



## Elicitation of drought alternatives based on Water Policy Council and the role of Shared Vision Model

Kim, Gi Joo<sup>a\*</sup> · Seo, Seung Beom<sup>b</sup> · Kim, Young-Oh<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Ph.D student, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Research Fellow, Division for Integrated Water Management, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

Paper number: 19-013

Received: 7 March 2019; Revised: 8 May 2019 / 5 June 2019; Accepted: 5 June 2019

### Abstract

The numbers of multi-year droughts due to climate change are increasing worldwide. Boryeong Dam, located in Chungcheongnam-do, South Korea, was also affected by a 4-year drought from 2014 to 2017. Since traditional unilateral decision making processes to alleviate drought damage have, until now, resulted in conflicts between many of the involved groups, the need for active participation from both stakeholders and policymakers is greater than before. This study introduced Shared Vision Planning, a collaborative decision making process that involves participation from various groups of stakeholders, by organizing Water Policy Council for Climate Change Adaptation in Chungcheongnam-do. A Shared Vision Planning Model was then developed with a system dynamics software by working together with relevant stakeholders to actively reflect their requests through three council meetings. Multiple simulations that included various future climate change scenarios were conducted, and future drought vulnerability analysis results of Boryeong Dam and districts, in terms of frequency, length, and magnitude, were arrived at. It was concluded that Boryeong Dam was more vulnerable to future droughts than the eight districts. While the total water deficit in the eight districts was not so significant, their water deficit in terms of spatial discordance was proved to be more problematic. In the future, possible alternatives to the model will be implemented so that stakeholders can use it to agree on a policy for possible conflict resolutions.

**Keywords:** Climate change, Shared Vision Planning, System dynamics, Water policy council

## 협약체 기반 가뭄 대응 대안 도출과 비전공유모형의 역할

김기주<sup>a\*</sup> · 서승범<sup>b</sup> · 김영오<sup>c</sup>

<sup>a</sup>서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정, <sup>b</sup>한국환경정책·평가연구원 통합물관리연구실 부연구위원, <sup>c</sup>서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

### 요 지

기후변화로 인한 다년 가뭄은 전세계적으로 증가하는 추세이며, 충청남도에 위치한 보령댐 또한 2014년부터 2017년까지 지속된 다년 가뭄으로 인해 큰 피해를 받았다. 다양한 가뭄 피해 저감 정책 수립 과정에 있어 일방적인 하향식 의사결정 과정을 바탕으로 진행된 정책은 이해당사자간의 갈등을 야기했기에, 이를 방지하기 위해서는 이해당사자와 정책결정자들간의 참여형 의사결정 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 다양한 그룹으로 구성된 이해당사자의 참여를 독려하는 참여형 의사결정 방식 중 하나인 비전공유계획을 충청남도 기후변화 적응 물관리정책 협의회를 통해 체계적으로 적용하였다. 또한, 비전공유계획의 핵심 요소인 비전공유모형을 시스템 다이내믹스 모형으로 개발하였고, 총 3회의 소위원회를 거쳐 이해당사자의 요청사항에 맞추어 모형을 보완하였다. 구축한 모형을 활용하여 미래에 발생 가능한 가뭄의 위험을 포함하고 있는 기후변화 시나리오로 모의하였고, 보령댐과 보령댐 계통 지자체의 가뭄으로 인한 취약성을 빈도, 지속기간, 크기 개념의 평가지표로 표현하였다. 모의 결과, 용수 공급원인 보령댐은 용수 수급처인 지자체보다 가뭄에 상대적으로 더 취약하며, 8개 지자체 중 가뭄 대응 대책이 주로 계획되어 있는 지역과 모의에서 추정된 가뭄 발생 지역이 일치하지 않음을 확인하였다. 모의 결과를 향후 협의회 회의에서 이해당사자와 공유하고, 댐과 지자체의 입장에서 용수 부족을 해소할 방안을 모형에 적용함으로써 미래 정책 결정 및 갈등 해소를 위해 개발한 비전공유모형을 이용할 수 있음을 제안하였다.

**핵심용어:** 기후변화, 비전공유계획, 시스템 다이내믹스, 물관리 협의회

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-880-8354  
E-mail: gjk\_0494@snu.ac.kr (G. J. Kim)

## 1. 서론

기후변화로 인한 다년 가뭄의 빈도와 크기는 매년 증가하고 있으며, 우리나라 또한 이러한 가뭄에 의한 피해가 증가하고 있다. 대표적으로, 2014년부터 4년 동안 지속된 충청남도 다년 가뭄으로 인해 보령댐에서 물을 공급받는 8개 시·군의 주민들은 총 127일 동안의 제한급수라는 피해를 경험하였다. 이에 대한 대책으로 백제보-보령댐 도수로 사업, 지방상수도 현대화 사업 등의 가뭄 대응 사업이 긴급하게 시행되었으나, 이해당사자들의 의견을 충분히 수렴하지 못하고 진행되었다는 비판에 직면하면서 사업의 타당성을 두고 갈등이 유발되기도 하였다. 이러한 의사결정 과정의 한계점을 극복하기 위해서는 사업계획의 시작부터 마지막까지 관련 이해당사자들의 참여를 유도하고 서로 간의 입장과 요청사항에 대해 소통하는 과정이 필요하다는 의견이 꾸준히 제기되어 왔다. 최근 만 보더라도 2017년 11월 독일 본에서 진행된 제 23차 기후변화협약 피지 당사국총회(23rd Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change)에서는 포용적이고 참여적이며 투명한 태평양 지역의 대화 방식인 ‘탈라노아 대화(Talanoa Dialogue)’를 채택하여 앞으로의 기후협상 과정에서 정부 대표들과 비정부 이해당사자들 간의 대화를 통한 참여형 의사결정 과정을 지향하고 있음을 확인하였다.

미국을 중심으로 한 서구사회에서는 이와 같은 참여형 의사결정 과정을 재난 대응과 정책 결정에 적극적으로 적용하고 발전시켜 왔다. 그러나, 국내에서는 현재까지 대부분의 시도가 모형개발자들의 주도하에 이루어졌고 이해당사자들이 참여할 기회가 부족했기에, 가뭄 피해를 직접 경험하는 이해당사자들의 요청사항을 반영한 모형을 개발하기가 어려웠다. 따라서, 해외에서 사용되고 있는 참여형 의사결정 과정의 틀 아래에서 국내 수자원계획의 특성을 반영하여 모형개발자, 이해당사자, 정책결정자들이 모두 적극적으로 참여하는 수자원 모형을 개발하고, 이를 사용하여 가뭄 대응 시 이해당사자와 정책결정자들의 원활한 합의를 도출하기 위한 노력이 필요한 시점이다.

본 연구는 참여형 의사결정 과정 중 하나인 ‘비전공유계획(Shared Vision Planning)’을 「충청남도 기후변화 적응 물관리정책 협의회」를 통하여 적용함으로써 보령댐으로부터 용수를 공급받는 8개 시·군의 이해당사자와 정책결정자 간의 갈등을 완화하는 것을 목적으로 하고 있다. 체계적 행정지원 하에서 용수 부족으로 인한 피해를 직접 경험하는 이해당사자와 가뭄 대응 정책을 결정하는 정책결정자 간의 토의를 통해 이

해당사자의 복합적 요청사항을 반영하여 모형을 개선하고, 궁극적으로는 완성된 모형을 활용하여 대상 지역의 미래 가뭄 취약성을 분석하고자 한다. 또한, 향후 미래 대안 선정 및 갈등 완화를 위해 국내에서도 참여형 의사결정 과정을 사용할 시 참고할 수 있는 선행 연구가 되고자 한다.

본 연구는 해외에서 처음 개발된 방법론을 국내 대상 지역의 특성을 반영할 수 있도록 변형하여 적용하였기에 논문의 방법론을 별도로 서술하기보다는 연구 동향과 적용 사례에서 함께 작성하였다. 2장에서는 본 연구에서 적용한 참여형 의사결정 과정인 비전공유계획과 비전공유모형(Shared Vision Model), 시스템 다이내믹스(System Dynamics)의 발전 과정과 국내외의 수자원 및 이해당사자 간 갈등 관리에 사용된 사례를 소개한다. 3장에서는 본 연구의 대상 지역과 시공간적 범위를 제시한다. 4장에서는 비전공유계획과 시스템 다이내믹스를 활용하여 모형을 개발하고 개선한 과정과 최종 모형을 사용한 대상 지역의 미래 가뭄 취약성을 분석 결과를 서술하고, 5장에 결론과 향후 연구를 제시한다.

## 2. 연구 동향

본 장에서는 본 연구의 이론으로 사용된 시스템 다이내믹스로 구축한 비전공유모형의 첫 등장 배경, 현재까지의 발전 과정, 그리고 국내외 가뭄 대응을 위해 적용된 사례를 중심으로 배경 이론의 연구 동향을 서술하였다.

### 2.1 비전공유계획

비전공유계획의 초기 개념은 1987-1989년 미국에서 발생한 대가뭄에 대한 대응 대책의 일환으로 US Army Corps of Engineers (USACE)가 수자원시스템 모형을 바탕으로 하는 참여형 가뭄 대응 대책을 제안하고, 미주리-미시시피 강 수계를 포함한 다양한 지역의 가뭄 대응 정책에 시범 적용하며 성립되었다(USACE, 2010). 객체 지향 소프트웨어(Object-Oriented Software)를 사용한 초창기의 연구는 주로 가뭄 대응 분야에 한정되어왔지만, 대가뭄 대응 대책 수립 과정에서 시스템 기반 계획, 시민참여, 이해당사자를 포함한 모형 개발의 특성을 반영한 절차가 최초로 ‘비전공유계획’으로 명명되었고, 정책결정자와 모형개발자를 포함한 다양한 직군의 이해당사자들이 함께 참여하여 개발하는 모형이 ‘비전공유모형’으로 정의되었다(Werick, 2000). 이후 선진국을 중심으로 다양한 분야에서 비전공유계획이 사용되었다. Palmer *et al.* (1993)은 National Drought Study와 Drought Preparedness

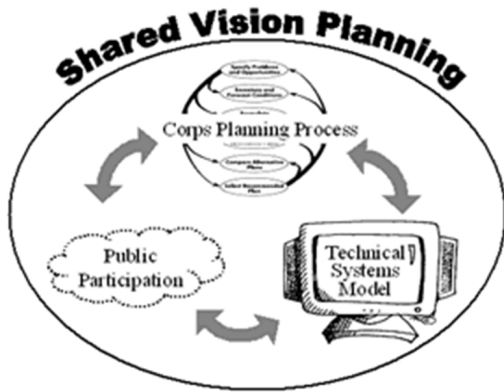


Fig. 1. Three pillars of Shared Vision Planning (USACE, 2010)

Studies에서 제안하는 절차를 이해당사자들과의 토의를 통해 각 지역의 특성에 맞게 수정하는 방안을 제시하였으며, Keyes and Palmer (1995)은 USACE가 제안한 내용을 수자원 계획 수립 과정에서 사용하는 가이드라인과 모형의 효과를 평가하는 방법을 제시하였다.

이후, 여러 가지 시행착오를 거쳐 최근에 이르러 비전공유 계획의 세 가지 핵심 구성요소가 다음과 같이 구분되었다: 1) 기존의 수자원 계획 수립 과정, 2) 구조적인 시민참여 과정, 3) 통합적 컴퓨터 모형(Fig. 1). 비전공유계획의 세 가지 핵심 구성요소가 확립된 이후에는 개념을 확장시키고, 각 지역의 특성에 맞는 방법으로 적용하고자 하는 연구가 수행되고 있다. Walker et al. (2010)은 기능성 게임으로 이해당사자들이 의사결정 과정에 더욱 효과적으로 참여하는 방안을 제시하였으며, 통합물관리 실현을 목적으로 설립된 국제 네트워크인 Global Water Partnership은 2017년에 유럽 중부 Tisza 강 용수 사용자들 간의 수리권, 수질 문제, 홍수 피해 저감을 위한 전문가 그룹을 비전공유계획의 이론을 바탕으로 구성하고 수 차례 워크숍을 진행해 왔다. 워크숍을 바탕으로 수자원 전문가들과 이해당사자들의 의견을 종합한 모형을 구성하고, 이를 사용하여 기술 보고서를 작성하여 타 영역에서도 적용할 수 있도록 했다(Global Water Partnership, 2018). 국내에서도 Lee and Chung (2011)이 지속가능한 유역통합관리 계획 수립을 위하여 비전공유모형을 개발하였으며, Jeong et al. (2012)은 객체 지향 소프트웨어인 Vensim으로 비전공유모형을 개발하여 치수 갈등 문제에 대한 이해당사자들 간의 합의를 이루고자 하였다.

## 2.2 시스템 다이내믹스 모형

시스템 다이내믹스는 1961년 미국 MIT의 Forrester가 산업공학에서 산업체 재고량과 노동력의 불안정한 변화, 시장

점유율의 감소문제를 다룬 산업동태론을 발표하면서 경영학, 정책학, 공학 등의 광범위한 분야에서의 의사결정 과정과 문제 해결을 위한 방법으로 제안되었다(Forrester, 1961; 1969; 1971). 시스템 다이내믹스는 동태적이고 순환적 인과관계의 시각(dynamic feedback perspective)으로 현상을 이해하고 설명하거나, 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모형을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변해나가는지를 컴퓨터상에서 실험해 보는 방법론으로 정의된다(Moon, 2002). 이 기법은 주로 산업공학에서 많이 사용되지만, 2000년대 초반부터는 산업공학 뿐만 아니라 공학분야, 경영학, 사회과학 등의 타 분야에서도 활발하게 연구되고 사용되고 있다. 국내에서는 시스템 다이내믹스 외에도 기업 다이내믹스(business dynamics), 피드백 다이내믹스(feedback dynamics), 사회 다이내믹스(social dynamics) 등의 용어로 지칭되기도 한다(Richardson, 1999).

시스템 다이내믹스의 응용은 주로 기업과 정부에서 정책 수립이나 평가에서 이루어지는데, 해외에서는 1960년대 말 미국 보스턴시의 도시 성장과 그에 의한 쇠퇴문제를 시스템 다이내믹스 모형을 이용해 다룬 사례가 대표적이며, 현재까지도 이 개념을 계승한 모형이 도시문제에 대한 이해와 도시정책의 분석에 유용하게 사용되고 있다(Moon, 2002). 수자원 분야에서는 Xi and Kim (2013)이 싱가포르에서의 지속가능한 수자원관리를 위하여 *SingaporeWater*라는 모형을 구축하였고, 이를 이용하여 수자원 대안들을 평가하였으며, Wang (2013)이 캐나다의 Oxbow Basin의 가뭄 관리 정책을 환경적 측면과 사회경제적 측면에서 평가하고자 시스템 다이내믹스 모형을 사용하였다. 국내에서는 Ryu et al. (2015)이 미래 물 수급관리 정책 지원을 위해 시스템 다이내믹스 모형을 사용하였다. 개발된 모형은 미래의 물수요 및 공급, 사회·경제 및 기후변화에 관련된 인자들을 도출하고 각 인자들 간의 인과관계를 파악하여 구축하였다. 이후, 구축한 모형의 모의 결과를 바탕으로 미래 물수급관리를 위한 의사결정을 지원하고자 노력하였다.

## 3. 대상유역 및 사용 자료

본 장에서는 연구의 공간적 범위인 대상 유역과 모형에 반영한 가뭄 대응 대안을 서술하였다. 또한, 검증에 위해 사용된 과거 자료와 취약성 분석을 위해 사용된 미래 자료, 그리고 모형 구축 시 관측 수치와 모의 수치의 차이를 최소화하기 위해 가정한 내용을 서술하였다.

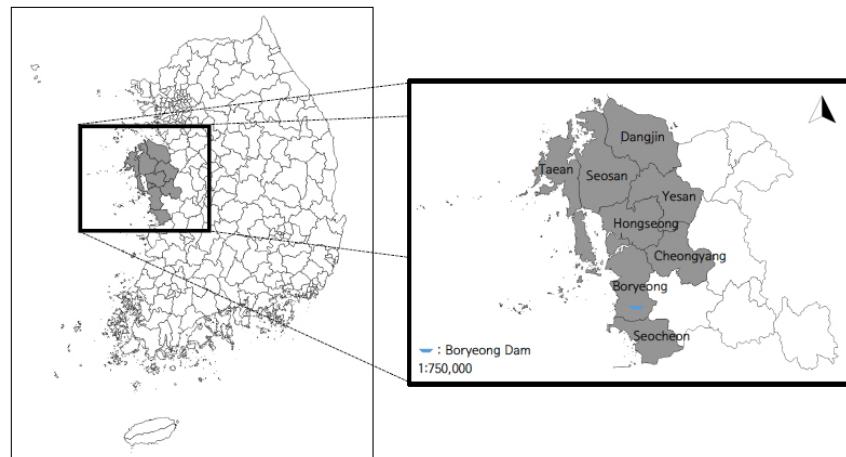


Fig. 2. Study basin: Boryeong Dam and eight districts

Table 1. Monthly average inflow of Boryeong Dam (Unit: m<sup>3</sup>/sec; Jeong *et al.*, 2016)

| Monthly Average Inflow (m <sup>3</sup> /s) | Jan  | Feb  | Mar  | Apr  | May  | Jun  | Jul   | Aug   | Sep  | Oct  | Nov  | Dec  | Avg  |
|--------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| For Design (1967-1988)                     | 1.42 | 1.99 | 2.79 | 3.81 | 2.58 | 3.68 | 10.87 | 8.72  | 5.8  | 2.1  | 2.03 | 1.78 | 3.98 |
| After Construction (1998-2015)             | 0.63 | 0.98 | 1.07 | 2.21 | 2.92 | 3.83 | 14.47 | 12.17 | 8.2  | 2.17 | 0.73 | 0.74 | 4.18 |
| Recent (2015-2017)                         | 1.26 | 1.69 | 1.38 | 3.72 | 2.97 | 1.17 | 7.25  | 2.94  | 1.56 | 1.52 | 1.81 | 2.08 | 2.44 |

### 3.1 보령댐 및 8개 시·군

본 연구의 대상은 최근 4년여간 극심한 가뭄을 겪었던 보령댐과 이로부터 생·공용수를 공급받는 8개 시·군(Fig. 2), 그리고 가뭄으로 인한 피해를 완화하기 위해 설립된 「충청남도 기후변화 적응 물관리정책 협의회」로 선정하였다. 보령댐은 충청남도 보령시에 위치하며 1998년도에 준공되었고, 총 저수용량이 116.9백만m<sup>3</sup>인 다목적댐이다. 보령댐의 용수공급능력은 총 106.6백만m<sup>3</sup>/year(생공용수 90.6백만m<sup>3</sup>/year, 농업용수 4.7백만m<sup>3</sup>/year, 하천유지용수 11.3백만m<sup>3</sup>/year)으로 비교적 작은 규모의 댐이며, 가능최대방류량은 2,173 m<sup>3</sup>/sec이다(MyWater, 2019). 특히, 보령댐은 설계 시(1967-1988년), 준공 후(1998-2015년) 월평균 유입량과 최근 3년(2015-2017년) 동안의 월평균 유입량을 비교했을 때(Table 1), 현저하게 감소한 홍수기 유입량을 경험하였기에 댐 내부에서의 용수공급 시스템 조정이나 용수를 공급받는 지자체와의 협의가 필수적인 상황이다.

보령댐은 충청남도의 총 15개 시·군 중 서북부의 8개의 지자체인 보령시, 서산시, 당진시, 서천군, 청양군, 홍성군, 예산군 및 태안군에 생공용수를 공급하고 있으며, 당진화력, 태안화력, 신보령화력, 보령화력, 서천화력에 발전용수를 공급하고 있다(MyWater, 2016). 8개 시·군중에서는 서산시에 연간 1.8천만m<sup>3</sup>으로 가장 많은 수량이 공급되고 있으며, 청양군이 1.2백만m<sup>3</sup>으로 가장 적게 공급되고 있다(Jeong and Kim,

2017). 2015년 발생한 마른장마에 따른 가뭄 극복 대책으로 2015년 8월 18일부터 2016년 2월 15일까지 127일 동안 생·공용수 급수조정이 시행되었으며, 이로 인해 8개 지자체의 시민들이 용수 부족으로 인한 피해를 경험하였다(Jeong *et al.*, 2016).

### 3.2 충청남도 기후변화 적응 물관리정책 협의회

「충청남도 기후변화 적응 물관리정책 협의회」(이하 협의회)는 2014-2017년까지 충청남도를 중심으로 발생한 다년 가뭄에 효과적으로 대응하기 위하여 2016년 12월 7일 창립총회에서 시작되었다. 협의회는 1) 불확실성이 큰 기후변화 적응의 기본 철학아래에서, 2) 다양한 이해관계를 가진 사람들이 투명한 정보를 공유하고 신뢰를 바탕으로 서로 배우며, 3) 비전을 만드는 시작 단계부터 대안을 선정하고 평가하는 마지막 단계까지 전 과정을 함께 하여 합의를 이끌어내기 위한 세 가지 원칙을 바탕으로 운영되고 있으며(Chungcheongnam-do, 2016), 자치단체, 유관기관, 시민단체 및 지역사회 등의 다양한 그룹에 속한 총 98명의 이해당사자가 모두 포함되도록 구성되었다(Fig. 3). 협의회가 창립된 이후, 2018년 11월까지 총 3회에 걸친 소위원회를 통하여 참석한 이해당사자들과의 협의가 진행되었다. 협의회에는 수자원 및 행정학 전문가도 포함되어 있어 회의의 사전준비는 물론, 사후 결과를 평가함으로써 비전공유계획의 효과를 진작시키기 위한 지원을 하고 있다.

Configuration of Water Policy Council for Climate Change Adaptation in South Chungcheong Province

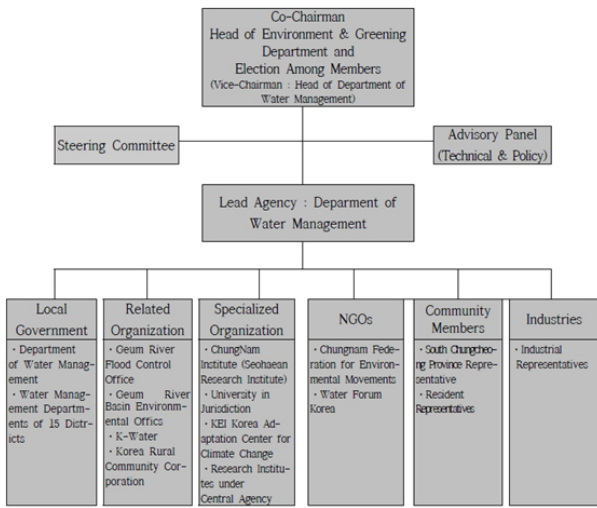


Fig. 3. Configuration of Water Management Policy Council for Climate Change Adaptation in Chungcheongnam-do (Chungcheongnam-do, 2016)

### 3.3 충청남도 가뭄 대응 사업

충청남도는 2014-2017년 동안의 용수 부족으로 인한 피해를 최소화하기 위하여 용수별로 다양한 가뭄 대응 사업을 장, 단기간으로 진행하였다. 단기적으로는 용수 개발 사업 추가 추진, 자체 비상관정 활용 준비, 가뭄 지역 병물 공급 준비 등의 대책을 통하여 가뭄이 발생할 시 신속히 대응할 수 있도록 노력하였다(Chungcheongnam-do, 2017). 장기적으로는, 생활용수의 경우 2018-2022년 동안 아산-홍성과 서산-태안을 연결하는 도·송수관로를 설치하고, 공업용수의 경우 대산임해 산업지역 해수담수화 사업을 통해 충남 대산임해단지 입주 기업들의 공업용수 부족을 예방하기 위한 대책을 설립하였다. 농업용수 부족에 대비하기 위해서는 금강-예당지 농업용수 이용체계 재편 사업을 진행하여 예산군 농민들의 농업용수 부족을 해결하고자 하였다. 추가적으로, 2016년 2월 완공되어 2016년 3월부터 가동되고 있는 보령댐 도수로를 K-water에서 설정한 운영기준에 맞추어 보령댐의 저수량이 일정 수준 이하로 떨어지거나 용수 사용자들이 필요하다고 요청할 때 회의를 통해 가동되도록 하였다(K-water, 2017). 또한, 충청남도는 2025년까지 전체 용수 예상 수요량의 25%를 지자체별 자체수원을 개발하여 확보하고자 한다(Chungcheongnam-do, 2018). 2018년 1월을 기준으로 전체 용수수요량의 약 9.4% (70,884 m<sup>3</sup>/일)이 자체수원으로 공급되고 있지만, 각 지자체별로 대체수원을 추가로 확보하여 광역상수도 의존율을 줄이고자 노력하고 있다.

### 3.4 사용 자료

본 연구에서는 대상 유역인 보령댐과 8개 시·군을 공간적 범위로 설정하고, 충청남도 가뭄 대응 사업을 포함하도록 비전공유모형을 구축하였으며, 이를 협의회 회의를 거치며 개선하였다. 이후, 과거의 보령댐 유입량 자료를 사용하여 모형을 검증하고, 유입량과 수요량 시나리오로 모형에 미래 가뭄 대책을 반영하여 미래 30년(2015-2044년) 동안의 모의를 진행하였다.

초기 모형은 미래 물수지 분석에 주로 사용되는 지자체별 용수 예측 수요량 자료를 사용하였으나, 수요량은 실사용량과 차이가 있어 왜곡된 결과를 야기할 수 있다는 이해당사자의 의견을 반영하여 지자체별 생공용수 실사용량 자료를 대신 모형에 입력하였다. 실공급량 자료는 용수수요량보다 주로 작은 값을 가지며, 실제로 지자체가 상수도를 통하여 댐으로부터 공급받은 양을 측정한 자료이다. 미래 실사용량 자료는 관측된 값이 없기에 아래의 가정을 바탕으로 생성하였다. 충남 수자원종합계획 수립용역 보고서(Chungcheongnam-do, 2015)에서 주어진 8개 시·군의 일평균 용수수요량과 과거 실공급량 자료를 바탕으로 미래의 실공급량과 용수수요량 간의 비율을 계산한 후, 이를 이용하여 미래 예상 실공급량을 생성한 후 모형에 입력하였다. 미래 모의의 하천유지용수 및 농업용수 수요량은 2015년 자료와 동일하고, 보령댐 가뭄 대응단계 또한 과거 자료와 동일하다고 가정한 후 미래 모의를 진행하였다.

모형에 반영된 가뭄 대응 대책은 충청남도 가뭄 대응 사업 중 공급용량과 가동 기준이 명확하여 모형에 포함시킬 수 있는 사업인 보령댐 도수로와 시·군 수원다변화 자체수원확보 실행계획을 반영하였다. 보령댐 도수로는 가동이 시작된 2016년 3월부터 보령댐 저수량이 경제단계 이하로 떨어질 시 공급용량 내에서 가동될 수 있도록 설정하였으며, 지자체별 자체수원 확보계획은 지자체별로 2025년까지의 용수수요량 대비 9.4% (2018년 1월 기준 확보율), 11.7%, 14.1%, 16.4%, 18.7%, 21%, 23.4%, 25.7% (2025년 목표 확보율), 28%, 30.3%만큼 확보하였을 경우를 대안으로 설정하고 이에 따라 변화하는 댐과 지자체별 미래 평가지표를 분석하고 이해당사자들과 공유하였다.

미래 가뭄 취약성 평가를 위해서는 기후변화를 고려한 미래 유입량 시나리오를 Seo and Kim (2018)이 제안한 기후변화 시나리오 선정기법으로 금강 대권역에 대해 RCP 4.5 아래 선정한 5개의 GCM 시나리오를 사용하여 모의를 진행하였다(Table 2). GCM 자료를 역거리가중법(inverse distance weighting scheme)으로 기상청의 종관기상관측장비 ASOS 60개소로 상세화한 뒤 QDM (Quantile Delta Mapping) 기법

Table 2. Selected GCM scenarios

| Number | Model Name      | Resolution  | Reference                     |
|--------|-----------------|-------------|-------------------------------|
| 1      | BCC-CSM1-1      | 2.813×2.791 | Wu (2012)                     |
| 8      | CMCC-CMS        | 1.875×1.865 | Davini <i>et al.</i> (2014)   |
| 16     | HadGEM2-ES      | 1.875×1.250 | Collins <i>et al.</i> (2011)  |
| 19     | IPSL-CM5A-MR    | 1.875×1.865 | Dufresne <i>et al.</i> (2013) |
| 23     | MICROC-ESM-CHEM | 2.813×2.791 | Watanabe <i>et al.</i> (2011) |

(Eum and Cannon, 2017)을 통해 자료의 편의를 보정하였다 (Seo *et al.*, 2018). 각 중권역별 면적평균값은 티센다각형 기법을 사용하였으며, 중권역별 자연유량은 강우유출모형인 Tank 모형(Sugawara, 1995)에 편의보정된 GCM 자료를 입력하여 모의하였다.

## 4. 적용 및 결과

### 4.1 소위원회를 통한 비전공유모형 개선

2016년 12월 창립총회 이후, 2019년 2월까지 총 3회의 소위원회 회의가 진행되었으며, 개발한 비전공유모형 또한 소위원회를 거치며 이해당사자들의 요청사항을 반영하도록 개선되었다. 2017년 9월 21일에 진행된 제1차 소위원회에서는 참석한 이해당사자들에게 비전공유계획과 비전공유모형에 대한 기본 개념과 8개 지자체를 중심으로 개발된 비전공유모형의 구성과 운영, 분석 결과를 설명하는 회의가 진행되었다. 또한, 모의 결과로 과거 10년(2007-2016년) 동안의 8개 시·군의 물 부족 지수를 산정하여 그 결과를 신뢰도(Reliability), 평균 회복 기간(Recovery Time), 최대 부족량(Maximum Deficit)으로 표현하여 공유하였다. 그 결과, 지자체 중심의 모형보다는 지자체들의 생·공용수 공급원인 보령댐 중심의 모형과 보령댐의 취약성을 분석할 수 있는 모형이 요구되었으며, 추가적인 대안을 반영한 모형 개발을 위한 자료를 공유하였다. 이로 인해, 향후 진행된 2차 소위원회에서는 보령댐과 지자체의 가뭄에 대한 취약성을 분석한 모형을 개발하고, 물 부족 해소 방안에 대한 논의를 진행하였다.

2017년 11월 3일에 진행된 제2차 소위원회에서는 8개 지자체의 용수 공급을 변화에 따른 보령댐과 8개 지자체의 취약성을 분석할 수 있는 모형을 구성하였다. 또한, 지자체별 자체 수원 비율을 모형에 입력하고, 변화하는 비율을 통해 자체수

원 비율이 보령댐과 지자체별 평가지표에 미치는 영향을 확인할 수 있도록 모형을 수정하였다. 수정한 모형과 모의 결과를 바탕으로 이해당사자들과의 회의를 진행하였으며, 용수공급계획량 자료 대신 실제 사용량 자료를 입력하여 모형을 구성해 달라는 요청을 받아 이를 반영하도록 모형을 수정하였다. 이를 바탕으로 향후 미래 가뭄에 대한 댐과 지자체의 취약성을 분석할 기반이 마련되었다.

2018년 7월 25일에 진행된 제3차 소위원회에서는 지자체 대표자들의 의견만을 반영한 모형을 구성할 위험을 줄이고자 충청남도와의 사전 회의를 한 차례 진행한 후 제3차 소위원회를 진행하였다. 충청남도에서는 모형의 구성과 모의 결과를 확인한 후, 몇 가지 자료에 대한 업데이트를 요청하였고, 모형 모의 결과가 현실성을 포함할 수 있도록 몇 가지의 방안을 제시하였다. 충청남도 측의 제안과 2차 소위원회에서 지자체 이해당사자들이 요청한 사항을 반영하여 3차 소위원회에서 사용할 모형을 구성하고, 과거와 미래를 포함한 총 3번의 모의를 진행하여 결과를 분석하였다. 그 결과, 미래 모의 시 사용한 미래 용수사용량 자료 대신 다른 방법으로 예측한 실사용량 자료를 사용하고, 지자체별로 개발하고 있는 자체수원을 포함하여 지자체별 용수 부족을 표현해 달라는 요청을 받았다. 또한, 가뭄에 대응하기 위한 핵심 대안 중 하나인 백제보-보령댐 도수로를 모형에 포함하여 이후 회의에서는 도수로 운영을 대안으로 선택한 후 보령댐과 8개 시·군의 미래 가뭄 대응 대책에 대하여 논의하고자 하였다.

### 4.2 실패 기준 및 평가지표 선정

보령댐과 댐으로부터 용수를 공급받는 시·군의 물공급 평가지표도 소위원회를 거치며 이해당사자와의 협의를 통해 개선하였다. 댐의 경우에는 가뭄이 발생했을 때 단계별로 댐 공급량을 감축시키는 ‘댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준’을 바탕으로 저수량을 4단계(관심, 주의, 경계, 심각)로 구분하여 전국 대응단계별 용수 감축 방안(MOLIT, 2016)에 따라 댐의 저수량이 감소하여 농업용수를 감축하기 시작했을 때(즉, 댐 저수량이 경계단계에 진입했을 시)를 실패 기준으로 선정하였다. 지자체의 경우에는 생·공용수 감축이 시작되어 수요량만큼 용수를 공급받지 못할 때(즉, 댐 저수량이 심각단계에 진입했을 시)를 실패 기준으로 하여 모의 결과를 이해당사자와 공유하였다.

위의 실패 기준을 빈도(frequency), 지속기간(length), 크기(magnitude)의 세 가지 개념으로 표현하고자 다음과 같이 평가지표를 설정하였다. 전체 모의 기간을  $T$ 라고 하고, 각 단위시간  $t$ 마다 시스템의 상태를 변수  $X_t (t = 1, 2, 3, \dots, T)$ 라

하면  $X_t$ 는 모든 시점에서 성공(S)이나 실패(F)의 상태를 가진다. 이를 바탕으로 Hashimoto *et al.* (1982)이 제안한 신뢰도(reliability), 회복도(resiliency), 취약도(vulnerability)의 개념을 다양한 배경을 가진 이해당사자들 또한 평가지표를 쉽게 이해할 수 있도록 수정하고, 직관성을 위해 세 개의 평가지표 모두 큰 값을 가질수록 가뭄에 취약함을 나타내도록 통일하였다. 첫 번째 평가지표는 모의 기간동안 평균적으로 시스템이 실패할 확률인 평균부족횟수(Average Deficit Frequency), 두 번째 평가지표는 시스템이 실패 상태에서 성공 상태로 돌아오는데 소요되는 평균 시간인 평균회복기간(Average Recovery Time), 마지막 평가지표로는 모든 시점에서 성공 상태에 도달하는데 필요한 최소량과 전체 수요량의 비율인 평균부족량(Average Deficit Magnitude)을 Table 3과 같이 선정하였다.

### 4.3 최종 모형 개발 및 검증

본 연구에서 개발한 모형은 제1-3차 소위원회회를 거치며 이해당사자들의 의견과 제안사항을 모두 반영해 업데이트된 최종 모형이며, 비전공유모형을 구축할 때 사용하기 적합한 STELLA® Architect 소프트웨어를 이용하여 구축하였다 (Fig. 4). 구축한 모형은 보령댐과 보령댐 계통 8개 지자체, 댐 운영 및 가뭄 대응 대책이 포함된 ‘보령댐-용수공급 부분’과 모의 결과를 바탕으로 평가지표 산정에 사용되는 ‘평가지표 계산 부분’으로 구분된다. 제3차 소위원회에서는 모형에 지자체별 자체수원 반영비율과 보령댐 도수로 반영비율을 변경해가며 대안에 대한 효과를 시각화하였으며, 이해당사자가 제안한 내용을 바탕으로 모형을 수정하여 시나리오별 댐과 지자체의 평가지표를 계산하였다.

Table 3. Classification of selected performance indices

| Number | Performance Indices       | Definition                                                                                                                                               | Classification |
|--------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1      | Average Deficit Frequency | $\beta(\%) = \frac{1}{T} \left( \sum_{t=1}^T X_t \in F \right) \times 100(\%)$                                                                           | Frequency      |
| 2      | Average Recovery Time     | $\gamma(\text{days}) = \frac{1 - \alpha}{\rho} = \frac{\left( \sum_{t=1}^T X_t \in F \right)}{\left( \sum_{t=1}^{T-1} X_t \in S, X_{t+1} \in F \right)}$ | Length         |
| 3      | Average Deficit Magnitude | $\omega(\%) = \frac{\left( \sum_{t=1}^T \max(0, D_t - R_t) \right)}{\left( \sum_{t=1}^T D_t \right)} \times 100(\%)$                                     | Magnitude      |

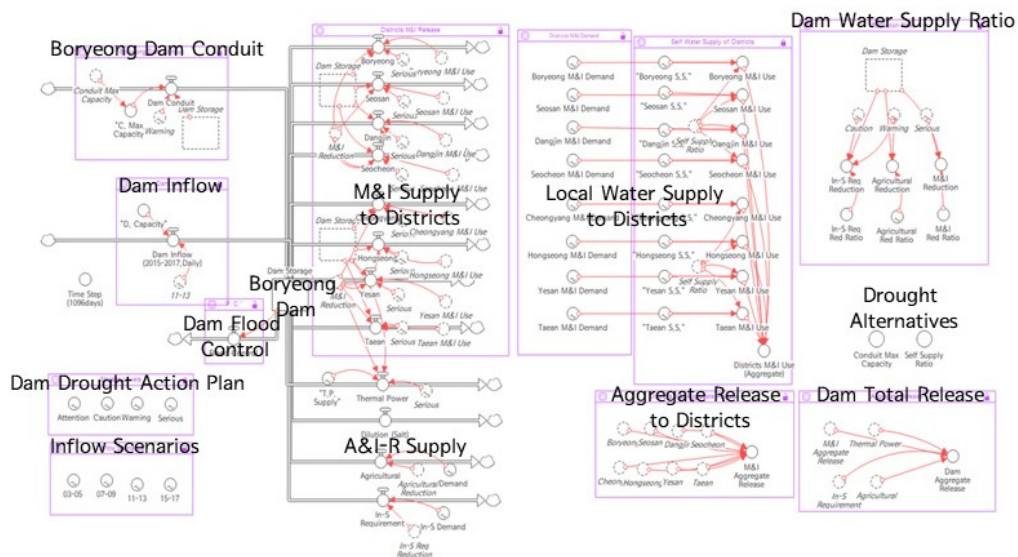


Fig. 4. The STELLA Shared Vision Model for Boryeong Dam water supply

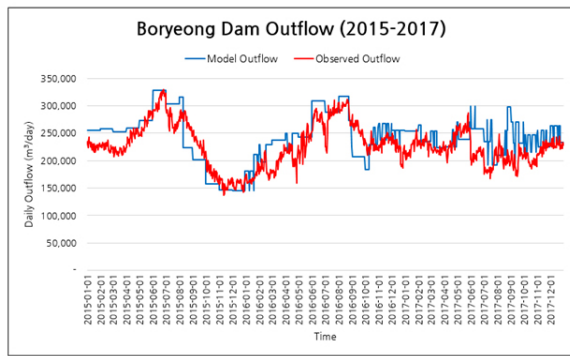


Fig. 5. Boryeong Dam outflow comparison: simulated vs. observed

구축한 최종 모형의 검증을 위해 2015-2017년 동안의 보령댐 모의 방류량과 보령댐 실제 관측 방류량을 평균상대오차(PMRE, Percent Mean Relative Error)와 상관계수(CC, Correlation Coefficient)로 평가하였다(Fig. 5). 그 결과, 월 기본계획 공급에 기초하여 일별 방류량으로 생성한 계단식 모양의 모의 방류량과 실제 관측 방류량 간의 차이가 가뭄으로 인해 기존 대응 계획과는 달리 탄력적으로 댐을 운영해야 했던 2017년을 제외한 구간에서는 크지 않았다. 또한, 가뭄으로 인해 탄력적 운영을 시행한 2017년에는 실제 저수지 운영 시 보다 보수적인 방향으로 운영하기 때문에 2017년 후반기의 모의 방류량이 관측 방류량보다 큰 값을 가지는 것을 설명할 수 있다. PRME는 12.39(%), CC는 0.733으로 산정 되었으며, 이를 근거로 가뭄이 발생했을 시 모형의 방류 시스템이 실제 방류량과 큰 차이 없이 방류를 진행한다고 판단하였고, 같은 모형으로 나머지 모의를 진행하고 결과를 분석하였다. 모의 방류량과 관측 방류량의 차이는 추후 연구에서 개선할 예정이다.

4.4 모의 조건

본 연구에서는 과거와 미래 수요량 시나리오를 각각 입력하여 2개의 모형을 구축하였다. 두 모형 모두에서 보령댐의 최대 저수량은 상시만수위 시의 저수량, 최저 저수량은 사수위 시의 저수량으로 설정하였으며, 보령댐의 초기 저수량은 두 모형 모두 동일하게 2015년 1월 1일 저수량으로 설정하였

다. 또한, 모의 저수량이 댐 최대 저수량을 초과하면 여수로를 통해 저수량을 감량하고, 일 유입량은 댐의 최대 용량을 초과할 수 없도록 설정하였다. 두 개의 모형에서의 단위 시간은 모두 일로 설정하였다.

첫 번째 모형은 모의 기간을 3년으로 설정하여 과거 평년 수준의 유입량(2003-2005년, 2007-2009년, 2011-2013년; 총 3회, Run#1)과 과거 가뭄시 유입량(2015-2017년, Run#2)을 모형에 입력자료로 사용해 실제 용수사용량 시나리오에서 과거 보령댐과 지하체의 가뭄에 대한 취약성을 계산하였다. 두 번째 모형은 30년의 모의 기간동안 2015-2044년 미래 예측 용수사용량에 대하여 2015-2017년 3년 동안의 가뭄이 10회 연속으로 일어난다고 가정한 모의와(Run#3), 선정한 5개 GCM 시나리오를 입력 자료로 사용하여(Run#4) 미래 가뭄 대응 대책 시나리오에 대한 보령댐과 지하체의 평가지표를 계산하였다. 모의 상세 조건을 정리한 내용은 Table 4와 같다.

4.5 모의 결과 및 분석

Table 4에 나타난 Run#1-Run#4를 각각 진행하여 총 4번의 모의 결과로 보령댐과 지하체의 평가지표를 산정하였다. Run#1의 경우, 총 3회의 모의 중 2회는 보령댐과 지하체에서 가뭄이 전혀 발생하지 않았으며(Run#1-1, #1-3), 나머지 1회(Run#1-2)에서는 보령댐에서만 2015-2017년 수준의 약 12.5%만큼의 가뭄이 발생하였다. 따라서, 2015-2017년 수요량 시나리오에서는 보령댐이 평년 수준의 유입량을 공급받는다면 가뭄으로부터 충분히 안전하다고 판단하였다.

나머지 모의 결과는 지하체별 자체수원 확보계획을 단일 대안으로 반영하여, 앞 절에서 서술한 바와 같이 2025년까지의 용수수요량의 9.4% (2018년 01월 기준 확보율), 11.7%, 14.1%, 16.4%, 18.7%, 21%, 23.4%, 25.7% (2025년 목표 확보율), 28%, 30.3%만큼 확보하였을 경우 변화하는 댐과 지하체별 평가지표를 계산하였다.

분석 결과, 대부분 평가지표가 2015-2017년의 장기 가뭄이 연속으로 일어나는 Run#3과 하나의 GCM 시나리오에서(GCM#8) 최악의 결과를 보였다. 이는 미래 기후변화 시나리

Table 4. Inflow and demand scenarios of each run

| Run                         | #1                                      | #2                                      | #3                                      | #4                                    |
|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| Inflow/<br>Demand Scenarios |                                         |                                         |                                         |                                       |
| Inflow Scenario             | Average Inflow<br>(Observed, 2003-2013) | Drought Inflow<br>(Observed, 2015-2017) | Drought Inflow<br>(Observed, 2015-2017) | GCM Scenarios<br>(Seo and Kim, 2018)  |
| Demand Scenario             | Actual Water Demand<br>(2015-2017)      | Actual Water Demand<br>(2015-2017)      | Projected Water Demand<br>(2015-2044)   | Projected Water Demand<br>(2015-2044) |



오 하에서 최악의 경우, 2015-2017년 가뭄에 버금가는 강도의 가뭄을 보령댐과 지자체가 미래에도 다시 한번 경험할 수 있을 것을 시사한다. 또한, 지자체보다는 보령댐이 가뭄으로 인한 영향을 모든 평가지표에서 심하게 받게 되며, 이를 극복하기 위해서는 댐 운영 방식의 개선을 통해 댐 내부적으로 해결방안을 마련해야 함을 알았다. 평가지표 중 보령댐과 지자체의 평균부족횟수와 평균부족량은 지자체의 자체수원 공급율을 증가시키면 선형적으로 감소하는 경향을 보여 예측 및 최적화가 가능하지만, 평균회복기간의 경우에는 선형적으로 감소하는 경향이 타 평가지표보다 뚜렷하게 확인되지 않아 미래 댐 운영 및 대안 추가 시 이에 대한 고려를 추가적으로 진행하여야 함을 확인하였다. 지자체의 경우, 2025년까지 목

표한 자체수원 공급율(25.7%)을 달성할 경우, 대부분의 미래 가뭄 시나리오에서 가뭄이 발생하지 않는다. 이는 곧 미래에 수량적으로는 충분한 대안이 계획되어 있고, 이를 성공적으로 달성한다면 지자체의 가뭄에 대한 위험은 현저하게 감소할 것을 의미한다.

또한, 자체수원 개발과 보령댐 도수로 최대용량 증가라는 두 가지 대안을 동시에 비교하기 위해서 반응함수(Response Function)를 그려보았다. Fig. 6의 반응함수(Response Function)는 지자체별 자체수원 개발비율을 X축, 도수로 최대용량 증가비율을 Y축으로 설정한 후 선정한 5개의 GCM 시나리오 중 최악의 시나리오(GCM #8)에 대해서 댐과 지자체의 평가지표를 시각화한 결과이다.

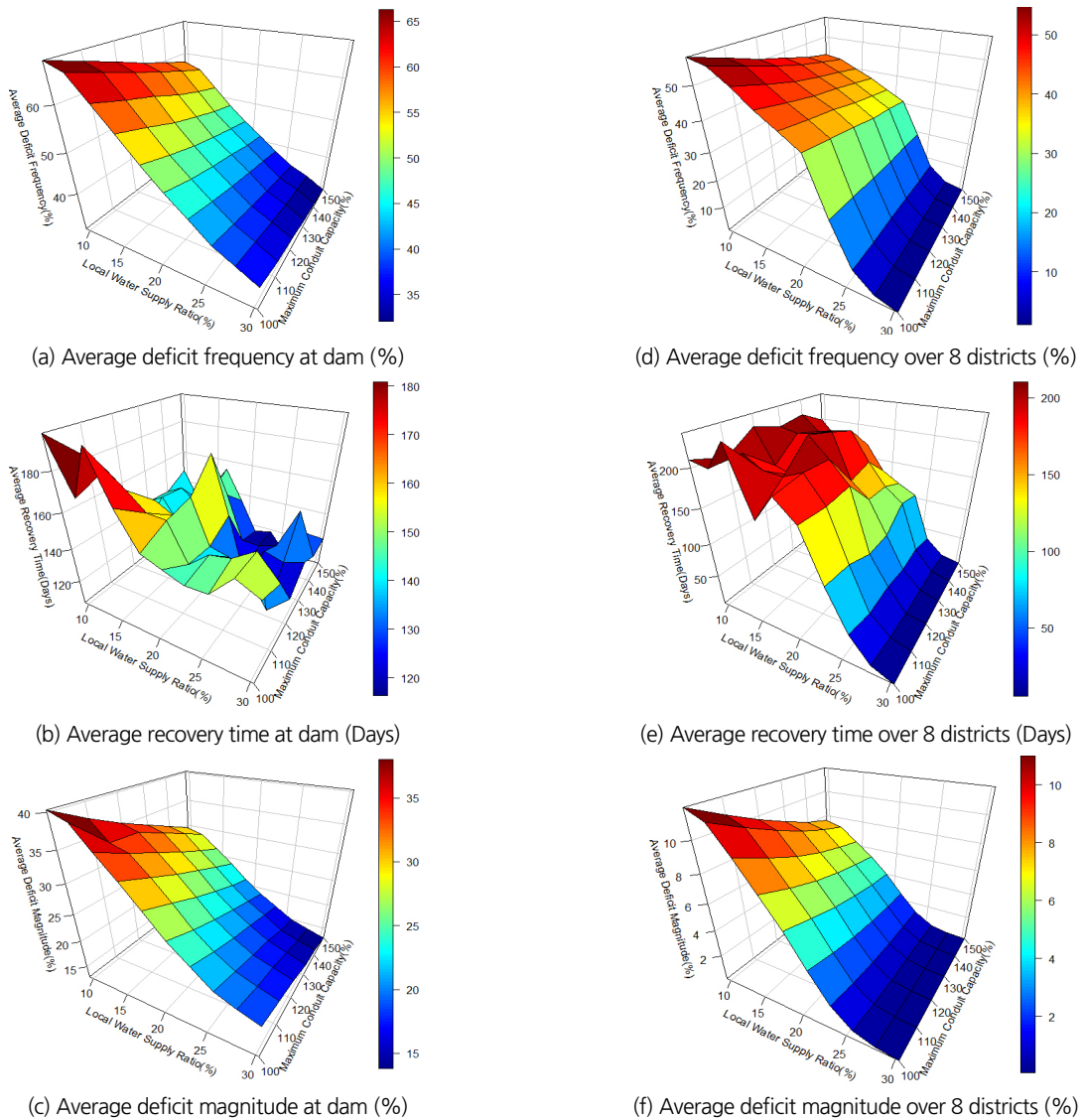


Fig. 6. Response function for the worst GCM scenario

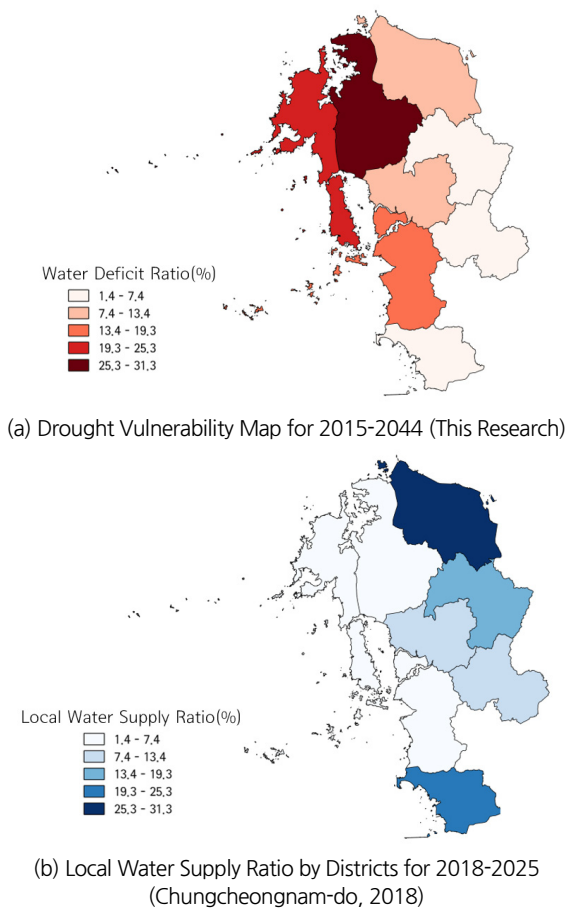


Fig. 7. Comparison of future drought vulnerability and future alternatives of districts

반응함수(Response Function)로 본 연구에서 선택한 두 개의 대안의 효과를 비교한 결과, 도수로의 최대용량을 증가시키는 대안보다는 지자체별 자체수원 공급율을 확보하는 대안이 댐과 지자체의 입장에서 더욱 효과적임을 확인하였으며, 단일 대안을 포함하여 계산한 결과와 유사하게 평가지표 중 평균회복기간이 가장 예측하기 어렵다는 사실을 다시 한번 확인하였다.

추가적으로, 미래 가뭄 취약성을 공간적으로 도시한 결과 Fig. 7과 같이 서산시, 태안군 등의 서해수역의 서쪽 지자체들이 더욱 취약함을 알 수 있었다. 그러나, 충청남도 자체수원 확보계획에 의하면 당진시, 예산군의 자체수원 확보계획이 상대적으로 높았음을 확인할 수 있었다. 그러므로 향후 이러한 불일치에 대한 조정이 필요할 것으로 사료된다.

### 5. 결론 및 향후 연구

본 연구는 협의회를 통하여 비전공유계획을 국내에 적용

하였고, 시스템 다이내믹스의 개념을 반영하여 비전공유모형을 구축하였다. 이후, 소위원회를 통해 이해당사자들의 요청사항을 반영하도록 모형을 수정하였으며, 이를 바탕으로 과거 및 미래 용수수요량별 과거 평년 유입량, 과거 가뭄 유입량 및 GCM 유입량의 세 가지 유입량 시나리오에 대해 모의를 진행하고 그 결과를 빈도, 지속기간, 크기의 측면으로 나누어 보령댐과 지자체의 평가지표를 제시하였다.

총 3차례의 소위원회를 거쳐 초기에 구축한 지자체 중심의 모형을 보령댐 중심의 모형으로 수정하였으며, 지자체뿐만이 아닌 보령댐의 평가지표도 계산할 수 있도록 모형을 개선하였다. 가뭄 시 모형에서의 방류량과 관측 방류량을 비교하여 모형을 검증하였고, 검증이 완료된 모형으로 미래 모의를 진행하고 보령댐과 지자체의 가뭄에 대한 평가지표를 산정하였다. 평가 결과, 2015-2017년의 가뭄 시 과거 유입량 시나리오 외에도 하나의 GCM 유입량 시나리오에서 보령댐과 지자체에서의 가뭄이 발생하였고, 이를 통해 곧 미래에도 보령댐이 가뭄에 취약하다는 것을 확인하였다. 또한, 평가지표 중 평균부족횟수와 평균부족량은 대안을 추가할수록 선형적으로 감소하는 경향을 보여 예측이 용이하였지만 평균부족기간은 경향성을 찾기가 어려워 향후 댐 운영 과정이나 대안 설정 과정에서 지속기간에 대한 고려가 필수적임을 알았다. 댐의 경우, 지자체보다 빈도, 지속기간, 크기 모든 측면에서 가뭄으로부터 더 취약하고, 이는 곧 댐 운영방법의 개선을 통해 극복되어야 하겠다. 가뭄 대응을 위한 대책의 효과적인 선택을 위해서 반응함수(Response Function)의 형태로 두 가지 대안을 동시에 비교하였는데, 본 연구의 대상 유역에서는 도수로 최대용량을 증가시키는 대안보다는 지자체별로 계획되어 있는 자체수원 확보율을 충족시키는 대안이 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 지자체의 경우에는 2025년까지 계획하고 있는 자체수원을 계획대로 개발한다면 보령댐 용수 부족으로 인한 가뭄 위험이 현저하게 감소함을 확인하였다. 그러나, 본 연구의 취약 예상지역과 기존에 충청남도에서 계획한 자체수원 확보 우선 지역이 상이함을 알 수 있었다.

향후 연구로써, 댐 내부적으로 운영방법 개선을 통해 용수 부족을 해소할 방안을 마련하고, 이를 구축한 모형에 적용하여 그 효과를 확인하고자 한다. 또한, 향후 추가적인 소위원회를 통해 현재까지 개발된 비전공유모형을 사용자가 더욱 쉽게 사용할 수 있도록 추가적으로 개선할 계획이다. 즉, 이해당사자들이 직접 모형을 수정하고 모의를 진행할 수 있도록 STELLA Architect 워크숍을 개최하여, 참여형 의사결정 과정으로 개발된 모형이 미래 가뭄 대응에 더욱 적극적으로 사용될 수 있도록 하겠다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원(과제번호 RE201901081)으로 수행되었으며, 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사를 드립니다.

## References

- Chungcheongnam-do (2015). *Comprehensive plan for water resources in Chungcheongnam-do*. Chungcheongnam-do. pp. IV-20-IV-92.
- Chungcheongnam-do (2016). *Minutes for inaugural assembly climate change adaptation council in Chungcheongnam-do*. Korean.
- Chungcheongnam-do (2017). Altering the drought action for drought overcoming, accessed 21 February 2019, <[http://www.chungnam.net:8100/multi/multiMedia.do?article\\_no=MD0001088108&med\\_action=view&mnu\\_cd=CNMENU00003](http://www.chungnam.net:8100/multi/multiMedia.do?article_no=MD0001088108&med_action=view&mnu_cd=CNMENU00003)>.
- Chungcheongnam-do (2018). *Local water supply secure plan for diversification of districts*. Korean.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., and Woodward, S. (2011). "Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2." *Geoscientific Model Development*, Vol. 4, pp. 1051-1075.
- Davini, P., Cagnazzo, C., Fogli, P. G., Gualdi, S., and Navarra, A. (2014). "European blocking and Atlantic jet stream variability in the NCEP/NCAR reanalysis and the CMCC-CMS climate model." *Climate Dynamics*, Vol. 43, No. 1-2, pp. 71-85.
- Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., and Benschila, R. (2013). "Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5." *Climate Dynamics*, Vol. 40, No. 9-10, pp. 2123-2165.
- Eum, H.-I., and Cannon, A. J. (2017). "Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: Application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble." *International Journal of Climatology*, Vol. 37, pp. 3381-3397.
- Forrester (1961). *Industrial dynamics*. Cambridge, The MIT Press.
- Forrester (1969). *Urban dynamics*. Cambridge, The MIT Press.
- Forrester (1971). *World dynamics*. Cambridge, Wright-Allen Press.
- Global Water Partnership (2018). Shared Vision Planning Approach Applied in Tisza River Basin, accessed 13 February 2019, <[www.gwp.org/en/GWP-CEE/WE-ACT/news/2018/shared-vision-planning-approach-applied-in-tisza-river-basin/](http://www.gwp.org/en/GWP-CEE/WE-ACT/news/2018/shared-vision-planning-approach-applied-in-tisza-river-basin/)>.
- Hashimoto, T., Loucks, D. P., and Stedinger, J. R. (1982). "Reliability, resiliency, robustness, and vulnerability: criteria for water resource systems." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Jeong, H.-O., Han, J.-I., and Park, S.-W. (2012). "Development of hydrological Shared Vision Model for conflict mediation of dam construction." *Journal of Korea Water Resources Association*. KWRA, Vol. 45, No. 10, pp. 1009-1022.
- Jeong, W. H., and Kim, Y. I. (2017). *Evaluation of Boryeong Dam water supply capacity and drought policy suggestions*. ChungNam Report Vol. 278, ChungNam Institute, pp. 1-16.
- Jeong, W. H., Rho, S. H., and Kim, Y. I. (2016). *Evaluation of Boryeong Dam water supply capacity and drought action plan*. Strategic Research 2016-33. Chungnam Institute. pp. 38-41.
- Keyes, A. M., and Palmer, R. N. (1995). "An assessment of Shared Vision Model effectiveness in water resources planning." *Proceedings from the 22<sup>nd</sup> Annual National Conference, Water Resources Planning and Management Division of ASCE, Cambridge, Massachusetts, May 1995*, pp. 532-535.
- K-water (2017). *Boryeong Dam conduit operation standards*. Korean.
- Lee, K. S., and Chung, E. S. (2011). "Planning and implementation for integrated watershed management." *Journal of The National Academy of Sciences, Republic of Korea*. Vol. 50, No. 2, pp. 153-191.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *National Water Supply Adjustment Standards*. Korean.
- Moon, T. H. (2002). "Issues and methodological status of system dynamics." *Journal of Korean System Dynamics Society, KSDS*, Vol. 3, No. 1, pp. 61-77.
- MyWater (2016). *Test operations of drought forecast and future plans*. MyWater Issue Report Vol. 2006-3. pp. 1-15.
- MyWater (2019). K water, accessed 13 February 2019, <<https://www.water.or.kr/index.do>>.
- Palmer, R. N., Keyes, A. M., and Fisher, S. (1993). "Empowering stakeholders through simulation in water resources planning." *Proceedings of the 20<sup>th</sup> anniversary conference: Water management in the '90s. A time for innovation*. ASCE, Seattle, Washington, pp. 451-454.
- Richardson, G. P. (1999). "Reflections for the future of system dynamics." *The Journal of Operational Research Society*. ORS, Vol. 50, No. 4, pp. 440-449.
- Ryu, J. N., Kang, H. S., Kim, M. A., and Shin, H. N. (2015). *Review of water budget management methods using casual loop*. Working Paper, 2015-12, Korea Environment Institute, Korean, pp. 35-55.
- Seo, S. B., and Kim, Y.-O. (2018). "Impact of spatial aggregation level of climate indicators on a national-level selection for representative climate change scenarios." *Sustainability*, Vol. 10, No. 7, pp. 2409.
- Seo, S. B., Kim, Y.-O., Kim, Y., and Eum, H.-I. (2018). "Selecting climate change scenarios for regional hydrologic impact studies based on climate extreme indices." *Climate Dynamics*, Vol. 53, No. 3-4, pp. 1595-1611.
- Sugawara, M. (1995). *Tank model. in computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, CO, USA.
- United States Army Corps of Engineers (USACE) (2010). *How to conduct a shared vision planning process*. IWR Report 10-R-6. Alexandria, Virginia, pp. 1-8.

- Walker, W. E., Mayer, I. S., and Hagen, E. R. (2010). "Shared vision planning as policy analysis: Opportunities for shared learning and methodological innovation." *Proceedings from World Environmental and Water Resources Congress 2010*. EWRI, Providence, Rhode Island, pp. 2204-2222.
- Wang, X. (2013). *A dynamic water balance model for drought management: A case study of the Invitational Drought Tournament*. M. S. dissertation, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, pp. 45-51.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., and Kawamiya, M. (2011). "MICROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments." *Geoscientific Model Development*, Vol. 4, pp. 845-872.
- Werick, W. (2000). "The future of shared vision planning." *Joint Conference in Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management 2000*, ASCE, Minneapolis, MN.
- Wu (2012). "A mass-flux cumulus parametrization scheme for large-scale models: description and test with observations." *Climate Dynamics*, Vol. 38, No. 3-4, pp. 725-744.
- Xi, X., and Kim, L. P. (2013). "Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore." *Procedia Computer Science*, Atlanta, Vol. 16, pp. 157-166.