실제 물이용 체계를 고려한 한강 동해 권역 물수급 평가

Water Supply-and-Demand Analysis Considering the Actual Water-Use System in the East Basin of Han River

오지환* · 류경식** · 북정수*** · 장연석**** · 배영대***** · 이봉국*****

Oh, Ji-Hwan*, Ryu, Kyong Sik**, Bok, Jung Soo***, Jang, Yeon Seok****, Bae, Yeong Dae*****,
and Lee, Bong Guk*****

Abstract

Korea has assessed its water supply-and-demand system to change, develop, and allocate water resources. This study confirmed the current problems in water supply-and-demand analysis and the need for improvement suggested by previous studies. By considering these problems and the proposed improvement, we developed a water supply-and-demand analysis system that takes the actual water-use system into account and quantifies the resulting water shortage in each administrative district. The spatial-unit analysis was subdivided into standard hydrologic watershed units in the East Sea region of the Han River, where water management was relatively weak, and the distortion was minimized by directly reflecting the basic unit of water demand for each type using the MODSIM model. In addition, the regional sources for water supply, such as water facilities and groundwater use, were directly reflected in the model. As a result, we discovered the possibility of water shortage in administrative district units that was not identified by the existing analysis system. In particular, the water-shortage problem that occurred in Gangneung-si and Sokcho-si was indirectly expressed by our method. Improved specific and realistic water-resource planning can possibly be realized by using the method developed in this study rather than the existing method.

Key words : Water Supply and Demand System, Water Shortage, Water Resources Planning, MODSIM

요 지

우리나라는 수자원의 여건 변화와 개발 및 공급, 적절한 배분 및 이용을 위해 물수급 평가를 수행해왔다. 이에 본 연구에서는 현재 물수급 분석에 대한 문제점과 선행 연구에서 제시한 개선 사항을 파악하고, MODSIM 모형을 활용하여 실제 물이용 체계를 고려한 물수급 분석 체계를 구축하였으며, 행정구역 단위의 물 부족 결과를 제시하였다. 이에 물 관리가 상대적으로 취약한 한강 동해 권역을 대상으로 분석 공간 단위를 표준유역단위로 세분화하고, 용도별 용수요량의 기초 단위를 적용하여 왜곡을 최소화하였다. 또한 수자원시설물, 지하수이용 등 지역공급원을 모형 내 일부 직접 반영하고, 하수처리장 정보를 이용한 회귀지점을 고려하여 분석하였다. 분석 결과, 기존의 분석 방식에서는 확인하기 어려웠던 행정구역 단위의 물 부족 표출 가능성을 확인하였고, 특히 최근 가뭄 상황이 발생했던 강릉시, 속초시에 대한 물 부족을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 더 현실적인 물수급 분석이 될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 물수급 분석, 가뭄, 물 부족, MODSIM

*정회원, K-water연구원 물순환연구소 위촉연구원(E-mail: ojh4525@kwater.or.kr)

Member, Researcher, Water Resources Research Center, K-water Research Institute

**교신저자, 정회원, K-water연구원 물순환연구소 책임연구원(Tel: +82-42-870-7472, Fax: +82-42-870-7472, E-mail: ksryoo@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Researcher, Water Resources Research Center, K-water Research Institute

***K-water 물관리기획처 물수요공급예측센터 과장

Manager, Water Resources Management Research & Planning Dept., Water Supply and Demand Prediction Center, K-water

****K-water 물관리기획처 물수요공급예측센터 차장

Senior Manager, Water Resources Management Research & Planning Dept., Water Supply and Demand Prediction Center, K-water

*****K-water 물관리기획처 물수요공급예측센터 센터장

General Manager, Water Resources Management Research & Planning Dept., Water Supply and Demand Prediction Center, K-water

*****K-water 물관리기획처 물수요공급예측센터 대리

Manager, Water Resources Management Research & Planning Dept., Water Supply and Demand Prediction Center, K-water

1. 서 론

최근 지구온난화에 따른 기후변화로 인해 전 세계적으로 극심한 가뭄과 집중호우에 따른 피해가 증가하고 있는 추세이다. 우리나라는 지형적 또는 강우발생 특성으로 평·갈수기의 수자원 관리는 가뭄 해소를 위해 매우 중요하다. 최근 2017년 1~12월의 강수량은 7월을 제외한 모든 달에 1966~2016년의 평균값 이하가 발생하였고, 특히 1, 3, 5, 6, 11월은 평균대비 50%이하의 강수가 발생하였다(Han River Flood Control Office, 2018). 이와 같은 변화는 유출 변화를 야기시키며, 물순환(water circulation)의 변동을 대응하기 위한 신·퇴성 있는 평가와 적절한 계획이 필요하다(No et al., 2013). 과거부터 우리나라는 수자원의 여건 변화와 개발 및 공급, 적절한 배분 및 이용을 위해 1965년의 수자원장기종합계획을 최초 수립 후 4차례의 본 계획, 3차례의 수정계획을 수립해왔다(MLTM, 2011). 가장 최근 수립된 수자원장기종합계획은 2016년에 목표년도 2020년을 대상으로 미래 물 수요에 따른 유역 내 공급가능한 수자원과의 균형 분석을 117개 중권역을 구분하고, 평가하였다(MOLIT, 2016). 그러나 중권역 단위의 결과 분석은 각 지자체의 구체적인 개발계획과 시기가 반영되지 않고, 실제 지역이 가지고 있는 의견과 문제 반영을 할 수 없어 실제 지역별 물 부족 현상을 평가하고, 전망하는 것은 한계가 존재한다. 또한 수자원장기종합계획에서 물수급 분석에 대한 방법과 가정에서 제시한 바와 같이 중권역 내 댐수, 하천수, 지하수 등 모든 수량을 이용할 수 있는 가정을 통해 수행하여 실제 물수급 체계를 반영하지 못하는 한계가 있다(MOLIT, 2016).

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 K-water (2008)는 3가지의 개선방안을 제시하였다. 첫 번째, 기존 방법은 행정구역별 취수장의 위치를 고려하지 않음으로써 실제 물이용 지역과 취수지역을 상이하게 하는 문제점이 존재함을 지적하고, 행정구역별 수요량자료를 중권역으로 할당하는 번거로운 작업보다는 행정구역별 결과를 직접 얻을 수 있어야 한다고 제시하였다. 두 번째는 취수장의 취수능력을 고려함과 동시에 현실적으로 모든 저수지를 평가에 포함시킬 수는 없기 때문에 일정규모를 기준으로 포함하고, 소규모 저수지는 가상저수지로 통합하여 고려하는 것을 제안하였다. 세 번째는 지하수 공급량을 중권역 단위 공급처로 통합하여 모의에 반영하고, 회귀수량은 하수처리장의 위치로 설정하고 모의하는 방안을 제시하였다. 또한 이를 극복하기 위하여 Kim et al. (2016)은 전 유역을 하나의 기준으로 설정할 때 해당 지자체의 물 부족의 지역적 분포와 특성을 이해하기 힘든 점을 지적하고, 기본 유역 단위를 행정구역단위로 세분화하여 평가하였다. Choi et al. (2018)은 기존 방식의 문제점으로, 생·공용수의 경우 수요 추정과 수도시설계획이 행정구역별로 이루어지기 때문에 이를 유역단위로 인위적인 변환을 할 경우, 오류가 발생할 수 있고, 중권역의 대표 하천으로부

터 공급받는다 가정 하에 분석되지만 현실은 타 유역으로부터 공급을 받는 경우가 많아 취수원과 취수지점을 정확히 파악하는 것이 필요하다고 제시하였다. 또한 일률적인 회귀율에 대한 문제, 농업용수 수요량에 대한 문제점을 지적하였으며, 이에 대한 개선방안으로 생·공용수의 수요처는 행정구역, 농업용수의 수요처는 수문학적 유역을 공간단위로 분석할 필요성을 제시하였다. 최근 Oh et al. (2019a)은 국내 수행했던 물수지 분석의 공간 단위에 대한 조사를 수행하고, 수자원단위지도를 기준으로 표준유역단위로 세분화하여 평가하였으며, 같은 수요량과 공급량임에도 불구하고 공간 세분화는 물 부족 결과에 영향을 미칠 수 있다고 제시하였다. 또한 개선을 위해 향후 유역단위 뿐만 아니라 생·공용수는 행정구역 내 수원과 취수시설을 고려하고, 농업용수는 기초단위인 농촌용수구역 단위로 분석하며, 하수처리장의 시설 용량을 고려한다면 좀 더 현실적인 물수급 전망이 될 것이라고 지적하였다.

이처럼 현재 국내 물수급 분석의 가정에 대한 한계와 문제점을 개선하고, 고도화를 위한 개선 방안이 제시되었으나, 실제 유역을 대상으로 적용된 사례와 평가는 현재까지 많지 않다. 이에 본 연구에서는 앞서 연구동향에서 제시한 개선 사항을 중심으로 실제 물이용 체계를 고려한 물수급 분석 체계를 구축하고, 물수급 분석 일련의 과정을 수행하는데 주요 목적이 있으며, 향후 분석의 고도화를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 대상 유역 및 연구 방법

2.1 대상 유역 현황

본 연구에서 물수급 분석을 위한 대상 유역은 한강 수계의 한강 동해 권역을 채택하였다. 한강 동해 권역은 유역면적 3,889.68 km²으로 구성되어 있고, 전체 한강 권역에 약 9%를 차지하고 있다. 기존의 물수급 분석 네트워크는 중권역 단위의 양양남대천(1301), 강릉남대천(1302), 삼척오십천(1303)으로 구분되어 있다.

한강 동해 권역을 채택한 이유는 Table 1에서 제시한 바와 같이 한강 권역 내 대부분 산맥으로 이루어져 있어 타 유역에 대비하여 유역의 표고가 높고, 유역 경사가 급해 강수에 의한 유출이 일시에 발생하는 특성으로 하천 관리가 상대적으로 힘들며, 하천의 형상이 평행상으로 동해로 직접 유출되는 특성으로 중권역 단위 분석에서 가장 많은 개선이 필요하기 때문이다. 또한 과거에 가뭄피해가 빈번하여 제한급수가 시행된 바 있으며 2017년 6월에는 강릉시 오봉저수지와 속초시 쌍천지하댐은 ‘주의’ 단계를 발령하는 등 최근까지도 가뭄문제가 속출되고 있어 정량적인 평가가 필요한 유역이다(ME and Han River Flood Control Office, 2018). Fig. 1(a)는 3개의 중권역과 20개의 표준유역을 도시하였고, Fig. 1(b)는 대상 유역에 포함된 행정구역으로 6개 시·군(고성, 속초,

Table 1. Topographic Characteristics of Han-river Basin

Classification (code)	Area (km ²)	Basin characteristics		
		Average elevation (El.m)	Maximum elevation (El.m)	Average slope (%)
Han-river (10)	34,428.1	406.9	1,575.0	39.1
Anseong-river (11)	1,658.66	69.5	570.9	14.9
Han-river West (12)	1,970.81	30.4	471.6	12.3
Han-river East (13)	3,889.68	371.7	1,705.0	47.3

Fig. 1. Basin and Administrative District Map in the Study Area

양양, 강릉, 동해, 삼척)을 제시하였으며 Fig. 1(c)는 표준유역보다 더 세분화된 유역단위인 KRF (Korean Reach File)로 2.2절 연구방법에서 자세하게 설명하고자 한다.

2.2 연구 방법

2.2.1 공간 단위(spatial unit)

세분화된 물수급 분석을 위해 기본 단위는 기존 3개의 중권역을 20개의 표준유역단위로 분할하였다. 또한 본 연구 대상과 같이 해안지역은 표준유역단위보다 더 작은 규모의 유역에서 취수장 또는 정수장이 존재하지 않거나, 합류하지 않고 직접 바다로 유출되는 하천이 있기 때문에 별도의 구분이 필요하였다. 이에 환경부 물환경정보시스템(Water Environment Information System)에서 제공하고 있는 KRF를 이용하여 용수공급량에 기여하지 않고, 무효 방류되는 지류들을 각각 표준유역에서 분리하였다. KRF는 GIS기반의 효율적인 유역과 수질관리를 위해 국가 및 지방하천을 대상으로 임의의 기준에 따라 하천구간(stream reach)를 정의한 자료이며 2015년을 기준으로 전국 단위의 3,838개로 분할되어 있다 (Water Environment Information System). 본 연구 대상인

한강 동해 권역은 총 99개로 분할되어 있어 실제 물수급에 기여하는 유량을 추출하였으며, 총 99개 중 55개로 유역분할과 유량 배분을 수행하였다. 최종적으로 물수급 분석을 위한 유역의 분할 결과는 Fig. 1(c)와 같다.

2.2.2 용수수요량(water demands)

물수급 분석에 필요한 용수수요량은 생활, 공업, 농업용수로서 인구전망, 경제발전, 농지면적을 반영하여 목표년도에 대한 수요량을 산정한다. 본 연구에서는 MOLIT (2016)에서 산정된 시·군단위 수요량과 농촌용수구역 단위 수요량을 활용하여 적용하고, 분석 결과를 비교하고자 계획하였다. 산정된 수요량은 2016년을 기준년도로 2020년, 2025년, 2030년에 대한 수요량을 산정한 바 있다.

2.2.2.1 생활 및 공업용수

MOLIT (2016)에서는 ME (2014)에서 제시하고 있는 생·공업수 수요량 산정 방법에 의거하여 고수요, 기준수요, 저수요 시나리오를 설정 후 물 수요량을 추정하였다(MOLIT, 2016). 본 연구에서 활용한 수요량은 기준수요에 해당하는 생·공업수 수요량을 활용하였다. Table 2는 시·군 단위로

Table 2. Domestic and Industrial Water Demands by Target Year

Unit: thousand m³/yr

Administrative districts	Domestic and Industrial water demands by target year				
	2016 (Base year)	2020	2025	2030	Average
Goseong-gun	9,656.79	9,079.53	9,177.70	9,164.38	9,269.60
Sokcho-si	13,174.94	12,979.97	13,294.89	13,468.50	13,229.58
Yangyang-gun	7,276.73	7,157.27	7,199.72	7,135.68	7,192.35
Gangneung-si	41,784.30	41,658.09	41,123.93	41,389.54	41,488.97
Donghae-si	33,589.33	35,558.44	36,486.84	36,349.05	35,495.91
Samcheok-si	29,581.28	28,047.77	28,347.81	28,639.83	28,654.17

산정한 목표년도 별 생활, 공업용수 수요량의 합계를 나타내고 있다.

산정된 시·군별 수요량을 바탕으로 실제 물이용 체계를 반영하기 위하여 ME (Ministry of Environment) and K-water (2018a)의 자료를 활용하여 구성하였다. ME (Ministry of Environment) and K-water (2018a)는 가뭄현황의 분석과 전망을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 2017년을 기준으로 전국 지자체를 대상으로 수원 및 용수공급체계를 조사하였다. 조사 자료는 읍·면·동 별 총 인구, 수원, 취수장, 정수장, 배수지, 급수지역(읍면동) 순으로 조사되어 있어 일련의 물 이동 과정을 조사한 결과이다.

이에 본 연구에서는 읍·면·동 별로 총인구수로 시·군의 생·공용수량을 배분하고, 해당 읍면동에 공급하는 정수장의 수요량으로 합산하여 적용하였으며, 모형 내 네트워크 구성 시 수원의 위치와 정수장의 위치정보를 활용하여 수요처로 설정하였다. 물수급 분석 수행 시, 배분된 읍면동의 수요량을 정수장을 기반으로 분석하는 것은 앞서 선행연구에서 제시했던 개선방안을 반영할 수 있고, 물 부족 결과가 실제 정수장에서 발생한 상황으로 읍·면·동 단위의 결과를 표출해 낼 수 있는 장점이 있다. Fig 2는 연구 대상 내 시·군 중 속초시의 용수공급체계 모식도를 예시로 나타냈다. 속초시는 8개의 동으로 이루어져 있고, 속초, 설악, 학사평 정수장

에서 공급받으며 여기서 대포동은 속초와 설악정수장, 교동, 노학동, 영랑동은 설악과 학사평정수장에서 동시에 공급받고 있는 동으로 구성되어 있다. 연구 대상 구역 내 수요량을 적용한 정수장의 위치정보는 Fig. 5(a)와 같다.

2.2.2.2 농업용수

MOLIT (2016)에서는 논, 밭, 축산용수를 대상으로 농업용수 수요량을 산정하였으며 행정구역, 권역별 수요량을 제시하고 있다. 그러나, 조사 결과 농업용수 수요량 산정의 기본단위는 수자원공동유역을 기본으로 하는 농촌용수구역으로 별도로 지정하여 관리하며 유역의 수문학적 특성과 수원공과 해당 수원공으로부터 공급받는 관개용수의 수혜를 받는 지역을 묶고 하나의 구역으로 정의되어 있다(Rural Agricultural Water Resource Information System). 이에 농촌용수구역별 산정된 수요량을 행정구역, 권역별로 변환하여 제시한 결과인 것으로 나타났다. 농촌용수구역은 유역 특성을 고려하였기 때문에 표준유역과 같거나, 일부는 표준유역 2개 이상 하나의 구역으로 설정되어 있어 수자원단위지도 표준유역 850개 대비 511개로 적은 숫자이며, 대상 유역 또한 12개로 표준유역 20개보다는 적게 구성되어 있다(Fig. 5(b) 참조). 선행연구의 개선방안은 농업용수의 경우 수문학적 단위를 기본단위로 분석할 수 있도록 제시하였으나, 본 연구에서는

Fig. 2. Diagram of Water Source and Supply System in the Sokcho-si (ME and K-water, 2018a)

Table 3. Agricultural Water Demand by Target Year

Unit: thousand m³/yr

Agricultural demand zone			Agricultural water demand by target year				
No.	Name	Code	2016	2020	2025	2030	Average
1	Gogeo	130101	19650.77	19113.88	18793.58	18776.41	19083.66
2	Gojuk	130102	25836.84	25111.99	24681.97	24666.51	25074.33
3	Yangson	130103	15338.65	14572.85	14111.01	14048.89	14517.85
4	Yanggang	130104	5980.73	5687.58	5510.96	5480.78	5665.01
5	Myeongsa	130201	9676.78	9543.27	9473.74	9486.51	9545.07
6	Gangneung1	130202	36748.81	36514.86	36565.72	36916.99	36686.60
7	Myeongseong	130203	521.99	553.02	594.70	638.84	577.14
8	Myeonggang	130204	9775.67	9691.23	9678.85	9747.57	9723.33
9	Donghae1	130205	4363.27	4225.37	4133.97	4098.47	4205.27
10	Sammi	130301	4722.97	4986.63	5358.58	5747.15	5203.83
11	Samgeun	130302	4465.92	4452.61	4495.04	4581.92	4498.87
12	Samwon	130303	4578.06	4541.31	4556.70	4623.13	4574.80

자료의 변환 중 발생할 수 있는 왜곡을 최소화하기 위해 가장 기초단위인 농촌용수구역을 적용하였다. Table 3은 수자원장기종합계획에서 활용한 농촌용수구역 별 산정한 수요량을 나타내고 있다.

각 목표년도에 대한 생·공용수와 농업용수 수요량 산정 결과를 도시한 결과는 Fig. 3과 같다. 목표년도별 수요량 비교 시 변화가 다소 미미하여, 물수급 분석 결과에 영향이 크지 않을 것으로 판단하고, 본 연구에서는 목표년도 2030년을 기준으로 분석하고자 계획하였다.

2.2.2.3 회귀수량과 수요변동의 적용

기존의 수자원장기종합계획의 물수급 분석 시 회귀수량의 설정 방법은 생·공용수의 경우 수요처에서 물을 공급받고 35%는 소모하고, 65%의 회귀율(return flow rate)을 각 중권역 유역 출구부에 적용하여 하류부에서 재이용할 수 있도록 설정하였으며, 농업용수는 순물소모개념을 도입하

여 수요량의 65%를 모형에 적용하였다(MOLIT, 2016). 또한 수요량의 연중 변동은 생·공용수는 연중 일정한 패턴을 유지하는 것으로 가정하고, 농업용수는 논, 밭, 축산을 구분하여 시간(관개기)에 따른 이용 패턴을 고려하였다(MOLIT, 2016).

K-water (2008)과 Choi et al. (2018)은 회귀수량의 지점 설정과 생·공용수의 일률적인 회귀율 문제, 농업용수 회귀율에 대한 문제점을 지적하였다. 필히 개선되어야 할 사항이라고 판단되나, 회귀율 변화에 따라 물 부족 발생량의 영향과 차이 분석은 별도로 고려되어야 할 사항이며, 본 연구 결과와 기존 방식으로 산정된 물 부족량과 정량적인 비교가 필요하기 때문에 기존의 용수수요량 대한 회귀율 적용 방식은 일관성을 유지하였다. 단, 회귀율의 적용 위치는 단순한 유역 출구부가 아닌 읍면동 별 해당 하수처리장 조사 결과를 이용하여 회귀지점을 설정하였기 때문에 물 순환 과정에 대한 실제 물이용 체계를 고려하였다고 볼 수 있다.

(a) Domestic and Industrial water demands

(b) Agricultural water demand

Fig. 3. Calculation of Water Demands by Target Year

2.2.3 수자원 공급량(water supply)

2.2.3.1 자연유량

공급량은 자연유량(unregulated inflow)과 댐, 농업용저수지, 지하수 등에 의한 공급으로 구분할 수 있으며, 기존 방법에서는 중권역 단위의 49개년 간(66'-15') TANK 모형에 의한 반순(5일) 단위 유출량과 용수전용댐인 광동댐과 달방댐을 모의에 적용하였다. 산정된 중권역 단위의 자연유량은 2.2.1절에서 제시한 KRF에 의한 유역분할에 따라 면적비를 활용하여 세분화하고 적용하였다. 표준유역 내 댐 또는 500 천m³이상인 농업용저수지가 있을 경우는 댐으로 간주하여 Eq. (1)과 같이 분할하였다.

$$q_d = \frac{a_i}{A} \times Q_u \quad (1)$$

여기서, q_d 는 댐 또는 500 천m³이상인 저수지에 유입되는 유입량이며, a_i 는 표준유역 내 i 번째 댐 또는 농업용저수지의 유역면적(km²)을 의미하고, A 는 표준유역의 면적(km²), Q_u 는 표준유역의 자연유출량을 의미한다. 또한 500 천m³이하인 농업용저수지가 표준유역 내 여러 지점에 있는 경우, 가상의 저수지 형태로 Eq. (2)와 같이 분할하였다. q_r 는 가상저수지로 유입되는 유입량이며, 각 저수지가 차지하고 있는 유역면적을 고려하여 적용하였다. A 와 Q_u 는 Eq. (1)에서 설명한 내용과 일치한다.

$$q_r = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{A} \times Q_u \quad (2)$$

그리고, 표준유역 내 댐, 농업용저수지를 제외한 잔유역은 Eq. (3)과 같이 Eqs. (1)과 (2)를 제외한 나머지를 반영하여 적용하였다.

$$Q_u' = Q_u - (q_d + q_r) \quad (3)$$

여기서, Q_u' 은 댐과 저수지 유입량을 제외한 잔유역에 대한 자연유출량을 의미한다. Fig. 4는 49개년 간 대상 유역 내 중권역별 자연유량을 표준유역별로 분할한 평균유출량을 유역면적과 함께 도시하였다.

2.2.3.2 수자원시설물

하천의 자연유량과 함께 공급하는 수자원시설물은 댐, 농업용저수지, 지하수(관정)와 물을 사용하고 난후 처리를 통해 방류되는 하수처리장으로 볼 수 있다. K-water (2018)와 Mywater 조사 결과, 연구 대상지 내 2개의 용수전용댐, 1개 지하댐, 51개의 농업용저수지, 44개의 암반관정, 89개의 하수처리장이 존재하는 것으로 분석되었다(Figs. 5(c) ~ (e) 참조). Table 4는 기존의 MOLIT (2016)에서 제시한 댐 정보와 본 연구에서 적용한 댐 정보를 제시하였다. K-water (2018)의 광동댐과 달방댐은 2014년 퇴사량 조사가 반영된 결과를 적용하였기 때문에 총저수용량과 유효저수용량이 소폭 감소됨을 보였으며, 쌍천지하댐은 공식적인 저류용량에 대한 정보가 부족하여 Kim (2017)이 대수층의 면적, 유효평균두께, 유효공극율을 반영하여 산정한 저류공간의 크기인 640 천m³을 유효저수용량으로 적용하였다.

농업용저수지는 농촌용수종합정보시스템(RAWRIS)의 현황 조사 결과, 전국에 17,289개가 분포하고 있으며, 시·군 단위로 분석한 결과 연구 대상 내 51개가 존재하는 것으로

Fig. 4. Unregulated Inflow by Standard Hydrologic Unit (MOLIT, 2016)

Table 4. Storage Capacity Information of Water Supply Dam and Subsurface Dam

Classification	Dam Name	Storage Capacity (thousand m ³)		
		Total	Effective	Inactive
MOLIT (2016)	Gwangdong	13,100	9,500	2,300
	Dalbang	8,700	7,600	100
This study	Gwangdong	12,500	9,200	2,300
	Dalbang	8,000	7,000	100
	Ssangcheon subsurface	640	640	0

나타났다. 51개를 모두 네트워크에 반영하는 것은 다소 무리가 있어 500 천m³을 기준으로 분류하였다. 500 천m³이상인 저수지는 51개 중 18개로서 모형 내 직접 저수지 노드로 반영하고, 이하인 저수지는 위치 정보를 이용하여 표준유역, 시·군 단위로 분류하여 물 부족을 계산 후 지역공급원으로 반영하였다. Table 5는 표준유역별 저수지의 개소수와 해당하는 유효저수용량(effective storage capacity)과 총저수용량(total storage capacity)을 나타내고 있다.

ME (Ministry of Environment) and K-water (2018b)의

자료를 이용하여 6개 시·군 자료에 대한 지하수 이용량 결과는 Table 6과 같다. 그러나, 이 자료는 암반관정(bedrock tube well)과 충적관정(alluvium tube well)의 합계량이며, 충적관정은 강우와 지표수 유출의 영향을 많이 받기 때문에 적용하지 않고, 암반관정을 대상으로 0.2 천m³/day를 기준으로 모형의 직접 또는 지역공급원으로 반영을 수행하였다. Table 7은 해당 시·군의 암반관정(bedrock tube well)을 대상으로 모형에 적용할 통계량을 분석한 결과를 나타내고 있다.

Table 5. Distribution and Storage Capacity of Agricultural Reservoirs by Standard Watershed Unit

Standard watershed code	Number of reservoirs (an excess of 50 million m ³)	Storage capacity (thousand m ³)	
		Effective	Total
130101	1	2.0	2.0
130102	7 (1)	2,760.0 (2,669.0)	2,763.0 (2,672.0)
130103	3	437.0	448.0
130104	5 (4)	8,641.6 (8,558.6)	9,293.3 (9,210.3)
130105	6 (1)	1,475.5 (1,430)	1,575.6 (1,530)
130107	4	20.0	24.0
130108	4	371.0	376.0
130201	3 (3)	2,986.1 (2,986.1)	3,128.7 (3,128.7)
130202	2 (2)	3,233.6 (3,233.6)	3,372.0 (3,372.0)
130204	5 (4)	16,464.9 (16,458.9)	18,252.2 (18,246.2)
130205	3 (1)	996.0 (972.0)	1,018.0 (994.0)
130206	1 (1)	1,604.4 (1,604.4)	1,639.7 (1,639.7)
130207	1	11.0	21.0
130302	2	313.0	369.0
130303	3 (1)	946.9 (921.9)	947.9 (921.9)
130305	1	97.8	167
Total	51 (18)	40,360.8 (38,834.5)	43,397.4 (41,714.8)

Table 6. Distribution and Yearly Usage of Tube well by Administrative Districts

Administrative districts	Number of tube well	Daily usage (thousand m ³ /year)				
		Domestic	Industrial	Agricultural	Etcetera	Total
Goseong	3,044	3,778,388	157,069	4,998,693	0	8,934,149
Sokcho	912	927,743	203,774	634,741	4,386	1,770,644
Yangyang	1,821	775,498	173,566	985,987	15,480	1,950,532
Gangneung	10,290	6,355,135	1,215,777	5,087,479	0	12,658,391
Donghae	1,087	3,038,851	3,287,989	488,072	37,714	6,852,626
Samcheok	2,756	16,495,273	1,163,351	4,462,666	87,311	22,208,601
Total	19,910	31,370,888	6,201,526	16,657,638	144,891	54,374,943

Table 7. Distribution and Yearly Usage of Bedrock Tube well by Administrative Districts

Adiministrative districts	Number of bedrock tube well (an excess of 0.2 thousandm ³ /day)	Daily usage (thousand m ³ /year)				
		Domestic	Industrial	Agricultural	Etcetera	Total
Goseong	126(3)	1,597.3 (376.0)	10.3	88.9	0.0	1,696.4 (376.0)
Sokcho	139(0)	333.5	139.0	66.1	1.2	539.8
Yangyang	576(0)	569.6	161.4	334.4	15.5	1,080.9
Gangneung	3,182(7)	3,993.9 (912.6)	817.5 (231.6)	3,211.4 (1,492.3)	0.0	8,022.8 (2636.5)
Donghae	390(14)	1,131.7 (271.3)	2,813.1 (2,483.5)	199.4	37.7	4,182.0 (2,754.7)
Samcheok	1,331(20)	8,098.6 (1,937.9)	1,021.8 (173.0)	2,220.7 (535.8)	56.4	11,399.0 (2,646.8)
Total	5,744(44)	15,724.6 (3,497.8)	4,963.1 (2,888.1)	6,120.9 (2,028.1)	110.8	26,920.9 (8,414.0)

(a) Purification plants

(b) Agricultural demand zones

(c) Dam and agricultural reservoirs

(d) Bedrock tube well

(e) Sewage treatment plants

Fig. 5. Water Resources Facilities for Calculation of Water Demand and Supply

앞서 제시한 기존의 수자원장기종합계획에서 활용한 방법과 본 연구에서 적용한 개선 방법에 대하여 물수급 분석 절차 별로 비교 정리한 결과는 Fig. 6과 같다. 공간단위는 기존의 3개 중권역에서 55개의 KRF단위를 기준으로 세분화하여 용수공급량에 기여하는 유출량만을 분리했고, 모의 기간은 동일하지만 일정 규모 이상의 농업용저수지를 모형 내 직접 반영하여 과도한 지역공급원 처리를 방지하였다. 또한 물 부족은 기존의 수자원장기종합계획에서는 중권역 단위로 표출되지만, 본 연구에서는 행정구역단위로 표출이 가능하여 지역의 계획 수립을 위해 시나리오 분석 등이 더 용이할 것으로 판단된다.

3. 물수급 분석 모델 및 구축

3.1 물수급 분석 모델

물수급 분석 모델은 물 수요와 공급의 균형에 대한 평가와 예측을 위해 지역, 수리권 특성 등을 고려하여 다양한 모델이 개발되어 활용 중에 있다. 국내 활용하고 있는 대표적인 물수급 분석 모델은 K-WEAP (Korea-Water Evaluation And

Planing System), MODSIM (MODified SIMYLD) 등이 있다. 현재 수자원장기종합계획에서 물수급 분석을 위한 모델은 “수자원의 지속적 확보기술 개발사업”의 성과로 국내 실정에 맞도록 개발한 K-WEAP모형을 활용하여 분석하였고(Park et al., 2003), 국내 다양한 연구자들에 의해 유역별로 적용되어 왔다(Choi et al., 2018). MODSIM 모형은 1978년 Colorado State University에서 처음 개발되었으며, 단기 물 관리, 장기 운영 계획 수립과 운영을 위해 하천 유역관리 의사결정 지원 시스템(decision support system)을 목적으로 수자원의 갈등 해소를 위해 수행하는 모형이다(Labadie and Larson, 2007).

두 모형 모두 선형계획법(linear programming)에 의한 최적화(optimization)를 통해 수자원의 운영, 배분하는 수단으로 수행한다. MODSIM은 최적해를 효율적으로 해석하기 위한 정수 기반의 lagrangian relaxation algorithm RELAX-IV를 적용하며 이는 기존 방법에 비해 계산 속도 수행 면에서 매우 우수하다고 알려져 있다(Bertsekas and Tseng, 1988; Ahn et al., 2009). 또한 Oh et al. (2019b) 등은 MODSIM과 K-WEAP모형과의 분석결과의 비교 시 큰 오차가 발생하지 않고, 모의 수행시간이 상대적으로 MODSIM이 더 빠른 것으로 분석하

Procedure	National Water Resources Plan ('16)	Improvement (This study)
Spatial unit	Middle hydrologic watershed unit (3)	Standard hydrologic watershed unit (20) + Major tributary (35)
Water demands	<ul style="list-style-type: none"> - Domestic and Industrial: Water demand (Return flow: 65% of water demand) - Agricultural: Net water consumption (65% of water demand) - River maintenance flow: 3 places (Yangyang, Gangneung, Samcheok) 	
Water supply (Unregulated inflow & Dams)	<ul style="list-style-type: none"> - River inflow: 3 places (TANK) - Dates: 1966 ~ 2015year - Dams: Gwandong, Dalbang 	<ul style="list-style-type: none"> - River inflow: 20 places (TANK) - Dates: 1966 ~ 2015year - Dams: Gwandong, Dalbang, Agricultural reservoirs
Water balance analysis model	K-WEAPdss	MODSIM ver8.5.0
Expression of Water shortage	Middle hydrologic watershed unit	Administrative districts
Regional water supply (Post processing)	Total agricultural reservoir and groundwater facilities	Small scale facilities Reservoirs: Storage capacity 500 thousand ↓ Groundwater: 0.2 thousand ↓
Final water shortage calculation	Middle hydrologic watershed unit	Administrative districts

Fig. 6. Comparison of Flowchart for Water Balance Analysis

였다. 노드와 링크의 수가 기존의 분석된 중권역 단위 분석에 비해 많아질 뿐만 아니라 향후 한강 전체 권역에 대한 확장성을 고려하여 최적화 방법과 원활한 계산 수행 속도가 상대적으로 우수하다고 판단되는 MODSIM을 채택하였다.

3.2 대상 유역 모형 구축

Fig. 7은 앞서 제시한 방법에 의거하여 구축한 MODSIM네트워크를 보여주고 있다. MODSIM의 네트워크를 구성하기 위한 노드는 Nonstorage, Consumptive Demand, FlowThru Demand, Reservoir, Network Sink 등 총 6개로 구분할 수 있다. Nonstorage는 하천과 같이 저류되지 않는 노드로, 하천

은 River Inflow(R_INF)와 표준유역번호로 구분하였고, 하취지점을 하수처리장으로 STP_하수처리장명으로 설정하였다. Consumptive Demand는 소모성 수요처로서 생·공용수는 DI_정수장명_수원명으로 구분하고, 농업용수는 A_용수구역번호로 정의하였다. FlowThru Demand는 비소모성 수요처로 하천유지유량에 적용하여, 고시지점명으로 정의하였다. 또한 Reservoir는 댐일 경우 Dam_댐명, 농업용저수지인 경우 Re_저수지명으로 구분하였다. Network Sink는 질량보전의 평형을 맞추기 위한 노드로 세분화한 유역 출구지점마다 한 개씩 설정하였다. Table 8은 모형 내 노드별 구분을 위한 노드명과 정의를 제시하였다.

Fig. 7. Construction of MODSIM Model in the Study Area

Table 8. Node Name Definition for Construction of MODSIM Model

Node name (MODSIM)	Classification	Definition
NonStorage	River	R_INF_Standard watershed code_Number
	Sewage Treatment Plant	STP_Plant name
Consumptive Demand	Domestic & Industrial	DI_Purification plant name_Water source name
	Agricultural	A_Agricultural demand zone name
FlowThru Demand	River maintenance flow	FlowThru_Notification name
Reservoir	Dam / Reservoir	Dam_Dam name / Re_Reservoir name
Network Sink	Outlet of watershed	Sink_Number

4. 물수급 분석 결과의 산정 및 표출

4.1 모형 분석 결과

4.1.1 생·공용수 분석 결과

본 절에서는 생·공용수의 분석단위인 정수장 별로 발생한 물 부족량을 당해년 10월 ~ 다음해 9월까지인 수문년(hydrological year)을 기준으로 최대값을 산정하고 비교하였다. Table 9는 생·공용수 수요량의 분석 단위인 정수장의 해당 행정구역의 위치, 최대 물 부족량과 당시의 물 부족 발생 년도, 66~15'년의 5일 단위 시간 간격 중 물 부족이 발생한 횟수를 분석하고, 전체 단위 시간에 대한 시간기반 신뢰도(time-based reliability)를 산정하였다. 시간기반 신뢰도는 Eq. (4)과 같이 산정하였으며, 여기서 t_{ws} 는 모의 기간 중 용수부족이 발생한 기간수를 의미하고, T_p 는 전체 모의 기간 수를 의미하며 66~15'년의 5일 단위 시간 간격으로 3,528개이다.

$$Rel = \left(1 - \frac{t_{ws}}{T_p}\right) \times 100\% \quad (4)$$

생·공용수의 물 부족 발생년도는 각각 다르지만, 발생가

능한 생·공용수 부족량은 전체 약 1.4 백만 m^3 으로 분석되었으며, 속초정수장, 설악정수장, 왜운정수장 등에서 물 부족이 상대적으로 크게 산정되어 정수장이 위치한 고성군과 속초시, 동해시 등의 물 부족이 예상되는 결과이다.

4.1.2 농업용수 분석 결과

Table 10은 농업용수 수요량의 분석 단위인 용수구역단위의 물 부족을 산정한 결과를 나타내고 있다. 농업용수의 총 물 부족량은 약 9,851.16 천 m^3 으로 산정되었다.

4.2 행정구역 단위 물 부족 표출

산정된 정수장의 생·공용수 물 부족량은 수요량 산정시 활용한 읍·면·동 단위로 변환하고, 농촌용수구역과 읍·면·동 변환비를 적용하여 물 부족량을 표출한 결과는 Fig. 8과 같다. 본 결과는 지역공급원인 0.2 천 m^3 /day 이하의 관정, 500 천 m^3 이하의 농업용저수지가 반영되지 않은 결과로 최종적인 물 부족량은 아니다. 그러나, 이 결과는 지역공급원을 기초단위별로 분류하여 반영한다면 읍·면·동별로 분석하고, 표출할 수 있는 가능성을 보이며, 기존의 중권역 단위 분석보다 구체적인 계획을 수립하기 위한 물 부족 지역을 나타낼 수 있을 것으로 보인다.

Table 9. Water Shortage Results of Purification Plants

Loacation	Node name	Maximum water shortage (thousand m^3)	Maximum Water shortage year	Reliability (%)
Goseong	DI_Hyeonnae_BaebongStr	-	-	100
	DI_Tonghab_BukStr	389.45	1983	94.2
Sokcho	DI_Haksapyeng_YongchonStr	8.19	1972	99.4
	DI_Sokcho_SsangStrDam	4,480.47	1970	77.4
	DI_Seolak_SsanStr	24.61	1970	87.1
Yangyang	DI_Yangyang_NamdaeStr	-	-	100
	DI_Osaek_OsaekStr	-	-	100
Gangneung	DI_Hongje2_Obong	9.00	1968	99.9
	DI_Hongje3_Obong	2,130.13	1968	99.2
	DI_Yeongok_YeongokStr	-	-	100
Donghae	DI_Iwon_JeonStr	3,029.13	2006	97.7
	DI_Samun_JusuStr	-	-	100
	DI_Soeun_JeonStrDalbang	1,715.26	2006	77.4
Samcheok	DI_Dongmak_MaeupStr	-	-	100
	DI_Imwon_GW	372.53	2015	0.0
	DI_Mapyeong_OsibStr	1,647.81	1983	96.4
	DI_Okwon_HosanStr	-	-	100
	DI_Magyo_OsibStr	211.42	1982	99.0
Taeback	DI_Hwangji_Gwangdong	-	-	100
Total		14,018.01		

Table 10. Water Shortage Results of Agricultural Demand Zone

Node name	Maximum water shortage (1,000m ³)	Maximum Water shortage year	Reliability (%)
A_130101	2974.02	1976	97.3%
A_130102	-	-	100.0%
A_130103	1168.42	1978	98.3%
A_130104	329.70	1976	99.0%
A_130201	-	-	100.0%
A_130202	1592.73	2013	99.8%
A_130203	125.13	2006	99.2%
A_130204	-	-	100.0%
A_130205	964.86	1968	98.7%
A_130301	2371.09	1982	91.2%
A_130302	-	-	100.0%
A_130303	325.21	1983	99.4%
Total	9,851.16

Fig. 8. Conversion and Expression of Water Shortage Results (non-considering regional supply)

4.3 지역공급원의 적용에 따른 최종 물 부족량 산정

최종적인 물 부족량 산정을 위하여 지역공급원을 반영하고 자 읍·면·동 단위 물 부족량을 시·군단위로 합산하고, 500 천m³이하의 농업용저수지, 암반관정 중 생활, 공업, 농업을 구분하여 각각의 용도별 물 부족량에 공급원으로 반영하여 산정하였다. 생·공용수 물 부족은 전체 7,550 천m³으로 속초시 4,040 천m³, 동해시 3,510 천m³이 발생한 것으로 분석되었다. 농업용수 물 부족은 총 4,350 천m³으로 속초시를 제외한

시·군에서 발생할 것으로 예측되었다. Table 11은 기존 결과와 지역공급원을 반영한 결과를 제시하였고, 최종 물 부족량에 대한 결과를 도시하면 Fig. 9와 같이 나타난다.

5. 분석 결과 고찰 및 평가

기존의 수자원장기종합계획의 중권역 단위 물 부족량과 본 연구에서 산정한 물 부족량을 중권역단위로 합산한 결과를 비교한 결과는 Table 12에 나타났다. 기존의 수자원장기

Table 11. Water Shortage Results Considering Regional SupplyUnit: thousand m³

Administrative districts	Water shortage Results (①)			Application of regional supply (②)			Final water shortage (①-②)		
	D&I*	A**	Total	D&I*	Reservoir	A**	D&I*	A**	Total
Goseong	390	2,970	3,360	1,200	610	90	0	2,270	2,270
Sokchoi	4,510	-	4,510	470	50	70	4,040	0	4,040
Yangyang	-	1,500	1,500	750	390	330	0	780	780
Gangneung	2,140	2,190	4,330	3,670	30	1,710	0	450	450
Donghae	4,740	490	5,230	1,230	20	190	3,510	280	3,790
Samcheok	2,230	2,700	4,930	6,900	440	1,690	0	570	570
Total	14,010	9,850	23,860				7,550	4,350	11,900

* D&I: Domestic&Industrial

** A: Agricultural

Fig. 9. Final Calculation of Water Shortage Results Considering Regional Supply**Table 12.** Comparison and Evaluation of Water Shortage Between MOLIT (2016) and this StudyUnit: thousand m³

Code	MOLIT (2016)				This study				Remark
	Application of regional supply				Application of regional supply				
	Before		After		Before		After		
	D&I*	A**	D&I*	A**	D&I*	A**	D&I*	A**	
1301	1,100	7,000	-	-	4,900	4,470	4,040	3,050	Goseong, Sokcho, Yangyang
1302	13,700	13,000	4,200	-	6,880	2,680	3,510	730	Gangneung, Donghae
1303	500	-	-	-	2,230	2,700	-	570	Samcheok
sum	15,300	20,000	4,200	-	14,010	9,850	7,550	4,350	
Total	35,300		4,200		23,860		11,900		Difference: 7,700

* D&I: Domestic&Industrial

** A: Agricultural

종합계획에서의 한강 동해 권역의 총 물 부족량은 최대 물 부족이 발생한 2015년을 기준으로 지역공급원 적용 전 35,300 천m³, 지역공급원 적용 후 총 4,200 천m³으로 생·공용수의 물 부족만 발생할 것으로 예측하였다(MOLIT, 2016). 그러나, 기존의 분석 방식 특성상 생·공용수 물 부족이 발생했던 1302유역에 포함된 행정구역의 물 부족량과 분포를 정량적으로 파악할 수 없다.

이와 반대로 본 연구에서 산정한 총 물 부족량은 각각의 해당하는 정수장과 용수구역별 발생가능한 물부족량의 최대치를 제시한 결과임에도 불구하고, 지역공급원 적용 전 생·공용수 14,010 천m³, 농업용수 9,850 천m³으로 총 23,860 천m³으로 상대적으로 적은 양이 발생하였다. 그러나, 지역공급원을 적용하면 생·공용수와 농업용수 모두 물 부족량이 발생하는 동시에 물 부족량도 증가하여 생·공용수 7,550 천m³, 농업용수 4,350 천m³으로 11,900 천m³으로 중권역 분석 결과 대비 약 7,700 천m³이 증가할 것으로 분석되었다. 이는 행정구역단위와 농촌용수구역에 대한 물 부족 평가와 행정구역 단위의 평가가 가능하며, 필요시 유역 단위로도 변경이 가능함을 보여주고 있어 다양한 조건에 따른 결과를 보여줄 수 있을 것으로 판단된다.

물수급 분석의 기본 가정 상 본 연구의 결과에 대하여 정량적인 비교와 평가는 어렵지만, 생성되는 기초 자료의 단위를 유지하여 변환하는 과정 중 왜곡을 줄였으며, 앞서 제시한 K-water (2008), Choi et al. (2018), Oh et al. (2019a) 등에서 개선방안으로 제시했던 행정구역별 수요량을 중권역으로 별도로 변환하는 작업, 농업용저수지의 반영여부, 회귀수량의 지점 설정 등에 대하여 실제 물이용 체계를 고려하여 개선하였다. 본 연구 결과를 활용한다면 이에 서론에 제시했던 강릉시 오봉저수지, 속초시 쌍천지하댐의 가뭄피해에 따른 제한급수 등 지자체 수준의 현재 발생 가능성 있는 물 부족 문제 등을 분석하고, 표출이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 한강 동해 권역을 대상으로 실제 물이용 체계를 고려한 물수급 네트워크를 구축하고, 개선 사항을 분석하고 목표년도의 물수급 분석의 일련의 과정을 수행 및 평가하였다. 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 물수급 분석 방법을 개선하고자 한 사항을 정리하면 첫 번째, 분석 공간 단위를 표준유역단위로 세분화하고, 필요시 더 세밀한 실제 물이용 체계를 고려하였다. 두 번째, 용수수요량의 기초단위가 생·공용수수요량은 행정구역 단위, 농업용수수요량은 농촌용수구역 단위로서, 이를 반영한 정수장과 농촌용수구역 기반의 네트워크를 구축하여 변환 중 발생 가능한

왜곡을 최소화하고자 하였다. 마지막으로 수자원시설물, 지하수이용 등 지역공급원을 모형 내 일부 직접 반영하고, 하수처리장 정보를 이용한 회귀지점을 고려하여 물수급 분석 네트워크를 구축하고 평가하였다.

- (2) 정수장의 물 부족량과 농촌용수구역 단위의 물 부족량을 제시하고, 행정구역단위로 변환하였으며, 최종적으로 분석된 생·공용수의 물 부족량은 전체 7,550 천m³으로 산정되었고, 농업용수는 4,350 천m³으로 분석되어, 중권역 분석 결과 대비 약 7,700 천m³이 증가할 것으로 분석되었다.
- (3) 행정구역 단위로 산정한 물 부족량에 대하여 평가할 경우, 기존의 중권역 기반 분석에서 도출되지 않는 자세한 물 부족 결과를 제시할 수 있음을 보였으며 특히, 최근 문제가 되고 있는 강릉시 오봉저수지, 속초시 쌍천지하댐의 가뭄피해 등 지자체 수준에서 발생할 수 있는 가뭄상황을 본 연구에서 제시한 방법으로 표출하고, 전망 및 평가 할 수 있을 것으로 보인다.
- (4) 본 연구에서는 일부 적용하지 못했지만 향후 농업용수의 실제 수혜지역 분석, 회귀를 적용 및 용수수요 변동, 지역공급원의 기초 단위 수준의 추가적인 분류와 적용 방법의 변화 등에 대한 추가 개선 방안을 모색하고, 이를 반영하여 분석한다면 더 현실적인 물수급 분석이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 83078).

References

- Ahn, S.R., Park, G.A., Shin, Y.H., and Kim, S.J. (2009). Assessment of the potential water supply rate of agricultural irrigation facilities using MODSIM: For Geum River basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 825-843.
- Bertsekas, D.P., and Tseng, P. (1988). Relaxation methods for minimum cost ordinary and generalized network flow problems. *Operations Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 93-114.
- Choi, S.J., Kang, S.K., Lee, D.R., and Kim, J.H. (2018). A study on water supply and demand prospect for water resources planning. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 589-596.
- Kim, H.S., Maeng, S.J., Jeon, K.S., Kim, D.J., and Kim, H.S. (2016). A water balance analysis for assessing

- water demand and supply in administrative districts. *Crisisonomy*, Vol. 12, No. 4, pp. 153-166.
- Kim, S.J. (2017). Assessment of water resources by the construction of subsurface dam. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 11, pp. 795-802.
- K-water. (2008). *Study on establishment of basic plan for water management*.
- K-water. (2018). *Practical manual for water management*.
- Labadie, J.W., and Larson, R. (2007). *MODSIM 8.1: River basin management decision support system user manual and documentation*. Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, pp. 4-24.
- Ministry of Environment (ME) and K-water. (2018a). *2018th drought basic survey report*.
- Ministry of Environment (ME) and K-water. (2018b). *2018 Groundwater annual report*.
- Ministry of Environment (ME). (2014). *Guidelines for master plan for development of water supply*.
- Ministry of Environment (ME) and Han River Flood Control Office. (2018). *2017th National watershed survey report*.
- Ministry of Land Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016). *National water resources plan (2011~2020)* (3rd rev.).
- Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Research report for national water resources plan (2011~2020)*.
- No, S.H., Jung, K.S., Park, J.H., and Ryoo, K.S. (2013). Water supply change outlook for Geum River basin considering RCP climate change scenario. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 505-517.
- Oh, J.H., Kim, Y.S., Ryu, K.S., and Bae, Y.D. (2019a). Comparison and discussion of water supply and demand forecasts considering spatial resolution in the Han-river basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 7, pp. 505-514.
- Oh, J.H., Kim, Y.S., Ryu, K.S., and Jo, Y.S. (2019b). Comparison and discussion of MODSIM and K-WEAP model considering water supply priority. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 7, pp. 463-473.
- Park, H.S., Lee, D.R., Moon, J.W., and Kang, S.U. (2003). Evaluation of applicability of K-WEAP in the Gum-River basin. *Proceedings of 2003 Annual Confernece*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 1966-1971.
- Rural Agricultural Water Resource Information System. Retrieved July 7, 2019, from <http://rawris.ekr.or.kr>
- Water Environment Information System. Retrieved June 10, 2019, from <http://water.nier.go.kr>

Received	October 2, 2019
Revised	October 2, 2019
Accepted	October 15, 2019