

기후변화의 물리적 리스크가 울산지역 산업에 미치는 영향*

김수현** 안주현***

본 연구는 기후변화에 따른 산업 부문의 매출 영향을 지역별로 분석하며 중화학공업이 집적된 울산지역에 주목한다. 이러한 분석을 위해 본 연구는 Actuarial Climate Index(ACI) 방법론을 토대로 이상기온, 이상강우, 가뭄, 해수면 변화 등의 고빈도 기후변수를 통합한 한국형 기후위험지수(CRI)를 구축하였다. 또한 CRI와 함께 세계 각국의 기후위험 수준을 나타내는 World Risk Index(WRI)를 주요 설명변수로 활용하고 한국의 전산업을 아우르는 기업패널자료를 바탕으로 동태적 패널모형(System GMM)을 추정하였다. 분석 결과, 미국과 중국의 WRI 상승은 한국 산업의 매출 감소에 유의한 영향을 미치며, 특히 미국의 WRI는 울산지역 산업에 대해 추가적인 부정적 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 대미수출 비중과 중화학공업 비중이 높은 울산지역 산업구조의 특성상 미국의 기후충격에 더욱 취약함을 시사한다. 반면 중국의 WRI는 전국 산업 매출에는 영향을 미치지만 울산지역에 대한 추가적인 효과는 유의하지 않았다. 본 연구는 지역별 산업구조의 이질성이 기후리스크의 경제적 충격에 있어 어떠한 역할을 하는지 실증적으로 보여주며, 기후위험의 국제적 전이 가능성을 지적하고 지역 맞춤형 기후적응정책 및 공급망 다변화의 필요성을 제시한다.

핵심주제어: 기후변화 리스크, 공급망 전이, 구조적 이질성, System GMM

경제학문헌목록 주제분류: Q54, R11, C33, F18

* 본 연구 수행을 위해 지원해주신 울산본부 최정태 본부장님, 유경훈 부분부장님, 박용민 팀장님께 감사의 말씀을 드립니다. 본고에 나타난 견해는 한국은행의 공식 견해가 아니며 저자의 의견이다. 본 연구에 남아있는 오류는 모두 저자의 책임임을 밝힌다.

** 전남대학교 경제학부 교수(soohyon.kim@jnu.ac.kr)

*** 한국은행 울산본부 조사역(jha@bok.or.kr)

I. 서론

글로벌 기후변화는 이제 담론 수준을 넘어 현실로 다가오고 있다. 따뜻한 겨울 속에 폭한이 닥치기도 하며, 봄에 눈이 내리거나 여름에 가뭄이 지속되다가 때로는 폭우로 인해 큰 홍수가 발생하는 등, 기후변화의 양태는 근래 더욱 가속화되고 있다.

이러한 기후변화는 일상의 불편함을 넘어서 다양한 경제활동에도 큰 영향을 미치고 있다. 이에 따라 온실가스 배출을 감축하기 위해 다양한 노력이 지속되어 왔으며, 산업 전반에 걸쳐 생산·유통 구조를 개선하려는 움직임도 활발히 전개되고 있다. 이러한 노력은 기업의 입장에서 친환경 설비의 도입, 기존 설비의 교체, 재생에너지의 활용 등으로 이어졌고, 이 과정에서 발생하는 비용과 불확실성은 이행 리스크(transition risk)로 나타나고 있다. 특히, 이행 리스크는 화석연료에 기반한 중화학공업에 매우 중대한 위협으로 작용하고 있다.

하지만 기업이 직면한 리스크는 이행 리스크에만 그치지 않는다. 기업들은 생산활동 과정에서 기후변화로 인한 직접적 혹은 간접적 영향에도 노출되어 있으며, 이러한 영향을 물리적 리스크(physical risk)라고 부른다. 예컨대 기후변화로 인해 생산과 영업활동에 차질이 발생하는 것이 이에 해당한다. 산업과 경제가 이러한 리스크에 어느 정도 노출되어 있는지를 심도 있게 분석하는 것은 대응 방안을 모색하기 위해 선행되어야 할 중요하고 시급한 과제이다. 본 연구는 이러한 문제의식 하에, 기후변화가 우리나라의 대표적인 중화학공업의 중심지인 울산지역 산업에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다.

기후변화로 인한 물리적 리스크는 농업과 어업에서 비교적 직관적이며, 이에 대해서는 언론 등을 통해서도 잘 알려져 있다. 예컨대 여름철 평균기온이 평년 대비 높아지고 해충 피해가 증가하여 농작물이 큰 피해를 입거나, 반대로 냉해로 인해 과일의 생육이 정상적으로 이루어지지 않는 등의 사례는 매년 쉽게 찾아볼 수 있다. 또한, 해수 온도 상승으로 양식어종이 대량 폐사하거나 어획량이 줄어드는 현상도 수산업에 큰 피해를 주고 있다. 이러한 1차 산업의 피해에 대해 정부와 관련 기관들은 TF를 구성하고 다양한 정책을 시행하는 등 다각적인 지원방안을 마련하고 있다.

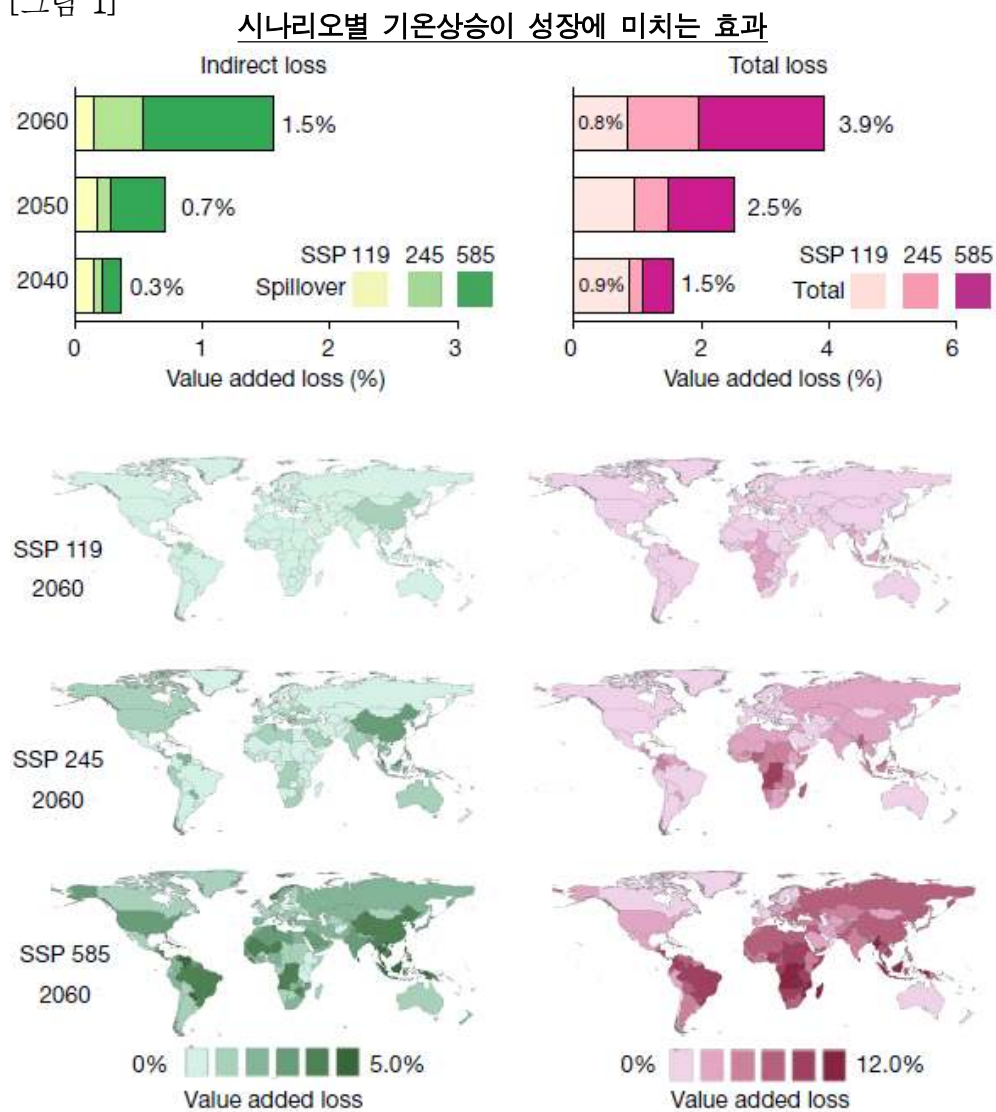
그러나 기후변화로 인한 물리적 리스크는 1차 산업에만 국한되지 않으며, 제조업과 서비스업에도 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 폭염으로 인한 열스트레스는 업무 효율을 떨어뜨리며, 폭우와 태풍으로 인해 제조업체나 항만의 작업이 중단될 경우 원자재 수입과 완성품 수출 경로가 차단되어 생산성 하락으로 이어질 수 있다.(채여라 외, 2024) 또한 물리적 리스크는 생산시설 자체를 마비시키기도 하는데, 2024년 철강 생산 시설이 집중호우로 인해 큰 홍수 피해를 입은 사례가 대표적이다. 이처럼 기후변화는 제조업과 서비스업 생산활동과 매출에도 중대한 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 이에 대한 인식과 연구, 정책적 대응¹⁾은 다소 미흡한 실정이다.

더욱이, 위와 같이 기후변화에 의해 직접적으로 발생하는 물리적 리스크 외에도, 글로벌 기후변화로 발생하는 물리적 리스크가 공급망과 국제무역을 통해 전이되는 2차 효과(second round effects)가 발생할 수 있다. Nordhaus and Yang(1996)은 기후변화는 국지적인 부분균형모형보다 다자간 일반균형으로 접근해야 한다고 주장한 바 있다. [그림 1]은 IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체)의 제6차 평가보고서(AR6, 2021)에서 사용하는 기후변화 시나리오SSP119, SSP245, SSP585²⁾에 따라 2040년부터 2060년까지

1) 정부와 지자체의 기후변화에 대한 최근의 정책은 산업활동에 따른 온실가스 감축 등 이행 리스크 측면에 초점을 맞추어 시행되고 있으며, 기후변화에 수반되는 직·간접적인 물리적 리스크에 대한 대응은 미흡한 실정이다. 울산광역시 역시 2025년 환경 관련 예산을 전년 대비 14.3% 증액한 4,165억 원으로 책정하였으나, 대부분의 예산은 산업단지 온실가스 감축 지원계획, 중소기업의 청정공정 개선 등 이행 리스크와 관련된 사업에 배정되었다.

기온상승이 GDP에 미치는 영향을 보여준다. 이에 따르면 글로벌 GDP는 2060년에 각각 -1.5%, -2.5%, -3.9% 감소할 것으로 나타난다. 그 중 각 시나리오별 무역경로 및 글로벌 공급망에 의해 전파되는 간접효과는 각각 -0.3%, -0.7%, -1.5%로 분석되어, GDP 감소에 대한 간접효과의 기여도가 총효과의 30~40%에 이르고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 GDP 감소 효과는 기후변화 시나리오가 전개됨에 따라 비선형적으로 커지게 됨을 확인할 수 있는데, 특히 2차 간접효과에서 비선형성이 크게 나타난다. 이는 대외개방도와 수출 의존도가 높은 우리나라의 경우 기후변화에 따른 1차적 효과뿐만 아니라 2차 간접효과에 대해서도 집중할 필요가 있음을 시사한다. 그럼에도 불구하고 기후변화의 물리적 리스크에 관한 기존 연구는 생산 현장에서 발생하는 직접적인 영향 외에 글로벌 공급망과 국제무역을 통해 전이되는 간접적인 효과 또한 크게 나타날 수 있다는 점을 간과하고 있다.

[그림 1]



주: 세 가지 시나리오(SSP119, SSP245, SSP585)에 따라 2040년부터 2060년까지 무역경로 및 글로벌 공급망에 의한 GDP 손실(좌)과 총 GDP 손실(우) 비교. SSP119, SSP245, SSP585는 IPCC의 제6차 평가보고서에서 사용하는 기후변화 시나리오이며, 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 각각 1.5°C 이하로 억제, 2~3도 수준 이하로 억제, 4°C 이상 방지하는 시나리오를 의미

자료: Sun et. al.,(2024)

2) SSP119, SSP245, SSP585는 지구 평균온도 상승을 각각 1.5°C 이하로 억제, 2~3도 수준 이하로 억제, 4°C 이상 방지하는 시나리오를 의미한다.

울산지역은 자동차, 조선, 석유화학, 비철금속 등 수출 비중이 높은 중화학 공업 중심의 산업구조를 갖추고 있으며, 이러한 산업들은 전통적으로 1차 산업 등에 비해 기후변화의 직접적인 영향을 덜 받는 것으로 여겨질 수 있다. 그럼에도 불구하고 2016년 태풍 차바³⁾로 인해 울산 지역 공장들이 일시적으로 가동을 멈춘 사례와 같이 기후변화의 직접적인 영향이 기업활동에 영향을 미칠 가능성은 충분히 존재한다. 뿐만 아니라, 글로벌 기후변화의 물리적 리스크에 따른 공급망 교란 등 2차 간접적 경로까지 고려하는 경우 기후변화는 더욱 상당한 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 울산의 대표적 산업인 조선, 자동차, 석유화학은 원자재를 글로벌 공급망에 의존하는데, 이러한 원자재를 수출하는 국가의 기후 재해로 원자재 수급이 지연되는 경우 생산활동에 차질이 발생할 수 있다. 또한, 물리적 리스크에 의한 원자재 수급 불안정은 생산활동에 영향을 미칠뿐만 아니라 글로벌 원자재 가격상승을 유발한다. 울산의 정유·석유화학·비철금속 산업은 원자재 가격 변동에 민감하기에 이러한 비용 증가가 생산 및 매출 감소⁴⁾로 이어질 수 있다. 게다가, 주요 수출대상국에서 발생한 물리적 리스크는 해당 지역의 소득 감소, 나아가 수입 수요의 감소로 이어져 울산지역 기업들의 수출에 악영향을 미칠 수 있다.

이러한 위협에도 불구하고 기후변화의 물리적 리스크가 울산지역의 산업에 미치는 영향에 대한 실증적 연구는 아직 제한적이다. 따라서 본 연구는 기상관측 데이터를 바탕으로 전국 광역시도 단위 기후리스크 지수를 구축하고 우리나라 기업활동조사의 마이크로 데이터를 활용하여 기후변화의 물리적 리스크가 울산지역 주요 산업의 매출에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 본고의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기후변화 관련 선행연구에 대해 정리한다. 3장에서는 기후변화의 정도를 강수, 가뭄, 기온 측면에서 종합적으로 측정할 수 있는 기후변화 지수를 산출하는 과정에 대해 자세히 기술한다. 4장에서는 마이크로 데이터를 활용하여 기후변화가 울산지역 산업에 미치는 영향을 실질 매출 측면에서 평가한다. 5장에서는 본 연구의 분석을 바탕으로 정책적 시사점을 도출한다.

II. 선행연구

기후요인이 성장에 미치는 영향은 광범위한 연구를 통해 실증적으로 분석되어 왔다. Dell, Jones, and Olken(2012)은 1950년 이후 세계 각국의 데이터를 이용하여 평균기온 상승의 누적효과가 구조적으로 신흥경제국의 성장률을 유의하게 저해함을 보여주었다. Colacito, Hoffmann, and Phan(2019)은 미국 주 단위 데이터를 사용하여 여름철 평균기온이 1°F 상승할 경우 연평균 성장률이 0.15~0.25%p 하락할 수 있음을 보였다. Burke, Hsiang, and Miguel(2015)은 연평균 기온이 약 13°C 이상일 경우, 고온이 경제성장에 비선형적으로 부정적 영향을 미친다는 임계점효과(threshold effect)를 제시하였다. 이와 같은 결과는 기후가 성장에 미치는 영향이 국가의 소득 수준, 기후변화에 대한 적응 역량, 산업구조 등에 따라 상이하게 나타날 수 있으며 비선형적 효과를 지닌다는 점을 시사한다.

이러한 기후리스크의 영향을 분석하는 방법 중에서는 계량경제모형이 특히 널리 활용되고 있다. 전통적 분석 방법으로는 패널고정효과모형이 대표적인데, Dell et al.(2012), Pretis et al.(2018) 등은 국가 또는

3) 2016년 9월 29일 미국령 괌(Guam) 부근에서 발생한 5등급 슈퍼태풍. 일반적으로 태풍은 남해쪽 경로를 지나지 않지만 차바는 남해안과 제주도를 관통하며 큰 피해를 주었다. 가장 피해가 심한 지역은 울산광역시로 당시 정부가 특별재난지역을 선포하였다. 시간당 124mm 이상의 폭우로 태화강이 범람하였으며 현대자동차 공장이 생산을 중단하였고, 선적 대기 중이던 완성차들이 침수되는 등 피해가 막심하였다.

4) Baek and Yoo(2022)는 정유산업의 과점경쟁구조로 인해 가격전가가 제한된다고 하였으며 Nam(2014)은 석유화학 산업에서 중국과 중동의 과잉생산으로 가격경쟁이 치열하고 수요탄력성이 높아 역시 가격 전가가 어렵다는 연구결과를 제시했다.

지역 단위의 기후 데이터와 성장률 데이터를 결합하여 기온·강수량 등의 변화가 성장률에 미치는 영향을 분석하였다. 한편, Berg, Curtis, and Mark(2023)는 국가별 GDP에 대한 온도 충격의 동태적 영향을 분석하기 위해 국소투영법(local projection)을 사용하였으며, Bilal and Kanzig(2024) 역시 국소투영법을 기반으로 지역별 기온 상승이 경제성장에 미치는 비대칭적이고 점진적인 효과를 분석하였다. 한편, 기후리스크의 비선형성과 장기 리스크 분포를 설명하기 위해서는 GaR(Growth-at-Risk) 접근법도 활용되고 있다. Kiley(2021)는 미국의 데이터를 이용하여 기온 충격이 성장률 분포의 왼쪽 꼬리(risk tail)를 확대시킴으로써 하방 리스크를 증가시키는 효과를 보인다고 분석하였다.

이러한 기존 연구들은 해당 지역 기후변화의 국지적 영향에 대한 분석이 주를 이루었다. 그러나 국제무역과 글로벌 공급망을 통해 기후변화가 간접효과 또는 파급효과로 이어질 가능성을 제대로 고려하지 못한 한계가 있었다. 최근에는 이러한 2차 파급효과에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Byrne and Vitenu-Sackey(2024)는 1901-2020년 동안의 30개국의 거시경제 데이터를 이용하여 국지적인 기후변화가 거시경제에 미치는 영향은 국제적인 요인에 비해 상대적으로 중요도가 낮음을 보였다. 해당 연구는 이러한 현상이 선진국 뿐만 아니라 신흥국에서도 나타나며, 기후변화에 대한 국가별 이질성 뿐 아니라 공통된 국가간 위험요인도 중요함을 강조하였다. Chabot and Bertrand(2025)는 일부 산업 부문이 기온 또는 강수 충격에 다른 부문보다 더 취약하며, 이상기후 현상의 영향이 지속되는 기간도 산업별로 상이하다는 점을 바탕으로 기후변화가 특정 부문의 공급망에 미치는 영향이나 부문 간 연계효과까지 분석하여야 함을 지적하였다. 한편, 한 지역의 기후재해가 글로벌 공급망을 통해 다른 지역 경제에 연쇄적인 충격을 줄 수 있음을 규명한 연구도 있다. Sun et al.(2024)은 전세계 141개 지역과 65개 부문을 연계한 통합 모형을 통해 극한고온 현상의 직·간접 경제적 피해를 추정하였다. 분석 결과, 극심한 폭염으로 인한 생산차질이 글로벌 공급망을 따라 전세계로 파급(spillover)되어 간접손실이 직접손실을 증폭시키는 것으로 나타났다. 이외에도 Haraguchi and Lall(2015)은 2011년 태국 홍수로 인한 글로벌 전자제품 공급 차질 사례나 일본 대지진으로 인한 자동차 부품망 교란 사례 등을 바탕으로 글로벌 공급망을 통해 해외에서 발생한 기후위험이 자국 산업과 소비에 충격을 줄 수 있다는 점을 밝혔다. 이러한 연구들은 기후위험의 평가는 개별 국가의 경계를 넘어 국제 무역체계와 연동한 거시적 관점에서 이루어져야 함을 강조하고 있다.

국내 연구에서도 기후변화의 영향에 대한 계량적 분석이 진행되고 있다. 박경훈 외(2021)는 이상기후 충격이 거시변수에 미치는 파급효과를 분석하였고, 이지원(2023)은 우리나라를 대상으로 기온과 강수량의 장기적 추세가 지역내총생산(GRDP)에 미치는 영향을 분석한 결과, 연간 강수량은 GRDP 성장에 유의한 부정적 영향을 미치는 반면, 평균기온은 통계적으로 유의한 효과를 보이지 않는다고 지적하였다. 정원석 외(2025)는 본고에서와 유사하게⁵⁾ 미국의 ACI 지수 방법론을 참고하여 우리나라의 기후변화 리스크 지수를 만들고 해당 지수가 인플레이션과 성장 등 주요 경제변수에 미치는 영향을 국소투영법으로 보여주었다. 또한, 채여라 외(2024)는 부산지역 주요 산업을 대상으로 이상기후가 생산에 미치는 영향을 분석하였으며 제조업의 기후변화에 대한 취약성을 정량화하였다. 김재운 외(2023)는 해외의 기후 리스크가 농축산물 및 원재료 수급의 불안정성 등 공급망을 통해 국내 산업에 간접적으로 전이될 수 있음을 강조하였다. 또한 해외 기후변화에 따른 소득 감소가 무역경로를 통해 국내 수출산업의 수요를 감소시키고 산업생산을 위축시킨다는 점을 지적하였다.

이러한 선행연구들은 기후변화에 따른 영향이 지역의 산업구조나 무역구조 등에 따라 다르게 나타날 수 있음을 지적한다. 따라서 본고는 울산지역에서 발생하는 기후변화의 영향을 분석하는 것뿐만 아니라 경제구

5) 본고와 정원석 외(2025)는 모두 ACI의 방법론을 참고하여 기후리스크 지수를 작성하였으나, 강수량, 가뭄 등 구성요인의 산정 방식 및 가중치에 있어서는 차이를 보인다.

조적으로 밀접한 지역에서 발생한 기후변화의 영향을 함께 살펴봄으로써 분석을 타당성을 높이고자 하였다.

III. 기후리스크지수의 산출

기존의 단순한 기후 변수(예: 평균기온, 강수량 등)는 기후위험의 종합적 수준이나 이상기후에 대한 상대적 심각도를 포착하기에 한계가 있다. 또한, 기후변화가 산업 및 지역경제에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는 지역 단위의 기후위험 수준을 체계적으로 측정할 수 있는 종합 지표의 구축이 우선 되어야 한다.

이러한 목적으로 다양한 방식의 지수들이 고안되고 있다. 미국의 Actuaries Climate Index(ACI)⁶⁾는 미국과 캐나다의 기후변화를 측정하기 위해 고온, 저온, 폭우, 가뭄(연속가뭄 일수), 바람, 해수면으로 구성된 기후지표를 종합하여 편제한다. 고온지수는 기온의 상위 90%에 해당하는 일수의 변화(T90)로 측정하며 저온지수는 기온의 하위 10%에 해당하는 일수의 변화(T10)로 측정한다. 지구온난화의 영향으로 북미의 경우 T10은 주로 음수(-)로 나타나며 T90은 양수(+)로 나타난다. 폭우지수는 월중 가장 비가 많이 오는 5일간의 강수량이며, 가뭄지수는 1mm 미만의 비가 내린 연속일수로 측정한다. 풍속은 한 달간 상위 90%의 풍속에서 기준기간 90% 수준의 풍속을 차감하여 계산하며 해수면의 경우 해수면 상승의 정도를 측정한다.

한편, Germanwatch는 각국의 기후변화 리스크를 측정하기 위해 수문학적(hydrological), 기상학적(meteorological), 기후학적(climatological) 이벤트로 인하여 발생하는 사망자수와 경제적 손실을 바탕으로 기후리스크지수(Climate Risk Index)를 편제하여 발표한다. 다만 인구, 경제적 손실을 바탕으로 편제한다는 방침만 공개하였을 뿐 정확한 수식과 가중치 등을 공개하지 않으며 지수 값이 국가별 순위(rank)로 발표된다. Notre Dame Global Adaptation Initiative에서 발표하는 ND-GAIN Index 또한 Germanwatch의 기후리스크지수와 유사하게 국가별 기후변화 취약성과 적응 역량을 평가하는 지표로 취약성(vulnerability)과 적응력(readiness) 두 가지 주요 요소를 기반으로 산출된다. 이때 취약성은 기후변화에 얼마나 영향을 받는지를 측정하며, 식량, 물, 건강, 생태계, 거주 환경, 기반시설을 측정하고 적응력은 기후변화에 대응할 수 있는 능력으로 경제환경, 정부 거버넌스, 사회적 준비도로 측정한다.

독일에 위치한 UN대학교 환경 및 인류안보연구소(United Nations University - Institute for Environment and Human Security, UNU-EHS)와 Bundnis Entwicklung Hilft에서 발간하는 World Risk Index(WRI)도 자연재해와 기후변화로 인한 위험 수준을 국가별로 평가하는 지표이다. WRI는 지진, 태풍, 홍수, 가뭄, 해수면 상승의 재해에 물리적으로 노출된 정도를 평가하는 재해 노출도(Exposure)와 빈곤율, 의료접근성, 교육수준이 포함된 민감성(susceptibility), 정부대응역량 등을 평가하는 대응력(capacity), 기후변화 적응정책, 환경보호정책, 기술개발 등을 포함하고 이들을 종합하여 산출한다.

본 연구에서는 지역단위로 가용한 자료를 활용하여 편제할 수 있는 ACI 지수의 산출방식을 바탕으로 국내 기상청에서 제공하는 기후 빅데이터를 활용하여 다차원적 위험 요소(고온, 저온, 폭우,

6) ACI는 2016년부터 산출하기 시작한 기후변화 모니터링 지수로 미국과 캐나다, 그리고 12개 하위지역의 이상기후를 측정하기 위해 편제되고 있다. 기준기간(1961~1990년)과 비교하여 1991년 이후 발생한 이상기후를 탐지하도록 설계되었다. 이 지수는 해당 지역의 기후의 물리적 리스크가 산업활동에 미치는 잠재적 영향을 실증적으로 분석하기 위한 핵심 기반 변수로 활용되며 미국의 보험요율 산정의 입력변수로 사용되기도 한다.(Zhou et. al., 2024)

가뭄 등)를 통합한 우리나라의 광역시도별 기후리스크지수(CRI: Climate Risk Index)를 편제하였다. 해당 지수는 지역의 고유한 기후 특성과 기상 이변의 강도 및 빈도를 반영하도록 설계되었다. 다만, 주요 교역국인 미국과 중국의 기후변화 리스크에 따른 영향을 평가하기 위해 해당국가의 기후변화로 발생한 경제적, 물리적 피해 정도와 정부 대응역량의 미비로 인한 재해의 장기화 가능성 등의 리스크를 반영하는 WRI를 함께 사용하였다. 이는 해당국가에서 기후변화의 물리적 리스크가 현실화되었을 때 공급망과 수입 수요를 통해 영향을 미치는 2차 효과를 식별하기 위함이다.

한편, 본 연구의 기후변화 지수는 고온, 저온, 폭우, 가뭄(연속가뭄일수) 및 해수면을 기준으로 편제되었는데, 총지수를 편제하기 위해서는 우선 기온, 강수, 가뭄 등 각 지표에 대한 리스크 지수를 편제할 필요가 있다. 지역별로 이러한 기후지표를 작성하기 위해 기상청 기상자료개방포털⁷⁾에서 16개 광역시도에 위치한 57개 관측소의 일간 자료를 사용하였다.([표 1] 참조) 표본기간은 본격적인 기상관측이 시작된 1973년 1월 1일부터 2024년 12월 31일까지이며, 본 연구에서 사용한 기업활동조사 패널데이터의 자료기간이 포함된 2000년 이후 기간은 관측기간으로, 그 이전 기간인 1973~1999년까지는 미국 ACI의 경우와 같이 기준기간(reference period)으로 설정⁸⁾하여, 기준기간 대비 관측기간의 기후변화를 기후리스크로 정의하였다. 다시 말해 기온, 강수, 가뭄 측면에서 1973년 이후 1999년까지의 기온, 강수량, 가뭄지수 대비 2000년 이후 각 지표가 통계적으로 유의하게 다르거나, 이상치를 보이는지 여부를 통해 지역별 기후변화가 발생하는지 여부를 지표로 산출하였다.

[표 1]

광역시도별 관측소

광역시도	관측소
강 원	강릉, 속초, 대관령, 춘천, 원주, 인제, 홍천, 태백
경 기	수원, 양평, 이천
경 남	거제, 남해, 통영, 진주, 거창, 합천, 밀양, 산청, 창원
경 북	구미, 울진, 포항, 영주, 문경, 영덕, 영천, 의성, 봉화, 안동
광 주	광주
대 구	대구
대 전	대전
부 산	부산
서 울	서울
울 산	울산
인 천	인천
전 남	목포, 여수, 완도, 장흥, 해남, 고흥
전 북	군산, 전주, 부안, 임실, 정읍, 남원, 장수
제 주	제주, 고산, 성산, 서귀포
충 남	서산, 천안, 보령, 부여, 금산
충 북	충주, 청주, 추풍령, 제천, 보은

주: 표에 나열된 관측소 외에 표본기간 중 관측이 시작된 신설 관측소가 있으나, 자료의 기간이 분석 기간보다 짧거나 간헐적 자료만 존재하기 때문에 지수의 일관성과 비교가능성을 위해 제외하였다.
 자료: 기상자료개방포털

7) 기온, 강수 및 가뭄(표준강수지수) 자료는 기상자료개방포털, 해수면 자료는 국립해양조사원에서 받을 수 있다.
 8) 기준년도와 관측년도를 구분하는 것은 관측년도 동안 발생한 평균 기후를 기준으로 기후변화를 측정할 경우 내생성 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 미국 ACI의 경우 1961~1990년을 기준년도로 설정하였다. 기준년도 설정에 대한 이론적 배경은 없으나, 지수 측정의 정확도를 제고하기 위해 충분한 기간을 설정할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 1973~1999년을 기준년도로 설정하였다.

1. 기온

기온은 생활환경부터 식물과 동물의 성장까지 광범위한 영향을 미치는 대표적 기후지표이다. 본 연구에서 사용하는 기후리스크 지수인 CRI에는 이상고온(abnormal high)과 이상저온(abnormal low) 리스크가 포함되어 있다. 기온의 이상현상은 일상생활뿐만 아니라 영업활동, 생산활동에도 여러 차질을 야기할 수 있다. 예컨대 산업의 경우 이상기온으로 조업과 생산이 중단되는 등 영업활동에 차질이 발생하여 생산과 매출 감소로 이어질 수 있다. 즉, 이상기온은 생산활동의 저하, 소득 감소, 소비와 투자 감소 등 총수요의 감소로 이어지며 지역경제를 둔화시킬 수 있다.

본 연구에서는 이상기온(고온, 저온)을 탐지할 수 있는 기온리스크 지수를 편제하기 위해 기준연도의 자료로 월별 기온의 고점과 저점의 임계치를 설정하고, 관측기간 중 매월 이를 상회 또는 하회하는 일수를 산출하였다. 기준기간 중에도 고온과 저온의 임계치를 상회하거나 하회하는 날들이 있으므로, 기준기간 동안 기준치를 상회하거나 하회하는 일수의 평균과 표준편차를 구하면, 관측기간 동안 기준치를 상회하거나 하회하는 날들을 표준화할 수 있다. 최고기온 임계치를 상회하는 기준은 일중 최고기온이며 최저기온 임계치를 하회하는 기준은 일중 최저기온이다. 기존 연구 방법론에서는 일평균기온이 특정 임계치를 상회 또는 하회하는 날들의 수로 이상기온을 측정하였는데, 이 경우 일중 최고기온 또는 최저기온의 충격을 과소 식별하는 문제가 있을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 기준년도(1973~1999년)의 월별 일중 최고기온의 상위 10%와 월별 일중 최저기온의 하위 10%를 각각 고온임계치와 저온임계치로 설정하였다. 그리고 기준년도 기간 동안 월별 총일수(28~31일) 대비 최고기온이 고온임계치를 상회하는 날의 비율과 최저기온이 저온임계치를 하회하는 날의 비율을 구하였다.⁹⁾ 이후 관측년도(2000~2024년)의 일중 최고기온, 일중 최저기온이 각각 고온임계치를 상회하거나 저온임계치를 하회하는 날의 비율을 구하고 앞에서 구한 기준연도의 평균과 표준편차로 표준화하여 아래와 같이 이상기온지표를 편제하였다.

$$Z_{i,t}^{highRat} = \frac{DayRat_{i,t}^{high} - \mu_i^{highRat}}{\sigma_i^{highRat}}, \quad Z_{i,t}^{lowRat} = \frac{DayRat_{i,t}^{low} - \mu_i^{lowRat}}{\sigma_i^{lowRat}}$$

여기에서 $Z_{i,t}^{highRat}$, $Z_{i,t}^{lowRat}$ 은 각각 고온과 저온의 임계치를 넘는 일수의 비율의 표준화된 지표이며, $DayRat_{i,t}^{high}$ 은 i 지역의 t 월 일중 최고기온이 임계치를 상회하는 날의 비율, $DayRat_{i,t}^{low}$ 는 i 지역의 t 월 일중 최저기온이 임계치를 하회하는 날의 비율을 의미한다. $\mu_i^{highRat}$ 은 기준년도 기간 동안 일중 최고기온이 고온임계치를 상회하는 날의 비율의 평균이며 $\sigma_i^{highRat}$ 는 이의 표준편차이다. μ_i^{lowRat} 은 기준년도 기간 동안 일중 최저기온이 저온임계치를 하회하는 일수의 비율의 평균이며 σ_i^{lowRat} 는 이의 표준편차를 의미한다.

2. 강수량

9) 이는 기준연도의 최저기온이 저온임계치를 하회하는 일수의 월별평균과 표준편차를 구하기 위함이다. 최저기온이 높아짐을 통해 지구온난화 정도를 측정할 ACI 방법론과 달리, 본 연구에서는 기준기간 대비 기온변동성이 증대함을 측정하기 위해 기준년도 대비 낮은 최저기온을 기록한 날의 비율을 리스크 요인으로 측정하였다.

최근 몇 년 동안 비교적 짧은 시간 동안 지엽적으로 다량의 비가 집중적으로 내림에 따라 도로가 침수되거나 맨홀과 같은 구조물에 의해 인명이 희생되는 등 집중호우에 따른 피해가 속출하고 있다. 이로 인해 물적 자본의 손실이 발생하거나 조업과 생산활동이 중단되는 경우 산업에 영향을 미칠 수 있다.

이러한 이상강우의 정도를 측정하기 위해 기준년도 기간의 일일 강수량의 월별 상위 10%를 임계치로 설정하고 관측기간 중 각 임계치를 초과하는 일수의 비율을 월별로 산출하였다. 또한, 기준년도 기간 동안 일일 강수량의 월별 상위 10%를 초과하는 일수의 비율의 평균과 표준편차를 구하고 이를 활용하여 아래와 같이 표준화하였다.

$$Z_{i,t}^{pptnRat} = \frac{DayRat_{i,t}^{pptn} - \mu_i^{pptnRat}}{\sigma_i^{pptnRat}}$$

여기에서 $Z_{i,t}^{pptnRat}$ 은 임계치를 넘는 강수량을 기록한 월간 일수 비율의 표준화된 지표이며 $DayRat_{i,t}^{pptn}$ 은 관찰연도 i 지역의 t 월 일일 강수량이 임계치를 상회하는 월간 일수의 비율을 의미한다. $\mu_i^{pptnRat}$ 은 기준연도 기간 동안 일일 강수량이 임계치를 상회하는 월간 일수의 비율의 평균이며 $\sigma_i^{pptnRat}$ 는 이에 대한 표준편차이다.

3. 가뭄

가뭄은 강수와 함께 기후변화의 양상을 나타내주는 지표이다. 가뭄은 농업부문에 특히 치명적인 영향을 줄 수 있으나 제조업 또한 가뭄이 지속되어 하천 수위가 충분하지 못할 경우 제한급수 등으로 필요한 용수가 부족해져 생산활동에 차질이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 가뭄을 측정하기 위해 표준강수지수(Standard Precipitation Index, SPI)를 활용하여 가뭄지표를 산출하였다. 표준강수지수는 Mckee, Doesken and Kleist(1993)가 개발한 가뭄지수로 세계기상기구(WMO)에 의해 기상학적 가뭄을 측정하기 위한 지수로 권고되고 있다. 표준강수지수는 강수량만을 사용하여 가뭄의 정도를 판단하며, 시간단위에 따라 강수량의 과잉 또는 부족을 나타낼 수 있으므로 일, 월, 연도 등 다양한 시간단위에 따라 가뭄의 정도를 측정하기 용이하다. 강수량은 시간단위 내에서 누적적으로 측정되는데 우리나라 표준강수지수에서 측정하는 누적기간은 1개월~24개월이며 이를 나타내는 기호는 각각 SPI1, SPI2, SPI3, ..., SPI24와 같다.¹⁰⁾

누적강수지수는 Mckee, Doesken and Kleist(1993)에 따라 1973년 이후 특정지역의 해당기간(1, 2, 3, ..., 24개월) 동안의 누적강수량으로 감마(Gamma)분포를 추정한다.¹¹⁾ 표준강수지수를 측정하기 위한 감마분포는 아래와 같다.

$$f(p_{i,l}; \alpha_{i,l}, \beta_{i,l}) = \frac{1}{\Gamma(\alpha_{i,l}) \beta_{i,l}^{\alpha_{i,l}}} p_{i,l}^{\alpha_{i,l}-1} \exp\left(-\frac{p_{i,l}}{\beta_{i,l}}\right), \text{ 단 } \alpha_{i,l} > 0, \beta_{i,l} < 0$$

10) 이는 각각 1, 2, 3, ..., 24개월 동안 누적강수량을 분석하여 산출한 지수를 의미한다.

11) 강수량은 일반적으로 0 이상의 연속변수이며 우측으로 긴 꼬리를 갖는 분포의 특성이 있으므로 두 개의 모수로 식별되는 감마분포를 띄게 된다.

위 감마분포에서 $p_{i,l}$ 은 i 지역 과거 l 누적기간(1, 2, 3, ..., 24개월) 동안의 강수량이며, $\alpha_{i,l}$ 은 감마분포의 형상(shape) 모수, $\beta_{i,l}$ 는 척도(scale) 모수이다. 감마분포는 지역(i)과 누적기간(l)에 따라 각각 추정된다. 표준강수지수는 위에서 추정된 감마분포에 관찰된 누적강수량을 넣어서 도출된 누적확률을 표준정규분포에 대입하여 산출¹²⁾한다. 표준강수지수는 1991년부터 1일 주기로 산출하기 시작하여 2017년까지 59개 지역에 대해 발표하였고, 2018년 이후에는 66개 지역에 대해 산출하고 있다. 표준강수지수의 범위로 판단할 수 있는 가뭄단계는 아래 [표 2]와 같다.

[표 2]

SPI값에 따른 가뭄단계

지수값 ¹⁾	가뭄 단계	확률 ²⁾	평균재현기간(년)
1.00 이상	습함	0.159	-
0.99 ~ -0.99	정상	0.683	-
-1.00 ~ -1.49	약한 가뭄(관심 단계)	0.092	1.4 ~ 2.0
-1.50 ~ -1.99	보통 가뭄(주의 단계)	0.044	2.1 ~ 3.7
-2.00 이하	심한 가뭄(경계 단계)	0.023	3.8 ~ 17.8
20일 이상 -2.00 이하	극심한 가뭄(심각 단계)	-	17.9 이상

주: 1) 표준정규분포의 표준편차 1을 기준으로 산출 2) 표준정규분포의 누적확률값
 자료: NASA, 기상청 수문기상 가뭄정보 시스템

본 연구에서는 표준강수지수와 가뭄단계¹³⁾를 활용하여 가뭄지표를 도출하였다. [표 2]와 같이 표준강수지수의 값에 따라 가뭄지수의 값이 -2.00 이하인 경우 심한가뭄으로 구분할 수 있다. 가뭄지표는 월중 심한가뭄을 기록한 날들의 비율을 계산한 후 아래와 같이 표준화를 해서 도출하였다.

$$Z_{i,t}^{drt.Rat} = \frac{DayRat_{i,t}^{drt} - \mu_i^{drt.Rat}}{\sigma_i^{drt.Rat}}$$

여기에서 $Z_{i,t}^{drt.Rat}$ 은 월간 가뭄지수가 임계치를 넘는 일수의 비율이 표준화된 지표이며 $DayRat_{i,t}^{drt}$ 은 i 지역의 t 월 가뭄지수가 임계치를 상회하는 일수의 비율을 의미한다. $\mu_i^{drt.Rat}$ 은 기준연도 기간 동안 가뭄지수가 임계치를 상회하는 월간 일수의 비율의 평균이며 $\sigma_i^{drt.Rat}$ 는 이에 대한 표준편차이다. 한편, 누적기간의

12) 감마분포와 표준정규분포로 SPI 지수를 산출하는 방법은 아래와 같다.(정세진 외, 2019)

1. 산출할 SPI의 시간척도 결정(1, 2, 3, ..., 24개월)
2. 일자별 과거(1, 2, 3, ..., 24개월) 누적강수량 계산
3. 누적강수량의 시계열 데이터를 통해 감마분포를 추정
4. 추정된 누적감마분포에서 현재시점 누적강수량의 확률값을 계산
5. 해당 확률값을 표준정규분포의 역함수에 대입하여 표준강수지수를 도출

13) 가뭄단계는 보통가뭄(주의단계)과 심한가뭄(경계단계)으로 구분된다. 본고에서는 심한가뭄(경계단계)을 기준으로 가뭄지표를 구성하였다.

경우 1, 2, 3개월 등 짧은 누적기간으로는 기준기간 대비 관찰기간의 가뭄의 정도가 크게 달라지지 않았다. 따라서 기후리스크 지수를 편제하기 위해서 SPI는 12, 16, 24개월 누적기간의 평균치를 사용하였다.

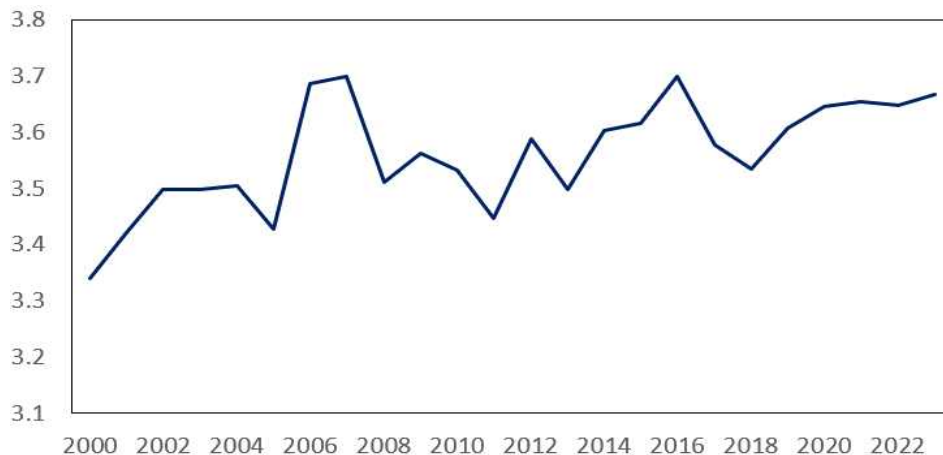
4. 해수면

글로벌 평균기온 상승은 만년설과 빙하의 용해 및 해수의 열팽창에 의한 부피의 증가로 해수면의 상승을 야기하고 있다. 이는 해류 및 전반적인 기후에 변화를 일으킬 수 있을 뿐만 아니라 해안선에 인접한 중화학공업단지인 조선소, 항만시설, 정유석유화학 설비의 염수 침투 위험을 증가시킬 수 있다. [그림 2]와 같이 울산지역은 해수면이 추세적으로 상승하고 있다는 점을 반영하여 이러한 기후변화 리스크를 분석에 포함하기 위해 본 연구에서는 해수면을 포함하여 기후리스크 지수를 작성하였다.

해수면의 경우 기본수준면¹⁴⁾이라는 기준이 이미 설정되어 있어 기준연도 대비 비교가 필요하지 않다. 따라서 관측연도 기간 동안의 기본수준면(약최저저조면) 대비 해수면 높이에 자연로그¹⁵⁾를 취한 값을 해수면 지표로 사용하였다.

[그림 2]

울산지역의 해수면 높이



주: 1977년 측정된 기본수준면(datum level) 대비 해수면 높이(cm)의 자연로그값
 자료: 국립해양조사원

5. 기후리스크 지수

기후리스크 지수는 각 기후지표에 나타난 리스크 지수를 조합하여 편제한다. 기후리스크 지수를 편제하는데 포함되는 기후지표는 이상고온, 이상저온, 강수량, 가뭄, 해수면이다. 이들 기후지표를 종합하여 기후리스크 지수를 편제할 때에는 각 기후지표가 전체적인 기후리스크에 기여하는 정도를 표준화하는 과정을 거쳐야한다. 이때 각 기후지표의 가중치는 모두 동일하게 설정¹⁶⁾하였다.

14) 국제수로협회에서는 조석의 최저면을 수심기준면으로 규정하고 있으며, 이 정의에 따라 국가별로 각기 다른 기준면을 채택하고 있다. 기본수준면(Datum Level, DL)은 우리나라 조석관측의 기준면이며 조석표의 조위와 해도에 수심을 표시하는 기준면이다. 우리나라는 1개월 이상의 조석관측을 실시한 뒤 해당지역 관측기간의 평균해수면에서 일정 수준만큼 아래로 내려간 면인 약최저저조면(기본수준면)을 수심기준면으로 규정하고 있다.
 15) 해수면을 제외한 기후지표가 표준화된 지표라는 점을 감안하여 이와 비슷한 척도를 나타내기 위해 해수면 높이에 자연로그를 취하였다.
 16) 가중치는 개별 기후지표의 변화가 기후리스크 지수에 기여하는 정도를 기준으로 하는 것이 가장 바람직하지만, 이

다만, 이 경우 각 지표의 절대적 크기를 표준화할 필요가 있다. 단순히 지표의 범주(scaling)에 의해 영향의 정도가 결정될 경우 전체적인 지수에 편의를 일으킬 수 있기 때문이다. 따라서 이를 보정하기 위해 개별 구성요소들의 값을 (-1, 1)범위내에 위치하도록 재조정(rescale)하였다.

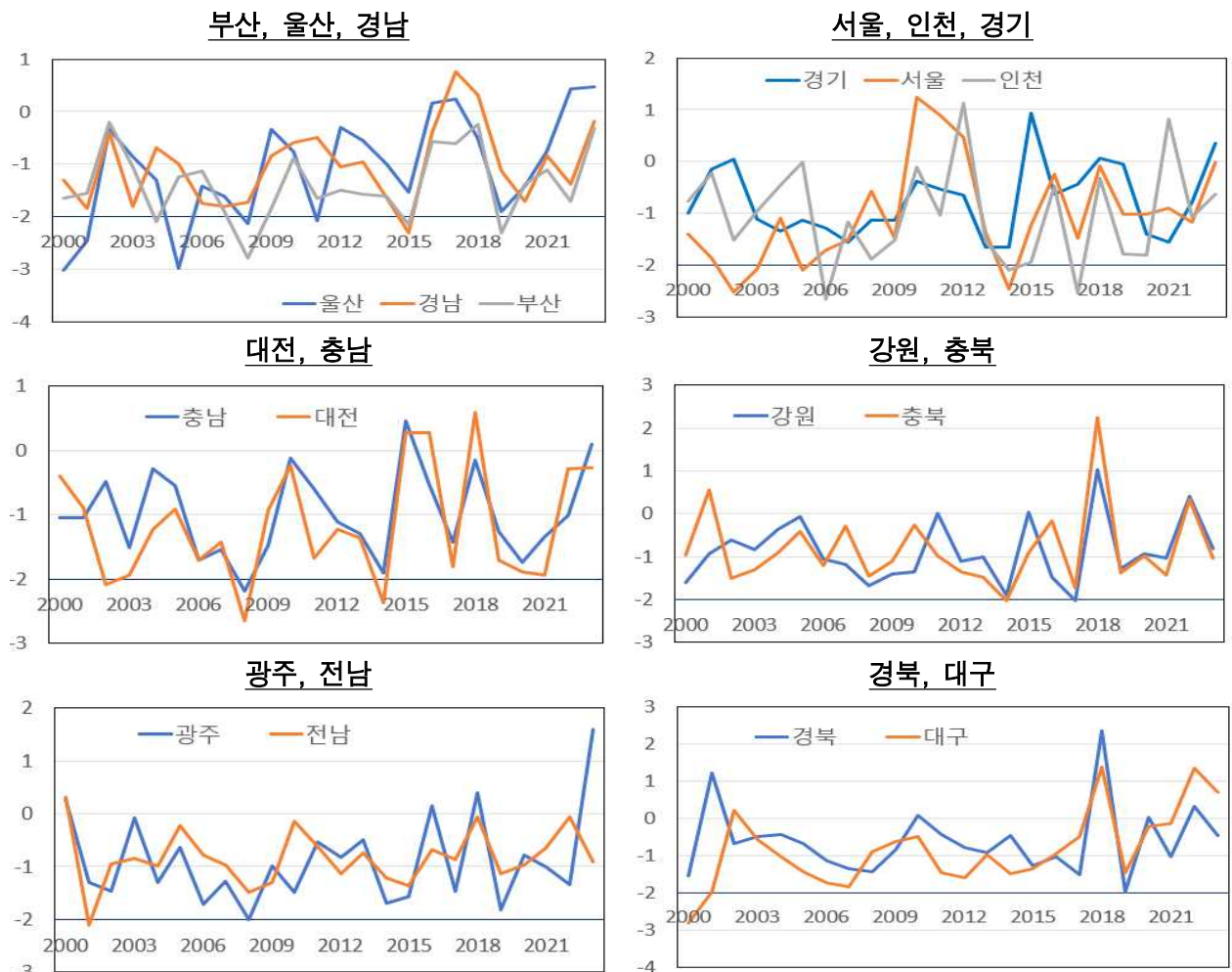
$$\begin{aligned}
 CRI_{i,t} &= w_1 Z_{i,t}^{highRat} + w_2 Z_{i,t}^{lowRat} + w_3 Z_{i,t}^{pptnRat} + w_4 Z_{i,t}^{drtRat} + w_5 Z_{i,t}^{sealevel} \\
 &= CRI_{i,t}^{high} + CRI_{i,t}^{low} + CRI_{i,t}^{prcp} + CRI_{i,t}^{drght} + CRI_{i,t}^{sealevel}
 \end{aligned}$$

여기에서 w_j 는 각 기후지수 값을 (-1, 1) 범주로 변환해주는 역할¹⁷⁾을 한다. j 기후변수와 가중치가 재조정된 CRI^j 간에는 아래와 같은 관계가 성립한다.

$$CRI_{i,t}^j = 2 \times (Z_{i,t}^j - \min(Z_{i,t}^j)) / (\max(Z_{i,t}^j) - \min(Z_{i,t}^j)) - 1$$

[그림 3]

지역별 기후리스크 지수 추이



자료: 통계청

를 측정할 수 있는 이론적인 근거나 방법론은 존재하지 않는다. 한편, American Academy of Actuaries(2018) 등에서도 종합지표를 구성할 때 각 지표의 가중치를 동일하게 설정하고 있다.

17) $w_j Z_{i,t}^j = CRI_{i,t}^j$ 에서 가중치 w_j 는 각 기후지표 j 를 (-1, 1)값으로 표준화시켜주는 값으로 설정하였다.

IV. 기후변화가 울산지역 산업에 미치는 영향

1. 기업활동조사 패널데이터

본 절에서는 기후변화가 울산지역 산업에 통계적으로 유의한 영향을 미쳤는지를 점검한다. 이를 위해 본 연구에서는 기업활동조사 패널데이터¹⁸⁾를 사용하였다. 기업활동조사 패널데이터는 기업 단위의 연간 마이크로 데이터로, 조사 대상 기업들의 경영 실적과 활동을 연도별로 조사한 서베이 데이터이다. 통계청은 2018년 이후 기업활동조사를 마이크로 데이터로 공개하기 시작하였고¹⁹⁾ 이후 매년 자료가 추가되어 현재 2006년부터 2022년까지 연속된 패널 데이터가 제공되고 있다.

기업활동조사에 따르면 울산지역은 제조업이 약 70.5%로 높은 비중을 차지하고 있다.([표 A2]) 그 중에서도 1차 금속 제조업, 금속가공제품 제조업, 기타 기계 및 장비 제조업, 기타 운송장비 제조업, 자동차 및 트레일러 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업 등 중화학공업으로 분류되는 사업체가 전체 표본의 약 70%에 이를 만큼 높은 비중을 보인다.([표 A3]) 이는 15개 광역시도 평균인 32.6%²⁰⁾의 두 배를 초과하는 수치로 울산지역의 산업이 제조업 중에서도 특히 중화학 장치산업에 특화되어 있음을 알 수 있다. 매출액을 기준으로 울산지역에 위치한 사업체의 특징을 살펴보는 경우에도 기타 운송장비 제조업(2.25조원), 전기, 가스 등 공급업(1.88조원), 1차 금속 제조업(1.26조원) 등 타 지역대비 중화학공업의 비중뿐만 아니라 규모 역시 큰 특징을 보인다.([표 A5])

2. 모형의 구성

본 연구에서는 마이크로 데이터인 기업활동조사 패널데이터의 이점을 최대한 활용하기 위해 패널분석 모형을 활용하여 기후변화가 울산지역 산업에 미치는 영향을 점검하였다. 특히, 주요 교역국에서 발생한 기후변화 리스크가 시간의 흐름에 따라 울산지역 산업에 미치는 영향을 살펴볼 수 있도록 동태적 패널분석모형을 구성하였다. 모형에는 지역을 나타내는 더미 변수를 포함하였으며, 해당 변수와 기후변수와의 교차항을 포함하여 기후변화가 울산지역 산업의 실질매출에 미치는 추가적인 영향을 식별할 수 있도록 구성하였다. 연간자료를 사용한 동태적 패널분석모형은 다음과 같다.

- 18) 기업활동조사 패널데이터에는 기업의 재무 상태와 경영활동 전반을 나타내는 다양한 변수가 포함되어 있다. (1) 매출액, 영업비용, 영업이익 및 당기순이익, 자산총계, 부채총계, 자본총계(자본금 포함) 등 기업의 재무구조와 실적을 나타내는 재무성과지표 (2) 종사자 수(상용근로자 수 등), 기업별 총 종업원 수(연말 기준), 조직형태(본사-지사 구조, 사업장 수 등) 등 고용 및 조직 구성에 관한 변수 (3) 기업의 설립연도, 기업 형태(회사법인 여부 등), 계열사 관련 정보 등 기업 특성 및 계열관계 변수 등이 포함되어 있다. 기업활동조사 패널데이터는 이러한 자료 구조로 기업의 동태적 변화(성장, 축소, 사업전환 등)를 조사하는데 유용한 자료이다.
- 19) 통계청은 2006년부터 2016년까지 11개 년도의 기업활동조사 자료를 연계하여 패널 데이터를 구축하였고, 2018년 이후부터 이를 마이크로 데이터로 공개하기 시작하였다.
- 20) 광역시도별 1차 금속 제조업, 금속가공제품 제조업, 기타 기계 및 장비 제조업, 기타 운송장비 제조업, 자동차 및 트레일러 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업의 비중은 아래 표와 같다.

	강원	경남	경북	광주	대구	대전	부산	서울	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
비율	14.1	54.7	44.2	24.9	37.5	23.9	32.8	10.2	69.5	37.6	33.6	34.3	1.2	43.8	26.1

자료: 기업활동조사 패널데이터

$$\begin{aligned} \ln y_{i,t} = & \sum_{k=1}^2 \rho_k y_{i,t-k} + \alpha I(\text{reg} = \text{Ulsan}) + \mu_i \\ & + \beta \text{Control}_{i,t} + \sum_{k=0}^2 \gamma_{1,k} \text{CRI}_{i,t-k} + \sum_{k=0}^2 \gamma_{2,k} \text{CRI}_{i,t-k} \cdot I(\text{reg} = \text{Ulsan}) \\ & + \sum_{k=0}^2 \gamma_{3,k} \text{WRI}_{i,t-k}^{\text{abroad}} + \sum_{k=0}^2 \gamma_{4,k} \text{WRI}_{i,t-k}^{\text{abroad}} \cdot I(\text{reg} = \text{Ulsan}) + \epsilon_{i,t} \end{aligned}$$

여기에서 y 는 사업체의 매출액(단위: 백만원)을 소비자물가지수로 나눈 실질매출액이며, $\text{CRI}_{i,t-k}$ 는 본고에서 편제한 기후리스크 지수를 의미한다. $I(\text{reg} = \text{Ulsan})$ 는 기업이 위치한 지역이 울산임을 나타내는 더미변수이며 μ_i 는 개별기업의 고정효과이다. $\text{CRI}_{i,t-k} \cdot I(\text{reg} = \text{Ulsan})$ 는 울산지역에서 발생한 기후리스크가 울산에 위치한 산업체들의 실질 매출액에 미치는 추가적인 효과를 식별하기 위한 교차항이다. 즉, $\gamma_{1,k}$ 는 기후변화 리스크가 산업체의 실질매출에 미치는 영향을 나타내며, $\gamma_{2,k}$ 는 울산지역에 위치한 산업체들의 매출이 기후변화 리스크에 반응하는 추가적인 효과를 나타낸다.

한편, $\text{Control}_{i,t}$ 는 로그화된 통제변수로 산업체의 규모를 통제하기 위한 고용자 수, 우리나라 지출부문 GDP 구성요소인 민간소비, 정부소비, 통관기준수출, 투자와 각 산업체의 재생에너지 사용량, 글로벌 금융위기 더미(2008, 2009=1), 코로나19 더미(2020, 2021=1), 그리고 시간의 선형 및 비선형 추세를 통제하기 위한 연도 index와 그 제곱항을 포함한다. 이 외에도 9차 표준산업분류에 따른 산업대분류 19개 항목에 대한 더미를 포함하여 각 산업군에서 특정 시점에 발생할 수 있는 충격을 통제하였다. 마지막으로 ϵ_{it} 는 오차항²¹⁾을 의미한다. 변수의 기술통계량은 [표 A1]과 같다.

기업활동조사 패널데이터는 비교적 짧은 기간(2006~2022년) 동안 18,459개 산업체에 대해 조사한 미시자료이며 산업체별로 조사가 이루어진 기간이 상이한 불균형 패널자료(unbalanced panel)이다. 또한, 기후변화 리스크의 충격이 일정 기간 지속성을 지닐 수 있다는 점을 고려하여 설정한 모형을 System GMM으로 추정하였다. 이를 위해 시차는 t-2기까지 설정하였는데, 기후변화 충격이 기업의 생산에 미치는 영향 중 일부가 재고요인으로 1~2년에 걸쳐 나타날 수 있다는 점을 반영하였다.

한편, 미국 또는 중국²²⁾과 같은 주요 교역국에서 기후변화 리스크가 발생하는 경우 공급망 차질에 따른 원자재 수급 악화나 해당 국가들의 수입수요 감소 등이 발생하여 울산지역 산업 매출액에 영향을 미칠 가능성이 있다. 울산지역의 경우 대미 수출비중이 높은 자동차, 석유화학 등의 산업이 전체 산업에서 차지하는 비중이 높아 지역내 기후변화 리스크보다 주요 교역국에서 발생하는 기후변화 리스크에 더 큰 영향을 받을 가능성이 높다. 이를 반영하여 모형에 미국의 기후리스크 지수인 $\text{WRI}_{i,t-k}^{\text{US}}$ 또는 $\text{WRI}_{i,t-k}^{\text{CH}}$ 를 포함하였다. 또한 주요 교역국에 대한 울산의 추가적인 반응을 확인하기 위해 교차항인 $\text{WRI}_{i,t-k}^{\text{US}} \cdot I(\text{reg} = \text{Uls})$ 또는 $\text{WRI}_{i,t-k}^{\text{CH}} \cdot I(\text{reg} = \text{Uls})$ 를 포함하였다.

21) 본 모형은 동태적패널모형이므로 일반적인 회귀모형의 강한 외생성보다 좀 더 완화된 가정인 순차적외생성(sequential exogeneity)을 가정하고 있다. 이는 $\text{CRI}_{i,t-k}$ 나 $\text{WRI}_{i,t-k}^{\text{US}}$ 와 같은 회귀변수가 현재 및 과거의 오차 ϵ_{is} ($s \leq t$)와 상관관계가 없음을 의미한다. 이는 System GMM 추정에서 시차변수를 도구변수로 사용하는데 유효성을 위한 최소한의 가정이라 볼 수 있다. 한편 System GMM은 이러한 순차적 외생성을 바탕으로 차분방정식과 수준방정식에 대한 직교성(orthogonality)을 적률조건(moment condition)으로 하여 추정된다.

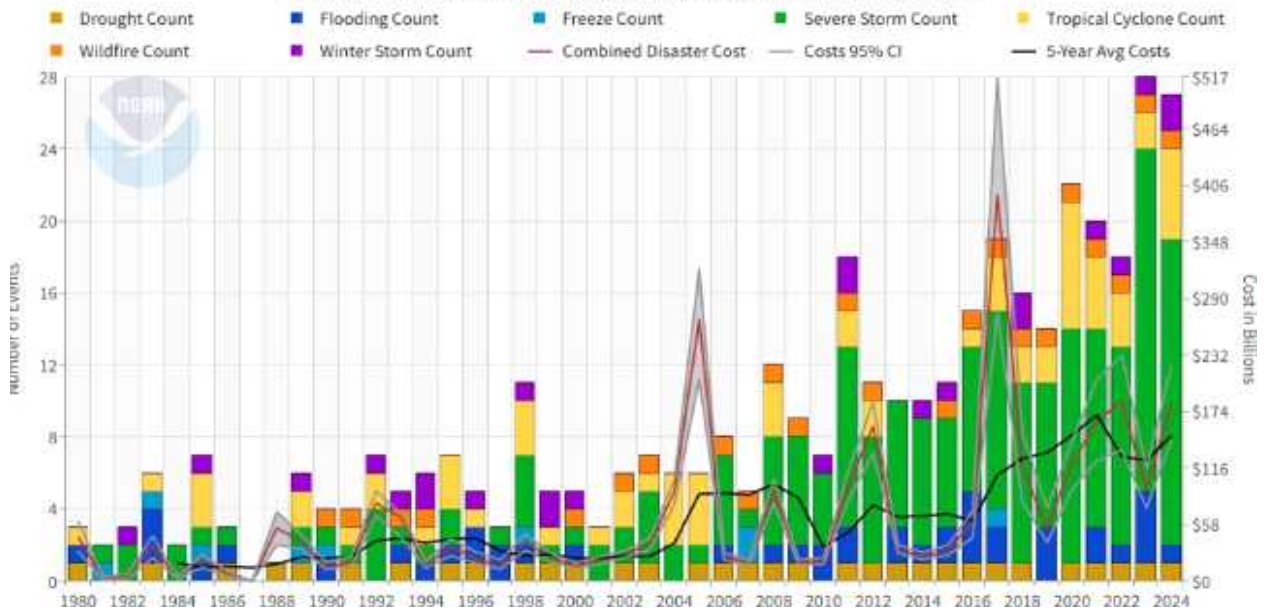
22) 울산지역과 주요 교역관계가 있는 두 지역 외에, 울산지역 산업과 원자재 교역관계가 있는 중동은 WRI가 편제되지 않는다. 한편 호주의 경우 WRI가 편제되지만 울산의 경우 철광석을 주원료로 사용하는 산업이 위치하지 않아 호주는 분석에 포함하지 않았다.

World Risk Index(WRI)는 각국이 직면한 다양한 자연재해의 발생 확률과 그로 인한 취약성을 통해 재해위험을 측정하는 지표로 지진, 해일(쓰나미), 사이클론·태풍, 해안·하천 홍수, 가뭄, 해수면 상승 등의 주요 기후·지질학적 위험요인이 반영된다. 한 예로 미국 내 지진이 발생할 경우 건축물 파괴, 생산설비 손실, 물류망 마비 등으로 경제적 손실이 발생한다. 홍수와 폭풍 위험은 주택과 생산시설 침수, 정전, 항만 폐쇄 등으로 기업활동을 마비시킨다. 가뭄 위험은 물 공급부족과 산불위험 증대로 이어지며 작황 악화와 원자재 가격 급등 등을 초래할 수 있다. 또한, 해수면 상승은 연안 도시와 산업단지의 상시적 침수 위험을 높이고 산업시설의 재배치 등으로 산업활동이 중단되는 결과를 초래할 수 있다.

한편, WRI는 단순히 자연재해 발생 가능성뿐만 아니라 정부의 대응과 적응 능력(vulnerability)도 함께 고려하는데, 미국의 경우 의료·SOC 인프라와 재난대응체계가 비교적 잘 갖춰져 있어 취약성 지표는 낮은 편이나, 최근 기후변화로 허리케인, 폭염·가뭄, 산불 등의 재해발생 빈도와 강도가 증대되면서 미국의 전반적 위험노출 수준도 상승²³⁾하고 있다. [그림 4]에서 미국의 연도별 재해발생 건수와 피해액은 전반적으로 상승 추세를 띄고 있으며, 5년 이동평균 피해액도 지속적으로 상승하는 것을 확인할 수 있다.

[그림 4]

미국 대규모(십억 달러 이상) 손실을 야기한 자연재해 빈도
United States Billion-Dollar Disaster Events 1980-2024 (CPI-Adjusted)



자료: NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). "Billion-Dollar Weather and Climate Disasters." 2025.

위와 같이 모형을 구성할 경우 각기 다른 세 모형²⁴⁾이 추정될 수 있다. 우선 미국과 중국의 WRI를 고려하지 않는 모형의 경우, 국내 기후변화 리스크 지수(CRI) 1단위 변화에 대한 국내 산업 실질매출의

23) UNU-EHS가 2022년 발표한 WRI 개정판에서는 미국이 세계 18위의 고위험국으로 재평가되었는데, 이는 방재능력이 높음에도 불구하고 거대한 인구나 자산이 다양한 재해에 노출된 현실을 반영한다.

24) 미국 WRI와 중국 WRI를 동시에 포함한 모형을 구성하지 않는 이유는 동태적 패널회귀모형의 특성에 따른 모형의 한계에 기인한다. 동태적 패널회귀모형을 추정할 때 설명변수의 내생성을 통제하기 위해 각 설명변수의 가능한 모든 시차항을 도구변수로 활용한다. 기후변화가 전 세계 공통된 추세로 진행된다는 점을 감안하면 WRI는 기후변화에 따른 재해의 빈도와 피해의 정도 등을 포함하고 있으므로, 두 국가 이상의 WRI를 설명변수에 포함시킬 경우 도구변수간 상관관계 증대로 인한 다중공선성(multicollinearity)의 위험이 있다. 이 경우 추정치가 불안정하고 추정치의 표준오차가 확대되는 문제가 발생한다. 또한, System GMM은 내생성 해결을 위해 많은 도구변수를 사용하므로 설명변수가 많아질수록 도구변수 폭주(instrument proliferation) 문제도 발생할 우려가 있다. 실제로 두 WRI를 모두 포함하여 추정을 시도한 결과 모든 추정치의 계수가 출력되지 않는 등 문제를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 미국 WRI와 중국 WRI를 개별적으로 포함한 모형을 추정하였다.

반응인 $\gamma_{1,k}$ 와 기후변화 리스크 지수에 대한 울산지역 산업 실질매출의 추가적인 반응인 $\gamma_{2,k}$ 의 합 ($\gamma_{1,k} + \gamma_{2,k}$)으로 기후변화가 울산지역 산업 실질매출에 미치는 총 영향을 식별할 수 있다. 이 경우 $\gamma_{1,k}$ 와 $\gamma_{2,k}$ 가 (1) 유의하게 추정되는지 (2) 어떤 방향으로 나타나는지 여부가 중요한 쟁점이 된다. 미국 WRI를 포함한 두 번째와 세 번째 모형의 경우 미국(또는 중국)의 기후변화 리스크 지수에 대한 산업 매출의 반응인 $\gamma_{3,k}$ 와 울산지역 산업 매출의 추가적인 반응을 나타내는 $\gamma_{4,k}$ 를 합한 $\gamma_{3,k} + \gamma_{4,k}$ 로 울산지역 산업 실질매출이 미국(또는 중국) 기후변화 리스크에 반응하는 정도를 살펴볼 수 있다.

3. 분석 결과

모형의 추정 결과는 [표 3]과 같다. 모형 (1)은 국내 광역시도별 기후리스크 지수($CRI_{i,t-k}$)만 설명 변수로 사용하여 추정된 모형으로, 울산지역 산업 실질매출의 총 반응의 정도는 통계적으로 유의한 계

수들의 합($\sum_{k=0}^2 \gamma_{1,k} + \sum_{k=0}^2 \gamma_{2,k}$)인 $-0.026(=-2.6\%)$ 으로 나타난다. 이는 기후리스크 지수가 1단위

증가하는 경우 울산울산을 포함한 전국 산업 매출이 2.6% 감소함을 의미하며, 만약 서론에서 논의한 바와 같이 기후변화가 비선형적으로 진행되어 기후리스크 지수가 1단위보다 많이 증가하게 되는 경우에는 산업 실질매출도 2.6% 보다 더 크게 감소할 수 있음을 의미한다. 한편, 기후변화가 울산지역 산업의

실질매출에 미치는 추가적인 효과($\sum_{k=0}^2 \gamma_{2,k}$)는 유의하지 않게 추정되었다. 미국 WRI를 포함한 모형

(2)의 경우에는 국내 기후리스크에 대한 실질매출의 반응이 $-0.014(=-1.4\%)$ 로 추정되었으며, 이 경우에도 울산지역 산업에 대한 추가적인 효과는 유의하지 않았다. 그러나 미국 WRI에 대해서는 국내 산업들의 실질매출이 $-0.051(=-5.1\%)$ 감소하는 반면, 울산지역은 $-0.022(=-2.2\%)$ 추가로 더 감소하는 것으로 분석되었다. 한편, 중국의 WRI를 포함한 모형 (3)의 경우에는 중국의 WRI가 증가할 경우 국내 산업의 전반적인 실질매출은 $-0.020(=-2.0\%)$ 만큼 감소하지만 울산지역 산업에 추가적으로 미치는 효과는 없는 것으로 나타났다.

이러한 추정 결과는 다음과 같은 점들을 시사한다. (1) 국내에서 발생하는 기후변화는 산업의 실질매출을 감소시키는 효과가 있지만, 울산지역 산업의 실질매출이 기후변화에 대해 반응하는 정도는 전국 수준과 크게 다르지 않다. (2) 미국의 기후변화 리스크가 상승하는 경우 전국 산업의 실질매출이 크게 감소한다. (3) 울산지역 산업의 경우 이에 더해 실질매출이 추가로 감소하는 효과가 있어 미국의 기후변화 리스크에 더욱 민감하다. (4) 중국의 기후변화 리스크가 상승하는 경우 전국 산업의 실질매출이 감소하나 울산지역 산업에 추가적으로 미치는 영향은 나타나지 않는다.

4. 강건성 검정

[표 4]는 강건성 검정을 위해 시차를 $t-1$ 로 조정하여 모형을 추정²⁵⁾한 결과이다. 앞선 모형의 결과와

25) 본고에 보고하지는 않았으나 $t-3$ 시차까지 감안하는 경우, $t-3$ 기에는 기후리스크 지수에 대한 계수가 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 수출 및 공급망을 통한 기후리스크의 파급이 3년 이상 지속된다고는 보기 어려움을 시사한다.

같이 각 지역의 기후리스크가 국내 산업에 미치는 영향은 -0.005 ~ -0.008(-0.5~-0.8%) 범위에서 유의하게 나타났으나, 울산지역의 산업에 미치는 추가적인 영향은 유의하지 않은 것으로 나타났다. 한편, 미국의 WRI에 대해서는 전국 평균적인 반응 외에 울산지역에서 나타나는 추가적인 반응은 보이지 않았다. 이를 앞선 모형의 결과와 비교해 보면, 미국 WRI의 효과는 울산지역에 2기의 시차를 두고 추가적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 한편, 중국 WRI에 대한 반응 역시 앞선 모형과 비슷한 수준으로 나타나고 있으며, 울산지역에만 추가적으로 미치는 효과는 나타나지 않았다.

[표 3]

기후변화가 울산지역 기업 매출에 미치는 영향

Variables	Dependent variable: $\ln y_{it}$		
	(1)	(2)	(3)
$\ln sales_{t-1}$	0.832** (60.53)	0.844** (62.95)	0.857** (62.88)
$\ln sales_{t-2}$	0.009 (0.89)	0.007 (0.75)	0.002 (0.22)
CRI_{it}	-0.008** (-6.27)	-0.009** (-7.20)	-0.007** (-5.80)
CRI_{it-1}	-0.011** (-8.11)	-0.002 (-1.32)	-0.001 (-0.83)
CRI_{it-2}	-0.007** (-4.69)	-0.005** (-3.25)	-0.000 (-0.11)
$CRI_{it} \cdot I(reg = Ulsan)$	-0.002 (-0.17)	-0.008 (-0.85)	-0.007 (-0.70)
$CRI_{it-1} \cdot I(reg = Ulsan)$	0.010 (1.33)	0.007 (0.96)	-0.000 (-0.01)
$CRI_{it-2} \cdot I(reg = Ulsan)$	0.007 (0.66)	0.001 (0.09)	0.004 (0.26)
$WRI_{i,t}^{US}$		-0.024** (-7.02)	
$WRI_{i,t-1}^{US}$		-0.022** (-5.66)	
$WRI_{i,t-2}^{US}$		-0.005** (-2.27)	
$WRI_{i,t}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$		0.000 (0.01)	
$WRI_{i,t-1}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$		-0.008 (-0.92)	
$WRI_{i,t-2}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$		-0.022** (-2.14)	
$WRI_{i,t}^{CH}$			-0.004** (-3.85)
$WRI_{i,t-1}^{CH}$			-0.010** (-10.66)
$WRI_{i,t-2}^{CH}$			-0.006** (-6.04)
$WRI_{i,t}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$			0.001 (0.20)
$WRI_{i,t-1}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$			-0.003 (-1.02)
$WRI_{i,t-2}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$			0.000 (0.15)
N	156,474	156,474	156,474
R^2	0.9575	0.9593	0.9599
AB test	AR(1)	0.0000	0.0000
	AR(2)	0.3374	0.2796

주: System GMM 추정의 경우 동적패널모형이 적합하기 위해 오차항의 1차 자기상관(AR(1))은 존재하는 동시에 2차 자기상관(AR(2))은 존재하지 않아야 한다. Arellano-Bond(AB) 검정의 경우 자기상관이 존재하지 않는다는 귀무가설에 대해 p-value가 각각 AR(1)의 경우 0에 가까우며 AR(2)의 경우 0.1 보다 큰 값을 갖게 되어 모형의 적합성이 있다고 판단된다.

자료: 저자계산

[표 4]

기후변화가 울산지역 기업 매출에 미치는 영향

Variables		Dependent variable: $\ln y_{it}$		
		(1)	(2)	(3)
$\ln sales_{t-1}$		0.812** (54.84)	0.828** (67.62)	0.829** (65.14)
CRI_{it}		-0.008** (-6.54)	-0.008** (-7.52)	-0.005** (-4.95)
CRI_{it-1}		-0.008** (-7.20)	-0.001 (-0.53)	-0.001 (-1.02)
$CRI_{it} \cdot I(reg = Ulsan)$		0.003 (0.36)	-0.003 (-0.32)	-0.003 (-0.37)
$CRI_{it-1} \cdot I(reg = Ulsan)$		0.000 (0.03)	-0.010 (-1.02)	-0.010 (-1.03)
$WRI_{i,t}^{US}$			-0.026** (-8.74)	
$WRI_{i,t-1}^{US}$			-0.023** (-7.36)	
$WRI_{i,t}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$			0.012 (1.49)	
$WRI_{i,t-1}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$			-0.017 (-1.60)	
$WRI_{i,t}^{CH}$				-0.008** (-10.76)
$WRI_{i,t-1}^{CH}$				-0.002** (-2.67)
$WRI_{i,t}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$				0.004 (1.33)
$WRI_{i,t-1}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$				-0.003 (-1.13)
N		156,474	156,474	156,474
R^2		0.9677	0.9683	0.9684
AB test	AR(1)	0.0000	0.0000	0.0000
	AR(2)	0.3249	0.2957	0.3140

주: Arellano-Bond(AB) 검정 결과 자기상관이 존재하지 않는다는 귀무가설에 대해 p-value가 각각 AR(1)의 경우 0에 가까우며 AR(2)의 경우 0.1 보다 큰 값을 갖게 되어 모형의 적합성이 있다고 판단된다.
자료: 저자계산

[표 5]는 시차를 $t-3$ 까지 설정하는 경우의 모형 추정 결과를 나타낸다. AB(Arellano-Bond) 검정 결과, 오차항간 2차 자기상관이 나타나는 것으로 나타나 $t-3$ 까지 시차를 두는 것은 적합하지 않음을 알 수 있다. 이는 시차를 늘릴 경우 도구변수의 수가 기하급수적으로 증가하여 도구변수의 유효성이 크게 낮아짐을 보여준다.²⁶⁾ 한편, 추정된 모형의 계수 추정치는 앞서 추정한 모형의 결과와 크게 달라지지 않았다.

26) 기업활동조사와 같이 관측기간이 비교적 짧은(20년 이내) 패널자료 분석 시 도구변수를 너무 많이 사용하게 되면 도구변수 폭주문제(instrument proliferation)가 발생하게 된다.

[표 5]

기후변화가 울산지역 기업 매출에 미치는 영향

Variables	Dependent variable: $\ln y_{it}$		
	(1)	(2)	(3)
$\ln sales_{t-1}$	0.854** (57.42)	0.864** (60.53)	0.867** (57.63)
$\ln sales_{t-2}$	-0.005 (-0.38)	-0.013 (-1.03)	-0.015 (-1.14)
$\ln sales_{t-3}$	0.034** (3.81)	0.039** (4.81)	0.040** (4.72)
CRI_{it}	-0.006** (-4.24)	-0.005** (-3.14)	-0.005** (-3.02)
CRI_{it-1}	-0.009** (-6.03)	-0.001 (-0.60)	-0.001 (-0.53)
CRI_{it-2}	-0.010** (-4.80)	-0.003 (-1.25)	-0.003 (-1.55)
CRI_{it-3}	-0.004** (-2.64)	-0.004** (-2.15)	-0.003* (-1.93)
$CRI_{it} \cdot I(reg = Ulsan)$	0.006 (0.63)	-0.005 (-0.46)	0.010 (0.64)
$CRI_{it-1} \cdot I(reg = Ulsan)$	0.009 (1.30)	0.010 (1.04)	0.021 (1.35)
$CRI_{it-2} \cdot I(reg = Ulsan)$	0.011 (1.24)	0.011 (0.83)	0.013 (0.90)
$CRI_{-3} \cdot I(reg = Ulsan)$	-0.010 (-1.40)	-0.010 (-0.89)	0.003 (0.19)
$WRI_{i,t}^{US}$		-0.031** (-8.49)	
$WRI_{i,t-1}^{US}$		-0.028** (-5.87)	
$WRI_{i,t-2}^{US}$		-0.021** (-6.58)	
$WRI_{i,t-3}^{US}$		-0.005* (-1.67)	
$WRI_{i,t}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$		-0.011 (-0.87)	
$WRI_{i,t-1}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$		-0.006 (-0.45)	
$WRI_{i,t-2}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$		-0.024** (-2.43)	
$WRI_{i,t-3}^{US} \cdot I(reg = Ulsan)$		-0.008 (-0.75)	
$WRI_{i,t}^{CH}$			-0.004** (-2.94)
$WRI_{i,t-1}^{CH}$			-0.009** (-8.97)
$WRI_{i,t-2}^{CH}$			-0.005** (-3.62)
$WRI_{i,t-3}^{CH}$			-0.001 (-0.67)
$WRI_{i,t}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$			-0.001 (-0.24)
$WRI_{i,t-1}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$			-0.006* (-1.68)
$WRI_{i,t-2}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$			-0.000 (-0.07)
$WRI_{i,t-3}^{CH} \cdot I(reg = Ulsan)$			0.011** (2.44)
N	156,474	156,474	156,474
R^2	0.9677	0.9683	0.9684
AB test	AR(1)	0.0000	0.0000
	AR(2)	0.0160	0.0046

주: Arellano-Bond(AB) 검정 결과 자기상관이 존재하지 않는다는 귀무가설에 대해 p-value가 AR(1)와 AR(2) 모두 0.05보다 작은 값을 가지므로 모형의 적합성이 있다고 판단할 수 없다.

자료: 저자계산

5. 토론 및 시사점

미국의 기후변화 리스크 또는 재해 위험이 높아진다는 것은 미국과 교역 관계에 있는 우리나라 기업들의 공급망 측면에서의 리스크가 높아짐을 의미한다. 이상의 추정 결과는 미국의 기후변화 리스크가 이러한 공급망 경로를 통해 울산지역 산업(석유화학, 자동차, 조선 등)에 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다.

Cao et al.(2024), Cevik(2024), Er Kara et al.(2021), Sun et al.(2024) 등은 기후 불확실성에 따른 공급망 중단 및 경제적 손실 증폭을 분석하여 기후변화 리스크가 글로벌 무역망을 통해 주요 무역국의 생산성 저하, 비용 증가, 매출 감소를 초래한다고 지적한다. Cao et al.(2024)은 기후 위험(물리적 리스크)이 발생할 경우 미국 기업의 무역신용이 10-20% 감소한다고 분석하였다. 이러한 무역신용의 감소는 주로 신용장에 의해 거래되는 원자재 수출의 감소로 이어질 수 있기 때문에 울산지역 산업의 원자재 수입 비용이 증가하고 생산이 감소할 수 있음을 시사한다. 또한, Cevik(2024)은 극한 기상(허리케인, 가뭄)이 도로·항만·철도 인프라를 파괴해 글로벌 무역 병목현상을 일으킨다고 지적한다. Er Kara et al.(2021)은 시나리오 분석을 통해 기후변화 리스크가 제조·물류 비용을 상승시키고 공급망의 효율성을 떨어뜨린다고 밝혔다. Sun et al.(2024)은 기후변화로 인한 극한 기상현상이 발생한 국가뿐만 아니라 그 국가와 경제적으로 연결된 국가들의 생산에도 실질적인 손실을 초래함을 보여주었다, 특히 미국, 중국과 같이 공급망 중심에 있는 국가에서 발생한 기후 재해는 전 세계적으로 파급효과가 전파될 수 있다는 사실을 실증적으로 밝히고 있다.

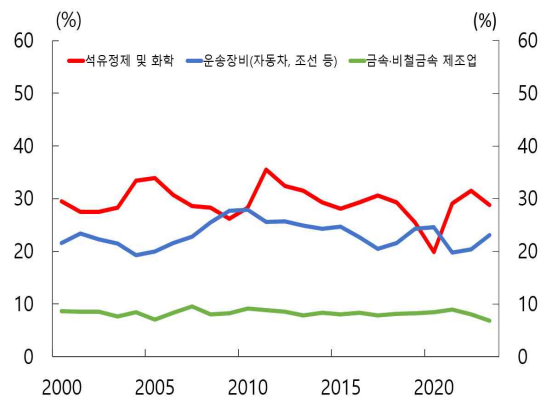
실제로 미국 내 자연재해로 물류망이 마비되는 경우, 우리나라의 원자재·중간재 수입 및 유통이 지연되어서 국내 산업생산과 매출 감소로 이어질 수 있다. 2021년 2월 텍사스의 극심한 한파에 따른 현지 반도체 공장 및 석유화학 시설의 정전은 이러한 가능성을 보여주는 대표적인 사례이다. 당시 글로벌 공급망의 한 축(node)에 위치한 해당 산업시설들의 생산 차질은 글로벌 반도체 공급 부족으로 이어져 당시 우리나라 자동차산업의 생산에도 차질이 발생하였다. 뿐만 아니라, 울산지역은 액화천연가스(LNG), 반도체 소재와 장비, 기타 화학원료 등을 허리케인 발생지역과 인접한 항로를 거쳐서 미국에서 수입하기 때문에 허리케인 등으로 항만이 폐쇄되거나 물류망이 교란되는 경우 원자재의 조달이 지연되고 그 가격도 일시적으로 급등할 리스크가 존재한다. 특히, 울산은 한국 최대의 중화학공업 지대로 GRDP에서 조선, 자동차, 석유정제·화학, 비철금속 등 중화학공업이 차지하는 비중이 60~70%에 이르는데, 대규모 설비산업으로서 원자재를 수입하고 제품을 생산하여 수출하는 중화학공업의 특성상 주요 무역대상국의 경제환경에 많은 영향을 받게 된다.

[그림 5] 울산지역 GRDP중 중화학공업 비중



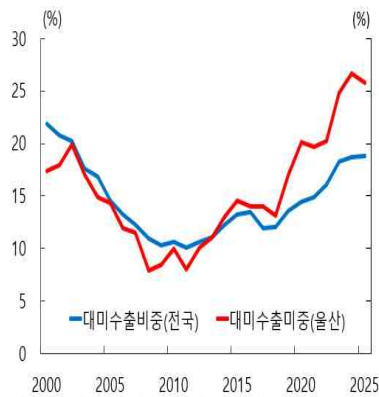
자료: 통계청

[그림 6] 울산지역 GRDP중 조선, 자동차 등 비중



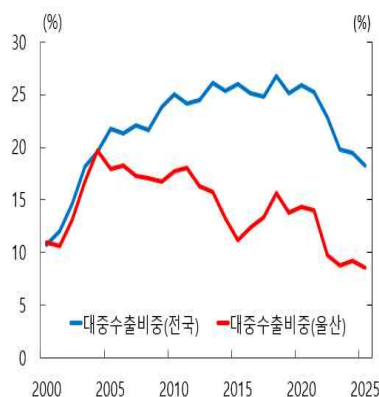
한편 미국의 기후변화는 울산의 수출 측면에서도 큰 영향을 미칠 수 있다. 기후변화로 수출대상국의 수입 수요가 감소하는 경우 대체 시장을 찾거나 수요가 회복되는데 상당한 시간이 소요될 수 있기 때문이다. 울산지역의 주요 수출국에 대한 수출비중을 살펴보면 글로벌 금융위기 이후 대미수출은 지속적으로 증가하는 반면 중국 및 기타국가들에 대한 수출비중은 점차 감소하고 있다. 이는 즉, 미국에서 대규모 기후 재해가 발생하는 등 기후변화의 물리적 리스크가 증대될 경우 울산지역 산업의 수출이 크게 위축될 수 있음을 시사한다. 특히, 자동차와 같은 내구재 수출은 재해 충격 및 이에 따른 경기변동에 민감하므로 미국 내 수요 위축 시 울산지역 기업의 매출감소로 이어질 수 있다. 구체적으로, 현대차의 북미시장 수출 비중이 60%에 이르고 있는 점을 고려할 때, 허리케인 등 미국 현지 기후 재해로 자동차 딜러 네트워크가 마비되거나 자동차 수요가 위축되는 경우 현대차 수출, 생산 및 매출이 크게 영향을 받을 것임을 예상할 수 있다. 한편, 울산 조선업은 글로벌 해운·에너지 기업들의 발주에 의존하는데, 미국발 재해로 경기가 둔화되거나 유가 등 에너지시장에 변동이 발생하면 선박 발주가 취소되거나 연기될 수 있어 매출 감소로 이어질 수 있다.

[그림 7] 울산 대미 수출비중



자료: 한국무역통계진흥원

[그림 8] 울산의 대중 수출비중



자료: 한국무역통계진흥원

[그림 9] 현대차 대북미시장 수출비중



자료: 한국자동차모빌리티산업협회

실증분석 결과에서 미국 WRI가 전국 산업의 실질매출에 부정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 울산지역의 산업에 추가적인 영향을 미치는 데에는 이러한 울산지역의 산업과 수출 구조가 원인이라 지목할 수 있다. 반면, 모형 추정 결과에서 중국 WRI가 울산지역에 미치는 추가적인 영향은 나타나지 않았는데, 이는 울산의 대중 수출비중은 전국 대비 높지 않기 때문인 것으로 보인다.

한편, 울산의 높은 산업 및 기업 구조의 집중도는 주요 교역대상국의 기후변화에 더 크게 영향을 받게 됨을 의미할 뿐만 아니라 다른 지역에 비해 기후변화에 따른 기업 매출 감소와 전반적인 경제 충격을 완화할 수 있는 회복력(resilience)이 상대적으로 강하지 않다는 점을 시사한다. 서비스업이나 내수산업의 비중이 높은 지역은 대외 충격이 발생하는 경우에도 이러한 산업들이 일정부분 완충역할을 할 수 있지만, 울산의 경우 주요 기업들의 실적 부진은 지역경제의 부진으로 직결될 수 있다. 이는 주요 교역대상국의 기후변화로 인한 충격이 울산지역 경제에 미치는 리스크가 다른 지역들보다 더욱 높아질 수 있음을 시사한다.

V. 결론 및 시사점

본 연구는 기후변화가 울산지역 산업에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고 취약성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 우리나라 광역시도 단위의 기후변화 리스크 지수(CRI)를 구축하고 미국과 중국의 기후리스크 수준을 나타내는 WRI(World Risk Index)와 한국 기업의 패널자료를 사용하였으며, 동태적 패널모형(System GMM)을 구성한 뒤 각 기후요인이 울산지역 산업매출에 미치는 영향을 추정하였다. 특히, 기후리스크 노출의 이질성을 반영하기 위해 울산지역 더미 변수와의 교차항을 포함하여 분석함으로써 울산지역 산업의 특수성을 강조하였다.

분석 결과 기후변화의 물리적 리스크는 국내 산업에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으나 울산지역만의 추가적인 반응은 유의하지 않은 것으로 추정되었다. 한편, 미국의 WRI의 경우에는 전체 산업의 매출에 부정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라, 울산지역 산업에 추가적으로 부정적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 반면, 중국의 WRI는 전국적으로 유의한 매출 감소를 초래하지만, 울산지역만의 추가적인 영향은 통계적으로 유의하지 않았다. 이러한 결과는 울산지역 산업이 미국 기후리스크에 구조적으로 더 취약하다는 것을 시사한다. 이러한 지역별 취약성의 원인은 울산의 산업구조와 수출입 경로 특성에서 기인한다.

이상의 분석 결과를 바탕으로 다음과 같은 정책적 시사점을 도출할 수 있다. 첫째, 기후리스크가 산업에 미치는 충격이 지역 및 산업구조에 따라 상이하므로 정책 대응 또한 이에 따라 세분화되어야 한다. 특히 울산과 같은 제조업 중심 지역은 산업이 기후변화에 미치는 부작용(이행 리스크)을 최소화하는 데만 모든 정책적 역량을 집중하기보다, 진행되고 있는 기후변화의 영향(물리적 리스크)을 완충할 수 있는 노력 또한 필요하다. 예를 들어, 에너지 및 원자재 공급망 다변화와 기후적응형 생산설비 도입 등을 통해 이러한 리스크를 완화할 필요가 있다. 둘째, 기후리스크의 조기경보체계가 필요하다. 본 연구에서 활용한 CRI와 같은 지역별 기후지수는 중앙 및 지방정부가 기후충격에 선제적으로 대응할 수 있는 유용한 도구가 될 수 있다. 한편 울산지역의 경우에는 국내 기후리스크뿐 아니라 미국의 기후리스크 또한 상당한 영향을 미치므로, 미국 지방정부 등과의 정기적인 정보 공유체계 구축 등을 통해 미국의 기후리스크 또한 면밀히 모니터링하는 노력이 필요하다. 셋째, 해외 기후리스크의 파급효과를 고려한 무역 및 산업정책의 재검토가 필요하다. 미국, 중국 등 주요 무역상대국의 기후리스크 수준이 한국 산업에 직접적인 영향을 미친다는 본 연구의 결과는 기후리스크가 단순한 환경문제를 넘어 실물경제에 심대한 파급효과를 미칠 수 있는 글로벌 리스크임을 의미한다. 따라서 이러한 리스크를 완화하기 위한 외교·통상정책, 에너지안보정책 등 범정부적 차원의 대응이 요구된다. 마지막으로, 기업 차원에서도 기후리스크에 대한 대응 역량을 제고하고, 공급망 리스크관리 전략을 강화할 필요가 있다. 최근 TCFD(Task Force on Climate-related Financial Disclosures) 권고안 등 기후리스크와 관련된 국제적 공시 기준이 확산되고 있는 만큼, 기후관련 물리적·전이 리스크에 대한 평가체계를 내부적으로 구축해야 할 것이다.

본 연구는 해외 기후리스크, 특히 미국과 중국의 물리적 기후위험 수준이 울산지역 산업에 미치는 영향을 동태적 패널모형을 통해 정량적으로 추정하고, 이 과정에서 울산지역 산업이 구조적으로 이러한 기후변화에 더욱 취약할 수 있음을 실증적으로 규명하였다는 점에서 중요한 의의를 갖는다. 이는 기후리스크가 지역 단위에서도 산업구조, 수출입 경로, 에너지 및 원자재의 공급망 구조 등에 따라 서로 다른 영향을 미칠 수 있음을 뒷받침하는 실증적 근거를 제공한다. 특히 제조업 비중이 높고, 정유·석유화학 등 장치산업에 특화된 울산지역의 경우, 해외 기후충격이 원료 수급 차질이나 글로벌 수요 둔화를 통해 빠르게 매출에 반영될 수 있음을 지적하였다.

다만, 본 연구는 지역 단위에서 기후변화의 물리적 리스크에 따른 영향을 분석하는 과정에서 사용할 수 있는 자료의 유용성 등의 제약으로 분석의 범위가 매출액에 제한되었다는 한계를 지닌다. 향후 기초자료의 한계가 개선된다면 투자, 수출 등에 미치는 영향과 같이 기후변화의 보다 종합적인 영향을 살펴보기 위해 본 연구를 확장할 수 있을 것이다. 한편, 울산지역의 사례를 다른 지역과 비교하는 방향으로도 본 연구를 확장할 필요가 있다. 예를 들어, 수도권이나 수도권 외 서비스업 중심 지역, 농축수산업 중심 지역 등과의 비교를 통해 산업적 및 경제적 구조의 차이가 기후충격에 대한 노출도와 취약성에 어떠한 영향을 미치는지를 보다 정밀하게 분석할 수 있을 것이다. 이를 통해 지역별 기후리스크 대응전략의 차별적 설계 및 정책 우선순위 설정에 기여할 수 있으며, 산업구조나 지역경제 여건을 고려하여 국가 차원의 기후적응정책이 보다 정교하게 차등 적용될 수 있도록 기여할 수 있을 것이다.

< 참고문헌 >

- 김재운, 정선문, 이성태, “수출입경로를 통한 해외 기후변화 물리적리스크의 국내 파급영향,” BOK 이슈 노트, No. 2023-26, 2023.
- 박경훈, 박종욱, 박상우, 임준혁, 김찬우, 이종웅, 곽윤영, “기후변화 대응이 거시경제에 미치는 영향,” BOK 이슈노트, No. 2021-23, 2021.
- 이승희, “기상 여건 변화가 물가에 미치는 영향과 시사점,” KDI 현안분석, 2024.
- 이지원, “국내 기후변화 물리적 리스크의 실물경제 영향 분석,” BOK 경제연구, No. 2023-26, 2023.
- 임웅지, 이동재, 이윤수, 박창현, “우리나라 물가수준의 특징 및 시사점: 주요국 비교를 중심으로,” BOK 이슈노트, No. 2024-14, 2024.
- 정원석, 이솔빈, 조은정, “이상기후가 실물경제에 미치는 영향,” 경제학연구, 73(1), 2025
- 조병수, 민초희, “기후변화가 국내 인플레이션에 미치는 영향,” BOK 이슈노트, No.2024-18, 2024.
- 채여라, 황진환, 김보람, 연정인, 김지원, “기후변화 리스크의 부산지역 주요 산업에 대한 경제적 영향 분석,” 한국은행 부산본부, No. 2024-01, 2024.
- Adger, W. N., S. Dessai, M. Goulden, et al., “Are There Social Limits to Adaptation to Climate Change?” *Climatic Change*, Vol. 93, 2009.
- Akbari, M., Sodhi, M.S., and Pincus, J., “Supply chain serviceability under climate change with application in the Arctic,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2025.
- American Academy of Actuaries, Canadian Institute of Actuaries, Casualty Actuarial Society, and the Society of Actuarie, “Actuaries Clima Index: Development and Design” 2018
- Baek C, Yoo S-H. Dynamic Changes in the Export Competitiveness of the South Korean Oil Refining Industry. *Applied Sciences*. 2022; 12(6)
- Berg, K., C. Curtis, and N. Mark, “GDP and Temperature: Evidence on Cross-Country Response Heterogeneity,” NBER Working Paper, 2023.
- Bilal, A., and D. Kanzig, “The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature,” NBER Working Paper, 2024.
- Burke, M., M. Hsiang, and E. Miguel, “Global Non-linear Effect of Temperature on Economic Production,” *Nature*, Vol. 527, No. 7577, 2015.
- Byrne, J. P., and P. A. Vitenu-Sackey, “The Macroeconomic Impact of Global and Country-Specific Climate Risk,” *European Association of Environmental and Resource Economists*, vol. 87(3), pp.655-682, 2024.
- Chabot, F., and P. Bertrand, “Assessing Sector Vulnerabilities to Physical Climate Risks: The Case of France,” *Structural Change and Economic Dynamics*, Forthcoming, 2025.
- Colacito, R., B. Hoffmann, and T. Phan, “Temperature and Growth: A Panel Analysis of the United States,” *Journal of Money, Credit and Banking*, Vol. 51, No. 2-3, 2019.
- Dell, M., F. Jones, and A. Olken, “Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century,” *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol. 4, No. 3,

2012.

- Cevik, V.A., “Impacts of Climate Change on Logistics and Supply Chains,” *Journal of Disaster and Risk*, Vol. 7, No. 2, 2024.
- Dong, T., Cui, X., Zhou, D., and Chan, K.C., “Climate change uncertainty and supply chain financing,” *The British Accounting Review*, 2024.
- Eckstein, D., V. Kunzel, L. Schafer, and M. Wings, “Global Climate Risk Index 2020: Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-related Loss Events in 2018 and 1999 to 2018,” *Germanwatch*, 2019.
- Er-Kara, M., Ghadge, A., and Bititci, U.S., “Modelling the impact of climate change risk on supply chain performance,” *International Journal of Production Research*, Vol. 59, No. 24, 2021.
- Faccia, D., M. Parker, and L. Stracca, “Feeling the Heat: Extreme Temperatures and Price Stability,” *ECB Working Paper*, 2021.
- Garschagen, M., D. Doshi, J. Reith and M. Hagenlocher, “Global Patterns of Disaster and Climate Risk - An Analysis of the Consistency of Leading Index-based Assessments and Their Results,” *Climatic Change*, Springer, vol. 169(1), pages 1–19, 2021.
- Germanwatch, “Climate Risk Index 2025: Who suffers most from extreme weather events?” 2025
- Hamilton, J. D., “Why You Should Never Use the Hodrick–Prescott Filter,” *Review of Economics and Statistics*, Vol. 100, No. 5, 2018, pp.831–843.
- Haraguchi, M., and U. Lall, “Flood Risks and Impacts: A Case Study of Thailand’s Floods in 2011 and Research Questions for Supply Chain Decision Making,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 14, No. 3, 2015.
- Hope, C., J. Anderson, and P. Wenman, “Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model,” *Energy Policy*, Vol. 21, No. 3, 1993.
- Kiley, M., “Growth at Risk from Climate Change,” *Fed Discussion Series*, 2021–054, 2021.
- Kim, H., C. Matthes, and T. Phan, “Severe Weather and the Macroeconomy,” *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol.17(2), 2025.
- Kim, S., M. M. Bennett, T. van Gevelt, and P. Joosse, “Urban Agglomeration Worsens Spatial Disparities in Climate Adaptation,” *Scientific Reports*, Vol. 11, 2021.
- Lewis, P., W. A. Chiu, E. Nasser, J. Proville, A. Barone, C. Danforth, B. Kim, J. Prozzi, and E. Craft, “Characterizing vulnerabilities to climate change across the United States,” *Environment International*, Vol.172, 2023,
- Mimura, N., R. S. Pulwarty, D. M. Duc, et al., “Adaptation Planning and Implementation,” *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC WGII AR5, 2014.
- Nam, Jang-Keun, “A Comparative Analysis of the Competition Structure among Main Countries in the Chinese Petrochemical Industry,” *KIET Industrial Economic Review*, Vol. 19 No. 4, pp. 40–60, 2014

- Nordhaus, W., and Z. Yang, “A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Alternative Climate–Change Strategies,” *American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, 1996.
- Pretis, F., M. Schwarz, K. Tang, K. Haustein, and R. Allen, “Uncertain Impacts on Economic Growth When Stabilizing Global Temperatures at 1.5° C or 2° C Warming,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 376, No. 2119, 2018.
- Smith, J. B., J. M. Vogel, and J. E. Cromwell III, “Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity,” in *Sustaining Environmental Capital: Protecting Society and the Economy*, World Bank, 2017.
- Sun, Y., Zhu, S., and Wang, D., “Global supply chains amplify economic costs of future extreme heat risk,” *Nature*, Vol. 627, 2024.
- Welle, T., and J. Birkmann, “The World Risk Index – An Approach to Assess Risk and Vulnerability on a Global Scale,” *Journal of Extreme Events*, Vol. 2, No. 01, 2015.
- Zhou, N., Vilar–Zanon, J. L., Garrido, J., and Heras–Martinez, A. J. (2024). “Measuring climate change from an actuarial perspective: A survey of insurance applications,” *Global Policy*, 15(S7), 34-46.
- Zhou, Y., Wu, S., Liu, Z. et al. “The asymmetric effects of climate risk on higher–moment connectedness among carbon, energy and metals markets.” *Nature Communications* 14, 7157 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42925-9>

< 부록1 >

[표 A1]

기술통계량

	Obs.	Mean	Std. dev	Min	Max
CRI_{it}	156,474	-0.9137	0.9197	-2.7748	2.3526
$WRI_{i,t}^{CH}$	156,474	23.5563	1.6723	20.8500	40.9200
$WRI_{i,t}^{US}$	156,474	23.5537	1.6573	21.8300	24.2700
$\ln(rconsumption)$	156,474	13.6808	0.1019	13.4818	13.8347
$\ln(rgov.consum)$	156,474	13.2245	0.2264	12.0992	12.8590
$\ln(rinvestment)$	156,474	13.0223	0.2557	12.0552	12.9476
$\ln(renewable)$	156,474	13.1810	0.2214	12.6835	13.4699
$\ln(rexport.fob)$	156,474	16.8049	0.9554	15.1746	17.7356
$\ln(rsales)$	156,474	5.9668	1.6109	-4.6052	14.3478
$D(gfc)$	156,474	-0.1079	0.3102	0.0000	1.0000
$D(covid)$	156,474	-0.1274	0.3334	0.0000	1.0000
$yearindex$	156,474	8.2948	4.8587	0.0000	16.0000
$yearindex^2$	156,474	92.4105	81.5494	0.0000	256.0000
$\ln(N.employee)$	156,474	4.8765	1.0876	0.0000	11.5325
$D(\text{건설업})$	156,474	0.0017	0.0411	0.0000	1.0000
$D(\text{광업})$	156,474	0.0005	0.02130	0.0000	1.0000
$D(\text{교육서비스업})$	156,474	-0.4500	0.4975	0.0000	1.0000
$D(\text{금융 및 보험업})$	156,474	-0.0039	0.0622	0.0000	1.0000
$D(\text{농업 임업 및 어업})$	156,474	-0.0065	0.0805	0.0000	1.0000
$D(\text{도매 및 소매업})$	156,474	-0.0540	0.2261	0.0000	1.0000
$D(\text{보건업 및 사회복지})$	156,474	-0.1151	0.3191	0.0000	1.0000
$D(\text{부동산업})$	156,474	-0.0637	0.2443	0.0000	1.0000
$D(\text{임대서비스})$	156,474	-0.0262	0.1597	0.0000	1.0000
$D(\text{수도 하수 폐기물처리})$	156,474	-0.0937	0.2914	0.0000	1.0000
$D(\text{숙박 및 음식점업})$	156,474	0.0310	0.1732	0.0000	1.0000
$D(\text{예술 스포츠 여가 서비스})$	156,474	0.0185	0.1347	0.0000	1.0000
$D(\text{운수 및 창고업})$	156,474	0.0476	0.2130	0.0000	1.0000
$D(\text{전기 가스 공급업})$	156,474	0.0581	0.2339	0.0000	1.0000
$D(\text{천문 과학 기술 서비스})$	156,474	0.0071	0.0839	0.0000	1.0000
$D(\text{정보통신업})$	156,474	0.0004	0.0201	0.0000	1.0000
$D(\text{제조업})$	156,474	0.0178	0.1323	0.0000	1.0000
$D(\text{기타개인서비스})$	156,474	0.0043	0.0651	0.0000	1.0000

[표 A2] 산업 대분류 별, 시도 별 사업체 수

산업분류	강원	경남	경북	광주	대구	대전	부산	서울	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
건설업	123 (6.26)	254 (2.18)	316 (3.85)	460 (13.65)	251 (4.10)	215 (7.07)	665 (5.85)	4,493 (5.88)	244 (8.49)	260 (2.88)	535 (15.43)	162 (4.80)	12 (1.22)	295 (3.61)	168 (2.63)
광업	-	-	-	-	-	-	-	58 (0.08)	-	13 (0.14)	-	-	-	-	-
교육서비스업	3 (0.15)	-	-	-	-	-	26 (0.23)	1,078 (1.41)	-	2 (0.02)	-	-	-	-	-
금융 및 보험업	-	9 (0.08)	-	15 (0.45)	71 (1.16)	15 (0.49)	171 (1.50)	4,466 (5.84)	-	12 (0.13)	3 (0.09)	59 (1.75)	-	-	23 (0.36)
농업, 임업 및 어업	-	-	20 (0.24)	-	-	-	174 (1.53)	44 (0.06)	-	-	-	-	-	12 (0.15)	15 (0.23)
도매 및 소매업	81 (4.12)	321 (2.76)	222 (2.70)	310 (9.20)	404 (6.59)	257 (8.45)	1,106 (9.72)	14,036 (18.36)	16 (0.56)	456 (5.05)	78 (2.25)	144 (4.27)	73 (7.43)	232 (2.84)	272 (4.26)
보건업 및 사회복지 서비스	-	-	-	-	-	-	-	60 (0.08)	-	-	-	-	3 (0.31)	-	-
부동산업	-	83 (0.71)	22 (0.27)	158 (4.69)	48 (0.78)	48 (1.58)	162 (1.42)	2,164 (2.83)	3 (0.10)	98 (1.08)	22 (0.63)	7 (0.21)	37 (3.77)	29 (0.35)	12 (0.19)
사업시설 관리, 사업지원 및 임대서비스업	44 (2.24)	236 (2.03)	230 (2.80)	221 (6.56)	215 (3.51)	223 (7.33)	774 (6.80)	6,313 (8.26)	50 (1.74)	349 (3.86)	213 (6.14)	48 (1.42)	51 (5.19)	19 (0.23)	106 (1.66)
수도, 하수 및 폐기물 처리, 원료 재생업	-	65 (0.56)	136 (1.66)	12 (0.36)	17 (0.28)	12 (0.39)	129 (1.13)	84 (0.11)	76 (2.64)	153 (1.69)	130 (3.75)	61 (1.81)	-	123 (1.51)	23 (0.36)
숙박 및 음식점업	178 (9.05)	118 (1.01)	125 (1.52)	66 (1.96)	138 (2.25)	116 (3.81)	321 (2.82)	2,412 (3.15)	-	140 (1.55)	31 (0.89)	57 (1.69)	262 (26.68)	61 (0.75)	73 (1.14)
예술, 스포츠 및 여가관련 서비스업	266 (13.53)	228 (1.96)	225 (2.74)	57 (1.69)	92 (1.50)	46 (1.51)	123 (1.08)	581 (0.76)	12 (0.42)	104 (1.15)	250 (7.21)	123 (3.65)	351 (35.74)	147 (1.80)	184 (2.88)
운수 및 창고업	158 (8.04)	378 (3.25)	316 (3.85)	316 (9.38)	367 (5.99)	258 (8.48)	1,543 (13.57)	4,215 (5.51)	196 (6.82)	750 (8.30)	404 (11.65)	285 (8.45)	83 (8.45)	320 (3.92)	386 (6.04)
전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업	31 (1.58)	27 (0.23)	43 (0.52)	-	-	-	21 (0.18)	256 (0.33)	31 (1.08)	12 (0.13)	18 (0.52)	76 (2.25)	-	93 (1.14)	-
천문, 과학 및 기술 서비스업	89 (4.53)	204 (1.75)	142 (1.73)	72 (2.14)	91 (1.48)	224 (7.36)	445 (3.91)	5,307 (6.94)	162 (5.64)	173 (1.91)	188 (5.42)	46 (1.36)	3 (0.31)	121 (1.48)	184 (2.88)
정보통신업	147 (7.48)	163 (1.40)	118 (1.44)	160 (4.75)	275 (4.49)	222 (7.30)	178 (1.56)	12,898 (16.87)	57 (1.98)	71 (0.79)	31 (0.89)	139 (4.12)	104 (10.59)	3 (0.04)	93 (1.46)
제조업	837 (42.57)	9,513 (81.75)	6,295 (76.65)	1,521 (45.15)	4,156 (67.82)	1,398 (45.96)	5,449 (47.91)	17,577 (22.99)	2,027 (70.53)	6,414 (70.97)	1,559 (44.95)	2,141 (63.49)	3 (0.31)	6,672 (81.66)	4,847 (75.90)
협회 및 단체, 수리 및 기타 개인서비스업	9 (0.46)	38 (0.33)	3 (0.04)	1 (0.03)	3 (0.05)	8 (0.26)	87 (0.76)	413 (0.54)	-	31 (0.34)	6 (0.17)	24 (0.71)	-	43 (0.53)	-
합계	1,966	11,637	8,213	3,369	6,128	3,042	11,374	76,455	2,874	9,038	3,468	3,372	982	8,170	6,386

주: 표본기간 동안 조사된 산업체 수(중복허용)이며 산업분류는 9차 표준산업분류 체계에서 제시한 대분류로 구분. () 숫자는 해당 지역 사업체수 표본 합계 대비 비율

[표 A3] 산업 중분류 별, 시도 별 사업체 수

산업분류	강원	경남	경북	광주	대구	대전	부산	서울	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
1차 금속 제조업	-	794	697	51	195	70	607	690	148	508	217	121	-	393	152
건축기술, 엔지니어링 및 기타 과학기술 서비스업	86	174	142	72	91	140	392	2711	153	125	188	46	3	118	168
고무 및 플라스틱제품 제조업	54	863	504	288	241	41	237	567	60	539	90	102	-	628	574
금속가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	-	874	491	79	401	30	563	715	230	586	161	114	-	390	305
금융업	-	9	-	15	71	15	119	2359	-	12	3	59	-	-	23
기타 개인 서비스업	9	38	-	1	3	-	39	261	-	-	6	24	-	34	-
기타 기계 및 장비 제조업	61	1841	553	262	564	203	850	1144	268	1062	175	113	-	887	373
기타 운송장비 제조업	-	923	30	-	12	24	449	97	158	24	150	9	-	6	16
기타 제품 제조업	-	57	-	-	-	21	58	343	-	97	-	3	-	3	58
도매 및 상품 중개업	46	286	199	151	267	175	831	10547	13	360	78	79	34	159	198
방송업	86	65	43	42	85	39	36	791	57	6	31	61	51	3	67
부동산업	-	83	22	158	48	48	162	2164	3	98	22	7	37	29	12
비금속 광물제품 제조업	72	267	329	33	37	-	66	741	15	76	191	97	-	258	193
사업시설 관리 및 조경 서비스업	25	71	117	76	77	64	355	2181	-	184	97	6	6	19	25
사업지원 서비스업	19	165	113	145	138	159	419	3743	50	165	116	42	19	-	65
산업용 기계 및 장비 수리업	-	-	15	-	-	-	6	15	-	-	69	-	-	-	-
섬유제품 제조업; 의복 제외	-	168	262	6	699	22	250	693	9	49	-	111	-	71	93
소매업; 자동차 제외	35	35	23	95	95	56	167	2664	3	73	-	38	39	70	74
수상 운송업	-	4	21	-	-	-	300	559	-	18	73	-	-	3	-
숙박업	158	73	62	41	80	53	188	1003	-	79	6	19	249	42	14
스포츠 및 오락관련 서비스업	266	228	225	57	92	46	123	446	12	104	250	123	279	147	184
식료품 제조업	198	463	264	61	99	112	408	1324	-	275	192	362	-	544	769
연구개발업	-	15	-	-	-	62	-	424	-	45	-	-	-	-	16
육상운송 및 파이프라인 운송업	158	339	265	304	367	258	826	2097	129	494	229	285	83	287	370
음료 제조업	-	95	43	-	-	-	-	227	-	-	3	21	-	-	35
음식점 및 주점업	20	45	63	25	58	63	133	1409	-	61	25	38	13	19	59
의료, 정밀, 광학기기 및 시계 제조업	142	181	136	69	109	218	126	678	-	216	-	12	-	156	154
의료용 물질 및 의약품 제조업	84	9	-	-	-	89	6	1453	-	84	-	1	-	140	195
의복, 의복 액세서리 및 모피제품 제조업	-	3	-	-	55	6	108	2313	-	34	-	-	-	56	-
인쇄 및 기록매체 복제업	-	-	-	-	92	-	-	352	-	59	-	-	-	-	32
자동차 및 부품 판매업	-	-	-	64	42	26	108	825	-	23	-	27	-	3	-
자동차 및 트레일러 제조업	136	1654	1506	286	1028	128	541	424	639	743	9	589	-	1388	391
전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업	31	27	43	-	-	-	21	256	31	12	18	76	-	93	-
전기장비 제조업	31	538	296	166	184	42	373	857	83	366	62	44	-	400	410
전문 서비스업	3	15	-	-	-	22	53	1878	9	3	-	-	-	3	-
전문직별 공사업	21	63	93	162	98	145	401	2748	194	130	265	26	12	87	57
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	-	429	826	220	292	260	251	1911	54	958	23	155	3	804	574
종합 건설업	102	191	223	298	153	70	264	1745	50	130	270	136	-	208	111
창고 및 운송관련 서비스업	-	35	30	12	-	-	417	1424	67	238	102	-	-	30	16
출판업	61	83	75	106	184	161	86	7255	-	65	-	78	50	-	26
컴퓨터 프로그래밍, 시스템 통합 및 관리업	-	15	-	3	6	22	56	2043	-	-	-	-	-	-	-
코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	-	-	-	-	-	-	12	168	3	-	3	-	-	14	-
펄프, 종이 및 종이제품 제조업	-	130	67	-	145	6	-	435	-	74	27	103	-	97	128
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	-	65	130	12	17	12	120	60	76	143	130	52	-	114	23
하수, 폐수 및 분뇨 처리업	-	-	6	-	-	-	9	24	-	10	-	9	-	9	-
화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	59	218	263	-	3	126	315	1995	360	341	187	184	-	424	372

주: 표본기간 동안 조사된 산업체이며(연도별 중복 허용) 산업분류는 9차 표준산업분류 체계에서 제시한 중분류로 구분하였으며, 해당산업 소재지역이 세 지역 이하인 경우는 생략하였음

[표 A4] 산업 대분류 별, 광역시도 별, 사업체 별 평균 매출액(십억원, 연간평균)

산업분류	강원	경남	경북	광주	대구	대전	부산	서울	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
건설업	55.7 (8.39)	87.1 (2.62)	254.5 (8.47)	113.5 (12.36)	120.4 (10.32)	152.1 (19.92)	109.7 (3.40)	423.1 (6.69)	63.3 (2.49)	346.8 (22.24)	136.8 (12.86)	80.5 (9.95)	41.4 (11.31)	94.5 (5.59)	95.7 (19.29)
광업	-	-	-	-	-	-	-	27.2 (0.43)	-	32.6 (2.09)	-	-	-	-	-
교육서비스업	1.7 (0.25)	-	-	-	-	-	4.9 (0.15)	35.6 (0.56)	-	22.4 (1.43)	-	-	-	-	-
금융 및 보험업	-	621.2 (18.66)	-	443.1 (48.26)	688.0 (58.97)	168.1 (22.02)	457.1 (14.18)	2,333.7 (36.89)	-	124.4 (7.98)	45.6 (4.29)	261.5 (32.30)	-	-	57.4 (11.58)
농업, 임업 및 어업	-	-	11.9 (0.40)	-	-	-	23.2 (0.72)	161.1 (2.55)	-	-	-	-	-	33.9 (2.00)	48.9 (9.85)
도매 및 소매업	51.3 (7.73)	181.6 (5.46)	67.7 (2.25)	80.4 (8.75)	112.5 (9.64)	115.9 (15.18)	127.7 (3.96)	302.3 (4.78)	61.6 (2.42)	309.3 (19.84)	139.9 (13.16)	70.7 (8.74)	83.5 (22.79)	73.4 (4.34)	56.7 (11.42)
보건업 및 사회복지 서비스	-	-	-	-	-	-	-	11.4 (0.18)	-	-	-	-	2.2 (0.59)	-	-
부동산업	-	101.6 (3.05)	23.6 (0.79)	81.1 (8.84)	75.8 (6.50)	7.5 (0.98)	56.2 (1.74)	61.1 (0.97)	13.1 (0.51)	23.5 (1.51)	27.6 (2.60)	30.5 (3.77)	36.0 (9.81)	11.1 (0.66)	23.2 (4.68)
사업시설 관리, 사업지원 및 임대서비스업	41.8 (6.30)	14.0 (0.42)	13.7 (0.45)	14.3 (1.55)	12.3 (1.06)	57.0 (7.46)	12.0 (0.37)	46.2 (0.73)	13.2 (0.52)	13.8 (0.89)	13.5 (1.27)	7.9 (0.98)	46.2 (12.60)	17.7 (1.05)	24.8 (5.00)
수도, 하수 및 폐기물 처리, 원료 재생업	-	18.4 (0.55)	61.1 (2.03)	6.5 (0.71)	14.5 (1.25)	11.5 (1.50)	15.1 (0.47)	27.7 (0.44)	21.4 (0.84)	59.8 (3.84)	21.0 (1.98)	14.5 (1.79)	-	20.1 (1.19)	26.9 (5.41)
숙박 및 음식점업	62.6 (9.44)	21.2 (0.64)	17.7 (0.59)	13.2 (1.44)	12.5 (1.07)	25.9 (3.40)	33.2 (1.03)	127.4 (2.01)	-	25.7 (1.65)	16.5 (1.55)	9.4 (1.17)	14.7 (4.02)	22.4 (1.32)	21.5 (4.33)
예술, 스포츠 및 여가관련 서비스업	97.1 (14.63)	16.3 (0.49)	14.1 (0.47)	14.6 (1.59)	11.3 (0.97)	22.5 (2.94)	20.4 (0.63)	70.9 (1.12)	13.9 (0.55)	43.1 (2.76)	14.7 (1.39)	14.1 (1.74)	15.5 (4.23)	11.1 (0.66)	14.2 (2.87)
운수 및 창고업	15.4 (2.33)	16.2 (0.49)	34.7 (1.15)	17.2 (1.88)	14.2 (1.21)	15.1 (1.98)	42.8 (1.33)	317.4 (5.02)	21.6 (0.85)	39.0 (2.50)	24.2 (2.28)	10.6 (1.31)	12.3 (3.35)	17.6 (1.04)	12.0 (2.42)
전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업	208.2 (31.38)	2,097.2 (63.01)	2,275.5 (75.72)	-	-	-	2,159.2 (66.97)	1,619.7 (25.61)	1,877.5 (73.76)	290.8 (18.65)	447.2 (42.06)	201.8 (24.93)	-	1,204.4 (71.18)	-
천문, 과학 및 기술 서비스업	11.5 (1.73)	13.5 (0.41)	49.6 (1.65)	17.7 (1.93)	12.6 (1.08)	28.3 (3.70)	33.9 (1.05)	51.8 (0.82)	28.0 (1.10)	51.2 (3.28)	17.0 (1.60)	11.0 (1.36)	18.5 (5.06)	14.9 (0.88)	19.9 (4.01)
정보통신업	32.1 (4.84)	16.4 (0.49)	45.8 (1.52)	15.4 (1.67)	17.7 (1.52)	18.2 (2.38)	27.6 (0.86)	99.7 (1.58)	30.4 (1.20)	35.5 (2.27)	19.9 (1.87)	11.3 (1.40)	40.2 (10.96)	19.6 (1.16)	15.3 (3.08)
제조업	54.2 (8.17)	116.6 (3.50)	128.9 (4.29)	97.6 (10.63)	70.7 (6.06)	111.6 (14.61)	87.9 (2.73)	579.9 (9.17)	401.5 (15.77)	134.6 (8.63)	137.0 (12.89)	83.6 (10.32)	56.0 (15.29)	146.0 (8.63)	79.6 (16.05)
협회 및 단체, 수리 및 기타 개인서비스업	32.0 (4.82)	7.2 (0.22)	6.3 (0.21)	3.6 (0.39)	4.2 (0.36)	30.0 (3.93)	12.9 (0.40)	29.7 (0.47)	-	6.7 (0.43)	2.1 (0.19)	1.9 (0.24)	-	5.3 (0.31)	-
합계	663.6	3,328.6	3,005.0	918.0	1,166.7	763.6	3,224.0	6,325.8	2,545.5	1,559.2	1,063.1	809.5	366.6	1,692.1	496.2

주: 산업분류는 9차 표준산업분류 체계에서 제시한 대분류로 구분. 산업분류내 총매출액으로 () 숫자는 해당 지역 산업 총매출액 대비 비율

[표 A5] 산업 중분류 별, 광역시도 별, 사업체 별 평균 매출액(십억원, 연간평균)

산업분류	강원	경남	경북	광주	대구	대전	부산	서울	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
1차 금속 제조업	-	185.8	490.8	117.5	159.6	111.0	175.8	1,141.5	1,256.2	454.9	88.0	179.8	-	132.3	66.7
건축기술, 엔지니어링 및 기타 과학기술 서비스업	11.3	14.3	49.6	17.7	12.6	25.9	36.4	58.7	18.4	31.0	17.0	11.0	18.5	15.1	20.6
고무 및 플라스틱제품 제조업	33.7	98.5	79.2	84.1	45.8	45.0	70.5	323.7	66.4	46.8	38.2	27.9	-	69.6	47.6
금속가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	-	99.9	47.9	37.8	40.5	63.2	66.7	119.5	87.2	51.7	69.0	35.8	-	70.9	86.5
금융업	-	621.2	-	443.1	688.0	168.1	519.3	2,395.7	-	124.4	45.6	261.5	-	-	57.4
기타 개인 서비스업	32.0	7.2	-	3.6	4.2	-	22.3	17.9	-	-	2.1	1.9	-	3.8	-
기타 기계 및 장비 제조업	58.4	98.4	54.4	73.6	83.7	193.0	42.6	170.3	63.5	67.3	44.7	47.5	-	96.9	63.9
기타 운송장비 제조업	-	237.1	35.4	-	19.0	27.9	87.5	2,906.3	2,249.8	39.1	510.5	2-	-	20.8	66.2
기타 제품 제조업	-	28.6	-	-	-	61.0	16.9	71.8	-	23.9	-	22.0	-	49.3	52.3
도매 및 상품 중개업	67.3	197.6	71.7	102.2	127.5	72.6	109.0	241.9	64.6	362.0	139.9	73.6	70.4	56.1	56.4
방송업	17.7	24.4	24.2	29.5	22.0	43.4	32.7	118.5	30.4	24.2	19.9	18.0	23.1	19.6	20.0
부동산업	-	101.6	23.6	81.1	75.8	7.5	56.2	61.1	13.1	23.5	27.6	30.5	36.0	11.1	23.2
비금속 광물제품 제조업	171.2	59.8	155.2	61.1	44.6	-	29.7	220.7	28.1	49.0	72.7	52.3	-	221.3	62.4
사업시설 관리 및 조경 서비스업	27.4	17.3	12.2	5.8	14.0	6.1	8.5	25.7	-	11.2	10.5	10.7	14.0	17.7	8.1
사업지원 서비스업	60.9	12.5	15.2	18.7	11.4	77.5	15.0	52.4	13.2	16.8	16.0	7.6	25.4	-	11.1
산업용 기계 및 장비 수리업	-	-	24.0	-	-	-	20.7	80.8	-	-	12.6	-	-	-	-
섬유제품 제조업; 의복 제외	-	30.4	34.7	15.1	18.4	12.4	41.5	157.8	85.5	32.9	-	20.7	-	37.4	41.7
소매업; 자동차 제외	30.2	50.5	33.5	63.6	79.6	265.0	197.4	539.2	48.8	38.3	-	50.2	95.0	112.3	57.5
수상 운송업	-	74.6	25.8	-	-	-	50.8	868.9	-	52.1	32.6	-	-	10.3	-
숙박업	61.1	6.9	13.9	18.1	12.9	8.0	44.1	144.2	-	15.4	4.7	8.1	14.9	26.3	33.4
스포츠 및 오락관련 서비스업	97.1	16.3	14.1	14.6	11.3	22.5	20.4	86.8	13.9	43.1	14.7	14.1	18.7	11.1	14.2
식품 제조업	31.9	38.9	38.9	36.6	32.5	281.2	51.0	435.3	-	130.8	41.5	98.5	-	56.7	58.8
연구개발업	-	9.5	-	-	-	17.5	-	22.1	-	109.3	-	-	-	-	12.3
육상운송 및 파이프라인 운송업	15.4	12.2	33.1	17.1	14.2	15.1	25.7	94.9	16.8	24.4	11.5	10.6	12.3	11.7	10.8
음료 제조업	-	141.7	38.3	-	-	-	-	458.9	-	-	67.7	32.4	-	-	204.2
음식점 및 주점업	75.2	44.4	21.4	5.2	12.0	41.0	18.0	115.5	-	39.1	19.3	10.1	12.7	13.8	18.7
의료, 정밀, 광학기기 및 시계 제조업	44.4	41.8	11-	17.7	26.0	31.4	54.0	76.4	-	33.0	-	31.0	-	56.5	38.0
의료용 물질 및 의약품 제조업	58.1	21.2	-	-	-	33.5	78.8	152.8	-	242.9	-	88.6	-	58.6	66.8
의복, 의복 액세서리 및 모피제품 제조업	-	14.3	-	-	24.0	12.0	119.3	145.6	-	24.0	-	-	-	69.6	-
인쇄 및 기록매체 복제업	-	-	-	-	32.9	-	-	26.1	-	17.6	-	-	-	-	17.6
자동차 및 부품 판매업	-	-	-	53.7	91.8	86.3	164.0	309.5	-	344.7	-	91.1	-	79.4	-
자동차 및 트레일러 제조업	45.8	125.9	97.5	96.7	107.6	161.6	201.4	3,835.7	134.6	366.6	21.5	62.0	-	127.8	104.0
전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업	208.2	2,097.2	2,275.5	-	-	-	2,159.2	1,619.7	1,877.5	290.8	447.2	201.8	-	1,204.4	-
전기장비 제조업	56.3	76.3	125.4	179.2	110.5	162.3	57.7	328.6	88.0	77.0	54.8	69.6	-	154.3	167.9
전문 서비스업	16.9	8.1	-	-	-	73.6	15.4	5-	190.5	17.7	-	-	-	9.4	-
전문직별 공사업	23.3	40.3	32.9	55.1	94.1	37.6	66.5	80.8	58.7	67.3	61.3	28.8	41.4	66.6	5-
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	-	130.1	88.7	149.9	75.3	79.2	41.9	875.2	40.4	81.5	58.1	60.2	56.0	167.5	118.0
종합 건설업	62.3	102.5	347.0	145.2	137.3	389.4	175.4	962.0	80.9	626.3	210.8	90.4	-	106.2	119.1
창고 및 운송관련 서비스업	-	48.3	55.2	20.3	-	-	70.9	254.0	30.7	68.4	46.8	-	-	74.9	40.8
출판업	52.5	8.3	58.2	9.4	14.6	12.4	29.4	47.4	-	36.5	-	6.1	8.7	-	3.1
컴퓨터 프로그래밍, 시스템 통합 및 관리업	-	26.7	-	48.7	52.0	15.6	21.6	111.4	-	-	-	-	-	-	-
코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	-	-	-	-	-	-	318.8	10,152.6	146.5	-	147.8	-	-	7,367.1	-
펄프, 종이 및 종이제품 제조업	-	112.9	74.3	-	64.6	30.9	-	246.1	-	21.2	87.4	164.5	-	38.8	54.0
폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업	-	18.4	63.6	6.5	14.5	11.5	15.9	22.8	21.4	62.2	21.0	14.4	-	19.9	26.9
하수, 폐수 및 분뇨 처리업	-	-	7.2	-	-	-	4.5	40.0	-	26.3	-	15.0	-	21.9	-
화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	36.9	35.5	94.8	-	257.6	106.2	99.8	808.6	373.2	71.3	346.8	188.2	-	406.1	55.7

주: 산업 내 총매출액을 사업체수로 나눈 값이며 산업분류는 9차 표준산업분류 체계에서 제시한 중분류로 구분하였음. 해당산업 소재지역이 제 지역 이하인 경우는 생략하였음