

한국 산불 발생에 대한 확률 시뮬레이션 모델 개발

이병두¹ · 이요한^{2*} · 이명보¹ · Heidi J. Albers²

¹국립산림과학원 산림방재연구과, ²오레곤주립대학 산림대학

Stochastic Simulation Model of Fire Occurrence in the Republic of Korea

Byungdoo Lee¹, Yohan Lee^{2*}, Myung Bo Lee¹ and Heidi J. Albers²

¹Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

²College of Forestry, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, USA

요약: 본 연구에서는 국내 과거 산불 자료를 기초로 하여 계절별 산불 발생 확률 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 산불 발생 확률 모델은 산불 발생 사건의 시간적 분포가 과거 자료와 부합해야 하므로, 세 단계를 거쳐 생성하였다. 먼저, 산불 기간 중의 산불 발생 일은 베르누이 분포에서 임의로 추출하여 일일 단위로 산불의 발생 여부를 결정하였다. 다음 단계로, 산불이 발생하면 기하학적 다중 분포에서 임의로 추출하여 그 날 하루 중에 발생하는 산불의 수를 결정하였다. 마지막 단계로, 각 산불의 발화 시간은 포아송 분포를 가정하여 하루 중 산불 발생이 가능한 시간 중 임의로 추출하여 결정하였다. 산불 발생의 확률적 분포는 과거 산불 발생 자료를 바탕으로 추정하였다. 확률 분포에 대한 중요 계수 값을 구하기 위해 최우도추정법을 이용하였다. 개발된 확률 시뮬레이션 모델에 의해 생성된 일련의 산불 발생 사건들은 과거 산불 통계 자료와 비교할 때 발생 주기 분포, 산불간의 시간 간격, 연간 일어나는 산불 총 건수에서 통계적으로 부합하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 향후 산불 관련 자원 활용 및 진화 계획 수립 시에 중요한 보조 자료로 활용될 것으로 기대된다.

Abstract: In this study, we develop a fire stochastic simulation model by season based on the historical fire data in Korea. The model is utilized to generate sequences of fire events that are consistent with Korean fire history. We employ a three-stage approach. First, a random draw from a Bernoulli distribution is used to determine if any fire occurs for each day of a simulated fire season. Second, if a fire does occur, a random draw from a geometric multiplicity distribution determines their number. Last, ignition times for each fire are randomly drawn from a Poisson distribution. This specific distributional forms are chosen after analysis of Korean historical fire data. Maximum Likelihood Estimation (MLE) is used to estimate the primary parameters of the stochastic models. Fire sequences generated with the model appear to follow historical patterns with respect to diurnal distribution and total number of fires per year. We expect that the results of this study will assist a fire manager for planning fire suppression policies and suppression resource allocations.

Key words : forest fire, stochastic, simulation, fire occurrence model

서론

한국은 지속적인 녹화 사업으로 단기간에 산림을 육성하는 성과를 얻었다. 하지만 산림의 밀도와 재적의 증가는 대형 산불 발생의 위험을 높이고 있다. 최근 기후 변화로 인한 상대습도의 감소, 기온 상승, 산불기간 강수량 감소로 인해 산불의 위험은 증대되고 있는 추세이며, 해마다 발생하는 대형 산불은 엄청난 탄소를 대기 중으로 방

출하여 지구 온난화를 더욱 가속화하고 있다(Frederic *et al.*, 2004). 국내에서도 대형 산불에 대한 위험이 항시 존재하고 있으므로, 산림청의 국가 주요 산림 정책과 장기 산림 경영 계획 수립 시 산불과 같은 재해 요인에 대한 고려가 필요하다. 이를 위해, 산림을 잘 보전하고 관리하기 위해서는 산불 발생 시에 일어날 수 있는 상황을 예측하고 최적의 산불대응 시스템을 사전에 구축하는 것이 중요하다.

일반적으로 산불의 피해와 진화비용을 최소화하기 위한 가장 핵심적인 방안은 초기 대응을 신속하고 효과적으

*Corresponding author
E-mail: Yohan.Lee@oregonstate.edu

로 수행하는 것이다. 최근 연구들에 따르면 산불 발생 후 30분 이내에 적절한 초기 대응이 이뤄졌을 때 산불을 효과적으로 진화할 수 있을 뿐만 아니라 대형 산불로 이어질 가능성이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다(Park, 1964; Haight and Fried, 2007). 한편, 효과적인 산불 진화 계획 수립을 위해서 연간 또는 계절 주기로 발생 가능한 산불의 수와 강도를 예측할 수 있어야 하고, 그에 따른 산불 진화 장비의 수요를 파악할 수 있어야 한다. 특히, 산불이 발생하여 대형 산불로 확산되는 것을 차단하는 것은 이러한 신속한 초기 대응 능력에 의해 좌우된다. 이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 과거 산불 발생 자료를 기초로 하여 한국에서 발생하는 산불에 대해 계절별 산불 확률 시뮬레이션 모델을 개발하고자 하였다.

확률 시뮬레이션 모델은 네 개의 모듈을 포함한다. 특히, 과거 산불 자료와 시뮬레이션을 통해 생성된 자료는 다음의 네 가지 측면에서 유사성을 보여야 하는데, 첫째, 매년 산불 건수의 분포, 둘째, 매일 산불 발생 시간의 분포, 셋째, 하루 동안에 한건 이상의 산불이 발생하는 빈도, 마지막으로 지역별, 계절별 산불의 분포이다.

이를 통해 개발된 시뮬레이션 모델을 이용하여 연간 진화 자원에 대한 수요를 예측할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 가상으로 생성된 산불 건수의 분포는 과거 산불 발생 건수의 분포와 서로 상응해야 한다. 특히, 매일 발생하는 산불이 몇 시에 발생하는 지에 대한 시뮬레이션 결과가 과거 산불 자료와 부합하는 것은 산불 진화 장비의 배치를 결정하는 모델과 연계할 때 중요하다. 이는 매 시간 산불이 발생할 때 이용 가능한 자원의 수를 결정할 수 있으며, 또한 낮에만 지원 및 운용이 가능한 산불 진화 장비들을 적절히 고려해서 산불진화장비 배치 모델을 개발할 수 있게 한다. 계절별 산불 분포는 연간 산불 진화 자원 운용 계획 수립 시에는 효과적으로 활용된다. 산불 발생 확률이 높은 기간과 그 외의 기간을 나누어 산불 진화 장비를 어떻게 계절별로 운용하는 지를 결정할 수 있다. 또한, 산불 집중 발생 기간에는 어느 정도의 자원 및 인원이 필요할 지를 파악하여 총원 계획을 세울 수 있다.

대부분의 산불 진화 계획 모델은 연중 얼마나 많은 산불이 발생하는 지에 대한 확률 모델을 포함하게 된다. 이를 위해 일반적으로 산불 발생의 우연성이나 확률적인 특성을 배제하고 보편적으로 평균값을 기준으로 하여 일어날 수 있는 산불 발생의 범위를 정하는 모델을 사용한다. 기존의 연구들을 살펴보면, Bratten 등(1981)은 확률적 산불 모델인 FOCUS(Fire Operational Characteristics Using Simulation)을 구상하였으나 궁극적으로 과거 산불 발생 방식에 따르는 한계를 보였다. 또한 미국 IAA(Initial Action Assessment) 모델의 개발자들은 몇 개의 대표적인 산불 발생지를 대상으로 지역별로 다른 속도로 산불이 확

산되는 것에 대한 초기 대응을 시뮬레이션 하였다(USDA Forest Service, 1985). 일반적으로 한 개의 관리 구역에 대한 산불 시뮬레이션은 매년 발생한 평균 산불 건수를 이용하여 일 년을 기준으로 추정한다. 미국 캘리포니아에서 개발되어 실용화된 시뮬레이션 프로그램인 CFES-IAM Version 1(California Fire Economic Simulator-Initial Attack Model)은 IAA에서 사용된 가정들에 기반을 두고 있다. Mills와 Kelton(1982)은 실제적으로 확률적 사건을 고려한 산불 발생 모델인 FEES(Fire Economics Evaluation System)를 개발하였다. 이 모델은 더 많은 산불의 발생이 가능한 지역을 별도로 구분하여 개발되었고, 특히 산불 발생 사건들이 상호작용하는 확률적 개연성을 고려하기 위해 과거 시계열 산불 자료를 사용하였다. 또한 이 모델은 연간 발생한 전체 산불에 대한 확률 분포를 기초로 단위 면적당 발생하는 경제적 손실과 물리적 영향을 확률적으로 측정하는데 적용되었다.

지금까지 다양한 산불 모델들이 개발되었다. 그러나 동시다발적으로 일어나는 산불을 진화해야 하는 상황이나, 밤에는 운행이 어려운 헬기를 효율적으로 활용하는 측면이나, 혹은 산불 집중 발생 기간에 인력 증원을 적절히 결정하는 등의 문제에서 실제적으로 산불보호 담당자가 계획을 수립하거나 평가하는 데는 기존의 모델들은 많은 한계를 보여준다. 또한 기존의 개발된 대부분의 모델들은 매년 발생할 수 있는 변동성을 무시한 채, 평균적인 산불 발생을 가정하고 일 년 단위의 시뮬레이션을 시행하였다. FEES는 이러한 해마다 다르게 발생할 수 있는 산불의 변동성을 고려하였다. 하지만 이 모델의 적용을 위해 보다 많은 정보와 노력이 요구 된다. 결과적으로 많은 경우에서 이 모델을 적용하기가 쉽지 않았다. 이러한 필요에 따라 California 산불보호청은 캘리포니아 산불 확률 시뮬레이션 모델을 포함하는 CFES Version 2를 개발하였다(Jeremy and Gilless, 1988; Jeremy and Gilless, 2006).

국내에서는 이병두와 정주상(2006)이 1970년부터 2005년까지 발생한 과거 산불 자료를 이용하여 시계열 예측 모델을 개발하였다. 한국에서 발생한 산불은 발생 건수와 연소 면적에서 월별로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났고, 전월과 전년의 발생건수, 연소면적 수치와 밀접하게 연관된 것으로 나타났다. 또한 산불의 효율적 관리를 위한 지역별 산불 행동 특성에 대한 연구들이 국내에서 수행되었다. 이병두와 이명보(2009)는 전국을 지역별로 구분하여 산불통계 자료와 GIS를 이용하여 국내 산불 발생 및 확산 특성을 분석하였고 발생하는 산불의 공간적 특성이 뚜렷한 것으로 나타났다.

기존 연구에서 나타난 국내 산불의 특성은 시간적, 공간적 범위에 따라 그 결과가 상이하게 나타나므로 국내 산불 발생에 대한 예측과 관리를 위해서는 지역별, 계절

별 확률 모델 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내 산불 발생에 대해서 지역별, 계절별 특성을 구분한 확률 시뮬레이션 모델을 개발하고자 한다. 또한 본 연구를 통해서 개발된 산불 확률 시뮬레이션 모델은 통계적 유효성에 대한 검증이 이뤄져야 한다. 이를 위해 과거 산불 발생 자료를 이용하여 모델에 대한 통계적 검증을 실시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구 자료

산림청 산불방지과는 전국 단위의 산불 발생에 대한 기본 자료를 구축하여 왔다. 이 자료는 산불 발생 시간과 날짜, 산불 발생 위치, 산불 발생 규모와 산불 확산 속도, 진화 장비 투입, 피해 규모, 당시의 풍속 등에 대한 내용을 포함한다. 본 연구에서는 1991년부터 2009년까지 산불 발생 자료를 도 단위의 경계로 나누어 총 8개 권역(시, 구, 군으로 약 160여개 지역)에 대해서 분석을 실시하였다. 8개 권역은 강원권(KW), 서울·경기·인천권(SKI), 충청권(CB), 충남권(CN), 경북권(KB), 경남권(KN), 전북권(JB), 전남권(JN)이다. 권역을 구분한 이유는 지역별로 산불의 연료가 되는 산림의 구성과 임분평균 재적량이 비교적 상이하며, 또한 산불은 바람, 습도 등 지역별 기후에 의해서도 영향을 많이 받기 때문이다. 따라서 산불의 발생에 대한 지역별 분석을 통해 산불 계획 수립 시 보다 신뢰할 만한 결과를 예측할 수 있다.

2. 연구 방법

일반적으로 산불 발생 사건과 시간에 기초한 시뮬레이션 모델들은 산불이 발생하는 사건들 사이의 시간 간격에 의해 하나의 확률 분포도를 도출하여 만들어진다. 따라서 첫 번째 산불 발생 모듈은 연중 혹은 산불 기간 동안 연속적으로 발생하는 산불 사건들 사이의 시간 간격에 대해 추정된 확률분포도에 기초한다. 시뮬레이션을 통해 생성된 일련의 산불들은 빈도, 시간적 중첩, 하루 동안 발생하는 산불의 건수 등을 포함한다.

본 연구는 보다 단순한 형태를 가지면서도 정교한 통계치를 보여주는 확률 모델을 사용함으로써 산불 발생에 대한 확률적 시뮬레이션 모델의 통계적 유효성을 입증하는데 중점을 두었다. 연구의 궁극적 목적이 되는 현실 세계를 정확하게 시뮬레이션 한다는 것에 있어서 단순한 확률 모델은 세부적인 요인들을 모두 담아서 보여주는데 제약이 있다. 하지만 본 연구에 사용된 산불 발생 분포도에 대한 개념은 산불 발생 모듈로 현재 활발하게 사용되고 있고, 통계적으로도 적합한 방법이다.

기존의 산불 발생 예측에 대한 연구들은 어떤 특정한 날

에 하나의 산불의 발생이 과거의 사건들과 독립적으로 발생하는 것이라고 보여준다(Haines *et al.*, 1983; Cunningham and Martell, 1976). 이러한 연구들은 하루 중에 발생할 수 있는 산불의 구조적 특성에 따라 산불에 대해서 하나의 확률 분포가 아닌 다수의 확률 분포를 사용하는 기법을 제안하고 있다. 그러므로 산불의 발생 유형을 설명하기 위해 특성에 따른 다수의 확률 분포를 모델에 적용함으로써 보다 설득력 있는 시뮬레이션 모델을 개발할 수 있다.

본 연구에서는 보다 발전된 모델 형태로서 일련의 산불 발생을 나타내기 위해 세 가지 분포도를 사용한다. 연중 발생하는 각 산불 발생 일에 대해서는 베르누이(0,1) 분포로부터 임의로 추출된 값을 통해 어떠한 산불이 그 날에 발생했는지(1) 혹은 발생하지 않았는지(0)를 보여준다. 만약에 하루에 한 건 이상의 산불이 발생한다면, 다음 단계에서 이산 확률 분포를 이용해서 다중 발생 산불 사건들을 임의로 추출하여 하루 중 일어나는 산불의 수를 생성한다. 그리고 마지막으로 이들 각각의 산불에 대한 발생 시간은 포아송 확률 분포로부터 임의적이고 독립적인 추출에 의해서 사건의 발생 시간을 결정할 수 있다.

우리나라의 연간 산불 발생을 볼 때, 산불이 발생하는 일수는 연중 유사한 산불 빈도를 나타내는 세 개의 계절적 단계로 구분한다. 첫째로, 장마 기간을 포함하는 다소 덥고 습도가 높은 여름은 산불 위험이 낮은 시기이다. 둘째로, 봄철을 중심으로 바람이 많이 불고 다소 춥고 건조한 계절은 산불 위험이 높은 시기이다. 마지막으로, 각 계절이 변화하는 사이에 다소 중간적인 기후 형태와 산불 위험을 나타내는 시기이다.

본 연구를 단계별로 구분하면, 최초 시뮬레이션 단계로 연중 산불이 발생하는 날을 예측한다. 다음 단계로, 어떤 날에 산불이 발생했다면 하루에 몇 건의 산불이 발생하는지를 예측한다. 최종 단계로 각 산불이 하루 중 몇 시에 발생하는 지에 대해서 예측한다. 또한 시뮬레이션 결과가 과거 자료와 통계적으로 부합하는지 여부를 계절별로 나누어서 검증하고자 한다.

결과 및 고찰

1. 산불 발생에 대한 지역별, 계절별 확률 모형

한국에서 산불은 지난 1991년부터 2009년까지 총 8,515 건이 발생하였다. 한 해에 평균 약 400여건의 산불이 발생하였는데, 절반 이상의 산불이 연중 3월과 4월에 집중하여 발생하는 것으로 나타났다. 연 중 산불이 발생하는 시기를 빈도에 따라 산불이 많이 발생하는 시기와 그렇지 않은 시기로 구분할 수 있다. 이를 위해 지난 19년간 산불 발생 건수를 주단위로 분석하였다(Figure 1).

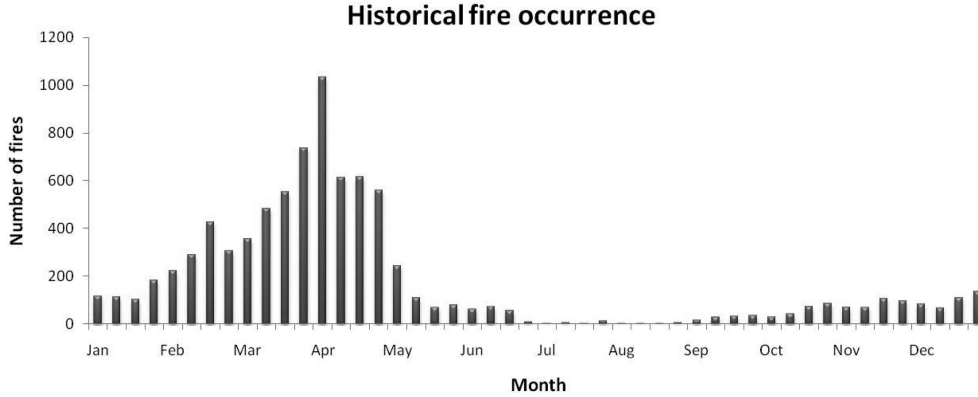


Figure 1. Number of fires per week over 19 years, 1991-2009.

Table 1. The results of Tukey's Studentized Range Test for Average.

Comparisons significant at the 0.05 level are indicated by ***				
Season Comparison	Difference Between Means	Simultaneous 95% Confidence Limits		
High-Trans	17.946	9.775 26.117	***	
High-Low	27.578	22.609 32.546	***	
Trans-High	-17.946	-26.117 -9.775	***	
Trans-Low	9.631	2.331 16.932	***	
Low-High	-27.578	-32.546 -22.609	***	
Low-Trans	-9.631	-16.932 -2.331	***	

Table 2. High fire seasons by region.

Region*	High fire season range
KW	3.22 ~ 4.30
SKI	3.8 ~ 4.30
CB	4.1 ~ 4.30
CN	3.8 ~ 4.21
KB	2.15 ~ 4.30
KN	1.22 ~ 4.30
JB	4.1 ~ 4.7
JN	2.15 ~ 4.21

*KW : Kangwon-do, SKI : Seoul, Kyunggi, Incheon, CB : Chungcheongbuk-do, CN : Chungcheongnam-do, KB: Gyeongsangbuk-do, KN : Gyeongsangnam-do, JB: Jeollabuk-do, JN: Jeollanam-do

산불의 발생 확률이 높은 기간과 발생 확률이 현저히 낮은 기간을 계절별로 구분하기 위해서 튜키 다중 범위 검사(Tukey Multiple Range Test)를 실시하였다(Table 1). 튜키 다중 범위 검사 결과에 따라 전국적으로 연중 산불이 발생하는 기간을 (1)비산불기간(Low), (2)전환기(Trans), (3)산불기간(High)으로 구분하였다. 이를 지역별로 분석하였을 때, 지역별 산불기간은 다소 상이한 것으로 나타났다(Table 2). 예를 들어, 겨울에도 비교적 기온이 높고 눈이 오지 않아서 건조한 경남 지역이 북쪽 강원 산간 지역에 비해 산불기간이 좀 더 일찍 시작하는 것으로 나타났다. 이는 중요한 정책적 시사점을 준다. 전국에 동일한 산

불 기간을 적용하는 것은 산불 진화 정책 수립에서 비효율성을 초래할 수 있다. 따라서 보다 지역적 특성에 맞추어 산불 기간을 지역별로 탄력적으로 적용함으로써, 산불 진화 정책 수립에서 보다 효율성을 가져올 수 있다. 전국 평균으로 볼 때, 산불기간 한 주 동안 발생하는 산불의 평균 빈도는 32건, 전환기에는 12건, 비산불 기간에는 5건으로 각각 나타났다. 튜키 다중 범위 검사 결과 기간별 한 주에 발생하는 산불 발생 건수의 평균값에 대하여 통계적으로 상이한 것으로 나타났다. 계절별 차이에 따른 범위 구분은 모두 95% 신뢰 구간에 대해서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

1991년부터 2009년까지 산불이 발생한 날은 베르누이 변수가 1 값을 가지는 것으로 정의된다. 그렇지 않다면 0 값을 가지게 된다. 베르누이 분포의 형태는 다음과 같다.

$$p(x) = \begin{cases} 1-\theta & \text{if } x = 0 \\ \theta & \text{if } x = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 x는 산불이 발생한 날을 나타낸다. 본 연구에서는 산불 발생 계절과 지역적 차이를 고려한다. 여기서 사용된 계수 θ 는 어떤 날에 발생하는 산불이 하나의 사건 이상일 확률로서 해석한다. 계절별 산불 발생 확률은 지역별, 계절별로 유의한 차이가 있었다. 최우도추정법(Maximum Likelihood Method)을 이용하여 θ 에 대해서 추정된 값은 Table 3과 같다.

각각의 계절 별로 하루 중 하나 이상의 다중 산불 발생에 대한 분포 형태는 다음과 같은 형태의 확률 밀도 함수를 가지는 기하확률분포에 의해서 가장 잘 나타난다.

$$p(x) = \begin{cases} \mu(1-\mu)^x & \text{if } x \in \{0, 1, 2, \dots\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 x는 어느 날의 총 산불 발생 수에서 1을 뺀 개수를 나타낸다. 전국을 대상으로 추정된 산불의 다중성에 대한 기하확률분포는 히스토그램을 통해 살펴볼 수 있다

Table 3. Probabilities of one or more fires occurring on a day by region and season.

Region* \ Season	All	KW	SKI	CB	CN	KB	KN	JB	JN
High	0.68	0.31	0.39	0.26	0.28	0.30	0.27	0.32	0.30
Trans	0.60	0.22	0.18	0.10	0.21	0.18	0.16	0.18	0.18
Low	0.25	0.06	0.04	0.02	0.03	0.05	0.04	0.02	0.03

ANOVA RESULTS

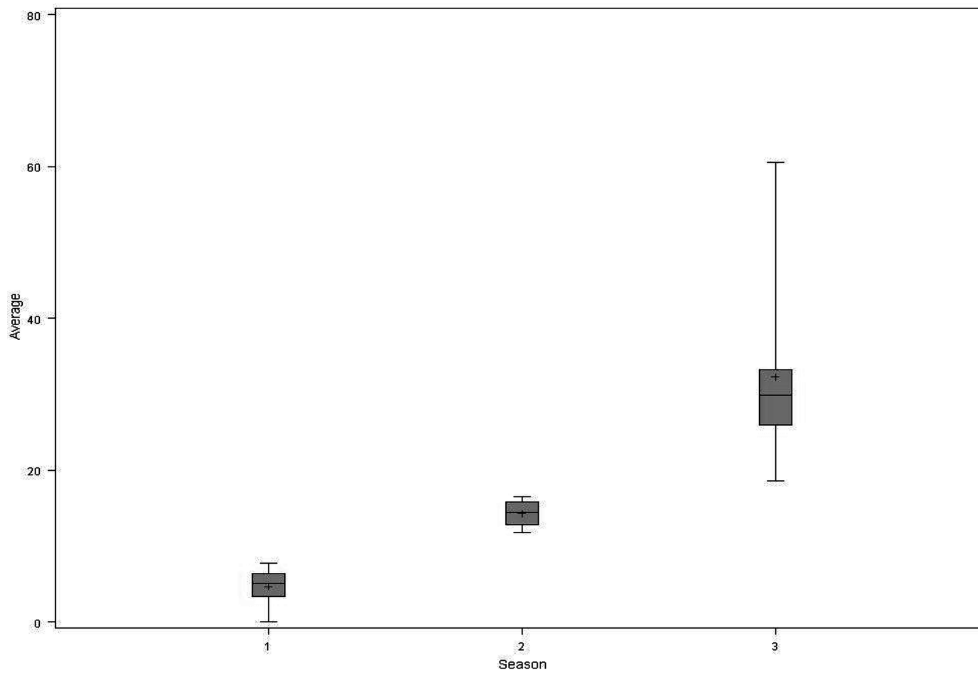


Figure 2. Average and 95% confidence interval plots of fire frequency per week for the Low(1), Transition(2), and High(3) fire seasons.

Table 4. Estimated μ parameters and chi-squared goodness-of-fit significance levels for geometric distributions fitted to (Multiplicity -1) by seasonal range.

Season	μ	Chi-Square	DF	Pr > ChiSq
High	0.2041	4730.0513	32	<.0001
Transition	0.2940	1962.9030	20	<.0001
Low	0.7148	71428.6311	17	<.0001

(Figure 3). 산불 기간 동안에는 하루 한건 이상의 산불이 일어난 날이 50% 이상으로 나타났고, 하루 중 최대 63건의 산불이 발생하였다. 비산불 기간에는 전국적으로 하루에 한건의 산불만 발생한 날이 80% 이상인 것으로 나타났다. μ 에 대한 추정치는 카이제곱 최적추정통계와 함께

주어진다.

다중성의 정도가 모든 계절에서 카이제곱 통계치를 구하기에 충분하였고, 통계적으로 유의하게 나타났다(Table 4). 산불발생의 다중성 정도에 대해서 기하확률분포는 전체적인 계절별 통계치의 적합성을 잘 보여준다. 또한 지수확률분포와 같은 다른 가능한 확률분포보다 훨씬 양호한 결과를 보여준다.

이러한 다중성의 정도도 지역별로 유의한 차이를 나타내었다(Table 5). 지역별로 살펴보면 산불 기간 동안 수도권 지역에 하루에 여러 건의 산불이 보다 빈번하게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 사람에 의한 실화로 발생하는 산불이 대부분을 차지하는 국내의 경우, 인구 밀도가

Table 5. Estimated μ for geometric distributions fitted to (Multiplicity -1) by region and season.

Region* \ Season	All	KW	SKI	CB	CN	KB	KN	JB	JN
High	0.20	0.79	0.66	0.85	0.78	0.73	0.82	0.78	0.77
Trans	0.29	0.91	0.93	0.96	0.92	0.94	0.91	0.90	0.92
Low	0.71	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.94	0.99	0.99

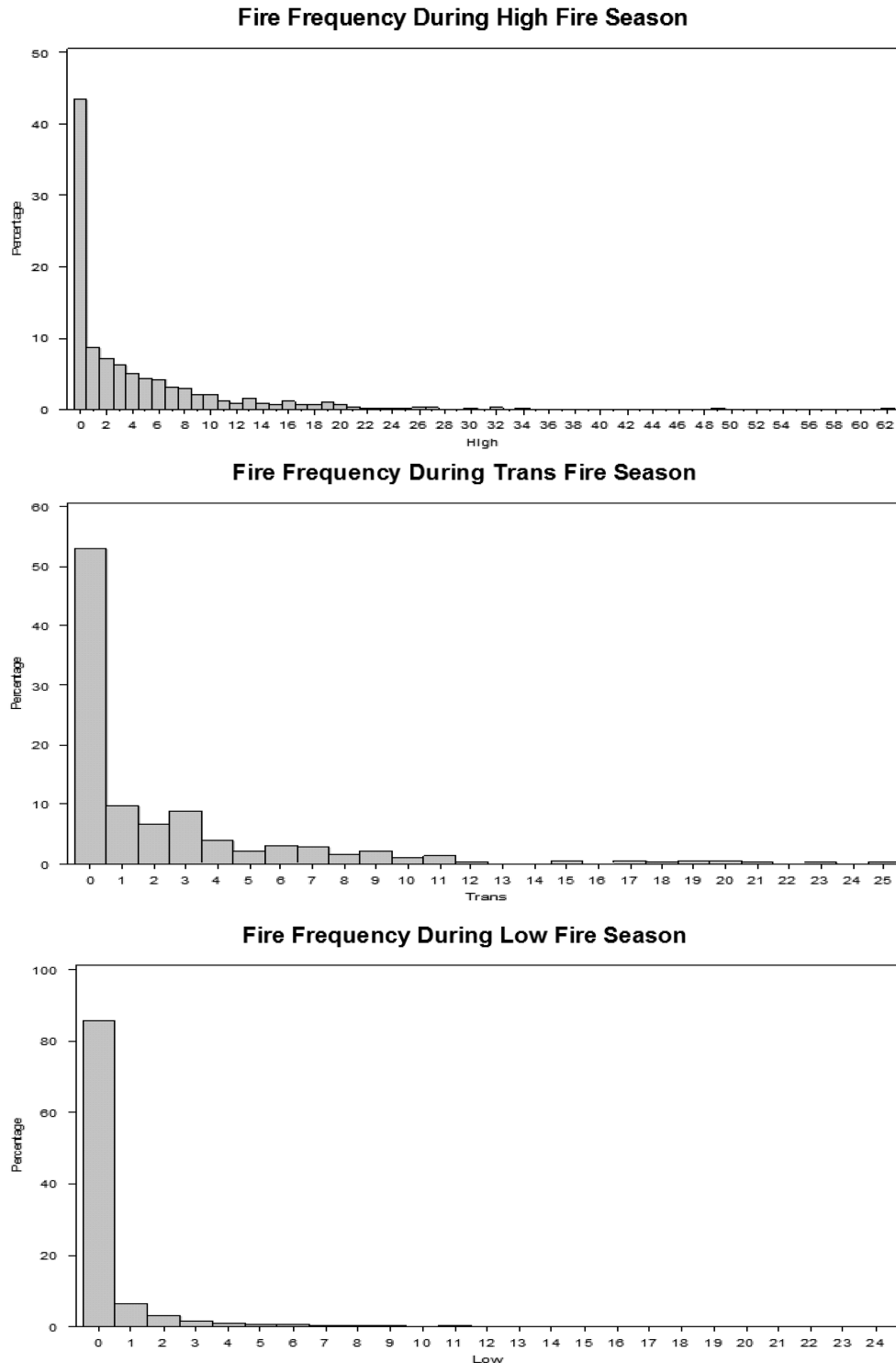


Figure 3. Relative histogram of historical high fire season.

높은 도시 근교에서 하루 동안 동시 다발적으로 산불이 일어날 확률이 보다 높은 것으로 해석된다.

산불 발생의 확률이나 산불발생의 다중성과 달리, 하루 중 발생하는 산불의 시간은 Figure 6에서 보는 바와 같이 지역별, 혹은 계절적인 변이가 크게 없는 것으로 나타났다. 산불 시간에 대한 빈도 분포는 다양하게 나타날 수 있

으나, 일반적으로 완만한 형태로 최고 시점을 보여주는 경우 0과 1 사이로 일반화 된 베타 분포를 사용하고, 산불 발생 시간이 비교적 특정 시간으로 높게 편중된 경우 포아송 분포를 사용한다(Jeremy and Gillness, 1988). 우리나라의 경우 산불 발생 시간이 오후 2-3시에 집중하여 발생하므로, 포아송 분포가 더 적합하다.

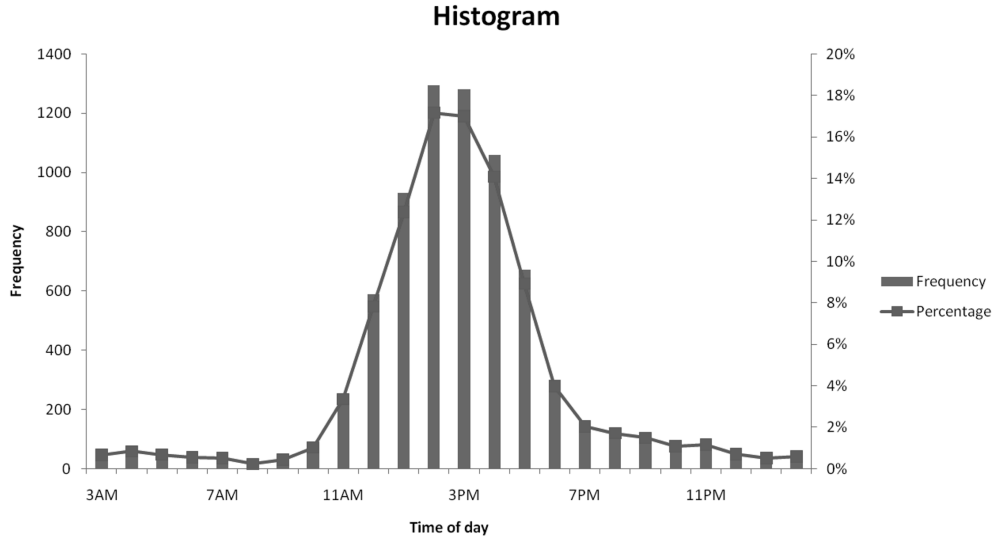


Figure 4. Histogram of the relative frequency of historical fires by time of day and the corresponding fitted time distribution.

Table 6. Distribution parameter and chi-squared goodness of fit significance levels for Poisson distribution fitted to time of day.

Best fitting distribution	Poisson
Transformation	1. subtract 2 2. if result is <0 then add 24
Estimated parameter	Lambda = 12.05
Chi-square Sig. level.	0

$$p(x) = \frac{(e^{-\lambda} \lambda^x)}{x!} \quad \text{if } x \in \{0, 1, 2, \dots\}$$

$$0 \quad \text{otherwise}$$

본 연구에서 각 확률 분포에 대한 주요 계수들의 값은 모두 최우도추정법을 통해서 구했다. 연중 산불 발생 시

간에 대한 확률 분포와 그에 대한 자세한 내용들은 Table 6, 7과 같다. 산불 발생 시간의 경우 전국적으로 오후 1시에서 5시 사이에 대부분 발생하였고, 특히 지역이나 계절에 상관없이 2시에서 3시 사이에 발생확률이 높은 것으로 나타났다.

2. 확률적 유의성 검증

과거 19년간의 국내 산불 자료를 활용하여 개발한 산불 발생 확률 시뮬레이션 모델의 통계적 타당성을 검증하였다. 이를 위해, 과거 산불 자료와 시뮬레이션 모델을 통해 생성된 산불 자료를 이용해 산불이 일어난 사건들이 통계적으로 부합하는지를 검증하였다. 먼저, 기초 통계치를 이용하여 과거 19년간 발생한 산불과 시뮬레이션에 의해 생

Table 7. Parameters on time of day by region.

Region*	All	KW	SK1	CB	CN	KB	KN	JB	JN
Time	12.05	11.42	12.17	11.58	11.54	12.07	12.23	12.32	12.21

Table 8. Descriptive statistics for historical and generated distributions of the time between fires by season.

	Low		Trans		High	
	Historical	Simulated	Historical	Simulated	Historical	Simulated
Mean	0.33	0.36	1.63	1.77	4.30	4.12
Standard Error	0.0137	0.0188	0.10	0.15	0.18	0.20
Standard Deviation	0.91	0.95	2.30	2.61	5.95	5.43
Sample Variance	0.83	0.91	5.29	6.79	35.37	29.49
Kurtosis	24.9	16.1	4.14	14.62	14.07	13.17
Skewness	4.2	3.6	1.95	3.18	2.81	2.79
Range	11	8	14.00	20.00	63.00	51.00
Minimum	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Maximum	11	8	14.00	20.00	63.00	51.00
Sum	1457	943	861.00	550.00	4901.00	3133.00
Count	4386	2580	527.00	310.00	1140.00	760.00

Table 9. The results of t-Test: Paired Two Samples for Means.

	Low		Trans		High	
	History	Simulated	History	Simulated	History	Simulated
Mean	0.37	0.37	1.6903	1.7742	4.2882	4.1224
Variance	0.94	0.92	5.2630	6.7903	37.7970	29.4909
Observations	2580	2580	310.0000	310.0000	760.0000	760.0000
Pearson Correlation	0.0099		0.0332		-0.0123	
Hypothesized Mean Difference	0		0.0000		0.0000	
df	2579		309.0000		759.0000	
t Stat	0.1888		-0.4325		0.5538	
P(T<=t) one-tail	0.4251		0.3328		0.2899	
t Critical one-tail	1.6454		1.6498		1.6469	
P(T<=t) two-tail	0.8502		0.6657		0.5799	
t Critical two-tail	1.9609		1.9677		1.9631	

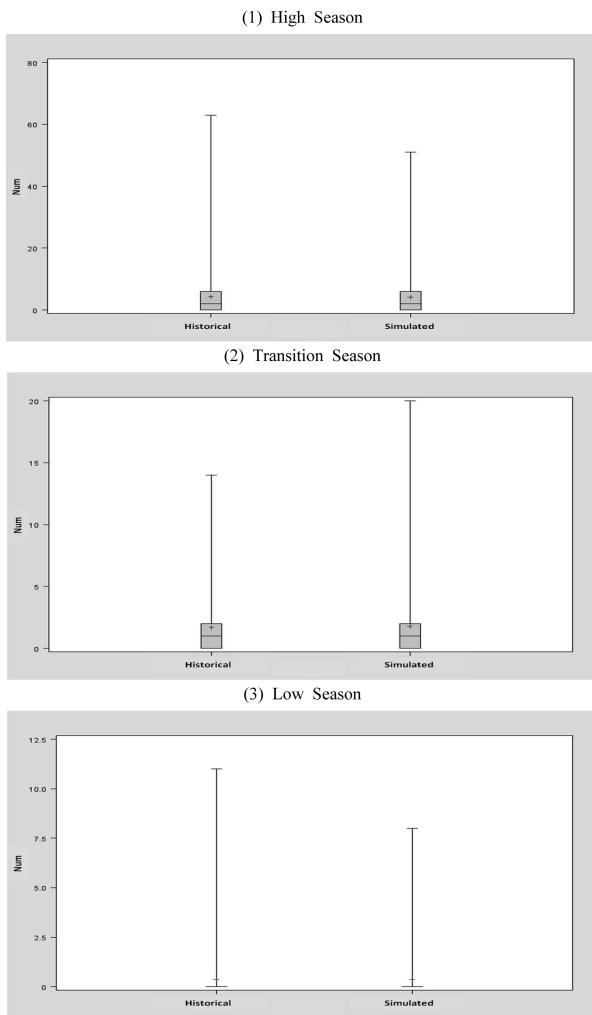


Figure 5. Box and whisker plots of historical and generated number of fires per day distribution and corresponding vital statistics in the Republic of Korea for the Low, Transition, and High fire seasons. The center horizontal line in each box represents the median of that distribution, while the upper and lower horizontal lines mark the upper and lower quartiles. The vertical lines(whiskers) extend out to the extremes(minimum and maximum) of the distribution.

성된 산불 자료를 비교하였다. 기초 통계에서 나타난 계절별 일일 산불 발생 건수에 대한 평균값과 분산은 매우 유사하게 나타났다 (Table 8).

과거 산불 발생 사건들과 시뮬레이션 모델을 통해 생성된 산불 발생 사건들의 통계적 부합 여부를 확인하기 위해 쌍체검정(Paired t-test)을 실시하였다. 쌍체검정을 위해서 과거에 발생한 산불의 모든 자료를 이용하지 않고, 최근 10년간 발생한 산불과 모델을 통해 가공한 10년의 산불을 이용하였다. T-검정 결과 Table 9에서 보는 바와 같이 계절별 한국의 산불 발생 사건들과 확률 모델을 통해 생성된 산불 사건들은 5% 유의 수준에서 동일한 분포를 보였다. 따라서 시뮬레이션 모델에 의해서 생성된 산불 사건들이 과거 발생한 산불 사건들을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

박스-위스커(Box-Whisker) 그래프(Figure 5)를 통해서 과거 산불 사건들과 시뮬레이션을 통해 가공된 산불 사건들을 비교했을 때 보다 명시적인 유사성을 보여주었다. 특히, 산불 기간 동안 발생하는 하루 평균 산불의 빈도에 있어서 5% 이내의 오차를 보였다.

결론

본 연구에서는 과거 산불 발생 자료를 기초로 하여 국내 계절별 산불 발생 확률 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 산불에 대한 확률모델은 산불 발생의 시간적 분포가 과거 자료와 부합하도록 하기 위해 세 가지 단계로 생성하였다. 먼저, 산불 기간 중의 산불 발생 일은 베르누이 분포에서 임의로 추출하여 일일 단위로 산불의 발생 여부를 결정한다. 만약 어느 날에 산불이 발생하면, 기하학적 다중 분포에서 임의로 추출하여 그 날 하루 중에 발생하는 산불의 수를 결정한다. 마지막 단계로 각 산불의 발화 시간은 베타 혹은 포아송 분포로 가정된 하루 중의 발생 가능 시간

에서 임의로 추출하여 결정한다. 국내에서 과거 19년간 매년 평균 약 400여건의 산불이 발생하였고, 산불 발생 분포는 일반적으로 3월, 4월에 집중되어 나타났다. 산불 발생 시간은 하루 중 오후 2시와 3시 사이에 집중적으로 발생하였다. 이들 자료를 이용하여 통계적 검정을 실시한 결과 산불 발생 시간 분포의 경우 비교적 특정 시간에 편중되어 나타나 포아송 분포를 잘 따르는 것으로 나타났다.

개발된 확률 시뮬레이션 모델에 의해 생성된 일련의 산불 발생 사건들은 과거 자료와 비교하여 통계적 검증을 실시한 결과, 생성된 산불 자료의 발생 주기 분포, 산불간의 시간 간격, 일 년간 일어나는 산불의 총 건수에서 통계적으로 잘 부합하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 산불의 확률 모델은 한국 산불 발생의 확률적 특성을 잘 나타내 준다고 판단되며, 산불 관련 자원 활용 및 진화 계획 수립 시에 실제적으로 활용될 수 있다. 향후 보다 발전적인 시뮬레이션 모델 개발을 위해 산불 발생 확률에 영향을 미치는 산림 특성(임분 축적, 수종)과 기후 등의 주요 인자들을 고려하여야 한다. 최근 이러한 시뮬레이션 모델은 최적화 기법과 연계하여 산불 진화 장비 배치를 위한 알고리즘을 개발하는데 적용되고 있다. 컴퓨터 계산 속도의 향상으로 인해 시뮬레이션 모델과 최적화 모델을 통합함으로써 보다 효율적인 모델 개발이 가속화되고 있으므로(Haight and Fried 2007, MacLellan and Marell 1996) 이와 관련된 추가 연구가 필요하다.

인용문헌

1. 이병두, 정주상. 2006. 1970-2005년 동안의 산불 발생건수 및 연소면적에 대한 시계열모형 추정. 한국임학회지 95(6): 643-648.
2. 이병두, 이명보. 2009. 1991년부터 2007년까지 산불의 공간적 특성. 한국화재소방학회 논문지 23(1): 15-20.
3. Bratten, F.W., Davis, J.B., Flatman, G.T., Keith, J.W., Rapp,

- S.R. and Storey, T.G. 1981. FOCUS: A fire management planning system - final report. USDA Forest Service, General Technical Report PSW-49. pp. 34.
4. Cunningham, A.A. and Martell, D.L. 1976. The use of subjective probability assessments to predict forest fire occurrence. Canadian Journal of Forest Research 6(3): 348-356.
5. Frederic, A., Hugel, D.E., Philippe, M., Hans, S. Jurgen and Alan, B. 2004. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. Global Biogeochemical Cycles 18: 1-11.
6. Fried, J.S. and Gilless, J.K. 1988. The California fire economics simulator - initial attack module (CFES-IAM): MS-DOS version 1.11 User's Guide. Bull. 1925. Division of Agriculture And Natural Resources, University California, Berkeley. pp. 84.
7. Haines, D.A., Main, W.A., Frost, J.S. and Simard, A. 1983. Fire-danger rating and wildfire occurrence in the North-eastern United States. Forest Science 29(4): 679-696.
8. Haight, R.G. and Fried, J.S. 2007. Deploying wildland fire suppression resources with a scenario-based standard response model. Information Systems and Operational Research 45(1): 31-39.
9. MacLellan, J.I. and Martell, D.L. 1996. Basing airtankers for forest fire control in Ontario. Operations Research 44: 677-686.
10. Mills, T.J., and Kelton, W.D. 1982. FEES: Design of a fire economics evaluation system. USDA Forest Service, General Technical Report. PSW-65. pp. 26.
11. Park, G.M. 1964. Development and application of a model for suppression of forest fires. Management Science 10: 760-766.
12. USDA Forest Service. 1985. National fire management analysis system users' guide of the initial action assessment model (FPL-IAA2.2). USDA Forest Service. Washington, DC.

(2010년 10월 29일 접수; 2011년 2월 28일 채택)