

경제 및 환경과 관련된 물 효율성 분석의 최근 문헌에 관한 연구*

김 영 준** · 김 창 희***

《目 次》

요약	Ⅲ. 문헌 조사
I. 서 론	Ⅳ. 결 론
Ⅱ. 자료 수집	

요약

최근 물에 대한 관심이 높아지고 있다. 물은 한정된 자원으로 모든 생명체의 삶에 필수적인 요소인 만큼, 효율적인 사용에 대한 관심 역시 함께 높아지고 있는 추세에 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 물 효율성에 대한 최근 3개년의 문헌에 대해 조사하고, 이를 정리하였다. 본 연구에서 정리한 물 효율성에 대한 연구는 비모수적인 효율성 측정 방법인 자료포락분석(DEA: Data Envelopment Analysis)을 활용한 연구로 한정하였으며, 선행 연구에 따라 분류된 다양한 물 효율성 중에서 생태효율성, 농장효율성, 도시효율성, 투자효율성, 시스템효율성, 경제효율성, 자원효율성을 망라하는 개념인 경제 및 환경과 관련된 물 효율성을 중심으로 살펴보았다. 본 연구에서 조사한 해외 문헌 연구들의 물 관리 효율성 지표들을 중심으로 추후 진행될 국내의 경제 및 환경과 관련된 물 효율성 측정에 대한 기반을 마련하였다는 것에 본 연구의 의의가 있다.

Keywords: Data Envelopment Analysis, Water Efficiency, Literature Study, Economy and Environment

* 본 연구는 서울대학교 경영정보연구소의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

해당 연구는 K-water 전문가포럼 단기공동연구과제로 수행된 연구에서 발췌 및 재정리하였으며, K-Water 연구원 물정책연구소의 허가를 받아 본 학술지에 투고되었습니다.

** 인천대학교 경영학부

*** 인천대학교 경영학부(ckim@inu.ac.kr), 교신저자

I. 서론

물은 우리 지구에 사는 모든 사람들의 삶에 필수적인 요소이다. 하지만 인구의 증가, 생활수준의 향상, 소비패턴의 변화, 관개 농업의 확대에 따른 물 수요의 증가로, 물 부족은 이제 인간의 지속 가능한 발전에 명백한 위협이 되고 있다(Vörösmarty et al., 2000). 전지구적 수준과 연간 기준으로 부족함 없이 물을 사용할 수 있지만, 물 수요 및 가용성의 공간적, 시간적 차이는 특정 기간 동안 세계 여러 지역에서 심각한 물 부족을 초래하고 있다(Mekonnen and Hoekstra, 2016). 이에 세계경제포럼(WEF)은 최근 위험보고서에서 물 위기가 잠재적으로 가장 큰 세계적 위험이라 평가하며, 물 위기에 대한 긴급한 대처를 촉구하고 있다(Risks, 2015).

따라서 세계의 많은 지역에서 물 수요와 가용성의 균형이 위험한 상황에 있어, 앞으로의 물 위기와 수자원 관리에 대한 지속 가능한 접근은 필수적이라 할 수 있으며, 유익하지 않은 물 손실을 최소화해야 할 필요가 있다. 즉, 향후의 물 부족에 대처하기 위해서는 물 소비 효율을 합리화하고 최적화해야 한다(Mancosu et al. 2015). 이러한 의미에서 물 효율성은 아주 중요한 의미를 가지며(Castillo et al. 2018; Zheng et al. 2019; Ullah et al. 2019), 우리는 직면한 문제를 해결하기 위해 물 관리의 모든 측면에 대한 연구를 해야 할 필요가 있다(Cosgrove and Loucks, 2015).

물 관리와 관련하여 일반적으로 통용되는 효율성에는 물사용효율성(Water-use Efficiency)뿐만 아니라, 상하수도효율성(Water and Sewage Efficiency), 폐수처리효율성(Waste-water Treatment Efficiency), 물절약효율성(Water-Saving Efficiency) 등 다양한 효율성 지표가 사용되고 있으며, 이를 활용한 연구들이 여러 부문에서 진행되고 있다.

이에 국내에서도 향후의 물 위기에 대처하고, 물이용 효율성을 제고하기 위해 해외 우수 사례를 충분히 살펴봄으로써, 관리 대책을 마련하고 정책을 입안할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 최근 3년간의 물과 관련된 효율성을 연구한 해외 SCI급 연구를 수집 및 분석하여 제시하는 것을 목적으로 한다.

II. 자료 수집

먼저, Elsevier, Springer, ACSESS DL 등 Journal Database에서 Water use efficiency, Water process efficiency, Water and sewage efficiency 등의 키워드로 검색하여 도출된 연구들을 수집하였다. 다음으로 Google Scholar 인용수 상위 3페이지에 속하는 연구들 중 2016년부터 2018년까지의 3개년 치에 해당하는 최근의 문헌들을 수집하였다. 마지막으로, 수집된 문헌

들의 전문을 확인함으로써, 순수과학, 화학공학 등 본 연구의 목적과 무관한 분야의 문헌들은 제외하였다.

물과 관련된 분야에서 문헌을 분류하여 분류하는 것은 다소 복잡하다. 일반적으로, 다양한 기존의 문헌들을 리뷰하는 연구는 전문가들의 의견을 이용하여 문헌을 분류하고 그룹핑을 한다. 하지만 본 연구의 수행에 있어 전문가의 의견을 구하는 데에는 시간적, 금전적인 제한 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 Mardani et al. (2017)에서의 적용분야 분류를 참조하여 문헌을 분류 및 분류하였다. 본 연구의 적용분야는 전체 8분야이며, 관련 효율성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 적용분야 및 관련 효율성

적용분야	관련 효율성
경제 및 환경효율성	생태효율성, 농장효율성, 도시효율성, 투자효율성, 시스템효율성, 경제효율성, 자원효율성 등
성과효율성	공장효율성, 기업효율성, 서비스효율성, 농장효율성, 상수도효율성, 성과효율성, 에너지효율성 등
물 효율성	물사용효율성, 수자원사용효율성, 하수처리효율성 등
에너지효율성	에너지효율성, 수자원효율성, 자원사용효율성 등
환경효율성	환경효율성, 환경규제효율성, 지역환경효율성 등
통합효율성	통합효율성, 결합 효율성 등
에너지절약	에너지절약효율성, 에너지환경효율성 등
재생가능 및 지속가능한 에너지	경제효율성, 시설효율성 등

이 중, 본 연구에서 다룰 경제 및 환경효율성은 생태효율성, 농장효율성, 도시효율성, 투자효율성, 시스템효율성, 경제효율성, 자원효율성을 망라하는 개념이다. 경제활동은 에너지 자본, 노동 등을 이용하여 필요한 물건을 생산하고 이익을 창출하지만, 온실가스배출 같은 원치 않는 생산물을 동시에 만든다. 만약 제조 공정에 있어 높은 수준의 배출이 이루어지거나 생태학적 영향을 야기하는 화석연료나 기계의 사용에 과도하게 의존하거나, 재정적으로 불충분하지 않은 경우, 이는 생태학적인 문제를 야기할 수 있다.

경제 및 환경효율성은 생산 공정의 생태학적 효과에 대한 생산물 및 시설 등의 경제적 가치와 관련된 비율을 통해 환경 효율을 확인할 수 있다. 또한 거시경제 수준에서의 환경효율성은 GDP와 CO2 배출량의 관계와 같은 지표를 통해 파악하며, 미시경제 수준에서의 환경 효율성은 생태 활동 지표와 관련된 전체 또는 샘플을 통해 광범위하게 검토된다.

Ⅲ. 문헌 조사

3.1 2016년의 경제 및 환경 효율성 문헌에 대한 연구

Egilmez et al. (2016)에서는 미국의 33개 식품제조업에 대한 지속가능성 성과 평가를 수행하기 위해 라이프 사이클 평가(EIO-LCA) 및 Fuzzy DEA 접근 방식을 결합한 모델과 민감도 분석을 이용하였다. 에너지발자국, 탄소발자국, 물발자국, 경작지, 목초지, 어장을 투입물로 사용하고, 총생산량을 산출물로 사용하여 생태 효율성을 분석하였으며, 이에 따라 식품제조업의 지속 가능성 성과 지수를 정량화하였다.

Ullah et al. (2016)에서는 LCA와 DEA를 결합한 3단계 모델을 이용하여 파키스탄의 169개 관계 먼 작물 공장의 경제 및 기술적 성과, 환경적 성과를 검토한다. 토지, 물, 기계, 연료, 비료, 살충제 사용을 투입물로 사용하고, 생산량과 방출량을 산출물로 사용하여 기술효율성 및 환경효율성을 측정하였으며, 이에 따른 정책적 시사점을 제공하였다.

Nabavi-Pelesaei et al. (2016)에서는 DEA와 MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)를 이용하여 이란의 39개 밀 농장의 기술효율성, 순수기술효율성, 규모효율성을 측정한다. 인력, 기계, 살충제, 관개용 물, 전기, 화학 비료 및 디젤 연료를 투입물로 사용하고, 밀 생산량을 산출물로 사용하였으며, 이에 따른 정책적 시사점을 제공하였다.

Storto (2016)에서는 Shannon's Entropy Method를 이용한 일부 DEA Cross-Efficiency 모델이 제공하는 측정치를 종합하여 도시의 생태적 효율을 계산하는 종합지수를 산출한다. 도시인구, 도시면적을 투입물로 사용하였으며, 폐수정화서비스를 제공받는 도의 인구, 도시폐기물 발생량, 공공건물 지붕에 설치된 태양광발전소의 총전력량, 시민들이 이용할 수 있는 도시녹지의 총량, 대중교통 수요, 도시에 거주하는 사람들이 소유한 유로 IV와 유로 V로 분류된 자동차의 수, 도시 폐기물 수집량, 천연가스 소비량, 전기 소비량, 대기 입계값(PM10)을 초과한 일수, 유로 0-III로 분류된 자동차의 수 등을 산출물로 이용하였다. 이를 통해 제안된 모델의 도출된 지수가 기존보다 뛰어난 것을 확인하였다.

Sun et al. (2016)에서는 DEA 효율성 모델에 게임 이론을 도입하여 도시가 서로 경쟁할 때의 인프라 투자 효율성을 평가한다. 전체투자액, 수계투자액, 에너지시스템투자액, 교통시스템투자액, 환경시스템투자액을 투입물로 사용하였고, 도시정비 및 건설자금 수익, 상수도, 가스공급, 도로표면적, 고용인원, 녹지면적을 산출물로 사용하여 도시 공공 인프라 투자 종합 효율성을 측정하였으며, 이에 따라 제안된 접근방식이 각 도시에 대해 효율적인 해결책을 제공할 수 있음 시사하였다.

Mu et al. (2016)에서는 Super-efficient DEA를 이용하여 중국 북서부 시안의 농업용수 이

용효율성을 시간적 공간적 차원에서 검토하였다. 농업용수 소비 비율, 농업용수 소비 비율, 농지 수확량의 가뭄과 홍수 보험, 효과적인 관개 구역, 물 손실과 토양 침식 통제 구역, 수질 관리 기금에 대한 총 투자액 등을 투입물로 사용하였고, 농업의 부가가치, 물의 세제곱미터당 농업 생산량을 산출물로 사용하였다. 이에 따라 2004년에서 2012년까지의 농수이용 효율성의 동태를 분석하였으며, 관개관행의 개선, 절수 전략 등의 개선방안을 제시하였다.

3.2 2017년의 경제 및 환경 효율성 문헌에 대한 연구

Fan et al. (2017)에서는 CCR 및 BCC DEA를 이용하여 2012년 중국 산업단지 40곳의 환경효율 수준을 평가하고 순위를 매겼다. 토지, 에너지, 물 사용량을 투입물로 사용하였고, 산업부가가치, 폐수, 고체폐기물, COD, SO₂를 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 지속가능성이 낮은 공원의 조정방안을 제시하였다.

Toma et al. (2017)에서는 Bootstrap DEA 접근법을 통해 EU 국가들의 농업 효율을 조사하였다. 노동자, 토지, 자본, 비료사용량, 관개지역을 투입물로 사용하였으며, 농업생산물가치를 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 정책 계획이나 경영 결정에 있어 농업 생산의 극대화와 환경 자원 과대증식에주의를 기울여야 한다고 하였다.

Peng et al. (2017)에서는 개인 여행 관광지에서 환경 효율성의 특성과 진화를 분석하기 위해 종합 평가 지수 시스템인 Time series SBM-DEA model을 제시하였으며, 환경 효율성의 결정 요인을 실증적으로 식별하였다. 평균 임금, 고정자산투자액, 에너지소비, 물소비, F&B소비를 투입물로, 1인당 관광수입, 쓰레기 배출량, 하수배출량, 폐가스 배출량을 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 관광지를 복잡한 진화 법칙을 가진 거시적 규모의 시스템으로 취급해야 하며, 버틀러의 이론과 결합해야 한다고 하였다.

Liu et al. (2017)에서는 엔트로피 방식(Entropy method)을 이용하여 공공 기반 시설의 건설 수준을 평가하기 위한 종합 지수 시스템을 확립하며, DEA를 이용하여 2005년부터 2014년까지의 290개 중국 도시의 지방 공공 기반 시설의 투자 효율을 평가하였다. 물 공급, 도로 및 다리, 배수, 조경, 환경위생을 투입물로 사용하였으며, 물 공급 파이프라인, 배수 파이프라인, 물 처리, 비위험 폐기물 처리, 차량 및 장비, 도로 길이를 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 중국 정책 입안자들이 도시 공공 기반 구조의 성과를 이해하고, 지속 가능한 발전을 위한 조치를 시행하는 데 유용한 정보를 제공하였다.

Zhao et al. (2017)에서는 2001년부터 2014년까지 중국 31개 지방행정구의 수자원 이용효율과 바람직하지 않은 산출량을 고려하기 위해 Two-stage slack-based measure model 기반

의 효율성 평가 모델을 채택하여 각 단계의 효율성을 측정하였다. 직원수, 고정 투자액, 총 물 사용량, COD 배출량, AN 배출량, 폐수처리사업 투자액을 투입물로 사용하였고, GDP, COD 배출량, AN 배출량, COD 제거량, AN 제거량을 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 수자원 활용 효율성을 높이기 위한 개선안을 제시하였다.

Jia et al. (2017)에서는 도시화율에 미치는 외생적 요인의 영향을 고려한 Three-stage DEA model 을 바탕으로 2015년 청두 19개 구/군의 도시화 효율을 평가한다. 부지면적, 고정자산 총 투자, 농업 이외의 급여를 투입물로 사용하였고, 비농업 GDP, 도시화율, 사회소비재 유통총량을 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 지속가능하고 원만한 도시개발을 위한 개선안과 정책안을 제공하였다.

Shen and Lin (2017)에서는 Stochastic nonparametric envelopment of data을 바탕으로 2002년부터 2012년까지 중국 본토에 있는 30개 지방 단위의 입력 출력 데이터를 사용하여 농업용수의 그림자 가격과 기술적 효율성을 추정하였다. 취업자수, 경작지, 농업기계, 비료, 농업용수 사용량을 투입물로 사용하였고, 총산출값을 산출물로 사용하였다. 제안된 모델을 이용하여 분석한 결과, 농업용수 감소 전망은 기술적 효율 개선과 절수 관개 기술의 확산에 달려 있음을 확인하였다.

Houshyar et al. (2017)에서는 Dynamic DEA 모델과 Malmquist index 모델을 이용하여 2009-2015년 이란 남서부의 Fars 지방에서 석류 생산의 동적 에너지 소비량과 생산성 증가를 측정하였다. 기계, 연료, 화학 물질, 질소, FYM, 인원, 물사용량을 투입물로 사용하였으며, 석류 수확량을 산출물로 사용하였다. 제안된 모델의 분석결과, 새로운 기술 사용 정책 외에도 효율적인 석류 생산이 궁극적으로 해당 부문의 강력한 기후 변화 완화에 기여할 수 있음을 확인하였다.

Guo et al. (2017)에서는 중국 31개 생태산업단지에 있는 석탄화력 복합열발전소(CHP) 44개 공장(160대)의 환경효율을 평가하기 위해 SBM-DEA 모델을 적용하였다. 석탄소비, 담수소비, 설립원가, 운영비를 투입물로 사용하였고, 순수 전기 생산량, 열생산량, 온실가스배출량을 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 산업단지의 CHP 환경효율 개선, 터빈 기술 정비, 사용 중인 CHP 주식의 열간 비율 증가, 신규 CHP 프로젝트의 용량 제어 등을 위한 정책적 시사점을 제시하였다.

Ren and Guo (2017)에서는 간쑤 성의 12개 시와 2개 자치현의 수자원 이용효율(WRUE) 분석과 관련 WRUE 이슈 분석을 위해 2단계 DEA 방식에 지역 수자원 대사(Regional water resource metabolic theory) 이론을 도입하여 새로운 모델을 개발하였다. 1단계 투입물로 수자원이 사용되었으며, 1단계 산출물 및 2단계 투입물로서 인구, 도시 인구 비율, 국내총생산, 2차,

3차 산업의 비율을 사용하였고, 2단계 산출물로 인구증가율, 도시인구의 증가율, GDP성장률, 2차, 3차 산업의 성장률을 사용하였다. 제안된 모델에 따라 의사결정자들은 간추성의 WRUE의 포괄적이고 정확한 WRUE와 부정적인 요소를 결정할 수 있음을 확인하였으며, 수자원의 효율적인 사용 계획을 권고하였다.

Ratner and Ratner (2017)에서는 남러시아의 지역 생산 시스템의 효율성에 대한 평가 문제의 해결책으로 Dynamic environmental DEA model을 제시하였다. 고정발생원으로부터 대기 중으로 방출되는 연간 오염량, 자동차 운송으로 인해 대기 중으로 배출되는 연간 오염량, 여과되지 않은 폐수의 연간 배출량, 완전히 여과되지 않은 폐수의 연간 배출량, 연간 산업 및 가계 폐기물 처리량, 지표와 지하에서 나오는 연간 담수 사용량을 투입물로 사용하였고, 지역 총생산량을 산출물로 사용하였다. 제시한 모델은 지역 경제 시스템의 효율성 변화를 항상 감시할 수 있고 높은 차별력을 가진다 하였다.

3.3 2018년의 경제 및 환경 효율성 문헌에 대한 연구

Yang and Zhang (2018)에서는 글로벌 벤치마크 기술, 방향성 거리 기능 및 부트스트래핑 접근방식을 결합한 extended DEA 모델을 제안하며, 2003년부터 2014년까지 중국의 30개 지역의 환경 효율성 동태를 조사하였다. 또한 Malmquist index를 이용하여 환경 효율성의 변화를 일으키는 핵심 요소들을 확인하였다. 자본주식, 노동력, 건설용지 면적, 물 소비, 에너지 소비를 투입물로 사용하였고, GDP, 고체 폐기물 배출, 생활폐기물, SO₂배출, 그을음 및 산업용 분진 배출, 폐수 배출을 산출물로 사용하였으며, 이에 따른 지역별 개선안과 정책적 시사점을 제시하였다.

Bai et al. (2018)에서는 SE-DEA 모델을 이용하여 2006~2013년 중국 현금 도시 281곳의 도시 환경 효율성을 측정하며, 도시화를 평가하기 위한 새로운 종합 지수 시스템을 제안하였다. 노동력, 자본, 도시 건설 지역, 전기 소비, 수자원 소비, SO₂배출량, 그을음 배출, 폐수 배출을 투입물로, GDP를 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 중국의 도시 생태 관리와 지속 가능한 도시 변형에 대한 유의미한 시사점을 제시하였다.

Huang et al. (2018)에서는 Meta-Frontier, 바람직하지 않은 출력, 초효율, 슬랙 등을 동시에 고려한 Meta-US-SBM이라는 새로운 데이터 개발 분석 접근방식을 채택하여, 2001-2004에서의 중국 30개성을 대상으로 환경효율성, 경제효율성, 에너지효율성, 환경효율성의 측정 시스템을 확립하였다. 자본, 노동력, 토지면적, 물 소비량, 에너지 소비량을 투입물로 사용하였으며, GDP, PI(오염물질 6개에서 도출한 오염지수)를 산출물로 사용하였다. 제안된 모델은 전반적으로 지역 경제 효율성이 다른 관련 효율성 지표보다 우수하게 나타났다. 또한 각 지방들이 서로 다른 개발안

을 채택함으로써 환경 효율성 지표들 간의 이질성이 있음을 확인하였다.

Zhou et al. (2018)에서는 2005~2014년 기간에 설정된 패널 데이터를 바탕으로 Super-SBM 모델을 적용하여 중국 광둥성 21개 도시의 환경 효율성을 추정하였다. 자본, 노동력, 급수, 에너지자원, 토지자원을 투입물로, 산업용 그을음 배출, 총폐수, 산업고체폐기물 배출, 산업용 SO₂ 배출량, GDP를 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 정책 입안자와 도시 계획자 모두에게 중요한 정보를 제공하였다.

Ho et al. (2018)에서는 DEA와 fractional regression models (FRMs) 이용하여 베트남의 재래식 커피 재배 농장과 지속가능성 인증을 받은 커피 재배 농장의 환경 효율성 차이에 대한 최초의 실증적 조사를 제공한다. 질소, 인, 관개수, 살충제, 제초제 및 곰팡이균의 양, 밀집도를 투입물로, 총 부가가치를 산출물로 사용한다. 제안된 모델에 따라 2012/13년부터 2014/15년까지의 베트남 내 726개 데이터를 분석하였으며, 이에 따른 정책적 시사점을 제시하였다.

Mohseni et al. (2018)에서는 Life Cycle Assessment와 DEA를 이용하여 이라크 포도밭 58개의 포도 생산 시스템 에너지 흐름과 환경 영향을 분석하고, 에너지 절약과 생산 시스템의 환경 영향 완화를 위한 최적의 에너지 소비 패턴을 최적화하였다. 디젤연료, 교통, 노동력, 질소, 거름, 살충제, 관개수 사용량을 투입물로 사용하였으며, 포도 생산량을 산출물로 사용하였다. 제안된 모델은 농부들이 포도 생산 시스템의 운영 효율성을 달성하고 비용을 절감할 수 있게 하며, 환경 영향을 낮추고 투입물의 소비를 줄이도록 설득하는 데 도움이 될 수 있다고 하였다.

Molinos-Senante et al. (2018)에서는 기존 DEA 모델의 한계를 극복하기 위해 이중 부트스트랩 DEA 모델을 적용한 칠레 23개 주요 수도 및 하수관로 업체의 효율을 평가한다. 운영비용, 노동력, 네트워크 길이를 투입물로 사용하였고, 분배된 물, 폐수처리 서비스 고객, 음용수 수질 지표, 폐수처리 품질 지표를 산출물로 사용하였으며, 기존 DEA 모델과 제안된 모델의 결과에 따라 벤치마킹 도구의 관련성을 높이기 위해서는 견고하고 신뢰할 수 있는 방법을 사용하는 것이 중요하다고 하였다.

Wang et al. (2018)에서는 헤이허 강 유역의 용수 이용 관련 상황을 점검하기 위해 2004년부터 2012년까지 Three-stage DEA를 통해 농업용수 이용효율성(WUE)을 측정하였다. 노동력, 고정자산투자, 작물 면적, 농업용수사용을 투입물로, 농업생산가치를 산출물로 사용하였다. 이에 따라 순수 기술이 전체 기술 향상에 미치는 영향은 매우 제한적이며, 규모 조정은 헤이허 강 유역의 농업 생산 지역에 매우 중요하다고 하였다.

Zhao et al. (2018)에서는 SE-DEA 모델과 Malmquist index를 이용하여 2005-2013에서의 베이징-톈진-허베이 지역의 13개 현급시경제·생태적 관점에서 토지 환경 효율성을 측정하였

다. 노동력, 자본, 물소비량, 전력소비량을 투입물로 사용하였고, GDP당 SO₂배출량, 그을음 배출량, 폐수 배출량을 산출물로 사용하였으며, 이에 따라 중국의 토지 이용 관리를 강화하고 지속 가능한 도시 개발을 위한 시사점을 제시하였다.

Hu et al. (2018)에서는 DEA를 기반으로 한 생태비효율성모델을 이용하여 중국 31개 성의 효율성을 측정하며, 클러스터 분석을 통해 개선안을 제시하였다. 주택용수 사용, 공업용수 사용, 농업용수 사용, 고정자산, 노동력을 투입물로, 가정COD, 산업 COD, 농업 COD, 지역 GDP를 산출물로 사용하였으며, 이에 따른 각 성의 개선안 및 정책적 시사점을 제시하였다.

IV. 결 론

물 수요의 증가와 가용성의 불균형으로, 인간의 지속 가능한 발전에 위협이 되고 있는 물 부족에 대처하기 위해 물 효율성과 관련된 많은 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 물과 관련된 효율성을 연구한 해외 SCI급 연구를 수집 및 분석하였으며, 이를 통해 국내 물 관리 대책 마련과 정책 입안에 이바지 하고자 하였다.

본 연구는 2016년부터 2018년까지 3개년에 해당하는 해외 연구를 저널 데이터베이스에서 수집하였으며, 이를 Mardani et al. (2017)가 제시한 적용분야에 따라, 기타분야를 제외한 8가지 분야로 분류하여 제시하였으며, 이 중 다수를 차지하는 경제 및 환경과 관련된 물 효율성을 대상으로 문헌 연구를 진행하였다.

수집된 연구들에서 사용된 자료포락분석(DEA)은 다수의 투입 및 산출물의 단위에 상관없이 효율성을 측정할 수 있는 편의성과, 동시에 분석대사의 개선방안 또한 제공할 수 있는 실용성에 따라, 다양한 분야에서 널리 접목되어 활용되는 것을 알 수 있었다. 또한 자료포락분석은 생명주기평가(LCA: Life Cycle Assessment), 인공신경망(ANN: Artificial Neural Network) 등 다양한 접근법들과 결합하여 기존의 모델과는 차별화된, 보다 목적 적합한 평가모델을 제공함으로써 의사결정자에게 유용한 정보를 제공할 수 있음을 확인하였다.

이와 같은 선행 연구 검토 결과를 바탕으로, 해당 효율성을 어떻게 측정하고 있는지를 벤치마킹하여 국내 물 효율성 관리에 실무적으로 적용하거나 관련 정책을 입안하는 데 본 연구의 결과물이 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 더불어 물 관련 효율성 분석의 최신 해외 트렌드를 살펴봄으로써 국내에서도 이와 같은 물 관련 효율성 분석이 활발해질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Bai, Y., Deng, X., Jiang, S., Zhang, Q., & Wang, Z. (2018). Exploring the relationship between urbanization and urban eco-efficiency: Evidence from prefecture-level cities in China. *Journal of cleaner production*, 195, 1487-1496.
2. Castillo, A., Goldfarb, B., Johnsen, K., Roberds, J., & Nelson, C. (2018). Genetic Variation in Water-Use Efficiency (WUE) and Growth in Mature Loblolly Pine. *Forests*, 9(11), 727.
3. Cosgrove, W. J., & Loucks, D. P. (2015). Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 51(6), 4823-4839.
4. Egilmez, G., Gumus, S., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2016). A fuzzy data envelopment analysis framework for dealing with uncertainty impacts of input - output life cycle assessment models on eco-efficiency assessment. *Journal of cleaner production*, 129, 622-636.
5. Fan, Y., Bai, B., Qiao, Q., Kang, P., Zhang, Y., & Guo, J. (2017). Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis. *Journal of environmental management*, 192, 107-115.
6. Guo, Y., Liu, W., Tian, J., He, R., & Chen, L. (2017). Eco-efficiency assessment of coal-fired combined heat and power plants in Chinese eco-industrial parks. *Journal of cleaner production*, 168, 963-972.
7. Ho, T. Q., Hoang, V. N., Wilson, C., & Nguyen, T. T. (2018). Eco-efficiency analysis of sustainability-certified coffee production in Vietnam. *Journal of cleaner production*, 183, 251-260.
8. Houshyar, E., Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Azadi, H. (2017). Impacts of technological change on energy use efficiency and GHG mitigation of pomegranate: Application of dynamic data envelopment analysis models. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1180-1191.
9. Hu, Z., Yan, S., Yao, L., & Moudi, M. (2018). Efficiency evaluation with feedback for regional water use and wastewater treatment. *Journal of hydrology*, 562, 703-711.

10. Huang, J., Xia, J., Yu, Y., & Zhang, N. (2018). Composite eco-efficiency indicators for China based on data envelopment analysis. *Ecological indicators*, *85*, 674-697.
11. Jia, S., Wang, C., Li, Y., Zhang, F., & Liu, W. (2017). The urbanization efficiency in Chengdu City: An estimation based on a three-stage DEA model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *101*, 59-69.
12. Liu, Q., Wang, S., Zhang, W., Li, J., Zhao, Y., & Li, W. (2017). China's municipal public infrastructure: Estimating construction levels and investment efficiency using the entropy method and a DEA model. *Habitat International*, *64*, 59-70.
13. Mancosu, N., Snyder, R., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. *Water*, *7*(3), 975-992.
14. Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., & Khoshnoudi, M. (2017). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *70*, 1298-1322.
15. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, *2*(2), e1500323.
16. Mohseni, P., Borghei, A. M., & Khanali, M. (2018). Coupled life cycle assessment and data envelopment analysis for mitigation of environmental impacts and enhancement of energy efficiency in grape production. *Journal of cleaner production*, *197*, 937-947.
17. Molinos-Senante, M., Donoso, G., Sala-Garrido, R., & Villegas, A. (2018). Benchmarking the efficiency of the Chilean water and sewerage companies: a double-bootstrap approach. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(9), 8432-8440.
18. Mu, L., Fang, L., Wang, H., Chen, L., Yang, Y., Qu, X. J., ... & Wang, Y. N. (2016). Exploring Northwest China's agricultural water-saving strategy: analysis of water use efficiency based on an SE-DEA model conducted in Xi'an, Shaanxi Province. *Water Science and Technology*, *74*(5), 1106-1115.
19. Nabavi-Pelesaraei, A., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Qasemi-Kordkheili, P.,

- Kouchaki-Penchah, H., & Riahi-Dorcheh, F. (2016). Applying optimization techniques to improve of energy efficiency and GHG (greenhouse gas) emissions of wheat production. *Energy*, *103*, 672-678.
20. Peng, H., Zhang, J., Lu, L., Tang, G., Yan, B., Xiao, X., & Han, Y. (2017). Eco-efficiency and its determinants at a tourism destination: A case study of Huangshan National Park, China. *Tourism Management*, *60*, 201-211.
21. Ratner, S., & Ratner, P. (2017). DEA-based dynamic assessment of regional environmental efficiency. *Applied Computer Science*, *13*(2).
22. Ren, C., Li, R., & Guo, P. (2017). Two-stage DEA analysis of water resource use efficiency. *Sustainability*, *9*(1), 52.
23. Risks, G. (2015). World economic forum. Insight Report. 10th Edition. Retrived from: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15.pdf.
24. Shen, X., & Lin, B. (2017). The shadow prices and demand elasticities of agricultural water in China: A StoNED-based analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, *127*, 21-28.
25. Storto, C. L. (2016). Ecological efficiency based ranking of cities: a combined DEA cross-efficiency and Shannon's entropy method. *Sustainability*, *8*(2), 1-29.
26. Sun, Y., Huang, H., & Zhou, C. (2016). DEA game cross-efficiency model to urban public infrastructure investment comprehensive efficiency of China. *Mathematical Problems in Engineering*, *2016*.
27. Toma, P., Miglietta, P. P., Zurlini, G., Valente, D., & Petrosillo, I. (2017). A non-parametric bootstrap-data envelopment analysis approach for environmental policy planning and management of agricultural efficiency in EU countries. *Ecological indicators*, *83*, 132-143.
28. Ullah, A., Perret, S. R., Gheewala, S. H., & Soni, P. (2016). Eco-efficiency of cotton-cropping systems in Pakistan: an integrated approach of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, *134*, 623-632.
29. Ullah, H., Santiago-Arenas, R., Ferdous, Z., Attia, A., & Datta, A. (2019). Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency

- in field crops under drought stress: A review. *Advances in Agronomy*, 156, 109.
30. Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288.
31. Wang, S., Zhou, L., Wang, H., & Li, X. (2018). Water Use Efficiency and Its Influencing Factors in China: Based on the Data Envelopment Analysis (DEA) -Tobit Model. *Water*, 10(7), 832.
32. Yang, L., & Zhang, X. (2018). Assessing regional eco-efficiency from the perspective of resource, environmental and economic performance in China: A bootstrapping approach in global data envelopment analysis. *Journal of cleaner production*, 173, 100-111.
33. Zhao, L., Sun, C., & Liu, F. (2017). Interprovincial two-stage water resource utilization efficiency under environmental constraint and spatial spillover effects in China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 715-725.
34. Zhao, Z., Bai, Y., Wang, G., Chen, J., Yu, J., & Liu, W. (2018). Land eco-efficiency for new-type urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Technological Forecasting and Social Change*, 137, 19-26.
35. Zheng, P. F., Yu, X. X., Jia, G. D., Liu, Z. Q., Zhang, Y. E., & Zhu, X. H. (2019). Water use efficiency and its influencing factors of *Platycladus orientalis* plantation in Beijing mountains area, China. *Ying yong sheng tai xue bao = The journal of applied ecology*, 30(3), 727-734.
36. Zhou, C., Shi, C., Wang, S., & Zhang, G. (2018). Estimation of eco-efficiency and its influencing factors in Guangdong province based on Super-SBM and panel regression models. *Ecological Indicators*, 86, 67-80.

