

온도와 압력의 변화에 따른 석유계 및 바이오항공유의 점화특성 분석

강새별^{1,*}

¹국방과학연구소

34060 대전광역시 유성구 북유성대로 488번길 160

(2019년 6월 6일 접수; 2019년 6월 18일 수정본 접수; 2019년 6월 22일 채택)

Ignition Characteristics of Petroleum-based and Bio Aviation Fuel According to the Change of Temperature and Pressure

Saetbyeol Kang^{1,*}

¹Agency for Defense Development

160, Bugyuseong-daero 488beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34060, Republic of Korea

(Received for review June 6, 2019; Revision received June 18, 2019; Accepted June 22, 2019)

요 약

본 연구에서는 온도와 압력의 변화에 따른 석유계항공유(Jet A-1), 바이오항공유(Bio-6308) 그리고 두 항공유를 50:50 (v:v)으로 혼합한 연료의 점화특성의 변화에 대한 분석을 수행하였다. Combustion research unit (CRU) 장비를 사용하여 각 항공유의 점화지연시간을 측정하였으며, GC/MS 및 GC/FID를 사용하여 각 항공유를 구성하는 화합물에 대한 정성 및 정량적인 분석을 수행하였다. 그 결과, 모든 연료의 경우에서 온도와 압력이 증가할수록 점화지연시간이 짧게 측정되었으며, 특히 압력보다 온도의 영향을 더 많이 받는 것을 확인하였다. 또한, 모든 측정 조건에서 Jet A-1의 점화지연시간이 가장 길게 측정되었는데 이는 Jet A-1을 약 22.48%의 비율로 구성하는 방향족화합물이 산화되는 과정에서 생성되는 benzyl radical이 구조적으로 매우 안정한 특성을 갖기 때문인 것으로 판단되었다. 이러한 benzyl radical은 negative temperature coefficient (NTC) 구간에 영향을 줄 수 있는 반응을 억제하여, Jet A-1의 경우에서는 온도가 증가함에 따라 점화지연시간이 짧아지는 정도가 감소하는 구간이 없는 것을 확인하였다. Jet A-1과 Bio-6308을 50:50 (v:v)으로 혼합한 연료의 점화특성은 Bio-6308 보다는 Jet A-1과 비슷한 경향을 나타내는 것을 통해 기존의 시스템을 변경하지 않고서도 실제로 적용이 가능함을 확인하였다.

주제어 : 석유계항공유, 바이오항공유, 점화지연시간

Abstract : In this study, the ignition characteristics of petroleum-based aviation fuel (Jet A-1), bio aviation fuel (Bio-6308), and blended aviation fuel (50:50, v:v) were analyzed in accordance with change of temperature and pressure. The ignition delay time of each aviation fuel was measured by combustion research unit (CRU) and the compositions of the fuels were analyzed by GC/MS and GC/FID for qualitative and quantitative results. From the results, it was confirmed that the ignition delay times of all aviation fuels were shortened with increasing temperature and pressure. In particular, the effect of temperature was larger than the effect of pressure. Also, the ignition delay time of Jet A-1 was the longest at all measurement conditions, and it was judged that this result is because of the structurally stable characteristics of the benzyl radical generated during the oxidation reaction of the aromatic compound (about 22.48%) in Jet A-1. Also, it was confirmed that Jet A-1 had no section where the degree of shortening of ignition delay time was decreased by increasing temperature, which was because the benzyl radical inhibits the response that can affect the negative temperature coefficient (NTC). The ignition characteristics of blended aviation fuel (50:50, v:v) showed a similar tendency to those of Jet A-1, rather than to those of Bio-6308, so that the blended aviation fuel (50:50, v:v) can be applied to the existing system without any change.

Keywords : petroleum-based aviation fuel, bio aviation fuel, ignition delay time

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ksb0316@add.re.kr; Tel: +82-42-821-2454; Fax: +82-42-823-3400

doi: 10.7464/ksct.2019.25.3.238 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

항공 산업에서는 환경의 지속가능성을 향상시키기 위한 변화를 필요로 하고 있으며, 특히 탄소 배출량의 감축을 위해 노력하고 있다. 디젤이나 가솔린과 같은 다른 액체 연료 분야에서 배터리 또는 전기적인 전력 공급 장치와 같은 대안에 대하여 연구하고 있는 것과는 다르게 대체 가능한 항공유는 아직 개발 초기에 머무르고 있으며, 그중에서도 가까운 미래에 실현이 가능할 것으로 여겨지는 것은 바이오항공유이다[1].

바이오항공유는 Table 1에 나타낸 바와 같이 식용기름, 비식용기름, 동물성기름 그리고 이를 제외한 다른 원료 등을 사용하여 제조할 수 있다[2]. 이러한 원료의 화학반응 및 특정 공정을 통해 제조되는 바이오항공유는 기존의 석유계항공유와 같은 물성 규격에 만족하면서도 구성 화합물의 종류 및 화학적 구조가 다를 수 있으며, 따라서 비교적 CO₂의 배출량이 적고 배기가스에 황 화합물과 방향족화합물을 함유하지 않는 등의 특성을 갖는다.

Figure 1에서 알 수 있듯이, 항공 산업에서 제시된 온실가스 감축 목표를 충족하기 위해서는 바이오항공유의 제조 및 소비를 늘려야 하며, 실제로 바이오항공유를 사용할 경우에 석유계항공유를 사용하는 것에 비해 온실가스를 50~95%까지 줄일 수 있다[3,4].

이러한 장점을 갖는 바이오항공유를 상용화함에 있어서 중요하게 고려되어야 할 부분은 기존의 엔진을 변형하지 않고 사용이 가능해야한다는 것이다. 항공유는 그것을 구성하는 물질에 따라 서로 다른 특성을 가질 수 있으며, 이는 비행체

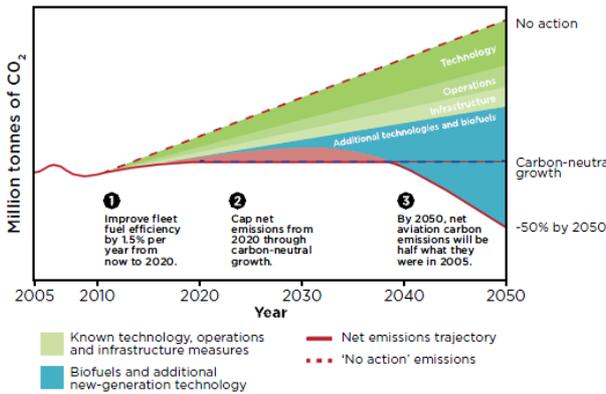


Figure 1. Plan for greenhouse gas reduction in aviation industry [4].

Table 1. Source of feedstocks

Edible oils	soybeans, rapeseed, safflower, rice bran oil, barley, sesame, groundnut, coconut, palm
Non-edible oils	salmon oil, cotton seed, tobacco seed, rubber seed, camelina, coffee ground, neem
Animal fats	pork lard, beef tallow, poultry fat, fish oil
Other sources	bacteria, algae, microalgae, terpenes, poplar, latexes, waste cooking oil

엔진의 디자인, 작동조건, 연료 시스템 제어 장치의 성능 등에 영향을 주기 때문에 엔진의 운용 이전에 사용하는 연료의 물성 및 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

연료의 점화특성 중의 하나인 점화지연시간은 연소실로의 연료 분사의 시작부터 화염의 출현 순간 또는 연료의 연소 시 열 발산에 의한 챔버 내의 압력 상승까지의 시간을 의미하며, 이는 연료가 분사된 후 연소반응이 일어날 수 있는 증기 상태로 분열 또는 미립화 되는데 걸리는 시간인 물리적 점화지연시간과 증기상태의 연료가 공기와의 부분적인 예연소를 거쳐 자발화가 일어날 수 있을 때 까지 걸리는 시간인 화학적 점화지연시간으로 나뉜다[5,6].

본 연구에서는 기존의 석유계항공유와 외국에서 개발된 바이오항공유 각각의 점화지연특성을 측정하여 비교하였고, 실제 비행체의 운용 속도에 따라 달라질 수 있는 온도 및 압력을 여러 가지 조건으로 설정하여 측정하였을 때 나타나는 점화지연특성의 변화에 대해 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험 재료

외국에서 개발 및 생산 중인 바이오항공유에는 Sasol사에서 Fisher-Tropsch (F-T)공정을 통해 제조한 11POSF7629, Shell사에서 F-T공정을 통해 제조한 07POSF5172 등이 있으나, 본 연구에서는 현재 국내에서 개발 중인 바이오항공유와 같은 hydroprocessed 공정으로 제조된 미국 UOP사의 10POSF6308 (이하 Bio-6308)을 실험 대상 연료로 선정하였다. 또한, 기준이 되는 연료로서 GS Caltex사에서 제조 하였으며 기존에 사용되고 있는 석유계항공유인 Jet A-1을 선정하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 점화지연시간 측정

각 실험대상 연료의 점화지연시간을 측정하기 위해 Figure

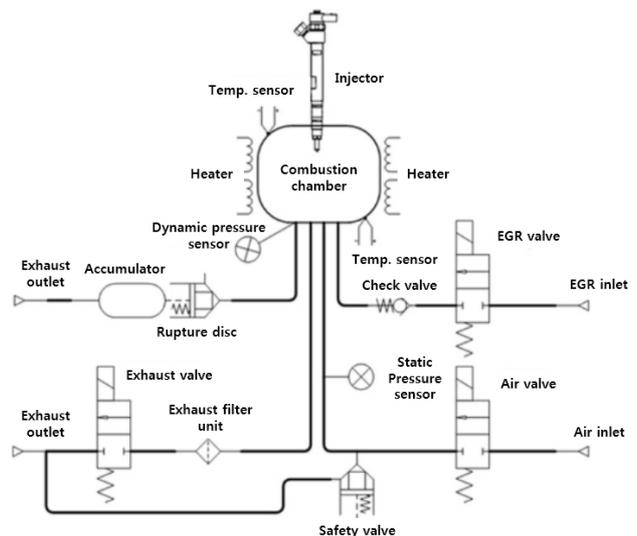


Figure 2. Schematic of CRU.

2와 같이 구성된 Combustion research unit (CRU, Fueltech)를 사용하였다. 기존의 점화지연특성과 관련된 연구들에서는 주로 Ignition quality tester (IQT)와 shock tube를 활용하였으나 [7-9], 이들은 818 K, 21 atm의 단일 온도 및 압력 조건으로만 설정할 수 있거나 연료의 화학적 점화지연시간만을 측정할 수 있는 등의 특징을 갖는다. 반면에 CRU 장비를 사용하여 측정할 경우에는 다양한 온도 및 압력조건(300 ~ 880 K, 10 ~ 75 atm)에서 실험이 가능하며, 연료의 화학적 점화지연시간은 물론 물리적 점화지연시간까지 모두 포함하는 결과를 얻을 수 있다[10].

CRU 장비는 측정하고자 하는 온도로 설정된 정적 챔버 내에 입력된 압력에 도달할 때 까지 air를 주입한 후, 설정된 온도 및 압력조건을 유지한 상태에서 약 0.09 mL의 샘플을 분사하여 연소되는 동안 시간에 따른 압력의 변화를 측정하여 그래프 및 데이터로 기록한다.

실험은 장비의 사양과 각 연료의 연소 조건을 고려하여 700 K부터 850 K까지 총 4개의 온도 조건에서 실시하였으며, 압력 조건은 기존에 수행된 연구들을 기준으로 하여 12 atm부터 42 atm까지 총 3가지로 설정하였다. 이때, 장비로 공급되는 air의 압력은 50 bar, 질소의 압력은 4 bar로 설정하여 각각 연소 시에 필요한 산화제와 purging의 용도로 사용이 가능하게 하였다. 또한, 챔버 주위에서 순환되는 항온수의 온도는 50 °C로 설정하였다.

측정 시에는 3번의 pre-injection을 통해 연소실로 향해있는 노즐의 끝부분까지 시료가 가득 차게 하였으며, 약 0.09 mL의 연료가 1000 bar의 압력으로 분사되는 시점부터 연료의 연소가 진행되는 동안 증가한 압력을 10번씩 측정하였다. 점화지연시간은 IP 541 규정을 토대로 연소가 끝난 후 기록된 최고 압력의 1%에 해당하는 시간인 Ignition Delay (ID)의 평균값으로 정의하였으며, 이에 대한 참고자료는 Figure 3에 나타내었다[11]. 각 시료에 대한 측정이 완료된 후에는 methyl alcohol (DUKSAN, EP, Korea)을 사용하여 3초간 3번의 세척을 진행하였다.

2.2.2. 성분 분석

각 연료의 정성 및 정량적인 분석 자료를 얻기 위해 Gas Chromatography/Mass Spectrometer (GC/MS, Agilent 7890) 장비를 활용하였고, 검출시간에 따른 스펙트럼 intensity의 피크에 해당하는 화합물을 기존에 존재하는 library를 통해 확인하였다. 또한, flame ionization detector (FID)를 활용하여 연료를 구성하는 화합물 중에서도 paraffin의 함량을 화학적인 구조를 기준으로 하여 정량적으로 분석하였고, 이를 GC/MS 분석을 통해 얻은 결과와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연료의 점화지연시간 측정 결과

CRU 장비의 사양과 연료의 연소 조건을 고려하여 700 K부터 850 K까지 총 4개의 온도 조건 및 12 atm부터 42 atm까지

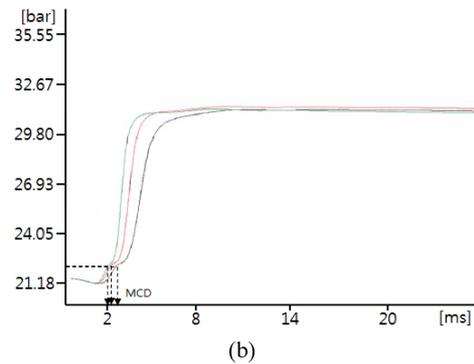
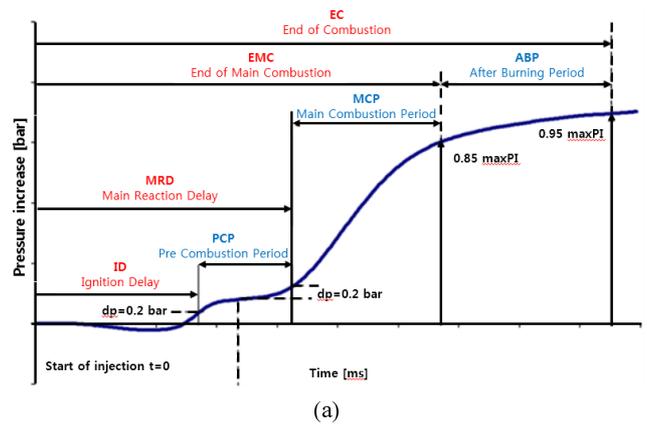
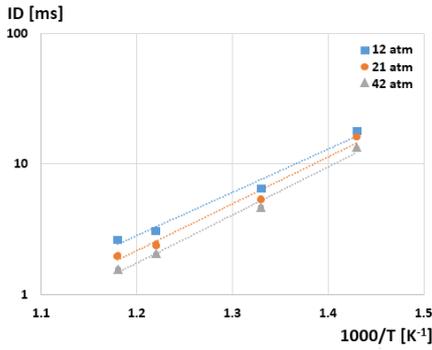


Figure 3. Pressure changes in combustion chamber (a) Definition of specific time, (b) Example of result.

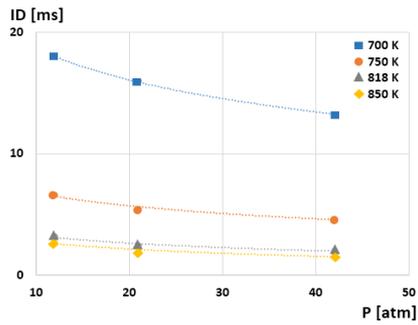
총 3개의 압력 조건에서 Jet A-1의 점화지연시간을 측정한 결과를 Figure 4에 정리하여 나타내었다. 일반적으로는 압력이 증가함에 따라 연료의 점화가 수월해지는 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서는 700 K미만에서 연소실 내의 압력이 증가하더라도 연소가 시작되지 않았으며, 700 K에서는 연소는 시작되었으나 완전 연소는 이루어지지 않는 것을 확인하였다. 특정 온도(750, 818, 850 K)에서는 압력이 12 atm에서 42 atm으로 증가함에 따라 점화지연시간이 29.55, 36.05, 40.98% 감소하였으며, 특정 압력(12, 21, 42 atm)에서는 온도가 750 K에서 850 K로 증가함에 따라 점화지연시간이 59.70, 63.07, 66.24% 감소하였다. 이러한 결과를 통해 일정 온도 이상에서는 온도와 압력이 증가함에 따라 연료의 점화가 용이해지는 것을 알 수 있다.

Jet A-1과 같은 온도와 압력 조건에서 Bio-6308의 점화지연시간을 측정한 결과는 Figure 5와 같다. Bio-6308도 Jet A-1과 마찬가지로 700 K미만에서는 연소실 내의 압력이 증가하더라도 연소가 시작되지 않았으며, 700 K에서는 연소는 시작되었으나 완전 연소는 이루어지지 않았다. 특정 온도(750, 818, 850 K)에서는 압력이 12 atm에서 42 atm으로 증가함에 따라 점화지연시간이 31.08, 36.54, 35.08% 감소하였으며, 특정 압력(12, 21, 42 atm)에서는 온도가 750 K에서 850 K로 증가함에 따라 점화지연시간이 63.13, 61.70, 65.27% 감소하였다.

위의 결과로부터 Jet A-1과 Bio-6308 모두 온도가 높아질수록 압력 증가에 따른 점화지연시간이 더욱 짧아지는 경향을



(a)



(b)

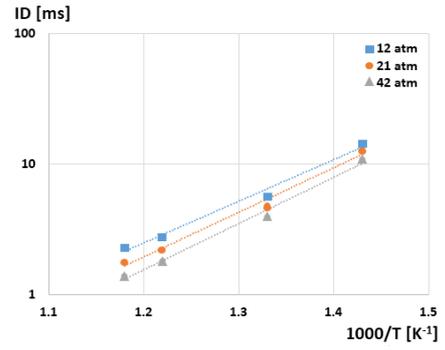
Figure 4. Ignition delay times of Jet A-1 (a) T-ID curve, (b) P-ID curve.

보이는 것을 알 수 있다. 특히 850 K에서 압력의 증가에 따른 Jet A-1의 ID 값의 변화는 818 K에서의 변화에 비해 여전히 크나, Bio-6308의 ID 값의 변화는 비슷한 것으로 나타났다. 또한, 압력이 높아질수록 온도 증가에 따른 Jet A-1의 ID 값 변화의 폭은 증가하지만 Bio-6308의 경우에는 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다.

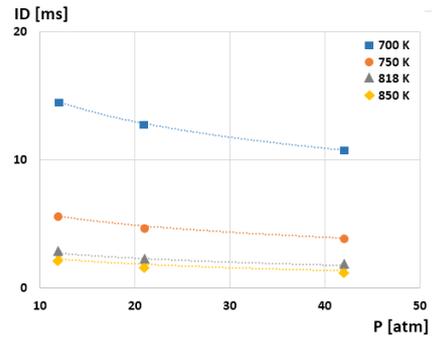
현재까지 특정 제조 공정을 통해 개발된 바이오항공유는 상용중인 석유계항공유와 50% 이상을 혼합하여 사용하는 것이 입증되어 있으며, 따라서 실험 대상인 두 연료를 50:50 (v:v)으로 혼합하였을 때의 온도와 압력에 따른 점화지연시간을 측정하였고, 그 결과는 Figure 6에 나타내었다. 혼합된 연료 역시 700 K 이하에서는 각 연료의 경우에서와 같이 완전한 연소가 이루어지지 않았다. 특정 온도(750, 818, 850 K)에서는 압력이 12 atm에서 42 atm으로 증가함에 따라 점화지연

Table 2. ID of various fuels

pres. [atm] temp. [K]	ID [ms]								
	Jet A-1			Bio-6308			Jet A-1 + Bio-6308		
700	17.95	15.99	13.22	12.89	11.30	9.33	14.56	12.76	10.80
750	6.60	5.47	4.65	5.18	4.36	3.57	5.66	4.76	3.94
818	3.19	2.47	2.04	2.60	2.06	1.65	2.78	2.20	1.81
850	2.66	2.02	1.57	1.91	1.67	1.24	2.31	1.78	1.38



(a)



(b)

Figure 5. Ignition delay times of Bio-6308 (a) T-ID curve, (b) P-ID curve.

시간이 30.39, 34.89, 40.26% 감소하였으며, 특정 압력(12, 21, 42 atm)에서는 온도가 750 K에서 850 K로 증가함에 따라 점화지연시간이 59.19, 62.61, 64.97% 감소하였다. 위의 결과들을 종합하여 Table 2에 정리하였으며, 이를 통해 두 연료를 50:50 (v:v)으로 혼합하였을 경우의 온도와 압력에 따른 점화지연시간 변화 거동은 Bio-6308 보다는 Jet A-1과 거의 유사함을 확인할 수 있다.

3.2. 연료의 점화특성 분석

석유계항공유와 바이오항공유의 점화지연특성이 차이가 나는 원인을 정성 및 정량적으로 분석하기 위해 GC/MS 분석을 수행하였으며, 얻어진 각 연료의 검출시간에 따른 intensity peak 그래프를 Figure 7에 나타내었다. Table 3에는 분석 결과를 토대로 각 연료를 구성하고 있는 화합물의 함량을 화학적 구조에 따라 분류하여 정리하였으며, 이를 통해 Jet A-1에는 특히 Bio-6308에 없는 aromatics가 약 22.48% 존재함을 알 수 있다.

Figure 8에는 FID를 통해 연료를 구성하는 화합물 중에서

Table 3. Results of GC/MS analysis

	components of fuels [area%]		
	paraffins (n / iso / cyclo)	olefins	aromatics
Jet A-1	16.98 / 27.90 / 30.24	2.40	22.48
Bio-6308	14.23 / 85.77 / -	-	-

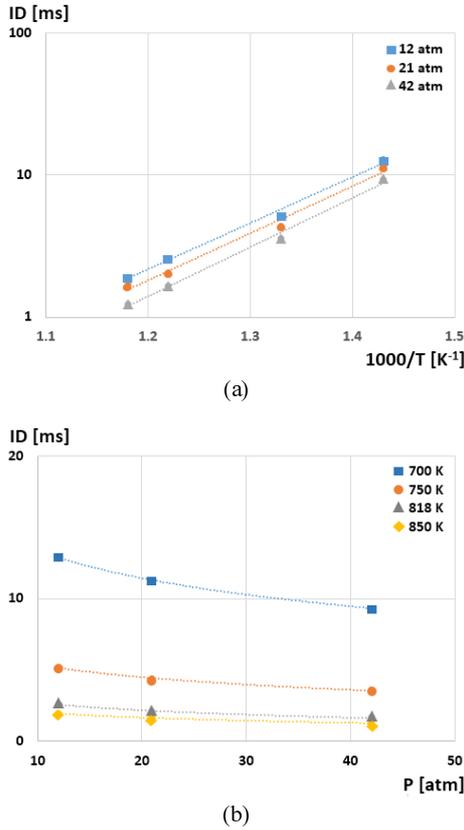


Figure 6. Ignition delay times of Jet A-1 + Bio-6308(50:50, v:v) (a) T-ID curve, (b) P-ID curve.

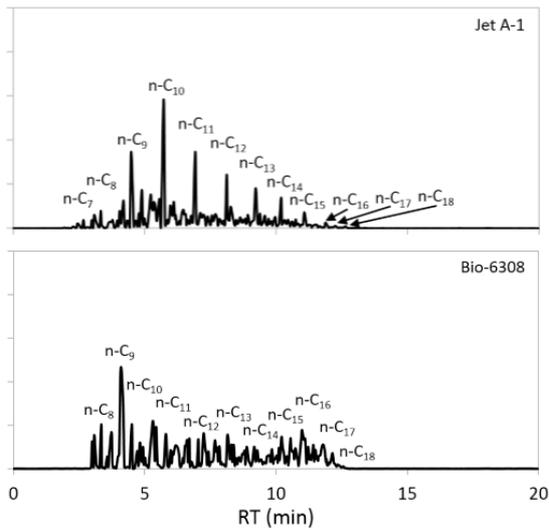


Figure 7. Intensity peaks of fuels from GC/MS analysis.

도 가장 큰 비중을 차지하는 paraffin의 화학적 구조 및 탄소수에 따른 wt%를 분석한 결과를 정리하여 나타내었으며, 이는 GC/MS 분석을 통해 얻은 Figure 7과 같은 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한, Table 4에 정리한 바와 같이 n-paraffin은 Jet A-1에 약 24.92wt%, Bio-6308에 약 10.97wt% 존재하는 것으로 측정되었으며, iso-paraffin은 Jet A-1에 약 74.70wt%, Bio-6308에 약 88.81wt% 존재하는 것으로 측정되어, Table 3

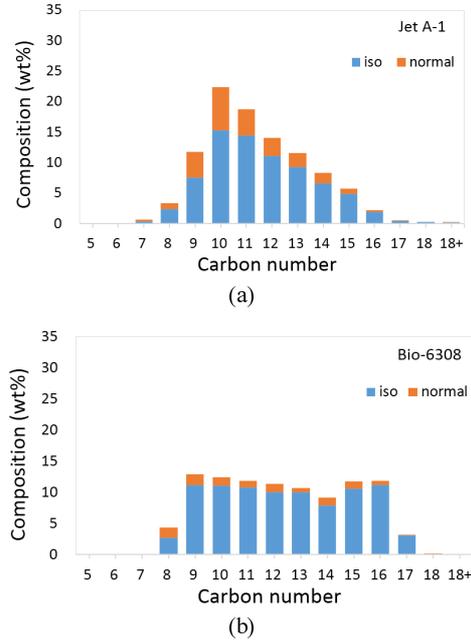


Figure 8. Composition ratio of paraffins by carbon number (a) Jet A-1, (b) Bio-6308.

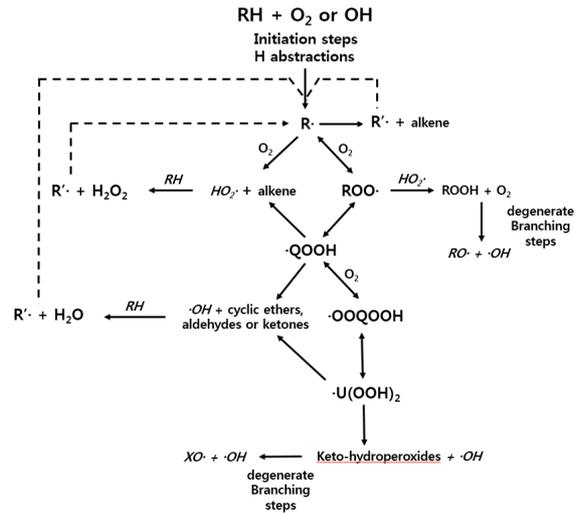


Figure 9. Schematic mechanism of oxidation and auto-ignition [12].

Table 4. Results of GC/FID analysis

	Weight% of paraffins							
	C ₇ - C ₉		C ₁₀ - C ₁₂		C ₁₃ - C ₁₅		C ₁₆ - C ₁₈	
	n-	iso-	n-	iso-	n-	iso-	n-	iso-
Jet A-1	5.46	10.37	14.31	40.85	4.80	20.81	0.35	2.67
Bio-6308	3.39	13.90	3.75	31.91	3.02	28.63	0.80	14.37

에서 paraffin만 고려하였을 때 계산되는 값과 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Battin [12]에 따르면 연료는 Figure 9와 같이 라디칼의 전파, 이성화, 산소의 결합 그리고 OH 라디칼의 생성과 같은

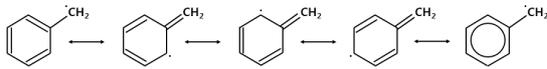


Figure 10. Various resonance structures of benzyl radical [13].

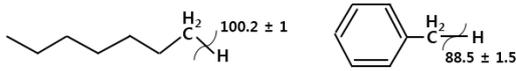


Figure 11. C-H bond dissociation energy of n-heptane and toluene [14].

일련의 과정을 통해 점화가 되는데, 이 중에서도 초기에 일어나는 라디칼의 전파과정이 전체 속도를 결정하는 단계이다.

Paraffin의 산화 반응은 주변의 O_2 가 분자 내 수소원자를 공격하여 alkyl radical을 생성하면서 시작되며, 이 radical은 반응을 통해 peroxy radical이 되어 일정 온도에서 분해된 후에 빠른 가지 반응을 일으켜 점화가 전파되게 한다. 그러나 aromatics의 경우에는 중간생성물인 benzyl radical이 Figure 10과 같이 여러 가지 공명 구조를 갖기 때문에 1000 K 이하의 낮은 온도에서 열적으로 안정하며 주변의 산소와도 반응을 거의 하지 않는 특성을 가지므로 점화의 시작 및 전파 속도가 비교적 늦어질 수 있다[13]. 또한, Figure 11에 나타낸 바와 같이 7개의 탄소로 이루어진 지방족화합물과 방향족화합물의 대표 물질인 n-heptane과 toluene을 기준으로 분자 내 methyl기에서의 C-H dissociation energy가 각각 100.2 ± 1 , 88.5 ± 1.5 kcal mol⁻¹인 사실을 통해[14], OH radical이 paraffin과 반응하여 peroxy radical이 생성되는 것 보다 aromatic과 반응하여 benzyl radical이 생성되는 것이 열역학적으로 더 수월하여 점화가 지연되는 데에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

반응 과정 중에 생성되는 peroxy radical의 화학반응은 복잡한 온도 의존성을 갖는 특징으로 인해 일정 온도 이상의 구간에서는 오히려 negative temperature coefficient (NTC)에 영향을 주어 점화의 전파속도가 더 이상 증가하지 않게 된다 [15-18]. 여기서 NTC 구간은 온도가 증가함에도 불구하고 점화지연시간이 더 이상 짧아지지 않고 오히려 증가하는 경향을 보이는 특정한 구간을 의미하며, Michael et al. [13]은 benzyl radical의 구조적 안정성이 이와 같은 NTC에 영향을 주는 특정 반응을 제한할 수 있음을 예측하였다.

위와 같은 사실로부터 모든 온도와 압력 조건에서 Bio-6308의 점화지연시간이 Jet A-1의 점화지연시간보다 짧게 측정된 것은 Jet A-1에 있는 aromatics가 Bio-6308에는 없기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 특히 Jet A-1의 경우에는 aromatics의 산화 반응 과정 중에 생성되는 benzyl radical의 안정적인 특성에 의해 peroxy radical의 생성이 제한되어 NTC의 영향을 비교적 덜 받기 때문에 온도가 증가함에 따라 점화지연시간이 감소하는 폭이 Bio-6308에 비해 여전히 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존에 상용 중인 석유계항공유(Jet A-1), 미국 UOP사에서 개발 및 생산된 바이오항공유(10POSF6308) 그리고 두 항공유를 50:50의 부피비로 혼합한 연료의 점화특성이 온도와 압력에 따라 어떻게 변화하는지에 관하여 분석하였고, 그 결과는 다음과 같다.

모든 실험 대상 연료의 경우, 700 K 이하에서는 압력을 높여도 완전 연소가 이루어지지 않는 것을 확인하였다. Jet A-1의 점화지연시간은 압력이 증가함에 따라 약 30~41% 감소하였으며, 온도가 증가함에 따라 약 60~66% 감소하였다. Bio-6308의 경우에는 압력이 증가함에 따라 점화지연시간이 약 31~35% 감소하였으며, 온도가 증가함에 따라 약 63~65% 감소하였다. 따라서 항공유의 점화지연시간은 압력 보다 온도의 영향을 더 많이 받는 것을 알 수 있다. 모든 온도와 압력 조건에서 Jet A-1의 점화지연시간이 Bio-6308 보다 길게 측정되었는데, 이는 Jet A-1에만 약 22.48% 존재하는 aromatics에 의한 것으로 판단된다. 방향족화합물이 산화되는 과정에서 benzyl radical이 생성되는 데에 필요한 에너지가 지방족화합물의 경우보다 크고, 생성된 benzyl radical은 주변 산소와 반응을 거의 하지 않으며 열적으로 매우 안정한 특징을 갖는 것이 점화지연시간이 길게 나타나는 것에 영향을 주는 것으로 판단된다. Jet A-1과 Bio-6308을 50:50 (v:v)으로 혼합한 경우에도 온도와 압력이 증가할수록 점화지연시간은 짧아지며, 이 때 나타나는 점화특성의 경향은 Bio-6308 보다는 Jet A-1과 유사함을 확인하였다. 이를 통해 석유계항공유와 바이오항공유를 50:50 (v:v)으로 혼합한 연료는 기존에 사용 중인 시스템을 변경하거나 개선하지 않고서도 실제로 적용할 수 있음을 확인하였다.

References

1. "Alternative Aviation Fuels: Overview of Challenges, Opportunities, and Next Steps," Energy Efficiency & Renewable Energy, Report No. 1515 (2017).
2. Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., and Mekhilef, S., "A Comprehensive Review on Biodiesel as an Alternative Energy Resource and its Characteristics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16(4), 2070-2093 (2012).
3. Susan, V. D., Jack, S., Francisco, B., Deger, S., Alessandra S., and Amr, S., "Biofuels for Aviation Technology Brief," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2-4 (2017).
4. "ICAO Environmental Report 2016: Aviation and Climate Change," International Civil Aviation Organization, Canada, 153-178 (2016).
5. John, B. H., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill Book Company, New York, 539-540 (1988).
6. Petrukhin, N. V., Grishin, N. N., and Sergeev, S. M., "Ignition

- Delay Time – an Important Fuel Property,” *Chem. Technol. Fuels Oils*, 51(6), 581-584 (2016).
7. Gauthier, B. M., Davidson, D. F., and Hanson, R. K., “Shock Tube Determination of Ignition Delay Times in Full-Blend and Surrogate Fuel Mixtures,” *Combust. Flame*, 139(4), 300-311 (2004).
 8. Robert, D., Hawthorn, and Alan, C. N., “Shock Tube Ignition Delay Studies of Endothermic Fuels,” *AIAA*, 4(3), 513-520 (1966).
 9. Nimal, N. S., Mani, S., and Chung, S. H., “Ignition Delay Time Sensitivity in Ignition Quality Tester (IQT) and its Relation to Octane Sensitivity,” *Fuel*, 233, 412-419 (2018).
 10. Kang, S. B., and Jeong, B. H., “Analysis on Ignition Delay Time according to the Ratio of Bio Aviation Fuel in Jet A-1 Mixture,” *J. Kor. Soc. Propul. Eng.*, 23(2), 13-20 (2019).
 11. “Determination of Ignition and Combustion Characteristics of Residual Fuels – Constant Volume Combustion Chamber Method,” Energy Institute, London (2006).
 12. Battin, L. F., “Detailed Chemical Kinetic Models for the Low-Temperature Combustion of Hydrocarbons with Application to Gasoline and Diesel Fuel Surrogates,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, 34(4), 440-498 (2008).
 13. Michael, D. B., Miao, T., Emiel, J. M. H., and Mani, S., “Impact of Fuel Molecular Structure on Auto-Ignition Behavior – Design Rules for Future High Performance Gasolines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, 60, 1-25 (2017).
 14. Rakesh, K. M., “Characteristics and Control of Low Temperature Combustion Engines: Employing Gasoline, Ethanol and Methanol,” Springer International Publishing, India, 139 (2018).
 15. Carrigan, J. H., Donald, R. B., and Jeffrey, A. M., “Chapter Three – Combustion Pathways of Biofuel Model Compounds: A Review of Recent Research and Current Challenges Pertaining to First-, Second-, and Third-Generation Biofuels,” *Adv. Phys. Org. Chem.*, 49, 103-187 (2015).
 16. Emdee, J. L., Brezinsky, K., and Glassman, I., “A Kinetic Model for the Oxidation of Toluene near 1200 K,” *J. Phys. Chem.*, 96(5), 2151-2161 (1992).
 17. Andrae, J., Johansson, D., Björnborn, P., Risberg, P., and Kalghatgi, G., “Co-Oxidation in the Auto-Ignition of Primary Reference Fuels and n-heptane/toluene Blends,” *Combust. Flame*, 140(4), 267-286 (2005).
 18. Vanhove, G., Petit, G., and Minetti, R., “Experimental Study of the Kinetic Interactions in the Low-Temperature Autoignition of Hydrocarbon Binary Mixtures and a Surrogate Fuel,” *Combust. Flame*, 145(3), 521-532 (2006).