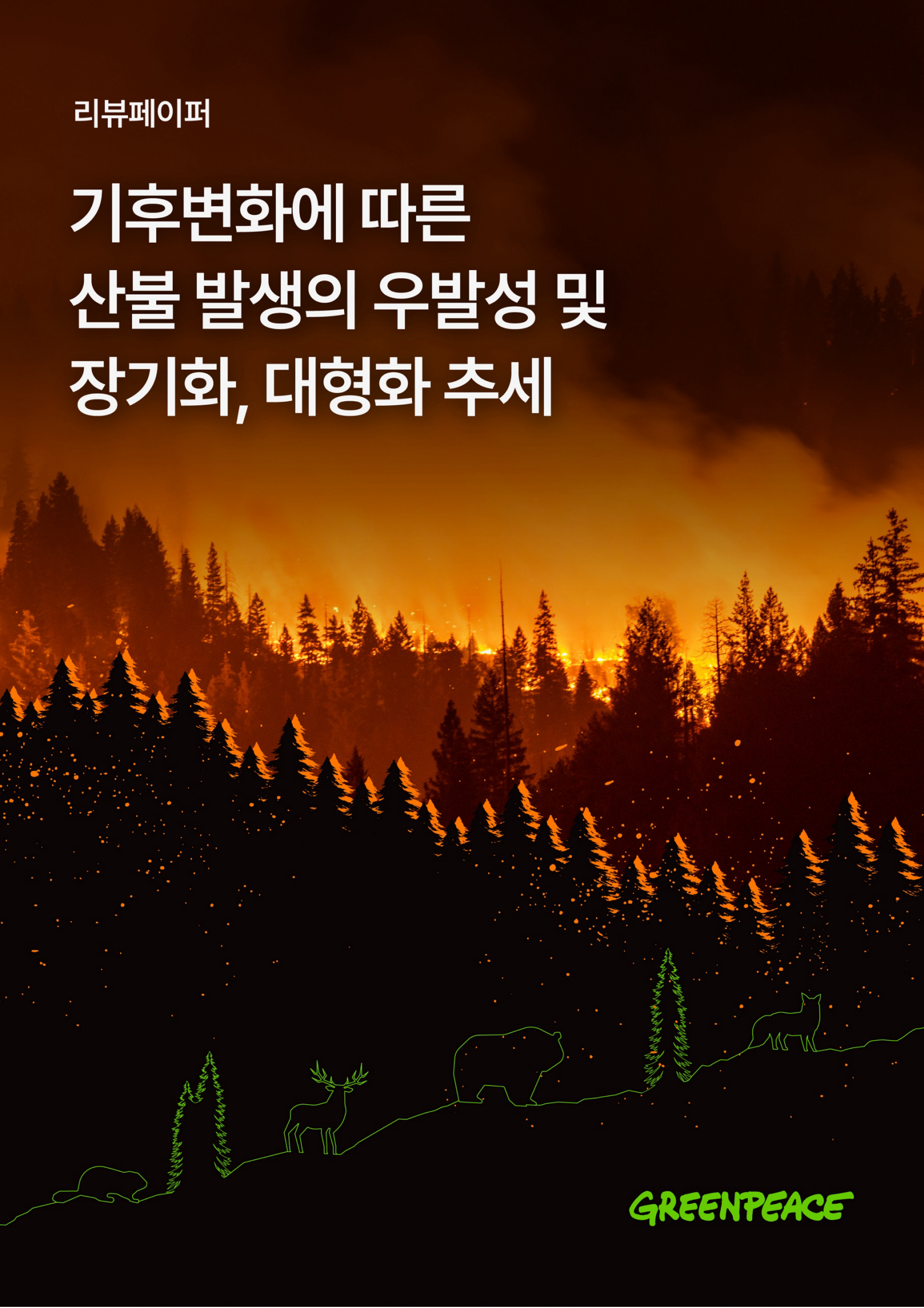
리뷰페이퍼

기후변화에 따른 산불 발생의 우발성 및 장기화, 대형화 추세



GREENPEACE

저자

심혜영

그린피스 동아시아 서울사무소

기후에너지 선임연구원

▶ CONTENTS

1 서론 4

2 이론적 고찰 및 선행연구 검토 5

2.1 산불 선행연구 현황 5

3 연구 범위 및 연구 방법 9

3.1 연구 범위 9
3.2 연구 방법 10

4 산불과 기후변화 간 선행연구 분석 결과 12

4.1 시간적 변화..... 12
4.2 공간적 변화..... 13
4.3 규모적 변화..... 16
4.4 한국의 산불 추세..... 18

5 결론 및 정책 제언 25

5.1 결론 25
5.2 한국 산불 관리에 대한 정책적 시사점..... 26
5.3 연구 한계 및 향후 연구 방향 제안..... 27

1. 서론

지구의 평균기온 상승과 강수 패턴 변화, 극한적인 기상현상의 빈발 등 기후변화의 영향이 전 지구적 차원에서 가시화됐다. 그 결과, 산불도 발생 양상과 피해 규모 면에서 근본적인 변화를 보인다. 이미 여러 연구에서 산불의 우발적 발생과 장기화, 대형화를 심화시키는 핵심 요인으로 기후변화를 지목해 왔다(Willias et al. 2019; Abatzoglou and Williams. 2016). 이러한 산불의 변화는 단순히 생태계 차원의 피해를 넘어 인명 및 재산 손실, 탄소배출과 대기질 악화 등 사회적·경제적 피해로 확장되고 있다. 일례로 캘리포니아는 2018 년 산불로 발생한 직·간접 피해액이 총 1,485 억 달러에 달한다고 보고했는데, 이는 캘리포니아주 연간 GDP 의 약 1.5%에 해당한다(Wang et al., 2020). 캘리포니아를 포함한 미국 서부는 기후변화로 인한 대형산불의 빈발과 그로 인한 사회적·환경적 비용이 심각한 대표적인 지역이다. 캘리포니아의 사례를 통해 산불이 일시적 재난이 아닌 구조적 위험이 돼 가고 있음을 알 수 있다. 한국 역시 기후변화의 영향에서 자유롭지 않다. 국내에서도 건조주의보 발령 일수가 증가하고 상대습도가 하락하는 등의 기후변화가 포착된다. 최근에는 강원 영동지역과 경북, 경남 지역을 중심으로 산불 발생 빈도와 피해 규모가 지속적으로 증대되는 경향이 나타난다. 그러나 현재까지 국내 산불에 대한 연구는 산불 예측이나 추세 분석 중심의 접근에 머무르고 있으며, 기후변화와 산불의 상관성에 대한 과학적 이해를 기반으로 한 논의는 매우 부족한 실정이다.

이번 연구는 미국 캘리포니아를 중심으로 한 대형 산불 관련 선행연구를 체계적으로 검토하여, 산불의 우발적 발생 및 장기화, 대형화 경향을 살펴보고, 그 기저에 있는 메커니즘과 기후적 요인을 종합적으로 고찰한 작업이다. 2 장에서 대형산불과 기후변화에 대한 선행연구를 정리하고, 3 장에서는 연구의 범위와 연구 방법을 소개한다. 4 장에서는 연구대상 논문의 경향성과 한국의 산불 추세를 분석했다. 5 장 결론은 캘리포니아와 한국의 기후지표 변화를 비교·분석함으로써, 향후 한국이 산불 정책 설계 시 기후위기 대응 차원에서 고려할 시사점을 제공하는 것을 목표로 한다. 이번 연구의 목적은 기후변화 대응 전략의 일환으로서 산불 관리 체계를 재정립할 필요성을 제기함과 동시에, 한국 산불 연구의 방향성을 심화·확장하는 데 있다.

2. 이론적 고찰 및 선행연구 검토

2.1 산불 선행연구 현황

캘리포니아의 산불 추세

최근 캘리포니아에서 대형산불의 발생 빈도가 증가하고 있다(Malamud et al. 2005; Salguero et al. 2020; Keeley et al. 2021). 1970 년부터 2000 년까지 미국 전역에서 발생한 산불 657,949 건의 소실면적을 분석한 결과, 산불 발생지역이 동쪽에서 서쪽으로 이동 중이라는 사실이 확인되었다(Malamud et al. 2005). 캘리포니아에서 1984 년부터 2017 년까지 발생한 산불 기록을 보면, 북부와 남부 지역의 평균 소실면적이 각각 1.32km^2/연, 1.2km^2/연으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다(Salguero et al. 2020).

캘리포니아 지역의 대형산불 증가는 일시적이고 이례적인 현상이 아니라, 더 크고 파괴적으로 진화하고 있는 산불 추세의 일부분이다(Buechi et al. 2021; Fasullo et al. 2018). 엘니뇨 남방진동(El Nino-Southern Oscillation, ENSO)[1]의 변화로 산불의 발생 빈도를 분석한 Fasullo et al.(2018)의 연구에 따르면, 폭염과 산불 발생 가능성이 증대되는 현상은 미래 기후의 특징이 될 수도 있다. 또한, Buechi et al.(2021)은 캘리포니아 산불이 대형화하고 발생 빈도가 높아지는 것이 미래 산불 경향의 일부이며, 앞으로 산림-도시 인접지역(Wildland-Urban Interface, WUI)의 피해는 더욱 증가할 것으로 예측했다. 산불의 대형화는 WUI 에 미치는 영향력 또한 점점 커지는 것을 의미하며 그 결과는 더욱 파괴적이다. 대형산불 발생 지점들은 공통적으로 주택밀도가 0.08~2.01 호/ha 로 낮은 지역인데, 앞으로 농촌지역이나 WUI 에서 주거지가 확대된다면 산불로 인한 구조물 피해도 증가할 것으로 예측된다(Syphard et al. 2019).

[1] 엘니뇨 남방진동(El Nino-Southern Oscillation, ENSO): 기압의 변동이 시소현상을 나타내는 남방진동과 동태평양 적도지역의 해수면온도가 높아지는 현상인 엘니뇨 현상이 합해진 말로, 기압이 낮아졌을 때 엘니뇨 현상이 발생하는 것을 일컫는다

이상기후와 산불의 대형화

연소의 3 요소는 연료, 산소, 점화원이다. 산불의 경우 입목과 바닥에 축적된 낙엽 등의 산림이 연료가 된다. 그리고 산림의 규모와 상태는 연료의 양과 상태(건조한 정도)를 결정한다. 장기간의 가뭄과 건조한 대기의 상태는 연료의 가연성을 높이는 주된 요인이다. 또한 산림의 경사면은 공기의 접촉면을 늘려 산불이 확산되기 쉬운 환경을 만든다(Coen et al. 2014). 사면을 따라 부는 바람은 공기를 유입하고 불씨를 옮겨서 산불의 확산에 기여한다. 산불의 점화원은 인간의 활동과 낙뢰 등의 자연발화원이 있다. 산불의 규모를 결정하는 요인은 산림의 상태 및 발화원 확산에 좋은 환경이다. 따라서 산불이 대형화하는 현상을 이해하려면 이러한 요건을 살피는 일이 중요하다.

기후변화로 인한 고온건조한 상태의 장기화는 산림의 가연성을 높이는 중요한 요인이다. 이와 같은 이상기후 요인(Climate change-induced natural factors)은 온도 상승 (Liu et al. 2022; Madadgar et al. 2020; Liu et al. 2015), 강수량(Lukovic et al. 2021; Swain et al. 2021; Li et al. 2022; Madadgar et al. 2020; Crockett et al. 2018; Keeley et al. 2021), 상대습도(Pierce et al. 2013; Jin et al. 2014) 등에 큰 영향을 준다. 또한 식생(Kolden et al. 2015; Syphard et al. 2019; Liu et al. 2015; Malamud et al. 2005)에도 영향을 끼쳐 산불이 발생하고 지속될 수 있는 조건을 구성한다.

고온건조한 상태가 장기화되면 기온이 높고 수분량이 적은 낮은 상대습도(Relative Humidity, RH)의 상태가 된다. 이는 연료(산림)를 건조하게 만드는 요인으로 산불 발생의 위험을 증가시킨다(Pierce et al. 2013; Jin et al. 2014). 예를들어, Pierce et al. (2013) 은 전지구기후모델을 통해 인위적인 복사 강제력과 상대습도의 지역별 변화를 분석했고, 2010-2099 년 캘리포니아를 포함한 미국 서부의 RH 는 점차 감소해 미국 북부와 로키산맥의 대형산불 발생확률이 13-60% 증가할 것으로 예측하였다.

강수량은 연료의 수분량에 직접 영향을 미치므로, 대형산불의 중요한 요인으로 작용한다(Lukovic et al. 2021; Swain et al. 2021; Li et al. 2022; Madadgar et al. 2020; Crockett et al. 2018; Keeley et al. 2021). 강수량의 변동성은 가뭄 발생의 직접적인 요인이며, 이로 인한 연료량 증가는 산불이 발생하기 좋은 조건을 만들고 산불이 대형화하는 중요한 원인이 된다(Li et al. 2022). 또한, Dwomoh et al. (2021)의 연구는 강수량 부족과 수증기압차(Vapor

Pressure Deficit, VPD) 상승이 결합된 고온 가뭄(hotter drought)이 캘리포니아의 대형산불 발생과 그에 따른 수목 피복 감소(1,266km^2)를 가속화했다는 점을 실증적으로 보여준다.

캘리포니아의 대형산불 리스크는 온도 상승으로 인해 크게 증가한다(Liu et al. 2022; Madadgar et al. 2020; Liu et al. 2015). 1980 년에서 2018 년까지 전지구적으로 나타난 비정상적인 온도상승의 결과로 취약지역의 40%에서 산불 발생가능성이 최소 4 배로 증가했다(Liu et al. 2022). 즉, 고온건조한 기후가 산불이 대형화하기에 좋은 환경이라는 사실을 확인할 수 있다.

산불의 대형화 요건에 있어, 바람은 산소를 주입하고 불씨를 날려 산불을 확산하는 데 중요한 역할을 한다(Abatzoglou et al. 2018; Coen et al. 2018; Jin et al. 2014; Miller et al. 2006). 바람의 산불확산 기여도를 모델링 스터디를 통해 분석한 결과, 산불로 소실된 면적의 57%은 바람에 의해 늘어난 것으로 나타났다 (Jin et al., 2014). Abatzoglou et al.(2018)의 연구는 인위적 원인(human-caused)에 의한 대형산불이 낙뢰로 인한 산불, 혹은 소형 산불에 비해 평균적으로 풍속이 더 강한 조건에서 발생한다는 사실을 보여준다. 특히 초속 5m 이상의 강풍이 동반된 경우, 인재형 대형산불이 발생할 확률은 일반적인 조건에 비해 55% 높은 것으로 나타났다. 이는 강풍이 산불의 초기 진압을 어렵게 하고 산불 확산을 가속화함으로써 인재형 산불의 대형화를 유도하는 주요한 기상 요인이 된다는 뜻이다.

캘리포니아 중부와 북부에서는 산불 발화의 주요원인으로 마른번개(dry lightning)가 지목된다. 이러한 점화원 역시 기후변화의 영향을 받는 것으로 나타나며, 특히 건조한 조건에서는 마른번개의 발생 빈도가 증가하여 산불로 이어질 가능성을 높인다 (Kalashnikov et al. 2022; Lutz et al. 2009; Malamud et al. 2005; Dhal et al. 2024). 캘리포니아 중부에 위치한 요세미티 국립공원의 사례 분석에 따르면, 봄철 적설량(snowpack)의 감소가 낙뢰로 인한 산불 발화 빈도를 유의미하게 증가시키는 것으로 나타났다. Lutz et al. (2009)는 당해 봄철 수분 상태를 판단하는 기준인 적설상당물량(Snow Water Equivalent, SWE)을 산불 발화 빈도와 함께 분석하였다. 구체적으로 4 월 1 일 기준의 SWE (1 April SWE)가 낮을수록 낙뢰 점화 비율과 산불 건수가 지수적으로 증가하였으며, 향후 적설량이 현재보다 24% 감소하는 시나리오에 따르면 2020 년부터 2049 년까지 낙뢰로 인한 산불 건수가 19.1% 증가할 것으로 예측되었다(Lutz et al. 2009).

다양한 선행연구를 통해 산불의 대형화에 연료와 바람이 주요 요인임을 확인했고, 그 이면에는 기후변화가 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 기후변화로 건조한 기후가 조성되면

산림은 태우기 좋은 연료가 된다. 이런 조건에서는 작은 불씨에도 산불이 발생, 빠른 속도로 확산되면서 대형산불로 전환된다는 것을 알 수 있다. 또한 산불의 자연발생적 점화원인인 마른번개도 기후변화로 건조해진 대기에서 빈번하게 발생한다. 산불을 일으키는 또 다른 주요 요인이 증가하고 있는 것이다. 즉, 기후변화로 인한 이상기후가 연소 조건의 모든 측면(연료, 산소, 점화원)에서 발화하기 좋은 환경을 조성해 산불의 대형화에 기여하고 있는 것을 알 수 있다.

대형산불 메커니즘

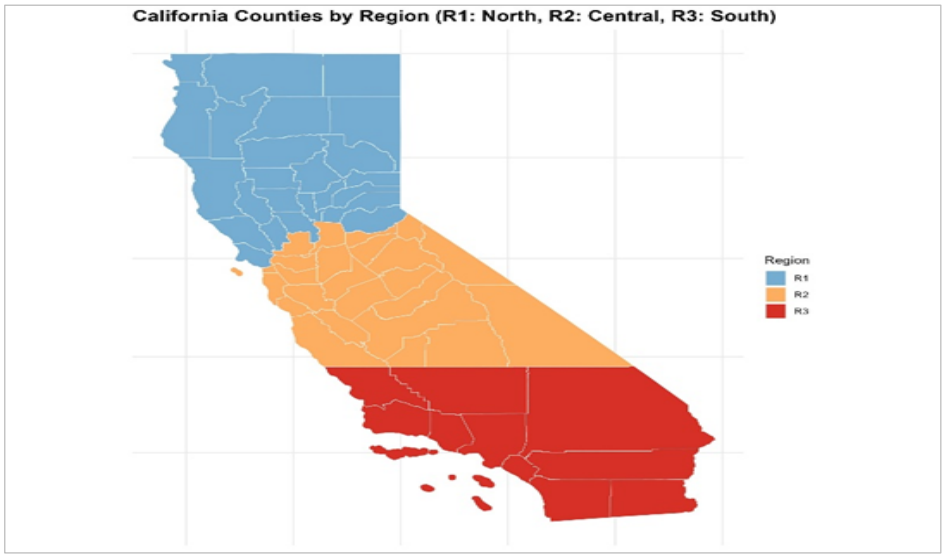
대형산불의 발생은 극단적인 기후요인만으로는 설명하기 힘들다. 산불의 발생과 그것이 대형화하는 것은 여러 요인들이 동시적, 복합적으로 작용한 결과물이다(Khorshidi et al. 2020; Varga et al. 2020; Cayan et al. 2022; Lutz et al. 2009). Khorshidi et al.(2020)의 연구에 따르면, 1982 년부터 2018 년까지 캘리포니아 남부에서 발생한 피해 규모 405ha(1,000acres) 이상 대형 산불의 사례를 분석한 결과, 개별 산불 요인이 극단값을 기록한 경우보다 복수의 산불 유발 요인이 동시에 중간 수준의 임계값을 초과하는 경우가 대형 산불 발생과 더 밀접하게 연관되어 있음을 확인하였다. 특히 최근 40 년간 여러 산불 요인이 동시에 임계치를 초과한 날이 개별 요인이 임계치를 초과한 날보다 빠르게 증가하였으며, 이로 인해 연간 대형산불 위험일수 (megafire critical danger days)가 3 배 이상 증가한 것으로 나타났다(Khorshidi et al., 2020).

Zhang et al.(2020)은 미국 서부의 대형산불 발생빈도가 증가하는 이유를 피드백 메커니즘으로 분석했다. 해당 연구는 상대습도와 구름의 감소로 지표면의 일사량이 증가하고, 그 결과 온난화 심화에 따라 단열온난화가 강화되어 대류권 침강현상이 증가하고, 이에 따라 해상 저층바람이 강해지면서 건조함이 강화되는 지역 기후의 되먹임 현상이 유발돼 산불이 증가했다고 결론 내렸다. 즉, 대형산불의 발생 메커니즘을 이해하기 위해서는 단일요인의 영향력보다는 각 요인 간의 상호관계를 이해하는 것이 중요하다. 또한 대다수 연구가 산불의 외부적 요인이 산불의 규모에 어떻게 영향을 미치는지에 초점을 맞추고 있지만, 산불 자체의 내부적 역학을 이해하는 것도 필수적이다(Coen et al. 2014). 산불로 인한 바람 형성과 그로 인한 동적 피드백을 고려하지 않는다면 대형산불의 영향을 과소평가하는 결과로 이어질 수 있기 때문이다. 2014 년 발생한 King Fire 의 경우 발화 후 25km 가 확산됐는데, 그 기저에는 산불로 인해 발생한 강한 바람, 경사진 지형에 남아있는 연료 등 산불의 규모를 키운 요인이 있다(Coen et al. 2014).

3. 연구 범위 및 연구 방법

3.1 연구 범위: 20 세기 이후의 캘리포니아 산불

기후변화는 시공간적으로 비균질적인 모습으로 진행된다. 그 과정에서 기온이 이전의 평균적인 기후에 비해 비정상적으로 오르거나 내려 이례적인 영향을 미친다(IPCC 6th Assessment Report, 2021). 지구의 평균기온 상승은 비균질한 기후변화를 증폭시키고, 더욱 극단적인 온도 상승에 기여한다(IPCC 6th Assessment Report, 2021). 이와 같은 특성으로 기후변화의 영향도 지역별로 다양하게 나타나며, 지역을 한정하여 그 변동성과 기후변화로 인한 영향을 연구할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 대형산불이 자주 발생하는 미국의 캘리포니아 지역을 북부, 중부, 남부로 나누어서 산불의 추세를 살펴보고자 한다. 캘리포니아는 인구밀집도가 높아 산불피해가 클 것으로 예상되는 지역으로, 산불과 기후변화에 대한 논의가 가장 활발한 지역이기도 하다. 또, 남북으로 길게 뻗어 있어 위도별로 기후대의 차이를 보인다. 따라서 산림지대인 북부지역과 혼합림인 중부지역, 건조한 지중해성 기후를 보이는 남부지역 등 3 개 지역으로 구분하여 대형산불의 발생 원인 및 추세를 분석하였다.



<**그림 1**> 캘리포니아 지역구분(R1:북부, R2:중부, R3:남부)

시기적으로는 기후변화의 원인으로 지목된 온실가스의 영향을 받은 20 세기 이후 발생한 산불로 한정하였다. 대기 중 온실가스는 산업혁명 이후 지속적으로 증가하여 전지구적으로 비가역적인 기후변화의 원인으로 지목된다. 이에 본 연구에서는 2024 년 12 월 1 일까지 발생한 20 세기 산불을 대상으로 하며, 이 기간에 관한 연구들을 검토했다.

3.2 연구 방법

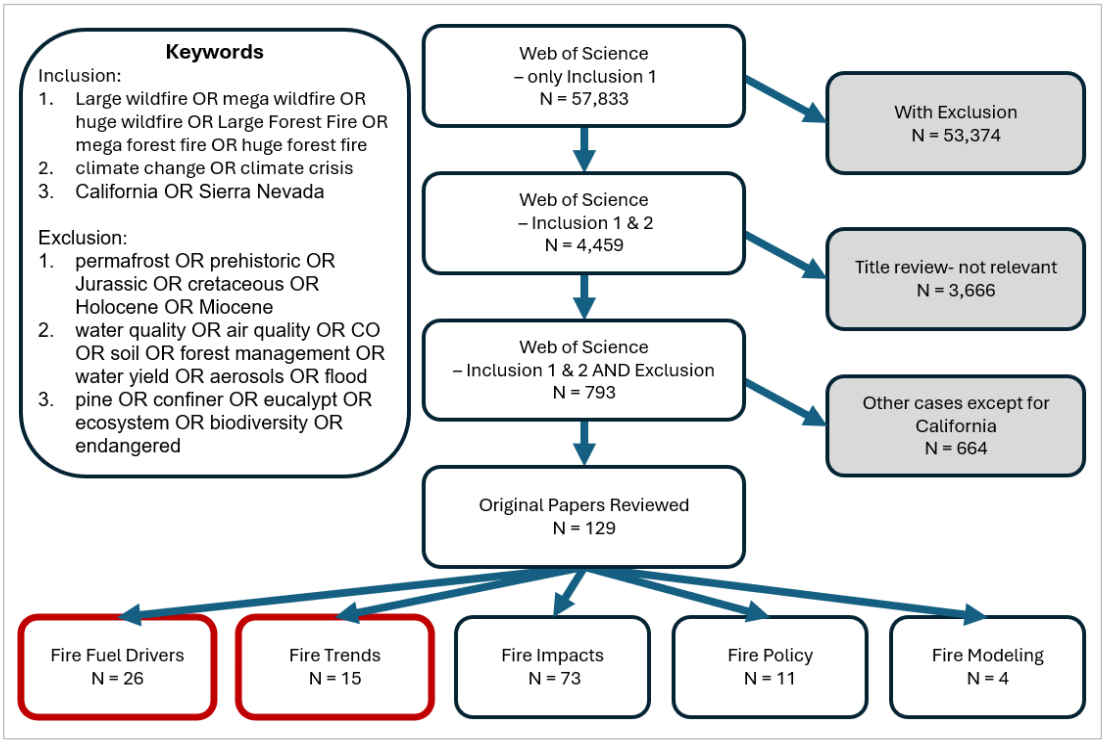
대형산불의 메커니즘에 관한 선행연구 선별을 위해 Web of Science 를 활용하여 대형산불과 기후변화에 관련된 키워드를 중심으로 리뷰 대상 논문을 선정하였다. "Wildfire OR Forest Fire"를 키워드로 검색한 결과, 총 57,833 개의 선행연구가 확인되었으며, "Climate change OR climate crisis" 와 같은 기후변화 관련 키워드를 추가해 이를 4,459 건으로 추렸다. 연도별로 살펴보면, 1987 년부터 1999 년까지는 98 건(2.2%), 2000-2004 년 155 건(3.48%), 2005-2009 년 314 건(7.04%), 2010-2014 년 660 건(14.8%), 2015-2019 년 1,221 건(27.38%), 2020-2024 년 2,011 건(45.1%)우로 나타났다. 현재에 가까워질수록 산불과 기후변화를 함께 다룬 연구가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

이번 연구의 시간적 범위인 20 세기 이후의 산불에 관한 연구로 범위를 좁히면 대형산불과 기후변화에 관한 논문은 793 건이 검색됐다. 연구기관의 소속 국가가 미국인 경우가 384 건(48.4%)으로 가장 많고, 캐나다(107 건, 13.5%), 호주(99 건, 12.5%), 중국(68 건, 8.6%) 등이 뒤를 이었다. 이들 국가는 산불이 자주 발생하고 산불을 모니터링 할 수 있는 위성 시스템을 갖춘 국가라는 공통점을 갖고 있다.

연구의 공간적 범위를 캘리포니아 지역으로 제한했을 때 총 129 건이 검색되었고, 내용적으로 크게 산불 영향(73 건), 산불의 연료 요인(26 건), 산불 추세(15 건), 산불 정책(11 건), 산불 모델(4 건) 등으로 분류할 수 있다. 산불 영향 분야(73 건)는 산불 발생 이후 산림구성의 변화에 대한 내용, 산불로 인한 대기질 악화, 그리고 이로 인한 인간의 건강 영향과 산불이 동식물을 포함한 생태계에 미치는 영향 등의 내용을 포함한다. 산불의 연료 요인에 관한 논문(26 건) 은 산불을 가속화시키는 연료 조건에 관한 것이거나 대기의 건조한 정도를 나타내는 강수량, 상대습도, 건조도, 가뭄, 바람 등의 기상학적 요인을 다룬 것이다. 산불 추세에 관한 것(15 건)은 산불의 경향성을 다룬 내용이며 주로 장기간에 걸친 산불의 심각성,

산불 위험지수, 횟수 등을 분석한 내용이다. 산불 정책 관련 논문(11 건)은 산불 대비 및 예방, 산불에 대응하는 시스템을 다룬다. 산불 모델 관련 연구(4 건)에는 산불발생 시 확산방향을 모델링하여 대피 시점이나 경로를 파악하는 내용이 포함된다.

이번 연구에서는 산불의 연료 요인과 산불 추세에 관한 선행연구 41 건에 대한 리뷰를 바탕으로 대형산불과 기후변화에 대한 상관관계를 고찰했다.



<그림 2> 선행연구 선별과정

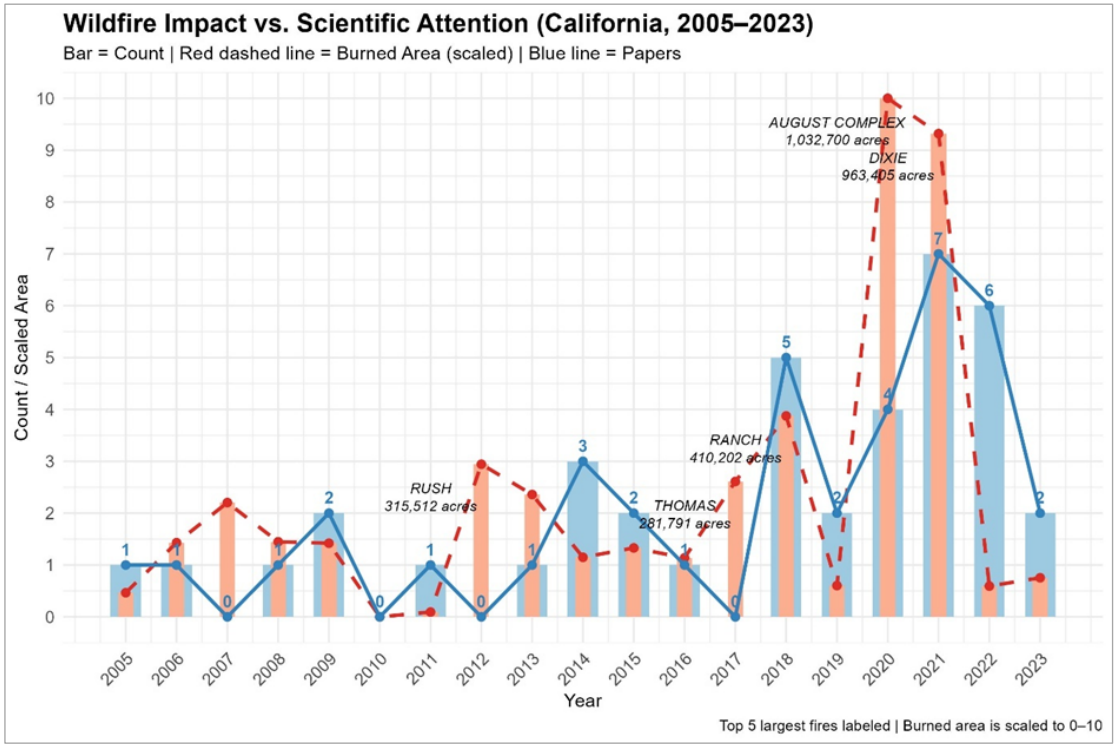
4. 산불과 기후변화 간 선행연구 분석 결과

4.1 시간적 변화

해당 논문 41 건의 연도별 발간 추이를 살펴보면 2021 년이 7 편으로 가장 많았고, 그 다음으로 2022 년 6 편, 2018 년 5 편, 2020 년 4 편, 2014 년 3 편 순으로 나타났다. 캘리포니아 지역을 대상으로 산불과 기후변화의 관계를 논의한 연구가 2005 년~2010 년에는 연간 1-2 편 정도 발간되고, 2015 년까지는 연간 1-3 편, 그 이후에는 매년 2-7 편으로 증가한 것으로 나타났다.

논문의 발간 시기와 가장 큰 산불이 발생한 시기를 함께 보면 일정한 시간차가 있었다 (그림 3). 2012 년 Rush 산불 이후 2014 년 발행된 논문이 3 건, 2018 년 Ranch 산불 이후 2020 년 발간된 논문이 4 건이다. 2020 년 August complex 산불 발생 이후 2021 년에는 7 건, 2022 년에는 6 건의 논문이 발간됐다.

선행연구에서도 대형산불 발생시기와 논문실적의 관계를 유추해볼 수 있다. 연구대상 지역인 캘리포니아에서 가장 큰 산불이 2020 년에 발생했고, 두번째로 큰 대형산불은 1929 년에 발생했다(Keeley et al. 2021). 2020 년에 발생한 Doe Fire 는 단기간에 산불이 급격하게 확산된 경우로 그 원인에 대한 집중적인 분석이 이루어졌다(Varga et al. 2022; Keeley et al. 2021). 대형산불 발생시점과 연도별 논문실적을 매칭해 본다면, 2020 년 역대급 산불로 인해 산불연구가 활발해진 것으로 보인다. 그리고 논문 작업과 투고에 시간이 소요되다 보니 2021 년과 2022 년에 가장 많은 논문이 발간된 것이라 볼 수 있다. 이번 연구에서 리뷰할 논문은 2024 년 12 월까지로 발간 시점을 한정했지만, 2025 년 1 월에 LA 에서 큰 재산피해를 낸 산불이 발생한 것으로 보아 2025 년과 2026 년에도 관련 논문이 쏟아질 것으로 예측된다.

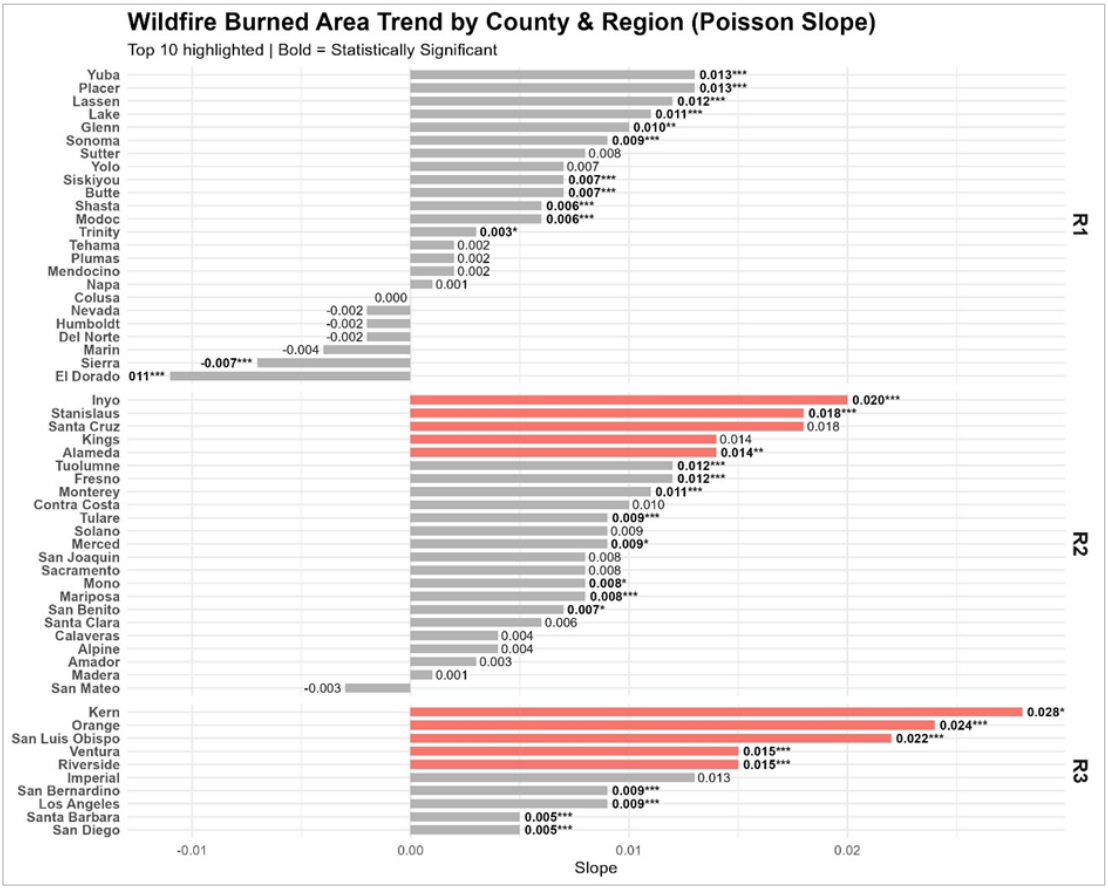


<그림 3> 대형산불의 발생 시기와 선행논문의 연도별 발간 추이

산불의 피해면적과 이에 관한 논문 발간 수 사이의 상관성을 분석한 결과, 시차 0 년(Lag = 0)에서 가장 높은 상관관계가 나타났다. 이는 대규모 산불이 발생한 당해 연도에 이에 관한 과학적 연구 활동이 즉각적으로 늘어나는 경향을 보여준다. 또한, 시차 +1 년에서도 상관계수가 비교적 높게 나타났다. 일부 연구는 산불 발생 이후 1 년 내에 학문적인 결과를 내놓았다. 이러한 경향은 대형 산불이 발생할 경우, 당해 또는 이듬해에 학계의 주목과 연구가 활발하다는 것을 의미한다.

4.2 공간적 변화

캘리포니아 소방청(California Department of Forestry and Fire Detection, CAL FIRE)에서 제공하는 자료를 바탕으로 캘리포니아 북부, 중부, 남부에서 1878 년부터 2023 년까지 약 145 년간 기록된 산불의 발생 빈도와 피해면적의 변화를 살펴보았다(그림 4). 2000 년 이후 세 지역 모두에서 산불 발생 빈도가 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.



<그림 4> 캘리포니아 지역별 산불 소실면적 추세 결과

지역별 분석 결과, 북부(R1)에서는 북부의 소수 카운티를 제외하고는 대체로 증가하는 추세임을 알 수 있다(그림 4). 일반적으로 북부는 대형산불이 발생하지 않던 지역으로 최근들어 대형산불이 발생하고 있어 주의가 필요하다는 연구를 다수 확인할 수 있다(Dennison et al., 2014; Dwomoh et al., 2021; Qian et al., 2021; Collins et al., 2014) . 예를들어, Dwomoh et al. (2021)의 연구결과, 1985 년부터 2016 년까지 발생한 대형산불로 인해 캘리포니아 북부에서는 총 1,266km^2 가 소실되었다고 밝혔다. 비슷한 시기에 관한 Dennison et al.(2014)의 연구에 따르면, 1984 년부터 2011 년까지 캘리포니아, 태평양 연안 북서부, 콜로라도 지역에서 405ha 이상 대형산불이 총 6,876 건 발생했다. 발생 빈도는 1 년에 약 7 번으로 증가했고, 소실면적 또한 1 년에 355km^2 씩 증가하는 경향을 확인했다. 캘리포니아 북부의 버트 카운티를 중심으로 한 Qian et al.(2021)의 연구는 한 해에 세 건의 대형 산불이 발생한 2018 년의 사례를 매우 이례적인 사건으로 규정하였다. Collins et al.(2014)은 고온·건조한 날씨의 급증이 초기 진화를 무력화시키고 대형 산불의 발생 가능성을 높일 수 있다고 경고하였다.

중부 지역(R2)은 산불 발생 경향이 양(+)의 기울기를 보이는 카운티 분포가 가장 넓게 나타나며, 이 중 일부 카운티는 통계적으로 유의하고 상대적으로 가파른 기울기를 보였다. 예를 들어, Stanislaus(0.020 ***), Santa Cruz (0.018**), Alameda (0.014*) 카운티가 대표적인 사례이다(그림 4). 이는 특히 산림도시인접지역(Wildland-Urban Interface, WUI)이나 준도시(peri-urban) 카운티에서 산불 피해 면적이 뚜렷한 증가 추세를 보임을 시사한다. 특히, Crockett(2018)의 연구에서는 2006 년부터 2014 년 사이 북부와 중부 캘리포니아에서 피해 면적 400ha 이상인 대형산불 7,742 건을 확인하였으며, 이는 산불 활동의 현저한 증가를 보여준다. 중부 캘리포니아(R2)는 산불 피해 면적의 일관되고 광범위한 증가 추세를 나타내며, 이는 특히 도시 개발과 자연 식생이 맞닿은 지역에서 두드러지는 것은 확인할 수 있다.남부 캘리포니아(R3)는 전체적으로 가장 가파른 기울기 값을 보이며, 특히 Kern (0.028***) 카운티가 해당 지역에서 두드러진다(그림 4). 이는 선행연구에서 제시된 바와 같이, 캘리포니아 남부는 고온·건조한 조건에서 발생하는 '산타아나 바람(Santa Ana winds)'과 산불의 확산이 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다(Cayan et al., 2022; Khorshidi et al., 2020; Jin et al., 2014; Miller et al., 2006). 산타아나 바람은 내륙의 고기압과 해안의 저기압 차로 인해 가을과 겨울철에 불어오는 강하고 건조한 바람으로, 남부 캘리포니아에서 산불을 빠르게 확산시키는 대표적인 기상 요인이다. 선행연구들에 따르면, 가을철 강수 지역과 강한 산타아나 바람의 동시 발생은 산불 위험을 현저히 증폭시키는 것으로 나타났다(Cayan et al., 2022; Jin et al., 2014; Khorshidi et al., 2020; Miller et al., 2006).

이런 경향은 논문의 대상 지역 범위에서도 찾아볼 수 있었다. 41 건의 논문 중 캘리포니아 전체를 대상으로 한 논문이 25 건(61%)으로 가장 큰 비중을 차지했지만, 북부에 대한 연구가 9 건(22%)으로 남부(4 건, 10%)와 중부(3 건, 7%)에 비해 많았다. 상대적으로 북부 지역에 대한 연구가 활발함을 확인할 수 있다. 다른 지역에 비해 캘리포니아 북부에 대한 연구논문이 많은 이유는 이 지역의 산불발생 빈도가 증가한 것과 연관돼 있는 것으로 보인다. 북부 지역은 본래 대형산불이 자주 발생하지 않는 지역이었지만, 근래 들어 그 빈도와 소실면적이 증가하는 경향을 확인할 수 있다(Dwomoh et al. 2021; Dennison et al. 2014; Qian et al. 2021).이러한 연구들은 캘리포니아 중부나 남부에 비해 상대적으로 산불 발생 빈도가 낮은 북부 지역에서도, 기후와 기상 조건에 따라 피해의 규모가 극단적으로 커질 수 있음을 보여준다. 북부 지역의 산불은 드물지만 치명적인 사례로 이어질 가능성이 높아, 이와 관련한 학술적 논의가 활발히 이루어져 왔던 것으로 보인다.

4.3 규모적 변화

산불의 규모에 따라 산불 발생 원인의 논의 방식이나 분석 단위가 뚜렷이 달라지는 경향을 반영하여, 이번 연구에서는 선행연구들을 기반으로 소실면적에 따라 산불을 소형 (0.4–39 ha), 중형 (40–399 ha), 대형 (400–999 ha), 초대형 (≥1,000 ha) 등 네 가지 등급으로 구분하였다(표 1). 선행연구에서 대상으로 고려된 산불의 최소 면적은 0.4ha 이상이었으며, 대형산불로 간주되는 하한선은 대체로 40ha 이상으로 나타났다(Kolden et al., 2015; Syphard et al., 2018, 2019; Jin et al., 2014; Lutz et al., 2009). 특히, 소실 면적 400ha 를 기준으로 산불의 발생 원인을 다루는 방식에 차이가 있었다.

400ha 미만의 소-중 규모(Small–Medium scale) 산불을 대상으로 한 연구들은 낙뢰(Kalashnikov et al., 2022; Abatzoglou et al., 2018), 바람(Jin et al., 2014), 식생(Kolden et al., 2015; Syphard et al., 2018), 기온(Parisien et al., 2009), 강설량(Lutz et al., 2009) 등 개별 환경·기후 요인이 산불 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 일부 연구에서는 산불의 연도별 추세나 확산 패턴을 통계적으로 분석하여 그 경향을 밝히기도 하였다(Malamud et al., 2005; Westerling et al., 2008; Westerling et al., 2011).

반면, 400ha 이상 대형 규모(Large scale) 산불 연구에서는 두 개 이상의 기후 요인 또는 기후 변수 간 상호작용(compound effects)을 고려한 분석이 주로 이루어졌다(Crockett et al., 2018; Dwomoh et al., 2021; Liu et al., 2015; Madadgar et al., 2020; Parks et al., 2016). 이런 연구는 단일 요인의 영향보다는 기온, 강수, 연료의 수분량, 풍속, 기압 등 복합적인 기상 조건이 동시에 작용할 때 산불확산과 피해 규모에 훨씬 더 큰 영향을 미친다는 점을 실증적으로 보여준다. 기후변화 시대의 산불 예측 및 대응 전략에 있어서 다층적 요인 분석이 중요하다는점을 강조하고 있다.

또한, 1,000ha 이상의 초대형 규모 (Mega scale) 산불 연구에서는 초대형 산불과 대기권 수준의 광역 기후 패턴(예: 해들리 순환 확장, 해양 표면 온도 이상, 고기압 발달, 중위도 제트류 이동 등) 사이의 연관성을 분석하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(Afolayan et al., 2024; Zhang et al., 2020; Keeley et al., 2021; Collins et al., 2014). 이러한 초대형 산불은 지역적인 조건을 넘어 지구의 기후 시스템과 연계해 논의되는 경우가 많았다.

<표 1> 산불의 규모에 따른 연구 경향

규모	피해면적(ha)	내용	연구 사례
소형	0.4	산불추세	Malamud et al. (2005)
	4	낙뢰	Kalashnikov et al. (2022)
중형	40	식생	Kolden et al. (2015)
	40	식생, 기후학적 물수지 결핍(Climatic Water Deficit, CWD)	Syphard et al. (2018)
	40	주택밀도, CWD	Syphard et al. (2019)
	40	바람(산타아나)	Jin et al. (2014)
	40	강설량, 낙뢰	Lutz et al. (2009)
	40.45	바람, 건조한 연료	Mitchell et al. (2023)
	121	기온, 식생	Parisien et al. (2009)
	200	기온, 강수량, 토양수분량, 눈 덮임 기간	Westerling et al. (2008)
	200	수분 부족지수, 기온, 상대습도, 식생	Westerling et al. (2011)
	205	기온, 상대습도, 풍속, 연료수분	Khorshidi et al. (2020)
대형	400	산불기상지수(Fire Weather Index, FWI), 최고기온, 건조지수	Parks et al. (2016)
	400	고온, 강수량 부족, 가뭄 지수(SPEI)	Crockett et al. (2018)
	404	고온, 수증기압차(VPD), 수목 증발응력, 봄 강수량	Dwomoh et al. (2021)
	405	기온, 연료수분, 식생 피복, 지형	Liu et al. (2015)
	405	기온, 강수량, 증발산량	Madadgar et al. (2020)
초대형	1000	다중 규모 기후 진동(ENSO, PDO, BSISO)	Afolayan et al. (2024)
	1000	해들리 순환 확장, 중장기 건조화	Zhang et al. (2020)
	1000	광역 기후 변화	Salguero et al. (2020)
	1000	광역 기후 패턴, 지형, 토지 이용	Dhal et al. (2024)
	10000	화재 확산 기상 조건	Collins et al. (2014)
	10000	장기적 가뭄, 기후 이상	Keeley et al. (2021)

산불의 규모가 대형(Large)을 넘어 초대형(Mega)으로 분류되는 경우에는 대부분 기후변화와의 관련성을 논의하는 경향을 보였다. 기후변화 시나리오 하에서 산불의 발생 가능성은 지역별로 차이가 있지만, 대체적으로 기후가 산불에 취약한 방향으로 변화될 것으로 예측되어 대부분의 지역에서 산불 발생 가능성이 증가할 것으로 예측됐다(Li et al. 2022; Miller et al. 2006; Westerling et al. 2011). 특히, Li et al.(2022)은 최첨단 지구시스템

모델(CMIP6)과 실제 관측 자료를 결합하여, 매우 높은 온실가스 배출 시나리오(SSP585) 하에서 21 세기 말 캘리포니아의 겨울 강수량이 북부는 0.4-1.3mm/일(10-34%), 중남부는 0.1-0.5mm/일(7-32%) 증가할 것으로 예측했다. 이러한 강수량 증가는 불균일하게 나타나고, 짧은 기간에 집중호우로 몰리는 경향이 있기 때문에 토양과 식생이 실제로 건조해지는 기간(연료 건조 기간)은 길어지게 된다. 이로 인해 비가 많이 오더라도 여름철에는 더 뜨겁고 건조해져서, 산불 위험 시기가 오히려 늘어날 수 있는 것으로 해석된다. Miller et al. (2006)와 Westerling et al. (2011) 등의 연구는 IPCC 가 제시한 온실가스 배출 경로 중 '고성장·고배출' 경로인 A2 시나리오 하에서 산불 발생을 예측한다. 해당 시나리오는 기술 혁신이 느리고, 인구 및 경제성장이 빠르며, 지역 간 격차가 큰 미래를 의미하는데 이에 따르면 이번 세기말(2100 년)이면 캘리포니아 남부 해안은 겨울철 산타아나 바람의 영향으로 12 월 산불 발생 빈도가 과거보다 117 배까지 증가하는 것으로 시뮬레이션됐다(Miller et al. 2006). Westerling et al.(2011)은 A2 시나리오 하에서 2085 년까지 캘리포니아 전체의 산불 소실면적이 36~74% 증가할 것으로 예측했고, 특히 북부 산림지역에서는 소실 면적이 100% 이상 늘어날 수 있다고 전망했다. 또 1975 년과 비교해 2085 년에는 평균 소실 면적이 41~69% 증가한다고 보았다. 이러한 증가폭은 더 낮은 배출 시나리오(B1) 하의 전망과 비교해 그 폭이 훨씬 크다는 점에서 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 절실함을 보여준다. 또한 미래에 산불 발생 가능성이 높은 기후 조건에서는 인구밀도가 높은 남부 해안, 베이지역, 새크라멘토 등 북동부의 대도시 및 WUI(산림-도시 인접지역)에서 대형산불로 인한 재산 피해도 가장 크게 나타날 것으로 예측되었다(Westerling et al. 2008). 이처럼 기후변화 시나리오 하에서는 대형산불의 발생 위험과 피해 규모가 모두 증가하며, 그 영향을 받는 범위 또한 넓어질 것이라는 사실을 기존 연구를 통해 확인할 수 있다.

4.4 한국의 산불 추세

한국에서는 사람에 의해 일어난 재난을 사회재난, 그렇지 않은 재난을 자연재난으로 구분한다. 한국에서 대부분의 산불은 입산자의 부주의나 소각 활동 등에 의해 발생하므로 사회재난으로 분류되며, 사람의 활동에 의해 점화되기 때문에 기후변화와 연관시키기가 힘들다. 그러나 기후변화의 영향권에 한국도 예외가 아니므로 한국에서 발생하는 산불과 기후변화에 대한 연구도 필요하다. 이번 연구에서는 앞에서 논의한 캘리포니아의 산불과

기후변화 간 연관성의 맥락에서 한국산불의 추세를 살펴보고, 한국의 산불 대응에 관한 시사점을 제시해보고자 한다.

캘리포니아 연구 사례에서 강수량보다는 강수일수가 전보다 짧아지면서 건조한 날이 길어진 것이 상대적으로 산불이 발생하기 쉬운 환경이라는 사실을 확인할 수 있었다. 이에 한국의 건조주의보 일수, 누적강수량, 강수일수, 평균 상대습도, 산불 추세를 살펴보고, 한국의 기후추세와 산불의 연관성을 분석해 본다.

4.4.1 건조주의보 일수

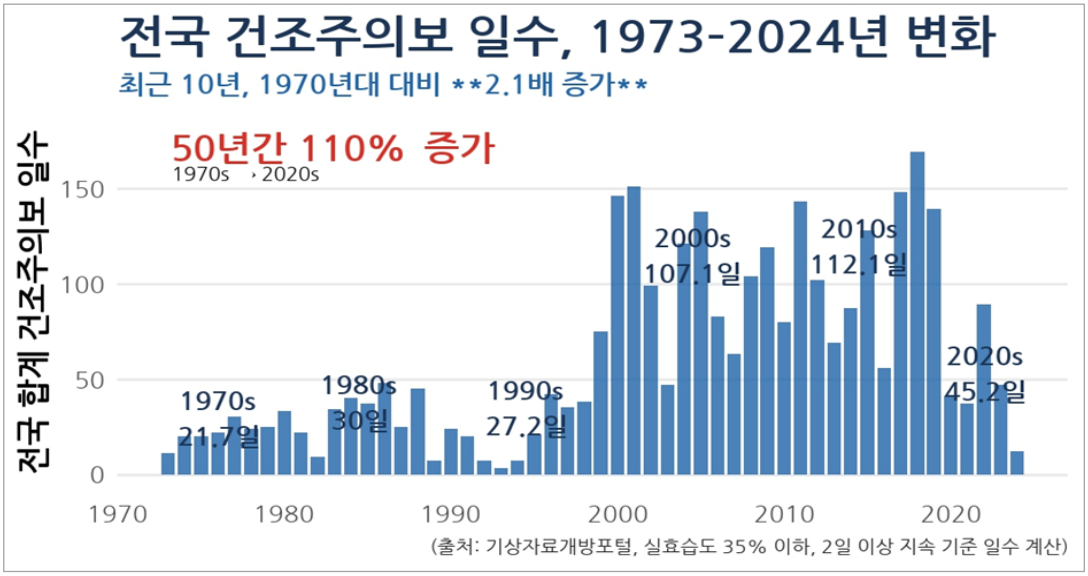
실효습도가 50% 이하가 되면 큰 화재가 발생할 위험이 커진다. 수식은 다음과 같다 (기상청, accessed date: 2025.06.02).

<수식 1> 실효습도 수식

$$He = (1-r)\times[H_t^{od} + rH_t^{1d} + rH_t^{2d} + rH_t^{3d} + rH_t^{4d}]$$

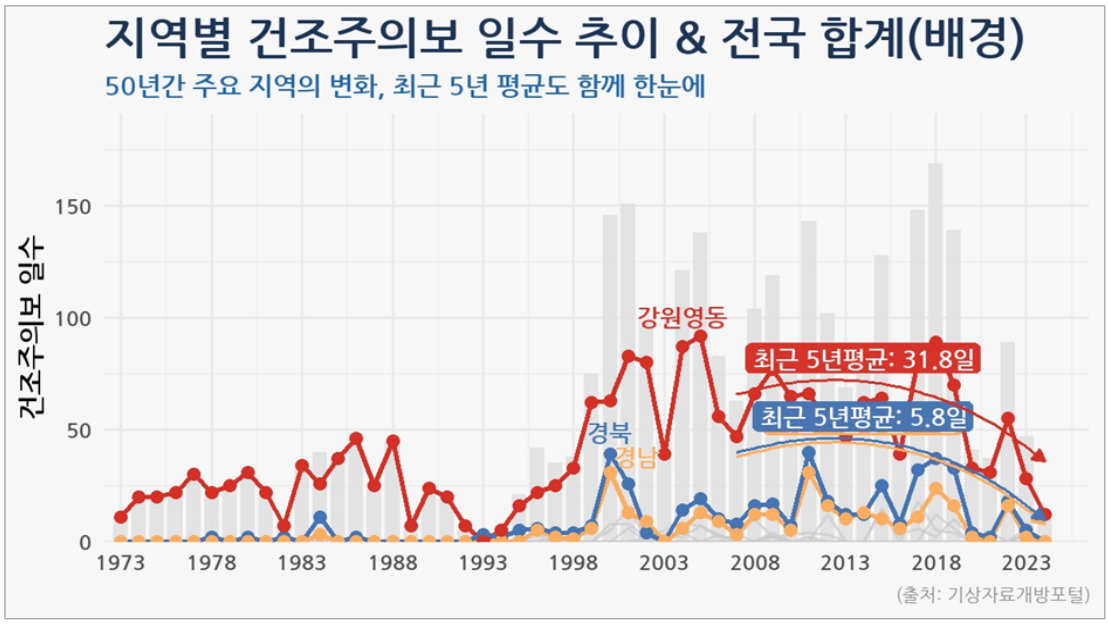
*He : 실효습도, r= 0.7, H^{od} : 당일의 상대습도, H^{1d} : 1 일 전의 상대습도,
H^{2d} : 2 일 전의 상대습도, H^{3d} : 3 일 전의 상대습도, H^{4d} : 4 일 전의 상대습도

기상청은 실효습도 35% 이하의 상태가 2 일 이상 지속될 것으로 예상될 때 건조주의보를, 실효습도 25% 이하인 날이 2 일 이상 지속될 것으로 예상되면 건조경보를 발표한다(기상청, accessed date: 2025.06.02). 이번 연구에서는 1973 년부터 2024 년까지의 건조주의보 발효 일수를 계산했다. 건조주의보 일수 전국 합계(막대 그래프)와 상위 3 개 지역별 변화(선 그래프)를 <그림 5>과 <그림 6>에서 각각 확인할 수 있다. <그림 5>을 보면 전국 건조주의보 일수가 지난 50 년간 뚜렷하게 증가해 온 것을 확인할 수 있다. 1970 년대 평균 21.7 일이던 것이 2020 년대 들어서는 평균 45.2 일로 약 2 배 증가했다. 특히 2000 년대~2010 년대에 급격한 증가세가 관측되었으며, 최근 10 년간도 높은 수준이 유지되고 있다. 건조주의보 일수의 증가는 대형산불로 번질 가능성이 높은 시기가 증가한 것으로서 산불의 위험이 커진 것으로 해석할 수 있다.



<그림 5> 전국 건조주의보 일수 변화

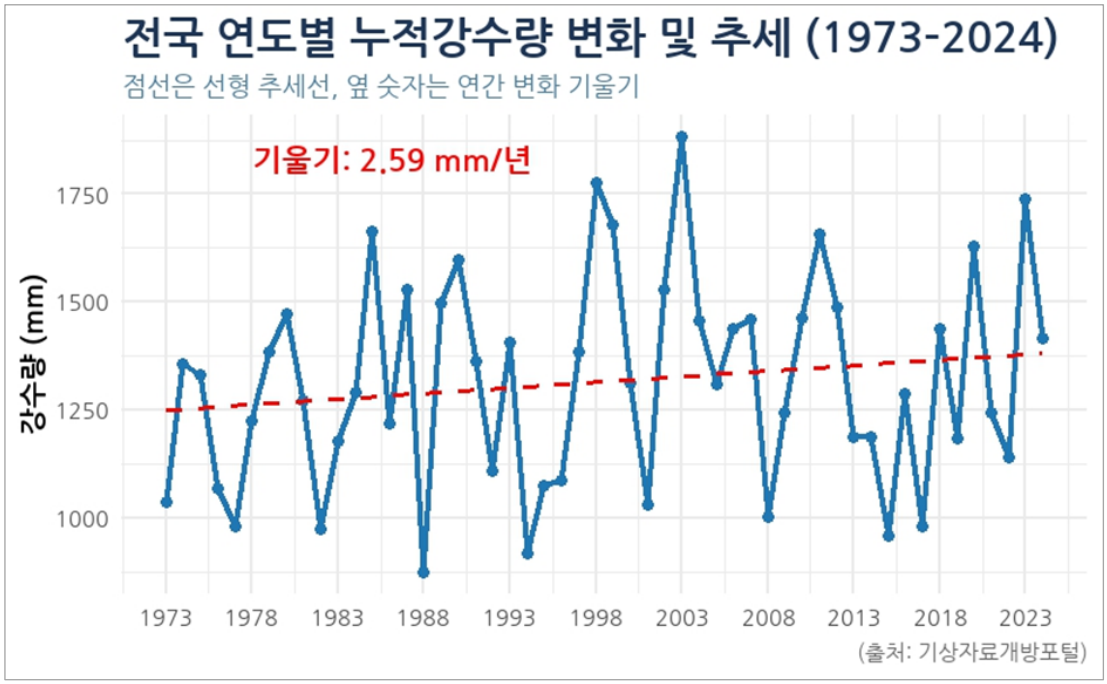
<그림 6> 배경의 회색 막대는 연도별 전국 건조주의보 일수 합계를 나타내며, 건조주의보 일수 상위 3 개 지역인 강원영동, 경북, 경남은 각각 빨강, 파랑, 주황색으로 표시돼 있다. 강원영동 지역의 건조주의보 일수는 지난 50 년간 뚜렷하게 증가했는데, 최근 5 년 평균이 31.8 일로 전국 평균을 크게 상회한다. 경북과 경남 역시 최근 5 년 평균이 각각 5.8 일, 4 일로, 전국적인 건조주의보 발효 일수 증가의 큰 부분을 차지한다. 캘리포니아와 같이 한국에서도 건조주의보 발효 기준을 넘는 기간이 2000 년대 이후 급증했으며, 일부 지역에서는 기후변화 영향에 따른 국지적 악화가 뚜렷하게 나타나고 있다고 해석할 수 있다.



<그림 6> 지역별 건조주의보 일수 변화

4.4.2 누적강수량

1973 년부터 2024 년까지 52 년간 전국의 연평균 강수량 데이터를 분석한 결과, 선형 추세선 상의 연간 증가율은 약 +2.59 mm/년으로 나타났다(그림 7). 장기적으로 전국 단위에서의 누적 강수량이 점진적으로 증가하는 경향을 알 수 있다. 연도별로 강수량의 변동성이 매우 크게 관측되지만, 전체적으로 봤을 때 통계적으로 유의한 상승의 기울기가 존재한다. 여름철 집중호우나 국지성 폭우 같은 극한 강수 이벤트가 늘어난 것을 고려할 때, 단순히 누적 강수량의 증가뿐 아니라 강수의 시간적 분포 특성 변화도 함께 분석해 볼 필요가 있다. 이에 이번 연구에서는 강수일수와 함께 강수패턴을 설명하고자 한다.

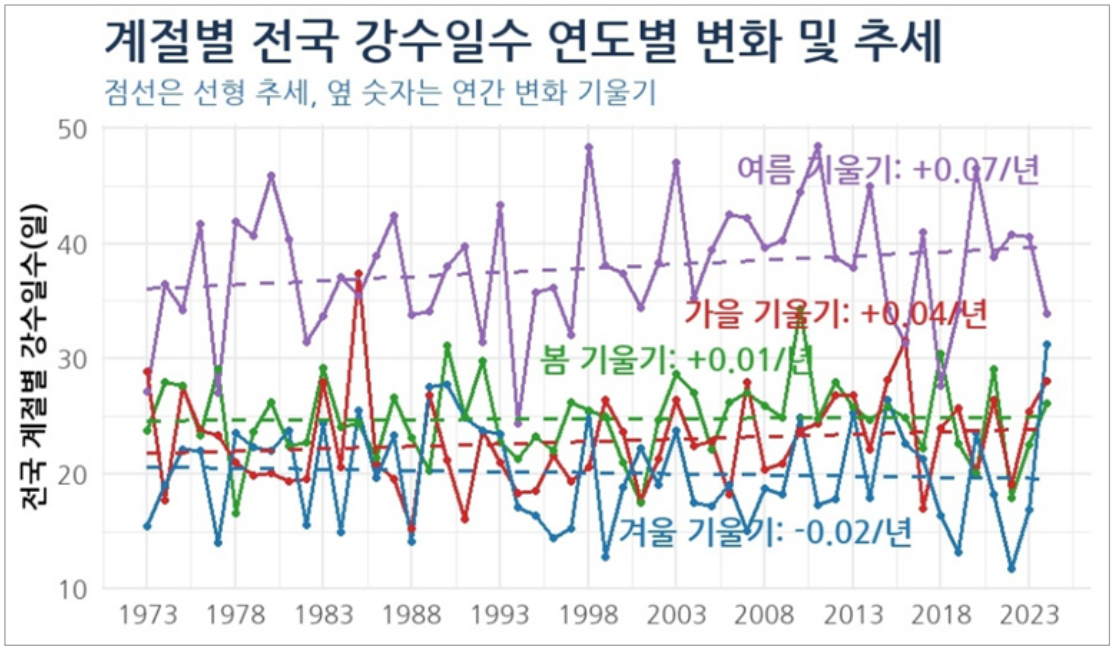


<그림 7> 연도별 전국 누적강수량 변화 및 추세(1973 년-2024 년)

4.4.3 강수일수

1973~2024 년 전국의 계절별 강수일수 변화를 분석한 결과, 여름과 가을의 강수일수는 꾸준히 증가해 온 반면, 겨울은 강수일수가 점차 감소하는 경향을 보인다(그림 8). 평균 강수일수는 여름철이 40 일 내외로 가장 길다. 최근 50 년간 여름 강수일수가 매년 0.07 일씩 증가하는 추세를 확인할 수 있다. 가을의 강수일수는 평균 20-30 일 사이이고, 매년 0.04 일씩 증가하고 있다. 봄의 평균 강수일수는 20-25 일이고, 매년 0.01 일씩 증가해 최근 몇 십 년 간

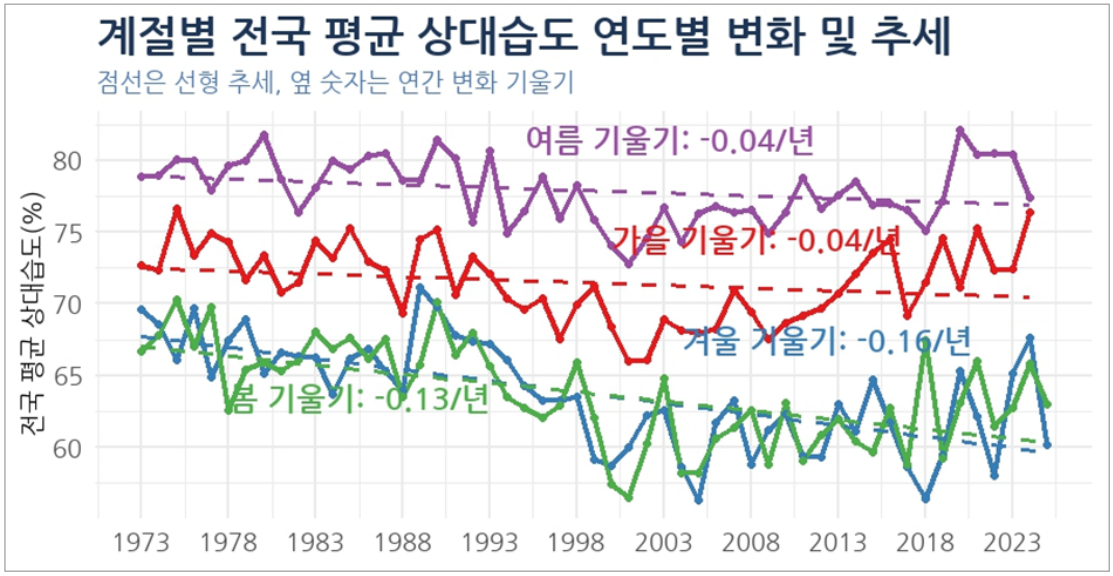
특별한 변화 없이 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 겨울의 평균 강수일수는 15~20 일이고, 다른 계절과 다르게 매년 약 0.02 일씩 감소하는 것을 확인할 수 있다. 여름과 가을은 비 오는 날이 더 많아지지만 봄은 거의 변화가 없다. 겨울은 강수일수가 오히려 감소하여 가뭄의 위험이 커질 수 있다. 따라서 해가 갈수록 누적강수량이 증가하는 것은 여름철의 집중강수에 따른 것으로 해석할 수 있다. 이에 반해 겨울철은 강수일수가 줄어들어 건조화 되는 추세가 확인된다. 즉, 산불조심 기간인 겨울철에 강수일수가 줄어들어 산불의 위험이 커지는 방향으로 기후가 변화하고 있음을 알 수 있다.



<그림 8> 계절별 전국 강수일수 연도별 변화 및 추세

4.4.4 평균 상대습도

1973 년부터 2024 년까지의 50 여 년간 전국의 평균 상대습도는 모든 계절에서 대체로 감소하는 추세를 보이고 있다(그림 9). 계절별로 감소 폭에는 차이가 있지만, 겨울과 봄의 하락세가 두드러진다. 겨울철에는 연평균 기울기가 -0.16%/년으로 가장 가파른 하락세를 보이며, 대기가 점점 더 건조해지는 현상이 나타나고 있다. 봄의 연평균 기울기는 -0.13%/년으로 겨울 다음으로 큰 감소폭을 기록했다. 이는 봄철 건조주의보 발령 가능성이 앞으로도 높아질 수 있음을 시사한다. 여름과 가을은 모두 연평균 기울기 -0.04%/년으로 완만한 감소 추세를 보인다. 겨울과 봄에 전국의 평균 상대습도가 빠르게 하락하고 있어, 건조주의보 발효 가능성과 산불 발생의 위험이 더 커질 것으로 보인다.



<그림 9> 연도별•계절별 전국 평균 상대습도 변화 및 추세

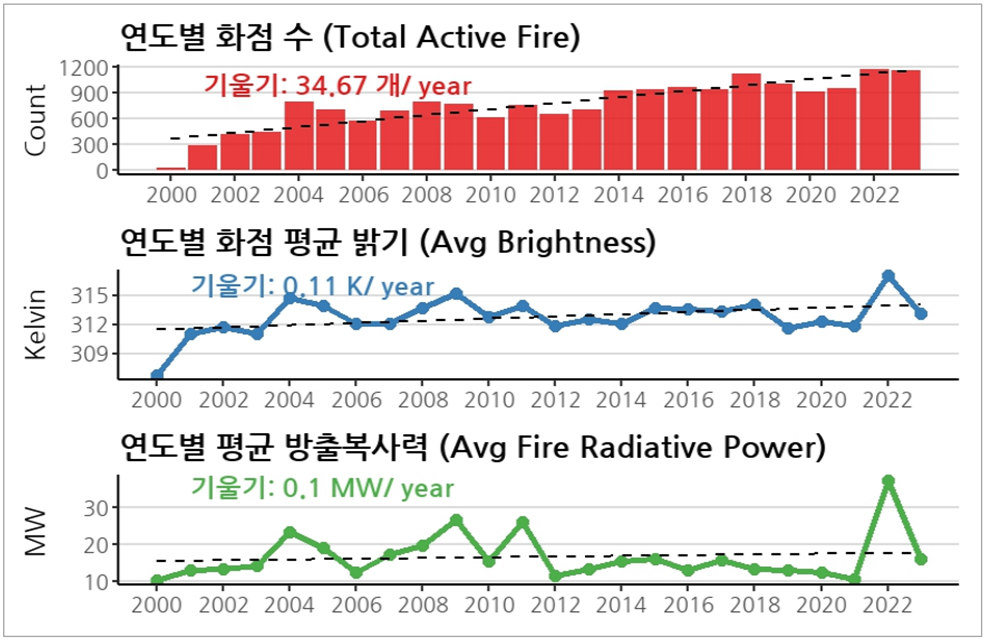
4.4.5 MODIS 관측기반 연도별 산불 변화 분석

한국에서는 건조주의보 일수가 증가하고 여름철에는 집중 강수가 증가하고 있다. 하지만 겨울에는 누적강수량과 강수일수가 감소하여 산불 위험기간인 겨울철에 대기가 건조해지는 추세를 확인할 수 있다. 이에 건조화된 대기로 인해 한국에서 산불이 증가 추세를 보이고 있는지 살펴보고자 한다. 이 과정에 미국 항공우주국(NASA)의 전 세계 산불 탐지 관측 위성 센서인 MODIS 의 자료를 이용했다. MODIS 는 2000 년 이후 10 여 년 동안 전 지구적인 산불관측 자료를 제공해왔으며, 연구뿐만 아니라 정책 대응 등에도 널리 활용되어 실효성이 입증되어 왔다(Giglio, 2016). 이번 연구에서는 MODIS 자료를 통해 활동 화점(Active Fire)의 연도별 변화를 분석하였다(그림 10).

화점 수는 전반적으로 증가하는 경향을 보이며, 평균 34.67 개/년의 증가 추세를 나타냈다. 2000 년대 초반과 대비해 최근에는 화점 탐지 건수가 약 3~4 배 이상 증가한 것으로 나타나, 한국의 산불 위험이 시간이 지남에 따라 높아졌음을 보여준다.

화점 밝기(Brightness)는 연도별 변동성이 크지 않으나, 평균 0.11K/년의 소폭 증가 추세를 나타냈다. 탐지된 화점의 에너지 방출 강도가 점진적으로 높아지고 있다고 볼 수 있다. 다만, 상승폭이 크지 않으므로 뚜렷한 강화 경향이 있다기보다는, 화점의 활동 특성이 일정하게 유지되는 것으로 해석된다.

화점의 방출 복사력(Fire Radiative Power, FRP)은 평균 0.1MW/년씩 증가하는 경향을 보이며, 대형 화재로 인해 일부 연도에서 피크가 관측되었다. 이는 화점 수가 늘어남과 동시에 개별 화점의 에너지 방출 규모도 확대되고 있음을 시사하며, 산불의 대형화 가능성에 대비한 지속적인 주의가 필요함을 의미한다.



<그림 10> MODIS 관측에 기반한 연도별 화점 수, 평균 밝기, 방출 복사력 변화 분석

한국의 기후와 산불 발생 간의 관계를 종합적으로 분석한 결과, 지난 50 년간 전국의 건조주의보 발령 일수가 유의미하게 증가했음을 확인하였다. 특히 강원 영동, 경북, 경남 지역에서 2000 년대 이후 건조주의보 일수가 급격히 증가하는 경향이 두드러졌다. 한편, 전국 누적 강수량은 장기적으로 증가하는 경향을 보였으나, 계절별 강수일수 분석결과 여름철 집중호우가 증가한 반면, 겨울철 강수일수는 오히려 감소했다. 따라서 겨울철 건조화 및 가뭄 위험이 심화되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 전국의 평균 상대습도는 전 계절에 걸쳐 감소하는 추세를 보였으며, 특히 겨울과 봄의 상대습도 하락 폭이 상대적으로 크게 나타나 산불 위험도를 높이는 요인으로 작용할 가능성이 확인되었다. NASA MODIS 위성자료를 활용한 분석에서는 한국에서의 활동 화점(Active Fire) 건수가 2000 년대 초반에 비해 최근 약 3~4 배 증가하였고, 화점의 방출복사력(FRP) 또한 상승하는 경향을 보여, 국내 산불의 발생 빈도와 강도가 장기적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 기후변화에 따라 산불 발생 위험이 높아지고, 대형화되는 경향에서 한국도 예외가 아님을 보여준다.

5. 결론 및 정책 제언

5.1 결론

이번 연구는 대형산불 발생이 빈번한 미국 캘리포니아의 사례를 중심으로, 산불과 기후변화 간의 연관성에 대한 선행연구들을 종합적으로 고찰하고, 이를 토대로 한국의 산불 위험 요인 및 추세를 분석한 것이다. 관련한 선행연구 41 편을 분석한 결과, 캘리포니아에서는 대형산불이 발생한 직후 또는 그 다음해에 산불과 기후변화 간 연관성을 다룬 연구가 집중적으로 수행되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이는 캘리포니아의 산불 모니터링 인프라와 연구 네트워크가 잘 구축되어 있어 신속한 학술적 대응이 가능한 덕분이다.

공간적 특성 면에서 살펴보면 중남부에 비해 상대적으로 산불 발생 빈도가 낮은 캘리포니아 북부에서 오히려 산불과 기후변화 간의 학술적 논의가 더 활발하게 이루어지고 있었다. 이는 산불이 드문 지역일수록 단일 사건이 초래하는 생태적·사회경제적 충격이 크기 때문에, 연구와 정책적 관심이 집중되었을 가능성을 시사한다. 기후변화로 인해 산불 발생 지역이 기존에 저위험 지역으로 인식됐던 곳으로 확산되고 있음을 보여주는 결과이기도 하다.

규모적 특성 면에서는 산불의 크기에 따라 연구의 접근 방식이 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 소규모 산불의 경우 단일 기후 요인이나 선형적 상관관계 분석이 주를 이루었으나, 대형 또는 초대형 산불의 경우 대기권 규모의 기후 패턴이나 지구적 기후 시스템과의 상호작용을 포괄적으로 다루는 경향이 확인되었다. 캘리포니아의 사례는 기온 상승, 상대습도 하락, 겨울철 강수 감소, 강풍 빈도 증가와 같은 복합적인 기후 요인이 대형산불이 발생하는 주요 배경임을 보여준다.

이러한 분석을 바탕으로, 이번 연구는 한국에서도 산불을 단순한 인위적 재난이 아니라 기후변화에 의해 심화되는 구조적 재난으로 인식할 필요가 있다는 점을 강조한다. 한국의

기후 데이터를 분석한 결과, 최근 50 년간 건조주의보 일수가 뚜렷하게 증가하고 있으며, 특히 강원 영동, 경북, 경남 지역에서 이러한 추세가 두드러졌다. 여름철 집중호우는 증가하는 반면, 겨울철 강수일수와 상대습도는 감소하는 경향을 보였고, MODIS 위성 자료를 기반으로 활동 화점을 분석한 결과 화점의 빈도와 강도가 과거 대비 3~4 배 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 한국 역시 기후변화로 인해 산불의 성격이 구조적으로 전환되고 있음을 시사한다. 즉, 한국에서도 이제 산불을 단순한 사고나 인위적 재난으로 인식하는 데서 벗어나 기후변화와 연계된 복합재난으로 재정의해야 한다. 그리고 이에 기반한 장기적이고 체계적인 산불 관리 전략을 수립해야 한다.

5.2 한국 산불 관리에 대한 정책적 시사점

기후위기 관점에서 산불을 학문적·정책적으로 주목해야 할 필요성

캘리포니아의 산불 연구 사례는 대형산불이 발생한 직후 학계와 정책 현장에서 빠르게 논의가 이루어지는 경향을 보여준다. 이러한 논의는 고도화된 산불 모니터링 체계와 산불에 대한 사회적 관심이 뒷받침되었기 때문에 가능했다. 반면, 아프리카 및 중동과 같이 산불이 빈번하게 발생하는 다른 지역에서는 관련 연구가 매우 부족하며, 이는 산불 모니터링 시스템, 연구 투자 등의 과학적·제도적 기반의 부재와 밀접한 관련이 있다. 한국 역시 최근까지 산불을 단순히 '입산자 실화'의 결과로 인식해 왔기 때문에, 산불이 발생해도 이를 심도 있게 학문적·정책적으로 분석하고 미래의 위험에 대응하려는 노력이 미흡했다. 한국에서도 강원 영동, 경북, 경남 지역을 중심으로 산불이 빈발하고 있으며, 2025 년 3 월에 발생한 대형산불은 인명 피해와 문화재 훼손 등 심각한 사회적 손실을 초래했다. 이는 단기적 초동 대응만으로는 한계가 있음을 보여준다. 이에 산불을 기후변화로 인한 복합재난으로 재정의해야 하며, 산불 위험 완화를 위한 장기적 전략을 세워야 한다.

전 지역으로 확산 가능한 산불 위험에 대한 재정의

기존의 한국 산불은 강원 영동과 경북 지역의 산림을 중심으로 발생했다. 그러나 2025 년 전국에서 동시다발적으로 발생한 산불은 산림뿐만 아니라 인명과 문화재 등 사회적

자산에까지 심각한 피해를 초래했다. 산불이 주거지 인근으로 확산될 경우 치명적인 인명·재산 피해로 이어질 수 있음에도 불구하고, 산불이 자주 발생하지 않는 지역에 대한 대비는 미흡한 상황이다. 국내외 선행연구에서는 산림-도시 인접지역(Wildland-Urban Interface, WUI)에서의 산불위험이 빠르게 증가하고 있음을 지적하고 있으며, 한국도 도시화의 확산으로 인해 이와 유사한 구조적 취약성이 확대되고 있다(안현진 외., 2024; 민정기, 2024). 또한 전지구적 기후변화의 맥락에서 산불을 바라볼 필요가 있다. 따라서 기존의 산불 발생 지역에 대한 관리뿐 아니라, 산불 발생 가능성이 낮았던 지역까지 포괄하는 국가적 차원의 대응전략 수립이 요구된다.

인위적 요인을 넘어 구조적 기후위험 논의로 확장 필요

한국의 산불정책은 입산자 실화 등 인위적 발생 요인에 초점을 맞추어 산불을 사회재난으로 관리하고 있다. 그러나 기후변화 시나리오에 따르면 한반도 전역이 산불위험 지역으로 확대될 가능성이 높으며, 기존의 접근 방식만으로는 구조적인 위험에 대응하기 어렵다. 특히 산불이 해안가 방향으로 확산되는 한국의 지형적 특성을 고려할 때, 2022 년 울진 산불과 같이 불이 원자력발전소 인근으로 확산될 위험성은 새로운 차원에서 재검토해야 한다. 산불이 원전 사고로 이어질 경우, 이는 단순한 재해를 넘어 국가적 재난으로 확산될 수 있다. 따라서 한국의 산불정책은 이제 입산자 행동 개선을 넘어, 대기 중 탄소 배출 저감 논의, 재생에너지 확대를 통한 에너지 전환 전략, 원자력발전소 안전성 재검토를 포함한 에너지 수급 체계 전반의 구조적 재설계를 수반해야 한다. 이러한 통합적 접근이야말로, 기후위기 시대 한국의 산불 리스크를 실질적으로 완화할 수 있는 지속가능한 전략이 될 것이다.

5.3 연구 한계 및 향후 연구 방향 제안

이번 연구는 캘리포니아와 한국의 산불 특성을 비교, 분석함으로써 기후위기 관점에서 시사점을 도출하고자 했다. 그러나 한국의 산불위험을 정량적으로 평가하기 위한 고해상도 기후, 산불 시뮬레이션 자료가 부족했고, 지역별 특성을 반영한 정밀 분석이 미흡하였다. 이는 한국의 산림 유형과 지역별 기후 특성을 반영한 고해상도 산불 시뮬레이션 연구가

필요하다는 것을 의미한다. 산불 발생 가능성이 심화되는 대기상태에서 지역별 특성을 반영한 정밀 분석 또한 필요하다. 그리고 앞으로는 산불이 미치는 경제적 피해뿐 아니라, 사회적, 생태적 피해를 포함하는 리스크 평가를 실시해야 한다. 이를 통해 산불 예방 및 대응 전략의 비용과 효율성을 분석하여 구조적이고 전략적인 대책을 마련해야 한다. 또한, 대형산불과 기후변화 간 연관성에 대한 연구가 캘리포니아를 중심으로 수행된 배경을 고려하면, 한국에서도 장기적인 산불 데이터 베이스를 구축하는 것이 과학적 근거에 기반한 정책을 수립하는 데 필요할 것이다.

References

- .Abatzoglou, J. T., Balch, J. K., Bradley, B. A., & Kolden, C. A. (2018). Human-related ignitions concurrent with high winds promote large wildfires across the USA. International Journal of Wildland Fire, 27(6), 377–386. https://doi.org/10.1071/WF17149
- Afolayan, S., Mekonnen, A., Gamelin, B., & Lin, Y. L. (2024). Multiscale Interactions between Local Short- and Long-Term Spatio-Temporal Mechanisms and Their Impact on California Wildfire Dynamics. Fire, 7(7). https://doi.org/10.3390/fire7070247
- Buechi, H., Weber, P., Heard, S., Cameron, D., & Plantinga, A. J. (2021). Long-term trends in wildfire damages in California. International Journal of Wildland Fire, 30(10), 757–762. https://doi.org/10.1071/WF21024
- Cayan, D. R., DeHaan, L. L., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Keeley, J. E., Mumford, J., & Syphard, A. D. (2022). Autumn precipitation: The competition with Santa Ana winds in determining fire outcomes in southern California. International Journal of Wildland Fire. https://doi.org/10.1071/WF22065
- Coen, J. L., Stavros, E. N., & Fites-Kaufman, J. A. (2018). Deconstructing the King megafire. Ecological Applications, 28(6), 1565–1580. https://doi.org/10.1002/eap.1752
- Collins, B. M. (2014). Fire weather and large fire potential in the northern Sierra Nevada. Agricultural and Forest Meteorology, 189–190, 30–35. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.005
- Crockett, J. L., & Leroy Westerling, A. (2018). Greater temperature and precipitation extremes intensify Western U.S. droughts, wildfire severity, and sierra Nevada tree mortality. Journal of Climate, 31(1), 341–354. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1
- Dennison, P. E., Brewer, S. C., Arnold, J. D., & Moritz, M. A. (2014). Large wildfire trends in the western United States, 1984-2011. Geophysical Research Letters, 41(8), 2928–2933. https://doi.org/10.1002/2014GL059576
- Dhal, S., Jain, S., Gadepally, K. C., Vijaykumar, P., Braga-Neto, U., Sharma, B. H., Acharya, B. S., Nowka, K., & Kalafatis, S. (2024). Predicting large wildfires in the Contiguous

United States using deep neural networks. Journal of Applied Remote Sensing, 18(02). https://doi.org/10.1117/1.jrs.18.028501

- Dwomoh, F. K., Brown, J. F., Tollerud, H. J., & Auch, R. F. (2021). Hotter Drought Escalates Tree Cover Declines in Blue Oak Woodlands of California. Frontiers in Climate, 3. https://doi.org/10.3389/fclim.2021.689945
- Fasullo, J. T., Otto-Bliesner, B. L., & Stevenson, S. (2018). ENSO's Changing Influence on Temperature, Precipitation, and Wildfire in a Warming Climate. Geophysical Research Letters, 45(17), 9216–9225. https://doi.org/10.1029/2018GL079022
- Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. Remote Sensing of Environment, 178, 31–41. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021 – The Physical Science Basis (pp. 1513–1766). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013
- Jin, Y., Randerson, J. T., Faivre, N., Capps, S., Hall, A., & Goulden, M. L. (2014). Contrasting controls on wildland fires in Southern California during periods with and without Santa Ana winds. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *119*(3), 432–450. https://doi.org/10.1002/2013JG002541
- Kalashnikov, D. A., Abatzoglou, J. T., Nauslar, N. J., Swain, D. L., Touma, D., & Singh, D. (2022). Meteorological and geographical factors associated with dry lightning in central and northern California. *Environmental Research: Climate*, *1*(2), 025001. https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac84a0
- Keeley, J. E., & Syphard, A. D. (2021). Large California wildfires: 2020 fires in historical context. *Fire Ecology*, *17*(1). https://doi.org/10.1186/s42408-021-00110-7
- Khorshidi, M. S., Dennison, P. E., Nikoo, M. R., Aghakouchak, A., Luce, C. H., & Sadegh, M. (2020). Increasing concurrence of wildfire drivers tripled megafire critical danger days in Southern California between 1982 and 2018. *Environmental Research Letters*, *15*(10). https://doi.org/10.1088/1748-9326/abae9e

- Kolden, C. A., Abatzoglou, J. T., Lutz, J. A., Cansler, C. A., Kane, J. T., Van Wagtendonk, J. W., & Key, C. H. (2015). Climate Contributors to Forest Mosaics: Ecological Persistence Following Wildfire. *Northwest Science*, *89*(3), 219–238. https://doi.org/10.3955/046.089.0305

- Li, F., Zhu, Q., Riley, W. J., Yuan, K., Wu, H., & Gui, Z. (2022). Wetter California Projected by CMIP6 Models With Observational Constraints Under a High GHG Emission Scenario. *Earth's Future*, *10*(4). https://doi.org/10.1029/2022EF002694

- Liu, Z., Eden, J. M., Dieppois, B., & Blackett, M. (2022). A global view of observed changes in fire weather extremes: uncertainties and attribution to climate change. *Climatic Change*, *173*(1–2). https://doi.org/10.1007/s10584-022-03409-9

- Liu, Z., & Wimberly, M. C. (2015). Climatic and landscape influences on fire regimes from 1984 to 2010 in the Western United States. *PLoS ONE*, *10*(10). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140839

- Luković, J., Chiang, J. C. H., Blagojević, D., & Sekulić, A. (2021). A Later Onset of the Rainy Season in California. *Geophysical Research Letters*, *48*(4). https://doi.org/10.1029/2020GL090350

- Lutz, J. A., Van Wagtendonk, J. W., Thode, A. E., Miller, J. D., & Franklin, J. F. (2009). Climate, lightning ignitions, and fire severity in Yosemite National Park, California, USA. *International Journal of Wildland Fire*, *18*(7), 765–774. https://doi.org/10.1071/WF08117

- Madadgar, S., Sadegh, M., Chiang, F., Ragno, E., & AghaKouchak, A. (2020). Quantifying increased fire risk in California in response to different levels of warming and drying. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *34*(12), 2023–2031. https://doi.org/10.1007/s00477-020-01885-y

- Malamud, B. D., Millington, J. D. A., & Perry, G. L. W. (2005). *Characterizing wildfire regimes in the United States*. https://www.pnas.org

- Miller, N. L., & Schlegel, N. J. (2006). Climate change projected fire weather sensitivity: California Santa Ana wind occurrence. *Geophysical Research Letters*, *33*(15). https://doi.org/10.1029/2006GL025808

- Parisien, M. A., & Moritz, M. A. (2009). Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales. *Ecological Monographs*, *79*(1), 127–154. https://doi.org/10.1890/07-1289.1

- Parks, S. A., Miller, C., Abatzoglou, J. T., Holsinger, L. M., Parisien, M. A., & Dobrowski, S. Z. (2016). How will climate change affect wildland fire severity in the western US? *Environmental Research Letters*, *11*(3). https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035002

- Pierce, D. W., Westerling, A. L., & Oyler, J. (2013). Future humidity trends over the western United States in the CMIP5 global climate models and variable infiltration capacity hydrological modeling system. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(5), 1833–1850. https://doi.org/10.5194/hess-17-1833-2013

- Qian, W., Ai, Y., Yu, J. Y., & Du, J. (2021). Opposite anomalous synoptic patterns for potential California large wildfire spread and extinguishing in 2018 cases. *Atmospheric Research*, *262*. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105804

- Salguero, J., Li, J., Farahmand, A., & Reager, J. T. (2020). Wildfire trend analysis over the contiguous United States using remote sensing observations. *Remote Sensing*, *12*(16). https://doi.org/10.3390/RS12162565

- Swain, D. L. (2021). A Shorter, Sharper Rainy Season Amplifies California Wildfire Risk. In *Geophysical Research Letters* (Vol. 48, Issue 5). Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1029/2021GL092843

- Syphard, A. D., Rustigian-Romsos, H., Mann, M., Conlisk, E., Moritz, M. A., & Ackerly, D. (2019). The relative influence of climate and housing development on current and projected future fire patterns and structure loss across three California landscapes. *Global Environmental Change*, *56*, 41–55. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.03.007

- Syphard, A. D., Sheehan, T., Rustigian-Romsos, H., & Ferschweiler, K. (2018). Mapping future fire probability under climate change: Does vegetation matter? *PLoS ONE*, *13*(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201680

- Varga, K., Jones, C., Trugman, A., Carvalho, L. M. V., McLoughlin, N., Seto, D., Thompson, C., & Daum, K. (2022). Megafires in a Warming World: What Wildfire Risk Factors Led to California's Largest Recorded Wildfire. *Fire*, *5*(1). https://doi.org/10.3390/fire5010016

- Wang, D., Guan, D., Zhu, S., Kinnon, M. Mac, Geng, G., Zhang, Q., Zheng, H., Lei, T., Shao, S., Gong, P., & Davis, S. J. (2021). Economic footprint of California wildfires in 2018. *Nature Sustainability*, *4*(3), 252–260. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00646-7

- Westerling, A. L., & Bryant, B. P. (2007). Climate change and wildfire in California. *Climatic Change*, *87*(1 SUPPL). https://doi.org/10.1007/s10584-007-9363-z

- Westerling, A. L., Bryant, B. P., Preisler, H. K., Holmes, T. P., Hidalgo, H. G., Das, T., & Shrestha, S. R. (2011). Climate change and growth scenarios for California wildfire. *Climatic Change*, *109*(SUPPL. 1), 445–463. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0329-9

- Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Bishop, D. A., Balch, J. K., & Lettenmaier, D. P. (2019). Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California. *Earth's Future*, *7*(8), 892–910. https://doi.org/10.1029/2019EF001210

- Zhang, L., Lau, W., Tao, W., & Li, Z. (2020). Large Wildfires in the Western United States Exacerbated by Tropospheric Drying Linked to a Multi-Decadal Trend in the Expansion of the Hadley Circulation. *Geophysical Research Letters*, *47*(16). https://doi.org/10.1029/2020GL087911

기후변화에 따른 산불 발생의 우발성 및 장기화, 대형화 추세

그린피스 동아시아 서울사무소
서울시 용산구 한강대로 257 청룡빌딩 6층(우 04322)
T. +82 2 3144 1994 **F**. +82 2 6455 1995
www.greenpeace.org/korea

문의 press.kr@greenpeace.org

저자 심혜영 그린피스 서울사무소 기후에너지 선임연구원

디자인 하루인포그래픽스
발간 2025년 8월

GREENPEACE