

# 석유 부산물의 물리화학적 분석을 통한 화재폭발 특성연구

김형기 · 이영석<sup>\*,\*\*,\dagger</sup>

한국소방안전원, \*충남대학교 응용화학공학과, \*\*충남대학교 탄소융복합기술연구소  
(2019년 7월 30일 접수, 2019년 8월 7일 심사, 2019년 8월 8일 채택)

## A Study on Fire Explosion Characteristics via Physico-chemical Analysis of Petroleum Residues

Hyeonggi Kim and Young-Seak Lee<sup>\*,\*\*,\dagger</sup>

Korea Fire Safety Institute, Daejeon 34426, Republic of Korea

<sup>\*</sup>Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

<sup>\*\*</sup>Institute of Carbon Fusion Technology (InCFT), Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

(Received July 30, 2019; Revised August 7, 2019; Accepted August 8, 2019)

### 초 록

본 연구에서는 석유 부산물인 열분해잔사유의 화재, 폭발특성을 파악하기 위하여 그 물리·화학적 분석을 실시하고 주요 성분을 선정하였다. GC-SIMDIS 및 MALDI-TOF 분석을 통해 열분해잔사유의 주요 성분 분포영역을 확인하였으며, GC-MS 분석을 통해 주요 성분 분포영역에 대한 정성분석을 실시하였다. 아울러 EA, SARA, TGA 등 다양한 분석 결과를 바탕으로 열분해잔사유의 주요 성분을 선정하였다. 그 결과 benzene, toluene, xylene을 주요 성분을 선정하여 PHAST 분석을 통한 화재·폭발 시 최대 피해영향범위를 고찰하였다. Toluene은 제트 화재 발생 시 227 kW/m<sup>2</sup>의 복사열 및 118 m의 영향범위를 나타내어 가장 높은 위험성을 보였으며, xylene과 benzene은 각각 114와 151 kW/m<sup>2</sup>의 최대 복사열 수치를 나타내었다. 또한, pasquill 안정도 및 풍속에 따른 피해영향범위를 분석한 결과 benzene에서 풍속에 따라 최대 55% 이상의 복사열이 증가함을 확인하였으며, 이는 영향범위를 증가시키는 주요인자인 것으로 여겨졌다.

### Abstract

In this study, the physical and chemical analyses of petroleum residues (pyrolyzed fuel oil, PFO) were conducted and major components were selected to investigate their fire and explosion characteristics. Major component distribution areas of the PFO were identified via the GC-SIMDIS and MALDI-TOF analyses. In addition, the qualitative analysis of major component distribution areas was performed by GC-MS analysis. Major components of pyrolysis residue were selected based on the results of various analyses such as EA, SARA and TGA. As a result, benzene, toluene and xylene were selected as major components. Finally, the process hazard analysis software tool (PHAST) analysis was performed to investigate the range of maximum damage effect in case of fire and explosion. Toluene presented the highest risk due to the radiation effect of 227 kW/m<sup>2</sup> and 118 m in the case of jet fire. Xylene and benzene showed the maximum radiant heat values of 114 and 151 kW/m<sup>2</sup>, respectively. It was also confirmed from the analysis of pasquill stability and wind speed that the radiant heat increased up to 55% according to wind speed in benzene, which was considered to be a main factor increasing the influence range.

**Keywords:** Pyrolyzed fuel oil, Petroleum residue, Jet fire, PHAST, Chemical analysis

## 1. 서 론

현재 국내 석유화학산업은 세계 5위(하루 평균 334.6만 배럴)의 정

제능력을 갖춘 국가기간산업으로 수십 년 동안 국민경제 발전에 크게 기여하여 왔다. 국내 최대 규모의 석유화학 클러스터가 울산, 여수 및 대산공단을 중심으로 위치하고 있으며, 정유공정과 개질공정을 통해 각종 석유, 전자, 자동차, 건설 등 전방산업에서 기초원료 및 연료유로 사용·생산되고 있다. 석유화학 정제공정 간에 생성된 가장 저품위 연료유는 석유 부산물(petroleum residue)이며 대표적으로 열분해잔사유(pyrolyzed fuel oil, PFO), 감압 잔사유(vacuum residue), 벙커-C유(bunker-C oil) 등이 있다. 이러한 석유 부산물은 높은 중합도와 불순물을 포함하고 있어 2차적인 개질공정 도입이 어려워 선박, 발전소 등

<sup>†</sup> Corresponding Author: Chungnam National University, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Daejeon 34134, Republic of Korea  
Tel: +82-42-822-6637 e-mail: youngslee@cnu.ac.kr

에서 연료유와 보조연료로 대부분 소비되고 있다. 석유 부산물은 산업고도화에 의한 석유사용량 증가 및 정제기술 발달 등에 따라 점점 증가하고 있는 추세로 국내에서 연간 100만 톤 이상 발생하고 있다. 또한, 석유 부산물은 다량의 인화성 액체 등을 포함하고 있는 고농축 방향족 탄화수소 혼합물이기 때문에 화재·폭발 등과 같은 물리·화학적 위험성을 내포하고 있어 「위험물안전관리법」에 따른 규제 대상으로 제조, 저장 및 취급상의 안전관리에 더욱 노력을 해야 한다.

최근 대한송유관공사 고양저유소 화재·폭발사고(2018년 10월) 및 창원터널 위험물운반 화물차 화재·폭발사고(2017년 11월)와 같은 대형 화학사고가 발생하는 등 사회적 관심도가 높아짐에 따라, 「위험물안전관리법」, 「화학물질 등록 및 평가 등에 관한 법률」 및 「화학물질관리법」에 의해 위험물과 유해화학물질로 분류되는 인화성 액체의 저장 및 취급 기준이 엄격해져 있다[1-3]. 그러나 석유 부산물의 경우 단일 성분별 함량 분석과 분류가 어려워 화재·폭발 등 고위험도를 가진 화학물질임에도 불구하고 석유화학산업의 안전관리 측면에서 효율적인 관리가 어려운 상황이다.

앞서 언급하였듯이 석유 부산물은 수천 종의 방향족 탄화수소로 구성된 혼합물이기 때문에 정량·정성 분석을 위한 기술적 난이도가 높은 실정이다. 그럼에도 따라 단순 화합물의 분자구조를 분석하는 연구에서 벗어나 석유 부산물과 같은 혼합물의 정량·정성적 분석을 위한 다양한 대안이 다수의 연구자들에 의해 시도되고 있다. 특히, 석유 부산물의 정량·정성 분석은 가스 크로마토그래피(gas-chromatography), 열중량 분석(TGA) 등 기본적인 유기분석법 아니라 MALDI-TOF (matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry), SARA 등과 같은 분자량 분포 및 정유 분석을 통해 얻은 종합적인 분석결과를 바탕으로 물리·화학적 성상을 판단할 수 있다[4-7]. Kim 등의 연구에 따르면 열중량 분석(TGA)을 통해 온도에 따른 감압 잔사유의 분해 특성을 고찰하였고 MALDI-TOF 분석을 통해 방향족 탄화수소별 분자량 분포도를 파악하였다[8]. 또한 TLC-FID (thin layer chromatography - flame ionization detector) 방법으로 SARA (saturates, aromatics, resins, and asphaltenes) 분석을 통해 열분해잔사유의 aromatic, resin 및 asphaltene 분포도를 파악하는 연구를 하는 등 인화성 액체로 분류되는 석유 부산물의 화재·폭발에 의한 물리·화학적 위험성 평가 기반이 마련되고 있으며 관련 연구 결과 및 성과들이 보고되고 있다[9].

하지만, 이러한 수천 종의 화합물로 구성된 석유 부산물의 위험성 평가는 분석법 정립과 대표물질 선정 등 다양한 평가 변수가 있어 그 결과가 매우 다양하게 나타날 수 있으나 이에 대한 기초연구가 아직까지 부족하여 관련 연구가 지속적으로 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 석유 부산물 중 열분해잔사유의 기초 화학분석뿐만 아니라 화재, 폭발에 대한 위험성 평가를 실시하여 물질의 안전성에 대해 고찰하였다. GC-MS (gas chromatograph-mass spectrometer), MALDI-TOF 등의 유기화합물 분석을 통해 열분해잔사유의 분자량 분포 및 주요 구성성분을 확인하였고 EA, TGA, SARA 분석을 실시하여 물리·화학적 특성을 고찰하였다. 이러한 화학분석 결과를 바탕으로 결과 분석(consequence analysis) 전용 소프트웨어인 PHAST를 통한 화재·폭발 특성평가를 실시하여 주요성분에 의한 피해영향범위를 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험 재료

본 연구의 화학분석을 위한 재료는 여천NCC(주)에서 생산한 열분해

잔사유를 사용하였으며, 정제와 희석 없이 분석하였다. MALDI-TOF 분석을 위한 매트릭스는 7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (TCNQ)을 사용하였다.

### 2.2. GC-SIMDIS 및 GC-MS 분석

열분해잔사유의 끓는점 분포를 확인하기 위해 GC-SIMDIS 분석을 실시하였다. 0.2 g의 샘플은 6.8 g의 CS<sub>2</sub>와 혼합되어 ASTM D 7169에 의해 분석되었다[10]. 열분해잔사유의 정성적인 성분분석은 GC-MS를 통해 진행되었다. 유기용매로 THF (tetrahydrofuran)를 사용하였으며, 열분해잔사유와 1 : 1의 질량비로 혼합하여 GC로 주입되었다. GC column으로 DB-IHT를 사용하였으며, 10 °C/min의 승온 속도로 330 °C의 범위까지 조사하였다.

### 2.3. SARA 분석

열분해잔사유의 saturated, aromatic, resin 그리고 asphaltene의 성분비를 확인하기 위해 SARA 분석을 실시하였다. 0.1 g의 샘플은 10 mL의 디클로로메탄에 용해된 후 Si rod에 장착되어 헥산, 톨루엔, 디클로로메탄 : 메탄올(95:5, v:v)의 용매에 따라 TLC-FID 법에 의해 분석되었다[11].

### 2.4. MALDI-TOF 분석

열분해잔사유의 분자량 분포를 확인하기 위하여 MALDI-TOF (bruker daltonics autoflex MALDI-TOF mass spectrometer) 분석을 실시하였다. 시료 전처리에는 Solvent-free 법에 의해 수행되었다. 이온화를 위한 매트릭스로는 TCNQ를 사용하였으며, 시료와 매트릭스를 1 : 20의 비율로 섞고 MALDI-TOF 플레이트 위에 water spotting method를 통해 코팅하였다[12]. 플레이트는 상온에서 12 h 건조 후 분석을 실시하였다. 0~1,500 m/z의 분자량 영역에 대하여 조사하였으며, 사용된 장비는 bruker daltonics autoflex MALDI-TOF mass spectrometer이다.

### 2.5. 열중량 분석(thermogravimetric analysis)

열분해잔사유의 열적 거동에 대한 고찰을 위하여 열중량 분석을 실시하였다. 분석은 Rigaku사의 Thermo plus EVO II TG8120를 통하여 실시하였다. 약 5.0 mg의 피치를 분석에 사용하였으며, 질소분위기에서 900 °C까지 5.0 °C/min의 승온 속도로 가열하여 조사하였다.

### 2.6. 화재, 폭발 특성평가

열분해잔사유의 화재, 폭발에 관한 모사는 PHAST 프로그램(DNV·GL)을 통해 실시하였다. 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌의 저장시설 규모는 석유화학단지에서 활용되는 실제 시설규모를 고려하여 1,000,000 kg로 설정하였으며, 화재 발생조건은 유출에 의한 제트 화재(zet fire)로 선정하였다. 또한, 유출 시나리오는 실제 옥외저장탱크 연결배관의 최대지름 구경인 100 mm으로 설정하여 화재·폭발 특성을 최대화하였으며, 유출공은 방유제 높이(1.8 m)를 초과하는 2 m 높이에서 발생하는 것으로 설정하였다. 제트 화재의 모사는 cone model을 기반으로 실시하였다[13].

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 석유 잔사유의 화학조성 평가

열분해잔사유의 화학조성을 확인하기 위해 원소분석(elemental analysis)을 실시하여 C, H, N, S의 함량비를 확인하고 Table 1에 정리하

Table 1. Elemental Contents of PFO via Elemental Analysis

Sample name	Element (%)			
	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulfur
PFO	87.4	7.2	0.1	0.1

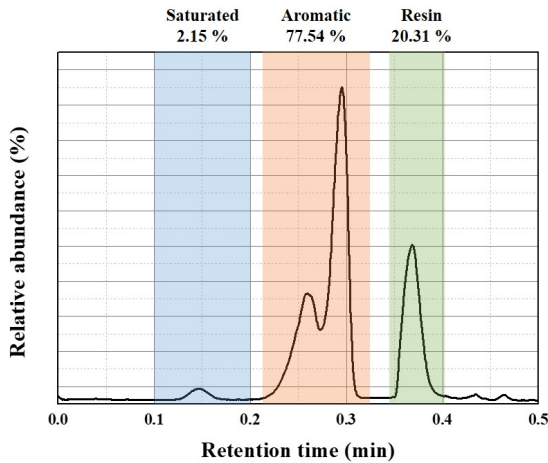


Figure 1. SARA fraction of PFO via TLC-FID.

었다. 열분해잔사유는 탄소와 수소의 함량이 각각 87.4, 7.2%로 다량의 탄화수소로 이루어져 있으며, 특히 두 원소의 원소비(hydrogen/carbon atomic ratios)는 0.989로 다량의 방향족 성분을 함유하고 있을 것으로 예상된다. 또한 황 및 질소의 경우에는 0.1%의 함량을 나타내었는데, 이는 석유 정제 및 개질공정 단계 간 탈황공정과 같은 불순물 처리공정을 거치기 때문인 것으로 판단된다.

원소분석으로부터 얻어진 화학조성에서 유추된 열분해잔사유의 방향족 성분 구성분포를 확인하기 위해 SARA 분석을 실시하였으며, 이를 Figure 1에 나타내었다. 열분해잔사유는 77.54%의 aromatic과 20.31%의 resin 성분을 주성분으로 이루어져 있으며 소량(2.15%)의 saturated 성분이 검출되었다. Aromatic과 resin 모두 방향족 성분에 소량의 결사슬을 가지는 형태이며, aromatic의 경우 수 개의 방향족 성분으로 구성되어 resin에 비해 낮은 분자량을 가지는 형태이다. 앞선 원소분석에서의 고찰과 같이 열분해잔사유는 다환 방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)로 구성된 혼합물이며 원소분석과 SARA 분석을 통해서는 정성적인 화학성분에 대한 고찰이 불가능하기 때문에 GC-SIMDIS 분석을 추가로 실시하였다.

3.2. 열분해잔사유의 화학성분 분석

GC-SIMDIS 분석을 통해 열분해잔사유의 끓는점에 따른 화학성분의 분포특성을 고찰하였다. Figure 2(a)의 200 °C 부근에서 매우 높은 피크를 나타내고 있으며, 특히 Figure 2(b)에서 약 320 °C 이하에서 60% 이상의 성분이 분포하고 있다. 3환 순수 방향족인 안트라센의 끓는점은 340 °C이므로 열분해잔사유의 주요 성분은 벤젠(B.P.: 80.1 °C), 나프탈렌(B.P.: 218 °C)과 같은 2환 이하의 성분임을 유추할 수 있다.

열분해잔사유의 분자량 분포는 MALDI-TOF를 통해 분석하였으며 이를 Figure 3에 나타내었다. 열분해잔사유는 75~500 m/z의 범위의 성분으로 분포되어 있으며, 약 150~160 m/z에서 가장 높은 peak를 나타내었다. 나프탈렌과 안트라센의 분자량은 각각 128, 178 m/z로 열분

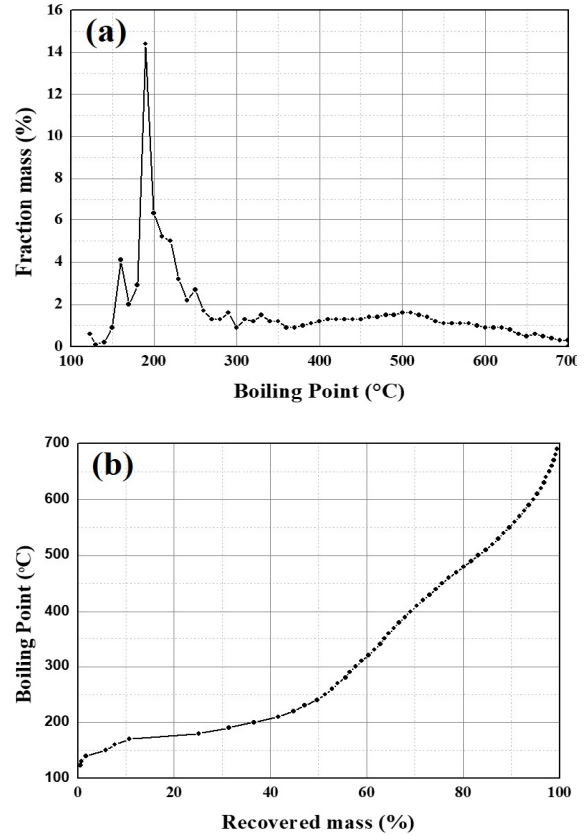


Figure 2. Boiling-point distribution of PFO by GC-SIMDIS.

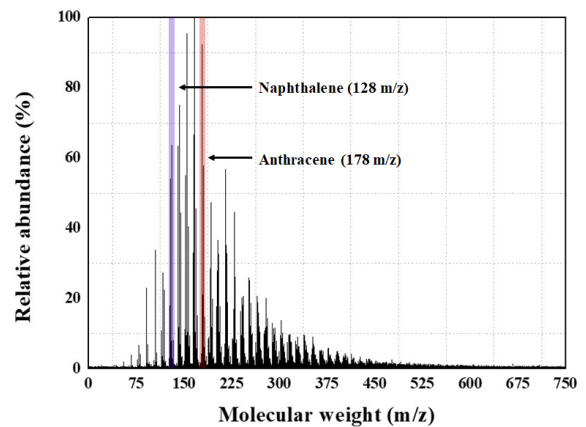


Figure 3. Molecular weight distribution of PFO.

해잔사유의 주요 구성성분은 2환의 나프탈렌에 결사슬을 가지는 형태임을 알 수 있으며 이는 GC-SIMDIS에서의 고찰과 일치하는 결과이다.

앞선 GC-SIMDIS와 MALDI-TOF 분석으로는 정성적인 화학성분에 대한 판단이 어렵기 때문에 추가적으로 GC-MS 분석을 실시하였다. GC-MS 분석은 시료의 용해도에 의해 분석범위가 결정되기 때문에 열분해잔사유의 전체 성분을 분석하기 용이하지 않다. 하지만, GC-SIMDIS 분석결과로부터 도출된 주요성분인 3환 이하의 성분에 대한 정성분석은 가능한 것으로 판단되어 주요성분에 대한 GC-MS 분석을 실시하고 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

열분해 잔사유의 GC-MS 분석결과 피렌(B.P.: 404 °C)의 범위까지

Table 2. GC-MS Result of PFO

Chemical		Area (%)	
Benzene group	Cyclohexane	4-chenyl-	0.68
		2-methyl-1-propenyl	0.69
		1,3 -dimethyl-	0.26
		p-Xylene	1
		1,2,4,5-tetramethyl	1.16
		Ethyl	3.34
		1-propenyl-	1.95
		(1-methylethenyl)-	0.53
		Styrene	1.5
		1-ethenyl-3-methyl-	2.2
	4-ethenyl-1,2-dimethyl	0.63	
Indane		-	6.97
		2-methyl-	5.08
Indane group		1,1-dimethyl-	0.5
		1,3-dimethyl-	2.05
		2,3-dimethyl-	0.39
		1,1a,6,6a-tetrahydro	5.9
Naphthalene		-	24.97
		1-methyl-	6.41
		2-methyl-	8.71
		1,2-dimethyl-	0.34
		1,5-dimethyl-	0.88
		1,7-dimethyl-	2.04
		2,6-dimethyl-	0.88
		2-ethyl-	1.48
		1-(2-propenyl)-	0.73
		2-phenyl-	0.23
	1,4-dihydro	3.02	
Acenaphthylene		1,2-dihydro-	1.23
		-	3.7
Biphenyl		2-methyl-	0.38
		4-methyl-	1.47
Diphenylmethane		-	0.52
Fluorene		-	1.93
		1-methyl-	1.2
Phenanthrene		-	2.96
		2-methyl-	1.54
Pyrene		-	0.52
Total			99.97

의 성분이 검출되었으며, 구체적으로 헥산, 벤젠, 인덴, 나프탈렌, 비페닐, 플로오렌, 펜트라센을 주구조로 하는 성분들이 확인되었다. 단일 성분으로는 나프탈렌, 2-메틸 나프탈렌, 인덴이 각각 24.97, 8.71, 6.97% 순으로 높게 나타났으며, 나프탈렌을 포함하는 나프탈렌 화합물이 49.69%, 인덴을 포함하는 인덴 화합물이 20.89%, 벤젠 화합물이 13.26%로 나타났다. 앞서 언급한바와 같이 GC-MS의 경우 열분해잔

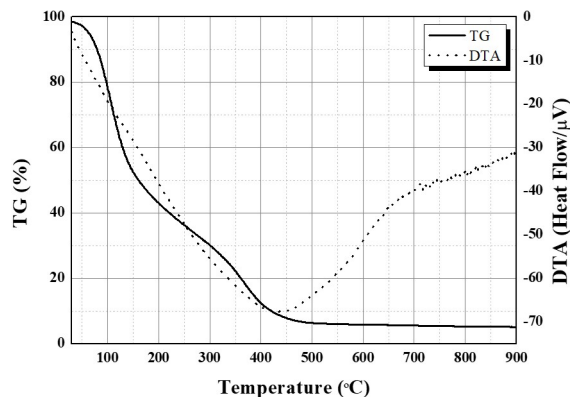


Figure 4. Thermogravimetric curve of PFO.

사유의 전체 구성성분에 대한 분석이 불가하지만 GC-SIMDIS와 MALDI-TOF의 분석결과와 종합적으로 고찰하였을 때 충분한 정성적인 분석 신뢰성을 가질 수 있다고 판단된다.

### 3.3 열분해잔사유 열화특성 모사를 위한 가상분(pseudocomponent) 설정

열분해잔사유의 화재, 폭발특성 평가를 위한 가상분을 설정하기 위해 열중량 분석을 실시하였으며 이를 Figure 4에 나타내었다. 열분해잔사유는 600 °C까지 중량감소를 보이다가 이후에는 일정하게 유지되어 900 °C에서 약 5 wt%의 잔존량을 보인다. 일반적으로 다환 방향족 탄화수소는 400~500 °C 범위에서 중축합 고분자화에 의한 피치화가 일어나며 이들 성분이 600 °C 이상에서 탄화되어 코크스화 된다고 알려져 있다. 열분해잔사유 또한 이러한 열중합 거동에 대하여 보고된 바 있다[14].

열분해잔사유는 220 °C까지 대략 60 wt%의 급격한 질량감소가 일어난다. 이는 열분해잔사유의 열화 시 낮은 비점의 성분부터 기화가 일어나며, 218 °C의 비점을 가지는 나프탈렌 성분들의 열화를 통해 초기 60%의 중량감소가 일어남을 나타낸다.

즉 열분해잔사유의 구성성분 중 3환 이상의 성분은 고온에서 중합되는 특성을 가지고 있으며, 동시에 열화 또한 상대적으로 높은 온도에서 진행되므로 본 연구에서의 화재, 폭발특성 평가를 위한 가상분 설정에서 제외되었다. 또한 GC-MS 분석에서 나프탈렌, 인덴, 벤젠 순으로 높은 구성성분을 나타내었는데 이들 성분의 인화점은 각각 78.9, 54.0, -11.0 °C로 상온(25.0 °C)을 고려하였을 때, 열분해잔사유의 1차적인 발화원은 벤젠 화합물에 의한 것임을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서 열분해잔사유의 화재 및 폭발특성 평가를 위한 가상분으로 벤젠, 메틸-벤젠(톨루엔), 디메틸-벤젠(자일렌)을 설정하여 진행하였다.

### 3.4 열분해잔사유의 화재, 폭발특성 평가

앞서 고찰된 열분해잔사유의 물리, 화학적 분석 결과를 바탕으로 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌을 화재, 폭발의 주요 성분으로 선정하고 각 물질의 유출 시나리오에 대한 PHAST 분석을 실시하였으며 Figure 5에 도시하였다. 상기 3가지 성분은 30 °C 이하의 낮은 인화점 및 13 kPa 이하의 증기압을 갖는 액체 상태이기 때문에 제트 화재에 의한 화재특성을 나타내었다. 제트 화재는 가압상태의 액체 분출화재로서 저장설비, 이송배관 또는 가압펌프에서 유출이 발생하였을 때 그 압력에 의해 분출하는 인화성 물질에 의해 발생하는 화재이다. 화재 규모가 작은 경우 배관의 밸브를 폐쇄하는 등의 방법으로 대응이 가능하나 그

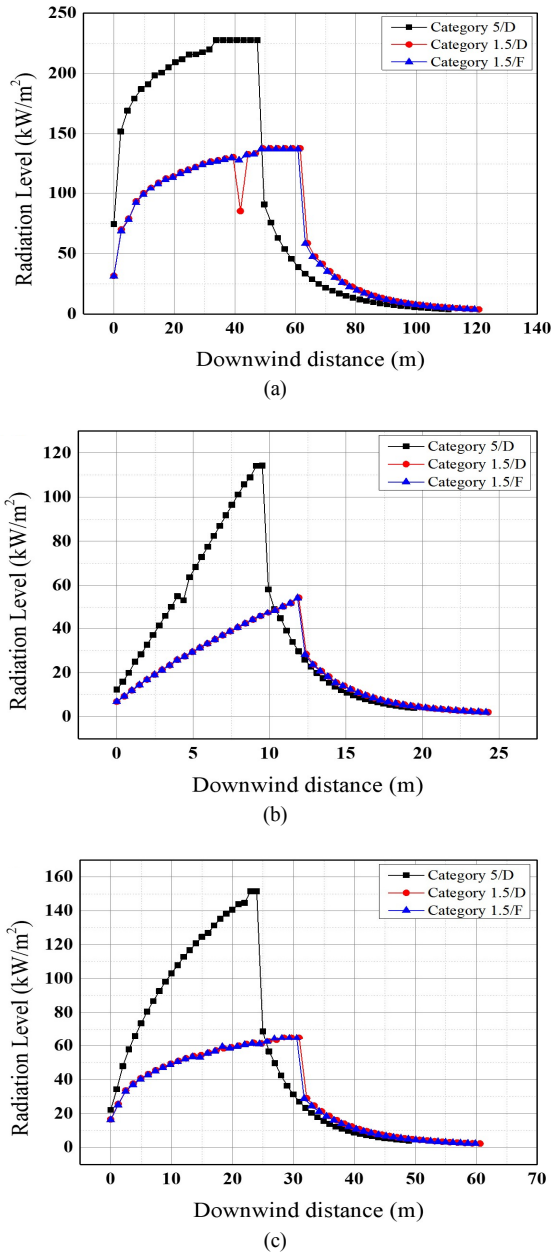


Figure 5. Analysis of jet fire effect range through PHAST simulation (a) toluene, (b) xylene, and (c) benzene.

렇지 않은 경우 화염이 원거리까지 도달할 수 있어 화재가 대형화 되는 경우 대응에 어려움이 많다. Figure 5(a)에서 볼 수 있듯이 제트 화재 발생 시 톨루엔에서  $227 \text{ kW/m}^2$ 의 가장 높은 복사열을 방출함을 확인하였다. 자일렌과 벤젠은 각각  $114$ 와  $151 \text{ kW/m}^2$ 의 최대 복사열 수치를 보였다. 미국 석유회사의 API-581 기준에 따르면 화재·폭발에 따른 피해는  $4 \text{ kW/m}^2$  이상일 경우 인체에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[15]. 또한 공정 설비의 경우  $37.5 \text{ kW/m}^2$  이상에서 피해영향 범위를 설정하고 있다[15]. 따라서 톨루엔의 유출에 따른 제트 화재 발생 시 인체에 대해 최대  $118 \text{ m}$ 까지 피해영향 범위를 판단할 수 있다. 자일렌과 벤젠은 각각  $20$ 과  $51 \text{ m}$ 의 범위까지 인체에 대한 영향을 미침을 확인하였다. 공정 설비에 대한 피해범위는 톨루엔, 자일렌, 그리고 벤젠에서 각각  $69.5$ ,  $12$ , 그리고  $31 \text{ m}$ 로 계산되었다. 이러한 결과는

집적화된 저장설비를 구축하고 있는 화학공장의 경우, 본 연구에서 선정한 최대 배관직경에 대한 제트 화재 발생 시 연쇄적인 화재 위험성에 노출되어 있음을 암시한다. 따라서 저장설비에 대한 폭발방지장치 또는 물분무설비를 설치하여 피해를 최소화 하는 방안이 필요한 것으로 판단된다. 또한 모든 물질에서 복사열의 크기와 방출거리는 대기 안정도와 풍속 변수에 따라 변화됨을 확인하였다. 특히 D(중립)와 F(매우 안정)로 설정된 pasquill 안정도 변수에도 불구하고 복사열과 방출거리의 결과 값이 유사함을 확인하였으며, 풍속변수가 pasquill 안정도보다 제트 화재의 주요인자임을 알 수 있다. 아울러, 복사열은 풍속 변수에 따라 톨루엔, 자일렌, 그리고 벤젠에서 각각 최대  $60.8$ ,  $47.4$ , 그리고  $42.8\%$  감소됨을 확인하였다. 따라서 석유 부산물을 저장, 취급하는 주요 석유화학 시설에서 발생할 수 있는 화재, 폭발의 피해영향 범위를 고려한 시설배치와 안전관리체계의 정립이 요구될 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

석유 부산물중 열분해잔사유에 대한 물리, 화학적 분석을 실시하여 주요 성분을 확인하고 이에 대한 화재, 폭발 특성과 영향범위를 고찰하였다. GC-SIMDIS 및 GC-MS 분석을 통해 열분해잔사유의 주요 성분분포가 벤젠과 나프탈렌 같은 2환 이하의 성분으로 구성됨을 확인하였다. 또한, 열중량 분석을 통해 1차적인 발화원을 벤젠 화합물로 유추할 수 있었으며 벤젠, 톨루엔 그리고 자일렌을 주요성분으로 판단하여 화재, 폭발 특성평가를 실시하였다.

PHAST를 통한 제트 화재 시 화재, 폭발특성 계산결과 톨루엔은  $227 \text{ kW/m}^2$ 의 가장 높은 복사열과 약  $120 \text{ m}$ 의 피해영향 범위를 나타냄을 확인하였다. 따라서 이러한 실험결과를 바탕으로 석유화학단지 등의 대규모 화학시설에서 석유 부산물을 저장, 취급하는 시설에서 화재, 폭발이 발생할 것을 대비하여 적절한 안전거리 설정 등 다양하고 적극적인 예방책이 필요할 것으로 판단된다.

#### References

1. K. Lee, H. M. Kwon, S. Cho, J. Kim, and I. Moon, Improvements of safety management system in Korean chemical industry after a large chemical accident, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **42**, 6-13 (2016).
2. H. Y. Lim, K. S. Um, and S. H. Jung, A study on effective mitigation system for accidental toxic gas releases, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **49**, 636-644 (2017).
3. K. O. Lee, J. Y. Park, and C. J. Lee, Evaluation of a mitigation system for leakage accidents using mathematical modeling, *Korean J. Chem. Eng.*, **35**(2), 348-354 (2018).
4. J. H. Kim, J. G. Kim, C. W. Lee, K. B. Lee, and J. S. Im, Effect of added mesophase pitch during the pitch synthesis reaction of PFO, *Carbon lett.*, **23**, 48-54 (2017).
5. J. G. Kim, J. H. Kim, B-J. Song, C. W. Lee, and J. S. Im, Synthesis and its characterization of pitch from pyrolyzed fuel oil (PFO), *J. Ind. Eng. Chem.*, **36**, 293-297 (2016).
6. J. G. Kim, J. H. Kim, J. S. Im, Y-S. Lee, and T-S. Bae, Empirical study of petroleum-based pitch production via pressure- and temperature-controlled thermal reactions, *J. Ind. Eng. Chem.*, **62**, 176-184 (2018).
7. J. G. Kim, J. H. Kim, B-J. Song, C. W. Lee, Y-S. Lee, and J. S. Im, Empirical approach to determine molecular weight distribution

- using MALDI-TOF analysis of petroleum-based heavy oil, *Fuel*, **186**, 20-23 (2016).
8. B. C. Bai, J. G. Kim, J. H. Kim, C. W. Lee, Y-S. Lee, and J. S. Im, Blending effect of pyrolyzed fuel oil and coal tar in pitch production for artificial graphite, *Carbon lett.*, **25**, 78-83 (2018).
  9. J. G. Kim, J. H. Kim, B-J. Song, Y. P. Jeon, C. W. Lee, Y-S Lee, and J. S. Im, Characterization of pitch derived from pyrolyzed fuel oil using TLC-FID and MALDI-TOF, *Fuel*, **167**, 25-30 (2016).
  10. J. H. Kim, J. G. Kim, K. H. Lee, and J. S. Im, Effects of pressure-controlled reaction and blending of PFO and FCC-DO for mesophase pitch, *Carbon lett.*, **29**, 203-212 (2019).
  11. J. Wang, T. Wang, X. Hou, and F. Xiao, Modelling of rheological and chemical properties of asphalt binder considering SARA fraction, *Fuel*, **238**, 320-330 (2019).
  12. W. F. Edwards, L. Jin, M. C. Thise, MALDI-TOF mass spectrometry: Obtaining reliable mass spectra for insoluble carbonaceous pitches, *Carbon*, **41**, 2761-2768 (2003).
  13. K. Zhou, J. Liu, and J. Jiang, Prediction of radiant heat flux from horizontal propane jet fire, *Appl. Therm. Eng.*, **105**, 634-639 (2016).
  14. H. Shui, Y. Feng, B. Shen, and J. Gao, Kinetics of mesophase transformation of coal tar pitch, *Fuel Process. Technol.*, **55**, 153-160 (1998).
  15. M. R. Shishesaz, M. N. Bajestani, S. J. Hashemi, and E. Shekari, Comparison of API 510 pressure vessels inspection planning with API 581 risk-based inspection planning approaches, *Int. J. Press. Vessels Piping*, **111-112**, 202-208 (2013).