

이시영, 여운홍  
임업연구원

Analysis of the Field Burning Test of Forest Fire in Hongcheon  
Lee, Si-Young and Woon Hong Yeo  
Forestry Research Institute

## 1. 서론

과거 산림이 헐벗을 때의 산불은 인력으로 쉽게 진화할 수 있었고 그 피해도 크지 않았기 때문에 산불에 대한 관심도 크지 않았다. 그러나 1, 2차 치산녹화 10년계획의 성공으로 산림이 울창해져서 사람의 접근도 어려워지고 진화인력도 부족하여 산불은 대형화되고 그 피해액도 증가하고 있다(1). '96년 강원고성 산불은 귀중한 산림 3,762ha를 연소시키고 54시간만에 진화되어 많은 산림과 재산피해를 가져왔던 정부수립이후의 최대규모의 산불이었다. 이와같이 최근의 산불추세는 과거와는 달리 산림내의 가연성 연소물량의 축적과 산을 찾는 휴양인구의 증가로 다발, 대형화되는 경향이다.

산불은 가옥화재와는 달리 연소하고 있는 지역주변의 지형, 임황, 기상인자의 영향을 매우 강하게 받는다. 특히, 우리나라와 같이 산악지형에서 발생한 산불은 연소속도와 연소방향 등이 지형의 영향을 받아 매우 복잡하게 변화된다. 이러한 복잡한 연소상황 때문에 산불확산에 미치는 요인들의 변화를 판단하기는 더욱 어렵다. 더욱이 산불 발생지역의 대부분이 민가와 떨어진 오지에서 발생하기 때문에 산불이 발생할 경우 산불의 진행상황과 풍속변화 등 연소특성에 대한 자료 수집이 매우 어렵다.

따라서 '86년4월1일 강원도 홍천군 두촌면 역내리에서 우리나라에서 최초로 실시한 산불연소 실연시험은 산불의 진행속도와 화염온도 그리고 산불주변에서 일어나는 기상변화를 계획된 상태에서 측정할 수 있었다.

최근에는 산불연소지역의 분석도 컴퓨터의 성능이 좋아 어떤 복잡한 계산도 매우 빠르고 효과적으로 실시할 수가 있다. 그 결과 우리나라와 같이 복잡한 지형에서 발생한 산불의 결과도 공간적인 자료로 구축하여 입체시한 지도에 자세하게 표시할 수가 있다(2).

山下 등(3, 4, 5)은 컴퓨터를 사용하여 산불확대를 예측하는 기법을 검토한 결과 산불의 확대는 기상·지형·임상 및 소방활동 등의 많은 조건에 영향을 받기 때문에 산불의 확대를 예측하기 위해서는 대상지역 전역에 걸쳐 많은 분석자료가 필요하다고 하였다. 그 결과 컴퓨터와 이미지 스캐너를 이용하여 산불피해지

역의 입체지도를 작성하였고 복잡한 지형과 국지풍, 수종, 수관소밀도 및 비화를 고려한 산불확대 예측모델을 개발하여 실제화재와 비교 검토하였다.

따라서 본 논문에서는 산불연소 실연시험에 대한 연소진행속도와 화염온도, 연소진행시 기상변화를 분석하였고, 연소시험지에 대하여 AutoCAD, LANDCADD 그리고 GIS 전산프로그램을 이용하여 수치지형자료를 구축하고, 기 개발된 산불확산 Simulation모델에 적용하므로서 연소확산 면적을 비교 분석하였다.

## 2. 시험방법

### 2.1 시험지 설정

산불시험지는 그림1과 같이 홍천에서 인제방향으로 약 20km에 위치한 강원도 홍천군 두촌면 역내리 지역 솔잎혹파리 피해지 약4ha지역을 대상으로 하였다.

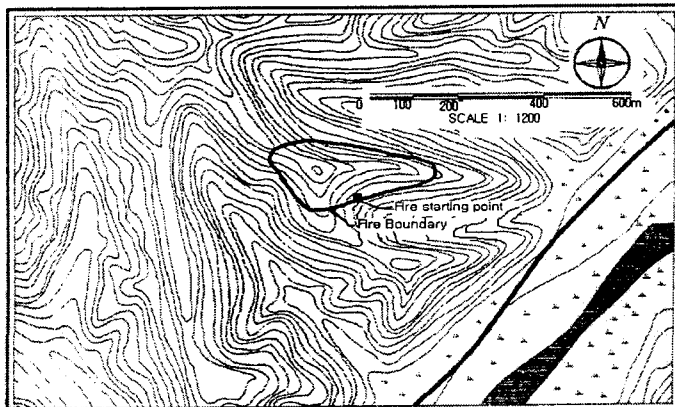


Fig.1. Location of forest fire burning experimental area at Hongcheon in Kangwon province within the solid line boundary.

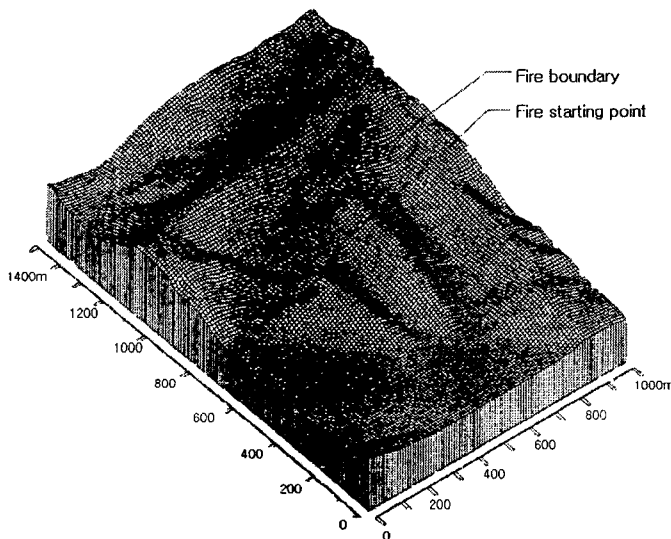


그림2는 산불시험지에 대한 입체지형도를 나타낸 것이다.

Fig.2.

Three-dimensional analysis of forest fire behavior at the burning site.

## 2.2 시험방법

'86년 4월1일13:40분 산불시험지의 하단부(그림1)에 3개의 발화지점을 설정하고 사면장이 약100m인 산정상 방향으로 20m 간격마다 백색천의 깃발을 설치해 연소속도를 측정하였다. 화염온도는 “에너콘 엔지니어링”의 적외선온도화상기를 이용하였고 이때의 기상변화는 휴대용 기상관측기로 측정하였다.

## 2.3 분석방법

산불시험지에 대하여 지형도의 등고선 간격을 20m로 입력하여 기본적인 수치자료원을 구축하였다. 3차원 입체지형도의 경우는 mesh간격을 5m×5m크기의 사각형으로 3차원을 만들고 이 사각형면을 서로 연결하여 Grid Model을 작성하여 이지역의 입지환경과 연소특성을 분석하였다. 자료구축에 사용된 기본도는 국립지리원 발행 축척 1:25,000지형도를 이용하였다.

산불시험지의 입지특성 및 연소특성 분석에 사용된 Software는 AutoCAD와 LANDCADD Software, Workstation, Arc/info, AML(Arc Macro Language) 응용프로그램 그리고 Solaris 2.3, MS DOS 6.2의 응용프로그램을 이용하였으며 산불시험지의 연소확산면적 비교는 이시영 등(6)이 개발한 산불연소 확산모델을 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 산불시험지의 임황 및 지황특성

#### 3.1.1 임황(林況)인자

산불시험지는 표1과 같이 소나무가 분포한 지역으로서 수고는 4-8m, 흉고직경 12-20cm, 100m<sup>2</sup>당 입목밀도는 8-21본이었고 솔잎혹파리 피해지였다.

또한 표2에서와 같이 이지역의 관목, 초본, 지표의 낙엽등 지피물량(생중량)을 조사한 결과 ha당 관목물량이 42.8kg, 초본 4.4kg, 지표가연물 31.1kg로서 총가연성지피물량은 7.84ton이었으며 이때 연료층의 두께는 6.3cm를 나타냈다.

Table 1 General description of the burning site at Hongcheon.

Plot	Ground conditions			Tree conditions			
	Aspect	Slope(°)	Plot position	Species	Height(m)	D.B.H(m)	Number of Trees/100m <sup>2</sup>
1	S	40	9/10	<i>P.densiflora</i>	7-8	12-14	21
2	S	40	5/10	"	5-7	15-20	8
3	S	40	8/10	"	4-6	6-12	17

Table 2. Fuel accumulation at the burning site.

Plot	Shrub (kg/ha)	Herbs (kg/ha)	Surface Fuel(kg/ha)	Fuel Depth(cm)	Remark
1	34.6	5.8	44.0	5.7	Total Amount 7.83 t/ha
2	62.3	2.5	43.5	7.4	
3	31.6	4.6	5.9	5.8	
Aver.	42.8	4.4	31.1	6.3	

### 3.1.2 지황(地況)인자

산불시험지의 방위를 표3과 같이 연소방향의 상향사면과 하향사면으로 구분하여 분석한 결과 상향사면의 경우 SE사면 46%, S사면 42.5%, E사면 9.1%순으로 나타났으며, 하향사면의 경우는 N사면이 34%, SW사면 28.3%, NE사면 20%순으로 나타났다. 또한, 연소지역의 경사도 분석은 표4와 같이 상향사면의 경우 20-30 °가 58.5%, 30-40 ° 27.1%, 10-20 °가 8.4%를 나타냈으며, 하향사면의 경우는 20-30 °가 35.2%, 30-40 °가 28.7%, 40-50 °가 14.5%로 나타나 하향사면이 상향사면 보다 다소 급한 경사형태를 나타냈다. 연소지역의 고도분석은 표5와 같이 상향 사면의 경우 300-400m가 77.1%, 200-300m가 22.9%로 나타났으며, 하향사면의 경우는 300-400m가 89%, 200-300m가 10.7%를 나타냈으며, 연소지역은 이시영(7)이 분류한 단순사면형의 연소지역으로서 우리나라 산불의 연소유형 중에서 가장 일반적인 유형을 가진 지역이었다.

Table 3. Analysis of Aspect

Items	E	NE	N	NW	W	SW	S	SE	Flat	total
Up meshes (no.)	63	6	0	0	0	2	293	317	8	689
slope rate(%)	9.1	0.9	0	0	0	0.3	42.5	46.0	1.2	100
Down meshes (no.)	26	208	353	7	30	294	82	13	26	1,039
slope rate(%)	2.5	20.0	34.0	0.7	2.9	28.3	7.9	1.2	2.5	100

Table 4. Analysis of slope

Items	0-10 °	10-20 °	20-30 °	30-40 °	40-50 °	50 °이상	total
Up meshes (no.)	35	58	403	187	6	0	689
slope rate(%)	5.1	8.4	58.5	27.1	0.9	0	100
Down meshes (no.)	77	119	366	298	151	28	1,039
slope rate(%)	7.4	11.5	35.2	28.7	14.5	2.7	100

Table 5. Analysis of elevation

Items		200-300m	300-400m	total
Up slope	meshes (no.)	158	531	689
	rate(%)	22.9	77.1	100
Down slope	meshes (no.)	108	901	1009
	rate(%)	10.7	89.3	100

### 3.2 화입주변의 기상변화

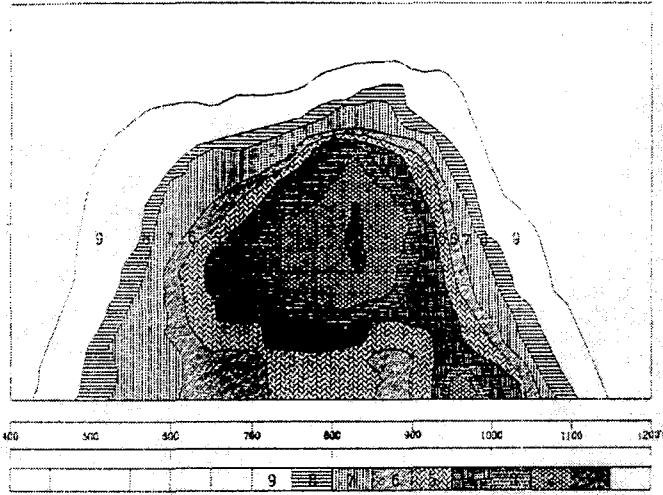
산불시험장 주변 지상 1.5m높이에서 휴대용 풍향풍속계를 이용하여 측정한 풍향, 풍속은 표6과 같았다. 표6과같이 산불이 점화되기전 시간대인 12:00-13:25분까지 경사면과 능선부근에는 5.0-7.3m/s의 남풍이 불었으나 연소시험 시간대인 13:40-14:00시에는 남풍이 5.3-7.5m/s로 불어 다소의 풍속 증가를 볼 수 있었다. 그러나 연소종료 후에는 풍속이 다시 5.2-5.7m/s의 속도로 떨어지는 경향을 나타냈다. 산불시험지 200m 원격지에서 측정한 대기온도는 16℃에서 18℃로 상승하였고, 공중습도의 경우는 21.9%에서 16.8%로 떨어지는 경향을 나타냈다.

Table 6. Weather data of the burning experimental sites on April 1, 1986

Time	Observation points	Temperature (°C)	Relative humidity(%)	Wind direction	Wind speed(m/s)
(Before ignition)					
12:00	Province Road	16.0	-	S	4.3
12:50	Ridge Top	15.1	21.3	S	7.3
13:05	Slope	14.7	21.0	S	6.0
13:10	"	13.7	21.0	S	5.7
13:15	"	14.9	19.0	S	5.5
13:20	"	14.1	19.1	S	5.0
13:25	Valley	15.2	22.5	-	0.0
(After ignition)					
13:40	Ridge Top	16.0	21.9	S	5.3
13:41	"	16.1	22.3	S	5.3
13:42	"	16.3	20.8	S	5.3
13:43	"	16.0	19.1	S	5.3
13:44	"	16.3	18.0	S	6.3
13:45	"	18.0	16.8	S	7.5
14:00	" "	16.7	18.5	S	6.5
Completion of burning					
15:00	"	16.4	18.9	S	5.7
16:00	"	19.0	19.0	S	5.2

### 3.3 산불연소 화염온도

산불시험지에서 화염온도를 측정한 결과 그림3과 같이 연소구역 중심점의 최고온도는 1,175℃ 였고, 주변온도 1,125℃, 점화초기 875℃ 그리고 시험지 부근



의 연기온도는 625℃를 나타냈다. 이 온도는 산불시험지로 부터 직선거리 150m인 맞은편 북향사면에서 원격측정한 것이며, 이때 지표온도는 410-809℃이지만 연료의 량에 따라 1,000℃를 초과할 수 있다는 Vasander(8)의 연구 결과와 일치하는 경향이였다.

Fig.3. Geometry of fire intensity at the burning site.

### 3.4 산불연소 진행속도 및 확산면적

지피물량이 서로다른 3 line에서의 연소속도를 측정한 결과는 표 7과 같았다. 표7에서와 같이 점화 후 산불 연소방향 20m 도달시 연소 전면부가 연기로 휩싸여 관측이 불가능하였다. 그러나 연소방향 20m 도달시까지의 연소시간을 측정한 결과 평균 134초가 소요되었고 초당 평균 0.15m/s의 진행속도를 나타내었다. 그러나 李(7)가 실내실험으로 측정한 결과인 0.17m/s 보다는 다소 늦은 결과를 나타냈는데 이것은 연료의 계속적인 배열 및 량과의 관계, 풍속의 불균일에서 오는 차이로 판단되었다.

Table 7. Fire spread rate at the burning site

Item	Ignition time	Time requirement of fire spread to 20m	Rate of spread (m/s)
1 line	13:40' 29"	130	0.15
2 line	13:40' 19"	90	0.22
3 line	13:40' 19"	181	0.11
Aver.	-	134	0.15

### 3.5 실측인자의 산불확산모델 적용

#### 3.5.1 실측인자를 이용한 Simulation

산불확산모델의 실행은 각 셀의 확산으로 진행된다. 각각의 셀에는 경사, 사면방향, 연료자료를 중첩시켜 그림3과 같이 산불확산위험도 지도를 작성하였다. 이때 노란색은 산불확산 위험지수가 가장 낮은 것을 나타내며 청색은 산불확산 위험지수가 가장 높은 것을 나타낸다. 또한, 산불확산모델에 적용할 변수는 정연하(9), 이시영(7)이 연구한 산불확산에 미치는 환경인자 중에서 각인자별 연소속도를 비교하여 가중치를 할당하였으며 그 결과는 이시영(1999)이 기술한 바 있다. 따라서 홍천시험지에 대하여 산불위험 수치지형도를 구축하고 산불확산 Simulation모델에 적용하였다. 그림4는 Simulation한 단계별 산불확산과정을 나타낸 것으로서 ㉠는 산불발화점을 나타낸 것이며 ㉡는 발화후 5분 ㉢는 발화후 10분 ㉣는 발화후 20분이 경과한후 산불진행이 종료된 상태를 나타낸 것이다. 특히 ㉣의 경우 연소지역 하단부의 회색은 연소물이 이미 타버린 상태를 의미한다.

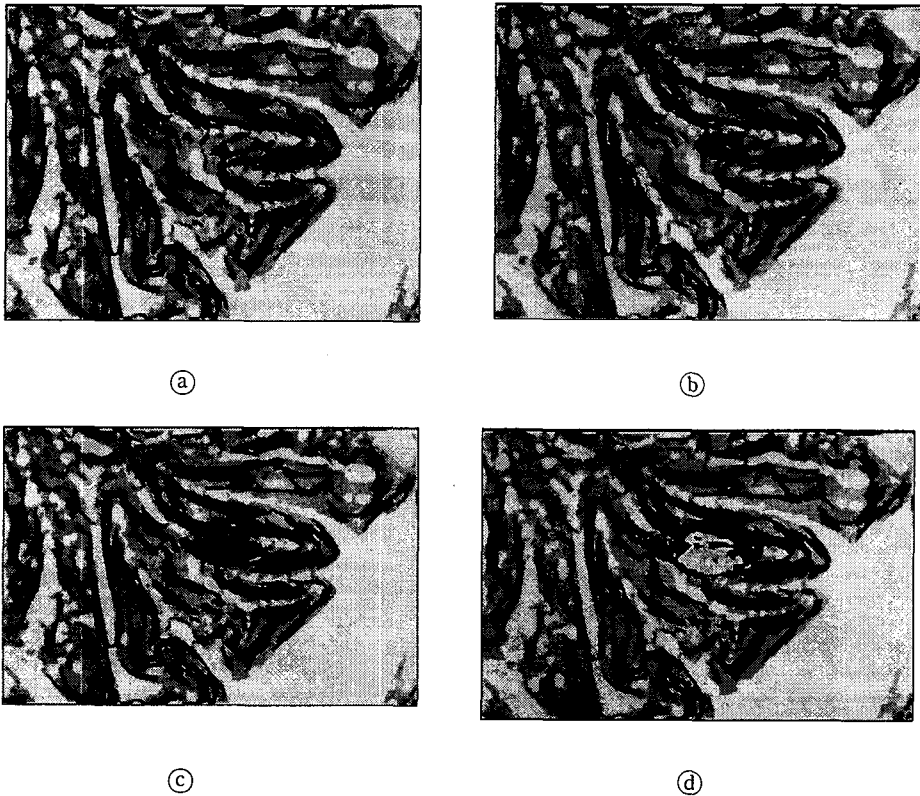


Fig.4. Computer output of forest fire spread model.

(Red and gray boundary indicate forest fire and ash of burned area,

㉠ Fire starting point, ㉡ After 5min., ㉢ After 10min., ㉣ After 20min.)

### 3.5.2 실측인자와 Simulation비교

산불확산 Simulation모델에 산불발생지점과 풍향, 풍속, 건조도를 입력하여 산불진행이 능선까지 도달할때 까지의 확산된 면적과 실제 연소면적을 비교한 결과 표6 및 그림5와 같았다. 이 결과 모델에 의해 연소확산된 면적의 셀의 수는 1,997개이고 연소확산 면적은 49,925m<sup>2</sup>이며, 실제 연소확산된 면적의 셀의 수는 1,734개이고 확산면적은 43,350m<sup>2</sup>로서 모델에 의한 연소확산은 실제 연소확산과 약 87%의 일치성을 보여주었다.

Table 6. Test of forest fire spread model by real burned area.

Items	No. of meshes	Burned area(m <sup>2</sup> )
Forest fire spread model	1,997	49,925
Real burned area	1,734	43,350



Fig.5. Comparison of the output of forest fire spread model with real burned area (Black and red boundary and ■ indicate real burned area, forest fire spread model and forest fire starting point)

## 결 론

'86년4월1일 강원도 홍천군 두촌면 역내리에서 우리나라에서는 최초로 산불실연시험을 실시하였다. 시험지의 조건은 솔잎혹파리의 피해를 받은 4ha 규모의 소나무 III령급 지역으로서 이지역에 대하여 화입을 실시한 후 화입주변의 기상변화, 연소온도, 연소진행속도 및 연소유형을 조사하여 분석하였다.

1. 홍천 산불시험지의 최고온도는 1,175℃, 중심점 주변온도는 1,125℃, 점화초기는 875℃, 인접주변의 연기온도는 625℃를 나타냈다.
2. 산불발화후 능선까지의 연소진행 속도는 0.15m/s였고, 연소유형은 단순사면형의 연소형태를 나타냈으며, 다소의 풍속변화와 온·습도변화가 있었다.
3. AutoCAD와 LANDCADD 그리고 ARC/INFO GRID와 AML 전산프로그램을 사용하여 수치지형자료를 구축하고, 기 개발된 산불연소확산 모델과 비교한 결과 약 87%가 일치하였다.



## 참고 문헌

1. 산림청, '98산불통계자료, 1998.
2. 李時泳, 丁延夏, 李鳳洙, 數値地形資料를 이용한 산불의 延燒類型 分析, 山林科學論文集, 53, 186-193, 1996.
3. 山下邦博, 林野火災의 飛火延燒에 關する 研究, 消防研究所研究資料, 21, 148pp, 1988.
4. ———, 稻垣實, 田村裕之, パソコンを利用した林野火災の擴大豫測法の概要, 消防輯報 44, 14-15, 1990.
5. ———, 大龍村의 林野火災と 火災擴大豫測手法의 概要, 火災 40(6), 1-12, 1991.
6. 李時泳, 林龍鎬, 李鳳洙, 單純斜面에서의 山火延燒擴散모 델 開發-慶北 義城郡의 事例調査를 中心으로-, 山林科學論文集, 60, 126-133, 1996.
7. 李時泳, 山火發生 危險度 및 燃燒擴大 要因 分析에 關한 研究, 東國大學校 大學院 博士學位論文, 104pp, 1995.
8. Vasander, H.&T. Lindholm, Fire intensities and surface temperatures during prescribed burning. Silva Fennica 19(1), 15pp, 1985.
9. 丁延夏, 落葉의 燃燒特性과 氣象條件에 따른 山火危險 豫測에 關한 研究, 서울대 博士學位論文, 47-63, 1992.