

PLANT&FOREST

Comparison of vegetation recovery according to the forest restoration technique using the satellite imagery: focus on the Goseong (1996) and East Coast (2000) forest fire

Yeongin Hwang^{1,†}, Hyeongkeun Kweon^{2,†}, Wonseok Kang^{3,*}, Joon-Woo Lee^{4,*}, Semyung Kwon⁵, Yugyeong Jung³, Jeonghyeon Bae³, Kyeongcheol Lee², Yoonjin Sim⁶

¹Department of Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Forestry, Korea National University of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

³Forest Fire Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

⁴Department of Environment and Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁵Division of Administration, Forest Restoration Center, Korea Association of Forest Enviro-Conservation Technology, Cheongju 28165, Korea

⁶Department of Landscape Architecture, Korea National University of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

[†]These authors contributed equally to this work

*Corresponding author: wons4457@korea.kr, jwlee@cnu.ac.kr



OPEN ACCESS

Citation: Hwang Y, Kweon H, Kang W, Lee JW, Kwon S, Jung Y, Bae J, Lee K, Sim Y. Comparison of vegetation recovery according to the forest restoration technique using the satellite imagery: focus on the Goseong (1996) and East Coast (2000) forest fire. Korean Journal of Agricultural Science 50:513-525. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500320>

Received: June 21, 2023

Revised: August 30, 2023

Accepted: August 30, 2023

Copyright: © 2023 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

This study was conducted to compare the level of vegetation recovery based on the forest restoration techniques (natural restoration and artificial restoration) determined using the satellite imagery that targeted forest fire damaged areas in Goseong-gun, Gangwon-do. The study site included the area affected by the Goseong forest fire (1996) and the East Coast forest fire (2000). We conducted a time-series analysis of satellite imagery on the natural restoration sites (19 sites) and artificial restoration sites (12 sites) that were created after the forest fire in 1996. In the analysis of satellite imagery, the difference normalized burn ratio (dNBR) and normalized difference vegetation index (NDVI) were calculated to compare the level of vegetation recovery between the two groups. We discovered that vegetation was restored at all of the study sites (31 locations). The satellite image-based analysis showed that the artificial restoration sites were relatively better than the natural restoration sites, but there was no statistically significant difference between the two groups ($p > 0.05$). Therefore, it is necessary to select a restoration technique that can achieve the goal of forest restoration, taking the topography and environment of the target site into account. We also believe that in the future, accurate diagnosis and analysis of the vegetation will be necessary through a field survey of the forest fire-damaged sites.

Key words: difference normalized burn ratio (dNBR), forest fire, forest remote sensing, forest restoration, normalized difference vegetation index (NDVI)

Introduction

최근 기후변화로 인해 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로도 대형산불의 발생 빈도와 그 피해가 증가하고 있다(Stephens et al., 2014; Smith et al., 2020).

대형 산불은 화재가 하루 이상 지속되거나, 화재 발생 면적이 1,000,000 m² 이상인 산불을 말하는데, 최근 5년간(2017 - 2022) 우리나라에서 발생한 대형산불은 총 21건으로 이는 우리나라 전체 산불피해의 93.6%에 해당하는 비율이다(KFS, 2023). 특히, 소나무 단순림의 비율과 임목밀도가 높은 임상에서는 초기 진화에 실패할 경우 대형산불로 확산될 가능성이 높고(Kwak et al., 2008), 대형산불 피해가 심각한 지역에서는 표토 침식 및 붕괴 등 2차 산림 재해에 대한 우려가 크기 때문에 산림의 조기 복구를 위해서는 신속한 산림복원 및 관리가 필요하다(Lee et al., 2004).

1970년대 산림녹화사업 이후, 산림청은 산불피해지를 대상으로 의무적으로 조림 사업을 시행하였으나(Jeong et al., 2000), 현재까지도 산불피해지역의 복원방식에 대해 많은 논란이 발생하고 있으며, 여전히 복원방식과 관리방법에 대해서는 많은 연구가 필요한 실정이다(Alayan et al., 2022). 이와 관련하여 산림청에서는 지난 2000년 동해안 산불 발생 이후, 산불피해지에 대한 복원방법의 선정 기준을 제시하였다(Lim et al., 2012). 먼저 자연복원은 국립공원 등 산림의 생태적 관리와 자연 천이를 우선시하는 지역을 대상으로 실시하고, 인공복원은 산사태 등 2차 피해가 발생할 수 있는 산림이나 경제림 조성을 목적으로 하는 산림을 대상으로 실행하는 것을 원칙으로 한다(Lim et al., 2010).

이렇게 산불피해지의 복원 방법을 결정하기 위해서는 산불피해에 대한 신속한 조사와 분석이 필요하다. 하지만 대형산불 발생지의 경우에는 피해면적이 넓고 지형이 험준하여 현장조사에 많은 시간과 인력이 소요되고 있다(Hwang et al., 2022). 이러한 이유로 시간과 인력을 절감시킬 수 있는 대표적 조사 방법인 위성영상을 활용한 원격탐사기법은 산불피해지역의 피해현황을 신속하게 파악할 수 있고, 산불발생 전과 후의 영상분석을 통해 식생복원에 대한 장기 변화를 시계열적으로 파악할 수 있는 장점이 있다(Kasischke et al., 2007; Seong et al., 2015). 또한, 위성영상을 활용한 연구는 다양한 사례가 보고 되고 있는데 도시 지역의 미세먼지 관측(Lee et al., 2020), 열섬 현상에 따른 도시 녹지의 온도 저감 효과 분석(Yoon and Ahn, 2009), 해안선 변화 탐지(Kim et al., 2005) 등 여러 분야에서 수행되었으며, 산불피해현황 조사에 대한 연구도 수행된 바 있다(Choi and Choi, 1997; Won et al., 2007; Park et al., 2018; Youn and Jeong, 2020; Hwang et al., 2022). 하지만, 국내에서 산불피해 이후 10년 이상의 장기간을 대상으로 위성영상을 활용한 산림복원 조사, 분석 및 모니터링에 대한 연구는 수행된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 우리나라에서 발생한 고성산불(1996년) 및 동해안산불(2000년) 피해지를 대상으로 지난 20년 동안의 위성영상을 활용하여 산림식생의 회복 수준을 모니터링하였으며, 자연복원과 인공복원에 따른 식생의 회복 수준을 비교하여 효과적인 복원 방법을 탐색하고 산불피해지역의 효율적인 복원을 위한 자료로 제공하고 자 수행하였다.

Materials and Methods

연구 대상지

본 연구는 1996년 4월 발생한 고성 산불(피해면적 3,384 ha)과 2000년 4월 발생한 동해안 산불(피해면적 23,794 ha) 피해지역 중 산림복원을 위해 조성된 자연복원지(19개소)와 인공복원지(12개소)를 대상으로 실시하였다.

산불피해 이후 산림복원 모니터링을 위해 조성된 각 방형구의 크기는 10 × 10 m와 20 × 20 m이다. 산불피해 이

전 대상지의 식생유형은 소나무림이었으며, 산불피해 이후 인공복원지의 조림수종은 소나무(*Pinus densiflora*)를 식재하였다. 현장조사 결과 복원사업 이후 자연복원지의 우점종은 대부분 참나무류(*Quercus sp.*)로 관찰되었으며, 주로 굴참나무(*Quercus variabilis*), 신갈나무(*Quercus monglica*), 졸참나무 (*Quercus serrata*)가 우점종으로 나타났고 일부 대상지에서 소나무(*Pinus densiflora*)와 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*)가 우점종으로 나타나기도 하였다. 대상지의 세부정보는 Fig. 1, Table 1과 같다.

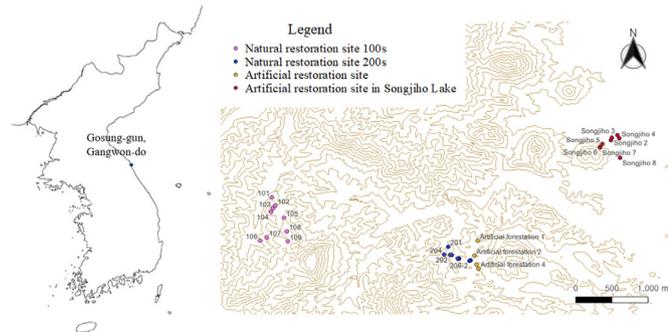


Fig. 1. The location of study areas in Goseong-gun, Gangwon-do, South Korea.

Table 1. Overview of study area.

Restoration type	Site No.	Forest fires	Above sea level (m)	Dominants
Natural restoration site 100s (10 × 10 m)	101	Two times (1996, 2000 year)	139	<i>Pinus densiflora</i>
	102		165	<i>Quercus serrata</i>
	103		127	
	104		167	
	105		170	
	106		158	
	107		178	
	108		201	
	109		217	<i>Larix kaempferi</i>
	109		217	<i>Quercus serrata</i>
Natural restoration site 200s (10 × 10 m)	201	One time (2000 year)	53	
	202		61	
	203		63	
	204		59	
	205-1		78	
	205-2		78	
	205-3		77	
	206-1		92	
	206-2		92	
	206-3		91	
Artificial restoration site (20 × 20 m)	1	One time (2000 Year)	84	<i>Pinus densiflora</i>
	2		95	
	3		85	
	4		83	
Artificial restoration site in Songjiho (10 × 10 m)	Songjiho 1	Two times (1996, 2000 Year)	10	<i>Pinus densiflora</i>
	Songjiho 2		8	
	Songjiho 3		8	
	Songjiho 4		9	<i>Pinus rigida, Pinus thunbergii</i>
	Songjiho 5		24	<i>Betula platyphylla</i>
	Songjiho 6		41	
	Songjiho 7		41	<i>Pinus koraiensis</i>
	Songjiho 8		10	

인공위성 영상 수집

본 연구에서 산불피해 이후 산림복원 방법에 따른 산림식생의 회복을 모니터링하기 위해서 Landsat TM/ETM+와 Sentinel-2A의 위성영상을 활용하였다(Table 2). 위성영상은 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration)과 미국지질조사국(United States Geological Survey)의 영상을 수집하였다. 다만, Landsat ETM+의 위성영상을 수집하는 과정에서 SLC (Scan Line Correction) off 현상에 의해 일정 간격마다 영상 정보의 손실이 발생하여 2003년 5월 31일 이후 영상은 Landsat TM의 영상을 대신 활용하였다. 또한, Landsat TM은 2012년 이후 활동을 중단하고 2015년부터 Sentinel-2A가 활동을 시작하였기 때문에 본 연구에서는 2012 - 2015년까지의 기간동안 영상 결실로 인한 Layer 수집의 한계가 존재한다. Won 등(2007)에 따르면 위성영상의 시계열 분석의 정확도를 위해 동일 시기의 영상을 활용하여 시간의 차이를 최소화 할 필요가 있다고 보고하였다. 이러한 시기의 오차를 최소화하기 위하여 산불피해 전과 후의 동일 시기 위성영상 31개를 활용하였으며, 각 영상의 촬영 일자 는 Table 3과 같다. 수집한 위성영상 중 촬영대상의 범위가 다르거나 구름 등으로 인해 영상분석에 제약이 있는 영상은 제외하였다.

Table 2. The information of satellite.

Satellite	Landsat TM/ETM+	Sentinel-2A
Bands	7 - 8	13
Resolution (m)	30	10 - 60
Cycle of revisit (days)	16	5
The period of activity	Landsat TM: 1984 - 2012 Landsat ETM+: 1999 - 2021	2015 - present

TM, thematic mapper; ETM, enhanced thematic mapper.
Adapted from USGS (2006).

Table 3. The date of satellite imagery used for analysis of dNBR (difference normalized burn ratio) and NDVI (normalized difference vegetation index) (continued).

Season	Satellite	Date		
Spring	Landsat TM	Apr. 17, 1996		
		Mar. 27, 1999		
		Apr. 17, 2001		
		May. 09, 2003		
		Apr. 09, 2004		
		Apr. 20, 2008		
		Apr. 07, 2009		
	Sentinel-2A	Apr. 13, 2011		
		Apr. 08, 2016		
		Apr. 18, 2018		
		Apr. 22, 2020		
		Summer	Landsat TM	Aug. 28, 1997
				Jul. 06, 2001
				Jul. 30, 2004
Aug. 05, 2006				
Aug. 24, 2007				
Jul. 09, 2008				
Aug. 06, 2016				
Sentinel-2A		Jul. 22, 2018		
		Jul. 31, 2020		

Table 3. The date of satellite imagery used for analysis of dNBR (difference normalized burn ratio) and NDVI (normalized difference vegetation index).

Season	Satellite	Date
Autumn	Landsat EM	Oct. 12, 1996
		Oct. 02, 1998
		Oct. 07, 2000
		Oct. 16, 2003
		Oct. 05, 2005
		Oct. 08, 2006
		Oct. 13, 2008
	Sentinel-2A	Oct. 28, 2015
		Oct. 30, 2017
		Oct. 30, 2019
		Oct. 24, 2021

TM, thematic mapper; ETM, enhanced thematic mapper.

분석 방법

정규탄화지수(normalized burn ratio)와 상대정규탄화지수(difference normalized burn ratio)

정규탄화지수는 단파적외선(short wavelength infrared)과 근적외선(near infrared spectrometer)의 합과 차를 이용하는 식으로 조사지역의 수분 함량에 따라 단파적외선의 반사도 차이로 만들어진 지표이다(García and Caselles, 1991). 이러한 특성으로 산불피해 전, 후의 식생변화를 탐지할 수 있는데, 이를 상대정규탄화지수라고 한다(Key and Benson, 2006). 정규탄화지수와 상대정규탄화지수는 식(1), (2)와 같이 산출할 수 있다.

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

NBR: Normalized burn ratio

NIR: Near infrared spectrometer

SWIR: Short wavelength infrared

$$dNBR = \text{pre NBR} - \text{post NBR} \quad (2)$$

dNBR: Difference normalized burn ratio

산불피해가 발생한 지역은 근적외선 반사도는 낮고 단파적외선 반사도는 높게 나타나는 특징이 있다. 정규탄화지수 값이 높게 산출되면 산불로 인하여 식생의 피해가 발생한 것을 의미하고, 반대로 정규탄화지수 값이 낮으면 식생의 피해가 발생하지 않은 것으로 구분할 수 있다(Key and Benson, 2006). 산불피해 전, 후의 정규탄화지수를 이용한 상대정규탄화지수(dNBR)를 산출하여 미국지질조사국에서 제시한 피해등급표(USGS, 2006)를 통해 피해현황을 추정할 수 있다(Table 4). 위성영상을 활용하여 시각화한 상대정규탄화지수는 다음 그림과 같다(Fig. 2).

정규식생지수(normalized difference vegetation index)

정규식생지수는 근적외선과 적색광의 합과 차를 이용하여 조사지역의 엽록소 함량에 따라 근적외선의 반사도는 높고 적색광의 반사도는 낮은 것의 차이로 만들어진 지표이다. 이러한 특성으로 조사지역의 식생활력도를 파악할 수 있다. 정규식생지수는 Krieglger 등(1969)에 의해 설명되었으며, Rouse 등(1974)이 처음으로 활용사례를 제안하였는데, 이는 식생의 활력과 식생밀도를 파악하고 계절별로 식생의 생장을 파악하는데 효과적이다(Huete et

Table 4. Classification of the burn severity level.

Burn severity level	dNBR range
Enhanced regrowth, high (post fire)	-0.5 to -0.251
Enhanced regrowth, low (post fire)	-0.25 to -0.101
Unburned	-0.1 to 0.999
Low severity	0.1 to 0.269
Moderate-low severity	0.27 to 0.439
Moderate-high severity	0.44 to 0.659
High severity	0.66 to 1.3

dNBR, difference normalized burn ratio.

Adapted from Key and Benson (2006).

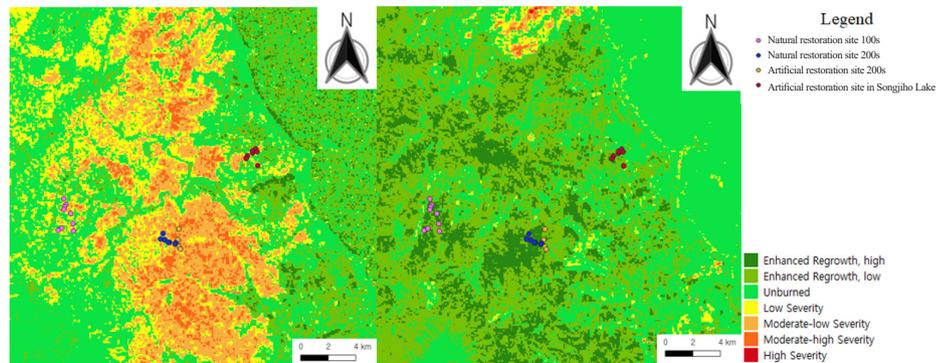


Fig. 2. Visualization of the dNBR (difference normalized burn ratio) analysis results using satellite images (left: 1995 - 1999, right: 2016 - 2018).

al., 1999). 정규식생지수의 등급은 Table 5와 같으며, 식(3)과 같이 산출할 수 있다. 위성영상을 활용하여 시각화한 정규식생지수는 다음 그림과 같다(Fig. 3).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

NDVI: Normalized difference vegetation index

NIR: Near infrared spectrometer

RED: Red spectrometer

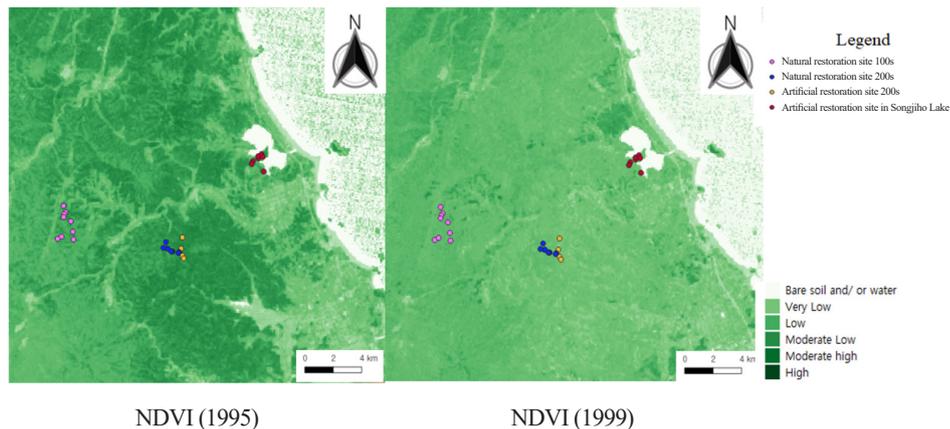


Fig. 3. Visualization of the NDVI (normalized difference vegetation index) analysis results using satellite images (left: 1995, right: 1999).

Table 5. Classification of the level.

Vegetation level	NDVI range
Bare soil and/or water	-1 to 0
Very low	0 to 0.2
Low	0.2 to 0.4
Moderate low	0.4 to 0.6
Moderate high	0.6 to 0.8
High	0.8 to 1

NDVI, normalized difference vegetation index.
Adapted from Aquino et al. (2018).

데이터 처리 및 분석방법

위성영상은 ‘Raw data’ 형태로 수집하게 되며, 이를 활용하기 위해서는 전처리 과정을 수행하여야 한다. 전처리 과정 중 방사보정은 지표면에 존재하는 물체로부터 반사되어 인공위성에 도달할 때까지 지형, 대기 효과에 의해 왜곡되어 이를 순수한 반사 값으로 보정하는 것에 이용되고, 대기보정은 태양광이 지표면 물체에 반사된 후 인공 위성 관측 센서에 감지될 때 태양 빛이 대기의 산란, 흡수, 반사, 투과 등의 영향을 받게 되며 태양 빛의 세기가 약화 되어 영상 자료의 밝기에 영향을 주기 때문에 원격탐사기법에서 필요하다(Choi and Park, 2004). 수집한 영상의 화상처리는 ‘QGIS 3.22.7 LTR’ (long time release)의 SCP Plugin (Semi-Automatic Classification Plugin)을 활용하여 보정을 실시하였으며, 위성영상의 전처리 과정 전, 후 영상은 Fig. 4와 같다. 산불피해 이후 식생회복 모니터링을 위해 사용하는 지수인 정규탄화지수와 정규식생지수를 산출하기 위한 인공위성의 분광밴드는 Table 6과 같으며 본 연구의 모식도는 Fig. 5로 나타내었다. 자연복원지와 인공복원지의 산림식생의 회복수준을 비교하기 위하여 t-test 양측검정을 실시하였으며, 각 복원대상지 영상의 유의성은 5% 수준에서 검증하였다.

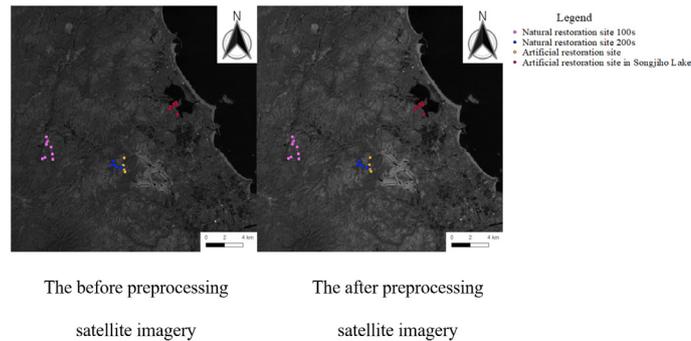


Fig. 4. Before and after preprocessing of the satellite imagery.

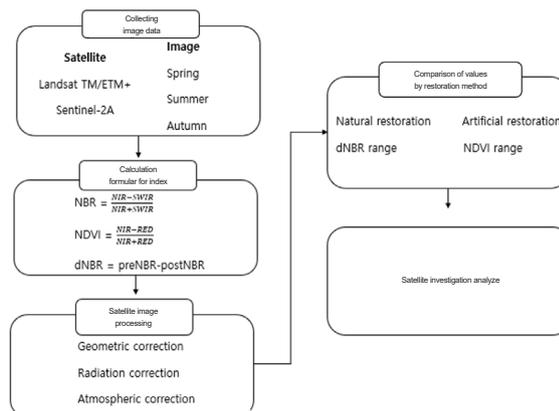


Fig. 5. The overall methodology to study. TM, thematic mapper; ETM, enhanced thematic mapper; NBR, normalized burn ratio; NDVI, normalized difference vegetation index; dNBR, difference normalized burn ratio; NIR, near infrared spectrometer; SWIR, short wavelength infrared; RED, red spectrometer.

Table 6. The information of satellite utilization bands.

Index	Landsat TM/ETM+	Sentinel-2A
NDVI	Band 3, 4	Band 4, 8
NBR	Band 4, 7	Band 8a, 12

TM, thematic mapper; ETM, enhanced thematic mapper; NDVI, normalized difference vegetation index; NBR, difference normalized burn ratio.

Results and Discussion

위성영상을 활용하여 계절별로 모니터링을 진행한 결과, 산불피해 이후 조성된 31개 대상지의 식생이 회복하는 경향을 보였으며, 봄, 여름, 가을 계절 중에서는 여름철 영상에서 가장 높은 값을 나타내었다. 인공복원지와 자연복원지의 상대정규탄화지수와 정규식생지수를 비교해볼 때, 대부분의 인공복원지가 일부 자연복원지보다 상대적으로 양호한 것으로 나타났지만(Table 7 and 8), 두 집단 간의 유의한 차이는 없었다.

Table 7. The average and standard deviations of dNBR (difference normalized burn ratio) value compared to the natural and artificial restoration sites.

Season	Natural restoration		Artificial restoration	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Spring	-0.006	0.276	-0.015	0.218
Summer	-0.040	0.084	-0.047	0.085
Autumn	-0.036	0.075	-0.046	0.084

Table 8. The average and standard deviations of NDVI (normalized difference vegetation index) value compared to the natural and artificial restoration sites.

Season	Natural restoration		Artificial restoration	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Spring	0.370	0.177	0.383	0.181
Summer	0.680	0.130	0.620	0.141
Autumn	0.584	0.146	0.584	0.13

상대정규탄화지수(dNBR) 비교

연구대상지의 봄철 상대정규탄화지수를 분석한 결과, 산불피해지 복원 방법에 따라 인공복원지(평균 -0.015)가 자연복원지(평균 -0.006)보다 상대적으로 양호한 값을 나타내고 있으며, 2001 - 2003, 2003 - 2004, 2016 - 2018, 2018 - 2020년 영상에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 산불피해 전과 후를 비교한 영상인 1995 - 1999년 영상의 상대정규탄화지수는 인공복원지(평균 0.332)가 자연복원지(평균 0.31)보다 높은 피해 수준을 나타내며 산불피해등급(Key and Benson, 2006)에서 'Moderate-low Severity' 등급을 나타냈다. 하지만, 1996년 산불피해 당시의 영상을 수집하지 못하였고 1999년까지 식생이 회복되어 촬영된 영상 간격 사이의 식생회복을 파악하지 못하였다는 단점이 있으며, 'Moderate-low Severity' 등급(Key and Benson, 2006)을 나타낸 것으로 산불피해 당시의 산림식생 피해는 더욱 심했을 것으로 판단된다. 2001 - 2003년의 영상에서는 자연복원지 평균 -0.497, 인공복원지 평균 -0.336으로 자연복원지가 더 양호한 값을 나타내고 있으며, 산불피해등급(Key and Benson, 2006)은 'Enhanced Regrowth, high'로 매우 높은 수준의 복원등급을 나타내었다. Won 등(2007)은 식생의 동적변화가 심한 봄철에 이러한 현상이 나타나기도 한다고 하였는데, 본 연구에서 분석한 위성영상의 촬영시기(2001년 4월 17일 및 2003년 5월 9일)가 참나무류(*Quercus sp.*)를 비롯한 하층식생의 피복률이 급격히 증가하는 시기적 특성에 따른 것으로 판단된다. 한편, 2003 - 2004년에 촬영된 영상에서는 식생의 피해가 발생한 'Moderate-low Severity'으로 나타났는데, 이는 수집

된 영상(2003년 5월 9일 및 2004년 4월 9일)의 촬영시기에서 1개월의 차이로 인한 상대정규탄화지수의 시기적 오류로 판단된다. 또한, 여름과 가을철에 촬영된 위성영상의 정규탄화지수와 정규식생지수를 비교하였을 때, 이 시기의 피해를 나타낸 것이 아닌 수집한 영상의 식생피복에 따른 차이로 사료된다. 2009 - 2011년 이후 영상에서는 'Unburned'에 해당하는 수준을 보여 복원지의 식생이 안정화된 것으로 판단된다.

여름철에 촬영된 위성영상의 상대정규탄화지수를 분석한 결과에서는 인공복원지(평균 -0.047)가 자연복원지(평균 -0.04)보다 다소 양호한 것으로 나타났으나, 2007 - 2008년 영상을 제외하면 나머지 시기의 영상에서는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($p > 0.05$). 1999 - 2001년에 촬영된 영상의 인공복원지 평균은 -0.19로 자연복원지 평균 -0.178보다 양호한 값을 나타내며 산불피해등급(Key and Benson, 2006)은 'Enhanced Regrowth, low'이었다. 산불피해 전과 피해 당시의 영상을 수집하지 못해 식생 피해정도를 파악하지 못하였다는 한계가 있었으며, 점차 산림식생이 회복하고 있는 경향만 파악할 수 있었다. 2001 - 2004년 영상부터 'Unburned'등급에 해당하는 것으로 나타났으며, 여름철의 영상에서는 복원 방법에 관계없이 식생의 복원이 원활하게 진행되고 있었던 것으로 보여진다.

가을철에 촬영된 위성영상의 상대정규탄화지수를 분석한 결과, 인공복원지(평균 -0.046)가 자연복원지(평균 -0.036)보다 식생회복이 더 양호한 것으로 나타났으며, 1996 - 1998, 2015 - 2017년 영상에서 두 대상지그룹 간에 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 1996년 산불피해 이후 2003 - 2005년 영상까지 산불피해 이후 식생 회복을 나타냈으며, 2005 - 2006년 영상부터 산불피해등급(Key and Benson, 2006)에서 'Unburned' 등급을 나타내어 식생이 안정적으로 회복하는 것으로 판단된다. 계절별 상대정규탄화지수의 위성영상을 분석한 결과, 산림복원을 시행한 이후 지속적으로 식생의 회복경향을 파악할 수 있었으며, 봄, 여름, 가을 계절 모두 2009년의 영상 이후 산불피해등급(Key and Benson, 2006)으로 'Unburned' 등급을 나타내어 식생이 안정적으로 회복을 하는 것으로 나타났다. 상대정규탄화지수의 자연복원지와 인공복원지의 비교 결과는 Fig. 6과 같다.

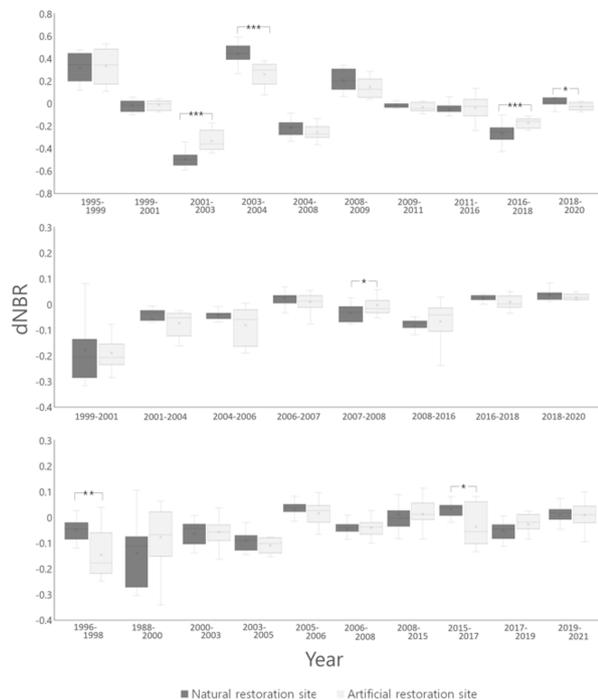


Fig. 6. The results of dNBR (difference normalized burn ratio) value of natural restoration sites and artificial restoration sites after forest fire restoration project (Top: Spring season, Middle: Summer season, Bottom: Autumn season, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$).

정규식생지수(NDVI) 비교

대상지의 봄철 정규식생지수를 분석한 결과, 복원 방법에 따른 산림식생 회복은 인공복원지의 평균 값(0.383)이 자연복원지의 평균 값(0.37)보다 더 양호한 것으로 나타났으며, 1999, 2001, 2016년 영상에서 자연복원지와 인공복원지의 식생회복 수치가 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 산불 발생 전 영상인 1995년의 자연복원지(평균 0.53)와 인공복원지(평균 0.504)의 정규식생지수는 'Moderate Low' 등급(Aquino et al., 2018)을 나타냈다. 하지만, 1996년 발생한 산불피해 이후 처음으로 촬영된 위성영상(1999년)의 정규식생지수는 자연복원지 평균 0.266, 인공복원지 평균 0.227으로 'Low' 등급(Aquino et al., 2018)에 해당하는 것으로 나타났다. 이는 산불피해 이후 자연복원지의 산림식생이 점차 회복되어 나타난 결과로 1996년 산불피해 당시의 정규식생지수 값은 더 낮았을 것으로 판단되며, 1996년 이후 조성된 인공복원지와 산불피해 이후 산림을 보존한 자연복원지의 식생 차이로 인해 자연복원지와 인공복원지의 유의한 차이가 나타난 것으로 생각된다($p < 0.05$).

산불 발생 이후부터 2001년 촬영된 위성영상까지는 자연복원지가 양호한 것으로 나타났는데, 이는 산불피해 이후 고사하지 않은 활엽수의 맹아가 발생하여 소나무를 조립한 인공복원지보다 빠른 회복을 나타낸 것으로 보고된 바 있다(Lim et al., 2012). 또한, 산불피해 이후 초기 식생회복에서 자연복원지의 정규식생지수 값이 인공복원지보다 높은 것은 선행연구(Noh and Choi, 2022) 결과와 유사한 양상을 나타내고 있다. 정규식생지수의 이러한 양상은 봄철 상대정규탄화지수의 2001 - 2003년에 촬영된 자연복원지 영상과 유사한 것으로 보여지며, 초기 자연복원지와 인공복원지의 식생회복 차이로 사료된다.

여름철 정규식생지수를 분석한 결과, 1997년 촬영된 위성영상에서 정규식생지수 등급(Aquino et al., 2018)에서 'Moderate low'을 나타내며, 자연복원지가 평균 0.68을 나타내었고 인공복원지가 평균 0.62로 나타나 전체적으로 양호한 경향을 보였다. 1997, 2008, 2016, 2018, 2020년 영상에서 자연복원지와 인공복원지의 식생지수가 유의한 차이가 있는 것으로 나타났는데($p < 0.05$), 정규식생지수는 식물의 엽록소에 반응하기 때문에 자연복원지의 우점종이 대부분 참나무류(*Quercus sp.*)인 이유로 수관부가 가장 발달하는 계절인 여름철 영상에서 소나무(*Pinus densiflora*)가 우점종인 인공복원지와 비교하여 식생의 엽록소 함량과 밀집도에 영향을 받는 정규식생지수의 값이 높게 나타난 것으로 사료된다. 2016년 이후 영상부터 정규식생지수 등급(Aquino et al., 2018)에 따라 'Moderate High'와 'High'에 해당하는 등급을 나타내며 높은 값을 나타내고 있다. 하지만, 산불피해 전과 피해연도의 영상을 수집하지 못하여 식생의 피해를 알 수 없다는 한계가 있으며, 이러한 이유로 식생의 회복이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한, 산불피해 이후 2차 천이 과정을 거치며 식생의 회복하는 과정에서 산불피해 전의 식생과 비교하였을 때, 피해 전과 유사한지 알 수 없다는 한계가 있다.

가을철 위성영상을 분석한 결과, 복원 이후 자연복원지와 인공복원지의 평균은 0.584로 복원 방법에 따른 차이를 나타내지 않았다. 가을철 정규식생지수는 2000, 2019년 영상에서 자연복원지와 인공복원지의 식생회복 정도가 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 산불피해 당해연도인 1996년 가을의 영상에서 자연복원지(평균 0.302)와 인공복원지(평균 0.371)는 정규식생지수 등급(Aquino et al., 2018)에서 'Low' 등급에 해당하는 피해를 나타냈다. 산불피해 이후 조성된 복원대상지의 식생은 매년 식생이 회복하는 양상을 나타내었는데 2000년 이후부터 자연복원지가 인공복원지보다 더 우세한 양상을 보이며, 2019년과 2021년 영상에서는 인공복원지가 자연복원지보다 더 양호한 값을 보였다. 계절별 정규식생지수의 결과로 산림복원을 진행한 이후 지속적인 회복을 하는 것으로 나타났다. 정규식생지수의 자연복원지와 인공복원지의 비교 결과는 Fig. 7과 같다.

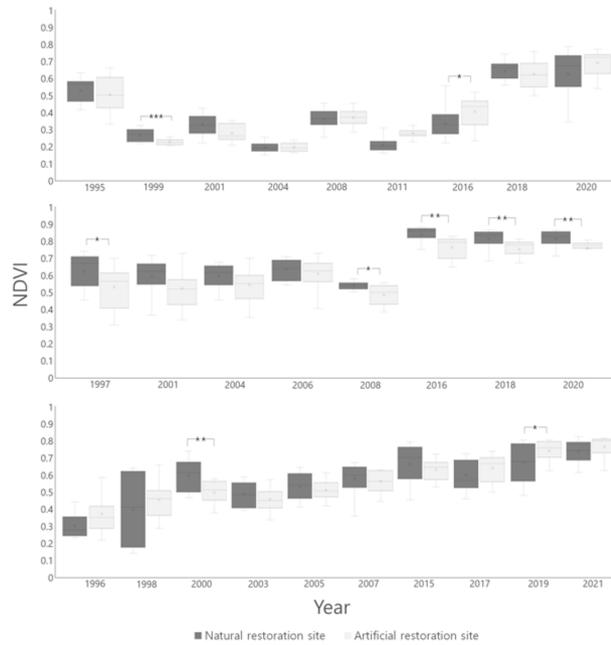


Fig. 7. The results of NDVI (normalized difference vegetation index) value of natural restoration sites and artificial restoration sites after forest fire restoration project (Top: Spring season, Middle: Summer season, Bottom: Autumn season, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$).

Conclusion

본 연구는 위성영상을 활용하여 산불피해지역의 복원 방법에 따른 산림식생 회복 수준을 알아보기 위해 수행되었다. 이를 위해 고성산불(1996년 4월 발생, 피해면적 약 3,834 ha)과 동해안산불(2000년 4월 발생, 피해면적 약 23,448 ha) 피해지인 강원도 고성군 죽왕면 및 송지호 일대의 복원사업 대상지(자연복원지 19개소, 인공복원지 12개소)를 대상으로 상대정규탄화지수와 정규식생지수를 활용하여 식생의 복원수준을 비교하였다. 그 결과 인공복원지가 자연복원지보다 상대적으로 식생회복에서 양호한 값을 나타냈지만, 유의한 차이는 없었다. 계절별 위성영상에서는 여름철에 가장 높은 값을 나타냈고, 여름철 정규식생지수에서 자연복원지가 인공복원지보다 양호한 값을 보였다. 전체적으로 인공복원지가 자연복원지보다 상대정규탄화지수와 정규식생지수에서 양호한 값을 나타냈지만, 값의 차이가 등급을 구분할 만큼 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 복원지 조성 20여년이 지난 후 인공복원지와 자연복원지의 복원 방법에 따른 식생회복은 큰 차이가 나지 않는다고 판단된다. 자연복원은 산불피해 이후 자연 천이를 거치며 인공복원지 보다 다양한 식생구조와 종다양성을 가지며 식생이 회복되고, 인공복원은 신속한 복원사업을 통해 목표임분으로 점차 식생이 안정되는 특징이 있다. 반면, 인공복원은 경제적 측면에서 자연복원보다 많은 비용이 소모된다는 단점도 있지만, 산불피해 이후 사면침식, 산사태 등의 2차 피해방지와 산림 생태계의 신속한 안정을 위해 반드시 요구되기도 한다.

본 연구에서는 과거 위성영상의 영상결실과 저해상도에 따른 분석의 정확도에 한계가 발생하였으나, 산불피해 이후 20여년간의 영상자료를 통해 인공복원지와 자연복원지의 식생회복의 수준을 비교할 수 있다는 의의가 있었다. 향후 후속 연구로 고해상도의 위성영상을 이용하여 정확한 피해예측과 현장검증으로 산불강도와 피해현황 그리고 산불피해지의 식생변화 모니터링을 실시하고 보다 더 정확한 분석이 필요할 것으로 사료된다. 이러한 연구 결과는 산불피해지역의 복원목표와 현장 조건에 적합한 복원 방법을 선택하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 연구는 국립산림과학원의 ‘산불피해지 복원 프로세스 및 내화숲 기능증진 연구’(과제번호 FE0100-2022-02-2023)의 지원으로 수행되었습니다.

Authors Information

Yeongin Hwang, <https://orcid.org/0009-0006-9669-4693>

Hyeongkeun Kweon, <https://orcid.org/0000-0002-9039-0158>

Wonseok Kang, <https://orcid.org/0000-0002-0915-2276>

Joon-Woo Lee, <https://orcid.org/0000-0002-5228-8566>

Semyung Kwon, <https://orcid.org/0000-0001-7951-1716>

Yugyeong Jung, <https://orcid.org/0000-0001-5006-2953>

Jeonghyeon Bae, <https://orcid.org/0009-0008-4633-2840>

Kyeongcheol Lee, <https://orcid.org/0000-0003-4945-4639>

Yoonjin Sim, <https://orcid.org/0000-0001-5832-6669>

References

- Alayan R, Brian R, Zoltán L. 2022. A comprehensive framework for forest restoration after forest fires in theory and practice: A systematic review. *Forests* 13:1354.
- Aquino DDN, Rocha Neto OCD, Moreira MA, Teixeira ADS, Andrade EMD. 2018. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica* 49:420-429.
- Choi CS, Choi SP. 1997. A tracing survey by means of satellite TM image for Go-Sung forest fire damage area. *Journal of Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 15:215-219. [in Korean]
- Choi SP, Park JS. 2004. Comparative analysis between normalized burn ration and normalized difference vegetation index in forest fire damage area. *Journal of the Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 22:261-268. [in Korean]
- García ML, Caselles V. 1991. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International* 6:31-37.
- Huete A, Justice C, Van Leeuwen W. 1999. MODIS vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document 3:259-309.
- Hwang YI, Kang WS, Park KY, Lee KC, Jan SG, Kweon HK. 2022. Comparison of vegetation growth rate after forest fire using satellite image. *Journal of Practical Agriculture and Fisheries Research* 24:33-43. [in Korean]
- Jeong YS, Ro CH, Oh HK, Lee MS. 2000. Effective natural restoration method of forest fire damaged area in the east coast region. *The Korea Association for Conservation of Nature* 110:34-41. [in Korean]

- Kasischke ES, Hoy EE, French NHF, Turetsky MR. 2007. Post-fire evaluation of the effects of fire on the environment using remotely-sensed data. In Proceeding of the 6th International Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Forest Fires-Operational Use of Remote Sensing.
- Key CH, Benson NC. 2006. Landscape assessment (LA). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station 164:LA-1-55.
- KFS (Korea Forest Service). 2023. Forest fire statistical yearbook. p. 273. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]
- Kim GH, Choi SP, Yook WS, Song YS. 2005. Coastline change detection using CORONA imagery. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 23:419-426. [in Korean]
- Kriegler FJ, Malila WA, Nalepka RF, Richardson W. 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In Proceeding of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor. pp. 97-131.
- Kwak HB, Lee WK, Lee SY, Won MS, Lee MB, Koo KS. 2008. The analysis of relationship between forest fire distribution and topographic, geographic, and climatic factors. *Journal of Korean Institute of Information Scientists and Engineers Conference* 465-470. [in Korean]
- Lee KS, Choung YS, Kim SC, Shin SS, Ro CH, Park SD. 2004. Development of vegetation structure after forest fire in the east coastal region. *Journal of the Ecological Society of Korea* 27:99-106. [in Korean]
- Lee SH, Park JC, Seo HY. 2020. Estimation of ambient PM10 and PM2.5 concentrations in Seoul, South Korea, using empirical models based on MODIS and Landsat 8 OLI imagery. *Korean Journal of Agricultural Science* 45:59-66. [in Korean]
- Lim JH, Kim JH, Bae SW. 2012. Natural regeneration patten of pine seedlings on the burned forest site in Gosung, Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology* 14:222-228. [in Korean]
- Lim JL, Lee YG, Jeong JH, Lee MB. 2010. Post-fire restoration to establish a healthy and sustainable forest ecosystem. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea.
- 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 Korea Society of Environmental Restoration Technology* 25:43-57. [in Korean]
- Park SW, Kim HW, Lee SJ, Yun YS, Kim ES, Lim JH, Lee YW. 2018. Detection of forest disaster areas using high-resolution satellite images with fully convolutional network. *Journal of The Association of Korean Photo-Geographers* 28:87-101. [in Korean]
- Rouse W, Haas H, Deering W, Schell A, Harlan C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA (No. E74-10678), Washington, D.C., USA.
- Seong SY, Lee DG, Kim JY. 2015. Monitoring of vegetation changes according to restoration methods of forest fire damaged area in the east coast region using landsat image. In Proceeding of the Korean Institute of Landscape Architecture 2015:15-16.
- Smith AJP, Jones MW, Abatzoglou JT, Canadell JG, Betts RA. 2020. Climate change increases the risk of wildfires. *ScienceBrief Review*. Accessed in <https://news.sciencebrief.org/wildfires-sep2020-update/> on 31 August 2022.
- Stephens L, Burrows N, Buyantuyev A, Gray RW, Keane RE, Kubian R, Van Wagtendonk JW. 2014. Temperate and boreal forest mega-fires: Characteristics and challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12:115-122.
- USGS (United States Geological Survey). 2006. Landsat 7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) instrument. Accessed in <https://www.usgs.gov/> on 07 March 2023.
- 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* 10:80-92. [in Korean]
- Yoon MH, Ahn DM. 2009. An application of satellite image analysis to visualize the effects of urban green areas on temperature. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 37:46-53. [in Korean]
- Youn HJ, Jeong JC. 2020. Classification of forest fire damage grade using machine learning and Sentinel-2. *Korea Research Insitute for Human Settlement* 166:107-117. [in Korean]