

백열전구 복사열에 의한 미송판의 발화 임계거리 및 발화시간 예측

이흥수 · 김두현*

한국화재보험협회 방재시험연구원 · *충북대학교 안전공학과
(2016. 1. 26. 접수 / 2016. 3. 18. 수정 / 2016. 4. 15. 채택)

Predicting of Ignition Time and Critical Distance for Ignition of Douglas fir by Radiant Heat of Incandescent Lamp

Heung-Su Lee · Doo-Hyun Kim**

Fire Insurers Laboratories of Korea, Korean Fire Protection Association

*Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received January 26, 2016 / Revised March 18, 2016 / Accepted April 15, 2016)

Abstract : The incandescent lamp is an electric light fixture with a tungsten filament heated to a high temperature, by passing an electric current through it, until it glows with visible light. The hot filament is protected from oxidation with a glass bulb that is filled with inert gas. The incandescent lamp has fire risk when combustible materials are close to its glass bulb. Because its lamp has the property which converts 90~95 percents of the electric power to heat energy. 2015 national fire statistics show that fires caused by lighting fixtures were 652 cases, and incandescent lamps(44 cases) and halogen lamps(53 cases) accounted for 15 percents in those of high heating light fixtures. Since incandescent lamp fires account for about 45 percents in the high heating light fixture, we could not overlook the fire risks by the incandescent lamp. Although many studies related with those have been conducted, incandescent lamp fires are continuously occurred. This study was carried out to study the fire risk of ignition of wood due to radiant heat of incandescent lamp. Radiant heat flux of the incandescent lamp was predicted by applying point source model, and critical distance for ignition of wood was calculated by applying integral model. The results from this study could applied to fire prevention activities related to light bulb, and it could be used in fire cause investigations related to radiant heat of incandescent lamp.

Key Words : incandescent lamp, radiant heat, point source, integral model, fire

1. 서론

백열전구는 유리구 속에 텅스텐 필라멘트를 봉입하고 불활성 가스를 넣어 빛을 내는 전기조명기구이다. 1879년 토머스 에디슨에 의해 발명되어 인류가 발견한 두 번째 불이라고 불릴 만큼 인류의 삶을 획기적으로 바꾸어 놓았다. 하지만 이러한 백열전구는 전력의 5~10%만을 빛으로 전환하고 대부분 열에너지로 변환되는 특성이 있기 때문에 가연물이 전구에 근접한 장소에서는 복사열 등에 의한 화재위험이 따른다고 할 수 있다. 이와 같은 이유 등으로 정부에서는 효율관리기재 운용규정을 제정하여 2014년부터 150W 이하 백열전구의 생산을 금지하기로 하였으나 200W 이상의 전구는 여전히 사용이 가능한 상태로 남아있어¹⁾ 그에

따른 화재위험은 상존할 것으로 보인다.

2015년 국가화재통계²⁾에 의하면 조명기구에 의한 화재건수는 652건이며, 이들 중에 고발열 기구인 백열전구(44건)와 할로겐램프(53건)에 의한 건수는 97건으로 전체 조명기구 화재의 약 15%를 차지하고 있다. 고발열 조명기구에 의한 화재만을 고려하였을 때에는 백열전구로 인한 화재가 약 45%를 차지하고 있기 때문에 그 위험성을 간과할 수 없는 상태이다. 이에 따라 백열전구 화재와 관련된 많은 연구³⁻⁶⁾가 선행되었으나 조명기구 화재패턴을 통한 원인조사기법이나 화재사례 재현의 실험연구가 대부분이었고, 백열전구의 발열시 주변으로 방열되는 복사열에 의한 가연물의 발화위험성에 대한 연구는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 백열전구 복사열에 의한 가연물의 발화가능성

* Corresponding Author : Doo-Hyun Kim, Tel: +82-43-261-2463, E-mail: dhk@chungbuk.ac.kr
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea

과 관련된 연구를 수행해 보고자 하였다. 백열전구의 복사열유속은 점열원 모델(Point source model)⁷⁾을 적용하여 열원의 열유속을 예측하였으며, 가연물의 최소 발화가능 임계거리 및 발화시간을 예측하기 위하여 적분 모델(Integral model)⁸⁾을 적용하였다. 일반적으로 점열원 모델은 화염으로부터 방열되는 복사열유속을 예측하기 위한 이론인데 이것을 이용하여 백열전구에서 방사되는 열유속을 계산하고 가연물의 발화 임계거리를 도출해 보고자 하였다.

본 연구를 통해 도출된 결과는 조명기구와 관련된 화재예방활동에 적용할 수 있으며, 백열전구 또는 이와 유사한 구형 발열체가 화재원인으로 판단되는 화재 현장조사 등에도 활용할 수 있을 것이다.

2. 적용이론

2.1. 점열원 모델

점열원 모델은 Modak에 의해 제시된 이론으로서 열원으로부터 주변으로 방사되는 복사열유속을 예측해 낼 수 있는 모델이다. 이 모델은 열원을 점으로 가정하고, Fig. 1과 같이 점열원에서 복사열이 등방성으로 방사되는 것을 전제로 하고 있다. 백열전구에 이 모델을 적용하는 경우 P 용량의 전구에서 D 위치로 복사되는 열유속은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$q'' = \frac{P_t \eta}{4\pi D^2} \quad (1)$$

여기서 q'' 는 복사 열유속(kW/m^2), P_t 는 백열전구의 용량(kW), η 는 복사율, D 는 열원에서 목표물까지의 이격거리(m)이다.

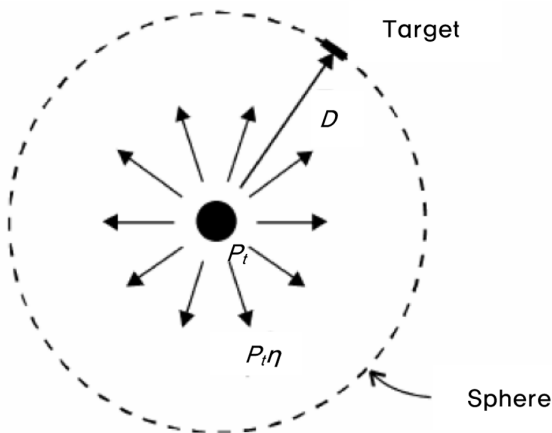


Fig. 1. Schematic of point source model.

2.2. 적분 모델

목재 발화에 대한 적분모델은 복사열원에 기인한 물질 표면의 복사 발화를 가정하여 Quintiere가 개발하였다. 이 적분모델이 성립되기 위한 가정은 다음과 같다.

- (a) 물질 표면의 온도가 임계값에 도달했을 때 발화한다(T_{ig}).
- (b) 고체는 발화될 때까지 불활성이다.
- (c) 고체는 무한히 두껍다.

Fig. 2는 적분모델의 발화 시나리오를 보여주고 있으며, 여기서 q_i'' 는 사고열유속(kW/m^2), T_s 는 표면온도(K), T_{ig} 는 발화온도(K), T_0 는 주위온도(K), δ 는 깊이(m)를 나타낸다.

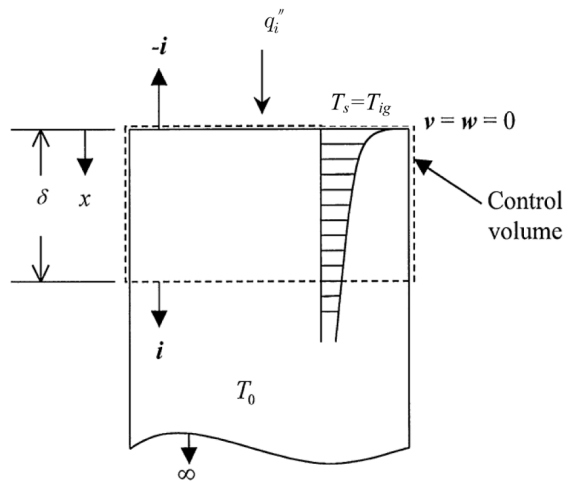


Fig. 2. Integral model ignition scenario.

목재가 발화될 때의 사고 열유속과 대류 및 복사 열손실을 고려하면 주어진 t_{ig} 시간에서 전체 열유속 $q''(t_{ig})$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$q''(t_{ig}) = \alpha q_i'' - \epsilon \sigma (T_{ig}^4 - T_0^4) - h_c (T_{ig} - T_0) \quad (2)$$

여기서 σ 는 스테판볼츠만상수($5.67032 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$), q_i'' 는 사고열유속(kW/m^2), ϵ 는 방사율, α 는 흡수율, h_c 는 대류열전달계수(W/m^2K)이다. 방사율 ϵ 과 흡수율 α 는 목재의 탄화로 인해 1에 근접하기⁹⁾ 때문에 $q''(t_{ig})$ 은 다음과 같이 변환된다.

$$q''(t_{ig}) = q_i'' - \sigma (T_{ig}^4 - T_0^4) - h_c (T_{ig} - T_0) \quad (3)$$

식(3)을 q_i'' 으로 양변을 나누면,

$$\frac{q''(t_{ig})}{q_i''} = 1 - \frac{\sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) + h_c(T_{ig} - T_0)}{q_i''} \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있으며,

$$\beta_{ig} \equiv \frac{\sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) + h_c(T_{ig} - T_0)}{q_i''} \quad (5)$$

라고 하면, $\beta_{ig} \rightarrow 1$ 인 경우

$$1 \equiv \frac{\sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) + h_c(T_{ig} - T_0)}{q_i''} \quad (6)$$

식(6)과 같고, $t \rightarrow \infty$ 인 경우 $q_{cr}'' \equiv q_i''$ 로서

$$q_{cr}'' \equiv \sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) + h_c(T_{ig} - T_0) \quad (7)$$

식(7)과 같이 표현되며¹⁰⁾, 다음과 같은 개념식으로 나타낼 수 있다.

$$q_{cr}'' \equiv q_{irad}'' + q_{conv}'' \quad (8)$$

즉, 임계열유속 q_{cr}'' 은 식(8)과 같이 복사 및 대류 사고 열유속(q_{irad}'' and q_{conv}'')의 합으로 표현될 수 있다.

3. 실험

3.1. 실험장치

백열전구는 투명전구(200 W, 220 V, Korea)를 사용하였으며, 백열전구에서 방사되는 복사 열유속을 측정하기 위한 장비로 열유속계(SBG01, ISO 14934)를 사용하였다. 발화시간과 표면온도를 측정하기 위하여 열전대(K-type, 0.32 mm, KS C 1062)를 미송판 표면에 설치하였다. PC Recorder(MSR128, MSYSTEM, Japan)를 사용하여 열전대로 측정된 온도를 실시간 기록하였다. MSP128의 최대 샘플링 속도는 8개 채널당 50 ms이며, 최대128개 채널을 동시에 감시할 수 있으며, 이때의 최대 샘플링 속도는 128개 채널당 50 ms이다. Fig. 3은 실험장치의 구성이다.

3.2. 실험재료

본 연구에서는 건축자재로 널리 사용되고 있는 미송판을 준비하여 100 mm × 100 mm × 20 mm 크기로 재단하였다.

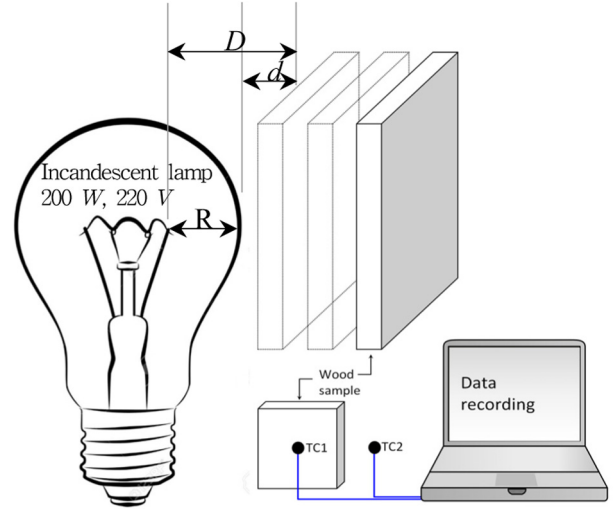


Fig. 3. Experimental setup.

3.2.1. 함수율 측정

함수율은 미송판을 105°C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시험목의 중량을 4 h 간격으로 더 이상 중량 변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식을 이용하여 계산하였다¹¹⁾.

$$MC = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad (9)$$

여기서, MC(Moisture content)는 함수율(%), W는 건조 전 미송판의 중량(g), W₀는 완전 건조시킨 시료의 중량을 나타낸다. 이를 통해 확인한 미송판의 함수율은 4.02%였다.

3.2.2. 미송판의 발화온도

미송판은 함수율이 증가함에 따라 발화온도가 상승하고 이와 함께 발화시간도 지연되는 것으로 알려져 있는데¹²⁾, 본 연구에서는 4.02%의 함수율을 갖는 미송판에 대한 발화온도를 M.J. Spearpoint와 D. Hopkins 등¹³⁻¹⁵⁾이 수행한 콘칼로리미터 방식에 의해 측정해 보고자 하였다. 우선 콘칼로리미터의 콘히터 복사열에 의해 목재가 발화되는 온도를 측정하기 위해 열전대를 목재표면에 설치하고 복사열유속 변화에 따른 발화온도를 기록하고 평균 발화온도를 구하였다. Fig. 4는 다양한 복사열유속에 의한 미송판의 발화온도 측정값이다.

이를 통해 시험재료로 사용되는 미송판의 외부 복사열에 의한 발화온도를 예측하였으며, 측정된 발화온도의 평균값은 393.73°C임을 확인할 수 있었다.

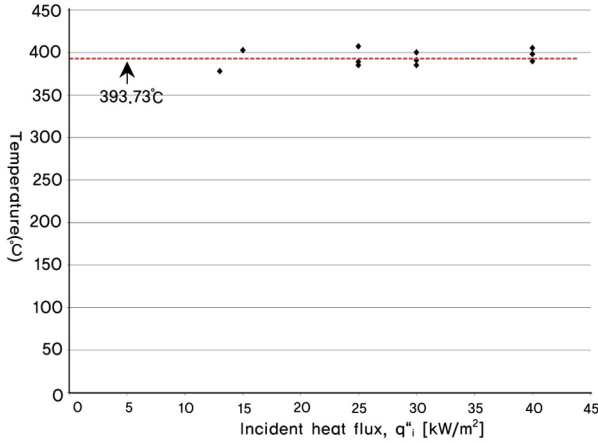


Fig. 4. Predicted ignition temperatures for given incident heat fluxes for douglas fir.

3.2.3. 미송판의 임계열유속

임계열유속은 외부 복사열에 노출된 시편이 발화되는데 필요한 최소 복사열로 정의되며, 콘칼로리미터 (CONE 2A, ATLAS, US)를 사용하여 임계열유속을 측정하였다. Fig. 5는 외부 복사열 변화에 따른 미송판의 임계열유속을 보여주고 있다.

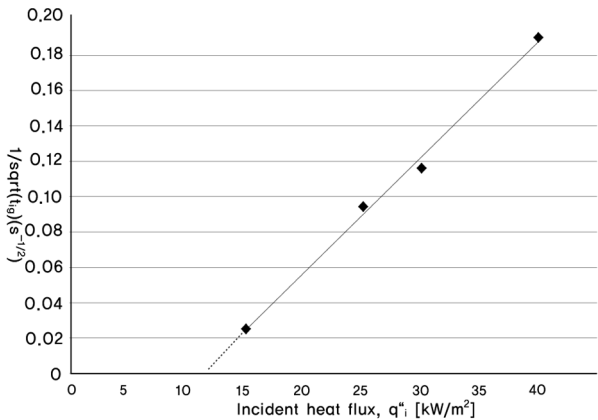


Fig. 5. Determination of the critical heat flux.

시험재료인 미송판의 임계열유속을 Fig. 5를 통해 예측해 볼 수 있으며, 다음의 식을 통해 미송판의 열관성($k\rho c$)을 도출해 낼 수 있다.

$$k\rho c = \frac{3}{2} \left[\frac{1}{\text{slope}(T_{ig} - T_0)} \right]^2 \quad (10)$$

여기서 slope은 $1/[\sqrt{2/3(k\rho c)}(T_{ig} - T_0)]$ 를 나타낸다.¹⁶⁾ 식(10)을 통해 미송판의 열관성은 $0.28 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-4} \text{ K}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 임을 구할 수 있었다.

3.3. 실험방법

백열전구로부터 방사되는 복사 열유속을 측정하기 위한 기본실험과 미송판의 발화 임계거리와 발화시간을 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 복사 열유속에 의한 미송판의 발화 여부를 확인하기 위하여 미송판은 백열전구 측면에 위치시키고 이격거리를 조정하는 방식으로 실험을 진행하였다. 미송판의 위치가 백열전구의 상부 방향으로 이동할수록 부력 및 대류 열전달에 의한 영향을 고려해야 하기 때문에¹⁷⁾ 그 밖의 열전달에 의한 상황은 가능한 배제하고자 하였다. 백열전구로부터 방사되는 복사 에너지를 확인하기 위해 전구 측면의 복사 열유속을 이격 거리별로 측정하였다. 미송판의 발화 임계거리와 발화시간을 측정하기 위해 열전대(TCI)를 미송판의 수열면 중심부에 부착시키고, 미송판은 백열전구 측면의 바닥면과 직각이 되도록 위치시켜 이격거리(d)별로 발화온도와 발화시간을 기록하였다. 이때 주위온도는 TC2의 열전대로 측정하고 그 결과를 기록하였다. 실험실의 온도는 6°C 이며, 상대습도는 $7\pm 2\%$ 의 환경에서 실험을 실시하였다. 대류와 바람에 의한 영향을 최소화하기 위하여 무풍상태를 유지하였다. 백열전구와 미송판의 이격거리는 $1/10,000 \text{ m}$ 정도로 변화시켰기 때문에 대류열전달계수 h_c 는 거의 무시해도 문제가 없을 정도였으나, 실험의 정확성을 위해 M.J. Spearpoint가 제시한 미송판의 임계열유속을 통해 도출된 $10.693 \text{ W/m}^2\text{K}^{18)}$ 를 적용하였다.

3.4. 실험결과 및 모델링

3.4.1. 복사율 예측

백열전구에서 방사되는 복사 열유속을 이격 거리별로 측정하고 기록하여 η 를 도출하였다. 실험을 통해 측정된 결과값은 Table 1과 같다.

Table 1. Calculated irradiance and the estimated radiant heat flux

$D(m)$	0.017	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04
$d(m)$	0.002	0.005	0.01	0.015	0.02	0.025
$p/(4\pi D^2)(\text{kW/m}^2)$	55.071	39.789	25.465	17.684	12.992	9.947
$q''(\text{kW/m}^2)$	12.75	9.38	6.47	5.36	4.23	3.64
η	0.231	0.236	0.254	0.303	0.326	0.366

보다 정확한 열유속을 위해서는 전구와 미송판의 이격거리 $d = 0 \text{ m}$ 인 조건에서도 측정해야 하지만, 열유속계의 센서 보호를 위해 전구 표면에 대한 접촉은 실시하지 않았다. 열유속은 $d = 0.002 \sim 0.025 \text{ m}$ 의 범위에서 측정되었으며, 보다 정확한 열유속 값을 구하기 위

해 백열전구의 복사열유속 값의 변화가 없는 시점까지 측정하여 기록하였다. 각 열유속 값을 통해 도출된 η 값은 전구 표면에서 이격될수록 증가함을 확인할 수 있었다.

3.4.2. 발화실험

화재과학 분야에서 고체가연물의 발화현상을 대표하는 실험재료로는 목재만큼 좋은 것이 없을 것이다. 이러한 목재도 그 두께에 따라 연소특성이 달라질 수 있는데 본 연구에서 사용된 미송판은 L. Peihsun의 분류에서 두꺼운 가연물로 구분되어질 수 있다¹⁹⁾.

백열전구 복사열에 의해 두꺼운 목재가 발화되기 위해서는 임계열유속 이상의 복사열이 목재 표면에 도달하여야 한다. 목재는 크게 견목재(Hard wood)와 연목재(Soft wood)로 구분할 수 있는데, 실험에 사용된 미송판은 연목재에 해당된다. 일반적으로 건조된 연목재를 구성하고 있는 물질의 구성비는 셀룰로오스(Cellulose)가 40~44%, 헤미셀룰로오스가 20~32%(Hemicellulose)이며 레진(Lignin)이 25~35%를 차지하고 있다. 이러한 물질이 열에 노출되는 경우 열분해를 통해 가연성 가스를 생성하며 생성된 가연성 가스는 발화온도 이상에서 발화하거나 점화원에 의해 착화된다. 연목재를 구성하는 각 물질의 열분해 온도범위는 셀룰로오스가 240~350℃, 헤미셀룰로오스가 200~260℃이며 레진이 280~500℃라고 알려져 있다²⁰⁾. 즉 백열전구로부터 방사된 복사열에 의해 미송판이 열분해 되기 위해서는 표면온도가 최소 200℃까지 상승하여야 한다는 의미이다. 이것은 목재가 갖고 있는 고유 흡수율(α)에 따라 달라질 수 있는데, Janssens에 의하면 건조목의 흡수율은 일반적으로 0.60~0.72이며, 이러한 흡수율은 목재가 외부 열에 노출되어 탄화가 진행되기 시작하면 그 값은 1에 근접해 진다고 논하였다²¹⁾. 초기에는 백열전구 복사열에 의해 목재의 표면온도가 초기 흡수율과 외부 복사열에 비례하여 상승할 것이며, 최대온도는 주위온도에 의한 냉각 영향으로 온도상승률에 변곡이 발생하는 지점까지 상승할 것이다. 그 이후부터는 흡수율에 비례하여 미송판의 표면온도가 서서히 상승하게 될 것이다. 미송판의 표면이 열분해 온도에 도달하는 시점부터 탄화가 진행되기 시작하여 목재 표면에서 가연성 분해가스를 생성하고, 결과적으로 가연성혼합기를 형성하여 발화조건을 충족시키게 된다.

만일 복사 열유속이 임계열유속보다 작은 경우에는 목재가 장시간 동안 발화되지 않을 것이다. 즉, 목재가 발화되기 위한 표면온도 조건이 형성되어야 하는데, 백열전구로부터 방사되는 복사열이 임계열유속보다 작은

Table 2. Summary of the ignition simulation test results

NO.	d(m)	D(m)	Ignition	t _{ign} (sec)	T _{ign} (K)
1*	0	0.015	Yes	-	-
2	0.0005	0.0155	Yes	1,325	663.87
3	0.001	0.016	Yes	2,175	625.21
4	0.0015	0.0165	Yes	3,661	593.6
5	0.00175	0.01675	No	-	-
6	0.002	0.017	No	-	-

*The ignition time and temperature to ignition were undetermined in this experiment.

경우에는 발화온도 조건을 만족시키는데 필요한 이격거리, 노출시간이 요구된다. 실험은 이러한 모든 조건을 부여하기 위해 발화되지 않은 미송판에 대해서는 5시간 이상 복사열에 노출시켜 발화여부를 확인해 보았다. Table 2는 발화실험의 결과값을 보여주고 있다.

Table 2에서 $d = 0\text{ m}$ 인 경우에는 전구 표면의 전도열에 의해 발화되는 경우이기 때문에 본 연구의 고려대상에서 제외되었다. 미송판은 $d = 0.0015\text{ m}$ 이격된 지점까지만 복사열에 의해 발화되었으며, $d = 0.00175\text{ m}$ 부터는 발화되지 않았다. 발화온도와 발화시간은 $d = 0.0005\text{ m}$ 지점에서는 1,325 sec 경과 후 663.87 K, $d = 0.001\text{ m}$ 의 지점에서는 2,175 sec 경과 후 625.21 K, $d = 0.0015\text{ m}$ 의 지점에서는 3,661 sec 경과 후 593.6 K에 발화되었다. 이러한 결과를 통해 이격거리가 증가될수록 발화시간은 지연되고, 발화온도가 낮아짐을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 발화된 미송판의 온도변화 차트이다.

Fig. 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 약 150~180℃까지는 온도상승률이 거의 비슷하였으나, 그 이후부터는 이격거리별로 온도상승률에서 차이가 발생하기 시작하였다. 이는 거리가 증가함에 따라 주위 온도에 의

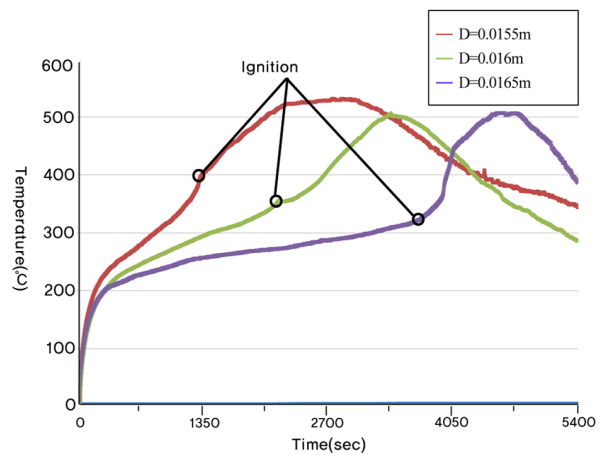


Fig. 6. Temperatures registered by TC1 in various tests.

한 대류현상 등으로 미송판 표면과 주변 공기층이 냉각되었기 때문에 판단된다. 실제로 식(7)에서 확인할 수 있듯이 T_0 값이 높을수록 q_{cr}'' 이 증가함을 알 수 있다.

3.4.3. 발화 임계거리

백열전구의 복사열로 인해 미송판이 발화될 수 있는 임계거리를 미리 예측할 수 있으면 사전에 가연물과 백열전구와의 이격거리를 산정하여 화재를 예방할 수 있을 것이다. 본 연구에서 미송판이 백열전구 복사열에 의한 발화 임계거리를 산정하기 위해 식(1)을 이용하였으며, 식(1)로부터 유도된 다음 식을 통해 D_{cr} 과 d_{cr} 을 구할 수 있다.

$$d_{cr} = D_{cr} - R = \sqrt{\frac{\eta P}{q_{cr}'' 4\pi}} - R \tag{11}$$

여기서 D_{cr} 은 필라멘트와 미송판 사이의 발화 임계거리(m), d_{cr} 은 전구 표면과 미송판 사이의 발화 임계거리(m), R 은 필라멘트에서 전구 표면까지의 거리(m)이며, q_{cr}'' 은 임계열유속이다. 복사율 η 는 미송판이 발화된 이격거리 범위내의 값으로 해야 하므로 Table 1에서 $D = 0.017$ m인 조건으로 산출한 0.231을 대입하였다. 백열전구의 복사열유속 값이 q_{cr}'' 이상이 되어야 하는데 미송판의 평균 발화온도 627.56 K, 주위온도 278.15 K와, 대류열전달계수 10.693 W/m^2K 를 식(7)에 대입 계산하면 q_{cr}'' 은 12.19 kW/m^2 임을 알 수 있다. 식(11)을 통해 백열전구 복사열에 의해 미송판이 발화될 수 있는 임계거리 D_{cr} 은 0.0173 m이며, d_{cr} 은 0.0023 m임을 계산할 수 있다. 이 값은 실제 실험값보다 약간 높은 수준인데, 이는 실험조건 및 환경조건 등에 의해 그 차이가 발생한 것으로 판단된다.

3.4.4. 발화시간

목재가 복사열에 의해 발화되는데 소요되는 시간은 화재예방을 위한 활동이나 화재원인을 조사하는 과정에서 매우 중요한 인자로 작용한다. Delichatsios는 이러한 주요인자를 수학적으로 계산해 내기 위해 수많은 실험을 수행하고 물질의 발화시간을 예측할 수 있는 방법을 발달시켜 다음과 같은 식을 제안하였다^{22,23)}.

만일 $q_i'' < 1.1q_{cr}''$ 이라면,

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} = \frac{\pi}{\sqrt{\pi k \rho c}} \frac{q_i'' - q_{cr}''}{(T_{ig} - T_0)} \tag{12}$$

여기서 t_{ig} 는 물질이 외부 열원에 노출된 후 발화될

때까지 소요되는 시간(sec)이며, $k\rho c$ 는 열관성, T_0 와 T_{ig} 는 실험시 측정된 목재의 초기온도와 발화온도를 나타낸다. t_{ig} 를 보다 쉽게 구할 수 있도록 식(12)를 변환하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t_{ig} = \frac{k\rho c}{\pi} \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{\left(\frac{\eta P}{4\pi D_{ig}^2} - q_{cr}''\right)^2} \tag{13}$$

여기서, $k\rho c$ 값인 0.25 $kJ\cdot m^{-4}K^{-2}\cdot s^{-1}$ 과 각각의 실험값을 대입하여 계산하면 Table 3과 같은 결과를 구할 수 있다.

Table 3. Time to ignition

NO.	Distance		Heat flux $q''(kW/m^2)$	Estimated value $t_{ig}(sec)$	Measured value $t_{ig}(sec)$
	d(m)	D(m)			
1	0.0005	0.0155	15.303	1,361	1,325
2	0.001	0.016	14.361	2,264	2,175
3	0.0015	0.0165	13.621	3,822	3,661
4	0.00175	0.01675	13.217	-	-
5	0.002	0.017	12.887	-	-

4. 고찰

백열전구 복사열에 의해 미송판이 발화될 수 있는 임계거리와 발화시간을 실험하고 모델링하여 결과값을 비교해 보았다. 발화 모델링을 통해 200 W 백열전구 복사열에 의해 미송판이 발화될 수 있는 임계거리 D_{cr} 은 0.0173 m라는 것을 예측할 수 있었으며, 실험값인 0.0165~0.01675 m 보다는 0.00055~0.0008 m 정도 더 이격된 거리임을 알 수 있었다. 이는 실험조건 및 가연물의 물성차이 때문에 발생한 것으로 판단된다. Table 2에서는 백열전구에서 미송판이 이격될수록 발화온도는 낮아지고 발화시간은 지연되는 것을 확인할 수 있다. 이는 식(13)을 통해 그 원인을 파악해 볼 수 있는데, t_{ig} 가 D^2 에 비례하여 증가하기 때문으로 추론해 볼 수 있다.

Fig. 7는 사고열유속 q_i'' 에 따라 변하는 $t_{ig}^{-0.5}$ 의 이론값과 실험값의 비교차트이다. 이론 $t_{ig}^{-0.5}$ 는 식(12)를 통해 계산할 수 있다. 실험을 통해 측정된 발화시간과 이론적으로 예상할 수 있는 발화시간이 거의 유사함을 Fig. 7의 차트를 통해 확인할 가능하다. 실험시 사용된 미송판이 발화될 수 있는 최소 사고 열유속은 13.621~14.361 kW/m^2 이며, 평균 사고 열유속은 14.428 kW/m^2 임을 계산할 수 있다.

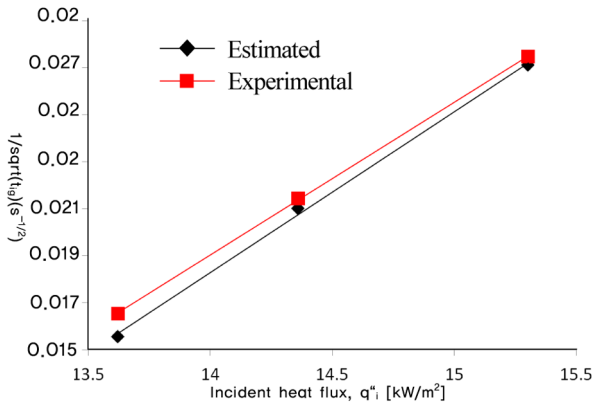


Fig. 7. Chart of time for burning wood.

5. 결론

백열전구 복사열에 의해 미송판이 발화될 수 있는 임계거리와 발화시간을 예측하기 위해 발화 모델링을 통해 예측하고, 실험을 통해 측정된 결과값을 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구와 같은 조건에서 200 W 백열전구 복사열에 의해 미송판이 발화될 수 있는 임계거리 D_{cr} 은 0.017 m 이내이며, 이때 최소 사고열유속은 13.621 ~ 14.361 kW/m^2 이다.
- 2) 점열원 모델 및 적분 모델을 적용하는 경우 백열전구 복사열에 의해 미송판이 발화될 수 있는 임계거리 및 발화시간을 예측할 수 있다.
- 3) 조명기구 등 전기 점열원의 발열체로 인한 화재 원인조사 시 가연물의 복사발화 가능성 예측 및 발화시간을 예측하여 방화 또는 실화 여부를 판단하는 자료로 활용할 수 있다.

References

- 1) Ministry of Trade, Industry and Energy, "Regulation of Energy Efficiency Labeling and Standards", Article 4, 2016.
- 2) MPSS National Fire Data System, <http://www.nfds.go.kr/fr_fact_0301.jsf>(22. Jan. 2016)
- 3) H. K. Kim, D. W. Kim, H. W. Moon, C. S. Choi and H. S. Choi, "Study on the Fire Investigation by Damaged Pattern Analysis of Incandescent Lamps", Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 22-28, 2008.
- 4) P. Austin, "Fires Caused by Lighting", Fire Investigation Essay, pp. 5-8, 2000.
- 5) T. H. Song and E. P. Lee, "A Case Study on the Lights Fire", Journal of Korean Institute of Fire Investigation, Vol. 11,

- No. 1, pp. 41-58, 2008.
- 6) D. S. Lee, "A Study of the Cause of a Fire about a Light Fire Experiment", Chonnam Univ. pp. 30-50, 2007.
- 7) A. T. Modak, "Thermal Radiation from Pool Fires", Combustion and Flame, Vol. 29, pp. 177-192, 1997.
- 8) J. G. Quintiere, "A Semi-quantitative model for the burning rate of solid materials", National Institute of Standards and Technology, pp. 2-23, 1992.
- 9) M. J. Spearpoint, "Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model", National Institute of Standards and Technology, pp. 45-46, 1999.
- 10) M. J. Spearpoint and J. G. Quintiere, "Predicting the Piloted Ignition of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model-Effect of Species, Grain Orientation and Heat Flux", Fire Safety Journal, Vol. 36, No. 4, pp. 391-415, 2001.
- 11) W. T. Simpso, "Wood Handbook", Forest Service Madison, Forest Products Laboratory, pp. 292-293, 2010.
- 12) P. Yin, N. Liu, H. Chen, J. S. Lozano and Y. Shan, "New Correlation Between Ignition Time and Moisture Content for Pine Needles Attacked by Firebrands", Fire Technology, Vol 50, No. 1, pp 9-12, 2012.
- 13) M. J. Spearpoint, "Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model", National Institute of Standards and Technology, pp. 17-18, 1999.
- 14) T. Poespowati, "An Experimental Study on Autoignition of Wood", Engineering and Technology, Vol. 2, No. 11, pp. 579-580, 2008.
- 15) D. Hopkins, "Predicting the Ignition Time and Burning Rate of Thermoplastics in the Cone Calorimeter", National Institute of Standards and Technology, pp. 6-13, 1995.
- 16) M. J. Spearpoint and J. G. Quintiere, "Predicting the Piloted Ignition of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model-Effect of Species, Grain Orientation and Heat Flux", Fire Safety Journal, Vol. 36, No. 4, pp. 28-30, 2001.
- 17) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th ed", John Wiley & Sons, pp. 6-9, 2007.
- 18) M. J. Spearpoint, "Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model", National Institute of Standards and Technology, pp. 72-79, 1999.
- 19) L. Peihusun and C Chiunhsun, "Numerical Analyses for Downward Flame Spread over Thin and Thick Fuels in a Gravitational Field", Combustion and Flame, Vol. 118, No. 4, pp. 744-746, 1999.

- 20) M. J. Spearpoint, "Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model", National Institute of Standards and Technology, pp. 2-8, 1999.
- 21) C. A. Harper, "Handbook of Building Materials for Fire Protection", McGraw-Hill, pp. 384-385, 2004.
- 22) M. A. Delichatsios, B. Paroz and A. Bhargava, "Flammability Properties for Charring Materials", Fire Safety Journal, Vol 38, No. 3, pp. 219-228, 2003.
- 23) M. A. Delichatsios, "Ignition Times for Thermally Thick, Intermediate Conditions in Flat and Cylindrical Geometries", International Symposium Fire Safety Science, pp. 233-244, 1999.