

기후변화 대응 수자원 관리를 위한 의사결정중심 영향평가

A Decision-Centric Assessment for Water Resources Management
in a Large River Basin under Non-Stationary Climate

김대하 응용사업팀

발간사

대기 온실가스 증가로 인한 기후변화는 기상학적 가뭄빈도를 높여 수자원 운영에 큰 어려움을 줄 수 있는 위험 요소입니다. 따라서 기후변화에 대한 적응은 미래 수자원 운영에 필수적인 부분이라 할 수 있습니다. 기후변화 위험을 과학적으로 분석하고 이에 대응하려는 노력은 지난 수십 년 동안 지속되고 있지만 대기 순환의 변화를 먼저 예측하고 이를 수문모형에 입력하는 방식의 분석이 주로 이루어져 왔습니다. 이 방식은 예측에 의존적이기 때문에 예측이 빗나갔을 경우를 대비하기 어렵게 합니다. 기후전망에 대한 분석이 의사결정에 필요한 정보이기는 하지만 이를 바탕으로 큰 비용이 드는 적응사업에 대한 의사결정을 하기에는 잠재되어 있는 위험이 너무 큼니다. 이 연구는 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하여 실제 의사결정에 도움을 줄 수 있는 영향평가 방식을 제안합니다. 의사결정 기준이 되는 수치가 기후 스트레스에 얼마나 민감한 영향을 받는지를 먼저 분석하고 기후전망을 이 분석 결과에 적용하여 예측의 불확실성을 의사결정에 고려할 수 있게 하는 연구입니다. 본 사례 연구가 미래 가뭄과 물 부족의 위험을 줄일 수 있는 실용적인 방법이 되기를 기대합니다.

끝으로 한 해 동안 연구를 성실히 수행해 주신 김대하 박사의 노고에 감사드립니다. 특히 연구를 위해 물수요 전망 자료와 소중한 의견을 제공해 주신 한국건설기술연구원 최시중 수석연구원께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 바쁘신 와중에도 연구 내용의 향상을 위해 자문과 조언을 아낌없이 전해 주셨던 서경대학교 안재현 교수, 부경대학교 김상단 교수께도 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

2018년 3월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

Climate change driven by human-made impacts is expected to pose challenges in water resources management, necessitating robust adaptation strategies to sustain human societies and ecosystems. However, many studies have taken the “predict-then-act” paradigm to assess impacts of global warming on hydrologic and agricultural systems. Usually, climate change impact assessments are dependent on a handful of climate projections from the general circulation models (GCMs) in which significant uncertainty sources are involved. In practice, the deep uncertainty present in climate projections may hinder policy-makers to use the scenario-led adaptation strategies owing to high potential regrets. To consider the deep uncertainty in climatic projections, the “robust decision-making” paradigm was taken in this study to assess impacts of global warming on a large river system. A decision-centric approach was employed to assess water supply efficiency in the Geum River Basin, South Korea, in which climate change and conflicting demands are concerns of water managers. First, a climate-stress-inducing stochastic model and a water resources optimizing scheme were used to develop response surfaces of supply efficiency to climatic stressors. Then, climate change impacts were assessed by superimposing 49 GCM projections on the response surfaces under stabilized and increasing greenhouse emission scenarios. Results show that the Geum River Basin is unlikely to experience significant water scarcity for the upcoming 20 years of 2020–2039. The worst water scarcity expected, according to the 49 GCMs, was less than 2.5% of the total demand. The reliability to satisfy 95% of monthly demand for a bi-decadal period was 100% under optimal water resources

management. To optimize water management under 20% reduction in bi-decadal mean annual precipitation, it was indicated that the smaller dam in the upper river should increase water release in order for the larger dam in the lower river to have better management flexibility. This study highlights that month-by-month optimal water management can be a robust strategy for adaptation to shifting climate. It also emphasizes that the robustness-based framework can visualize system responses to climatic stresses, and can provide reliable assessments by overlaying numerous climate projections.

목 차

1. 서론	1
2. 연구지역 및 자료	5
2.1 연구대상지역	5
2.2 기상자료	6
2.3 수문자료	8
2.4 기후변화 시나리오 자료	12
3. 연구방법	15
3.1 Decision-Scaling Framework	15
3.2 추계학적 기후스트레스 모의	17
3.3 유출모의	19
3.4 수자원 운영관리 최적화	22
3.5 기후반응함수(CRF) 개발	27
3.6 기후 스트레스 대응 댐 운영방식 도출	27
4. 결과 및 고찰	28
4.1 추계학적 기후스트레스 모의	28

4.2 유출모의-----	31
4.3 수자원 운영 최적화-----	34
4.4 기후반응 함수(CRF) 개발 및 기후변화 영향평가-----	38
4.5 기후스트레스 대응 댐 및 저수지 운영-----	43
4.6 시사점 및 한계점-----	45
5. 요약 및 결론-----	47
Ⅱ REFERENCES-----	49

1. 서론

대기 온실가스 농도 증가로 인한 인위적 기후변화는 수자원 운영효율을 떨어뜨려 사회의 지속성에 위협을 가하는 위험요소이다. 대기온도 상승으로 인한 가뭄 위험은 전 지구적으로 증가되고 있고 미래 가뭄 강도와 진행속도는 과거에 경험했던 수준보다 강력해질 것으로 예상되고 있다(Trenberth et al., 2014; Dai, 2013). 전 지구적인 기온 상승은 증발산량(evapotranspiration; ET)을 증가시키고 강수현상의 변동성을 키워, 사회의 기반이 되는 농업 생산 및 수자원 운영에 큰 영향을 미치는 기후 스트레스로 여겨진다(IPCC, 2014).

기후변화 위험을 대비하기 위한 수자원 운영에 있어 댐과 저수지의 역할은 빼놓을 수 없다. 댐과 저수지는 환경에 미치는 영향에 대한 논란이 있기는 하지만 자연적인 수문순환 과정에 개입하여 가용 수자원을 분명 증가시키고 경제활동을 지속시키는데 중요한 역할을 한다(Bietmans et al., 2011). 전 세계 하천의 절반 이상이 댐과 저수지에 의해 인위적으로 조절되고 있고 댐과 저수지에 저장된 수자원은 수요가 높은 시기에 공급을 늘릴 수 있게 한다(Nilsson et al., 2005). 그러나 기후변화로 인해 자연유출이 감소하는 경우, 댐과 저수지의 저수능력에도 불구하고 시스템에 가용한 수자원 양이 전반적으로 줄게 되어 운영효율이 떨어지게 된다. 많은 수자원 시스템은 관측 수문자료를 기반으로 하는 경험적 운영 정책에 의존하고 있기 때문에 관측되지 않은 기후조건에 대해서는 충분한 운영 효율이 달성되기 어려울 수 있다(Georgakakos et al., 2012). 따라서 기후변화에 적응하는 운영 정책의 개발은 기후변화의 위험을 줄이는 가장 중요한 부분 중 하나이다(Raje and Mujumdar, 2011).

기후변화 위험을 줄이기 위해서는 기후변화에 대한 시스템의 대비능력(preparedness)과 영향에 대한 회복력(resilience)을 키우는 것이 기본이다. 이를 위해 가장 먼저 필요한 것이 기후변화 영향평가(climate change impact assessment)이다. 대비능력과 회복력을 키우는데 필요한 사회기반시설의 규모를 결정하기 위해 반드시 필요한 과정이기 때문이다. 전형적인 예로 기후변화에 의해 상승하게 되는 홍수량을 미리 산정하고 대응 구조물의 규모를 키우는 것을 들 수 있다. 영향평가를 하지 않으면 어느 정도로 구조물의 규모를 키워야 할 지 알 수 없기 때문에 경제적인 대응을 하기가 어려워진다. 이 기후변화 영향평가를 위한 패러다임은 크게 두 가지가 있는데 하나는 ‘predict-then-act’ 방

식이고, 다른 하나는 ‘robust’ 의사결정 프레임이다(Weaver et al., 2012).

‘predict-then-act’ 방식은 먼저 기후변화가 미치는 환경적 영향을 예측한 후 그 예측이 현재 시스템에 미치는 정도를 분석하고 필요한 정책을 만들어내는 패러다임이다. 따라서 이 패러다임을 따르는 기후변화 영향평가는 먼저 기후를 전망(projection)하고 그 전망에 대한 시스템 분석을 수행하는 방식으로 이루어진다. 2000년대 이전에 이루어진 많은 기후변화 영향평가가 이러한 방식을 취하고 있다. 대표적인 예로, Vicuna and Dracup(2007)은 장기적으로 유출이 줄고 있는 캘리포니아 몇몇 유역에 대해 대기순환 모형(General Circulation Models; GCM) 모의 결과를 물리적 모형에 입력해 유출변화를 평가하였다. GCM으로 온실가스 배출에 대한 대기 반응을 예측하고 이를 시스템 모형에 입력해 그 결과를 평가하는 방식은 같은 캘리포니아 지역을 대상으로 하는 연구만 추려도 세기 어려울 정도이다(e.g., Gleick, 1987; Lettenmaier, et al., 1988; Lettenmaier and Gan, 1990; Miller et al., 1999; Hay et al., 2000; Kim, 2001; Kim et al., 2002; Georgakakos et al., 2005).

문제는 ‘prediction-then-act’ 패러다임은 장기적인 정책을 위한 의사결정에 도움이 되지 않고 오히려 해가 될 수 있다는 것이다. 물리법칙을 이용한 확정론적 모의에는 많은 불확실성이 내재하고 어떻게 모형을 구성하는가에 따라 모의결과가 크게 차이날 수 있다(Brown et al., 2012). Stevens and Bony(2013)는 대기 순환을 GCM만으로 설명하기에는 구름 형성, 대류, 열전달과 같은 주요 현상에 대한 이해가 아직 충분하지 않다고 강조한다. 그럼에도 불구하고, GCM에 의존한 결과를 규모가 큰 투자가 요구되는 정책에 사용하는 것은 의사결정자에게 큰 부담이 아닐 수 없다(Brown et al., 2012; Brown and Wilby, 2012). 정확하게 장기간의 기후변화를 예측하는 것은 절대 쉬운 일이 아니기 때문에 예측에 의존하는 ‘predict-then-act’ 패러다임을 정책 결정을 위해 선택하기에는 어려운 부분이 있다.

‘predict-then-act’ 패러다임의 약점을 보완하기 위해 제안된 방식이 ‘robust’ 의사결정 프레임이다(Weaver et al., 2012; Brown et al., 2012; Steinschneider et al., 2015). 이 방식은 의사결정의 기준이 되는 수치가 기후조건에 따라 어떻게 달라지는지 분석하고 미래 기후전망(climate projections)으로 그 수치의 범위를 파악하여 의사결정을 위한 정보로 사용하게 하는 접근 방식이다. 예를 들어, 수자원 시스템의 효율을

의사결정 기준으로 잡고 기후스트레스에 따른 효율변화를 파악한 후 미래 전망이 효율 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되면 시스템에 추가적인 투자를 하지 않도록 의사결정을 지원하는 것이다. 의사결정 중심(decision-centric) 분석이라고도 불리는 이 프레임은 기후에 대한 시스템의 반응 민감도를 줄어둘게 하는 쪽으로 정책을 이끌어 내기 때문에 low-regret 기후변화 적응정책(Hallegatte, 2009; Adgar et al., 2005)과 관계가 깊다.

기후변화 대응 수자원 운영을 위한 의사결정중심 평가의 대표적인 예는 Brown et al.(2012), Moody and Brown(2013), Whatley et al.(2014), Turner et al.(2014), Steinschneider et al.(2015) 등을 들 수 있다. 이 연구들은 지속가능한 수자원 운영을 지원하기 위한 방법론을 제시하고 있으며, 평가의 초점은 시스템 효율이 예상되는 기후스트레스 하에서도 충분히 유지되는 가이다. 적정 효율이 유지되는 기후스트레스의 크기를 시스템의 기후변화에 대한 견고성(robustness)으로 정의하고 견고성을 최대화 시키는 방향으로 정책을 제안하도록 유도한다. 이 방식은 GCM 기후전망이 빗나간다 하더라도 정책의 효과가 어느 정도는 있기 때문에 소수 GCM 예측에 의존하는 ‘predict-then-act’ 방식보다 정책 결정자가 선호할 가능성이 높고 비교적 더 현실적이다(Whatley et al., 2014).

그럼에도 불구하고 한국의 대규모 댐 유역에 대한 의사결정 중심 기후변화 영향평가는 아직 찾기 어렵다. 대규모 댐 유역에 대한 기후변화 영향평가가 수자원장기종합계획(국토교통부, 2016)을 통해 5년마다 수행되고 있기는 하지만 ‘predict-then-act’ 패러다임 접근방식을 취하고 있고 소수의 GCM에 의존하는 단점을 가지고 있다. 비교적 다수의 GCM을 이용해 기후변화 시나리오에 따른 낙동강유역의 수자원 운영 효율을 평가하는 Eum and Simonovic(2010) 역시 ‘predict-then-act’ 방식이기 때문에 의사결정자에게 필요한 간단하고 종합적인 정보를 제공하는 데는 한계가 있다.

본 연구의 목적은 두 개의 대규모 다목적 댐이 직렬로 연결된 금강 수계의 수자원 운영 효율을 ‘robust’ 의사결정 프레임을 이용해 평가하는 것이다. 금강수계의 운영효율과 물 부족의 크기를 평가하기 위해 먼저 추계학적 모형으로 여러 기후스트레스에 대한 일강우 및 기온 시계열을 생산하고 강우-유출모형에 입력해 각 스트레스에 대한 월유출량을 모의하였다. 모의된 월 유출량을 금강수계 수자원 시스템 운영의 최적화를 위한 변수로

이용하였고 각 기후스트레스에 대한 시스템 효율의 변화를 분석하였다. 분석을 통해 시스템 효율과 기후스트레스 사이의 함수를 구하였고 다수의 GCM 기후전망을 적용하여 2020-2039 기간 동안의 최적 수자원 운영 효율을 전망하였다. 이와 함께, 최적 수자원 운영을 위해 기후스트레스에 대응하기 위한 댐 및 저수지 운영방식에 대해 논하였다.

2. 연구지역 및 자료

2.1 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 금강유역(Figure 1)으로 총면적은 $9,915\text{km}^2$ 이고, 무주남대천, 초강, 보청천, 갑천, 미호천, 논산천 등 비교적 큰 하천을 지류로 포함하는 큰 유역이다. 14개 중권역 면적의 평균은 708km^2 이고 최소와 최대면적은 각각 120km^2 , $1,856\text{km}^2$ 이다. 속리산과 덕유산 부근에서 발원하는 강물은 북서쪽 방향으로 흐르다 미호천이 유입된 이후에는 남서쪽으로 방향을 돌려 황해로 흘러 나간다. 하천의 총 길이는 약 402km 이다. 본류는 큰 저수용량을 가진 다목적댐인 용담댐과 대청댐에 의해 조절되고 두 댐은 직렬로 연결되어 있어 상류에 위치한 용담댐의 방류량은 하류에 있는 대청댐의 저수량에 영향을 주게 된다. 14개 중권역에 내린 강수는 유역반응에 의해 하천으로 유출되어 용수공급을 위한 기본 자원이 되고 모든 중권역은 생활용수, 공업용수, 농업용수 수요량을 가지고 있다. 각 중권역 상류에는 다수의 소규모 저수지가 넓게 분포하고 있고 갈수기 용수공급에 일부 역할을 담당한다. 인구가 밀집된 주요 도시는 대전, 청주, 공주 등이고 이 도시들이 위치한 중권역의 생활용수 및 공업용수 수요량은 다른 중권역들보다 많다.

Köppen-Geiger 기후 분류에 의하면 한국의 북쪽지역은 습한 대륙성기후에 해당하고 남쪽 및 동부해안 지역은 다습한 아열대성 기후를 보인다. 알려진 대로 한국은 동아시아 몬순에 강한 영향을 받아 여름철에 강수량이 집중되며(50-60%) 연평균강수량은 $1,200\text{--}1,500\text{mm}$, 연평균기온은 대략 $12\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다(KMA, 2011). 금강유역도 전형적인 몬순 기후 안에 있으며 연평균 강수량은 약 $1,280\text{mm}$, 연 평균 기온은 약 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다. 여름철 장마, 태풍, 집중호우의 영향으로 7-9월 유출량이 많고 10월 이후에는 낮은 빈도로 약한 비가 주로 내리기 때문에 하천유출이 점차 줄어든다. 겨울철에 고도가 높은 지역 위주로 눈이 내리기는 하지만 그 양이 크지 않아 봄철 유출에 큰 영향을 주지는 않는다. 모내기철인 5-6월에는 많은 농업용수가 필요한 반면 자연유출은 6월 이후에 상승하기 때문에 10-5월 건기 동안의 댐과 농업용 저수지의 저수량이 봄철 수요를 만족시키는데 중요한 역할을 하고 있다.

2.2 기상자료

금강 수계 수자원 운영에 대한 기후변화 영향평가를 위해 사용된 관측 기상자료는 기상청 종관관측소(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 60개 지점의 1973년부터 2015년까지 일강수량, 일최고 및 최저기온 자료를 $3 \times 3 \text{ km}^2$ 해상도로 공간내삽 한 격자강수량 및 기온자료이다. Jung and Eum(2015)은 Parameter-elevation Regression on Independent Slope Model(PRISM; Daly et al., 2008) 방법으로 일강수 및 기온자료를 공간내삽한 후 과도하게 추정된 PRISM 격자값을 역거리법으로 후처리하는 방법을 제안하였다. 생산된 격자자료를 243개 자동기상관측지점(Automated Weather Station, AWS)의 관측 자료와 비교해 검증하였고 PRISM 방법과 역거리법을 혼합하는 방법이 다른 내삽방법보다 예측성이 높은 것으로 평가하였다.

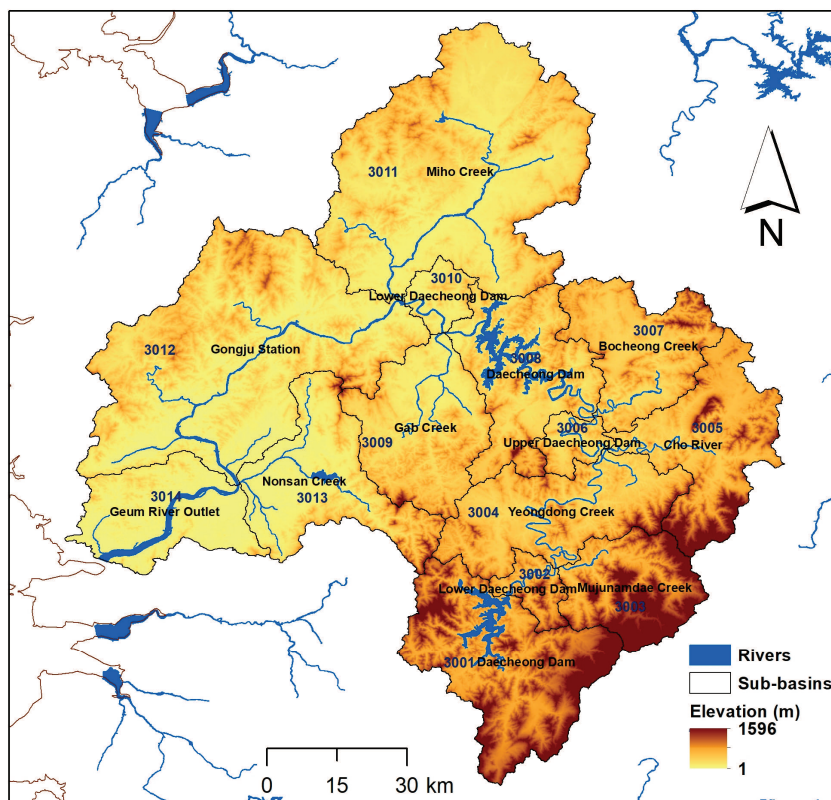


Figure 1. Layout of Geum River Basin

수집된 격자 기상자료는 기후 스트레스를 반영하는 일강수량 및 일평균기온 시계열을 추계학적으로 모의하는데 사용되었고 추계학적 일강수량 및 기온자료가 개념적 강우-유출모형에 입력되어 기후 스트레스에 대한 유출 시계열이 생산된다. 격자 기상자료는 기후 스트레스를 받지 않은 일강수량 및 기온 시계열로 가정되었다. 각 중권역 경계 안의 격자 값들을 산술평균하여 중권역별 면적평균 강수량 및 기온을 산정하였고 금강수계 평균은 금강수계 경계 안의 전체 격자를 평균하여 산정하였다. 따라서 분석에 사용되는 자료는 격자 강수량을 이용해 만들어진 14개 중권역과 금강수계를 대표하는 43년 길이 (1973-2015) 15개 세트의 강수량, 일최고·최저기온 시계열이다.

격자자료로부터 얻어진 1976-1995 기간 금강수계 연평균강수량은 1,245mm, 연평균기온은 11.7 °C 이었고 1996-2015 기간에는 1,325mm, 12.2 °C로 강수량과 기온 모두 증가추세를 보였다. 일강우량의 변동계수는 두 기간 동안 각각 2.90과 2.91로 유의한 변화가 나타나지는 않았던 것으로 보인다. Kim(2016)은 동일한 격자자료를 이용해 1974-2015년 6개월 SPEI(Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index; Vicente-Serrano et al., 2010)를 한국 전역에 대해 산정하고 Mann-Kendall test를 이용해 비모수적 추세를 격자별로 평가하였다(Figure 2). 금강 하류 및 대청댐 상류 일부 지역에서 느린 감소추세가 발견되었고 이는 장기적으로 이 지역들의 기상학적 가뭄위험이 커지고 있음을 의미한다. 감소 추세가 가장 심한 지역은 삽교천과 금강수계의 경계부근이었다. 반대로 6개월 SPEI가 증가추세를 보이는 곳은 용담댐과 무주남대천 주변유역으로 가뭄보다는 홍수위험이 커질 가능성이 큰 지역들이다. Rhee and Cho(2016)는 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5(CMIP5; Taylor et al., 2012) GCM 기후변화 시나리오를 이용해 금강유역의 가뭄위험이 한국의 다른 대규모 유역에 비해 더 큰 것으로 평가하였다.

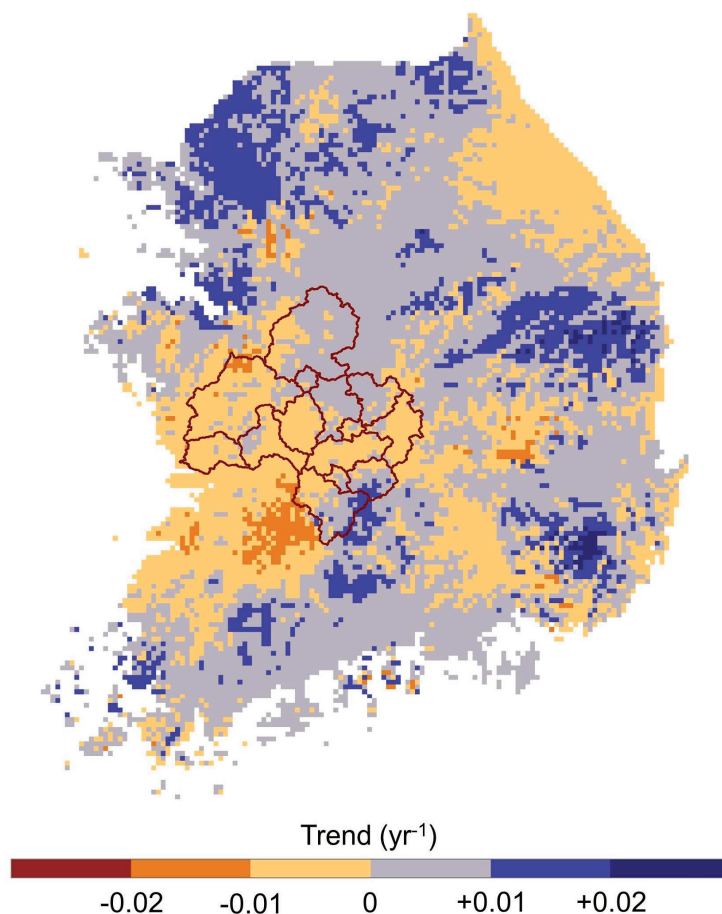


Figure 2. Long-term trends in 6-month SPEI estimated by non-parametric trend tests in South Korea

2.3 수문자료

본 연구에서는 유출량이 추계학적 기후스트레스 시계열로 모의되기 때문에 관측 유출 자료는 사용되지 않았다. 대신에, 유출 모의를 위해 Kim et al.(2017)이 몬테-카를로 모의로 추정한 한국 내 45개 관측유역의 GR4J 모형 매개변수를 수집하였다. 매개변수 추정방법과 미계측유역에서의 유출모의 성능평가는 Kim et al.(2017)을 참조할 수 있다. 유출모의에 대한 더 자세한 사항은 3.3절에서 다루고 있다.

이와 함께, 최적 수자원 운영 모의를 위해 필요한 수요량 자료는 수자원장기종합계획(국토교통부, 2016) 수요전망을 참조하였다. 수자원장기종합계획에서 용수추정 시나리

오는 고수요(high demand), 기준수요(standard demand), 저수요 시나리오(low demand)로 나뉘고 생활용수, 공업용수, 농업용수 추정 기준은 Table 1과 같다. 용수수요 추정 기준에 대한 자세한 사항은 국토교통부(2016)을 참조할 수 있다.

Table 1. Description of water demand projection scenarios for municipal, industrial, and agricultural demands

Water use	Scenario	Description
Municipal	High demand	50% reduction from the demand under standard water conservation
	Standard demand	100% reduction from the demand under standard water conservation
	Low demand	150% reduction from the demand under standard water conservation
Industrial	High demand	demand at 4.5% of economic growth
	Standard demand	demand at 4.0% of economic growth
	Low demand	demand at 3.5% of economic growth
Agricultural	High demand	demand for standard agricultural areas* plus 3.5%
	Standard demand	demand for standard agricultural areas
	Low demand	demand for standard agricultural areas minus 3.5%

*Projected by KREI (2009)

국토교통부(2016)의 수요량 산정방법을 간단히 요약하면, 생활용수 수요량은 국가 계획지침과 전차 및 관련계획의 연계성을 종합적으로 고려하여 단변량 시계열 추세 모형을 적용한 후 광역상수도 및 공업용수도 수도정비기본계획(국토해양부, 2009)에서 환경부 및 지자체와의 협의를 통해 반영한 정책지표들을 최근 통계자료를 감안해 추정된다. 아울러 수요량의 물 절약 정책을 감안하여 고수요, 기준수요, 저수요 시나리오별로 수요량이 산정된다.

공업용수 수요량은 기존공단 수요량, 신규 계획공단(조성 중 포함) 수요량, 지하수 수요량, 하천수 및 댐(저수지 포함) 수요량으로 구분하여 산정된다. 기존공단 수요량은 기존 이용량을 토대로 분양률 및 업체 가동률을 종합한 실제 가동률의 증가 추세를 고려하여 계획년도에 따른 실 가동률을 예측하여 산정된다. 신규 계획 공단 수요량은 광역상수도 및 공업용수도 수도정비기본계획 수립 시 조사된 개발계획 중 고시기준의 개발이 확정된 공단과 조성중인 공단에 대해서 상수도 수요량 예측 업무편람(국토교통부/환경부, 2014)에 제시된 부지면적당 원단위를 적용하여 산정된다. 지하수와 하천수 및 댐(저수

지 포함) 사용량은 지하수 조사연보 및 하천법에 의거 취수량 보고자료를 토대로 산정된다. 이렇게 산정된 계획연도별 수요량은 경제성장에 따른 시나리오와 재이용률 증가추세를 감안하여 최종적으로 수요량이 결정된다.

농업용수 수요량을 추정하는 직접적인 방법은 전국적인 사용량을 측정하여 누계하는 방법과 대표지역의 실측 사용량을 구역전체에 확대 적용하는 방법이 있고, 간접적인 방법은 증발산량 산정이론, 논 필지내의 물수지 및 토양수분추적법을 통하여 이론적으로 산정하는 방법이 있다. 농업용수를 직접 추정하는 방법을 적용하기에는 자료 부족과 같은 현실적인 어려움이 있어 수자원장기종합계획에서는 필요수량을 이론적인 방법으로 정립하고 경지면적을 중심으로 지역별 기상, 토양특성 등을 반영하여 전체 농업용수 수요량을 추정한다. 논 용수의 경우 Doorenbos and Pruitt(1977)의 수정 Penman 공식에 의한 증발산량, 유효수량, 침투량 등이 함께 고려되며 밭용수의 경우에는 FAO Penman-Monteith 공식(Allen et al., 1998)이 사용된다. 더 자세한 사항은 국토교통부(2011)를 참조할 수 있다.

본 연구에 사용된 수요량은 2011년 수자원장기종합계획과 동일한 방법으로 추정된 금강 수계 중권역별 2030년 고수요 및 기준수요 시나리오 전망이다. Table 2는 2016년, 2020년, 2025년, 2030년 고수요 및 기준수요 시나리오에 대한 농업용수, 생활용수, 공업용수의 총량을 나타낸 그림이다. 기준수요와 고수요의 차이는 크게 차이나는 않지만 고수요 시나리오는 2030년까지 총수요가 유지되지만 기준수요는 조금씩 감소하고 있음을 알 수 있다. 기준수요의 경우 쌀 경지면적 감소의 영향이 좀 더 크기 때문이다. 두 시나리오 모두 2030년까지 생활용수, 공업용수는 증가하는 것으로 전망되고 있고 농업 관개용수 수요는 감소할 것으로 전망되고 있다.

Table 2. Projected water demands under high demand and standard demand scenarios ($\text{Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$)

		2016	2020	2025	2030
High Demand	Municipal	506	524	541	556
	Industrial	134	153	161	152
	Agricultural	1,531	1,495	1,474	1,465
Standard Demand	Municipal	505	518	532	545
	Industrial	134	152	159	149
	Agricultural	1,524	1,474	1,442	1,432

고수요 및 기준수요 시나리오에 대한 각 중권역별 2030년 수요량은 Figure 3에 나타내었다. 농지면적이 넓을수록 농업용수 수요량은 증가하고 생활용수와 공업용수는 인구가 밀집된 대도시의 유무에 의해 수요량 차이가 주로 발생한다. 미호천(3011) 유역의 경우는 청주시와 같은 인구밀집지역과 함께 넓은 경작지를 포함하고 있어 가장 수요가 높은 중권역이다. 갑천(3009) 유역에는 대전광역시 위치하고 있어 상업지역에 요구되는 생활용수 수요가 가장 크다. 금강유역 하류는 도시지역보다는 농업지역이 훨씬 넓어 생공용수보다는 농업용수 수요량이 현저히 높은 것으로 나타났다.

수요전망치는 연층수요를 나타내기 때문에 월 단위 시스템 분석을 위해서는 수요의 시간적 변화에 대한 정보가 필요하다. 생공용수의 경우 매월 동일한 양이 필요한 것으로 가정하여 연층량을 12로 나눈 값을 사용하였다. 농업용수의 경우는 경작시기별로 논과 밭의 관개요구량이 다르기 때문에 수자원장기종합계획(국토해양부, 2016)의 연층수요량 대비 순별 수요량 비율을 월단위로 집성하여 각 중권역별로 월수요량을 산정하였다(Figure 4). 농업용수는 모내기가 가장 활발히 진행되는 6월에 가장 높고 7, 8, 9월에는 높아진 증발산량 만큼 관개용수가 필요하다. 관개능력을 갖춘 밭지역이 많은 용담댐유역(3001)은 4월, 5월, 10월에도 상대적으로 많은 농업용수를 필요로 한다. 수자원장기종합계획에서는 용수 재이용률을 고려하여 산정된 용수량 65%를 공급기준으로 설정하기 때문에 본 연구에서도 농업용수 경우 중권역별 필요량의 65%를 기준으로 최적화를 수행하였다. 이와 함께 금강 수계 외부로 광역상수도망을 통해 공급되는 수요를 시스템 분석에 추가로 고려하였고 이 수요량은 최대 월간 71.8Mm^3 정도 이다.

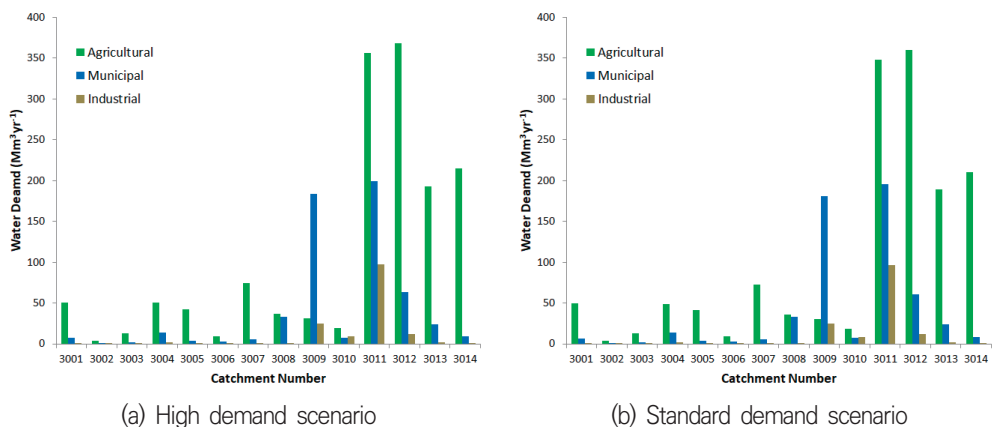


Figure 3. Projected water demands for 2030 per catchment

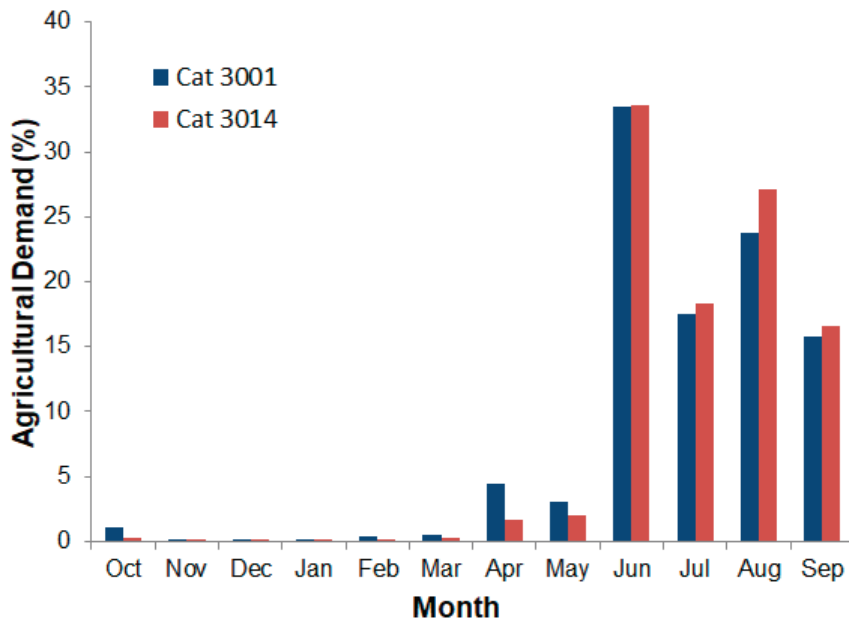


Figure 4. Percentage of monthly agricultural demands to annual total in catchments 3001 and 3014

2.4 기후변화 시나리오 자료

본 연구를 위해 수집된 기후변화 시나리오 자료는 CMIP5 25개 GCM 기후 전망이다 (Table 3). 2050년 이후 온실가스 배출이 완화되는 Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5와 2100년 이후까지 계속 증가하는 온실가스를 가정하는 RCP8.5 두 시나리오에 대한 일강수량 및 최고·최저 기온 자료를 수집하였다. RCP4.5와 RCP8.5는 각각 호의적인 경우와 최악의 경우에 대한 온실가스 배출 시나리오로 여러 기후변화 관련 연구에서 자주 사용되고 있다(e.g., Yan et al., 2015; He and Zhou, 2015).

통상적인 GCM의 공간해상도는 위경도 기준으로 1-3° 정도이므로 본 연구와 같이 GCM의 해상도보다 작은 지역에 대한 해석을 수행할 때는 공간해상도 차이 때문에 발생하는 편의를 보정하고 사용하는 것이 보통이다. 수자원 관리를 목적으로 하는 연구에서 GCM과 지역 시스템 모형을 연결할 때, 통계학적 편의 보정기법(Statistical bias correction; Wood et al., 2004)이 많이 사용되는데 그 예로 Chang and Jung(2010), Monk et al.(2011) 등을 들 수 있다. 본 연구에 사용된 편의보정 방법은 Detrended Quantile Mapping(DQM; Bürger et al., 2013)이다. 이 방법은 예측기간 동안 GCM 모의에서

나타난 장기 추세를 먼저 제거하고 관측 자료의 확률밀도함수를 이용해 Quantile Mapping을 수행한 후 제거되었던 추세를 다시 더하는 방법으로 GCM의 장기추세를 보존하는 장점이 있다.

Eum and Cannon(2017)은 Quantile Mapping(QM), DQM, Quantile-Delta Mapping(QDM; Cannon et al., 2015) 세 가지 방법으로 CMIP5의 20개 GCM을 한국 기상청 60개 종관관측지점(Automated Synoptic Observing System; ASOS)에 적용하였고 세 방법 중 QDM이 기상자료의 극치 값과 장기추세를 동시에 잘 보존하는 것으로 평가하였다. 연강수량과 연평균기온에 대해서는 DQM과 QDM의 성능차이는 크게 없는 것으로 나타났다. 본 연구에 필요한 자료는 극치 값이 아닌 20년 평균 강수량과 평균기온 전망이므로 추세보존에 적합한 방법인 DQM 편의보정 결과를 이용하였다. 각 편의보정에 대한 자세한 사항은 Eum and Cannon(2017)을 참조할 수 있다.

편의보정을 위한 관측자료 기간은 1976년부터 2005년까지이고 GCM의 전망기간은 2006-2099이다. 수집된 금강유역 경계 내에 있는 격자강수량 및 기온의 산술평균값을 이용해 편의보정 하였고 기후변화 영향평가를 위해 2020-2039년 동안의 평균강수량 및 평균기온을 25개 모형에 대해 산정하였다.

Table 3. List of the bias-corrected GCMs by the Delta-Quantile mapping for climate change impact assessment

No.	Model name	Resolution	Institution
1	CMCC-CM	0.750°×0.748°	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
2	CMCC-CMS	1.875°×1.865°	
3	CCSM4	1.250°×0.942°	National Center for Atmospheric Research
4	CESM1-BGC	1.250°×0.942°	
5	CESM1-CAM5	1.250°×0.942°	
6	MRI-CGCM3	1.125°×1.122°	Meteorological Research Institute
7	CNRM-CM5	1.406°×1.401°	Centre National de Recherches Meteorologiques
8	HadGEM2-AO	1.875°×1.250°	Met Office Hadley Centre
9	HadGEM2-CC	1.875°×1.250°	
10	HadGEM2-ES	1.875°×1.250°	
11	MPI-ESM-LR	1.875°×1.865°	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
12	MPI-ESM-MR	1.875°×1.865°	
13	FGOALS-s2	2.813°×1.659°	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
14	NorESM1-M	2.500°×1.895°	Norwegian Climate Centre
15	GFDL-ESM2G	2.500°×2.023°	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
16	GFDL-ESM2M	2.500°×2.023°	
17	BCC-CSM1-1	2.813°×2.791°	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
18	BCC-CSM1-1-M	1.125°×1.122°	
19	IPSL-CM5A-MR	2.500°×1.268°	Institut Pierre-Simon Laplace
20	IPSL-CM5A-LR	3.750°×1.895°	
21	IPSL-CM5B-LR	3.750°×1.895°	
22	MIROC5	1.406°×1.401°	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
23	MIROC-ESM-CHEM	2.813°×2.791°	
24	MIROC-ESM	2.813°×2.791°	
25	CanESM2	2.813°×2.791°	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis

3. 연구방법

3.1 Decision-Scaling Framework

전형적으로 이루어지는 기후변화 영향평가는 특정 온실가스배출 시나리오에 대한 GCM 모의 결과를 선택해 대상지역의 기상관측자료로 편의보정을 수행한 후 이를 시스템 모형의 입력해 분석하는 방식을 취한다. GCM에서 출발해 시스템 모형으로 이어지는 하향식(Top-down) 평가는 수자원이나 농업분야의 기후변화 영향평가 연구에 일반적으로 적용되어온 접근방식이다. 관개용수 요구량에 대한 기후변화 영향평가(Döll, 2002; Gondim et al., 2012; Mainuddin et al., 2014), 작물생산성에 대한 평가(Stöckle et al., 2010), 저수지운영과 관개농업에 대한 평가(Vano et al., 2010) 등이 대표적인 예이다. 이 하향식 평가는 시스템 모형이 비교적 복잡할 경우 계산 부담으로 인해 GCM이 제한적으로 이용될 수밖에 없는 큰 단점을 가지고 있다. 안타깝게도 GCM이 가지는 불확실성은 기후변화영향평가의 전체 과정이 가지는 불확실성에서 가장 큰 부분을 차지하고 있어(Teng et al., 2012; Masutomi et al., 2009), 소수의 GCM 기후전망에 의존적인 분석은 신뢰도가 낮을 수밖에 없고 이에 따라 의사결정에 반영되기 어렵다(Brown et al., 2012; Brown and Wilby, 2012). 심한 경우, 특정 GCM 전망(projection)에 최적화된 저수지 운영방식은 단순히 경험적인 운영방식을 사용하는 것보다 좋지 않을 가능성도 있다(Wood et al., 1997). GCM이 가지는 불확실성을 차치하더라도 하향식 평가는 시스템의 기후 스트레스에 대한 반응을 넓은 범위에 대해 확인하기 어려운 구조를 가지고 있다(Brown et al., 2012).

하향식 평가방식의 단점을 보완하기 위해 의사결정을 중심에 두는 시스템 분석을 먼저 수행하고 GCM 기후전망을 확인하도록 제시된 방법이 decision-scaling(Brown et al., 2012)이다. Decision-scaling은 추계학적 모형을 이용해 기후조건에 다양한 변화를 준 다음 시스템분석을 수행해 의사결정에 사용될 수 있는 변수와 기후스트레스와의 관계를 먼저 설정할 것을 제안한다. Brown et al.(2012)은 의사결정변수와 기후조건과의 관계식을 climate response function(CRF)으로 정의하였고 기후변화의 영향은 CRF에 여러 GCM의 기후전망을 결합하여 평가하게 된다. CRF를 만들어 내기만 하면 단순히 GCM 기후전망을 CRF에 겹쳐 영향평가가 이루어지기 때문에 다수의 GCM 기

후전망을 한눈에 확인할 수 있는 장점이 있다. 아울러 기후변화 영향을 의사결정변수만으로 평가하기 때문에 기후스트레스에 대한 시스템의 반응을 CRF를 통해 간략히 확인할 수 있다. 2010년 이후 많은 연구에서 이 방법을 사용하고 있으며 Ghile et al.(2014), Steinschneider et al.(2015), Moursi et al.(2017) 등을 대표적인 사례로 들 수 있다.

Figure 5는 본 연구에 사용된 기후변화 영향평가의 흐름도이다. Decision-scaling 방식을 이용해 시스템분석에서 출발해 기후변화 시나리오로 이어지는 상향식(bottom-up) 평가를 위해 금강유역의 농업용수 및 생공용수 수요량에 대한 수자원 공급효율을 나타내는 일반적인 두 개의 기준을 의사결정 변수로 먼저 선정하였다. 월 단위 최적화 모의에 의해 산정되는 두 기준은 20년 동안의 월수요 95% 대한 공급 신뢰도(Reliability(ρ); Hashimoto et al., 1983)와 총수요량대비 공급부족량(ν)으로 각각 Eq.(1)과 Eq.(2)로 정의된다.

$$\rho = \Pr [WS_t \geq 0.95 WD_t] \quad (1)$$

$$\nu = \frac{TWD - TWS}{TWD} \quad (2)$$

여기서, WS_t 는 월총공급, WD_t 는 월총수요, TWD는 20년 동안의 총수요, TWS은 20년 동안의 총공급이다. 본 연구의 CRF는(ρ , ν)와 기후스트레스의 관계를 의미하며 각각에 대해 독립적으로 개발되었다.

ρ 와 ν 의 CRF 개발을 위해 먼저 다양한 기후스트레스를 포함하는 20년 길이의 일강우와 일최고 및 최저기온을 각 중권역에 대해 추계학적 모형을 이용해 발생시켰다. 발생시킨 추계학적 강우와 기온을 개념적 유출모형에 입력해 월유출값으로 변환시켰다. 월유출량과 최적화 모형을 이용해 20년 동안의 최적 수자원 배분을 모의하여 발생시킨 기후스트레스에 대응하는 ρ 와 ν 값을 산정하였다. 총 343개의 기후스트레스에 대해 같은 분석을 반복해 자료를 구성하였고 다중회귀분석을 이용해 CRF를 개발한 후 수집된 GCM자료를 CRF와 결합하는 상향식 분석을 수행하였다. 각 단계에 대한 자세한 사항은 다음 절에 이어진다.

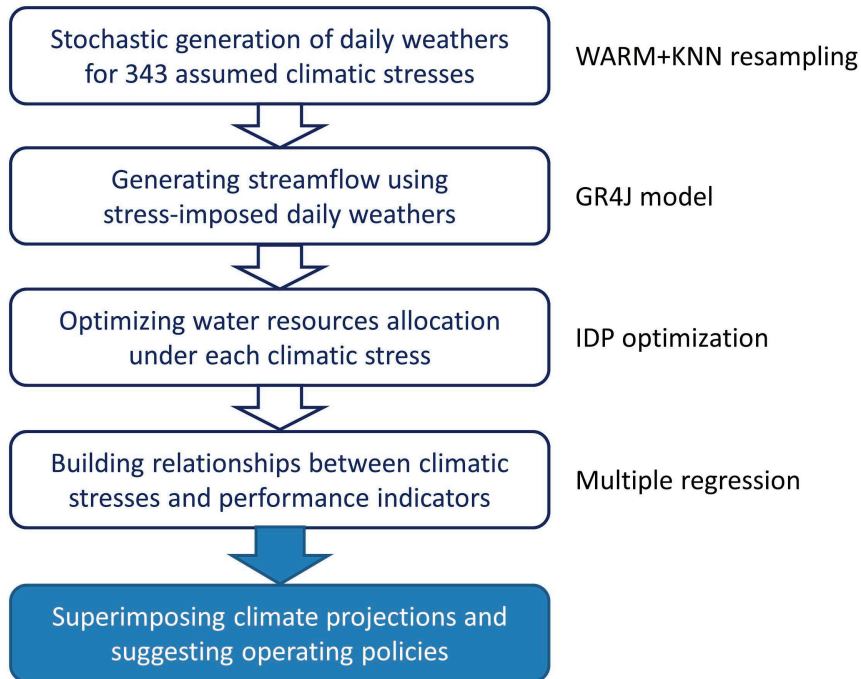


Figure 5. Procedures and tools for climate change impact assessment and developing climate-adaptive operations

3.2 추계학적 기후스트레스 모의

기후변화는 10년 이상의 길이를 가지는 기상관측에서 나타나는 특성변화로 정의되기 때문에(IPCC, 2007), 기후변화 관련 연구에서는 통상 20-30년 기간 동안의 기후에 대한 평균적인 반응을 분석하는 것이 보통이다(e.g., Zhao and Dai, 2016; Moursi et al., 2017). 본 연구에서는 20년 기간에 대한 연평균 강수량 및 기온의 변화를 기후스트레스로 정의하였다. 안타깝게도 수집된 기상자료의 길이는 43년으로 관측만을 이용해 시스템 분석을 할 경우 2개의 20년 평균값만을 얻게 되기 때문에 다양한 기후스트레스에 대한 추계학적 모의 발생이 필수적이다. 본 연구에서는 관측 강수량 및 기온자료를 이용한 추계학적 모의에 기후스트레스를 가하는 방법인 Steinschneider and Brown(2013)의 semi-parametric 모형이 사용되었다.

Steinschneider and Brown(2013)은 decision-scaling과 같은 의사결정에 중심을 두는 기후변화 영향평가를 위해 Kwon et al.(2007)의 wavelet autoregressive

model(WARM) 연강수량 모형과 Apipattanavis et al.(2007)의 날씨모형을 결합한 후 Quantile Mapping을 통해 기후 스트레스를 가하는 방법을 제시하였다. 이 모형은 먼저 유역평균 자료를 이용하여 일정 기간(본 연구의 경우 20년) 동안 연강수량을 WARM 모형으로 발생시킨다. WARM 모형은 연강수량 시계열을 여러 성분으로 분해한 후 각 분해 성분을 자기회귀모형으로 원하는 길이만큼 발생시킨 후 다시 결합하는 방법을 사용한다. 이 방법은 낮은 빈도로 나타나는 연강수량을 일반적인 자기회귀모형보다 잘 발생시키는 것으로 알려져 있다(Kwon et al., 2007).

20년 길이의 연강수량이 모의되면 각 모의 연강수량에 해당하는 일단위 날씨자료는 Apipattanavis et al.(2007) 제안한 Markov chain 기반 추출기법을 통해 발생된다. Steinschneider and Brown(2013)은 강수발생 상태를 3개 모드로 구분하여 3×3 전이확률(transition probability; $p_{00}, p_{01}, p_{02}, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{20}, p_{21}, p_{22}$) 행렬을 강수 발생 모의를 위해 사용할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 무강우(state 0), 보통강우(state 1), 극한강우(state 2), 세 경우로 강수발생 상태를 구분하였고 무강우와 보통강우를 구분하는 기준은 일강우 0.1mm, 보통강우와 극한강우 사이의 기준은 각 월의 관측 일강우 99% 백분위수를 사용하였다. 관측에서 얻어진 전이확률행렬을 이용해 1차 Markov chain으로 365일의 임의적 강우발생 상태를 모의한 후에는 각 일을 중심으로 하는 15일 window를 안에서 모의된 강우발생 상태를 나타내는 관측자료들을 중복을 허용하여 반복적으로 추출한다. 추출된 날짜에 해당하는 관측연강수량과 WARM으로 발생된 연강수량 사이의 Euclidean distance의 역수로 추출된 강수량 및 기온들을 가중 평균하여 추계학적 강수량 및 기온(최고 및 최저기온)으로 결정한다. 이 과정을 WARM으로 발생시킨 20개의 연강수량에 반복해 적용하면 20년 길이의 임의적 일강수량 및 기온자료가 생성된다.

생성된 강수량 및 기온자료는 결국 관측 일강수량과 기온자료에서 추출된 값들이기 때문에 관측 자료에 나타난 통계치 변화(본 연구의 경우 20년 평균기온과 20년 연평균 강수량의 변화) 이상의 기후 기후스트레스를 포함할 수 없다. Decision-scale을 위해서는 관측 통계치 이상의 기후 스트레스에 대한 시스템의 반응을 필요로 하기 때문에 임의적인 기후 스트레스를 발생된 강수량 및 기온자료에 추가적으로 부가해야 한다. 강수량에 기후 스트레스를 가하기 위해 Steinschneider and Brown(2013)은 기후스트레스에

의해 변형된 일강수량 확률밀도 함수를 이용해 Quantile Mapping(QM) 하는 방법을 제안하였다. 추출된 강수량의 확률밀도함수를 가정된 평균과 변동계수를 이용해 변형시켜 발생한 강수량의 누가확률을 대응시키는 방법이다. 간단히, 이 방법은 GCM의 편의 보정을 위해 사용되는 통상적인 QM방법을 반대방향으로 적용하는 것이다. 기온에 스트레스를 가하는 방법으로는 간단히 온도 변화량을 더하는 방법을 사용한다. 따라서 강수량과 기온에는 서로 독립적인 기후스트레스가 가해진다. 본 연구를 위해 일강수량의 확률밀도 함수에 평균의 변화를 -40%에서 80%까지 20% 간격으로 7개 스트레스를 가하였고 일강수량의 변동계수도 같은 7개 조건에 대해 독립적으로 적용해 강우의 크기와 변동성을 모두 기후스트레스로 고려하였다. 아울러 기온 증가량은 0 °C에서 +6 °C까지 +1 °C 간격으로 고려되었다. 따라서 금강유역의 수자원 배분 효율 분석을 위해 본 연구에서 사용된 기후 스트레스 조건은 평균 강수량 조건 7개, 강수변동성 조건 7개, 평균기온 조건 7개, 총 343개이며 각 조건에 대해 20년 길이 일강수량 및 기온자료가 생성되었다. 추계학적 모의기법에 대한 더 자세한 사항은 Steinschneider and Brown(2013)을 참조할 수 있고 기후 스트레스 모의를 위한 weathergen R package는 <http://walkerjeffd.github.io/weathergen/>에서 제공된다. 추계학적 모의는 유역평균값을 이용해 먼저 수행되었고 유역평균값 모의에 추출된 날짜에 대한 각 중권역 별 관측 값에 중권역 평균에 적용된 기후스트레스 값을 각각 적용해 강우와 기온의 공간상관성이 유지될 수 있도록 하였다.

3.3 유출모의

발생된 추계학적 일 강수 및 기온에 대한 14개 중권역의 자연유출량을 모의하기 위해 GR4J(Perrin et al., 2003) 모형이 사용되었다(Figure 6). 이 모의를 통해 기후스트레스가 자연유출에 미치는 영향을 분석할 수 있다. GR4J는 강우에 대한 유역의 유출반응을 매개변수 4개로 모의하는 개념적 일 유출모형으로 각 매개변수(X1-X4)는 토양 및 지하수에서의 수분이동, 하도 저수기능, 단위도 기저시간을 개념적으로 나타낸다. GR4J는 간단한 구조를 가지고 있어 매개변수 추정 및 지역화를 수행하기에 용이하며 다양한 기후조건에 대해 여러 연구목적으로 사용되어온 적용성이 높은 모형이다(e.g. Oudin et al., 2008; Zhang et al., 2015). 유출 모의에 요구되는 상세한 계산방법 및 모형의

주요 특성은 Perrin et al.(2003)을 참조할 수 있다. 유출 모의에 필요한 잠재증발산량은 개념적 강우-유출 모의를 위해 제안된 Oudin et al.(2005)의 평균기온 기반 잠재증발산량 공식이 사용되었다.

유출모의를 위해서는 각 중권역의 강우-유출반응을 특성화하는 매개변수를 먼저 결정해야 한다. 금강유역 내에는 여러 지점에 대해 수위-유량관계식과 계측수위 자료가 제공되고 있지만 14개 중권역 출구점의 유출자료는 용담댐(3001)의 유입량 자료를 제외하면 없기 때문에 미계측유역에 사용되는 방법 중 하나인 인접성기반 매개변수 지역화 방법을 적용하였다. Kim et al.(2017)은 한국 내 수위-유량관측지점 29개소의 일유출 자료와 16개 다목적댐의 일유입량 자료를 이용해 45개 계측유역에 대해 GR4J 매개변수를 추정하였고, 인접한 계측유역의 매개변수 조합을 미계측 유역의 유출모의에 사용하는 방법이 상당히 유효함을 leave-one-out cross-validation(LOOCV)을 통해 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 추계학적으로 발생시킨 기온 및 강수에 대한 유출반응 모의를 위해 Kim et al.(2017)의 계측유역 중 각 중권역에 가까운 5개 유역의 매개변수를 이용해 일 유출을 모의한 후 이를 산술평균하였다. 용담댐 유역의 경우는 유입량자료가 가용하기 때문에 2011-2015년 관측 일유입량 시계열에 적합 시킨 매개변수를 사용해 모의하였다. Kim et al.(2017)의 45개 계측유역에 대한 LOOCV 평가에서 얻어진 Nash-Sutcliffe Efficiency(NSE)의 평균은 0.53, 표준편차는 0.41 이다. 아울러, 용담댐 유역에 대한 유출모의 성능은 NSE 0.62 이다. 각 중권역에 대해 모의된 일유출자료는 금강유역 월단위 수자원 최적화 분석을 위해 월유출값으로 집성되었다. NSE 기준으로는 GR4J를 이용한 일유출 모의 성능이 아주 높다고 보기는 어렵지만 일유출을 월유출값으로 집성하는 과정에서 오차가 상당히 줄어들게 되기 때문에 월단위 최적화에 사용하는 정도에는 모의성능이 충분한 것으로 판단하였다.

참고로 미계측유역의 유출모의를 위한 매개변수 지역화 방법은 크게 세 가지로 나뉜다. 가까운 계측유역의 매개변수를 옮겨 사용하는 인접성기반 매개변수 지역화(Proximity-based parameter transfer; e.g., Oudin et al., 2008), 유역간 물리적 유사성을 기반으로 매개변수를 이동시키는 유사성 기반 지역화(Similarity-based parameter regionalization; e.g., McIntyre et al., 2005), 매개변수와 유역의 물리적 특성을 관계시켜 미계측 유역의 매개변수를 구하는 회귀분석을 이용한 방법(e.g., Cutore et al.,

2007; Kim and Kaluarachch, 2008)이 대표적인 세 분류이다. 세 가지 분류 모두 계측 유역에서 얻어진 매개변수에 의존하는 한계를 가지고 있기 때문에 이를 보완하기 위해 최근에는 유황곡선과 같은 유출특성을 대표하는 flow signature를 먼저 지역화하고 이를 이용해 미계측 유역의 매개변수를 추정하는 방법이 제안되기도 하였다(e.g., Westerberg et al., 2014). Kim et al.(2017)은 인접성 기반 매개변수 지역화 방법과 미계측유역의 지역유황곡선에 매개변수를 적합 시키는 방법의 성능을 비교평가 한 연구로 인접성 기반 지역화 방법이 훨씬 우수한 성능을 보이는 것으로 결론을 내고 있다. 아울러 인접성기반 매개변수 지역화는 한국과 같은 비교적 습윤한 기후에서 그리고 GR4J와 같은 간단한 모형에 대해 성능이 우수한 것으로 평가 되었다(Parajka et al., 2013).

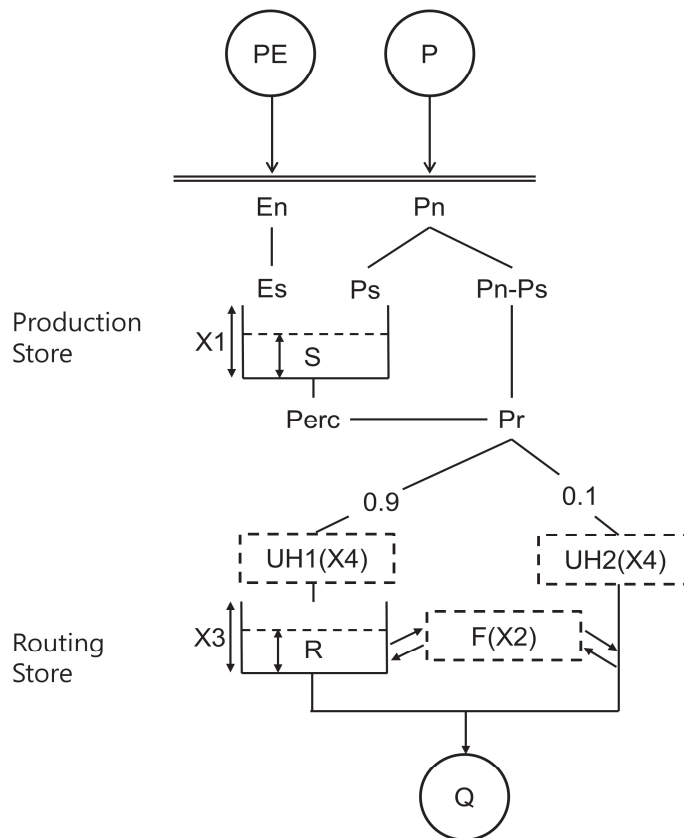


Figure 6. The schematized structure of GR4J (X1–X4: model parameters, PE: potential evapotranspiration, P: precipitation, Q: runoff, other letters indicate variables that conceptualize internal processes in a watershed)

3.4 수자원 운영관리 최적화

금강수계 각 중권역과 외부 수요량에 최적화된 공급량 결정을 위해 전통적인 방법 중 하나인 incremental dynamic programming(IDP)을 사용하였다. 이 방법은 적당한 초기조건으로 첫 시점의 결정 변수를 최적화 한 후 최적화된 결정변수를 다음 시점의 초기조건으로 적용해 최적화하는 과정을 끝 시점까지 반복하는 방법이다. 이 분석을 위해 먼저 금강유역을 Figure 7과 같이 node-and-link 모형으로 개념화 하였다. 14개 중권역을 자연유출과 농업 및 생공용수 수요를 가지는 절점(node)으로 가정하였고 각 절점은 하천(river network) 및 상수도망(water supply network)으로 연결(link)되는 구조로 간략화 하였다. 용담댐과 대청댐은 하천의 중간에서 흐름을 조절하는 regulator 절점으로 구성하였다.

각 중권역에서 강우-유출과정을 통해 생성되는 자연유출은 하천에 유입되기 전에 각 중권역 상류에 위치하고 있는 소규모 농업용저수지에 먼저 저장될 수 있다. 금강유역에는 1,200개소가 넘는 농업용저수지가 넓게 분포되어 있고 이에 따라 자연유출수가 금강 본류에 유입되기 전에 저류되는 양이 실제로 존재한다. 따라서 각 중권역은 강우-유출과정의 이외에 추가적인 인위적인 저류능력을 가지고 있는 것으로 가정하였고 각 중권역 절점의 저류능력은 각 중권역내에 위치한 농업용저수지들의 유효저수량의 합으로 결정하였다. 농업용저수지 유효저수량 자료는 농촌용수종합정보 시스템 농업수리시설 현황 (https://rawris.ekr.or.kr/facilities_present.do)에서 제공되고 있다. Figure 8은 개별 농업용 저수지 유효저수량의 누가확률분포와 합산된 중권역별 유효저수량을 나타낸다. 개별 저수지의 95%는 유효 저수량이 1Mm³를 넘지 않지만 중권역별로 합계를 낼 경우 100Mm³가 넘는 경우도 있어 이를 고려하지 않을 경우 유역의 저수능력을 저평가하게 된다. 특히 5월, 6월 자연유출은 비교적 작은 반면 모내기에 요구되는 관개 용수량은 상당히 커서 이 저류능력을 고려하지 않을 경우 유역 내 수자원공급이 원활하지 못한 것으로 해석될 수 있다.

IDP를 이용해 1개 기후 스트레스 조건 240개월에 대해 월단위로 결정해야할 변수는 각 중권역 절점에 공급되는 농업용수량(Agricultural Supply; AS_i), 생공용수량(M&I Supply; MS_i), 중권역 절점의 저류량(Water Storage at Catchments ; WSC_i), 용담댐과 대청댐에서 상수도망을 통해 각 중권역으로 공급되는 생공용수량(M&I Supply from

dams: MSD_t), 상수도망을 통해 유역경계 바깥으로 공급되는 생공용수량(M&I Supply to Out of the basin; MSO_t), 용담댐과 대청댐의 저류량(Water Storage at Dams; WSD_t)이다. 수자원 관리자는 현재 시점(t)의 물부족을 최소화하고 미래 수자원공급에 영향을 주게 되는 현재시점의 총저수량은 최대화 하는 운영을 하는 것으로 가정하였다. 따라서 수자원 분배를 위한 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } RWD_t - SR_t \quad (3)$$

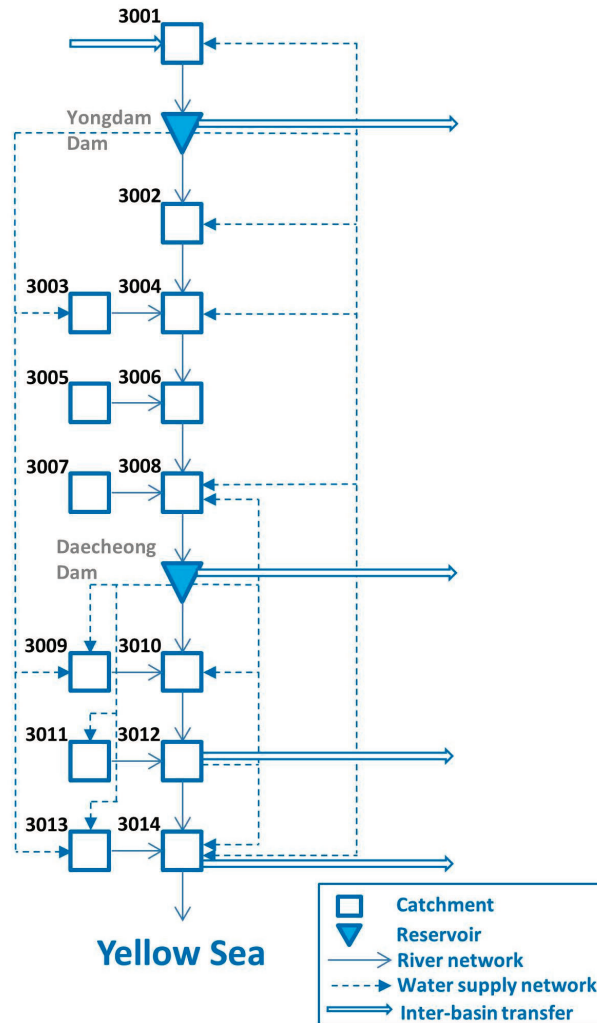


Figure 7. Node-and-link network for water resources management in Geum River Basin

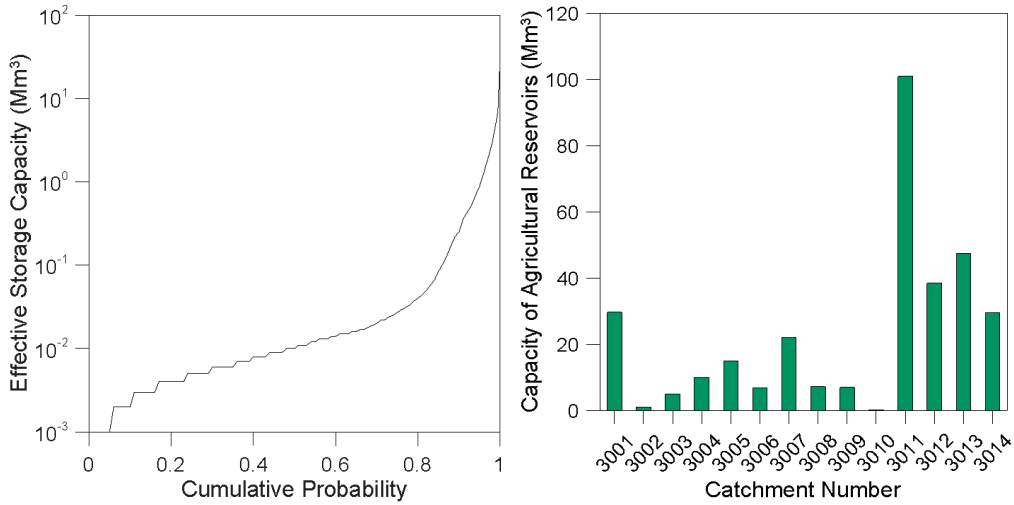


Figure 8. Cumulative distribution of water storage capacities of agricultural reservoirs (left) and sum of the storage capacities per catchment (right)

여기서, RWD_t 는 현재시점의 상대적 물 부족(Relative Water Deficit), SR_t 은 현재시점의 저수율(Storage ratio)이고 각각 금강유역의 총수요량 대비 공급부족량(%), 총저수능력 대비 저류량(%)으로 정의하였다. 따라서 RWD_t 와 SR_t 는 Eq.(4)와 같이 정의된다.

$$RWD_t = \frac{\sum AD_t + \sum MD_t + \sum MDO_t - \sum AS_t - \sum MS_t - \sum MSO_t}{\sum AD_t + \sum MD_t + \sum MDO_t} \quad (4a)$$

$$SR_t = \frac{\sum WSC_t + \sum WSD_t}{\sum SCC + \sum SCD_t} \quad (4b)$$

여기서, AD_t , MD_t , MDO_t 는 각각 현재시점에 요구되는 농업용수, 유역내 생공용수, 유역의 생공용수 수요량이고, SCC 와 SCD_t 는 각각 중권역 절점의 최대저수용량, 댐최대저수용량이다.

결정변수의 최적화를 위해 필요한 제약조건(constraints)는 Eqs. (5)-(7)과 같다.

Mass balance at a catchment:

$$WSC_t \leq SF_t + WSC_{t-1} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned}
AS_t \leq & SFu_t + SF_t + WSCu_{t-1} - WSCu_t + WSC_{t-1} - WSC_t \\
& + MSDu_t + WSDu_{t-1} - WSDu_t \\
& - ASu_t - 0.35MSu_t - MSOu_t + 0.22
\end{aligned} \tag{5b}$$

$$\begin{aligned}
MS_t \leq & SFu_t + SF_t + WSCu_{t-1} - WSCu_t + WSC_{t-1} - WSC_t \\
& + MSDu_t + MSD_t + WSDu_{t-1} - WSDu_t \\
& - ASu_t - 0.35MSu_t - MSOu_t - AS_t + 0.22
\end{aligned} \tag{5c}$$

Mass balance at dams:

$$\begin{aligned}
WSD_t \leq & WSD_{t-1} + SFu_t + WSCu_{t-1} - WSCu_t \\
& + MSDu_t + WSDu_{t-1} - WSDu_t \\
& - ASu_t - 0.35MSu_t - MSOu_t - MSO_t + 0.22
\end{aligned} \tag{6a}$$

$$\begin{aligned}
\sum MSD_t \leq & WSD_{t-1} + SFu_t + WSCu_{t-1} - WSCu_t \\
& + MSDu_t + WSDu_{t-1} - WSDu_t \\
& - ASu_t - 0.35MSu_t - MSOu_t - MSO_t - WSD_t + 0.22
\end{aligned} \tag{6b}$$

Maximum Storage Capacity:

$$WSC_t \leq SCC \tag{6a}$$

$$WSD_t \leq SCD_t \tag{6b}$$

No water surplus:

$$AS_t \leq AD_t \tag{7a}$$

$$MS_t \leq MD_t \tag{7b}$$

$$MSO_t \leq MDO_t \tag{7c}$$

여기서, SFu_t 는 상류 자연유출의 합, SF_t 는 해당 중권역 자연유출, $WSCu_t$ 는 상류 저수량의 합, $MSDu_t$ 는 댐에서 상류 중권역으로 이동된 생공용수량의 합, $WSDu_t$ 는 상류에 위치한 댐 저수량의 합, ASu_t 는 상류에 공급된 농업용수량의 합, MSu_t 는 상류에 공급된 생공용수량의 합, $MSOu_t$ 는 상류에서 유역외부로 공급된 생공용수량의 합이다.

앞서 설명한대로 중권역내 최대저류용량 SCC 는 각 중권역 내에 위치한 농업용저수지 유효저수량의 합으로 결정하였고 홍수조절기능 없이 연중 변화가 없는 것으로 가정하

였다. 용담댐과 대청댐은 홍수를 대비하기 위해 최대용량이 조절되며 이에 따른 각 댐의 시기별 최대용량(SCD)은 Table 4와 같다. 각 중권역으로 공급된 생공용수의 회귀율은 수자원장기종합계획과 동일하게 65%로 가정하였고 이에 따라 공급된 생공용수의 35%만이 손실되고 나머지는 하천으로 회귀된다. 각 중권역에 수요량 이상의 공급은 일어나지 않는 것으로 가정하였다. 아울러 용담댐 유역(3001)에 매월 대략 0.22Mm^3 정도의 생공용수가 유역외부에 위치한 동화댐에서 공급되는데 이를 고정된 공급으로 고려하였다. 모든 결정변수는 positivity 제약조건을 갖게 되고 댐에서 광역상수도망을 통한 물 이동은 상수도 취수능력을 고려하여 월 40Mm^3 를 넘지 않는 것으로 가정하였다.

Table 4. Storage capacity of Yongdam Dam and Daecheong Dam

	Effective storage capacity (Mm^3)		
	June to September	October to May	Flood control
Yongdam Dam	672	809	137
Daecheong Dam	790	1040	250

각 중권역 절점에 대해 현 시점에 가용한 수자원은 이전 시점 유역과 댐의 저수량과 현시점 자연유출의 합이다. 이중 일부를 다시 유역과 댐에 저장하고 남은 양을 이용해 농업용수와 생공용수를 공급한다. 앞서 언급한대로 공급된 생공용수중 65%는 회귀하여 하류지역의 가용량에 영향을 미치게 된다. 따라서 현시점의 최적화에 영향을 미치는 이전 시점의 변수는 중권역 저수량(WSC_{t-1})과 댐 저수량(WSD_{t-1})이다. 최적화 시작시점의 초기 저수량을 알 수 없기 때문에 먼저 최대저수량의 절반을 초기 저수량으로 가정한 후 관측에서 얻어진 60개월 유출량을 이용해 시스템을 자연유출의 변동성에 의존하도록 수립시켰다. 이어서 추계학적 모의된 유출량을 입력해 240개월의 시스템분석을 반복적으로 수행하였다.

요약하면, 1개 기후스트레스 조건에 대한 추계학적 유출량의 길이는 240개월이기 때문에 기후조건 1개에 대한 월 단위 최적화 횟수는 시스템초기화를 제외하면 240회가 된다. 이 과정을 전체 기후스트레스 조건 343개에 대해 반복 수행하였기 때문에 총 82,320회의 최적화가 고수요 및 기준수요 시나리오에 대해 각각 수행되었다.

3.5 기후반응함수(CRF) 개발

본 연구에서 가장 중요한 부분은 하천시스템의 자원배분 효율이 기후스트레스에 대해 어떻게 반응하는 가를 직접 연결하는 것이다. 이를 위해 Brown et al.(2012)는 기후스트레스와 시스템 효율을 나타내는 지수를 직접 연결하는 방법을 제안하였다. 수자원 배분 효율을 평가하기 위해 본 연구에서 선택한 평가지수는 앞서 설명한 대로 20년 동안 월공급이 월수요의 95%를 만족시킬 확률(ρ)과 총수요대비 물부족량(ν)이다. IDP 최적화 결과를 이용해 343개 기후스트레스에 각각에 대응하는(ν , ρ) 쌍을 구할 수 있으며 다중선행회귀 분석을 통해 기후조건과(ν , ρ) 사이의 관계를 설정할 수 있다. 잔차가 정규분포를 따르게 하기 위해 ν 의 경우 종속변수에 대한 로그변환을 적용했고, 이에 따라 시스템 효율과 기후조건과의 관계를 나타내는 다중회귀식은 Eq.(8)과 같다.

$$\rho = a_1 + b_1 \times T_{avg} + c_1 \times P_{avg} + \epsilon_1 \quad (8a)$$

$$\ln(\nu) = a_2 + b_2 \times T_{avg} + c_2 \times P_{avg} + \epsilon_2 \quad (8b)$$

여기서, a_i , b_i , c_i 는 회귀식의 매개변수, ϵ_i 는 정규분포를 따르는 무작위 오차, T_{avg} 와 P_{avg} 는 각각 20년 평균기온 및 강수량이다. 다중회귀분석을 통해 얻어진 매개변수를 이용하면 ν 와 ρ 의 총변동성에서 기후조건으로 설명되는 부분만을 추출해 낼 수 있다.

3.6 기후 스트레스 대응 댐 운영방식 도출

3.4절의 자원배분 최적화 과정을 거치면 각 댐에서 광역상수도를 통해 공급되는 최적 생공용수의 양과 하천유출량이 결정되게 된다. 최적 댐운영방식은 유출량과 가용량(전월의 저수량과 현월의 유입량의 합)의 관계로부터 도출될 수 있다. 먼저 GCM 기후변화 시나리오를 기후반응함수에 적용한 후 2020-2039 기간 동안에 발생할 수 있는 가장 좋지 않은 기후스트레스를 나타내는 GCM을 선정하였고 이 GCM과 가장 가까운 추계학적 기후스트레스에 대한 최적화 결과를 이용해 용담댐과 대청댐의 가용량-유출량의 관계를 도출하였다. 각 경우에 대해 우기(6-9월)와 건기(10월-5월)를 구분하여 댐 운영방식을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 추계학적 기후스트레스 모의

Figures 9-11는 평균강수량, 평균기온, 강수변동성(일강우의 변동계수)이 관측기록과 대비해 각각 40% 감소, 3℃ 증가, 40% 증가할 것을 가정하여 추계학적으로 발생시킨 일강수량 및 일평균기온 시계열이다. 기온 및 강수변동성의 변화 없이 평균 강수량이 40% 감소하는 경우(Figure 9), 강수발생의 계절성은 기후스트레스가 없을 때와 유사하지만 일강수의 크기가 현저히 감소했음을 확인할 수 있다. 평균강수량과 강수변동성이 고정된 상태에서 평균기온이 3℃ 상승한 경우는(Figure 10) 시계열이 전반적으로 상승했음을 알 수 있다. 강수변동성이 40% 증가한 경우(Figure 11)는 총강수량과 강수발생의 계절성은 변하지 않지만 강수크기 변화가 훨씬 커지게 된다.

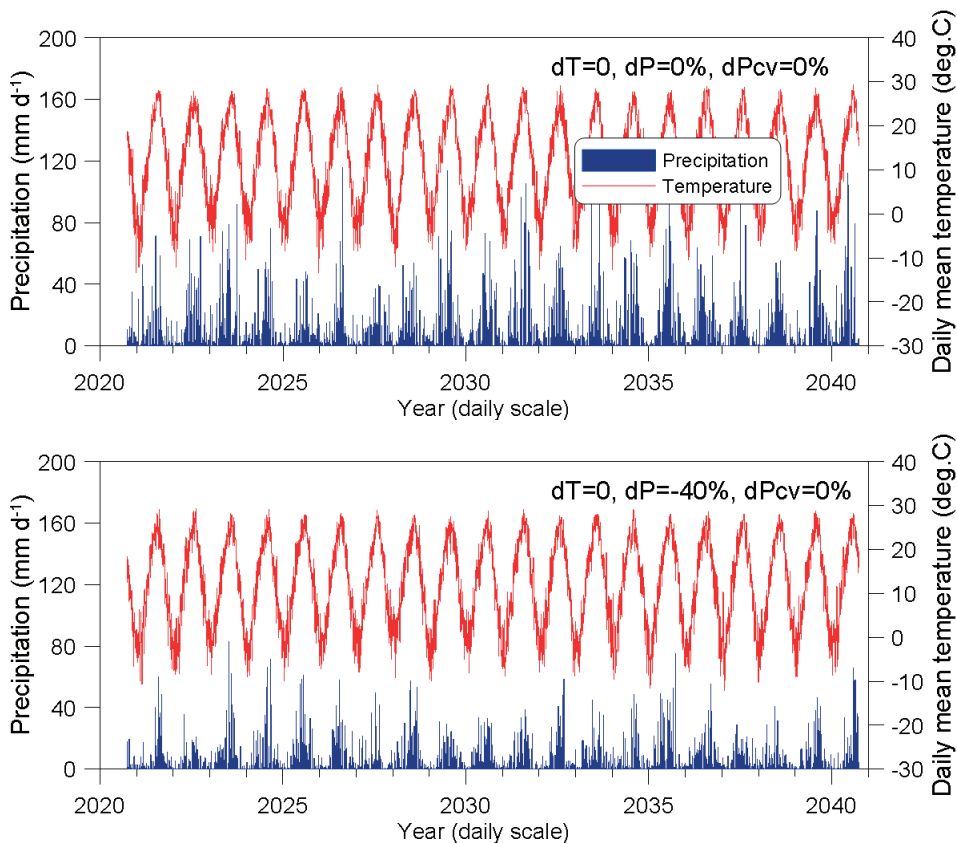


Figure 9. Daily precipitation and temperatures with no climatic stress (top) and with 40% decrease in mean precipitation (bottom)

Figures 9-11의 모의된 일강수량은 1973-2015 기간의 관측 자료에서 얻어진 전이 확률에 의해 발생유무가 결정되기 때문에 관측기간 동안에 나타났던 강수발생 패턴을 벗어나기 어렵다. 따라서 시계열에 가해진 기후 스트레스는 일강수량의 크기는 변화하지만 강수발생 확률은 변화시키지 않는다. 아울러 기온의 경우에도 모형이 연중 전반적인 기온상승을 가정하기 때문에 기후 스트레스가 기온자료의 계절성에는 변화를 주지 않는다. 다시 말하면 시스템 분석을 수행할 때 강수발생 확률과 기온의 계절성은 변하지 않는다는 가정을 해야 한다. 이 가정이 실제 기후와 기상현상과는 다를 수 있지만 관측되지 않은 기상현상을 발생시키는 과정에는 항상 불확실성이 포함될 뿐만 아니라 기후변화와 기상 현상 사이에는 아직 확실히 규명되지 않은 점이 많다. 추계학적 날씨발생에 대한 연구는 여전히 진행 중이라고 할 수 있다(Steinschneider and Brown, 2013).

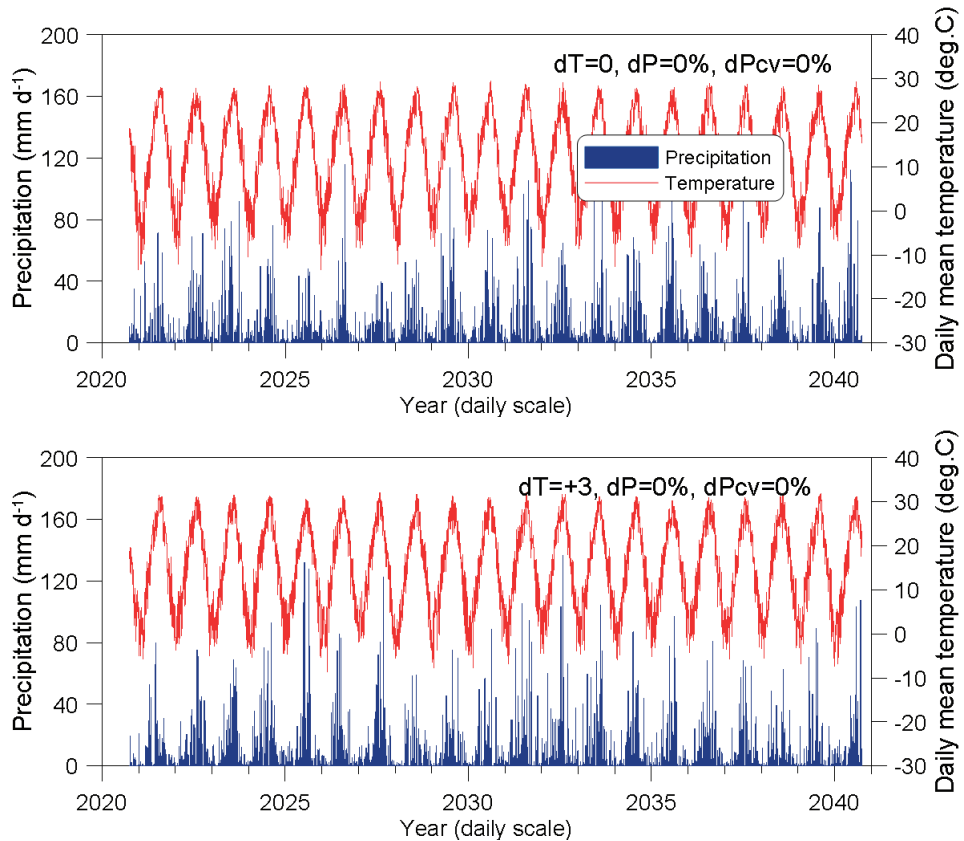


Figure 10. Daily precipitation and temperatures with no climatic stress (top) in comparison to +3 deg.C increase in mean temperature (bottom)

Steinschneider and Brown(2013) 모형 대신에 Wilks(1999)와 같은 모수적인 (parametric) 모형을 이용해 장기간의 일자료를 모의하고 관측의 장기추세를 더하는 방법이 대안이 될 수도 있다. 하지만, Wilks(1999)와 유사한 형태의 모형을 사용할 경우, 장기간 모의를 수행해야 비교적 넓은 기후 스트레스의 범위를 얻을 수 있는데다 중심 극한정리 때문에 20년 평균값들이 정규분포를 따르게 되어 유사한 기후 조건이 반복되어 모의되는 단점이 있다(Moursi et al., 2017). 반면, Steinschneider and Brown(2013) 모형은 사용자가 원하는 기후스트레스를 직접 설정하게 하기 때문에 시스템 분석을 위한 계산량을 조절할 수 있게 한다. 다만, 기후변화가 기상변수들에 독립적인 영향을 줄 것인가에 대해서는 아직 많은 논란이 있다. Prudhomme et al.(2010)은 관측 자료에 나타난 강수량과 기온 사이에 상관성이 비교적 낮기 때문에 각각에 독립적인 스트레스를 가하는 것도 적용할 수 있는 방법의 하나로 보고 있다.

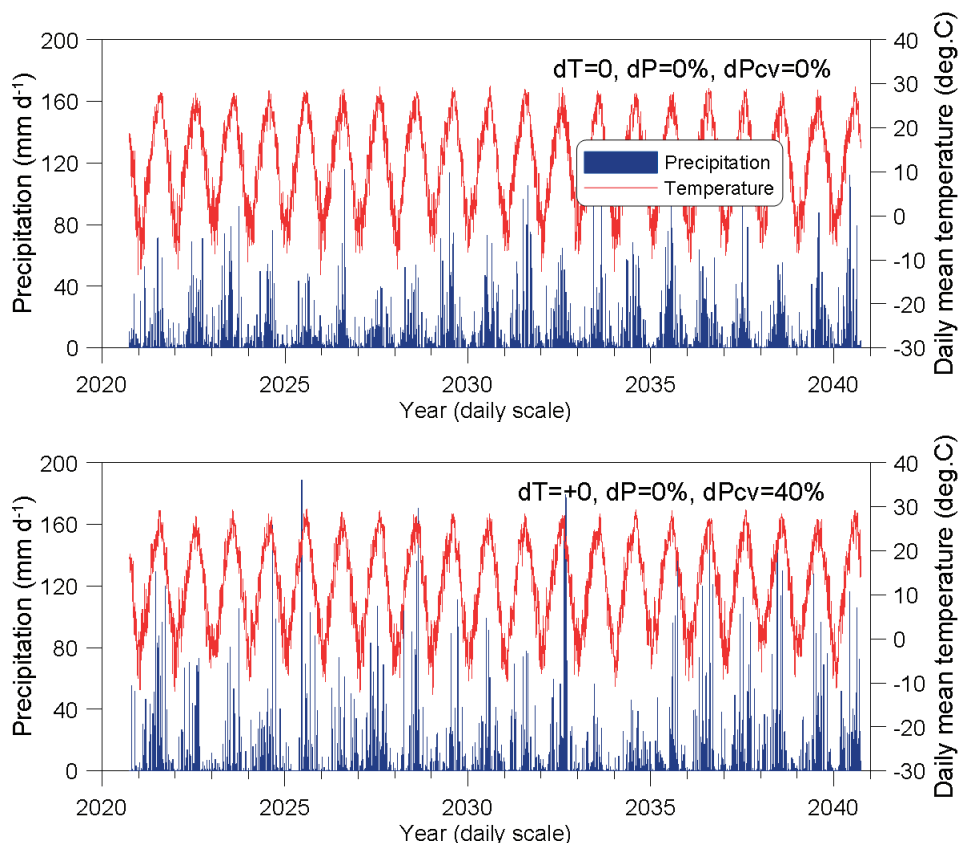


Figure 11. Daily precipitation and temperatures with no climatic stress (top) in comparison to 40% increase in variability of daily precipitation

Figure 12는 발생된 추계학적 일강수, 일최고 및 최저기온의 중권역간 공간상관성을 나타낸다. 추계학적 모형이 관측에서 나타난 공간상관성을 전반적으로 잘 보존하고 있음을 확인할 수 있다. 최고·최저 기온의 경우에는 금강유역 관측 평균과 가정된 변화량을 더하는 방법을 사용했기 때문에 관측에서 나타난 공간상관이 크게 변화하지 않았고 상관계수의 범위도 매우 0.96이상 매우 높은 것으로 나타났다. 반면, 강수의 경우, 중권역간 거리가 멀어질수록 상관성이 떨어지게 되어 상관계수의 범위가 온도보다 훨씬 크게 나타났다. 일강수의 변동성에 스트레스를 가했을 때에는 관측에서 나타났던 공간상관성보다 약간 더 큰 공간상관이 나타나는 것을 확인하였다. Steinschneider and Brown(2013) 모형은 관측에서의 추출을 통해 추계학적 일강수와 일기온을 모의하기 때문에 관측이 가지는 공간상관성을 잘 보존하는 것으로 판단되고, 다만 일강수 변동성에 스트레스를 가하면 관측 공간상관 재현성이 조금 약해지는 것으로 보인다.

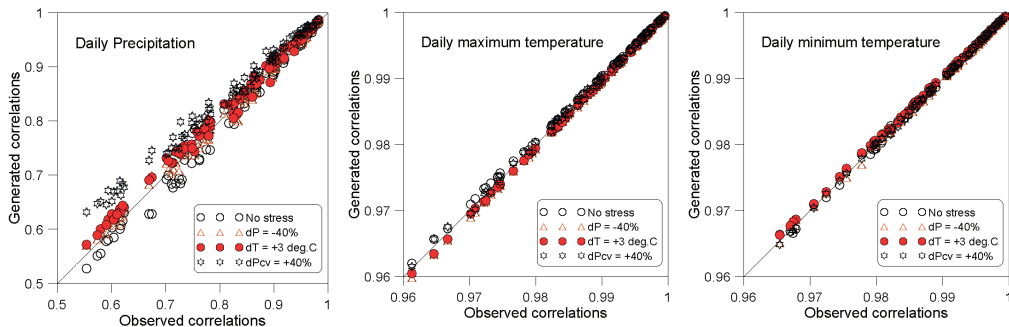


Figure 12. 1:1 scatter plots between observed and generated spatial correlations for precipitation (left), maximum temperature (middle), and minimum temperature (right). Spatial correlations were evaluated with the Pearson correlation coefficients.

4.2 유출모의

Figure 13는 Figures 9-11의 기후스트레스와 대해 모의된 금강유역 총유출량을 기후스트레스가 없는 경우와 비교하여 나타난 240개월간의 시계열이다. 평균 강수량이 40% 감소한 경우에 유출이 가장 많이 감소했음을 쉽게 확인할 수 있다. 평균기온이 3 ℃ 증가한 경우에는 잠재증발산량 증가로 인해 유출의 감소가 예상되지만 이 스트레스에 대해 발생된 강수량이 기후스트레스가 없는 경우에 비해 우연히 약간 크게 발생하여 유출이 스트레스가 없는 경우보다 조금 많게 모의되었다. 추계학적 모형이 가지는 무작위성에

의한 결과로 판단된다. 다시 말하면, 기온 상승에 대한 유출반응의 민감도가 강수량 변화에 비해 작아 때로는 기온상승이 유출에 큰 영향을 주지 않는 경우가 나타나기도 한다. 하지만 전체 343개 기후스트레스를 모두 모아 기온에 대한 유출의 변화를 확인하였을 때에는 강수량의 무작위성이 상당히 제거되어 기온이 올라갈수록 총유출은 일반적으로 감소하는 추세가 얻어졌다. 강수변동성이 증가한 경우에는 월유출의 변동폭이 크게 상승함을 알 수 있다.

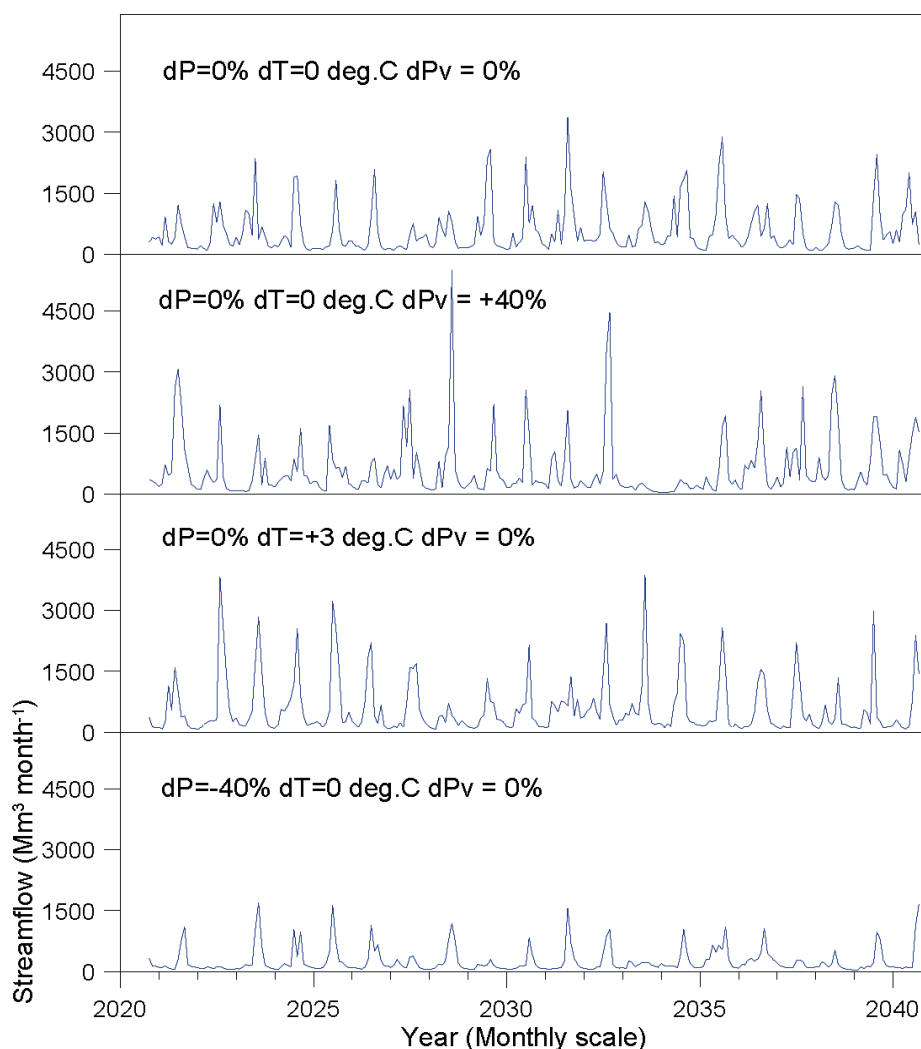


Figure 13. Monthly streamflow simulated by GR4J using the stress-imposed stochastic weathers in comparison to the case under no climatic stress

343개 기후스트레스 모두에 대한 유출모의 결과는 Figure 14에 요약되어 있다. 20년 평균 강수량, 강수변동성, 평균기온은 각각 독립적인 기후 스트레스로 가정되었기 때문에 각 스트레스 사이의 큰 상관성은 발견되지 않는다. 따라서 CRF를 개발할 때 평균강수량, 강수변동성, 평균 기온 사이의 다중공선성(multicollinearity)은 무시할 수 있을 정도의 수준이다. 예상 되는대로 세 기후스트레스 중 유출과 가장 강한 높은 상관성을 보인 변수는 평균 강수량이다. 평균 강수량과 유출량은 사이에는 매우 직접적이고 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 평균 강수량만큼 민감하지는 않지만 강수변동성(Pcv)도 총유출량에 영향을 주는 중요한 요소인 것으로 나타났다. 강수변동성이 커지게 되면 강한 강우사상이 더 빈번히 발생하기 때문에 강우가 유역 내부에 저류되는 시간이 줄어들어 증발산량은 감소하고 직접유출은 늘어나게 된다.

유출모의에 사용된 Oudin et al.(2005)의 잠재증발산량 공식은 extraterrestrial solar radiation과 평균기온의 함수이기 때문에 강수량에 관계없이 평균기온과 선형적인 관계를 갖게 된다. 하지만 실증발산량(ET)은 강수량과 잠재증발량 둘 모두에 영향을 받는다. 실증발산량을 조절하는 수문학적 변수는 토양수분(유역 수분함량)과 잠재증발산(기상학적 증발수요)이기 때문이다. 토양수분이 제한적인 경우에는 증발산량은 토양수분량에 의해 제한되고 반대로 토양수분이 많은 경우에는 잠재증발산량이 증발산량을 제한하게 된다. 따라서 토양수분에 영향을 주는 강수량과 잠재증발산량을 결정하는 평균기온 모두에 실증발산량은 영향을 받게 된다. Figure 14에서도 평균 강수량이 증가함에 따라 (토양수분이 증가함에 따라) 증발산량이 증가하다가 평균 강수량이 일정수준에 도달하면 오히려 증발산량은 감소함을 알 수 있다. 토양수분은 충분하지만 잠재증발산량이 상대적으로 낮은 경우이다. 마찬가지로, 잠재증발산량은 증가하지만 증발산량은 감소하는 경우도 나타나는데, 이는 반대로 잠재증발산량은 충분하나 토양수분이 부족한 경우이다. 앞서 설명한대로 큰 강우사상이 빈번하게 나타나면 직접유출이 증가하게 되어 증발산량은 상대적으로 줄게 된다. 따라서 강수변동성이 커질수록 증발산량이 감소함을 확인할 수 있다.

요약하면, 유출에 가장 밀접하고 강한 영향을 미치는 변수는 강수량이다. 강수량의 평균과 변동성이 증가할수록 유출률은 높아진다. 평균기온이 높아질수록 잠재증발산량이 증가하여 유출이 감소하는 경향을 보이지만, 실제 증발산량은 강수량과 평균기온 모두에

영향을 받기 때문에 강수량이 주는 영향보다는 덜 민감하다. 정도의 차이는 있지만, 세 기후 스트레스 모두 유출에 중요한 영향을 미치는 것으로 보이고 따라서 모두 유역 수자원 운영에 영향을 미치는 주요 기후인자가 될 수 있다.

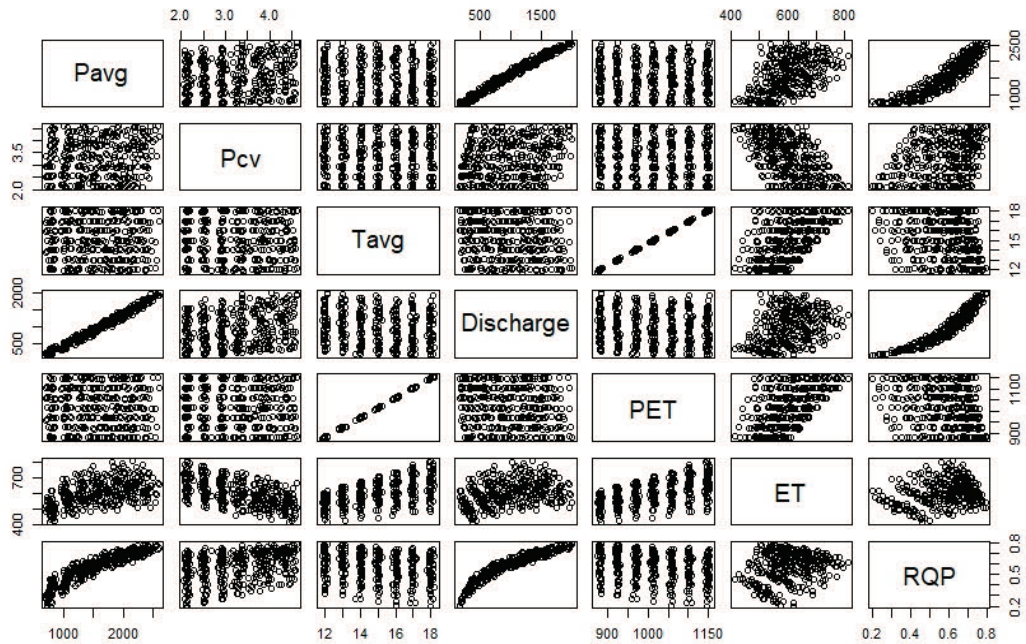


Figure 14. Scatter plots between mean annual precipitation (Pavg), coefficient of variation in daily precipitation (Pcv), mean annual temperature (Tavg), total runoff (Discharge), potential evapotranspiration (PET), actual evapotranspiration (ET), and Runoff ratio (RQP) gained from the 343 climatic stresses and GR4J simulations. Pavg, Tavg, Discharge, PET, and ET are in mm, and Pcv and RQP are unitless.

4.3 수자원 운영 최적화

본 연구에서 기후스트레스의 영향을 받는 변수는 자연 유출량뿐이다. 물론 수요의 경우에도 기후조건의 영향을 받기는 하지만 여러 사회경제적 요인이 함께 영향을 주기 때문에 기후변화의 영향만을 받는다고 보기 어렵고, 이에 따라 기후인자와의 상관성은 떨어진다. 농경지역의 단위면적당 기상학적 수요량(잠재증발산량)은 기온상승에 의해 증가할 것으로 예상되기는 하지만 증가하는 대기 이산화탄소로 인해 작물 반응이 변하고 있을 뿐 아니라 경지면적이 줄어들고 있어 수자원 장기종합계획(2011)에서는 농업용수 수

요가 줄어들 것으로 보고 있다. 뿐만 아니라 주요 생산품인 쌀의 경우, 수요에 비해 생산이 과도한 상태라 생산을 줄이는 방향으로 현재 정부정책이 제안되고 있다. 생공용수 역시 인구, 경제정책 등에 영향을 많이 받기 때문에 기후스트레스의 함수만으로 나타내기 어렵다. 따라서 본 연구의 초점은 기후 스트레스에 민감하게 영향을 받는 자연유출이 고수요와 기준수요 시나리오를 만족시킬 수 있을 것인가에 맞춰져 있다.

선택된 몇 개의 추계학적 기후스트레스에 대해 자연유출량이 현재의 금강유역 시스템을 안에서 중권역별 기준수요 전망을 만족시킬 수 있는지는 Figure 15에서 확인할 수 있다. 비현실적으로 큰 기후스트레스이기는 하지만 2020-2039년 동안 관측치보다 연평균강수량이 대략 40% 감소하고 평균기온이 2 °C 상승하게 되면 20년간 총 수요(ν)의 21.2%를 만족시킬 수 없게 된다. 월수요의 95%를 만족시킬 확률(ρ)은 0.22로 240개월 중 185개월은 물 부족상태에 있게 된다. 금강유역에서 황해로 유출되는 양은 통상 100 Mm³ 이하가 될 것으로 예상된다. 물 부족이 시작되면 대략 2년 이상 지속될 가능성이 높고 심하면 수요에 비해 공급이 60%이상 부족한 상태가 2개월 이상 지속될 수 있다. 금강유역의 총저수율은 20% 이하가 되는 경우가 대부분이며 최대 40%를 넘지 못하게 된다. 이 결과는 최적화된 수자원 분배를 전제로 얻어진 것이기 때문에 실제로 이 정도 크기의 기후스트레스가 현실화 되었을 때에는, 더욱 심각한 물 부족을 겪게 될 가능성이 있다.

연평균강수량이 20% 감소하고, 연평균기온이 1 °C 증가한 경우, 월 수요의 95%를 만족시킬 확률은 대략 91%(240개월 중 218개월), 20년 총수요에 대한 부족량은 1% 정도 모의되었다. 연강수량이 40% 줄어든 경우와 비교했을 때 물 부족의 빈도와 크기는 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 1 °C 차이의 평균기온보다는 20% 증가한 강수량이 주요 원인이다. 유역의 총저수율은 통상 50%가 넘고 심한 가뭄이 지속되었을 때에도 20% 이하로 떨어지지 않을 것으로 보인다. 가장 높은 경우 저수율은 대략 80%이다. 황해로 흘러나가는 유출의 크기도 크게 증가함을 확인할 수 있다.

연강수량의 감소가 없고 연평균기온 증가가 없는 경우, 최적 수자원 운영이 이루어질 경우 물 부족은 거의 일어나지 않을 것으로 보인다. 분석과정에서 0.1%의 물 부족이 나타나기는 하였지만 최적화를 좀 더 정밀하게 하면 무시할 수 있는 수준이다. 다시 말하면 1973-2015 기간 동안 통상적으로 관측된 일 강수량 및 기온이 2020-2039 기간

동안 반복된다면 공급이 수요에 비해 부족한 경우는 사실상 없다고 봐도 무방하다. 유역의 저수율은 항상 70%를 넘고 물 부족보다는 과잉을 걱정해야 하는 수준이다. 이 결과는 수자원 운영이 최적으로 이루어진다면 금강유역에서 현재까지 관측된 기후조건에 대해서는 자연적인 수자원 공급량이 수요를 충족시키고 남는다는 의미이다.

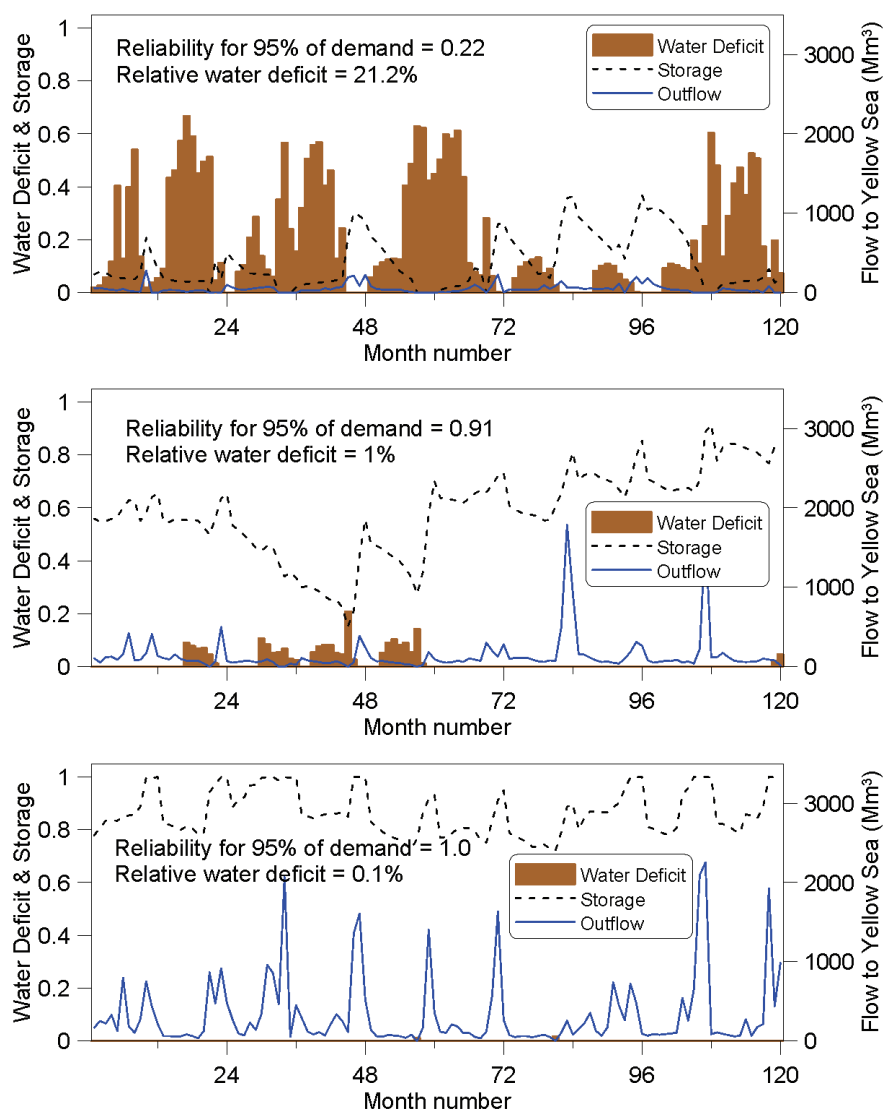


Figure 15. Water deficit and storage rate, and outflow from the Geum River Basin to the Yellow sea gained from IDP optimizations with stress-imposed runoff time series for 40% decrease in P_{avg} and 2 deg.C increase in T_{avg} (top), 20% decrease in P_{avg} and 1 deg.C increase in T_{avg} (middle), and 0% decrease in P_{avg} and 0 deg.C increase in T_{avg} (bottom)

Figure 16은 Figure 15의 세 기후스트레스에 대한 용담댐, 대청댐, 중권역의 최적 저수량 시계열이다. 연평균강수량이 40% 감소하고 기온이 2 ℃ 증가한 경우, 최적 운영을 위해 용담댐은 상시적으로 비워져야 하고 저수능력이 더 큰 대청댐에서 주로 저수가 이루어져야 함을 확인할 수 있다. 최적 수자원 배분을 위해 중권역 내 농업용저수지들은 매우 중요한 역할을 한다. 많은 농경지역이 금강본류의 상류지역에 위치하기 때문에 저수지가 가지는 의미는 매우 크다. 연평균 강수량은 커지고 평균기온이 낮아질수록 IDP에 의한 최적운영은 용담댐의 저수량을 늘리는 방향으로 나타났다. 기후스트레스가 없는 경우, 대청댐의 건기 저수량은 홍수기 최대저류용량보다 통상적으로 커진다. 이는 금강 유역 하천망 안에서 최적 수자원 공급을 이루기 위해서는 규모면에서 더 유연한 대처가 가능한 대청댐의 저수량을 높이는 것이 중요함을 의미한다. 또한 각 중권역의 농업용저수지 저수량이 미치는 영향이 상당하기 때문에 수자원 운영에서 중요하게 고려되어야 할 부분임을 확인할 수 있다.

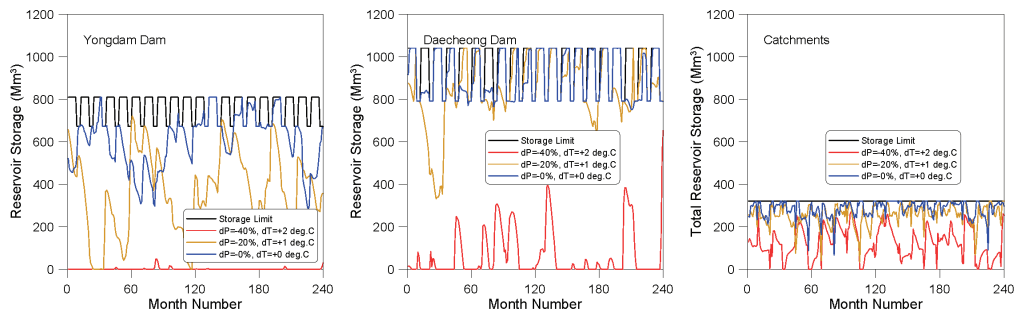


Figure 16. Water Storage in Yongdam Dam (left), Daechong Dam (middle), and Catchments (right) under each climatic stress in Figure 16.

4.4 기후반응 함수(CRF) 개발 및 기후변화 영향평가

추계학적으로 모의된 343개 기후스트레스 모두에 대해 IDP 분석에서 얻어진 기후스트레스와(ρ , ν)의 관계를 Figure 17에 요약하였다. 예상대로 세 기후스트레스 중 유출과 가장 큰 상관성을 보였던 평균 강수량이(ρ , ν) 모두와 가장 큰 상관을 보인다. 연평균 강수량이 대략 1,200mm가 넘을 경우, 강수변동성이나 평균기온과 상관없이(ρ , ν)는 각각 1과 0으로 수렴된다. 20년 평균 강수량이 대략 1,200mm가 넘을 경우 기온과 강수변동성의 크기와는 상관없이 물 부족은 0이 되고 월수요량의 95%는 항상 만족된다는 의미이다. 강수변동성과 평균기온의 변화도 자연유출에 영향을 미치는 요소이기 때문에(ρ , ν)에 영향을 주지만 중권역, 대청댐, 용담댐의 저수효과 때문에 그 영향이 강수량의 영향에 비해서는 비교적 작다.

고수요와 기준수요 시나리오 사이의 수요량 차이는 유출에 비해 상당히 작은 수준이기 때문에 두 수요시나리오의(ρ , ν) 차이는 육안으로 구별할 수 없는 정도이다. 하지만 기준수요 시나리오의 수요량이 더 작기 때문에 고수요 시나리오보다 ρ 값은 근소하게 더 크고 ν 값은 근소하게 더 작다. 두 시나리오 사이의(ρ , ν) 값 차이는 2% 이내이다.

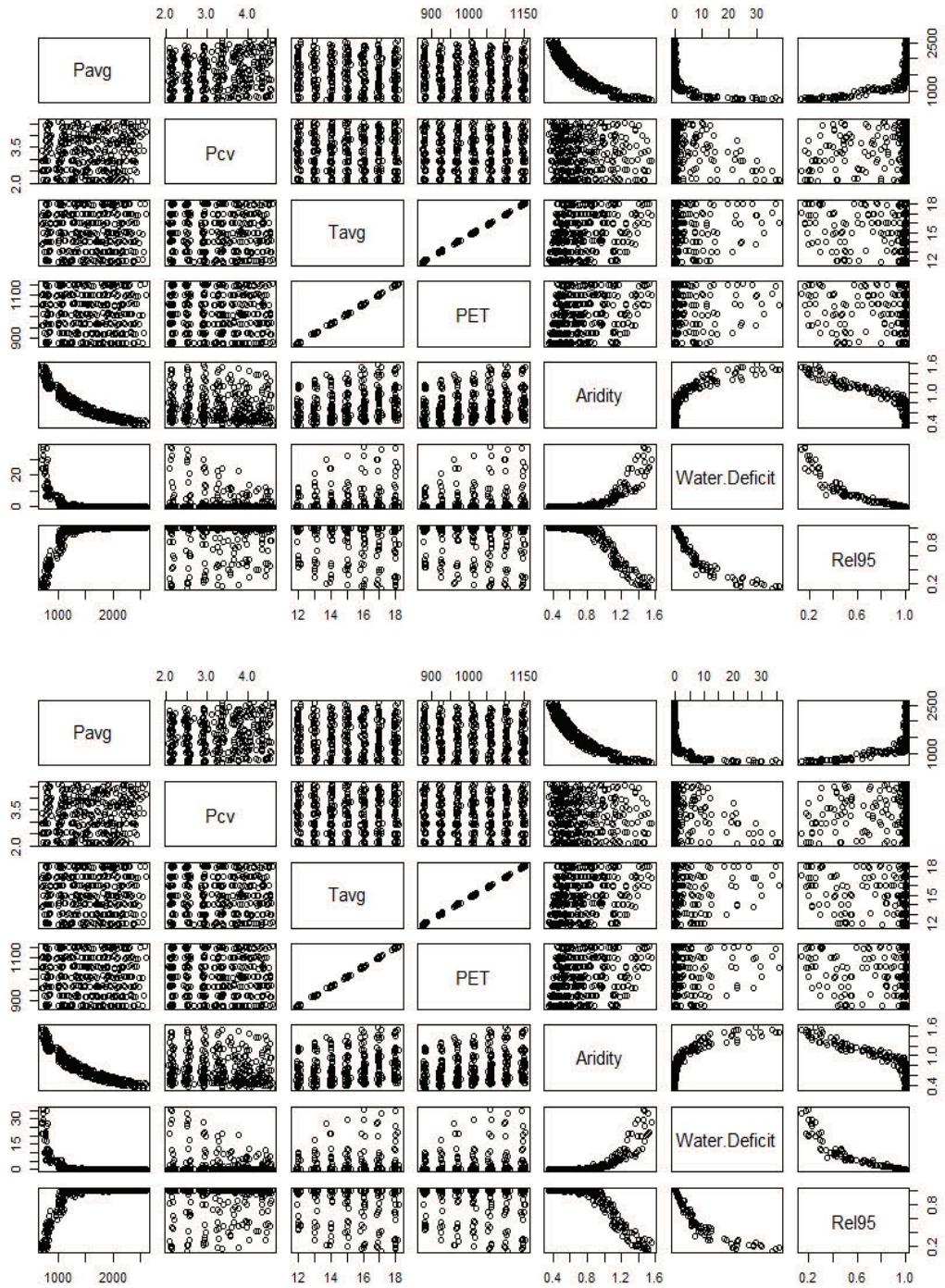


Figure 17. Scatter plots between Pavg, Pcv, Tavg, PET, Aridity (PET over Pavg), Water Deficit (v), and Reliability for 95% demand (ρ) gained from IDP optimizations under high demand (top) and standard demand (bottom) scenarios

기후반응함수(CRF)를 개발할 때는 기후스트레스에(ρ , ν) 값이 반응하지 않는 구간의 샘플을 이용할 필요는 없다. 따라서 CRF 개발을 위해 기후스트레스에 비교적 큰 변화를 나타냈던 $\rho < 0.95$ 의 89개 샘플만을 추려내어 다중회귀분석을 수행하였다. (ρ , ν)와 20년 연평균강수량(P_{avg}) 및 평균기온(T_{avg}) 사이의 다중회귀분석 결과는 Table 5와 Table 6에 각각 요약하였다. 앞서 설명한 대로 잔차의 정규화를 위해 ν 에 대한 회귀분석에는 로그변환이 적용되었다. 다중회귀분석을 수행할 때 유출 변화에 상당한 영향을 주는 것으로 분석된 강수변동성(P_{cv})을 독립변수로 추가해 분석하였으나 의미 있는 설명력을 보이지 않아 독립변수에서 제외하였다. 강수변동성이 증가해 유출이 늘어난다 하더라도 홍수기에 그 효과가 크기 때문에 P_{cv} 가 변하지 않는 경우와 비교했을 때 수요를 만족시키는 정도는 유사하기 때문으로 보인다. 반면, 기온이 증가하는 경우에는 유역 전반에서 증발산량이 증가하는 요인이 되어 물 부족의 크기를 증폭시키는 것으로 확인되었다. 결과적으로 20년 평균 강수량과 평균기온 두 개의 독립변수만으로(ρ , ν)의 변동성의 85% 이상을 설명할 수 있는 것으로 확인하였다.

Table 5. Results of the multiple regressions between the reliability (ρ) and climatic stresses

	Intersect	coefficient for P_{avg}	coefficient for T_{avg}	R^2
High demand	-0.292	0.00156	-0.0372	0.907
Standard demand	-0.307	0.00157	-0.0358	0.891

Table 6. Results of the multiple regressions between the relative water deficit (ν) and climatic stresses. Logarithmic transformation was applied to the dependent variable.

	Intersect	coefficient for P_{avg}	coefficient for T_{avg}	R^2
High demand	5.392	-0.00662	0.163	0.886
Standard demand	5.315	-0.00666	0.159	0.869

Figure 18는 다중회귀분석으로 얻어진 CRF를 이용해 기후 스트레스와(ρ , ν)의 관계를 등치선도로 나타낸 것이다. 변화량의 기준으로 1996-2015년 동안의 금강유역 평균 값인 1,325mm 와 12.2 °C를 사용하였다. 고수요 및 기준수요 시나리오 모두에 대해 20년 연평균강수량이 대략 15% 정도 줄어들어야 ρ 값이 1보다 작아지기 시작함을 알 수 있다. 약 1,200mm 이상에서는 기온과 강수변동성에 상관없이 월수요의 95%를 100% 확률로 만족시켰던 시스템 분석 결과를 잘 반영한다. 월수요 95%에 대한 공급 신뢰도(ρ)값에 대한 고수요와 기준수요 시나리오의 CRF는 거의 차이가 없어 보이지만

고수요 시나리오의 CRF 등치선도가 미세하게 오른쪽으로 치우쳐져 있는 것을 알 수 있다. 고수요 시나리오의 수요량이 기준수요보다 크기 때문에 ρ 값이 좀 더 작게 나타나는 것이 당연하다.

물 부족(ν)에 대한 CRF는 고수요시나리오가 기후스트레스에 좀 더 민감하게 반응한다. 고수요 시나리오 등치선도의 간격이 저수요 시나리오 등치선도의 간격보다 좀 더 촘촘한 것을 볼 수 있다. 고수요 시나리오에서는 평균강수량 40% 감소, 평균기온 2 °C 증가했을 때 6.0% 이상의 물 부족이 나타난다. 반면 기준수요 시나리오의 경우 같은 스트레스에 대해 5.0% 정도의 물 부족이 나타나게 되는 것을 확인할 수 있다. 수요량이 작은 기준수요 시나리오의 경우가 물부족 CRF에 대해 약간이기는 하지만 기후스트레스에 덜 민감한 것을 알 수 있다.

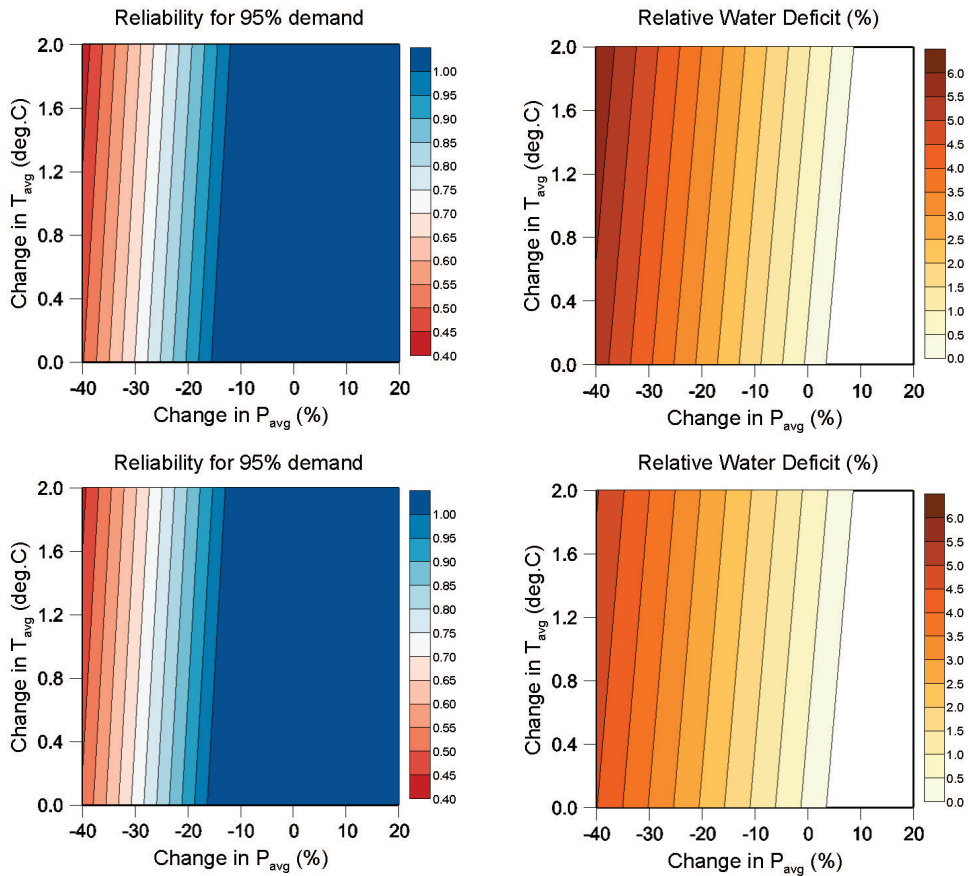


Figure 18. Contoured CRF for ρ (left) and ν (right) under high demand (top) and standard demand (bottom) scenarios

CRF의(ρ , ν) 값은 시스템 분석에서 얻어진 값들과는 당연히 차이가 난다. 예를 들면, 평균강수량 40% 감소, 평균기온 2 °C 증가에 대한 시스템 분석 결과(Figure 15)의 ν 값은 22% 이지만 CRF로는 대략 6.5% 정도이다. 이는 시스템 분석에는 무작위성이 개입되지만 CRF는 그 무작위성을 제거하고 기후스트레스의 영향만을 고려하기 때문이다. ν CRF의 경우에는 로그변환이 포함되어 있어 시스템분석과의 차이가 좀 더 클 수 있다.

Figure 19는 ρ 와 ν CRF 위에 수집된 2020-2039기간 GCM 기후전망 값을 함께 표시한 그림이다. 총 49개 기후전망(CMCC-CMS모형은 RCP8.5만 적용)이 나타내는 ρ 와 ν 값을 아주 간단히 4개의 그래프에 요약하고 있다. 이를 통해 복잡한 추계학적 분석, GCM 기후전망이 주는 많은 정보가 집약적으로 표현된다. 49개 기후전망은 비교적 넓게 분포하고 있어 GCM이 가지는 불확실성이 상당함을 의미한다. 따라서 한 두 개의 GCM에 의존하는 기후변화 적응 정책이나 영향평가의 신뢰도는 낮을 수 있음을 기억해야 한다. GCM의 큰 불확실성은 forcing 자료의 불확실성, 구름의 피드백작용, 초기조건, 그 외에 아직 확실히 밝혀지지 않은 물리적 요인이 결합되어 발생 하는 것으로 알려져 있다(Stainforth et al., 2005; Dufresne and Bony, 2008; Deser et al., 2012; New and Hulme, 2000).

2020-2039에 대한 GCM 기후전망 49개중 ρ 값이 1 이하로 떨어질 것으로 예상하는 모형은 없다. 최악의 기후변화 시나리오인 IPSL-CM5B-LR 모형의 RCP8.5 시나리오에 대한 기후전망으로 1996-2015 동안에 비해 2020-2039 동안의 연평균강수량은 약 11.2% 감소, 평균기온은 0.9 °C 증가할 것으로 전망하고 있다. 이정도 기후스트레스에 대해서는 최적운영이 이루어질 경우, 다른 임의적인 영향이 없다면 월수요 95%를 100% 확률로 만족시킬 것으로 보인다. 물 부족(ν)은 고수요 시나리오에 대해 3%, 기준수요 시나리오에 대해 2%를 넘지 않을 것으로 예상된다. 정리하면 GCM의 변동성은 매우 크지만 대부분의 GCM은 금강유역의 물 부족이 심하게 커질 것으로 예상하지 않고 있다. 50개 GCM의 양상불 값은 ρ 는 1, ν 는 1-1.5% 정도를 전망하고 있다. 이 전망치는 물론 금강유역의 월 단위 수자원 운영이 물 부족율과 저수율 사이에서 최적으로 이루어질 때를 전제한 결과이다.

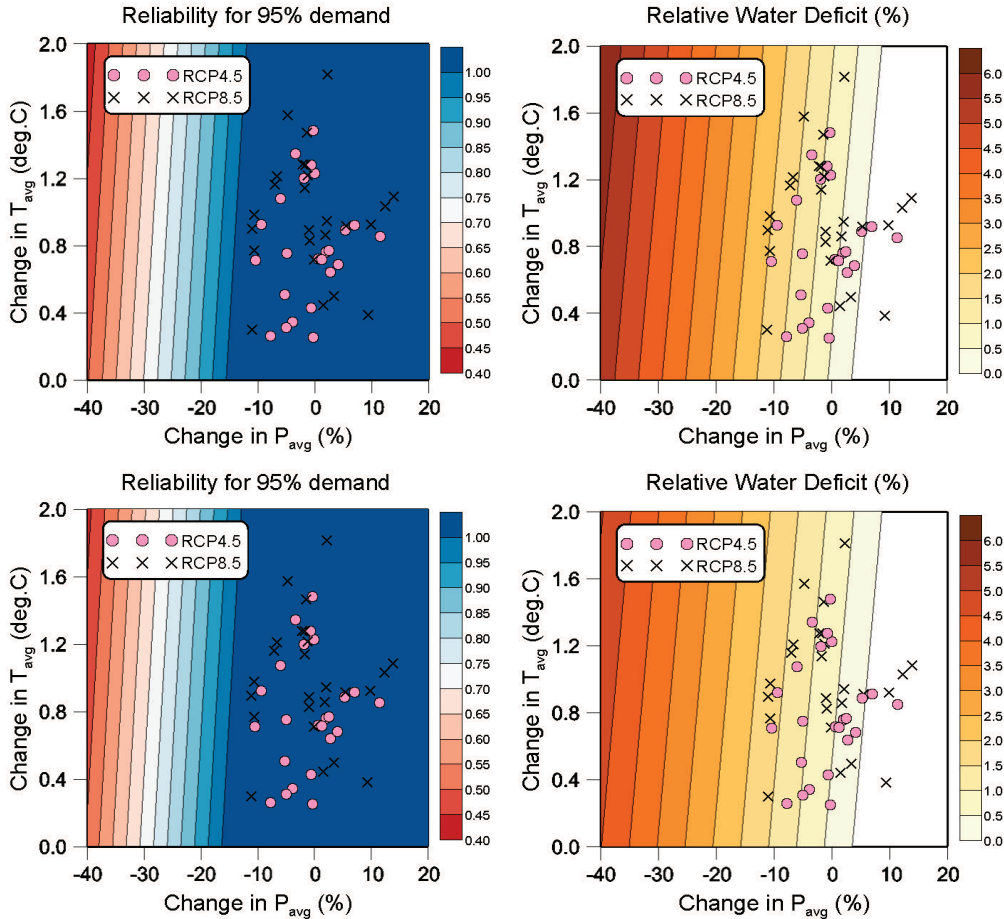


Figure 19. Contoured CRF for ρ (left) and ν (right) under high demand (top) and standard demand (bottom) scenarios superimposed by the GCM projections

4.5 기후스트레스 대응 댐 및 저수지 운영

현재 기후조건 하에서 최적 수자원 배분이 이루어질 경우 금강유역의 물 부족은 그다지 크지 않음이 시스템 분석에서 확인되었다. 하지만 2020-2039년 GCM 기후전망으로 판단했을 때 평균 강수량이 15-20% 감소하는 정도의 기후스트레스에는 대응할 수 있는 댐 및 저수지 운영에 대해서는 논할 필요가 있다.

평균 강수량이 20% 감소하고 평균기온의 변화가 없는 스트레스에 대해 시스템 분석에서 얻어진 저수지 및 댐 운영방식을 Figure 20에 기후 스트레스가 없는 경우와 비교하

여 나타내었다. 수요량이 가장 큰 중권역인 미호천(3011) 유역의 저수지 운영방식을 함께 포함하였다. 평균 강수량이 20% 줄어들어 유출이 감소하는 경우, 건기(10-5월)에는 용담댐에서 60-110Mm³ 정도를 방류해야 한다. 이때 대청댐에서는 90Mm³ 정도를 하류에 방류해야 최적 운영에 가까워진다. 우기(6-9월)에는 자연유출이 많아지기 때문에 용담댐 저류량을 좀 더 늘리고 50Mm³ 정도로 방류량을 줄이는 것이 최적운영이다. 홍수기에 대청댐에는 통상 유효저수용량보다 더 많은 물이 가용하게 되어 수자원 배분 보다는 홍수대비를 위한 운영에 집중해야할 것으로 보인다. 하지만 우기에 저수용량보다 가용량이 적을 때에는 대략 120-180Mm³ 사이에서 방류량이 결정되어야 한다.

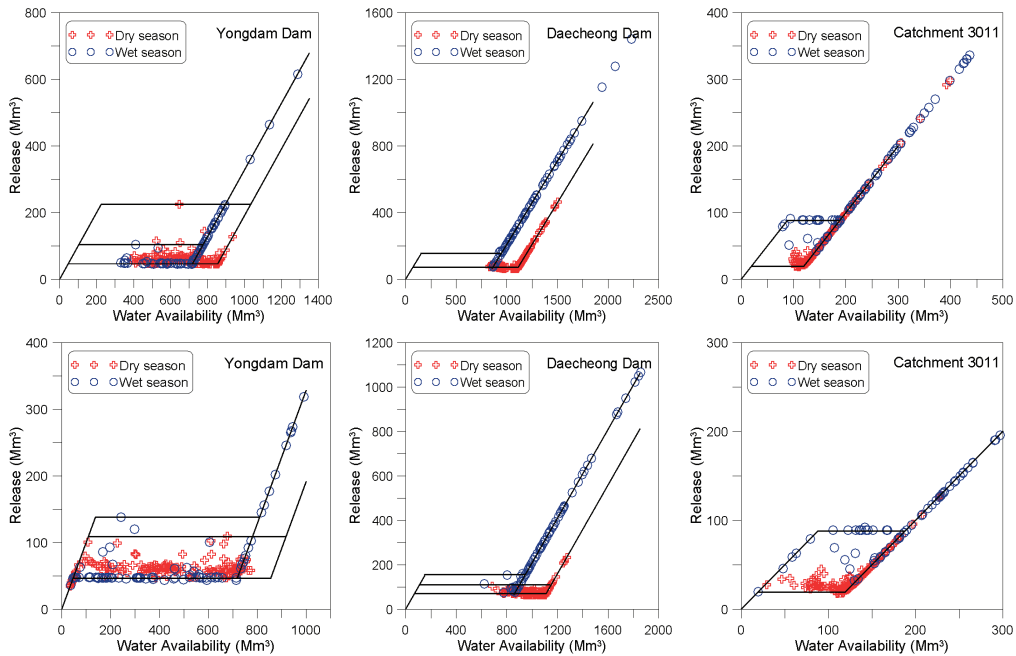


Figure 20. Proposed reservoir operating rule under no climatic stresses (top) and 20% decrease in P_{avg} (bottom) for Yongdam Dam (left), Daecheong Dam (middle), and Miho Creek (right)

기후스트레스가 없을 때에는 용담댐의 방류량을 50Mm³ 정도로 줄여 저수량을 더 확보하는 것이 최적 운영에 가깝고, 이 때 대청댐은 상시적으로 물이 가득해 지는 것을 알 수 있다. 물론 이 경우에도 당연히 홍수대비를 위한 운영이 더 중요하다. 한편, 우기에 미호천 유역의 가용량이 제한적인 경우 농업용저수지 방류량의 총합은 대략 90Mm³ 로 제시되고

있다. 미호천 유역의 우기 최대 농업용수 수요는 월 140Mm^3 이고 이중 $90\text{Mm}^3(65\%)$ 가 요구되는 관개용수이기 때문에 표준 선형 저수지운영(Standard Linear Operating Policy)이 최적 운영으로 제시되고 있다. 건기에는 평균 강수량이 20% 정도 감소하는 경우, 저수지 방류량의 총합 $25\text{--}50\text{Mm}^3$ 정도로 결정되는 것이 최적에 가깝다.

4.6 시사점 및 한계점

본 연구에서 사용된 decision-scaling 방법은 기후 스트레스에 대한 시스템의 반응을 먼저 분석한 후, GCM 기후변화 전망이 시스템의 효율에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 때문에 많은 자료를 의사결정변수를 기준으로 통합하는 장점이 있다. 예를 들어 월수요 95%를 시스템이 만족시키는지 여부가 금강유역의 추가적인 댐 건설을 위한 기준이라면 GCM 전망으로는 추가 건설이 필요 없어 보인다. 금강유역 하천 연결구조와 저수능력을 고려했을 때 2020-2039에 심한 물 부족이 발생한다면 평균 강수량이나 평균 기온의 변화가 원인이기 보다는 본 연구에서는 고려하지 않은(혹은 임의적인 것으로 가정된) 다른 원인 때문이거나 최적 운영이 이루어지지 않아서일 확률이 높다. 금강유역에 요구되는 수요량은 자연공급량에 비해 비교적 크지 않고 2020-2039 기간에 예상되는 기후 스트레스는 수자원 운영에 그렇게 심각한 영향을 주지 않을 가능성이 커 보인다. Decision-scaling의 장점은 이렇게 의사결정자가 중요하게 생각하는 변수가 기후변화에 어떤 영향을 받는지 한눈에 알아볼 수 있게 한다는 점이다. 이에 반해 전형적인 하향식 영향평가는 제공되는 정보를 의사결정을 위해 통합하기가 쉽지 않을 뿐 아니라 소수의 GCM만을 이용하는 경우가 많아 의사결정자가 가지는 위험부담이 매우 클 수밖에 없다. 아울러 의사결정 중심의 상향식 영향평가는 복잡한 시스템에 대해서도 충분히 적용 가능한 것을 확인하였다(Turner et al., 2014).

하지만 본 연구에는 몇 가지 한계점이 있다. 첫째로 본 연구는 최적운영에 초점을 맞춘 분석이기 때문에 수자원 운영이 최적으로 이루어지지 않았을 때는 다른 결론에 이를 수 있다. 정책결정자는 유연성이 떨어지는 최적운영방법 1개보다 실제로 적용이 가능한 여러 개의 최적에 근사한 운영을 선호할 수 있다(Rosenberg, 2015). 이를 고려하기 위해서는 최적기반 상향식 분석을 수정해야 한다. 여러 가지 운영방법 중 어떤 것을 선택해야 하는지, 그 선택이 의사결정 변수에는 어떤 영향을 미치게 되는지 확인하기 위해서는

추가적인 연구가 필요하다. 아울러, 본 연구에서는 금강유역과 광역상수도망으로 연결된 타 수계와의 수요-공급 관계를 외부수요의 개념으로 축소 적용하였다. 좀 더 현실적인 해석을 위해서는 외부 유역의 유출량을 충분히 고려해야할 것으로 판단된다. 한국은 태풍이 홍수와 가뭄위험에 크게 영향을 주는 경우가 많기 때문에 태풍 사상의 특성을 고려한 평가도 필요할 것으로 보인다. 마지막으로, 본 연구에서는 생공용수와 농업용수만을 고려한 자원배분을 수행하였다. 하지만 생태계 보존을 위한 수요 또한 의사결정에 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에(Momblanch et al., 2016) 향후 연구에는 이를 함께 고려한 분석이 필요할 것으로 보인다(e.g., Poff et al., 2016). 수자원은 사람뿐만 아니라 생태계 전체에 필수적인 자원이기 때문이다.

5. 요약 및 결론

이미 지구온난화는 물 부족을 심각하게 만드는 중요한 스트레스 요인으로 여겨지고 있다. 기후변화를 대비하기 위한 비구조적 적응책은 결국 주어진 기후스트레스 내에서 수자원 배분을 효율적으로 이루어내는 것이다. 효율적 수자원 운영은 기후변화의 영향을 최소화하여 경제활동과 농업생산을 유지시키는데 중요한 역할을 한다. 하지만 온실가스 증가에 대한 대기의 반응은 아직 명확히 규명되지 않은 점이 많기 때문에 소수의 확정론적 GCM 기후전망에 최적화된 수자원 운영을 현실에 적용하기는 쉽지 않다.

본 연구에서는 수자원 시스템의 운영효율과 임의적 기후스트레스의 관계를 먼저 규명하고 시스템의 기후 스트레스에 대한 민감도를 평가하는 ‘robust’ 의사결정을 위한 기후 변화 영향평가를 수행하였다. 2개의 다목적 댐이 직렬로 연결된 금강유역에 대해 월수요의 95%에 대한 공급 신뢰도와 총 물 부족의 크기를 추계학적 기후스트레스를 이용해 평가하였고 연평균 강수량이 12% 이상 감소하지 않을 경우 공급신뢰도는 줄어들지 않을 것으로 확인되었다. 금강유역은 CMIP5 RCP4.5와 RCP8.5 온실가스 배출 시나리오 모두에 대해 2020-2039년 20년 동안 금강유역 시스템은 안정적으로 월수요 95%를 만족시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 분석에 사용된 49개 GCM 중 가장 좋지 않은 기후전망에 대해서도 20년 총수요대비 물 부족은 2.5%를 넘지 않을 것으로 평가되었다. 평균 강수량이 20% 감소하는 스트레스에 대한 최적운영은 용담댐의 저수량을 줄이고 하류에 있는 용량이 더 큰 대청댐의 저수량을 늘려 자원 운영의 유연성을 늘리는 것이었다. 이 평가는 관리자가 수자원 공급과 저수 사이에서 균형을 이루며 자원 배분을 최적으로 이루어 낸다는 가정 하에 이루어 졌다.

본 연구를 통해 얻어진 중요한 결론 중 하나는 금강 유역에서는 단순히 저수량과 공급량 사이에서 균형을 잡고 최적에 가까운 운영을 이루기만 하면 기후변화 영향을 크게 받지 않고 물 부족을 최소화할 수 있다는 점이다. 다시 말하면 수자원 최적 운영을 하려는 상시적인 노력 자체가 기후스트레스에 대한 민감도를 낮추는 방법인 것이다. 본 연구에서는 예측에 크게 의존하는 수자원 운영방식을 제시하지 않는다. 예측에 초점을 맞춘 수자원 운영은 그 예측이 빗나갔을 때 최적 운영이 될 수가 없고 오히려 손실을 일으킬 가능성이 있다. 대신 본 연구는 의사결정을 위한 기준을 크게 감소시키지 않는 기후 스트레스의 크기를 결정하고 여러 GCM에 의해 전망되는 시스템 효율 값을 제시한다. 물론

본 연구에 사용된 CRF에도 불확실성이 내재하고 있고 기후스트레스에 대응하기 위한 기준을 설정해야 하지만 의사결정중심 기후변화 영향평가는 ‘predict-then-act’ 패러다임보다 정책결정자가 가지는 부담을 줄여주는 장점이 있다.

본 연구의 한계점 중 하나는 유역환경유지에 필요한 수요량을 고려하지 않은 점이다. 수자원은 인간 활동뿐만 아니라 생태계 유지를 위한 필수요소이기 때문에 지속가능한 수자원 정책개발을 추가적으로 고려되어야 할 것이다. 기후 변화와 사회경제적 변화를 동시에 고려하여 좀 더 현실적인 연구를 기대한다.

REFERENCES

- 국토교통부, 2016: 수자원장기종합계획(2001-2020). 3차 수정계획. 발간등록번호 11-1613000-001716-13.
- 국토교통부/환경부, 2014: 상수도 수요량 예측 업무편람. 한국수자원공사/한국환경공단.
- Adgar, W.N., N.W. Arnell, and E.L. Tompkins, 2005: Successful adaptation to climate change across scales. *Glob. Environ. Chang.* 15, 77-86.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirement, FAO Irrig. Drain., Paper No. 56, Food and Agr. Orgn. of the United Nations, Rome.
- Apipattanavis, S., G. Podesta, B. Rajagopalan, and R.W. Katz. 2007: A semiparametric multivariate and multisite weather generator. *Water Resour. Res.*, 43, W11401, doi:10.1029/2006WR005714.
- Biemans, H., I.Haddeland, P. Kabat, F. Ludwig, R.W.A. Hutjes, J. Heinke, W. von Bloh, and D. Gerten, 2011: Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resour. Res.* 47, W03509, doi:10.1029/2009WR008929.
- Brown, C., and R.L. Wilby, 2012: An alternate approach to assessing climate risks. *Eos Trans. AGU*, 93 (41), 401.
- Brown, C., Y. Ghile, M. Laverty, and K. Li, 2012: Decision scaling: linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. *Water Resour. Res.*, W09537, doi:10.1029/2011WR011212.
- Bürger G, S.R. Sobie, A.J. Cannon, A.T. Werner, and T.Q. Murdock, 2013: Downscaling extremes: an intercomparison of multiple methods for future climate. *J. Climate* 26 (10): 3429-3449, doi:10.1175/JCLI-D-12-00249.1.
- Cannon, A.J., S.R. Sobie, and T.Q. Murdock, 2015: Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Clim.* 28, 6938-6959.
- Cutore, P., G. Cristaudo, A. Campisano, C. Modica, A. Cancelliere, and G. Rossi, 2007: Regional Models for the Estimation of Stream-flow Series in Ungauged Basins, *Water Resour. Manage.*, 21, 789-800.
- Dai, A., 2013: Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat. Clim. Change*, 3, 52-58, doi:10.1038/nclimate1633.
- Daly, C., M. Halbleib, J.I. Smith, W.P. Gibson, M.K. Doggett, G.H. Taylor, J. Curtis, and P.P.

- Pasteris, 2008: Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. *Int. J. Climatol.*, 28, 2031–2064, doi:10.1002/joc.1688.
- Deser, C., A. Phillips, V. Bourdette, and H. Teng, 2012: Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Clim Dyn.* 38, 527–546. doi:10.1007/s00382-010-0977-x.
- Döll, P., 2002: Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective. *Clim. Chang.*, 54 (3), 269–293.
- Doorenbos, J., and W.O. Pruitt, 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. Food and Agriculture Organization of the United States, Rome.
- Dufresne, J.-L., and S. Bony, 2008: An assessment of the primary sources of spread of global warming estimates from coupled atmosphere–ocean models. *J. Clim.* 21, 5135–5144.
- Eum, H.-I., A. J. Cannon, 2016: Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: Application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble. *Int. J. Climatol.*, 37 (8), 3381–3397. doi: 10.1002/joc..
- Eum, H.-I., and S.P. Simonovic, 2010: Integrated reservoir management system for adaptation to climate change: The Nakdong River Basin in Korea. *Water Resour. Manage.* 24, 3397–3417.
- Georgakakos, A.P., H. Yao, M. Kistenmacher, K.P. Georgakakos, N.E. Graham, F.-Y. Cheng, C. Spencer, and E. Shamir, 2012: Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management. *J. Hydrol.*, 412–413, 34–46. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.04.038.
- Georgakakos, K.P., N.E. Graham, T.M. Carpenter, A.P. Georgakakos, and H. Yao, 2005: Integrating climate–hydrology forecasts and multi-objective reservoir management for Northern California. *EOS Trans. AGU* 86 (12).
- Ghile, Y.B., M.Ü. Taner, C. Brown, J.G. Grijnsen, and A. Talbi, 2014: Bottom-up climate risk assessment of infrastructure investment in the Niger River Basin. *Clim. Chang.*, 122 (1–2), 97–110.
- Gleick, P.H., 1989: Climate change, hydrology, and water resources. *Rev. Geophys.* 27, 329–344.
- Gondim, R.S., M.A.D. Castro, A.D.H. Maia, S.R. Evangelista, and S.C.D.F. Fuck, 2012: Climate change impacts on irrigation water needs in the Jaguaribe River Basin. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 48 (2), 355–365.

- Hallegatte, S., 2009: Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Glob. Environ. Chang.* 19, 240–247. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003.
- Hashimoto, T., J.R. Stedinger, D.P. Loucks, 1982: Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.* 18 (1), 14–20.
- Hay, L.E., R.L. Wilby, and G.H. Leavesley, 2000: A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 36 (2), 387–397.
- He, C., and T. Zhou, 2015: Responses of the western North Pacific Subtropical High to global warming under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios projected by 33 CMIP5 models: the dominance of tropical Indian Ocean–tropical western Pacific SST gradient. *J. Clim.* 28, 365–380.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jung, Y., and Eum, H.-I., 2015: Application of a statistical interpolation method to correct extreme values in high-resolution gridded climate variables, *J. Clim. Chang. Res.*, 6, 331–334.
- Kim, D. 2016: Analysis of historical droughts in South Korea and assessment of climate change impacts on droughts and water scarcity in an agricultural reservoir system. APCC Report 2016–27. ISBN 979–11–5698–178–7.
- Kim, D., I.W. Jung, and J.A. Chun, 2017: A comparative assessment of rainfall-runoff modelling against regional flow duration curves for ungauged catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, in press.
- Kim, J., 2001: A nested modeling study of elevation-dependent climate change signals in California induced by increased atmospheric CO₂. *Geophys. Res. Lett.* 28 (15), 2951–2954
- Kim, J., 2005: A projection of the climate change induced by increased CO₂ on extreme hydrologic events in the western U.S. *Clim. Change* 68 (1–2), 153–168
- Kim, U. and J.J. Kaluarachchi, 2008: Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia, *J. Hydrol.*, 362, 39–56, doi:10.1029/j.jhydrol.2008.08.016.
- KMA, 2011: Climatological normals of Korea (1981–2010). Publ. 11–1360000–000077–14,

- Korea Meteorological Administration, 678 pp. [Available online at http://www.kma.go.kr/down/Climatological_2010.pdf.]
- Kwon, H.-H., U. Lall, and A. F. Khalil, 2007: Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: Applications to rainfall and temperature. *Water Resour. Res.*, 43, W05407, doi:10.1029/2006WR005258.
- Lettenmaier D.P., and T.Y. Gan, 1990: Hydrologic sensitivities of the Sacramento-San Joaquin river basin, California, to global warming. *Water. Resour. Res.* 26, 69-86.
- Lettenmaier D.P., T.Y., Gan, and D.R. Dawdy, 1988: Interpretation of hydrologic effects of climate change in the Sacramento-San Joaquin river basin, California. Prepared for U.S. Environmental Protection Agency. Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, WA.
- Mainuddin, M., M. Kirby, R.A.R. Chowdhury, and S.M. Shah-Newaz, 2014: Spatial and temporal variations of, and the impact of climate change on, the dry season crop irrigation requirements in Bangladesh. *Irrig. Sci.*, 33 (2), 107-120.
- Masutomi, Y., K. Takahashi, H. Harasawa, and Y. Matsuoka, 2009: Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 131 (3), 281-291.
- McIntyre, N., H. Lee, H. Wheeler, A. Young, and T. Wagener, 2005: Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resour. Res.*, 41., W12434, doi:10.1029/2005WR004289, 2005.
- Miller, N.L., J. Kim, R.K. Hartman, and J. Farrara, 1999: Downscaled climate and streamflow study of the Southwestern United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 35 (6), 1525-1537.
- Momblanch, A., J.D. Connor, N. D. Crossman, J. Paredes-Arquiola, and J. Andreu, 2016: Using ecosystem services to represent the environment in hydro-economic models. *J. Hydrol.*, 538, 293-303.
- Moody, P., and C. Brown, 2013: Robustness indicators for evaluation under climate change: Application to the upper Great Lakes. *Water Resour. Res.*, 49, 3576-3588.
- Moursi, H., D. Kim, and J.J. Kaluarachchi, 2017. A probabilistic assessment of agricultural water scarcity in a semi-arid and snowmelt-dominated river basin under climate change. *Agricul. Water Manage.*, 193, 142-152.
- New, M., and M. Hulme, 2000: Representing uncertainty in climate change scenarios: a Monte-Carlo approach. *Integrated Assessment* 1, 203-213.

- Nilsson, C., C.A. Reidy, M. Dynesius, and C. Revenga, 2005: Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science* 308, 405–408.
- Oudin, L., V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel, and N. Le Moine, 2008: Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison between of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resour. Res.*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- Parajka, J., A. Viglione, M. Rogger, J.L. Salinas, M. Sivapalan, and G. Blöschl, 2013: Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1783–1795, doi:10.5194/hess-17-1783-2013.
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andréassian, 2003: Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279, 275–289.
- Poff, N. L., C.M. Brown, T.E. Grantham, J.H. Matthews, M.A. Palmer, C.M. Spence, R.L. Wilby, M. Haasnoot, G.F. Mendoza, K.C. Dominique, and A. Baeza, 2016: Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. *Nature Clim. Change*, 6, 25–34.
- Prudhomme, C., R.L. Wilby, S. Crooks, A.L. Kay, and N.S. Reynard, 2010: Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. *J. Hydrol.*, 390, 198–209.
- Raje, D., and P. P. Mujumdar, 2011: A comparison of three methods for downscaling daily precipitation in the Punjab region. *Hydrol. Process.*, 25, 3575–3589. doi:10.1002/hyp.8083.
- Rhee, J., and J. Cho, 2016: Future changes in drought characteristics: regional analysis for South Korea under CMIP5 projections. *J. Hydrometeorol.*, 17, 437–450.
- Rosenberg, D.E., 2015: Blended near-optimal alternative generation, visualization, and interaction for water resources decision making. *Water Resour. Res.*, 51, 2047–2063, doi:10.1002/2013WR014667.
- Stainforth, D. A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D.J. Frame, J.A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J.M. Murphy, C. Piani, D. Sexton, L.A. Smith, R.A. Spicer, A.J. Thorpe, and M.R. Allen, 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* 433, 403–406.
- Steinschneider, S., and C. Brown, 2012: Dynamic reservoir management with real-option risk hedging as a robust adaptation to nonstationary climate. *Water Resour. Res.* 48, W11525. doi:10.1029/2011WR011318.
- Steinschneider, S., R. McCrary, S. Wi, K. Mulligan, L.O. Mearns, and C. Brown, 2015:

- Expanded decision-scaling framework to select robust long-term water-system plans under hydroclimatic uncertainties. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 141, 04015023-1.
- Stevens, B. and S. Bony, 2013: What are climate models missing? *Science*, 340, 1053-1054.
- Stöckle, C.O., R.L. Nelson, S. Higgins, J. Brunner, G. Grove, R. Boydston, M. Whiting, and C. Kruger, 2010: Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Clim. Change*, 102, 77-102.
- Taylor, K.E., R.J. Stouffer, and G.A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485-498.
- Teng, J., J. Vaze, F.H. Chiew, B. Wang, and J.M. Perraud, 2012: Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling climate change impact on runoff. *J. of Hydrometeorol.*, 13 (1), 122-139.
- Trenberth, K.E., A. Dai, G. van der Schrier, P.D. Jones, J. Barichivich, K.R. Briffa, and J. Sheffield., 2014: Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Change*, 4, 17-22.
- Turner, S.W.D., D. Marlow, M. Ekström, B.G. Rhodes, U. Kularathna, and P.J. Jeffrey, 2014: Linking climate projections to performance: A yield-based decision scaling assessment of a large urban water resources system. *Water Resour. Res.*, 50, 3553-3567, doi:10.1002/2013WR015156.
- Vano, J.A., M.J. Scott, N. Voisin, C.O. Stöckle, A.F. Hamlet, K.E.B. Mickelson, M.M. Elsner, and D.P. Lettenmaier, 2010: Climate change impacts on water management and irrigated agriculture in the Yakima River Basin, Washington, USA. *Clim. Chang.*, 102 (1-2), 287-317.
- Vicuna, S., and J. A. Dracup, 2007: The evolution of climate change impact studies on hydrology and water resources in California. *Clim. Change*, 82, 327-350.
- Vincente-Serrano, S.M., S. Begueria, and J.I. Lopez-Moreno, 2010: A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate*, 23, 1696-1718.
- Weaver, C.P., R.J. Lempert, C. Brown, J.A. Hall, D. Revell, D., and D. Sarewitz, 2013: Improving the contribution of climate model information to decision making: the value and demands of robust decision frameworks. *WIREs Clim Change*, 4: 39-60. doi:10.1002/wcc.202
- Westerberg, I.K., L. Gong, K.J. Beven, J. Seibert, A. Semedo, C.-Y. Xu, and S. Halldin, 2014: Regional water balance modelling using flow-duration curves with observational uncertainties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2993-3013, doi:10.5194/hess-18-2993-2014.
- Whateley, S., S. Steinschneider, and C. Brown, 2014: A climate change range-based method

- for estimating robustness for water resources supply. *Water Resour. Res.* 50, 8944–8961, doi:10.1002/WR015956.
- Wilks, D., 1999: Simultaneous stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation at multiple sites in complex terrain. *Agric. Forest Meteorol.*, 96 (1–3), 85–101.
- Wood, A. W., D. P. Lettenmaier, and R. N. Palmer, 1997: Assessing climate change implications for water resources planning. *Clim. Change*, 37, 203–228.
- Yan, D., S.E. Werners, F. Ludwig, H.Q. Huang, 2015: Hydrological response to climate change: the Pearl River, China under different RCP scenarios. *J. Hydrol. Regional Stud.* 4, 228–245.
- Zhang, Y., J. Vaze, F.H.S. Chiew, and M. Li, 2015. Comparing flow duration curve and rainfall-runoff modelling for predicting daily runoff in ungauged catchments. *J. Hydrol.*, 525, 72–86.
- Zhao, T., and A. Dai, 2016: The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emission scenario. *J. Climate*, 28, 4490–4512.

【연구자】

김대하 선임연구원

연구보고서 2017-18

기후변화 대응 수자원 관리를 위한 의사결정중심 영향평가

I S B N 979-11-5698-208-1

발 행 2018년 3월

발 행 인 정 홍 상

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.