

기후변화 시나리오의 불확실성을 고려한 수자원 계획수립에 관한 연구



정은성 |
서울과학기술대학교 건설공학부 교수
eschung@snut.ac.kr



김연주 |
한국환경정책·평가연구원 부연구위원
yjkim@kei.re.kr



강노을 |
국립기상연구소 연구원
noriya@snu.ac.kr



김영오 |
서울대학교 건설환경공학부 교수
yokim05@snu.ac.kr

유는 기후 변화의 비정상성(non-stationarity)과 불확실성(uncertainty)이라는 특성 때문에 볼 수 있다. 비정상성이란 기후변화로 인해 기상 변수의 통계값이 시간에 따라 변하는 것을 의미한다. 불확실성이란 과거의 관측치를 기초하여 계획했던 기존의 방식과는 달리 온실가스 배출시나리오와 기후 모델 등에 의한 영향분석부터 의사결정까지의 전반적 과정이 이전보다 매우 복잡해진 상태를 의미한다. Ellsberg(2001)은 이러한 기후변화 연구의 불확실성을 Deep Uncertainty라고 표현하였는데 다음과 같은 세 개의 항목들에 대해 분석가가 거의 알지 못하거나 의사결정담당자들이 동의할 수 없는 상황을 의미한다. (1) 시스템 변수들 사이의 상호관계를 묘사할 수 있는 적절한 모형, (2) 모형 내에서 중요한 매개변수에 대한 불확실성을 나타내는 확률 분포, (3) 사업이나 대안의 성과에 대한 평가치를 도출하는 방법. 즉 기후변화와 수자원 계획 수립을 위한 의사결정은 상호관계를 규명할 수 있는 적절한 모형을 찾는 것이 거의 불가능하고 비교적 적당한 모형을 사용하더라도 정확한 모의를 위한 매개변수 추정은 현실적으로 매우 어려울 뿐만 아니라 미래 기후변화를 대비하여 적응전략으로 제안되는 수자원 관련 사업의 성과를 예측하는 것은 아예 불가능하다는 의미로 해석될 수 있다.

기존 기후변화 연구는 우리가 예측할 수 있는 미래 CO₂ 농도와 사회경제상황에 대한 가정을 기초

1. 서론

수자원 분야에서 기후변화 관련 연구가 약 20년 이상 지났음에도 불구하고 기후변화 적응을 위한 수자원 계획 수립관련 기술이 더디게 발전하는 이

로 전지구모형(global circulation model, GCM) 및 시공간 다운스케일링 기술을 토대로 적응전략을 수립하였다. 즉 IPCC의 SRES (special report on emission scenario)와 같은 기후변화 시나리오를 기반으로 많은 연구가 이루어 졌으나 사용하는 GCM 모형과 가정하는 SRES에 따라 전혀 다른 결과가 도출되는 상황이므로 최근 이를 보완하기 위한 다양한 접근법이 고안되고 있다 (Parson et al., 2006).

이 중 가장 설득력 있는 방법은 로버스트 의사결정기법(robust decision making, RDM)이라 불리는 개념이다. 전망에 기반을 둔 기존 분석은 “미래에는 무엇이 일어날 것인가?” 라는 질문의 답을 정확하게 하는 것인 반면에 적응에 기반을 둔 새로운 분석은 “미래에 예측할 수 없는 일에 대해서 우리가 어떠한 행동을 해야 하는가?” 라는 질문을 더 중요시 여기고 있다 (Lempert and Schlesinger, 2000). 그러므로 많은 연구에서는 미래의 기후변화에서 발생할 수 있는 넓은 범위의 가능성을 둔 수자원 계획 수립을 위한 RDM 방법들이 다양하게 제안되고 있다. 따라서 본 고에서는 수자원 계획수립 분야에서 기후변화 시나리오의 불확실성을 저감시키기 위한 RDM 방법에 대해 조사하고 RDM을 달성하기 위해 제안되는 다양한 방법론들과 이를 적용해서 제시한 주요 연구결과를 요약하고자 한다. 또한 분석 결과를 바탕으로 우리나라 향후 연구방향도 일부 제시하고자 한다.

기후변화 적응전략을 수립하기 위해 RDM이 필요하다라는 의견은 1990년대 후반에 제기되었으나 구체화 시킨 연구는 보는 관점에 따라 다를 수 있지만 Lempert and Schlesinger(2000)가 처음이라고 볼 수 있다. 이후 일부 연구자들이 RDM을 실제로 적용해서 제시하려는 연구가 진행되었는데 영국에서 Dessai(2005)가 박사학위논문에서 처음으로 구체적으로 수자원 계획에 적용하여 결과를 제시하였다. 이를 정리보완해서 Dessai and Hulme (2007)은 다양하게 존재하는 기후변화 시나리오의

불확실성을 반영하여 안정적인 적응전략을 찾을 수 있는 체계를 제안하였고 이를 영국 동부에 적용하여 결과를 구체적으로 제시하였다 (2.1절). 미국의 캘리포니아에 위치한 RAND corporation에서도 기후변화를 고려하여 적응을 위한 캘리포니아의 수자원 계획을 수립하기 위해 RDM이 중요하다고 판단하고 여러 연구보고서를 발표한 바 있다 (RAND, 2000; 2008). RAND의 결과를 정리하여 발전시켜 Lempert et al.(2004), Lempert et al.(2006), Groves and Lempert(2007), Lempert and Collins(2007), Lempert and Groves(2010) 등으로 연구결과를 제시하였다 (2.2절).

위와 같은 초기 선구적인 연구들로 인해 전 세계 많은 연구자들도 RDM을 달성하기 위한 참신한 방안을 제안하고 특정 분야에 적용하려는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. Brown et al.(2012)은 다양한 기후변화 시나리오의 많은 정보를 의사결정에 활용할 수 있도록 Decision Scaling 기법을 개발하였고(2.3절), Nassopoulos et al.(2012)은 그리스 지역에 최적 담규모를 결정하기 위해 RDM 체계를 개발해서 적용결과를 제시하였다(2.4절).

우리나라에서도 강노을(2012)은 기존 Lempert et al.(2006)의 RDM 방법을 우리나라 댐 운영에 적용하여 결과를 제시한 바 있고(2.5절) Chung et al.(2013)은 기후변화 적응을 위한 사업의 우선순위 결정을 위해 Fuzzy 개념을 결합한 다기준 의사결정기법(multi-criteria decision making, MCDM)을 활용한 바 있다(2.6절).

본 고에서는 위와 같은 기후변화 적응전략 수립을 위한 RDM 기법의 적용 방안에 대해 새로운 방안을 제안한 연구를 중심으로 주요 내용을 요약 제시하고자 한다. 또한 더 나아가 다양한 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하여 안정적인 기후변화 적응전략을 수립하기 위한 연구방향에 대해 제시하고자 한다.

2. 로버스트 의사결정기법의 적용사례

2.1. 민감도 분석을 통한 적응의사결정의 robustness 평가

Dessai and Hulme(2007)은 기후변화 불확실성에 대한 적응의사결정의 robustness를 평가하는 체계를 제안하였고, 이를 잉글랜드 동쪽 지방의 수자원 관리 사례에 적용하였다. 수립된 지역 수자원 계획을 대상으로 불확실성을 고려하는 로버스트 의사결정 방법론이 어떻게 기후변화 적응관련 실제 의사결정에 적용될 수 있는가를 설명하였다.

잉글랜드 동쪽 지방의 수자원을 공급하는 기업인 Anglian Water Services (AWS)가 관리하는 12개의 지역에 대해 향후 25년간의 수자원계획을 수립하였다. 본 연구는 이중 East Suffolk와 Essex(이하 ES&E, 그림 1)의 일부 지역의 수자원계획에 대해 초점을 맞추었다.

AWS는 수요를 제외한 공급에 대한 기후변화 영



그림 1. 연구 대상 지역. 검은부분은 Anglian Water에서 관리하는 동쪽 잉글랜드지방(12개 수자원지역), 타원은 East Suffolk와 Essex를 포함한다. (Desai and Hulme, 2007)

향, 여러 다른 위험(예, 시추공 성능저하), 불확실성(예, 미래 수요)을 포함하여 2005-2030년에 대한 수자원계획을 수립하였다. 수자원계획에서 기후변화를 고려하기 위해 UKCIP02에 사용된 기후변화 시나리오를 사용하였다. 2020년대와 2050년대 기후값에 대한 하천유출과 지하수 재충전의 변화를 분석하고, 이를 이용하여 기후변화로 인한 수자원 공급가능량에 대한 영향을 산출하였다. 본 연구에서는 기후변화 적응을 위한 의사결정의 여러 불확실성에 대한 민감도를 평가하기위해 다음과 같은 모델링 체계를 구축하였다.

- (1) 문헌조사, 수자원 관리자와의 엘리트 면담, 계획 관련 서류의 심층조사를 통해 ES&E 지역을 위한 적응대안을 나열한다.
- (2) 영향모형을 이용하여 대안들을 온도와 강수와 같은 기후변수와 연계하였다. 예를 들면, 기후변화 시나리오와 여러 적응대안들을 입력변수로 하여 수문모형을 구동하여 수자원 공급가능량을 산출할 수 있고, 이를 바탕으로 여름철 기후변화와 지역에서 추가적으로 요구되는 수자원 수요량과의 관계식을 도출할 수 있다.
- (3) 전지구 및 지역기후모형 결과물을 분석하여 기후시나리오를 구성하였다. 온실가스 배출, 기후민감도, 탄소순환, 해양 diffusivity, 에어로졸강제력 등 매개변수들의 전 지구 기온 변화에 대한 불확실성 분석을 수행하고, 문헌 조사와 전문가의 조언을 바탕으로 이러한 매개변수들의 불확실성 범위를 정할 수 있다.

본 연구는 기후변화에 적응하기 위한 결정이 위에서 구축된 모델링체계의 여러 요소의 불확실성에 민감한가 여부를 분석하여 제시하였다. 한 번에 하나의 매개변수를 바꾸는 실험('one-at-a-time' experiment)을 통해 다른 매개변수들이 일정할 때 각각의 변수의 불확실성 범위를 도출하였다. 또한

학술/기술기사

AWS의 수자원계획은 2030년의 공급과 수요의 균형을 11 MI/d로 추산하였고, 민감도 분석을 통해 산출된 2030년의 공급과 수요의 균형이 수자원계획의 값보다 작다면 수자원계획은 로버스트하다고 판단하였다.

- (1) 온실가스배출(GHG emission scenario)에 대한 민감도를 살펴보기 위해 6개의 SRES 시나리오가 사용되었으며, RCM(regional climate model)과 GCM 결과물이 각각 사용되었다 (그림 2). GCM 결과의 95백분위수 불확실성의 범위는 5.55 MI/d로 RCM 결과보다 훨씬 컸다. 배출시나리오를 바탕으로 추산된 불확실성은 4.5-5.55 MI/d이고, 이는 큰 불확실성을 나타내지만 수자원계획의 수요공급균형량인 11 MI/d에 비교하자면 위험한 정도는 아니다.

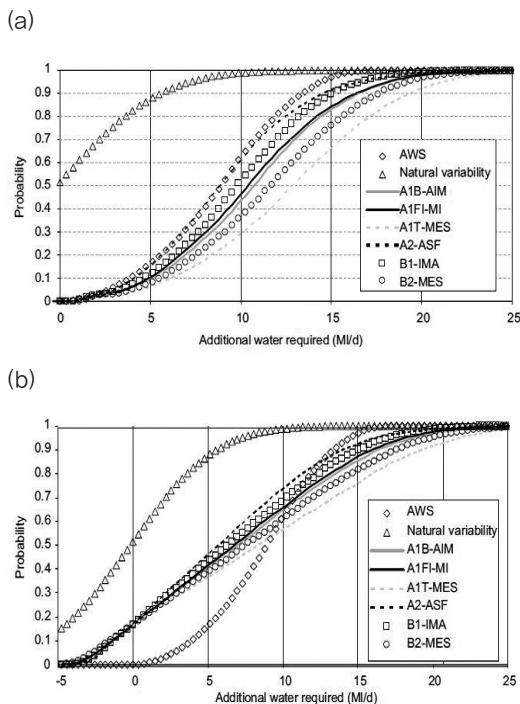


그림 2. A)RCM과 B)GCM을 이용하여 산출된 배출시나리오에 따른 ES&E지역에서의 2030년 추가 물 요구량 CDF

- (2) 기후민감도(climate sensitivity)는 모든 기후변화 리스크평가에 포함되어있는 중요한 매개변수이다. 기후민감도란 대기 중의 이산화탄소 농도를 현재보다 2배로 만든 경우에 대한 전지구평균 표면 온도의 평형 변화를 일컫는다. 문헌조사를 바탕으로 여러 확률밀도 함수가 가정되었고, 95백분위를 기준으로 불확실성 범위는 8.27 MI/d이고, 이에 AWS의 수자원계획은 로버스트하다고 할 수 있다.
- (3) 에어로졸강제력(aerosol forcing), 해양 diffusivity, 탄소순환을 포함하는 기후 매개변수에 대한 민감도를 살펴보았다. 해양 diffusivity와 탄소순환의 경우 2.69-2.91 MI/d의 불확실성으로 물공급에 많은 영향을 주지 않으나, 에어로졸의 경우 7.53 MI/d로 훨씬 더 큰 불확실성을 보인다.
- (4) 지역기후반응(regional climate response)을 산출하기 위해 여러 GCM과 RCM의 결과값이 이용된다. 민감도 분석에서 가장 큰 불확실성이 GCM 간의 불확실성에서 나타났으며, 그 값은 약 23 MI/d이다. 이는 어떤 GCM 모델은 여름 강수의 증가를 전망하지만, 다른 모델은 감소를 전망하기 때문이다. RCM의 경우 불확실성 범위가 15 MI/d으로 GCM에 비해 작으나 여전히 큰 값이다.
- (5) 기후영향(climate impacts), 즉 기후와 추가적으로 요구되는 수자원 양의 관계를 산출하기 위해 기후-수자원 공급가능량 모형이 AWS에 의해 사용되었고, 앞에서 설명했듯이 문헌조사를 바탕으로 변화율 25%를 가정하였다. 산출된 불확실성은 8.3 MI/d로 AWS의 수자원계획은 로버스트하다.

본 연구는 기후변화 불확실성을 고려하여 로버스트한 대안을 결정하기 위한 체계를 제안하였다. 자원은 지역기후반응, 기후 민감도, 기후 영향으로 부터의 불확실성에 매우 민감하다는 것을 보여 주었

표 1. 민감도 분석 결과 요약표

Parameter	Uncertainty range (Ml/d)	AWS shortfall (Ml/d)
GHG emissions scenario	5.55	7.35
Climate sensitivity	8.27	9.39
Aerosol forcing	7.53	5.63
Ocean diffusivity	2.69	3.74
Carbon cycle	2.91	4.01
Regional climate response GCMs (RCMs)	22.66 (14.88)	7.28 (9.10)
Climate impacts	8.28	6.06

다(표 1).

반면 AWS의 수자원계획은 연구에서 논의된 불확실성들에 대해 로버스트했다. 이는 AWS가 우연히 가장 건조한 모형(즉, HadCM3)을 사용하였고, 또한 하수처리장과 저수장의 증가 등 큰 규모의 공급증가를 적응조치로 사용하였기 때문이다. 이에 더해, 수행된 민감도 분석이 'one-at-a-time' experiment로 여러 종류의 불확실성의 극값을 더하지 않았기 때문이다. 이 연구의 한계는 모델링체계가 대부분 선형관계를 바탕으로 한다는데 있다. 즉, 간단한 전 지구 에너지 수지 모형, 패턴-스케일링법, 선형이동식 등을 사용하였다. 하지만, 이를 통해 민감도 분석을 할 수 있다는 데 장점이 있다. 또한, 2030년을 중심으로 30년 동안의 여름 평균 강수량의 변화만 살펴본 것인데 한계가 있다. 경년변동성과 극값을 고려하지 않았기에, 이 연구의 결과는 아마도 리스크를 과소평가했을 가능성이 높다고 예상된다.

2.2. 캘리포니아의 수자원관리 계획 수립

Grove(2005)는 기후변화에 직면한 캘리포니아 주의 미래 수자원 계획이 나아가야 할 방향을 확인하고 기후변화를 반영한 장기적인 정책을 위해 새로운 의사결정기법의 필요성에 관하여 분석하였다. 본 연구에서는 먼저 일반적으로 쓰이는 확률을 기반하여 최고의 효율을 가져오는 표준 의사결정의 기후변화 적용에 대한 한계점을 제시하고 안정적인

정책을 찾는 방향으로 나아가야 한다고 말한다. 상태의 불확실성을 발생 확률로 나타냄으로 순위를 산정하는 방식인 표준 의사결정은 분석의 착수 시점에서 완벽한 대안의 세트가 구성될 수 없고 미래 대안에 의한 결과의 불확실성도 너무 큰 기후변화의 경우, 대안 별 결과를 도출하는 과정에서 의사결정자와 이해당사자들

간의 동의가 이루어지기가 힘들기 때문에 기후변화 상황에 적합하지 않다고 보는 것이다. 본 연구에서는 기후변화를 반영하기 위해 deep uncertainty와 연관된 특정 상황 발생 유무에 영향을 덜 받는 안정적인 정책을 찾기 위한 새로운 방식의 의사결정 기법이 필요하다고 제시하였다.

본 연구에서 로버스트한 정책을 찾기 위해 다양한 미래 기상 시나리오를 적용하여 낮은 후회도(regret)를 갖는 후보 전략을 선정된 뒤, 대안의 성능인자에 민감하게 영향을 미치는 불확실성의 요소를 파악하여 적용한 시나리오를 검토하고 대안을 업데이트해서 일정 수준까지 시나리오 변화에 둔감한 대안을 찾는 과정이다. 주요한 특징으로는 몇 개의 시나리오가 아니라 가능한 많은 시나리오 양상을 적용해야 한다는 것과 시간에 따라 새로운 정보를 업데이트 하여 대안이 계속적으로 보다 안정적인 대안이 될 수 있도록 진화시킨다는 것이다. 또한, 대안의 순위를 매길 때 안정적인 대안을 찾을 수 있도록 하는 로버스트 인자(robust index)를 사용한다는 점이 있다. 본 연구에서는 로버스트 인자로 후회도를 제시하였는데, 그 이유는 후회도는 다양한 미래 상황이 일어날 수 있다는 것을 인정하고 특정 시나리오가 발생했을 경우 평가 지표의 결과가 가장 높은 우수한 대안을 채택하지 않았을 때의 후회정도를 수치화함으로써 의사결정자들이 최소 후회도를 기반한 의사결정이 가장 로버스트하다고 판단하기 때문이다.

2.3. Decision scaling: 상향식 확률분석과 기 후전망의 연계를 통한 기후위험평가방법

Brown et al.(2012)은 상향식(bottom-up) 확률분석을 여러 기후변화 정보들의 하향식(top-down) 사용과 연계하는 기후위험평가 방법을 제안하고, 제안된 방법을 도시 수자원 공급 시스템에 적용하였다. 본 평가방법을 표현하기 위해 ‘decision scaling’이란 용어가 사용되었는데, 이는 주어진 의사결정에 대해 최선의 정보를 제공하기 위해 필요한 기후정보를 확장 혹은 축소 (즉, 스케일링, scaling) 하는 의사결정분석체계를 의미한다.

본 방법은 특정한 의사결정에 더 적합한 기후조건을 식별하는 과정으로부터 시작한다. 기후시스템에서 가능한 영향을 샘플링하고, 기후조건에 따라 최적의사결정이 변하는 지점인 의사결정 한계점(decision threshold)을 관통하는 기후조건을 밝혀낸다. 의사결정에 영향을 미치는 기후조건이 밝혀지면, 각각의 기후상태에 대한 확률을 산출한다. 즉, ‘미래기후는 어떻게 변할 것인가?’라는 어려운 질문대신 ‘결정대안A에 적합한 기후조건이 대안B에 적합한 기후조건에 비해 발생할 확률이 높은가 혹은 낮은가?’라는 질문에 대답하고자 한다. 방법은 다음과 같이 3단계로 나누진다.

- (1) 기후위험성의 식별(Identification of climate hazards): 특정한 결정에 더 적합하거나 혹은 위험을 초래하는 기후조건을 식별하는 단계이다.
- (2) 위험도 발견(Risk discovery): 결정시스템모형을 사용하여 의사결정에 연결된 기후조건을 찾는 위험도 발견단계로서 3개의 세부단계를 포함한다. 시스템의 민감도 분석, 기후반응함수 구축, 결정모형을 이용한 기후상태의 결정을 포함한다.
- (3) 기후정보를 바탕으로 한 위험도 산출(Climate informed risk estimation): 기후위험과 기회

와 관련된 의사결정을 돕기 위해 기후정보를 가공해야 하는 단계로, GCM 실험의 진단을 통해 모델 전망의 신뢰성을 어느 정도 평가할 수 있다. 여러 모형의 많은 종류의 앙상블을 이용하여 주관적 확률(subjective probability)로 사용할 수 있다.

위에서 설명한 방법론을 도시 물 공급 시스템에 개념적으로 적용하였다. Boston 도심지역에 물을 공급하는 Quabbin-Wachusett 저수 시스템의 설계 매개변수를 바탕으로 하는 예이다.

가. 기후위험성의 식별

우선 시스템을 파악하고 의사결정 한계값을 정해야 한다. 결정시스템모형은 Stella 모델링환경에서 저수지 시스템과 저수지 유입량의 통계모형을 활용하였다. 매해 저수지 유입량은 미국 동북부지역을 위해 개발된 로그선형 회귀분석모형을 사용하였다. 또한, 성과지표로 물 공급의 신뢰성을 이용하였다. 이는 각 기간 동안 요구된 물수량을 충족시킬 수 있는 확률로 정의되며, 수용가능한 물 공급 신뢰성의 한계값을 95%로 정하였다.

나. 위험도 발견

기후민감도분석은 통계적으로 발생시킨 50,000년 동안의 매달 net basin supply (NBS)(즉, 유입량에서 증발산량을 뺀 값) 값을 사용하여 수행하였다. 시스템의 물 공급 신뢰성의 상당부분은 연평균 NBS에 의해 설명($R^2=0.98$)되었고, 이는 물 공급신뢰성과 기후변수를 연계하는 기후반응함수가 성공적으로 유도될 수 있음을 뜻한다.

격자샘플링접근법(grided sampling approach)을 활용하여 여러 GCM 및 다른 기후전망의 결과값에서 강수와 온도 값을 추출하였다. 표준편차와 상관계수는 과거 자료에서 계산된 값을 그대로 사용하였다. 그림 3은 유도된 기후반응 함수이며, 대부분의 기후상태에 대해 물 공급 신뢰도는 상대적으로

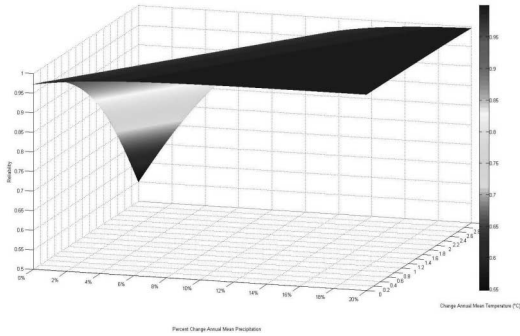


그림 3. 저수지 신뢰성의 온도와 강수에 대한 기후반응 함수

변함이 없고 낮은 민감도를 보인다. 온도 증가가 크고 강수 증가가 작은 기후상태에 대해서는 신뢰도가 급격하게 떨어진다.

다음으로, 의사결정분석체계에 따라 95% 신뢰도 한계값에 따라 기후상태를 둘로 나눌 수 있다(그림 4). 신뢰도가 95%이상인 기후상태는 어떠한 조치도 요구되지 않으며, 95%이하인 기후상태는 안정적인 물 공급을 위한 조치가 요구된다.

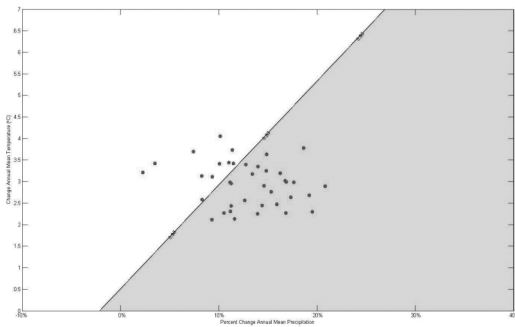


그림 4. 현재와 GCM 결과로부터 계산된 평균 강수와 온도의 차이(red dots)와 95% 신뢰도로 나뉜 기후상태(회색-95%이상, 흰색-95%이하).

다. 기후정보를 바탕으로 한 위험도 산출

마지막으로 위의 두 개 기후조건에 대한 상대적인 확률을 산출해야 한다. 즉, 각각의 기후상태에 대한 확률을 산정해야 한다. 본 사례에서는 CMIP3(Coupled Model Intercomparison Project phase 3)의 39개의 GCM 기후전망으로부터 온도와 강수량을 추

출하여 미래 물 공급 신뢰도를 확률적으로 산출하였다. 연평균 온도와 강수는 2000-2025, 2025-2050, 2050-2075, 2075-2100년 4개의 미래 기간에 대해 계산되었다.

각각의 GCM 결과물에 대해 신뢰도가 계산되어지고, 이의 확률밀도함수를 도출하고, 이를 바탕으로 각각의 기후상태에 대한 상대적 확률을 계산한다(그림 5). 모든기간에 대해 신뢰도가 95%보다 큰 기후상태(즉, 안정적 물공급을 위한 어떠한 조치도 필요하지 않은 기후상태)의 폭이 훨씬 크며, 39개 GCM을 바탕으로 계산된 신뢰도가 한계점보다 작아지는 기후상태는 전체의 15% 이내의 경우이다.

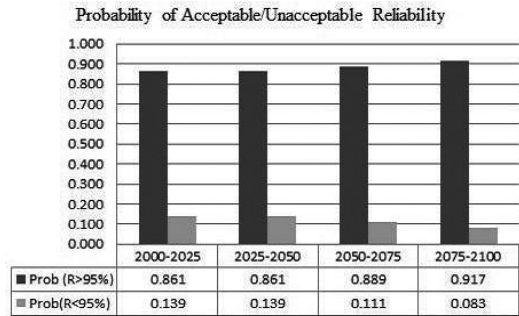


그림 5. GCM 전망을 바탕으로 한 95%이상, 이하의 신뢰도에 대한 확률

본 연구는 수자원시스템의 기후위험평가를 상향식 확률분석과 기후전망정보를 연계하여 수행하였다. 첫째로, 의사결정시스템모델을 구축하고 성과지표에 대한 한계점을 정한다. 둘째로, 확률적 분석과 기후반응함수를 통해서 위험한 기후상태를 찾아낸다. 마지막으로, 여러 GCM과 앙상블들을 통해 얻어지는 기후정보를 활용해 위의 기후상태의 확률을 산출한다. 이러한 과정은 사용가능한 기후정보를 최대한으로 활용하는데 장점이 있다. 본 연구에서는 제안된 의사결정체계를 설명하기 위해 저수지 물공급 시스템의 신뢰도를 평가하는 간단한 예시를 제시하였다. 이 방법론의 복잡한 시스템에의 적용 여부 결정은 민감한 기후변화를 체계적으로 요약할 수 있는가에 달려있다.

2.4. 로버스트 의사결정 기법을 이용한 댐 규모 결정

Nassopoulos et al.(2012)는 기후 변화의 특징인 불확실성을 고려할 수 있도록 기존에 제시된 RDM 개념을 활용해서 기후변화 시나리오를 반영해서 기후변화에 민감한 수자원 계획관련 문제인 댐의 규모 결정(dam dimensioning)에 사용하였다.

기후변화가 없다고 가정하는 시나리오(NOCC)와 19개 기후변화 모형 중 세 개의 기후변화 모형인, CNRMCM3 (강우량의 감소폭이 큰 시나리오), CSIROMK35 (강우량의 감소폭이 중간인 시나리오), NCARPCM1 (강우량 평균은 변화가 없으나 변동성은 증가한 시나리오)을 이용하여 최적 댐 규모를 도출하였다. 이 때 이자율은 0%, 3%, 6% 세 개의 시나리오를 고려하였다. 그 결과 이자율에 따라 최적 댐 규모가 세 개의 그룹으로 나뉘었다. 이자율이 높을수록 순현재가는 줄어들어서 최적 댐 규

모는 작을수록 좋다는 결과가 도출되었지만 기후변화로 인한 영향은 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 즉 이자율이 높아지면 기후변화가 중요해지는 미래에는 댐 규모 결정할 때 기후변화에 큰 의미를 부여하지 않아도 된다는 것을 의미한다.

19개 기후변화 시나리오별로 최적 댐규모의 변화량은 다음 아래의 표 2와 같다. 여기서도 이자율이 낮을수록 최적 댐규모의 변화폭이 커지는 것을 알 수 있다. 즉 비용효과 분석을 사용하면 줄어드는 양으로 인해 최적 댐 규모는 변화가 없음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Ward et al.(2010)의 수요량 중심의 최적 규모 결정 결과와는 다름을 확인할 수 있다.

하지만 위의 결과는 물 값의 변화가 없다고 가정한 경우이다. 하지만 미래에는 가용 수자원의 양이 달라질 수 있고 수요량도 변화하므로 물 값의 변화가 동시에 발생하여 물의 가치가 변화할 수 있다. 따라서 물 값의 변화 시나리오를 세 개 고려한 경우

표 2. 19개 기후변화 시나리오 별로 변화하는 최적 댐규모 변화율

Reservoir length Pure time preference	4km			10km			20km			Stddev change
	0%	3%	6%	0%	3%	6%	0%	3%	6%	
BCCRBCM20	-10	-6	-3	-12	-7	-7	-8	-8	-2	-9
CCCMACGCM31	-9	-4	-3	-15	-5	-6	-16	-10	-1	-9
CNRMCM3	-23	-12	-12	-23	-14	-10	-23	-13	-7	-21
CSIROMK30	-14	-9	-5	-16	-10	-8	-11	-10	-3	-13
CSIROMK35	-10	-6	-3	-12	-6	-7	-9	-9	-1	-9
GFDLCM20	-10	-3	-3	-14	-6	-4	-25	-9	-1	-10
GFDLCM21	-17	-7	-6	-21	-10	-8	-34	-12	-3	-16
GISSMODELER	-15	-9	-6	-21	-10	-8	-25	-11	-3	-16
INGVECHAM4	-17	-10	-8	-22	-11	-9	-17	-12	-4	-18
INMCM30	-4	-2	-1	-4	-2	-3	-5	-4	-1	-4
IPSLCM4	-17	-10	-7	-20	-11	-8	-17	-11	-4	-16
MIROC32MEDRES	-5	-2	-1	-6	-2	-3	-8	-7	-1	-5
MIUBECHOG	-17	-10	-7	-18	-10	-9	-14	-10	-4	-15
MPIECHAM5	-17	-10	-7	-22	-11	-8	-26	-12	-4	-18
MRICGCM232A	-6	-3	-1	-7	-2	-4	-9	-8	-1	-6
NCARCCSM30	-8	-4	-2	-12	-4	-5	-11	-9	-1	-8
NCARPCM1	2	2	0	1	1	1	-9	-1	1	1
UKMOHADCM3	-6	-3	-2	-10	-3	-4	-13	-9	-1	-6
UKMOHADGEM1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0

에 대한 최적 댐 규모 결과는 일부 변화가 발생하지만 물 값의 변화가 없다고 가정할 경우와는 크게 다르지 않음을 제시하였다.

마지막으로 RDM을 위해 기후변화 시나리오별로 에러손실비용(error cost)을 결정하였다. 즉 현실적으로 불가능하지만 19개 기후변화 시나리오 중 하나가 미래에 완벽하게 부합한다면 나머지 18개의 잘못된 시나리오를 선택해서 설계했을 경우 발생할 수 있는 비용의 손실을 계산하였다. 그 결과는 표 3에 제시되어 있다. 여기서 왼쪽 열의 모형이 미래 발생한다고 가정하고 있으며 첫 번째 행의 모형을 사용했다고 가정한 경우이다. 각각의 기후변화 모형은 숫자 기호로 정의되어 있다.

기후변화는 일반적으로 deep uncertainty로 표현될 정도로 불확실성이 매우 큰 상황이다. 따라서 본 연구에서는 RDM을 위해 최대에러손실비용이 최소가 되는 (다기준 의사결정기법 중 minimax 방법) 두 개의 기후변화시나리오, GFDLCM20과 CSIROMK35를 사용하는 것이 가장 안정적인 댐 규모를 결정할 수 있는 방법으로 여겨진다.

2.5. RDM을 활용한 기후변화 불확실성하의 용수공급계획 수립

강노을(2012)은 RDM과 가중치 및 평가기준 점수를 합산하는 일반적인 형태의 표준 의사결정(Standard Decision Making, SDM)의 효과를 비교하기 위해 댐 용수공급계획에 시범적으로 두 기법을 적용하였다. 대상지역은 안동댐과 임하댐 유역으로 온실가스 배출시나리오 A1B, A2, B1과 12개의 GCMs을 조합하여 25개의 미래 기상시나리오를 이용하였다. 용수공급의 대안은 안동댐과 임하댐의 상시만수위와 저수위를 조정하여 유효저수용량이 증가될 수 있도록 하였으며, 이수기와 홍수기 측면의 저수지 운영 능력 향상 정도를 대안 별로 평가하여 최종 순위를 도출하였다. 연구결과 로버스트 의사결정과 표준 의사결정 간에는 여섯 개의 대안을 기준으로 평균적으로 0.33 ~ 1.33 순위의 차이를 보였다.

SDM은 기대효용(expected utility) 개념을 활용하여 불확실성이 존재하는 상황에서 대안을 평가

표 3. 하나의 기후변화 모형이 미래 발생한다고 가정할 경우 다른 기후변화 모형을 사용할 경우 발생할 수 있는 에러손실비용 결과

	3	11	14	9	8	4	13	7	1	6	5	2	16	18	10	12	15	19	20	17
3	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	1.1	1.1	1.2
11	0.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.8
14	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.9
9	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.9
8	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7
4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6
13	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7
7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.7
1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
6	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2
16	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
18	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
10	0.8	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
12	0.7	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
15	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.1	0.1	0.1
19	1.2	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0	0.0	0.1
20	1.3	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0	0.1
17	1.4	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0

할 시 보편적으로 사용되는 방법이다. SDM은 주어진 정보를 갖고 각 상황에 부여된 확률값을 이용하여 가장 높은 기댓값을 갖는 대안을 찾아 채택하는 것으로 다양한 불확실한 상황에 적용할 수 있다. 식(1)을 보면 i 번째 대안의 기댓값($EV(A_i)$)은 i 번째 대안(A_i)과 j 번째 시나리오(S_j)에 해당하는 성능지표(P)에 각 시나리오에 부여된 확률($Pr(S_j)$)을 곱한 값의 합으로 구할 수 있다.

$$EV(A_i) = \sum_{j=1}^n P(A_i, S_j) \times Pr(S_j) \quad (1)$$

SDM은 목적이 다양하고 분쟁의 소지가 있을 때 대안을 수식으로 계산하여 순위(ranking)를 매겨 계획의 목적에 의해 의사결정자가 합리적인 대안을 찾을 수 있도록 돕는다는 특징을 가지고 있다. 또한 대안 평가의 결과를 이용해 반복적으로 시행할 수 있다는 이점을 가지고 있어 다양한 형식으로서의 발전 가능성도 가지고 있다. 그러나 불확실성이 매우 높은 기후변화와 같은 상황의 경우 하나의 최적 대안보다 유연성을 가지고 있는 대안 세트가 선호되기 때문에 표준 의사결정의 적용이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

RDM은 RAND(2000; 2008)에서 처음 제시한 기법으로 기후변화를 고려한 장기적 정책 분석을 위하여 개발한 방법이다. 로버스트 의사결정은 기후변화와 같이 높은 불확실성을 갖는 상황 하에 가

장 털 민감한(Insensitive) 대안을 찾는 것으로 전체 과정은 그림 6과 같다.

여기에서 후보대안은 다양한 시나리오들에 대해 가장 안정적인 값을 갖는 대안으로 후보 대안의 평가지표(performance index)를 저하시키는 시나리오를 추출하여 대안을 업데이트해 보다 안정적인 대안을 찾는다. 후보대안을 찾기 위한 평가지표로 사용한 후회도(regret index)의 산정 과정은 식(2)와 같다. A_i 는 i 번째 대안, S_j 는 j 번째 시나리오, A_{all} 는 모든 대안을 나타내며, 각 시나리오를 고정시킨 후 모든 대안 중 가장 성능지표가 큰 값에서 각 대안의 성능지표의 차가 후회도가 된다. 최종적으로 가장 작은 후회도를 갖는 대안이 1순위가 된다.

$$R(A_i, S_j) = \max_{A_{all}} [P(A_{all}, S_j)] - P(A_i, S_j) \quad (2)$$

RDM의 대표적인 특징은 첫째, 미래 불확실성을 서술하기 위해 방대한 시나리오 양상부를 사용하고 둘째, 시간이 지남에 따라 새로운 정보를 업데이트하여 계속적으로 안정적인 대안을 찾을 수 있도록 유도하며 셋째, 대안을 평가하기 위한 지표로 모든 미래 상황에서 위험수준 이하의 변동이 발생하지 않는 정도를 측정하는 로버스트 인자를 이용하여 평가한다는 것이다. 본 연구는 첫 번째와 세 번째 특징만을 적용하여 시행하였다.

안동댐과 임하댐 유역을 대상으로 가능한 다양한 미래 기후를 반영하기 위해 IPCC 4차 보고서의 배출시나리오 A1B, B1, A2와 12개의 GCM을 사용하여 25개(SCN1~SCN25)의 미래 기상시나리오를 작성하였다. Racsco et al.(1991)에 의해 개발되어 최근에 활발히 사용되고 있는 통계적 상세화 모형 중 일기 발생기(weather generator)인 Lars-WG 5.0을 이용해 25개의 미래 기상시나리오를 작성하였고 이를 이용해 각 시나리오 별 미래 유량과 댐 방류량을 모의하였다. 두 댐에 대해 미래 25개의 시나리오 별 평균 강우량은 물수지 모형으로 가장 많이 쓰이는 $abcd$ 모형(Thomas, 1981)을 사용했

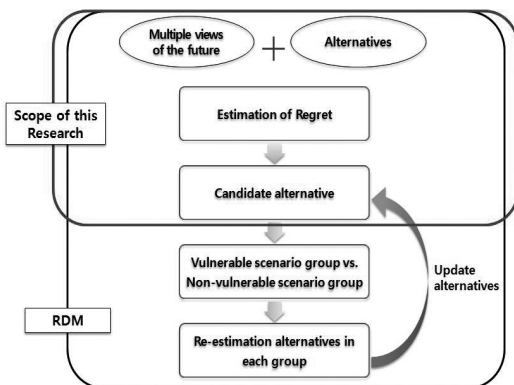


그림 6. RDM 시행 과정 (강노을, 2012)

표 4. 안동과 임하댐의 미래 평균 총 강우량과 유량 및 댐 방류량 (2011.1 ~ 2100.12)

Scenario	Montlyly average accumulated precipitation (mm)	Monthly average inflow (CMS)	Annual average accumulated amount of spill (m ³ /year)
SCN1	196	45.02	52,151,549
SCN2	201.67	48.21	67,834,810
SCN3	189.5	41.43	6,787,430
SCN4	197.13	47.19	85,106,736
SCN5	193.73	46.69	93,917,405
SCN6	186.07	43.12	8,389,056
SCN7	181.42	39.38	2,712,653
SCN8	209.11	51.79	215,677,853
SCN9	190.26	42.97	45,669,293
SCN10	197.61	44.85	18,153,418
SCN11	190.84	43.17	27,685,536
SCN12	182.37	40.28	7,531,891
SCN13	187.21	43.46	36,956,054
SCN14	183.88	40.56	5,811,533
SCN15	182.34	39.77	3,681,533
SCN16	198.25	47.8	112,364,621
SCN17	189.24	42.56	26,781,533
SCN18	203.49	48.72	87,349,757
SCN19	194.92	44.95	99,645,187
SCN20	191.97	43.74	7,533,840
SCN21	187.78	41.09	18,613,094
SCN22	172.87	37.17	3,892,262
SCN23	218.53	57.42	342,222,058
SCN24	192.19	44.01	49,106,122
SCN25	211.22	53.2	207,274,454

고, 댐 방류량 모의를 위해서는 1996년부터 미 공병단에서 사용한 HEC-5에서 사용자 인터페이스 형태로 개발된 모형인 Hec-ResSim 3.0을 사용하였다. 모의 결과는 2020s(2011~2040), 2050s(2041~2070), 2080s(2071~2100)의 30년씩 세계의 기간으로 나누어 분석하였고 그 결과는 표 4와 같다.

본 연구에서는 안동댐과 임하댐이 위치한 낙동강이 반복적인 가뭄에 대처하기 위한 비구조적 방안을 적용하였으며 한국수자원학회(2005)의 댐 건설 기준을 기초로 댐 수위 조정 대안으로 그 범위를 국한시켰다. 상시만수위나 저수위를 조정함으로써 이수용량(water conservation storage)을 증대시켜

표 5. 저수지 운영 가상 대안

Alternative index	Alternative name	Initial alternative
ALT1	AD_NHWL	AD NHWL + 1 m
ALT2	IH_NHWL	IH NHWL + 1 m
ALT3	AD+IH_NHWL	AD NHWL + 0.5 m, IH NHWL + 0.5 m
ALT4	AD_LWL	AD LWL - 1 m
ALT5	IH_LWL	IH LWL - 1 m
ALT6	AD+IH_LWL	AD LWL - 0.5 m, IH LWL - 0.5 m

가뭄을 개선할 수 있도록 6개의 대안을 가상적으로 설정하였고, 그 내용은 표 5와 같다.

6개의 대안에 대해서 저수지 운영 능력을 평가하기 위해서는 이수기에 대해 PA1(용수공급량의 순현가), PA2(용수공급 신뢰도), 홍수기에 대해 PA3(여수로 방류량), PA4(여수로비방류 신뢰도) 평가지표를 구성하였다. 네 개의 지표는 어떤 대안도 적용하지 않았을 시, 즉 현재 상태를 유지하는 대안을 적용한 경우의 각 지표 증감량을 의미한다. PA1은 대안을 적용했을 시 변동하는 용수공급량을 경제적으로 환산한 순현가를 의미하고, PA2, PA3, PA4는 각각 대안 적용 시 용수공급 신뢰도, 여수로 방류량, 여수로 비방류 신뢰도의 변동량을 의미한다. 6개의 대안에 대해 4개의 평가지표를 사용하여 로버스트 의사결정과 표준 의사결정 기법을 사용하여 순위를 도출한 결과는 표 6과 같다.

먼저 SDM에 의한 결과를 살펴보면, PA1과 PA3에서 공통적으로 ALT6이 1순위가 나왔고, PA2와 PA4에서 동일하게 ALT5가 1순위가 도출되었다. 최하위 순위인 6순위의 대안을 살펴보면 이수기 평가지표인 PA1과 PA2에서 공통적으로 ALT1이 6순위가 되었고 홍수기 평가지표인 PA3과 PA4에서 공통적으로 ALT2가 6순위를 보였다. 네 개의 평가지표에 대해 SDM에 의한 각 대안의 평균 순위를 산정한 결과, ALT6이 1.5순위로 가장 높은 값을 나타냈으며 그 뒤로 ALT5, ALT4, ALT3, ALT2, ALT1이 순으로 높은 순위로 보였다. RDM에 의한 결과를 살펴보면, PA1의 결과 안

표 6. 표준 의사결정과 로버스트 의사결정에 의한 평가지표의 평가지표 값과 순위

평가지표	평가값	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	ALT6
PA1	기대값(unit: 1,000 won)	35,516	41,961	43,084	40,654	38,095	44,874
	순위	6	3	2	4	5	1
	최대 후회도(unit: 1,000 won)	90,283	96,303	86,093	85,057	89,882	30,783
	Rank	5	6	3	2	4	1
PA2	기대값	-0.0009	0.0008	-0.0009	-0.0008	0.0066	0.0023
	순위	6	3	5	4	1	2
	최대 후회도	0.0170	0.0010	0.0169	0.0169	0.0000	0.0122
	Rank	6	2	5	4	1	3
PA3	기대값(unit: m ³ /year)	-175,909	6,032	-104,853	-202,412	-226,820	-234,263
	순위	4	6	5	3	2	1
	최대 후회도(unit: m ³ /year)	484,362	729,091	560,656	464,966	573,900	222,855
	Rank	3	6	4	2	5	1
PA4	기대값	0.000085	0.000000	0.000050	0.000108	0.000201	0.000161
	순위	4	6	5	3	1	2
	최대 후회도	0.00152	0.00146	0.00146	0.00152	0.00030	0.00116
	Rank	5	3	3	5	1	2

동댐과 임하댐의 최저수위를 하강시켰던 대안 ALT6이 1순위를 나타냈으며 임하댐의 상시만수위를 상승시킨 ALT2가 최하위인 6순위가 되었다. PA2의 결과에서는 임하댐의 최저수위를 하강시킨 대안 ALT5가 최대후회도가 가장 작아 1순위가 되었고 안동댐의 상시만수위를 상승시킨 ALT1은 6순위가 되었다. PA3의 결과에서는 최대 후회도가 가장 작은 대안은 ALT6으로 1순위가 되었고 ALT2가 가장 큰 최대 후회도를 가져 6순위가 되었다. PA4의 결과, 최대 후회도 값이 가장 작은 ALT5가 1순위가 되었고 ALT1과 ALT4가 공동 5순위가 되었다. RDM에 의한 각 대안 별로 평균 순위를 보면 ALT6이 1.75순위로 가장 높고 그 뒤로 ALT5, ALT4, ALT3, ALT2, ALT1 순서로 높은 순위를 가진 것을 확인되었다. SDM과 RDM 간의 순위 결과를 비교해 보면, PA1은 1순위 대안인 ALT6을 제외하고 나머지 대안들에서 모두 순위의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. PA2에서는 ALT2와 ALT3의 대안에서만 순위 차가 발생하여 두 의사결정 기법 간의 순위 차가 가장 작은 것을 알 수 있다. 평가 지표 PA3의 경우는 1순위와 6순위 대안을 제외한 나머지 대안에서 모두 순위 차이를 보였다. PA4에

서는 1순위와 2순위 대안이 일치하고 나머지 대안에서 순위 차가 발생하였다. 종합적으로 SDM과 RDM의 지표 별 평균 순위의 차이를 살펴보면, PA1과 PA4는 평균적으로 1.33순위 차이로 순위 차가 가장 크고 그 다음으로 PA3이 1순위 차, PA3이 0.33순위 차로 그 뒤를 따른다. 이를 통해 동일한 시나리오 하에 대안들을 평가했음에도 불구하고 두 의사결정 기법 간에 순위의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 본 연구는 수자원 분야에서 기후변화 적응에 대한 연구가 국내에 미비한 가운데 RDM을 처음으로 시범 적용하였다는 것에 그 의의가 있다.

2.6. Fuzzy 다기준 의사결정기법을 이용한 RDM

Jeon et al.(2013)은 기후변화 적응전략 수립을 위해 기후변화 시나리오에 대한 불확실성 및 적응 전략의 우선순위 결정에 사용되는 가중치의 불확실성을 최소화하기 위해 Fuzzy 집합이론이 결합된 Fuzzy TOPSIS 방법과 불확실성하에서 일반적으로 사용되는 다기준 의사결정기법들을 활용한 분석 체계를 개발하고 이를 활용하여 기후변화 적응전략들의 로버스트 우선순위를 제시하였다.

기후변화의 적응전략으로는 안양천 유역의 10개의 소유역에 하수처리수 재이용을 위한 시설의 설치로 하였다. 본 연구에서 사용된 기후변화 시나리오는 IPCC 5차에서 선정된 RCP(Representative Concentration Pathway) 시나리오 중에서 RCP 4.5와 8.5시나리오를 사용하였다. 또한 각 소유역의 평가를 위하여 유량과 수질에 대한 평가기준은 공학적인 요소뿐만 아니라 사회, 경제적인 요소까지도 고려하였다. 유역의 수문특성 분석은 HSPF 모형을 사용하였다. 앞서 말한 fuzzy 이론을 결합한 fuzzy TOPSIS를 통하여 평가치와 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하였다.

Fuzzy TOPSIS 기법을 이용해서 대안별로 평가지수(alternative evaluation index, AEI)를 계산하면 그림 7과 같다. 이는 기후변화 시나리오별, 연도별 변동폭이 매우 크게 나타날 수 있음을 제시하고 있다. 특히 RCP4.5가 RCP8.5보다 변동폭이 더 크므로 불확실성이 더 높다고 볼 수 있다. 특히 DJ, SB, SM, SS, DR은 다른 전략에 비해 변동폭이 훨씬 큼을 알 수 있다.

또한 하나의 기후변화 시나리오에서 연도별로 BOD 농도 값을 모의해보면 같은 시나리오라도 같은 적응 전략의 연도별 효과가 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 불확실성을 반영하

는 것이 필요하다고 볼 수 있다.

Fuzzy TOPSIS와 일반적인 다기준 의사결정기법인 가중합계법, TOPSIS의 순위를 그림 8과 같이 비교하였다. Fuzzy TOPSIS와 두 가지 다기준 의사결정기법(가중합계법과 TOPSIS)을 사용한 결과 불확실성을 고려하는 fuzzy 이론을 결합한 Fuzzy TOPSIS와 나머지 다기준 의사결정기법과는 다른 순위를 나타내고 있다. 이와 같이 fuzzy 이론을 사용하여 대안을 평가하면 그렇지 않은 경우와 결과가 다를 수 있음을 보여준다.

불확실성하에서 의사결정자들은 다양한 자연 상태에서의 발생 확률을 측정할 수 없을 뿐만 아니라 발생할 확률에 대해서도 확신할 수가 없다. 또 다른 발생 가능성은 필요가 만족되어야 하는 가장 중요한 목표의 의사결정이 있다는 것이다 (Stevenson and Ozgur, 2006).

본 연구에서는 기후변화 적응전략들의 로버스트 우선순위를 결정하기 위해서 완벽한 불확실성하에서의 순위결정을 위한 네 가지 MCDM을 표 7과 같이 적용하였다. 적용결과는 일반하수처리(TWW)와 고도하수처리(HTWW)로 나누어서 순위를 제시하였다. 이렇게 다양한 측면에서 우선순위를 산정한 결과 OJ, DJ, SB, HU, SA, DR 등은 두 대안에서 모두 로버스트 순위를 결정할 수 있다. 다만 WG는

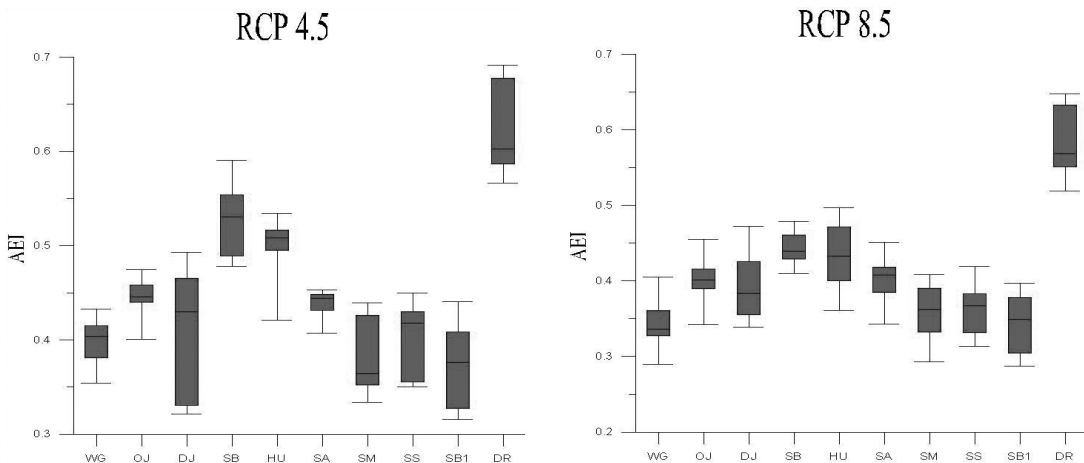


그림 7. 퍼지 탑시스의 대안평가지수

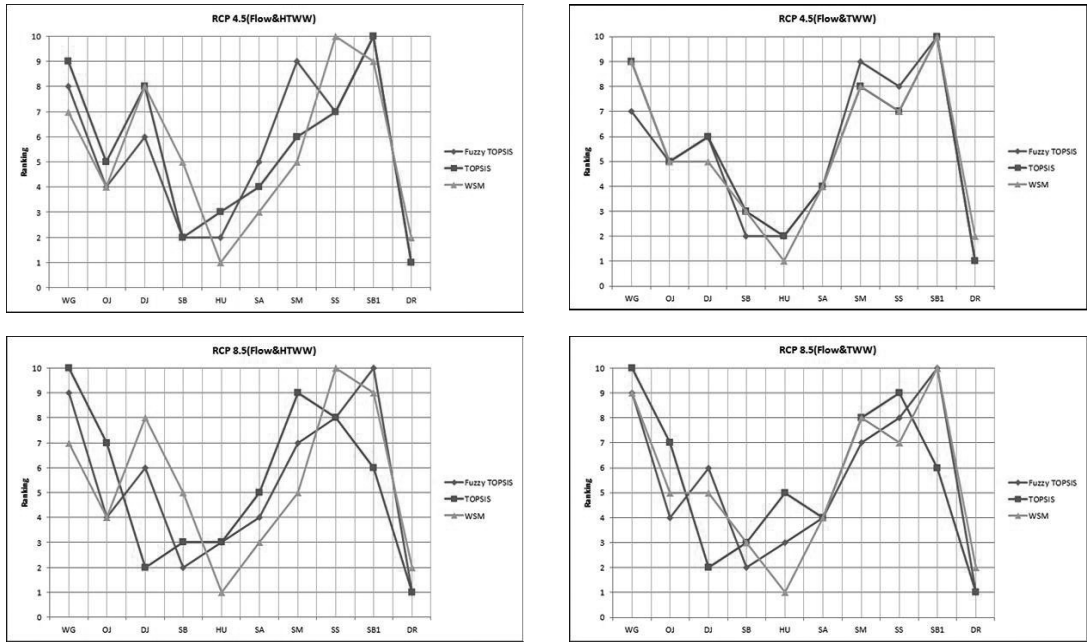


그림 8. Fuzzy TOPSIS와 가중합계법, TOPSIS의 순위비교

표 7. 불확실한 상황에서 우선순위 결정을 위해 사용가능한 MCDM 기법들의 적용 결과

대안유역	HTWW				TWW			
	Maximin	Maximax	Hurwicz	Equal Likelihood Criterion	Maximin	Maximax	Hurwicz	Equal Likelihood Criterion
WG	8	6	7	9	8	7	8	9
OJ	4	4	4	4	4	4	4	5
DJ	6	6	6	6	4	6	6	6
SB	2	2	2	2	2	2	2	2
HU	2	3	3	3	3	3	3	3
SA	4	4	4	5	4	4	4	5
SM	6	9	7	8	7	7	7	7
SS	8	6	7	7	8	7	8	8
SB1	8	10	10	10	8	10	10	10
DR	1	1	1	1	1	1	1	1

두 대안에서 모두 불확실성이 큰 순위가 유도되었고 SM과 SS는 TWW에서 불확실한 순위가 유도되었다.

본 연구는 다양한 의사결정문제에서의 불확실성을 고려한 기후변화 적응 전략의 우선순위를 확인하기 위해 새로운 RDM 체계를 제안하였다. 첫 번째로 미래의 기후변화 값과 영향분석 결과를 사용하기 위해 fuzzy 개념을 사용하였다. 두 번째로 다양한 다

기준의사결정기법의 서로 다른 특징을 사용하기 위하여 완전 불확실한(complete uncertainty) 상황에서 우선순위 결정에 사용될 수 있는 다기준 의사결정기법을 사용하였다.

새롭게 제안된 의사결정 체계는 안양천 유역의 물 순환 복원을 위한 하수처리수 재이용 시설 적응 전략을 평가하기 위해 적용되었다. 이를 위해 다음과 같이 6단계 과정을 수행하였다. (1) 하수처리수

재이용을 위해 다양한 유역에 대안을 선정하였다. (2) DPSIR 개념 기반의 의사결정 기준을 설정하였다. (3) 선정된 평가기준에 대한 가중치 선정 및 fuzzy 삼각수를 산정하였다. (4) 다양한 기후변화 시나리오에 대한 수문모의를 통해 얻어진 적응전략의 효과에 대한 평가점수를 산정하고 이를 fuzzy 삼각수로 도출하였다. (5) Fuzzy TOPSIS 방법을 이용해서 기후변화 시나리오 및 연도별로 적응전략들의 우선순위를 결정하였다. (6) 완전 불확실성하에서 적응전략의 우선순위 결정을 위해 사용할 수 있는 다기준 의사결정기법을 이용해서 안정적인 우선순위를 제시하였다.

3. 결론 및 향후 적용방안

이상의 결과를 종합해볼 때 기후변화 적응전략을 수립하기 위한 수자원 분야 RDM 연구는 다음과 같은 특징과 향후 발전방안을 가지고 있다.

- 1) 『기후변화 적응전략 수립을 위한 RDM 기법의 개발 및 적용』관련 연구 분야에서 기술수준이 우수한 선진국으로는 미국과 영국 등이 있으며 독일, 네델란드, 프랑스 등도 관련 연구 결과를 지속적으로 발표하고 있는 상황이다. 우리나라도 일부 연구자들에 의해 연구가 진행되고 있으며 곧 주요연구결과들이 국외로 발표될 예정이다.
- 2) 기존 기후변화 연구는 미래 실현가능성이 가장 높은 몇 개의 대표 시나리오를 결정하고 이를 이용해서 수자원 계획을 수립하였으나 RDM은 되도록 많은 기후변화 시나리오를 고려하여 상대적으로 모든 시나리오에 대해 다방면에서의 좋은 효과를 나타내는 적응전략을 수립하는 방안이다.
- 3) 또는 고려한 모든 시나리오들 중 하나가 미래에 발생했다고 가정하고 나머지 시나리오에

대해 사업계획을 수립했을 경우 발생할 수 있는 손해정도가 가장 적은 시나리오를 대표 시나리오로 결정하고 사업의 우선순위를 제안하는 방안도 RDM의 한 형태이다.

- 4) RDM을 위해 다기준 의사결정기법을 활용한 연구는 상당수 있었으며 일부에서는 fuzzy 개념을 결합하여 제시한 사례도 있다. 이는 다기준 의사결정기법을 적용할 경우 결과의 안정성을 향상시키기 위해 fuzzy 개념을 활용하는 연구는 경영과학 분야에서 흔히 있으므로 이를 기후변화 적응전략 수립을 위한 RDM에 활용했다.
- 5) 기후반응 등 여러 불확실성에 대해 확률을 이용해서 표현하여 적응전략의 robustness를 평가하거나 특정 의사결정에 적합한 미래 기후상태를 확률로 표현하는 등 확률기반의 RDM 접근법이 있는 반면, 기후변화의 큰 불확실성으로 인해 미래를 확률로 표현할 수 없고 이에 확률을 모르는 상황에 활용되는 의사결정전략(예, 최대 후회도의 최소화)을 이용하는 RDM 방법도 있다.
- 6) 현재 RDM의 적용은 특정한 방법이 정해져 있는 것이 아니라 적용 문제별로 다르게 고안될 수 있는 개방형 접근법으로 아직 다양한 연구사례가 필요한 분야이다.
- 7) 전 세계적으로 수자원 분야에서 기후변화 관련 연구는 수문영향 분석, 취약성 분석에 이어 적응전략 수립에도 많은 관심이 모이고 있다. 특히 기후변화 적응전략 수립을 위한 RDM 관련 연구는 이제 초창기를 막 지나 참신한 방안이 제안될 수 있는 단계이므로 적용 범위의 폭이 정해져 있지 않다. 따라서 다양한 수자원 계획수립 문제에 도입될 경우 전세계에서 주목할 수 있는 연구결과를 도출할 수 있을 것이다.

감사의글

본고는 한국수자원학회 수자원시스템분과위원회 연구지원활동에 의해 지원받았습니다. 또한 일부 요약한 연구결과는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다. ☺

참고문헌

1. 강노을 (2012). 기후변화 불확실성 하의 용수공급계획을 위한 로버스트 의사결정의 적용성 검토. **석사학위논문**, 서울대학교.
2. 강노을, 김영오, 정은성, 박준형 (2013). 기후변화 불확실성하의 용수공급계획을 위한 로버스트 의사결정의 적용, 한국기후변화학회, 제 4권, 제 1호.(in press).
3. 한국수자원학회 (2005). 댐 설계 기준, 건설교통부.
4. Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., and Li, K. (2012). "Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector." *Water Resources Research*, Vol. 48, W09537, doi:10.1029/2011WR011212.
5. Dessai, S. (2005). Robust Adaptation Decisions amid Climate Change Uncertainties. University of East Anglia.
6. Dessai, S., and Hulme, M. (2007). "Assessing the robustness of adaptation decisions to climate change uncertainties: A case study on water resources management in the East of England." *Global Environmental change*, Vol. 17, pp. 59-72.
7. Ellsberg, D. (2001). *Risk, Ambiguity, and Decision*. Garland Publishing, New York.
8. Groves, D.F. (2005). New methods for identifying robust long-term water resources management strategies for California. PhD Thesis, Research and Development.
9. Jeon, S.M., Chung, E.S, Kim, Y., and Lee, S. (2013). "Prioritizing the best areas for treated wastewater use using RCP 8.5." *Journal of Environmental Protection*, Vol. 4(S), pp. 56-61.
10. Lempert, R.J., and Schlesinger, M.E. (2000). "Robust strategies for abating climate change." *Climate Change*, Vol. 45, No. 3, 387-401.
11. Lempert, R.J., and Collins, M.T. (2007). "Managing the risk of uncertain threshold responses: Comparison of robust, Optimum, and precautionary approaches." *Risk Analysis*, Vol. 27, No. 4, pp. 1009-1026.
12. Lempert, R.J., and Groves, D.G. (2010). "Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American West."

- Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 77, pp. 960–974.
13. Lempert, R.J., Groves, D.F., Popper, S.W., and Bankes, S.C. (2006). “A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios.” *Management Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 514–528.
 14. Lempert, R.J., Nakicenovic, N., Sarewitz, D., and Schlesinger, M. (2004). “Characterizing climate-change uncertainties for decision-makers.” *Climatic Change*, Vol. 65, pp. 1–9.
 15. Nassopoulos, H., Dumas P., and Hallefatte, S. (2012). “Adaptation to an uncertain climate change: Cost benefit analysis and robust decision making for dam dimensioning.” *Climatic Change*, Vol. 114, pp. 497–508.
 16. Parson, E.S., Burkett, V., Fischer-Vanden, K., Keith, D., Mearns, L., Pitcher, H., Rosenweig, C., and Webster, M. (2006). *Global-Change Scenarios: Their Development and Use, Synthesis and Assessment Product 2.1b*. US Climate Change Science Program.
 17. Racksko, P., Szeidl, L., and Semenov, M. (1991). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modeling*, Vol. 57, pp. 27–41.
 18. RAND (2000). *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-term Policy Analysis*. Research and Development.
 19. RAND (2008). *Preparing for an Uncertain Future Climate in the Inland Empire: Identifying Robust Water-management Strategies*. Research and Development.
 20. Stevenson, W., and Ozgur, C. (2006). *Introduction to Management Science with Spreadsheets*. McGraw-Hill International Edition.
 21. Thomas, H.A. (1981). Improved methods for national water assessment. Water Resources Council.
 22. Ward, P., Strzepek, K., Pauw, W., Brander, L., Hughes, G., and Aerts, J., (2010). Partial costs of global climate change adaptation for the supply of raw industrial and municipal water: a methodology and application. *Environmental Research Letters*, Vol. 5, No. 4 (044011).