산불방재

토지이용에 따른 산불발생의 영향 분석: 충청북도 사례를 중심으로

Analysis of the Effect of Land use on Forest Fires: Focused on Chungbuk Province Cases

김유리* · 조진희** · 이재홍*** · 황희연****

Kim, Yu Ri*, Jo, Jin Hee**, Lee, Jae Hong***, and Hwang, Hee Yun****

Abstract

The purpose of this study was to analyze land uses affecting spatial distribution patterns, and forest fire occurrence in forest fire areas using forest fire data of Chungbuk Province (1991 to 2012). For this purpose, this study examined spatial distribution patterns in forest fire areas using nearest neighbor index analysis, kernel density estimation and spatial autocorrelation analysis. Land use types affecting forest fire occurrence was induced by spatial regression analysis. As the result, forest fire occurrence in Chungbuk Province was spatially autocorrelated, and formed local clustering patterns. Land uses affecting forest fire occurrence were forest area, agricultural area and bare land. Forest fire in the area affects forest fire by 40.7%. Results of this study can be used to enhance monitoring system for forest fire prevention in forest fire areas, and help take preventive measures against forest fires by land use type significantly affecting forest fire occurrence.

Key words : Forest fire, Land use, Spatial distribution patterns, Spatial autocorrelation analysis, Spatial regression analysis

요 지

본 연구는 충청북도의 산불발생자료(1991년~2012년)를 활용하여 산불발생지역의 공간분포패턴과 산불발생에 영향을 주는 토지이용을 분석하고자 하였다. 이를 위해 최근린지수분석과 커널밀도분석, 공간자기상관성 분석을 통해 산불발생지역의 공간분포 패턴을 파악하였고, 공간회귀분석을 통해 산불발생에 영향을 주는 토지이용 유형을 도출하였다. 연구결과 충청북도의 산불발생은 공간적 자기상관성이 있으며, 국지적인 군집패턴을 형성하고 있는 것으로 나타났다. 산불발생에 영향을 주는 토지이용은 산림지역, 농업지역, 나지인 것으로 나타났고, 산불발생은 주변지역의 산불발생에 40.7%의 영향을 받는 것으로 나타났다. 연구결과는 산불발생이 군집을 이루는 지역을 대상으로 산불예방을 위한 감시체계를 강화하고, 산불발생에 영향을 많이 주는 토지이용 유형에 맞는 산불예방정책 수립에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 산불발생, 토지이용, 공간분포패턴, 공간자기상관분석, 공간회귀분석

1. 서 론

일반적으로 산불은 산림과 산림생태계를 위협하는 대표적인 산림재해 중 하나이며 광범위한 지역에 신속하게 피해를 입히는 특성이 있다(Choi *et al.*, 2006). 또한, 지구 온난화와

동반된 평균 기온증가에 따른 습도감소, 강수일수 감소 등에 의해 산불발생의 위험성이 증가하고 있는 것으로 보고되고 있어 이에 대한 대책 마련과 관련 연구가 필요한 상황이다(McCoy and Burn, 2005; Sung *et al.*, 2010).

우리나라의 산불발생 원인은 주로 입산자의 실화, 논·밭두

*정회원. 행정중심복합도시 기획조정단 연구원(E-mail: mirage577@nate.com)
Member. Researcher, Planning and Coordination Division, Multifunctional Administrative City

**충청권 건설교통기술 지역거점센터 책임연구원
Senior Researcher, Chugcheong Regional Infrastructure Technology Management Center

***교신저자. 정회원. 충북대학교 도시공학과 박사수료(Tel: +82-2-272-0217, Fax: +82-2-272-0237, E-mail: blossom23@nate.com)
Corresponding Author. Member, Ph.D. Candidate, Department of Urban Engineering, Chungbuk National University

****충북대학교 도시공학과 교수
Professor, Department of Urban Engineering, Chungbuk National University

령 소각, 쓰레기 소각 등 토지이용 속성과 밀접한 관계를 보이고 있다. 지난 50년간 산불발생 원인을 보면 실화에 의한 산불이 가장 높게 나타났으며, 논밭두렁 소각에 의한 산불은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2012). 그러나 기존의 산불관련 연구는 산불발화에 영향을 주는 인자에 대한 연구보다는 산불발생 후 확산과 대형화에 영향을 주는 임상·지피물량 등의 연료요인과 지형·사면향 등의 지형적 요인, 온도·습도 등의 기상요인에 대한 연구가 주를 이루고 있어 산불방지를 위한 실효성 있는 연구는 부족한 것으로 보인다. 또한, 산불예방을 위한 정책은 주로 산불조심기간, 산불대책본부 운영, 과태료 부과 등 전국단위의 획일적인 정책이 적용되고 있어 산불예방을 위한 정책적 실효성은 떨어지는 것으로 판단된다.

산불은 예방이 최우선 과제로 추진되어야 하며 산불예방을 위해 산불발생 원인에 직접적인 영향을 주는 요인을 면밀히 조사하여 산불예방을 강화할 필요가 있다. 따라서 인위적으로 발생하는 산불을 예방하기 위해 토지이용에 따른 산불발생 관계를 파악하여 집중적으로 관리한다면 제한된 예산과 장비, 인력 운용 등에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

이를 위해 본 연구는 3단계의 연구목표를 설정한다. 첫째, 산불발생 위치를 활용하여 공간적 군집화 정도와 밀집화의 패턴을 파악한다. 둘째, 각 읍면동별 산불발생 건수를 활용하여 산불발생의 공간적 자기상관성을 파악한다. 마지막으로, 산불발생의 읍면동별 격차에 영향을 주는 토지이용을 분석하는 것을 본 연구의 목적으로 설정한다.

연구 방법과 절차는 다음과 같다. 첫째, 충청북도의 산불발생자료(1991년~2012년)와 환경부의 토지피복도를 활용하여 분석 자료를 구축한다. 둘째, 산불발생 위치자료를 토대로 커널 밀도분석과 최근린분석을 실시하여 공간적 군집화 정도와 밀집화의 패턴을 파악한다. 또한 각 읍면동별 산불발생건수 자료를 Global Moran's I 지수와 LISA 지표에 적용하여 산불발생의 공간적 자기상관성을 확인한다. 마지막으로 공간회귀모형을 통해 산불발생의 읍면동별 격차에 영향을 주는 토지이용을 도출한다.

2. 이론적 고찰

2.1 산불의 개념 및 특징

산불은 산림 내에서 낙엽(落葉), 낙지(落枝), 고사목(枯死木), 임목(林木), 지피물(地被物) 등과 같은 열에너지원이 적용됨과 동시에 공기와 적절하게 혼합되면서 연소되는 화재로서 사람에 의한 실화·방화·낙뢰 등으로 인하여 발생된 불씨가 산림내의 가연물질을 연소시키는 것을 말한다.

우리나라의 산지는 경사가 급하고 기복이 많아 연소진행이 빠르고 급속하게 확산되는 경향이 있다. 또한 산림이 울창하고 가연성 낙엽 등이 많이 쌓여있어 봄철 건조기에 계절풍이

접치게 되면 동시다발적으로 확산되는 경향이 있다. 최근 10년간 우리나라의 산불발생 원인은 입산자 실화에 의한 산불이 43%를 차지하고 있으며, 바람이 많이 부는 건조기에 논·밭두렁 및 농산폐기물 태우기에 따른 산불도 많이 발생하고 있다(Kim, 2012).

2.2 산불예방 및 관리정책 동향

정부는 원인별 맞춤형 산불예방 활동으로 산불발생 요인을 사전에 차단하고 통합적·체계적인 초동대응으로 산불피해를 최소화하는 등 산불방지 역량을 강화하는 것을 기본전략으로 제시하고 있다(Korea Forest Service, 2013). 이러한 정부 정책을 살펴보면, 이미 발생한 산불을 진화하는 정책이 아니라 사전예방 정책에 초점을 두고 있음을 알 수 있다. 산불취약시기에 산불조심기간을 운영하고, 산불위험 예보 및 대형산불 위험 사전예보를 시행하고 있으며, 초기 대응력을 높이기 위해 감시인력 선발 및 교육 강화, 산불상황 관제시스템이 운영되고 있음을 알 수 있다. 또한 입산객의 인화물질 소지 및 소각행위 단속, 산불방지 대국민 홍보, 문화재 등 주요 시설물에 급수방지시설을 설치하고 이격공간을 확보하고 있다(Korea Forest Service, 2013). 그러나 이러한 사전예방정책들은 전국 지자체에 공통적으로 적용되는 것으로 각 시군들이 가지고 있는 상이한 임상 및 지형적 조건, 산림의 이용행태, 산불 감시실태 등을 고려한 정책으로 보기는 어렵다. 또한, 산불발생 위험기간이기 때문에 조심하라는 예보나 홍보만으로는 산불발생 위험을 줄이기에는 실효성이 떨어진다(Bae *et al.*, 2013).

산불발생의 원인은 입산자의 실화, 논·밭두렁 소각 등 토지의 이용과 밀접한 관계가 있다. 토지이용은 인간이 토지에 대해 영위하는 행위의 총칭으로 토지이용 속성만으로도 인간의 활동을 예측할 수 있고 대부분 인위적 원인에 의해 발생하는 산불과 토지이용 속성과의 관계를 면밀하게 분석·도출한다면 산불관련 예산, 장비 및 인력의 효율적 운용에 효과적인 대응책을 마련할 수 있을 것이다.

2.3 공간계량모형의 개념과 특성

공간계량모형은 어떤 사상(事象, phenomenon)의 공간분포와 그 이면에 있는 프로세스를 분석하는 방법이라 할 수 있다. 특히, 공간사상을 나타내는 공간데이터가 갖는 공간효과를 통제함으로써 모델 추정 및 분석결과의 신뢰도를 제고시킨다. 공간효과는 공간적 자기상관(spatial autocorrelation)과 공간적 이질성(spatial heterogeneity)으로 구분할 수 있으며, 공간효과에 대처하기 위한 공간계량모형은 다음과 같이 구체화된다. 첫째, 공간적 자기상관을 통제하는 공간회귀모형으로, 공간가중치행렬에 기반을 둔 설명변수를 투입하는 모형, 공간자기회귀 종속변수를 활용하는 공간시차모형, 공간자기회귀오차를 사용하는 공간오차모형 등을 들 수 있다. 특히, 공간시차

모형과 공간오차모형을 공간자기회귀모형이라고 통칭한다. 둘째, 공간적 이질성에 관한 모형으로 설명변수가 종속변수에 미치는 영향이 공간상에서 일정하지 않다는 점을 반영하고자 하는 공간확장모형, 공간체제모형, 지리적 가중회귀모델 등이 있다.

공간적 자기상관은 “모든 것은 그 밖의 다른 모든 것과 관련되어 있지만, 인접해 있는 것들이 멀리 있는 것들보다는 더 높은 관련성을 보인다”는 지리학 제1법칙에 의해 잘 설명된다(Tobler, 1970).

통계적으로 공간적 자기상관은 어떤 한 지점 a의 변수 X관측치가 인근 지점 b, c, d의 동일 변수 관측치와 관련성이 높을 수 있고, 그에 따라 b, c, d지점의 X 관측치로부터, a지점의 X 관측치를 모르더라도, 그 값을 예측할 수 있음을 의미한다. 이러한 특성을 가진 공간데이터를 전통적인 선형회귀모델, 즉 최소자승법(Ordinary Least Squares: OLS) 회귀모델의 종속변수로 사용할 경우, 해당 OLS모델링 결과의 신뢰도가 떨어질 수 있다. 공간데이터를 종속변수로 사용할 때 기존 계량모형이 직면할 수 있는 이상의 문제를 보완해서 모델링 결과의 신뢰도를 제고시키는 수단이 공간계량모형이다(Byun, 2007).

2.4 선행연구 검토

산불관련 선행연구는 크게 산불화재발생 패턴 분석과 산불 예측으로 구분된다. 산불발생 패턴을 분석하는 연구는 산불발생 장소와 피해면적을 기반으로 산불발생 밀집도 등을 분석하는 연구가 주를 이루고 있다. 산불 예측 연구는 산불발생건수를 대상으로 지형인자와 임상인자 등 산불발생에 영향을 미치는 요인들에 대한 모형식을 만들어 통계분석이나 GIS를 활용한 공간분석을 통해 새로운 산불발생 위험을 예측하는 방법과 임의의 화재발생을 가정한 후 기상조건을 고려하여 산불 확산을 시뮬레이션 하는 연구로 구분된다(Korea Forest Research Institute, 2012).

산불관련 초기 연구는 주로 산불위험에 영향을 주는 요인을 규명(Choi and Han, 1996; Lee, 1995)하는 연구가 주를 이루었고, 이후 산불발생 위험요인을 고려하여 GIS를 이용한 산불예측 및 시뮬레이션에 관한 연구(Weinstein *et al.*, 1995; Finney, 2004; Carty *et al.*, 2009; An *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004; Kwak *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012)들이 진행되어 왔다.

우리나라의 경우 산불발생 원인은 대부분 인위적 원인에 의해 발생하기 때문에 토지이용이 중요한 변수로 작용하고 있음에도 불구하고 도로로부터의 거리, 농경지 등의 변수를 고려한 일부의 연구를 제외하고는 토지이용에 관한 변수를 적용한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산불발생의 공간분포패턴을 파악하고, 산불발생에 영향을 주는 토지이용속성을 공간계량모형을 활용하여 도출하고자 한다.

3. 분석체계 구축

3.1 사례지역 선정

충청북도의 산불발생은 전국 17개 시·도에서 5위에 속할 만큼 높게 나타났다. 또한, 산불발생 원인이 낙뢰와 같은 자연적 원인은 22년간 4건에 불과하여 대부분 토지이용과 밀접한 관련이 있을 것으로 예상되므로 토지이용에 따른 산불발생 영향 분석에 적합하다고 할 수 있다.

충청북도의 산불발생은 1991년부터 2012년까지 총 635건이 발생했으며, 지역별로는 청원군이 98건(15.43%), 옥천군 75건(11.81%), 충주시 70건(11.02%) 순으로 나타났고, 증평군이 8건으로 가장 적게 발생한 것으로 나타나 지역별 편차가 매우 큰 것으로 나타났다.

3.2 분석자료 구축

토지이용에 따른 산불발생 영향을 분석하기 위한 자료는 1991년부터 2012년까지 총 22년간의 산불발생 현황 자료와 환경부의 토지피복도를 활용하였다.

산불발생현황 자료는 읍면동 단위의 원인별 발생현황으로 구축하였고, 토지이용에 따른 산불발생 영향을 분석하기 위해 토지피복의 대분류(시가화전조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역)로 분류하여 구축하였다.

3.3 분석체계

토지이용에 따른 산불발생 영향 분석은 다음과 같은 단계로 진행된다. 첫째, 산불의 공간적 군집화 경향을 분석하기 위해

Fig. 1. Location of Forest Fire Occurrence(1991 to 2012).

Table 1. Framework of Analysis

Spatial Statistical Analysis	Analysis materials	Method of analysis
Spatial distribution patterns of forest fire occurrence	<ul style="list-style-type: none"> • Location of Forest Fire Occurrence • Land cover map 	<ul style="list-style-type: none"> • Nearest neighbor index analysis • Kernel density analysis
Spatial autocorrelation analysis	<ul style="list-style-type: none"> • EupMyeonDong Forest Fire Occurrence 	<ul style="list-style-type: none"> • Global Moran's I • LISA Cluster
Analysis of the effect of land use on forest fires	<ul style="list-style-type: none"> • EupMyeonDong Forest Fire Occurrence • Land cover map 	<ul style="list-style-type: none"> • Spatial regression model -Spatial error model -Spatial lag model

산불발생지역의 공간 분포 패턴을 분석한다. 공간 분포 패턴은 산불발생위치 자료로 커널밀도분석과 최근린지수분석을 통해 공간적 군집화 정도와 밀집화의 패턴을 분석한다. 둘째, 각 읍면동별 산불발생 건수의 공간적 자기상관성을 분석하여 산불발생이 공간적인 연관성을 가지고 군집하고 있는가를 분석한다. 공간자기상관성은 Global Moran's I지수와 LISA지표를 이용하여 전역적 측면, 국지적 측면의 공간자기상관성을 분석한다. 셋째, 산불발생의 읍면동별 격차에 영향을 미친 토지이용 측면의 요인을 추출하기 위해 공간계량 모형인 공간 회귀분석을 하여 산불발생에 영향을 주는 토지이용을 분석한다.

3.3.1 산불발생의 공간적 군집 경향 분석

산불발생의 공간적 군집 경향을 분석하기 위해 최근린지수 분석과 커널밀도 분석을 진행한다.

최근린지수분석은 어떤 현상의 공간적 분포를 결정할 때 공간상에서 가장 가까운 두 지점간의 거리를 측정하여 분포패턴을 분석하는 기법으로($R = \frac{\bar{d}_{min}}{E(d)}$) 일반적으로 R 값이 작을수록 클러스터형 패턴에 가까워지고, R 값이 커질수록 분산형 패턴에 가까워진다. R 값의 범위는 0에서 2.1491까지의 값을 가지는데 $R=0$ 일 경우 각 점에서 가장 가까운 이웃 점까지의 거리가 '0'이라는 것으로 이는 모든 점이 한 곳에 모여 있음을 의미하고, $R=2.1491$ 은 이론적으로 점들이 완전하게 분산되며 정육각형과 같이 규칙적인 패턴을 나타낼 경우에 해당된다. $R=1$ 은 실제 최근린 점들의 거리가 임의적 분포패턴과 일치하는 경우를 가리키며, R 값에 대한 통계적 유의성은 표준 정규분포(z)에 따라 나타내는 것으로($z = \frac{\bar{d}_{min} - E(d)}{\sigma_d}$)에 따라 Z 값이 ± 1.96 보다 크거나 작게 산출되면 군집된 패턴에 가까움을 의미한다(Lee and Shim, 2003).

이희연 외(2003)에 따르면, $R=1.35$ 는 무작위 패턴과 가까우며 $R=2.31$ 은 분산된 패턴, $R=0.25$ 는 군집된 패턴에 가까움을 보인다고 풀이할 수 있다. 일반적으로 $R=1$ 은 실제 최근린 점들의 거리가 임의적 분포 패턴과 일치하는 경우이므로 $R=1$ 보다 작으면 군집된 패턴을 보이고 있다고 할 수 있다.

커널밀도분석은 대상지역의 점 개체 분포를 토대로 대상지

Fig. 2. Distribution Patterns of Nearest Neighbor Index.

역 전체에 걸친 공간밀도를 추정하는 방법이다. 밀도 추정은 격자들의 중심점 간의 거리가 증가할수록 공간적 연관성이 감소한다는 지리학의 제1법칙 하에서 특정 격자로부터 일정한 크기의 대역폭을 설정하고, 해당 대역폭 내에 포함된 점 개체들을 기준으로 격자들의 밀도를 조정하는 방법이다. 즉, 커널밀도의 추정 자체가 점 개체가 발생하는 점과의 거리에 따른 가중치가 고려되기 때문에 거리에 따른 조락현상이 나타나게 된다(Lee and Shim, 2003). 커널밀도분석은 시각적으로 공간밀도를 쉽게 표현할 수 있어 점 개체의 분포 패턴을 분석하는데 많이 사용되는 분석 방법 중 하나이다. 본 연구에서는 ESRI사의 ArcGIS 9.3을 활용하여 커널밀도분석을 수행하였으며, 셀 사이즈는 50 m×50 m, 밀도분석 반경은 산불발생 지점간의 평균거리를 고려하여 10 km로 설정하였다. 이후 토지이용 형태를 분석하기 위해 Natural Breaks(Jenks)방법을 이용하여 속성 값을 9단계로 구분하여 등급별 토지이용 DB를 구축하였다.

3.3.2 공간계량분석

공간자기상관은 어떤 한 지역의 특정변수 관측치가 인접지역의 동일변수 관측치와 상관이 있음을 의미하는데, 이를 위해 공간적 가중치 행렬(spatial weight matrix)을 산출하고 가중치에 의해 조정된 수치로 공간분석에 활용한다(Byun, 2007). 공간가중치행렬은 두 공간 단위 간 인접관계를 나타내는데 일반적으로 거리척도와 인접성 척도를 기준으로 한다. 거리척도는 거리감쇠함수를 이용하며, 인접성 척도는 공간단위별로 가장 근접한 이웃 공간의 수가 몇 개인지, 경계를 공유하는 이웃 공간의 수가 몇 개인지 등을 이용하여 공간가중치 행렬을 도출할 수 있다. 공간가중치 행렬이 정의된 후 공간자기상관이 존재하는지를 파악하기 위해서 가장 보편적인

로 사용되는 방법이 식 (2)로 정의되는 Moran's I는 인접한 지역이 비슷한 특징을 가지고 있을 때에는 (+)값을 가지며, 서로 다른 특징을 나타내면 (-)값을 가지며 $-1 \leq \text{Moran's I} \leq 1$ 의 값을 갖는다.

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$S = n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}, w_{ij}: \text{공간가중치}$$

x_k : 해당공간자료, i, j : 공간위치

하지만 Moran's I는 연구대상지역 전체의 공간적 자기상관도를 하나의 값으로 나타내기 때문에 공간적 연관성에 대한 국지적 구조를 파악할 수 없다. 이와 같은 문제를 최소화하기 위해 Anselin(1995)은 LISA(Local Indicator of Spatial Association) 유형의 분석기법을 제시하였는데 LISA 기법은 공간자기상관의 국지적 변화를 고려한 시각지표로 공간적 군집의 유의성과 온열지점(Hot spots)을 찾을 수 있다. 이때 LISA 중 가장 손쉽게 활용할 수 있는 것이 Local Moran's I로 공간가중치와 평균편차로 표현되는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad (3)$$

공간 데이터가 공간자기상관성을 갖고 있다고 판명되면 공간자기상관을 통제하여 회귀모형이 추정되어야 한다. 이러한 공간적 특성을 고려한 기법인 공간회귀모형은 공간효과를 공간적 의존성과 공간적 이질성으로 나누고 다음과 같은 식 (4)와 식 (5) 모형으로 나타낼 수 있다.

$$y = pWy + X\beta + e \quad (4)$$

$$e = \lambda W_2 \mu + \mu \quad (5)$$

y : 종속변수($N \times 1$ 벡터), X : 독립변수($N \times k$ 벡터), p, λ : 공간자기회귀계수, β : 회귀계수($k \times 1$ 벡터), W_1, W_2 : 공간가중치행렬($N \times N$), e : 오차($N \times 1$ 벡터).

$$\begin{aligned} y &= X\beta + e \\ e &= \lambda W_e + u \end{aligned} \quad (6)$$

$$y = X\beta + (I - \lambda W)^{-1} u$$

$e = (I - \lambda W)^{-1} u$ 단, $(I - \lambda W)^{-1}$: 공간영향요인

$$\begin{aligned} y &= pWy + X\beta + e \\ y &= (I - pW)^{-1} X\beta + (I - pW)^{-1} e \end{aligned} \quad (7)$$

$$(I - pW)^{-1} = \frac{1}{1-p} \text{ 단, } (I - pW)^{-1}: \text{공간영향요인}$$

공간회귀모형에는 일반적으로 공간오차모형(Spatial Error Model), 공간시차모형(Spatial Lag Model)이 있다. 공간오차모형은 공간 종속성이 오차에서 발생하며 식 (4)의 공간가중치 행렬(W_1)이 0이 된다. 공간오차모형에서는 모형에 고려하지 않은 변수들 간에 공간종속성이 있다는 것을 가정하고 있는데, 모형에는 고려하지 않은 독립변수가 주변지역의 독립변수들의 영향을 받게 되고, 이는 공간가중치행렬을 통해 모형에 반영된다. 공간오차모형은 식 (6)과 같으며 공간오차모형의 영향요인은 오차항에만 영향을 받는다. 공간시차모형은 식 (7)에서와 같이 공간 종속성이 종속변수 y 에서 발생하며, 하나의 종속변수 y 는 주변지역의 종속변수들에 영향을 받으며, 식 (5)의 공간가중치 행렬(W_2)이 0임을 의미한다(Anselin, 1995).

본 연구에서는 충북의 읍면동별 산불발생의 공간적 자기상관성과 읍면동별 산불발생 원인의 공간적 자기상관성 분석을 실시하였다. 전역적 자기상관성 분석결과, 충청북도의 읍면동이 가장 많이 인접하는 지역은 충주시 가금면으로 10개 지역이 접하고 있는 것으로 나타났으며, 가장 적게 인접하는 지역은 청원군 현도면, 강외면, 영동군 추풍령면, 단양군 백곡면, 단양군 대강면, 영춘면으로 각각 2개 지역과 접하고 있는 것을 알 수 있었다.

전역적 자기상관성 분석에 이용되는 전역적 모란지수는 -1에서 1사이의 값을 갖게 되며, 그 값이 1에 가까울수록 강한 자기상관성을 의미하고 0에 가까울수록 약한 자기상관을 의미하게 된다. 선행연구에서 살펴보면 일반적으로 (+)의 정적인 계수가 산출되면 모두 자기상관성이 있는 것으로 분석되고 있다. 이희연(2012)의 연구에서는 0.4이상의 모란지수를 매우 높은 자기상관성이라고 해석하였다.

4. 토지이용에 따른 산불발생 영향분석

4.1 산불발생의 공간적 군집 경향 분석

최근린지수는 공간상에 분포한 데이터의 군집화 정도를 나타내는 지수로서 클러스터 분석에서 많이 이용되는 분석이다. 최근린지수(R)는 0에서 2.1491까지의 값을 가지는데 이론적으로 $R=0$ 일 경우 모든 점이 한 곳에 모여 있음을 의미하고, $R=2.1491$ 은 점들이 완전하게 분산되며 정육각형과 같이 규칙적인 패턴을 나타낼 경우에 해당된다(Lee and Shim, 2003). 충청북도의 산불발생지역의 최근린지수를 분석한 결과 지수는 0.7, Z검정 결과 -14.39, P값은 0.0000으로 통계적으로 매우 유의한 것으로 나타나 상당히 군집화된 패턴임을 알 수 있다.

커널밀도분석결과 밀도가 가장 높은 곳은 청원군 남이면, 부용면, 현도면, 문의면이 경계하고 있는 지역과 옥천군 청성면으로 나타났으며, 다음으로 밀도가 높은 곳은 음성읍으로 나타났다. 밀도가 높은 곳 중 청원군의 경우 답(沔)과 임야가 혼재된 지역으로 대부분 쓰레기 소각, 논·밭두렁 소각으로 인

Fig. 3. Result of Nearest Neighbor Index Analysis.

Fig. 4. Result of Kernel Density Analysis.

한 산불이 원인인 것으로 나타났다. 옥천군의 청성면은 대부분이 임야 지역으로 임야지역 사이사이에 있는 논·밭두렁 소각, 쓰레기 소각으로 인한 산불이 발생한 것으로 나타났다. 음성읍의 경우 읍내 시가지지역의 산불 밀도가 높은 것으로 나타났으며, 산불발생 원인은 입산자 실화, 논·밭두렁 소각 등으로 나타났다.

산불발생의 국지적인 공간밀도를 나타내고 있는 청원군 북부지역, 옥천군 청성면, 음성군 음성읍의 3개 지역은 임야와 인접한 농경지로부터 산불이 대부분이었으며, 음성읍의 경우 시가지에 높은 산불발생밀도가 나타난 것을 알 수 있었다.

4.2. 공간적 자기상관 분석

산불발생의 공간적 군집 경향 분석 결과 산불발생이 일정한 지역에 군집된 패턴을 보이고 있음을 알 수 있었다. 분석결과를 통해 시각적으로 공간적 자기상관성이 존재함을 가정할 수 있으나, 보다 정확한 판정을 위해서는 공간적 자기상관성

Fig. 5. Degree of Scattering and Moran's I

검정이 필요하다.

산불의 공간분포 패턴에 대한 전역적 자기상관성 분석을 실시한 결과 모란지수 값(Moran's I)은 0.419235로 높은 양(+)의 관계가 나타나 공간적 자기상관성이 존재하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 1991년부터 2012년까지(22년간) 충북의 산불발생은 산불이 많이 발생한 지점에서 산불이 많이 발생하고, 인접한 지역에 서로 유사한 값을 나타내고 있는 공간적 군집을 이루고 있다고 할 수 있다.

LISA(Local Indicator of Spatial Association) 지표를 활용한 국지적 자기상관분석을 통해 나타나는 군집은 높은 값 주변에 높은 값이 존재하는 High-High(HH)클러스터 지역, 낮은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 Low-Low(LL)클러스터 지역, 높은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 High-Low(HL)클러스터 지역, 낮은 값 주변에 높은 값이 존재하는 Low-High(LH)클러스터 지역으로 총 4가지 유형으로 구분된다. 국지적 자기상관성 분석을 실시한 결과 군집분석은 0.05수준으로 유의한 읍면동은 36개 지역으로 나타났으며, 0.01수준으로 유의한 지역은 21개 지역, 유의하지 않은 지역은 97개 지역으로 나타났다. 산불발생이 많은 지역들이 군집하고 있는 HH클러스터 지역은 총 17개 지역으로 충북의 중부권에 해당하는 청원군 북부, 옥천군 일대로 나타났다. 이 지역은 산불이 국지적으로 많이 발생하는 지역으로 인근지역과 정적인 영향을 주고 받으며 군집화된 패턴을 보인 것으로 해석된다. 반면 낮은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 LL지역은 청주시, 충주시, 제천시의 도심지역인 것으로 나타났다. 이 지역은 비교적 산불이 발생하지 않는 군집지역으로 해석된다. 또한 낮은 값 주변에 높은 값이 존재하는 이례적 결과를 보이는 지역은 충주시의 신미면, 보은군의 삼승면, 산외면, 옥천군 안남면으로 나타

Fig. 6. Autocorrelation Analysis of Local Significance Map.

Fig. 7. LISA Cluster Map.

낮으며, 높은 값 주변에 낮은 값이 존재하는 이례지역은 없는 것으로 나타났다.

4.3. 산불발생의 토지이용에 따른 영향요인 분석

산불발생의 공간적 분포패턴을 분석한 결과 지역적으로 군집하는 경향을 보이고 있으며, 산불발생에 대한 공간적자기상관성을 보이고 있어 산불발생은 이웃하고 있는 지역과 상당히 연관되어 있다는 것을 확인하였다. 이에 산불발생에 영향을 주는 토지이용을 분석하기 위해 공간회귀모형을 통해 공간계량분석을 하도록 한다.

REGRESSION DIAGNOSTICS			
MULTICOLLINEARITY CONDITION NUMBER	9.617065		
TEST ON NORMALITY OF ERRORS			
TEST	DF	VALUE	PROB
Jarque-Bera	2	99.64009	0.0000000
DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY			
RANDOM COEFFICIENTS			
TEST	DF	VALUE	PROB
Breusch-Pagan test	7	36.62975	0.0000055
Koenker-Basett test	7	13.36605	0.0636762
SPECIFICATION ROBUST TEST			
TEST	DF	VALUE	PROB
White	35	41.10035	0.2208543

Fig. 8. Linear Model Estimation.

DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE			
FOR WEIGHT MATRIX : fire.gal			
(row-standardized weights)			
TEST	MI/DF	VALUE	PROB
Moran's I (error)	0.224041	4.8763545	0.0000011
Lagrange Multiplier (lag)	1	9.8322050	0.0017148
Robust LM (lag)	1	0.3514338	0.5533026
Lagrange Multiplier (error)	1	19.2262220	0.0000116
Robust LM (error)	1	9.7454507	0.0017977
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	19.5776557	0.0000561

Fig. 9. Decision statistics of Spatial Regression Model.

공간회귀모형은 일반적으로 공간시차모형(spatial lag model)과 공간오차모형(spatial error model) 중 하나의 모형을 선택하여 사용하게 되며, 공간회귀모형을 선정하는 절차에 따라 먼저 선형회귀분석을 실시하여 적합성을 검정한다. 앞서 분석한 결과에 따라 산불발생은 공간적 자기상관성이 존재하는 것으로 판정되었기 때문에 일반선형회귀모형은 적합하지 않다는 것을 1차적으로 판단할 수 있다. 실제로 일반선형회귀모형을 이용하여 회귀모델의 가정에 위배되는지를 검토한 결과 오차항의 정규분포를 검정하는 Jarque-Bera 값이 높은 수준으로 정규분포하지 않음을 보이고 있으며, 이분산성을 검정하는 Breusch-Pagan, Koenker-Basett, White 검정은 White검정을 제외하고 모두 유의한 수준에서 오차항에 이분산이 존재함을 보이고 있다.

공간자기상관성을 분석해보면 Moran's I(error)의 유의확률이 0.00으로 자기상관성이 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 공간시차모형과, 공간오차모형을 선택해야 한다는 것을 알 수 있다. 또한, 공간시차모형과 공간오차모형의 적합도 검정을 나타내는 라그랑지 승수(Lagrange Multiplier)에서 공간오차모형이 $p=0.0000$, 공간시차모형이 $p=0.0017$ 로 모두 유의하게 나타났다. 두 모형의 값이 모두 유의한 경우 Robust LM 통계량 중 보다 더 유의하게 나타난 모형을 선택해야 한다. 그 결과, 공간시차모형은 $p=0.553$ 으로 유의하지 않으며, 공간오차모형은 $p=0.0018$ 로 유의한 것으로 나타났다. 따라서 산불발생에 대한 공간회귀분석은 공간오차모형을 적용하도록 한다.

공간회귀모형의 적합도를 판단하기 위해 선형회귀분석결과와 공간회귀분석결과를 비교하였다.

공간회귀모형의 적합도는 R-squared, 로그우도, AIC, SC등

Table 2. Estimation Results by Spatial regression Model

Classification	OLS(일반회귀모형)		SEM(공간오차모형)	
	z-value	prob.	z-value	prob.
Built-up Area	1.249	0.214	1.466	0.143
agricultural area	3.112	0.002	2.568	0.010*
forest area	7.945	0.000	7.695	0.000*
grassland	-1.095	0.275	-1.463	0.144
marshy land	0.134	0.894	-0.188	0.851
bare land	1.812	0.072	1.940	0.052**
wetlands	1.636	0.104	1.090	0.276
R-squared	0.555908		0.611552	
Log likelihood	-365.615		-358.082	
AIC	747.229		734.165	
SC	771.525		761.497	
Lag coeff.(Rho)			0.407183	0.000*
Likelihood Ratio			15.064	0.000*

*,p<0.05, **,p<0.1

으로 검정하는데, 일반적으로 공간회귀모형은 일반선형분석보다 로그우도는 증가하고 AIC, SC는 감소하게 되면 모형의 적합도가 향상됨을 의미한다(Lee, 2012).

먼저 로그우도 값을 비교하면 일반선형회귀모형(OLS)에서는 -365.615에서 공간오차모형(SEM)에서는 -358.082로 증가하였고, AIC는 일반선형모형에서 747.229에서 공간오차모형에서 734.165로 줄어들었으며, SC는 일반선형모형에서 771.525에서 761.497로 줄어들었다. 또한 R-squared 값도 일반선형모형에서 0.55에서 0.61로 증가하였다.

충청북도의 산불발생은 공간적 자기상관성을 나타내고 있으며, 등분산성의 위배와 오차항의 이분산성이 존재하므로 일반선형회귀모형을 통한 분석은 적합하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 공간회귀모델 결정 통계량 분석을 통해 공간회귀모델의 공간시차모형과 공간오차모형 중 공간오차모형이 적합하다는 것을 알 수 있었다. 이에 공간오차모형을 적용한 공간회귀분석 결과는 다음과 같다. 먼저, 인접지의 영향력을 나타내는 공간오차항의 추정계수(Lag coeff.)는 0.407로 나타났다(p<0.05). 즉, 산불발생은 주변지역의 평균 산불발생의 약 40.7%의 영향을 받는 것을 의미한다. 공간 종속성의 진단결과를 보면 공간 래그항이 포함되었을 때 모형 적합도의 개선이 통계적으로 유의한가를 검정하는 우도비 검정(Likelihood Ratio Test)결과는 15.06363으로(p<0.05)나타났다. 이는 공간오차항을 포함한 모형이 그렇지 않은 모델에 비해 유의하게 나타나는 것으로 모형의 적합도를 개선시켰다고 판정할 수 있다. 결정계수는 0.612로 약 61.2%의 설명력을 갖는 것으로 나타났으며 농업지역, 산림지역, 나지가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 이 결과는 읍면동별로 산림지역, 농업지역, 나지가 많을수록 산불발생이 높게 나타날 수 있는 것으로 해

Table 3. Estimation Results by Spatial Error Model

Classification	z-value	prob.
Built-up Area	1.466	0.143
Agricultural area	2.568	0.010*
Forest area	7.695	0.000*
Grassland	-1.463	0.144
Marshy land	-0.188	0.851
Bare land	1.940	0.052**
Wetlands	1.090	0.276
R-squared	0.611552	
Lag coeff.	0.407183	0.000*
Likelihood Ratio	15.06363	0.000*

*,p<0.05, **,p<0.1

석이 가능하다. 이는 산불이라는 특성상 산림지역이 많을수록 산불발생 확률이 높아지는 것으로 판단되며, 농업지역과 나지의 경우 논·밭두렁 소각, 쓰레기 소각 등에 의해 산불발생 확률이 높기 때문에 통계적으로도 유의한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

4.4. 분석결과 종합

산불의 공간적 자기상관 분석결과, 1991년부터 2012년까지 충북의 산불발생은 산불이 많이 발생한 지점에서 주로 발생하였으며, 공간적으로 군집하고 있는 경향을 보이고 있다.

산불발생에 영향을 주는 토지이용 분석은 공간회귀모형 선정 절차에 따라 공간오차모형이 선정되었다. 공간오차항의 추정계수(Lag coeff.)가 0.407로 나타나 산불발생은 주변지역의 평균 산불발생의 약 40.7%의 영향을 받는 것으로 나타났다.

Table 4. Analysis Result

Analysis items	Analysis result
Result of nearest neighbor index analysis	<ul style="list-style-type: none"> • index: 0.7 • Z= -14.39 • P= 0.0000
Spatial autocorrelation analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Moran'I : 0.419235 • LISA P=0.05(36) P=0.01(21)
Decision statistics of spatial regression model	<ul style="list-style-type: none"> • Lagrange Multiplier SEM: P=0.0017 SLM: P=0.0000 • Robust LM SEM: P=0.553 SLM: P=0.0018
Estimation results by spatial error model	<ul style="list-style-type: none"> • Lag coeff. (P<0.05): 0.407(40.7%) • Likelihood Ratio (p<0.05): 15.06363 • R-squared: 0.612 (61.2%) • Factor : agricultural area, forest area, bare land

이는 각 읍면동별로 농업지역·산림지역·나지가 많을수록 산불발생의 확률이 높게 나타날 수 있는 것으로 해석된다.

5. 결 론

본 연구는 충청북도의 산불발생자료(1991년~2012년)를 활용하여 산불발생에 영향을 주는 토지이용 요인을 공간회귀분석을 통해 도출하였다. 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

산불발생 위치의 공간적 분포는 매우 국지적인 공간패턴을 보이고 있음을 확인하였다. 이러한 국지적인 패턴은 공간적 자기상관성의 존재를 암시하는데, 읍면동별 산불발생 건수를 Moran's I 지수와 LISA지표를 이용하여 전역적·국지적인 공간적 자기상관성을 검토한 결과, 전역적 Moran's I지수는 0.419235로 높은 공간적 자기상관성이 존재하는 것으로 나타났다. 이에 비해 LISA국지적·공간적 자기상관은 청원군 북부지역과 옥천군 일대에 높은 정(+)의 상관관계를 갖고 있는 것으로 드러났다. 즉, 이 지역은 강한 정적인 공간적 연관성을 보이면서 산불발생의 군집된 패턴을 형성하여 왔음을 알 수 있었다.

국지적인 산불발생패턴에 영향을 주는 토지이용을 분석하기 위해 공간계량모델의 공간회귀분석을 실시한 결과, 산림지역·농업지역·나지에서 통계적으로 유의한 결과가 나타났다. 또한, 산불발생은 주변지역의 평균 산불발생의 약 40.7% 정도 영향을 받는 것으로 나타났다.

연구결과를 종합하면, 산불발생지역은 공간적 자기상관성을 나타내며, 군집적인 패턴을 보이고 있는 산림지역, 농업지역, 나지에 대해 집중적인 관리가 필요한 것으로 보인다. 산불

의 국지적인 발생 패턴이 토지이용과 밀접한 관련이 있다는 점을 고려할 때, 산불예방을 위해 토지이용 특성에 맞는 구체적인 산불예방계획과 정책수립이 필요하다. 산불발생의 군집지역을 대상으로 우선적인 산불예방과 감시를 강화하고 관련 계획 및 정책 수립 시 토지이용과의 관계를 고려해야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 산불발생의 공간분포 패턴을 파악하고, 산불발생에 영향을 주는 토지이용 변수를 공간회귀모형을 통해 도출하였다는 점에서 향후 공간통계이론을 적용한 산불 관련연구와 정책 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 토지이용에 따른 산불발생 영향을 읍면동 단위로 분석하였으나, 수집 가능한 데이터의 한계로 인해 산불발생에 영향을 주는 다양한 변수들을 고려하지 못했다는 한계점이 있다. 산불의 피해규모에 대한 분석과 함께 읍면동 단위의 다양한 데이터를 구축하여 산불발생에 영향을 주는 토지이용 측면의 요인을 보다 미시적으로 도출하기 위한 연구가 이어지기를 바란다.

References

- An, S.H., Lee, S.Y., Won, M.S., Lee, M.B., and Shin, Y.C. (2004) Developing the Forest Fire Occurrence Probability Model Using GIS and Mapping Forest Fire Risks, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol.7, No.4, pp.57-64.
- Anselin, L. (1995) Local indicators of spatial association-LISA, *Geographical analysis*, Vol.27, No.2, pp.1-25.
- Anselin, L. (2005), *Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook*, IL, Spatial Analysis Laboratory.
- Bae, M.K., Kim, Y.R., and Lee, B.D. (2013) Directions on Forest Fire Prevention Policies through the Deduction of Priority Area for Forest Fire Management, *Environmental Policy*, Vol.21, No.4, pp.173-196.
- Byun, P.S. (2007) Spatial Econometric Modeling, *The Korea Spatial Planning Review*, Vol.304, pp.111-119.
- Catry, F.X., Rego, F.C., Bacao, F.L., and Moreira, F. (2009) Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal, *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 18, pp.1-11.
- Choi, G. and Han, S.Y. (1996), Development of probability models of forest fires using meteorological data, *Journal of Korean Forest Society*, Vol.85, No.1, pp.15-23.
- Choi, S.P., Kim, D.H., and Lee, S.G. (2006) The Abstraction of Forest Fire Damage Area using Factor Analysis from the Satellite Image Data, *The Korea Society For Geospatial Information System*, Vol.14, No.1, pp.13-19.
- Finney, M.A. (2004) FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation. Fort Collins: Rocky Mountain Research Station.
- Kim, Y.K. (2012) Management of restoration of ecological changes of the affected areas and metropolitan area Forest Fire prevention, *Gyeongnam development*, Vol.119, pp.100-110.
- Korea Forest Research Institute (2012) Forestry forest disaster

- management measures for the conservation of the temple building, vol.474.
- Korea Forest Service (2013) National forest fire prevention comprehensive measures.
- Kwak, H.B., Lee, W.K., Lee, S.Y., Won, M.S., Koo, K.S., Lee, B.D., and Lee, M.B. (2010) Cause-specific Spatial Point Pattern Analysis of Forest Fire in Korea, *Journal of Korean Forest Society*, Vol.99, No.3, pp.259-266.
- Lee, B.D., Yoo, G.S., Kim, S.Y., Kim, K.H., and Lee, M.B. (2012) Development of Forest Fire Occurrence Probability Model Using Logistic Regression, *Journal of Korean Forest Society*, Vol.101, No.1, pp.1-6.
- Lee, H.Y. (2012) Factor analysis of regional disparities and spatial integration of knowledge creation activities, *The Journal of Intellectual Property*, Vol.5, No.1, pp.113-149.
- Lee, H.Y., Shim, J.H. (2003) GIS: geomatics, bobmunsa.
- Lee, M.U., Lee, S.Y., and Lee, J.H. (2012) Study of the Characteristics of Forest Fire Based on Statistics of Forest Fire in Korea, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.5, pp.185-192.
- Lee, S.Y. (1995) Studies on the factor analysis of combustion and expansion occurrence risk of forest fire, Ph.D. Dissertation, Dongguk University.
- Lee, S.Y., An, S.H., Won, M.S., Lee, M.B., Lim, T.G., and Shin, Y.C. (2004), Classification of Forest Fire Occurrence Risk Regions using GIS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol.7, No.2, pp.37-46.
- McCoy, V.M., Burn, C.R. (2005), Pontential Alteration by Climate Change of the Forest-Fire Regime in the Boreal Forest of Central Yukon Territory, *Arctic*, Vol.58, No.3, pp.276-285.
- Sung, M.K., Lim, K.H., Choi, E.H., Lee, Y.Y., Won, M.S., and Koo, K.S. (2010), Climate Change over Korea and Its Relation to the Forest Fire Occurrence, *Atmosphere*, Vol.20, No.1, pp.27-35.
- Tobler, Waldo (1970) A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*. Vol. 46, No.2. pp.234-240.
- Weinstein, D., Green, K., Campbell, J., and Finney M. (1995), Fire Growth Modeling in an Integrated GIS Environment Proceedings, ESRI User Conference.

Received ■ June 30, 2014

Revised ■ July 2, 2014

Accepted ■ August 4, 2014