

임도가 산불확산 완화에 미치는 영향: 2023년 한국 주요 산불사례와 시뮬레이션 결과의 비교 분석

장미나¹ · 안수정¹ · 한송희¹ · 권경남² · 권춘근^{1*}

¹국립산림과학원 산불연구과, ²고려대학교 기계공학과

Impact of Forest Roads on the Mitigation of Wildfire Spread: A Comparative Analysis of Major 2023 Wildfires in Korea and Simulation Results

Mina Jang¹, Sujung Ahn¹, Songhee Han¹, Kyeongnam Kwon² and chungun Kwon^{1*}

¹Division of Forest Fire Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

요약: 본 연구는 2023년에 발생한 대형산불 사례와 산불확산예측 결과를 비교·분석하여 임도의 유무가 산불확산에 미치는 영향을 분석하였다. 대형산불 8건 중 5건을 선정(합천, 영주, 금산·대전, 함평, 하동)하였으며, 그 중 하동을 제외한 4개 지역은 임도가 설치되어 있었다. 헬기 투입이 이루어지지 않은 야간 시간대의 산불확산예측시스템 결과와 실제 확산 경계를 비교한 결과, 임도가 설치된 지역의 피해면적 감소 효과는 평균 2.6배, 설치되지 않은 지역은 1.4배로 임도가 산불확산 저감에 기여했음을 확인할 수 있었다. 또한, 산불확산시뮬레이터(FDS)를 이용해 강원도 고성군 산림을 가상공간화하여 실험한 결과, 임도가 설치된 구간은 임목의 연료 소모율, 산불 강도, 화염길이 모두 감소하였으며, 특히, 바람 방향이 임도와 평행할 때 확산 저감 효과가 더 큰 것으로 확인되었다. 본 연구는 향후 산불 대응에 있어 최적의 임도망 설계, 임도를 활용한 진화 자원 운영 전략 방향 제시 등에 과학적 근거를 제시함으로써 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: This study evaluated the influence of forest road presence on wildfire spread by systematically comparing observed wildfire perimeters with simulation-based predictions for major wildfire events in South Korea in 2023. Of eight large-scale wildfires (>100 ha), five representative cases (Hapcheon, Yeongju, Geumsan-Daejeon, Hampyeong, and Hadong) were selected for detailed analysis. Four study areas contained established forest road networks, whereas Hadong had no forest roads. Focusing on nighttime periods when aerial suppression was not conducted, predicted burned extents were compared with actual wildfire progression. Areas with forest roads showed a substantially greater reduction in burned area, with an average reduction factor of 2.6, compared with 1.4 in areas without roads, highlighting the fire-mitigating function of forest roads. Furthermore, three-dimensional wildfire simulations using the Fire Dynamics Simulator were performed for a virtual forest stand in Goseong-gun, Gangwon Province. Simulation results demonstrated lower fuel consumption, fire intensity, and flame length in landscapes containing forest roads. Mitigation effects were strongest when the wind direction was aligned parallel to the road orientation. Collectively, these results provide robust scientific evidence to inform the strategic planning of forest road networks and the optimized allocation of wildfire suppression resources, thereby supporting improved wildfire mitigation and response policies.

Key words: forest roads, wildfire spread, fire dynamics simulator, suppression effectiveness

서론

임도는 산불이 이동하는 데 있어 물리적 장벽, 산불 진화

활동에 대한 접근성 증가 등과 같은 역할을 통해 산불의 확산과 규모에 영향을 미칠 수 있는 반면, 임도를 이용하는 인간의 활동에 의해 산불 발생의 증가를 가지고 올 수 있다 (Covington and Moore, 1992). 그럼에도 불구하고 잘 계획되고 개발된 임도망은 산불과 관련하여 여러 기능을 수행할 수 있으며, 산불 위험이 높은 기간 동안 주기적으로 관리 차량이 통행할 수 있으므로 감시를 통한 산불 발생을 억제하고 감지

* Corresponding author

E-mail: chungun@korea.kr

ORCID

chungun Kwon  <https://orcid.org/0000-0002-7392-9246>

시 빠른 대응을 가능하게 할 수 있다(Calvani et al., 1999). 산불에 있어 중요한 기능 중 하나로 진화대원이 가능한 한 빠르게 산불의 가장자리에 도달할 수 있게 하는 역할을 하며, 산불 진화 실패 시 대피로로 활용하여 진화대원의 안전수준을 높일 수 있다(Laschi et al., 2019). 산불 진화가 비교적 쉬운 상황에서는 임도가 효율적인 방화선 역할을 하여 산불 확산 속도를 늦추고 효율적이고 신속한 진화가 가능하게 하여 노력과 피해를 줄이는데 도움을 줄 수 있다(Demir et al., 2009). 이 외에도 진화 관련 인프라(감시시설, 헬기기지, 통신중계기 등)의 효율적인 사용과 유지관리에도 중요한 역할을 하며, 급수가 필요한 지점에 쉽고 빠르게 접근하게 하여 진화 작업이 최적화될 수 있다(Laschi et al., 2019).

국외에서는 임도 설계 시 산불 진화를 고려하여 임도밀도, 임도 길이, 폭 등에 대한 최적값을 제시하는 연구가 수행한 바 있다. 산불 진화 지점까지 인력과 장비가 이동하는 시간을 고려하여 최적의 임도밀도 산정한 바 있으며, 산불확산모델을 이용해 도로에 도달할 때 화선의 이론적 길이를 고려하여 임도의 길이, 폭 등을 산정한 바 있다(Croisé and Crouzet, 1975; De Montgolfier, 1989). 또한, 전문가 의견을 반영하여 임도를 이용한 진화차량으로 산불진화가 가능한 최적 면적을 고려하는 연구를 수행하였으며, 진화대원의 작전 능력 분석과 경험을 기반으로 실제와 이론적 보호구역을 구분하여 진화 효과를 비교하는 연구를 수행한 바 있다(Pentek et al., 2008; Psilovikos et al., 2011) 이외에도 산불진화 시 임도 활용에 대한 효과를 검증하는 연구로 3D 산불행동시뮬레이션 프로그램(PyroSim)을 활용하여 경사, 풍속, 임도 폭 등 조건별 임도의 산불확산 차단 효과를 분석하는 연구가 있다 (Zhongliang et al., 2020).

국내의 경우 임도와 산불 간의 상관관계에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이나, 최근 효율적인 산불관리를 위한 임도의 역할이 재조명됨에 따라 관련 연구 수요가 증가하고 있다. 최근 논문을 보면 2023년에 산불피해지 중 임도가 설치된 대전·금산, 영주시, 합천군을 대상으로 임도 중심으로부터의 거리에 따른 산불 피해 강도를 분류하여 임도의 중요성을 분석한 연구가 수행된 바 있다(Hwang et al., 2024). 실제 현장에서는 산불진화를 위해 차량 통행이 가능한 모든 도로

와 임도를 자원의 이동, 저지선으로 적극 활용하고 있다. 그럼에도 불구하고 대형산불과 같이 강풍 및 비화 등으로 인한 산불확산 시 이를 저지하기에는 어려움이 있다. 따라서, 주간에는 헬기를 이용한 진화 작업이 이루어지며, 상대적으로 바람의 세기나 기온이 낮아지는 야간에 진화인력을 투입하여 진화 작업을 수행하고 있다. 이 과정에서 진화인력이 효율적으로 진화 작업을 수행하기 위해서는 노동력을 최소화하여 신속하게 산불의 가장자리 부근으로 접근하는 것이 중요하며, 한국의 산악지형을 고려하였을 때 임도의 활용도는 높을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 2023년 대형산불 사례를 중심으로 국립산림과학원에서 개발한 산불확산예측시스템 결과와 실제 확산을 비교·분석하여 임도의 효과를 검증하고자 하였으며, 3D 산불행동 모사를 통해 임도가 산불확산에 미치는 영향을 과학적으로 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구 범위 및 대상지

본 연구에서는 23년에 발생한 100 ha 이상의 대형산불 피해지 자료를 활용하였으며, 임도의 효과를 구명하기 위해 피해지 내 임도가 있는 피해지와 임도가 없는 피해지로 구분하여 자료를 수집하였다. 특히, 임도를 이용하여 진화자원을 투입할 경우 산불확산에 어떠한 영향을 미치는가를 보기 위해 헬기가 철수하는 일몰시각 이후부터 일출시각 전까지의 상황을 산불확산예측 결과와 비교·분석하였다. 이를 수행하기 위해 ①~④에 해당되는 산불의 경우 대상지에서 제외하였다.

- ① 야간에 산불확산 상황도가 없는 경우
- ② 주간에 진화율이 높아 야간에 산불확산 상황의 변화가 없는 경우
- ③ 주간에 이미 진화가 완료된 경우
- ④ 산불확산 방향으로 도로가 많아 야간에 진화자원 배치가 가능한 경우

이를 반영한 결과 대상지는 2023년 발생한 대형산불 총 8건 중 5건으로 합천, 영주, 금산대전, 함평, 하동산불로 선정

Table 1. Overview of site characteristics during nighttime for the 2023 major wildfires.

Wildfire	Damage area (ha)	Wind speed (m/s)	Relative humidity (%)	Temperature (°C)	Forest road
Hapcheon	179.1	0.44	63.83	10.13	O
Youngju	244.5	1.60	67.56	4.89	O
Geumsan · Daejeon	889.4	3.04	38.33	11.78	O
Hampyeong	681.72	2.33	54.22	13.78	O
Hadong	128.5	0.44	59.13	12.13	X

하였으며, 이중 하동을 제외하고 임도가 개설되어 있는 피해 지였다. 대형산불 발생 당시 야간 시간대의 풍속, 상대습도, 온도는 합천산불 풍속 0.44 m/s, 상대습도 63.38%, 온도 10.13°C, 영주산불 풍속 1.60 m/s, 상대습도 67.56%, 온도 4.89°C, 금산대전산불 풍속 3.04 m/s, 상대습도 38.33%, 온도 11.78°C, 함평산불 풍속 2.33 m/s, 상대습도 54.22%, 온도 13.78°C, 하동산불 풍속 0.44 m/s, 상대습도 59.13%, 온도 12.13°C였다(Table 1).

2. 자료수집 및 분석

1) 산불확산 경계 정보 수집

대형산불이 발생하면 산림청 산불상황 관제시스템을 통해 산불이 확산하는 상황부터 진화자원의 배치, 진화율 등 현장의 모든 정보를 통합 관리하고 있다. 이 중에서도 시간 경과에 따라 산불이 확산하는 경계 정보를 공간자료로 구축하는 것은 한정된 자원을 이용해 효율적인 진화 작업을 하기 위해 필수적이며, 산림에서 산불이 확산하는 과정을 이해하고 진화에 대한 효과성을 검증하기 위해서도 중요한 자료로 활용되고 있다. 산불확산 경계 정보는 실시간으로 확인하여 공간자료로 구축되고 있으며, 본 연구에서는 2023년 대형산불 5건에 대하여 야간 시간대(일몰시각 이후~일출시각 전까지)에 구축된 산불확산 경계자료를 수집하여 산불이 확산하는 과정에서 임도를 이용한 지상 진화가 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2) 산불확산예측시스템(2D)

국외에서도 산불확산을 예측하기 위한 프로그램을 개발하여 활용하고 있으며, 주요 프로그램으로는 미국의 FARSITE, 캐나다의 Prometheus 등이 있다. 산불확산예측은 사전에 산불 위험을 평가하고 관리하기 위해 활용되거나, 산림 내 연료관리 후 효과 예측, 기후변화가 산불확산에 미치는 영향, 대피 경로 설정 등에 활용되고 있다(Minsavage-Davis et al., 2024; Iliopoulos et al., 2024; Kim et al., 2024; Sheng et al., 2024). 본 연구에서는 실제 산불확산 공간자료와 진화효과가 반영되지 않은 산불확산을 비교하기 위해 국립산림과학원에서 개발한 ‘산불확산예측프로그램’을 활용하였다. 먼저 일몰시각 이후까지의 실제 대형산불확산 경계를 기준으로 진화가 완료된 경계를 제외하고 헬기 진화가 시작되는 일출시각 전까지 시간대별 확산예측을 수행하였다. 산불발생 당시 기상청 지역별상세관측자료(AWS)의 풍향, 풍속, 상대습도, 온도 정보를 1시간 단위로 적용하여 분석하였으며, 현장의 산불확산 상황을 알 수 있는 상황도의 경계자료를 기준으로 6~8시간을 예측하였다.

3) 산불확산시뮬레이터(3D)

가상공간에서 산불확산을 시뮬레이션하기 위해서는 현실 산림에 대한 정보를 정교하게 구현해야 한다. 최근에는 공중·지상 LiDAR를 이용하여 3D 촬영 영상을 정합하여 가상 공간에 구현하는 방식을 사용하고 있다. 그러나, 지상 LiDAR의 경우 산림 내에서 장비를 이용해 스캔해야 하므로 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 개발된 소나무 임목 연료의 수직적 분포 추정모델로 3차원 연료 구조를 모델링하여 시뮬레이션 상에 표출하였으며, 드론을 이용한 정사영상, 공중 LiDAR 영상을 이용해 임분 단위로 가상공간화 하였다(Lee et al., 2020). 산불확산 시뮬레이션은 미국의 National Institution of Standards and Technology에서 개발한 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 도구로 사용하였다. FDS는 물리모형 기반의 산불확산에 특화된 시뮬레이터이며, 질량, 운동량, 에너지 보존방정식을 수치적 해석을 통해 화염의 확산을 예측한다. 3차원 연료의 표출이 가능하고 보존 방정식을 풀어 산불확산을 예측하므로 정확도가 2차원 산불확산시뮬레이션보다 뛰어나다. 다만, 계산시간이 많이 소요되므로 실시간 대응보다는 연소 및 산불행동에 대한 연구 등에 사용하는 것이 현재는 효율적이다. 따라서 본 연구에서는 강원도 고성에 위치한 대상지를 가상공간화하여 산불확산시뮬레이션을 통해 임도 유무에 따라 미치는 영향을 비교하고자 하였다.

결과 및 고찰

1. 2023년 대형산불의 임도 유무에 따른 산불확산 저감효과

임도가 개설되어 있는 대형산불 피해지는 합천, 영주, 금산·대전, 함평산불로 산불진화 상황보고서를 통해 야간 시간대에 지상 진화자원을 투입하여 작업이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 반면 하동산불은 임도나 도로가 개설되어 있지 않고 매우 험준한 지형으로 진화자원의 투입이 없었던 것으로 확인되었다. 총 5건의 대형산불 사례를 중심으로 야간 시간대의 실제 산불확산 상황과 산불확산예측 결과를 비교·분석하여 임도의 산불확산 저감 효과를 검증하고자 하였다.

합천산불은 산불발생 다음 날 오전 2:00에 진화율이 92%까지 증가하여 2:00분 이후부터는 산불확산 상황의 변화가 없었으므로 19:00에서 8시간 경과 후에 대한 산불확산을 예측하였다. 산불확산예측 면적은 128 ha이었으며, 동일한 시간 경과 후 실제 산불확산 면적은 42 ha로 3배 정도 작은 것으로 나타났다. 영주산불은 일몰 이후 산불확산 경계자료가 있는 21:00의 피해구역 경계를 기준으로 익일 일출시각 이전인 5:00까지 산불확산을 예측하였다. 영주산불의 산불확

산예측 면적은 89 ha로 실제 산불확산 면적인 44 ha와 비교하여 2배 정도 작은 것으로 나타났다. 영주산불의 경우 20:00 경 임도를 통해 진화자원을 투입하였으며, 지상진화로만 다음날 7:00분경 진화율을 90%까지 높였다(Figure 1).

금산·대전산불과 함평산불은 일몰 이후 산불확산 경계자료가 있는 23:00분의 피해구역 경계를 기준으로 익일 일출시각 이전인 7:00까지 산불확산을 예측하였다. 금산·대전산불의 산불확산예측 면적은 128 ha이었으며, 동일한 시간 경과 후 실제 산불이 확산된 면적은 137 ha로 큰 차이를 보이지 않았다. 금산대전산불 피해지 내에는 임도가 개설되어 있지 않아 야간에 임도로 인한 진화 효과를 크게 보지 못한 것으로 판단되었다. 한편, 함평산불의 산불확산예측 면적은 110 ha로 실제 산불확산 면적인 62 ha와 비교하여 1.8배 정도 큰 것으로 나타났다. 금산·대전산불과 함평산불 피해구역 중 일부 임도가 있는 구역만을 대상으로 동일한 조건을 적용하여 비교한 결과 금산·대전산불은 산불확산예측 면적이 30 ha이었고, 실제 산불이 확산된 면적은 13 ha로 2.3배 정도 큰 것으로 나타났으며, 함평산불은 산불확산예측 면적이 59 ha이었고, 실제 산불이 확산된 면적은 19 ha로 3.1배 정도 큰 것으로 나타났다. 실제로 일부 임도가 개설되어 있는 구간으로 야간에 진화 작업을 실시하였으며, 임도를 이용한 진화 자원 투입의 효과가 있었던 것으로 볼 수 있다. 반면, 하동산

불은 임도나 도로가 개설되어 있지 않고 험준한 산악지역으로 야간에 진화 작업이 이루어지지 않았던 피해지이다. 일몰 이후 산불확산 경계자료가 있는 18:30의 피해구역 경계를 기준으로 다음 날 1:30경까지 7시간 경과 후 산불확산예측을 실시하였으며, 산불확산예측 면적은 62 ha이었고 실제 산불확산 면적은 45 ha로 약 1.4배의 정도 큰 값을 보였다.

2023년에 발생한 대형산불 중 분석이 가능한 5건에 대해서 산불상황도 상의 피해면적 대비 산불확산예측시스템 상의 예측 피해면적을 비교한 결과 임도가 개설된 합천, 영주, 금산·대전, 함평산불은 평균 2.6배, 임도가 개설되지 않은 하동산불은 1.4배로 야간에 임도를 이용한 산불진화 시 약 2배 정도의 산불확산 저감효과가 있었던 것으로 볼 수 있다 (Table 2). 임도가 개설되지 않은 사례는 하동산불 1건으로 수치를 평균값으로 제시하기에는 무리가 있으나, 임도 개설되지 않은 경우 예측 면적과 실제 면적의 차이는 임도가 개설된 경우와 비교하여 상대적으로 적은 것을 알 수 있었다. 호주 빅토리아주에서 발생한 10건의 대형산불 사례를 대상으로 진화 활동에 대한 질적 기술 분석을 수행한 연구에서 도로는 접근 통로를 제공하며, 산불이 접근할 때 직접 진화를 수행할 수 있는 방어 가능한 연료가 없는 공간으로 분류하고 있다. 또한, 계획적 소각 작업을 시작할 수 있는 지점으로 활용될 수 있으며, 10건의 사례 중 6건에서 기존의 도로망을 이용하

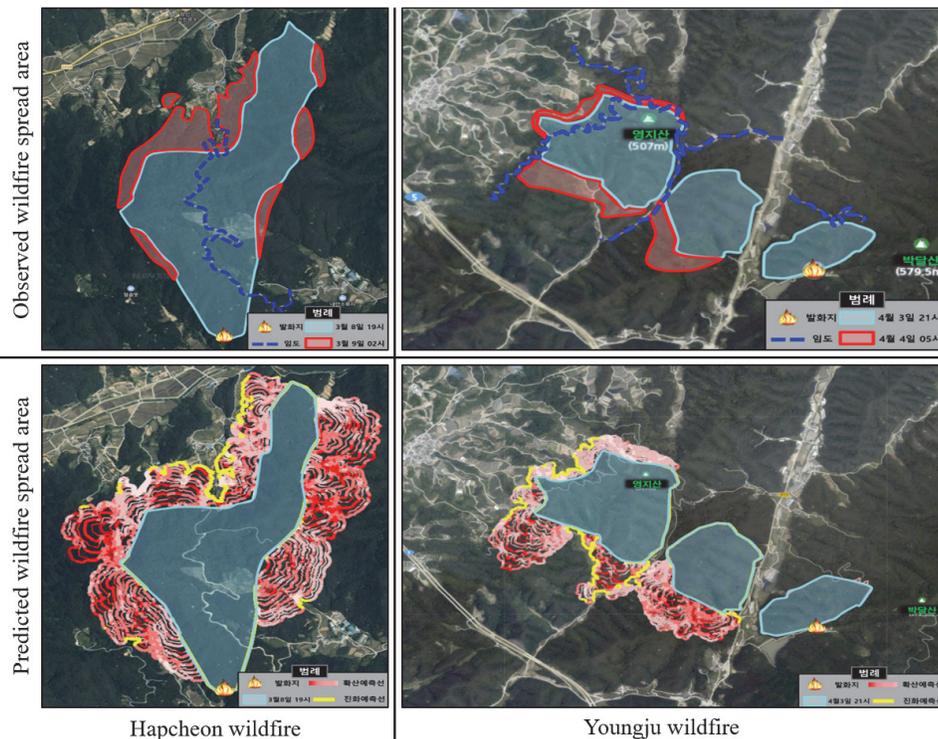


Figure 1. Temporal comparison between observed and predicted wildfire spread area(left: Hapcheon wildfire, right: Youngju wildfire).

Table 2. Comparison of wildfire spread area reduction by forest road availability and suppression resource deployment.

Wildfire	wildfire spread area(ha)		Fold reduction	Forest road	Suppression resource
	Predicted	Observed			
Hapcheon	128	42	3.0	○	○
Youngju	62	45	2.0	○	○
Geumsan · Daejeon	30	13	2.3	○	○
Hampyeong	59	19	3.1	○	○
Hadong	89	44	1.4	×	×

여 계획적 소각을 수행한 것으로 분석된 바 있다(Simpson et al., 2019). 이외에도 미국 콜로라도주에서 발생한 산불사례 연구를 통해 산불을 관리하는데 임도(도로 포함)가 미치는 영향을 분석한 결과 산불 진화 계획 구역 선정에 사용된 변수별 상대적 중요도(Relative Importance, RI)는 도로까지의 거리(RI=22.6%), 수계 또는 불에 잘 타지 않는 물질로 구성된 구역까지의 거리(RI=14.9%)가 가장 중요한 변수로 분석된 바 있다(Thompson et al., 2021). 산불진화 계획수립에서 있어 임도 및 도로와 같이 장비를 쉽게 이동시켜 직접 진화하거나 연료를 관리할 수 있도록 하는 시설은 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

2. 임도가 산불확산에 미치는 영향

임도가 산불확산에 어떠한 영향을 미치는지를 구명하고자 FDS에서 가상의 숲을 구현하고 임도 유무에 따른 산불확산 시뮬레이션을 실시하였다. 강원도 고성군에 위치한 산불예방 숲가꾸기 효과 모니터링 시험지의 공중 LiDAR 영상과 드론 정사영상, 임목의 연료량을 기반으로 60 m×60 m 규모의 가상공간에 3차원으로 구현하였다(Figure 2).

산불확산시뮬레이션 시 임도의 폭은 4 m로 설정하였으며, 경사에 따라 산불확산 시 미치는 영향에 차이가 있을 수 있

므로 직접적인 임도의 효과를 구명하기 위해 경사가 0°인 평지 상태로 설정하였다. 풍속은 6 m/s로 대상지 내 4월 평균 풍속 조건을 적용하였다. 산불확산시뮬레이션 시나리오는 바람이 임도와 평행하게 부는 경우와 바람이 임도와 수직으로 부는 경우 2가지로 구성하였다. 시뮬레이션 결과 산불과 임도와 교차점이 평행하거나 수직인 경우 모두 임목의 연료 소모율(Mass loss rate of trees)이 임도가 설치된 구간을 지나갈 때 감소하였다(Figure 3). 본 연구의 대상지와 동일한 합천, 대전·금산, 영주산불을 대상으로 임도 주변부의 산림을 대상으로 상대정규탄화지수를 활용하여 산림식생피해 강도 분류 시 임도 중심부로부터 이격거리가 멀어질수록 산불피해 강도가 높아지는 결과와 비교하여 동일한 결과로 볼 수 있다(Hwang et al., 2024).

산불 강도(Fire intensity)와 화염길이(Flame length)는 바람이 임도와 평행하게 부는 경우 산불이 확산하는 과정에서 임도가 연속되는 연료의 중간 부분을 단절시키는 역할을 하여 임도 주변의 산불 강도(Fire intensity)와 화염길이(Flame length)가 감소하는 것을 알 수 있었다. 반면, 바람이 임도에 수직으로 부는 조건에서는 산불이 진행되는 과정에서 임도와 수직으로 만나 일시적으로 산불 강도와 화염길이가 줄어드는 현상을 보이기는 하나 화염이 바람에 의해 임도를 뛰어넘으

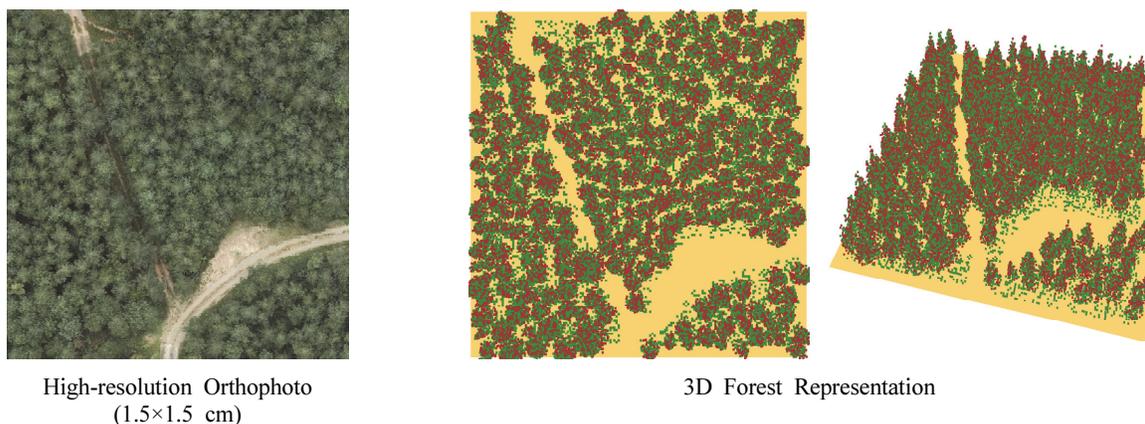


Figure 2. 3D Forest Representation of a Thinning Test Site With Forest Roads in Goseong-gun.

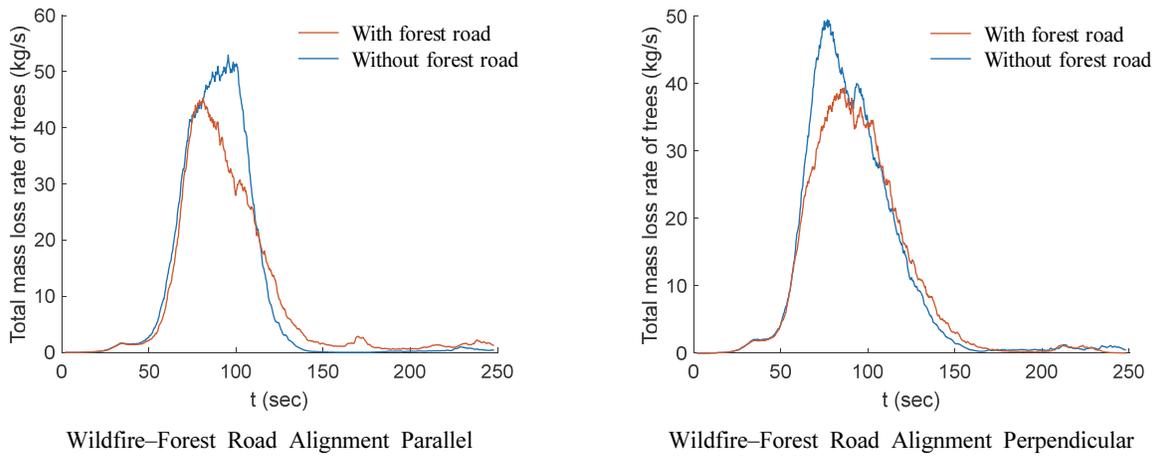


Figure 3. Comparison of tree fuel loss rate during wildfire spread with and without forest roads(left: wildfire-forest road alignment parallel, right: wildfire-forest road alignment perpendicular).

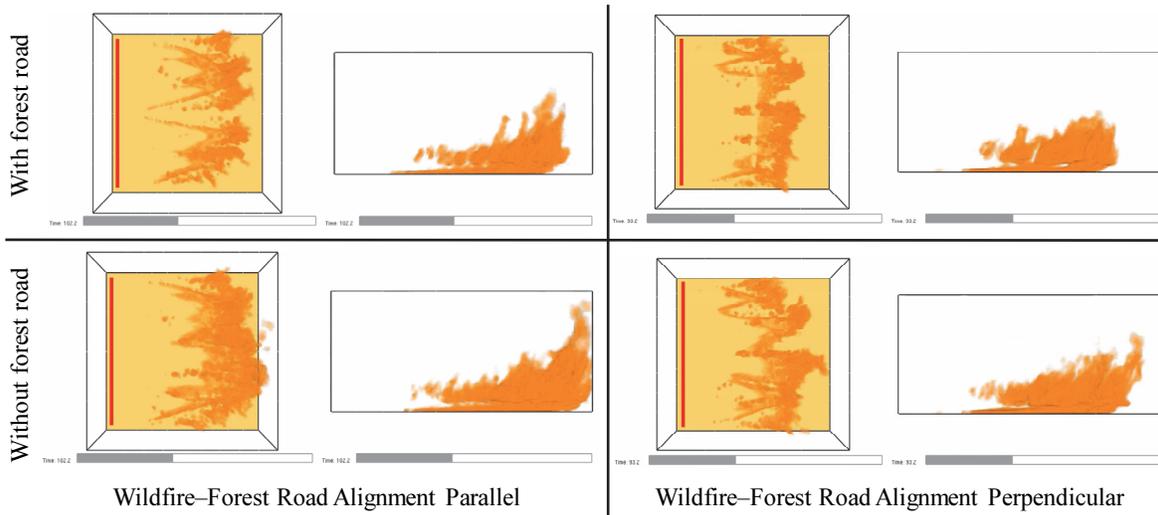


Figure 4. FDS(Fire Dynamics Simulator) results with and without forest roads(left: wildfire-forest road alignment parallel, right: wildfire-forest road alignment perpendicular).

면서 전체적인 산불확산에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보였다(Figure 4). 임도는 아니지만 연료가 없고 자원의 투입이 가능하다는 기능적 측면에서 동일한 연료 차단선(폭: 평균 17.3 m, 최소 1.5 m, 최대 450 m)에 대한 효과 연구로 스페인 남부에서 발생한 산불 563건을 대상 분석한 결과 연료 차단선의 효과에 가장 큰 영향을 준 요인은 연료 차단선에서 수행된 진화 작업의 유형, 화염길이, 산불과 연료 차단선이 만나는 각도이었다. 지상 진화자원 투입 시 산불 차단효과가 76.7% 있었으며, 화염길이와 길수록 연료 차단선의 효과는 감소하고 산불과 연료 차단선의 교차 지점이 평행할 때 차단 효과가 증가한다는 결과를 보였다(Ortega et al., 2024). 이는 본 연구에서의 시뮬레이션 결과와 매우 유사한 것으로 볼 수 있다.

결론

본 연구는 임도가 산불확산에 미치는 영향을 구명하고자 2023년에 발생한 대형산불 사례를 중심으로 임도 유무에 따른 야간 시간대 산불확산 예측 면적과 실제 면적과 산불확산 시뮬레이터(FDS)를 활용하여 임도의 유무에 따른 임목의 연료 손실율, 산불강도, 화염길이의 차이를 비교·분석하고자 하였다.

대형산불 사례에서 야간 시간대에 실제 산불확산 면적과 산불확산예측시스템 예측 면적을 비교한 결과 임도가 있는 경우 2배 정도 감소하는 것을 알 수 있었으며, 이는 임도가 있는 지역에서는 진화인력과 장비가 비교적 화세가 약한 산불의 가장자리부터 빠르게 접근하여 진화 작업을 수행할 수

있었기 때문이다. 또한, 야간 시간대는 낮에 비해 상대적으로 풍속이 약해지고 상대습도는 높아지며, 기온은 낮아지는 기상조건으로 지상 진화 작업에 보다 유리한 환경을 제공해 효율을 높일 수 있다.

산불확산시뮬레이터(FDS)를 활용한 시뮬레이션 결과, 임도가 있는 구간에서는 임목의 연료 소모율, 산불강도, 화염길이 모두 감소하는 경향이 확인되었으나, 산불이 임도와 평행하게 확산되는 경우가 수직으로 확산되는 경우에 비해 상대적으로 저감 효과가 좋은 것으로 나타났다. 이는 단순한 임도의 유무보다 산불확산 저감에 영향을 미치기 위해서는 임도 규모 및 배치, 임도 주변의 연료 구조 등 복합적인 공간 설계가 필요하다는 것을 보여주는 결과이다.

이러한 통합적 분석을 통한 결과는 임도가 단순한 물리적 시설이 아닌 산불에 있어 확산을 효과적으로 저지할 수 있는 대응 인프라로서 기능할 수 있음을 보여준다. 이는 향후 산불 대응 및 진화 전략 수립에 있어 임도망을 단순한 접근로 차원이 아닌 산불확산 가능성, 기상 및 지형 조건, 연료 관리 등과 연계한 전략적 공간 설계 차원에서 접근이 필요하다. 한편, 본 연구에서 대형산불 사례를 통한 정량적 실측 자료와 산불확산시뮬레이션 결과를 연계하여 해석한 방법은 복합적인 산불확산 메커니즘을 이해하고 적절한 대응 방안을 마련하는데 유효한 접근 방식으로 판단된다. 다만, 실제 대형산불 사례 비교·분석 시 5건의 사례로 분석 범위가 제한됨에 따라 연구 결과의 대표성에는 한계가 있다. 향후 다양한 사례와 지형, 임상 등 다양한 조건을 반영한 연구를 통해 산불 대응에 효과적인 임도망 설계 및 진화 자원 운영 전략 마련을 위한 과학적 근거를 마련하고 이를 바탕으로 실효성 있는 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 국립산림과학원 산림과학연구사업 <인공지능 기반 차세대 산불위험예보 알고리즘 개발(과제번호 FE0500-2025-02-2025)>의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Calvani, G., Marchi, E., Piegai, F. and Tesi, E. 1999. Funzioni, classificazione, caratteristiche e pianificazione della viabilità forestale per l'attività di antincendio boschivo. *L'Italia Forestale e Montana* 54(3): 109-125.
- Covington, W.W. and M.M. Moore. 1992. Postsettlement Changes in Natural Fire Regimes: Implications for Restoration of Old-Growth P. Ponderosa Forests. In: *Old-Growth Forests in the Southwest and Rocky Mountain Regions* (Eds.: M.R. Kaufmann, W.H. Moir and R.L. Bassett). Proceedings of a Workshop, Portal, Arizona, March 9-13, 1992. USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep. RM-213. pp. 81-99.
- Croisé, R. and Crouzet, Y. 1975. L'infrastructure routière. *Revue forestière française*, 27(S): 300-307.
- De Montgolfier, J. 1989. Heritage Management and Negotiated Management in European Forestry. *Renewable Natural Resources-Economic Incentives for Improved Management*, 102-108.
- Demir, M., Kucukosmanoglu, A., Hasdemir, M., Ozturk, T. and Hulusi Acar, H. 2009. Assessment of forest roads and firebreaks in Turkey. *African Journal of Biotechnology* 8(18): 4553-4561.
- Hwang, Y., Kweon, H., Lee, K., Seo, J. I., Choi, S., Shim, Y., Lee, J. and Hwang, J. 2024. Comparison of forest fire damage reduction effects of forest road based on dNBR. *Korean Journal of Agricultural Science* 51(4): 671-685.
- Iliopoulos, N., Aliferis, I. and Chalaris, M. 2024. Effect of Climate Evolution on the Dynamics of the Wildfires in Greece. *Fire* 7(5): 162.
- Kim, J., Ahn, J. and Kang, J. 2024. Adaptive wildfire spread prediction for complex terrain: modeling the effectiveness of sprinkler systems. *Fire Ecology* 20(1): 75.
- 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, S. J., Jang, M. N., Lee, Y. J., Kwon, C. G., Lee, B. D. and Kim, S. Y. 2020. The Effects of Thinning Intensity on Vertical Distribution of Wildfire Fuel in *Pinus rigida* Stands. *Crisis and Emergency Management: Theory and Praxis* 16(7): 147-156.
- Minsavage-Davis, C., Davies, G., Haugum, S., Thorvaldsen, P., Guri Velle, L. and Vandvik, V. 2024. Development and evaluation of generalized fuel models for predicting fire behaviour in northern European heathlands. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 17(2): 109-119.
- Ortega, M., Silva, F. R. Y. and Molina, J. R. 2024. Modeling fuel break effectiveness in southern Spain wildfires. *Fire Ecology* 20(1): 40.
- Pentek, T., Nevečerel, H., Poršinsky, T., Pičman, D., Lepoglavec, K. and Potočnik, I. 2008. Methodology for development of secondary forest traffic infrastructure cadastre. *Croatian Journal of Forest Engineering. Journal*

- for Theory and Application of Forestry Engineering 29(1): 75-83.
- Psilovikos, T.A., Doukas, K.G. and Drosos, V.K. 2011. The contribution of forest roads to the forest fire protection. *Forests* 10(10): 884.
- Sheng, J., Li, X., Wang, X., Wang, Y., Li, S., Li, D., Sun, S. and Zhao, L. 2024. An escape route planning model based on wildfire prediction information and travel rate of firefighters. *International Journal of Wildland Fire* 33(3): WF23166.
- Simpson, H., Bradstock, R. and Price, O. 2019. A Temporal Framework of Large Wildfire Suppression in Practice, a Qualitative Descriptive Study. *Forests* 10(10): 884.
- Thompson, M. P., Gannon, B. M. and Caggiano, M. D. 2021. Forest Roads and Operational Wildfire Response Planning. *Forests* 12(2): 110.
- Zhongliang, G., Zhi, L., Jianheng, W., Tengeng, L., Qiuhua, W. and Lifu, S. 2020. Study on forest road of fireproof blockade functions based on PyroSim. *Journal of Beijing Forestry University* 42(9): 51-60.

Manuscript Received : November 13, 2025

First Revision : December 13, 2025

Accepted : December 14, 2025