

물-에너지-토지 넥서스 연구(3차년도):

국내 도시별 물순환 시스템 분석

2022. 12



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



International Centre for
Water Security and
Sustainable Management

물-에너지-토지 넥서스 연구(3차년도): 국내 도시별 물순환 시스템 분석

Analysis on Urban Water System in South Korea

2022. 12



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



International Centre for
Water Security and
Sustainable Management

제 출 문

이 보고서를 2022년도 UNESCO i-WSSM에서 수행한 “물-에너지-토지 넥서스 연구(3차년도): 국내 도시별 물순환 시스템 분석”의 연구보고서로 제출합니다.

2022 12. 28

연구책임자 : UNESCO i-WSSM

연구수행자 : UNESCO i-WSSM

팀 장 신 은 허

선임전문관 최 서 형

목 차

제 출 문	i
목 차	ii
표 목 차	iv
그림목차	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
1.3 연구내용 및 범위	4
제 2 장 본 론	6
2.1 도시 물순환 시스템과 넥서스	6
2.2 선행 연구결과 및 연계	8
2.3 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링	10
2.4 프로파일링: 분석범위 설정 및 자료 처리	14
2.4.1 분석범위 및 대상	14
2.4.2 데이터 수집, 추출 및 전처리	16
2.5 프로파일링: 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향 분석	23
2.5.1 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티	25
2.5.2 광역지자체별 단위 공정 에너지 인텐시티: 취수 및 도수	29
2.5.3 광역지자체별 단위 공정 에너지 인텐시티: 정수처리 및 송	33
2.5.4 광역지자체별 단위 공정 에너지 인텐시티: 배급수	37
2.6 프로파일링: 상수 시스템 에너지 인텐시티 영향요인 도출	41
2.7 프로파일링: 스냅샷·궤적분석 및 전략 도출	49
2.7.1 부산	49
2.7.2 대구	53
2.7.3 인천	57

2.7.4	광주	61
2.7.5	대전	65
2.7.6	울산	69
2.7.7	세종	73
2.7.8	제주	77
2.7.9	광역지자체별 프로파일링 시사점 및 도출전략	81
2.8	특·광역시 프로파일 벤치마킹	89
2.8.1	벤치마킹 기준	89
2.8.2	벤치마킹	94
2.9	총 사용수량, 우수수량, 실 사용수량 영향 분석	96
2.9.1	총 사용수량, 우수수량, 실 사용수량 영향 분석	96
2.9.2	제주	97
제 3 장	결 론	99
참 고 문 헌		101

표 목 차

표 1. 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링 절차	11
표 2. 도시 물순환 시스템 물-에너지 사용량 이동 궤적에 따른 주요 원인	13
표 3. 3차년도 연구 분석 범위 및 대상	14
표 4. 군포시 가압장 연간전력사용량	19
표 5. 원주 취수장 연간전력 사용량, 이용률 및 가동율	20
표 6. 예천군 취수장별 연간전력사용량	21
표 7. 예천군 정수장별 연간전력 사용량	22
표 8. 광역지자체 상수 시스템 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값	26
표 9. 상수 시스템 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류	27
표 10. 상수 시스템 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류	28
표 11. 광역지자체 취수 및 도수 공정 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값	30
표 12. 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류	31
표 13. 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류	31
표 14. 광역지자체 정수처리 및 송수 공정 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값	34
표 15. 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류	35
표 16. 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류	36
표 17. 광역지자체 배급수 공정 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값	38
표 18. 배급수공정 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류	39
표 19. 배급수 공정 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류	39
표 20. 상수도시스템 에너지 인텐시티 영향요소	41
표 21. 상수도 시스템 에너지 인텐시티 분석 영향요소	42
표 22. 영향요소와 에너지 인텐시티의 상관관계 및 결정계수 값	42
표 23. 부산 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	50
표 24. 부산 상수 시스템 특성 변동	51
표 25. 대구 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	54
표 26. 대구 상수 시스템 특성 변동	55
표 27. 인천 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	58
표 28. 인천 상수 시스템 특성 변동	59
표 29. 광주 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	62
표 30. 광주 상수 시스템 특성 변동	63
표 31. 대전 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	66
표 32. 대전 상수 시스템 특성 변동	67
표 33. 대전시 상수 시스템 공정(취수&도수, 정수처리&송수) 연간 에너지 사용량	68
표 34. 울산 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	70

표 34. 울산 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	70
표 35. 울산 상수 시스템 특성 변동	71
표 36. 울산 상수 시스템 공정(취수&도수, 배급수) 연간 에너지 사용량	72
표 37. 세종 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	74
표 38. 세종 상수 시스템 특성 변동	75
표 39. 제주 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성	78
표 40. 제주 상수 시스템 특성 변동	79
표 41. 도시 물순환 시스템 물-에너지 사용량 이동 궤적에 따른 주요 원인 및 사례	81
표 42. 국내 특광역시 및 제주 프로파일 분석 결과	82
표 43. 기술통계 기반 및 공정 모델링 기반 도시 분류 가이드라인	89
표 44. 도시 물순환 시스템 공정별 에너지 인텐시티 기술통계	91
표 45. 도시 물순환 시스템 변수 변동에 따른 인텐시티 별 궤적	96

그림 목 차

그림 1. 3차년도 연구 절차	4
그림 2. 도시 물순환 시스템의 구성	6
그림 3. 1, 2, 3차년도 연구 목표 및 연관관계	8
그림 4. 대사물질 프로파일링	10
그림 5. 도시 물순환 시스템 물-에너지 사용량 이동 궤적	13
그림 6. 3차년도 연구 범위	14
그림 7. 도시물순환 시스템에서 K-water의 역할	15
그림 8. 우리나라 상수 시스템 내 원수와 정수의 이동 경로	17
그림 9. 이상치 처리 전 광역지자체별 10년간 상수 시스템 물-에너지 사용량	18
그림 10. 10년간 경기 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수 공정별 에너지 인텐시티 변동	19
그림 11. 10년간 강원 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수 공정별 에너지 인텐시티 변동	20
그림 12. 10년간 경북 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수 공정별 에너지 인텐시티 변동	21
그림 13. 이상치 처리 후 광역지자체별 10년간 상수 시스템 물-에너지 사용량	22
그림 14. 특광역시 상수 시스템 에너지 인텐시티 변동	25
그림 15. 도·자치도 상수 시스템 에너지 인텐시티 변동	25
그림 16. 상수 시스템의 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계	28
그림 17. 특광역시 취수 및 도수 공정 에너지 인텐시티 변동	29
그림 18. 도·자치도 취수 및 도수 공정 에너지 인텐시티 변동	29
그림 19. 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계	32
그림 20. 특광역시 정수처리 및 송수 공정 에너지 인텐시티 변동	33
그림 21. 도·자치도 정수처리 및 송수 공정 에너지 인텐시티 변동	33
그림 22. 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계	36
그림 23. 특광역시 배급수 공정 에너지 인텐시티 변동	37
그림 24. 도·자치도 배급수 공정 에너지 인텐시티 변동	37
그림 25. 배급수 공정 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계	40
그림 26. 배급수 공정 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계 (울산 제외)	40
그림 27. 도수관 길이와 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 관계	43
그림 28. 도수관 길이/취수량과 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 관계	43
그림 29. 도수관 길이/급수인구와 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 관계	44
그림 30. 고도처리 시설비율과 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계	44
그림 31. 도수관 길이와 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계	45
그림 32. 송수관 길이/급수량과 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계	45
그림 33. 송수관 길이/급수인구와 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계	46
그림 34. 누수율과 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계	46
그림 35. 배급수관 길이와 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계	47
그림 36. 배급수관 길이/급수량과 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계	47

그림 37. 배급수관 길이/급수인구와 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계	48
그림 38. 부산 물-에너지 사용량 프로파일	49
그림 39. 대구 물-에너지 사용량 프로파일	53
그림 40. 인천 물-에너지 사용량 프로파일	57
그림 41. 광주 물-에너지 사용량 프로파일	61
그림 42. 대전 물-에너지 사용량 프로파일	65
그림 43. 울산 물-에너지 사용량 프로파일	69
그림 44. 세종 물-에너지 사용량 프로파일	73
그림 45. 제주 물-에너지 사용량 프로파일	77
그림 46. 특광역시 물-에너지 사용량 프로파일 (서울 제외)	85
그림 47. 자치도 물-에너지 사용량 프로파일 (경기 제외)	86
그림 48. 광역지자체 별 물-에너지 사용량 프로파일	86
그림 49. 기술통계기반 상수 시스템 도시 분류 가이드라인	90
그림 50. 공정 모델링 기반 도시물순환 시스템 도시 분류 가이드라인	90
그림 51. 기술통계기반 가이드라인에 따른 특광역시 벤치마킹	94
그림 52. 공정모델기반 가이드라인에 따른 특광역시 벤치마킹	95
그림 53. 총 사용수량 기반 제주 물-에너지 프로파일 궤적	97
그림 54. 유수수량 기반 제주 물-에너지 프로파일 궤적	98
그림 55. 실 사용 수량 기반 제주 물-에너지 프로파일 궤적	98

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

전 세계는 지금 급격한 인구증가, 도시화, 생활 방식 변화, 기후변화, 자원 감소 등으로 인하여 물, 에너지, 식량, 토지 및 환경 부문에서 다양한 위기에 직면하고 있다. 이와 같은 문제를 더욱 복잡하고 어렵게 만드는 점은 각각의 부문에서 한정된 자원에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있으며, 부문들은 다양한 방식으로 서로에게 영향을 미친다는 것이다. 기존의 물, 에너지, 식량, 토지 및 환경 분야의 자원관리를 위한 의사결정 프레임워크는 전통적으로 부문별로 독립된 접근방식을 취해왔으며, 상호연계성은 고려가 되지 않았다. 이는 부문 간 자원 흐름과 같은 복잡한 관계를 잘 나타내지 못할 뿐만 아니라, 자원이용에 스트레스를 가중시킨다(Pittock 등, 2016). 일례로 물, 에너지, 농업 분야의 단독 계획은 의도하지 않은 결과를 초래하고 물, 에너지, 식량 자원 사용량을 증가시켜 지속 가능한 발전에 큰 방해요소로 작용하기도 한다(Bizikova 등, 2013).

이러한 단점을 극복하기 위해 각 부문 간의 상관관계를 인지, 이해, 분석하기 위한 통합적 분석의 필요성이 대두되었다. 이에 따라 보다 효율적인 물, 에너지, 식량, 토지 및 환경 시스템 관리를 위한 새로운 접근법으로 넥서스(Nexus)가 주목을 받기 시작하였다. 부문 간의 연관성과 상호의존성을 기반으로 시너지를 최대화하고 트레이드오프를 감소하고자 하는 넥서스 개념은 부문 간 자원 이동의 정량화가 가능하며, 합리적인 의사결정을 통해 효율적인 자원관리가 가능하다(Brandi 등, 2013; Weitz 등, 2014; Daher 등, 2017). 물은 식량과 에너지를 생산하며 인류의 기본 생계를 유지하고 개발을 위한 필수 요소이며, 물 부족과 비균형적인 분배는 물 분야뿐만 아니라 다른 분야에 큰 문제를 초래한다. 따라서 기존의 많은 물, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 넥서스 연구에서 물은 넥서스 연구에서 핵심 부문으로 간주 된다. 이와 같은 넥서스 접근법은 자원을 다루기 위한 다면적 접근법을 강조하는 통합물관리(integrated water resource management, IWRM)에서 나타나기도 한다.

도시화는 전 세계적으로 지속해서 진행하고 있으며, 산업화뿐만 아니라 경제성장과 사회 변화를 뒷받침하는 요소이다. 도시화는 개발도상국과 같은 국가들에 발전의 기회를 제공하는 긍정적인 역할을 하기도 하지만, 급격한 도시화로 인한 무분별한 도시의 확장은 다양한 문제를 이야기하기도 한다. 그러나 계획적으로 도시를 지속가능하게 개발하는 것은 과학적이고 동적인 접근이 필요하여서 달성하기 매우 어려운 실정이다. 따라서 도시화로 인한 급격한 인구증가 및 필요 용수량의 증가로 도시가 필요로 하는 생활, 상업 및 공업 용수를 적절하게 공급하지 못하는 사례가 많이 발생하고 있다.

도시 시스템은 다양한 하위 시스템(물리, 사회, 경제, 생태, 환경, 인프라, 기관 시스템 등)

을 포함하고 있으며, 이러한 하위 시스템들은 각각 독립적이며 연결되어있다. 이중 도시 물순환 시스템(Urban Water System, UWS 또는 Urban Water Cycle, UWC)은 용수공급(즉, 상수 시스템) 및 하수처리(즉, 하수 시스템)를 위한 인위적인 물순환을 중심으로 이루어져 있으며, 일반적으로 취수(abstract 또는 intake), 도·송수(conveyance and transmission), 정수처리(water treatment), 배·급수(supply and distribution), 물이용(end use), 하수집수(wastewater collection), 하수처리(wastewater treatment), 재이용(water reuse), 방류(discharge) 등의 단위 공정으로 구성되어있다. 이러한 도시 물관리에서는 몇 가지 개별적 이슈의 관리보다는 복잡한 시스템의 관리에 더 초점을 맞추어야 한다. 따라서 효율적인 도시 물관리를 위해서는 시·공간적인 동적 특성을 고려해야 하며, 더 나아가 에너지와 환경 부문을 함께 고려하는 넥서스 접근방식이 필요하다.

1차년도 연구(도시 물순환 시스템 물손실 관리를 위한 물-에너지-환경 넥서스 연구, 2020)에서는 도시 물순환의 물-에너지-환경 넥서스 모델을 적용하여, 도시 물순환 과정에서 물, 에너지, 환경 간의 자원의 사용량 및 이동량을 정량적으로 산정하였다. 또한, 개발된 모델의 적용을 통해 기존의 경제성만 고려한 도시 물순환 시스템 내 상수 시스템의 넥서스 관점에서 물손실 관리 전략과 실행계획을 제시하였다.

2차년도 연구(물-에너지-환경 넥서스 연구: 도시여건, 외부영향 및 운영관리 효율이 도시 물순환 시스템에 미치는 영향, 2021)에서는 1차년도의 연구를 확장하여 넥서스 관점에서 도시 물순환 시스템의 효율적인 관리 전략 및 실행계획을 도출하였다. 이를 위해 기존 문헌에서 제시된 도시 물순환 시스템의 공정별 에너지 인텐시티를 조사하여 에너지 인텐시티 매트릭스를 구축하였으며, 시스템 다이내믹스를 적용하여 도시 물순환 시스템 넥서스 모델을 고도화하였고, 도시여건, 외부영향 및 운영관리 효율에 따른 도시 물순환 시스템 내에서 물-에너지 사용량 및 사용효율을 분석하였으며, 최종적으로 현재 도시의 상태를 벤치마킹할 수 있는 가이드라인을 제시하였다.

1, 2차년도 연구에서는 도시 물순환 시스템 거동과 넥서스 관점에서 관리 전략 및 실행계획을 기존의 국내·외 문헌 자료와 모델링에 기반하여 이론적으로 제시하였다. 제시된 전략과 실행계획의 신뢰성을 더하기 위해 실제 도시들의 사례 분석을 통해 제시된 전략 및 실행계획의 적합성에 관한 연구가 추가로 필요하다. 이를 통해 각각의 도시의 여건에 맞는 방향을 구체적으로 제시가 가능할 것이다.

1.2 연구 목적

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

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

1.3 연구내용 및 범위

1.2 절에서 제시된 연구 목적에 따른 연구 절차는 [그림 1]과 같으며 세부 연구 내용 및 범위는 아래와 같다.

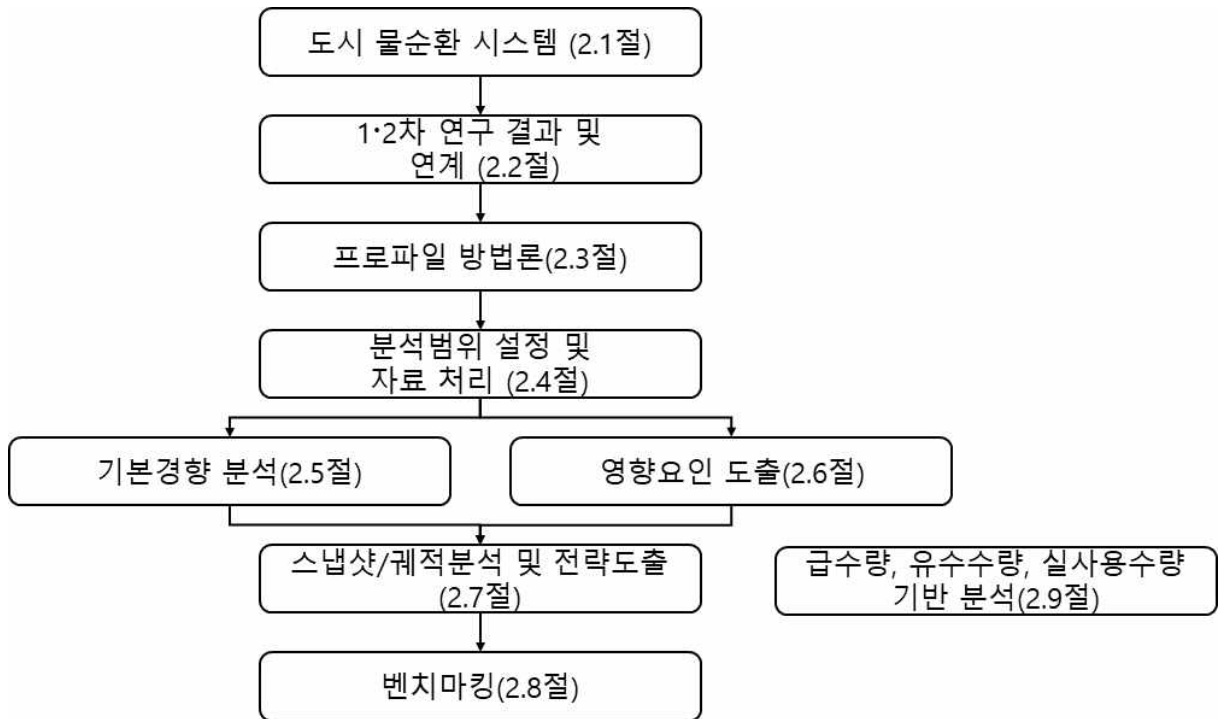


그림 1. 3차년도 연구 절차

- 도시 물순환 시스템과 넥서스 (2.1절)
 - 도시 물순환 시스템과 넥서스 정의
 - 도시 물순환 시스템 관리를 위한 넥서스 접근법의 필요성 제시
- 1·2차 연구결과 및 연계 (2.2절)
 - 도시 물순환 시스템의 넥서스 관점에 관한 1, 2차 연구 목표 및 결과 요약
 - 1, 2차 연구결과 기반 3차년도 연구 범위와 목표 제시
- 프로파일링 방법론 제시 (2.3절)
 - 상수 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링 정의 및 방법론 제시
- 분석범위 설정 및 자료 처리 (2.4절)
 - 분석 대상(도시 물순환 시스템 내 상수 시스템) 및 분석 범위 제시
 - 분석 자료(출처, 기간), 분석 방법 및 자료 전처리 제시

- 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향 분석 (2.5절)
 - 광역지자체(특광역시, 도·자치도) 상수 시스템 에너지 인텐시티 평균 및 변동성 분석
 - 광역지자체 단위 공정(취수 및 도수, 정수처리 및 송수, 배급수) 에너지 인텐시티 평균 및 변동성 분석

- 상수 시스템 단위 공정 에너지 인텐시티 영향요인 도출 (2.6절)
 - 기후 및 외부적 요인, 지리적 특징, 시스템 특징, 시스템 운영관리 관점 상수 시스템 에너지 인텐시티 영향요인 제시
 - 도·자치도 단위공정별(취수 및 도수, 정수처리 및 송수, 배급수) 에너지 인텐시티 영향요인(관 길이, 단위 물 이용량 당 관 길이, 단위 급수인구 당 관 길이, 누수율, 고도처리 비율) 분석

- 광역지자체별 스냅샷·궤적분석 및 전략도출 (2.7절)
 - 2차년도 연구결과 기반 물-에너지 넥서스 변동원인 제시
 - 광역지자체(특광역시 및 제주도) 상수 시스템 대상 물-에너지 넥서스 프로파일링 적용 및 시사점 도출

- 벤치마킹: 전 세계 상수 시스템과 물-에너지 넥서스 비교 (2.8절)
 - 2차년도 연구결과 기반 상수 시스템 벤치마킹 기준 제시
 - 특광역시 벤치마킹

- 급수량, 유수량, 실 사용수량 영향 분석 (2.9절)
 - 급수량, 유수량, 실 사용수량이 기반 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링에 미치는 영향 제시
 - 누수율이 높은 제주도 대상 급수량, 유수량, 실 사용수량 기반 상수 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링 및 시사점 도출

제 2 장 본론

2.1 도시 물순환 시스템과 넥서스

인간은 물을 사용하기 위해 인위적인 물순환 과정을 만들며, 이는 도시 물순환 시스템을 구성한다(Bagley 등, 2005; Chhipi-Shrestha 등, 2015). 이러한 도시 물순환 시스템은 크게 상수 시스템(drinking water system)과 하수 시스템(wastewater system)으로 크게 구분할 수 있으며, 그 세부공정은 [그림 2]에 설명된 바와 같이 취수, 도·송수, 정수처리, 배·급수, 용수사용, 하수집수, 하수처리, 재이용, 방류 등의 과정들이 있다.

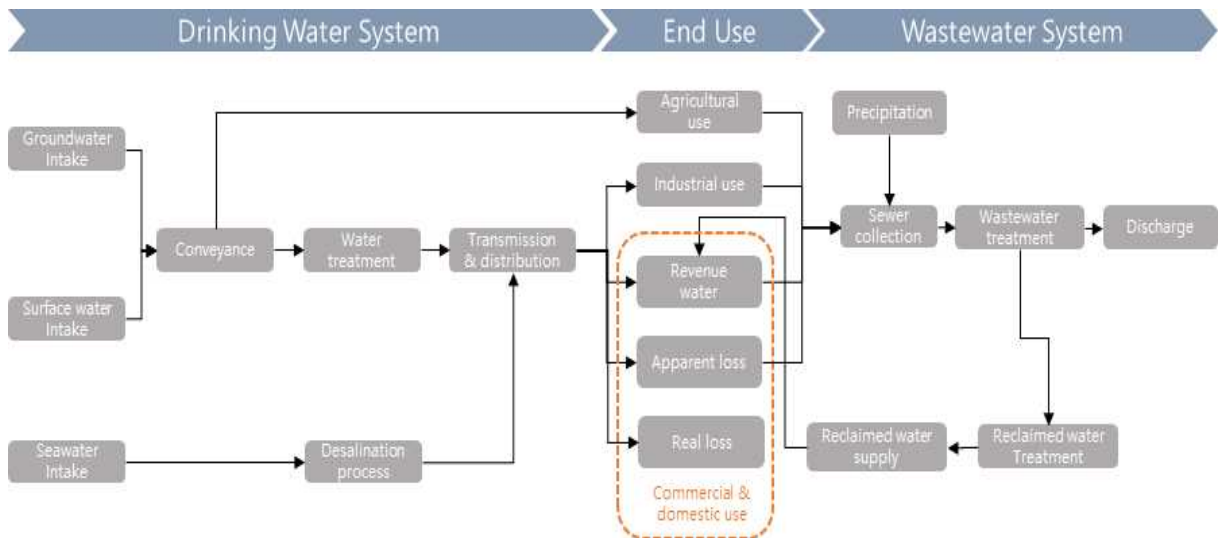


그림 2. 도시 물순환 시스템의 구성

기존의 물 분야 자원관리 의사결정을 위한 프레임워크는 전통적으로 물 부문만 고려된 독립된 접근방식을 취해왔으며, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 부문들과의 상호연계성은 고려가 되지 않았다. 이는 부문 간의 자원 이동의 복잡한 관계를 고려하지 않아, 자원이용에 스트레스를 더할 수 있다(Pittock 등, 2013). 일례로 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 등, 2013).

이러한 단점을 극복하기 위해 각 부문 간의 연관 관계 및 상호의존성을 확인하고, 이해·분석하기 위해서 동등한 관점에서 통합적으로 분석할 필요성이 대두되었다. 변화하는 생활 습관 및 소비 패턴과 자원 수요량 증가에 대비하기 위해서 더욱 책임감 있고 긴급한 물, 에너지, 식량, 토지, 및 환경 시스템 관리가 필요하며(Liu 등, 2017), 복합적인 체계와 의사결정 지원 도구로서 넥서스는 부문 간의 자원 이동을 정량화가 가능하며, 더욱 합리적인 의사결정에 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 확산되었다.

물과 관련된 목적으로 사용되는 에너지 대부분은 전기의 형태이며, 도시 물순환 시스템의 운영 단계는 생애주기 관점에서 가장 에너지 집약적인 단계이다(Friedrich, 2002; Nair 등, 2014). 에너지는 도시 물순환 시스템의 모든 공정 및 세부 단위 공정에서 사용된다. 기수나 바닷물의 담수화, 지하수 대수층에서 펌핑, 물이 풍부한 지역에서 물이 부족한 지역으로의 원수 또는 정수의 이송, 정수, 폐수 처리와 같은 물과 관련된 과정에서 에너지는 필수적인 역할을 한다. 또한, 물은 에너지 생산에 필수적인 역할을 한다. 물은 원자재 추출 및 가공, 전기 생산, 화력발전소 냉각, 폐기물 처리 및 에너지 발전 설비 유지보수와 같은 일련의 에너지 생산 공정에서 필요하다. 석탄 처리 중 물은 탐사와 발전소 운영에 소비된다. 원유의 경우, 물은 석유 탐사, 추출, 회수, 정제, 그리고 다른 공장 운영 중에 사용된다. 천연가스 또한 탐사 및 시추 과정과 처리를 위해 물을 필요하다.

물과 에너지의 관계를 넥서스 관점에서 이해하는 것은 도시 물순환 시스템의 지속가능성에 중요한 요소로 간주 될 수 있다. 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. 즉, 에너지와 물의 연관성을 이해하면 에너지와 물 소비를 최소화하고 환경 배출을 줄이는 데 도움이 될 수 있다. 이에 따라 최근 몇 년 동안 부족한 자원과 기후변화와 같은 물 관련 문제들을 개선하기 위해 도시 급수 시스템에 물 에너지 연계성을 고려하기 시작하였다(Huang 등, 2018).

도시 물순환 시스템과 넥서스는 1차년도 보고서 2.1절~2.3절, 2차년도 보고서 2.1절과 2.2절에 자세하게 설명되어 있다.

2.2 선행 연구결과 및 연계

넥서스 관점에서 도시 물순환 시스템의 운영관리 전략 제시를 위하여 기 수행된 1, 2차년도에 선행연구와 3차년도 연구의 관계는 [그림 3]과 같다. 각 차년별로 도시 물순환 시스템을 분석하기 위한 모델을 구축하였고(3차년도 제외), 도시 물순환 시스템의 거동(물-에너지 사용 및 이동)에 미치는 영향요소를 분석하였다. 그리고 이를 통해 넥서스 관점에서 운영관리 전략을 각각 제시하였다.



그림 3. 1, 2, 3차년도 연구 목표 및 연관관계

1차년도 연구에서는 도시 물순환 시스템의 물-에너지-환경 넥서스 모델은 기존의 도시 물순환 시스템 다이내믹스 모델을 물순환 과정에서 높은 에너지 인텐시티를 나타내는 과정을 분석하여 구축하였다. 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 도시 물순환 시스템의 여건에 따른 명목손실과 실손실의 영향을 분석하였다. 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 우선으로 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 나타났다.

2차년도 연구에서는 1차년도의 연구를 확장하여 기존 문헌에서 제시된 도시 물순환 시스템의 공정별 에너지 인텐시티를 조사하여 에너지 인텐시티 매트릭스를 구축하였으며, 매트릭스를 적용하여 도시 물순환 시스템 넥서스 모델을 고도화하였다. 해당 도시의 여건에 따라서 도시 물순환 시스템의 외부 영향(인구, 취수원 비율, 도시 에너지 인텐시티 여건) 및 운영효율 변동(Lpcd, 누수율, 도시 에너지 인텐시티 여건) 시나리오에 따른 물-에너지 자원의 사용량 및 효율의 변동을 10년 기간 동안 분석하였다. 이와 같이 결과를 통해 부정적인 외부영향은 도시 물순환 시스템의 효율적인 측면을 악화시키며, 부정적인 운영효율은 양적인 측면에서 악영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그리고 기존 문헌들에서 제시된 도시 물순환 시스템의 각 단계별 에너지 인텐시티 값을 적용하여 에너지 인텐시티 관점의 도시를 크게 뛰어남(Excellent), 좋음(Good), 좋지 않음(Poor), 나쁨(Bad)의 4가지 단계로 구분하는 가이드라인을 제시하였다. 이와 같은 도시여건, 외부영향 및 운영효율 변동 시나리오 분석 결과와 벤치마킹 가이드라인을 통해 도시 물순환 시스템 관련 의사 결정권자는 본인들의 시스템이 어떻게 변동될지 예측할 수 있으며, 이에 따라 효율적인 전략 및 프로그램을 수립할 수 있다. 또한, 분석 대상 도시의 현재 도시 물순환 시스템의 물-에너지 넥서스 관점에서 자원의 효율적인 이용 수준을 파악하고 전 세계 다른 도시와 비교하는데 유용할 것이다. 그리고 시간에 따른 도시의 효율 변동의 궤적을 추적할 수 있어 영향 및 도입되는 전략의 효율을 평가할 수 있다.

1, 2차년도 연구를 통해 도시 물순환 시스템의 거동과 넥서스 관점에서 관리 전략 및 실행계획을 기존의 국내·외 문헌 자료와 모델링에 기반하여 이론적으로 제시하였다. 제시된 전략과 실행계획의 신뢰성을 더하기 위해 실제 도시들의 물과 에너지 사용량 분석을 통해 제시된 전략 및 실행계획의 적합성에 관한 연구가 추가로 필요하며, 각각의 도시의 여건에 맞는 방향을 구체적으로 제시가 가능할 것이다. 이를 위해 3차년도에서는 10년간(2011년~2020년) 상수 시스템 자료를 활용하여 국내 광역지자체(시, 도)별 물-에너지 프로파일링 및 국내 광역지자체 벤치마킹을 수행하였다. 이를 통해 1, 2차년도 연구결과와 3차년도 실증자료 기반의 상수 시스템 운영관리 전략을 제시하고자 한다.

2.3 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링

프로파일링(profiling)은 자료 수집이 원래의 뜻이었으나 현재는 범죄, 의료, 프로그램, 대사물질 등 다양한 분야에서 원인을 규명하기 위해 사용되고 있다. 범죄 프로파일링(criminal profiling)은 범죄 현장을 분석해 범인의 습관, 나이, 성격, 직업, 범행 수법을 추론한 뒤 이를 바탕으로 범인을 찾아내는 수사 기법이다. 의료 프로파일링(medical profiling)은 임상에서 장기장애의 종류, 합병증, 경과관찰, 예후판정의 목적으로 알고 싶은 정보를 검출할 수 있는 특징 있는 검사법을 조합해서 검사하는 경우, 그 검사항목의 조합하여 검사하는 것 뜻한다. 프로그램의 성능을 최적화하기 위해 프로그램 프로파일링(program profiling)은 프로그램의 시간, 공간 복잡도와 특정 명령어의 사용량, 함수 호출의 빈도수와 주기 등을 측정하여 소프트웨어 성능과 프로그램 작동 상태 등을 분석하는 동적 프로그램 분석의 한 가지 방법이다. 대사물질 프로파일링(metabolite profiling)은 [그림 4]와 같이 세포 또는 조직 내의 대사물질의 거동, 분비 변화 등을 체계적으로 확인, 정량하고 그 결과로부터 대사물질군을 다양한 생리, 병리적 상태와 연관 지어 대사물질 네트워크를 다시 해석하는 것을 기반으로 한다.

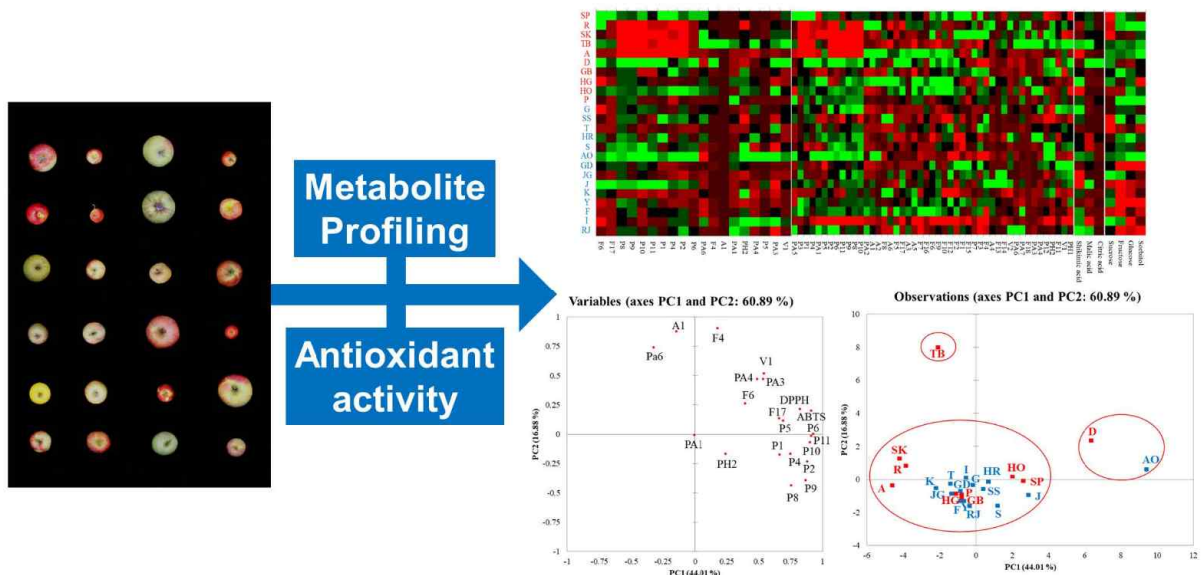


그림 4. 대사물질 프로파일링

출처: Kim 등(2020), “Metabolite Profiling and Antioxidant Activity of 10 New Early- to Mid-Season Apple Cultivars and 14 Traditional Cultivars”

이와 같은 프로파일링은 도시 물순환 시스템의 넥서스 관점 분석에서도 적용될 수 있다. 본 연구에서는 물 사용량과 에너지 사용량의 현황과 거동을 분석하기 위한 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링(Water-energy Nexus profiling for urban water system)을 제시하였으며, 해당 기법은 우리나라 광역지자체 상수 시스템에 적용하여 방법의 타당성과 함께 광역지자체 상수 시스템에 대한 넥서스 관점에서 분석을 수행하여 시

사점을 제시하였다.

제시된 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링의 절차는 [표 1]과 같으며 분석 범위 설정, 자료처리, 기본경향 분석, 스냅샷&궤적 분석, 전략도출의 과정으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 2.4절(1단계, 2단계), 2.5절(3단계) 2.6절(4단계), 2.7절(5단계, 6단계)에서 제시된 상수 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링을 수행하였다.

표 1. 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링 절차

단계	절차	주요 업무
1단계	분석 범위 설정	- 수집 가능 자료 조사 및 자료 한계 검토 - 분석 범위 및 분석 대상 설정
2단계	자료처리	- 자료 수집 - 자료 전처리
3단계	기본경향 분석	- 시스템 물 사용량 경향 분석 - 시스템 에너지 사용량 경향 분석 - 시스템 에너지 인텐시티 경향 분석
4단계	영향요인 도출	- 분석 시스템 대상 영향요인 문헌 조사 - 분석 시스템 대상 영향요인 상관관계 분석 및 주요 영향인자 도출
5단계	스냅샷 및 궤적 분석	- 시스템 물-에너지 사용량 스냅샷 분석(snap shot analysis) - 시스템 물-에너지 사용량 궤도 분석(trajecory analysis)
6단계	전략도출	- 시스템 물-에너지 사용량 현황 및 변화 원인 분석 - 넥서스 관점 시스템 운영·관리 전략 및 실행계획 도출

넥서스 프로파일링을 위한 첫 단계는 분석하고자 하는 범위와 분석대상을 명확하게 설정하는 것이다. 일반적으로 분석을 하고자 하는 자료는 넥서스 프로파일링을 수행하기 위해 수집된 자료가 아니므로 분석에 적합하지 않은 경우들이 많다. 따라서 분석자는 넥서스 분석을 위한 수집이 가능한 자료와 해당 자료가 가지는 한계점들에 대하여 인지한 후에 분석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 수집 가능한 자료(상수도통계)에 기반하여 도시 물순환 시스템 내 상수 시스템을 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수의 3개의 단위 공정으로 구분한 후 2011년부터 2020년까지 10년간 우리나라 광역지자체(특광역시, 도·자치도)를 대상으로 물과 에너지 관점에서 프로파일링을 수행하였다.

수집된 자료는 다양한 기관에서 많은 사람이 조사하고 입력, 기재한 자료들이다. 따라서 각각의 자료는 입력 가이드라인에 맞추어서 입력되지 않았거나, 중요 자료를 제외하였거나, 오기로 입력된 경우들이 있다. 이에 따라 분석자는 분석 전에 자료 전처리를 통해 이와 같은 부분을 사전에 인지하고 자료를 보정 하여야 한다. 그러나 너무 많은 자료의 보정에는 분석자의 의도가 개입될 여지가 많으므로 최소한의 자료처리만을 하는 것이 프로파일링 분석에 적합하다. 본 연구에서는 입력의 오류임을 자료를 통해 확인된 경우만 자료 보정을 하였으며, 그 외 자료는 원본 그대로 해석하였다.

세 번째 단계는 시스템 내 물과 에너지 사용에 대한 기본경향 분석이다. 단편적으로 해당 부문(예를 들면 물 또는 에너지)에서 경향 및 변동을 기술통계와 시계열 그래프와 같은 그래프를 통해 분석하는 탐색적 분석(exploratory data analysis)이다. 해당 분석은 시스템 전체 및 개발 단위 공정에 대하여 물 사용량, 에너지 사용량, 그리고 에너지 인텐시티에 대해 분석을 수행할 수 있으며, 해당 결과는 이후 분석 단계의 기초자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 우리나라 광역지자체별로 에너지 인텐시티에 대해서 상수 시스템 전체와 단위 공정(취수&도수, 정수처리&송수, 배급수)별로 경향 및 변동에 대해 분석을 수행하였다.

네 번째 단계는 분석대상 시스템의 에너지 인텐시티에 영향을 미치는 주요 요인에 대한 분석이다. 이를 위해 우선적으로 해당 시스템의 에너지 인텐시티 영향요소에 대한 문헌조사 및 분석이 선행되어야 할 것이다. 그 이후 해당 조사결과 및 분석 가능한 자료를 기반으로 분석대상 시스템의 에너지 인텐시티에 대한 주요 요인에 대한 도출이 필요하다. 2차년도 연구에서 상수 시스템의 에너지 인텐시티에 영향을 미치는 주요 요인(기후와 외부 요소, 지리적 특징, 시스템 특징, 시스템 운영관리 등)에 대한 문헌연구를 기 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 자료 분석이 가능한 영향요소(관길이, 수량, 급수인구, 고도처리비율, 누수율)을 기반으로 우리나라 광역지자체의 상수 시스템의 에너지 인텐시티에 영향을 미치는 주요 요인을 도출하였다.

그다음 단계로는 시스템의 물-에너지 사용량을 기반으로 스냅샷 분석(snapshot analysis) 및 궤적 분석(trajjectory analysis)이다. 스냅샷 분석은 해당 광역지자체의 해당년도에 물-에너지 사용량에 대한 현황을 제시한다. 그리고 궤적 분석을 통해 변동량 및 이동 경로를 포함한 변동 경향의 분석이 가능하다. 본 연구에서는 우리나라 7개 특광역시(부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 세종)와 1개 자치도(제주)에 대하여 스냅샷 분석과 궤적 분석을 수행하였다.

마지막 단계로는 이전단계의 경향 분석, 영향요인 도출, 스냅샷&궤적 분석과 활용 가능한 타 자료들을 이용하여 시스템 내 물-에너지 사용량 현황 및 변동원인을 분석하는 것이다. 그리고 해당 결과를 기반으로 시스템의 운영관리를 위한 전략 방향의 제시가 가능할 것이다. 2차년도 연구결과에 따르면 시스템의 물-에너지 사용량의 변동은 [그림 5]에 나타난 바와 같이 크게 수직 방향, 사선 방향, 수평 방향으로 발생될 수 있다. 그리고 각 방향의 증가 또는 감소에 따른 가능성이 큰 주요 원인은 [표 2]에 제시되어 있다. 일반적으로 수직 방향 변동의 원인은 에너지 인텐시티 관점의 시스템 개선 또는 악화 및 기존의 미가입 자료의 현행화에 따른 변동이며, 사선 방향은 물 사용량의 변동이 주요 원인이다. 그리고 수평 방향의 이동은 누수율의 증감이 원인인 것으로 추측된다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 스냅샷과 궤적분석을 수행한 8개의 광역자치단체를 대상으로 원인 규명을 진행하였다.

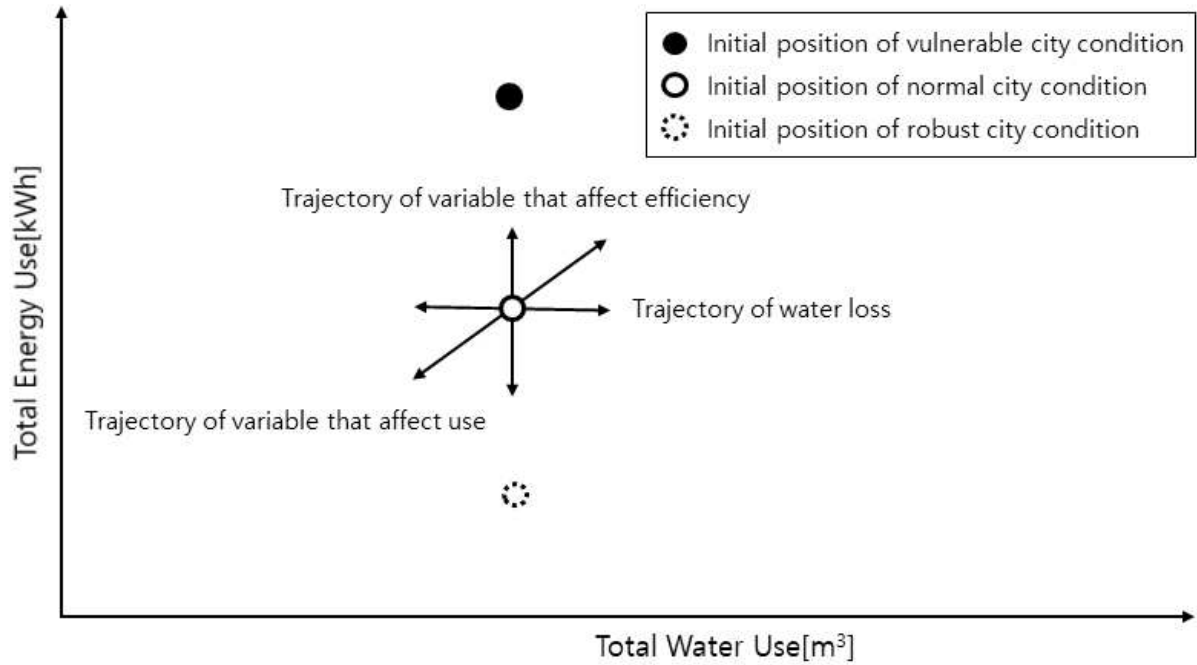


그림 5. 도시 물순환 시스템 물-에너지 사용량 이동 궤적

표 2. 도시 물순환 시스템 물-에너지 사용량 이동 궤적에 따른 주요 원인

궤적		주요 원인
이동방향	세부방향	
수직	증가	- (자료관리) 미기입된 에너지사용 자료의 현행화 - (도시여건) 에너지 효율 관점 시스템 악화
	감소	- (도시여건) 에너지 효율 관점 시스템 개선
사선	증가	- (외부요인) 인구 증가 및 lpcd 증가에 따른 용수사용량 증가
	감소	- (외부요인) 인구 감소 및 lpcd 감소에 따른 용수사용량 감소
수평	증가	- (운영효율) 누수량 증가
	감소	- (운영효율) 누수량 감소

2.4 프로파일링: 분석범위 설정 및 자료 처리

2.4.1 분석범위 및 대상

본 연구에서는 국내 광역지자체 상수 시스템의 에너지 인텐시티 경향, 영향요인 및 넥서스 프로파일링을 적용하기 위한 분석범위 및 대상을 아래 [표 3]와 같이 정의하였다.

표 3. 3차년도 연구 분석 범위 및 대상

분석 범위		분석대상
시스템 범위	세부공정	
상수 시스템	<ul style="list-style-type: none"> - 취수&도수 - 정수처리&송수 - 배급수 	<ul style="list-style-type: none"> - 특광역시(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 세종) - 도·자치도(경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주)

[그림 6]에서와 같이 도시 물순환 시스템은 상수 시스템과 하수 시스템으로 구성되어있다. 사용자는 원수나 정수를 농업, 공업, 또는 생활용수로 사용하며 사용된 하수나 폐수는 우수와 함께 처리되어 방류되거나 재이용된다. 본 연구에서는 자료의 한계로 인해 분석범위를 상수 시스템으로 한정하였다.

상수 시스템은 지하수 또는 지표수를 취수한 후, 도수 공정을 거쳐, 정수처리장에서 처리하여, 처리된 정수를 배수지까지 송수된 후, 배급수 과정을 통해 사용자에게 전달된다. 이와 같이 상수 시스템은 취수, 도수, 정수처리, 송수, 배급수 공정으로 일반적으로 나누어지지만 본 연구에서는 자료의 분류에 따라 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수의 3가지 공정으로 분류하였다.

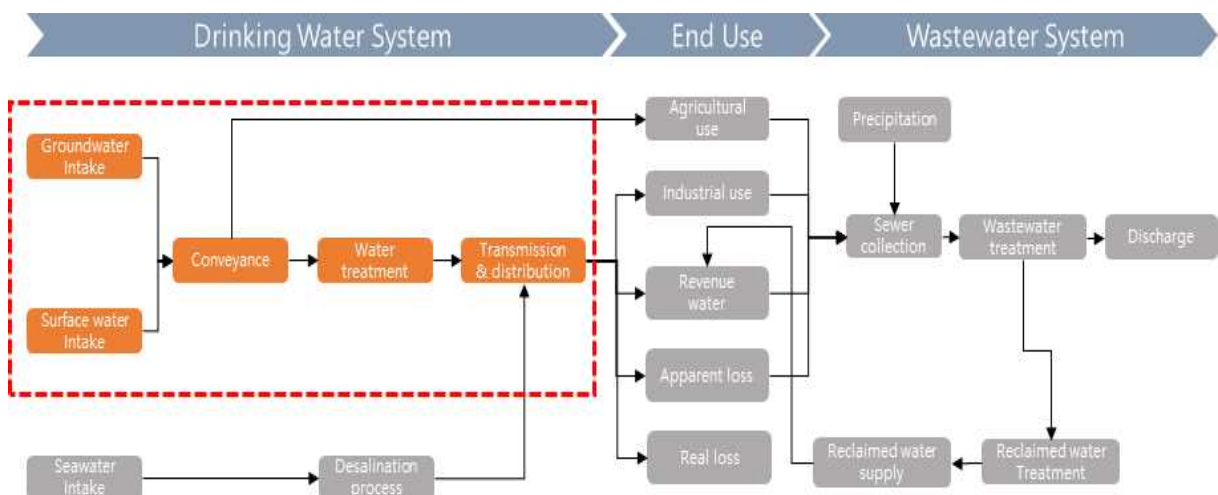


그림 6. 3차년도 연구 범위

우리나라는 각각 8개의 특광역시(특광역시)와 도·자치도(8개)로 구성된 광역자치단체(광역 지자체)와 226개의 기초자치단체(기초지자체)의 총 243개의 자치단체로 구성되어있다. 본 연구에서는 특광역시와 자치도를 대상으로 하여 분석하였다. 특광역시는 1개 도시의 경향을 나타내지만, 자치도는 여러 개의 기초자치단체로 구성되어있으므로 자치도의 자료는 1개의 도시의 거동이 아닌 여러 개의 도시 거동 특성이 중첩된 특성을 나타내게 될 것이다.

분석 대상인 특광역시, 자치도와 더불어 K-water 또한 [그림 7]과 같이 도시 물순환 시스템 내 상수 시스템에서 역할을 담당하고 있다. K-water는 우리나라의 주요 수원인 댐 운영관리, 공업용수 공급, 광역용수 공급 및 광역지자체 수도사업의 수탁 사업자의 임무를 수행하고 있다. 따라서 광역지자체는 아니지만, 원수 및 정수처리 공급자로서 분석에 포함하였다.

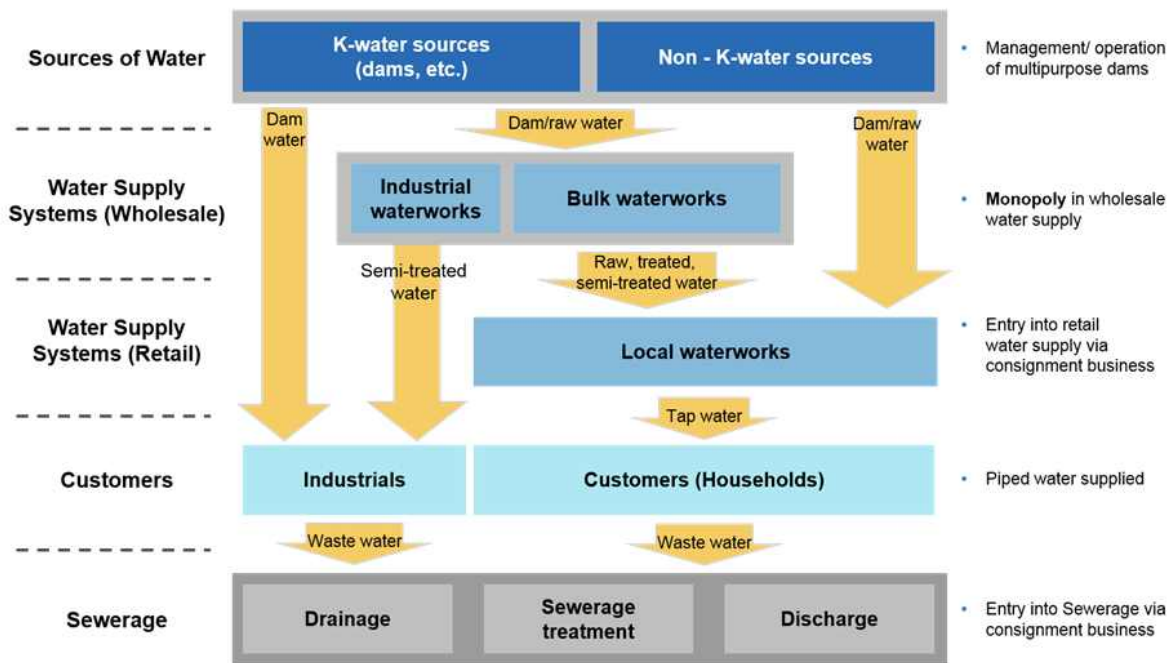


그림 7. 도시물순환 시스템에서 K-water의 역할

2.4.2 데이터 수집, 추출 및 전처리

가. 데이터 수집

우리나라에서는 정책결정자, 실무자 및 연구자가 상수도 전반에 걸쳐 필요한 정보를 획득하여 건전한 상수도를 공급하고, 상수도에 관련된 모든 사업 및 서비스 영역의 기초자료로 활용하며, 추후 수도사업 전반에 관련 서비스 수준 파악을 위해 자료를 구축하여 국내 현황을 파악하고, 장기적인 계획을 수립하기 위하여 환경부에서 상수도통계를 매년(1996년~2020년) 발간하고 있다. 상수도통계에서는 지방상수도, 광역상수도, 마을상수도, 공업용수(정수처리 하여 공급하는 정수중 공업용 업종으로 공급하는 것만 해당)와 관련된 일반 현황(지역별일반현황, 급수보급현황, 급수계약현황), 수도시설 현황(취수시설현황, 정수시설현황, 관로현황, 수도관현황, 배수지 및 저수조, 수도계량기현황), 수도운영관리 현황(수량관리, 물손실관리, 관로신설·교체·철거 및 개량실적, 사업추진실적, 서비스수준, 경영성, 직원현황) 자료를 제공한다. 본연구에서는 상수도통계 자료를 활용하여 도시 상수 시스템을 물-에너지 넥서스 관점에서 분석하였다.

분석에 활용된 상수도 통계자료는 1996년부터 작성이 시작되었으나 본 연구에서는 2011년부터 2020년까지 10년간 자료만 활용하였다. 이전의 자료들은 입력자료가 많이 누락되어 있거나 자료입력 오류 등에 따른 신뢰성 문제(예, 상수도 통계상의 총인구와 통계청상 총인구 불일치, 일평균 취수량이 일최대 취수량보다 큼, 총급수량과 성분별 수량합계(유효수량+무효수량) 불일치, 유수율이 100% 넘는 광역지자체 발생 등)가 있다고 판단하여 분석에서 제외하였다.

나. 데이터 추출

상수도시스템의 취수&도수, 정수처리&송수 및 배급수 과정에서 원수와 정수의 이동 경로는 [그림 8]에 나타난 바와 같다. 해당 광역지자체는 자체 취수(자체취수량)나 다른 광역지자체 또는 K-water의 취수시설에서 원수(원수+침전수 수입량)를 수입하여 자체 정수장에서 정수처(정수생산량)리 후 사용자에게 공급하고 있다. 광역지자체는 정수가 부족할 경우 타 광역지자체에서 취수 및 정수처리 된 정수(정수수입량-광역지자체 수입량)나 K-water에서 취수되고 정수처리 된 정수(정수수입량-광역수입량)를 수입하여 공급한다.

본 연구에서는 자체취수량, 원수취수량, 정수 광역지자체 수입량에 해당하는 취수량, 정수 광역 수입량에 해당하는 취수량을 해당 광역지자체의 취수량 및 도수량으로 고려하였다. 그리고 자체 정수생산량, 광역지자체 정수 수입량, 광역 정수 수입량을 해당 광역지자체의 정수생산량 및 송수량으로 판단하였다.

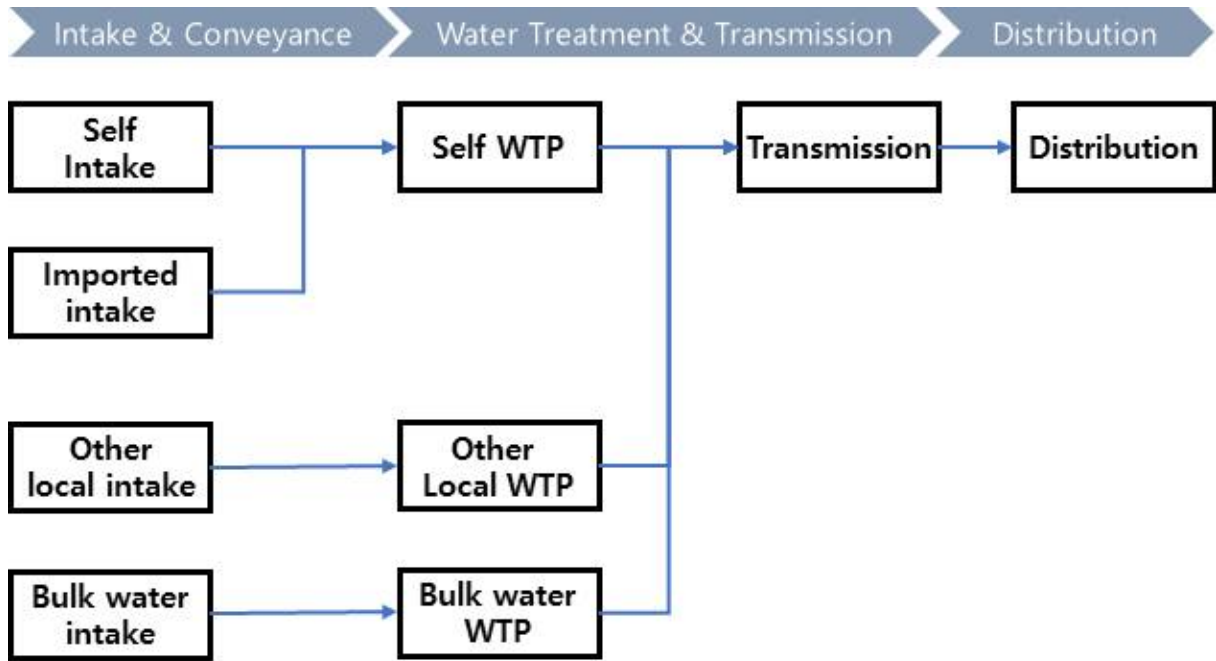


그림 8. 우리나라 상수 시스템 내 원수와 정수의 이동 경로

다. 데이터 정제: 이상치 제거

우리나라 광역지자체별 상수 시스템의 물-에너지 넥서스에 대한 우수한 분석은 수집된 데이터상의 이상치(outlier)와 결측치(missing data)의 처리와 같은 데이터 정제(data cleaning)부터 시작된다. 이후 심도 있는 분석을 위해 데이터 통합(data integration), 데이터 변환(data transformation), 데이터 축소(data reduction) 및 데이터 이산화(data discretization)와 같은 데이터 전처리가 필요하다.

분석에 활용된 2011년부터 2020년까지 상수도 통계자료는 몇몇 잘못된 입력된 값들과 누락 값들이 존재한다. 많은 데이터의 정제는 분석 결과를 왜곡시킬 수 있는 문제가 있어서 본 연구에서는 [그림 9]에서와 같이 광역지자체별 10년간 상수 시스템 물-에너지 사용량 그래프에서 판단되는 명백한 자료 기입 오류 3건의 자료를 수정하는 것 이외에 다른 자료 정제 과정을 거치지지는 않았다. 본 연구에서 입력 오류라고 판단한 3건은 경기(2016년), 강원(2014년), 경북(2017년) 자료이었다.

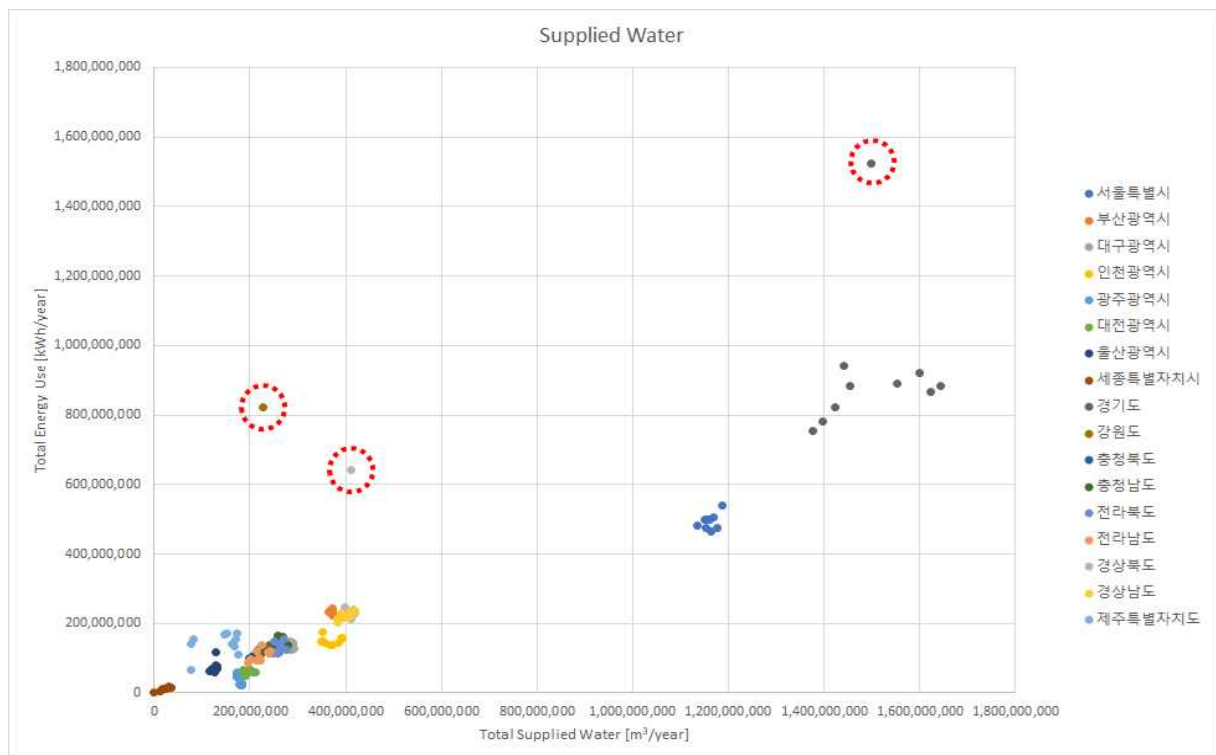


그림 9. 이상치 처리 전 광역지자체별 10년간 상수 시스템 물-에너지 사용량

2016년 경기 자료의 오류가 발생한 부분을 검토한 결과 입력자료 오류는 [그림 10]에 보여지는바와 같이 배급수 공정에서 발생함을 알 수 있었다. 경기도와 같은 자치도는 여러 개의 기초자치단체 자료의 합으로 자료를 생성한다. 경기도를 구성하는 기초자치단체의 배급수 부분에 입력자료들을 분석한 결과, [표 4]에서와 같이 군포시 가압장 연간전력사용량의 입력에서 오류가 있는 것을 판단되었다. 군포시의 가압장 연간전력사용량은 2016

년 자료를 제외하고 평균 146,206 kWh/year의 값을 나타내었으나, 2016년 가압장 연간전력사용량 값은 687,794,490 kWh/year의 값으로 평균값의 약 4,700배 이상의 값을 나타내었다. 본 연구에서는 해당 입력값 대신에 전후년도 (2015년, 2017년)의 평균값인 168,647 kWh/year로 보정하여 분석에 적용하였다.

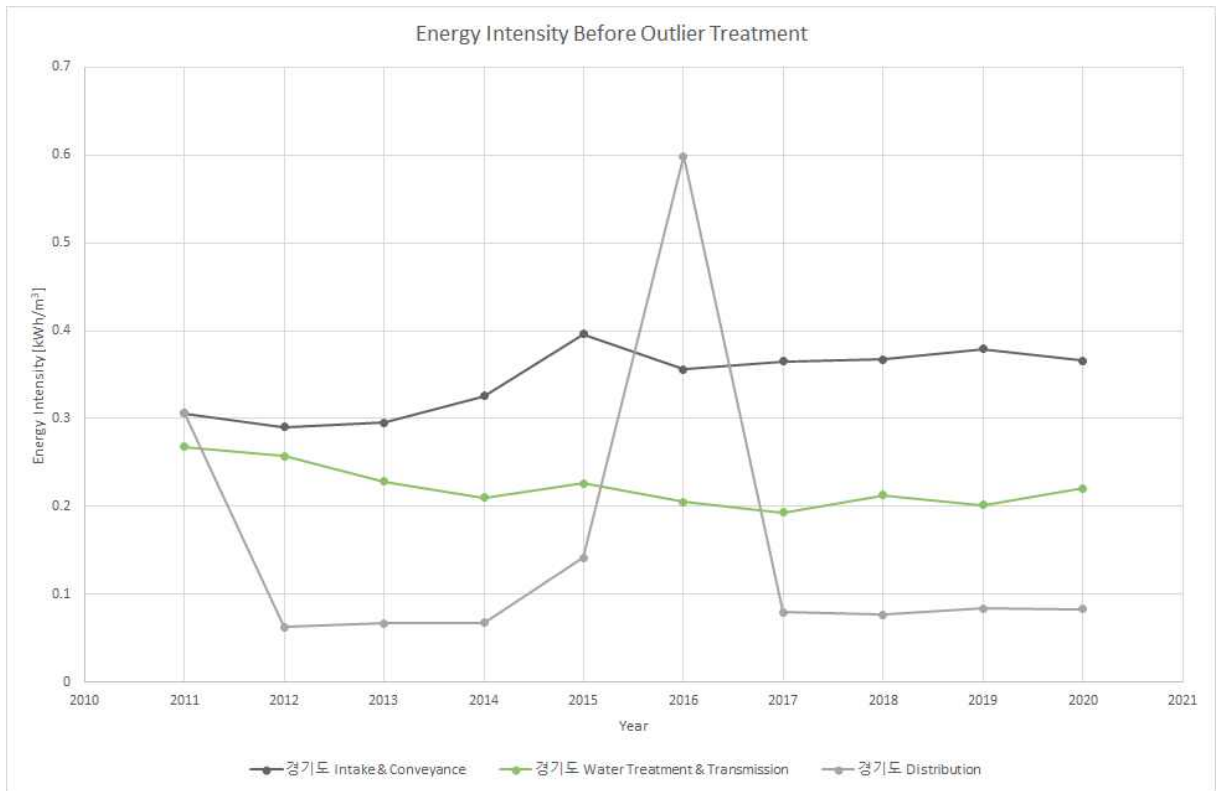


그림 10. 10년간 경기 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수 공정별 에너지 인텐시티 변동

표 4. 군포시 가압장 연간전력사용량

년	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
가압장 연간 전력사용량 [kWh/year]	159,324	48,283	203,151	215,147	196,857	687,794,490	140,437	127,620	109,380	115,651

2014년 강원도의 입력자로 오류가 발생한 부분을 검토한 결과 [그림 11]에서와 같이 취수 &도수 부분에서 발생한 것을 알 수 있었다. 이에 따라 취수&도수 부분에서 기초자치단체의 값들을 검토한 결과, [표 5]에서와 같이 2014년 원주 취수장의 연간전력 사용량에서 오류가 있음을 알 수 있었다. 2014년을 제외한 원수 취수장의 연간전력 사용량의 평균값은 6,465,131 kWh/year의 값을 나타내었는데 2014년에는 698,882,350 kWh/year으로 평균값의 약 108배 이상을 나타내었다. 해당 기간 동안 취수장 평균 이용률[%]과 취수장 최대 가동률[%]은 크게 변동이 없어 해당 입력값을 잘못된 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 2013년과 2015년 입력값의 중간값인 6,393,659 kWh/year으로 대체하여 분석을 수행하였다.

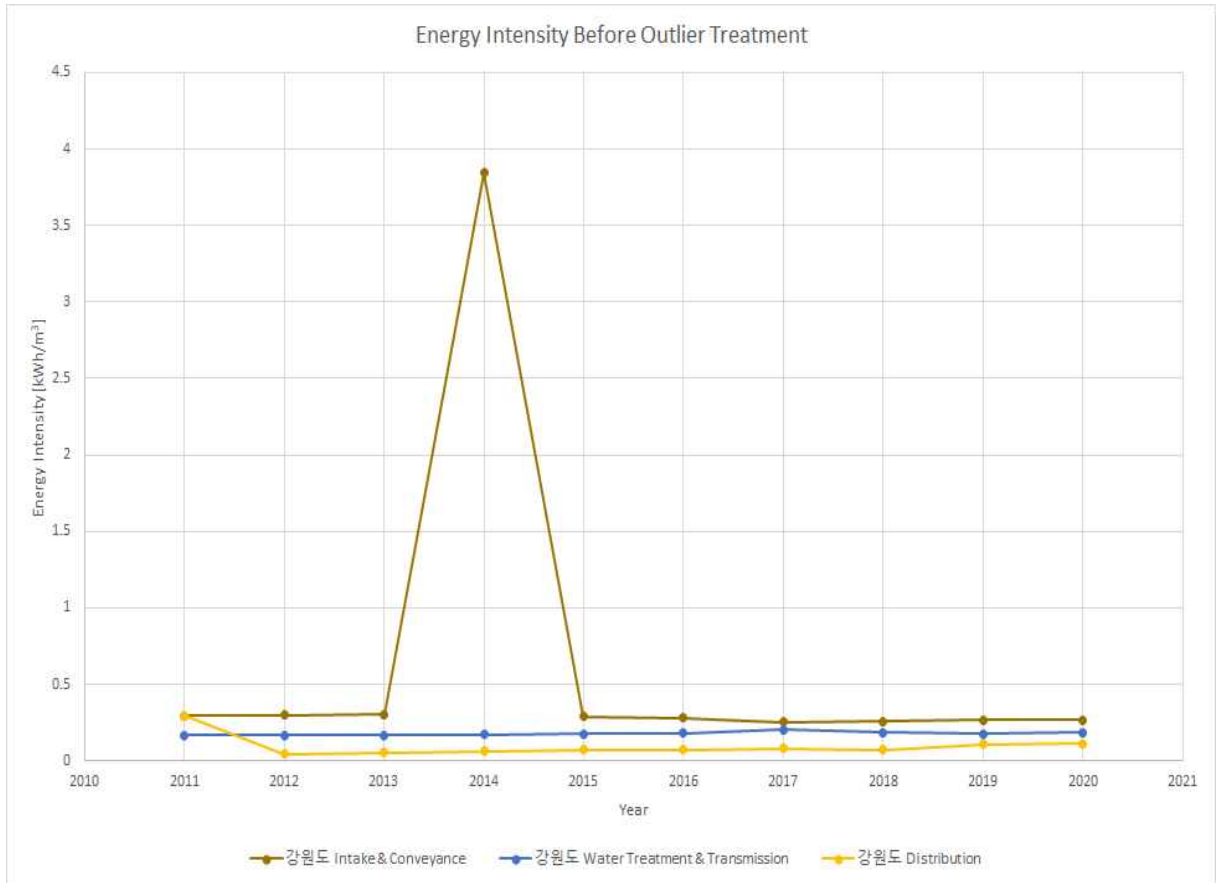


그림 11. 10년간 강원 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수 공정별 에너지 인텐시티 변동

표 5. 원주 취수장 연간전력 사용량, 이용률 및 가동율

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
취수장 연간전력 사용량 [kWh/year]	6,868,676	6,729,666	6,476,758	688,882,330	6,310,559	6,018,893	6,323,926	6,555,956	6,381,435	6,520,313
취수장 이용률(평균) [%]	70.0	70.9	64.3	65.0	63.4	60.9	68.8	74.8	81.4	73.8
취수장 가동율(최대) [%]	76.4	81.5	76.9	74.3	90.6	76.8	80.6	94.1	90.9	83.9

2017 경북 상수도 통계자료의 오류 부분을 검토한 결과 [그림 12]에서와 같이 취수&도수 및 정수처리&송수 공정에서 입력자료의 오류가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 2017년 경북 기초자치단체의 취수&도수 및 정수처리&송수 공정의 입력값을 검토한 결과 [표 6] 과 [표 7]에서와 같이 예천군의 입력자료에 오류가 있음을 알 수 있었다. 예천군은 7개의 취수장(개포, 예천, 용문, 풍양, 용궁, 지보, 감천)을 운영하였으며, 개포 취수장은 2018년, 용궁과 지보 취수장은 2019년 가동을 중단하였다. 2017년 자료를 제외한 모든 취수장에서 사용된 취수장 연간전력사용량은 1,674,665 kWh/year이었으나, 2018년 취수장 연간전력 사용량 총 합은 224,069,320 kWh/year으로 평균값의 약 133배 이상의 값이 입력되었다. 따라서 본 연구에서는 예천군의 2017년 취수장 연간전력 사용량은 2016년과 2018년의 평균값인 19,949,323 kWh/year을 적용하였다. 예천군은 예천 정수장, 용문 정수장, 개포 정

수장, 지보 정수장, 풍양 정수장, 용궁 정수장 및 감천 상수도를 통해 정수를 예천 시민에게 공급하고 있으며 2012년 개소된 개포 정수장은 2018년 가동을 중지하였으며, 지보 정수장과 용궁 정수장은 2019년 운영을 중단하였다. 예천군의 2017년을 제외한 정수장별 연간전력사용량은 1,263,973 kWh/year의 평균값을 가졌으며, 2017년의 총 정수장 연간전력사용량은 183,757,230 kWh/year으로 평균값의 145배 이상의 값이 입력되었다. 본 연구에서는 해당 값을 2016년과 2017년의 평균값인 1,624,476 kWh/year으로 적용하여 분석하였다.

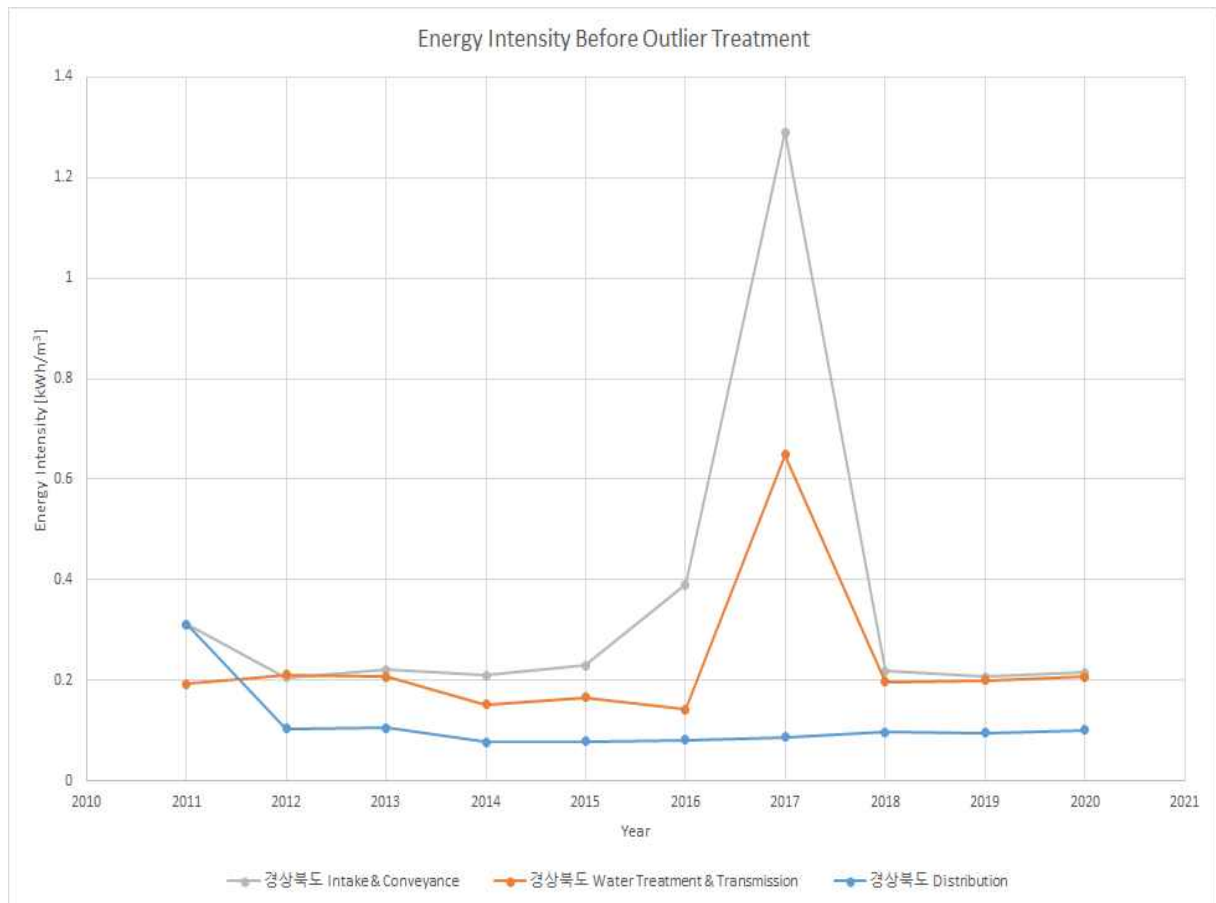


그림 12. 10년간 경북 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수 공정별 에너지 인텐시티 변동

표 6. 예천군 취수장별 연간전력사용량

취수장 연간전력 사용량 [kWh/year]	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
개포취수장	0	40,268	140,312	151,199	107,910	117,130	12,695,920	71,354	-	-
예천취수장	855,293	856,250	1,053,202	1,020,587	1,074,612	1,168,409	135,611,540	1,163,351	922,256	864,556
용문취수장	113,940	106,489	119,800	108,380	115,917	126,739	14,815,920	183,889	147,461	138,253
풍양취수장	180,415	153,834	152,714	136,657	134,464	160,985	18,226,130	165,164	186,439	192,226
용궁취수장	145,045	141,498	145,032	150,298	170,756	197,461	18,926,590	172,223	81,228	-
지보취수장	100,214	105,548	117,697	130,900	139,737	157,978	15,694,970	141,382	81,905	-
감천취수장	58,526	61,675	67,982	63,654	63,869	75,065	8,098,250	88,735	96,655	86,470
계	1,453,433	1,465,562	1,796,739	1,761,675	1,807,265	2,003,767	224,069,320	1,986,098	1,515,944	1,281,505

표 7. 예천군 정수장별 연간전력 사용량

정수장 연간전력 사용량 [kWh/year]	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
예천정수장	855,293	856,250	1,053,202	1,020,587	756,496	1,168,409	135,611,540	1,167,336	219,030	1,080,695
용문정수장	32,295	29,100	30,603	27,288	26,979	29,794	2,869,960	30,903	29,725	36,640
감천상수도	105,722	117,162	124,623	118,538	127,553	138,852	15,807,320	163,098	187,384	165,696
개포정수장	0	8,033	19,316	20,513	19,975	21,886	2,681,130	21,789		
지보정수장	25,597	25,123	24,169	25,413	25,559	28,653	2,416,010	37,013	19,452	
풍양정수장	41,710	44,145	38,839	39,836	37,752	36,361	5,444,680	34,687	30,543	30,859
용궁정수장	145,045	141,498	145,032	150,298	47,943	197,461	18,926,590	172,713	19,291	
계	1,205,662	1,221,311	1,435,784	1,402,473	1,042,257	1,621,416	183,757,230	1,627,539	505,425	1,313,890

위에 언급된 경기(2016년), 강원(2014년), 경북(2017년)의 자료를 보정 한 후 광역지자체별 10년간 상수 시스템 물-에너지 사용량은 [그림 13]에 나타난 바와 같으며, 보정을 통해 명백한 입력자료의 오류는 더 없는 것으로 판단되었다.

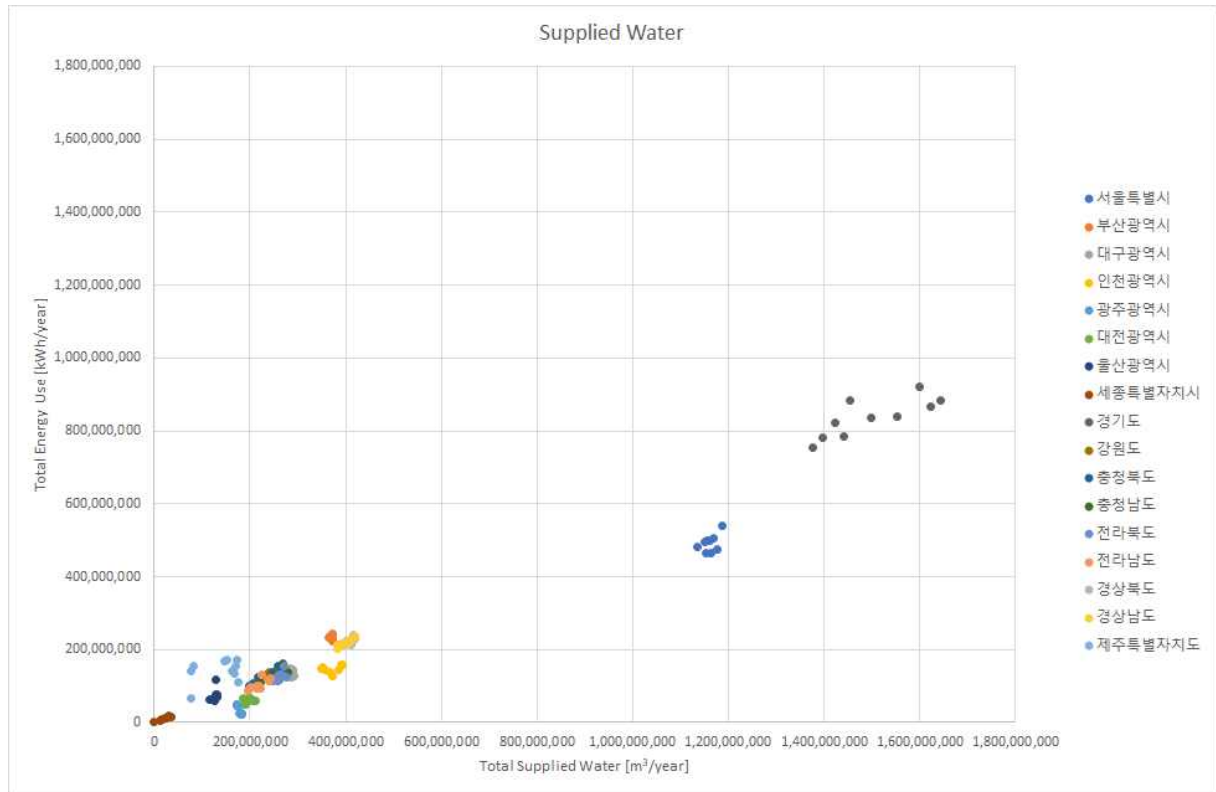


그림 13. 이상치 처리 후 광역지자체별 10년간 상수 시스템 물-에너지 사용량

2.5 프로파일링: 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향 분석

2.5 절에서는 광역지자체별 상수 시스템의 물-에너지 사용량의 거동을 분석하기 위하여 우선적으로 상수 시스템의 에너지 인텐시티의 경향을 분석하였다. 더욱 자세한 경향을 분석하기 위해서 분석자는 상수 시스템의 물 사용량 및 에너지 사용량의 경향을 추가로 분석할 필요가 있으며, 본 연구에서는 해당 과정은 생략하였다.

물을 위한 에너지(water for energy)의 대표적인 지수인 에너지 인텐시티는 도시 물순환 시스템에서 사용되는 단위 전기 사용량을 의미하며 그 단위는 kWh/m³이다. 시스템에서 에너지 인텐시티가 높다는 것은 해당 용수를 사용하기 위해서 더 많은 에너지를 필요로 한다는 것이다.

도시 물순환 시스템의 에너지 인텐시티를 산정하기 위해 이용되는 물 사용량은 총 사용수량(총 급수량), 유수수량, 실 사용수량 3가지를 활용할 수 있으며, 일반적으로 총 사용수량이 가장 널리 활용되고 있다. 2차년도 연구결과에 따르면 도시 물순환 시스템의 자원 사용에 대한 양적인 측면을 표현할 때는 총 사용수량을 활용하는 것이 적합한 것으로 제시되었다. 도시 물순환 시스템 내에서 취수되는 총량이 실질적으로 소모되는 자원의 양이므로, 유수수량 또는 실 사용수량보다는 총 사용수량을 고려하는 것이 자원의 소모량 관점에서는 합리적이다. 그러나 효율적인 측면을 분석할 때는 실 사용수량 에너지 인텐시티를 이용하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다. 일반적으로 활용되는 총 사용수량 에너지 인텐시티를 사용할 경우, 누수율이 높을수록 총 사용수량 에너지 인텐시티는 낮아지므로 누수율에 의해 효율이 왜곡되는 현상이 발생할 수 있다. 유수수량 에너지 인텐시티의 경우 총 사용수량 에너지 인텐시티 보다 왜곡되는 정도는 적으나, 약간의 오류가 발생된다. 이와는 다르게 실 사용수량을 적용할 경우 누수율로 인해 오류가 발생되지 않아 사용효율을 판단하는데 적합하였다. 그러나 정확한 실 사용수량을 파악하기 위해서는 상수관망 물손실 분석을 통해서 누수율과 누수 중 명목손실과 실손실의 비율이 정확하게 계산되어야 한다. 그리고 관련 자료의 확보가 어려운 경우, 해당 도시 물순환 시스템에서 취득할 수 있는 자료 내에서의 분석이 필요하다.

우리나라 광역지자체의 경우 누수율이 높은 편이 아니어서 상수 시스템 물-에너지 넥서스 분석 수행 시 총 사용수량을 사용할 경우 효율 부분에서 잘못된 결과를 도출할 가능성이 낮다. 따라서 본 연구에서는 총 사용수량을 기반으로 하여 상수 시스템 물-에너지 넥서스 분석을 수행하였다. 다만 제주의 경우 높은 누수율과 누수율 변동이 크므로 2.9절에서 총사용수량 에너지 인텐시티, 유수수량 에너지 인텐시티, 실 사용수량 에너지 인텐시티를 적용하여 분석하였다.

2.5절에서 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티의 경향은 시계열 그래프와 표로 제

시된 10년간의 에너지 인텐시티의 값의 평균과 변동성을 상대적으로 분석하였다. 평균은 광역지자체의 물-에너지 사용량에 따른 현재의 여건을 나타내며, 변동성은 지난 10년간 해당 광역지자체에 도시여건, 외부영향 요소, 운영효율 등에 기반한 변화가 있었는지를 알 수 있게 한다.

특광역시와 도·자치도 사이의 에너지 인텐시티 거동에는 차이가 있다. 특광역시는 그 자체로 1개의 도시 특성을 나타낸다. 그러나 도·자치도는 여러 개의 시 또는 군으로 이루어진 기초자치단체의 물과 에너지 사용량의 합으로 산정되기 때문에 중첩 효과로 인해 평균값으로 수렴하는 경향이 있을 것으로 판단된다. 따라서 도·자치도의 에너지 인텐시티 경향은 우리나라의 기초자치단체의 특성을 나타내는 것으로 가정할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 상수 시스템 전체(2.5.1절), 취수&도수 공정(2.5.2절), 정수처리&송수 공정(2.5.3절), 배급수 공정(2.5.4절)로 나누어서 각각의 에너지 인텐시티 경향을 분석하였다. 에너지 인텐시티 분석 시 기초자치단체의 경향을 나타내는 자치도의 에너지 인텐시티 경향을 기준으로 특광역시의 경향을 설명하였다.

2.5.1 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티

2.5.1절에서는 광역지자체별 상수 시스템 에너지 인텐시티의 현황(집중 경향성) 및 변동성을 분석하였다. 특광역시와 도·자치도의 2011년부터 2020년까지 10년간 에너지 인텐시티의 시계열 변화, 인텐시티 값 그리고 인텐시티의 기술통계 값(평균, 중위값, 분산, 표준편차, 사분범위(Interquartile range, IQR), 변동계수)는 [그림 14], [그림 15], [표 8]에 나타난 바와 같다.

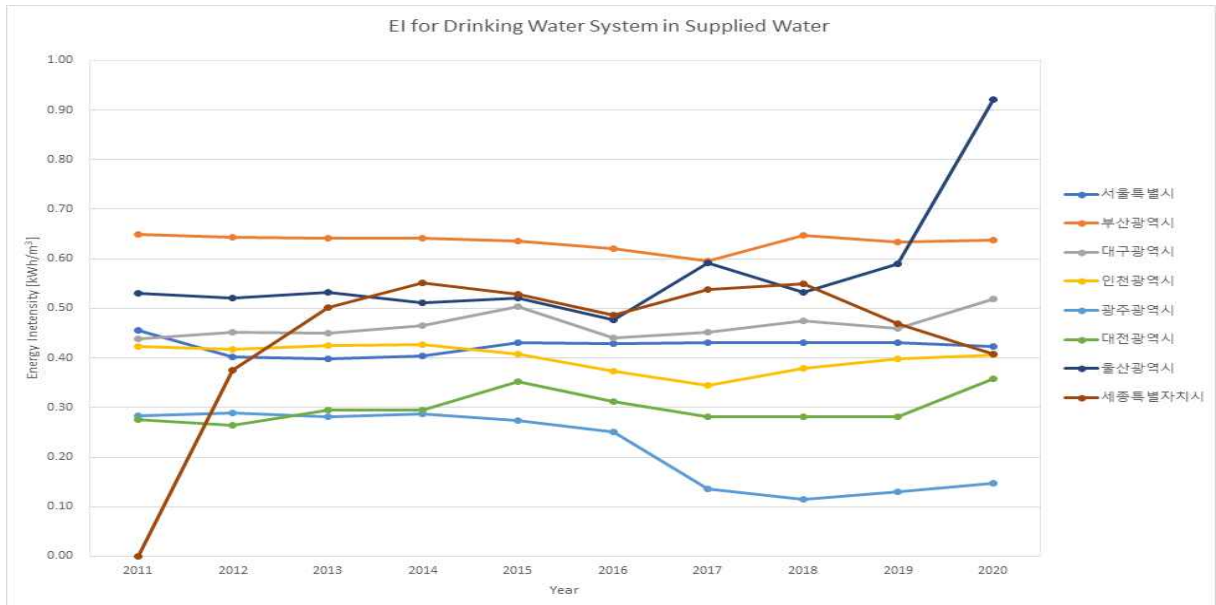


그림 14. 특광역시 상수 시스템 에너지 인텐시티 변동

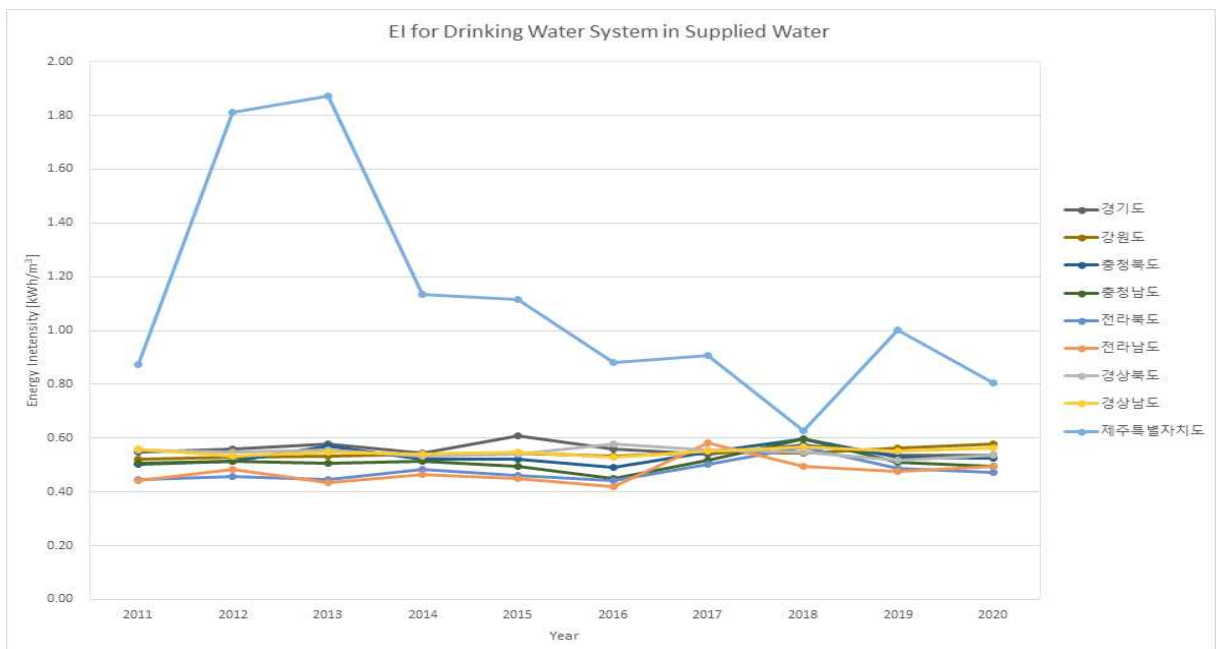


그림 15. 도·자치도 상수 시스템 에너지 인텐시티 변동

표 8. 광역지자체 상수 시스템 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값

광역지자체	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수
서울특별시	0.46	0.40	0.40	0.40	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42	0.42	0.43	0.00	0.02	0.02	0.04
부산광역시	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.62	0.60	0.65	0.63	0.64	0.63	0.64	0.00	0.02	0.01	0.03
대구광역시	0.44	0.45	0.45	0.47	0.50	0.44	0.45	0.47	0.46	0.52	0.47	0.46	0.00	0.03	0.02	0.06
인천광역시	0.42	0.42	0.42	0.43	0.41	0.37	0.35	0.38	0.40	0.41	0.40	0.41	0.00	0.03	0.04	0.07
광주광역시	0.28	0.29	0.28	0.29	0.27	0.25	0.14	0.12	0.13	0.15	0.22	0.26	0.01	0.08	0.14	0.35
대전광역시	0.28	0.26	0.30	0.30	0.35	0.31	0.28	0.28	0.28	0.36	0.30	0.29	0.00	0.03	0.03	0.11
울산광역시	0.53	0.52	0.53	0.51	0.52	0.48	0.59	0.53	0.59	0.92	0.57	0.53	0.02	0.13	0.05	0.22
세종특별자치시	-	0.38	0.50	0.55	0.53	0.49	0.54	0.55	0.47	0.41	0.49	0.50	0.00	0.06	0.07	0.13
경기도	0.55	0.56	0.58	0.54	0.61	0.56	0.54	0.58	0.54	0.54	0.56	0.55	0.00	0.02	0.03	0.04
강원도	0.52	0.53	0.53	0.54	0.55	0.53	0.55	0.54	0.57	0.58	0.54	0.54	0.00	0.02	0.02	0.03
충청북도	0.50	0.51	0.57	0.52	0.52	0.49	0.55	0.60	0.53	0.52	0.53	0.52	0.00	0.03	0.03	0.06
충청남도	0.50	0.51	0.51	0.51	0.49	0.45	0.52	0.60	0.51	0.50	0.51	0.51	0.00	0.04	0.01	0.07
전라북도	0.45	0.46	0.45	0.48	0.46	0.44	0.50	0.57	0.49	0.47	0.48	0.47	0.00	0.04	0.04	0.08
전라남도	0.44	0.48	0.43	0.46	0.45	0.42	0.58	0.50	0.48	0.50	0.47	0.47	0.00	0.05	0.05	0.10
경상북도	0.55	0.55	0.56	0.53	0.54	0.58	0.56	0.55	0.52	0.54	0.55	0.55	0.00	0.02	0.02	0.03
경상남도	0.56	0.53	0.55	0.54	0.55	0.53	0.55	0.57	0.55	0.56	0.55	0.55	0.00	0.01	0.01	0.02
제주특별자치도	0.87	1.81	1.87	1.14	1.12	0.88	0.91	0.63	1.00	0.81	1.10	0.95	0.17	0.42	0.26	0.38

광역지자체 상수 시스템 에너지 인텐시티의 현황을 분석하기 위해 인텐시티 값의 평균값을 적용하였다. 일반적으로 평균과 중위값 등을 통해 현황을 분석할 수 있으며, 본 연구에서는 평균과 중위값의 차이가 크지 않아 평균을 기준으로 분석하였다.

[표 9]에서 나타난 바와 같이 도·자치도의 상수 시스템 에너지 인텐시티는의 평균값은 경기(0.56), 경북(0.55), 경남(0.55), 강원(0.54), 충북(0.53), 충남(0.51), 전북(0.48), 전남(0.47)을 나타내었다. 제주는 1.10의 매우 높은 값을 나타냈는데 제주는 자치도 중 섬 지역의 특수성을 가지고 있어서 예외적인 것으로 고려하였다. 이에 따라 0.47에서 0.56의 상수 시스템 에너지 인텐시티를 우리나라 도·자치도 및 기초자치단체의 중간 그룹으로 판단하였다. 해당 기준을 특광역시에 적용한 결과 서울(0.42), 인천(0.40), 대전(0.30), 광주(0.22)는 낮은 그룹으로, 세종(0.49), 대구(0.47)는 중간 그룹으로, 부산(0.63), 울산(0.53)은 높은 그룹으로 분류되었다. 높은 그룹의 도시 특성과 낮은 그룹의 도시 특성을 비교해보면, 도시 상수 시스템의 에너지 인텐시티에 영향을 미치는 주요 원인에 대해 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 광주는 상수 시스템 에너지 인텐시티가 매우 낮았으며, 부산은 높은 값을 나타내 그 원인에 대한 규명이 필요하다.

표 9. 상수 시스템 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류

광역지자체	낮은 그룹 (0.47 미만)	중간 그룹 (0.47~0.56)	높은 그룹(0.56 초과)
특광역시	서울(0.42), 인천(0.40), 대전(0.30), 광주(0.22)	세종(0.49), 대구(0.47)	부산(0.63), 울산(0.57)
도·자치도	-	경기(0.56), 경북(0.55), 경남(0.55), 강원(0.54), 충북(0.53), 충남(0.51), 전북(0.48), 전남(0.47)	제주(1.10)

광역지자체 상수 시스템의 에너지 인텐시티의 변동성을 분석하기 위해서는 시계열 그래프, 사분범위 및 변동계수가 이용될 수 있으며, 본 연구에서는 변동계수 기반으로 변동성을 검토하였다.

[표 10]에서와 같이 자치도의 변동계수 값은 전남(0.10), 전북(0.08), 충남(0.07), 충북(0.06), 경기(0.04), 강원(0.03), 경북(0.03), 경남(0.02)의 값을 나타내었다. 제주(0.38)는 평균값과 유사하게 변동계수에서도 매우 높은 값을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 0.02에서 0.10의 변동계수 값을 우리나라 광역지자체와 기초자치단체의 상수 시스템 에너지 인텐시티 변동계수의 중간 그룹으로 판단하였다. 해당 기준을 특광역시에 적용한 결과 인천(0.07), 대구(0.06), 서울(0.06), 부산(0.03)은 중간 그룹에 속하였으며, 광주(0.35), 울산(0.22), 세종(0.13), 대전(0.11)은 높은 그룹으로 판단되었다. 따라서 광주, 울산, 세종 및 대전에서는 상수 시스템의 에너지 인텐시티에 영향을 미치는 도시여건 변화, 외부영향요소 또는 운영 효율변동이 지난 10년간 있었던 것으로 추측된다.

표 10. 상수 시스템 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류

광역지자체	낮은 그룹 (0.02 미만)	중간 그룹 (0.02~0.10)	높은 그룹(0.10 초과)
특광역시		인천(0.07), 대구(0.06), 서울(0.04), 부산(0.03)	광주(0.35), 울산(0.22), 세종(0.13), 대전(0.11)
도·자치도		전남(0.10), 전북(0.08), 충남(0.07), 충북(0.06), 경기(0.04), 강원(0.03), 경북(0.03), 경남(0.02)	제주(0.38)

광역지자체별 분석된 상수 시스템 에너지 인텐시티의 평균과 변동계수의 관계는 [그림 16]에서 나타난 바와 같다. 광역지자체 중 광주(낮은 평균, 높은 변동성), 울산(중간 평균, 높은 변동성), 부산(높은 평균, 낮은 변동성), 세종(보통 평균, 높은 변동성), 제주(높은 평균, 높은 변동성)는 2.7절의 스냅샷 및 궤적분석 시 주의 깊게 살펴봐야 할 것이다.

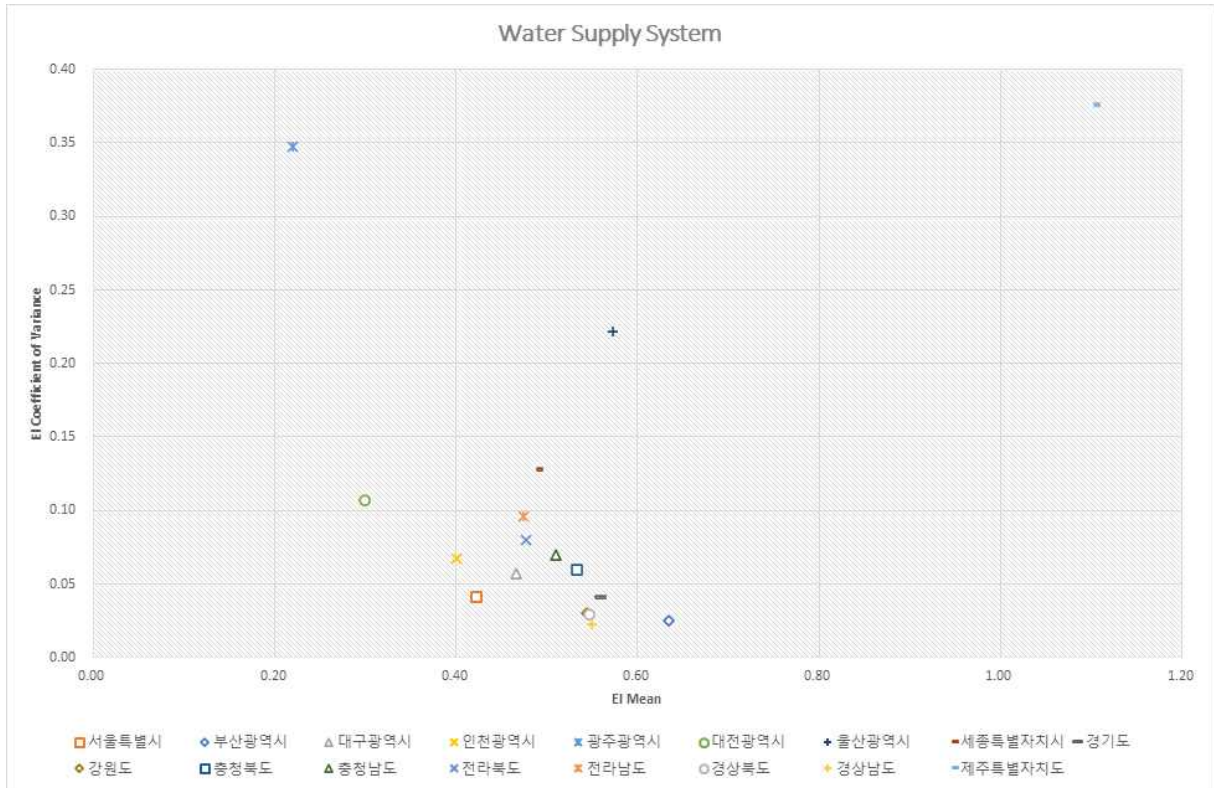


그림 16. 상수 시스템의 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계

2.5.2 광역지자체별 단위 공정 에너지 인텐시티: 취수 및 도수

2.5.2절에서는 광역지자체별 취수&도수 공정에서 에너지 인텐시티의 현황 및 변동성을 분석하였다. 특광역시와 도·자치도의 2011년부터 2020년까지 10년간 에너지 인텐시티의 시계열 변화, 인텐시티 값 그리고 인텐시티의 기술통계 값(평균, 중위값, 분산, 표준편차, 사분범위, 변동계수)은 [그림 17], [그림 18], [표 11]에 나타난 바와 같다.

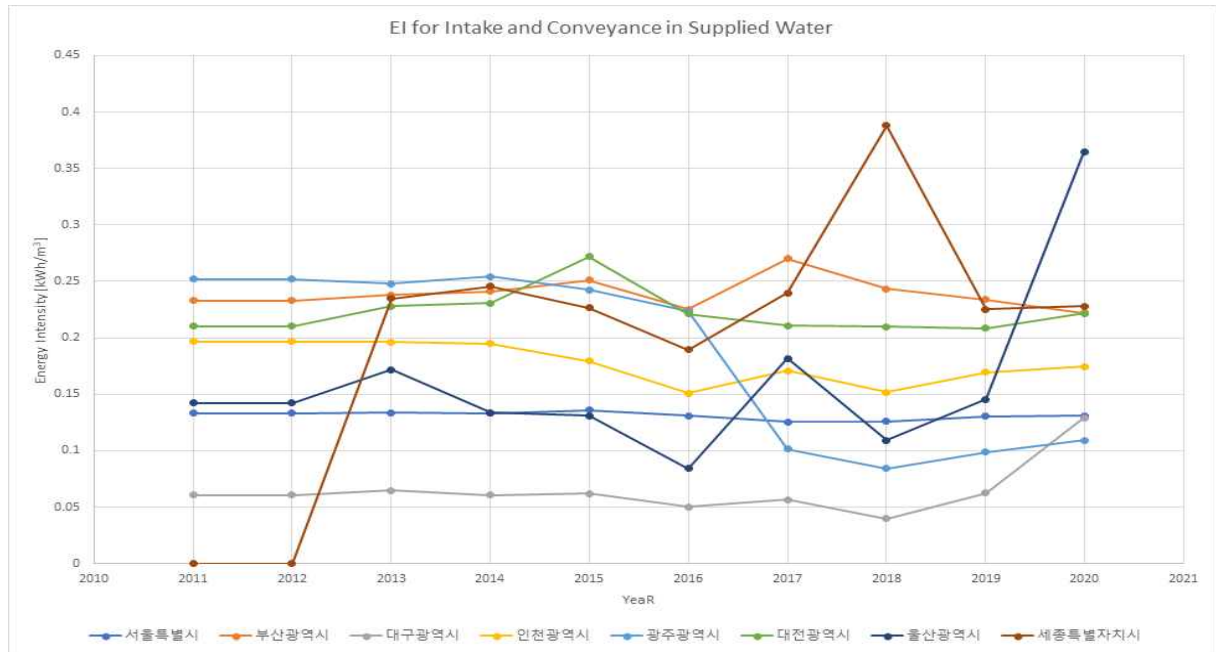


그림 17. 특광역시 취수 및 도수 공정 에너지 인텐시티 변동

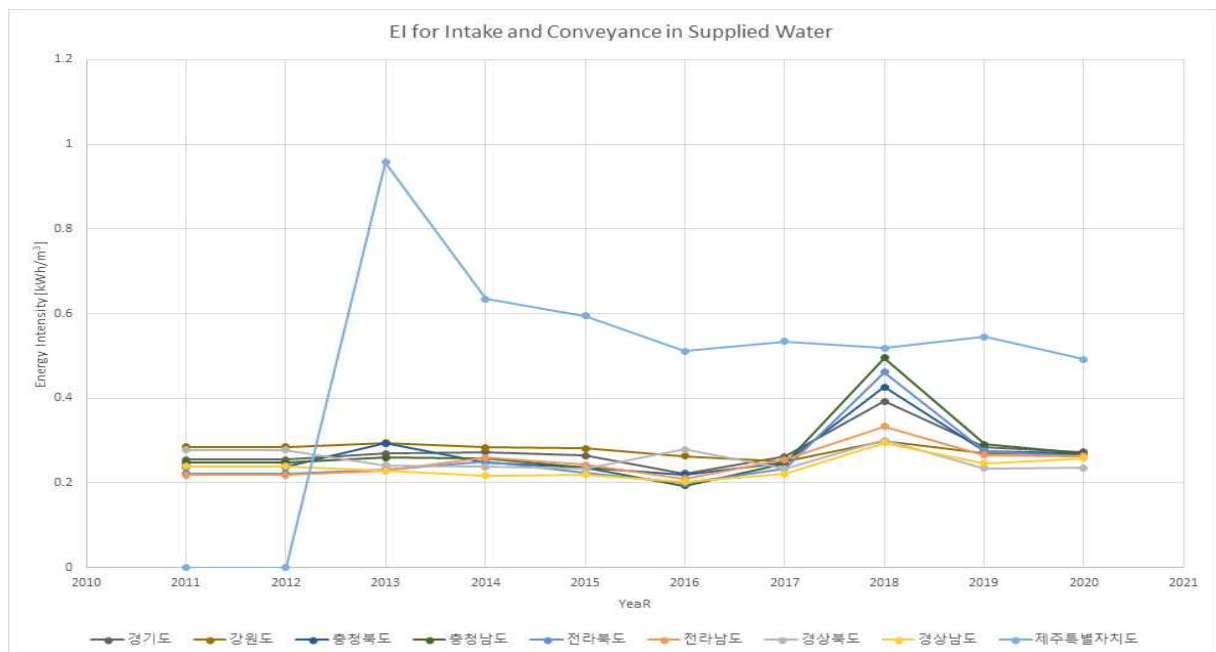


그림 18. 도·자치도 취수 및 도수 공정 에너지 인텐시티 변동

표 11. 광역지자체 취수 및 도수 공정 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값

광역지자체	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위 값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수
서울특별시	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.03
부산광역시	0.23	0.23	0.24	0.24	0.25	0.23	0.27	0.24	0.23	0.22	0.24	0.24	0.00	0.01	0.01	0.06
대구광역시	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06	0.13	0.06	0.06	0.00	0.02	0.00	0.37
인천광역시	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.15	0.17	0.15	0.17	0.17	0.18	0.18	0.00	0.02	0.03	0.10
광주광역시	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.22	0.10	0.08	0.10	0.11	0.19	0.23	0.01	0.08	0.15	0.41
대전광역시	0.21	0.21	0.23	0.23	0.27	0.22	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.00	0.02	0.02	0.09
울산광역시	0.14	0.14	0.17	0.13	0.13	0.08	0.18	0.11	0.15	0.37	0.16	0.14	0.01	0.08	0.03	0.48
세종특별자치시	0.00	0.00	0.23	0.25	0.23	0.19	0.24	0.39	0.23	0.23	0.22	0.23	0.01	0.10	0.01	0.45
경기도	0.26	0.26	0.27	0.27	0.26	0.22	0.26	0.39	0.29	0.27	0.28	0.27	0.00	0.04	0.02	0.16
강원도	0.29	0.29	0.30	0.28	0.28	0.26	0.25	0.30	0.27	0.27	0.28	0.28	0.00	0.02	0.02	0.05
충청북도	0.24	0.24	0.29	0.25	0.24	0.22	0.25	0.43	0.27	0.27	0.27	0.25	0.00	0.06	0.04	0.22
충청남도	0.25	0.25	0.26	0.26	0.24	0.19	0.25	0.50	0.29	0.27	0.27	0.25	0.01	0.08	0.02	0.30
전라북도	0.22	0.22	0.23	0.25	0.22	0.20	0.23	0.46	0.28	0.26	0.26	0.23	0.01	0.07	0.04	0.29
전라남도	0.22	0.22	0.23	0.26	0.24	0.21	0.25	0.33	0.27	0.26	0.25	0.25	0.00	0.04	0.04	0.14
경상북도	0.28	0.28	0.24	0.24	0.23	0.28	0.23	0.30	0.23	0.24	0.26	0.24	0.00	0.03	0.04	0.10
경상남도	0.24	0.24	0.23	0.22	0.22	0.20	0.22	0.29	0.25	0.26	0.24	0.23	0.00	0.03	0.02	0.11
제주특별자치도	0.00	0.00	0.96	0.63	0.60	0.51	0.53	0.52	0.55	0.49	0.48	0.53	0.08	0.29	0.09	0.60

[표 12]에 나타난 바와 같이 도·자치도의 취수&도수 공정에서 에너지 인텐시티 값은 제주(0.48), 경기(0.28), 강원(0.28), 충북(0.27), 충남(0.27), 전북(0.26), 경북(0.26), 전남(0.25), 경남(0.24) 순으로 나타났다. 2.5.1절에서와 마찬가지로 제주지역을 제외한 나머지 도·자치도의 에너지 인텐시티 값을 우리나라 기초자치단체 및 도·자치도의 중간 그룹으로 판단하였으며 그 값의 범위는 0.24에서 0.28을 나타내었다. 해당 기준을 특광역시에 적용한 결과 부산(0.24)만 중간 그룹에 속하였으며 대전(0.22), 광주(0.19), 인천(0.18), 울산(0.16), 서울(0.13), 대구(0.06), 세종(0.02)은 낮은 그룹에 속하였다.

표 12. 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류

광역지자체	낮은 그룹 (0.24 미만)	중간 그룹 (0.24~0.28)	높은 그룹(0.28 초과)
특광역시	대전(0.22), 광주(0.19), 인천(0.18), 울산(0.16), 서울(0.13), 대구(0.06), 세종(0.22)	부산(0.24)	-
도·자치도	-	경기(0.28), 강원(0.28), 충북(0.27), 충남(0.27), 전북(0.26), 경북(0.26), 전남(0.25), 경남(0.24)	제주(0.48)

도·자치도들의 취수&도수 공정에서 변동계수의 값은 [표 13]에 나타난 바와 같이 제주(0.60), 충남(0.30), 전북(0.29), 충북(0.22), 경기(0.16), 전남(0.14), 경남(0.11), 경북(0.10), 강원(0.05) 순으로 나타났다. 전체 상수 시스템 경우와 마찬가지로 제주는 높은 값을 나타냈으며 특이하게 강원은 매우 낮은 값을 나타내었다. 본 연구에서는 제주와 강원을 제외한 0.10에서 0.30의 값을 도·자치도 및 기초자치단체의 중간 그룹의 변동계수 값으로 고려하였다. 그리고 2018년 제주를 제외한 모든 광역지자체에서 취수 및 도수 공정 에너지 인텐시티가 해당 연도만 증가한 값을 나타내는 경향을 나타내었다. 이는 상수도통계 작성 시 가이드라인에 문제 또는 작성자의 오류로 판단된다. 이 사항은 2.7절의 스냅샷 및 궤적 분석 시 고려되어야 할 것이다. 해당 기준을 특광역시에 적용한 결과 인천(0.10)만 중간 그룹에 속하였으며 대전(0.09), 부산(0.06), 서울(0.03)은 낮은 그룹, 울산(0.48), 세종(0.45), 광주(0.41), 대구(0.37)는 높은 그룹으로 나타났다.

표 13. 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류

광역지자체	낮은 그룹 (0.10 미만)	중간 그룹 (0.10~0.30)	높은 그룹(0.30 초과)
특광역시	대전(0.09), 부산(0.06), 서울(0.03)	인천(0.10)	울산(0.48), 세종(0.45), 광주(0.41), 대구(0.37)
도·자치도	강원(0.05)	충남(0.30), 전북(0.29), 충북(0.22), 경기(0.16), 전남(0.14), 경남(0.11), 경북(0.10)	제주(0.60)

광역지자체 취수&도수 공정의 에너지 인텐시티에 대한 평균값과 변동계수의 관계는 [그림 19]에 제시되어 있다. 제주를 제외한 나머지 광역지자체에서 낮은 범위의 값을 나타내었으며, 변동성이 큰 광역지자체(울산, 세종, 광주, 대구, 제주)의 취수 및 도수 공정을 살펴보는 것이 스냅샷 및 궤적 분석에서 중요할 것으로 판단되었다.

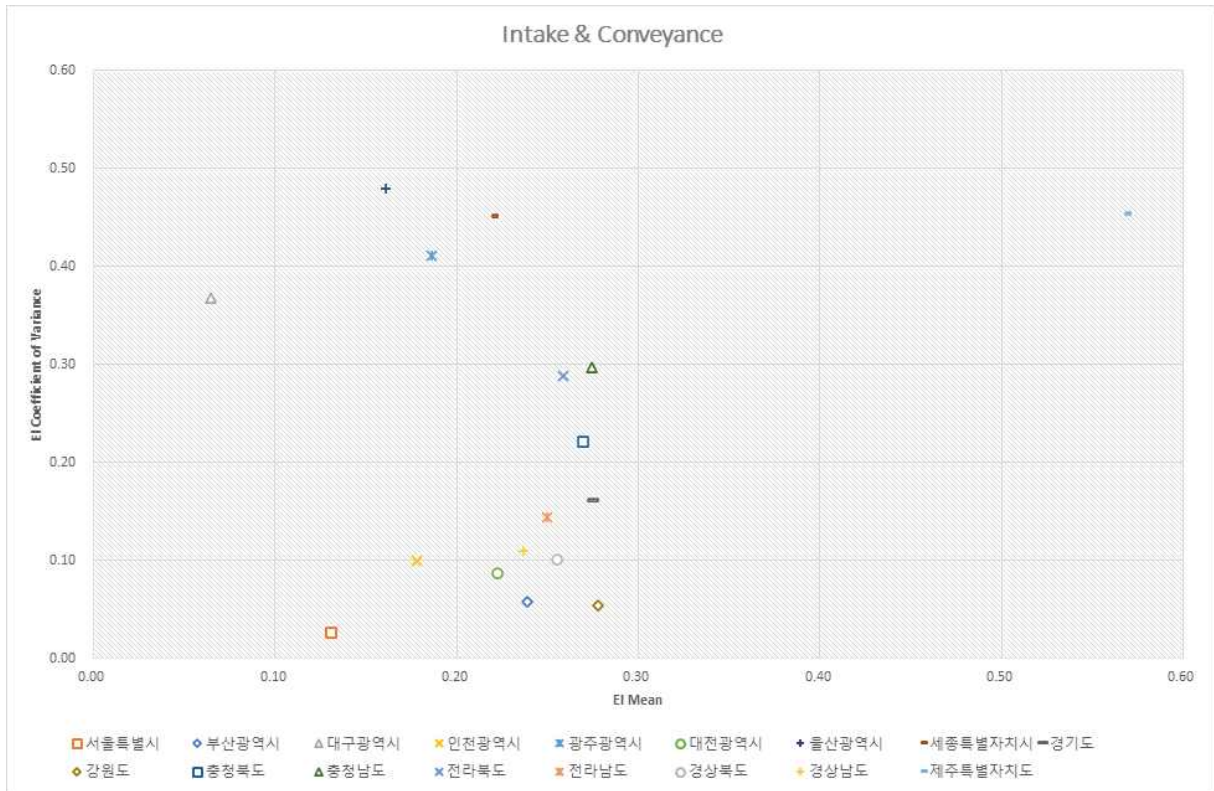


그림 19. 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계

2.5.3 광역지자체별 단위 공정 에너지 인텐시티: 정수처리 및 송수

2.5.3절에서는 광역지자체별 정수처리&송수 공정에서 에너지 인텐시티의 현황 및 변동성을 분석하였다. 특광역시와 도·자치도의 2011년부터 2020년까지 10년간 에너지 인텐시티의 시계열 변화, 인텐시티 값 그리고 인텐시티의 기술통계 값(평균, 중위값, 분산, 표준편차, 사분범위, 변동계수)은 [그림 20], [그림 21], [표 14]에 나타난 바와 같다.

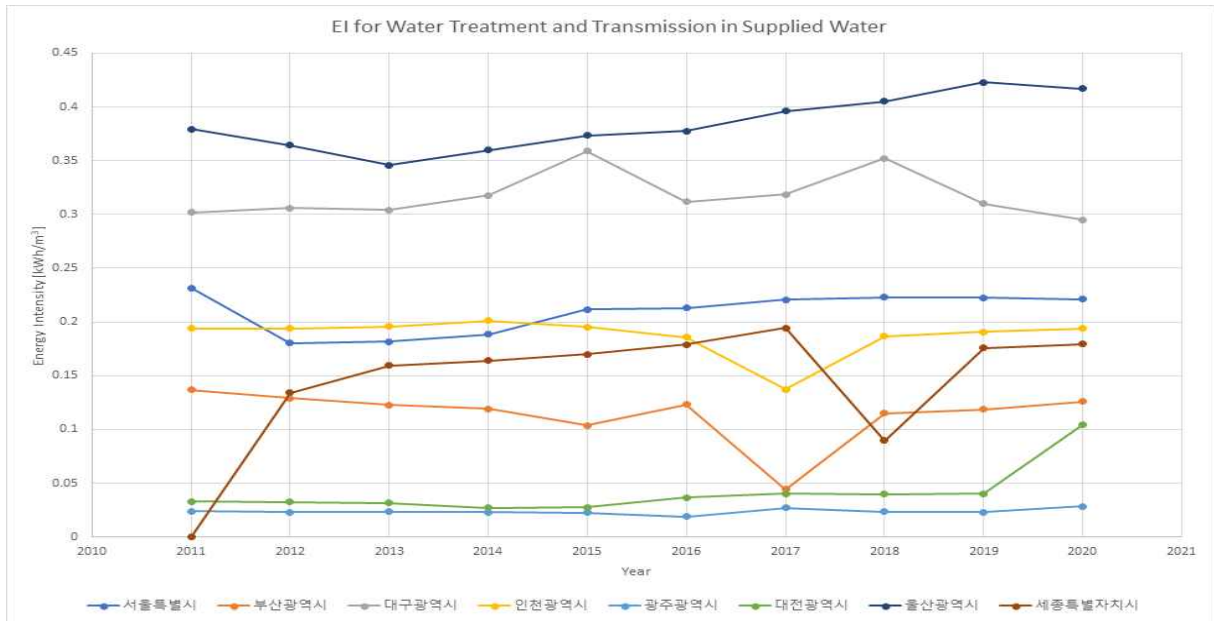


그림 20. 특광역시 정수처리 및 송수 공정 에너지 인텐시티 변동

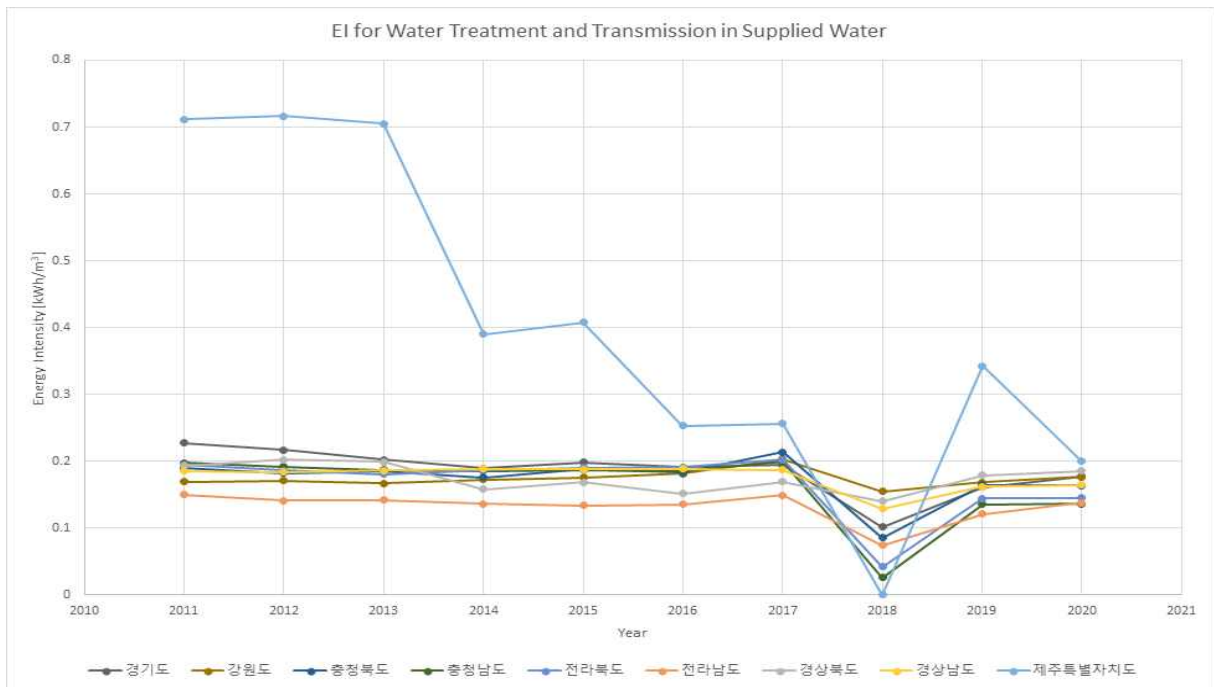


그림 21. 도·자치도 정수처리 및 송수 공정 에너지 인텐시티 변동

표 14. 광역지자체 정수처리 및 송수 공정 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값

광역지자체	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위 값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수
서울특별시	0.23	0.18	0.18	0.19	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.22	0.00	0.02	0.03	0.09
부산광역시	0.14	0.13	0.12	0.12	0.10	0.12	0.04	0.12	0.12	0.13	0.11	0.12	0.00	0.03	0.01	0.23
대구광역시	0.30	0.31	0.30	0.32	0.36	0.31	0.32	0.35	0.31	0.30	0.32	0.31	0.00	0.02	0.01	0.07
인천광역시	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19	0.14	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.00	0.02	0.01	0.10
광주광역시	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11
대전광역시	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.10	0.04	0.04	0.00	0.02	0.01	0.55
울산광역시	0.38	0.36	0.35	0.36	0.37	0.38	0.40	0.41	0.42	0.42	0.38	0.38	0.00	0.03	0.04	0.07
세종특별자치시	-	0.13	0.16	0.16	0.17	0.18	0.19	0.09	0.18	0.18	0.16	0.17	0.00	0.03	0.02	0.20
경기도	0.23	0.22	0.20	0.19	0.20	0.19	0.19	0.10	0.16	0.18	0.19	0.19	0.00	0.03	0.02	0.19
강원도	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.20	0.15	0.17	0.18	0.17	0.17	0.00	0.01	0.01	0.07
충청북도	0.19	0.18	0.18	0.18	0.19	0.18	0.21	0.09	0.16	0.16	0.17	0.18	0.00	0.03	0.02	0.20
충청남도	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.03	0.14	0.14	0.16	0.19	0.00	0.05	0.04	0.33
전라북도	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.20	0.04	0.14	0.15	0.17	0.19	0.00	0.05	0.04	0.29
전라남도	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.15	0.07	0.12	0.14	0.13	0.14	0.00	0.02	0.01	0.17
경상북도	0.19	0.20	0.20	0.16	0.17	0.15	0.17	0.14	0.18	0.19	0.17	0.17	0.00	0.02	0.03	0.12
경상남도	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.13	0.16	0.16	0.18	0.19	0.00	0.02	0.02	0.11
제주특별자치도	0.71	0.72	0.71	0.39	0.41	0.25	0.26	0.00	0.34	0.20	0.40	0.37	0.06	0.24	0.38	0.61

도·자치도의 정수처리&송수 공정에서 에너지 인텐시티는 [표 15]에 나타난 바와 같이 경기(0.19), 경남(0.18), 강원(0.17), 충북(0.17), 경북(0.17), 전북(0.17), 충남(0.16), 전남(0.13)의 순으로 나타났으며, 제주는 전체 상수 시스템과 취수&도수 공정에서와 마찬가지로 다른 자치도에 비해 높은 0.40의 값을 나타내었다. 제주를 제외한 나머지 자치도는 0.13에서 0.19의 거의 유사한 범위를 나타내었으며, 이에 따라 해당 범위를 우리나라 기초자치단체의 정수처리 및 송수 공정에서 중간 그룹의 에너지 인텐시티로 고려하였다. 해당 기준을 특광역시에 적용할 경우 부산(0.11), 대전(0.04), 광주(0.02)는 낮은 그룹으로 인천(0.19), 세종(0.16)은 중간 그룹으로 울산(0.38), 대구(0.32), 서울(0.21)은 높은 그룹으로 나타났다. 대전과 광주의 경우 일반적인 인텐시티 값보다 매우 낮은 값을 나타내어 그 원인에 대한 검토가 필요할 것으로 판단되었다.

표 15. 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류

광역자치체	낮은 그룹 (0.13 미만)	중간 그룹 (0.13~0.19)	높은 그룹(0.19 초과)
특광역시	부산(0.11), 대전(0.04), 광주(0.02)	인천(0.19), 세종(0.16)	울산(0.38), 대구(0.32), 서울(0.21)
도·자치도	-	경기(0.19), 경남(0.18), 강원(0.17), 충북(0.17), 경북(0.17), 전북(0.17), 충남(0.16), 전남(0.13)	제주(0.40)

[표 16]에 제시된 바와 같이 도·자치도의 정수처리&송수 공정의 에너지 인텐시티 변동계수는 제주(0.61), 충남(0.33), 전북(0.29), 충북(0.20), 경기(0.19), 전남(0.17), 경북(0.12), 경남(0.11), 강원(0.06) 순이었다. 제주는 타 자치도와 비교할 경우 큰 변동을 나타내었으며, 강원은 변동이 거의 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 제주와 강원을 제외하고 0.11에서 0.33을 중간 그룹으로 하여 특광역시에 적용하였다. 적용 결과 인천(0.10), 서울(0.09), 대구(0.07), 울산(0.07)은 변동이 낮은 그룹, 부산(0.23), 세종(0.20), 광주(0.11)는 중간 그룹, 대전(0.55)은 높은 그룹으로 분석되었다. 이에 대전의 경우 프로파일링 적용 시 정수처리 및 송수 공정에 대해 좀더 자세하게 살펴볼 필요가 있다. 그리고 [그림 21]에서 나타난 바와 같이 모든 도·자치도에서 2018년에 정수처리 및 송수 공정에서 에너지 인텐시티 값이 낮아 짐을 알 수 있었다. 이는 2.5.2절의 취수 및 도수 공정에서 해당연도(2018년)에 에너지 인텐시티 값이 증가하는 것에 비추어 해당연도에 상수도통계 자료 작성 시 가이드라인에 문제가 있었던 것으로 추측된다. 이에 따라 프로파일링 시 2018년도의 취수 및 도수 공정과 정수처리 및 송수 공정의 변동에는 큰 의미를 둘 필요는 없으며, 자료 기입 시 명확한 가이드라인의 수립 및 자료 기입자에 대한 교육이 필요한 것으로 판단된다.

표 16. 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류

광역지자체	낮은 그룹 (0.11 미만)	중간 그룹 (0.11~0.33)	높은 그룹(0.33 초과)
특광역시	인천(0.10), 서울(0.09), 대구(0.07), 울산(0.07)	부산(0.23), 세종(0.20), 광주(0.11)	대전(0.55)
도·자치도	강원(0.07)	충남(0.33), 전북(0.29), 충북(0.20), 경기(0.19), 전남(0.17), 경북(0.12), 경남(0.11)	제주(0.61)

광역지자체별 정수처리 및 송수 공정에서 에너지 인텐시티의 평균값과 변동계수는 [그림 22]에 설명되어 있다. 해당 그래프에서 가장 멀리 떨어져 있는 제주와 대전에 대해 높은 변동성에 대해 분석할 필요가 있을 것이다. 그리고 변동성은 적지만 높은 평균 에너지 인텐시티를 나타내는 울산과 대구에 대한 검토가 필요하다.

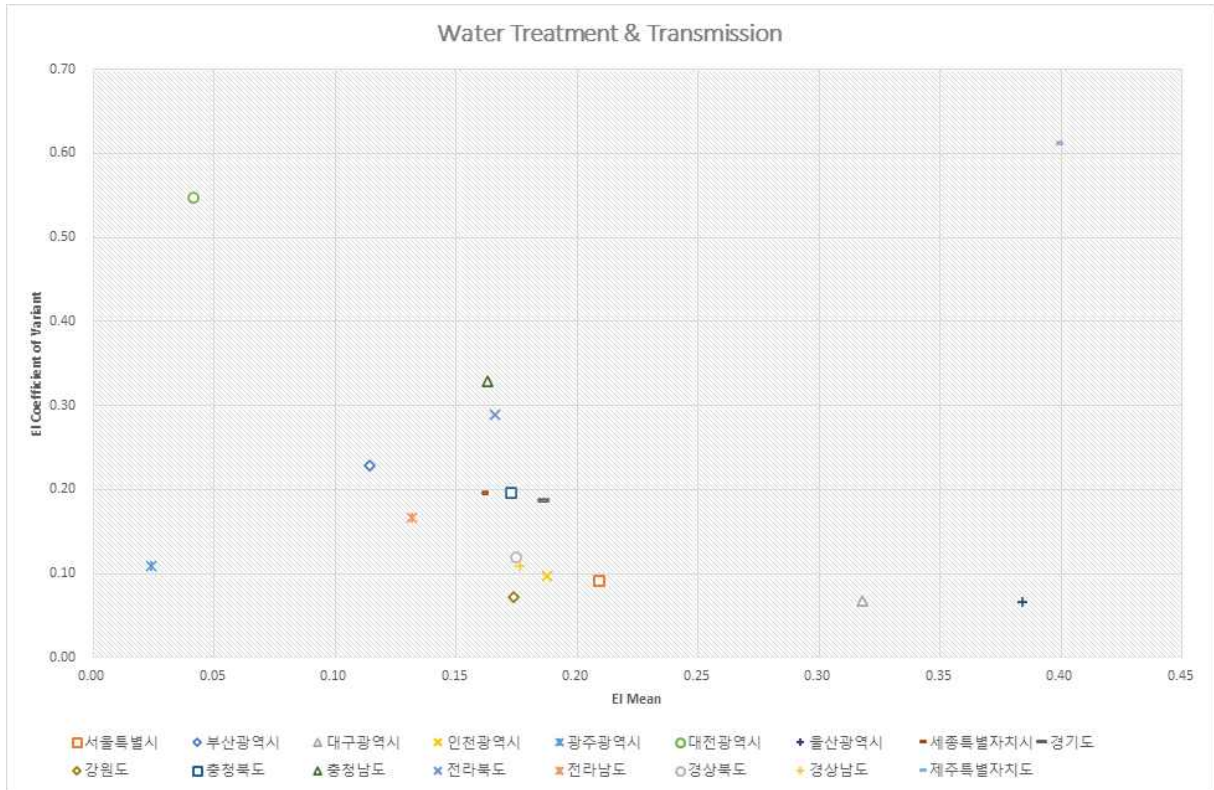


그림 22. 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 평균과 변동계수 관계

2.5.4 광역지자체별 단위 공정 에너지 인텐시티: 배급수

2.5.4절에서는 광역지자체별 배급수 공정에서 에너지 인텐시티의 현황(집중 경향성) 및 변동성을 분석하였다. 특광역시와 도·자치도의 2011년부터 2020년까지 10년간 에너지 인텐시티의 시계열 변화, 인텐시티 값 그리고 인텐시티의 기술통계 값(평균, 중위값, 분산, 표준편차, 사분범위, 변동계수)은 [그림 23], [그림 24], [표 17]에 나타난 바와 같다.

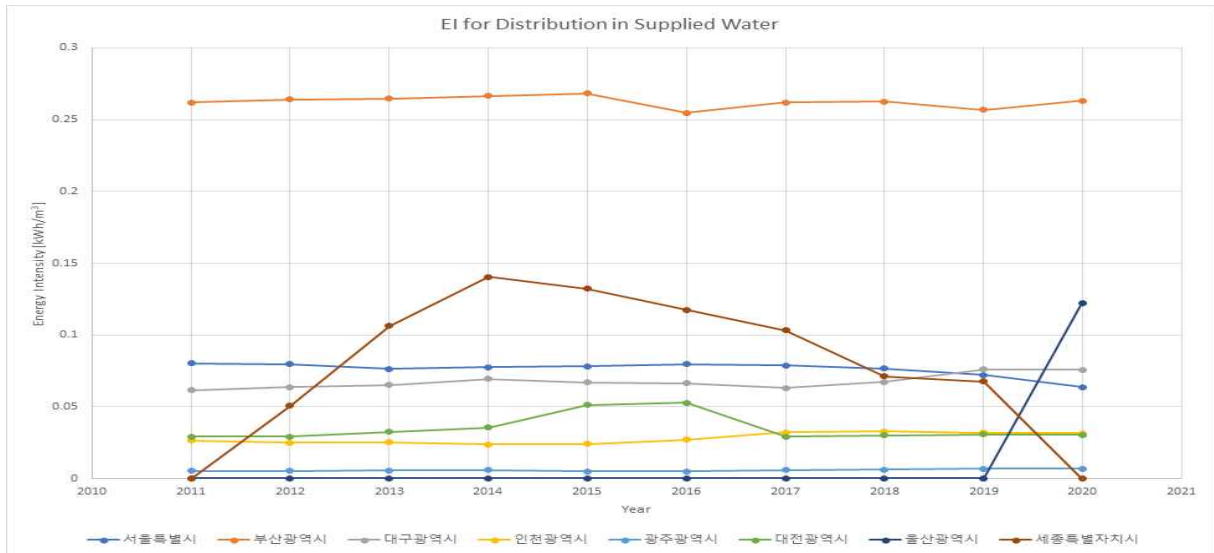


그림 23. 특광역시 배급수 공정 에너지 인텐시티 변동

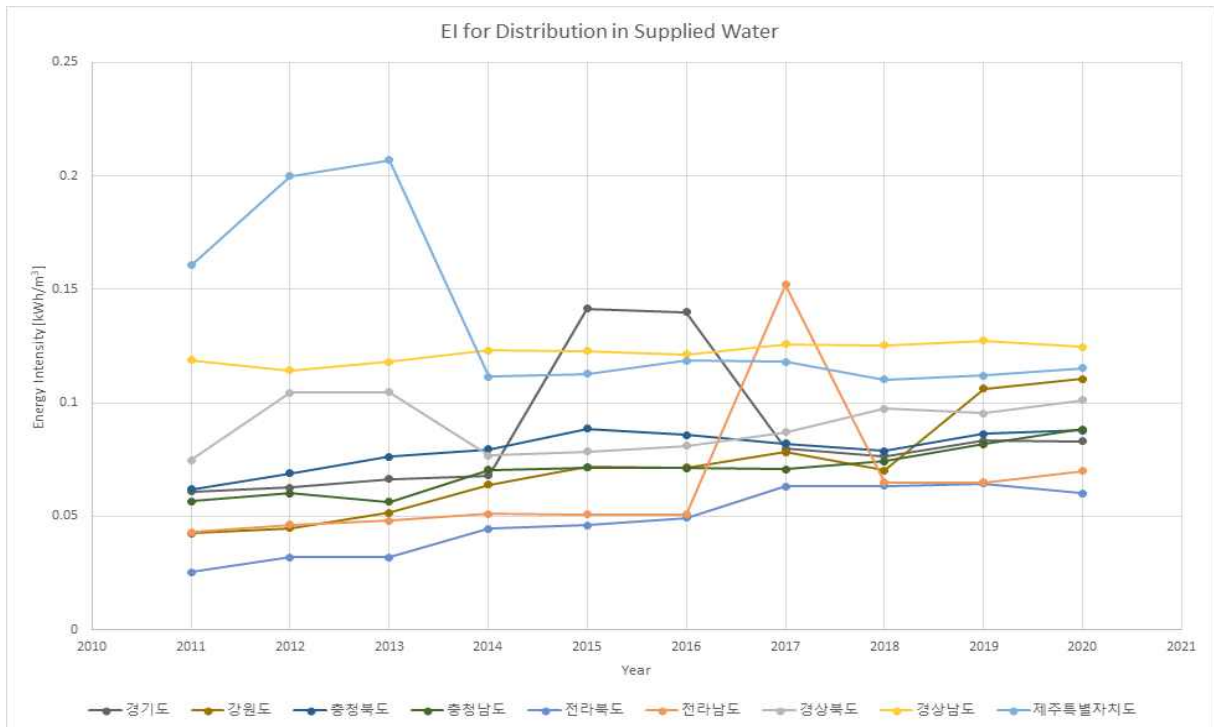


그림 24. 도·자치도 배급수 공정 에너지 인텐시티 변동

표 17. 광역지자체 배급수 공정 연간(2011~2020) 에너지 인텐시티 및 기술통계 값

광역지자체	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위 값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수
서울특별시	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08	0.00	0.01	0.00	0.07
부산광역시	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.00	0.00	0.00	0.02
대구광역시	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.07
인천광역시	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.13
광주광역시	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.12
대전광역시	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.00	0.01	0.01	0.26
울산광역시	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	3.14
세종특별자치시	-	0.05	0.11	0.14	0.13	0.12	0.10	0.07	0.07	0.00	0.09	0.10	0.00	0.04	0.05	0.51
경기도	0.06	0.06	0.07	0.07	0.14	0.14	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.00	0.03	0.02	0.35
강원도	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.07	0.11	0.11	0.07	0.07	0.00	0.02	0.02	0.32
충청북도	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.00	0.01	0.01	0.11
충청남도	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.07	0.07	0.00	0.01	0.01	0.15
전라북도	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.00	0.01	0.03	0.30
전라남도	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.00	0.03	0.02	0.50
경상북도	0.07	0.10	0.10	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.00	0.01	0.02	0.13
경상남도	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.00	0.00	0.01	0.03
제주특별자치도	0.16	0.20	0.21	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.14	0.12	0.00	0.04	0.04	0.28

배급수 공정에서 광역지자체별 에너지 인텐시티의 값은 [표 18]에 나타나 있다. 도·자치도의 경우 제주(0.14), 경남(0.12), 경기(0.09), 경북(0.09), 충북(0.08), 강원(0.07), 충남(0.07), 전남(0.06), 전북(0.05)의 값을 나타내었다. 배급수 공정의 에너지 인텐시티에 있어 제주는 상수 시스템 또는 다른 공정(취수&도수, 정수처리&송수) 공정과는 다르게 다른 자치도와 큰 차이를 나타내지는 않았다. 본 연구에서는 0.05에서 0.12의 범위를 우리나라 도·자치도 및 기초자치단체의 배급수 공정 에너지 인텐시티의 중간 범위로 고려하였다. 해당 기준을 특광역시에 적용한 결과 대전(0.04), 인천(0.03), 광주(0.01), 울산(0.01)은 에너지 인텐시티가 낮은 그룹으로 세종(0.09), 서울(0.08), 대구(0.07)의 중간 그룹으로 나타났다. 부산은 다른 특광역시와는 다르게 0.26의 매우 높은 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.

표 18. 배급수공정 에너지 인텐시티 평균값에 의한 분류

광역지자체	낮은 그룹 (0.05 미만)	중간 그룹 (0.05~0.14)	높은 그룹(0.14초과)
특광역시	대전(0.04), 인천(0.03), 광주(0.01), 울산(0.01)	세종(0.09), 서울(0.08), 대구(0.07)	부산(0.26)
도·자치도	-	제주(0.14), 경남 (0.12), 경기(0.09), 경북(0.09) 충북(0.08), 강원(0.07), 충남(0.07), 전남(0.06), 전북(0.05)	-

배급수 공정의 에너지 인텐시티의 변동계수는 [표 19]에 나타난 바와 같다. 도·자치도의 경우 전남(0.50), 경기(0.35), 강원(0.32), 전북(0.30), 제주(0.28), 충남(0.15), 경북(0.13), 충북(0.11) 순이었다. 배급수 공정 에너지 인텐시티 평균값과 마찬가지로 제주는 다른 공정에 비해 변동이 크지 않는 것으로 파악되었다. 전남의 경우 에너지 인텐시티 값은 낮은 반면 변동성은 큰 상황이었다. 해당 결과를 기반으로 0.11에서 0.35의 범위를 우리나라 기초자치단체 및 자치도의 배급수 공정 에너지 인텐시티 변동계수의 중간 그룹으로 고려하였다. 해당 기준을 특광역시에 적용할 경우 서울(0.07), 대구(0.07), 부산(0.02)은 낮은 그룹 대전(0.26), 인천(0.13), 광주(0.12)는 중간 그룹, 그리고 울산(3.14)과 세종(0.51)은 높은 그룹으로 평가되었다. 특히 울산은 매우 높은 변동계수 값을 나타내어 그 원인에 대한 주의 깊은 분석이 필요하다.

표 19. 배급수 공정 에너지 인텐시티 변동계수에 의한 분류

광역지자체	낮은 그룹 (0.11 미만)	중간 그룹 (0.11~0.35)	높은 그룹(0.35 초과)
특광역시	서울(0.07), 대구(0.07), 부산(0.02)	대전(0.26), 인천(0.13), 광주(0.12)	울산(3.14), 세종(0.51)
도·자치도	-	경기(0.35), 강원(0.32), 전북(0.30), 제주(0.28), 충남(0.15), 경북(0.13), 충북(0.11)	전남(0.50),

모든 광역지자체의 배급수 공정 에너지 인텐시티의 평균값과 변동계수 관계는 [그림 25]와 같다. 앞에서 제시한 바와 같이 울산은 타 광역지자체에 비해 매우 높은 변동계수 값을 나타내어서 비교를 용이하게 하기 위한 울산을 제외한 에너지 인텐티시 평균값과 변동계수의 관계를 [그림 26]에 제시하였다. 이에 따라 프로파일 적용 시 울산은 유심하게 분석될 필요가 있는 것으로 판단되다.

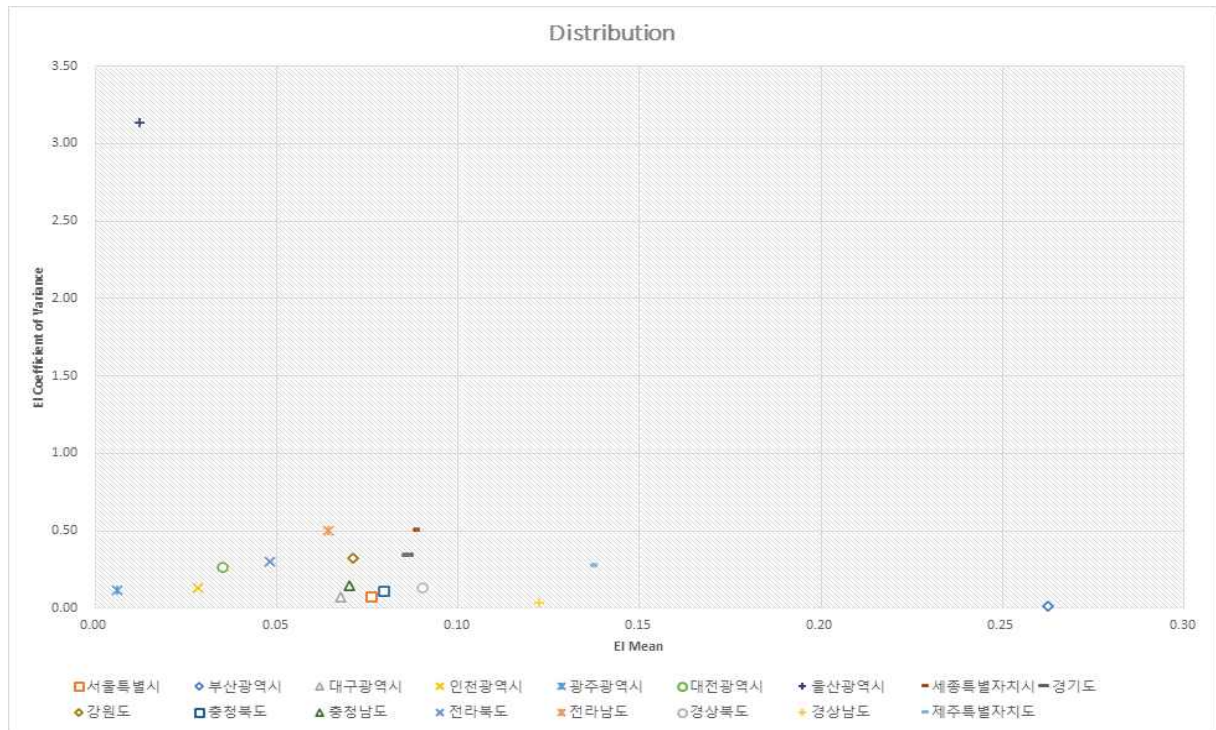


그림 25. 배급수 공정 에너지 인텐티시 평균과 변동계수 관계

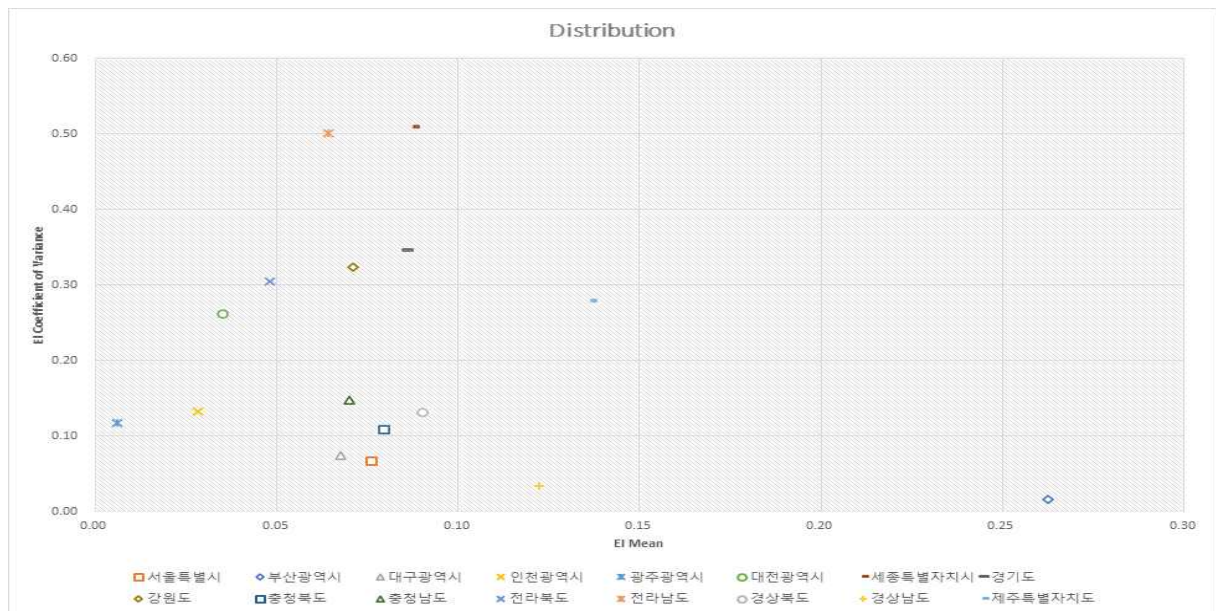


그림 26. 배급수 공정 에너지 인텐티시 평균과 변동계수 관계 (울산 제외)

2.6 프로파일링: 상수 시스템 에너지 인텐시티 영향요인 도출

도시 물순환 시스템에서 물과 에너지의 연관 관계는 각각의 나라와 지역마다 다르므로 넥서스 관점에서 의사결정을 위해서는, 해당 지역의 도시 물순환 시스템의 에너지 인텐시티에 영향을 주는 요소들을 파악하고 그 관계를 이해하는 것이 필수적이다. 이에 따라 도시 물순환 시스템 물-에너지 넥서스 프로파일링을 시 변화의 원인을 규명하기 위해 해당 지역의 물순환 시스템의 에너지 인텐시티 영향요인을 도출하는 것은 반드시 선행되어야 한다.

에너지 인텐시티 값의 차이는 기후와 외부적인 요소(연평균 강수량, 가뭄, 기후유형 등), 지리적 특징(표고차, 평지비, 내륙&해안 등), 시스템 특징(도시 총 급수량, 도시인구, 인구밀도, 관로연장 등) 및 시스템의 운영관리(상수관망 수압, 누수율, 시스템 에너지 효율향상, 물 절약 등)와 밀접한 관계가 있으며, 각각의 세부 영향요소들과 에너지 인텐시티의 관계는 2차년도 연구보고서(2.4.2절~2.4.5절)에 자세히 설명되어 있다.

2차년도의 문헌 조사에 따른 상수 시스템과 취수, 도수, 정수처리, 송수 및 배급수 단위 공정의 에너지 인텐시티에 영향을 미치는 주요 요인은 [표 20]로 정리될 수 있다. 수량, 설비 효율, 가뭄과 같은 단기 기후변동 및 물 절약에 대한 인식은 상수 시스템 전반에 걸쳐 에너지 인텐시티에 영향을 미친다. 취수과정에서는 지하수 취수 시 지표수 취수에 비해 더 큰 양정을 필요로하며, 이는 지하수 수위에 영향을 받는다. 도수 공정, 송수 공정 및 배급수 공정에서는 관길이와 수압 그리고 동수경사 등에 의해 에너지의 사용이 달라지며, 배급수 과정에서는 누수율 또한 중요한 영향요소이다. 정수처리 공정에서는 원수 수질, 정수처리 적용 세부공정 및 고도처리 공정 도입 여부, 그리고 방류수 기준 등에 따라 에너지 사용량이 달라지게 된다.

표 20. 상수도시스템 에너지 인텐시티 영향요소

	취수	도수	정수처리	송수 및 배급수
공동 영향요소	<ul style="list-style-type: none"> - 수량(취수량/급수량/유수수량/시사용수량, 급수인구/비급수인구, lpcd) - 설비(가압펌프, 유량제어 설비, 압력제어 설비) 효율 - 단기 기후변동(가뭄) - 물절약(인식) 			
세부 영향요소	<ul style="list-style-type: none"> - 지표수/지하수 취수 비율 - 지하수 취수 시 지하수 수위 	<ul style="list-style-type: none"> - 도수관 길이(총길이, 단위인구당 관 길이, 단위급수량당 관 길이) - 수압 - 표고차/평지비 	<ul style="list-style-type: none"> - 원수 수질 - 정수처리 세부공정 및 고도처리공정 도입 여부 - 방류수 기준 	<ul style="list-style-type: none"> - 송수 및 배수관 길이(총길이, 단위인구당 관 길이, 단위급수량당 관 길이) - 수압 - 누수율 - 표고차/평지비

본 연구에서는 2.4.1절에서 설명된 바와 같이 자료의 한계로 인해 상수 시스템을 취수&도수 공정, 정수처리&송수 공정, 배급수 공정의 3개로 구분하였다. 각각의 공정에서 [표 21]에 의한 영향요소 분석이 가능한 자료는 관(도수관, 송수관, 배급수관)의 길이와 수량(취수량, 급수량), 인구(급수인구, 비급수인구), 고도처리 비율 및 누수율 자료이다. 따라서 본 연구에서는 [표 21]에서와 같이 취수 및 도수 공정에서는 도수관 길이, 도수관 길이/취수량, 도수관 길이/급수인구를 정수처리 및 송수 공정에서는 고도처리 비율, 송수관 길이, 송수관 길이/급수량, 송수관 길이/급수인구를 배급수 공정에서는 누수율, 배급수관 길이, 배급수관 길이/급수량, 배급수관 길이/급수인구를 영향요인으로 고려하여 분석하였다. 분석 대상은 자치도(제주 자료 제외)의 자료를 활용하였다.

표 21. 상수도 시스템 에너지 인텐시티 분석 영향요소

	취수 및 도수	정수처리 및 송수	배급수
고려 영향요소	- 도수관 길이 [m] - 도수관 길이/취수량 [m/m ³] - 도수관 길이/급수인구 [m/capita]	- 고도처리 비율 [-] - 송수관 길이 [m] - 송수관 길이/급수량 [m/m ³] - 송수관 길이/급수인구 [m/capita]	- 누수율 [%] - 배급수관 길이 [m] - 배급수관 길이/급수량 [m/m ³] - 배급수관 길이/급수인구 [m/capita]

취수 및 도수 공정, 정수처리 및 송수 공정, 배급수 공정에서 영향요소에 따른 에너지 인텐시티의 상관관계는 [표 22]와 [그림 27] ~ [그림 37]에 제시되어 있다. 도수관, 송수관 및 배급수관 길이는 각각의 공정에 에너지 인텐시티와 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 분석되었으며 누수율 또한 배급수 공정 에너지 인텐시티와 높은 상관관계를 나타내었다. 영향요소의 정규화를 위하여 관길이를 수량 또는 급수인구로 나눈 값은 대체로 관길이의 유사하거나 약간 낮은 상관관계를 나타내었다.

표 22. 영향요소와 에너지 인텐시티의 상관관계 및 결정계수 값

공정	고려 영향요소	회귀식	결정계수(R ²)
취수&도수	도수관 길이	$y = 0.0000013 x$	0.80
	도수관 길이/취수량	$y = 95.91x$	0.55
	도수관 길이/급수인구	$y = 2.54x$	0.62
정수처리&송수	고도처리 비율	$y = 0.33x$	0.32
	송수관 길이	$y = 0.00000021 x$	0.83
	송수관 길이/취수량	$y = 78.89x$	0.86
	송수관 길이/급수인구	$y = 0.52x$	0.84
배급수	누수율	$y = 0.0038x$	0.77
	배급수관 길이	$y = 0.0000000041 x$	0.81
	배급수관 길이/급수량	$y = 1.42x$	0.75
	배급수관 길이/급수인구	$y = 0.77x$	0.82

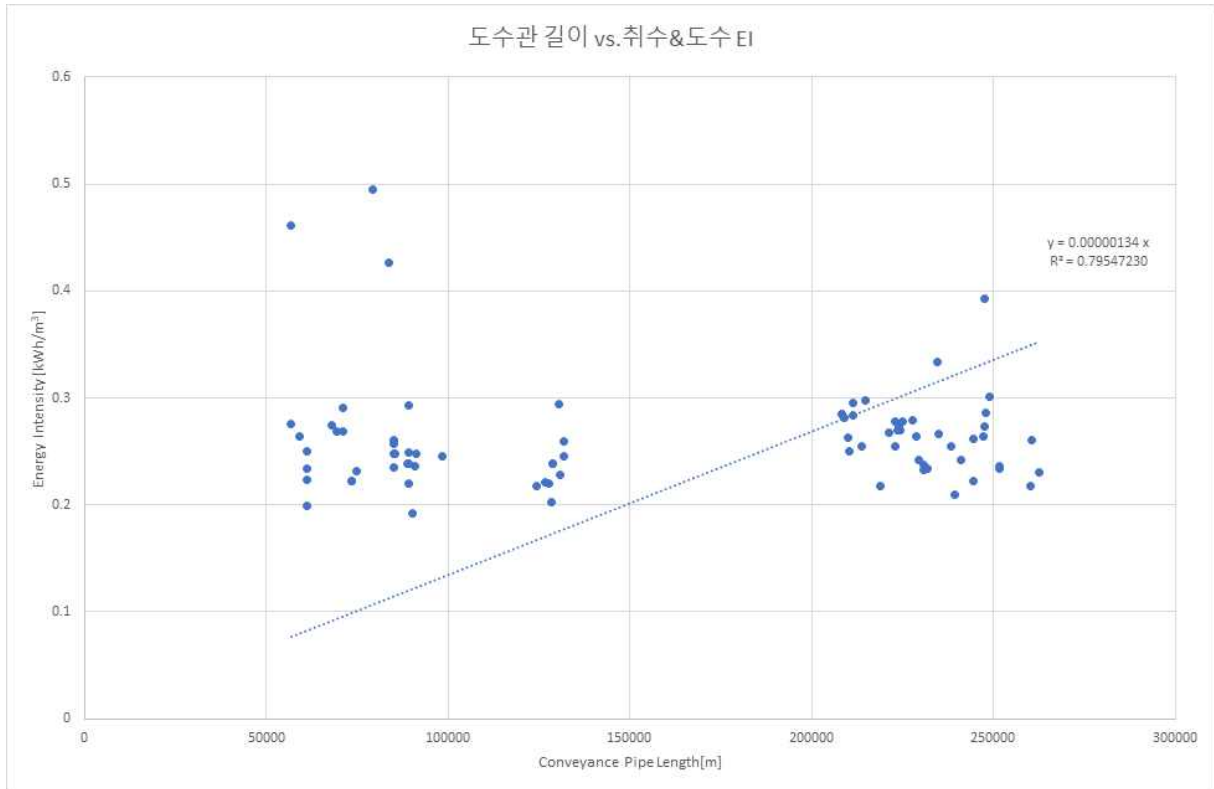


그림 27. 도수관 길이와 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 관계

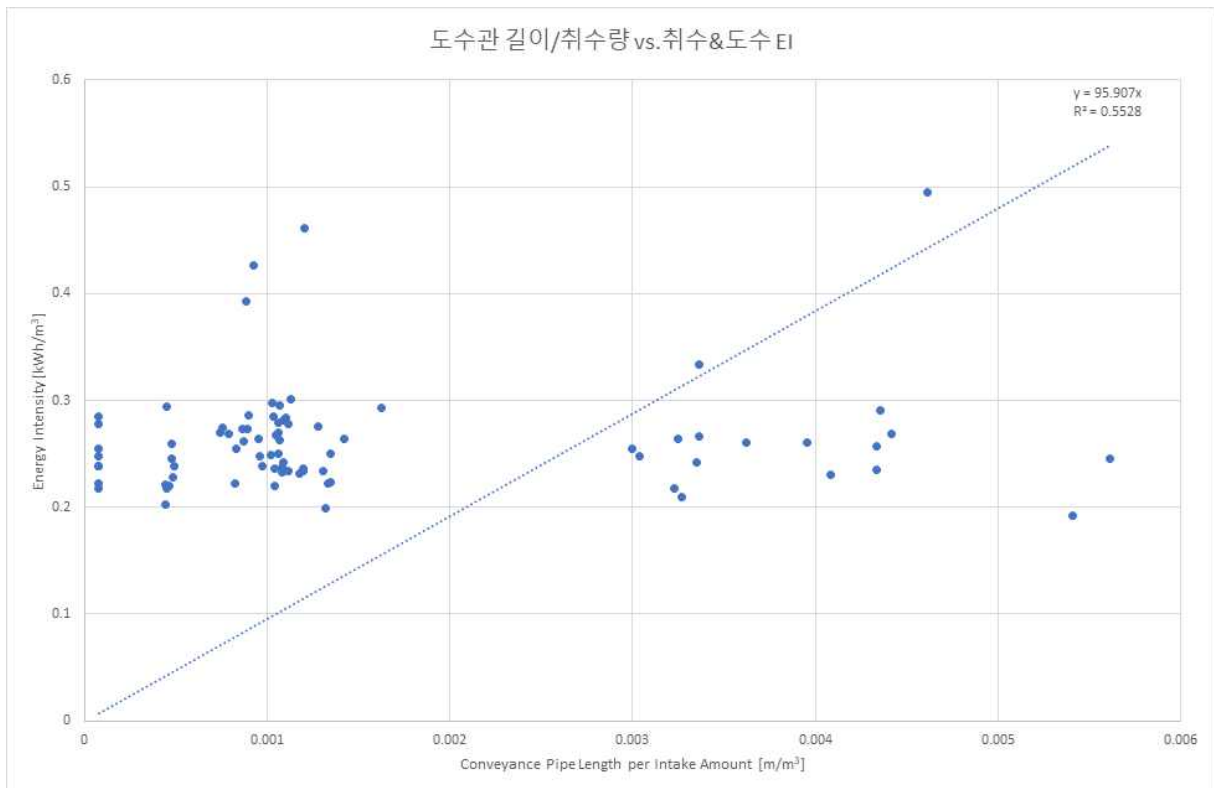


그림 28. 도수관 길이/취수량과 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 관계

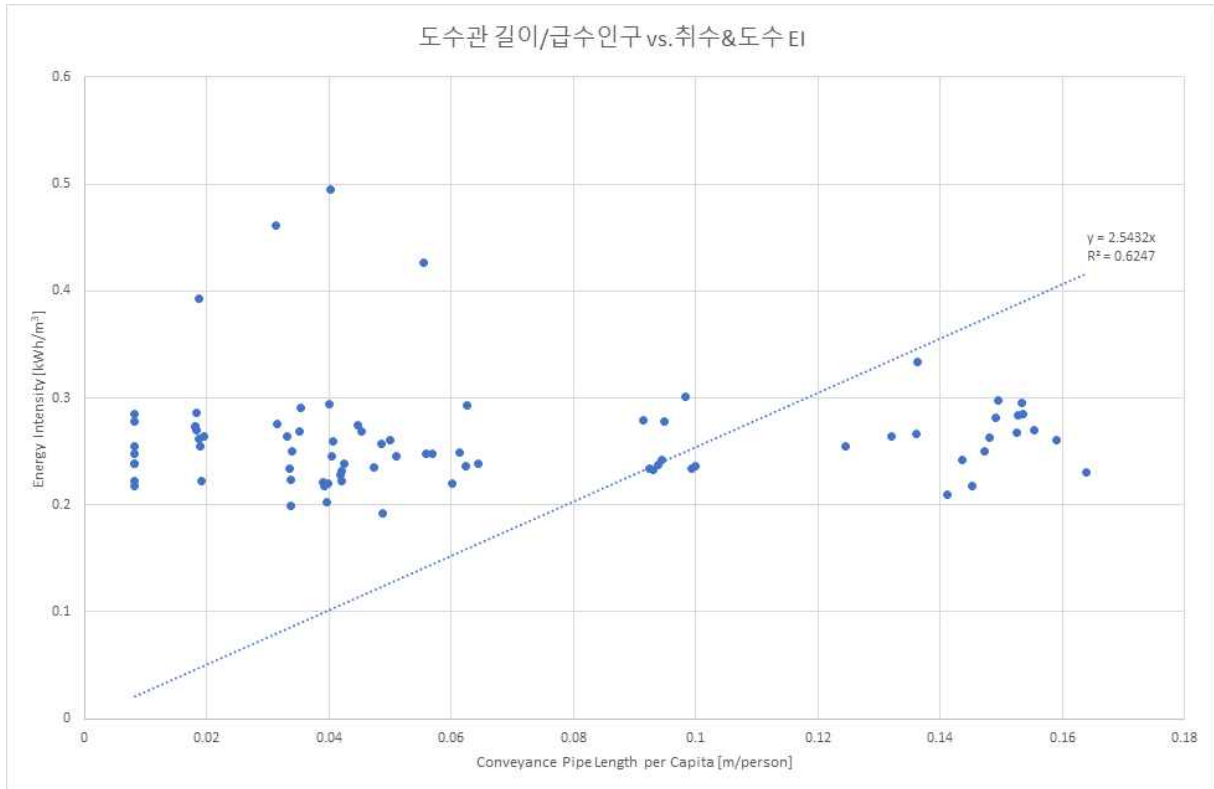


그림 29. 도수관 길이/급수인구와 취수&도수 공정 에너지 인텐시티 관계

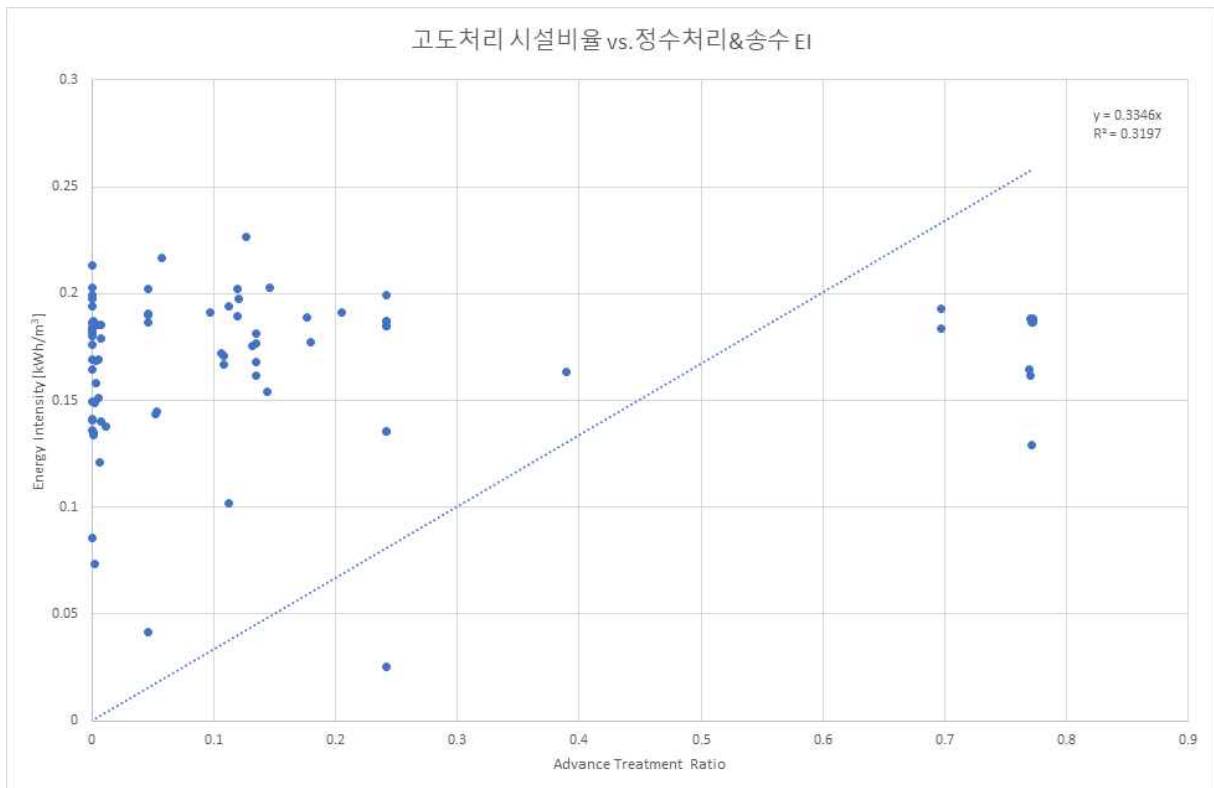


그림 30. 고도처리 시설비율과 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계

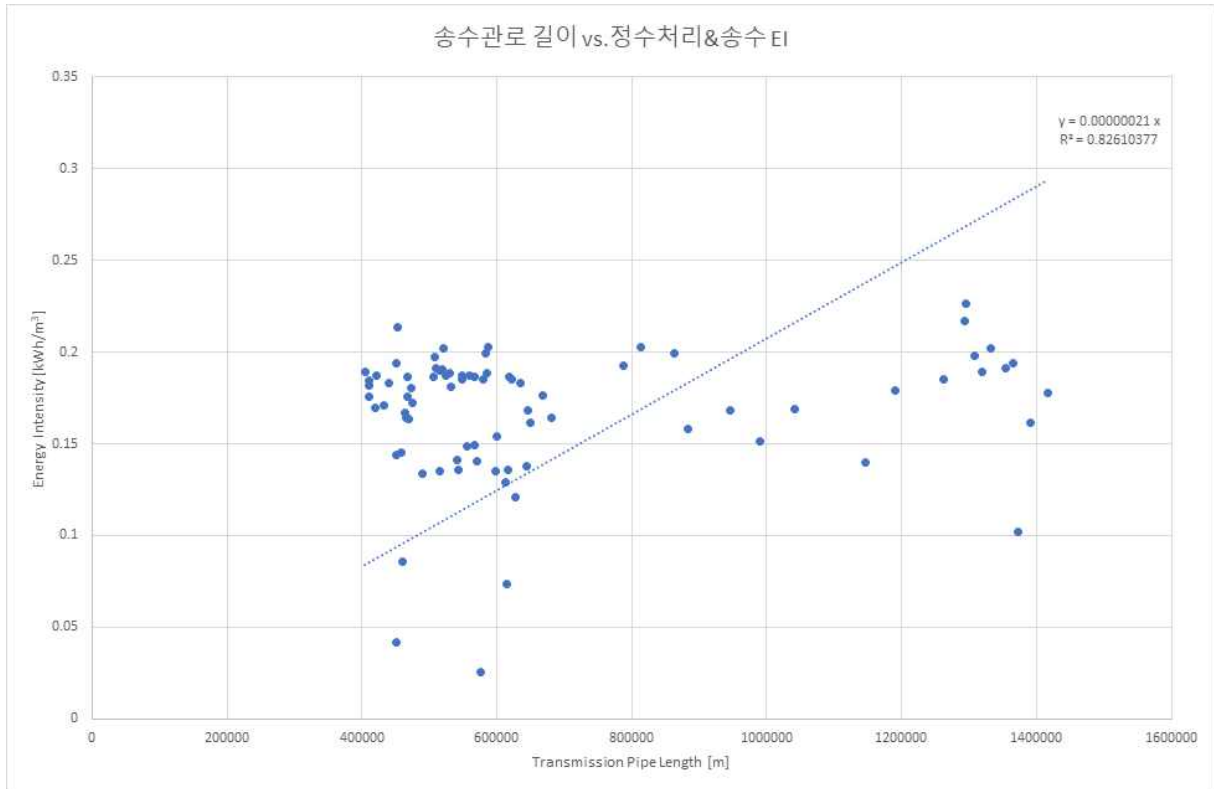


그림 31. 도수관 길이와 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계

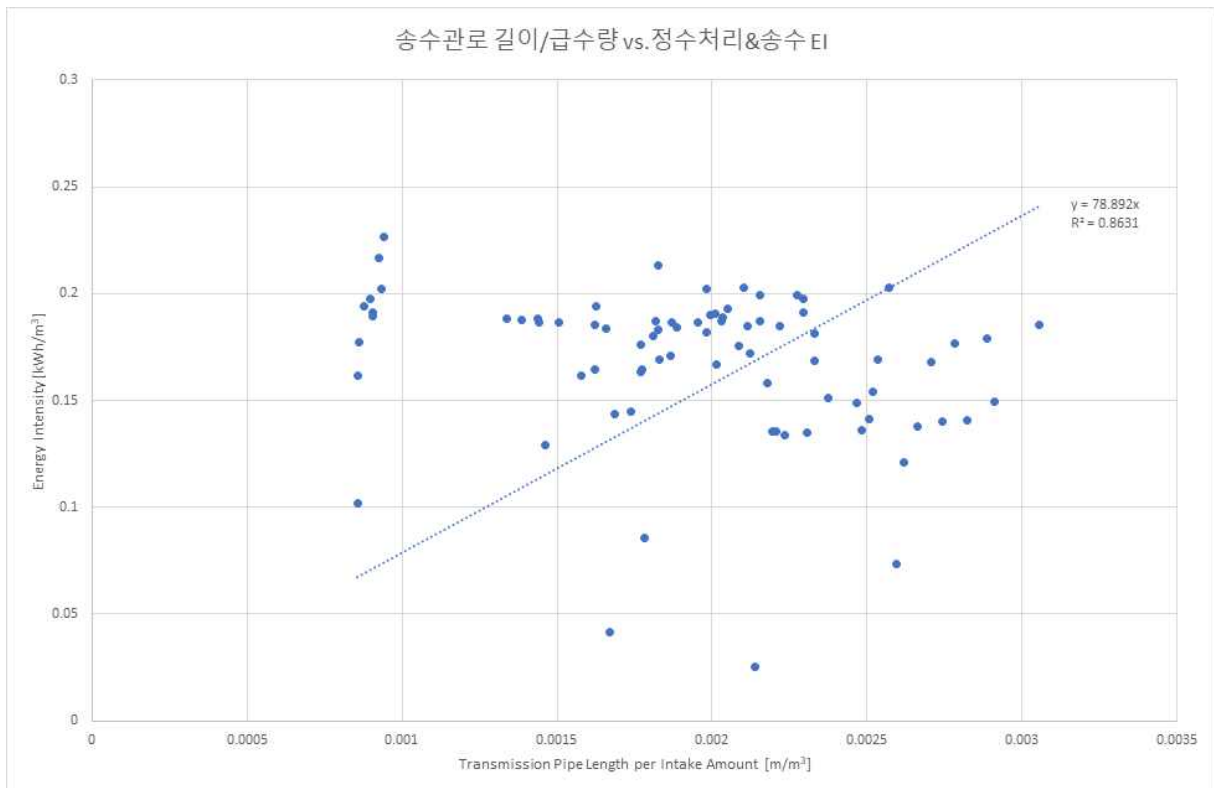


그림 32. 송수관 길이/급수량과 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계

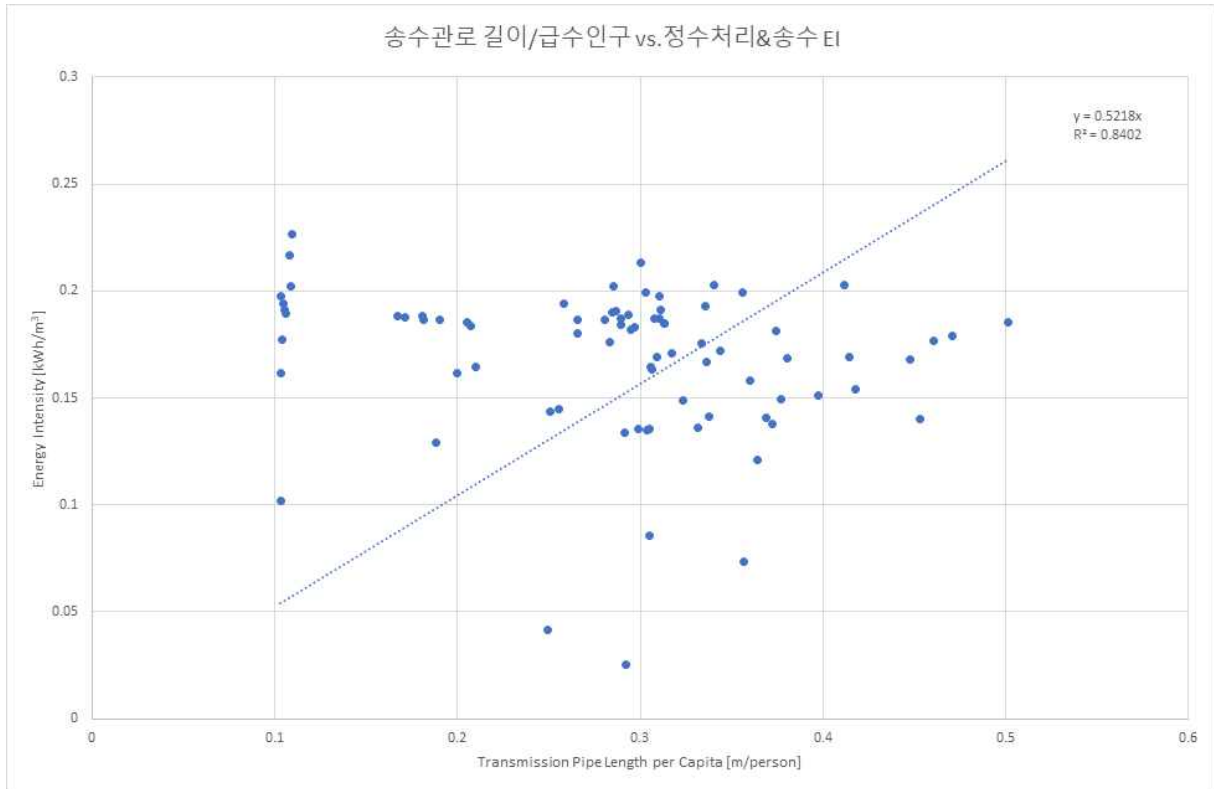


그림 33. 송수관 길이/급수인구와 정수처리&송수 공정 에너지 인텐시티 관계

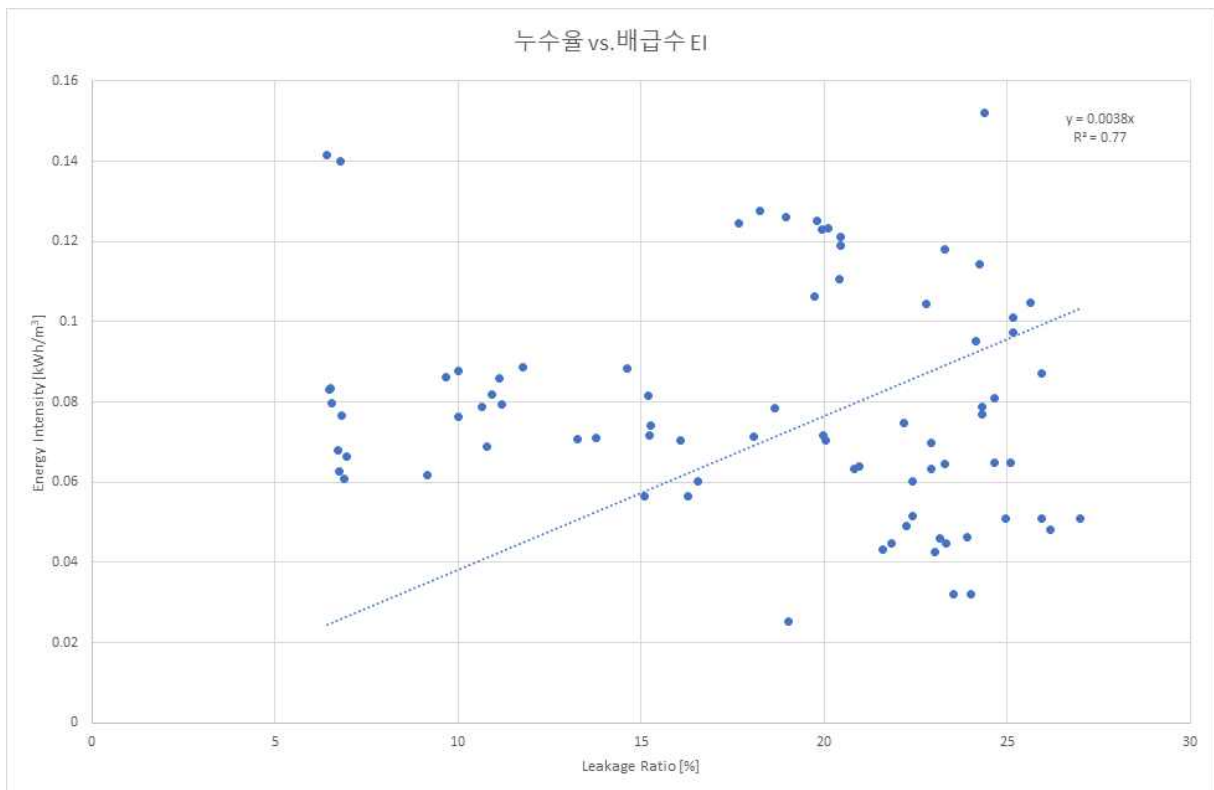


그림 34. 누수율과 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계

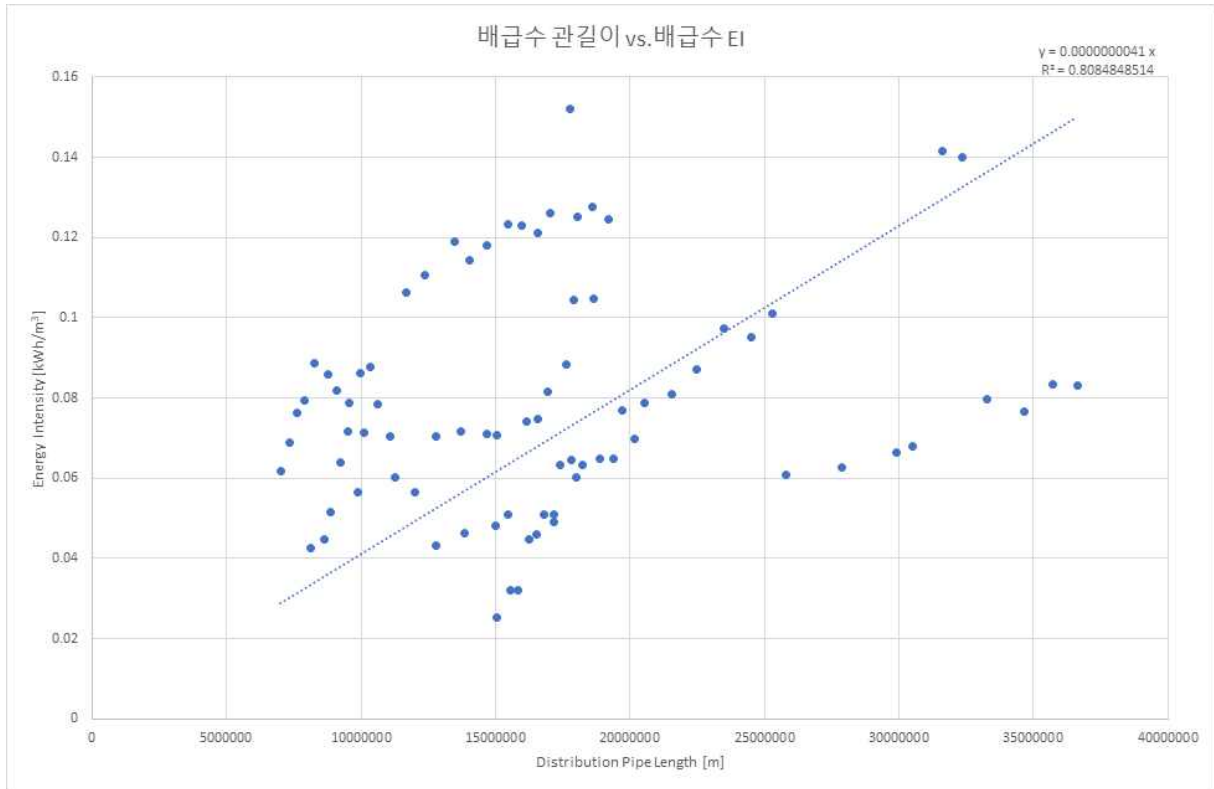


그림 35. 배급수관 길이와 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계

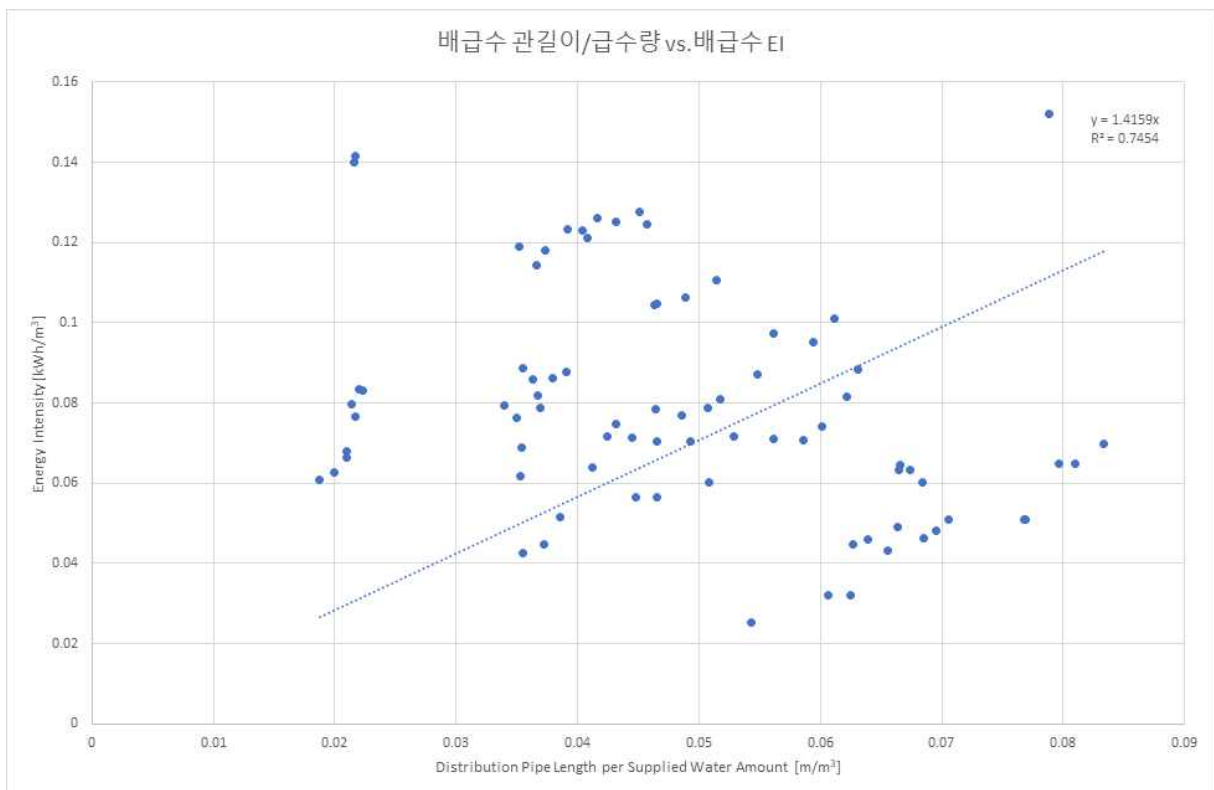


그림 36. 배급수관 길이/급수량과 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계

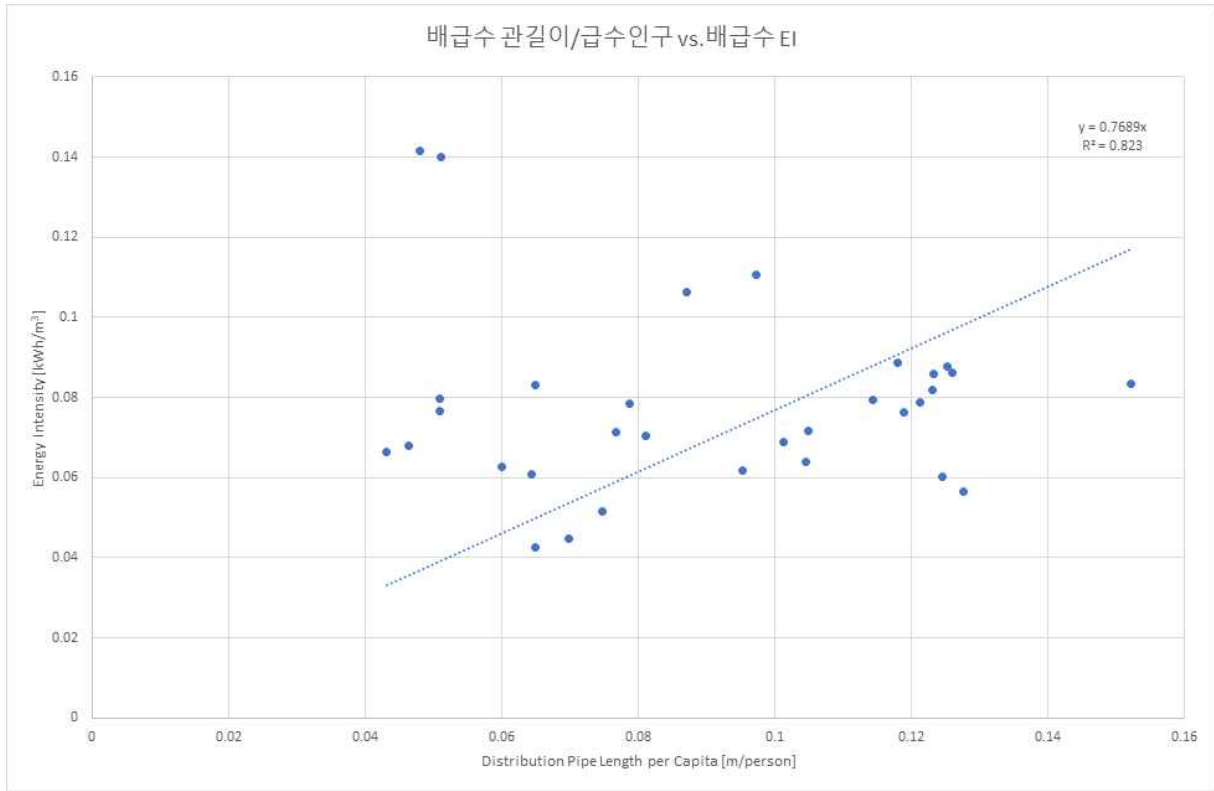


그림 37. 배급수관 길이/급수인구와 배급수 공정 에너지 인텐시티 관계

2.7 프로파일링: 스냅샷·궤적분석 및 전략 도출

2.7.1 부산

2.5절에서 수행된 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향 분석과 [그림 38], [표 23]에 제시된 바와 같이 부산의 물-에너지 상수 시스템은 높은 값의 에너지 인텐시티, 낮은 에너지 인텐시티 변동성, 그리고 정적인 물-에너지 사용량 궤적으로 특징 질 수 있다.

에너지 인텐시티 평균관점에서 부산의 상수 시스템의 에너지 인텐시티는 0.63 kWh/m^3 으로 특광역시에는 가장 높은 값을 나타내었다. 취수&도수 공정의 에너지 인텐시티(0.24 kWh/m^3)는 중간 그룹, 정수처리&송수 공정(0.11 kWh/m^3)은 낮은 그룹, 그리고 배급수 공정(0.26 kWh/m^3)은 매우 높은 값을 나타내었다. 그리고 상수 시스템, 취수&도수 공정, 정수처리&송수 공정, 배급수 공정에서는 2011년부터 2020년까지 큰 변동은 없었으며, 정수처리&송수 공정에서 2017년만 특별히 낮은 값을 나타내었다.

이에 따라 [그림 38]에 나타난 바와 같이 부산의 2011년부터 2020년까지 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일에서 궤적의 변동은 크게 발생하지 않았으며, 사선 방향으로 약한 감소 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 부산의 상수 시스템 물-에너지 넥서스는 안정화된 단계로 판단된다.

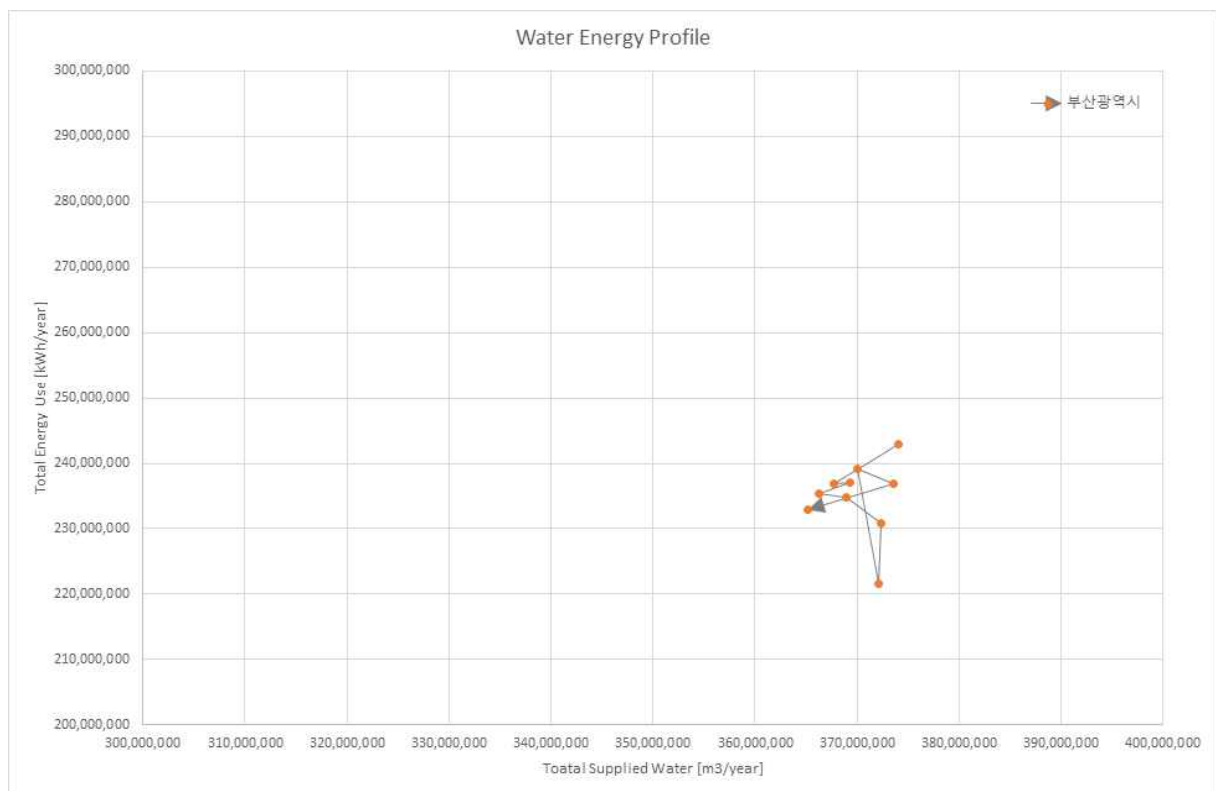


그림 38. 부산 물-에너지 사용량 프로파일

표 23. 부산 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수	
E [kWh/m ³]	상수 시스템	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.62	0.60	0.65	0.63	0.64	0.63	0.64	0.00	0.02	0.01	0.03	
	취수&도수 공정	0.23	0.23	0.24	0.24	0.25	0.23	0.27	0.24	0.23	0.22	0.24	0.24	0.00	0.01	0.01	0.06	
	정수처리&송수 공정	0.14	0.13	0.12	0.12	0.10	0.12	0.04	0.12	0.12	0.12	0.13	0.11	0.12	0.00	0.03	0.01	0.23
	배급수 공정	0.262	0.264	0.265	0.266	0.268	0.255	0.262	0.262	0.263	0.257	0.263	0.263	0.263	0.000	0.004	0.003	0.02
취수& 도수	도수관 길이 [m]	85,901	86,939	87,978	87,562	89,135	89,144	89,134	88,774	88,985	88,521	88,207	88,207	88,648	1,224,197	1,106	1,431	0.01
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	0.00022	0.00008	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00022	0.00022	0.00023	0.00023	0.00021	0.00023	0.00000	0.00005	0.00001	0.22
	도수관길이/ 급수인구 [m/capita]	0.024	0.008	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.026	0.026	0.023	0.025	0.000	0.005	0.001	0.23
	고도처리 시설 비율	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
정수처리 &송수	송수관로 길이 [m]	471,396	472,887	473,848	492,974	497,763	501,048	505,250	508,276	509,558	489,933	492,293	492,293	495,369	20,885,589	14,861	26,330	0.03
	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.00126	0.00129	0.00128	0.00134	0.00135	0.00135	0.00136	0.00137	0.00136	0.00134	0.00134	0.00133	0.00134	0.00000	0.00004	0.00006	0.03
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capita]	0.132	0.132	0.133	0.139	0.140	0.142	0.144	0.146	0.147	0.147	0.143	0.140	0.141	0.000	0.006	0.009	0.04
	누수를 [%]	5.02	4.12	4.23	3.99	4.41	3.67	3.59	2.91	4.56	3.33	3.98	3.98	4.05	0.39	0.62	0.76	0.16
배급수	배급수 관길이 [m]	7,788,519	7,782,467	7,808,170	7,902,801	7,939,256	7,922,618	7,912,387	7,882,803	7,874,204	7,870,187	7,866,341	7,866,341	7,878,504	3,885,415,165	59,878	86,316	0.01
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.021	0.021	0.021	0.021	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.022	0.022	0.021	0.021	0.000	0.000	0.000	0.01
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capita]	2.17	2.18	2.19	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26	2.28	2.30	2.23	2.23	2.24	0.00	0.04	0.06	0.02

부산의 상수 시스템의 높은 에너지 인텐시티는 배급수 공정에서 에너지 인텐시티가 높은 것으로 분석되었다. 높은 에너지 인텐시티의 원인을 분석하기 위하여 [표 24]에서와 같이 2.6절에서 유의미한 것으로 도출된 에너지 인텐시티 영향요인들 중 상대비교가 가능한 영향요인(누수율)과 정규화된 영향요인(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구, 송수관길이/급수량, 송수관길이/급수인구, 배급수관길이/급수량, 배급수관길이/급수인구)의 값과 비교하였다. 비교결과 취수&도수 공정(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구)와 배급수 공정(누수율, 배급수관길이/급수량, 배급수관길이/급수인구)에서는 도·자치도에서 분석된 값들과 일치하지 않는 경향을 보여주었다. 그러나 정수처리&송수 공정(송수관길이/급수량, 송수관길이/급수인구)에서는 일치되는 경향을 보여주었다. 해당 결과를 통해 도·자치도에서 분석된 영향요인의 회귀 식을 특광역시에 적용하는 것은 어려운 것으로 판단되었다. 그러나 이것이 해당 영향요소가 특광역시에 에너지 인텐시티에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미하지는 않는다. 따라서, 같은 국가 내에서도 영향요인을 파악하는 것은 가능하지만 영향의 관계식(회귀식)을 통해 분석은 어렵다. 또한, 본연구에서는 자료의 한계로 인해 에너지 인텐시티에 모든 영향요인을 분석하지는 못한 한계도 존재한다.

에너지 인텐시티의 낮은 변동과 낮은 프로파일 궤적의 변화는 원인을 파악하기 위해 [표 24]에서와 같이 도시여건(인프라 변경, 원수 수입량, 정수 수입량), 외부요인(급수인구, lpcd) 및 운영효율(누수율) 관점에서 검토하였다. [표 24]에서 설명되었듯이 도시여건은 프로파일의 수직 방향, 외부요인은 사선 방향, 그리고 운영효율은 수평 방향의 변동과 관계가 일반적으로 있다.

표 24. 부산 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	원수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	정수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
외부 요인	급수인구[명]	3,582,580	3,571,946	3,562,753	3,557,716	3,553,768	3,540,369	3,513,490	3,487,191	3,459,840	3,422,355
	Lpcd [liter/capita/day]	286	282	284	282	284	288	290	291	296	292
운영 효율	누수율[%]	5.0	4.1	4.2	4.0	4.4	3.7	3.6	2.9	4.6	3.3

부산지역의 취수원 및 취수시설(매리, 물금, 범기, 회동 취수장)과 정수시설(덕산, 명장, 범어사, 화명 정수장)은 10년간 변동이 없었다. 또한, 부산은 원수나 정수를 타 광역지자체나 K-water로부터 수입하지 않고 있다.

부산지역의 인구는 2011년부터 꾸준히 감소하고 있으며, 연평균 감소인구는 17,803명으로 나타났다. Lpcd의 경우 해마다 소폭의 상승과 감소가 있어 전체적으로 큰 변동이 없는 것으로 나타났다. 부산시 프로파일의 매년 궤적의 변동은 사선 방향의 감소를 나타내지는

않았지만 10년의 경향을 살펴볼 경우 사선 방향의 감소 경향을 확인할 수 있었다. 이와 같이 명백한 경향이 나타나지 않는 것은 자료 기입의 에러와 해당년도의 기후(여름 온도, 가뭄)와 같은 불확실성을 가진 영향요인에 의해 노이즈(진동)가 있는 것으로 판단된다. 그리고 부산의 10년간 누수율 평균은 3.99%로 거의 변화가 없는 것으로 조사되었다.

부산의 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링을 통해 알게 된 시사점은 아래와 같다.

- 부산의 상수 시스템은 타 특광역시에 비해 높은 에너지 인텐시티를 가지고 있으며, 이는 배급수 공정에서 에너지 인텐시티가 높음에 기인한다.
- 부산의 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 큰 변동이 없으며, 약한 사선 방향의 감소가 있다. 이는 부산의 상수 시스템이 물-에너지 관점에서 안정적인 상태임을 의미한다.
- 부산지역의 높은 에너지 인텐시티의 원인은 명확하게 규명하기는 어려웠다. 이는 상수 시스템의 에너지 인텐시티는 단편적인 영향요인이 아닌 다양한 영향요인이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 급수인구 감소로 인한 전반적으로 사선 방향의 약한 감소를 나타내었다. 이를 통해 모델을 통해 제시된 외부영향(급수인구 감소)로 인한 프로파일의 사선 방향 감소의 실증사례를 제시할 수 있다.

2.7.2 대구

2.5절의 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향분석과 [표 25], 그리고 [그림 39]의 대구 물-에너지 사용량 프로파일에 의하면 대구의 물-에너지 상수 시스템은 보통 값의 에너지 인텐시티, 낮은 에너지 인텐시티 변동성, 그리고 정적인 물-에너지 사용량 궤적으로 특징 질 수 있다.

대구시의 상수 시스템 전체의 에너지 인텐시티는 보통의 값(0.47 kWh/m^3)을 가지며 특광역시 기준으로 부산(0.63 kWh/m^3)과 울산(0.57 kWh/m^3) 다음의 값을 나타내었다. 취수&도수 공정(0.06 kWh/m^3)은 도·자치도 기준으로 하였을 경우 낮은 값을, 정수처리&송수 공정(0.32 kWh/m^3)은 높은 값을 나타내었다. 배급수 공정(0.07 kWh/m^3)은 보통의 값에 속하였다. 그리고 에너지 인텐시티의 변동성은 전체 상수 시스템에서는 중간 범위를 나타내었고, 취수&도수 공정에서는 약간 높은 값을, 그 외 정수처리&송수 공정 및 배급수 공정에서는 낮은 그룹에 속하였다. 그러나 취수&송수 공정에서 2019년에서 2020년에 0.06 kWh/m^3 에서 0.13 kWh/m^3 으로 급격한 증가가 발생 되었다.

[그림 39]에서와 같이 대구의 2011년부터 2020년까지 10년간의 상수 시스템의 물-에너지 사용량 프로파일의 궤적 변동은 크지 않은 것을 알 수 있었으며 수직 방향으로 약하게 증가하는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 이를 통해 물-에너지 관점에서 대구의 상수 시스템은 안정화 단계로 판단되었다.

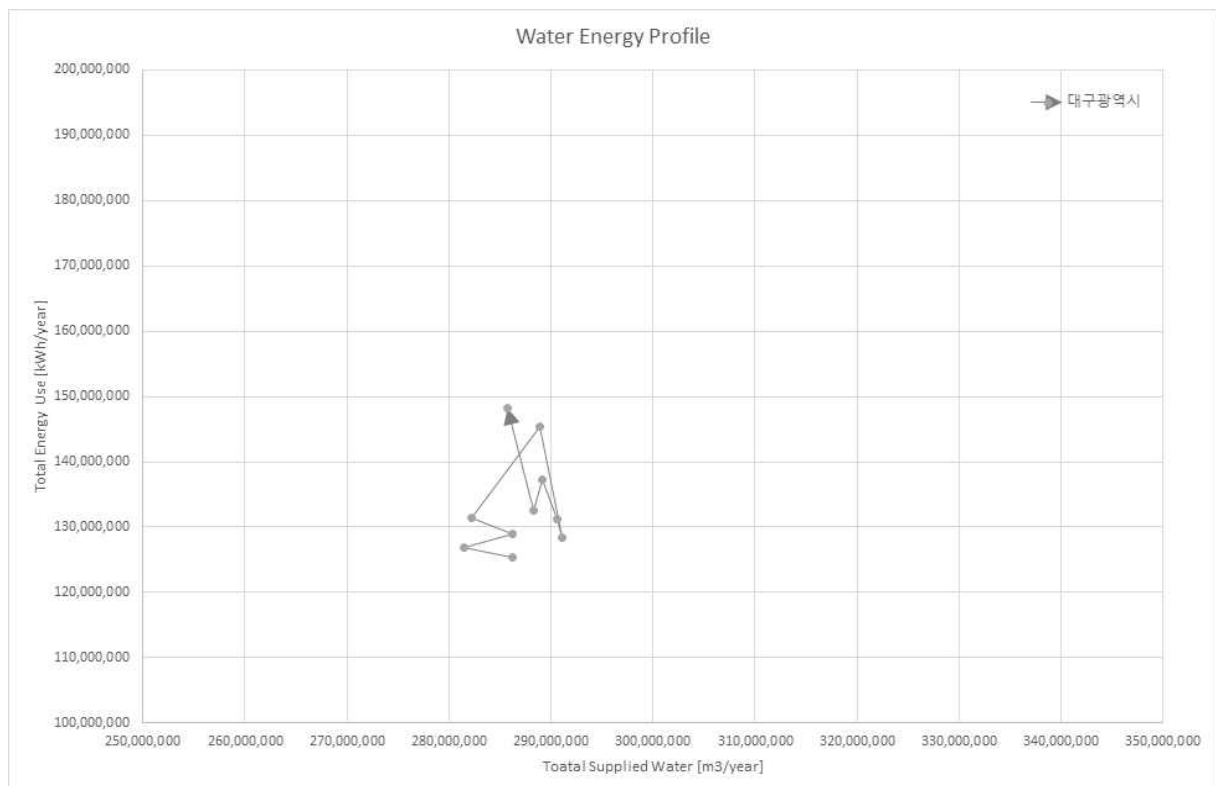


그림 39. 대구 물-에너지 사용량 프로파일

표 25. 대구 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수	
E [kWh/m ³]	상수 시스템	0.44	0.45	0.45	0.47	0.50	0.44	0.45	0.47	0.46	0.52	0.47	0.46	0.00	0.03	0.02	0.06	
	취수&도수 공정	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06	0.13	0.06	0.06	0.00	0.02	0.00	0.37	
	정수처리&송수 공정	0.30	0.31	0.30	0.32	0.36	0.31	0.32	0.35	0.31	0.30	0.32	0.32	0.31	0.00	0.02	0.01	0.07
	배급수 공정	0.061	0.064	0.065	0.070	0.067	0.067	0.063	0.067	0.067	0.076	0.076	0.068	0.067	0.000	0.005	0.005	0.07
취수& 도수	도수관 길이 [m]	42,733	41,801	41,011	41,011	42,281	40,794	37,528	37,566	39,766	39,769	40,426	40,903	3,213,225	1,793	1,837	0.04	
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	0.00019	0.00008	0.00018	0.00019	0.00019	0.00018	0.00016	0.00016	0.00018	0.00019	0.00017	0.00018	0.00000	0.00004	0.00002	0.21	
	도수관길이/ 급수인구 [m/capita]	0.017	0.008	0.016	0.016	0.017	0.016	0.015	0.015	0.015	0.016	0.015	0.015	0.016	0.000	0.003	0.001	0.17
	고도처리 시설 비율	0.69	0.69	0.69	0.72	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.00	0.01	0.01	0.01
정수처리 &송수	송수관로 길이 [m]	288,457	297,290	316,714	319,420	360,043	366,208	371,613	371,394	375,809	377,136	344,408	363,126	1,237,736	34,940	54,168	0.10	
	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.00101	0.00106	0.00111	0.00111	0.00125	0.00126	0.00128	0.00128	0.00128	0.00130	0.00132	0.00120	0.00125	0.00000	0.00012	0.00018	0.10
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capita]	0.114	0.118	0.126	0.127	0.143	0.146	0.149	0.149	0.149	0.152	0.154	0.138	0.145	0.000	0.015	0.023	0.11
	누수율 [%]	6.96	5.47	5.62	4.67	5.40	4.88	4.37	3.90	3.90	3.94	3.79	4.90	4.78	0.98	0.99	1.40	0.20
배급수	배급수 관길이 [m]	701,724	7,088,949	7,053,022	7,130,195	7,366,041	7,480,281	7,550,808	7,604,881	7,621,817	7,575,253	7,347,887	7,423,161	61,245,032	253,228	487,331	0.03	
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.026	0.026	0.026	0.026	0.027	0.026	0.026	0.026	0.000	0.001	0.001	0.03
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capita]	2.78	2.80	2.80	2.83	2.93	2.98	3.02	3.06	3.09	3.10	2.94	2.96	0.02	0.13	0.24	0.04	

대구의 상수 시스템의 에너지 인텐시티는 취수&도수 공정에서 낮은 값을 정수처리&송수 공정에서 높은 값을 나타내며 상쇄되어 전체적으로 중간 그룹에 속하는 것을 알 수 있었다. 자치도 기준으로 영향요인을 분석한 결과, 취수&송수 공정 영향요소(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구), 정수처리&송수 공정 영향요소(송수관길이/급수량, 송수관길이/급수인구), 배급수 공정 영향요소 (누수율, 배급수관길이/급수량, 배급수관길이/급수인구) 모두 낮은 값을 나타내어서 부산의 사례와 마찬가지로 자치도 분석을 통한 회기식의 적용은 어려운 것으로 판단되었으며, 에너지 인텐시티 값의 영향요인을 명확하게 도출하지는 못하였다.

에너지 인텐시티의 낮은 변동과 정적인 프로파일 궤적의 변화는 원인을 파악하기 위해 [표 26]에서와 같이 도시여건(인프라 변경, 원수 수입량, 자체취수량, 정수 수입량), 외부요인(급수인구, lpcd) 및 운영효율(누수율) 관점에서 검토하였다. 대구의 경우 원수 수입량의 변동이 궤적에 영향을 미쳐서 자체취수량을 추가로 검토하였다.

표 26. 대구 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	고도처리 도입	시설용량 감소	-	-	-	-	-
	원수수입 [m ³ /year]	74,221,956	75,897,960	73,547,380	69,022,391	78,876,228	79,552,160	70,882,988	62,413,404	81,254,808	88,767,356
	자체취수 [m ³ /year]	222,672,886	216,534,370	225,167,514	226,462,439	220,364,950	221,745,391	229,748,954	237,718,454	215,614,738	209,632,451
	정수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
외부 요인	급수인구[명]	2,525,297	2,524,026	2,522,020	2,515,798	2,512,107	2,509,849	2,500,976	2,489,156	2,467,531	2,445,503
	lpcd [liter/capita/day]	310	306	311	307	315	318	318	318	320	320
운영 효율	누수율[%]	7.0	5.5	5.6	4.7	5.4	4.9	4.4	3.9	3.9	3.8

대구지역의 취수원 및 취수시설(가창댐, 공산댐, 매곡, 문산 취수장)은 10년간 큰 변동이 없었으며, 2015년 매곡 취수장의 시설용량이 800,000톤/일에서 700,000톤/일로 소폭으로 감소하였다. 정수시설(가창, 고산, 공산, 매곡, 문산)에도 큰 변동이 없으며 2014년 공산(막여과), 매곡(전오존), 문산(전오존) 정수장에 고도처리 시설 도입하였다. 정수처리&송수 공정에서 에너지 인텐시티 값이 2014년 0.32 kWh/m³에서 2015년 0.36 kWh/m³으로 소폭 증가하는 경향을 나타냈으나, 2016년 0.31 kWh/m³의 값을 나타내어 고도처리 시설 추가에 따른 에너지 인텐시티의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

대구는 원수는 외부로부터 수입하고 있으며 정수의 수입은 없는 상황이다. 자체취수량과 원수수입량의 평균값은 각각 22,256,6216 m³/year, 75,443,663 m³/year로 전체취수량에서 원수수입량은 약 25.3%를 차지하였다. 그러나 2020년 원수수입량은 8,8767,356 m³/year으로 증가하여 전체 취수량에서 원수수입량이 차지하는 비중은 29.7%로 증가하였다. 이에

따라 대구의 취수&도수 공정의 에너지 인텐시티도 2019년 0.06 kWh/m³에서 0.13 kWh/m³으로 크게 증가하였으며, 대구의 상수 시스템 프로파일도 수직 방향으로 상승하는 것을 나타내었다.

대구 급수인구는 2011년부터 2020년까지 연평균 8,866명 감소하고 있으며 2019년과 2020년에는 각각 21,625, 22,028명으로 인구 감소폭이 크게 증가하였다. 현재 프로파일에서 인구변화에 따른 사선 방향의 감소는 확인할 수 없지만 향후 다른 영향요인이 없을 경우 인구에 의한 사선 방향의 감소 경향이 나타날 것으로 예상된다. lpcd는 310 liter/capita/day에서 320 liter/capita/day 범위의 약한 변동만 있었다. 대구의 누수율 또한 큰 변동이 없으며 소폭으로 감소하고 있는 추세이다.

대구 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링을 통해 알게 된 시사점은 아래와 같다.

- 대구 상수 시스템은 보통의 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.
- 대구 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 큰 변동이 없으며, 2020년 약한 수직 방향의 증가를 확인할 수 있었다. 이는 대구 상수 시스템이 물-에너지 관점에서 정적인 상태를 의미한다.
- 부산과 동일하게 대구지역의 에너지 인텐시티의 원인은 명확하게 규명하기는 어려웠다. 자치도의 자료를 통해 회귀분석을 한 결과는 특광역시 적용이 적합하지 않았다.
- 외부에서 수입한 취수량의 증가로 인해 대구 프로파일은 2020년에 수직 방향의 약한 증가를 나타내었다. 이를 통해 모델을 통해 제시된 도시여건 악화(외부 취수량 증가 또는 광역용수 수입량 증가)로 인한 프로파일의 수직 방향 증가의 실증사례를 제시할 수 있다.
- 대구 프로파일은 향후 인구감소로 인한 사선 방향의 감소와 취수수입량 증가로 인한 수직방향의 증가 경향을 나타낼 가능성이 크며, 향후 지속적인 모니터링이 필요하다. 또한 수질과 같은 다른 문제가 없다면 취수수입량을 줄이고 자체취수량을 늘릴 방안을 강구할 필요가 있다.

2.7.3 인천

인천의 물-에너지 상수 시스템은 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향분석(2.5절)과 [표 27], 그리고 [그림 40]에 의하면 낮은 값의 에너지 인텐시티, 낮은 에너지 인텐시티 변동성, 동적인 물-에너지 사용량 궤적으로 특징 질 수 있다.

상수 시스템 전체의 에너지 인텐시티는 약간 낮은 값(0.40 kWh/m³)을 나타내었다. 취수 & 도수 공정, 정수처리&송수 공정, 배급수 공정의 에너지 인텐시티는 각각 0.18 kWh/m³, 0.19 kWh/m³, 0.03 kWh/m³을 나타내었다. 취수&도수 공정은 자치도 기준으로 판별하였을 때 낮은 그룹에, 정수처리&송수 공정에서는 중간 그룹에 속하였다. 배급수 공정에서는 광주(0.01 kWh/m³), 울산(0.01 kWh/m³)에 이어 특광역시에서 3번째로 낮은 에너지 인텐시티를 나타내었다. 상수 시스템의 에너지 인텐시티의 변동성은 크지 않았으며, 2011년부터 2017년까지는 약하게 감소하다 2017년부터 2020년까지는 약하게 증가하는 경향을 나타내었다. 취수&도수 공정과 배급수 공정 또한 변동 또한 중간 그룹에 속하였으며, 정수처리&송수 공정의 변동성은 낮게 분석되었다. 그러나 해당 공정에서 2017년만 특별하게 낮은 값을 나타내었다.

위에 언급된 바와 같이 인천의 에너지 인텐시티의 평균값과 변동성은 낮으나, [그림 40]과 같이 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일의 궤적은 전체적으로 사선 방향의 상승의 동적인 경향을 나타내었다.

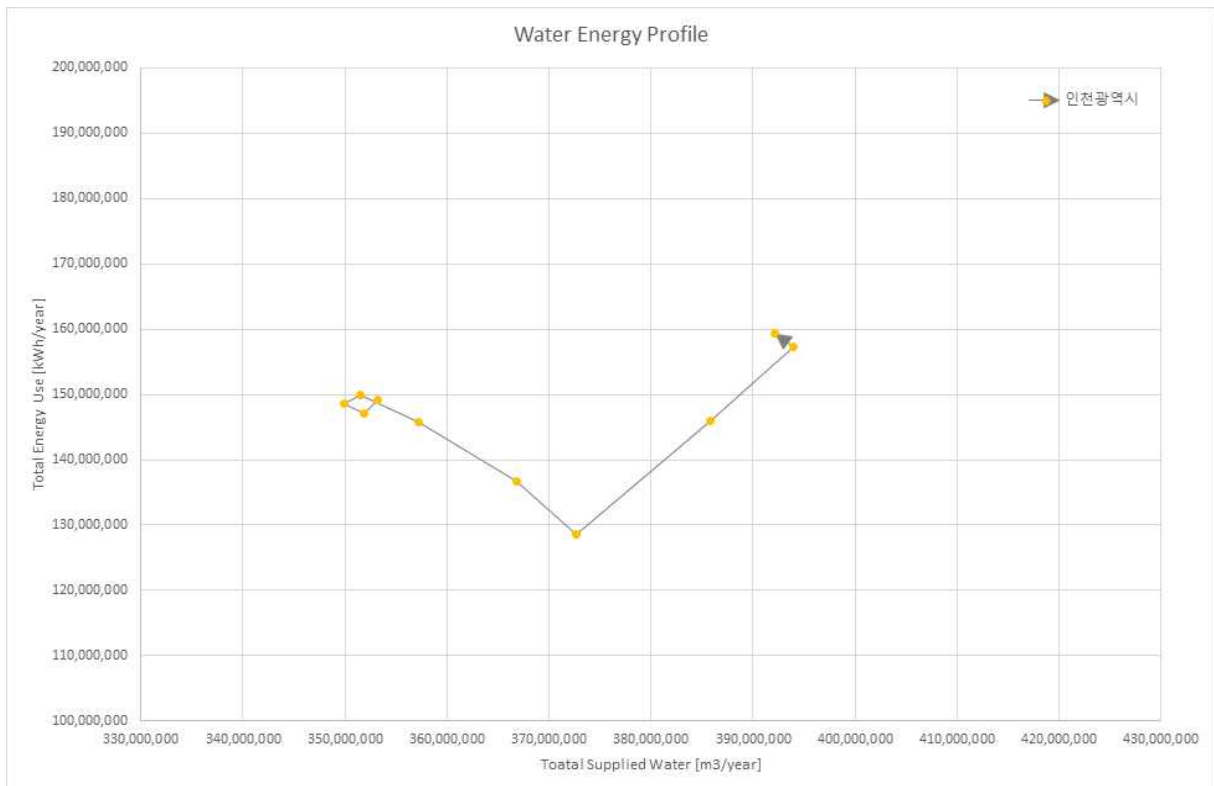


그림 40. 인천 물-에너지 사용량 프로파일

표 27. 인천 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수	
E [kWh/m ³]	상수 시스템	0.42	0.42	0.42	0.43	0.41	0.37	0.35	0.38	0.40	0.41	0.40	0.41	0.00	0.03	0.04	0.07	
	취수&도수 공정	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.15	0.17	0.15	0.17	0.17	0.18	0.18	0.00	0.02	0.03	0.10	
	정수처리&송수 공정	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19	0.14	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.00	0.02	0.01	0.10	
	배급수 공정	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024	0.027	0.032	0.033	0.032	0.032	0.032	0.028	0.027	0.000	0.004	0.007	0.13
취수& 도수	도수관 길이 [m]	92,088	90,945	76,858	78,063	81,769	78,636	78,642	78,633	78,707	77,092	81,143	78,639	31,700,655	5,630	2,798	0.07	
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	0.00056	0.00008	0.00046	0.00045	0.00047	0.00043	0.00042	0.00040	0.00040	0.00042	0.00041	0.00043	0.00000	0.00013	0.00005	0.31	
	도수관길이/ 급수인구 [m/capita]	0.033	0.008	0.027	0.027	0.028	0.027	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.025	0.026	0.000	0.006	0.000	0.25
	고도처리 시설 비율	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.31	0.06	0.00	0.02	0.13	0.00	2.09
정수처리 &송수	송수관로 길이 [m]	332,946	273,478	239,823	227,105	285,036	290,052	297,584	286,535	295,724	229,640	275,792	285,786	1,141,143,288	33,899	46,069	0.12	
	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.00094	0.00078	0.00069	0.00064	0.00080	0.00079	0.00080	0.00074	0.00075	0.00059	0.00075	0.00076	0.00000	0.00010	0.00010	0.13	
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capita]	0.119	0.096	0.083	0.078	0.097	0.098	0.100	0.096	0.099	0.077	0.094	0.097	0.000	0.012	0.012	0.13	
	누수율 [%]	9.48	8.14	6.93	6.55	6.38	5.61	5.70	5.57	5.57	7.11	8.84	7.03	6.74	1.90	1.38	2.01	0.20
배급수	배급수 관길이 [m]	5,372,854	5,588,793	5,760,057	5,879,134	6,061,888	6,211,634	6,279,467	6,483,239	6,577,459	6,812,541	6,099,708	6,136,766	22,770,224	461,238	642,470	0.08	
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.015	0.016	0.016	0.016	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.000	0.000	0.04	
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capita]	1.92	1.95	2.00	2.02	2.06	2.09	2.11	2.17	2.19	2.28	2.08	2.08	2.08	0.01	0.11	0.15	0.05

인천 상수 시스템 낮은 에너지 인텐시티의 원인을 도·자치도의 회기식을 통해 분석하는 것은 다른 특광역시와 마찬가지로 파악하기는 어려웠다. 취수&송수 공정 영향요소(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구), 정수처리&송수 공정 영향요소(송수관길이/급수량, 송수관길이/급수인구), 배급수 공정 영향요소 (누수율, 배급수관길이/급수량, 배급수관길이/급수인구) 모두 낮은 값을 나타내어서 다른 경우의 사례를 통해 영향요소를 도출하는 것은 어려운 것으로 판단되었다.

인천의 에너지 인텐시티의 값에 큰 변화는 없으나 사선 방향으로 증가하는 동적인 프로파일 궤적의 변화 원인을 파악하기 위해 [표 28]에서와 같이 도시여건(인프라 변경, 원수수입량, 자체취수량, 정수수입량), 외부요인(급수인구, Lpcd) 및 운영효율(누수율) 관점에서 검토하여 그 원인을 도출하고자 하였다. 인천의 경우 원수수입량에 크고 변동이 있어 자체취수량을 추가 조사하였다.

표 28. 인천 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	-	-	-	-	-	고도처리 도입	-
	원수수입 [m ³ /year]	192,358,800	183,529,400	185,794,300	185,251,055	188,623,421	190,140,843	190,200,708	197,590,417	204,930,451	215,103,401
	자체취수 [m ³ /year]	164,139,804	168,666,993	167,620,214	168,759,549	173,883,640	182,636,924	185,906,834	194,347,008	194,816,929	182,526,843
	정수수입 [m ³ /year]	1,684,470	2,523,075	3,603,841	2,955,414	3,360,517	3,769,418	2,353,854	1,459,826	1,464,775	1,462,930
외부 요인	급수인구[명]	2,801,671	2,844,966	2,884,226	2,914,420	2,940,926	2,965,367	2,974,416	2,986,455	2,999,152	2,981,928
	Lpcd [liter/capita/day]	345	339	332	330	333	339	343	354	360	360
운영 효율	누수율[%]	9.5	8.1	6.9	6.7	6.4	5.6	5.7	5.6	7.1	8.8

인천의 취수원 및 취수시설(강화, 길당, 백령, 풍납)과 정수시설(강화, 공촌, 길상, 남동, 백령, 부평, 수산 정수장)에 큰 변동은 없으며, 공촌 정수장에 2019년 고도정수처리시설(활성탄흡착지)을 도입하였다. 인천의 10년간 원수수입량과 자체수입량의 평균값은 각각 183,352,280 m³/year, 178,330,473 m³/year으로 원수수입량이 전체 취수량의 약 52%를 차지하였다. 전체 취수량에서 원수 수입량이 차지하는 비율은 2011년 54.0%에서 2018년 50.4%로 지속적으로 감소하였으나 그 이후 2020년 54.1%로 증가하였다. 인천 연간 인구 증가 평균값은 20,029명/년으로 세종(39,259명/년)에 이어서 두 번째로 높은 값을 나타내었다. 세종이 수도 이전 목적의 신도시임을 고려하면 인천의 인구증가율은 특광역시 중 가장 가파름을 알 수 있었다. 그러나 이와 같은 연간 인구증가는 2011년부터 2019년까지는 지속되었으나 2020년에는 인구가 17,224명이 감소되었다. Lpcd는 약 344 liter/capita/day로 큰 변동은 없었다. 이에 따라 프로파일 궤적은 인구증가의 외부요인으로 인해 전체적으로는 사선 방향의 증가를 확인할 수 있었으며, 2020년에는 사선 방향의 증가가 둔화한 것으로 판단된다. 누수율은 2011년 9.48%에서 2016년 5.61%로 지속적으로

감소하였으나 그 이후 점차적으로 악화되어 2020년에는 8.84%로 증가되었다. 인천의 경우 프로파일 궤적은 인구증가에 의해 사선 방향의 증가가 주요 경향이었으며 2018년부터 원수수입량 증가, 2016년부터 누수율 증가가 궤적에 영향을 미친 것으로 판단된다.

인천의 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링을 통해 알게 된 시사점은 아래와 같다.

- 인천의 상수 시스템은 낮은 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.
- 인천의 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 10년간 전체적으로 사선방향의 증가 경향을 나타내었다. 이는 인천의 상수 시스템이 물-에너지 관점에서 동적 상태임을 의미한다.
- 부산, 대구와 유사하게 인천의 에너지 인텐시티의 원인은 명확하게 규명하기는 어려웠다. 자치도의 자료를 통해 회귀분석을 한 결과는 특광역시에 적용이 적합하지는 않다.
- 인구의 지속적인 증가가 주요 원인으로 사선 방향의 증가를 나타내었으며, 그 경향은 2020년 인구가 유출되면서 변화하기 시작하였다. 그리고 2018년 원수수입량 증가, 2016년 누수율 증가가 해당 경향에 다른 변화를 준 것으로 판단된다. 이와 같은 인천 사례를 통해 인구증가에 의한 프로파일의 사선 방향 증가 실증사례를 제시할 수 있다.
- 인천은 상수 시스템은 동적이며 이 경향은 인구변화, 원수수입량 증가, 누수율에 기인하고 있으며, 지속적으로 모니터링이 필요하다. 또한, 다른 문제가 없을 경우 자체 취수량을 증가시키는 것이 필요하다. 그리고 에너지 인텐시티의 왜곡을 피하기 위해 누수율을 감소시키는 노력이 필요하다.

2.7.4 광주

광주의 상수 시스템은 2.5절의 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향분석과 [표 29], 그리고 [그림 41]에 따라 매우 낮은 값의 에너지 인텐시티, 높은 에너지 인텐시티 변동성, 그리고 전체적으로 정적이며 단기간(2016년~2017년) 동적인 프로파일 궤적으로 특정 지을 수 있다.

광주 상수 시스템의 에너지 인텐시티 평균값은 0.22 kWh/m^3 로 모든 특광역시 중 가장 낮은 값을 나타내었다. 취수&도수 공정은 0.19 kWh/m^3 로 낮은 값을 가졌으며, 정수처리 & 송수 공정, 배급수 공정에서는 각각 0.02 kWh/m^3 , 0.006 kWh/m^3 으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 상수 시스템의 에너지 인텐시티의 변동은 큰 것으로 분석되었으며 이는 2017년 급격한 변동에 기인하였다. 해당 기간 동안 정수처리&송수 공정 및 배급수 공정에는 큰 변화가 없었으나 취수&도수 공정에서 2017년에 에너지 인텐시티에 큰 변화가 있어 취수&도수 공정의 2017년 변화에 대한 검토가 필요하였다.

[그림 41]에서와 같이 광주의 프로파일 궤적은 정적(2011년~2016년), 단기간 동적(2016년~2017년), 정적(2017년~2018년)의 경향을 나타내었다. 그리고 동적인 기간의 궤적이동은 수직 방향으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

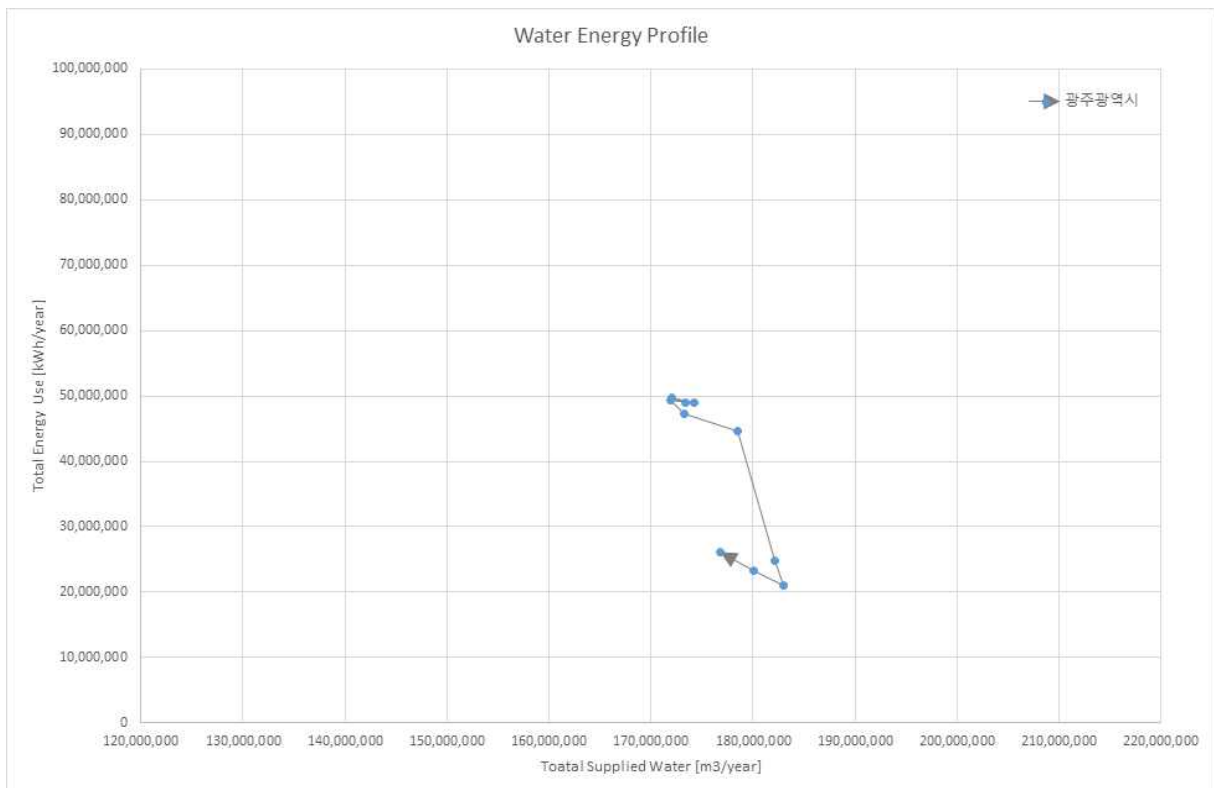


그림 41. 광주 물-에너지 사용량 프로파일

표 29. 광주 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수	
E [kWh/m ³]	상수 시스템	0.28	0.29	0.28	0.29	0.27	0.25	0.14	0.12	0.13	0.15	0.22	0.26	0.01	0.08	0.14	0.35	
	취수&도수 공정	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.22	0.10	0.08	0.10	0.11	0.19	0.23	0.01	0.08	0.15	0.41	
	정수처리&송수 공정	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11	
	배급수 공정	0.005	0.005	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.000	0.001	0.001	0.117
취수& 도수	도수관 길이 [m]	52,443	52,443	56,855	55,947	55,947	4,465	1,427	40,362	40,362	40,362	40,061	46,403	48,147,694	20,692	14,709	0.52	
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	0.00049	0.00008	0.00054	0.00053	0.00053	0.00004	0.00001	0.00037	0.00037	0.00038	0.00034	0.00039	0.00000	0.00000	0.00021	0.00037	0.63
	도수관길이/ 급수인구 [m/capita]	0.036	0.008	0.038	0.038	0.038	0.003	0.001	0.027	0.027	0.027	0.024	0.027	0.000	0.000	0.015	0.024	0.61
	고도처리 시설 비율	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/ 0!	0.14
정수처리 &송수	송수관로 길이 [m]	43,353	49,775	46,092	46,276	45,756	55,720	57,098	61,551	61,345	61,345	52,831	52,748	53,938,644	7,342	14,145	0.14	
	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.00025	0.00029	0.00026	0.00027	0.00026	0.00031	0.00031	0.00034	0.00034	0.00034	0.00035	0.00030	0.00030	0.00000	0.00004	0.00007	0.12
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capita]	0.030	0.034	0.031	0.031	0.031	0.037	0.038	0.042	0.042	0.041	0.042	0.036	0.036	0.000	0.005	0.010	0.14
	누수를 [%]	11.89	11.67	11.61	10.52	10.12	9.86	10.69	8.32	7.60	5.18	9.75	10.32	4.54	2.13	2.67	0.22	
배급수	배급수 관길이 [m]	5,185,849	3,631,258	3,685,421	3,677,769	3,745,961	3,787,353	3,777,910	3,880,989	3,884,400	3,930,685	3,915,760	3,782,632	20,988,265,1	456,002	170,491	0.12	
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.030	0.021	0.021	0.021	0.022	0.021	0.021	0.021	0.022	0.022	0.022	0.021	0.000	0.003	0.000	0.12	
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capita]	3.53	2.46	2.49	2.47	2.52	2.55	2.55	2.59	2.63	2.67	2.65	2.55	0.10	0.32	0.12	0.12	

광주의 상수 시스템 에너지 인텐시티가 매우 낮은 값을 나타내는 것은 정수처리·송수 공정 및 배급수 공정에서 에너지의 사용량이 거의 없기 때문인 것으로 분석되었다. 그러나 정수처리·송수 공정의 에너지 인텐시티 값(0.02 kWh/m³)은 매우 낮은 값이며 입력의 오류일 수 있다. 그리고 배급수 또한 마찬가지로 매우 낮은 값(0.006 kWh/m³)을 나타내었으며, 이는 광주의 지형이 평평하여 많은 정수가 배수지가 아닌 광주 정수장에서 직접 사용자에게 공급되며 배수지 후단에서는 대부분 자연유하 방식으로 이송되기 때문이다. 그러나 입력자료의 정확성에 관한 확인은 필요하다. 광주의 경우 앞에서 논의된 부산, 대구, 인천의 경우와 마찬가지로 도·자치도를 통해 도출된 회기식을 통한 주요 영향 원인 규명은 어려운 것으로 판단되었다. 취수·송수 공정 영향요소(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구), 정수처리·송수 공정 영향요소(송수관길이/급수량, 송수관길이/급수인구), 배급수 공정 영향요소 (누수율, 배급수관길이/급수량, 배급수관길이/급수인구) 모두 낮은 값을 나타내어 경향과는 일치하였으나 대부분의 특광역시는 모든 영향요소에서 도·자치도보다 낮은 값들을 형성하여서 영향요인을 규명하였다고 판단하기는 어렵다.

앞에서 논의된 바와 같이 광주 프로파일의 단기간(2016년~2017년) 수직 방향으로 감소하는 동적 거동의 원인을 규명하기 위하여 [표 30]에서와 같이 도시여건(인프라 변경, 원수 수입량, 자체취수량, 정수 수입량), 외부요인(급수인구, Lpcd) 및 운영효율(누수율) 관점에서 검토하여 그 원인을 도출하고자 하였다.

표 30. 광주 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	--		정수장 증설, 도수관로 개선	-	-	-	-
	원수수입 [m ³ /year]	66,963,300	69,076,818	70,629,770	69,386,105	69,987,181	75,574,550	71,261,190	77,344,940	75,100,630	77,357,010
	자체취수 [m ³ /year]	107,335,666	105,161,579	106,086,426	104,729,167	105,196,102	104,825,145	109,283,905	108,163,576	106,318,294	102,431,140
외부 요인	정수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	7,921	3,574,123	9,884	9,884	10,072
	급수인구[명]	1,469,466	1,476,306	1,481,922	1,486,976	1,487,423	1,486,409	1,483,264	1,480,864	1,479,133	1,470,417
운영 효율	Lpcd [liter/capita/day]	323	319	322	317	319	329	336	338	333	329
	누수율[%]	11.9	11.7	11.6	10.6	10.1	9.9	10.7	8.3	7.6	5.2

광주의 취수원과 취수 시설(동북, 제2수원, 제4수원지)은 10년간 동일 하나 2016년 7월 18일 동북 도수관로 시설개량을 통해 동북계통 자연유하식 도수터널을 준공하였다. 이에 따라 동북취수장은 기존의 가압방식에서 자연유하식으로 변경되었으며 도수과정에 필요한 에너지도 감소하게 되었다. 이는 에너지 효율 관점에서 시스템 개선을 통한 도시여건 개선이며, 이를 통해 2016년에서 2017년 광주 프로파일의 수직 방향의 감소가 발생한 것으로 판단된다. 정수시설(각화, 덕남, 용역)에 큰 변동은 없으며, 2016년 용연 정수장에서 시설용량 증설이 있었다. 광주는 전체 취수량에서 원수 수입량이 차지하는 비율은 10년간

약 40.5%이었으며 해당 비율은 지속적으로 증가하여 2020년 약 43.0%로 증가하였다. 따라서 도시여건은 지속적으로 악화되고 있다. 정수의 수입은 2016년부터 시작되었으나 그 양은 미미한 실정이다. 급수인구는 2011년부터 2014년까지는 소폭의 증가 그리고 2015년부터 2020년까지는 소폭의 감소가 있었으며 전체기간 동안 큰 변동은 없었다. 2010년간 광주의 Lpcd는 327 liter/capita/day로 큰 변동이 없는 것으로 파악되었다. 광주시의 누수율은 2011년부터 2017년까지 10% 이상 값을 일정하게 유지하였으나, 2018년부터 지속적으로 감소하여 2020년에는 5.18%에 이르렀다. 광주의 2016년까지의 프로파일 궤적의 거동은 인구증가가 2017년 이후 궤적은 인구감소, 누수율 감소, 원수수입량 증가 등이 영향을 미친 것으로 판단된다.

광주의 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링을 통해 알게 된 시사점은 아래와 같다.

- 광주의 상수 시스템은 매우 낮은 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.
- 광주 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 안정화(2011년~2016년), 단기 수직 방향의 감소(2016년~2017년), 안정화(2017년~2018년)의 경향을 나타내었다. 그러나 안정화된 기간에도 약한 궤적이동의 방향성은 나타났다.
- 광주의 경우 부산, 대구, 인천과 마찬가지로 에너지 인텐시티의 원인은 명확하게 규명하기는 어려웠다. 자치도의 자료를 통해 회귀분석을 한 결과는 특광역시에 적용이 적합하지는 않는다.
- 시스템 개선(동북 도수 공정을 가압에서 자연유하로 변경)을 통한 도시여건 향상이 상수 시스템 궤적을 수직 방향으로 감소하게 한 것으로 판단된다. 이를 같은 광주 사례를 통해 시스템 개선에 의한 프로파일의 수직 방향 감소 실증사례를 제시할 수 있다. 또한, 누수율 감소에 의해 수평 방향의 감소와 원수 수입량 증가로 인한 수직 방향의 증가가 2017년부터 2020년의 프로파일 궤적에 영향을 준 것으로 판단된다.
- 인천은 상수 시스템은 단기간 동적인 모습을 나타내었고 나머지 기간에는 정적이었다. 타 광역지자체는 시스템 개선을 통해 도시 상수 시스템을 개선한 가장 모범적인 사례이며, 광주 사례를 벤치마킹하여 시스템의 개선 방향을 검토할 필요가 있다. 그리고 현재 누수율 감소, 인구감소, 원수 수입량 증가에 따른 변동을 지속적으로 모니터링할 필요가 있다.

2.7.5 대전

대전의 상수 시스템은 낮은 에너지 인텐시티, 높은 에너지 인텐시티 변동성, 그리로 단기간 변동(2014년~2015년, 2015년~2016년, 2019년~2020년)을 포함한 동적인 프로파일 궤적으로 특정 지을 수 있다.

[표 31]에서와 같이 대전의 상수 시스템 에너지 인텐시티는 0.30 kWh/m^3 으로 광주(0.22 kWh/m^3) 다음으로 특광역시에서 2번째로 낮은 값을 나타내었다. 취수&도수 공정, 정수처리&송수 공정, 배급수 공정의 에너지 인텐시티 값은 0.22 kWh/m^3 , 0.04 kWh/m^3 , 0.04 kWh/m^3 로 모두 자치도 기준으로 판단하였을 경우 낮은 그룹에 속하였다. 그러나 사분위수 기준으로 검토한 결과 대전 상수 시스템의 에너지 인텐시티 변동성은 약간 높은 편이었으며 증가(2011년~2015년), 감소(2015년~2019년), 증가(2020년)의 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 2015년과 2020년의 에너지 인텐시티가 다른 연도에 비해 높은 값을 나타내는 것에 기인하였다. 취수&도수 공정의 변동성은 낮은 편이었지만 2015년에만 특별하게 높은 값(0.27)을 나타내었다. 정수처리&송수 공정에서는 2020년에 특별히 높은 값(0.10)을 나타내었다. 배급수 공정의 변동성은 중간 범위에 속하였다.

[그림 42]에서와 같이 대전의 프로파일 궤적은 2014년~2015년, 2015년~2016년, 2019년~2020년에 큰 변화가 있었다. 이는 앞에서 논의된 바와 같이 2015년 취수&도수 공정의 변동, 2020년 정수처리&송수 공정의 변동에 기인하는 것으로 판단된다.

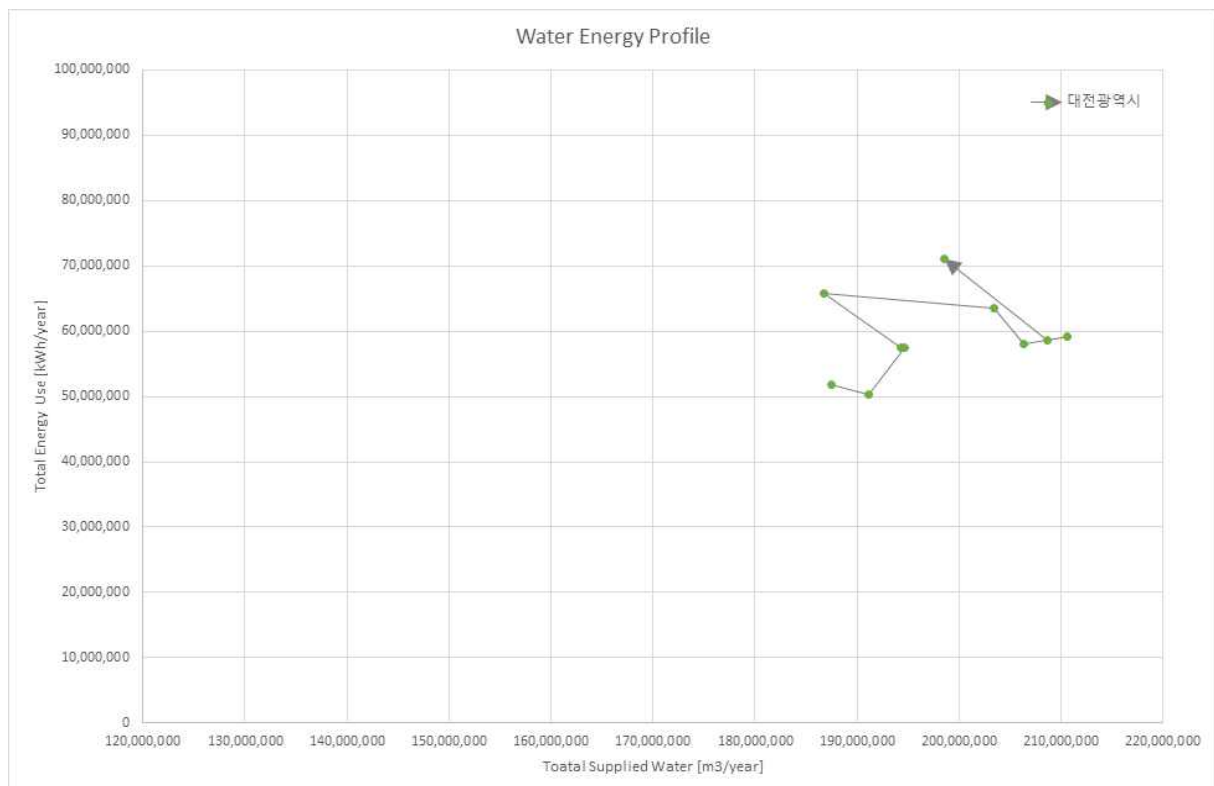


그림 42. 대전 물-에너지 사용량 프로파일

표 31. 대전 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수	
E [kWh/m ³]	상수 시스템	0.28	0.26	0.30	0.30	0.35	0.31	0.28	0.28	0.28	0.36	0.30	0.29	0.00	0.03	0.03	0.11	
	취수&도수 공정	0.21	0.21	0.23	0.23	0.27	0.22	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.00	0.02	0.02	0.09	
	정수처리&송수 공정	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.10	0.04	0.04	0.00	0.02	0.01	0.55
취수& 도수	배급수 공정	0.029	0.029	0.033	0.036	0.051	0.053	0.029	0.030	0.030	0.031	0.030	0.035	0.031	0.000	0.009	0.005	0.26
	도수관 길이 [m]	19,347	19,347	19,347	23,115	23,115	23,115	23,115	23,115	23,115	23,115	23,115	21,985	23,115	3,312,826	1,820	2,826	0.08
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	0.00010	0.00008	0.00010	0.00012	0.00012	0.00011	0.00011	0.00011	0.00011	0.00011	0.00012	0.00011	0.00011	0.00000	0.00001	0.00001	0.13
정수처리 &송수	도수관길이/ 급수인구 [m/capita]	0.013	0.008	0.013	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.016	0.014	0.015	0.000	0.002	0.002	0.17	
	고도처리 시설 비율	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.08	0.08	0.03	0.00	0.00	0.04	0.08	1.29	
	송수관로 길이 [m]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
배급수	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capita]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	누수율 [%]	6.45	7.11	7.18	5.82	4.63	3.28	3.40	3.07	2.04	2.04	1.66	4.46	4.02	4.26	2.06	3.17	0.46
배급수	배급수 관길이 [m]	4,289,374	3,785,674	3,815,808	3,774,542	3,828,523	3,889,786	3,855,431	3,891,466	3,971,791	3,945,683	3,918,810	3,910,631	3,910,631	22,662,112	149,254	134,010	0.04
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.023	0.020	0.020	0.020	0.021	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.020	0.020	0.020	0.000	0.001	0.001	0.06
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capita]	2.81	2.47	2.47	2.44	2.50	2.54	2.60	2.61	2.66	2.67	2.58	2.57	0.01	0.12	0.17	0.04	

대전 상수 시스템의 에너지 인텐시티가 낮은 것은 취수&도수, 정수처리&송수, 배급수 모든 공정에서 낮은 에너지 인텐시티를 나타내기 때문이었다. 대전의 경우는 모든 영향요소(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구, 송수관길이/급수량, 송수관길이/급수인구, 누수율, 배급수관길이/급수량, 배급수관길이/급수인구)가 도·자치도를 기준으로 낮은 값을 나타내어 경향에 일치하였다. 그러나 이전에 언급된 특광역시들도 모두 낮은 값을 나타내는 경향을 보여 해당 영향요소를 통해 에너지 인텐시티의 높고 낮음을 판단하기는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

대전 프로파일의 단기간(2014년~2015년, 2015년~2016년, 2019년~2020년) 동적 거동을 분석하기 위해 [표 32]와 같이 도시여건(인프라 변경, 원수 수입량, 정수 수입량), 외부요인(급수인구, Lpcd), 및 운영효율(누수율)을 검토하였다.

표 32. 대전 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	-	-	고도처리 도입	-	-	-	-
	원수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	정수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
외부 요인	급수인구[명]	1,526,532	1,535,095	1,544,418	1,545,626	1,533,553	1,529,882	1,518,400	1,506,903	1,492,844	1,479,645
	Lpcd [liter/capita/day]	337	341	345	344	334	364	372	383	383	368
운영 효율	누수율[%]	6.4	7.1	7.2	5.7	4.6	3.3	3.4	3.1	2.0	1.7

대전의 취수원과 취수시설(삼정, 중리)는 변동이 없었으며, 정수시설(송촌, 신탄진, 월평)에 큰 변동은 없었으며, 2016년 송촌정수장에 고도정수처리($Q = 100,000 \text{ m}^3$)를 도입하였다. 그리고 대전은 원수나 정수수입 없이 자체취수량과 정수량을 통해 도시 사용자들에게 용수를 공급하고 있다. 대전의 인구는 2013년까지 지속적으로 증가하다 2014년부터 증가세가 둔화되어 2015년부터는 인구가 유출되었다. 이는 대전이 2.7.7절에서 논의될 세종과 인접하고 있어 세종으로 인구가 유출되었기 때문이다. 그리고 Lpcd의 변동은 타 도시에 비해 큰 편이며 2016년에는 약 30.8% 증가, 2020년에는 15.4% 감소를 보여주었다. 그리고 대전시의 누수율은 2011년부터 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이와같이 대전의 상수 시스템은 인구, Lpcd, 누수율 등에 변동은 있으나 이를 통해 단기간 궤적 변동을 설명하기는 어렵다.

대전시의 상수도통계 입력자료를 검토한 결과 [표 33]에서와 같이 취수장 연간전력사용량은 연평균 44,051,123 kWh/year이었는데 2015년에는 50,987,520 kWh/year로 평균보다 약 15.1%가 높은 값이 입력되었다. 정수처리&송수 공정 연간 에너지 사용량도 2020년에 20,803,548 kWh/year로 평균값 8,291,346 kWh/year에 비해 150.9%가 높은 값을 기록하였다. 이에 따라 2015년 취수&도수 공정 연간전력 사용량과 2020년 정수처리&송수 공정

연간전력 사용량의 자료 기입 시 오류가 발생하였을 가능성이 있으며, 추후 지속적으로 해당 부분 입력자료를 모니터링 할 필요가 있다.

표 33. 대전시 상수 시스템 공정(취수&도수, 정수처리&송수) 연간 에너지 사용량

항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균
취수&도수 공정 연간전력 사용량 kWh/year	40,011,704	38,426,480	44,884,424	45,159,985	50,987,520	45,191,375	43,646,352	44,360,799	43,673,616	44,168,976	44,051,123
정수처리&송수 공정 연간전력 사용량 kWh/year	6,319,700	6,325,269	6,255,398	5,342,457	5,147,850	7,528,067	8,306,864	8,415,985	8,468,324	20,803,548	8,291,346

대전의 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링의 시사점은 아래와 같다.

- 대전의 상수 시스템은 매우 낮은 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.
- 광주 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 단기간(2014년~2015년, 2015년~2016년, 2019년~2020년)의 큰 궤적변화가 자주 나타났다.
- 대전의 경우 부산, 대구, 인천, 광주과 마찬가지로 에너지 인텐시티의 원인은 명확하게 규명하기는 어려웠다. 자치도의 자료를 통해 회귀분석을 한 결과는 특광역시에 적용이 적합하지는 않는다.
- 입력자료의 오류가 단기간 에너지 인텐시티 변동의 주요 원인으로 판단된다. 그러나 해당기간의 궤적은 입력자료의 오류에 따라 수직 방향의 상승이 아닌 11시 방향의 경향을 나타내었다. 이는 입력자료의 오류와 함께 다른 영향요소(급수인구 Lpcd, 누수율 등)이 영향을 미친 것으로 판단된다.
- 대전은 동적인 프로파일 궤적은 10년간 나타내었다. 해당 사항의 원인을 명확하게 규명하기 위해 지속적인 모니터링과 입력자료의 신뢰성 확보가 필요하다.

2.7.6 울산

2.5절, [표 34], [그림 43]에서 나타난 바와 같이 울산의 상수 시스템은 높은 에너지 인텐시티, 높은 에너지 인텐시티 변동, 지속적인 사선 방향의 상승 궤적, 단기간(2019년~2020년) 수직 방향의 급격한 상승으로 특징지을 수 있다.

울산의 상수 시스템 에너지 인텐시티는 우리나라 특별시·광역시 중 부산(0.63 kWh/m^3) 다음으로 높은 0.57 kWh/m^3 의 값을 나타내었다. 취수&도수 공정에서는 낮은 그룹에 속하였으나, 정수처리&송수 공정에서는 가장 높은 값을 나타내었다. 배급수 공정에서는 광주와 함께 가장 낮은 값을 나타내었다. 에너지 인텐시티의 변동성을 검토한 결과 상수 시스템의 에너지 인텐시티 변동성은 매우 큰 것으로 나타났다. 2011년부터 2016년까지 에너지 인텐시티의 변동은 없었으며, 2016년~2019년 사이 소폭의 증가가 확인되었다. 그리고 2019년에서 2020년사 매우 급격한 변화가 관찰되었다. 이는 2020년 취수&도수 공정과 배급수 공정에서 에너지 인텐시티의 급격한 증가에 의한 것으로 제시되었다.

울산의 프로파일은 [그림 43]에서와 같이 연도가 지날수록 진폭이 발생 되었지만 2019년까지는 사선 방향의 증가 경향을 확인할 수 있었다. 그리고 2020년 수직 방향의 급격한 궤적변화가 나타났다.

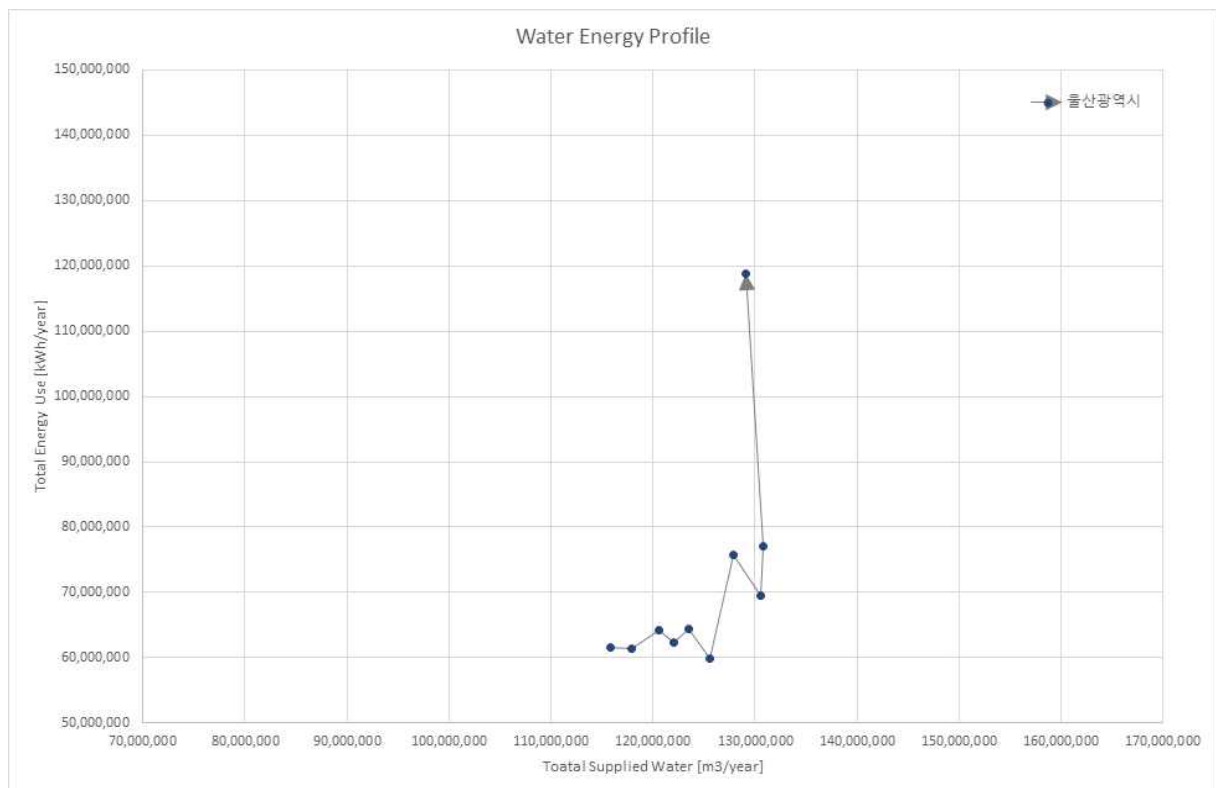


그림 43. 울산 물-에너지 사용량 프로파일

표 34. 울산 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준 편차	IQR	변동 계수
E [kWh/m ³]	상수 시스템	0.53	0.52	0.53	0.51	0.52	0.48	0.59	0.53	0.59	0.92	0.57	0.53	0.02	0.13	0.05	0.22
	취수&도수 공정	0.14	0.14	0.17	0.13	0.13	0.08	0.18	0.11	0.15	0.37	0.16	0.14	0.01	0.08	0.03	0.48
	정수처리&송수 공정	0.38	0.36	0.35	0.36	0.37	0.38	0.40	0.41	0.42	0.42	0.38	0.38	0.00	0.03	0.04	0.07
	배급수 공정	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.012	0.000	0.001	0.039	0.000	3.14
취수& 도수	도수관 길이 [m]	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,872	1,872	1,872	1,872	1,559	1,350	72,662	270	522	0.17
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	0.00003	0.00008	0.00003	0.00002	0.00002	0.00002	0.00006	0.00003	0.00004	0.00003	0.00004	0.00003	0.00000	0.00002	0.00001	0.49
	도수관길이/ 급수인구 [m/capita]	0.001	0.008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000	1.06
	고도처리 시설 비율	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	0.80	0.04	0.21	0.40	0.26
정수처리 &송수	송수관로 길이 [m]	145,540	145,540	148,420	148,420	151,429	156,359	168,140	168,140	170,417	170,417	157,282	153,894	116,530,837	10,795	19,720	0.07
	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.00126	0.00123	0.00123	0.00120	0.00123	0.00125	0.00132	0.00129	0.00130	0.00132	0.00126	0.00125	0.00000	0.00004	0.00007	0.03
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capita]	0.130	0.128	0.129	0.127	0.129	0.133	0.144	0.145	0.148	0.150	0.136	0.131	0.000	0.009	0.016	0.07
	누수율 [%]	8.28	8.32	7.46	7.68	6.91	6.72	8.30	9.58	9.70	8.51	8.15	8.29	0.99	0.99	0.95	0.12
배급수	배급수 관길이 [m]	2,571,842	2,630,618	2,709,056	2,797,161	2,900,347	2,994,161	3,088,086	3,190,458	3,266,746	3,355,224	2,950,371	2,947,254	749,636,782	273,306	433,783	0.09
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.022	0.022	0.022	0.023	0.023	0.024	0.024	0.024	0.025	0.026	0.024	0.024	0.000	0.001	0.002	0.05
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capita]	2.29	2.31	2.35	2.39	2.47	2.55	2.65	2.76	2.83	2.94	2.55	2.51	0.05	0.23	0.37	0.09

울산의 상수 시스템의 에너지 인텐시티가 높은 것은 정수처리&송수 공정에서의 높은 값에 기인함을 알 수 있었다. 그리고 최근(2020년) 취수&도수 공정과 배급수 공정에서 높은 값이 주요 원인이었다. 그러나 다른 특광역시의 경우와 마찬가지로 [표 35]에서와 같이 명확한 영향요소(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구, 송수관로길이/급수량, 송수관로길이/급수인구, 누수율, 배급수 관길이/급수량, 배급수 관길이/급수인구)를 도출하기는 어려웠다.

울산 프로파일의 사선 방향의 지속적인 상승과 2020년 단기간의 수직 방향의 궤도 변화의 원인을 도출하기 위해 [표 35]에서와 같이 인프라 변경사항, 원수수입량, 정수수입량, 급수인구, Lpcd, 누수율을 검토하였다.

표 35. 울산 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	고도처리 도입	-	고도처리 도입	-	-	-	-
	원수수입 [m ³ /year]	68,991,945	63,796,824	80,677,794	65,000,857	70,839,272	57,768,881	99,275,424	76,711,194	86,416,125	76,018,059
	정수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
외부 요인	급수인구[명]	1,123,738	1,137,252	1,152,779	1,168,939	1,176,323	1,173,964	1,165,337	1,157,532	1,152,794	1,139,613
	lpcd [liter/capita/day]	283	284	286	286	288	293	301	309	311	310
운영 효율	누수율[%]	8.3	8.3	7.5	7.8	6.9	6.7	8.3	9.6	9.7	8.5

울산의 인프라 변동을 살펴본 결과 취수원 및 취수시설(회야댐)은 변동이 없었으며, 정수 시설(천상, 회야) 또한 큰 변동이 없었다. 다만 2014년 회야와 2016년 천상에 고도처리설비가 도입되었다. 울산은 10년 동안 74,549,638 m³/year의 원수를 수입하고 있었으며 수입량의 변동이 다른 특광역시에 비해 매우 큰편 이었다. 정수의 수입량은 없는 것으로 조사되었다. 울산의 급수인구는 2011년부터 2014년까지는 증가하였으나 2015년 이후 인구는 감소하였다. Lpcd의 경우 2011년 283 litres/capita/day에서 310 litres/capita/day으로 지속적으로 증가하였으며 연평균 Lpcd의 증가량(3.08%)은 특광역시 중 가장 높은 값을 나타내었다. 이와 같은 Lpcd의 지속적인 증가로 울산 프로파일의 사선 방향 증가가 나타난 것으로 판단되다. 울산의 연평균 누수율을 8.16%로 10년간 거의 일정한 값을 나타내었다.

2020년 울산 프로파일의 수직 방향의 급격한 증가는 입력자료의 현행화로 판단되었다. [표 36]에서와 같이 상수도통계상의 울산의 도수&취수 공정에서 연간 에너지 사용량은 2011년부터 2019년까지 없는 것으로 입력되었다. 그러나 2020년 해당 값은 30,474,034 kWh/year로 나타났다. 비슷하게 배급수 공정에서도 2011년부터 2019년까지 연간 에너지 사용량은 12,897 kWh/year에 불과하였으나 2020년은 15,774,238 kWh/year로 매우 크게 증가하였다. 해당기간 동안 자체취수량, 원수 및 침전수 수입량에 큰 변동이 없어, 2020년 울산의 상수 시스템이 크게 변동된 것이 아니라 과거에 누락된 값을 현행화한 것으로 추

측되며, 2021년 이후 해당 값의 지속적인 모니터링이 필요하다.

표 36. 울산 상수 시스템 공정(취수&도수, 배급수) 연간 에너지 사용량

항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균
취수&도수 공정 연간전력 사용량 kWh/year	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,474,034	3,047,403
배급수 공정 연간전력 사용량 kWh/year	11,668	11,994	11,906	13,043	13,043	13,040	13,585	13,568	14,225	15,774,238	1,589,031

울산의 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링을 통해 알게 된 시사점은 아래와 같다.

- 울산의 상수 시스템은 매우 높은 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.
- 울산 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 10년간 지속적으로 사선 방향의 증가 경향을 나타내었으며 최근 단기간(2019년~2020년) 수직 방향으로 급격한 증가세를 나타내었다.
- 울산의 경우 타 특광역시와 마찬가지로 에너지 인텐시티의 원인은 명확하게 규명하기는 어려웠다. 자치도의 자료를 통해 회귀분석을 한 결과는 특광역시에 적용이 적합하지는 않는다.
- 울산 프로파일의 사선 방향의 증가는 인구증가가 아닌 Lpcd의 지속적인 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 이는 외부요인(Lpcd)에 의한 사선방향 증가의 실증사례가 될수 있다. 2019년~2020년의 수직 방향의 증가는 상수 시스템의 통계자료의 현행화로 인해 발생 된 것으로 판단된다.
- 울산의 에너지 인텐시티는 2020년 입력자료의 현행화 이전에 특광역시에서 매우 높은 값을 나타내었으며, 현행화 이후에는 더욱더 높은 값을 나타내었다. 따라서 울산 상수 시스템의 높은 에너지 인텐시티의 원인을 명확하게 규명할 필요가 있으며, 이를 통해 개선이 필요하다. 그리고 2020년 취수&도수 공정과 배급수 공정의 연간 에너지 사용량에 대한 검토와 해당 항목에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

2.7.7 세종

2.5절의 상수 시스템 에너지 인텐시티 경향분석과 [표 37], 그리고 [그림 44]에 따르면 세종의 중간 그룹의 에너지 인텐시티, 높은 변동성, 그리고 지속적인 사선 방향의 상승하는 동적인 프로파일 궤적으로 특징지을 수 있다.

세종시의 상수 시스템 에너지 인텐시티 값은 0.49를 나타내 내어 광역시 중 부산, 울산 다음으로 높은 값을 나타내었으며, 이는 도·자치도 기준으로 중간 그룹에 속하였다. 취수 & 도수 공정의 에너지 인텐시티는 낮은 그룹에 속하였으며, 정수처리 & 송수 공정, 배급수 공정에서는 중간 그룹에 속하였다.

상수 시스템의 에너지 인텐시티는 2012년부터 2014년까지 증가하는 경향을 나타내었고 2014년에서 2018년 사이에서는 일정범위를 유지하였으며, 그 이후(2018년~2020년)에는 감소하는 경향을 나타내었다. 취수 & 도수 공정에서는 2012년 각각 0의 값을 나타내었으며 2013년까지 증가 후 일정하게 유지되었다. 그리고 2018년은 일시적으로 높은 값을 나타내었는데 이러한 현상은 해당년도 자치도에서도 동일하게 나타났다. 정수처리 & 송수 공정에서도 2012년부터 2013년까지 증가하였으며 2013년 이후는 일정 범위를 유지하였다. 해당 공정에서는 2018년 값이 낮은 값을 나타내었다. 배급수 공정에서는 2012년부터 2014년까지 증가하였으며 그 이후 감소하는 경향을 나타내었다.

[그림 44]에서와 같이 세종의 프로파일의 궤적은 원점에서 시작되어서 사선 방향으로 지속적으로 증가되는 신도시 건설 이후 나타나는 전형적인 모습을 보여주었다.

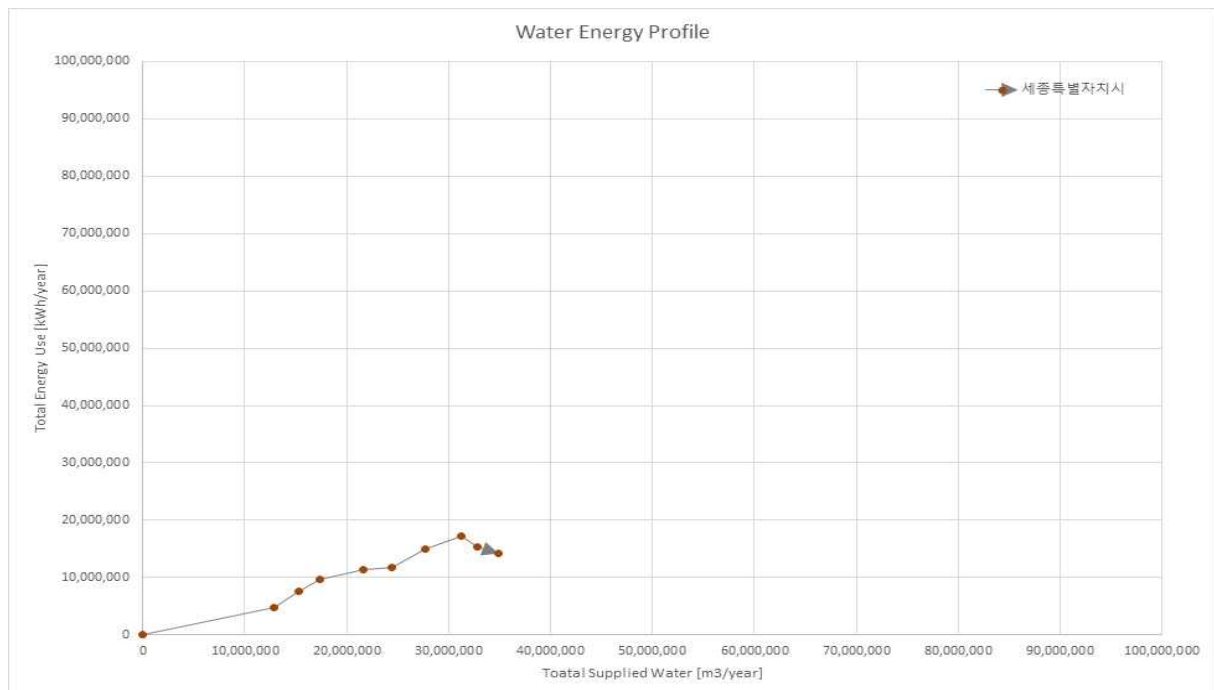


그림 44. 세종 물-에너지 사용량 프로파일

표 37. 세종 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준편 차	IQR	변동계 수	
E [kWh/m ³]	상수 시스템	-	0.38	0.50	0.55	0.53	0.49	0.54	0.55	0.47	0.41	0.49	0.50	0.00	0.06	0.07	0.13	
	취수&도수 공정	-	0.00	0.23	0.25	0.23	0.19	0.24	0.39	0.23	0.23	0.22	0.23	0.01	0.10	0.01	0.45	
	정수처리&송수 공정	-	0.13	0.16	0.16	0.17	0.18	0.19	0.09	0.09	0.18	0.18	0.16	0.17	0.00	0.03	0.02	0.20
	배급수 공정	-	0.051	0.106	0.141	0.132	0.118	0.103	0.071	0.071	0.068	0.000	0.088	0.103	0.002	0.045	0.050	0.51
취수& 도수	도수관 길이 [m]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	도수관길이/ 급수인구 [m/capital]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	고도처리 시설 비율	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
정수처리 &송수	송수관로 길이 [m]	-	365	26,413	26,413	27,698	30,025	33,685	33,685	37,093	71,421	31,866	30,025	333,852,250	18,273	7,272	0.57	
	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	-	0.00003	0.00172	0.00122	0.00128	0.00123	0.00122	0.00108	0.00113	0.00205	0.00122	0.00122	0.00000	0.00055	0.00015	0.45	
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capital]	-	0.004	0.272	0.202	0.147	0.135	0.127	0.110	0.111	0.202	0.146	0.135	0.006	0.075	0.091	0.52	
	누수율 [%]	-	28.82	26.17	19.13	19.93	14.47	12.73	11.20	7.76	6.59	16.31	14.47	60.58	7.78	8.73	0.48	
배급수	배급수 관길이 [m]	-	10,252	31,340	45,769	100,825	178,686	315,104	421,728	504,446	1,125,883	303,780	178,686	1,679,402,214	356,005	375,959	1.17	
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	-	0.001	0.002	0.002	0.005	0.007	0.011	0.013	0.015	0.032	0.010	0.007	0.000	0.010	0.011	1.00	
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capital]	-	0.12	0.32	0.35	0.54	0.80	1.19	1.38	1.50	3.19	1.04	0.80	0.89	0.94	1.03	0.90	

세종시는 [표 37]에서와 같이 취수&도순 시설이 없어 해당 영향요소(도수관길이/취수량, 도수관길이/급수인구)를 평가할 수는 없었다. 정수처리&송수 공정 및 백급수 공정의 영향 요소들은 다른 특별시·광역시와 마찬가지로 낮은 값을 나타내었으며, 도·자치도 기준으로 산정한 회기식의 적용에는 무리가 있었다.

세종은 2010년 12월 27일에 공포된 '세종시 설치 등에 관한 특별법'에 따라 충청남도 연기군 전역과 공주시(의당면·장기면·반포면)의 일부 그리고 충청북도 청원군(부용면)의 일부를 흡수하여 2012년 7월 1일에 17번째 광역자치단체로 공식 출범한 신도시이다. 신도시 세종의 프로파일 변동을 파악하기 위해 [표 38]에서와 같이 도시여건(인프라변경, 원수수입량, 자체정수생산량, 정수수입량), 외부요인(급수인구, Lpcd) 및 운영효율(누수율)을 분석하였다.

표 38. 세종 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	취수, 정수장 가동중지	-	취수, 정수장 가동중지	-	-	-	-
	원수수입 [m ³ /year]	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	정수생산 [m ³ /year]	-	0	3,397,953	1,647,609	928,892	842,792	0	0	0	0
	정수수입 [m ³ /year]	-	9,454,420	13,701,644	16,492,872	20,799,101	24,388,478	27,711,958	31,280,935	32,801,333	34,909,853
외부 요인	급수인구[명]	-	82,501	97,167	130,693	188,058	222,224	264,475	304,953	335,194	353,328
	Lpcd [liter/capita/day]	-	427	433	365	315	301	287	281	268	271
	총급수량 [m ³ /year]	-	12,852,373	15,349,253	17,421,764	21,641,893	24,388,478	27,711,958	31,280,935	32,801,333	34,909,853
운영 효율	누수율[%]	-	28.8	26.2	23.5	19.9	14.5	12.7	11.2	7.8	6.6

세종시는 2012년부터 2016년까지 자체 취수시설을 통해 소량의 정수를 생산하였다. 2012년부터 2013년까지 2개의 취수원 및 취수시설(금남, 조치원)과 2개의 정수시설(금남, 조치원)을 가동하였으며, 2014년부터 2016년까지는 1개의 취수원 및 취수시설(금남)과 정수시설(금남)을 운영하였다. 그 이후에는 전량 정수를 수입하여 사용자에게 공급하였다. 세종은 행정수도로 계획된 특별시로 수립된 후 지속적으로 인구가 증가하여 2020년 353,328명에 이르렀다. Lpcd는 2012년에는 427 litres/capita/day로 매우 높은 값을 나타내었으나 2017년 이후 약 280 litres/capita/day전후의 일정한 값을 나타내었다. 이는 초기 신도시 건설에 따른 높은 누수율이 점차 안정화 되면서 나타난 현상으로 판단된다. 이에 따라 신도시 건설 시 급수인구로 인한 급수량의 증가로 인해 사선 방향의 증가되는 프로파일 궤적을 나타내었다.

세종의 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링을 통해 알게 된 시사점은 아래와 같다.

- 세종의 상수 시스템은 보통의 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.
- 세종 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 10년간 지속적으로 사선 방향의 증가 경향을 나타내었으며 증가되는 경향은 점차 줄어들었다.
- 세종은 다른 도시들과 마찬가지로 에너지 인텐시티의 값의 원인을 명확하게 설명하기는 어려웠다.
- 세종 프로파일의 사선 방향의 증가는 인구증가가 주된 요인이었다. 그리고 높은 누수율로 인한 높은 Lpcd가 점차 누수율이 개선되면서 줄어들어 사선 방향의 증가를 완화시키는 것으로 판단된다.
- 세종의 경우 신도시 건설 이후 도시가 확장되며 상수 시스템 물-에너지 프로파일이 어떻게 변화하는지 보여주는 전형적인 사례이다. 신도시 초기의 높은 누수율에 따른 높은 Lpcd가 인구증가와 더불어 사선 방향의 증가를 더욱 가속화시킨다. 그러나 일정 기간이 지난 후 누수율 감소에 따른 Lpcd의 감소와 도시 인구 증가의 둔화로 인해 사선 방향의 증가 폭은 완화되는 모습을 보여주었다.
- 2018년 사례를 비취보았을 때 자료 기입 시 가이드라인을 명확하게 하는 것이 매우 중요한 것으로 판단되었다. 전체 상수 시스템의 에너지 인텐시티에 영향을 미치지 않는 않았지만 세부 공정의 경향을 파악할 때는 문제가 발생 되었다.

2.7.8 제주

제주는 2.7.1절부터 2.7.7절에서 논의된 특광역시에 포함되지 않는 자치도이지만 섬 지역이며, 타 도·자치도에 비해 소수의 기초자치단체로 구성되어있으며, 독특한 에너지 인텐시티의 변동을 나타내어서 스냅샷과 궤적을 분석하여 시사점을 도출하였다. 제주는 상수 시스템 에너지 인텐시티 분석 경향과 [표 39], [그림 45]에 따라 높은 에너지 인텐시티, 높은 변동성, 매우 동적인 프로파일 궤적 변동을 들 수 있다. 그리고 2011년부터 2012년까지의 수직방향의 증가 변동, 2013년에서 2014년의 수평방향의 증가가 있었다.

제주 상수 시스템 에너지 인텐시티는 1.10으로 우리나라 광역지자체 중 가장 높은 값을 나타내었으며 그다음으로 높은 값을 나타내는 부산(0.63)에 비해 약 75% 높은 값을 나타내는 특성을 보였다. 취수&도수 공정과 정수처리&송수 공정에서도 에너지 인텐시티는 각각 0.48, 0.40으로 광역지자체 중 가장 높은 값을 나타내었으며, 배급수 공정에서는 부산의 0.26 다음으로 높은 0.14을 나타내었다. 제주는 상수 시스템과 모든 세부 공정에서 단위 용수를 생산하고 공급하기 위해서 높은 에너지를 필요로 하였다. 상수 시스템의 에너지 변동은 매우 높았다. 2011년부터 2013년까지 전체적으로 증가하는 경향을 나타냈으며 2013년에서 2014년은 감소하는 경향을 나타냈다. 그 이후에는 해당 에너지 인텐시티를 유지하는 경향을 나타내었다. 취수&도수 공정에 변동성 또한 매우 높았으며 2012년부터 2013년까지는 증가, 2013년부터 2016년은 감소, 그리고 그 이후는 유지하는 경향을 보여주었다. 정수처리&송수 공정에서는 초기에 일정한 값을 유지하였으며, 2013년부터 2016년까지 감소하고, 그 이후는 일정한 값을 유지하였다. 배급수 공정에서는 2011년에서 2013년 사이에 증가, 2014년에 감소, 그리고 그 이후는 유지하는 경향을 나타내었다. 전체적으로 변동성은 초기(2011년~2014년)에는 증가하는 경향, 중기(2014년)는 감소하는 경향, 그리고 후기(2015년 이후)는 일정한 값을 유지하는 경향을 나타내었다.

[그림 45]에서와 같이 제주의 프로파일 궤적은 전체적으로 변화가 크며 안정화가 되지 않은 상태를 나타내었다. 특히, 2011년~2012년의 수직 방향의 증가, 2013년~2014년 수평 방향의 증가 경향은 그중에서도 매우 큰 변화이어서 해당 원인을 파악하고 문제를 해결하는 것이 제주 상수 시스템의 넥서스 관점에 운영관리에서 매우 중요한 사항이 될 것으로 추측되었다.

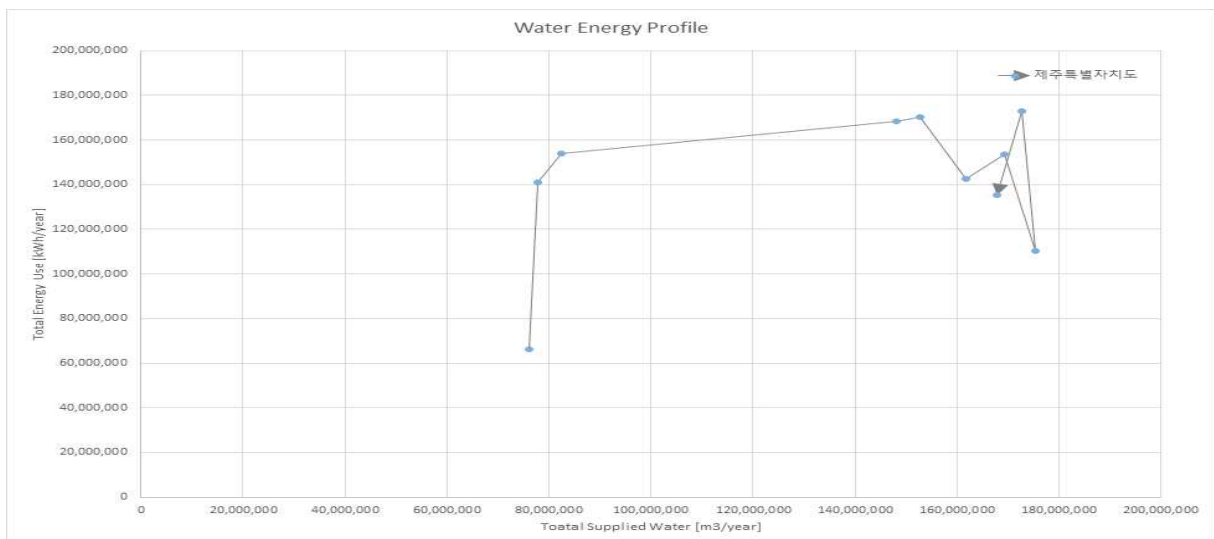


그림 45. 제주 물-에너지 사용량 프로파일

표 39. 제주 상수 시스템 공정별 에너지 인텐시티 및 특성

티 및 공정	세부항목	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	평균	중위값	분산	표준편 차	IQR	변동계 수
E [kWh/m ³]	상수 시스템	0.87	1.81	1.87	1.14	1.12	0.88	0.91	0.63	1.00	0.81	1.10	0.95	0.17	0.42	0.26	0.38
	취수&도수 공정	0.00	0.89	0.96	0.63	0.60	0.51	0.53	0.52	0.55	0.49	0.48	0.53	0.08	0.29	0.09	0.60
	정수처리&송수 공정	0.71	0.72	0.71	0.39	0.41	0.25	0.26	0.00	0.00	0.34	0.20	0.40	0.37	0.06	0.24	0.38
취수& 도수	배급수 공정	0.161	0.200	0.207	0.111	0.113	0.119	0.118	0.110	0.112	0.115	0.137	0.117	0.001	0.038	0.038	0.28
	도수관 길이 [m]	72,590	75,370	75,370	75,370	75,370	75,370	75,370	75,523	75,523	75,523	75,138	75,370	806,658	898	115	0.01
	도수관길이/ 취수량 [m/m ³]	0.00095	0.00008	0.00092	0.00049	0.00049	0.00047	0.00045	0.00043	0.00043	0.00044	0.00045	0.00046	0.00000	0.00025	0.00005	0.49
정수처리 &송수	도수관길이/ 급수인구 [m/capita]	0.124	0.008	0.125	0.121	0.118	0.145	0.144	0.145	0.144	0.143	0.122	0.134	0.002	0.042	0.022	0.34
	고도처리 시설 비율	0.069	0.004	0.004	0.004	0.004	0.033	0.033	-	0.033	0.033	0.024	0.033	0.001	0.022	0.030	0.93
	송수관로 길이 [m]	425,240	425,707	435,608	449,755	454,703	469,652	475,340	479,713	494,523	500,886	461,113	462,178	742,272,881	27,245	39,475	0.06
배급수	송수관로 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.00559	0.00547	0.00529	0.00295	0.00298	0.00290	0.00281	0.00274	0.00286	0.00299	0.00366	0.00296	0.00000	0.00124	0.00184	0.34
	송수관로 길이/ 급수인구 [m/capita]	0.729	0.719	0.720	0.724	0.709	0.903	0.911	0.920	0.946	0.951	0.823	0.816	0.012	0.110	0.196	0.13
	누수율 [%]	14.85	15.54	15.54	41.71	41.68	41.08	44.38	43.32	43.20	41.29	34.26	41.48	172.03	13.12	20.90	0.38
배급수	배급수 관길이 [m]	4847,325	4884,226	4883,112	4907,488	4916,009	5,101,279	5,284,196	5,313,882	5,319,854	5,192,889	5,066,029	5,008,644	38823888	196,883	364,663	0.04
	배급수 관 길이/ 급수량 [m/m ³]	0.064	0.063	0.059	0.032	0.032	0.032	0.031	0.030	0.031	0.031	0.041	0.032	0.000	0.015	0.022	0.37
	배급수 관 길이/ 급수인구 [m/capita]	8.31	8.24	8.09	7.90	7.67	9.81	10.13	10.19	10.17	9.86	9.04	9.06	1.15	1.07	1.93	0.12

제주의 동적인 프로파일과 특히 2011년부터 2012년까지의 수직 방향의 증가, 2013년에서 2014년의 수평 방향의 증가에 대한 원인을 도출하기 위해 [표 40]에서와 같이 도시여건(인프라 변경, 원수수입량, 정수수입량), 외부요인(급수인구, Lpcd, 총급수량) 및 운영효율(누수율)을 포함한 제주 상수 시스템의 특성 변동을 검토하였다.

표 40. 제주 상수 시스템 특성 변동

동인	세부요인	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
도시 여건	인프라 변경	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	원수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	정수수입 [m ³ /year]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
외부 요인	급수인구[명]	583,284	592,449	604,670	621,550	641,355	519,965	521,791	521,551	522,948	526,457
	Lpcd [liter/capita/day]	357	360	373	653	652	852	888	921	905	873
	총급수량 [m ³ /year]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
운영 효율	누수율[%]	14.8	15.5	15.5	43.0	41.7	41.1	44.4	43.3	43.2	41.3

제주도는 섬 지역으로 타 광역지자체와 접해 있지 않아 원수 수입량과 정수 수입량 없이 자체취수와 자체 정수처리를 통해 상수를 공급하고 있다. 상수도통계에 의하면 제주의 급수인구는 2011년부터 2015년까지 583,284명에서 641,355명으로 지속적으로 증가하였으나 2016년 519,965명으로 121,390명 감소하였으며 그 이후로는 소규모의 증가가 있었다. Lpcd 는 2011년부터 2013년까지 360전후의 값을 나타내었으며 2014년 653으로 1년 사이 약 75%가 증가하였다. 그리고 2016년에는 852로 전년 대비 약 31%가 증가하였다. 누수율의 경우 2011년에서 2013년에는 약 15%를 전후한 값을 나타내었으며 그 이후는 40% 이상의 높은 값을 나타내었다. 상수 시스템의 총급수량은 급수인구, Lpcd 및 누수율에 영향을 받는다. 제주의 연간 총급수량은 2011년부터 2013년까지 76,066,890 m³/year에서 82,364,135 m³/year로 소폭으로 증가하다 2014년 148,163,954 m³/year로 급격하게 증가하였다.

제주는 2007년부터 2013년까지 유수율과 누수율 등 통계를 허위로 발표해왔다가 2015년 감사에서 적발돼 대도민 사과를 하였다. 이에 따라 상수도통계의 2013년까지의 총사용수량은 실제 상황보다 과소평가된 것이다. 이에 따라 2013년에서 2014년의 제주 프로파일의 수평 방향의 증가는 누수율 증가로 인한 이동이며, 인텐시티는 2013년 1.87에서 2014년 1.14로 개선된 것과 같은 착시현상이 발생 되었다. 해당 궤적은 누수율이 프로파일의 수평방향 이동에 영향을 미치는 것의 실증사례가 될 수 있으며, 이와같이 누수율이 높을 경우 총급수량 기반의 에너지 인텐시티를 적용하여 분석하는 것은 도시 물순환 시스템의 상수 시스템의 운영효율은 악화되고 있지만 에너지 인텐시티 관점에서 개선이 되는 착시현상을 유발할 수 있다. 따라서 이 경우 실 사용수량 또는 유수수량 기반의 에너지 인텐

시티의 적용이 필요할 것이다.

2011년에서 2012년의 수직방향의 상승은 앞서 울산의 경우 논의된 바와 같이 기존에 미기입된 자료(취수장 연간전력사용량 자료) 현행화하면서 발생된 것으로 판단된다. 그리고 2015년에서 2016년 사이의 급수인구와 Lpcd의 변동은 서로 상쇄되어 프로파일에 큰 영향을 미치지 않는 것이다. 이와 같은 경우가 실제 존재하였는지 자료의 신뢰성의 검토가 필요하다.

제주의 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 프로파일링을 통해 알게 된 시사점은 아래와 같다.

- 제주의 상수 시스템은 우리나라 광역 자치단체 중 가장 높은 에너지 인텐시티 값을 나타내었다.
- 세종 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일의 변동성은 매우 컸으며, 2011년~2012년은 수직 방향의 큰 증가, 2013년~2014년은 수평 방향의 큰 증가가 있었다.
- 제주는 다른 도시들과 마찬가지로 에너지 인텐시티의 값의 원인을 명확하게 설명하기는 어려웠다.
- 제주의 2011년에서 2012년 사이의 수직 방향 증가는 입력자료의 현행화가 주요 원인이었다. 그리고 2013년에서 2014년의 수평 방향의 증가는 누수율이 주요 원인이었다. 이번 제주 사례는 누수율에 의한 프로파일 거동의 실증사례가 될 수 있다.
- 제주 프로파일의 변동성은 실제 시스템의 변동에도 기인하지만, 자료의 불확실성에 의해 발생하는 부분이 많은 것으로 판단된다. 이에 따라 제주는 프로파일 분석에 의한 분석 전 자료의 정확성과 신뢰성에 대한 검토가 선행되어야 할 것이다.
- 프로파일 분석자는 해당 도시의 상수 시스템을 분석할 경우 이전에 모든 세부공정의 주요 입력자료들이 제대로 기입되었는지를 검토하여야 한다. 만약 자료가 제대로 기입되지 않았을 경우 해당 자료 기반 분석은 실제상황보다 과소평가하게 될 가능성이 높다.

2.7.9 광역지자체별 프로파일링 시사점 및 도출전략

특광역시(서울 제외)와 자치도(경기 제외)의 전체 상수 시스템 물-에너지 사용량 프로파일은 [그림 46]과 [그림 47]에 제시되어 있으며, 광역지자체의 개별적인 프로파일은 [그림 48]에 나타난 바와 같다. 그리고 2.7.1절에서 2.7.8절까지 분석한 광역지자체별 프로파일링의 시사점과 도출된 전략은 [표 42]에 요약되어 있다.

3차년도 연구의 프로파일링에서는 프로파일 스냅샷 분석을 통해 각 광역지자체별로 에너지 인텐시티가 해당 값을 가지는 원인과 주요 영향요소를 도출하는 것은 어려웠다. 그러나 프로파일 궤적분석을 통해 의미 있는 궤적 변동의 원인을 알 수 있었다.

프로파일의 궤적 변동은 수직 방향, 사선 방향, 그리고 수평 방향으로 발생하며 해당 주요 원인과 프로파일을 통한 실증사례는 [표 41]과 같다. 그리고 해당 사항 외에 입력자료의 오류(부정확한 가이드라인, 입력자 실수 등)로 인한 변동이 있는 것으로 분석되었다. 국내사례 분석을 통하여 2차년도에 이론적으로 제시된 원인에 관한 실증사례는 대부분 확인할 수 있었다. 그러나 에너지 효율 관점의 시스템 악화로 인한 수직 방향의 증가와 누수율 감소로 인한 수평 방향의 감소는 확인하기 어려웠다. 이는 해당 항목의 변동은 단기간에 발생 되는 것이 아니라 천천히 발생 되는 것이어서 급격한 변동을 나타내지는 못하는 것으로 판단된다.

표 41. 도시 물순환 시스템 물-에너지 사용량 이동 궤적에 따른 주요 원인 및 사례

궤적		주요 원인	실증사례
이동방향	세부방향		
수직	증가	- (자료관리) 미기입된 에너지사용 자료의 현행화 - (도시여건) 에너지 효율 관점 시스템 악화	- 대전(19~20) - 울산(19~20) - 제주(11~12)
	감소	- (도시여건) 에너지 효율 관점 시스템 개선	- 광주(16~17)
사선	증가	- (외부요인) 인구 증가 및 lpcd 증가에 따른 용수사용량 증가	- 인천(11~20) - 울산(11~20) - 세종(12~20)
	감소	- (외부요인) 인구 감소 및 lpcd 감소에 따른 용수사용량 감소	- 부산(11~20)
수평	증가	- (운영효율) 누수량 증가	- 제주(13~14)
	감소	- (운영효율) 누수량 감소	

표 42. 국내 특광역시 및 제주 프로파일 분석 결과

광역지 자체	프로파일 경향		프로파일 분석	
	변동성	경향	원인	시사점
부산	◦ 정적	①사신 방향 장기적 약한 감소	①외부영향(급수인구 감소)	◦(향후 추세) 지속적인 사신 방향의 감소가 발생 될 것으로 예측 ◦(주요 모니터링) 인구 감소 ◦(개선 #1) 높은 에너지 인텔리티 시스템 개선 방안 검토 ◦(향후 추세) 인구감소로 인한 지속적인 사신방향의 감소와 취수 수입량 증가로 인한 수직방향 증가가 혼합되어 발생될 것으로 예상
대구	◦ 정적	①수직 방향 단기적(19~20) 증가	①외부영향(원수수입량 증가)	◦(주요 모니터링) 원수수입량 증가, 인구 감소 ◦(개선 #1) 원수수입량 감소방안 검토 ◦(개선 #2) 높은 에너지 인텔리티 시스템 개선 방안 검토
인천	◦ 동적	①사신 방향 장기적 강한 증가 -20년 해당 경향의 둔화	①외부영향(급수인구 증가) -20년부터 인구감소 시작	◦(향후 추세) 인구감소, 원수수입량 증가, 누수를 변동에 따른 기존 10년간의 추세와는 다른 경향을 나타낼 것으로 예측 ◦(주요 모니터링) 인구 감소, 원수수입량 증가, 누수율 변동 ◦(개선 #1) 지속적 프로파일 궤적 변동 분석 ◦(개선 #2) 원수수입량 감소방안 검토
광주	◦ 정적 ◦ 단기 동적	①장기적 변동 경향 없음 ②수직 방향 단기적(16~17) 감소	②도시여건(시스템 개선) -도수공정을 가압에서 자연유하로 변경	◦(향후 추세) 큰 변동은 없을 것으로 예측 ◦(주요 모니터링) 인구감소, 원수수입량 증가, 누수율 감소 ◦(개선 #1) 지속적 프로파일 궤적 변동 분석
대전	◦ 단기 동적	①여러 차례 단기적 변동(14~15, 15~16, 19~20) 발생	①입력자료 부정확성 또는 현행화 -15년 입력자료 오류 -20년 입력자료 오류 또는 자료의 현행화 -여러 영향요소의 영향으로 수직방향의 변동 경향성은 나타나지 않음	◦(향후 추세) 인구감소, Lpcd 변동, 누수율 감소로 인한 변동이 있을것으로 추측 ◦(주요 모니터링) 인구 감소, Lpcd 변동, 누수율 감소 ◦(개선 #1) 입력자료의 신뢰성 확보 ◦(개선 #2) 지속적인 프로파일 궤적 변동 - 2020년 정수처리&송수 공정 연간 전력 사용량이 오류 또는 현행화 자료인지 검토 필요

광역지 자체	프로파일 경향		프로파일 분석	
	변동성	경향	원인	시사점
울산	<ul style="list-style-type: none"> 동적 단기 동적 	<ul style="list-style-type: none"> ①사선 방향 장기적 강한 증가 ②수직 방향 단기적(19~20) 증가 	<ul style="list-style-type: none"> ①외부영향(Lpcd 증가) ②입력자료 부정확성 또는 현행화 	<ul style="list-style-type: none"> (항후 추세) Lpcd 증가에 의한 사선방향의 증가가 있을 것으로 예측되며, 2020년 입력자료가 오류일 경우 2011~2019년의 경향과 유사할 것으로 판단됨 (주요 모니터링) 취수&도수 공정, 배급수 공정 연간전력사용량, Lpcd (개선 #1) 입력자료의 신뢰성 확보 (개선 #2) 지속적인 프로파일 궤적 변동 - 2020년 취수&도수 공정, 배급수 공정 연간 전력 사용량이 오 류 또는 현행화 자료인지 검토 필요 (개선 #3) Lpcd 증가 원인 규명 및 감소방안 검토 (개선 #4) 높은 에너지 인텐시티 시스템 개선 방안 검토 (항후 추세) 인구증가 둔화, 누수율감소에 의한 Lpcd 저감으로 인해 사선방향과 수평방향 사이의 변동 경향을 나타낼 것으로 예측 (주요 모니터링) 인구 증가, Lpcd 감소, 누수율 감소 (개선 #1) 지속적인 프로파일 궤적 변동 - 신도시의 성장기를 지나 안정화되는 단계로 전환이 되고 있으며, 이에 따른 프로파일 궤적 변동 분석이 필요 (개선 #2) 높은 에너지 인텐시티 시스템 개선 방안 검토 (항후 추세) 변동 예측이 어려움 (주요 모니터링) 모든 측정 지표 (개선 #1) 입력자료의 신뢰성 확보 - 부정확한 누수율(13~14), 총급수량은 유사하나 급수인구와 Lpcd의 변동(15~16) 등 입력자료의 신뢰성에 대한 문제가 큼 (개선 #2) 총사용수량 관점외에 실 사용수량, 유수수량 관점의 프로파일 궤적 변동 분석 (개선 #3) 높은 에너지 인텐시티 시스템 개선 방안 검토
세종	<ul style="list-style-type: none"> 동적 	<ul style="list-style-type: none"> ①사선 방향 장기적 강한 증가 	<ul style="list-style-type: none"> ①외부영향(인구 증가) - 도시가 안정화되며 누수율은 감소하고 이에 따라 Lpcd도 감소 	
제주	<ul style="list-style-type: none"> 동적 단기 동적 	<ul style="list-style-type: none"> ①동적 경향의 방향성이 없음 ②수직 방향 단기적(11~12) 증가 ③수평 방향 단기적(13~14) 증가 	<ul style="list-style-type: none"> ①불확실한 자료로 인한 변동원인 규명이 어려움 ②입력자료 현행화 ③입력자료&누수율 현행화 	

국내 특광역시(서울 제외)와 제주의 프로파일 분석을 통해 얻을 수 있었던 시사점은 다음과 같다.

- (인텐시티 값 원인 규명 어려움) 도시의 에너지 인텐시티 값들은 여러 가지 요소의 영향을 받아 몇몇 개의 값으로 해당 도시의 에너지 인텐시티 값의 위치를 설명하기는 어려웠다.
- (높은 에너지 인텐시티 원인공정 파악 가능) 도시의 에너지 인텐시티 값이 높은 경우 그 원인을 규명하기는 어려웠으나, 해당 도시의 상수 시스템에서 어느 공정(취수 & 도수, 정수처리 & 송수, 배급수)에서 높은 값을 나타내는지 파악이 가능하였다.
- (넥서스 관점 자료 부족) 넥서스 관점에서 상수 시스템을 분석하기에 자료는 적합하지 않았다. 분석에 사용된 자료(상수도통계)는 물 중심의 관점에서 작성되는 자료여서 해당 자료 분석으로 넥서스 관점에서 분석하는 데는 한계가 있었다.
- (넥서스 관점 자료수집방안 제시) 넥서스 관점에서 도시 물순환 시스템 분석자는 도시물순환 시스템의 공정에 대한 이해를 바탕으로 수집된 자료 기반에서 최대한의 넥서스 관점 분석을 수행할 방안을 제시하여야 한다. 비록 제시된 결과가 의미 있는 결과를 도출하지 못하는 경우도 있으나, 해당 과정을 통해 어떻게 기초자료를 수집하여야 하는지에 대한 방안을 제시할 수 있다.
- (자료의 신뢰성) 조사된 자료는 자료입력 가이드라인 부재, 자료 부족, 입력자의 낮은 숙련도 및 기입 오류 등으로 정확하지 않은 자료인 경우들이 있다. 분석자는 분석 시 자료의 정확성에 대해 지속적으로 확인하면서 분석하여야 한다.
- (궤적 분석의 중요성) 프로파일 분석은 스냅샷 분석과 궤적분석을 동시에 수행하여야 한다. 위에 언급된 바와 같이 인텐시티 값 원인의 규명이 복잡하여 스냅샷 분석을 통해 분석할 수 있는 것들은 제한적이다. 그러나 궤적분석을 통해 변동의 원인을 파악하는 것은 가능한 것으로 판단되었다. 따라서 궤도분석에 기반하여 전략을 제시하는 것이 더 효율적일 수 있다.
- (시스템 개선 및 악화) 도시여건을 나타내는 시스템의 에너지 효율 개선으로 인한 프로파일의 수직 방향 감소의 실증사례(광주)를 확인할 수 있었다. 그러나 시스템 악화를 통해 수직 방향의 증가 사례는 확인할 수 없었다. 시스템의 악화는 지속적으로 천천히 발생 되어서 장기간 궤적분석이 필요하나 다른 영향요소로 인해 시스템 악화만 따로 분석하는 것은 어렵다.
- (급수량 증가 및 감소) 인구 증가/감소와 Lpcd 증가/감소에 의해 급수량이 증가/감소할 경우 프로파일 궤적은 사선 방향을 따라서 움직인다. 급수량 증가에 의한 사선 방향의 증가는 인천과 세종 사례를 통해 확인할 수 있었으며, 감소의 경우 부산의 사례를 통해 알 수 있었다. Lpcd 증가에 의한 사선 방향의 변동은 울산의 경우에서 나타났다. 급수량은 인구와 Lpcd의 곱으로 산정되며 급수인구가 증가하는 경우 일반적으로 Lpcd에 변동은 없어 급수량의 증가는 즉각적으로 나타났다. 그러나 인구가 감소할 경우 Lpcd에 증가가 발생하여 급수량의 감소가 바로 나타나지 않는 현상을 확인할 수 있었다.

- (누수율) 누수율의 급격한 증가로 인해 수평 방향으로 프로파일 궤적이 변동하는 경우는 제주의 사례를 통해 확인할 수 있었다. 그러나 누수율 감소를 통한 궤적의 변동은 궤적의 변동이 인지할 수 있을 정도로 크게 유발하지는 않아 실증사례를 찾을 수 없었다.
- (누수율로 인한 에너지 인텐시티 왜곡) 누수율이 증가하여 에너지 인텐시티가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이에 따라 상수 시스템 물-에너지 사용량 넥서스 분석 시 프로파일의 궤적분석과 함께 에너지 인텐시티 변동도 수반되어야 할 것이다.
- (이론적 궤적 변동 실증) 2차년도 연구결과에서 제시된 바와 같이 도시여건, 외부요인, 운영효율에 따른 프로파일의 이동 궤적의 실증사례를 3차년도에 확인할 수 있었다.

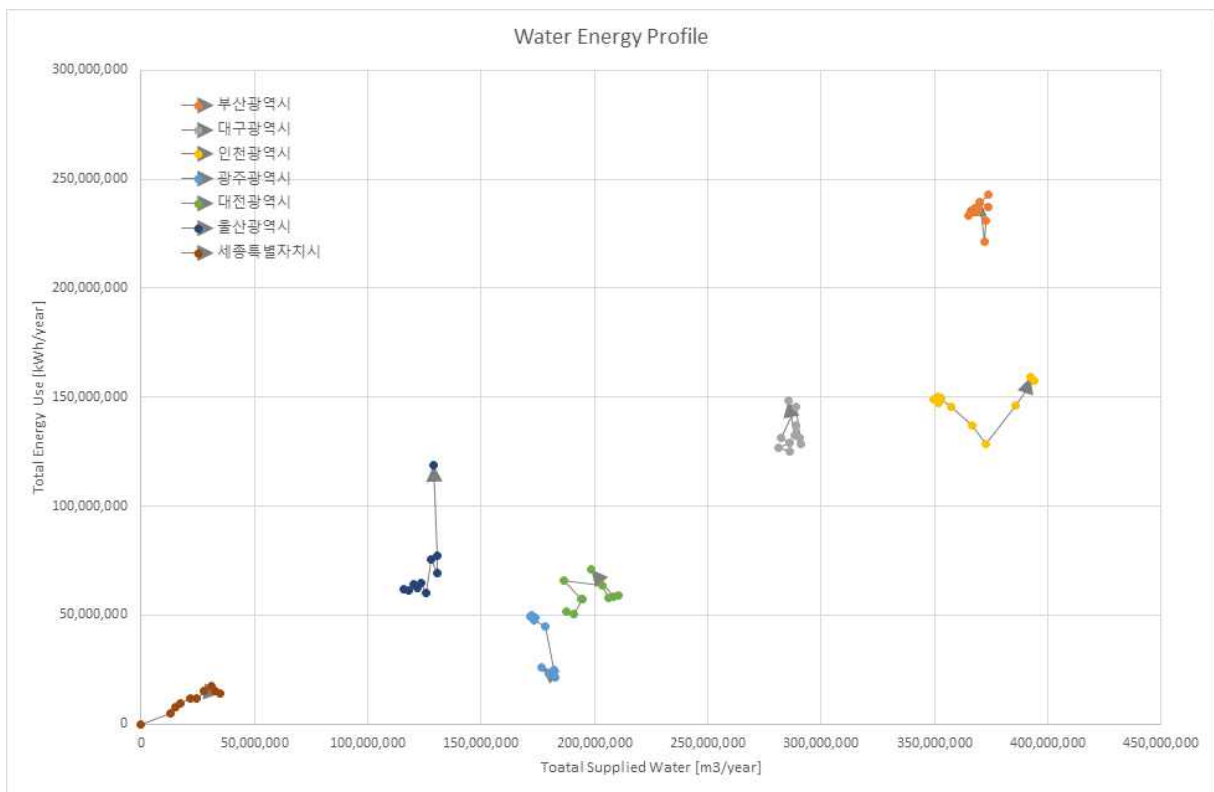


그림 46. 특광역시 물-에너지 사용량 프로파일 (서울 제외)

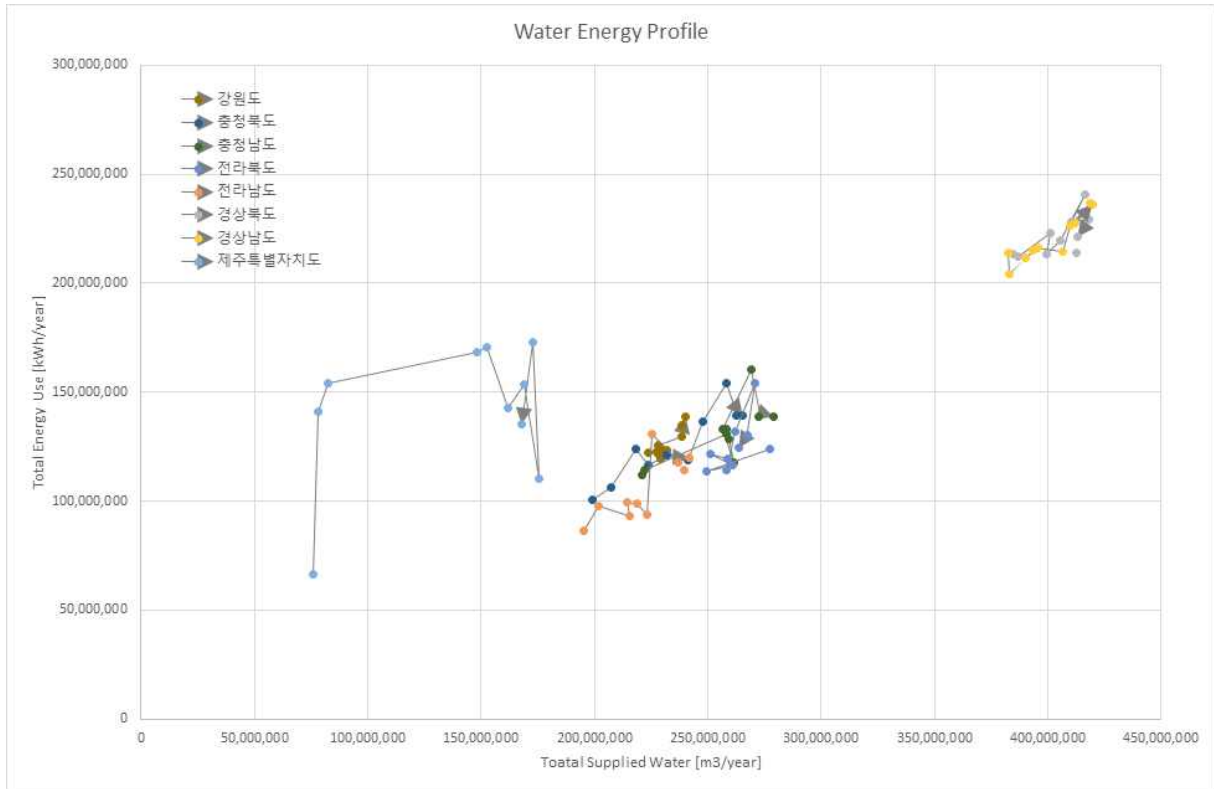
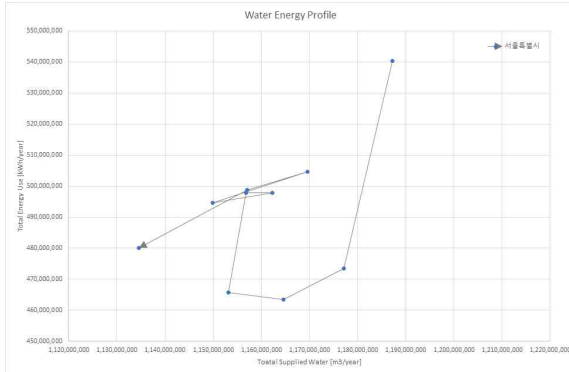
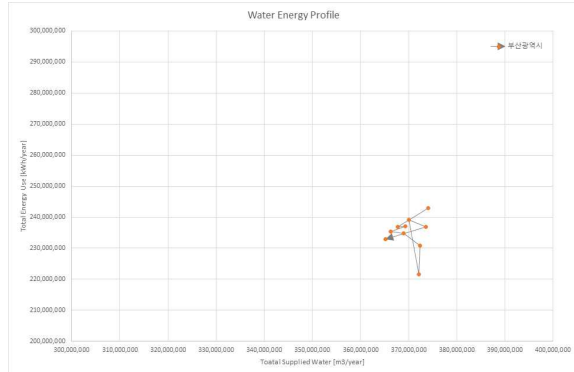


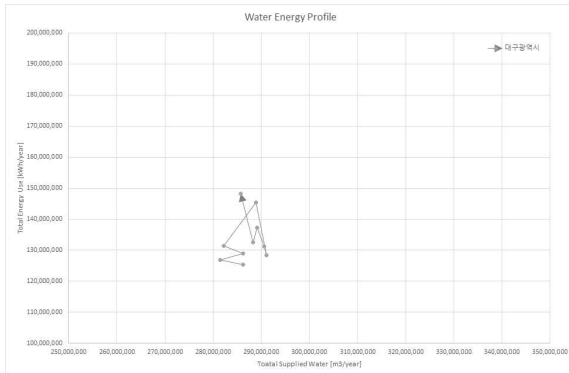
그림 47. 자치도 물-에너지 사용량 프로파일 (경기 제외)



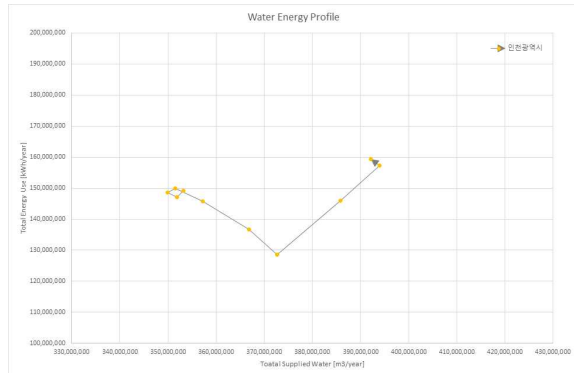
(a) 서울특별시



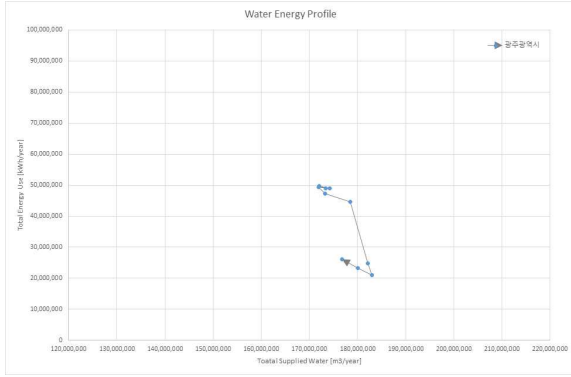
(b) 부산광역시



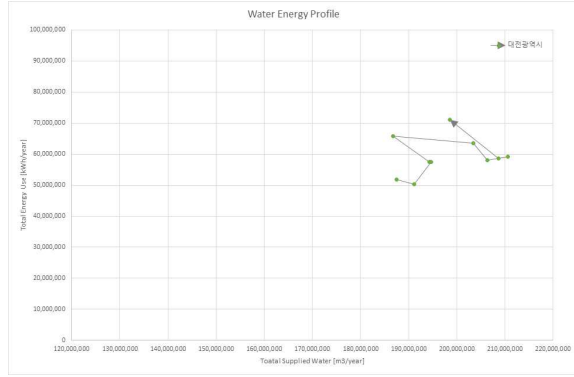
(c) 대구광역시



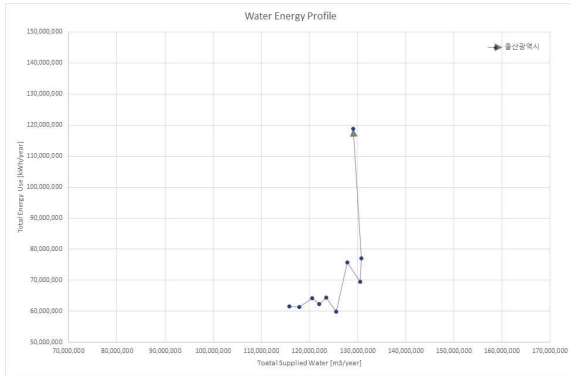
(d) 인천광역시



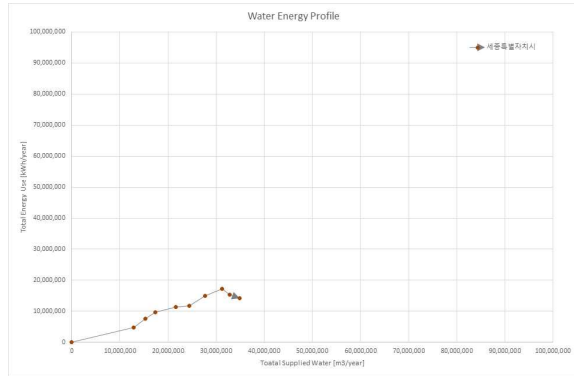
(e) 광주광역시



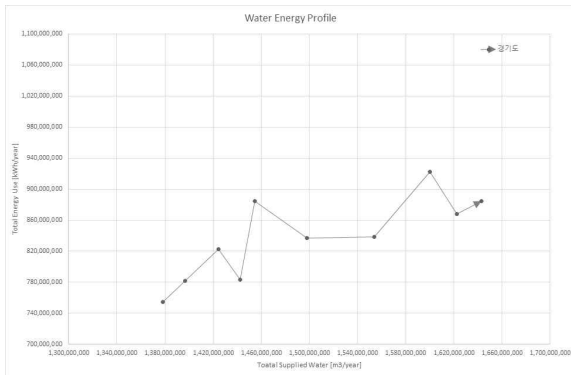
(f) 대전광역시



(g) 울산광역시



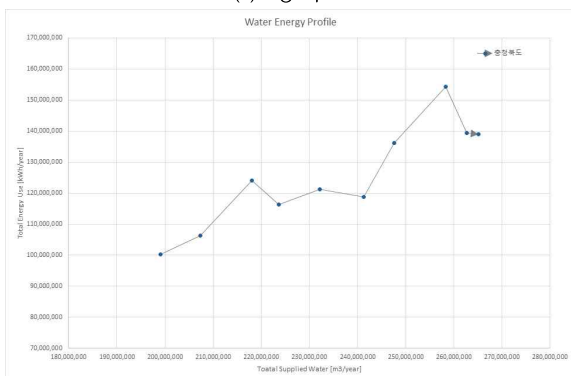
(h) 세종특별자치시



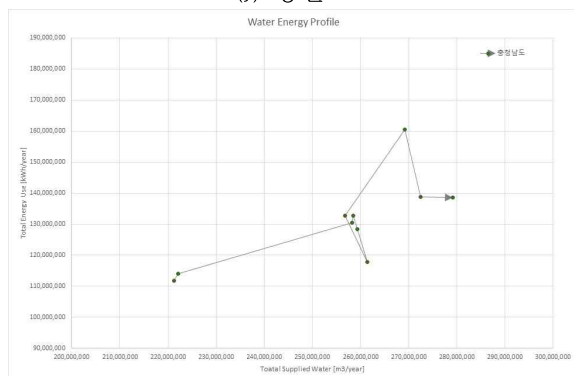
(i) 경기도



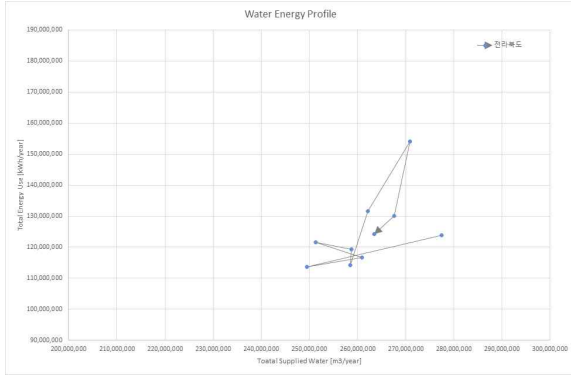
(j) 강원도



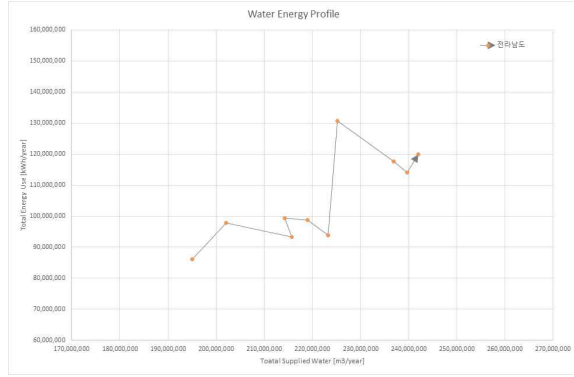
(k) 충청북도



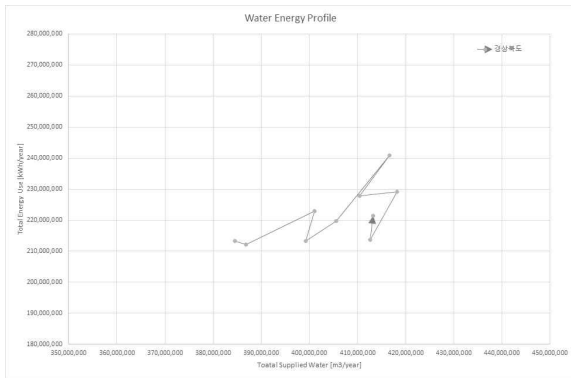
(l) 충청남도



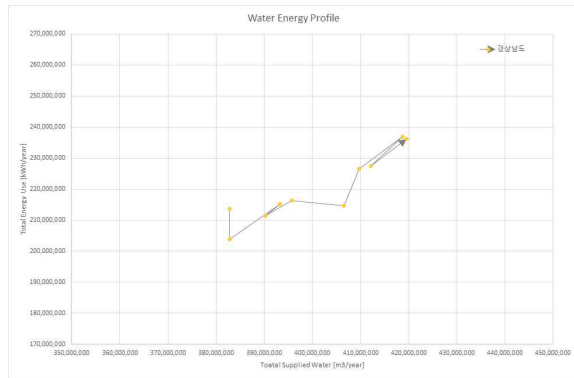
(m) 전라북도



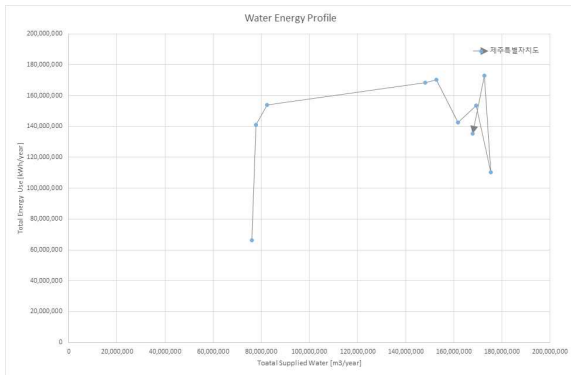
(n) 전라남도



(o) 경상북도



(p) 경상남도



(q) 제주특별자치도

그림 48. 광역지자체 별 물-에너지 사용량 프로파일

2.8 특광역시 프로파일 벤치마킹

2.8.1 벤치마킹 기준

2차년도 연구에서는 기존 문헌들에서 제시된 도시 물순환 시스템의 각 단계별 에너지 인텐시티 값에 따라서 총 사용수량 에너지 인텐시티 관점에서 도시를 분류하였다. 연구에서 제시된 도시 벤치마킹은 크게 기술통계 기반 도시 분류 가이드라인과 공정 모델링 기반 도시 분류 가이드라인 2가지의 방법으로 진행될 수 있다. 기술통계 기반 도시 분류 가이드라인은 [표 43]과 같이 상수 시스템(TDWS), 하수시스템(TWWS), 그리고 전체 도시물순환시스템(Total)에서 조사된 에너지 인텐시티 기술통계를 기반으로 제시되었다. 단계의 구분은 사분위수 값을 기준으로 수립하였으며, 각각의 단계에서 일사분위수 이상은 뛰어남(Excellent), 일사분위수와 중위값 사이는 좋음(Good), 중위값과 삼사분위수 사이는 좋지 않음(Poor), 그리고 삼사분위수 이하는 나쁨(Bad)의 4단계로 구분하였다. 공정 모델링 기반 도시 분류 가이드라인은 에너지 매트릭스를 기반으로 도시 물순환 시스템의 각각의 단계별 공정별 에너지 인텐시티의 일사분위수, 중위값, 삼사분위수 값으로 구성된 모델을 일정 인구(5만, 25만, 50만), 지하수 취수비율(50%) 및 물손실(0.3)의 경우에 분석하여, 기술통계 기반 도시 분류 가이드라인과 동일하게 뛰어남, 좋음, 좋지 않음, 나쁨의 4단계로 구분하였다. 각각의 기준을 통해 산정된 도시 분류 가이드라인 값은 [표 44]에 제시되어 있다.

동일한 도시물순환시스템을 기술통계 기반 가이드라인과 공정 모델링 기반 도시분류 가이드라인을 비교한 결과 기술통계 값이 상대적으로 적은 값을 제시하는 것으로 나타났다. 이는 공정 모델링 기반 분류 가이드라인은 모든 공정들을 고려하여 높은 값이 나타난 것으로 판단된다.

벤치마킹 적용시 기술통계 기반 가이드라인에 따라 벤치마킹이 수행 후, 단위 공정별 에너지 인텐시티 자료가 있을 경우 공정 모델링 기반 도시 분류 가이드라인을 적용할 수 있다.

표 43. 기술통계 기반 및 공정 모델링 기반 도시 분류 가이드라인

	기술통계 기반 도시 분류 가이드라인			공정 모델링 기반 도시 분류 가이드라인 (도시물순환시스템)
	상수 시스템	하수시스템	도시물순환시스템	
Excellent	~ 0.36	~ 0.47	0.87	~ 3.27
Good	0.36 ~ 0.52	0.47 ~ 0.58	0.87 ~ 1.21	3.27 ~ 3.57
Poor	0.52 ~ 0.90	0.58 ~ 0.93	1.21 ~ 1.69	3.57 ~ 4.15
Bad	0.90 ~	~ 0.93	1.69 ~	4.15 ~

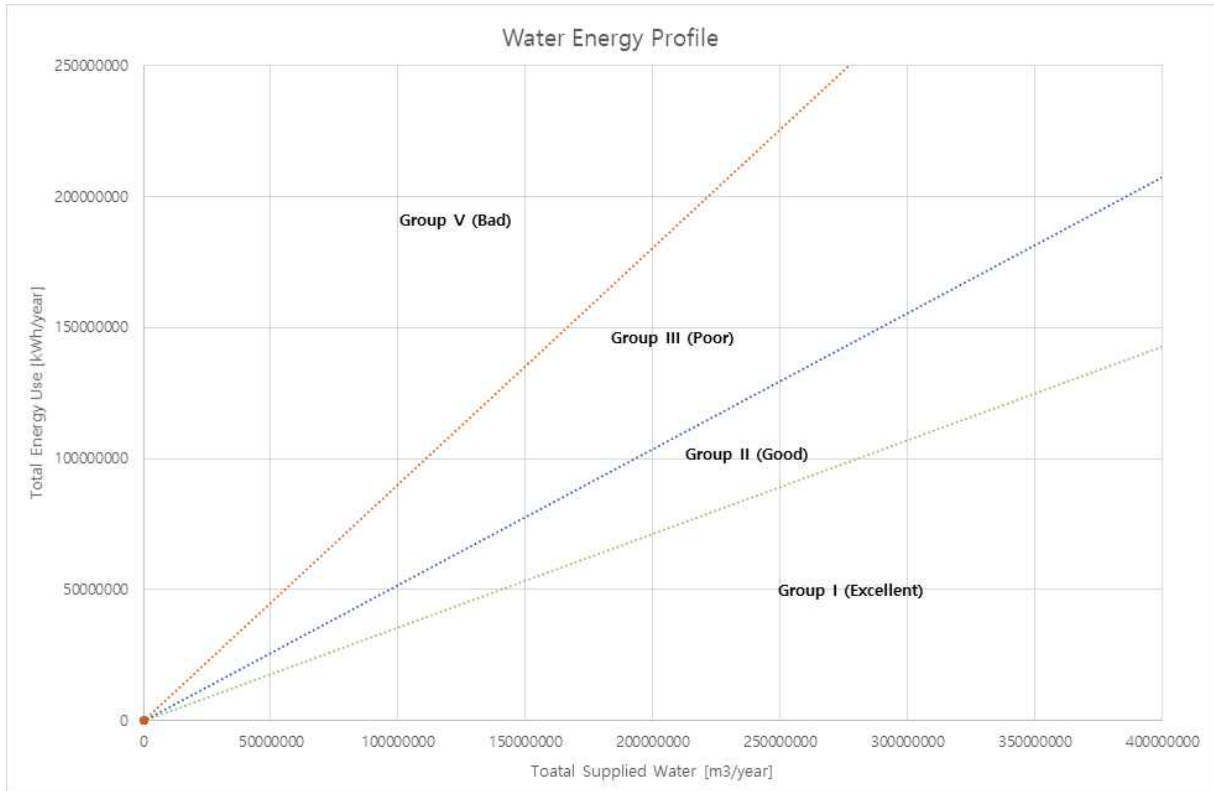


그림 49. 기술통계기반 상수 시스템 도시 분류 가이드라인

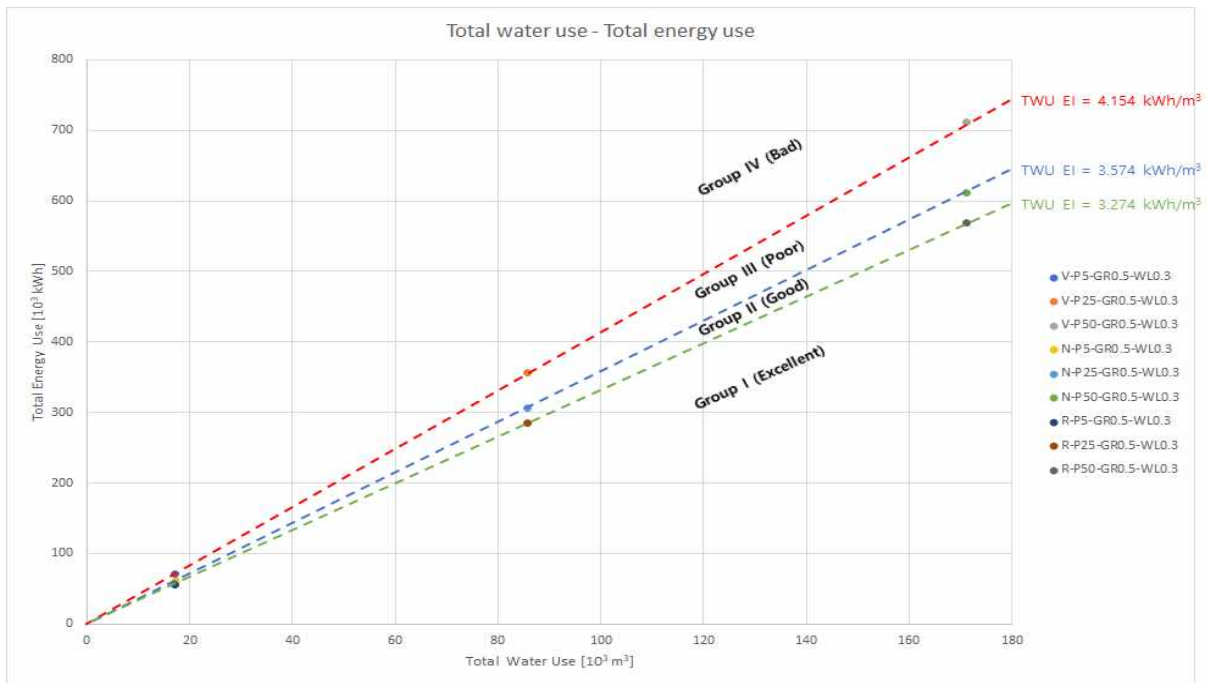


그림 50. 공정 모델링 기반 도시물순환 시스템 도시 분류 가이드라인

표 44. 도시 물순환 시스템 공정별 에너지 인텐시티 기술통계

대분류	Total		Abs.	Con.	Abs. Con	WT				Dis.	EU	WWC	WWT	WR	D	
	Total	TDWS				TWWS	Abs_g	Con_s	Abs. Con							WT_all
중분류	Total															
평균	2.334	1.029	1.024	0.822	0.910	0.820	0.294	0.382	-	11.983	54.491	0.181	0.494	1.072	0.053	
표준 오차	0.728	0.212	0.277	0.178	0.211	0.185	0.099	-	-	4691	51.297	0.080	0.044	0.238	0.014	
중앙값	1.210	0.519	0.580	0.505	0.370	0.396	0.090	0.382	-	3.170	3.211	0.061	0.440	0.820	0.054	
최빈값	1.155	0.850	0.840	0.415	0.882	0.040	0.029	-	-	3.170	-	0.710	0.410	0.820	0.055	
일사분위수	0.865	0.357	0.470	0.372	0.150	0.048	0.029	-	-	1.197	3.161	0.037	0.300	0.588	0.038	
삼사분위수	1.680	0.903	0.840	0.874	1.813	1.636	0.238	-	-	5.450	157.100	0.140	0.711	1.445	0.068	
표준 편차	3.492	1.646	1.327	0.794	1.099	0.927	0.560	-	-	30.761	102.593	0.264	0.246	0.880	0.034	
분산	12.191	2.708	1.760	0.630	1.208	0.860	0.314	-	-	946.217	10525.32	0.070	0.060	0.739	0.001	
첨도	13.661	26.006	8.237	4.636	1.513	-0.647	9.415	-	-	12.528	4.000	1.853	0.495	1.989	2.448	
왜도	3.584	4.594	3.008	2.197	1.448	0.968	3.098	-	-	3.955	2.000	1.846	1.037	1.608	-0.022	
범위	15.900	11.210	5.190	3.110	4.070	2.624	2.385	0.000	0.000	142.466	205.220	0.689	0.942	2.947	0.106	
최솟값	0.700	0.090	0.310	0.190	0.000	0.000	0.005	0.382	0.000	0.015	3.160	0.022	0.198	0.215	0.000	
최댓값	16.600	11.300	5.500	3.300	4.070	2.624	2.390	0.382	0.000	142.500	208.380	0.710	1.140	3.162	0.106	
관측수	23	60	23	20	27	25	32	1	0	43	4	11	31	13	6	
출처	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)	i)	j)	k)	l)	m)	n)	o)	p)

- a) The World Bank (2013); Mo et al. (2014); Hardy et al. (2012); Kenway et al. (2008); Amores et al. (2013); Lemos et al. (2013); Zappone et al. (2014); Miller et al. (2013); Venkatesh and Brattebø (2011); Racoviceanu et al. (2007); Maas (2009); The World Bank (2013); Mo et al. (2014); Hardy et al. (2012); Kenway et al. (2008); Amores et al. (2013); Lemos et al. (2013); Zappone et al. (2014); Miller et al. (2013); Venkatesh and Brattebø (2011); Racoviceanu et al. (2007); Wang et al. (2016); Li et al. (2016); Maddocks et al. (2015); Cheng (2002); Lundie et al. (2004); Friedrich et al. (2009); Stillwell et al. (2011); Lassaux et al. (2007)
- b) The World Bank (2013); Lam et al. (2016); Poussade et al. (2011); Hardy et al. (2012); Mo et al. (2014); California Energy Commission (2006); Cohen et al. (2004); Kenway et al. (2008); Majid et al. (2020); Tan et al. (2015); Maas (2009); Amores et al. (2013); Zappone et al. (2014); Lemos et al. (2013); Majid et al. (2020); Racoviceanu et al. (2007); Wang et al. (2016); Li et al. (2016); Maddocks et al. (2015); USGS (2000); Olsson (2012); Miller et al. (2013); Stillwell et al. (2011); Venkatesh and Brattebø (2011); Lassaux et al. (2007); Navigant Consulting (2014); Cheng (2002); Venkatesh et al. (2014); Lundie et al. (2004); Loubet et al. (2014); Danish Water and Waste Water Association (2014); Shrestha (2015); Friedrich et al. (2009); Western Resource Advocates (2009)
- c) The World Bank (2013); Mo et al. (2014); Kenway et al. (2008); Amores et al. (2013); Kenway et al. (2008); Lemos et al. (2013); Venkatesh and Brattebø (2011); Miller et al. (2013); Friedrich et al. (2009); Hardy et al. (2012); Maas (2009); Lundie et al. (2004); Zappone et al. (2014); Racoviceanu et al. (2007); Cheng (2002); Stillwell et al. (2011); Wang et al. (2016); Li et al. (2016); Lassaux et al. (2007)
- d) McMahon and Price (2011); Anderson (2006); Maas (2009); Maas (2010); Wang et al. (2012); Plappally & Lienhard (2012); Sala and Serra (2004); Tan et al. (2015); GEI Consultants & NC (2010); GEI Consultants & NC (2010); Liu et al. (2013); Gude et al. (2010); WRI (2014); Porse et al. (2020); Goldstein and Smith (2002); EPRI (2002)
- e) Raluy et al. (2005); Munoz et al. (2010); Stokes (2009); Dale (2004); Anderson (2006); Navigant Consulting (2006); Sydney Catchment Authority (2006); Sydney Catchment Authority (2010); Sydney Water Corporation (2012); NSW Government (2012); Klein et al. (2005); Cohen et al. (2004); Kneppers (2009); Maas (2009); Kenway et al. (2008); Plappally and Lienhard (2012); Tan et al. (2015); WBCDS (2009); Scott et al. (2009); AGDSEWPC (2010); Wang (2008); GEI Consultants & NC (2010); Liu et al. (2013); GAO (2012); EPRI (2002)
- f) Los Angeles Department of Water and Power (2011); Urban Water Management Plan (2010); California Energy Commission (2006); Klein et al. (2005); Olsson (2012); Plappally and Lienhard (2012); Corominas (2009); Cramwinckel (2009); Eltawil et al. (2008); Sala and Serra (2004); WPRI & WRF (2013); WaterRF US Study (2007); Hardy et al. (2012); Yokohama Waterworks Bureau (2011); Tokyo Metropolitan Government Bureau of Waterworks (2015); 1996 EPRI report (1996); Sapporo City Waterworks Bureau (2015); Shrestha (2015)
- g) Olsson (2012); Gleik (2009); Plappally & Lienhard (2012); Kenway et al. (2008); Porse et al. (2020); Buckley et al. (2011); Klein et al. (2005); Cohen et al. (2004); Kneppers (2009); Maas (2009); Navigant Consulting (2006); Burton (1996); Shrestha (2015); Sapporo City

- Waterworks Bureau (2015); California Energy Commission (2006); Los Angeles Department of Water and Power (2011); Urban Water Management Plan (2010); The City of San Diego (2015); California Energy Commission (2006); Burton (1996); 1996 EPRI report (1996)
- h) Goldstein and Smith (2002)
- j) Goldstein and Smith (2002); IDA (2012); NRC (2008); Younos and Tulou (2005); Plappally and Lienhard (2012); Liu et al. (2013); WBCDS (2009); Sala and Serra (2004); Medeazza (2005); Siddiqi & Anadon (2011); Tan et al. (2015); Rocheta and Peirson (2011); Xie (2009); Sydney Catchment Authority (2006); Sydney Catchment Authority (2010); Sydney Water Corporation (2012); NSW Government (2012); EPRI & WRF (2013); Stokes & Horvath (2006); Porse et al. (2020); NRC (2008); Cooley et al. (2006); GEI Consultants & NC (2010); GEI Consultants. (2009)
- k) Stokes and Horvath (2009); Lam et al. (2016); Kenway et al. (2008); Friedrich (2002); Klein et al. (2005); Cohen et al. (2004); Kneppers (2009); Maas (2009); Kenway et al. (2008); Navigant Consulting (2006); Rothausen and Conway (2011); Olsson (2015); Venkatesh and Brattebø (2011); City of Toronto (2015); Los Angeles Department of Water and Power (2011); Urban Water Management Plan (2010); The City of San Diego (2015); California Energy Commission (2006); 1996 EPRI report (1996); Liu et al. (2013); Miller et al. (2013); Smith et al. (2016); Cohen et al. (2004); Plappally and Lienhard (2012); Navigant Consulting (2014); Loubet et al. (2014); Hardy et al. (2012); Paul, R. (2014); Buckley et al. (2011); Cheng (2002); Corominas (2009); Cramwinckel (2009); Eltawil et al. (2008); Yokohama Waterworks Bureau (2011); Shrestha (2015); Venkatesh et al. (2014); Western Resource Advocates (2009); Iowa Study (2002); WaterRF US Study (2007); Sapporo City Waterworks Bureau (2015); City West Water Corporation (2014); Danish Water and Waste Water Association (2014)
- l) Sattenspiel and Wilson (2009); Cohen et al. (2004)
- m) Klein et al. (2005); Buckley et al. (2011); Kneppers (2009); GEI Consultants & NC (2010); Maas (2009); California Energy Commission (2006); GEI & Navigant Consulting (2009); Navigant Consulting (2006); GEI Consultants & NC (2010)
- n) Kenway et al. (2008); GEI Consultants & NC (2010); Marsh (2008); Plappally and Lienhard (2012); Sala and Serra (2004); Klein et al. (2005); WBCDS (2009); EPRI & WRF (2013); Hardy et al. (2012); Corominas (2009); Cramwinckel (2009); Eltawil et al. (2008); Goldstein and Smith (2002); Cohen et al. (2004); Buckley et al. (2011); Cheng (2002); EPRI (2002); Yang et al. (2008); Liu et al. (2013); Gude et al. (2010); WRI (2014); GAO (2012); Li et al. (2015); EPRI & WRF (2013)
- o) Cohen et al. (2004); Dimitriadis (2005); Plappally and Lienhard (2012); Sala and Serra (2004); Schroeder (2012); WBCDS (2009); Lam et al. (2016); Poussade et al. (2011); GAO (2012); Tan et al. (2015); Liu et al. (2013); GEI Consultants & NC (2010); Hardy et al. (2012); Corominas (2009); Cramwinckel (2009); Eltawil et al. (2008); Klein et al. (2005)
- p) Klein et al. (2005); Corominas (2009); Cramwinckel (2009); Eltawil et al. (2008); Klein et al. (2005); Cohen et al. (2004); Kneppers (2009); Maas (2009); Kenway et al. (2008); Navigant Consulting (2006); Hardy et al. (2012); Navigant Consulting (2006)

2.8.2 벤치마킹

기술통계기반 가이드라인에 따른 특광역시(부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 세종) 프로파일의 거동은 [그림 51]에 나타난 바와 같다. 광주와 대전은 뛰어난 그룹에 속하였으며, 세종, 대구, 인천은 좋은 그룹, 그리고 울산과 부산은 나쁨 그룹에 속하였다.

부산은 상수 시스템 물-에너지 사용 효율 관점에서 지난 10년간 좋지 않음 그룹에 속해 있으며 변화가 크지 않는 것으로 분석되었다. 대구, 대전, 울산은 점차적으로 효율이 나쁜 그룹으로 변경되어서 앞으로 지속적인 프로파일링과 개선이 필요한 것으로 판단되었다. 세종과 인천은 물사용량 증가에 따른 에너지 사용량의 증가가 확인되었으나 효율적인 측면에서 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 광주는 타 특·광역시와는 다르게 좋음 그룹에서 효율이 개선되고 있는 것으로 나타났다. 전 세계 관점에서 우리나라의 특광역시의 상수 시스템은 물-에너지 효율은 나쁘지 않은 것으로 분석되었다. 그러나 점차적으로 악화되고 있는 경향을 보여 이에 대한 대안이 필요하다고 판단된다.

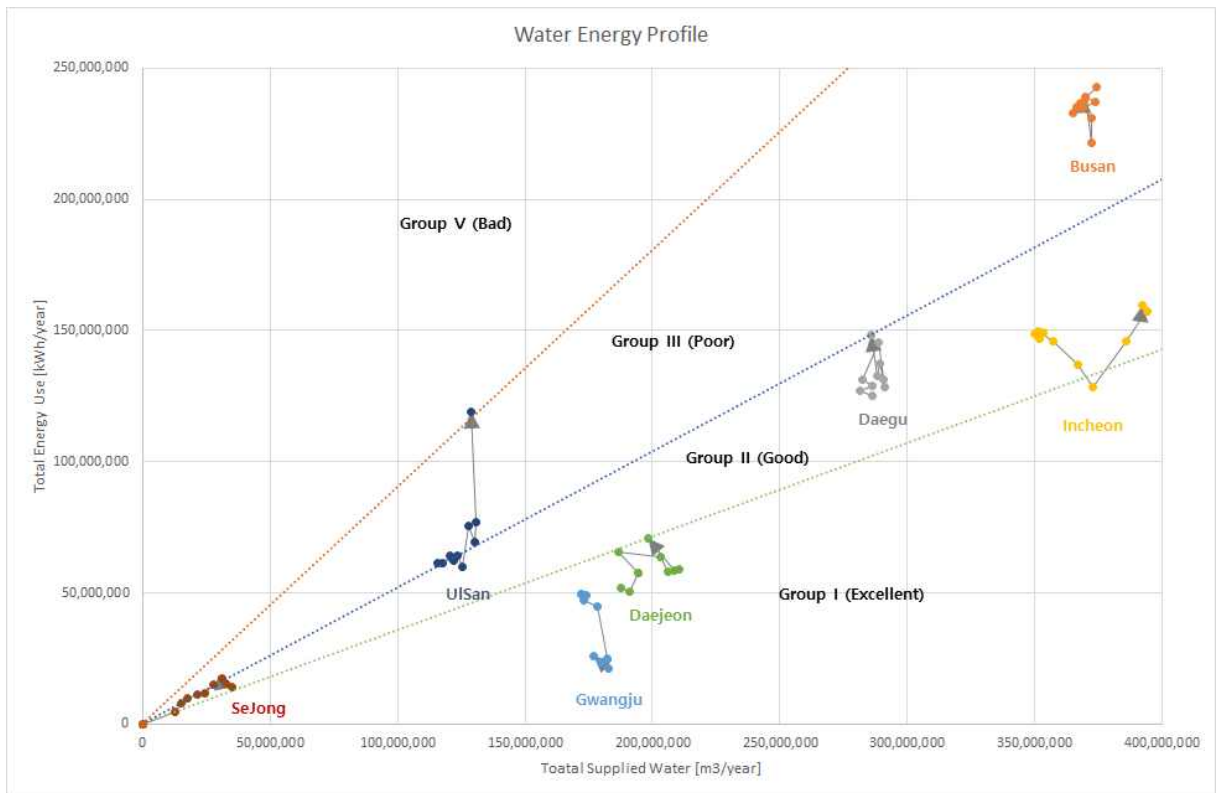


그림 51. 기술통계기반 가이드라인에 따른 특광역시 벤치마킹

공정 모델링 기반 가이드라인을 적용한 결과는 [그림 52]에 나타난 바와 같다. 전체적으로 해당 기준은 높은 값을 나타내었으며, 벤치마킹에 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

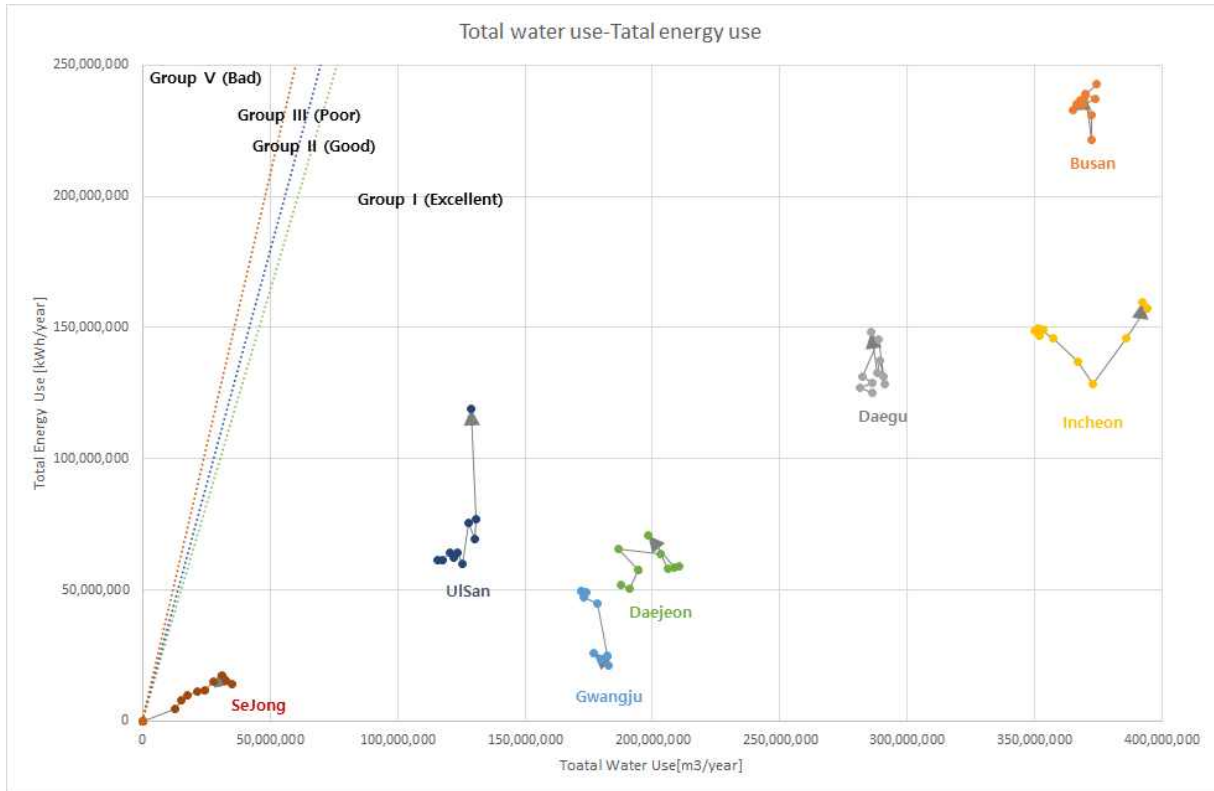


그림 52. 공정모델기반 가이드라인에 따른 특광역시 벤치마킹

2.9 총 사용수량, 유수량, 실 사용수량 영향 분석

2.9.1 총 사용수량, 유수량, 실 사용수량 특성

2차년도 연구 결과에 따르면 도시 물순환 시스템의 자원 사용에 대한 양적인 측면을 표현할 때는 총 사용수량과 총 에너지 사용량을 활용하는 것이 적합한 것으로 판단된다. 도시 물순환 시스템 내에서 취수되는 총량이 실질적으로 소모되는 자원의 양이므로, 유수량 또는 실 사용수량보다는 총 사용수량을 고려하는 것이 자원의 소모의 양적인 관점에서는 합리적이다.

그러나 효율적인 측면을 분석할 때는 총 사용수량 에너지 인텐시티를 적용하는 것 보다는, 실 사용수량 에너지 인텐시티를 이용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 일반적으로 활용되는 총 사용수량 에너지 인텐시티를 사용할 경우, 누수율이 높을수록 총 사용수량 에너지 인텐시티는 낮아지므로 누수율에 의해 효율이 왜곡되는 현상이 발생할 수 있다. 유수량 에너지 인텐시티의 경우 총 사용수량 에너지 인텐시티 보다 왜곡되는 정도는 적으나, 약간의 편향이 발생된다. 그러나 정확한 실 사용수량을 파악하기 위해서는 상수관망 물손실 분석을 통해서 누수율과 누수 중 명목손실과 실손실의 비율이 정확하게 계산되어야 한다. 그리고 관련 자료의 확보가 어려울 경우, 해당 도시 물순환 시스템에서 취득할 수 있는 자료 내에서의 분석이 필요하다.

표 45. 도시 물순환 시스템 변수 변동에 따른 인텐시티 별 궤적

변수	궤적		
	총 사용수량 EI	유수량 EI	실 사용수량 EI
인구, LPCD	EI유지 선	EI유지 선	EI유지 선
취수원 비율	수직이동	수직이동	수직이동
도시 에너지 인텐시티 여건	수직이동	수직이동	수직이동
누수율	EI보다 낮은 기울기의 선에 따른 이동	거의 수직 이동	수직이동

2.9.2 제주

제주는 본연 구에서 분석대상을 설정한 다른 도시 범위의 특광역시들과는 다르게 높은 누수율을 나타내고 있으며, 2.7.8절에서 분석된 바와 같이 2014년 잘못 산정해오던 누수율을 현행화하여 누수율이 2013년 15.5%에서 2014년 43.0%로 급격하게 증가하였다. 이에 따라 일반적으로 널리 적용되는 총 사용수량과 총 에너지 사용량에 기반한 사용량과 사용효율에 대한 프로파일 궤적은 [그림 53]과 같이 나타나게 된다. 이와 같은 경우 누수율 증가로 인해 총 사용수량 에너지 인텐시티는 1.87에서 1.14로 감소하여 사용 효율이 개선되는 것과 같은 해석의 왜곡이 발생하게 된다.

일반적으로 활용되고 있는 총 사용수량 기반의 물과 에너지 사용량과 사용효율 분석의 한계점을 극복하기 위해 총 유수량 또는 실 사용수량에 기반한 분석이 필요하며 그 결과는 [그림 54], [그림 55]에 나타나 있다. 해당 수량을 사용할 경우 그림과 같이 높은 누수율 또는 누수율 증가에 따른 왜곡 현상을 줄일 수 있다.

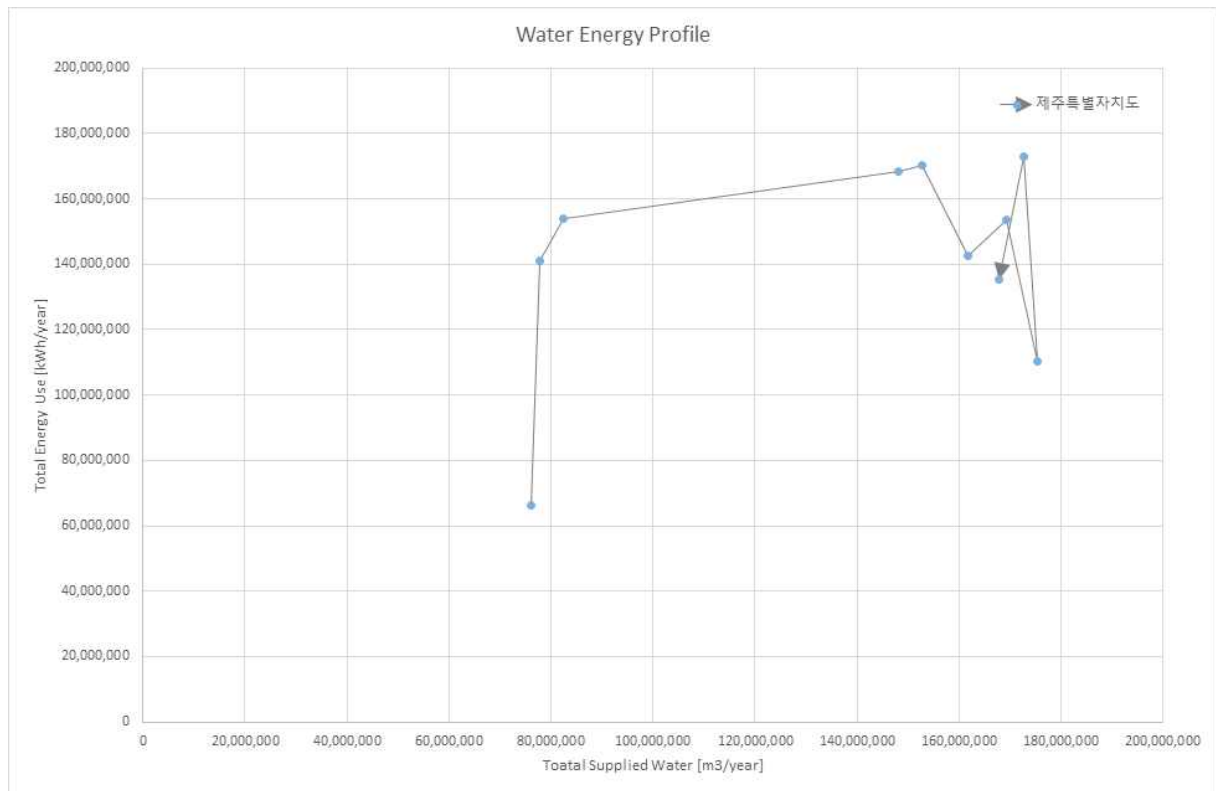


그림 53. 총 사용수량 기반 제주 물-에너지 프로파일 궤적

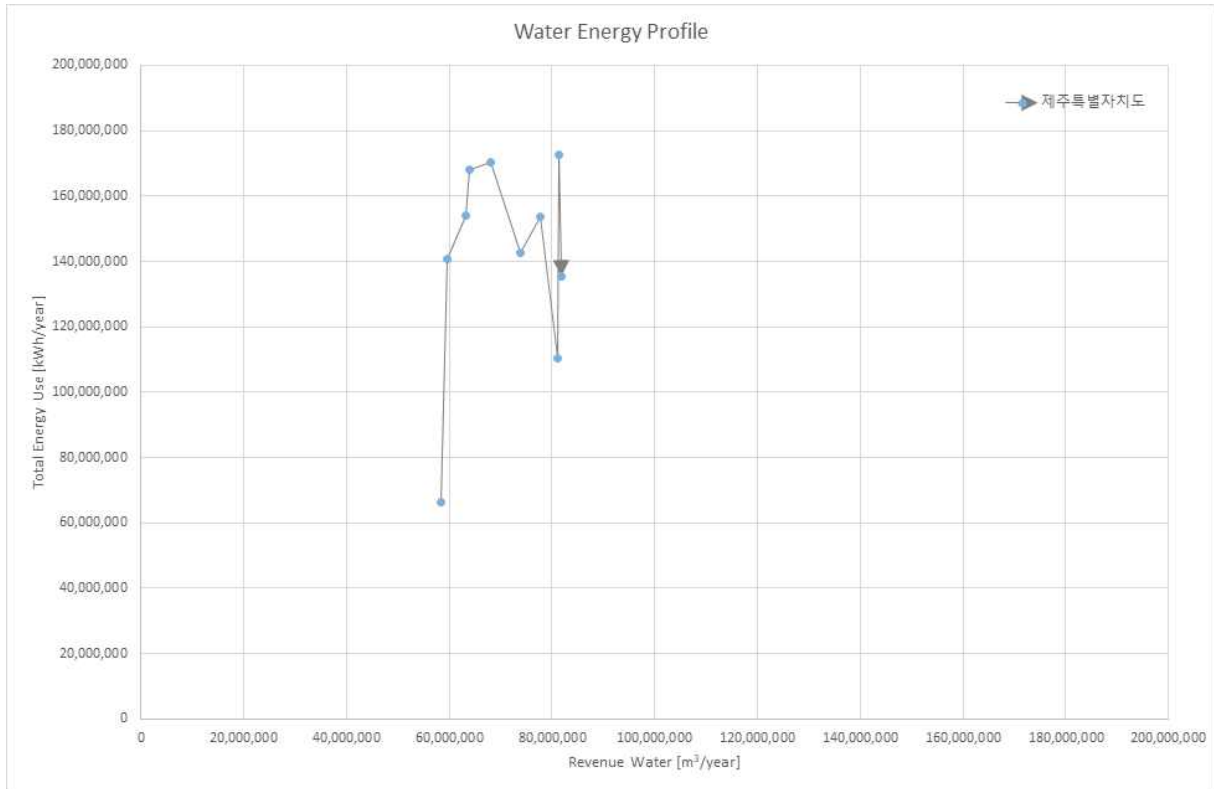


그림 54. 유수수량 기반 제주 물-에너지 프로파일 궤적

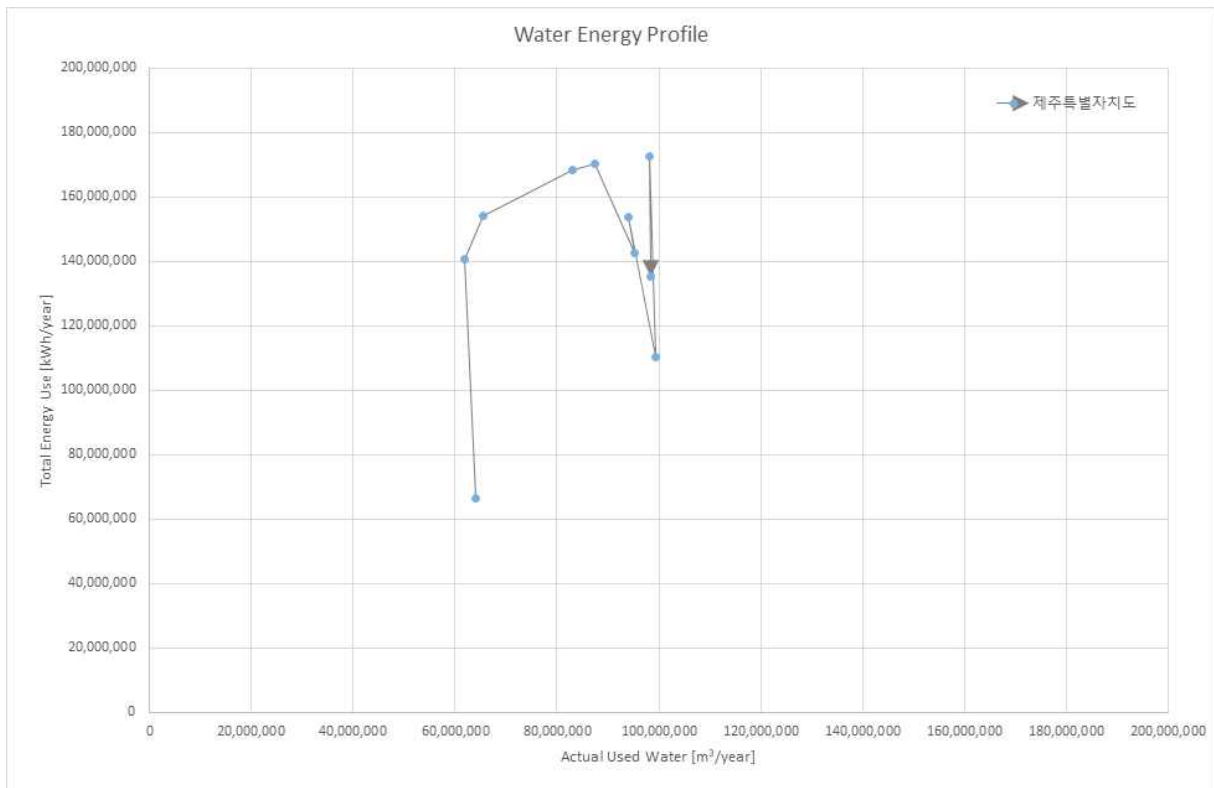


그림 55. 실 사용 수량 기반 제주 물-에너지 프로파일 궤적

제 3 장 결론

3차년도 연구에서는 우리나라 상수 시스템의 지난 10년간 물-에너지 사용량 및 사용효율을 넥서스 관점에서 분석을 통해 1·2차년도의 모델링에 기반한 연구결과를 입증하였고, 이를 바탕으로 최종적으로 도시 물순환 시스템 관리 전략 방향 및 실행계획을 제시하는 것을 연구 목적으로 하였다. 이를 위해 우리나라 특광역시(부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 세종)와 제주도를 대상으로 물-에너지 사용량 및 사용효율 변화를 분석 목적의 넥서스 프로파일링과 국외 도시와 비교를 위한 벤치마킹을 수행하였다. 물-에너지 넥서스 프로파일링은 분석 범위 설정, 자료처리, 기본경향 분석, 영향요인 도출, 스냅샷 및 궤적 분석, 원인 도출의 6단계로 진행되며, 각 도시별로 프로파일 변동성 및 경향, 변화 원인 그리고 향후 추세와 개선방안을 포함한 시사점을 도출하였다. 그리고 2차년도에 제시된 에너지 인텐시티 매트릭스 기반의 벤치마킹 가이드라인을 우리나라 도시에 적용하여 전 세계 관점에서 우리나라 도시의 물-에너지 사용효율 수준을 비교하였다. 이를 통해 도출된 주요 결과는 아래와 같다.

첫 번째로 프로파일의 스냅샷에 기반한 해당 도시의 현 위치(사용량 및 사용효율)의 원인을 정량적으로 설명하기는 어려웠다. 기후와 외부적인 요소(연평균 강수량, 가뭄, 기후유형 등), 지리적 특징(표고차, 평지비, 내륙·해안 위치 등), 시스템 특징(도시 총 급수량, 도시인구, 인구밀도, 관로연장 등) 및 시스템의 운영관리(상수관망 수압, 누수율, 시스템 에너지 효율, 물 절약 등)와 일반적으로 밀접한 연관이 있는 현재의 물-에너지 사용량과 에너지 인텐시티로 표현되는 사용효율을 몇몇 개의 요소만으로 그 원인을 제시하지 못하였다. 그러나 해당 도시의 상수 시스템에서 어느 공정(취수&도수, 정수처리&송수, 배급수)에서 에너지 인텐시티가 높은 값을 나타내는지 파악이 가능하였다.

두 번째로 처음으로 도출된 결론에 따라 프로파일 분석 시 스냅샷 분석과 궤적분석이 동시에 수행하여야 함을 알 수 있었다. 위에 언급된 바와 같이 인텐시티 값 원인의 규명이 복잡하여 스냅샷 분석을 통해 분석할 수 있는 것들은 제한적이었으나, 궤적분석을 통해 변동의 원인을 파악하는 것은 가능한 것으로 판단되었다. 따라서 궤도분석에 기반하여 도시물순환 시스템의 전략과 실행계획을 수립하고 적용하는 것이 더 효율적일 수 있다.

세 번째로 2차년도 연구결과에서 제시된 바와 같이 도시여건, 외부요인, 운영효율에 따른 프로파일의 이동 궤적의 실증사례를 3차년도 연구를 통해 확인할 수 있었다. 시스템의 에너지 효율 개선으로 인한 프로파일의 수직 방향 감소(광주), 인구 및 LPCD 증감에 따른 사선 방향 궤적(인천, 세종, 부산), 누수율의 급격한 증가로 인해 수평 방향으로 프로파일 궤적이 변동(제주)을 명확하게 프로파일을 통해 확인할 수 있었다.

네 번째로 2차년도 연구에서 제시된 기술통계기반 에너지 인텐시티 가이드라인을 우리나라 특광역시에 적용하여, 각 광역지자체별 현황을 다른 국외 도시들과 비교가 가능하였으

며, 이를 통해 개선이 필요한지 여부를 판단할 수 있다.

마지막으로, 본 연구는 자료의 한계로 인해 도시 물순환 시스템에 물-에너지 넥서스 프로파일을 적용하지 못하고, 상수 시스템으로 한정하여 분석을 수행하였다. 그리고 분석에 사용된 자료(상수도통계)는 물 중심의 관점에서 작성되는 자료여서 해당 자료 분석으로 넥서스 관점에서 분석하는 데는 한계가 있었다. 그리고 조사된 자료들은 자료입력 가이드라인 부재, 자료 부족, 입력자의 낮은 숙련도 및 기입 오류 등으로 신뢰성이 낮은 자료인 경우들이 존재하였다. 앞으로 넥서스관점의 도시 물순환 시스템 분석을 위해서는 자료를 어떻게 조사하고 정확성을 확보하는 방안이 지속적으로 제시되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- UNESCO i-WSSM. (2020). 도시 물순환 시스템 물손실 관리를 위한 물-에너지-환경 넥서스 연구: 물-에너지-토지연계 전략수립을 위한 공동연구.
- UNESCO i-WSSM. (2021). 물-에너지-환경 넥서스 연구(2차년도): 도시 여건, 외부영향 및 운영관리 효율이 도시 물순환 시스템에 미치는 영향.
- AGDSEWPC. Moving water long distances: grand schemes or pipe dreams. [Online] Canberra: Dept. of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities 2010; 2013.<<http://www.environment.gov.au/water/publications/action/pubs/moving-water.pdf>>.
- 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.
- Anderson, J. M. (2006). Integrating recycled water into urban water supply solutions. *Desalination*, 187(1-3), 1-9.
- Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H. D., & McCandless, M. (2013). The water-energy-food security nexus: Towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management (pp. 16-20). Winnipeg: International Institute for Sustainable Development.
- Brandi, C.; Richerzhagen, C.; Stepping, K. (2013). Why is the Water-Energy-Land Nexus Important for the Future Development Agenda? Briefing Paper; German Development Institute/Deutsches Institut für Entwicklungspolitik: Bonn, Germany.
- Buckley, C., Friedrich, E., & Von Blottnitz, H. (2011). Life-cycle assessments in the South African water sector: A review and future challenges. *Water Sa*, 37(5), 719-726.
- California Energy Commission. (2006). 2006 California Commercial End-Use Survey (CEUS). California Energy Commission.

- 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.
- Chhipi-Shrestha, G. K., Hewage, K., & Sadiq, R. (2015). System dynamics modelling for an urban water system: Net-zero water analysis for Peachland (BC).
- City of San Diego. (2015). Climate Action Plan. San Diego, California.
- City West Water. (2014). Annual Report for the year ended. Victoria, Australia.
- Cohen, R., Wolff, G., & Nelson, B. (2004). Energy down the drain. *Water Supply*.
- Cooley, H., Gleick, P. H., & Wolff, G. H. (2006). Desalination, with a grain of salt: a California perspective.
- Daher, B., Mohtar, R. H., Lee, S. H., & Assi, A. (2017). Modeling the Water Energy Food Nexus: A 7 Question Guideline. *Water Energy Food Nexus: Principles and Practices*, 55-66.
- Dale, L. (2004). Electricity price and Southern California's water supply options. *Resources, conservation and recycling*, 42(4), 337-350.
- Danish Water and Waste Water Association. (2014). Water in figures 2014: DANVA Benchmarking 2014 - process benchmarking and statistics. Dansk Vand- og Spledevandsforening (DANVA).
- Dimitriadis, S. (2005). Issues encountered in advancing Australia's water recycling schemes.
- Electric Power Research Institute (EPRI), & Water Research Foundation (WRF), (2013). Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries., Canada.
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2002). Water and Sustainability: U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment—The Next Half Century, EPRI, Palo Alto, CA: 2000. 1006787.

- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2008, March). Renewable energy powered desalination systems: technologies and economics-state of the art. In Twelfth international water technology conference, IWTC12 (pp. 1-38).
- Friedrich, E. (2002). Life-cycle assessment as an environmental management tool in the production of potable water. *Water Science and Technology*, 46(9), 29-36.
- Friedrich, E., Pillay, S., & Buckley, C. A. (2009). Carbon footprint analysis for increasing water supply and sanitation in South Africa: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 17(1), 1-12.
- GEI Consultants & Navigant Consulting. (2010). Embedded Energy in Water Studies - Study 2: Water Agency and Function Component Study and Embedded Energy-Water Load Profiles. California Public Utilities Commission Energy Division.
- Gleick, P. H. (2009). Facing down the hydro-crisis. *World Policy Journal*, 26(4), 17-23.
- Goldstein, R., & Smith, W. (2002). Water & sustainability (volume 4): US electricity consumption for water supply & treatment-the next half century. Electric Power Research Institute.
- Griffiths-Sattenspiel, B., & Wilson, W. (2009). The carbon footprint of water. River Network, Portland.
- Gude, V. G., Nirmalakhandan, N., & Deng, S. (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2641-2654.
- Hardy, L., Garrido, A., & Juana, L. (2012). Evaluation of Spain's water-energy nexus. *International Journal of Water Resources Development*, 28(1), 151-170.
- Huang, C., Li, Y., Li, X., Wang, H., Yan, J., Wang, X., ... & Li, F. (2018). Understanding the water-energy nexus in urban water supply systems with city features. *Energy Procedia*, 152, 265-270.

- IDA (2012). "Desalination Yearbook 2010-2011." International Desalination Association (IDA).
- 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.
- Klein, G., Krebs, M., Hall, V., O'Brien, T., & Blevins, B. (2005). California's Water - Energy Relationship. California, USA.
- Kneppers, B., Birchfield, D., & Lawton, M. (2009). Energy-water relationships in reticulated water infrastructure systems. *Water Supply (kWh/Capita)*, 76(20.86), 75-15.
- Lam, K. L., Lant, P. A., O'Brien, K. R., & Kenway, S. J. (2016). Comparison of water-energy trajectories of two major regions experiencing water shortage. *Journal of environmental management*, 181, 403-412.
- Lassaux, S., Renzoni, R., & Germain, A. (2007). Life Cycle Assessment of Water: From the pumping station to the wastewater treatment plant (9 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(2), 118-126.
- Lemos, D., Dias, A. C., Gabarrell, X., & Arroja, L. (2013). Environmental assessment of an urban water system. *Journal of Cleaner Production*, 54, 157-165.
- 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.
- Liu, J., Yang, H., Cudennec, C., Gain, A. K., Hoff, H., Lawford, R., ... & Zheng, C. (2017). Challenges in operationalizing the water - energy - food nexus. *Hydrological Sciences Journal*, 62(11), 1714-1720.
- Liu, J., Zang, C., Tian, S., Liu, J., Yang, H., Jia, S., ... & Zhang, M. (2013). Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward. *Global Environmental Change*, 23(3), 633-643.

- Los Angeles Department of Water and Power. (2011). Urban Water Management Plan 2010. Los Angeles, California.
- Loubet, P., Roux, P., Loiseau, E., & Bellon-Maurel, V. (2014). Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. *Water Research*, 67, 187-202.
- Lundie, S., Peters, G. M., & Beavis, P. C. (2004). Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning.
- Maas, C. (2009). Greenhouse gas and energy co-benefits of water conservation. POLIS Project on Ecological Governance, University of Victoria.
- 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.
- Maddocks, A., Young, R. S., & Reig, P. (2015, August 26). Ranking the world's most water-stressed countries in 2040. World Resources Institute. Retrieved April 4, 2022, from <https://www.wri.org/insights/ranking-worlds-most-water-stressed-countries-2040>
- Majid, A., Cardenes, I., Zorn, C., Russell, T., Colquhoun, K., Bañares-Alcantara, R., & Hall, J. W. (2020). An analysis of electricity consumption patterns in the water and wastewater sectors in South East England, UK. *Water*, 12(1), 225.
- Marsh, D. M. (2008). The water-energy nexus: a comprehensive analysis in the context of New South Wales (Doctoral dissertation).
- McMahon, J. E., & Price, S. K. (2011). Water and energy interactions. *Annual review of environment and resources*, 36, 163-191.
- 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.

- 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.
- 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.
- Nair, S., George, B., Malano, H. M., Arora, M., & Nawarathna, B. (2014). Water - energy - greenhouse gas nexus of urban water systems: Review of concepts, state-of-art and methods. *Resources, Conservation and Recycling*, 89, 1-10.
- National Research Council (NRC). (2008). *Desalination: A national perspective*. National Academies Press.
- Navigant Consulting. (2006). *REFINING ESTIMATES OF WATER-RELATED ENERGY USE IN CALIFORNIA*.
- Navigant Consulting. (2014). *Water-Energy Cost Effectiveness Analysis: Public Workshop Presentation of Work Plan*.
- NSW Government. (2012). *Sydney Catchment Authority Answers to Questions on Notice*.
- Olsson, G. (2012). ICA and me - a subjective review. *Water research*, 46(6), 1585-1624.
- Olsson, G. (2015). *Water and energy: threats and opportunities*. IWA publishing.
- Pittock, J., Dumaresq, D., & Bassi, A. M. (2016). Modeling the hydropower - food nexus in large river basins: A mekong case study. *Water*, 8(10), 425.
- Plappally, A. K. & Lienhard, V. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4818-4848.

- Porse, E., Mika, K. B., Escriva-Bou, A., Fournier, E. D., Sanders, K. T., Spang, E., ... & Pincetl, S. (2020). Energy use for urban water management by utilities and households in Los Angeles. *Environmental Research Communications*, 2(1), 015003.
- Poussade, Y., Vince, F., & Robillot, C. (2011). Energy consumption and greenhouse gases emissions from the use of alternative water sources in South East Queensland. *Water Science and Technology: Water Supply*, 11(3), 281-287.
- 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.
- Raluy, R. G., Serra, L., & Uche, J. (2005). Life cycle assessment of water production technologies-part 1: life cycle assessment of different commercial desalination technologies (MSF, MED, RO)(9 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(4), 285-293.
- Rocheta, E., & Peirson, W. (2011). Urban water supply in a carbon constrained Australia. UNSW Water Research Centre.
- Rothausen, S. G., & Conway, D. (2011). Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, 1(4), 210-219.
- Sala, L., & Serra, M. (2004). Towards sustainability in water recycling. *Water Science and Technology*, 50(2), 1-7.
- Schroeder, J. (2012). S-127: ISEE Symposia: Improving the Linkages between Air Pollution Epidemiology, Qualitative Science Assessment, and Quantitative Risk Assessment. *Epidemiology*, 23(5S).
- 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: Temple, AZ, USA.

- Shrestha, S. (2015). *Water-Energy-Carbon Nexus in Cities: Cases from Bangkok, New Delhi, Tokyo. Water Energy Food Nexus: International Cooperation and Technology Transfer*; Asian Institute of Technology: Paris, France.
- Siddiqi, A., & Anadon, L. D. (2011). The water - energy nexus in Middle East and North Africa. *Energy policy*, 39(8), 4529-4540.
- Smith, K., Liu, S., & Chang, T. (2016). Contribution of urban water supply to greenhouse gas emissions in China. *Journal of Industrial Ecology*, 20(4), 792-802.
- Stillwell, A. S., King, C. W., Webber, M. E., Duncan, I. J., & Hardberger, A. (2011). The energy-water nexus in Texas. *Ecology and Society*, 16(1).
- Stokes, J. R., & Horvath, A. (2009). Energy and air emission effects of water supply.
- Sydney Metropolitan Catchment Management Authority. (2006). *Annual Report*. Sydney Metropolitan Catchment Management Authority, Australia.
- Sydney Metropolitan Catchment Management Authority. (2010). *Annual Report*. Sydney Metropolitan Catchment Management Authority, Australia.
- Sydney Water. (2012). *Sydney Water Operating License Environment Report: Environment Plan 2011-16 Annual Report Environmental Indicators Report 2011-12*. Sydney Water, Australia.
- Tan, D., Hu, F., Thieriot, H., & McGregor, D. (2015). Towards a water & energy secure China. *China Water Risk*.
- 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.
- Venkatesh, G., Chan, A., & Brattebø, H. (2014). Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: comparison of four city case studies and the relevant influencing factors. *Energy*, 75, 153-166.

- Von Medeazza, G. M. (2005). "Direct" and socially-induced environmental impacts of desalination. *Desalination*, 185(1-3), 57-70.
- 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.
- Wang, L., Chen, D., Liu, W., Ma, Y., Wu, Y., & Deng, Z. (2012). DDDAS-based parallel simulation of threat management for urban water distribution systems. *Computing in Science & Engineering*, 16(1), 8-17.
- Weitz, N.; Humber-Lee, A.; Nilsson, M.; Davis, M.; Hoff, H. (2014). Cross-Sectoral Integration in the Sustainable Development Goals: A Nexus Approach; Discussion Paper; Stockholm Environment Institute (SEI): Stockholm, Sweden.
- Western Resource Advocates. (2009). Water Conservation = Energy Conservation: A Report for the CWCB, Western Resource Advocates Stacy Tellinghuisen. Energy/Water Analyst.
- WRI. (2014). Water - Energy Nexus of Urban Water Systems for Chengdu's Low-Carbon Blueprint. World resources institute. <http://www.wri.org.cn/Chengduwater>.
- Xie, J. (2009). Addressing China's water scarcity: recommendations for selected water resource management issues.
- Yang, H., Yang, D., Lei, Z., & Sun, F. (2008). New analytical derivation of the mean annual water energy balance equation. *Water resources research*, 44(3).
- Younos, T., & Tulou, K. E. (2005). Overview of desalination techniques. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 132(1), 3-10.
- 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.