

산불 대응을 위한 화재기상가중 WUI 지표 개발과 정책적 활용 방안

Development of a Climate-Weighted WUI Index and Policy
Applications for Wildfire Management in Korea

서세교* · 정주철**

Segyo Seo · Juchul Jung

요약: 본 연구는 전국 1km 격자에서 화재기상지수(Fire Weather Index, FWI) 기반 극한 화재기상일수와 산림-정주지 물리적 노출을 결합한 화재기상가중 산림-정주지 인접 구역(Climate-Weighted Wildland-Urban Interface, CW-WUI) 선별지표를 구축하고, 이를 우선관리구역 후보를 선별하기 위한 계획지원 지표로 해석하였다. 최근 10년의 극한 화재기상 조건과 현재의 노출 구조를 결합하되, 광역 화재기상위험권역 위에 세밀한 노출 구조를 중첩한 전국 단위 선별지표로서, 기존의 취약성 연구와 차별성을 지닌다. 분석 결과, CW-WUI는 상위 구간에 총량이 집중되는 긴 꼬리 분포를 보였으며 상위 10% 격자가 전체의 51.5%를 차지하였다. 위험 정의를 달리해도 상위 구간의 공간적 윤곽은 대체로 안정적이었다. 산불 발생 자료와의 비교에서도 CW-WUI는 산불 발생확률을 직접 예측하기보다 고노출 구간 내 관리 강도를 구분하는 데 기여하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구는 CW-WUI를 WUI 유형 및 위험 등급 체계와 결합하여, 우선관리구역 선별과 정책 적용을 위한 해석 틀로 제시하였다.

핵심주제어: 산불, WUI, 화재기상위험, 정주지 노출, 도시계획

Abstract: This study develops a fire-weather-weighted WUI screening index (CW-WUI) for Korea by combining FWI-based extreme fire-weather days and forest-settlement physical exposure on a nationwide 1-km grid and positions it as a planning-support screening tool for identifying candidate priority management areas. By integrating recent extreme fire-weather conditions with the current exposure structure and overlaying fine-grained exposure patterns onto broad fire-weather risk zones, the index differs from conventional vulnerability assessments. The results reveal a long-tailed distribution, with the top 10% of grid cells accounting for 51.5% of the total. The spatial configuration of upper-ranked areas remains broadly stable across alternative hazard definitions, and comparison with wildfire occurrence data suggests that CW-WUI helps differentiate management intensity within highly exposed areas. Based on these findings, the study presents CW-WUI, in conjunction with WUI types and risk tiers, as an interpretive framework for screening priority management areas and linking them to policy instruments.

Key Words: Wildfire, WUI, Fire-Weather Risk, Settlement Exposure, Urban Planning

* 주저자, 부산대학교 도시공학과 석박사통합과정

** 교신저자, 부산대학교 도시공학과 교수

I. 서론

기후변화는 고온·건조·강풍이 겹치는 극한기상의 빈도와 강도를 높이고 있으며 산불은 이러한 변화가 가장 직접적으로 드러나는 재난 가운데 하나이다(IPCC, 2022). 최근의 대형 산불은 짧은 시간 안에 넓은 면적으로 확산되면서 정주지 피해를 동반하고 있고, 이는 사후 대응만으로는 위험에 적절히 대응하기 어렵다는 점을 시사한다(산림청, 2025; Read and Mowery, 2018).

문제는 단순히 피해 면적의 확대에 있지 않다. 고위험 화재기상 조건에서는 초기 대응 시간이 급격히 짧아지고 산불의 영향이 정주지로 빠르게 번진다. 재난위험은 위험요인만으로 설명되지 않으며 노출과 취약성이 결합될 때 비로소 피해로 전환된다(IPCC, 2022; UNDRR, 2017). 따라서 산불 관리는 반복되는 고위험 조건 아래에서 어떤 공간이 더 큰 피해 잠재력을 갖는지 사전에 가려내고, 계획 단계에서 이를 다루는 방향으로 나아가야 한다.

한편, 산불 문제가 가장 선명하게 드러나는 공간이 Wildland-Urban Interface(WUI)이다. WUI는 주택 등 정주 요소가 산림과 접하거나 혼재하는 구역으로, 위험요인과 노출이 맞물릴 때 정주지 피해와 대피 문제가 발생하기 쉽다(Radeloff, Hammer, Stewart, Fried, Holcomb, and McKeefry, 2005). WUI는 단순한 경계선이 아니라 개발의 확산에 의해 위험 노출이 축적된 공간으로 이해되어 왔으며, 이러한 맥락에서 계획과 규제가 핵심 관리 수단으로 강조되어 왔다(Read and Mowery, 2018; Walls and Wibbenmeyer, 2025).

그러나 국내 산불은 계절성이 뚜렷하고 WUI 운영정의가 충분히 정리되어 있지 않아 WUI 논의를 그대로 적용하기 쉽지 않다. 최근 10년간 산불은 봄철 비중이 57%로 가장 높고, 겨울(24%)과 가을(9%)이 뒤를 이었다(통계청, 2025). 겨울철(12-1월) 산불은 발생 횟수가 적지 않으나 낮은 기온으로 인해 대형 산불로 확산되는 경우는 드물다. 반면 봄·가을에는 강풍과 건조 기상이 반복되면서 산불이 대형화되거나 정주지 피해로 확대될 가능성이 크다.

Fire Weather Index(FWI)와 같은 화재기상위험 지수는 화재기상 조건을

정량화하는 데 활용되고 있으나, 공간에 따른 상대적 피해 잠재력을 설명하기 어렵다는 한계가 있다(Van Wagner, 1987). WUI 개념은 정주와 연료가 맞닿는 공간을 포착하는 데 강점이 있으나, FWI 기반 화재기상위험의 반복성을 함께 고려하지 않으면 공간별 관리 우선순위를 제시하는 데 한계가 있다(Radeloff et al., 2005). 결국 FWI 기반 화재기상위험과 WUI 노출을 하나의 분석 틀에서 결합하여 계획 기준으로 해석할 수 있는 지표가 필요하다.

이에 본 연구는 전국의 FWI 기반 화재기상위험과 산림-정주지 물리적 노출을 결합한 화재기상가중 WUI 선별지표(CW-WUI)를 구축하고, 이를 우선관리구역 선별을 위한 계획지원 지표로 해석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 전국 단위에서 재현 가능한 WUI 운영정의의 제시하고, 화재기상위험과 산림-정주지 노출을 결합한 CW-WUI를 구축하여 우선관리구역 후보를 선별하고 민감도를 점검하였다. 아울러 도출된 결과를 WUI 유형과 위험 등급 체계와 결합하여, 오버레이 지구와 개발행위허가 기준에 연계할 수 있는 정책 적용 방향을 검토하였다.

II. 선행연구 분석 및 과제 식별

1. WUI의 개념적 정의 및 유형화

WUI는 건물과 산림이 만나는 공간으로 정의되며, 산불 위험이 생태·사회적으로 교차하는 핵심 경계로서 연구와 정책 논의에서 활용되고 있다(Radeloff et al., 2005). WUI 운영의 대표적 정의는 접경형(Interface)과 혼재형(Intermix)으로 구분하는 방식이며, 이 구분은 토지이용 관리와 연료 관리에서 각각 다른 초점을 요구하며, 산불 위험 관리 정책과 공간계획 측면에서 함의를 지닌다.

WUI의 식별은 일반적으로 인공 구조물 분포와 식생 분포를 결합하는 방식으로 수행된다. 미국의 경우 인구조사 단위에서 주택밀도와 야생 식생 비율을 결합해 WUI를 산정하였고, 이후 다양한 지역의 연구에서 유사한 접근

이 확산되고 있다(Platt, 2010; Radeloff et al., 2005). 최근에는 전 지구 차원의 WUI 증가 추세도 확인되어, WUI가 특정 국가의 문제가 아니라 보편적인 토지이용 변화의 결과임이 드러나고 있다(Schug et al., 2023).

단, WUI는 자료 단위, 건물 밀도 임계값, 식생 판정 기준에 따라 달라질 수 있어 정의 효과(definition effect)에 대한 지속적인 논의가 있어 왔다(Kumar, Li, Nguyen, and Banerjee, 2022; Platt, 2010). 따라서 계획 연구에서 WUI를 활용하기 위해서는 개념적 틀을 명시하는 것에 그치지 않고 최소한의 자료로도 재현 가능한 운영정의를 제시해야 한다. 특히 국가 단위 연구에서는 미세한 경계선을 정밀하게 재현하는 것보다, 산림 내부에 개발이 혼재한 공간과 산림 경계에 개발이 접한 공간을 구분하는 유형화 논리가 더 중요하다.

국내에서도 최근 대형 산불에 따른 산림 인접 정주지의 피해 가능성이 사회적 이슈로 부각되면서, WUI 관점의 관리 필요성과 산불 관리구역 선별에 관한 논의가 확대되고 있다(민정기, 2024; 산림청, 2024). 그러나 많은 연구들이 특정 사례지역 분석, 위험지도 작성, 예측모형 개발에 상대적으로 집중되어 있어 정책 수립 단계에 적용할 수 있는 표준화된 WUI 운영정의와 유형화 기준을 제시한 연구는 많지 않다(김구윤·이미란·곽창재·한지혜, 2023).

제도 측면에서는 산불취약공간을 '산림 인접지역' 등으로 규정하고 취약지 관리와 대응체계를 제시하는 지침이 마련되어 왔다(산림청, 2018, 2024). 그러나 실제 제도 운영은 거리 기준의 행위규제나 사후 대응 조치에 무게가 실려, 정책 수립 단계에서 요구되는 소방 접근, 완충공간, 대피로 요건을 정책 기준으로 구조화하는 작업은 여전히 제한적이다.

2. 산불 위험 평가의 개념적 틀

재난위험 연구에서 위험은 일반적으로 위험원(hazard), 노출(exposure), 취약성(vulnerability)의 상호작용으로 구성된다(IPCC, 2014, 2022). 이를 산불에 적용하면, 위험원은 건조·고온·강풍 등 화재기상과 연료 상태가 만드는 발화·확산 조건이다. 노출은 산불 영향권 안에 놓인 인명·자산·시설, 특

히 건물이며, 취약성은 구조물의 내화성·배치, 방화공간, 대피 가능성, 대응 역량 등 피해로 이어지는 민감도를 뜻한다. 최근 WUI 연구와 적응계획 논의에서는 위험의 세 요소를 모두 하나의 지표로 기계적으로 결합하는 대신, 광역 선별 단계에서는 위험원과 노출을 먼저 결합하고 취약성은 건축·대피·완충공간과 같은 관리 수단을 통해 별도로 다루는 접근이 정책적으로 더 유효하다고 평가하고 있다.

도시·지역계획 부문은 노출과 취약성을 구조적으로 설명한다. 개발이 산림 내부로 분산되는 혼재형 WUI에서는 소방 접근성과 대피 취약성이 커지고, 개발이 산림 경계에 밀집된 접경형 WUI에서는 연료 관리와 완충공간 확보의 중요성이 커진다. 이러한 관점은 산불 위험이 산림 내부의 연료 상태뿐만 아니라 토지이용 패턴과 인공 구조물의 조건에 따라 확대되거나 완화될 수 있다는 계획 논리와 직접 연결된다.

재난 완화를 위한 토지이용계획의 유효성은 오래전부터 강조되어 왔으며, 최근 기후변화 적응에서도 공간계획을 통해 노출을 줄이고 취약성을 완화하는 접근이 핵심 전략으로 제시되고 있다(Burby, Deyle, Godschalk and Olshansky, 2000; Godschalk, 2003; IPCC, 2022). 산불에 있어서도 화재기상과 같은 위험요인의 변화에 집중하는 것보다 산림과 정주지의 접촉 구조가 만드는 노출을 함께 평가하고, 그 결과를 계획 수단의 선택 논리와 연결할 필요가 있다.

3. 기후변화와 화재기상위험 지수(FWI)

FWI(Fire Weather Index)는 기온, 습도, 풍속, 강수 등 기상요소를 결합해 잠재적 화재 위험을 나타내는 화재기상위험 지수로, Canadian Forest Fire Danger Rating System의 핵심 구성요소로 개발되었다(Van Wagner, 1987). 정량화 가능성과 해석의 용이성, 자료 접근성이 높아 기후변화 영향평가와 산불 위험분석에서 가장 널리 쓰이는 지수 가운데 하나이며, Copernicus/EFFIS 등 국제 시스템에서도 표준 화재기상 지수로 활용되고 있다(Copernicus Emergency Management Service (CEMS), 2019; Hersbach et al., 2020).

국내에서도 FWI 또는 FWI 기반 산불모형을 활용하여 산불 발생 및 산불 위험의 계절적·공간적 특성을 분석하려는 연구가 이루어져 왔다(정지윤 등, 2018; Jo et al., 2023). 한편 마정혁·유철상(2024)은 국내외 주요 산불위험지수의 국내 적용성을 비교하여 기상요인 기반 산불위험지수의 국내 적용 가능성과 한계를 논의하였다. 김정훈·안현빈·김주환·이태우·김형수(2024) 역시 가뭄 시나리오와 기상자료를 활용하여 산불위험성 평가의 확장 가능성을 검토하였다. 이러한 연구들은 FWI 기반 화재기상위험 지수가 특정 산불의 우발성에 좌우되지 않으면서 기후변화로 심화되는 산불기상 조건을 공간계획의 기준으로 반영하는 데 유효하다는 점을 보여준다.

물론 FWI는 캐나다의 연료와 기상 조건을 바탕으로 개발된 화재기상위험 지수이므로(Van Wagner, 1987), 지역별 연료 특성, 미시지형, 국지풍을 충분히 반영하지 못할 수 있다. 또한 국내 산불은 사람의 행위에 의한 점화가 우세하므로, FWI가 곧바로 산불 발생확률을 뜻하지는 않는다. 그럼에도 화재의 확산과 대형화는 건조와 강풍 등 화재기상 조건에 크게 좌우되기 때문에, FWI는 산불이 발생할 가능성 자체보다 점화가 발생했을 때 확산과 진화 난이도, 피해확대 가능성이 커질 수 있는 화재기상 조건의 강도와 반복성을 보여주는 지수로 해석하는 편이 타당하다(IPCC, 2021, 2022). 따라서 FWI는 기후위험 전체를 대표하는 지표가 아닌 화재기상 조건의 강도와 반복성을 나타내는 지수로 이해하고, 세분된 노출 정보와 결합하여 산불 관리구역을 가려내는 데 활용하는 접근이 필요하다.

4. WUI에서의 피해 집중과 관리 수단

WUI는 산불 발생 가능성뿐 아니라 구조물 피해가 집중되는 공간이기도 하다(Platt, 2010). 이 공간에는 연료(식생)와 점화원(인간 활동)이 동시에 존재하고, 인공 구조물이 가까이 놓여 있어 피해로 전환되는 메커니즘이 강화되기 때문이다(Radeloff et al., 2005). 따라서 WUI 관리의 핵심은 화재가 발생했을 때 구조물 점화 가능성과 대피 실패 가능성을 줄이는 것에 있다.

Cohen(2000)은 구조물 피해가 산림 내부의 대형연료보다 정주지 인근 연

료와 구조물 취약성에 의해 더 크게 좌우될 수 있음을 강조하며 HIZ(Home Ignition Zone) 개념을 제시하였다. NFPA(2018) 역시 구조물 점화 위험을 중심에 두고 연료 수정(fuel modification)과 건축적 요구사항을 제시하고 있으며, 최근 WUI 관리 연구는 접근성, 완충공간, 급수 등 계획·규정의 적용 틀을 보다 명확히 제시하는 방향으로 발전하고 있다(International Code Council, 2024). 이러한 기준들은 WUI 관리가 단순한 행동지침이 아닌 방재 정책의 공간적 기준으로 제도화될 수 있음을 보여준다.

또한 WUI에서는 대피 가능성 자체가 피해의 핵심 요인이 될 수 있기 때문에, 대피로의 이중성(egress redundancy)과 같은 최소요건이 개발 허용의 전제가 되어야 한다는 논의도 제기되어 왔다(Cova, 2005). 즉 산불 위험관리에서 대피 요건은 권고사항이 아니라 개발행위의 필수 조건으로 제도화할 필요가 있다.

이와 관련하여 국내에서는 산불 위험이 높은 정주지의 피해저감 방안으로 주택 주변 연료 관리, 점화원 관리, 대피 교육 등 행동지침이 제시되어 왔으며, 최근에는 산림-도시 접경에서의 기반시설·입지 관리의 필요성도 논의되고 있다(민정기, 2024; 산림청, 2020; 이석민·신상영·윤형미, 2025). 일부 지자체는 산불방지 및 지원 조례를 통해 행정적 지원체계를 규정하고 있으나(부산광역시, 2024), 이러한 논의는 여전히 발생 이후의 관리와 지원에 무게가 실리는 경우가 많다.

한편, 산불 이외의 기후재난 분야에서는 위험분석 결과를 지구단위계획 시행지침이나 개발행위허가 기준으로 구체화하려는 논의가 이루어져 왔다. 김경훈·김민선·이제선(2016)은 토사재해 저감을 위한 계획기법을 토지이용·도시·단지·건축 수준으로 정리하고 이를 지구단위계획 시행지침 항목으로 제안하였고, 최유라·한우석(2024)은 용도지역별 취약특성을 고려해 예방형 도시계획 요소를 차등 적용해야 함을 주장하였다. 김현주·김태현·이계준(2010)도 도시 방재수준 진단 지표와 체크리스트를 통해 계획 단계별 적용 가능성에 대해 논의하였다. 이러한 국내 논의는 위험지표를 계획 기준과 연결할 수 있음을 시사하고 있다.

5. 선행연구 종합 및 연구과제 식별

이상의 선행연구는 WUI의 공간 구조를 식별하는 기준, 재난위험의 개념적 틀, 화재기상의 정량화 방법, 그리고 관리 수단의 유형을 제시하고 있다. 그러나 국내 계획 연구에서는 이러한 요소들이 계획 체계로 연결되기보다, 산불 위험지도 작성, 피해 사례지역 분석, 개별 관리 수단 논의로 분절되어 다루는 경향이 있기 때문에 연구 결과를 계획·허가 단계의 판단 기준으로 전환하기 어려운 상황이다.

이러한 분절은 세 가지 연구 공백으로 이어지며, 본 연구는 이를 각각의 연구과제로 설정하였다. 첫째, 전국 단위에서 재현 가능한 WUI 운영정의와 유형화 기준이 충분히 정리되어 있지 않아 산불 대응의 공간적 후보군을 일관되게 선별하기 어렵다. 이에 본 연구는 1km 격자 기반의 WUI 유형화 기준(혼재형·접경형)을 제시하고 전국 단위 선별에 적용하였다. 둘째, 화재기상위험과 정주지 노출을 함께 반영하는 통합 지표가 부족하여 관리 우선순위 제시에 제약이 있다. FWI 기반 극한 화재기상일수와 산림-정주지 물리적 노출을 결합한 CW-WUI 구축으로 이 공백을 채운다. 셋째, 위험분석 결과를 오버레이 지구, 개발허가 조건, 완충공간 등 계획 수단으로 연결하는 논리가 아직 체계화되지 않았다. CW-WUI 상위 구간을 WUI 유형 및 위험 등급과 결합하여 정책 적용 강도를 차등화하는 해석 틀을 제시함으로써 이 공백에 대응할 것이다.

현재 국내 산불 관리에서 필요한 것은 이미 축적된 논의를 계획에 적용 가능한 하나의 체계로 통합하는 작업이다. 본 연구는 FWI 기반 화재기상위험과 산림-정주지 물리적 노출이 결합되는 우선관리 후보지를 선별하기 위한 계획지원 지표로 설정하였다. 이를 위해 재현 가능한 WUI 운영정의를 바탕으로 CW-WUI를 구축하고, 그 결과를 WUI 유형과 위험 등급 체계로 재해석하여 우선관리구역 후보를 가려내는 기준과 정책 적용의 해석 틀을 함께 검토하였다. 특히 본 연구는 화재기상가중의 의미를 고노출 구간 내부에서 관리 강도를 세분하는 증분적 정보로 파악하였다.

III. 연구 방법

1. 연구의 초점과 설계

본 연구의 초점은 0.25° 수준의 FWI 기반 화재기상위험권역과 1km 수준의 산림-정주지 물리적 노출 구조를 중첩하여 전국 단위 산불 우선관리구역을 식별하고, 그 결과를 계획·허가 단계의 사전검토 기준으로 활용할 수 있는지 살펴보는 것이다.

이를 위해 본 연구는 IPCC의 Hazard-Exposure-Vulnerability 구분을 분석 틀의 출발점으로 삼되, 전국 단위의 공간 선별 단계에서는 위험요인과 노출의 결합에 초점을 두었다. 취약성은 건축 기준, 완충공간, 접근·대피 조건과 같은 계획·관리 수단을 해석 단계에서 반영하였다.

즉 CW-WUI는 FWI 기반 극한 화재기상일수와 물리적 노출을 중심으로 우선관리구역 후보를 추려내는 1차 선별지표이며, 세부 취약성 판단은 후속 현장 검토와 허가 기준에서 보완하는 구조로 설계하였다. 분석 절차는 (1) FWI 기반 화재기상위험과 노출지표 산정, (2) CW-WUI 구축과 상위 구간 도출, (3) WUI 유형 및 위험 등급 결합, (4) 산불 발생 지점과의 비교 검토 순으로 진행하였다.

2. 연구의 범위 및 분석 자료

1) 연구의 범위

공간적 범위는 전국을 대상으로 한 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 의 107,100개 격자이다. 서로 다른 원자료를 같은 기준에서 중첩·집계하기 위해 모든 자료의 좌표체계를 EPSG:5179로 통일하였다. 1km 격자는 전국 단위 비교, 이질적 공간자료의 통합, 계획 적용 단위로서의 해석 가능성까지 고려하여 설정하였다.

시간적 범위는 지표 산정 자료와 비교자료를 구분해 설정하였다. 화재기상위험은 최근 반복된 화재기상 조건을 반영하기 위해 2015-2024년을 기본

기간으로 두고, 국내 산불의 계절성을 고려해 봄(2-4월)과 가을(10-11월)을 중심으로 산정하였다. 노출은 현재의 관리 수요를 반영할 수 있는 최신 구조 자료로서 2024년 중분류 토지피복지도와 건물통합정보를 활용하였다. 겨울철 발생 비중도 작지 않지만, 본 연구의 목적은 산불 발생 건수 총량의 재현이 아니라 구조물 노출과 결합되는 화재기상 조건의 공간 차이를 전국 단위에서 비교하는 데 있다. 이에 계절적 작동 메커니즘이 이질적인 겨울을 동일 지표에 포함하기보다, 구조물 피해 확대와 계획적 대응 필요성이 보다 안정적으로 드러나는 봄·가을을 분석 범위로 한정하였다.

본 연구에서 봄철 2-4월은 산불 발생과 화재기상 조건이 집중되는 핵심 고위험기간으로 설정한 분석 대상 기간이다. 국제 산불 연구에서도 지역별 화재계절은 봄·가을 전체가 아닌 화재 활동과 화재기상 조건이 집중되는 기간을 기준으로 설정되는 경우가 많다. 중국의 경우 산불이 주로 4월까지의 초봄에 발생한다고 보고되었고(Fang et al., 2021; Lian, Xiao and Feng, 2023), 국내 연구에서도 한국 산불이 봄철, 특히 2-4월에 우세하게 발생한다는 사실이 확인되었다(Choi and Chae, 2024). 이에 따라 본 연구의 봄철은 국내외 선행연구에서 확인되는 이른 봄철 화재활동 집중기를 반영하여 2-4월로, 가을철은 동일한 원칙에 따라 10-11월로 한정하였다.

따라서 CW-WUI는 최근 10년의 화재기상위험과 2024년 시점의 구조적 노출을 결합한 현재 시점의 전국 단위 선별지표에 해당한다. 반면 산불 발생 지점은 사용 가능한 자료의 최신 구축 연도가 2021년이므로 2015-2021년으로 한정하였다. 이에 따라 IV장 5절의 비교는 과거 사건의 예측 검증이 아니라, 현재의 선별 결과가 최근 발생 이력과 어느 정도 공간적으로 부합하는지를 살펴보는 비교 검토로 설계하였다.

2) 분석 자료

〈표 1〉 분석 자료 요약

자료명	기준 시점	원자료 공간 단위	분석 초점	출처
FWI (Fire Weather Index)	1991-2024 (임계값 추세) 2015-2024 (위험 산정)	0.25° 격자	계절별 극한 화재기상 일수 및 변화·추세 산정	Copernicus CEMS Fire Historical (ERA5)
중분류 토지피복지도	2024	5m 해상도	산림비율 산정	환경공간정보서비스
건물통합정보 GIS	2024	건물 폴리곤	건축 면적 및 건물 개수 산정	국토교통부
산불 발생 지점 GIS	2015-2021 (최신)	점 데이터	CW-WUI와 산불 발생 이력의 공간 비교	산림빅데이터 거래소

본 연구에 활용한 자료는 FWI, 토지피복, 건축물, 산불 발생 지점의 네 범주이며 각 자료의 출처, 기준시점, 원자료 공간단위, 분석상 역할은 〈표 1〉에 제시하였다.

FWI 원자료는 Copernicus Emergency Management Service (CEMS)의 “Fire danger indices historical data”에서 제공하는 일별 FWI이다. 본 연구는 1991-2024년을 장기 기준기간으로 사용해 계절별 95번째 백분위 임계값을 설정하고, 2015-2024년에 임계값을 초과한 일수를 집계하였다. 따라서 이 자료는 지속적으로 나타나는 고위험 화재기상 조건의 공간 분포를 정량화하는 데 활용된다.

노출 산정에는 2024년 중분류 토지피복지도와 건물통합정보 GIS를 활용하였다. 토지피복지도에서는 중분류 코드 체계에 따라 활엽수림, 침엽수림, 혼효림에 해당하는 피복코드(310, 320, 330)를 산림으로 추출해 격자별 산림 비율(for_frac)을 계산하였고, 건물자료에서는 건물 개수와 건축면적을 집계하였다. 두 자료는 현재 시점의 구조적 노출을 반영하는 자료로 활용되었다.

본 연구에서 산림은 법적 산림경계가 아니라 토지피복지도상 수목피복지를 의미한다. 따라서 for_frac은 산림의 소유·관리 경계가 아니라 1km 격자 내 수목피복 면적의 비율을 나타낸다. 다만 본 연구는 수종, 임령, 임분밀도,

하층식생, 연료연속성 등 산림연료의 질적 차이를 직접 반영하지 못하므로, CW-WUI는 산림연료 위험지도가 아니라 산림피복과 정주지 노출의 접촉구조를 반영한 선별지표로 해석해야 한다.

산불 발생 지점은 산림빅데이터 거래소의 산불발생위치도 시도 데이터를 이용하였다. 해당 자료는 지표 산정에 직접 투입하지 않고, 도출된 선별 결과가 과거 산불 발생 이력과 어느 정도 공간적으로 부합하는지 살펴보기 위한 비교자료로 활용하였다.

〈표 2〉 분석 격자의 구성

구분	격자 수	비율 (%)
전체 1km 격자(중복 제거)	107,100	100
건물 존재(bld_cnt ≥ 1)	85,533	79.86
건물 부재(bld_cnt = 0)	21,567	20.14
산림 존재(for_frac > 0)	93,020	86.85
산림 부재(for_frac = 0)	14,080	13.15
노출 존재(E_area > 0)	77,149	72.03
노출 부재(E_area = 0)	29,951	27.97

개별 자료를 1km 격자에 집계한 기본 구성은 〈표 2〉에 정리하였으며, 전체 격자 가운데 건물, 산림에 해당하는 노출 격자의 규모를 보여준다. 특히 $E_area > 0$ 은 산림과 건물이 같은 격자 안에 함께 존재하는 경우를 뜻하므로, 전국 격자 전체 가운데 CW-WUI가 실제로 작동하는 공간의 기초 규모를 파악할 수 있다.

3. CW-WUI 지표 산정

1) FWI 기반 화재기상위험(Hazard) 산정

본 연구에서 화재기상위험은 FWI를 이용한 극한 화재기상일수로 집계하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 FWI는 기후위험 전체를 대표하는 지표가 아니라 화재기상 조건의 강도와 반복성을 나타내는 지수이므로, 본 연구에서는

산불 발생 가능성보다 확산과 피해 확대를 유발하는 화재기상 조건의 공간적 패턴을 파악하는 지수로 활용하였다(Van Wagner, 1987).

산정 절차는 세 단계로 구성하였다. 첫째, Copernicus Emergency Management Service (CEMS)의 일별 FWI를 수집·가공하였다. 둘째, 0.25° 격자별로 1991-2024년 계절별 일별값의 95번째 백분위 임계값을 산정하였다(Copernicus Emergency Management Service (CEMS), 2019). 절대 임계값을 전국에 동일하게 적용할 경우 지역별 배경 수준의 차이가 가려질 수 있으므로, 본 연구는 각 격자의 장기 분포 안에서 상위 위험 꼬리를 식별하는 95번째 백분위 기준을 사용하였다. 이러한 방식은 지역별 배경 기상조건의 차이를 보정하면서 상대적으로 이례적인 고위험 화재기상 조건을 식별하기 위한 것으로, 기존 연구에서도 FWI95d 또는 FWI_{95d}와 같이 지역별 FWI 분포의 95번째 백분위 초과일수를 극한 화재기상일수로 활용해 왔다(Abatzoglou, Williams and Barbero, 2019; Quilcaille, Batibeniz, Ribeiro, Padrón and Seneviratne, 2023). 셋째, 2015-2024년에 이 임계값을 초과한 일수를 계절별로 집계하여 봄·가을의 극한 화재기상일수를 산정하였다. 임계값은 1991-2024년 장기 분포에서 산정하였고, 최근 변화(dH)는 1991-2014년과 2015-2024년을 구분하여 산정하였다. 두 기간의 차이와 1991-2024년의 선형추세도 함께 계산하여 위험 변화의 방향을 분석하였다.

FWI 원자료는 0.25° 격자(약 27km) 해상도에서 산정되므로(Copernicus Climate Data Store (CDS), 2018; Hersbach et al., 2020), 본 연구에서는 이를 1km 분석 격자에 할당한 뒤 노출 지표와 결합하였다. 구축된 지도의 세밀한 공간 패턴은 주로 1km 노출 구조에서 비롯되며, 화재기상위험은 그 위에 광역적 화재기상 조건의 차이를 부여한다. 따라서 본 연구의 해석 단위는 '격자별 절대위험'이라기보다 '광역 화재기상위험권역 안에서의 상대적 관리 우선순위'에 가깝다. FWI 기반 화재기상위험 지수 및 파생지표는 계절별 수준, 최근 변화, 장기 추세의 세 가지 범주로 구성하였으며, 개별 지표의 정의는 <표 3>에 제시하였다.

〈표 3〉 화재기상위험 산정 지표의 정의

지표	정의	단위
H_spr_1524	2015-2024년 봄(2-4월) 일별 FWI가 1991-2024 기준기간 p95 초과인 날의 연평균 수	일/년
H_aut_1524	2015-2024년 가을(10-11월) 일별 FWI가 1991-2024 기준기간 p95 초과인 날의 연평균 수	일/년
H_sum_1524	봄·가을 합계: H_spr_1524 + H_aut_1524	일/년
H_max_1524	봄·가을 최댓값: max(H_spr_1524, H_aut_1524)	일/년
dH_spr	봄철 변화(ΔH): (2015-2024 봄) - (1991-2014 평균)	일/년
dH_aut	가을철 변화(ΔH): (2015-2024 가을) - (1991-2014 평균)	일/년
trH_spr_dp	봄철 추세(trH): 1991-2024 연간 극한일수의 선형추세	일/10년
trH_aut_dp	가을철 추세(trH): 1991-2024 연간 극한일수의 선형추세	일/10년

주: 변수명에서 1524는 위험 산정기간인 2015-2024년을 의미. p95 임계값은 1991-2024년 장기 기준기간에서 산정.

spr은 봄철(2-4월), aut는 가을철(10-11월), sum은 봄·가을 합산, max는 계절별 최댓값을 의미.

〈표 3〉은 우선관리구역 후보 선별에 직접 사용하는 계절별 수준 지표(H_spr, H_aut, H_sum, H_max)와 최근 변화 및 장기 추세를 파악하기 위한 보조지표(dH, trH)를 함께 제시하고 있다. 본 연구의 CW-WUI 산정은 H_sum을 기본값으로, H_max를 민감도 분석용 대안값으로 사용하였다. dH와 trH는 위험 수준의 결정에 관여하지 않으므로, 최근 변화와 장기 추세의 방향을 읽는 보조 해석자료로 활용하였다.

2) 노출(Exposure) 산정

노출은 산림과 건물이 같은 공간 단위 안에 함께 존재할 때 형성되는 물리적 접촉 구조로 정의하였다. 따라서 노출 산정은 산림과 건물이 같은 격자 안에서 얼마나 중첩되어 나타나는지를 포착하는 데 초점을 두었다. 노출 산정에 사용한 핵심 변수는 산림비율(for_frac), 건물 개수(bld_cnt), 건축면적 합계(bld_area_m)이며, 각 변수의 정의는 〈표 4〉와 같다. 본 연구는 건물 개수와 건축면적을 함께 산정하되, 최종 노출 규모는 동일한 건물 수 안에서도 개발 규모 차이를 반영할 수 있는 건축면적 기반 지표를 중심으로 해석하였다.

〈표 4〉 산림·건물 노출 변수의 정의

변수	정의	단위
for_frac	1km 격자 내 산림면적 비율	비율 (%)
bld_cnt	1km 격자 내 건물 개수	동
bld_area_m	1km 격자 내 건축면적 합계	m ²

3) CW-WUI 산정

CW-WUI는 노출과 FWI 기반 화재기상위험을 순차적으로 결합하여 산정하였다. 핵심 쟁점은 산림과 건물이 같은 격자에 존재할 때 노출을 어떻게 수치화할 것인지, 그리고 그 노출에 화재기상위험을 결합하여 우선관리구역 후보의 선별 기준을 어떻게 구성할 것인가에 있다.

산림과 건물이 분리된 격자에서는 산불이 구조물 노출로 이어질 가능성이 상대적으로 낮으므로, 본 연구는 건물과 산림이 함께 존재하는 경우에만 노출이 형성된다고 보았다. 또한 노출과 FWI 기반 화재기상위험의 결합은 덧셈이 아니라 곱셈식으로 설정하였다. 본 연구에서 곱셈식은 산불 발생확률을 추정하기 위한 통계모형이 아니라, 화재기상 조건과 물리적 노출이 동시에 존재하는 공간을 선별하기 위한 논리적 결합 방식이다. 이는 화재기상위험 또는 노출 중 하나라도 0이면 선별 필요성도 0에 가깝게 반영하고, 동일한 노출이라도 더 높은 화재기상위험 배경 아래 놓인 격자의 상대적 우선순위가 높아지도록 반영하기 위함이다. 덧셈 방식이나 표준화 합은 한 요소가 거의 0에 가까워도 다른 요소에 의해 일정한 점수를 부여할 수 있기 때문에 위험요인과 노출이 모두 존재하는 구간을 1차로 가려내려는 본 연구의 목적과는 거리가 있다. 다만 이 방식은 고노출·저화재기상 지역이나 저노출·고화재기상 지역의 정책적 의미를 단일 점수 안에서 충분히 드러내지 못할 수 있으므로, CW-WUI는 1차 선별지표로 해석해야 한다.

〈표 5〉 CW-WUI 산정 지표와 산정식

지표	의미	산정식
E_cnt	건물 개수 기반 노출	$E_cnt = bld_cnt \times for_frac$
CW_cnt_Hs	건물 개수 기반 보조지표(누적형 위험)	$CW_cnt_Hs = E_cnt \times H_sum_1524$
CW_cnt_Hm	건물 개수 기반 보조지표(최대치형 위험)	$CW_cnt_Hm = E_cnt \times H_max_1524$
E_area	건축면적 기반 노출(기본지표)	$E_area = bld_area_m \times for_frac$
CW_area_Hs	기본지표(누적형 위험)	$CW_area_Hs = E_area \times H_sum_1524$
CW_area_Hm	민감도 대안지표(보수적)	$CW_area_Hm = E_area \times H_max_1524$

〈표 5〉에서는 노출지표와 화재기상가중지표가 어떤 산정 단계로 구성되는지 제시하였다. E_cnt는 건축물의 존재와 분포 규모를 포착하는 지표이고, E_area는 동일한 건물 수에서도 개발 규모의 차이를 반영한다. CW_cnt_Hs와 CW_cnt_Hm은 건물 개수 기반 노출에 화재기상위험을 결합한 보조지표이며, CW_area_Hs는 E_area에 봄·가을 누적형 위험(H_sum_1524)을 결합한 기본 지표로, 고위험 화재기상에 노출된 구조물 규모를 나타낸다. CW_area_Hm은 최대치형 위험(H_max_1524)을 적용한 대안 지표로, 위험정의의 변화가 결과를 얼마나 바꾸는지 점검하는 데 사용하였다. 후속 절에서 결과 해석은 기본 지표인 CW_area_Hs를 중심으로 수행하고, CW_area_Hm은 민감도 분석을 위한 비교 기준으로 활용하였다.

4. 상위 구간 도출과 WUI 분류

1) 상위 구간 도출 및 민감도 분석

본 연구에서는 CW-WUI 값이 높은 격자를 상위 구간으로 구분하여 우선 관리구역 후보를 선별하였다. 이를 위해 상위 10% 격자를 기본 구간으로 사용하고, 상위 5%와 1%를 함께 제시해 동일한 후보군 안에서도 관리 강도를 단계적으로 구분할 수 있도록 하였다. 민감도 분석에서는 위험에 대한 정의에 따라 결과가 과도하게 좌우되는지 점검하기 위해 화재기상위험을 누적형(H_sum)과 최대치형(H_max)으로 달리해 각각의 CW-WUI를 산정하고, 두

결과의 순위와 공간 중첩을 비교하였다.

2) WUI 운영정의와 위험 등급 구분

WUI는 일반적으로 건물과 식생이 만나거나 섞이는 구역으로 정의된다 (Radeloff et al., 2005). <표 6>에서는 본 연구에서 적용한 WUI의 유형과 분류 방법을 제시하였다. 본 연구가 1km 격자에서 건축면적(bld_area_m) 기준이 아니라 bld_cnt > 0 기준을 둔 이유는 선별 단계에서 소규모 마을이나 격자 경계에 걸친 정주지를 누락하지 않기 위해서이다. 또한 for_frac 0.1, 0.5, 0.7 기준은 1km 격자에서 혼재형과 접경형의 차이를 재현 가능한 기준에 따라 구분하기 위한 운영 임계값이며, 보편적 법정 기준을 뜻하지는 않는다.

〈표 6〉 WUI 유형 및 분류 방법

유형	분류 방법 (1km 격자)
혼재형 (Intermix)	bld_cnt > 0 and for_frac ≥ 0.5
접경형 (Interface)	bld_cnt > 0 and 0.1 ≤ for_frac < 0.5 and 8방향 인접 격자의 최대 for_frac ≥ 0.7
비 WUI	그 외

화재기상위험 등급은 WUI 형태와 위험 수준이 결합될 때 관리 강도의 차이를 반영하기 위한 상대 구간 분류로서, 누적형 화재기상위험 지수의 상위 10% 격자를 ‘고위험 등급’으로, 그 외를 ‘기준 등급’으로 구분하는 2단계 체계로 설정하였다. 정책의 적용 방향은 해당 분류의 2×2 조합을 바탕으로 제시하였다.

IV. 분석 결과

1. 화재기상위험(Hazard)과 노출(Exposure)

〈표 7〉 화재기상위험 지수의 기초 통계 (n=107,100)

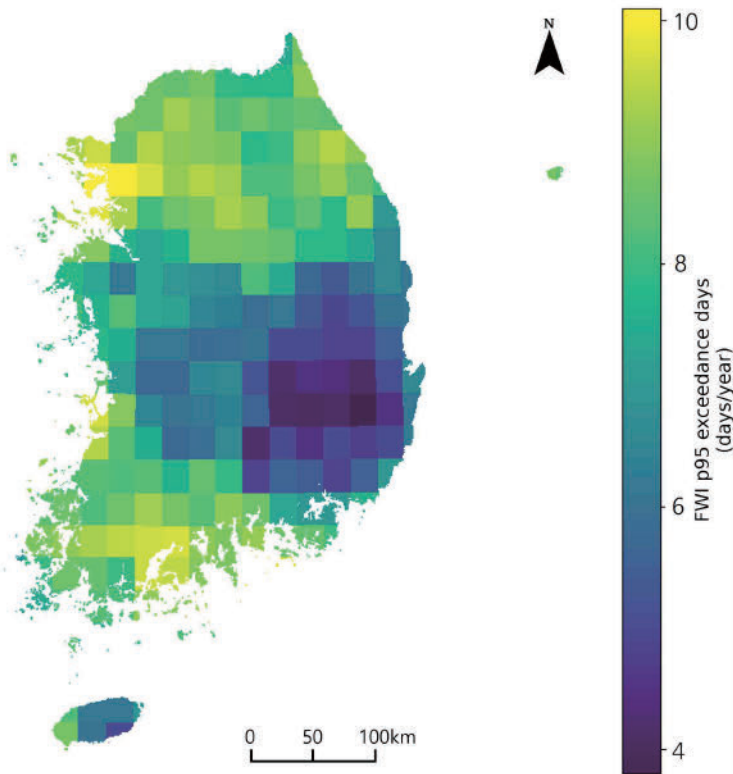
변수	설명	단위	평균 (표준편차)	중앙값 [P10-P90]	범위
H_spr_1524	1991-2024 봄(2-4월) p95 초과 극한 화재기상일수의 2015-2024 연평균	일/년	5.12 (0.96)	5.20 [3.60-6.30]	0.00-7.60
H_aut_1524	1991-2024 가을(10-11월) p95 초과 극한 화재기상일수의 2015-2024 연평균	일/년	2.20 (0.86)	2.30 [1.10-3.30]	0.00-4.10
H_max_1524	max(H_spr, H_aut)	일/년	5.12 (0.96)	5.20 [3.60-6.30]	0.00-7.60
H_sum_1524	H_spr + H_aut	일/년	7.32 (1.64)	7.80 [4.90-9.20]	0.00-10.10
dH_spr	ΔH: 2015-2024 - 1991-2014, 봄철	일/년	1.60 (1.17)	1.80 [-0.10-3.10]	-1.50-4.10
dH_aut	ΔH: 2015-2024 - 1991-2014, 가을철	일/년	-1.21 (2.04)	-1.30 [-3.90-1.70]	-5.40-2.90
trH_spr_dp	추세: 1991-2024 선형추세, 봄철	일/10년	0.45 (0.58)	0.50 [-0.37-1.12]	-0.75-1.94
trH_aut_dp	추세: 1991-2024 선형추세, 가을철	일/10년	-0.48 (0.71)	-0.53 [-1.38-0.58]	-1.82-1.02

〈표 7〉에서는 CW-WUI 산정에 사용된 화재기상위험 지수의 수준과 변화 방향을 정리하였다. 평균값 기준으로 봄은 5.12일/년, 가을은 2.20일/년으로, 봄철 화재기상위험이 가을철보다 전반적으로 높게 나타났다. 최대치형 화재기상위험(H_max_1524)의 요약통계가 봄철(H_spr_1524)과 일치하는 것은 대부분의 격자에서 봄철 위험이 가을철을 상회하여 최대치가 사실상 봄철 지표와 같아지기 때문이다. 또한 봄철 화재기상위험 변화지표(dH_spr, trH_spr_dp)가 대체로 양(+)의 값을 보인 것은 봄철 위험이 과거보다 강화되는 경향이 상대적으로 뚜렷함을 시사한다.

〈그림 1〉은 이러한 FWI p95 초과일수 기반 화재기상위험의 공간 분포를 보여준다. 상대적으로 높은 위험은 수도권 서부와 전남, 일부 강원권에서 나타났다고, 내륙 산지와 남해안 일부가 뒤를 이었다. 이는 국내 산불 화재기상위

험이 0.25° 수준의 기후자료에서도 광역적 차이를 식별할 수 있음을 보여준다. 동시에 이 결과는 국지적 미시기후를 직접 재현한 지도가 아니라, 이후 노출지표와 결합될 화재기상 배경권역의 차이를 제시한다는 점에서 해석할 필요가 있다.

〈그림 1〉 FWI95d 기반 화재기상위험의 공간 분포



화재기상위험의 공간 분포를 바탕으로 다음에서는 노출의 분포를 확인하였다. 〈표 8〉은 산림, 건물, 노출 변수의 분포를 정리한 것이다. 특히 E_{area} 는 앞서 정의한 기본 노출지표로, 건축면적과 산림비율이 모두 높은 격자에서 크게 나타난다. 산림비율은 전국적으로 넓게 분포해 상대적으로 편차가 작았지만, 건물 개수와 건축면적 합계는 일부 지역에 집중된 비대칭 분포를

보였다. 이는 산림이 넓게 분포하더라도 산림비율이 높으면서 동시에 건물의 노출도 큰 격자는 제한적이라는 것을 의미한다. 즉, CW-WUI에 따라 위험 관리가 필요한 지역은 산림과 개발이 실제로 접촉하는 일부 구간에 집중되어 있다는 것을 알 수 있다. 산림비율(for_frac)은 경기·강원·경남 내륙 산지를 중심으로 높게 나타나며, 건물 개수와 건축면적은 수도권, 충청, 영남 대도시권 주변부에서 두드러지는 비대칭 분포를 보인다. 기본 노출지표인 E_area는 산림과 개발 밀도가 중첩되는 수도권 외곽, 전남, 충청 내륙, 강원 접경부에서 높은 값을 보이며, 이 공간 패턴이 CW-WUI 상위 구간의 기본 윤곽을 결정하는 주된 구조가 된다.

〈표 8〉 산림·건물·노출 변수의 기초 통계 (n=107,100)

변수	설명	단위	평균 (표준편차)	중앙값 [P10-P90]	범위 (최소-최대)
for_frac	1km 격자 내 산림비율 (0-1)	비율	0.58 (0.39)	0.70 [0.00-1.00]	0.00-1.00
bld_cnt	격자 내 건물 개수	동	134 (290)	42 [0-324]	0-5,588
bld_area_m	격자 내 건축면적 합계	m ²	15,803 (39,052)	3,734 [0-35,373]	0-1,206,529
E_cnt	bld_cnt × for_frac	동×비율	43 (68)	13 [0-123]	0-1,593
E_area	bld_area_m × for_frac	m ²	4,111 (7,233)	1,130 [0-11,299]	0-207,723

또한, 본 연구의 노출지표는 건물통합정보에 기반한 물리적 구조물 노출을 의미하며, 실제 거주 여부, 건물 이용강도, 빈집 여부, 건축물의 내화성은 직접 반영하지 않는다. 따라서 CW-WUI는 인명피해 또는 시설피해 예측지표가 아니라 구조물 기반 WUI 노출 선별지표로 해석되어야 한다.

2. CW-WUI 분포 및 집중도

화재기상위험과 노출을 결합한 CW-WUI의 분포는 〈표 9〉에 정리하였으며, 본 연구의 기본지표인 건축면적 기반 지표(area)와, 보조적으로 활용한 건물 개수 기반 대안지표(cnt)를 함께 제시하였다.

〈표 9〉 CW-WUI 지표의 기초 통계 (n=107,100)

변수	설명	단위	평균 (표준편차)	중앙값 [P10-P90]	범위 (최소-최대)
CW_area_Hs	$E_{area} \times H_{sum_1524}$	㎡·일/년	28,867 (52,647)	7,815 [0-78,718]	0-1,092,673
CW_area_Hm	$E_{area} \times H_{max_1524}$	㎡·일/년	20,370 (36,373)	5,564 [0-55,958]	0-706,257
CW_cnt_Hs	$E_{cnt} \times H_{sum_1524}$	동·일/년	298 (488)	88 [0-849]	0-12,423
CW_cnt_Hm	$E_{cnt} \times H_{max_1524}$	동·일/년	211 (343)	63 [0-604]	0-9,080

기본지표와 대안지표를 함께 보면, 노출이 0인 격자가 상당수 존재하며, CW-WUI 값은 상위 구간에서 급격히 증가하는 긴 꼬리 분포를 보인다. 특히 분석 결과의 해석은 건축면적 기반 지표(CW_area_Hs, CW_area_Hm)에 초점을 두었는데, 동일한 건물 수라도 개발 규모의 차이가 실제 관리 부담과 구조물 노출을 다르게 만들 수 있기 때문이다. 반면 건물 개수 기반 지표는 건축물 분포의 존재 여부와 결과의 전반적 경향을 보조적으로 점검하기 위해 활용되었다.

이러한 집중 양상을 구체적으로 확인하기 위해, 건축면적 기반 기본지표(CW_area_Hs)를 중심으로 상위 비율 기준의 임계값과 총량 기여율을 산정하였다. 〈표 10〉은 상위 10%, 5%, 1% 구간이 각각 어떤 임계값에서 나뉘며, 각 구간이 전체 CW-WUI 총량을 얼마나 설명하는지 함께 보여준다. 본 연구에서는 이 값을 이용해 우선관리구역 후보의 단계별 선별 기준을 제시하고, CW_area_Hm을 이용하여 도출된 공간의 윤곽이 위험정의 변화에도 유지되는지 민감도 분석을 수행하였다.

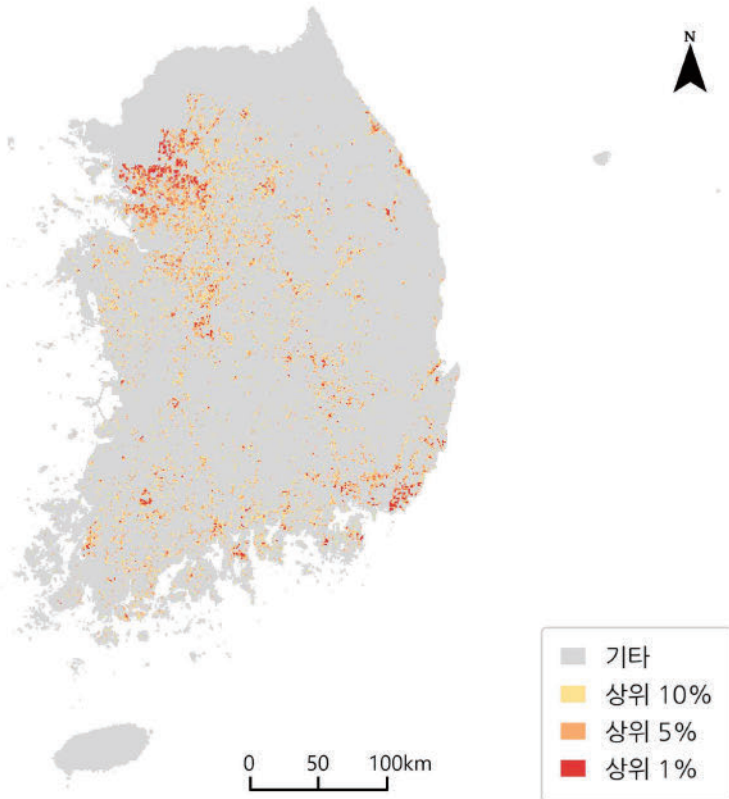
〈표 10〉 CW-WUI 상위 구간의 임계값과 총량 기여율

지표	상위 (%)	임계값	격자 수 (n)	총량 기여율 (%)
CW_area_Hs	10	78,718	10710	51.5
CW_area_Hs	5	117,482	5355	35.1
CW_area_Hs	1	250,206	1071	12.5
CW_area_Hm	10	55,961	10710	50.9
CW_area_Hm	5	82,825	5355	34.4
CW_area_Hm	1	174,054	1071	12.1

기본 지표의 분포는 상위 구간에 뚜렷하게 집중되었다. 상위 10% 격자가 전체 CW-WUI 총량의 51.5%, 상위 5%가 35.1%, 상위 1%가 12.5%를 차지하였다(표 10). 이는 제한된 산불 관리 자원을 상위 구간에 우선 배분하는 전략이 더 효율적일 수 있음을 시사한다. 공간적으로는 경기, 전남, 영남 산지 인접권, 충청 내륙, 강원 의 산림 인접지에서 CW-WUI 상위 구간이 넓게 분포하였다.

상위 10%, 5%, 1% 구간을 단계적으로 시각화한 결과, 우선관리구역 후보를 강도별로 구분해 적용할 수 있음을 보여준다(그림 2). 동일한 WUI 유형이라도 상위 구간이 밀집된 지역에 관리 수단을 우선 배치하고, 주변부에는 단계적으로 기준을 적용하는 방식으로 관리 강도를 차등화할 수 있다.

〈그림 2〉 CW-WUI 상위 구간 분포



CW-WUI 상위구간이 수도권 및 일부 도시 확장지역에서 높게 나타나는 것은 본 지표가 산불 발생 가능성 자체보다 산림-정주지 접촉공간의 구조물 노출을 중심으로 설계되었기 때문이다. 최근 대형산불이 강원·경북 등에서 집중적으로 나타나는 현상은 강풍, 건조, 지형, 연료 연속성 등 산불 발생·확산 조건과 밀접하게 관련된다. 반면 CW-WUI는 산불이 정주지 피해로 전환될 수 있는 물리적 노출공간을 선별하는 지표이다. 따라서 본 지표는 산불 대응과 토지이용 관리가 필요한 WUI 노출관리 우선순위 지표로 해석할 수 있다.

3. 민감도 분석: 최대치형 위험과 누적형 위험

민감도 분석의 목적은 위험정의 방식이 달라져도 우선관리구역 후보의 공간 윤곽이 유지되는지 확인하는 데 있다. <표 11>은 기본 지표와 보조지표 순위의 상관을, <표 12>는 상위 구간의 공간 중첩을, <그림 3>은 두 지표 간 대응 관계를 보여준다.

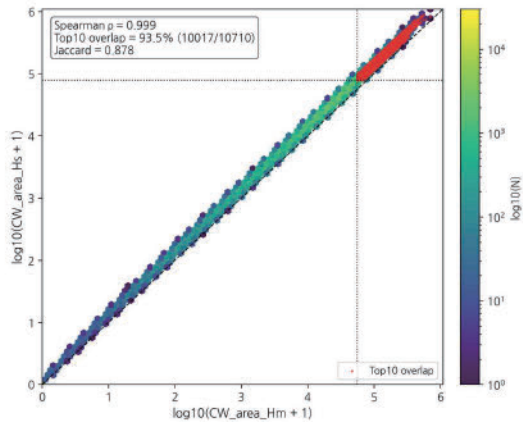
<표 11> 민감도 분석 결과: 연속 순위 상관

비교	표본	Spearman (ρ)
CW_area_Hm vs CW_area_Hs	전체 격자(107,100)	0.9991
CW_area_Hm vs CW_area_Hs	노출 존재 격자(E_area)0, 77,149)	0.9976

<표 12> 민감도 분석 결과: 상위 구간 중첩률

상위 (%)	n	교집합 격자 수	중첩률 (교집합/n)	Jaccard
20	21420	20496	95.70%	0.917
10	10710	10017	93.50%	0.878
5	5355	4950	92.40%	0.859
1	1071	949	88.60%	0.795

〈그림 3〉 CW-WUI 민감도 비교 산점도



민감도 분석 결과, 전체 격자 기준 순위 상관은 $\rho=0.9991$ 이고 노출 존재 격자만 보더라도 $\rho=0.9976$ 으로 매우 높게 나타났다. 상위 10% 구간의 중첩률도 93.5%(Jaccard=0.878)로 높아, 위험 정의 방식이 달라져도 우선관리구역 후보의 공간 윤곽은 거의 유지되는 것을 확인하였다.

단, 공간 중첩률이 상위 1% 구간에서 88.6%로 다소 낮아지는 점은 극상위 구간에서는 특정 계절의 위험 특성이 상대적으로 더 크게 작용할 수 있음을 보여준다. 종합하면 위험정의의 변화는 상위 구간의 위치 자체를 근본적으로 바꾸기보다 일부 극상위 구간의 상대 순위를 조정하는 수준에 머물며, CW-WUI는 기본적으로 노출의 공간 패턴을 강하게 반영하되 화재기상위험은 그 내부에서 관리 강도를 세분하는 역할을 한다고 해석할 수 있다. 이는 본 지표가 산불 발생위험을 나타내기보다는 산림-정주지 물리적 노출관리 우선순위 지표로서 설계되었음을 의미한다.

4. WUI 유형과 위험 등급의 정책적 해석

앞서 CW-WUI의 공간적 집중도를 확인하였다. 이 절에서는 해당 집중이 어떤 WUI 유형과 화재기상위험 등급에서 나타나는지 식별하고, 그 차이를

관리 수단의 우선순위로 해석할 수 있는지 살펴보는 것이다. 단, 이 절은 특정 규제 수단의 효과를 실증적으로 검증하는 목적이 아니며, 도출된 유형과 등급을 기존 관리 수단에 대응시켜 정책 수단으로 전환하는 기준을 제시하는 것에 초점을 두었다.

〈표 13〉 WUI 유형별 분포

구분	격자 수	비율 (%)
WUI	61,900	57.8
혼재형	50,841	47.47
접경형	11,059	10.33

이를 위해 앞서 제시한 WUI 정의를 적용하여 WUI를 혼재형과 접경형으로 구분하고, 누적형 화재기상위험 지수의 상위 구간을 고위험 등급, 그 외 지역을 기준 등급으로 구분하였다.

유형화 결과, WUI는 전체 격자의 57.8%를 차지하였고, 그 가운데 혼재형이 47.47%, 접경형이 10.33%를 차지하였다(표 13). 이는 국내에서 산림 경계부에 밀집한 개발만이 아니라, 산림 내부 또는 산림과 맞물린 저밀 개발이 넓게 분포하고 있음을 의미한다.

혼재형은 저밀·분산 개발이 산림 내부로 스며든 형태이므로 소방 접근과 대피 취약성이 상대적으로 클 수 있고, 접경형은 산림 경계부에 개발이 집적된 형태이므로 연료 관리와 완충공간 확보의 필요성이 더 크다. 다만 정책 적용 방향은 유형 구분만으로 결정할 수 없으므로, 각 집단이 전체 관리 대상에서 차지하는 비중과 집단 내부의 상위 구간 집중도를 함께 고려할 필요가 있다. 이를 위해 〈표 14〉에서는 2×2 집단의 평균 특성과 CW 총량 기여율을, 〈표 15〉에서는 CW-WUI 상위 10% 구간이 각 집단에 얼마나 편입되는지 제시하였다.

〈표 14〉 화재기상위험(FWI) 등급과 WUI 유형의 2×2 조합

FWI 등급	WUI 유형	n	for_frac (평균)	bld_cnt (평균)	H_sum (평균)	CW_area_Hs (평균)	CW 총량 기여율 (%)	상위 10% 포함률 (%)
기준	접경형	10,005	0.327	282.6	6.98	64,156	24.7	25.1
기준	혼재형	47,824	0.839	82.9	6.8	35,135	64.5	11.3
고위험	접경형	1,054	0.303	330.7	9.51	97,472	3.9	36.5
고위험	혼재형	3,017	0.808	95.1	9.49	59,246	6.9	23.2

〈표 15〉 CW-WUI 상위 10% 구간의 유형·등급별 구성

FWI 등급	WUI 유형	CW 상위 10% 격자 수	전체 상위 10% 격자 대비 비중 (%)
기준	접경형	2,511	23.40%
기준	혼재형	5,410	50.50%
기준	비 WUI	1,328	12.40%
고위험	접경형	385	3.60%
고위험	혼재형	700	6.50%
고위험	비 WUI	376	3.50%

CW 총량 기여율은 특정 집단이 전국 단위에서 차지하는 용량을 보여주므로 값이 큰 집단일수록 넓은 범위에 관리기준을 우선 적용해야 한다. 반면 상위 10% 구간 포함률은 그 집단 내부에서 고강도 관리가 얼마나 집중되어야 하는지를 보여주므로, 값이 높은 집단일수록 상대적으로 좁은 공간에 더 강한 관리 수단을 집중해야 한다. 여기에 WUI 유형은 어떤 관리 수단이 상대적으로 우선되어야 하는지를, 위험 등급은 같은 유형 안에서 적용 강도를 어떻게 달리할지를 구분하는 기준으로 활용하였다.

이 기준에 따라 보면, 기준등급×혼재형은 WUI 내 CW 총량의 64.5%를 설명하고 CW-WUI 상위 10% 구간의 절반(50.5%)을 차지해 절대 규모 측면에서 가장 큰 관리 수요를 형성하였다. 반면 고위험 등급×접경형은 총량 기여율이 3.9%에 그치지만 집단 내부의 상위 10% 구간 포함률이 36.5%로 가장 높아, 상대적으로 좁은 공간에 고강도 관리가 집중되어야 할 집단으로 나타났다.

또한 WUI에 포함되지 않지만 상위 구간에 속하는 격자도 일부 확인되었다. 이러한 비 WUI 고노출 격자는 보편적 의미의 WUI는 아니더라도 도시와

인접한 산림이나 도시 경계부 외곽에서 관리 수요가 크게 나타나는 공간으로 해석할 수 있다. 따라서 이들을 분석에서 배제하지 않고 완충공간과 연료 관리를 중심으로 한 보완적 관리 대상에 포함하였다.

우선관리구역 후보를 오버레이 지구와 개발행위 기준으로 연결하기 위한 해석 틀은 <표 16>과 <표 17>에 제시하였다. 두 표는 기존 WUI 관리연구, 방어공간 기준, 접근·대피 연구를 종합한 뒤 이를 국내의 지구단위계획과 개발행위허가 기준에 대응시켜 재구성한 정책 해석의 틀이다. 오버레이 지구는 관리가 필요한 공간을 지정하는 공간적 틀에 해당하고, 개발행위허가 기준은 해당 구역에서 허가조건을 부여하는 정책적 틀이며, 완충공간·연료 관리·복수 대피로는 유형과 등급에 따라 차등화할 세부 지침에 해당한다. 즉, 본 연구는 기존 문헌의 관리원칙을 공간지정-허가조건-사후 유지관리라는 틀로 재구성하고, 국내 제도 적용 가능성을 검토하였다.

<표 16> CW-WUI 기반 오버레이 지구 적용 방안

구분	기준 × 혼재형	기준 × 점경형	고위험 × 혼재형	고위험 × 점경형
규제 (개발 행위 허가 기준)	- 집단화된 개발 유도 (분산·세분화 억제) - 최소 접근·대피 기준 충족 시 조건부 허용	- 완충·연료 관리 공간을 사전에 확보 - 착화 위험 저감 기준과 유지관리계획을 허가 조건	- 강화된 검토 적용 - 복수 대피로, 막다른 도로 제한, 연료 관리계획 수립	- 완충공간과 접근·대피 기준을 확보한 경우에만 한해 강한 규제 적용 - 상위 1% 구간은 신규 개발을 제한하거나 엄격한 조건부 허용으로 운영하고, 기존 정주지 개선을 우선
완충 (완충 및 연료 관리)	- 경계부, 사면, 능선을 우선 관리 - 마을 단위 공동관리와 등급별 차등 적용	- 경계부 연료차단대 확보 및 저연료 토지 이용 유도 - 공원·완충녹지·서비스도로와 연계한 지구 단위 관리	- 주거지 주변과 접근·대피로를 중심으로 관리 - 산림·화재 연료저감 사업과 연계(등급에 따라 강화)	- 상위 1% 구간은 완충·연료 관리 공간을 의무화 - NFPA 1144를 참고해 폭과 관리주기를 설정하고, 점검 절차와 책임 주체를 명확화
대피 (접근 및 도로망)	- 진입·막다른 도로 패턴 진단 - 통제 강도가 높아질수록 2방향 대피 원칙 적용	- 병목 개선과 대피로 확보 - 대피로를 연료 관리 및 안내체계와 연계	- 고위험 지역은 2개 이상 대피로 설치 원칙 - 연료 관리와 함께 협소·급경사·교량 제약 구간을 우선 정비	- 복수 대피로 확보와 병목 제거를 최우선 적용 - 개발행위허가와 연계하여 복수 대피로 원칙

주: 분산개발 억제와 집단화된 개발 유도: Syphard et al. (2013); Read and Mowery (2018), 방어공간·연료 관리 기준: Cohen (2000); Syphard et al. (2014); NFPA (2018); International Code Council (2024), 접근·대피 기준: Cova (2005); International Code Council (2024); California Governor's Office of Emergency Services (2025)를 참고하여 재구성

〈표 16〉에서는 WUI 유형과 위험 등급의 조합별로 어떤 관리 수단을 상대적으로 우선 검토할 것인지 제시하였다. 혼재형과 접경형의 구분은 관리 수단의 종류를, 기준등급과 고위험 등급의 구분은 같은 수단 안에서 요구되는 적용 강도를 해석하기 위한 기준으로 활용하였다.

〈표 17〉 CW-WUI 상위 구간별 정책 적용 강도

단계	기준 (CW_area_Hs)	적용 대상	적용 강도
1단계	상위 1%(≥ 250,206)	고위험 등급×접경형 우선 (대형산불 대응 최우선 구간)	매우 엄격한 개발 규제; 완충·연료 관리 의무화; 유지관리와 점검
2단계	상위 5%(≥ 117,482)	고위험 등급×혼재형/접경형; 산림 인접 정주지	강화된 개발 허가조건; 완충공간 확보; 병목구간 개선; 연료 관리계획
3단계	상위 10%(≥ 78,718)	기준등급 지역; 1-2단계 주변 완충구간	위험관리 최소 기준 점검; 중점 개선 로드맵; 모니터링과 행정지도

주: 본 표는 Burby et al. (2000), Godschalk (2003), Read and Mowery (2018), Walls and Wibbenmeyer (2025)를 참고하여, CW-WUI 상위 구간의 상대값을 정책 적용 강도로 재해석하여 작성

〈표 17〉은 앞서 제시한 상위 1%, 5%, 10% 구간을 정책 적용 강도의 단계로 재해석한 것이다. 여기서 단계별 기준은 본 연구의 CW-WUI 분포에서 도출한 상대 구간 값을 바탕으로 토지이용 관리와 유지관리 의무의 강도를 구분한 것이다. 따라서 고정된 제도 기준을 제시한다기보다 우선관리구역 후보 내부에서 관리 강도를 차등화해 읽기 위한 정책 해석 도구로 이해하는 것이 적절하다.

5. 산불 발생 지점과의 비교 및 WUI의 증분적 역할

이 절에서는 CW-WUI가 과거 산불 발생 이력과 어느 정도 공간적으로 부합하는지, 그리고 화재기상 가중치 고노출 구간에서 제공하는 증분적 정보의 의미를 검토하였다.

분석은 세 단계로 진행하였다. 첫째, 각 지표의 상위 10%, 5%, 1% 구간이 산불 발생 지점을 얼마나 포함하는지 비교하였다. 둘째, E_area 상위 10% 격자(10,710개)를 H_sum 중앙값 기준으로 상·하위 50%로 나누어 고노출 구간

내부에서 화재기상위험이 관리 강도를 세분화하는지 확인하였다. 셋째, 전국 257개 시군구 수준에서 CW-WUI와 산불 발생강도 사이의 거시적 방향성을 검토하였다. 산불 발생 지점 자료는 2015-2021년 전국에서 발생한 18,738건을 대상으로 하였다.

〈표 18〉 지표별 상위 구간의 산불 발생 지점 적중률 비교 (2015-2021)

지표	상위 구간 (k%)	임계값	전체 지점 수	상위 구간 내 지점 수	적중률 (%)	향상도 (lift)
H_sum	10	9.2	18,738	2,291	12.2	1.22
H_sum	5	9.4	18,738	808	4.3	0.86
H_sum	1	9.8	18,738	306	1.6	1.63
E_area	10	11,299	18,738	5,675	30.3	3.03
E_area	5	16,635	18,738	3,807	20.3	4.06
E_area	1	35,193	18,738	770	4.1	4.11
CW-WUI	10	78,718	18,738	5,677	30.3	3.03
CW-WUI	5	117,482	18,738	3,973	21.2	4.24
CW-WUI	1	250,206	18,738	754	4.0	4.02

적중률(hit rate)은 상위 구간 안에 포함된 산불 발생 지점 수를 전체 발생 지점 수로 나눈 값이고, 향상도(lift)는 이를 해당 상위 비율로 나눈 값이다. 이를 통해 화재기상위험 단독지표, 노출지표, CW-WUI의 선별력을 같은 기준에서 비교하였다〈표 18〉.

먼저, 상위 10% 기준에서 CW-WUI와 E_area의 적중률은 모두 30.3%로 동일했고, 상위 5%에서는 CW-WUI가 21.2%로 E_area(20.3%)보다 소폭 높게 나타났다. 반면 H_sum 단독 적중률은 4.3~12.2% 수준에 그쳤고, 상위 5%에서는 향상도도 0.86으로 1보다 낮았다. 이는 CW-WUI 상위구간의 공간 윤곽이 주로 건축면적 기반 노출에 의해 결정되는 데서 비롯되며, 산불 발생확률 예측보다 산림-정주지 접촉공간의 구조물 노출 선별에 초점을 둔 지표 설계 의도와 일치한다. 동시에 화재기상위험은 산불이 한 번 발생했을 때 확산과 대형화와 연결되는 조건을 설명하는 성격이 강하다. 따라서 화재기상가중의 핵심은 전국 순위를 전면적으로 재편하는 것이 아니라 고노출 후보군 내부의 관리 강도를 세분화하는 데 있다고 해석하는 것이 타당하다.

〈표 19〉 E_area 상위 10% 내부에서 H_sum 중앙값 기준 비교

비교 집단	격자당 평균 산불 발생 지점 (n)	산불 발생 1건 이상 격자 비율 (%)
H_sum 상위 50% (n=5,355)	0.6	23.9
H_sum 하위 50% (n=5,355)	0.46	19.5

〈표 20〉 시군구 수준 연관성 분석 결과 (n=257)

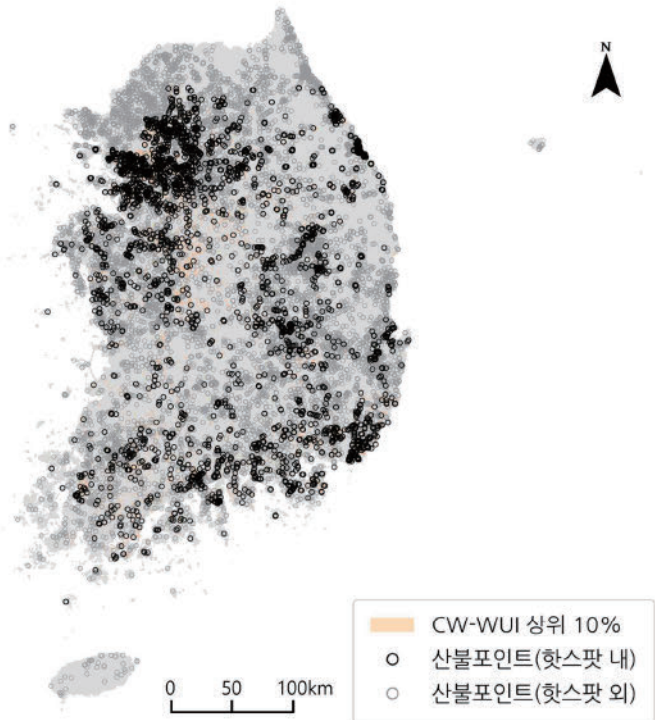
모형	종속변수	설명변수	오프셋	β	표준오차	p	AIC / 적합도
포아송	누적 산불발생건수	$\log(\text{Mean CW-WUI} + 1)$	$\log(\text{m}^2)$	0.037	0.003	<0.001	14715.8
음이항	누적 산불발생건수	$\log(\text{Mean CW-WUI} + 1)$	$\log(\text{m}^2)$	0.085	0.018	<0.001	2540.5

두 번째로 E_area 상위 10% 내부에서 H_sum 값을 중앙값 기준으로 상·하위 50%로 나누어 보면, 상위 50%는 하위 50%보다 격자당 평균 산불 발생 지점 수가 0.60건으로 더 높고, 산불 발생이 1건 이상 있었던 격자 비율도 23.9%로 더 높게 나타났다(표 19). 이는 화재기상위험이 전체 지표의 공간 윤곽을 크게 뒤바꾸지는 않더라도, 이미 높은 노출을 보이는 후보군 내부에서는 관리 강도의 우선순위를 더 정교하게 나누는 증분 정보를 제공하고 있음을 보여준다.

세 번째로 전국 257개 시군구 수준에서는 CW-WUI와 산불 발생강도 사이의 거시적 방향성을 참고적으로 확인하였다(표 20). 이를 위해 누적 산불 발생 건수를 종속변수로 두고, 시군구별 CW-WUI 평균을 설명변수로 포함한 발생 건수 모형을 추가로 추정하였다. 면적 규모효과를 통제하기 위해 $\log(\text{면적})$ 을 오프셋으로 포함하였고, 과산포 가능성을 고려하여 포아송 모형과 음이항 모형을 함께 비교하였다(Cameron and Trivedi, 2013; Hilbe, 2011).

분석 결과, 두 모형에서 $\log(\text{Mean CW-WUI}+1)$ 의 계수는 유의한 양(+)으로 나타났고, 음이항 모형은 과산포를 고려한 뒤에도 정(+)의 방향을 유지하였다. 적합도 또한 음이항 모형이 포아송 모형보다 뚜렷하게 높은 적합성을 보였다. 해당 분석은 기존의 격자보다 비교적 더 거친 시군구라는 공간 규모에서 관찰되는 평균적인 방향성을 확인하는 과정에 해당하며, CW-WUI가 시군구 수준의 산불 집계와도 대체로 같은 방향의 관계를 보인다는 점을 확인하였다.

〈그림 4〉 CW-WUI 상위 10%와 산불 지점 중첩



이러한 공간적 연관성은 전국 단위 중첩 지도에서도 확인된다. 〈그림 4〉는 CW-WUI 상위 10% 구간과 산불 발생 지점을 함께 보여주며, CW-WUI 상위 구간과 산불 발생 지점 집중 구간이 상당 부분 중첩된다는 점을 시각적으로 확인할 수 있다. 분석 결과를 종합하면, 본 연구에서 도출한 CW-WUI가 산불 발생 이력과 일정한 공간적 부합을 보이면서 고노출 구간 내부의 관리 강도를 세분화하는 전국 단위 선별지표로 기능할 수 있음을 확인하였다.

V. 결론

본 연구는 전국 1km 격자를 대상으로 산불의 FWI 기반 화재기상위험과 정

주지 물리적 노출을 결합한 화재기상가중 WUI 선별지표를 구축하고, 이를 우선관리구역 선별 기준과 정책적 해석을 위한 근거로 사용하였다. 특히 CW-WUI는 0.25° 수준의 광역 화재기상위험 권역과 1km 수준의 노출 구조를 중첩한 전국 단위 지표라는 점에서 의의가 있다. 해당 지표는 심화되는 극한 화재기상 조건과 현재의 구조적 노출을 함께 고려해 어디를 먼저 점검하고 관리할 것인지를 가려내는 1차 선별 도구로 활용될 수 있을 것이다. 이러한 점에서 본 연구는 산불 위험 분석과 계획·정책 수립 단계 사이의 간극을 좁히는 의사결정 기준을 제시하였다는 데 기여가 있다.

분석 결과는 세 가지로 요약된다. 첫째, 봄철 화재기상위험은 가을철보다 전반적으로 높게 나타나 국내 산불 위험의 계절성과 지역성이 분명하게 확인되었다. 둘째, CW-WUI는 상위 구간에 총량이 집중되는 긴 꼬리 분포를 보였고, 상위 10% 격자가 전체 총량의 51.5%를 차지하였다. 이는 제한된 관리 자원을 우선순위가 높은 구간에 집중 배분하는 전략의 효율성을 지지한다. 셋째, 산불 발생 이력과의 비교에서 CW-WUI의 상위 10% 적중률은 면적 기반 노출과 동일했고 상위 5%에서만 소폭 높았지만, 고노출 구간 내부에서는 화재기상위험이 높은 구간에서 산불 발생 밀도가 더 높게 나타났다. 이는 화재기상가중 지표의 주된 의미가 고노출 후보군 내부의 관리 강도를 세분화하는 데 있음을 보여준다.

계획 및 정책적 함의는 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, CW-WUI는 중앙 정부와 광역·기초지자체가 전국 단위 예산 배분, 우선 점검 대상지 선정, 모니터링 순서를 정할 때 활용할 수 있는 선별 기준을 제공한다. 둘째, WUI 유형과 위험 등급을 결합한 분석 틀은 동일한 후보군 내부에서도 어떠한 관리 수단을 상대적으로 우선 적용할지 판단하는 근거를 제공한다. 본 연구에서 제시한 오버레이 지구와 개발허가 기준의 연결 방안은 유형별·등급별 관리 수단을 계획·허가 단계의 검토항목으로 구체화했다는 점에서 정책적 적용 가능성을 지닌다. 다만 CW-WUI는 최종 규제등급을 단독으로 확정하는 지표가 아니라, 현장 여건과 사회·기능적 노출을 결합하기 위한 1차 선별 기준으로 활용되어야 한다.

이러한 기여에도 불구하고 본 연구에는 몇 가지 한계가 있다. 첫째, 화재기상위험 지수는 ERA5 재분석 기반 FWI 95d를 0.25° 단위로 산정한 값이므로, 세부 지형·국지풍·미기후를 격자 단위에서 정밀하게 재현할 수 없다. 따라서 구축된 지도의 세밀한 공간 패턴은 주로 노출 구조에서 비롯되며, 본 연구의 해석은 격자별 절대 위험보다 광역 화재기상위험권역 내 상대적 우선순위에 가깝다. 둘째, 노출지표는 산림 분포와 건물의 평면 면적을 바탕으로 산정하였기 때문에 구조물의 내화성, 인구 특성, 사회경제적 취약성, 접근·대피 용량 등 세부 취약성 요인을 포함하지 못했다. 또한 농촌지역의 빈집 또는 미사용 건물이 포함될 경우 인명피해 위험을 과대평가할 수 있으며, 관공서, 학교, 요양시설, 통신시설 등 핵심 보호시설은 동일한 건축면적 안에서도 과소 평가될 수 있다. 셋째, CW-WUI는 2015-2024년 기간의 화재기상위험과 2024년의 구조적 노출을 결합한 현재 시점의 선별지표이며, 산불 발생 지점과의 비교는 2015-2021년 자료를 이용한 공간적 중첩에 해당한다. 따라서 노출자료와 비교자료 사이의 시점 차이는 한계로 남는다. 넷째, 본 연구의 WUI 기준은 전국 단위 선별을 위한 운영정의이므로, 실제 정책 수립과 허가 적용에는 더 세밀한 공간자료와 현장 검토가 추가되어야 한다. 특히 임계값 변화에 따른 WUI 운영정의의 민감도는 후속 연구에서 별도로 점검할 필요가 있다. 마지막으로 본 연구의 봄철 2-4월은 이른 봄철 핵심 화재기상기간에 초점을 둔 분석 대상 기간으로, 기후변화에 따라 늦봄으로 확장될 수 있는 산불위험을 충분히 포괄하지는 못한다.

향후 연구에서는 정책 적용성을 높이기 위해 더 세분한 격자와 국지풍·지형 효과, 접근·대피 지표, 구조물 취약성, 피해자료 기반 검증을 결합하여 지표의 공간 정밀도를 향상시켜야 한다. 아울러 주민등록인구, 생활인구, 고령인구, 요양시설·학교·관공서·통신시설 등 핵심 보호시설, 건축물 내화성, 대피로 및 소방접근성 자료를 결합하여 물리적 노출지표를 사회·기능적 노출지표로 확장하는 방향도 추구할 필요가 있다. 특히 기후변화에 따른 봄철 건조화와 복합 가뭄·폭염의 증가는 늦봄과 겨울의 화재기상위험을 확대할 수 있으므로(Kelley et al., 2025; Seo and Ha, 2022), 미래 기후를 반영한 화

재 위험 또한 후속 연구에서 검토해야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

- 김경훈·김민선·이제선, 2016, “토사재해 저감을 위한 계획기법 및 지구단위계획시행지침에 관한 연구,” 『한국방재학회논문집』, 16(6), pp.145-155.
- 김경훈·안현빈·김주환·이태우·김형수, 2024, “가뭄 시나리오 기반의 산불 위험성 분석에 관한 연구,” 『한국방재학회논문집』, 24(1), pp.7-18.
- 김구윤·이미란·곽창재·한지혜, 2023, “동해안 산불피해 사례기반 격자체계를 활용한 산불 위험분석,” 『대한원격탐사학회지』, 39(5), pp.785-798.
- 김현주·김태현·이계준, 2010, “도시 방재력 진단을 위한 지표 및 체크리스트 개발,” 국립방재연구소(현 국립재난안전연구원).
- 마정혁·유철상, 2024, “국내외 주요 산불 위험지표의 국내 적용성 평가: 태백산맥 동쪽 지역을 대상으로,” 『한국습지학회지』, 26(3), pp.204-218.
- 민정기, 2024, “산림-도시 인접지역의 산불로 인한 물류시설의 화재확산방지 방안 연구,” 『한국재난정보학회논문집』, 20(4), pp.922-934.
- 부산광역시, 2024, “부산광역시 산불방지 및 지원에 관한 조례,” 『부산광역시조례 제7424호』, 국가법령정보센터.
- 산림청, 2018, “산불관리통합규정,” 『산림청훈령 제1384호』, 국가법령정보센터.
- _____, 2020, 『산불 위험 대비 주택 안전관리 매뉴얼 리플렛 자료』, 산림청 통합자료실.
- _____, 2024, 『2024년 전국산불방지 종합대책』, 산림청 e-산림정책도서관.
- _____, 2025, “경북·경남·울산 산불피해 규모 잠정 104천ha, 산림청 복구에 최선,” 보도자료(2025.4.18).
- 이석민·신상영·윤형미, 2025, 『기후변화에 따른 산지경계부 개발행위 협의기준 개선방안(2024-PR-42)』, 서울연구원.
- 정지윤·우성호·손락훈·윤진호·정지훈·이석준 등, 2018, “대규모 기후인자와 관련된 우리나라 봄철 산불 위험도 변동,” 『대기』, 28(4), pp.457-467.
- 최유라·한우석, 2024, “용도지역별 폭우재해 취약지역의 재해예방형 도시계획 수립방안: 창원시를 중심으로,” 『국토연구』, 120, pp.77-95.
- 통계청, 2025, 『계절별 산불발생 현황』, KOSIS 국가통계포털(산불통계).
- Abatzoglou, J. T., A. P. Williams and R. Barbero, 2019, “Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices,” *Geophysical Research Letters*, 46(1), pp.326-336.
- Burby, R. J., R. E. Deyle, D. R. Godschalk and R. B. Olshansky, 2000, “Creating

- hazard resilient communities through land-use planning," *Natural Hazards Review*, 1(2), pp.99-106.
- California Governor's Office of Emergency Services, 2025, 2018 Camp fire after action report, California Governor's Office of Emergency Services.
- Cameron, A. C. and P. K. Trivedi, 2013, Regression analysis of count data, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press.
- Choi, J. and H. Chae, 2024, "Assessing wildfire risk in south korea under climate change using the maximum entropy model and shared socioeconomic pathway scenarios," *Atmosphere*, 16(1), 5.
- Cohen, J. D., 2000, "Preventing disaster: home ignitability in the wildland-urban interface," *Journal of Forestry*, 98(3), pp.15-21.
- Copernicus Climate Data Store (CDS), 2018, ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present, Copernicus Climate Data Store.
- Copernicus Emergency Management Service (CEMS), 2019, Fire danger indices historical data (cems-fire-historical-v1), Copernicus Emergency Management Service.
- Cova, T. J., 2005, "Public safety in the urban-wildland interface: should fire-prone communities have a maximum occupancy?," *Natural Hazards Review*, 6(3), pp.99-108.
- Fang, K., Yao, Q., Guo, Z., Zheng, B., Du, J., and Qi, F., et al., 2021. "ENSO modulates wildfire activity in china," *Nature communications*, 12(1), 1764.
- Godschalk, D. R., 2003, "Urban hazard mitigation: creating resilient cities," *Natural Hazards Review*, 4(3), pp.136-143.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., and Muñoz-Sabater, J., et al., 2020, "The ERA5 global reanalysis," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), pp.1999-2049.
- Hilbe, J. M., 2011, Negative binomial regression, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press.
- International Code Council, 2024, 2024 International wildland-urban interface code (IWUIC), International Code Council.
- IPCC, 2014, Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. contribution of working group II to the fifth assessment report, Cambridge: Cambridge University Press.
- _____, 2021, Climate Change 2021: The physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge: Cambridge University Press.
- _____, 2022, Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution

- of working group II to the sixth assessment report, Cambridge: Cambridge University Press.
- Jo, H. W., A. Krasovskiy, M. Hong, S. Corning, W. Kim, F. Kraxner, et al., 2023, "Modeling historical and future forest fires in south korea: the FLAM optimization approach," *Remote Sensing*, 15(5), 1446.
- Kelley, D. I., C. Burton, F. Di Giuseppe, M. W. Jones, M. L. F. Barbosa, E. Brambleby, et al., 2025, "State of wildfires 2024–2025," *Earth System Science Data*, 17, pp.5377–5488.
- Kumar, M., S. Li, P. Nguyen and T. Banerjee, 2022, "Examining the existing definitions of wildland-urban interface for california," *Ecosphere*, 13, e4306.
- Lian, C., C. Xiao and Z. Feng, 2023, "Spatiotemporal characteristics and regional variations of active fires in china since 2001," *Remote Sensing*, 15(1), 54.
- NFPA, 2018, NFPA 1144: Standard for reducing structure ignition hazards from wildland fire, National Fire Protection Association.
- Platt, R. V., 2010, "The wildland-urban interface: evaluating the definition effect," *Journal of Forestry*, 108(1), pp.9–15.
- Quilcaille, Y., F. Batibeniz, A. F. S. Ribeiro, R. S. Padrón and S. I. Seneviratne, 2023, "Fire weather index data under historical and shared socioeconomic pathway projections in the 6th phase of the coupled model intercomparison project from 1850 to 2100," *Earth System Science Data*, 15, pp.2153–2177.
- Radeloff, V. C., R. B. Hammer, S. I. Stewart, J. S. Fried, S. S. Holcomb and J. F. McKeefry, 2005, "The wildland-urban interface in the united states," *Ecological Applications*, 15(3), pp.799–805.
- Read, A. and M. Mowery, 2018, "Zoning and land-use tools in the wildland-urban interface," *Zoning Practice*, September 2018, American Planning Association.
- Schug, F., A. Bar-Massada, A. R. Carlson, H. Cox, T. J. Hawbaker, D. Helmers, et al., 2023, "The global wildland-urban interface," *Nature*, 621(7977), pp.94–99.
- Seo, Y. W. and K. J. Ha, 2022, "Changes in land-atmosphere coupling increase compound drought and heatwaves over northern east asia," *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, 100.
- Syphard, A. D., A. Bar Massada, V. Butsic and J. E. Keeley, 2013, "Land use planning and wildfire: development policies influence future probability of housing loss," *PLoS ONE*, 8(8), e71708.
- Syphard, A. D., T. J. Brennan and J. E. Keeley, 2014, "The role of defensible space for residential structure protection during wildfires," *International Journal of Wildland Fire*, 23(8), pp.1165–1175.

- Van Wagner, C. E., 1987, Development and structure of the canadian forest fire weather index system, *Forestry Technical Report 35*, Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute.
- Walls, M. A. and M. Wibbenmeyer, 2025, Shaping land use patterns in the wildland-urban interface: the role of state and local governments in reducing exposure to wildfire risks, RFF Report 25-11, Resources for the Future.

웹사이트

- UNDRR, 2017, "Disaster risk: Terminology", UNDRR. <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk> [2026.3.17.]

서세교: 부산대학교 도시공학 석박사통합과정을 수료하였다. 주요 연구 분야는 기후변화방재, 회복탄력성, 토지이용계획, 환경계획 등이다(plan_ssg@pusan.ac.kr).

정주철: The University of Texas at Austin에서 도시 및 지역계획 박사학위를 취득하였으며, 현재 부산대학교 도시공학과 교수로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 토지이용계획, 환경계획 및 정책, 스마트 성장관리정책 등이다(jcjung@pusan.ac.kr).

투 고 일: 2026년 03월 23일
심 사 일: 2026년 04월 13일
게재확정일: 2026년 05월 22일