

물-에너지-환경 넥서스 연구(4차년도):
도시 물순환 시스템 모델의 구조와
기능에 대한 AI기반 평가분석

2023. 12



물-에너지-환경 넥서스 연구(4차년도): 도시 물순환 시스템 모델의 구조와 기능에 대한 AI기반 평가분석

AI-based Analysis and Evaluation
on Structure and Function of Urban Water Cycle

2023. 12



unesco

Centre
Under the auspices
of UNESCO



International Centre for
Water Security and
Sustainable Management

유네스코 물 안보 및 지속가능 물 관리
국제연구교육센터

제 출 문

이 보고서를 2023년도 i-WSSM에서 수행한 “물-에너지-환경 넥서스 연구(4차년도): 도시 물순환 시스템 모델의 구조와 기능에 대한 AI기반 평가분석”의 연구보고서로 제출합니다.

2023. 12. 29

연구책임자 : i-WSSM

연구수행자 : i-WSSM

팀 장 김 동 균

선임전문관 최 서 형

요 약 문

1. 연구제목

물-에너지-환경 넥서스 연구(4차년도): 도시 물순환 시스템 모델의 구조와 기능에 대한 AI기반 평가분석

2. 연구기간

2023. 3. 29 ~ 2023. 12. 29

3. 연구목적

본 연구에서는 선행연구들에 대한 평가·검증을 하기 위해, 시스템 다이내믹스를 활용하여 기 구축된 도시 물순환 시스템 모델을 대상으로 평가하였다. 1~3차년도 연구를 통해 수집된 에너지 인텐시티, 물공급량 등의 에너지 인텐시티 매트릭스 자료의 파라미터값의 분포도를 이용하여, 물-에너지-환경에 관련된 각각의 요소들이 어떠한 방식으로 넥서스 모델에서 모의가 되는지, 이러한 결과가 어떠한 유사성 및 차별성이 있는지 분석해 보고자 한다.

- 도시 물순환 시스템 공정별 에너지 인텐시티 매트릭스 보완 및 개선
- 물-에너지-탄소 연계형 넥서스 가상 분석
- 도시별 결과에 대한 재평가 및 검증
- 도시 내 소형저수지 또는 친환경 저류지와 같은 자연 생태계에서의 물순환 시스템에서의 적용성 검토

4. 연구내용

가. 선행 연구 정보 분석 및 모델의 재해석

- 에너지 인텐시티 및 도시별 공정별 물사용에 대한 정보 보완 및 개선

나. 물-에너지-탄소 기반의 넥서스 모델의 재평가

- 도시 물순환 시스템 모델 대상지역의 물사용량 및 에너지 인텐시티 유형별 몬테카

를로 시뮬레이션을 통한 가상데이터 생성 및 결과값 평가

다. 인공지능 기반의 데이터 분석 기법을 이용한 넥서스 연구 확장성 분석평가

- 자기조직화지도(SOM)을 적용한 데이터 분석
- AI기반 분석방식의 데이터 클러스터링을 통한 선행연구에서 제시된 유형별 가이드라인과의 상호연관성 및 일관성 판별 및 실효성 제고

5. 연구결과

가. 도시 물순환 공정별 평가의 기술통계량 보완 및 개선

- 각 도시의 물순환 공정별 에너지 소비량은 지역의 인프라, 기술 수준, 기후 조건 등에 따라 상이
- 물순환 공정의 에너지 사용량을 줄이기 위해서는 효율적인 물관리 시스템과 기술 도입이 필요하며 이러한 부분들에 대한 개선 및 보완을 위해서는 다양한 도시들의 지역별·유형별 물사용에 대한 에너지 강도를 기술적·통계적으로 정리하는 것이 매우 중요
- 본 연구에서는 도시물순환 전체 공정, 식수공급 공정, 하수처리 공정, 지하수 취수 공정, 지표수 이송 공정, 자연취수의 이송 공정, 정수처리 공정으로 구분하여 기존 통계량을 개선

나. 도시 물순환 시스템 넥서스 모델 가상 분석 평가

- 물과 에너지 간의 물과 에너지의 상호작용, 기회비용과 주요 요인과 같은 트레이드 오프에 대한 관계 분석
- 넥서스 연구는 자원 간의 상호 의존성 이해, 지속가능성 및 자원 절약, 기후변화와의 관계, 에너지 및 물의 효율성 증대, 자원 관리 및 정책 개발, 경제적 파급효과, 지속가능한 도시 및 지역개발, 국제적 협력 도모 및 글로벌 문제 해결의 중요성을 지니며, 궁극적으로 서로 얽혀있는 복잡환 관계를 이해하고 효율적이고 지속가능한 관리 방법을 제시하는 데 중요한 역할을 함
- 라틴하이퍼큐브(LHS) 기법을 통해 변수들간의 의존성 및 상관성을 배제하고 생성하여, 이를 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 분석
- 본 연구의 분석에 사용된 데이터는 온수비율(WHR), 지하수비율(GWR), 지하수위(GWL), 이송에너지(EI_CON), 정수에너지(EI_WT), 분배에너지(EI_TD), 하수처리에너지(EI_WWT), 물발자국(WF), 에너지소비(EC), 탄소발자국(CF)과 같이

총 10개의 데이터를 이용하여 자가조직화(SOM) 분석

- 분석 결과, 총 4가지 클러스터로 구분되었으며, 클러스터 1은 자원 사용량이 대체로 많으며 상대적으로 공정별 에너지 강도가 다소 높은 것으로 분석되었으며, 클러스터 2는 공정별 에너지 강도가 상대적으로 낮으며 이에 따라 물 발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소 발자국이 낮게 분석됨. 클러스터 3은 정수처리 공정, 도수 공정의 에너지 강도가 높았으며, 클러스터 4는 대부분의 모수값이 낮게 나타나며 결과값이 가장 낮게 분석됨

S U M M A R Y

1. Project Title/Subtitle

Water-Energy-Environment Nexus (4th year): AI-based Analysis and Evaluation on Structure and Function of Urban Water Cycle

2. Research Period

2023. 3. 29 ~ 2023. 12. 29

3. Objectives of Research

In this study, we evaluated and validated previous research. We used system dynamics to assess an pre-established urban water system model. By utilizing the distribution of parameter values from the energy intensity matrix from 2nd year of study, such as energy intensity and water withdrawal, we aim to analyze how each component related to the water-energy-environment nexus is simulated in the nexus model. We also seek to examine the similarities and differences in these results.

- Enhancement and improvement of the energy intensity matrix for each process in the urban water cycle system
- Virtual analysis of the water-energy-carbon nexus
- Re-evaluation and validation of results by city
- Assessment of applicability in natural ecosystem-based water cycle systems, such as small reservoirs or environmentally friendly storage facilities in urban areas

4. Contents, Scope, and Method of Research

A. Analysis of Previous Research and Reinterpretation of the Model

- Enhancement and improvement of information on energy intensity and water usage by process

B. Reevaluation of the Water-Energy-Carbon Nexus Model

- Generation of virtual data and evaluation of results through Monte Carlo simulations based on water usage and energy intensity for the urban water system model

C. Evaluation of the Expandability of Nexus Research Using AI-Based Data Analysis Techniques

- Data analysis using Self-Organizing Maps (SOM)
- Identification of correlations and consistency with the guidelines presented in previous research through AI-based data clustering, and improvement of effectiveness

5. Research Results

A. Enhancement and Improvement of Descriptive Statistics for Urban Water Cycle Process Evaluation

- The energy consumption of each urban water cycle process varies depending on factors such as regional infrastructure, technological level, and climatic conditions
- To reduce the energy consumption of water cycle processes, the introduction of efficient water management systems and technologies is essential. For improvements in these areas, it is crucial to technically and statistically organize the energy intensity of water usage by region and type across various cities
- In this study, the urban water cycle processes are categorized into overall water cycle, drinking water supply, wastewater treatment, groundwater intake, surface water transport, natural water intake transport, and water treatment processes, with improvements made to the existing statistical data for each process

B. Virtual Analysis and Evaluation of the Urban Water Cycle System Nexus Model

- Analysis of the relationship between the interaction of water and energy, opportunity costs, and key trade-offs between factors such as energy and water
- Nexus research is important for understanding the interdependence of resources, sustainability and resource conservation, the relationship with climate change, increasing the efficiency of energy and water, resource management, policy

development, economic impacts, sustainable urban and regional development, fostering international cooperation, and solving global problems. Ultimately, it plays a critical role in understanding complex interconnections and proposing efficient and sustainable management strategies

- Using the Latin Hypercube Sampling (LHS) method, dependencies and correlations between variables are excluded and generated, followed by analysis through Monte Carlo simulations
- The data used in this study for analysis includes ten parameters: hot water ratio (WHR), groundwater ratio (GWR), groundwater level (GWL), transmission energy intensity (EI_CON), water treatment energy intensity (EI_WT), transmission & distribution energy intensity (EI_TD), wastewater treatment energy intensity (EI_WWT), water footprint (WF), energy consumption (EC), and carbon footprint (CF), which are analyzed using Self-Organizing Maps (SOM)
- The analysis resulted in four clusters:
 - Cluster 1: Generally high resource usage, with relatively higher energy intensity per process
 - Cluster 2: Relatively low energy intensity per process, leading to lower water footprint, total energy use, and carbon footprint
 - Cluster 3: High energy intensity in the water treatment and intake processes
 - Cluster 4: Most parameter values are low, and the results show the lowest values overall

목 차

제	출	문	i
요	약	문	ii
목		차	vii
표	목	차	ix
그	림	목	x
제 1 장 서론			1
1.1	연구	배경	1
1.2	연구	목적	3
1.3	연구	내용 및 범위	4
제 2 장 연구방법 및 내용			6
2.1	도시	물순환 시스템 모델	6
2.1.1	도시	물순환 시스템	6
2.1.2	도시	물순환 시스템 모델	7
2.2	사용	된 자료	10
2.3	몬테	카를로 시뮬레이션 분석	10
2.4	코호넨	자가조직화지도(Kohonen Self-Organizing Maps)	12
제 3 장 결과 및 고찰			15
3.1	도시	물순환 공정별 평가의 기술통계량 보완 및 개선	18
3.1.1	도시	물순환 전체 공정에 대한 에너지 강도	20
3.1.2	식수	공급 공정에 대한 에너지 강도	21
3.1.3	하수	처리 공정에 대한 에너지 강도	22
3.1.4	지하	수 취수 공정에 대한 에너지 강도	26
3.1.5	지표	수의 이송 공정에 대한 에너지 강도	28
3.1.6	자연	취수의 이송 공정에 대한 에너지 강도	31
3.1.7	정수	처리 공정에 대한 에너지 강도	34
3.2	도시	물순환 시스템 넥서스 모델 가상 분석 평가	37

3.2.1 물과 에너지 간의 트레이드 오프에 대한 관계 이해	37
3.2.2 물과 에너지 넥서스 연구의 중요성 고찰	41
3.2.3 AI 알고리즘 기반의 도시물순환 구조 및 관계의 평가분석	44
제 4 장 결론 및 향후계획	56
4.1 물-에너지-탄소 기반으로 구축된 넥서스 모델에 대한 확장	56
4.1.1 물-에너지-생태계 넥서스 분석의 예	56
4.1.2 물-에너지-생태계 넥서스 분석의 주요 접근법	59
4.2 결론 및 전략방향	62
Appendix	63
A.1 사용된 R Code	63
참 고 문 헌	65

표 목 차

표 1 도시 물순환 시스템 항목별 주요 모수	10
표 2 도시 물순환 시스템 항목별 주요 모수 설정값	12
표 3 도시 물순환 시스템에서의 에너지 수반 요소	18
표 4 SOM 클러스터별 분석결과	55

그림 목 차

그림 1	본 연구에 대한 세부 주제별 연구 프로세스 개념도	4
그림 2	도시 물순환 시스템 체계도	7
그림 3	물-에너지-탄소 시스템 다이내믹스 분석 예시	8
그림 4	도시 물순환 시스템 모델 인과관계	9
그림 5	몬테카를로 시뮬레이션 분석 예시	11
그림 6	SOM 체계도	13
그림 7	SOM 분석 사례	14
그림 8	물공급 시스템에 따른 물사용량과 시간적 경향성	15
그림 9	수처리에 대한 에너지 인텐시티 비교	16
그림 10	물이용과 관련한 에너지 사용에 따른 상대적 비용 관계	17
그림 11	물 재이용에 관한 다각적 모식도	19
그림 12	하수재이용 시스템 규모에 따른 에너지 강도의 변화율	20
그림 13	도시물순환 전체 공정에 대한 에너지 통계량	21
그림 14	식수 공정에 대한 에너지 통계량	22
그림 15	중앙 제어식 물 재이용 시스템	24
그림 16	전통적 방식의 하수처리 및 재이용에 관한 모식도	24
그림 17	하수처리 공정에 대한 에너지 통계량	25
그림 18	지하수 취수 공정에 대한 에너지 통계량	27
그림 19	지표수 이수 공정에 대한 에너지 통계량	29
그림 20	자연취수의 이송 공정에 대한 에너지 통계량	33
그림 21	정수처리 공정에 대한 에너지 통계량	36
그림 22	물과 에너지 간의 트레이드 오프에 대한 관계	37
그림 23	물 재이용 시스템에서의 에너지 강도에 대한 4가지 케이스	38
그림 24	물 재이용 시스템 모식도	39
그림 25	물-에너지 넥서스 적용에 관한 시너지 효과를 보여주는 다이어그램	41
그림 26	도시 내 물-에너지-탄소 넥서스 시스템에 관한 모식도	44
그림 27	회귀분석의 다양한 예시	45
그림 28	랜덤포레스트에 대한 이해도	46
그림 29	LSTM에 대한 구조이해도	47
그림 30	클러스터 분석의 예시	47
그림 31	강화학습에 대한 원리 및 이해 모식도	48
그림 32	도시물순환 모델에서의 변수간의 상관관계 분석결과	50

그림 33 상관관계 분석에 대한 실제 변수간 관계 그래프	51
그림 34 도시물순환 모델의 데이터를 이용한 SOM의 U-matrix 결과	52
그림 35 SOM 결과 분석	53
그림 36 SOM을 기반으로 한 클러스터링 분석평가	54
그림 37 생태계 서비스 지향의 미래 빅서스 연구의 방향성 및 아이디어	56

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

1차년도 연구는 시스템 다이내믹스(System Dynamics, SD) 방법을 적용하여 도시 물순환 시스템 (Urban Water System, UWS)의 물-에너지-환경 넥서스 모델을 개발하고, 물손실 관리 전략에 따른 자원의 사용량 및 넥서스 부문 간 이동량을 분석하여 최적의 물손실 관리 전략을 도출하는 것을 목적으로 진행하였다. 이를 위해 세부 연구 내용은 다음과 같았다.

- (적용 사례) 다양한 적용 기준에 따른 넥서스 분석 사례 검토
- (평가기법) 기존의 학문 분야에서 발전된 방법과 분석 접근법들의 넥서스 적용현황 검토 및 도시 물순환 시스템 분석에 적합한 평가기법의 도출
- (모델 개발 및 분석) 도시 물순환 시스템의 물-에너지-환경 넥서스 모델 개발 및 물손실 관리 시나리오에 따른 넥서스 분석

2차년도 연구에서는 기존 문헌에서 제시된 도시 물순환 시스템의 공정별 에너지 강도(인텐시티, intensity)를 조사하여 에너지 인텐시티 매트릭스를 구성하였으며, 시스템 다이내믹스를 적용하여 물-에너지-환경 넥서스 모델을 개발하고, 여러 요인 및 시나리오에 따른 도시 물순환 시스템 내에서 자원의 양적·질적 사용을 분석하여, 현재 도시의 상태를 벤치마킹할 수 있는 가이드라인을 제시하였다. 이를 통하여 넥서스 관점에서 도시 물순환 시스템의 효율적인 자원 관리 전략 및 실행계획을 도출하는 것을 연구 목적으로 하였다. 이를 위해 아래와 같은 세부 내용은 다음과 같다.

- 기존 도시 물순환 시스템 연구에 대한 문헌조사를 통하여 도시 물순환 시스템 공정별 에너지 인텐시티 매트릭스 구축 및 기술통계 값 도출
- 도시 물순환 시스템 내 변수들의 변동에 따른 물 사용량(총 사용수량, 우수수량, 실 사용수량)과 에너지 사용량(총 에너지 사용량), 그리고 그에 따른 다양한 에너지 인텐시티(총 사용수량 에너지 인텐시티, 우수수량 에너지 인텐시티, 실 사용수량 에너지 인텐시티)의 변화 분석
- 기존 문헌들의 도시 물순환 시스템의 각 단계별 에너지 인텐시티 값을 기준으로 하여 총 사용수량 에너지 인텐시티, 우수수량 에너지 인텐시티 및 실 사용수량 에너지 인텐시티 관점에서 도시를 분류할 수 있는 가이드라인 제시

- 해당 도시의 여건에 따라서 도시 물순환 시스템의 외부 영향 및 운영효율 변동 시나리오에 따른 자원의 사용량 및 효율 변동을 시계열 분석 수행

3차년도 연구에서는 1·2차년도의 연구결과에 기반하여 우리나라 광역지자체를 대상으로 도시 물순환 시스템을 구성하는 상수 시스템의 물-에너지 이용을 넥서스 관점에서 분석하여, 이를 바탕으로 도시 물순환 시스템 관리 전략 및 실행계획을 제시하는 것을 연구 목적으로 한다. 이를 위해 다음과 같은 세부 연구 목표를 수립하였다.

- 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링 방법론 제시
 - 도시 물순환 시스템 물-에너지 사용량 및 사용효율의 현황과 거동분석을 위한 방법론 제시
- 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향 분석
 - 국내 특광역시(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 세종)와 도·자치도(경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주)의 10년간(2011년~2020년) 상수 시스템 및 상수 시스템 단위 공정(취수 및 도수, 정수처리 및 송수, 배급수)의 에너지 인텐시티의 평균 및 변동성 분석
- 상수 시스템 단위 공정 에너지 인텐시티 영향요인 도출
 - 시스템 특징(급수량, 급수인구, 관로 연장)과 시스템 운영관리 수준(고도처리비율, 누수율)이 국내 상수 시스템 단위 공정 에너지 인텐시티에 미치는 영향 분석
- 광역지자체 상수 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링 적용
 - 국내 광역지자체(부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 세종, 제주) 상수 시스템에 물-에너지 사용량 프로파일링을 적용하여 물-에너지 사용 현황 및 거동 분석
 - 변화 원인 분석 및 넥서스 관점 상수 시스템 운영관리 전략 및 실행계획 도출
- 벤치마킹: 전 세계 상수 시스템과 물-에너지 사용효율 비교
 - 2차년도의 도시 물순환 시스템 에너지 인텐시티 매트릭스 기반으로 제시된 벤치마킹 가이드라인을 적용하여 국내 광역지자체 상수 시스템 물-에너지 사용효율 검토
- 급수량, 유수량, 실 사용수량 영향 분석
 - 누수량과 누수량 변동이 가장 큰 제주지역 대상으로 급수량, 유수량, 실 사용수량이 물-에너지 사용량 프로파일에 미치는 영향 분석

1.2 연구 목적

4차년도인 본 연구에서는 선행연구들에 대한 평가·검증을 위한 목적으로, 기 구축된 물순환시스템 모델(시스템 다이내믹스)을 대상으로 평가를 수행하였다. 연구에 대한 접근방식은 1~3차년도를 통하여 선행 수집된 에너지 인텐시티, 물공급량 등의 매트릭스 자료의 파라미터값의 분포도를 이용하여, 가상모의를 실시하여 모델에서 시뮬레이션 되는 물-에너지-환경에 관련된 제각각의 요소들이 프로세스 기반으로 디자인된 넥서스 모델에서 어떠한 방식으로 모의가 되며, 이러한 결과들이 다양한 연구들에서 추론된 물순환 구조에서 밝혀진 내용들과 어떠한 유사성 및 차별성이 있는지 밝혀낸다. 이를 위해 세부적인 연구내용은 다음과 같다.

- 도시 물순환 시스템 공정별 에너지 인텐시티 매트릭스 보완 및 개선
 - 과거 선행연구들을 바탕으로, 여러 가지 유형의 국내·외 도시를 대상으로 물순환 시스템 연구에 대하여 문헌정보를 바탕으로 실시
 - 기 도출된 도시 물순환 시스템 공정별 에너지 인텐시티 매트릭스 및 관련 기술통계 추정치를 바탕으로 다양한 방법의 데이터 분석(전통적 통계 vs. 인공지능 기반의 머신러닝 기법)을 실시
 - 에너지 인텐시티에 대하여 상수시스템에 포함되는 취수·도수 공정, 정수처리·송수 공정, 배급수 공정, 도수관에 대한 구조적·비구조적 세부항목을 이용하여 시공간적으로 패턴양상을 평가
- 물-에너지-탄소 연계형 넥서스 가상 분석
 - 기 구축된 도시 물순환 시스템 넥서스 모델을 바탕으로 물-에너지-탄소발자국에 해당하는 세부항목에 대해서 가상 자료를 입력하여 모델의 출력값을 도출
 - 도출된 시뮬레이션 결과값들을 이용하여 물-에너지-탄소와 관련된 상호작용 및 관계를 특성화
- 도시별 결과에 대한 재평가 및 검증
 - 기존의 선행결과로 제시된 다수의 결론 및 최종 산물은 도시 물순환 시스템의 각 단계별 에너지 사용패턴에 따라 대부분 선형적으로 프로파일링 되는 경우가 대부분
 - 많은 시스템 모델링의 결과, 특히 적용대상의 시스템의 구조와 기능이 복잡해질수록 선형적인 패턴에 의해 구분이 되는 경우도 있으나, 비선형적인 패턴이 발견되는 경우가 많음
 - 따라서, 본 연구들의 결과에 대한 실용성 및 실효성을 높이기 위해서는 기 구축된 모의 결과 및 사용데이터들에 대해서도 차별적인 관점 및 접근방식에서의 분석평가가 필요할 수 있음
- 도시 내 소형저수지 또는 친환경 저류지와 같은 자연 생태계에서의 물순환 시스템에서의 적용성 검토
 - 최근 도시 물순환 시스템을 고려함에 있어서 관로시스템과 같은 물공급에 대한 마이크로 관점에서의 프로세스도 중요하지만, 도시 내 생태계와의 연관성 및

상호작용을 고려할 수 있는 친환경 저류지와 같은 매크로 관점에서의 프로세스 고찰도 매우 중요한 부분임

- 따라서, 본 연구에서는 도시 물순환 시스템 구축에 있어서 저류지 및 친환경 물순환 시스템 구축의 확장성을 고려하여 자연생태계 구조에서의 물-에너지-탄소를 포함하는 넥서스 기법 평가방식 도입 검토

1.3 연구내용 및 범위

본 연구에 대한 개념적인 모식도 및 프로세스는 다음과 같다[그림 1].

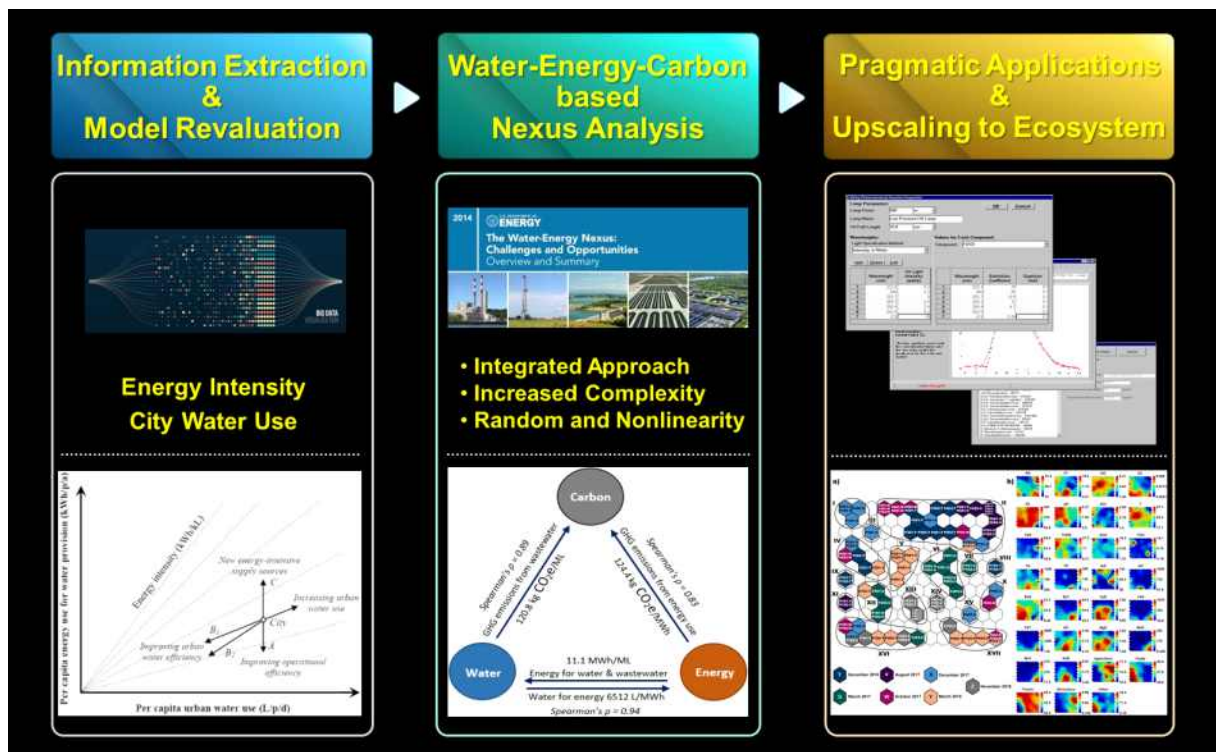


그림 1 본 연구에 대한 세부 주제별 연구 프로세스 개념도

- 선행 연구 정보 분석 및 모델의 재해석
 - 기존 수집 및 분석된 자료를 이용하여 에너지 인텐시티 및 도시별 공정별 물사용에 대한 정보 보완 및 개선
- 물-에너지-탄소 기반의 넥서스 모델의 재평가
 - 기 구축된 도시 물순환 시스템 넥서스 모델을 이용하여 도시의 물사용량 및 에너지 인텐시티 등의 에너지 사용조건에 따른 유형별 패턴을 몬테카를로 시뮬레이션 형태로 가상데이터를 생성하여 모델을 통해서 출력되는 값들에 대한 객관적 평가 실시

- 인공지능 기반의 데이터 분석 기법을 이용한 넥서스 연구 확장성 분석평가
 - 본 연구에서는 인공지능기반의 신경망 모델의 유형 중에서 Kohonen 네트워크로 널리 알려진 자기조직화지도(SOM:Self-Organizing Map)를 적용하여 데이터 분석
 - SOM을 활용한 데이터 분석방식은 기존의 통계와 같은 데이터 분석평가와는 다르게 모델에서 추출된 데이터의 자체패턴을 학습을 통하여 관계해석을 하기 때문에, 구축된 모델에서 출력되는 값들의 관계 규명에 있어서 객관적인 데이터가 평가가 가능할 것으로 판단됨
 - 이러한 데이터 평가를 통하여 AI기반 분석방식의 데이터 클러스터링이 기존 선행연구에서 제시된 유형에 대한 가이드라인과의 상호연관성 및 일관성을 판별하여, 넥서스 연구의 확장성 및 실효성을 제고하는 데에 목표를 둠

제 2 장 연구방법 및 내용

2.1 도시 물순환 시스템 모델

2.1.1 도시 물순환 시스템

현재 전 세계 인구 중 절반 이상이 도시에 거주하고 있으며, 도시화는 전 세계적으로 지속적으로 가속화되고 있다. 국토연구원에 의하면 도시화의 정의는 일반적으로 도시의 인구 집중과 더불어 근대산업이 발전함에 따라 농업적인 지역이 도시적인 지역으로, 도시적인 지역이 더욱 도시적인 지역으로 변해가는 과정 등으로 설명된다. 최근에는 생활양식의 변화의 관점에서 도시적인 생활양식이 사회에 보편화되어 가는 과정 혹은 취락이나 지역에서 도시적인 문화가 점차 확산하는 과정이라고도 한다. 요컨대 도시화란 이로 인하여 나타나는 결과를 뜻하는 것이 아니라 진행중인 도시의 과정(Urban Processing)과 이에 부수되어 나타나는 도시의 현상을 말하는 것이며, 물리적, 사회적, 정치적, 경제적, 문화적 변화를 포함한 총체적인 변화를 의미한다. 도시화의 직접적인 요인으로는 도시의 흡인력을 들 수 있다. 산업화로 인한 과학기술의 발달과 생산능력의 향상은 경제발전, 인구증가, 교통수단의 발달, 각종 문화복지의 혜택 등을 가능케했으며, 이것이 도시화를 촉진시킨 원인이 되었다. 부차적인 도시화 요인으로는 농촌의 압출력을 들 수 있다. 즉 농촌인구의 과다와 상대적 빈곤, 농업의 과학화로 인한 잉여 인력, 농촌의 가치관의 변화와 도시에의 동경 등이 농촌인구를 압출하는 요인이라고 할 수 있다. 도시화는 도시의 입지여건이나 도시의 기능에 따라 집약형과 분산형, 연담형과 확산형, 거대도시형 등 다양한 양상으로 전개된다. 한편 산업발달 및 도시경제성장이라는 동기부여 없이 단순히 인구만 증가하는 기형적인 도시화현상을 가도시화(Pseudo-Urbanization)라고 하는데, 주로 경제기반이 약한 개발도상국가에서 나타나는 급격한 도시화 현상이 이에 해당한다. 가도시화는 도시의 성장과정이 선진국의 경험과 같이 산업화에 의하여 농촌인구가 도시로 유입되었다기 보다는 농촌경제의 파탄에 의하여 농촌인구가 도시로 압출되는 현상이라고 설명할 수 있다. 즉 도시의 경제기반이 없는 상태에서 농촌으로부터 압출된 인구의 집중으로 비정상적인 성장을 하게 되는 도시화를 말한다.

이처럼 도시화는 경제성장과 산업화뿐만 아니라 사회 전반적으로 많은 영향을 미치며, 저개발국가와 같은 곳에서는 개발과 발전의 기회를 제공하기도 하지만, 이로 인한 무분별한 도시의 확장은 기후, 환경 등 다양한 문제를 야기시킬 수 있다. 2003년 교토에서 개최된 제3차 세계물포럼(World Water Forum)에 의하면, 물 문제는 단순히 물 부족으로만 비롯된 것이 아니라 잘못된 운영을 통해 발생하는 경우가 많으며, 도시 물순환 시스템을 효율적으로 운영하는 것이 매우 중요하다. 도시 물순환 시스템은 다양한 하위 시스템을 포함하고 있으며, 이러한 하위 시스템들은 각각 독립적이며 연결되어있다. 이중 인위적으로 운영되는 도시 물순환 시스템은 [그림 2]와 같이 취수, 정수 및 하수처리, 배-

급수, 용수 사용 등의 과정으로 구성되어 있다.

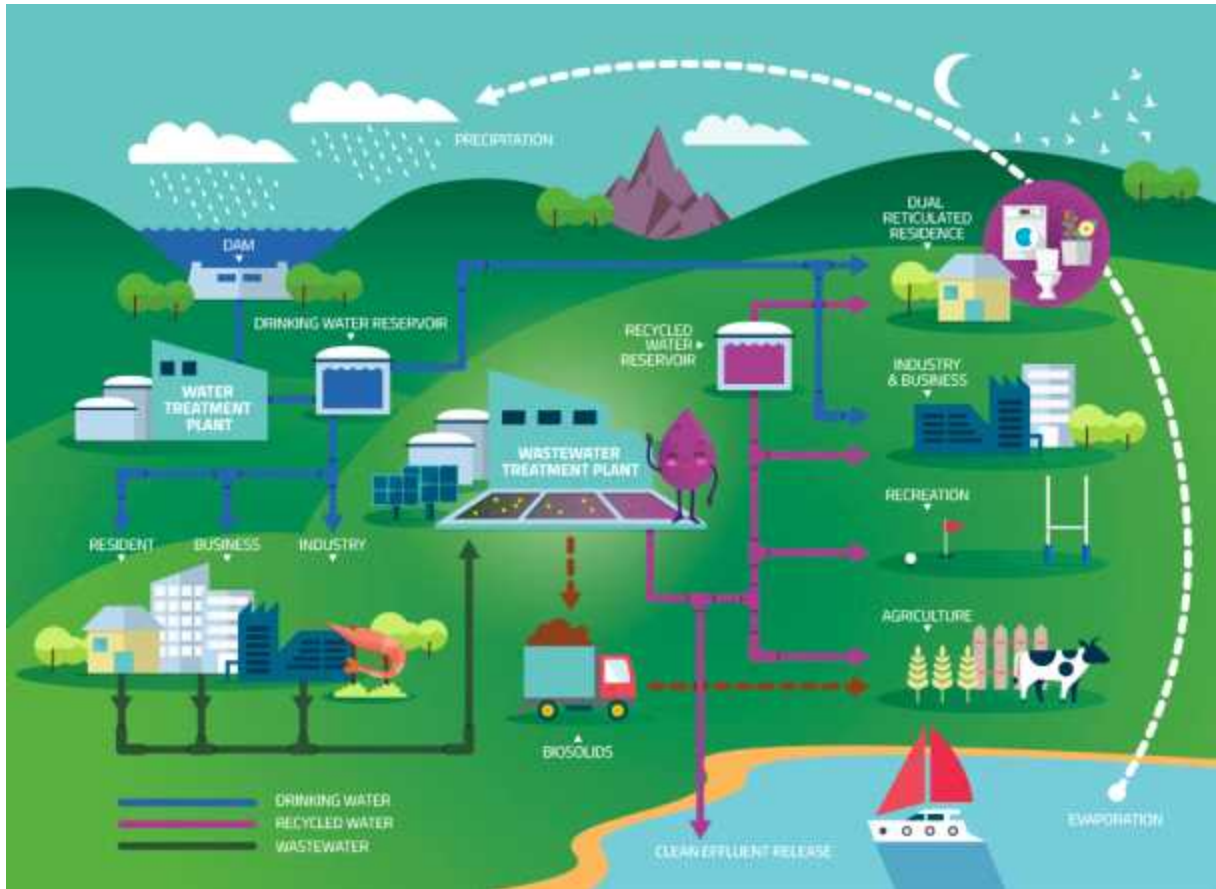


그림 2 도시 물순환 시스템 체계도(출처: Ballina Water)

도시 물순환 시스템을 지속가능하고 더욱 효율적으로 관리하기 위해서는 시스템 내 공정을 잘 살필뿐만 아니라 물, 에너지, 탄소 간의 관계를 넥서스 관점에서 이해하는 것이 필요하다. 도시 물순환 시스템을 효율적으로 관리하기 위해 물 부문만을 고려하는 것이 아닌 에너지와 탄소 등의 물과 연관된 다양한 부문들을 함께 고려하는 넥서스 관점이 학계와 관련 의사 결정권자들에게 점차 각광받고 있다. 넥서스 간 부문들은 긴밀한 연계성을 지니고 있으며, 이 요소들은 복잡한 상호작용을 가지고 있다. 이러한 상호 연결 중에서 물과 에너지는 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 이렇듯, 시스템 내에서 물, 에너지, 탄소의 상호연관성과 복잡한 관계를 이해하면 자원 소비량을 줄일 수 있으며 오염물질 배출량을 같이 저감시킬 수 있다.

2.1.2 도시 물순환 시스템 모델

본 연구에서는 「물-에너지-토지연계 전략수립을 위한 국제공동연구」에서 시스템 다이내믹스를 활용하여 개발된 도시 물순환 시스템 모델을 사용하였다. 시스템 다이내믹스는 복잡한 인과와 상호연관성을 분석하기에 적합한 방법이며(Forrester, 1961; 1968), 시스템

내 피드백에 의한 영향을 분석하는데 용이한 방법이다(Qi and Chang, 2011). 여러 수자원 연구자들은 수계에서 발생하는 상호연결이 불가결하고 얽혀 있는 인과관계 때문에 시스템 다이내믹스를 적용하기도 하였다. 시스템 다이내믹스는 도시 물순환 시스템에 한정된 분석뿐만 아니라 도시 에너지, 도시 환경 시스템으로 범위를 확대해서 적용가능하다. 이에 따라 기존의 도시물순환 중심의 시스템 다이내믹스 연구에서 에너지 사용량과 탄소 배출량을 고려하는 넥서스 관점의 연구가 점차적으로 제시되고 있다.

Chippi-Shrestha *et al.* (2017)은 시스템 다이내믹스를 이용한 도시 물순환 시스템 물-환경-에너지 넥서스 모델을 구축하여, 도시 물순환 시스템에 대한 종합적인 물-에너지-환경 연계 분석을 통해 도시 개발자와 정책 결정자가 도시 물순환 관련 계획을 수립하고 관리할 수 있도록 하였다. 이를 위해 도시 물순환 시스템 내 최적의 물-에너지-환경 넥서스를 위한 다양한 시나리오들을 검토·분석 하였다[그림 3].

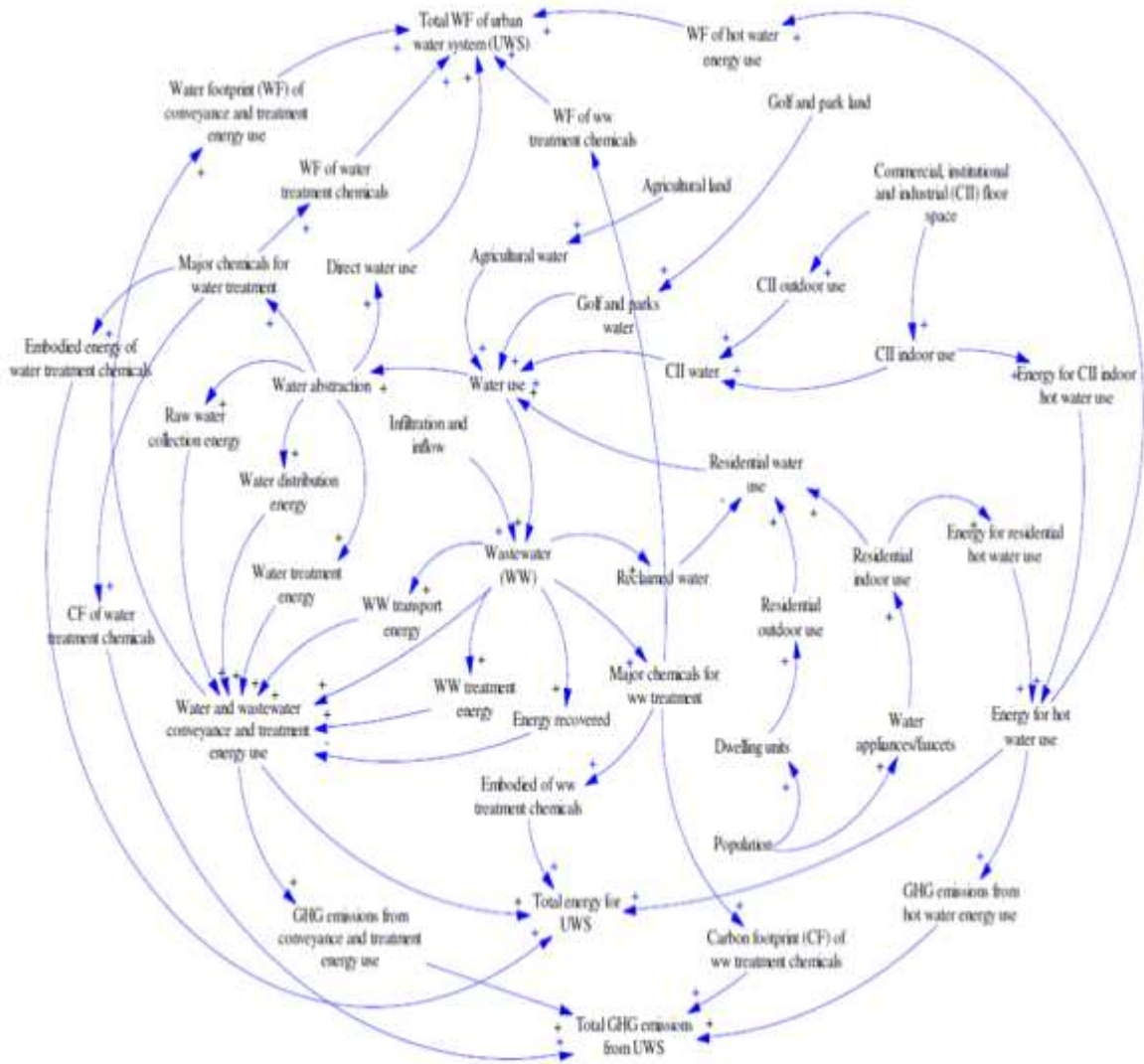


그림 3 물-에너지-탄소 시스템 다이내믹스 분석 예시
(자료: Chippi-Shrestha *et al.*, 2017)

본 연구에서 사용된 모델은 취수 (지하수/지표수), 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수 사용 (생활용수·산업용수), 하수 집수, 하수처리 및 방류 과정을 주요 과정으로 고려하였다. 일반적으로 도시에서 용수 사용은 농업, 공업 및 생활용수로 구분되나, 본 연구에서는 생활용수 공급에 따른 도시 물순환 시스템을 고려하였기 때문에 농업용수와 공업용수는 생략되었다.

물, 에너지 및 환경 부문을 각각 정량적으로 분석하기 위해 물발자국, 총 에너지 사용량과 탄소발자국을 산정하였다. 물발자국은 도시 물순환 과정에서 지하수 또는 지표수를 취수한 양(W_G , W_{SW}), 정수처리 및 하수처리 공정에서 사용된 약품의 생산 시 소모된 양(WF_{WTC} , WF_{WWTC}), 그리고 도시 물순환 과정에서 소모된 에너지를 생산하는데 필요한 물의 양($WF_{Total\ Energy}$)의 합으로 산정하였다. 총 에너지 사용량은 지하수 취수과정(E_{GI}), 도·송수과정(E_C), 정수처리 과정(E_{WT}), 배·급수 과정(E_{TD}), 용수 사용 과정(E_{DU}), 하수 집수 과정(E_{SC}), 하수처리 과정(E_{WT}) 및 방류 과정(E_D)에서 사용되는 에너지와 정수처리 및 하수처리에 사용되는 약품의 생산 시 사용된 에너지 양(EE_{WTC} , EE_{WWTC})을 고려하였다. 탄소발자국은 도시 물순환 과정에서 사용된 에너지는 생산하는데 발생된 이산화탄소 증가량($CF_{Total\ Energy}$)과 정수처리 및 하수처리에 사용되는 약품의 생산 시 발생된 이산화탄소 증가량(CF_{WTC} , CF_{WWTC})를 합하여 계산하였다[그림 4].

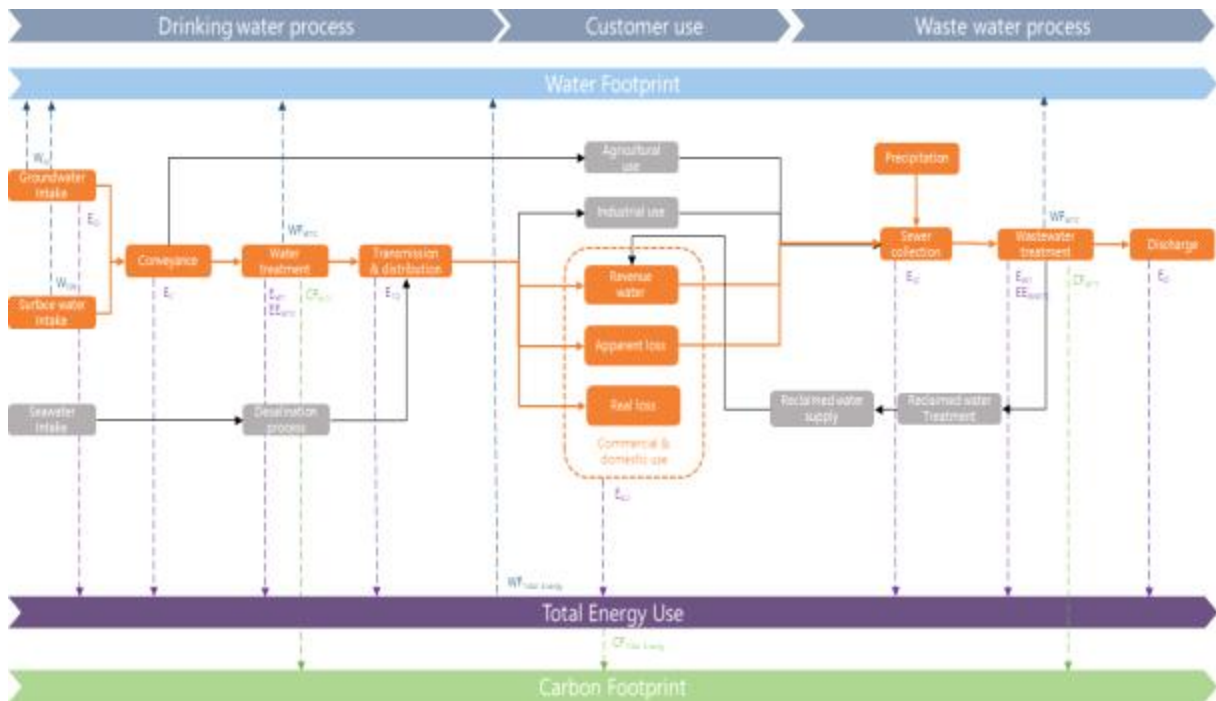


그림 4 도시 물순환 시스템 모델 인과관계

2.2 사용된 자료

본 연구에서는 물-에너지-환경 넥서스 2차년도 연구에서 구축한 도시 물순환 시스템 공정별 에너지 인텐시티 매트릭스를 주요 자료로 사용하였다. 에너지 인텐시티는 각각의 도시 물순환 시스템 공정에서 단위 유량당 사용되는 전력량을 의미한다.

본 연구에서는 도시 물순환 시스템의 조건, 에너지 인텐시티 및 누수율을 주요 항목으로 구분하였으며, 각 항목에서 변동성이 유의미한 주요 모수들을 선정하여 분석하였다. 도시 물순환 시스템 조건에서 선정된 모수는 온수사용비율(water heating ratio)과 지하수 사용비율(groundwater ratio)이 포함되었으며, 에너지 인텐시티에서는 지하수 수위(groundwater level), 도·송수(conveyance), 정수처리(water treatment), 배·급수(transmission & distribution), 하수처리(wastewater treatment)가 주요 모수로 선정되었다. 마지막으로 누수율에서는 명목손실(apparent loss) 및 실손실(real loss)별 누수율비율(non-revenue water ratio)을 주요 항목으로 하였다[표 1].

표 1 도시 물순환 시스템 항목별 주요 모수

항목	모수
Conditions	Water heating ratio (WHR)
	Groundwater Ratio (GWR)
Energy Intensity	Groundwater level (GWL)
	Conveyance (EI_CON)
	Water treatment (EI_WT)
	Transmission & distribution (EI_TD)
Water Loss Control	Wastewater treatment (EI_WWT)
	Non-revenue water apparent loss ratio
	Non-revenue water real loss ratio

2.3 몬테카를로 시뮬레이션 분석

몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation, MCS)은 무작위로 반복해서 얻은 수많은 샘플들을 통해 함수값을 근사하는 방법으로 제2차 세계대전 중 존 폰 노이만(John von Neumann)과 스타니스와프 울람(Stanislaw Ulam)이 불확실한 상황에서 의사결정을 개선하기 위해 개발됐다. 룰렛 게임과 유사하게 우연의 요소가 모델링 접근 방식의 핵심이기 때문에 모나코(Monaco)라는 유명 카지노 도시의 이름을 따서 명명되었다. MCS는

확률분포에 따라 반복적으로 난수를 이용하여 표본을추출하는 기법으로, 불확실한 입력변수를 기반으로 확률분포를 이용해 무작위로 선정된 표본에 의해 시뮬레이션 반복 및 결과를 도출한다. 하지만 시뮬레이션을 통해 예측된 결과는 확률론적 중심치에 의존해 결정되기에 불완전한 추정치에 의존한 의사결정이라는 단점이 존재한다.

MCS는 반복된 무작위 난수를 추출해 복잡한 함수의 결과값을 수리적으로 근사하는 알고리즘으로 불확실한 사건의 결과를 예측할 수 있어 다양한 분야에 사용된다[그림 5]. 일반적인 예측 모델과는 달리 몬테카를로 시뮬레이션은 고정된 입력값 집합에 비해 추정된 값 범위를 기반으로 일련의 결과를 예측한다. 즉, 몬테카를로 시뮬레이션은 본질적으로 불확실성이 있는 모든 변수에 대해 균일 분포나 정규 분포와 같은 확률분포를 활용하여 가능한 결과에 대한 모델을 구축하고, 다음으로 최솟값과 최댓값 사이의 다른 난수 집합을 사용하여 매번 결과를 반복해서 다시 계산한다. 일반적인 몬테카를로 실험에서는 이 연습을 수백 혹은 수천 번 반복하여 많은 수의 가능한 결과를 도출할 수 있다. 몬테카를로 시뮬레이션 사용 방법은 다음과 같다:

- 예측 모델을 설정하여 예측할 종속 변수와 예측을 유도할 독립 변수 식별
- 독립 변수의 확률분포 지정 및 과거 데이터 및/또는 분석가의 주관적인 판단을 사용하여 가능한 값의 범위를 정의하고 각 값에 확률 가중치 할당
- 시뮬레이션을 반복적으로 실행하여 독립 변수의 임의 값 생성

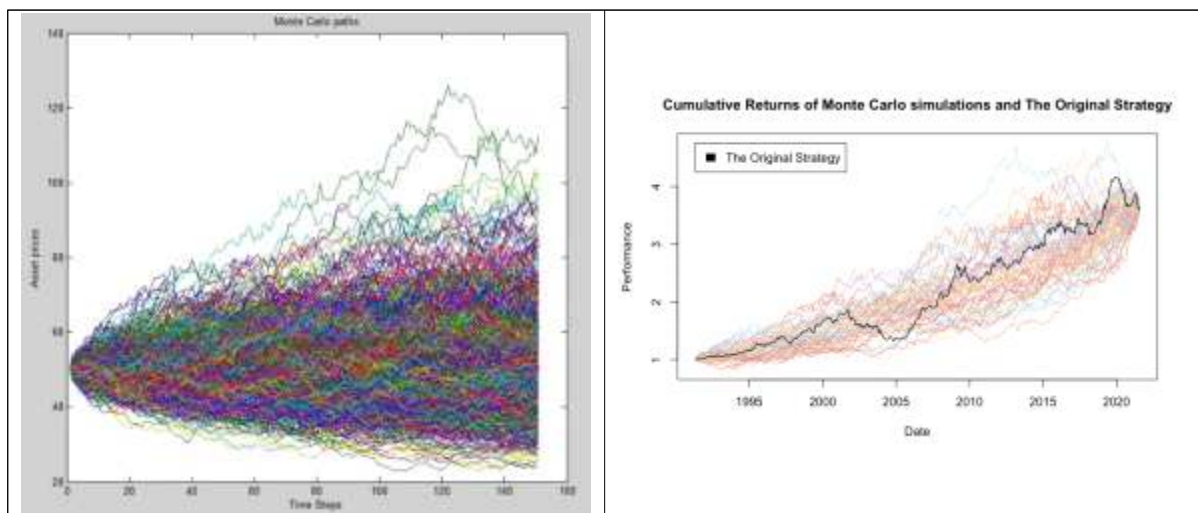


그림 5 몬테카를로 시뮬레이션 분석 예시(자료: Methods, Quantpedia)

본 연구에서는 기개발된 도시 물순환 시스템 모델에 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하기 위해 각 항목의 주요 모수별로 [표 2]와 같이 최솟값, 평균값 및 최댓값의 평균치와 같은 통계값에 근거하여 300개의 수를 무작위로 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling, LHS)을 사용하여 생성하였다. 라틴 하이퍼큐브 샘플링은 d 차원을 가지는 인자 x 에 대해 p 개의 데이터 포인트를 샘플링하는 기법으로 각각의 차원을 균일

하게 등분하여 나누어 자료를 생성한다. LHS는 입력변수를 등간격으로 나누기 때문에 생성된 자료가 다른 방법에 비해 비교적 일관성있으며 고른 분포로 표본이 추출되는 장점이 있어 다양한 분야에 사용되는 샘플링 기법이다. 자료를 중심점에 고정시키거나 랜덤하게 위치할 수 있지만, 이러한 방식은 전체 인자 공간에 데이터를 균일하게 분포시키는 것을 보장하지 못하기 때문에 높은 충실도(high-fidelity) 및 다중 충실도(multi-fidelity) 라틴 하이퍼큐브 샘플링, 층화(stratified) 라틴 하이퍼큐브 샘플링 등 다양한 기법이 개발되어 각 차원간의 상관관계를 최소화하는 방법들이 소개되어 왔다. 다만, 전체 물손실량은 50%로 설정하였기 때문에 명목손실과 실손실의 합은 0.5로 설정하였다.

표 2 도시 물순환 시스템 항목별 주요 모수 설정값

항목	모수	최솟값	평균값	최댓값
Conditions	Water heating ratio	0.01	0.02	0.03
	Groundwater ratio	0.1	0.5	0.9
Energy Intensity	Groundwater level (m)	20	40	60
	Conveyance (kWh/m ³)	0.2	2.1	4
	Water treatment (kWh/m ³)	0.2	0.6	1
	Transmission & distribution (kWh/m ³)	0.2	0.5	0.8
	Wastewater treatment (kWh/m ³)	0.3	0.65	1
Water Loss Control	Non-revenue water apparent loss ratio	0.05	0.15	0.25
	Non-revenue water real loss ratio	0.25	0.35	0.45

2.4 코호넨 자가조직화지도(Kohonen Self-Organizing Maps)

본 연구에서는 선정된 모수의 변동성에 따라 물, 에너지, 탄소 부문의 대푯값인 물발자국, 에너지사용량, 탄소발자국을 도출하여 코호넨 자가조직화지도(Kohonen Self-Organizing Maps)를 사용하여 결과값을 군집화하고 분석하였다. 자가조직화지도(self-organizing maps, SOM)는 비지도 신경망 모형의 한 종류로서 고차원의 다변량 자료를 저차원의 그리드(grid)에 지도형태로 시각화하는 기법으로 핀란드의 전기공학자 T. Kohonen에 의해 개발되었다. SOM은 고차원의 데이터를 지도형태로 형상화하기 때문에 차원 축소, 군집화 및 시각화를 가능하게 하며, 군집화를 통하여 자료의 패턴과 클러스터를 찾을 수 있는 특징이 있다.

SOM의 성능 및 활용 방안에 다양한 문헌에서 제기되어 왔다. Samad & Harp (1992)는 SOM 관측된 개체만을 이용하는 것보다 학습과정에서 결측값을 제외한 불완전한 자료를 활용하는 것이 더 좋을 수 있다고 제시하였다. Ibbou (1998)는 SOM 모형에서 불완

전한 자료를 그대로 사용하는 것에 강건하다고 제시하였다.

SOM은 입력자료, 그리드 위에 유닛으로 구성된 출력층, 그리고 가중치 벡터로 구성되어 있다[그림 6]. 입력자료와 가중치 벡터와의 거리가 가장 짧은 단위를 BMU(Best Matching Unit)라고 부르며, SOM은 입력자료와 BMU를 가깝게 지속적으로 업데이트한다. 이 과정을 정의된 횟수까지 반복하거나, 더 이상 업데이트가 필요하지 않게 되면 종료된다. SOM이 업데이트 되는 과정은 [수식 1]과 같다.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t)h_{ijv}(t)[w_{ij} + x(t)] \quad \text{수식 1}$$

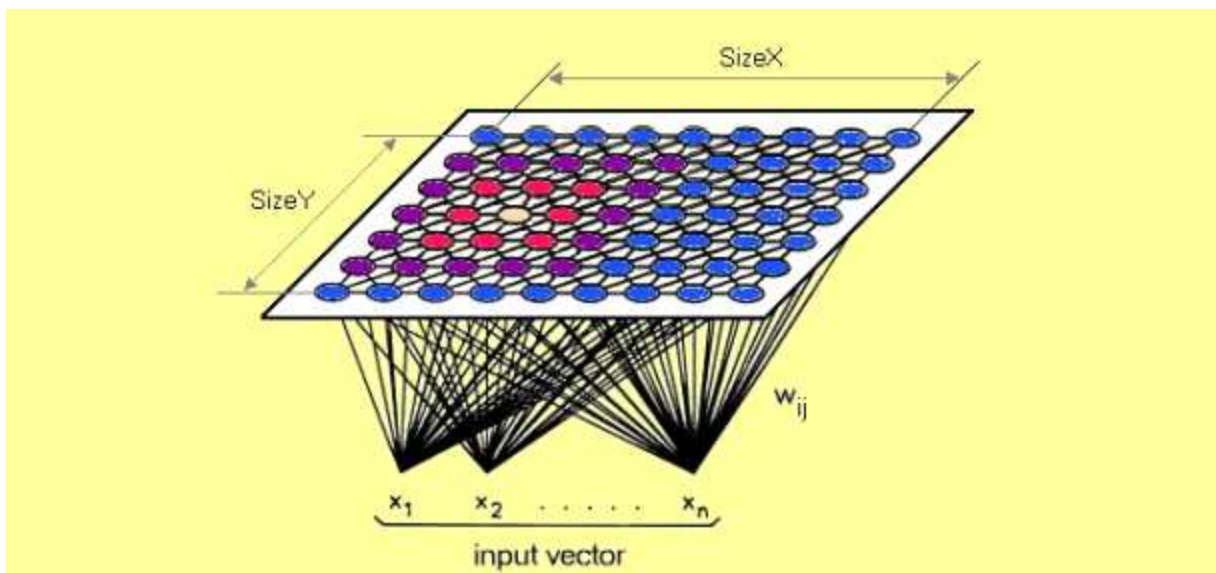


그림 6 SOM 체계도

이때, x 는 t 시점별 입력자료, w 는 차원별 i,j 번째 가중치 벡터, α 는 학습률, h 는 근접 유닛 v 와 BMU와의 거리를 정의하는 근방함수(neighbourhood function)이다.

SOM은 그룹 정보가 알려지지 않은 자료에 대한 분석법인 비지도학습방법의 일종으로 학습 과정을 통해 몇 개의 노드로 자료의 분포를 파악하고 이를 저차원 그리드 공간에 나타낼 수 있다는 특성으로 인해 물 분야를 포함한 다양한 분야에서 군집분석을 위해 [그림 7]와 같이 널리 사용된다.

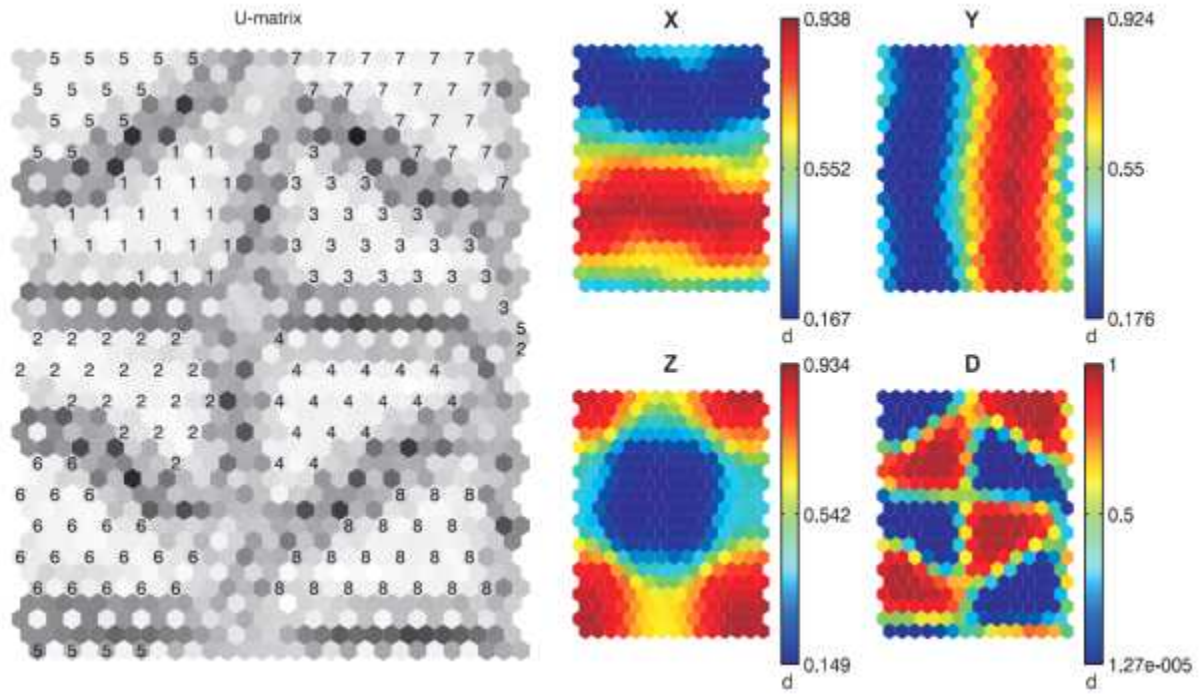


그림 7 SOM 분석 사례(자료: Peeters *et al.*, 2007)

제 3 장 결과 및 고찰

물이라는 것이 지구의 약 70%를 덮고 있기 때문에, 우리는 항상 풍부할 것이라고 생각할 수 있지만, 그 중에서도 실제 우리가 사용할 수 있는 수자원인 담수(freshwater)는 매우 적은 양이다. 이러한 관점에서 수자원을 이용하기 위한 다양한 방법 및 기술이 개발되어 왔으며, 수자원을 이용하는 데에는 항상 에너지가 수반될 수 밖에 없다. 물 사용량은 지속적으로 증가되는 추세를 보인다[그림 8]. 또한, 최근에는 지구온난화 및 기후변화, 그리고 이보다 기후위기대응 차원에서의 탄소배출저감은 수자원 이용에 있어서 에너지 문제를 심각하게 고려하지 않을 수 없는 상황에 놓여 있다.

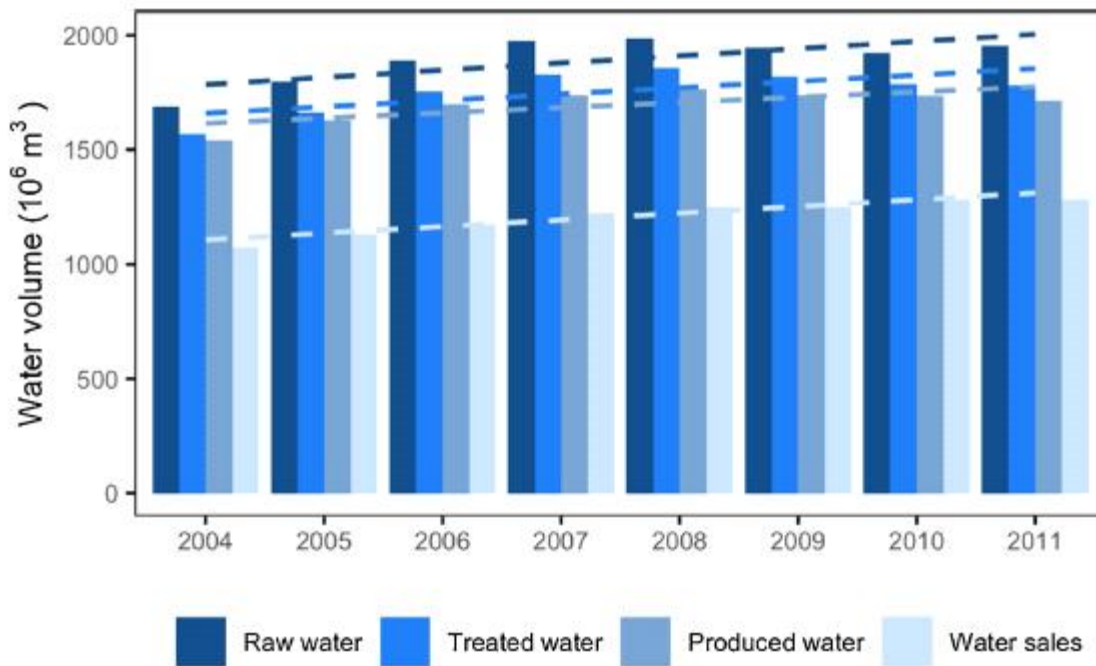


그림 8 물공급 시스템에 따른 물사용량과 시간적 경향성

물과 에너지의 관계를 이해하는 것과 더불어, 더 나은 에너지 관리를 위하여 수자원 이용 및 처리에 관한 공정별 에너지 평가는 매우 중요한 부분이며, 큰 관심사이다. 최근에는 인구증가 및 산업시설에 대한 발전이 비약적으로 이루어짐에 따라, 수자원에 대한 소비가 급격히 증가하고 있다. 따라서 물과 폐수 처리를 위한 전기 소비가 증가하고 있다. 이와 이유와 함께, 수자원 이용 및 처리를 개선하기 위하여 새로운 규정 및 정책들이 시행·제정되기도 한다(Babel *et al.*, 2021).

일반적으로 상하수도 처리장은 거의 항상 설계 용량의 일부에서만 운영되기 때문에 에너지 소비는 지역에 따라서도 매우 다르며, 심지어는 같은 시설 내에서도 차이가 크게 나타나는 경우가 많다. 그리고 하수처리시설의 경우 상수도공급시설에 비해서 에너지 인텐시티는 상대적으로 매우 높다. 수자원을 이용하는 데에 지하수와 표층수가 주요

수원이다.

지하수의 경우에는 수질상태가 상대적으로 양호하기 때문에, 적은 에너지 비용으로 이용 가능하다는 장점이 있다. 하지만 그 양이 매우 적기 때문에 과도하게 이용하는 경우에는 부족현상과 함께 지반침하와 같은 부작용을 발생시킬 수 있다. 반면에 지표수의 경우에는 수질이 지하수에 비해서 상대적으로 매우 떨어지기 때문에, 더 많은 수처리가 필요하고 따라서 더 많은 에너지를 사용한다. 최근에는 수원(water sources)을 늘리기 위하여, 해수를 담수화하는 기술을 개발하여, 수자원의 일부는 해수 담수화를 통해 공급되기도 하지만, 가장 에너지 집약적인 유형의 수처리라는 측면은 이용하는 데에 있어서 단점으로 고려되고 있다.

일반적으로 수자원 공급에 있어서 많은 부분이 식수가 차지하기 때문에, 펌핑을 통한 물공급이 상당한 양의 에너지를 소비하는 것으로 알려져 있다. 독일, 스페인, 이탈리아의 여러 처리 공장에서 폐수 처리의 에너지 강도는 아래의 그림에 나와 있다[그림 9]. 폐수 처리는 독일에서 가장 낮은 것으로 보고되고 있으며, 최소 0.155 kWh/m³, 최대 0.697 kWh/m³의 에너지 강도로 가장 낮은 것으로 문헌조사 되었다. 스페인의 최소 처리 공장 소비량은 0.047 kWh/m³이고 최대 소비량은 0.905 kWh/m³으로 나타났다. 이탈리아의 최소 소비량은 0.485 kWh/m³이지만 최대 소비량은 2.971 kWh/m³로 독일과 스페인의 평균 소비량보다 각각 4배와 3배 높은 것으로 보고되고 있다(Paraschiv *et al.*, 2023) .

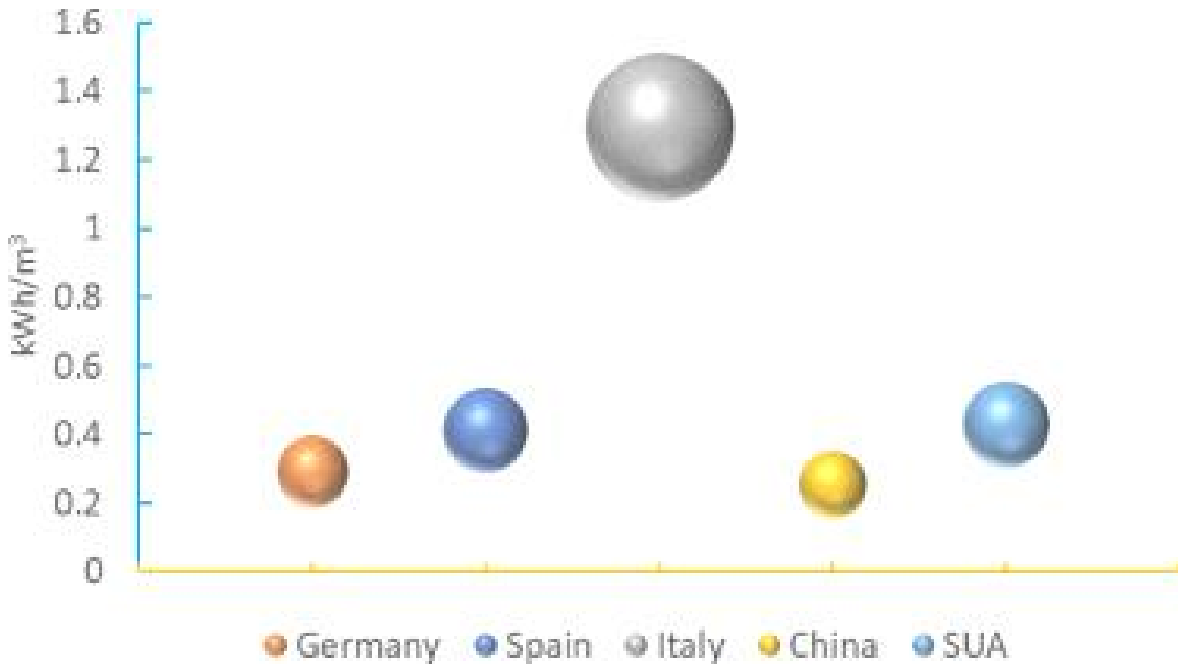


그림 9 수처리에 대한 에너지 인텐시티 비교
(독일, 스페인, 이탈리아, 중국, 미국)

또한 물사용에 대해서 동남아시아 국가에서 조사한 바에 따르면, 물에 대한 사용량은 물에 대한 판매량과 비슷하게 나타나는 것으로 알려져 있고, 물사용에 대한 패턴은 인구

증가에 의해 나타나는 경향도 있지만, 실제로 일인당 사용하는 소비패턴에 따라서 물사용량이나 판매량이 같이 증가하거나 감소하는 경향이 있다는 것이 조사로 나타났다. 이러한 경향은 에너지의 사용 패턴에 대해서도 유사하게 나타나는 경향이 있다(Babel *et al.*, 2021)[그림 10].

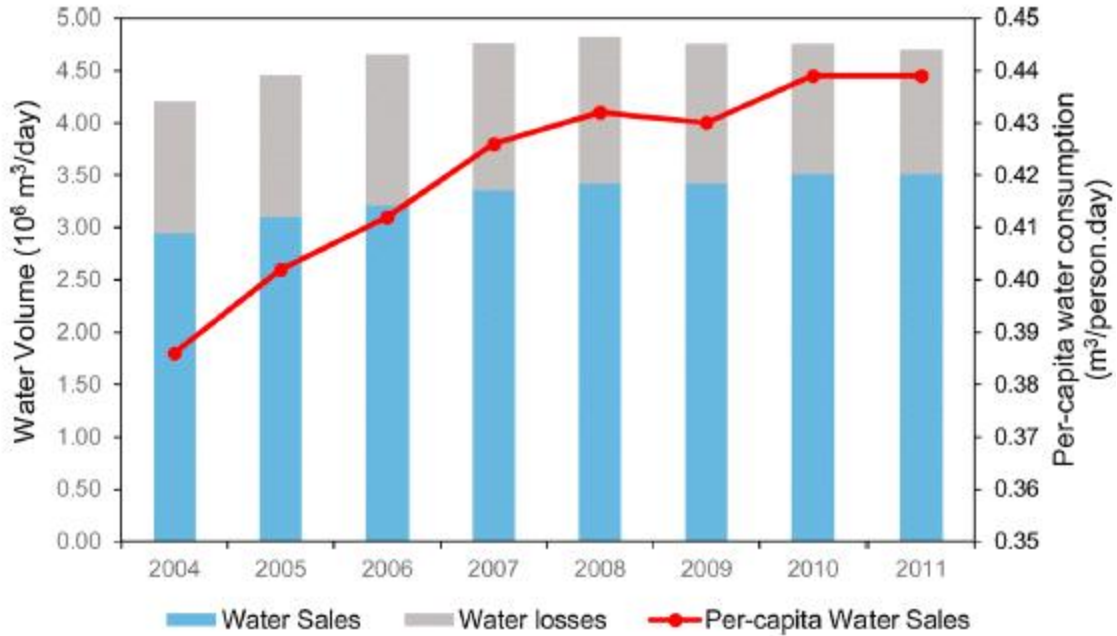


Fig. 8. Water sales (consumption), losses and per-capita water sales.

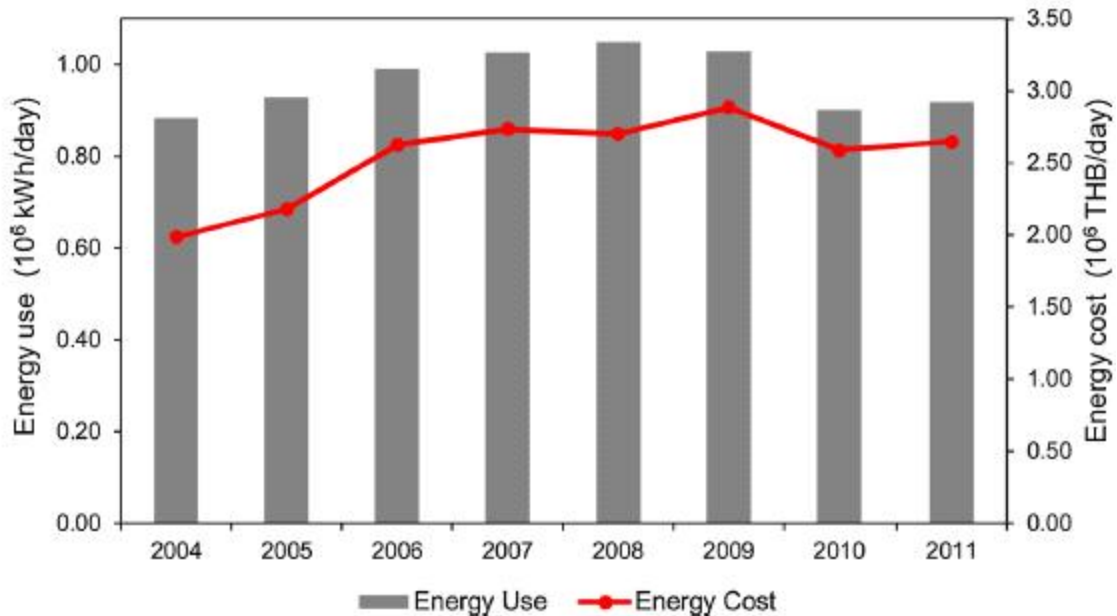


그림 10 물이용과 관련한 에너지 사용에 따른 상대적 비용 관계

3.1 도시 물순환 공정별 평가의 기술통계량 보완 및 개선

물순환 공정별 물사용량에 따른 에너지 소비량은 도시의 물 관리 시스템과 인프라에 따라 다르게 나타난다. 일반적으로 물순환은 다음과 같은 주요 공정으로 나눌 수 있다[표 3].

표 3 도시 물순환 시스템에서의 에너지 수반 요소

Stage	Factor	Variable	Effect on Energy Intensity	
			-	+
Raw water	Climate	Availability	Strong	Weak
	Geography	Source	Surface	Ground
	Geography	Distance	Near	Far
Water treatment	Socioeconomics	Water quality	High	Low
	Technology	Treatment equipment	Old	Modern
	Technology	Treatment process	Chlorination	Ozonation
Distribution	Geography	Topography	Gravity-fed	Elevated
	Socioeconomics	Network size	Small	Large
	Technology	System condition	Old	New
Collection	Geography	Topography	Gravity-fed	Elevated
	Socioeconomics	Network size	Small	Large
	Technology	System condition	Old	New
Wastewater treatment	Socioeconomics	Use & consumer type	Domestic	Industrial
	Technology	Treatment equipment	Old	Modern
	Technology	Treatment process	Trickling filter	Anaerobic digestion

- (1) **물 추출:** 지하수나 수원에서 물을 추출하는 과정으로, 이 과정에서 펌프를 사용하여 에너지를 소비한다. 대도시의 경우에는 일반적으로 이 단계에서 상당한 에너지가 소모된다.
- (2) **정수 처리:** 추출된 물을 정수 처리하여 안전한 음용수로 만드는 과정으로, 이 과정은 화학 물질 사용과 함께 여러 단계의 필터링 및 소독을 포함하며, 에너지 소비가 대체로 크다.
- (3) **수송:** 정수된 물을 소비자에게 전달하기 위해 배관 시스템을 통해 수송하는 과정이다. 이 과정에서도 펌프를 사용하여 에너지를 소모하는데, 이러한 물의 수송

및 이송과정에서 소모되는 에너지는 거리에 따라서 달라지기 때문에, 에너지 강도 및 소비량의 범위가 다른 에너지 소비 공정들에 비해 매우 넓다.

- (4) **사용:** 가정이나 산업에서 물을 사용하는 단계로, 이 단계에서 직접적인 에너지 소비는 없지만, 물 사용량이 많을수록 간접적으로 에너지 소비가 증가하는 경향이 나타난다.
- (5) **폐수 처리:** 사용된 물을 처리하여 환경에 안전하게 방출하는 과정으로, 이 과정에서도 많은 에너지가 소모되며, 특히 생물학적 처리와 화학적 처리가 포함된다.
- (6) **재활용 및 재이용:** 일부 도시에서는 폐수를 재활용하여 다시 사용하는 시스템을 도입하고 있으며, 이 과정에서도 에너지가 필요한데, 물 재이용 기술이나 방법에 따라서 에너지 강도가 크게 다르다[그림 11].

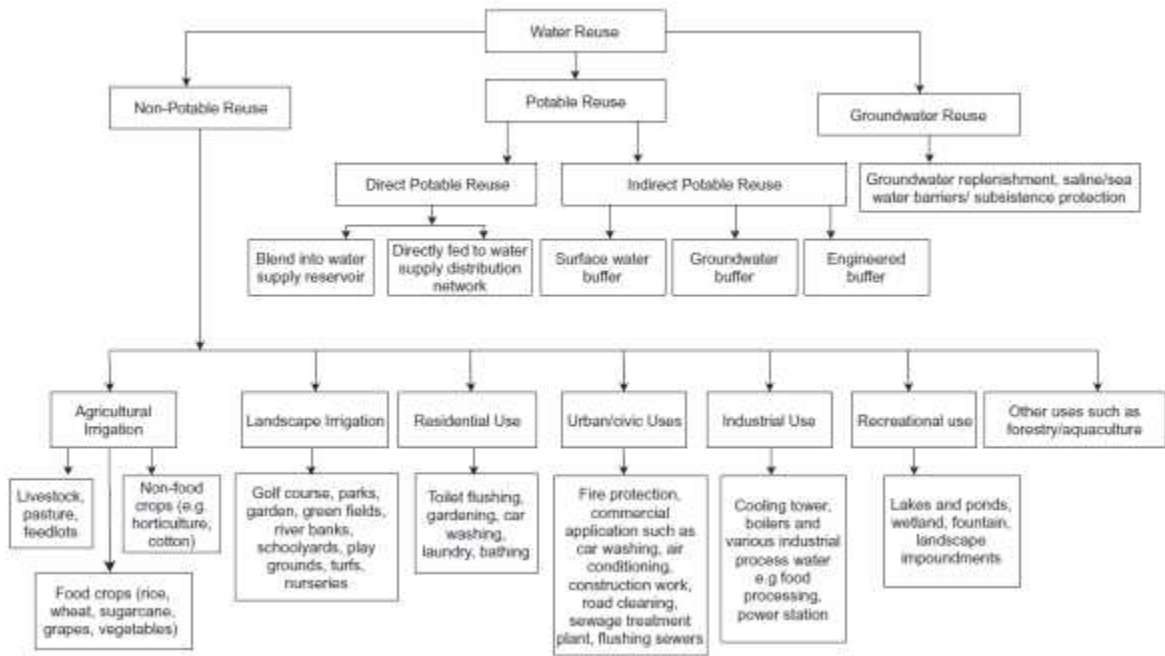


그림 11 물 재이용에 관한 다각적 모식도

각 도시의 물순환 공정별 에너지 소비량은 지역의 인프라, 기술 수준, 기후 조건 등에 따라 다르므로, 구체적인 수치는 도시별로 상이할 수 있다. 예를 들어, 대도시에서는 물의 수송과 정수 처리에서 다른 중소도시들에 비해서 상대적으로 더 많은 에너지를 소비하는 경향이 있다[그림 12].

이와 같은 물순환 공정의 에너지 소비를 줄이기 위해서는 효율적인 물 관리 시스템과 기술의 도입이 필요하며, 이러한 부분들에 대한 개선 및 보완하기 위해서는 다양한 도시들의 지역별·유형별에 따라서 물사용에 대한 에너지 강도를 기술적·통계적으로

정리하는 것은 매우 중요한 일이다.

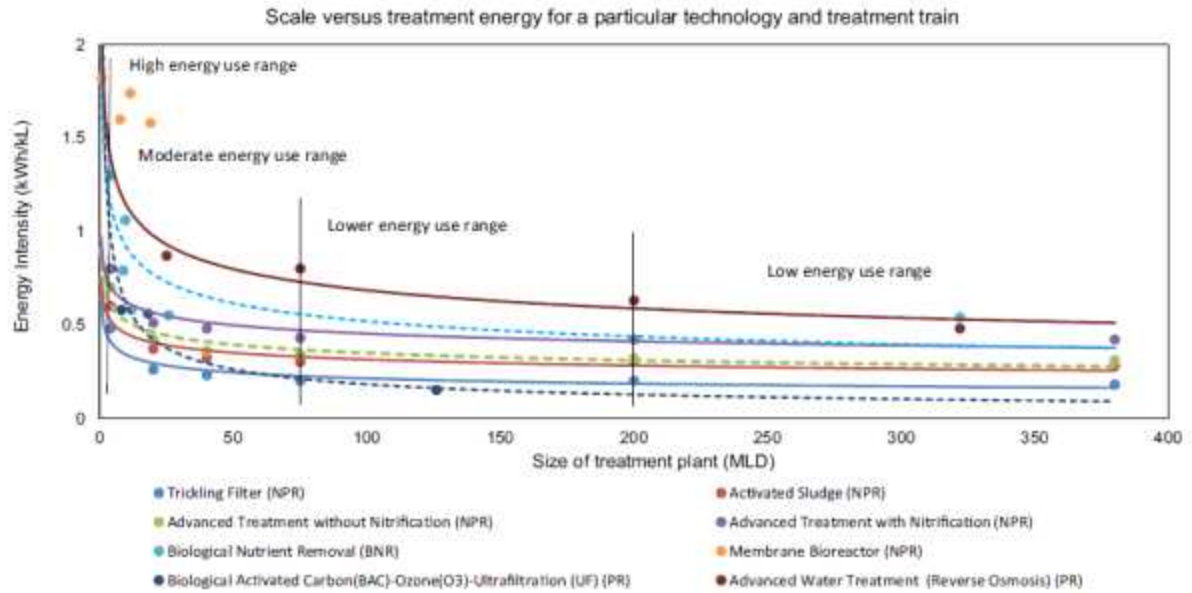


그림 12 하수재이용 시스템 규모에 따른 에너지 강도의 변화율

3.1.1 도시물순환 전체 공정에 대한 에너지 강도

다음 아래의 그래프에서 나타난 바와 같이 선행 연구를 통한 도시물순환 공정에 대한 에너지 강도에 대한 통계량은 참고문헌을 통한 분석에 있어서 중복된 값들에 의한 편차 등의 문제점들도 나타났다. 하지만, 이번 보완 연구를 통하여 이러한 중복된 값들에 의한 바이어스(bias) 현상을 제거하거나 최소화할 수 있도록 개선하였다. 또한 위의 그래프에서는 히스토그램에서 나타나는 바와 같이 오리지널 스케일에서 정규분포를 고려함으로써, 이러한 값들을 통하여 모델링을 하는 경우 문제가 발생할 수 있다[그림 13]. 하지만 당해연도에서 개선된 통계분포를 로그정규화함에 따라 확률적으로 좀 더 현실적이고 정상적인 범위에서 값을 도출할 수 있다는 점이 크게 개선된 부분이다.

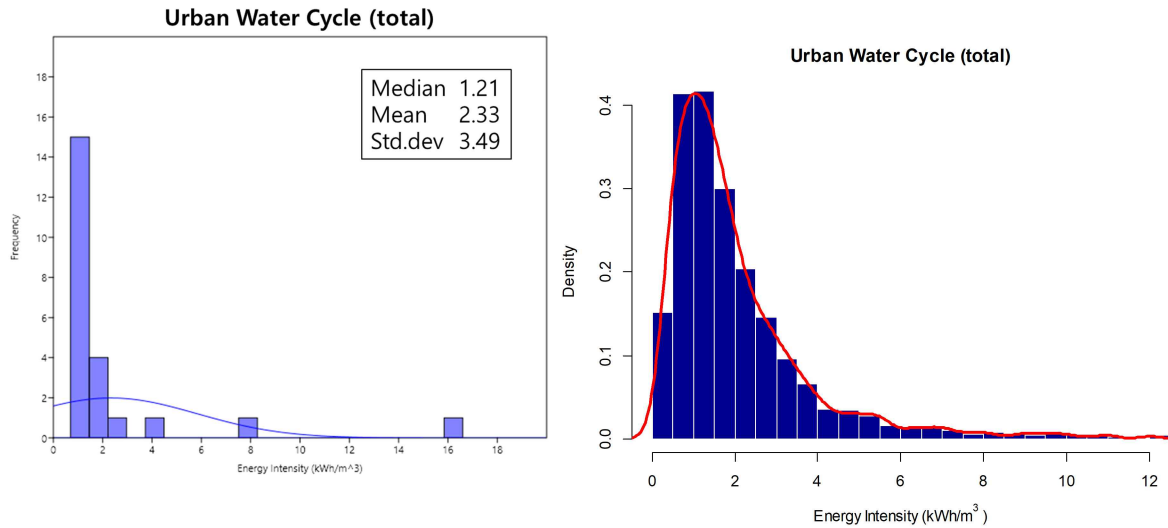


그림 13 도시물순환 전체 공정에 대한 에너지 통계량: 기존 분포(좌), 개선된 통계분포(우)

향후 도시물순환 공정에 있어서 프로세스 모델을 개발하고, 도시 유형에 따라 에너지 강도에 변화를 고려하는 경우 그림에서 나타난 우측 그래프의 경향을 통하여 현실적이고 타당한 에너지 인텐시티 값을 도출 가능하다.

3.1.2 식수공급 공정에 대한 에너지 강도

식수공급 공정은 물을 취수하여 정수하고, 이를 최종 소비자에게 안전하게 공급하기까지의 과정을 말한다. 이 과정은 일반적으로 다음과 같은 몇 가지 주요 단계로 나뉜다.

- 취수 (Water Intake): 식수공급의 첫 번째 단계로 물을 자연에서 취수하는 것. 보통 하천, 강, 호수, 지하수 등에서 이루어진다.
- 응집 및 침전 (Coagulation and Sedimentation): 취수된 물에는 미세한 오염물질이나 입자들이 포함되어 있을 수 있기 때문에, 이 입자들을 제거하기 위해 화학 응집제를 추가하여 작은 입자들을 서로 결합시킨다. 이 과정을 통해 대부분의 물리적 오염물이 제거된다.
- 여과 (Filtration): 침전 후, 물은 모래, 활성탄, 세라믹 등 다양한 여과 매체를 통해 지나가며, 남아있는 미세한 입자나 오염물질을 추가로 제거하며, 이 단계에서 대부분의 미세한 입자들이 여과됩니다.
- 소독 (Disinfection): 정수된 물이 다시 오염되지 않도록 소독을 실시한다. 가장 흔히 사용되는 방법은 염소를 추가하는 것으로, 이 단계에서는 박테리아, 바이러스 등의

미생물을 제거한다. 염소 외에도 오존, 자외선(UV) 소독 등 다양한 소독 방법이 사용될 수 있다.

- pH 조정 및 추가 처리 (pH Adjustment and Additional Treatment): 경우에 따라 물의 pH를 조정하거나 추가적인 화학 처리를 통해 물의 맛이나 특성을 개선한다. 예를 들어, 물이 너무 산성일 경우 알칼리성 물질을 추가하여 pH를 조정한다.
- 저장 및 배급 (Storage and Distribution): 정수된 물은 대개 대형 저장 탱크에 저장되어 일정량이 필요할 때마다 공급된다. 이후에는 파이프라인 시스템을 통해 각 가정이나 산업체로 안전하게 공급된다.

이러한 일련의 과정에는 당연히 에너지가 발생하며 이에 대한 에너지 강도의 패턴은 다음과 같다[그림 14].

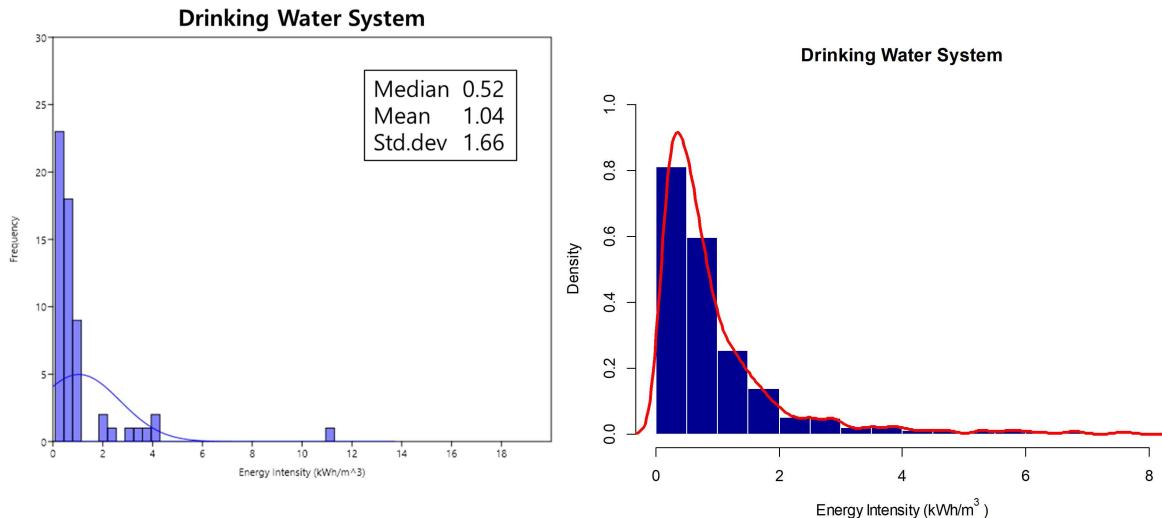


그림 14 식수 공정에 대한 에너지 통계량: 기존 분포(좌), 개선된 통계분포(우)

위의 그래프에서 나타난 바와 같이 선행 연구를 통한 식수 공정에 대한 에너지 강도에 대한 통계량은 참고문헌을 통한 분석에 있어서 중복된 값들에 의한 편차 등의 문제점들이 앞의 결과와 유사하게 나타났다. 식수 공정에 있어서 위의 그래프에서는 히스토그램에서 나타나는 바와 같이 문제를 보완·개선할 수 있었다.

3.1.3 하수처리 공정에 에너지 강도

하수처리 공정은 물리적, 화학적, 생물학적 방법을 통해 하수에 포함된 오염물질을 제거하는 과정이다. 이 과정에서 사용되는 에너지는 여러 단계에 걸쳐 소모되며, 주요 에너지 사용 항목은 다음과 같다[그림 15, 16]:

- **하수 이송 (펌핑 및 유입)**
 - 에너지 소모: 하수를 처리시설로 이송하는 과정에서 많은 에너지가 필요하며, 주로 하수의 흐름을 인위적으로 유도하는 데에 에너지가 사용된다.
 - 에너지 사용량: 펌프의 크기와 수, 하수의 양과 수로의 경사도에 따라 에너지 소모가 달라진다.

- **응집 및 침전 (Coagulation, Flocculation and Sedimentation)**
 - 에너지 소모: 주로 물리적 처리를 포함하며, 주로 믹서나 교반기를 사용하여 화학 물질을 물에 혼합하고 오염물질을 응집시키는 과정이다. 이 과정에서 사용되는 에너지는 비교적 적지만, 교반기의 회전력에 따른 에너지 사용이 발생한다.
 - 에너지 사용량: 화학 물질을 사용하는 양에 따라 에너지 사용량은 비례하여 나타난다.

- **생물학적 처리 (활성슬러지 처리 및 기타 생물학적 공정)**
 - 에너지 소모: 활성슬러지법과 같은 생물학적 처리 과정에서는 공기 공급이 중요한데, 오페수 속의 미생물이 유기물을 분해하도록 도와주는 산소를 공급하는 과정에서 많은 에너지가 소모된다.
 - 에너지 사용량: 공기압축기와 공기 공급 시스템을 작동시키는 데 전력이 필요하며, 처리 용량에 따라 에너지 사용량이 비례한다.

- **탈수 및 건조 (슬러지 처리)**
 - 에너지 소모: 하수에서 오염물질을 제거하고 남은 슬러지(하수찌꺼기)는 탈수 및 건조 과정에서 처리되며, 이 과정에서 슬러지 탈수기, 건조기 등을 사용하는 데에 에너지가 사용된다.
 - 에너지 사용량: 슬러지 탈수와 건조는 에너지가 상대적으로 많이 소모된다. 탈수 과정에서 수분을 제거하고, 건조 과정에서는 열을 공급하기 위한 에너지가 필요하다. 특히 건조기에서의 에너지는 열 에너지로 공급되며, 이때 사용하는 연료나 전기량에 따라 에너지 소모가 크게 달라질 수 있다.

- **소독 및 최종 처리**
 - 에너지 소모: 소독을 위한 자외선(UV) 소독기, 오존 발생기, 또는 염소 주입 시스템에서 에너지가 사용된다. UV 소독의 경우 높은 전력을 소모하고, 오존 발생기도 고전압을 요구하는 장비이다.
 - 에너지 사용량: 자외선 소독 시스템은 상대적으로 높은 에너지 소비를 나타내며, 오존 발생기 또한 지속적인 전력 공급을 요구한다. 염소 소독은 상대적으로 적은 에너지를 소모할 수 있지만, 여전히 일정한 전력 공급이 필요하다.

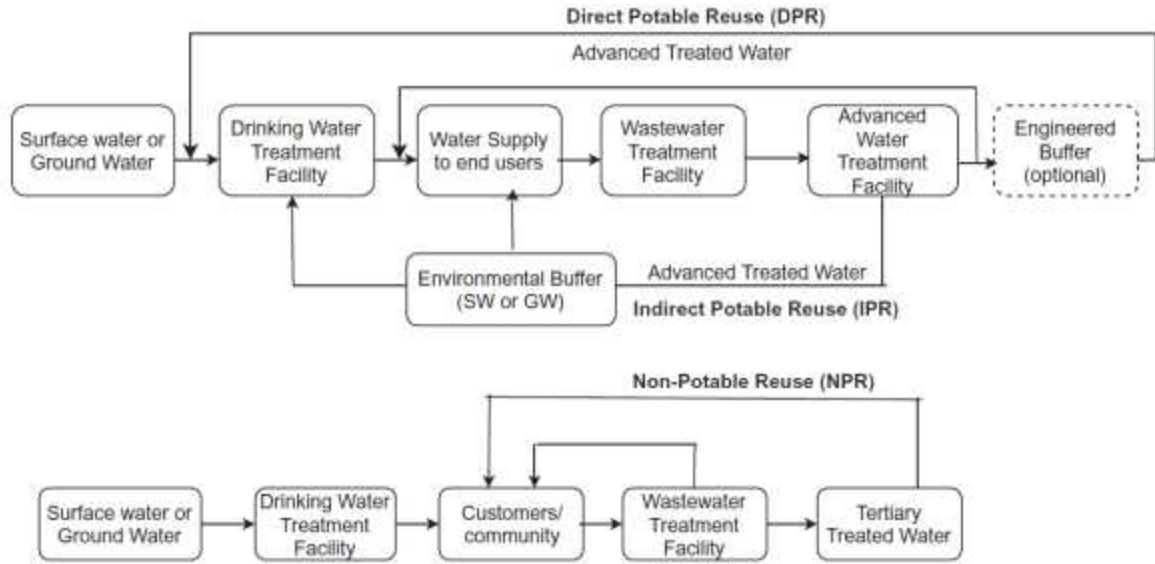


그림 15 중앙 제어식 물 재이용 시스템 (DPR, IPR, and NPR)

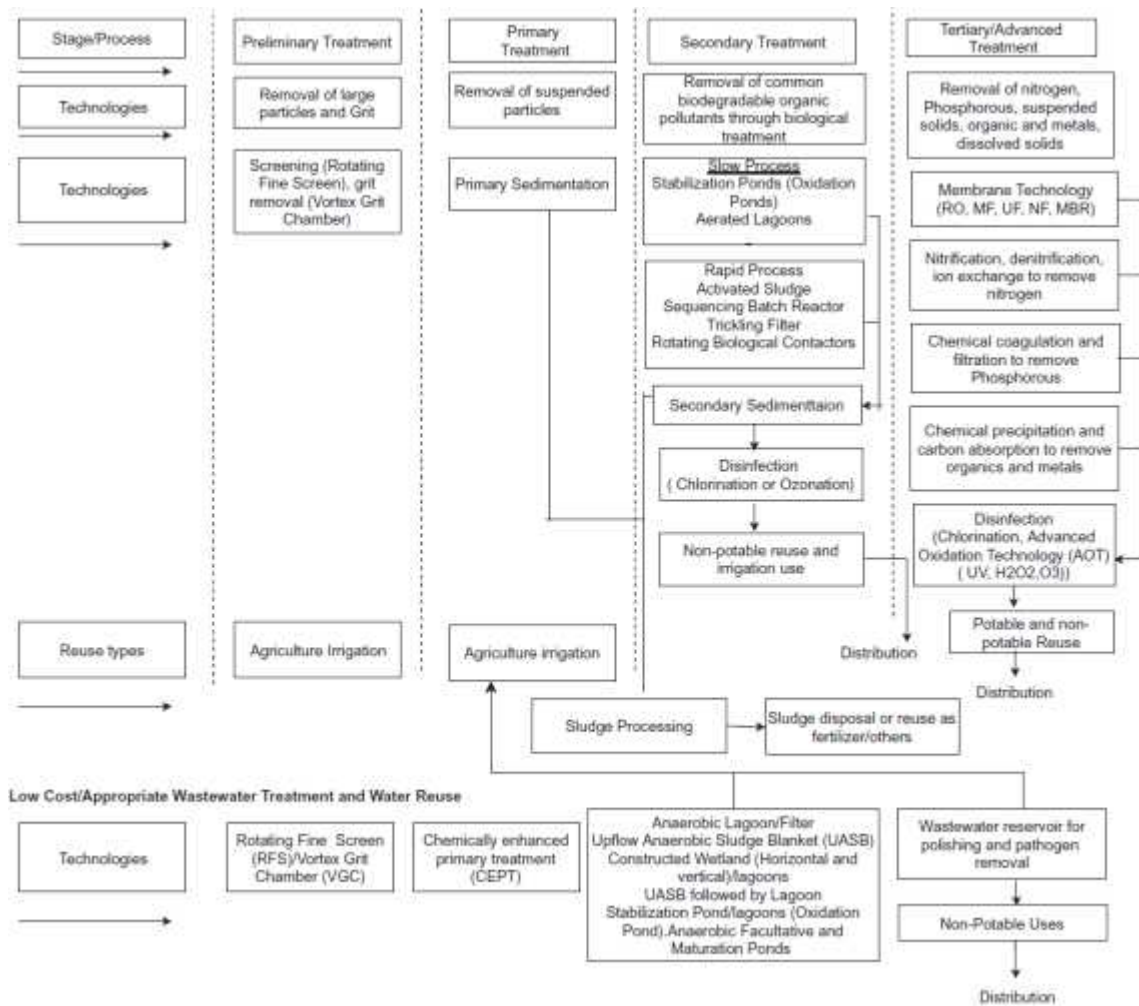


그림 16 전통적 방식의 하수처리 및 재이용에 관한 모식도

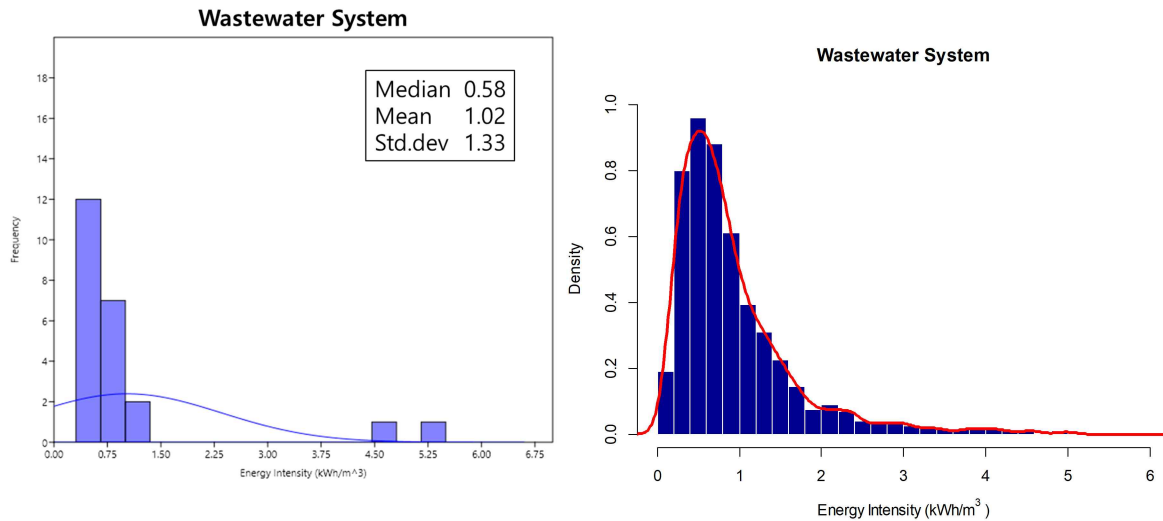


그림 17 하수처리 공정에 대한 에너지 통계량: 기존 분포(좌), 개선된 통계분포(우)

위의 그래프에서 나타난 바와 같이 선행 연구를 통한 하수처리 공정에 대한 에너지 강도에 대한 통계량은 참고문헌을 통한 분석에 있어서 중복된 값들에 의한 편차 등의 문제점들이 앞의 결과와 유사하게 나타났다[그림 17]. 하수처리 공정에 있어서 위의 그래프에서는 히스토그램에서 나타나는 바와 같이 문제를 보완·개선할 수 있었다.

하수처리에서의 에너지 최적화

하수처리 과정에서 사용되는 에너지는 상당히 크기 때문에, 에너지 효율을 높이는 방법에 대한 연구가 계속되고 있으며, 주요 에너지 절감 방법은 다음과 같다.

○ 재생 에너지 활용:

하수처리장에서 발생하는 바이오가스(예: 메탄)를 활용하여 에너지를 생산하고, 이를 시설 내에서 재사용하는 방법으로, 메탄가스를 발전소에서 전력으로 변환하거나, 열 에너지를 생성하여 에너지를 최적화 할 수 있다.

○ 공기 공급 최적화:

활성슬러지 공정에서의 공기 공급을 고효율 공기압축기로 개선하거나, 공기 공급량을 자동화하여 에너지를 절감할 수 있다.

○ 슬러지 처리의 에너지 회수:

슬러지 건조 과정에서 발생하는 열을 회수하여 열 회수 시스템을 이용해 건조나 다른 공정에 활용할 수 있다.

○ **공정 통합 및 자동화:**

전체 공정을 보다 효율적으로 운영하기 위해 스마트 제어 시스템을 도입하거나, 공정 통합을 통해 에너지 낭비를 줄이는 방법도 있다. 하수처리 공정에서의 에너지 사용은 필수적인 부분이지만, 효율성을 높이고 재생가능한 에너지를 활용하는 방법을 통해 비용과 환경 영향을 줄일 수 있다.

3.1.4 지하수 취수 공정에 대한 에너지 강도

지하수 취수공정 과정에서 사용되는 에너지는 주로 물을 지하에서 표면으로 끌어올리거나, 운반하는 데 필요한 에너지이다. 지하수 취수는 다른 수자원(예: 하천, 강, 호수)에서 물을 취수하는 것과 달리, 지하수는 깊은 지층에서 끌어올려야 하기 때문에 그에 따라 에너지 소비가 다르게 발생한다. 지하수 취수 공정에 따른 에너지 사용 항목은 다음과 같다.

○ **지하수 펌핑**

- **에너지 소모:** 지하수는 대개 깊은 지하층에서 추출되므로, 취수에는 펌프가 필요하고, 이에 따라 지하수의 수위나 지하수 층의 깊이에 따라 다르게 작동하며, 이를 위로 끌어올리거나 일정한 압력을 유지하기 위해 에너지를 소모한다.
- **수심:** 지하수 취수의 에너지 사용량은 수심에 비례한다. 수심이 깊을수록 더 많은 에너지가 필요하며, 이때 사용하는 양수 펌프의 크기와 힘이 중요하다. 수심이 깊을수록 더 강력한 펌프를 사용해야 하며, 이로 인해 에너지 소비가 증가하게 된다.
- **펌프 용량:** 취수량과 수압을 고려하여 펌프의 용량을 결정하는데, 이에 따라 소비되는 전력이 결정되고, 더 많은 물을 취수할수록 펌프의 출력도 커지며, 그만큼 더 많은 전력이 필요하다.

○ **수압 유지 및 송수**

- **에너지 소모:** 취수한 물을 처리시설까지 이송하려면 일정한 수압을 유지해야 하는데, 이 과정에서 주로 송수 펌프와 배관 시스템을 통한 압력 차에 의하여 일정한 수압을 유지하는 데에 에너지가 소비된다. 또한, 지하수의 취수 위치에서 정수시설까지 물을 이송할 때 펌프가 사용되며, 송수 압력을 유지하는 데 필요한 에너지는 송수관의 길이, 경사도, 관로의 크기 및 이송하는 물의 양에 따라 달라진다.

○ **지하수 정수 및 처리**

지하수는 취수 후 대개 정수 및 처리 공정을 거치는데, 이때 추가적인 에너지가 소모되며, 특히 여과와 소독 과정에서 에너지 사용이 발생한다.

- **여과:** 일반적으로 여과 공정은 펌프를 통해 물을 필터를 지나게 하여 오염물질을

제거하는 방식으로 이루어지는데, 이때 물의 흐름을 유지하는 데 에너지가 사용된다.

- 소독: 염소, 오존, UV 등을 이용한 소독 공정에서도 소독을 위한 장비가 에너지를 소비한다.

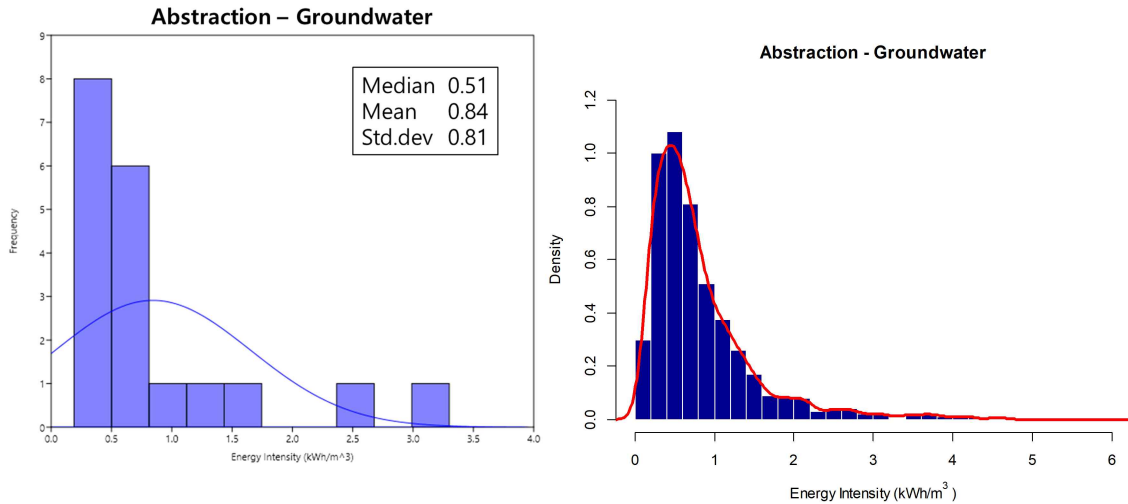


그림 18 지하수 취수 공정에 대한 에너지 통계량: 기존 분포(좌), 개선된 통계분포(우)

위의 그래프에서 나타난 바와 같이 선행 연구를 통한 지하수 취수 공정에 대한 에너지 강도에 대한 통계량은 참고문헌을 통한 분석에 있어서 중복된 값들에 의한 편차 등의 문제점들이 앞의 결과와 유사하게 나타났다[그림 18]. 지하수 취수 공정에 있어서 위의 그래프에서는 히스토그램에서 나타나는 바와 같이 문제를 보완·개선할 수 있었다.

지하수 취수 에너지 최적화

지하수 취수 공정에서의 에너지 소비를 줄이기 위한 여러 방법들이 있으며, 에너지 효율을 높이려면 주로 아래와 같은 전략을 사용할 수 있다.

- 고효율 펌프 사용: 고효율 펌프는 전력 소모를 줄이면서도 물을 취수하며, 또한 더 적은 에너지로 더 많은 물을 이송할 수 있다.
- 변속기(Pump Variable Speed Drives, VSD) 사용: 변속기를 사용하면 펌프의 회전 속도를 조절하여 필요에 따라 적절한 에너지를 공급하는 장점이 있다. 과잉전력 소비를 줄이고, 필요할 때만 최적의 출력으로 작동하도록 할 수 있다.
- 지하수 재활용 및 회수: 한 번 사용한 지하수를 재처리하여 다시 사용할 수 있다면

취수량을 줄여 에너지 소비를 낮출 수 있다.

- 태양광 등 재생 가능한 에너지 활용: 지하수 펌프를 태양광 발전으로 운영하면, 장기적으로 에너지 비용을 절감할 수 있다. 특히 태양광 패널을 설치하여 지하수 취수에 필요한 전력을 자급자족할 수 있다.
- 효율적인 송수 시스템 설계: 수압을 최소화하거나, 단열된 배관을 사용하여 에너지 손실을 줄일 수 있다.
- 지하수 관리 및 모니터링 시스템 개선

3.1.5 지표수의 이송 공정에 대한 에너지 강도

지표수 이송(surface water transport)은 하천, 호수, 댐 등 지표수원을 이용해 물을 취수하고 필요한 지점으로 이송하는 과정이다. 이 과정은 주로 펌핑과 파이프라인 또는 수로를 통해 이루어지며, 물을 원하는 위치로 이동시키는 데 소모되는 에너지는 여러 요소에 따라 달라진다. 지표수 이송에서의 주요 에너지 사용 항목은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 물의 이송을 위한 펌핑
 - 에너지 소모: 지표수에서 취수한 물을 이송하는 데 가장 큰 에너지가 소모되는 부분은 펌프를 이용한 양수입니다. 펌프는 물을 물리적으로 끌어올려 이송하는 장치로, 물을 높은 곳으로 올리거나 먼 거리로 이동시킬 때 필요한 압력을 생성합니다.
 - 수원과 수송 지점의 수압 차: 물을 이송해야 할 거리, 고도 차, 그리고 수원의 수위가 낮을수록 펌핑에 소모되는 에너지가 커집니다. 예를 들어, 수원(예: 강이나 호수)에서 물을 취수한 후 이를 높은 지역으로 이송해야 하는 경우, 추가적인 압력이 필요하므로 펌핑 에너지가 많아집니다.
 - 펌프 성능: 펌프의 효율에 따라 에너지 사용량이 달라집니다. 고효율 펌프는 같은 양의 물을 더 적은 에너지로 이송할 수 있다.
- 수로(파이프라인) 시스템을 통한 물의 이송
 - 에너지 소모: 펌프를 통해 물이 파이프라인이나 수로를 통해 이동할 때에도 에너지가 소모됩니다. 물이 파이프를 따라 이동할 때 마찰이 발생하고, 이 마찰로 인해 물의 흐름에 저항이 생깁니다. 이를 극복하려면 일정한 압력과 유속을 유지해야 하므로 추가적인 에너지가 소모됩니다.
 - 파이프 크기와 길이: 파이프라인의 길이가 길수록, 또는 지름이 작을수록 마찰 손실이 커져서 더 많은 에너지가 필요합니다.

- 수로의 경사도와 형태: 지표수 이송 시 수로(대형 수로, 운하 등)를 사용할 때도 물의 흐름에 대한 저항이 발생합니다. 수로의 경사도, 마찰계수 등은 물이 자연스럽게 흐를 때의 에너지 소모에 영향을 미칩니다.
 - 수도관의 상태: 파이프의 상태와 유지 관리 수준에 따라 마찰 저항이 달라집니다. 파이프에 이물질이 쌓이면 유속이 저하되고, 이를 해결하기 위해 더 많은 에너지를 소모하게 됩니다.
- 수송용 저장 시설
- 에너지 소모: 물을 일시적으로 저장하기 위한 저수지나 탱크에서 물을 취수하고 다시 이송할 경우, 저장시설의 운영도 에너지를 소모합니다. 예를 들어, 물을 저장소에 펌핑한 후 다시 이송해야 할 경우 추가적인 펌핑과 압력 유지에 에너지가 사용됩니다.
- 압력 조정 및 밸브 시스템
- 에너지 소모: 물을 이송하는 동안 일정한 압력과 유속을 유지하기 위한 압력 조정과 밸브의 조작에도 에너지가 필요합니다. 이 과정은 물이 이송되는 동안 압력이 지나치게 높거나 낮아지지 않도록 조절하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 수로에서 물이 지나치게 빠르게 흐르면 손실이 발생할 수 있고, 너무 느리면 물이 stagnation 상태에 빠져 에너지 손실이 커집니다.
 - 자동화 시스템: 수로와 파이프라인의 압력과 유속을 자동으로 조정하는 시스템도 전력을 사용합니다.

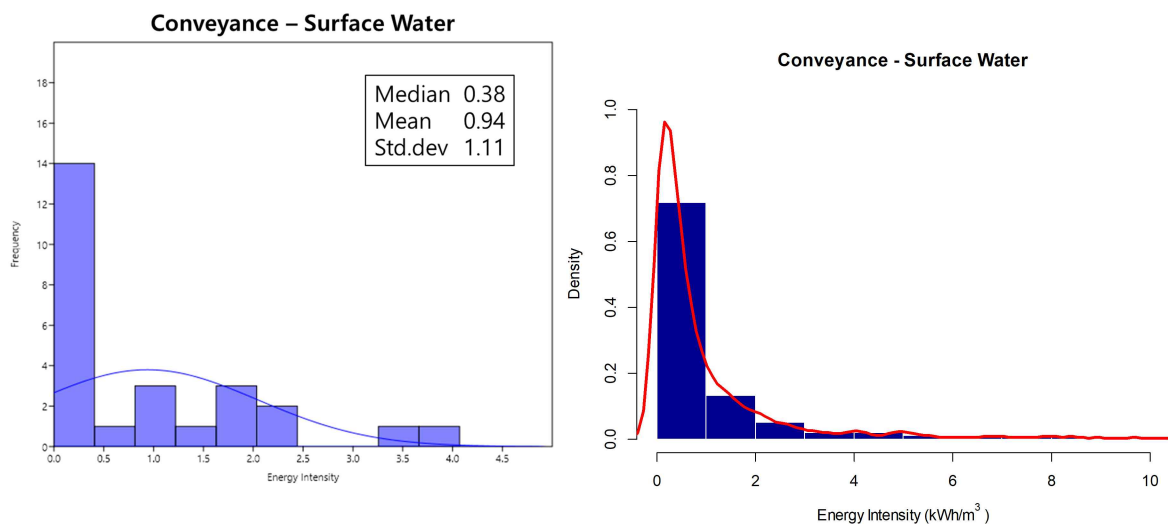


그림 19 지표수 이송 과정에 대한 에너지 통계량: 기존 분포(좌), 개선된 통계분포(우)

위의 그래프에서 나타난 바와 같이 선행 연구를 통한 지표수 이송 과정에 대한 에너지 강도에 대한 통계량은 참고문헌을 통한 분석에 있어서 중복된 값들에 의한 편차 등의

문제점들이 앞의 결과와 유사하게 나타났다[그림 19]. 지표수 이수 공정에 있어서 위의 그래프에서는 히스토그램에서 나타나는 바와 같이 문제를 보완·개선할 수 있었다.

지표수 이수 에너지 최적화

지표수 이송 공정에서의 에너지 사용을 최적화하려면 여러 가지 방법을 사용할 수 있다. 에너지 효율성을 높이고 비용을 절감하는 동시에 환경 영향을 최소화할 수 있는 방법들은 다음과 같다.

- 고효율 펌프와 변속기 사용: 선행 기술 참조
- 최적화된 파이프라인 설계
 - 파이프라인 설계 최적화는 마찰 손실을 최소화하는 중요한 요소입니다. 파이프의 크기를 적절하게 설정하고, 직선 구간을 늘리며, 각도와 방향을 최적화하면 마찰 저항을 줄일 수 있다.
 - 배관의 유지 관리를 철저히 해서 이물질이나 손상으로 인한 에너지 손실을 줄일 수 있다.
- 재생 가능한 에너지 활용
 - 지표수 이송에 필요한 에너지를 태양광이나 풍력 등 재생 가능한 에너지원으로 보충할 수 있다. 예를 들어, 펌프 시설에 태양광 발전 시스템을 설치하여 취수와 이송에 필요한 에너지를 자체적으로 생산하면, 장기적으로 에너지 비용을 절감할 수 있다.
- 중간 저장소 및 재이용
 - 중간 저장소를 활용하여 물을 일시적으로 저장한 후, 필요한 시간에 이송하는 방식으로 이송 과정을 최적화할 수 있다. 이를 통해 물의 흐름을 일정하게 유지하고, 필요할 때 에너지를 집중적으로 사용할 수 있다.
- 데이터 기반 에너지 관리 시스템
 - 스마트 모니터링 시스템을 도입하여 실시간으로 수로 및 파이프라인의 압력, 유속, 펌프 작동 상태 등을 모니터링하고, 에너지 소비를 분석하여 최적화된 운전 조건을 제공할 수 있다.
 - AI 기반의 예측 모델링을 통해 수요와 흐름을 예측하고, 필요에 따라 펌프 속도나 유량을 조정함으로써 에너지 낭비를 줄일 수 있다.

3.1.6 자연취수의 이송 공정에 대한 에너지 강도

자연취수의 이송 공정은 주로 하천, 호수, 댐 등 자연 수원에서 물을 취수한 후, 이를 정수 시설이나 저장소로 이송하는 과정이다. 자연취수에서는 물을 자연적으로 흐르는 경로를 따라 취수하거나, 때로는 펌프나 수로를 이용해 물을 이송하기 때문에 에너지 소비가 발생한다. 이송 과정에서의 에너지 사용은 여러 요소에 따라 달라지며, 주요 항목을 살펴보면 다음과 같다.

○ 자연수원에서의 취수

- 에너지 소모: 자연취수의 첫 번째 단계는 하천, 호수, 댐 등에서 물을 취수하는 것이다. 이때 물의 수위 차이, 취수 위치의 특성(수심, 흐름 속도 등), 취수 방법에 따라 에너지가 소모된다.
- 중력 흐름: 자연적인 흐름을 이용하는 경우, 예를 들어 하천이나 호수에서 물을 직접 취수하는 경우에는 중력의 도움을 받을 수 있다. 이때는 물을 끌어올리거나 이동시키는 데 필요한 에너지가 적다. 예를 들어, 수원과 정수시설이 수평으로 위치해 있거나 수위 차이가 없으면 중력만으로도 물이 자연스럽게 흐를 수 있다.
- 취수시설 설치 위치: 취수시설이 물의 흐름을 저지하거나 물을 끌어올리는 형태일 경우, 더 많은 에너지가 소모될 수 있다. 예를 들어, 수심이 깊거나 수로가 비탈진 지형에 위치한 경우에는 취수를 위한 펌프가 필요하고, 이로 인해 에너지가 소비된다.

○ 펌핑을 통한 이송

- 에너지 소모: 자연수원에서 취수한 물을 정수 시설이나 저장소로 이송하는 과정에서 펌프가 필요할 경우, 이는 주요한 에너지 소비 항목이다. 물이 자연적으로 흐르지 않거나 수원에서 이송해야 하는 거리가 길 경우, 물을 이송하는 데 펌프를 사용한다.
- 수위 차: 취수 지점과 이송 목적지(예: 정수장) 사이의 수위 차이가 클 경우, 펌프의 용량이 커지고 더 많은 전력이 소모된다. 예를 들어, 물을 고지대나 높은 위치로 이송해야 할 때는 더 많은 에너지가 필요하다.
- 펌프의 효율성: 펌프의 효율성도 중요한 요소다. 고효율 펌프를 사용하면 동일한 양의 물을 이송하는 데 필요한 에너지가 줄어들 수 있다. 반면, 효율이 낮은 펌프는 더 많은 전력을 소모한다.
- 펌프 시스템의 자동화: 현대적인 펌프 시스템은 자동화되어 있어 수요에 맞춰 펌프의 속도나 출력을 조정할 수 있다. 이를 통해 에너지 소비를 최적화할 수 있다.

- 수로(파이프라인) 또는 운하를 통한 물의 이동
 - 에너지 소모: 물을 이송할 때는 파이프라인이나 수로를 사용하게 된다. 이때 파이프와 수로에서 물의 흐름에 저항이 발생하고, 이를 극복하려면 일정한 압력과 유속을 유지해야 한다.
 - 수로의 경사도: 수로를 통해 물을 이송할 때, 경사도가 급할수록 물의 속도가 빨라지지만, 과도한 속도는 마찰로 인해 에너지 손실을 초래할 수 있다. 반대로 경사가 완만하면 물의 흐름이 느려져 수로의 길이가 길어질 수 있고, 이를 위해 펌프나 압력 시스템을 추가로 사용해야 할 수도 있다.
 - 마찰 손실: 파이프라인을 사용할 경우, 파이프 내벽과 물이 접촉하면서 발생하는 마찰 손실이 에너지를 소모한다. 마찰 계수는 파이프의 재질, 내벽 상태, 수로의 직경, 길이 등에 따라 달라진다. 마찰 손실을 줄이기 위해서는 파이프의 재질과 크기를 최적화하고, 정기적인 유지보수를 통해 마찰을 최소화해야 한다.

- 수송 및 압력 조정
 - 에너지 소모: 물을 이송하는 동안 일정한 압력을 유지하고 유속을 조절하기 위한 압력 조정이 필요하다. 이를 위해 추가적인 압력 조정 시스템이나 밸브가 사용될 수 있다. 예를 들어, 물이 지나치게 빠르게 흐르면 마찰 손실이 커지고, 너무 느리면 물이 정체되면서 에너지가 낭비될 수 있다.
 - 압력 유지 및 조절: 펌프를 통해 일정한 압력을 유지하면서 물을 이송하기 위한 전력 소비가 발생하며, 이 과정에서 소모되는 에너지는 시스템의 압력과 유량에 비례한다. 압력차를 극복하고 안정적인 수송을 위해 적절한 에너지 소비가 필수적이다.
 - 자동화 및 제어 시스템: 현대적인 취수 및 이송 시스템은 자동화되어 있어, 수위나 유량에 맞춰 펌프와 밸브의 작동을 자동으로 조정한다. 이를 통해 불필요한 에너지 낭비를 줄일 수 있다.

- 저장소로의 이송
 - 에너지 소모: 자연수원에서 물을 취수한 후, 이를 일시적으로 저장소(저수지, 탱크 등)에 저장한 후 다시 이송할 경우, 이 과정에서도 에너지가 소모된다. 저장소에 물을 보낼 때는 수압을 유지하기 위해 추가적인 펌핑이 필요할 수 있다.
 - 저장소의 높이와 크기: 저장소가 높거나 크면 물을 이송하는 데 추가적인 에너지가 소모될 수 있다. 또한 저장된 물을 정수장으로 이동할 때도 에너지 소비가 발생한다.

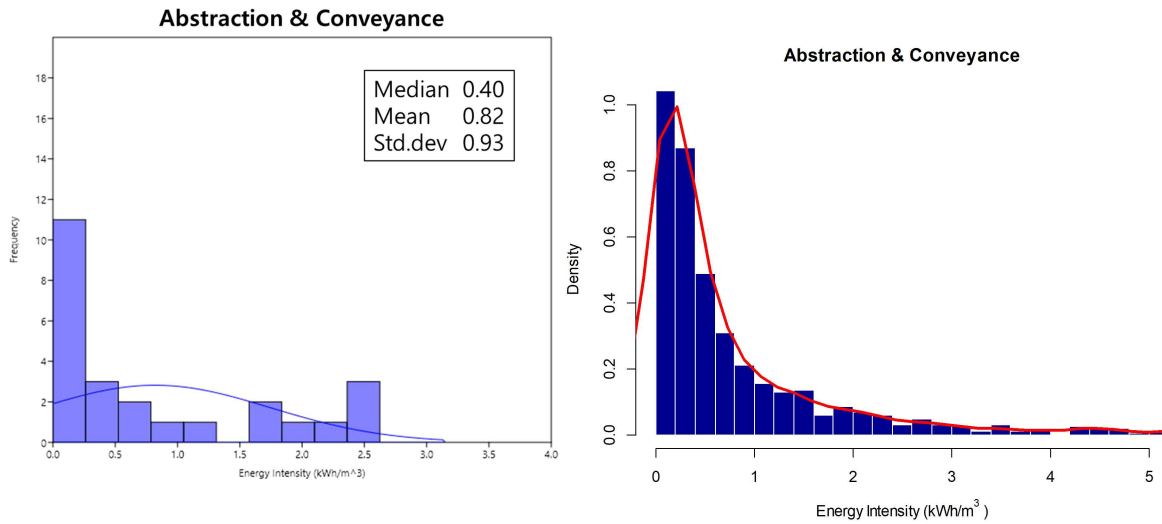


그림 20 자연취수의 이송 공정에 대한 에너지 통계량: 기존 분포(좌), 개선된 통계분포(우)

위의 그래프에서 나타난 바와 같이 선행 연구를 통한 자연취수의 이송 공정에 대한 에너지 강도에 대한 통계량은 참고문헌을 통한 분석에 있어서 중복된 값들에 의한 편차 등의 문제점들이 앞의 결과와 유사하게 나타났다[그림 20]. 하지만, 다른 항목이나 공정에 비해 개선된 값들에 대한 빈도분포는 대략 유사하게 나타났으며, 기존 선행연구에서 나타나는 실제 분포는 다소 1.5~2.5 kWh/m³의 에너지 강도 구간에서 일부 상대빈도가 높은 것으로 나타났지만, 개선된 분포를 통하여 이 부분에 있어서의 비정상적 발생빈도를 통계에 맞도록 보완·개선하였다.

자연취수의 이송과정의 에너지 최적화

자연수원에서 물을 취수하고 이송하는 과정에서의 에너지 사용을 최적화하려면 다음과 같은 방법을 고려할 수 있다:

1. 고효율 펌프 사용: 전력 최소화를 통한 최적화
2. 변속기(Pump Variable Speed Drive, VSD) 사용: 펌프 속도를 유량에 맞게 조절하여 에너지 소비를 최적화
3. 수로 및 파이프라인 최적화: 마찰 손실의 최소화. 파이프의 크기와 재질을 적절히 선택하고, 배관 시스템의 길이를 최소화하여 에너지 소모 저감가능
4. 재생 가능한 에너지 활용: 이송하는 소모에너지를 태양광이나 풍력 등의 재생 가능한 에너지로 대체 가능
5. 스마트 모니터링 및 제어 시스템: 실시간으로 에너지 소비를 모니터링하고, 유량이나 압력에 맞춰 시스템을 자동으로 조정가능. 이를 통해 에너지 소비 최적화

3.1.7 정수처리 공정에 대한 에너지 강도

정수처리 과정은 원수(지표수, 지하수 등)를 안전하고 깨끗한 식수로 변환하기 위해 여러 단계의 물리적, 화학적, 생물학적 처리 과정을 포함한다. 이 과정에서 사용되는 에너지는 주로 물을 필터링, 살균, 소독, 그리고 필요시 화학적 처리를 위한 펌핑과 기계적 작업에 소모된다. 에너지 소비는 정수 처리의 각 단계에서 다르게 발생하며, 전체적인 에너지 사용량을 줄이기 위해서는 각 공정의 최적화가 필요하다. 정수처리에서의 주요 에너지 소비 항목은 다음과 같다.

○ 펌핑(Pumping)

- 에너지 소모: 원수를 취수한 후, 정수 시설까지 이송하려면 펌프를 사용해 물을 이송해야 하기 때문에 이에 대한 전기 에너지 소비가 발생한다.
- 이송 거리와 수압: 원수의 수원과 정수장 간의 거리가 길거나 수위 차이가 클 경우, 펌프가 더 많은 에너지를 소모하게 된다.
- 펌프 용량과 효율: 펌프는 용량에 맞춰 선택해야 하며, 효율이 높은 펌프를 사용하면 동일한 양의 물을 처리하는 데 필요한 에너지를 줄일 수 있다. 변속기(Pump Variable Speed Drive, VSD)를 사용하면 용량에 맞춰 펌프 속도를 조절하여 에너지 소비를 최적화할 수 있다.

○ 여과(Filtration)

- 에너지 소모: 여과는 원수에서 고형물, 먼지, 미세한 오염물질을 제거하는 과정이다. 주로 여과기(sand filter, membrane filter 등)가 사용되며, 물을 필터를 통과시켜 불순물을 제거하는데 필요한 압력을 유지하기 위해 일정한 에너지가 소모된다.
- 압력 여과: 일부 여과 시스템(예: 막 여과, 역삼투압)은 물을 필터를 통과시키기 위해 지속적인 압력 유지가 필요하다. 이 경우 압력을 유지하는 데 사용되는 펌프의 에너지가 상당히 소모된다.
- 여과 속도와 막의 오염도: 여과 속도가 빠를수록 더 많은 에너지를 소모하며, 필터가 오염되면 더 많은 압력이 필요하고, 이로 인해 에너지 소비가 증가한다. 여과기 또는 막을 정기적으로 청소하고 교체하는 것도 에너지 절감에 중요한 요소다.

○ 응집 및 침전(Coagulation and Sedimentation)

- 에너지 소모: 원수에서 떠 있는 미세한 입자나 불순물을 응집제(alum, ferric chloride 등)를 사용해 응집시키고, 그 후 침전지에서 입자를 가라앉게 하는 과정이다.
- 응집 교반: 이 과정에서 원수에 응집제를 혼합하기 위해 교반기가 사용된다. 교반기는 물을 빠르게 회전시키거나 혼합하여 응집제를 고르게 분산시키는 역할을 하며, 이 과정에서 에너지가 소모된다.

- 침전지에서의 흐름 유지: 침전지는 물의 흐름을 천천히 유지해야 하므로, 물이 자연스럽게 침전지에 들어가도록 펌핑하는 데에도 에너지가 소모된다.
- 소독(Sanitation)
 - 에너지 소모: 소독은 미생물을 제거하거나 비활성화하여 식수로서 안전하게 만드는 중요한 과정이다. 주로 염소, 오존, UV(자외선) 등의 방법이 사용되며, 각각의 방법에서 에너지 소비가 달라진다.
 - 염소 소독: 염소는 화학적으로 반응하여 미생물을 제거하지만, 에너지가 크게 소모되지 않는다. 그러나 염소를 생성하고 공급하는 과정에서 작은 에너지가 필요할 수 있다.
 - 오존 소독: 오존 소독은 오존 발생기를 사용해 오존을 생성하고 이를 물에 주입하는 방식으로, 오존 발생기의 운영에 전력이 소모된다. 오존 발생기는 많은 전기를 소비하므로, 오존 소독은 에너지 사용이 높은 방법으로 분류된다.
 - UV 소독: 자외선 소독은 UV 램프를 통해 미생물을 제거하는 방법으로, UV 램프는 전력을 소비한다. UV 소독은 상대적으로 에너지를 많이 사용하지만, 화학 약품을 사용하지 않는 장점이 있다.
- pH 조정 및 화학적 처리
 - 에너지 소모: 원수의 pH를 조정하기 위해 산이나 알칼리성 화학 물질을 추가하는 과정이다. 이때 화학 물질을 혼합하고, 균일하게 섞는 데 필요한 교반이나 펌핑을 통해 에너지가 소모된다. 또한 화학 처리 후 물의 상태를 안정화시키기 위해 추가적인 에너지가 필요할 수 있다.
- 여유 용수 및 배수 처리
 - 에너지 소모: 정수 처리 후 남은 여유 용수(슬러지 등)나 배수 처리에도 에너지가 소모된다. 슬러지는 탈수하고 처리하는 데 펌프, 압축기, 여과기 등이 필요하며, 이 과정에서 에너지가 사용된다.

아래의 그래프는 정수처리 공정에 대한 에너지 통계량을 분포로 나타낸 것이다[그림 21]. 선행 연구를 통한 자연취수의 이송 공정에 대한 에너지 강도에 대한 통계량은 참고문헌을 통한 분석에 있어서 중복된 값들에 의한 편차 등의 문제점들이 앞의 결과와 유사하게 나타났다 (아래 그림 좌). 하지만, 다른 항목이나 공정에 비해 개선된 값들에 대한 빈도분포는 대략 유사하게 나타났으며, 기존 선행연구에서 나타나는 실제 분포는 다소 2.0~2.5 kWh/m³의 에너지 강도 구간에서 일부 상대빈도가 높은 것으로 나타났지만, 개선된 분포를 통하여 이 부분에 있어서의 비정상적 발생빈도를 통계에 맞도록 보완·개선하였다.

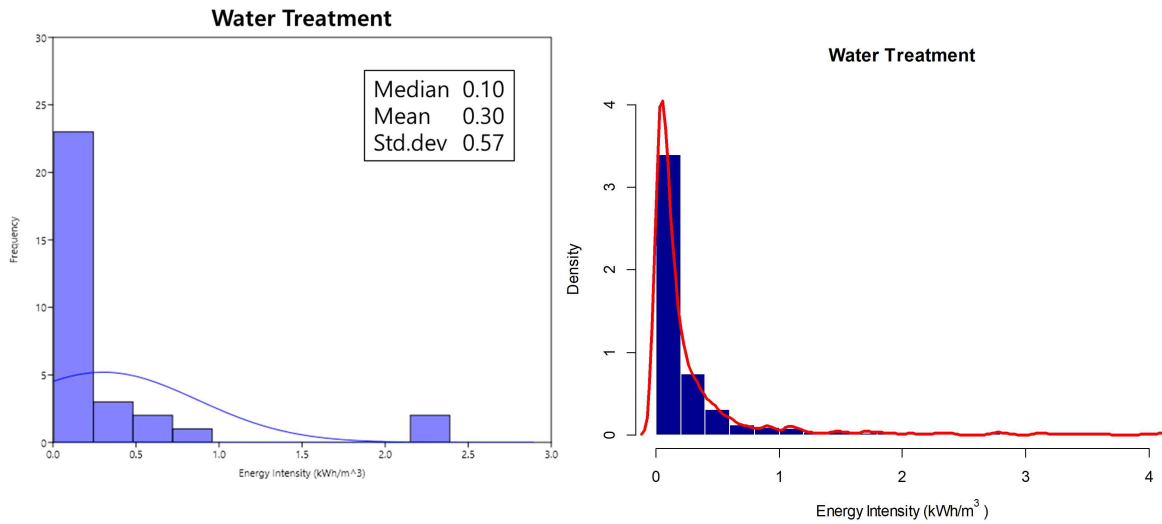


그림 21 정수처리 공정에 대한 에너지 통계량: 기존 분포(좌), 개선된 통계분포(우)

정수처리 과정의 에너지 최적화

정수처리 공정에서의 에너지 소비를 최적화하려면 몇 가지 접근 방식이 필요하다.

1. 고효율 펌프 및 기계 장비 사용
2. 막 여과 시스템의 효율성 개선: 발생하는 압력 손실을 최소화하기 위해 고효율 막과 정기적인 막 세척을 통해 압력 유지에 필요한 에너지를 절감 가능. 또한, 막 오염을 방지하기 위해 화학 세척 또는 물리적 세척 주기를 최적화하여 에너지 최소화
3. 소독 과정에서의 에너지 절약: UV 소독의 경우, UV 램프의 수명을 연장하고, 필요에 따라 적정 용량의 UV 램프만을 사용하는 것이 에너지 절약에 효율적임. 오존 소독의 경우, 오존 발생기의 효율을 높이고, 오존 농도를 필요에 맞춰 조절하여 에너지 사용을 최소화 가능
4. 통합 관리 시스템: 스마트 관리 시스템을 도입하여 공정 전반을 모니터링하고, 실시간 데이터를 통해 각 공정의 에너지 최적화. 교반 속도, 펌핑 압력, 여과 속도 등을 실시간으로 조정하여 에너지 소모 최소화 가능
5. 재생 가능한 에너지 활용: 태양광 또는 풍력 등의 재생 가능한 에너지를 활용하여 정수처리에 필요한 에너지를 자체적으로 조달가능

3.2 도시 물순환 시스템 넥서스 모델 가상 분석 평가

3.2.1 물과 에너지 간의 트레이드 오프에 대한 관계 이해

물과 에너지 간의 기회비용(trade-off) 관계는 물과 에너지가 서로 밀접하게 연관되어 있으며, 한 자원을 다른 자원으로 대체하거나, 특정 자원의 사용을 늘리거나 줄일 때 발생하는 경제적 선택과 관련이 있다. 두 자원은 모두 제한된 자원이며, 효율적인 자원 관리가 필수적이다. 기회비용은 특정 자원을 사용할 때 발생하는 다른 자원의 사용을 포기한 가치를 의미하는데, 물과 에너지 간의 기회비용 관계는 다양한 방식으로 분석될 수 있다[그림 22].

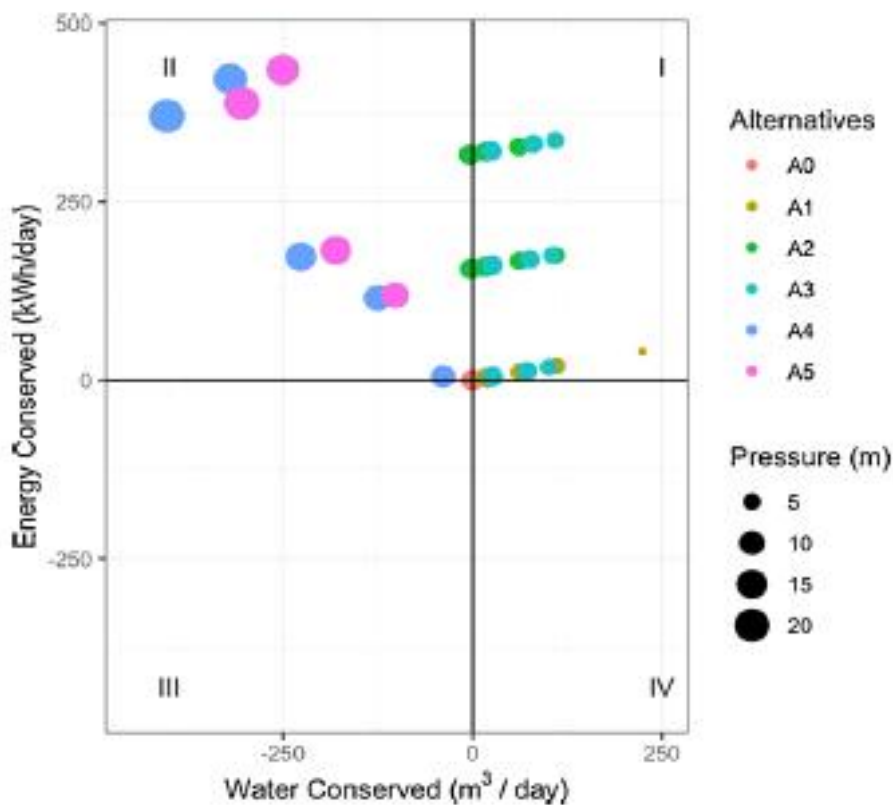


그림 22 물과 에너지 간의 트레이드 오프에 대한 관계

가. 물과 에너지의 상호작용

물과 에너지는 여러 산업 분야에서 서로 영향을 미친다[그림 23].

- 물과 에너지의 생산: 물을 정수하거나, 산업에 사용하는 데 많은 에너지가 필요하며, 에너지를 생산하는 과정에도 상당량의 물이 필요하다. 에너지와 물의 소비: 발전소에서 전기를 생산하거나, 산업에서 에너지를 사용하려면 많은 양의 물이

필요하고, 이때 에너지를 사용하여 물을 처리하거나, 물을 펌핑하는 데 에너지가 소모된다.

- 물과 에너지의 관리: 두 자원을 동시에 관리하려면, 한 자원의 공급이나 수요를 조절하는 것 자체가 다른 자원의 공급에 영향을 미칠 수 있다.

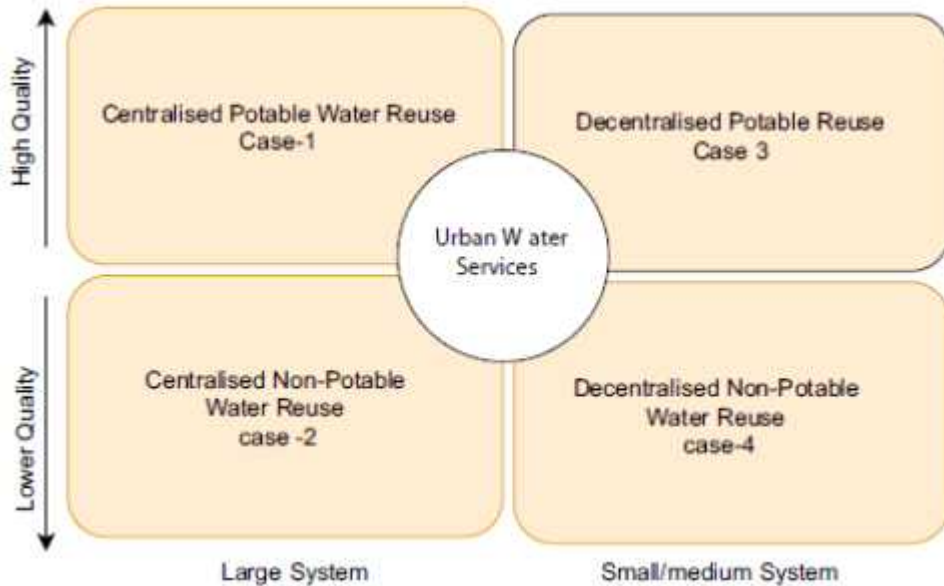


그림 23 물 재이용 시스템에서의 에너지 강도에 대한 4가지 케이스

나. 물과 에너지 간의 기회비용 관계 분석

- 에너지 생산을 위한 물 사용

에너지 생산, 특히 발전(화력, 원자력, 수력 등) 과정에서는 상당한 양의 물이 필요하다. 예를 들어, 수력 발전은 물의 흐름을 이용하는 반면, 화력 발전은 냉각수를 많이 사용한다. 물을 공급받는 발전소에서 물을 많이 사용하지만, 물을 관리하고 처리하는 데 필요한 에너지가 기회비용을 발생시킬 수 있다.

- 기회비용: 물을 에너지 생산에 사용하는 경우, 같은 양의 물을 농업, 정수 처리, 또는 식수 공급 등에 사용할 기회가 줄어든다. 예를 들어, 화력 발전소에서 물을 냉각수로 사용하면, 그 물은 다른 용도로 사용될 수 없게 되며, 이는 농업용수나 식수 공급에서 사용될 수 있는 기회를 잃게 된다.

- 물 공급을 위한 에너지 사용

물을 정수하고, 이송하고, 저장하는 과정에서도 상당한 양의 에너지가 소모된다. 지하수 취수, 수로 이송, 정수 처리 등에서는 펌프와 필터 시스템을 운영하는 데 에너지가 필요하다. 이러한 시스템은 효율적인 운영을 위해 최적화되어야 한다.

- 기회비용: 물을 정수하고 이송하는 데 사용하는 에너지가 많을 경우, 다른 에너지 소비를 줄이는 데 비용을 투자해야 할 수 있다. 예를 들어, 에너지 자원이 제한적인 지역에서는 물의 처리 과정에서 소모되는 에너지 비용이 다른 분야에서의 에너지 활용을 제한할 수 있다. 이때 기회비용은 에너지 자원의 대체 또는 절약 방식으로 나타난다.

○ 산업 공정에서의 물과 에너지 사용

많은 산업 공정에서는 물과 에너지를 동시에 사용합니다. 예를 들어, 화학 공정에서는 물을 식히는 데 에너지가 필요하고, 산업용 증기나 냉각수로서 물이 중요한 역할을 한다. 에너지를 사용하는 공정에서 물을 아끼기 위해서는 해당 공정의 에너지 소비를 줄이는 방법이 필요하다[그림 24].

- 기회비용: 산업 공정에서 물을 아끼기 위해 에너지를 덜 사용하려는 시도가 있을 수 있다. 예를 들어, 물의 사용을 줄이기 위해 에너지 효율성을 높이는 대신, 에너지를 더 많이 사용하는 장비나 시스템을 도입하는 것이 기회비용으로 나타날 수 있다. 이는 한 자원을 아끼는 대신 다른 자원을 더 많이 사용하는 결과를 낳을 수 있다.

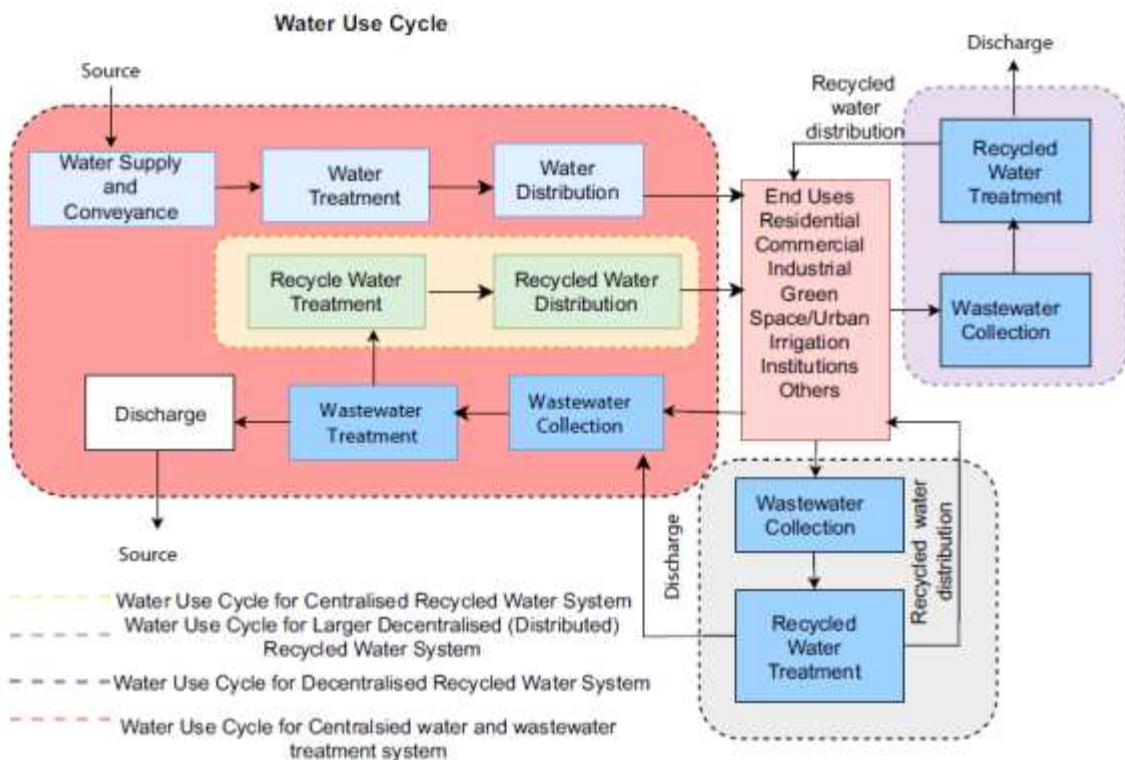


그림 24 물 재이용 시스템 모식도

○ 재생 가능한 자원 활용에 따른 기회비용

태양광, 풍력 등 재생 가능한 에너지를 사용할 때도 물과 에너지 간의 기회비용이 발생할 수 있다. 예를 들어, 태양광 발전의 경우, 태양광 패널을 설치하는 데 물이 소모되고, 풍력 발전은 날씨와의 관계로 에너지 생성에 변동성이 있을 수 있다. 재생 가능 에너지를 사용하기 위해서는 다른 자원의 사용을 고려해야 할 때가 있다.

- 기회비용: 재생 가능한 에너지를 사용하는 것이 전통적인 화석 연료 기반 발전에 비해 물 사용을 절감할 수 있지만, 초기 설치 및 유지 관리에서 자원의 투입이 필요하다. 물을 아끼는 동시에 에너지의 효율성을 개선하는 데 필요한 기술이나 인프라의 비용을 감수해야 하며, 이는 기회비용으로 작용한다.

다. 물과 에너지의 기회비용 관계의 주요 요인

○ 자원 부족 상황

물과 에너지 자원이 부족한 지역에서는 기회비용이 더 중요해진다. 예를 들어, 물 부족 지역에서는 물을 효율적으로 관리하기 위해 에너지 소비를 최적화하려고 하며, 이는 에너지 자원의 사용에 영향을 미칠 수 있다. 반대로, 에너지가 부족한 지역에서는 에너지 효율적인 기술을 사용하기 위해 물 소비를 줄이려고 할 수 있다.

○ 기술적 혁신

물과 에너지 간의 기회비용 관계는 기술 발전에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, 수돗물 정수 및 이송 기술이 발전하면서, 물을 정수하고 이송하는 데 소모되는 에너지를 줄일 수 있다. 에너지 효율적인 펌프나 막 여과 시스템을 사용하는 것만으로도 상당한 에너지 절감 효과를 볼 수 있다. 마찬가지로 고효율 발전소나 재생 가능 에너지 기술은 물 소비를 줄이면서 에너지 생산을 최적화하는 데 기여할 수 있다.

○ 경제적 선택과 균형

물과 에너지의 기회비용 관계는 경제적 관점에서도 중요한 요소다. 예를 들어, 물 자원의 가용성이 높다면 에너지를 더 많이 사용할 수 있지만, 물 자원이 부족하면 물 절약을 우선시해야 한다. 각 자원의 사용에 따른 기회비용을 정확히 분석하여 최적의 자원 배분을 결정하는 것이 중요하다.

물과 에너지 간의 기회비용 관계는 각 자원의 사용이 다른 자원의 공급에 영향을 미치는 상호 의존적이다. 에너지를 생산하거나 물을 처리하는 데 각각 많은 자원이 소모되며, 자원 관리에서의 기회비용은 한 자원의 사용을 증가시키는 대신 다른 자원의 사용을 감소시키는 경제적 선택을 의미한다. 따라서, 이를 최적화하기 위해서는 기술 혁신, 자원 관리 전략, 그리고 경제적 효율성을 고려하여 물과 에너지를 상호 보완적으로 관리하는 것이 중요하다.

3.2.2 물과 에너지 넥서스 연구의 중요성 고찰

물-에너지 넥서스(Water-Energy Nexus) 연구는 물과 에너지 자원이 상호 의존적인 관계에 있음을 강조하며, 이들의 효율적인 관리와 사용이 지속 가능한 발전을 위해 매우 중요하다. 물과 에너지는 현대 사회의 핵심 자원으로, 각각의 자원은 서로를 의존하면서도 제한된 특성을 가지고 있기 때문에, 이들 간의 관계를 연구하고 이해하는 것은 여러 측면에서 필수적이다. 물-에너지 넥서스 연구의 중요성을 살펴보면 다음과 같은 여러 이유들을 살펴볼 수 있다[그림 25].

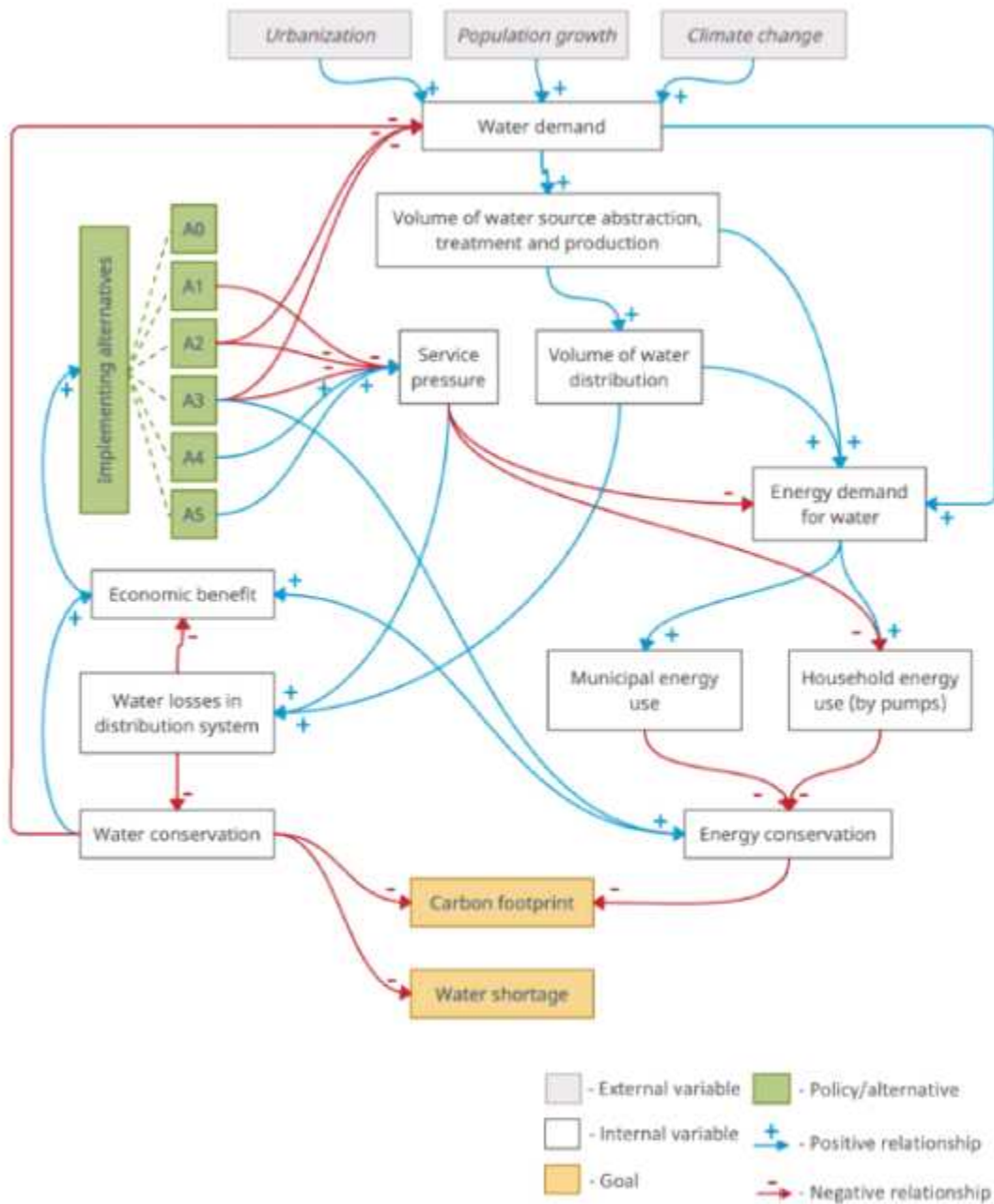


그림 25 물-에너지 넥서스 적용에 관한 시너지 효과를 보여주는 다이어그램

가. 자원 간의 상호 의존성 이해

- 상호 의존성: 물과 에너지는 서로 밀접하게 연관되어 있다. 예를 들어, 에너지를 생산하려면 물이 필요하고, 물을 처리하거나 이송하려면 에너지가 소모됩니다.

발전소는 냉각을 위해 많은 양의 물을 사용하고, 정수 처리 및 급수 시스템은 물을 이송하고 정수하기 위해 막대한 에너지를 필요로 한다. 이러한 상호 의존성은 물과 에너지 자원을 독립적으로 관리하는 것보다 종합적인 관리가 중요하다는 것을 알려준다. 물과 에너지 자원의 효율적 관리 없이는 하나의 자원을 과도하게 소비하거나 다른 자원을 낭비하게 될 수 있다.

나. 지속가능성 및 자원 절약

지속 가능한 개발 목표(SDGs) 달성에는 물과 에너지 자원의 효율적인 사용과 관리가 핵심적인 역할을 한다. 물 부족 및 에너지 부족 문제는 많은 지역에서 중요한 현안으로 대두되고 있다. 예를 들어, 물을 사용하는 발전소가 물 부족 문제를 심화시킬 수 있고, 반대로 에너지 부족은 물 공급 시스템을 운영하는 데 필요한 에너지를 줄여 효과적인 물 공급을 어렵게 만들 수 있다. 물-에너지 넥서스를 연구하면 두 자원의 효율적인 사용을 극대화하고, 자원 낭비를 줄이며, 경제적 비용 절감을 이끌어낼 수 있다.

다. 기후변화와의 관계

기후변화가 물과 에너지 자원에 미치는 영향은 매우 큼니다. 기후변화로 인해 강수량의 변화, 극단적인 기후 사건(가뭄, 홍수 등), 온도 상승 등이 발생하면서 물의 가용성에 변화가 생긴다. 예를 들어, 가뭄은 물을 사용하는 발전소의 운영에 심각한 영향을 미치며, 극단적인 온도 변화는 냉각수의 필요성을 증가시킬 수 있다. 기후변화가 물과 에너지의 공급에 미치는 영향을 이해하는 것은 대응 전략을 세우는 데 중요한 정보가 된다. 물-에너지 넥서스 연구를 통해 기후변화에 대응하는 방안을 모색할 수 있다.

라. 에너지 및 물의 효율성 증대

물의 에너지 소비와 에너지의 물 소비를 최적화하는 것은 매우 중요하다. 예를 들어, 물을 정수하고 이송하는 데 필요한 에너지를 줄이거나, 에너지 생산 과정에서 필요한 물 소비를 최소화하는 기술 개발이 필요하다. 고효율 펌프나 막 여과 시스템을 이용해 물을 정수하고 이송하는 데 소모되는 에너지를 절감할 수 있다. 또한, 재생 가능 에너지(예: 태양광, 풍력)를 활용하여 물 공급 시스템에서 사용하는 에너지를 자급자족할 수 있다면,

에너지의 물 소비를 줄일 수 있다.

마. 자원 관리 및 정책 개발

물과 에너지 자원을 효율적으로 관리하고, 이들의 사용을 최적화하는 정책 개발이 필요하다. 물-에너지 넥서스 연구는 정책 입안자들이 자원 관리를 잘 할 수 있도록 과학적 근거를 제공한다. 예를 들어, 국가나 지방정부에서 물과 에너지 자원의 조화로운 관리 방안을 도입할 때, 넥서스 연구는 통합적 접근을 위한 기초 자료를 제공한다. 물과 에너지의 균형을 맞추는 정책을 통해 두 자원의 사용 효율성을 높이고, 지속 가능한 자원 활용을 추구할 수 있다.

바. 경제적 효과

물과 에너지 자원의 관리에서 발생하는 기회비용을 줄이면, 경제적 효과가 크다. 예를 들어, 물을 정수하고 이송하는 데 필요한 에너지 소비를 줄이거나, 물을 사용하는 산업 공정에서 에너지 효율성을 높이면, 운영비용 절감과 자원 효율성 증대를 동시에 달성할 수 있다. 물-에너지 넥서스 연구는 경제성을 고려하여 효율적인 기술 개발 및 관리 방안을 제시하고, 비용-효과적인 해결책을 제시한다.

사. 지속 가능한 도시 및 지역 개발

도시화가 진행됨에 따라 물과 에너지 자원의 수요가 급증하고 있다. 스마트 시티와 같은 지속 가능한 도시 개발에서는 물과 에너지를 효율적으로 관리하는 것이 핵심이다. 물-에너지 넥서스 연구는 도시 계획 및 설계에서 물과 에너지를 최적화하는 방안을 제시하고, 도시 인프라의 효율성을 높이는 데 기여할 수 있다[그림 26].

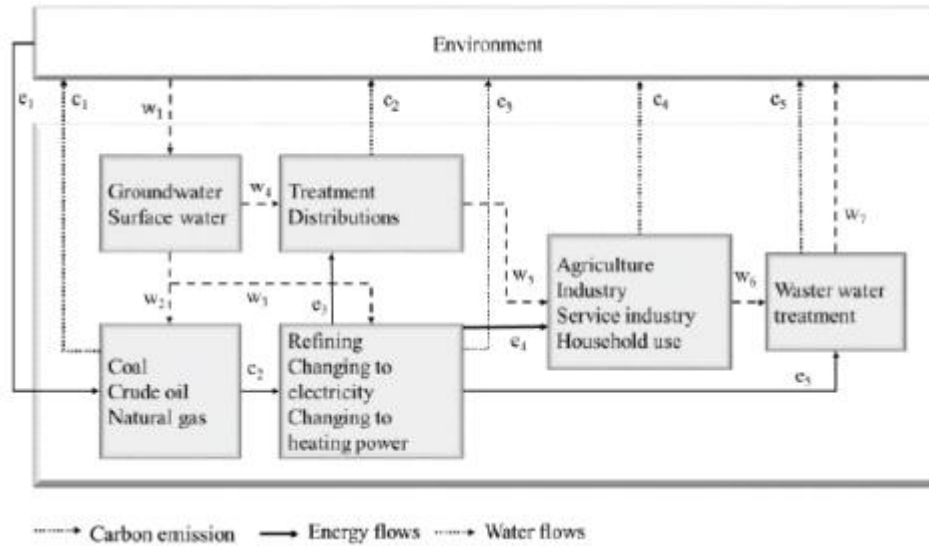


그림 26 도시 내 물-에너지-탄소 넥서스 시스템에 관한 모식도

아. 국제적 협력과 글로벌 문제 해결

물과 에너지의 부족 문제는 많은 국가에서 공통된 문제다. 예를 들어, 물 부족 지역에서는 에너지 생산을 위한 물 자원이 부족하고, 에너지 부족 지역에서는 물을 처리하고 이송하는 데 필요한 에너지를 확보하기 어려운 경우가 많다. 물-에너지 넥서스 연구는 국제적인 차원에서 협력적 해결책을 제시할 수 있으며, 글로벌 기후변화나 지속 가능한 개발 목표(SDGs)에 대한 국제적인 접근을 강화하는 데 기여할 수 있다.

자. 넥서스 연구의 가치

물-에너지 넥서스 연구는 물과 에너지가 서로 얽혀있는 복잡한 관계를 이해하고, 두 자원의 효율적이고 지속 가능한 관리 방법을 제시하는 데 중요한 역할을 한다. 물과 에너지를 독립적으로 다루는 것이 아니라, 상호 연결된 자원으로서 통합적인 접근을 통해 물과 에너지의 효율성, 경제성, 지속가능성을 증대시킬 수 있다. 이는 기후변화 대응, 경제적 효율성, 국제적 협력 등 여러 차원에서 중요한 영향을 미치며, 미래 지향적인 자원 관리를 위한 필수적인 연구 분야이다.

3.2.3 AI 알고리즘 기반의 도시물순환 구조 및 관계의 평가분석

도시 물 사용량과 에너지 소비의 관계를 머신러닝을 활용해 해석하는 연구는 자원 관리와 효율성을 높이기 위해 점점 더 중요한 분야가 되고 있다. 특히, 데이터 기반으로 예측하거나 패턴을 분석하는 머신러닝 모델을 적용하면 도시의 물과 에너지 자원 관리에 대한 통찰을 얻을 수 있다. 이를 통해 보다 효율적인 정책이나 시스템을 설계할 수 있으며, 이러한 새로운 접근방식은 넥서스와 같은 여러 가지의 복잡한 구조와 상호작용을

동시에 이해하는 데에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

가. 머신러닝을 활용한 도시 물 사용량과 에너지 소비 분석

머신러닝 모델을 사용하여 도시의 물 사용량과 에너지 소비의 관계를 분석하는 방법에는 다양한 접근이 있을 수 있으며 다음과 같다.

(1) 회귀 분석 (Regression Analysis)

회귀 분석이라 함은 보통 AI기반의 데이터 학습이라기 보다는 통계학을 기반으로 추계론적 데이터 접근방식으로 볼 수 있지만, 데이터를 통하여 해석한다는 점에서 본 연구에서는 하나의 분석으로 제시한다. 회귀 분석의 경우, 도시의 물 사용량과 에너지 소비 간의 선형적 또는 비선형적 관계를 모델링하는 데 사용될 수 있다[그림 27]. 회귀 모델을 사용하면, 두 변수 간의 관계를 보다 정확하게 예측할 수 있다. 크게 다음과 같은 예를 들 수 있다.

- 다중 회귀 분석 (Multiple Regression): 물 사용량을 설명하는 다양한 변수들 (예: 기온, 인구 밀도, 경제 활동 수준 등)과 에너지 소비의 관계를 모델링하여, 물과 에너지의 사용 패턴을 예측할 수 있다.

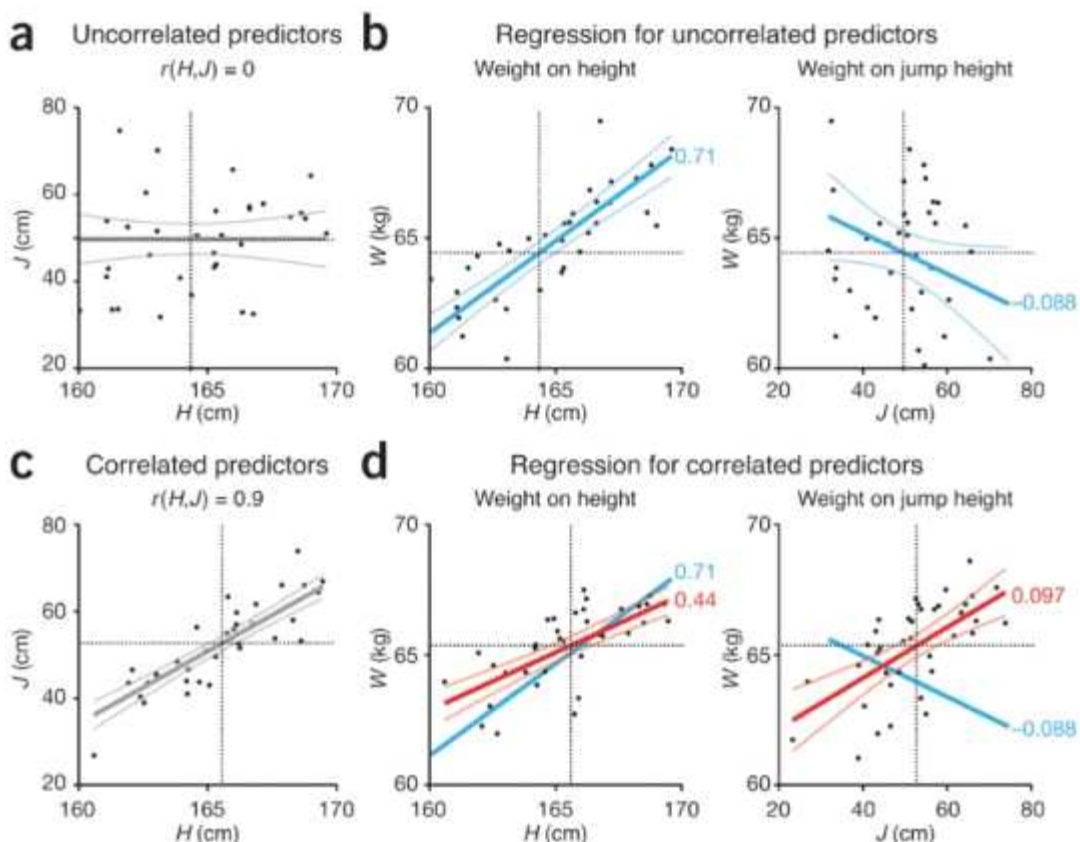


그림 27 회귀분석의 다양한 예시

- 랜덤 포레스트 회귀 (Random Forest Regression): 복잡한 상호작용과 비선형적 관계를 처리할 수 있는 비선형 회귀 모델로, 에너지 소비와 물 사용량 간의 복잡한 관계를 파악할 수 있다[그림 28].

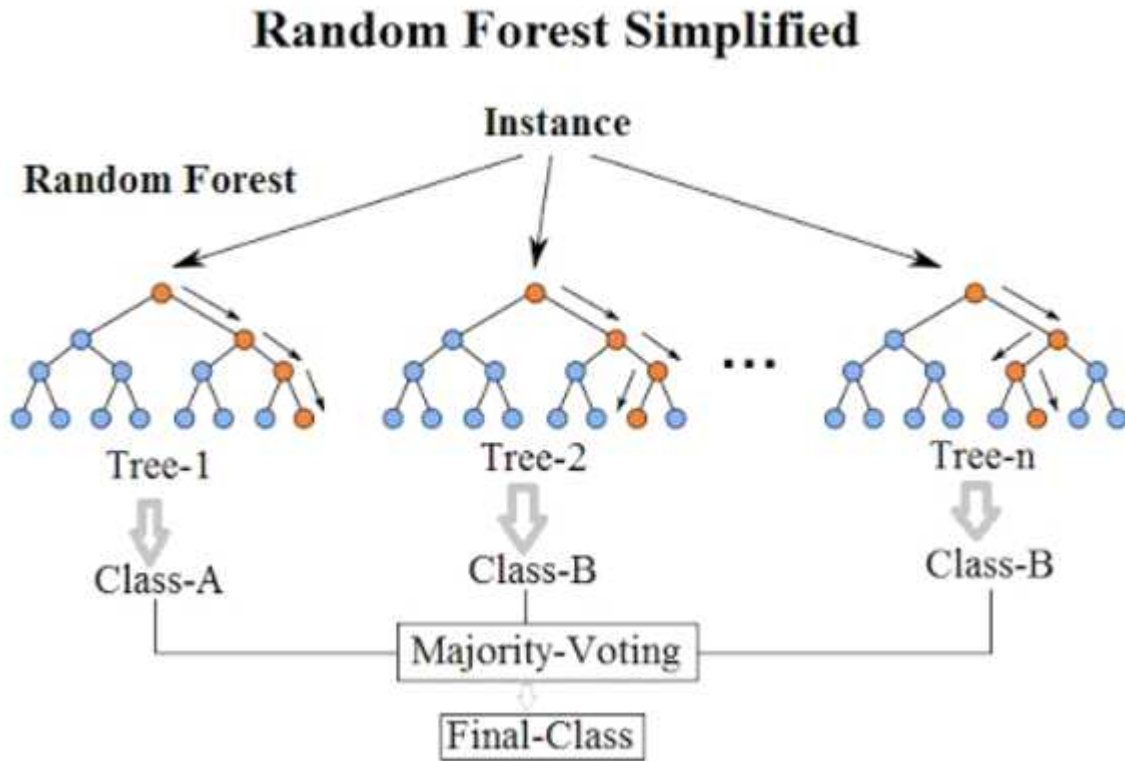


그림 28 랜덤포레스트에 대한 이해도

(2) 시간 시계열 예측 (Time Series Forecasting)

도시의 물 사용량과 에너지 소비 데이터는 시간에 따라 변동하는 시계열 데이터의 특성을 가질 수 있다. 머신러닝을 활용한 시계열 분석을 통해 시간에 따른 물과 에너지 소비 패턴을 예측할 수 있다. 구체적인 예는 다음과 같이 제시할 수 있다.

- LSTM (Long Short-Term Memory): LSTM 모델은 시계열 데이터를 처리하는 데 유용한 딥러닝 모델로, 물 사용량과 에너지 소비 간의 관계를 시간적인 흐름에 따라 예측할 수 있다[그림 29].
- ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average): 시계열 데이터를 기반으로 물 사용량과 에너지 소비의 패턴을 분석하고 예측하는 데 활용될 수 있다. 이 방법은 앞의 LSTM에 비해 전통적인 통계 시계열 예측방법의 하나로 구분될 수 있다.

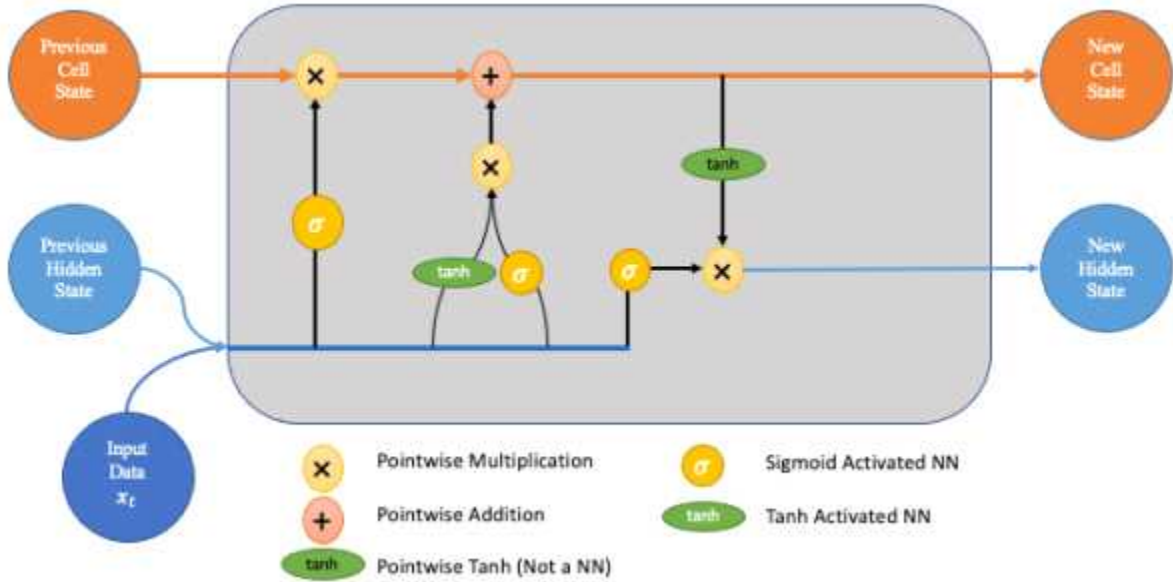


그림 29 LSTM에 대한 구조이해도

(3) 클러스터링 (Clustering)

클러스터링은 도시 지역이나 특정 시점에서 물과 에너지 사용 패턴이 비슷한 집단을 찾는 데 사용된다. 이를 통해 물과 에너지 소비의 주요 특징이나 트렌드를 파악할 수 있다. 구체적인 예는 다음과 같이 제시할 수 있다[그림 30].

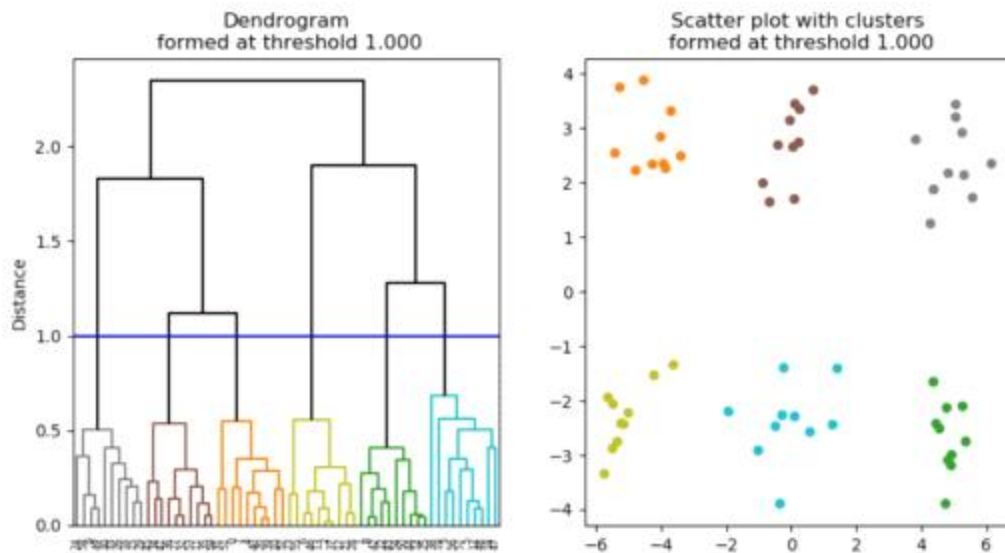


그림 30 클러스터 분석의 예시

- K-평균 클러스터링 (K-Means Clustering): 도시 내에서 물 사용량과 에너지 소비의 패턴이 유사한 지역들을 클러스터링하여, 각 클러스터에 맞는 효율적인 자원 관리

전략을 수립할 수 있다.

- DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise): 밀도가 높은 지역에서 물과 에너지 소비 패턴을 추출하고, 이상값을 식별하여 보다 정교한 분석을 할 수 있다.

(4) 강화 학습 (Reinforcement Learning)

강화 학습은 도시의 물과 에너지 자원을 최적화하는 정책을 개발하는 데 사용될 수 있다. 예를 들어, 에너지 소비를 줄이는 동시에 물 사용량을 효율적으로 관리하는 최적의 정책을 찾을 수 있다[그림 31].

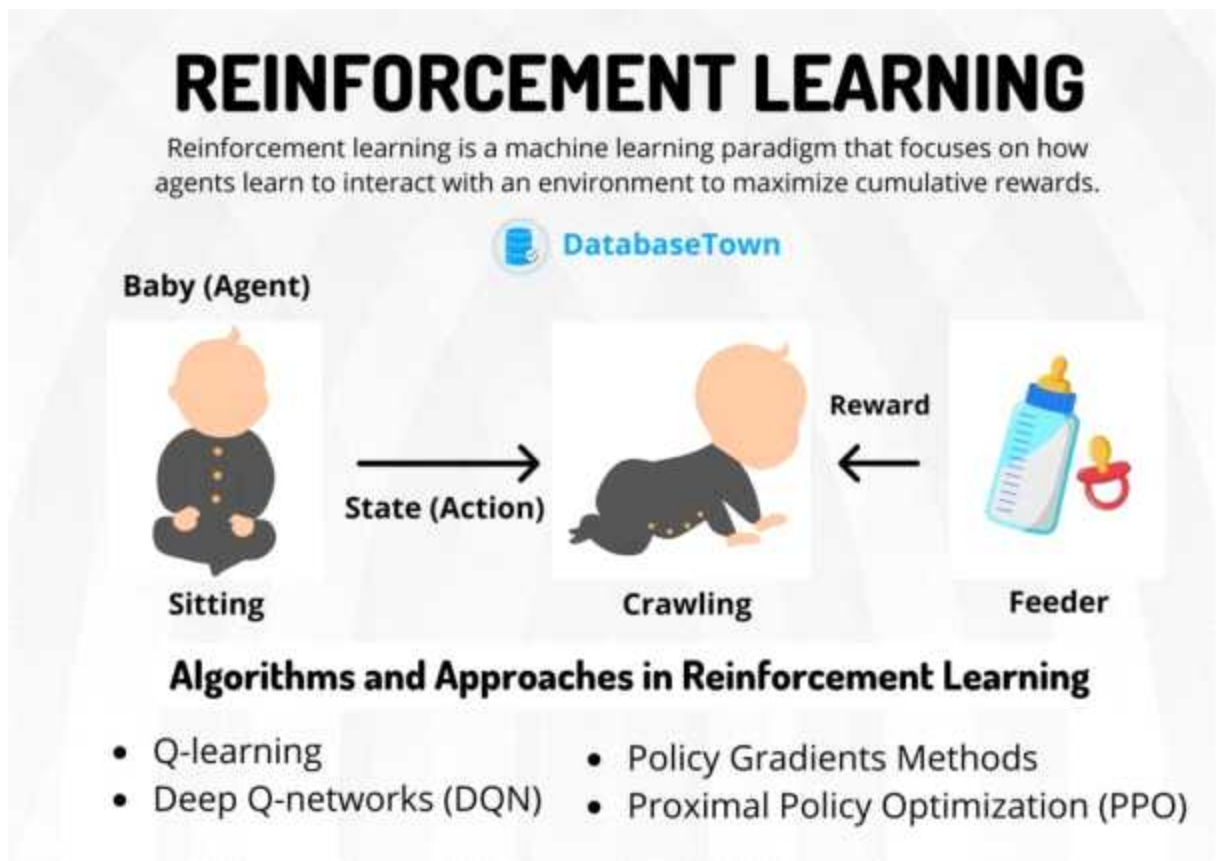


그림 31 강화학습에 대한 원리 및 이해 모식도

- Q-러닝 (Q-Learning): 물과 에너지 소비를 최소화하는 최적의 결정을 내리기 위한 정책을 학습하는 데 사용될 수 있다. 이를 통해 정책이 에너지와 물 자원의 효율적인 분배를 실시간으로 학습할 수 있다.

나. 다양한 도시물관리 시스템 관련 머신러닝의 적용 사례

몇 가지 실제 연구나 적용 사례를 살펴보면, 머신러닝이 어떻게 도시 물 사용량과 에너지 소비의 관계를 해석하는 데 사용될 수 있는지 더 구체적으로 이해할 수 있다.

(1) 스마트 물 관리 시스템

스마트시티에서는 실시간 데이터를 통해 물 사용량과 에너지 소비를 모니터링하고 최적화하는 시스템을 구축하고 있다. 예를 들어, 머신러닝 모델을 사용해 기온, 인구 활동, 건물 내 냉난방 시스템 등을 분석하여 물과 에너지의 소비 패턴을 예측하고, 이에 따른 효율적인 공급 전략을 마련한다. 이러한 시스템은 예측된 데이터를 기반으로 물과 에너지 소비의 효율성을 높이고, 피크 시간대의 과잉 소비를 줄이는 데 기여할 수 있다.

(2) 에너지 효율적인 물 공급 시스템

도시에서 물을 공급하는 데 드는 에너지를 최소화하는 방법에 대한 연구도 있다. 예를 들어, 머신러닝을 사용하여 다양한 지역의 물 사용량과 에너지 소비 데이터를 분석하고, 특정 지역에서 물 공급 시스템의 효율성을 높이는 방안을 제시할 수 있다. 물 공급의 시간대나 용도별로 에너지 소비를 최적화하는 모델을 통해, 에너지 절약과 물 낭비를 줄이는 효과를 볼 수 있다.

(3) 기후변화와 물-에너지 넥서스

기후변화가 도시의 물과 에너지 소비에 미치는 영향을 예측하는 연구도 이루어지고 있다. 머신러닝을 통해 기후변화 시나리오를 고려한 물과 에너지 소비 예측 모델을 구축하여, 미래의 물 부족 문제나 에너지 공급 불안정성에 대비할 수 있다. 예를 들어, 기온 상승이나 강수량 변화가 도시의 물 사용량과 에너지 소비에 어떤 영향을 미칠지 예측하고, 이에 따른 정책적 대응을 모색하는 연구들이 진행되고 있다.

다. 도시물순환 가상모형을 이용한 머신러닝의 적용 평가분석

당해연도에 실시된 연구는 기존의 선행된 도시물순환 연구분석에 대한 객관적인 데이터 검증을 AI 기반의 머신러닝을 통하여 재검증하는 데에 있다. 이는 최근 국제연합(UN)의 지속가능발전목표(SDGs)에 기반하여, 중장기적으로는 글로벌 물안보 실현을 위한 적정 솔루션을 제공하기 위함이다. 특히 유네스코 IHP 9단계 전략(5개 우선주제, 34개 기대성과) 중 통합도시물관리에 연계할 수 있을 것으로 예상된다.

(1) 몬테카를로 분석을 통한 변수 생성 결과

도시물순환 모델을 이용하여 Condition, Energy Intensity, Water Loss Control에 관한 변수들의 관계를 단순한 통계로 확인하였다. 이는 기존의 통계방식을 통하여 임의로 생성된 변수들의 관계가 전통적인 분석방법으로도 가능한지를 우선적으로 검토하기 위함이었다.

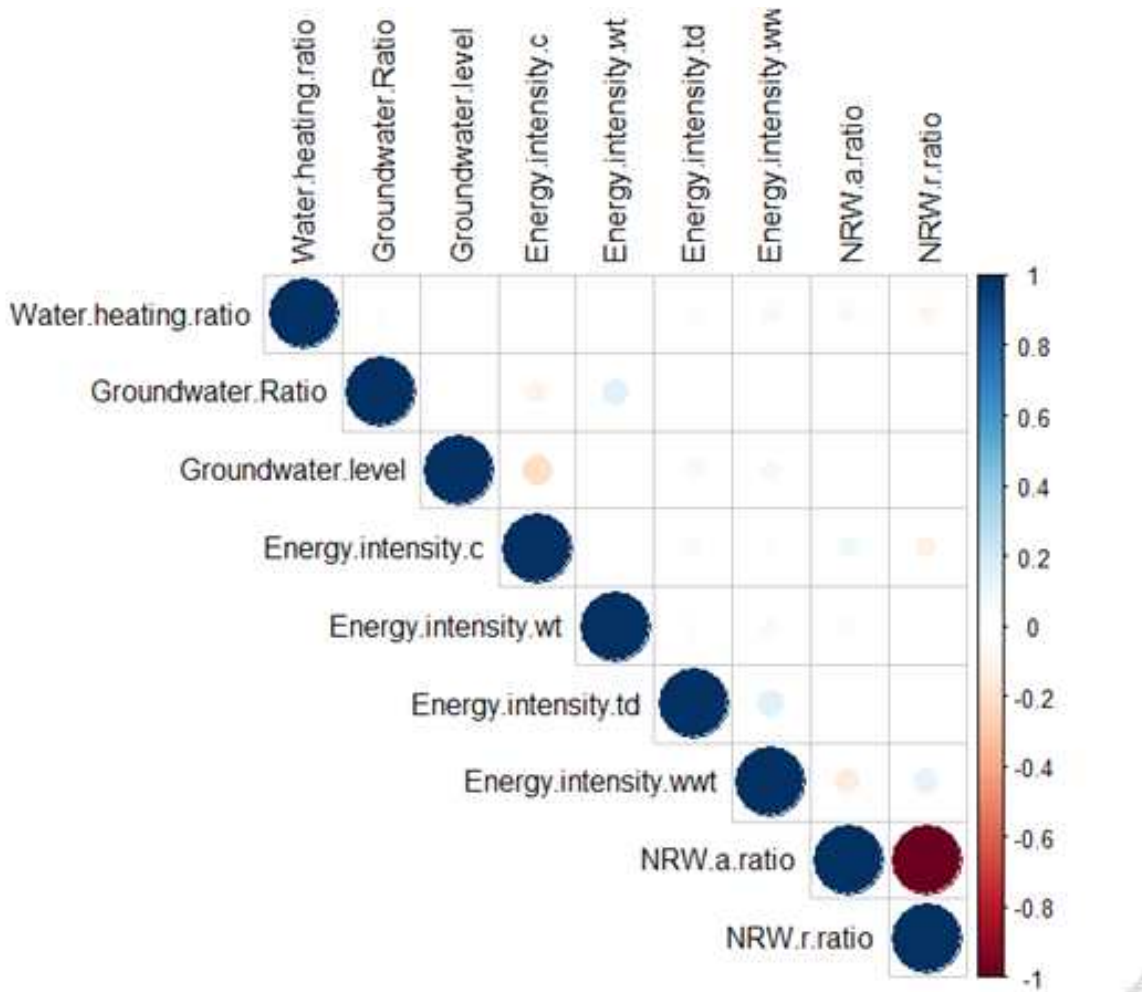


그림 32 도시물순환 모델에서의 변수간의 상관관계 분석결과

위의 그림에서 나타난 결과에서 보는 바와 같이 라틴하이퍼큐브(LHS) 방식으로 추출된 결과이기 때문에 모든 변수들간의 의존성 및 상관성은 인위적으로 배제하였다는 것을 알 수 있다[그림 32]. 이것은 분석에 있어서 매우 중요한 요소로 생성된 가상의 데이터라고 할지라도, 의도하지 않은 상관관계에 의해서 통계적 유의성이 나타나는 경우라면 굳이 AI 기반의 머신러닝과 같은 복잡한 방법을 사용하는 것은 크게 의미가 없다고 할 수 있기 때문이다.

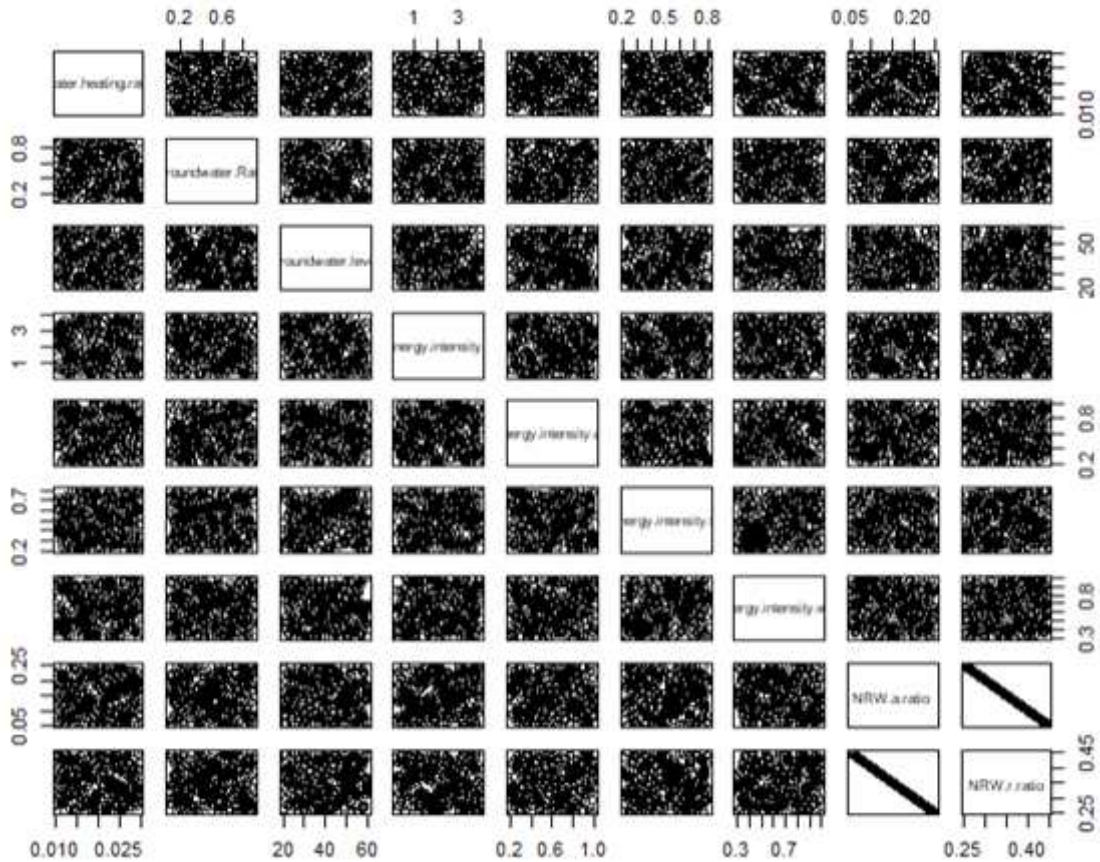


그림 33 상관관계 분석에 대한 실제 변수간 관계 그래프

앞에서 설명된 이러한 경향성은 실제 데이터 플랏에 있어서도 명확히 나타남을 재차 확인할 수 있었다. 위의 그림은 앞서 도출된 몬테카를로 시뮬레이션을 위한 변수들간의 상관관계를 분산형 그래프로 나타낸 것이고, 각 변수들간 관계가 전혀 나타나지 않음을 알 수 있었으며, 수치를 표시하지는 않았지만 모든 변수들간의 상관계수는 거의 0에 가까운 수준으로 상관성이 나타남을 확인할 수 있었다.

(2) 도시물순환의 다양한 변수를 이용한 자가조직화(SOM) 분석결과

본 연구의 분석은 온수비율(WHR), 지하수비율(GWR), 지하수위(GWL), 이송에너지(EI_CON), 정수에너지(EI_WT), 분배에너지(EI_TD), 하수처리에너지(EI_WWT), 물발자국(WF), 에너지소비(EC), 탄소발자국(CF)과 같이 총 10개의 데이터를 이용하여 자가조직화(Self-Organizing Map, SOM) 분석을 실시하였다[그림 34].

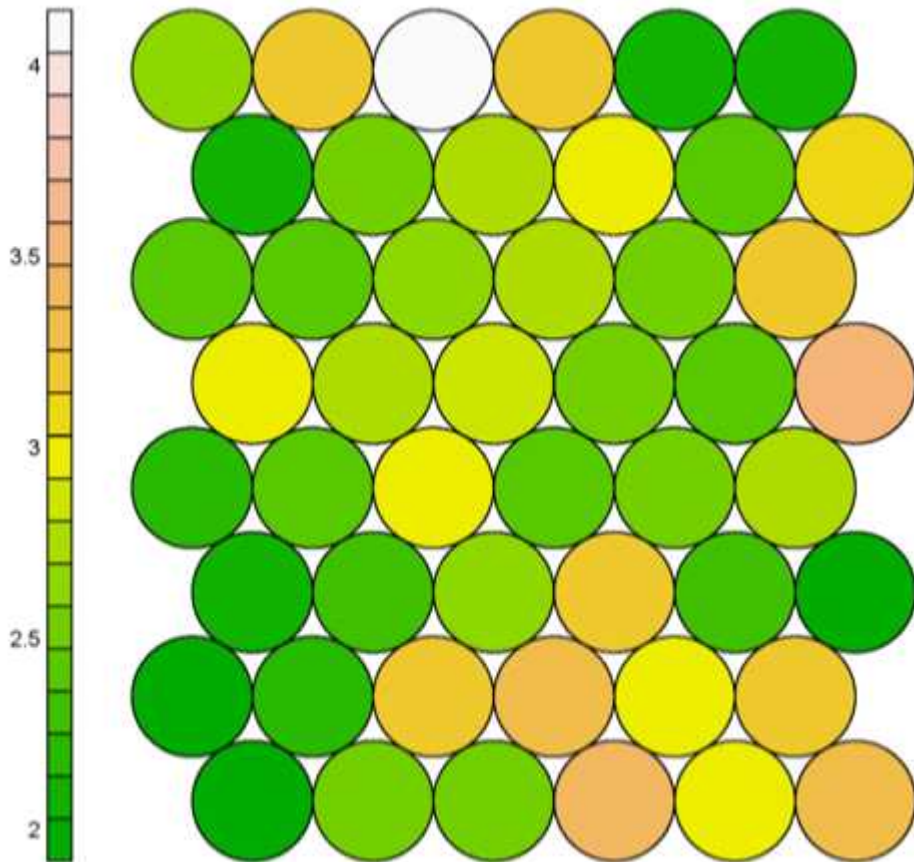


그림 34 도시물순환 모델의 데이터를 이용한 SOM의 U-matrix 결과

위의 SOM 결과는 우선적으로 U-matrix라고 표현하는 데이터 지도를 생성해준다. 이것은 도시물순환 모델에서 생성된 여러 가지 조건의 데이터 변수와 매칭되는 물발자국, 에너지 소비량, 탄소발자국 등의 값들을 동시에 고려하여 각각의 모델에서 나타나는 경우를 유클리드 거리와 같은 척도 기준을 기반으로 계산하는 것이다. 이 계산된 값들은 각각의 데이터 표본, 즉 도시물순환 과정을 고려하는 데에 있어서 각각의 경우들을 하나하나 열거하여 표본 간의 거리를 나타낸다. 이러한 거리의 값들은 다르게 해석하면, 도시물순환 과정에서 고려될 수 있는 각각의 경우에 대한 유사도로 해석할 수 있다. 이는 어떠한 경우나 조건에 따라 물사용량, 에너지소비량, 그리고 탄소배출량이 유사하게 또는 다르게 나타날 수 있는가를 정량적으로 나타낼 수 있기때문에 관계를 이해하고 해석하는 데에 훨씬 더 직관적이라고 할 수 있다.

U-matrix에 나타난 경우를 살펴보면 녹색으로 표시된 부분의 영역이 서로 비슷한 데이터끼리 도식화되는 것을 알 수 있고, 최상단 일부와 우측 하단 및 우측의 경우 데이터의 성향이 다른 케이스들과 차별된다는 점을 알 수 있다.

이렇게 해석을 해본다면, 다음의 내용은 과연 어떠한 변수 혹은 데이터들이 각각의 지도 위에 표출되는지를 해석해야 하는 것이고, 그에 따라 관련성에 대한 이해가 뒷받침될 수 있다.

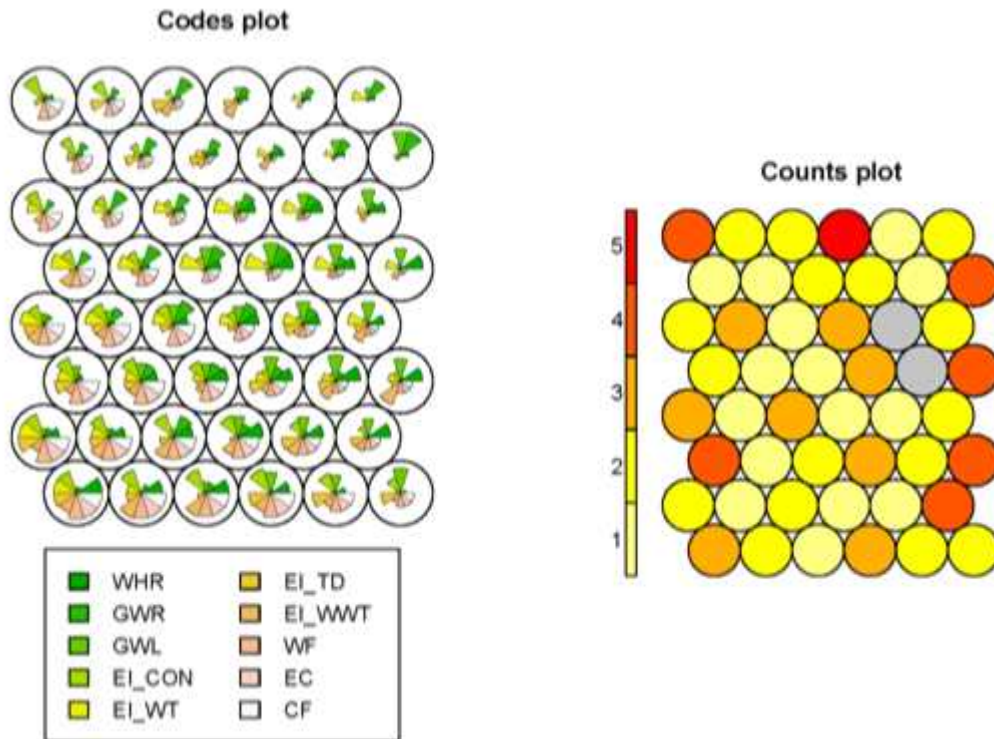


그림 35 SOM 결과 분석: 변수별 Map(좌), 데이터 표본의 밀도 Map(우)

위의 결과는 우선적으로 오른쪽 맵을 보게 되면 지도 상에 매칭된 데이터들의 밀도를 살펴볼 수 있다[그림 35]. 빨간색으로 된 오른쪽 부분 및 일부 부분들은 상대적으로 4개 이상의 데이터들끼리 그룹화되어 나타나는 것으로 볼 수 있고, 그렇지 않은 부분들은 노란색으로 나타나거나 일부 회색으로 표현된 부분은 해당되는 원형 셀에 포함되지 않는다는 것을 파악할 수 있었다. 전체적으로 Map을 볼 때 빈 공간없이 골고루 분포하는 것을 알 수 있고, 이러한 점에 있어서 분석 결과의 편향적(Bias) 성향은 크게 나타나지 않은 것으로 해석하였다.

한편 도시물순환 모델의 각 변수에 관하여 해석을 해보면, 왼쪽에 위치한 Component 지도를 이용하여 해석할 수 있다. 원형 셀 내부의 작은 부채꼴 모양의 크기는 각 Component에 대한 크기를 나타낸다. 즉, 크기가 크면 해당하는 변수의 수치가 높거나 크다는 의미이고, 반대로 모양이 작으면 변수의 수치가 낮거나 적다는 의미이다. SOM의 공간적 패턴을 살펴보면 왼쪽 하단 쪽에는 대체로 많은 변수들의 값들이 높게 위치하고 있음을 알 수 있다. 중요한 포인트 중 하나는 물사용량에 따른 에너지 강도라든지 또는

탄소발자국이 의미있는 것이라고 할 수 있으며, 직관적으로 볼 때 이 3가지의 유형은 현재 개발된 도시물순환 모델의 구조에서는 단방향으로 나타나는 것처럼 판단된다.

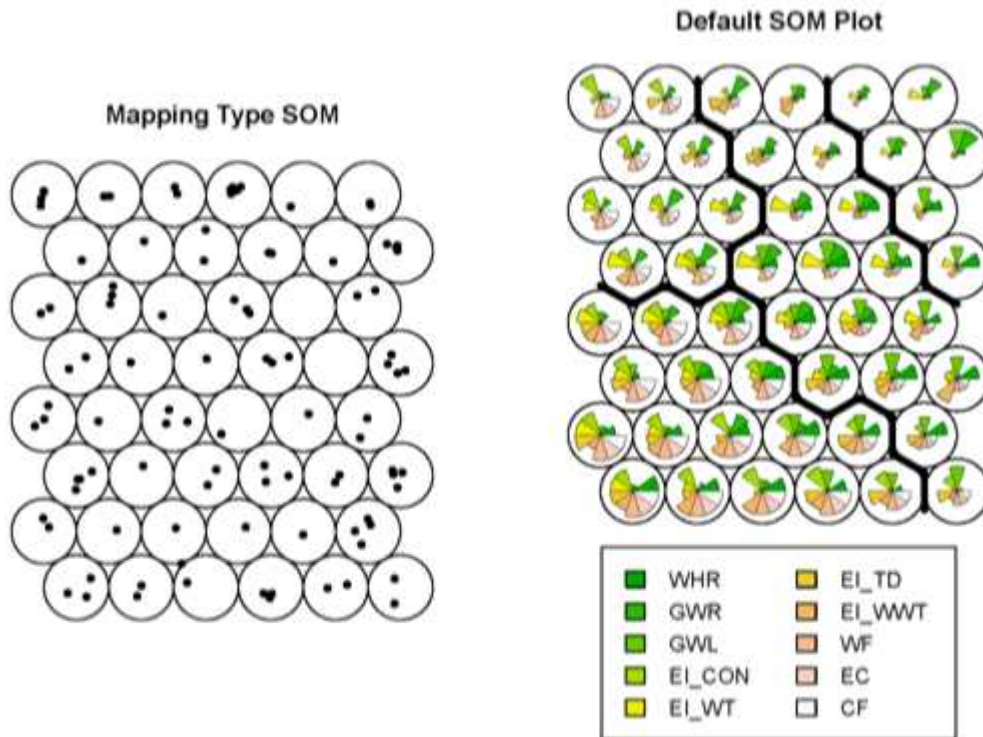


그림 36 SOM을 기반으로 한 클러스터링 분석평가: 데이터 밀도(좌), 클러스터(우)

SOM 모델의 결과값을 기초로 다시 클러스터링 분석을 실시하면 위의 그림(우)과 같이 나타났다[그림 36]. 크게 4가지 유형의 그룹으로 구분되는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과를 통하여 선행연구된 도시물순환 넥서스 모델에서의 구조와 기능을 객관적으로 재평가 검증할 수 있었다.

4가지 클러스터에 대해서는 다음과 같은 결과로 정리될 수 있었다[표 4].

표 4 SOM 클러스터별 분석결과

Parameters	Clusters			
	1	2	3	4
Hot Water Ratio (WHR)	0.021	0.022	0.016	0.020
Groundwater Ratio (GWR)	0.442	0.484	0.538	0.506
Groundwater Level (GWL) (m)	39.450	43.937	27.354	46.463
Energy Intensity – Conveyance (EI_CON) (kWh/m ³)	3.392	1.561	2.995	0.641
Energy Intensity – Water Treatment (EI_WT) (kWh/m ³)	0.643	0.600	0.599	0.563
Energy Intensity – Transmission & Distribution (EI_TD) (kWh/m ³)	0.595	0.523	0.430	0.336
Energy Intensity – Wastewater Treatment (EI_WWT) (kWh/m ³)	0.776	0.695	0.551	0.539

또한 분석된 클러스터들에 대해서 각각의 특성을 정리하면 다음과 같았다.

- **Cluster 1:** 물 발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소 발자국량이 대체로 많은 결과값으로 구분되며, 상대적으로 공정별 에너지 강도가 다소 높은 것으로 분석됨
- **Cluster 2:** 온수사용 비율, 지하수 사용 비율 및 지하수 수위가 높은 것으로 나타났지만, 공정별 에너지 강도가 상대적으로 낮기 때문에 물 발자국, 총 에너지 사용량과 탄소 발자국은 낮게 나타남
- **Cluster 3:** 정수처리공정, 도수 공정의 에너지 강도가 높은 군집군으로, 물 발자국, 총 에너지 사용량과 탄소 발자국의 결과값은 나머지 클러스터에 비해 상대적으로 낮게 나타남
- **Cluster 4:** 온수사용 비율, 지하수 사용 비율 및 지하수 수위를 제외하고 모든 공정의 모수값이 낮게 나타난 클러스터로, 물 발자국, 총 에너지 사용량, 탄소 발자국의 결과값 또한 가장 낮게 분석됨

이러한 분석 방식을 통하여 각 특성을 정량적으로 유형화할 수 있었고, 이러한 AI기반의 머신러닝 기법을 통해 선행연구에 대한 이해도를 좀 더 명확히 높일 수 있었다. 그리고 향후 미래의 넥서스 연구를 생태계 생물다양성 등과 같은 확장된 영역으로 발전시켜나갈 때에 유용한 툴과 분석 방법으로 이용가능하다.

제 4 장 결론 및 향후계획

4.1 물-에너지-탄소 기반으로 구축된 넥서스 모델에 대한 확장

물-에너지-생태계 넥서스(Water-Energy-Ecosystem Nexus)로의 확장성 분석은 물, 에너지, 생태계 자원이 서로 어떻게 연결되고 상호작용하는지를 이해하고, 이를 기반으로 보다 통합적이고 지속 가능한 자원 관리를 목표로 할 것이다. 이러한 확장된 넥서스 관점은 자원들이 서로 의존하고 있기 때문에 한 가지 자원에 대한 변화가 다른 자원에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 수 있을 것이다. 특히, 물과 에너지를 사용하는 방식은 생태계에 심각한 영향을 미칠 수 있기 때문에, 이 세 가지 자원 간의 관계를 잘 이해하는 것이 미래에는 더욱 중요할 것으로 예상되며, 본 연구를 생태계 서비스 등과 같은 요소로 확장시키는 것은 매우 중요하다고 생각한다[그림 37].

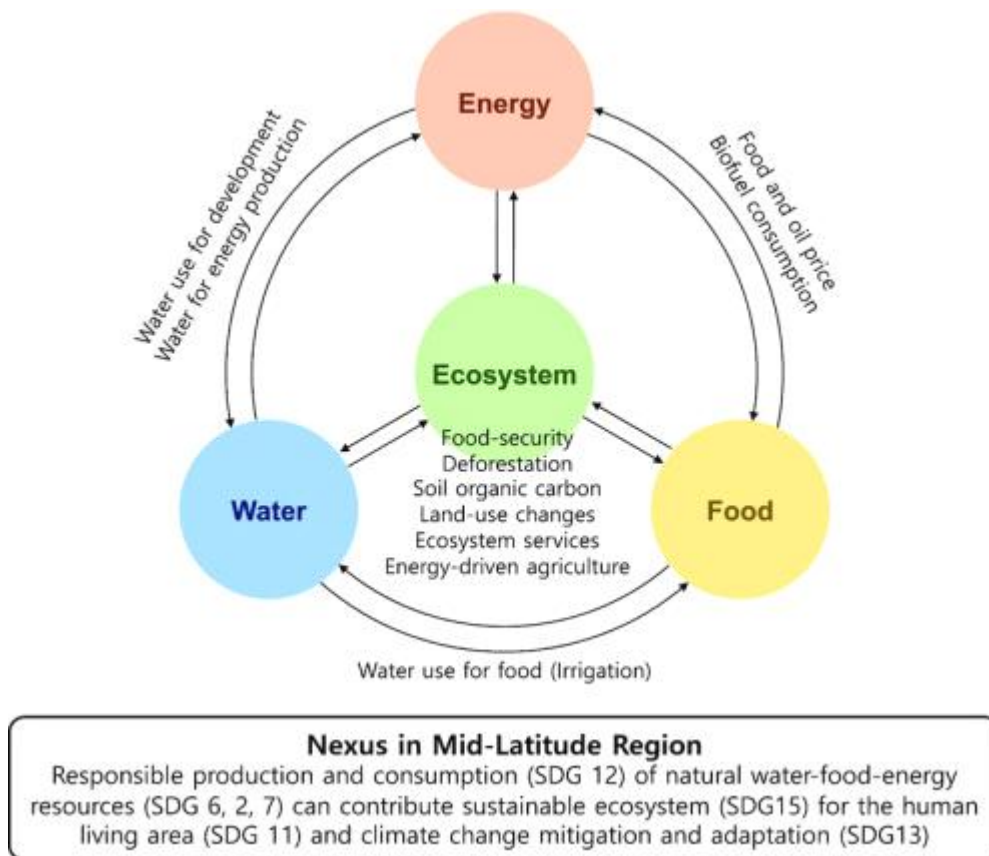


그림 37 생태계 서비스 지향의 미래 넥서스 연구의 방향성 및 아이디어

4.1.1 물-에너지-생태계 넥서스 분석의 예

물, 에너지, 생태계 간의 관계는 결국 탄소와도 연계될 수 있을 것으로 생각되며,

적용될 수 있는 사례는 다음과 같다.

가. 수력 발전과 생태계

수력 발전은 대표적인 물과 에너지가 결합된 시스템이지만, 운영되는 과정에서 물과 에너지뿐만 아니라 주변 생태계에 미치는 영향도 고려해야 하기 때문에 이러한 연구는 매우 중요하다.

- 물-에너지 관계: 수력 발전은 물을 이용해 전기를 생성하는 방식으로, 물의 흐름을 제어하고 저장하는 데 에너지를 사용한다. 수력 발전소가 많은 지역에서는 물의 흐름과 저장 용량이 에너지 생산에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.
- 물-생태계 관계: 수력 발전소의 댐은 물의 자연 흐름을 방해하고, 이를 통해 생태계에 영향을 준다. 예를 들어, 댐이 물의 흐름을 차단하면 물고기의 이동 경로가 방해받고, 수생 생물들의 서식지가 파괴될 수 있다. 또한, 댐의 수위 변동은 주변 식물과 동물의 생태적 조건에 영향을 준다.
- 에너지-생태계 관계: 에너지를 생산하기 위해 댐이 필요한 경우, 수력 발전은 전통적인 화석 연료 발전보다 상대적으로 친환경적이지만, 생태계의 변화를 초래할 수 있다. 특히, 댐 건설과 관련된 환경 파괴가 생물 다양성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

나. 농업과 물-에너지-생태계

농업은 물과 에너지 소비가 집중되는 분야로, 이 분야에서의 넥서스 분석은 중요한 부분으로 최근 각광받고 있다.

- 물-에너지 관계: 농업에서는 물을 대규모로 사용하는 동시에, 이 물을 공급하기 위한 에너지가 필요하다. 예를 들어, 물을 대규모로 끌어오기 위해 사용하는 펌프나 관개 시스템은 상당한 양의 에너지를 소비하며, 이러한 에너지 소비는 농업 생산성에 영향을 미친다.
- 물-생태계 관계: 농업 활동은 종종 수자원에 큰 영향을 미치며, 관개용수로 사용되는 물은 강, 호수, 지하수 등 자연 수자원에서 끌어오기 때문에, 자연적인 수생 생태계가 영향을 받거나 고갈될 수 가능성이 높다. 또한, 농업에서 사용되는 농약과 비료는 물에 유입되어 수질을 오염시키고, 생물 다양성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.
- 에너지-생태계 관계: 농업에 필요한 에너지 생산은 환경에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 화석 연료를 사용하여 농업 기계나 관개 시스템을 운영하는 경우, 이산화탄소

배출량이 증가하고 기후변화에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 에너지 생산 과정에서 발생하는 오염물질이 생태계에 영향을 미칠 수 있다.

다. 에너지 생산과 생태계 보호

에너지 생산이 자연 생태계에 미치는 영향을 평가하고, 이를 통해 지속 가능한 에너지 시스템을 설계하는 것이 중요한 문제이다.

- 에너지-생태계 관계: 화석 연료 기반의 에너지 생산은 대기 오염, 온실가스 배출, 수질 오염 등을 초래하며, 이러한 환경적 영향은 생태계에 부정적인 영향을 미친다. 예를 들어, 석탄이나 석유 발전소의 배출물은 대기와 수질을 오염시키고, 이는 특정 생물군에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.
- 물-에너지-생태계 관계 통합 분석: 태양광이나 풍력 같은 재생 가능한 에너지 생산 방법은 물과 에너지 소비를 최소화하고 생태계에 미치는 영향을 줄이는 방법으로 인식되고 있다. 하지만, 재생 가능 에너지 생산 시설도 생태계에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 대규모 태양광 발전소는 대지와 생태계를 변화시킬 수 있고, 풍력 발전소는 조류나 박쥐에게 영향을 미칠 수 있다.

라. 기후변화와 물-에너지-생태계 넥서스

기후변화는 물, 에너지, 생태계 자원에 전방위적인 영향을 준다. 기후변화의 영향을 고려한 넥서스 분석은 이러한 상호작용을 보다 명확하게 이해할 수 있게 한다.

- 기후변화 영향: 수자원 이용성에 직접적인 영향을 주고, 강수량 패턴이나 온도가 변하는 경우에는, 양적인 부분뿐만 아니라 질적인 부분에도 큰 영향을 준다. 이로 인해 수자원 관리가 어려워지며, 에너지 생산이 영향을 받을 수 있으며, 극단적인 기후 사건(가뭄, 홍수 등)은 생태계에 심각한 영향을 미칠 수 있다.
- 적응 전략: 기후변화에 대한 적응 전략으로 물과 에너지 소비를 최적화하고, 생태계를 보호하기 위한 통합적 접근이 필요합니다. 예를 들어, 물 재활용과 재생 가능한 에너지 시스템을 결합하여 기후변화에 대비하는 방법이 있을 수 있다.

4.1.2 물-에너지-생태계 넥서스 분석의 주요 접근법

물-에너지-생태계 넥서스를 분석할 때 사용되는 주요 방법들로 본 연구진들은 아래의 방법을 지향하고 있다.

- 시스템 다이내믹스 (System Dynamics): 물, 에너지, 생태계의 상호작용을 시간에 따른 변화를 모델링하는 방법으로, 각 자원 간의 피드백 루프를 분석하고 미래의 변화를 예측할 수 있는 장점이 있다. 현재 도시물순환 넥서스 모델의 기본 방법적인 접근방식이 되고, 향후 확장성에 있어서도 이러한 방법을 기반으로 발전시키는 것이 올바른 방법으로 예상하고 있다.
- 통합 모델링 (Integrated Modeling): 물, 에너지, 생태계 간의 상호작용을 포괄적으로 모델링하는 접근법이다. 예를 들어, 물의 흐름, 에너지 생산, 생태계의 변화를 동시에 고려한 모델을 구축하여 정책 결정을 지원하는 데에 사용된다.

다목적 최적화 (Multi-objective Optimization): 다양한 자원을 최적화하는 모델을 개발하여 물, 에너지, 생태계의 상충하는 목표를 동시에 고려하는 방법이다. 최근에는 디지털 기술이 발전함에 따라, 이러한 넥서스 기법을 디지털 트윈에도 시도하려는 컨셉들이 등장하고 있으며, 앞으로 가능할 것으로 예상된다. 디지털 트윈(Digital Twin) 기술을 넥서스(Nexus) 관점에 적용한 사례는 물, 에너지, 식량, 생태계 자원 간의 복잡한 상호작용을 보다 효율적으로 관리하고 최적화하기 위해 점차 증가하고 있다. 디지털 트윈은 물리적 시스템의 디지털 복제본을 만들어 실시간 데이터, 시뮬레이션, 분석을 통해 자원 소비 및 시스템 동작을 모니터링하고 예측할 수 있게 해주는 기술로, 자원 관리, 도시 인프라, 기후변화 대응 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 넥서스 관점에서도 매우 유용하게 적용될 수 있다.

가. 디지털 트윈과 넥서스의 통합

디지털 트윈을 물-에너지-생태계 넥서스에 적용하는 경우, 세 가지 자원(물, 에너지, 생태계) 간의 상호작용을 실시간으로 모니터링하고 분석하여 효율적인 자원 관리 및 최적화를 추구하는 목표를 가집니다. 디지털 트윈은 실시간 데이터(센서, IoT 기기 등)와 예측 모델을 결합하여 물리적 시스템의 상태를 시뮬레이션하고, 이를 통해 자원의 흐름과 사용을 모니터링할 수 있는 장점이 있다.

나. 디지털 트윈 넥서스 적용 사례

(1) 스마트시티 및 도시 물-에너지-생태계 관리

스마트시티에서는 디지털 트윈 기술을 활용해 도시 내 물과 에너지 자원의 흐름을

실시간으로 모니터링하고, 이를 기반으로 다양한 자원을 최적화하는 사례가 늘고 있다.

- 시스템 통합 관리: 도시에서 물, 에너지, 교통, 공기질 등 다양한 시스템을 디지털 트윈을 통해 통합 관리하는 시스템을 구축하고 있다. 예를 들어, 디지털 트윈 모델을 사용하여 도시의 물 공급 시스템과 에너지 소비 패턴을 분석하고, 이를 통해 물 사용량을 최적화하면서 동시에 에너지 소비를 줄이는 전략을 세울 수 있다.
- 에너지와 물 소비 최적화: 도시 내 대규모 관개 시스템, 물 펌프, 난방/냉방 시스템 등의 에너지 소비를 실시간으로 분석하여, 에너지 소비를 줄이고 물 낭비를 방지할 수 있다. 예를 들어, 특정 시간대나 날씨 조건에 맞춰 물과 에너지를 효율적으로 분배하는 방법을 제시한다. 또한, 센서 데이터를 통해 물의 소비 패턴을 실시간으로 모니터링하고, 이에 따른 에너지 사용량을 최적화하는 시스템을 구축한다.
- 예시: 싱가포르의 Smart Nation 프로젝트에서는 디지털 트윈을 활용하여 도시의 물, 에너지, 교통 등의 데이터를 통합 관리하고 있다. 물의 소비 및 에너지의 효율적인 사용을 목표로 하여, 도시 내 자원 흐름을 실시간으로 모니터링하고 예측할 수 있는 시스템을 개발하였다.

(2) 농업의 물-에너지-생태계 넥서스 관리

농업 분야에서도 디지털 트윈 기술을 적용하여 물, 에너지, 생태계 자원을 통합적으로 관리하는 시스템이 발전하고 있다. 디지털 트윈을 이용하여 농업 생산성과 자원 효율성을 높이고, 환경 영향을 최소화할 수 있다.

- 정밀 농업: 디지털 트윈을 활용하여 농장의 물과 에너지 사용을 최적화하고, 그로 인한 생태계 영향을 최소화하는 전략을 취한다. 예를 들어, 농업용 관개 시스템에 디지털 트윈을 적용하여 물 소비를 실시간으로 분석하고, 기후변화나 날씨 패턴에 맞춰 물을 최적화한다. 또한, 비료나 농약의 사용도 디지털 트윈을 통해 예측하고 최적화할 수 있다.
- 에너지와 물 관리의 최적화: 농업에서 사용하는 대규모 에너지와 물 자원을 디지털 트윈을 통해 예측하고, 이들을 상호 연결하여 효율적으로 관리할 수 있다. 예를 들어, 태양광 패널이나 풍력 발전을 사용한 농업용 에너지 생산을 디지털 트윈으로 관리하여, 에너지 소비를 줄이고 지속 가능한 농업을 실현할 수 있다.
- 예시: 스페인의 디지털 농업 프로젝트에서는 디지털 트윈 기술을 사용하여 농업용 물 관리 시스템을 최적화하고 있다. 이 시스템은 농작물의 물 소비 패턴, 기상 데이터, 토양 수분 상태를 실시간으로 모니터링하고, 최적의 관개 시점과 수량을 자동으로 조정할 수 있다.

(3) 기후변화 및 환경 보호

디지털 트윈은 기후변화가 물, 에너지, 생태계에 미치는 영향을 예측하고 이에 대응하는 방법을 제시하는 데도 활용된다.

- 기후변화 시나리오 분석: 디지털 트윈 모델은 기후변화가 물 자원, 에너지 생산, 생태계에 미치는 영향을 예측하는 데 활용된다. 예를 들어, 강수량 변화, 온도 상승, 극단적인 기후 사건(가뭄, 홍수 등)이 물의 가용성에 미치는 영향을 시뮬레이션하여, 이를 기반으로 에너지 소비 패턴을 조정하고, 자연 생태계의 피해를 최소화할 수 있다.
- 생태계 변화 대응: 디지털 트윈을 통해 특정 생태계(예: 해양, 호수, 숲 등)의 변화 과정을 시뮬레이션하고, 기후변화나 인간 활동이 생태계에 미치는 영향을 예측하여 이에 대응하는 정책을 수립할 수 있다. 이를 통해 생물 다양성 감소나 서식지 파괴를 방지하는 데 중요한 정보를 제공할 수 있다.
- 예시: 네덜란드의 Delta Program에서는 디지털 트윈을 사용하여 기후변화가 해수면 상승에 미치는 영향을 분석하고, 이에 대응하는 방안을 모색하고 있다. 디지털 트윈은 물리적 모델과 환경 데이터를 결합하여, 해양 생태계 및 도시 인프라에 대한 영향을 예측하고 이에 맞는 적응 전략을 개발하는 데 도움을 준다.

다. 디지털 트윈 넥서스 적용의 이점

디지털 트윈을 물-에너지-생태계 넥서스에 적용하면 다음과 같은 이점이 있다.

- 실시간 모니터링 및 예측: 디지털 트윈은 다양한 자원의 흐름과 사용 상태를 실시간으로 모니터링하고, 이를 통해 자원의 효율적인 관리와 최적화를 가능하게 한다. 예를 들어, 물과 에너지의 소비 패턴을 실시간으로 추적하고, 예측 분석을 통해 필요한 조치를 취할 수 있다.
- 시나리오 분석과 최적화: 다양한 환경 변화나 정책 변화에 대한 시나리오를 분석할 수 있으며, 이를 통해 더 나은 자원 배분 전략을 개발할 수 있다.
- 지속 가능한 자원 관리: 물과 에너지 자원의 효율적인 관리를 통해 자원 낭비를 줄이고, 환경적 영향을 최소화할 수 있다. 또한, 생태계와의 상호작용을 고려한 관리 방안을 제시하여 지속 가능한 발전을 도울 수 있다.
- 위기 대응 및 적응력 향상: 자연 재해나 극단적인 기후변화에 대한 대응을 더

효과적으로 할 수 있다. 디지털 트윈을 통해 이러한 위기의 영향을 미리 분석하고, 그에 맞는 대응책을 마련할 수 있다.

4.2 결론 및 전략방향

물-에너지-생태계 넥서스 분석은 자원 간의 상호의존성을 고려하여 지속 가능한 발전과 자원 관리 전략을 수립하는 데 중요한 역할을 한다. 이러한 분석을 통해 우리는 물, 에너지, 생태계가 어떻게 상호작용하고, 한 가지 자원에 대한 변화가 다른 자원에 어떤 영향을 미치는지를 이해할 수 있다. 이를 기반으로 보다 효율적이고 환경적으로 지속 가능한 정책을 설계하는 데에 큰 도움을 줄 수 있다.

도시 물 사용량과 에너지 소비의 관계를 머신러닝을 통해 분석하는 연구는 자원 관리의 효율성을 높이고, 지속 가능한 도시 개발을 위한 중요한 도전 과제이다. 머신러닝을 활용하면 두 자원 간의 상호작용을 보다 정교하게 모델링하고, 예측하여 효율적인 자원 분배와 정책 설계에 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 머신러닝 기법을 통해 도시 환경의 복잡한 데이터 패턴을 이해하고, 이를 바탕으로 지속 가능한 발전을 위한 실질적인 해결책을 제시하는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

마지막으로 최근의 트렌드인 디지털 트윈은 물-에너지-생태계 넥서스를 분석하고 관리하는 데 중요한 도구로 자리잡고 있다. 이 기술을 활용하면 자원 간의 상호작용을 실시간으로 모니터링하고, 최적화하며, 환경적 영향을 최소화하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 디지털 트윈 기반의 넥서스 분석은 스마트시티, 농업, 기후변화 대응 등 다양한 분야에서 지속 가능한 발전을 위한 혁신적인 솔루션을 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 지속적이고 발전적인 넥서스 연구는 글로벌 물안보 향상에 있어서 i-WSSM의 국내외 인지도 및 영향력을 향상시키고, 유네스코 IHP 전략강화에 이바지할 수 있을 뿐만 아니라, 궁극적으로 국제연합(UN)의 SDG 달성 이행에도 크게 도움이 된다.

Appendix

A.1 사용된 R Code

```
require(kohonen)
require(RColorBrewer)

library(RCurl)
library(writexl)
library(readxl)

NEXUS <- read.csv("NEXUS2.csv")
colnames(NEXUS)
NEXUS.measures1 <-
c("WHR", "GWR", "GWL", "EL_CON", "EL_WT", "EL_TD", "EL_WWT", "WF", "EC", "CF")

# seed
set.seed(17)
NEXUS.SOM1 <- som(scale(NEXUS[NEXUS.measures1]), grid = somgrid(6, 8,
"hexagonal"))
plot(NEXUS.SOM1)
colors <- function(n, alpha = 1) {
  rev(heat.colors(n, alpha))
}

plot(NEXUS.SOM1, type = "counts", palette.name = colors, heatkey= TRUE)
par(mfrow= c(1, 1))
plot(NEXUS.SOM1, type = "dist.neighbours", palette.name = terrain.colors)
par(mfrow= c(1, 2))
plot(NEXUS.SOM1, type = "mapping", pchs= 20, main = "Mapping Type SOM")
plot(NEXUS.SOM1, main = "Default SOM Plot")
par(mfrow= c(1, 2))
plot(NEXUS.SOM1, type = "mapping", pchs= 20, main = "Mapping Type SOM")
plot(NEXUS.SOM1, main = "Default SOM Plot")

hc<- cutree(hclust(dist(NEXUS.SOM1$codes[[1]])), k=4)
add.cluster.boundaries(NEXUS.SOM1, hc)
```

```
# Plot by parameter (e.g., whr, gwr, etc.)
par(mfrow= c(1, 1))
plot(NEXUS.SOM1, type = "property", property = getCodes(NEXUS.SOM1)[1],
palette.name = colors, main = "WHR Plot", col = "azure")
add.cluster.boundaries(NEXUS.SOM1, hc)
```

참 고 문 헌

- 유네스코 물 안보 국제연구교육센터(i-WSSM). (2020). 도시 물순환 시스템 물손실 관리를 위한 물-에너지-환경 넥서스 연구: 물-에너지-토지연계 전략수립을 위한 공동연구.
- 유네스코 물 안보 국제연구교육센터(i-WSSM). (2021). 물-에너지-환경 넥서스 연구(2차년도): 도시 여건, 외부영향 및 운영관리 효율이 도시 물순환 시스템에 미치는 영향.
- Babel, M. S., Shrestha, A., Anusart, K., & Shinde, V. (2021). Evaluating the potential for conserving water and energy in the water supply system of Bangkok. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102857.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102857>
- Ballina Shire Council Water and Recycled Water Services - Urban Water Cycle. (n.d.).
<https://www.ballinawater.com.au/general-information/urban-water-cycle.html>
- Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., & Sadiq, R. (2017). Water - Energy - Carbon Nexus Modeling for Urban Water Systems: System Dynamics Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(6), 04017016.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000765](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000765)
- Duan, C., & Chen, B. (2016). Energy-water-carbon Nexus at Urban Scale. *Energy Procedia*, 104, 183-190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.032>
- Fang, D., & Chen, B. (2018). Linkage analysis for water-carbon nexus in China. *Applied Energy*, 225, 682-695.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.058>
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Pegasus Communications.
- Forrester, J. W. (1968). *Principles of systems* (2nd ed.). Pegasus Communications.
- Paraschiv, S., Paraschiv, L. S., & Serban, A. (2023). An overview of energy intensity of drinking water production and wastewater treatment. *Energy Reports*, 9, 118-123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.074>

Pease, C. (2018, September 11). An Overview of Monte Carlo Methods - Towards Data Science. Medium.

<https://towardsdatascience.com/an-overview-of-monte-carlo-methods-675384eb1694>

Peeters, L., Baçao, F., Lobo, V., & Dassargues, A. (2007). Exploratory data analysis and clustering of multivariate spatial hydrogeological data by means of GEO3DSOM, a variant of Kohonen's Self-Organizing Map. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), 1309-1321.

Venkatesh, G., Chan, A., & Brattebø, H. (2014). Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: Comparison of four city case studies and the relevant influencing factors. *Energy*, 75, 153-166.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.111>

Quantpedia. (2022, May 30). Introduction and Examples of Monte Carlo Strategy Simulation - QuantPedia. QuantPedia - The Encyclopedia of Algorithmic and Quantitative Trading Strategies.

<https://quantpedia.com/introduction-and-examples-of-monte-carlo-strategy-simulation/>

Qi, C., & Chang, N.-B. (2011). System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts. *Journal of environmental management*, 92(6), 1628-1641.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.020>

Samad, T., & Harp, S. A. (1992). Self - organization with partial data. *Network: Computation in Neural Systems*, 3(2), 205-212.

https://doi.org/https://doi.org/10.1088/0954-898X_3_2_008