

한국의 지역별 기후변화 피해비용 및 탄소의 사회적 비용 추정

최미희* · 유종현**†

*서울시립대학교 도시공학과 석사과정, **서울대학교 행정대학원 조교수 / 서울대학교 환경대학원 겸무교수

Regional climate damage and social cost of carbon in South Korea

Choi, Mihee* and Yoo, Jonghyun**†

*Master Candidate, Dept. of Urban Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

**Assistant Professor, Graduate School of Public Administration, Seoul National University, Seoul, Korea /

Adjunct Professor, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study estimates regional climate change damage and domestic social cost of carbon (DSCC) across 17 provinces in South Korea using a probabilistic approach. Unlike previous studies that relied on deterministic scenarios at the national level, this research incorporates regional heterogeneity in climate and socio-economic changes while accounting for future uncertainties through probabilistic projections. We construct long-term socio-economic-climate scenarios and downscale national projections to the provincial level, applying empirical damage estimates based on precipitation-induced economic growth impacts. Our analysis reveals substantial regional disparities in climate damage costs. The total damage for South Korea is estimated at approximately 87 trillion won (2030 ~ 2060, present value), with the Seoul Metropolitan Area—comprising Gyeonggi Province, Seoul, and Incheon—accounting for over 59% of total damages. Gyeonggi Province faces the highest absolute damage costs, averaging 13 trillion won annually in the mid-term period (2040 ~ 2060). The regional DSCC ranges from 94 won/tCO₂ in Jeonbuk to 4,199 won/tCO₂ in Gyeonggi, a 45-fold difference. When expressed as a percentage of regional GDP, Daejeon, Gwangju, Incheon, and Sejong show the highest relative vulnerability. All regions exhibit rapidly increasing damage costs, particularly in the mid-term period, with significant tail risks indicating potential extreme losses. These findings demonstrate the necessity for differentiated regional climate policies rather than uniform national approaches. The results provide crucial quantitative evidence for regional climate adaptation planning and budget allocation, emphasizing the urgency of targeted interventions in high-risk areas while considering extreme scenario planning across all regions.

Key words : Climate Change, Regional Climate Damage, Probabilistic Socio-Economic Projection, Social Cost of Carbon

1. 서론

인간 활동으로 인한 기후변화는 전 지구적 기상 패턴을 근본적으로 변화시키고 기온을 상승시키고 있다(Fischer and Knutti, 2015; Gillett et al., 2021; IPCC, 2023). 특히 기온 상승은 단순히 평균 기온의 증가뿐 아니라, 대기 중 수증기 함량을 높여 연간 최대 일 강수량을 증가시키고

폭우, 태풍, 홍수 등 극단적 기상 현상의 강도와 빈도를 현저하게 증가시킨다(IPCC, 2021; Utsumi and Kim, 2022; Zhang et al., 2024). 이러한 기후변화는 사회·경제적 시스템에 광범위한 물리적 영향을 초래하고 있으며, 이에 따라 경제적 손실의 정량적 평가는 기후변화 대응 정책 수립의 핵심 요인이라 할 수 있다.

우리나라 역시 기후변화의 영향으로 연평균 기온이 점

†Corresponding author : jonghyun.yoo@snu.ac.kr, (Graduate School of Public Administration, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea. Tel. +82-2-880-5632)

ORCID 최미희 0009-0009-6339-2594

유종현 0000-0003-2784-7431

진적으로 상승하고 있으며, 21세기 후반으로 갈수록 아열대 기후구가 북상함에 따라 대부분 지역이 아열대 습윤 기후구로 전환될 것으로 전망된다(Korea Meteorological Administration, 2018). 이는 한국 대부분 지역에서 기후변화로 인한 강수 피해가 전반적으로 심화될 가능성을 시사한다. 실제로 기상청의 한국 이상 기후 보고서(Korea Meteorological Administration, 2024a)는 기록적인 태풍 및 호우로 인해 전국적으로 농업, 수산업, 교통, 인명 등 다양한 분야에서 상당한 자산 및 인프라 피해가 발생하였으며, 특히 여름철 폭우로 인해 약 8천억 원 이상의 재산 피해가 발생한 것으로 집계하였다.

기온과 강수량의 변화는 전 세계적으로 경제 성장, 다양한 부문의 생산성, 에너지 수요 등 경제적 손실의 규모에 큰 영향을 미친다(Burke et al., 2015; Carleton and Hsiang, 2016; Chen et al., 2016; Dell et al., 2012; Wenz et al., 2017). 다수의 경제학 문헌은 기온 상승이 거시 경제에 미치는 부정적인 영향을 실증적으로 추정하였으며, 대표적으로 Dell et al. (2012)은 연평균 기온의 1°C 상승이 저소득 국가의 장기 성장률을 약 1.3% 감소시켜 부정적 영향이 장기간 지속될 수 있음을 보였다. Burke et al. (2015)은 약 13°C의 연평균 기온에서 국가 경제 생산성이 최대에 달하며 이를 초과하는 기온 상승은 생산성을 급격히 감소시킨다고 밝혔는데, 특히 향후 기후변화를 고려할 때 열대 및 저소득 국가에서 최대 75%의 소득 손실이 발생할 수 있다고 경고하였다. 비슷한 맥락에서 Henseler and Schumacher (2019)는 103개 국가의 패널 데이터를 분석해 연평균 기온이 10°C를 초과할 때 1인당 GDP 및 생산 요소 성장률이 감소하며, 특히 저소득 국가에서 그 영향이 더욱 두드러지게 나타남을 확인하였다.

다수의 문헌은 기온 상승 외에도 강수량 변화의 거시 경제적 영향을 실증적으로 밝혔다. Generoso et al. (2020)은 엘니뇨 및 라니냐와 연계된 과소 혹은 과도한 강우가 열대 및 온대 기후 국가에서 경제 성장에 부정적 영향을 초래함을 찾아냈다. Meyghani et al. (2023)은 중동 및 북아프리카 지역에서 강수량의 1% 증가가 경제 성장을 0.005-0.024% 감소시킨다고 추정했으나, 효과의 크기가 작아 통계적 강건성이 제한적이었다. 국내에서는 Lee (2023)가 Kalkuh and Wenz (2020)의 실증 모형을 한국 거시 데이터에 적용하여 연간 총강수량의 증가가 경제 성장에 부정적 영향을 미친다고 분석했다. 국내의 대표적인 피해비용 산정 연구로서 Korea Environment Institute (2022)는 RCP2.6-SSP1, RCP4.5-SSP2, RCP8.5-SSP3 세

가지 미래 전망에 대해 건강, 농업, 수자원 등 부문별로 대리 지표를 적용하여 피해비용을 추정하였다.

다만, 국가 기후 정책 수립 시 이러한 실증연구 결과를 활용할 때는 주의가 요구된다. 첫째, 지역별로 크게 상이할 것으로 예상되는 기후변화 및 사회·경제적 변화가 충분히 고려되어야 한다. 예를 들어, 기후변화로 인한 강수량 증가는 지역에 따라 크게 상이하며, 이에 따라 지역별 실제 피해비용에는 상당한 차이가 발생할 수 있다. 사회·경제적 요인 역시 지역별로 인구 및 GRDP의 증감 양상이 매우 상이할 것으로 예상되며, 이로 인해 인명 및 자산 규모에 비례하는 기후변화 피해비용 또한 지역별로 크게 다를 수 있다. 둘째, 국가 기후 정책의 수립은 실제 예상되는 미래 전망 시나리오를 기반으로 해야 한다. 그러나 기후변화 연구에서 일반적으로 사용되는 SSP-RCP 시나리오는 실제 미래에 대한 예측이 아닌 특정 조건을 가정한 조건부 시산이며, 이를 기반으로 한 피해비용 전망은 엄밀한 의미에서 미래 상황에 대한 전망이라기보다는 특정 조건 하에서의 전망으로 해석되어야 한다.

이러한 맥락에서 본 연구는 기후 및 사회·경제 변화의 지역적 이질성을 고려하여 우리나라의 시·도별 피해비용을 추정하였다. 특히 미래 전망 시나리오를 확률론적 접근법으로 분석함으로써 조건부 시산의 한계를 극복하고 확률 기반의 피해비용을 산출하였다. 이를 통해 본 연구의 분석 결과는 국내 지역별 탄소 감축 및 기후 적응 정책 수립에 실질적인 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

본 연구의 지역별 기후변화 피해비용 추정 과정을 개괄적으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 먼저, 장기 사회·경제 전망 시나리오를 확률론적으로 구축하며, 이에 따른 온실가스 배출 및 기후변화 양상을 확률적으로 전망한다. 기후변화는 전 지구적 현상이므로 이러한 전망은 전 세계를 대상으로 수행된다. 이후 우리나라의 확률론적 사회·경제 및 기후 전망을 국내 17개 광역자치단체별로 다운스케일하여 지역별 사회·경제 및 기후변화 양상 역시 확률적으로 전망한다. 마지막으로 기존 실증연구의 피해 추정치를 활용하여 지역별 기후변화가 해당 지역 경제에 미치는 영향을 정량적으로 추정한 후, 지역별 탄소의 사회적 비용(Domestic social cost of carbon)을 도출한다. 모든 장기 전망 자료가 확률론적으로 구축됨에 따라 최종 결과인 지

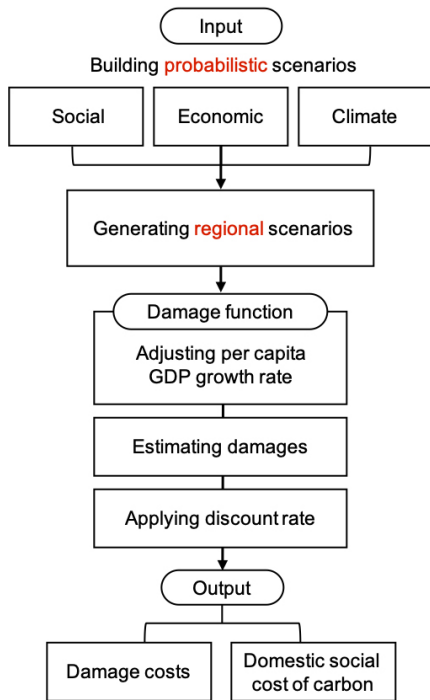


Fig. 1. Research flowchart

역별 피해비용 및 탄소의 사회적 비용 역시 확률분포의 형태로 제시된다.

2.1. 확률론적 사회·경제·기후 전망 시나리오 구축

본 연구는 미래 사회·경제·기후 전망 시나리오를 확률론적으로 구축하여 활용하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 SSP-RCP 시나리오와 같은 조건부 시나리오가 아닌 실제 발생 가능한 전망치를 바탕으로 피해비용을 추정함으로써 국가 정책에 대한 활용성을 제고하기 위함이다. 본 연구에서 확률론적 사회(인구) 및 경제(1인당 GDP) 전망 시나리오는 각각 Yoo et al. (2024)과 Rennert et al. (2021)의 국가 시나리오를 기반으로 시·도별로 재구축하였다. 먼저 지역별 인구의 경우, Yoo et al. (2024)의 국가 수준 시나리오를 활용하여 전국 인구에서 각 지역(i)이 연도별(t)로 차지하는 비중($s_{i,t}$)의 확률적 변화를 로짓-정규 과정으로 모델링하는 방식을 채택하였다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다:

$$\text{logit}(s_{i,t}) = \text{logit}(s_{i,t-1}) + \xi_i + u_{i,t} \quad (1)$$

여기에서 ξ_i 는 과거 데이터(1970~2022년)에서 추정된 지

역별 추세 모수이며, 이를 통해 지역별 인구추계의 합이 항상 국가 전체 추계(Yoo et al., 2024)와 일치하도록 설정하였다. 지역별 경제(1인당 GRDP)의 경우 충분한 지역별 시계열 데이터의 부재로 Rennert et al. (2021)이 추정된 우리나라의 확률론적 장기 경제성장률을 모든 지역에 동일하게 적용하였다. 이는 본 연구의 한계점으로 지적될 수 있다. 최종적으로 시·도별 인구와 시·도별 1인당 GRDP를 곱하여 구축된 17개 광역자치단체별 확률론적 GDP 시나리오는 Fig. 2와 같다.

앞서 구축한 장기 사회·경제 전망 시나리오에 상응하는 탄소배출 및 기후변화 전망은 통합 평가 모형을 활용하여 도출하였다. 통합 평가 모형으로는 인구 및 경제 성장에 따른 기후변화 양상을 동적으로 반영하는 거시경제학 기반의 RICE 모형을 사용하였다. 기후변화는 전 지구적 온실가스 배출 양상에 의존하므로 모형 운용을 위해서는 우리나라 외 모든 국가·지역의 사회·경제 전망 시나리오가 필요하며, 이 역시 Rennert et al. (2021)이 제공하는 국가별 확률론적 시나리오를 활용하였다. Fig. 3은 앞서 확률론적 사회·경제 전망 시나리오에 기반한 우리나라의 기온 상승 경로를 확률론적으로 제시하고 있으며, 2100년 기준으로 평균 14.2°C와 [13.6°C, 15.0°C]의 5~95% 범위로 전망된다.

다음 단계로 국가 수준(우리나라)의 기후 전망 시나리오를 국내 17개 광역자치단체별로 다운스케일링하였다. 기후 전망의 다운스케일링은 연평균 기온과 연 총강수량 등 두 변수에 대해 수행하였으며, 이러한 변수 선택은 후술할 피해 추정 모형의 요구사항에 따른 것이다. 다운스케일링 방식은 다음과 같다. 먼저, 국가 단위 연평균 기온을 시·도 단위로 변환할 때 Korea Meteorological Administration (2023)에서 제공하는 과거 장기간(2000~2019년)의 시·도별 연평균 기온과 국가 연평균 기온 간 차이 데이터를 활용하였다. 이후 지역 단위의 연평균 기온 상승 시나리오를 강수량 변화 시나리오로 변환하기 위해 Korea Meteorological Administration (2024b)의 국가 기후변화 표준 시나리오를 이용하였다. 해당 자료는 RCP-SSP 통합 시나리오별로 지역별 기온 및 연 총강수량을 장기적으로 전망하고 있다. 본 연구에서는 이 장기 전망 자료를 기반으로 지역별 연평균 기온 상승과 연 총강수량 변화의 관계를 다음과 같은 회귀식을 통해 분석하고, 이를 확률론적 기온 상승 시나리오에 적용하여 확률론적 총강수량 변화 시나리오를 도출하였다. Fig. 4는 17개 광역자치단체별 연 총강수량 상승 경로를 확률론적

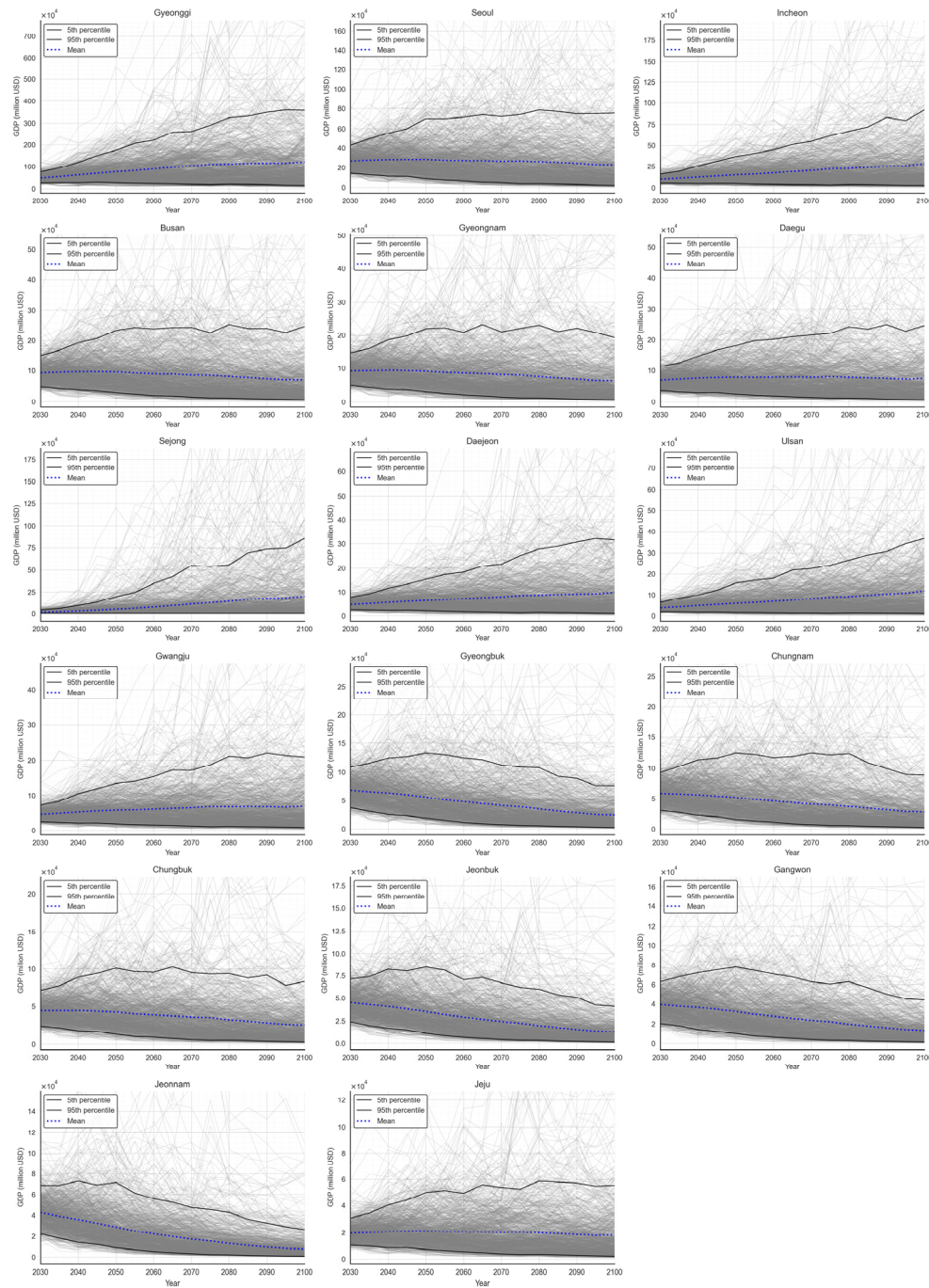


Fig. 2. Regional probabilistic GDP pathways for Korea

로 보여준다. 2100년 기준으로 연평균 총강수량이 가장 높은 제주의 경우 평균 2.01 m와 [2.00 m, 2.03 m]의 5~95% 범위로, 가장 낮은 대구의 경우 평균 1.16 m와 [1.14 m, 1.17 m]의 5~95% 범위로 전망된다.

$$P_{i,t} = \alpha \ln(T_{i,t}) + \beta \ln(t) + \gamma_i + c + \epsilon_{i,t} \quad (2)$$

상기 식에서 $T_{i,t}$ 는 시·도 i , 연도 t 별 평균 기온, $P_{i,t}$ 는 총강수량, γ_i 는 시·도별 고정 효과, c 는 상수항을 의미한다. 본 연구는 기온 상승에 따른 강수의 비선형적 반응이

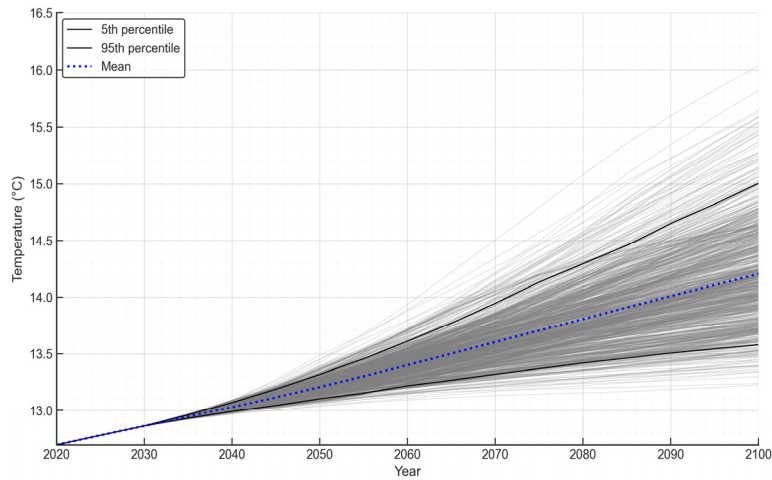


Fig. 3. Probabilistic surface temperature pathways for Korea

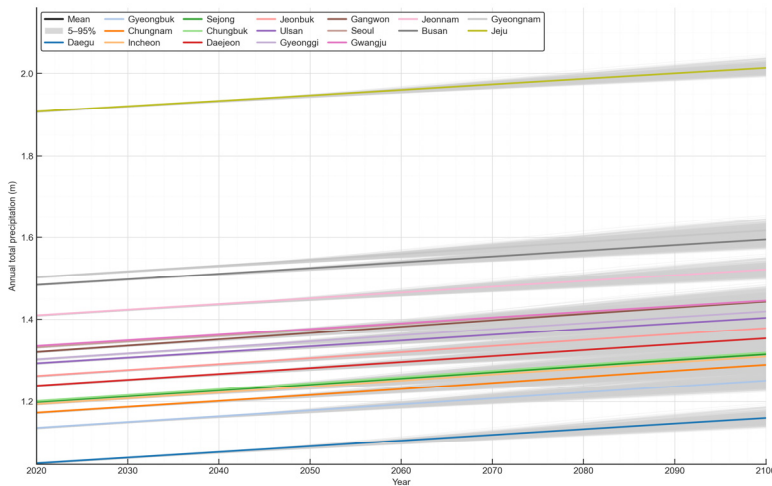


Fig. 4. Regional probabilistic precipitation pathways for Korea

확인된 점을 감안하되(Zhang et al., 2021), 모형의 단순화 및 단위 해석의 편의성을 위해 반로그(linear-log) 사양을 적용하여 선형성을 개선하였다. 또한 기온 이외의 장기적·비선형적 요인을 통제하기 위해 시간의 로그 추세항을 사용하였다. 회귀 결과는 통계적으로 유의하며, 이는 부록 Table A1.에 수록되었다.

2.2. 기후변화에 따른 지역별 피해비용 산정

지역별 기후변화 피해비용 추정은 Lee (2023)의 실증분석 결과를 활용한다. Lee (2023)는 국내 기후 및 경제 데이터에 Kalkuhl and Wenz (2020)가 제안한 경제성장모형 기반의 실증 모형을 적용하여 분석하였으며, 여섯 가지

모형 중 최종 모형으로 채택된 모형(5)를 수식으로 나타내면 다음과 같다:

$$g_{i,t} = \gamma_1 C_{i,t} + \gamma_2 C_{i,t} \Delta C_{i,t} + \gamma_3 \Delta C_{i,t} + FE + \nu_{i,t} \tag{3}$$

여기에서 $g_{i,t}$ 는 경제성장률, $C_{i,t}$ 는 기후 변수(연 평균 기온 혹은 연 총강수량), FE 는 고정 효과 항을 의미한다. 기후 변수는 해당 연도(t)의 기후 수준($C_{i,t}$)뿐만 아니라 연간 변화 ($\Delta C_{i,t}$)를 포함한다. Kalkuhl and Wenz (2020)의 연구가 기온 상승이 거시 경제 생산량에 미치는 영향을 유의미하게 도출한 반면, Lee (2023)는 동일한 모형을 우

리나라 데이터에 적용한 결과 기온 상승이 아닌 강수량 증가가 우리나라 경제 성장에 유의미한 부정적 영향을 미치는 것으로 나타났다. 구체적으로 연 총강수량 1단위(m) 증가는 우리나라의 지역별 장기 경제성장률(일인당 지역 내총생산 성장률)을 1~4% 감소시키는 것으로 추정되었다. 이는 지역별로 상이한 기후 적응 역량을 반영한 결과이며, 본 연구에서는 통계적으로 유의하게 추정된 연 총강수량에 따른 지역별 추정치를 활용하여 각 시·도별 피해비용을 산정하였다.

기후변화 피해비용은 강수량 증가가 발생하지 않는 경우의 지역별 GRDP와 강수량 증가가 발생한 경우의 지역별 GRDP 간 차이로 정의하였다. 본 모형에서 기후(강수량) 변화는 경제성장률에 영향을 미치므로, 매년 일인당 지역내총생산 성장률에 강수량 변화로 인한 부정적 한계 효과를 반영하여 경제성장률을 조정하는 방식으로 기후 변화 영향을 추정하였다.

2.3. 기후변화에 따른 지역별 탄소의 사회적 비용 산정

마지막으로 지역별 피해비용 산정값을 기반으로 지역별 탄소의 사회적 비용(Social cost of carbon)을 도출하였다. 탄소의 사회적 비용은 이산화탄소 1톤 배출 시 장기적으로 발생하는 모든 경제적 비용을 현재가치로 환산한 개념으로, 한계 기후 피해비용에 해당하며 장기적 기후 정책 수립의 핵심적인 지표로 활용된다. 일반적으로 탄소의 사회적 비용은 피구세 개념에 따라 글로벌 수준에서 추정되어 왔으며(Greenstone et al., 2013; Nordhaus, 1992), 최근 Rennert et al. (2021)과 미국 환경보호청(EPA, 2023)은 확률론적 방법론을 사용하여 각각 \$185/tCO₂와 \$190/tCO₂로 추정하는 바 있다.

본 연구에서는 글로벌 수준이 아닌 지역별 탄소의 사회적 비용(Domestic social cost of carbon)을 추정하였다(Ricke et al., 2018; Tol, 2019). 지역별 탄소의 사회적 비용은 1톤의 탄소배출이 해당 지역 내에서 초래하는 장기적 한계 피해비용을 의미하며, 기후변화로 인한 지역별 영향을 하나의 지표로 비교·평가할 수 있다는 점에서 국가의 기후 피해 대응 및 적응 정책(예산 배분 등)에 활용될 수 있다(Kotchen, 2018). Nordhaus (2017)는 지역별 피해비용의 현재가치를 가중치로 활용하여 글로벌 탄소의 사회적 비용을 지역별로 배분하였다. 본 연구는 이를 준용하여 시·도별 연간 피해비용을 현재가치로 환산한 후 시·도별 비중을 산출하고, 이를 가중치로 사용하여 Seoul National

University (2025)가 추정한 우리나라 탄소의 사회적 비용을 시·도별로 배분하는 방식을 적용하였다. 현재가치 산정을 위해 2025년 기준 연 3%의 할인율을 적용하였다.

3. 추정 결과

Fig. 5는 2060년까지의 17개 광역자치단체별 기후변화 피해비용을 확률론적으로 추정한 결과이다. 17개 광역자치단체 중 가장 높은 피해비용을 보인 지역은 경기도로, 단기(2030~2040년) 연평균 2조 원(5~95%: 0~5조 원), 중기(2040~2060년) 연평균 13조 원(5~95%: 2~38조 원)으로 나타났다. 특히 시간이 갈수록 피해비용의 분포가 상당히 확대되어 낮은 확률이지만 연평균 38조 원의 피해비용이 발생할 수 있는 것으로 추정되었다. 17개 광역자치단체 중 경기도의 피해비용이 가장 높게 산정된 주요 이유는 경제·인구 자산이 집중되어 기후변화에 대한 취약성이 상대적으로 높고, 향후에도 이러한 취약 자산의 증가가 전망되기 때문이다.

동일한 이유로 인구 및 경제 자산이 집중된 서울과 인천의 피해비용도 높게 나타났다. 서울은 단기 연평균 1조 원(5~95%: 0~3조 원), 중기 연평균 5조 원(5~95%: 1~15조 원)으로, 인천은 단기 연평균 1조 원(5~95%: 0~2조 원), 중기 연평균 4조 원(5~95%: 1~12조 원)으로 추정되었다. 다만 경기도와 비교하여 서울의 경우 빠른 인구 감소 전망이, 인천의 경우 상대적으로 작은 경제 규모로 인해 경기도 대비 피해비용이 절반 이하 수준으로 추정되었다. 이외에 주요 광역시인 대구와 부산도 각각 단기 연평균 0.4조 원(5~95%: 0~1조 원), 중기 연평균 2조 원(5~95%: 0~5조 원)의 비교적 높은 피해비용을 보였다.

다만, 우리나라의 빠른 인구 감소 추세에도 불구하고 모든 지역에서 시간 경과에 따라 피해비용이 급격히 증가하는 경향은 주목할 만한 결과라 할 수 있다. 특히 중기(2040~2060년) 구간에서 피해비용의 변동 폭이 크게 확대되는 양상을 보이는데, 이는 장기적으로 극단적인 손실을 초래할 수 있는 꼬리 위험(tail risk)의 가능성을 의미한다. 평균 피해비용이 상대적으로 낮은 지역 역시 시간이 흐를수록 꾸준히 상승하며, 극단적인 시나리오 하에서는 예상치를 훨씬 상회하는 막대한 손실 가능성을 내포하고 있다. 부록 Fig. A.1.에서 확인할 수 있듯이, 2060년 피해비용 분포는 평균뿐만 아니라 상위 5% 극단값에서도 지역 간 이질성이 뚜렷하게 나타나며, 대부분 지역이 우측 꼬리 분포를 형성하여 극단적 손실 위험을 반영하고 있

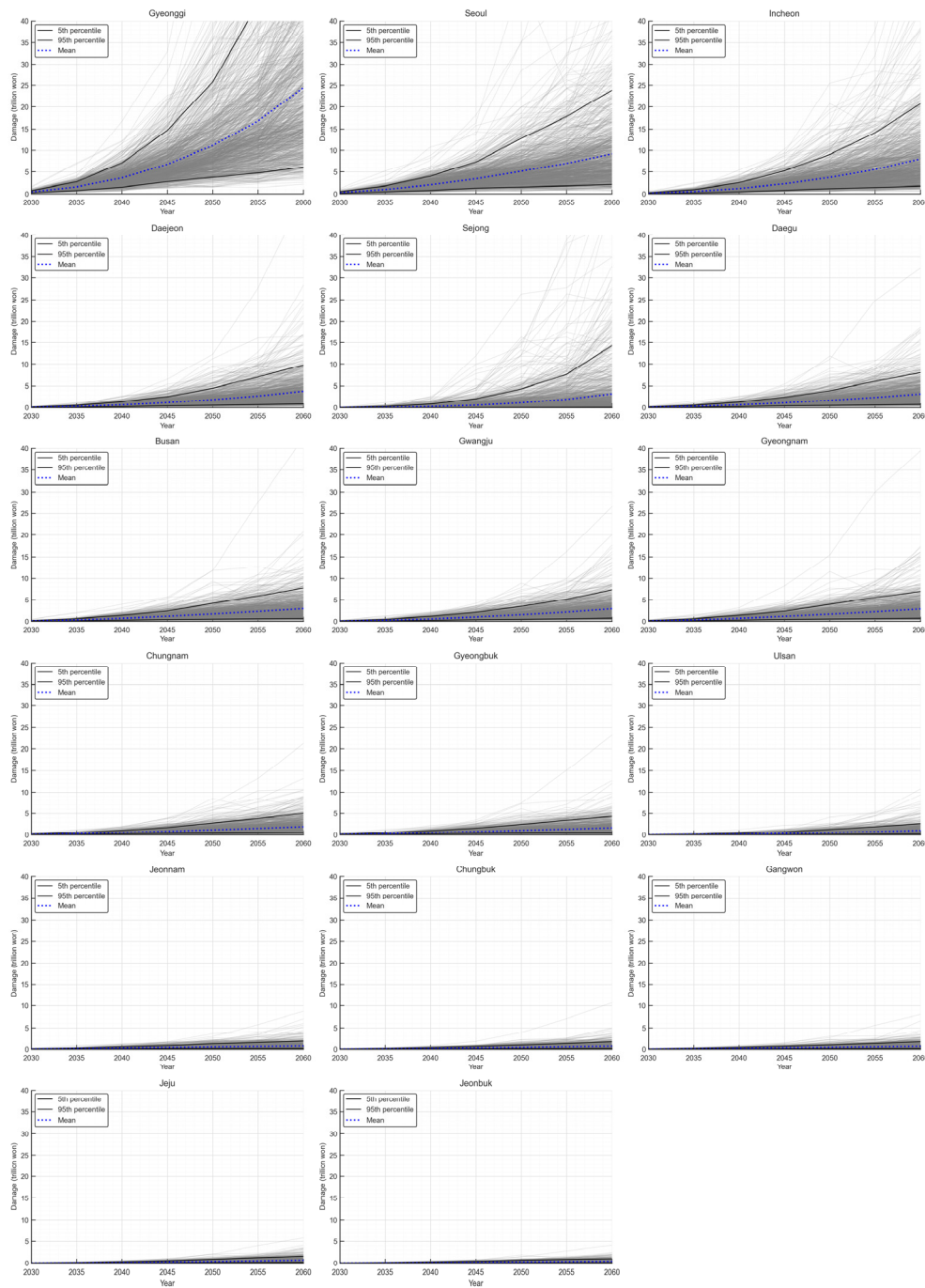


Fig. 5. Regional probabilistic climate change damages, 2030 ~ 2060, arranged by mean damage in 2060

다. 이러한 분포 양상은 기후 충격에 내재된 불확실성을 보여주며, 특히 강수량 증가에 기인한 복합 재해 발생 시 손실 규모가 기하급수적으로 확대될 수 있음을 시사한다.

Table 1은 2030 ~ 2060년 기간의 시·도별 피해비용(평균값)을 현재가치로 환산하고, 이를 바탕으로 지역별 탄소

의 사회적 비용(DSCC)을 추정된 결과이다. 우리나라 전체 피해비용은 약 87조 원(5 ~ 95%: 26 ~ 200조 원)으로 추정되며, 이 중 경기도(29조 원), 서울특별시(13조 원), 인천광역시(10조 원)가 각각 33%, 15%, 11%를 차지하여 수도권만으로 전체 피해의 59% 이상을 점유하는 것으로

Table 1. Present value of climate damages and Domestic Social Cost of Carbon (DSCC) by 17 regions (metropolitan cities and provinces) in Korea (5th ~ 95th percentiles in brackets)

Region	Present value damage, trillion won [5%, 95%]	Damage ratio, %	DSCC Mean, won
Gyeonggi	29 [10, 64]	33	4,199
Seoul	13 [4, 28]	15	1,885
Incheon	10 [3, 22]	11	1,398
Daejeon	5 [2, 11]	5	689
Daegu	4 [2, 10]	5	624
Busan	4 [1, 10]	5	613
Gyeongnam	4 [1, 9]	5	599
Gwangju	4 [1, 9]	4	550
Sejong	3 [0, 12]	4	445
Chungnam	3 [1, 6]	3	425
Gyeongbuk	3 [1, 6]	3	150
Jeonnam	1 [0, 3]	2	191
Ulsan	1 [0, 3]	1	176
Gangwon	1 [0, 2]	1	153
Chungbuk	1 [0, 2]	1	150
Jeju	1 [0, 2]	1	132
Jeonbuk	1 [0, 1]	1	94
Total	87	100	12,703

나타났다. 이는 수도권에 집중된 경제 규모와 지역 특성이 기후변화 피해비용을 결정하는 핵심 요인임을 명확히 보여준다. 이 세 지역의 95% 분위 수 피해비용을 합산하면 전체의 약 57%에 달하며, 대도시권 및 중간 규모 지역의 5~95% 분위 수 구간은 평균치의 약 2배에 달해 상당한 불확실성을 내포하고 있다.

이러한 피해비용 추정 결과를 바탕으로 산출한 경기도, 서울특별시, 인천광역시의 탄소의 사회적 비용은 각각 4,199원, 1,885원, 1,398원으로 나타났다. 이는 1톤의 이산화탄소 배출이 수도권에서 장기적으로 1,400~4,200원의 경제적 피해를 야기함을 의미하며, 역으로 1톤의 탄소 감축이 해당 지역에서 동일한 규모의 경제적 편익을 창출함을 시사한다. 지역 간 격차는 극명하게 나타나는데, 피해비용이 가장 낮은 제주도와 전라북도의 탄소의 사회적 비용은 각각 132원, 94원으로 추정되어 경기도 대비 약 1/32, 1/45 수준에 그친다. 이러한 현저한 지역 간 차이는 탄소 배출의 피해와 감축의 편익이 지역별로 매우 상이함을 보여주며, 향후 국가 및 지역 차원의 차별화된 탄소 감축 정책 설계에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

Fig. 6은 우리나라 시·도별 기후변화 피해비용을 GRDP

대비 비중으로 나타낸 결과이다. 이는 경제 규모의 차이를 통제하여 지역별 기후변화(강수량 증가) 양상과 기후변화에 대한 취약성 차이를 반영한 지표이다. 피해비용 비중은 대전(단기: 0.49%, 중기: 2.34%), 광주(단기: 0.44%, 중기: 2.09%), 인천(단기: 0.43%, 중기: 2.06%), 세종(단기: 0.42%, 중기: 2.03%) 순으로 높게 나타났으며, 해당 지역에서 기후변화의 심화 및 이에 대한 높은 취약성을 시사한다. 특히 17개 광역자치단체 중 피해 비중이 가장 높은 대전과 가장 낮은 전북 간 차이는 중기 기준 약 4.3배에 달하였다.

단기(2030~2040년)에서는 모든 시·도의 GRDP 대비 피해비용 비중이 0.0~0.5% 구간에 분포하였으나, 중기(2040~2060년)에는 0.5~2.3%로 범위가 확대되며 평균 약 4배 이상 증가하였다. 중기 구간에서는 17개 광역자치단체 중 13개 지역이 GRDP 대비 피해비용 비율 1%를 초과하였다. 비교적 낮은 비중을 보였던 충북(단기: 0.16%, 중기: 0.74%), 울산(단기: 0.14%, 중기: 0.65%), 전북(단기: 0.12%, 중기: 0.54%) 역시 큰 폭으로 상승하여, 기후변화의 영향이 모든 지역에서 향후 수십 년 내에 크게 심화될 것임을 시사한다.

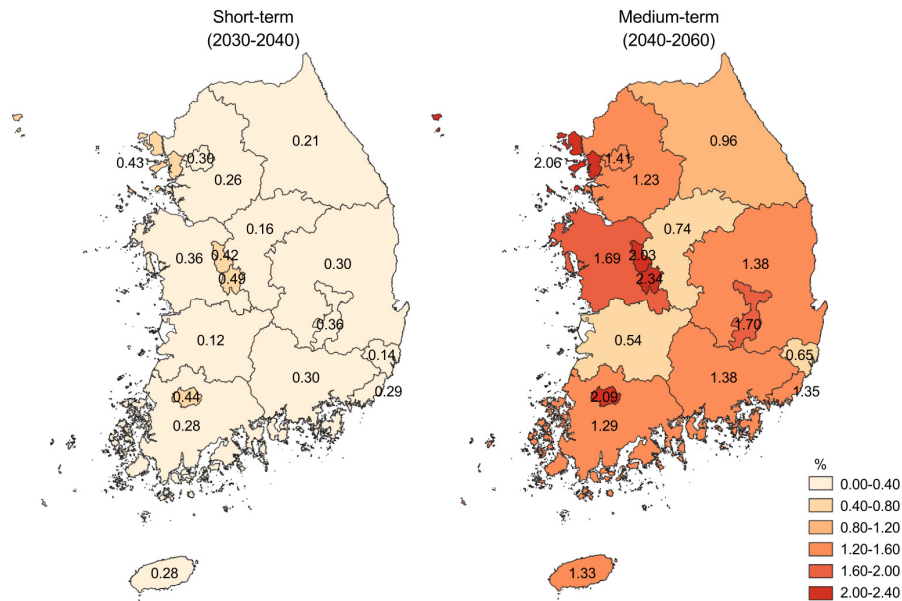


Fig. 6. Regional damage ratios relative to GRDP

4. 결론

본 연구는 기후변화로 인한 17개 광역자치단체별 경제적 피해비용을 추정하고, 이를 기반으로 지역별 탄소의 사회적 비용을 산출하였다. 특히 중앙 및 지방정부의 기후 정책 활용도를 높이기 위하여 지역별 사회·경제·기후 특성을 확률론적으로 반영하였다.

분석 결과, 모든 지역에서 기후변화 피해비용은 지속적으로 증가하며, 특히 중기(2040~2060년) 이후 피해 규모가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 다만, 기후변화 피해비용은 지역 간 현저하게 상이한 것으로 나타났는데 인구 및 경제 자산이 집중되어 향후 기후변화로 인한 취약성이 상대적으로 큰 수도권 지역(경기도: 중기 연평균 13조 원, 서울: 5조 원, 인천: 4조 원)의 피해비용이 압도적으로 추정되었다. 반면 경제 규모를 통제한 GRDP 대비 기후 피해 비율에서는 대전, 광주, 세종 등이 높게 나타나 지역별 기후변화 양상과 적응 역량 차이 역시 중요한 요인을 확인하였다.

이와 같은 분석 결과는 다음과 같은 정책적 시사점을 제시한다. 첫째, 기후변화로 인한 피해비용은 지역별로 매우 상이하며, 이는 기후변화 양상뿐만 아니라 사회·경제적 변화에 의존한다. 특히 사회·경제적 자산이 집중된 수도권의 피해비용 및 탄소의 사회적 비용은 다른 지자체와 비교하여 매우 높은 수준으로 나타나며, 이는 해당 지역에

서 기후변화 피해비용 저감을 위한 적응 노력이 특히 필요함을 시사한다. 본 연구에서 추정한 지역별 탄소의 사회적 비용(경기도: 4,199원/톤 vs 전북: 94원/톤)은 지역별 차별화된 탄소 가격 정책(지역별 탄소세·배출권 차등 적용의 타당성 검토 및 도입), 기후 적응 예산 및 보조금 배분, 그리고 지역별 기후 정책의 비용-편익 분석에 직접 활용될 수 있다. 이는 전국 획일적 접근에서 벗어나 지역 특성을 반영한 맞춤형 기후 정책 설계의 정량적 근거를 제공한다. 둘째, 상대적으로 취약 자산 규모가 낮더라도 대전, 광주, 인천, 세종 등의 지역은 기후변화(강수량 증가)의 양상과 이에 대한 취약성이 높은 지역으로서, 향후 기후 적응 역량 향상을 위한 노력이 상대적으로 중요함을 보인다. 셋째, 모든 지역에서 기후변화 피해비용은 빠르게 증가하며, 특히 중기(2040~2060년)에 이러한 경향이 두드러지게 나타날 것으로 예상된다. 이는 기후변화에 따른 상당한 피해가 먼 미래가 아닌 향후 수십 년 내에 발생할 것임을 의미하며, 탄소 감축 노력 및 기후 적응 노력의 시급성을 강조한다. 마지막으로, 시간이 갈수록 기후변화에 따른 극단적인 피해 발생 가능성을 배제할 수 없으며, 비록 낮은 확률이지만 매우 높은 수준의 기후 피해가 많은 지역에서 예상된다. 이는 기후 정책에 있어 평균적 손실뿐만 아니라 극단적인 위기 상황까지 고려한 포괄적 정책 수립의 필요성을 강조한다.

본 연구는 기존 국가 단위 분석에서 벗어나 세분화된

행정 단위 수준에서 기후변화에 따른 경제적 피해비용 및 탄소의 사회적 비용을 정량적으로 산출한 점에서 의의가 있다. 각 지역의 고유한 기후 양상과 사회·경제적 특성을 확률론적으로 반영함으로써 국가 단위에서 모호하게 나타났던 경제적 영향을 보다 명확하게 분석할 수 있었다. 이는 지역별 기후변화 대응 전략 수립에 필요한 기초 자료와 정책적 근거를 제공할 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서는 데이터의 한계로 인해 지역별로 상이한 세부 특성(인구 구조, 산업 구조 등)을 상세하게 고려하지 못하였으며, 지역별 피해 부문(농업 생산성 저하, 보건비용 증가 등)별로 피해비용을 산출하지 못하였다. 또한 중앙정부·지자체의 향후 기후적응 투자 및 기술 발전에 따른 피해 완화 효과를 모형에 반영하지 못하였다. 이는 본 연구의 한계로 지적되며, 향후 연구에서 보다 상세하게 다뤄져야 할 과제이다.

사사

이 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제 대응 환경기술 개발사업(RS-2023-00218794) 지원에 의하여 연구되었습니다.

Reference

- Burke M, Hsiang SM, Miguel E. 2015. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527(7577): 235-239. doi: 10.1038/nature15725
- Carleton TA, Hsiang SM. 2016. Social and economic impacts of climate. *Science* 353(6304): aad9837. doi: 10.1126/science.aad9837
- Chen S, Chen X, Xu J. 2016. Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China. *J Environ Econ Manage* 76: 105-124. doi: 10.1016/j.jeem.2015.01.005
- Dell M, Jones BF, Olken BA. 2012. Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century. *American Econ J: Macroeconomics* 4(3): 66-95. doi: 10.1257/mac.4.3.66
- EPA. 2023. Report on the social cost of greenhouse gases: Estimates incorporating recent scientific advances. United States Environmental Protection Agency.
- Fischer EM, Knutti R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nat Clim Chang* 5(6): 560-564. doi: 10.1038/nclimate2617
- Generoso R, Couharde C, Damette O, Mohaddes K. 2020. The growth effects of El Niño and La Niña: Local weather conditions matter. *Ann Econ Stat* 140: 83-126. doi: 10.15609/annaeconstat2009.140.0083
- Gillett NP, Kirchmeier-Young M, Ribes A, Shiogama H, Hegerl GC, Knutti R, Gastineau G, John JG, Li L, Nazarenko L, Rosenbloom N, Seland Ø, Wu T, Yukimoto S, Ziehn T. 2021. Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period. *Nat Clim Chang* 11(3): 207-212. doi: 10.1038/s41558-020-00965-9
- Greenstone M, Kopits E, Wolverton A. 2013. Developing a social cost of carbon for US regulatory analysis: A methodology and interpretation. *Rev Environ Econ Policy* 7(1): 23-46. doi: 10.1093/reep/res015
- Henseler M, Schumacher I. 2019. The impact of weather on economic growth and its production factors. *Clim Change* 154(3): 417-433. doi: 10.1007/s10584-019-02441-6
- IPCC. 2021. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (eds.)]. Cambridge and New York: Cambridge University Press. p. 3-32. doi: 10.1017/9781009157896.001
- IPCC. 2023. Climate change 2023: Synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Switzerland: IPCC.
- Kalkuhl M, Wenz L. 2020. The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a

- global panel of regions. *J Environ Econ Manage* 103: 102360. doi: 10.1016/j.jeem.2020.102360
- Korea Environment Institute. 2022. Research on the analysis of sectoral socioeconomic damage costs due to climate change. Sejong, Korea: Korea Environment Institute.
- Korea Meteorological Administration. 2018. 2017 abnormal climate report. Korea: Korea Meteorological Administration.
- Korea Meteorological Administration. 2023. Regional climate change projection report (revised edition). Korea: Korea Meteorological Administration. Report 2023-12.
- Korea Meteorological Administration. 2024a. 2023 abnormal climate report. Korea: Korea Meteorological Administration.
- Korea Meteorological Administration. 2024b. National climate change standard scenarios; [accessed 2024 Oct 16]. http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/35_download1_ssp.php
- Kotchen MJ. 2018. Which social cost of carbon? A theoretical perspective. *J Assoc Environ Resour Econ* 5(3): 673-694. doi: 10.1086/697241
- Lee JW. 2023. Climate change impacts on the domestic economy in Korea: A chronic risk perspective. Seoul, Korea: Bank of Korea. Bank of Korea Economic Research Paper 2023-26.
- Meyghani S, Khodaparast Mashhadi M, Salehnia N. 2023. Long-term effects of temperature and precipitation on economic growth of selected MENA region countries. *Environ Dev Sustain* 25(7): 7325-7343. doi: 10.1007/s10668-022-02330-6
- Nordhaus WD. 1992. An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science* 258(5086): 1315-1319. doi: 10.1126/science.258.5086.1315
- Nordhaus WD. 2017. Revisiting the social cost of carbon. *Proc Nat Acad Sci* 114(7): 1518-1523. doi: 10.1073/pnas.1609244114
- Rennert K, Prest BC, Pizer WA, Newell RG, Anthoff D, Kingdon C, Rennels L, Cooke R, Raftery AE, Ševčíková H, Errickson F. 2021. The social cost of carbon: Advances in long-term probabilistic projections of population, GDP, emissions, and discount rates. Washington, DC: Resources for the Future. Working Paper 2021-28.
- Ricke K, Drouet L, Caldeira K, Tavoni M. 2018. Country-level social cost of carbon. *Nat Clim Chang* 8(10): 895-900. doi: 10.1038/s41558-018-0282-y
- Seoul National University. 2025. Estimating the social cost of carbon in Korea using integrated assessment models (National R&D project RS-2023-00218794) [Climate Damage Estimation Platform]. Supported by Korea Environmental Industry & Technology Institute; [accessed 2025 Jun 6]. <https://www.climateeconlab.com/platform>
- Tol RSJ. 2019. A social cost of carbon for (almost) every country. *Energy Econ* 83: 555-566. doi: 10.1016/j.eneco.2019.07.006
- Utsumi N, Kim H. 2022. Observed influence of anthropogenic climate change on tropical cyclone heavy rainfall. *Nat Clim Chang* 12(5): 436-440. doi: 10.1038/s41558-022-01344-2
- Wenz L, Levermann A, Auffhammer M. 2017. North-south polarization of European electricity consumption under future warming. *Proc Nat Acad Sci* 114(38): E7910-E7918. doi: 10.1073/pnas.1704339114
- Yoo J, Choi YH, Oh J. 2024. Economic impacts of climate change in Korea: Accounting for climate damage and carbon abatement costs (in Korean with English abstract). *Korean J Econ Stud* 72(2): 5-31. doi: 10.22841/kjes.2024.72.2.001
- Zhang W, Furtado K, Wu P, Zhou T, Chadwick R, Marzin C, Rostron J, Sexton D. 2021. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Sci Adv* 7(31): 8021-8049. doi: 10.1126/sciadv.abf8021
- Zhang W, Zhou T, Wu P. 2024. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century. *Science* 385(6707): 427-432. doi: 10.1126/science.adp0212

Appendix

Table A1. Regression results of regional temperature and precipitation

Variable	Coefficient	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-14.334658***	3.217261	-4.456	8.54E-06
log(temp)	0.338485***	0.049803	6.797	1.19E-11
log(year)	1.953955***	0.433969	4.503	6.86E-06
Gyeonggi	-0.070614***	0.020075	-3.517	0.000439
Gyeongnam	0.092528***	0.021601	4.283	1.87E-05
Gyeongbuk	-0.243730***	0.020134	-12.106	1.00E-20
Gwangju	-0.089057***	0.022287	-3.996	6.53E-05
Daegu	-0.377869***	0.022606	-16.715	1.00E-20
Daejeon	-0.156436***	0.02085	-7.503	7.25E-14
Busan	0.046319*	0.023129	2.003	0.0453
Seoul	-0.066491**	0.021154	-3.143	0.00168
Sejong	-0.177689***	0.020077	-8.85	1.00E-20
Ulsan	-0.138267***	0.022622	-6.112	1.05E-09
Incheon	-0.185478***	0.020213	-9.176	1.00E-20
Jeonnam	-0.003888	0.021636	-0.18	0.857
Jeonbuk	-0.119313***	0.020264	-5.888	4.15E-09
Jeju	0.436449***	0.025344	17.221	1.00E-20
Chungnam	-0.200664***	0.020001	-10.033	1.00E-20
Chungbuk	-0.160334***	0.019596	-8.182	3.44E-16
Residual Std. Error (DF = 5421)	0.2417	F-statistic (DF1 = 18, DF2 = 5421)	186.5	-
Multiple R-squared	0.3824	Model p-value	< 2.2e-16	-
Adjusted R-squared	0.3803	-	-	-

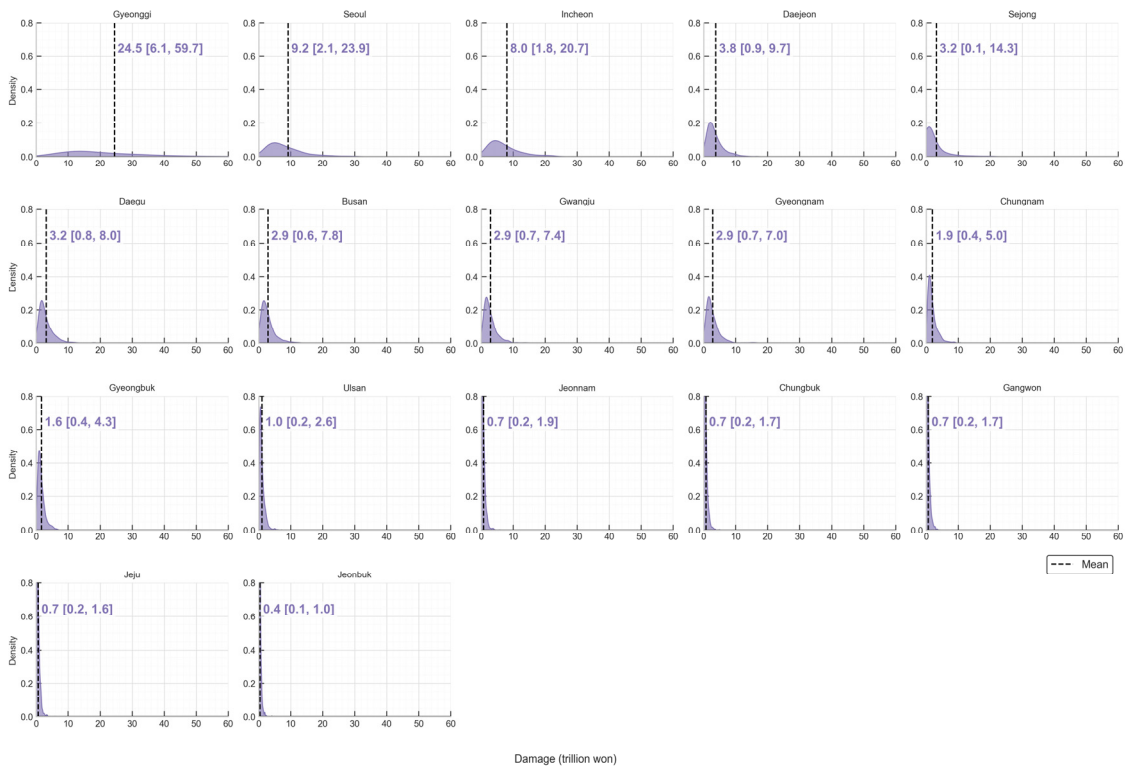


Fig. A1. Regional damage distribution in 2060. The dashed line represents the mean, and the numbers on the right denote the mean [5th, 95th percentiles]

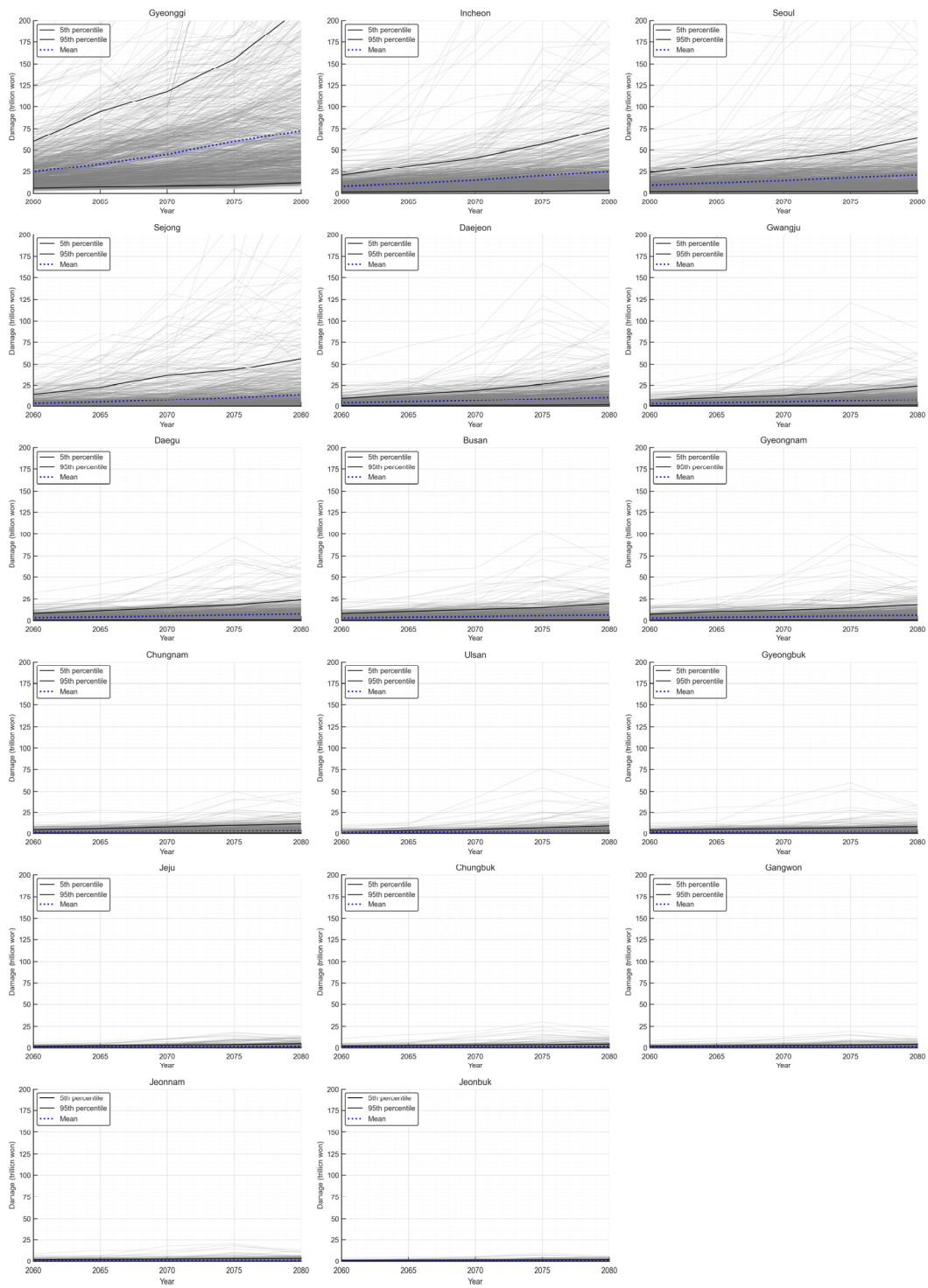


Fig. A2. Regional probabilistic climate change damages, 2060 ~ 2080, arranged by mean damage in 2080

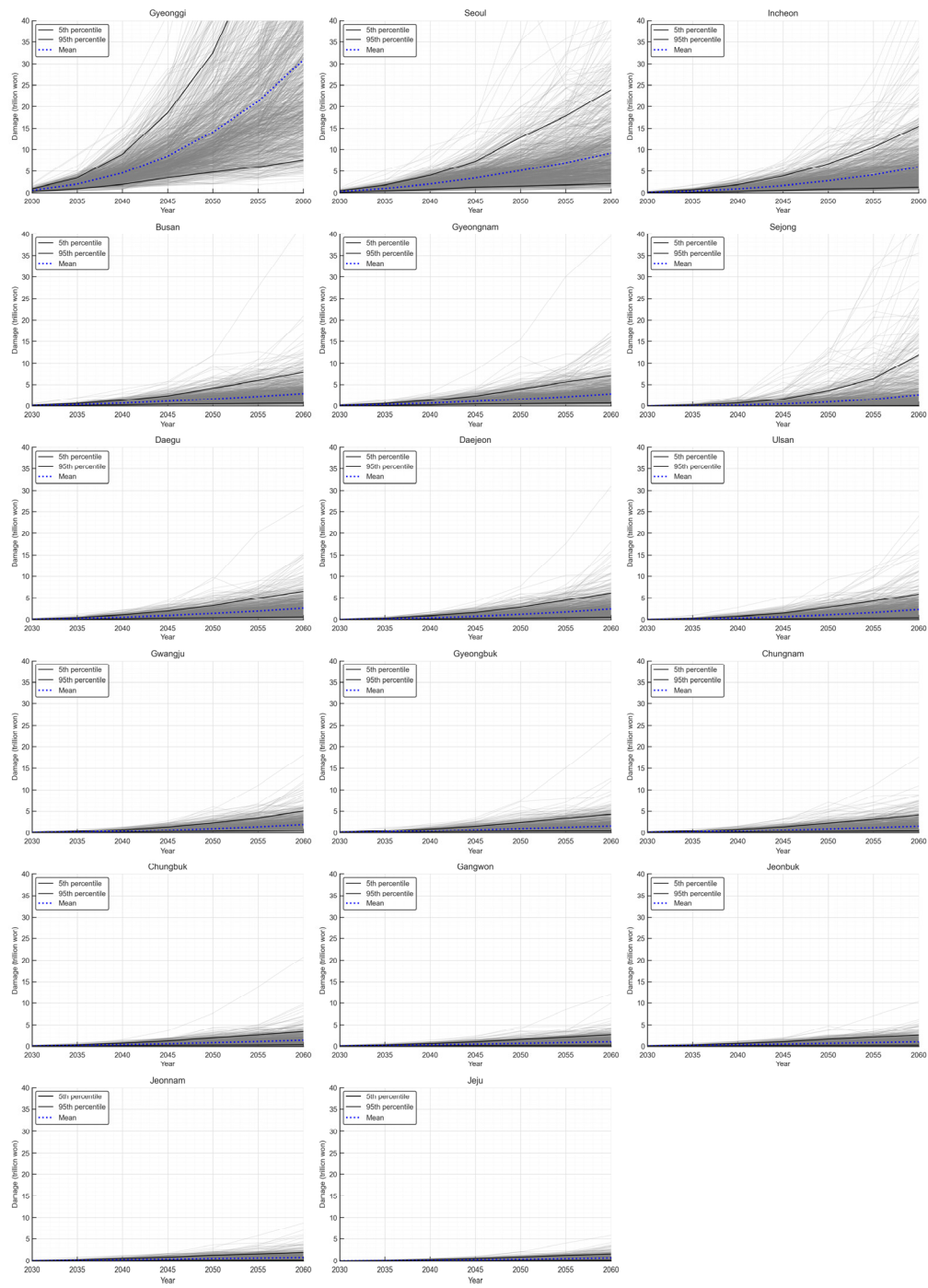


Fig. A3. Regional probabilistic climate change damages, 2030 ~ 2060, arranged by mean damage in 2060. The results were applied with the same marginal effect of -2.54% on regional long-term economic growth due to climate change for sensitivity analysis