

[Research Paper]

방화 범죄에서 가연성 물질과 연소촉진제의 연소 특성에 관한 연구

박혜정 · 남기훈^{*†} · 김광일^{**}

인제대학교 재난관리학과, ^{*}창신대학교 소방방재공학과, ^{**}인제대학교 보건안전공학과

Study on the Combustion Characteristics of Flammable materials and Combustion Accelerants in an Arson

Hye-Jeong Park · Ki-Hun Nam^{*†} · Kwang-Il Kim^{**}

Department of Emergency and Disaster Management, Inje University

^{*}Department of Fire and Disaster Prevention Engineering, ChangShin University

^{**}Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University

(Received August 2, 2017; Revised August 29, 2017; Accepted September 6, 2017)

요 약

본 연구는 방화에 사용된 가연성 물질, 연소촉진제의 연소특성을 파악하여 방화에 사용 가능한 물질 관리의 필요성을 인지하고 방화를 예방하기 위한 연구이다. 방화에 대한 통계자료를 조사 및 분석하여 사용된 가연성 물질(목재, 종이, 합성섬유, 합성수지)과 연소촉진제(휘발유, 경유, 페인트 도료)를 선정하였다. 가연성 물질의 열적 특성을 파악하기 위해 열 중량 분석을 실시하였다. 또한, 가연성 물질과 연소촉진제의 연소특성을 비교 및 분석하기 위해 연소·화염전파속도 측정 실험을 실시하여 실험 결과를 도출하였다.

ABSTRACT

The purpose of this study is to recognize the necessity for the management of the available materials in cases of arsons and to prevent arson gaining an understanding of the combustion characteristics of the flammable materials and combustion accelerants in arson cases. We investigated and analyzed the statistical data on arsons and selected flammable materials (wood, paper, synthetic textiles, synthetic resins), and combustion accelerants (gasoline, diesel, solvent) that are frequently used in cases of arson. We conducted a thermogravimetric analysis to assess the thermal properties of the flammable materials. Also, we conducted burning and flame spread rate tests for the purpose of comparing and analyzing the combustion characteristics of the flammable materials and combustion accelerants.

Keywords : Arson, Combustion characteristics, Flammable materials, Combustion accelerants, Burning and flame spread test

1. 서 론

우리나라는 1962년 경제개발을 시작으로 빠른 경제성장을 이룩하였다. 하지만 1997년 경제위기 이후 경기침체의 장기화로 인해 빈곤, 실업, 사회적 불평등 등과 같은 문제가 발생하였다.⁽¹⁾ 이로 인해 강도, 살인, 방화, 성폭력 등과 같은 흉악범죄가 지속적으로 증가 추세를 보이고 있으며, 이는 한국 사회에 많은 혼란을 야기하고 국민의 생명과 재산을 위협하고 있다.(Figure 1)⁽²⁾

그 중 방화의 경우 과거에는 타인에 대한 보복, 범죄은닉과 같은 동기를 가졌으나 최근에는 사회 불만, 정신이상 등 다양한 동기를 가진다. 범죄 대상 또한 불특정 다수 또는 문화재와 같은 국가 주요 시설물이 범죄 대상이 되고 있다. 방화의 대표적인 사례는 2003년 대구지하철 방화 사건, 2008년 승례문 방화 사건이 있다. 대구지하철 방화 사건에서는 192명의 사망자와 약 516억 원의 재산피해가 발생하였다. 승례문 방화 사건에서는 약 100억 원의 재산 피해와 국보 1호가 소실되었다.

[†] Corresponding Author, E-Mail: nkh0712@gmail.com, TEL: +82-55-250-1305, FAX: +82-55-250-1306

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

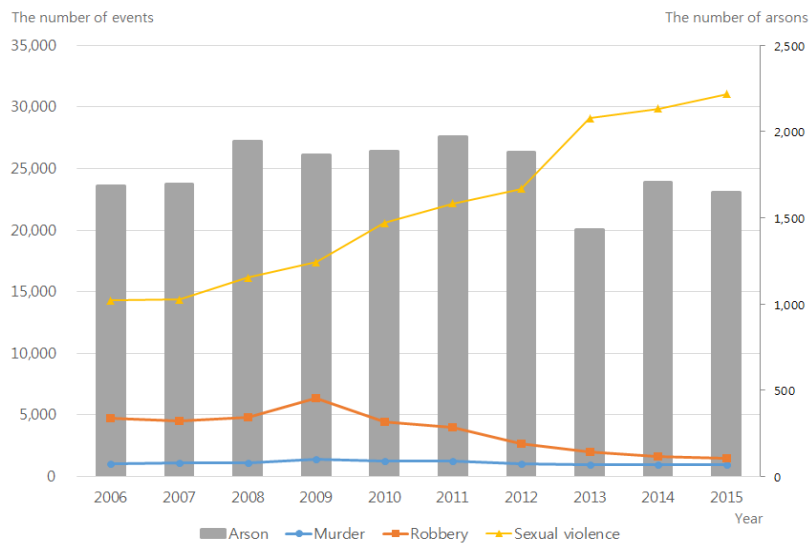


Figure 1. Occurrence frequency of felonies in recent decades in south korea.⁽²⁾

Table 1. Classification of Ignition Sources, Combustion Accelerants, and Flammable Materials on Arson Crime in Busan Metropolitan⁽³⁾
(The Number of Events)

Classification		2009	2010	2011	2012	2013
Ignition sources	Lighter	131	124	93	75	46
	Gasoline	3	3	3	3	2
Combustion Accelerants	Diesel	2	2	1	1	3
	Paint Thinner	9	1	3	2	1
	Fabric	33	24	42	20	9
Flammable materials	Paper	36	36	21	12	14
	Wood	11	12	6	10	7
	Synthetic Resins	12	13	15	8	8

법무연수원의 범죄백서(2016)에 따르면 방화는 2006년 1,685건이 발생했으며 현재까지 증가와 감소를 반복하고 있다. 비록 범죄 발생 건수는 감소 추세를 보이고 있지만 방화는 인명 및 재산의 막대한 피해를 야기하며, 피해의 범위를 예측하기 어려워 지속적인 관리와 예방이 반드시 필요하다.

방화 현장에서 방화범들은 착화를 용이하게 하고 빠른 화염확산을 위해 가연성 물질로써 종이, 목재, 직물류 등을 사용하고, 연소촉진제로써 가솔린, 페인트 도료 등과 같은 인화성 액체를 사용하고 있다.⁽³⁾ 연소촉진제로 사용된 물질들은 인화점이 낮아 작은 점화원에 의해서도 쉽게 착화되며, 가연성물질은 신속하게 화염을 전파시켜 화재 위험성을 더욱 높이고 있다.

방화 사례를 살펴보면 대구지하철 방화 사건에서는 휘발유가 사용되었으며 승례문 방화 사건에서는 페인트 도료가 사용되었다.^(4,5) 이러한 연소촉진제는 일상에서 접근 및 취급이 용이하여 많은 사람들이 그 위험성에 대한 심각성을 간과하고 있다.

본 연구에서는 국내 방화현장에서 사용된 연소촉진제와

가연성 물질에 대해 조사 및 분석하였다. 또한, 연소촉진제와 가연성 물질의 연소특성을 파악하기 위해 열 중량 분석과 연소 및 화염의 확산속도 실험을 실시하였다. 그 결과를 분석하여 연소촉진제의 더욱 면밀한 관리 및 방화 예방의 필요성에 대해 인지하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험 재료의 분류

실험 재료는 부산광역시 소방안전본부의 화재통계자료 (Table 1)를 활용하여 실제 방화에서 사용된 연소촉진제, 가연성 물질, 점화원을 분석하여 선정하였다. 분석결과 연소촉진제로는 가솔린, 경유, 페인트 도료가 사용되었으며, 가연성 물질로 목재류, 종이류, 직물류, 합성수지류, 점화원으로 라이터가 사용된 것으로 분석되었다.⁽³⁾ 이에 본 연구에서는 실험을 위해 연소촉진제로 휘발유, 경유, 페인트 도료, 가연성 물질은 합판(목재류), 골판지(종이류), 합성섬유(직물류), 바닥 장식재(합성수지류)로 선정하였다.



Figure 2. Thermogravimetric analyze (TGA).⁽⁷⁾

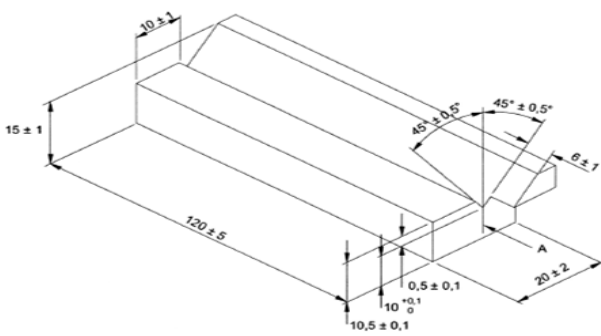


Figure 3. Horizontal flame test apparatus.⁽⁹⁾

2.2 실험방법

방화에서 사용된 연소촉진제와 가연성 물질의 연소특성을 파악하기 위해 가연성 물질의 열 중량 분석, 가연성 물질과 연소촉진제의 연소 및 화염전파속도에 대한 실험을 실시하였다.

가연성 물질의 열적 특성 평가를 위해 열 중량 분석기 (Thermogravimetric Analyzer : TGA)를 사용하여 각 시료별 (크기 : 5 mm×5 mm) 온도 상승에 따른 물질의 질량 감소 및 분해 속도를 분석하였다.(Figure 2)⁽⁶⁾ Purge gas(air)를 주입하면서 1,300 °C(승온 속도 : 20 °C/min)까지 상승 시켜 시료의 열분해를 관찰하였으며, 각 시료별로 1회 실시하였다.

물질의 연소 및 화염확산속도 실험은 건축 재료의 화염

전파시험방법(KS F 2844: 2002)⁽⁸⁾과 화재위험성 시험-제 11-10부- : 시험 화염-50W수평 및 수직화염 시험방법(KS M IEC 60695-11-10:2005)⁽⁹⁾에 따라 실시하였다.(Figure 3) 실험 환경 조건은 기준에 따라 기온 27 °C, 습도 47%로 유지하였다.

연소 및 화염확산속도 실험은 길이 500 mm, 폭 100 mm, 두께 2 mm인 가연성 물질의 겉면에 10 ml의 연소촉진제를 균일하게 흡수시킨 뒤 라이터(점화원)로 착화시켜 연소 및 화염확산시간을 측정하였다. 화염 전파시간은 점화원에 의해 가연성 물질이 착화되어 육안으로 화염을 확인한 시점부터 화염이 소실되는 시점까지로 하였다. 연소속도의 측정은 시료에 대한 교차실험을 3회씩 실시하였다. 또한, 가연성 물질의 실험 전후 중량을 측정하여 아래 산출 공식에 따라 연소속도를 산정하였다.

$$B_v(g/min) = \frac{W_0 - W_t}{t} \times 60 \tag{1}$$

여기서 B_v 는 연소속도(g/min), W_0 는 연소 전 무게(g), W_t 는 연소 후 무게(g), t 는 연소 시간(s)을 의미한다.

또한, 화염전파시간을 측정하기 위해 실험 과정을 비디오 레코딩하여 실측하였으며, 이를 바탕으로 아래의 화염 전파속도 산출 공식에 적용하여 실험 결과를 도출하였다.

$$F_v(m/s) = \frac{m}{t} \tag{2}$$

여기서 F_v 는 화염전파속도(m/s), m 는 시료의 길이, t 는 화염전파시간(s)을 의미한다.

2.3 실험결과 및 고찰

가연성 물질(목재, 종이, 직물, 합성수지)의 열 중량 분석 결과는 Table 2와 같다.

열 중량 분석 결과 종이류(골판지)는 가장 낮은 온도 (33.97 °C)에서 1차 분해가 개시되었으며, 2차 분해는 가장 높은 온도인 367.38 °C에서 이루어졌다. 목재류인 합판은



(a) Burning paper with gasoline



(b) Burning fabric with diesel

Figure 4. Burning and flame spread rate test.

Table 2. Thermogravimetric Analysis of Flammable Materials

Classification	Primary Pyrolysis	Secondary Pyrolysis	Tertiary Pyrolysis	Quaternary Pyrolysis	weight Loss at 1300 °C (%)
Wood (Plywood)	83.18 °C	181.04 °C	503.19 °C	-	99.28
	8.92%	67.2%	23.15%	-	
Paper (Boxes-corrugated Paper)	33.97 °C	367.38 °C	441.75 °C	707.12 °C	88.57
	6.92%	75.61%	2.24%	3.82%	
Synthetic Fiber (Fabric)	73.05 °C	220.52 °C	490.09 °C	-	96.42
	6.7%	80.2%	9.57%	-	
Synthetic Resins (Linoleum)	81.76 °C	310.01 °C	590.39 °C	709.72 °C	83.47
	6.33%	47.95%	18.92%	10.27%	

Table 3. Burning and Flame Spread Rate of Flammable Materials with Combustion Accelerants

Combustion Accelerants	Gasoline		Diesel		Thinner	
	Bv (g/min)	Fv (m/s)	Bv (g/min)	Fv (m/s)	Bv (g/min)	Fv (m/s)
Flammablematerials						
Wood (Plywood)	0	2.27	0	0.001	0	2.27
Paper (Boxes-corrugated Paper)	1.8	2.27	1.8	0.006	1.8	2.38
Synthetic Fiber (Fabric)	1.95	1.78	1.95	0.0009	1.95	2.08
Synthetic Resins (Linoleum)	0	1.85	0	0.0013	0	1.85

(B_v : Burning Rate (g/min), F_v : Flame Spread Rate (m/s))

83.18 °C, 합성수지인 바닥장식재는 81.76 °C에서 열분해가 개시되었으며, 이는 실제 방화현장에서 단일 착화원(가연물)으로써 연소 개시가 어렵다는 것을 의미한다. 목재류(합판)는 연소에 용이한 섬유질을 다량 함유하고 있고, 직물류(합성섬유)는 주원료가 발화점이 낮은 석유류로 구성되어 있다. 이로 인해 혼합 물질의 종류가 다양한 종이류나 합성수지류에 비해 낮은 온도에서 열분해가 종료되었으며 최종적으로 95% 이상 분해되었다.

가연성 물질에 연소촉진제를 적용한 연소 및 화염전파 속도 실험은 Figure 4와 같이 실시되었으며, 실험 결과는 Table 3과 같다.

연소속도 실험에서 연소촉진제(휘발유, 경유, 페인트 도료)에 대해 목재류와 합성수지류는 시료의 중량변화가 없으며, 연소촉진제만 연소되어 연소속도 측정이 불가능하였다. 종이류와 직물류는 모든 연소촉진제에 대해 완전연소되었으며, 연소속도가 각각 1.8 g/min, 1.95 g/min로 측정되었다. 목재류의 경우 연소촉진제의 흡수율이 높지만 발화점이 400~600 °C이고 분자구성이 치밀하여 연소촉진제만 연소하였다. 합성수지류는 연소촉진제의 흡수가 거의 이루어지지 않으며 난연성 물질이 혼합되어 있어 물질의 연소가 이루어지지 않았다. 종이류와 직물류는 연소촉진제의 흡수가 원활하고 밀도가 낮아 연소촉진제와 물질이 함께 연소되었다. 실험 결과에서 목재류와 합성수지류는 발화점이 높고, 물질 구성이 치밀하여 연소촉진제만 연소되어 물

질의 무게 변화가 거의 없었다. 종이류와 직물류는 연소촉진제의 흡수율이 높으며, 목재류와 합성수지류에 비해 공기 접촉 면적이 넓고 물질 구성의 치밀도가 낮아 연소촉진제 및 물질의 완전 연소가 가능하였다.

화염전파속도에서 연소촉진제인 휘발유, 경유, 페인트 도료에 대해 각각 목재류는 2.27 m/s, 0.001 m/s, 2.27 m/s, 종이류는 2.27 m/s, 0.006 m/s, 2.38 m/s, 직물류는 1.78 m/s, 0.0009 m/s, 2.08 m/s, 합성수지류는 1.85 m/s, 0.0013 m/s, 1.85 m/s이다. 목재류와 종이류는 4가지 시료 중 화염전파속도가 빠른 것으로 나타났다. 이는 목재 및 종이류에서 연소촉진제의 흡수율이 높고, 시료 표면에 형성된 연소촉진제 증기에 의해 화염이 빠르게 전파되었기 때문이다. 직물류의 경우 연소촉진제의 물질에 대한 흡수율이 높지만 공기 접촉면이 넓고 물질 구성이 치밀하지 못하여 연소촉진제와 물질의 연소와 함께 화염이 전파되었다. 합성수지류는 연소촉진제가 흡수가 이루어지지 않았으며, 연소촉진제만 연소되면서 화염의 전파가 이루어졌다.

또한, 인화점이 경유는 55 °C 이상, 휘발유는 -21 °C 이하, 페인트 도료는 아세트산에스터, 부탄올, 톨루엔 혼합물로 21 °C 이하이다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 본 실험에서 인화점이 높은 경유는 화염 전파 시 휘발유 또는 페인트 도료보다 많은 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 즉, 가연성 물질의 화염전파 속도는 연소촉진제의 흡수율이 높은 목재류와 종이류가 가장 빨랐으며, 직물류와 합성수지류는 목재류와 종이류보다 느

렸다. 이는 목재류, 종이류에서 물질의 특성에 따라 연소촉진제의 흡수 및 증발이 용이하여 표면에 생성된 유증기에 의한 것임을 알 수 있었다. 하지만, 직물류의 경우 물질이 가지는 화학적 성분에 의해 화염전파와 동시에 물질의 연소가 이루어져 비교적 전파 속도가 느렸다. 합성수지류는 표면이 난연 및 방수 처리되어 연소촉진제의 흡수가 이루어지지 않아 화염전파속도 측정 시 연소촉진제만 연소하면서 화염이 전파되어 목재 및 종이류에 비해 화염의 전파속도가 느렸음을 알 수 있다.

3. 결 론

방화는 다양한 동기를 가지며 방화의 특성상 야간에 주로 발생되어 막대한 인명 및 재산 피해를 유발한다. 이에 본 연구는 실제 방화의 화재현장 자료를 바탕으로 한 조사 및 실험 연구를 실시하였다. 방화에 사용된 물질을 분석하기 위해 부산광역시의 2006년부터 2013년까지 화재 통계 자료를 분석하였다. 방화에서 사용된 가연성 물질은 목재류, 종이류, 직물류, 합성수지류, 연소촉진제는 휘발유, 경유, 페인트 도료로 분석되었다. 이를 바탕으로 방화에서 물질에 따른 연소 위험성을 파악하기 위해 가연성 물질에 대한 열 중량 분석을 실시했으며, 가연성 물질과 연소촉진제의 연소특성을 파악하기 위해 연소 및 화염전파속도를 측정하였다.

실험 결과 사용된 가연성 물질의 열적 특성과 연소촉진제의 특성이 연소 및 화염전파 속도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 목재류는 열분해 개시온도가 83.18 °C로 가장 높고, 종이류는 33.97 °C로 가장 낮다. 하지만 실험을 통해 이 두 가연물의 화염전파속도가 가장 빠른 것을 확인할 수 있었다. 이는 목재류와 종이류에 연소촉진제를 적용했을 때 흡수가 신속하게 이루어졌으며, 이로 인해 물질의 표면에 유증기의 형성이 단시간에 이루어졌기 때문이다. 직물류와 합성수지류의 경우 물질의 열분해 개시온도가 각각 73.05 °C, 81.76 °C로 단일 물질에서 연소의 개시가 어려움 알 수 있었다.

연소 및 화염전파속도 실험에서 직물류에 연소촉진제를 적용한 즉시 흡수가 이루어졌으나 직물류의 특성(고르지 못한 표면, 물질과 유증기 사이 공기층 형성)으로 직물이 연소하면서 화염전파가 이루어졌다. 합성수지류의 경우 연소촉진제의 흡수가 이루어지지 않았으며 물질 표면에 유증기 형성이 원활하지 않아 연소촉진제 자체가 연소하면서 화염전파가 이루어졌다.

본 연구를 통해 방화에는 주변에서 쉽게 구할 수 있는 가연성 물질 및 연소촉진제가 사용되고 있음을 알 수 있었다. 또한, 사용된 가연성 물질과 연소촉진제의 물리·화학적 조합과 환경적 요건에 따라 방화가 대형화재로 전개될 수 있음을 알 수 있었다. 국내에서는 위험물질의 안전한 관리를 위해 관련 법령을 따르고 있지만, 방화에 사용

된 물질은 주로 일상에서 활용도가 높은 물질들로 체계적이고 구체적인 관리가 어려운 실정이다. 이에, 지속적으로 변화하는 사회적 환경 및 생활환경에서의 방화를 예방하고 인명 및 재산을 보호하기 위해 연소촉진제 또는 가연성 물질의 체계적이고 적절한 관리에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참 언

이 논문은 주저자의 2012년도 석사학위논문에서 데이터를 활용하여 재구성하였음.

References

1. W. S. You and S. H. Hwang, "A Comparative Study of the Security Prevention Strategies on Arson: Focused on the Behavioral Characteristics between Serial Arsonists and Simple Arsonists", Korean Security Science Review, Vol. 29, pp. 139-162 (2013).
2. Ministry of Justice, "White Paper on Crime" (2017).
3. Busan Metropolitan City Fire Safety Headquarters, "Fire Statistics 2009-2013" (2013).
4. H. G. Seong and S. J. Park, "A Case Study on the Crime of Arson and Arsonist in the Train of Daegu Metropolitan Subway", KIC 2003-48, Korea Institute of Criminology (2003).
5. Seoul Metropolitan Fire and Disaster Headquarters, "Comprehensive Report on Sungnyemun Fire" (2008).
6. S. J. Yang, C. D. Lee and J. Y. Kang, "A Numerical Study of the Effect of Polymers Pyrolysis Rate on Fire Growth through TGA Analysis", Proceedings of 2009 Autumn Annual Conference, The Korean Society for Railway, pp. 2764-2772 (2009).
7. Artisan Technology Group, "Thermogravimetric Analyze", <http://www.artisanag.com> (2017).
8. Korean Agency for Technology and Standards, "Test Method for Flame Spread of Building Products", KS F 2844, (2012).
9. Korean Agency for Technology and Standards, "Fire hazard testing -Part 11-10: Test flames- 50 W horizontal and vertical flame test methods", KS M IEC 60695-11-10 (2016).
10. Korea Occupational Safety & Health Agency, "MSDS-Gasoline" (2017).
11. Korea Occupational Safety & Health Agency, "MSDS-Clean Diesel" (2017).
12. Korea Occupational Safety & Health Agency, "MSDS-Solvent" (2017).