

산림화재 종합위험등급화에 관한 연구

김동현, 김광일, 김태구
인제대학교 산업안전시스템공학부

Study on the Wildland Fire Total Hazard Classification

Dong Hyun Kim, Kwang Il Kim, Tae Gu Kim
Department of Industrial Safety System Engineering, INJE University

1. 서론

산림화재에 대한 종합 위험성평가는 산림화재 위험성 인자인 연료, 기상, 지형의 상대적 위험도에 따라 결정되어 진다. 이러한 인자들은 크게 두 가지로 산림화재 위험성에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 첫째는 화재 발생 가능성에 영향을 미치는 인자, 둘째는 화재발생 후 화재의 확산속도에 영향을 미치는 인자로 대별될 수 있다. 연료와 기상의 경우에는 화재 발생 가능성 및 확산속도에 결정적인 영향을 미치지만 지형인자의 경사도에 대한 위험성은 화재발생 가능성에 있지 않고 화재 확산 속도에만 크게 영향을 미친다고 볼 수 있다. 산림화재 종합위험성은 이러한 화재 발생 가능성과 화재 확산속도라는 위험성 분류 내에서 개별적 인자들의 위험성 기여도를 적용함이 타당하다고 볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 각 인자들에 대해 실험 및 외국의 산림화재 위험성 평가자료를 분석 및 고찰을 통해 위험성 등급을 설정, 산림화재 위험성 기여도에 대해 가중치를 적용함으로써 종합위험등급을 표현하였다. 산림화재 종합위험등급의 표현은 각 지역별, 산림 구획별, 주요 산에 대한 산림화재에 대한 위험성 정도를 시간대별, 일별, 월별 단위로 나타낼 수 있다.

2. 위험성 인자와 위험등급

산림화재 위험성인자는 크게 연료, 기상, 지형으로 나뉘어 지며 각 인자들에 대해 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

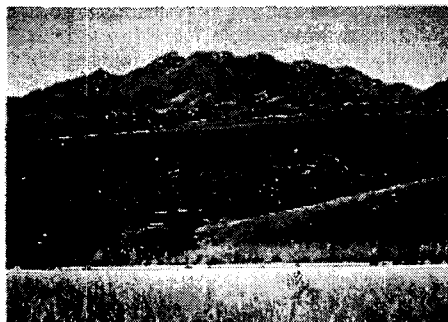
2.1 연료

연료에 대한 산림화재 위험성은 화재 발생 가능성과 화재 확산속도에 모두 영향을 미치며 연료가 가지는 여러 가지 특성에 따라 이에 대한 위험성의 정도가 달라질 수 있다. 연료에 대한 화재 위험성의 인자는 산림지역에 존재하고 있는 연료의 종류, 배열상태, 수목의 크기, 그리고 down, dead woody fuel 등의 조사에 의해 결정되어질 수 있다. 이러한 식별 가능한 연료의 상태를 대표적으로 모델화 한 것이 Fire Behavior Prediction System (FBPS)과 National Fire Danger Rating System (NFDRS)이다. 이들 두 System에서의 연료 모델은 Grass, Shrub, Timber, 그리고 Slash로 크게 4개의 집단으로 분류한다. 각 Fuel Model에 대한 묘사는 Table 1과 같고 Fuel Model 예는 Fig 1에 보여진바와 같다. 수종에 따른 열량값의 적용은 참고문헌 1을 적용한다.

Table 1. Description of fuel models used in fire behavior by Albini (1976) and Fuel Hazard Level

Fuel Model	Typical fuel complex	Fuel Loading				Total Fuel Loading	Fuel bed depth
		1 hour	10 hours	100 hours	Live		
Grass and grass-dominated							
			Tons/ha				(cm)
1	Short grass (Height : 0.3m)	3	0	0	0	3	30
2	Timber(grass & understory)	8.1	4.1	2	2	16.2	30
3	Tall grass (Height : 0.76m)	12.5	0	0	0	12.5	76
Chaparral and shrub fields							
4	Chaparral (Height : 1.82m)	20.3	16.2	8.1	20.3	64.9	182
5	Brush (Height : 0.61m)	4.1	2.0	0	8.1	14.2	61
6	Dormant brush, hardwood slash	6.1	10.1	8.1	0	24.2	76
7	Southern rough	4.6	7.6	6.1	1.5	19.8	76
Timber litter							
8	Closed timber litter	6.1	4.1	10.1	0	20.3	6
9	Hardwood litter	11.8	1.7	0.6	0	14.1	6
10	Timber (litter & understory)	12.5	4.2	20.3	8.1	45.1	30
Slash							
11	Light logging slash	6.1	18.2	22.3	0	46.6	30
12	Medium logging slash	16.2	56.8	66.9	0	139.9	70
13	Heavy logging slash	28.4	93.2	113.5	0	235.1	91

Hazard Level	1 (No)	2 (Low)	3 (Medium)	4 (High)	5 (Extreme)
Fuel Model	None	Models 1,2	Models 5,8,9	Model 6,7,10,11,12	Models 3,4,13



(a) Fuel Model 1



(b) Fuel Model 13

Fig. 1. Example Photographs of the Fuel Model 1 and 13

2.2 지형

① 경사

경사의 Percentage Grade는 식 1에 의해 산출된다. Elevation Difference와 Distance는 지도상의 임의의 두 지점을 연결하여 Elevation Difference와 Distance를 측정하여 축척비에 대해 실제거리로 환산한 후 식 1에 대입하여 계산한다(Fig. 2 참조).

$$\text{Slope}(\%) = \frac{\text{Elevation Difference}}{\text{Distance}} \times 100 \quad \dots \text{식 1)}$$

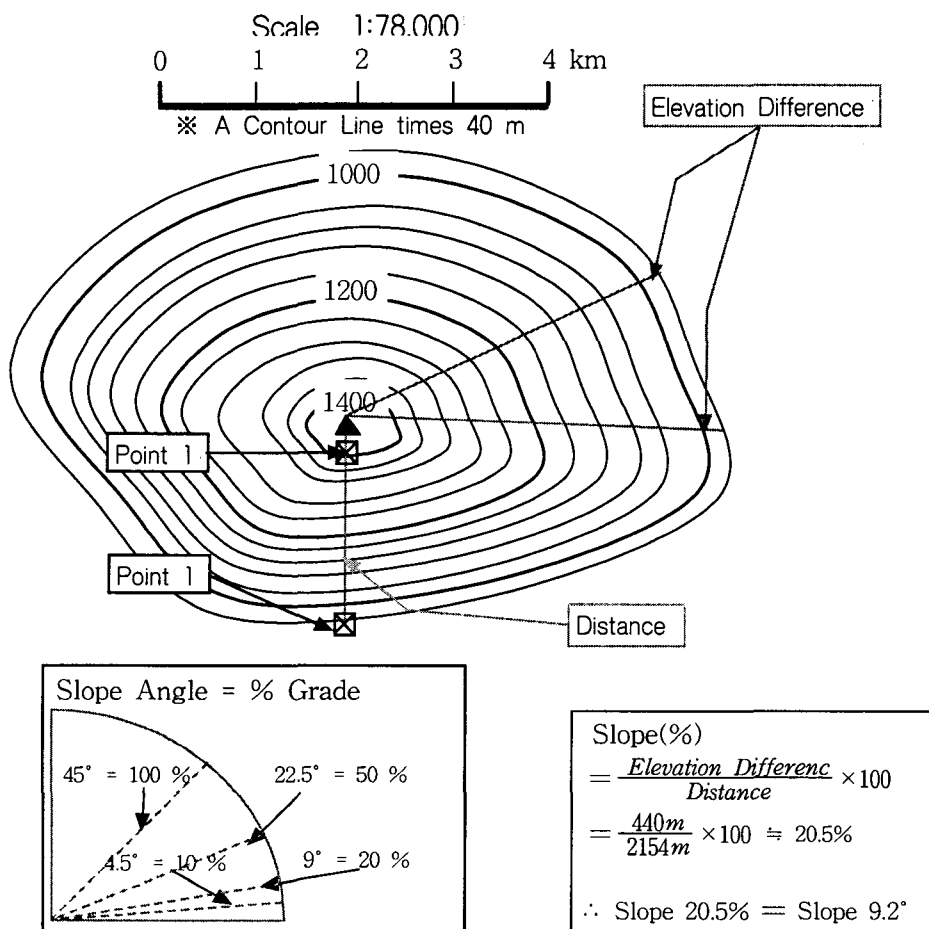


Fig. 2. Example Slope Angle Calculation

Table 2. Slope Hazard Level

Hazard Level	1	2	3	4	5
Slop Degree	0° ~12°	13° ~18°	19° ~25°	26° ~34°	over 35°

② 사면의 향

사면의 향에 따른 화재위험성은 태양복사에너지의 수용률에 따른 연료의 수분 함유량과의 관계이다. 태양의 복사에너지를 가장 많이 받는 사면의 지형은 그렇지 못한 사면의 지형보다 연료의 온도 뿐 아니라 수분함유량의 건조율이 상대적으로 높으며 이는 발화 가능성과 확산속도의 증가에 영향을 미치는 인자이다. 일반적인 사면의 향에 따른 태양복사에너지의 수용률은 Fig. 3과 같다. 해발 300m 이하의 저지형에 대해서는 Hazard Level 4를 적용한다.

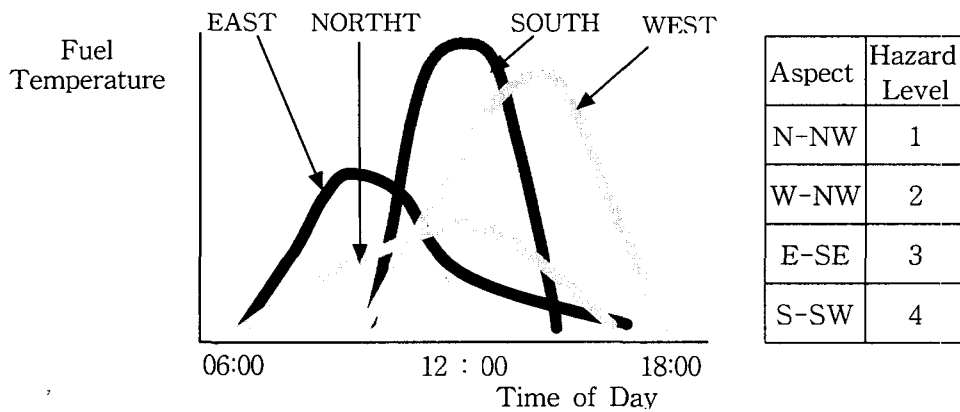


Fig. 3. Flammability of Fuel by Time of Day and Aspect and Hazard Level

2.3 기상

① 기상

기상인자에 대한 위험성은 크게 바람의 세기와 수분함유량(공기중 또는 연료)에 의해 결정되어진다. 기상인자에 대한 위험성의 정량화작업은 미국의 National Fire Danger Rating System(NFDRS, 1977)에서 사용하고 있는 Fire Weather Index System과 가뭄지수(Drought Index), 상대습도, 그리고 풍속 등에 따른 산림화재 위험성 표현의 방법이 있다. 산림화재에 대한 기상인자의 종합적인 위험성의 표현은 캐나다와 미국의 National Fire Danger Rating System(NFDRS, 1977)에서 사용하고 있는 Fire Weather Index System이 가장 효과적이다. Fire Weather Index는 Fig. 4에 보여지는 바와 같이 기온, 상대습도, 바람, 강우에 대한 종합적인 위험성 기준을 제시하였다. Fine Fuel Moisture Code(FFMC)은 surface litter와 다른 fine fuel에 대한 수분함유량을 나타낸 것으로 하루의 Time lag에 대한 값이다. 이 값은 Fine fuel에 대한 가연성 정도를 상대적으로 나타내는 것이다. Duff Moisture Code(DMC)는 지표층의 나뭇가지나 낙엽 등에 대한 수분함유량을 숫자로 Code화 한 것으로 지표층 연료의 깊이는 각 산림지역의 평균 깊이를 적용하였다. Drought Code(DC)는 깊고 촉촉한 유기물들에 대한 연료층의 수분함유량을 숫자로 Code화 한 것으로 이 Code는 산림지역 연료들에 대한 주기적인 건조 영향의 지표로 사용된다. Initial Spread Index(ISI)는 화재 확산정도가 예상되는 정도를 숫자로 지수화 한 것이다. 이 값은 연료의 양에 관계없이 Fine Fuel Moisture Code와 Wind Velocity에 대한 관계값이다. 이 값은 Fig. 5에 의해 구해진다. Buildup Index (BUI)는 초기 화재 확산이 일어난 후 화재의 전파에 의해 연소 가능한 연료의 양을 나타낸 것으로 Duff Moisture Code와 Drought Code에 대한 관계값이다.

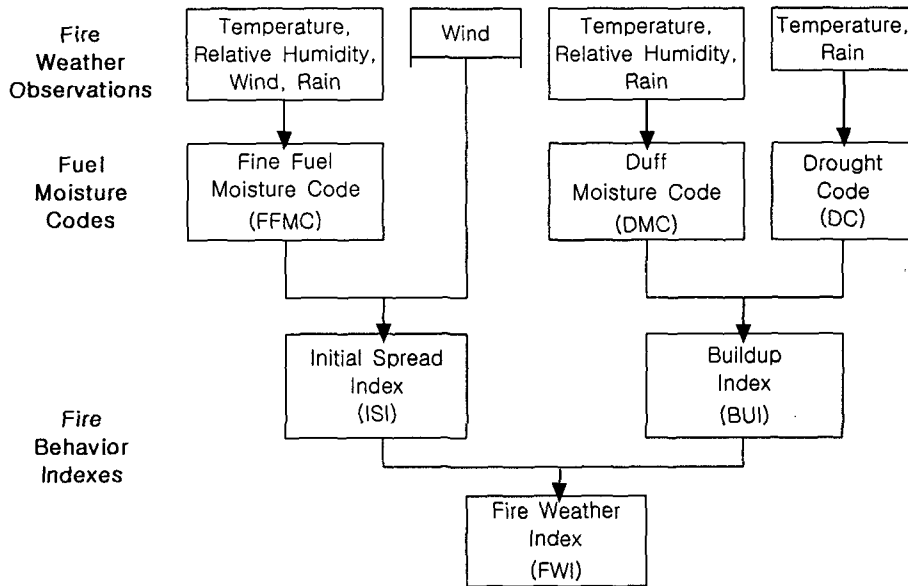


Fig. 4. Structure of the Forest Fire Weather Index System

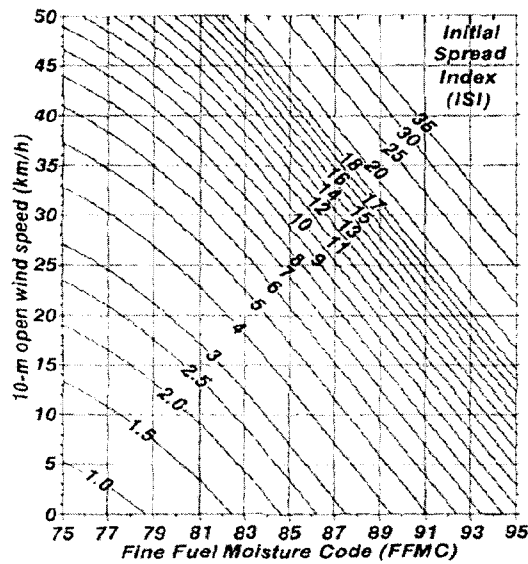


Fig. 5. Initial Spread Index (ISI) as a function of the Fine Fuel Moisture Code (FFMC) and 10-m open wind speed

Buildup Index (BUI)의 산출식은 식 2와 같다.

$$\text{if } P \leq (0.4 \times D), \quad BUI = 0.8 \times \frac{(P \times D)}{(P + 0.4 \times D)} \quad \dots \text{식 2)}$$

$$P = \text{Duff Moisture Code(DMC)}, \quad D = \text{Drought Code(DC)}$$

Fire Weather Index (FWI)의 주요산출식은 식 3과 같다.

$$\text{if } BUI \leq 80, \quad B = 0.1 \times (2 + 0.626 \times 0.809 \sqrt{BUI}) \times ISI \quad \dots \text{식 3)}$$

$B = \text{common in calculate}, \quad S = \text{Fire Weather Index},$
 $ISI = \text{Initial Spread Index}, \quad BUI = \text{Buildup Index}$

Table 3. Weather Hazard Level

Hazard Level	1	2	3	4	5
Fire Weather Index	0~3	4~13	14~23	24~28	29<

② Slope direction to the wind

경사면과 바람 방향의 상관관계는 Vector Plotting Method에 의해 설명되어 질 수 있다. 예로 Fig. 6에 보여지는 바와 같이 Slope와 Wind의 Scalar의 크기가 각각 1이라고 가정하면 Slope와 Wind의 내각이 0~120°사이에는 Vector의 값이 항상 1 이상의 Vector 값을 가지는 화염속도 상승구간이다. 내각의 범위가 120~180°의 경우에는 1이하의 Vector 값을 가지는 화염속도 감소구간이 된다고 볼 수 있다.

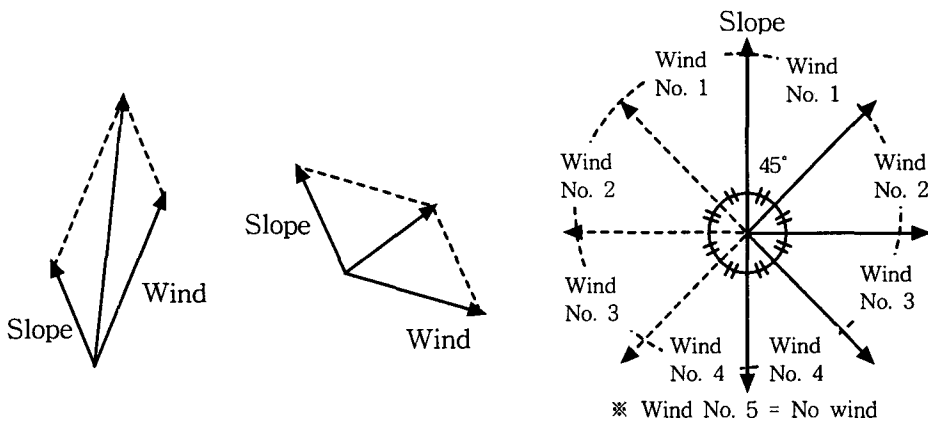


Fig. 6. A vector is the combination of two different forces; (wind and slope) and the Different Impact of Slope Direction to the Window

Table 4. Slope Direction to the Window Hazard Level

Hazard Level	1	2	3	4	5
Wind No.	5	4	3	2	1

3. 산림화재 종합위험등급화

3.1 산림화재 종합위험등급

산림화재에 영향을 미치는 연료, 기상, 지형과 이들 인자들 상호간의 위험 증가 효과 등을 실험 및 위험성 평가 자료를 토대로 연료의 상태, 지형에서의 경사, 기상조건, 지형과 바람의 상호 관계, 수종별 상대적 열량가치 그리고 사면의 향의 6개 인자들에 대해 위험성 정도를 나타내었다. 산림화재의 발생 가능성 그리고 확산속도에 대한 위험성에 있어서 6개 인자들 모두 같은 크기의 산림화재 위험성에 영향을 주는 것은 아니다. 따라서 각 인자들에 대해 위험성 기여도를 산정하여 가중치를 적용하여야 한다. 여기서는 Montana Department of State Lands System, Insurance Services Organization (ISO) 에서 개발한 FireLine System 그리고 Department of Housing and Urban Development(HUD) Study system에서 사용하고 있는 각각의 위험성 인자들에 대한 부여 점수치를 비교하여 가중치를 산정하였다. 종합위험등급의 산정 흐름은 Fig. 7과 같다. 산림화재 종합위험성등급은 최저값과 최소값에 대한 5 등급으로 균등분할 하였으며 이에 대한 위험성의 정도는 Table 5에 나타난 바와 같다.

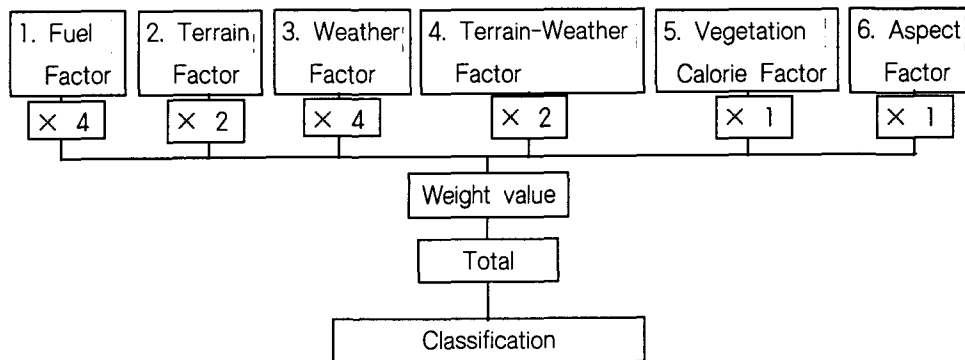


Fig. 7. Wildland Fire Total Hazard Evaluation Flow

Table 5. Total Hazard Classification Criteria of Factors

Hazard Classification	Range
Low	14 ~ 23
Moderate	24 ~ 33
High	34 ~ 43
Very High	44 ~ 53
Extreme	54 ~ 64

3.2 종합위험등급의 평가 적용예

1996년 4월과 2000년 4월에 각각 발생한 강원도 산불에 대해 산림화재 종합 위험등급을 적용하여 실제 산림화재 위험성과 당시의 위험 상황 등을 비교 평가하고자 한다. 위 두 화재에 대한 발생 당시의 기상조건과 지형 그리고 연료에 대한 자료를 토대로 종합위험등급에 적용하였다. 두 화재의 당시 조건은 Table 6과 같으며 기상조건의 상대습도를 제외한 다른 인자들에 대한 값에는 큰 차이를 나타내지 않고 있어 Fig. 8과 같이 적용하여 평가하였다. 평가 결과, 가중치를 적용한 위험성 값이 61로 EXTREME에 해당하는 극도의 산림화재 위험성을 나타내었다.

Table 6. The Present Environment in Kwangwon Wildland Fire occurs in the 1996 and 2000

Date	1996. 04. 23	2000. 04.07
Conditions		
1. Weather	Max. Wind Speed : 27m/s Min. Humidity : 26 % Continued Drought	Max. Wind Speed : 26.8m/s Min. Humidity : 11 % Continued Drought
2. Fuel	Fuel level 5	Fuel Level 5
3. Terrain	About 21°	About 21°
4. Occurrence Aspect	A Single Burn	Many of fire on similar time
5. Damage Areas(ha)	3,762	23,789

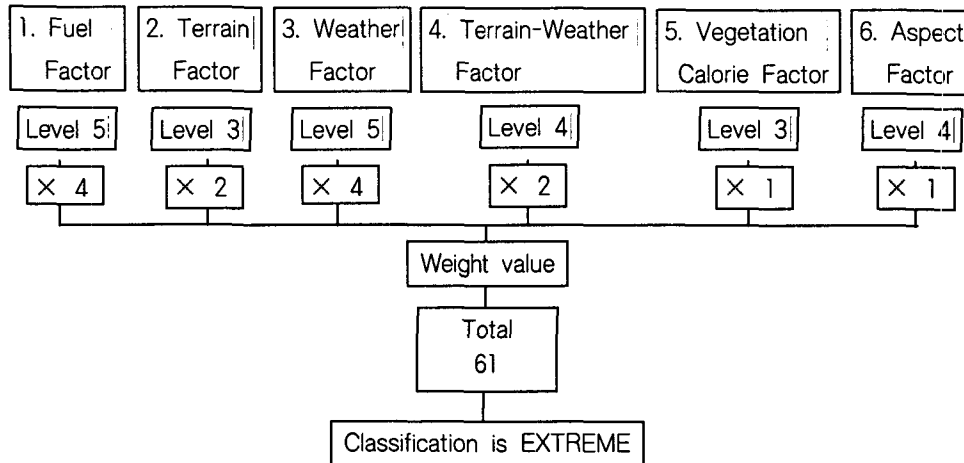


Fig. 8. Wildland Fire Total Hazard Evaluation for Kwangwon Wildland Fire occurs in the 1996 and 2000

4. 결론

산림화재종합위험등급의 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.
 첫째, 산림화재의 종합위험등급을 설정하기 위해 산림화재 발생가능성, 화재 확산속도에 주요한 영향을 미치는 6가지 인자들을 규정하였다.
 둘째, 6가지 인자들에 대한 개별적 위험성을 열분석 실험 및 외국의 산림화재 위험성평가 자료의 고찰을 통해 설정하였다.
 셋째, 개별적 위험성 등급에 대해 가중치를 두어 산림화재 종합위험등급을 개발하였다.
 넷째, 산림화재 종합위험등급에 대해 실제 산불지역에 대한 당시의 위험성을 평가한 결과 Extreme 단계의 위험성수준을 보였으며, 이는 실제 화재의 심각

성과 일치한다고 볼 수 있다.

참고문헌

1. 김동현, 김광일, “지리산 수목분포에 따른 열량분석 및 산불 위험도 평가”, 한국화재·소방학회, 1999년 추계학술대회 논문초록집, 1999.
2. Alexander, M.E. and W.J. De Groot. “Fire behavior in Jack Pine stands as related to the Canadian Forest Fire Weather Index System”, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Poster (with text). 1988.
3. Quintilio, D., G.R. Fahnestock, and D.E. Dube. “Fire behavior in upland jack pine: the Darwin Lake Project” Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-174. 1977.
4. Philips, Clinton B. “Instructions for Zoning Fire Hazard Severity in State Responsibility Area in California”, Resources Agency, California Department of Forestry, State of California, December, 1983.
5. William C.Teie, “Fire Officer’s Hand Book on Wildland Firefighting”, Neotec. 1995.
6. Barrette, Brian, “System for Rating Structural Vulnerability in SRA, Sacramento, California, September, 1999.