

화재의 경과 시간에 따른 휘발유, 등유, 경유의 잔류특성 및 효율적 검출법 연구

(Study on Residual Characteristics and Efficient Detection Methods of Gasoline, Kerosene, and Diesel over Time in Fire)

성태명*, 김해중*, 김정화**

(Tae-myung Sung, Hae Jung Kim, Jeong Hwa Kim)

요 약

화재사건에서 인화성물질의 검출은 방화를 입증하는데 결정적인 단서가 될 수 있다. 주요 인화성물질로는 휘발유, 등유 및 경유이며, 연소성, 기화성 및 잔류성에 있어 큰 차이를 나타낸다. 주요 추출방법으로는 용매추출법, solid phase microextraction(SPME)법 및 activated charcoal strip(ACS)법이 있으나, 인화성물질의 특성을 고려한 포괄적인 추출법 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 인화성물질의 종류별 연소성, 기화성 및 잔류성을 확인하고 가장 적합한 추출법을 검토하였다. 휘발유는 등유 및 경유에 비해 연소성 및 기화성은 높으나 잔류성이 낮아 SPME법이 가장 효과적이었고, 등유와 경유는 잔류성이 높아 용매추출법이 가장 적합하였다. 휘발유, 등유 또는 경유가 함유될 수 있는 화재잔류물에서 인화성물질을 검출할 수 있는 가장 효율적인 분석절차로는 SPME법을 이용하여 휘발유 성분을 확인하고, 등유성분이 검출될 경우, 용매추출법을 추가로 실시하여 등유인지 경유인지를 확증하는 것이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

Abstract

The detection of ignitable liquids in fire incidents can be a decisive clue in proving arson. The main ignitable liquids are gasoline, kerosene, and diesel, and show a big difference in combustibility, vaporization, and remainability. The main extraction methods are solvent extraction, solid phase microextraction (SPME) method, and activated charcoal strip (ACS) method, however comprehensive extraction method considering the

properties of ignitable liquids is insufficient. In this study, the combustibility, vaporization, and remainability of each type of ignitable liquids were confirmed, and the most suitable extraction procedure was investigated. Gasoline had better combustibility and vaporization than kerosene and diesel, but had lower remainability, so SPME method was the most effective, and kerosene and diesel had high persistence, so solvent extraction method was the most suitable. The most efficient analysis procedure to detect ignitable liquids in fire debris that may contain gasoline, kerosene, or diesel, it was judged that it was proper to check gasoline using SPME method, and if kerosene was detected, solvent extraction method was additionally performed to confirm whether it was kerosene or diesel.

Key word : Ignitable Liquids, Solvent Extraction, SPME, ACS, Fire Debris

* 경찰과학수사과 교수

** 한국과학수사학회 회원

1. 서 론

화재는 사람의 의도와는 상관없이 확대되거나 방화에 의해 발생하여 소화가 필요한 연소를 말하며[1], 2011~2020년 사이 국내에서 발생한 화재는 매년 40,000 여건으로 보고 되었다[2]. 그러나 화재의 원인을 규명하기 위한 현장조사는 증거물의 소실 등으로 인하여 화재의 발생 원인을 판단하기 어려운 경우가 대부분이다[3]. 2020년 국내에서 발생한 화재를 원인에 따라 분류하면 부주의에 의한 화재가 19,000 여건으로 가장 많았고, 그 다음으로 전기적 화재 9,000 여건, 기계적 화재 4,000 여건, 화학적 화재 600 여건, 그리고 방화 및 방화의 심 화재가 750 여건 나타났다[4]. 다양한 화재 중 방화는 자기 또는 타인의 건물이나 재산에 의도적으로 불을 지르는 행위를 말하고[5], 그 위험성이 매우 커 5대 강력사범 중 하나로 분류되고 있다[6].

방화사건에서 널리 사용되는 인화성물질은 석유제품으로 휘발유, 등유 및 경유이며, 휘발유[7]의 주성분은 탄소 수 5~9개의 지방족화합물로 C1-알킬벤젠인 톨루엔, C2-알킬벤젠인 에틸벤젠 및 자일렌, C3-알킬벤젠인 프로필벤젠, 에틸톨루엔, 1,2,3-트리메틸벤젠, C4-알킬벤젠인 메틸프로필벤젠, 에틸디메틸벤젠 및 테트라메틸벤젠 등으로 구성되어 있다. 등유는 주로 탄소 수 9~16개의 포화탄화수소 화합물로 구성되어 있으며[7], 경유는 주요성분으로 탄소 수 9~25개의 포화탄화수소 화합물로 구성되어 있다[8]. 휘발유, 등유 및 경유에 따라 구

성성분의 상이함으로 인하여 화재의 연소시간 및 시료의 채취시기 등에 따라 화재잔류물에 잔류하는 인화성물질의 성분 및 함량에 큰 차이가 나타날 수 있다.

화재잔류물에서 인화성물질의 추출법은 용매추출법[10], activated charcoal strip(이하 ACS)법[11-13] 및 solid phase microextraction(이하 SPME)법[14-17]이 주로 활용되고 있다. 인화성물질의 확인시험은 1959년에 가스크로마토그래프가 처음으로 도입[18]된 후 화재 시 발생하는 다양한 열분해물질에 의한 방해물질을 정제과정과 선택성을 이용한 검출기[19]를 활용하고 있으며, 특히 질량분석법[20, 21]을 이용하여 보다 정확한 판단이 가능하게 되었다.

위에서 소개된 다양한 추출법은 휘발유, 등유 및 경유 모두에 대하여는 효율적인 추출효과를 나타내지는 못하므로, 인화성물질의 종류에 따른 각 추출법의 장·단점이 고려되어야 한다[12, 17, 22]. 그러나 인화성물질의 추출법[11, 12, 17]에 대한 적합성이 부분적으로는 검토되었으나, 용매추출법[22], SPME법[14] 및 ACS법[11]의 장·단점을 바탕으로 휘발유, 등유 및 경유를 포괄적으로 검출할 수 있는 추출법으로서 인화성물질의 연소성, 기화성 및 잔류성을 토대로 효율적인 추출법에 대한 종합적인 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 화재발생 시 인화성물질의 종류에 따른 소실 속도와 추출양상 등을 추정해 볼 수 있는 방법으로 휘발유, 등유 및 경유를 흡착시킨 가연물을 상이한 시간 동안 연소시킨 후 시간 경과에 따라 용매추출법, SPME법 및 ACS법의 검출 경향성을 확인하고, 화재잔류물에 잔류될 수 있는 휘발유, 등유, 경유를 모두 검출할 수 있는 시험법을 검토하였다.

2. 실험

2.1 시약

화재잔류물에서 인화성물질의 추출에 사용된 methyl *tert*-butyl ether(MTBE, extra pure)와 *n*-hexane(extra pure)은 Samchun pure chemical사(한국) 제품을 사용하였다.

2.2 재료

인화성물질의 추출에 사용된 SPME holder와 fiber는 Supelco사 제품을 사용하였으며, fiber의 고정상은 polydimethylsiloxane (PDMS, 30 μ m, yellow)을 이용하였다. Activated charcoal strip(ACS, USA)은 Albayco technologies사 제품을 사용하였고, 인화성물질의 추출을 위한 Vortex mixer는 DLAB사(China) 제품을 사용하였으며, 용액의 분리를 위한 원심분리기는 800D Centrifuge 제품을 사용하였다.

2.3 화재잔류물 시료 제조

연소잔류물을 제조하기 위한 가연물은 정사각형(5 cm x 5 cm)의 청바지섬유를 사용하였

으며, 휘발유, 등유 및 경유를 각각 1 mL 흡착시킨 후 연소시켰다. 휘발유는 10초, 30초 및 1분 간 연소시킨 후 소화시켰으며, 등유와 경유의 연소시간은 30초, 1분 및 2분으로 연소시킨 후 연소잔류물을 분석시료로 사용하였다.

2.4 용매추출(solvent extraction)법에 의한 인화성물질 추출

연소잔류물을 15 mL 팔콘튜브에 넣은 후 연소물이 잠길 정도로 물을 가한 후 MTBE를 약 3 mL 가하였다. Voltex mixer로 1분간 혼합한 후 원심분리기(3000 rpm)로 유기층과 물층으로 분리하였다. 유기층을 다른 시험관에 옮긴 후 소량의 무수 황산나트륨(Na_2SO_4)을 가한 후 Vortex mixer로 10초 간 혼합하여 물을 제거하였다. 유기층을 다른 시험관에 옮긴 후 질소로 농축하였다. 농축된 시료에 100 μL 의 MTBE를 가한 후 Vortex mixer로 혼합한 후 1 μL 의 용액을 GC(FID)(Agilent Technologies, 7890B GC System, US)에 주입하였다. GC의 분석조건은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> GC analysis conditions

GC	Conditions
Injection temp/mode	250 $^{\circ}\text{C}$, split ratio (20:1)
Detector	FID (flame ionization detector)
Detection temp.	270 $^{\circ}\text{C}$
Column	DB-5 MS (30 m x 320 μm x 0.25 μm)
Carrier gas, flow rate	N_2 , 3.0 mL/min
Oven temp.	40 $^{\circ}\text{C}$ (2 min) \rightarrow 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min} \rightarrow$ 250 $^{\circ}\text{C} \rightarrow$ (20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) \rightarrow 300 $^{\circ}\text{C}$ (5.25 min)

2.5 SPME(solid phase microextraction)법에 의한 인화성물질 추출

연소잔류물을 삼각플라스크(약 250 mL)에 가한 후 알루미늄 호일로 밀봉하고 SPME fiber의 needle을 위에서 꽂은 다음 SPME fiber가 needle의 외부로 돌출된 상태에서 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 오븐에서 15분 간 인화성물질을 흡착한 다음 GC에 주입하여 분석하였다.

1.5 ACS(activated charcoal strip)법에 의한 인화성물질 추출

화재잔류물을 삼각플라스크(약 250 mL)에 가한 후 activated charcoal로 구성된 얇은 조각을 클립을 이용하여 플라스크의 입구에 매달았다. 70 $^{\circ}\text{C}$ 의 오븐에서 16시간 동안 화재잔류물을 가열하여 인화성물질을 기화시켜 ACS에 흡착하였다. ACS 리본을 가위로 잘게 자른 후 2 mL 바이알에 넣은 후 0.5 mL *n*-hexane을 가하였다. Vortex mixer로 1분 간 저어주

면서 인화성물질을 추출한 후 1 μL 의 용액을 주사기로 채취하여 GC에 주입하여 분석하였다.

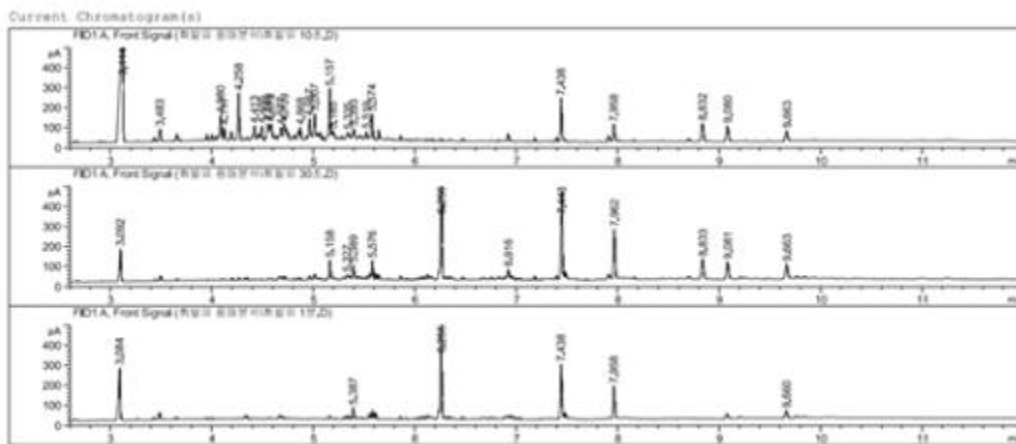
3. 결과 및 고찰

휘발유, 등유 및 경유는 액체에서 기체상태로 기화된 후 연소작용이 일어나는 물질로서 기화성에 따라 연소성 및 잔류성에 있어 큰 차이가 나타날 수 있다. 휘발유는 등유 및 경유보다 기화가 훨씬 용이하기 때문에 화재 시 연소 및 기화로 화재잔류물에 잔류될 가능성이 등유 및 경유보다 매우 낮다[24]. 따라서, 화재 시 휘발유, 등유 및 경유의 종류에 따른 잔류성과 검출방법에 따른 효율성을 다음과 같이 검토하였다.

3.1 휘발유의 화재 경과 시간에 따른 검출 양상 검토

3.1.1 용매추출법에 의한 휘발유 추출

청바지조각(25 cm^2)에 1 mL의 휘발유를 가한 후 연소시간을 달리하여 10초, 30초 및 1분에 소화된 화재잔류물을 MTBE로 추출하여 Fig. 1과 같이 얻었다. 10초 연소 시에는 소량의 C1~C4 알킬벤젠이 검출되었으나 30초 연소 시는 극미량의 C3~C4 알킬벤젠이 검출되었다. 그러나 1분경과 시에는 휘발유가 완전히 연소 또는 기화되어 휘발유성분이 용매추출법에서는 검출되지 않았다. 이는 휘발유의 연소 및 기화를 통한 소실과 용매의 추출과정 및 농축과정에서 휘발유성분이 소실되어 검출 가능성이 낮아지는 것으로 추정된다.



<Fig. 1> Chromatograms of gasoline obtained by solvent extraction
(10 s, 30 s, & 1 min combustion from top to bottom)

3.1.2 SPME법에 의한 휘발유 추출

휘발유가 함유된 시료를 10초간 연소시킨 후 화재잔류물에서 SPME법으로 검출했을 때 용매추출법보다는 많은 양의 휘발유성분이 검출되었다. 따라서 휘발유성분의 검출을 위해서는 SPME법이 매우 효율적인 것으로 판단되었다. 30초 연소에서는 미량의 휘발유 성분이 검출되었고 1분 연소에서는 검출되지 않는 것으로 보아 짧은 연소시간에도 휘발유가 소실되는 특성에 의해서 30초에서는 미량 검출되고 1분에서는 검출되지 않는 것으로 판단되었다. 따라서, 인화성물질을 휘발유로 사용했을 경우 방화의 경우라 하더라도 화재잔류물에서 휘발유성분이 검출되지 않을 가능성이 높다는 것을 고려해야 할 것으로 판단된다.

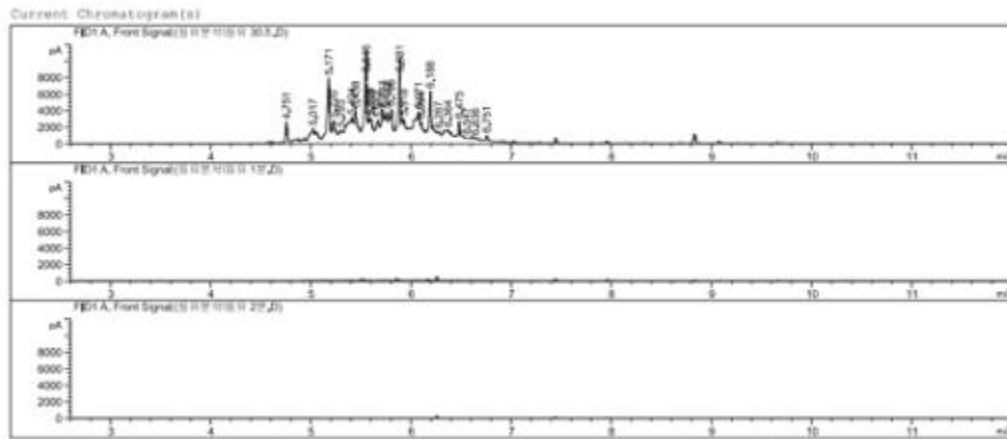
3.1.3 ACS법에 의한 휘발유 추출

ACS법에서는 SPME법보다 더 많은 양이 10초 연소시킨 화재잔류물에서 검출되었다. 이는 SPME법의 경우 휘발유 성분이 fiber의 겉면에 부착되는 특성으로 ACS법에서 사용되는 얇고 넓은 조각보다 훨씬 표면적이 작기 때문에 ACS법에서 더 많은 양의 휘발유성분이 추출되는 것으로 판단된다. 따라서, 극미량의 휘발유를 검출할 때에는 SPME법보다 ACS법이 더 효율적인 것으로 판단되었다. 그러나 ACS법은 인화성물질의 흡착에 요구되는 시간이 16시간으로 SPME법보다 훨씬 길기 때문에 신속한 분석을 통한 방화여부 판단을 위해서는 단점이 될 수 있다[12].

3.2 등유의 화재 경과시간에 따른 검출 양상 검토

3.2.1 용매추출법에 의한 등유 추출

등유 1 mL를 청바지조각(25 cm²)에 가한 다음 30초, 1분 및 2분 동안 연소시킨 후 소화하고 연소잔류물을 MTBE로 추출하여 Fig. 2와 같이 검출하였다. 30초 연소된 시료에서는 용매추출법으로 추출한 것이 SPME법 및 ACS법보다 훨씬 많은 양이 검출되었으며, 탄소수 9~16개의 포화탄화수소 화합물이 주요 성분으로 검출되었다. 이는 유기용매로 화재잔류물에 잔존하는 거의 모든 등유 성분을 채취할 수 있는 용매추출법이 기화 후 흡착을 통하여 검출되는 SPME법 및 ACS법보다 훨씬 효율적임을 확인할 수 있었다. 또한 미량이나마 1분 경과한 시료에서도 등유성분이 검출되었다. 이는 휘발유보다 기화성이 낮은 등유의 특성으로 방화 시 휘발유보다 등유가 화재잔류물에 더 길게 잔류되어 검출될 가능성이 높다는 것으로 판단할 수 있다[24]. 연소시간이 2분일 경우 등유가 검출되지 않았으며, 이는 등유를 이용한 방화사건이라 하더라도 화재의 연소시간이 길면 등유성분이 완전히 연소 또는 기화되어 화재잔류물에 잔존하지 않아 검출되지 않을 수도 있다는 것을 나타낸다. 따라서, 등유의 연소 및 기화 특성과 검출법을 고려할 때 용매추출법이 가장 효율적인 것으로 판단된다.



<Fig. 2> Chromatograms of kerosene obtained by solvent extraction
(30 s, 1 min, 2 min combustion from top to bottom)

3.2.2 SPME법에 의한 등유 추출

SPME법에서는 탄소 수 8~14개의 포화탄화수소 화합물이 주요 성분으로 검출되었으며, 이는 등유의 주요 성분인 탄소 수 8~16개보다 고비점성분이 상대적으로 적게 검출되는 것으로 나타났다. 이는 등유성분이 기화를 통해 SPME fiber에 흡착되는 과정에서 용매추출법보다 등유의 고비점성분들의 흡착이 상대적으로 적게 이루어졌다는 것을 나타낸다. 또한 검출량도 적게 나타나 1분 연소 이상에서는 등유 성분이 검출되지 않았다. 이는 등유를 화재 잔류물로부터 추출할 수 있는 능력 또한 용매추출법보다 낮다는 것을 의미한다.

3.2.3 ACS법에 의한 등유 추출

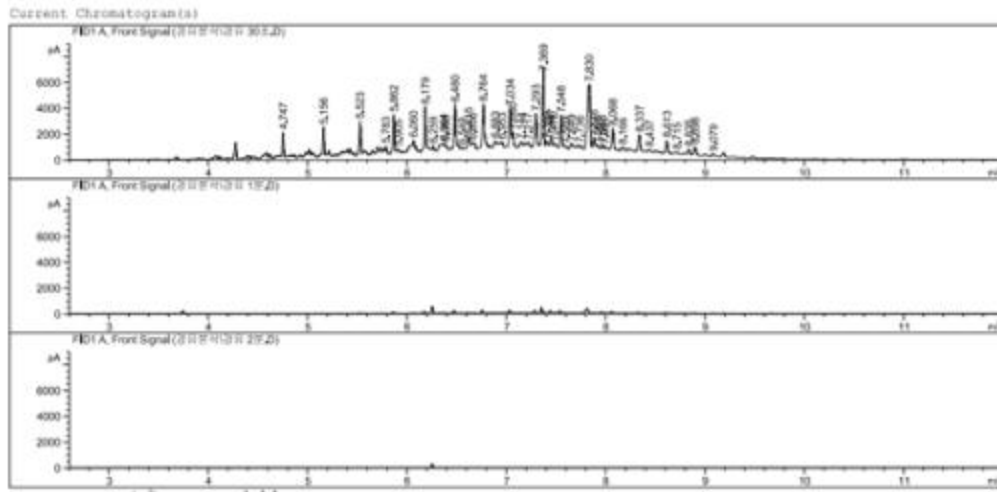
ACS법에 의한 등유 분석에서는 탄소 수 8~14개의 포화탄화수소 화합물이 주요 성분으로 검출되었으며, 이의 특성은 SPME와 유사하게 관찰되었다. 검출량 또한 SPME법과 유사하였으며, 30초 연소 시에는 등유성분이 다량 검출되었으나 1분 이상에서는 검출되지 않았다. ACS법의 흡착에 요구되는 시간이 16시간 정도로 분석의 신속성 측면에서는 SPME법보다 효율적이지 않다고 판단된다.

3.3 경유의 화재 경과시간에 따른 검출 양상 검토

3.3.1 용매추출법에 의한 경유 추출

경유 1 mL를 청색 면조각(25 cm²)에 가한 후 30초, 1분 및 2분 연소시킨 후 Fig. 3과 같이 얻었다. 30초 연소 후 연소잔류물에서 용매추출법으로 추출한 시료에서 경유의 조성 성분과 유사하게 탄소 수 9~25개 정도의 포화탄화수소 화합물이 주요 성분으로 검출되었으

며, 1분 연소된 화재잔류물에서도 경유성분이 미량 검출되었다. 경유성분으로 판단될 수 있는 탄소 수 23~25개 정도의 포화탄화수소 화합물이 용매추출법에서만 검출되므로 경유성분의 확인에는 용매추출법이 가장 효율적인 것으로 판단된다.



<Fig. 3> Chromatograms of diesel obtained by solvent extraction
(30 s, 1 min, 2 min combustion from top to bottom)

3.3.2 SPME법에 의한 경유 추출

SPME법에서는 탄소 수 19개 정도의 포화탄화수소 화합물까지 검출되었으며, 이는 등유의 저비점이 상대적으로 많이 소실되고 고비점이 많이 남을 경우 탄소 수 19개 이상의 포화탄화수소 화합물이 검출될 수 있는 것과 유사하므로 등유인지 경유인지를 정확하게 판단하기는 어렵다. 비교적 기화성이 낮은 포화탄화수소 화합물로 구성된 경유는 1분 동안 연소된 경유에도 검출되었으나 2분 동안 연소된 경우에는 검출되지 않았다. 이와 같은 결과는 등유보다는 경유의 기화성이 낮기 때문에 화재잔류물에 잔류될 가능성이 더 높은 것으로 판단된다.

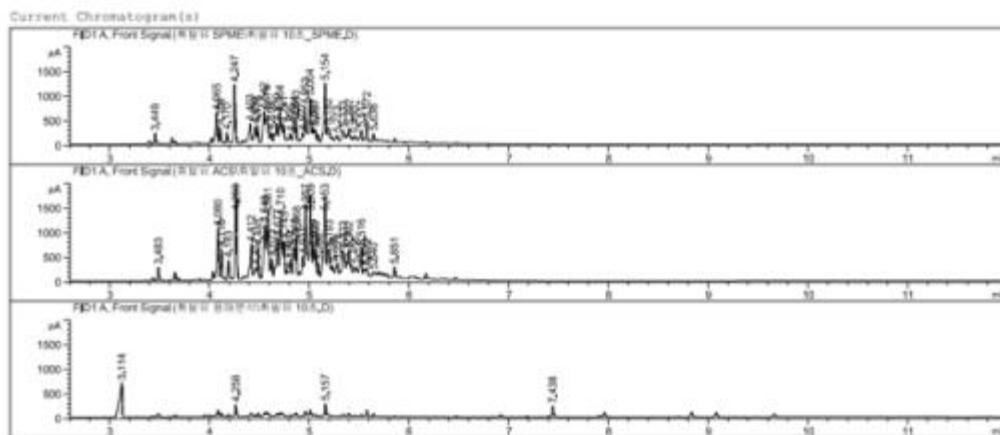
3.3.3 ACS법에 의한 경유 추출

ACS법에 의한 경유성분 검출은 SPME법보다는 검출이 양호하였으나 용매추출법보다는 낮게 나타났다. 이는 휘발유나 등유보다 증기압이 더 낮은 경유성분이 기화를 통해 흡착되기 때문에 용매추출법보다는 ACS법의 단점으로 생각되며, 흡착량을 증가시키기 위해 16시간 정도의 긴 흡착시간 또한 신속한 분석에는 단점으로 작용한다[12]. 흡착시간을 늘려도 낮은 증기압으로 고비점성분의 검출은 상대적으로 낮아 경유라고 판단하기에 부적합한 경우도 관찰되었다. 경유의 낮은 증기압으로 인하여 1분 동안 연소시킨 잔류물에서도 경유를 확인할 수 있었다. 그러나 SPME와 같이 검출되는 탄소 수가 9~20개 정도로서 등유성분일 가

능성도 검토해야 하는 단점이 있었다. 따라서, SPME법 및 ACS법으로 분석하여 등유 또는 경유로 추정되는 인화성물질이 검출될 경우 용매추출법을 추가로 실시하여 등유인지 경유인지를 확증해야 할 것으로 판단된다.

3.4 휘발유의 추출방법에 따른 검출양상 비교

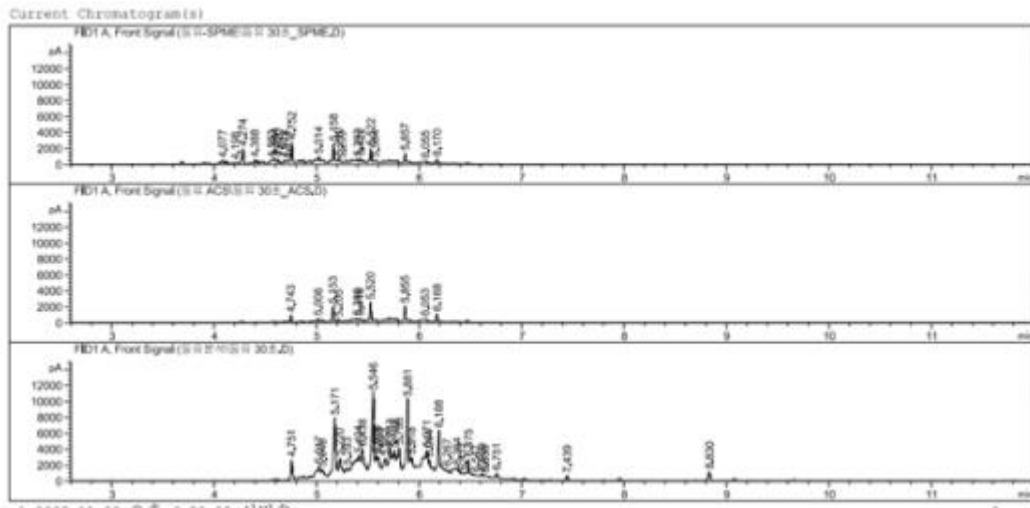
휘발유의 검출에는 Fig. 4와 같이 SPME법과 ACS법이 유사한 농도로 양호하게 검출되었으나, 용매추출법에서는 매우 낮은 농도로 검출되었다. 이는 휘발유가 연소성 및 기화성이 매우 큰 탄화수소 화합물로 구성되어 있기 때문에 용매추출법에서 용매 제거 시에 휘발유 또한 상당량 소실되기 때문에 낮은 농도로 검출되는 것으로 판단된다. ACS법은 휘발유에 대하여 양호한 검출양상을 보였으나 16시간 정도의 매우 긴 시간 동안 흡착해야 하는 것이 단점으로 판단되었다. 따라서, 휘발유의 추출량 및 추출시간을 고려할 때 SPME법이 가장 효율적인 것으로 판단된다.



<Fig. 4> Chromatograms of gasoline obtained by SPME, ACS
& solvent extraction (from top to bottom)

3.5 등유의 추출방법에 따른 검출양상 비교

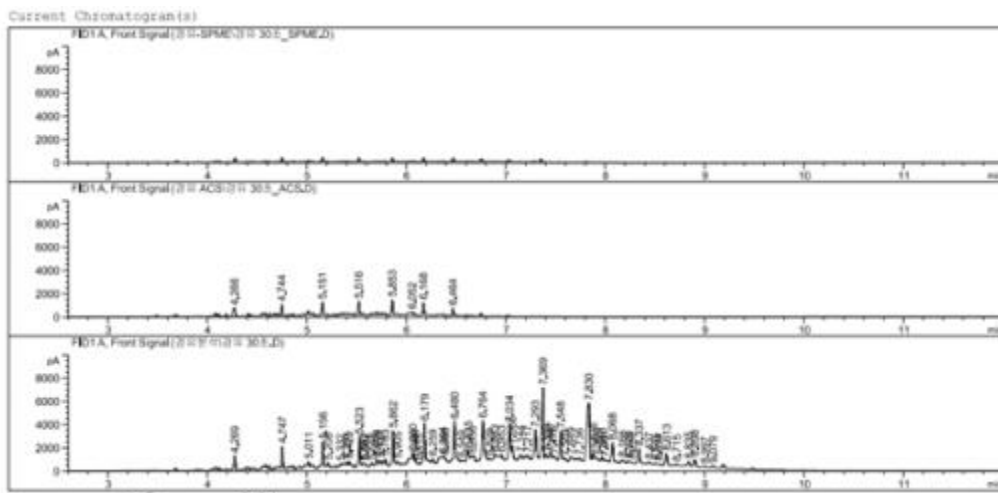
등유의 검출은 Fig. 5와 같이 용매추출법이 SPME법 및 ACS법보다 훨씬 양호하게 나타났으며, 추출되는 포화탄화수소 화합물의 고비점성분도 가장 많이 관찰되었다. 따라서, 등유를 검출하는데 있어 신속성과 정확성을 고려할 때 용매추출법이 가장 효율적으로 판단되며, SPME법 및 ACS법에 의한 결과는 등유 또는 경유 여부를 정확하게 판단하기 위해서는 추가적인 시험이 필요한 것으로 판단되었다.



<Fig. 5> Chromatograms of kerosene obtained by SPME, ACS
& solvent extraction (from top to bottom)

3.6 경유의 추출방법에 따른 검출양상 비교

경유의 검출은 <Fig. 6>과 같이 용매추출법에 의한 경유의 분석에서는 탄소 수 9~25개의 포화탄화수소 화합물이 다량 검출되었으나, SPME법 및 ACS법은 검출량이 용매추출법보다 낮고 포화탄화수소 화합물의 탄소 수도 경유를 확증하기에는 고비점의 포화탄화수소 화합물이 검출되지 않았다. 따라서 경유의 검출량과 검출되는 포화탄화수소 화합물의 탄소 범위를 고려할 때 용매추출법이 가장 적합한 것으로 판단된다.



<Fig. 6> Chromatograms of diesel obtained by SPME, ACS
& solvent extraction(from top to bottom)

3.7 인화성물질의 특성과 추출법의 특성을 고려한 분석절차 제안

화재잔류물에서 인화성물질을 신속·정확하게 분석하기 위해서는 방화에 사용된 인화성물질의 특성을 고려한 효율적인 추출법을 선택하는 것이 중요하다. 방화에 널리 사용되는 인화성물질로는 휘발유, 등유 및 경유이며, 이 석유제품들은 기화성, 연소성 및 잔류성 측면에서 상이하기 때문에 한 가지 추출법만으로는 만족한 결과를 얻기 어렵다. 이번 연구를 통하여 Table 2와 같이 휘발유, 등유 및 경유의 기화성에 따른 연소성과 <Table 3>과 같이 용매추출법, SPME법 및 ACS법의 장단점을 토대로 분석을 수행해야 할 것으로 판단된다. 따라서, 화재잔류물에 함유된 휘발유, 등유 및 경유의 인화성물질을 신속하고 정확하게 확인하는 효율적인 방법으로는 추출시간이 매우 짧은 SPME법을 1차로 실시하여 휘발유성분이 검출되면 휘발유로 확증하고, 등유와 유사한 성분이 검출되면 2차로 용매추출법을 실시하여 등유인지 경유인지를 판단하는 것이 가장 효율적인 분석법으로 판단된다.

<Table 2> Comparison of combustibility, volatility and remainability of ignitable liquids

Division	Gasoline	Kerosene	Diesel
Combustibility	high	middle	low
Volatility	high	middle	low
Remainability	low	middle	high

<Table 3> Comparison of extraction ability with the type of ignitable liquid

Division	SPME	ACS	Solvent extraction
Gasoline	proper	proper	improper
Kerosene	proper	proper	proper
Diesel	improper	semi-proper	proper

4. 결론

화재잔류물에서 휘발유, 등유 및 경유의 인화성물질의 검출은 방화 여부를 판단하는데 결정적인 단서로 활용될 수 있으며[25], 화재의 원인이 방화임을 입증하기 위해서는 화재현장에서의 연소특성과 더불어 인화성물질을 검출하는 것이 매우 중요하다[26].

인화성물질의 종류별 연소, 기화 및 잔류특성과 추출법의 장·단점을 고려하여 각 종류별 적합한 추출법에 대하여 다음과 같이 검토하였다.

1. 휘발유는 기화성 및 연소성이 등유 및 경유보다 매우 커서 화재 시 빠르게 소실될 가능성이 높아 화재잔류물에서 검출되지 않을 가능성이 등유 및 경유보다 높은 것으로 판단된다.
2. 연소잔류물에서 휘발유 검출을 신속성과 정확성 측면에서 가장 효율적으로 분석할 수 있는 방법은 SPME법으로 판단되며, ACS법은 장시간의 흡착시간이 요구되고 용매추출법은 농축과정에서 휘발유성분이 함께 소실되어 검출한계가 비교적 높은 것이 단점으로 관찰되었다.
3. 등유는 휘발유보다 매우 낮은 증기압을 갖는 탄화수소 화합물로서 경유보다는 높은 증기압을 갖으며, 용매추출법으로 화재잔류물에서 등유를 추출하는 것이 검출량 및 신속성 측면에서 가장 효율적인 것으로 판단되며, SPME법에서는 등유성분을 효율적으로 분석하였으나 경유의 고비점부분의 포화탄화수소 화합물을 효율적으로 검출하지 못하기 때문에 등유인지 경유인지를 정확하게 판단하지 못하는 단점이 관찰되었다. ACS법은 16시간 정도의 장시간의 등유 흡착시간이 요구되는 것이 신속한 분석을 저해하는 단점으로 작용하였다.
4. 경유는 방화에 사용되는 인화성물질 중 가장 증기압이 낮은 인화성물질로서 검출량 및 신속성 측면에서 용매추출법이 가장 효율적으로 판단되었다. SPME법과 ACS법은 경유라고 확정할 수 있는 탄소 수 20 이상의 포화탄화수소 화합물의 검출이 어려워 등유와 경유를 확증하는 데에는 적합하지 않는 것으로 판단된다.

이와 같이 휘발유, 등유, 경유의 기화특성과 추출법의 장·단점을 고려한 효율적인 추출법으로는 1차적으로 SPME법에 의해 인화성물질을 추출 및 분석하여 휘발유가 검출되면 추가 실험 없이 휘발유로 판단하고, 등유와 유사한 성분이 검출되면 2차적으로 용매추출법을 통하여 등유인지 경유인지를 판단하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 이승훈, 화재조사 이론과 실무, 동화기술, 2019, p 264.
- [2] <https://yeosuesh.tistory.com/entry/화재발생-현황소방청-통계>, 연도별 화재발생 현황 (2011~2020) (2024.03.09.)
- [3] Kendell A., Galloway A., Miligan C., The Path of Flames, Taylor & Francis, Boca Raton 2023. (2024.03.09.)
- [4] <https://yeosuesh.tistory.com/entry/화재발생-현황소방청-통계>, 원인별 화재발생 현황 (2020).
- [5] Hurley, W., Monahan, T., Arson: The criminal and the crime.” Brit. J. Criminology, Vol 9, No. 1, pp. 4~21, 1969.
- [6] 최수형, 박현수, 박상옥, 청소년 강력범죄의 실태 및 특성에 관한 연구, 형사정책연구원

연구총서, pp. 1~350, 2014.

[7] Suzuki, O., Watanabe, K., Components of gasoline and kerosene, *Drugs and Poisons in Humans: A Handbook of Practical Analysis*, Springer, Japan, pp. 159-169, 2005.

[8] Hsu, C. S., Diesel fuel analysis, *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 6613-6622, 2000.

[9] Turner, D. A., Williams, M., Sigman, M. A., Goodpaster, J. V., A comprehensive study of the alteration of ignitable liquids by weathering and microbial degradation, *Journal of forensic sciences*, Vol. 63, No. 1, pp. 58-65, 2018.

[10] Tournon, P., Malaquin, P., Gardebas, D., Nicolai, J.-P., Semiautomatic analysis of fire debris, *Forensic science international*, Vol. 110, No. 1, 7-18, 2000.

[11] Martin F. M., Broillet, A., König, S., Weinmann, W., Analysis of volatiles in fire debris by combination of activated charcoal strips (ACS) and automated thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry (ATD/GC-MS), *Forensic Science Internal*, Vol. 289, pp. 232-237, 2018.

[12] Fabritius, M. M., Broillet, A., König, S., Weinmann, W., Analysis of volatiles in fire debris by combination of activated charcoal strips (ACS) and automated thermal desorption - gas chromatography mass spectrometry (ATD/GC - MS), *Forensic science international*, Vol. 289, pp. 232-237, 2018.

[13] Newman, R. T., Lothridge, K., Dietz, W., The use of activated charcoal strips for fire debris extractions by passive diffusion. Part 1: The effects of time, temperature, strip size, and sample concentration, *Journal of Forensic Sciences*, Vol. 41, No. 3, pp. 361-370, 1996.

[14] Grafit, A., Muller, D., Kimchi, S., Avissar, Y. Y., Development of a Solid-phase microextraction (SPME) Fiber protector and its application in flammable liquid residues analysis, *Forensic Science Internal*, Vol. 292, pp. 138-147, 2018.

[15] Monfreda, M., Gregori, A., Differentiation of unevaporated gasoline samples according to their brands, by SPME-GC-MS and multivariate statistical analysis, *J Forensic Sciences*, Vol. 56, No. 2, pp. 372-380, 2011.

[16] Yoshida, H., Kaneko, T., Suzuki, S., A Solid phase Microextraction Method for the Detection of Ignitable Liquids in Fire Debris. *Journal of forensic sciences*, Vol. 53, No. 3, pp. 668-676, 2008.

[17] Furton, K. G., Bruna, J., Almirall, J. R., A simple, inexpensive, rapid, sensitive and solventless technique for the analysis of accelerants in fire debris based on SPME,

Journal of high resolution chromatography, Vol. 18, No. 10, 625–629, 1995.

[18] Bartle, K. D., Myers, P., History of gas chromatography, TrAC Trends in Analytical Chemistry Vol. 21, No. 9–10, pp. 547–557, 2002.

[19] Martín-Alberca, C., Ortega-Ojeda, F. E., García-Ruiz, C., Analytical tools for the analysis of fire debris, A review, 2008–2015, Analytica Chimica Acta Vol. 928, pp. 1–19, 2016.

[20] Sigman, M. E., Williams, M. R., Chemometric applications in fire debris analysis, WIREs Forensic Sciences, Vol. 2, e1368, 2020.

[21] de Vos, B.-J.; Froneman, M.; Rohwer, E.; Sutherland, D. A. Detection of petrol (gasoline) in fire debris by gas chromatography/mass spectrometry/mass spectrometry (GC/MS/MS), Journal of forensic sciences, Vol. 47, No. 4, pp. 736–756, 2002.

[22] Kerr, T. J., Sample preparation for the analysis of fire debris - Past and present, Journal of separation science, Vol. 41, No. 21, pp. 4055–4066, 2018.

[23] Stauffer, E., Lentini, J. J., ASTM standards for fire debris analysis: a review, Forensic Science International, Vol. 132, No. 1, pp. 63–67, 2003.

[24] Okamoto, K., Hiramatsu, M., Miyamoto, H., Hino, T., Honma, M., Watanabe, N., Hagimoto, Y., Miwa, K., Ohtani, H., Evaporation and diffusion behavior of fuel mixtures of gasoline and kerosene, Fire Safety Journal, Vol. 49, pp. 47–61, 2012.

[25] Pert, A. D., Baron, M. G., Birkett, J. W., Review of analytical techniques for arson residues. Journal of forensic sciences, Vol. 51, No. 5, pp. 1033–1049, 2006.

[26] Sandercock, P. M. L., Fire investigation and ignitable liquid residue analysis—a review: 2001 – 2007, Forensic science international, Vol. 176 No. 2–3, pp. 93–110, 2008.

[27] Long, R. B., Speight, J. G., The composition of petroleum, Taylor & Francis, Washington, DC, 1998.