

# 산불 예측 모델에 관한 연구

## - 북한산 국립공원을 대상으로 -

성 효 현<sup>1</sup> · 김 윤 정<sup>2</sup>

### 서 론

#### 연구배경 및 목적

산불은 매년 자연적, 인위적 원인에 의해 전세계 곳곳에서 발생하여 대규모 피해를 유발하고 있다. 그에 따라 많은 국가에서 산불을 자연재해의 일종으로 간주하여 궁극적으로 산불 피해를 감소시키기 위한 다각적인 연구를 진행하고 있다. 특히 미국과 캐나다, 호주 등지에서는 산불 발생 및 확산, 예측과 관련된 다양한 연구가 진행되어 산림 자원 관리 및 보존 측면에서 활용되고 있는 단계에 이르고 있다.

특히 최근에는 해상도 높은 인공위성 이미지, 강력한 이미지 프로세싱 소프트웨어와 GIS 기술이 급속히 발달하고 이러한 작업을 원활히 수행할 수 있는 하드웨어가 발달함에 따라 산불과학 분야에서도 놀라운 진보가 일어나고 있다. 즉 과거 수십년동안 축적해온 산불 관련 연구 및 전문지식을 기반으로 최첨단 컴퓨터 과학기술을 가미하여 산불 응용프로그램을 개발하여 실무에 적용할 수 있는 실용적인 연구로 이행해 가고 있는 추세이다. 특히 산불 연구는 그 특성상 공간 데이터 및 방대한 속성데이터의 연계, 관리 뿐만 아니라 동적인 변화를 시뮬레이션할 필요성이 크기 때문에 GIS 기술이 이러한 연구에 적합한 것으로 인정받고 있으며, 실제로 세계 각국에서 이러한 분야에 관심을 가지고 많은 연구를 하고 있다.

GIS를 통해 구현할 수 있는 산불 관련 기능으로는 (1) 대규모 산불이 발생하기 전에 산불 예방 계획에 대한 의사결정 지원, (2) 산불 발생시 산불 발생지역의 파악과 영향요소들의 종합적인 평가와 산불 행태 예측, (3) 확산 시뮬레이션을 통한 산불의 분석 업무 등이 포함된다.

---

\* 이화여자대학교 사회생활학과 교수(Department of Social Studies, Ewha Womans University, 11-1, DaeHyun Dong, Seodaemun Gu, Seoul 120-750, Korea, (02)864-5746)

\*\* 이화여자대학교 사회생활학과(Department of Social Studies, Ewha Womans University, 11-1, DaeHyun Dong, Seodaemun Gu, Seoul 120-750, Korea, (02)864-5746)

본 연구에서는 (1) 산불 발생과 확산에 영향을 미치는 다양한 요인들을 선정하여 산불 발생에 대한 기여도를 평가하고, (2) 연구지역에 대해 이를 적용하여 산불 발생 확률이 높은 지역을 추출해 내고, (3) 현재의 산불감시초소 입지에 대한 적합성 분석과 가시도를 기초로 적지 분석을 시행하여 산불감시초소 후보지를 선정하고자 하였다.

## 연구대상지역 및 연구방법

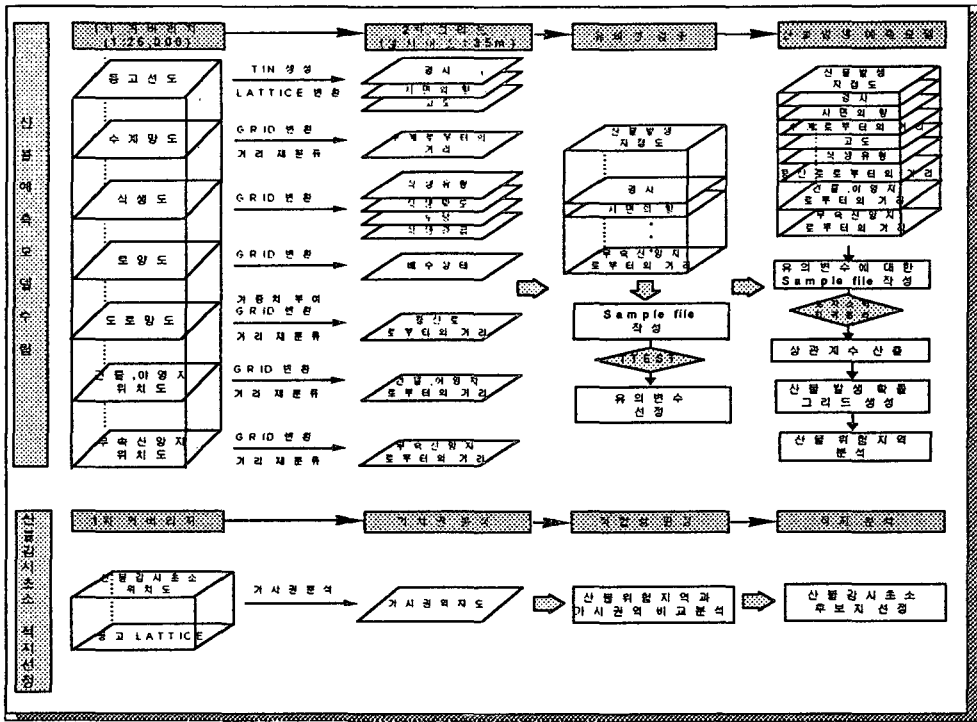
본 연구의 대상지역은 북한산 국립공원으로서 이 지역은 북한산과 도봉산 전역을 포함하여 78.45 km<sup>2</sup>의 면적에 걸쳐 분포하고 있어 타 국립공원에 비해 면적은 넓지 않으나 수도권에 가까이 위치하고 있다는 입지적 이점 때문에 이용빈도가 매우 높다는 것이 특징이며, 그에 따라 등산객에 의한 산불 발생 또한 빈번하다.

본 연구에서는 산불발생 확률분석을 위한 잠재요인을 자연적인 요인과 인문적인 요인으로 대분류하였는데, 자연적인 요인으로는 등고데이터로부터 추출한 사면의 향, 고도, 경사, 수계, 식생, 토양 특성이 포함되며, 인문적인 요인으로는 도로망 및 등산로에 대한 접근도, 각 등산로별 등산객수, 야영장 및 건물에 대한 접근도, 무속신앙지에 대한 접근도가 포함된다. 기상적인 요인은 산불 발생과 관련된 매우 중요한 요인이기는 하지만 현실적으로 미기후자료를 구하기 어려울 뿐만 아니라 변화무쌍한 기상요인들을 모두 고려하여 예측 모델을 수립한다는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 본 연구에서는 이를 제외시키고 향후의 과제로 남겨 두기로 하였다.

본 연구에서 사용한 도면자료는 국립지리원 발행 1:25,000 지형도를 기초로 편집 제작한 북한산 국립공원 지형도(1995년 7월 10일 발행)를 기본도로 사용하였다. 그 외에 주제도로는 산림청 발행 축척 1:25,000의 입상도와 농촌진흥청에서 1989년 발행한 축척 1:50,000의 개략토양도를 사용하였다.

분석 틀로는 GIS 분석에서 널리 이용되고 있는 ARC/INFO를 주로 사용하였으며, 특히 대부분의 분석과정은 GRID 모듈상에서 진행되었다. 분석에 이용된 그리드의 셀 간격은 25미터로 하였는데, 그 이유는 1:25,000 지형도의 경우 지도상에서 1 mm 간격인데 북한산 국립공원 내에서의 산불 피해면적이 크지 않아서 이를 표현하기 위해서 충분히 작은 셀사이즈를 채택한 것이다. 통계분석은 SAS 패키지를 사용하였으며, 지도 작성과 출력은 ArcView를 이용하였다.

본 연구의 분석과정은 [그림 1]과 같다.



[ 그림 1 ] 분석과정도

## 산불 예측모델 수립을 위한 요인분석

북한산 국립공원에서는 1988년 이후 1996년 2월까지 총 29건의 산불이 발생하였는데, 대부분의 산불은 초기에 발견·진화하여 그 피해는 적은 편이었다. 피해 규모를 살펴 보면, 1995년 2월 20일에 발생한 산불이 5평의 면적 피해로 가장 작은 산불로 기록되었으며, 1991년 4월 3일과 5일에 발생한 산불이 1,000평의 피해면적을 기록하여 북한산 국립공원에서 발생한 산불중 가장 큰 산불로 기록되었다. 대부분의 산불은 100~500평의 피해를 나타내고 있어 비교적 피해 규모가 적은 편이다. 연도별 산불발생건수를 보면 1988년에 1건, 89년에 1건, 90년에 1건, 91년에 2건, 92년에 9건, 93년에 3건, 94년에 0건, 95년에 5건, 96년 2월 기준 7건이 기록되었다. 이중 17건은 봄에 발생했는데, 그중에서 4월에 10건이 발생하여 봄에 집중 발생하고 있는 현상이 나타나고 있다. 또한 1, 2월에도 11건이 발생하여 상당히 많은 발생건수를 기록하고 있다. 행정구역별 발생건수는 29건 중 21건이 도봉구(현재는 도

봉구와 강북구로 분할)에서 발생하여 집중현상이 두드러지게 나타난다.

## 자연환경 요인

산불 발생과 확산과정에 있어서 큰 영향을 미치는 자연환경 요인은 크게 기상요인과 지형요인과 임상요인으로 분류할 수 있다.

1) 기상요인 : 산림지역 내에서 일단 산불이 발생하면 이후의 산불로 인한 피해 규모는 산림 내의 가연성 물질의 함수량에 따라 크게 달라질 수 있다. 만약 지표에 축적되어 있는 낙엽이나 죽은 나무가지와 풀과 같은 가연성 물질의 습도가 높을 경우에는 산불 확산에 대한 저항요인으로 작용하여 확산을 저지하는 역할을 할 수 있다. 반면에 가연성 물질이 극도로 건조해 있다면 오히려 산불 확산을 촉진시키는 반대의 효과를 유발할 수도 있다.

2) 지형요인 : 본 연구에서는 지형적인 요인으로 경사와 사면의 향, 고도, 수계망을 선정하여 과거 산불 발생지역과의 연관성을 찾아내고자 하였다.

경사는 다양한 측면에서 산불 발생과 연소 및 확산에 영향을 미치는데, 특히 바람과 관련하여 확산속도에 큰 영향력을 행사할 뿐만 아니라 소방활동상에 있어서도 큰 장애요인으로 작용한다. 북한산 국립공원내에서 발생한 산불중 60%이상이 0~10도 경사지역에서 발생하였으며, 경사가 급해질수록 산불발생건수가 감소하는 양상을 나타내고 있는데, 그 이유는 경사가 급해질수록 인간의 접근이 어렵기 때문이다.

사면의 향은 일사량과 직결되는 요인으로서 우리나라가 속해 있는 북반구의 온대지역은 일반적으로 남향이 북향보다 일사량이 훨씬 많다. 따라서 일사량이 적은 북향보다는 일사량이 많은 남향이 발화의 위험도가 훨씬 클 것으로 여겨진다. 이와 같이 사면의 향은 발화 위험도에도 직접적인 연관성을 가지지만, 이보다는 일사로 인한 가연성 물질의 건조도가 더욱 중요하다. 북한산 국립공원의 경우, 남사면 지역에서 산불이 많이 발생한 것으로 나타났는데, 특히 40%이상이 남사면에서 발생하였으며 그 다음으로 남서사면과 동사면에서 산불이 많이 발생한 것으로 나타났으며 북사면, 북동사면, 북서사면 지역에서는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 사면의 향과 산불발생과는 밀접한 관련성이 있다고 볼 수 있다.

과거 산불 연구에서는 고도에 관한 언급이 없지만, 북한산 국립공원과 같은 공원형 산림지역에서는 인간과 관련된 산불 발생이 많기 때문에 고도가 낮은 지역이 산불 발생 위험도가 매우 높을 것이다. 과거 산불발생과 고도와의 관계를 살펴 보면, 100미터

이하의 지역에서 약 50%의 산불이 발생하였으며, 100~300미터 지역에서 45%의 산불이 발생하여 300미터 이하지역에서 95%이상의 산불이 발생한 것으로 나타났다. 이와 같이 인간의 활동과 관련이 깊은 고도와 산불발생과는 매우 밀접한 연관성을 가지고 있으며, 특히 고도가 낮은 지역에서 산불이 많이 발생한 것으로 나타났다.

산불 확산과정에서 수계는 직접적인 방화선 역할을 할 수 있을 뿐만 아니라 주변 식생에 수분을 공급함으로써 식생 자체내의 함수량을 높여주고 식생의 내연성을 높여주는 역할을 한다. 수계로부터의 거리에 따른 산불발생상황을 살펴보면, 수계로부터 100미터 이내에 있는 지역에서는 7%정도의 산불이 발생하였으나, 약 85%의 산불이 100~500미터지역에서 발생한 것으로 나타나 수계로부터 멀리 떨어져 있는 지역일수록 산불 위험도가 높다는 사실을 알 수 있다.

3) **임상요인** : 식생은 산불 발생의 3대 조건 중에서 연료의 제공에 해당하는 중요한 요소이다. 식생의 종류, 수령, 수고, 수목의 밀도와 같은 요인들은 산불의 발생과 확산에 큰 영향을 미치게 된다.

수종에 따라 산불 위험도가 매우 다르게 나타나는데, 일반적으로 침엽수는 활엽수에 비해서 일반적으로 수지분(樹脂分)이 많고 발열량도 크기 때문에 발화의 위험도가 높는데, 소나무가 그 대표적인 수종이다. 국립공원 내에서의 산불발생과 연관시켜 살펴보면, 산불 발생중 60%가 활엽수림지역에서 발생하였으며, 25%가 침활혼효림지역에서 발생하여 활엽수림과 침활혼효림지역에서의 산불발생확률이 높은 것으로 나타났다.

수목의 종류 뿐만 아니라 수령이나 수목의 밀도, 토양의 배수상태 또한 산불 위험도에 영향을 미친다.

## 인문환경 요인

본 연구에서는 인간활동이 집중 분포하고 있는 등산로에 대한 접근도, 건물이나 야영지에 대한 접근도, 무속신앙지에 대한 접근도를 인문환경 요인으로 선정하였다.

1) **등산로에 대한 접근도** : 국민 생활수준의 향상과 여가시간의 급증으로 인해 등산 인구가 증가하고 있어 산불 발생에 대한 위험도가 점점 커지고 있다. 그에 따라 등산로 주변의 식생파괴 등의 환경피해가 날로 급증하고 있을 뿐만 아니라 산불의 위험도 또한 높아지고 있는 것이 현실이다. 통계자료에서도 볼 수 있듯이 일요일이나 공휴일에 산불 발생 건수가 많은 것은 이러한 등산이나 성묘와 같은 인간의 활동과 깊게

연관되어 있는 것이다. 따라서 등산로 이용객수는 산불 위험도 평가에 있어서 매우 중요한 요인이 된다.

산불발생지역과 비교해 보면 약 44%의 산불이 등산로로부터 50미터 이내 지역에서 발생하였으며, 33%가 50~100미터내에서 발생하였다. 이와 같이 등산로에 가까울수록 산불발생의 확률이 높게 나타났다.

2) 건물 및 야영지에 대한 접근도 : 건물, 야영지로부터의 거리와 산불발생과 비교해본 결과 건물이나 야영지로부터 200~1000미터 떨어진 지역에서 약 55%의 산불이 발생하였으며, 50미터 이내, 50~100미터, 100~200미터 지역에서는 각각 8%의 산불이 발생하였다. 이와 같은 결과는 건물과 야영지로부터의 거리가 가까울수록 산불발생 위험도가 높을 것이라는 예상과는 동떨어진 것으로서, 본 지역에서는 야영행위, 거주나 상업활동이 산불 발생과 밀접한 연관이 없음을 의미하는 것이다.

3) 무속신앙지에 대한 접근도 : 북한산은 예로부터 서울지방 무속의 메카로 자리 잡아 왔으며 거의 매일매일 무속행위가 행해지고 있는데, 이러한 무속행위의 문제점은 무속행위가 끝난 후에도 촛불이나 기타 불씨를 그대로 방치해 둔다는 사실이다. 무속신앙지와 산불발생지역과의 관계를 살펴 보면, 무속신앙지와의 거리가 멀리 떨어진 지역에서 산불이 많이 발생한 것으로 나타나 예초의 예상에 어긋나는 결과가 나타났는데, 이 또한 무속행위가 산불발생에 많은 영향을 미치지 않는다는 사실을 의미하는 것이다.

## 북한산 국립공원의 산불 예측모델

### 산불 발생 확률분석

산불발생에 강력한 영향을 미치는 요인들을 파악하기 위해서는 각 요인들에 대한 유의성 판정과정을 거쳐야만 한다. 본 연구에서는 SAS의 TTEST를 실시하여 산불 발생지점과 미발생지점간의 요인들간의 평균을 비교한 후 두 집단간의 평균의 차이가 뚜렷하게 나타나는 변수를 찾아내어 로지스틱 회귀분석에 사용할 유의변수로 선정하였다.

변수들의 유의성을 판정해본 결과 경사, 사면의 향, 고도, 수계, 식생의 유형, 등산로에 대한 접근도, 건물이나 야영지에 대한 접근도, 무속신앙지에 대한 접근도를 유의한 변수로 선정되었다.

T-Test를 통해 선정한 유의변수를 독립변수로 하고 종속변수를 산불의 발생여부로 하여 로지스틱 회귀분석을 실시하면 각 독립변수에 대한 예측치를 찾아낼 수 있다. 북한산 국립공원을 대상으로 하여 로지스틱 회귀분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

$$U_i = -3.248 + -0.157 \times (\text{경사}) + -0.279 \times (\text{고도}) + 0.024 \times (\text{사면의 향}) + 0.264 \times (\text{하천으로부터의 거리}) + 0.201 \times (\text{식생유형}) + -0.585 \times (\text{무속신양지로부터의 거리}) + -0.083 \times (\text{건물이나 야영지로부터의 거리}) + 0.009 \times (\text{등산로로부터의 거리})$$

아래의 회귀방정식을 이용하여 각 지점에서 산불이 발생할 확률을 산출해 낼 수 있는데, 그 모델식은 다음과 같다.

$$P_i = \frac{\exp(U_i)}{1 + \exp(U_i)}$$

로지스틱 회귀분석 결과 산출된 회귀방정식은 종속변수와 독립변수간의 비선형 관계를 나타내며, 이를 통해 특정 현상이 나타날 수 있는 확률을 예측할 수 있으며 그 값은 0에서 1사이에 존재한다. 회귀방정식에 대입한 결과치가 0에 가까울수록 산불이 발생한 확률이 낮음을 의미하고, 1에 가까울수록 산불이 발생할 확률이 높다는 것을 의미한다.

북한산 국립공원의 산불 발생 확률 분포는 Fig. 과 같으며, 저확률 지역, 중확률 지역, 고확률 지역으로 나누어 지도화하였다. 저확률 지역은 발생확률이 1%이하의 지역, 중확률 지역은 2~3% 지역, 고확률 지역은 3%이상 지역으로 분류하였다.

분석 결과 대부분의 지역은 발생확률이 1% 이하의 확률이 낮은 지역으로 나타났다. 산불 발생 확률이 비교적 높게 나타난 지역은 주로 국립공원 경계 주변부로 강북구와 도봉구 일대, 구기터널 부근과 고양시와 은평구 경계 부근, 의정부시 북부지역으로 나타났다. 특이한 점은 고양시와 은평구 경계 부근에서는 과거 산불 발생은 적었지만 산불위험도가 매우 높은 지역으로 판명되어 앞으로 이 지역에서 빈번한 산불 피해가 발생할 것으로 예상된다. 따라서 이 지역에 대한 특별한 감시가 필요할 것이다.

북한산 국립공원 내에서의 산불위험도는 자연적인 요인보다는 인문적인 요인에 의해 지배받는 것으로 나타났는데, 특히 등산로 주변에서 산불 발생 확률이 높기 때문에 등산로 주변지역에 대한 세심한 관리가 절실히 요구된다.

## 산불감시초소 적지분석

산불 방지대책이 아무리 철저하다 할지라도 산불 발생을 완벽하게 억제할 수는 없다. 따라서 일단 발생한 산불에 대한 대처방안의 수립도 매우 중요하다고 할 수 있는데, 다양한 사후 대처방안중에서도 산불 발생을 초기에 발견하여 진화하는 것은 산불 피해를 감소시키는 데 중요한 역할을 한다.

산불 초기 진화를 위해서는 산불을 쉽게 발견할 수 있는 지점에 산불감시초소를 설치하는 것이 바람직한데, 산불감시초소의 적절한 위치는 가시권역이 넓고 다른 가시권역과 중복되지 않고 특히 산불 발생확률이 높은 지역을 잘 감시할 수 있는 지역이 가장 적합하다.

본 연구에서는 기존의 감시초소에 대한 가시권 분석을 통해 감시초소로서의 적합성을 평가하고, 새로운 감시초소 건설시 가장 적합한 후보지를 제시하였다.

기존 감시초소에 대한 가시권 분석 결과 현재의 감시초소에서 볼 수 있는 가시권역의 총면적은 29.25 km<sup>2</sup> 로서, 많은 지역이 비가시권역에 포함되어 있다. 특히 더 큰 문제는 산불 발생 확률분석을 통해 확률이 높은 지역으로 판명된 몇몇 지역이 현재 감시초소의 가시권역내에 포함되지 않는다는 점이다. 의정부시 북부지역과 도봉구 일부지역, 강북구 지역, 성북구 지역과 같은 산불위험지역에 대해서는 감시가 가능하지만, 발생확률이 매우 높게 나타난 고양시 지역과 은평구 남부지역과 그 외의 지역에 대해서는 감시가 불가능하다. 따라서 현재의 감시초소만으로는 산불 발생시 감시가 효율적으로 이루어지지 않기 때문에 대형 피해를 초래할 수 있는 가능성이 매우 크다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운 지역에 감시초소를 신설하는 것이 바람직하는데, 이 과정에서 고려해야할 가장 중요한 요인은 산불 발생확률이 높은 지역에 대한 가시도이다. 특히 기존 감시초소에서도 감시할 수 없는 산불위험지역에 대한 가시도가 뛰어난 지역을 선정하였다.

첫번째 후보지는 고도가 716 미터인 포대능선과 도봉주능선이 만나는 지점으로서 행정구역상으로는 양주군에 속한다. 이 지점에서는 도봉구, 강북구 지역에 대한 가시도가 뛰어나며, 총 가시면적은 21 km<sup>2</sup>로 나타났다.

두번째 후보지는 고도 604 미터의 노봉 하단 지점으로서 이 지점에서는 도봉구, 강북구 지역에 대한 가시도가 뛰어나며, 총 가시면적은 4.8 km<sup>2</sup>이다.

세번째 후보지는 고도 80 미터의 은평구 여기소 부근의 한 지점으로서 이 지점에서는 은평구와 고양시의 산불 위험지역에 대한 가시도가 뛰어나며, 총 가시면적은 7.1 km<sup>2</sup>이다.



## 결 론

우리나라에서는 최근 계속되는 한발로 인해 사상 최대의 산불이 발생하여 수일동안 광범위한 지역으로 확산되어 엄청난 수목피해와 재산피해를 야기시켜 산불에 대한 경각심을 불러 일으켰다. 최근 산불의 특징은 초기 진화가 어렵고 대형화되어 피해규모가 점차 증가하고 있다는 것이다. 따라서 이에 대한 대책이 다각적으로 수립되어야 할 것이다.

본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 북한산 국립공원내의 산불 발생과 관련성이 높은 변수로는 경사, 사면의 향, 고도, 수계, 식생의 유형, 등산로에 대한 접근도, 건물이나 야영지에 대한 접근도, 무속 신앙지에 대한 접근도가 선정되었다. 북한산 국립공원내에서는 등산로의 접근도가 높고 고도가 낮은 남사면 지역에서 많은 산불이 발생한 것으로 나타났다.

둘째, 산불 발생 확률분석 결과 확률이 비교적 높게 나타난 지역은 주로 국립공원 경계 주변부로 강북구와 도봉구 일대, 구기터널 부근과 고양시와 은평구 경계 부근, 의정부시 북부지역으로 나타났다. 특이할 만한 점은 고양시와 은평구 경계 부근에서는 과거 산불 발생은 적지만 산불위험도가 매우 높은 지역으로 판명되어 앞으로 이 지역에서 빈번한 산불 피해가 발생할 것으로 예상된다.

셋째, 현재의 감시초소에서 볼 수 있는 가시권역의 총면적은 29.25 km<sup>2</sup> 로서, 의정부시 북부, 도봉구 일부지역, 강북구, 성북구에 분포하는 산불 위험지역에 대해서는 감시가 가능하지만, 발생확률이 매우 높게 나타난 고양시와 은평구 남부지역 및 그 외의 지역에 대해서는 감시가 불가능한 것으로 나타났다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 감시초소에서 감시할 수 없는 산불위험지역에 대한 가시도가 뛰어난 3개 감시초소 후보지를 선정하였다. 첫번째 후보지는 포대능선과 도봉주능선이 만나는 고도 716 미터인 지역이며, 두번째 후보지는 노봉 하단의 고도 604 미터 지점이며, 세번째 후보지는 은평구 여기소 부근의 고도 80 미터 지점이다.