

도시 물순환 시스템 물손실 관리를 위한 물-에너지-환경 넥서스 연구

물-에너지-토지연계 전략수립을 위한 공동연구

2020. 12



도시 물순환 시스템 물손실 관리를 위한 물-에너지-환경 넥서스 연구

Assessing Water-Energy-Environment Nexus
for Water Loss Control in Urban Water System

물-에너지-토지연계 전략수립을 위한 공동연구

2020. 12



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



International Centre for
Water Security and
Sustainable Management

제 출 문

이 보고서를 2020년도 UNESCO i-WSSM에서 수행한 “도시 물순환 시스템의 물손실 관리를 위한 물-에너지-환경 넥서스 연구 (물-에너지-토지 연계 전략수립을 위한 국제 공동 연구)”의 연구보고서로 제출합니다.

2020. 12. 31

연구책임자 : UNESCO i-WSSM
연구수행자 : UNESCO i-WSSM

팀 장 신 은 허
전 문 관 최 서 형

요 약 문

1. 연구제목

도시 물순환 시스템 물손실 관리를 위한 물-에너지-환경 넥서스 연구 (1차년도)

2. 연구기간

2020. 5. 1 ~ 2020. 12. 31

3. 연구목적

본 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 한다. 이를 위해 다음과 같은 세부 연구 목표를 수립하였다.

- (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

4. 연구내용

가. 적용 사례 조사

- 넥서스 범위, 적용 방법론, 지리적 스케일, 분석 목적에 따른 기존의 넥서스 분석 사례를 검토
- Nexus 범위: 물, 에너지, 식량, 토지이용, 기후, 생태계
- 적용 방법론: 학문(disciplinary), 분석 접근법(analysis approach), S/W, 툴, 모형
- 지리적 스케일: 전세계 범위(global level), 다국가 간 범위(transboundary level), 국가 범위(national level), 지역 범위(regional level), 도시 범위(city level), 가정 범위(household level)
- 분석목적: 이해(understanding), 방향제시(governing), 정책제시(implementing)

나. 평가기법 검토

- 사회과학, 경제, 환경관리, 시스템 분석, 통계, 물리적 모델 및 통합 모델 부문에서

- 정성적 또는 정량적인 평가기법을 평가하여 본 연구에 적합한 평가기법을 도출
- 사회과학: questionnaire survey, ontology engineering 등
 - 경제: input output analysis, computable general equilibrium model, econometric model 등
 - 환경관리: Benefit-cost analysis, life cycle assessment 등
 - 시스템 분석: System dynamics model
 - 통계: Statistical application
 - 물리적 모델: Physical modeling

다. 모델 구축 및 분석

- 도시 물공급 시스템의 도시 물순환 에너지 인텐시티 현황과 물손실 현황(누수율 및 구성요소(실손실, 명목손실)의 비율)에 따른 최적의 물손실 관리 전략 도출을 위한 시스템 다이내믹스 모델 개발
- 물, 에너지, 환경 부문 적합 지표 선정, 시나리오 분석 및 넥서스 부문 간 이동량 분석

5. 연구결과

가. 적용사례 조사

넥서스는 물, 에너지, 식량, 토지, 기후, 및 환경 등의 부문 간 연관성과 상호의존성을 나타내며, 이러한 상호의존성은 최근에 학계와 정책결정자들에게 많은 관심을 받고 있다. 넥서스 관점의 도입으로 각각의 부문별로 자원을 관리하는 기존의 정책 결정 체계의 한계를 극복하고, 관련 있는 부문 간의 시너지와 트레이드오프를 고려한 지속가능한 발전을 위한 의사 결정이 가능하게 되었다.

기존의 넥서스 연구는 범위(물, 에너지, 식량, 토지이용, 기후, 생태계 등), 방법론(학문, 분석 접근법, S/W, 틀, 모형 기반), 지리적 스케일(전 세계, 다국가 간, 국가, 지역, 도시, 가정 범위) 및 분석 목적(이해, 방향 제시, 정책제시)에 따라 다양한 형태의 연구가 이루어지고 있다. 그중 물-에너지 넥서스, 물-에너지-환경 넥서스, 물-에너지-식량 넥서스 및 물-에너지-토지-기후 넥서스와 같이 물을 핵심요소로 하는 넥서스 모델이 주를 이루고 있다. 그리고 전 세계, 다국가, 국가 또는 지역 범위에서 자원의 사용, 이동 및 상관관계의 거시적 분석을 통해 넥서스를 이해하는 연구가 초창기에 주로 제시되었고, 점차 도시 또는 가정 수준의 미시적인 분석을 통해 구체적인 넥서스 관점의 정책을 제시하고자 하는 연구들이 늘어나고 있는 추세이다.

나. 평가기법 검토

사회과학 분야 (questionnaire survey, ontology engineering 등), 경제 분야(input output analysis, computable general equilibrium model, econometric model 등) 환경 분야 (Benefit-cost analysis, life cycle assessment 등), 시스템 분야 (System dynamics model),

통계 분야(Statistical application)의 다양한 방법론들이 현재 넥서스 연구에 적용되고 있다. 연구자들은 넥서스 연구 목적 및 방법론들의 장·단점을 고려하여 해당 연구에 적합한 방법론을 선택·적용하여 분석을 수행하고 있으며, 하나의 방법론 또는 통합된 방법론 기반의 범용적인 넥서스 분석 방법을 제시하는 것은 어려운 실정이다. 본 연구에서는 도시 물순환 시스템의 연구 목적, 범위, 자료 취득 가능성 및 상호 연관성 등을 고려하여 시스템 개념과 역학 모델에 기초하여 맥락을 형상화할 수 있는 시스템 다이내믹스 기법을 분석 방법론으로 선택하였다.

다. 모델 개발 및 분석

수도사업자의 물손실 관리 전략 수립을 위한 도시 물순환 시스템의 물-에너지-환경 넥서스 모델은 기존의 도시 물순환 시스템 다이내믹스 모델과 물순환 과정에서 높은 에너지 인텐시티를 나타내는 과정을 검토하여 개발하였다. 부문 간 자원의 이동 및 사용량을 정량화하기 위하여 물, 에너지, 환경 지표로 각각 물발자국(water footprint), 총 에너지 사용량(total energy use) 및 탄소발자국(carbon footprint)을 적용하였다.

개발된 모델을 활용하여 3개의 도시 에너지 인텐시티 현황 (낮음, 보통, 높음)과 4개의 물손실 현황(낮은 물손실, 높은 물손실-낮은 명목손실비, 높은 물손실-보통 명목손실비, 높은 물손실-높은 명목손실비)을 고려한 12개의 시나리오 분석을 통해 수도사업자의 물손실 관리를 위한 전략 수립 및 각 시나리오별 넥서스 부문 간의 자원 이동량에 대하여 분석을 수행하였다. 그 결과 기존의 수도사업자는 경제적인 측면 중심의 의사결정과정에서는 높은 물손실-높은 명목손실의 경우가 물손실 관리 전략 수립 및 적용의 우선순위였으나, 넥서스 관점에서는 높은 물손실-낮은 명목손실의 경우를 우선적으로 고려하여야 함을 알 수 있었다. 또한, 수도사업자는 지속 가능한 도시 물순환 시스템을 위하여 도시의 단위 물공급 에너지 인텐시티 또한 지속가능한 물손실 관리 전략을 위해 사전적으로 분석해야 하는 항목으로 고려해야 한다.

높은 도시 에너지 인텐시티의 높은 물손실-낮은 명목손실비의 시나리오에서(S 3-1) 도시 물순환 과정에서 적합한 물손실 관리 프로그램의 적용을 통해 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국의 발생량은 각각 27%, 22%, 22%가 감소하였다. 전체 도시 물순환 과정에서 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수 과정에서 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국이 약 28% 정도 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 용수 사용, 하수처리 및 방류 과정에서는 약간의 증가가 발생 되었다.

이와 같은 도시 물순환의 물-에너지-환경 넥서스 모델을 적용하여, 도시 물순환 과정에서 물, 에너지, 환경 간의 자원의 사용량 및 이동량의 정량적인 산정이 가능하였다. 또한 개발된 모델의 적용을 통해 수도사업자는 기존의 경제성만 고려한 물손실 관리 전략의 수립에서, 지속가능한 도시 물순환 시스템을 위한 넥서스 관점에서 물손실 관리 전략을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

S U M M A R Y

1. Project Title/Subtitle

Assessing Water-Energy-Environment Nexus for Water Loss Control in Urban Water System

2. Research Period

2020. 5. 1 ~ 2020. 12. 31

3. Objectives of Research

This study aims to achieve an optimal water loss management strategy by applying System Dynamics (SD) model to build a water-energy-environment Nexus model for Urban Water System (UWS) and analyzing the resource consumption and transfer between water, energy, and environment sector. The detailed research objectives were established:

- (review) Literature review of Nexus application and case studies
- (evaluation) Reviewing the recent Nexus application of existing methodologies and analytical approaches for analysis of UWS
- (model development & analysis) Building and analyzing water-energy-environment Nexus models of UWS

4. Content, Scope and Method of Research

(1) Review on Nexus application

- Literature review on Nexus application by methodology, spatial scale, and study objective
- Nexus level: water, energy, food, land use, climate, ecosystem
- Methodology: disciplinary, analysis approach, SW, tool, model
- Spatial scale: global level, transboundary level, national level, regional level, city level, household level
- Research objective: understanding, governing, implementing

(2) Evaluation of existing methodologies

- Selecting an appropriate methodology by evaluating social, economy, environmental, system analysis, statistics, physical model and integrated model
- Social science: Questionnaire survey, ontology engineering, etc.
- Economy: input output analysis, computable general equilibrium model, econometric model, etc.
- Environment management: Benefit-cost analysis, life cycle assessment, etc.
- System analysis: System dynamics model

- Statistics: Statistical application
- Physical model: Physical modeling

(3) Model development & analysis

- The optimal water loss management strategy by proportion of water leakage rate and component (real loss, apparent loss) of urban water supply system is derived with water, energy, environment indices and applying multiple scenarios

5. Research Results

(1) Review on Nexus applications

Nexus represents interconnections and interdependencies among sectors such as water, energy, food, land use, climate, and the environment, and these interdependencies have recently attracted much attention from academia and policy-makers. This enables more reasonable decision-making considering synergies and trade-offs between various sectors.

Existing Nexus studies have varied forms of research depending on scope (water, energy, food, land use, climate, ecosystem), methodology (disciplinary, system analysis, SW, tools, model-based), spatial scales (global, transboundary, regional, city level, household level) and objectives of study (understanding, governing, implementing). Among them, water acts as a main component of water-energy Nexus, water-energy-environment Nexus, water-energy-food Nexus, and water-energy-land use-climate Nexus. In addition, Nexus studies analyze macro consumption, correlation, and movement of resources is suggested in global, transboundary, national, regional level. Studies in micro level, city and household level are increasing to support in policy analysis and strategies.

(2) Evaluation of existing methodologies

Nexus is widely applied in various sectors like social sector (Questionnaire survey, ontology engineering), economy sector (input output analysis, computable general equilibrium model, econometric model) environment sector (Benefit-cost analysis, life cycle assessment), system sector (system dynamics model), statistics sector (statistical application). Although various methodologies and systems are applied to Nexus research depending on the advantages of each methodology, but it is limited to present an integrated analysis in the Nexus perspective. In this study, system dynamics is selected to use to shape context based on its concepts and dynamics, considering the objectives, scope, data availability, and correlation of urban water systems.

(3) Model development & analysis

The water-energy-environment Nexus model for the analysis of urban water systems for the

establishment of water loss management strategies was developed including the existing urban water system dynamics model and the process of high energy intensity in water circulation. Water, energy, and environmental indices are considered as water footprint, total energy use, and carbon footprint in order to quantify the movement and consumption of resources on each sectors.

Using the developed model, 12 scenario were applied by considering the status of three urban energy intensities and four water loss conditions. As a result, it was shown that high water loss-high nominal loss was a priority for the establishment and application of water loss management strategies, but from the Nexus perspective, high water loss-low nominal loss should be considered first. In addition, water supply operators are needed to analyze the city's unit water supply energy intensity for sustainable urban water systems in advance for water loss management strategies.

In the scenario of high water loss-low nominal loss ratio of high urban energy intensity (S3-1), the application of a suitable water loss management program during the urban water cycle resulted in a reduction of 27%, 22%, and 22%, respectively. During the entire urban water circulation process, water footprint in water abstraction, water treatment, water distribution, total energy usage, and carbon footprint decreased significantly by 28%, and a slight increase occurred during the end use, wastewater treatment, and discharge process.

This urban water system water-energy-environment Nexus model allows quantitative analysis of the consumption and movement of resources between water, energy and the environment, and is expected to enable water conservation strategies for sustainable urban water circulation systems.

목 차

제 출 문	i
요 약 문	ii
목 차	viii
표 목 차	ix
그림목차	x
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	2
1.3 연구내용 및 범위	2
제 2 장 본 론	4
2.1 넥서스 적용 사례	4
2.1.1 넥서스 정의	4
2.1.2 넥서스 분석 접근법	5
2.1.3 물-에너지-환경 넥서스간 주요 연결관계	6
2.1.4 넥서스 평가 지표	11
2.1.5 넥서스 연구 사례	15
2.2 넥서스 분석 방법론	22
2.2.1 현황 및 문제점	22
2.2.2 넥서스 분석 형태	23
2.2.3 방법론	27
2.3 도시 물순환 시스템 물-에너지-환경 넥서스	33
2.3.1 도시 물순환 시스템	33
2.3.2 도시 물순환 시스템이 에너지와 환경에 미치는 영향	35
2.3.3 도시 물순환 분석을 위한 시스템 다이내믹스	37
2.3.4 도시 물순환 시스템 다이내믹스 연구 사례	39
2.4 도시 물순환 물-에너지-환경 넥서스 모델 구축	45

2.4.1	모델 구축 방향	45
2.4.2	시스템 구성 요소 : 도시 물순환 시스템 시스템 다이내믹스 모델	46
2.4.3	시스템 구성 요소 : 에너지 인텐시티, CO ₂ equivalent	48
2.4.4	물손실 관리	59
2.4.5	모델 구축 및 검·보정	63
2.5	도시 물순환 물-에너지-환경 넥서스 모델 분석	68
2.5.1	시나리오	68
2.5.2	시나리오 분석 결과	73
2.5.3	공급과정별 발생량 및 부문 간 이동량	84
제 3 장	결 론	95

표 목 차

[표 2. 1] 자원 분류별 정의	6
[표 2. 2] 물 지수별 정의 및 특성	11
[표 2. 3] 에너지 지수 정의 및 특성	13
[표 2. 4] 환경 지수 정의 및 특성	14
[표 2. 5] 넥서스 연구 종류 및 수준	25
[표 2. 6] 넥서스 영향 분석	25
[표 2. 7] 넥서스 적용 방법론	27
[표 2. 8] 넥서스 적용 방법론별 정의 및 장단점	28
[표 2. 9] 도시 물순환 시스템 물-에너지-환경 넥서스 모델 구축 방향	45
[표 2. 10] 기존연구별 도시 물순환 시스템 다이나믹 모델의 인과관계 구성	47
[표 2. 11] 도시 물순환 공정별 에너지 인텐시티 값의 범위	48
[표 2. 12] 취수 과정에 에너지 인텐시티	51
[표 2. 13] 도.송수 과정에 에너지 인텐시티	51
[표 2. 14] 지역 및 위치별 정수처리 과정의 에너지 인텐시티 및 CO ₂ eq.	52
[표 2. 15] 세부 공정별 정수처리 과정의 에너지 인텐시티	53
[표 2. 16] 담수화 적용 기술별 에너지 인텐시티	54
[표 2. 17] 용수 사용 목적별 에너지 인텐시티	55
[표 2. 18] 지역 및 위치별 하수처리 과정의 에너지 인텐시티 및 CO ₂ eq.	56
[표 2. 19] 폐수처리 공정별 에너지 사용량 (Wakeel et al., 2016)	57
[표 2. 20] 모델 구성 변수, 관계식 및 단위	66
[표 2. 21] 시뮬레이션 시나리오	70
[표 2. 22] 물순환 에너지 인텐시티에 따른 도시의 분류	70
[표 2. 23] 누수율 및 명목손실에 따른 도시의 분류	71
[표 2. 24] 시간에 따른 시나리오별 물발자국	81
[표 2. 25] 시간에 따른 시나리오별 총 에너지 사용량	82
[표 2. 26] 시간에 따른 시나리오별 탄소발자국	83
[표 2. 27] S 3-1 시나리오에서 구성요소별 물발자국	86
[표 2. 28] S 3-1 시나리오에서 구성요소별 총 에너지 사용량	86
[표 2. 29] S 3-1 시나리오에서 구성요소별 탄소발자국	87
[표 2. 30] S 3-1 시나리오, 초기(t=0 month)에 도시물순환 공정별 물발자국 발생량	88
[표 2. 31] S 3-1 시나리오, 초기(t=0 month)에 도시물순환 공정별 에너지 소모량	88
[표 2. 32] S 3-1 시나리오, 초기(0번째 달)에 도시물순환 공정별 탄소발자국 발생량	88
[표 2. 33] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61 month)에 도시물순환 공정별 물발자국 발생량	91
[표 2. 34] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61 month)에 도시물순환 공정별 에너지 소모량	91
[표 2. 35] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61 month)에 도시물순환 공정별 탄소발자국 발생량	91

그 립 목 차

[그림 1. 1] 강건한 물-에너지-식량 넥서스 정량화를 위한 방법론적 지원, 도전과제 및 기회	1
[그림 2. 1] 물-에너지-식량 상호연관성	7
[그림 2. 2] 물-에너지-식량 상호연관성	7
[그림 2. 3] ELS 달성을 위해 필요한 내부 및 외부 요인	8
[그림 2. 4] 물-에너지-식량 넥서스	8
[그림 2. 5] 물-에너지-식량 안보 넥서스	9
[그림 2. 6] 히말라야와 남아시아 물-에너지-식량 넥서스 접근법	9
[그림 2. 7] 넥서스 평가를 위한 식량농업기구 요소	10
[그림 2. 8] ELS와 물-에너지-식량 넥서스 결합 개념도	10
[그림 2. 9] 가상수와 물 발자국 계산 과정	11
[그림 2. 10] 에너지 생산을 위한 물 인텐시티	12
[그림 2. 11] 평균 물 발자국	12
[그림 2. 12] 수원별 용수 처리별 에너지 인텐시티	13
[그림 2. 13] 폐수처리를 위한 에너지 인텐시티	13
[그림 2. 14] 식량 생산을 위한 에너지 및 CE	14
[그림 2. 15] 목적, 모델 타입, 수준에 따른 거시적 넥서스 방법론	15
[그림 2. 16] 시공간 스케일에 따른 관계도	22
[그림 2. 17] 거시적 수준의 넥서스 연구 주요 분야 도식도	23
[그림 2. 18] 거시적 및 미시적 넥서스 연구 체계도	24
[그림 2. 19] 물-에너지-식량 넥서스 외부 요인 분류	26
[그림 2. 20] 도시 물순환 주요 단계	33
[그림 2. 21] 도시 물순환 개념도	34
[그림 2. 22] 물과 에너지 사용량 (좌 : 에너지 부문에서 물 사용량, 우 : 물 부문에서 에너지 사용량)	35
[그림 2. 23] 물 및 에너지 시스템별 총 탄소 배출량	36
[그림 2. 24] 넥서스 방법론 요약	37
[그림 2. 25] 도시 물순환 물-에너지-탄소 넥서스 인과 관계도	39
[그림 2. 26] 물-에너지-탄소 하위모델별 다이어그램	40
[그림 2. 27] 도시수계 단계별 연간 직접 물, 에너지 사용량 및 온실가스 배출량	40
[그림 2. 28] 시나리오 1 대비 연평균 물발자국, 에너지 사용량, 탄소 배출량 변화	41
[그림 2. 29] 타브리즈 시스템 다이내믹스 다이어그램	42
[그림 2. 30] 타브리즈 물관리별 누적 물 부족량	43
[그림 2. 31] 영국 도시 물-에너지 넥서스 다이어그램	43
[그림 2. 32] 민감도 분석 : 모수값 +10%(+), -10%(-) 변동성에 대한 인구당 물 소비량 분석	44
[그림 2. 33] 민감도 분석 : 모수값 +10%(+), -10%(-) 변동성에 대한 누수율 분석	44
[그림 2. 34] 물과 에너지 부문의 관계	45
[그림 2. 35] 도시 물순환 시스템 개념도	46
[그림 2. 36] 간소화된 도시 물-에너지-탄소 넥서스	46

[그림 2. 37] 도시 물순환에서 사용되는 에너지 인텐시티 값 범위	50
[그림 2. 38] 정수처리 세부 공정별 에너지 인텐시티	53
[그림 2. 39] 지역별 배·급수 과정의 인텐시티	54
[그림 2. 40] 하수처리 과정	57
[그림 2. 41] 특정 하수처리 공정별 에너지 인텐시티 비교	58
[그림 2. 42] 잘못된 누수 관리로 인한 부정적인 영향	59
[그림 2. 43] 실손실 분류	59
[그림 2. 44] 위치에 따른 실손실 분류	60
[그림 2. 45] 크기와 누수시간에 따른 실손실 분류	60
[그림 2. 46] 명목손실 분류	61
[그림 2. 47] 누수 관리 프로그램 과정	61
[그림 2. 48] 명목손실 감축을 위한 경제적 균형	62
[그림 2. 49] 누수량 재정 분배 예시	62
[그림 2. 50] 도시 물순환 과정별 에너지 인텐시티 범위	63
[그림 2. 51] 도시물관리 모델 인과관계	64
[그림 2. 52] 도시물관리 모델 인과관계도	65
[그림 2. 53] 개발도상국 워터 유틸리티 NRW 수준 (자료 : IBNET Database)	68
[그림 2. 54] 도시별 물손실 비교	69
[그림 2. 55] 수도사업자의 물손실 관리 전략	69
[그림 2. 56] 물손실 시나리오별 물발자국 및 비율	74
[그림 2. 57] 물손실 시나리오별 총 에너지 사용량 및 비율	74
[그림 2. 58] 물손실 시나리오별 탄소발자국 및 비율	74
[그림 2. 59] 도시 물순환 에너지 인텐시티 시나리오별 물발자국 및 비율	75
[그림 2. 60] 도시 물순환 에너지 인텐시티 시나리오별 총 에너지 사용량 및 비율	75
[그림 2. 61] 도시 물순환 에너지 인텐시티 시나리오별 탄소발자국 및 비율	75
[그림 2. 62] 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 물발자국 변화 (S 1-0, S 1-1, S 1-2, S 1-3)	76
[그림 2. 63] 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 총 사용 에너지 변화 (S 1-0, S 1-1, S 1-2, S 1-3)	76
[그림 2. 64] 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 탄소발자국 변화 (S 1-0, S 1-1, S 1-2, S 1-3)	77
[그림 2. 65] 중간 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 물발자국 변화 (S 2-0, S 2-1, S 2-2, S 2-3)	77
[그림 2. 66] 중간 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 총 사용 에너지 변화 (S 2-0, S 2-1, S 2-2, S 2-3)	78
[그림 2. 67] 중간 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 탄소발자국 변화 (S 2-0, S 2-1, S 2-2, S 2-3)	78
[그림 2. 68] 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 물발자국 변화 (S 3-0, S 3-1, S 3-2, S 3-3)	79
[그림 2. 69] 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 총 에너지 사용량 변화 (S 3-0, S 3-1, S 3-2, S 3-3)	79
[그림 2. 70] 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 탄소발자국 변화	

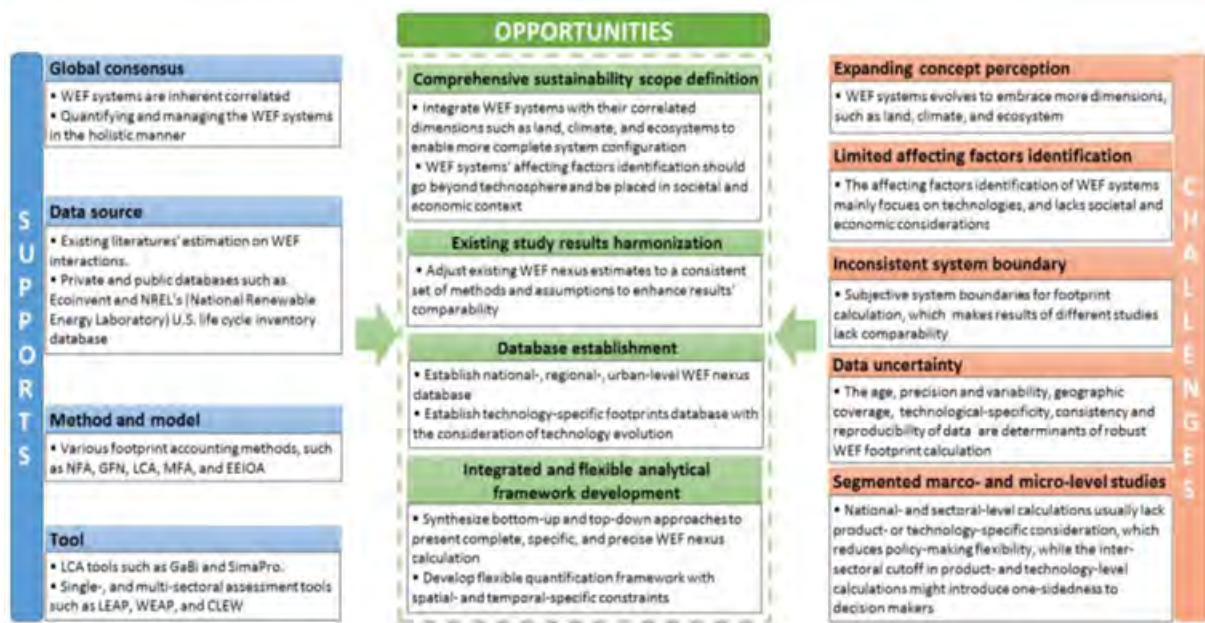
(S 3-0, S 3-1, S 3-2, S 3-3)	80
[그림 2. 71] S 3-1 시나리오, 초기(t=0month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국	89
[그림 2. 72] S 3-1 시나리오, 초기(t=0month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 비율	90
[그림 2. 73] S 3-1 시나리오, 안정화 후 (t=61month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국	92
[그림 2. 74] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 비율	93
[그림 2. 75] S 3-1 시나리오, 초기(t=0month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 부문간 이동량	94
[그림 2. 76] S 3-1 시나리오, 안정화 후 (t=61month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 부문간 이동량	94

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

전 세계는 지금 급격한 인구 증가, 도시화, 생활 패턴 변화, 기후변화, 자원 감소 등으로 인하여 물, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 안보에 큰 위기 초래되고 있다. 더욱더 문제를 어렵게 하는 점은 관련 부문은 다양한 방식으로 서로 영향을 미치며 동일한 자원을 기반으로 하고, 사회·경제적 개발 수요로 비롯된 한정된 자원에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다는 것이다. 천연자원의 지속가능성을 보장하며 동시에 적절한 양의 물, 에너지, 식량을 제공하기 위한 새로운 접근법 필요하며, 부문 간 상호작용 분석이 가능한 넥서스 접근법(nexus approach)은 이에 적합할 것이다. 넥서스 접근법은 서로 다른 목표를 가진 부문간 상호 작용을 정량화하고 평가하는데 용이하고 (Brandi et al., 2013; Weitz et al., 2014; Mohtar, 2016), 부문간 복잡한 관계를 지역적 특성을 반영한 피드백으로 나타내므로 정책 결정과 자원 관리에 효율적으로 활용될 수 있다.

2030 아젠다 달성을 위한 17개 지속 가능 개발목표 (Sustainable Development Goals, SDGs) 중 3개의 목표는 물, 식량, 에너지 부문과 직접적으로 관련이 있다 (UN, 2015). 이와 같은 SDGs 달성을 위해 상호관계 분석이 핵심이라는 점을 감안 할 때, [그림 1. 1]에서와 같이 물, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 넥서스가 SDGs 이행을 위한 중심 역할을 할 수 있는 것은 자명하다.



[그림 1. 1] 강건한 물-에너지-식량 넥서스 정량화를 위한 방법론적 지원, 도전과제 및 기회 출처 : Chang et al. (2016)

기존의 물, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 넥서스 연구는 수자원 연구에서 비롯되었기 때문에 물은 많은 넥서스 연구에서 핵심요소로 간주 된다. 물은 식량과 에너지를 생산하며 인류의 기본 생계를 유지하고 개발을 위한 필수 요소이며, 물 부족과 비균형적인 분배는 물 분야 뿐 아니라 다른 분야에 큰 문제를 야기 한다. 이와 같은 넥서스 접근법은 자원을 다루기 위한 다면적 접근법을 강조하는 통합물관리(Integrated Water Resource Management, IWRM)에서 나타나기도 한다.

현재 넥서스의 각 부문 간의 관계를 정량화하는 범용적인 방법론 부재하며, 모든 상황에 적용할 수 있는 한 가지 접근방식은 찾기 힘들 것이다(Endo et al., 2015; Liu et al., 2017). 넥서스의 정량화 및 평가 목적 틀들은 점차적으로 제시되고 있으나, 구체적인 의사결정을 위한 적용에는 한계가 있다. 또한, 넥서스 모델 분석에 가장 큰 어려운 점은 활용될 가용 데이터가 제한적인 것이다. 원격감지, 지상관측, 모델 결과 등으로부터 도출된 공공영역의 자료가 넥서스 분석의 핵심 자료이며, 현재 지속적인 센서 기술과 원격감지 기술의 발달은 넥서스 안의 연관 관계를 정량화하는데 기여 할 것으로 기대되고 있다. 넥서스 접근에서 정부 구성(수직적)과 부문(수평적)의 조정·통합, 기관 간의 관계와 협력 메커니즘이 성공의 핵심요소이나(Scott, 2017; Weitz et al., 2017), 기존의 고착화 된 정부 기관 구조, 독립된 부문 기반 정책 및 규제로 넥서스 적용이 어려운 실정이다. 그리고 대부분의 넥서스 분석은 국가 단위의 거시적(macro scale) 분석을 통한 정책 결정으로 도시 이하 범위의 넥서스 사례 연구는 많지 않으며, 도시 물순환 시스템에 대한 연구는 부족한 실정이다.

1.2 연구 목적

본 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 한다. 이를 위해 다음과 같은 세부 연구 목표를 수립하였다.

- (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

1.3 연구내용 및 범위

1.2절에서 제시된 연구 목적에 따른 세부 연구 내용 및 범위는 아래와 같다.

- (적용 사례) 넥서스 범위, 적용 방법론, 지리적 스케일, 분석 목적에 따른 기존의 넥서스 분석 사례를 검토한다.
 - Nexus 범위: 물, 에너지, 식량, 토지이용, 기후, 생태계
 - 적용 방법론: 학문(disciplinary), 분석 접근법(analysis approach), S/W, 틀, 모형
 - 지리적 스케일: 전 세계 범위(global level), 다국가 간 범위(transboundary level), 국가 범위(national level), 지역 범위(regional level), 도시 범위(city level), 가정 범위(household level)
 - 분석목적: 이해(understanding), 방향 제시(governing), 정책제시(implementing)
- (평가기법) 사회과학, 경제, 환경관리, 시스템 분석, 통계, 물리적 모델 및 통합 모델과 같은 정성적이고 정량적인 평가기법을 평가하여 본 연구에 적합한 평가기법을 도출 한다.
 - 사회과학: Questionnaire survey, ontology engineering 등
 - 경제: input output analysis, computable general equilibrium model, econometric model 등
 - 환경관리: Benefit-cost analysis, life cycle assessment 등
 - 시스템 분석: System dynamics model
 - 통계: Statistical application
 - 물리적 모델: Physical modeling
- (모델 구축 및 분석) 도시 물공급 시스템의 누수율 및 구성요소(실손실, 명목손실)의 비율별 최적의 물손실 관리 전략 도출하며, 이를 위해 물, 에너지, 환경 지표산정, 시나리오분석 및 넥서스 부문 간 이동량 산정을 수행한다.

제 2 장 본론

2.1 넥서스 적용 사례

2.1.1 넥서스 사고 및 정의

넥서스 개념은 연구자와 적용 분야에 따라 다양한 의미로 사용되며, 넥서스를 정의하기 전 넥서스 사고(NEXUS thinking)에 대해 정립할 필요가 있다.

기존의 물, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 분야 자원관리 의사결정을 위한 프레임워크는 전통적으로 부문별로 독립된 접근방식을 취해왔으며, 상호연계성의 고려가 되지 않았다. 이는 부문과 자원 사이에 복잡한 관계를 잘 나타내지 못할 뿐만 아니라 자원이용에 스트레스를 더할 수 있다 (Pittock et al., 2013). 일 예로 물, 에너지, 농업 분야의 고립된 계획은 의도하지 않은 결과를 초래하고 물, 에너지, 식량 자원 사용량을 증가시켜 생계를 악화시키고 지속 가능한 발전에 큰 방해요소로 작용하기도 한다 (Bizikova et al., 2013).

이러한 단점을 극복하기 위해 각 부문 간의 연관 관계 및 상호의존성을 확하고, 이해·분석하기 위해서 동등한 관점에서 통합적으로 분석할 필요성이 대두되었다. 변화하는 생활 습관 및 소비 패턴과 자원 수요량 증가에 대비하기 위해서 보다 책임감 있고 긴급한 물, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 시스템 관리가 필요하며 (Liu et al., 2017), 복합적인 체계와 의사 결정 지원 도구로서 넥서스는 부문 간의 자원의 이동을 정량화가 가능하여, 보다 합리적인 의사 결정에 이를 수 있게 한다.

이와 같은 넥서스의 주요 목적은 천연자원의 고갈 없이 지속가능한 개발을 이루는 것이며, 이러한 관점은 주된 소요 자원인 물을 중심으로 지속가능성을 인지하는 것에서 시작하였다. 이후 에너지 수요량 증가로 인해 에너지 부문에 대한 인식 제고되었으며, 점차 식량 안보로 확산 되었다.

위에 언급된 관점에서의 논의는 “The Limits to Growth” 보고서(Meadows, 1972)에서 시작되었으며, 인구, 식량, 산업, 오염과 재생 불가능한 천연 자원의 상호작용을 예측하였다.

이후 통합물관리에서 물, 에너지, 식량, 토지 및 환경 부문 간 상호연관성을 고하였으며, 현재 통합물관리는 에너지(수력 발전)와 식량(관개) 수요에 대한 물 배분 균형을 맞추기 위해 여러 국가에서 시행되고 있다. 이러한 통합물관리는 물(수자원)을 핵심 요소로 간주하고 에너지와 식량은 종속 인자로 간주하여 분석하며(FAO, 2014), 각 요소들을 별개의

개별 부문으로 두어, 다른 부문이나 기관을 추가하거나 규모를 확대하여 더 넓은 통합을 수용하기 어려운 실정이다(Hoff, 2011).

몇 세기동안 부문간 상호연관성은 활발히 연구되지 않았으며 2011년 본에서 개최된 ‘The Water, Energy, and Food Security Nexus Solutions for the Green Economy’ 넥서스 학회에서 다시 등장하였다. 본에서 개최된 학회는 물-에너지-식량 넥서스를 국제적 관점에서 고려하게 하였고, Nexus 2014: Water, Food, Climate & Energy 학회에서 세계는 모든 부분이 지속적으로 상호작용하는 단일 복합 시스템이며 기본적인 가치들이 글로벌, 지역, 국가 및 지역 수준에서 시스템 전체를 다루어야 한다는 점에 동의가 이루어졌다 (Dodds & Bartram, 2014).

이와 같은 과정을 통해 여러 연구자들은 서로 다른 부문의 상호작용 관점 또는 각 부문간 상관관계를 정량화하기 위한 분석 접근법 관점에서 넥서스를 아래와 같이 정의하였다.

- 넥서스는 물, 에너지, 식량 부문 간 연관성과 상호의존성을 나타내며, 이러한 상호의존성은 최근에 학계와 정책결정자들에게 많은 관심을 받음 (Hassan et al., 2018)
- 물-에너지-식량 넥서스는 세 분야 간 상호 연관성을 분석하기 위함으로 각 분야에 미치는 잠재 시너지 효과를 식별하며 피해를 최소화 시키고자 하는 노력을 나타냄 (Hoff, 2011)
- 넥서스는 시스템 내 서로 다른 부문 (또는 섹터) 간의 상호작용으로 정의 (Sanders and Webber, 2012)
- 넥서스는 인간-자연을 체계적으로 분석하고, 서로 다른 부문에 걸친 천연자원의 통합관리와 균형관리를 만들어 내는 것 (FAO, 2014)

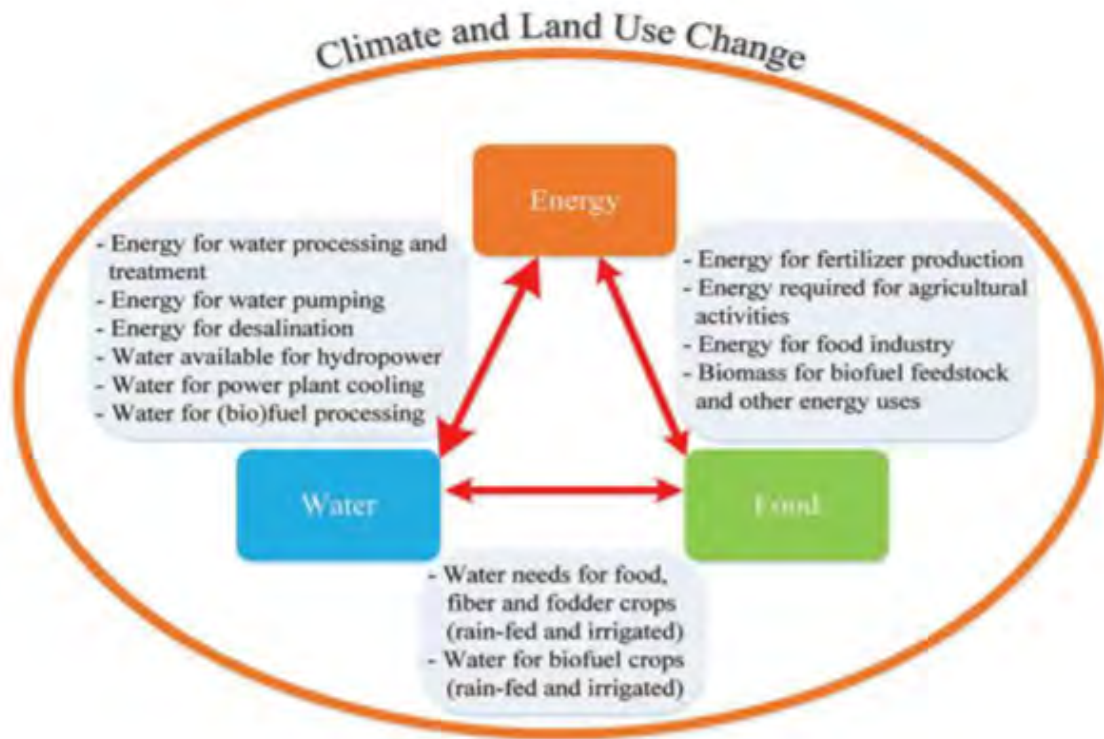
그리고 기존의 넥서스가 자원 시스템 간 물리적인 관계에 초점이 맞춰져 있었지만 추가적으로 환경적, 경제적, 정치적, 사회적 차원을 고려 할 필요가 있다. 그리고 정확한 부문간 상호연결 및 상호의존성을 이해 및 분석하기 위해서는 각 부문을 복합적이며 동등하게 고려할 필요가 있다.

2.1.2 넥서스 간 연결 관계

물, 에너지, 식량, 토지 및 환경 부문 간 상호연결성 및 자원의 이동을 조사하는 것은 부문 간의 시너지 또는 트레이드오프와 부문별 미치는 영향에 대해 알 수 있는데 매우 중요하다. 이와 관련된 중요 물과 에너지 자원과 그 분류는 [표 2. 1]에 나타난 바와 같다. [그림 2. 1] ~ [그림 2. 3]에 설명된 바와 같은 상호연결성의 이해를 통해 [그림 2. 4] ~ [그림 2. 8]과 같은 연구 목표별 넥서스 프레임워크를 결정하는 것을 가능하게 한다.

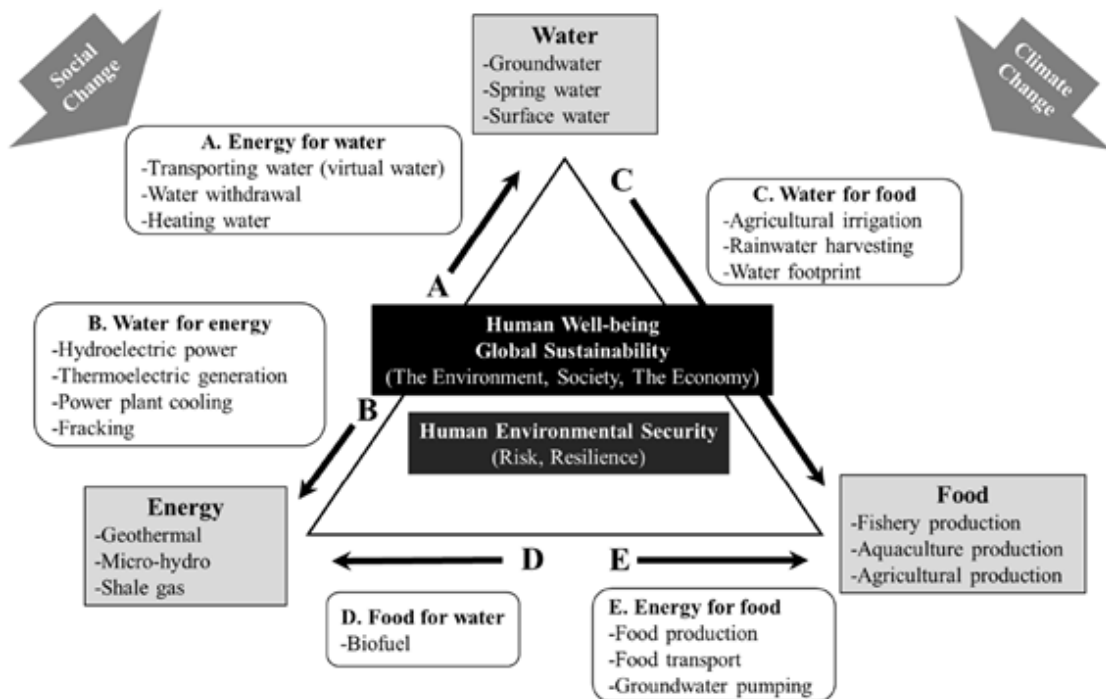
[표 2. 1] 자원 분류별 정의

자원	분류	정의
물	전통적 자원	- 지표수, 강수량, 지하수를 포함
	비전통적 자원	- 담수화, 하수 재이용수
	그린워터	- 물은 수원에 따라 그린 워터(green water), 블루워터(blue water), 중수(grey water)로 구분됨 - 그린 워터는 식물과 생태계에 공급되는 토양에 흡수된 강수량으로 이루어짐
	블루워터	- 블루워터는 하천, 강, 저수지, 대수층에 있는 수자원으로 일상 생활에 사용됨
에너지	전기	- 전기는 수력, 화력, 원자력 발전소에서 생산됨 - 최근에는 풍력, 태양열 등과 같은 재생가능 에너지가 물 소비를 줄이며 친환경적인 대체에너지가 됨
	교통수단 연료	- 대부분의 교통수단 에너지는 광산에서 나온 원유를 이용
	직접 소비	- 식량 생산에 사용되는 에너지원은 직접 소비(direct consumption)와 간접 소비(indirect consumption)로 구분 - 직접 연료 소비는 농업생산량에 직접적으로 사용되는 에너지양으로써 기계에 사용되는 연료 및 전기 등이 있음
	간접 소비	- 간접 소비는 농업에 사용되는 비료, 제초제, 기계 등에 사용되는 에너지를 나타냄



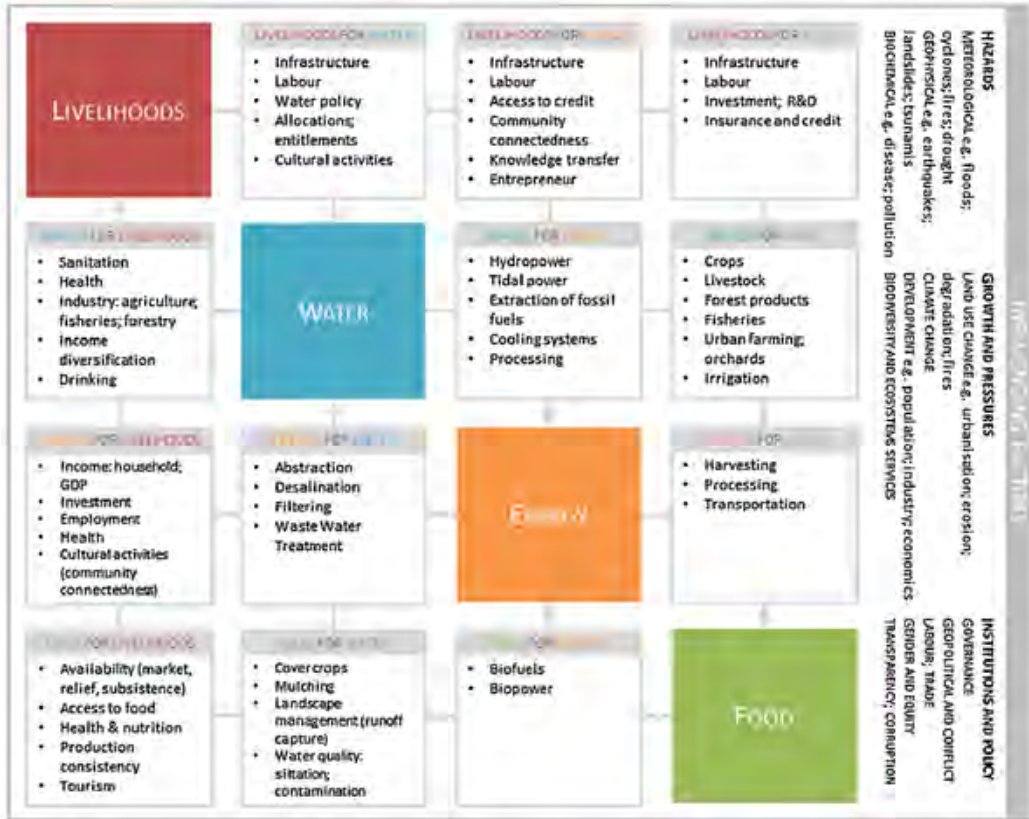
[그림 2. 1] 물-에너지-식량 상호연관성 #1

출처 : Liu et al. (2017)



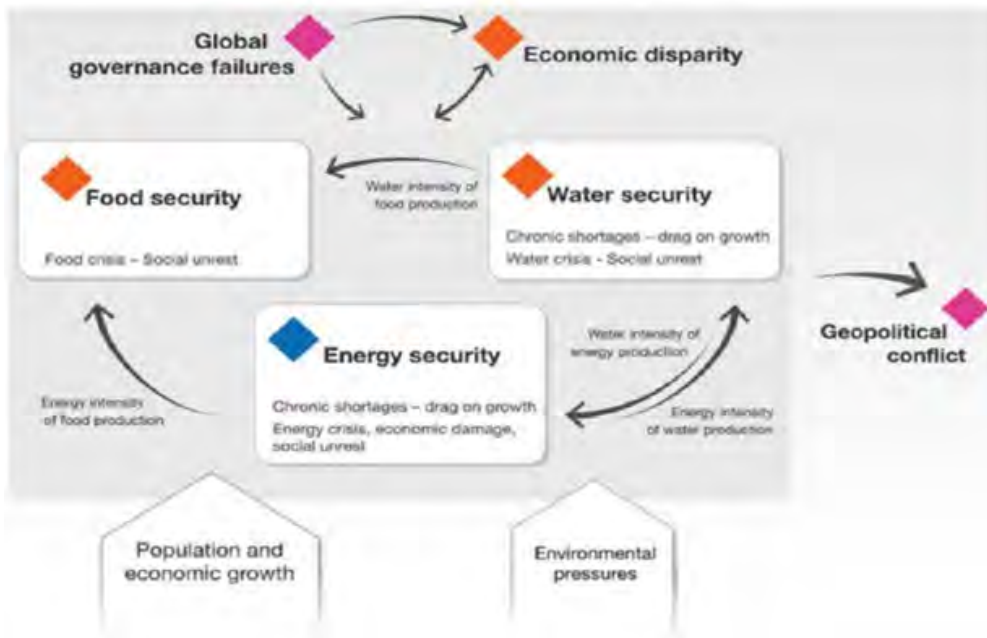
[그림 2. 2] 물-에너지-식량 상호연관성 #2

출처 : Liu et al. (2017)



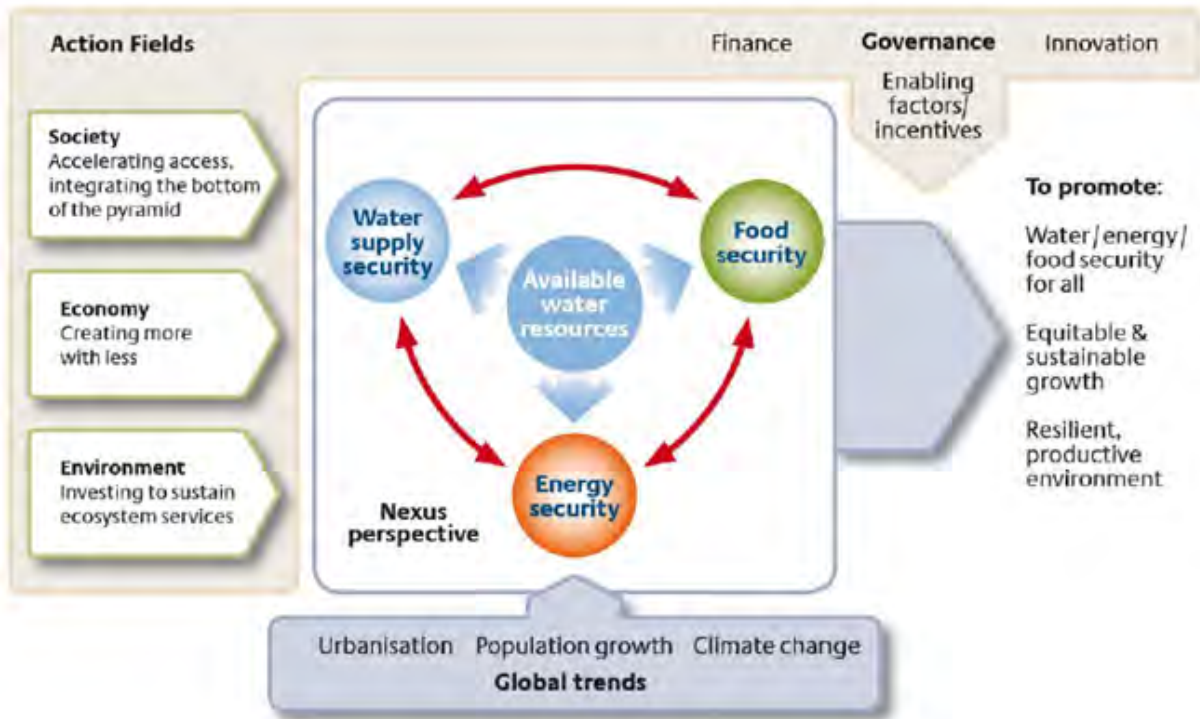
[그림 2. 3] 생계-물-에너지-식량간의 상호연계성

출처 : Biggs et al. (2015)



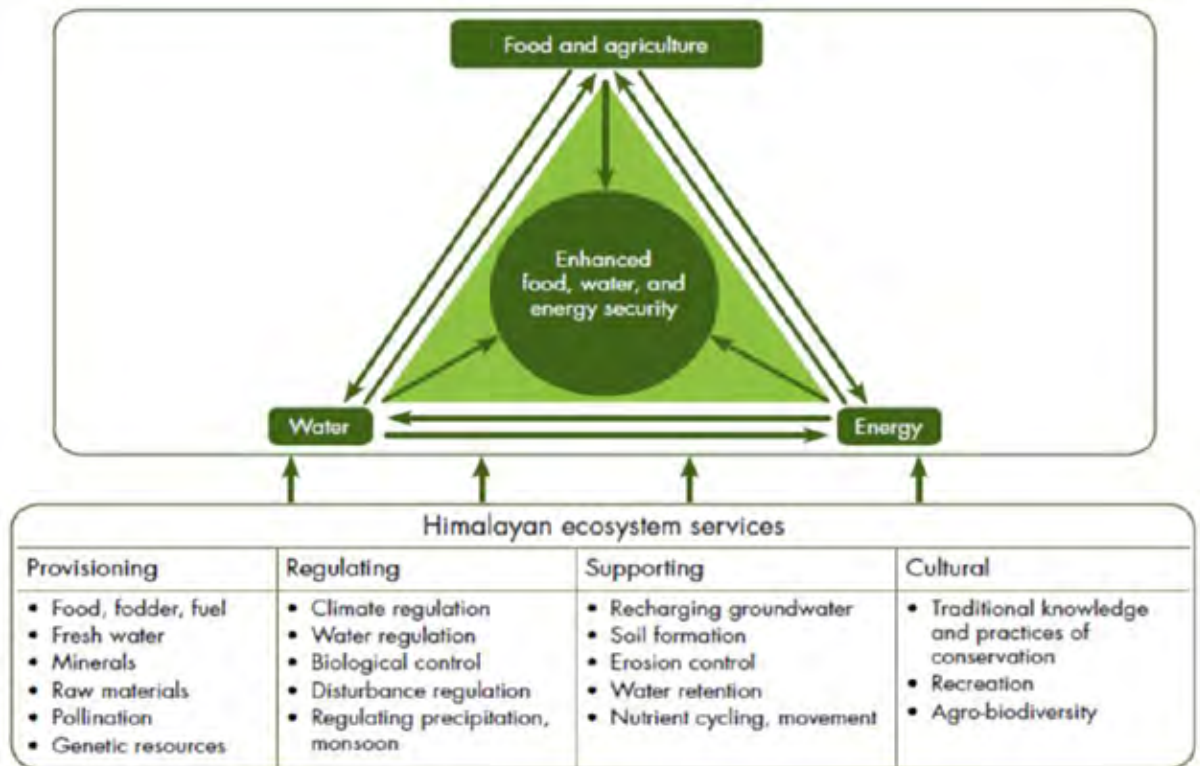
[그림 2. 4] 물-에너지-식량 넥서스 프레임워크

출처 : World Economic Forum (2011)



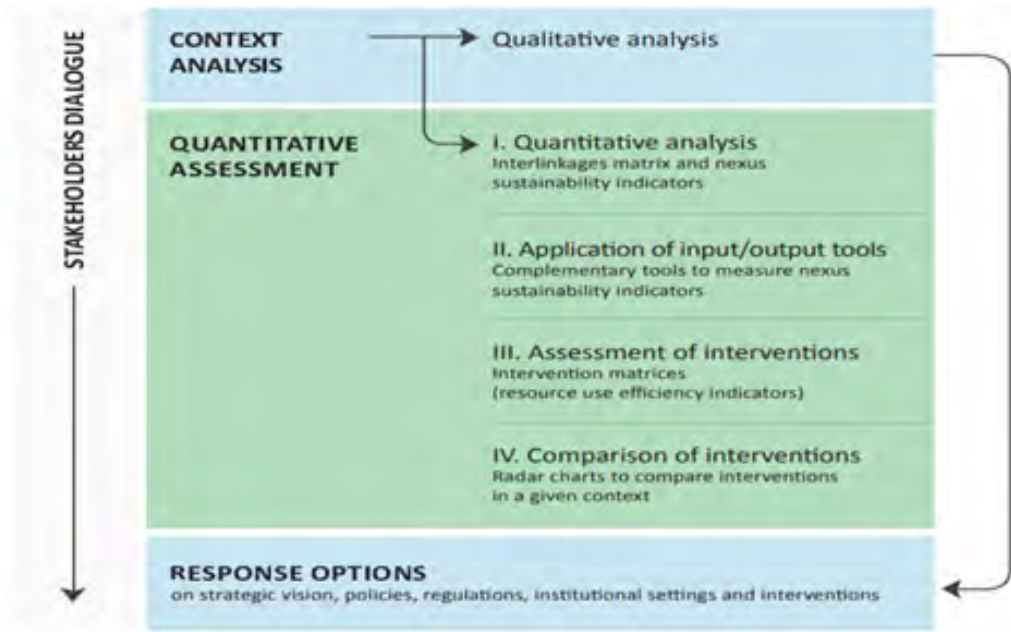
[그림 2. 5] 물-에너지-식량 안보 넥서스 프레임워크

출처 : Hoff (2011)



[그림 2. 6] 히말라야와 남아시아 물-에너지-식량 넥서스 프레임워크

출처 : Rasul (2012)



[그림 2. 7] 넥서스 평가 프레임워크

출처 : Flammini et al. (2014)

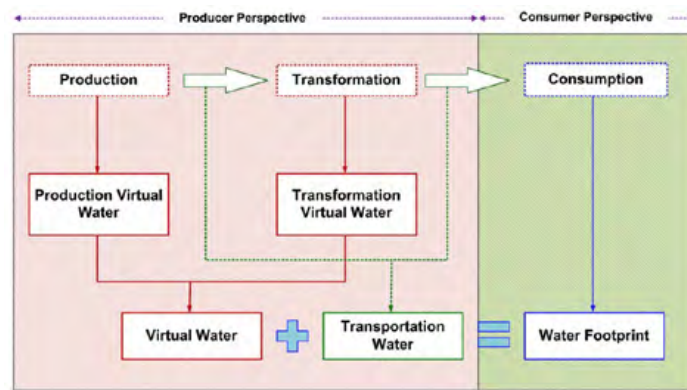


[그림 2. 8] 생계를 고려한 물-에너지-식량 넥서스 프레임워크

출처 : Biggs et al. (2015)

2.1.4 넥서스 평가 지표

넥서스의 주요 목적은 2.1.2절에서 설명된 물, 에너지 등의 자원의 이동 및 효율성을 분석하는 것이며 이를 정량화하기 위한 자원들 별 다양한 지표들이 적용되고 있다. 물 지수(water index)로는 [표 2. 2]와 [그림 2. 9]에 나타난바와 같은 물 인텐시티(water intensity), 가상수(virtual water), 및 물발자국(water footprint)이 널리 활용되고 있다. 물 인텐시티는 단위 에너지를 발전하기 위해 사용되는 물의 양(m^3/MWh)을 의미하며, 가상수는 생산자 관점에서의 물 소비량, 그리고 물발자국은 가상수와 소비자에게 공급하기 위해 이동에 필요한 물의 양을 합한 소비자 관점에서의 물 소비량을 의미한다. 기존 연구에서 제시된 물 인텐시티 및 물 발자국 값은 [그림 2. 10]과 [그림 2. 11]에 나타나 있다.



[그림 2. 9] 가상수와 물 발자국 계산 과정

출처 : Velazquez et al. (2011)

[표 2. 2] 물 지수별 정의 및 특성

지수	정의 및 특성
물 인텐시티 (Water intensity)	<ul style="list-style-type: none"> - 물 인텐시티는 단위 에너지를 발전하기 위해 사용되는 물의 양을 의미하며 m^3/MWh의 단위로 표기 - 화력발전소에서 물 인텐시티는 냉각과정에서 사용된 물의 양과 손실량으로 산정됨 - 수력발전소에서 물 인텐시티는 물이 사용되지 않고 터빈을 거치므로 저수지에서 증발량으로 계산됨 - 농업 부문에서 생산된 대체 에너지인 바이오연료는 전통적인 방법보다 많은 수자원을 사용
가상수 (Virtual water)	<ul style="list-style-type: none"> - 가상수는 식량을 생산하는데 혹은 식량 자체에 사용되는 물로 정의 - 가상수는 생산자 관점에서의 개념
물 발자국 (Water footprint)	<ul style="list-style-type: none"> - 물 발자국은 가상수의 양과 더불어 소비자에게 전달되는데 사용되는 물까지 포함 - 물발자국은 소비가 관점에서의 개념

Energy process	Units ^a	Average water intensity
Hydropower	Gal/MWh	1,430 (variable)
Thermal power		
Geothermal	Gal/MWh	2,900
Nuclear	Gal/MWh	400–720
Coal	Gal/MWh	200–480 (390)
Biomass	Gal/MWh	390
Natural gas	Gal/MWh	100–180 (140)
Solar (photovoltaic) ^b	Gal/MWh	30
Wind ^b	Gal/MWh	1
Crude oil production	Gal. water/Gal. crude oil	350

^a1 gallon = 3.7854 litres.

^bThe water in solar and wind power plants is only used for cleaning the panel or blade.

[그림 2. 10] 에너지 생산 프로세스별 물 인텐시티

출처 : Lamberton et al. (2010); Desai (2013)

Food item	Water footprint per tonne (m ³ /tonne)				Water footprint per unit of nutritional value		
	Green water	Blue water	Grey water	Total	Calorie (litre/kcal)	Protein (litre/g protein)	Fat (litre/g fat)
Vegetables	194	43	85	322	1.34	26	154
Starchy roots	327	16	43	387	0.47	31	226
Fruits	726	147	89	962	2.09	180	348
Cereals	1,232	228	184	1,644	0.51	21	112
Oil crops	2,023	220	121	2,364	0.81	16	11
Nuts	7,016	1,367	680	9,063	3.63	139	47
Milk	863	86	72	1,020	1.82	31	33
Eggs	2,592	244	429	3,265	2.29	29	33
Chicken meat	3,545	313	467	4,325	3.00	34	43
Butter	4,695	465	393	5,553	0.72	0	6.4
Pig meat	4,907	459	622	5,988	2.15	57	23
Sheep/goat meat	8,253	457	53	8,763	4.25	63	54
Bovine meat	14,414	550	451	15,415	10.19	112	153

[그림 2. 11] 단위 농작물 생산을 위한 물발자국

출처 : Mekonnen & Hoekstra (2010)

에너지 지수로는 [표 2. 3]에서 설명된바와 같이 물 공급에서 사용되는 단위 전기량 (kWh/m³)을 의미하는 에너지 인텐시티(energy intensity)가 널리 활용되고 있으며, 그 값 들은 [그림 2. 12], [그림 2. 13]에 나타난 바와 같다.

[표 2. 3] 에너지 지수 정의 및 특성

지수	정의 및 특성
에너지 인텐시티 (Energy intensity)	<ul style="list-style-type: none"> - 에너지 인텐시티는 물 공급에서 사용되는 단위 전기 사용량을 의미하며 그 단위는 kWh/m³ - 비전통적 방식의 물 공급은 전통적 방식보다 더 많은 에너지 사용량이 필요함 - 지하수를 원수로 사용할 경우 에너지 사용량은 대수층(aquifer)의 깊이, 취수량, 펌프의 종류 등에 따라 상이함 - 도·송수 및 배·급수 과정에 필요한 에너지량은 지형적 특성 및 관망 인프라 특성에 영향을 받으며, 에너지 효율을 높이기 위해 누수를 고려해야 함 - 하·폐수처리를 위한 에너지 사용량은 하·폐수의 수질과 물의 재이용 여부에 의해 좌우됨

Source of water	Energy intensity
Lake or river	0.37 kWh/m ³
Groundwater	0.48 kWh/m ³
Wastewater treatment	0.62-0.87 kWh/m ³
Wastewater reuse	1-2.5 kWh/m ³
Seawater	2.58-8.5 kWh/m ³

[그림 2. 12] 수원별 에너지 인텐시티

출처 : Hoff (2011), Mohtar & Daher (2012)

Technologies	Energy intensity (kWh/MG)	End user
Conventional tertiary treatment		
Anthracite coal bed filtration, demineralization, chlorination	982	Irrigation, industrial use
Flocculation, direct filtration, UV/advanced oxidation	1,500	Irrigation, industrial use
Clarification, media filtration, chlorination	1,619	Irrigation, industrial & commercial
Anthracite coal bed filtration, UV	1,703	Irrigation, industrial use
Rapid mix, flocculation, media filtration, & UV	1,800	Irrigation
Membrane treatment		
Coagulation, flocculation, clarification, UF, RO, UV/advanced oxidation	3,220	Agriculture, industrial use
MF, RO, UV/advanced oxidation	3,680	Groundwater recharge
MF, RO, UV/advanced oxidation	3,926	Seawater intrusion barrier
UF, RO, UV	4,050	Industrial use
MF, RO	4,674	Industrial use
MF, RO	8,300	High-quality industrial use

[그림 2. 13] 하·폐수처리 공정별 에너지 인텐시티

출처 : Hoff (2011), Mohtar & Daher (2012)

환경 지수로는 [표 2. 4]에서 설명된바와 에너지 사용에 따른 CO₂의 발생량(kgCO₂eq)을 의미하는 이산화탄소 등가량(CO₂ equivalent, CE)이 널리 활용되고 있으며, 그 값 들은 [그림 2. 14]에 나타난 바와 같다.

[표 2. 4] 환경 지수 정의 및 특성

지수	정의 및 특성
이산화탄소 등가량 (CO ₂ Equivalent, CE)	<ul style="list-style-type: none"> - 농업에서 사용되는 작업은 대부분 이산화탄소화 온실가스를 배출하는 에너지 연소를 포함 - Lal (2004)는 이를 위해 탄소 배출량을 정량화할 수 있도록 탄소당량(CE)의 단위를 무게(kg)으로 하는 통이하는 것으로 제안

Energy input	Unit	Energy equivalent		Carbon equivalent (kg CE/unit)
		(MJ/unit)	(kWh/unit)	
Human power	hour	1.96-2.3		-
Fuel				
Diesel	litre	38.6	10.7	0.94
Liquid petroleum gas (LPG)	kg fuel	27.0	7.5	0.63
Electricity	kWh	11.9	3.3	0.00725
Fertilizer				
Nitrogen	kg	66.1	18.4	1.3
Phosphorous	kg	12.4	3.4	0.2
Potassium	kg	11.2	3.1	0.15
Lime	kg	0.6	0.2	0.16
Pesticide	kg/ha	199.0	55.3	-
Fungicide	kg/ha	92.0	25.6	3.9
Herbicide	kg/ha	240.0	66.7	6.3
Insecticide	kg/ha	200.0	55.6	5.1

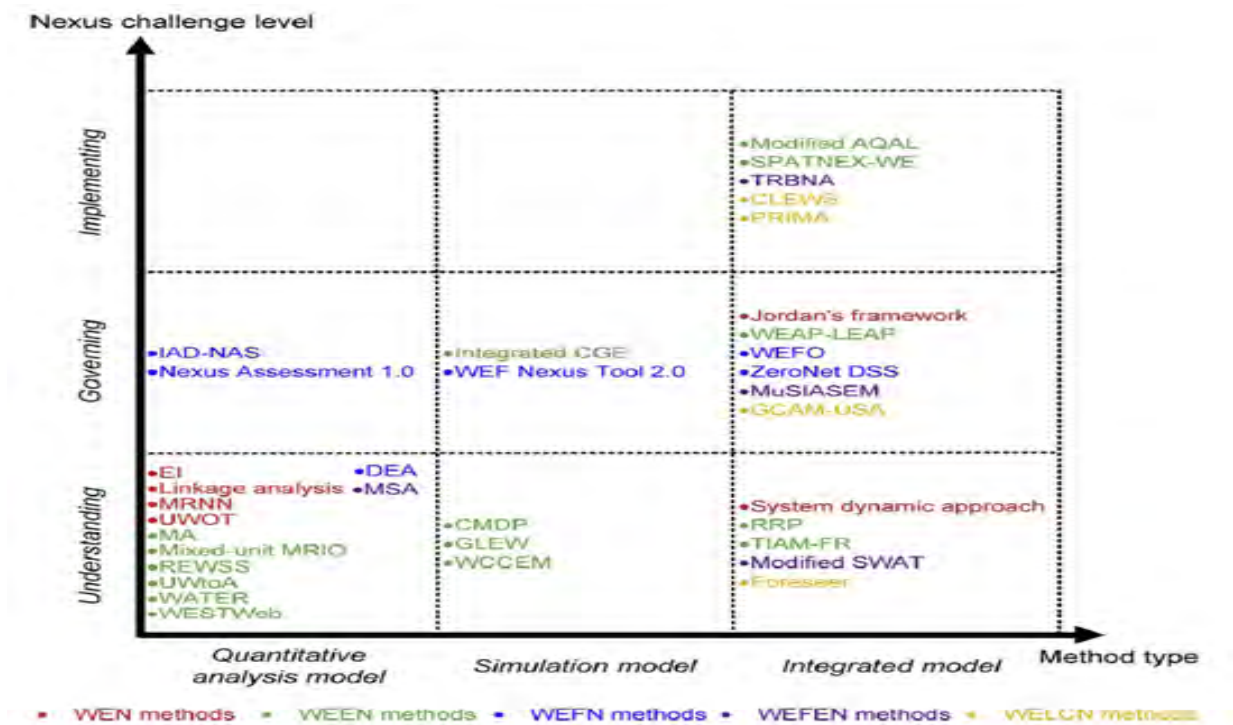
[그림 2. 14] 식량 생산을 위한 에너지 및 CE

출처 : Lal (2004), Canakci et al. (2005), Jackson (2010)

2.1.4 넥서스 연구 사례

기존 문헌들의 넥서스 개요 및 정의, 모델 개발, 거버넌스 분석, 및 관련 정책 개발에 대한 연구는 [그림 2. 15]에서와 같이 넥서스 부문, 적용 방법론, 지리적 스케일, 분석 목적에 따라 분류할 수 있으며, 물-에너지 넥서스, 물-에너지-환경 넥서스, 물-에너지-식량 넥서스 및 물-에너지-토지-기후 넥서스의 연구 사례는 다음에 요약되어 있다.

- 넥서스 부문: 물, 에너지, 식량, 토지이용, 기후, 생태계
- 적용 방법론: 학문(disciplinary), 분석 접근법(analysis approach), SW, 툴, 모형
- 지리적 스케일: 국제적 수준, 범국가적 수준, 국가 수준, 지역 단위, 도시 수준, 가구 단위
 - * 분석 지리적 스케일을 결정하는 것이 모델 구축, 이해당사자 정립 및 필요 데이터를 결정하는데 큰 영향을 미침 (Daher et al., 2017)
- 분석목적: 이해(understanding), 방향제시(governing), 정책제시(implementing)
 - * 각 부문별로 수집된 자료의 통합, 문제의 시각화, 이슈 평가 및 시스템 분석 등이 수행



[그림 2. 15] 분석목적 및 모델 따른 거시적 넥서스 연구 분류

출처 : Dai et al. (2018)

가. 물-에너지 넥서스

□ 에너지 인텐시티 (energy intensity)

- 지리적 범위 : 도시 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(software 없음)
- 목적 : 도시 수계 내 에너지 흐름 분석
- 분석목적 : 이해

□ 연관성 분석 (linkage analysis)

- 지리적 범위 : 도시 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(software 없음)
- 목적 : 도시 내 물과 에너지 부분의 연관성과 구조를 분석하기 위함
- 분석목적 : 이해

□ UWOT (Urban Water Optioneering Tool)

- 지리적 범위 : 도시 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(온라인 UWOT tool)
- 목적 : 도시 상수도 시스템 에너지 사용량 분석
- 분석목적 : 이해

□ MRNN (Multi-Regional Nexus Network)

- 지리적 범위 : 도시 및 지역 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(software 없음)
- 목적 : 도시 시스템 내 물과 에너지 사용량 분석
- 분석목적 : 이해

□ 시스템 다이내믹스(System dynamic approach)

- 지리적 범위 : 지역 수준
- 모형 형식 : 통합 모델 (software 없음)
- 목적 : 지역 수준에서의 장기적 물과 에너지 관리
- 분석목적 : 이해

□ 요르단 체계 (Jordan' s framework)

- 지리적 범위 : 국가 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(software 없음)
- 목적 : 요르단에서의 높은 효율의 물과 에너지 사용을 위한 의사결정 지원 도구
- 분석목적 : 방향제시

나. 물-에너지-환경 넥서스

UWtoA (Urban Water to Air Model)

- 지리적 범위 : 도시 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(Pacific Institute; A spreadsheet model)
- 목적 : 도시 수계에서 에너지 사용과 대기질 모의
- Nexus Challenge Level : 이해할 수 있는(understanding) 수준

WESTWeb (Water-Energy Substantiality Tool Web)

- 지리적 범위 : 도시 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(캘리포니아 대학교 버클리 캠퍼스; online tool)
- 목적 : 수자원 공급에서 에너지 사용과 온실가스 평가
- 분석목적 : 이해

GLEW (Great Lakes Energy Water model)

- 지리적 범위 : 지역 수준
- 모형 형식 : 시뮬레이션 모델(Studio Expert 2008)
- 목적 : Great Lakes 지역에서 수자원 공급에서 전력 발전 영향 분석
- 분석목적 : 이해

REWSS (Regional Energy & Water Supply Scenarios model)

- 지리적 범위 : 지역 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(open source REWSS)
- 목적 : 수자원 및 에너지 공급으로부터 연간 환경 영향 분석
- 분석목적 : 이해

Integrated CGE (Computable General Equilibrium)

- 지리적 범위 : 국가 수준
- 모형 형식 : 시뮬레이션 모델(software 없음)
- 목적 : 에너지, 용수 사용 및 수요로부터 에너지세 정책 영향 전망
- 분석목적 : 방향제시

CMDP (Competitive Markov Decision Process Model)

- 지리적 범위 : 국가 수준
- 모형 형식 : 시뮬레이션 모델(software 없음)
- 목적 : 탄소세 영향 및 시스템의 수자원 분석
- 분석목적 : 이해

MA (Meta-system architecture model)

- 지리적 범위 : 국가 수준
 - 모형 형식 : 정량적 분석 모델(software 없음)
 - 목적 : 국가 단위의 정량적 에너지, 수자원, 하폐수 시스템 분석
 - 분석목적 : 이해
- SPATNEX-WE (SPatial and Temporal NEXus-Water Energy)
- 지리적 범위 : 국가 수준
 - 모형 형식 : 통합 모델(software 없음)
 - 목적 : 에너지 흐름과 물 사용 분석
 - 분석목적 : 정책제시
- Modified AQAL (All Quadrants All Levels)
- 지리적 범위 : 지역 및 국가 수준
 - 모형 형식 : 통합 모델(software 없음)
 - 목적 : 기후변화에서의 물-에너지 부문간 상호연관성 분석 및 정책 실행 평가
 - 분석목적 : 정책제시
- Mixed-unit MRIO(Multi-Regional Input-Output analysis model)
- 지리적 범위 : 국가 및 범국가적(transboundary) 수준
 - 모형 형식 : 정량적 분석 모델(software 없음)
 - 목적 : 에너지 생산에서의 용수 사용 및 환경 영향 전과정평가(life cycle assessment)
 - 분석목적 : 이해
- TIAM-FR (Times Integrated Assessment Model)
- 지리적 범위 : 국가 및 범국가적(transboundary) 수준
 - 모형 형식 : 통합 모델(MINES Paris Tech Center of Applied Mathematics; NS)
 - 목적 : 기후변화를 고려한 에너지 최적화에서의 용수 사용량 전망
 - 분석목적 : 이해
- WCCEM (The Water and Carbon Conscious Electricity Market)
- 지리적 범위 : 국가 및 국제 수준
 - 모형 형식 : 시물레이션 모델(software 없음)
 - 목적 : 국가적 전력 생산에서 용수 사용량과 온실가스 배출량을 줄이기 위한 수도세 및 탄소세 영향 평가
 - 분석목적 : 이해

- RRR (the integrated rainfall-runoff model and power system model)
 - 지리적 범위 : 다중 범위(multi-scales) 수준
 - 모형 형식 : 통합 모델(software 없음)
 - 목적 : 물 흐름과 전력 시스템의 온도 영향 분석
 - 분석목적 : 이해

- WATER (Water Analysis Tool for Energy Resources)
 - 지리적 범위 : 다중 범위(multi-scales) 수준
 - 모형 형식 : 정량적 분석 모델(Argonne National Laboratory; online tool)
 - 목적 : 연료 생산에서 용수 사용량 및 수질 평가
 - 분석목적 : 이해

- WEAP-LEAP (Water Evaluation And Planning System and Long Range Energy Alternatives Planning)
 - 지리적 범위 : 다중 범위(multi-scales) 수준
 - 모형 형식 : 통합 모델(SEI; WEAP and LEAP software)
 - 목적 : 용수 및 에너지 수요량과 온실가스의 정책 평가
 - 분석목적 : 방향제시

- ZeroNet DSS (Decision Supporting System)
 - 지리적 범위 : 지역 수준
 - 모형 형식 : 통합 모델(몇몇 무료 software)
 - 목적 : 유역에서의 자원 관리를 위한 의사결정 지원 도구
 - 분석목적 : 방향제시

- 넥서스 평가 1.0 (Nexus Assessment 1.0)
 - 지리적 범위 : 지역 및 국가 수준
 - 모형 형식 : 정량적 분석 모델(식량농업기구, online rapid appraisal tool)
 - 목적 : 정성적 및 정량적 넥서스 평가
 - 분석목적 : 방향제시

- IAD-NAS (Insitutional Analysis and Development Frameworks combined with value chain analysis)
 - 지리적 범위 : 국가 수준
 - 모형 형식 : 정량적 분석 모델(software 없음)
 - 목적 : 물, 식량, 에너지의 지속가능성의 제도적 및 정책적 영향 평가
 - 분석목적 : 방향제시

□ 물-에너지-식량 넥서스 도구 2.0 (WEF Nexus Tool 2.0)

- 지리적 범위 : 국가 수준
- 모형 형식 : 시뮬레이션 모델(온라인)
- 목적 : 물-에너지-식량 넥서스 정량적 평가 및 전망
- 분석목적 : 방향제시

□ DEA (Data Envelopment Analysis)

- 지리적 범위 : 다중 범위(multi-scales) 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(software 없음)
- 목적 : 자원 관리를 위한 지역적 입출력 자료 효율성 평가
- 분석목적 : 이해

□ WEFO (Water, Energy and Food security nexus Optimization model)

- 지리적 범위 : 다중 범위(multi-scales) 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(WEFO tool)
- 목적 : 시스템간 정량적 상호연관성 및 절충 평가 및 환경 영향 분석
- 분석목적 : 방향제시

다. 물-에너지-식량 넥서스 / 물-에너지-토지-기후 넥서스

□ MSA (Multi-sectoral Systems Analysis)

- 지리적 범위 : 도시 수준
- 모형 형식 : 정량적 분석 모델(Matlab tool)
- 목적 : 사람이 도시에 미치는 영향과 더불어 자원의 흐름을 이해하기 위함
- 분석목적 : 이해

□ GCAM-USA (The Global Change Assessment Model in USA)

- 지리적 범위 : 지역 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(open source tool)
- 목적 : 장기적 미국 에너지 부문에서 물 사용 및 수요량 분석
- 분석목적 : 방향제시

□ PRIMA (Platform for Regional integrated Modelling and Analysis)

- 지리적 범위 : 지역 및 국가 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(Velo)
- 목적 : 의사결정을 지원할 수 있는 기후, 에너지, 물, 토지간 상호연관성 모의
- 분석목적 : 정책제시

□ MuSIASEM (Multi-Scale Integrated Assessment of Society and Ecosystem Metabolism)

- 지리적 범위 : 지역 및 국가 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(식량농업기구, free online tool)
- 목적 : 에너지, 식량, 물 부문의 사회경제적 및 생태적 관계 평가
- 분석목적 : 방향제시

□ Foreseer

- 지리적 범위 : 국가 및 범국가적(transboundary) 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(캠브리지 대학, online Foreseer tool)
- 목적 : 물, 에너지, 토지 이용, 온실가스간 관계 분석
- 분석목적 : 이해

□ Modified SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

- 지리적 범위 : 범국가적(transboundary) 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(open source model)
- 목적 : 범국가적 수준에서의 수자원 분야의 경제적 분석
- 분석목적 : 이해

□ TRBNA (Transboundary River Basin Nexus Approach)

- 지리적 범위 : 범국가적(transboundary) 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(UNECE, NS)
- 목적 : 범국가적 유역의 물-에너지-식량-환경 넥서스 평가
- 분석목적 : 이해

□ CLEWs (Climate, Land, Energy and Water)

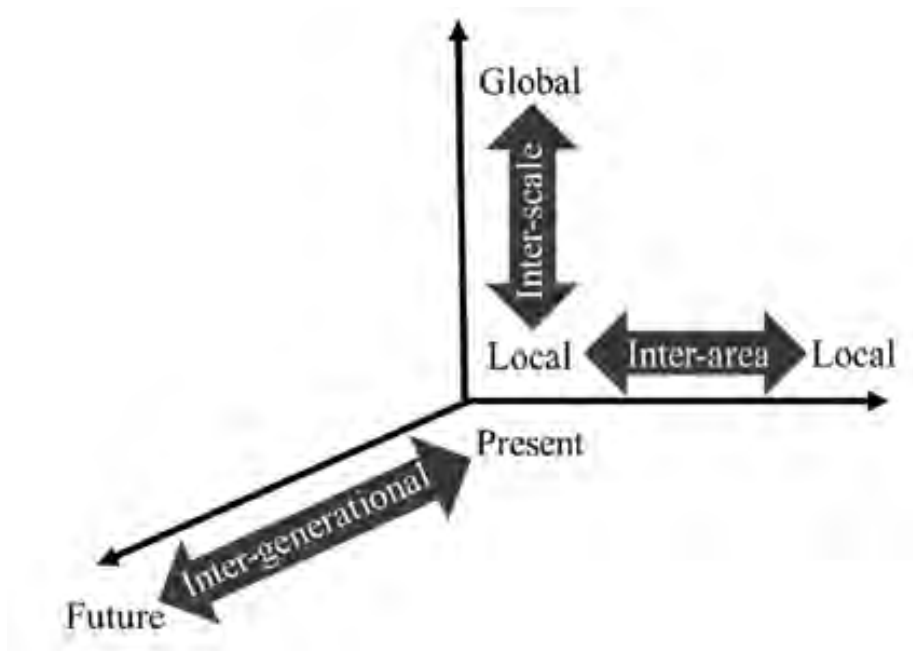
- 지리적 범위 : 다중 범위 (multi-scales) 수준
- 모형 형식 : 통합 모델(KTH, OseMOSYS)
- 목적 : 기후 영향으로부터 자원 관리를 위한 정책 영향 평가
- 분석목적 : 이해

2.2 넥서스 분석 방법론

2.2.1 현황 및 문제점

최근 많은 방법론과 프레임워크가 넥서스를 잘 이해할 수 있도록 제시되고 있다. 각각의 방법론들은 분석을 위해 다른 종류의 다양하고 많은 자료들을 필요로 하며, 방법론별 장점과 한계점, 그리고 적용가능한 공간적 범위가 상이하다(Albrecht 등, 2018). 따라서 자료와 정보 가용성은 넥서스에서 상호작용을 분석하는데 가장 중요한 요소로 간주된다(Embid & Martin, 2017).

넥서스는 각광받고 있는 연구주제이지만, 현재의 방법론으로는 물, 에너지, 식량, 토지, 기후 및 환경 부문 간의 상호연계를 체계적으로 평가하거나 사회·정치 관련 자원 정책을 지원하기엔 제한적이다. 그리고 다양한 연구자들로부터 각각의 넥서스 사례별 고유한 모델들이 제시되고 있으며, 모든 사례를 아우르고 통합할 수 있는 모델은 존재하지 않는다. 더욱이 사용가능한 모델의 종류가 다양한 것을 감안하더라도, 모델에 필요한 정보의 다양성과 복잡성은 통합적인 모델을 구축하는데 걸림돌이다. 이에 넥서스 연구의 최종 과제는 [그림 2. 16]에서 나타난바와 같이 시공간적 규모를 함께 고려하며 서로 다른 부문의 다양한 이해관계자들의 생각과 행동을 연결하기 위한 통합적인 방법론과 모델을 개발하는 것이라 할 수 있다.



[그림 2. 16] 시공간 스케일에 따른 관계도

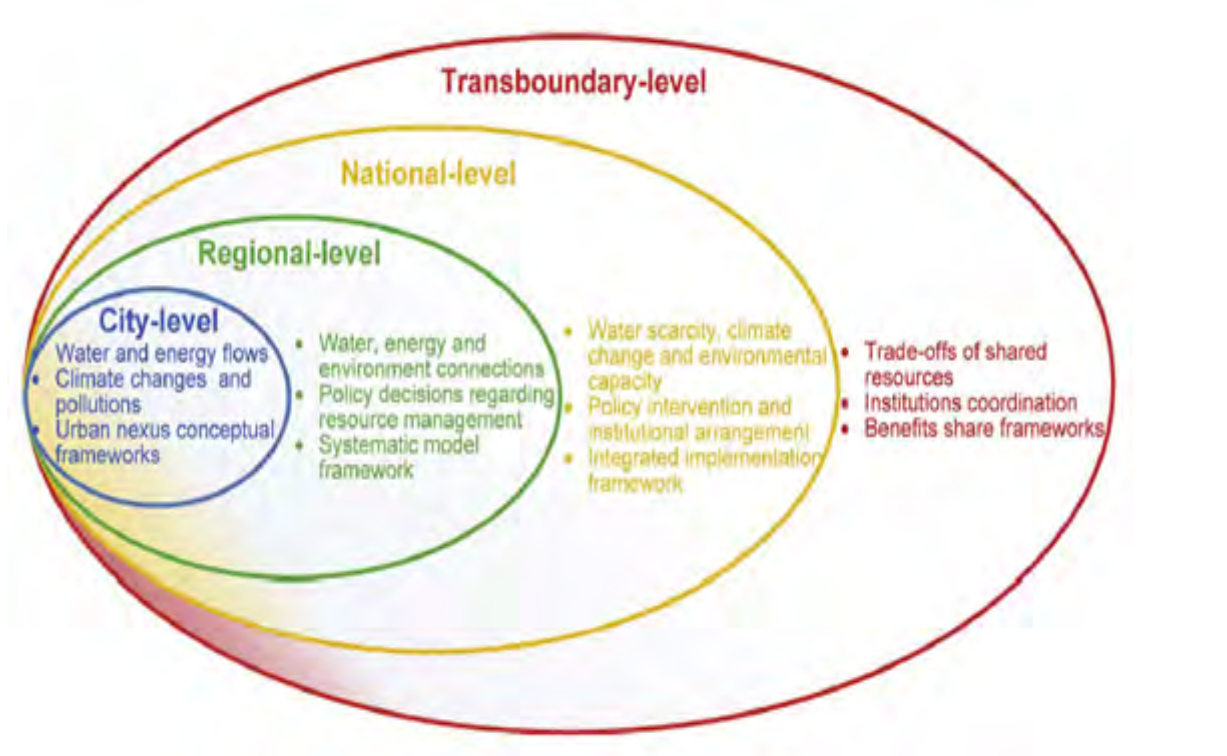
출처 : Endo 등(2015)

2.2.2 넥서스 분석 형태

넥서스는 분석을 하고자하는 대상의 범위(넥서스 부문, 공간적 범위, 미시적·거시적) 및 목적(분석 수준, 내부·외부 영향 분석)에 따라 그 다양한 구성을 이룰 수 있다. 모델 개발 단계에서 시스템 범위를 정의하고 목적을 명확히 하는 것은, 추진 요인의 구체화를 통해 보다 목표 지향적인 분석을 수행하고 우선순위를 결정하는 데 유용한 통찰력을 제공할 수 있다.

널리 고려되는 넥서스의 부문은 물, 에너지, 환경, 식량, 토지, 기후 등을 들 수 있다. 선택된 부문을 기반으로 분석하고자하는 넥서스의 명칭을 표현하게 되며, 물-에너지 넥서스, 물-에너지-환경 넥서스, 물-에너지-식량 넥서스, 물에너지-토지-기후 넥서스가 가장 널리 분석되고 있다.

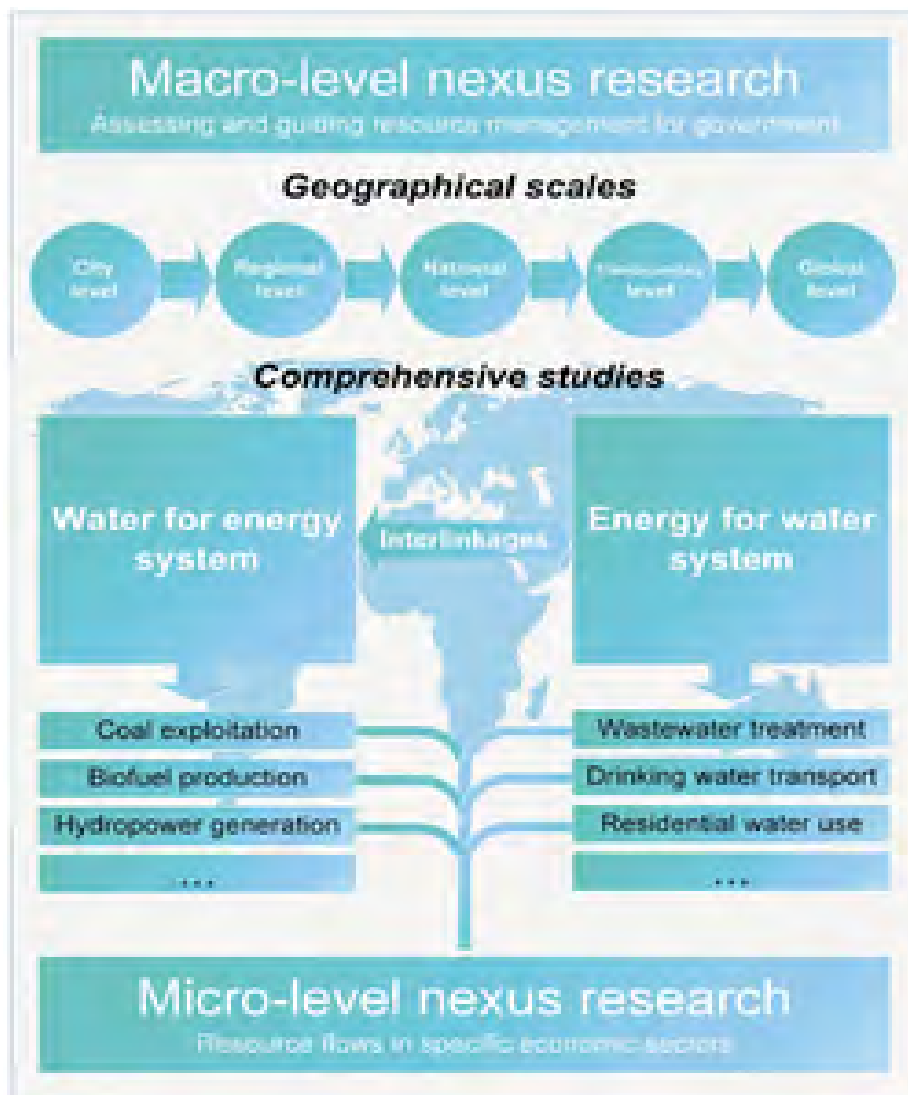
넥서스는 다양한 공간적 범위에서 분석이 이루어질 수 있다. 이러한 공간적 범위는 분석 방법론, 모델 구조, 이해관계자 식별 및 필요한 데이터의 결정에 큰 영향을 미치므로 (Daher et al., 2017), 분석 전에 공간적 범위를 명확하게 정립하는 것은 매우 중요하다. [그림 2. 17]에서와 같이 넥서스의 공간적 범위는 가정 수준에서 국가 규모, 범국가적 범위까지 포함할 수 있다.



[그림 2. 17] 거시적 수준의 넥서스 연구 주요 분야 도식도

출처 : Dai et al. (2018)

특히 물과 에너지 부문의 상호연계성 사례는 [그림 2. 18]과 같이 미시적 수준에서 거시적 수준까지 아우르고 있다. 미시적인 넥서스 분석 시 시스템의 내부 메커니즘을 포함하여 사회적 및 물리적 현상을 나타낼 수 있어야 한다. 미시적 수준의 연구는 물 발자국 산정을 위한 에너지 생산량, 용수의 목적(생활용수, 공업용수 등) 별 공급을 위한 에너지 사용량과 같은 주로 자원의 경제적인 관점에서의 평가가 대부분을 차지하고 있다. 거시적 수준의 넥서스 연구는 주로 각각 다른 지역과 규모의 물과 에너지 부문의 관리를 평가 및 제안 하는 것이 주목적이다. 이와 같은 거시적 수준의 연구는 자원의 가용성과 여러 규모(도시, 지역, 국가, 범국가적 범위)의 물과 에너지 부문의 전망을 포함할 수 있다. 넥서스 분석은 많은 경우 자료의 가용성과 국가 수준의 정책 목표(또는 측정 기준)로 인해 지역 또는 국가 수준의 거시적인 접근이 주로 선택되지만, 다수의 상호 작용성을 다루기 위해서는 미시적 접근법과 거시적인 접근법의 균형이 필요하다.



[그림 2. 18] 거시적 및 미시적 넥서스 연구 체계도

출처 : Dai et al. (2018)

실제적인 해법을 도출하기 위해 구축·분석되는 다른 공학적인 모델과는 다르게, 넥서스 모델은 [표 2. 5]에 설명된 바와 같이 넥서스 간의 연관관계에 대한 이해, 정책의 방향제시 및 기술적인 개입 효과 분석과 같은 정책실행 평가로 수준(level)을 구분할 수 있다.

[표 2. 5] 넥서스 분석 수준에 따른 분류

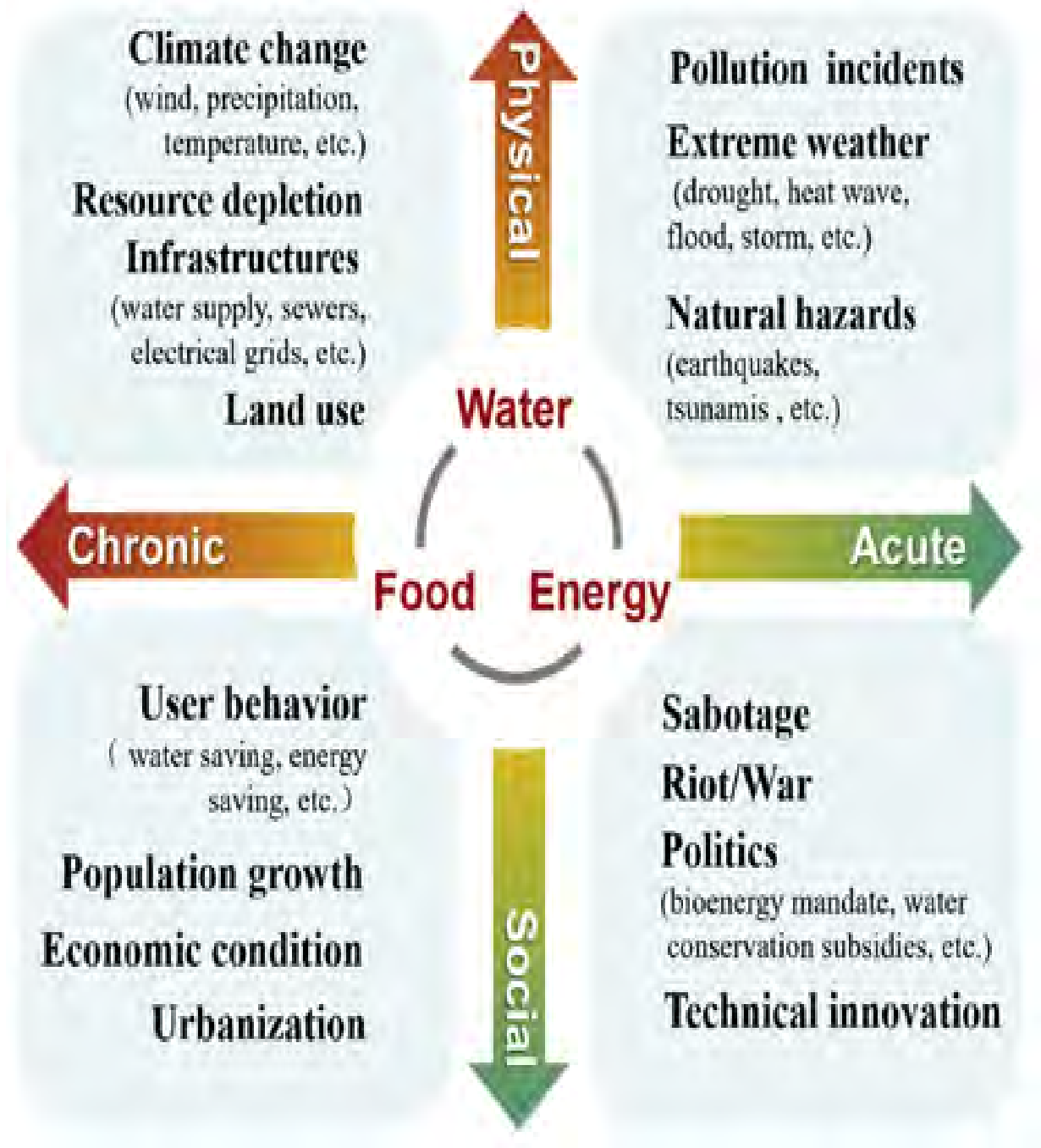
No.	수준(level)	세부사항
1	연관관계 이해 (Understanding the Nexus)	- 상호관계를 입증하고 문제, 위험 또는 기회를 식별
2	방향 제시 (Governing the Nexus)	- 제도/정책적 대응을 유도하기 위함
3	정책 실행 (Implementing the Nexus)	- 자원 활용의 효율성을 증진하기 위해 정책 및 기술 도입을 나타내는 목적을 가짐

또한 넥서스 분석의 형태는 내부 관계 분석 또는 외부 영향 분석으로도 분류할 수 있다. 내부 관계 분석은 서로 다른 부문 간의 상호작용을 포착하여 결합된 시스템의 내부 특징을 나타내는 것을 목적으로 하며, 이를 통해 물, 에너지 및 식량 부문의 시너지와 트레이드오프를 파악하여, 시너지를 극대화하고 트레이드오프를 최소화하는 방향을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이와 같은 서로 다른 부문 간의 상호작용은 [표 2. 6]에서 나타난바와 같이 일방적 영향 분석과 상호적 영향 분석으로 구분될 수 있다.

[표 2. 6] 넥서스 부문간 영향분석 형태

	일방적 영향 분석	상호적 영향 분석
연결성	- 일방적 관계	- 상호 관계(양자간 관계, 피드백 루프)
장점	- 분석에 필요한 자료, 시간, 인력, 자원이 상대적으로 적음 - 한 부문이 다른 부문에 어떤 변화를 주는지 분명히 나타남 - 트레이드오프의 사전 평가 촉진 - 통합관리의 시작점 역할 수행	- 넥서스 시스템의 보다 복합적인 평가 제공 - 여러 부문에서 종속 역할 제어 결정 - 파생 요인 및 진행과정 식별 용이 - 전체적인 관점에서 넥서스 문제에 대한 새로운 해결책 제시
단점	- 피드백 및 2차 효과를 반영하지 못하며 넥서스 분석에서 제한된 성능 발휘	- 더 큰 시간, 자료, 인력 및 재원을 필요
특성	- 간단하며 목표 지향적 - 최근 특정 분야 내의 신기술이 다른 분야에 미치는 영향을 분석하기 위해 널리 사용	- 복잡하며 복합적인 분석

외부 환경의 변화는 물, 에너지, 식량의 생산 및 사용을 변화시키며 넥서스 시스템을 복잡하게 한다. 이러한 외부 압력은 기후변화, 오염사고, 인구 증가, 정치 등의 외부에서 오는 영향을 의미하며, 이와 같은 외부 영향 요인은 [그림 2. 19]와 같이 발생원(물리적 요인, 사회적 요인)과 발생시간(만성, 급성)에 따라 4가지 범주로 분류될 수 있다.



[그림 2. 19] 물-에너지-식량 넥서스 외부 요인 분류

출처 : Zhang et al. (2018)

2.2.3 방법론

불행이도 모든 상황을 아우르는 넥서스 분석을 위한 접근법은 없으며 (Endo et al., 2015; Liu et al., 2017), 2.2.2절에서 논의된 넥서스 연구의 범위(넥서스 부문, 공간적 범위, 미시적·거시적)와 목적(분석 수준, 내부·외부 영향 분석)에 따라 적절한 방법론은 상이하다.

일반적으로 넥서스 분석을 위한 방법론은 [표 2. 7]에 나타난바와 같이 정성적 또는 정량적인 학제별 접근법으로 분류할 수 있으며, 각각의 방법론의 특징 및 장·단점은 [표 2. 8]에 요약되어 있다. 이와 같은 방법론들 중 넥서스 분석에 가장 널리 활용되고 있는 방법으로는 Input output analysis, System dynamics 및 Integrated modeling을 들 수 있다. 이외에도 다양한 분석 방법론이 넥서스 연구에 사용 및 제안되었으며, 현재는 각각의 방법론의 장·단점으로 인해 많은 연구에서 여러 방법을 결합하여 사용하고 있는 추세이다.

[표 2. 7] 넥서스 적용 방법론

분류	학제(discipline)	방법론
정성적	사회과학	Questionnaire Survey
		Ontology engineering
	-	Integrated Maps
정량적	경제	Input output analysis
		Computable general equilibrium model
		Econometric model
	-	Ecological network analysis
	-	Integrated indices
	환경관리	Benefit-cost analysis (BCA)
		Life cycle assessment
	시스템 분석	System dynamics model
	-	Agent-based modeling
	통계	Statistical application
	물리적 모델	Physical models
	통합 모델	Integrated modeling
	-	Optimization management models

[표 2. 8] 넥서스 적용 방법론별 정의 및 장단점

방법론	정의	장점	단점
<p>Investigations and Mathematical Statistics</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 조사 및 통계 분석법은 넥서스 이슈를 공공 자료(현장 조사, 관계자·전문가·관련기관·정부기관 관련 자료)를 통해 분석 - 일반적으로 설문조사를 통해 진행되며 수집된 정보는 통합적 지수 개발에 사용 - 넥서스 연구에서 상호연관성을 분석하는데 가장 대표적으로 사용되는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> - 특정 자원의 생산 과정과 소비를 추적하여, 물, 에너지, 식량 그리고 다른 자원들 사이의 상호작용에 대한 정량적 평가를 할 수 있음 - 또한 물-에너지-식량 넥서스 시스템 변화의 핵심 요인(기후 변화, 토지 이용 변화, 인구 통계, 지역 인프라 등)을 포착하는 데 유용 - 정성적 분석은 의사결정에 도움이 될 수 있는 통찰력을 줄 수 있음(셀문조사는 특히 물-식량 연계성의 질적 및 양적 측면에서 다양한 변화가 발생할 때 지역 사회의 경제적 수준, 식량 및 생계 안보 수준을 전망하는 데 유용함) - 다양한 공간적 범위(국제적, 국가 및 지역적 규모)에서 광범위한 영향 범주에 대해 잠재적으로 추정할 수 있는 주요 변수는 통합 넥서스 모델 및 평가를 위한 기반을 마련 	<ul style="list-style-type: none"> - 통계적 접근방식은 물-에너지 및 식량간 상호작용의 내부 메커니즘에 대한 인과관계를 제공할 수 없으며, 정책 수립 및 평가에 적용하기는 어려움
<p>Ontology engineering</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 온톨로지(ontology)는 웹 기술의 기초 기술 중 하나이며, 컴퓨터가 직접 다룰 수 있는 지식 기반을 만들기 위해 사용 - 온톨로지는 지향적 세계(target world)를 묘사하는 데 사용되는 개념과 관계로 구성 - 사용자가 보다 명확하게 내용을 표현할 수 있는 공통 용어, 개념, 의미를 제공 - 물-에너지-식량 넥서스 모델과 지속가능한 과학/사회 생태 시스템(SS-SES)의 온톨로지 사이의 관계는 모델과 온톨로지 사이의 관계에 해당 	<ul style="list-style-type: none"> - 온톨로지는 사례 자체보다는 모델, 지표 시스템 또는 분석 프레임워크를 다룸 - 온톨로지를 이용한 주요 단계는 용어의 정의, 항목 간의 관계 공유, 모델·지표, 시스템·분석 프레임워크 간의 관계 공유, 정의된 용어와 메타데이터 항목 간의 관계 공유로 구성 	<p>-</p>
<p>Integrated Maps</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 통합지도(Integrated Maps)는 각종 단일지도를 중첩한 것 - 구성원들 간의 상호 이해를 향상시키기 위해 학제간 통합 방법으로 개별 연구 결과를 지도에 통합하는 데 사용 	<ul style="list-style-type: none"> - 지도 상의 자료와 정보를 통합하여 하천 유역 및 해안 지역의 환경 및 활용 현황을 시각화하고 이해관계자들 위해 사용할 수 있음 - 영양분의 흐름(nutrient flow)이 해안 생태계에 미치는 영향과 같은 넥서스 관련 문제를 시각적으로 식별하는 데 사용될 수 있음 - 이해관계자와 정책결정자가 통합지도를 통해 토지 및 해안 지역의 통합 관리를 구현하는 방법을 논의 할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 자원 사용자뿐만 아니라 물, 에너지 및 식량 자원의 현 상태를 시각화하기 위해 지역 수준에서 통합지도를 작성할 수 있으나 국가 또는 국제적 수준에서 통합지도를 만들기 위해서는 많은 어려움이 있음 - 통합지도는 향후 시나리오가 아닌 정적인 상태(스케일 간, 세대 간 및 영역 간 상황)를 보여주며, 이는 지도의 효용성을 제한

방법론	정의	장점	단점
Input Output Analysis	<ul style="list-style-type: none"> - 입력력 모델(Input-output model)은 경제학의 정량적 모델로서 부문 간 국가적 경제 혹은 지역적 경제의 상호의존성을 분석하기 위한 모델임 - 연산일반균형(Computable General Equilibrium, CGE) 모델은 경제성 모델로서 정책을 경제적으로 분석하는 데 많이 사용되는 모델임 - CGE 모델은 시장 변화와 관련된 상호연결성을 파악하며 가격 경쟁성을 통해 넥서스 시스템에 대한 정책적 영향을 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 간단한 개념 - 고품질의 자료로 통해 국가적 경제 모델 구축 가능 - 입출력 시스템을 사용하는 산업 분류, 자료 처리 기술 필요 - CGE 모델은 거시경제와 천연자원 시스템과의 상호작용에 대한 포괄적인 해석을 제공 - 경제계량분석 기법과 절차는 인과관계를 추론하고 넥서스 연구 분야에서 경제이론을 적용하기 위해 널리 사용됨 - 경제계량분석은 일반적인 통계 방법보다 정책 평가 및 설계에 더 효과적이고 표적적임 	<ul style="list-style-type: none"> - 한 입력 자료를 다른 입력자료로 대체하는 문제가 있음 - 생산량 증가 혹은 감소함에 따라 모수의 안정성에 문제가 발생(이는 지역 생산 특성과 관련이 있음) - 많은 수의 매개변수가 포함된 경우, 모델 결과의 유효성은 모델 보정에 사용되는 자료의 질에 매우 의존적 - 모델 내 경제적 가정 사항이 현실과 맞지 않아 정책 평가의 큰 편차를 초래할 수 있음
Computable General Equilibrium (CGE) Model	<ul style="list-style-type: none"> - 연산일반균형(Computable General Equilibrium, CGE) 모델은 경제성 모델로서 정책을 경제적으로 분석하는 데 많이 사용되는 모델임 - CGE 모델은 시장 변화와 관련된 상호연결성을 파악하며 가격 경쟁성을 통해 넥서스 시스템에 대한 정책적 영향을 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 경제계량분석(econometric analysis)은 통계 방법을 사용하여 비경험적 경제 자료를 분석하여 경험적 내용을 제공 - 경제계량분석은 방정식을 통해 넥서스 시스템을 나타내고 경제 이론에 기초한 넥서스 문제를 설명하므로 일반적인 통계 방법과 차이가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - CGE 모델과 유사하게, 계량경제 모델은 데이터에 의존하며, 일부 가정사항은 현실과 다를 수 있음 - 계량경제 모델의 주요 변수와 데이터의 적용으로 인해 오해의 소지가 있는 결론이 도출될 수 있음 - 보다 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해 큰 표본 크기, 데이터 접근 방식 및 다변량 모형을 사용하여 계량경제 분석 수행 필요 - 구축되지 않은 경제 자료에 대해서는 계량경제 모델에서 실제 경제와 근사한 값으로 가정해야 함
Econometric analysis	<ul style="list-style-type: none"> - 경제계량분석(econometric analysis)은 통계 방법을 사용하여 비경험적 경제 자료를 분석하여 경험적 내용을 제공 - 경제계량분석은 방정식을 통해 넥서스 시스템을 나타내고 경제 이론에 기초한 넥서스 문제를 설명하므로 일반적인 통계 방법과 차이가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - BCA는 연구자들이 트레이드오프 결과에 관한 정보를 의사결정자들에게 제공하고, 부족한 자원(예 : 수자원)을 식량이나 에너지에 할당하기 위해 의사결정의 순이익을 명시적으로 검토할 수 있도록 함 - 트레이드오프에 대한 이해를 높이기 위해, BCA는 일정 기간 동안 발생한 비용과 편익을 투명하게 함 - ENA는 생산과 소비의 교차된 사슬에 구체화된 직접 및 간접 흐름에 대한 통일된 분석을 제공할 수 있으며, 여러 요소들 사이의 트레이드오프를 조사할 수 있음 - 연계 분석(linkage analysis), Finn의 사이클링 지수 및 시스템 강건성(robustness)과 같은 다른 기준과 결합하여, ENA는 부문의 성능(사이클링 및 복원력)을 정량화할 수 있음 - 제어 할당(control allocation) 및 의존성 할당(dependence allocation)과 같은 요소 지향적 ENA 지표는 여러 부문(또는 구성 요소) 간의 제어 또는 의존성 역할을 식별 가능하게 함 - 이러한 분석은 넥서스 시스템의 원동력을 찾고 시스템 및 부문 수준에서 자원 관리를 위한 새로운 해결책을 모색하는데 매우 중요 	<ul style="list-style-type: none"> - ENA는 입력변수가 각 구성 요소 및 전체 네트워크에 대한 출력변수와 동일하다는 가정을 가진 정적 방법임 - ENA가 도시 계획에 미치는 영향은 부문별 수준 분석과 토지 이용 기반 도시 계획과 직접 관련된 지표의 부족으로 인해 여전히 제한적
Benefit-Cost analysis (BCA)	<ul style="list-style-type: none"> - 비용편익분석(Benefit-Cost Analysis, BCA)을 통해 환경 관련 프로젝트 및 투자자의 경제적 편익과 비용을 비교할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - ENA는 생산과 소비의 교차된 사슬에 구체화된 직접 및 간접 흐름에 대한 통일된 분석을 제공할 수 있으며, 여러 요소들 사이의 트레이드오프를 조사할 수 있음 - 연계 분석(linkage analysis), Finn의 사이클링 지수 및 시스템 강건성(robustness)과 같은 다른 기준과 결합하여, ENA는 부문의 성능(사이클링 및 복원력)을 정량화할 수 있음 - 제어 할당(control allocation) 및 의존성 할당(dependence allocation)과 같은 요소 지향적 ENA 지표는 여러 부문(또는 구성 요소) 간의 제어 또는 의존성 역할을 식별 가능하게 함 - 이러한 분석은 넥서스 시스템의 원동력을 찾고 시스템 및 부문 수준에서 자원 관리를 위한 새로운 해결책을 모색하는데 매우 중요 	<ul style="list-style-type: none"> - ENA는 입력변수가 각 구성 요소 및 전체 네트워크에 대한 출력변수와 동일하다는 가정을 가진 정적 방법임 - ENA가 도시 계획에 미치는 영향은 부문별 수준 분석과 토지 이용 기반 도시 계획과 직접 관련된 지표의 부족으로 인해 여전히 제한적
Ecological Network Analysis (ENA)	<ul style="list-style-type: none"> - 생태망 분석(ecological network analysis, ENA)은 input-output 분석에서 파생되어 경제와 자연환경의 상호연관성을 나타내는 대표 모델임 - 도시 대사 흐름(metabolic flows)(예 : 물, 에너지 탄소 배출)과 에너지 및 가상 수자원의 전지구적 교환을 해석하는 데 사용 	<ul style="list-style-type: none"> - ENA는 생산과 소비의 교차된 사슬에 구체화된 직접 및 간접 흐름에 대한 통일된 분석을 제공할 수 있으며, 여러 요소들 사이의 트레이드오프를 조사할 수 있음 - 연계 분석(linkage analysis), Finn의 사이클링 지수 및 시스템 강건성(robustness)과 같은 다른 기준과 결합하여, ENA는 부문의 성능(사이클링 및 복원력)을 정량화할 수 있음 - 제어 할당(control allocation) 및 의존성 할당(dependence allocation)과 같은 요소 지향적 ENA 지표는 여러 부문(또는 구성 요소) 간의 제어 또는 의존성 역할을 식별 가능하게 함 - 이러한 분석은 넥서스 시스템의 원동력을 찾고 시스템 및 부문 수준에서 자원 관리를 위한 새로운 해결책을 모색하는데 매우 중요 	<ul style="list-style-type: none"> - ENA는 입력변수가 각 구성 요소 및 전체 네트워크에 대한 출력변수와 동일하다는 가정을 가진 정적 방법임 - ENA가 도시 계획에 미치는 영향은 부문별 수준 분석과 토지 이용 기반 도시 계획과 직접 관련된 지표의 부족으로 인해 여전히 제한적

방법론	정의	장점	단점
Physical Models	<ul style="list-style-type: none"> - 물리 모형(physical model)은 수학 연산과정을 통해 생물 및 생태학적 시스템을 모의 - 시간에 따라 자원의 가용량과 질에 영향을 주는 외부(예 : 가뭄, 해수면상승, 자연재해) 및 내부(예 : 지하수 추출, 지표수, 오염) 요인 분석 - 물리 모형의 결과물은 경제모형의 모수를 산정하는 데 도움이 됨 	<ul style="list-style-type: none"> - 미래 기후 시나리오를 적용하여 의사결정에 도움을 줄 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 통합모형 모의 결과는 지역적 특성과 사회적 요인을 고려하지 않기 때문에 정치, 경제적 신뢰를 주기 어려움
Life-cycle analysis (LCA)	<ul style="list-style-type: none"> - 전과정분석(Life-Cycle Analysis, LCA)은 전체 주기 동안 특정 제품 또는 프로세스의 환경 영향을 정량화하기 위해 가장 널리 사용되는 방법임 	<ul style="list-style-type: none"> - 수명 주기 동안 모든 과정을 정량화하여 보여주고 환경에 항을 미칠 수 있는 임출력 자료를 식별가능하게 함 - 의사결정을 위한 일관성 있는 분석 체계와 환경 자료를 제공할 수 있는 LAC 접근 방식은 생산 및 소비 프로세스 전반에 걸쳐 넥서스 시스템에서 환경 영향을 평가하는데 광범위하게 적용되어 현재의 자원 부족과 전지구적 기후변화에 효과적으로 대처할 수 있는 방법을 모색함 - 다수의 부문간 복잡한 분석을 미시적에서 거시적으로까지 가능하게 하며 피드백루프(feedback loop)를 기반으로 요소 간 분석이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - LCA는 자료에 의존적이며 자료 구축이 잘 되지 않은 곳에서 적용이 어려운 단점이 있음 - 생산 과정을 생략하는 것이 불가피하며, 이는 종종 오류를 내는 요인으로 작용 - LCA는 복잡한 시스템의 동적 분석에 적합하지 않음 - LCA 방식은 환경영향평가에 초점이 맞춰져 있으며 이로 인해 사회적 요인을 고려하는 데 어려움이 있음
System Dynamics Modeling (SDM)	<ul style="list-style-type: none"> - 시스템 다이내믹스(System Dynamics Modeling, SDM)은 하향식 모델을 기반으로 시스템이 정해진 구조에 의해 구성된 것을 가정으로 함 	<ul style="list-style-type: none"> - 학제 간 혹은 다수의 문제가 발생하는 연구에 용이 - 시스템 다이내믹스를 통해 문제 행동의 근원을 식별하고 시스템의 피드백 구조를 이해할 수 있음 - 다양한 시나리오 적용을 통해 시스템 다이내믹스 모델은 시스템 내의 다양한 요소를 조정하고 의사결정을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있는 최적의 시스템 구조를 제공할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 모델링 프로세스 중 넥서스 시스템의 가정과 단순화로 인해, 현실을 잘 반영하지 못할 수 있음 - 현실성 반영을 위해 SDM 모델 개발에 관련 이해관계자를 참여시킬 필요가 있음
Agent-based Modeling (ABM)	<ul style="list-style-type: none"> - ABM(Agent-based Modeling)은 모든 에이전트가 특정한 사회적 독립체로 구성된 상황시 접근법임 - 시스템 수준의 새로운 현상은 모든 에이전트의 행동을 집계하며 조사 	<ul style="list-style-type: none"> - 에이전트를 독립적으로 모의하며 에이전트 사이에 존재하는 다양성과 행동이 최하위 수준(bottom level)에서 관찰될 수 있음 - ABM은 단일 수준 및 개인 수준(single-level)의 한계를 극복하고, 상호작용하며 영향을 주는 에이전트로 구성된 사회 시스템의 모가 가능하며, 이를 통해 복잡한 시스템을 설명하며 현실적이고 효과적인 모델링 프레임워크를 제공 	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 수준의 자료 요구사항과 비경제적 행동의 정의 및 산정으로 인해 넥서스 관련 사례를 적용하기에는 제한적

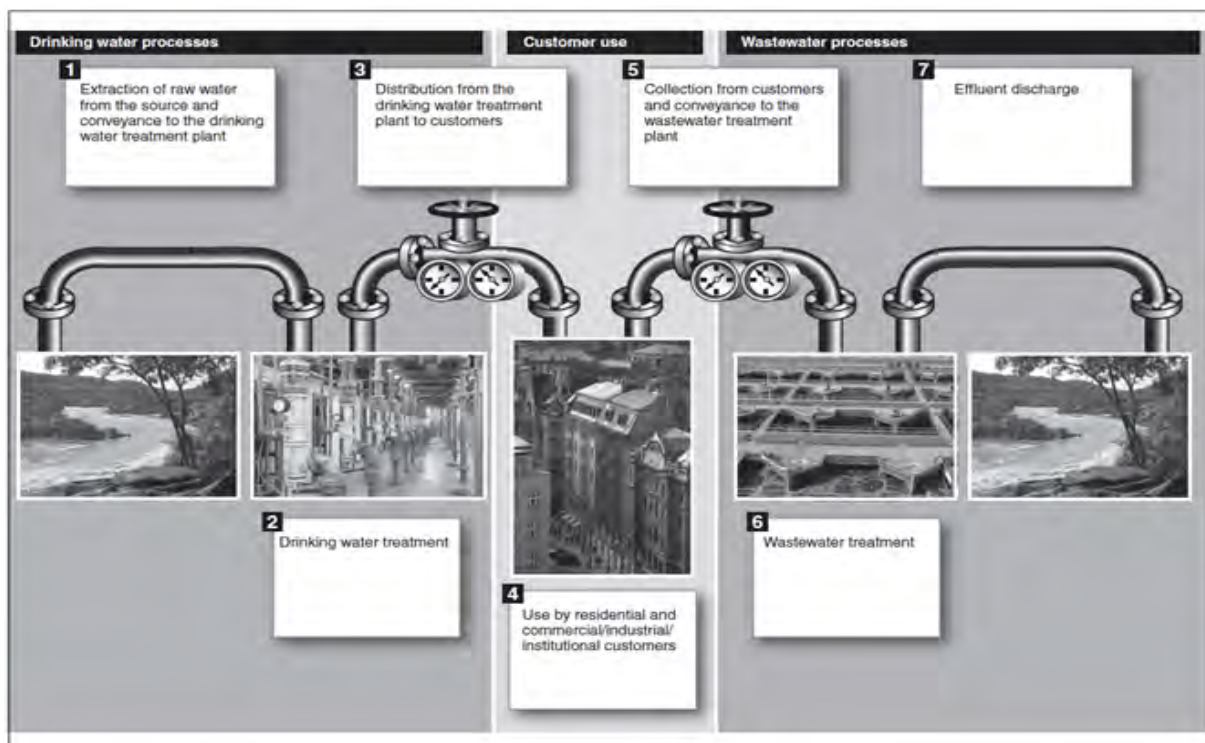
방법론	정의	장점	단점
<p>Integrated index</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 통합지수(integrated index)는 구축할 수 있는 자료를 사용하여 각 지표를 생성 - 시스템 내 다양한 사회 및 환경적 특성을 반영하여 정량적으로 분석 - 인자를 선정하기 전, 지역 전문가의 도움을 받아 물리적, 사회적 특성에 대한 정보를 수집하며 다음과 같은 내용이 포함됨(사회 및 환경 안보를 위협하는 재해, 영향을 주는 내부조건(예 : special needs populations, 재해 요인), 재해 효과로 인한 결과) - 사회학적, 지리학적, 자연과학적 요소를 혼합한 학제 간 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 넥서스 시스템의 복잡성에 상관없이 전체 속성 파악이 가능 - 지수를 기반 방법론을 통해 균일하고 표준화된 포맷으로 비교평가와 벤치마킹을 가능하게 함 - 시스템이 복잡해도 정량적 평가가 가능 - 지역 수준의 물-식량 연계성을 통해 가계 관점에서의 물-식량 연계를 분석할 수 있게 하며 이는 사회 및 환경 평가를 편향되지 않게 함 	<ul style="list-style-type: none"> - 시스템적 자료에 의존하기 때문에 도시계획을 적용하기에 한계점이 있음 - 가중치를 부여하여 편향(bias)을 제거하는 데 어려움이 있음 - 다른 환경을 위한 일반 요소는 특정 지역에 맞춰져 있음 - 신뢰성 있는 자료를 구축하지 못하는 어려움이 있음
<p>Optimization Management Models</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 최적화관리모델(optimization management model)은 하나의 최적화된 자원 배분을 위한 방법을 제공 - 중요한 트레이드오프는 간단한 이론적 최적화 프레임워크를 통해 정성적으로 식별되며 최적화된 자원 추출량과 저장량을 계산하기 위해선 수치적 방법이 필요함 - 간단한 문제에서는 standard gradient method가 자주 사용되며 최대 순현재가치의 해법으로 이어지기도 함 	<ul style="list-style-type: none"> - 구축된 모델 내에서 의사결정을 위한 최적의 조건을 찾을 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 복잡한 문제에서는(예 : 상호 연결된 자원이 증가할 때) 비선형적 프로그램 알고리즘이 요구될 수 있음

2.3 도시 물순환 시스템 물-에너지-환경 넥서스

2.3.1 도시 물순환 시스템

도시화는 전 세계적으로 지속적으로 진행 중에 있으며, 산업화뿐만 아니라 경제성장과 사회 변화의 과정을 뒷받침하는 요소이다. 이와 같은 급격한 도시화는 개발도상국과 같은 국가들에게 발전의 기회를 제공하기도 하지만, 급격한 도시화로 인한 무분별한 도시의 확장은 다양한 문제를 야기한다. 계획적으로 도시를 지속가능하게 개발하는 것은 과학적이고 동적(dynamic)인 접근이 필요하기 때문에 달성하기 매우 어렵다. 또한 도시화를 통한 급격한 인구 증가 및 필요 용수량의 증가로 도시가 필요로 하는 생활, 상업 및 공업용수를 적절하게 공급하지 못하는 사례가 많이 발생되고 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.

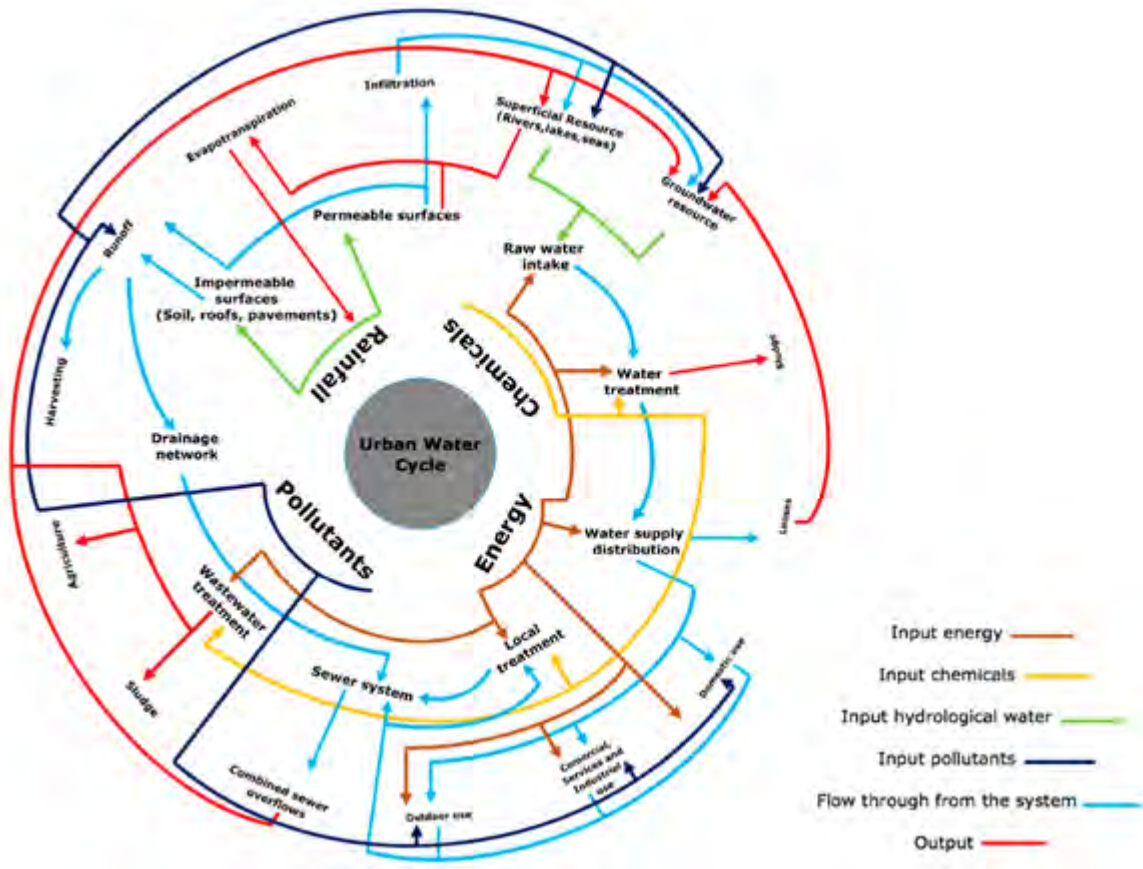
도시 시스템은 다양한 하위 시스템(물리, 사회, 경제, 생태, 환경, 인프라, 기관 시스템)을 포함하고 있으며, 이러한 하위 시스템들은 각각 독립적이며 연결되어 있다. 이중 사람이 관리하는 도시 물순환 시스템은 용수 공급 및 하수처리를 위한 인위적인 물 순환을 중심으로 이루어져 있으며, [그림 2. 20]에서와 같이 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 하수도, 하수처리 등의 과정으로 구성되어 있다.



[그림 2. 20] 도시 물순환 주요 단계

출처 : GAO (2011)

이러한 도시 물 관리에서는 몇 가지 고립된 이슈의 관리보다는 복잡한 시스템의 관리에 더 초점을 두어야 하며, 도시 물순환이나 시스템에서 나타나는 동적인 복잡성은 일반적으로 원인을 시간과 공간에 연관시킬 수 없기 때문에 도시 물 관리에 큰 어려움을 주고 있다. 따라서 효율적인 도시 물 관리를 위해서는 시·공간적인 동적 특성을 고려해야 하며, 더 나아가 [그림 2. 21]에서 나타난 바와 같이 에너지와 환경 부문을 포함하여 고려하는 넥서스 접근 방식이 필요하다.



[그림 2. 21] 도시 물순환 개념도

출처 : Pena-Guzman et al. (2017)

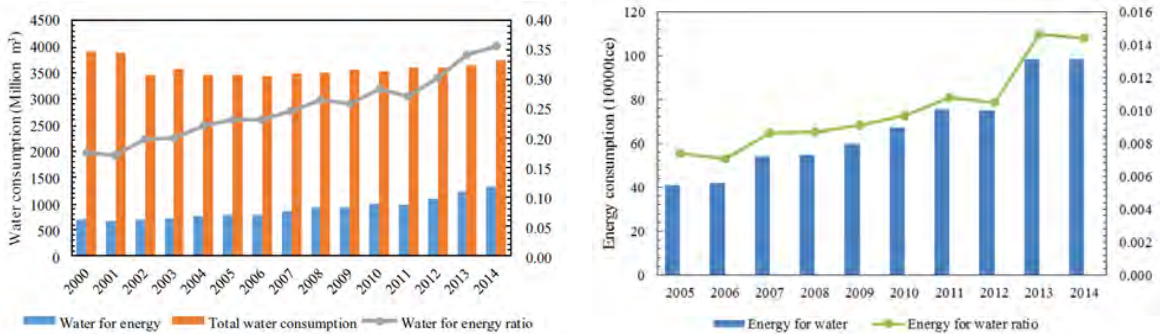
2.3.2 도시 물순환 시스템이 에너지와 환경에 미치는 영향

도시 범위에서 물에 비해 에너지의 상대적인 높은 우선순위와 도시 내 에너지 생산 및 사용량이 전체 에너지 사용량에 큰 영향을 주기 때문에, 일반적으로 도시 스케일의 연구는 에너지 시스템을 기반으로 수행되었다. 그리고 도시 전체 물순환 시스템에서 에너지 사용은 활발히 연구가 진행되는 분야는 아니었으며, 종종 관련 시스템 및 공정(정수처리, 하수처리 등)에서 별개로 산정되었다.

도시 물순환 과정에 필요한 에너지 또는 에너지 인텐시티는 지형, 기술, 수원, 사회적 요인, 효율성, 물 분배 운영 조건 등에 따라 다르게 요구된다. 특히 도시 물순환 시스템의 적용 기술 및 운영 효율성은 에너지 사용량에 막대한 영향을 미친다.

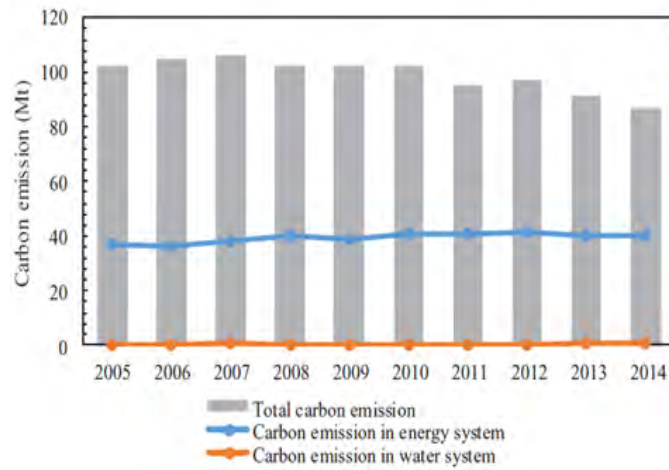
도시 물순환시스템은 전순환(life cycle) 관점에서 에너지 사용량이 많은 단계로 분류되며 (Friedrich, 2002; Nair 등, 2014), 대략 2001년 전체 에너지 중 7%가 도시물순환에 사용되는 것으로 보고되었다 (James K 등, 2002). Zhou 등(2013)은 중국 창저우의 전체 수계에서 에너지 사용량을 산정하며 도시 전체 에너지 중 물 시스템이 10%의 에너지를 사용하는 것으로 분석하였다.

Duan & Chen (2016)은 [그림 2. 22]에서 나타낸바와 같이 중국에서 10년간 에너지 사용량 중에 물 부문에서 사용된 에너지는 약 1% 가량으로, 기존의 연구와는 다르게 작은 에너지가 물순환 시스템에 사용되고 있다고 판단하였다. 그러나 Duan과 Chen (2016) 역시 물순환 시스템에 필요한 총 에너지량이 2005년부터 2014년까지 꾸준히 상승하는 추세를 보이는 것을 확인하였다. 최근 15년간 중국의 총 물 사용량은 큰 변동성을 보이지는 않았지만(2003년 3,580 백만m³, 2014년 3,760 백만m³), 최근 10년간 중국에 총 에너지 사용량은 2005년 59 Mtce부터 2014년 68 Mtce까지 꾸준히 증가하였다. 베이징의 경우 지난 10년간 지하수위가 11m에서 24m까지 떨어지면서 취수 시 에너지 소비량이 증가하였고, 베이징 수도 공급 계획과 지하수 수위 감소에 따라 도시 물순환 시스템에서 소비되는 에너지는 계속 증가할 것으로 전망하였다.



[그림 2. 22] 물과 에너지 사용량 (좌 : 에너지 부문에서 물 사용량, 우 : 물 부문에서 에너지 사용량)
출처 : Duan & Chen (2016)

에너지 생성 과정과 정수 및 하수처리 과정을 포함한 도시 물순환 과정은 온실가스 (Green House Gases, GHGs)를 배출한다. 온실가스 배출량은 간단히 에너지원(전기, 태양열, 화력 등) 별로 배출되는 탄소량에 따라 상이하다. 이전의 연구에서 탄소배출량과 에너지사용량은 강한 양의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었으며, Duan는 Chen (2016)은 [그림 2. 23]에서와 같이 베이징 물순환 시스템 내 탄소배출량은 총 탄소배출량에서 적은 부분을 차지하는 것으로 보고하였다.



[그림 2. 23] 물 및 에너지 시스템별 총 탄소 배출량

출처 : Duan & Chen (2016)

2.3.3 도시 물순환 분석을 위한 시스템 다이내믹스

2.2.3절에서 설명된 바와 같이 넥서스 연구에는 다양한 방법론이 적용되고 있으며, [그림 2. 24]에서 설명된 바와 같이 연구의 우선순위, 목적, 범위, 자료 구축 현황, 상호연관성 등을 고려하여 어떠한 방법이 넥서스 연구에 적합한지 연구자는 판단하여야 한다.



[그림 2. 24] 넥서스 방법론 요약

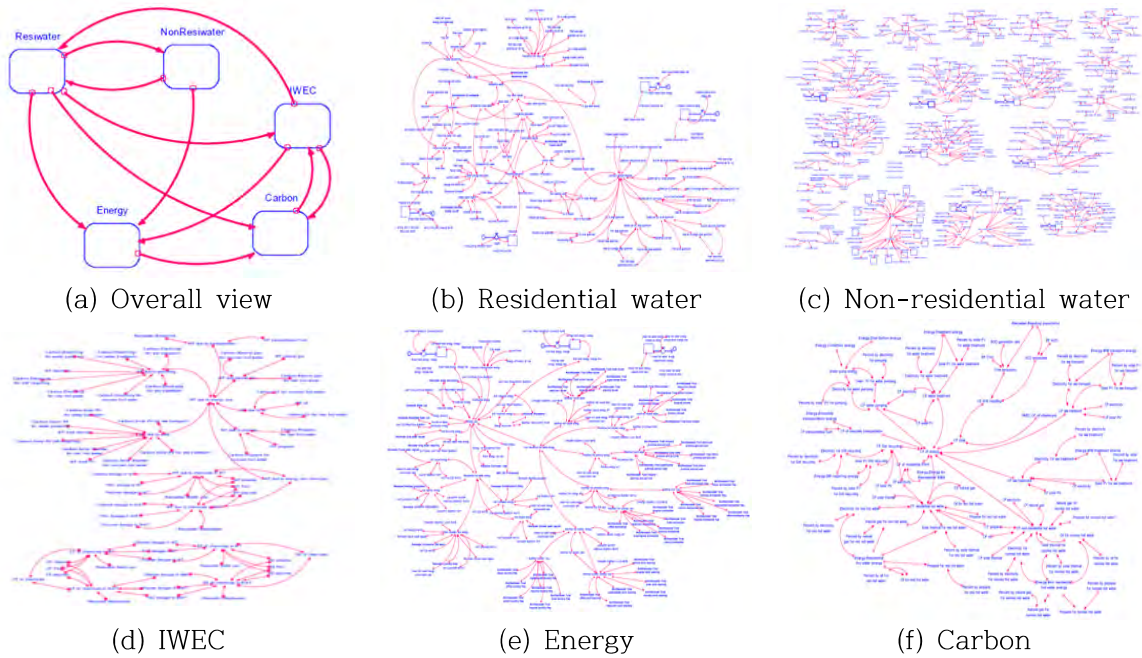
출처 : Zhang et al. (2018)

시스템 개념과 역학 모델에 기초한 시스템 다이내믹스는 도시 계획자와 관리자가 도시 시스템의 지속가능한 개발을 위한 의사 결정 및 정책 수립에 큰 기여를 하고 있다. 시스템 다이내믹스는 특정 문제와 이와 관련된 맥락을 형상화 하는 것으로, 1960년대 초에 산업 공정과 공급망에 적용하며 처음 소개되며, 이후로 다양한 범위의 문제들을 분석하기 위해 사용되었다(Forrester, 1961).

시스템 다이내믹스는 복잡한 인과와 상호 연관성을 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.

도시 물순환 시스템 역시 복잡한 시스템 평가를 위해 학제간 동적(dynamic) 접근방식이 필요 하다(Simonovic, 2003). 이에 따라 해당 도시 물순환 시스템에 철저한 이해를 바탕으로, 도시 물순환 시스템의 복잡성을 해결하기 위한 시스템 다이내믹스는 적합한 방법이며, 시간에 따른 다양한 전략을 비교할 수 있는 다중 시나리오, 다중 속성 분석을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다(Sahlke and Jacobson, 2005).

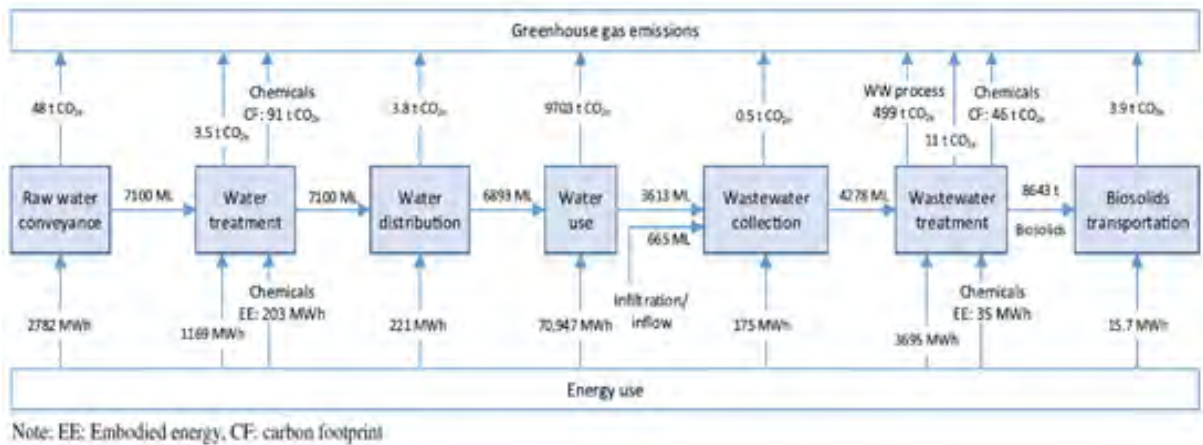
시스템 다이내믹스는 도시 물순환 시스템에 한정된 분석뿐만 아니라 도시 에너지, 도시 환경 시스템으로 범위를 확대해서 적용가능하다. 이에 따라 기존의 도시물순환 중심의 시스템 다이내믹스 연구에서 에너지 사용량과 탄소 배출량을 고려하는 넥서스 관점의 연구가 점차적으로 제시되고 있다.



[그림 2. 26] 물-에너지-탄소 하위 모델별 인과 관계도

출처 : Shrestha 등(2017)

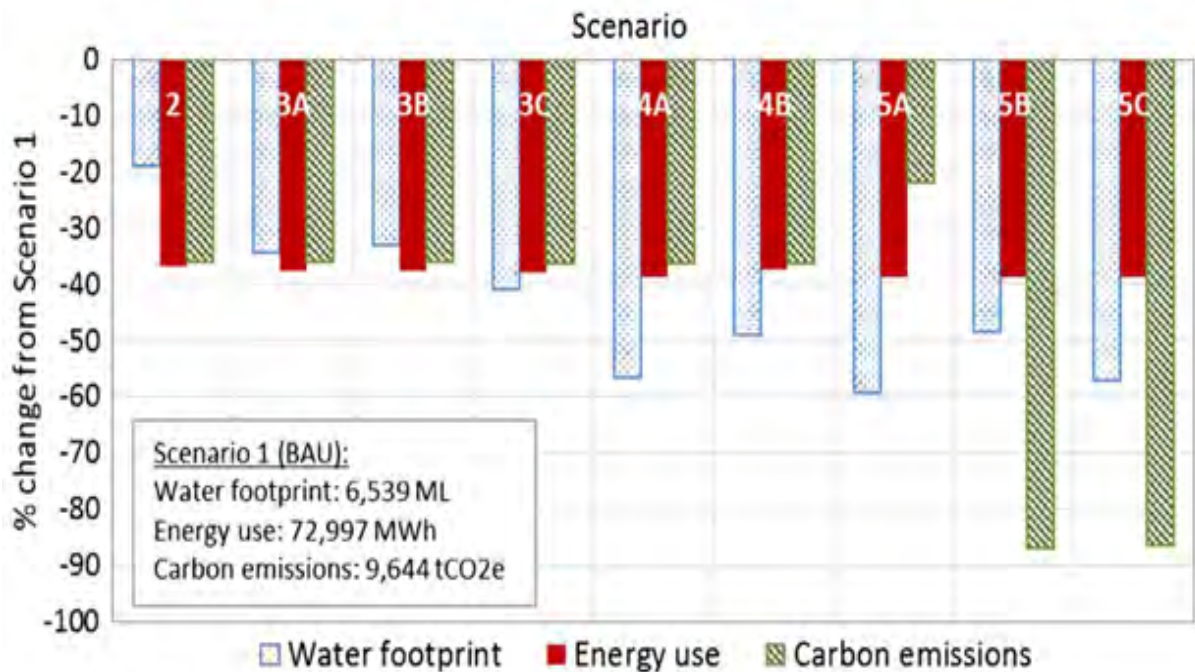
[그림 2. 27]에서 나타난바와 같이 에너지 소비는 주거 및 산업 지역 온수 사용에서 대부분 발생하였으며, 해당 과정에서 총 도시 물순환 에너지의 약 90%를 소비하고 총 탄소 배출량에 약 93%를 기여하는 것으로 확인되었다. 이에 따라 에너지 사용량과 탄소 배출량 감소를 위해서는 온수 사용 관리가 우선 되어야 하며, 조경용수, 세척용 용수(샤워, 세면 등)와 거주용 식기세척을 위한 에너지 사용량이 다른 인자에 비해 민감도가 높은 것으로 나타났다.



[그림 2. 27] 도시 물순환 과정별 연간 물, 에너지 사용량 및 온실가스 배출량

출처 : Shrestha 등(2017)

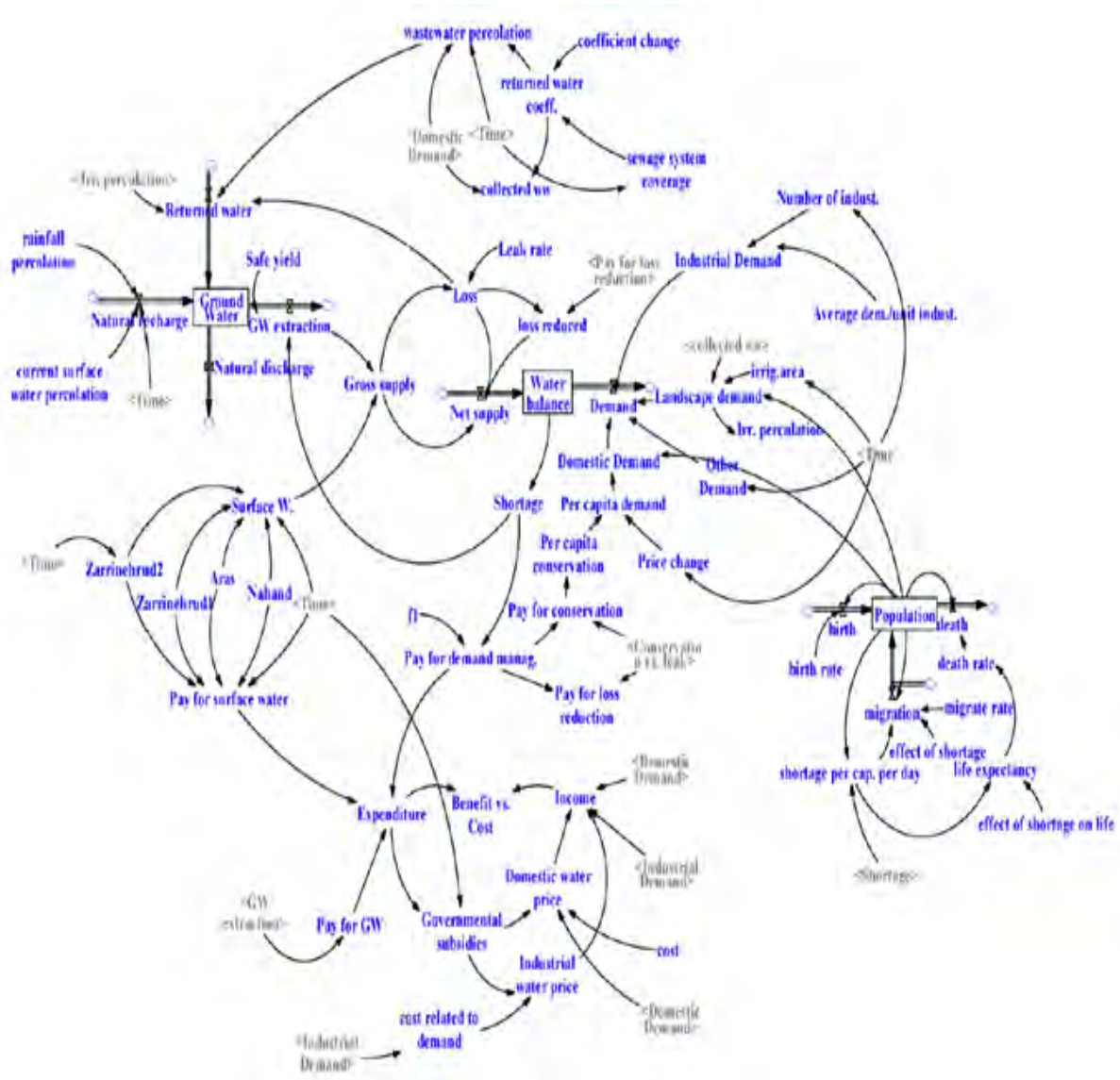
해당 모델을 통해 시나리오 분석을 수행한 결과, [그림 2. 28]과 같이 2015년부터 2034년까지 적용되는 기술(효율적인 물 사용 장치, 건식조경, 물 재이용 등)에 따른 에너지 저감량과 탄소 배출량 저감량을 정량적으로 산정할 수 있었다. 또한 대체된 에너지원(천연 가스, 전기, 태양열로 실내 온수를 공급하는 경우) 도입으로 탄소 배출량은 크게 저감되었다. 해당 연구에서는 시스템 다이내믹스를 적용한 물-에너지-환경 넥서스 모델을 통해 도시 물순환 시스템의 지속가능성을 개선하기 위한 방향을 제시할 수 있었으며, 미래 도시 물순환 시스템의 내 물-에너지-탄소 간 상호연결성을 전망할 수 있음을 보여주었다.



[그림 2. 28] 시나리오별 대비 연평균 물발자국, 에너지 사용량, 탄소 배출량 변화
 출처 : Shrestha 등(2017)

Zarghami와 Akbariyeh(2012)는 반건조지역인 이란 타브리즈의 도시 물순환 시스템을 모의하기 위한 시스템 다이내믹스 모델 개발하였다. 타브리즈 지역은 인구 증가와 최근 발생한 가뭄으로 인해 물 수요량은 증가하였으며, 수요와 공급의 격차를 줄이기 위해서는 더욱 효과적인 관리 도구가 필요하였다.

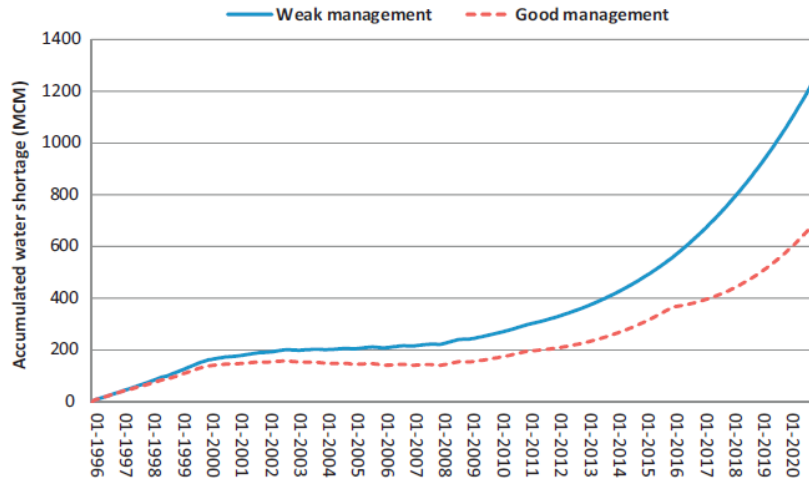
해당 시스템 다이내믹스 모델은 [그림 2. 29]에서 나타난 바와 같이 도시 물순환 시스템에서 용수 공급량(지하수, 광역용수, 재이용수), 용수 수요량(생활, 농업, 공업용수) 및 관리 방안(물 재이용 도입, 광역 연계, 수도요금 변동, 물 절약)에 따른 도시의 물부족 상황을 분석하는 것을 목적으로 하였다.



[그림 2. 29] 타브리즈 시스템 다이나믹스 다이어그램

출처 : Zarghami & Akbariyeh (2012)

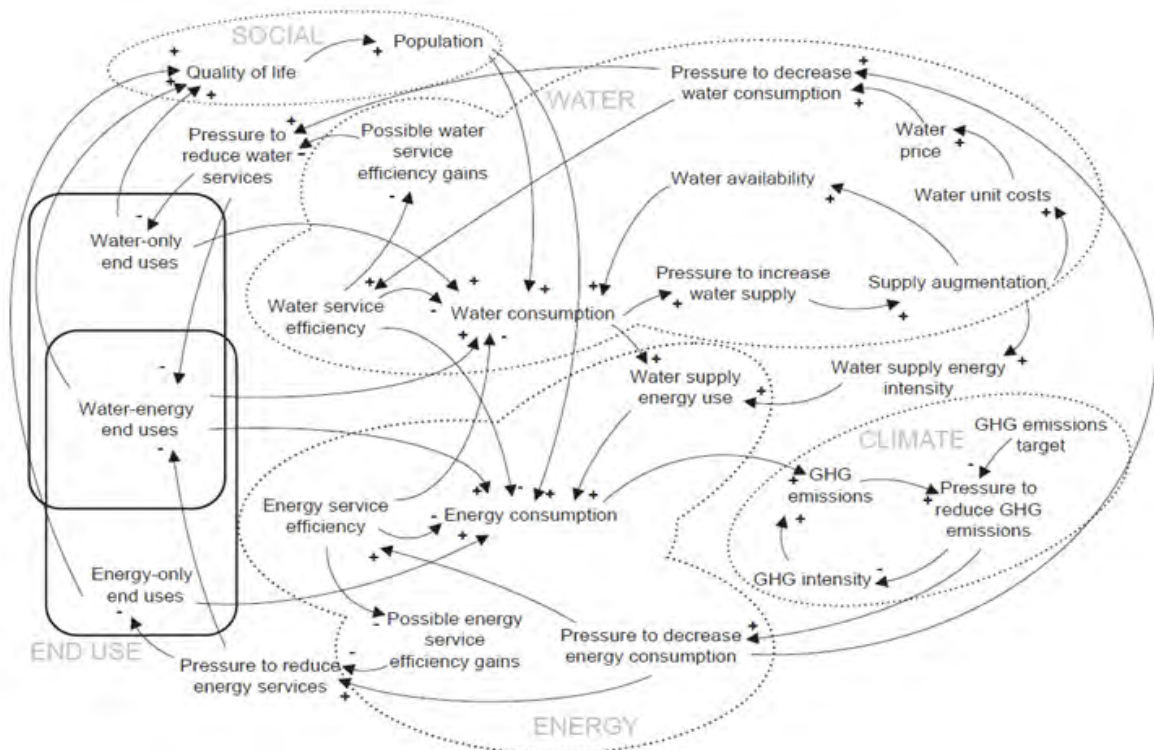
개발 모델 분석 결과 하수를 활용한 물 재이용 시스템의 도입은 물 부족을 줄일 수 있었으나, 이러한 확장은 지하수량이 감소되는 문제를 유발하였다. 미래에 증가하는 용수 수요량을 맞추기 위해서는 다른 유역에서 광역 용수를 공급받을 필요가 있지만, 이는 사회적 분쟁을 일으킬 수 있으므로 실제로 반영하기에는 어려움이 있을 수 있다. 물을 절약하는 것은 물의 수요를 감소시키지만 향후 전망되는 수요량을 충족시키기 위한 전략은 아닌 것으로 분석되었다. [그림 2. 30]의 타브리즈 시스템 다이나믹스 모델은 용수공급의 운영관리를 위한 복합적인 관점에서 도시 물순환 시스템 분석을 위한 도구를 제공할 수 있었으며, 이를 통해 타브리즈 도시 물순환 시스템을 더 잘 이해할 수 있는 통찰력을 제공할 수 있었다.



[그림 2. 30] 타브리즈 물관리별 누적 물 부족량

출처 : Zarghami & Akbariyeh (2012)

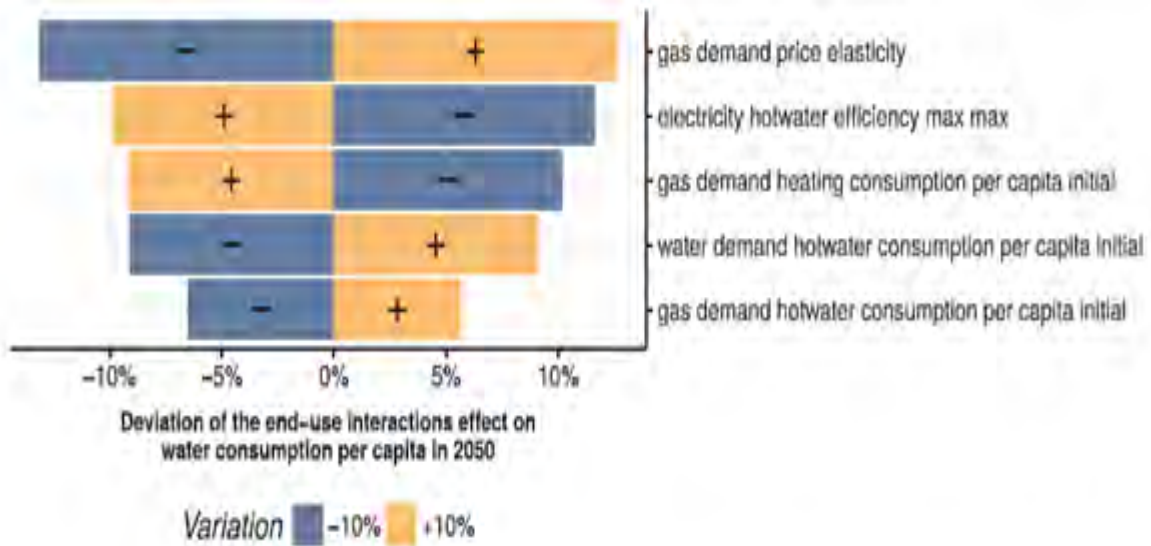
Stercke 등(2018)은 [그림 2. 31]에서와 같이 도시 물순환 시스템과 에너지 관계에서 용수 사용(end-use)을 핵심요소로 가정하여 시스템 다이내믹스 모델을 개발하였다. 개발 모델을 적용하여 용수 가격을 조정을 통한 소비자 수요 감소 정책, 탄소세 기반 기후변화 완화 정책, 시스템 용량과 관련된 수자원 계획 및 공급 확대를 모의하였다.



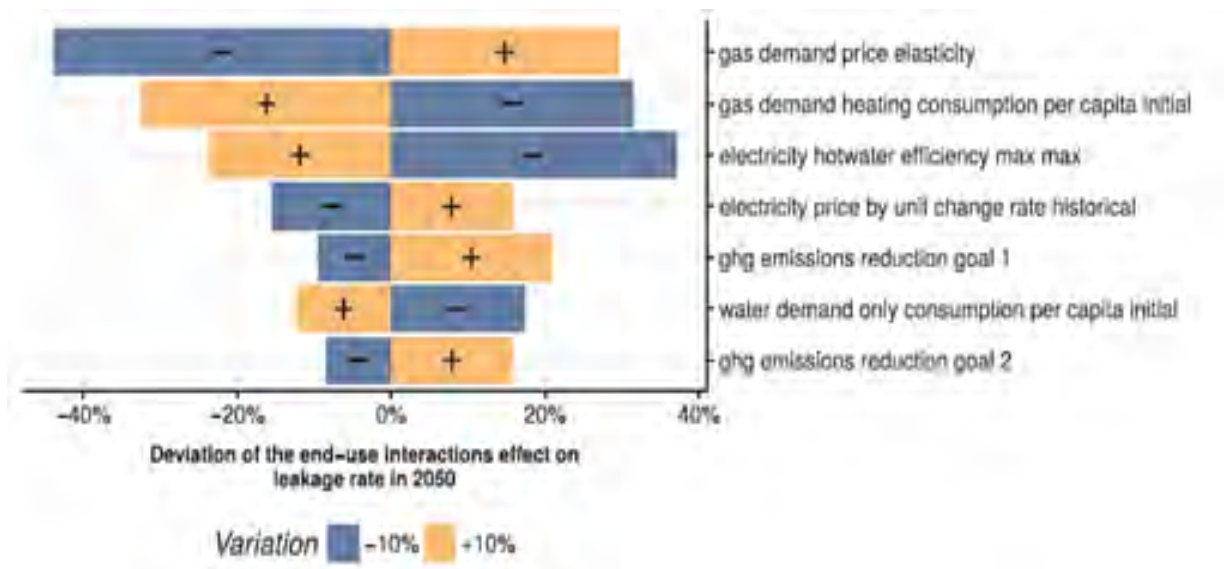
[그림 2. 31] 영국 도시 물-에너지 넥서스 다이어그램

출처 : Stercke 등(2018)

런던의 케이스를 분석해본 결과 용수가격 이외에 활용 기술의 변화가 탄소 발생에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다. 탄소 배출 및 에너지 사용에서 큰 부분을 차지하는 온수 가열의 가스를 전기로 대체할 경우, 가스와 비교했을 때 도시 온실가스 배출 목표와 부합하는 탄소 배출량을 만족할 수 있음을 보여주었다.



[그림 2. 32] 민감도 분석 : 모수값 +10%(+), -10%(-) 변동성에 대한 인구당 물 소비량 분석
출처 : Stercke 등(2018)



[그림 2. 33] 민감도 분석 : 모수값 +10%(+), -10%(-) 변동성에 대한 누수율 분석
출처 : Stercke 등(2018)

2.4 도시 물순환 물-에너지-환경 넥서스 모델 개발

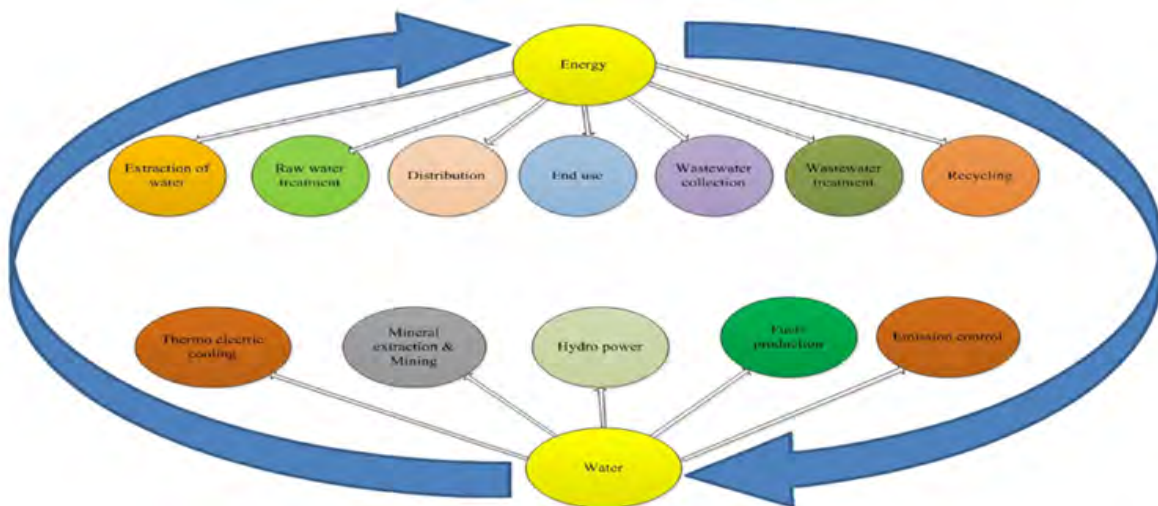
2.4.1 모델 개발 방향

도시 물순환 시스템 물-에너지-환경 넥서스 모델의 부문, 공간적 범위, 상호연계성, 연구 목표 수준 및 분석 목적을 포함한 개발 방향은 [표 2. 9]에 나타난바와 같다.

[표 2. 9] 도시 물순환 시스템 물-에너지-환경 넥서스 모델 개발 방향

항목	넥서스 모델 개발 방향
부문	- 물, 에너지, 환경
공간적 범위	- 도시 수준
상호연계성	- 거시적
연구 목표 수준	- 넥서스 이해
분석 목적	- 내부 관계 분석
	- 일방적(물 → 에너지, 환경) 영향 분석 (물 중심 넥서스 모델 구축)

여러 연구에서 도시 넥서스 분석을 위해서는 [그림 2. 34]에서와 같이 물-에너지 부문의 상호적 영향을 분석하는 것이 필요하며, 한 방향으로만 분석(일방적 영향 분석)을 진행할 경우 두 부문의 인과관계를 분석하는 데 한계가 있음을 강조하고 있다. 그리고 물 중심의 일방적 영향분석을 할 경우 간략하게 물 관련 목표를 달성할 수 있는 것을 보여주지만, 변화가 발생하는 시간과 이에 따른 잠재적 문제점을 보여주는 데 한계가 있을 수 있다. 그러나 본 연구에서는 도시 시스템이 아닌 도시 물순환 시스템 중심의 모델을 구축하여, 해당 시스템 내의 상수관망 물손실 관리 전략에 따른 자원의 사용 및 이동을 분석하고 합리적인 상수관망 물손실 관리 전략 방안을 도출하고자 하였다.

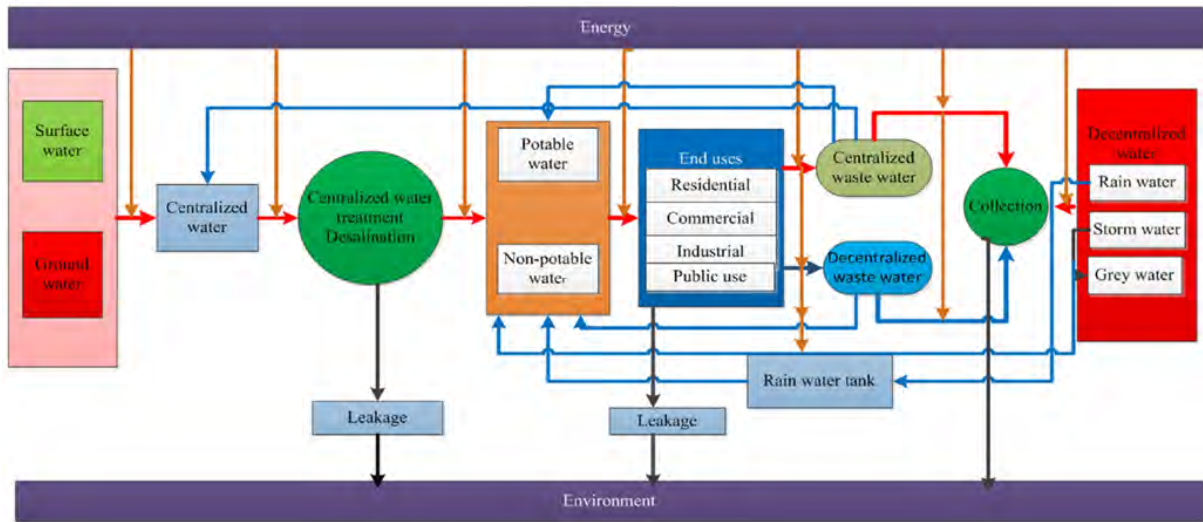


[그림 2. 34] 도시 내 물과 에너지 부문의 관계

출처 : Wakeel 등(2016)

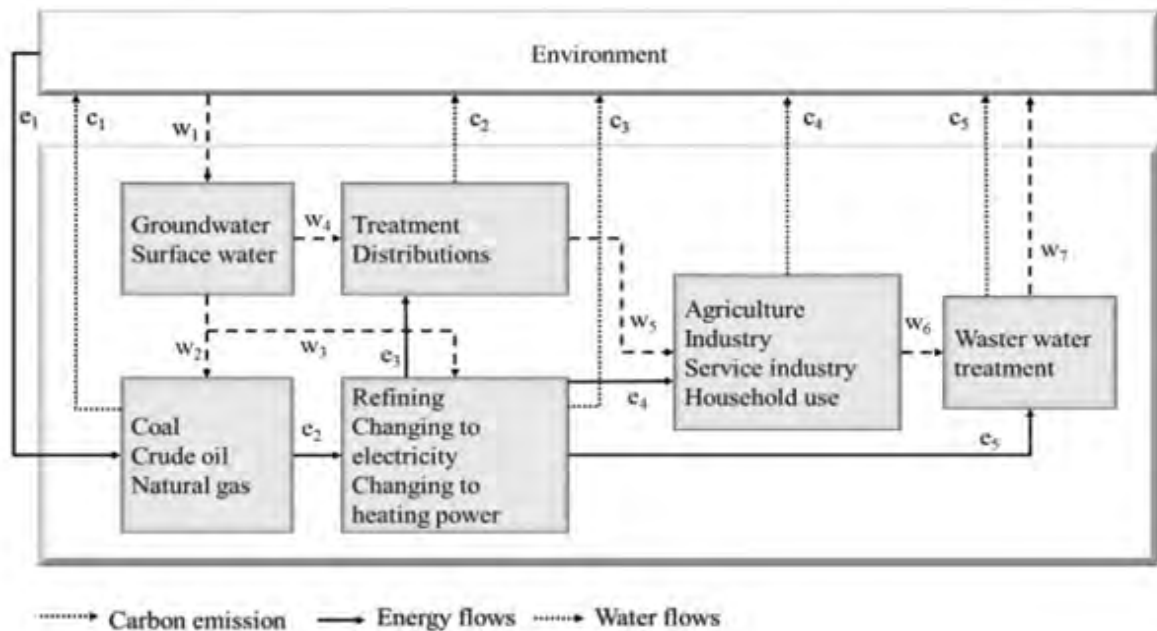
2.4.2 시스템 구성 요소 : 도시 물순환 시스템 시스템 다이내믹스 모델

기존의 도시 물순환 시스템 모델은 [그림 2. 35], [그림 2. 36], 또는 [표 2. 10]에서와 같이 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수사용, 하수집수, 하수처리, 재이용, 방류 등의 과정을 공통적으로 포함하고 있다. 이에 본 연구에서도 해당 과정 및 인과관계를 모델 구축 시 고려하였다.



[그림 2. 35] 도시 물순환 시스템 개념도

출처 : Wakeel et al. (2016)



[그림 2. 36] 간소화된 도시 물-에너지-탄소 넥서스

출처 : Duan & Chen (2016)

[표 2. 10] 기존연구별 도시 물순환 시스템 다이내믹 모델의 인과관계 구성

	Shrestha 등(2017)	Zarghani & Akbariyeh (2012)	Stercke 등(2018)
원수	- Surface water (-)	- Surface water (-) - Ground water (-)	- Surface water (-)
취수 / 도·송수	○	X	X
정수처리	- Chemicals for water treatment (+)	X	X
배·급수	○	X	X
지하수 함양	X	- Returned water (-) - Natural recharge (-) - Natural discharge (+) - Water extraction (+)	X
기타 수처리	- Reclaimed water	○	○
인구	- Population growth rate (-) - Residential water use (+)	- Birth (birth rate) (-) - Death (death rate) (-) - Migration (migration rate) (-) - Landscape demand (+) - Domestic demand (+)	- Birth rate (-) - Death rate (+) - Immigration rate (-) - Emigration rate (+)
물손실	- Water loss	- Leak rate (-) - Loss reduction (+)	- Distribution leakage rate (-)
재이용	- Residential water use (-) - Commercial water use (-) - Institutional water use (-) - Industrial water use (-) - Golf and parks water (-) - Agricultural land (-)	- Industrial demand (-) - Landscape demand (-) - Domestic demand (-) - Other demand	- Water-only end uses (-) - Water0energy end uses (-)
하수집수	- Infiltration inflow (-) - Reclaimed water (+) - Chemicals for WW treatment (+) - Biosolids transportation (+)	X	X
하수처리	○	X	X

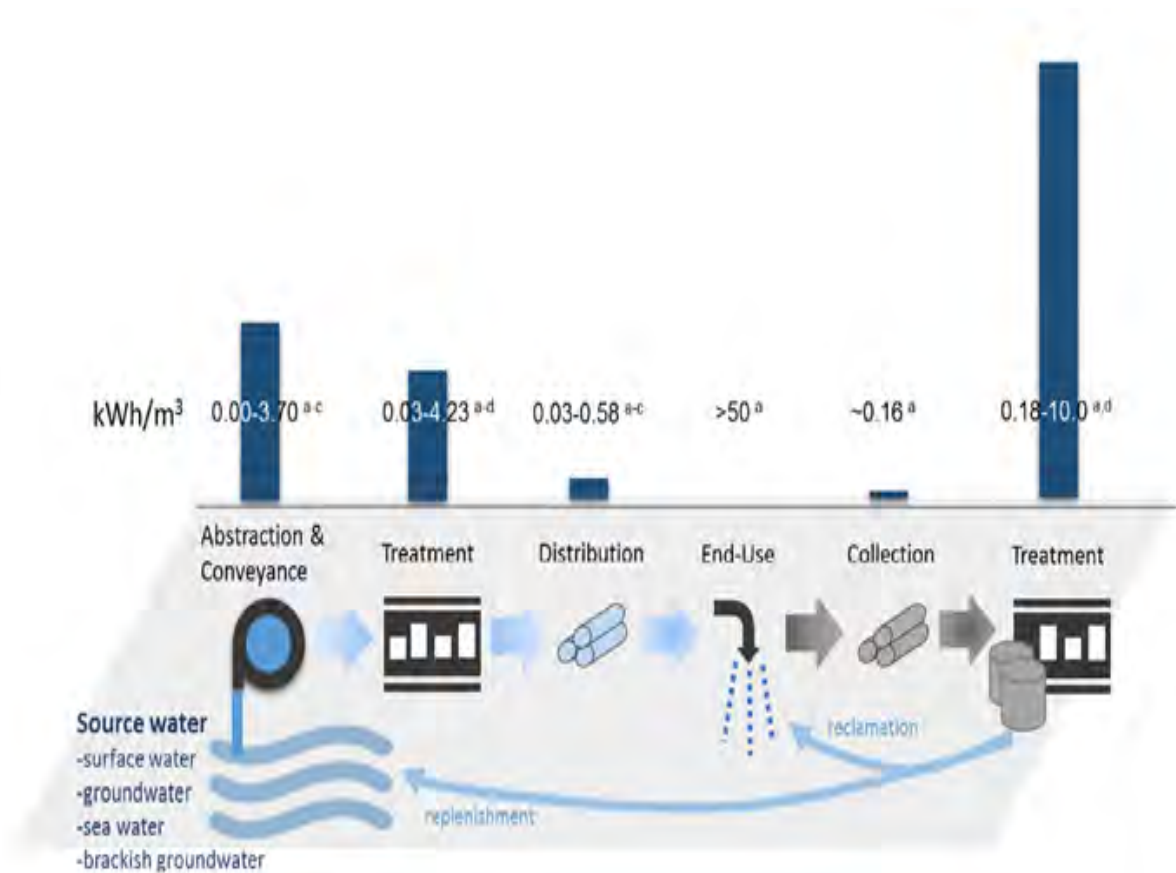
2.4.3 시스템 구성 요소 : 에너지 인텐시티, 이산화탄소 등가량

2.4.2절에 논의한 물순환 시스템의 중요 과정과 더불어 자원의 사용량과 이동량이 큰 과정을 물-에너지-환경 넥서스 모델의 중요 구성 요소로 고려하여야 한다. 특히 도시 물순환 과정별 단위 물 사용량 당 에너지 필요량(에너지 인텐시티)은 모델 구축 시 우선적으로 고려해야하는 항목이다. 또한 동일 과정에서도 지역별, 적용 기술별, 수원별 및 수질별로 다양한 에너지 인텐시티 값이 존재하며, 이러한 에너지 인텐시티 범위는 연구의 다양한 경계 조건으로 반영되어야 한다. 기존연구의 문헌분석을 통해 [표 2. 11]에서 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수사용, 하수집수, 하수처리, 재이용, 방류과정에서 에너지 인텐시티 값의 범위를 정리하였으며, 기존 연구에서 요약한 값은 [그림 2. 37]에서 나타나 있다.

[표 2. 11] 도시 물순환 과정별 에너지 인텐시티 범위

과정	에너지 인텐시티(kWh/m ³)	참고문헌
취수	0.0027~0.05	- Rothausen & Conway (2011) - Nelson et al. (2009)
도·송수	0.21~4.07	- Wilkinson (2000) - Dale (2004) - Anderson (2006) - Stokes and Horvath (2009) - Scott et al. (2009) - Raluy et al. (2005) - Muñoz et al. (2010)
정수처리	0.01~16.4 (지표수 & 지하수)	- Cammerman (2009) - Muñoz et al. (2010) - Kneppers et al. (2009) - WEF (2009) - Cheng (2002) - Friedrich et al. (2009) - Kenway et al. (2008) - Lundie et al. (2004) - Wang et al. (2016) - Li et al. (2016) - Wakeel et al. (2016) - Miller et al. (2013) - Tan et al. (2015) - Tan et al. (2015) - Lemos et al. (2013) - Venkatesh & Brattebø (2011) - Hardy et al. (2012) - Amores et al. (2013) - Zappone et al. (2014) - Lassaux et al. (2007) - Mo et al. (2014)

과정	에너지 인텐시티(kWh/m ³)	참고문헌
		- Hardberger et al. (2009) - Racoviceanu et al. (2007) - Maas (2009)
	0~8.14 (일반 정수처리 공정)	- Kelin et al. (2005)
	0.36~68.69 (담수화 공정)	- Park & Bennett (2010) - Cooley et al. (2006) - National Research Council (2008) - Younos & Tulou (2005)
배·급수	0.2~4.9	- Wakeel et al.(2016)
용수 사용	1.5~50	- Apostolidis, 2010
하수 집수		
하수처리	0.05~7.50	- Friedrich et al. (2009) - Kenway et al. (2008) - Lundie et al. (2004) - Wang et al. (2016) - Li et al. (2016) - Wakeel et al. (2016) - Miller et al. (2013) - Mizuta & Shimada (2010) - Cheng (2002) - Lemos et al. (2013) - Venkatesh & Brattebø (2011) - Hardy et al. (2012) - Amores et al. (2013) - Zappone et al. (2014) - Lassaux et al. (2007) - Mo et al. (2014) - Hardberger et al. (2009) - Racoviceanu et al. (2007)
재이용	0.72~3.8 (중앙 집중식 시스템)	- Munoz et al. (2010) - Gruenspecht et al. (2010) - Coffey (2006) - Anderson (2006) - Apostolidis (2010) - GPSC (2006) - Knight et al. (2007)
	1.7~4.5 (분산형 시스템)	- Apostolidis (2010)
방류	0.02	- Apostolidis (2010)



[그림 2. 37] 도시 물순환 과정별 에너지 인텐시티 범위

출처 : Lee et al. (2017)

가. 취수

지하수 및 지표수에 대한 직접 에너지 소비량 조사에 따르면 지표수보다 지하수에 대한 직접 에너지 사용이 일반적으로 27% 더 높은 것으로 나타났다(Mo 등, 2011). 이와 유사한 결과가 전력연구소에 의해 보고되었으며, 지하수 취수에 더 많은 에너지가 사용되기 때문에 지하수 공급 시스템이 지표수 공급 시스템보다 직접 에너지를 약 30% 더 필요로 하였다(Goldstein & Smith, 2002). 미국에서는 전체 에너지 사용량 중 1~2%가 지하수 펌프에 사용되고 있으며, 캘리포니아에서는 7%가 지하수 펌프를 위한 전력 생산에 사용되는 것으로 보고되었다.

지하수 사용을 위해 필요한 에너지는 지하수 수위, 취수량, 펌프 에너지 효율성 등에 의존 하며, [표 2. 12]에 기존의 연구에서 제시된 이론적인 에너지 인텐시티와 현장에서 측정된 에너지 인텐시티가 제시되어 있다.

[표 2. 12] 취수 과정의 에너지 인텐시티

형태	에너지 인텐시티 (kWh/m ³ /m)	고려조건	참고문헌
Theoretical physical relationship	0.0027	- Density of 1000 kg/m ³ 100% efficiency	Rothausen & Conway (2011)
	0.00273	- Without friction - At peak efficiency	Nelson 등(2009)
Case study	0.01 ~ 0.05	- 0.01 kWh/m ³ are consumed when water is withdrawn at 36.5m while 0.05 kWh/m ³ at 121 m	Cohen 등(2004); GAO(2011)

나. 도·송수

일반적으로 도·송수 과정에 필요한 에너지는 도·송수 관로의 길이가 길수록, 관경이 작을수록, 관 조도계수(C 값)이 작을수록 증가한다. 기존 문헌에 따른 지역별 도·송수 과정의 에너지 인텐시티는 [표 2. 13]에 설명된 값과 같다.

[표 2. 13] 도·송수 과정의 에너지 인텐시티

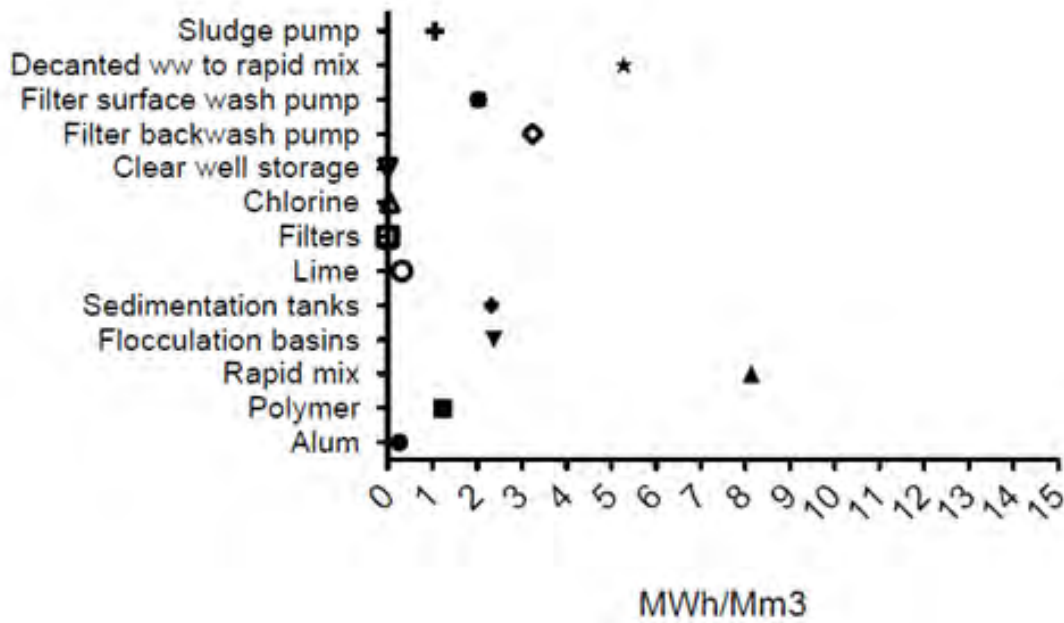
지역 / 위치	에너지 사용량 (kWh/m ³)	참고문헌
From Colorado River to Los Angelas (US)	1.6	Wilkinson (2000)
From Coastal Branch to Aqueduct (US)	2.31	Dale (2004) Anderson (2006)
Water pipeline supply (Australia)	3.3	Stokes and Horvath (2009)
SSDP to PIWSS (Australia)	0.21	Scott 등(2009)
Shoal haven River (Australia)	2.4	Anderson (2006)
From Tortosa to Aguadulce (Spain)	4.07	Raluy 등(2005) Muñoz 등(2010)

다. 정수처리

전 세계적으로 도시 생활용수와 산업용수를 위한 공급 시스템과 정수처리를 위해 사용되는 에너지는 전체 에너지 중 2-3%에 이른다(TRCA, 2010). 미국에서는 정수처리 및 공급을 위해 4%의 에너지가 사용되는 것으로 보고되었으며(Goldstein & Smith, 2002), 캘리포니아에서는 정수처리 및 공급을 위해 이보다 많은 5%의 에너지가 사용되고 있다(CEC, 2005). 이와 같은 정수처리 공정에 필요한 에너지는 원수의 수질과 적용된 정수처리 공정에 따라 달라진다. 일반적으로 지하수는 지표수보다 총용존고형물이 적기 때문에 지표수 처리공정보다 적은 에너지가 사용 된다(Cooley & Wilkinson, 2012). [표 2. 14]에 지역별 정수처리 공정에 필요한 에너지 인텐시티가 요약되어 있으며, [그림 2. 38]과 [표 2. 15]에는 정수처리 공정별 에너지 인텐시티가 설명되어 있다.

[표 2. 14] 지역 및 위치별 정수처리 과정의 에너지 인텐시티 및 이산화탄소 등가량

지역/위치	에너지 인텐시티 (kWh/m ³)	이산화탄소 등가량 (g CO ₂ eq/m ³)	참고문헌
Australia	0.01-0.2		Cammerman (2009)
Spain	0.11-1.5		Muñoz 등(2010)
New Zealand	0.15-0.44		Kneppers 등(2009)
US	0.184-0.47		WEF (2009)
Canada	0.38-1.33		Maas (2010)
Taiwan	0.16-0.25		Cheng (2002)
Durban, South Africa	0.19	481	Friedrich 등(2009)
Adelaide, Australia	1.92	1884	Kenway 등(2008)
Auckland, New Zealand	0.21	54	Kenway 등(2008)
Brisbane, Australia	0.68	586	Kenway 등(2008)
Gold Coast, Australia	0.21	206	Kenway 등(2008)
Melbourne, Australia	0.09	69	Kenway 등(2008)
Perth, Australia	0.98	1030	Kenway 등(2008)
Sydney, Australia	1.10	1044	Kenway 등(2008)
Sydney, Australia	0.34	406-452	Lundie 등(2004)
China	0.43-0.67	-	Wang 등(2016), Li 등(2016), Wakeel 등(2016)
India	0.17-0.71	-	Miller 등(2013)
Qingdao, China	0.73-1.08	-	Tan 등(2015)
Taipei, Taiwan	0.26-0.51	-	Cheng (2002)
Aveiro, Portugal	0.79	766-898	Lemos 등(2013)
Oslo, Norway	0.39-0.44	70-80	Venkatesh & Brattebø (2011)
Spain	0.23-6.99	-	Hardy 등(2012)
Tarragona, Spain	0.85	736	Amores 등(2013)
Turin, Italy	0.85	323	Zappone 등(2014)
Walloon region, Belgium	0.39	-	Lassaux 등(2007)
Tampa Bay, Florida, USA	3.00-3.60	1585-1911	Mo 등(2014)
Texas, USA	0.38-0.48	-	Hardberger 등(2009)
Toronto, Canada	0.64-0.73	111-128	Racoviceanu 등(2007)
Province of Ontario, Canada	0.68-1.11	184-300	Maas (2009)
San Diego, California, USA	6.20-16.4	1855-4903	Mo 등(2014)



[그림 2. 38] 정수처리 세부 공정별 에너지 인텐시티

출처 : Wang (2014)

[표 2. 15] 세부 공정별 정수처리 과정의 에너지 인텐시티

Process	에너지 인텐시티 (MWh/Mm ³)	참고문헌
Alum	0.26	Kelin 등(2005)
Polymer	1.24	Kelin 등(2005)
Rapid mix	8.14	Kelin 등(2005)
Flocculation basins	2.38	Kelin 등(2005)
Sedimentation tanks	2.32	Kelin 등(2005)
Lime	0.32	Kelin 등(2005)
Filters	0.00	Kelin 등(2005)
Chlorine	0.05	Kelin 등(2005)
Clear well storage	0.00	Kelin 등(2005)
Filter backwash pump	3.25	Kelin 등(2005)
Filter surface wash pump	2.03	Kelin 등(2005)
Decanted washwater to rapid mix	5.28	Kelin 등(2005)
Sludge pump	1.03	Kelin 등(2005)

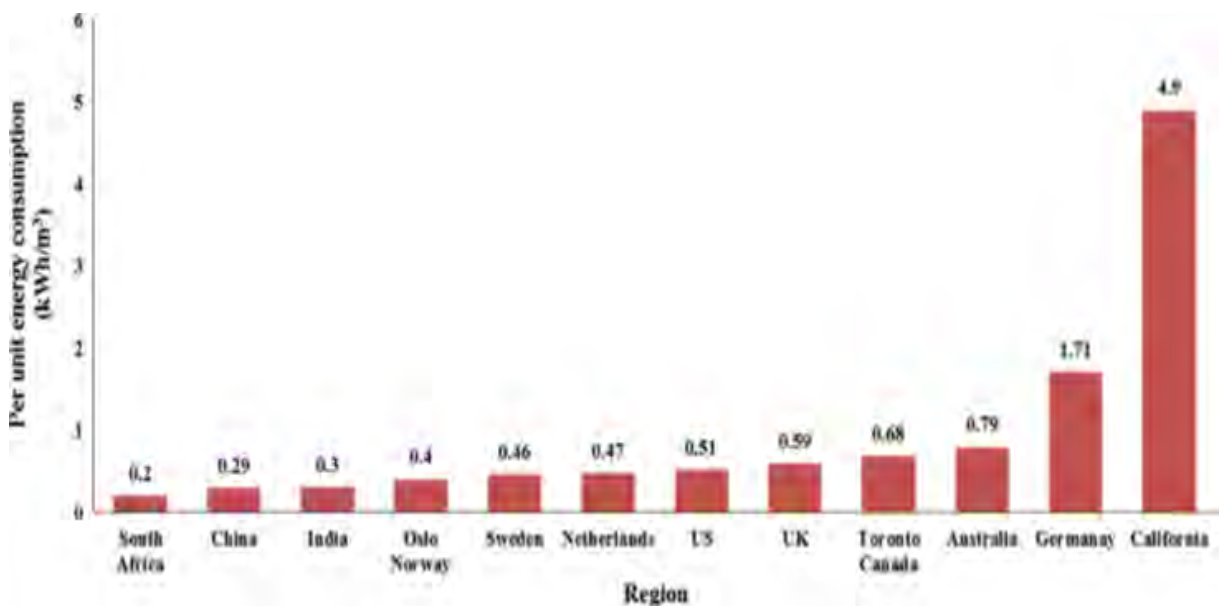
담수는 부족한 수자원을 공급을 위한 대체 수자원으로 물 문제가 있는 특정 지역에서 중요한 역할을 할 수 있다. 담수화는 일반적인 정수처리 과정보다 더 많은 에너지가 필요로 하지만 새로운 담수 시설은 높은 효율성을 가진 새로운 기술을 적용하여 더 적은 에너지를 사용하며 그 격차는 줄어들고 있는 추세이다. 한 예로, 담수과정의 에너지 인텐시티는 이전에 16 kWh/m³에서 2011년 3.0 kWh/m³으로 크게 줄어들었다 (Elimelech & Phillip, 2011). 그러나 담수화 과정의 에너지 인텐시티 범위는 정수처리 과정의 에너지 인텐시티보다 더 넓으며, 그 값은 [표 2. 16]에 나타난 바와 같다.

[표 2. 16] 담수화 적용 기술별 에너지 인텐시티

담수화 기술	에너지 인텐시티 (MWh/Mm ³)	참고문헌
Reverse osmosis (RO) Brackish water	0.36-0.47	Park & Bennett (2010)
RO for seawater	0.79	Cooley et al. (2006)
Nanofiltration	0.92	National Research Council (2008)
Electro dialysis	0.5-1.7	National Research Council (2008), Younos & Tulou (2005)
Multistage-flash-distillation	26.42-68.69	National Research Council (2008), Younos & Tulou (2005)
Thermal process	4.7	Younos & Tulou (2005)
Thermal + electrical	4.7	Younos & Tulou (2005)
Multiple-effect distillation	39.71-105.7	National Research Council (2008)
Sea water oldest and efficient	7.9-15.85	National Research Council (2008), Younos & Tulou (2005)
Vapor compression		
Seawater + thermal process		

라. 배·급수

정수처리된 용수는 배·급수 관망을 통해 소비자에게 각각 다른 목적(생활용수, 농업용수, 공업용수)으로 공급되며, 해당 과정의 인텐시티의 영향 인자는 도·송수 과정의 영향인자와 동일하다. [그림 2. 39]에 배·급수 과정에 지역별 에너지 인텐시티가 요약되어 있으며, 그 값은 지역별로 편차가 큼을 알 수 있었다.



[그림 2. 39] 지역별 배·급수 과정의 인텐시티

출처 : Wakeel et al. (2016)

마. 용수 사용

물의 최종 용도에서 소비되는 에너지는 사용 목적에 따라 크게 변동되며, 해당 과정에 필요한 에너지 소모량은 취수, 공급 및 처리 과정보다 상대적으로 높다. 그리고 생활 및 공업용수는 농업용수보다 최종 용수 사용 단계에서 더 높은 에너지를 필요로 한다(Siddiqi & Fletcher, 2015). 캐나다의 경우 산업 부문의 물 순환에서 사용되는 에너지량은(38.5%) 농업 부문(2.7%)보다 월등히 높은 것으로 나타났다(Cuddihy et al., 2005). 물의 사용 용도 별 에너지 인텐시티는 [표 2. 17]에 나타나 있다.

이러한 에너지 소비의 격차는 가정과 산업에서 사용되는 온수 때문에 주로 발생 한다. 호주에서 물을 가열하는 데 사용되는 에너지는 전체 물에 사용되는 에너지 중 97%에 해당되며(Nair et al., 2014), 미국에서는 물에 사용되는 직접 에너지 중 75%는 가열하는 데 사용되는 것으로 보고되었다(Sanders & Webber, 2015).

[표 2. 17] 용수 사용 용도별 에너지 인텐시티

사용목적	에너지 인텐시티 (kW h/m ³)	참고문헌
heating	50	Apostolidis (2010)
swimming pools	7.5	Apostolidis (2010)
washing machines	3.5	Apostolidis (2010)
dishwashers	2.5	Apostolidis (2010)

바. 하수 집수

일반적인 하수도 시스템은 중력식으로 운영이 되므로 별도의 에너지를 필요하지 않으나, 우수를 고려할 경우 우수 펌프에 에너지가 사용된다.

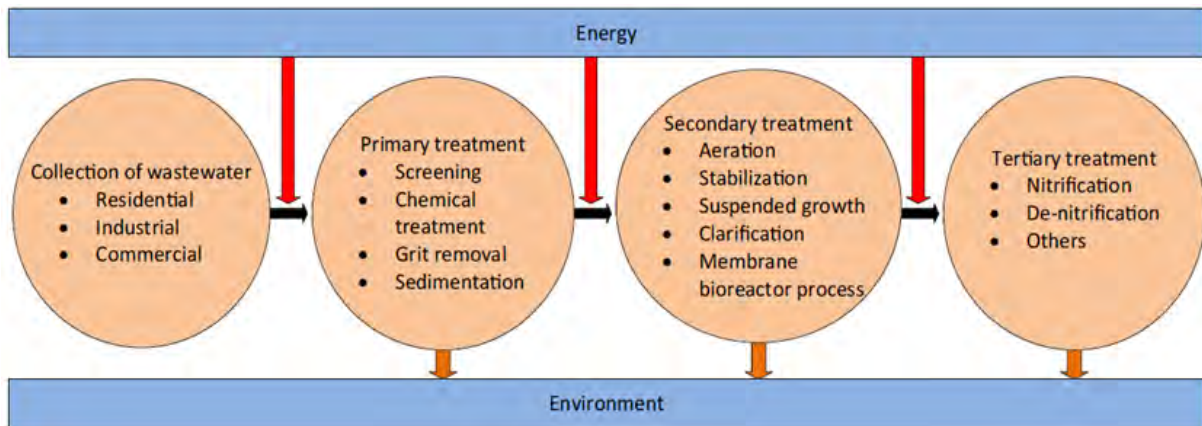
사. 하수 처리

하수처리장 운영을 위한 에너지 소비량 조사 결과, 북미지역에서는 도시 물순환 과정의 에너지 사용량의 94%가 하수처리장 운영에 사용되는 것으로 나타났다(Racoviceanu et al, 2007; Friedrich, 2002). 지역 및 위치별로 전체적인 하수처리 과정에 필요한 에너지 인텐시티와 이산화탄소 등가량 값은 [표 2. 18]에 요약되어 있다.

[표 2. 18] 지역 및 위치별 하수처리 과정의 에너지 인텐시티 및 이산화탄소 증가량

지역/위치	에너지 인텐시티 (kWh/m ³)	이산화탄소 증가량 (g CO ₂ eq/m ³)	참고문헌
Durban, South Africa	0.58	353	Friedrich 등(2009)
Adelaide, Australia	0.69	674	Kenway 등(2008)
Auckland, New Zealand	0.84	219	Kenway 등(2008)
Brisbane, Australia	0.57	499	Friedrich 등(2009)
Gold Coast, Australia	1.00	991	Kenway 등(2008)
Melbourne, Australia	1.13	835	Kenway 등(2008)
Perth, Australia	0.71	748	Kenway 등(2008)
Sydney, Australia	0.45	423	Kenway 등(2008)
Sydney, Australia	0.48	672-719	Lundie 등(2004)
China	0.13-0.50	-	Wang 등(2016) Li 등(2016) Wakeel 등(2016)
India	0.05-1.40	-	Miller 등(2013)
Japan	0.30-2.07	-	Mizuta & Shimada (2010)
Taipei, Taiwan	0.39-0.44	-	Cheng (2002)
Aveiro, Portugal	0.84	659-851	Lemos 등(2013)
Oslo, Norway	0.67-0.81	55-62	Venkatesh & Brattebø (2011)
Spain	0.41-0.72	-	Hardy 등(2012)
Tarragona, Spain	1.09	128	Amores 등(2013)
Turin, Italy	0.47	126	Zappone 등(2014)
Walloon region, Belgium	0.31	-	Lassaux 등(2007)
Tampa Bay, Florida, USA	4.50-5.10	2457-2739	Mo 등(2014)
Texas, USA	0.32-0.36	-	Hardberger 등(2009)
Toronto, Canada	0.47	22	Racoviceanu 등(2007)
Province of Ontario, Canada	0.34-0.70	92-189	Maas (2009)
San Diego, California, USA	3.50-7.50	1041-2249	Mo 등(2014)

[그림 2. 40]에서와 같이 하수처리장의 규모와 위치, 수질 오염 정도, 불순물 유형, 인구, 처리과정 유형, 최종 사용자, 배출기준 및 근로자의 역량에 따라 하수처리 공정에서 다양한 양의 에너지가 소비된다. 일반적으로 1차 하수처리 단계는 다른 단계에 비해 에너지 집약도가 낮으며 설계 및 운영에 영향을 받으며, 2차 하수처리 과정은 기술 수준과 하수 수질에 따르며, 고도 처리과정은 에너지 집약이 가장 큰 과정이다. 하수처리 공정별 에너지 인텐시티는 [표 2. 19]와 [그림 2. 41]에 요약되어 있다.

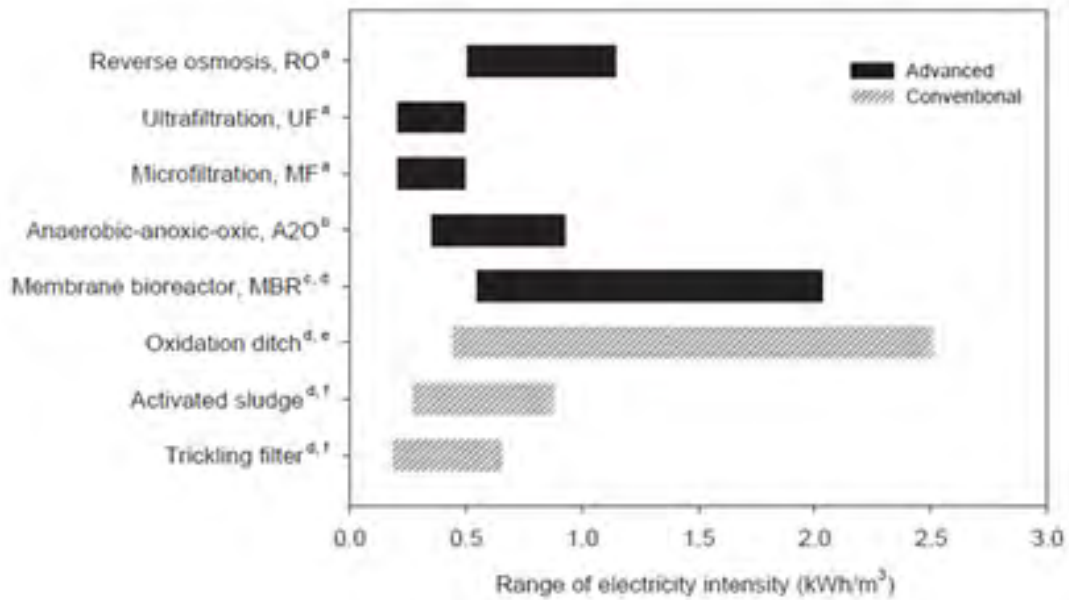


[그림 2. 40] 하수처리 공정

출처 : Wakeel et al. (2016)

[표 2. 19] 하수처리 공정별 에너지 사용량

지역	1차 처리 (kWh/m ³)	2차 처리 (kWh/m ³)				고도 처리 (kWh/m ³)	참고문헌
		라군	산화구 공법	활성화 슬러지공법	멤브레인 바이오리액터		
Canada	0.02-0.1	-	-	-	-	-	Maas (2009) Kneppers 등(2009)
California	0.003-0.04	-	-	-	-	-	Schwarzenegger (2006)
US	0.04	0.09-0.29	-	0.33-0.60	0.8-0.9; 0.49-1.5	-	Radcliffe 등(2004), Schwarzenegger (2006), NEEA (2001) Lesjean & Luck (2005)
Australia	0.1-0.37	-	0.5-1	0.1 (avg)	0.10-0.82	0.23-10.55	WEF (2009) Kenway 등(2008), Radcliffe 등(2004)
New Zealand	0.04-0.19	-	-	-	-	0.49	Maas(2009) Kneppers 등(2009)
China	-	0.253 (avg)	0.302	0.269	0.33 (avg)	-	Yang 등(2010)
Japan	-	-	0.43-2.07	0.3-1.89	-	0.39-3.74	Radcliffe 등(2004)
Taiwan	-	-	-	-	-	0.41	Mizuta & Shimada (2010)



[그림 2. 41] 특정 하수처리 공정별 에너지 인텐시티 범위

출처 : Lee et al. (2017)

아. 재이용

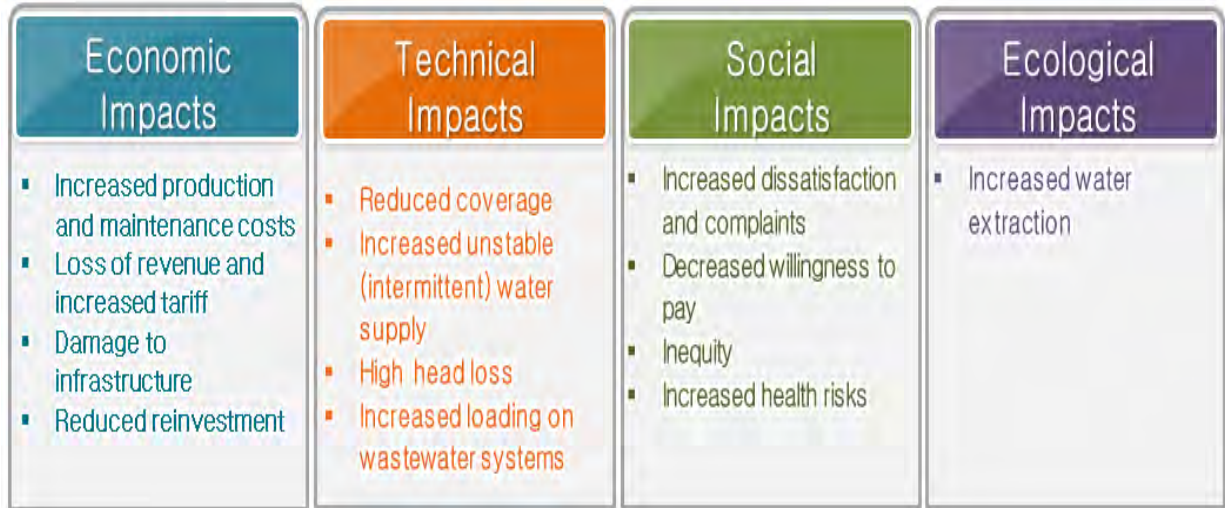
하수 배출에 대한 지역사회 및 환경적 우려 및 부족한 용수 확보를 위해 선진국에서는 농업용수 및 생활용수 목적의 재이용을 고려하며, 실제 도입·활용하고 있다. 그러나 이와 같은 물 재이용은 물 절약을 실천할 수 있지만 많은 에너지를 필요로 하는 과정이다. 현재 물재이용 과정에서 널리 사용되고 있는 역삼투압 방식은 2.8~3.8 kWh/m³의 에너지를 필요로 한다(Anderson, 2006; Apostolidis, 2010; GPSC, 2006; Knight 등, 2007). 그리고 이스라엘과 싱가포르의 하수의 87%와 50%를 재이용하지만 동시에 0.72~0.93 kWh/m³의 상대적으로 낮은 에너지를 재이용에 필요로 한다(Munoz 등, 2010; Gruenspecht 등, 2010; Coffey, 2006).

자. 방류

하수는 일반적으로 강, 하류, 바다로 방류되며, 해당과정에 소모되는 에너지는 다른 도시 물순환 과정에 비해 상대적으로 적다. Apostolidis(2010)은 호주에서 0.02 kWh/m³의 에너지가 하수를 방류하는데 사용된다고 보고하였다.

2.4.4 물손실 관리

도시에서 용수를 공급하는데 부족한 수원, 나쁜 원수 수질, 고령화된 인프라 및 높은 누수율로 나타낼 수 있는 낮은 수준의 운영관리 등의 문제가 발생되고 있으며, 이러한 문제들은 [그림 2. 42]에 나타난 바와 같이 경제적, 기술적, 사회적 및 환경적인 영향을 끼친다. 이중 누수는 수도사업자의 수익과 직결되는 문제로, 정부와 수도 사업자들은 물손실을 줄이는 것의 중요성을 인지하고 있다.



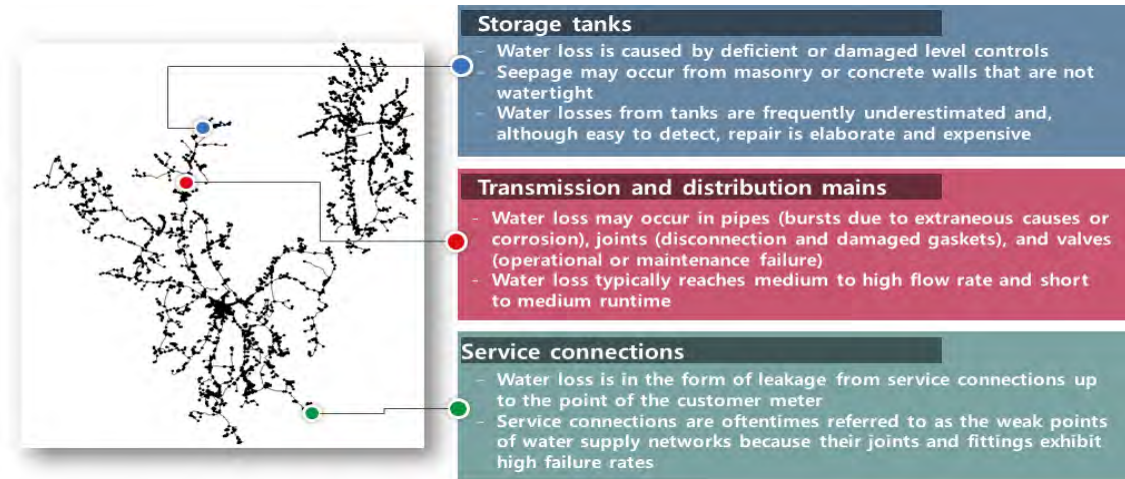
[그림 2. 42] 잘못된 누수 관리로 인한 부정적인 영향

물손실은 실손실(real loss)과 명목손실(apparent loss)로 나누어 질수 있다. 실손실은 취수부터 배급수까지 실제 공급과정에서 관로의 파손과 같은 물공급 시설의 문제로 손실되는 물의 양을 의미하며, 명목손실은 인프라의 문제가 아닌 시스템적인 문제로 야기되는 물손실을 의미한다. 실손실은 [그림 2. 43]에서와 같이 위치별 또는 누수량·누수시간에 따라 분류할 수 있다.



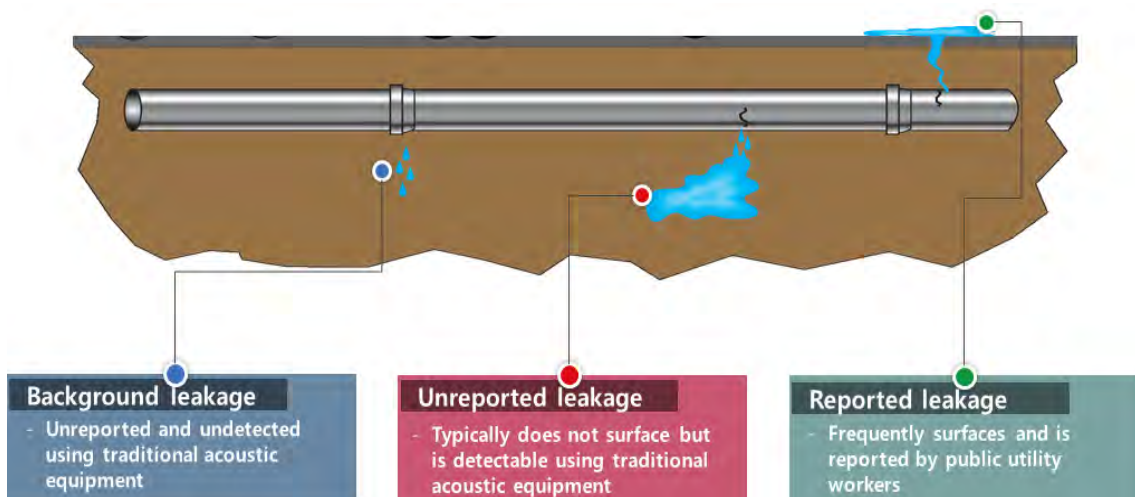
[그림 2. 43] 실손실 분류

누수 위치에 따라 실손실을 분류할 경우 [그림 2. 44]에서 설명된 바와 같이 배수지 (distribution reservoir 또는 storage tank)에서의 누수, 도송수 및 배수 계통(transmission-distribution mains)과 같은 공급관로에서의 손실 그리고 급수관로(service connection)에서의 손실로 나누어 질 수 있다.



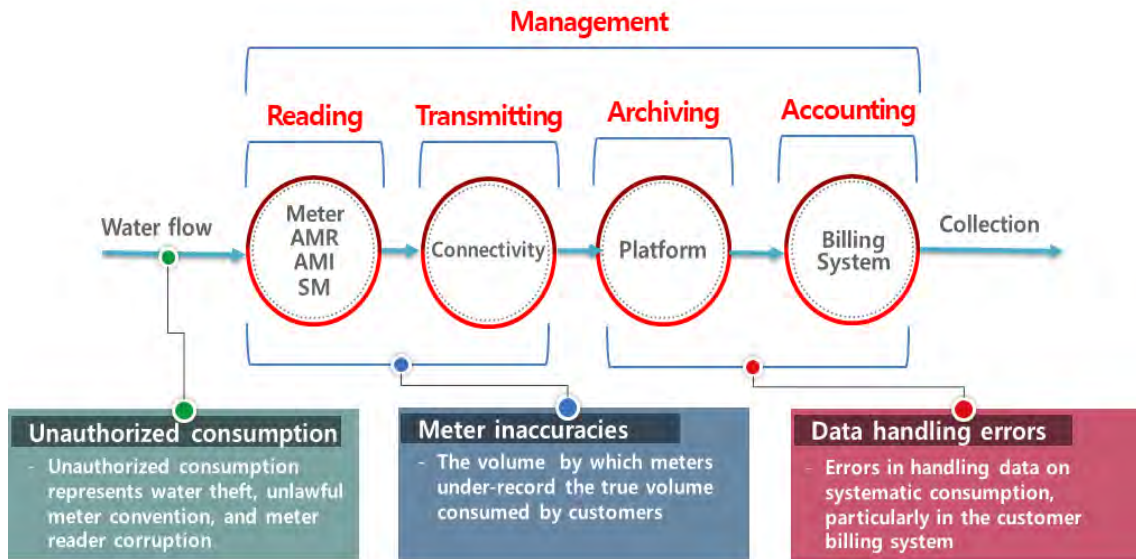
[그림 2. 44] 위치에 따른 실손실 분류

누수량·누수시간에 따라 실손실은 [그림 2. 45]에서와 같이 배경 누수(background leakage)와 보고된 파손누수(reported leakage), 보고되지 않은 파손누수(unreported leakage)로 나눌 수 있다. 배경 누수는 관의 접합부와 같은 미세한 부분에서 발생하는 매우 적은 누수이며, 수년 동안 지속될 수 있다. 이로 인해 큰 누수로 커지기 전까지 큰 문제를 발생하지 않는다. 그러나 배경 누수는 긴 누수시간으로 인해 실제 물 손실의 상당 부분을 차지하기도 한다. 파손누수는 일반적으로 50m 수두에서 250l/h 이상의 누수량이 발생하는 경우로 정의된다.



[그림 2. 45] 크기와 누수시간에 따른 실손실 분류

명목손실은 [그림 2. 46]에서 설명된 바와 같이 계량기 부정확성(meter inaccuracies), 데이터 처리 오류(data handling error), 도수와 같은 공인되지 않은 사용으로 인한 손실(unauthorized consumption)을 의미한다. 즉 명목손실은 실손실과 다르게 공급과정에서 발생하는 손실이 아닌, 사용자가 사용을 하고는 있으나 수도사업자가 요금을 징수할 때 포함하지 않는 경제적인 손실을 의미한다.



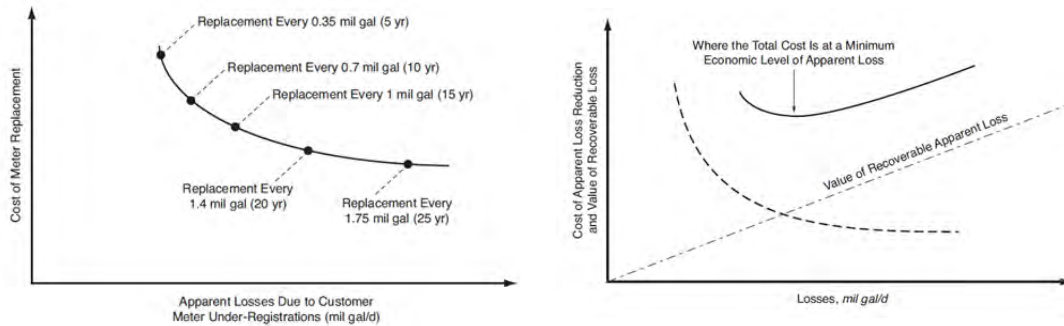
[그림 2. 46] 명목손실 분류

이와 같은 실손실과 명목손실을 줄이기 위해 수도사업자는 자체적으로 [그림 2. 47]과 같은 물손실 관리 프로그램을 수립하여 적용하고 있으며, 일반적으로 해당 프로그램은 조사, 설계, 조치, 평가의 네 단계로 구성되어 있다.



[그림 2. 47] 누수 관리 프로그램 과정

위에 언급된 물손실 관리 프로그램에서 가장 중요한 부분은 적절하고 실현가능한 목표 (예 : 최종 누수율)를 설정하는 것이다. 누수 관리의 초기 단계에서는 주로 일반 가정을 기반으로 하여 목표를 설정하며, 추후에 보다 정확한 정보를 기반으로 최종적인 목표를 설정한다. 이와 같은 누수율 목표를 설정할 때 [그림 2. 48]에서와 같이 경제수준누수 (economic level of leakage, ELL) 혹은 목표설정 가이드라인을 기반으로 하며, 수도사업자의 가용 예산, 인적 자원, 기술의 타당성 및 시간 제약 등을 고려하여야 한다.



[그림 2. 48] 명목손실 감축을 위한 경제적 균형

출처 : AWWA (2009)

목표가 설정되면 누수를 줄이기 위해 감소 대상의 우선순위를 설정한다. [그림 2. 49]에서 나타난 바와 같이 명목손실은 짧은 기간에 달성할 수 있으며, 수도사업자의 수익에 직접적인 영향을 미치므로 수도사업자는 명목 손실을 줄이는 것을 실손실을 줄이는 것에 비해 우선으로 하는 전략을 선택한다. 그러나 이러한 경제적인 관점 외에 물, 에너지, 환경의 자원의 소모를 고려하는 넥서스 관점에서 물손실 관리의 도입도 필요하다.

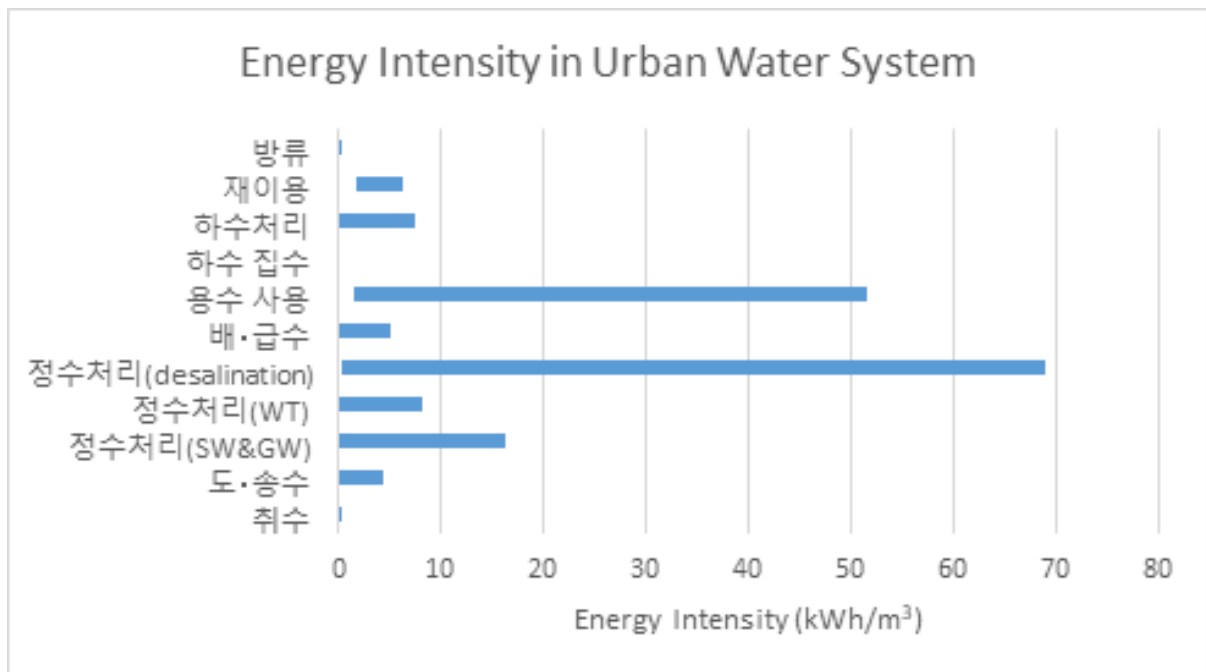


[그림 2. 49] 누수량 재정 분배 예시

출처 : GIZ (2011)

2.4.5 모델 구축 및 검·보정

본 연구에서는 2.4.2절의 기존 시스템 다이내믹스 도시물순환 모델들과 2.4.3절의 도시 물순환 과정의 에너지 인텐시티의 검토를 통해 도시 물순환 시스템 물-에너지-환경 넥서스 모델의 중요 구성요소를 도출하였다. [그림 2. 50]에 나타난 바와 같이 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수 사용, 하수 집수, 하수처리, 방류의 일반적인 도시 물순환 과정에서 펌프를 통해 압력으로 물을 이동하는 도·송수 및 배·급수 과정과 물리적, 화학적 생물학적 공정이 포함된 정수처리 및 하수처리과정은 에너지 집약적인 과정으로 모델 구축 시 반드시 포함되어야 하는 과정으로 판단되었다. 취수과정은 해당 도시의 수원이 지하수이며, 지하수의 수위가 깊을 경우에 모델의 중요 요소가 될 수 있으며, 용수 사용과정에서 온수 사용 또는 세탁기나 식기 세척기와 같은 가전제품을 사용할 경우에는 모델에 해당 과정 또한 포함되어야 할 것이다.

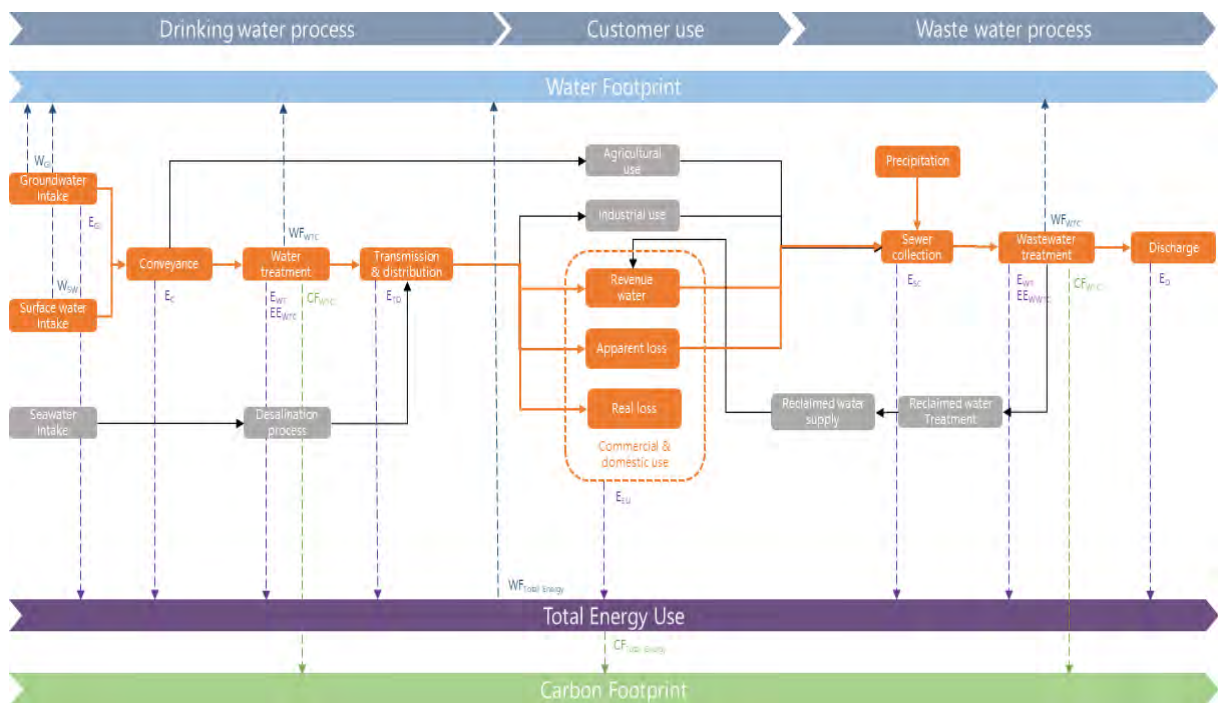


[그림 2. 50] 도시 물순환 과정별 에너지 인텐시티 범위

본 모델은 [그림 2. 51]에 설명된 바와 같이 취수 (지하수/지표수), 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수 사용 (생활용수·상업용수), 하수 집수, 하수처리 및 방류 과정을 주요 과정으로 고려하였으며, 담수화와 하수 재이용은 고려하지 않았다. 도시에서 일반적인 용수 사용은 농업용수, 공업용수, 상업용수 및 생활용수로 분류될 수 있으나, 본 연구에서는 농업용수와 공업용수 부분은 생략하였다. 추후 연구에서는 제외된 부분을 모두 고려하는 모델의 고도화가 필요할 것으로 판단된다.

물, 에너지 및 환경 부문의 자원 사용량을 정량화하기 위해 2.1.3절에서 논의된 넥서스 평가 지표들 중 가장 널리 활용되는 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국을 평가

지표로 각각 고려하였다. 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 등가량($CF_{Total\ Energy}$)과 정수처리 및 하수처리에 사용되는 약품의 생산 시 발생된 이산화탄소 등가량(CF_{WTC}, CF_{WWTC})를 합하여 계산하였다.



[그림 2. 51] 도시물관리 모델 인과관계

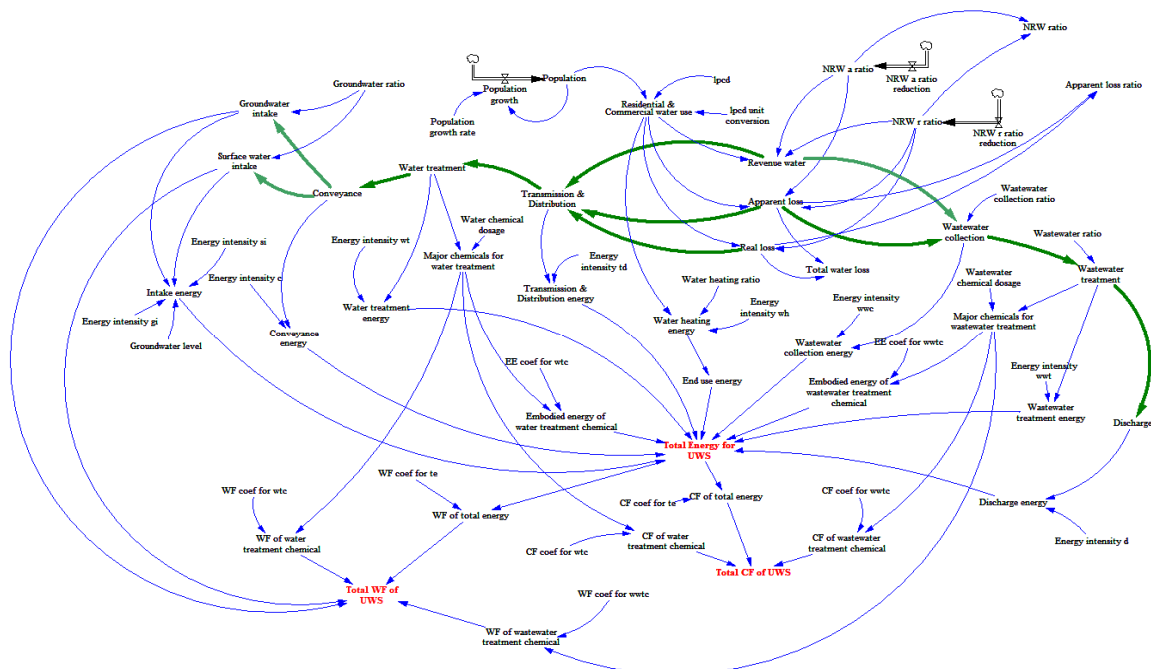
모델에서 자원의 이동 및 소모되는 양을 정량적으로 산정하기 위한 매개변수로 물 인텐시티, 에너지 인텐시티와 탄소 인텐시티를 고려하였다. 총 에너지 소모량을 생산하는데 사용된 물의 양을 산정하기 위한 물 인텐시티(WF coef for te) 값으로 다른 모델에서 널리 사용되는 $0.02m^3/kWh$ 를 고려하였다. 지하수 및 지표수 취수 에너지 인텐시티(Energy intensity gi, Energy intensity si), 도·송수 에너지 인텐시티(Energy intensity c), 정수처리에 에너지 인텐시티(Energy intensity wt), 배·급수 에너지 인텐시티(Energy intensity td), 온수 사용 에너지 인텐시티(Energy intensity wt), 하수 집수 에너지 인텐시티(Energy intensity wwc), 하수처리 에너지 인텐시티(Energy intensity wwt), 방류 에너지 인텐시티(Energy intensity d) 값으로 각각 0.0027, 0, 0.2 (2.1, 4), 0.2 (0.6, 1), 0.2 (0.5, 0.8), 50, 0, 0.3 (0.65, 1), $0.02kWh/m^3$ 으로 고려하였다. 총 에너지 생산 시 발생되는 탄소 발생량을 산정

하기 위한 탄소 인텐시티(CF coef for te) 로는 0.25 kgCO₂e/kWh를 이용하였다. 본 모델에서 각각의 인텐시티 값은 2.4.3절에 설명한 바와 같이 기존의 문헌 검토를 통해 일반적으로 사용되는 값으로 선정하였다. 향후 모델의 고도화를 위해서는 에너지 발전 방식(수력, 화력, 원자력, 태양광, 풍력 등), 관망의 조건(관경, 관 길이, 조도계수 등), 정수 및 하수처리 공정(1차, 2차, 고도처리 등)을 고려한 물, 에너지, 탄소 인텐시티 값의 고려되어야 할 것이다.

모델에서는 분석 대상 도시로 가상의 도시를 고려하였으며, 해당 도시의 초기 인구(Population)는 300,000명, 인구 증가율(Population growth rate)은 0.001 1/월, 1인당 용수 사용량(lpcd)은 100 liter/명/일로 고려하였다.

위에 언급된 과정을 통해 구축된 도시 물순환 시스템 물-에너지-환경 넥서스 모델의 인과관계는 [그림 2. 52]에 나타난 바와 같으며, 해당 모델의 변수, 관계식 및 단위는 [표 2. 20]에 설명되어 있다.

일반적으로 개발된 시스템 다이내믹스 모델의 검증 및 보정은 모델 단위의 일관성 검증(Dimensional consistency test), 구조적 검증(Structural test), 그리고 과거 계측된 자료 기반의 검·보정(Historical consistency)으로 수행될 수 있다. 본 연구에서는 분석대상 도시는 가상의 도시이므로 일관성 검증 및 구조적 검증만을 수행하였으며, 향후 고도화된 모델에서는 특정 도시에 해당 모델을 적용하여 과거 자료 기반의 검·보정을 하여 모델의 신뢰도를 높일 필요가 있다



[그림 2. 52] 도시물관리 모델 인과관계도

[표 2. 20] 모델 구성 변수, 관계식 및 단위

순번	모델 변수	관계식	단위
1	Apparent loss	NRW a ratio / (1-NRW r ratio) * "Residential & Commercial water use"	m ³
2	Apparent loss ratio	Apparent loss / (Apparent loss + Real loss)	-
3	CF coef for te	0.25	kgCO ₂ e/kWh
4	CF coef for wtc	1e-06	kgCO ₂ e/mg
5	CF coef for wwtc	1e-06	kgCO ₂ e/mg
6	CF of total energy	CF coef for te * Total Energy for UWS	kgCO ₂ e
7	CF of wastewater treatment chemical	CF coef for wwtc * Major chemicals for wastewater treatment	kgCO ₂ e
8	CF of water treatment chemical	CF coef for wtc * Major chemicals for water treatment	kgCO ₂ e
9	Conveyance	Water treatment	m ³
10	Conveyance energy	Energy intensity c * Conveyance	kWh
11	Discharge	Wastewater treatment	m ³
12	Discharge energy	Energy intensity d * Discharge	kWh
13	EE coef for wtc	5e-07	kWh/mg
14	EE coef for wwtc	5e-07	kWh/mg
15	Embodied energy of wastewater treatment chemical	EE coef for wwtc * Major chemicals for wastewater treatment	kWh
16	Embodied energy of water treatment chemical	EE coef for wtc * Major chemicals for water treatment	kWh
17	End use energy	Water heating energy	kWh
18	Energy intensity c	0.2, 2.1, 4	kWh/m ³
19	Energy intensity d	0.02	kWh/m ³
20	Energy intensity gi	0.0027	kWh/m ³ /m
21	Energy intensity si	0	kWh/m ³
22	Energy intensity td	0.2, 0.5, 0.8	kWh/m ³
23	Energy intensity wh	50	kWh/m ³
24	Energy intensity wt	0.2, 0.6, 1	kWh/m ³
25	Energy intensity wwc	0	kWh/m ³
26	Energy intensity wwt	0.3, 0.65, 1	kWh/m ³
27	Groundwater intake	Groundwater ratio * Conveyance	m ³
28	Groundwater level	20, 40, 60	m
29	Groundwater ratio	0.1, 0.5, 0.9	-
30	Intake energy	(Energy intensity gi*Groundwater level*Groundwater intake) + (Energy intensity si *Surface water intake)	kWh
31	lpcd	100	liter/Person/day
32	lpcd unit conversion	0.03	(day*m ³)/liter
33	Major chemicals for wastewater treatment	Wastewater chemical dosage * Wastewater treatment	mg
34	Major chemicals for water treatment	Water chemical dosage * Water treatment	mg
35	NRW a ratio	INTEG (IF THEN ELSE(NRW a ratio < 0.01001 , 0 , - NRW a ratio reduction) , 0.01)	-
36	NRW a ratio reduction	0	1/Month
37	NRW r ratio	INTEG (IF THEN ELSE(NRW r ratio < 0.19001 , 0 , - NRW r ratio reduction) , 0.19)	-
38	NRW r ratio reduction	0	1/Month
39	NRW ratio	NRW a ratio + NRW r ratio	-

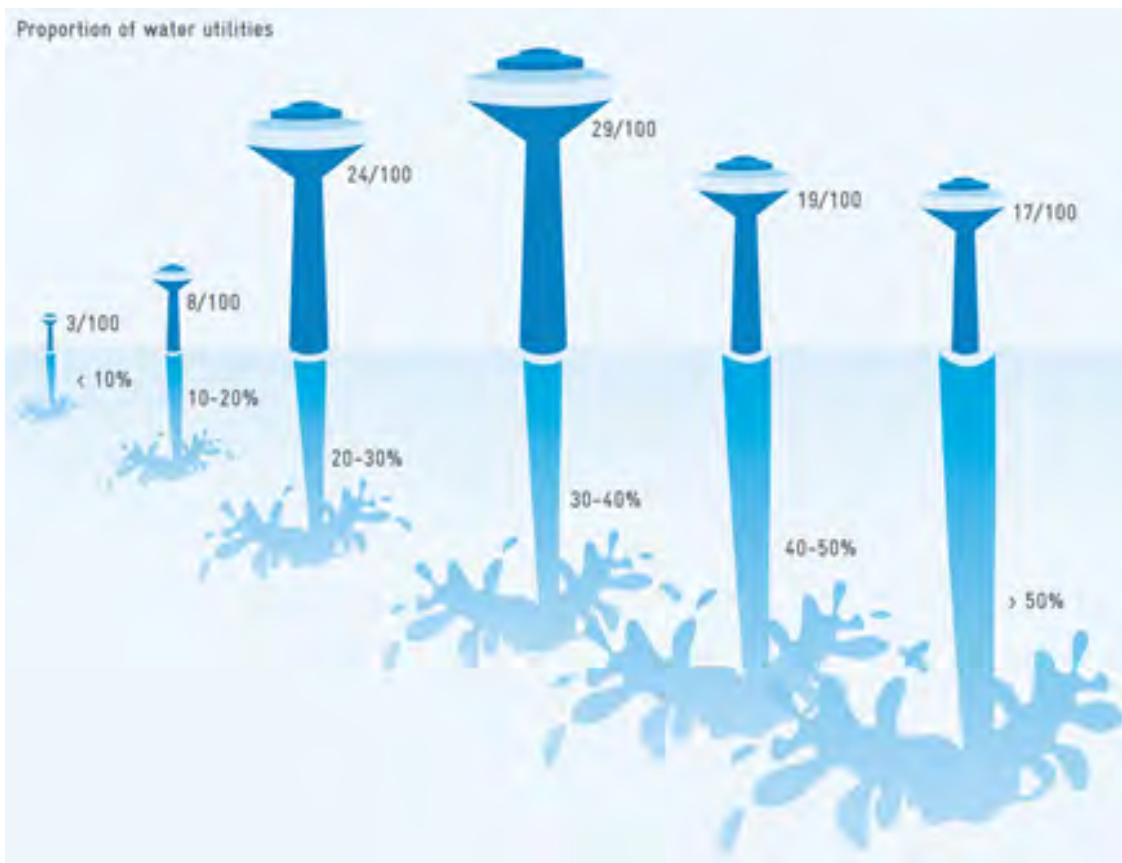
순번	모델 변수	관계식	단위
40	Population	INTEG (Population growth, 300000)	Person
41	Population growth	Population growth rate*Population	Person/Month
42	Population growth rate	0.001	1/Month
43	Real loss	NRW r ratio / (1-NRW r ratio) * "Residential & Commercial water use"	m ³
44	"Residential & Commercial water use"	lpcd unit conversion * lpcd * Population	m ³
45	Revenue water	(1-NRW a ratio-NRW r ratio) / (1-NRW r ratio) * "Residential & Commercial water use"	m ³
46	Surface water intake	(1-Groundwater ratio) * Conveyance	m ³
47	Total CF of UWS	CF of total energy + CF of water treatment chemical + CF of wastewater treatment chemical	kgCO ₂ e
48	Total Energy for UWS	Intake energy + Conveyance energy + Water treatment energy + "Transmission & Distribution energy" + End use energy + Wastewater collection energy + Wastewater treatment energy + Discharge energy + Embodied energy of water treatment chemical + Embodied energy of wastewater treatment chemical	kWh
49	Total water loss	Apparent loss + Real loss	m ³
50	Total WF of UWS	Groundwater intake + Surface water intake + WF of water treatment chemical + WF of total energy + WF of wastewater treatment chemical	m ³
51	"Transmission & Distribution energy"	Energy intensity td * "Transmission & Distribution"	kWh
52	"Transmission & Distribution"	Revenue water+Apparent loss+Real loss	m ³
53	Wastewater chemical dosage	20000	mg/m ³
54	Wastewater collection	Revenue water + (Wastewater collection ratio * Apparent loss)	m ³
55	Wastewater collection energy	Energy intensity wwc * Wastewater collection	kWh
56	Wastewater collection ratio	0.9	-
57	Wastewater ratio	0.9	-
58	Wastewater treatment	Wastewater ratio * Wastewater collection	m ³
59	Wastewater treatment energy	Energy intensity wwt * Wastewater treatment	kWh
60	Water chemical dosage	20000	mg/m ³
61	Water heating energy	Energy intensity wh * Water heating ratio * "Residential & Commercial water use"	kWh
62	Water heating ratio	0.01	-
63	Water treatment	"Transmission & Distribution"	m ³
64	Water treatment energy	Energy intensity wt * Water treatment	kWh
65	WF coef for te	0.02	m ³ /kWh
66	WF coef for wtc	1e-08	m ³ /mg
67	WF coef for wwtc	1e-08	m ³ /mg
68	WF of total energy	WF coef for te * Total Energy for UWS	m ³
69	WF of wastewater treatment chemical	WF coef for wwtc * Major chemicals for wastewater treatment	m ³
70	WF of water treatment chemical	WF coef for wtc * Major chemicals for water treatment	m ³

2.5 도시 물순환 물-에너지-환경 넥서스 모델 분석

2.5.1 시나리오

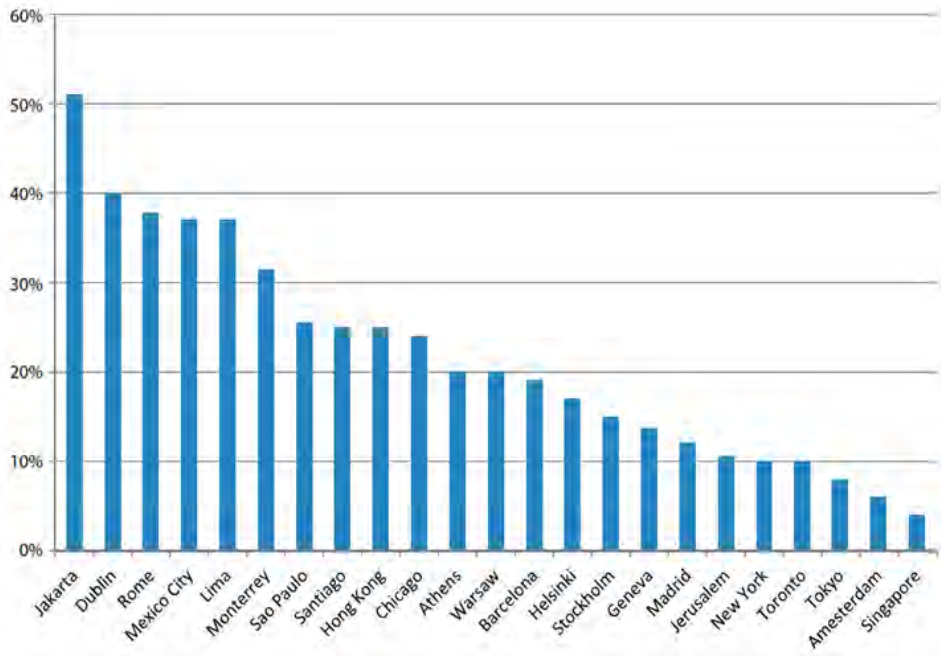
물순환 과정에서 단위량의 용수를 공급하고 하수를 집수하고 방류하는데 필요한 에너지의 양은 도시의 여건에 따라 다르다. 일반적으로 지하수를 원수로 사용하고, 공급하는 관로가 길고 오래되었으며, 원수의 수질이 나쁘고, 추운 지방이어서 온수 사용량이 많으며, 하수 처리 시설에 고도 처리 시설이 도입되어 있는 도시일수록 많은 에너지를 필요로 한다.

또한 도시별로 누수율과 누수 중에 명목손실과 실손실이 차지하는 비율이 다르다. [그림 2. 53]에서와 같이 대부분의 개도국의 누수율은 30~50%정도이며, 50%를 넘는 비율도 상당하다. 그리고 [그림 2. 54]와 같이 선진국의 도시들은 10~20% 이내로 누수율이 잘 관리되고 있다. 또한 동일한 누수율이어도 개도국일수록 수도미터의 부정확, 자료 관리의 문제 또는 도수 등으로 야기되는 명목손실의 비율이 높은 상황이다.



[그림 2. 53] 개발도상국 누수율 현황

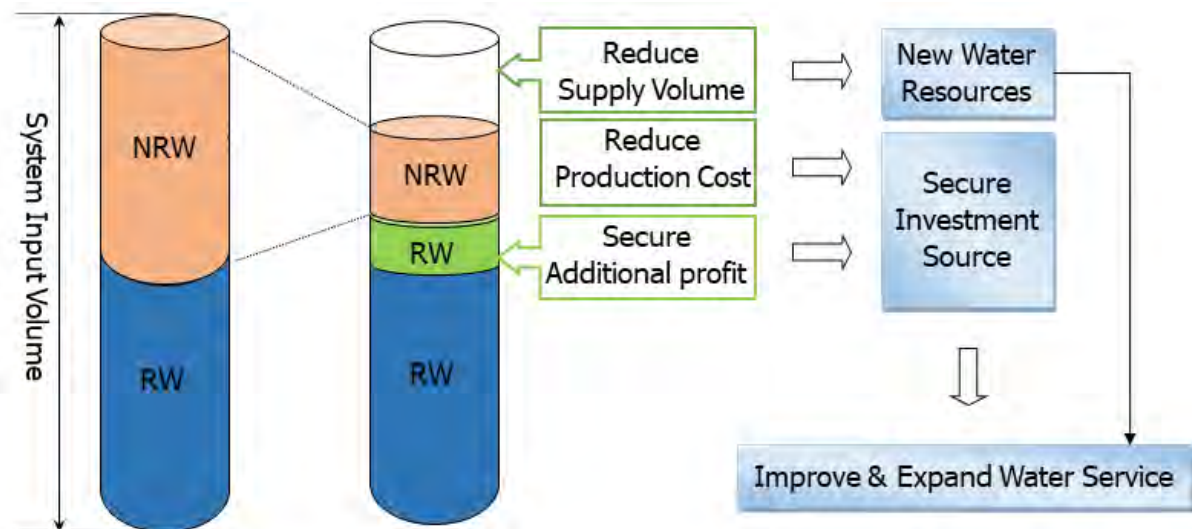
출처: Kingdom 등(2006)



[그림 2. 54] 도시별 물손실 비교

출처 : Swan-Smart Water Network Forum (2011)

일반적으로 수도사업자는 물손실 관리 전략을 수립하는데 [그림 2.55]에서와 같이 짧은 기간에 수익으로 환원할 수 있는 명목손실을 줄이는 것을 실손실을 줄이는 것에 우선시하는 경향이 있다. 이는 물손실 관리 전략 수립 시 경제적인 관점을 우선으로 하기 때문이다. 그러나 지속가능한 도시를 위해서, 수도사업자의 경제적인 관점 외에 도시 물순환 시스템 에서 물, 에너지, 탄소의 자원이 사용되고 발생하는 넥서스 관점의 검토가 필요하다.



[그림 2. 55] 수도사업자의 물손실 관리 개념도

위에 언급된 다양한 도시 물순환 시스템 에너지 인텐시티와 물손실 현황(누수율, 실손실과 명목손실의 비율)에 따라 적합한 도시 물손실 관리 전략 및 물, 에너지, 환경 부문 간에 자원의 이동량을 분석하기 위해, 2.4.5절에서 구축된 모델을 [표 2. 21]에 제시된 바와 같이 12개의 시나리오에 따라 분석을 수행하였다.

[표 2. 21] 시뮬레이션 시나리오

물순환 에너지 인텐시티 \ 물손실	낮은 물손실 (Good condition)	높은 물손실 - 낮은 명목손실비 (High NRW - Low AL)	높은 물손실 - 보통 명목손실비 (High NRW - Medium AL)	높은 물손실 - 높은 명목손실비 (High NRW - High AL)
낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시	S 1-0	S 1-1	S 1-2	S 1-3
보통 물순환 에너지 인텐시티 도시	S 2-0	S 2-1	S 2-2	S 2-3
높은 물순환 에너지 인텐시티 도시	S 3-0	S 3-1	S 3-2	S 3-3

물순환 에너지 인텐시티에 따라 3개의 상황(낮은, 보통, 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시)으로 분류하였다. 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시는 높은 물순환 에너지 인텐시티에 비해 도시 물순환 과정에서 단위량의 용수를 공급하고 사용된 용수를 처리하는데 소모되는 에너지의 양이 적은 도시를 의미하며, 해당 시나리오별 도시 물순환 과정에서 설정된 변수 및 해당 값은 [표 2. 22]에 제시되어 있다.

[표 2. 22] 물순환 에너지 인텐시티에 따른 도시의 분류

도시 물순환 과정	변수	낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시	보통 물순환 에너지 인텐시티 도시	높은 물순환 에너지 인텐시티 도시
취수	에너지 인텐시티	0.0027	0.0027	0.0027
	지하수위	20	40	60
	지하수 비율	0.1	0.5	0.9
도·송수	에너지 인텐시티	0.2	2.1	4
정수처리	에너지 인텐시티	0.2	0.6	1
배·급수	에너지 인텐시티	0.2	0.5	0.8
용수 사용	에너지 인텐시티	50	50	50
	온수 사용 비율	0.01	0.02	0.03
하수집수	에너지 인텐시티	0	0	0
	하수 집수 비율	0.9	0.9	0.9
하수처리	에너지 인텐시티	0.3	0.65	1
	하수처리 비율	0.9	0.9	0.9
방류	에너지 인텐시티	0.02	0.02	0.02

누수율 및 명목손실 비율에 따라서 도시를 낮은 물손실(Good condition), 높은 물손실-낮은 명목손실비(High NRW-Low AL), 높은 물손실-보통 명목손실비(High NRW-Medium AL), 높은 물손실-높은 명목손실비(High NRW-High AL)의 4개의 사례로 분류하였고, 각 사례별 명목손실 및 실손실 설정값은 [표 2. 23]에 나타난바와 같다. 낮은 물손실 도시(Good condition)의 누수율(NRW), 명목손실(NRW a), 실손실(NRW r)은 각각 0.2, 0.01, 0.19이며, 해당 조건에서 명목손실비율은 5%로 물손실 관리가 잘 되고 있는 도시를 의미한다. 높은 물손실-낮은 명목손실비 도시(High NRW-Low AL)의 누수율(NRW), 명목손실(NRW a), 실손실(NRW r)은 각각 0.5, 0.05, 0.45이며, 해당 조건에서 명목손실비율은 10%로, 물손실이 도시 물순환 과정에서 크게 발생하며, 해당 발생부분은 관파손과 같은 실손실이 주요 요인이 도시이다. 높은 물손실-보통 명목손실비 (High NRW-Medium AL)의 누수율(NRW), 명목손실(NRW a), 실손실(NRW r)은 각각 0.5, 0.15, 0.35이며, 해당 조건에서 명목손실비율은 30%로, 물손실이 도시 물순환 과정에서 크게 발생하며, 명목손실이 일정부분 누수에 영향을 미치는 도시이다. 마지막으로 높은 물손실-높은 명목손실비 (High NRW-High AL)의 누수율(NRW), 명목손실(NRW a), 실손실(NRW r)은 각각 0.5, 0.25, 0.25이며, 해당 조건에서 명목손실비율은 50%로, 물손실이 도시 물순환 과정에서 크게 발생하며, 명목손실이 누수에 큰 영향을 미치는 도시를 의미한다.

[표 2. 23] 누수율 및 명목손실에 따른 도시의 분류

	명목손실 (NRW a)				실손실 (NRW r)			
	초기값	최종값	감소율 (1/month)	최종값 도달 시기	초기값	최종값	감소율 (1/month)	최종값 도달 시기
낮은 물손실 (Good condition)	0.01	0.01	0	-	0.19	0.19	0	-
높은 물손실 - 낮은 명목손실비 (High NRW - Low AL)	0.05	0.01	0.00066 6667	60	0.45	0.19	0.00433 3333	60
높은 물손실 - 보통 명목손실비 (High NRW - Medium AL)	0.15	0.01	0.00233 3333	60	0.35	0.19	0.00266 6667	60
높은 물손실 - 높은 명목손실비 (High NRW - High AL)	0.25	0.01	0.004	60	0.25	0.19	0.001	60

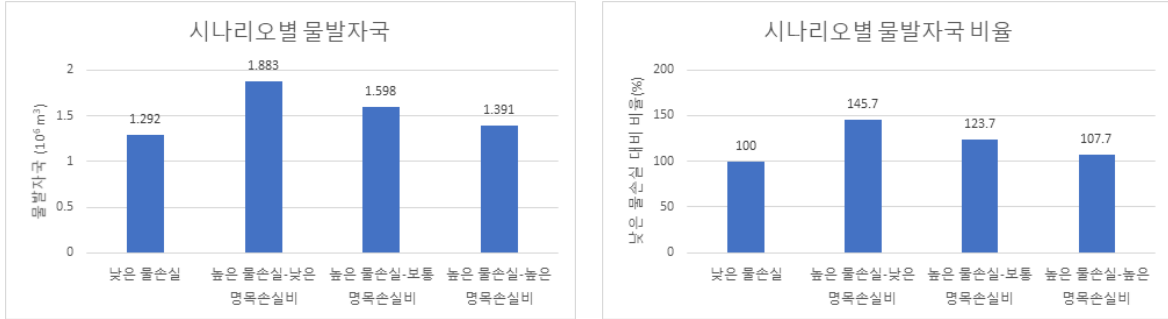
수도사업자 관점에서 일반적으로 명목손실을 줄이는 것이 실손실을 줄이는 것에 비해 큰 인프라에 투자 없이 빠른 투자 자금을 회수할 수 있으므로, 높은 물손실의 사례 중 명목손실비가 높은 경우(High NRW-High AL)가 물손실 전략을 수립하기에 용이한 경우이다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 낮은 물손실(Good condition)의 경우 10년(120개월) 동안 초기에 설정된 누수율, 명목손실, 실손실 및 명목손실 비를 유지하는 것으로 모델을 설정하였다. 높은 물손실-낮은 명목손실비(High NRW-Low AL), 높은 물손실-보통 명목손실비(High NRW-Medium AL), 높은 물손실-높은 명목손실비(High NRW-High AL)의 경우 효율적인 물손실 관리 전략 및 업무도입을 통해 5년(60개월) 후에 낮은 물손실(Good condition) 조건과 동인한 누수율, 명목손실, 실손실 및 명목손실 비율에 도달하며 그 이후에는 해당 조건을 유지하는 것으로 모의하였다. 이를 위한 모델의 명목손실 및 실손실의 최종값 및 감소율은 [표 2. 23]에 나타난 바와 같다.

2.5.2 시나리오 분석 결과

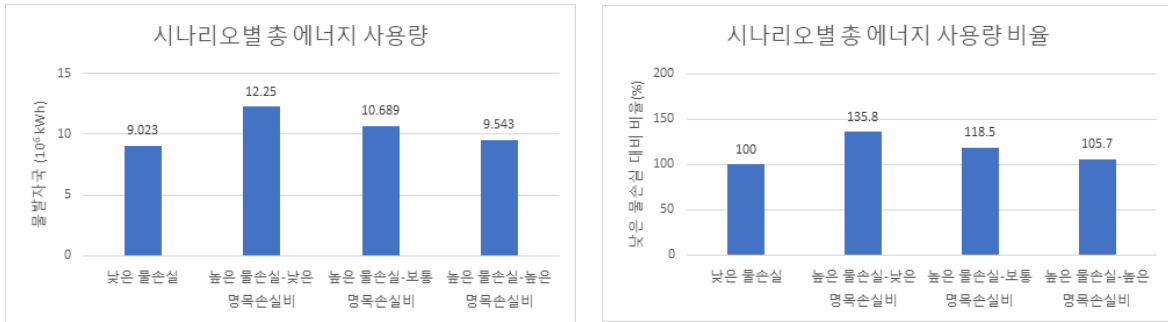
2.5.1절에서 제시된 12개의 시나리오에 따른 물발자국, 총 에너지 사용량, 및 탄소발자국의 변화는 [그림 2. 62] ~ [그림 2. 70]과 [표 2. 24] ~ [표 2. 26]에 제시되어 있다.

동일한 물순환 에너지 인텐시티 도시에서는 높은 물손실-낮은 명목손실비(High NRW-Low AL), 높은 물손실-보통 명목손실비(High NRW-Medium AL), 높은 물손실-높은 명목손실비(High NRW-High AL), 낮은 물손실(Good condition) 순으로 물발자국, 총 에너지 사용량, 및 탄소발자국양이 많은 것으로 분석되었다. 일반적으로 명목손실은 필요한 용수를 공급하고는 있으나 사용자에게 수도사업자가 요금을 징수하고 있지는 못하는 상황이므로, 동일한 누수율에서 명목손실이 클수록 넥서스 관점에서 손실되는 자원은 적기 때문에 위와 같은 결과가 나타나게 되었다. 즉 명목손실은 수도사업자에게 수익을 감소시키는 문제를 일으키나 도시 넥서스 관점에서 추가적인 자원을 필요로 하지 않으며, 실손실은 수도사업자에게 생산비용의 증가 및 도시 넥서스 관점에서 자원의 손실로 이어지게 되는 것이다. 이에 따라 도시 물-에너지-환경 넥서스 관점에서는 실손실을 최대한 줄이는 것이 지속가능한 물공급이 가능한 도시를 이루는데 중요한 요소로 판단된다.

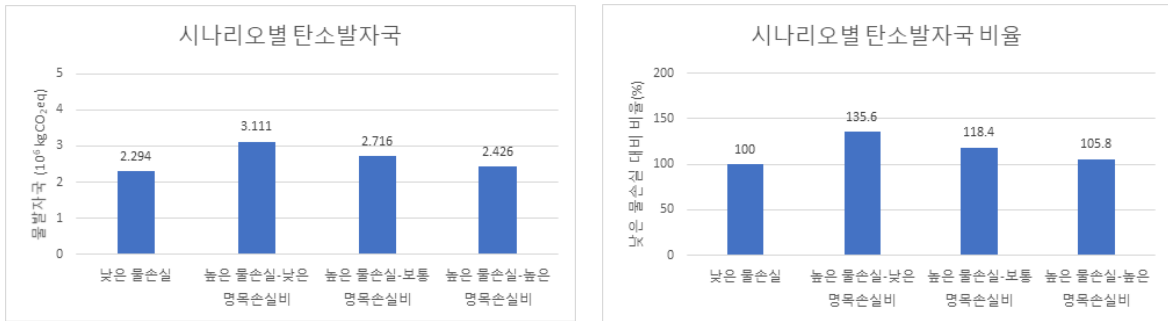
높은 물순환 에너지 인텐시티 도시의 경우 낮은 물손실(Good condition), 높은 물손실-낮은 명목손실비(High NRW-Low AL), 높은 물손실-보통 명목손실비(High NRW-Medium AL), 높은 물손실-높은 명목손실비(High NRW-High AL) 별 초기($t=0$ month)의 물발자국은 [그림 2. 56]에 나타난바와 같이 각각 1.292×10^6 m³, 1.883×10^6 m³, 1.598×10^6 m³, 1.391×10^6 m³의 값을 나타내었다. 낮은 물손실(Good condition)에 대비하여 높은 물손실-낮은 명목손실비(High NRW-Low AL), 높은 물손실-보통 명목손실비(High NRW-Medium AL), 높은 물손실-높은 명목손실비(High NRW-High AL)는 45.7%, 23.7%, 7.7%의 높은 값을 나타내었다. 각 시나리오별 총 에너지 사용량은 [그림 2. 57]에서와 같이 9.023×10^6 kWh, 12.250×10^6 kWh, 10.689×10^6 kWh, 9.543×10^6 kWh의 값을 나타내었으며, 낮은 물손실 (Good condition)에 대비하여 35.8%, 18.5%, 5.7%의 높은 값을 나타내었다. 각 시나리오별 탄소발자국 역시 [그림 2. 58]에서와 같이 2.294×10^6 kgCO₂eq, 3.111×10^6 kgCO₂eq, 2.716×10^6 kgCO₂eq, 2.426×10^6 kgCO₂eq가 발생되었으며, 낮은 물손실(Good condition) 대비 35.6%, 18.4%, 5.8%의 높은 값을 나타내었다. 일반적으로 수도사업자는 물손실관리 전략을 수립하고 적용할 도시로 적은 투자비용으로 빠른 회수가 가능한 높은 물손실-높은 명목손실비 (High NRW-High AL)의 경우를 우선순위로 설정하나, 물-에너지-환경 넥서스 관점에 소모되는 자원을 줄이고, 발생하는 오염원을 감소시키기 위해서는 높은 물손실-낮은 명목손실비 (High NRW-Low AL)의 경우가 우선되어야 하는 것으로 분석되었다.



[그림 2. 56] 물손실 시나리오별 물발자국 및 비율



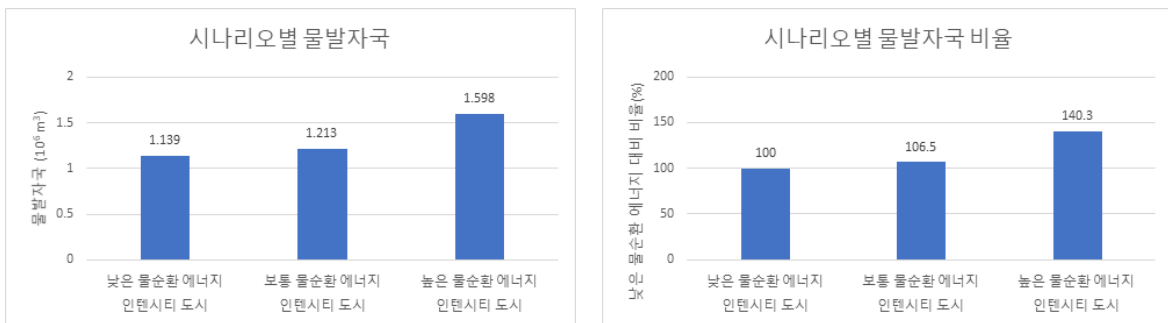
[그림 2. 57] 물손실 시나리오별 총 에너지 사용량 및 비율



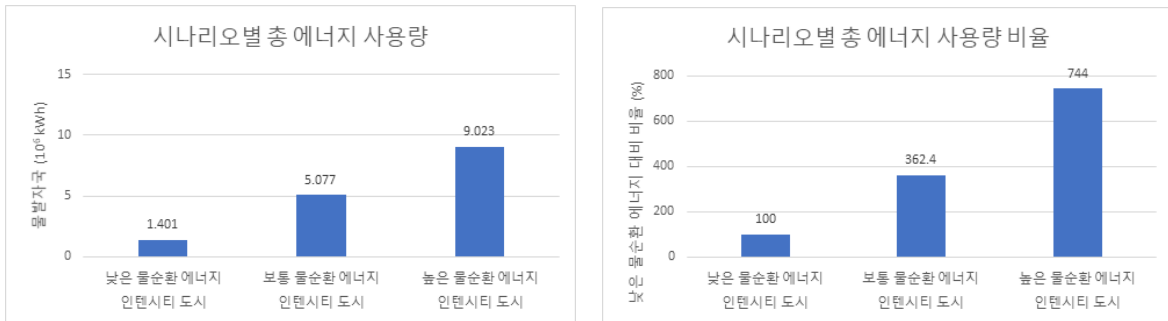
[그림 2. 58] 물손실 시나리오별 탄소발자국 및 비율

동일한 누수 조건의 도시에서는 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시, 보통 물순환 에너지 인텐시티 도시, 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시 순으로 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국이 높은 값을 나타내었다. 낮은 물순환(Good condition) 조건에서 낮은, 보통, 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시 순서로 초기(t=0month) 물발자국은 [그림 2. 59]와 같이 각각 $1.139 \times 10^6 \text{m}^3$, $1.213 \times 10^6 \text{m}^3$, $1.598 \times 10^6 \text{m}^3$ 의 값을 나타내었다. 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시 기준으로 보통 및 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시는 각각 6.5%, 40.3% 높은 물발자국 값을 나타내었다. 총 에너지 사용량은 $1.401 \times 10^6 \text{kWh}$, $5.077 \times 10^6 \text{kWh}$, $9.023 \times 10^6 \text{kWh}$ 값을 나타내었으며, 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시 기준으로 보통 및 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시는 각각 262.4%, 644.0% 증가된 총 에너지 사용량을 필요하였다. 탄소발자국은 각각의 시나리오별로 $0.389 \times 10^6 \text{kgCO}_2 \text{eq}$,

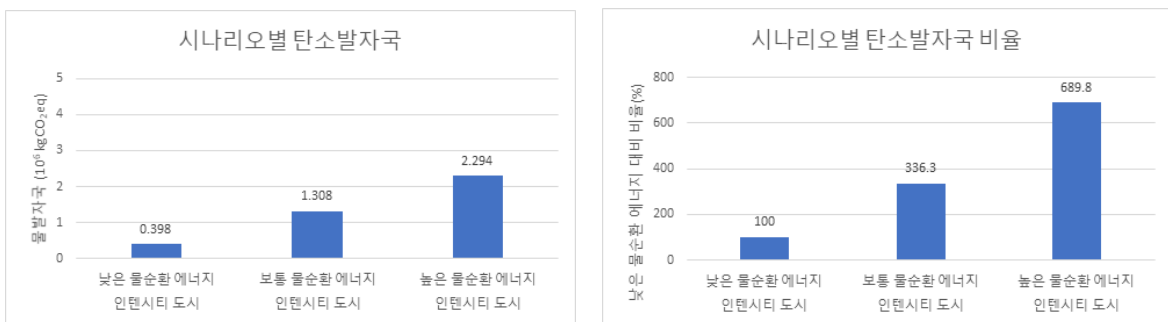
1.308×10⁶kgCO₂eq, 2.294×10⁶kgCO₂eq이었으며, 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시 기준으로 보통 및 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시의 탄소발자국 증가율은 236.3%, 589.8%이었다. 도시의 물순환 에너지 인텐시티가 증가할수록 물발자국도 어느정도 증가하는 경향을 보였으며, 총에너지 사용량은 물발자국에 비해 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 탄소발자국의 발생량 역시 총 에너지 사용량과 직접적인 관계가 있으므로 총 에너지 사용량과 비슷한 비율로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 기존의 수도사업자는 물손실 관리를 위한 대상 도시의 우선순위를 선택 시 도시 물순환 에너지 인텐시티는 고려항목이 아니나, 물-환경-에너지 넥서스 관점에서 전략을 수립할 경우 도시의 물순환 에너지 인텐시티는 매우 중요한 항목으로 판단된다.



[그림 2. 59] 도시 물순환 에너지 인텐시티 시나리오별 물발자국 및 비율

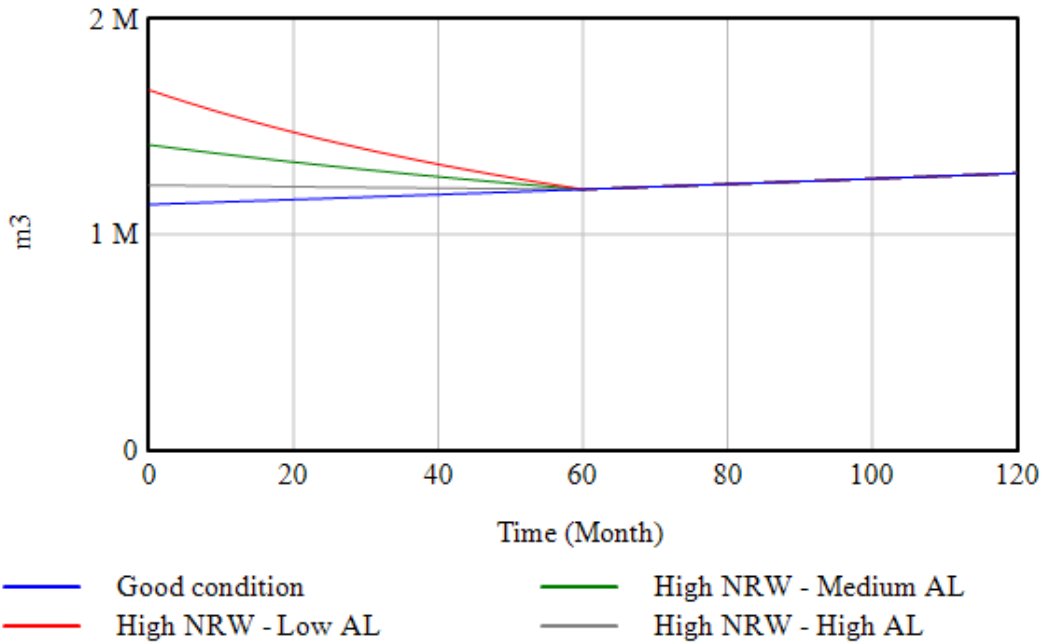


[그림 2. 60] 도시 물순환 에너지 인텐시티 시나리오별 총 에너지 사용량 및 비율



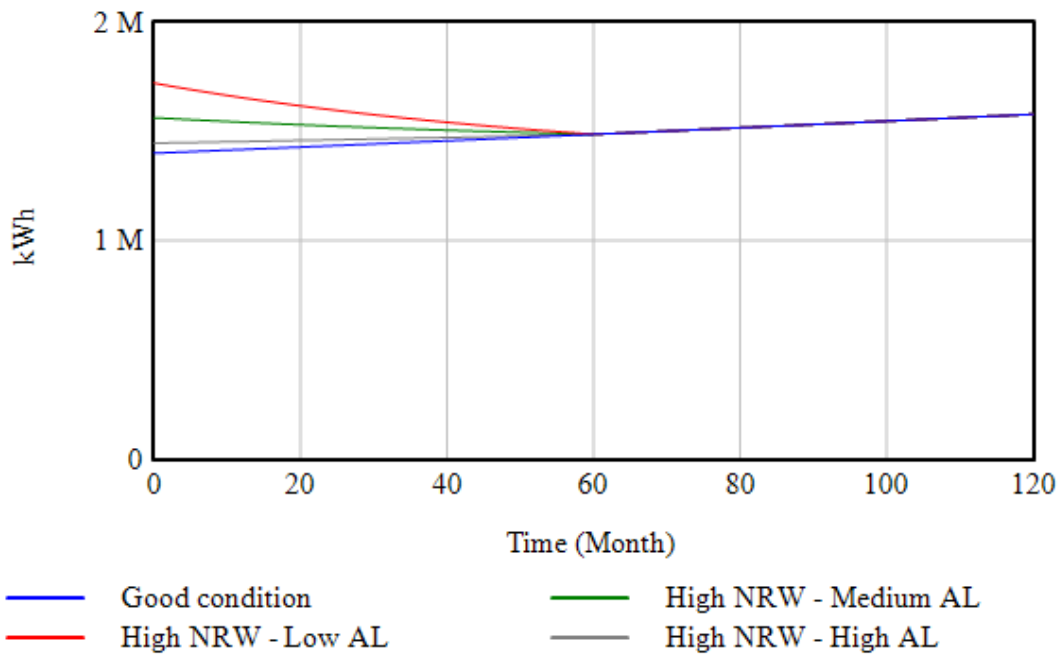
[그림 2. 61] 도시 물순환 에너지 인텐시티 시나리오별 탄소발자국 및 비율

Total WF of UWS



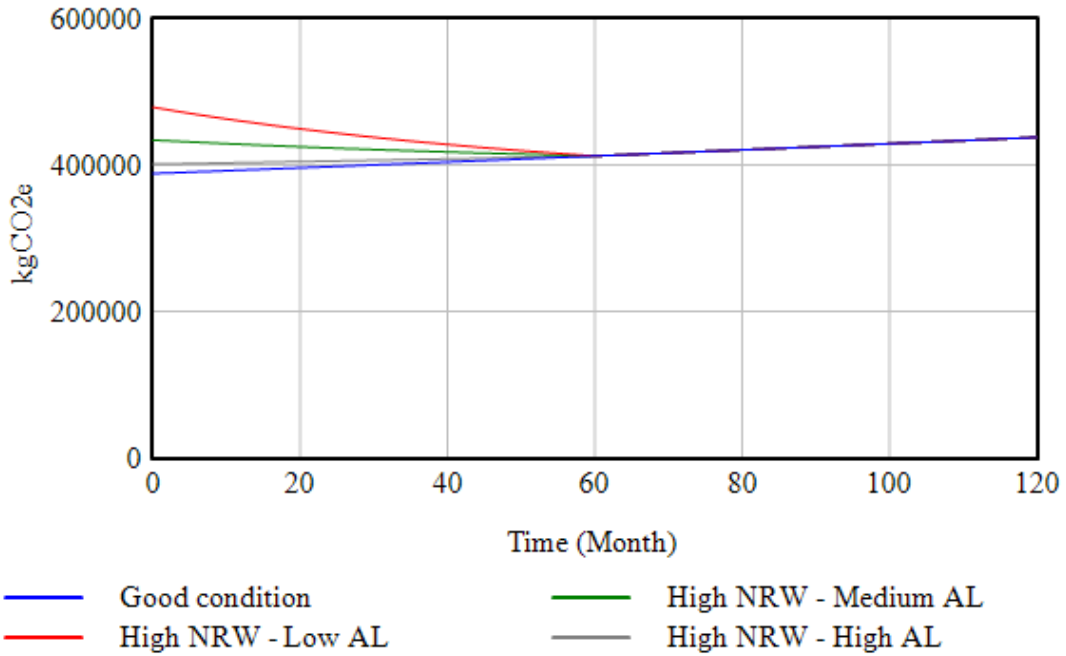
[그림 2. 62] 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 물발자국 변화 (S 1-0, S 1-1, S 1-2, S 1-3)

Total Energy for UWS



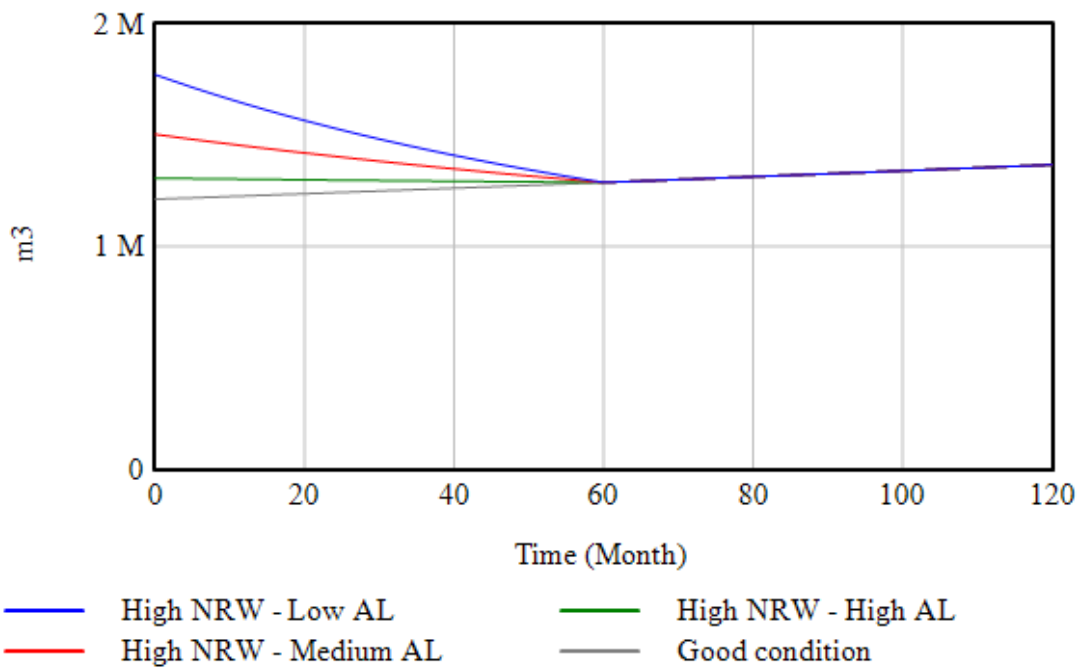
[그림 2. 63] 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 총 사용 에너지 변화 (S 1-0, S 1-1, S 1-2, S 1-3)

Total CF of UWS



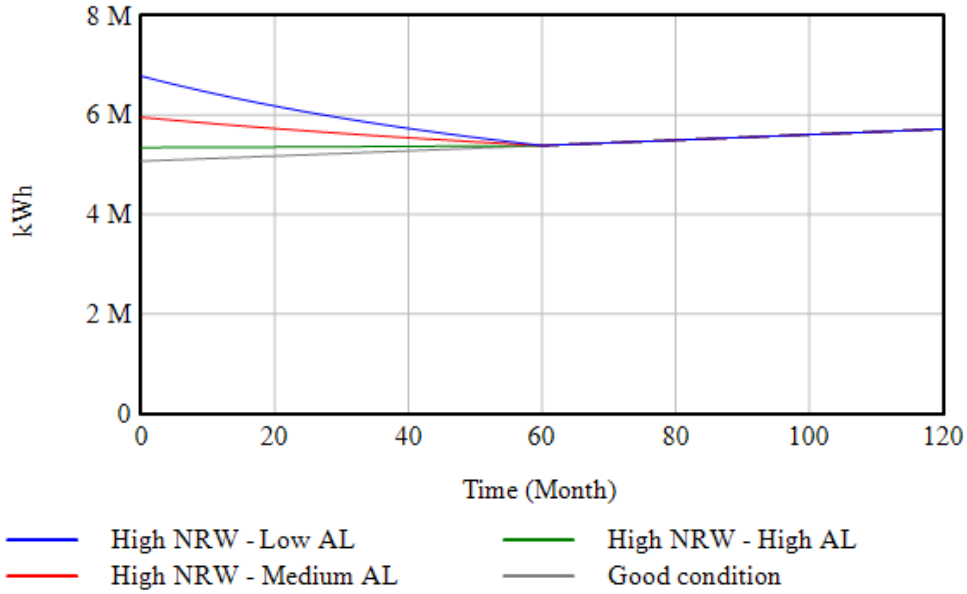
[그림 2. 64] 낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 탄소발자국 변화 (S 1-0, S 1-1, S 1-2, S 1-3)

Total WF of UWS



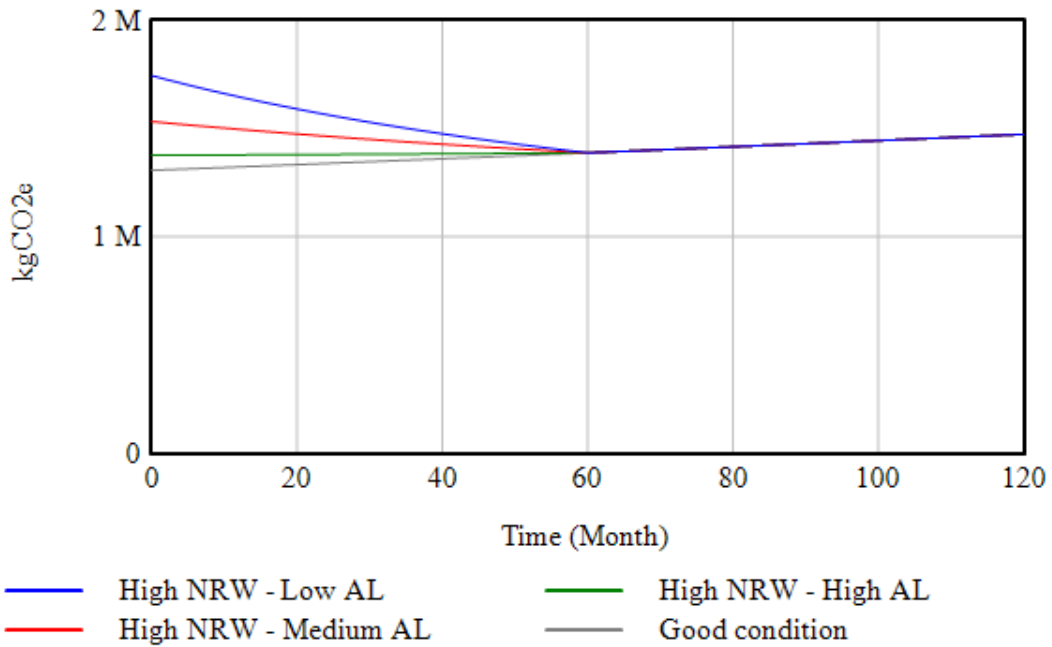
[그림 2. 65] 중간 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 물발자국 변화 (S 2-0, S 2-1, S 2-2, S 2-3)

Total Energy for UWS



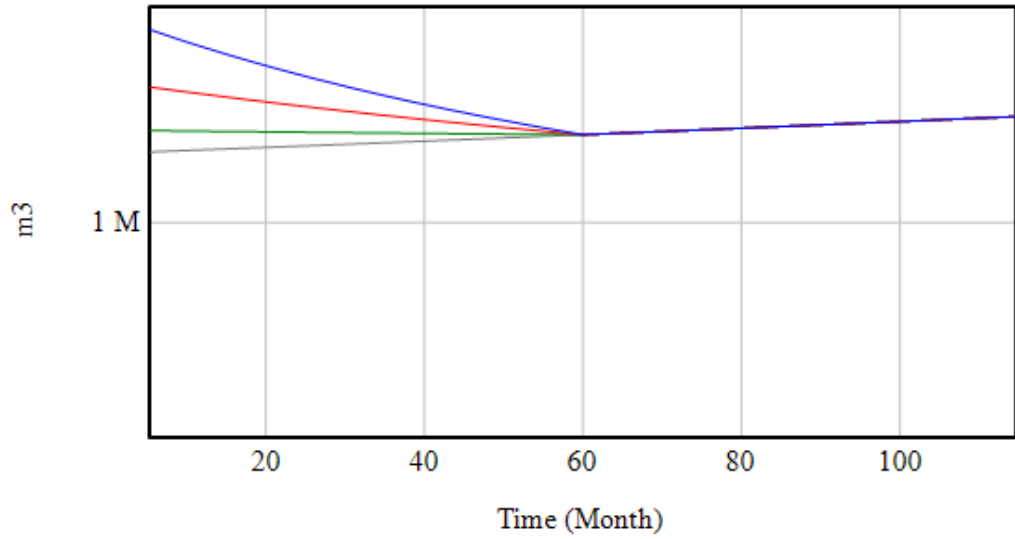
[그림 2. 66] 중간 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 총 사용 에너지 변화 (S 2-0, S 2-1, S 2-2, S 2-3)

Total CF of UWS



[그림 2. 67] 중간 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 탄소발자국 변화 (S 2-0, S 2-1, S 2-2, S 2-3)

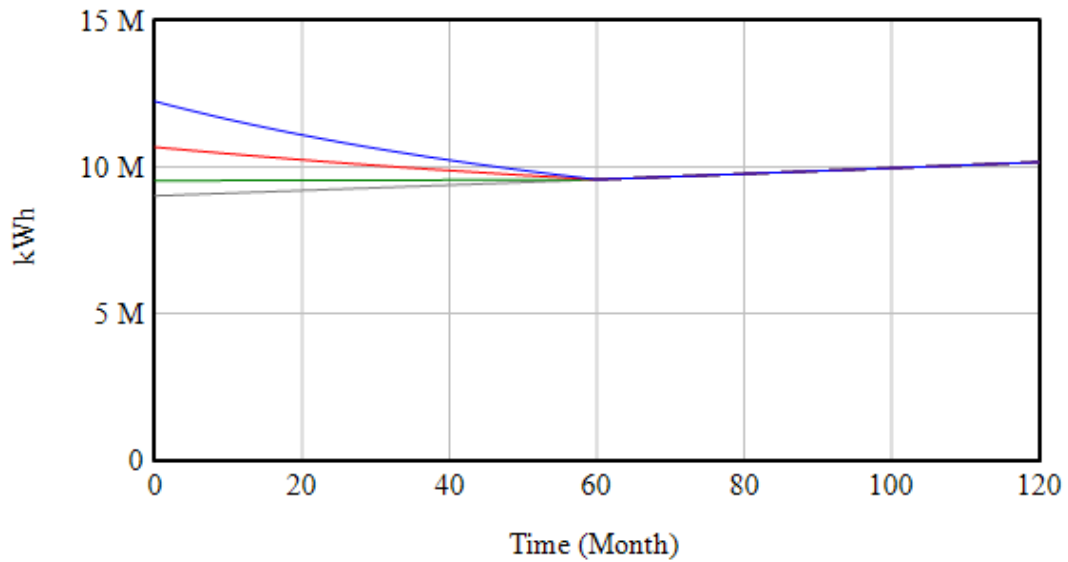
Total WF of UWS



- High NRW - Low AL
- High NRW - Medium AL
- High NRW - High AL
- Good condition

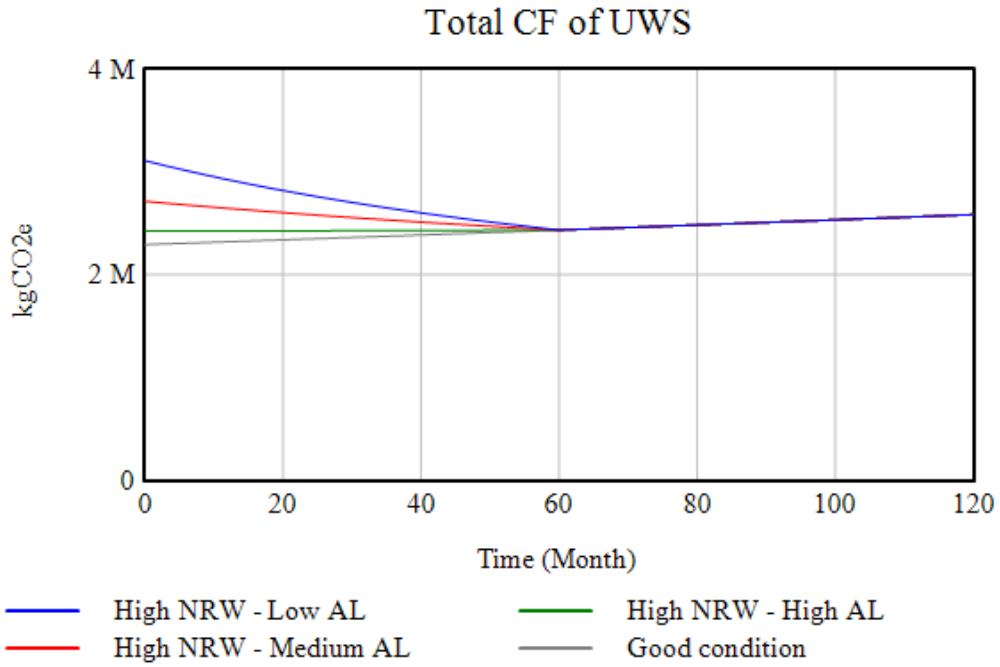
[그림 2. 68] 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 물발자국 변화 (S 3-0, S 3-1, S 3-2, S 3-3)

Total Energy for UWS



- High NRW - Low AL
- High NRW - Medium AL
- High NRW - High AL
- Good condition

[그림 2. 69] 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 총 에너지 사용량 변화 (S 3-0, S 3-1, S 3-2, S 3-3)



[그림 2. 70] 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 물손실 및 명목손실비에 따른 탄소발자국 변화 (S 3-0, S 3-1, S 3-2, S 3-3)

[표 2. 24] 시간에 따른 시나리오별 물발자국

에너지 인텐시티	Time (Month)											
	0	1	13	25	37	61	73	85	97	109	120	
낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시	물순실 현황 낮은 물순실 (Good condition)	1.13951 M	1.14065 M	1.15441 M	1.16834 M	1.18244 M	1.21115 M	1.22576 M	1.24055 M	1.25552 M	1.27067 M	1.28472 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	1.67129 M	1.66 M	1.53721 M	1.43406 M	1.34622 M	1.21115 M	1.22576 M	1.24055 M	1.25552 M	1.27067 M	1.28472 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	1.41631 M	1.412 M	1.36296 M	1.3185 M	1.27804 M	1.21115 M	1.22576 M	1.24055 M	1.25552 M	1.27067 M	1.28472 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	1.22933 M	1.22895 M	1.22448 M	1.22033 M	1.21649 M	1.21115 M	1.22576 M	1.24055 M	1.25552 M	1.27067 M	1.28472 M
	낮은 물순실 (Good condition)	1.21303 M	1.21424 M	1.2289 M	1.24372 M	1.25873 M	1.28929 M	1.30485 M	1.32059 M	1.33653 M	1.35265 M	1.36761 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	1.77259 M	1.76072 M	1.63169 M	1.52332 M	1.43107 M	1.28929 M	1.30485 M	1.32059 M	1.33653 M	1.35265 M	1.36761 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	1.5042 M	1.49968 M	1.44826 M	1.40167 M	1.35929 M	1.28929 M	1.30485 M	1.32059 M	1.33653 M	1.35265 M	1.36761 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	1.30738 M	1.30699 M	1.30249 M	1.29833 M	1.2945 M	1.28929 M	1.30485 M	1.32059 M	1.33653 M	1.35265 M	1.36761 M
	낮은 물순실 (Good condition)	1.29196 M	1.29325 M	1.30885 M	1.32465 M	1.34063 M	1.37318 M	1.38975 M	1.40651 M	1.42349 M	1.44066 M	1.45659 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	1.88185 M	1.86935 M	1.73349 M	1.6194 M	1.52231 M	1.37318 M	1.38975 M	1.40652 M	1.42349 M	1.44066 M	1.45659 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	1.59882 M	1.59407 M	1.54004 M	1.49111 M	1.44661 M	1.37318 M	1.38975 M	1.40651 M	1.42349 M	1.44066 M	1.45659 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	1.39127 M	1.39087 M	1.38632 M	1.38213 M	1.37827 M	1.37318 M	1.38975 M	1.40651 M	1.42349 M	1.44066 M	1.45659 M

[표 2. 25] 시간에 따른 시나리오별 총 에너지 사용량

Time (Month)		0	1	13	25	37	61	73	85	97	109	120
에너지 인텐시티	물순실 현황											
낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시	낮은 물순실 (Good condition)	1.40075 M	1.40215 M	1.41907 M	1.43619 M	1.45352 M	1.48881 M	1.50677 M	1.52495 M	1.54335 M	1.56198 M	1.57924 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	1.72189 M	1.71578 M	1.65024 M	1.59665 M	1.55243 M	1.48881 M	1.50677 M	1.52495 M	1.54335 M	1.56198 M	1.57924 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	1.56322 M	1.56142 M	1.54148 M	1.52433 M	1.50963 M	1.48881 M	1.50677 M	1.52495 M	1.54335 M	1.56198 M	1.57924 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	1.44687 M	1.44749 M	1.45505 M	1.46289 M	1.471 M	1.48881 M	1.50677 M	1.52495 M	1.54335 M	1.56198 M	1.57924 M
보통 물순환 에너지 인텐시티 도시	낮은 물순실 (Good condition)	5.07679 M	5.08186 M	5.14318 M	5.20524 M	5.26805 M	5.39595 M	5.46105 M	5.52695 M	5.59364 M	5.66113 M	5.72372 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	6.78688 M	6.75198 M	6.37419 M	6.05973 M	5.79474 M	5.39595 M	5.46105 M	5.52695 M	5.59364 M	5.66113 M	5.72372 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	5.95747 M	5.9452 M	5.80669 M	5.68298 M	5.5722 M	5.39595 M	5.46105 M	5.52695 M	5.59364 M	5.66113 M	5.72372 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	5.34924 M	5.34969 M	5.35571 M	5.36294 M	5.37133 M	5.39595 M	5.46105 M	5.52695 M	5.59364 M	5.66113 M	5.72372 M
높은 물순환 에너지 인텐시티 도시	낮은 물순실 (Good condition)	9.02305 M	9.03207 M	9.14105 M	9.25135 M	9.36298 M	9.59029 M	9.70601 M	9.82313 M	9.94166 M	10.0616 M	10.1728 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	12.2498 M	12.1834 M	11.4639 M	10.8637 M	10.3568 M	9.5903 M	9.70602 M	9.82313 M	9.94166 M	10.0616 M	10.1729 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	10.6885 M	10.6647 M	10.3958 M	10.1548 M	9.93814 M	9.59029 M	9.70601 M	9.82313 M	9.94166 M	10.0616 M	10.1728 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	9.54345 M	9.54363 M	9.547 M	9.55256 M	9.56025 M	9.59029 M	9.70601 M	9.82313 M	9.94166 M	10.0616 M	10.1728 M

[표 2. 26] 시간에 따른 시나리오별 탄소발자국

Time (Month)		0	1	13	25	37	61	73	85	97	109	120
에너지 인텐시티	물순실 현황											
낮은 물순환 에너지 인텐시티 도시	낮은 물순실 (Good condition)	0.388589	0.388978	0.393671	0.398421	0.403229	0.413018	0.418002	0.423046	0.42815	0.433316	0.438107
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	0.479252	0.477521	0.458935	0.443723	0.431152	0.413018	0.418002	0.423046	0.42815	0.433316	0.438107
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	0.434324	0.433812	0.428128	0.423231	0.419024	0.413018	0.418002	0.423046	0.42815	0.433316	0.438107
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	0.401378	0.401549	0.403647	0.405823	0.408077	0.413018	0.418002	0.423046	0.42815	0.433316	0.438107
보통 물순환 에너지 인텐시티 도시	낮은 물순실 (Good condition)	1.3076 M	1.30891 M	1.3247 M	1.34068 M	1.35686 M	1.3898 M	1.40657 M	1.42354 M	1.44072 M	1.45811 M	1.47423 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	1.7455 M	1.73657 M	1.63992 M	1.55949 M	1.49173 M	1.3898 M	1.40657 M	1.42354 M	1.44072 M	1.45811 M	1.47423 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	1.53289 M	1.52976 M	1.49443 M	1.46289 M	1.43466 M	1.3898 M	1.40657 M	1.42354 M	1.44072 M	1.45811 M	1.47423 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	1.37697 M	1.3771 M	1.37881 M	1.38084 M	1.38316 M	1.3898 M	1.40657 M	1.42354 M	1.44072 M	1.45811 M	1.47423 M
높은 물순환 에너지 인텐시티 도시	낮은 물순실 (Good condition)	2.29416 M	2.29646 M	2.32417 M	2.35221 M	2.38059 M	2.43839 M	2.46781 M	2.49759 M	2.52773 M	2.55823 M	2.58651 M
	높은 물순실 - 낮은 명목순실비 (High NRW - Low AL)	3.11124 M	3.09443 M	2.91234 M	2.76048 M	2.63225 M	2.43839 M	2.46781 M	2.49759 M	2.52773 M	2.55823 M	2.58651 M
	높은 물순실 - 보통 명목순실비 (High NRW - Medium AL)	2.71563 M	2.70962 M	2.6417 M	2.58084 M	2.52615 M	2.43839 M	2.46781 M	2.49759 M	2.52773 M	2.55823 M	2.58651 M
	높은 물순실 - 높은 명목순실비 (High NRW - High AL)	2.42552 M	2.42558 M	2.42663 M	2.42824 M	2.43039 M	2.43839 M	2.46781 M	2.49759 M	2.52773 M	2.55823 M	2.58651 M

2.5.3 공급과정별 발생량 및 부문 간 이동량

취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수 사용, 하수 집수, 하수처리, 방류의 도시 물순환 과정별로 사용 및 이동되는 자원의 변화를 알기위해, 높은 물순환 에너지 인텐시티 도시에서 높은 물손실-낮은 명목손실비 시나리오(S 3-1)의 경우를 분석하였다. [표 2. 27], [표 2. 28], [표 2. 29]에 S 3-1 시나리오에서 시간이 지남에 따라 항목별 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국 값이 나타나 있다.

S 3-1 시나리오에서 물손실 관리 프로그램을 적용하기 이전의 초기 단계(t=0month)에서 물순환 과정에서 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국은 [표 2. 30], [표 2. 31], [표 2. 32]와 [그림 2. 71], [그림 2. 72]에 나타나 있다.

이 시기에 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수 사용, 하수 집수, 하수처리, 방류 과정에 물발자국은 각각 1,641,147m³(87.21%), 131,170m³(6.97%), 33,120m³(1.76%), 32,793m³(1.74%), 27,054m³(1.44%), 0m³(0%), 16,245m³(0.86%), 322m³(0.02%) 발생하였으며, 전체 물순환 과정에서 1,881,851m³이 발생되었다. 직접적으로 용수로 사용하는 취수과정이 전체 물발자국의 87.21%를 차지하여, 대부분이 물발자국이 발생됨을 알 수 있었다. 취수를 제외한 나머지 과정에서는 각각의 과정에 활용되는 에너지 또는 약품에 의해 발생하는 물발자국이었으며, 전체 물발자국에서 에너지와 약품에 의한 물발자국은 각각 13.02%, 0.03%를 차지하였다.

취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수 사용, 하수 집수, 하수처리, 방류과정에 총 에너지 사용량은 238,582kWh(1.95%), 6,545,450kWh(53.43%), 1,652,724kWh(13.49%), 1,636,360kWh(13.36%), 1,350,000kWh(11.02%), 0kWh(0%), 810,662kWh(6.62%), 16,053kWh(0.13%) 이었다. 해당 도시 조건에서 많은 부분의 에너지 사용은 도·송수 과정에서 발생하였으며, 정수처리, 배·급수, 용수사용 과정이 그 다음으로 에너지 소모가 많은 과정이었다.

탄소발자국의 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수 사용, 하수 집수, 하수처리, 방류 과정별 값은 59,765kgCO₂eq(1.92%), 1,639,628kgCO₂eq(52.70%), 442,634kgCO₂eq(14.23%), 409,906kgCO₂eq(13.18%), 338,174kgCO₂eq(10.87%), 0kgCO₂eq(0%), 217,112kgCO₂eq(6.98%), 4,021kgCO₂eq(0.13%)이었으며, 대부분이 에너지 사용에 따른 탄소발생량이기 때문에 에너지 사용과 유사한 결과는 나타내었다.

S 3-1 시나리오에서 물손실 관리 프로그램을 적용하여 누수율을 20%로 유지하고 명목손실비가 5%인 안정화 시기(t=61month)에서 물순환 과정에서 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국은 [표 2. 33], [표 2. 34], [표 2. 35]와 [그림 2. 73], [그

림 2. 74]에 나타나 있다.

효율적인 물손실 관리 프로그램의 적용을 통해 물손실 관리 목표 달성시 초기에 비해 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국의 발생량 각각 27%, 22%, 22%가 감소됨을 확인할 수 있었다. 전체 도시 물순환 과정에서 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수 과정에서 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국이 약 28%정도로 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 용수 사용, 하수처리 및 방류 과정에서는 약간의 증가가 발생 되었다.

[그림 2. 75]와 [그림 2. 76]에 나타낸바와 같이 각 부문별 자원의 이동량을 확인할 수 있었다. S 3-1 시나리오의 초기(t=0month)와 안정화시기에(t=61month)의 경우 물 부분에서 에너지 부문으로는 244,997m³, 191,806m³의 물이 이동되었으며, 물순환을 위한 에너지는 12,249,800kWh, 9,590,300kWh가 이동되었다. 대부분의 탄소 발생은 3,098,187kgCO₂eq, 2,421,189kgCO₂eq로 물순환을 위해 사용된 에너지를 생산하기 위해 발생하는 탄소량이 대부분의 값을 나타내었다.

[표 2. 27] S 3-1 시나리오에서 구성요소별 물발자국

항목	시간(월)											
	0	1	13	25	37	49	61	73	85	97	109	120
Groundwater intake	1,472,730	1,462,680	1,353,370	1,261,510	1,183,270	1,115,860	1,062,870	1,075,690	1,088,670	1,101,810	1,115,100	1,127,430
Surface water intake	163,636	162,520	150,374	140,168	131,474	123,985	118,096	119,521	120,963	122,423	123,900	125,270
WF of total energy	244,997	243,669	229,277	217,274	207,136	198,484	191,806	194,120	196,463	198,833	201,232	203,457
WF of water treatment chemical	327	325	301	280	263	248	236	239	242	245	248	251
WF of wastewater treatment chemical	161	161	163	165	168	170	172	174	176	178	180	182
Total WF of UWS	1,881,850	1,869,350	1,733,490	1,619,400	1,522,310	1,438,750	1,373,180	1,389,750	1,406,520	1,423,490	1,440,660	1,456,590

[표 2. 28] S 3-1 시나리오에서 구성요소별 총 에너지 사용량

항목	시간(월)											
	0	1	13	25	37	49	61	73	85	97	109	120
Intake energy	238,582	236,953	219,246	204,365	191,690	180,769	172,184	174,262	176,365	178,493	180,647	182,644
Conveyance energy	6,545,450	6,500,780	6,014,980	5,606,720	5,258,980	4,959,380	4,723,850	4,780,850	4,838,540	4,896,920	4,956,010	5,010,800
Water treatment energy	1,636,360	1,625,200	1,503,740	1,401,680	1,314,740	1,239,850	1,180,960	1,195,210	1,209,630	1,224,230	1,239,000	1,252,700
"Transmission & Distribution energy"	1,636,360	1,625,200	1,503,740	1,401,680	1,314,740	1,239,850	1,180,960	1,195,210	1,209,630	1,224,230	1,239,000	1,252,700
End use energy	1,350,000	1,351,350	1,367,660	1,384,160	1,400,860	1,417,760	1,434,870	1,452,180	1,469,710	1,487,440	1,505,390	1,522,080

항목	시간(월)	0	1	13	25	37	49	61	73	85	97	109	120
Wastewater collection energy		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wastewater treatment energy		802,636	803,594	814,999	826,290	837,518	848,723	859,859	870,234	880,735	891,362	902,117	912,090
Discharge energy		16,053	16,072	16,300	16,526	16,750	16,975	17,197	17,405	17,615	17,827	18,042	18,242
Embodied energy of water treatment chemical		16,364	16,252	15,037	14,017	13,147	12,399	11,810	11,952	12,096	12,242	12,390	12,527
Embodied energy of wastewater treatment chemical		8,026	8,036	8,150	8,263	8,375	8,487	8,599	8,702	8,807	8,914	9,021	9,121
Total Energy for UWS		122,49800	12,183,400	11,463,900	10,863,700	10,356,800	9,924,190	9,590,300	9,706,020	9,823,130	9,941,660	10,061,600	10,172,800

[표 2. 29] S 3-1 시나리오에서 구성요소별 탄소발자국

항목	시간(월)	0	1	13	25	37	49	61	73	85	97	109	120
CF of total energy		3,062,460	3,045,860	2,865,960	2,715,920	2,589,200	2,481,050	2,397,570	2,426,500	2,455,780	2,485,410	2,515,400	2,543,210
CF of water treatment chemical		32,727	32,504	30,075	28,034	26,295	24,797	23,619	23,904	24,193	24,485	24,780	25,054
CF of wastewater treatment chemical		16,053	16,072	16,300	16,526	16,750	16,975	17,197	17,405	17,615	17,827	18,042	18,242
Total CF of UWS		3,111,240	3,094,430	2,912,340	2,760,480	2,632,250	2,522,820	2,438,390	2,467,810	2,497,590	2,527,730	2,558,230	2,586,510

[표 2. 30] S 3-1 시나리오, 초기(t=0 month)에 도시물순환 과정별 물발자국 발생량

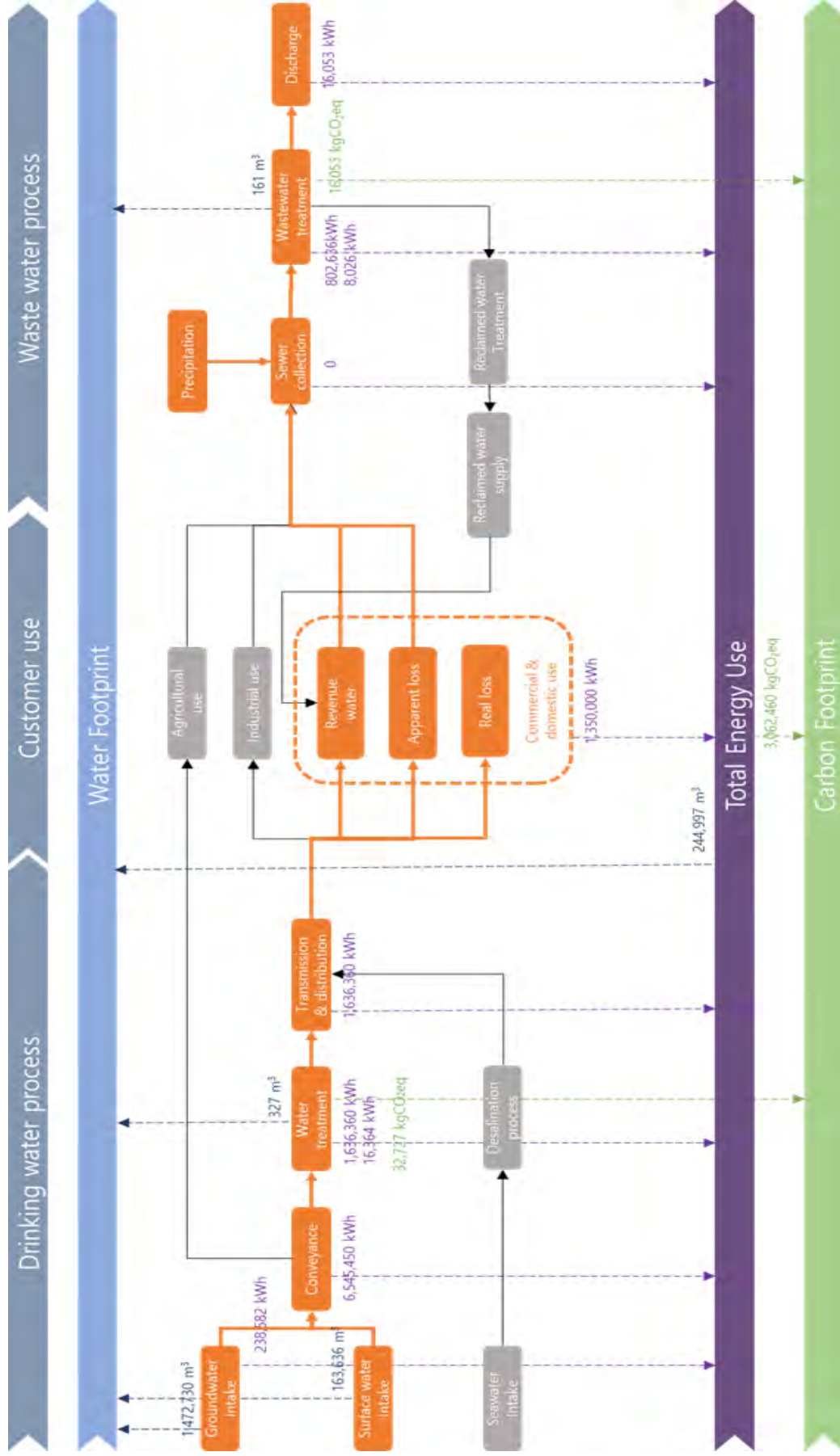
물순환과정 항목	취수	도·송수	정수처리	배·급수	용수사용	하수집수	하수처리	방류	총계
Direct	1,636,366								1,636,366
WF of energy	4,781	131,170	32,793	32,793	27,054	0	16,085	322	244,997
WF of chemical			327				161		488
Total	1,641,147	131,170	33,120	32,793	27,054	0	16,245	322	1,881,851

[표 2. 31] S 3-1 시나리오, 초기(t=0 month)에 도시물순환 과정별 에너지 소모량

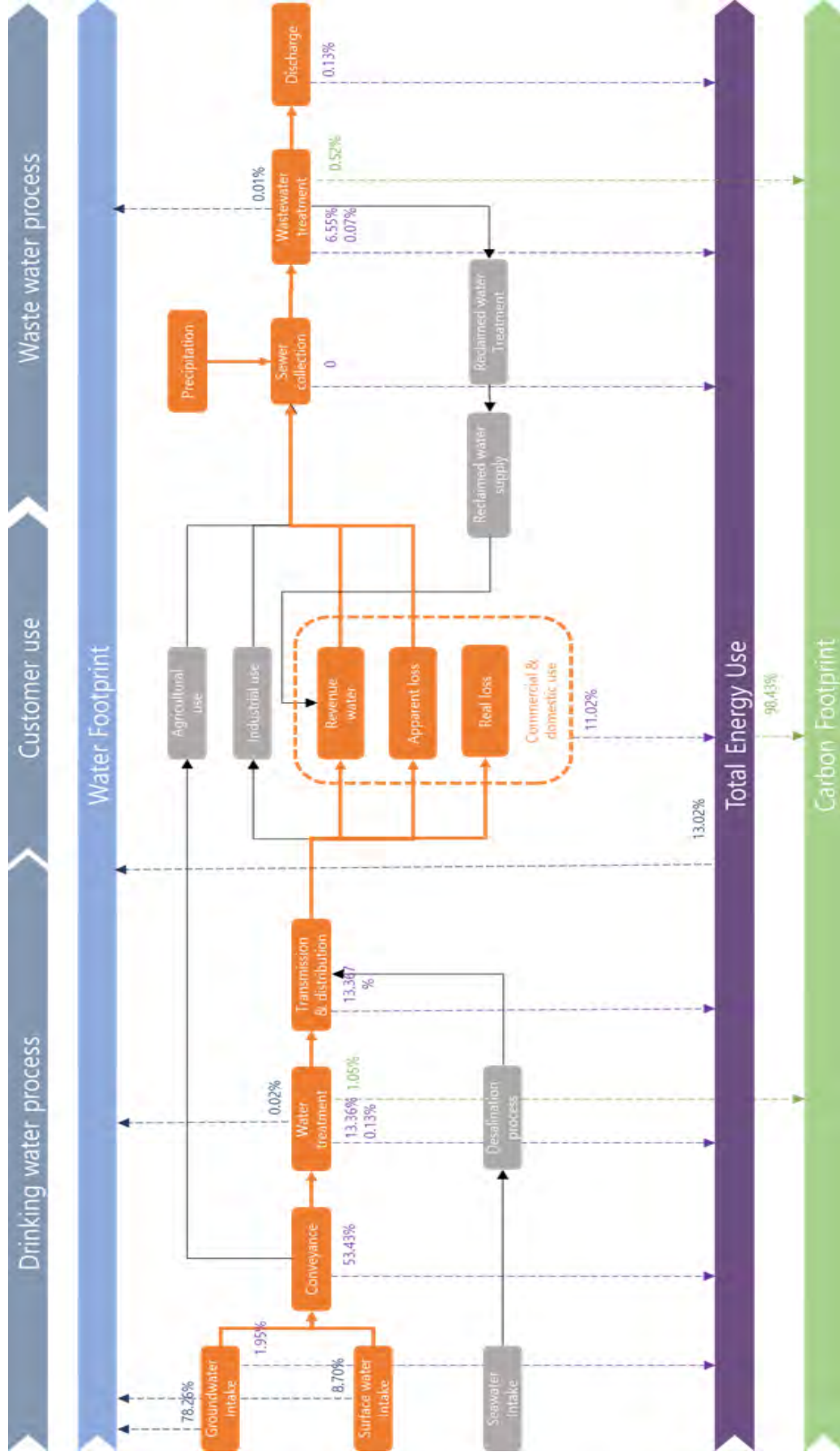
물순환과정 항목	취수	도·송수	정수처리	배·급수	용수사용	하수집수	하수처리	방류	총계
Direct	238,582	6,545,450	1,636,360	1,636,360	1,350,000	0	802,636	16,053	12,225,441
EE of chemical			16,364				8,026		24,390
Total	238,582	6,545,450	1,652,724	1,636,360	1,350,000	0	810,662	16,053	12,249,831

[표 2. 32] S 3-1 시나리오, 초기(0번째 달)에 도시물순환 과정별 탄소발자국 발생량

물순환과정 항목	취수	도·송수	정수처리	배·급수	용수사용	하수집수	하수처리	방류	총계
CF of energy	59,765	1,639,628	409,906	409,906	338,174	0	201,059	4,021	3,062,460
CF of chemical			32,727				16,053		48,780
Total	59,765	1,639,628	442,634	409,906	338,174	0	217,112	4,021	3,111,240



[그림 2. 71] S 3-1 시나리오, 초기(t=0month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국



[그림 2. 72] S 3-1 시나리오, 초기(t=0month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 비율

[표 2. 33] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61 month)에 도시물순환 과정별 물발자국 발생량

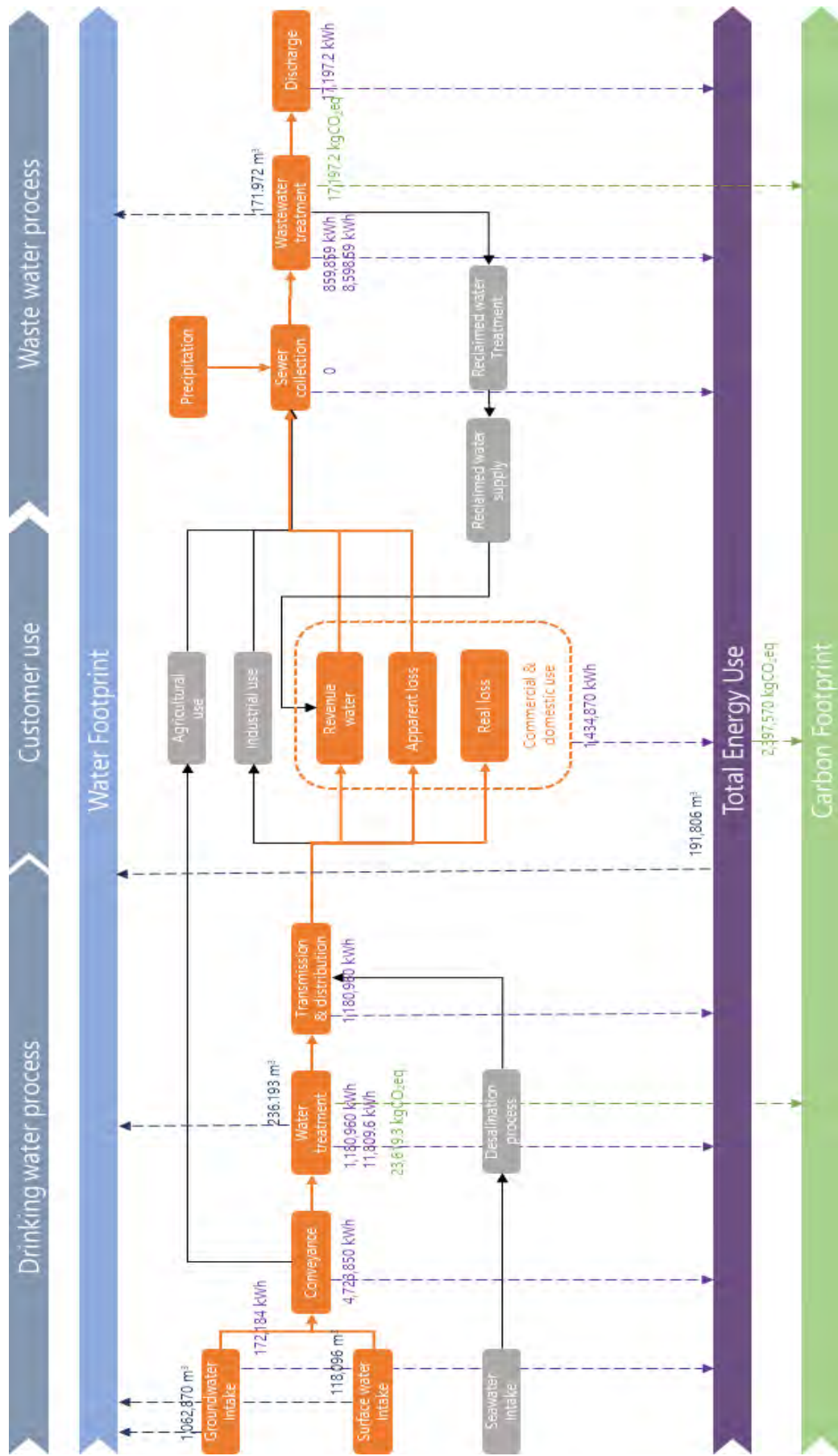
물순환과정 항목	취수	도·송수	정수처리	배·급수	용수사용	하수집수	하수처리	방류	총계
Direct	1,180,966								1,180,966
WF of energy	3,451	94,679	23,670	23,670	28,759	0	17,234	345	191,806
WF of chemical			236				172		408
Total	1,184,417	94,679	23,906	23,670	28,759	0	17,406	345	1,373,180
Reduction rate	-28	-28	-28	-28	+6	-	+7	+7	-27

[표 2. 34] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61 month)에 도시물순환 과정별 에너지 소모량

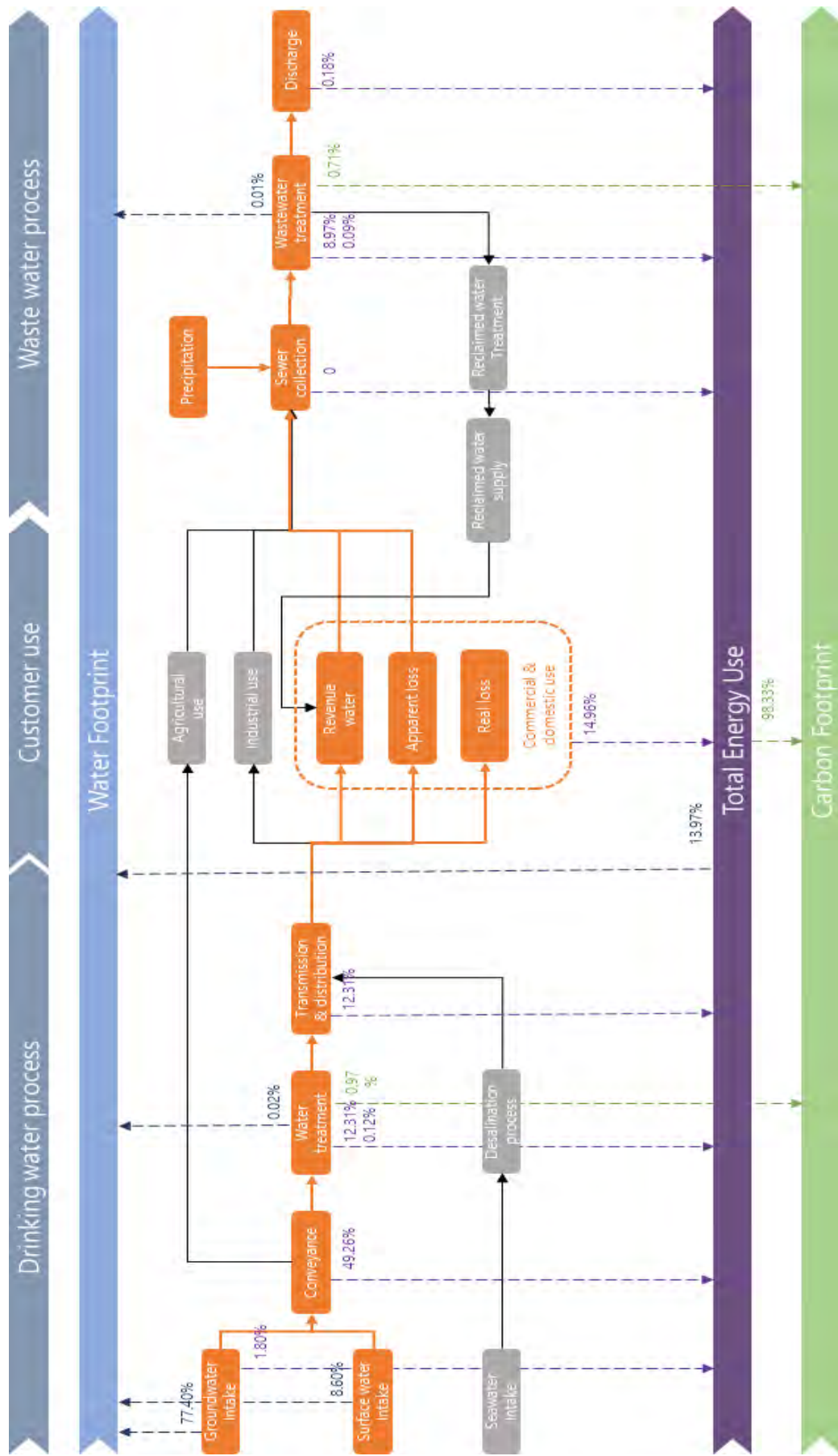
물순환과정 항목	취수	도·송수	정수처리	배·급수	용수사용	하수집수	하수처리	방류	총계
Direct	172,184	4,723,850	1,180,960	1,180,960	1,434,870	0	859,859	17,197	9,569,880
EE of chemical			11,810				8,599		20,408
Total	172,184	4,723,850	1,192,770	1,180,960	1,434,870	0	868,458	17,197	9,590,288
Reduction rate	-28	-28	-28	-28	+6	-	+7	+7	-22

[표 2. 35] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61 month)에 도시물순환 과정별 탄소발자국 발생량

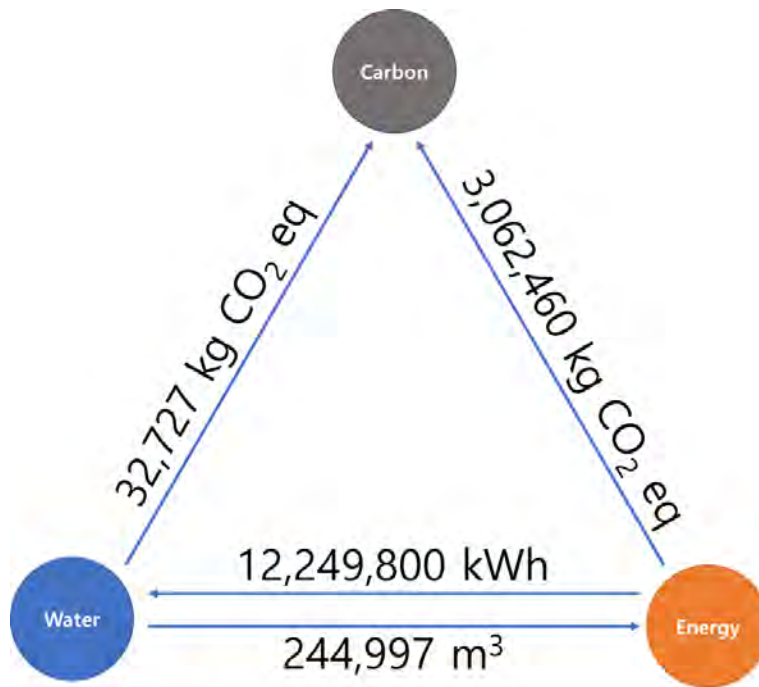
물순환과정 항목	취수	도·송수	정수처리	배·급수	용수사용	하수집수	하수처리	방류	총계
CF of energy	43,138	1,183,480	295,869	295,869	359,482	0	215,423	4,308	2,397,570
CF of chemical			23,619				17,197		40,817
Total	43,138	1,183,480	319,489	295,869	359,482	0	232,620	4,308	2,438,387
Reduction rate	-28	-28	-28	-28	+6	-	+7	+7	-22



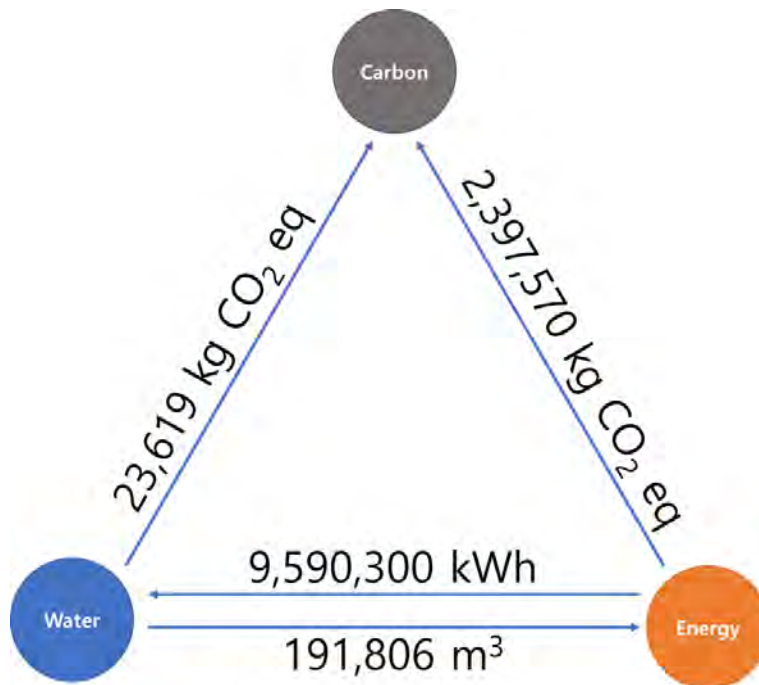
[그림 2. 73] S 3-1 시나리오, 안정화 후 (t=61month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국



[그림 2. 74] S 3-1 시나리오, 안정화 후(t=61month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 비율



[그림 2. 75] S 3-1 시나리오, 초기(t=0month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 부문간 이동량



[그림 2. 76] S 3-1 시나리오, 안정화 후 (t=61month)의 도시 물순환 과정별, 물발자국, 총 에너지 소모량 및 탄소 발자국의 부문간 이동량

제 3 장 결론

넥서스는 물, 에너지, 식량, 토지, 기후, 및 환경 등의 부문 간 연관성과 상호의존성을 나타내며, 이러한 상호의존성은 최근에 학계와 정책결정자들에게 많은 관심을 받고 있다. 넥서스 관점의 도입으로 각각의 부문별로 자원을 관리하는 기존의 정책결정 체계의 한계를 극복하고, 관련 있는 부문 간의 시너지와 트레이드오프를 고려한 지속가능한 발전을 위한 의사 결정이 가능하게 되었다.

기존의 넥서스 연구는 범위(물, 에너지, 식량, 토지이용, 기후, 생태계 등), 방법론(학문, 분석 접근법, S/W, 툴, 모형 기반), 지리적 스케일(전 세계, 다국가 간, 국가, 지역, 도시, 가정 범위) 및 분석 목적(이해, 방향 제시, 정책제시)에 따라 다양한 형태의 연구가 이루어지고 있다. 그중 물-에너지 넥서스, 물-에너지-환경 넥서스, 물-에너지-식량 넥서스 및 물-에너지-토지-기후 넥서스와 같이 물을 핵심요소로 하는 넥서스 모델이 주를 이루고 있다. 그리고 전 세계, 다국가, 국가 또는 지역 범위에서 자원의 사용, 이동 및 상관관계의 거시적 분석을 통해 넥서스를 이해하는 연구가 초창기에 주로 제시되었고, 점차 도시 또는 가정 수준의 미시적인 분석을 통해 구체적인 넥서스 관점의 정책을 제시하고자 하는 연구들이 늘어나고 있는 추세이다.

사회과학 분야 (questionnaire survey, ontology engineering 등), 경제 분야(input output analysis, computable general equilibrium model, econometric model 등) 환경 분야 (Benefit-cost analysis, life cycle assessment 등), 시스템 분야 (System dynamics model), 통계 분야(Statistical application)의 다양한 방법론들이 현재 넥서스 연구에 적용되고 있다. 연구자들은 넥서스 연구 목적 및 방법론들의 장·단점을 고려하여 해당 연구에 적합한 방법론을 선택·적용하여 분석을 수행하고 있으며, 하나의 방법론 또는 통합된 방법론 기반의 범용적인 넥서스 분석 방법을 제시하는 것은 어려운 실정이다. 본 연구에서는 도시 물순환 시스템의 연구 목적, 범위, 자료취득 가능성 및 상호 연관성 등을 고려하여 시스템 개념과 역학 모델에 기초하여 맥락을 형상화할 수 있는 시스템 다이내믹스 기법을 분석 방법론으로 선택하였다.

수도사업자의 물손실 관리 전략 수립을 위한 도시 물순환 시스템의 물-에너지-환경 넥서스 모델은 기존의 도시 물순환 시스템 다이내믹스 모델과 물순환 과정에서 높은 에너지 인텐시티를 나타내는 과정을 검토하여 개발하였다. 부문 간 자원의 이동 및 사용량을 정량화하기 위하여 물, 에너지, 환경 지표로 각각 물발자국(water footprint), 총 에너지 사용량(total energy use) 및 탄소발자국(carbon footprint)을 적용하였다.

개발된 모델을 활용하여 3개의 도시 에너지 인텐시티 현황 (낮음, 보통, 높음)과 4개의 물손실 현황(낮은 물손실, 높은 물손실-낮은 명목손실비, 높은 물손실-보통 명목손실비, 높은 물손실-높은 명목손실비)을 고려한 12개의 시나리오 분석을 통해 수도사업자의 물손실 관리를 위한 전략 수립 및 각 시나리오별 넥서스 부문 간의 자원 이동량에 대하여 분석을 수행하였다. 그 결과 기존의 수도사업자는 경제적인 측면 중심의 의사결정과정에서는 높은 물손실-높은 명목손실의 경우가 물손실 관리 전략 수립 및 적용의 우선순위였으나, 넥서스 관점에서는 높은 물손실-낮은 명목손실의 경우를 우선적으로 고려하여야 함을 알 수 있었다. 또한, 수도사업자는 지속 가능한 도시 물순환 시스템을 위하여 도시의 단위 물공급 에너지 인텐시티 또한 지속가능한 물손실 관리 전략을 위해 사전적으로 분석해야 하는 항목으로 고려해야 한다.

높은 도시 에너지 인텐시티의 높은 물손실-낮은 명목손실비의 시나리오에서(S 3-1) 도시 물순환 과정에서 적합한 물손실 관리 프로그램의 적용을 통해 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국의 발생량은 각각 27%, 22%, 22%가 감소하였다. 전체 도시 물순환 과정에서 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수 과정에서 물발자국, 총 에너지 사용량 및 탄소발자국이 약 28% 정도 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 용수 사용, 하수처리 및 방류 과정에서는 약간의 증가가 발생 되었다.

이와 같은 도시 물순환의 물-에너지-환경 넥서스 모델을 적용하여, 도시 물순환 과정에서 물, 에너지, 환경 간의 자원의 사용량 및 이동량의 정량적인 산정이 가능하였다. 또한 개발된 모델의 적용을 통해 수도사업자는 기존의 경제성만 고려한 물손실 관리 전략의 수립에서, 지속가능한 도시 물순환 시스템을 위한 넥서스 관점에서 물손실 관리 전략을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Amores, M. J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A., & Castells, F. (2013). Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 43, 84-92.
2. Anderson, J. M. (2006). Integrating recycled water into urban water supply solutions. *Desalination*, 187(1-3), 1-9.
3. Cammerman, N. (2009). Integrated water resource management and the water, energy, climate change nexus. A Discussion Report. University of Queensland, Brisbane, Australia.
4. Cheng, C. L. (2002). Study of the inter-relationship between water use and energy conservation for a building. *Energy and buildings*, 34(3), 261-266.
5. Cooley, H., Gleick, P. H., & Wolff, G. (2006). Desalination, with a grain of salt. Pacific Institute. June.
6. Dale, L. (2004). Electricity price and Southern California's water supply options. *Resources, conservation and recycling*, 42(4), 337-350.
7. Friedrich, E., Pillay, S., & Buckley, C. A. (2009). Environmental life cycle assessments for water treatment processes - A South African case study of an urban water cycle. *Water Sa*, 35(1).
8. Hardberger, A., Stillwell, A. S., King, C. W., Webber, M., & Duncan, I. J. (2009). Energy-water nexus in Texas. The University of Texas at Austin Environmental Defense Fund.
9. Hardy, L., Garrido, A., & Juana, L. (2012). Evaluation of Spain's water-energy nexus. *International Journal of Water Resources Development*, 28(1), 151-170.
10. Kenway, S. J., Priestley, A., Cook, S., Seo, S., Inman, M., Gregory, A., &

- Hall, M. (2008). Energy use in the provision and consumption of urban water in Australia and New Zealand. Water Services Association of Australia (WSAA): Sydney, Australia.
11. Kenway, S. J., Priestley, A., Cook, S., Seo, S., Inman, M., Gregory, A., & Hall, M. (2008). Energy use in the provision and consumption of urban water in Australia and New Zealand. Water Services Association of Australia (WSAA): Sydney, Australia.
 12. Klein, G., Krebs, M., Hall, V., O'Brien, T., & Blevins, B. B. (2005). California's water - energy relationship. California Energy Commission, 1-180.
 13. Kneppers, B., Birchfield, D., & Lawton, M. (2009). Energy-water relationships in reticulated water infrastructure systems. *Water Supply (kWh/Capita)*, 76(20.86), 75-15.
 14. Lassaux, S., Renzoni, R., & Germain, A. (2007). Life cycle assessment of water from the pumping station to the wastewater treatment plant. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(2), 118-126.
 15. Lemos, D., Dias, A. C., Gabarrell, X., & Arroja, L. (2013). Environmental assessment of an urban water system. *Journal of Cleaner Production*, 54, 157-165.
 16. Lesjean, B., & Luck, F. (2005). Assessment of the membrane bioreactor technology and European market outlook. IDS Water.
 17. Li, X., Liu, J., Zheng, C., Han, G., & Hoff, H. (2016). Energy for water utilization in China and policy implications for integrated planning. *International Journal of Water Resources Development*, 32(3), 477-494.
 18. Lundie, S., Peters, G. M., & Beavis, P. C. (2004). Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning.
 19. Maas, C. (2009). Greenhouse gas and energy co-benefits of water conservation. POLIS Project on Ecological Governance, University of

Victoria.

20. Maas, C. (2010). Ontario's Water-Energy Nexus: Will We Find Ourselves in Hot Water... or Tap into Opportunity?. POLIS Project on Ecological Governance, University of Victoria.
21. Miller, L. A., Ramaswami, A., & Ranjan, R. (2013). Contribution of water and wastewater infrastructures to urban energy metabolism and greenhouse gas emissions in cities in India. *Journal of Environmental Engineering*, 139(5), 738-745.
22. Mizuta, K., & Shimada, M. (2010). Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Water Science and Technology*, 62(10), 2256-2262.
23. Mo, W., Wang, R., & Zimmerman, J. B. (2014). Energy - water nexus analysis of enhanced water supply scenarios: a regional comparison of Tampa Bay, Florida, and San Diego, California. *Environmental science & technology*, 48(10), 5883-5891.
24. Muñoz, I., Milà i Canals, L., & Fernández Alba, A. R. (2010). Life cycle assessment of water supply plans in Mediterranean Spain: the Ebro river transfer versus the AGUA Programme. *Journal of Industrial Ecology*, 14(6), 902-918.
25. National Research Council. (2008). *Desalination: a national perspective*. National Academies Press.
26. Northwest Energy Efficiency Alliance (NEEA). (2001). *Market Research Report: Pacific Northwest Water and Wastewater Market Assessment*.
27. Park, L., & Bennett, B. (2010). *Embedded energy in water studies-study 2: water agency and function component study and embedded energy-water load profiles*. Sacramento, CA: California Public Utilities Commission.

28. Racoviceanu, A. I., Karney, B. W., Kennedy, C. A., & Colombo, A. F. (2007). Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions inventory for water treatment systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(4), 261-270.
29. Radcliffe, M. R., Bennett, R. M., & Bryja, J. (2004). Highly cored extruded clay units: testing and design procedures. In *Structures 2004: Building on the Past, Securing the Future* (pp. 1-8).
30. Raluy, R. G., Serra, L., Uche, J., & Valero, A. (2005). Life cycle assessment of water production technologies-Part 2: reverse osmosis desalination versus the Ebro river water transfer (9 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(5), 346-354.
31. Schwarzenegger, A. (2006). *REFINING ESTIMATES OF WATER-RELATED ENERGY USE IN CALIFORNIA*.
32. Scott, C., Pasqualetti, M., Hoover, J., Garfin, G., Varady, R., & Guhathakurta, S. (2009). *Water and Energy Sustainability with Rapid Growth and Climate Change in the Arizona-Sonora Border Region*. A Report to the Arizona Water Institute June.
33. Stokes, J. R., & Horvath, A. (2009). Energy and air emission effects of water supply.
34. Tan, D., Hu, F., Thieriot, H., & McGregor, D. (2015). *Towards a water & energy secure China*. China Water Risk.
35. Venkatesh, G., & Brattebø, H. (2011). Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway). *Energy*, 36(2), 792-800.
36. Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2016). Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. *Applied Energy*, 178, 868-885.
37. Wang, H., Yang, Y., Keller, A. A., Li, X., Feng, S., Dong, Y. N., & Li, F.

- (2016). Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa. *Applied Energy*, 184, 873-881.
38. WEF. (2009). *Energy Conservation in Water and Wastewater Facilities*. Prepared by the Energy Conservation in Water and Wastewater Treatment Facilities, Task Force of the Water Environment Federation.
39. Wilkinson, R. (2000). *Methodology for analysis of the energy intensity of California's water systems and an assessment of multiple potential benefits through integrated water-energy efficiency measures*. University of California Santa Barbara.
40. Yang, L., Zeng, S., Chen, J., He, M., & Yang, W. (2010). Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 62(6), 1361-1370.
41. Younos, T., & Tulou, K. E. (2005). Overview of desalination techniques. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 132(1), 3-10.
42. Zappone, M., Fiore, S., Genon, G., Venkatesh, G., Brattebø, H., & Meucci, L. (2014). Life cycle energy and ghg emission within the turin metropolitan area urban water cycle. *Procedia Engineering*, 89, 1382-1389.