J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 55, No. 11 (2022), pp. 941-953
doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.11.941

pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Evaluation and comparison of water balance and budget forecasts considering the domestic and industrial water usage pattern

Oh, Ji Hwan[a]* · Lim, Dong Jin[b] · Kim, In Kyu[c] · Shin, Jung Bum[d] · Ryu, Ji Seong[e]

[a]Senior Specialist, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea
[b]General Director, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea
[c]Deputy Director, Water Resources Policy Divison, Ministry of Environment, Sejong, Korea
[d]Senior Manager, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea
[e]Researcher, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea

Paper number: 22-081
Received: 20 September 2022; Revised: 17 October 2022; Accepted: 19 October 2022

Abstract

In this study, monthly water use data were collected for 5 years from the 65 local governments included in the Han-river basin and a typical water usage ratios and patterns were calculated. The difference in water shortage was compared by considering the water usage patterns using the water balance and budget analysis model (MODSIM) and data base. As a result, it was confirmed that the change occurred in the range of -3.120% to +4.322% compared to the monthly constant ratio by period. In addition, when applying the patterns in the water balance model, 17 of the 28 middle watershed showed changes in the quantity of water shortage and the domestic and industrial water shortage would decrease about 8.0% during the maximum drought period. If it is applied in conjunction with predictive research on water usage patterns reflecting climate change, social and regional characteristics in the future, it will be possible to establish a more realistic water supply forecasts and a reliable national water resources plan.

Keywords: Water usage patterns, Water supply and demand, Water balance, Water budget, MODSIM

생활 및 공업용수 물이용 패턴을 고려한 물수급 전망 비교 및 고찰

오지환[a]* · 임동진[b] · 김인규[c] · 신정범[d] · 류지성[e]

[a]한국수자원공사 물관리기획처 선임위원, [b]K-water 물관리기획처 처장, [c]환경부 수자원정책관 수자원정책과 사무관,
[d]K-water 물관리기획처 차장, [e]K-water 물관리기획처 위촉연구원

요 지

본 연구에서는 한강 권역의 포함된 65개 지자체를 대상으로 5년간 월별 물이용량 자료를 수집, 분석하여 월 단위의 대표적인 생공용수 물이용 패턴을 도출하고, 물수급 네트워크 모델(MODSIM)과 기초자료를 이용하여 물이용 패턴을 반영함에 따른 유역 내 발생 가능한 물부족량의 차이를 비교하였다. 분석 결과, 특정 시기별 물이용 주기성을 파악하고, 월별 일정 비율 대비-3.120%~+4.322%의 증감 폭이 나타남을 확인하였다. 이를 물수급 모델에 적용할 경우, 28개 중권역 중 17개 유역에서 물부족량의 변화가 나타났고, 연간 동일한 수요량임에도 불구하고, 시기별 수요량의 비율을 적용함에 따라 최대 생공용수 부족량은 기존대비 약 8.0% 수준으로 감소할 것으로 분석되었다. 장래 기후변화, 사회적, 지역적 특성이 반영된 물이용 패턴에 대한 예측 연구와 연계한다면, 더욱 현실감 있는 물수급 전망과 신뢰도 높은 국가수자원계획 수립이 가능할 것이라고 판단된다.

핵심용어: 물이용 패턴, 물수급 네트워크, 물수지, MODSIM

***Corresponding Author.** Tel: +82-42-629-3147
E-mail: ojh4525@naver.com (Oh, Ji Hwan)

© 2022 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

전세계적으로 기후변화의 영향으로 온난화 속도와 규모에 따라 홍수 및 가뭄 등 자연재해의 발생이 증가할 것으로 예측되고 있으며, 이러한 위험에 대비하기 위한 다양한 분야의 연구가 이루어지고 있다(NIMS, 2020). 우리나라도 지역적으로 홍수와 가뭄을 동시에 겪는 등 양극화가 심화되고 있는 추세로 수자원의 효율적인 관리에 대한 중요성이 매우 커지고 있다. 이에 최근에는 국가 수자원 관리계획 수립체계를 개편하고, 관계부처 합동으로 제1차 국가물관리기본계획(2021-2030)을 공표, 발간하였으며 이에 대한 실행계획으로 하천유역수자원관리계획을 수립 중에 있다(Jo *et al.,* 2021). 수립중인 계획에는 전국단위의 다양한 물관련 통계 및 수문기상학적 자료를 활용하여 장래 예상되는 물수요에 대한 물공급 가능 여부를 전망하여 지역별로 물부족에 대한 원인을 제시하고, 이를 해소하기 위한 대책을 마련하고 있다. 그간 국내에서 분석해왔던 물수급 분석의 한계점을 지속적으로 개선하고자 유역별로 물이용 상황을 현실적으로 구현하기 위해 분석단위를 정밀화하고, 지역별 물공급시설과 물순환 체계(수원-취수-급수지역-회귀)를 반영하는 등 물수급 모델을 개선한 바 있다. 하지만, 시공간적으로 다양하고 방대한 정보가 필요하므로 현실과는 다른 가정사항을 일부 적용하고 있어 지속적인 조사와 고도화된 기술개발이 필요한 실정이다.

그간 수립된 수자원장기종합계획뿐 아니라 국가물관리기본계획의 장래 생공용수의 수요량은 도시 전체에 대하여 평균개념의 1인1일당급수량(Liter Per Capita Day)를 이용하여 목표연도별로 추정하기 때문에 연중 일정한 물수요를 적용하여 분석하였다(MOLIT, 2016; Joint Ministries, 2021a). 그러나 실제 물이용은 인구, 세대수, 가계인원, 고령화비율과 같은 지역특성, 가계소득, 직업, 학력과 같은 사회특성, 기온, 강수량, 습도와 같은 계절특성 등 다양한 요인에 따라 시기별로 차이가 존재하며, 국내에서도 물이용 패턴을 분석하고 이를 검증한 연구가 다수 있었다. Kim *et al*. (2004)은 1인당 물사용량 추정의 근거자료로 활용하기 위하여 수도권 지역 10가구를 대상으로 유량계를 설치하여 생활용수 중 가정용수에 대한 실측사용량 분석을 통해 시간, 주별, 월별패턴을 분석하여 용수량 변동에 미치는 영향을 평가하였으며, 시간별로는 오후 3시, 주별로는 월요일, 월별로는 7월의 용수사용량이 가장 큰 것으로 제시하였다. Lee *et al*. (2004)은 인구의 도시집중과 산업화에 따라 공동주택의 집중도가 높아지면서 장래 물부족 현상을 방지하기 위한 물사용량의 적정수준에 대한 기초자료를 제시하고자 경북 영천시 공동주택 6동을 대상으로 거주자 조사, 3년간 동별, 시간별, 월별 물소비량을 조사하였으며, 월별 사용량의 큰 변화는 없었으나 하절기에 사용량이 조금 증가하는 경향을 분석하였다. Kim *et al*. (2008)은 전국 140여개의 표본가구를 선정하여 가정용수의 용도별 사용량 실측자료를 바탕으로 사용패턴을 분석하여 요일별, 월별, 계절별 사용량을 비교하였고, 가구특성인자, 기온 등 외부인자에 대한 용도별 사용특성을 분석하였다. 분석 결과, 주별 물사용량의 차이는 있지만 평균사용량의 10%를 넘지 않았으며, 월별 물이용 패턴은 기온과 상관관계가 높은 것으로 분석하였다. 또한 Joo *et al*. (2012)은 인천시 일대 96가구를 대상으로 상수도 원격검침시스템을 설치 후 현장적용성을 검토하고자 2011년 7월부터 12월까지 가정용수 사용량을 분석하였다. 8월에 가정용수를 가장 많이 사용한 반면 9월에는 감소되고 다시 11월에는 증가한 후 12월에 감소되는 추세를 분석하였으며 기상요인이 가정용수 사용량에 영향을 미치며 계절적 주기성을 나타냄을 증명하였다. Myoung (2019)은 55개 시군대상으로 140개 가구를 표본으로 선정하여 5년간의 용도별 유량실측자료를 활용하여 분석한 결과 12월에 비해 상대적으로 온도가 올라가는 6~7월에 유의성이 있는 것으로 분석하여 계절적인 요인이 존재함을 분석하였고, 실거주인원이 용수사용에 가장 큰 영향을 주는 인자임을 분석하였다. 이와 같이 생활용수를 중심으로 물이용 패턴을 파악하기 위한 다양한 연구가 있었으나, 표본 지역에 국한한 연구가 대다수로 전국 단위의 지역적 특성을 대표하는 물이용 패턴에 대한 도출은 자료부족 등의 이유로 다소 부족했고, 지역별, 시간적 물이용 패턴의 적용 여부에 따라 장래 물수급 전망 영향을 분석하는 연구는 없는 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 다년간 축적된 전국 지자체별 정수생산 공급량과 광역상수도 용수공급자료를 수집하여 월 단위의 지역별 생공용수 물이용 패턴을 도출하고, 국가물관리기본계획에서 구축한 한강 권역 물수급 네트워크를 이용하여 물이용 패턴 반영에 따른 물부족량 차이를 정량적으로 비교하고자 한다.

2. 연구 대상 지역 및 연구 방법

본 연구의 대상 유역은 한강 권역이다. 한강 권역은 수자원단위지도상 한강(10), 안성천(11), 한강서해(12), 한강동해(13) 등 4개의 대권역으로 구분되며, 유역면적은 41,946.6 km^2로 제주도를 제외한 내륙면적의 39.0% 수준으로 구성되어 있다(Table 1). 한강 권역은 서울특별시, 인천광역시, 경기도 등 전체 인구의 약 51.3%가 거주하고 있으며, 광역상수도 공급실적

등 가용 자료도 충분하여 지자체 정수 생산공급과 광역상수도 공급실적간 상호비교가 가능하다. Fig. 1은 연구 지역인 한강 권역에 포함되어 있는 주요 65개 지자체를 나타내고 있다.

본 연구에서는 물이용 패턴 산정시 월별 시계열 자료를 수집하였다. 해당 자료는 환경부(Ministry of Environment)와 K-water가 발간하는 '가뭄기초조사 보고서'에서 제시한 지자체 지방상수도 시설의 5년간('17-'21) 월별 운영 실적자료를 활용하였다(ME and K-water, 2018; 2019; 2020; 2021). 그리고, K-water에서 정보관리 중인 광역상수도의 31년간('91-'21) 월별 공급실적자료를 활용하여 수집한 지자체별 운영 실적자료의 적정성을 확인하는데 활용하였다. 광역상수도 공급실적은 자료의 길이는 충분한 것으로 파악되었으나, 지자체 기준이 아닌 취수원 단위로 구분되어 있기 때문에 지자체별 공급량을 분리하는데 오류를 범할 수 있어 자료의 적정성 및 품질을 상호 비교하는 용도로 활용하고자 하였다. 5년간 월별 운영자료는 자료길이가 상대적으로 짧지만, 지자체별로 광역상수도 수입량과 지방정수장 공급실적을 동시에 파악할 수 있고, 국내 모든 시군의 정보를 확인할 수 있어 최근 물이용 패턴의 월별 주기성을 파악하기에는 더 용이할 것으로 판단하였다. 수집된 월별 시계열 자료를 이용하여 5년간 연별 평균공급량 대비 월별 공급량 비율을 도출하고, 한강 권역의 대표 물이용 패턴을 산정하였다. 국가물관리기본계획에서 적용한 목표연도 2030년의 생공용수 수요량 기초자료에 상기에서 도출한 월별 물이용 패턴을 적용하고, 동일한 물수급

Table 1. Characteristics of basin and major local governments in the South Korea

Major river	Area (km^2)	Ratio (%)	Major local governments
Total	107,486.6	100.0	-
Han-river	41,946.6	39.0	Seoul, Incheon, Gyeonggi, Gangwon, etc
Nakdong-river	31,711.5	29.5	Busan, Daegu, Ulsan, Gyeongsang, etc
Geum-river	17,924.6	16.7	Daejeon, Sejong, Chungcheong, etc
SeomjinYoungsan-river	15,903,9	14.8	Gwangju, Jeolla, etc

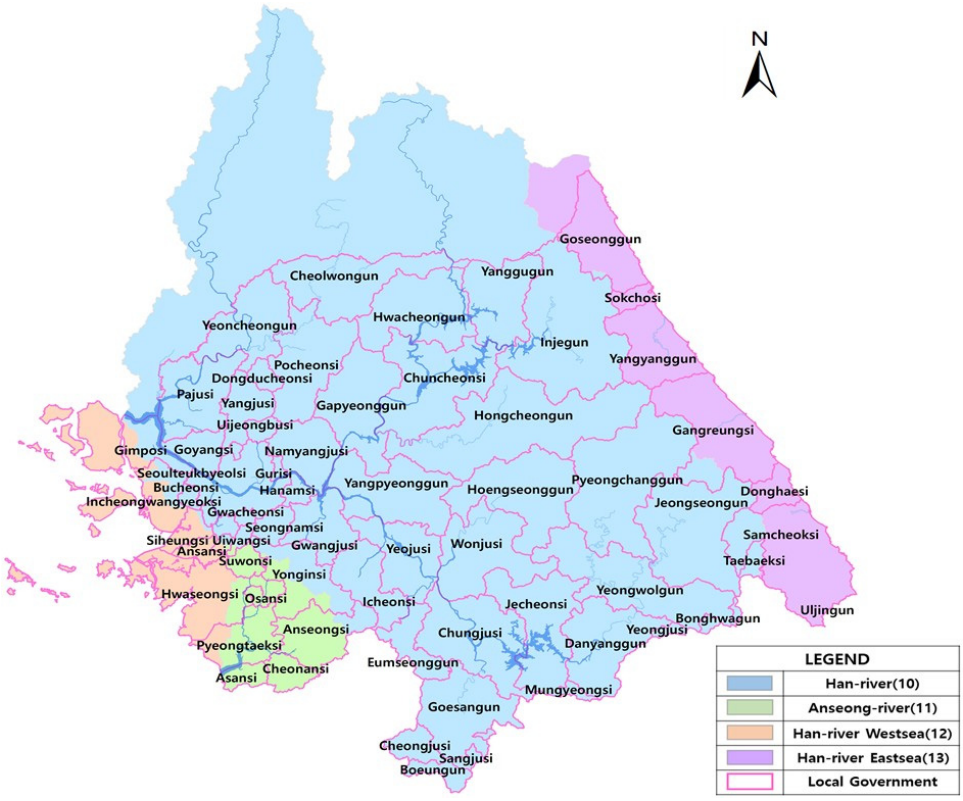


Fig. 1. Study area and basin map in the Han-river

네트워크와 분석기술을 활용하여 물수급 전망을 수행하였으며 물이용 패턴 반영 여부에 따른 유역 내 발생 가능한 용도별 물부족량의 차이를 비교하고, 고찰하였다. Fig. 2는 본 연구의 주요 절차를 나타내고 있다.

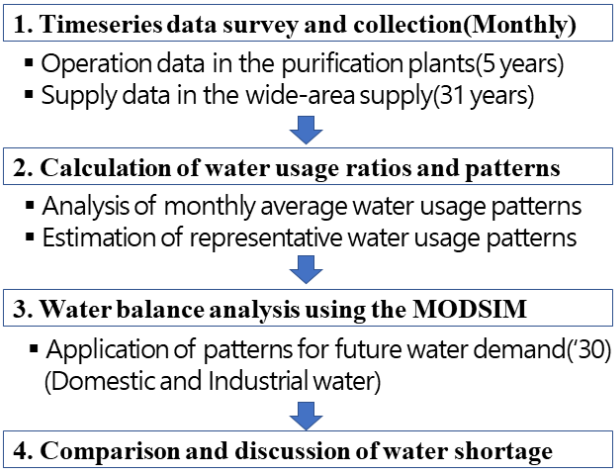


Fig. 2. Diagram of research methods and procedure

3. 생공용수 물이용 패턴 도출

3.1 월별 물이용량 분석

한강 권역에 포함된 65개 지자체의 5년간 월단위 물이용량과 평균 물이용량을 도시한 결과는 Fig. 3과 같다. 지자체별로 인구와 면적, 산업 규모 등에 따라 물리적인 이용량의 차이가 있으며 평균 물이용량은 점진적으로 증가하는 추세로 나타났다. 지자체별로 일부 특정 월에 이상치가 있거나, 0 자료가 포함되어 있는데 이는 전산 자료화하는 과정중 오류로 판단하고, 최종 물이용 패턴 적용시 제외하였다. 평균 물이용량 분석 결과, 선행연구와 동일하게 시기별로 주기성이 있음을 확인하여 물이용 패턴을 도출하는데 금회 연구성과 자료를 활용하였다.

3.2 월별 물이용 패턴 도출

월별 물이용 패턴을 도출하기 위하여 65개 지자체별 수집한 자료를 연단위로 구분하여 월평균 이용량을 산정하고, 총공급량 대비 비율을 산정한 결과는 Table 2 and Fig. 4와 같다. 1월부터 4월까지는 연평균 물이용량 보다 낮은 수치로 이용하고, 5월 이후 물이용이 점차 증가하여 7월과 8월에 최대를 나타냈으며, 9월부터 12월까지 평균수준으로 감소하는 주기

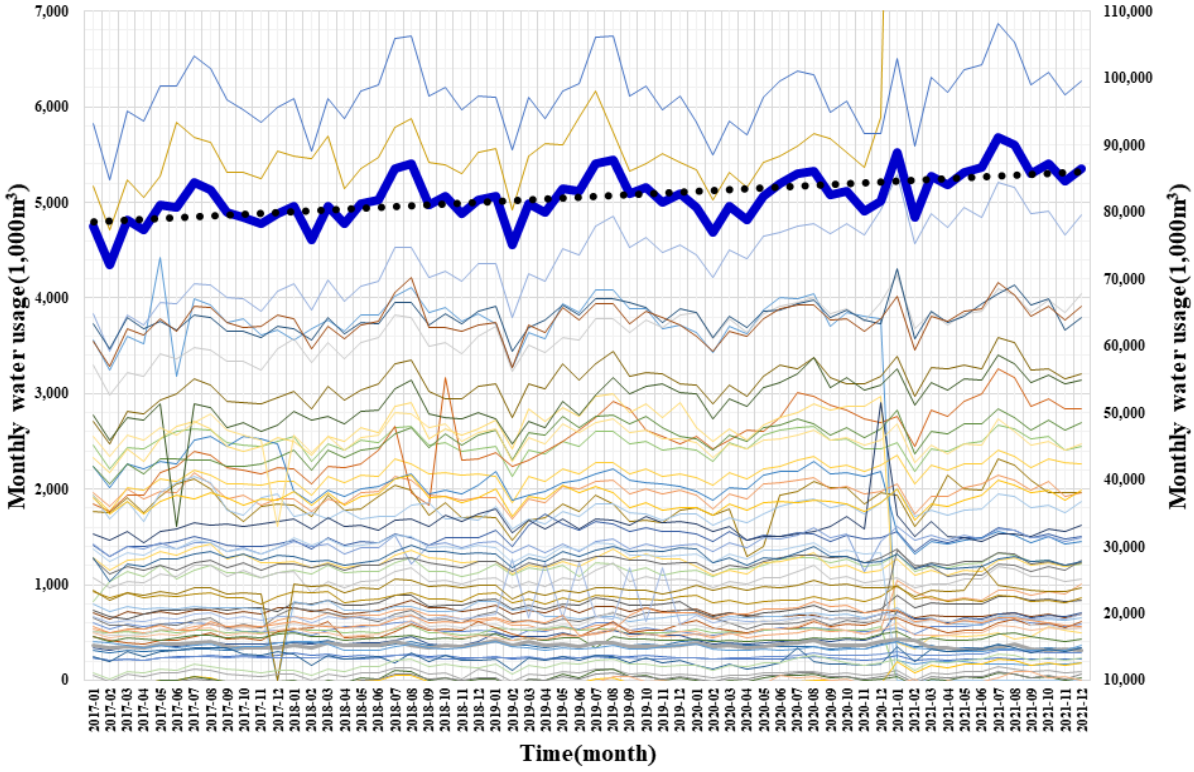


Fig. 3. Monthly periodicity of water usage in local governments

Table 2. Calculation of monthly observed water usage and ratios (Unit : thousand m^3, %)

Month	2017yr		2018yr		2019yr		2020yr		2021yr		Average	
	Avg.	Ratio (%)	Avg.	Ratio (%)	Avg.	Ratio (%)	Avg.	Ratio (%)	Avg.	Ratio (%)	Avg.	Ratio (%)
Total	58,304.1	100.0	60,023.1	100.0	60,938.6	100.0	60,425.2	100.0	64,053.9	100.0	60,823.7	100.0
1	4,756.3	8.158	4,964.4	8.271	5,065.6	8.313	4,953.4	8.197	5,522.0	8.621	5,058.3	8.316
2	4,347.2	7.456	4,608.5	7.678	4,549.3	7.465	4,688.6	7.759	4,836.3	7.550	4,611.5	7.582
3	4,817.9	8.263	4,966.1	8.274	4,983.7	8.178	4,961.5	8.211	5,273.5	8.233	5,006.3	8.231
4	4,710.3	8.079	4,780.7	7.965	4,895.2	8.033	4,821.6	7.979	5,183.3	8.092	4,883.8	8.029
5	4,977.2	8.537	4,980.8	8.298	5,147.7	8.447	5,070.3	8.391	5,316.2	8.300	5,104.4	8.392
6	4,946.1	8.483	5,022.2	8.367	5,112.1	8.389	5,191.9	8.592	5,362.5	8.372	5,132.8	8.439
7	5,207.8	8.932	5,358.0	8.927	5,404.9	8.869	5,297.5	8.767	5,679.8	8.867	5,395.7	8.871
8	5,134.0	8.806	5,403.7	9.003	5,448.0	8.940	5,327.1	8.816	5,601.0	8.744	5,388.9	8.860
9	4,900.0	8.404	4,971.2	8.282	5,096.7	8.364	5,076.1	8.401	5,302.4	8.278	5,074.9	8.344
10	4,847.3	8.314	5,062.7	8.435	5,150.1	8.451	5,119.4	8.472	5,403.9	8.436	5,122.4	8.422
11	4,772.8	8.186	4,879.4	8.129	4,995.6	8.198	4,905.1	8.118	5,225.9	8.159	4,961.4	8.157
12	4,887.2	8.382	5,025.3	8.372	5,089.7	8.352	5,012.7	8.296	5,347.1	8.348	5,083.4	8.358

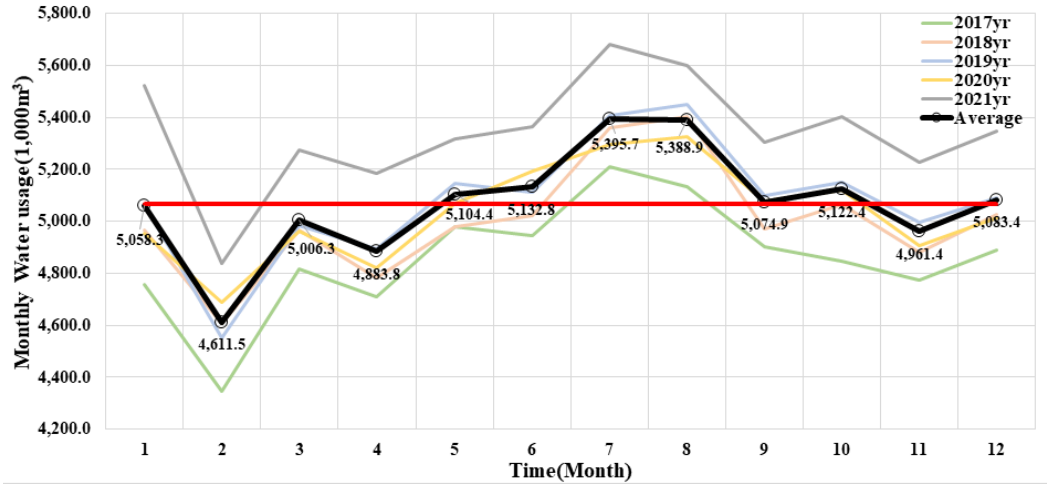


Fig. 4. Averaged monthly water usage pattern

성을 보여 기존의 수행되었던 연구와 유사한 물이용 패턴을 보였다. 또한 2월에는 물이용량이 최소로 나타났는데, 이는 각 월의 일수 차이로 인한 것으로 이를 보완하기 위해 일평균 자료로 변환하여 활용하였다.

일평균으로 재산정한 결과와 월별 비율의 결과는 Table 3 and Fig. 5와 같다. 기존의 월평균 결과는 월별 일정 비율인 8.333% 대비 2월에 -9.020%, 7월에 +6.453%의 차이로 15.472% 증감폭이 발생하였다. 일평균으로 재산정할 경우, 동일한 방식으로 산정시 3월의 -3.026%, 7월에 +4.517%로 7.543% 수준으로 증감 폭이 상대적으로 감소하였다. 이는 2월의 급감하는 현상이 감소하고, 3~4월, 9~10월 등 증가와 감소가 반복되는 현상이 감소하여 물이용 패턴에 영향을 미친 것으로 판단된다. 일평균 적용시 2월의 경우, 3~4월 대비 이용량이 높은 것으로 나타났는데, 이것은 겨울철 동파방지용수 등으로 물이용량이 많은 것으로 유추해볼 수 있으며, 일평균 자료를 이용하여 한강 유역의 대표 월별 물이용 비율을 산정하는 것이 더 적합할 것으로 판단하였다.

3.3 월별 물이용 패턴 적정성 확인

Fig. 6은 본 연구에서 산정한 5년간 65개 지자체의 월별 물이용 패턴과 동일한 방식으로 한강 권역 광역상수도 용수공급 실적을 활용하여 산정한 월별 공급패턴을 도시한 결과이다. 자

Table 3. Transformation of water usage and ratios monthly average to daily average (Unit : thousand m^3, %)

Month	Monthly average	Ratio (%)	Difference (%)	Daily average	Ratio (%)	Difference (%)
Total	60,823.7	100.0	-	1,998.4	100.0	-
1	5,058.3	8.316	-0.205	163.2	8.165	-2.020
2	4,611.5	7.582	-9.020	163.5	8.183	-1.798
3	5,006.3	8.231	-1.230	161.5	8.081	-3.026
4	4,883.8	8.029	-3.647	162.8	8.146	-2.246
5	5,104.4	8.392	+0.705	164.7	8.239	-1.127
6	5,132.8	8.439	+1.265	171.1	8.561	+2.738
7	5,395.7	8.871	+6.453	174.1	8.710	+4.517
8	5,388.9	8.860	+6.319	173.8	8.699	+4.385
9	5,074.9	8.344	+0.124	169.2	8.465	+1.580
10	5,122.4	8.422	+1.061	165.2	8.269	-0.777
11	4,961.4	8.157	-2.116	165.4	8.276	-0.693
12	5,083.4	8.358	+0.290	164.0	8.206	-1.534

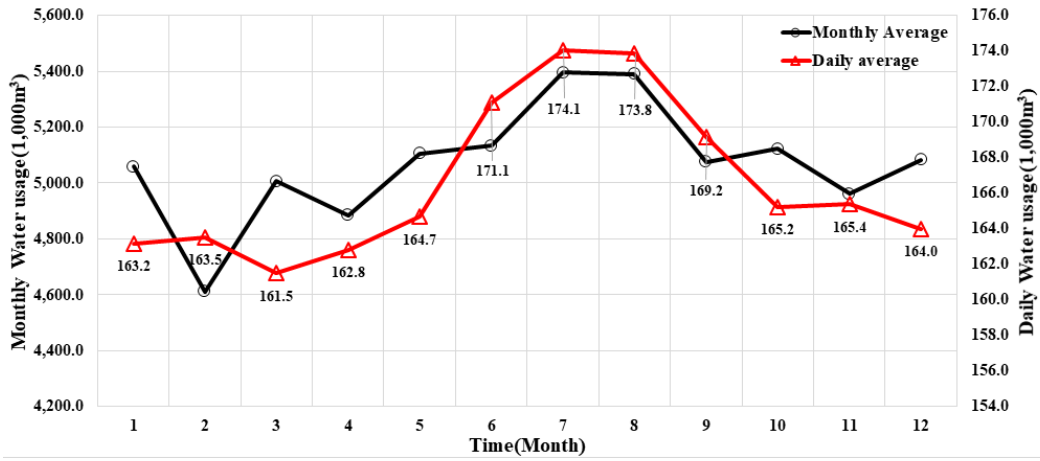


Fig. 5. Comparison of monthly and daily water usage patterns in local governments

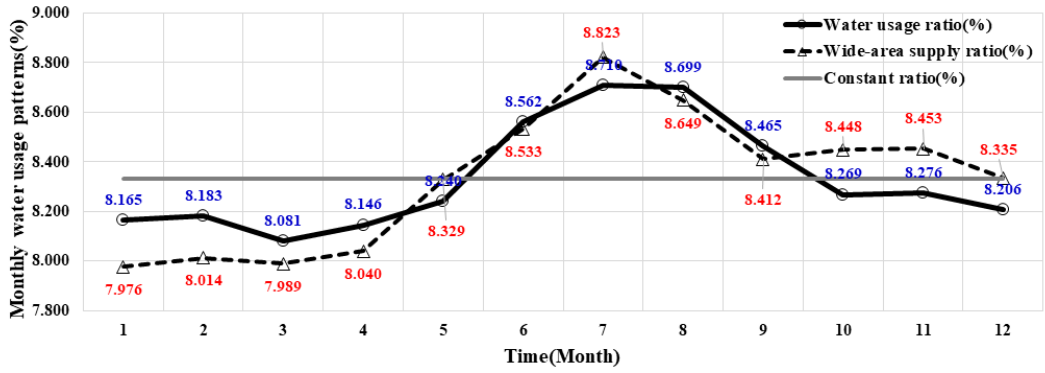


Fig. 6. Comparison of water usage ratio and wide-area supply ratio

료 기간과 방법의 차이가 있어 비율이 일치하지는 않았지만, 월별 주기성은 유의하게 나타나 본 연구에서 산정한 물이용 패턴을 적용하는데는 무리가 없을 것으로 판단하였다.

4. 물수급 모델 구축 및 물부족 전망 결과 비교

4.1 물수급 모델 및 네트워크 구축

물수급 분석 모델은 미국의 RiverWare™, WRAP (Water Right Analysis Package), WEAP (Water Evaluation and Planning System), MODSIM (Modified SIMYLD), 유럽의 WaterWare 모델 등 물수요와 공급의 균형에 대한 평가 및 예측, 중장기 저수지 운영계획 및 물배분, 수리권 허가 등을 위해 기관별로 목적에 맞춰 다양한 운영, 최적화 계획 모델들이 개발되어 활용 중이다. 국내에서는 수자원계획 수립시 K-WEAP과 MODSIM 모형을 주로 활용해왔으며, 국가물관리기본계획에서는 MODSIM 모델을 이용하여 장래 용도별 물부족량을 전망하였다(Joint Ministries, 2021a). MODSIM은 1972년 미국 텍사스의 수자원개발부(Texas Water Development Board)가 개발한 SIMYLD 네트워크 모형을 미 콜로라도 주립대학의 Labadie 교수가 수정하여 MODSIM (MODified SIMYLD)으로 발전되었으며, 네트워크 기반의 용수공급 및 수요체계를 쉽게 모식화하고, 최소비용 기반 흐름 최적화를 통해 물배분을 수행한다(Labadie and Larson, 2007).

과거의 수자원장기종합계획에서 수행했던 분석방법과 가정에 대한 한계점을 개선하고, 지역별 정밀하고 수용성 높은 물수급 전망을 위하여 실제 물이용 여건을 최대한 반영하고자 노력하였다. 주요 개선사항은 광역상수도 및 지방상수도 시설 규모와 공급지역을 정밀화하기 위하여 기초단위를 중권역에서 표준유역단위로 공간해상도를 정밀화하고, 행정구역의 읍면동 수준, 산업단지 등에서 사용하는 정수장-취수장-수원 정보를 반영하여 시설중심의 네트워크를 구현하였으며 물공급시설, 하수처리장 시설 등 위치기반으로 상세하게 반영하여 모의기간 동안 운영상황을 고려할 수 있도록 하였다. Fig. 7은 한강 유역의 중권역인 섬강(1006)을 중심으로 기존의 중권역 단위 분석 네트워크와 국가물관리기본계획에서 정밀화한 물수급 네트워크를 예시로 나타냈다.

MODSIM에서는 주요 하천과 같은 비저류(nonstorage), 시설(reservior), 수요처(demand), 도수(flowthru), 출구(sink) 등 총 5개의 주요노드로 구성하며 각 노드와 노드는 링크(link)를 통해 모식도를 구성한다(Fig. 7). 한강 유역의 표준유역 290개에 대한 주요 노드는 2,674개, 링크는 2,736개로 구성하였으며 Fig. 8과 같다. 물수급 네트워크의 적정성 검증을 위해 2018년 기준(수문년)의 물이용 실적, 댐 운영자료 등을 물수급 모델 내 입력하고, 유역 내 대표 수위관측소인 여주시(여주대교), 서울시(한강대교)의 관측유량과 모의유량의 결과를 모의시간단위인 5일(반순) 단위로 비교하였다(Fig. 9). 수자원 부존량의 척도가 되는 ROV (Ratio of Volume)는 1.03~1.04, 결정계수(R^2)는 0.90~0.94로 적합한 것으로 나타내어 본 연구의 물수급 전망에 활용하고자 하였다(Jo *et al.*, 2021).

4.2 입력자료 정리

물부족 전망과 평가를 위해서는 물공급량, 물수요량, 기타 정보(물수급 네트워크, 회귀율) 등이 필요하다. 국가물관리기본계획에서는 2030년의 목표연도를 기준으로 고수요, 기준수요, 저수요 등 3개의 시나리오로 구분하여 제시하고, 1966년 10월~2018년 9월까지(52개년)의 하천 유량이 장래에 재현

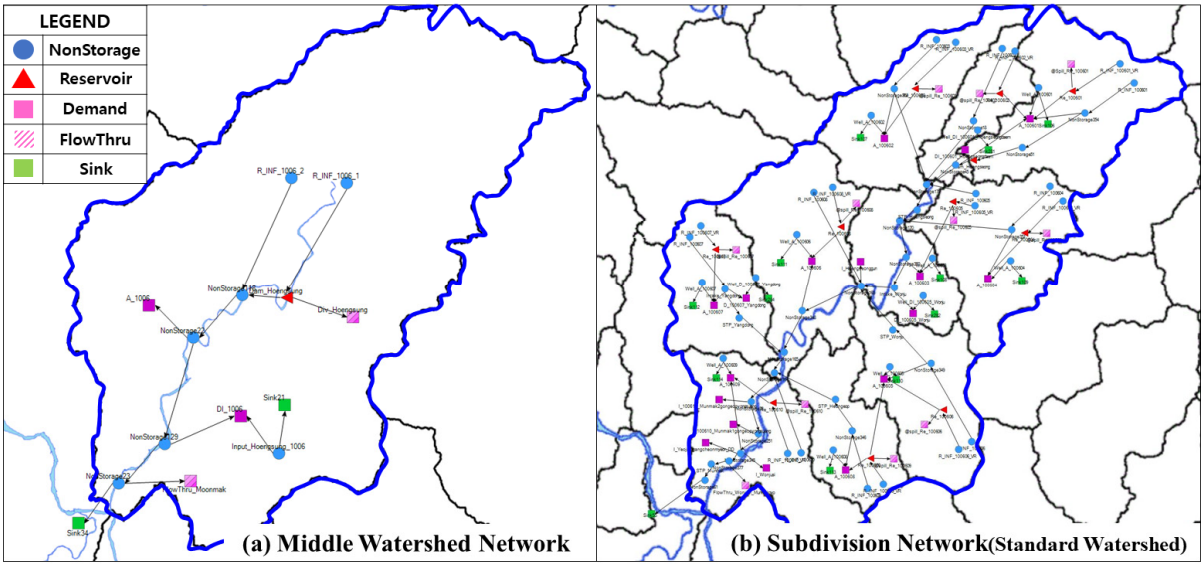


Fig. 7. Improvements of water supply and demand network model

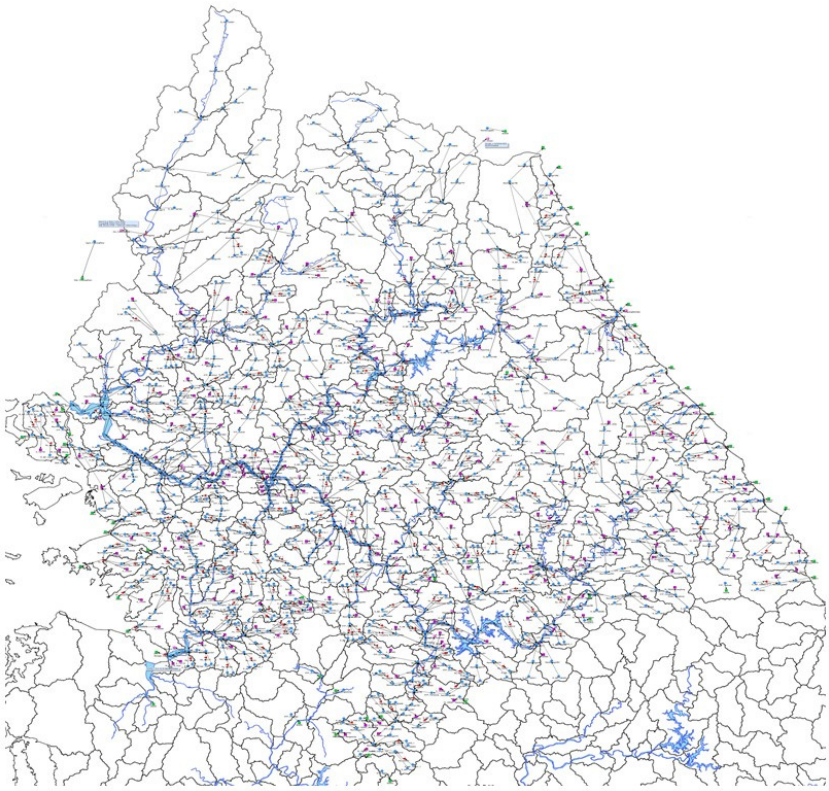


Fig. 8. Water supply and demand network in the Han-river basin by MODSIM model

된다는 가정을 통해 기준수요량에 대한 물부족을 전망하였다 (Joint Ministries, 2021b). 분석방법에 대한 자세한 사항을 주요 요소별로 구분하여 정리하였다.

물공급량은 하천수의 경우 한강 유역 내 290개 표준유역단위로 강우-유출량 모의를 통해 산정하였으며, 표준유역 내 댐·농업용 저수지와 같이 물공급시설이 있을 경우 시설의 제원상 유역면적에 따라 비유량법을 적용하여 유입량을 별도로 고려하였다. 또한 지하수의 경우는 생공용수와 농업용수를 구분하여 암반관정 물이용량을 행정구역별로 구분하고, 생공용수 수요처, 농업용수 수요처에 공급시설로 반영하여 필요시 공급원으로 이용될 수 있도록 적용하였다.

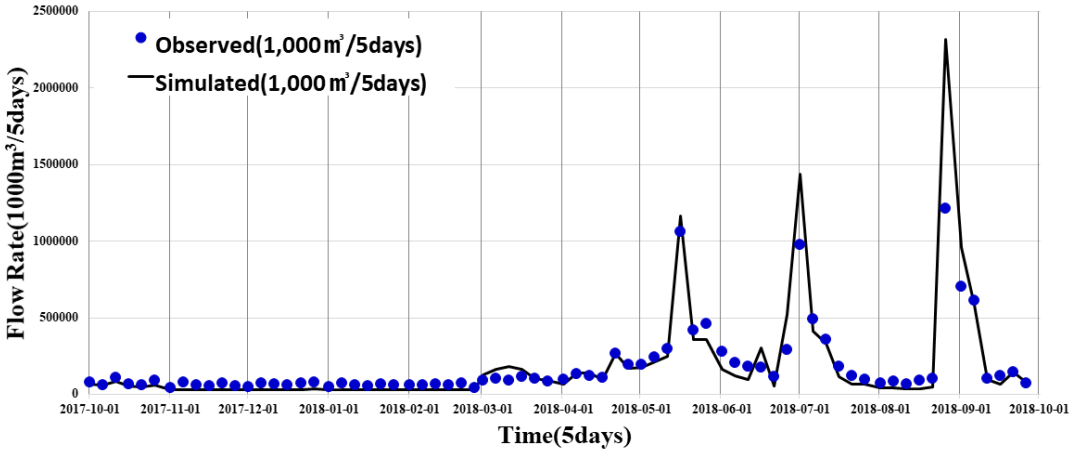
물수요량은 생활용수의 경우 행정동별, 공업용수는 산업단지의 급수체계를 판단하여 취수장 및 수원 기준으로 그룹화하여 적용하였고, 물수급 네트워크를 고려하여 생공용수 수요량의 65%가 하수처리장을 통해 회귀되는 것으로 구성하였으며, 농업용수는 수요량 산정의 기초단위인 농어촌용수구역을 중심으로 수요처를 구성하였다. 생공용수는 연간 수요량을 모의기간인 5일(반순)내 일정하게 반영하고, 농업용수는 논, 밭, 축산으로 시기에 따른 물이용 패턴을 고려하였다. 또한 수요처간 우선순위는 용도별로는 생공용수가 농업용수보다 우선, 같은 용도일 경우에는 위상을 고려하여 하천 유하 기준 상류 취수장에서 하류보다 우선 공급하도록 조정하였다.

또한 댐 및 저수지 운영의 기본방향은 하천에서 먼저 공급하고 물부족 발생시 물공급시설에서 추가적으로 공급하는 부족분 공급방식(deficit supply)을 적용하였다. 농업용저수지는 시설 제원상 유효저수용량 300만m^3 기준으로 이상과 이하를 구분하여 이상인 경우, 저수지 운영이 될 수 있도록 모델 내 직접 반영하고, 이하인 경우는 표준유역별 유효저수용량과 유역면적의 합계를 이용하여 대표 저수지로 반영하였으며, 농업용수를 공급하기 위한 목적으로 농업용수 수요처(농어촌용수구역)에 우선적으로 물 공급이 가능하도록 적용하였다.

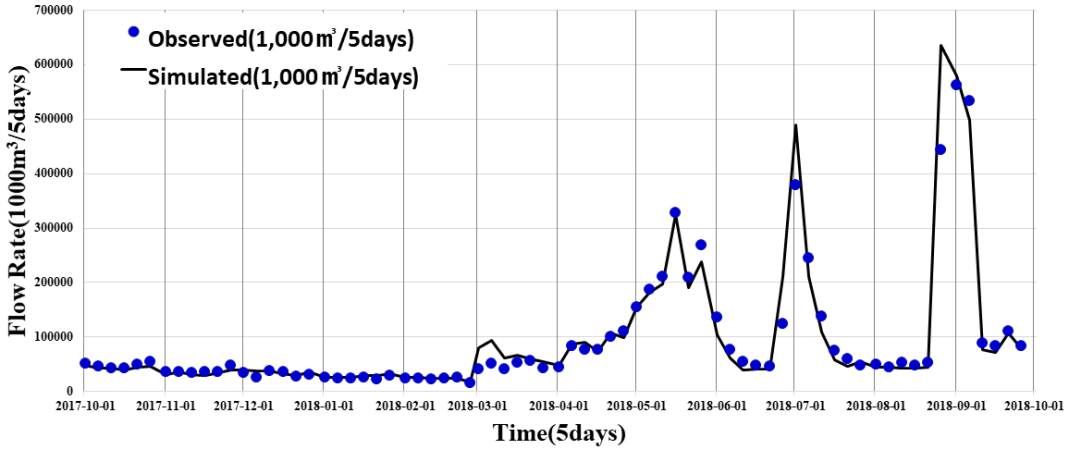
본 연구의 주제인 생공용수의 물이용 패턴에 따른 물부족량 영향 비교를 위하여 위에서 제시한 다른 조건은 국가물관리기본계획에서 적용한 방법을 동일하게 적용하되, 본 연구에서 산정한 한강 유역의 대표 생공용수 수요량 비율을 고려하여 시기별로 변동될 수 있도록 자료를 수정하였다.

4.3 물수급 전망 결과 비교

국가물관리기본계획에서는 유역별 52개년간 용도별 물부족량을 분석하고, 과거 최대, 10년, 25년 빈도 수준 물부족량



(a) Seoul-si (Hangang Bridge)



(b) Yeoju-si (Yeoju Bridge)

Fig. 9. Perfomance evaluation of water supply and demand network (Jo *et al.*, 2021)

을 제시하였으며, 한강 권역의 물부족은 최대 생공용수 1.2 백만m^3/년, 농업용수 81.7 백만m^3/년으로 총 82.9 백만m^3/년의 물부족을 예측하였다. 금회 생공용수의 물이용 패턴을 적용한 용도별 물부족량 분석 결과를 중권역으로 산정하여 비교한 결과는 Table 4와 같다. 북한에 해당하는 금강산댐(1008), 고미탄천(1020)을 제외한 28개 중권역 중 5개 중권역은 물부족량이 증가하였고, 12개 중권역은 물부족의 감소하는 등 17개 중권역에서 물부족량의 변화가 나타났다. 생공용수의 경우 당초 1,189.2 천m^3 대비 1,094.2 천m^3으로 약 8.0% 감소, 농업용수는 생공용수 수요변동 비율이 변함에 따라 물부족이 증가하거나, 감소하는 지역이 있으나 기존의 81,663.1 천m^3 대비 81,488.2 천m^3으로 0.2% 수준으로 감소하는 것으로 전체 물부족량은 269.9 천m^3 감소하는 것으로 분석되었다.

생공용수 부족이 발생한 청평댐(1015), 양양남대천(1301), 강릉남대천(1302) 유역의 물부족은 지류 상류에 위치한 소규모 하천유역 또는 한강 동해권 표준유역에서 발생한 것으로 가장 물부족이 큰 과거 2015년의 연간 모의기간 단위(5일)별 물부족을 자세히 비교하였다(Fig. 10). 청평댐(1015) 유역은 경기도 가평군을 포함하는 유역으로 물부족이 설악취수장(지방상수도)의 모의결과를 도시하면 Fig. 10(a)와 같다. 1월에 물부족이 나타났으며, 물이용 패턴을 고려할 경우 물수요량이 감소함으로써 물부족 기간이 연간 2회에서 1회로 감소, 물부족량 또한 감소되었다. 양양남대천(1301) 유역은 강원도 고성군 및 속초시 일대로 물부족은 북천통합취수장(지방상수도), 쌍천취수장(지방상수도)에서 발생하였으며, 모의결과는 Figs. 10(b) and 10(c)와 같다. 북천통합취수장의 경우 물부족 기간은 동일하나, 물이용 패턴에 맞춰 1~3월은 물부족 감소, 수요가 증가하는 6월에는 물부족이 증가할 것으로 분석되었으며 연간부족량 합계는 감소할 것으로 분석되었다. 쌍천취수장은 기존에 3월에 발생했던 물부족량은 수요가 줄어

Table 4. Results of the largest water shortage year based on the middle watershed (water year 2015) (Unit : thousand m^3)

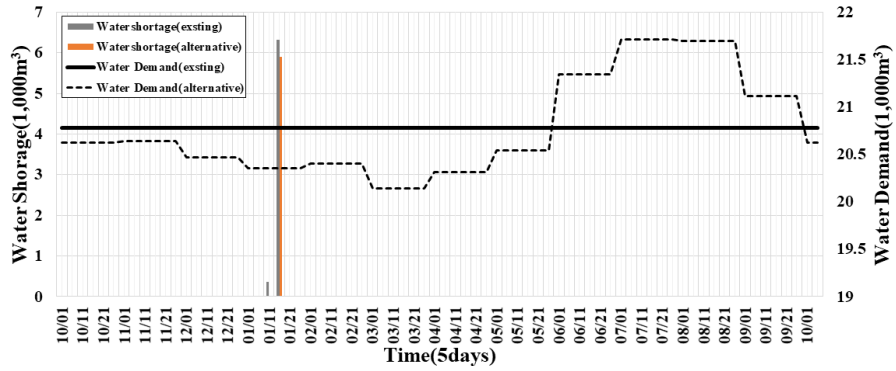
Watershed code	Constant ratio (exsiting)			Application of water patterns			Difference of water shortage		
	D&I*	A**	Total	D&I	A	Total	D&I	A	Total
Total	1,189.2	81,663.1	82,852.3	1,094.2	81,488.2	82,582.4	95.0↓ (8.0%)	174.9↓ (0.2%)	269.9↓ (0.3%)
1001	-	255.9	255.9	-	256.7	256.7	-	0.8↑	0.8↑
1002	-	3,028.0	3,028.0	-	3,065.1	3,065.1	-	37.1↑	37.1↑
1003	-	833.7	833.7	-	827.1	827.1	-	6.6↓	6.6↓
1004	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1005	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1006	-	2,775.1	2,775.1	-	2,777.4	2,777.4	-	2.3↑	2.3↑
1007	-	9,160.8	9,160.8	-	9,154.8	9,154.8	-	6.0↓	6.0↓
1009	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1011	-	1,114.7	1,114.7	-	1,113.6	1,113.6	-	1.1↓	1.1↓
1012	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1015	6.7	96.9	103.6	5.9	96.9	102.8	0.8↓	-	0.8↓
1016	-	336.9	336.9	-	331.9	331.9	-	5.0↓	5.0↓
1017	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1018	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1019	-	609.0	609.0	-	604.0	604.0	-	5.0↓	5.0↓
1021	-	4,547.3	4,547.3	-	4,541.3	4,541.3	-	6.0↓	6.0↓
1022	-	13,727.4	13,727.4	-	13,711.4	13,711.4	-	16.0↓	16.0↓
1023	-	15,189.0	15,189.0	-	15,137.9	15,137.9	-	51.1↓	51.1↓
1024	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1101	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1201	-	22,752.5	22,752.5	-	22,764.7	22,764.7	-	12.2↑	12.2↑
1202	-	4,561.5	4,561.5	-	4,407.5	4,407.5	-	154.0↓	154.0↓
1301	1,171.0	2,459.7	3,630.7	1,077.6	2,472.1	3,549.8	93.4↓	12.4↑	80.9↓
1302	11.5	-	11.5	10.7	-	10.7	0.8↓	-	0.8↓
1303	-	214.7	214.7	-	226.0	226.0	-	11.3↑	11.3↑

*D&I : Domestic and Industrial water, **A : Agricultural water

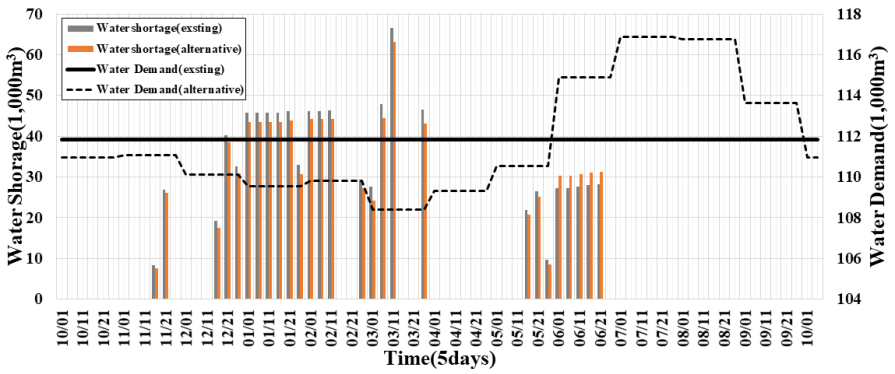
들어 물부족기간은 3회에서 2회로 감소하고, 물부족량도 감소하는 것으로 분석되었다. 강릉남대천(1302) 유역은 강원도 동해시가 포함되어 있는 유역으로 옥계취수장(지방상수도)에서 물부족이 발생하였으며 연간 모의결과는 Fig. 10(d)와 같다. 옥계취수장은 물부족기간은 변화가 없었으나, 2월에 발생한 물부족량이 물이용 패턴 적용시 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 취수장별 모의 기간의 물부족이 변화함에 따라 유역 내 상·하류에 위치한 생공용수 수요처와 농업용수 수요처의 모의 시기별 가용 수량에 영향을 주기 때문에 전체적인 물부족량의 변화로 이어지는 것으로 분석되었다.

4.4 한계점 고찰

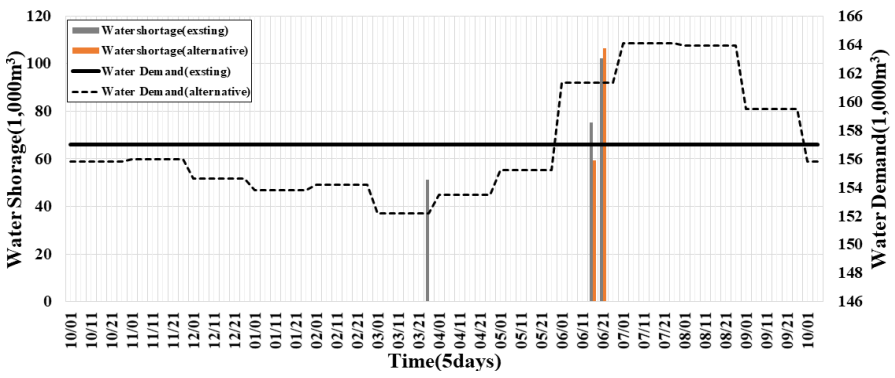
국가물관리기본계획에서 제시하는 고도화된 물수급 분석 방법을 더욱 정밀화하는 방향을 마련하기 위하여 본 연구에서는 물수요 및 공급량 자료를 개선하는 방법에 대하여 수행하였다. 과거 물공급 실적을 통해 지역별 생활 및 공업용수 사용량이 시기별로 차이를 나타냄을 알 수 있었다. 이를 국가 수자원 정책에 수반되는 물수급 분석 적용시, 연간 동일한 물수요



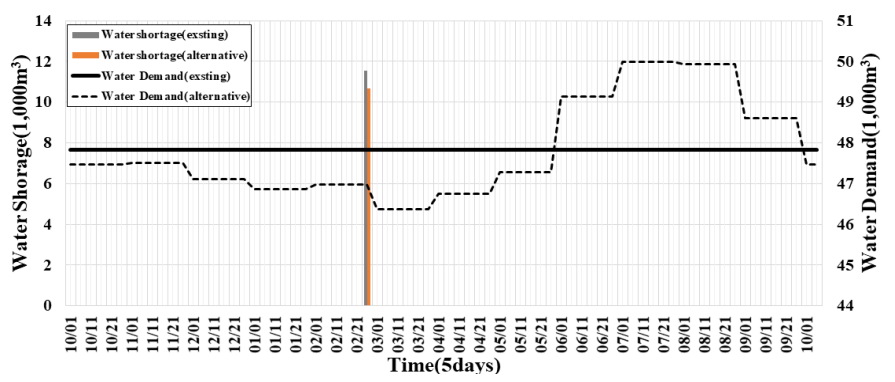
(a) Seolak intake (1015)



(b) Bukcheon intake (1301)



(c) Ssangcheon intake (1301)



(d) Okgye intake (1302)

Fig. 10. Simulation results of water shortage by water intake point

량임에도 유역 내 발생가능한 물부족량, 물부족 발생 시기 등에 영향을 주어 물부족량을 전망 평가하는데 있어 중요한 요인으로 작용함을 확인하였다. 아울러, 현재 수행중인 하천유역수자원관리계획에서는 수도시설의 제원과 통수능을 포함한 고도화된 물수급 분석을 수행하고 있어, 본 연구의 성과를 활용하여 향후 수자원분야 계획 수립에 반영하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 수집하고 분석한 자료는 생활용수와 공업용수에 대한 분리, 하천, 지하수 등 수원별로 구분하여 반영하지 못했으며, 과거의 물이용 실적자료를 활용하였기 때문에 장래 예측 물수요량에 패턴을 적용하는 것에는 아직까지 한계가 있다.

이는 장래 기후변화 등과 같은 수문기상학적 인자, 사회적, 지역적 특성이 반영된 물이용 예측 패턴에 대한 연구와 연계하여 물수급 전망 평가에 활용할 경우, 선진 수자원정책 수립에 기여할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 생활 및 공업용수의 물이용 패턴 변화에 따른 물부족량 변화를 확인하기 위하여 한강 권역을 대상으로 국가물관리기본계획에서 활용한 물수급 분석 모델(MODSIM)을 활용하여 분석하였으며 주요 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 연구 대상 지역에 포함된 65개 지자체의 5년간 월별 물이용량 자료를 수집, 분석하였으며 선행연구와 동일하게 시기별로 주기성이 있음을 확인하고, 유역의 대표 물이용 패턴을 도출하였다. 월별 물이용 비율 산정 결과, 기존에 적용한 연중 일정한 비율대비 -3.120%~+4.322%로 최대 7.442%의 차이가 나타났다.
2) 동일한 조건에서, 물이용 패턴 반영 여부에 따라 용도별 물부족량을 분석하였으며 28개 중권역(북한제외) 중 5개 중권역은 물부족량 증가, 12개 중권역은 물부족이 감소하는 등 물부족량의 변화가 나타났다. 최대 물부족량을 기준으로 생공용수의 경우 당초 1,189.2 천m^3 대비 1,094.2 천m^3으로 약 8.0% 감소, 농업용수는 당초 81,663.1 천m^3 대비 81,488.2 천m^3으로 0.2% 수준으로 감소하는 것으로 전체 물부족량은 269.9 천m^3 감소하는 것으로 분석되었다.
3) 생공용수 물부족이 발생한 유역 내 취수지점을 중심으로 모의 기간별 물부족량 산정 결과를 비교한 경우, 연간 동일한 수요량임에도 불구하고 시기별 물이용 패턴(비율)을 적용함에 따라 물부족 시기와 횟수 및 물부족량의 차이에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 유역 내 상·하류에 위치한 생공용수 수요처와 농업용수 수요처의 가용 수량에 영향을 주어 전체적인 물부족량의 변화로 이어지는 것으로 나타났다.
4) 과거의 물이용 실적자료를 활용하여 장래에도 동일한 물이용 패턴이 발생하는 가정이 포함되어 있어 장래 기후변화, 사회적, 지역적 특성이 반영된 물이용 패턴에 대한 예측 연구와 연계하여 적용할 경우, 더욱 현실감 있는 물수급 전망과 신뢰도 높은 국가 수자원계획 수립이 가능할 것이라고 판단된다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Jo, Y.S., Kim, J.H., Shin, J.B., and Lee, S.H. (2021). “Overview of water supply and demand evaluation model in river basin water resources management plan.” *Water for Future*, Vol. 54, No. 10, pp. 32-38.

Joint Ministries (2021a). *1st National water management plan report [2021-2030]*.

Joint Ministries (2021b). *1st National water management plan report [2021-2030] appendix Ⅱ, Analysis report of forecasting for water supply and demand balance*.

Joo, J.C., Ahn, H.S., Ahn, C.H., Ko, K.R., and Oh, H.J. (2012). “Field application of waterworks automatic meter reading and analysis of household water use.” *Journal of the Korean Society of Environmetal Engineers*, Vol. 34, No. 10, pp. 656-663.

Kim, H.S., Lee, D.J., Park, N.S., and Jung, K.S. (2008). “Analysis on statistical characteristics of household water end-uses.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5B, pp. 603-614.

Kim, J.H., Cho, I.Y., Park, N.H., Woo, H.M., and Ahn, H.W. (2004). “Analysis of domestic water consuming pattern and metered water use.” *Proceedings of Korea Water Resources Association*, pp. 1,310-1,315.

Labadie, J.W., and Larson, R. (2007). *MODSIM 8.1: river basin management decision support system user manual and documentation*, Colorado State University and Bureau of Reclamation, CO and Washington, D.C., U.S., pp. 24-24.

Lee, S.H., Choi, M.Y., and Hong, W.H. (2004). “A analysis about the characteristics of the using water by time according to the life pattern in apartment house.” *Proceedings of Architectural Institute of Korea*, pp. 734-737.

Ministry of Environment (ME) and K-water (2018). *2018th drought basic survey report*.

Ministry of Environment (ME) and K-water (2019). *2019th drought basic survey report*.

Ministry of Environment (ME) and K-water (2020). *2020th drought basic survey report*.

Ministry of Environment (ME) and K-water (2021). *2021th drought basic survey report*.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *National water resources plan (2011~2020) (3rd rev.)*.

Myoung, S.M. (2019). "A study on prediction model for laundry and toilet water-use demand" *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 327-335.

Natinal Institute of Meteorogical Sceinces (NIMS) (2020). *Global climate change prospect report in response to the IPCC 6th assessment report (revised version)*.