

## 임도의 공간적 분포를 고려한 대형산불 확산 속도의 환경적 영향 요인 규명

이하은 · 권수현 · 임철희<sup>ID\*</sup>

국민대학교 산림환경시스템학과

### Investigating the Environmental Influencing Factors on Large Wildfire Spread Rate Considering the Spatial Configuration of Forest Roads

Ha-Eun Lee, Soohyun Kwon and Chul-Hee Lim<sup>ID\*</sup>

Department of Forestry, Environment and Systems, Kookmin University, Seoul 02707, Korea

**요약:** 기후변화로 야기된 고온·건조한 기후 조건은 산불의 발생 빈도와 피해 규모를 증가시키고 있다. 임도는 산불 상황에서 진입로 및 방화선으로서 핵심적 역할을 하는 것으로 알려져 있으나, 그 피해 규모에 미치는 임도의 영향에 대한 정량적·공간적 검증은 미흡한 실정이다. 이에 본 연구는 2025년 3월 발생한 의성, 산청, 울주 대형산불 사례를 중심으로 공간 정보 분석과 랜덤 포레스트 회귀 분석을 통해 임도를 포함한 환경 요인이 산불 확산에 미치는 영향을 규명하고자 한다. NASA VIIRS 영상을 기반으로 시계열 산불 확산 속도를 구축하여 종속변수로 삼았으며, 독립변수로는 임도 접근성 변수, 지형변수, 기상변수, 연료변수를 활용하였다. 회귀 분석 결과로 변수 중요도 및 SHAP(SHaply Additive Explanations) 값을 이용하여 산불 영향 요인을 해석했다. 분석 결과, 세 대상지 공통으로 바람의 영향력이 높았으며, 그 외 요인은 각 요인 간 상호작용으로 대상지별 상이했다. 특히, 임도 밀도가 상대적으로 높았던 울주에서는 임도 접근성 변수가 음의 영향력을 보였으며, 이는 임도와 가까운 위치일수록 산불의 확산 속도가 낮아지는 경향을 보였음을 의미한다. 울주 사례는 임도가 산불 확산을 저해하도록 기능했을 가능성을 제시한다. 본 연구는 임도를 포함한 환경 요인이 산불 확산에 미치는 영향을 정량적으로 제시하여, 향후 산불 대응 전략 및 임도 관리 전략 수립의 과학적 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**Abstract:** High temperatures and arid conditions, exacerbated by climate change, are increasing the frequency and extent of wildfire damage. Although forest roads are critical as access routes and firebreaks, quantitative and spatial evidence of their specific effects on wildfire behavior remains limited. This study quantifies the influence of forest roads and other environmental factors on wildfire spread speed using spatial analysis and Random Forest regression applied to major wildfires in Uiseong, Sancheong, and Ulju in March 2025. The dependent variable was time-series wildfire spread speed derived from National Aeronautics and Space Administration Visible Infrared Imaging Radiometer Suite imagery. Independent variables included road accessibility, topographical, meteorological, and fuel factors. Regression results were interpreted using variable importance metrics and Shapley Additive Explanations values. Wind was the most influential factor across all sites, with interaction patterns varying spatially. Notably, in Ulju, which had the highest forest road density, greater road accessibility was associated with reduced wildfire spread speed, suggesting that forest roads acted as practical barriers. This study provides a scientific baseline for supporting future wildfire response planning and forest road management strategies.

**Key words:** wildfire, forest road, spatial analysis, random forest regression, forest disaster

## 서론

최근 전 세계적인 기후변화의 가속화는 고온·건조한 기후

조건을 형성하며, 이러한 기후 조건은 산불의 발생 빈도와 피해 규모를 증가시키는 주요 원인으로 지목되고 있다 (Abatzoglou and Williams, 2016; Bowman et al., 2020; IPCC, 2021). 전 세계 곳곳에서 초대형 산불(Mega-fire)의 빈도가 증가하고 그 기간이 장기화되며, 특정한 기간 없이 연중화(年中化)되는 등 산불의 피해가 지속적으로 심화하는 모습을 보이고 있다. 산불은 수많은 인명 및 재산 피해를 낳

\* Corresponding author

E-mail: clim@kookmin.ac.kr

ORCID

Chul-Hee Lim <sup>ID</sup> https://orcid.org/0000-0001-7752-0694

을 뿐만 아니라, 가장 심각한 것은 단기간에 막대한 양의 이산화탄소를 대기 중으로 공급한다는 점이다. 이렇게 대기 중으로 공급된 이산화탄소는 온실효과를 가중하며, 기후변화의 가속화에 지배적인 영향을 미친다(Lee et al., 2023). 실제로, 1997-1998년 인도네시아에서 발생한 산불로 인한 탄소 배출량은 평년 지구 생물권이 흡수하는 총탄소량과 동일했다(Tacconi et al., 2007). 2019-2020년 발생한 호주 블랙 썸머 산불은 엄청난 양의 이산화탄소를 배출하여 그 배출량이 호주 전체 연간 화석 연료 배출량보다 많았다는 분석이 있다(van der Velde et al., 2021). 이처럼 산불이 발생하면 단순히 단기적인 피해에 그치는 것이 아니라, 그간 산림에 저장되어 있었던 탄소가 대량으로 방출되며 지구 온난화를 가속하는 양성 피드백이 심화된다는 점에 주목해야 한다(IPCC, 2019).

이러한 문제는 국내에서도 예외가 아니다. 국립산림과학원에서는 기후변화 시나리오 연구를 통해 2100년경 한국의 산불 위험 수준은 20세기 후반 대비 최대 158%까지 상승할 것으로 예측했으며, 한반도 기온이 1.5~2.0°C 상승할 경우, 봄철 산불 위험 시기가 앞당겨질 가능성이 높다고 밝혔다(NiFoS, 2025). 실제로 2025년 3월, 국내에서도 울주, 산청, 의성을 포함한 전국 각지에서 대형산불이 동시다발적으로 발생하여, 총 100,000 ha 이상의 임야가 소실되는 막대한 피해가 발생했다(KFS, 2025b). 3월 전국 수준의 동시다발적 산불은 그 피해 규모와 기간이 전례 없었을 뿐만 아니라, 극심한 강풍과 건조한 기후가 겹쳐 진화 작업에 극도의 난이도를 더했다. 특히, 여러 지역에서 산불이 동시에 확산됨에 따라 진화 인력과 장비의 분배에 심각한 차질이 발생했으며, 신속한 진입의 어려움으로 초기 진화에 실패하고 장기화되며 진입에 큰 어려움을 겪었다. 이러한 복합적 재난 상황은 기존의 산불 대응 시스템으로는 통제하기 어려운 산불의 “뉴 노멀(New Normal)” 시대가 도래했음을 보여주며, 이에 대한 근본적인 대응책 마련의 시급성을 보여주고 있다(UNEP, 2022).

이러한 재난 상황에서 신속한 초기 대응과 진화 효율성 확보는 산불 피해를 최소화하기 위한 핵심적인 국가적 과제로 대두되고 있다(Rodrigues et al., 2023). 효과적인 산불 대응 전략 마련의 필요성이 커짐에 따라, 산림청은 임도 확충을 주요 전략으로 제시하고 있다(KFS, 2025c). 산불 상황에서 진화 접근성을 확보하는 것은 매우 중요하며, 이를 위한 길이 바로 임도이다. 그러나 우리나라의 임도는 매우 부족한 실정으로, 국내 임도 밀도는 1 ha당 4.3 m로 일본 24.1 m, 오스트리아 50.5 m 등의 주요국과 비교하여 현저히 낮은 수준이다(KFS, 2024a). 산불 진화 활동에서 임도는 핵심적인 역할을 수행한다. 임도를 통해 소방 차량과 인력 등 진화 자원을 신속하게 투입함으로써 지상 진화 작업의 효율성을 높일 수 있으며(Laschi et al., 2019), 이는 산불이 초기 단계를 넘어 대

형화되는 것을 막는 데 결정적인 영향을 미친다. 나아가, 임도는 지형적으로 산불의 확산 경로를 단절시키거나 지연시키는 방화선 기능도 수행할 수 있다. 또한 임도는 공중 진화가 어려운 야간 및 악기상 시 지상 진화의 유일한 수단이 될 수 있다. 이처럼 임도망의 밀도와 공간적 배치 형태는 산불 확산 속도 및 최종 피해 규모에 중대한 영향을 미치는 주요 요인으로 간주된다(Arienti et al., 2006; Thompson et al., 2018; Laschi et al., 2019).

그러나, 임도의 공간적 분포가 산불 확산과 그 피해 규모에 미치는 영향을 정량적, 공간적으로 분석한 실증 연구는 여전히 부족한 실정이다. 일부 선행 연구(Hong et al., 2024)에서는 임도가 오히려 화염 확산을 촉진할 가능성을 제기하고 있어, 임도의 실제 영향에 대한 객관적 검증의 필요성이 더욱 커지고 있다. 국내에서도 산불 발생 지점을 대상으로 지형, 지리, 기상 변수와의 관계를 회귀 분석으로 규명하거나(Kwak et al., 2008), 산불의 이동 방향 및 속도를 예측하는 알고리즘을 개발한 연구(Koo and Lee, 2016) 등 확산 양상과 영향 요인을 분석한 연구는 진행 되어왔다. 그러나 임도 효과를 정량적·공간적으로 검증하고, 개별 산불 영향 요인 간의 상호작용 및 상관관계를 심층적으로 파악한 사례는 아직 보고되지 않았다.

이에 본 연구는 공간 정보 분석(GIS)과 머신러닝 기법을 활용하여 임도의 공간적 분포를 포함한 환경 요인이 산불 확산 속도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하며, 사례 간 비교를 통해 대형산불 영향 요인과 특성을 규명한다. 이를 위해 2025년 3월 발생한 경북, 경남, 울산 지역의 대형산불 사례를 대상으로 시계열에 따른 산불 확산 속도를 구축하였으며, 다차원적 변수가 산불 확산 속도에 미치는 영향의 양상을 랜덤 포레스트 회귀 기반으로 분석한다. 더불어 통계적 기법을 이용해 산불 발생 특성과 대상지 환경 특성을 비교 분석하여 결과의 이해를 높였으며, 궁극적으로 효과적인 산불 대응 전략 수립을 위한 정책적 제언을 담고자 한다.

## 연구방법

### 1. 연구 대상지

본 연구는 2025년 3월 발생한 경북(의성군, 안동시, 영양군, 영덕군, 청송군) 산불, 경남(산청군, 하동군) 산불, 울산(울주군) 산불을 대상으로 하였다(Figure 1). 본 분석에서는 각 대형산불의 발화 지점을 기준으로 대표 지역명을 부여하여, 각각 ‘의성 산불’, ‘산청 산불’, ‘울주 산불’로 명명하였다. 사용한 대상지 경계는 문헌조사 상 소실 피해가 기록된 행정 단위로 설정했다. 의성은 3개의 읍, 26개 면, 산청은 5개의 면, 울주는 1개의 읍, 2개 동의 합을 대상지 경계로 하였다.

각 산불의 발생·진화 일시 및 피해 면적은 Table 1에 제시되어 있다. 지역별 잠정 산림 피해 면적은 의성이 99,289 ha, 산청이 3,397 ha, 울주가 1,190 ha로 보고되었다(KFS, 2025b).

2. 데이터 및 전처리

본 연구의 분석 모델의 종속변수는 시계열에 따른 산불 확산 속도이다. 대상지별 산불 발생 기간 내에서 시점을 분할하고, 각 시점의 활성 화재 위성 영상을 취득하여 화재 경계면을 구축하였다. 이후 시점 간 확산 거리와 시간차를 계산하여 시점별 확산 속도를 생성하였다. 위성영상을 가공하여 지리적 이동 거리를 산정하고, 경과 시간을 기반으로 산불의 확산 속도를 산정하는 접근 방식은 선행 연구(Schag et al., 2022)에서 산불 행동 특성을 정량화하는 데 활용하여 그 타당성이 입증된 바 있다.

활성 화재 영상은 NASA에서 제공하는 FIRMS(Fire Information for Resource Management System)를 활용하였다(NASA FIRMS, 2023). FIRMS는 NOAA와 NASA가 공동 운영하는 극궤도 환경 관측 위성인 NOAA-20에 탑재된 VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 센서가 수집한 산불 관측값을 가공하여 활성 화재(Active Fire) 영상

을 제공한다(NASA, 2025). VIIRS 센서는 12~13시간의 시간 해상도를 가지며, 대한민국 전역에 대해 일 2회(주·야간) 영상 취득이 가능하다.

대상지별 산불 기간 내 가용한 모든 영상을 취득한 후, 구름 등으로 인한 미탐지로 영상이 누락되었거나 활성 화재 면적이 이전 시점과 지리적으로 완전히 동일한 시점의 영상을 제외하였다. 결과로 의성 10개( $T_1-T_{10}$ ), 산청 10개( $T_1-T_{10}$ ), 울주는 6개( $T_1-T_6$ ) 시점의 영상을 선정했다. 시점 번호는 서로 무관하며 대상지별로 취득된 영상의 시간 순서대로 매겨졌으며, 실제 시간은 결과부에 기재하였다.

이후 취득한 위성 영상 래스터 데이터를 벡터화하여 활성 화재의 경계면을 구축하였다. 구축한 경계면은 60 m 단위로 분할하여 분석 단위인 세그먼트를 생성하였다. 한 시점( $T_n$ )의 세그먼트는 다음 시점( $T_{n+1}$ )의 지리적으로 가장 거리가 가까운 세그먼트와 일대일로 짝지어지며, 이들의 거리 차를 시점 간 시간차로 나누어 확산 속도 변수를 최종 구축했다. 첫 시점( $T_1$ )의 세그먼트에 대한 확산 속도는 발화점과의 거리를 이용해 산정하였다.

임도변수, 지형변수, 연료변수 및 기상변수를 모델 구동을 위한 주요 독립변수(Table 2)로 설정하고 구축하였다.

임도변수 구축을 위해 산림청 산림공간정보서비스에서 제

Table 1. Ignition and containment date-time and burned area of each study site.

	Ignition date/time	Containment date/time	Burned area (ha)
Uiseong	Mar. 22, 2025, 11:24	Mar. 28, 2025, 17:15	99,289
Sancheong	Mar. 21, 2025, 15:26	Mar. 30, 2025, 13:00	3,397
Ulju	Mar. 22, 2025, 12:12	Mar. 27, 2025, 20:40	1,190

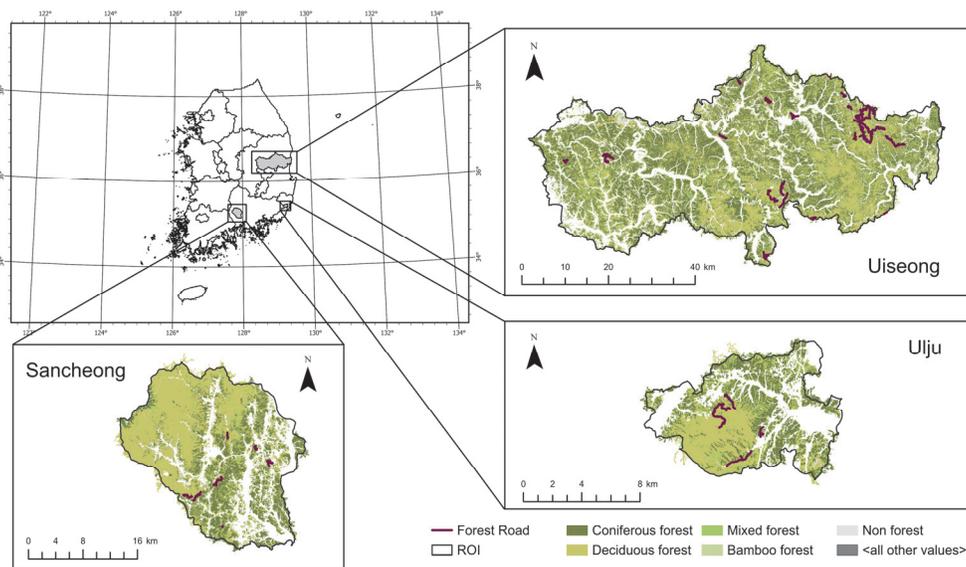


Figure 1. The study areas of wildfires based on forest type with forest road distribution.

공하는 임도망도(KFS, 2025a)를 활용하였다. 분석 단위인 세그먼트별 가장 가까운 임도와의 거리(RoadDist<sub>m</sub>,  $d$ )를 계산하고 지수 감쇠 함수를 적용하여 임도와의 근접도 점수(Prox<sub>exp</sub>)를 산정했다(식 1). 세그먼트와 임도 간 거리가 멀어질수록 근접도는 1에서 0으로 감소한다. 다음으로, 세그먼트의 확산 방향( $\theta_{Fire}$ )과 해당 세그먼트가 가장 가까운 임도와 이루는 각도( $\theta_{RoadRay}$ )의 차이( $\Delta\theta$ )를 기반으로 임도 정렬 변수(RoadAlign<sub>score</sub>)를 구축했다. 이 변수는 산불 진화 상황에서 화두(Fire Head) 진압의 중요성(NWCG, 2023)을 고려하여, 산불 확산 방향이 임도를 향하는지, 반대 방향인지에 따라 -2부터 2까지의 정수로 점수화되었다. 산불이 임도를 향할 때, 임도를 통한 ‘화두 접근성’이 양호하다는 논리를 가정한다. 점수화된  $\Delta\theta$ 의 범위는  $2(\Delta\theta \leq 45^\circ)$ ,  $1(45^\circ < \Delta\theta \leq 90^\circ)$ ,  $-1(90^\circ < \Delta\theta \leq 135^\circ)$ ,  $-2(135^\circ < \Delta\theta \leq 180^\circ)$ 이다. 최종적으로 이 두 변수(근접도 점수, 정렬 변수)를 융합하여 임도 접근성 변수(RoadSignedProx)를 구축했다(식 2). 여기서, 임도가 산불 진

입에 이용될 수 있는 ‘유효거리 기준’을 경험적 방식을 통해 1,500 m로 설정하였으며, 가장 가까운 임도와의 거리(RoadDist<sub>m</sub>)가 1,500 m 초과인 세그먼트의 임도 정렬 변수(RoadAlign<sub>score</sub>)에 0을 할당하여 기준 초과 거리에 위치한 임도의 미미한 영향력을 변수에 반영하였다. 이 융합 변수는 임도의 영향력과 방향성을 나타내는 지수이다. 세그먼트가 임도와 가깝고 그 확산 방향이 임도를 향할수록 높은 양수 값을 가지며, 임도와 가깝지만 확산 방향이 임도와 반대일수록 낮은 음수 값을 가진다. 또한 세그먼트가 임도에서 멀리 떨어진 경우, 그 값이 0에 수렴하여 임도의 영향력이 미미함을 나타낸다.

$$Prox_{exp} = e^{-d/\tau} \tag{1}$$

$$RoadSignedProx = Prox_{exp} \times RoadAlign_{score} \tag{2}$$

**Table 2. Environmental factor variables used in this study.**

Variables	Unit	Data description
Elevation	%	The height above sea level of the center of the grid cell. It describes the vertical position of the terrain, influencing fire behavior through factors like temperature lapse rate and wind exposure.
Slope	%	The maximum rate of change in elevation across the surface, measured at the center of the grid cell. Increased slope promotes preheating and convective heat transfer, significantly accelerating uphill fire velocity.
Terrain Shape Index	Index with negative values for concave to positive values for convex	Represents concave to convex shapes of terrain, with negative values representing a concave terrain shape (cove) and positive values representing a convex terrain shape (ridge).
Heat Load Index	Index ranging from 0 to 1	Measure of the solar exposure of a location using a cosine transformation.
WindSpeed	m/s	The 10-minute mean wind speed value at the time the satellite imagery was acquired.
WindAlign	-	Mapped using values ranging from -2 to 2 based on the degree of alignment with the wildfire’s direction of spread, calculated using the 10-minute mean wind direction at the time of satellite image acquisition.
Road proximity (RoadSignedProx)	-	Fusion index of ‘proximity to the nearest road’ and ‘road alignment’ score. Positive values indicate a high proximity to the road coupled with a diffusion direction toward the road. Negative values indicate a high proximity coupled with a diffusion direction away from the road, and values near zero indicate minimal influence.
Fuel load	kg/m <sup>2</sup>	Total surface fuel load per unit area, including fine and coarse dead fuels(< 7.6 cm diameter). Represents the potential amount of combustible material.
Fuel bed depth	m	Vertical depth of the surface fuel layer composed of litter, branches, and grasses. Indicates the structural continuity and volume of surface fuels.
Moisture of extinction dead fuel	%	Moisture of extinction - the threshold fuel moisture content above which fire spread ceases.

지형변수는 고도(Elevation), 경사도(Slope), HLI(Heat Load Index), TSI(Terrain Shape Index)를 적용하였다. 고도는 대한민국 전역의 30 m 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용했으며, 이외 변수는 DEM을 가공하여 구축하였다. TSI는 지형이 오목한지(concave) 볼록한지(convex)의 형태를 수치화한 지수로, McNab(1989)의 방식을 이용해 계산되었다. 일반적으로 TSI가 양의 값일 때 오목한 계곡부, 음의 값일 때 볼록한 능선부를 나타낸다. 일반적으로 계곡부는 습하고 시원하며, 능선부는 열이 잘 축적되고 바람의 영향을 많이 받는 특성을 가진다(McNab, 1989). HLI는 지형이 받는 잠재적인 열 축적량을 나타내는 지수이며, 방위 및 경사를 이용해 계산되었고 남서사면에서 북동사면으로 갈수록 낮은 값을 갖는다(McCune and Neon, 2002).

연료변수는 2024년 산림청 대축적 임상도(1:5,000)(KFS, 2024b)에 Anderson13 연료 모델(Anderson, 1982)을 매핑하여 사용하였다. Anderson13 모델은 식생 유형을 기반으로 화염 확산 속도, 화염 길이, 연소 강도 등을 예측하는 분류 모델이다. 이 모델은 크게 초지, 관목, 임목 낙엽층, 벌채 잔재 네 가지 그룹으로 분류되어 있다. 임상도의 속성 정보를 이용해 분류 로직을 구축하였으며, 수종, 수관 밀도, 그리고 임목의 크기(경급)가 지표면 연료의 특성에 미치는 영향을 반영하여 13개 연료 모델 중 하나(FM1-FM13)로 분류하였다. 구축된 분류 로직을 통해 임상도의 각 피처에 연료량(Fuel Load), 연료층 두께(Bed depth), 연료 소화 수분 한계(Moisture of extinction dead fuel) 값을 할당하였으며, 세그먼트에 조인하였다.

기상변수는 기상청의 융합기상(KMA, 2025b) 자료 중 풍속과 풍향 데이터를 가공하여 이용했다. VIIRS 위성 영상이 취득된 각 시점에 해당하는 풍속 및 풍향 정보를 수집하였다. 풍향은 산불 진행 방향과의 정합 정도에 따라 -2부터 2까지의 값으로 점수화하여, 산불에 대한 영향을 정량적으로 반영하였다.

기상변수 중 대상지 특성 분석을 위한 기술통계에 사용한 기온, 풍속 데이터는 기간 내 대표성을 가지는 값을 취득하기 위하여 기상청 AWS 자료(KMA, 2025a)를 이용해 별도로 수집하였다. 대상지 경계 내외에 위치한 중관 기상 관측소의 관측값 중, 대상지 각각의 산불 발생 기간 내 가용한 모든 값을 수집하여 통계에 이용하였다. 강수는 기상청 융합기상(KMA, 2025b) 자료를 이용해 구역 통계를 산정했다.

### 3. 변수 및 대상지 특성 분석

모델의 유의미한 해석을 위하여 수집된 변수에 대해 대상지별 기술통계(Descriptive Statistics)를 수행하고 그 특성을 분석하였다. 분석에는 산불 발생 일반 사항, 임도 분포, 지형, 기상, 식생 요소를 포함했으며, 각 요소에 대해 기초 통계를 산정했다. 임도 분포 분석을 위해 대상지 경계 내 임도

연장과 밀도를 산출하였다. 지형은 고도와 경사도를 중심으로 최대/최소값, 평균, 표준편차를 계산하여 지형적 편차를 정량적으로 파악했다. 기상변수 중 기온은 수집된 관측값의 최댓값, 최솟값, 평균 최댓값 및 평균 최솟값을 사용했다. 풍속은 최대순간풍속을 이용하여 순간적인 강풍의 영향을 파악하고자 했으며, 최대/최소값과 평균을 산출했다. 강수는 발생 기간 내 최소, 최대, 평균 일일 강수량을 산정 및 비교하였다. 식생은 임상도를 이용하여 대상지 경계 내 임상(林相) 비율을 조사했다. 최종적으로, 대상지 간 통계를 비교한 후 세 산불의 특성에 따라 산불을 유형화하였다.

### 4. 머신러닝 기반 영향 규명 방법

산불 확산 속도에 영향을 미치는 주요 요인을 정량적으로 분석하고자 랜덤 포레스트(Random Forest, RF) 회귀 모델(Breiman, 2001)을 구축하였다. RF는 다수의 결정트리(Decision Tree)를 학습시키고 그 결과를 앙상블(Ensemble)하여 예측 성능을 향상시키는 비모수적(non-parametric) 머신러닝 기법이다(Breiman, 2001). 이 기법은 특히 변수 간의 비선형 관계나 상호작용 효과를 효과적으로 반영할 수 있다는 장점이 있다.

모델 학습 후, 각 요인이 산불 확산 속도에 미치는 상대적인 영향력을 해석하기 위해 SHAP(SHapley Additive exPlanations) 값을 활용하였다(Lundberg and Lee, 2017). SHAP 값은 각 변수의 기여도를 개별 예측 결과 단위에서 정량적으로 분해하여 설명할 수 있게 한다(Lundberg and Lee, 2017). 이를 통해 변수별 중요도와 각 요인이 산불 확산 속도에 미치는 영향의 방향성(양/음)을 파악했으며, 대상지 간 상호 비교로 산불 확산 영향 요인을 심층적으로 분석했다.

## 결과 및 고찰

### 1. 산불 발생 및 환경 요인 특성 분석

본 연구에서 선정한 세 가지 산불 대상지에 대해 산불 발생 특성과 환경 요인에 대한 기술통계 분석이 진행되었으며, 주요 특징을 비교하였다(Table 3).

의성 산불은 면적 소실률(Area burned rate)이 662.59로 세 대상지 중 압도적으로 높아 가장 폭발적인 확산 양상을 보였다. 산청은 가장 긴 기간 동안 확산이 지속되었으며, 울주는 가장 짧은 기간 동안 가장 적은 면적 소실을 기록했다. 임도 밀도의 경우, 산청이 0.28 m/ha로 가장 낮았으며, 의성이 0.49 m/ha, 울주가 1.28 m/ha를 기록하여 세 대상지 간 뚜렷한 차이가 있었다. 그러나 국내 전국 평균 임도 밀도는 4.3 m/ha이며, 세 대상지 모두 국내 최소 필요 임도 밀도(6.8 m/ha)에 비해 절대적으로 부족한 수준이었다(KFS, 2024a).

**Table 3. Descriptive statistics of wildfire characteristics and environmental variables by study area.**

Variables		Uiseong	Sancheong	Ulju	
General	Duration(h)	149.85	213.57	128.47	
	Burned area(ha) (KFS, 2025b)	99,289	3,397	1,190	
	Area burned rate(ha/h)	662.59	15.91	9.26	
Road	Total length(m)	127,155.05	13,032.76	10,149.09	
	Density(m/ha)	0.49	0.28	1.28	
Topology	Elevation	Min	-6	27	-3
		Max	925	1,896	734
		Mean	269.05	428.05	161.17
		SD	141.99	346.73	144.91
	Slope	Min	0	0	0
		Max	63.53	59.02	48.80
		Mean	16.50	19.05	14.02
		SD	9.06	10.00	8.75
Weather	Temperature (°C)	Min	1.1	-5	9.6
		Max	28.4	27.3	27.8
		Mean <sub>Min</sub>	5.81	3.87	11.85
		Mean <sub>Max</sub>	22.47	19.47	22.47
	Precipitation (mm/day)	Min	0	0	0
		Max	0.61	0.26	0
		Mean	0.00	0.01	0
Peak wind speed (m/s)	Min	6.4	8.2	9.4	
	Max	27.6	19.9	18.5	
	Mean	12.93	12.97	14.39	
Vegetation	Conifer	47.84	31.15	38.32	
	Deciduous	35.25	58.01	43.88	
	Mixed	Ratio (%)	13.68	6.69	15.72
	Non forest		3.21	2.41	1.71
	Bamboo		0.02	1.73	0.37

지형적으로 산청은 고도와 경사 표준편차가 가장 높아 지형적 편차가 가장 복잡했음을 알 수 있다. 반면 의성과 울주는 고도와 경사도가 비교적 낮아 지형적 편차가 평이한 수준이었다. 기상의 경우, 세 대상지 공통으로 고온·건조한 기후 조건 및 강력한 바람 등 극한 조건의 영향을 받았다. 의성에서는 최대 27.6 m/s의 강력한 순간풍속이 기록되어 폭발적인 확산의 직접 원인으로 작용했을 가능성이 크다. 산청과 울주 역시 최대순간풍속이 평균 12 m/s 이상으로, 강력한 바람의 영향에 있었다. 세 대상지 모두 발생 기간 내 평균 최고기온이 19°C 이상으로 높게 기록되었으며, 강수 또한 매우 적은 양으로 나타났다.

의성은 침엽수림 비중이 47.84%로 가장 높아, 침엽수림이 일반적으로 가지는 높은 가연성과 수관화 발전 위험성(Van Wagner, 1977; Agee, 1996; Cruz et al., 2013)으로 인해 강한 확산에 취약한 연료 조건을 제공했을 가능성을 제시한다. 산청과 울주는 의성에 비해 활엽수림 및 혼효림 비중이 높게 나타났다.

종합적으로, 강력한 순간풍속, 불충분한 임도 분포, 높은 침엽수림 비중 등 극단적 조건이 결합된 의성은 “폭발적 확산형”, 복잡한 지형과 최저 임도 밀도로 진화 접근에 제약이 컸던 산청은 “진입 취약형”, 비교적 높은 임도 밀도로 낮은 확산세를 보인 울주는 “방어적 확산형”으로 유형화했다.

2. 시점별 활성 화재 경계 확산 속도 산정

의성 산불(Figure 2)의 활성 화재 경계 평균 확산 속도는 221.84 m/h로 가장 높게 나타났다. 단일 발화점에서 시작된 산불은 T<sub>2</sub> 이후 비화로 인해 두 덩어리로 분화 및 확산했으며, T<sub>6</sub>와 T<sub>7</sub> 시점 사이에 매우 급격하게 확산해 연소 면적이 크게 확대된 후 다시 한 덩어리로 합쳐졌다. 산불 후기(T<sub>8</sub>-T<sub>10</sub>)에서는 연소 면적 확대가 비교적 둔화했다. 연소 면적이 지속적으로 확대된 초-중기(T<sub>1</sub>-T<sub>6</sub>)의 지도를 분석한 결과, 화재 경계 인근에 산불 진행을 저해하는 방화선·지상 진화를 위한 진입로로의 임도가 부재했던 것으로 확인된다. 이는 산불의 초기 진화에 난항을 겪고 대형화되었을 가능성을 시사한다.

산청 산불(Figure 3) 역시 발화 초기(T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>)에는 단일 발화점에서 시작되었으나, 이후 비화로 인해 두 덩어리로 분화되어 진행되었다. 산청 활성 화재 경계의 평균 확산 속도는 27.55 m/h로 세 대상지 중 가장 낮았다. 시점별 확산 속도 지도를 보면, 타 대상지와 달리 급격한 확산 없이 지리적으로 동일한 면적이 장기간 연소했다. 이에 따라 확산 거리가 상대

적으로 작게 산정되어 평균 확산 속도가 낮게 도출된 것으로 해석된다. 산청 역시 활성 화재 경계 근처에 지상 진화 진입에 충분한 수준의 임도가 부재했던 것으로 나타났다.

울주 산불(Figure 4)의 연소 경계 평균 확산 속도는 109.60 m/h였다. 울주에서는 발화 직후 초기(T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>)에 연소 면적이 가장 크게 확대되었다. 큰 확산이 일어나지 않은 중기(T<sub>3</sub>-T<sub>5</sub>) 지도를 살펴본 결과, 연소 경계 인근에 다수의 임도가 분포하

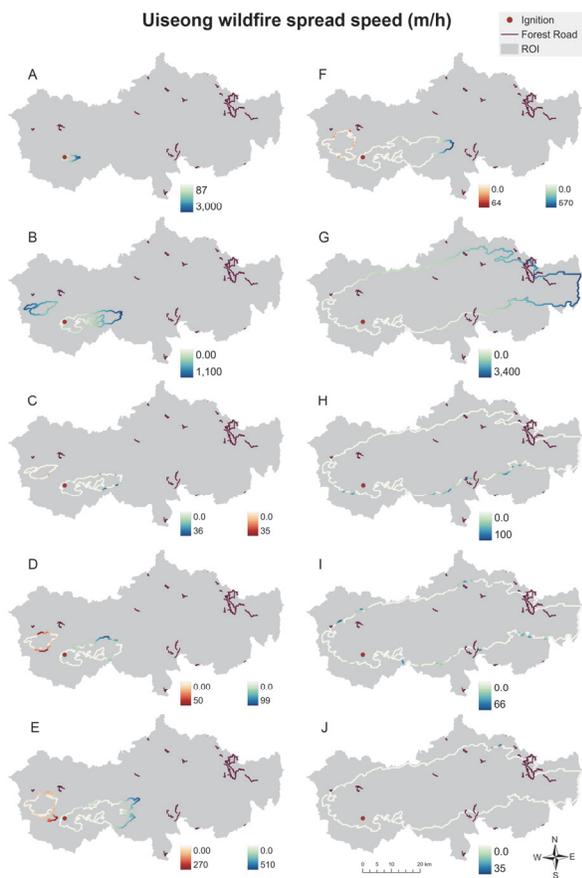


Figure 2. Time-series wildfire spread speed in Uiseong (A: T<sub>1</sub>(03/22 13:08) B: T<sub>2</sub>(03/23 02:45) C: T<sub>3</sub>(03/23 13:08) D: T<sub>4</sub>(03/24 13:08) E: T<sub>5</sub>(03/25 02:45) F: T<sub>6</sub>(03/25 13:08) G: T<sub>7</sub>(03/26 02:45) H: T<sub>8</sub>(03/26 13:08) I: T<sub>9</sub>(03/27 02:45) J: T<sub>10</sub>(03/27 13:08)).

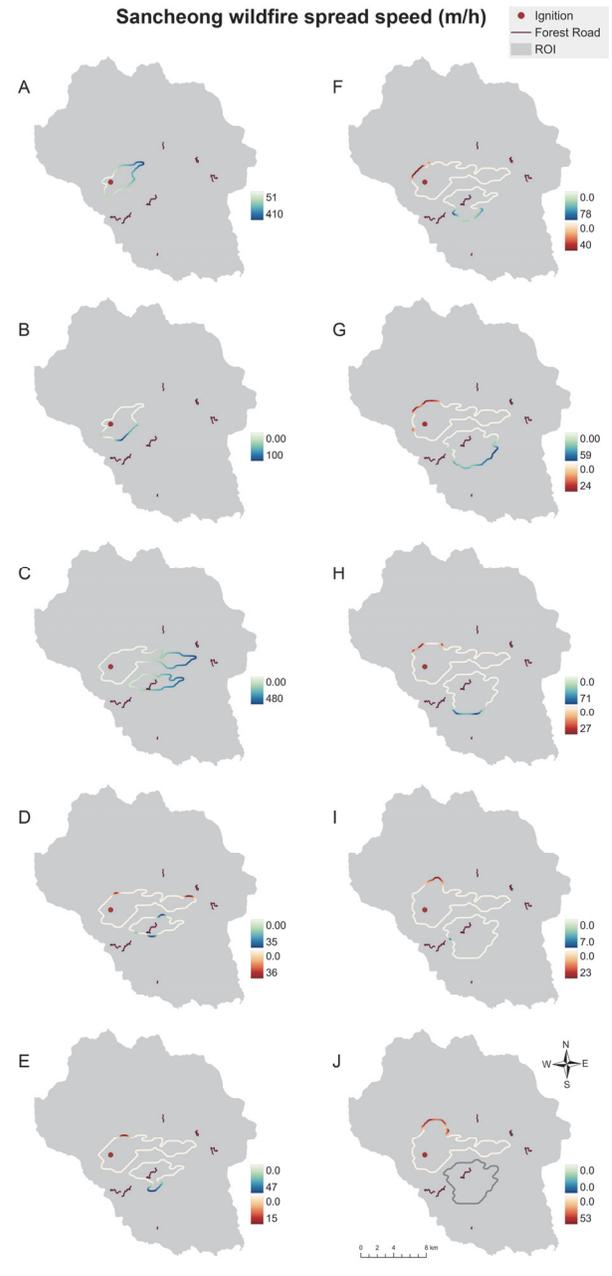


Figure 3. Time-series wildfire spread speed in Sancheong (A: T<sub>1</sub>(03/22 02:45) B: T<sub>2</sub>(03/22 13:08) C: T<sub>3</sub>(03/23 02:45) D: T<sub>4</sub>(03/23 13:08) E: T<sub>5</sub>(03/24 13:08) F: T<sub>6</sub>(03/25 02:45) G: T<sub>7</sub>(03/26 02:45) H: T<sub>8</sub>(03/26 13:08) I: T<sub>9</sub>(03/28 13:08) J: T<sub>10</sub>(03/29 02:45)).

고 있었다. 후기(T<sub>6</sub>)에서는 임도를 넘어 다시 확산하는 양상이 나타났다.

**3. 산불 확산 속도 영향요인 분석**

랜덤 포레스트 회귀 모델을 적용하여 변수 중요도 분석 (Figure 5)을 수행하고, 대상지별로 종속변수에 대한 영향력이 큰 변수를 도출하였다.

의성 산불에서는 풍속(WindSpeed)이 예측에 미치는 영향이 가장 컸으며, 고도(Elevation)가 그 뒤를 이었다. 반면, 연료 조건 변수(연료량, 연료층 두께, 연료 소화 수분 한계)는 미미한 중요도를 보였다. 산청과 울주 산불에서도 풍속이 가장 높은 중요도를 보였으며, 풍향 정합도, 고도, 임도 접근성이 주요 요인으로 식별되었으나, 그 값이 약 0.1 전후로 절대적인 값이 크지는 않았다. 전반적으로 세 대상지 공통으로 풍속이 가장 높은 중요도를 보였으며, 풍향 정합도, 임도 접근성이 뒤를 이어나 낮은 중요도를 가졌으며, 연료 변수가 미미한 중요도를 가진다는 유사한 양상이 확인되었다.

변수 중요도 값만으로는 각 요인이 종속변수에 미치는 구체적인 영향의 양상을 판단하기 어렵다. 이에 개별 변수들 영향의 방향성과 비선형적 관계를 심층적으로 규명하기 위해 SHAP 분석(Figure 6)을 수행하였다(Lundberg and Lee, 2017; Molnar, 2025). 의성 산불에서는 바람 관련 변수가 양

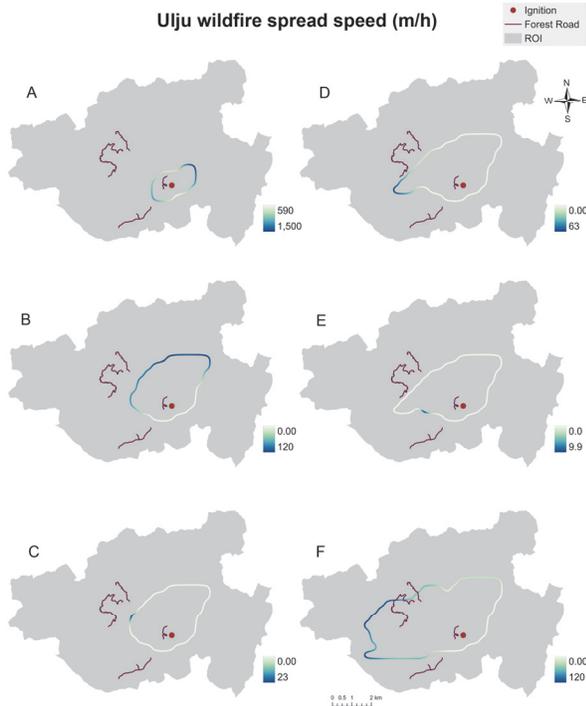
의 상관관계를 나타냈다. 즉, 풍속이 클수록 확산 속도가 빨라지고, 산불 진행 방향과 바람 방향이 정합할수록 확산이 가속화되는 경향을 보였다. 특히, 풍속 변수는 양의 방향으로 최대 약 1,600의 SHAP 값을 기록했는데, 이는 다른 변수들의 최대 SHAP 값을 크게 상회하는 값으로, 높은 풍속이 예측값을 극단적으로 상승시키는 경향을 보여준다는 것을 정량적으로 보여준다. 이는 산불 진행 방향과 일치하는 강한 바람이 폭발적인 확산의 주요 원인이었음을 뒷받침한다. 지형 변수 중 고도는 높은 중요도를 가졌으나 선형적 관계는 없었다. HLI는 약한 양의 상관관계를 보였는데, 이는 열이 많이 축적되어 건조한 지형에서 산불이 빠르게 확산했음을 의미한다.

산청 산불의 경우, 풍속은 음의 상관관계를, 풍향 정합도는 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 즉, 산불 진행 방향과 풍향이 일치했을 때 확산 속도는 빨라졌으나 풍속이 강할 때 오히려 확산 속도는 낮아지는 양상이 관찰되었다. 지형적 편차가 컸던 산청의 특성상, 복잡한 지형의 영향 또는 강한 역풍이나 횡풍의 작용이 풍속의 확산 효과를 상쇄하는 복합적인 작용을 야기했을 가능성이 있다.

의성과 산청 산불에서 임도 접근성 변수는 유사한 양상을 보였다. SHAP 상으로 높은 변수값에서 예측값이 극에 치우치는 영향이 나타나지만, 낮은 변수값에서 예측값이 '0'에 집중적으로 분포하는 극단적인 비선형적 형태를 가진다. 임도가 고르게 분포하지 않는 의성과 산청의 특성상, 산불 확산 세그먼트와 임도와의 거리가 유효거리 기준보다 멀리 떨어져 임도 접근성 변수가 0으로 처리된 종속변수 비율이 80%를 상회하였다. 이에 데이터 분포 구조에 따른 편향 가능성도 고려할 필요가 있다.

울주 산불의 경우, 풍속은 가장 높은 중요도를 가졌으나, 변수값이 중간일 때 예측값이 증가하고 극값(풍속이 매우 크거나 낮을 때)에서는 예측값이 감소하는 비선형적 형태를 보였다. 임도 분포가 비교적 양호했던 울주에서는 임도 접근성 변수가 음의 상관관계를 가졌다. 이러한 영향 형태는 임도와 가까울수록(임도 접근성 변수값이 높을수록) 확산 속도가 낮아졌다고 해석될 수 있다. 즉, 임도 인근에서 지상 진화 활동이나 임도의 확산 저해 기능이 산불 진행 속도를 완화했을 가능성을 제시한다.

종합적으로, 세 대상지 모두 풍속의 영향이 가장 컸지만, 대상지별 특성과 변수 간 복합적인 상호작용으로 인해 그 영향의 양상은 상이하게 나타났다. 폭발적 확산형(의성)은 산불 진행 방향과 일치하는 강력한 바람으로 인한 확산 속도의 증가가 주된 특징이었다. 진입 취약형(산청)은 복잡한 지형 및 임도 분포 형태와의 상호작용으로 복합적인 확산 형태를 보였다. 방어적 확산형(울주)은 임도와의 접근성이 산불 확산 속도를 완화하는 영향 형태를 보였는데, 이는 다른 두 대상지



**Figure 4. Time-series wildfire spread speed in Ulju (A: T<sub>1</sub>(03/22 13:08) B: T<sub>2</sub>(03/23 02:45) C: T<sub>3</sub>(03/23 13:08) D: T<sub>4</sub>(03/24 13:08) E: T<sub>5</sub>(03/25 13:08) F: T<sub>6</sub>(03/26 02:45)).**

와 차이가 있는 결과이다. 또한, 연료 관련 변수는 세 대상지 모두에서 종속변수 예측값에 미미한 영향을 미쳤다.

4. 산불 대응 및 임도 관리에 대한 함의

본 연구의 분석 결과, 세 대상지 모두에서 풍속 변수가 산불 확산 속도에 높은 영향을 준 것으로 나타났으며, 임도의 영향

은 대상지별 차이를 보였다. 임도 분포가 상대적으로 양호했던 울주에서만 확산 속도가 낮아지는 경향이 확인되었으며 나머지 대상지에서는 극단적 비선형성을 보였다. 그러나, 산

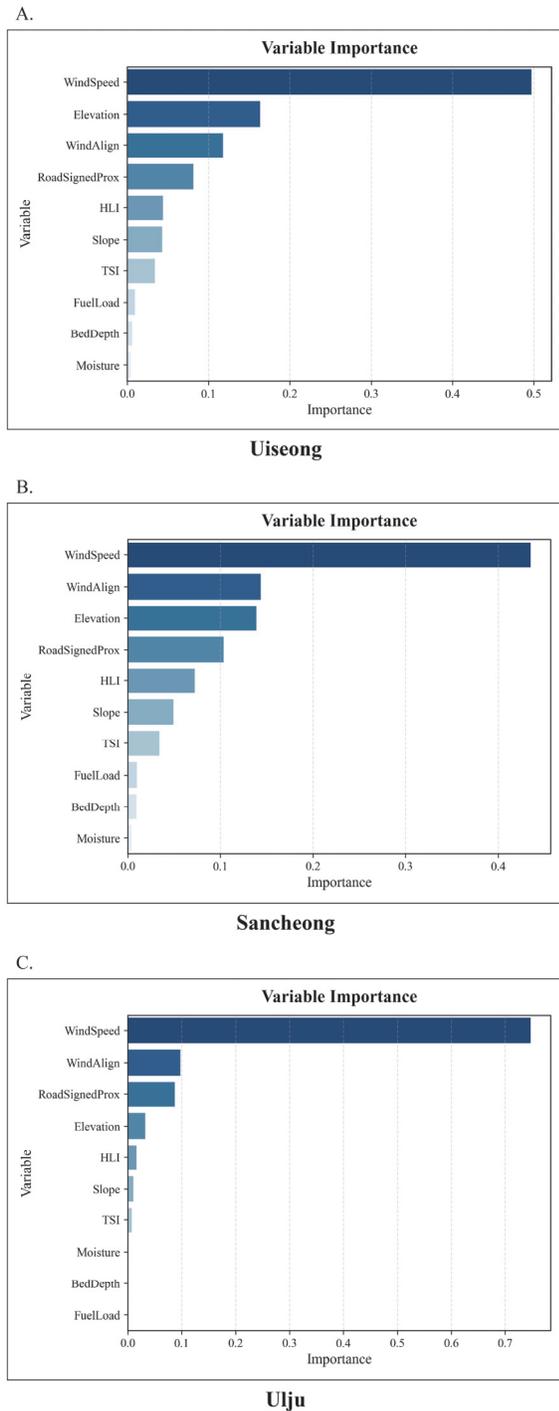


Figure 5. Variables importance plot by study area (A: Uiseong B: Sancheong C: Ulju).

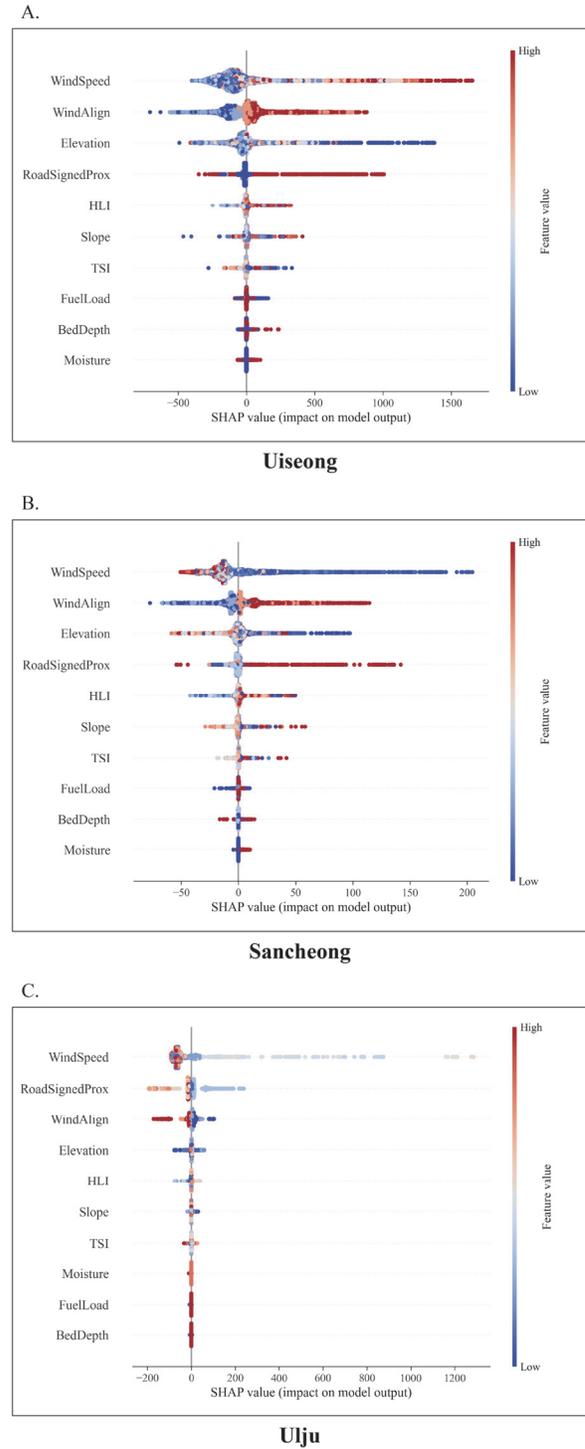


Figure 6. SHAP summary plot by study area (A: Uiseong B: Sancheong C: Ulju). The horizontal axis (SHAP Value) shows the magnitude and direction of the impact (positive for increase, negative for decrease) on the prediction. Red points indicate a high feature value, and Blue points indicate a low feature value.

불 진행 과정에서 확산의 경계와 임도 간 이격거리가 과도하게 커, 영향권 내 임도가 존재하지 않았던 경우가 매우 많았던(80% 이상) 사실을 고려할 필요가 있다.

산불 피해 및 임도의 관계를 다룬 선행 연구(Hong et al., 2024)에서는 홍성 산불 사례 분석을 통해 도로로부터 가까울수록 산불 피해 면적 및 강도가 증가하는 현상을 보고한 바 있다. 본 연구는 이러한 기존 연구의 방법론에서 나아가 산불 상황에서의 임도 기능과 환경 요인의 복합적인 효과에 대하여 보다 다층적이고 정량적인 시각을 제시하였다. 기존 연구가 단일 사례 지역에 한정하여 산불 피해 결과를 단순 통계적으로 분석하는 데에 그쳤다면, 본 연구는 머신러닝 기반의 정량적 기법을 활용함으로써 임도 기능을 포함한 다양한 환경 요인들 간 복합적 작용 및 비선형적 관계를 규명하고자 시도하였다는 점에서 방법론적 의의를 가진다. 또한, 산불의 동적인 특성을 반영한 것은 중요한 차별성 중 하나이다. 기존 연구가 산불 발생 전후의 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio, NBR) 비교를 통해 최종적인 산불 피해 면적과 강도를 추정하고 이를 분석에 이용한 정적 접근을 취했다면, 본 연구에서는 시계열에 따른 활성 화재 면적 정보를 활용해 산불 확산의 속도를 구축하였다. 이로써 산불의 동적인 확산 과정 자체를 분석 모델에 반영하였으며, 확산 과정에서의 임도 역할 및 다양한 환경 변수의 영향을 정교하고 정량적인 방식으로 평가할 수 있었다. 이러한 면에서 본 연구는 결과 중심적 분석의 한계를 넘어, 산불 대응 및 임도 관리 전략 수립에 필요한 운용적이고 실천적인 함의를 제공한다는 점에서 학술적 가치를 확보한다.

본 연구의 결과는 향후 산불 대응 및 임도 관리 전략 수립에 다음과 같은 시사점을 제공한다. 임도망의 체계적 확충은 산불 피해 저감을 위한 핵심적 수단으로 고려되어야 한다. 본 분석 대상지 모두에서 절대적인 임도 분포 부족이 확인되었으며, 이는 초기 진화 및 확산 억제에 구조적 제약으로 작용한 것으로 해석된다. 임도의 부재는 진화 진입로 확보를 어렵게 하고 확산 억제 기능의 상실로 이어져, 산불의 대형화·장기화를 초래한다. 따라서 임도는 단순한 진입로를 넘어 대형화를 방지하는 예방 인프라로 기능해야 한다. 향후 전국 산림 차원에서, 산불 취약 지역 및 임도 부족 지역을 중심으로 단계적이고 전략적인 임도 확충이 요구되며, 지형적 특성과 기존의 배치 형태를 고려한 최적화된 설계가 필수적이다. 지형·기상·연료 등 지역적 특성을 반영한 맞춤형 산불 대응 체계 구축이 필요하다. 산불 확산 요인(지형 편차, 기상 조건, 임도 분포 등)은 개별적으로 작용하기보다 복합적으로 상호작용하는 것으로 나타났다. 이는 획일적인 산불 대응 전략이 모든 지역에 효과적으로 적용되기 어려움을 시사한다. 따라서 지역별 주요 확산 요인을 정량적으로 분석하고 이를

데이터베이스화하여, 지역 환경에 기반한 맞춤형 방재 전략 및 대응 매뉴얼을 수립해야 한다.

본 연구는 산불 확산 영향 요인의 정량적·공간적 규명이라는 의의를 가지나, 다음과 같은 한계점을 가진다. 첫째, 분석에 사용된 위성 영상은 낮은 시간 및 공간 해상도를 가지므로, 실제 화재의 정밀한 재현에 한계가 있었다. 둘째, 공간 자료 기반의 분석으로 인해 실제 진화 자원의 투입량 및 이동 경로는 분석에서 포함되지 못했다. 셋째, 본 연구는 세 개의 산불 사례로 특정 시기 중심의 분석에 국한되어, 전국 단위의 보편적 해석에는 제한적이다.

후속 연구에서는 더 정밀한 위성 영상 혹은 실제 조사된 화재 정보를 활용하여 더욱 정교한 산불 확산 속도를 구축할 필요가 있다. 또한, 산불 영향 요인의 보편적이고 심층적인 분석을 위하여 산불 유형을 다양화할 필요가 있다. 본 연구의 세 사례는 모두 소실 면적이 100 ha 이상, 진화 기간이 24시간 이상 지속된 대형산불이며 임도의 분포가 절대적으로 적은 지역이었다. 따라서 다차원적 환경 요인이 산불 양상을 어떻게 다변화하는지 규명하는 데에 그 사례의 개수가 충분하지는 않았으며, 특히 임도 분포량의 범위가 넓지 않아 그 영향을 일반화하기에는 추가적인 분석이 요구된다. 추후 산불 규모 및 임도 분포 수준의 세분화를 통해 더욱 다층적인 영향이 분석되길 기대한다. 이러한 연구는 임도 설계 및 산불 관리 정책에 실질적인 과학적 근거를 제공할 것이다.

## 결론

본 연구는 2025년 3월 발생한 의성, 산청, 울주의 대형산불을 대상으로 임도의 공간적 분포를 포함한 환경적 요인이 산불 확산 속도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 시계열적 활성 화재 면적 정보를 활용하여 산불 확산의 동적인 과정을 분석에 반영하였으며, 랜덤 포레스트 회귀 모델 및 SHAP 분석 방법론을 적용하여 시점별 산불 확산 속도(중속변수)와 지형, 기상, 연료, 그리고 임도 접근성 등 다차원적 변수 간의 관계를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 풍속이 세 대상지 모두에서 가장 높은 중요도를 보였다. 산불 확산은 바람의 방향과 정합할 때 가속화되는 경향을 보였으며, 풍속의 영향은 풍향 및 지형 등 다른 요인과 복합적으로 상호작용하는 양상을 나타냈다. 임도의 영향은 대상지별 차이를 보였다. 임도 분포가 가장 부족했던 의성과 산청과 달리, 울주 산불에서는 화재 경계가 임도 가까이에 위치할 때 확산 속도가 상대적으로 낮아지는 영향의 형태가 확인되었다. 이러한 결과는 임도가 진화 접근성을 높이고 확산을 단절하는 방화선 기능을 수행할 가능성을 제시한다.

본 연구는 기존 연구의 분석적 한계를 넘어, 머신러닝 기법

과 시계열적 화재 확산 속도라는 동적 지표를 결합하여 산불 확산 영향 요인의 정량적·공간적 기여도를 규명하였다는 점에서 중요한 학술적 의의를 가진다. 특히, 임도 영향을 포함한 환경 요인의 기여도를 개별 수준이 아닌 다차원적인 복합 상호작용의 형태로 정교하게 평가하였다는 점에서 방법론적 의의가 크다. 결과적으로 향후 산불 대응 및 임도 관리 전략에 크게 두 가지 시사점을 제공한다. 먼저, 임도망의 체계적 확충은 산불 피해 저감을 위한 핵심적 수단으로 고려되어야 한다는 점이다. 또한, 산불확산 요인의 지역별 편차 및 복합적 상호작용을 반영하여 지역 특성에 기반한 맞춤형 산불 대응 체계를 구축해야 함을 시사했다.

다만, 본 연구는 위성 영상의 해상도 한계 및 분석 대상 산불 사례의 한정으로 전국 단위의 보편적 해석에 제한적이라는 한계를 가진다. 따라서 후속 연구에서는 더 정밀한 데이터를 이용한 정교한 산불 확산 속도의 구축이 요구된다. 또한, 산불 규모 및 임도 분포 수준을 세분화하고 다양한 유형의 산불 사례를 포함하여 다차원적 환경 요인이 산불 양상에 미치는 영향을 심층적으로 분석한다면, 임도 설계 및 산불 관리 정책에 더욱 폭넓고 실질적인 과학적 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 대형산불 대응 지능형 솔루션 기술개발사업(RS-2025-25438293)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Abatzoglou, J.T. and Williams, A.P. 2016. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113(42): 11770-11775.
- Agee, J.K. 1996. The influence of forest structure on fire behavior. *Proceedings of the 17th Annual Forest Vegetation Management Conference*: 52-68.
- Anderson, H.E. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service, General Technical Report INT-122.
- Arienti, M.C., Cumming, S.G. and Boutin, S. 2006. Empirical models of forest fire initial attack success probabilities: the effects of fuels, anthropogenic linear features, fire weather, and management. *Canadian Journal of Forest Research* 36(12): 3155-3166.
- Bowman, D.M.J.S., Kolden, C.A., Abatzoglou, J.T., Finn, M., Johnston, F.H., van der Werf, G.R. and Flannigan, M. 2020. Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment* 1: 500-515.
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning* 45(1): 5-32.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E. and Wakimoto, R.H. 2013. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science* 59(6): 571-579.
- Hong, S., An, M. and Hwang, J. 2024. Impact of Road Density and Vegetation Type on Large-Scale Forest Fire Damage. *Korean Journal of Environment and Ecology*. Korea Society of Environment and Ecology.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 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 University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KFS (Korea Forest Service). 2024a. Forest Road Density in Major Countries. [https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC\\_000812&mn=AR01\\_06\\_01](https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000812&mn=AR01_06_01). (2025. 10. 08).
- KFS (Korea Forest Service). 2024b. Forest Spatial Information Service-Forest Type Map. <https://map.forest.go.kr/forest/>. (2025. 08. 04).
- KFS (Korea Forest Service). 2025a. Forest Spatial Information Service-Forest Road Network Map. <https://map.forest.go.kr/forest/>. (2025. 08. 21).
- KFS (Korea Forest Service). 2025b. Provisional scale of forest fire damage in Gyeongbuk, Gyeongnam, and Ulsan is 104 thousand ha, Korea Forest Service is doing its best for restoration. <https://buly.kr/1xzblGH>. (2025. 04. 18).
- KFS (Korea Forest Service). 2025c. The 6th Forest Basic Plan (Revised: 2018-2037). Korea Forest Service. Daejeon, Korea.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2025a. Automatic Weather Station (AWS) Observation Service. <https://www.weather.go.kr/w/observation/land/aws-obs.do>. (2025. 10. 16).
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2025b. Open MET Data Portal – API Service. <https://apihub.kma.go>

- kr/apiList.do?seqApi=971. (2025. 10. 15).
- Koo, N.K. and Lee, K.W. 2016. Prediction of Wildfire Spread and Propagation Algorithm for Disaster Area. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering* 20(8): 1581-1586.
- Kwak, H.B., Lee, W.K., Lee, S.Y., Won, M.S., Lee, M.B. and Koo, K.S. 2008. The Analysis of Relationship between Forest Fire Distribution and Topographic, Geographic, and Climatic Factors. *Proceedings of Korean Society for Geospatial Information Science*.
- Laschi, A., Foderi, C., Fabiano, F., Neri, F., Cambi, M., Mariotti, B. and Marchi, E. 2019. Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 40(1): 207-219.
- Lee, C.B. et al. 2023. *Scientific Understanding of Forest Fire Management*. Jieul. Seoul, Korea.
- Lundberg, S.M. and Lee, S.-I. 2017. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2017)* 30: 4765-4774.
- McCune, B. and Keon, D. 2002. Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of Vegetation Science* 13(4): 603-606.
- McNab, W.H. 1989. Terrain shape index: Quantifying effect of minor landforms on tree height. *Forest Science* 35(1): 91-104.
- Molnar, C. 2025. *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable*. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/>. (2025. 12. 06).
- NASA FIRMS. 2023. *Fire Information for Resource Management System (FIRMS): Active Fire Data*. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>. (2025. 09. 10).
- NASA. 2025. *VIIRS Land Near Real-Time Data*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs/land-near-real-time-data>. (2025. 09. 24).
- NIFOS (National Institute of Forest Science). 2025. *Global Forest Fire Risk Rises, South Korea is No Exception!*. [https://nifos.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=3204191&bbsId=BBSMSTR\\_1036&mn=UKFR\\_03\\_03\\_01&orgId=kfri](https://nifos.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=3204191&bbsId=BBSMSTR_1036&mn=UKFR_03_03_01&orgId=kfri). (2025. 02. 07).
- NWCG (National Wildfire Coordinating Group). 2023. *NWCG Glossary of Wildland Fire, PMS 205*. National Wildfire Coordinating Group, Boise, ID. Available at: <https://www.nwcg.gov/publications/pms205> (2025.12.10).
- Rodrigues, J., et al. 2023. *Spatial Resilience to Wildfires through the Optimal Deployment of Firefighting Resources: Impact of Topography on Initial Attack Effectiveness*.
- Schag, G.M., Stow, D.A., Riggan, P.J. and Nara, A. 2022. *Spatial-Statistical Analysis of Landscape-Level Wildfire Rate of Spread*. *Remote Sensing* 14(16): 3980.
- Taconi, L., Moore, P.F. and Kaimowitz, D. 2007. *Fires in tropical forests – what is really the problem? lessons from Indonesia. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12: 55-66.
- Thompson, M.P., Lauer, C.J., Calkin, D.E., Rieck, J.D., Stonesifer, C.S., and Hand, M.S. 2018. *Wildfire Response Performance Measurement: Current and Future Directions*. *Fire* 2018, 1, 21.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2022. *Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires*. United Nations Environment Programme.
- Van der Velde, I.R., et al. 2021. *Vast CO<sub>2</sub> release from Australian fires in 2019-2020 constrained by satellite*. *Nature* 597: 366-369.
- Van Wagner, C.E. 1977. *Conditions for the start and spread of crown fire*. *Canadian Journal of Forest Research* 7(1): 23-34.

---

Manuscript Received : November 11, 2025  
 First Revision : December 10, 2025  
 Second Revision : December 12, 2025  
 Accepted : December 14, 2025