[Technical Paper]

탄화패턴 및 유증기 분석에 의한 카펫화재의 조사기법에 관한 연구

박은주 · 최충석^{†*}

전주대학교 소방안전공학과 박사과정, *전주대학교 소방안전공학과 교수

Investigation Method for Carpet Fires by Analyzing Carbonation Patterns and Oil Vapor

Eun-Ju Park · Chung-Seog Choi^{†*}

Graduate Student, Dept. of Fire Safety Engineering, Jeonju University

*Professor, Dept. of Fire Safety Engineering, Jeonju University

(Received November 15, 2020; Revised December 12, 2020; Accepted December 14, 2020)

요 약

본 연구에서는 탄화패턴 및 유증기 분석에 의한 카펫화재의 조사기법을 제시하는 데 있다. 카펫의 연소는 층류와 난류가 지배하였고, 바닥면은 달무리 패턴(Halo pattern)을 형성되었다. 인화성 액체(flammable liquid)가 뿌려진 바닥재의 연소 패턴은 중심부가 탄화되는 도넛모양(Doughnut-shaped) 및 원형 패턴(Circular pattern)이 형성되었다. 실제현미경에 의한 표면 분석에서 카펫의 방염 처리 유무와 관계없이 경계면은 용융과 재결합이 진행되는 것을 알 수 있었다. 연소가 완료된 후에 가스검지관(Gas detector tube)을 이용한 유증기의 포집 분석에서 일반카펫은 검지관의 눈금 1~2개 정도가 짙은 녹색으로 변색되었고, 일반카펫과 휘발유의 연소는 검지관의 눈금 2~3개 정도가 반응하였다. 그리고 방염카펫은 검지관의 눈금 1~2개 정도가 짙은 녹색으로 변색되었으며, 방염카펫과 휘발유의 연소는 검지관의 눈금 5~6개 정도가 변색되는 것으로 분석되었다. Gas Chromatography & Mass Spectrometry (GC & MS) 분석에서 연소 생성물의 차이는 명확하게 구별할 수는 없으나 반응 패턴의 세기는 차이가 발생하는 것으로 확인되었다.

ABSTRACT

We present a fire investigation method for carpets by analyzing the carbide pattern and oil vapor. The combustion of carpets is dominated by laminar and turbulent flow, and the combustion pattern on the floor surface is shaped like a halo pattern. The combustion pattern on flooring material sprayed with an flammable liquid takes a donut-shaped and a circular pattern in which the core is burned. Surface analysis by substance microscopy showed that the boundary surface was melting and recombining, regardless of whether or not the carpet was treated with flame retardant. In the analysis of the capture of oil vapor using a gas detector tube after combustion was completed, the general carpet was discolored to dark green with one to two divisions, and combustion of ordinary carpets and gasoline exhibited two to three divisions. It was found that one to two divisions of flameproof carpets were discolored to dark green, and combustion of flameproof carpets and gasoline produces five to six divisions. The differences in combustion products could not be clearly distinguished using gas chromatography and mass spectrometry (GC & MS), but the strengths of their response patterns were found to be different.

Keywords : Fire investigation method, Halo pattern, Donut-shaped, Circular pattern, Gas detector tube, GC & MS

1. 서 론

소방청 화재 통계자료에 의하면 최근 5년간 전국의 방화는 매년 1,000건 정도가 발생되는 것으로 조사되었다. 다중

이용업소에서 발생한 방화건수는 2017년 9건, 2018년, 2019년 각 17건으로 점유율을 보면 2017년 1.48%에서 2019년 3.19%로 증가하는 경향이 있다⁽¹⁾. 방화 현장에서 유류는 연소 촉진제로 활용되며, 다중이용시설에서 화재가 발생하면

[†] Corresponding Author, TEL: +82-63-220-3119, FAX: +82-63-220-2056, E-Mail: enetek@naver.com

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

많은 인명피해가 발생할 수 있다. 일부의 연구자들은 연소 시험법에 따른 바닥재의 연소 및 탄화특징⁽²⁾, 비닐장판 위에서 연소된 인화성 액체의 성장 특성과 탄화페턴⁽³⁾, 비닐 바닥재 위에 휘발유를 뿌린 후 연소될 때의 특성⁽⁴⁾, 인화성 액체의 연소거동 및 탄화페턴⁽⁵⁾ 등을 연구하였다. 그러나 다중이용시설에서 사용되고 있는 일반카펫과 방염카펫이 직접 화염에 노출되었을 때와 인화성 액체를 뿌렸을 때의 탄화페턴의 특성에 대한 연구는 부족한 것으로 조사되었다. 그리고 화재조사요원은 가스검지관(Gas detector tube)으로 사고 원인을 판정하고 있으나 과학적인 접근보다는 개인의 경험에 의존하는 경향이 있다. 또한, 가스검지관 및 화재감식·감정에 적용하기 위한 Gas Chromatography & Mass Spectrometry (GC & MS)의 연구는 일부 연구자들에 의해 인화성 액체를 촉진제로 사용한 방화 화재의 감식기법 연구⁽⁶⁾, 유류화재의 감식기법의 실험적 연구⁽⁷⁾ 등을 연구하였다. 그러나 일반카펫과 방염카펫의 연소거동 및 탄화페턴과 가스검지관 및 GC & MS 분석 등 카펫화재의 총괄적인 조사기법 연구는 부족하다.

따라서 본 연구에서는 카펫의 표면에 휘발유(Gasoline), 시너(Thinner), 경유(Diesel), 알코올(Alcohol)을 뿌리고 연소되었을 때의 탄화페턴을 제시하는 데 있다. 또한, 연소가 완료된 잔존물에 대한 가스검지관의 반응특성 및 GC & MS를 이용한 반응시간에 따른 페턴 발생 유무를 제시하여 화재원인 판정을 위한 근거를 제시하고자 한다.

2. 실험 방법 및 조건

Figure 1은 구획된 공간에서 일반카펫과 방염카펫 위에 인화성 액체를 뿌린 후 연소 실험이 진행된 실험실의 개략도이다. 실험이 진행된 조건은 온도 23~25 °C, 습도 84~89%, 풍속 0.3~0.5 m/s를 일정하게 유지시켰다. 화염의 진압은 이산화탄소소화기(Carbon dioxide extinguisher, NK Co., Korea)를 사용하였다. 실험실은 1,000 m³로 정육면체의 구획된 곳이며, 연소가 진행된 바닥은 1 m²의 내화벽돌로 제작하였다. 한 변의 길이가 90 cm인 정사각형 모양의 카펫을 각각 바닥에 깔았으며, 바닥재 위에 방화가 발생한 상황을 인위적으로 가정하였다. 실험에 사용된 휘발유, 시너, 경유, 알코올 등은 각각 100 ml를 사용하였다. 그리고 연소가 진행될 때의 온도 측정을 위해 바닥으로부터 30 cm 간격으로 크로멜-아로멜 열전대를 설치하였다. 디지털카메라(Digital camera, EOS 80D, Canon Co., Japan)와 비디오카메라(Video camera, FDR-AXP55, Sony Co., Japan)를 사용하여 연소 거동을 촬영하였다. 화염의 온도는 온도측정시스템(Temperature measuring system, Festec Co., Korea)을 사용하여 실시간 기록하였다. 연소가 완료된 바닥재의 유증기의 포집은 가스검지관(Gas detector tube, Gastec Co., Japan)을 사용했으며, 소손된 카펫의 탄화페턴은 실체현미경(Stereoscopic microscopic, NIKON SMZ25, Japan)을 이용하여 분석하였고,

Figure 1. Plan drawing and measuring equipment arrangement drawing for the fire test of flammable liquid.

Figure 2. An actual photograph showing combustion behavior when flammable liquid is sprayed and burned on a normal carpet.

성분 분석은 Gas Chromatography & Mass Spectrometry (GC & MS, PekinElmer Co., Clarus 600, Turbomarix 350 ATD, USA)을 사용하였고, 이때 캐리어 가스는 99.99%의 헬륨을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 일반카펫에 휘발유, 시너, 알코올, 경유 등을 뿌린 후 착화시켰을 때의 연소 거동을 나타낸 실체사진이다. 인화성 액체는 100 ml를 각각 사용했으며, 방화를 가정하여 인위적으로 착화시켰다. Figure 2(a)는 일반카펫 위에 휘발유가 뿌려지고 연소될 때의 연소 거동을 나타낸 것으로 착화 후 약 34 s에 최고화염까지 성장하였으며, 화염은 밝은 주황색이고, 검은색 연기가 발생하였다. Figure 2(b)는 일반카펫 위에 시너가 뿌려지고 연소될 때의 연소 거동을 나타낸 실체사진이다. 착화된 후 약 9 s에 최고화염까지 성장하였다. 화염은 밝은 주황색이었고, 검은색 연기가 발생하였다. Figure 2(c)는 일반카펫 위에 알코올이 뿌려진 후 연소가 진행될 때의 연소 거동을 나타낸 실체사진이다. 화염은 약 16 s에 최고화염까지 성장하였으며, 연기는 거의 발생하지 않았다. 화염은 30 s까지 밝은 청색으로 연소하다가 약 30 s 이후에는 밝은 청색과 주황색이 혼합된 화염이 확인되었다. Figure 2(d)는 일반카펫 위에 경유가 뿌려지고 연소될 때의 연소 거동을 나타낸 실체사진이다. 경유는 약 6 s 정도 화염을 연속 인가해야만 바닥재에 착화되었으며,

Figure 3. Photograph of a carbonated pattern that has been burned after spraying flammable liquid on a normal carpet.

Figure 4. An actual photograph showing combustion behavior when flammable liquid is sprayed and burned on a flameproof carpet.

중심부에서 바깥쪽으로 연소 면적이 확대되는 패턴을 나타냈다. 화염의 성장 및 패턴은 기존의 연구와 유사한 것을 확인할 수 있었다⁽³⁻⁵⁾.

Figure 3은 Figure 2의 연소가 완료된 후의 탄화패턴을 나타낸 실체사진이다. Figure 3(a)는 휘발유, Figure 3(b)는 시너, Figure 3(c)는 알코올, Figure 3(d)는 경유에 착화되어 탄화된 패턴의 실체사진이다. 휘발유가 뿌려진 카펫의 탄화면적은 약 140 mm²이며, 중심부가 심하게 탄화되면서 바닥재가 말아 올라가면서 구멍이 발생한 것을 알 수 있었다. 시너의 탄화면적은 약 37 mm²이며, 중심부보다는 경계면이 강하게 탄화되면서 가운데 중심부만 남아 구멍이 생기는 달무리 모양(Halo pattern)이 생성되었다^(5,8-9). 알코올의 탄화면적은 약 35 mm²이며, 바닥재 상층부 경계면만 탄화되고 중심부는 탄화되지 않는 도넛 모양의 패턴이 생성되었다. 경유의 탄화면적은 약 132 mm²로 가장 넓고 중심부에서 바깥쪽으로 연소 확대되는 특성을 나타냈다.

Figure 4는 방염카펫에 연소거동을 촬영한 실체사진으로 일반카펫과 동일한 조건에서 실험을 진행하였다. Figure 4(a)는 휘발유, Figure 4(b)는 시너, Figure 4(c)는 알코올, Figure 4(d)는 경유 등이 연소될 때의 연소 거동을 나타낸 실체사진이다. 착화된 후 최고화염에 도달되는 시간은 약 33 s로 휘발유가 가장 빠른 것으로 분석되었고, 경유는 화염을 약 8 s 동안 인가한 후에 바닥재가 연소되는 것을 확인할 수 있었다. 화염은 난류 및 층류가 혼합된 패턴을 나타내는 것으로 해석되었으며, 경유는 불완전 연소의 영향으로 상대적으로 검은색 연기가 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그리고 화염의 성장 특성 및 패턴은 기존의 연구와 유사한 것을 확인할 수 있었다⁽¹⁰⁻¹⁵⁾.

Figure 5. Photograph of a carbonated pattern that has been burned after spraying flammable liquid on a flameproof carpet.

Figure 6. Carbonized surface and cross section pictures after spraying gasoline on normal carpet.

Figure 5는 Figure 4의 연소가 완료된 후의 탄화패턴을 나타낸 실체사진이다. Figure 5(a)는 휘발유, Figure 5(b)는 시너, Figure 5(c)는 알코올, Figure 5(d)는 경유에 착화되어 탄화된 패턴의 실체사진이다. 휘발유의 탄화면적은 약 90 mm², 시너는 약 126 mm², 알코올은 약 53 mm², 경유는 약 169 mm² 등으로 분석되었다. 즉, 탄화 범위는 알코올이 가장 적고, 경유가 상대적으로 넓은 것으로 분석된바 화재 현장의 원인조사를 진행할 때 인화성 액체의 추정을 위한 참고로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그리고 화염의 성장 특성 및 패턴은 기존의 연구와 유사한 것을 확인할 수 있었다^(3-5,8,9).

Figure 6은 Figure 3(a)를 실체현미경을 이용하여 해석한 것이다. Figure 6(a)는 정상 부분의 상부 표면이며, Figure 6(b)는 정상 부분과 소손된 부분의 경계면을 나타낸 것으로 비닐선의 일부가 용융되었고, 비닐성의 형태가 대부분 변형된 것을 확인할 수 있다. Figure 6(c)는 탄화된 부분의 표면 실체사진으로 불규칙한 표면과 강한 화열을 받은 곳은 용융과 부풀어 오른 현상이 확인되었다. Figure 6(d)는 탄화면 단면 실체사진으로 가는 비닐선의 묶음별 반구 형태로 탄화 및 용융이 진행되어 본래의 형태 및 색상은 대부분 없어졌으며, 접착층에 융착된 것을 알 수 있다. 그리고 시너, 알코올 및 경유 등에 의해서 탄화된 카펫의 탄화 패턴 역시 유사한 성상을 보이는 것으로 분석되었다. 그러므로 탄

Figure 7. Carbonized surface and cross section pictures after spraying gasoline on flame proof carpet.

화된 패턴만을 고려하여 원인을 분석하는 것은 오판할 수 있다는 것을 알 수 있었다⁽³⁻⁵⁾.

Figure 7은 Figure 5(a)를 실체현미경을 이용하여 해석한 것이다. Figure 7(a)는 정상 부분의 상부 표면이고, Figure 7(b)는 탄화가 진행된 경계면 표면으로 비닐선의 일부가 용융되었고, 비닐성의 형태가 대부분 변형된 것을 확인할 수 있다. Figure 7(c)는 탄화된 표면으로 비닐선이 용융되어 변형 및 경화가 진행된 것으로 판단되며, 표면은 거칠고 광택이 없어진 것을 알 수 있다. Figure 7(d)는 탄화된 부분을 나타낸 것으로 비닐선 본래의 형태 및 색상이 대부분 없어지고 용융 및 재결합이 진행된 것으로 판단된다. 즉, 탄화된 패턴 및 방염 처리의 유무만을 고려하여 원인을 분석하는 것은 판정의 오류가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있었다⁽³⁻⁵⁾.

Figure 8은 연소가 완료된 후에 즉시 가스검지관을 이용하여 유증기를 추출하여 반응색을 해석하기 위해 나타난 실체사진이다. Figure 2 및 Figure 4의 화재실험이 진행되고, 자연냉각이 완료된 후에 5회 유증기를 포집하여 분석하였다. 화재현장에서 유증기의 포집을 위해 사용되는 가스검지관은 탄화수소(C_nH_m), 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$) 및 황산(H_2SO_4) 등을 일정한 비율로 혼합하여 용기에 밀봉한 제품이다. 화재로 탄화된 현장에서 인화성 액체가 연소되었는지 여부의 판정에 주로 사용되며, 휘발성 유기 용매가 연소에 사용되었다면 유증기와 반응하여 황크롬산($Cr_2(SO_4)_3$)이 생성되므로 가스검지관은 주황색에서 녹색으로 변화되는 것이다. 즉, 가스검지관의 변색 유무는 화재 원인 판정의 중요한 인자 중의 하나이다. Figure 8(a)는 정상제품의 가스검지관을 나타낸 것으로, 본래의 주황색이 균일한 상태를 나타내고 있다. Figure 8(b)는 일반카펫이 연소된 후의 가스검지관의 반응 결과를 나타낸 것이다. 주황색의 일부(1~2마디)가 짙은 녹색으로 변색된 것을 알 수 있다. Figure 8(c)는 일반카펫과 휘발유가 연소된 후의 가스검지관 반응을 나타낸 것으로 Figure 8(b)보다 많이 녹색(2~3마디)으로 반

Figure 8. An actual photograph of vapor collected using a gas detector after combustion is completed.

응한 것을 알 수 있다. Figure 8(d)는 방염카펫이 연소된 후의 가스검지관의 반응 결과를 나타낸 것이다. 주황색의 일부(1~2마디)가 짙은 녹색으로 변색된 것을 알 수 있다. Figure 8(e)는 방염카펫과 휘발유가 연소된 후의 가스검지관 반응을 나타낸 것으로 Figure 8(d)보다 많이 녹색(5~6마디)으로 반응한 것을 알 수 있다. 즉, 카펫의 방염 처리 유무에 따라 변색 차이가 있는 것을 알 수 있었고, 방염 처리된 카펫과 인화성 액체가 동시에 연소되었을 때 가스검지관의 반응이 활성화된다는 것이 확인되었다. 따라서 화재조사관은 화재현장의 유증기를 추출할 때 각별한 주의가 요구되며, 변색의 정도를 정량적으로 해석한다면 화재 원인 판정의 근거가 될 수 있다⁽³⁻⁵⁾.

Figure 9는 GC & MS를 이용한 일반카펫과 방염카펫의 반응 패턴을 분석한 것이다. Figure 9(a)는 휘발유가 연소될 때의 GC & MS로 분석하여 나타난 토랄이온크로마토그램의 표본 패턴이다. 반응시간 경과에 따라 5.28 min, 5.69 min, 6.92 min, 7.51 min에서 피크가 상대적으로 크게 생성되었다. 휘발유는 비점이 30~120 °C 액체 탄화수소로서 구성분자의 탄소수는 5~12개 정도 되는 탄화수소의 혼합물이며, 알킬벤젠과 노말알칸이 주로 검출되는 것으로 보고되었다⁽⁶⁻⁷⁾. Figure 9(b)는 일반카펫과 방염카펫이 휘발유에 의해 연소될 때의 특성을 GC & MS로 분석한 것이다. 반응시간의 경과에 따라 5.28 min, 5.69 min, 6.92 min, 7.51 min에서 일반카펫과 방염카펫에서 휘발유가 연소될 때와 동일한 피크가 생성된 것을 확인하였다. Figure 9(c)는 일반카펫과 방염카펫이 연소될 때의 특성을 분석한 것이다. 반응 시

Figure 9. Analysis of gas chromatography and mass spectrometry when normal carpets and flameproof carpets burn.

간의 경과에 따라 3.58 min, 4.74 min, 5.66 min, 8.13 min에 주요 피크가 생성되는 것으로 해석되었다. 검출되는 물질은 연소생성물 또는 바닥재에 묻어 있는 물질로 추정되며, 특히 8.13 min에 D-Limonene에서 가장 높은 피크가 생성되었다. 이상의 연소반응 패턴 결과에서 알 수 있듯이 연소 반응 시간에 따라 반응 패턴의 크기 차이가 발생하는 것으로 확인된바 화재 원인을 분석하는 조사관은 GC & MS를 이용하여 원인 판정에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 1은 Gas Chromatography & Mass Spectrometry (GC & MS, Pekinlmer co, Clarus 600, Turbomarix 350 ATD USA)을 이용하여 분석한 일반카펫과 방염카펫의 특성을 나타낸 것이다. GC & MS는 물질의 연소가 진행됨에 따라 생성되는 물질 및 반응패턴을 비교하여 물질의 연소특성을 해석한다. 일반카펫과 방염카펫 모두 동일한 대역에서 같은 물질의 반응이 발생하는 것으로 분석되었다. 즉, GC & MS를 이용한 생성물질의 차이는 구별이 불가능한 것으로 분석되었으나 반응 패턴의 크기 차이는 판별이 가능한 것으로 확인되었다⁽⁶⁻⁷⁾.

Table 1. Characteristic Analysis of Normal Carpets and Fireproof Carpets using GC & MS

Sample name	Detection time	Putative chemicals
Normal carpet	3.58	Toluene (C_7H_8)
	4.74	2,4-Dimethyl-1-heptene (C_9H_{18})
	5.66	Styrene ($C_6H_5CH-CH_2$)
	8.13	D-Limonene ($C_{10}H_{16}$)
	12.27	11-Methyldodecanol ($C_{13}H_{28}O$)
Flame proof carpet	3.58	Toluene (C_7H_8)
	4.74	2,4-Dimethyl-1-heptene (C_9H_{18})
	5.67	Styrene ($C_6H_5CH-CH_2$)
	6.87	D-Limonene ($C_{10}H_{16}$)
	8.13	D-Limonene ($C_{10}H_{16}$)
	12.27	11-Methyldodecanol ($C_{13}H_{28}O$)

4. 결 론

다중이용시설에 주로 사용되는 카펫이 연소할 때의 연

소거동 및 탄화패턴을 해석하고, 가스검지관 시험 및 GC & MS 분석을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 일반카펫 위에 시너가 뿌려지고 착화된 후 약 9 s에 최고화염까지 도달하였으며, 알코올은 16 s 정도가 소요되었다. 알코올의 초기 화염의 색은 청색이며, 연소의 후반부는 청색과 주황색이 혼합된 패턴을 나타냈다. 경유는 화염을 6 s 정도 연속 공급해야만 바닥재에 착화되었으며, 중심부에서 바깥쪽으로 연소 면적이 확대되는 패턴을 나타냈다.

2) 일반카펫과 방염카펫의 연소는 대부분 층류와 난류 형태로 진행되는 달무리 패턴이 형성되었고, 중심부가 타지 않는 도넛모양의 패턴과 중심부까지 타는 원형 패턴이 확인되었다.

3) 방염카펫에 연소거동 분석에서 착화된 후 최고화염에 도달되는 시간은 약 33 s로 휘발유가 가장 빠른 것으로 분석되었고, 화염은 난류 및 층류가 혼합된 패턴을 나타내는 것으로 해석되었다.

4) 연소가 완료된 후의 탄화패턴 분석에서 경유를 뿌렸을 때의 탄화면적은 약 169 mm²로 가장 넓었으며, 휘발유는 약 90 mm², 시너는 약 126 mm², 알코올은 약 53 mm²으로 분석되었다.

5) 실체현미경을 이용한 표면 분석에서 카펫의 방염 처리 유무와 관계없이 경계면은 용융과 재결합이 진행되는 것으로 확인되었고, 본래의 색상 및 구조가 변형되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 표면의 탄화된 패턴만을 고려하여 원인을 분석하는 것은 오판할 수 있다.

6) 연소가 완료된 후에 가스검지관을 이용한 유증기의 포집 분석에서 일반카펫의 연소는 1~2등급이 짙은 녹색으로 변색되었고, 일반카펫과 휘발유의 연소는 2~3등급이 반응하는 것을 알 수 있었다. 그리고 방염카펫 역시 1~2등급이 짙은 녹색으로 변색되었으며, 방염카펫과 휘발유의 연소는 5~6등급이 반응하는 것으로 분석되었다. 그러므로 화재조사관은 유증기를 포집하고 분석할 때 각별한 주의가 요구된다.

7) GC & MS를 이용한 분석에서 물성의 차이는 구별할 수 없었으나 반응 패턴의 크기는 차이가 있는 것으로 확인된바 화재원인의 판정에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

References

1. National Fire Agency 119, "National Fire Data System", (2019).
2. M. S. Park, "A Study on the Characteristics of Combustion and Carbonization of Flooring Materials according to Combustion Test Methods", Master's Thesis, General Graduate School, Jeonju University (2019).
3. H. S. Joe and C. S. Choi, "Growth Characteristics and Hydrocarbon Patterns of Flammable Liquid on a Vinyl Layer", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 5, pp. 15-21 (2018).
4. H. S. Joe and C. S. Choi, "A Study on the Characteristics of Burning after Gasoline Spraying on Vinyl Floor", Proceeding of 2017 KIFSE Annual Fall Conference, pp. 29-30 (2017).
5. H. S. Joe, "A Study on the Examination Technique for the Fire Behavior and Carbonization Pattern of a Flammable Liquid", Jeonju University, Doctoral thesis, p. 123 (2016).
6. M. K. Choi, "A Study on Investigation technique of Arson used as Flammable Liquids Accelerant", Master's Thesis, General Graduate School, Gachon University (2014).
7. T. Y. Hwang, "A Study on the Experimental Characteristics in Fire investigation Techniques of Flammable Liquids", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 6, pp. 7-14 (2012).
8. J. D. Dehaan, "Kirk's Fire Investigation", Pearson, p.35, pp. 51-52, pp. 109-112, pp. 252-276 (2012).
9. NFPA, "NFPA 921-Guide for Fire and Explosion Investigations", pp. 20-63 (2011).
10. D. J. Icove and J. D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", 4th Edition, Prentice Hall, pp. 70-114 (2004).
11. Y. G. Park, "An Experimental Study on A Flammable Liquid Appraisal Technique through Fire Cases: Focusing on the Height of Flame Depending on the Accelerants", Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 18, No. 6, pp. 197-204 (2018).
12. S. S. Park, "A Study on Arson Fire Caused by Flammable Liquids", Master's Thesis, Graduate School of Urban Sciences, University of Seoul (2012).
13. S. H. Lee, "A Study on the Reliability of Flammable Liquid Fire Pattern through Case Analysis of Arson Scenes", Doctoral thesis, General Graduate School, Gachon University (2018).
14. S. H. Lee and D. M. Choi, "A Morphological Study of the Burn Patterns of Flammable Liquids in Arson Investigations", Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 18, No. 5, pp. 113-118 (2018).
15. D. M. Choi, S. B. Choi and J. S. Choi, "A Study on the Discrimination of Fire Pattern by the Phenomenological Observation: Focused on the Fire Cases", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 98-110 (2009).