



The remote-sensing based estimation of the evapotranspiration change due to the 2019 April Gangwon-do wildfire

Kim, JiHyun^a · Sohn, Soyoun^b · Kim, Yeonjoo^{c*}

^aResearch Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^bUndergraduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^cAssociate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

Paper number: 19-060

Received: 31 July 2019; Revised: 27 September 2019 / 6 November 2019; Accepted: 6 November 2019

Abstract

A wildfire could significantly alter the local hydrological regime, depending on the area and severity, and thus it is critical to understand its effect and feedback using data and simulation. For the wildfire in Gangwon-do on April 4-5, 2019, South Korea, we retrieved the Normalized-Burned Ratio (NBR) index using remote-sensing data (500-m 8-day MODIS surface reflectance data), and detect the damaged-area based on the difference in the NBR (dNBR) before and after the fire. The damaged area was 29.50 km² in total, taking up 1.00-6.19% of five catchments. We then used remote-sensing data (500-m 8-day MODIS evapotranspiration data) and estimated that annual evapotranspiration (AET) would decrease as 0.05-1.56% over the five catchments, as compared to the pre-fire AET (2004-2018). This study highlights the importance of improving our understanding about the impact of wildfire on the local hydrological cycle.

Keywords: Wildfire, Remote-sensing technique, Evapotranspiration, Hydrological cycle, Water resource management

2019년 강원도 산불로 인한 증발산 변화 원격탐사기반 추산

김지현^a · 손소영^b · 김연주^{c*}

^a연세대학교 건설환경공학과 연구교수, ^b연세대학교 건설환경공학과 학부생, ^c연세대학교 건설환경공학과 부교수

요 지

산불은 면적과 산불 강도에 따라 지역 수문환경을 중대하게 변화시킬 수 있는 중대한 요소이며, 따라서 측정자료와 모형모의를 통한 산불의 영향과 피드백을 이해하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 2019년 4월 4-5일에 대한민국 강원도에서 발생한 산불을 원격탐사자료(8-일 500-m MODIS 지표면 반사율 자료)를 사용하여 계산한 정규탄화지수의 차이(dNBR)를 이용하여 탐지하였다. 그 결과, 산불피해 총면적은 5개의 표준유역에 걸쳐 29.50 km²에 달하였고, 유역 면적의 1.00-6.19%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 원격탐사자료(8-일 500-m MODIS 증발산량 추산자료)를 사용하여 분석한 결과, 산불 이전(2004-2018년)과 비교하여 2019년의 연간 증발산량이 해당 5개 유역에서 0.05-1.56% 감소할 것이라고 추산하였다. 본 연구는 산불의 지역 수문 순환에 미치는 영향을 이해하는 데 중요하다.

핵심용어: 산불, 원격탐사 기법, 증발산량, 수문 순환, 수자원 관리

1. 서 론

지난 2019년 4월 4-5일 강원도 고성-속초, 인제, 강릉-동해에서 각각 변압기 폭발, 잡초방제, 전기 합선으로 인해 화재가

발생하였다. 지역적 특징(건조한 날씨, 양양과 강릉 사이의국지적 강풍, 소나무 군락 밀집 등)에 의해 대형 산불화 되었고, 이로 인한 산림 피해 규모 면적은 28.32 km²로 최종 집계되었다(Korea Forest Service, News and Announcements, 2019). 우리나라의 대형산불은 강원도에서 가장 높은 빈도로 발생하였으며, 1996년 이후 최대 규모의 산불은 2000년 동해안 산불

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2123-2801
E-mail: yeonjoo.kim@yonsei.ac.kr (Y. Kim)

(피해 면적: 237.94 km²)이다. 산림 내 식생의 증산작용과 토양 및 식생 표면에서 발생하는 증발작용은 지표면의 수분과 에너지를 대기로 이동시키는 중요한 역할을 한다. 따라서 산불에 의한 산림 훼손과 그로 인한 에너지 및 수문순환의 변화를 이해하는 것은 전체 국토면적의 약 63.2%가 산림인 우리나라의 기상예측 및 수자원 관리에 필수라고 할 수 있다(Cho and Lee, 2011).

산불에 의한 수문순환 변화는 산불 발생지의 식생 타입, 지역 기후 및 산불 강도와 관련이 있는 것으로 조사 되어왔다. Roche *et al.* (2018)은 원격탐사 자료와 증발산량 지상관측 자료를 사용하여 미국 캘리포니아 두 구역 내 증발산량 감소량 차이가 구역 고도 및 습도와 화재 강도의 차이에 의해 약 2배 차이가 난다는 것을 증명하였다. Nolan *et al.* (2015)은 모형모의 결과와 증발산량 지상관측 자료를 사용하여 호주 유칼립투스 혼효림 구역에서 산불 발생 후 증발산량과 유량의 회복기간(recovery time)이 약 8~12년이며, 화재 강도가 심할 경우는 이러한 회복 현상(즉, 증발산량의 증가와 유량의 감소)이 일어나지 않는다는 연구 결과를 발표하였다. Poon and Kinoshita (2018)은 모형모의 결과와 증발산량 지상관측 자료를 바탕으로 미국 뉴멕시코 내 16개 구역에서 연간 증발산량이 약 120 mm 감소했고, 그중 9개 구역에서 강수량 대비 증발량 비율이 유의미하게 변했다고 보고하였다. 한편, 국내의 산불에 관한 생태계 변화 및 생지화학 순환 변화에 관련한 연구는 아직 시작단계로, 원격탐사 자료를 이용한 산불 발생지역 탐지가 주류를 이루어왔다(Won and Im, 2001). 본 연구에서는 원격탐사 자료를 이용하여 2019년 4월 강원도 산불 발생지역을 탐지하고, 해당 지역을 포함한 구역의 연간 증발산량의 변화량을 추산한다.

2. 산불발생 지역 탐지

2.1 원격탐사 자료 및 분석방법

본 연구에서는 미국항공우주국(NASA)의 지상관측위성에 탑재된 MODerate resolution Imaging Spectrometer (MODIS)에서 측정된 지표면 반사율(surface reflectance, MOD09A1, 8-day, 500-m) 자료를 사용하여 산불 발생지역을 탐지하였다

(Earthdata, 2019). 식생 생장의 계절적 변화에 의한 영향을 최소화하기 위해 산불 전후 날짜가 같고, 두 날짜에 모두 구름이 없는(cloud-free) 영상을 선정하였고(2018-2019년, 4월 15일), Band 5(파장 영역: 1230 - 1250 nm)와 Band 7(파장 영역: 2105 - 2155 nm)의 quality control (QC)이 “highest quality”인 픽셀만 이용하였다.

정규탄화지수(Normalized Burn Ratio, NBR)는 일반 식생의 스펙트럼에 비교하여 산불 발생 후의 Near InfraRed (NIR, 0.77-3 μm)이 감소하고 Short Wavelength Infrared (SWIR, 3.0-8.0 μm)이 증가하는 것을 바탕으로 하여 그 비율을 계산한 지수이다(Eq. (1); Key and Benson, 1999). MODIS를 이용한 정규탄화지수 계산 시, Band 5와 Band 7의 값을 각각 NIR과 SWIR으로 사용한다.

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \tag{1}$$

산불 발생 전후의 정규탄화지수의 차이값(dNBR; Eq. (2))이 기준값(0.1에서 0.3까지 0.01 간격으로 증가; Loboda *et al.*, 2007; Walz *et al.*, 2007)보다 낮으면 산불 미발생(unburned)으로 분류하고 높으면 발생(burned)으로 분류하였다.

$$dNBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire} \tag{2}$$

여기서, NBR_{pre-fire}은 산불 발생 전의 정규탄화지수값을 의미하고 NBR_{post-fire}은 산불 발생 후의 정규탄화지수값을 의미한다. 분류된 산불 발생 면적이 산림청에서 발표한 최종 집계 면적(Korea Forest Service, News and Announcements, 2019)과 가장 근접한 기준값을 최종 기준값으로 선정하였다.

2.2 산불 발생지역과 해당 구역

2019년 4월 강원도 산불 발생지역 면적을 앞서 언급한 정규탄화지수 차이(dNBR)의 기준값을 0.22로 하였을 때 산림청의 최종 집계 면적(28.32 km²)과 가장 근접하였고, 고성-속초, 인제, 강릉-동해 순으로 각각 13.75, 1.00, 14.75 km²로 나타났다(Fig. 1, Table 1).

Table 1. Wildfire locations and related-catchments

	Goseong-Sokcho	Inje	Gangneung-Donghae
Catchment (Catchment ID)	Yongchoncheon, Cheongchocheon (130104, 130105)	Yanggu Bridge water level mark (101206)	Jusucheon, Jeoncheon* (130206, 130207)
Catchment area (km ²)	211.91, 152.24	278.21	141.31, 183.99
Burned area(km ²)	10.25, 3.50	1.00	8.75, 6.00
Ratio of burned area over catchment(%)	4.84, 2.30	0.36	6.19, 3.26

*based on Water Resources Management Information system (2019). The burned area is located in the Jusucheon administratively

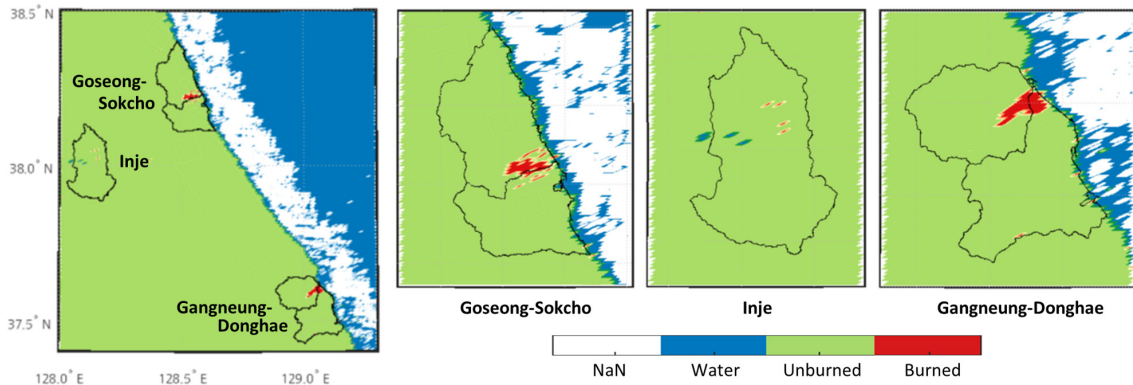


Fig. 1. MODIS data-based burned area (dnBR threshold=0.22) and catchment boundaries

고성-속초 산불 발생지역은 용춘천 유역과 청초천 유역에 걸쳐 분포되어 있고, 인제 산불 발생지역은 양구교수위표 유역 안에 포함되어 있으며, 강릉-동해 산불 발생지역은 주수천 유역과 전천 유역에 걸쳐 분포되어 있다(Table 1. 표준유역코드 - Water Resources Management Information system, 2019). 지난 5년간 각 유역 내 산불은 유역 면적의 1% 내외로 보고되었다 (Korea Forest Service, 2019).

Table 2. Climate (temperature and precipitation) at the wildfire locations (in 2004-2018)

	Goseong-Sokcho	Inje	Gangneung-Donghae
Annual temperature (°C) (median, standard deviation)	13.6, 0.68	11.3, 0.62	14.2, 0.69
Annual precipitation (mm) (median, standard deviation)	1333.8, 238.26	1214.9, 301.98	1342.7, 353.23

3. 증발산량 변화

3.1. 기후 분석

3개의 산불 발생지역의 기온 및 강수량 자료를 기상자료개방포털(Korea Meteorological Administration, 2019)에서 수집한 후, 연평균기온 및 연강수량 경년변동을 분석하였다. 3개 지역의 2004-2018년 사이 연평균기온(중앙값)은 11.3도에서

14.2도 사이였으며, 연강수량은 1214.9 mm에서 1342.7 mm 사이로 나타났다(Fig. 2, Table 2). 3개 지역 중, 강릉-동해의 연평균기온이 가장 높고 연강수량이 가장 많았으며, 인제의 연평균기온이 가장 낮고 연강수량이 가장 낮았다.

3.2 증발산량 경년변동 분석 및 평균추산

MODIS 증발산산출물(MOD16A2, 8-일, 500-m)을 사용하여 유역별 연간 증발산량(Annual Evapotranspiration, AET)의 산불 발생 이전(2004-2018년) 경년변동을 분석하였다

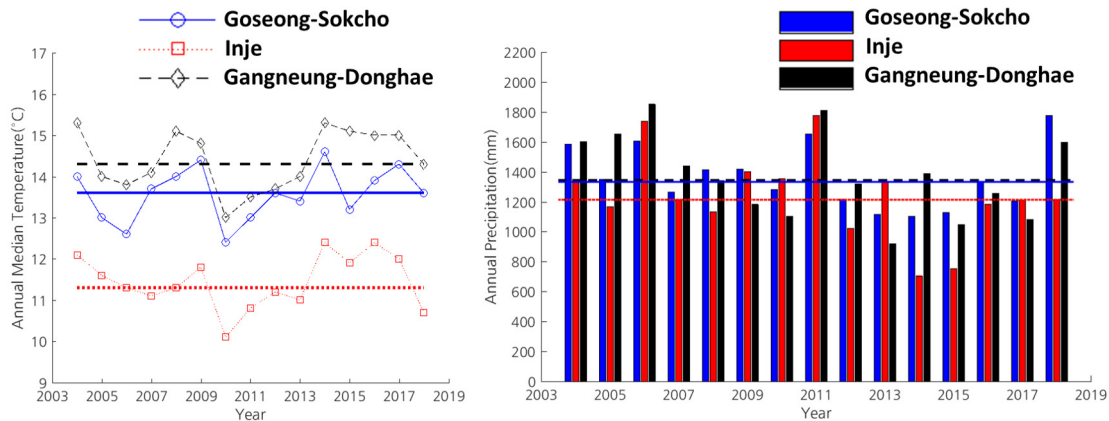


Fig. 2. Annual median temperature and annual total precipitation at the wildfire locations (horizontal line: median value between 2004 and 2018)

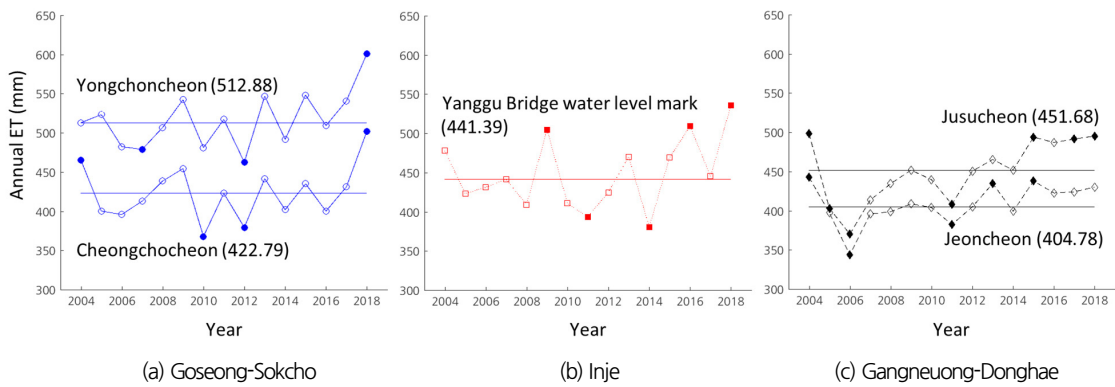


Fig. 3. Annual Evapotranspiration (AET) at each catchment (horizontal line: median value between 2004 and 2018, filled-marker: AET beyond mean±std)

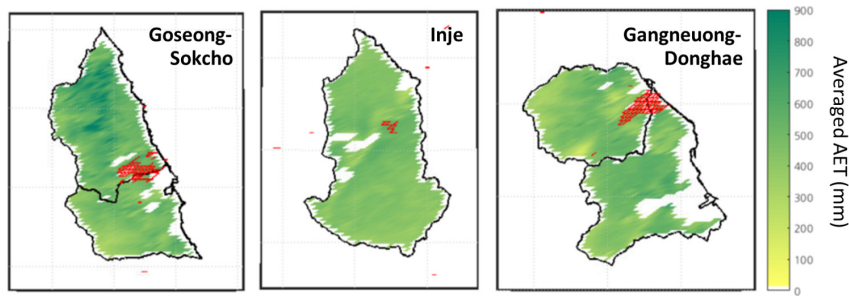


Fig. 4. Averaged-AET of each catchment (median value between 2004 and 2018) and wildfire locations (red grids)

(Good-quality, cloud-free 픽셀 사용). 다섯 유역 중, 고성-속초 산불 발생지역을 포함하고 있는 용춘천 유역의 연간 증발산량이 512.88 mm로 가장 높았고, 강릉-동해 산불 발생지역을 포함하고 있는 전천 유역의 연간 증발산량이 404.78 mm로 가장 낮았다(2004-2018년 중앙값, Fig. 3). 각 유역의 연간 증발산량 중 평균에서 표준편차범위를 벗어난 해(Fig. 3에서 filled-marker)를 제외한 연간 증발산량의 중앙값으로 유역별 평균 연간 증발산량(Averaged-AET)을 추산하였다(Fig. 4).

3.3 산불로 인한 증발산량 변화 추산

2019년 연간 증발산량 추산을 위해, 산불 이후 8-일 증발산량과(day of year 1-154)의 감소비율을 계산하여(Fig. 5) 산불 발생 지역(Fig. 4 붉은색 격자)의 평균 연간 증발산량(Averaged-AET)에 적용하였다. 산불 발생지역의 증발산량은 2019년 산불 이후 13.79%에서 44.15% 사이로 감소되었고, 가장 높은 감소율과 낮은 감소율을 보인 산불 발생지역은 각각 인제와 고성-속초로 나타났다. 이러한 감소비율은 전년도의 유역별 평균 증발산량과는 상관관계가 없었다($p > 0.05$). 또한, 이러한 감소비율은 잠재 증발산량 감소량의 최소 6배 이상인 것으로 미루어 기후의 영향이 아닌 것으로 추정된다(Fig. 6).

산불 발생으로 인한 2019년 유역별 연간 증발산량 감소 추산량은 0.05%에서 1.56% 사이로 나타났다(Fig. 7). 인제 산불 발생지역을 포함한 양구교수위표 유역의 감소 비율(0.05%)이 가장 적은 이유는 유역 내 산불 발생 면적 비율이 가장 적고 (0.36%) 산불 발생지역의 2019년 증발산량 감소량이 가장 적게 나타난 지역(13.79%) 중 한 곳이기 때문으로 추정된다. 고성-속초 산불 발생지역을 포함한 용춘천 유역의 산불 발생 면적 비율(4.84%)은 주수천 유역 내 산불 발생 면적 비율(6.19%)보다 낮았지만 2019년 증발산량 감소량이 더 높았기 때문에(42.01%) 유역 연간 증발산량 감소 비율(1.56%)이 가장 높게 추산된 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2019년 4월 4-5일에 발생한 강원도 고성-속초, 인제, 강릉-동해의 산불로 인한 유역 내 수문 변화를 추정하기 위해 원격탐사 자료를 활용하여 산불 발생지역을 탐지하고 증발산량 감소비율을 추산하였다. 이번 산불은 강원도 내 다섯 유역 면적의 1.00-6.19%를 차지하였고, 산불로 인한

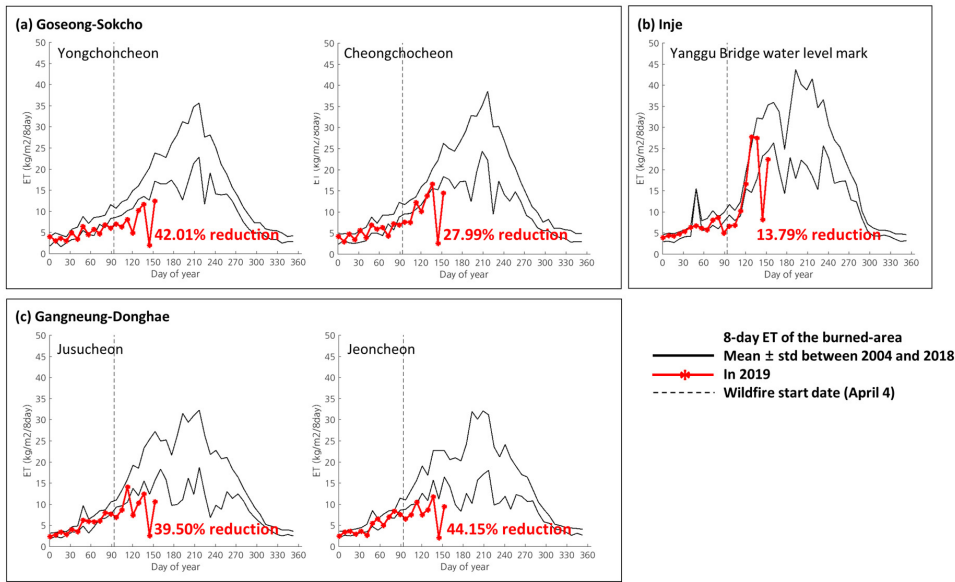


Fig. 5. 8-day evapotranspiration (ET) of the burned area in each catchment before the wildfire (mean±std between 2004-2018 in black lines) and after the wildfire (in 2019)

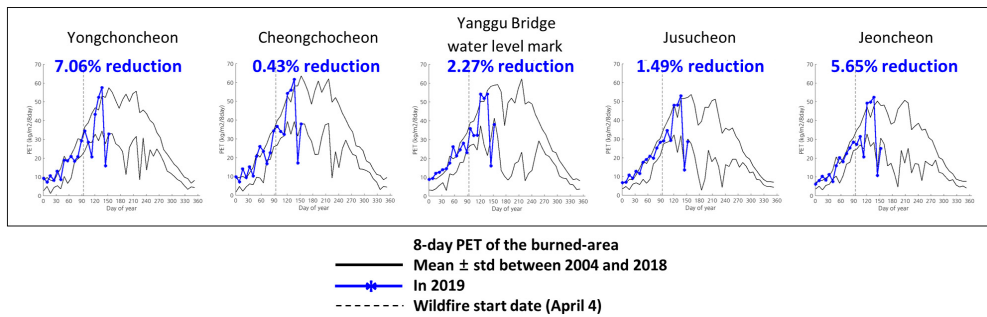


Fig. 6. 8-day potential evapotranspiration (PET) of the burned area in each catchment before the wildfire (mean±std between 2004-2018 in black lines) and after the wildfire (in 2019)

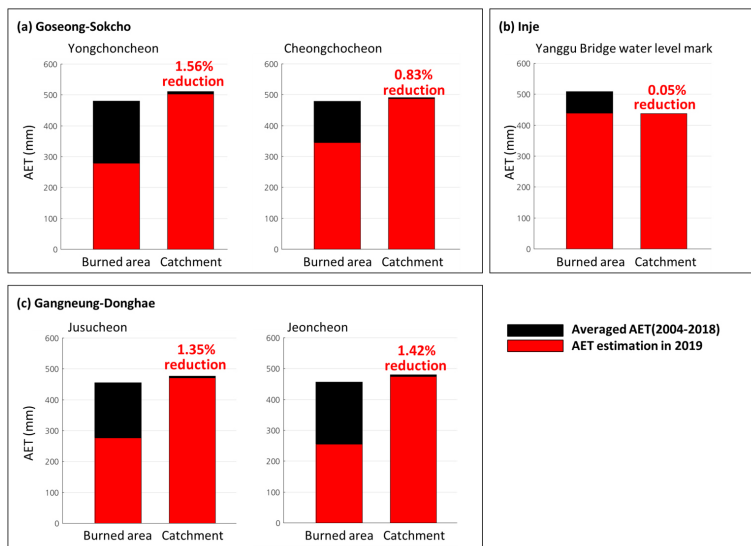


Fig. 7. Changes in the annual evapotranspiration (AET) at the wildfire locations and the related-catchments in 2019

2019년 연간 증발산량의 감소는 0.05-1.56%일 것으로 추정되었다. 산불로 인한 증산량(transpiration) 감소가 토양증발량(soil evaporation) 증가로 보충되어 연간 증발산량이 보존되었다고 해석할 수 있다. 차후, 이러한 에너지 배분 변화가 야기하는 피드백 현상(예, 토양수분 변화 추이) 등에 대한 현장 관측과 모델링을 통해 우리나라에서 발생하는 대형산불로 인한 유역 수문 변화에 대한 이해를 높이고 해당 지역의 수자원 관리 효율성을 높일 수 있을 것이다. 또한, 대형산불로 이후 산림의 회복 기간을 고려한 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원(83089) 및 환경부/한국환경산업기술원의 기후변화대응 환경기술개발사업의 지원(2018001310001) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2018R1A1A3A04079419)을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Cho, H. J., and Lee, C. B. (2011). "Vegetation types and diversity patterns of pinus densiflora forests in South Korea." *Journal of Korean Forestry Society*, Vol. 100, No. 1, pp. 118-123.
- Earthdata (2019). United States, assessed 1 May 2019, <<https://earthdata.nasa.gov>>.
- Key and Benson (1999). The normalized burn ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity, USGS, assessed 1 May 2019, <https://archive.usgs.gov/archive/sites/www.nrmisc.usgs.gov/files/norock/products/SEVER36_im_copy6.pdf>. <www.nrmisc.usgs.gov/research/ndbr.htm>.
- Korea Forest Service (2019). Republic of Korea, assessed 1 May 2019, <<http://www.forest.go.kr/>>.
- Korea Forest Service, News and Announcements (2019), Republic of Korea, assessed 1 May 2019. <<https://www.forest.go.kr>>.
- Korea Meteorological Administration (2019). Republic of Korea, assessed 1 May 2019, <<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>>.
- Loboda, T., O'Neal, K. J., and Csizsar, I. (2007). "Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 109, No. 4, pp. 429-442. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.017>.
- Nolan, R. H., Lane, P. N. J., Benyon, R. G., Bradstock, R. A., and Mitchell, P. J. (2015). "Trends in evapotranspiration and streamflow following wildfire in resprouting eucalypt forests." *Journal of Hydrology*, Vol. 524, pp. 614-624. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.045>.
- Poon, P. K., and Kinoshita, A. M. (2018). "Spatial and temporal evapotranspiration trends after wildfire in semi-arid landscapes." *Journal of Hydrology*, Vol. 559, pp. 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.023>.
- Roche, J. W., Goulden, M. L., and Bales, R. C. (2018). "Estimating evapotranspiration change due to forest treatment and fire at the basin scale in the Sierra Nevada, California." *Ecohydrology*, Vol. 11, No. 7, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1002/eco.1978>.
- Walz, Y., Maier, S. W., Dech, S. W., Conrad, C., and Colditz, R. R. (2007). "Classification of burn severity using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): A case study in the jarrah-marri forest of southwest Western Australia." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Vol. 112, No. 2, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1029/2005JG000118>.
- Water Resources Management Information system (2019). Republic of Korea, assessed 1 May 2019, <<http://www.wamis.go.kr/>>.
- Won, K. Y., and Im, J. H. (2001). "Fire severity mapping using a single post-fire landsat 7 ETM+ imagery." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 1, pp. 85-97.