

SPI 변화에 따른 산불발생과의 관계 분석

윤석희¹ · 원명수^{1*}

Correlation Analysis of Forest Fire Occurrences by Change of Standardized Precipitation Index

Suk-Hee YOON¹ · Myoung-Soo WON^{1*}

요 약

본 연구는 1970년 이후 기상청 정규기상대의 월별 누적강수량과 1991년부터 2000년까지 지역별 산불발생자료를 이용하여 지속기간별(1, 3, 6, 12개월)에 따른 SPI 지수와 산불발생과의 상관관계를 비교·분석하고자 하였다. 그리고 지역별 산불발생자료를 활용하여 권역별 산불건수와 Log(산불 건수)를 산출하여 연대별 변화에 따른 가뭄과 산불의 관계를 비교하였다. 산불발생과 SPI 지수를 10년 단위인 1990년대와 2000년대로 나누어 분석한 결과, 1990년대에는 경기, 강원, 충남에서 SPI 3개월이 산불발생빈도와 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 또한 충북은 SPI 6개월, 영·호남 지역에서는 SPI 12개월이 산불발생빈도와 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 2000년대에는 경기, 충남, 충북, 전남, 전북에서 SPI 6개월과 산불발생빈도가 상관관계를 보이면서 1990년대와 다른 양상을 보였다. 반면에 강원 영서는 SPI 3개월과 상관성이 있었으며 강원 영동, 경남, 경북은 SPI 1개월과 비교적 상관성이 높게 나타났다. 그 결과 1990년대에는 권역별 가뭄 현상이 북부와 남부로 나뉘면서 SPI 3개월과 12개월 사이에 뚜렷한 차이를 나타냈고, 2000년대 이후로는 강원 영서를 제외하고 백두대간을 따라 SPI 1개월과 6개월이 차이를 보였다. 따라서 미래의 산불발생위험 예측력 향상을 위한 모델 개발을 위해 SPI 1개월과 SPI 6개월 지수를 적용시킬 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 산불, 표준강수지수, 가뭄, 기후변화

ABSTRACT

This study analyzed the correlation between the standardized precipitation index(SPI) and forest fire occurrences using monthly accumulative rainfall data since 1970 and regional fire occurrence data since 1991. To understand the relationship between the SPI and forest fire occurrences, the correlations among the SPI of nine main observatory

2016년 3월 7일 접수 Received on March 7, 2016 / 2016년 3월 22일 수정 Revised on March 22, 2016 / 2016년 3월 29일 심사완료 Accepted on March 29, 2016

¹ 국립산림과학원 기후변화연구센터 Center for Forest and Climate Change, National Institute of Forest Science

* Corresponding Author E-mail : forestfire@korea.kr

weather stations including Seoul, number of fire occurrences, and log of fire occurrences were analyzed. We analyzed the correlation of SPI with fire occurrences in the 1990s and 2000s and found that in the 1990s, the SPI of 3 months showed high correlation in Gyeonggi, Gangwon, and Chungnam, while the SPI of 6 months showed high correlation in Chungbuk, and the SPI of 12 months showed high correlation in Gyeongnam, Gyeongbuk, Jeonnam, and Jeonbuk. In the 2000s, the SPI of 6 months showed high correlation with the fire frequency in Gyeonggi, Chungnam, Chungbuk, Jeonnam, and Jeonbuk, whereas the fire frequency in western Gangwon was highly correlated with the SPI of 3 months and, in eastern Gangwon, Gyeongnam, and Gyeongbuk, with the SPI of 1 month. In the 1990s, distinct differences in the drought condition between the SPI of 3 months and 12 months in the northern and southern regions of Korean Peninsula were found, whereas the differences in both the SPI of 1 month and 6 months were found in the Baekdudaegan region except western Gangwon since the 2000s. Therefore, this study suggests that we can develop a model to predict forest fire occurrences by applying the SPI of 1-month and 6-month data in the future.

KEYWORDS : Forest Fire, Standardized Precipitation Index, Drought, Climate Change

서론

가뭄은 인류의 삶과 재산에 피해를 주는 가장 심각한 자연재해 중에 하나이며, 전 지구적으로 발생하는 기후변화에 따른 지구온난화는 강우발생일수의 감소와 증발산의 증가로 가뭄 피해가 증가할 것이라는 견해가 나오고 있다 (Trenberth *et al.*, 2004; Sheffield and Wood, 2008; National Emergency Management Agency, 2013). 최근에는 기후 변화로 인한 기온 상승과 가뭄 현상이 빈발하고 장기화됨에 따라 산불발생 위험성과 발생빈도가 증가되면서 다양화·대형화되는 경향을 보이고 있는데 우리나라 또한 예외는 아니라고 할 수 있다 (Pinol *et al.*, 1998; McCoy and Burn, 2005; Sung *et al.*, 2010; Lee, 2011). 우리나라는 최근 40년 동안에 5~8년 주기로 극심한 가뭄을 경험하였고(Ministry of Construction & Transportation, 2002), 1990년대부터 남부지역을 중심으로 겨울에서 봄철까지 만성적 가뭄의 발생횟수가 증가하면서 피해가 늘어나고 있다(Korea Institute of Civil Engineering and

Building Technology, 2002). 특히, 2001년 3월부터 6월까지의 강수량이 예년 평균의 10~30%에 불과할 정도로 1904년 기상관측 이래 우리나라 전역에 걸친 최악의 봄철 가뭄이었고, 2008년에는 전남, 경남, 강원 지역에서 큰 가뭄 피해가 발생하였다(Ministry of Construction & Transportation, 2002; Oh and Yu, 2014). 이러한 계절별 가뭄 현상은 강우 특성상 10~2월의 겨울철 가뭄과 3~5월의 봄철 가뭄으로 나타나고 있는데, 이는 연중 산불이 다발하는 2~5월인 봄철과 11~12월인 가을철 시기와 일치하기 때문에 계절별 가뭄현상과 산불발생은 관련성이 있다.

가뭄 현상의 증가는 산불이 발생하기에 유리한 조건을 만들어주는 중요한 역할을 하고 있다(Wang *et al.*, 2008). Xiao and Zhuang (2007)은 캐나다와 알래스카 산림지역을 대상으로 PDSI(Palmer Drought Severity Index)와 과거 산불기간 동안에 발생했던 대형산불 자료를 비교 분석한 결과, 여름철 건조기 동안에 가뭄현상이 산불행동에 상당한 영향을 준다고 하였다. 그리고 미국의 서부지역에서 발생한 가뭄은 산불발생빈도와 피해면적에 큰 영향력

을 미친다는 연구들이 있다(Malamud *et al.*, 1998; Veblen *et al.*, 2000; Brose *et al.*, 2013). 이와 같이 미국과 캐나다를 비롯하여 기후변화에 의한 가뭄현상과 산불발생과의 관련성을 논하는 국외 연구들은 활발히 진행되어 왔다. 그러나 국내에서는 가뭄과 관련하여 기상학적·수문학적·농업적 해석에 의해 시·공간적인 가뭄 현상을 정량적으로 평가하고 규명하고 있다. 그리고 우리나라의 실정에 알맞게 개선된 가뭄지수를 시·공간적으로 표현하는 시스템을 개발하고 있다. 또한 국내의 산불 연구는 기후변화와 연관성을 갖는 기온, 습도, 바람, 강우 등의 기상현상과 관계를 보는 연구들이 활발하게 진행되고 있지만, 가뭄 현상과 산불발생과의 관계를 연구하는 사례는 미미한 실정이다.

따라서 한반도 가뭄 현상에 따른 산불과의 연관성 연구를 위해서는 산불발생위험성과 관련이 있는 기상인자인 강수량의 부족을 기상학적으로 해석하는 정량적인 가뭄지수와 과거에 발생한 산불과의 시·공간적인 관계를 비교하는 것이 타당할 것이다. 가뭄지수는 가뭄을 대비하는 비구조적인 수단 중의 하나로 객관적인 지표를 마련하고자 개발된 정보이다. 전 세계에서 가장 많이 활용하고 있는 대표적인 가뭄지수는 Palmer(1965)에 의해 개발된 PDSI와 McKee *et al.*(1993)에 의해 개발된 SPI(Standardized Precipitation Index)가 있다. 이 지수들은 국외뿐만 아니라 국내에서도 가뭄을 대비하기 위해 다양한 분야에서 적용하고 있지만 실제 가뭄과 비교하여 평가한 결과, 기간에 따라 일치하거나 불일치하는 결과가 나타났다. 국내에서는 주로 PDSI를 사용하고 있는데, 이는 넓고 고른 지형을 이루고 있는 미국에는 적용이 가능하지만 지형이 조밀하고 복잡한 한반도에 적용하는 것은 다소 한계가 있다. 특히 단기에보와 복잡한 산악지형에 이용하는 것은 부적합한 단점이 있다. 반면에 확률 특성을 가진 정규분포형태의 SPI는 미국의 가뭄대비 계획에 사용되고 있으며 국·내외 전문가들도 다방면으로 SPI의 이용성을 높이 평가하고 있다(Bae *et al.*, 2013; Sur *et al.*, 2014).

최근 우리나라에서는 이상고온, 건조 등 기후변화 영향으로 건조일수 증가 및 산림내 지피물인 연소물질의 증가 등으로 인해 2000년 동해안(23,794ha), 2002년 청양·예산(3,095ha), 2005년 양양(1,141ha)에서 대형 산불이 발생하였다(Korea Forest Service, 2009). 특히, 겨울철 고온 건조로 인한 가뭄 현상이 나타나므로써 농경활동의 조기 실시와 야외활동 증가 등으로 산불이 발생할 수 있는 요인이 증가하면서 산불발생위험성은 더욱 높아질 것으로 전망되고 있다. 이러한 가뭄으로 인한 산불발생의 위험성을 줄이기 위해서는 과거에 발생한 가뭄현상과 산불발생 현황을 파악하고 이에 대한 비교 분석 및 평가 등을 통해 보다 정확하면서도 신뢰할 수 있는 예측 연구가 필요하다. 또한 산불발생위험예측력 향상을 위해 기온, 실효습도, 강수량 등과 같은 기상요소들 중에서 강수량과 밀접한 관련성이 있는 가뭄 발생의 시간적인 변화와 지리적인 특성을 고려한 시·공간 자료의 비교·분석이 중요하다. 따라서 본 연구는 다른 가뭄지수에 비해 비교적 최근에 개발된 SPI를 활용하여 1·3·6·12개월에 대한 변화와 과거 1991년 이후의 지역별 산불발생 자료를 활용하여 시·공간적인 가뭄 변화에 따른 산불발생과의 관계를 비교·분석하는 기초 연구를 수행하고자 한다.

분석 자료 및 방법

1. SPI(Standardized Precipitation Index)

McKee *et al.*(1993, 1995)은 가뭄이 상대적으로 물의 수요에 비해 물의 부족을 유발하는 강수량의 감소에 의해서 시작된다는 것을 착안하여 SPI를 개발하였다. 이는 다른 가뭄지수들에 비해 최근에 개발되었으며 PDSI보다 습윤과 건조의 표현방법을 향상시키고 시·공간적으로 일정한 지표로 이용하기 위하여 개발되었다. 또한 확률을 기초로 수자원의 유용성 해석에 있어서 지속시간의 중요성과 공간적으로 일정한 지표가 되기 위해 설계되었다. Guttman

TABLE 1. Drought classification by SPI value and corresponding event probability

SPI Values	Drought Category	Occurrence Probability(%)
$2.00 \leq X$	Extremely wet	2.3
1.50 ~ 1.99	Very wet	4.4
1.00 ~ 1.49	Moderately wet	9.2
-0.99 ~ 0.99	Near normal	68.2
-1.49 ~ -1.00	Moderately dry	9.2
-1.99 ~ -1.50	Severe dry	4.4
$X \leq -2.00$	Extremely dry	2.3

(Source: Mckee *et al.*, 1995)

(1998)과 Hayes *et al.*(1999)은 SPI와 PDSI를 비교한 결과, SPI가 통계적으로 일관성이 있으면서 시기별에 따라 장·단기적으로 가뭄의 영향을 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다고 제시하였다. 그래서 SPI는 사용자에게 따라 특정 지역의 충분한 강우자료가 확보된다면 다양한 지속기간(1, 3, 6, 9, 12개월 등)에 대해 계산할 수 있다(Edwards, 1997). 반면에 PDSI는 매우 복잡하면서도 공간적으로 변하면서 해석하기도 어렵고 시간 단위가 고정되었다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 가뭄의 시·공간적인 변동성을 파악하기 위해 SPI를 활용하였으며, 가뭄 정도의 판정은 표 1과 같다.

SPI의 계산은 해당 관측지점에 대한 강수량의 주기분포를 토대로 Gamma 확률밀도함수를 이용하는 데 Gamma 확률분포함수는 다음 식과 같다.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

여기에서 α , β 는 Gamma 확률밀도함수의 계수로 지정된 시간 축척별 따라 해당 관측지점별로 추정된다. 이에 대한 α , β 의 추정치는 다음과 같은 식에 의해서 계산할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{\frac{1+4A}{3}} \right), \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (2)$$

$$A = 1n(\bar{x}) - \frac{\sum 1n(x)}{n} \quad (3)$$

그리고 n은 강수량 자료의 개수이며, 얻어진 매개변수들은 다음과 같은 누가확률분포 함수 식에서 이용된다.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (4)$$

위의 식에서 $t = x/\beta$ 로 하면 다음과 같이 정리된다.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

Gamma 함수는 $x = 0$ 으로 정의되지 않으나 강수량이 0인 경우가 있으므로, 누가확률은 아래의 식과 같다.

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (6)$$

q는 0인 경우의 확률로서 무강우 일수를 m, 강우관측일수를 n이라고 하면 무강우 확률 q는 $q = m/n$ 으로 나타낼 수 있다. 누가 확률 H(x)를 다시 평균 0 분산 1의 표준정규분포의 임의 변수 Z로 나타낼 수 있도록 변환하면 SPI 값이 된다.

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (7)$$

for $0 < H(x) \leq 0.5$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (8)$$

for $0 < H(x) \leq 1.0$

여기에서,

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad (9)$$

for $0 < H(x) \leq 0.5$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)} \quad (10)$$

for $0 < H(x) \leq 1.0$

$C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853,$

$C_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788,$

$d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$

x 는 강수량이며 $H(x)$ 는 강수량 관측 값의 누적확률이며 $C_0, C_1, C_2, d_1, d_2, d_3$ 는 상수 값이 된다.

2. 분석 자료

본 연구를 위한 SPI의 산출은 기상 자료의 기간이 최소 30년이라는 통계적 이론을 적용하

고자 과거 1970년부터 2009년까지 기상청 68개 정규기상관측소의 월별 누적강수량을 분석 자료로 사용하였다. 68개 지점별 월 누적강수량 자료는 기상청에서 운영하는 Meteorological Information Portal Service System으로부터 수집하였다. 산불의 경우에는 산림청의 공식적인 산불발생통계 시작 시기인 1991년을 기준으로 2010년까지의 연도별 산불통계대장을 수집하여 연대별 산불발생패턴을 분석하고자 10년 단위로 분류하였다. 연대별(1990년대, 2000년대)로 분류한 자료는 산불발생 전 지점의 점 데이터 공간자료 구축과 산불발생빈도 분석을 통한 산불의 시·공간적인 분포 경향을 분석하는데 활용하였고, 지속기간별 SPI 가뭄 지수의 변화와 산불발생빈도 그리고 산불발생(Log 건수)과의 상관관계를 분석하는데 사용하였다.

3. 분석 자료

1) 공간 분석 및 권역 설정

최근 20년(1991~2010년)간 전국의 산불발생자료는 10년 단위인 1990년대와 2000년대로 나누어 공간자료화하였다. 산불발생위치의 공간자료화는 해당 지적별 폴리곤의 중심을 기



FIGURE 1. Delimitation of forest fire climate zone considering Baekdudaegan and eco region

준으로 점 데이터를 생성하였고, 연대별 산불발생빈도의 공간분포 경향을 파악하기 위하여 시군구별 중심점에 산불발생건수를 입력하고 여러 보간 방법 중에서 가장 일반적으로 사용하는 거리역산가중(IDW, Inverse Distance Weighting)법에 의해 1km×1km 공간 해상도로 보간 지점수는 기본설정 값인 12개로 설정하여 지역별 산불발생빈도를 분석하였다. 산불발생빈도에 분석을 위한 공간 해상도는 Won *et al.*(2011)에 의한 산불발생빈도 공간분석 방법을 적용하고자 1990년대 이후로 발생한 산불발생지점간의 평균 거리가 약 1km인 것을 고려하여 공간해상도를 설정하였다. 그리고 산불발생빈도 공간분석 결과를 토대로 SPI와 상관관계 분석을 위해 9개 권역별(서울·경기, 강원 영동·영서, 경북, 경남, 충북, 충남, 전북, 전남)로 나누고 해당 권역을 대표할 수 있는 주요 기상대 9개(서울, 춘천, 강릉, 대구, 부산, 충주, 대전, 전주, 광주) 지점을 선정하였다(그림 1).

이러한 권역의 설정은 Sung *et al.*(2010)과 Korea Forest Research Institute(2013)에서 산불과 기후와의 관계 구명을 위해 백두대간과 16개의 생태권역을 고려하여 설정한 산불기후 권역을 반영하였다. 또한 과거 20년(1991~2010년) 동안에 산불다발 지역이 인구가 밀집되어 있는 서울, 인천, 부산 등과 같은 광역 대도시와 그 주변으로 확인되어 발생지점으로부터 가장 인접한 기상관측소가 앞서 언급한 지점과 동일함에 따라 이를 주요 기상대로 선정하였다. 제주의 경우에는 최근 20년 동안에 연평균 1건 미만의 산불이 발생한 점을 고려하여 전남 권역에 포함시켰다.

2) 지속기간별 SPI 산출 및 산불발생 관계 분석
기상청으로부터 수집한 68개 기상대의 월 누적강수량자료는 지속기간별(1, 3, 6, 12개월)에 따른 SPI의 변화를 계산하기 위해 앞서 1 항목에서 언급된 산출 과정에 의해 산정하였다. 이 중에서 총 40년간(1970~2009년)의 월 누적강수량을 사용한 기상대의 지점 수는 68개 중에서 25개이며, 나머지 43개 지점들은 연도별

로 관측시작 시기가 다소 상이한 것을 감안하여 1970년 이후에 최초로 관측된 시점을 기준으로 SPI를 산출하였다. 상관분석을 위한 SPI의 공간설정은 기상관측소의 공간분포가 전국 시군구 단위로 분포하는 것이 아니기 때문에 본 연구는 시도 단위로 권역을 설정하였다. 또한 수집한 자료는 9개 권역별로 주요 기상대의 1, 3, 6, 12개월에 따른 SPI 변화와 권역별 산불발생빈도(Log 건수 포함)를 산출하여 상관관계를 분석하였다. 그리고 산불과 가뭄과의 상관성을 세분화하기 위하여 시·공간적으로 산불발생빈도 패턴이 변곡점인 1990년대와 2000년대로 나누어 연대별 SPI의 특성을 비교·분석하였다. 본 연구에서 10년 단위로 나누어 연대별로 비교 분석하는 이유는 1990년대와 달리 2000년대 이후로 대도시를 중심으로 봄철 산불발생의 피해규모가 커지면서 동시다발 집중시기가 4월에서 3월로 앞당겨지는 산불발생 패턴을 보였기 때문에 상관관계 분석을 세분화하였다(Won *et al.*, 2011).

결과 및 고찰

1. 1990년대와 2000년대의 산불발생빈도 변화

1990년대와 2000년대의 지역별 산불발생빈도 공간 분석 및 연대별에 따른 공간 분포의 변화를 비교·분석하기 위하여 1차적으로 1991년부터 2010년까지 총 8,802건의 산불발생지점에 대한 주소를 확인 후 연대별로 나누어 산불발생위치를 공간자료화하였다. 1990년대와 2000년대의 산불발생빈도는 인구가 밀집되어 있는 광역대도시를 중심으로 발생하는 공간분포 형태를 보였고, 1990년대에 비해 2000년대에는 광역대도시를 중심으로 발생건수 증가와 분포 범위가 확대되는 경향을 보였다.

연대별 산불발생위치 공간자료를 행정구역별로 나누어 산불발생빈도를 분석한 결과, 1990년대에는 서울, 부산, 대구, 울산, 광주, 대전과 같은 광역 대도시를 중심으로 산불발생빈도가 높게 나타났으며 강원 영서와 영남 동해안 일

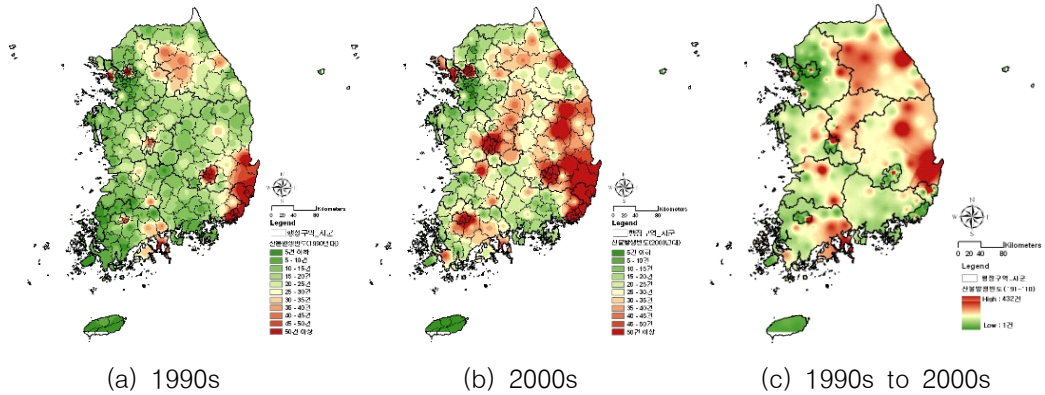


FIGURE 2. Change in frequency of forest fire occurrence between 1990s and 2000s

대, 대구 주변도시를 중심으로 집중되어 발생하는 경향을 나타냈다(그림 2(a)). 2000년대에는 1990년대와 마찬가지로 산불발생빈도가 광역 대도시를 중심으로 발생하는 경향을 보였을 뿐만 아니라 대도시 주변을 포함한 인근 지역으로 뚜렷하게 확대되는 경향을 보이면서 전체 발생비율 또한 증가하는 결과를 나타냈다. 특히, 강원 영서에서 영동 지역인 강릉 일대로 산불발생빈도 영역이 확대되는 경향을 보였고, 가장 집중적으로 발생했던 영남 동해안 일대에서는 경북 내륙으로 산불발생빈도의 공간적인 영역이 확대되는 경향을 보였다(그림 2(b)). 2000년대에는 1990년대와 달리 산불발생빈도의 공간적인 분포가 대도시 일대를 중심으로 인근 주변 시·군으로 확대되는 경향을 뚜렷하게 보였다. 이러한 결과는 인문·사회적인 측면에서 보면 우리나라의 사회·경제적인 여건의 개선과 정신·건강 등에 대한 관심의 증대 그리고 편리한 교통수단 등의 개선으로 이동 범위가 확대되었다. 따라서 산을 찾는 사람들이 많아지면서 산불발생확률과 건수가 증가되었을 것으로 추정된다. 또한 우리나라의 산불은 대부분이 사람들의 부주의에 의해서 발생하는데, 그 중에서 가장 큰 원인 비율을 차지하는 입산자실화의 공간적 분포가 인구가 밀집한 대도시 지역에서 높게 나타나는 결과와 일치하는 경향을 보이고 있다(Kwak *et al.*, 2010; Won *et al.*, 2011).

1990년대와 2000년대의 산불발생빈도를 중

합한 결과, 최대 343건과 최소 1건의 시·군별 산불발생빈도를 나타냈다. 가장 높은 산불발생빈도를 보인 지역은 부산(432건)이며 그 다음으로 서울(358건) > 인천(321건) > 울산(304건) > 대구(258건) > 대전(183건) 순으로 나타났다. 가장 낮은 산불발생빈도를 보인 지역은 부천(1건)으로 분석되었다. 권역적인 공간 분포 경향을 보면 2000년대와 비슷하게 경북과 강원 권역이 가장 넓은 범위로 산불발생빈도 결과를 보였고, 대전을 중심으로 충북과 전남 일부 권역에서 높은 빈도를 보이는 경향을 보였다(그림 2(c)). 따라서 2000년대에는 1990년대에 비해 지역별 산불발생빈도가 증가하는 경향을 보였고, 지역별 공간 분포도 대도시를 중심으로 인근 주변 지역으로 확대되면서 백두대간을 기준으로 동서로 나뉘어 발생하는 경향을 보였다. 이는 Sung *et al.*(2010)이 제시한 것 같이 기후적인 측면에서 보면 산불발생이 지구 온난화와 동반된 한반도 평균 기온의 증가와 함께 습도, 강수 및 강우일수의 감소로 나타난 결과로 판단된다.

2. 연대별 SPI와 산불발생의 관계

1990년대와 2000년대의 SPI와 산불발생 패턴의 상관관계 분석 결과, 1990년대에는 9개 권역 중에서 경기, 강원, 충남 권역에서 SPI 3개월이 산불건수(Log 건수 포함)와 상관성이 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 경기 권역의

SPI 3개월은 산불건수(Log 건수)가 -0.1965 (-0.3354), 강원 영서는 -0.2510 (-0.3353)으로 강원 영동에 비해 상관관계가 다소 높게 나타났다. 또한 SPI 3개월과 산불발생과의 상관분석에서 충남 권역은 -0.1023 (-0.1901)으로 다른 권역에 비해 수치적으로 높은 상관관계를 보이지 않았지만 지속기간별로 비교하면 충남 권역의 SPI 3개월이 가장 높게 나타났다. 그리고 충북권역은 SPI 6개월이 -0.1054 (-0.4130)로 분석되었고, 그 밖에 경남, 경북, 전남, 전북 권역은 SPI 12개월이 다른 결과에 비해 산불발생과 상관성이 높은 것으로 나타났다(표 2). 1990년대의 상관분석 결과를 권역별로 시·공간화하면 충청도를 중심으로 북부(경기, 충남, 강원)와 남부(경상, 전라, 제주)권역으로 나뉘면서 SPI 3개월과 12개월은 뚜렷한 가뭄현상으로 산불발생과 관련성이 있는 것을 파악할 수 있었다(그림 3(a)).

2000년대에는 경기, 충남, 충북, 전남, 전북 권역에서 SPI 6개월 지수가 산불건수(Log 건수 포함)와 비교적 높은 상관관계를 나타냈다. SPI 6개월 중에서 산불과 가장 상관관계가 있는 지역은 경기권역으로 -0.3419 (-0.4329)이고, 충남 -0.1931 (-0.2526), 충북 -0.1938 (-0.1874), 전남 -0.2466 (-0.1570), 전북 -0.3116 (-0.2185)으로 분석되었다. 강원 영서권역의 경우에는 SPI 3개월이 -0.3221 (-0.3040)으로 상관관계가 비교적 높은 것으로 나타났고, 강원 영동, 경남, 경북 권역은 SPI 1개월과 산불발생과의 상관성이 비교적 높은 것으로 나타났다(표 3). 따라서 2000년대에는 강원 영서권역을 제외한 SPI 1개월과 6개월 지수의 상관관계가 상대적으로 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 상관관계 분석 자료를 권역별로 공간자료화한 결과, 그림 3(b)와 같이 공간적으로 지속기간별로 따라 동서로 분할되는 경향을 보였다.

1990년대와 2000년대를 종합하여 권역별 산불발생과 지속기간별로 따른 SPI의 상관 분석 결과, 경기권역에서 SPI 6개월이 산불건수(Log 건수)를 포함하여 -0.2990 (-0.3773)이

있으며 상대적으로 가장 높은 상관관계를 보였다. 그 다음으로 충북, 전남, 전북 권역에서 SPI 6개월이 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 나머지 강원 영동, 경북, 경남, 충남 권역은 SPI 1개월이 산불발생과 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 강원 영서권역의 경우에는 1990년대와 2000년대의 상관분석 결과와 동등하게 SPI 3개월이 산불발생과 상관성이 있는 것으로 나타났다(표 4). 특히, 강원 영서권역은 Bae *et al.*(2013)이 제시한 SPI 3개월과 동일하게 국내에서 단기간의 가뭄을 가장 잘 표현할 수 있는 가뭄지수로 지역별 산불발생위험예측 연구에 적용이 가능할 수 판단된다. 1990년대와 달리 2000년대에는 강원 영서지역을 제외하고 백두대간을 중심으로 SPI 1개월과 6개월 지수가 뚜렷한 공간분포의 차이를 보였는데, 앞서 기술했던 그림 2와 같이 Korea Forest Research Institute(2013)에서 제시한 산불기후권역(Forest Fire Climate Zone)과 유사한 공간분포 패턴을 보이면서 이에 맞추어 권역을 구분하는 것이 타당할 수 있을 것으로 사료된다(그림 3(c)).

따라서 1990년대와 2000년대 그리고 최근 20년간 SPI 지속기간별(1, 3, 6, 12개월)에 따른 과거 산불발생과의 상관관계를 종합적으로 분석한 결과, SPI 지속기간별로 따라 1990년대에는 남한의 남부와 북부로 나뉘어 발생했던 산불발생빈도 패턴에 맞추어 유사한 가뭄현상을 보였고 2000년대에는 백두대간을 따라 동부와 서부로 나누어지는 산불발생빈도와 가뭄지수의 공간패턴을 토대로 향후 SPI 1개월과 6개월 지수를 지역별로 적용함으로써 산불발생 변화 예측모형을 개발하는데 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 결과에서 SPI와 산불발생과의 상관관계는 통계학적인 수치로 상관관계가 높다고 볼 수는 없지만 99%의 인위적인 산불발생과 기상학적인 상관관계 값은 상대적으로 높게 나타날 수가 없다. 그리고 향후 추가적인 연구로 SPI와 다른 가뭄지수들과 산불발생과의 상호 비교연구를 통해 지역별 산불발생예측 모델에 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

TABLE 2. Correlation between SPI and forest fire occurrence in 1990s

KMA Stations ^a	Fire Regions ^b	1-month		3-month		6-month		12-month	
		SPI-FFO ^c	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO	SPI-Log (FFO)
SO	GG	-0.1191	-0.0963	-0.1965	-0.3354*	-0.1557	-0.1551	-0.0952	-0.0230
CC	YS	-0.1415	-0.1029	-0.2510	-0.3353*	-0.1478	-0.2962	-0.0737	-0.1895
GN1	YD	-0.1873	-0.1230	-0.1092	-0.2093*	-0.0542	0.0335	-0.1597	-0.1704
DJ	CN	-0.0923	-0.0437	-0.1023	-0.1901*	0.0052	-0.0885	-0.0046	-0.0659
CJ	CB	-0.1058	-0.1869	-0.2139	-0.2415	-0.1054	-0.4130*	-0.0509	-0.2602
DG	GB	-0.2205	-0.1591	-0.2095	-0.2090	-0.2477	-0.2969	-0.3887	-0.4523*
BS	GN2	-0.2974	-0.1366	-0.2424	-0.0682	-0.3151	-0.2055	-0.3158*	-0.2536
GJ	JN	-0.0650	-0.0391	0.0185	0.0827	-0.0792	-0.0640	-0.1680*	-0.1605
JJ	JB	-0.1258	-0.0046	-0.0785	-0.0481	-0.0812	-0.0518	-0.2153*	-0.1803

* : p<0.05

^aSO: Seoul, CC: Chuncheon, GN1: Gangneung, DJ: Daejeon, CJ: Chungju, DG: Daegu, BS: Busan, GJ: Gwangju, JJ: Jeonju^bGG: Gyeonggi, YS: Yeongseo, YD: Yeongdong, CN: Chungnam, CB: Chungbuk, GB: Gyeongbuk, GN2: Gyeongnam, JN: Jeonnam,

JB: Jeonbuk

^cFFO: Forest fire occurrence

TABLE 3. Correlation between SPI and forest fire occurrence in 2000s

KMA Stations ^a	Fire Regions ^b	1-month		3-month		6-month		12-month	
		SPI-FFO ^c	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO ^c	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO ^c	SPI-Log (FFO)
SO	GG	-0.2432	-0.1782	-0.2258	-0.1085	-0.3419*	-0.4329*	-0.0280	-0.0448
CC	YS	-0.2849	-0.2460	-0.3221*	-0.3040*	-0.2494	-0.2512	0.0189	-0.0453
GN1	YD	-0.3289	-0.3671*	-0.3612	-0.2266	-0.1889	-0.0555	-0.1299	-0.1264
DJ	CN	-0.2300	-0.1717	-0.1996	-0.1772	-0.1931	-0.2526*	-0.0281	-0.0332
CJ	CB	-0.1559	-0.0299	-0.1879	-0.0535	-0.1938*	-0.1874	-0.0847	0.0207
DG	GB	-0.3406*	-0.3884*	-0.3355	-0.3328	-0.2979	-0.3551	-0.0309	-0.1185
BS	GN2	-0.3194*	-0.1888	-0.2637	-0.1092	-0.2435	-0.1933	-0.0857	-0.0222
GJ	JN	-0.2619*	-0.1719	-0.1579	-0.0389	-0.2466*	-0.1570	0.0247	0.1044
JJ	JB	-0.2470	-0.0591	-0.2373	-0.1938	-0.3116*	-0.2185	-0.0409	0.0776

* : p<0.05

^aSO: Seoul, CC: Chuncheon, GN1: Gangneung, DJ: Daejeon, CJ: Chungju, DG: Daegu, BS: Busan, GJ: Gwangju, JJ: Jeonju^bGG: Gyeonggi, YS: Yeongseo, YD: Yeongdong, CN: Chungnam, CB: Chungbuk, GB: Gyeongbuk, GN2: Gyeongnam, JN: Jeonnam,

JB: Jeonbuk

^cFFO: Forest fire occurrence

TABLE 4. Correlation between SPI and forest fire occurrence from 1990s to 2000s

KMA Stations ^a	Fire Regions ^b	1-month		3-month		6-month		12-month	
		SPI-FFO ^c	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO	SPI-Log (FFO)	SPI-FFO	SPI-Log (FFO)
SO	GG	-0.1691	-0.1796	-0.2005	-0.2276	-0.2990	-0.3773*	-0.1022	-0.1147
CC	YS	-0.2099	-0.2113	-0.2835*	-0.2528*	-0.1921	-0.2521	-0.0366	-0.0977
GN1	YD	-0.2784	-0.3391*	-0.2778	-0.1508	-0.1399	-0.052	-0.1132	-0.0043
DJ	CN	-0.1444	-0.1685*	-0.1365	-0.1341	-0.0917	-0.1014	-0.0245	-0.0537
CJ	CB	-0.0955	-0.1426	-0.0920	-0.0302	-0.2005*	-0.1530	-0.1236	-0.1334
DG	GB	-0.2845*	-0.2823*	-0.2379	-0.2673	-0.2636	-0.2609	-0.1725	-0.1828
BS	GN2	-0.2465	-0.2616*	-0.1601	-0.1282	-0.2384	-0.2811	-0.1914	-0.2434
GJ	JN	-0.1345	-0.0656	-0.0235	-0.0270	-0.1364*	-0.1030	0.0280	-0.0806
JJ	JB	-0.0928	-0.0331	-0.1339	-0.0462	-0.1815	-0.2933*	-0.0648	-0.1149

* : p<0.05

^aSO: Seoul, CC: Chuncheon, GN1: Gangneung, DJ: Daejeon, CJ: Chungju, DG: Daegu, BS: Busan, GJ: Gwangju, JJ: Jeonju^bGG: Gyeonggi, YS: Yeongseo, YD: Yeongdong, CN: Chungnam, CB: Chungbuk, GB: Gyeongbuk, GN2: Gyeongnam, JN: Jeonnam,

JB: Jeonbuk

^cFFO: Forest fire occurrence

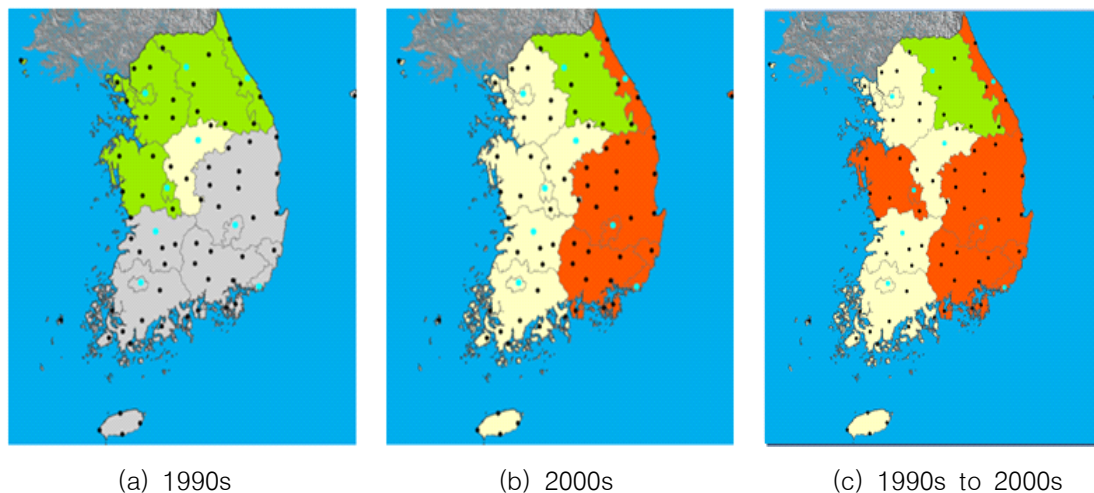


FIGURE 3. Change of drought phenomenon between
(a)1990s, (b)2000s, and (c)1990s to 2000s
(red : SPI-1month, bright green : SPI-3month, bright yellow : SPI-6month, grey :
SPI-12month).

결론

기후 변화로 인한 기온 상승과 가뭄 현상이 빈발하고 장기화됨에 따라 산불발생의 위험성 또한 증가되는 경향을 보이고 있다. 따라서 본 연구는 건조와 관련성을 갖고 있는 자연 재해 중에서 하나인 가뭄 현상과 산림 재해 중에서 하나인 산불과의 시·공간적인 관계를 비교·분석하고자 기상청에서 1970년 이후로 관측된 68개 기상대별 월 누적강수량과 1991년부터 2000년까지의 산림청 산불발생통계자료를 이용하였다. 그리고 지속기간별(1, 3, 6, 12개월)에 따른 지역별 SPI 지수의 변화에 따른 과거 산불발생의 상관관계를 분석하였다. 지속기간별에 따른 SPI 지수의 산출 과정은 국립산림과학원에서 수행했던 기후변화 대응 산림재해변화 예측 연구의 산불기후권역을 본 연구에 반영하여 권역별로 대표할 수 있는 9개의 주요 기상대(서울, 춘천, 강릉, 대구, 부산, 충주, 대전, 전주, 광주)를 설정하여 지속기간별로 SPI 지수 값을 산출하였다. 지역별 산불발생 자료는 권역별로 산불건수 및 $\text{Log}(\text{산불 건수})$ 를 산출

하여 1990년대와 2000년대로 나누어 가뭄과 산불과의 상관관계를 분석하였다. 이처럼 10년 단위로 나누어 상관관계를 분석한 것은 1990년대와 2000년대에 지역별 산불발생빈도 패턴이 서로 다른 양상을 보였기 때문에 본 연구에 적용하였다.

1990년대와 2000년대로 나누어 연대별 산불발생과 SPI 지수의 비교·분석 결과, 1990년대에는 경기, 강원, 충남 지역에서 SPI 3개월이 산불발생빈도와 상관관계가 높게 나타났다. 또한 충북은 SPI 6개월이 상관관계가 높게 나타났으며 그 밖에 경북, 경남, 전북, 전남 지역은 SPI 12개월이 산불발생빈도와 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 2000년대에는 경기, 충남, 충북, 전남, 전북에서 SPI 6개월과 산불발생빈도가 높은 상관관계를 보였다. 반면에 강원 영서지역은 SPI 3개월과 상관성이 높았으며 강원 영동, 경남, 경북 지역은 SPI 1개월과 높은 상관관계를 나타냈다. 그 결과 1990년대의 가뭄 현상은 남부와 북부로 나뉘면서 SPI 3개월과 12개월 사이에서 뚜렷한 차이를 보였으며, 2000년대 이후로는 강원 영서지역을 제외하고

백두대간을 따라 SPI 1개월과 6개월이 차이를 보였다. 본 연구의 상관관계 값은 우리나라 산불의 99%가 사람들의 부주의에 의해서 발생하기 때문에 기상학적인 측면에서 상관관계 값은 상대적으로 높게 나타날 수가 없다. 이러한 결과는 가뭄현상과 산불발생과의 관계를 시공간적으로 분석한 기초 연구로서 미래의 산불발생 변화에 대한 예측을 위한 모델에 SPI 1개월과 SPI 6개월 지수를 적용할 수 있는 것으로 사료된다. **KAGIS**

REFERENCES

- Bae, D.H., K.H. Sohn, H.K. Kim, J.H. Lee, D.R. Lee, J.H. Ahn and T.W. Kim. 2013. Standar dization and evaluation of PDSI calculation method for Korean drought management agencies. *Atmosphere* 23 (4):539-547 (배덕효, 손경환, 김현경, 이주현, 이동률, 안재현, 김태웅. 2013. 국내 가뭄관리 기관별 PDSI 산정방법의 표준화 및 평가. *대기* 23(4):539-547).
- Brose, P. H., D. C. Dey, R. P. Guyette, J. M. Marschall and M. C. Stambaugh. 2013. The influences of drought and humans on the fire regimes of northern Pennsylvania, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 43(8):757-767.
- Edwards, D. C. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Master's Thesis, Colorado State Univ., Colorado, USA. p.155.
- Guttman, N. B. 1998. Comparing the palmer drought severity index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1):113-121.
- Hayes, M. J., M. Svoboda, D. A. Wilhite, and O. Vanyarkho. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(3): 429-438.
- Korea Forest Research Institute. 2013. A prediction of forest disaster change on climate change and establishment of counter-strategy. p.421 (국립산림과학원. 2013. 기후변화 대응 산림재해 변화 예측 및 대응전략 개발. 421쪽).
- Korea Forest Service. 2009. Statistics of forest fires in 2009 (산림청. 2009. 산불 통계자료).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. 2002. Study on establishment of comprehensive counterplan for drought management system. p.567 (한국건설기술연구원. 2002. 가뭄관리 종합 대책 수립연구. 567쪽).
- Kwak, H.B., W.K. Lee, S.Y. Lee, M.S. Won, K.S. Koo, B.D. Lee and M.B. Lee. 2010. Cause-specific spatial point pattern analysis of forest fire in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 99(3):259-266 (곽한빈, 이우균, 이시영, 원명수, 구교상, 이병두, 이명보. 2010. 우리나라 산불 발생의 원인별 공간적 특성 분석. *한국임학회지* 99(3):259-266.
- Lee D.G. 2011. Development of standardized evaluation method for climate change vulnerability. Seoul Nat' l Univ., Seoul, Korea. p. 287 (이동근. 2011. 기후변화 취약성 평가 표준화 방법론 개발. 서울대학교. 287쪽).
- Malamud, B. D., G. Morein and D. L. Turcotte. 1998. Forest-fires: an example of self-organized critical behavior. *Science*

- 281(5384):1840-1842.
- McCoy, V. M. and C. R. Burn. 2005. Potential alteration by climate change of the forest-fire regime in the boreal forest of central Yukon Territory. *Arctic* 58(3):276-285.
- McKee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, January 17-22. pp.179-183.
- McKee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. *Proceedings of the 9th AMS Conference on Applied Climatology*, Dallas, TX, January 15-20. pp.233-236.
- Meteorological Information Portal Service System. <http://metsky.kma.go.kr> (방재 기상정보시스템. <http://metsky.kma.go.kr>)
- Ministry of Construction & Transportation. 2002. Report of 2001 drought investigation record. p.845 (건설교통부. 2002. 가뭄기록조사 보고서 2001. 845쪽).
- National Emergency Management Agency. 2013. Establishment of national drought disaster information system. p.465(소방방재청. 2013. 국가 가뭄재해 상황관리 정보 시스템 구축. 465쪽).
- Oh, K.R. and I.S. Yu. 2014. Measures for drought damage during the spring in Korea. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 14(2):4-9 (오국열, 유인상. 2014. 우리나라 봄철 가뭄의 피해현황과 대책. *한국방재학회지* 14(2):4-9).
- Palmer, W.C. 1965. *Meteorological drought*. Office of Climatology U.S. Weather Bureau, Washington. p.58.
- Pinol, J., J. Terradas and F. Lloret. 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climate Change* 38(3):345-357.
- Sheffield, J. and E. F. Wood. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulation. *Climate Dynamics* 31(1):79-105.
- Sung, M. K., G. H. Lim, E. H. Choi, Y. Y. Lee, M. S. Won and K. S. Koo. 2010. Climate change over Korea and its relation to the forest fire occurrence. *Atmosphere* 20(1):27-35 (성미경, 임규호, 최은호, 이윤영, 원명수, 구교상. 2010. 기후변화에 따른 한반도 산불 발생의 시공간적 변화 경향. *대기* 20(1):27-35).
- Sur, C.Y., K.J. Kim, W.J. Choi, J.H. Shim and M.H. Choi. 2014. Drought assessments using satellite-based drought index in Korea; southern region case in 2013. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 14(3):127-132 (서찬양, 김경준, 최우정, 심재현, 최민하. 2014. 인공위성 가뭄지수를 활용한 한반도 가뭄 평가, 2013년 남부지방 가뭄을 대상으로. *한국방재학회 논문집* 14(3):127-132).
- Trenberth, K., J. Overpeck and S. Solomon. 2004. Exploring drought and its implications for the future. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 85(3):27.
- Veblen, T. T., T. Kitzberger and J. Donnegan. 2000. Climatic and human influences on fire regimes in ponderosa pine forests in the Colorado front

- range. *Ecological Applications* 10(4): 1178–1195.
- Wang, L., J. J. Qu and X. Hao. 2008. Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 148(11):1767–1776.
- Won, M.S., S.H. Yoon, K.S. Koo and K.H. Kim. 2011. Spatio-temporal analysis of forest fire occurrences during the dry season between 1990s and 2000s in South Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3):150–162 (원명수, 윤석희, 구교상, 김경하. 2011. 1990년대와 2000년대 건조계절의 산불발생 시공간 변화 분석. *한국지리정보학회지* 14(3):150–162).
- Xiao, J. and Q. Zhuang. 2007. Drought effects on large fire activity in Canadian and Alaskan forests. *Environmental Research Letters* 2(4):1–6. 