

# 축소 모의된 구획 화재의 흘림 실험에 대한 인화성 액체의 화재 패턴 해석

조희수 · 최충석<sup>†</sup>

전주대학교 소방안전공학과

## Analysis of Fire Patterns of Flammable Liquids for Oil Flow Tests of Compartment Fires with Reduced Simulation

Hi-Su Joe · Chung-Seog Choi<sup>†</sup>

Dept. of Fire Safety Engineering, Jeonju University

(Received March 23, 2014; Revised April 28, 2014; Accepted June 13, 2014)

### 요 약

본 연구는 구획된 공간에 인화성 단일 물질을 채우고 착화된 화염의 전파 속도, 방사 범위, 확산 패턴 및 연소 완료 시간 등을 해석하는 데 있다. 화염의 전파 속도는 등유가 0.2 s로 가장 빠르고, 알코올이 82.1 s로 가장 늦었다. 화염이 착화된 후 화염이 가장 빠르게 최성기에 도달한 것은 시너이었고 19.0 s가 걸렸다. 그리고 가장 늦은 것은 알코올로 138.6 s로 측정되었다. 인화성 액체 200 ml가 연소 완료되는 시간은 시너가 79.9 s로 가장 짧았고, 가솔린 135 s, 등유 170 s, 경유 231.4 s, 알코올 337.0 s 등으로 측정되었다. 그리고 인화성 액체가 연소될 때 화염의 하단 부분은 층류 패턴이 지배하였고, 상단 부분은 난류 패턴을 나타냈다. 대두유의 실험에서 착화시킨 화원을 제거하면 화염은 자연 소화되어 연소가 진행되지 않았고, 불완전 연소에 따른 흰색의 연기가 발생하는 것을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the flame propagation speed, radiation range, diffusion pattern and combustion completion time of a fire by filling a divided space with single combustible substance. It was found that the flame propagation speed was the fastest (0.2 s) for kerosene and the lowest (82.1 s) for alcohol. In the case of paint thinner, it took 19.0 s for the flame to reach its peak at the fastest speed after ignition while in the case of alcohol, it took 138.6 s for the flame to reach its peak at the lowest speed. In the case of the combustion of 200 ml of flammable liquids, the combustion completion time was 79.9 s for paint thinner, which is the shortest, 135 s for gasoline, 170 s for kerosene, 231.4 s for diesel and 337.0 s for alcohol. In addition, when flammable liquids are combusted, the lower part of the flame is governed by laminar flow pattern and the upper part of the flame showed turbulence pattern. In the case of a test performed for bean oil, it could be seen that if the fire source was removed, the flame was automatically extinguished without further combustion and that white smoke was generated due to incomplete combustion.

**Keywords :** Fire patterns, Flammable liquids, Oil flow tests, Flame propagation speed, Diffusion pattern

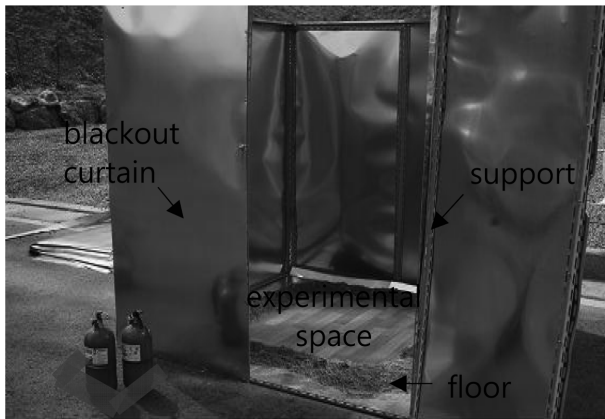
## 1. 서 론

화재는 연소 물질 및 에너지원의 종류에 따라 일반 화재, 유류 화재, 전기 화재, 금속 화재 등으로 분류한다. 화재가 발생한 현장에 출동한 화재조사관이 화재의 정확한 원인을 규명함에 따라 향후 화재 예방 및 교육 등을 위한 정책 지표로 활용된다. 그런데 대부분의 화재 현장은 화염의 크기, 연소 시간 및 진압 방법 등에 따라 잔존물의 형태 및 위치는 건축물의 최초 상황과 다르게 나타난다. 최초의 건축물의 형상과 많은 변형이 발생한 현장을 보고 화재 원인

을 정확히 규명하기 위해서는 고도로 전문적인 지식과 경험이 없이는 불가능하다. 그러므로 화재조사관은 화재 현장의 타고 남은 사물과 재, 화염의 연소 확산 패턴, 물리·화학적 특성 등을 종합하여 화재의 원인을 규명해야 한다. 그러나 화재 현장은 화재가 진압된 후에도 피난, 수습 및 응급조치 등의 요인에 의해 2차 변형이 발생됨에 따라 조사관은 최초의 상황을 판단하는 데 다양한 요소를 고려해야 한다<sup>(1-3)</sup>. 특히 인화성 액체에 의해 방·실화된 사고 현장은 조사관의 입장을 더욱 곤란하게 만들고 실수를 범할 때 또 다른 피해가 발생할 수 있다. 따라서 이와 같은

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: enetek@naver.com  
TEL: +82-63-220-3119, FAX: +82-63-220-2056

ISSN: 1738-7167  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.3.043>



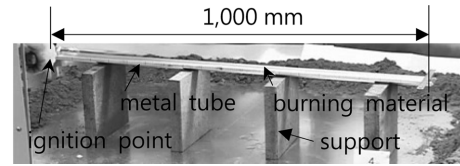
**Figure 1.** Photograph of the actual test equipment used for combustion tests.

오관의 확률을 줄이기 위한 사례 중심의 연구는 Hwang<sup>(4)</sup>, Kim<sup>(5)</sup>, Choi<sup>(6)</sup> 등에 의해서 일부 진행되었다. 그들은 주로 화재가 발생한 사고 현장을 근거로 사례 중심의 연구를 실시하였으나 인화성 액체 화염의 전파 속도, 최성기의 도달 시간, 확산 패턴 및 잔존물의 특성 등 종합적인 해석을 수행하지 못했다. 즉, 인화성 액체가 사용된 방·실화 현장에서 고려되어야 할 인화성 액체의 종류가 무엇이고 화염의 특성은 어떤 관계를 갖고 있는지 종합적으로 해석하는 것이 과학적인 판정이라고 할 수 있다. 그러므로 신뢰할 수 있는 구획 화재(compartment fire)를 근거로 홀림 실험(oil flow test)을 실시하여 과학적인 원인 조사가 요구된다.

따라서 본 연구는 구획된 공간에 인화성 단일 물질을 채우고 착화된 화염의 전파 속도, 방사(放射) 범위, 확산 패턴 및 연소 완료 시간 등을 해석하여 제시함에 따라 화재 조사관이 원인 판정을 객관적으로 결정할 수 있는 기초 자료를 제공하는 데 있다.

## 2. 실험방법

실험의 신뢰성을 확보하기 위해서 구획 화재 실험을 수행하였고, Figure 1은 홀림 실험(oil flow test)을 수행한 실제 사진을 나타낸 것이다. 구획된 공간은 가로, 세로, 높



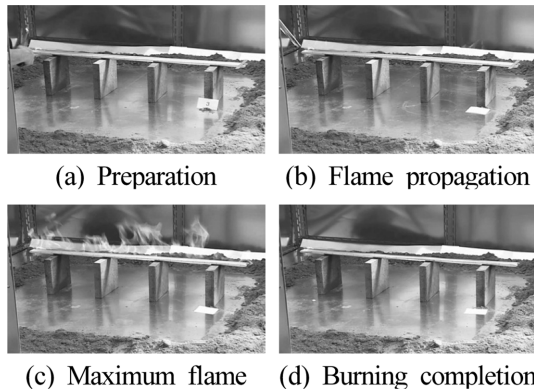
**Figure 2.** Photograph of the actual test equipment used for oil flow tests.

이가 각각 2,000 mm이며, 아연도금강판으로 제작한 것이다. 또한 모서리 및 중간에 지지대를 세워 물리적 충격에 견딜 수 있게 하였다. 구획된 공간은 원룸을 1/4로 축소 모의하여 재현함에 따라 실물화재와 유사한 특성을 획득할 것으로 기대한다. 또한 외부에서 실험이 진행될 때 일정한 조건을 유지시킬 수 있다는 장점도 있다. 비닐 장판은 일반 주거 공간과 유사한 조건을 유지함에 따라 향후 진행될 뿌림 실험, 혼합 실험, 담유 실험 등의 정보를 공유할 수 있을 것이다. 가스 토치를 이용하여 화염을 인위적으로 착화시킨 후 화염이 용기 내의 인화성 액체를 타고 이동하여 한쪽 끝까지 전파되는 소요 시간을 측정하였다. 홀림 실험에 사용된 인화성 액체는 휘발유(gasoline), 등유(kerosene), 경유(diesel), 시너(thinner), 벤젠(benzene), 아세톤(acetone), 알코올(alcohol), 대두유(bean oil)이다<sup>(7,8)</sup>. Table 1은 본 연구에 사용된 인화성 액체의 주요 특성을 나타낸 것이다. 그리고 내부의 바닥은 일반 가정에서 사용하는 비닐 장판을 깔았으며, 실험이 진행될 때 주변 온도는 21 °C, 상대 습도는 60 ± 2% 등을 유지시켰다.

Figure 2는 홀림 실험이 진행된 연소 장치의 실제 사진을 나타낸 것이다. 인화성 액체 200 ml를 흘려주기 위한 금속관은 깊이 20 mm, 넓이 30 mm, 길이 1,000 mm 등이다. 금속관의 내부에 각각의 인화성 액체를 채운 후 좌측에 가스 토치를 사용하여 착화시켜 화염이 용기 내의 인화성 액체를 타고 우측의 끝단까지 도달될 때의 화염의 전파 속도, 확산 패턴, 방사 범위 및 연소 완료 시간 등을 해석하였다. 연소 실험이 진행될 때 디지털카메라(Digital Camera, Nikon Co., D-80, Japan) 및 비디오카메라(Video Camera, Samsung Co., SV-U10, Korea)를 사용하여 영상을 확보하였다. 즉, 영상 기록 장치에 기록된 각각의 단계를 실측함

**Table 1.** Properties of Flammable Liquids Used for Tests

Classification	Temp. [°C]	Melting point	Boiling point	Flash point	Ignition point
Gasoline		-90.5~95.4	39~200	-45	250
Kerosene		-46	175~325	65~85	225
Diesel		-	150~350	50~70	257
Benzene		5.5	80.1	-11.0	580
Acetone		-94.8	56.3	-20	465
Alcohol		-117	78.3	12.8	-

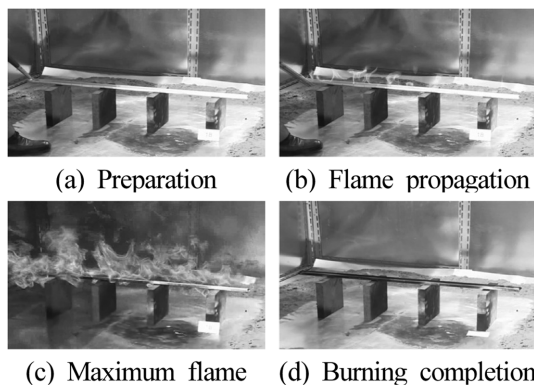


**Figure 3.** Flame pattern of gasoline created from combustion test of single substance.

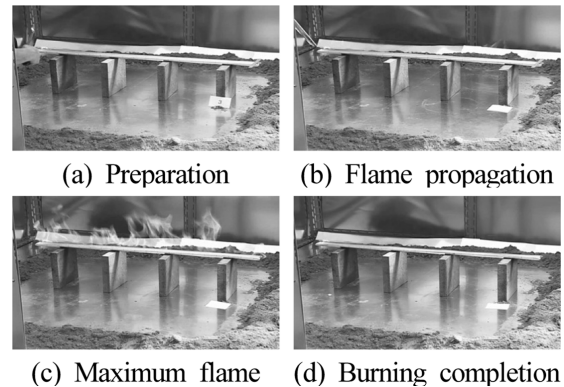
에 따라 정확한 시간을 제시할 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

Figure 3은 휘발유의 연소 실험이 진행될 때의 단계별 특징을 나타낸 실체 사진이다. Figure 3(a)는 홀림 실험 용기인 금속관에 휘발유를 채우고 착화를 준비한 초기 단계이다. 정확한 화염의 연소 완료 시간을 측정하기 위해 디지털 카메라를 이용하여 실시간으로 영상을 확보하였다. Figure 3(b)는 착화 후 화염이 전파되는 과정이며, 1,000 mm를 화염이 도달하는 데 소요된 시간은 0.7 s로 측정되었다. 화염의 색상은 연한 주황색으로 하단 부분은 층류 패턴이 나타났고, 상단 부분은 난류 패턴을 나타냈다. Figure 3(c)는 화염이 최성기에 도달할 때를 나타낸 것으로 소요 시간은 18.5 s로 측정되었고, 화염의 길이는 250 mm로 측정되었다. 이때 화염의 하단 부분에서는 층류 패턴이 줄어들었고 대부분 난류 패턴을 나타냈으며, 검은색 연기가 다량 발생하였다. Figure 3(d)는 연소가 완료된 것으로 135 s로 측정되었고, 홀림 실험이 완료된 금속관의 표면은 그을음이 형성된 것이 확인되었다<sup>(9-11)</sup>.



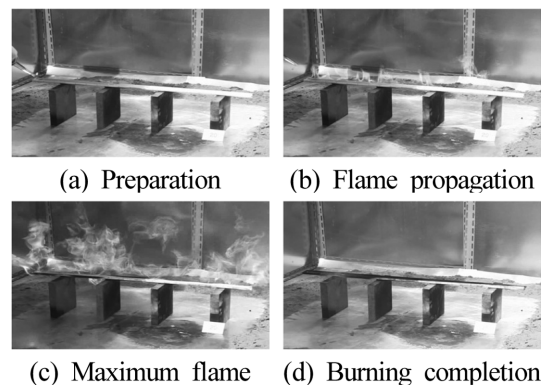
**Figure 4.** Flame pattern of kerosene created from combustion test of single substance.



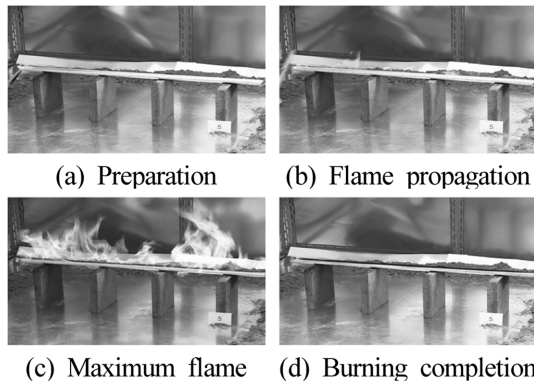
**Figure 5.** Flame pattern of diesel created from combustion test of single substance.

Figure 4(a)는 등유의 연소 패턴 해석의 첫 단계를 나타낸 실체 사진이다. Figure 4(b)는 착화 후 화염이 전파되는 과정을 나타낸 실체 사진으로 화염이 1,000 mm 도달하는데 소요된 시간은 0.8 s로 측정되었다. 화염의 색상은 연한 주황색이었으며 하단 부분은 층류 패턴이 나타났고, 상단 부분은 난류 패턴을 보였다. Figure 4(c)는 화염이 가장 크게 성장되었을 때를 나타낸 것으로 소요 시간은 43.5 s이었고, 화염의 길이는 500 mm로 측정되었다. 이때의 화염은 대부분 난류 패턴을 보였고, 검은색 연기가 다량 발생하였다. Figure 4(d)는 등유의 홀림 실험이 완료된 것으로 소요 시간은 170.0 s로 측정되었다<sup>(9,10)</sup>.

Figure 5(a)는 경유의 화염 패턴 해석을 위한 준비의 첫 단계를 나타낸 실체 사진이다. Figure 5(b)는 착화 후 화염이 전파되는 과정을 나타낸 것으로 화염의 도달 시간은 0.2 s로 측정되었다. 화염의 하단은 층류 패턴이 지배하였고, 화염의 상단은 난류 패턴이 지배하는 특성을 알 수 있었다. Figure 5(c)는 화염의 크기가 최대가 되었을 때의 실체 사진으로 소요 시간은 47.4 s로 측정되었고, 화염의 길이는 200 mm로 측정되었다. 이때의 화염은 대부분 난류 패턴을 보였으며, 색상은 진한 주황색을 보였다. Figure



**Figure 6.** Flame pattern of thinner created from combustion test of single substance.



**Figure 7.** Flame pattern of benzene created from combustion test of single substance.

5(d)는 경유의 흘림 실험이 완료된 실체 사진으로 소요 시간은 231.4 s로 측정되었고, 연소가 완료될 때의 색상은 흰색이다<sup>(9-11)</sup>.

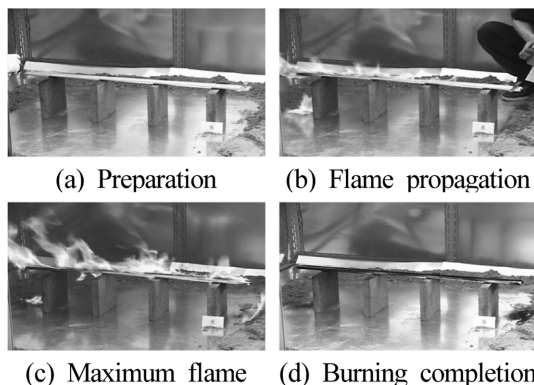
Figure 6(a)는 시너의 연소 패턴 해석을 위한 준비의 첫 단계를 나타낸 실체 사진이다. Figure 6(b)는 착화된 후 화염이 1,000 mm 도달되는 과정을 나타낸 것으로 소요 시간은 0.7 s로 측정되었다. 화염의 색상은 연한 주황색이며 하단 부분은 층류 패턴이 지배하였고, 상단 부분은 난류 패턴을 확인할 수 있었다. Figure 6(c)는 화염이 가장 크게 성장되었을 때를 나타낸 것으로 소요 시간은 19.0 s로 측정되었고, 화염의 길이는 1,000 mm로 측정되었다. 이때의 화염의 패턴은 대부분 난류 패턴을 나타냈으며, 검은색 연기가 다량 발생하였다. Figure 6(d)는 연소가 완료된 것으로 소요 시간은 79.9 s로 측정되었고, 색상은 흰색으로 확인되었다<sup>(9-11)</sup>.

Figure 7(a)는 벤젠의 연소 패턴 해석을 위해 준비된 실체 사진이다. Figure 7(b)는 벤젠이 착화되어 화염이 1,000 mm를 도달하는 소요 시간은 0.8 s로 측정되었다. 화염의 하부는 층류 패턴이 나타났고, 상부는 난류 패턴이 나타났다. Figure 7(c)는 화염의 크기가 가장 활성화되었을 때를

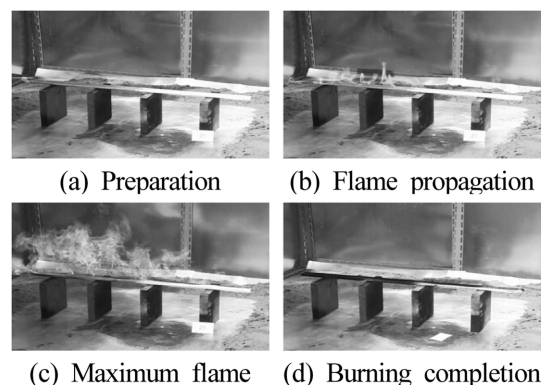
나타낸 실체 사진으로 소요 시간은 22.6 s로 측정되었고, 화염의 길이는 600 mm로 측정되었다. 이때 화염의 패턴은 대부분 난류 패턴을 보였으며, 초기에 착화된 지점의 화염이 더 크고 색상이 더 진한 것으로 확인되었다. Figure 7(d)는 연소가 완료된 후의 패턴이며, 연소가 완료된 시간은 122.8 s로 측정되었고, 연기는 흰색이다<sup>(9-11)</sup>.

Figure 8은 아세톤의 연소 확산 실험을 진행하기 위해 준비된 실체 사진이다. Figure 8(a)는 착화 준비가 완료된 실체 사진이며, Figure 8(b)는 화염이 아세톤에 착화되어 끝단인 1,000 mm를 도달하는 데 걸리는 소요 시간은 50.2 s로 측정되었다. 화염의 색상은 연한 주황색으로 하단 부분은 층류 패턴이 지배하였고, 상단 부분은 난류 패턴이 지배하는 것으로 확인되었다. Figure 8(c)는 화염의 크기가 최성기에 도달하였을 때를 나타낸 것으로 소요 시간은 80.0 s로 측정되었고, 화염의 길이는 400 mm로 측정되었다. 이때 화염의 패턴은 대부분 난류 패턴을 보이며, 색상은 화염이 전파 될 때의 색상과 동일한 연한 주황색을 보였다. Figure 8(d)는 연소가 완료된 실체 사진으로 소요 시간은 164.4 s로 측정되었고, 연소가 완료될 때의 연기의 색상은 흰색이다<sup>(9-11)</sup>.

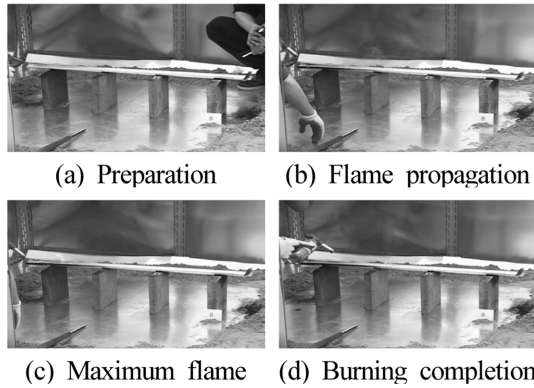
Figure 9는 알코올의 연소 확산 실험을 진행하기 위해 준비된 실체 사진이다. Figure 9(a)는 흘림 실험 장치 안에 알코올을 채우고 착화 준비가 완료된 단계의 실체 사진이다. 알코올은 초기 연소의 특성을 육안으로 인지하기가 어려워 인위적 착화와 동시에 연소가 시작된 것으로 설정하여 실험이 진행되었다. Figure 9(b)는 착화 후 화염이 전파되는 과정을 나타낸 실체 사진으로 1,000 mm를 화염이 도달하는 데 걸리는 소요 시간은 82.1 s로 측정되었다. 화염의 하단은 층류 패턴이 나타났고, 상단은 난류 패턴을 나타낸 것으로 확인되었다. Figure 9(c)는 화염이 최성기에 도달되었을 때의 실체 사진으로 소요 시간은 138.6 s로 측정되었고, 화염의 길이는 450 mm로 측정되었다. 이때 화염의 패턴은 대부분 난류 패턴을 보였으며, 화염의 색상은 진한 주황색을 보였다. Figure 9(d)는 연소가 완료된 실체



**Figure 8.** Flame pattern of acetone created from combustion test of single substance.



**Figure 9.** Flame pattern of alcohol created from combustion test of single substance.



**Figure 10.** Flame pattern of bean oil created from combustion test of single substance.

사진으로 소요 시간은 337.0 s로 측정되었고, 연기의 색상은 흰색으로 확인되었다<sup>(9-11)</sup>.

Figure 10은 대두유가 연소될 때 화염의 특성을 해석하기 위해 준비된 실체 사진이다. Figure 10(a)는 대두유를 홀림 실험관에 채우고 착화 준비가 완료된 실체 사진이다. Figure 10(b)는 착화 시작 후 연소가 확산되는 과정을 나타낸 것으로 화염이 끝단에 도달하는 소요 시간은 1,030.3 s로 측정되었다. Figure 10(c)는 대두유의 화염이 가장 크게 성장되었을 때를 나타낸 실체 사진으로 소요 시간은 1,156.0 s로 측정되었고, 화염의 크기는 50 mm로 측정되었다. 이때 화염의 패턴은 대부분 난류 패턴을 보였다. Figure 10(d)는 대두유의 홀림 실험이 종료된 실체 사진으로 토치를 제거하자 바로 자연 소화되는 것으로 확인되었다. 즉, 다른 인화성 액체는 초기 화염을 인가하고 화원을 제거하여도 화염이 전파되었으나 대두유는 인가된 화염 원을 제거하면 곧 자연 소화되어 화재의 확산이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다<sup>(9-11)</sup>.

Table 2는 단독 물질의 연소 과정에 확인된 가연물의 특성을 비교한 것이다. 화염이 인화성 가연물에 착화되어 1,000 mm를 도달하는 데 걸리는 소요 시간이 가장 짧았던 것은 경유로써 0.2 s이다. 그리고 착화된 화염이 최성기에

가장 빠르게 도달되는 것은 휘발유이며, 대두유를 착화시키기 위해 사용된 토치 화염을 제거하면 곧 자연 소화되는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 조건에서 연소의 지속성은 알코올이 가장 우수했고, 337.0 s로 확인되었다. 즉, 방·실화가 발생했을 때 어떤 인화성 물질을 사용하느냐에 따라 화염의 지속 시간과 방사 범위의 차이가 있으므로 화재 진압이 완료된 직후 연소의 패턴, 방사 범위 및 잔존물 등을 입체적 해석하여 원인을 규명하고 판정하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

구획된 공간에 인화성 단일 물질을 각각 채우고 착화된 화염의 전파 속도, 방사 범위, 확산 패턴 및 연소 완료 시간 등을 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 실험에 사용된 인화성 액체 중에서 화염의 전파 속도는 등유가 0.2 s로 가장 빠르게 측정되었고, 알코올이 82.1 s로 가장 늦은 것을 알 수 있었다. 인화성 액체가 착화되어 화염이 가장 빠르게 최성기에 도달한 것은 시너이었고 19.0 s가 걸렸다. 그리고 가장 늦게 최성기에 도달하는 것은 알코올로 138.6 s로 측정되었다. 따라서 시너를 이용한 방·실화가 발생하면 화염이 급속히 방사되며 알코올을 이용할 때는 지속시간이 길다는 것을 고려하여 분석해야 한다.

(2) 인화성 액체 200 ml를 동일한 조건에 홀림 실험을 실시하여 연소가 완료되는 시간은 시너가 79.9 s로 가장 짧았고, 휘발유 135 s, 등유 170 s, 경유 231.4 s, 알코올 337.0 s 등으로 측정되었다. 그리고 실험에 사용된 인화성 액체가 연소될 때 화염의 하단 부분은 층류 패턴이 지배하였고, 상단 부분은 난류 패턴을 나타내는 것을 알 수 있었다.

(3) 동일한 조건을 적용한 대두유의 실험에서 착화를 시킨 후 화원을 제거하면 화염은 자연 소화되어 연소가 진행되지 않는 것을 확인하였고, 불완전 연소에 따른 흰색의 연기가 발생하는 것을 알 수 있었다. 즉, 대두유는 화원이 지속적으로 공급될 때 화염이 성장되고 확산되는 것으로

**Table 2.** Comparison of Characteristics of Flammables Confirmed during Combustion of Single Substance

Flammable liquids	1,000 mm propagation delay time [s]	Time of when smoke rose grows most [s]	Completion times [s]	Smoke colors	
				Max.	Final
Gasoline	0.7	18.5	135	Black	White
Kerosene	0.8	43.5	170	Black	White
Diesel	0.2	47.4	231.4	Black	White
Thinner	0.7	19.0	79.9	Black	White
Benzene	0.8	22.6	122.8	Black	White
Acetone	50.2	80.0	164.4	Black	White
Alcohol	82.1	138.6	337.0	Black	White
Bean Oil	-	-	-	White	

보아 화원의 제거를 통해서 손쉽게 화재를 진압할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 단일 물질을 이용한 홀림 실험에서 확인한 바와 같이 인화성 액체의 종류에 따라 화염의 전파 속도, 화염의 최성기 도달 시간, 연소 완료 시간 및 확산 패턴 등의 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 향후 혼합유에 대한 홀림 실험을 실시하여 객관적인 연소 특성을 제시하면 화재 원인 규명 및 판정을 위한 근거는 더욱 명확해질 것으로 판단한다.

## References

1. R. K. Chandler, "Fire Investigation", Delmar Centage learning, pp. 1-13, 406-424 (2009).
2. J. Jones, "Fire Investigation", First Edition, Oklahoma State University, pp. 1-13 (2000).
3. NFPA-921, "Guide for Fire and Explosion Investigations", pp. 4-16,17, 22-184-190 (2008).
4. T. Y. Hwang, "A Study on the Fire Investigation Techniques of Flammable Liquids", School of Environmental Kyung-Won University, pp. 15-19 (2011).
5. J. S. Kim, "Liquid Mixtures (including alcohol) Research Report on the Flammability Hazard", National Fire Service Academy, Fire Science Lab., pp. 1-15 (2009).
6. S. B. Choi, "Experimental Studies on the Burning Forms of Flammable Liquids", Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 98-110 (2009).
7. Korean Dangerous Center, "Dangerous Handbook", Dae-woong Publishing Co. (1993).
8. J. H. Hyun, "Qualitative Analysis of Some Kinds of Petroleum (Thinner, Gasoline, Kerosene, and Diesel Oil) by Gas Chromatography", Analysis Science & Technology, pp. 512-518 (2006).
9. H. S. Joe, "Study on the Flame Propagation Speed of Flammable Liquids and Patterns of Damage by Fire", Jeonju University, pp. 25-36 (2013).
10. John D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", Sixth Edition, Pearson Education Inc., pp. 23-28 (2007).
11. C. S. Choi and H. S. Joe, "Flame Propagation Rate of Flammable Liquid by Oil Flow Test Experiment of Division Fire", Proceeding of 2014 Spring Annual Conference (KIFSE), Daegu EXCO, pp.145-146 (2014).