군	789.0	1,976.7	1,559,523,175
무주군	630.0	1,947.5	1,226,919,181
장수군	532.2	2,061.3	1,096,976,750
임실군	596.8	2,134.4	1,273,805,606
순창군	500.6	2,161.8	1,082,074,114
고창군	611.4	1,600.9	978,841,335
부안군	491.1	1,747.9	858,383,586
합계	8,077.2	1,987.4	16,052,886,262

자료: 저자 작성



[그림 3-2] 지자체별 평균 강수량 현황



[그림 3-3] 지자체별 총 강수량 현황

나) 증발산 현황

■ 전북자치도 지자체별 증발산 현황

전북특별자치도 지자체별 연평균 증발산량과 면적에 따른 총 증발산량을 인공위성 자료를 활용하여 산정하였다. NASA에서 제공하는 인공위성 자료로 MODIS/Terra Evapotranspiration(ET) Yearly L4 500m grid 자료를 이용하여 래스터형태로 변경 후 전북특별자치도 행정구역을 포함하는 그리드를 선별하였다. 인공위성 증발산량 자료에서 증발산량 값이 누락된 그리드는 인근 그리드의 평균으로 보간하였다. 구역통계를 활용하여 지자체별 행정구역에 해당하는 연 증발산량을 전북 시군 행정구역과 중첩하여 면적가중 평균을 계산하였고 평균증발산량에 면적을 반영하여 총 증발산량을 산정하였다.

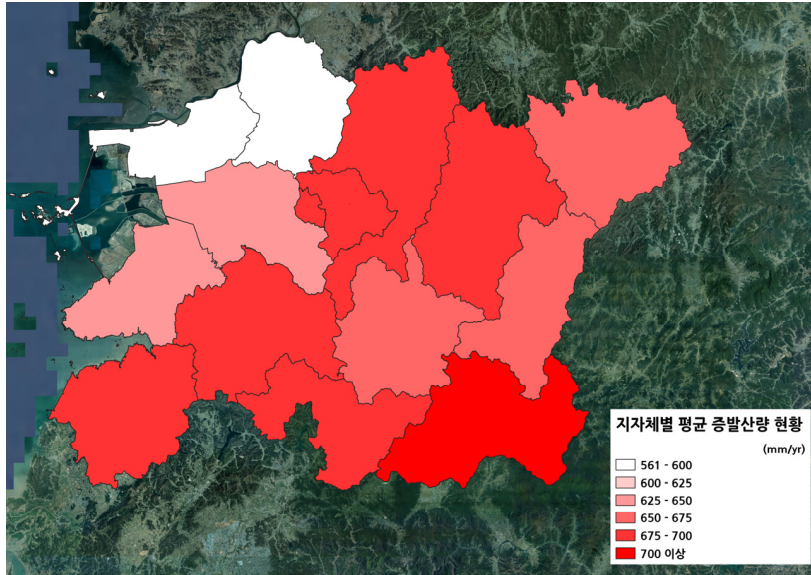
2023년 전북 연평균 증발산량은 660.3mm/년으로 조사되었으며, 총 증발량은 약 5,334백만톤으로 산정되었다. 평균 증발산량이 가장 높은 곳은 남원시로 715.4mm/년으로 나타났으며 가장 낮은 곳은 익산시로 560.6mm/년으로 나타났다. 총 증발산량 기준으로는 면적이 크고 평균 증발산량도 높은 완주군이 약 569백만톤으로 가장 큰 값을 보였고 면적이 상대적으로 작은 전주시가 143백만톤으로 가장 낮은 총 증발산량으로 분석되었다.

[표 3-3] 지자체별 증발산량 현황

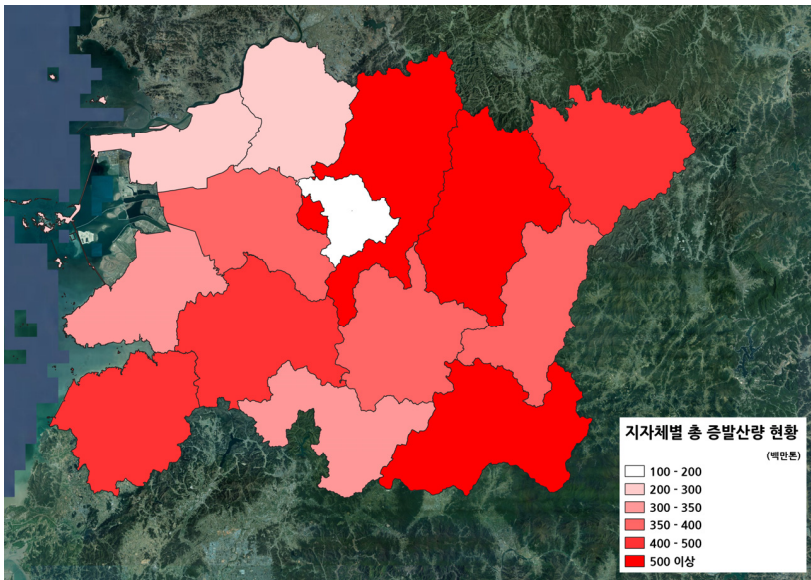
(단위 : km², mm/년, ton)

행정구역	면적(km ²)	평균 증발산량(mm/년)	총 증발산량(ton)
전주시	204.9	699.5	143,304,194
군산시	397.4	573.3	227,806,973
익산시	507.6	560.6	284,550,175
정읍시	697.3	688.7	480,241,236
남원시	750.3	715.4	536,708,425
김제시	546.4	642.3	350,940,335
완주군	822.5	692.1	569,196,983
진안군	789.0	680.1	536,590,313
무주군	630.0	657.9	414,457,104
장수군	532.2	664.6	353,676,435
임실군	596.8	658.8	393,184,757
순창군	500.6	675.0	337,886,755
고창군	611.4	688.4	420,924,427
부안군	491.1	643.4	315,960,833
합계	8,077.2	660.3	5,333,721,221

자료: 저자 작성



[그림 3-4] 지자체별 평균 증발산량 현황



[그림 3-5] 지자체별 총 증발산량 현황

2) 수자원 이용현황

가) 댐 이용현황

■ 전북자치도 댐 용수별 이용현황

전북지역 주요 다목적댐의 용도별 공급량을 용담댐, 섬진강댐, 부안댐을 대상으로 생공용수, 농업용수, 유지용수로 구분하여 각 용수별 공급량과 합계를 산정하였다.

용담댐은 생공용수 492.7백만톤, 유지용수 157.7백만톤으로 650.4백만톤을 공급하여 세 댐 가운데 가장 큰 비중을 차지한다. 섬진강댐은 농업용수 370백만톤, 생공용수 65백만톤으로 구성되어 435백만톤의 용수를 공급하고 있다. 부안댐은 생공용수 28.5백만톤, 농업용수 6.6백만톤으로 합계 35.1백만톤으로 소규모 공급량을 보인다.

[표 3-4] 지자체별 댐 용수별 현황

(단위 : 백만톤)

지점명	생·공용수	농업용수	유지용수	합계
용담댐	492.7	-	157.7	650.4
섬진강댐	65	370	-	435
부안댐	28.5	6.6	-	35.1
합계	586.2	376.6	157.7	1120.5

자료: 한국수자원공사(2023)

나) 저수지 이용현황

■ 전북자치도 지자체별 저수지 이용현황

2023년을 기준으로 전북특별자치도 14개 시군에 분포한 저수지의 유효저수량은 한국농어촌공사와 전북특별자치도에서 관리하고 있는 저수량을 조사하였다. 조사 결과, 전북특별자치도 전체 저수지의 총 유효저수량은 408,367,000톤으로 계산되었다. 시군별로 살펴보면, 완주군이 116,652,000톤으로 가장 높은 유효저수량을 기록하여 전체 저수량에서 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이와 달리, 전주시는 3,232,000톤로 가장 낮은 유효저수량을 보여, 지역 간 저수지 용량의 차이가 상당히 뚜렷함을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 각 시군별 저수지의 수와 규모, 지리적 조건 등에 따라 발생한 것으로 보인다.

[표 3-5] 전북자치도 지자체별 저수지 유효저수량

(단위 : 톤)

지점명	유효저수량
전주시	3,232,000
군산시	25,823,000
익산시	8,103,000
정읍시	30,160,000
남원시	19,370,000
김제시	19,451,000
완주군	116,652,000
진안군	15,612,000
무주군	9,970,000
장수군	67,371,000
임실군	15,991,000
순창군	15,506,000
고창군	28,370,000
부안군	32,756,000
합계	408,367,000

자료: 한국농어촌공사, 전북특별자치도(2023)

다) 지하수 현황

■ 전북자치도 지자체별 지하수 현황

전북지역 지하수 이용 현황은 14개 시군을 대상으로 생활용수, 공업용수, 농·어업용수, 기타용으로 구분하여 정리하였다. 전북 전체 지하수 이용량은 생활용수 68.97백만톤/년, 공업용수 8.61백만톤, 농·어업용수 175.05백만톤, 기타용 1.91백만톤으로, 합계 254.56백만톤으로 조사되었다. 비율로 보면 농·어업용수가 약 68.8% 수준으로 가장 큰 비중을 차지하고, 생활용수가 약 27.1% 정도를 차지하여 지하수가 주로 농·어업 및 생활부문에서 사용되고 있음을 보여준다. 공업용수와 기타용 지하수는 작은 비중해 해당한다.

생활용수 지하수 이용량을 보면, 완주군이 9.80백만톤으로 가장 많이 사용하고 있으며 다음으로 전주시 8.34백만톤, 익산시 7.10백만톤, 김제시 7.04백만톤, 남원시 6.44백만톤 순으로 나타났다. 반면 장수군 1.12백만톤, 군산시 2.22백만톤, 무주군 2.25백만톤, 임실군 2.42백만톤 등은 지하수의 생활용수 활용이 비교적 낮은 시군이다.

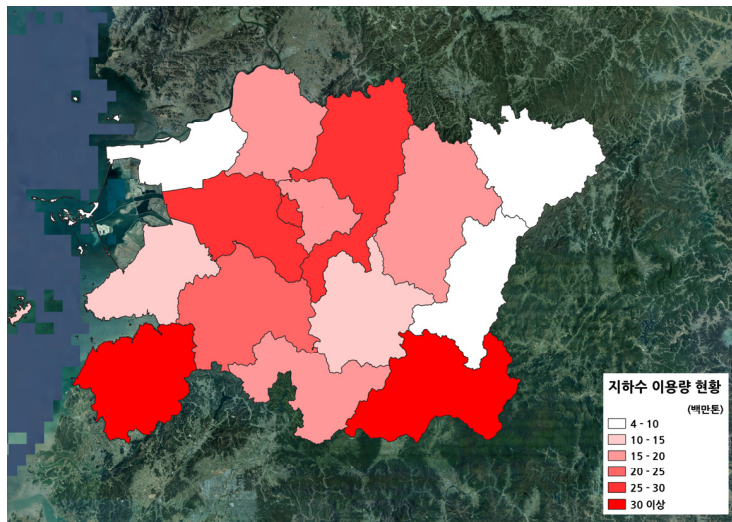
지하수 총 이용량은 고창군 34.38백만톤, 남원시 29.18백만톤, 김제시 26.87백만톤, 완주군 26.19백만톤, 정읍시 25.69백만톤으로 높은 값을 보였으며 이들 시군은 농·어업용 지하수 이용이 특히 두드러지게 나타나고 있다. 농·어업용수를 살펴보면 고창군 29.69백만톤, 남원시 21.98백만톤, 정읍시 19.90백만톤, 김제시 17.75백만톤, 완주군 15.58백만톤으로 지하수의 농·어업용수이용 비중이 높게 나타나고 있다. 기타용 지하수는 전체에서 차지하는 비율이 매우 작으나, 순창군 1.48백만톤을 비롯해 일부 시군에서 소규모로 활용되고 있다. 이러한 지하수 이용 패턴은 전북지역 생활·공업·농업 부문별 정책 물발자국 산정 시, 지하수 기원 청색 물의 공간적 분포와 부문별 의존도를 해석하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

[표 3-6] 전북자치도 지자체별 용도별 지하수 현황

(단위 : 톤/년)

지점명	생활용수	공업용수	농·어업용수	기타용	합계
전주시	8,341,116	1,173,333	7,699,961	0	17,214,410
군산시	2,226,897	891,505	1,880,090	880	4,999,372
익산시	7,105,527	835,648	10,778,692	0	18,719,867
정읍시	5,699,166	63,628	19,906,603	22,000	25,691,397
남원시	6,444,394	753,183	21,989,536	0	29,187,113
김제시	7,040,025	1,849,447	17,750,556	236,820	26,876,848
완주군	9,806,688	798,072	15,589,810	0	26,194,570
진안군	5,257,420	176,869	10,040,509	30,306	15,505,104
무주군	2,254,987	110,036	5,192,292	3,551	7,560,866
장수군	1,123,744	185,398	5,680,284	4,088	6,993,514
임실군	2,428,184	599,470	8,483,704	0	11,511,358
순창군	3,781,323	304,963	11,720,128	1,489,017	17,295,431
고창군	4,283,829	371,996	29,690,009	43,465	34,389,299
부안군	3,183,460	506,207	8,655,036	85,535	12,430,238
합계	68,976,760	8,619,755	175,057,210	1,915,662	254,569,387

자료: 지하수 통계연보(2023년 기준)



[그림 3-6] 지하수 이용량 현황(합계)

다) 하천수 이용현황

■ 전북자치도 하천수 사용실적 현황

전북지역 하천수 이용 현황은 전주시부터 진안군까지 14개 시군을 대상으로 생활용수, 공업용수, 농업용수로 구분하여 정리하였다(단위는 표와 동일함). 하천수를 통한 총 사용량은 990.85백만톤이며, 이 중 생활용수는 46.427백만톤, 공업용수는 34.120백만톤, 농업용수는 910.303백만톤으로, 전체 하천수 이용의 대부분이 농업용수(약 90% 이상)에 집중되어 있고 생활·공업부문은 상대적으로 비중이 작은 것으로 나타난다.

생활용수 측면에서 보면, 하천수를 생활용으로 직접 이용하는 시군은 남원시 5.220백만톤, 순창군 1.705백만톤, 완주군 19.221백만톤, 임실군 2.805백만톤, 정읍시 17.477백만톤으로 한정된다. 이 가운데 완주군과 정읍시의 생활용 하천수 이용량이 상대적으로 크고, 남원시, 임실군, 순창군은 소규모로 생활용 하천수를 사용하는 수준이다. 군산시, 김제시, 부안군, 익산시, 장수군, 전주시, 진안군, 고창군, 무주군 등은 생활용수 항목에 하천수 이용이 계상되지 않아, 해당 지역에서는 상수도 및 지하수 등 다른 수원에 대한 의존도가 더 높은 것으로 해석할 수 있다.

공업용수 하천수 이용은 전주시 18.454백만톤, 완주군 13.842백만톤으로 두드러지며, 정읍시 1.786백만톤, 고창군 0.038백만톤으로 소규모로 나타난다. 전주시와 완주군은 산업단지 및 도시 기능이 집중된 지역으로, 공업용수 공급 측면에서 하천수의 역할이 상대적으로 중요한 시군으로 볼 수 있다. 반면 다수 시군에서는 공업용수 항목에 하천수 이용 실적이 없어, 공업용수는 상수도, 지하수, 공업용 전용 취수시설 등 다른 수원을 통해 공급되는 비중이 크다고 판단된다.

농업용수는 하천수 이용에서 가장 큰 비중을 차지하는 항목으로, 정읍시 322.672백만톤, 완주군 237.311백만톤으로 이용량이 특히 크게 조사되었다. 이를 통해 전북지역에서는 주요 평야지와 농업지역을 중심으로 하천수가 관개용 수자원으로 광범위하게 이용되고 있는 것으로 판단된다.

[표 3-7] 지자체별 하천수 사용현황

(단위 : 백만톤/년)

행정구역	생활용수	공업용수	농업용수	합계
전주시	-	18.454	25.127	43.581
군산시	-	-	46.353	46.353
익산시	-	-	33.096	33.096
정읍시	17.477	1.786	322.672	341.935
남원시	5.220	-	7.624	12.843
김제시	-	-	93.245	93.245
완주군	19.221	13.842	237.311	270.373
진안군	-	-	1.582	1.582
무주군	-	-	-	-
장수군	-	-	1.354	1.354
임실군	2.805	-	6.276	9.081
순창군	1.705	-	42.970	44.675
고창군	-	0.038	10.389	10.428
부안군	-	-	82.305	82.305
합계	46.427	34.120	910.303	990.850

자료: 영산강홍수통제소(2023)

[표 3-8] 전북자치도 지자체별 하천수 이용현황

(단위 : m³/일, ton/년)

지자체	시설명	하천수 사용목적	허가량(m ³ /일)	총 사용량(ton/년)
고창군	흥덕저수지	농업용수	289,260	5,004,041
고창군	화룡취수보	농업용수	14,300	336,749
고창군	성내저수지	농업용수	31,200	186,150
고창군	성송저수지	농업용수	17,700	105,576
고창군	산정저수지	농업용수	12,300	73,365
고창군	예전저수지	농업용수	25,200	150,289
고창군	석남저수지	농업용수	20,000	119,294
고창군	동아양수장	농업용수	12,000	71,631
고창군	라성저수지	농업용수	17,200	102,626
고창군	궁산저수지	농업용수	13,000	77,532
고창군	금평양수장	농업용수	13,800	82,308
고창군	고성저수지	농업용수	11,700	69,806
고창군	도천저수지	농업용수	35,000	208,810
고창군	연화저수지	농업용수	20,500	122,336
고창군	월산양수장	농업용수	9,300	55,115
고창군	월평양수장	공업용수	4,300	38,416
고창군	구암양수장	농업용수	8,000	52,095
고창군	덕림저수지	농업용수	26,100	155,673
고창군	평지저수지	농업용수	8,400	49,762
고창군	고라저수지	농업용수	9,300	83,220
고창군	노동양수장	농업용수	28,000	167,048
고창군	노동저수지	농업용수	33,000	196,857
고창군	고수저수지	농업용수	90,700	541,082
고창군	남산취수보	농업용수	8,200	48,880
고창군	연기저수지	농업용수	70,000	417,621
고창군	신림저수지	농업용수	117,500	700,922
고창군	석교양수장	농업용수	37,800	225,479
고창군	수동취수보	농업용수	28,500	169,999
고창군	수양2양수장	농업용수	34,700	209,510
고창군	오산저수지	농업용수	36,400	217,145

[표 3-8] 계속

(단위 : m³/일, ton)

지자체	시설명	하천수 사용목적	허가량(m ³ /일)	총 사용량(ton/년)
고창군	창내저수지	농업용수	65,100	388,360
군산시	신오산양수장	농업용수	259,100	14,578,982
군산시	접산1양수장	농업용수	64,800	2,357,535
군산시	접산2양수장	농업용수	60,400	1,657,982
군산시	술산양수장	농업용수	80,300	2,172,328
군산시	연제양수장	농업용수	43,500	4,214,016
군산시	입석양수장	농업용수	115,000	12,724,569
군산시	원두양수장	농업용수	9,500	511,213
군산시	보덕양수장	농업용수	33,000	-
군산시	신기양수장	농업용수	26,000	2,257,920
군산시	중야양수장	농업용수	13,000	-
군산시	평사양수장	농업용수	14,000	1,357,952
군산시	남개정양수장	농업용수	34,000	4,520,647
군산시	남개정7양수장	농업용수	9,500	-
군산시	만석양수장	농업용수	10,886	-
김제시	안전양수장	농업용수	52,704	3,461,265
김제시	해창양수장	농업용수	13,824	907,877
김제시	서포양수장	농업용수	32,600	2,140,968
김제시	내광취입보	농업용수	28,080	2,599,986
김제시	연포양수장	농업용수	52,900	3,474,131
김제시	원천양배수장	농업용수	138,240	12,745,103
김제시	와룡양수장	농업용수	8,290	529,220
김제시	중촌양수장	농업용수	16,410	997,210
김제시	부용양수장	농업용수	45,960	2,792,889
김제시	하팔련양수장	농업용수	79,830	6,932,019
김제시	송정양수장	농업용수	20,730	1,942,469
김제시	저산양수장	농업용수	46,310	2,950,478
김제시	척산임시양수장	농업용수	17,280	1,944,203
김제시	금평저수지	농업용수	172,850	11,351,743
김제시	대화저수지	농업용수	140,970	7,980,543
김제시	하장(좌)취수보	농업용수	9,330	883,391
김제시	하장(우)취수보	농업용수	9,330	963,700
김제시	난봉양수장	농업용수	16,410	1,175,665
김제시	백학양수장	농업용수	38,880	2,553,388
김제시	황산양수장	농업용수	79,480	5,219,743
김제시	석교양수장	농업용수	23,320	1,531,510
김제시	신평양수장	농업용수	186,000	12,215,333

[표 3-8] 계속

(단위 : m³/일, ton/년)

지자체	시설명	하천수 사용목적	허가량(m ³ /일)	총 사용량(ton/년)
김제시	용성양수장	농업용수	88,000	5,951,994
남원시	월락정수장	생활용수	21,000	5,219,500
남원시	귀석양수장	농업용수	30,000	2,781,604
남원시	방산양수장	농업용수	17,000	905,200
남원시	금암보	농업용수	20,000	1,315,369
남원시	금안취입보	농업용수	8,640	195,488
남원시	기설취입보	농업용수	18,749	499,746
남원시	용산양수장	농업용수	29,890	559,910
남원시	도촌저수지	농업용수	24,880	1,366,560
남원시	금강양수장	농업용수	40,600	-
부안군	동진강제수문	농업용수	304,200	-
부안군	오곡양수장	농업용수	24,500	2,258,720
부안군	현호양수장	농업용수	18,100	1,608,721
부안군	원천양수장	농업용수	34,905	3,218,072
부안군	팔양양수장	농업용수	47,600	4,388,461
부안군	용적양수장	농업용수	89,900	8,288,354
부안군	중기양수장	농업용수	57,500	5,301,194
부안군	대수양배수장	농업용수	14,618	1,347,713
부안군	난산양수장	농업용수	71,800	6,619,640
부안군	하장양수장	농업용수	39,277	3,621,165
부안군	해평양수장	농업용수	49,939	4,604,176
부안군	고마제양수장	농업용수	49,939	4,874,973
부안군	부안양수장	농업용수	50,976	483,492
부안군	사산저수지	농업용수	80,524	7,156,721
부안군	개암양수장	농업용수	10,368	921,492
부안군	주산양수장	농업용수	23,328	2,073,333
부안군	대초양수장	농업용수	11,404	1,013,572
부안군	청서양수장	농업용수	11,750	1,044,331
부안군	청호양수장	농업용수	169,344	15,781,936
부안군	계화18양수장	농업용수	34,560	3,220,793
부안군	아리양수장	농업용수	15,552	1,382,288
부안군	언독양수장	농업용수	9,020	801,606
부안군	유유저수지	농업용수	14,532	1,291,569
부안군	운산저수지	농업용수	10,264	912,268
부안군	영전저수지	농업용수	16,761	90,301
순창군	적성취수장	생활용수	5,500	1,704,702
순창군	두승양수장	농업용수	17,200	949,669

[표 3-8] 계속

(단위 : m³/일, ton/년)

지자체	시설명	하천수 사용목적	허가량(m ³ /일)	총 사용량(ton/년)
순창군	가치양수장	농업용수	11,000	985,804
순창군	무수양수장	농업용수	11,000	908,059
순창군	점촌양수장	농업용수	30,150	1,779,375
순창군	내월양수장	농업용수	28,000	1,691,045
순창군	괴정2양수장	농업용수	11,000	1,547,813
순창군	유촌1양수장	농업용수	16,400	1,210,370
순창군	대가1양수장	농업용수	36,000	2,400,757
순창군	낙덕보(낙덕저수지)	농업용수	43,200	2,937,459
순창군	팔덕2양수장	농업용수	24,624	1,237,076
순창군	팔덕1양수장	농업용수	28,944	621,899
순창군	팔덕저수지	농업용수	46,359	4,757,136
순창군	동산저수지	농업용수	26,800	3,013,470
순창군	회양저수지	농업용수	8,360	3,119,564
순창군	대가저수지	농업용수	18,400	1,526,552
순창군	종암저수지	농업용수	14,350	1,242,734
순창군	구림저수지	농업용수	41,140	4,413,063
순창군	월정양수장	농업용수	22,460	1,696,033
순창군	울복양수장	농업용수	33,350	2,401,457
순창군	무수취수보	농업용수	17,570	1,342,744
순창군	괴정양수장	농업용수	11,940	1,043,839
순창군	대산저수지	농업용수	22,720	2,144,223
완주군	어우보	농업용수	1,548,000	116,449,539
완주군	읍내보	농업용수	11,000	1,198,356
완주군	하리보	농업용수	12,500	1,428,336
완주군	제자보	농업용수	22,600	2,867,592
완주군	장자보	농업용수	19,100	1,760,608
완주군	마근보	농업용수	23,800	2,260,050
완주군	산회보	농업용수	10,300	1,316,008
완주군	산정보	농업용수	14,600	1,827,646
완주군	완주군집수정	공업용수	18,000	5,054,216
완주군	집수정	공업용수	10,000	1,690,832
완주군	오산보	농업용수	10,700	1,159,940
완주군	오조보	농업용수	12,096	1,230,598
완주군	동상저수지	농업용수	289,000	39,556,875
완주군	경천저수지	농업용수	1,104,000	51,559,991
완주군	화정저수지	농업용수	59,000	6,127,133
완주군	용진저수지	농업용수	18,100	1,656,918

[표 3-8] 계속

(단위 : m³/일, ton/년)

지자체	시설명	하천수 사용목적	허가량(m ³ /일)	총 사용량(ton/년)
완주군	구이저수지	농업용수	425,000	6,911,305
완주군	어우보	공업용수	28,000	7,096,604
완주군	어우보(생활용수)	생활용수	74,000	19,220,505
익산시	간리양수장	농업용수	39,600	3,349,301
익산시	앵금양수장	농업용수	8,121	482,986
익산시	도순저수지	농업용수	26,680	2,155,964
익산시	금마저수지	농업용수	39,588	1,009,468
익산시	금마양수장	농업용수	10,713	576,426
익산시	어익양수장	농업용수	8,640	687,782
익산시	간촌양수장	농업용수	46,310	3,189,796
익산시	오산양수장	농업용수	11,232	935,951
익산시	신평양수장	농업용수	186,000	1,217,518
익산시	강경양수장	농업용수	51,840	1,808,697
익산시	요교양수장	농업용수	51,840	3,149,555
익산시	신요교양수장	농업용수	37,497	3,133,403
익산시	도선양수장	농업용수	14,688	1,011,689
익산시	익산천양수장	농업용수	51,840	2,699,418
익산시	왕궁저수지	농업용수	93,415	7,687,873
임실군	임실취수장	생활용수	12,100	2,805,238
임실군	신전저수지	농업용수	13,000	877,217
임실군	지산저수지	농업용수	11,100	145,392
임실군	오봉저수지	농업용수	100,900	5,253,597
임실군	신취수보	농업용수	14,000	-
임실군	대리취수보	농업용수	11,500	-
임실군	호암취수보	농업용수	13,300	-
임실군	세심리1 취수보	농업용수	8,600	-
장수군	사계저수지	농업용수	8,900	1,353,542
전주시	장서보	농업용수	20,700	1,201,124
전주시	금학보	농업용수	97,200	12,341,745
전주시	이성보	농업용수	43,000	3,345,712
전주시	신계보	농업용수	13,200	1,039,033
전주시	화전보	농업용수	21,600	1,981,889
전주시	전미취수장	공업용수	70,000	13,834,260
전주시	전주페이퍼양수장	공업용수	20,000	4,381,582
전주시	취수관	공업용수	5,000	237,950
전주시	화전취수보	농업용수	25,900	1,974,255
전주시	상삼취수보	농업용수	17,000	2,326,875

[표 3-8] 계속

(단위 : m³/일, ton/년)

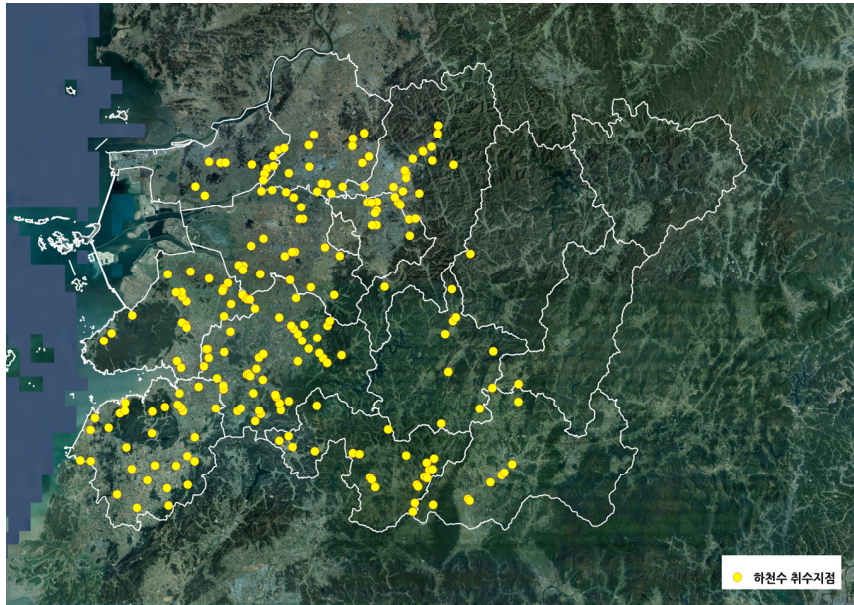
지자체	시설명	하천수 사용목적	허가량(m ³ /일)	총 사용량(ton/년)
전주시	인교저수지	농업용수	32,500	916,302
정읍시	백제양수장	농업용수	17,971	578,343
정읍시	삼평양수장	농업용수	9,248	607,360
정읍시	풍천양수장	농업용수	8,800	325,361
정읍시	영원양수장	농업용수	435,600	63,219,161
정읍시	공평양수장	농업용수	55,831	2,281,798
정읍시	떡내보	농업용수	51,390	1,621,148
정읍시	사금보	농업용수	50,000	365,000
정읍시	동원제지 집수정	공업용수	1,000	343,565
정읍시	삿갓보	농업용수	94,030	3,517,542
정읍시	용신양수장	농업용수	9,650	47,012
정읍시	강고양수장	농업용수	12,650	464,718
정읍시	제3산업단지취수장	공업용수	6,000	692,296
정읍시	낙양(김제간선)취수보	농업용수	2,160,000	197,877,085
정읍시	명천취수보	농업용수	35,770	1,624,287
정읍시	보림취수보	농업용수	124,410	5,348,966
정읍시	제1통관취수보	농업용수	43,200	2,103,203
정읍시	내의양수장	농업용수	15,550	146,000
정읍시	낙양(동진강본류)취수보	농업용수	185,000	3,287,373
정읍시	낙양(정읍간선)취수보	농업용수	432,000	21,494,266
정읍시	구석양수장	농업용수	156,000	3,016,798
정읍시	오성저수지	농업용수	42,330	360,511
정읍시	왕림취수보	농업용수	8,640	21,024
정읍시	저상취수보	농업용수	8,640	21,024
정읍시	내장저수지	농업용수	102,220	827,333
정읍시	부전취수보	농업용수	8,640	471,069
정읍시	송산(내장)취수보	농업용수	8,640	58,400
정읍시	행정취수보	농업용수	10,000	-
정읍시	간내취수보	농업용수	13,470	163,046
정읍시	부전저수지	농업용수	43,020	290,783
정읍시	서드리취수보	농업용수	9,980	-
정읍시	구력취수보	농업용수	9,980	-
정읍시	용산저수지	농업용수	67,440	685,470
정읍시	구삼거리취수보	농업용수	8,640	-
정읍시	연정취수보	농업용수	9,980	141,000
정읍시	도수로취수보	농업용수	8,640	185,603
정읍시	국정양배수장	농업용수	67,390	2,477,584

[표 3-8] 계속

(단위 : m³/일, ton)

지자체	시설명	하천수 사용목적	허가량(m ³ /일)	총 사용량(ton/년)
정읍시	백운양수장	농업용수	25,920	423,875
정읍시	계보양수장	농업용수	44,580	1,807,371
정읍시	하입석양배수장	농업용수	124,410	2,219,200
정읍시	소성양수장	농업용수	14,510	381,425
정읍시	중앙취수보	농업용수	9,980	84,315
정읍시	제3산업단지 집수정	공업용수	3,000	750,367
정읍시	산성취수장	생활용수	10,000	-
정읍시	신중양수장	농업용수	23,400	-
정읍시	운흥양수장	농업용수	40,700	3,617,250
정읍시	칠보취수장	생활용수	90,000	17,476,626
정읍시	화호입시	농업용수	10,300	73,000
정읍시	영파입시	농업용수	12,900	195,275
정읍시	마정입시	농업용수	12,000	242,204
진안군	신정저수지	농업용수	13,000	1,581,667

자료: 영산강홍수통제소(2023)



[그림 3-7] 지자체별 하천수 취수지점

2) 상수도 이용현황

가) 상수도 이용현황

■ 전북자치도 상수도 공급현황

전북지역 상수도 공급 현황은 표와 같이 14개 시군을 대상으로 총인구, 급수인구, 미급수인구, 연간 총 급수량을 기준으로 정리하였다. 전북 전체 총인구는 1,794,972명이며, 이 가운데 상수도 급수인구는 1,764,216명으로 약 98% 수준이다. 미급수인구는 3,931명에 불과하여, 전북 대부분 지역에서 상수도 체계에 의한 생활용수 공급이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

시군별로 보면, 전주(652,807명), 익산(276,043명), 군산(268,423명) 등 도시지역이 상대적으로 인구 규모가 크고, 무주(23,578명), 진안(24,936명), 장수(21,415명) 등 산간·농촌 지역은 인구가 적다. 급수율(급수인구/총인구)을 기준으로 할 때 전주, 김제, 고창, 부안, 익산 등은 거의 전 주민이 상수도 공급을 받고 있으며, 무주, 순창, 완주, 진안 등 일부 시군에서는 미급수인구가 수백~2천 명 수준으로 나타난다. 이들 지역은 상수도 보급 여건, 지형 및 농촌 분산 취락 구조 등으로 인해 상수도 외 수원(지하수, 소규모 급수시설 등)에 대한 의존이 일정 부분 남아 있는 것으로 해석할 수 있다.

연간 총 급수량은 전북 전체 합계가 268,769,946톤이다. 시군별로는 전주가 85,857,353톤으로 가장 큰 급수량을 보이며, 익산(48,667,039), 군산(42,478,077)가 그 뒤를 잇는다. 이는 인구 규모와 도시 기능, 산업·서비스업 밀집 정도를 반영한다. 반대로 장수(2,811,713), 순창(2,832,311), 무주(3,945,328), 진안(4,150,140) 등은 급수량이 상대적으로 적어 소규모 농산촌 지역의 수요 특성이 드러난다.

[표 3-9] 지자체별 상수도 공급현황

(단위 : 명, 톤/년)

지점명	총 인구	급수인구	미급수인구	총 급수량
전주시	652,807	652,662	0	85,857,353
군산시	268,423	265,639	39	42,478,077
익산시	276,043	275,280	601	48,667,039
정읍시	106,686	105,479	0	14,387,112
남원시	77,961	73,847	50	10,204,493
김제시	84,115	84,075	5	13,209,514
완주군	101,982	91,114	2,240	13,471,248
진안군	24,936	23,033	303	4,150,140
무주군	23,578	20,548	130	3,945,328
장수군	21,415	19,883	0	2,811,713
임실군	26,361	25,329	0	4,993,137
순창군	27,179	23,943	518	2,832,311
고창군	53,267	53,215	45	10,295,895
부안군	50,219	50,169	0	11,466,586
합계	1,794,972	1,764,216	3,931	268,769,946

자료: 상수도통계(2023년 기준)

■ 전북자치도 공업용수 공급현황

전북지역 공업용수 공급 현황은 공업용 정수시설, 광역상수도(공업용), 외부 공업용수, 상수도(공업용) 네 가지 수원을 합산하여 정리하였으며, 전체 공업용수 공급량 합계는 78,454,970톤이다. 이 가운데 공업용 정수시설이 25,477,704톤, 광역상수도(공업)가 24,601,317톤, 외부 공업용수가 13,813,410톤, 상수도(공업용)가 14,562,539톤을 차지하여, 공업용 전용 정수시설과 광역상수도, 그리고 일반 상수도를 공업용으로 전용하는 구조가 혼재되어 있음을 보여준다.

군산시는 공업용수 측면에서 가장 특성이 뚜렷한 시군이다. 군산 지역의 공업용수는 광역상수도(군산취수장, 24,601,317)와 외부 공업용수(석성정수장, 13,342,011)를 합한 37,943,328로, 전북 전체 공업용수 공급량의 상당 부분을 차지한다. 즉 군산은 독자적인 공업용 정수시설이나 상수도(공업용) 계정보다, 광역상수도와 외부 공업용수 계통에 강하게 의존하는 대표적인 산업도시로 볼 수 있다.

한편, 전주시(13,855,421, 전미취수장), 익산시(공업용 정수시설 7,084,245 + 상수도 공업용 6,390,267), 완주군(공업용 정수시설 4,538,038), 김제시(상수도 공업용 2,625,890 + 외부 공업용수 471,399) 등은 하천수 기반 공업용 정수시설과 일반 상수도를 동시에 활용하는 형태가 특징적이다. 고창군, 남원시, 무주군, 부안군, 임실군, 장수군, 정읍시, 진안군 등은 자체 상수도 계통에서 공업용수를 공급하는 비중이 크고, 순창군은 공업용수 공급 실적이 0으로 계상되어 공업 입지와 수요가 상대적으로 적은 지역임을 시사한다.

종합하면, 전북의 공업용수는 군산과 같이 광역·외부 공업용수 계통에 크게 의존하는 산업도시와, 전주·익산·완주·김제 등처럼 하천수 기반 정수시설과 일반 상수도를 공업용으로 함께 사용하는 지역, 그리고 소규모로 상수도 공업용수에 부분 의존하는 군 단위 지역으로 나뉜다.

[표 3-10] 지자체별 공업용수 공급 현황

(단위 : 톤/년)

지점명	공업용 정수시설	광역상수도 (공업)	외부 공업용수	상수도 (공업용)	합계	비고
전주시	13,855,421				13,855,421	하천수 (전미취수장)
군산시		24,601,317*	13,342,011**		37,943,328	군산취수장*, 석성정수장**
익산시	7,084,245			6,390,267	13,474,512	신흥정수장
정읍시				1,644,882	1,644,882	
남원시				716,414	716,414	
김제시			471,399	2,625,890	3,097,289	석성정수장
완주군	4,538,038				4,538,038	하천수
진안군				174,556	174,556	
무주군				303,478	303,478	
장수군				73,532	73,532	
임실군				483,736	483,736	
순창군					0	
고창군				730,465	730,465	
부안군				1,419,319	1,419,319	
합계	25,477,704	24,601,317	13,813,410	14,562,539	78,454,970	

자료: 상수도통계(2023)

나) 하수도 이용현황

■ 전북자치도 공공하수처리시설 현황

전북지역 공공하수처리시설의 처리역량과 실제 유입하수량, 연계처리량 및 재이용량을 시군별로 정리한 결과는 표와 같다. 전북 전체 공공하수처리시설 총 시설용량은 1,056,545톤/일이며, 총 유입하수량은 865,667톤/일(315.9백만톤/년)으로 집계된다. 시설용량 대비 유입하수량을 단순 비교하면 전반적으로 약 80% 수준에서 처리시설이 가동되고 있는 것으로 볼 수 있으며, 이는 현재 처리능력 측면에서는 일정 수준의 여유를 가지고 운영되고 있다.

시설규모를 보면 전주시와 군산시, 익산시의 비중이 뚜렷하다. 전주시는 시설용량 420,135톤/일, 유입하수량 367,420톤/일로 전북에서 가장 큰 하수처리 기반을 갖추고 있으며, 연계처리량도 38,208.6톤/일로 상당한 규모를 나타낸다. 군산시는 시설용량 207,520톤/일, 유입하수량 143,242톤/일, 연계처리량 32,289.1톤/일로 두 번째로 큰 처리체계를 갖추고 있다. 반대로 순창군, 장수군, 진안군 등 농촌·산지 위주의 시군은 시설용량과 유입량 모두 상대적으로 소규모로 나타나 지역적 특성을 반영한다.

연계처리량을 보면 전주시(38,208.6), 군산시(32,289.1), 정읍시(13,390.3) 세 지역의 비중이 매우 크고, 그 외 시군에서는 비교적 작은 규모로 분뇨, 축산폐수, 침출수, 기타 유입이 처리되고 있다. 이는 전주와 군산, 정읍이 인근 지역의 하·폐수를 함께 처리하는 거점 역할을 수행하고 있음을 보여준다. 재이용량은 군산시에서 15,120톤/일이 계상되어 있으며, 이는 공공하수처리시설 방류수를 일부 회수하여 재이용하는 대표적인 사례로, 향후 회색 물발자국과 청색 물발자국 해석 시 중요한 참고 지표가 될 수 있다.

전북의 공공하수처리 인프라는 전주군산익산을 축으로 한 도시 지역과, 상대적으로 소규모 시설에 의존하는 농산촌 지역으로 나뉘어 있으며, 연계처리와 재이용은 특정 시군에 집중된 양상을 보인다.

[표 3-11] 지자체별 공공하수처리시설 현황

(단위 : 톤/일)

지점명	총 시설용량	총 유입하수량	연계처리량	재이용량
전주시	420,135	367,420	38,208.6	
군산시	207,520	143,242	32,289.1	15,120
익산시	139,517	122,900	191.2	
정읍시	62,386	60,716	13,390.3	
남원시	56,839	36,927	81.0	
김제시	32,767	26,984	12.5	
완주군	38,248	27,273	189.6	
진안군	7,708	7,981	91.6	
무주군	16,855	9,459	29.1	
장수군	8,990	7,956	51.0	
임실군	9,867	8,596	96.7	
순창군	7,351	6,662	24.9	
고창군	22,594	20,876	393.7	
부안군	25,768	18,676	0.0	
합계	1,056,545	865,667	85,049.3	15,120

자료: 하수도통계(2023)

■ 수질오염총량제 산업계 기반 공업용수 사용량 및 폐수발생량 현황

수질오염총량제 산업계 자료를 이용하여 전북 각 시군의 공업용수 사용량, 폐수발생량, 물 재이용량을 정리하였다. 전북 전체 공업용수 사용량은 373,482톤/일(136.321백만톤)이며, 이 중 폐수발생량은 254,030톤/일(92.721백만톤), 재이용량은 53,873톤/일(19.664백만톤)으로 나타나, 공업부문에서 사용된 물의 약 14% 정도가 재이용되고 있는 것으로 정리할 수 있다.

공업용수 사용 규모를 보면 군산시, 전주시, 익산시가 가장 큰 비중을 차지하며, 정읍시, 완주군, 김제시 등이 그 뒤를 잇는다. 이들 지역은 산업단지 및 제조업 기반이 집중된 시군으로 판단되며 무주군, 진안군, 장수군 등은 공업용수 사용량이 매우 작은 수준으로 나타나, 공업 입지 자체가 제한적인 지역적 특성을 반영한다.

폐수발생량 역시 공업용수 사용과 유사한 패턴을 보인다. 군산시, 전주시, 익산시가 대표적인 고부하 지역이며, 정읍시, 완주군, 김제시 등이 뒤따른다. 대부분 시군에서 공업용수 사용량 대비 폐수발생량이 상당한 비율을 차지하고 있어, 공업용수의 상당 부분이 처리시설을 거쳐 수계로 환원되고 있음을 알 수 있다. 다만 무주군의 경우 공업용수 사용량과 폐수발생량이 동일하게 계상되어 재이용 항목이 없고, 일부 군 단위 지역은 폐수 발생·재이용 규모가 매우 작게 나타난다.

물 재이용 측면에서는 전주시, 익산시, 군산시, 정읍시에서 재이용량이 상대적으로 크며, 무주군은 공업용수 재이용이 계상되지 않았고, 장수군·임실군·순창군 등은 재이용량이 소규모에 그친다. 이는 전북 공업부문에서 재이용 기반이 일부 주요 도시와 산업거점에 집중되어 있음을 의미한다.

[표 3-12] 지자체별 공업용수 사용량 및 폐수발생량 현황

(단위 : 톤/일, 백만톤)

행정구역	공업용수 사용량		폐수발생량		물 재이용량	
	공급량	사용량	총량	처리량	재이용량	처리량
전주시	71,178	25.980	60,129	21.947	14,299	5.219
군산시	156,333	57.062	81,239	29.652	9,363	3.417
익산시	54,904	20.040	42,026	15.340	12,215	4.458
정읍시	22,464	8.199	17,581	6.417	5,013	1.830
남원시	11,914	4.349	11,399	4.161	8,147	2.974
김제시	12,327	4.499	10,585	3.864	1,796	0.656
완주군	27,519	10.044	16,971	6.195	1,283	0.468
진안군	1,036	0.378	712	0.260	151	0.055
무주군	1,269	0.463	1,269	0.463	-	-
장수군	460	0.168	283	0.103	86	0.031
임실군	2,187	0.798	1,846	0.674	66	0.024
순창군	2,008	0.733	1,583	0.578	229	0.084
고창군	2,979	1.087	2,988	1.091	574	0.209
부안군	6,904	2.520	5,417	1.977	652	0.238
합계	373,482	136.321	254,030	92.721	53,873	19.664

자료: 수질오염총량 산업계 오염원(2023)

2. 전북자치도 물발자국 산정방법

가. 녹색 물발자국 산정방법

■ 녹색 물발자국 개요

본 연구에서 녹색 물발자국은 전북특별자치도 내에 내린 강수 중에서 증발·증산으로 소비된 양으로 정의하였으며 인공위성 기반 증발산량을 녹색 경로(토양·식생을 통한 자연 소비)에 해당하는 수량으로 간주하였다.

공간적인 범위는 전북특별자치도 행정구역으로 선정하였으며, 시간적 범위는 2023년을 기준으로 지정하였다.

■ 녹색 물발자국 산정 공식

전북 시군별 녹색 물발자국 산정공식은 다음과 같다.

$$WF_i^{green} = ET_i$$

여기서 ET_i 는 인공위성 기반 증발산 자료를 활용하여 시군별 연간 총 증발산량이다.

WF_i^{green} 는 토양에 저장된 강수 유래 수분 중 식물 생장·생산 과정에서 증발산으로 소비된 물의 양으로 정의할 수 있다.

나. 청색 물발자국 산정방법

1) 청색 물발자국(생활계)

■ 청색 물발자국(생활계) 개요

본 연구에서 생활용수 부문의 청색 물발자국은 전북특별자치도 각 시군 주민의 일상적인 생활활동(가정용, 일부 일반용 포함)을 위해 공급된 물 중에서, 공공하수처리시설

등을 통해 다시 수계로 되돌아가지 않고 지역 내에서 실제로 소모되는 물의 양으로 정의하였다. 즉, 강이나 댐, 지하수 등에서 취수되어 상수도 체계를 통해 가정으로 공급되거나, 상수도 이외의 생활용 지하수·하천수를 통하여 공급된 물 가운데, 하수처리장을 거쳐 방류수 형태로 자연계로 환원되지 않은 부분을 생활용 청색 물발자국으로 본 것이다. 이러한 정의는 물발자국 이론에서 청색 물발자국을 “취수량에서 환원량을 뺀 순 소비량”으로 보는 기본 개념을 전북의 생활용수 실태에 맞게 적용한 것이다.

생활용수 청색 물발자국 산정을 위해 먼저 시군별 생활용수 공급량을 정리하였다. 공급량은 상수도통계에서 제공되는 급수량을 기반으로 하되, 가정용 및 생활 관련 일반용 항목을 중심으로 추출하여 생활용 상수도 급수량을 산정하였다. 여기에 지하수 이용현황에서 생활용수 지하수 사용량을 더하고, 하천수·저수지 이용자료에서 생활용으로 직접 사용되는 하천수 사용량을 포함하여, 각 시군별 생활용수 총 공급량을 구성하였다. 이 과정에서 공업용, 농업용, 기타용으로 분류된 계정은 별도의 청색 물발자국 항목에서 다루도록 분리함으로써, 생활부문에 해당하는 파란 물 공급량만을 최대한 분리·추출하고자 하였다.

생활용수 사용 후 자연계로 되돌아가는 물을 파악하기 위해 하수도통계상의 공공하수처리시설 현황을 활용하였다. 시군별 공공하수처리시설의 연간 방류량을 “생활부면에서 사용된 물이 처리된 뒤 다시 하천·하구·해역으로 환원되는 양”으로 보고, 이를 생활용수 공급량에서 차감되는 환원량으로 설정하였다.

■ 청색 물발자국(생활계) 산정 공식

전북 시군별 청색 물발자국(생활계) 산정 공식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \circ \quad WF_i^{blue} &= \text{공급량} - \text{방류량} \\ &= (\text{상수도} + \text{지하수} + \text{하천수}) - (\text{하수처리방류량}) \end{aligned}$$

2) 청색 물발자국(농업계)

■ 청색 물발자국(농업용수) 개요 : 전북특별자치도 물 공급량 파악

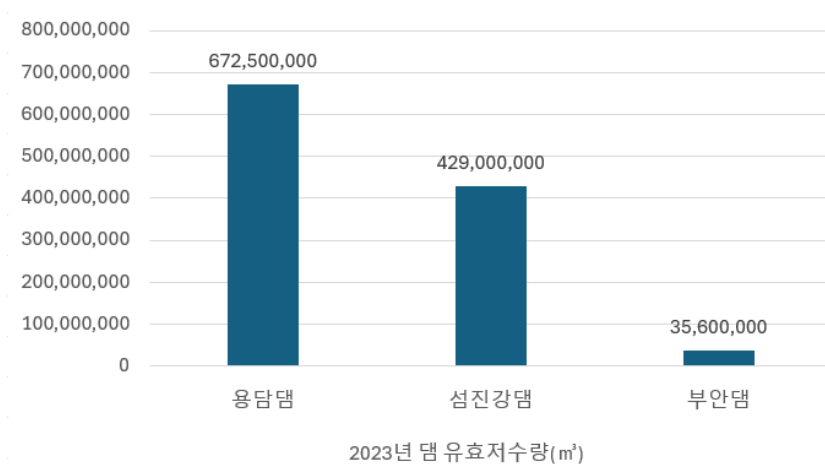
전북특별자치도 지역의 총 물 공급 규모를 종합적으로 파악하기 위해, 본 보고서에서는 2023년도를 기준 연도로 하여 전주, 군산, 익산, 김제, 정읍 등 전북특별자치도 14개

시·군의 주요 수자원 공급 체계를 전반적으로 검토하였다. 본 조사는 지역 내 생활용수, 농업용수, 공업용수 등 다양한 수요를 충족시키는 기반이 되는 물 공급원을 체계적으로 분석함으로써, 전북특별자치도 전체의 수자원 현황을 정확하게 진단하는 데 목적이 있다.

이를 위해 먼저 각 시·군에 분포한 주요 저수지와 댐의 유효저수량 자료를 수집·정리하였다. 유효저수량은 실제 용수 공급에 활용 가능한 저장량을 의미하므로, 지역 공급능력을 평가하는 데 핵심적인 지표로 활용된다. 또한 전북특별자치도는 지역적 특성상 지표수뿐만 아니라 지하수 의존도 역시 높은 편이기 때문에, 농업·생활·공업 부문에서 사용되고 있는 지하수 이용량 자료도 함께 조사하여 분석 범위를 확장하였다.

수집된 저수지·댐의 유효저수량, 지하수 사용량 등 다양한 수자원 항목을 통합적으로 분석함으로써 전북특별자치도 전체의 총 물 공급량을 산정하였으며, 이를 통해 지역 내 물 공급 여건과 수자원 활용 수준을 보다 명확하게 파악할 수 있었다. 본 결과는 전북특별자치도의 중·장기적인 물 수급 계획을 수립하는 데 있어 기초 자료로서 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 향후 기후변화나 수요 증가에 대비한 수자원 관리 전략 및 정책 수립의 근거 자료로도 활용될 수 있을 것이다.

■ 2023년 댐 유효저수량



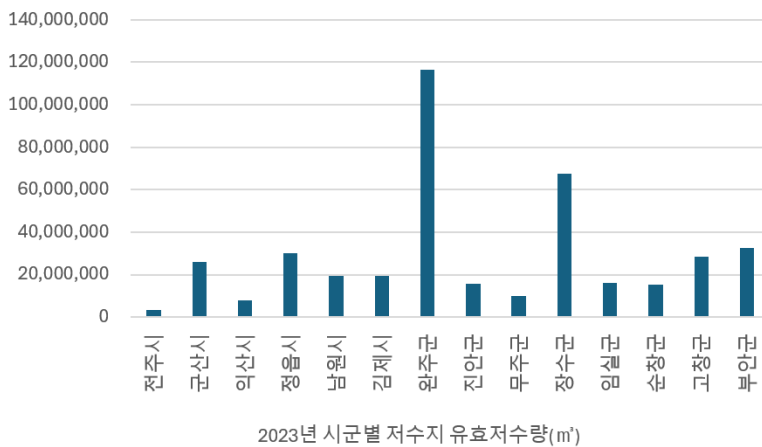
[그림 3-8] 2023년 전북 댐의 유효저수량 (자료: kwater.or.kr)

2023년을 기준으로 전북특별자치도 내에서 주요 공급원으로 분류되는 댐들의 현황을 정리한 결과, 용담댐은 672,500,000m³, 섬진강댐은 429,000,000m³, 부안댐은 35,600,000m³의 유효저수량을 보유하고 있는 것으로 확인되었다. 이 자료는 각 댐에 대해 공식적으로 산정된 유효저수량 값을 취합한 것으로, 해당 연도 기준 전북특별자치도 지역의 가용 저장량 규모를 나타낸다.

세 댐의 수치를 합산하면 총 1,137,100,000m³에 이르며, 이는 댐들이 보유한 유효저수량을 단순 합산하여 산정한 값으로, 전북특별자치도 주요 댐 저장량의 전체 규모를 보여준다.

그러나 세 댐 가운데 농업용수로 활용되는 것은 섬진강댐이기 때문에, 본 보고서에서는 농업용수 공급 분석에 섬진강댐의 유효저수량 429,000,000m³만을 반영하였다. 이에 따라 세 댐 중 농업용수 공급 항목에 포함되는 값은 섬진강댐의 유효저수량으로 한정되며, 이후 제시되는 물 공급량 산정과 관련 계산 과정에서도 429,000,000m³을 기준값으로 일관되게 적용하였다.

■ 2023년 각 시군별 저수지 유효저수량



[그림 3-9] 2023년 전북 시군별 저수지 유효저수량 (자료: 전북연구원)

그림 3-9는 2023년을 기준으로 전북특별자치도 14개 시군에 분포한 저수지의 유효저수량 분포를 나타낸 것이다. 조사 결과, 전북특별자치도 전체 저수지의 총 유효저수량은 408,367,000m³으로 계산되었다.

[표 3-13] 2023년 전북 시군별 저수지 유효저수량

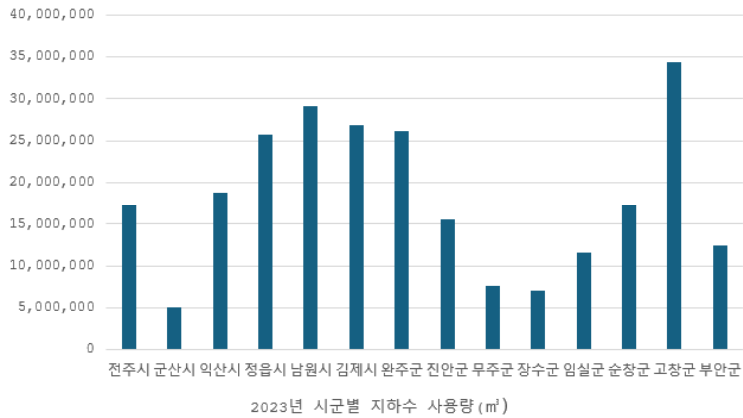
행정구역	저수지 유효저수량(㎡)
전주시	3,232,000
군산시	25,823,000
익산시	8,103,000
정읍시	30,160,000
남원시	19,370,000
김제시	19,451,000
완주군	116,652,000
진안군	15,612,000
무주군	9,970,000
장수군	67,371,000
임실군	15,991,000
순창군	15,506,000
고창군	28,370,000
부안군	32,756,000
합계	408,367,000

시군별로 살펴보면, 완주군이 116,652,000㎡으로 가장 높은 유효저수량을 기록하여 전체 저수량에서 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이와 달리, 전주시는 3,232,000㎡로 가장 낮은 유효저수량을 보여, 지역 간 저수지 용량의 차이가 상당히 뚜렷함을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 각 시군별 저수지의 수와 규모, 지리적 조건 등에 따라 발생한 것으로 보인다.

또한 14개 시군의 유효저수량을 통계적으로 분석한 결과, 평균 유효저수량은 29,169,071㎡, 중앙값은 19,410,500㎡로 나타났다. 평균값과 중앙값의 차이는 일부 시군의 저수량이 매우 높은 값을 가지면서 전체 분포에 영향을 준 결과로, 시군별 수자원 분포의 편차가 존재함을 보여준다.

■ 2023년 각 시군별 지하수 사용량

그림 3-10은 2023년 기준으로 전북특별자치도 14개 시군의 지하수 사용량을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 조사 결과, 생활용·공업용·농업용·기타용을 모두 합산한 전북특별자치도 전체 총 지하수 사용량은 254,569,387㎡으로 집계되었다.



[그림 3-10] 2023년 전북 시군별 지하수 저수량 (자료: 지하수조사연보2023)

시군별 사용량을 살펴보면, 고창군이 34,389,299m³로 가장 높은 지하수 사용량을 기록하였다. 반면, 군산시는 4,999,372m³로 가장 낮은 사용량을 보였으며, 시군 간 지하수 이용 규모 차이가 상당함을 확인할 수 있었다.

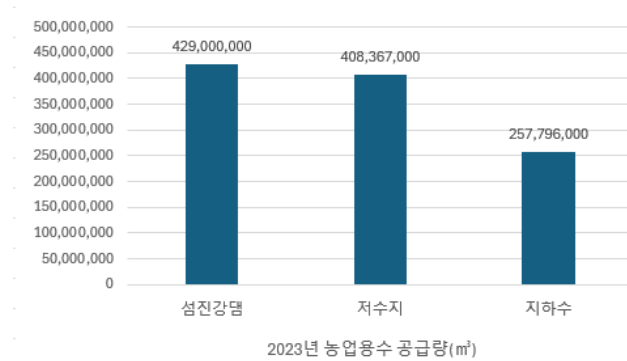
행정구역	지하수 사용량(m³)
전주시	17,214,410
군산시	4,999,372
익산시	18,719,867
정읍시	25,691,397
남원시	29,187,113
김제시	26,876,848
완주군	26,194,570
진안군	15,505,104
무주군	7,560,866
장수군	6,993,514
임실군	11,511,358
순창군	17,295,431
고창군	34,389,299
부안군	12,430,238
합계	254,569,387

전체 14개 시군을 대상으로 통계 분석을 실시한 결과, 평균 사용량은 18,183,528m³,

중양값은 17,254,921m³으로 산정되었다. 이러한 수치들은 시군별 지하수 사용량의 분포를 이해하는 데 참고할 수 있다.

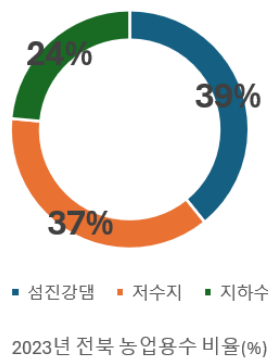
또한 상위 3개 시군인 고창, 남원, 김제의 지하수 사용량을 합산하면 전북특별자치도 전체 지하수 사용량의 약 35.5%를 차지하며, 하위 3개 시군인 군산, 장수, 무주는 총량의 약 7.6%를 기록하였다. 이를 통해 시군 간 지하수 사용 규모의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다

■ 2023년 각 시군별 농업용수 공급량



(자료: kwater.or.kr, 전북연구원, 지하수조사연보)

[그림 3-11] 2023년 전북 농업용수 공급량



(자료: kwater.or.kr, 전북연구원, 지하수조사연보)

[그림 3-12] 2023년 전북 농업용수 공급량에 대한 비율

그림 3-11와 그림 3-12는 2023년 기준 전북특별자치도 지역의 물 공급량과 각 공급원별 비율을 나타낸 것이다. 조사 결과, 섬진강댐은 429,000,000m³, 저수지는 408,367,000m³, 지하수는 257,798,073m³의 물을 공급한 것으로 확인되었다. 이를 모두 합산하면 전북특별자치도 전체 물 공급량은 1,095,165,073m³으로 산정되었다.

각 공급원의 비중을 살펴보면, 섬진강댐이 전체 공급량의 약 39%를 차지하며 가장 높은 비율을 기록하였고, 저수지는 약 37%, 지하수는 약 24%를 차지하였다. 이 수치들을 통해 각 공급원이 전체 물 공급에서 차지하는 상대적 규모를 확인할 수 있으며, 공급량 분포의 차이를 비교할 수 있다.

또한, 수치상의 차이를 보면 섬진강댐과 저수지가 전체 공급량의 상당 부분을 차지하고 있으며, 지하수는 상대적으로 적은 비중을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 전북특별자치도의 물 공급 구조가 댐과 저수지 중심으로 구성되어 있으나 지하수 또한 상당한 규모의 공급원으로서 활용되고 있음을 보여준다.

■ 청색 물발자국(농업용수) 산정 공식

$$\text{작물 소비수량} = \text{면 적(m}^2\text{)} \times \text{CWR(mm)} \div 1000$$

3) 청색 물발자국(공업용수)

■ 청색 물발자국(공업용수) 개요

공업부문 청색 물발자국은 전북특별자치도 각 시군의 산업체에서 사용하는 물 가운데, 수계로 다시 돌려보내지 않고 유역 내에서 소모되는 공업용수의 순량을 의미한다. 여기서 공업용수는 하천수, 지하수, 공업용 정수시설, 상수도(공업용 계정) 등 여러 수원에서 취수되며 청색 물발자국 산정시 공업활동에 의해 얼마나 소비되었는가에 초점을 두었다.

본 연구에서는 수질오염총량제 산업계 자료를 활용하였으며 시군별로 공업용수 사용량, 공장·산업단지에서 발생하는 폐수발생량, 그리고 폐수 재이용량이 함께 제시되어 있다. 즉, 한 시군 안에서 산업계가 얼마만큼의 물을 공정에 투입하고(공업용수 사용량), 그 결과 얼마만큼의 폐수를 배출하며(폐수발생량), 그 중 어느 정도를 다시 재이용하고 있는지(물 재이용량)를 동시에 파악할 수 있다.

■ 청색 물발자국(공업용수) 산정 공식

- $WF_i^{blue} = \text{공급량} - \text{방류량}$
= 공업용수 사용량 - 폐수발생량+재이용량

다. 회색 물발자국 산정방법

■ 회색 물발자국 개요

본 연구에서 회색 물발자국은 전북특별자치도 각 시군에서 발생하는 오염부하를, 수계가 법적 수질기준을 초과하지 않고 회색·자정하기 위해 추가로 필요하게 되는 물의 양으로 정의한다. 이를 위해 시군별로 대표 공공하수처리장을 1개씩 선정하고, 해당 처리장의 연간 방류량과 방류수 BOD 농도를 이용하여 연간 BOD 부하량을 산정한다. 이렇게 계산된 오염부하가 수계에 유입되었을 때, 그 수역이 갖고 있는 배경농도(관련 댐·취수원 BOD 농도)에서 법적 수질기준(환경기준 또는 목표수질)까지 허용되는 농도 차이만큼만 농도가 상승한다고 가정하고, 이 농도 차이를 이용해 오염부하를 회색하기 위해 필요한 물의 체적을 회색 물발자국으로 본다.

■ 회색 물발자국 산정 공식

$$WF_i^{grey} = \frac{P}{C_1 - C_2}$$

여기서 P는 대표 하수처리장의 오염부하량을 뜻하며, C_1 은 폐수배출시설 법적기준치에 해당하는 BOD 배출농도로 정의하였으며, C_2 는 행정구역 관련 댐이나 취수원 BOD 농도로 정의하였다.⁸⁾

8) 지역 물발자국 산정 및 제도화 방안 연구, 환경부, 2016

라. 전북특별자치도 물발자국 산정방법

본 연구는 전북특별자치도 시·군 단위의 물발자국을 녹색·청색(생활·농업·공업)·회색으로 구분하여 산정하였다. 물발자국은 기본적으로 “공급된 물에서 다시 수계로 환원되는 방류량을 제외한 순 소비량”의 개념을 기반으로 하며, 전북 지역의 자료 가용성과 행정구역 단위 분석 목적을 고려하여 부문별로 산정공식과 입력자료를 다음과 같이 정의하였다.

녹색 물발자국은 자연 강수에 의해 토양에 저장된 수분 중 식물 성장 과정에서 증발산으로 소비된 물의 양으로 정의하였다. 따라서 전북특별자치도의 녹색 물발자국은 인공위성 기반 증발산 자료를 활용하여 행정구역 단위로 공간 집계한 값을 적용하였다. 인공위성 자료와 토지피복별 자료는 픽셀단위의 한계로 인해 현실적인 정확한 분석에 어려움이 있어 산림, 농경지, 초지를 포함한 행정구역별 증발산량으로 산정하였다. 전북 14개 시·군 및 전북 전체 합계로 동일 기준에서 비교 가능하도록 구성하였다.

청색 물발자국은 생활계·농업계·공업계로 구분하였다. 생활계 청색 물발자국은 “공급량 - 방류량”의 기본 구조를 적용하되, 공급량은 상수도 공급량과 생활용 지하수 사용량을 활용하였다. 방류량은 하수도통계의 공공하수처리시설 방류량을 사용하여, 생활부문에서 사용된 물이 처리 후 수계로 되돌아가는 규모를 반영하였다. 사용 자료의 범위는 상수도 통계, 지하수 통계연보, 하수도통계를 기준으로 하며, 모두 행정구역 단위로 집계하여 적용하였다.

농업계 청색 물발자국은 전북 시·군별 농업용수 이용을 “작물별 필요용수량”으로 접근하였다. 즉, 논·밭·과수·시설재배 등 작물 유형별 재배면적에 작물수요수량(CWR, Crop Water Requirement)을 곱하여 필요용수량을 산정하고, 이를 농업계 청색 물발자국으로 정의하였다. 전북의 농업용수는 간선·지선수로써 통해 공급되며 배수단계에서 강우시 우수와 합류되어 유역단위로 배수되는 구조를 가지고 있어 배수량 및 회귀량 등 실측자료 확보에 어려움이 있어 관개수의 소비가 아닌 작물의 소비량으로 산정하였다. 해당 산정에는 농림부(또는 관련 농업 통계)에서 제공하는 작물별 면적 및 수요수량 기준을 활용하며, 행정구역 단위로 합산하여 시·군별 농업용수 규모를 산정하는 방식으로 구성하였다.

공업계 청색 물발자국 역시 “공급량 - 방류량”의 기본 구조를 적용하되, 본 연구에서는 수질오염총량제 산업계 오염원 자료를 사용하여 공업용수 사용량과 폐수 방류량을 동일 자료체계 내에서 확보하였다. 공급량은 산업계의 공업용수 사용량을 적용하고, 방류량

은 산업계 폐수 방류량을 적용하여 공업부문에서 수계로부터 취수된 물이 실제로 얼마나 순소비되는지를 산정하였다.

회색 물발자국은 수질 측면에서 오염부하를 수용하기 위해 필요한 희석수량을 의미하며, “오염부하량 ÷ (배출기준농도 - 배경농도)”의 기본공식을 그대로 적용하였다. 오염부하량은 지자체별 대표 하수처리장을 선정한 뒤, 해당 처리장의 방류량에 방류수 BOD 농도를 곱해 산정하였다. 배출기준농도는 폐수배출시설의 법적 방류기준(BOD)을 적용하고, 배경농도는 지자체별 관련 댐의 2023년 BOD 평균농도를 활용하였다. 회색 물발자국 산정을 위한 자료는 하수도통계와 수자원공사 자료를 기반으로 하며, 지자체별로 동일한 방식으로 산정하여 비교 가능한 구조를 확보하였다.

이와 같은 산정체계는 전북특별자치도 시·군 단위에서 자료 확보가 가능한 공공 통계와 제도 자료를 중심으로 구성되었으며, 부문별 물 이용(청색)과 자연 기반 수문(녹색), 수질 부담(회색)을 동일 공간단위에서 병렬적으로 산정·비교할 수 있도록 설계하였다.

[표 3-14] 물발자국 산정방법(총괄)

구분	물발자국 기본공식	본 연구	산정방법	출처/범위	
녹색 물발자국		증발산량	증발산량 : 행정구역별 증발산량 (인공위성)	기상청 인공위성	
청색 물발자국	공급량 - 방류량	생활계	공급량 : 상수도 공급량, 지하수량 방류량 : 하수처리장 방류량	상수도통계 지하수 통계연보 하수도통계	
		농업계	작물별 필요용수량	필요용수량 : 논/밭/과수/시설재배 면적 × CWR	농림축산 식품부
		공업계	공급량 - 방류량	공급량 : 공업용수 사용량 (수질오염총량 산업계 오염원) 방류량 : 폐수방류량 (수질오염총량 산업계 오염원)	산업계 오염원
회색 물발자국	오염부하량/(배출 농도-배경농도)	오염부하량/(배출 농도-배경농도)	오염부하량: 지자체별 대표 하수처리장 방류량 × BOD농도 배출농도: 폐수배출시설 법적기준 BOD농도 배경농도: 지자체별 관련 댐 BOD평균농도 (2023)	하수도통계 수자원공사	

자료: 저자 작성

3. 전북자치도 지자체별 물발자국

가. 녹색 물발자국 산정결과

■ 전북자치도 지자체별 녹색 물발자국 산정 결과

전북특별자치도 14개 시군을 대상으로 증발산량을 이용해 녹색 물발자국을 산정한 결과는 [표 3-15]와 같다. 전북 전체 기준으로 연 총 강수량은 약 160억 5천만 톤, 총 증발산량은 약 53억 6천만 톤으로 나타났으며, 이를 단순 수문 수지 관점에서 정리한 수자원 가용량은 약 106억 8천만 톤으로 산정되었다. 즉, 전북에 내리는 강수 중 약 3분의 1 정도는 증발·증산을 통해 대기로 되돌아가고, 나머지 3분의 2 수준이 유출·지하침투·저류 등으로 전환될 수 있는 잠재 여유수량으로 정리된다.

시군별 녹색 물발자국을 보면, 완주군(약 11.26억 톤), 남원시(약 10.28억 톤), 진안군(약 10.23억 톤)이 가장 큰 값을 보이며, 정읍시(약 8.90억 톤), 임실군(약 8.81억 톤), 익산시(약 8.31억 톤), 무주군(약 8.12억 톤) 등이 그 뒤를 잇는다. 이들 지역은 연 강수량 자체도 크고, 증발산량을 제외하고도 상당한 규모의 잔여수량이 남는 것으로 정리된다. 반면, 전주시(약 2.65억 톤)는 전북 내에서 상대적으로 작은 녹색 물발자국을 보여, 행정구역 면적과 강수량 규모가 녹색 물발자국 크기에 직접적으로 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

강수량과 증발산량의 절대 규모를 비교하면, 대부분의 시군에서 총 강수량이 총 증발산량을 크게 상회하는 공통된 경향이 나타난다. 예를 들어 정읍시는 연 총 강수량 약 13.70억 톤, 증발산량 약 4.80억 톤, 녹색 물발자국 약 8.90억 톤으로, 강수의 상당 부분이 증발산 외 경로(유출·침투 등)로 전환되는 것으로 정리된다. 고창군, 군산시, 부안군과 같은 서해안 인접 시군도 강수량 대비 증발산량의 비율은 비슷한 수준을 보이며, 각 시군마다 절대 규모의 차이만 존재한다.

요약하면, 전북 전체적으로는 강수 공급이 증발산 소비를 크게 상회하는 구조 속에서 시군별 녹색 물발자국의 크기가 형성되고 있으며, 산간·내륙부(완주, 남원, 진안, 임실 등)와 도시 지역(전주시, 군산시, 익산시) 간에 강수·증발산 절대 규모와 녹색 물발자국 규모에서 뚜렷한 차이가 나타난다.

[표 3-15] 녹색 물발자국 산정결과

(단위 : ton/년, 백만ton/년)

행정 구역	총 강수량		녹색 물발자국 (=총 증발산량)		수자원 기용량	
	총 강수량	강수량	녹색 물발자국	증발산량	수자원 기용량	기용량
전주시	407,840,393	407.8	143,304,194	143.3	264,536,199	264.5
군산시	796,974,314	797.0	227,806,973	227.8	569,167,341	569.2
익산시	1,115,699,944	1,115.7	284,550,175	284.6	831,149,769	831.1
정읍시	1,370,426,765	1,370.4	480,241,236	480.2	890,185,529	890.2
남원시	1,564,393,481	1,564.4	536,708,425	536.7	1,027,685,056	1,027.7
김제시	1,025,701,539	1,025.7	350,940,335	350.9	674,761,204	674.8
완주군	1,695,326,079	1,695.3	569,196,983	569.2	1,126,129,096	1,126.1
진안군	1,559,523,175	1,559.5	536,590,313	536.6	1,022,932,862	1,022.9
무주군	1,226,919,181	1,226.9	414,457,104	414.5	812,462,077	812.5
장수군	1,096,976,750	1,097.0	353,676,435	353.7	743,300,315	743.3
임실군	1,273,805,606	1,273.8	393,184,757	393.2	880,620,849	880.6
순창군	1,082,074,114	1,082.1	337,886,755	337.9	744,187,359	744.2
고창군	978,841,335	978.8	420,924,427	420.9	557,916,908	557.9
부안군	858,383,586	858.4	315,960,833	316.0	542,422,753	542.4
합계	16,052,886,262	16,052.9	5,365,428,945	5,365.4	10,687,457,317	10,687.5

자료: 저자 작성

■ Blaney-Criddle 방법을 이용한 전북 논벼 증발산량 산정

이번 연구는 전북특별자치도 14개 시군의 물 수요량을 파악하기 위해 Blaney-criddle 방법으로 증발산량을 산정하였다. 이는 전북특별자치도 14개 시군 전역에 대해 동일 기준으로 적용 가능한 기상자료 확보에 제약이 있었기 때문이다. Penman 및 Penman-Monteith 방법은 순복사, 풍속, 습도 등 다수의 기상요소가 필요하며, 복사량 산정, 풍속 관측높이 보정 등 추가적인 전처리 과정이 요구되며, 관측자료의 결측과 관측 소멸 측정조건 차이에 따라 결과의 불확실성이 증가할 수 있다. 이에 따라 이번 연구에서는 입력자료의 가용성과 시군 간 공간 비교의 일관성을 우선하여 평균기온과 주간 일조시간 비율에 기반한 Blaney-Criddle방법을 적용하였다.

가) Penman 공식과 Penman-Monteith 공식

○ Penman 공식

$$E_{tr} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$$

E_n : 에너지수지방법에 의해 산정한 증발량(cm/day)

E_a : 공기동역학적 방법에 의해 산정한 증발량(cm/day)

Δ : 온도 대 포화증기압곡선의 기울기

γ : 습도계상수(mb : 0.66, mmHg : 0.485)

○ Penman-Monteith 공식

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}$$

ET_0 : 표준증발산량(mm)

R_n : 작물표면에서의 순 일사량(MJm⁻²day⁻¹)

G : 토양 열 유동밀도(MJm⁻²day⁻¹)

T : 2m높이에서의 일 평균 대기온도(°C)

C_n : 900=short crop surface, 1600=tall crop surface

C_d : 0.34=short crop surface, 0.38=tall crop surface

u_2 : 2m높이에서의 풍속(m/s)

e_s : 포화증기압(kPa), e_a : 실제증기압(kPa)

Δ : 증기압 곡선 기울기(kPa/°C)

γ : 건습구(습도계) 상수(kPa/°C)

Blaney-Criddle 방법은 농경지에서 증발산량을 계산할 때 사용하는 경험적인 방법이고, 증발산량은 작물이 자라면서 필요한 물의 양을 의미한다. 미국 NRCS에서 농작물 경작지에 대한 관개 설계 시 추천하는 방법이다. 이 방법은 미국 서부지역에서 수집된 작물의 물 소비수량, 월평균 기온, 일조시간 비율 간의 관계를 기본으로 하여 개발된 방법이다. 관개 설계를 할 때는 작물이 성장하며 필요한 물 뿐만이 아니라, 수로를 통해 공

급하는 과정에서 발생하는 증발 및 침투 손실까지 합쳐 총 물 수요량을 계산한다. 강우로 인한 소비수량 변화는 일반적으로 고려하지 않고, 소비수량은 결국 지표면에서 증발하는 물과 작물의 증산하는 양을 합친 값이라고 정리할 수 있다. 전북지역 10년간 논벼의 증발산량을 산정하였다.

나) Blaney-Criddle 공식

$$U = \sum_{i=1}^n u = \sum_{i=1}^n (K^* f) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{K^* T_a^* P}{100} \right)$$

k: 작물별 계절 소비 수량계수

P(%): 연간 총 일조시간에 대한 월간 일조시간의 백분율

T_a : 해당 지역의 월평균기온(°F)

f: 각 월의 소비수량 인자

u: 월별 소비수량

U: 작물 성장 전 기간에 대한 소비수량

이번 증발산량 산정에서는 벼의 소비수량 계수(K값)를 우리나라에서 사용하는 값을 적용하기 위해 대구 지역 벼의 평균 K값을 사용하였다. 이 값은 식량작물의 소비수량 계수를 나타내며, 영농 방식 변화에 따른 필요 수량 연구(1997.12)에서 제시된 자료를 사용하였다.

일조 시간 비율(P값)은 전주시 위도(36°N)에 해당하는 값을 기준으로 하였으며, 다른 도시들도 동일한 전주시 P 값을 사용하였다.

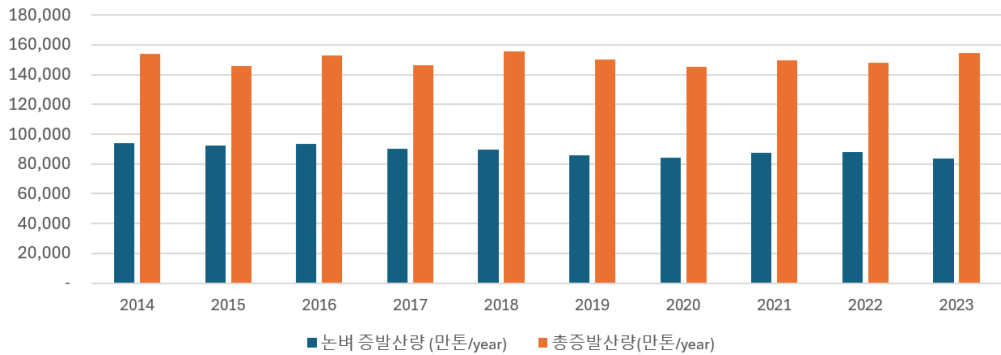
월평균 기온(T_a)은 전주시의 기상 자료를 사용하였고, 다른 도시들도 동일한 전주시 값을 사용하였다. 이 자료는 기상청 기상자료 개방 포털에서 제공하는 종관 기상관측(ASOS) 데이터를 사용하였다.

월별 소비수량(u)는 인치(in) 단위를 미터(m)로 환산하여 사용하였고, 연간 총 소비수량(U)은 월별 소비수량을 합산한 값이다. 재배면적은 KOSIS 국가 통계 포털에서 제공하는 헥타르(ha) 단위 자료를 이용하였으며, 이를 제곱미터(m^2)로 변환하여 사용되었다.

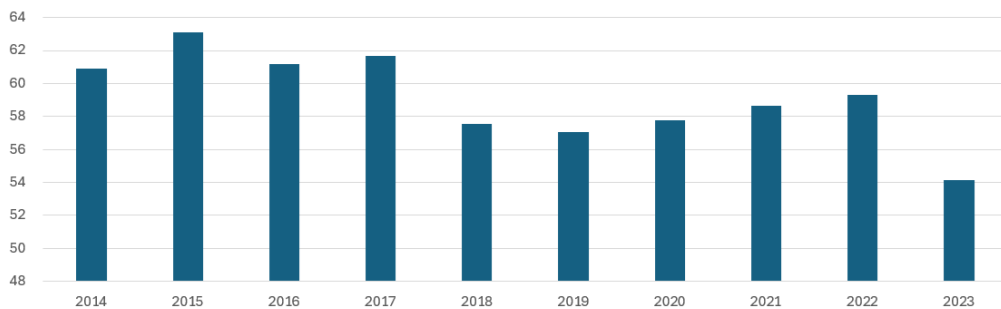
총 증발산량은 연간 소비수량(U)에 면적(m²)을 곱하여 산출하였다. 계산 결과는 톤 단위로 나타내었다. 전체 증발산량 중 논벼의 비중이 가장 높게 나타났으며, 실제 K 값을 확일 할 수 있는 작물도 논벼이기 때문에, 전북 지역 논벼의 증발산량을 따로 계산하여 전체 증발산량에서 차지하는 비율도 구하였다.

다) 전복지역 전체 증발산량 중 논벼의 비율

가장 높은 논벼의 증발산량은 2014년의 93,799(만톤/year)이고, 가장 낮은 값은 2023년의 83,717(만톤/year)이며, 가장 높은 총 증발산량은 2018년의 155,476(만톤/year)이고, 가장 낮은 값은 2020년의 145,342(만톤/year)이다.



[그림 3-13] 전북 논벼 증발산량



[그림 3-14] 전체 총 증발산 중 논벼의 비율(%)

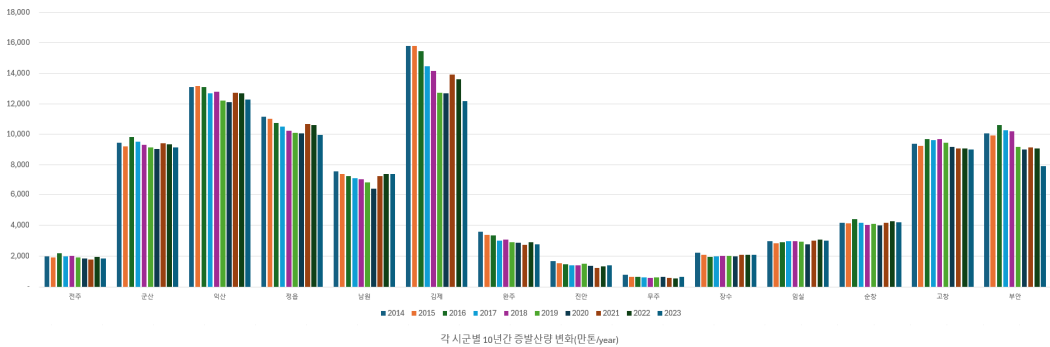
전체 총 증발산 중 논벼의 비율(%)은 2015년 63%로 가장 비율이 높고 2023년 54%로 가장 낮은 값이 나왔고 10년 평균 증발산은 59.14%이다.

2023년에 총 증발산 중 논벼의 비율이 현저히 감소하였는데, 그이유는 총 증발산량은 증가하였지만 논벼 면적은 감소하여 2023년의 논벼 비율이 감소되었다.

라) 전북지역 각 시군별 논벼의 10년간 증발산량

전북 지역 중 증발산량이 가장 높은 지역은 김제시이고, 2014년 15,801(만톤/year)이라는 값으로 가장 높은 값이며, 2023년 12,179(만톤/year)이라는 값으로 가장 작은 값을 가지고 있다.

전북 지역 중 증발산량이 가장 작은 지역은 무주군이고, 2014년 791(만톤/year)이라는 가장 높은 값으로 가장 높은 값이고, 2022년 561(만톤/year)이라는 값으로 가장 작은 값을 가지고 있다.



[그림 3-15] 각 시군별 10년간 증발산량 변화

[표 3-16] 각 시군별 10년간 증발산량 변화

(단위 : 만ton/년)

행정 구역	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
전주시	1,970	1,925	2,200	1,980	2,012	1,922	1,840	1,779	1,931	1,834
군산시	9,432	9,212	9,830	9,526	9,304	9,141	9,051	9,407	9,334	9,154
익산시	13,084	13,158	13,114	12,690	12,793	12,219	12,104	12,719	12,693	12,264
정읍시	11,138	11,003	10,733	10,520	10,232	10,106	10,067	10,668	10,604	9,975
남원시	7,564	7,325	7,208	7,067	7,009	6,773	6,387	7,188	7,318	7,323
김제시	15,801	15,782	15,457	14,470	14,153	12,734	12,697	13,929	13,609	12,179
완주군	3,592	3,366	3,334	3,005	3,057	2,907	2,874	2,736	2,883	2,763
진안군	1,662	1,543	1,454	1,389	1,388	1,497	1,374	1,241	1,317	1,386
무주군	791	647	664	617	583	614	645	574	561	653
장수군	2,227	2,093	1,958	1,977	2,029	2,015	1,986	2,088	2,083	2,067
임실군	2,953	2,838	2,905	2,979	2,975	2,920	2,777	3,004	3,070	2,993
순창군	4,157	4,114	4,398	4,174	4,033	4,101	3,990	4,147	4,256	4,202
고창군	9,381	9,259	9,698	9,627	9,684	9,458	9,173	9,086	9,058	8,996
부안군	10,047	9,912	10,592	10,281	10,197	9,177	9,013	9,158	9,075	7,928
합계	93,799	92,177	93,545	90,302	89,449	85,584	83,978	87,724	87,792	83,717

나. 청색 물발자국 산정결과

1) 청색 물발자국 생활계 산정결과

■ 생활계 공급량 산정

전북지역 생활용수 부문의 청색 물발자국 산정을 위해, 먼저 시군별 생활용수 공급량을 다음과 같은 방식으로 정리하였다. 생활용수 공급량은 상수도통계와 지하수 이용현황을 이용하여 상수도 총 급수량(A)에 포함된 상수도 공업용(B)을 차감하고 생활용수로 사용되는 지하수량(C)를 가산하여 청색 물발자국 산정을 위한 생활용수 공급량(D)을 산정하였다.

산정결과, 전북 전체 생활용수 공급량은 323,184,167톤으로 나타났으며, 시군별로는 전주시(94,198,469톤), 익산시(49,382,299톤), 군산시(44,704,974톤) 등 도시 지역의 생활용수 공급 규모가 크고, 장수군(3,861,925톤), 무주군(5,896,837톤), 순창군(6,613,634톤) 등 농산촌 지역은 상대적으로 적은 공급량을 보였다.

[표 3-17] 청색 물발자국(생활계) 공급량 산정

(단위 : ton/년)

행정구역	상수도 총 급수량(A)	상수도(공업용)(B)	지하수량(생활용수)(C)	생활용수 공급량(D=A-B+C)
전주시	85,857,353	-	8,341,116	94,198,469
군산시	42,478,077	-	2,226,897	44,704,974
익산시	48,667,039	6,390,267	7,105,527	49,382,299
정읍시	14,387,112	1,644,882	5,699,166	18,441,396
남원시	10,204,493	716,414	6,444,394	15,932,473
김제시	13,209,514	2,625,890	7,040,025	17,623,649
완주군	13,471,248	-	9,806,688	23,277,936
진안군	4,150,140	174,556	5,257,420	9,233,004
무주군	3,945,328	303,478	2,254,987	5,896,837
장수군	2,811,713	73,532	1,123,744	3,861,925
임실군	4,993,137	483,736	2,428,184	6,937,585
순창군	2,832,311	-	3,781,323	6,613,634
고창군	10,295,895	730,465	4,283,829	13,849,259
부안군	11,466,586	1,419,319	3,183,460	13,230,727
합계	268,769,946	14,562,539	68,976,760	323,184,167

자료: 상수도통계(2023), 지하수 통계연보(2023기준)

■ 생활계 방류량 산정

청색 물발자국 생활계 방류량을 산정하기 위해 하수도통계 기반인 하수방류량(A)에 포함된 연계처리용수(B)를 차감하여 생활용수 방류량을 산정하였다. 하수처리장 방류수에는 생활용수와 공업용수가 혼합되어 처리되는 처리장이 존재하기 때문에 하수방류량에서 연계처리용수를 제외하였다. 연계처리용수에는 축산, 침출수, 기타 등 용수가 있는데 기타 용수에 공업용수가 포함되어 있을 가능성이 있어 순수 생활용수 방류량을 산정하기 위해 차감하였다.

산정결과, 전북지역 생활용수 방류량은 270,199,316톤(270백만톤)으로 산정되었으며 시군별 비율은 전주시가 43.5%로 가장 큰 값을 차지하고 있다. 익산시(15.8%), 군산시(13.9%)가 다음 순으로 인구와 도시 기능이 집중된 지역에서 생활용수에 이용에 의한 하수 방류가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 상수도량, 인구밀도 등의 차이가 생활용수 방류량에 반영된 것으로 판단된다.

[표 3-18] 청색 물발자국(생활계) 방류량 산정

(단위 : ton/년)

행정구역	하수방류량(A)	연계처리용수(B)	생활용수 방류량 (C=A-B)
전주시	131,545,672	13,946,139	117,599,533
군산시	49,261,094	11,785,522	37,475,572
익산시	42,788,366	69,788	42,718,578
정읍시	19,736,828	4,887,460	14,849,368
남원시	12,618,269	29,565	12,588,704
김제시	9,171,282	4,563	9,166,719
완주군	8,988,089	69,204	8,918,885
진안군	2,735,237	33,434	2,701,803
무주군	3,154,549	10,622	3,143,927
장수군	2,847,876	18,615	2,829,261
임실군	2,937,447	35,296	2,902,151
순창군	2,351,330	9,089	2,342,241
고창군	6,779,401	143,701	6,635,700
부안군	6,326,874	-	6,326,874
합계	301,242,311	31,042,995	270,199,316

자료: 하수도통계(2023)

■ 생활계 청색 물발자국 산정결과

전북특별자치도 생활용수 청색 물발자국은 시·군별 생활용수 공급량에서 하수처리 과정을 거쳐 다시 수계로 방류되는 양을 제외하고, 여기에 재이용량을 더하는 방식으로 산정하였다. 즉, 상수도 총 급수량에서 공업용 상수도 급수량을 뺀 값에 생활용 지하수 사용량을 더해 생활용수 공급량(A)을 구하고, 하수도통계 기반으로 산정한 생활용수 방류량(B)을 차감한 뒤, 공공하수처리시설 재이용량(C)을 더해 청색 물발자국(D=A-B+C)을 계산하였다.

그 결과, 전북 전체 생활용수 공급량은 약 3억 m^3 /년, 생활용수 방류량은 약 2억 7천만 m^3 /년, 재이용량은 약 551만 m^3 /년으로 집계되었으며, 이를 종합한 생활용수 청색 물발자국은 약 4천8백만 m^3 /년으로 나타났다. 이는 전북에서 생활부문을 위해 공급된 물 가운데 이 정도 규모가 하수처리 방류수로 되돌아가지 않고 증발, 누수, 개별 정화시설, 인체·제품 체류 등 다양한 경로를 통해 유역에서 순수하게 소실되고 있음을 의미한다.

시·군별로 살펴보면, 완주군, 김제시, 정읍시, 고창군, 부안군, 익산시 등이 상대적으로 큰 청색 물발자국을 보이는 반면, 무주군·장수군·임실군·순창군·진안군 등 산지·농촌 위주의 지역은 생활용수 공급·방류 규모가 작아 청색 물발자국도 상대적으로 낮게 나타난다. 이는 인구 규모와 상수도 보급 수준, 하수도 정비율과 같은 인구·인프라 특성이 생활부문의 순수한 청색 물 방류량에 그대로 반영된 결과로 해석할 수 있다. 공급량이 크더라도 하수처리장을 통해 상당 부분이 방류되는 지역은 청색 물발자국이 상대적으로 작게 나타나며, 반대로 공급량 대비 하수 방류량이 상대적으로 적은 지역은 생활부문에서의 순소비 비율이 높게 나타난다.

전주시는 다른 시·군과 달리 생활용수 공급량(94,198,469 m^3 /년)에 비해 생활용수 방류량으로 추정된 하수 방류량(117,599,533 m^3 /년)이 더 크게 나타나, 청색 물발자국이 -23,401,064 m^3 /년으로 산정되는 특이한 결과를 보인다. 이는 상수도 공급량보다 하수처리장 방류량이 더 크게 계상되었다는 뜻으로, 전주시 공공하수처리시설에 우수(빗물)와 지하수 침투수, 인근 지역에서 유입되는 하·오수, 기타 연계처리용수 등이 함께 유입되는 통계 구조를 반영한 결과로 볼 수 있다.

[표 3-19] 청색 물발자국(생활계) 산정

(단위 : ton/년)

행정구역	생활용수 공급량(A)	생활용수 방류량(B)	재이용량(C)	청색 물발자국 (D=A-B+C)
전주시	94,198,469	117,599,533	-	-23,401,064
군산시	44,704,974	37,475,572	5,518,800	12,748,202
익산시	49,382,299	42,718,578	-	6,663,721
정읍시	18,441,396	14,849,368	-	3,592,028
남원시	15,932,473	12,588,704	-	3,343,769
김제시	17,623,649	9,166,719	-	8,456,930
완주군	23,277,936	8,918,885	-	14,359,051
진안군	9,233,004	2,701,803	-	6,531,201
무주군	5,896,837	3,143,927	-	2,752,910
장수군	3,861,925	2,829,261	-	1,032,664
임실군	6,937,585	2,902,151	-	4,035,434
순창군	6,613,634	2,342,241	-	4,271,393
고창군	13,849,259	6,635,700	-	7,213,559
부안군	13,230,727	6,326,874	-	6,903,853

자료: 하수도통계(2023), 저자작성

2) 청색 물발자국 농업계 산정결과

■ 작물 소비수량을 이용한 전복 농업용수 사용량 산정

CWR(Crop Water Requirement)은 작물이 생육하는 기간 동안 필요로 하는 총 수분량을 의미한다. 이는 작물의 성장 단계와 기상 조건, 토양 수분 상태 등에 따라 달라지는 일별 작물 증발산량을 누적하여 산정되는 값으로, 작물이 성장하는 과정에서 필요한 수분 공급량을 정량적으로 나타낸다. CWR은 단순히 작물의 물 소비량을 나타내는 수치가 아니라, 전체 생육 기간 동안 작물이 필요로 하는 수분 요구를 포괄적으로 반영한 값으로 이해할 수 있다. 이러한 특성 때문에, 농업용수 계획이나 관개 설계, 작물 재배 관리 등 다양한 분야에서 활용되며, 작물별, 지역별 수분 요구량을 비교하거나 적절한 물 공급량을 결정하는 데 참고 자료로 활용된다.

본 보고서는 이러한 정의를 기반으로 하였으며, 관련 산정 방법과 개념은 유승환 외 4인(2009)의 연구를 참고하였다.

[표 3-20] 논 작물별 CWR값

논벼 작물별 종류	CWR(mm)
Rice, Paddy(벼)	1046
Barley(보리)	345
Wheat(밀)	365
Rye(호밀)	574

자료: 유승환 외 4인(2009)

논 작물의 CWR값을 산정할 때, 벼의 CWR 값을 대표적인 기준으로 활용하였다. 이는 벼가 전북특별자치도 내 논 면적에서 가장 넓게 재배되는 작물로, 전체 논 작물 중 비중이 크기 때문에 대표값으로 적합하기 때문이다. 따라서 본 보고서에서는 보리, 밀, 호밀 등 다양한 논 작물의 물 필요량을 산정할 때, 개별 작물별 데이터를 직접 사용하지 않고 벼의 CWR 값을 기준으로 계산하였다. 이러한 방법을 통해 지역 내 논 작물 전체의 수분 요구량을 효율적으로 추정할 수 있다.

[표 3-21] 밭 작물별 CWR값

밭 작물별 종류	CWR(mm)
Soybean(콩)	527
Red Bean(팥)	245
Mung Bean(녹두)	427
Pulses, n.e.s.(콩류)	331
Millet(기장)	351
Sorghum(수수)	385
Maize(옥수수)	480
Buckwheat(메밀)	273
Miscellaneous Cereals, n.e.s.(기타곡물류)	270
Sweet Potato(고구마)	664
Potato(감자)	365
Chinese Cabbage(배추)	283
Spinach(시금치)	151
Lettuce(상추)	320
Radish(무)	334
Carrot(당근)	361
Hot Pepper(고추)	688
Garlic(마늘)	259
Spring Onion(파)	694
Onions(양파)	582
Ginger(생강)	591
Cabbage&Brassica(양배추,브라사카)	339

자료: 유승환 외 4인(2009)

밭 작물의 CWR 값은 각 시군별로 작물 재배 면적을 고려하여 비율을 산정하였다. 먼저, 각 시군에서 재배 면적이 가장 큰 상위 세 가지 작물을 선정하고, 각 작물의 CWR 값을 해당 작물의 재배 면적에 비례하여 계산하였다. 이렇게 함으로써 각 시군에서 면적이 넓은 주요 작물의 수분 요구량이 전체 밭 작물 CWR 산정에 보다 큰 영향을 미치도록 반영하였다.

이후, 상위 세 작물을 제외한 나머지 작물들에 대해서는 개별 작물별 데이터를 사용하지 않고 나머지 작물 CWR의 중앙값(median)을 대표값으로 산정하였다. 이러한 방식은 재배 면적이 상대적으로 작은 작물들의 CWR을 평균값 대신 중앙값으로 처리함으로써 극단적인 값이 전체 산정에 미치는 영향을 줄이는 역할을 한다. 결과적으로 상위 작물과 기타 작물을 합산하여 시군별 밭 작물 전체 CWR 값을 산정할 수 있었다.

[표 3-22] 과수 작물별 CWR값

과수 작물별 종류	CWR(mm)
Apple(사과)	742
Pear(배)	745
Peach(복숭아)	717
Grape(포도)	467
Mandarin(귤)	635
Persimmon(감)	744
Plum & Sloe(자두,슬로)	724
Fruit Fresh, n.e.s.(신선한 과일)	734

자료: 유승환 외 4인(2009)

[표 3-23] 시설재배 작물별 CWR값

시설재배 작물종류	CWR(mm)
Watermelon(수박)	414
Other Melons(기타멜론)	318
Strawberry(딸기)	303
Cucumber(오이)	377
Pumpkin(호박)	437
Tomato(토마토)	381

자료: 유승환 외 4인(2009)

과수 및 시설작물의 CWR 산정 역시 밭작물과 동일한 방식으로 이루어졌다. 다만, 이들 작물의 경우 대표 작물의 수는 세 가지가 아니라 두 가지로 선정하였다. 각 시군에서 재배 면적이 가장 큰 두 가지 작물을 선정하고, 각 작물의 CWR 값을 해당 작물의 재배 면적에 비례하여 산정하였다. 이러한 방식은 재배 면적이 넓은 주요 작물의 수분 요구량이 전체 CWR 계산에 적절히 반영되도록 하기 위함이다.

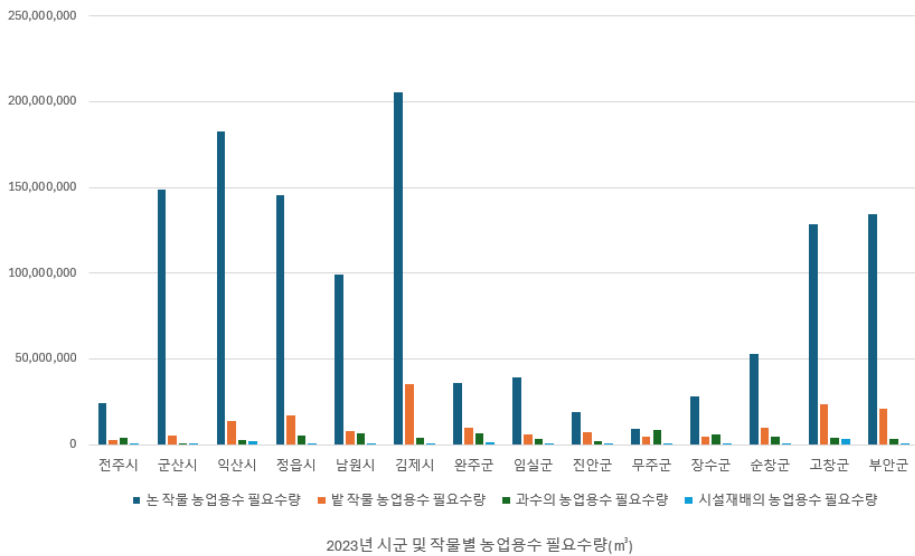
또한, 대표 작물로 선정되지 않은 나머지 과수 및 시설작물에 대해서는 개별 데이터를 사용하지 않고 중앙값을 이용하여 대표값을 산정하였다. 이를 통해 전체 작물군의 CWR 값을 계산할 때 극단적인 값이 산정 결과에 과도한 영향을 미치지 않도록 조정하였다. 이렇게 산정된 과수 및 시설작물의 CWR 값은 이후 시군별 총 CWR 계산에 통합되어 활용되었다.

■ 2023년 총 용수 필요수량과 2022년 총 용수 필요수량

○ 2023년 총 용수 필요수량(농림축산식품부 데이터 사용)

2023년 기준 전북특별자치도 시군 및 작물별 물 필요수량을 나타내었고, 논 작물의 물 필요수량 최대치는 김제시로 205,220,179 m³이고, 최소치는 무주군으로 9,454,062 m³이라는 값이 나오며, 평균값은 89,530,472 m³, 중앙값은 76,088,184 m³으로 산정된다.

김제시는 넓은 논 면적과 집약적인 벼 재배로 인해 다른 시군에 비해 월등히 높은 물 필요량을 보이며, 내륙 산지 비중이 큰 무주군은 상대적으로 논 면적이 작아 물 필요수량이 가장 낮게 나타난다. 전체적으로 벼는 다른 작물에 비해 시군 간 편차가 매우 크게 나타난다.



자료: 유승환 외 4인(2009), 농림축산식품부(면적)

[그림 3-16] 2023년 시군 및 작물별 물 필요수량

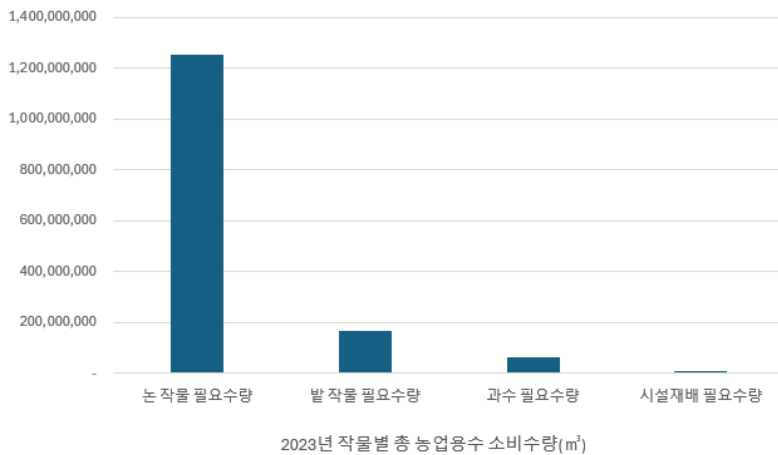
밭의 물 필요수량 최대치는 김제시 35,153,470 m³이고, 최소치는 전주시로 2,400,950 m³이라는 값이 나오며, 평균값은 12,018,017 m³, 중앙값은 8,755,714 m³으로 산정된다.

김제시는 밭 작물의 물 필요수량 역시 가장 크게 나타나며, 도시화가 진행된 전주시는 상대적으로 밭 면적이 적어 물 필요수량이 최소 수준으로 계산된다. 이는 밭 작물의 경우에도 농업 위주의 시군과 도시 기능이 강한 시군 간에 물 사용 구조가 뚜렷이 차이를 보여준다.

과수의 물 필요수량 최대치는 무주군으로 8,696,659 m³이고, 최소치는 군산시로 1,088,044 m³이라는 값이 나오며, 평균값은 4,482,503 m³, 중앙값은 4,220,421 m³으로 산정된다.

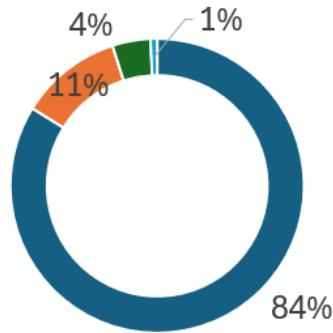
시설재배의 물 필요수량 최대치는 고창군으로 3,523,800 m³이고, 최소치는 부안군으로 100,968 m³이며, 평균값은 773,630 m³, 중앙값은 330,731 m³으로 산정된다.

종합하면, 논 작물·밭 작물·과수·시설재배 모두 시군별로 물 필요수량에 뚜렷한 차이를 보이며, 특히 논 작물에서 물 수요 집중 현상이 크게 나타난다. 이는 향후 농업용수 공급계획 수립 시 작물 특성과 재배 구조, 지역별 경지 분포를 함께 고려하여, 물 수요가 높은 시군을 중심으로 우선적인 관개시설 확충과 수자원 배분전략을 마련할 필요가 있음을 보여준다.



자료: 유승환 외 4인(2009), 농림축산식품부(면적)

[그림 3-17] 2023년 작물별 총 물 필요수량



■ 논 작물 필요수량 ■ 밭 작물 필요수량 ■ 과수 필요수량 ■ 시설재배 필요수량

2023년 작물별 총 농업용수 필요수량 비율(%)

자료: 유승환 외 4인(2009), 농림축산식품부(면적)

[그림 3-18] 2023년 작물별 총 물 필요수량 비율

2023년 기준 전북특별자치도 작물별 총 물 필요수량을 산정한 결과, 논 작물은 1,253,426,612 m³로 가장 높은 값을 나타냈다. 밭작물의 총 물 필요수량은 168,252,235 m³로 산정되었으며, 과수는 62,755,047 m³, 시설재배 작물은 10,830,823 m³로 조사되었다. 수량의 절대값을 비교하면 논 작물은 다른 작물과 비교할 때 가장 큰 규모의 물 필요량을 보였으며, 밭작물과 과수, 시설재배 작물은 벼에 비해 상대적으로 낮은 수준으로 집계되었다.

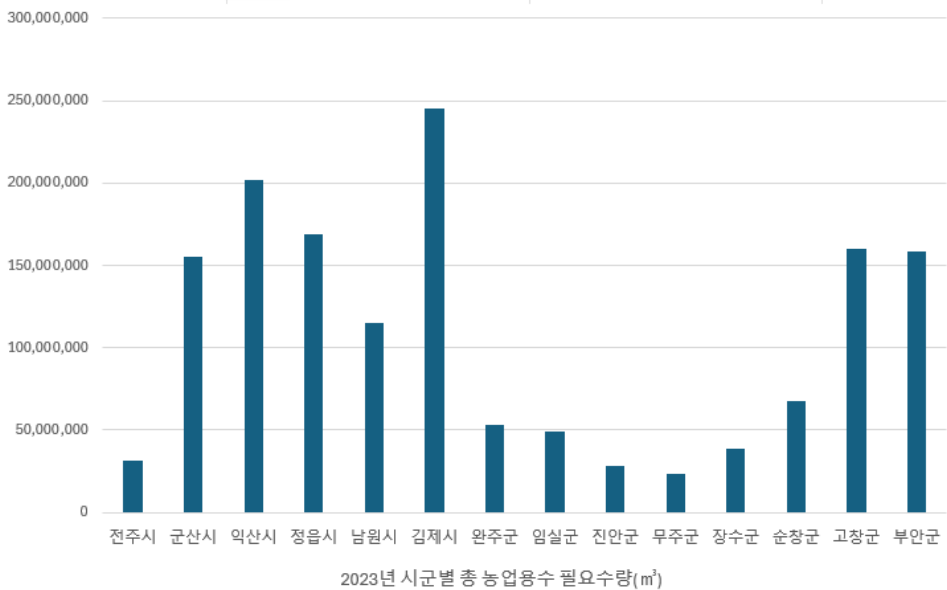
각 작물이 전체 농업용수 필요량에서 차지하는 비율을 계산하면, 논 작물은 약 84%로 전체 물 필요량의 대부분을 구성하였다. 밭 작물은 약 11%를 차지하였으며, 과수는 약 4%, 시설재배 작물은 약 1%로 나타났다. 이러한 비율 산정은 각 작물별 물 필요수량을 전체 합산 값에 대해 나누어 계산한 결과로, 작물별 물 수요의 상대적 크기를 명확하게 보여준다.

이 자료를 통해, 전북특별자치도 내 작물별 총 물 필요량과 그 비중을 구체적으로 확인할 수 있으며, 벼, 밭 작물, 과수, 시설재배 작물 간 절대량과 비율 차이를 수치로 비교할 수 있다.

또한, 농업 부문에서 사용되는 물의 대부분이 논 작물 재배에 집중되어 있으며, 나머지

지 작물들은 상대적으로 적은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 전북특별자치도 농업 구조에서 여전히 논 작물 재배가 큰 비중을 차지하고 있고, 벼가 대표적인 작물이라는 점을 반영한 결과로 해석할 수 있다.

본 그림에서 제시한 값은 논·밭·과수·시설작물의 물 필요수량만을 합산한 것으로, 통계상 ‘기타 재배지’로 분류되는 면적은 제외하였다. 기타 재배지를 제외한 이유는 CWR을 제시하는 자료에서 해당 작물군을 구체적으로 식별하기 어려워, 동일 기준으로 물 필요수량을 산정할 경우 결과의 신뢰성이 저하될 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구는 주요 작물군을 중심으로 수요를 재구성하여 비교 가능성과 계산의 일관성을 확보하고자 하였다. 실제 농업용수 수요는 본 연구 결과보다 다소 클 수 있으나, 기타 재배지 면적이 전체 경작면적에서 차지하는 비중이 제한적이라는 점을 고려하면 총 물 필요수량에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.



자료: 유승환 외 4인(2009), 농림축산식품부(면적)

[그림 3-19] 2023년 시군별 총 물 필요수량

시군별 총 물 필요수량을 살펴보면, 김제시가 244,898,361 m³로 가장 높게 나타났고, 무주군이 23,012,272 m³로 가장 낮게 산정되었다. 전북특별자치도 전체 14개 시군을

모두 합한 2023년 기준 총 물 필요수량은 1,495,264,716 m³으로 계산된다. 이 결과는 지역별 농업 구조와 경지 분포의 차이가 물 수요 규모에 직접적으로 반영된 것으로 해석할 수 있다.

김제시는 논과 밭, 과수 및 시설재배 면적이 비교적 넓게 분포하는 전형적인 농업 중심 지역이며, 특히 벼 재배 비중이 높아 다른 시군에 비해 물 수요가 크게 집중되는 특징을 보인다. 반면 무주군은 산지 비중이 크고 농경지가 상대적으로 제한적이어서 작물 재배면적 자체가 작아 총 물 필요수량이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

[표 3-24] 2023년 시군별 농업용수 필요수량

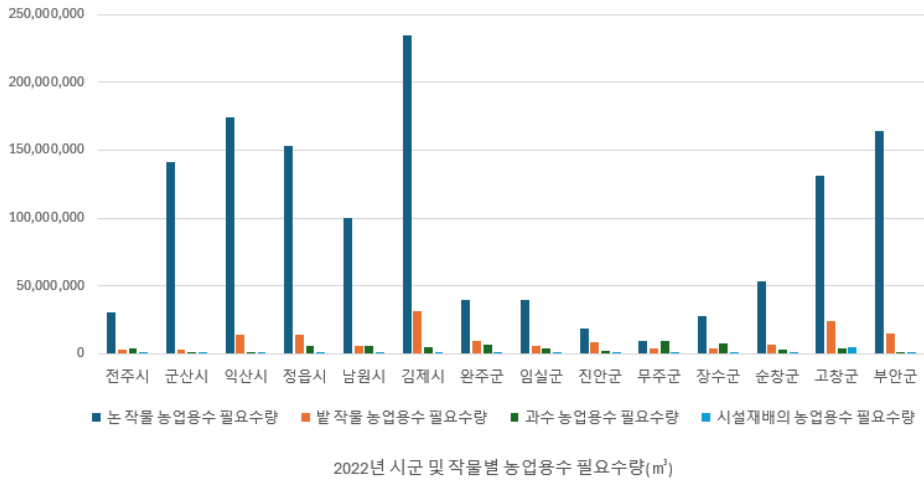
(단위 : m³)

행정구역	논 작물 농업용수 필요수량	밭 작물 농업용수 필요수량	과수의 농업용수 필요수량	시설재배의 농업용수 필요수량	시군별 농업용수 필요수량
전주시	24,530,374	2,400,950	4,191,711	308,197	31,431,232
군산시	148,935,965	5,197,921	1,088,044	111,714	155,333,644
익산시	182,391,648	13,969,299	2,754,579	2,372,681	201,488,206
정읍시	145,436,886	17,230,914	5,442,780	654,712	168,765,293
남원시	99,224,711	7,859,461	6,768,180	1,063,357	114,915,708
김제시	205,220,179	35,153,470	4,071,360	453,352	244,898,361
완주군	35,650,923	9,651,968	6,450,156	1,242,957	52,996,004
임실군	38,985,884	6,173,052	3,680,083	156,906	48,995,926
진안군	19,321,084	7,065,004	1,959,518	175,708	28,521,315
무주군	9,454,062	4,748,985	8,696,659	112,567	23,012,272
장수군	28,070,456	4,408,876	5,900,139	353,264	38,732,735
순창군	52,951,658	9,906,519	4,437,287	200,640	67,496,104
고창군	128,863,434	23,576,841	4,249,131	3,523,800	160,213,207
부안군	134,389,348	20,908,975	3,065,420	100,968	158,464,711
합계	1,253,426,612	168,252,235	62,755,047	10,830,823	1,495,264,716

○ 2022년 총 물 필요수량 (지자체 통계연보 데이터 사용)

초기 자료조사에서 2022년 자료가 먼저 조사되어 예비 분석과 방법 검증에 사용하였다. 이후 2023년을 중심으로 정리하는 과정에서 유형 비교를 위한 참조 값이며, 최종 판단

은 2023년 결과에 따른다.



자료: 유승환 외 4인(2009), 지자체 통계연보(면적)

[그림 3-20] 2022년 시군 및 작물별 물 필요수량

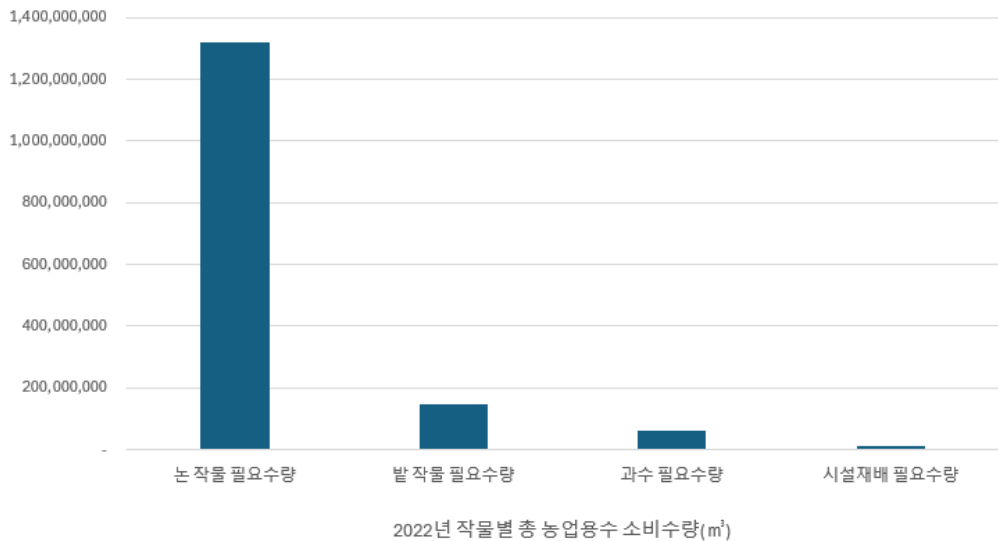
논 작물의 물 필요수량 최대치는 김제시로 234,670,100 m³이고, 최소치는 무주군으로 9,319,860m³이라는 값이 나오며, 평균값은 94,115,658 m³, 중앙값은 76,700,042 m³으로 산정된다. 김제시는 넓은 평야 지형을 기반으로 논 면적이 크고 벼 재배 비중이 높아 관개수요가 집중되는 지역으로, 다른 시군에 비해 압도적으로 큰 물 필요량이 도출되었다. 반면 무주군은 산지 비중이 크고 논 면적이 제한적이어서 벼 재배 규모가 상대적으로 작아 물 필요량이 가장 낮게 나타난 것으로 해석된다. 이처럼 벼는 지역별 논 면적과 재배 구조의 영향을 크게 받는 작물로, 시군 간 물 필요수량 편차가 뚜렷하게 나타나는 특징을 보인다.

밭 작물의 물 필요수량 최대치 역시 김제시로 31,085,288 m³이고, 최소치는 전주시로 2,837,070 m³이라는 값이 나오며, 평균값은 10,596,847 m³, 중앙값은 7,733,376 m³으로 산정된다. 김제시는 밭 작물 경지 면적 또한 큰 편이어서 논 작물처럼 높은 물 수요가 산정되었으며, 농업 기반이 넓게 분포한 지역 특성이 결과에 반영된 것으로 판단된다. 반면 전주시는 행정·상업 중심의 도시 기능이 강하고 농경지 면적이 상대적으로 적어 밭작물 물 필요량이 최소 수준으로 나타났다. 이는 밭 작물 부문에서도 농업 중심 지역과

도시형 지역 간 토지 이용 구조 차이가 물 수요 규모를 결정하는 중요한 요인임을 보여 준다.

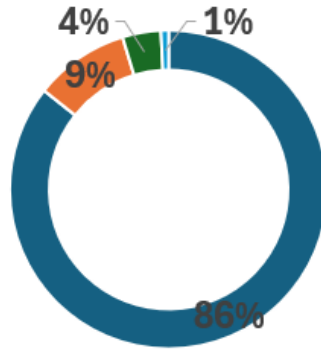
과수의 물 필요수량 최대치는 무주군으로 9,067,321 m³이고, 최소치는 군산시로 177,319 m³이라는 값이 나오며, 평균값은 4,289,845 m³, 중앙값은 4,093,680 m³으로 산정된다. 무주군은 지역 특성상 과수 재배 비중이 비교적 높아 과수 부문 물 필요량이 크게 산정된 것으로 보이며, 단위 면적당 수분 요구가 상대적으로 큰 과수의 특성이 반영된 결과로 해석할 수 있다. 반면 군산시는 과수 재배면적이 제한적이거나 다른 작물 비중이 상대적으로 커 과수 물 필요량이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

시설재배의 물 필요수량 최대치는 고창군으로 5,085,715 m³이고, 최소치는 군산시로 77,712 m³이며, 평균값은 856,308 m³, 중앙값은 505,919 m³으로 산정된다. 고창군은 시설재배 면적이 상대적으로 크게 분포하여 물 필요량이 가장 높게 나타났으며, 시설재배가 특정 지역에 집중되는 경향이 수요 차이를 확대시킨 것으로 보인다. 반면 군산시는 시설재배 규모가 제한적인 것으로 추정되며, 이로 인해 시설작물 물 필요량이 매우 낮게 산정되었다.



자료: 유승환 외 4인(2009), 지자체 통계연보(면적)

[그림 3-21] 2022년 총 물 필요수량



■ 논 작물 필요수량 ■ 밭 작물 필요수량 ■ 과수 필요수량 ■ 시설재배 필요수량

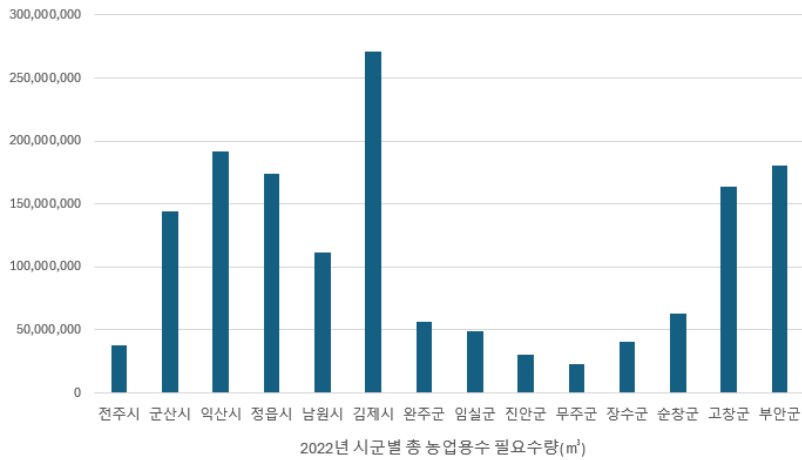
2022년 작물별 총 농업용수 필요수량 비율(%)

자료: 유승환 외 4인(2009), 지자체 통계연보(면적)

[그림 3-22] 2022년 총 물 필요수량 비율

2022년 기준 작물별 총 물 필요수량을 합산한 결과, 논 작물은 1,317,619,213 m³, 밭 작물은 148,355,857 m³, 과수는 60,057,826 m³, 시설재배 작물은 11,988,311 m³로 산정된다. 막대그래프에서 확인되듯이 논 작물의 물 필요량이 다른 작물에 비해 압도적으로 큰 수준을 보이며, 밭 작물·과수·시설재배는 상대적으로 작은 규모에 머무른다. 이는 전북특별자치도 농업 구조에서 논 작물 재배가 주요 생산 기반으로 유지되고 있음을 보여주는 동시에, 작물별 물 수요가 재배면적과 관개 특성에 의해 크게 좌우된다는 점을 시사한다. 특히 벼는 생육 과정에서 관개 의존도가 높고 재배 면적의 규모가 커, 전체 농업용수 수요를 결정짓는 핵심 작물로 기능하고 있음을 확인할 수 있다.

도넛형 그래프에서 비율을 살펴보면, 전체 물 필요수량 중 벼가 약 86%를 차지해 가장 큰 비중을 보이며, 밭작물이 9%, 과수가 4%, 시설재배가 1% 수준으로 나타난다. 즉 2022년 전북특별자치도 농업용수 수요 구조는 벼 중심으로 형성되어 있으며, 다른 작물의 비중은 비교적 제한적인 범위에 분포한다.



자료: 유승환 외 4인(2009), 지자체 통계연보(면적)

[그림 3-23] 2022년 시군별 총 물 필요수량

2022년 시군별 총 물 필요수량을 보면 김제시가 270,919,136 m³로 가장 높게, 무주군이 23,044,125 m³로 가장 낮게 산정되었다. 전북특별자치도 전체 14개 시군을 합한 2022년 총 물 필요수량은 1,538,021,208 m³이며, 이는 논·밭·과수·시설작물의 물 필요수량만을 합산한 값으로 ‘기타 재배지’는 제외한 결과이다. 따라서 본 수치는 주요 작물군을 중심으로 지역별 농업용수 수요 규모를 비교하기 위한 기준값으로 활용할 수 있으며, 작물 분류의 일관성과 산정 과정의 신뢰성을 확보하기 위한 분석상의 선택이 반영되어 있다.

그래프에서 알 수 있듯이 김제시, 익산시, 정읍시, 완주군 등 평야지대 시군에서 물 수요가 상대적으로 크게 나타나며, 산지 비중이 높은 무주군·진안군 등은 전체 규모가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 평야 지역에서 논 면적과 밭 경지가 넓게 분포하고 농업 활동의 집약도가 높은 반면, 산지 지역은 경작 가능 면적이 제한되어 작물 재배 규모 자체가 상대적으로 작기 때문으로 해석된다. 또한 시군별 물 필요수량의 차이는 단순한 지리적 특성뿐 아니라 재배 집중도, 농업 기반시설의 분포 등 지역 농업 구조 전반이 복합적으로 반영된 결과로 볼 수 있다. 이러한 공간적 수요 편차는 농업용수 공급계획 수립 시 지역별 우선순위를 설정하고, 고수요 지역의 안정적 관개 여건을 확보하는 데 기초자료로 활용될 수 있다는 점에서 의미가 있다.

[표 3-25] 2022년 시군별 농업용수 필요수량

(단위 : m³)

구분	논 작물 농업용수 필요수량	밭 작물 농업용수 필요수량	과수 농업용수 필요수량	시설재배의 농업용수 필요수량	시군별 농업용수 필요수량
전주시	30,177,100	2,837,070	4,320,170	275,520	37,609,860
군산시	140,969,420	2,875,855	177,319	77,712	144,100,306
익산시	174,580,538	14,267,110	1,609,635	1,209,512	191,666,795
정읍시	153,252,598	13,976,712	5,890,620	741,575	173,861,505
남원시	99,599,074	6,035,468	5,466,949	504,171	111,605,662
김제시	234,670,100	31,085,288	4,647,141	507,666	270,910,195
완주군	39,664,320	9,000,604	6,960,459	1,019,686	56,645,069
임실군	39,798,208	5,686,489	3,867,189	150,136	49,502,022
진안군	18,427,382	8,828,286	2,158,490	873,802	30,287,959
무주군	9,319,860	4,380,632	9,067,321	276,312	23,044,125
장수군	28,157,483	4,250,104	8,004,648	629,735	41,041,971
순창군	53,801,010	6,638,465	2,788,416	228,591	63,456,482
고창군	131,223,838	23,848,427	3,717,045	5,085,715	163,875,025
부안군	163,978,282	14,645,347	1,382,425	408,179	180,414,233
합계	1,317,619,213	148,355,857	60,057,826	11,988,311	1,538,021,208

[표 3-26] 2023년과 2022년 총 물 필요수량 비교

2023년 총 물 필요수량	1,495,264,716 m ³
2022년 총 물 필요수량	1,538,021,208 m ³

자료: 유승환 외 4인(2009), 2023년 농림축산식품부(면적), 2022년 지자체 통계연보 데이터(면적)

표는 2023년과 2022년의 연도별 총 물 필요수량을 비교한 결과로, 2023년은 1,495,264,716 m³, 2022년은 1,538,021,208 m³로 산정되어 2022년이 약 4,275만 m³ (약 2.9%) 정도 더 많은 것으로 나타난다. 두 해의 값은 전체 규모에서 큰 차이는 없지만, 각각 서로 다른 통계자료와 출처를 기반으로 산정되었기 때문에 연도 간 단순 수치 비교에는 주의가 필요하다.

[표 3-27] 청색 물발자국(농업계) 산정

(단위 : ton/년)

행정구역	논 총 필요수량	밭 총 필요수량	과수 총 필요수량	시설재배 총 필요수량	청색 물발자국 (합계)
전주시	24,530,374	2,400,950	4,191,711	308,197	31,431,232
군산시	148,935,965	5,197,921	1,088,044	111,714	155,333,644
익산시	182,391,648	13,969,299	2,754,579	2,372,681	201,488,206
정읍시	145,436,886	17,230,914	5,442,780	654,712	168,765,293
남원시	99,224,711	7,859,461	6,768,180	1,063,357	114,915,708
김제시	205,220,179	35,153,470	4,071,360	453,352	244,898,361
완주군	35,650,923	9,651,968	6,450,156	1,242,957	52,996,004
진안군	38,985,884	6,173,052	3,680,083	156,906	48,995,926
무주군	19,321,084	7,065,004	1,959,518	175,708	28,521,315
장수군	9,454,062	4,748,985	8,696,659	112,567	23,012,272
임실군	28,070,456	4,408,876	5,900,139	353,264	38,732,735
순창군	52,951,658	9,906,519	4,437,287	200,640	67,496,104
고창군	128,863,434	23,576,841	4,249,131	3,523,800	160,213,207
부안군	134,389,348	20,908,975	3,065,420	100,968	158,464,711
합계	1,253,426,612	168,252,235	62,755,047	10,830,823	1,495,264,716

자료: 저자 작성

3) 청색 물발자국 산업계 산정결과

■ 수질오염총량제 산업계 자료를 활용한 청색 물발자국 산업계 산정결과

전북특별자치도 공업용수 부문의 청색 물발자국은 수질오염총량제 산업계 오염원 자료를 활용하여 산정하였다. 시군별 공업용수 사용량(A), 공업용수 폐수발생량(B), 폐수 재이용량(C)을 이용하여, 공정에 투입된 물 중에서 실제로 하천·해역으로 방류되지 않고 유역 내에서 순수하게 소모되는 양을 청색 물발자국으로 보았다. 산정은 공업용수 사용량에서 하천으로 방류된 폐수량을 차감하는 구조로 이루어지며, 방류량은 폐수발생량(B)을 빼고 재이용량(C)을 더한 값으로 최종적으로 각 시군의 청색 물발자국은 $D=A-B+C$ 로 계산하였다. 다시 말해, 산업체가 사용한 물 가운데 일부는 폐수로 배출되어 수계로 다시 돌아가고, 일부는 재이용을 거쳐 공정 내에서 순환하며, 나머지 D 값이 증발, 제품·공정 내 체류, 설비 손실 등의 형태로 유역에서 사라지는 공업부문 청색 물의 순소비량으로 해석된다.

산정 결과, 전북 전체 공업용수 사용량은 약 1억 3,632만 m^3 /년, 폐수발생량은 약 9,272만 m^3 /년, 재이용량은 약 1,966만 m^3 /년으로 집계되었고, 이를 반영한 공업용수 청색 물발자국은 약 6,326만 m^3 /년으로 나타났다. 시군별로는 군산시의 청색 물발자국이 약 3,082만 m^3 /년으로 가장 크며, 전주시 925만 m^3 /년, 군산시 915만 m^3 /년이 다음 순이다. 이들 지역은 공업용수 사용량 자체가 크고, 폐수로 방류되는 양을 제외하고도 상당한 규모의 순소비가 발생하는 산업 거점으로 볼 수 있다. 반면 무주군은 공업용수 사용량과 폐수발생량이 동일하게 계상되어 재이용량이 없고, 산정된 청색 물발자국도 0으로 나타나 공업 활동 규모가 매우 제한적인 지역임을 보여준다.

고창군, 김제시, 남원시, 전주시, 정읍시의 경우에는 최종적으로 청색 물발자국이 음수로 산정되었다. 이는 수질오염총량제 통계에서 공업용수 사용량과 폐수발생량이 서로 다른 기준(취수량 vs 공정 사용량, 타 수원 유입 포함 등)으로 집계되거나, 일부 재이용·연계처리 구조가 복합적으로 반영된 결과로 해석할 수 있다.

[표 3-28] 청색 물발자국(산업계) 산정

(단위 : ton/년)

행정구역	공업용수 사용량(A)	공업용수 폐수발생량(B)	재이용량(C)	청색 물발자국 (D=A-B+C)
전주시	25,980,142	21,946,918	5,219,148	9,252,372
군산시	57,061,719	29,652,359	3,417,440	30,826,800
익산시	20,040,061	15,339,539	4,458,318	9,158,840
남원시	4,348,502	4,160,710	2,973,535	3,161,327
정읍시	8,199,230	6,417,132	1,829,895	3,611,993
김제시	4,499,466	3,863,596	655,628	1,291,498
완주군	10,044,334	6,194,569	468,280	4,318,045
진안군	377,992	259,817	55,173	173,348
무주군	463,259	463,259	-	-
장수군	167,980	103,321	31,427	96,086
임실군	798,293	673,957	23,955	148,291
순창군	732,801	577,859	83,589	238,531
고창군	1,087,178	1,090,667	209,469	205,980
부안군	2,519,971	1,977,373	237,878	780,476
합계	136,320,928	92,721,076	19,663,734	63,263,587

자료: 수질오염총량(2023기준)

■ 공급량을 통한 청색 물발자국 산업계 산정결과

본 연구에서는 전북지역 공업용수 청색 물발자국을, 시·군별 공업용수 공급량에서 수질 오염총량제 산업계 자료에 기반한 폐수발생량과 재이용량을 반영하여 산정하였다. 먼저 상수도(공업용) 공급량, 공업용 지하수 사용량, 하천 취수량을 합산하여 시·군별 공업용수 공급량(A¹)을 구하고, 수질오염총량제 산업계 자료에서 제공하는 공업용수 사용량·폐수발생량·재이용량(B, C)을 활용하여, 공급량을 실제 공정 사용·배출 구조에 맞추어 보정한 뒤 청색 물발자국을 계산하였다. 최종적으로 공업계 청색 물발자국은 공업용수 공급량(A¹)에서 하천·해역으로 실제 방류되는 폐수량(B)을 차감한 순 소비량(D=A¹-B+C)으로 정의하였다.

산정 결과, 전북 전체 공업용수 공급량은 약 1억 2,119만 m³/년 수준이며, 산업계에서 발생하는 폐수발생량은 약 9,272만 m³/년, 이 중 약 1,966만 m³/년이 재이용되는 것으로 집계되었다. 청색 물발자국은 전북 산업부문이 수계로부터 취수한 물 중 증발, 제품·공정 내 체류, 시스템 손실 등으로 유역에서 순소비되는 양임을 의미한다. 시군별로 전주시(1,675만m³/년), 완주군(1,345만m³/년), 군산시(1,259만m³/년)에서 청색 물발자국이 높게 산출되고 있어 전북내 공업용수 순소비의 주요 거점임을 짐작할 수 있다. 전주·완주·군산은 공업용수 공급량과 폐수발생·재이용이 모두 큰 도시·산업 중심지로, 산업 구조의 영향이 청색 물발자국에 뚜렷이 반영되고 있음을 알 수 있다.

[표 3-29] 청색 물발자국(산업계) 공급량 산정

(단위 : ton/년)

행정구역	수도 공급량	지하수량	하천취수량	공업용수 공급량(A ¹)
전주시	13,855,421	1,173,333	18,453,792	33,482,546
군산시	37,943,328	891,505	-	38,834,833
익산시	13,474,512	835,648	-	14,310,160
정읍시	1,644,882	63,628	1,786,227	3,494,737
남원시	716,414	753,183	-	1,469,597
김제시	3,097,289	1,849,447	-	4,946,736
완주군	4,538,038	798,072	13,841,652	19,177,762
진안군	174,556	176,869	-	351,425
무주군	303,478	110,036	-	413,514
장수군	73,532	185,398	-	258,930
임실군	483,736	599,470	-	1,083,206
순창군	0	304,963	-	304,963
고창군	730,465	371,996	38,416	1,140,877
부안군	1,419,319	506,207	-	1,925,526
합계	78,454,970	8,619,755	34,120,087	121,194,812

자료: 상수도통계(2023), 하수도통계(2023), 영산강홍수통제소(2023)

[표 3-30] 청색 물발자국(산업계) 산정

(단위 : ton/년)

행정구역	공업용수 사용량(A ¹)	공업용수 폐수발생량(B)	재이용량(C)	청색 물발자국 (D=A ¹ -B+C)
전주시	33,482,546	21,946,918	5,219,148	16,754,776
군산시	38,834,833	29,652,359	3,417,440	12,599,914
익산시	14,310,160	15,339,539	4,458,318	3,428,939
정읍시	3,494,737	6,417,132	1,829,895	-1,092,500
남원시	1,469,597	4,160,710	2,973,535	282,422
김제시	4,946,736	3,863,596	655,628	1,738,768
완주군	19,177,762	6,194,569	468,280	13,451,473
진안군	351,425	259,817	55,173	146,781
무주군	413,514	463,259	0	-49,745
장수군	258,930	103,321	31,427	187,036
임실군	1,083,206	673,957	23,955	433,204
순창군	304,963	577,859	83,589	-189,307
고창군	1,140,877	1,090,667	209,469	259,679
부안군	1,925,526	1,977,373	237,878	186,031

자료: 수질오염총량(2023기준), 저자 작성

다. 회색 물발자국 산정결과

전북 각 지자체별로 대표 하수처리장의 연간 BOD 오염부하량(A), 해당 방류수에 적용되는 법적 방류기준 농도(B), 같은 유역권에서의 배경 BOD 농도(C)를 설정하고, 이 오염부하를 기준농도 이내로 희석하기 위해 필요한 물의 양을

$$\text{회색 물발자국} = A \div (B - C)$$

로 계산하였다. 즉, 지자체별 회색 물발자국은 “대표 하수처리장 방류로 발생하는 BOD 부하량, 배경농도에서 법적 기준까지 허용되는 농도 여유도(B-C) 안에서 수용하기 위해 필요한 희석수량”으로 본 것이다.

표에 정리된 값들을 보면, 전북 전체 BOD 오염부하량 합계는 528톤이며, 이를 바탕으로 산정된 전북 전체 BOD 기반 회색 물발자국은 7,298,169톤으로 계산된다.

지자체별로는 전주시 2,910,981톤, 군산시 1,811,176톤, 익산시 967,941톤으로 회색 물발자국이 가장 크게 산정되었다. 이 지역은 BOD 오염부하(A)가 매우 크고, 적용된 법적 기준(80 또는 60mg/L)과 배경농도(1.85mg/L 내외) 사이의 농도 차이가 제한적이어서, 동일한 부하라도 필요한 희석수량이 크게 계산되는 특징을 보인다. 그다음으로는 남원시(368,488), 정읍시(357,047), 고창군(240,018), 완주군(155,387), 김제시(143,790) 등이 중간 수준의 회색 물발자국을 형성하고 있다.

반면, 진안군(22,338), 임실군(28,259), 장수군(35,861), 무주군(71,089) 등은 오염부하 자체가 작고, 그에 따라 회색 물발자국도 상대적으로 작은 값을 보인다. 순창군과 무주군처럼 법적 기준이 30mg/L로 비교적 엄격한 수역의 경우, 배경농도와의 차이가 작아 단위 부하당 필요한 희석수량은 커지지만, 절대 오염부하가 크지 않기 때문에 최종 회색 물발자국 규모는 중·소 수준에 머무른다.

정리하면, BOD를 기준으로 산정한 회색 물발자국은 전주·군산·익산으로 이어지는 도시·산업 축에서 가장 크게 나타나고, 산지·농촌 위주의 군 단위 지역에서는 낮게 나타난다. 동시에, 단순히 오염부하량뿐 아니라 법적 방류기준과 배경농도 간의 차이(B-C)가 회색 물발자국의 크기를 좌우하기 때문에, 오염부하가 크고 기준이 엄격하거나 배경농도가 이미 높은 수역일수록 더 많은 희석수량을 요구한다는 회색 물발자국 개념이 전북 지자체별 결과에 잘 반영되어 있다.

■ 오염원의 양 산정

[표 3-31] 지자체별 대표 하수처리장 방류량 및 수질농도 현황

(단위 : ton/일, mg/L)

행정구역	평균유량	BOD	TOC	SS	T-N	T-P
전주시	346,261	1.8	8.4	3.2	11.238	0.073
군산시	129,263	3.0	12.9	2.8	12.936	0.777
익산시	85,671	1.8	5.2	2.0	10.628	0.067
정읍시	51,258	1.5	7.7	2.1	9.652	0.046
남원시	29,530	2.0	7.9	5.1	15.801	0.121
김제시	20,525	1.5	5.0	1.4	5.106	0.028
완주군	19,571	1.7	5.0	2.5	6.986	0.066
진안군	2,738	1.3	4.2	3.1	4.530	0.073
무주군	2,109	2.6	2.8	2.3	6.696	0.036
장수군	2,874	2.0	4.6	1.7	7.260	0.094
임실군	4,117	1.1	4.6	2.3	6.638	0.058
순창군	4,619	1.9	5.7	3.5	10.365	0.125
고창군	13,310	2.9	6.2	2.9	8.662	0.153
부안군	8,793	1.8	6.1	2.3	7.023	0.048

자료: 하수도통계(2023)

■ 폐수배출허용 법적기준치

[표 3-32] 폐수배출허용 법적기준치 현황

(단위 : mg/L)

행정구역	1일 폐수배출량 2천m3이상			1일 폐수배출량 2천m3미만		
	BOD	TOC	SS	BOD	TOC	SS
청정지역	30 이하	25 이하	30 이하	40 이하	30 이하	40 이하
가 지역	60 이하	40 이하	60 이하	80 이하	50 이하	80 이하
나 지역	80 이하	50 이하	80 이하	120 이하	75 이하	120 이하
특례지역	30 이하	25 이하	30 이하	30 이하	25 이하	30 이하

자료: 물환경보전법 시행규칙 수질오염물질의 배출허용기준

■ 수역별 자연농도 선정

[표 3-33] 청색 물발자국(공업용수) 선정

(단위 : mg/L)

행정구역	하수처리장 주소	지역 구분	유역권	유역권 기반 배경농도(BOD)
전주시	전북자치도 전주시 덕진구 송천동 2가1035	나	용담	1.85
군산시	전북자치도 군산시 서해로 289	나	용담	1.85
익산시	전북자치도 익산시 금강동 1091-10	가	용담	1.85
정읍시	전북자치도 정읍시 가곡길 67-49	나	섬진	1.4
남원시	전북자치도 남원시 주생면 중동리 255	가	동화	1.5
김제시	전북자치도 김제시 석교1길 135	나	용담	1.85
완주군	전북자치도 완주군 후상제방길 60-48	나	용담	1.85
진안군	전북자치도 진안군 학천변길 99	가	용담	1.85
무주군	전북자치도 무주군 설천면 심곡리 451-1번지	청정	용담	1.85
장수군	전북자치도 장수군 장수읍 선창리 935	가	동화	1.5
임실군	전북자치도 임실군 춘향로 3024	가	동화	1.5
순창군	전북자치도 순창군 유등면 창신리 538	청정	동화	1.5
고창군	전북자치도 고창군 고창읍 죽림리 871	가	부안	1.3
부안군	전북자치도 부안군 부안읍 신운리 488	나	부안	1.3

자료: 하수통계(2023), 저자 작성

■ 회색 물발자국 산정결과

전북특별자치도 회색 물발자국은 BOD를 기준 오염물질로 설정하고, 지자체별 대표 하수처리장의 방류수 수질과 방류량을 바탕으로 산정하였다. 회색 물발자국은 하수처리장 방류로 인해 발생하는 BOD 오염부하를 해당 수역이 수용할 수 있는 농도 여유도 내에서 희석하기 위해 필요한 물의 양으로 해석되며, 본 연구에서는 각 지자체별 오염물질 양(A)을 법적 방류기준 농도(B)와 유역권 기반 배경농도(C)의 차이로 나누는 방식($D=A/(B-C)$)을 적용하였다. 즉, 동일한 오염부하라도 적용되는 방류기준이 엄격하거나 배경농도가 높아 (B-C)가 작아질수록 더 많은 희석수량이 요구되는 구조를 갖는다.

산정 결과, 전북 전체 BOD 오염물질 양은 약 528톤으로 집계되었으며, 이를 이용해 계산한 전북 전체 회색 물발자국 합계는 7,298,169톤으로 나타났다. 지자체별로는 전주

시가 2,910,981톤으로 가장 큰 회색 물발자국을 보였고, 다음으로 군산시(1,811,176톤), 익산시(967,941톤)가 높은 값을 나타내어 도시·산업 기능이 집중된 지역에서 회색 물발자국이 크게 산정되는 경향이 확인된다. 정읍시(357,047톤)와 남원시(368,488톤)는 중간 규모 수준으로 나타났으며, 고창군(240,018톤), 완주군(155,387톤), 김제시(143,790톤) 등이 그 뒤를 잇는다. 반면 진안군, 임실군, 장수군 등은 상대적으로 작은 값을 보여, 오염부하 규모 자체가 작거나 방류기준 및 배경농도 조건에서 회석수량 요구가 크지 않은 것으로 정리된다.

법적 방류기준 농도는 지역에 따라 30, 60, 80으로 구분되어 적용되었고, 배경농도는 1.3~1.85 수준에서 설정되었다. 특히 무주군과 순창군은 법적 기준이 30으로 상대적으로 엄격한 조건에 해당하므로, 동일한 오염부하 대비 필요한 회석수량이 더 커질 수 있는 구조를 갖지만, 실제 오염물질 양(A)이 크지 않아 최종 회색 물발자국 절대 규모는 각각 71,089톤과 112,388톤 수준으로 나타났다.

[표 3-34] 지자체별 회색 물발자국 현황

(단위 : ton/일, mg/L)

행정구역	오염물질 양(BOD) (A)	법적 방류기준 농도(B)	유역권 기반 배경농도(C)	회색 물발자국 (D=A/(B-C))
전주시	227.493	80	1.85	2,910,981
군산시	141.543	80	1.85	1,811,176
익산시	56.286	60	1.85	967,941
정읍시	28.064	80	1.4	357,047
남원시	21.557	60	1.5	368,488
김제시	11.237	80	1.85	143,790
완주군	12.143	80	1.85	155,387
진안군	1.299	60	1.85	22,338
무주군	2.001	30	1.85	71,089
장수군	2.098	60	1.5	35,861
임실군	1.653	60	1.5	28,259
순창군	3.203	30	1.5	112,388
고창군	14.089	60	1.3	240,018
부안군	5.777	80	1.3	73,405
합계	528.444	-	-	7,298,169

자료: 하수도통계(2023), 물환경보전법 시행규칙 수질오염물질의 배출허용기준

■ 전북특별자치도 물발자국 산정결과

전북특별자치도의 전체 물발자국은 녹색물발자국이 5,365백만톤/년으로 높은 비중을 차지하고 있으며 청색물발자국(농업계)가 1,495백만톤으로 다음 순으로 나타났다. 이는 전북이 논·밭 중심의 농업기반의 공간구조를 지역 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

녹색물발자국은 토양 속에 저장된 빗물이 식물에 흡수되어 증산하는 양을 의미하며 완주군 569백만톤/년, 남원시 536백만톤/년, 진안군 536백만톤/년, 정읍시 480백만톤/년의 순으로 높게 나타났다. 산림과 농경지 비중이 높은 지역에서 높게 나타나고 있어 전북의 토지이용 특성을 반영하고 있음을 알 수 있으며 산간지역의 높은 수치는 하류지역에 수자원을 공급할 수 있는 생태적댐 기능을 수행하고 있음을 보여주고 있다 할 수 있다.

청색물발자국은 하천수나 지하수가 직접 사용되는 양을 뜻하며 농업계가 1,495백만톤/년으로 생활계와 산업계 대비 높은 비중을 차지하고 있다. 김제시 244백만톤/년, 익산시 201백만톤/년, 정읍시 168백만톤/년의 순으로 나타났으며 대규모 농경지가 위치한 지역들로 많은 양의 관개·농업용수 공급이 이루어지고 있음을 짐작할 수 있다. 전주시의 경우 생활계 청색물발자국이 음수를 나타내고 있어 지하수, 빗물 등 불명수의 하수관로 유입이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 노후 하수관로 정비를 통한 효율적 물관리가 필요할 것으로 판단된다. 산업계 청색물발자국은 군산시가 30.8백만톤/년으로 가장 높게 나타났다으며 전주시 9.2백만톤/년, 익산시 9.1백만톤/년 순으로 산업단지가 발달한 도시지역에서 높게 나타났다.

회색물발자국은 오염된 물을 환경기준까지 희석/정화하는 데 필요한 물의 양으로 도시 및 산업 거점에서 상대적으로 높게 나타나고 있다. 전주시가 2.9백만톤/년으로 가장 높게 나타났으며 군산시 1.8백만톤/년, 익산시 0.9백만톤/년의 순이었다.

[표 3-35] 전북특별자치도 물발자국 산정결과

(단위 : ton/년)

행정구역	녹색 물발자국	청색 물발자국			회색 물발자국
		생활계	농업계	산업계	
전주시	143,304,194	-23,401,064	31,431,232	9,252,372	2,910,981
군산시	227,806,973	12,748,202	155,333,644	30,826,800	1,811,176
익산시	284,550,175	6,663,721	201,488,206	9,158,840	967,941
정읍시	480,241,236	3,592,028	168,765,293	3,161,327	357,047
남원시	536,708,425	3,343,769	114,915,708	3,611,993	368,488
김제시	350,940,335	8,456,930	244,898,361	1,291,498	143,790
완주군	569,196,983	14,359,051	52,996,004	4,318,045	155,387
진안군	536,590,313	6,531,201	28,521,315	173,348	22,338
무주군	414,457,104	2,752,910	23,012,272	-	71,089
장수군	353,676,435	1,032,664	38,732,735	96,086	35,861
임실군	393,184,757	4,035,434	48,995,926	148,291	28,259
순창군	337,886,755	4,271,393	67,496,104	238,531	112,388
고창군	420,924,427	7,213,559	160,213,207	205,980	240,018
부안군	315,960,833	6,903,853	158,464,711	780,476	73,405
합계	5,365,428,945	48,837,291	1,495,264,716	63,263,587	7,298,169

자료: 저자 작성

전북 물발자국은 농업계가 결정적 요인으로 작용하고 있는 구조이며 청색물발자국 중 농업계가 매우 높은 비중을 차지하고 있다. 농경지와 관개기반이 발달한 김제시, 익산시, 정읍시, 군산시, 고창군, 부안군이 농업계 청색물발자국의 대부분을 차지하고 있으며 산업계 청색물발자국과 회색물발자국은 산업·도시 거점인 전주시, 군산시, 익산시가 대부분을 차지하고 있다. 도시와 농촌의 물발자국 특성이 잘 나타나고 있으나 농업계의 높은 물소비는 기후 위기 시대에 전북지역의 취약점이 될 수 있어 녹색 물발자국은 효율적으로 보존하고 농업계 청색물발자국의 이용 효율을 극대화시킬 수 있는 물관리 전략이 필요할 것으로 판단된다.

[표 3-36] 전북특별자치도 1인당 물발자국 산정결과

(단위 : ton/인/년)

행정구역	인구수(2023)	청색 물발자국			회색 물발자국
		생활계	농업계	산업계	
전주시	642,727	-	49	14	5
군산시	259,980	49	597	119	7
익산시	270,036	25	746	34	4
정읍시	103,620	35	1,629	31	3
남원시	76,781	44	1,497	47	5
김제시	81,430	104	3,007	16	2
완주군	97,827	147	542	44	2
진안군	24,465	267	1,166	7	1
무주군	23,251	118	990	0	3
장수군	20,983	49	1,846	5	2
임실군	25,956	155	1,888	6	1
순창군	26,764	160	2,522	9	4
고창군	51,750	139	3,096	4	5
부안군	49,187	140	3,222	16	1
합계	1,754,757	74*	852	36	4

자료: 저자 작성

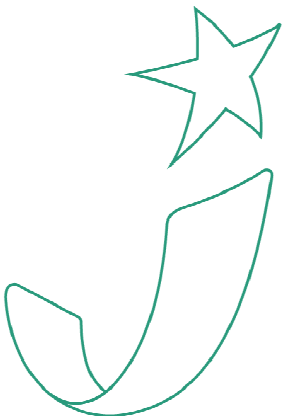
*전주시를 제외하고 산출한 값임



제4장

결론 및 정책제언

1. 결론
2. 정책제언 및 한계점



제4장 결론 및 정책제언

1. 결론

전북과 각 시군의 물발자국 평가를 수행하기 위해서는 적정 평가방법 및 정책적 활용 방향을 설정하기 위해서는 평가에 활용가능한 기초자료 수집 가능성 및 수집방법에 대한 현황 진단이 필요하다. 본 연구에서는 가장 최근 자료를 활용하기 위해 2023년을 기준으로 설정하고 기초 자치단체를 대상으로 물발자국 평가가 수행되었던 평가방법을 기준으로 기초 행정단위의 물발자국평가가를 수행해 봄으로써 평가의 지속가능성을 판단하였다.

물발자국 산정을 위해 강수량, 수자원 현황 등을 기초현황자료 수집 정리하였다. 전북에는 현재 강수 특성을 파악할 수 있는 종관기상관측소(ASOS) 10개 지점과 방재관측소 33개 지점이 있으며 2023년 연 강수량은 1,200 ~ 2,600mm(평균 1,987.4mm)사이의 범위를 보였다. 전체면적 8,077.2km²을 활용한 년 수자원 강수량은 16,052백만톤으로 분석되었다. 증발량은 인공위성 MODIS Evapotranspiration(ET) 자료를 활용하여 산출하였으며 연간 5,333백만톤이 증발되는 것으로 나타났다.

전북의 주요 댐인 용담댐, 섬진강댐, 부안댐에 통해 공급되고 있는 용수의 양은 연간 1,120.5백만톤이었으며 생공용수 586.2백만톤, 농업용수 376.6백만톤, 유지용수 157.7백만톤이 공급되고 있다. 전북내 전체 저수의 유효저수량은 408백만톤이었으며 대규모 농업용 저수지를 보유하고 있는 완주군 116백만톤(대아저수지, 경천저수지 포함), 장수군 67백만톤(동화댐 포함)가 높게 나타났다.

지하수는 연간 254.5만톤이 이용되고 있으며 농·어업용수 175.0백만톤, 생활용수 68.9백만톤, 공업용수 8.6백만톤으로 구분되어 이용되고 있다. 하천수에서 취수되어 이용되고 있는 수자원량은 990.8백만톤이었으며 농업용수 910.3백만톤, 생활용수 46.4백만톤, 공업용수 34.1백만톤이었다.

상수도로 공급되는 연간 급수량은 268.7백만톤이었으며 공업용수는 78.4백만톤이었다. 이용후 하수처리시설로 유입되는 하수량은 연간 315.9백만톤이었다.

수질오염총량제 산업계 자료에서 나타나고 있는 전북내 전체에서 이용되고 있는 공업 용수는 연간 136.3백만톤이었으며 이 중 폐수발생량이 92.7백만톤, 재이용량 19.6백만톤으로 나타났다.

환경부에서 수행한 ‘지역 물발자국 산정 및 제도화 방안 연구(2016.12.)’ 등에서 수행한 물발자국 산정방식을 참고하여 전북의 행정단위까지의 물발자국 산정을 수행하였다.

녹색물발자국은 5,365.4백만톤/년(3,057.6톤/인/년)으로 위성분석자료를 활용하여 분석된 총 증발산량을 활용하였으며 수자원 가용량은 10,687.5백만톤/년으로 총 수자원 강수량 16,052백만톤/년에서 총 증발산량을 감한 값이 산출되었다.

청색물발자국은 농업계 1,495.2백만톤/년(852.1톤/인/년), 산업계 63.2백만톤/년(4.2톤/인/년)으로 분석되었다. 생활계의 경우 음의 값을 나타내고 있는 전주시를 제외할 경우 81.9백만톤/년(73.7톤/인/년)으로 분석되었다. 농업계가 큰 비중을 차지하고 있어 농경지 비율이 높은 전북의 특성이 잘 반영될 결과를 보여주고 있다.

회색물발자국은 7.3백만톤/년(4.2톤/인/년)으로 분석되었다.

전북의 물발자국은 도시와 농촌의 물발자국 특성이 잘 나타나고 있으나 기후 위기 시대에 농업계의 높은 물소비는 전북지역의 취약점이 될 수 있으므로 농업계 청색물발자국의 이용 효율을 극대화할 수 있는 물관리 전략이 필요할 것으로 판단된다.

2. 정책제언 및 한계점

가. 정책제언

■ 농업분야 정책적 활용방안

농업계 청색물발자국 산정시 물 필요수량(1,495백만 m^3)이 유효저수량(1,095백만 m^3)보다 약 400백만 m^3 더 크게 나타났으며 이는 공급 능력에 비해 수요가 초과되는 구조적 불균형이 존재함을 시사한다. 특히, 가뭄 등 비상 상황에서는 이 격차가 더욱 확대될 수 있어 일부 시·군에서는 관개용수 부족, 용수 공급 제한 등 실제 농업 생산 활동에 제약이 발생할 가능성이 있다.

○ 수자원 정책 측면에서 시사점

이와 같은 결과는 농업용수 부문에서 유효저수량만으로는 안정적인 용수 공급이 어렵다는 점을 보여주며, 추가적인 수자원 확보 대책이 필요함을 의미한다. 단기적으로는 기존 저수지의 저수 효율을 높이고, 지하수·소규모 보 등 잠재 수원을 보다 체계적으로 관리하는 방안이 요구된다. 중·장기적으로는 저수지 증설, 지류 및 농업용수로 정비, 분산형 저류지 조성 등 다양한 수자원 개발 대책을 병행하여 물 수급의 안전 여유를 확보할 필요가 있다.

○ 생산 및 지역경제에 미치는 영향

수요 대비 공급의 지속적인 부족은 농업 생산성 저하로 직결될 수 있으며, 작물 생육 단계에서 물 스트레스가 증가함에 따라 수량 감소 및 품질 저하를 초래할 가능성이 크다. 이는 농가 소득 감소, 농업 기반 산업의 위축으로 이어져 장기적으로는 지역 주민의 생활 수준 저하와 지역경제 피해로 확산될 우려가 있다. 특히 벼 재배 비중이 높은 시·군에서는 관개 실패가 곧바로 대규모 수확 손실로 이어질 수 있으므로, 물 수급 안정성을 확보하는 것이 지역경제 유지 차원에서도 중요한 과제로 판단된다.

■ 도시계획 분야 정책적 활용방안

스페인 세구라 강 유역, 과디아나 상류 분지에 대한 물발자국 평가를 통하여 수자원의

높은 농업용수 활용으로 인한 물부족 현상을 과학적으로 진단하고 정책적 방향을 제시한 사례가 있었으며 스페인 세비야시는 도시계획시 물발자국 개념을 활용하여 정량화된 계획을 수립함으로써 물사용량 절감, 회색물발자국의 도시 수질기준 연계 등의 효과를 발생시켜 도시 단위 물관리에 물발자국 평가가 이용될 수 있음을 사례로 제시하고 있다.

■ AWARE와 물발자국의 연계활용

물발자국을 산정하기 위해 수집된 기초자료는 지역별 물 스트레스 수준을 평가하는 AWRE(Available Water Remaining)과 연계하여 새로운 지표로 발전시킬 수 있을 것으로 판단되며 정책적으로는 크게 수자원 관리·계획 분야, 지속가능한 도시계획 수립 분야 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

AWRE(Available Water Remaining)는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)에서 지역별 물 부족 정도를 정량화하기 위해 고안된 대표적 수자원 영향평가 기법으로, 유역 단위에서 인간 활동과 생태계가 필요로 하는 물을 제외하고 남아 있는 가용수량(Available Water)을 기반으로 산정하는 지표이다.

이 지표는 지역적 물 스트레스 수준을 나타내며, 값이 높을수록 해당 지역의 물 자원이 상대적으로 부족함을 의미한다.

AWRE는 UNEP-SETAC Life Cycle Initiative와 WULCA(Working Group on Water Use in LCA)가 공동으로 개발하였으며, 전 세계 약 11,000개의 유역을 대상으로 0.1~100 범위의 값을 제공한다.

이러한 정량화 과정은 전통적인 물 사용량 통계만으로는 파악하기 어려운 지역별 수자원 취약성 및 이용압력을 비교 가능하게 한다.

AWRE는 기본적으로 다음의 논리 구조를 따른다.

우선, 각 유역에서의 가용수량(Availability)에서 인간 및 생태계의 수요(Demand)를 차감하여 남은 물의 양(AWR, Available Water Remaining)을 계산한다.

그다음, 해당 지역의 AWR 값을 세계 평균 AWR과 비교하여 상대적 부족 정도를 역수화(inverse)한 값이 AWARE 지수(Characterization Factor, CF)가 된다.

AWARE의 개념적 산출식

$$AWARE_i = \frac{Available\ Water\ Remaining_i}{Water\ Consumption_i}$$

Available Water Remaining(AWR) : 재생 가능한 담수량(유입량) - 인류 및 환경의 물 수요량

Water Consumption : 인류의 물 소비량 (증발, 제품에 포함된 수분, 하류로 가지 않는 물 등)

즉, AWARE 값이 1이면 해당 지역이 세계 평균과 동일한 수준의 물 가용성을 갖고 있음을 의미하며, 10 이상일 경우 물 부족이 세계 평균보다 훨씬 심각한 상태로 해석된다.

물발자국(Water Footprint)은 제품·서비스·국가 단위에서 직접 및 간접적인 물 소비량을 정량화하는 지표로, ISO 14046에 의해 표준화된 LCA 기반 방법론이다.

AWARE는 이런 물발자국 평가에서 '물 소비가 지역적 물 부족 조건에 미치는 영향을 정성적으로 표시하는 영향계수' 역할을 하며, 이를 통해 단순한 소비량 평가를 넘어 물 사용이 인간과 생태계에 미치는 상대적 스트레스 정도를 파악할 수 있다.

이러한 특성 덕분에 AWARE는 LCA 도구(OpenLCA, SimaPro 등)에서 통합 영향평가 방법으로 사용되며, 물발자국 결과를 지역별 물 스트레스 영향값으로 정규화하는 데 이용할 수 있을 것이다.

나. 한계점

■ 위성을 활용한 증발산량 산정에 대하여

본 연구에서는 이번 녹색 물발자국 산정의 장점은 몇 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 강수와 증발산을 모두 전복 전체를 커버하는 공간자료(티센망 강수 + 위성 ET)로 처리했기 때문에, 개별 기상관측소 값에만 의존하지 않고 행정구역 단위의 공간 평균값을 비교적 일관되게 산정했다는 점이다. 둘째, 강수량과 증발산량을 동일한 시간 스케일(연간)과 동일한 단위(ton/yr)로 통일함으로써, 이후 청색·회색 물발자국과도 바로 비교할 수 있는 틀을 만들었다는 점도 의미가 있다. 셋째, 전복 시군별 잠재 여유수량을 산정하여 추후

청색 물발자국(생활·농업·공업용수)과 연결하기 쉬운 구조를 만들어 정책적 활용성을 높였다. 다만, 위성 기반 증발산 자료를 토지피복별로 세분화하지 않고 행정구역 평균으로 사용했기 때문에, 산림·농경지·도시지역 간의 세밀한 차이를 녹색 물발자국에 직접 반영하지 못한 한계점을 가지고 있다.

■ 농업계 청색 물발자국에 대하여

첫째, 수자원 공급 확대 측면에서 신규 저수지·저류지 구축, 노후 농업용수로 개보수, 관정 정비 등 물 저장·이송 능력을 높이기 위한 사업을 지속적으로 추진할 필요가 있다.

둘째, 기존 시설의 운영 효율화를 통해 동일한 저수량으로 더 많은 면적을 관개할 수 있도록 저수지 운영 규칙 개선, 홍수·갈수기 연계 운영, 수원 전환 등의 전략을 검토할 수 있다.

셋째, 수요 관리 차원에서 물 절약형 관개기술(간단관개, 점적관개 등)과 내건성 품종 도입, 재배체계 조정 등 물 사용 효율을 높이는 농업기술을 확산하는 것도 중요하다.

전북 지역은 현재 유효저수량만으로는 장기적인 농업용수 수요를 충분히 충족하기 어려운 구조를 보이므로, 공급 확대와 수요 절감 정책을 병행하는 통합적인 수자원 관리 전략이 요구된다. 다만, 본 연구에서는 모든 작물별 CWR 값을 확보하지 못하고 일부 작물의 CWR 값만을 이용해 통합 물 필요수량을 산정하였으므로, 실제 수요가 다소 과대 또는 과소 추정되었을 가능성이 있다. 향후 보다 정확한 수자원 계획 수립을 위해서는 작물별 CWR 자료의 보완과 관개 효율, 실제 물 사용량 조사 등을 통해 추정값을 정교화할 필요가 있다.

■ 생활계 청색 물발자국에 대하여

각 시군별 생활용수 청색 물발자국은 “생활용수 공급량에서 공공하수처리시설 방류량을 차감한 순 소비량”으로 산정하였으나 일부 시군에서는 우수·침투수 및 공업폐수 유입 등으로 인해 하수처리장 방류량이 생활용수 공급량을 상회하는 경우가 나타났다. 이 경우 청색 물발자국이 음수로 계산되는 비직관적인 결과가 발생하였다. 본 연구에서는 청색 물발자국을 “실질적인 순 소비량”으로 해석하기 위해 음의 값은 0으로 보정하고, 해당 시군은 데이터 구조상 생활·공업·우수 유입이 복합된 지역이라는 점을 함께 언급하였다.

○ 전북자치도 공업용수 공급량 및 방류량 비교

실제 통계에서는 공업용수 사용량과 폐수발생량이 서로 다른 기준(취수량 vs 사용량, 공정 내 손실 포함 여부 등)으로 집계되는 경우가 있어, 일부 시군에서는 폐수발생량이 공업용수 사용량보다 크게 나타나거나, 재이용량 통계가 누락·과소 계상될 가능성도 존재한다. 이러한 경우에는 청색 물발자국이 음수로 계산되는 비논리적인 값이 나올 수 있으므로, 본 연구에서는 음수 값은 0으로 보정하고, 해당 시군은 데이터 구조상 불확실성이 큰 지역으로 별도 표시하여 해석 시 주의하도록 하였다.

공업용수 청색 물발자국은 수질오염총량제 산업계 자료에 포함된 공업용수 사용량, 폐수발생량, 재이용량을 이용해 공정 전 과정에서의 순소비량을 추정한 값이며, 이를 통해 전북 시군별 산업부문이 수계로부터 얼마나 많은 청색 물을 실질적으로 소모하고 있는지를 파악할 수 있다. 이러한 산정 결과를 공업용수 공급 구조(공업용 정수시설, 광역상수도, 공업 지하수 등) 및 회색 물발자국(산업계 오염부하)과 함께 비교하여, 산업 입지 특성과 수자원 이용 구조에 대한 시사점을 도출하였다.

참 고 문 헌

REFERENCE

- 자연과 생태 (2015). 물발자국 평가매뉴얼
- 산업통상자원부. (2015). 국내외 호환가능한 물발자국 산정방법 개발 연구
- 환경부. (2016). 지역 물발자국 산정 및 제도화 방안 연구
- 서울특별시의회. (2015). 물발자국 도입을 통한 지속가능한 서울시 물환경시스템 조성
- 한국환경정책평가연구원. (2012). 물발자국(Water Footprint) 개념의 정책적 도입과 활용방안
- 국회입법조사처. (2017). 물발자국(Water Footprint) 관리현황과 개선과제_인증제도를 중심으로
- Water Research. (2022). Evaluation of water footprint of urban renewal projects. Case study in Seville, Andalusia
- Department of Industrial Engineering, University of Padova. (2014). URBAN water footprint: a new approach for urban water management

Water Footprint Assessment and Policy Roadmaps for Efficient Water Resource Management in Jeonbuk

Boguk Kim · Jung Yong · Yoon Seung Hyeon

1. Research Goals and Methods

- The intensification of climate change-induced seasonal variability, combined with rising agricultural water demand driven by the expansion of digital industries and smart farming, requires more efficient water resource management. Traditional water management policies have primarily focused on supply allocation based on demographic trends, along with basic quantity and quality control. However, an integrated water use management system capable of tracing and controlling the water involved in the entire production and consumption lifecycle is now needed.
- The water footprint is an indicator used to measure the environmental impact of human activities. It is defined as the total volume of direct and indirect water used across the entire lifecycle of a product or service—from raw material extraction and production to distribution, use, and final disposal. In addition to measuring freshwater consumption, the water footprint also quantifies associated water pollution loads.
- The water footprint is classified into three components according to water resource characteristics—green, blue, and gray—which measure the consumption of rainwater, the use of available freshwater resources such as surface water and groundwater, and the amount of freshwater required to dilute pollutants to meet water quality standards, respectively. This integrated analytical framework expands the scope of water resource analysis beyond individuals and firms to the regional

and facility levels, enabling more precise assessments of water supply and demand, including the concept of virtual water.

- Jeonbuk State is currently at an early stage of introducing water footprint-based policies. To support effective policy development, it is necessary to establish assessment methodologies tailored to regional characteristics and determine the scope of water footprint assessment. In addition, the feasibility of collecting relevant baseline data should be examined and systematic data collection mechanisms established. Building on this foundation, this study aims to evaluate water footprints at the administrative-unit level and derive sustainable water management policy options tailored to Jeonbuk State, focusing on climate change response and water reuse promotion.

2. Conclusions and Policy Recommendations

- This study evaluated the feasibility of baseline data collection and identified potential policy applications to support the development of a water footprint assessment framework for Jeonbuk State and its cities and counties. The analysis used 2023 as the base year and employed the Ministry of Environment's regional water footprint assessment methodology to conduct evaluations at the administrative-unit level. Through this approach, the study assessed the sustainability of data-driven water resource management.
- Meteorological observation data from stations across Jeonbuk were collected to assess the baseline status of regional water resources. In 2023, the annual average precipitation was 1,987.4 mm, corresponding to an estimated total precipitation volume of approximately 16,052 million tons per year when calculated on an area basis. The green water footprint was estimated at 5,365.4 million tons per year based on total evapotranspiration derived from MODIS satellite data.
- From a water supply perspective, the total annual supply from major dams in Jeonbuk—Yongdam Dam, Seomjin River Dam, and Buan Dam—was approximately

1,120.5 million tons, of which domestic and industrial water uses accounted for the largest share at 586.2 million tons. Analysis of sectoral water consumption, including groundwater and river withdrawals, indicated that the blue water footprint amounted to 1,495.2 million tons per year for agriculture, 81.9 million tons per year for domestic use (excluding Jeonju), and 63.2 million tons per year for industry, respectively.

- The blue water footprint assessment results showed that the agricultural sector accounted for the largest share, reflecting Jeonbuk's regional characteristics, particularly its high proportion of agricultural land. However, given the challenges posed by the climate crisis, high agricultural water consumption may represent a potential vulnerability for the region. Therefore, it is necessary to develop water management strategies for improving agricultural water-use efficiency.

Key Words

water footprint, water resources, water management, domestic water, industrial water, agricultural water

기초연구 2025-06

전북 수자원의 효율적 활용을 위한
물발자국 산정과 도입방향 연구

발행인 | 장성화

발행일 | 2025년 12월 31일

발행처 | 전북연구원

55068 전북특별자치도 전주시 완산구 콩쥐팍쥐로 1696

전화: (063)280-7100 팩스: (063)286-9206

ISBN 978-89-6612-617-0 95530

본 출판물의 판권은 전북연구원에 속합니다.

2026년도 주요 연구과제

기초연구

농촌 식품사막 지수 개발에 관한 연구
전북자치도 농촌지역 마을소멸 분석 및 대응 전략: 사례지역을 중심으로
전북특별자치도 학교스포츠클럽 활성화 방안 연구
전북특별자치도 관세탄력성 분석: 대미수출을 중심으로
2026 전북특별자치도 관광객 실태조사
전북형 탄소중립 거버넌스 구축방안 연구

기획연구

전북자치도 맞춤형 메디컬 푸드 산업 육성방안 연구
전북 Physical AI 기반 바이오헬스산업 육성 전략 연구
전북형 기본사회 추진전략 연구

정책연구

기후변화 및 변화의 시대 농업분야 대응 방안
전북형 수산업 특화 발전방안 연구
전북 지역균형발전 권역 협의체 구성 및 공동사무 발굴 방안
전북특별자치도 탄소중립 성과관리 방안 연구
노화융합기술연구원 설립 방향 연구
전북사랑도민증 성과분석 및 발전방향 연구
농촌주민 역량 강화 농촌경제사회서비스 교육과정 체계화 방안
청년 정주형 지역사회혁신 생태계 구축 방안 연구
지방소멸 대응을 위한 전북형 농촌특화마을 클러스터 구축 연구
전북자치도 외국인정책의 전략적 대응 방향 연구
전북특별자치도 미식관광 활성화 방안
전북특별자치도 성년후견제도 이용 실태 및 지원체계 구축 방안
지역특성을 반영한 전북형 환경영향평가 협의모델 개발
전북 삼천리길 추진상황 점검 및 지역 활성화 방안 연구
전북자치도 산불 예방 대책 및 대응체계 개선
제5차 섬발전종합계획수립에 따른 전북도 대응 방안 연구
익산미륵사지휴게소 고속도로 환승시설(EX-HUB) 타당성 검토
전북자치도 AI 특화 시범도시 조성 기초 연구
전북자치도 신중년 일자리사업 활성화 방안
전북특별자치도 우수상품 육성사업 실태분석 및 발전방안
전북형 수출 지원 체계 고도화 방안 연구
전북 기술창업 활성화를 위한 기술사업화 플랫폼 구축 연구
전북형 지역거점 창업도시 모델 개발
전북과학기술원 기본방향 설정 연구
피지컬AI 기반 첨단 모빌리티 산업 전환을 위한 전북형 모델 마련 방안
전북형 재생에너지 기반 소득모델 마련 방안
전북자치도 가상융합산업 육성 기본방향 연구
스마트농업 혁신 AX 거점 육성 전략 연구
동물헬스케어 산업 발전 방안
곤충산업의 그린바이오산업화 연계 발전방안 및 육성전략
자치단체 ODA사업 연계 유학생 유치 및 정착 지원 방안 연구
전북사랑도민증 성과 분석 및 발전전략 수립 연구

현안연구

새만금 RE100 기업유치를 위한 기반연구 기초조사
통합돌봄 시행 대비 전북형 통합돌봄 지원 실행계획 수립
전북체육역사기념관 설치 적합성 검토 연구
새만금국제공항 사회적·경제적 효과 분석
광역행정통합 특별법 연계 전북특별법 특례 추진방안 연구



55068 전북특별자치도 전주시 완산구 콩쥐팍쥐로 1696

Tel 063. 280. 7100

Fax 063. 286. 9206

www.jthink.kr

