

산림 내 도로의 확대는 대형산불을 막을 수 있는가?^{1a}

홍석환² · 안미연^{3*} · 황정석⁴

Can the Expansion of Forest Roads Prevent Large Forest Fires?^{1a}

Suk-Hwan Hong², Mi-Yeon An^{3*}, Jung-Suk Hwang⁴

요약

본 연구는 우리나라 대형산불의 진화에 있어 임도(산림도로)의 역할을 검증하고자 하였다. 연구대상지는 그간 발생한 대형산불 중 도로밀도가 가장 높은 지역 중 하나인 강원특별자치도 강릉시에서 발생한 2023년 4월 산불피해지역을 대상으로 하였다. 산불피해지역 범위는 현장확인하였으며, 산불의 피해강도는 Sentinel-2 영상을 통해 분석하였다. 이후, 피해범위 및 강도와 산림도로의 관계를 살펴보았다. 전체 149.1ha의 산불피해지역에 쉽게 접근할 수 있는, 피해지역 경계로부터 50m 이내에 조성된 도로는 약 59.6km로, 인접지역을 포함한 산불피해지역의 도로밀도는 무려 168.9m/ha에 달했다. 도로에 의해 단절된 산림은 모두 83개소로 파편화되어 있었는데, 이들 산림은 모두 비산화에 의한 확산으로 판단할 수 있어, 도로가 산불의 차단선 역할을 하지 못했음이 확인되었다. 진화차량 접근의 용이성에 따른 피해정도를 살펴보기 위해 도로로부터의 거리별 피해강도 분포를 살펴본 결과, 낮은 강도의 피해를 입은 지역은 오히려 도로에서 75m 이상 떨어진 곳에서 비율이 대폭 높아짐이 확인되었다. 진화인력의 접근 용이성에 따른 피해정도를 살펴보기 위해 해발고별 피해강도 분포를 살펴본 결과 약한 강도의 피해를 입은 지역 비율은 해발고가 높아질수록 늘어난 반면, 강한 강도 이상의 피해지역은 반대로 해발고가 높아질수록 비율이 줄어들었다. 강릉시 난곡동 산불피해지역에서 산림내부 혹은 인접한 도로가 산불진화에 효과적이라는 데이터는 없는 것으로 확인되었다. 이상의 결과는 산림 내 임도밀도를 높이는 것이 산불진화에 효과적이라는 논리와 배치된다. 강릉시 난곡산불지역의 경우 현재 산림청이 주장하는 우리나라 임도밀도인 3.9m/ha에 비해 무려 43배나 높다.

주요어: 임도밀도, 대형산불, 산불진화, Sentinel-2, 비산화

ABSTRACT

This study was conducted to verify the role of forest roads in the extinction of large forest fires in Korea. The study area was the forest fire-damaged area of Gangneung City, Gangwon Special Self-Governing Province, in April 2023, which is one of the areas with the highest road density among the major forest fires that have occurred so far. The scope of the forest fire damage area was confirmed through on-site survey, and the intensity

1 접수 2023년 9월 23일, 수정 (1차: 2023년 11월 25일), 게재확정 2023년 12월 4일

Received 23 September 2023; Revised (1st: 25 November 2023); Accepted 4 December 2023

2 부산대학교 조경학과 정교수 Dept. of Landscape Architecture, Pusan National Univ., Miryang, 627-706, Korea (hong@pusan.ac.kr)

3 부산대학교 대학원 조경학과 박사후연구원 Dept. of Landscape Architecture, Pusan National Univ., Miryang, 627-706, Korea (ahnmi0809@naver.com)

4 기후재난연구소 연구소장 Institute on Climate Disaster, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16977, Korea (hyh4884@hanmail.net)

a 이 이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: ahnmi0809@naver.com

of the fire was carried out through Sentinel-2 satellite imagery analysis. After that, the relationship between the damage range and intensity and the forest road was examined. About 59.6 km of roads were built within 50 m from the boundary of the forest fire damage area, which can easily access the entire 149.1 ha of forest fire damaged area. The road density is as high as 168.9 m/ha. All forests that were fragmented by roads were fragmented into 83 places, and all of these forests could be judged to have spread by spotting fire. As a result of analyzing the distribution of damage intensity by distance from the road to see the extent of damage according to the ease of access of fire extinguishing vehicles, it was confirmed that the proportion of areas with low-intensity damage has increased sharply even from 75 m or more away from the road. The results of analyzing the distribution of damage intensity by altitude to see the extent of damage according to the ease of access of fire extinguishing showed that the proportion of areas with low-intensity damage increased as the altitude increased, while the proportion of areas with damage of more than strong intensity decreased as the altitude increased. It was confirmed that there is no data that roads inside or adjacent to forests in the forest fire area of Gangneung City are effective in extinguishing forest fires. These results are contrary to the logic that increasing the road density in forests is effective in extinguishing forest fires. In the case of this fire area in Gangneung City, the road density is 43 times higher than the current road density in Korea claimed by the Korea Forest Service of 3.9 m/ha. This study suggests that roads can be a hindrance to extinguishing forest fires.

KEY WORDS: DENSITY OF FOREST ROAD, LARGE FOREST FIRE, FIRE EXTINGUISHING, SENTINEL-2, SPOTTING FIRE

서론

임도는 산림자원의 경영을 통한 목재생산기능 강화를 주 목적으로 하고 있으며, 주목적 외 휴양, 산림마을의 연결, 산불진화 등 다양한 기능을 가진다 (Ji *et al.*, 2015). 따라서 원활한 경영을 위해 낮은 임도밀도를 높이는 주장은 산림청을 중심으로 지속적으로 제기되고 있다. 그러나, 주된 목적인 산림경영에 임도가 경제적으로 어느정도 효과가 있는지, 비용투입대비 편익이 어느 정도인지에 대한 분석은 거의 없는 실정이다. 객관적 자료를 통해 임도의 주 목적인 산림자원의 경영 입장에서 편익을 산정한 연구로는 Hwang *et al.* (2015), Hwang *et al.* (2016)의 연구가 있는데, 해당 연구에서는 산림작업이 지속적으로 이루어진 5개 지방청, 8개 경영계획구를 대상으로 비용절감효과를 산정한 바 있다. 연구에 따르면 임도시설에 따른 비용절감 효과는 조림 및 숲가꾸기작업 시 평균 57.6만원/km/년으로 분석되었다(Hwang *et al.*, 2015). 산림작업 중 목재수확과정에서 임도를 통해 얻을 수 있는 경제적 효과는 30.8만원/km/년으로 나타났다(Hwang *et al.*, 2016). 결국 산림자원의 경영을 핵심 목적으로 하는 임도의 산림경영비용 절감 효과는 조림 및 숲가꾸기, 목재수확까지 모두 합쳐 연간 약 100만원/km 미만인 것으로 실증되었다. 임도의 조성비

용은 2023년 현재, 「임업·산촌부문 예산안 편성지침」에 의해 기준단가를 25,300만원/km로 책정하고 있다. 결국, 임도를 조성함으로써 산림경영을 통해 얻을 수 있는 이익은 임도조성원가 대비 1/250에도 미치지 못함을 알 수 있다. 이는 시간에 따른 이자율과 보수비용을 산정하지 않은 것으로 실제 이들 비용을 추가할 경우에는 더욱 심각한 수준에 이름을 알 수 있다.

산림청에 따르면(KFS, 2022) 우리나라 총 임도길이는 23,981km이며, 산림면적을 기준으로 한 밀도는 약 3.9m/ha이다. 산림청이 제시하고 있는 주요 국가의 산림도로 밀도를 살펴보면¹⁾, 독일의 경우 54m/ha에 달하며 미국은 9.5m/ha, 캐나다는 10.3m/ha로 우리나라 임도 밀도에 비해 매우 높다. 그러나, 해당 자료에서는 각 국가의 산림도로 밀도를 산정하는 기준이나 방법은 물론, 정의조차 없다. 우리나라 통계에 사용되는 임도는 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」에서 정의하고 있으며, 해당 법률에서 임도는 ‘산림의 경영 및 관리를 위하여 설치한 도로’를 말한다. 즉, 산림 내에 다른 목적으로 조성된 도로는 동일한 기능을 수행할 수 있더라도 임도에 포함되지 않는다. 반면, 산림청이

1) https://www.forest.go.kr/kfswweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_05_01&cmsId=FC_000812

비교하고 있는 위 다른 나라의 경우에는 그렇지 않다. 예로, 미국의 경우를 살펴보면, 미국 Forest Service Road System에 포함된 도로²⁾ 즉, 우리나라에서 임도로 정의되는 산림 내 도로는 약 371,000마일로, km로 환산 시 약 597,067km가 된다. 미국 산림면적은 약 3,097,201km² (USDA, 2023)으로 산림대비 임도의 밀도를 계산하면 단지 1.9m/ha로 우리나라의 절반에도 미치지 못함을 알 수 있다. 즉, 산림청이 제시하고 있는 미국의 임도밀도 9.5m/ha와 미국 Forest Service의 자료를 토대로 산정한 임도밀도 1.9m/ha는 심각한 수치적 괴리를 보여준다. 일본 또한 산림 내 도로밀도를 산정함에 있어 임도에 더해 임도의 역할을 하는 일반도로 및 농로 등을 포함한다(Japan Forestry Agency, 2018). 오스트리아의 경우는 산림 전 지역의 임도계산이 아닌 목재생산림만을 대상으로 밀도를 계산하는데, 이 또한 국가에서 정의한 임도가 아니라, 공공도로와 마을도로, 사유도로의 합으로 계산된다³⁾. 그러나, 우리나라의 경우 산림 내부의 다양한 도로 중 산림청이 건설한 임도만을 산림도로에 포함하고 있어 이러한 비교는 인식의 왜곡을 발생시킬 여지가 매우 크다.

산불 대응에 있어 임도를 바라보는 두가지 관점이 있다. 임도는 산불진화 시 차량 및 인력을 적기에 투입할 수 있는 진입로 및 방화선 역할을 하므로 마을과 가까운 산림 내 임도 확충이 중요하다는 측면(Ju, 2021)과 임도가 오히려 바람세기를 강하게 하기 때문에 산불에 부정적이라는 측면이 있다. Einzmann *et al.*, (2022)에 따르면 숲과 임도변의 바람세기를 비교하여 실측한 결과 숲 속에서 바람세기가 평균 0.1~0.4 m/s로 약할 때, 임도 주변에서는 평균 3.4~5.0 m/s로 바람이 강하게 불었으며, 동일한 상황에서 임도변 바람세기는 숲보다 최소 15배 이상 빨랐다고 밝혔다. 그러나 이러한 일반론적 개념은 우리나라에서 긍정적이건 부정적이건 실증된 바가 거의 없다. 또한 우리나라의 대형산불은 대부분 강풍을 동반하기에 임도의 효용이 없다는 반론이 상당한 설득력을 얻는 이유가 되기도 한다. 산불과 임도의 관계에 대한 실증연구로는 2003년 Cha *et al.*의 연구가 있는데, 이 당시에도 관련 연구가 국내는 물론, 국제적으로도 없음을 밝히고 있었다. Cha *et al.* (2003)은 2000년 삼척시를 중심으로 발생한 산불을 중심으로 임도와 산불의 관계를 분석한 바 있는데, 연속적으로 동일한 사면방위를 갖는 사면을 하나의 조사구로 설정하여 분석한 관계로 정량 분석으로 판단하기에는 어려움이 있었다. 위 연구에서는 남서방향의 임도사면과 활엽수림 및 무림목지, 임도를 통과하는 주변의 하층식생 상태가 양호한 경

우에는 어느정도 효과가 있다고 하였는데, 이는 임도가 아니더라도 일반적인 우리나라 산불피해지역에서 나타나는 현상과 동일한 결과로 임도의 직접적 효과로 보기에는 무리가 있다.

2000년 이후, 2~3년 주기로 발생하던 대형산불이 2017년 이후 매년 꾸준히 발생했음에도 불구하고 임도와 산불과의 관계에 대한 객관적 연구가 진행되지 않은 것은 매우 이례적이라 할 수 있다. 산림청 자료⁴⁾에 의하면, 대형산불 발생빈도가 급격히 증가하기 시작한 최근 6년 6개월(2017.01~2023.06)간 발생한 피해면적 100ha이상의 대형산불만 하더라도 32건에 달해 산불과 관련 요소와의 관계성 검증은 위한 대상지는 적지 않음에도 연구가 진행되지 않은 것이다. 이렇게 산불에 대한 임도의 효용성이 검증되지 않은 상황에서 임도의 대규모 신규조성을 주장하는 의견에 대한 부정적인 의견들이 공론화되고 있다⁵⁾⁶⁾. 이에 본 연구는 산림 내 도로가 산불진화에 도움을 줄 수 있는지에 대해, 가장 최근 발생한 대형산불인 2023년 4월 11일 발생한 강원특별자치도 강릉 난곡동 산불지역을 대상으로 그 관계성을 검증하고자 하였다.

연구방법

1. 연구대상지

연구대상지는 도로망이 발달한 도심지역에서 발생한 대형산불 지역으로 강원특별자치도 강릉시 난곡동에서 2023년 4월 11일 오전 08:30분에 발화하여 4월 15일 00시까지 4일간 도시에 대규모 피해를 입힌 산불피해지역이다. 본 대상지는 지금까지 우리나라에서 발생한 어떤 대형산불과 비교해서도 산불피해지역의 도로밀도가 높다. 또한 도심 내부에서 발생했기 때문에, 멀리 떨어진 산림지역에서 발생한 것과 비교하여 진화를 위한 장비 및 인력이 신속히 투입될 수 있기 때문에 도로의 효과를 확인할 수 있는 지역이다. 특히, 피해지역 내부에 소방서(경포 119 안전센터)까지 위치하고 있어 그 어느 지역보다 빠르게 대응할 수 있는 지역이라 할 수 있다.

강릉 난곡동 산불의 산림청 집계 공식 피해면적은 120.7ha였으며, 소방청이 집계한 인명 및 재산피해는 사

2) <https://www.fs.usda.gov/science-technology/travel-management>
3) <https://bfw.ac.at/700/2109.html>

4) https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/frfr/selectFrfrStatsNow.do?mn=NKFS_02_02_01_05

5) https://www.ohmynews.com/NWS_Web/Series/series_premium_pg.aspx?CNTN_CD=A0002917866

6) https://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002969624

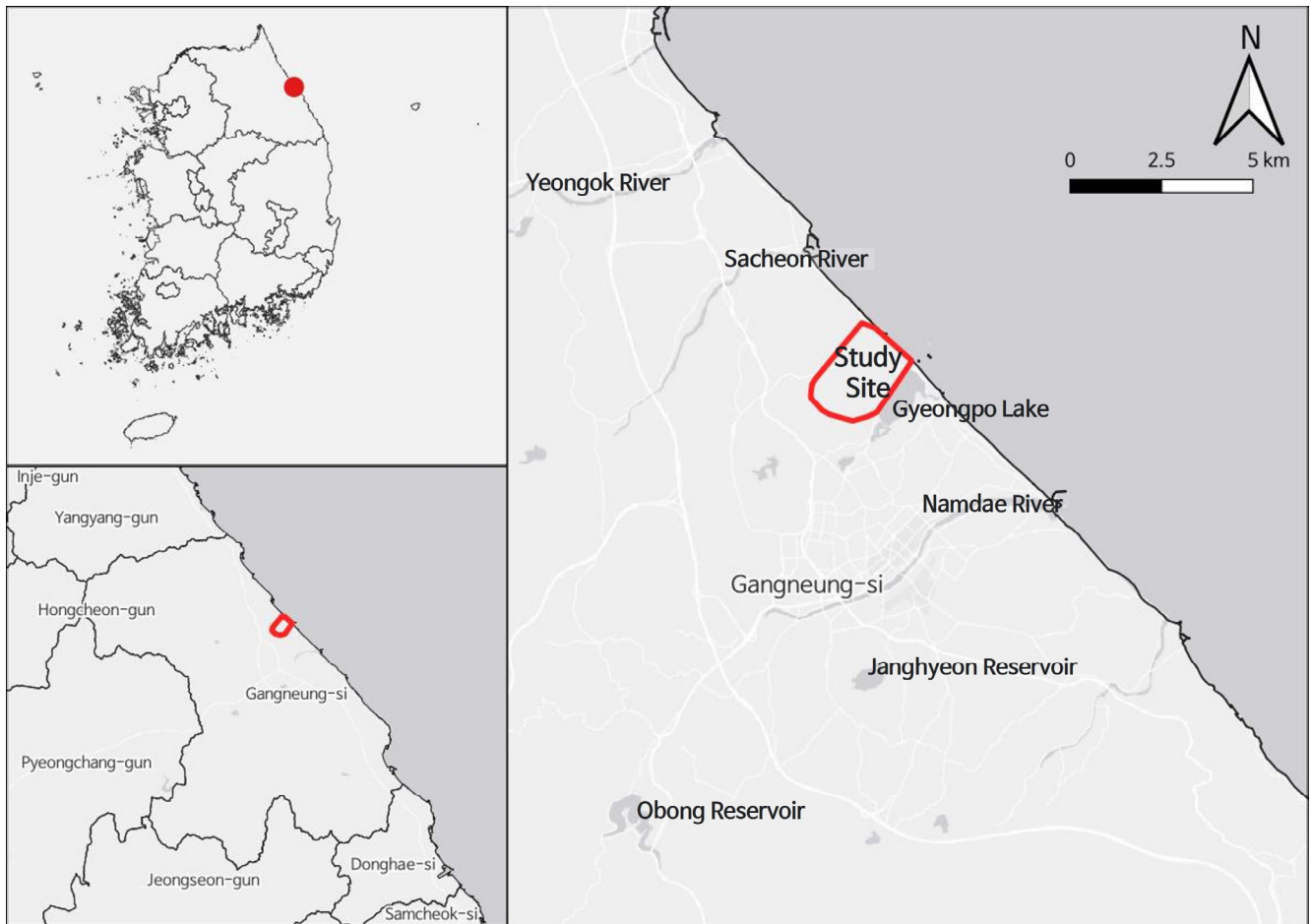


Figure 1. Key map of study site.

망 1명, 부상 37명, 재산피해는 약 250억 원이다. 강릉 난곡산불의 특이점은 산불이 도로가 발달한 도심의 야산을 중심으로 번졌다는 데 있다. 따라서, 대형산불에서 도로가 어떠한 역할을 하는지에 대해 명확한 분석이 가능한 장소이다.

2. 산불피해 분석

산불피해지역은 피해지 경계조사와 피해강도분석의 두 단계로 실시하였다. 피해지 경계조사의 경우 인공위성영상 (Sentinel-2A)을 통해 1차적으로 산불피해지역을 산정한 후, 이를 1:5,000 지형도에 중첩하여 현장조사를 통해 세부 경계를 획정하였다.

산불피해강도의 분석은 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio, NBR)를 사용하였다. NBR이란 위성영상의 근적외선(Near-infrared spectroscopy, NIR)과 단파적외선(Short Wavelength InfraRed, SWIR) 대역을 이용하여 산불피해지

역을 식별하고 피해심각도를 측정하는데 사용된다. 건강한 식생은 NIR에서 매우 높은 반사율을 나타내고, SWIR은 낮은 반사율을 나타낸다. 산불 피해지역에서는 건강한 식생과 비교하였을 때 파장의 반사율이 역으로 나타나기 때문에, NIR 파장이 낮은 반사율을 나타내면서, SWIR 파장이 높은 반사율을 나타내는 지역이 산불피해정도가 심각하다고 판단할 수 있다(Lutes *et al.*, 2006). NBR은 근적외선 파장과 단파적외선 파장의 차이를 근적외선 파장과 단파적외선 파장의 합으로 나눈 값을 사용한다(Eq 1). 일반적으로 산불피해를 입지 않은 지역은 NBR 값이 0에 가까우며, 이를 활용하여 dNBR은 산불 전후의 NBR 값의 차를 통해 산불 피해등급을 추정할 수 있다(Eq 2). dNBR은 지수 값의 차이와 더불어 현장검증을 통해 피해 등급을 분류하기 때문에 다양한 산림을 대상으로 정규화된 피해 등급 값을 제시하기 힘들며, 위성영상 피해 등급 분류를 위한 과정에서는 피해 강도에 따른 정의를 사전에 수립하고 현장검증을 통한 결과와 병행하여 검증 결과로 사용하는 것이 효과적이라고

Table 1. Burn severity levels by dNBR (Lutes *et al.*, 2006)

U.S. Geological Survey		Burn Severity
Severity Level	dNBR Range(scaled by 103)	
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-
Unburned	-100 to +99	-
Low Severity	+100 to +269	Low Severity
Moderate-low Severity	+270 to +439	Moderate Severity
Moderate-high Severity	+440 to +659	High Severity
High Severity	+660 to +1,300	Very High Severity

판단된다(Won *et al.*, 2007). USDA에서는 Fire Effects Monitoring and Inventory System(Lutes *et al.*, 2006)을 통해 위성 영상의 분석과 더불어 현장평가를 통해 각 값에 따른 피해등급표를 제시하였는데(Table 1), dNBR값이 높을수록 더 심각한 손상을 나타내며, dNBR 값이 음수인 지역은 화재 발생 이후 식생의 재생장을 나타낸다. 우리나라의 경우 Sentinel-2를 이용한 산불피해강도 검증은 아직 정립된 바 없으며, 대부분의 연구에서 USGS의 값을 그대로 준용하여 사용하였다(Youn and Jeong, 2019). 본 연구에서도 USGS의 기준을 준용하였으며, 사전조사를 통해 산불피해가 있는 지역의 경계를 선정하여, 인공위성영상에서 피해 정도가 없는 것으로 확인되는 지역에 대해서는 약한 피해를 입은 지역으로 간주하였다.

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR}) \quad (1)$$

$$\text{dNBR} = \text{prefireNBR} - \text{postfireNBR} \quad (2)$$

Sentinel-2는 유럽 우주국(European Space Agency, ESA)과 유럽 위성 운영 기구(Copernicus Programme)에서 개발한 지구 관측 위성 시스템으로서, 다양한 지구 관측 목적을 위해 고해상도 멀티스펙트럼 광학 영상을 제공한다. 13개의 밴드를 가지고 있으며 각 밴드의 공간 해상도는 10m, 20m, 60m로 다르게 제공한다. 특히 Sentinel Analysis Ready Data(ARD)는 Sentinel 위성 시스템에서 수집한 위성 영상 데이터를 사전 처리하여 분석 및 활용을 쉽게 할 수 있도록 준비된 데이터 형식을 나타내며, 본 연구에서는 대기보정, 기하보정, 구름 및 그림자 제거 등 위성영상 분석 시 필요한 전처리 후 제공되는 Level-2A 영상을 사용하였다.

Table 2. Band information of Sentinel-2 bands used in this study (ESA, 2015)

Acquisition date	Sentinel-2 Bands		Wavelength (μm)	Resolution (m)
prefire: 20230409 postfire: 20230419	B1	Coastal aerosol	0.443	60
	B2	Blue	0.490	10
	B3	Green	0.560	10
	B4	Red	0.665	10
	B5	Vegetation Red Edge	0.705	20
	B6	Vegetation Red Edge	0.740	20
	B7	Vegetation Red Edge	0.783	20
	B8	NIR	0.842	10
	B8A	Narrow NIR	0.865	20
	B9	Water vapour	0.945	60
	B10	SWIR-Cirrus	1.375	60
	B11	SWIR	1.610	20
	B12	SWIR	2.190	20

*NIR: near-infrared; SWIR: shortwave infrared

SENTINEL-2A 위성영상의 경우 근적외선 파장에 해당하는 밴드가 두 가지 종류로 B8, B8A가 있으며, 각각의 공간해상도는 10m와 20m로 제공된다. 분석의 효율성을 위해 NBR에서 사용되는 단파적외선(SWIR) 대역의 B12와 동일한 공간해상도 20m로 제공되는 B8A를 사용하였다.

산림과 도로와의 관계를 보다 명확히 살펴보고자 현장에 서 작성한 산불피해지역 조사결과와 산림청 2022년 정밀임상도와 중첩하여 산림으로 정의된 공간만을 추출하였고, 산림 외 골프장 잔디밭이나 공원 및 기타녹지지역 등은 분석에서 제외하였다. 이러한 과정을 통해 설정한 산불피해지역은 약 149.1ha로 확인되었다. 산림청 공식 자료와 비교하면 약 30ha 더 넓은 지역이 산불에 피해를 입은 것으로 나타났다. 산정한 피해 대상지는 현장에서 확인한 결과에 따른 것으로 일부 가장자리에 대해 Sentinel-2 영상이 피해를 입지 않은 지역으로 구분하고 있는데, 영상분석을 통한 피해정도 구분은 현장을 감안하여 연구자가 조정하여 설정하도록 권고하고 있다는 점을 감안하면 산림청의 발표와 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 판단할 수 있었다.

피해지역의 면적비율 및 도로로부터의 거리분석 등 산불피해강도 결과는 Sentinel-2 영상의 공간해상도인 20m 기준으로 20x20m의 그리드를 생성하여 분석하였다.

산불피해지역으로 접근가능한 도로의 추출과 도로밀도를 산정하기 위해 피해지역 경계 외곽선에서 50m 이내에 위치한 도로를 추출하여 사용하였는데, 이는 진화대원이 산불진화를 위해 도로에서부터 신속하게 접근할 수 있는 거리이다. 이에, 피해지역 경계로부터 50m 이내에 포함되는 공간을 분석하여 해당지역 내의 도로길이를 계산하였다. 산불지역의 도로정보는 국립지리원 1:5000축척의 수치지형도를 활용하여 차량통행이 가능한 도로유형코드레이어에 포함되는 선형객체를 추출하여 도로데이터로 활용하였다. 수치지형도 1/5,000에서는 도로의 폭이 3m 이상일 경우 실폭으로 표현하며, 도로의 폭이 3m 이하인 경우 단선으로 표현한다⁷⁾. 이에, 공간분석을 위한 도로경계는 모든 선형객체를 그대로 사용하였으며, 도로길이 산정을 위해서는 노선이 단선으로 작성된 경우에는 해당 길이를, 도로폭이 3m 이상으로 넓어 양측 경계가 선형으로 표시된 도로의 경우 해당 레이어의 전체 길이를 산정한 후 2분하여 합산하였다. 도로로부터의 거리별 피해강도 및 피해면적 분석은 25m 간격으로 공간을 구분하여 계산하였다.

모든 공간분석은 오픈소스 소프트웨어인 QGIS 3.22.6을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 산불피해지 분포특성

연구대상지 149.1ha를 대상으로 산불피해강도를 낮음(1), 보통(2), 높음(3), 매우높음(4)의 4개 강도로 구분한 결과, 전체 면적의 절반이 넘는 53.9%가 보통강도(2)로 산불의 피해를 입었으며, 낮은 피해(1)를 입은 지역이 21.9%, 높은 피해(3)를 입은 지역이 19.3% 순으로 분포하였다. 매우 높은(4) 피해를 입은 지역은 전체 피해지역의 4.8%를 차지하였다. 일반적으로 강한 피해를 입었다고 판단하는 경우 산불이 수관화로 확대된 경우를 말하며, 현장확인 결과 피해강도가 매우높음(4)으로 구분된 지역의 대부분이 수관화 지역의 중심부였으며, 수관화가 진행되었으나 지표화 또는 수간화와 이어지는 가장자리 부분은 높은 피해(3)를 입은 지역으로 구분되고 있었다. 현장조사를 통한 피해강도 구분결과와 인공위성영상을 활용한 피해강도구분은 피해강도 패턴이 일치하는 경향을 보였으나, 산림가장자리 간벌이나 벌목으로 인해 수목의 밀도가 현저히 낮은 지역의 경우에는 남아있는 수목이 모두 심한 피해를 입었음에도 불구하고 피해강도는 상대적으로 약하게 구분되고 있었다. 전반적인 경향은 일치하지만, 피해강도 구분의 적용에 있어 우리나라 산불특성 기준에 맞게 보다 세분화되고, 조정될 필요성이 있을 것으로 판단되는 부분이었다.

산불발생지점은 전체 피해지역에서 남서쪽 가장자리에 위치하고 있었는데, 이러한 피해결과와 분포는 당시 바람의 방향과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 화재발생시간인 4월 11일 오전 8시경 기상청 강릉관측소에서 측정한 바람은 14.7m/s의 강한 서풍이 주를 이루고 있어 불은 화재발생지점에서 동쪽으로 확산되었다. 피해강도를 살펴보면 산불피해지역의 가장자리 중 서쪽 및 북서쪽, 남서쪽 등 서쪽방향의 가장자리는 피해강도가 약한 반면 반대로 동쪽을 포함하여 동북쪽 및 동남쪽 가장자리는 피해강도가 매우 강하게 나타나고 있어 방향별 피해강도가 확연히 구분되고 있었다. 이러한 피해강도의 분포특성으로 미루어, 이 산불은 발생이후에 시간이 지날수록 동쪽방향으로 커지는 부채꼴 모양을 그리며 화선을 꾸준히 확장하면서 그 강도 또한 확대되었음을 알 수 있었다. 확대된 화선과 강해진 산불의 강도가 더 이상 지속할 수 없었던 것은 산불이 동해와 경포호의 경계와 마주했기 때문이다. 결국, 바다와 호수를 만나지 않았다면 시간이 지나며 강해진 세력에 의해 산불피해지역은 걷잡을 수 없이 늘어날 수밖에 없는 상황이었음을 산불피해결과를 보여주고 있었다.

산불확산이 멈춘 경계를 살펴보면 더욱 뚜렷해지는데, 남서방향의 경우 산림 내부에서 모두 화선이 멈추는 것을

7) 국토지리정보원 고시 제2019-145호 수치지형도 작성 작업규정 제19조(정위치편집) 7항

확인할 수 있었다. 이는 산불이 바람방향이 아닌, 바람과 반대 방향으로 아주 서서히 역진하다가 오후 3시경 소나기가 내리면서 꺼진 것으로 해석된다. 북서쪽의 경계를 형성하는 지점은 산림중간 및 산림이 끝나고 경작지 또는 시가지와 만나는 지점이었는데, 바람방향에 역진하던 산불이 약화되어 산림이 끝나는 지점에서 더 이상 나아가지 못하고 꺼진 것으로 추정된다. 북동방향과 남동방향으로 형성된 경계부는 모두 산림 끝까지 산불이 강하게 타오른 것을 확인할 수 있었고 진화 지점은 주로 도로를 경계로 하는 것으로 보이나, 이는 도로가 차단선 역할을 한 것으로 해석할 여지는 없었다. 도로를 경계로 산불지역 맞은편으로 경포호와 동해가 이어지기에 차단선은 수면으로 보는 것이 타당하였다.

2. 산불피해지와 도로와의 관계

산불피해지역 외곽경계로부터 50m 이내에 포함되는 도

로 면적은 약 352.9ha였다. 해당 지역 내 차량이 통행할 수 있는 총 도로길이는 59,614m로 확인되었다. 산불지역 내부와 산불지역에 신속하게 접근이 가능한 연결지역의 도로밀도는 168.9m/ha에 달한다. 그러나, 산림청에서 조성한 임도는 해당지역 내 한 곳도 없기에 산림청 기준 임도밀도는 0m/ha가 된다. 임도는 주로 비포장면으로 조성되며 폭 또한 매우 협소하며 경사가 급한 경우가 많아 신속한 차량이동은 현실적으로 어려운 곳이 대부분이다. 반면, 도심의 일반도로는 잘 포장되어있고 도로폭 또한 넓어 산불의 진화를 위해 투입되는 차량 및 인력의 신속한 이동이 가능하여 임도보다 화재진압을 위한 접근이 훨씬 용이하다. 이러한 측면에서 본 산불지역의 도로는 산불진화에 있어 임도보다 훨씬 유리했다고 판단할 수 있다. 결국, 강릉 난곡동 산불지역의 도로밀도는 산림청이 제시하고 있는 우리나라 전체 산림의 평균 임도밀도에 비해 무려 40배 이상 높은 지역이면서, 일반적 임도와는 달리 차량이 신속하게 접근가능하게 아스팔트 또는 콘크리트로 포장된 도로로서 진화를 위한 접근

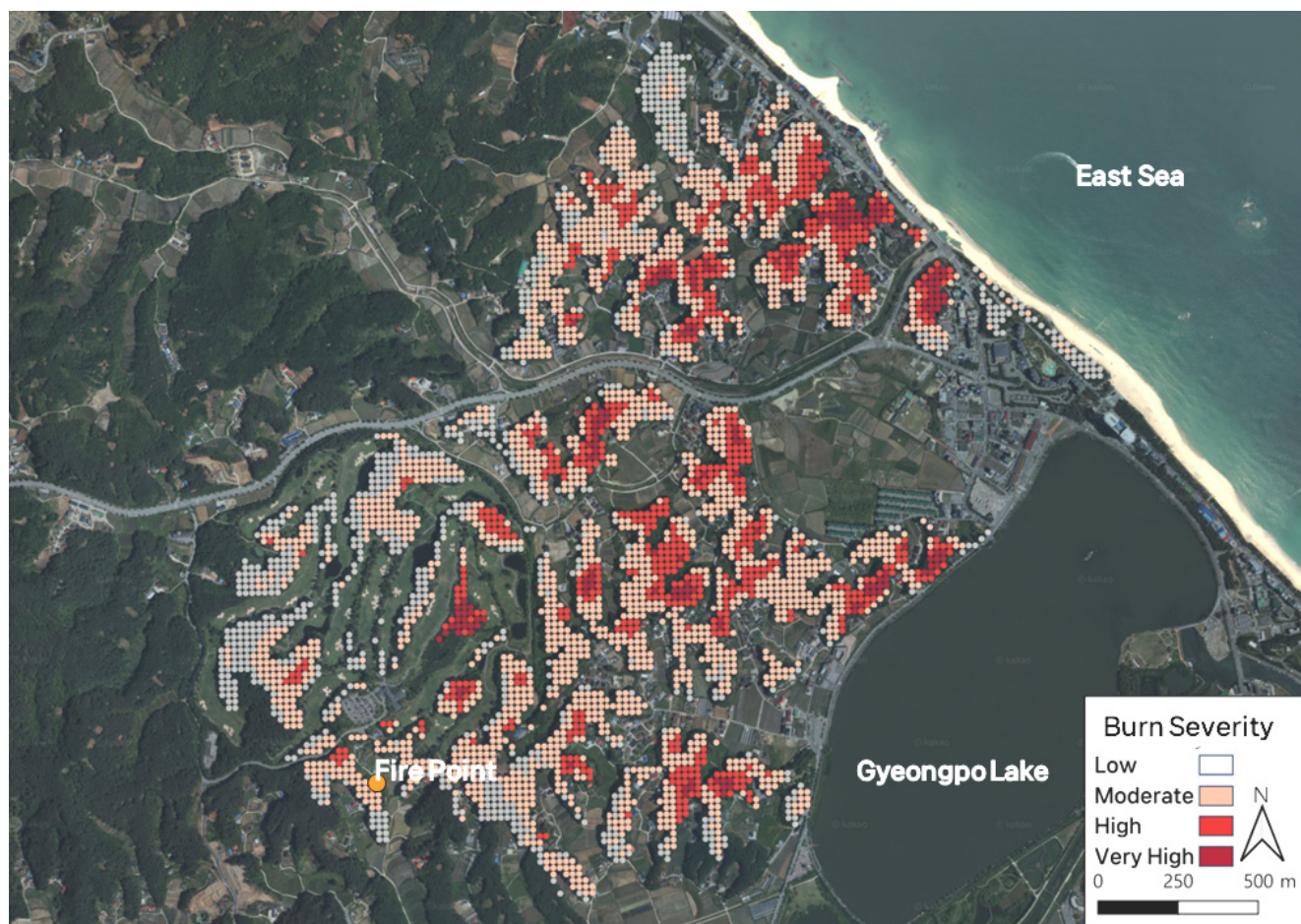


Figure 2. Status of damage intensity in 2023 Gangneung City forest fire (2023.04.11 ~ 04.15) area according to Sentinel-2 image analysis.

측면에서 다른 어느 곳의 산불보다 훨씬 빠르게 접근할 수 있는 기반을 갖추었다고 볼 수 있다. 아울러, 도로 및 경작지 등에 의해 단절된 산림은 총 83개 블록으로 구분되고 있었는데, 이들 지역으로의 산불확산은 모두 지표화가 아닌, 비산화에 의한 확산으로 판단할 수 있었다.

산불피해지역 내부로는 하천(안현천)이 관통하고 있으며 안현천 양측으로는 4차선 도로와 제방도로가 양안에 조성되어 있다. 이에 차단선의 폭이 가장 넓은 지역 중 하나이면서 동시에 신속한 출동이 가능한 지역임에도 불구하고 비산화로 쉽게 확산되었음을 보여주고 있다. 안현천을 날아서 넘어간 비산화는 최소 세 개 지점 이상에서 발생한 것으로 확인되는데, 한 곳은 최단거리가 146m에 달하고, 다른 두 곳도 각각 107m와 85m에 달했다. 일반적으로 산림 하단부 끝 지점이 아닌, 능선상부에서 비산이 이루어지는 것을 감안한다면 비산거리는 최소 200m가 넘는 것으로 확인되었다. 3m 전후로 조성되는 임도와 비교하였을 때, 훨씬 넓은 폭을 확보하고 있는 일반도로, 그리고 더 넓게 형성된 하천 조차 인위적 진화를 위한 혹은 자연적 방화선으로는 전혀

작용하지 못했음을 확인할 수 있었다.

차량의 접근이 가능한 도로로부터의 거리에 따른 피해면적을 살펴보면(Table 3) 총 피해면적 중 절반에 가까운 41%의 산불피해지역이 도로에서부터 단지 25m이내의 가까운 거리였다. 50m이내 거리까지는 무려 전체 피해면적의 3/4에 달한다. 반면, 도로에서부터 100m 이상 떨어진 피해면적은 전체 피해면적의 단 0.6%에 불과하였고, 125m를 넘는 거리의 피해지역은 없었다. 거리별 피해강도 분포를 살펴보면(Figure 3), 도로에서부터 75m까지의 구간에서는 보통(2)의 피해강도를 보이는 지역의 면적비율이 모두 50%를 넘긴 반면, 75m이상 떨어진 지역은 모두 약한(1) 피해강도를 보이는 지역의 면적비율이 가장 높아 대조를 이루고 있었다. 약한(1) 피해강도와 중간(2) 피해강도를 보이는 지역이 차지하는 비율 외, 전반적으로 도로로부터의 거리에 따른 피해강도 분포경향의 차이는 뚜렷하지 않았다.

해발고별 피해정도를 살펴보면(Table 4), 전체 피해면적의 2/3이 해발고 25m이하로서, 본 산불피해지역은 낮은 평지 또는 구릉지에 형성된 산림임을 확인할 수 있었다. 해발

Table 3. Status of forest fire damage intensity by distance from road (unit: percentage)

Dist. from road Burn severity	~25m	25~50m	50~75m	75~100m	100~125m	Total
(1) Low	10.8	5.3	3.3	2.4	0.3	22.1
(2) Moderate	23.0	18.2	10.3	2.2	0.2	53.9
(3) High	6.7	7.1	4.3	1.2	0.1	19.4
(4) Very-High	0.8	2.7	1.2	0.1	-	4.8
Total	41.2	33.3	19.1	5.8	0.6	100.0

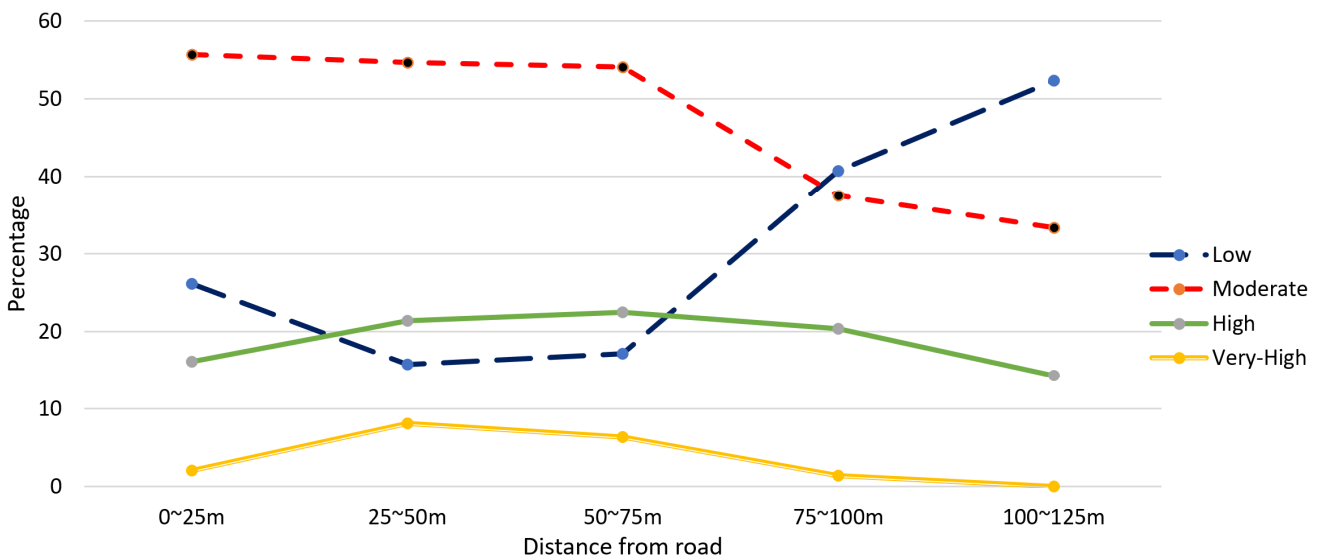


Figure 3. Percentage of forest fire damage intensity by each group of distance from road.

75m이상 지역은 단 0.4%에 불과하였다. 본 대상지는 전체적으로 도로와 접하고 낮은 평지 또는 구릉형 산림으로서 접근의 용이성은 우리나라 그 어느 산지보다 양호한 곳으로 판단할 수 있었다. 해발고별 피해강도 특성을 살펴보면 (Figure 4) 모든 고도별로 중간강도(2)의 피해지역이 고르게 절반 이상을 차지하고 있었으며, 해발고가 높아질수록 낮은 강도(1)의 피해지역 비율이 증가하는 반면, 강도가 강한(4) 피해지역은 반대로 비중이 줄어드는 경향을 보였다.

산불진화를 위해서는 일반적으로 저지대가 용이하며, 접근도로 또한 저지대에 주로 위치하고 있는 경향으로 미루어 저지대의 피해강도가 낮을 것이라 예상할 수 있는데, 강릉난곡동 산불의 경우에는 이러한 일반적 예상과는 정반대의 결과를 보여주고 있었다. 이러한 특성에 대해서는 보다 다양한 관점에서, 다양한 사례 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 다만, 도로로부터의 접근용이성이 산불피해강도에 영향을 주지는 못함을 확인할 수 있었다.

경사향별 피해정도(Table 5)는 뚜렷하지는 않으나, 남동

향을 중심으로 북향과 동향에서 강한 피해를 입은 지역이 많은 것으로 확인되었으며, 이와 반대쪽인 서향을 중심으로 한 남서향부터 북서향까지는 상대적으로 약한 피해지역의 비율이 높게 나타나고 있었다.

우리나라 산불의 특징은 소나무림의 생육이 양호한 남향보다 북향의 피해가 적게 나타나는 것이 일반적인데, 본 지역에서도 이러한 특성이 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 낮은 구릉지가 대부분인 이 지역의 경우 사면을 구분하지 않고 모든 지역에서 하층의 활엽수를 제거하는 소나무림 숲가꾸기가 진행된 관계로 극단적 패턴이 나타나지는 않고 있었다. 경사향에 따른 경향은 인위적 산불진화와는 관계가 없는 자연적 요소로서 산불피해강도 경향이 나타난다는 것은 인위적 요소보다 자연적 요소가 산불확산에 훨씬 강하게 작용한다고 판단할 수 있는 근거가 된다. 다만, 본 대상지는 경사도 및 경사향에 따른 식생구분이 뚜렷하게 나타나지 않는 지역이기에 이러한 패턴이 아주 강하게 나타나지는 않았는데, 향후 산림의 면적이 크고 경사향에 따른 식생유

Table 4. Status of forest fire damage intensity by altitude (unit: percentage)

Dist. from road Burn severity	~25m	25~50m	50~75m	75~100m	Total
(1) Low	12.2	7.5	2.0	0.2	21.9
(2) Moderate	35.5	14.5	3.6	0.2	53.8
(3) High	14.4	4.5	0.5	-	19.4
(4) Very-High	3.4	1.4	0.0	-	4.8
Total	65.5	27.9	6.2	0.4	100.0

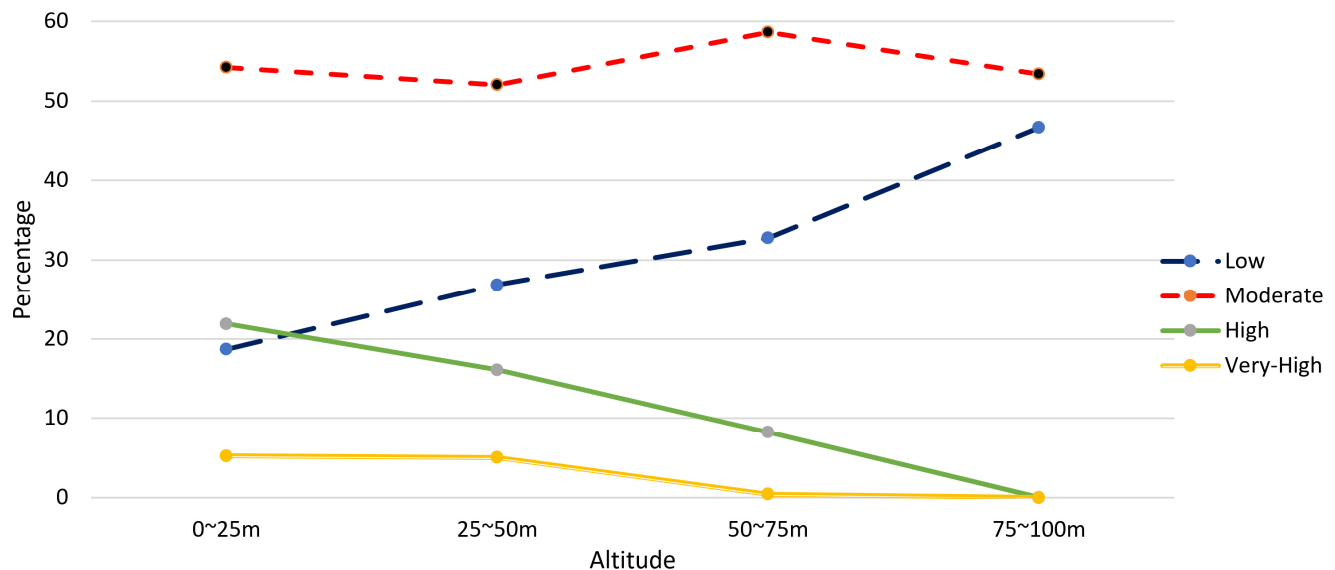


Figure 4. Percentage of forest fire damage intensity by each group of altitude.

Table 5. Status of forest fire damage intensity by slope direction (unit: percentage)

Forest slope direction Burn severity	North	North East	East	South East	South	South West	West	North West	Flat	Total
(1) Low	2.0	2.1	1.9	1.8	1.4	2.1	4.2	3.8	2.6	21.9
(2) Moderate	5.6	6.5	7.0	6.9	4.3	6.0	6.9	6.9	3.8	53.9
(3) High	2.3	3.4	4.1	3.0	1.0	1.1	1.1	2.0	1.3	19.3
(4) Very-High	0.3	0.5	0.8	1.1	0.6	0.2	0.3	0.4	0.6	4.8
Total	10.2	12.6	13.8	12.7	7.4	9.4	12.5	13.1	8.3	100.0

형 구분이 자연적으로 형성되어 나타나는 지역을 대상으로 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단되었다.

3. 종합고찰

산림청은 2023년 3월 임도확충전략을 발표하였는데, 해당 전략은 2027년까지 매년 임도를 500km씩 늘린다는 계획이다. 산림청의 임도확장 논리는, 임도가 조성된 현장은 산불진화장비와 인력투입이 상대적으로 용이하다는 것에 있다. 위 발표 후 한달 뒤에 발생한 강릉 난곡동 산불은 최근 대형산불 중 산불진화장비와 인력투입이 가장 용이한 산불지역이라는 점에서 해당 정책의 합리성 판단에 시사하는 바가 크다 할 것이다. 지금까지는 임도와 산불진화와의 관계에 대한 정량적·객관적인 분석 없이 대규모 예산투입 계획이 수립되었으나, 강릉 난곡동 산불 분석결과는 이러한 경향과는 정반대의 결과를 보여줬다. 난곡동 산불이 발생한 지역의 산림도로밀도는 무려 168.9m/ha에 달해 산림 전체가 도로에 의해 매우 작게 파편화된 지역이었다. 그럼에도 불구하고 산림의 149.1ha를 모두 태운 상황으로 미루어, 현재 산림청이 원활한 산불진화를 위해 달성하고자 하는 임도 밀도 목표 5.9m/ha에 이른다 해도 해당 목표는 빠른 산불진화에는 관련이 없음을 확인할 수 있었다. 또한, 우리나라 임도밀도는 산림을 관통하거나 내부로 진입하는 일반도로 및 산림과 접한 도로 등, 산불진화차량 및 인력이 훨씬 빠르고 안전하게 접근할 수 있는 도로를 모두 제외하고 임도밀도를 산정하는 관계로 해당 기준을 명확히 할 필요성이 있었다. 산림 내부나 인접한 도로 또한 산불진화 및 산림경영을 위해 동일하게 사용할 수 있는 도로이기 때문이다.

전 세계 목재생산량의 10%이상을 생산하는 최대 목재생산국인 미국의 경우에는 산림도로의 밀도가 우리나라의 절반이 채 되지 않는 매우 낮은 수준임에도 불구하고 지난 1998년, 새로운 임도관리시스템의 도입을 선언하였고, 이후 1999년부터는 일정 지역에 대해 영구임도를 포함하여 임시도로의 건설까지 신규 건설을 중단하였다. 이후, 미국은 관리비용을 줄이면서도, 환경적으로 건전한 도로망 유지

를 위해 2001년에 국유림의 약 1/3의 면적에 대해 새로운 임도 건설뿐만 아니라 벌목까지 영구 금지하는 법안을 만들어 신규 임도조성 및 벌목을 제한한 바 있다⁸⁾. 또한 2008년부터는 사용하지 않는 기존 임도를 자연상태로 복원하는데 매진하고 있다. 2022년 미국 Forest Service는 4,000만 달러를 산림의 복원 프로그램에 사용한다고 밝혔는데, 임도유지 관리 예산은 단 900만 달러에 불과하였다. 산림복원프로그램에는 임도의 복원 또한 포함되는데 2008년부터 2021년까지 7,000마일(약 11,270km) 이상의 임도를 폐쇄하였음을 강조하고 있다⁹⁾. 임도의 축소와 산림의 생태적 복원은 산불대응을 포함하여 현재 미국의 산림관리에서 최우선 정책인 기후변화 완화를 위한 정책임을 강조하고 있다. 미국의 정책변화는 1년 동안 임도의 효용성을 객관적으로 판단하고 내린 결과임을 주지할 필요가 있다. 이러한 경향은 최근 더욱 강화되고 있는데, 미국 산림청 예산에서 최근 몇 년간 임도관련 예산은 소규모 정비비용만을 책정하고 있다. 이러한 상황임에도 불구하고, 산림청은 2023년도에 임도조성에 산을 총 2,469억원(KFS, 2023)을 책정하였다.

앞서 제시한 바와 같이, 임도의 주 목적인 산림경영을 위해서 임도는 경제적 효용이 전혀 없음이 실증연구를 통해 확인된 바 있다. 또한 산불에 있어서도 강릉 난곡산불의 정량적 분석결과 도로밀도와 산불진화는 관련이 없음을 확인하였다. 반대로 자연적 요소인 경사향에 따른 산불피해정도는 상대적으로 뚜렷한 패턴을 보이고 있어 인위적 진화체계보다 자연적 패턴이 더 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과로 미루어 산불대응을 위한 임도 확장은 다시 검토해야 할 것으로 판단된다. 다만, 최근 가장 심각한 피해를 입힌 산불이면서 도로밀도가 가장 높은 지역 내에서 발생한 산불인 강릉 난곡동 산불지역만을 대상으로 분석하였으며, 이후 보다 많은 대형산불지역에서 정량분석을 진행하여 임도와 산불의 관계를 검증할 필요성이 있었다. 아울러, 본 대상지는 현장조사결과, 거의 모든 지역에서 강한 숲가

8) https://www.fs.usda.gov/eng/road_mgt/overview.shtml

9) <https://www.fs.usda.gov/news/releases/usda-forest-service-invests-65m-bipartisan-infrastructure-law-clean-water>

꾸기사업이 진행된 것을 확인할 수 있었다. 이에, 숲가꾸기와 산불의 관계에 대해서는 분석이 가능하지 않았는데, 하층식생이 양호한 경우 산불확산이 억제되는 경향의 연구결과(Cha *et al.*, 2003)와 산림청이 주장하는 하층식생 제거가 산불에 도움이 된다는 주장 또한 대립하고 있는 관계로, 향후 다른 산불지역에서는 해당 관점에서도 분석이 진행되어야 할 것이다.

REFERENCES

- Cha, D.S., J.W. Lee, D.H. Jung, B.Y. Ji, K.S. Chun and J.Y. Kim(2003) Fire control effect of the forest road in the forest-fired areas. Jour. Korea Soc. For. Eng. Tech 1(1): 15-24. (Korean with English Abstract)
- Einzmann, H.J.R., G. Zotz and J.T.Y. Ling(2022) What happens to epiphytic bromeliads in a windy spot? Journal of Tropical Ecology 38(3): 1-6.
- European Space Agency(ESA)(2015) Sentinel-2 user handbook. 64pp.
- Hwang, J.S., B.Y. Ji, D.H. Jung and M.J. Cho(2015) Effect of forest road network on accessibility and cost reduction for forest operations (I). Journal of Korean Forest Society 104(4): 615-621. (Korean with English Abstract)
- Hwang, J.S., B.Y. Ji, H. Kweon and D.H. Jung(2016) Effect of forest road network on accessibility and cost reduction for forest operations (II). Journal of Korean Forest Society 105(4): 456-462. (Korean with English Abstract)
- Japan Forestry Agency(2018) Forest general inspector (forester) basic text. 322pp. (Japanese)
- Ju, Y.K.(2021) A study on the problems and improvement by analyzing the disastrous large-scale forest fire response system-Focused on simultaneous forest fires along the east coast of Gangwon-do Province-. Ph.D. Dissertation, Wonkwang Univ., 306pp. (Korean with English Abstract)
- Korea Forest Service(2022a) 2022 statistical yearbook of forestry. 454pp. (Korean)
- Korea Forest Service(2022b) 2023 fiscal year 2023 budget overview. 14pp. (Korean)
- Lutes, D.C., R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, S. Sutherland and L.J. Gangi(2006) FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD.
- Senande-Rivera, M., D. Insua-Costa and G. Miguez-Macho(2022) Spatial and temporal expansion of global wildland fire activity in response to climate change. Nat Commun 13: 1208. doi: 10.1038/s41467-022-28835-2
- USDA(2023) Forest inventory and analysis-Fiscal year 2021 business report. 84pp.
- Won, M.S., K.S. Koo and M.B. Lee(2007) An quantitative analysis of severity classification and burn severity for the large forest fire areas using normalized burn ratio of landsat imagery. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 10(3): 80-92. (Korean with English abstract).
- Youn, H.J. and J.C. Jeong(2019). Detection of forest fire and NBR mis-classified pixel using multi-temporal sentinel-2A images. Korean Journal of Remote Sensing 35(6): 1107-1115. (Korean with English Abstract)
- <https://bfw.ac.at/700/2109.html>
- https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_05_01&cmsId=FC_000812
- https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/frfr/selectFrfrStatsNow.do?mn=NKFS_02_02_01_05
- https://www.fs.usda.gov/eng/road_mgt/overview.shtml
- <https://www.fs.usda.gov/news/releases/usda-forest-service-invests-65m-bipartisan-infrastructure-law-clean-water>
- <https://www.fs.usda.gov/science-technology/travel-management>