

# 산불 열영향 범위 산정을 위한 실험 및 FDS 데이터 비교

김형식 · 강영진\* · 김장환\* · 김경하\*\* · 이병두\*\* · 김정훈\*\*

호서대학교 대학원 안전공학과 · \*호서대학교 안전보건학과 · \*\*국립산림과학원 산림방재연구과  
(2014. 5. 22. 접수 / 2014. 8. 4. 채택)

## Comparison of Experimental and FDS Data for Calculating Heat-Affected Range in Forest Fires

H. -S. Kim · Y. -J. Kang\* · J. -H. Kim\* · K. -H. Kim\*\* · B. -D. Lee\*\* · J. -H. Kim\*\*

Department of Safety Engineering, Graduate School of Hoseo University

\*Department of Safety and Health Engineering, Hoseo University

\*\*Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

(Received May 22, 2014 / Accepted August 4, 2014)

**Abstract :** This research deals with the combustion experiment of pine trees, which are the most representative species in Korea. Experimental data are compared with theoretical ones using Fire Simulation Program(FDS). It is considered that horizontal/vertical temperature distribution and radiant heat influence on adjacent areas in fire scenes. The linear function for separation distance to temperature was drawn by applying Stefan-Boltzmann's law;  $y=112.13133 \times (\sigma T^4)^{-0.52916}$  for calculating the separation distance. In combustion experiment, the radiant heat came to 1.4~1.5kW/m<sup>2</sup> in case of the separation distance by one meter. The numerical values mean that human body show the critical level of pain after one minute without a protective equipment.

**Key Words :** forest fire, combustion experiment, separation distance, radiant heat, FDS

### 1. 서론

우리나라는 국토의 63.7%가 산림으로 이루어져 있으며, 전체 국토의 63.7% 중 침엽수림의 비중이 40.5%를 차지하고 있다. 2011년 산불 피해지 인근 시설의 피해 결과, 숲이 참나무 등 활엽수림일 때는 피해율이 17%였으며, 소나무와 같은 침엽수림에서는 2.6배 높은 45%의 피해를 입은 것으로 조사되었다<sup>1),2)</sup>. 또한, 국내 산불 발생 건수는 최근 10년(2003~2012년) 평균 산불 발생 건수는 387건, 피해면적은 734 ha, 인명피해는 사망 6명, 부상 1명 이었다. 2012년 지역별 산불발생 빈도는 영남지역 18.8%로 가장 많이 발생하였고, 강원도 15.2%으로 나타났다<sup>2)</sup>. 국내에서 발생하고 있는 산불은 대부분 등산객, 성묘객, 무속행위자, 산림약초채취자 등 입산자의 사소한 부주의에 의한 실화가 가장 많으며 그 밖에 논 · 밭두렁 소각, 담뱃불, 군사훈련, 어린이 불장난 등에 의해 발생하고 있다<sup>12)</sup>. 최근 2013년 3월에

발생한 포항산불이 가장 대표적인 산불로 산림 면적은 포항시 전체 67%이며 소나무 임지는 산림의 37%를 차지한다. 방화로 시작된 산불은 풍속 5.7~11.5 m/s의 강풍으로 빠르게 확산되었으며 피해지 대부분이 소나무 단순림으로 산불이 수관화 되면서 빠르게 비산되어 대형산불로 전이되었고 이 산불로 인해 산림 79 ha, 사망을 포함 27명의 인명 피해가 발생, 건물 110동과 차량 8대 등의 물적 피해를 입었다<sup>4),5)</sup>. 또한 2013년 3월에 발생한 울산시 울주군 산불은 야간에 발생하여 헬기 운항이 제한되었으며, 순간풍속 7~15 m/s로 빠르게 확산되어 산불 발생지로부터 5.5 km까지 확대되었다. 쓰레기소각으로 시작된 산불은 산림 280 ha, 주택 37동, 가축 1,457, 농기계 114대의 물적 피해를 입었으며, 3명의 부상자를 발생시켰다<sup>3)</sup>. 현재 산불에 대한 발생 및 피해 저감을 위해 활발한 연구가 진행 중에 있으나 산불로 인한 인접 지역에 대한 열적 영향 및 국내 환경에 적합한 실측 데이터에 대한 연구는 매우 부족한 실정

\* Corresponding Author : Jeong Hun Kim, Tel : +82-41-540-5726, E-mail : kjh0789@hoseo.edu

Department of Safety and Health Engineering, Hoseo University, 20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 336-795, Korea

이다. 산림피해, 인명 피해 및 물적 피해가 증가 되었고, 산림인접지의 가옥, 사찰과 같은 국보급 다양한 문화재가 산불로 인한 소실의 위험성이 높은 것으로 조사되었으며<sup>6)</sup>, 최근 기후변화 등의 원인으로 전 세계적으로 초대형 산불이 자주 발생하여 산불이 국제적 재난으로 부각되고 있다<sup>1)</sup>.

따라서 본 연구에서는 국내 주요 수종인 소나무를 이용하여 산불로 발생하는 복사열이 연소실험 및 화재 시뮬레이션 FDS 측정을 통해 화재가 발생할 경우 열 유속 및 발열온도가 주변에 미치는 범위에 대해 평가하고자 한다. 또한 측정된 열적인자를 통해 산불발생 원으로부터 이격거리에 대한 수식모델을 도출하여 산불발생시 인적·물적 피해를 예방하는데 활용하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연소실험

복사열 및 온도의 실측 데이터 측정을 위한 실험장치는 Fig. 1과 같이 제작 하였으며, 높이 140 cm인 연소실험 장비에 설치된 시료 거치대(90 cm×90 cm)에 소나무를 적재 후 지면으로부터 10 cm 이격시킨 거리에 버너를 설치하여 낙엽 1 kg(189 kW)을 이용한 점화를 실시하였다. 연소 실험에 사용된 측정 장비는 주변의 온도측정을 위해 열전대(K-type) 위치 및 높이를 일정하게 하여 측정된 온도 데이터를 저장하였고, 복사열

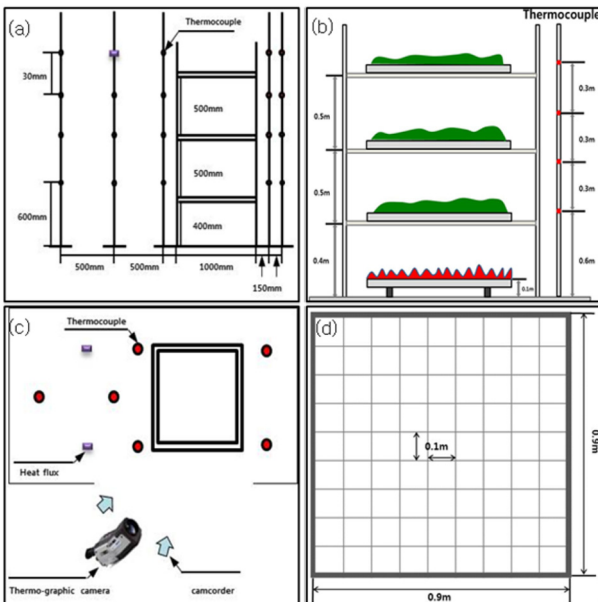


Fig. 1. Experimental Apparatus Described. (a, b) Elevation, (c) Plane, (d) Sample Tray.

측정을 위해 Heat Flux를 사용하였다. 소나무는 자연 상태에서 수집하여 실험 전·후 중량을 측정하였으며, 일정량의 소나무를 20±2℃에서 온도를 유지하도록 설정하여 상온에서 24시간 이상 건조시킨 후 중량을 측정한 결과 함수율은 평균 100~130%로 나타났다.

### 2.2 화재시뮬레이션

FDS는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 출시한 FDS5의 확장 버전으로, 야외 화재전파 및 화재에 기인한 유동 흐름을 CFD(Computational Fluid Dynamics)로 해석하는 프로그램이다. 화염전파 및 화재확산 모사가 가능하며, 해석된 결과는 Smokeview Program에 의해 시각화된다<sup>(7-9)</sup>.

본 연구에서는 FDS를 사용하여 실제 연소실험 데이터 비교 및 실제 실험이 불가능한 거대 규모의 화재현장의 가상 재연 및 특수한 조건을 추가한 가상 실험 등 제한된 실험 환경에 대한 해결 방안을 모색하였으며, 실제 연소실험과 비교하기 위해 FDS에 적용시킨 모델링의 개요는 Table 1과 같다. FDS와 실제 연소 실험의 화염 형상에 대한 분석을 위해 열화상 카메라 및 캠코더로 측정된 데이터와 FDS로 측정된 데이터를 비교한 결과 착화 후 화염의 진행 형상 및 소염 부분까지 유사한 양상을 나타내었다. Table 2는 시간대별 화염의 진행형상이 변화하는 모습이다.

### 2.3 이격거리 산정 수식 도출

이격거리 도출 방법의 경우, 연소 실험에서 측정된 복사열유속 및 온도결과 값과 열량, 온도, 시간 등의

Table 1. Conditions of Simulation

Division	Details
Room Size	5 m × 6 m × 4 m
Combustion	Wood
Density	640.0 kg/m <sup>3</sup>
Specific Heat	2.85kJ/(kg·k)
Conductivity	0.14 w/(m·k)
Emissivity	0.9
Absorption Coefficient	5.0E4 1/m
Heat of Combustion	2.2E4kJ/kg
Heat Release Rate Per Area	200.0kw/m <sup>2</sup>
Flame Start	0.0 Time(s)
Flame Maximum	16~25 Time(s)
Flame End	36.0 Time(s)
Heat flux : 6ea, Thermocouple : 36ea	

Table 2. Image of Ignition & Flame

Time	10s	20s	30s	80s
Camcorder				
Thermo-Graphic Camera				
FDS				

변수를 주어 FDS로 측정된 결과를 비교하여 각 측정값을 회귀분석의 추산 값으로 확인한 후 지수방정식화하여 각각의 실험값을 도출하였다. 이 후, 복사열에 대한 온도 기인 값을 확인 할 수 있는 Stefan-Boltzmann's 법칙을 사용하여 온도에 대한 복사열 및 이격거리의 실험값을 도출하였으며, Stefan-Boltzmann's 법칙의 응용 온도 및 에너지 곡선은 Fig. 2와 같다.

$$R_d = \sigma T^4 \tag{1}$$

여기서,  $R_d$ 는 상온·상압에서의 열유속 값이며,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann's 상수( $5.67 \times 10^{-8} \sim 11 \text{ kW/m}^2$ )로 표현되고  $T$ 의 경우 물체의 표면온도( $K=273+t$ )를 의미한다.

또한 Table 3에서 나타낸 복사열 강도에 따른 영향에 대한 평가 자료를 근거로 이격거리에 대한 정량적 평가를 실시하였다.

Table 3. Recommended Design of Total Radiation<sup>(10)</sup>

Permissible Design Level(K)		Conditions
(Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	
5000	15.8	Heat intensity on structures and in areas where operators are not likely to be performing duties and where shelter from radiant heat is available (for example, behind equipment).
3000	9.46	Value of K at design flare release at any location to which people have access (for example, at grade below the flare or a service platform of a nearby tower); exposure should be limited to a few seconds, sufficient for escape only.
2000	6.31	Heat intensity in areas where emergency actions lasting up to 1 minute may be required by personnel with out shielding but with appropriate clothing.
1500	4.73	Heat intensity in areas where emergency actions lasting several minutes may be required by personnel without shielding but with appropriate clothing
500	1.58	Value of K at any location where personnel with appropriate clothing may be continuously exposed

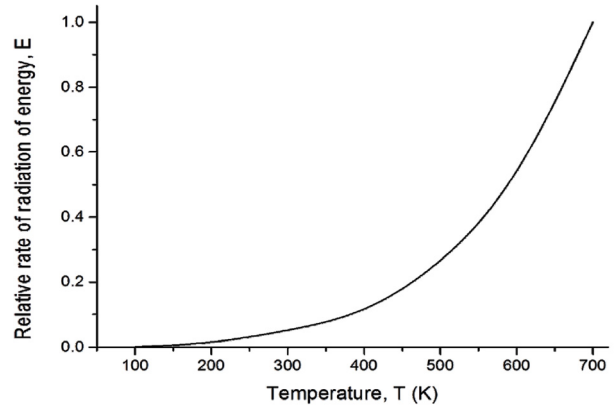


Fig. 2. Stefan-Boltzmann's law.

### 3. 결과

#### 3.1 연소실험 결과

연소실험을 위해 제작된 실험장치를 사용하여 총 3회의 연소 실험을 실시하였으며, 실험장치 및 장비의 적합성을 평가하기 위하여 예비 실험을 1회 실시 하였다. 이격거리에 대한 측정값의 경우 10 cm, 40 cm, 70 cm, 100 cm의 거리로 Thermocouple를 설치하여 측정하였다.

2차 연소 실험의 경우, 점화 후 32초가 경과되었을 때 10cm 이격된 Thermocouple에서 최고온도인 782°C가 측정되었으며, 연소진행 130초 후 100°C 이하로 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 3차 연소 실험 온도 측정 결과는 점화 27초 후 10cm 이격된 Thermocouple에서 최고온도 1028°C로 측정되었으며, 연소진행 120초 후 100°C 이하로 감소되었다. Fig. 3은 각 부분 별 온도에 대한 결과를 나타낸 것이다.

Heat Flux 측정 결과 2차 연소실험에서 100초 이후 1.7 kW/m<sup>2</sup>으로 측정되었으며, 3차 연소 실험은 37초에서 최고 2.4 kW/m<sup>2</sup>으로 측정되었다.

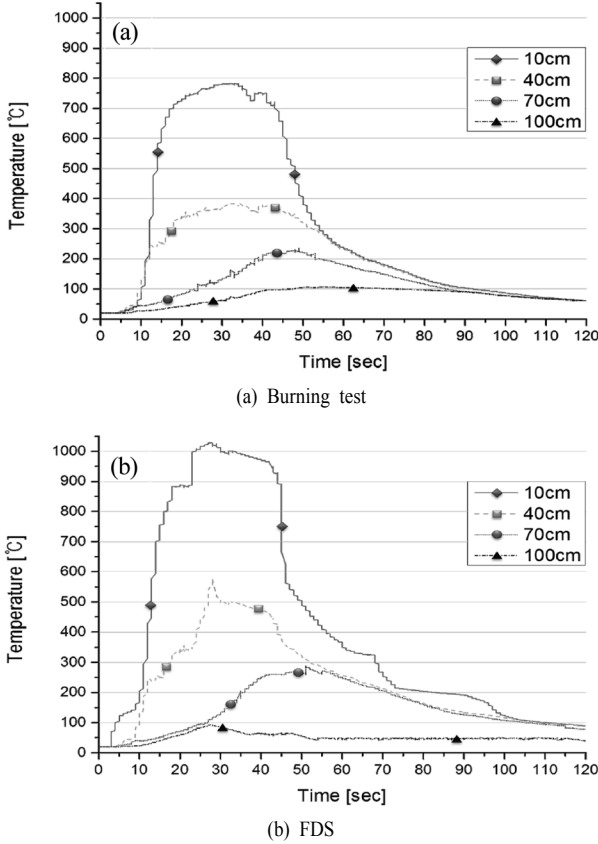


Fig. 3. Separation distance by comparing the temperature.

### 3.2 FDS 측정 결과 비교

연소실험 결과와 FDS 측정값을 비교한 결과, Heat Flux는 실제 실험에 따른 민감도에 대한 차이로 인해 약간의 노이즈가 발생되나 FDS와 비교 시 유사한 양상을 나타내었다. Fig. 4는 Heat Flux 결과를 비교한 것이다.

Fig. 5는 연소실험과 FDS의 이격거리별 온도 변화를 나타내었다. 연소실험은 최대온도 782°C로 나타났으며, FDS의 최대온도는 831°C로 나타났다. 연소 시작 10초

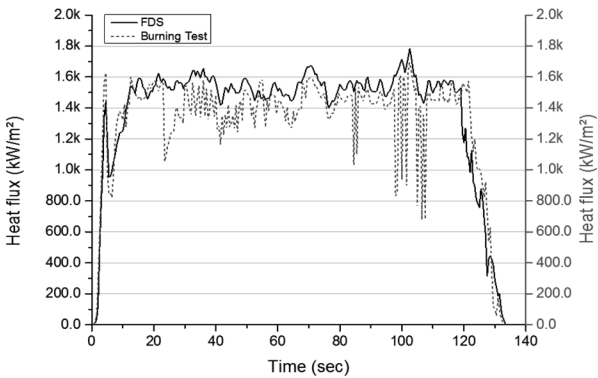


Fig. 4. Comparison of Burning test & FDS results.

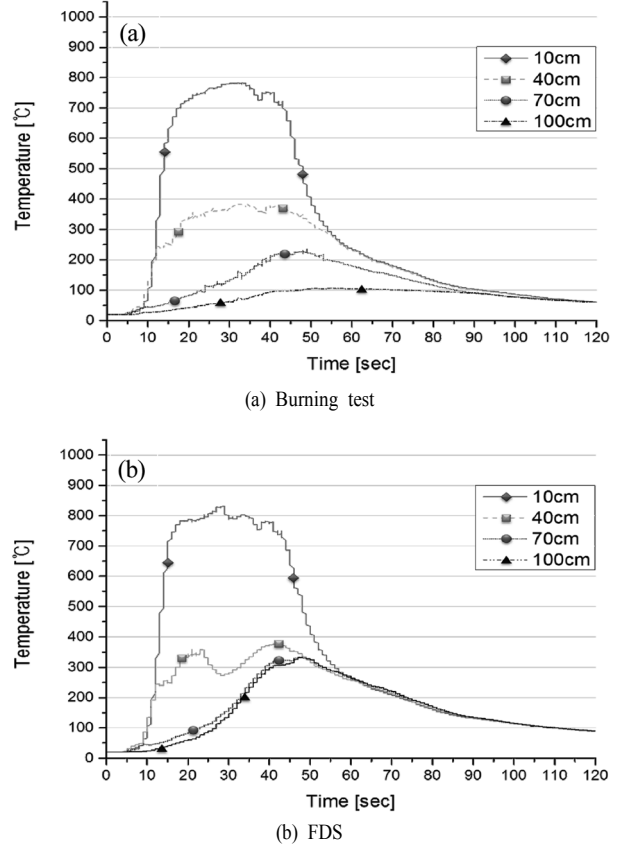


Fig. 5. Comparison of Burning test & FDS Temperature.

이후부터 급격하게 온도가 상승하였으며, 대략 4분의 1의 수치가 측정되었다. 비교결과 최대온도 및 온도의 상승, 감소 구간이 유사한 경향을 나타내었다.

연소실험과 FDS측정 결과 비교를 통해 연소 실험이 불가능한 경우 화재시뮬레이션 적용을 통해 대형화재 및 대형산불에 적합한 수치해석을 적용하여 대부분의 산불과 같이 예측이 가능할 것으로 사료된다.

### 3.3 이격거리 산정

이격거리는 대형산불로 확대되는 것을 방지하고 인적·물적 피해를 최소화하기 위해 필요한 최소 거리이다. 산림으로부터 산불발생시 이격거리 산정 수식을 도출하기 위해 Fig. 6과 같이 연소 실험 및 FDS의 측정 결과를 활용하여 거리별 온도 변화를 확인 후, Stefan-Boltzmann's 법칙을 사용하여 측정된 온도를 Heat Flux로 환산하여 이격거리에 따른 온도 및 Heat Flux 수치를 Table 4와 같이 정리하였다.

정리된 수치를 회귀분석을 통해 지수방정식화 하여 실험식을 도출하였다. 환산된 결과를 회귀분석에 적용하기 위해 Fig. 7과 같이 도식화 시켜 분석을 실시하였다.

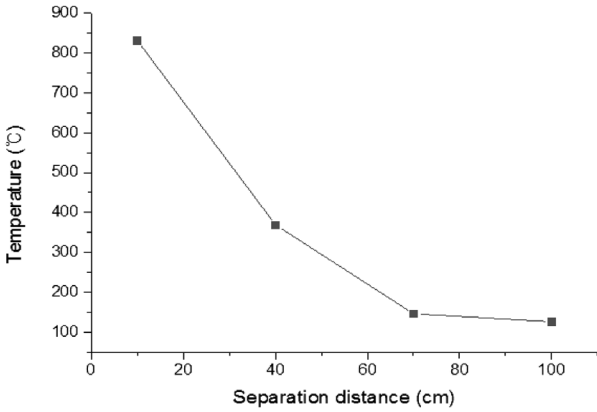


Fig. 6. Separation distance by the temperature change.

Table 4. Temperature and Heat Flux according to the distance

Separation distance(cm)	Temperature(°C)	Heat flux (kW/m <sup>2</sup> )
10	831	84.3
40	369	9.6
70	146	1.7
100	125	1.4

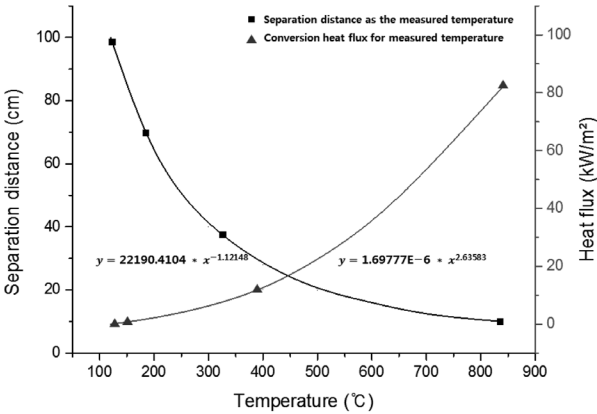


Fig. 7. Pattern of Regression analysis and Heat flux.

그 결과를 토대로 식 (2)와 같이 온도와 이격거리에 대한 실험식을 도출하였다.

$$y = 22190.4104 \times x^{-1.12158} \quad (2)$$

또한, 온도에 대한 Heat Flux의 실험식은 식 (3)과 같이 확인되었다.

$$y = 1.69777 \times x^{2.63583} \quad (3)$$

제시된 식 (3)과 같이 온도에 따른 이격거리 및 Heat Flux에 대한 상관관계를 확인한 후 Heat Flux에 따른

이격거리에 대한 회귀분석을 통해 식 (4)와 같은 실험식을 도출하였다.

$$y = 112.13133 \times x^{-0.52916} \quad (4)$$

여기서, Heat Flux 수치에 따른 영향에 대한 자료를 근거로 위험성을 판정 할 수 있다. 또한, 식 (4)의 실험식의 변수인 x값에 Stefan-Boltzmann's 법칙을 적용하여 식 (5)와 같이 온도 측정값에 대한 이격거리를 최종 1차방정식으로 도출할 수 있다.

$$y = 112.13133 \times x^{-0.52916} \quad (4)$$

여기서,  $x = R_d = \sigma T^4$ 을 적용하였다.

$$y = 112.13133 \times (\sigma T^4)^{-0.52916} \quad (5)$$

$$= 112.13133 \times [5.67 \times 10^{-11} (273 + t)^4]^{-0.52916}$$

$$= 206.6529726 + (296.2927071 \times 10^5) t^4$$

$$\therefore \text{이격거리} = 206.65 + (296.29 \times 10^5) t^4 \quad (6)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 산불 발생원으로부터의 이격거리 산정을 실시하여 산림으로부터 산불발생시 피해가 예상되는 이격거리를 도출하였다.

1) 연소 실험 및 FDS를 통해 얻어진 결과를 활용하여 식 (4)와 같이 최종 1차 방정식으로 측정 온도대비 이격거리 산정에 대한 근거를 제시할 수 있다.

2) 화재 시뮬레이션과 실제 연소 실험 데이터를 비교 분석한 결과 화염의 진행형상 및 소염부분까지 유사한 형태를 보였다. 이로 인해 실제 화재 시뮬레이션을 통해 대형산불 예측 및 예방이 가능할 것으로 판단된다.

3) Heat Flux에 대한 전문적 영향 분석 자료와 연소 실험 결과의 분석된 데이터를 확인 하였다. 그 결과 장기간 신체 노출 시 불편함을 느끼며, 복사열 1.75 kW/m<sup>2</sup>의 경우 1 m 이격된 경우 1분 후부터 통증을 느끼기 시작한다는 결과를 통해 연소 실험의 복사열 측정 결과 1.4~1.7 kW/m<sup>2</sup>로 측정됨으로써, 최소 1.5 m 이상 이격이 필요할 것으로 사료된다.

**감사의 글:** 이 논문은 국립산림과학원 산불지도 작성 알고리즘 개발 및 제작기법 연구(2013년)에 의하여 연구되었음

## References

- 1) Korea Forest Service, "Statistics Annual Report of Forest Fires", Korea Forest Research Institute, 2012.
- 2) Korea Forest Service, "Statistical Yearbook of Forestry", No. 43, 2013.
- 3) Korea Forest Service, "Statistics Annual Report of Forest Fires", Korea Forest Research Institute, 2013.
- 4) M. S. Won, K. H. Kim, S. W. Lee, "A Study on Damage Characteristics and Development of Burn Severity Evaluation Methods", Korea Forest Research Institute, 2013.
- 5) W. H. Koo, J. H. Shin, M. H. Back, "Research on Occurrence Case of Urban Forest Fires", Fall Conference of Korean Institute of Fire Sci. & Eng, No. 21, pp. 157~158, 2013.
- 6) D. H. Kim, J. H. Lee, Y. M. Sun, K. I. Kim, "Method of Qualitative Hazard Assessment of Forest Fire for the Major Temple in Domestic using by Checklist", Proceeding of 2011 Korean Institute of Fire Science & Engineering Spring Conference, pp. 432~435, 2011.
- 7) Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication, pp. 1019~1025, 2007.
- 8) Kevin McGrattan, Glenn P. Forney, "Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide", NIST, 2004.
- 9) T. H. Kim, "A Study on the Thermal Radiation Effects by Various Wind Speeds Affecting the Growth of Wildland Fire", Seoul National University of Science & Technology, 2012.
- 10) API Recommended Practice 521 Fourth Edition, "Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems", American Petroleum Institute, 1997.
- 11) J. H. Kim, E. S. Kim and D. H. Kim, "The Study on Reignition Characteristics of Forest Fire", Fire Research Conference, No. 22, 2012.