

NDVI 평균-분산 도표를 활용한 산불피해지 복원 방법별 식생 회복 경향 분석*

김인화¹⁾ · 김윤지²⁾ · 정혜인²⁾ · 신유진¹⁾ · 이상욱¹⁾ · 정다영¹⁾ · 전성우³⁾

¹⁾고려대학교 환경생태공학과 학생 · ²⁾고려대학교 오정리질리언스센터 교수 ·

³⁾고려대학교 환경생태공학부 교수

Analysis of Vegetation Recovery Trends by Restoration Method in Wildfire-Damaged Areas Using NDVI Mean-Variance plot

Kim, In-hwa¹⁾ · Kim, Yoon-Ji²⁾ · Chung, Hye-In²⁾ · Shin Yu-jin¹⁾ · Lee, Sang-Wook¹⁾ ·
Jeong, Da-yong¹⁾ and Jeon, Seong-Woo³⁾

¹⁾Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Student,

²⁾Ojeong Resilience Institute, Korea University, Professor,

³⁾Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Professor.

ABSTRACT

With the increasing wildfire damage driven by climate change, it is crucial to assess the effectiveness of restoration efforts on a large scale. The majority of forests in Korea are situated in rugged mountainous regions, making it challenging to monitor large-scale wildfires. Consequently, establishing methodologies that use satellite imagery to evaluate restoration effectiveness is essential. This study aims to assess the recovery trends of ecosystems in wildfire-affected areas using NDVI mean-variance plots, which monitor changes in NDVI mean and variance over time through satellite imagery and visually represent the restoration process. The analysis of NDVI mean-variance plots for different restoration methods revealed that landscape restoration had the slowest recovery. This slower recovery is likely due to reduced growth from the complete removal of damaged trees. In contrast to High Severity (HS) areas, Moderate High Severity (MHS) areas showed that commercial afforestation, revegetation, ecological forest treatment led to a more stable recovery state post-disturbance, suggesting

* 본성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 "신기후체제 대응 환경기술개발사업"의 연구개발을 통해 창출되었습니다. (2022003570003)

First author : Kim, Inhwa, Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Student,
Tel : +82-2-3290-3543, Email : jadekim2082@daum.net

Corresponding author : Jeon, Seongwoo, Division of Environmental Science & Ecological Engineering,
Korea University, Professor,
Tel : +82-2-3290-3543, Email : eepps_korea@korea.ac.kr

Received : 13 August, 2024. **Revised** : 25 September, 2024 **Accepted** : 25 September, 2024

that areas with lower wildfire severity may recover more quickly. Furthermore, the recovery trends between artificial and natural restoration showed no significant difference, indicating that natural restoration can have similar restoration effects to artificial restoration in appropriate areas. Therefore, the study emphasizes the need to expand natural restoration areas, considering ecological and economic benefits such as increased biodiversity and genetic resource conservation. This research provides critical baseline data for the formulation and implementation of restoration policies in large-scale wildfire-affected regions and is expected to contribute significantly to the development of effective management strategies and monitoring techniques.

Key Words : *NDVI mean-variance plot, forest fire recovery, vegetation restoration, Remote Sensing, NBR*

I. 서론

최근 기후변화의 가속화로 인해 산불 발생 빈도와 강도가 높아지고 있으며, 이로 인한 피해 면적도 확대되고 있다(Jones et al., 2020; Djalante, 2019). 지난 10년간(2014~2023년) 우리나라의 산불발생현황은 평균 567건, 면적 4,004ha 수준으로 확인되었다. 2000년대, 2010년대와 비교했을 때 발생 건수는 유사하지만, 피해 면적이 각각 4,643ha, 7,512ha가 증가했음을 보여준다. 이는 건조한 환경과 부엽층의 증가로 인해 산불이 쉽게 대형화되는 경향을 나타낸다(Korea Forest Service, 2023). 지역별로는 강원 지역에서 78.4건(면적 1,101.36ha), 경북 지역에서 92.4건(면적 2,110.47ha)로 동해안 지역에서 대형산불이 많이 발생하였는데(Korea Forest Service, 2023), 이는 동해안 지역의 험준한 산악지형과 봄철에 태백산맥을 넘어오는 고온건조 성질을 띤 바람이 높은 강도로 부는 환경적 요인 때문이다.

우리나라 산림은 대부분 험준한 산악지형으로 대형산불 발생 및 피해지 복원 과정에서 접근이 어렵기 때문에, 신속한 산불 발생 및 피해 탐지를 위해 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 원격탐사 기법을 활용한 산불 피해지 탐지 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Youn and Jeong, 2020; Hwang et al., 2022). 위성영상을 활용하면 토지피복의 상태변화를 시

계열적으로 파악할 수 있어 산불 발생 지역의 복원 양상을 주기적으로 분석하는데 효과적이기에(Seong et al., 2015), 위성영상을 활용하여 산불 피해지의 모니터링과 회복 경향을 파악한 연구들이 있다. Noh and Choi(2022)은 위성영상을 활용하여 산불피해지역을 분류하고, 산불 피해강도별 산림유형을 파악하였으며, 인공 및 자연복원지의 정규식생지수(NDVI) 평균값의 변화 경향을 분석하였다. Hwang et al(2022)는 인공 및 자연복원 방법별 동해안 산불 피해지역의 식생회복 추이를 상대탄화지수(dNBR)와 NDVI를 이용하여 비교하였으며, Cheon et al(2023)는 Sentinel-2B 영상과 임상도를 활용하여 산불 피해 면적을 산출하고, 식생지수(NDVI, GNDVI)를 구축하여 복원방법에 따른 식생 회복력을 -1~1 범위에서 정량적으로 분석하였다. 산불 피해지역의 자연복원지와 인공복원지역의 식생회복양상에 대해 식생지수를 바탕으로 모니터링한 연구는 다수 존재하지만, 재해 전후의 단순 비교에 그쳐 시간 흐름에 따른 생태계의 상태변화, 즉 회복의 경향을 충분히 보여주지 못했다.

본 연구는 산불피해지역의 복원을 효과적으로 모니터링하고 시계열적으로 분석하기 위해, NDVI 평균과 분산을 활용하였다. Pickup and Foran(1987)이 제안한 NDVI 평균-분산 도표(NDVI mean-variance plot)는 교란 이후 생태계의 상태변화를 시간 흐름에 따라 분석하는데 널리 사용되며,

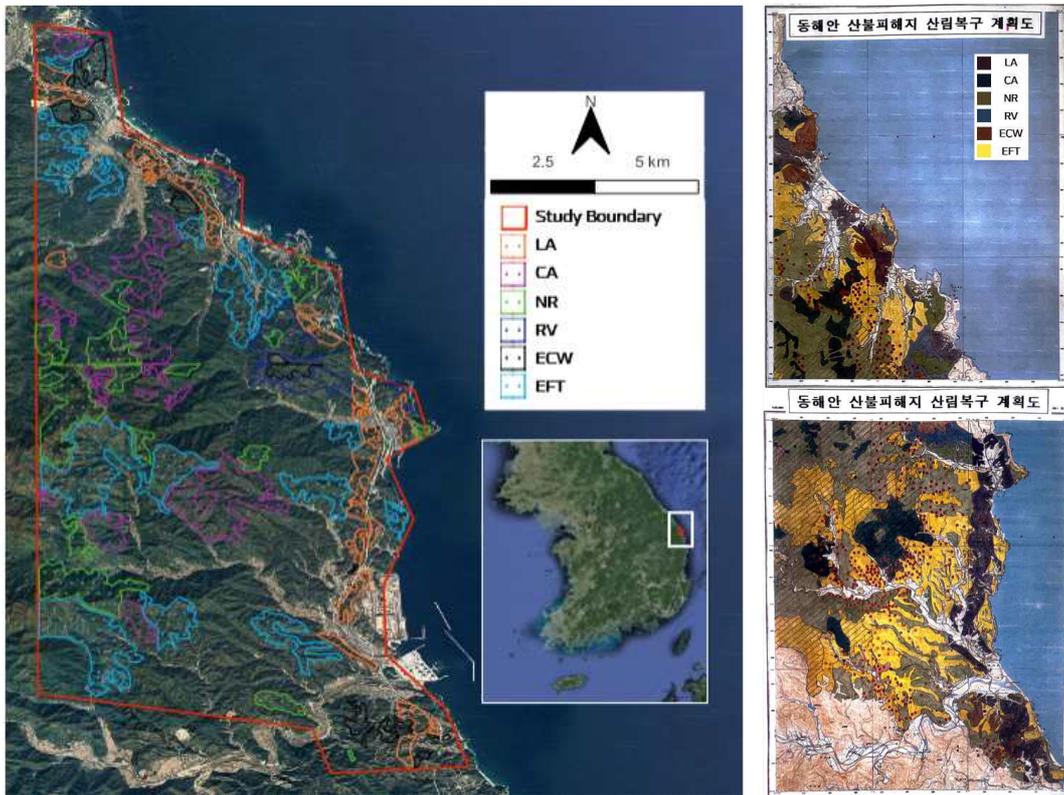


Figure 1. Study boundary map & Forest recovery plan for wildfire-damaged areas on the east coast (Source: East Coast Wildfire Damage Joint Investigation Team, 2000) (LA: Landscape Afforestation, CA: Commercial Afforestation, NR: Natural Restoration, RV: Revegetation, ECW: Erosion Control Work, EFT: Ecological Forest Treatment)

각 단위 시간에서 회복 경향을 시각적으로 확인할 수 있는 장점을 지닌다. 또한 여러 연구에서 특정 지역의 교란으로 인한 식생 동태를 분석하고 시계열적 변동을 모니터링하는데 해당 도표를 활용하였다(Muttiet et al., 2020; Pricope et al., 2015). 본 연구에서는 237.94km²의 피해면적과 1,072억원의 피해액을 남긴 2000년 4월 동해안 산불 이후, 산불 피해 정도와 복원 방법 차이에 따른 식생 회복 경향을 해당 도표를 통해 확인하였다. 이를 통해 산불피해지역에 조성된 자연복원지와 인공복원지에 대하여, 각 복원 방법에 따른 식생 회복 경향을 시각화함으로써 효과적인 복원 방법을 탐색하였다. 또한, 산불 피해 강도와 지역의 특성을 고려하여 복원 방법을 설정한 ‘산불피해지역 복구

의사결정 흐름도(East Coast Wildfire Damage Joint Investigation Team, 2000)’의 효과성을 확인하였다. 이를 통해 향후 산불 피해지역의 복원 정책의 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 2000년에 발간된 ‘동해안 산불지역 정밀조사 보고서’에 구축된 동해안 산불피해지 산림복구 계획도를 바탕으로 복원방법별 위치가 골고루 분포된 지역을 추출하여 연구대상지로 설정하였다(Figure 1). 설정된 연구대상지는 산불 발생 지역 중 삼척시 인근(근덕면 부남

Table 1. Spectral bands used for NBR and NDVI calculation in Landsat 5 and 8

Index	Landsat 5	Landsat 8
NBR	Band 4, 7	-
NDVI	Band 3, 4	Band 4, 5

리 인근 ~ 삼척시 원덕읍 원천리 인근)이며, 대상지역은 2000년 4월 7일부터 15일까지 발생한 대규모 산불 이후 체계적인 복원계획 수립을 통해 복원이 실시되었으며(East Coast Wildfire Damage Joint Investigation Team. 2000), 그 후 20년 이상이 경과되어 복원 방법에 따른 산림의 변화를 관찰하기에 적합한 지역으로 판단된다.

2. 연구재료

1) 영상자료

본 연구에서는 대상지의 산불피해 전부터 현재까지의 식생 변화를 시계열적으로 모니터링하기 위해 Landsat 위성영상자료를 활용하였다. USGS에서 제공하는 Landsat 5, 8의 Level 2, Collection 2, Tier1 데이터를 활용하였으며, 해당 데이터는 30m의 공간해상도를 가진다. 본 연구에서 상대정규화지수(dNBR)와 정규식생지수(NDVI) 계산에 활용된 Landsat 밴드는 Table 1과 같으며, Landsat 8의 경우 2013년 4월부터 영상을 제공하고 있어, 이전 시기 영상에 대해서는 Landsat 5를 활용하였다.

날씨와 계절적 요인으로 인한 dNBR과 NDVI 값의 차이를 줄이기 위해 QA밴드를 활용하여 구름과 눈이 있는 부분을 마스킹하였고, 클라우드 기반의 위성자료 분석 플랫폼인 Google Earth Engine을 활용하여 1994년부터 2023년을 6개의 시기(1994~1998년, 1999~2003년, 2004~2008년, 2009~2013년, 2014~2018년, 2019~2023년)로 나누어 각 시기별 Median 값을 사용하였으며, 식물의 성장기인 5~9월의 영상을 사용하였다.

2) 동해안 산불지역 정밀조사 보고서

2000년도 동해안 산불피해지역의 복원계획을

수립하는 과정에서 각 분야의 의견이 상이하게 나타나, 이를 종합하여 하나의 통일된 복원계획을 결정할 필요성이 대두되었다. 따라서 산림청, 환경부, 강원도, 시민단체가 추천하는 176명의 전문가들이 참여하는 ‘동해안 산불피해지 산림복구계획 수립을 위한 민관 공동조사단’이 구성되었다(East Coast Wildfire Damage Joint Investigation Team. 2000). 이들은 현지조사를 바탕으로 복원계획을 수립하였으며, 수립된 복원계획은 다음과 같다(Figure 2).

동해안 산불피해지 중 수관층이 유지된 지역과 수관층 소실 후 맹아가 발생한 자연림 지역 중 피도가 적절히 유지되는 지역에는 피해목을 존치하는 자연복원(Natural restoration;NR)방법이 적용된다. 맹아발생지역 중 주택·농경지·도로 주변에서 산사태가 우려되어 응급복구가 필요한 지역에는 피해목을 가능한 존치하는 사방복구(Erosion control work;ECW) 방법이 적용된다. 국도 및 시가지 주변, 문화 경관자원 및 관광지 주변에는 향토성 및 계절성을 고려하여 경관적으로 적합한 수종(주로 꽃나무를 위주로 산주가 희망하는 수종)을 식재하는 경관림 조성(Landscape Afforestation;LA)이 이루어졌으며, 이때 피해목은 모두 벌채되었다.

수관층 소실 후 맹아발생지역에서 임지생산력이 ‘중’ 이상인 곳에는 자연림·인공림 모두 경제조림(Commercial Afforestation;CA)이 이루어지며, 피해목은 피해 대상만 벌채되고, 산주가 주로 희망하는 용재수와 유실수를 중점적으로 조림된다. 맹아발생지역 중 인공림 내 임지생산력 ‘중’ 미만인 곳에는 경제성보다는 녹화를 우선으로 하는 녹화조림(Revegetation;RV)이 이루어지며, 해당 지역 내 피해목은 존치되고 리기

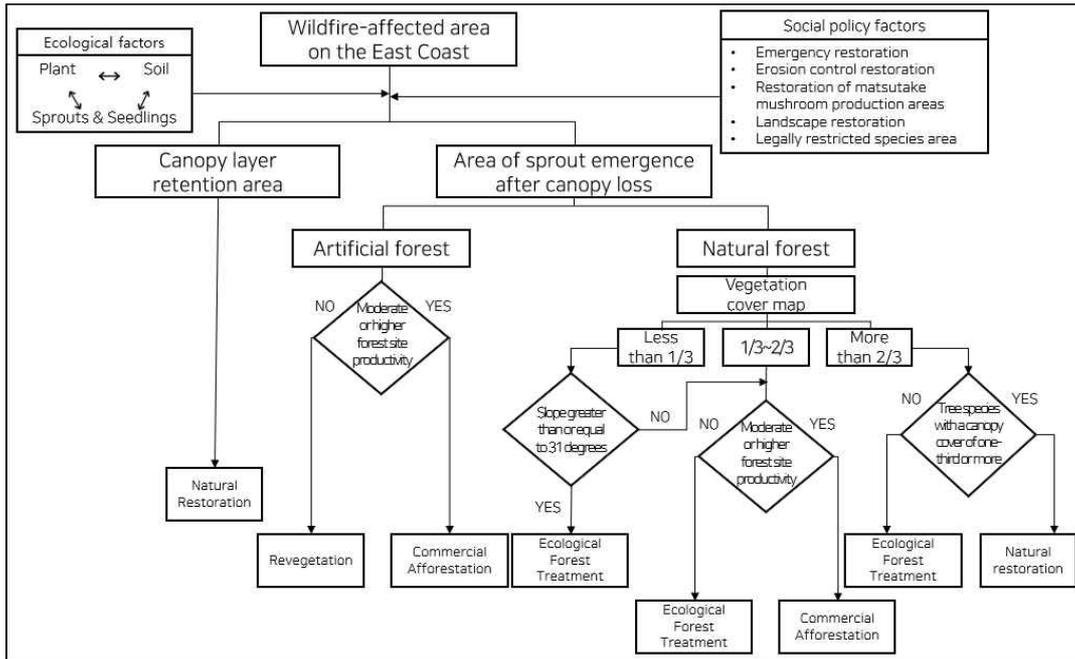


Figure 2. Decision-making flowchart for restoration of wildfire-damaged areas (Source: East Coast Wildfire Damage Joint Investigation Team, 2000)

테다소나무, 물오리나무 등이 조림된다. 마지막으로 생태시업(Ecological Forest Treatment;EFT)의 경우, 자연림 중 경제조림지와 자연복원지를 제외한 곳에 시행되었으며, 식생유입촉진 및 토양안정을 위해 경사도 31도 이상인 곳에는 직파조림이, 경사도 31도 미만인 곳에는 보완식재가 이루어진다.

3. 연구방법

1) Normalized Burn Ratio(NBR)

정규탄화지수(NBR)는 식생에 민감한 근적외선(NIR: Near Infrared Spectrometer) 파장대와 토양 수분에 민감한 단파 적외선(SWIR: Short Wavelength Infrared) 파장대를 이용하여 산불피해지의 구획 및 피해강도를 분석하는데 적합하다 (García and Caselles, 1991; Won et al, 2007). 산불 발생 전후 영상에서 각 NBR 값을 산출하고, NBR의 차이인 상대탄화지수(dNBR: Difference Normalized Burn Ratio)를 계산하여 이를 바탕으로

로 산불피해지를 구분하고, 산불피해 강도를 분석하였다. USGS에서 제공하는 산불 피해기준은 High Severity, Moderate-high severity, Moderate-low severity, low severity, Unburned의 5개 구간으로 나뉜다(Figure 3). 본 연구에서도 전체 연구지역을 이 5개의 산불 피해 등급으로 분류하여 각 등급 내 복원 방법을 구분하고, 산불 피해별 및 복원 방법별 효과성을 분석하였다.

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

$$dNBR = pre\ fire\ NBR - post\ fire\ NBR$$

Severity Level	dNBR Range
Unburned	-0.1 ~ 0.099
Low Severity	0.1 ~ 0.269
Moderate Low Severity	0.27 ~ 0.439
Moderate High Severity	0.44 ~ 0.659
High Severity	0.66 ~ 1.3

Figure 3. Fire severity levels, proposed by USGS (Fassnacht et al. 2021)

2) NDVI 평균-분산 도표

NDVI 평균-분산 도표는 Pickup & Foran (1987)에 의해 제안되었으며, 교란 이후 특정 영역의 회복 단계를 평가하고 생태계 상태를 시간의 흐름에 따라 분석하는 데 널리 사용된다 (Rezaei and Ghaffarian, 2021; Cui et al., 2013). 이 도표는 Heterogeneity(이질성, NDVI 분산)와 Greenness(녹색성, NDVI 평균)를 기준으로 4개의 사분면으로 구성된다(Figure 4). 왼쪽 아래 사분면(Q1)은 낮은 이질성과 녹색성을 특징으로 하며, 비교적 균일하게 활력이 낮은 식생이 분포하여 황폐화된 경관을 나타낸다. 왼쪽 위 사분면(Q2)은 높은 이질성과 낮은 녹색성을 보이며, 나지로 인해 식생 사이에 간격이 있는 경관을 나타낸다. 오른쪽 위 사분면(Q3)은 높은 이질성과 녹색성을 가지며, 이는 Q2보다 더 많은 식생 피복을 보이지만, 일부 지역은 활력도가 매우 높은 식생을, 다른 일부는 그렇지 않은 상태를 나타낸다. 오른쪽 아래 사분면(Q4)은 낮은 이질성과 높은 녹색성을 나타내며, 활력도가 높은 식생이 균질하게 분포하는 이상적이고 안정적인 식생 조건을 의미하며, Q4에서 멀어질수록 경관의 황폐화를 나타낸다 (Muttiet et al., 2020; Pricope et al., 2015).

시간 경과에 따른 NDVI 평균-분산 도표의 변화를 궤도로 그리게 되면, 특정 지역의 생태계가 안정되고 있는지를 시각적으로 파악할 수 있으며, 식생 회복의 지속성을 평가할 수 있다. Washington-Allen et al. (1998)에 따르면 교란이 환경에 미치는 영향을 평가하고 해석하는 기준인 기준 상태(Q4, 교란 전)를 바탕으로 교란 이후 Q1 → Q2 → Q3 → Q4의 궤도를 그리며 피해 지역이 회복하는 양상을 보인다. 즉, 교란 발생 전을 기준으로 교란 후 이질성은 증가하고, 녹색성은 감소하였다가, 녹색성이 증가한 후 이질성이 감소하는 추세를 보인다. 또한, 이질성이 감소하는 추세라면 식생이 균일하게 회복되고 있음을 의미하고, 이질성이 증가하는 추세라면

회복이 불균일하게 진행되고 있거나 새로운 교란이 발생했음을 의미할 수 있다.

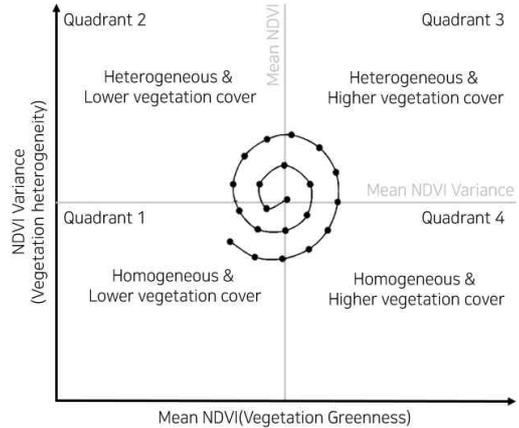


Figure 4. Relationship between mean-variance of the vegetation index and vegetation status (Reconstructed based on: Muttiet et al., 2020; Rezaei and Ghaffarian, 2021)

III. 연구결과

1. 산불 강도에 따른 지역 구분

산불 피해 강도 구분을 위해 상대정규탄화치수(dNBR)를 바탕으로 대상지를 5개의 등급으로 구분하였다. 이 등급은 High Severity(HS), Moderate High Severity(MHS), Moderate Low Severity(MLS), Low Severity(LS), Unburned(UB)로 나뉘며, 각 등급의 면적과 비율을 비교하였다(Figure 5, Table 2). 분석 결과, 가장 많은 비율을 차지하는 등급은 MHS로 전체 면적의 약 30%를 차지하였다. 그 다음으로는 LS, MLS, UB, HS 순으로 비율이 높았다. 이러한 결과는 해당 지역 내 산불 피해가 MHS 수준에서 집중되었음을 나타내며, 이는 해당 지역이 상당한 수준의 산불 피해를 입었음을 의미한다.

2. 산불 피해 등급별·복원 방법별 분석 결과

대상지 내 산불 피해 등급과 복원 방법을 구분하여 그 면적과 비율을 비교하였다(Table 3).

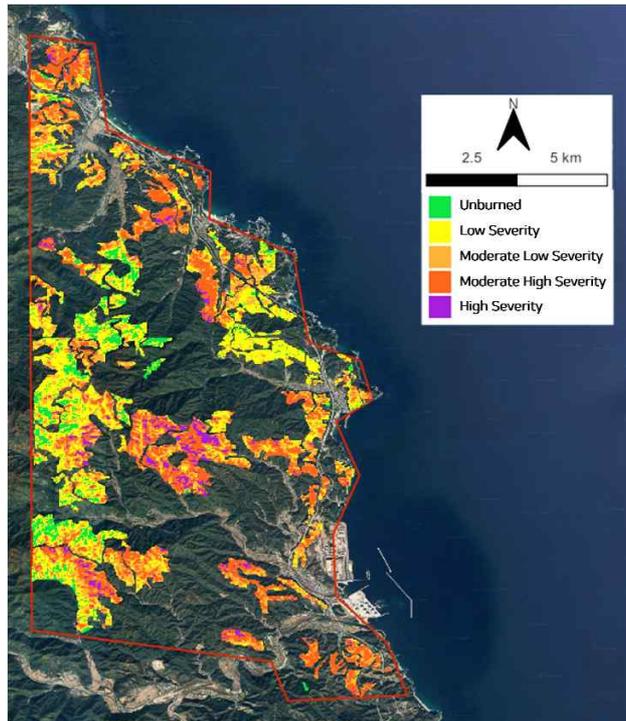


Figure 5. Classification of Wildfire Damage Severity

Table 2. Area and Proportion of Wildfire Damage Severity Grade

	HS	MHS	MLS	LS	UB	Total
Area(km2)	1.951	14.23	12.166	13.523	4.07016	45.94
Proportion(%)	4.2468	30.974	26.483	29.436	8.8597	100

Table 3. Area and proportion of wildfire damage severity grade and restoration method

		HS	MHS	MLS	LS	Total
LA	Area(m2)	88,792	2,019,772	1,895,960	1,411,649	5,416,173
	Proportion(%)	0.21	4.82	4.53	3.37	13%
CA	Area(m2)	800,129	3,232,867	2,245,943	1,981,838	8,260,777
	Proportion(%)	1.91	7.72	5.36	4.73	20%
NR	Area(m2)	98,618	966,447	1,966,036	4,345,437	7,376,538
	Proportion(%)	0.23	2.3	4.69	10.37	17%
RV	Area(m2)	2,579	188,345	456,027	1,450,335	2,097,286
	Proportion(%)	0.006	0.45	1.08	3.46	5%
ECW	Area(m2)	33,156	1,477,116	601,844	500,025	2,612,141
	Proportion(%)	0.08	3.52	1.43	1.19	6%
EFT	Area(m2)	927,704	6,345,163	5,000,504	3,833,713	16,107,084
	Proportion(%)	2.21	15.15	11.94	9.15	38%

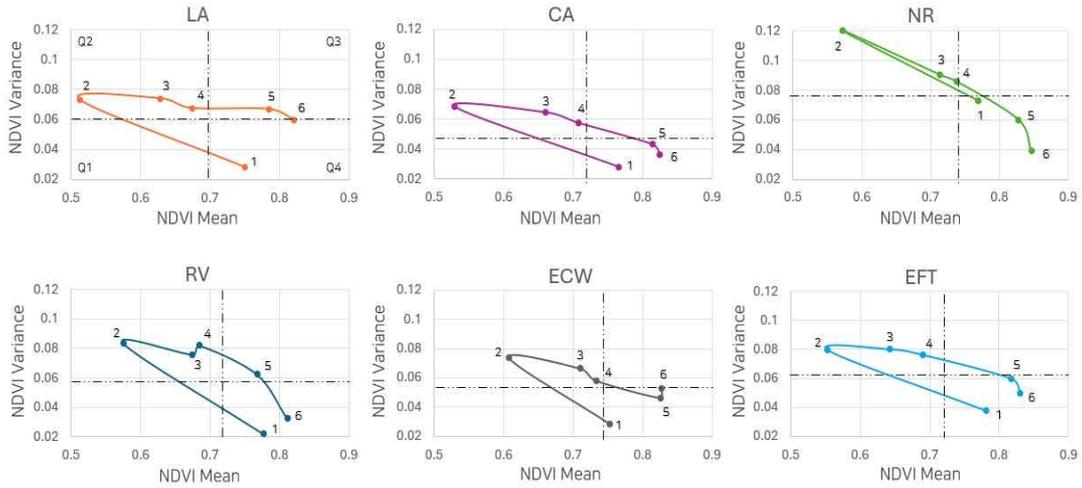


Figure 6. High severity NDVI mean-variance plot(1st: 1994~1998, 2nd:1999~2003, 3rd:2004~2008, 4th:2009~2013, 5th:2014~2018, 6th:2019~2023)

가장 많이 시행된 복원 방법은 생태시업이었으며, 자연복원과 녹화조림은 산불 강도가 약할 때 비교적 많이 시행되었다. 반면, 사방복구와 경제조림은 산불 강도가 강할 때 비교적 많이 시행되었다.

NDVI 평균-분산 도표를 활용한 분석에서는, 산불의 영향이 커 복원 시행 후 모니터링이 필요하고, 회복속도나 회복 경향을 잘 보여 줄 수 있는 HS와 MHS 두 가지 피해 등급에 대하여 집중적으로 분석하였다.

1) High Severity(HS)

산불 강도가 가장 강한 영역(HS)에서 모든 복원 방법은 산불 발생 직전 Q4에서 직후 Q2로 이동한 후, 회복 과정에서 Q3를 거쳐 Q4에 이르는 공통적인 궤적을 보인다(Figure 6). 인공복원 방법인 경관, 경제, 녹화, 사방, 생태복원과 달리 자연복원은 산불 이전 기준 상태(첫 번째 시기, 교란 전)에서도 이질성이 높다는 특징을 보인다. 이는 자연복원 지역의 경우 활엽수림과 혼효림의 비율이 높아 NDVI가 높은 지역과 민가나 도로 등으로 인해 NDVI가 낮은 지역이 혼

재하여 균질하지 않은 NDVI 분포 특성을 나타내기 때문이다.

6개의 시기 중 네 번째 시기에서 자연복원 방법이 가장 빠르게 기준 상태의 NDVI 평균과 분산 값에 도달하여 가장 빠른 회복 경향을 보였는데, 이러한 결과는 산불 발생 후 NDVI 평균을 기준으로 천연림과 인공림의 식생 회복력을 평가한 선행 연구들의 결과와 유사하게 나타났다(Cheon et al., 2023; Noh and Choi, 2022). 다섯 번째 시기에서는 모든 복원 방법에서 녹색성이 기준 상태보다 높아졌으나, 이질성의 경우 자연복원 방법만이 기준 상태로 회복되어 해당 영역의 피복 상태가 기준 상태보다 더 균질해졌음을 보여준다. 자연복원의 경우 기준 상태에서 이질성이 높았기에 해당 값으로 회복하는 것이 더 쉬울 수 있으나, 교란 직후인 두 번째 시기 대비 회복률을 고려하면 자연복원이 더 탄력적인 회복 경향을 보인다.

여섯 번째 시기에서 녹화, 경제, 자연, 생태복원 모두 Q4에 도달해 이상적인 상태를 보이나, 경관림 조성 방법은 여섯 번째 시기에 가까스로 Q4에 진입하여 가장 늦은 회복 경향을 보인다.

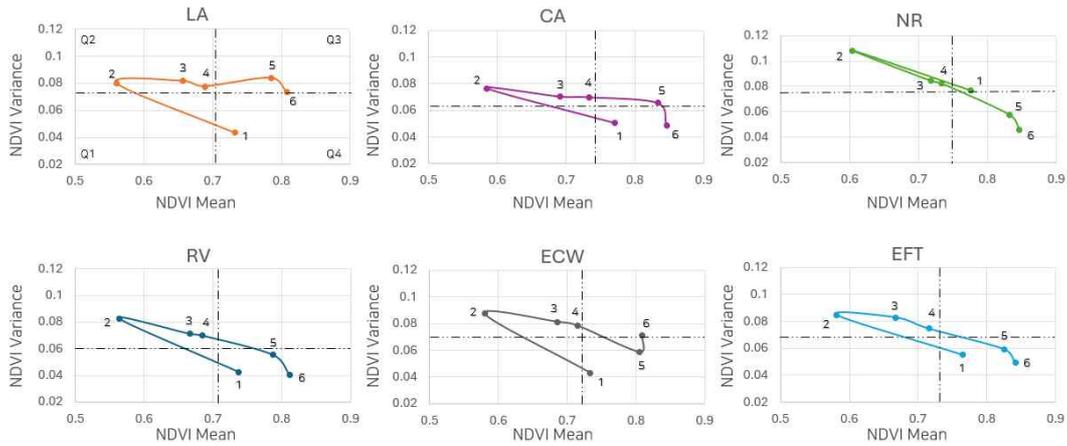


Figure 7. Moderate high severity NDVI mean-variance plot(1st: 1994~1998, 2nd:1999~2003, 3rd:2004~2008, 4th:2009~2013, 5th:2014~2018, 6th:2019~2023)

이는 피해목 모두 벌채로 인해 식물에 수분 스트레스를 주어 성장 저해를 초래하는 경관림 조성 방법의 영향으로 볼 수 있다(신유승 외, 2014). 마지막으로 사방복구 방법은 여섯 번째 시기에 이질성이 높아지는데, 이는 지역 내 일부 구간이 스트레스를 받고 있거나 새로운 교란을 바탕으로 새로운 체제의 시작일 가능성을 시사한다(Cui et al., 2013).

2) Moderate High Severity(MHS)

Moderate High Severity(MHS) 산불 피해 등급에서도 대부분의 복원 방법은 HS 등급의 산불 피해지역과 유사한 궤적(Q4 → Q2 → Q3 → Q4)을 따르지만, 자연복원의 경우 기준 상태가 Q4가 아닌 Q3에 있다는 차이가 있다. HS 등급에서와 마찬가지로, 다섯 번째 시기에서 모든 복원 방법의 녹색성이 기준 상태보다 높아졌다. 이질성의 경우 자연복원 방법만이 기준 상태보다 더 낮아져 자연복원 방법이 가장 탄력적인 회복 경향을 보였다. 여섯 번째 시기에서도 HS 등급과 유사하게 경관림 조성방법이 가장 늦게 Q4에 진입하여 느린 회복 경향을 보였으며, 사방복구의 경우 이질성이 증가하여 Q4에서 벗어

나는 현상을 보였다. 이는 지역 내 일부 구간이 교란을 받거나 새로운 체제가 시작된 것이라 볼 수 있다.

HS 등급과는 달리, 경제, 녹화, 생태복원 방법에서는 기준 상태보다 더 높은 녹색성과 더 낮은 이질성을 보여주며, 교란 이후 산림이 더 안정적인 상태로 회복되었음을 보여준다. 이러한 결과는 산불 피해 정도가 약할수록 회복 속도가 더 빠를 수 있음을 시사한다. 이는 Ryu et al.(2018)의 연구 결과와 유사한데, 이 연구에서는 낮음과 보통 심각도를 보인 dNBR 지역의 NDVI 평균이 9년 내에 회복된 반면, 피해 정도가 높은 지역은 더 많은 시간이 필요했음을 밝혔다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구는 대규모 산림 피해 회복 경향에 대한 모니터링 필요성이 강조됨에 따라, 위성영상을 바탕으로 제작된 NDVI 평균-분산 도표를 통해 교란 이후 생태계의 상태를 평가하는 방법론을 제시하였다. 기존 연구들이 NDVI 평균에만 초점을 맞췄던 것과 달리, 본 연구는 NDVI 분

산(이질성)을 추가적인 평가기준으로 활용하여 복원방법별 식생 회복의 지역적 균등성을 분석할 수 있다는 장점을 갖는다. NDVI 평균값으로는 전반적인 식생회복의 효과를 파악할 수 있지만, NDVI 분산을 고려하면 회복이 특정 지역에만 집중되었는지, 전 지역에 고르게 이루어졌는지를 명확하게 평가할 수 있다. 이는 대규모 산불피해 지역의 장기적 회복 모니터링과 평가에 있어 중요한 도구로 활용될 수 있다.

해당 도표를 활용하여 2000년 강원도 삼척시 원덕읍 일대에서 발생한 대규모 산불 피해지역의 식생 회복 경향을 분석한 결과, 산불 직후 전 지역에서 녹색성(NDVI 평균)은 감소하고 이질성(NDVI 분산)은 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 산불 피해 강도가 높은 지역일수록 더 뚜렷했다. 또한, 산불 발생 이후 모든 복원 방법은 비슷한 회복 경향을 보였으며, 복원 방법별 회복 경향의 변화에 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 자연복원이 적합한 지역에서는 인공복원과 유사한 복원 효과를 가질 수 있음을 시사하며, 생물다양성 증대와 유전자원 보호 등 다양한 생태적 및 경제적 가치를 고려하여 자연복원 면적을 확대하는 것이 중요함을 보여준다. 또한, 이러한 결과를 통해 피해 정도 및 입지 환경특성 등을 고려하여 생태·사회·경제적 요구에 부응하는 산림복원 방법을 설정한 ‘산불피해지역 복구 의사결정 흐름도(2000)’의 효과성을 확인하였다. 그러나 해당 연구에서 활용된 2000년 산불 피해지 복구 흐름도는 2006년 수정된 산불 피해지 의사결정 흐름도와는 차이가 있다. 수정된 흐름도에서는 자연복원 대상지가 산림의 6대 기능 중 자연환경보전립으로 구분되는 지역 또는 자연력이 높은 지역(상수리나무와 굴참나무의 맹아 발생이 왕성한 지역)으로 축소되었으나, 해당 연구 결과는 자연복원의 비율을 확대할 필요가 있음을 시사한다.

본 연구는 ‘2000 동해안 산불 보고서’ 내의 산림 복구 계획도에 기반하였으나, 계획 이행

여부를 검토하지 못한 한계가 있다. 또한 위성 영상에서 장기간의 median 값을 활용해 NDVI를 구축하였기에 변동폭과 식생 유형의 특성이 충분히 반영되지 않은 제한점도 존재한다. NDVI 만을 활용한 회복 경향 분석 또한 지형과 토양 인자 등의 영향을 고려하지 못했기에, 향후 이러한 환경 요인을 포함한 추가 연구가 필요하다. 이는 복원 방법의 효과성을 더욱 정확히 평가하고, 다양한 환경 요인이 식생 회복 과정에 미치는 영향을 이해하는 데 기여할 것이다.

본 연구는 복원 방법 의사결정 흐름도를 보완하는 기초자료로 활용될 수 있으며, 특히 산불 강도에 따른 복원 방법의 차별화를 위해 강도 분석을 추가할 수 있다. 또한, 복원 방법의 적절성 및 효과성을 파악하거나, 식생 회복의 장기적 모니터링을 통해 시각적인 회복 경향을 파악하는 데도 활용 가능하다. 이 연구는 대규모 산불 피해 지역의 복원 연구에 중요한 기초자료가 될 수 있으며, 향후 복원 정책 수립과 실행에 있어 유의미한 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Cheon GS · Cheon K and Park BB. 2023. A Study on the Recovery Rate of Vegetation in Forest Fire Damage Areas Using Sentinel-2B Satellite Images. *Environ. Impact Assess.* 32(6): 463-472.
- Cui X · Gibbes C · Southworth J and Waylen P. 2013. Using remote sensing to quantify vegetation change and ecological resilience in a semi-arid system. *Land.* 2(2):108-130.
- Djalante R. 2019. Key assessments from the IPCC special report on global warming of 1.5 C and the implications for the Sendai framework for disaster risk reduction. *Progress in Disaster Science.* 1:100001.

- East Coast Wildfire Damage Joint Investigation Team. 2000. Detailed Investigation Report on the East Coast Wildfire Area for Establishing Plans for Healthy Ecosystem Recovery and Permanent Forest Restoration. Volume 1. Korea Forest Service. National Institute of Forest Science.
- East Coast Wildfire Damage Joint Investigation Team. 2000. Detailed Investigation Report on the East Coast Wildfire Area for Establishing Plans for Healthy Ecosystem Recovery and Permanent Forest Restoration. Volume 2. Korea Forest Service. National Institute of Forest Science.
- García ML and Caselles V. 1991. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6(1): 31-37.
- Hwang YI · Kang WS · Park KH · Lee KC · Han SG and Kweon HK. 2022. Monitoring of Vegetation Recovery According to Natural and Artificial Restoration Methods After Forest Fire Damage Using Satellite Imagery. *Practical Agriculture and Fisheries Research*. 24(3) 33-43.
- Jones MW · Smith AJ · Betts R·Canadell JG · Prentice IC and Le QC. 2020. Climate change increases the risk of wildfires. *ScienceBrief Review*. pp.116-117.
- Kang HM · Choi SH · Kim DH and Song JT. 2017. A Study on the Restoration Effects of Vegetation Restoration Types. *Korean J. Environ. Ecol*. 31(2):174-187.
- Kim SI · Ahn DS and Kim SC. 2021. RGB Composite Technique for Post Wildfire Vegetation Monitoring Using Sentinel-2 Satellite Data. *Korean Journal of Remote Sensing*. 37(5): 939-946.
- Korea Forest Service. 2019. 2018 Annual Wildfire Statistics Report. Korea Forest Service.
- Korea Forest Service. . 2023. https://www.forest.go.kr/kfswweb/kfi/kfs/frfr/selectFrfrStats.do?mn=AR04_01_03
- Lee GS · Jeong YS · Kim SC · Shin SS · No CH and Park SD. 2004. Development of vegetation structure over the years following a wildfire in the East Coast affected area. *Korean J. Ecology*. 27(2): 99-106.
- Lim JH · Kim JH and Bae SW. 2012. Natural Regeneration Patten of Pine Seedlings on the Burned Forest Site in Gosung, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 14(4): 222-228.
- Lin WT · Lin CY and Chou WC. 2006. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan. *Ecological Engineering*. 28(1):79-89.
- Mutti PR · Lúcio PS · Dubreuil V and Bezerra BG. 2020. NDVI time series stochastic models for the forecast of vegetation dynamics over desertification hotspots. *International Journal of Remote Sensing*. 41(7): 2759-2788.
- National Institute of Forest Science. 2006. Wildfire Damage Restoration Manual for Healthy Ecosystem Recovery and Permanent Forest Restoration. Korea Forest Service.
- National Institute of Forest Science. 2010. Map of Wildfire Occurrences from 1991 to 2009. Korea Forest Service.
- Noh JS and Choi JY. 2022. Normalized Difference Vegetation Index based on Landsat Images Variations between Artificial and Natural Restoration Areas after Forest Fire. *Korean Env. Res. Tech*. 25(5):3-57.
- Ryu JH · Han KS · Hong KS · Park NW · Lee

- YW and Cho JI. 2018. Satellite-based evaluation of the post-fire recovery process from the worst forest fire case in South Korea. *Remote Sensing*, 10(6), 918.
- Pickup G and Foran BD. 1987. The use of spectral and spatial variability to monitor cover change on inert landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 23(2), 351-363.
- Pricope NG · Gaughan AE · All JD·Binford MW and Rutina LP. 2015. Spatio-temporal analysis of vegetation dynamics in relation to shifting inundation and fire regimes: disentangling environmental variability from land management decisions in a southern african transboundary watershed. *Land*. 4(3): 627-655.
- Rezaei R and Ghaffarian S. 2021. Monitoring forest resilience dynamics from very high-resolution satellite images in case of multi-hazard disaster. *Remote Sensing*, 13(20): 4176.
- Seong SY · Lee DG and Kim JY. 2015. Monitoring vegetation changes in the East Coast wildfire area using Landsat imagery based on restoration methods. *Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference*. 15-16.
- Shin YS · Song SH · Yang AR · Hwang JH and Park YM. 2014. Growth Characteristics of Trees following Different Types of Cutting in *Quercus acutissima* Stand. *Journal of Environmental Science International*, 23(6): 1075-1083.
- Song YK. 2018. Analysis of Urban Green Areas using NDVI and Development of a Model to Analyze Bird Diversity in Urban Parks. *Korean Env. Res. Tech.* 21(1): 73-82.
- Washington-Allen RA · Ramsey RD · West NE and Norton BE. 2008. Quantification of the Ecological Resilience of Drylands Using Digital Remote Sensing. *Ecology and Society*. 13(1).
- Won MS · Koo KS and 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.
- Xue J and Su B. 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of sensors*. 2017(1): 1353691.
- Youn HJ Y and Jeong JC. 2020. Classification of forest fire damage grade using machine learning and Sentinel-2. *The Korea Spatial Planning Review*. 106: 107-117.
- Zhang X · Wang M · Liu K · Xie J and Xu H. 2018. Using NDVI time series to diagnose vegetation recovery after major earthquake based on dynamic time warping and lower bound distance. *Ecological indicators*. 94:52-61.

부록

시기 구분	Satellite	Date
1994~1998 (33개 영상)	Landsat 5 TM	19940610/19940626/19940712/19940914/19950613 19950629/19950816/19950901/19950917/19960514 19960530/19960615/19960701/19960802/19960903 19970501/19970704/19970720/19970821/19970906 19980520/19980621/19980707/19980824/19980909 19980925/19960505/19960606/19970711/19970727 19970812/19970828/19970929
1999~2003 (36개 영상)		19990523/19990624/19990710/19990726/19990811 19990928/20000509/20000525/20000610/20000712 20000813/20000829/20010512/20010528/20010629 20010715/20010901/20020616/20020702/20020803 20020904/20020920/20030518/20030603/20030705 20030721/20030806/20030923/20030509/20030610 20030626/20030712/20030728/20030813/20030829 20030914
2004~2008 (55개 영상)		20040504/20040520/20040605/20040808/20040824 20040925/20050507/20050523/20050608/20050624 20050827/20050912/20050928/20060526/20060611 20060627/20060814/20060830/20070513/20070529 20070630/20070801/20070817/20080515/20080531 20080616/20080702/20080718/20080803/20080819 20080904/20080920/20040511/20040527/20040612 20040628/20040730/20040815/20040831/20050514 20050530/20050615/20060501/20060517/20060602 20060618/20060720/20060805/20060821/20060906 20060922/20070723/20070824/20070909/20070925
2009~2013 (34개 영상)		20090502/20090518/20090619/20090705/20090721 20090822/20090907/20090923/20100505/20100521 20100622/20100809/20100825/20100926/20110508 20110524/20110609/20110812/20110828/20090509 20090525/20090610/20090626/20090728/20090813 20090829/20090914/20100629/20100715/20100816 20110616/20110702/20110718/20110803
2014~2018 (49개 영상)		Ladnsat 8 OLI/TIRS