

RapidEye 영상을 활용한 대형산불피해지의 온실가스 배출량 추정

원명수¹ · 김유승^{1*} · 김경하¹

Estimation on Greenhouse Gases(GHGs) Emission of Large Forest Fire Area in 2013

Myoung-Soo WON¹ · You-Seung KIM^{1*} · Kyong-Ha KIM¹

요 약

본 연구는 RapidEye 영상을 활용하여 2013년 발생한 대형산불 피해지역(울주, 포항, 봉화)을 대상으로 온실가스 배출량 추정하였다. 온실가스 배출량 추정은 2006 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인에서 제시하는 추정식을 이용하였다. 본 연구에서는 최대 우도법을 기반으로 한 감독분류를 실시하여, 산불피해지역의 강도등급 및 피해면적을 산출하였으며, 현장정보와 비교하여 정확도 검증을 실시하였다. 산불피해 등급별 정확도 평가 결과는 평균적으로 전체정확도 73.93%과 Kappa 계수 0.67로 나타났다. 2013년 대형산불피해지의 온실가스 배출량 추정은 울주지역 CO₂ 63,260, CO 5.207, CH₄ 360, N₂O 28.0, NO_x 4.4 g/kg⁻¹ · ha⁻¹, 포항지역 CO₂ 28,675, CO 2.359, CH₄ 163, N₂O 12.7, NO_x 1.9 g/kg⁻¹ · ha⁻¹ 그리고 봉화지역 CO₂ 53,086, CO 1,655, CH₄ 114, N₂O 23.5, NO_x 3.6 g/kg⁻¹ · ha⁻¹로 나타났다.

주요어 : 온실가스 배출, 대형산불, 피해강도, 연소효율, RapidEye

ABSTRACT

This study was performed to estimate Greenhouse gases(GHGs) emissions from biomass burning at large forest fire(Ulju, Pohang and Bonghwa) in 2013. The extended methodology to estimate GHGs adopted the IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) Guidelines(2006) equation. For classifying fire damaged area and analyzing burn severity of total three large-fire area damaged, this study used post-fire imagery from Rapideye imagery to compute the Maximum Likelihood Classification (MLC). The result of accuracy assessment on burn severity from imagery showed that

2014년 5월 31일 접수 Received on May 31, 2014 / 2014년 6월 27일 수정 Revised on June 27, 2014 / 2014년 7월 29일 심사완료 Accepted on July 29, 2014

¹ 국립산림과학원 산림방재연구과 Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

* Corresponding Author E-mail : diprvention@forest.go.kr

average overall accuracy was 75.93% and Kapp coefficient was 0.67. Finally, GHGs emissions from biomass burning in the three large-fire area 2013 were estimated as follows: Ulju CO₂ 63,260, CO 5.207, CH₄ 360, N₂O 28.0 and NO_x 4.4 g/kg⁻¹ · ha⁻¹, Pohang CO₂ 28,675, CO 2.359, CH₄ 163, N₂O 12.7 and NO_x 1.9 g/kg⁻¹ · ha⁻¹ and Bonghwa CO₂ 53,086, CO 1,655, CH₄ 114, N₂O 23.5 and NO_x 3.6 g/kg⁻¹ · ha⁻¹.

KEYWORDS : Greenhouse Gases Emission, Large Forest Fire, Burn Severity, Combustion Efficiency, RapidEye

서 론

지난 100년간 화석연료 사용의 증가로 인해 평균온도가 증가하면서 기후변화가 나타나고 있다. 이러한 현상은 대기 중에 이산화탄소(CO₂)와 Non-CO₂ 증가로 기온이 상승하여 온실효과가 나타나고 기상이변을 일으켜 생태계와 사회 경제 분야에 영향을 끼치고 있다. 우리나라는 최근 10년간(2004~2013) 연평균 389건의 산불이 발생하여 781ha의 산림피해를 입고 있다. 이 중 산불발생 건수의 51%(196건), 피해면적의 84%(614ha)가 봄철(3~4월)에 집중된다. 특히 대형산불이 많이 발생하는 4월에는 발생건수의 28%(107건), 피해면적은 60%(442ha)를 차지한다. 특히 동기간 동안 300ha 이상의 대형산불이 10건이 발생하여 28,377ha의 산림과 재산피해를 가져왔으며, 대부분 4월에 집중되고 있다(Forest service, 2014). 최근 우리나라의 기후변화로 인해 봄철 겨울철 가뭄이 심해져 산불위험시기가 앞당겨지고, 산불의 빈도도 많아지고 대형화 되는 추세이다. 대형화 추세와 더불어 신속성, 객관성, 효율성 측면에서 원격탐사를 이용한 산불피해지의 조사·분석은 점차 각광을 받고 있다(Won *et al.*, 2007).

산불피해로 인한 분광 패턴의 변화 분석은 산불피해 전후 영상의 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio: NBR)와 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)를 포함한 다양한 분광밴드들의 조합에 의한 지수의 형태로 활용할 수 있다. 특히,

NBR과 ΔNBR은 원격탐사 자료에서 산불피해 강도를 추정하는데 폭넓게 활용된다(Key *et al.*, 2002, 2006; van Wagendonk *et al.*, 2004; Cocke *et al.*, 2005; Roy *et al.*, 2006). Duffy *et al.*(2007)은 NBR을 이용하여 알래스카 산불피해지의 식생형태와 피해강도의 상관성을 분석하였으며, Miettinen *et al.*(2007)은 MODIS와 Landsat ETM+ 영상 자료를 활용하여 2005년 인도네시아 보르네오 산불피해지의 피해강도를 평가한 바 있다. 또한, 2000년 강원도 삼척지역에서 발생한 산불을 Landsat TM 위성영상을 이용하여 NBR를 통해 산불피해면적을 산출하고 온실가스 배출량 시나리오를 이용하여 산불 피해지에서 바이오매스를 추정하고 지형과 산불피해강도를 분석한 바 있다(Lee *et al.*, 2008; Won *et al.*, 2008). 또한 Won(2013)은 위성영상을 이용하여 산불피해 특성 및 강도 분석하기 위해서는 산불피해지의 면적에 따라 영상자료를 선택해야 한다고 말한 바 있다. 일반적으로 산불피해지의 면적이 1,000ha 이상인 경우 Landsat TM/ETM 자료를 이용하는 것이 시간과 비용적인 부분에서 효과적이고, 300~100ha 미만의 경우는 Rapideye 혹은 SPOT 등 중해상도 영상자료를 활용하고, 300ha 미만의 경우는 칼라 항공사진 혹은 아리랑 3호, Geoeye1, Worldview 2 등 고해상도를 가진 영상자료를 활용하는 것이 적합하다(KFRI, 2010). 현재 우리나라는 산불피해지에 대한 피해강도 조사는 이루어지고 있지만, 보다 정량화된 피해지구분은 되어 있지 않은 상태이다. 또한, 기후변화의 주범이 되는 온실가스가 산불피해지에서

배출이 되는데, 이에 대해서는 전혀 추정이 이뤄지지 않고 있다(KFRI, 2013).

본 연구에서는 위성영상을 이용하여 산불피해지내 산불피해 강도에 따른 등급을 수관전소, 수관열해, 피해중, 피해경, 미피해 5단계로 구분하고 면적을 산정하였고 각 등급에서 배출되는 CO₂, Non-CO₂ 등 온실가스 배출량을 추정하였다. 또한, 국가적으로 기후변화협약에 대응하기 위해 산불피해지내 온실가스 배출량 추정량을 구하여 post-2012 대응을 위한 국가 보고 자료로 활용하는데 목적이 있다.

연구방법

1. 연구대상지

연구 대상지역은 2013년 3월 9일 같은 날 발생한 대형산불피해지로 경상북도 봉화와 포항, 경상남도 울주 3지역을 대상으로 하였다. 본 지역은 산불피해면적이 100ha 이상으로 산

림보호법 시행령 제25조 제1항에 정의되어 있는 대형산불피해지였다. 본 연구에서는 대형산불피해지의 현장조사와 위성영상자료를 취득하여 산불피해강도 별 면적을 산출하고 온실가스 배출량 추정을 하였다.

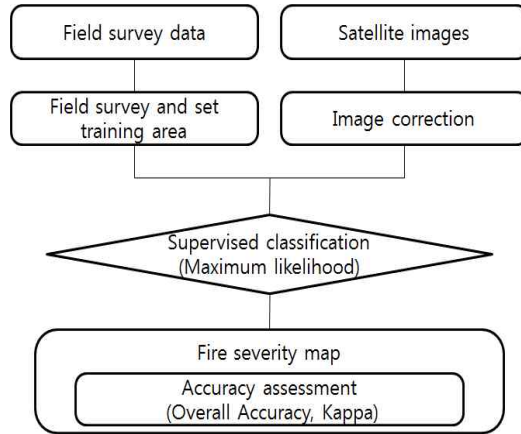


FIGURE 2. Research process

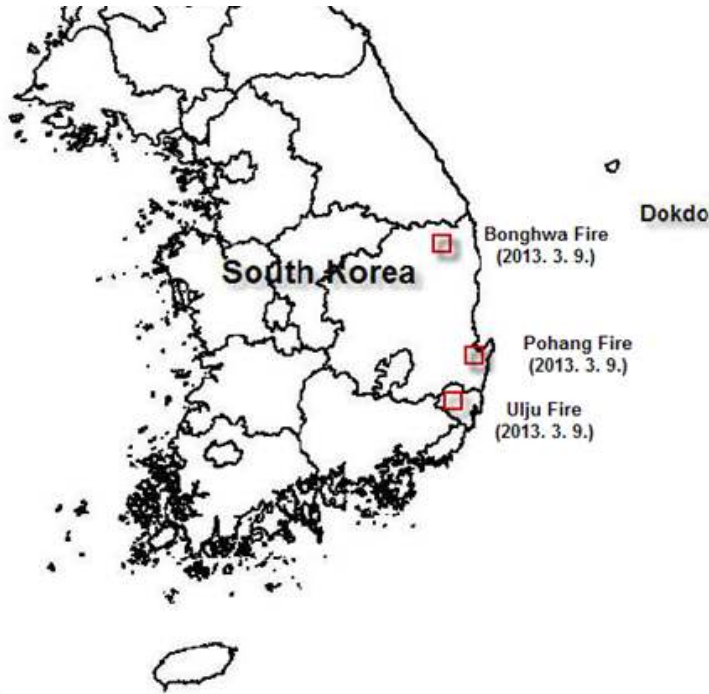


FIGURE 1. Study area

2. 위성영상자료

산불피해강도별 분석을 위해서 3지역 모두

5m 해상도인 RapidEye 위성영상을 이용하였다. 울주산불의 영상은 2013년 4월 28일 촬영



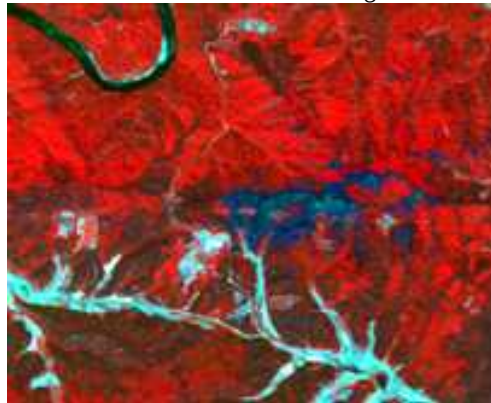
(a) Ulju forest fire area

Date occurred : 2013.03.09. Date of image taken : 2013.04.28.



(b) Pohang forest fire area

Date occurred : 2013.03.09. Date of image taken : 2013.06.03.



(c) Bonghwa forest fire area

Date occurred : 2013.03.09. Date of image taken : 2013.06.03.

FIGURE 3. RapidEye image of large forest fire area

되었고, 포항과 봉화지역은 촬영시기가 다소 늦은 2013년 6월 3일 영상이다. 산불피해강도별 면적 추출을 위해 사용된 고해상도 위성영상자료는 그림 3와 같다.

3. 산불피해강도 분석

1) 위성영상을 이용한 산불피해강도 분석

대형산불피해지의 피해강도와 식생회복 과정을 파악하기 위해서는 많은 인력과 예산 그리고 상당한 시간이 소요된다. 이러한 대규모 산불피해지의 조사 및 평가를 위해서는 위성영상 자료를 이용한 산불피해지 분석이 신속하고 객관적인 결과를 취득할 수 있는 장점을 가지며, 국내외 많은 연구에서 그 효용성이 검증되었다(Turner and Romme, 1994; Kushla and Ripple, 1998; Key and Benson, 2002; Collins *et al.*, 2007; Wimberly and Reilly, 2007; Won *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008).






위성영상을 활용한 연구대상지의 산불피해강도 분석을 위해 감독분류기법을 사용하여 산불피해지 현장조사 자료를 기반으로 최대우도법(Maximum Likelihood, 이하MLC)을 이용하여 산불피해 후의 피해등급을 구분하였다. 위성영상을 분류하는 방법으로 다양한 기법이 있지만 산불피해지 분류에서는 국내 연구에서 최대우도법의 효율성이 검증되었다(KFRI, 2013). MLC 기법은 광학영상에 많이 사용하는데 이는 다중 정규 분포 가정하에 상대적으로 적은 계산량을 요구하기 때문이다(Park *et al.*, 2012). 연구대상지의 위성영상자료는 기하보정을 통해

TM(Transverse Mercator) 좌표체계(중부원점)에 따라 투영 변환한 다음 근접 재배열(Nearest neighbor resampling)에 의해 재배열하였으며, 이 때 영상 좌표변환은 X, Y 각 방향에 대해 RMSE 1.0 픽셀 이내의 정확도로 수행하였다.

본 연구에서는 산불피해강도의 정의를 유기물 감소 등 환경요소의 변화 개념을 고려하여 산불 후 효과 모니터링을 위해 피해강도(Burn severity) 측면으로 국한시켜 접근하였으며, 피해강도의 등급을 수관전소(Extreme), 수관열해(High), 피해중(Moderate), 피해경(Low), 미피해지(Unburn) 5등급으로 구분하였다(표 1).

연구대상지의 산불피해등급 구분을 위하여 그림 3의 각 위성영상 내 지역에 대해 현지조사를 실시하였다. 먼저 대상지의 주요 수종의 분포를 파악하고 현지 조사를 통해 수종에 대한 수종명, 흉고직경, 수고 그리고 산불피해강도에 따른 구분을 하였다. 각 산불피해지에서 GPS 수신기를 이용하여 산불피해등급별로 위치정보를 수집하였다. 결과적으로 총 31개 지점에서 파악하였는데, 수집된 자료를 훈련자료로 이용하여 7~8개의 수관전소, 수관열해, 피해중, 피해경으로 구분했고 미피해지는 1개 지점으로 구분하였다. 산불피해지역의 경계 구획은 현장에서 조사한 결과와 위성영상의 다양한 밴드조합을 통해 산불피해지의 외곽선을 On-screen digitizing을 실시하여 피해경계를 설정하였다. 자료처리를 위해서 원격탐사 처리

TABLE 1. Standard for burn severity classification

Burn severity level	Color code	Remarks
Extreme		Crown fire (100% burnt to death)
High		Heat damage of crown layer(60% > burnt to death)
Moderate		Crown and Surface fire(30~60% live)
Low		Surface fire(61% > live)
Unburn		Unburn

및 분석 프로그램인 ENVI와 GIS 프로그램인 ArcGIS를 이용하였다.

2) 산불피해강도 분류정확도 검증

원격탐사를 이용하여 분류된 지도는 자료의 가치를 가지려면 분류 결과에 대한 정확도 검증이 있어야 한다. 분류 정확도를 평가하는 방법으로 오차행렬(Error Matrix)를 주로 이용하고 있다. 본 연구에서는 오차행렬을 이용하여 전체정확도(Overall Accuracy), 생산자 정확도(Producer's accuracy)와 사용자 정확도(User's accuracy) 간에 Kappa 계수로 정확도를 평가하였다. 전체정확도의 값은 계산과 이해가 용이하여 주로 사용되는 것으로, 오차행렬에서 대각요소의 합에 대한 전체 참조자료와의 백분율로 표현된다. 이 때 대각요소의 값들은 각각의 지표항목에 대해 정확히 분류된 참조자료의 수이다. 반면 Kappa 계수값은 대각요소 뿐만 아니라 모든 행렬요소를 대상으로 하는 것이기 때문에 전체정확도보다 분류정확도에 대한 신뢰도가 높다.

4. 온실가스 배출량 추정

1) 온실가스 배출량 추정식

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 산불에서 직접 배출되는 온실가스 추정방법을 제시하고 있다. 본 연구에서 사용한 온실가스 배출량 추정은 IPCC 2006 가이드라인에서 제시하는 식 (1)을 이용하였다.

$$L_{fire} = A \times B \times C \times D \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기에서,

L_{fire} =산불로 인해 배출된 GHG 양, tonnes of GHG

A=연소면적(산불피해강도 별 면적), ha

B='이용가능한' 연료량, kg d.m. ha⁻¹

C=연소효율(또는 연소된 바이오매스 비율)

D=배출계수, g(kg d.m.)⁻¹

2) 연료량(바이오매스)

이용 가능한 연료량을 구하기 위해서 본 연구에서는 국립산림과학원에서 2009년~2012년까지 현장에서 조사한 데이터를 통해 얻어진 결과를 수치임상도(1:5,000)의 임상과 영급 정보를 이용하여 총 18개로 분류코드화 한 지도를 이용하였다(KFRI, 2010). 현장조사 자료로는 상층, 중층 관목층 그리고 지표층으로 나누었으며 상층과 중층 연료량 개산을 위해 국립산림과학원에서 개발한 임목자원평가프로그램을 이용하였다(KFRI, 2004). 상층의 경우 W=aD2H 추정식을 이용하였고, 중층의 경우에는 현장에서 지상에서 최대한 가깝게 벌채한 후 수고와 생중량(연료의 무게)을 측정하고 그 중 1/3을 표본으로 하여 실험실에서 측정된 건중량을 이용하였다. 관목층과 지표층의 경우에는 표준 정방형구(관목층 2×2m와 지표층 0.5×0.5m)를 설치하고, 모든 표본은 완전히 채집한 후 건중량을 재고 단위면적당(ha) 추정된 연료량을 이용하였다.

본 연구에서는 KFRI(2010)이 작성한 전국 연료량지도(1:5,000)에서 경북지역과 경남지역만 추출하였다(그림 4). 추출된 연료량지도는 상층과 지표층으로 분리하여 산불피해강도에 따른 온실가스 배출량 추정에 이용하였다. 상층과 지표층으로 구분한 이유는 수관화(crwon fire)와 지표화(surface fire) 피해특성에 따라 수관층과 지표층의 연소량에 영향을 미침으로 그 차이로 산불로 인한 산림연료의 연소시 온실가스 배출량이 달라질 수 있기 때문이다. 특히, 수관화는 대형산불의 주된 확산유형으로 빠른 확산속도와 높은 산불피해강도의 특성을 보이며 많은 피해를 입힌다(Ryu *et al.*, 2014).

3) 연소효율과 배출계수

산불로 인한 연소효율(Combustion efficiency)은 일반적으로 50%에서 95%까지로 추정(Ward, 1990)하고 있으며, 연소효율의 계산은 모든 탄소가 이산화탄소로부터 배출된다고 가정하고 이산화탄소에 포함되어 있는 실제 탄소비율로 측정할 수 있다. 대개 연소효율

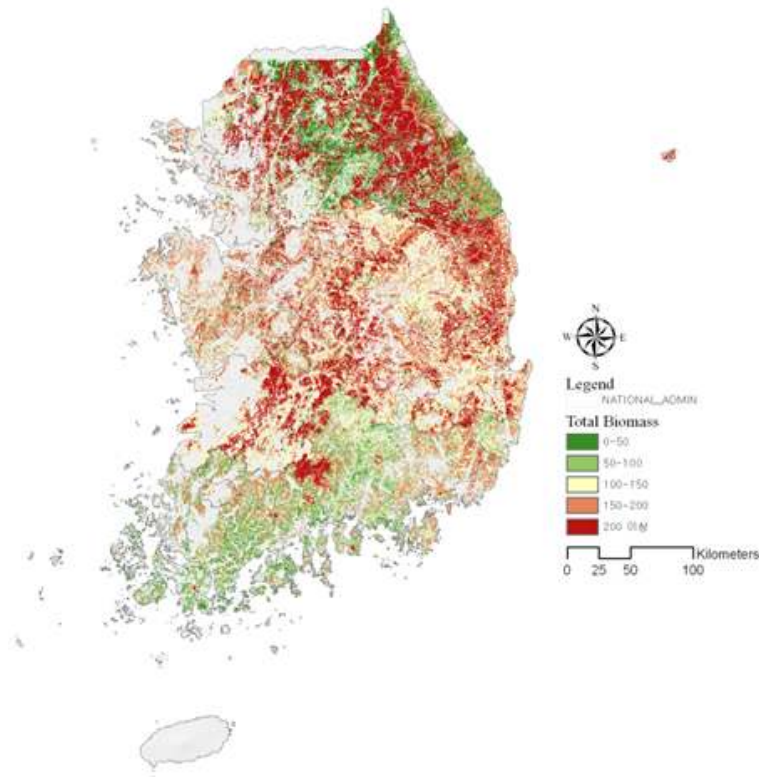


FIGURE 4. Fuel loads distribution map in Korea

은 연기가 나고 화세가 약한 불에서 가장 낮고 통풍이 잘되고 화세가 강한 산불의 경우에 가장 높다. 연무를 많이 동반하는 산불(smoldering combustion)의 경우 미립자와 일산화탄소의 배출이 매우 높다. 즉 피해강도가 낮은 산불은 미립자 배출량이 많은 반면 연소효율은 낮다고 할 수 있다(Ward, 1990).

현재 우리나라는 수목이 연소 시에 연소효율에 관한 연구가 없는 관계로 IPCC에서의 기준과 국내 산불의 사례를 이용하였다. 기본적으로 연소효율은 기후, 지형, 산림의 상태와 구조 등

복합적이며 국가마다 상당한 차이가 나타난다.

본 연구에서는 ‘연소효율’은 표 2와 같이 KFRI(2010)가 연구한 울진산불사례에서 적용하여 수관전소 0.95 수관열해 0.46 피해중 0.27 피해경 0.12 값을 IPCC(2006) 가이드라인에서 제시한 추정식의 연소효율 항목에 적용하였다(표 2).

또한, 배출계수는 IPCC에서 제시한 Delmas *et al.*(1995) 기본 배출계수를 적용하였다. CO₂는 1,580, CO 130, CH₄ 9, NO_x 0.7, N₂O 0.11 값을 적용하였다.

TABLE 2. Combustion efficiency

Categories	Extreme	High	Moderate	Low	Source
Uljin Forest fire	0.95	0.46	0.27	0.12	KFRI(2010)
IPCC		0.43	0.40	0.30	IPCC(2006)

TABLE 3. IPCC emission factor (G/kg dry matter combusted)

Categories	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	N ₂ O	Source
Forest Fires	1,580	130	9	0.7	0.11	Delmas <i>et al.</i> (1995)

결과 및 고찰

1. 위성영상을 이용한 산불피해강도 및 정확도 분석

산불피해강도 분석결과 울주 산불의 전체 피해면적은 376.9ha로 나타났고 산림청 통계로는 280ha였다. 정확도 평가 결과 전체정확도는 82.09%, Kappa 계수는 0.754로 나타났다. 최대우도법을 적용하여 울주산불 피해강도별 연

소면적 추출한 결과 ‘수관열해’ 로 인한 피해가 가장 많았다. 그러나 실제 현장조사 결과 울주지역의 경우 ‘수관열해’ 보다는 ‘수관전소’ 지역이 많았으며, 이는 영상 분류 시 음영지역 혹은 산불피해지의 반사값과 유사하게 나타나서 오분류가 발생한 것으로 사료된다.

산불피해강도 분석결과 포항지역의 산불피해면적은 98.5ha였으며 산림청 통계는 79ha였다. 분류결과 전체정확도는 73.70%로 나타났고 Kappa 계수는 0.645였다. 최대우도법을 적용

TABLE 4. Classification accuracy of Ulju forest fire area

	Extreme	High	Moderate	Low	Unburn	Total	User' s accuracy
Extreme	116	24	0	13	0	153	75.8%
High	21	148	4	0	0	173	85.5%
Moderate	0	1	127	0	0	128	99.2%
Low	14	14	0	33	0	61	54.1%
Unburn	0	0	0	0	7	7	100.0%
Total	151	187	131	46	7	522	
Produce' s accuracy	76.8%	79.1%	96.9%	71.7%	100.0%		

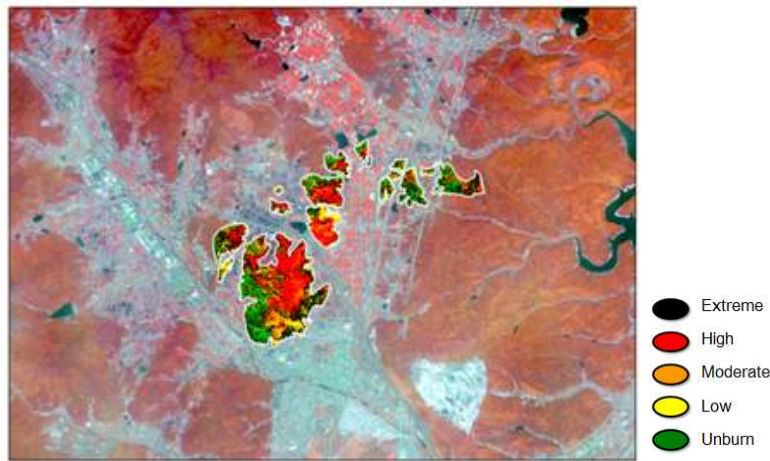


FIGURE 5. Ulju burn severity by MLC

TABLE 5. Classification accuracy of Pohang forest fire area

	Extreme	High	Moderate	Low	Unburn	Total	User' s accuracy
Extreme	28	9	9	0	0	46	60.9%
High	1	42	21	0	0	64	65.6%
Moderate	1	17	83	0	0	101	82.2%
Low	5	7	1	51	0	64	79.7%
Unburn	0	0	0	5	9	14	64.3%
Total	35	75	114	56	9	289	
Produce' s accuracy	80.0%	56.0%	72.8%	91.1%	100.0%		



FIGURE 6. Pohang burn severity by MLC

하여 포항산불 피해강도별 연소면적을 추출한 결과 '수관열해'로 인한 피해가 가장 많은 것으로 나타났다. 실제 산불 현장조사 결과 이러한 원인은 3월 10일 산불진화가 완료된 후 최초 산불피해지역이 '수관전소' 지역임에도 불구하고 '수관열해' 지역으로 잘 못 분류된 결과이다. 이는 위성영상의 촬영 시점이 6월 3일로 산불발생(3월 9일) 후 약 3개월이 경과된 시점으로 하층식생이 자라나면서 산불피해지로 구분되지 않고 분광특성이 변화하고 혼합되면서 오분류가 나타난 것으로 보인다.

한편 봉화지역의 산불피해강도 분석결과는 전체 피해면적은 62.02ha로 나타났다. 봉화지역의 정확도 평가 결과 전체정확도는 72.01%

로 나타났고 Kappa 계수는 0.625였다. 봉화산불 피해강도별 연소면적 추출을 위한 최대우도법 분석결과 '피해중'으로 인한 피해가 가장 많았다. 이 지역은 현장조사 결과 '피해중'으로 분류된 지역이 대부분 '수관열해' 지역인 것으로 나타났다. 이는 현장에서 조사한 훈련지역의 산불피해강도 등급과 영상에서의 분광특성이 다르게 나타난 것으로 보인다. 된 봉화지역 역시 취득된 영상이 이미 하층식생이 유입되어 우점한 상태에서 촬영된 영상으로 영상분류 과정에서 오분류가 발생한 것으로 사료된다. 그리고, 현장 조사 시 각 지점 간에 근접하여 피해강도를 구분한 것도 영상 오분류의 영향을 미친 것이라 생각된다.

TABLE 6. Classification accuracy of Bonghwa forest fire area

	Extreme	High	Moderate	Low	Unburn	Total	User' s accuracy
Extreme	80	14	0	0	0	94	85.1%
High	9	17	6	11	0	43	39.5%
Moderate	0	6	156	0	1	163	95.7%
Low	2	0	0	12	0	14	85.7%
Unburn	5	0	0	56	18	79	22.8%
Total	96	37	162	79	19	393	
Produce' s accuracy	83.3%	45.9%	96.3%	15.2%	94.7%		

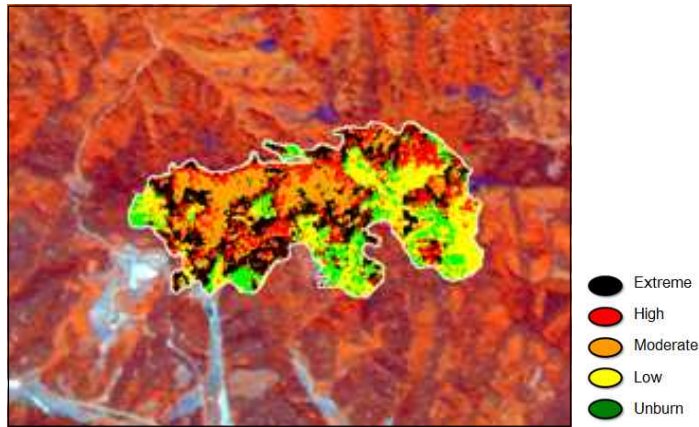


FIGURE 7. Bonghwa burn severity by MLC

2. 온실가스 배출량 추정 분석

울주산불 피해강도별 온실가스 배출량 추정 수관화의 결과로 인해 CO₂가 63,260g/kg⁻¹ · ha⁻¹ (91.1%), CO가 5,207g/kg⁻¹ · ha⁻¹ (7.50%),

CH₄가 360g/kg⁻¹ · ha⁻¹ (1.32%), N₂O가 28.0g/kg⁻¹ · ha⁻¹ (0.04%) 그리고 NO_x가 4.4g/kg⁻¹ · ha⁻¹ (0.01%)로 배출 되었고 지표 화로 인해 CO₂가 11,176g/kg⁻¹ · ha⁻¹ (16.1%), CO가 919g/kg⁻¹ · ha⁻¹ (1.32%),

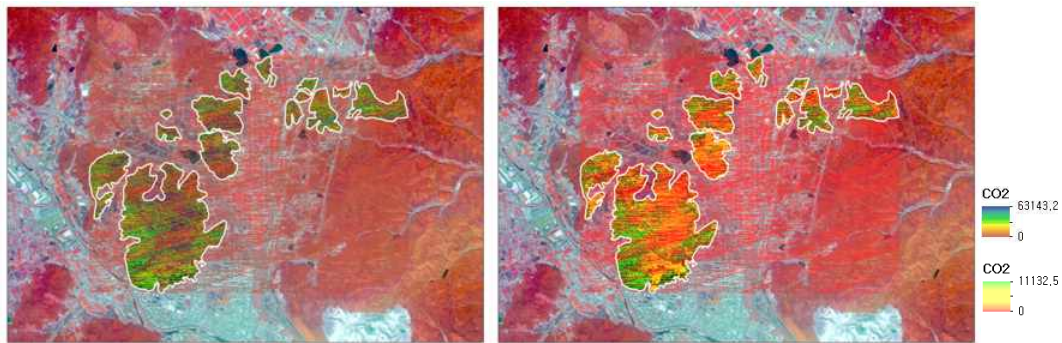


FIGURE 8. GHGs emission at Ulju; (Left) Crown fire and (Right) Surface fire



FIGURE 9. GHGs emission at Pohang; (Left) Crown fire and (Right) Surface fire

CH₄가 63g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.09%), N₂O가 4.9g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.01%) 그리고 NO_x가 0.7g/kg⁻¹ · ha⁻¹로(0.001%) 배출되었다(표 7). 결과를 보면, 산불피해면적이 가장 큰 울주 지역에서 온실가스가 가장 많이 배출된 것으로 나타났다.

포항산불로 인해 배출된 온실가스 배출량은 수관화로 CO₂가 28,675g/kg⁻¹ · ha⁻¹(91.9%), CO가 2,359g/kg⁻¹ · ha⁻¹(7.56%), CH₄가 154g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.49%), N₂O가 12.7g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.04%) 그리고 NO_x가 1.9g/kg⁻¹ · ha⁻¹

(0.01%)로 배출되었고 지표화는 CO₂가 1,874g/kg⁻¹ · ha⁻¹(91.9%), CO가 154g/kg⁻¹ · ha⁻¹(7.55%), CH₄가 10g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.49%) N₂O가 0.8g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.04%) 그리고 NO_x가 0.1g/kg⁻¹ · ha⁻¹로(0.005%) 배출되었다(표 7). 포항지역은 산불피해면적이 작아 전반적으로 온실가스 배출량이 작게 도출되었다. 그 중에서도 지표화에서 CO가 상대적으로 다른 지역보다 낮게 나타났다. 기존 연구결과에 따르면, CO가 낮게 배출된 이유로 산불피해가 심각한 지역에서는 비이산화탄소가 많이 배출되는 것

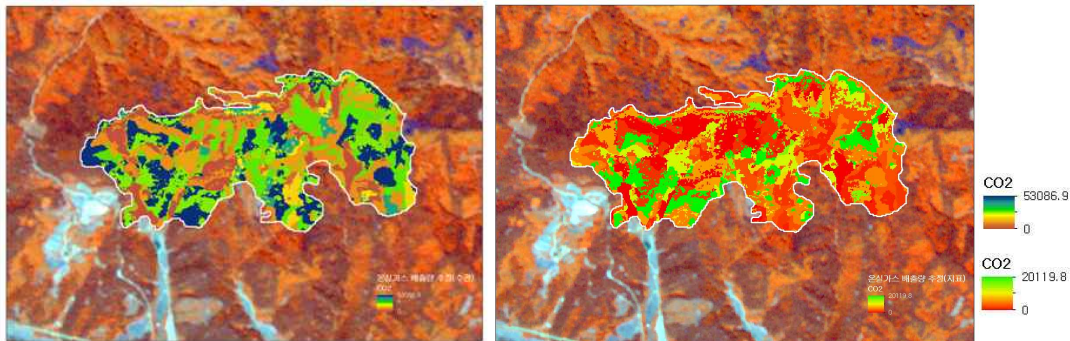


FIGURE 10. GHGs emission at Bonghwa; (Left) Crown fire and (Right) Surface fire

TABLE 7. Greenhouse gases emission at Ulju, Pohang and Bonghwa (unit: g/kg⁻¹ · ha⁻¹)

	CO ₂		CO		CH ₄		N ₂ O		NO _x	
	Crown	Surface	Crown	Surface	Crown	Surface	Crown	Surface	Crown	Surface
Pohang	28,675	1,874	2,359	154	163	10	12.7	0.8	1.9	0.1
Ulju	63,260	11,176	5,207	919	360	63	28.0	4.9	4.4	0.7
Bonghwa	53,086	20,119	4,367	1,655	302	114	23.5	8.9	3.6	1.4

으로 분석한 바 있다(Won *et al.* 2008).

봉화산불로 인해 배출된 온실가스 배출량은 수관화로 CO₂가 53,086g/kg⁻¹ · ha⁻¹(89.8%), CO가 4,367g/kg⁻¹ · ha⁻¹(7.38%), CH₄가 1,655g/kg⁻¹ · ha⁻¹(2.8%), N₂O가 23.5g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.04%) 그리고 NO_x가 3.6g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.01%)로 배출 되었고 지표화는 CO₂가 1,874g/kg⁻¹ · ha⁻¹(91.9%), CO가 1,655g/kg⁻¹ · ha⁻¹(7.56%), CH₄가 10g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.52%), N₂O가 8.9g/kg⁻¹ · ha⁻¹(0.04%) 그리고 NO_x가 1.4g/kg⁻¹ · ha⁻¹로(0.01%) 배출되었다(표 7).

결론

본 연구에서는 산불로 인해 배출되는 온실가스 배출량을 정량적으로 추정하기 위해 방법론을 제시하였다. 이를 위해 2013년 3월에 9일에 발생한 대형 산불피해지(포항, 울주, 봉화)의 현장조사 자료와 위성영상 자료를 통해 산불피해강도를 구분하여 피해면적을 산출하고 산불로 인해 배출되는 온실가스 배출량을 추정하였다. 각 지역의 온실가스 배출량을 비교해보면, 수관화 피해로 인해 배출되는 온실가스 배출량이 지표화로 인한 배출량보다 월등이 많은 것을 알 수 있었다. 이는 우리나라 산불피해 특성이 경사가 급하고, 소나무 단순림 지역에서는 지표화 보다는 수관화가 많이 일어나는 것과 연관성이 있다. 특히 수관연료량이 지표연료량보다 60~70% 가량 많이 분포하는 특성을 가져 수관화로 인한 산림연료가 연소될 경우 훨씬 많은 온실가스가 배출되는 것을 알 수 있었다.

또한 온실가스 배출량을 추정하는데 있어 산불피해등급에 의한 면적 산출이 상당히 중요한 인자로 작용한다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 5m급 중고해상도를 사용하였는데, 최근 촬영되는 1m이하의 고해상도 위성영상(Geoeye, Worldview-2)등을 이용하면 보다 정밀하게 피해면적 산출이 가능할 것으로 사료된다. 향후 연료량 지도, 연소효율 그리고 배출

계수 등에 대한 추가 연구를 통해 국가고유지표의 개발이 요구된다. 본 연구를 통해 산불피해지의 정확한 피해특성을 신속하게 파악할 수 있으며 대형 산불피해지 복구 계획 수립을 위한 기초자료 제공은 물론 산불로 인한 피해평가 및 온실가스 배출량 추정 등 국가 고유 활동자료 작성이 가능할 것으로 판단된다. [KAGIS](#)

REFERENCES

- Choromanska, U. and T.H. DeLuca. 2002. Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: evaluation of post-fire effects. *Soil Biology & Biochemistry* 34:263-271.
- Cocke, A.E., P.Z. Fule and J.E. Crouse. 2005. Comparison of burn severity assessments using differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire* 14(2):189-198.
- Duffy, D.A., J. J.M. Epting, T.S. Graham, Rupp and A.D. McGuire. 2007. Analysis of Alaskan burn severity patterns using remotely sensed data. *International Journal of Wildland Fire* 16(3):277-284.
- Ice, G.G., D.G. Neary and P.W. Adams. 2004. Effects of wildfire on soils and watershed processes. *Journal of Forestry* 102(6):16-20.
- Key, C.H. and N.C. Benson. 2002. Fire effects monitoring and inventory protocol-landscape assessment. USDA Forest Service Fire Science Laboratory, Missoula, MT. pp.1-16.
- Key, C.H. and N.C. Benson. 2006. Landscape assessment. In: D.C. Lutes

- et al.(eds.). FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, pp. LA-155.
- KFRI(Korea Forest Research Institute). 2010. Research report in 2010 : forest preservation. 248-249pp (국립산림과학원. 2010. 2010년도 연구사업 보고서 : 산림보전분야. 248-249쪽).
- KFRI(Korea Forest Research Institute). 2013. A study on damage characteristics and development of burn severity evaluation methods. 66-88pp (국립산림과학원. 2013. 산불피해강도의 정량적 평가 기법 개발 및 피해특성 구명. 66-88쪽).
- KFRI(Korea Forest Research Institute). 2013. A prediction of forest disaster change on climate change and establishment of counter-strategy. 185-190pp (국립산림과학원. 2013. 기후변화 대응 산림재해 변화 예측 및 대응전략 개발. 185-190쪽).
- Lee, B.D., M.S. Won, K.M. Jang and M.B. Lee. 2008. Analysis of the relationship between landform and forest fire severity. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 11(1):58-67 (이병두, 원명수, 장광민, 이명보. 2008. 지형과 산불피해도와의 관계 분석. 한국지리정보학회지 11(1):58-7).
- Lee, H.J., J.M. Lee, M.S. Won and S.W. Lee. 2012. Development and validation of Korean Composit Burn Index(KCBI). Journal Of Korean Forest Society 101(1):163-174 (이현주, 이주미, 원명수, 이상우. 2012. 한국형 산불피해강도지수(KCBI) 개발 및 검증. 한국임학회지 101(1):163-174).
- Lee, J.M., M.S. Won, J.H. Lim and S.W. Lee. 2012. Effect of edge area burn severity on early vegetation regeneration in damaged area. Journal Of Korean Forest Society 101(1):121-129 (이주미, 원명수, 임주훈, 이상우. 2012. 가장자리와 산불피해강도가 산불피해지역 초기식생재생에 미치는 영향. 한국임학회지 101(1):121-129).
- Lentile, L.B., Z.A. Holden, A.M.S. Smith, M.J. Falkowski, A.T. Hudak, P. Morgan, S.A. Lewis, P.E. Gessler and N.C. Benson. 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. International Journal of Wildland Fire 15:319-345.
- McHugh, C. and T.E. Kolb. 2003. Ponderosa pine mortality following fire in northern Arizona. International Journal of Wildland Fire 12(1):7-22.
- Miettinen, J., L. Andreas and S. Florian. 2007. Burnt area estimation for the year 2005 in Borneo using multi-resolution satellite imagery. International Journal of Wildland Fire 16(1):45-53.
- Morgan, P., C.C. Hardy, T. Swetnam, M.G. Rollins and L.G. Long. 2001. Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fine-scale fire patterns. International Journal of Wildland Fire 10(3):329-342.
- Park, N.W., H.Y. Yoo, Y.H. Kim and S.Y. Hong. 2012. Classification of remote sensing data using random selection of training data and multiple classifiers. Korean Journal of Remote Sensing

- 28(5):489-499 (박노옥, 유희영, 김이현, 홍석영. 2012. 훈련자료의 임의선택과 다중분류자를 이용한 원격탐사 자료의 분류. 대한원격탐사학회지 28(5):489-499).
- Perez, B. and J.M. Moreno. 1998. Methods for quantifying fire severity in shrubland-fires. *Plant Ecology* 139(1): 91-101.
- Ryu, G.S., B.D. Lee, M.S. Won and K.H. Kim. 2014. Development of crown fire propagation probability equation using logistic regression model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17(1):1-12 (유계선, 이병두, 원명수, 김경하. 로지스틱 회귀모형을 이용한 수관화확산확률식의 개발. 한국지리정보학회지 17(1):1-12).
- Spencer, C.N., K.O. Gabel and F.R. Hauer. 2003. Wildfire effects on stream food webs and nutrient dynamics in Glacier National Park, USA. *Forest Ecology and Management*. 178(1):141-153.
- Won, M.S. 2013. Analysis of burn severity in large-fire area using satellite imagery. Ph.D. Thesis, Univ. of Korea. Seoul, Korea. 6-9pp (원명수. 2013. 위성영상을 이용한 대형산불지역의 피해강도 분석 연구. 고려대학교 대학원 박사학위논문. 6-9쪽).
- Won, M.S., K.S. Koo, and M.B. Lee. 2007. An quantitative analysis of severity classification and burn severity for the large forest fire areas using normalized burn ratio of landsat imagery. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(3):80-92 (원명수, 구교상, 이명보. 2007. Landsat 영상으로부터 정규탄화지수 추출과 산불피해지역 및 피해강도의 정량적 분석. 한국지리정보학회지 10(3): 80-92).
- Won, M.S., K.S. Koo, M.B. Lee and Y.M. Son. 2008. Forest fire, biomass burning, Non-CO₂ GHGs, normalized burn ratio, combustion efficiency, emission factor, Landsat TM. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 10(1):17-24 (원명수, 구교상, 이명보, 손영모. 2008. Landsat TM 영상자료를 활용한 삼척 대형산불피해지의 미이산화탄소 온실가스 배출량 추정. 한국농림기상학회지 10(1):17-24). **KAGIS**