

Research Paper

Sentinel-2B 위성 영상을 활용한 산불 피해지역 식생 회복률에 관한 연구

천금성* · 천광일* · 박병배**

국립생태원*, 충남대학교**

A Study on the Recovery Rate of Vegetation in Forest Fire Damage Areas Using Sentinel-2B Satellite Images

Gumsung Cheon* · Kwangil Cheon* · Byung Bae Park**

Team of Ecosystem Service, National Institute of Ecology*

Department of Environment and Forest Resources, Chungnam National University**

요약: 산불에 대한 피해액과 피해 면적은 전 세계적으로 커지고 있지만 피해 후 복원 방법에 따른 효과연구는 부족한 현실이다. 본 연구는 Sentinel-2B 위성 영상과 임상도를 활용하여 산불 피해 면적을 산출하고, 임상에 따른 산불 피해 강도를 분석하였다. 또한, 다양한 파장대를 활용하여 식생지수를 계산하고, 이를 토대로 복원 방법에 따른 식생 회복률을 -1.0에서 1.0 범위 내에서 정량적으로 분석하였다. 그 결과 침엽수림 비율이 높은 지역에서 높은 강도의 산불 피해가 발생하였고, 상대적으로 혼효림과 활엽수림의 비율이 높은 지역에서 낮은 강도의 산불 피해 경향을 보였다. 산불 발생 이후 인공림과 천연림에서의 식생 회복률을 분석한 결과, 인공림은 산불 발생 이전 대비 약 92%, 천연림은 약 101% 식생을 회복하였으며 인공림보다 천연림에서 식생 회복률이 우수한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 임상에 따른 산불 피해 강도를 분석하고 복원 방법에 따른 식생 회복률을 평가함으로써 산불 피해를 줄이기 위한 수목 선정에 기초자료를 제공하고 복원방법에 따른 식생회복률을 비교하는데 의의가 있다.

주요어: 정규식생지수, 정규탄화지수, 원격탐사, 피해강도, 임상

Abstract: The amount of damage and the area of damage to forest fires are increasing globally, and the effectiveness analysis of the restoration method after the damage is performed insufficient. This study calculated the area of forest fire damage was calculated using Sentinel-2B satellite images and stack map and the intensity of forest fire damage is analyzed according to the forest type. In addition, the vegetation index was calculated using various wavelength bands. Based on the results, the vegetation resilience by the restoration method was quantitatively. As results, areas with a high

First Author: Gumsung Cheon, Tel: +82-41-950-5681, E-mail: rmatjd1024@nie.re.kr, ORCID: 0009-0007-4567-5609

Corresponding Author: Byung Bae Park, Tel: +82-42-821-5747, E-mail: bbpark@cnu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4548-0699

Co-Author: Kwangil Cheon, Tel: +82-41-950-5463, E-mail: ndz1000@nie.re.kr, ORCID: 0000-0001-6768-8071

Received: 6 November, 2023. Revised: 23 November, 2023. Accepted: 27 November, 2023.

proportion of coniferous forests suffered high intensity forest fire damage, and areas with a relatively high ratio of mixed and broad-leaved forests tended to have low forest fire damage. Also, artificial forests showed a recovery of about 92.7% compared to before forest fires and natural forests showed a recovery of about 99.6% from the result of analyzing vegetation resilience in artificial and natural forests after forest fires. Accordingly, it was confirmed that natural forests after forest fire damage had superior vegetation resilience compared to artificial forests. It can be proposed that this study is meaningful in providing important information for efficiently restoring the affected target site and the selection criteria for trees to reduce forest fire damage through the evaluation of vegetation resilience by the intensity of forest fire damage and restoration methods.

Keywords: Forest Fires, NDVI, Vegetation Recovery, NBR, Remote sensing

I. 서론

최근 기후 변화의 영향으로 겨울철 강수량이 줄어들고 있으며 이로 인한 가뭄이나 지역적 기상 이변 등으로 산불 위험성은 더욱 커지고 있다(Choi and Kwon 2008). 특히 낮은 습도의 영향으로 임분 내 수분 함량이 감소하게 되어 산불이 발생하게 되면 급속도로 확산되는 등 산불이 대형화되는 추세이다(Korea Forest Service 2022). 산불통계연보(Korea Forest Service 2022)에 따르면 최근 10년(2013~2022년) 평균 537건의 산불이 발생하여 약 3,560ha의 산림이 소실되었으며 그중 대형 산불은 강원도와 경상북도에 집중되었다. 또한 산불의 심각성은 세계적으로 증대되고 있는데, 2023년 8월 캐나다에서 발생한 산불은 피해 면적만 대한민국 국토 면적의 약 1.3배인 13만7천km²에 달하며 동년 미국 하와이주 마우이섬에서 발생한 산불은 2,700여 채의 건물을 파괴해 약 8조 원의 피해를 발생하는 등 매년 전 세계적으로 대형화재로 인한 피해가 증가함에 따라 산불의 예방과 관리가 국제적 이슈로 두드러지고 있다.

산불은 강도와 빈도, 지속 시간 등과 같은 다양한 요인에 따라 토양의 수분량 변화, 지표면의 식생 감소, 토양 내 유기물의 양 등에 변화를 준다고 알려져 있다(Noh and Choi 2022). 이러한 산불에 의한 물리적 변화는 지표와 토양 위에 복합적 영향을 나타내는 산불 피해 강도로 정의될 수 있으며(White et al. 1996; Wang 2002; Brewer et al. 2005; Doerr et al. 2006), 산불 피해 강도에 따라 식생의 고사와 피해 그리고

회복 속도에 영향을 준다는 사실이 여러 연구에 의해 입증되었다(Morgan and Neuenschwander 1988; DeBano et al. 1998). 선행 연구 중 산불 피해 강도에 관한 연구는 정규탄화지수(NBR, Normalized Burn Ratio)와 정규탄화지수의 차이(dNBR, differenced Normalized Burn Ratio)를 이용한 위성영상 분석 방법이 있으며 현재 산불 강도를 추정하는데 폭넓게 활용되고 있다(Key and Benson 2006; van Wagtenonk et al. 2004; Cocke et al. 2005; Roy et al. 2006). 산불 피해를 대상으로 위성 영상을 이용한 식생 활력을 확인하기 위하여 정규식생지수(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)와 녹색정규식생지수(GNDVI, Green Normalized Difference Vegetation Index) 등을 활용하는데, 정규식생지수는 적색(Red) 파장대를 강하게 흡수하는 반면 근적(NIR, Near-Infrared) 파장대는 반사하는 특성을 이용하여 식생 상태를 파악할 수 있으며(National Geographic Information Institute 2021) 녹색정규식생지수는 적색 파장대 대신 녹색 파장대를 사용하여 식물의 엽록체에 더욱 민감하게 반응함으로써 식생상태를 확인하는데 사용된다(Shaver et al. 2006). 정규식생지수와 녹색정규식생지수는 산불 피해지뿐 아니라 산림 식생 변화 모니터링, 산사태 피해지, 사막화 지역 등 다양한 방면에서 활용되고 있다(Genevieve et al. 1996; Li et al. 2014; Xingwang and Yuanbo 2016; Cho et al. 2020).

우리나라는 최근 산불 피해와 규모가 대형화됨에 따라 산불 피해지 복원에 대한 관심이 커지고 있다.

산불 피해지의 복원 방법은 산불 피해지의 성격과 특성에 따라 인공복원과 자연 복원 두 가지로 구분할 수 있으며 우리나라의 경우 2000년 동해안 산불을 계기로 구체적인 복원 방법에 대한 선정 기준이 제시되었다(Lim et al. 2012). 인공 복원은 목재 생산을 통한 경제성 추구를 목적으로 하는 목재 생산림, 산지재해 방지림 등 대면적 조림지 및 황폐지(강우에 의해 토양이 유실되거나 토성이 크게 나빠질 가능성이 높은 지역)에 적용하는 방법이다. 자연 복원은 산불 후 자연 회복력을 이용하여 후계림을 조성하는 방법으로 국립공원, 보호지역 등 숲의 생태적 관리와 자연 천이를 우선시하는 지역에 적용하는 방법이다(National Institute of Forest Science, 2010).

따라서 본 연구에서는 위성 영상과 공간정보를 이용하여 임상 종류와 복원 방법에 따른 산불 피해 지역의 식생 회복 정도를 지수화하여 비교함으로써 임상에 따른 산불 피해 정도를 파악하고 복원 방법에 따른 식생 회복률을 도출하고자 한다. 본 연구의 결과는 산

불 피해지 복원과 관리 방향, 대상 지역 선별 등 기초 자료로 활용할 수 있을 것이며 산불 피해지 복원에 대한 인력, 비용 등의 재정적 자원을 절약할 수 있는 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상 지역

본 연구는 임상에 따른 산불 피해 정도를 파악하고 복원 유형에 따른 효과를 분석하기 위한 연구이다. 환경적인 영향을 최소화하기 위하여 1,000ha 이상의 대규모 산불이 발생한 후 인공복원과 자연복원이 동시에 이루어져 현재 시점에서 비교 가능한 지역을 선정하였다.

2019년 강원도 고성군 토성면 원암리 일대에서 발생한 고성군-속초시 산불은 전봇대 개폐기 내 전선에서 발생한 스파크로 인해 발화되었으며 1,266ha의 산림을 소실시켰다(Korea Forest Service, 2023).

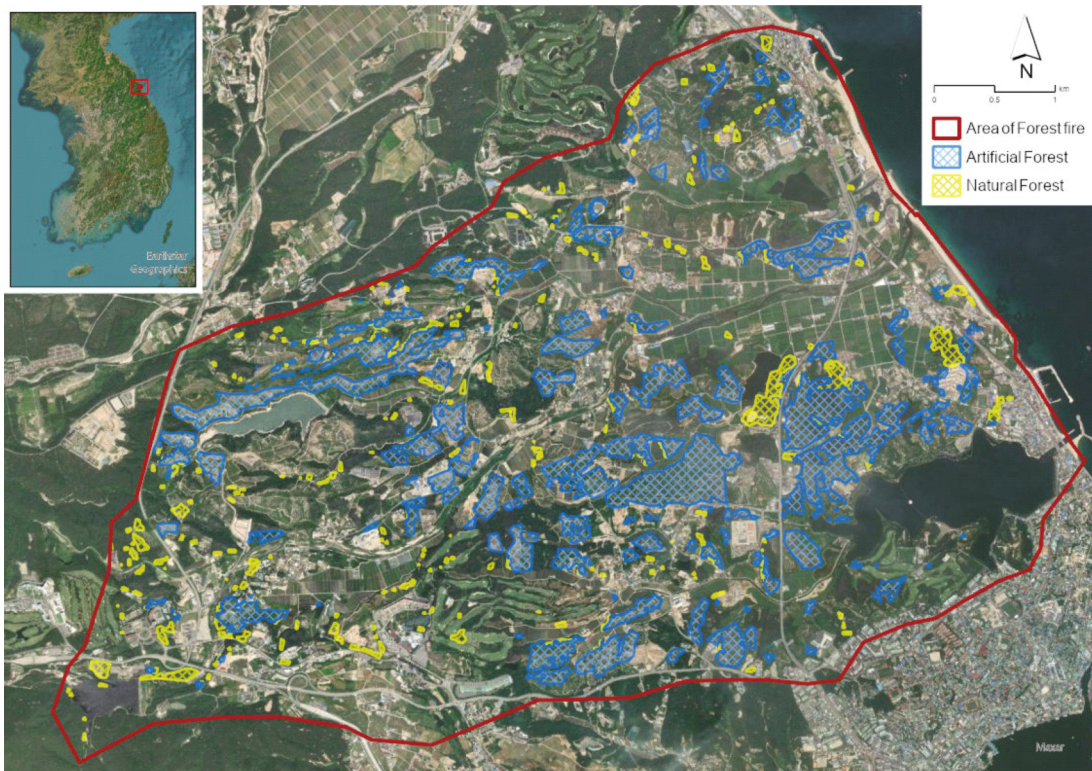


Figure 1. Location map of the study area.

고성군의 총면적은 664,28km²이며 그중 82,3%가 임야로 구성되어 있다. 조사 지역인 토성면의 평균 강수량은 전년 대비 421,5mm 줄었고 산불 발생 시기 순간 최대 풍속은 전년보다 4,9m/s 높았으며 양양군과 고성군 사이에 빠른 속도로 부는 양간지풍 등 지형적 영향으로 화재가 대형화된 것으로 보인다. 피해 면적 1,266ha 중, 2022년 임상도의 임종 코드에 따라 무림목지/비산림을 제외하였으며 인위적 조림 또는 파종을 통해 복원된 인공림 346,7ha와 인간의 간섭이 적고 자연적으로 형성된 천연림 69,5ha, 총 416,2ha를 대상지로 선정하여 분석하였다. 대상지는 복원 유형을 제외한 지형적 특성이 유사하기에 임상에 따른 산불 피해 강도 분석 및 복원 유형에 따른 식생 회복력 평가가 용이할 것으로 판단되어 연구 대상 지역으로 선정하였다(Figure 1).

2. 자료 수집 및 분석 방법

1) 위성 자료 및 공간 자료

산불 발생지역의 과거 및 현재 임상 파악을 위한 기초자료로 산림청에서 발표한 4차 임상도 및 2022년 임상도를 활용하였다. 4차 임상도의 임종 코드는 경작지, 소나무 인공복원림, 소나무림, 잣나무림, 침활혼효림, 활엽수림으로 구분되고, 2022년 임상도의 임종 코드는 인공림, 천연림 및 무림목지와 비산림 등으로 구분된다. 또한 임상에 따른 피해 강도 및 식생 회복력 분석을 위해 ESA(European Space Agency)에서 운영하는 Sentinel-2B 위성 영상(<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>)을 이용하였다. Sentinel-2B 위성 영상은 2017년 발사되었으며 공간해상도 10m, 시간해상도 5일 간격으로 제공된다. 그 중 2019년 발생한 산불 전후의 식생 회복 변화를 비교하기 위해 산불 발생 직전 해부터 현재까지의

Table 1. Sentinel-2B scenes used to map in the study area

| Study area | Image type | Image date |
|-------------|--------------------------------|------------|
| Goseong-gun | Sentinel-2B, 10m resolution | 2018.5.23 |
| | | 2019.5.23 |
| | | 2020.5.27 |
| | | 2021.5.22 |
| | | 2022.5.29 |
| | | 2023.5.09 |

영상 중 Cloud and Shadow 5% 미만으로 설정하여 2018년부터 2023년까지 위성영상을 수집하였다(Table 1).

2) 정규탄화지수(NBR)를 통한 임상별 피해 강도 분석 방법

정규탄화지수는 습도와 토양수분에 민감한 SWIR (Short-Wave Infrared)과 식물의 상태 및 생산력에 민감한 NIR (Near Infrared)를 사용하여 화재의 영향을 감지 및 모니터링하는 중요한 도구로 산불 피해지의 범위 및 피해 강도를 분석하는 데 활용된다(Won et al., 2007). 산불 발생 전후 Sentinel-2B 영상의 Band 8 (NIR)와 Band 12 (SWIR)를 추출하여 정규탄화지수를 계산하였다. Fassnacht et al. (2021)은 산불 피해 강도를 분석하기 위해 영상 분석을 통해 얻은 정규탄화지수값의 차이(dNBR)를 산출한 후 피해 등급에 따라 피해상(High Severity), 피해중상(Moderate-high Severity), 피해중하(Moderate-low Severity), 피해하(Low Severity), 피해무(Unburned) 총 5단계로 구분하였으며, 본 연구에서도 선행 연구를 참조하여 산불의 피해 등급을 피해무(Unburned) 단계를 제외한 4단계로 구분하였다(Table 2). 임상에 따른 피해 강도를 구분하기 위해 임상도를 활용하였으며 침엽수림, 침활혼효림, 활엽수림, 농경지와 그 외 지역은 해당 없음 총 4가지로 구분하였다.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \tag{1}$$

$$dNBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire}$$

Table 2. Fire Severity levels, proposed by USGS (Fassnacht et al. 2021)

| Severity Level | dNBR Range |
|------------------------|----------------|
| Low Severity | 0.100 to 0.269 |
| Moderate-low Severity | 0.270 to 0.439 |
| Moderate-High Severity | 0.440 to 0.659 |
| High Severity | > 0.660 |

3) 복원방법 및 연도별 식생 회복력 분석

NDVI(정규식생지수)와 GNDVI(녹색정규식생지수)는 식생 및 식물 성장을 모니터링하고 품질을 평가하

기 위해 사용되는 중요한 도구이며 식물의 성장량을 추정하는데 사용된다(R Zennir et al, 2023). NDVI는 적외선 파장대와 근적외선 파장대를 통해 식생의 상태를 파악할 수 있는 지수이며 GNDVI는 NDVI의 변형 형태 중 하나로 적외선 대신 녹색광선을 사용하여 작물 내 엽록소 변화에 NDVI보다 비교적 민감하게 반응하는 지수이다. 두 지수 모두 $-1 < NDVI, GNDVI < 1$ 범위의 값을 가지며, 본 연구에서는 인공림과 천연림을 대상으로 산불 발생 전후의 NDVI 및 GNDVI를 비교하여 복원방법 및 연도별 식생 회복률을 분석하였다. Kurnaz et al. (2020)은 산불발생 이전 NDVI, GNDVI와 산불 발생 후 NDVI와 GNDVI의 차이를 계산한 dNDVI, dGNDVI를 활용하여 식생 회복력 산출하였으며, 본 연구도 선행연구를 참조하여 대상지역 내 복원 유형에 따른 식생 회복률을 산출하였다.

$$\begin{aligned}
 NDVI &= \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \\
 GNDVI &= \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \\
 dNDVI &= NDVI_{prefire} - NDVI_{postfire} \\
 dGNDVI &= GNDVI_{prefire} - GNDVI_{postfire}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Table 3. NDVI levels, proposed by USGS

| NDVI Level | NDVI Range |
|------------|-------------|
| Low | -0.1 to 0.1 |
| Moderate | 0.2 to 0.5 |
| High | 0.6 to 0.9 |

산불 발생 전후 Sentinel-2B 영상의 Band 3 (Green) 과 Band 4 (Red), Band 8 (NIR)을 추출하여 NDVI 와 GNDVI을 산출하였고, dNDVI, dGNDVI를 비교 할 때 $-3 < z\text{-score} < 3$ 의 범위를 넘어서는 값은 이상치로 판단하여 분석 대상지에서 제외 후 분석을 진행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 임상별 산불 피해 강도 분석 결과

Sentinel-2B 위성영상 중 산불 발생 지역의 산불 전후 영상을 비교하여 산불 피해 강도를 분석하고 기존 임상에 따른 산불 강도를 산출하였다.

연구 지역 내 산불 피해 강도는 피해상 지역 108.9ha (26.2%), 피해중상 지역 109.4ha (26.3%), 피해중하

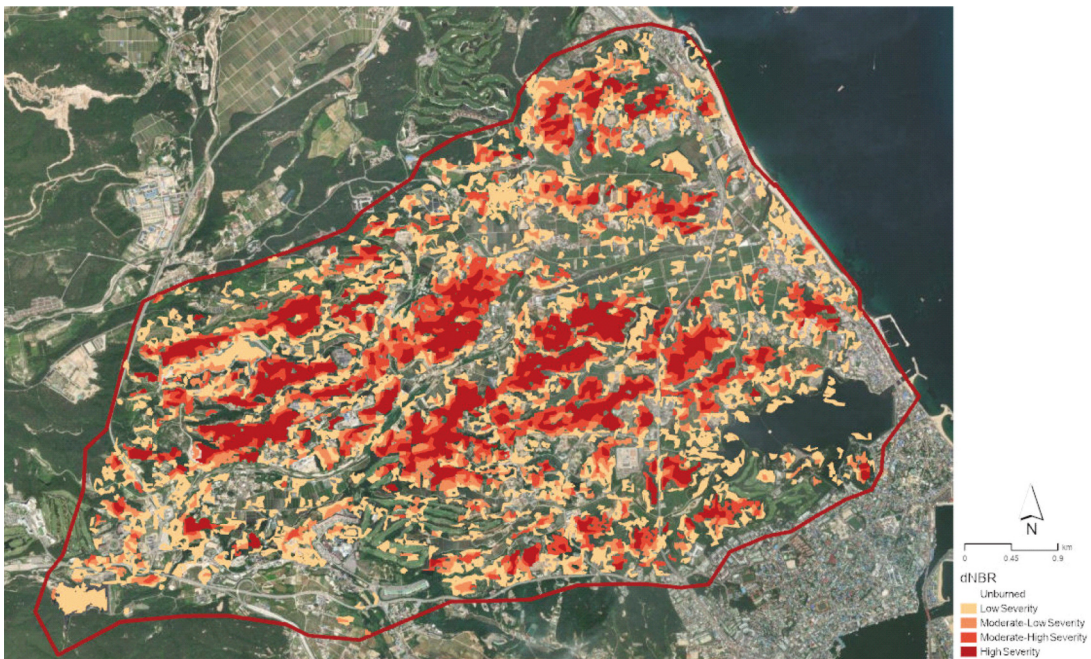


Figure 2. Forest fire severity level of forest type in the study area.

지역 93.4ha (22.4%), 피해하 지역 104.5ha (25.1%)로 연구 지역 내 피해 강도는 고르게 분석되었다. 산불 피해 지역 중 375.9ha (90.3%)가 침엽수림으로 가장 많은 면적을 차지했고 침활혼효림이 13.3ha (3.2%), 활엽수림 0.9ha (0.2%) 순으로 분석되었다. 일원배치분산분석을 이용하여 산불 피해 지역의 임상별 산불 피해 강도를 분석한 결과, 임상 유형에 따라 산불 피해 강도가 유의미한 차이가 있는 것으로 분석되었으며(Figure 3), 단위면적(100m²)당 dNBR의 평균값은 침엽수림이 평균 0.49로 가장 컸고, 침활혼효림은 평균 0.34, 활엽수림은 평균 0.22 순으로 나타났다(Table 3). 이는 산불 피해 강도별 임상을 확인한 결과, 산불 피해 강도가 높은 등급의 지역일수록 침엽수림의 비율이 높아진다는 Lee et al. (2002)의 결과와 유사함을 확인할 수 있다. 우리나라 총 산림면적의 37%가 침엽수림에 해당하며 그중 소나무의 비율은 68%로 소나무의 식재 면적이 넓고(Korea Forest

Service 2023), 특히 소나무는 참나무류에 비해 열에 대한 저항성이 낮아(Kim et al. 1999) 산불 피해 강도를 높였을 것으로 판단된다.

2. 식생 회복력 분석 결과

임상에 따른 식생 회복력을 확인하기 위해 NDVI와 GNDVI를 활용하였으며 산불 피해 이전 식생 회복력과 산불 직후부터 현재까지의 연도별 식생 회복력을 구분하여 분석하였다. 대상지역 전체의 NDVI와 GNDVI 평균값 변화를 확인한 결과 NDVI의 경우 산불 발생 전 평균값은 0.77이었으나 산불 발생 직후 평균값은 48% 감소한 0.40을 나타냈으며 4년 후 NDVI 평균값은 92% 회복한 0.71로 나타났다. GNDVI의 경우 산불 발생 전 평균값은 0.69이었으나 산불 발생 후 GNDVI 평균값은 28%가량 감소한 0.50을 나타냈으며 4년 후 GNDVI 평균값은 94%가량 회복한 0.65를 나타내는 것을 확인할 수 있었다(Figure 4).

산불 발생 전후 NDVI와 GNDVI 통계값의 차이(dNDVI, dGNDVI)는 식생이 회복력과 반비례 관계이며, dNDVI와 dGNDVI를 연산하여 식생의 활력도를 확인하였다(Kurnaz et al. 2020). 복원 유형에 따른 식생 회복력을 확인하기 위하여 산불 발생 후 5년간 연도별 dNDVI와 dGNDVI를 산출하였다. Noh and Choi (2022)는 산불 발생 2년 후, 천연림은 산불 발생 이전 NDVI 값을 회복하지 못하였고 인공림의 경우 산불 발생 이전보다 최대 0.03 더 높은 NDVI 값을 회복하였는데 이와 달리 본 연구에서는 산불 발생 후 천연림이 매년 인공림보다 높은 식생 회복력을 보였다. 산불 피해 지역 중 인공림의 dNDVI는 산불 피해 직후 0.40이었으며 4년 후 dNDVI는 0.07로 감소하여 산불 피해 이전과 비교할 때 약 91%의 식생이

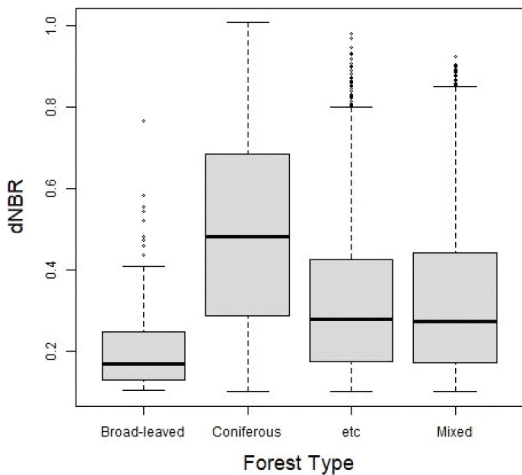


Figure 3. Box plots of forest fire severity level according to forest type ($p \leq 0.05$, F-value=630).

Table 4. Severity level and area by tree type of the study area

| Tree type | dNBR | High | | MidHigh | | MidLow | | Low | |
|--------------|------|-------|-------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | | ha | % | ha | % | ha | % | ha | % |
| Coniferous | 0.49 | 105.5 | 25.33 | 103.4 | 24.83 | 82.3 | 19.77 | 84.7 | 20.35 |
| Mixed | 0.34 | 1.6 | 0.37 | 1.8 | 0.43 | 3.3 | 0.80 | 6.6 | 1.57 |
| Broad-leaved | 0.22 | 0.0 | 0.00 | 0.1 | 0.02 | 0.1 | 0.03 | 0.7 | 0.18 |
| etc | 0.29 | 1.9 | 0.46 | 4.2 | 1.00 | 7.7 | 1.84 | 12.5 | 3.01 |
| Total | - | 108.9 | 26.2 | 109.4 | 26.3 | 93.4 | 22.4 | 104.5 | 25.1 |

Table 5. Result of NDVI and GNDVI (2018~2023)

| Index | Forest Type | 2019 yr | 2020 yr | 2021 yr | 2022 yr | 2023 yr |
|--------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| dNDVI | Artificial Forestation | 0.40 | 0.31 | 0.21 | 0.16 | 0.07 |
| | Natural Forestation | 0.22 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.00 |
| dGNDVI | Artificial Forestation | 0.21 | 0.18 | 0.14 | 0.10 | 0.05 |
| | Natural Forestation | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.00 |

* Forest fire in 2019 yr.

회복되었고 산불 피해 직후 dGNDVI는 0.21이었으며 4년 후 0.05로 감소하여 약 93%의 식생이 회복되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 천연림의 dNDVI는 산불 피해 직후 0.22이었으며 4년 후 0.00으로 감소하였다. 또한 천연림의 dGNDVI는 산불 피해 직후 0.10이었으며 4년 후 0.00으로 감소하여 산불 피해 4년 후 NDVI와 GNDVI 모두 산불 이전 식생 상태를 100% 이상 회복하였다(Table 4).

인공림에 비해 천연림이 상대적으로 산불 피해 강도가 적었으며, 이로 인해 피해 후 생존한 잔존목의

종자산포 및 맹아갱신이 천연림 내 빠른 식생 회복에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과는 천연림이 인공림에 비해 상대적으로 주변 식생으로부터 유입된 종자가 서식지를 점유하여 다양한 식생층을 이루고 기후변화와 외래종의 침입 등 외부 압력요인에 대한 저항력이 강하다는 선행 연구 결과와 유사하게 나타났다(Kunert and Mercado., 2015; Silverio et al.,2020). 산불 발생 후 식생 회복 정도를 확인하기 위해 산불 발생 전후에 NDVI와 GNDVI 차이(dNDVI, dGNDVI) 분석 결과 산불 피해 이전 수

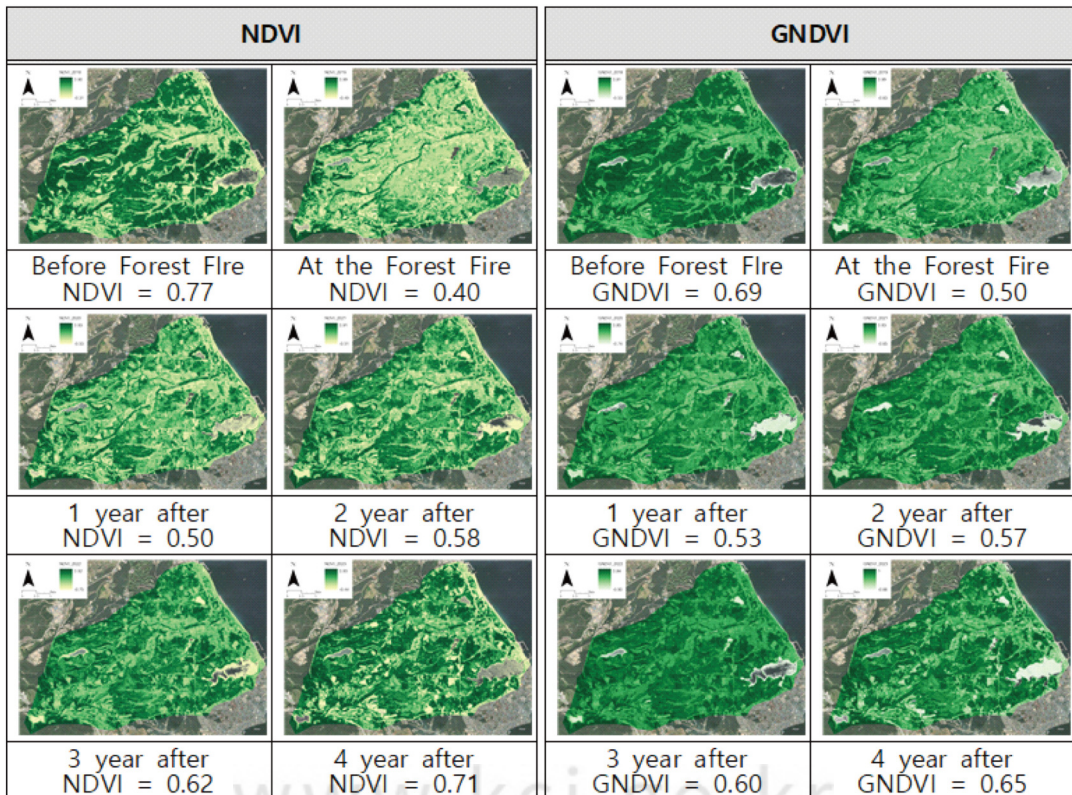


Figure 4. Changes in NDVI and GNDVI after forest fires.

준의 식생 회복으로 돌아가려는 회복력은 NDVI와 GNDVI 모두 천연림에서 높게 분석되었다. 이러한 결과 산불 발생 이전 침엽수림의 비율이 높았던 인공림에 비해 활엽수림의 비율이 상대적으로 높았던 천연림에서 더 많은 잔존목이 생존했으며 잔존목의 맹아갱신 및 매토종자로 인해 식생 회복력이 상대적으로 높게 평가된 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 Sentinel-2B 위성 영상과 임상도를 활용하여 대규모 산불 피해 지역의 정규탄화지수 및 정규식생지수와 녹색정규식생지수를 분석하였다. 이를 통해 산불 피해 면적뿐만 아니라 임상에 따른 산불 피해 강도를 정량적으로 평가하였으며 복원 방법에 따른 식생 회복력을 평가하였다.

연구 대상지 대부분은 소나무 순림 형태로 산불 피해에 취약한 특성을 보였다. 산불 피해 강도가 높은 지역에서는 침엽수림의 비율이 높고, 혼효림과 활엽수림의 비율이 낮은 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 침엽수림 비율이 높을수록 산불 피해 강도가 높았음을 시사하며 최근 연구 결과(Noh and Choi 2022)와 일치한다. 이에 향후 소나무 순림의 복원 형태보다는 혼효림, 내화수림대 등의 형태의 숲 구조로의 복원 방향을 정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 산불 확산 인자 중 임상에 따른 산불 강도를 평가하고 복원 방법에 따른 식생 회복력을 정량적으로 비교한 논문으로 의의가 있다고 할 수 있다. 이를 통해 내화수림대 조성을 위한 수종 제시하고 산불 피해 지역에 적합한 복원 방법을 선택하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 정책적 활용도를 높이기 위해서는 다양한 요소들의 추가적인 분석이 필요하다. 특히 피해 지역의 경사, 토양, 식재 방법 등 세부적인 환경 요소들을 고려하여, 미피해지와 구성적, 기능적 차이를 구명할 때 보다 정확한 복원 효과 분석이 이루어질 것으로 판단된다. 또한 산불 피해 이전의 산림이 제공했던 서식처 제공, 생물다양성, 수량공급, 침식방지, 경관 가치 등 생태계서비스를 정량적으로 산출하여 복원 방

법에 따른 효과를 비교할 때 의사결정자들에게 비교적 신속하고 구체적인 정보를 제공해줄 수 있을 것으로 사료된다.

향후 연구 대상지 숲의 기능 변화에 대한 현장 조사 예정이며 주변부 온전한 식생과의 비교를 통해 피해지와 구성적, 기능적 차이를 구명할 것이다. 또한 비슷한 수준의 연구 대상지를 선정하여 사례 연구를 진행할 예정이며 결과를 바탕으로 InVEST 모델을 활용하여 산불 전후 생태계서비스 물리량 변화를 산출하고 다각적인 시각에서 산불과의 관계를 제시할 예정이다.

사사

본 연구는 국립생태원 생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립(NIE-고유연구-2023-3)" 및 "기후변화 적응을 위한 의사결정형 통합 영향평가 모형요소 기술개발:생태계(2022003570001)"의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Brewer CK, Winne JC, Redmond RL, Opitz DW, Mangrich MV. 2005. Classifying and mapping wildfire severity, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71(11): 1311-1320.
- Cho SH, Lee GS, Hwang JW. 2020. Drone-based vegetation index analysis considering vegetation vitality. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 23(2): 21-35. [Korean Literature]
- Choi KY, Kwon WT. 2008. Current and Future Changes in the Type of Wintertime Precipitation in South Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 43(1): 1-19. [Korean Literature]
- Cocke AE, Fule PZ, Crouse JE. 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced

- Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14(2): 189-198.
- DeBano LF, Neary DG, Ffolliott PF. 1998. Fire's effects on ecosystems, John Wiley and Sons: New York, NY.
- Doerr SH, Shakesby RA, Blake WH, Chafer CJ, Humphreys GS, Wallbrink PJ. 2006. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 319(1-4): 295-311.
- Fassnacht FE, Schmidt-Riese E, Kattenborn T, Hernandez J. 2021. Explaining Sentinel 2-based dNBR and RdNBR variability with reference data from the bird's eye (UAS) perspective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, p. 95.
- Genevieve R, Mochael S, Frederic B. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55: 95-107.
- Key CH, Benson NC. 2006. Landscape assessment (LA). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system, 164, LA-1.
- Kim DH, Ko JS, Choi SW, Kim KI. 1999. A study on fire investigation and calorie analysis of main trees in Go-sung wildfire land. *Korean Institute of Fire Science and Engineering*, 13(1): 12-334.
- Kim YH. 2022. A Study on the Recovery Rate of Vegetation in Forest Fire Damage Areas using Multi-Spectral data. *Sungkyunkwan University, Master thesis*, p. 97.
- Korea Forest Service. 2022. *Forest Fire Statistics*, 128: 154.
- Korea Forest Service. 2023. *Statistical yearbook of Forestry*, p. 160.
- Kunert N, Mercado Cardenas A. 2015. Are mixed tropical tree plantations more resistant to drought than monocultures?. *Forests*, 6(6): 2029-2046.
- Kurnaz B, Bayik C, Abdikan S. 2020. Forest fire area detection by using Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images: A case study in Mugla. Turkey.
- Lee SY, Kang YS, An SH, Oh JS. 2002. Characteristic Analysis of Forest Fire Burned Area using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 5(1): 20-26. [Korean Literature]
- Li F, Miao Y, Feng G, Yuan F, Yue S, Gao X, Chen X. 2014. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, 15: 111-123.
- Lim JH, Kim JH, Bae SW. 2012. Natural Regeneration Patten of Pine Seedings on the Burned Forest Site in Gosung. Korea, 14(4): 222-228.
- Morgan P, Neuenschwander LF. 1988. Shrub response to high and low severity burns following clearcutting in northern Idaho. *Western Journal of Applied Forestry*, 3(1): 5-9.
- National Geographic Information Instiute. 2021. *National Land Satellite Center Research Report*. pp. 124-125. [in Korean]
- National Institute of Forest Science. 2010. *Post-Fire Restoration-To Establish a Healthy and Sustainable Forest Ecosystem*, Korea Forest Service. pp. 7-60.
- Noh JS, Choi JY. 2022. Normalized Difference Vegetation Index based on Landsat Images Variations between Artificial and Natural Restoration Areas after Forest Fire. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 25(5): 43-57. [Korean Literature]
- Roy DP, Boschetti L, Trigg SN. 2006. Remote sensing of fire severity: assessing the performance of

- the normalized burn ratio, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1): 112-116.
- SentinelHub. Sentinel-hub. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>, 2023.11.02.
- Shaver TM, Khosla R, Westfall DG. 2006. Utilizing green normalized difference vegetation indices (GNDVI) for production level management zone delineation in irrigated corn. In *The 18th World Congress of Soil Science*.
- Silverio E, Duque-Lazo J, Navarro-Cerrillo RM, Perena F, Palacios-Rodriguez G. 2020. Resilience or vulnerability of the rear-edge distributions of *Pinus halepensis* and *Pinus pinaster* plantations versus that of natural populations, under climate-change scenarios. *Forest Science*, 66(2): 178-190.
- Teodoro A, Amaral A. 2019. A statistical and spatial analysis of Portuguese forest fires in summer 2016 considering Landsat 8 and Sentinel 2A data. *Environments*, 6(3): 36.
- Van Wagtenonk JW, Root RR, Key CH. 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote sensing of environment*, 92(3): 397-408.
- Wang GG. 2002. Fire severity in relation to canopy composition within burned boreal mixedwood stands. *Forest Ecology and Management*, 163(1-3): 85-92.
- White JD, Ryan KC, Key CC, Running SW. 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6(3): 125-136.
- Won MS, Koo KS, Lee MB. 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.
- Xingwang F, Yuanbo L. 2016. A global study of NDVI difference among moderate-resolution satellite sensors. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 121: 177-191.
- Zennir R, Khallef B. 2023. Forest fire area detection using Sentinel-2 data: Case of the Beni Salah national forest Algeria. *Journal of Forest Science*, 69: 33-40.