

극한기후 리스크의 경제적 정량화: 홍수 부문 기후변화 적응 정책의 경제적 효과 분석 연구 소개



서승범

서울시립대학교
국제도시과학대학원 조교수
sbseo7@uos.ac.kr



지희원

서울시립대학교
도시과학연구원 연구원
heewon.jee@uos.ac.kr



고경문

서울시립대학교
국제도시과학대학원 석사과정
moonsmile_v@naver.com



조재필

유역통합관리연구원 원장
jpcho89@gmail.com



채여라

한국환경연구원
기후대기안전연구본부 선임연구위원
yrchae@kei.re.kr

1. 들어가며

세계경제포럼(World Economic Forum)의 2020년 글로벌 리스크 보고서에서는 주요 리스크를 영향(Impact)과 발생가능성(Likelihood) 측면에서 분석하였는데, 극한기상(Extreme weather)과 기후변화 정책 실패(Climate action failure)가 최상위권 순위로 제시되었다(그림 1 참조). 이는 기후변화 리스크가 미

래 인간의 삶에 미치는 영향이 여타 리스크보다 점차 더 크게 다가올 것으로 전망한 것이다. 따라서 미래의 불확실한 기후 및 사회·경제 여건 변화에 대비하기 위한 적절한 적응 정책의 수립이 필요하며, 이러한 정책들에 대한 대응능력 및 효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이는 파리협정에 의거한 신기후체제에서 적응 역량 확보의 중요성을 강조하고 지속가능개발(SDG) 달성을 위한 기후변화 적응 보고서 제출을

의무화하는 방향과 일치한다.

국가 단위의 기후변화 리스크 및 적응 역량을 경제적 가치로 평가하는 연구는 미국과 유럽을 중심으로 진행되고 있으며(Feyen et al., 2020; Harrison et al., 2019; Hsiang et al., 2017; USEPA, 2017), 건강, 수자원, 농업, 산림, 에너지, 인프라, 생태계 등 다양한 부문에 걸쳐 연구를 해오고 있다. 국내의 경우도 미래 기후 및 사회·경제 시나리오 평가, 기후변화의 경제적 영향 분석, 기후변화 취약성 평가 등 다양한 연구가 수행되었지만, 기후 및 사회·경제 시나리오를 경

제적 영향 분석 모듈에 적용하여 정량적으로 정책 평가를 수행한 사례는 다소 부족하였다. 하지만 최근에 이르러서는 다양한 부문별 취약성 평가 모형을 개발하고 여러 적응 대책에 대한 통합적 분석이 시도되고 있다. 그 일환으로 채여라 외(2020)는 현재 국내 기후변화 리스크 및 적응 정책 효과를 정량적으로 분석하고 정책 지원 도구를 개발하기 위한 연구를 수행 중에 있으며, 본 기사에서는 해당 연구의 ‘홍수 부문 기후변화 적응 정책의 경제적 효과 분석’ 연구를 소개하고자 한다.



그림 1. Global risk landscape 2020 (WEF, 2020)

2. 홍수 관련 기후변화 적응대책

2020년 12월에 발표된 「제3차 국가 기후변화 적응 대책(2021-2025)」(관계부처합동, 2020)에서는 홍수 관리, 물안보 강화, 건전한 물환경 조성 등을 수자원 부문의 기후변화 적응 기본 방향으로 설정하였다. 홍수 관리는 치수시설 강화와 정보 제공 체계 구축에 중점을 두며, 특히 지역 맞춤형 홍수 대응 강화를 위해 저류·펌프시설, 빗물저류터널 설치 및 확충, 홍수터 확대 등의 사업과 노후 물관리 시설의 치수 기능 개선, 하수관로 및 댐하천 설계기준 강화 사업 등을 제시하고 있다. 건전한 물환경 조성은 지역별 물순환목표관리제를 추진하고, 저영향개발 기법을 확대 적용하여 도시 물순환 구조를 개선하고, 물순환 모니터링 시스템을 구축하여 종합적 관리 체계를 강화하는 것을 목표로 한다. 추진되는 모든 세부과제 들은 홍수 피해 저감을 위한 중요한 정책들이지만, 본 연구에서는 현황 자료의 수치적 변화를 반영하여 홍수 리스크

저감에 대한 정량적인 평가를 수행할 수 있는 두 가지 정책 방향을 다음과 같이 선정하였다. ‘수자원 인프라 설치’는 통수능력의 향상을 위하여 지역 내 저류 및 펌프시설을 지속적으로 확충하고 도심 저지대에 우수 저류시설을 보충하는 과제를 포함한다. ‘치수시설 역량 강화’는 하수도 및 소하천 정비와 하천 인접지역의 홍수터를 확대하는 방안을 포함한다.

3. 홍수 적응대책 효과 분석 방법론

기후변화로 인해 극치 수문 사상의 규모와 빈도가 증가하고 도시화에 따른 주거·공공시설의 집중화는 홍수로 인한 피해 규모를 증가시키고 있다. 홍수에 따른 발생 가능한 피해를 경제적으로 정량화하기 위하여 본 연구에서는 아래 그림 2와 같이 적응 정책의 영향평가를 수행하였다.

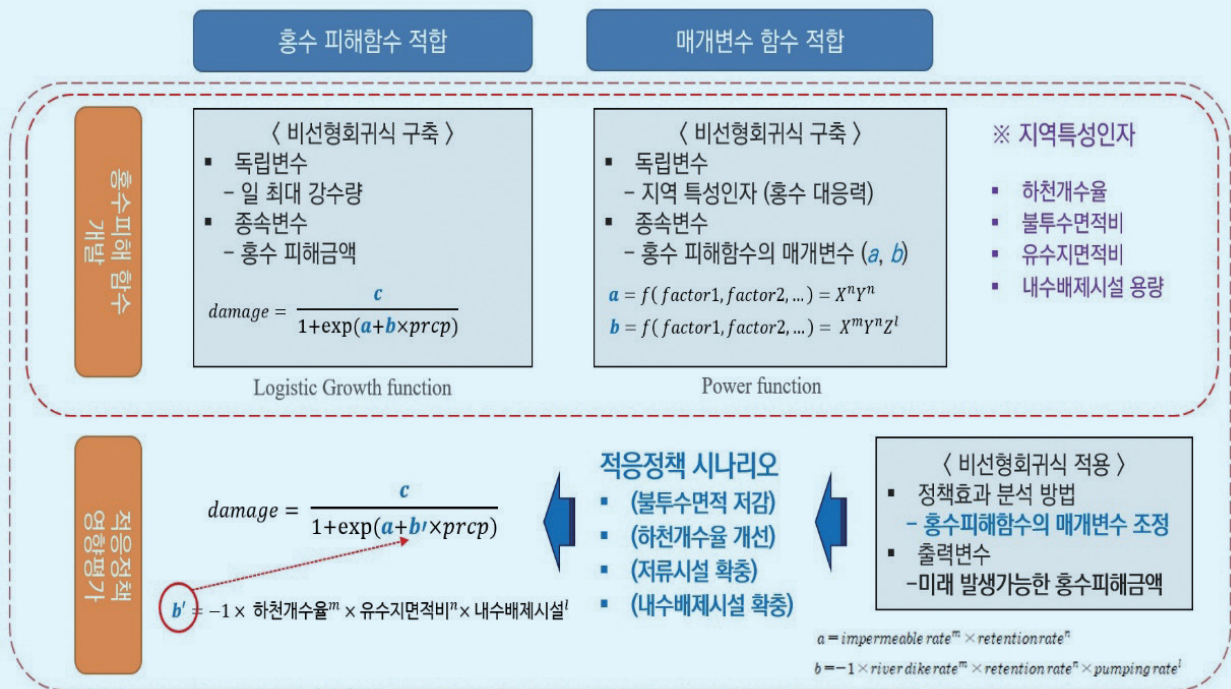


그림 2. 홍수 리스크의 경제적 정량화 연구 절차 (채여라 등, 2021)

홍수 피해함수 산정

우선 실제 피해사례 자료 기반 홍수 피해함수를 구축한다. 행정안전부에서 매년 발간하는 재해연보 자료를 통해 시군구 행정단위로 과거 25년간(1994년~2018년) 발생했던 홍수 피해사례를 조사하고 과거 홍수 사례별 피해금액 자료와 동기간의 기상자료(강우량)자료를 구축하였다. 기상자료는 기상청의 중관기상관측(ASOS, Automated Synoptic Observing System)장비에서 관측한 일단위(daily) 강수량 시계열자료를 구축한 후 전국 시군구 행정단위 면적평균값으로 변환하였다. 홍수 사례를 조사함에 있어 풍랑에 의한 영향을 제거하기 위해 호우에 의한 피해 자료만을 반영하였으며, 본 연구에서는 구축된 자료를 시도(특광역시도) 행정단위로 업스케일 하였다. 이는 상세화된 행정단위로 분석할 때 부득이하게 발생하는 미세측지역을 피하고, 지역인자를 구축함에 있어 결측 자료의 보간 및 자료 부재 등에 의한 모형 구축과정에서의 불확실성을 최소화 하기 위함이다.

홍수 피해액 산정을 위한 강수인자로 일최대강수량을 사용하였다. 실제로 홍수 분석을 위해서는 시 단위(hourly) 강수 등 단기 강우강도를 반영할 수 있는 독립변수를 사용하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 전국 단위 분석과 기후변화 적응 정책의 영향 평가가 주 목적이므로 시공간적 규모를 크게 하고 피해함수를 상대적으로 간소하게 구성하기 위해 일최대강수량 단일 변수를 사용하였다. 홍수 피해함수로 비선형함수인 로지스틱 성장 함수(Logistic growth function)를 사용하여 아래 식과 같은 비선형회귀식을 적용하였다.

$$\text{flood damage} = \frac{c}{1 + \exp(a + b \cdot \text{PRCP})}$$

특정 규모의 강수가 내릴 때까지는 지역내 홍수저감능력에 따라 발생가능 피해가 아주 서서히 증가하

다가 특정 규모 이상의 강수가 내리게 되면 피해가 급격히 증가하게 되는 홍수 피해의 특성과, 지역내 주거 및 기반 시설의 규모에 따라 발생가능 최대피해액의 상한이 제한되는 특성을 반영하게 된다. 매개변수 중 a와 b는 피해함수 곡선의 형태를 결정하고, c는 피해금액의 상한값을 의미한다. 즉, 일최대강수량이 충분히 커지게 되면 피해금액은 c 값으로 수렴하게 된다. 본 연구에서는 제주도를 제외한 총 15개의 특광역시도별 홍수 피해함수의 매개변수를 추정하였다.

홍수 피해함수 매개변수의 변화 분석

매개변수 b가 피해함수 곡선에 미치는 영향을 도식적으로 나타내기 위해 아래 그림 3과 같이 b 값 변화에 따른 홍수 피해함수의 변화를 분석하였다. 그림 3의 빨간색 곡선은 서울특별시에 대해 추정된 매개변수 산정 결과를 보여주며, 이를 기준으로 매개변수 b에 대하여 균등하게 증감시키면서 변화하는 피해함수 곡선을 함께 나타내었다. 여기서 b 값이 증가할수록(b 값이 음수이므로 음의 절대값이 작아질수록) 곡선이 오른쪽으로 이동하면서 기울기가 미세하게 감소함을 확인할 수 있다. 즉 b의 값이 증가할수록 동일한 강수량에 대한 발생가능 피해금액이 감소함을 보여주고 강수량 변화에 대한 피해금액의 변화량 역시 서서히 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 각 지역별 홍수 대응력을 반영하는 특성인자 들로 홍수 피해함수의 매개변수 값을 설명할 수 있다면, 그 해당 특성인자의 변화에 따른 홍수 피해함수의 매개변수 변화를 연계시킬 수 있게 된다. 본 연구에서는 기후변화 적응 정책에 따라 변화할 수 있는 지역의 특성인자를 선정하여 매개변수 b를 설명하는 비선형 파워함수를 새롭게 추정하였다.

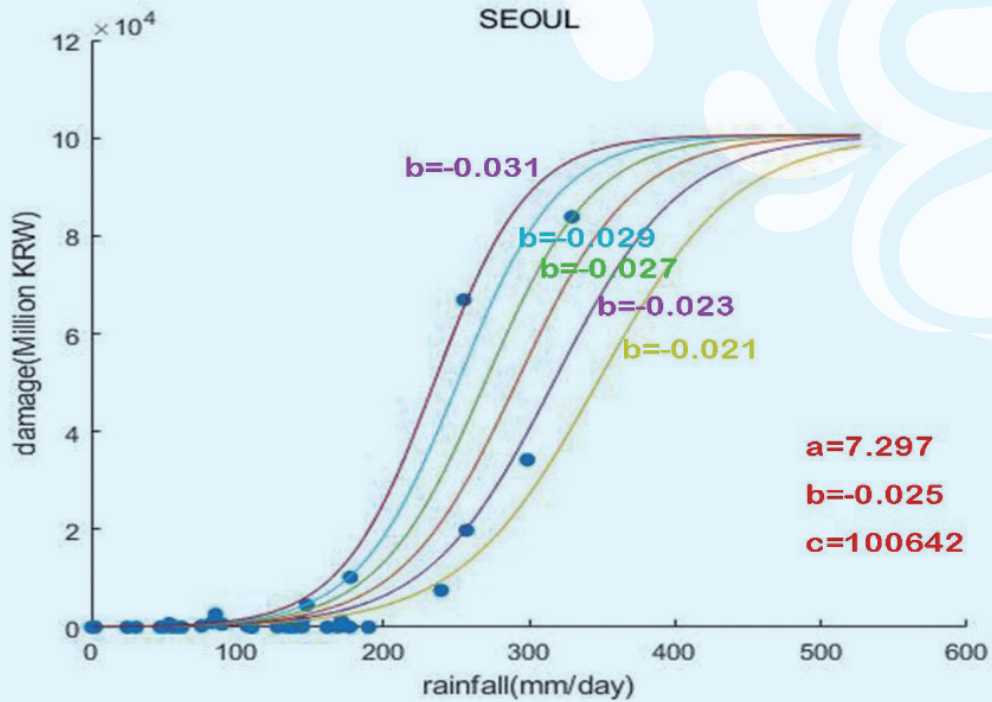


그림 3. 홍수 피해함수 매개변수 b 민감도 분석 (채여라 등, 2021)

지역인자 선정 및 매개변수 함수 추정

제3차 기후변화 적응대책의 정책방향을 반영할 수 있는 지역 특성인자를 선정하기 위해 지역별 물리적 특성과 홍수 저감 시설의 규모를 대표할 수 있는 총 4 개의 지역인자를 선정하였다. 유수지 면적, 내수배재 시설 용량(양수량), 하천개수율(%), 그리고 불투수 면적 비율(%)을 각 자치구별로 정리하였으며, 각 자치구별로 구축된 값을 특광역시도 단위로 취합한 후 유수지는 전체 행정구역 면적대비 비율(‰), 양수량은 면적평균 양수량(m/day) 단위로 변환하였다. 매개변수 b에 대한 지역 특성인자의 설명력을 분석하기 위해 매개변수와 지역인자간의 상관관계를 분석한 후, 매개변수 b에 대한 파워함수를 아래와 같이 결정하였다. 아래 식에서 river dike rate는 하천개수율, retention rate는 유수지면적비, pumping rate는 내수배재능을 말한다.

$$b = -1 \times \text{river dike rate}^m \times \text{retention rate}^n \times \text{pumping rate}^l$$

기후변화 적응정책 선정

본 연구에서는 제3차 기후변화 적응대책에서 제시한 다양한 기후변화 적응 정책들 가운데 현황에 대한 자료 구축이 가능하고 정책 실현 후 발생하는 결과의 객관적인 효과가 입증될 수 있는 정책들을 중심으로 선정하였다. 그리고 정책별 시행계획안을 결정하기 위해 2021년 3월 발행된 「제3차 국가 기후변화 적응대책(2021-2025) 세부시행계획」(관계부처합동, 2021)을 중점적으로 착안하여 적응 정책을 수치화하는 방안을 제시하였다. 유수지 면적과 내수배재시설 용량 증대는 도시지역 침수예방사업 다각화 과제의 주요 시행계획으로 선정된 저류·펌프시설 확충(매년 30~40개소 확충) 계획을 참고하였다. 하천정비율

의 경우엔 특광역시도 별로 반영하기 위하여 현재 하천개수율 현황을 기준으로 미진한 지역을 우선추진지역으로 선정하는 시나리오를 구성하였다. 지역별 반영 계획 등 세부적인 가정은 채여라 외(2021)를 참조하기 바란다.

정책영향 평가

앞서 제안한 정책별 시행계획안(관계부처합동, 2021)을 향후 10년간 꾸준히 시행한다는 가정하에, 각 지역별 홍수 피해함수의 변화(매개변수 b 값의 변화)를 계산하였다. 즉, 시행계획안에 따라 변화된 지역 특성인자 값을 반영하여 변경된 매개변수 b 값을 적용함으로써 적응대책별 대응 효과를 평가하는 것이다. 아래 표 1은 각 정책별 시행계획안을 적용하여 새롭게 추정한 매개변수 b 산정 결과를 보여준다. 정책을 시

행함에 따라 매개변수 b 값이 증가함을 보여주는데 이는 홍수 피해함수 곡선이 오른쪽으로 이동하며 기울기가 약간 감소하는 방향으로 변화하는 걸 의미한다.

그림 4는 서울특별시의 기후변화 적응 정책 시행에 따른 홍수 피해함수의 변화를 보여준다. 빨강색 점선은 홍수 피해금액과 강수량 자료로 추정된 홍수 피해함수이며 검정색 실선은 매개변수 b를 지역 특성인자로 설명하는 관계식을 적용한 홍수 피해함수이다. 이 검정색 실선의 매개변수 b 값이 기후변화 적응대책 시행계획의 반영 여부에 따라 변화하게 되며, 저류·펌프시설 확충 정책이 반영된 결과를 초록색 점선으로 나타내었다. 본 예시에서 나타나듯이 기후변화 적응 정책을 반영함에 따라 동일한 일최대강우량에 대한 피해액 산정 결과가 감소하는 방향으로 전망됨을 확인할 수 있다.

표 1. 지역 특성인자의 변화에 따른 홍수 피해함수 매개변수 b 추정 결과 (채여라 외, 2021)

매개변수 b 특광역시·도	기준값 b	정책별 시행계획안 적용					
		모두 적용시		개수율 개선		저류·펌프시설 확충	
		b 추정	증감	b 추정	증감	b 추정	증감
서울특별시	-0.0219	-0.0214	-0.0006	-0.0219	0.0000	-0.0214	-0.0006
부산광역시	-0.0542	-0.0476	-0.0066	-0.0488	-0.0053	-0.0528	-0.0014
대구광역시	-0.0354	-0.0345	-0.0009	-0.0354	0.0000	-0.0345	-0.0009
인천광역시	-0.0536	-0.0421	-0.0115	-0.0432	-0.0104	-0.0523	-0.0014
광주광역시	-0.0398	-0.0388	-0.0010	-0.0398	0.0000	-0.0388	-0.0010
대전광역시	-0.0775	-0.0756	-0.0020	-0.0775	0.0000	-0.0756	-0.0020
울산광역시	-0.0589	-0.0520	-0.0069	-0.0533	-0.0056	-0.0574	-0.0015
경기도	-0.0573	-0.0506	-0.0067	-0.0519	-0.0054	-0.0559	-0.0015
강원도	-0.0836	-0.0740	-0.0096	-0.0759	-0.0076	-0.0814	-0.0021
충청북도	-0.0740	-0.0655	-0.0085	-0.0672	-0.0068	-0.0722	-0.0019
충청남도	-0.0798	-0.0627	-0.0170	-0.0644	-0.0154	-0.0778	-0.0020
경상북도	-0.0748	-0.0662	-0.0086	-0.0680	-0.0069	-0.0729	-0.0019
경상남도	-0.0753	-0.0590	-0.0163	-0.0606	-0.0147	-0.0734	-0.0019
전라북도	-0.0849	-0.0664	-0.0185	-0.0681	-0.0168	-0.0828	-0.0022
전라남도	-0.0859	-0.0683	-0.0176	-0.0701	-0.0158	-0.0837	-0.0022

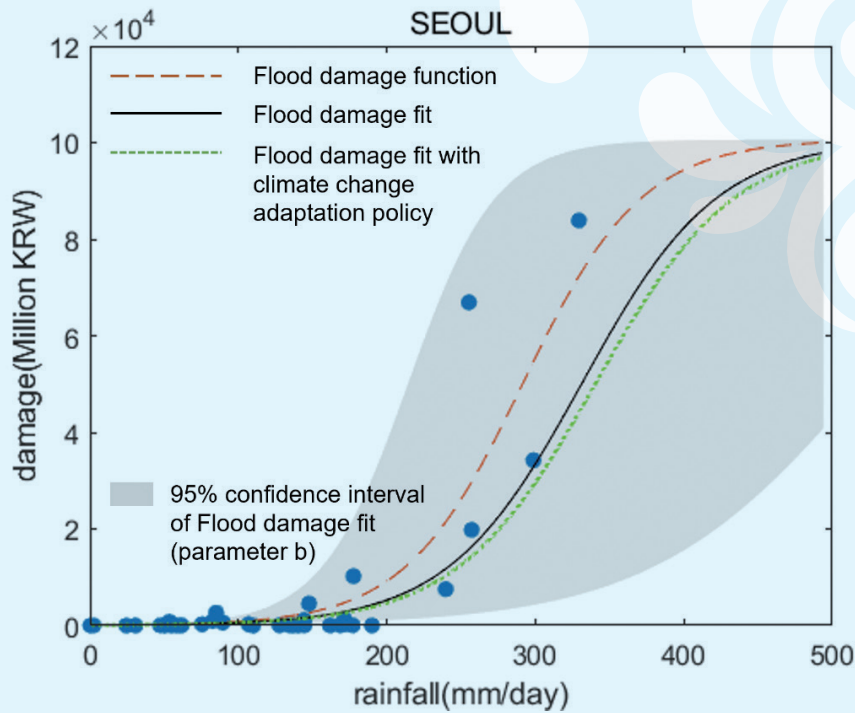


그림 4 기후변화 적응대책 시행에 따른 홍수 피해함수의 변화 (채여라 외, 2021)

4. 맺으며

본 기사에서는 홍수 부문 기후변화 적응 정책의 역할을 정량적으로 평가하기 위한 연구를 소개하였으며, 이는 현재 진행중인 연구로서 궁극적으로 다른 부문과의 통합 평가를 통한 정책 지원 도구로의 활용을 기대하고 있다. 본 연구에서 적용한 저류·펌프시설 확충, 하천개수율 개선과 같은 구조적 대책은 중단기적으로 홍수 대응에 큰 효과를 가져올 수 있으며 국가 보고서에 발표된 방향대로 향후 10년간 꾸준한 적응 대책의 시행이 이루어 진다면 상당한 규모의 홍수 피해를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 전국단위로 적응 정책에 대한 정량적 역량평가를 수행하였지만 여전히 불확실성과 한계점을 가지고 있다. 우선 홍수피해를 강수량 하나의 인자로 설명하는 과정에서 강풍을 동반하는 태풍 피해

사례가 분석에서 제외되었다. 따라서 모든 홍수 피해 사상을 반영하지 못 하였으므로 연평균 홍수 피해액이 과소 산정 되었다. 또한 충분한 홍수 피해 사례를 반영하고 모형을 간소화 하기 위해 시공간적으로 매크로(macro)한 모형을 구축하였다. 물론 전국 단위의 장기 영향평가를 수행하고 이를 통한 정책 영향을 개략적으로 판단하기 위해서는 시공간적으로 상세한 단위의 모형 구축이 불필요할 수 있다. 그럼에도 불구하고 지역단위에서 보다 정밀한 정량적 영향평가를 위해서는 추후에 충분한 피해 자료를 동반한 지역 규모의 상세한 모형의 구축과 분석이 필요할 수 있다. 마지막으로 충분히 다양한 홍수저감대책이 반영되지 못했다. 불투수면적비 감소와 같은 저영향개발(LID) 정책을 반영하지 못 했는데 이는 도시지역에 대하여 SWMM과 같은 유출모의 모형의 구축을 통한 지역 단위 사례연구를 통해 분석하는 것이 더 적절하다고 판

단된다.

앞서 제시한 몇 가지 아쉬운 점에도 불구하고, 본 연구의 방향은 제안된 기후변화 적응 정책의 장기적인 영향을 정량적으로 비교·분석할 수 있는 결과를 제공해 준다는 점에서 그 의의가 크다고 할 수 있다. 모형 구축과정에서 축적되는 불확실성을 감안하더라도, 지역의 피해사례를 종합한 자료를 반영하여 홍수 피해함수의 매개변수를 추정하고 정책 대안별 매개변수의 변화를 적용함으로써 여러 정책들 간의 상대적인 대응 능력의 비교 및 지역간 비교분석을 가능하게

해준다. 이렇듯 다양한 적응 옵션의 분석과 역량 평가를 통해 중장기적인 정책적 시사점을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의글

본 연구는 KEI(한국환경연구원)의 “국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가” 과제에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌

- 관계부처합동(2020), 「제3차 국가 기후변화 적응대책(2021-2025)」
- 관계부처합동(2021), 「제3차 국가 기후변화 적응대책(2021-2025) 세부시행계획」
- 채여라 외 (2020), 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가 (1차년도), 한국환경정책·평가연구원.
- 채여라 외 (2021), 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가 (2차년도), 한국환경연구원.
- Feyen et al. (2020), Climate change impacts and adaptation in Europe, JRC PESETA IV final report.
- Harrison et al. (2019), Differences between low-end and high-end climate change impacts in Europe across multiple sectors, Regional Environmental Change, 19, pp.695-709.
- Hsiang et al. (2017), Estimating economic damage from climate change in the United States, Science. 356(6345).
- USEPA (2017), Multi-Model Framework for Quantitative Sectoral Impacts Analysis: A Technical Report for the Fourth National Climate Assessment, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- World Economic Forum (2020), The Global Risks Report 2020, 15th Edition.