

# 온도 변수에 대한 유류의 휘발특성 및 탄화수소 화합물의 존재비에 관한 연구

최정식\*†

\* 목포해양대학교 해양경찰학부 교수

## Evaporation Characteristics of Oil and Abundance Ratio of Hydrocarbon Compounds at Different Temperatures

Jung-Sik Choi\*†

\* Professor, Division of Coast guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**요 약 :** 해수에 유출된 유류는 대기와 해수와의 접촉을 통해 다양한 풍화 과정(증발, 확산, 분산, 유화, 용해, 산화, 침전 및 생물분해 등)을 통해 물리·화학적 변화와 함께 생물학적 분해과정을 겪는다. 본 연구에서는 여러 가지 풍화작용 중 가장 즉각적이고 빠르게 오염물질의 질량에 가장 큰 영향을 미치는 인자라고 알려진 증발(evaporation)에 대한 영향을 확인해보고자 하였다. 휘발유, 등유, 경유를 대상으로 25 ℃(해수 연평균 온도)와 35℃(적도 부근 온도) 조건에서 유류의 휘발특성을 비교하였다. 이를 위해, 일정 기간마다 채취한 유류를 전처리하여 GC/MS 분석을 수행하고, 탄화수소의 변화량을 계산하여 비교하였다.

**핵심용어 :** 유류 해상 유출, 풍화, 휘발특성, 탄화수소, GC/MS(Gas Chromatography/Mass Spectrometry)

**Abstract :** Oil spilled in seawater undergoes physical and chemical changes as well as biological degradation through various weathering processes, such as evaporation, diffusion, dispersion, emulsification, dissolution, oxidation, and sedimentation. Evaporation is one of the most immediate and prompt weathering processes, and it has the greatest influence on majority of pollutants. In this study, the evaporation characteristics of different oil samples were studied; the volatilization characteristics of gasoline, kerosene, and diesel were compared at average seawater (25 ℃) and near-equator (35 ℃) temperatures. The oil samples were pre-treated and then collected at regular intervals. Gas chromatography -mass spectrometry analysis was performed, and the changes in the amount of the hydrocarbons were calculated.

**Key Words :** Oil spill, Weathering, Evaporation, Hydrocarbon, Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

### 1. 서 론

유류(Oil)는 해양에 유출된 이후 대기와 해수와의 접촉을 통하여 증발, 침전 등의 물리·화학적 변화와 함께 미생물에 의한 생물학적 분해과정을 겪는다. 구체적으로 해양에 유출된 유류는 증발(evaporation), 확산(diffusion), 분산(dispersion), 유화(appeasement), 용해(dissolution), 산화(oxidation), 침전(precipitation) 및 생물분해(biodegradation) 등의 과정을 겪으며, 유류의 풍화(weathering)는 유류의 종류 및 물리·화학적 특성, 해상 조건 및 해면 상태 등에 따라 다르게 작용한다(Mishra and Kumar,

2015). 수중 환경에 유출된 유류 내 탄화수소 화합물은 수면 표면에 부유하여 얇은 표면 또는 유막을 형성하는 경향이 있고, 특정 해양 조건에서 석유 탄화수소와 해수는 "무스"라고 불리는 점성 물질인 에멀전을 형성하기도 하며(Rodriques and Totola, 2015), 풍화와 함께 고분자 화합물은 물의 바닥으로 가라앉아 침전된다(Mishra and Kumar, 2015). 해수에 내리쬐는 햇빛(UV radiation in sunlight)은 휘발성 성분이 많은 유류 오염물질을 분해하기도 하고(Logeshwaran et al., 2018), 일부 성분들은 해수에 용해되기도 한다(Clay, 2014). 유류 내 탄화수소 화합물은 대부분 호기성(산소 존재 시) 또는 혐기성(산소 부재 시) 미생물 세포가 기질에 부착하여

\*† First and Corresponding Author : jungsikchoi@mmu.ac.kr, 061-240-7236

생물 계면활성제 및 유화제 생산을 하면서 분해되는 효소 특이적 생분해 메커니즘에 의해 분해된다(Das and Chandran, 2011; Hu, 2016; Varjani and Upasani, 2017). 여러 가지 풍화 작용 중 증발이 가장 즉각적이고 빠르며 오염물질의 질량에 가장 큰 영향을 미치는 인자라고 알려져 있다(Lee et al., 2015).

해상에서 유출된 유류의 증발속도(evaporation rate)와 증발율은 유류의 휘발성에 따라 좌우된다고 보고되고 있다. 통상적으로 비점이 낮은 성분을 많이 함유한 유종일수록 증발 현상이 강하며, 유출유(spill oil)가 넓은 범위에 걸쳐 확산될 수록 표면적이 크기 때문에 증발이 빨리 일어난다. 해수의 조건에 따라 며칠 안에 경질 원유(light crude oil)가 초기 부피의 최대 75%, 중간 원유(medium crude oil)는 최대 부피의 40%까지 감소되기도 하고, 중유(heavy oil) 또는 잔류 오일(residual oil)은 약 5% 정도만 손실된다고 보고되기도 하였다(Fingas, 1999). 또한, 잔잔한 해면의 경우보다도 파도 등이 있는 거친 해면과 풍속이 강하고 기온이 높을 때 증발율이 높다고 알려져 있다. 2001년 갈라파고스에서 제시카호(Jessica)로부터 유출된 유류(50% diesel)가 뜨거운 열대 태양으로 인해 많은 양의 유류가 증발되고 일부만 해수에 잔존하여 피해가 적었던 사고가 보고되기도 하였다(Kingston, 2002). 유류의 증발은 비점이 낮은 성분의 함량이 많을수록, 환경적 요인(온도, 바람의 세기, 면적 등)이 효과적으로 작용 될수록 빠른 것으로 보고되고 있다.

우리나라의 해수면 온도(sea surface temperature, SST)는 19.2 °C(남해), 17.8 °C(동해), 15.3 °C(서해) 수준으로, 상대적으로 저위도에 위치하고 있어 태양복사에너지를 많이 받는 남해가 가장 높은 수온을 나타내고 있다(Climatic policy, 2020). 전 지구의 연평균 해수면 온도는 약 18.21 °C(1981~2010 평균)이고, 가장 뜨거운 바다는 적도 부근으로 약 35 °C이며, 가장 차가운 바다는 남극 과 북극으로 0~-2 °C 범위에서 보고되고 있다(earth observatory, NASA). 같은 유종의 유류가 해수에 유출되는 해양 사고가 발생하더라도 해수면의 온도(-2~35 °C)에 따라 유류의 휘발률과 휘발 속도는 다를 것이며 저위도와 극지방에서 극명한 차이를 보이게 된다.

본 연구에서는 다양한 풍화인자 중 가장 효과적인 것으로 알려져 있는 휘발 인자에 대한 유류의 변화양상과 휘발특성을 파악해 보고자 하였다. 휘발유(gasoline), 등유(kerosene) 및 경유(diesel)를 대상으로, 연평균 해수 온도(20 °C)와 적도 부근의 온도(35 °C)를 가정하여 휘발 실험을 수행하였으며, 대상 유종을 용매 추출 후 가스크로마토그램 분석을 통해 유류 내 탄화수소 화합물의 변화량을 비교·분석 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 유류 증발실험

해양에 유출된 유류가 겪게 되는 변화의 여러 가지 원인 중 휘발(evaporation) 변수에 대한 유류 변화를 관찰하고자 하였으며, 실제 해수 유출 모사실험을 하기 전 배치(batch test)로 진행하였다. 선박용 등유 및 경유는 면세유로서 구입 용이성이 좋지 않고, 유류의 물리·화학적 특성이 선박용과 유사하므로 주유소에서 구매하여 실험에 사용하였다. 유류 약 0.5 mL 정도를 15 mL 유리 시험관에 넣고 뚜껑이 없는 채로 20 °C에서 방치 하였으며, 관찰하고자 하는 기간(0일, 10일, 40일, 85일)의 수만큼 시료를 준비하여 사용하였다. 가온 조건(35 °C) 상태에서의 유류의 휘발 특성을 확인하기 위하여, 유류 약 0.5 mL를 15 mL 유리 시험관에 넣은 뒤, 수욕조를 이용하여 중탕하여 온도를 유지하였다. 수욕조의 온도는 35 °C 도이며 주기적으로 온도를 확인하여 항온 조건을 유지하였다. 자연 휘발 실험과 동일하게 관찰하고자 하는 기간의 수만큼 시료를 준비하여 사용하였다.

### 2.2 분석절차

15 mL 유리 바이알에 담겨진 유류를 다이클로로메테인(dichloromethane, DCM, ≥99.8%, Merck)으로 추출하였으며, 유의한 측정값을 얻을 수 있도록 희석배율을 조절하였다. GC/MS 장비는 Agilent사의 GC5977B 모델을 이용하였으며, Table 1은 분석 조건을 나타내었다. 분석용 GC 칼럼은 DB-5MS caillary column을 사용하였고, 이동상 기체는 헬륨 기체를 사용하였으며, 유속은 1 ml/min이다. 칼럼의 초기 온도 100 °C에서 8분간 머무른 후, 분당 20 °C씩 180 °C까지 승온 하였으며, 6분간 머무른 후, 분당 20 °C씩 280 °C까지 승온한 후 최종 온도에서 16분 동안 머무르게 하였다.

Table 1. GC/MS operating conditions for analysis

	condition
column	DB-5MS caillary column
column oven	100 °C(8 min) -20 °C/min-180 °C(6min)-20 °C/min-280 °C (16min)
injection temperature/source temperature	250 °C / 250 °C
carrier gas flow	He gas, 1ml/min
split ratio	20:1
injection volume	2 μL

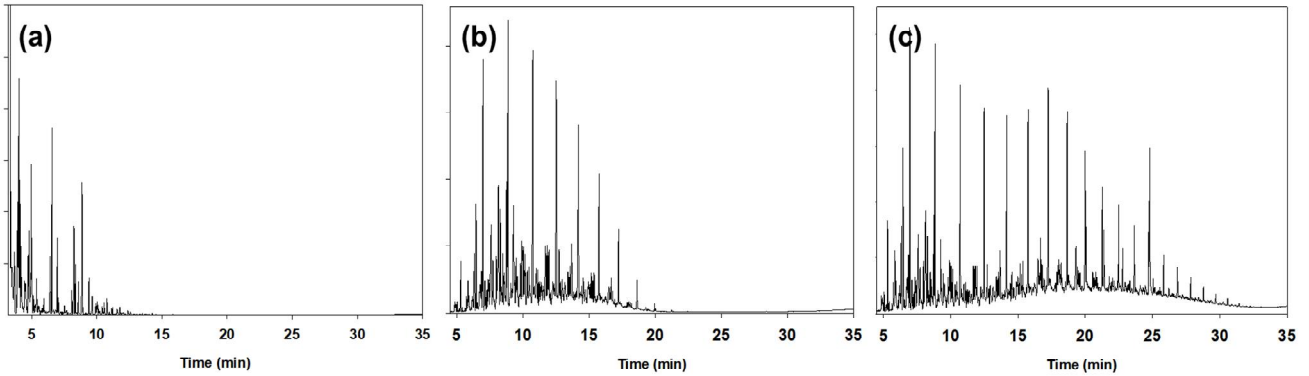


Fig. 1. GC/MS results for oil: gasoline (a), kerosene (b) and diesel (c).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 연평균 해수 온도에서의 유류의 휘발특성

휘발 실험에 앞서 주유소에서 구입한 유종(휘발유, 등유 및 경유)을 분석하고 GC/MS의 크로마토그램을 Fig. 1에 표시하였다. 머무름 시간이 짧은 휘발유 성분들이 크로마토그램 앞단에서 나오기 시작하였으며, 등유 및 경유의 순으로 화합물들이 관찰되었다. 휘발유에서 메틸-삼차부틸에스테르(methyl t-butyl ether, MTBE), 톨루엔(toluene), 자일렌(xylene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 벤젠(benzene), C2-벤젠류(C2-benzene), C3-벤젠류(C3-benzene), C4-벤젠류(C4-benzene), 인단(indane), 나프탈렌(naphtalene) 등의 성분이 확인되었다. 등유의 경우 C9~C16 부분에서 탄화수소류가 관찰되었으며, 경유의 경우 C8~C21의 탄화수소류 및 지방산메틸에스테르(fatty acid methyl ester, FAME)가 관찰되었다. 일반적으로 휘발유의 밀도는  $0.75 \text{ g/cm}^3$ 이고 C4에서 C12 범위의 탄화수소를 포함하고 있다. 등유의 밀도는  $0.78 \sim 0.81 \text{ g/cm}^3$ 이며(Collins, 2007), 등유 내 존재하는 탄화수소는 C6에서 C20의 탄소 원자수 범위이지만 일반적으로 등유는 주로 C9에서 C16 범위의 탄화수소를 포함한다(Shepherd et al., 2000). 경유의 밀도는  $0.85 \text{ g/cm}^3$ 이며, 주로 C8에서 C21 범위의 탄화수소를 포함한다. 실험에 사용한 유류는 기존 표준적으로 알려져 있는 유류와 차이가 없음을 확인하였다.

Fig. 2는 0일, 10일, 40일, 85일 동안 연평균 해수 온도( $20^\circ\text{C}$ )에서의 유류의 휘발특성을 분석한 결과이다. 휘발인자에 대한 화합물의 변화량을 관찰하기 쉽도록 각 유류의 GC/MS 크로마토그램의 총면적을 해당하는 유류의 GC/MS 가스 크로마토그램(초기값, 0일)의 총면적으로 나누어 상대 비율로 표시하였다. 시간이 지남에 따라 저분자 화합물의 휘발이 고분자 화합물에 비하여 강하게 관찰되었으며, 화합물 전체의 양이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 가장 휘발 변수에 영향을 잘 받는 휘발유의 경우, 10일이 지난 뒤 약 51%의 정

도의 탄화수소류가 감소하였으며 40일이 지난 뒤 35.4% 수준의 탄화수소류만이, 85일이 지난 뒤 약 25.8%의 탄화수소류만이 잔존 하였다. 10일이 지난 뒤 휘발유에서 MTBE 등 일부 휘발성이 강한 성분들이 관찰되지 않았다. 햇볕(sunlight, UV irradiation)의해 BTEX나 다환 방향족 탄화수소(PAH)와 같은 석유 탄화수소의 성분이 분해된다고 알려져 있어(Logeshwaran et al., 2018), 햇볕변수를 적용했을 경우 본 실험결과보다 빠르게 휘발될 것으로 예상된다.

등유의 경우 휘발유에 비교하여 휘발에 대한 영향이 적었으며, 98.5%(10일), 86.3%(40일), 77.8%(85일) 정도의 탄화수소류가 잔존 하였다. 세 가지 유류 중에서 경유의 휘발이 가장 적었으며, 97.7%(0일), 92.1%(40일), 85.5%(85일) 정도의 탄화수소류가 잔존 하였다. 일반적으로 비점이 낮은 성분을 많이 함유한 유종일수록 증발 현상이 뚜렷하고 증발속도는 선형적이지 않다고 보고되고 있어, 휘발성분이 가장 많은 휘발유의 휘발 정도가 가장 크고 상대적으로 비점이 큰 화합물의 존재비가 큰 경유가 가장 영향을 덜 받았다.

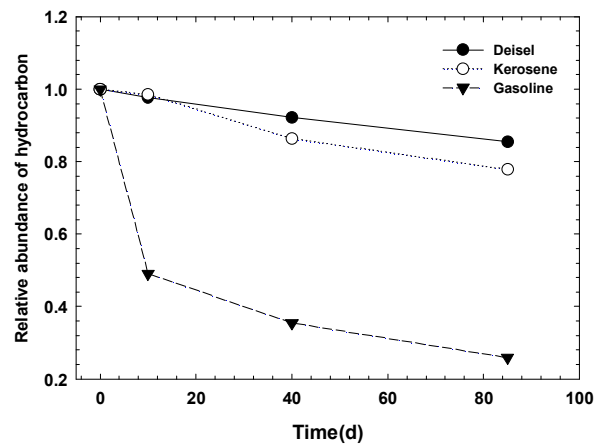


Fig. 2. Relative abundance of oil (gasoline, kerosene and diesel) at annual sea temperature.

온도 변수에 대한 유류의 휘발특성 및 탄화수소 화합물의 존재비에 관한 연구

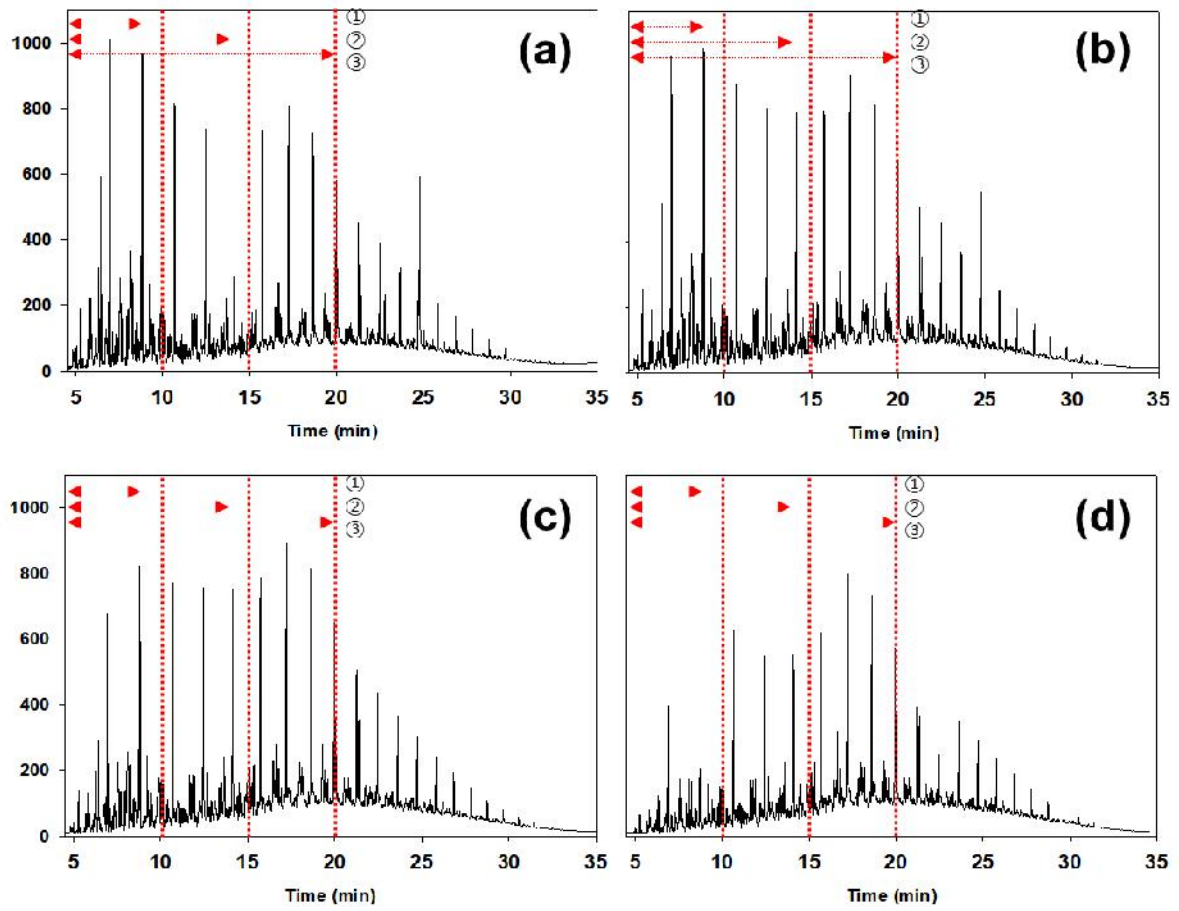


Fig. 3. GS/MS result for diesel at annual sea temperature: 0d(a), 10d(b), 40d(c) and 85d(d).

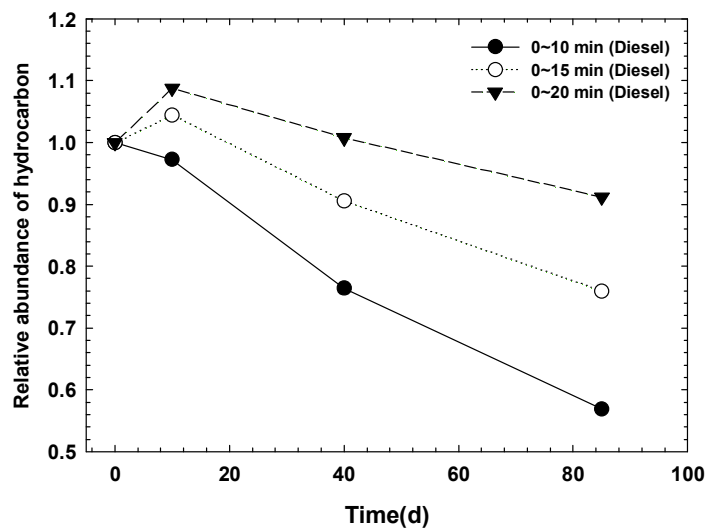


Fig. 4. Relative abundance of diesel at annual sea temperature: 0~10 min(①), 0~15 min(②) and 0~20 min(③).

휘발에 대한 영향 정도를 좀 더 세분하여 관찰하고자 세 가지 유류 중 휘발이 가장 적은 경유를 머무름 시간별(저분자~고분자 탄화수소로 구분)로 구분하여 상대적 존재비를 계산하였다(Fig. 3~Fig. 4). 0~10분(①, C8~C10), 0~15분(②, C11~C13), 0~20분(③, C14~C17) 구간으로 나누어 구분하였으며, 해당 되는 구간의 크로마토그램의 면적을 초기값으로 나눠서 계산하였다. 그림3에서 보는 것과 같이 C8~C10의 크로마토그램이 다른 탄화수소류에 비하여 작은 것을 확인할 수 있으며, 고분자 화합물로 갈수록 휘발의 정도가 약한 것을 알 수 있다. 그림4에서 보는 것과 같이 자연 휘발 시간에 따른 감소세는 C8~C10구간(①), C11~C13(②), C14~C17(③)순이었으며 비점이 낮은 저분자 화합물의 휘발이 더 활발한 것을 알 수 있다. ①구간에서 탄화수소의 비율은 1.0(0일), 0.97(10일), 0.76(40일), 0.57(85일)순으로, ②구간에서 1.0(0일), 1.04(10일), 0.91(40일), 0.76(85일)순으로 탄화수소류가 감소였다(1.0(0일), 1.05(10일), 1.01(40일), 0.91(85일), ③구간). C8~C10구간(①)의 탄화수소류 감소 속도는 C11~C13 보다는 1.79배 정도 빠르고, C14~C17 구간 보다는 4.89배 정도 빠른 것을 알 수 있다(1구간의 탄화수소류 잔류비율을 각 구간의 잔류비율로 나누 것, 85일 기준). 즉, 휘발에 대한 영향은 비점이 작은 작은 분자량의 탄화수소에 의해 지배되는 것을 알 수 있다.

### 3.2 가온 조건에서의 유류 휘발특성

Fig. 5(등유)와 Fig. 6(경유)은 0일, 5일, 60일 동안 가온 조건(35°C)에서 유류의 변화를 관찰하고 분석한 결과이다. 실온 조건에서도 휘발이 강하게 일어나는 휘발유는 가온 조건에서 실험을 수행하지 않았다. 등유와 경유 모두 시간이 지남에 따라 저분자 화합물의 휘발이 고분자 화합물에 비하여 강하게 관찰되었으며, 화합물 전체의 양이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 연평균 해수온도 조건에 비교하여 휘발되는 속도가 빠른 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)에서 보는 것과 같이 60일이 지난 뒤에는 등유의 알케인류 탄화수소가 관찰되지 않았으며, 일부 다중결합 탄화수소와 함께 UCM(unresolve complex mixture)만이 관찰되었다. UCM은 GC/MS를 이용하여 석유계 물질을 분석할 때 관찰되는 분리되지 않은 탄화수소 구역(언덕)을 말하며, 알케인(alkane), 사이클로알칸(cycloalkane), 단일 방향족(mono-aromatics), 다중 고리 방향족(multi-ring aromatics), 헤테로 원자(hetero-atomics), 스테란(steranes) 및 고리형 트리테르페노이드(cyclic triterpenoids를 포함한 약 250,000개의 화합물로 구성되어 있다(Fryzinger et al., 2003; Sutton et al., 2005; Ventura et al., 2008). 풍화(weathering)에 의해 가스크로마토그램에서 정상적인 탄화수소류 피크(peak)를 관찰 할 수 없는 상태에서도 UCM은 관찰된다고 보고되며(Hallmann et al., 2008), 관찰되는 UCM의 위치에 따라 유종을 구분하기도 한다(Jeon et al., 2017).

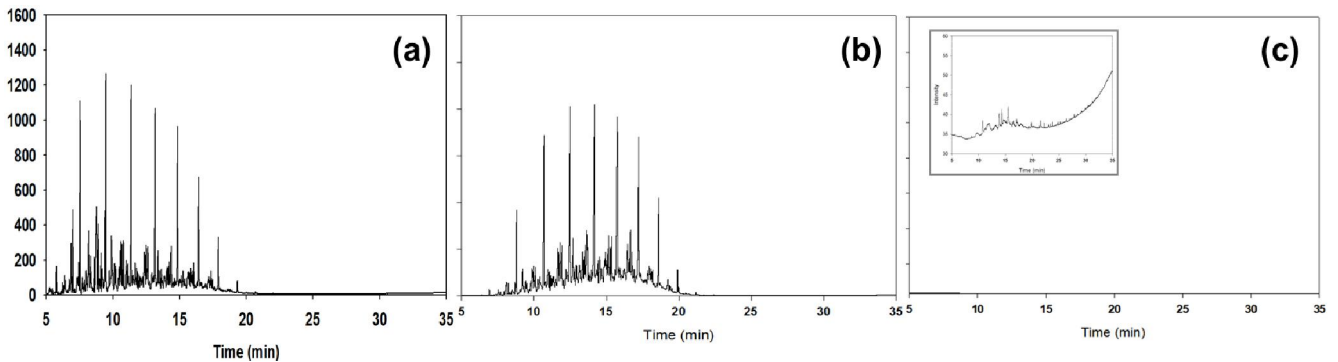


Fig. 5. GS/MS result for kerosene at warm temperature: 0d(a), 5d(b) and 60d(c)

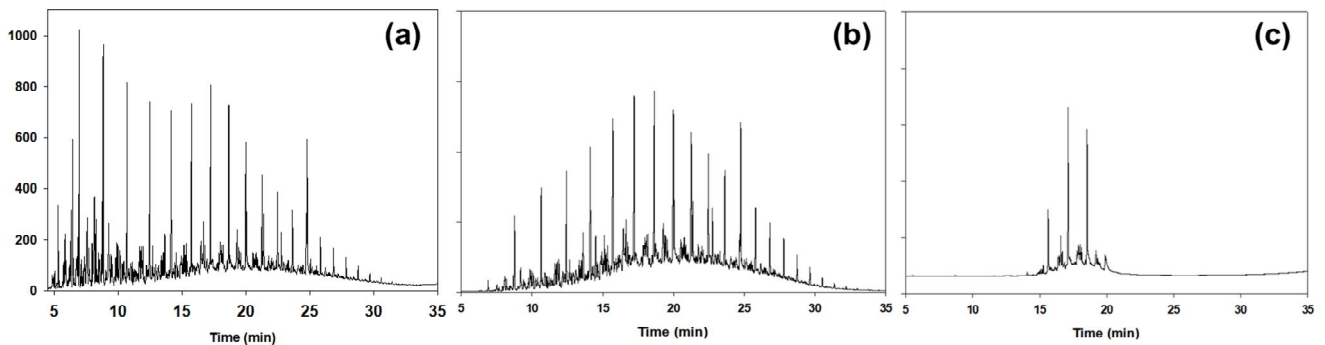


Fig. 6. GS/MS result for diesel at warm temperature: 0d(a), 5d(b) and 60d(c)

가온 조건에서, 60일이 지난 등유는 UCM 정도만을 이용하여 등유임을 확인 가능하며, 실제 유류 유출된 상황이라 가정한다면 유종을 쉽게 판별할 수 없을 정도로 휘발된 것을 알 수 있다. 77.8%(연평균 해수 온도조건, 85일) 정도의 탄화수소가 잔존한 것과 비교하면, 15℃도 온도차가 탄화수소의 휘발에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 지구 온난화 및 이상 기온에 의해 해수 온도가 상승할 경우, 더 짧은 기간 안에 더 많은 탄화수소 화합물이 휘발될 것이고 휘발 속도도 더 빠를 것으로 추정된다.

상대적으로 고비점 탄화수소류를 포함하고 있는 경유는 등유에 비하여 고온에 영향을 덜 받으나, 연평균 해수 온도 조건과 비교해서는 상당량의 유류가 휘발된 것을 알 수 있다(Fig. 6). 가온 조건에서 60일이 지난 뒤, 가스크로마토그램에서 C13-alkane(n-tridecane) 중부터 확인이 가능하였으며, C12-alkane(n-dodecane)은 미량만이 남았으며, C8~C11 알케인 탄화수소는 휘발되어 관찰되지 않았다. 그림 7에서는 5분~17분 사이의 가스크로마토그램을 표시하여 휘발 시간에 따라 관찰되는 탄화수소를 비교하였다(Fig. 7). 휘발 시작 전 경유에서는 C8~C26의 탄화수소가 관찰되며(Fig. 7(a)), 5일이 지난 뒤 C8-alkane (n-octane)의 세기(intensity)는 작아졌으며(Fig. 7(b)), C9-alkane(n-nonane)부터 관찰이 용이하고, 60일이 지난 뒤부터는 C13-alkane 이후의 화합물의 관찰이 용이하였다(Fig. 7(c)).

연평균 해수 온도 조건과 가온 조건에서의 탄화수소 휘발 정도를 비교하기 위하여 상대적 존재비를 나타내었다(Fig. 8). 변화량을 관찰하기 쉽도록 각 유류의 GC/MS 크로마토그램의 총면적을 해당하는 유류의 GC/MS 가스크로마토그램(초기값, 0일)의 총면적으로 나누어 상대값으로 표시하였다. 등유와 경유 모두, 가온 조건에서 휘발되는 탄화수소의 감소 기울기가 더 컸으며, 5일이 지난 뒤 등유는 92.1%의 탄화수소가, 경유는 96.8% 정도의 탄화수소가 잔존 하였다. 60일이 지난 뒤 11.9%(등유)와 27.1%(경유) 정도의 탄화수소만이 잔존 하였으며, 자연 휘발 조건에서 85일이 지난 뒤 77.8%의 등유가, 85.5%의 경유가 잔존한 것과 비교하면 큰 변화임을 알 수 있다. 온도는 유류의 증발에 영향을 미치는 가장 중요한 환경 변수인 것으로 보고되고 있으며, 해수에 유류가 유출되었을 경우 유류의 유출면적, 바람의 속도, 온도 중에서 유류의 휘발에 영향을 가장 많이 미치는 인자는 온도라고 보고한 바 있다(Fingas, 1999). 연평균 해수 온도(20℃)와 적도 부근의 해수 조건(35℃) 결과를 바탕으로, 실제 유류 유출 사고 시 적도에 유출된 유류가 고온과 뜨거운 햇볕으로 인해 더 빨리 휘발되고 분해될 것임을 유추해볼 수 있다. 또한, 생물학적 분해 등의 다른 풍화 요인이 함께 작용한다면 60일 이전에 알케인류 탄화수소가 모두 관찰되지 않을 것으로 판단된다.

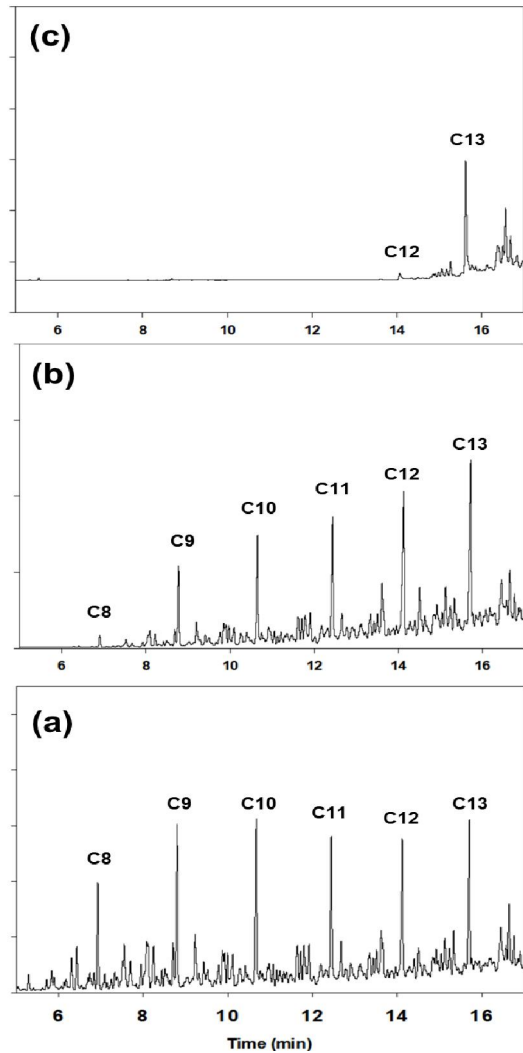


Fig. 7. GS/MS result for diesel at warm temperature (5 min ~ 17 min): 0d(a), 5d(b) and 60d(c).

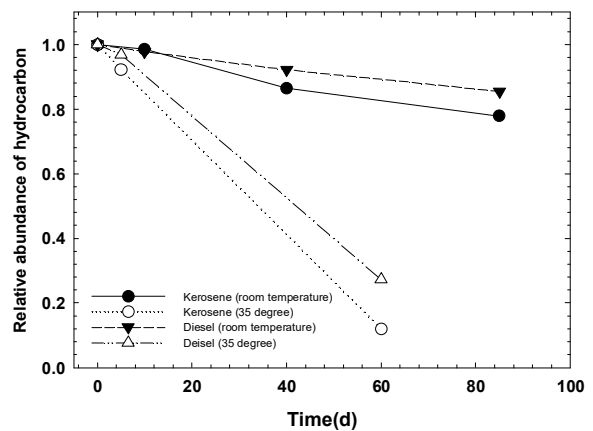


Fig. 8. Relative abundance of kerosene and diesel: annual (20℃) and warm (35℃) temperature.



#### 4. 결론

해수에 유출된 유류는 확산(diffusion), 증발(evaporation), 분산(dispersion), 유화(appeasement), 용해(dissolution), 산화(oxidation), 침전(precipitation) 및 생물분해(biodegradation) 등의 복합 작용을 통해 풍화된다. 유류 내 탄화수소 화합물은 대부분 호기성 또는 혐기성 미생물 세포에 의해 분해되고(Das and Chandran, 2011; Hu, 2016; Varjani and Upasani, 2017), 햇별은 휘발성 성분이 많은 유류 오염물질을 분해하기도 하며(Logeshwaran et al., 2018), 일부 성분들은 해수에 용해되기도 한다(Clay, 2014). 탄화수소 성분의 용해는 분자 크기, 구조 및 극성과 같은 특정 특성에 따라 그 정도가 결정된다고 알려져 있으며, 유출된 유류의 약 1% 정도가 용해된다고 한다(Kingston, 2002).

기존 연구에 의하면, 여러 가지 풍화작용 중 증발이 가장 즉각적이고 빠르게 오염물질의 질량에 가장 큰 영향을 미치는 인자라고 알려져 있다(Lee et al., 2015). 본 연구를 통해 적도 부근의 해수 온도와 유사한 가온 조건에서 등유 및 경유의 휘발 속도가 빠르며, 비점이 작은 탄화수소의 휘발 속도가 상대적으로 큰 화합물 중보다 큰 것을 알 수 있다. 이상기온으로 인해 해수 온도와 햇별이 강하게 내리쬐는 조건에서는 더 빨리 휘발 및 분해될 것이다. 햇별(sunlight, UV irradiation)에 의한 광분해(photolysis)로 인해 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 자일렌(xylene) 및 다환방향족 탄화수소(PAH)와 같은 석유 탄화수소의 성분이 분해된다고 보고되고 있어(Logeshwaran et al., 2018), 본 실험에서 햇별변수를 적용했을 경우 연구결과보다 더 빠르게 휘발유의 휘발이 진행되었을 것으로 판단된다. 비점에 따른 휘발 정도를 정성적으로 보고한 연구는 많으나, 실제 유류(휘발유, 등유 및 경유)의 휘발 정도를 정량화하여 비교하였다는 것에 본 연구의 의미를 찾을 수 있다. 다만, 다른 변수(미생물에 의한 분해, 용해 등)를 통제하기 위하여 해수에 유출시키지 않은 상태로 진행한 부분이 제한적일 수 있어, 향후 연구에서는 증류수, 수돗물, 해수 등 다양한 수계 조건에서 실험을 수행할 예정이다.

실제로 유류가 해수에 유출되었을 경우, 유류는 다양한 변수의 영향을 받아 복합적인 원인으로 풍화를 겪기 때문에 변수 통제를 통해 그 영향 정도를 파악할 필요가 있다. 해수 유출 실험은 해수의 조건(온도, 풍향, 파도의 강도 등), 햇별의 세기(UV irradiation), 미생물 분해 등의 변수에 따라 하나의 변수를 확인해야 하며, 설계된 조건에 따라 다양한 결과를 가져올 수 있다. 향후 연구에서는 확산(diffusion), 분산(dispersion), 유화(appeasement), 용해(dissolution), 산화(oxidation), 침전(precipitation) 및 생물분해(biodegradation) 등에 대한 유류의 변화를 복합적으로 연구해 볼 예정이다.

#### Acknowledgements

본 논문은 2020년도 목포해양대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 연구결과임.

#### References

- [1] Clay, S.(2014), Identifying the fate of petroleum hydrocarbons released into the environment and their potential biodegradation using stable carbon isotopes and microbial lipid analysis (Doctoral dissertation).
- [2] Climate policy(2020), surface sea temperature, Climate change monitoring, [http://www.climate.go.kr/home/09\\_monitoring/marine/sst\\_main](http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/marine/sst_main).
- [3] Collins, C. D.(2007), Implementing phytoremediation of petroleum hydrocarbons. In *Phytoremediation*, pp. 99-108, Humana Press.
- [4] Das, N. and P. Chandran(2011), Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology research international*.
- [5] Earthobservatory, NASA, <https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MYD28M>
- [6] Fingas, M. F.(1999), The evaporation of oil spills: development and implementation of new prediction methodology. In *International Oil Spill Conference*, Vol. 1999, No. 1, pp. 281-287, American Petroleum Institute.
- [7] Frysinger, G. S., R. B. Gaines, L. Xu, and C. M. Reddy (2003), Resolving the unresolved complex mixture in petroleum-contaminated sediments. *Environmental science & technology*, 37(8), pp. 1653-1662.
- [8] Hallmann, C., L. Schwark, and K. Grice(2008), Community dynamics of anaerobic bacteria in deep petroleum reservoirs. *Nature Geoscience*, 1(9), pp. 588-591.
- [9] Hu, G.(2016), Development of novel oil recovery methods for petroleum refinery oily sludge treatment (Doctoral dissertation, University of Northern British Columbia).
- [10] Jeon, S. K., D. Kwon, and S. Lee(2017), Identification of weathered multiple petroleum products in contaminated soils by characterizing unresolved complex mixture hump in gas chromatograph data. *Science of the Total Environment*, 607, pp. 42-52.
- [11] Kingston, P. F.(2002), Long-term environmental impact of oil spills. *Spill Science & Technology Bulletin*, 7(1-2), pp. 53-61.
- [12] Lee, K., M. Boufadel, B. Chen, J. Foght, P. Hodson, S.

- Swanson, and A. Venosa(2015), Expert panel report on the behaviour and environmental impacts of crude oil released into aqueous environments. Royal Society of Canada, Ottawa, ON.
- [13] Logeshwaran, P., M. Megharaj, S. Chadalavada, M. Bowman, and R. Naidu(2018), Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: An overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches. *Environmental technology & innovation*, 10, pp. 175-193.
- [14] Mishra, A. K. and G. S. Kumar(2015), Weathering of oil spill: modeling and analysis. *Aquatic Procedia*, 4, pp. 435-442.
- [15] Shepherd, J. E., C. D. Nuyt, J. J. Lee, and J. E. Woodrow (2000), Flash point and chemical composition of aviation kerosene (Jet A).
- [16] Sutton, P. A., C. A. Lewis, and S. J. Rowland(2005), Isolation of individual hydrocarbons from the unresolved complex hydrocarbon mixture of a biodegraded crude oil using preparative capillary gas chromatography. *Organic Geochemistry*, 36(6), pp. 963-970.
- [17] Varjani, S. J. and V. N. Upasani(2017), A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 120, pp. 71-83.
- [18] Ventura, G. T., F. Kenig, C. M. Reddy, G. S. Frysinger, R. K. Nelson, B. Van Mooy, and R. B. Gaines(2008), Analysis of unresolved complex mixtures of hydrocarbons extracted from Late Archean sediments by comprehensive two-dimensional gas chromatography (GC×GC). *Organic Geochemistry*, 39(7), pp. 846-867.

---

Received : 2021. 11. 29.

Revised : 2021. 12. 17.

Accepted : 2021. 12. 28.