방화조사를 위한 인화성 액체 연소흔적의 형태학적 연구

A Morphological Study of the Burn patterns of Flammable Liquids in Arson Investigations

이승훈* · 최돈묵**

Lee, Seunghun*, and Choi, Donmook**

Abstract

The determination of the involvement of liquid fuel is very important in fire investigations. However, it is very difficult to obtain a positive result through chemical analysis of the debris collected at fire scenes as liquid fuel burns or evaporates completely after fires. Determining whether liquid combustibles are involved in fire patterns is equally difficult because of various interference factors. The melting-burning of thermoplastic plastics is one such interference factors. In this study, we studied the characteristics of the fire patterns of liquid combustibles in arson investigations and the melting-burning of thermoplastics. We expect that the results are highly confident as diffusion of the melting-burning thermoplastic plastics flows consistently in the direction of gravity. Additionally, as liquid hydrocarbons involved in arson are intentionally poured and spread in places such as the thresholds, these traces may provide the investigator a higher degree of confidence to determine the cause of the arson.

Key words : Fire Investigation; Liquid Pattern, Thermoplastic, Arson

요 지

방화현장 조사에서 액체 탄화수소의 판단여부는 방화에 대한 확신을 갖게 하는 중요한 요소이다. 그러나 화재현장 액체 탄화수소들은 화재로 소실되는 등 감정시료에서 양성반응을 얻는 것은 어려운 일이다. 연소흔적을 통해서 액체 탄화수소를 판단하는 것은 여러 가지 간섭요소가 있으며 열가소성 플라스틱의 용융-연소는 그 중 하나이다. 본 연구에서는 액체 탄화수소의 연소로 인한 바닥재의 연소의 연소흔적과 열가소성 플라스틱의 용융-연소로 인한 바닥재의 연소흔적의 사례를 발취 비교하여 구분할 수 있는 특징적 지표를 탐색하였다. 열가소성 플라스틱의 용융-연소에 의한 확산은 중력방향으로 일관되게 흐르는 반면 방화현장에 관여된 액체탄화수소는 방화범의 의도에 의해 중력과 무관하게 살포되어 열가소성 플라스틱에서는 불가능한 문턱 등과 같이 비교적 높은 곳에서 확산되거나 독립된 Pool-shaped burn pattern과 Splash pattern을 생성시킬 수 있기 때문에 이러한 흔적의 발견은 현재 전통적으로 활용하고 있는 탐색방법인 ‘광범위하고 균일한 연소흔적’ 이상의 추가적인 근거를 제시하여 조사관의 판단에 증명력을 강화할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 화재조사, 액체가연물 연소패턴, 열가소성플라스틱, 방화

1. 서 론

방화범들은 라이터로 고체가연물에 직접 착화하거나 축진제로서 인화성 액체 탄화수소를 살포하고 점화시키는 경우도 있다. 국가화재정보시스템에 따르면 2016년 한 해 동안 발생한 화재건수는 43,413건이며 그 중 가솔린, 등유

등 석유류 위험물이 관여된 건수는 1,008(2.92%)건이다. 방화 및 방화의심 건수는 987건이다. 방화사건에서 석유류 위험물을 사용한 것은 94(9.52%)건이었다(NFDS, 2016). 화재조사관들이 액체 탄화수소의 관여여부를 확인하기 위해 전통적으로 사용해왔던 지표는 바닥재의 균일하고 광범위한 연소흔적(Pool-shaped burn pattern)이다. 그러나 현장

*정회원, 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발 조사관(E-mail: storm374@empal.com)

Member, Fire Investigator. Div. CSI. Seoul Police Agency

**교신저자, 정회원, 가천대학교 소방설비공학과 교수(Tel: +82-31-750-5716, Fax: +82-31-750-8749, E-mail: fire@gachon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. Fire & Disaster Protection Engineering Gachon University

에는 액체 탄화수소가 관여되지 않은 곳에서도 여러 가지 간접현상에 의해서 유사한 형태의 연소흔적이 발생하고 있다. 열가소성 플라스틱은 상온에서는 고체이지만 화재실의 열기에 의해 용융되어 액체로서 연소하며 물리적, 화학적 성질이 방화범들이 사용하는 액체 탄화수소와 유사하기 때문에 이로 인한 연소흔적은 액체 탄화수소가 관여되지 않은 곳에서도 유사한 Pool-shaped burn patterns을 생성하여 현장조사관의 판단을 방해한다. 화재현장에 관여된 액체 탄화수소의 연소흔적을 구분하기 위한 연구는 바닥재의 변형 정도와 형태에 집중되어 왔다. Choi et al. (2009)은 화재현장에서 발견된 광범위한 연소흔적에 대하여 지목하였으며 이러한 연소형태 분석은 플래시오버가 발생하기 전에 유용하며 플래시오버가 발생하여 형태의 경계면이 소멸될 경우는 연소형태 분석에 어려움이 있다는 사례 중심의 연구를 수행하였다. Hwang and Choi (2012)은 비교적 빠르게 화재가 확대될 수 있는 고체가연물인 화장지, 신문지, 섬유류 PVC 계열 장판 위에서 연소시키고 등유, 경유, 시너, 가솔린, 메탄올을 동일한 장판 위에 연소시켜 고체 가연물과 액체가연물의 연소 후 바닥재에 남는 형태적 차이를 비교하여 화재조사 실무자들이 현장의 연소형태를 분석할 때 활용할 수 있는 지표를 확인하였다. 실험 결과 고체 가연물에 의한 경우 가연물이 배치된 장소에 국한되는 정형적인 Out-line을 나타냈으며, 액체가연물은 바닥재의 기울기에 따라 흐르면서 불규칙한 Out-line을 나타내었고, 탄화된 Out-line을 벗어난 방울 모양의 탄화형태가 관찰되었지만 연소형태는 여러 인자에 영향을 받으므로 확실적인 적용에는 무리가 있다고 지적하였다. Joe and Choi (2017)는 액체가연물이 연소된 후 바닥재의 탄화 패턴과 단면의 구조 등을 해석하는 보다 심층적인 연구를 수행하였다. 열가소성 플라스틱의 용융-연소는 실제 화재조사관들의 판단에 상당한 혼란을 주는 간접요소임에도 불구하고 현재까지 연구된 바가 없다.

본 연구에서는 화재현장에서 확인된 열가소성 플라스틱의 용융-연소와 방화 축진제로 살포된 액체 탄화수소의 연소흔적을 형상학적으로 관찰하여 특징적 요소를 탐색하고 양자 간의 차이점을 확인하여 방화현장 감식에서 액체 탄화수소 연소흔적에 대한 구분에 기여하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 액체 가연물 관련 연소흔적

액체 탄화수소 관련 연소패턴은 NFPA 921을 비롯하여 관련 연구에 발표되었으며 국내외 공히 이미 정착되어 활용되고 있으며 화재현장에서 액체 탄화수소의 관여여부를 판단할 때 근거로 제시되고 있지만 판단에 혼란을 줄 수 있는 간접현상의 주의를 강조하고 있다. 각 연구에서는 액체 가연물 관련 연소패턴으로 다음과 같은 내용을 나열하고 있다.

2.1.1 Pool-shaped burn pattern

이 연소흔적은 Pool을 이루고 있는 액체 탄화수소에 의해서도 발생하지만 열가소성 플라스틱에 의해서도 발생하는 불규칙한 바닥재의 연소흔적이다. 이것은 부분적인 가열이나 소택물에 의해서도 발생할 수 있다(NEPA 921, 2008a, 6.3.7.8.4절 참조). 가연성 액체가연물의 분포는 넓은 부위에 광범위하게 균일한 가연물의 제공하게 되므로 광범위한 연소를 하게 되고, 액체의 흐른 경계는 액체가 흘러 연소한 부분과 흐르지 않은 부위에 뚜렷한 연소정도의 차이를 나타내는 특징적 연소흔적이다. Fig. 1은 Pool-shaped burn pattern의 예이다.

Fig. 1. Example of Pool-shaped Pattern

2.1.2 Pour pattern

Pour pattern은 위 Pool-shaped burn pattern과 동일한 형태이지만 액체 탄화수소가 의도적으로 관여된 연소흔적 말한다. 그러나 이러한 의도가 형태적으로 독특하게 나타나는 것은 아니므로 연소형태를 묘사할 때 이 용어를 사용하는 것을 피해야한다. 형태적 묘사로서는 정확한 용어는 “Irregularly fire pattern”이라고 한다(NEPA 921, 2008b, 6.3.7.8.5절 참조).

2.1.3 Splash pattern

Splash pattern은 액체 탄화수소가 바닥에 쏟아졌을 때 추락 충격에 의해서 작은 방울로 튀어 연소흔적의 경계를 넘어 부착되고 이것이 연소된 국부적인 연소흔적이다(Lee, 2015). Fig. 2는 Splash pattern의 예이다.

Fig. 2. Example of Splash Pattern

2.2 액체 탄화수소의 성질

액체 탄화수소는 수평 표면에 쏟아졌을 때 중력에 의해서 물질의 표면장력이 허락하는 수준의 두께로 넓게 퍼지는데 Modak (1981)은 에폭시 코팅된 콘크리트와 강철 표면에 가솔린과 등유를 쏟아 부은 실험에서 펼쳐진 액체의 두께는 쏟아 부은 양과 관계없이 일정한 두께를 가지며 그것은 0.22 mm라는 것을 확인하였고 Anthony et al. (2001)는 연소된 형태를 통해서 사용된 액체 탄화수소의 양을 예측하기 위한 쏟아 부었을 때 바닥에 퍼지는 형태와 연소흔적에 대하여 연구하였다. 액체 탄화수소의 표면장력은 일정하지만 바닥재의 특성에 따라서 다르게 나타날 수 있고 Anthony et al. (2001)의 연구에서 찾아 볼 수 있다.

Table 1. Comparison of Predicted and Empirically Derived Spill Thickness

Fuel / Material	Empirically derived thickness (mm)
Gasoline/Wood	0.67 · 0.05
Gasoline/Vinyl	0.56 · 0.05
Kerosene/wood	0.82 · 0.05
Kerosene/Vinyl	0.79 · 0.05

몇몇 연구들은 쏟아진 액체 탄화수소의 깊이를 통해 전체적인 양을 산출하려는 시도를 하였으며 대체로 약 2 mm 이하의 경향을 나타냈다(Christopher et al., 2013). 이 연구에서 실제화재현장은 바닥재의 틈새 또는 기울기 등에 의해서 실험적 데이터를 이용하여 산출한 양보다 실제 분포 범위가 작게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 이 연구는 실제 쏟아진 액체의 두께는 액체의 종류, 액체의 온도, 바닥재의 온도, 바닥재의 흡수와 관련된 성질, 쏟는 방법 등에 영향을 민감하게 받으며 중력에 의해 수평을 유지하려는 액체의 성질에 의해서 바닥재가 수평일 경우 두께는 일정하다는 것을 확인하였다. 바닥면이 수평이 아닌 경우에도 이곳에 쏟아진 액체 탄화수소는 중력에 대하여 수평을 유지하겠지만 액체 탄화수소 Pool의 깊이는 바닥재의 요철상태에 따라서 다양한 깊이를 가지게 될 것으로 사료된다.

2.3 열가소성 플라스틱의 성질

열가소성 플라스틱은 열에너지를 가하여 분자가 유동성을 갖도록 한 후 급형에 사출하거나 일정한 단면적을 가진 다이(Die)를 통해 압출한 다음 냉각시켜 고화시킨 플라스틱을 말하며 가열, 성형 공정 중 고분자의 화학적 변화가 없이 물리적인 변화만 수반되는 재료를 말한다. 쉽게 말하면 열을 가하면 연화되어 용융이 일어나고 냉각하면 다시 고화되는 플라스틱을 말한다. 석유화학 산업에서 제조되는 폴리에틸렌 등을 말하며 PE, PP, PVC, PS, ABS를 5대 범용수지라고도 한다. 일반적으로 가정이나 사무실 등 공간에 존재하는 열가

소성 플라스틱은 포장지, 의류, 생활가전제품의 하우징, 쓰레기통 등 많은 생활용품들이 있다. 열가소성 플라스틱은 대체적으로 150℃에서 열변형이 발생한다(Choi, 2017).

3. 액체 탄화수소와 열가소성 플라스틱의 비교검토

3.1 화재 성질 비교

액체 탄화수소와 열가소성 플라스틱은 상온상태에서 각 액체와 고체로서 존재하여 물리적 성질이 전혀 다르지만 화재의 고온상황 속에서 열가소성 플라스틱은 용융되어 일반적인 탄화수소 액체가연물과 유사한 물리적 성질을 가지게 된다. 또 석유류 액체가연물과 동일한 탄화수소 가연물이며 대부분 석유의 정제과정을 거쳐 생산한 물질이므로 근본적으로 화학적 성질 또한 석유류 액체가연물과 유사하다. Table 2 (Cafe, 1992)를 살펴보면 열가소성 플라스틱은 화재에서 액체로 상변화한 상태로 흐르며 연소를 확대시키기 때문에 액체 탄화수소가 관여된 것과 같이 광범위하고 균일한 연소 형태(Pool-shaped burn pattern)를 발생시킬 수 있다.

Table 2. Thermoplastic Properties

Plastic	Melting point range	Ignition point
ABS	88 ~ 125	416
Acrylics	91 ~ 125	560
Cellulosics	49 ~ 121	475 ~ 540
Nylons	160 ~ 275	424 ~ 532
Polycarbonate	140 ~ 150	580
Polyesters	220 ~ 268	432 ~ 488
Polyethylene Id	107 ~ 124	349
Polyethylene Hd	122 ~ 137	349
Polypropylene	158 ~ 168	570
Polystyrene	100 ~ 120	488 ~ 496
Polyurethanes	85 ~ 121	416
PTFE	327	530
P.vinylidenechlor	212	454
PVC	75 ~ 110	435 ~ 557

3.2 화재현장 분포 메커니즘 비교

방화현장에서 액체 탄화수소의 분포는 방화자의 의도에 의한 것으로 방화범들은 현장의 신속, 완벽한 연소를 위해서 액체 탄화수소를 활용하기 때문에 대부분 광범위한 지역에 걸쳐 살포 행위가 이루어진다. 액체 탄화수소 용기를 들고 이동하며 쏟아 붓는 행위에 의해서 살포되는 액체 탄화수소는 바닥에 액체가 바닥에 쏟아질 때 발생하는 추락 충격에 의해서 더욱 작은 방울로 분리되며 Splash pattern을 형성하게 될 수 있다. 그러나 화재현장의 열가소성 플라스틱은

화재열기에 의해 용융되어 광범위하게 퍼져 나가기 때문에 수평적인 장소에서는 넓게 확산되는 모습이며 기울기에 따라서 오직 중력에 의해서 일정한 방향으로 확산되는 모습일 것으로 판단된다. 화재가 성장하였을 때 방화에 사용되는 액체 탄화수소와 열가소성 플라스틱은 물리적, 화학적으로 매우 유사한 성질의 물질이지만 화재현장에서 양자의 가연물이 분포하는 메커니즘을 고려하면 그 차이를 구분할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 사례검토

위와 같은 연구문제를 확인하기 위해서 실제 방화현장에 액체 탄화수소가 관여되어 발생한 바닥재의 연소형태와 열가소성 플라스틱이 관여되어 발생한 바닥재의 연소형태를 검토하였다.

4.1 방화현장 액체탄화수소의 연소형태

Figs. 3과 4는 액체 탄화수소가 관여된 방화현장에서 촬영된 사진으로 액체 탄화수소의 살포 메커니즘에 의한 특성을 확인할 수 있는 주요 특징인 독립된 Pool-shaped burn pattern과 Splash pattern이 관찰되며, 바닥으로 돌출된 문턱 위로 액체가연물이 부착되어 연소된 흔적이 관찰되고 있다.

Fig. 3. Anti-gravity Pool-shaped Burn Pattern

Fig. 4. Separated Pool-shaped Burn Pattern & Splash Pattern

4.2 화재현장 열가소성 플라스틱의 연소형태

열가소성 플라스틱은 화재열기에서 용융되어 결국 액체 탄화수소로서 화재패턴에 영향을 미치게 된다. Fig. 5는 건물 옥상에서 화재가 발생하였을 때 현장의 방수재인 열가소성 재료가 녹아 연소한 것이며, Fig. 6은 목재 데크 위에 적재해둔 폴리에틸렌 재질의 파라솔 의자에 화재가 발생하면서 용융되어 연소한 것이다. 각 열가소성 물질이 화재에 의해 녹아 흐르면서 연소하였기 때문에 바닥재의 연소 경계의 형태는 마치 물이 흐른 것과 같은 곡선형태의 모습을 보이고 있다. 또한 이러한 흐름은 중력방향으로 일정하게 흘러가는 모습이며 한 개의 균일하고 광범위한 Pool-shaped burn pattern을 형성하였다는 공통점이 있다. 이것은 방화현장에서 2개 이상의 Pool-shaped burn pattern이 관찰되었던 점과 명확하게 구분될 수 있을 것으로 사료된다. 또 선정된 2개의 사례에는 연소부위 위에 바닥재 외 용융-연소하였던 잔류 물질이 화재 이후 냉각에 의해 다시 응고되어 발견되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5. Melting-burning Pattern of Waterproof Epoxy

Fig. 6. Melting-burning Traces of Parasol Chair Polyethylene

4.3 사례의 분석 및 결과

열가소성 플라스틱이 화재에 의해 녹아 퍼져나가는 경우에는 오직 중력에 의해 낮은 방향으로 흘러가는 반면 방화현장에서 살포되는 액체 탄화수소는 방화범의 의도에 의해서 곳곳으로 용기를 들고 이동하며 살포하는 경우가 있는데 이것은 열가소성 플라스틱이 용융되어 연소하는 모습을 구분할 수 있는 중요 지표가 될 것으로 사료된다. 분포 메커니

즘에 의한 차이를 화재 이후 관찰 가능한 다음 3가지의 연소형태로서 구분할 수 있다.

4.3.1 중력을 역행하는 흐름의 연소흔적

열가소성 플라스틱이 용융-연소하는 경우에는 애초에 열가소성 플라스틱이 존재하였던 위치에서 녹아 자연스럽게 낮은 곳으로 흘러가는 반면 방화에 사용된 액체 탄화수소는 방화범의 이동 살포 등에 의해 액체 탄화수소의 분포는 중력과 관계없이 방화범의 살포 동선을 따라서 Pool-shaped burn pattern이 발생할 수 있다. 현장에서 중력에 반하는 Pool-shaped burn pattern이 분포하고 있다면 이것은 열가소성 플라스틱의 용융-연소에 의한 Pour pattern일 가능성을 배제할 수 있다.

4.3.2 독립된 2개 이상의 Pool-shaped burn pattern

열가소성 플라스틱은 위치했던 지점으로부터 녹아 그 양이 많아지면 해당지점을 중심으로 범위가 확대되어 흘러가므로 독립된 분포를 가질 수 없다. 반면 액체 탄화수소는 방화범의 살포 방법에 따라서 독립된 Pool-shaped burn pattern이 형성될 수 있으며, 그 모습은 Fig. 2에 잘 나타나 있다. 현장에서 발견되면 열가소성 플라스틱의 용융-연소로부터 배제될 수 있다.

4.3.3 Splash pattern

Pool-shaped burn pattern의 경계부분에 추락 충격에 의해서 독립된 작은 액체 탄화수소의 국부적 연소흔적이 관찰되면 이것은 액체상태의 추락충격이 있었다는 것을 증명한다. 의심되는 고체 가연물이 바닥에 존재하고 있어 용융-연소하더라도 더 낮은 곳으로 추락하는 상황이 아니라면 자연스럽게 흘러가는 형태를 가지며 Splash pattern은 발생하지 않을 것이므로 Pool-shaped burn pattern의 경계 너머에서 Splash pattern이 관찰된다면 열가소성 플라스틱의 용융-연소 가능성을 배제할 수 있으며 액체탄화수소의 고의 살포에 대한 판단에 더욱 높은 증명가력을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

열가소성 플라스틱은 상온에서 고체이지만 화재상황에서 용융되고 액체로 상변화하고, 화학적 성질 또한 액체탄화수소와 유사하여 결과적으로 유사한 Pool-shaped burn pattern을 생성하기 때문에 액체 탄화수소 관여여부 판단을 위한 지표로서 확신을 가지기 어려웠다. 그러나 각 물질이 현장에 확산될 때 방화범에 의해 고의적으로 살포되는 액체 탄화수소와 화재열기에 의해 용융되어 흐르며 연소하는 물질은 확산 또는 살포 방식의 차이로 인해 다음과 같이 구별 가능한 흔적이 발견될 수 있다.

- (1) 열가소성 플라스틱의 용융-연소는 중력에 역행하는 흐름과 분포를 나타낼 수 없다. 방화 촉진제는 의도에 의해 살포되므로 문턱과 같은 중력과 무관한 높은 곳에도 살포될 수 있다.
- (2) 열가소성 플라스틱의 용융-연소는 독립된 독립적인 Pool-shaped burn pattern을 형성할 수 없다. 방화 촉진제는 이동 중 뿌려지는 경우 독립된 Pool-shaped burn pattern을 생성시킬 수 있다.
- (3) 열가소성 플라스틱의 용융-연소는 Splash pattern이 생성되지 않는다. 용기를 들고 다니며 살포하는 경우 액체로서 바닥에 떨어지는 충격에 의해 Pool-shaped burn pattern의 경계 너머에 Splash pattern을 생성시킬 수 있다.

이러한 분포 메커니즘에 의한 차이를 구분하여 현장을 관찰하고, 논리적으로 설명한다면 현재 활용하고 있는 전통적인 액체 탄화수소의 탐색방법인 ‘광범위하고 균일한 연소 흔적’ 이상의 추가적인 근거를 제시하여 조사관의 판단에 증명력을 강화할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Anthony D.P., McElroy, J.A., and Daniel, M. (2001). Flammable and combustible liquid spill/burn patterns. NIJ Report 604-00, National Institute of Justice.
- Choi, D.M., Choi, S.B., and Choi, J.S. (2009). A study on the discrimination of fire pattern by the phenomenological observation: Focused on the fire cases. *Fire Science and Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 98-110.
- Choi, J.H. (2017). *An experimental study on the fire-propagation characteristics of thermoplastics*. Master's thesis, Gachon University, p. 44.
- Christopher L.M., Benfer, M.E., Gottuk, D.T. (2013). *Fire dynamics and forensic analysis of liquid fuel fires*. U.S. Department of Justice.
- Hwang, T.Y., and Choi, D.M. (2012). A study on experimental characteristics in fire investigation techniques of flammable liquids. *Fire Science and Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 7-14.
- Joe, H.S., and Choi, C.S. (2017). A study on the characteristics of burning after gasoline spraying on vinyl floor. *Proceedings of 2017 Annual Fall Conference*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 31-32.
- Lee, S.H. (2015). *Theory and practice of fire investigation* (3rd ed., p. 82). Paju, Korea: Donghwa Press.

Modak, A.T. (1981). *Ignitability of high-fire-point liquid spills*. EPRI Report NP-1731, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

NFDS (National Fire Data System). (2016). *Fire statistics 2016*. Retrieved from https://www.nfds.go.kr/fr_base_0001.jsf

NFPA 921. (2008a). *Guide for fire and explosion investigation*. 6.3.7.8.4, p. 56.

NFPA 921. (2008b). *Guide for Fire and Explosion Investigation*. 6.3.7.8.5, p. 56.

Tony, C. (1992). *Physical Constants for Fire Investigators*. Reproduced from Firepoint magazine: Journal of Australian Fire Investigators. Retrieved from <http://www.tcforensic.com.au/docs/article10.html>

Received	■ April 24, 2018
Revised	■ April 26, 2018
Accepted	■ May 8, 2018