

가뭄 대응 및 피해 경감 목적의 수자원 관리 및 공급 전략에 대한 소고



차호영
중앙대학교 일반대학원
스마트시티학과 석사과정
ckghdud2@cau.ac.kr



구서영
중앙대학교 공과대학
사회기반시스템공학부
학부과정
presentia4109@cau.ac.kr



권건우
중앙대학교 공과대학
사회기반시스템공학부
학부과정
pppoyai2002@cau.ac.kr



이진욱
하와이대학교
공과대학 토목공학과
박사후연구원
jinwookl@hawaii.edu



전창현
중앙대학교 공과대학
사회기반시스템공학부
부교수
cjun@cau.ac.kr

01 들어가며

수자원은 인간의 활동에 밀접하게 연결되어 있는 유한하고 필수적인 기초자원이며, 생활 분야를 포함한 농업 및 산업 분야에서 광범위하게 활용된다(Green et al., 2007; Wang and Qin, 2017). 한편, 수자원의 공급체계는 기후변화 인하여 발생하는 극한 호우사상에 대해 취약하다(Ding et al., 2021; Banuri and Opschoor, 2007). 특히, 급격하게 영향을 미치는 홍수 및 폭우와는 다르게 가뭄은 그외 지속성에 따라 극심한 피해를 야기할 수 있다(Lin et al., 2022; Spinoni et al., 2014; Loucks and Van Beek, 2017; Li et al., 2022). 이와 같이, 가뭄은 지속기간에 따라 생태계, 농업 및 인류 사회에 미치는 영향이 다르며, 이러한 영향은 하천 유지의 불가능부터 식량 안보에 이르기까지 광범위한 분야를 위협할 수 있다(Yang et al., 2020). 이를 대처하기 위해 수자원을 효과적으로 관리하고, 지속 가능한 발전 및 환경 탄력성을 보장한 전략적인 수자원 배분 계획을 아우르는 종합적인 접근이 필요하다(Cosgrove and

Loucks, 2015; Shiklomanov 1991).

수자원 배분이란 통상 이해관계자들 내에서 서로 상충하는 상황을 토대로 우선 순위를 선정하고, 수자원을 효율적으로 분배하는 것을 의미한다(Eriksson et al., 2011). 일반적인 상황에서의 수자원 배분은 정해진 법령과 규제에 맞게 지속 가능한 선에서 이루어지면 된다. 그러나 가뭄이 발생한 시점에서는 상황이 달라진다(Charalambous, 2001). 가뭄에서의 수자원 배분은 가뭄을 완화하는 측면에서 한쪽에 치우쳐지지 않고 농업, 도시, 산업 및 생태계에 모든 측면을 균형있게 고려해야 한다(Guo et al., 2017). 수요량 관리를 포함한 우선순위 선정에서 다양한 부문과 지역 사회에 미치는 부정적인 영향을 최소화하는 것이 중요하다(Loucks and Van Beek, 2017). 또한, 주요 가뭄 위험 인자와 가뭄 피해의 발생 과정에 대한 이해관계자 간의 공통적 이해를 필요로 한다(Collins et al., 2016). 이를 통해, 수자원 배분에서의 우선 순위를 구성하고 평가하는 점에 있어 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

수자원 배분을 통해 가뭄에 의한 사회, 경제, 환경적 문제를 효율적으로 해결하는 것은 세계적으로 고민이 필요한 필수 과제이다. 수자원 배분 전략은 가뭄 기간 동안 수자원을 효율적으로 관리할 수 있는 중추적인 요소이며, 균형잡힌 전략을 제시하기 위해 지속적으로 고민할 필요가 있다(Fontane and Frevert, 1995). 이러한 전략은 수요량 관리를 시작으로 가뭄 취약지역 판단, 수자원 이용 현황, 수자원 이용제한 및 규제, 그리고 물 가격 책정 등으로 발전하여 나타났다.(Cosgrove and Loucks, 2015; Thomas et al., 2022; Recio et al., 2005). 이처럼 다양한 전략들이 제시되지만, 우리는 수자원 배분을 효율적으로 살펴보기 위해 제시된 전략을 구분하고 정의할 필요가 있다.

이에, 본 연구에서는 가뭄으로 인해 직면한 지역사회의 부정적인 영향을 회복할 수 있도록 유도하는 수자원 관리 및 공급 전략에 대해 소고해 보고자 한다. 수자원 배분 방식에서의 전략을 크게 4가지로 나누어 살펴볼 것이다. 이러한 전략은 지속 가능한 수자원 공급과 기후변화에 따른 신속한 적응 능력에 초점을 맞추어 구성한다.

02

효율적인 수자원 관리 공급을 위한 4대 전략

그림 1은 가뭄 기간 중 수자원 및 수요 관리에 대응하기 위한 주요 요소들을 표현한다.

2.1. 관측 자료의 가치 증진: 실시간 모니터링, 품질 평가, 정보 공개

가뭄을 실시간으로 모니터링하고 판단하기 위해 기온, 강수량, 가뭄 지수 등과 같이 기타 관련된 데이터들을 지속적으로 사용한다. 이러한 데이터들은 가뭄의 상황을 과학적으로 판단할 수 있는 근거가 될 수 있으며, 가뭄의 영향을 완화하기 위해 적시

효율적인 수자원 배분 방식에서의 주요 구성요소

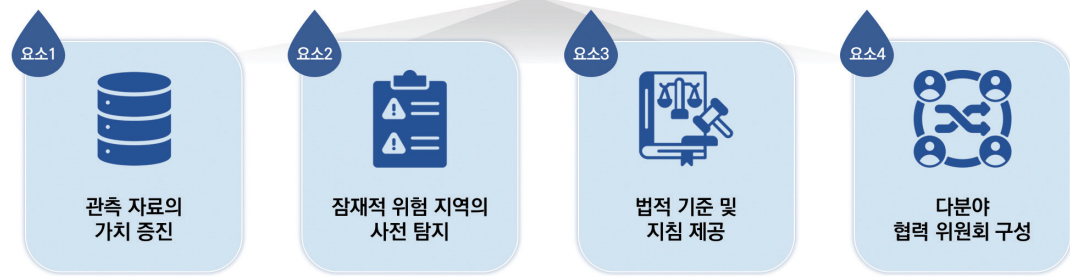


그림 1. 효율적인 수자원 배분 방식에서의 주요 구성요소

의 조치를 취하게 하는 중요한 요소이다. 정확한 계측을 통해 가뭄 위험 저감 및 공간적 수자원 배분을 계획할 수 있다(Hagenlocher et al., 2019). 이처럼 관측 자료는 중요한 가뭄 상황의 판단 기준이 될 수 있으며, 이를 효율적으로 정리할 필요가 있다. 따라서, 본 절에서는 국내에서 확보 가능한 데이터를 중심으로 살펴봄, 그 데이터가 가뭄 상황에서의 어떠한 판단 기준이 될 수 있는지를 확인해보았다.

기상 관측 자료(강수량, 기온 등): 강우 패턴 및 부족량은 가뭄의 시작과 진행 과정을 감지하기 위해 기본적으로 살펴보아야 한다. 평년치 및 강수평년비 등은 강우 부족 지역을 식별하기 위해 사용할 수 있다(Masoudi and Hakimi, 2014). 또한, 강우 예보는 가뭄 모니터링 및 단기적 가뭄 대응에 대한 통찰을 제공할 수 있다(Dikshit et al., 2021; Ghasemi et al., 2021). 높은 기온은 증발을 가속시켜 토양 수분 고갈에 영향을 미칠 수 있다. 기온의 이상치는 증발산량 및 추세 분석을 통해 가뭄 전파 및 가뭄 심도 변화에 유효한 영향을 확인할 수 있다(Zhao et al., 2022). 가뭄 상황을 악화시킬 수 있는 지속적인 폭염 기간도 기온을 통해 식별할 수 있다. Vicente-Serrano et al. (2010)은 기온과 강수를 통합적으로 고려하여 증발산을 통해 기상학적 가뭄을 정의하기도 하였다.

원격 탐사 및 위성 이미지(가뭄 지수, 식생 상태 등): 원격 탐사 및 위성 이미지는 가뭄의 심도를 공간적으로 파악할 수 있는 자료로 활용된다. 그에 있어, 다양한 가뭄지수를 지도 상으로 확인할 수 있는 하나의 매개체이기도 하다. 가뭄 지수는 표준 강수 지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 포함하여 다양한 지수들이 지속적으로 개발되어 왔다(Palmer, 1965; McKee et al., 1993; Byun and Wilhite, 1999; Tsakiris et al., 2007; Vicente-Serrano et al., 2010). 이를 활용해 추세 및 가뭄

지속기간에 따른 가뭄 발생의 증감 패턴을 확인할 수 있으며 다가오는 가뭄의 상황도 예측할 수 있다(Wang et al., 2019). 또한, 이를 통해 식생 상태 변화를 모니터링할 수도 있다. 예를 들어, 식생의 녹색 채널 감소량 감지 등을 통해 식생 상태 변화를 감지한 사례들은 어렵지 않게 찾아볼 수 있다. Nijhawan et al. (2017)은 CNN을 활용하여 위성 이미지를 통해 식생 영역을 구분하였으며, 정확도가 88.43%가 나오는 알고리즘을 개발하기도 하였다. 이외에도, 원격 탐사와 이미지는 다양한 방법론을 통해 농업 및 생태학적 가뭄을 감지하는 데 자주 활용된다(Amalal and Hidayat, 2017; Du et al., 2013; Jiao et al., 2016; Karnieli et al., 2010; Quiring and Ganesh, 2010).

수문학적 자료(수위 변화, 저수율 등): 수문학적 가뭄은 유량 감소와 하천 및 호수의 수위 감소로 정의될 수 있다. 이러한 수표면에서의 수위 감소를 감시하는 것은 수문학적 가뭄의 주요 지표 중 하나이다(Vicente-Serrano et al., 2012; Tabari et al., 2013; Salimi et al., 2021). 또한, 저수지 수위에 대한 지속적인 모니터링은 관개, 음용수 공급 및 수력 발전을 포함한 다양한 용도를 위해 수자원 가용성을 평가하는데 활용된다. 가뭄으로 인한 저수지의 수위 감소는 수자원 부족의 시작을 나타낼 수 있다. 지하수는 특히 (준)건조 지역에서 중요한 수자원이다. 관정과 지하수층의 지하수위를 모니터링하면 지하수위 감소를 감지할 수 있으며, 이는 가뭄 상황을 초기에 판단할 수 있는 지표가 될 수 있다(Ashraf et al., 2021).

감지 센서(토양 수분 등): 토양 수분은 식생을 자라게 하는 직접적 요인으로, 이를 통해 가뭄으로 인해 감소한 수확량을 예측할 수 있다. 이는 더 나아가 식량 부족과 같은 중대한 경제적 및 인도적 위기를 초래할 수 있다. 이러한 위기를 최소화하기 위해선, 수개월 전에 향후 토양 수분에 대한 가뭄과 관련된 수문학적 예보를 하는 것이 중요하다(Sridhar et al., 2008; Thober et al., 2015). 그리고 이를 위해 토양 수분을 정확하게 측정하고 감지하는 것이 중요하다. 토양 수분 함량을 정확하게 계측하기 위해 다양한 선행연구에서 토양 수분 감지 센서를 지속적으로 개발하고 있다(Yu et al., 2021).

관측 자료를 확보하고 지속적으로 살펴보는 것은 가뭄을 완화하는 점에 있어 핵심적인 요소로 작용한다. 이는 의사결정권자가 그들의 조치를 뒷받침하는 정확하고 가장 최근의 정보에 접근할 수 있게 한다. 과거 강우 패턴부터 가뭄 심도의 추세에 이르기까지 포괄적인 데이터는 정보에 기반한 의사결정, 위험 평가, 자원 배분을 가능하게 한다. 실시간 데이터는 새로운 가뭄 상황에 적시에 대응하여 그 영향을 최소화하는데 필수적이다. 관측 자료의 접근성 및 가치를 우선시하는 것은 가뭄을 완화하는

데 필수적일 뿐만 아니라 변화하는 기후와 수자원 문제에 대처하기 위한 적응력 향상에 도움을 준다. 또한, 관측 자료를 각각 다른 시각으로 보는 것이 아니라 종합적인 보는 시각은 서로 간의 데이터에 대한 타당성을 부여할 수 있고, 관측 자료의 가치를 증진시킬 수 있을 것이다.

2.2. 잠재적 위험 지역의 사전 탐지: 대기중 취약성 분석, 적정 수요-공급량 기준 마련

잠재적 위험 지역을 판단하는 것은 수자원 배분 전략에서의 지역적으로 우선순위를 결정할 수 있는 하나의 판단 기준으로 활용 가능한 요소이다(Avia et al., 2023; OECD, 2015). 이는 가뭄 기간 동안 지역 내 피해에 대한 지리적 분포를 평가하고 이해하는 것도 포함한다. 위험 지역을 판단하는 기준은 가뭄 상황에서 잠재적 수자원 부족에 대한 종합적인 평가로 시작되며, 이러한 위험에 있어 수자원 가용성 감소, 수자원 수요 증가, 환경적 영향, 그리고 사회경제적 취약성 등이 포함된다. 위험지역에 있어 가뭄에 취약할 수 있는 지역은 조기 경보 시스템을 통해 다른 지역보다 미리 대응할 수 있도록 한다. 그리고 이는 앞단에서 언급한 관측 자료를 활용하여 시·공간적 분석을 통해 잠재적 위험 지역을 특정할 수 있다(Li et al., 2022).

관측 자료뿐만 아니라 수문학적 조건, 수자원의 환경적 요인에 대한 데이터를 수집하고 분석하여 위험 지역을 판단할 수 있다. 지리 정보 시스템은 데이터의 공간 분포를 지도로 나타낼 수 있으며, 이는 인구 밀도, 기대 수명과 같은 지역적 특성은 물론 빈곤율, 국내 총생산, 댐의 개수, 댐의 용량, 농업 생산성 등 수자원에서의 경제·환경적 요인을 포함할 수 있다. Avia et al. (2023)은 이러한 지리 정보 시스템을 통해 여러 매개변수를 활용하여 가뭄의 취약성을 감지하였다. 이 연구를 통해 정부에서는 가뭄 피해 완화를 위해 우선순위를 판단할 수 있는 여러 구역을 확인할 수 있었으며, 이를 토대로 잠재적 위험 지역을 계층화했다. 이에 본 절에서는 잠재적 취약성을 확인할 수 있는 기준을 정리했다.

가뭄 취약성의 공간분포 확인: 가뭄의 취약성은 여러 지역 및 공동체에 대한 다양한 인자를 고려하여 평가한다. 사회·경제 조건을 포함한 자원 접근성, 인프라 수준, 과거의 가뭄 경험 등을 고려할 필요가 있다. 이를 지역화하여 한 구역 내 취약성의 공간적 분포를 확인할 수 있다. 가뭄 취약성 수준에 따라 대상 지역을 세분화하여 구분하고, 가뭄 취약성이 높은 지역을 중심으로 가뭄 완화를 위한 조치에 대해 우선적으로 고려한다. 이러한 지역은 수자원 관리, 교육, 홍보 등과 같은 시민 참여의 적극적 개입을 유도할 수 있도록 정부 차원에서 지원해야 한다.

인구 취약성: 인구 취약성은 연령, 성별, 소득 수준, 교육 및 사회적 지위를 포함한 다양한 인구학적 요인들을 고려한다(Ahmadalipour et al., 2019). 인구 취약성은 지역별로 크게 다를 수 있다. 노인, 어린이, 기저질환을 가진 사람들은 가뭄의 영향에 더 취약한 경우가 많다. 취약 계층은 건강 및 복지 측면에서 잠재적인 건강 위험 수준을 평가하고 이들이 피해받지 않도록 대비할 필요가 있다. 특히, 가뭄을 통해 수질 관리, 적합한 위생, 충분한 영양 공급이 이루어지지 않을 경우, 취약 계층의 생존 문제까지 이어질 수 있다. 가뭄이 잦은 지역에 속한 취약 계층은 사회적 차원에서 제공하는 지원 시스템과 지역 사회 네트워크에 의존하게 될 것이며, 이러한 의존성은 해당 지역사회에 대한 가뭄의 회복력에도 영향을 미칠 수 있다.

기반시설 유지 및 보수: 기반시설 유지 및 보수에 대한 취약성 평가는 가뭄 중에도 가정에 깨끗한 식수를 공급할 수 있는 정수장, 배급 관망, 저장 시설이 언제까지 지속 가능한지 판단할 수 있는 기준이 된다(Zeff et al., 2016). 또한, 지역 사회의 건강성을 위한 적절한 위생 시설과 폐수 처리는 공중 보건을 유지하는 데 필수적이며, 기반시설로 하수 시스템, 폐수 처리장이 포함된다. 소방 시설 및 공중 보건 시설은 가뭄으로 인하여 유지성이 떨어질 수 있으며, 이는 곧 지역 사회의 복지에 대한 위기로 이어질 수 있다. 비상 대응을 위한 기반 시설에는 가뭄 관련 비상 상황에 신속하게 대응할 수 있는 재난 관리 센터, 조기 경보 시스템, 통신 네트워크를 토대로 취약성을 평가한다.

2.3. 법적 기준 및 지침 제공: 자원 배분 전략, 비상 대응 체계 마련

수자원에 대한 법적 기준 및 지침은 가뭄의 영향을 완화하고 지속 가능한 물 관리를 보장하기 위해 시행되는 필수 조치다. 일반적으로 수자원에 대한 지침은 정부, 지방 당국, 및 수자원 관리 기관에서 이를 시행하고 공표한다. 지침에 대한 주요 목표는 가뭄 기간 동안 용수 수요량을 최소한으로 줄이고 필수적인 수요에 우선적으로 배분하는 것이다. 이는 앞단에서 설명한 취약 계층의 생존 문제와 같은 필수 요소를 참고하여 효율적으로 보존하고 관리하는 뚜렷한 목표를 지니고 있다. 한편, 가뭄 기간 동안 필수 목적 외의 개인 실외용수(잔디밭 물주기, 수영장 물 등), 공업용수, 농업용수 등 다양한 형태의 용수가 제한될 수 있다. 이러한 규정은 지역에 맞게 조정되어야 하며, 지역마다 상수도 상황과 그에 대한 취약성에 적합한 제한 조치를 시행해야 한다. 그리고, 이와 같은 조치는 급수 일정과 실외용수가 사용가능한 날짜를 지정하는 것으로부터 시작된다.

법적 지침을 제시하는 수자원 관리 기관은 명확한 기준 수립을 통해 다음과 같은

과제를 성공적으로 수행할 수 있다. 1) 취약성 및 필요 수준에 따른 제한된 자원의 적절한 분배, 2) 수요 집중 지역에서의 물 사용 최적화, 3) 지역사회 참여 유도, 4) 투명성 보장, 5) 생태계 보호, 6) 자료와 증거에 기반한 결정, 나아가, 이러한 기준은 책임, 적응성 및 전반적 가뭄 완화 시도에 대한 효력을 향상시킨다. 궁극적으로 체계적인 기준 설정은 이해관계자에게 정보에 입각한 정당한 선택을 할 수 있는 능력을 부여하고, 이를 통해 공급 계획의 영향력을 높여 가뭄 피해에 대한 복원력을 구축할 수 있는 역량을 강화한다. 본 절에서는 이러한 법적 기준 및 지침에 대한 사례들을 살펴보고자 한다.

계층적 구간 요금제(Increasing Block Rate, IBR): 용수 수요량에 대한 관리는 용수의 가격 책정을 통해 해결할 수 있다. 그 중 용수 절약을 위해 IBR을 도입하는 사례가 많다(Baerenklau et al., 2014; Mukherjee et al., 2016). IBR이란 수도 사업장에서 용수 가격을 설정하여 물 단위당 요금이 소비량에 따라 증가하는 가격 책정 전략이다. IBR은 소비자의 효율적 물 소비를 위한 보상 제공과 과도한 소비 억제에 대해 고안되었으며, 수도 시설과 지방 자치 단체에서 효율적 용수 사용 및 절약 장려를 하기 위해 많이 사용된다. 캘리포니아 남부 지역의 동부 지자체를 대상으로 한 실증 분석에 따르면 해당 형태의 요금제는 동일한 평균 가격 수준의 단일화된 요금 구조에 비해 용수 수요를 10~15% 감소시킨 것으로 나타났다(Baerenklau et al., 2014).

임계 수자원 수요량(Critical Human Water Needs, CHWN): CHWN은 인구의 일일 소비량 충족을 위해 필요한 최소한의 양을 결정하는 정책이다. 계층에 관계 없이 모든 사람들이 안전하고 깨끗한 식수를 이용할 수 있도록 보장하는 정책이며, 특히, 취약 계층에서의 음용수 유지를 가능하게 할 수 있다. CHWN은 가뭄 기간 중에도 음용수의 가용성 확보를 최우선적으로 진행하며, 수자원 보존 전략, 수질 모니터링 강화, 그리고 비상 급수 시스템 구축 등에도 영향력을 행사할 수 있다(Mullin, 2020). CHWN은 위생 시설과 밀접한 관계가 있으며, 위생시설 유지부터 하수 처리까지 위생적 활동을 포함한다. 이를 토대로 위생 및 폐수 관리를 위해 필요로 한 최소한의 용수만을 설정하고, 낭비되지 않은 용수를 토대로 가뭄 완화에 도움을 줄 수 있다. 위생분야뿐만 아니라 농업 분야, 생태계 분야, 공업 분야 등 다양한 분야에서 해당 정책을 활용하여 필수적인 용수만을 구별하여 활용한다.

수자원-경제 모델을 통한 정책 결정(Policy decision for hydro-economic model): 수자원-경제 모델은 공간적으로 분산된 수자원 시스템, 인프라, 관리 옵션 및 경제적

가치를 통합한 모델을 의미한다. 핵심 개념은 수자원 수요를 고정시키는 것이 아닌 시간과 공간에 따라 변화하는 경제적 가치를 계산하는 것이다. 이는 다양한 영역에서 정책 결정을 내리는 데 중요한 역할을 한다(Harou et al., 2009). 기반 시설 계획부터 수자원 배분, 시장 변동성 등 광범위한 분야에 적용된다. 또한, 수자원-경제 모델은 정부의 권리에 대한 고려 사항을 포함하여 환경적, 사회적, 경제적 목표를 달성하기 위한 제도적 정책 설계에 기여한다. 이러한 모델들은 경제 정책 영향 분석에 유용한 도구로 사용되며 수자원 관리와 관련된 규제 프레임워크 및 법적 근거를 제공한다. 본질적으로, 수자원-경제 모델은 광범위한 정책적 함의를 아우르며, 이는 정보에 입각한 의사 결정을 할 수 있는 안내자의 역할을 한다. 따라서 이를 활용한다면, 가뭄의 상황에서 용수를 가정에 공급하는 과정에 대한 경제적 효용성을 계산하고, 그에 적합한 수자원 배분에 대한 의사결정을 수립할 수 있을 것이다.

수자원 배분에서의 법적 기준은 정해져 있는 틀 내에서 의사결정권자들에게 신속한 가뭄 대응을 유도할 수 있다. 또한, 이는 수자원을 효과적으로 관리할 수 있도록 지속적인 도움을 줄 수 있다. 시민들에게 기존 규제를 준수하도록 정부에서는 지속적인 교육과 홍보를 지원하고, 시민 참여에 따른 가뭄 완화에 대한 새로운 정책을 개발할 수 있다. 의사결정권자는 법적 정책을 결정하는 단계에서 가뭄의 복원력을 중점으로 조정하며, 효율적인 수자원 배분 전략과 비상 대응 체계를 쉽게 이행할 수 있다. 더욱이, 법적 및 정책을 토대로 수자원 관리에 활용한다면 자원 관리의 책임성과 명확성을 높여 취약한 지역 사회와 생태계를 보호할 수 있다. 본질적으로, 수자원에 대한 법적 기준과 지침은 가뭄 완화가 지속 가능성과 공평한 자원 배분을 반영한 법적 틀 내에서 운영되도록 도와주는 기초적인 역할을 한다.

2.4. 다분야 협력 위원회 구성: 시민 참여, 형평성 보장, 복원력 확보

가뭄은 장기간의 수자원 부족으로 농업을 황폐화시키고, 생태계를 교란시키며 식량 안보 및 시민들의 생존까지 위협할 수 있다. 기후변화로 인해 가뭄의 빈도와 심도가 증가함에 따라 이를 신속하게 대응할 수 있는 하나의 매개체가 필요하다. 이에 가뭄 상황 시 수자원 배분 결정을 모니터링하고 관리하기 위한 다분야 협력 위원회를 설립하는 것이다. 다분야 협력 위원회란 다양한 분야의 전문가와 이해관계자로 구성되어 특정 문제를 효과적으로 해결하기 위한 모임을 의미한다. 그리하여, 본 절에서는 가뭄에서의 수자원 관리에 있어 위원회의 핵심 요소와 역할, 그리고 가뭄 완화의 형평성과 복원력을 보장하는 데 있어 위원회의 중요성을 살펴본다(Wihite et al., 2014; Wilhite, 2016; Wilhite and Pulwarty, 2017; Jedd et al., 2021).

위원회 구성(안) - 다양한 전문가 및 이해관계자로 구성된 패널: 가뭄 완화를 위한 다분야 협력 위원회의 기본적인 접근 중 하나는 위원회를 구성하는 것이다. 위원회는 기본적으로 자신의 분야에서 가뭄 시 수자원 관련 문제를 해결할 수 있는 구성원으로 시작되어야 한다. 위원회 구성에는 일반적으로 수자원 가용성 및 가뭄 상황에 관한 데이터와 예측을 제공하는 수문학과 기상학자가 포함된다. 환경 과학자들은 수자원 배분 결정의 환경적 영향을 평가하고 생태계를 보호하는 데 중요한 역할을 한다. 농업 및 식량 안보 전문가들은 수자원 배분이 농작물 수확량과 식량 공급에 미치는 영향을 이해하고 이에 대한 의견을 제시한다. 경제학자는 일련의 결정에 대한 경제적 결과를 분석하고, 법률 및 정책 전문가는 규제 준수를 확인한다. 중요한 것은 지방당국관계자, 비영리 단체, 환경 옹호단체가 수자원 배분 결정에 직접적으로 영향을 받는 사람들의 우려와 요구를 고려한다는 것이다. 이러한 전문성과 관점의 다양성을 통해 보다 포괄적인 의사결정을 내릴 수 있을 것이다.

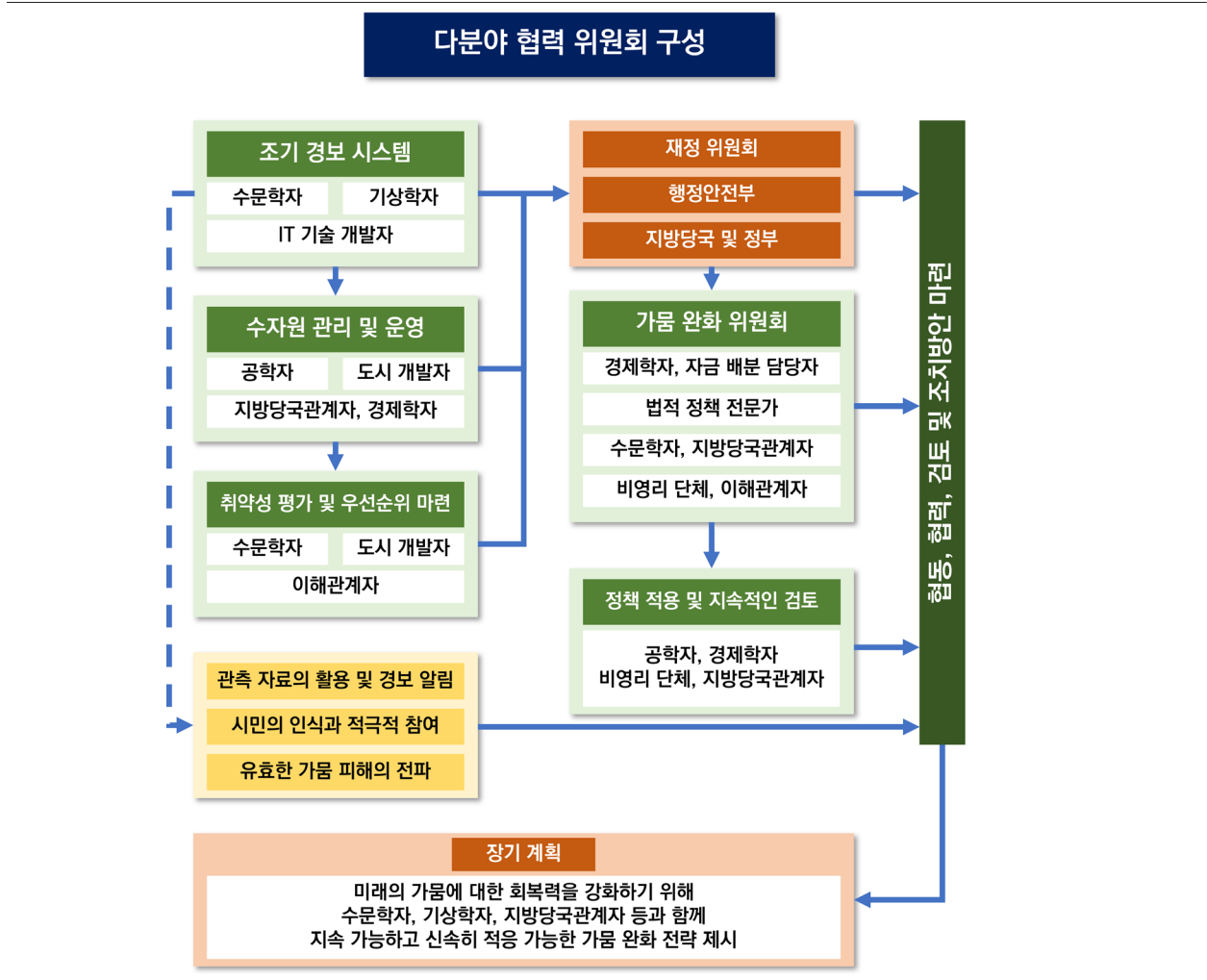


그림 2. 효율적인 수자원 배분 방식에서의 주요 구성요소

위원회의 책임-다분야 협력 위원회의 주요 역할 사례: 가뭄 완화를 위한 다분야 위원회의 주요 책임은 여러가지 중요한 분야를 포함한다. 위원회는 가뭄 상황을 지속적으로 모니터링할 책임이 있다. 위원회는 기상학자와 수문학자로부터의 관측 자료를 평가하고 분석하여 가뭄의 심도를 판단한다. 그에 따라 위원회는 가뭄 시 가용 수자원을 다양한 부문(농업, 공업, 생활 등)에 어떻게 배분할지 결정한다. 그와 더불어, 위원회는 환경적 지속 가능성을 보장하기 위해 수자원 배분 결정이 생태계에 미칠 수 있는 잠재적 결과를 평가한다. 이후, 다양한 가뭄에서의 영향성에 대한 평가를 진행한다. 식량 안보 평가는 수자원 배분이 지역 사회의 식량 공급에 미치는 영향을 분석하는 데 필수적이다. 경제적 평가는 이러한 결정이 기업, 공업 및 지역 사회에 미치는 재정적 영향을 조사한다. 이러한 점을 근거로 하여 정책 및 규제 준수에 대해 제시하고 모든 결정이 기존 법률과 규정을 준수하도록 보장하는 것이 중요하다.

의사과정 결정(안) - 협력적 접근 및 의사소통과 시민의식: 다분야 위원회는 협업 및 데이터 기반 의사결정 원칙을 기반으로 한다. 다양한 분야의 전문가들이 모여 데이터와 분석 결과를 제공한다. 위원회에서 과학적 접근을 근거로 한 형평성 있는 의사결정 과정이 수립되며, 가뭄의 심도에 따른 구체적인 대응과 조치가 취해진다. 협력적 접근 방식은 탄탄한 데이터를 기반으로 영향을 받는 당사자들의 다양한 이해관계와 우려를 고려하여 의사결정을 내릴 수 있도록 보장한다. 그리고 이러한 위원회는 의사결정 과정에 있어 지역 사회 당국의 이해관계자들을 참여시키고 대중의 의식과 책임감을 고취한다. 대중의 참여와 형평성은 위원회 책임의 중요한 요소이다. 위원회는 영향을 받는 지역 사회와 소통하고, 그들의 필요 사항을 고려하며, 수자원 배분 결정에 대한 정보를 제공한다. 또한, 이러한 위원회는 형평성과 책임을 유지하기 위해 수자원 배분 결정, 그 정당성 및 영향에 대한 정기 보고서를 발행한다. 이를 통해, 가뭄 상황에서의 수자원 관리에 대한 정보에 입각한 지역을 구성할 수 있다.

환경적 영향 - 지속 가능한 생태계 유지 방안: 가뭄 완화 노력에서 환경적 영향을 우선순위로 선정하는 것은 중요한 생태계와 천연 자원의 보존 및 지속가능성을 보장하기에 무엇보다 중요하다(Dey et al., 2011; Katalakute et al., 2016). Slette et al. (2019)는 선행연구들을 토대로 생태학자 혹은 환경 과학자의 환경적 가뭄의 정의를 어떻게 내렸는지를 살펴보았다. 이에 따라, 가뭄이 어떻게 생태계에 영향력을 미치는가에 대해서도 확인하였다. 허나, 실질적으로 환경적 가뭄에 대한 명확한 조건을 제시한 선행연구가 많이 부족하였다고 언급하였다. 이에, 다분야 협력 위원회를 통해 환경적 가뭄과 그에 대한 생태계학적 변화를 다분야의 전문가분들과 함께 지속적으로 소

통하고 그에 대한 기준을 명시할 필요가 있다. 특히, 정량적인 기준을 명시하여 의사결정권자들에게 가뭄 상황에서 1) 수생 서식지를 보호하고, 2) 하천의 최소 유량을 유지하며, 3) 생물의 다양성을 보존할 수 있도록 하는 정보에 입각한 선택을 할 수 있도록 도움을 주어야 한다. 이러한 체계는 생태계의 장기적인 건강을 보호할 뿐만 아니라 인간 복지와 환경 모두에 필수적인 요소로 작용할 수 있다.

03 결론

본 연구에서는 다양한 선행연구를 참고하여 지속가능성과 기후변화에 대한 적응성에 초점을 맞추어 효율적인 수자원 배분 전략에 대해 4가지를 제시하였다. 먼저, 관측 자료는 가뭄에 대한 지속적인 모니터링을 가능하게 하며, 의사결정권자들의 조치에 대해 뒷받침할 수 있는 근거가 될 수 있다. 이에, 관측 자료에 대한 가치 증진과 자료의 통합에 대한 노력이 요구된다. 다음, 관측 자료와 지리 정보 시스템을 기반으로 하여 가뭄에서의 잠재적 위험 지역을 선정한다. 취약계층에 대한 비율과 기반 시설의 유지성을 통해 잠재적 위험 지역의 공급 조치를 파악한다. 다음, 취약 계층과 더불어 다양한 이해관계자들이 납득할 수 있는 법적 기준 및 지침을 제공한다. 다양한 법적 기준 사례를 살펴보고, 이를 참고하여 수자원 배분 전략에서의 효율성을 극대화한다. 마지막으로 법적 기준과 지침을 제공하는 것을 포함하여 잠재적 위험 지역을 선정하기 위해 다분야 협력 위원회를 구성한다. 다양한 분야에서의 전문가들이 모여 미래의 지속 가능한 가뭄 완화 전략과 장기 계획을 논의할 수 있는 자리를 지속적으로 마련하는 것이 주요 전략 중 하나이다.

수자원 가용성은 수자원을 관리하는 노력과 직결되는 요소이다. 강수량, 하천, 지하수와 같은 요인이 수자원 가용성을 결정하지만, 가뭄으로 인해 수자원의 가용성이 감소하게 된다. 그리하여, 기후변화 속에서 지속 가능한 수자원을 구축하는 것이 필요하다. 미래 세대의 필요 요건을 훼손하지 않으면서 현재 세대에 대한 책임감을 갖고 이를 낭비하지 않는 것이 중요하다. 그리고 기후변화로 인하여 가뭄의 심도가 증가하는 상황에서 지속적인 변화를 추구하며, 갑작스러운 변화에 있어 이를 쉽게 적응할 수 있는 능력을 미래 세대에게 전달해야 한다. 그에 있어, 효율적인 수자원 배분 전략을 지속적으로 검토하고 변화하며 현재 세대와 미래 세대가 수자원에 있어서 공평한 사회가 될 수 있도록 노력해야 한다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002032).

참고문헌

- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., Castelletti, A. and Magliocca, N., 2019. Future drought risk in Africa: Integrating vulnerability, climate change, and population growth. *Science of the Total Environment*, 662, pp.672-686.
- Amalo, L.F., Hidayat, R., 2017. Comparison between remote-sensing-based drought indices in East Java, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 012009.
- Ashraf, S., Nazemi, A. and AghaKouchak, A., 2021. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific reports*, 11(1), p.9135.
- Avia, L.Q., Yulihastin, E., Izzaturrahim, M.H., Muharsyah, R., Satyawardhana, H., Sofiati, I. and Nurfindarti, E., 2023. The spatial distribution of a comprehensive drought risk index in Java, Indonesia. *Kuwait Journal of Science*, 50(4), pp.753-760.
- Baerenklau, K.A., Schwabe, K.A. and Dinar, A., 2014. The residential water demand effect of increasing block rate water budgets. *Land Economics*, 90(4), pp.683-699.
- Banuri, T., & Opschoor, H. 2007. Climate change and sustainable development.
- Byun, H.R., Wilhite, D.A., 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *J Clim* 12, pp.2747-2756.
- Charalambous, C. N. 2001. Water management under drought conditions. *Desalination*, 138(1-3), pp.3-6.
- Collins, K., Hannaford, J., Svoboda, M., Knutson, C., Wall, N., Bernadt, T., Crossman, N., Overton, I., Acreman, M., Bachmair, S., & Stahl, K., 2016. Stakeholder coinquiries on drought impacts, monitoring, and early warning systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11), pp.ES217-ES220.
- Cosgrove, W. J., & Loucks, D. P., 2015. Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 51(6), pp.4823-4839.
- Dey, N.C., Alam, M.S., Sajjan, A.K., Bhuiyan, M.A., Ghose, L., Ibaraki, Y. and Karim, F., 2011. Assessing environmental and health impact of drought in the Northwest Bangladesh. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, 4(2), pp.89-97.
- Ding, Y. J., Li, C. Y., Xiaoming, W. A. N. G., Wang, Y., Wang, S. X., Chang, Y. P., ... & Wang, Z. R., 2021. An overview of climate change impacts on the society in China. *Advances in Climate Change Research*, 12(2), pp.210-223.
- Dikshit, A., Pradhan, B., Alamri, A.M., 2021. Long lead time drought forecasting using lagged climate variables and a stacked long short-term memory model. *Science of The Total Environment* 755, 142638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142638>.
- Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., Huang, Y., 2013. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23, 245-253.
- Eriksson, E., Revitt, D. M., Ledin, A., Lundy, L., Holten Lützhøft, H. C., Wickman, T., & Mikkelsen, P. S., 2011. Water management in cities of the future using emission control strategies for priority hazardous substances. *Water Science and Technology*, 64(10), pp.2109-2118.
- Fontane, D. G., & Frevert, D. K., 1995. Water management under drought conditions: overview

- of practices. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 121(2), pp.199-206.
- Ghasemi, P., Karbasi, M., Nouri, A.Z., Tabrizi, M.S., Azamathulla, H.M., 2021. Application of Gaussian process regression to forecast multi-step ahead SPEI drought index. *Alexandria Engineering Journal* 60, 5375–5392.
- Green, T. R., Taniguchi, M., & Kooi, H., 2007. Potential impacts of climate change and human activity on subsurface water resources. *Vadose Zone Journal*, 6(3), pp.531-532.
- Guo, D., Westra, S., & Maier, H. R., 2017. Use of a scenario-neutral approach to identify the key hydro-meteorological attributes that impact runoff from a natural catchment. *Journal of hydrology*, 554, pp.317-330.
- Hagenlocher, M., Meza, I., Anderson, C.C., Min, A., Renaud, F.G., Walz, Y., Siebert, S. and Sebesvari, Z., 2019. Drought vulnerability and risk assessments: state of the art, persistent gaps, and research agenda. *Environmental Research Letters*, 14(8), pp.083002.
- Harou, J.J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D.E., Medellín-Azuara, J., Lund, J.R. and Howitt, R.E., 2009. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), pp.627-643.
- Jedd, T., Fragaszy, S.R., Knutson, C., Hayes, M.J., Fraj, M.B., Wall, N., Svoboda, M. and McDonnell, R., 2021. Drought Management Norms: Is the Middle East and North Africa Region Managing Risks or Crises?. *The Journal of Environment & Development*, 30(1), pp.3-40.
- Jiao, W., Zhang, L., Chang, Q., Fu, D., Cen, Y., Tong, Q., 2016. Evaluating an enhanced vegetation condition index (VCI) based on VIUPD for drought monitoring in the continental United States. *Remote Sens (Basel)* 8, 224.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N., Goldberg, A., 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *J Clim* 23, 618–633.
- Katalakute, G., Wagh, V., Panaskar, D. and Mukate, S., 2016. Impact of drought on environmental, agricultural and socio-economic status in Maharashtra State, India. *Natural resources and conservation*, 4(3), pp.35-41.
- Lin, J., Qian, T., & Schubert, S., 2022. Droughts and Mega-droughts. *Atmosphere-Ocean*, 60(3-4), pp.245-306.
- Li, Q., Chen, L. and Xu, Y., 2022. Drought risk and water resources assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Science of the Total Environment*, 832, p.154915.
- Loucks, D.P. and Van Beek, E., 2017. *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Springer.
- Masoudi, M., & Hakimi, S. 2014. A new model for vulnerability assessment of drought in Iran using Percent of Normal Precipitation Index (PNPI). *Iranian Journal of Science and Technology (Sciences)*, 38(4), pp.435-440.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston, pp. 179–183.
- Mullin, M., 2020. The effects of drinking water service fragmentation on drought-related water

- security. *Science*, 368(6488), pp.274-277.
- Mukherjee, M., Mika, K. and Gold, M., 2016. Overcoming the challenges to using tiered water rates to enhance water conservation. *California Journal of Politics and Policy*, 8(3).
- Nijhawan, R., Sharma, H., Sahni, H., & Batra, A., 2017. A deep learning hybrid CNN framework approach for vegetation cover mapping using deep features. In 2017 13th international conference on signal-image technology & internet-based systems (SITIS) pp.192-196. IEEE.
- OECD. Publishing, 2015. *Water resources allocation: Sharing risks and opportunities*. OECD Publishing.
- Palmer, W.C., 1965. *Meteorological drought*. US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Quiring, S.M., Ganesh, S., 2010. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agric For Meteorol* 150, 330–339.
- Recio, B., Ibáñez, J., Rubio, F., & Criado, J. A. 2005. A decision support system for analysing the impact of water restriction policies. *Decision Support Systems*, 39(3), pp.385-402.
- Salimi, H., Asadi, E. and Darbandi, S., 2021. Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Applied Water Science*, 11, pp.1-10.
- Shiklomanov, I. A., 1991. The world's water resources. In *Proceedings of the international symposium to commemorate* (Vol. 25, pp. 93-126). Paris, France: Unesco.
- Slette, I. J., Post, A. K., Awad, M., Even, T., Punzalan, A., Williams, S., Smith, M., & Knapp, A. K., 2019. How ecologists define drought, and why we should do better. *Global Change Biology*, 25(10), pp.3193-3200.
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J., 2014. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), pp.2792-2804.
- Sridhar, V., Hubbard, K.G., You, J. and Hunt, E.D., 2008. Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its “user friendliness” in severity-area-duration assessment. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), pp.660-676.
- Tabari, H., Nikbakht, J. and Hosseinzadeh Talaee, P., 2013. Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water resources management*, 27, pp.137-151.
- Thober, S., Kumar, R., Sheffield, J., Mai, J., Schäfer, D. and Samaniego, L., 2015. Seasonal soil moisture drought prediction over Europe using the North American Multi-Model Ensemble (NMME). *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), pp.2329-2344.
- Thomas, T., Nayak, P. C., & Ventakesh, B., 2022. Integrated assessment of drought vulnerability for water resources management of Bina basin in Central India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), pp.621.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H., 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water resources management* 21, 821–833.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C. and Morán-Tejeda, E., 2012. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2), pp.318-332.
-

-
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), pp.1696-1718.
- Wang, Y., Liu, G. and Guo, E., 2019. Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901–2014 using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Science of the Total Environment*, 654, pp.850-862.
- Wang, Y. J., & Qin, D. H., 2017. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview. *Advances in Climate Change Research*, 8(4), pp.268-278.
- Wilhite, D. and Pulwarty, R.S. eds., 2017. *Drought and water crises: integrating science, management, and policy*. CRC Press.
- Wilhite, D.A., Sivakumar, M.V. and Pulwarty, R., 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and climate extremes*, 3, pp.4-13.
- Wilhite, D.A., 2016. Drought-management policies and preparedness plans: changing the paradigm from crisis to risk management. In *Land restoration* (pp. 443-462). Academic Press.
- Yang, X., Zhang, M., He, X., Ren, L., Pan, M., Yu, X., Wei, Z., & Sheffield, J., 2020. Contrasting influences of human activities on hydrological drought regimes over China based on high-resolution simulations. *Water Resources Research*, 56(6), pp.e2019WR025843.
- Yu, L., Gao, W., R Shamshiri, R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., & Su, G. (2021). Review of research progress on soil moisture sensor technology.
- Zeff, H.B., Herman, J.D., Reed, P.M. and Characklis, G.W., 2016. Cooperative drought adaptation: Integrating infrastructure development, conservation, and water transfers into adaptive policy pathways. *Water Resources Research*, 52(9), pp.7327-7346.
- Zhao, M., Liu, Y. and Konings, A.G., 2022. Evapotranspiration frequently increases during droughts. *Nature Climate Change*, 12(11), pp.1024-1030.
-