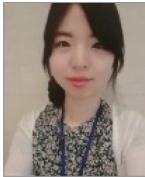
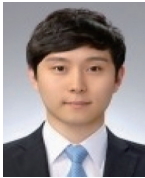


기후변화 적응을 위한 의사결정기술 개발



윤해나
서울대학교 건설환경공학부 석사과정
hny418@snu.ac.kr



임선후
서울대학교 건설환경공학부 석사과정
dominic.ihm@snu.ac.kr



서승범
서울대학교 공학연구원
sbseo7@snu.ac.kr



김영오
서울대학교 건설환경공학부 교수
yokim05@snu.ac.kr



정은성
서울과학기술대학교 공과대학
건설시스템공학과 부교수
eschung@seoultech.ac.kr

1. 머리말

온실가스 배출로 인한 지구의 온난화는 관측데이터로부터 입증된 외면할 수 없는 현실이다. 하지만 지난 20년간 이산화탄소배출 저감을 위한 전 세계적인 노력에도 불구하고 기후변화와 그로 인한 영향은 경감의 징후를 보이지 않고 있다. 기후변화 '완화(Mitigation)'는 근본적인 행동이지만 그 효과가 나타나기까지 수십 년의 시간이 필요할 수 있기 때문에 현재 기후변화에 적응하는 것이 시급하다.

'적응(Adaptation)'이라는 개념은 17세기 초반의 영문학 논문에서 등장하였고, IPCC가 기후변화 적응을 "실제 또는 예측된 기후자극과 그로 인한 부정적인 영향에 따라 자연 또는 인간 시스템을 조정하는 것"으로 정의한 이후 기후변화 관련 분야에서 주목을 받기 시작했다. 그리고 UNFCCC는 "적응은 신속히 이루어져야 하고 모든 국가의 조치가 필요하다"고 강조했다. 최근에는 이론적 개념과 실천 및 이론 중심의 서적에서부터 포괄적인 국가 보고서에 이르기까지 기후변화 적응에 대한 여러 연구가 수행되고 있다. Tompkins et al. (2010)에 의하면 "물"은 긴급히 적응이 필요하며 가장 기후에 민감한 부문 중 하나이다. 수자원 문제를 대처하기 위한 정책, 계획 그리고 프로젝트는 기후변화 적응 활동의 핵심이 될 수 있다. 기후변화 적응의 성공은 그 대안의 선택뿐만 아니라 시간과 장소, 그리고 선택된 대안을 수

행하는 방법에도 의존한다. 그러므로 기후변화 적응 과정에서 합리적인 “의사결정” 이론이 필요하다. 기후변화 적응을 위한 의사결정 이론은 기존과는 다른 특성을 가지고 있는데, 기후변화가 비정상성과 깊은 불확실성을 내재하고 있기 때문이다. 또한 기후변화 적응 의사결정은 수행결과뿐만 아니라 전체 프로세스를 포함하기 때문에 의사결정권자를 효과적으로 지원하려면 강건하며, 적응가능하고, 잘 설계된 의사결정 프레임워크가 필요하다.

2. Classical Decision-Making Theory

일반적으로 의사결정 문제는 ‘결정 변수’와 ‘상태 변수’로 구성되는데, 대부분의 경우에서 결정 변수는 ‘대안’으로 표시되고, 상태 변수는 ‘시나리오’로 표시된다. 손실 위험이 매우 높을 때에는 최적화 과정에서 ‘보다 안전한’ 목표를 추구할 수도 있는데, 이를 위해 Stevenson과 Ozgur(2007)은 세 가지 대체 선택 전략(Maximin, Maximax, Minimax 전략)을 비교하였다.

한편, 실제 의사결정 문제에서는 여러 가지 기준이 존재하고 그 중 일부는 다른 기준과 충돌하기도 한다. 이러한 현실에서의 문제를 반영하고 적응전략의 우선순위를 정하기 위해 양적 및 질적 데이터를 모두 고려하는 다중기준 분석(Multi-Criteria Analysis, MCA) 또는 다중기준 의사결정분석(Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA)이 개발되고 널리 사용되어 왔다. MCA의 주요 역할은 대량의 복잡한 정보를 일관된 방식으로 처리할 때 의사결정자가 직면한 어려움을 해결하는 것인데, 가장 바람직한 전략을 파악하고 전략에 순위를 매긴다. 또한 이어지는 심층 평가를 위하여 전략을 제한적으로 열거하거나 허용할 수 없는 가능성과 허용 가능한 가능성을 구별하기도 한다(Dodgson et al. 2009). 시나리오와 기준의 가중치는 이해관계자의 참여 또는 전문가의 개입을 통해 이끌어낼 수 있다

(Werners et al. 2013; Kim and Chung 2015).

대부분의 고전적인 의사결정 방법은 임의의 변수(Random Variables)의 확률이 잘 알려져 있다는 가정 하에 개발되어 왔다. ‘함축적 (Implicit)’ 최적화 접근법은 시나리오 기반의 의사결정 접근법과 동일한 개념을 이용하지만 ‘명확한 (Explicit)’ 최적화 접근법(예를 들어, 추계학적 동적 프로그래밍)에서 불확실성은 시나리오 보다는 확률에 더 초점이 맞추어진 명확한 공식으로 표현된다. 지난 30년 동안, 시나리오 기반의 접근법은 많은 주목을 받아왔다. 일반적으로, 기후변화 영향평가는 이러한 기후 시나리오를 일련의 전지구순환 모델(Global Circulation Model, GCM), 다운스케일링(Downscaling) 모델, 수문 모델, 그리고 홍수 및 가뭄 취약성 모델에 입력함으로써 시작되었다. 예측된 취약성의 감소를 목표로 하는 기후변화 적응에 대한 이전 연구의 대부분은 적응전략의 결과를 예측하고 최적의 대안을 선택하기 위하여 “Predict-Then-Act” 접근법을 주로 사용해왔다. 이러한 하향식(Top-down) 접근은 자연스럽게 단순한 것처럼 보이지만 Lempert et al. (2003)은 확률은 오직 시나리오가 불변의 정보를 포함하고 있을 때에만 사용되어야 한다고 주장했고, Moss and Scheider (2000)은 객관적인 판단을 근거로 한 확률을 강조했다. 일부 IPCC 참석자들은 과학 공동체의 합의를 나타내는 확률분포를 가지고 불확실성을 특성화하기 위한 평가 보고서를 이끌어내기 위한 프로세스를 시작했으나 (Giles 2002), IPCC (2005)는 이것이 나타난 결과에만 집중해 잘못된 판단을 가져올 수 있다고 경고했다. 이러한 논쟁은 Robust Decision Making (RDM) 이론으로 발전하게 되었다.

3. Robust Decision Making

RDM은 강건성 (Robustness)의 관점에 초점을 맞춘다. RDM은 광범위한 불확실성의 상황에서 합

리적으로 잘 수행되는 대안을 선택한다. RDM은 여러 시나리오를 고려하여 불확실성을 특성화하고, 확률적 정보를 정량적 방법으로 통합한다. 하지만 RDM은 단일 확률분포가 불확실한 미래를 표현하는 최적의 방법이라는 견해를 거부하며, 오히려 깊은 불확실성을 설명하기 위해 확률분포의 범위를 사용한다. 또한 RDM은 적응전략을 평가하기 위하여 최적성 (Optimal) 기준보다는 강건성 기준을 사용하는데, 이는 추정된 확률 분포를 기반으로 대안 옵션의 순위를 매기는 전통적인 방법과는 상반된다. RDM은 불확실성을 특성화하고 강건한 전략을 식별하고 평가하는데 도움이 되도록 다양한 분석의 프레임워크를 사용하는데, 이러한 접근 방법의 강점과 약점에 대해서는 Hall et al. (2012), Hallegatte et al. (2012) 및 Weaver et al. (2013)의 연구에서 설명되고 있다.

RDM의 4가지 전형적인 방법인 MCDA-Based RDM, Assess-Risk-of-Policy Approach, Vulnerability-and-Response-Option Approach, Decision Scaling은 지난 10년간 세계적으로 많은 응용 프로그램을 통해 개발되고 개선되었다. 또한 위의 4가지 방법론으로 분류할 수 없는 혁신적인 의사결정 기술들도 개발되고 있다.

최근의 연구에 따르면 RDM은 3가지 대표적인 특징을 나타낸다. 먼저, 이해 관계자의 참여와 대중들의 참여가 중요하다. Vulnerability-and-Response-Option Approach와 Decision Scaling은 주민과 의사결정자를 포함한 다양한 이해 관계자의 의견을 양적•질적으로 반영하도록 발전하였고, MCDA-Based RDM은 강건성 기준의 중요성을 높이는 동시에 이해 관계자의 선호도를 고려하도록 확장되었다. 따라서 의견 수렴을 위한 공청회, 문제해결능력 향상을 위한 워크숍, 그리고 분쟁해결을 위한 공공회의와 합의형성이 중요하게 요구된다. 두 번째로, 기후변화 시나리오와 의사결정요소의 불확실성을 줄이기 위한 불확실성 분석과 민감도분석이 요구된다. MCDA-Based RDM은 결정기준의

가중치, 전략의 성과, 기후변화 시나리오의 중요성의 불확실성을 포함하는 퍼지 집합 이론을 사용하였다. Decision Scaling은 기후반응함수를 기반으로 최적의 결정을 통해 기후공간의 분할지도(Division Map of the Climate Space)를 도출하였다. 마지막으로, 사회·경제적 요소 등의 인문사회학적 취약성 평가를 포함한다. IPCC (2001)는 시스템의 관점에서 취약성을 개념화했는데, 이에 따르면 시스템은 1) 기후변화의 영향에 노출되어 있고 2) 이러한 영향에 민감하며 3) 이러한 영향에 대처하는 능력이 낮은 경우에 취약하다고 판단된다. MCDA-Based RDM과 Vulnerability-and-Response-Option Approach, Decision Scaling은 취약성의 개념을 이전 RDM 프로세스와 결합하고 있다. 이러한 연구는 사회•경제 시스템의 평가로부터 시작하여 의사결정에 영향을 미치는 기후상태를 파악하고, 관련된 취약성 또는 위험을 분석하는 상향식 분석방법을 따른다 (Brown, 2013).

4. Real Options Analysis

실물옵션분석(Real Option Analysis, ROA)은 기후변화 적응을 위한 의사결정방법으로 종종 언급되어왔다(e.g., Watkiss et al. 2013). RDM은 위험을 시나리오에 분산 시키지는데 반해 ROA는 시간에 분산시킨다. “실물”이라는 단어는 투자가치 평가에 적용된 옵션 가격책정이론으로부터 나온 단어이다. ROA는 Myer (1977)에 의해 금융시장에 처음으로 등장하였고, De Neufville (2003)은 다양한 공학적 프로젝트의 설계 및 계획 분야에서 발생하는 불확실성에 대한 ROA의 유연함을 강조하여 실물옵션의 개념과 장점을 재검토하였다.

ROA는 전통적인 현금흐름방법(Traditional Cash Flow)을 사용한 비용편익분석 (Cost Benefit Analysis)의 확장이다. 전통적인 현금흐름방법에서는, 각 대안의 수명 기간 동안 유입 및 유출되는 현

금흐름이 예측되고 가장 경제적인 (혹은 최적의) 대안이 선택되는데, 한 번 선택된 대안은 끝날 때까지 어떠한 변경 없이 수행 된다. 즉, 전통적인 현금흐름방법은 시간에 따른 유연성이 없는 “Now and never” 옵션이다. 그러나, ROA 과정에서는 선택된 대안이 여러 옵션들을 통해 변경될 수 있고, 한 번에 모든 대안을 결정하기보다 미래에 어떻게 변화할 것인지 단계적으로 지켜보며 구성할 수 있다. ROA 옵션을 사용하면 전통적인 경제성 분석에서는 실행

불가능한 것으로 평가된 대안이 실현 가능한 해결책으로 간주 될 수도 있는데, 이를 옵션의 가치라고 한다. ROA 프로세스는 의사결정나무 구조를 통해 의사결정자가 적응계획을 개념화하고 시각화할 수 있도록 하는 강력한 접근 방식이다(WSAA 2008). 그림 1은 의사결정나무 구조를 통한 ROA 프로세스의 예시를 보여준다. 또한, Backward Moving Dynamic Programming을 통하여 의사결정나무 구조의 복잡한 계산을 용이하게 할 수 있다.

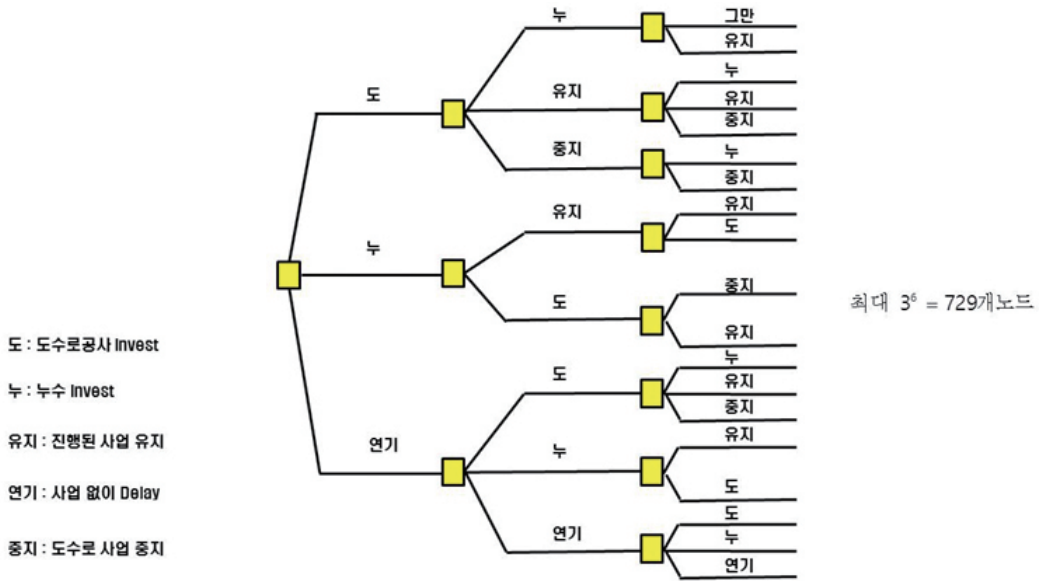


그림 1. ROA 의사결정나무 구축

ROA는 수십 년 동안 금융시장의 여러 분야에서 적용되고 발전되어 왔기 때문에 시나리오 확률이 잘 정의되고 경제적 자료가 충분히 제공된다면 기후변화 적응에서의 적용 가능성도 높다. 따라서 수자원 계획 분야에서 기후변화 적응 의사결정을 위한 ROA의 적용 사례는 점차 증가하는 추세이다. 과거의 수자원 계획에 대한 ROA 연구 결과에 따르면 ROA는 자본 투자가 많은 대형 인프라 투자와 가장 관련이 있으며 종종 기존 투자 옵션을 대안과 비교할 때도 사용 된다 (WSAA 2008). 이러한 장점에도

불구하고 ROA는 자원집약적이며 명확한 확률이 경제적 데이터를 필요로하기 때문에 현실에서의 적용에 어려움이 따르기도 한다.

5. Dynamic Adaptive Policy Pathways

Haasnoot et al. (2013)에 의해 제시된 Dynamic Adaptive Policy Pathways(DAPP)는 기후변화 시나리오에 따라 다른 의사결정방법을 제공한다. 특

히 DAPP는 시간이 지남에 따라 유연성을 획득하기 위한 적응적 접근에 기초하고 있으며 액션을 취하며 미래에 옵션을 열어둔다 (Haasnoot et al. 2013). DAPP는 ‘Adaptive Policy Making (Walker et al. 2001)’ 및 ‘Adaptation Pathway (Haasnoot et al. 2011; 2012)’라는 2가지 선행 방법론의 조합에서 발생하지만, Walker et al. (2013)이 DAPP를 강건한 동적 방법론으로 분류한 것에 의하면 ‘동적’ 및 ‘적응’은 동일하다고 판단된다. Haasnoot et al. (2013) 및 Walker et al. (2013)은 적응 정책이 "가정에 근거한 계획"(Dewar et al., 1993)에 기인한 방법론이라 밝히며, DAPP의 "Sell-by Date" 개념은 "Adaptation Tipping Point" 방법론에서 채택되

었다고 하였다.

DAPP의 본질은 의사결정자가 변화하는 조건을 반영하기 위해 '적응 경로 그림'을 만드는 것이다. 그림2가 DAPP의 간단한 예시를 나타낸다. ROA는 특정 대안에 대한 몇 가지 '옵션' 경로를 제공하지만, DAPP 지도는 다양한 대체경로를 제공한다. DAPP는 RDM과 ROA보다 더욱 다양한 범위의 대안과 조정, 전환 및 결합을 아우르는 가장 일반적인 의사결정을 제공할 수 있다. 그러나 아직 DAPP의 적용은 제한적이기 때문에 추가적인 연구진행이 필요하며, 계산상의 부담을 줄일 수 있는 응용 프로그램이 개발되어야 한다.

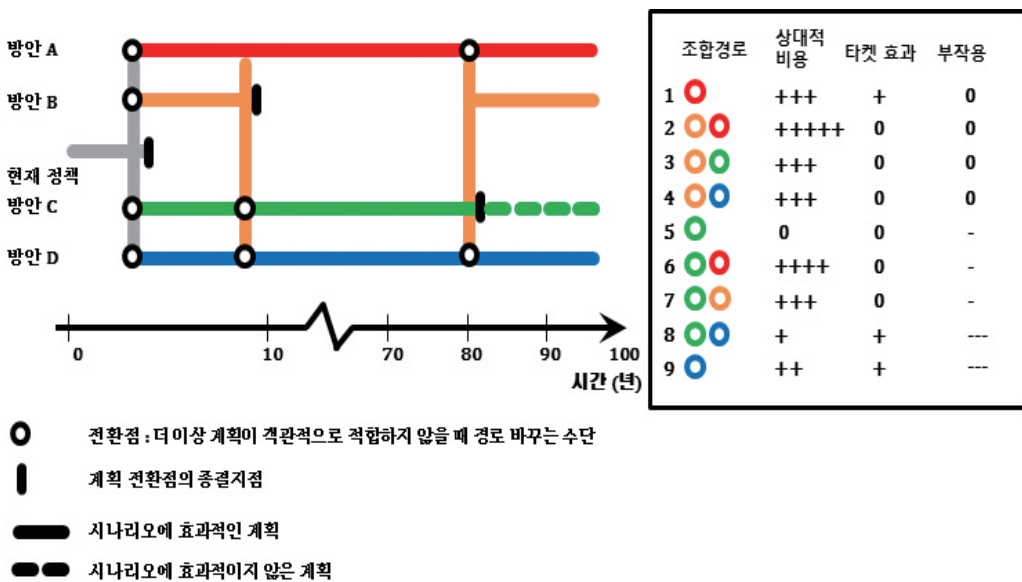


그림 2. DAPP 도식화

6. 맺음말

기후변화의 비정상성 및 불확실성 하에서 합리적인 가정이 이루어지거나 적절한 수정이 이루어질 경우에는 고전적인 의사결정이론도 여전히 훌륭

한 의사결정 방법일 수 있지만, 수자원 계획 과정에서 다양한 기후변화 시나리오를 고려하기 위해서는 RDM, ROA, 또는 DAPP의 적용이 더욱 타당할 것이다. 이 외에도 수자원 분야에 아직 적용되지 않았지만, 기후변화에 따른 의사결정 문제를 해결할 수

있는 다른 방법이 있다. 예를 들면, '포트폴리오 분석'과 같이 단일 대안을 선택하는 것보다 여러 대안을 사용하는 것이 더욱 효과적일 수도 있다(WUCA 2010, Hunt and Watkiss 2013). 금융시장 이론에 기초를 둔 포트폴리오 분석은 대안에 위험을 분산시키는데, 이는 위험을 시나리오나 시간에 분산시키는 위의 의사결정 방법과 유사하다고 볼 수 있다(Hunt and Watkiss, 2013).

앞서 언급했듯이, 새로운 의사결정방법은 주로 기후변화의 불확실성을 추가적으로 고려하기 때문에 자원 집약적이다. 다시 말해 기후변화 적응은 일반적으로 다른 계획 절차보다 더 많은 전문가, 비용, 시간 및 기타 유형의 노력을 필요로 한다. 특히 이해관계자들은 복잡하고 자원을 많이 소비하는 절차를 꺼리기 때문에 기후변화 시대에서는 대중 참여 절차를

를 위한 지속적인 노력이 강조되어야 한다. 의사결정은 구현되어야 할 행동뿐 아니라 과정의 전체라는 점을 기억해야 한다.

감사의 글

본 학술기사는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(15AWMP-B083066-02)에 의해 수행되었으며, 북 챕터 “Kim and Chung (2016) Ch. 8. Adaptation to Climate Change: Decision Making, Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change, Springer”를 국문으로 번역한 것에 기초합니다.



참고문헌

- Alliance W.U.C. (WUCA) (2010) Incorporating climate change uncertainties into water planning, decision support planning methods, San Francisco, CA, January
- Borison A and Hamm G (2008) Real options and urban water resource planning in Australia. Water Services Association of Australia (WSAA), April
- Brown C (2013) Decision-scaling for robust planning and policy under climate uncertainty. Expert Perspectives Series Written for the World Resources Report, 2011
- Dewar JA et al. (1993) Assumption-based planning: a planning tool for very uncertain times. RAND CORP MR-114-A, Santa Monica
- Dodgson JS et al. (2009) Multi-criteria analysis: a manual. Department for Communities and Local Government, London
- Giles J (2002) Scientific uncertainty: when doubt is a sure thing. Nature 418(6897):476-478
- Greco S et al. (1999) The use of rough sets and fuzzy sets in MCDM. Multicriteria decision making. Springer US, Boston, pp 397-455
- Haasnoot M et al. (2011) A method to develop sustainable water management strategies for an uncertain future. Sustain Develop 19(6):369-381. doi:10.1002/

sd.438

Haasnoot M et al. (2012) Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. *Clim Chang* 115(3–4):795–819

Haasnoot M et al. (2013) Dynamic adaptive policy pathways: a method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Glob Environ Chang* 23(2):485–498. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006

Hall JW et al. (2012) Robust climate policies under uncertainty: a comparison of robust decision making and info-gap methods. *Risk Anal* 32(10):1657–1672

Hallegatte S (2009) Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Glob Environ Chang* 19(2):240–247. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003

Hunt A and Watkiss P (2013) Portfolio analysis: decision support methods for adaptation. MEDIATION Project, Briefing Note 5. Funded by the EC's 7FWP

IPCC (2001) Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Summary for Policy Makers, World Meteorological Organisation, Geneva

IPCC (2005) Guidance notes for lead authors of the IPCC fourth assessment report on addressing uncertainties. Cambridge University Press available via, Cambridge, UK, <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4uncertaintyguidancenote.pdf>

Kim Y and Chung ES (2015) Robust prioritization of climate change adaptation strategies using the VIKOR method with objective weights. *J Am Water Resour Assoc*, 51,5: 1167–1182.

Lempert RJ et al. (2003) Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, longterm policy analysis. Tech. Rep RAND CORP MR-1626-RPC

Moss RH and Schneider SH (2000) Uncertainties in the IPCC TAR—recommendations to lead authors for more consistent assessment and reporting. In: Pachauri R, Taniguchi T, Tanaka K (eds) Guidance papers on the cross cutting issues of the third assessment report of the IPCC. World Meteorological Organization, Geneva, pp 33–51

Myers SC (1977) Determinants of corporate borrowing. *J Financ Econ* 5(2):147–175. doi:10.1016/0304-405X(77)90015-0

Neufville R (2003) Real options dealing with uncertainty in systems planning and design. *Integrat Ass* 4(1):26–34. doi:10.1076/iaij.4.1.26.16461

Stevenson WJ, Ozgur C (2007) Introduction to management science with spreadsheets and student CD. McGraw-Hill Inc, New York

Tompkins EL et al. (2010) Observed adaptation to climate change. UK evidence of transition to a well-adapting society. *Glob Environ Chang* 20(4):627–635. doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.05.001

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2002) Annotated guidelines for the preparation of national adaptation programs of action, United Nations, New York

Walker WE et al. (2001) Adaptive policies, policy analysis, and policy-making. *Eur J Oper Res* 128(2):282–289. doi:10.1016/S0377–2217(00)00071–0

Walker WE et al. (2013) Adapt or perish: a review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty. *Sustainability* 5(3):955–979. doi:10.3390/su5030955

Watkiss P, Hunt A (2013) Method overview: decision support methods for adaptation, Briefing Note 1. Summary of Methods and Case Study Examples from the MEDIATION Project. Funded by the EC's 7FWP

Weaver CP et al. (2013) Improving the contribution of climate model information to decision making: the value and demands of robust decision frameworks. *Wiley Interdisciplinary Reviews, Clim Chang* 4(1):39–60

Werners et al. (2013) Adaptation turning points: decision support methods for adaptation, MEDIATION Project, Briefing Note 9.
