

위성영상을 이용한 산불피해 이후 자연복원과 인공복원 방법에 따른 식생회복 모니터링

Monitoring of Vegetation Recovery According to Natural and Artificial Restoration Methods After Forest Fire Damage Using Satellite Imagery

황영인¹

Yeong In Hwang
한국농수산대학교
작물산림학부¹

강원석²

Won Seok Kang
국립산림과학원
산림생태연구과²

박기형²

Ki Hyung Park
국립산림과학원
산림생태연구과²

이경철¹

Kyeong Cheol Lee
한국농수산대학교
작물산림학부¹

한상균³

Sang Gyun Han
강원대학교
산림과학부³

권형근^{1*}

Hyeong Keun Kweon
한국농수산대학교
작물산림학부¹

¹ Department of Landscape Architecture, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

² Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

³ Division of Forest Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

ABSTRACT

This study was conducted to monitor the vegetation recovery in the areas damaged by the forest fires on the east coast that occurred in April 2000. The study site was a forest fire-damaged area in Samcheok-si, Gangwon-do, and 21 monitoring areas (12 natural restoration sites, 9 artificial restoration sites) were selected to analyze the vegetation recovery trend since 1998. The vegetation recovery trend was compared by calculating the values according to the year using the difference Normalized Burn Ratio (dNBR) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) based on satellite images (Landsat TM/ETM+ and Sentinel-2A). As the result of this study, all 21 sites, vegetation was recovered, and both groups showed the greatest recovery in summer. In the case of the dNBR, the artificial restored sites showed higher values than the natural restored sites, and in the case of the NDVI, the natural restored sites were higher than the artificially restored sites in summer and autumn. However, the difference between the two groups of natural and artificial restoration sites was not significant. Therefore, the direction of forest restoration after forest fire damage can be effectively restored if properly implemented for the purpose of restoration of the target site.

Key Words : forest remote sensing, Satellite image, vegetation restoration, dNBR, NDVI

Received Sep. 08, 2022
Revised Oct. 15, 2022
Accept Oct. 18, 2022

*Correspondence
Hyeong Keun Kweon
namoo81@af.ac.kr

서론

최근 기후변화로 인해 산불의 발생 빈도가 증가하고 그에 따른 피해도 커지고 있다(Jones et al., 2020; Stephens et

al., 2014; 이형석·이시영, 2011). 산불재해의 발생 원인은 다양하게 보고되고 있는데, 그 중에서 대기의 평균온도 상승과 강우의 변화와 같은 지구온난화에 따른 환경변화는 대형 산불의 발생위험을 점차 증가시키고 있다(채희문 등, 2011).



특히, 우리나라의 산불 발생 특성은 자연적 원인보다 인위적 원인으로 인해 많이 발생하는 것으로 보고되고 있으며(산림청, 2021), 대형산불 발생에 따른 피해를 최소화하기 위해 산불 발생 시 효율적인 대응 방안(김남균 등, 2019)과 산불피해 이후 2차 피해를 방지하기 위해 다양한 복구 및 관리방안(이규송 등, 2004)이 필요하다. 최근 2년(2020~2021)의 우리나라의 산불 발생 현황을 살펴보면, 2010년대(평균 440건)보다 42건이 더 발생하였고 산불피해 면적은 약 857ha에서 1,840ha로 증가하였다(산림청, 2021). 이에 따라 점차 증가하고 있는 산불재해 피해지역의 복원 방법에도 많은 노력이 필요한 시기이다. 산불피해지역의 복원 방법은 산불피해의 강도에 따라 복원 이후 식생 회복 과정이 달라질 수 있기 때문에(원명수 등, 2007), 산불피해 이후의 피해강도를 조사하고 식생 회복 속도를 예측하여 산림복원 계획에 반영해야 할 필요성이 있다(이규송 등, 2004).

우리나라 산림은 대부분 지형이 험준한 산악지에 위치하고 있어 접근이 어렵고, 대형산불 재해가 발생할 경우 피해 면적이 넓고 방대하여 피해현황 파악에 많은 시간과 비용이 소요되고 있는 실정이다. 따라서 항공사진이나 위성영상을 이용한 원격탐사기법을 주로 활용하고 있는데(원명수 등, 2007), 위성영상을 활용한 원격탐사기법은 대면적을 신속하고 적은 비용으로 분석할 수 있다는 장점이 있다(Lentile et al., 2006). 또한 영상분석을 통해 장기적인 식생 회복의 변화를 시계열적으로 평가하는 것이 가능하고(Kasischke et al., 2007), 이를 통해 산불 발생 후 복원양상을 파악하는데 효과적이다(성선용 등, 2015).

그동안 위성영상을 활용한 산불피해와 식생회복에 대한 연구(성선용 등, 2015; 박성욱 등, 2018; 최철순·최승필, 1997; 윤형진·정충철 2020)를 살펴보면, 산불피해 분석과 식생 회복 분석을 위해 위성영상의 분광특성에 착안되어 만들어진 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index)를 활용한 방법(원명수 등, 2014), 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio)와 상대정규탄화지수(difference Normalized Burn Ratio)을 활용한 방법(Weirather et al., 2018; Franco et al., 2020; McKenna et al., 2018)이 보고된 바 있다. 하지만 국내에서 20여년의 기간동안 산불 피해지역의 자연복원지와 인공복원지의 식생회복경향에 대해 모니터링한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 2000년 4월 발생한 동해안 산불의 피해 지인 강원도 삼척시를 대상으로 산불피해 전과 후의 위성영상을 활용하여 산불피해와 그 이후의 식생회복의 경향을 모니터링하기 위해 실시하였다. 이를 위해 산불피해지역에 조성된 자연복원지(12개소)와 인공복원지(9개소)를 계절

별로 시계열 분석하고 각 복원 방법에 따른 식생회복 양상을 파악하여 보다 효과적인 복원 방법을 탐색하고 향후 산불 피해지역의 복원정책의 기초자료로 제공하고자 한다.

연구방법

연구대상지

본 연구는 2000년 4월 산불이 발생한 강원도 삼척시 원덕읍 일대의 산불 피해지역(23,794 ha) 중 산림복원을 위해 조성된 자연복원지(12개소)와 인공복원지(9개소)를 대상으로 실시하였다. 각 연구대상지의 크기는 20 × 20m이며, 인공복원지의 조림수종은 소나무(*Pinus densiflora*)로 2001년에 식재하였다. 대상지의 세부정보는 Table 1과 같다.

인공위성 영상 분석

본 연구에서는 대상지의 산불피해 이후 산림식생의 회복을 모니터링한 인공위성은 중, 고해상도 위성인 Landsat TM/ETM+와 Sentinel-2A를 활용하였다. Landsat TM/ETM+은 7개의 분광밴드와 30m의 공간해상도를 가지며(Table 2), Sentinel-2A는 13개의 분광밴드와 10~60m 까지 다양한 공간해상도를 가진다(Table 3). 또한, 이들 위성의 재방문 주기는 Landsat TM/ETM+ 위성은 16일, Sentinel-2A 위성은 5일이기 때문에(미국지질조사국, <https://www.usgs.gov/>) 각 시기에 따른 계절별 위성영상을 활용하기에 적합하다. 본 연구에서 활용한 인공위성 영상은 QGIS의 SCP Plugin(Semi-Automatic Classification Plugin)을 활용하여 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration)과 미국지질조사국(United States Geological Survey)의 영상을 활용하였으나, Landsat ETM+는 SLC(Scan Line Correction) off 현상에 의해 영상에 대한 손실이 발생하는 단점이 존재하여 2003년 5월 31일 이전의 데이터만 사용하였고 이후에는 Landsat TM의 영상을 활용하였다(박성욱 등, 2018).

본 연구에서 상대정규탄화지수와 정규식생지수를 계산하기 위한 인공위성 밴드는 Table 4와 같으며 각 인공위성 밴드는 정확도를 위해 같은 공간해상도로 사용하였다. 식생회복을 파악하기 위한 시계열 분석은 다중시기, 동일시기 등 시간의 차이를 최소화해야 한다(원명수 등, 2007). 따라서 오차를 최소화하기 위해 산불 전과 후의 계절별 영상 32개를 활용하였으며, 이 영상의 촬영 일자 는 Table 5와 같다.

Table 1. Description of the study site

Restoration techniques	Site No.	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Main species
Natural restoration	1-1	37°14'14.87"N	129°17'50.78"E	193	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Quercus serrata</i>
	1-2	37°14'14.86"N	129°17'50.58"E	195	
	1-3	37°14'14.84"N	129°17'50.36"E	195	
	3-1	37°14'6.81"N	129°18'17.24"E	293	
	3-2	37°14'9.76"N	129°18'16.76"E	285	
	3-3	37°14'13.14"N	129°18'15.82"E	263	
	11-1	37°12'46.25"N	129°18'29.59"E	231	
	11-2	37°12'45.83"N	129°18'29.59"E	228	
	11-3	37°12'45.40"N	129°18'29.38"E	228	
	13-1	37°12'46.89"N	129°18'36.58"E	230	
	13-2	37°12'47.34"N	129°18'36.80"E	227	
	13-3	37°12'47.76"N	129°18'36.99"E	224	
Artificial restoration	8-1	37°13'3.16"N	129°18'4.48"E	284	<i>Pinus densiflora</i>
	8-2	37°13'2.72"N	129°18'4.44"E	283	
	9-1	37°13'4.03"N	129°18'6.34"E	267	
	10-1	37°12'51.24"N	129°18'19.21"E	262	
	10-2	37°12'51.59"N	129°18'19.51"E	257	
	10-3	37°12'52.05"N	129°18'20.01"E	249	
	12-1	37°12'56.89"N	129°18'36.58"E	235	
	12-2	37°12'47.34"N	129°18'36.80"E	232	
12-3	37°12'47.76"N	129°18'36.99"E	232		

Table 2. The information of the Landsat TM/EMT+ bands

Band	Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 - Blue	0.45 - 0.52	30
Band 2 - Green	0.52 - 0.60	
Band 3 - Red	0.63 - 0.89	
Band 4 Near Infrared	0.77 - 0.90	
Band 5 Short-wave Infrared	1.55 - 1.75	60 × (30)
Band 6 Thermal Infrared	10.4 - 12.5	
Band 7 Short-wave Infrared	2.09 - 2.35	30
Band 8 Panchromatic (Landsat ETM+ only)	0.52 - 0.90	15

Table 3. The information of the Sentinel-2A bands

Band	Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	
Band 4 - Red	0.665	
Band 5 - Vegetation red edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation red edge	0.740	
Band 7 - Vegetation red edge	0.783	
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8a - Vegetation red edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR- Cirrus	1.375	
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	

Table 4. The band range used in both satellite imagery

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

Table 5. The date of satellite imagery used for analysis of dNBR and NDVI

Season	Satellite	Date
Spring	Landsat TM	May 20, 1998
		May 25, 2000
		Apr. 26, 2001
		Apr. 18, 2004
		Apr. 05, 2005
		Apr. 24, 2006
		Mar. 26, 2007
		Apr. 29, 2008
		May. 18, 2009
		May. 08, 2011
	Sentinel 2A	Apr. 15, 2016
		Apr. 15, 2018
		Apr. 15, 2019
		Apr. 09, 2020
Summer	Landsat TM	Aug. 13, 2000
		Aug. 14, 2006
		Aug. 17, 2007
	Sentinel 2A	Aug. 13, 2016
		Aug. 14, 2018
		Jul. 04, 2019
Autumn	Landsat TM	Sep. 25, 1998
		Oct. 16, 2000
		Oct. 19, 2001
	Landsat ETM+	Oct. 14, 2002
	Landsat TM	Oct. 11, 2004
		Oct. 09, 2009
		Oct. 31, 2011
		Oct. 07, 2018
	Sentinel 2A	Nov. 01, 2019
		Oct. 06, 2020
Oct. 01, 2021		

정규탄화지수는 단파적외선(Short Wavelength Infrared)과 근적외선(Near Infrared Spectrometer)의 합과 차를 이용하는 식으로 조사지역의 수분 함량에 따라 단파적외선 반사도의 차이로 분석하는 것으로 Garcia et al.(1991)에 의해 처음 설명되었다. 이러한 특성으로 산불 전과 후 영상을 통해 급격하게 변화하는 식생 변화를 탐지할 수 있으며, 이를 상대정규탄화지수이라 하고(Key et al., 2006) 정규탄화지수와 상대정규탄화지수의 계산식은 다음과 같다.

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

$$dNBR = preNBR - postNBR \quad (2)$$

Key et al.(2006)에 따르면 정규탄화지수는 불이 발생하지 않은 지역의 근적외선은 반사도가 높은 반면, 단파적외선의 반사도는 낮은 것이 특징이다. 정규탄화지수 값이 높은 지역은 산불피해로 인한 나지 혹은 임상이 불탄 지역을 뜻하고, 반대로 정규탄화지수 값이 낮은 지역은 식생이 존재하는 지역으로 구분할 수 있다. 또한, 단순 피해 유무뿐만 아니라 피해강도 또한 조사할 수 있다. 정규탄화지수 차이를 이용한 상대정규탄화지수는 산불피해 전과 후 영상의 차이를 이용하여 산불피해 등급을 추정할 수 있다. 산불피해 등급에 대한 구분은 미국지질조사국에서 제시한 것으로 Table 6과 같으며, 상대정규탄화지수의 값이 높을수록 산불피해가 크고 반대로 값이 낮을수록 식생이 회복하는 양상을 보인다.

Table 6. Classification of burn severity level (dNBR, USGS)

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

정규식생지수는 식생활력도를 나타내는 것으로 근적외선과 적색광의 합과 차를 이용하는 것으로 분석한다. 조사지역의 엽록소 함량을 통해 근적외선의 반사도는 높고 적색광의 반사도는 낮은 것을 활용하여 만들어진 지표로 Krigler et al.(1969)에 의해 설명되었으며, Rouse et al.(1974) 등이 처음으로 활용사례를 제안하였다. 정규식생지수는 잎의 면적과 식생분포도를 확인하는데 효과적이고 -1부터 1까지의 지수를 가진다. 지수는 -1에 가까울수록 물 혹은 눈을

나타내고 0에 가까울수록 식생은 존재하지 않는다. 또한, 1에 가까울수록 식생의 밀도가 높다는 것을 알 수 있다(신형진 등, 2010). 정규식생지수의 등급은 Table 7과 같다. 정규식생지수의 산출식은 다음과 같다.

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

Table 7. Description and NDVI class interval for vegetation cover (Aquino et al., 2018)

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

분석방법

본 연구에서는 위성영상자료를 통해 자연복원지와 인공복원지의 식생회복 모니터링을 위해 상대정규탄화지수와 정규식생지수를 활용해 시계열 분석하였다. 위성영상을 분석하기 위한 GIS 프로그램으로 QGIS 3.22.7 LTR(Long Time Release)을 사용하였으며 정확한 영상을 활용하기 위해 전처리 과정인 방사보정과 대기보정 과정을 거친 후 재배열하여 계절별 식생의 회복을 파악하였다. 방사보정은 지표면에 존재하는 물체로부터 반사되어 인공위성에 도달할 때까지 지형, 대기 효과에 의해 왜곡되는데 이를 순수한 반사 값으로 보정 하는 것에 이용되고, 대기보정은 태양광이 지표면 물체에 반사된 후 인공위성 관측 센서에 감지될 때 태양 빛이 대기의 산란, 흡수, 반사, 투과 등의 영향을 받게 되며 태양 빛의 세기가 약화되어 영상 자료의 밝기에 영향을 주기 때문에 원격탐사기법에서 필요하다(윤형진·전종철, 2020). 실험의 정확도를 위해 모든 영상은 동일한 좌표를 사용하였으며, 활용한 위성영상은 대상

범위가 다르거나 구름이 많아 품질에 영향을 끼치는 영상은 제외하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 2000년 4월 7일 발생한 동해안 산불 이후 조성된 삼척시 원덕읍 일대의 자연복원지(12개소)와 인공복원지(9개소)의 산림식생 회복 모니터링을 진행하기 위하여 인공위성 Landsat TM/ETM+와 Sentinel-2A의 위성영상을 활용하였으며, 분석 방법으로 정규식생지수와 정규탄화지수를 채택하여 정량적 지수로 산출하였다. 산불 전과 후 영상을 활용하여 시계열 분석한 결과는 공통적으로 봄, 여름, 가을 중 식생이 여름에 가장 많이 회복하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

상대정규탄화지수와 정규식생지수의 계절별 평균은 Table 8과 같으며, 강원도 삼척시의 상대 정규탄화지수와 정규식생지수의 식생 회복은 Fig 1, 2와 같다.

Table 8. Average value of dNBR and NDVI by seasonal image

Season	Natural restoration site		Artificial restoration site	
	dNBR	NDVI	dNBR	NDVI
Spring	-0.004	0.396	-0.032	0.406
Summer	-0.074	0.617	-0.099	0.596
Autumn	-0.054	0.627	-0.068	0.596

상대정규탄화지수(dNBR) 분석 결과

대상지의 봄철 위성영상을 분석한 결과, 복원 방법에 따른 식생 회복은 전체적으로 인공복원지의 식생회복이 더 양호한 것으로 나타났다(Fig. 1). 산불피해 발생 전과 후를 비교한 1998년~2000년 영상의 산불피해강도를 측정하였을 때 전체 대상지의 평균 산불피해지수는 0.533이었으며, 이는 미국지질조사국의 산불피해 등급기준에서 'Moderate-high Severity'에 해당하는 수준을 나타내었다. 산불피해 이후 초기 식생회복은 산불피해 이후 생존한 잔존목의 종자가 발아하여 초기 생장량이 더 높게 나타난 것으로 판단된다(임주훈 등, 2012). 2004~2005년 영상에서는 기존까지 회복하는 경향을 보이다 식생회복이 더디게 나타났으나 이를 정규식생지수와 비교할 때, 피해 직후 식생회복이 빠르게 회복하다가 2004년 이후 기존의 식생회복수준을 유지하는

것으로 판단된다. 또한 이는 봄철 식생회복속도가 빠른 동적변화에 따른 것으로 사료되며, 2006년 이후에는 다시 식생이 회복하는 경향을 나타내었다. 이 시기부터는 대체로 'Unburned'에 해당하는 수준을 보인다.

여름철 위성영상을 분석한 결과, 복원 방법에 따른 식생 회복은 2016~2018년 영상을 제외하고 인공복원지의 식생 회복이 더 양호한 것으로 나타났다. 2000년과 2006년의 영상을 비교하였을 때 전체 대상지의 산불피해강도지수는 평균 -0.394로 미국지질조사국의 산불피해등급기준에 따르면 'Enhanced Regrowth, high' 로 높은 회복성을 보인다. 하지만, 이는 산불피해 직후부터 2006년 전까지 위성영상을 수집하지 못하여 6년 동안의 분석결과가 확연하게 회복으로 나타난 것으로 판단된다. 2006~2007년 위성 영상부터는 미피해에 해당하는 'Unburned'에 해당하여 식생이 안정적인 것으로 나타났다.

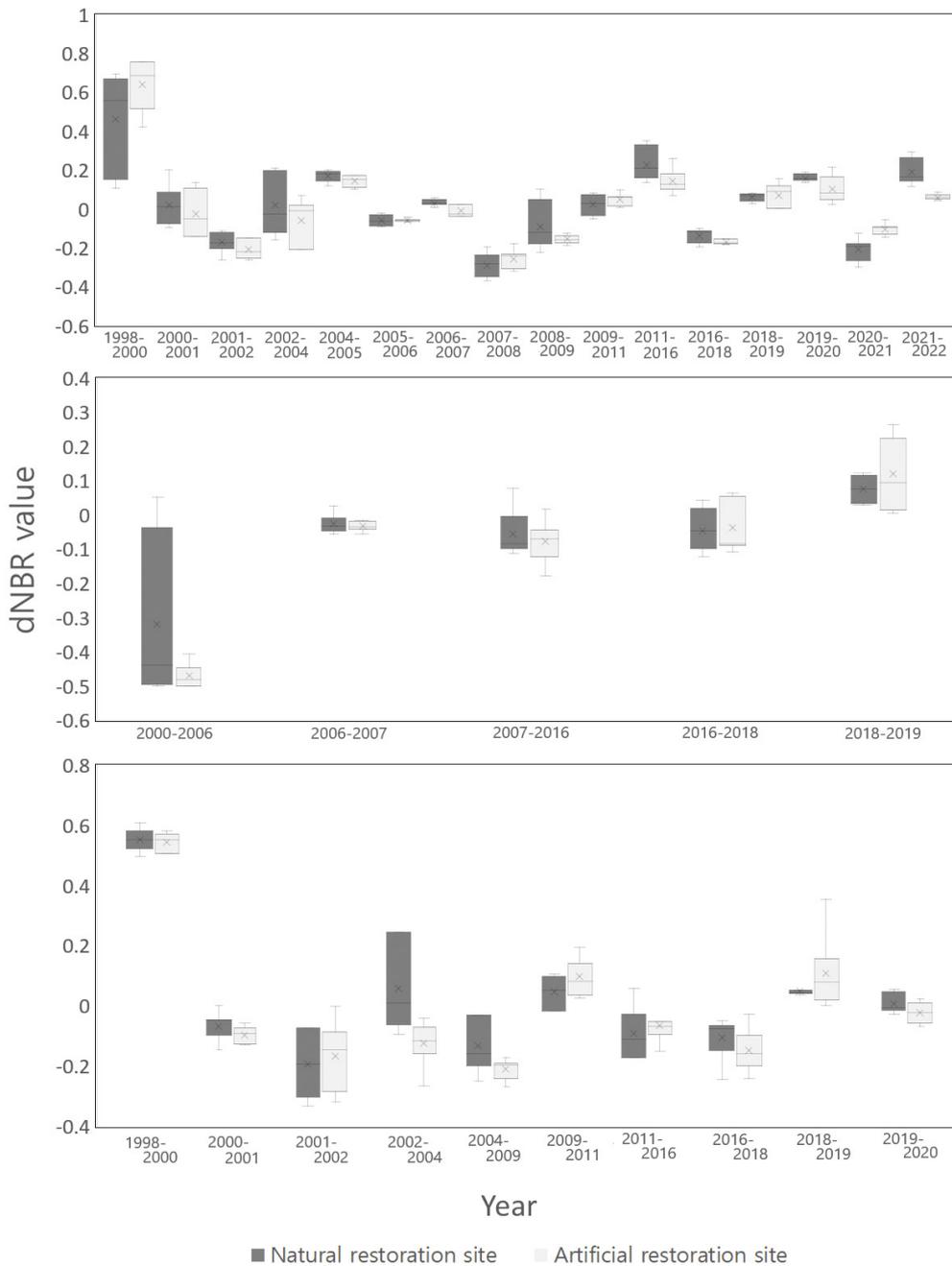


Fig. 1. The results of dNBR value on the restoration sites (Top: Spring, Middle: Summer, Bottom: Autumn)

가을철 위성영상의 분석 결과, 인공복원지의 식생회복이 더 양호한 것으로 나타났다. 1988~2000년 영상에서 산불피해를 측정하였을 때 전체 대상지의 평균 산불피해지수는 0.548이었으며, 미국지질조사국의 산불피해등급기준에 따르면 'Moderate-high Severity'에 해당하는 피해를 나타내었다. 이시영·안상현(2009)에 따르면 산불발생 후 2년이

경과하면 수목의 생존과 고사를 파악할 수 있다고 하였다. 이는 2002~2004년 영상에서 인공복원지는 회복하는 양상을 보이는 반면, 자연복원지는 상대적으로 피해 양상을 나타내는 것으로 보아 산불피해에 따른 잔존목이나 고사목에 의한 것으로 판단된다. 2009~2011년 이후 영상은 식생이 회복하거나 미피해 상태인 것으로 나타났다.

정규식생지수(NDVI) 분석 결과

대상지의 봄철 영상분석 결과 산불피해 발생 전인 1998년 정규식생지수는 0.707로 나타났다(Fig. 2). Aquino et al.(2018)의 NDVI등급 분류에 따르면 'Moderate high'

등급을 나타내었으며, 산불피해가 발생한 연도인 2000년 평균 0.155의 값을 보이며 'Very low'에 해당하는 매우 낮은 등급을 보였다. 산불피해 이후 지속적으로 회복되는 식생성장지수를 보이며, 2005년부터 2007년 까지 3년간 낮은 값을 보인다. 이는 봄철 상대정규탄화지수의 결과에서

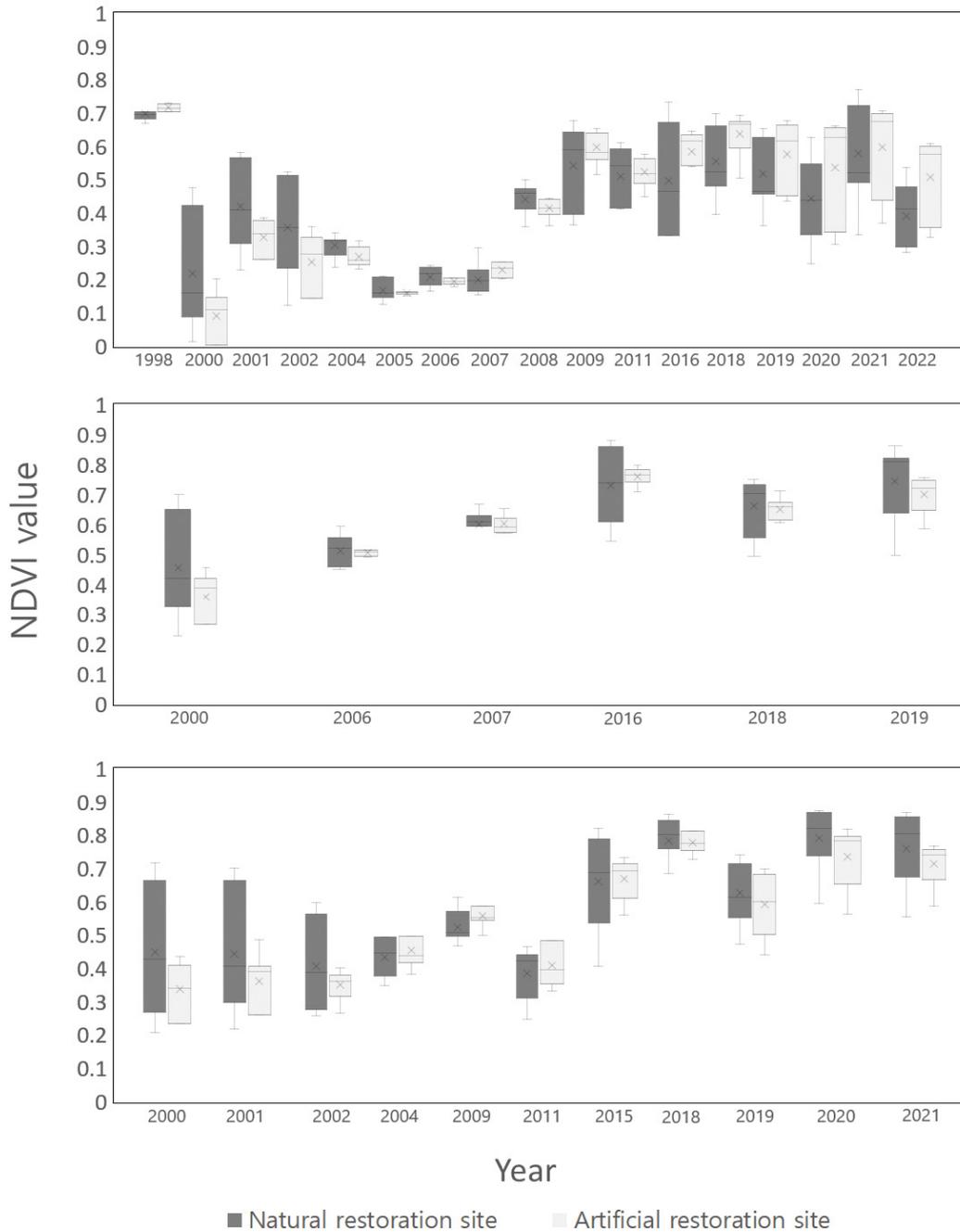


Fig. 2. The results of NDVI value on the restoration sites (Top: Spring, Middle: Summer, Bottom: Autumn)

피해 양상을 보인 시기와 유사하다. 2007년 영상 이후 안정적으로 식생회복을 하는 것으로 나타났으며, 대상지의 봄철 위성영상(2000년, 2002년 2004년 영상)에서 자연복원지가 인공복원지보다 정규식생지수가 높은 이유는 피해 이후 생존한 잔존목의 종자가 발아하여 초기 성장량이 더 높게 나타난 것으로 판단되며(임주훈 등, 2012), 이는 2000년 발생한 동해안 산불을 대상으로 NDVI를 활용하여 모니터링 Ryu et al.(2018)의 연구와 비슷한 경향을 보였다.

여름철 영상분석 결과는 산불피해 이후 자연복원지가 인공복원지보다 높은 정규식생지수를 갖는다. 이러한 경향은 인공복원지의 우세종은 소나무 및 침엽수류로 엽면적이 작은 반면 자연복원지는 참나무류와 활엽수류가 일부 존재하여 엽면적이 비교적 넓고 엽록소에 반응하는 정규식생지수의 값이 높게 나타나는 경향을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 대상지의 여름철 위성영상을 수집 하지 못해 정기적인 모니터링을 진행하지 못한다는 한계가 있었다.

대상지의 가을철 위성영상 분석결과는 산불피해 전인 1998년 평균 0.707으로 Aquino et al.(2018)의 NDVI에서 'Moderate high' 등급을 나타내었다. 산불피해 이후 감소하는 경향을 보이다 꾸준히 성장하는 것으로 나타났다. 산불피해 이후부터 2011년 전 영상까지 성장치를 보이며 2011년 영상에서 식생지수가 감소하였는데 이는 10월 31일의 영상을 사용하여 일부 수종의 수관이 낙엽으로 인해 사라지고 하층이 사라지며 감소하였다고 판단된다. 2018년 영상과 2020년 영상에서는 1998년보다 높은 식생지수를 나타내어 식생이 산불피해 전과 비슷해졌다고 판단된다.

상대정규탄화지수를 활용한 모니터링에서 인공복원지가 자연복원지보다 양호한 경향을 나타낸 것은 인공복원을 진행한 수종이 자연 천이 과정을 거치며 성장하는 것보다 빠르게 성장하여 초기에 빠른 속도로 복원이 진행된 것으로 파악된다. 하지만, 위성영상 촬영 일자에 따라 식생이 발달하기 전 영상이 포함되어 당해년도에 식생이 회복되었지만, 피해를 나타낸 연도의 영상도 존재하므로 위성영상을 활용한 모니터링은 실제로 복원대상지의 식생이 회복되었는지, 혹은 산불피해 이후 조립 혹은 천이 과정에서 회복되는 각각의 수종 및 성장량 차이에 따라 회복되는 양상이 어떠한지 파악할 수 없다는 단점이 존재한다. 반면, 정규식생지수를 활용한 모니터링에서 여름과 가을철의 자연복원지가 인공복원지보다 좋은 양상을 나타낸 것은 인공복원지에 비해 여름과 가을 계절에 자연복원지의 하층식생 발달이 활발하여 식생의 활력과 밀집에 영향을 받는 정규식생지수의 지수 값에 영향을 준 것으로 판단된다.

본 연구에서는 정규탄화지수 및 정규식생지수를 이용하여 분석하였다는 것에 대한 한계가 있다. 현장 조사를 통한 식생

조사와 우세종을 파악한 후 수치임상도 등과 위성영상을 활용한 GIS 분석을 병행한다면 산불피해 이후 조성된 모니터링을 위해 조성된 대상지에서의 식생회복에 대한 지표를 더욱 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

동해안 산불은 2000년 4월 7일 강원도 고성군에서 발화하여 동년 4월 15일까지 191시간 동안 계속된 산불로 강원도 고성군, 삼척시, 동해시, 강릉시, 경상북도 울진군 일대의 산림 약 23,794ha을 불태운 초대형 산불이다. 본 연구는 동해안 산불의 피해지인 강원도 삼척시 원덕읍 일대를 산불피해 이후 복원 방법에 따른 식생 회복 모니터링을 진행하기 위해 조성된 자연복원지(12개소)와 인공복원지(9개소)를 인공위성 Landsat TM/ETM+와 Sentinel-2A 위성을 통한 위성영상을 활용하였고, 32개의 영상을 통해 계절별 식생회복을 시계열 분석하였다. 산불피해 이후 조성된 복원대상지의 모니터링 결과 21개소의 복원지 모두 식생이 회복하는 결과를 나타내었고, 봄, 여름, 가을 영상에서 봄 영상의 식생회복에 대한 변화가 가장 많이 나타나는 것으로 보였다. 이는 봄철 하층식생 및 수관부의 성장에 의해 나타나는 것으로 판단된다. 모니터링 결과 여름과 가을 정규식생지수를 제외한 봄 영상과 상대정규탄화지수의 비교에서 인공복원지가 우세한 것으로 나타나지만, 상대정규탄화지수와 정규식생지수의 지수 차이가 크지 않아 인공복원지와 자연복원지의 식생 회복은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 자연복원지는 산불피해 이후 자연 천이 과정을 거치며 인공복원지에서는 볼 수 없는 식물 다양성을 갖는 것에서 생태적 가치가 있다. 따라서, 복원 방법에 따라 산사태취약지역과 경제림이 목적인 산림 등은 인공복원을 실시하고 자연 천이가 목적인 산림에서는 자연복원을 실시한다면 그 목적에 맞는 효율적인 산림복원을 기대할 수 있을 것이다.

추후, 위성영상을 활용한 산불피해 후 식생 회복 모니터링을 효과적으로 진행하기 위해 재방문 주기가 16일인 Landsat TM/ETM+와 재방문 주기가 5일인 Sentinel-2A를 포함한 재방문 주기가 각기 다른 국내외 인공위성의 위성영상을 활용하여 여러 일자의 영상을 확보한다면 국내 산불피해와 복원양상을 효과적으로 시계열 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 후속 연구를 통해 산림복원 기법에 따른 식생회복에 대한 연구가 필요하다 필요할 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 우리나라의 산불피해지역에 조건에 맞는 복원방법을 선택 해야하는 지역에서 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김남균, 곽재환, 김만일. (2019). 산불 사고사례 분석을 통한 산불 대응 의사결정 트리 강화의 중요성 고찰. 2. 한국방재학회 논문집, 19, 213-220.
2. 박성욱, 김형우, 이수진, 윤예슬, 김은숙, 임종환, 이양원. (2018). 고해상도 위성영상과 Fully Convolutional Network 를 활용한 산림재해 피해지 탐지. 한국사진지리학회지, 28(4), 87-101.
3. 성선용, 이동근, 김지연. (2015). Landsat 영상을 활용한 동해안 산불지역의 복원방법에 따른 식생변화 모니터링. In Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference (pp. 15-16). The Korean Institute of Landscape Architecture.
4. 신형진, 하림, 박민지, 김성준. (2010). Estimation of spatial evapotranspiration using the relationship between MODIS NDVI and morton ET-For Chungjudam watershed. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 52(1), 19-24.
5. 원명수, 구교상, 이명보. (2007). Landsat 영상으로부터 정규탄화지수 추출과 산불피해지역 및 피해강도의 정량적 분석. 한국지리정보학회지, 10(3), 80-92.
6. 원명수, 김경하, 이상우. (2014). SPOT5 영상과 현장조사 자료를 융합한 대형산불지역의 피해강도 분석. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 16(2), 114-124.
7. 윤형진, 정종철. (2020). 기계학습을 이용한 Sentinel-2 산불피해등급 분류. 국토연구, 107-117.
8. 이규송, 정연숙, 김석철, 신승숙, 노찬호, 박상덕. (2004). 동해안 산불 피해지에서 산불 후 경과 년 수에 따른 식생 구조의 발달. 한국생태학회지, 27(2), 99-106.
9. 이시영, & 안상현. (2009). 지표화 산불피해지의 수종별 임목 고사율 비교분석. 한국방재학회논문집, 9(2), 39-43.
10. 이형석, 이시영. (2011). The analysis of distribution and characteristics of forest fires damage over 30 ha in Korea. Fire Science and Engineering, 25(5), 39-46.
11. 임주훈, 김정환, 배상원. (2012) 고성 산불피해지에서 소나무 치수의 자연복원 패턴, 한국농림기상학회지, 14(4), 222-228.
12. 채희문, 엄기증, 이시영. (2011). CCGIS 를 활용한 강원도 산불의 기후변화 취약성 평가. 2. 한국방재학회 논문집, 11, 123-130.
13. 최철순, 최승필. (1997). 인공위성 TM 영상을 이용한 고성 산불 피해지역의 추적조사. 한국측량학회지, 15, 215-219.
14. 산림청. (2021). 산불통계연보
15. Aquino, D. D. N., Rocha Neto, O. C. D., Moreira, M. A., Teixeira, A. D. S., Andrade, E. M. D. (2018). Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. Revista Ciência Agronômica, 49, 420-429.
16. Franco, M. G., Mundo, I. A., Veblen, T. T. (2020). Field-validated burn-severity mapping in North Patagonian forests. Remote Sensing, 12(2), 214.
17. García, M. L., Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. Geocarto International, 6(1), 31-37.
18. Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. International Journal of Wildland Fire, 15(3), 319-345.
19. Jones, M. W., Smith, A., Betts, R., Canadell, J. G., Prentice, I. C., Le Quéré, C. (2020). Climate change increases the risk of wildfires. ScienceBrief Review, 116, 117.
20. Kasischke, E. S., Hoy, E. E., French, N. H. F., Turetsky, M. R. (2007). Post-fire evaluation of the effects of fire on the environment using remotely-sensed data. Towards an operational use of remote sensing in forest fire management, 38.
21. Key, C. H., Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA). In: Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55, 164.
22. McKenna, P., Phinn, S., Erskine, P. D. (2018). Fire severity and vegetation recovery on mine site rehabilitation using WorldView-3 imagery. Fire, 1(2), 22.
23. Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W.,

- Schell, J. A., Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation NASA, (No. E75-10354).
24. Ryu, J. H., Han, K. S., Hong, S., Park, N. W., Lee, Y. W., Cho, J. (2018). Satellite-based evaluation of the post-fire recovery process from the worst forest fire case in South Korea. *Remote Sensing*, 10(6), 918.
25. Stephens, S. L., Burrows, N., Buyantuyev, A., Gray, R. W., Keane, R. E., Kubian, R., Van Wagtendonk, J. W. (2014). Temperate and boreal forest mega-fires: Characteristics and challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(2), 115-122.
26. Weirather, M., Zeug, G., Schneider, T. (2018). Automated Delineation Of Wildfire Areas Using Sentinel-2 Satellite Imagery. *GI_Forum 2018.*, 6, 251-262.
27. 미국지질조사국(United States Geological Survey)
<https://www.usgs.gov/>

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원(Korea Forest Research Institute)의 연구비 지원에 의해 이루어진 것임.