

# 정압기지에 대한 산불화재 영향평가 - Effect Evaluation of Forest Fire on Governor Station -

장 서 일 \*

Jang Seo Il

차 순 철 \*\*

Char Soon Chul

강 경 식 \*\*\*

Kang Kyung Sik

## Abstract

This Study is to suggest a method of effect evaluation of forest fire on governor station in shrub land. Theoretically, to evaluate effects of forest fire, it is combined that Spread Rate of Forest Fire, Flame Model, and Thermal Radiation Effects Model; i.e. a travel time of forest fire is calculated by Spread Rate of Forest Fire, fire-line intensity is calculated by Flame Model, and effects of fire-line intensity is affected by Thermal Radiation Effects Model. With the aforementioned method, we could carry out the effect evaluation of forest fire on governor station in shrub land and could distinguish scenarios to need protection plan from all scenarios.

**Keywords:** Forest fire, Evaluate effects, Spread Rate of Forest Fire, Governor station, Flame Model

## 1. 서 론

일반적으로 산불의 거동은 산불확산속도(spread rate)와 산불라인의 강도(fire-line intensity)로 설명된다. 산불확산속도 예측의 경우, 유럽에서는 일반적으로 Rothermel의 모델[1]을 사용하고 있으며, 이 모델은 관목(shrub) 지역에 한해서 적용할 수 있다[2]. 또한 여러 가지 경험적인 모델이 현재 개발되고 있고 있는 실정이다. 산불라인의 강도

---

\* 명지대학교 리서치파크 전임연구원 (공학박사)

\*\* 명지대학교 박사과정

\*\*\* 명지대학교 안전경영연구소 소장

2007년 1월 접수; 2007년 2월 수정본 접수; 2007년 4월 게재확정

는 직접적으로 화염의 크기와 억제 가능성에 관련이 있다[3,4].

산불의 원인으로서는 우리나라의 경우, 산림청 자료[5]에서 입산자 실화가 856건(41.3%)으로 가장 많았으며 논·밭두렁 소각 397건(19.2%), 쓰레기 소각 176건(8.5%), 담뱃불 실화 174건(8.4%), 성묘객 실화 138건(6.7%), 어린이 불장난 65건(3.1%), 기타 265건(12.8%) 등이었다. 그리고 최근 5년간 발생한 2천618건의 산불을 분석한 결과 3-5월에 69.0%인 1천806건의 산불이 발생했으며, 12-2월 561건(21.4%), 9-11월 193건(7.4%), 6-8월 58건(2.2%)이 각각 발생하였고, 요일별로는 일요일에 501건(19.1%), 화요일 351건(13.4%), 월요일 337건(12.9%), 금요일 329건(12.6%), 목요일 326건(12.5%), 토요일 325건(12.4%), 수요일 283건(10.8%), 공휴일 166건(6.3%) 이었다. 또 발생 시간대별로는 오후 2~7시 1천339건(51.1%), 오전 11시~오후 2시 815건(31.1%), 오후 7시~다음날 오전 6시 326건(12.5%), 오전 6~11시 138건(5.3%)의 산불이 난 것으로 분석됐다.

이와 같은 산불화재의 경우 현재까지 각 모델별로 즉, 산불확산속도모델과 산불라인의 강도모델 등으로 연구가 진행되고 있으나, 산불화재에 의해 가스공급시설 등과 같은 구조물에 대한 영향을 체계적으로 평가할 수 있는 가이드라인이나 방법은 아직 개발이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 우리나라의 관목지역 내에 있는 가스공급시설인 정압기지를 대상으로 산불화재의 영향평가 방법을 제시하자 하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 Spread Rate of Forest Fire

Rothermel의 모델은 산불의 연료가 되는 나무들의 형태 및 크기가 다양한 불균일 혼합물로 구성되어 있는 연료들을 수용할 수 있게 변형된 식들이다. 이 모델은 건조 연료량, 연료의 높이, 연료의 표면적과 부피의 비 등 많은 입력변수를 결정하여야 하는 어려움이 존재하고 있다.

따라서 현재 여러 연구자들이 사용하기에 많은 입력변수를 결정하여야 하는 Rothermel의 식을 대체하기 위한 여러 연구를 수행하고 있으며, 이중에서 Fernandes[6]는 관목지역 내에서 산불확산 속도를 예측에 관한 연구결과를 발표하였는데, 비교적 Rothermel의 식보다는 결정하여야 하는 입력변수가 간단한 특징이 있다.

식 (1)은 Fernandes가 발표한 식으로서 본 연구에서 채택하였다.

$$R = aU^b \exp(-cM_d) \quad (1)$$

여기서, R은 산불확산속도[m/min], U는 2m에서 측정된 바람속도[km/h],  $M_d$ 는 수분함유량[%], 그리고 a, b, c는 상수로써 각각 3.258, 0.958, 0.111이다.

## 2.2 Flame Model

Chetehouna 등[7]은 화염과 상승 가스속도를 실험을 통해 특징을 결정하는 연구를 수행하였다. 이들은 실험결과를 해석하는데 있어서 화염의 특징을 설명하기 위해 첫 번째 모델(화염을 평판형 표면으로 고려함)과 두 번째 모델(복사 전달식을 재해석함)로 해석한 결과 큰 차이점이 없는 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 첫 번째 모델을 채택하였다.

복사열 플럭스  $\varphi_i$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi_i = B \sum_{j=1}^3 (T_j^4 - T_i^4) F_{i-j} \quad (2)$$

여기서, B는 Stefan Boltzman's 상수,  $T_j$  는 매체 j의 온도,  $T_i$ 는 i 면의 온도, 그리고  $F_{i-j}$  는 view factor이다.

완전히 밀폐된 경우에는  $\sum_{j=1}^3 F_{i-j} = 1$ 이므로, 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_i(t, h_f, \alpha_f, \varphi_0, R) = & F_{i-f}(t, h_f, \alpha_f, R) \varphi_0 \left[ 1 - \left( \frac{T_i}{T_f} \right)^4 \right] \\ & - B [1 - F_{i-f}(t, h_f, \alpha_f, R)] (T_i^4 - T_a^4) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, t는 시간,  $h_f$ 와  $\alpha_f$ 는 화염의 높이와 각도,  $\varphi_0 = BT_f^4$ , 그리고 R은 산불확산 속도로서 상수로 취급한다.

view factor는 다음과 같다.

$$F_{1-f}(t, h_f, \alpha_f, R) = \frac{1}{\pi} \int_{-w}^w \int_0^{h_f} \frac{(x-x_f)[(x-x_f)-(y-y_f)\tan\alpha_f]}{[(x-x_f)^2 + (y-y_f)^2 + (z-z_f)^2]^2} dy_f dz_f \quad (4)$$

$$F_{2-f}(t, h_f, \alpha_f, R) = \frac{1}{\pi} \int_{-w}^z \int_0^{h_f} \frac{(z-z_f)[(x-x_f)-(y-y_f)\tan\alpha_f]}{[(x-x_f)^2 + (y-y_f)^2 + (z-z_f)^2]^2} dy_f dz_f \quad (5)$$

$$F_{3-f}(t, h_f, \alpha_f, R) = \frac{1}{\pi} \int_z^w \int_0^{h_f} \frac{(z-z_f)[(x-x_f)-(y-y_f)\tan\alpha_f]}{[(x-x_f)^2 + (y-y_f)^2 + (z-z_f)^2]^2} dy_f dz_f \quad (6)$$

여기서,  $xf = Rt + yf \tan(\alpha_f)$ , W는 대상물의 절반폭이다.

## 2.3 Thermal Radiation Effects Model

장치나 구조물에 대한 열복사의 영향은 가연성 여부 또는 노출 지속시간과 크기에

의존한다. 목재의 재료는 연소 때문에 쓸모없이 되어버릴 수 있고, 반면에 철 재료는 항복응력(Yield Stress)의 열적 저하 때문에 못쓰게 된다. 정상하중하에서 철구조물은 온도 500~600oC 상승할 때 급격히 약해진다. 그러나 콘크리트 구조물은 더 오래 남을 것이다. 구조물에 대한 화염충돌은 열복사보다 더 심각하다. World Bank[8]에서는 대형화재의 관찰에 의해 구조물 등의 피해정도를 제시하였는데 이를 <표 1>에 나타내었다. 또한 TNO[9]에서는 물질과 복사강도에 따른 기준을 <표 2>와 같이 제시하였다.

<표 1> 복사강도와 피해 형태

Thermal Radiation Intensity		Type of Damage
Btu/hr/ft <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	
11,890	37.5	공정장치에 손상을 야기 시키기에 충분함
7,930	25.0	오랫동안 노출에 의해 화염 없이 목재를 점화하기 위해 필요한 최소 에너지
3,960	12.5	플라스틱 튜브를 녹이거나 화염 없이 목재를 점화시키기 위해 필요한 최소 에너지

<표 2> 물질과 복사강도에 따른 기준

Material	Critical Radiation Intensity*(kW/m <sup>2</sup> )	
	Damage Level 1**	Damage Level 2***
철	100	25
목재	15	2
합성물질	15	2
유리	4	-

\* Defined as the radiation intensity that can cause damage from long-term exposure.

\*\* Damage Level 1 : Surfaces of exposed materials catch fire and structural elements collapse or rupture.

\*\*\* Damage Level 2 : Surfaces of exposed materials experience serious discoloration as well as paint peeling, and structural elements undergo substantial deformation

### 3. 시나리오 설정

산불화재 영향평가를 위한 시나리오들은 <표 3>에 나타낸 바와 같이 산불위험경보와 산불경계경보 수준으로 구분하고, 화염의 온도는 약 800oC, Ti와 Ta의 차는 무시할 정도로 작은 것으로 가정하여 설정하였다.

정압기지는 Control Room과 Valve Station으로 구성되어 있으며, 산불화재를 대비

하여 Safety Zone이 형성되어 있다. Safety Zone은 산불화재 발생 시 정압기지의 설비를 보호하기 위한 안전지대로 산불의 확산을 방지하고, 화염의 접근을 차단한다. 본 연구에서는 Safety Zone의 거리변화를 고려하여, 설정된 시나리오는 총 12 가지이다.

<표 3> 산불경보 발령 조건

구 분	경보발령요령
산불경계경보	위험지수 : 61~80    실효습도 : 40~60%    풍속 : 5m미만/초
산불위험경보	위험지수 : 81~100    실효습도 : 40%이하    풍속 : 7m이상/초

<표 4> 산불경계 상황에서의 시나리오

시나리오	내 용
S1	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 5m/s*, 습도는 40% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 40m가 형성 되어 있으며, 발화원은 Safety Zone에서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S2	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 5m/s*, 습도는 40% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 20m가 형성 되어 있으며, 발화원은 Safety Zone에서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S3	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 5m/s*, 습도는 40% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 10m가 형성 되어 있으며, 발화원은 Safety Zone에서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S4	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 5m/s*, 습도는 60% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 40m가 형성 되어 있으며, 발화원은 Safety Zone에서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S5	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 5m/s*, 습도는 60% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 20m가 형성 되어 있으며, 발화원은 Safety Zone에서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S6	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 5m/s*, 습도는 60% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 10m가 형성 되어 있으며, 발화원은 Safety Zone에서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.

\* 산불경계경보는 5m/s 미만이지만, 최대값에 근사한 값을 산출하기 위해서 5m/s로 가정하여 적용함.

&lt;표 5&gt; 산불위험 상황에서의 시나리오

시나리오	내 용
S7	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 7m/s, 습도는 40% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 40m가 형성 되어 있으며, 발화원은 시설과 Safety Zone의 거리를 합쳐서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S8	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 7m/s, 습도는 40% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 20m가 형성 되어 있으며, 발화원은 시설과 Safety Zone의 거리를 합쳐서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S9	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 7m/s, 습도는 40% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 10m가 형성 되어 있으며, 발화원은 시설과 Safety Zone의 거리를 합쳐서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S10	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 7m/s, 습도는 20% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 40m가 형성 되어 있으며, 발화원은 시설과 Safety Zone의 거리를 합쳐서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S11	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 7m/s, 습도는 20% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 20m가 형성 되어 있으며, 발화원은 시설과 Safety Zone의 거리를 합쳐서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.
S12	입산자 실화(소각, 담뱃불 실화 등)에 의해 산불이 발생하고, 이때 대기 조건은 풍속은 7m/s, 습도는 20% 이었다. 가스공사 시설 주변의 Safety Zone은 10m가 형성 되어 있으며, 발화원은 시설과 Safety Zone의 거리를 합쳐서 50m 이격된 거리에서 산불이 발생되었다.

#### 4. 결과 및 고찰

각 시나리오에 대해서 영향평가를 실시한 결과는 <표 6>에 나타내었다. 시나리오에서 산불경계 상황보다 풍속이 강한 산불위험 상황이 매우 높은 위험성을 나타내었으며, 습도의 영향은 산불확산속도에 영향을 미치지만, 복사열에 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다. Safety Zone의 거리가 짧을수록 매우 높은 위험성을 나타내었으며, 풍속, 습도, Safety Zone 거리 중에서 Safety Zone의 거리가 구조물의 위험성에 매우 민감한 매개변수로 평가되었다.

&lt;표 6&gt; 시나리오에 따른 산불확산속도와 산불라인의 강도

시나리오		산불확산속도 (m/min)	Safety zone 까지 도달시간(min)	복사열(kW/m <sup>2</sup> )	
				Control Room	Valve Area
산불경계 상황	S1	0.61	16.32	20.32	58.84
	S2	0.16	48.97	39.12	121.85
	S3	0.61	65.29	59.31	192.76
	S4	0.07	150.28	20.32	58.84
	S5	0.07	450.84	39.12	121.85
	S6	0.07	601.12	59.31	192.76
산불위협 상황	S7	0.85	11.82	86.82	124.60
	S8	0.85	35.47	473.00	655.88
	S9	0.85	47.30	2750.93	3617.64
	S10	7.79	1.28	86.82	124.60
	S11	7.79	3.85	473.00	655.88
	S12	7.79	5.14	2750.93	3617.64

시나리오 중에서 S1과 S4 즉, 산불경계 상황인 풍속 5m/s, 습도 40과 60%에서 Safety Zone이 40m일 때를 제외하고는 전 범위에서 공정장치에 손상을 야기 시키기에 충분한 복사에너지가 형성되는 것으로 평가되었다.

또한 전범위에서 철이 손상되는 것으로 평가되었다. 따라서 Safety Zone의 거리를 평가하여 방호대책을 수립할 필요가 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 우리나라의 관목지역 내에 있는 가스공급시설인 정압기지를 대상으로 산불화재의 영향평가 방법을 제시하자 하였다.

이론적으로 1. Spread Rate of Forest Fire, 2. Flame Model, 3. Thermal Radiation Effects Model을 결합하여 평가할 수 있었다. 즉, 산불확산속도모델에서는 대상물까지 산불이 이동하는 시간 등을, 화염모델에서 산불의 복사에너지, 영향모델에서는 산출된 복사에너지에 대한 영향을 각각 평가할 수 있었다.

이상과 같은 방법으로 산불에 대한 영향평가를 가스공급설비인 정압기지에 대해서 수행할 수 있었으며, Safety Zone변화에 대한 방호대책을 수립하여야 할 시나리오들을 판별해 낼 수 있었다.

## 6. 참고 문헌

- [1] Rothermel, R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-115 Intermt. For. and Range Exp. Stn. Ogden, 1972.
- [2] Albini, F.A., Computer-based models of wildland fire behaviour: a user's manual. USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1976.
- [3] Byram, G.M., Combustion of forest fuels. In: Davis, K.P. (Ed.), Forest Fire Control and Use. McGraw-Hill, New York, 1959. pp. 61-89.
- [4] Andrews, P.L., Rothermel, R.C., Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-131, Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, 1982.
- [5] 연합뉴스, 2002-02-04
- [6] Paulo A. Martins Fernandes, "Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal", Forest Ecology and Management, 144, 67-74 (2001).
- [7] K. Chetehouna, O. Sero-Guillaume, A. Degiovanni, "Identification of the upward gas flow velocity and of the geometric characteristics of a flame with a specific thermal sensor", International Journal of Thermal Sciences, 44, 966-972 (2005).
- [8] World Bank. Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques. ed. P. J. Kayes. Washington, DC: Office of Environmental and Scientific Affairs, World Bank, (1985)
- [9] TNO. Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting From Releases of Hazardous Materials. Voorburg, The Netherlands: The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, (1992)



## 저 자 소 개

장 서 일 : 명지대학교 리서치파크 전임연구원(공학박사), 관심분야는 정량적 위험성평가, 대기확산모델, 폭발반응, 경제성분석

차 순 철 : 기술사사무소 차스텍이앤씨(주) 대표, 화학장치설비기술사, 화학공장설계기술사, 화공안전기술사, 소방기술사, 가스기술사, 산업안전지도사(화공안전), 관심분야는 플랜트공정설계, 공정시스템의 위험성평가

강 경 식 : 현 명지대학교 산업공학과 교수, 명지대학교 안전경영연구소 소장, 명지대학교 산업대학원 원장, 대한안전경영과학회 회장, 경영학박사, 공학박사

## 저 자 주 소

장 서 일 : 경기도 용인시 처인구 남동 명지대학교 리서치파크

차 순 철 : 서울시 서초구 양재1동 64-2 양재대일빌라 2차 101호

강 경 식 : 경기도 성남시 분당구 정자1동 파크뷰 APT 611동 3103호