



A proposal for regional customization and optimal operation management of groundwater resources through analysis of water resources research trends in Korea

Lee, Jae-Beom^a · Kim, Jin-Soo^b · Yang, Jeong-Seok^{c*}

^aPh.D Candidate, Department of Civil Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

^bLegislative researcher, National Assembly Research Service, Land, Transport and Maritime Affairs Team, Seoul, Korea

^cProfessor, Department of Civil Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

Paper number: 20-042

Received: 1 May 2020; Revised: 4 August 2020; Accepted: 6 August 2020

Abstract

In this study, research trends in the water resources in Korea were analyzed to present regional customization and optimal operation management of groundwater resources. Detailed classification fields were determined in the water and groundwater resources. Through the analysis of examples and trends of research related to water resources and underground water resources, three improvements were presented: securing sites for long-term observable research area, evaluating water resources based on spatial units, and not reflecting the characteristics of watersheds in acts and ordinances. The research results of this study are expected to be the basis for policy judgment in determining the groundwater management policy after the group of groundwater management policy makers at the research site can identify the requirements.

Keywords: Groundwater resources management, Regional customization, Optimal operation, Research trend analysis

국내 수자원 분야 연구 동향 분석을 통한 지역 맞춤형 지하수자원 최적 운영 관리 방안 제시

이재범^a · 김진수^b · 양정석^{c*}

^a국민대학교 건설시스템공학과 박사과정, ^b국회입법조사처 국토해양팀 입법조사관, ^c국민대학교 건설시스템공학과 교수

요 지

본 연구에서는 지역 맞춤형 지하수자원 최적 운영 관리 방안 제시를 위하여 국내 수자원 분야 연구 동향 분석을 실시하였다. 수자원 분야와 지하수 자원 분야에서 세부 분류 분야를 결정하였다. 수자원 및 지하수자원 관련 연구의 사례 및 동향 분석을 통해 장기 관측 가능 실증 연구 부지의 확충, 공간 단위 위주의 수자원 평가, 법률 및 조례의 유역 특성 미반영 등 세 가지 개선 사항을 제시하였다. 본 연구의 연구 결과는 지하수자원 관리 정책 입안자 집단으로 하여금 연구 현장에서 요구 사항을 파악할 수 있고, 이후 지하수자원 관리 정책 결정 시 정책적 판단 근거가 될 것으로 기대된다.

핵심용어: 지하수자원 관리, 지역 맞춤형, 최적 운영, 연구 동향 분석

*Corresponding Author. Tel: +82-2-910-4289
E-mail: jyang@kookmin.ac.kr (J.-S. Yang)

1. 서론

전 세계적인 인구 및 경제 규모의 성장, 산업 구조의 다양화 등 다양한 이유로 인하여 물 수요량 및 이용량이 증가하고 있다. 이러한 물수요량의 증가 추세 가운데 IPCC (2013)에 의하면 전 세계적으로 기후변화 현상을 피할 수 없다는 연구 결과가 발표되었다. 전 세계적인 추세와 마찬가지로 국내의 강우사상의 변화로 기존의 지표수 우주의 수자원 확보 형태는 증가하는 물 수요량에 대한 충족이 점차 어려워 것으로 예상된다. 지속가능한 수자원 확보에 대한 요구가 높아지면서, 지하수 이용에 대한 관심이 높아지고 있으며 그에 따라 지하수 이용량이 증가하는 추세에 있다. 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)에 의하면 우리나라의 수자원 총량은 약 760억 m³이고, 국내 전체 수자원 총량의 약 48.9%에 해당하는 372억 m³이 실제 이용 가능한 수자원 양으로 조사되었으며, 이 중 약 41억 m³이 연간 사용 가능한 지하수자원 양으로 조사되었다.

국내 지하수 활용 현황으로 2000년대 이후 우리나라의 지하수는 주로 생활용수 및 농업용수를 중심으로 개발·이용이 늘어나고 있는 추세이며, 2001년부터 2017년까지 지하수 시설 수는 111만 공에서 169만 공으로 약 1.5배 증가하였다(Kim, 2019). 지하수 이용시설이 증가함에 따라 같은 기간 동안 지하수 이용량 역시 상승하는 추세로 나타나나, 2017, 2018년 지하수 이용량이 감소하는 것으로 나타났는데 이는 2017~2018년 지하수 이용실태 자료의 개선으로 기존에 누락되어 있던 불용공 및 이용량 재산정 등의 작업으로 지하수 이용량 산정에서 약 5만 공의 자료가 제외되었기 때문으로 조사되었다(ME, 2019).

지속가능한 수자원의 확보를 위하여 최근 지하수자원 관리의 필요성이 대두되고 있다. 지하수자원 관리를 위하여 지하수 및 지하수자원 특성 분석 및 평가 관련 연구는 국내·외에서 지속적으로 수행되었다. 지하수 관련 연구는 크게 지하수자원을 대표할 수 있는 인자를 선정하고, 지하수자원 대표 인자의 특성 분석을 통한 지하수자원 변동 평가·예측과 관련한 연구와 지하수자원 대표 인자의 변동 특성에 따른 취약성 평가 기법의 개발 및 적용에 대한 연구가 수행되었다(Chachadi and Ferreira, 2005; Jha *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2014; Sadeghfam *et al.*, 2016). 또한 수문환경 요소의 변동에 따른 지하수 유동과 지하수 흐름에 따른 수질 변동 수치해석 연구가 수행되었다(Doherty and Simmons, 2011; Leube *et al.*, 2012; Asher *et al.*, 2015).

지하수자원 관련 연구에서 지하수자원 대표 인자로 지하수위를 선정하였다. 국내의 경우 수자원 관련 분야 선진국에

비하여 중·소규모 유역 또는 하위 행정구역을 대표하는 지하수위 관측소가 많지 않기 때문에 강우자료와 지하수위 자료의 상관관계를 분석함으로써 미래 지하수위 변동을 예측하기 위한 연구가 수행되었다(Yang and Ahn, 2007). 국외에서 지하수위 변동을 예측하기 위하여 지하수위 변동에 기여하는 인자의 데이터를 기반으로 인공신경망 등의 기법을 통해 학습 및 예측하는 방법의 개발 연구가 진행되었다(Izady *et al.*, 2012; Sahoo and Jha, 2013). 최근 지하수위 변동 예측 연구 이외에도 지하수자원을 포함한 지속가능한 수자원 개발 및 관리를 위하여 취약성의 개념을 적용하여 지역단위의 수자원 관리·이용 취약성 평가 기법을 개발하는 연구가 수행되었다. IPCC (2007)에 따르면, 유역 단위에서 발생하는 자연재해에 대한 잠재적인 피해량 또는 대응할 수 있는 능력이라고 정의되었다. 국외 연구에서 수자원 관리·이용 취약성 평가를 위해 수자원 변동에 기여할 수 있는 수문·환경적 지표뿐만 아니라 인문 사회적 지표를 선정하여 연구 대상 지역의 수자원 관리·이용 취약성을 평가하는 연구가 진행되었다(Leal *et al.*, 2012; Cai *et al.*, 2017). 수문환경 요소의 변동에 따른 지하수 유동과 지하수 흐름에 따른 수질 변동 해석 연구는 최근 기후변화로 인하여 해수면이 상승으로 인하여 연안지역 지하대수층의 오염 문제가 대두됨에 따라 지하수 염해 문제를 분석하기 위한 수치해석 모델과 취약성 개념을 적용한 연구가 수행되었다(Luoma and Okkonen, 2014; Seeboonruang, 2016).

지하수자원 관리를 통한 효율적인 수자원 확보 방안을 제시할 수 있는 개선안을 도출하고 기존의 지하수자원 관련 연구 및 정책의 발전 방향을 제시하기 위하여 지하수자원 관리와 관련된 연구·기술을 분류하였고, 최근 15개년(2005~2019년) 동안의 국내 지하수자원 특성 분석 및 지하수자원 관리 관련 연구 동향을 파악하였다. 또한 지하수자원 관리를 통한 효율적인 수자원 확보 방안을 제시할 수 있는 개선안을 도출하고 기존의 지하수자원 관련 연구 및 정책의 발전 방향을 제시하였다. 본 연구의 결과는 장래의 지하수자원 관리 관련 연구 및 정책의 발전 방향을 제시하고, 중앙정부 및 지방자치단체의 지하수자원 관리·개발 정책 수립 또는 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 최근 국내 수자원 관련 연구 성과의 정량적 출판 동향

최근 국내의 수자원 관리에 관한 국가 수자원 관리 정책의 패러다임은 통합물관리(Integrated Water Resources Manage-

ment, IWRM)로 변화하고 있다. 지난 국내의 수자원 관리 정책 및 연구에서 수자원 이용 및 관리는 단순히 양적인 측면에서 가용수량 확보에 중점을 두었다. 하지만 현재 수자원 이용 및 관리의 패러다임은 양적 측면과 함께 질적 측면의 안정성을 요구하고 있고, 기존의 지표수 위주의 형태에서 다양한 수원 이용·개발을 통한 안정적인 가용 수량 확보를 요구하며, 미래에 발생할 수 있는 가뭄·홍수와 같은 수재해에 대비하고, 수재해에 대응 가능한 상시 수자원 확보의 안정성을 요구하고 있다.

국내 수자원 분야 연구 성과의 출판 동향을 파악하기 위하여 KCI (Korea Citation Index, www.kci.go.kr)를 이용하여 2005~2019년 최근 15년간의 수자원 분야 출판 연구논문을 분석하였다. 지하수자원 관리 연구의 개선안을 도출하기 위하여 수자원 분야 연구 논문의 검색은 기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망, 유역 물순환·물관리, 지표수-지하수 연계 통합수자원 관리 및 시스템 평가·분석, 수자원 정책 및 제도적 연구로 세부 분야를 실시하고, 각 분야 별 출판 연구 논문의 동향 및 추세를 파악하였다. 최근 15년간 수자원 분야의 출판 연구 논문은 2,144건의 연구 논문이 검색되었다. 최근 세부 분야 별 연구논문의 출판 건수는 기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망 분야가 1,213건으로 가장 많은 출판 건수로 파악되었고, 지표수-지하수 연계 통합수자원 관리 및 시스템 평가·분석 분야에서 114건으로 비교적 가장 적은 출판 건수로 파악되었다.

Fig. 1은 연구 흐름도를 나타내고 있고, Table 1은 연도 별 수자원 분야 연구논문 출판 건수와 수자원 분야 중 세부 분야 별 연도 별 연구논문 출판 건수를 나타내고 있다.

2.1 기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망 분야 연구논문 동향

기후변화의 수자원에 대한 영향은 1990년대 이래로 다양한 연구가 수행되었다. 현재에 이르기까지 사회의 요구에 따라 기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망 분야 연구는 조금씩 관점이 변화되었다. 과거 1990년대로 부터 기후변화의 수자원 영향을 규명하고, 기후변화의 징후나 증거를 발견하는 연구, 강수와 온도변화에 따른 수문시스템의 민감도 분석 연구를 주로 수행하였으나 2000년대 중반에 이르러 수자원 영향평가 결과에 대한 불확실성을 평가하고 영향을 최소화하기 위한 연구들(Webster et al., 2003; Wilby, 2005)이 수행되었다.

기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망 분야의 연구의 신뢰성과 결과의 활용도를 높이기 위해서는 국내 기후 및 유출 시나리오 개발이 필수적이다. Bae et al. (2007)은 국내 유역을 139개 소유역으로 구분하고, A2 온실가스 배출 시나리오

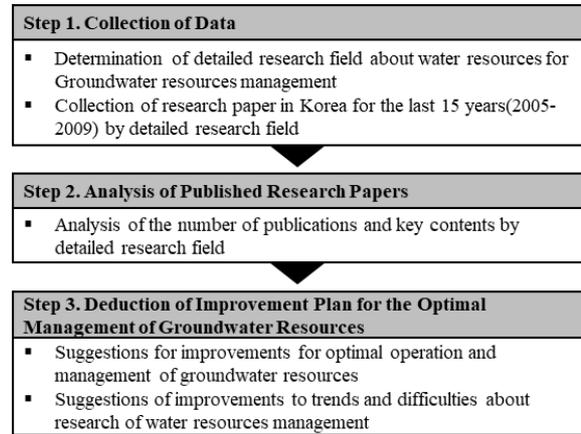


Fig. 1. Procedure of Study

Table 1. Annual number of published research papers in water resources and sub-detailed fields

Year	Water Resources	Assessment and Prospect of Water Resources	Water Cycle and Management in Watershed	Assessment and Analysis of Integrated Water Resources	Water Resources Management Policy and Legislation
2005	118	40	7	7	7
2006	125	53	16	4	8
2007	132	73	17	7	11
2008	138	35	7	6	6
2009	138	83	17	11	15
2010	141	69	25	12	31
2011	144	84	12	7	13
2012	148	90	13	3	19
2013	150	91	22	8	29
2014	164	107	19	4	28
2015	155	82	22	15	33
2016	148	87	18	8	24
2017	129	88	12	8	19
2018	173	146	26	9	23
2019	141	85	21	5	17
Total	2144	1213	254	114	283

와 고해상도 기후변화 시나리오 자료, 일 기상 발생기인 LAR-WG를 활용하여 유역 단위의 기후시나리오를 생산하는 연구를 수행하였다. 앞선 유역 단위 기후시나리오 생산 연구의 후속 연구로써, Jung et al. (2007)은 생산된 유역 단위 기후시나리오와 PRMS (Precipitation Rnuoff Modeling System)을 활용하여 유역 단위 유출 시나리오를 생산하고 기후변화 시나리오에 따른 유역 별 유출량의 변동성을 평가하는 연구를 수행

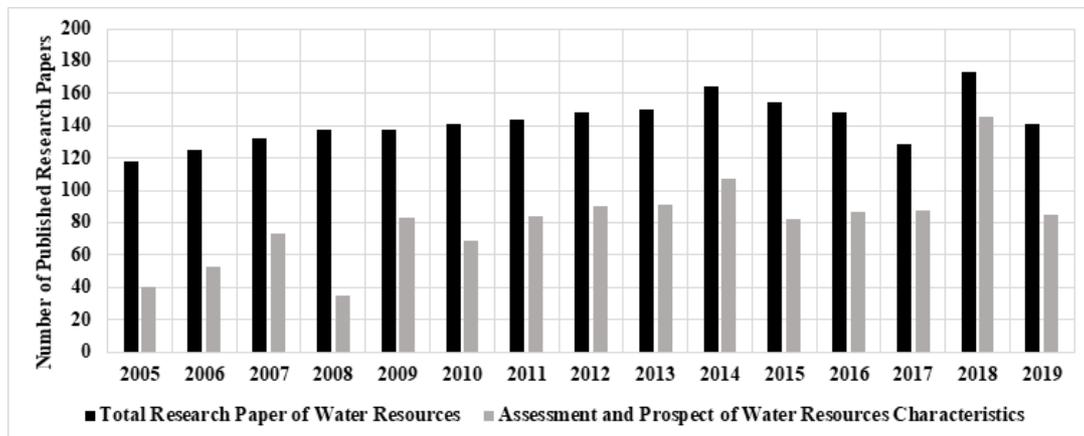


Fig. 2. Annual number of published research papers in assessment and prospect of water resources characteristics

하였다. Bae *et al.* (2011)은 유역 단위 기후·유출 시나리오의 불확실성을 정량적으로 규명하고, 기후변화에 따른 한반도 수자원 영향을 평가하기 위하여 MME (Multi-Model Ensemble) (Giorgi and Mearns, 2002) 기법과 PRMS (Leavesley *et al.*, 1983), SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1993), SLURP (Semi-distributed Land Use based Runoff Process) (Kite and Haberland, 1999) 모형을 통해 유역 단위 기후변화 영향평가 연구를 수행하였다. Park *et al.* (2011)은 유역 단위의 상세 수문시나리오를 생산하기 위하여 다지점 비정상성 다운스케일링 기법을 활용하였고, SWAT 모형을 통해 용담댐 및 대청댐 지점의 유입량 및 최종 방류부의 유출량을 예측하는 연구를 수행하였다. 앞선 연구와 같이 수자원의 양적인 부분의 연구가 수행된 이후, 최근에는 유역의 수량·수질 변동을 고려하여 수자원에 대한 영향을 평가하기 위한 연구가 수행되고 있다. Ahn *et al.* (2014)은 SWAT 모형을 통해 유역의 유출량을 분석하고 Qual2E 모형을 통해 저수지 운영에 따른 환경영향을 평가하였다. Woo *et al.* (2018)은 SWAT 모형을 이용하여 기후변화에 따른 유역 유출량 변화 및 수질 변화를 고려한 수생태계 건강성 지수 영향 평가 연구를 수행하였다.

Fig. 2는 연도 별 수자원 분야 연구논문 출판 건수 및 기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망 분야 연구논문 출판 건수를 나타내고 있다.

2.2 유역 물순환·물관리 분야 연구논문 동향

기존의 국내 물 관리 패러다임은 취수량 중심, 물 공급 중심의 물 관리 패러다임으로 최근 수자원 확보에 위기를 초래하는 다양한 인자들의 영향에 대한 효율적인 대응이 어려웠다. 2012 ~ 2015년 전국적인 가뭄, 최근 2018년 가뭄으로 인한

피해이후 효율적 물관리, 건전한 물순환에 대한 사회적 요구가 증가하였다. 유역 단위의 효율적 물 관리를 위하여 Kim *et al.* (2013)은 Allan (1993)이 처음 제시한 물발자국과 같은 제품의 소비관점에서 물 사용을 판단할 수 있는 인벤토리를 개발하는 연구를 수행하였다. Park *et al.* (2016)은 우리나라 지류 중소하천의 물 관리 탄력성을 평가할 수 있는 지수를 개발하고, 117개 중권역에 적용하였으며, 다목적댐에 의한 유량조절 및 용수공급이 가능한 분류와 지류, 유량조절이 불가능한 지류의 3가지 분류로 구분하여 비교분석함으로써 우리나라 지류 중소하천의 물관리 탄력성을 평가하는 연구를 수행하였다. Choi *et al.* (2018)은 미래 수자원 변동 상황 시나리오를 구성하고, 각 시나리오 별 물 수급 전망을 수행함으로써 미래 용수 공급의 안정성을 평가하였으며, 낙동강 유역의 용수 공급 시설물 공급 신뢰도 및 물 수급 네트워크의 취약성 평가, 미래 물 공급 취약지역 분석 및 용수공급 시설물의 최적연계 운영 체계 개발을 통한 효과를 분석하였다.

물 순환은 전 지구적인 물의 지속적인 움직임으로 강수, 증산, 증발, 침투, 유출 등의 연속된 과정을 의미하며, 물 순환은 유역 내 생태계 및 인간 사회에 영향을 미친다. 도시화는 불투수면적이 증가를 야기하고 이는 표면 유출 증가, 침투량 감소에 영향을 미쳐 집중호우 시 돌발홍수 및 하천건천화, 하천수질 악화 등 다양한 도시 수자원 문제의 원인이 될 수 있다. Lee *et al.* (2005)은 도시 하천으로 왜곡된 물 순환을 보이는 도림천 유역에 대해서 WEP (Water and Energy transfer Processes) 모형을 이용하여 도시화 전·후의 유출 특성을 비교하였고, 침투 트렌치와 투수성 포장재와 같은 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법 적용에 따른 효과를 모의하였다. 최근 연구에서도 LID 기법 중 Planter Box 의 우수유출 저감 효과 평가 연구가 수행되었다(Kim *et al.*, 2019).

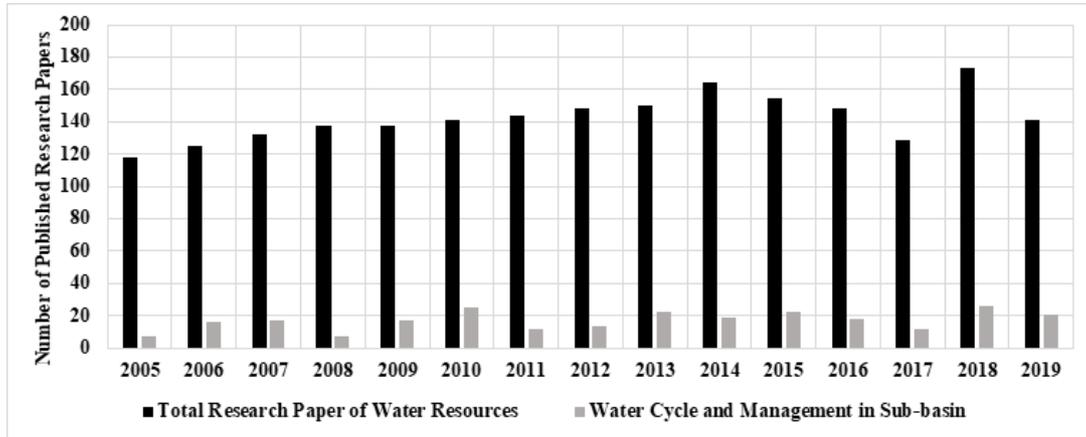


Fig. 3. Annual number of published research papers in water cycle and management in sub-basin

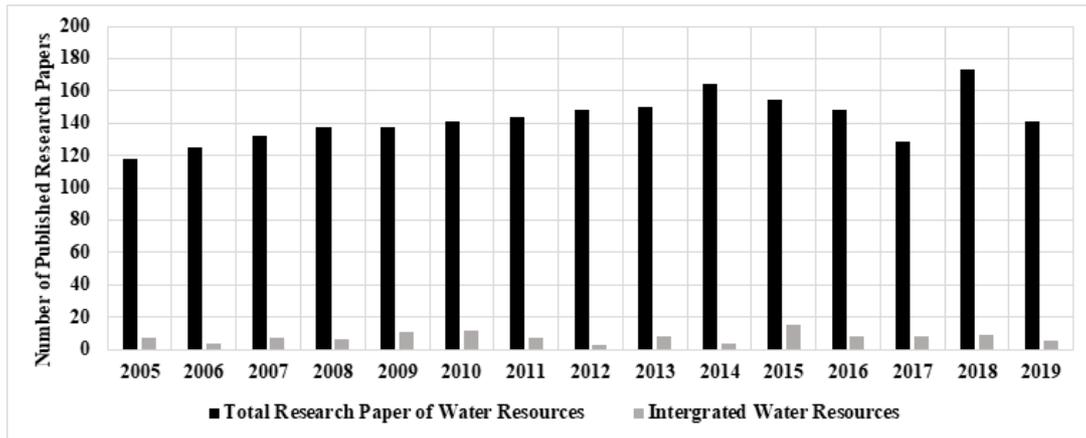


Fig. 4. Annual number of published research papers in integrated water resources

Fig. 3는 연도 별 수자원 분야 연구논문 출판 건수 및 유역 물순환·물관리 분야 연구논문 출판 건수를 나타내고 있다.

2.3 지표수-지하수 연계 통합수자원 관리 및 시스템 평가·분석 분야 연구논문 동향

기존의 지표수자원 취수 위주의 수자원 관리·개발 및 수량 위주 분석·평가에서 탈피하여 최근 지속가능한 수자원 확보, 건전한 물순환, 효율적 수자원 분배 관련 이슈가 대두되고 있다. 이러한 연구·정책 경향에 맞추어 2000년대 이후로 지표수-지하수를 포함하여 유역 내 수문 순환 과정을 모두 고려한 유역 단위 통합수자원 관리 및 시스템 평가·분석 관련 연구가 수행되고 있다. 통합수자원 관련 연구는 주로 통합수자원 관리 및 통합수자원 시스템 평가 관련 연구가 주로 수행 되고 있다. Cheong *et al.* (2008)은 유역 전체 혹은 유역 간 가용 수자원을 최대한 이용하기 위해 유역 간 수자원을 정확히 평가하고 하천 유역에 합리적으로 물을 배분하는 문제를 해결하기

위하여 KModsim을 이용한 용담댐과 대청댐 운영률을 구하는 연구를 수행하였다. Lee *et al.* (2013)은 물이용취약지수 (Water Use Vulnerability Index, WUVI), 홍수취약성지수 (Flood Vulnerability Index, FVI), 하천환경취약지수(River Environment Vulnerability Index, REVI)를 통합하여 통합수자원평가지수(Integrated Water Resources Evaluation Index, IWREI)를 개발하였고, 물이용, 홍수 및 하천환경의 3개 수자원 정책 부문에서 수행한 사업성과를 지역별로 평가한 결과 1990년대에 비하여 2000년대 초반의 지수가 개선되어 사업의 효과를 확인하였다.

Fig. 4는 연도 별 수자원 분야 연구논문 출판 건수 및 지표수-지하수 연계 통합수자원 관리 및 시스템 평가·분석 분야 연구 논문 출판 건수를 나타내고 있다.

2.4 수자원 정책 및 제도적 연구 분야 연구논문 동향

수자원 정책 및 제도 관련 연구는 주로 수자원 분배에 관련한

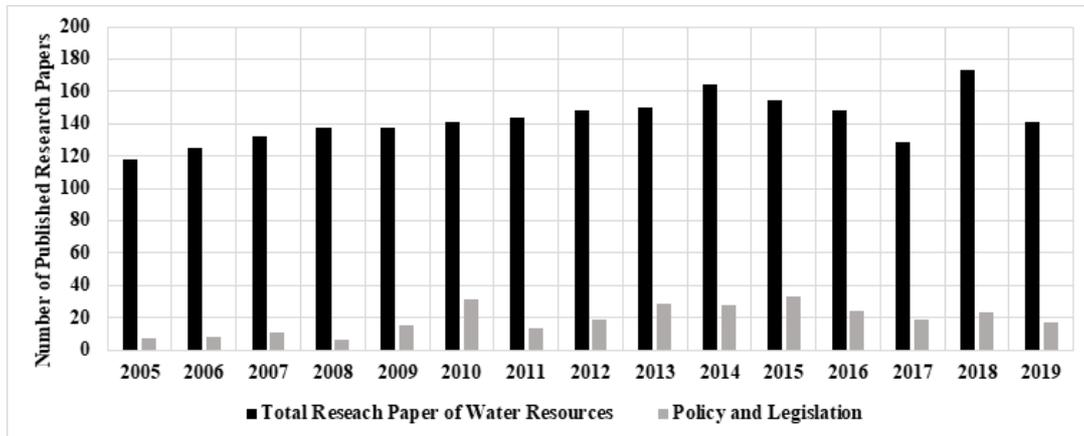


Fig. 5. Annual number of published research papers in water policy and legislation

연구가 수행되었고, 최근 대체수자원 확보를 위한 제도적 개선안 도출 등의 연구가 수행되고 있다. 국내뿐만 아니라 해외 주요 국가들은 전체 수자원 이용량이 점차 증가하는 추세이며, 수자원 확보 기술뿐만 아니라 기술 적용을 위한 법제도 정비가 활발히 진행 중이다. 국내 역시 수자원 정책 및 제도 개선을 위한 연구가 수행 중이다. Kim and Kim (2011)은 국내 4대강 권역 대상으로 지역 별 산업구조 및 경제 활동을 설정하여 수자원 정책의 지역 경제 및 지역 효율 효과를 분석함으로써 수자원 통합 개발 및 관리체계 구축을 위한 방안을 제시하였다. Kim (2016)은 에너지와 물은 서로 긴밀하게 관련되어 있다는 에너지-물 넥서스(Energy-water nexus) 개념을 소개하며 미국의 법·제도에서 에너지-물 넥서스 관련 법·제도 현황을 소개하였고, 국내 법·제도에서 물과 에너지의 관계에 대한 통계 및 정보의 제한, 관련 정보를 지속적으로 수집 및 편찬할 수 있는 주체가 명확하지 않은 실정 등에 대하여 개선안을 제시하고 있다.

Fig. 5는 연도 별 수자원 분야 연구논문 출판 건수 및 수자원 정책 및 제도적 연구 분야 연구논문 출판 건수를 나타내고 있다.

3. 지하수자원 최적 운영을 위한 연구 사례 및 동향 분석

최근 수자원 이용량 및 수요량이 증가하면서, 지속가능한 수자원 확보 요구로 인해 지하수자원 관리 및 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 과거로부터 각종 요소로서 지하수자원의 개발이 저렴하고, 안정적인 수량을 확보 할 수 있기 때문에 각종 생활·농업용수로 이용되었다. 우리나라의 경우 경제개발 시기 다목적 댐 건설 등 대규모 수자원 개발 사업을 지속적

으로 실시하여, 해외 주요 국가에 비해 지표수 사용 비율이 상대적으로 높은 상황이나, 댐 및 저수지 등의 건설을 통한 대규모 지표수 개발이 한계에 이르고 있어 지하수 개발·이용이 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다(Kim, 2019). OECD (2015)는 지하수 개발 스트레스(Groundwater Development Stress, GDS) 지표를 산정하였는데, 2014년 기준 우리나라의 GDS는 극심한 물 부족 국가인 이스라엘을 제외하면 OECD 국가 중 가장 높은 것으로 발표하였다. ME (2019)에 의하면 2001 ~ 2018년 동안 우리나라의 지하수 이용량 중 생활용수(1,600백만 m^3 /년 \rightarrow 1,437백만 m^3 /년)와 공업용수(248백만 m^3 /년 \rightarrow 198백만 m^3 /년)는 감소하였으나 농업용수는 2018년 기준 2001년에 비하여 약 9% 증가한 것으로 발표되었다. 우리나라의 GDS 절반 가까이 농업 분야에서 발생하고 있으므로 향후 농업용 지하수에 대한 체계적인 관리가 필요하다(Kim, 2019).

지하수자원 관리에 대한 중요성이 높아지는 가운데, 국내 지하수자원 최적 운영을 위한 연구 사례를 파악하였다. 지하수자원 최적 관리를 위한 세부 연구 분야는 지하수자원 유동 해석 기술, 지하수자원 특성 평가 기술, 지하수자원 관련 법·제도 현황 및 개선 분야로 구분하여 연구 사례 및 동향을 파악하였다. Fig. 6은 2005 ~ 2019년 간 수자원 관련 연구 논문의 출판 건수와 지하수자원 관련 출판 건수를 나타내고 있다.

3.1 지하수자원 유동 해석 기술

국내 지하수자원 변동 해석 기술은 지하수자원을 대표할 수 있는 인자로 지하수위를 선택하여 수치해석 모형에 적용하는 연구가 주로 이루어지고 있다. 또한 지하수 오염에 대한 문제가 대두되면서 외부 오염원에 의한 지하수 오염 거동 해석, 해수침투로 인한 염수의 지하대수층 오염 등의 연구가 수행되

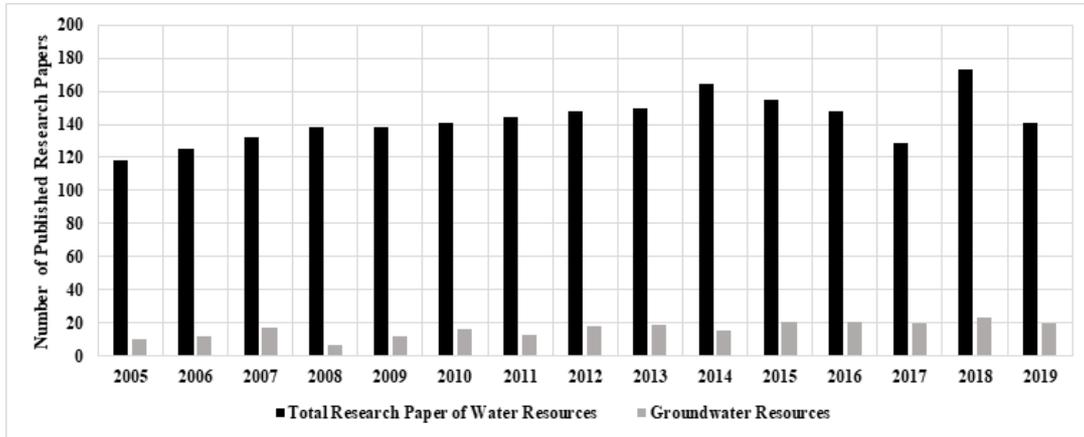


Fig. 6. Annual number of published research papers in groundwater resources

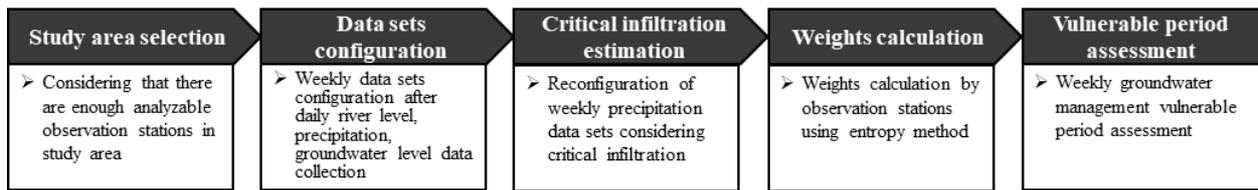


Fig. 7. Calculation procedure of vulnerable period assessment (Lee *et al.*, 2019)

고 있다. 지하수자원 변동 해석 기술 연구는 크게 하천/내륙 지역, 연안/도서 지역으로 연구 대상지역이 구분되어 수행되고 있다.

Kim *et al.* (2013)은 지표수-지하수 통합 수문해석 모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 제주도 한천 유역에 적용하였고, 정확한 지하수 함양 특성과 양수정 분포 특성을 감안한 지표수-지하수 통합 수문 모형의 가능성을 제시하였다. 지하수 자원의 유동은 단순히 하천 인근에서만 영향을 받는 것이 아니라 다양한 외부 인자들에 의해 영향을 받을 수 있다.

연안지역에서는 해수면 상승, 해수 월류 등으로 인한 지하대수층의 염해 피해 양상을 분석하는 연구가 수행되고 있고, 지하수자원 확보를 위하여 해안지역 대수층을 활용한 수자원 확보 및 해수침투 저감 대책에 대한 연구가 수행되고 있다. 지하수자원 확보의 측면에서 Yang *et al.* (2018)은 SEAWAT 모형을 통해 여수지역의 해수침투 현황을 파악하고, RCP 기후변화 시나리오 적용 시의 해수침투 피해 면적 확산 양상, 해수침투 피해 저감 대책을 적용하였을 경우의 효과를 분석하였다.

3.2 지하수자원 평가 기술

국내 지하수자원 분야의 평가 기술은 다양한 목적을 위해 연구되고 있다. 지속가능한 지하수자원의 확보 측면에서 지하수자원에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들을 고려하기

위해 다중의사결정기법을 적용한 취약성 평가 기술 개발 관련 연구가 주로 수행되고 있다. 행정구역 또는 유역 별로 지하수 자원에 영향을 미칠 수 있는 수문·환경 요소, 인문·사회적 요소, 경제적 요소들을 인자로 선정하고, 인자들을 통해 산정된 취약성 지수가 해당 행정구역 및 유역의 공간단위를 대표하는 취약성 지수 평가 방법은 다수 수행되었다. Yang *et al.* (2017)은 낙동강 본류 유역의 21개 행정구역을 대상으로 수문·환경·인문·사회적 요소들을 지하수자원에 영향을 미치는 인자로 선정하고, 산정된 취약성 지수를 해당 행정구역의 취약성을 대표 할 수 있는 연구를 수행하였다. 수자원 관련 연구에서는 수자원 특성을 분석할 경우 시간·공간 특성을 결합한 연구를 수행한다. 그러나 지하수자원 분야의 취약성 평가 기법 개발 연구의 경우 시간 차이에서 나타나는 지하수자원 취약성 평가 기법은 국내외로 전무한 실정이다. 최근 Kim *et al.* (2018)은 낙동강 본류 유역의 공간 단위의 취약성 평가를 실시한 후 취약성 지수가 높게 나타난 지역에 대해 시간 변화에 따른 지하수자원 관리 취약 시기 평가 방법을 개발하였다. Lee *et al.* (2019)는 지하수자원을 대표할 수 있는 인자를 지하수위로 선정하였고, 지하수위와 강수의 물리적 연관성을 규명하기 위한 한계침투량 개념을 적용한 주단위 지하수자원 관리 취약성 평가 방법을 개발하였다.

Fig. 7은 Lee *et al.* (2019)가 제시한 지하수자원 관리 취약

시기 평가 방법의 순서도를 나타내고 있다.

3.3 지하수자원 관련 법·제도 현황 및 개선안 제시 관련 연구

기후변화로 인한 수문 사상의 변화에 따라 예기치 못한 가뭄에 대한 대응·대비를 위하여 지속가능하고 안정적인 수원 확보가 절실한 상황이다. 지표수 이용보다 단기간에 저렴한 비용으로 수자원을 확보할 수 있다는 측면과 수량·수질 측면에서 지하수자원은 지속가능하고 안정적인 수원으로 이용되고 있다. 그러나 무분별한 개발은 지하수자원의 고갈, 해안지역의 경우 해수침투로 인한 지하 대수층 오염, 지표면으로부터 오염물질이 유입될 경우 정화가 어렵다는 점에서 지하수자원의 관리는 필수적이다. 2019년 6월부터 시행된 물관리 기본법은 지하수의 지속가능한 개발의 원리를 담고 있으나, 실제로 실효성과 구체성을 갖고 있는 조항이 미비한 실정이다 (Kim, 2019). Kim (2019)은 해당 연구에서 지하수 법에서의 지속가능한 개발 및 이용에 대한 목적과 정의를 규정, 지하수의 공공성과 허가제도, 지하수보전구역 확대, 지하수위가 현저히 낮아지거나 수질악화 등 지하수 장해 관리 등의 제도 개선을 통해 지하수자원의 지속가능성 확보를 주장하고 있다.

4. 지역 맞춤형 지하수자원 최적 운영 관리 방안 수립을 위한 개선사항 제안

앞서 수자원 분야에 대한 세부 하위 분야로 기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망, 유역 물순환·물관리, 지표수-지하수 연계 통합수자원 관리 및 시스템 평가·분석, 수자원 정책 및 제도적 연구로 구분하였고, 지하수자원 분야에 대한 세부 하위 분야로 지하수자원 유동 해석 기술, 지하수자원 특성 평가 기술, 지하수자원 관련 법·제도 현황 및 개선 분야로 구분하여 국내 출판 연구 논문 동향 및 사례를 분석하였다.

지역 맞춤형 지하수자원 최적 운영 관리 방안을 마련하기 위해서는 지하수자원에 영향을 미칠 수 있는 수문·환경 요소의 장기적인 관측이 가능한 실증 연구 부지의 부족, 유역 물순환 연구의 경우 도시지역 또는 신도시 조성 지역에 편중, 지하수자원 관리 취약성 평가 관련 연구가 공간단위 위주의 평가, 지하수자원 관리를 위한 법률 및 조례의 적용이 행정구역 내 일률적인 적용 등의 사항이 개선되어야 한다고 판단된다.

4.1 장기 관측이 가능한 실증 연구 부지의 부족

물순환 측면에서 지하수자원은 강수, 지표수, 증발산 등 다

양한 물 순환 요소에 영향을 받는다. 현재 지표수, 강수에 대한 관측에 비하여 지하수에 대한 관측 자료의 길이가 턱없이 짧은 상황이다. 또한, 관측소 밀도, 관측자료 신뢰성 확보 등의 문제로 보다 신뢰성 있는 자료의 확보가 어렵기 때문에 지하수자원 관리·확보·개발 관련 연구에서 연구자의 애로사항이 발생하고 있다. 지하수자원은 지표수 및 강수에 영향을 밀접하게 받기 때문에 강수와 지표수의 영향을 장기적으로 관측하고, 분석할 수 있는 실증 연구 부지가 필수적이다. 자료의 획득과 접근성이 용이한 장기 관측 가능 실증 연구 부지의 부족이 개선된다면 장기관측을 통한 강수-지표수-지하수-증발산의 물순환 메커니즘 규명과 지속가능한 정량적 지하수자원 관리 방안이 도출 될 것으로 보인다. 또한 물 순환 메커니즘 규명을 통해 도시지역에 편중되어 있는 물 순환 회복 연구를 농·어촌, 산간 지역 등과 같은 비 도시지역이 물 순환 회복 연구로 확장할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 수자원 관리 취약성 평가의 공간단위 위주의 평가 연구

지하수자원 및 지표수자원 이용·관리 취약성 평가 연구의 경우 현재 대부분 공간 단위의 취약성 평가 및 취약성 지수 산정이 이루어지고 있다. 공간 단위 위주의 취약성 평가가 정책적 판단의 정량적인 근거 자료로 이용될 경우 지하수자원의 시간 흐름에 따른 특성 변동을 반영할 수 없기 때문에 시간 단위의 취약시기 평가 방법 연구가 필수적이다. 또한 기존의 공간단위 취약성 평가와 결합하여, 시공간 특성을 고려한 신뢰성 있는 취약성 평가 방법이 개발 될 경우 유역 또는 행정 구역 단위의 지하수자원뿐만 아니라 지표수자원의 효율화·지역 최적화 운영 및 관리가 가능할 것으로 보인다.

4.3 법률 및 조례 제정의 유역 특성 미반영

현행 지하수 관련 법률 및 조례는 국내 중앙정부와 지방자치단체 별로 제정이 되어있는 상황이다. 지하수자원의 지속가능한 이용과 관리를 위한 구체적이고 실효성이 있는 조항은 아직 부족한 실정이다. 또한, 법률 및 조례의 제정 시 행정 구역 내 유역 별 지하수자원 및 지표수자원의 특성 파악이 필수적이다. 지하수자원의 관리 및 이용을 위한 예산 조달, 시설 운영 등을 위해 행정구역 내의 지하수자원 관리 및 운영에 관한 법률 및 조례가 일률적으로 적용될 경우 효율적인 지하수자원 관리가 어려울 것으로 보인다. 유역 별 지역 맞춤형 및 지하수자원의 최적인영을 위해서 지하수자원 관련 법률·조례 제정 시 유역 특성 파악이 필수적인 절차로 조항에 추가되어야 한다.

5. 결론

기후변화에 따른 수문환경의 변화와 인구 증가, 산업화 등과 같은 사회적 변화로 인하여 점차 수자원 이용량 및 수요량이 증가할 것으로 보인다. 기존의 지표수자원 위주의 물 공급 방식은 최근 발생한 가뭄으로 인하여 한계점이 나타났다. 이러한 상황에서 안정적이고 지속가능한 수원으로서의 지하수 자원에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. 본 연구는 지역 특성을 고려한 지역 맞춤형 지하수자원 최적 운영 관리 방안을 도출하기 위하여, 최근 15개년 동안의 2005~2019년에 출판된 수자원 분야 관련 논문의 연구 사례 및 동향을 분석하였다. 수자원 분야는 기후변화에 따른 수자원 특성 평가 및 전망, 유역 물순환·물 관리 분야, 지표수-지하수 연계 및 유역 단위 통합 수자원 시스템 평가 및 분석 분야, 수자원 정책 및 제도적 연구 분야로 구분하였다. 지하수자원 분야는 지하수자원 유동 해석 기술, 지하수자원 평가 기술, 지하수자원 관련 법제·정책 연구 분야로 구분하였다. 수자원 및 지하수자원의 하위 항목에 대한 연구 사례 및 동향 분석을 통해 지역맞춤형 지하수자원 최적 운영 관리 방안을 위한 개선 사항을 도출하였다. 개선 사항으로는 장기적인 관측이 가능한 실증연구 부지, 공간단위 위주의 수자원 관리 취약성 평가, 법률 및 조례 제정 시 유역 특성 미반영으로 도출되었다. 세 가지 개선사항이 개선될 경우 지역 맞춤형 지하수자원 최적 운영 관리 방안이 마련될 것으로 판단된다.

지하수자원의 효율적인 관리를 위한 개선사항 도출을 위한 연구 사례 및 동향 분석 중 본 연구에서 각 분야의 하위 항목으로 선정하지 않아 분석에 제외된 연구들이 다수 존재하였다. 지하수자원 관리 방안 마련을 위한 최소한의 연구 항목 분류를 통한 분석을 수행하였기 때문에, 추후 연구 사례 및 동향 파악과 관련된 연구를 진행할 경우 공학적인 논문 외에도 인문·사회적 분야 연구 및 현상 파악과 관련된 연구를 추가할 경우 보다 구체적인 개선 사항이 도출될 것으로 생각된다. 본 연구의 연구 결과는 지하수자원 관리 정책 입안자 집단으로 하여금 연구 현장에서 요구 사항을 파악할 수 있고, 이후 지하수자원 관리 정책 결정 시 정책적 판단 근거가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 수요대응형, 물공급사업 연구사업의 재원으로 수행된 연구입니다.

References

- Ahn, J.M., Im, T.H., Lee, I.J., and Cheon, S.U. (2014). "Assessment of future river environment considering climate change and basin runoff characteristics." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 3, pp. 269-283.
- Allan, J.A. (1993). "Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible." *ODA, Priorities for water resources allocation and management*, ODA, London, UK, pp. 13-26.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bemhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Asher, M.J., Croke, B.F., Jakeman, A.J., and Peeters, L.J. (2015). "A review of surrogate models and their application to groundwater modeling." *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 8, pp. 5957-5973.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Kwon, W.T. (2007). "Generation of high resolution scenarios for climate change impacts on water responses (I): Climate scenarios on each sub-basins." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 3, pp. 191-204.
- Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011). "Future Korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406.
- Cai, J., Varis, O., and Yin, H. (2017). "China's water resources vulnerability: A spatio-temporal analysis during 2003-2013." *Journal of cleaner production*, Vol. 142, pp. 2901-2910.
- Chachadi, A.G., and Ferreira, A.C.A.P.L. (2005). "Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 - GALDIT Indicators Description." *Proceedings The Fourth Inter-celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, IAHS and LNEC, Guimaraes, Portugal, 11-14, July 2005.
- Cheong, T.S., Kang, S.U., Hwang, M.H., and Ko, I.H. (2008). "Development and validation of reservoir operation rules for integrated water resources management in the Geum river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 4, pp. 433-444.
- Choi, S.J., Kang, S.K., Lee, D.R., and Kang, S.U. (2018). "Evaluation on the water supply stability of nakdong river basin based on future scenarios." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. S-1, pp. 1105-1115.
- Doherty, J., and Simmons, S.C. (2011). "Use of paired simple and complex models to reduce predictive bias and quantify uncertainty." *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 12, W12534.
- Giorgi, F., and Mearns, L.O. (2002). "Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the Reliability Ensemble Averaging (REA) method." *Journal of Climate*, Vol. 15, No. 10, pp. 1141-1158.

- International Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate change 2007: The physical science synthesis report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., Sadeghi, M., and Moghaddamnia, A. (2012). "Application of panel-data modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor Plainm Iran." *Hydrogeology Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 435-447.
- Jha, M.K., Chowdary, V.M., and Chowdhury, A. (2010). "Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques." *Hydrogeology journal*, Vol. 18, No. 7, pp. 1713-1728.
- Jung, I.W., Bae, D.H., and Kwon, W.T. (2007). "Generation of high resolution scenarios for climate change impacts on water responses (II): Runoff scenarios on each sub-basins." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 3, pp. 205-214.
- Kim, B.S., Kim, J.M., Baek, J.S., and Shin, H.S. (2019). "An analysis of storage and runoff reduction characteristics using planter box in architectural LID system." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 3, pp. 219-226.
- Kim, E.J. (2016). "Legal tasks for sustainable development and use of groundwater." *Environmental Law Review*, Vol. 41, No. 3, pp. 1-28.
- Kim, H.B., and Kim, J.K. (2011). "A Study on establishment of regional water policy in Korea: Focused on four rivers in Korea." *Journal of the Korean Regional Science Association*, Vol. 27, No. 3, pp. 61-80.
- Kim, I.-H., Lee, J.-B., and Yang, J.-S. (2018). "Development of vulnerability period assessment method for efficient groundwater resources management in upstream of Nakdong river basin using entropy method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 9, pp. 761-768.
- Kim, J.S. (2019). *The Utilization of Sustainable Groundwater a management plan*. Legislation·Policy Report Vol. 31, NARS Publication No. 31-9735026-001607-14, National Assembly Research Services, pp. 55-70.
- Kim, N.W., Na, H.N., and Chung, I.M. (2013). "Simulation of groundwater variation characteristics of Hancheon Watershed in Jeju Island using integrated hydrologic modeling." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, N0. 5, pp. 512-522.
- Kim, Y.D., Lee, S.H., Ono, Y., and Lee, S.H. (2013). "Development of water footprint inventory using input-output analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 4, pp. 401-412.
- Kite, G.W., and Haberland, U. (1999). "Atmospheric model data for macroscale hydrology." *Journal of Hydrology*, Vol. 217, pp. 303-313.
- Leal, J.A.R., Silva, F.O.T., Montes, I.S. (2012). "Analysis of aquifer vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regression." *Environmental earth sciences*, Vol. 66, No. 8, pp. 2257-2271.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1983). *Precipitation-Runoff Modeling System*. User's manual, by Water-Resources Investigations, pp. 83-4238.
- Lee, D.R., Choi, S.J., and Moon, J.W. (2013). "Development of integrated water resources evaluation index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 10, pp. 1017-1028.
- Lee, J.-B., Kim, I.-H., and Yang, J.-S. (2019). "Development of the vulnerable period assessment method for the weekly groundwater resources management in Yeongsan river basin considering the critical infiltration concept and the correlation between hydrological data sets." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 3, pp. 195-206.
- Lee, S.J., Kim, Y.O., Lee, S.H., and Lee, G.S. (2005). "Water cycle simulation for the Dorimcheon catchment using WEP model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 6, pp. 449-460.
- Leube, P.C., Nowak, W., and Schneider, G. (2012). "Temporal moments revisited: Why there is no better way for physically based model reduction in time." *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 11, W11527.
- Luoma, S., and Okkonen, J. (2014). "Impacts of future climate change and Baltic Sea level rise on groundwater recharge, groundwater levels, and surface leakage in the Hanko Aquifer in Southern Finland." *Water*, Vol. 6, No. 12, pp. 3671-3700.
- Ministry of Environment (ME) (2019). *2019 Groundwater annual report*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *Water resources plan (2001-2020) : The 3rd revision plan*.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (2015). *Drying wells, rising stakes : Towards sustainable agricultural groundwater use*. OECD Studies on Water, pp. 24-26.
- Park, J.E., Lee, E.R., and Lim, K.S. (2016). "Development and assessment of water management resilience of mid-small scale tributaries." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 2, pp. 95-106.
- Park, J.H., Kwon, H.H., and No, S.H. (2011). "Outlook of discharge for Daecheong and Yongdam Dam watershed using A1B climate change scenario based RCM and SWAT Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 920-940.
- Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A.A., and Zarghami, M. (2016). "Localization of groundwater vulnerability assessment using catastrophe theory." *Water resources management*, Vol. 30, No. 13, pp. 4585-4601.
- Sahoo, S., and Jha, M.K. (2013). "Groundwater-level prediction using multiple linear regression and artificial neural network techniques: a comparative assessment." *Hydrogeology Journal*, Vol. 21, No. 8, pp. 1865-1887.

- Seeboonruang, U. (2016). "Impact assessment of climate change on groundwater and vulnerability to drought of areas in Eastern Thailand." *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, No. 1, pp. 42.
- Webster, M., Forest, C., Reilly, J., Babiker, M., Kicklighter, D., Mayer, M., and Wang, C. (2003). "Uncertainty analysis of climate change and policy response." *Climatic change*, Vol. 61, No. 3, pp. 295-320.
- Wilby, R.L. (2005). "Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment." *Hydrological Processes: An International Journal*, Vol. 19, No. 16, pp. 3201-3219.
- Woo, S.Y., Jung, C.G., Kim, J.U., and Kim, S.J. (2018). "Assessment of climate change impact on aquatic ecology health indices in Han river basin using SWAT and random forest." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 10, pp. 863-874.
- Wu, W., Yin, S., Liu, H., and Chen, H. (2014). "Groundwater vulnerability assessment and feasibility mapping under reclaimed water irrigation by a modified DRASTIC model." *Water resources management*, Vol. 28, No. 5, pp. 1219-1234.
- Yang, J.-S., and Ahn, T.-Y. (2007). "The correlation between groundwater level and moving average of precipitation in Nakdong river watershed" *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 17, No. 4, pp. 507-510.
- Yang, J.-S., Lee, J.-B., and Kim, I.-H. (2017). "Assessment of the vulnerability of groundwater level management in Nakdong river basin" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 12, pp. 815-825.
- Yang, J.-S., Lee, J.-B., and Kim, I.-H. (2018). "Analysis of the effects of the seawater intrusion countermeasures considering future sea level rise in Yeosu region using SEAWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 6, pp. 515-521.