

HEFA 공정으로 제조된 바이오항공유의 점화지연특성 분석

강삿별[†]

국방과학연구소 제4기술연구본부 5부
34060 대전광역시 유성구 북유성대로 488번길 160
(2019년 6월 19일 접수, 2019년 7월 10일 수정본 접수, 2019년 7월 11일 채택)

Analysis on Ignition Delay Characteristics of Bio Aviation Fuels Manufactured by HEFA Process

Kang Saethyeol[†]

The 4th R&D Institute 5th Directorate Agency for Defense Development, 160, Bugyuseong-daero 488 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34060, Korea

(Received 19 June 2019; Received in revised form 10 July 2019; accepted 11 July 2019)

요 약

본 연구에서는 서로 다른 원료를 이용하여 HEFA 공정을 통해 제조한 국내외 바이오항공유(Bio-ADD, Bio-6308, Bio-7720)의 점화지연특성을 비교 및 분석하였으며, 이러한 바이오항공유의 실제 시스템에의 적용 가능성을 확인하기 위하여 기존에 사용되고 있는 석유계항공유(Jet A-1) 및 바이오항공유와 석유계항공유를 일정한 비율(50:50, v:v)로 혼합한 연료의 점화지연특성에 대해서도 분석하였다. 각 항공유의 점화지연시간은 CRU 장비를 사용하여 측정하였으며, 결과 해석을 위해 표면장력 측정, GC/MS 및 GC/FID 분석을 수행하였다. 그 결과, 모든 온도 조건에서 Jet A-1의 점화지연시간이 가장 길게 측정되었는데, 이는 aromatic compounds가 약 22.8% 존재하여 분해 과정에서 열적으로 안정하고 주변 산소와도 반응성이 낮은 benzyl radical이 생성되기 때문인 것으로 판단된다. 바이오항공유의 점화지연시간은 모두 비슷하게 측정되었는데, 이는 각 항공유를 구성하는 n-paraffin과 iso-paraffin의 비율(n-/iso-)이 약 0.12로 서로 비슷한 값을 가지며, cycloparaffin의 구성 비율도 약 3% 미만으로 크게 차이가 없기 때문인 것으로 해석된다. 또한, 국내외에서 개발된 바이오항공유(Bio-ADD, Bio-6308)를 석유계항공유와 50:50(v:v)으로 혼합한 연료의 점화지연시간은 혼합하지 않은 Jet A-1과 각 바이오항공유가 갖는 점화지연시간의 사잇값으로 측정되어, 기존에 사용 중인 시스템을 변경하거나 개선하지 않아도 적용이 가능함을 확인하였다.

Abstract – In this study, ignition delay characteristics of various bio aviation fuels (Bio-ADD, Bio-6308, Bio-7720) produced by HEFA process using different raw materials were compared and analyzed. In order to confirm the feasibility of applying bio aviation fuel to actual system, ignition delay characteristics of petroleum-based aviation fuel (Jet A-1) and blended aviation fuel (50:50, v:v) also analyzed. Ignition delay time of each aviation fuel was measured by using CRU, surface tension measurement and GC/MS and GC/FID analysis were performed to interpret the results. As a result, ignition delay time of Jet A-1 was the longest at all temperature because it contains aromatic compounds about 22.8%. The aromatic compounds can produce benzyl radical which is thermally stable and has low reactivity with oxygen during decomposition process. In the case of bio aviation fuels, ignition delay times were measured similarly because the ratio of n-paraffin/iso-paraffin constituting each aviation fuel is similar (about 0.12) and the composition ratio of cycloparaffin also has no difference. In addition, ignition delay times of blended aviation fuels (50:50, v:v) were measured close to the mean value those of each fuel so it was confirmed that it can be applied without any changing or improving of existing system.

Key words: Bio aviation fuel, Petroleum-based aviation fuel, Ignition delay time, Aromatic compound, Paraffin

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ksb0316@add.re.kr

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. 서 론

항공유는 항공 업계의 운영비용에서도 가장 큰 비중을 차지하기 때문에 원유의 불안정한 가격은 장기 계획 및 비용 예산 측면에 부정적인 영향을 준다. 또한, 2005년을 기준으로 모든 운송 분야에서 비롯되는 CO₂ 배출량의 약 11%에 해당하는 양이 항공에 의한 것이며, 연비 향상 및 기타 완화 조치가 없을 경우 2050년까지 이의 3 배가 될 것으로 추산되었다. 이를 해결하기 위한 유망한 기술 중에서도 지속 가능한 항공유를 도입할 경우, 제조 공정에 따라 작게는 43 Mt에서 크게는 85 Mt까지 CO₂ 배출량을 감량할 수 있을 것으로 예상되며, 이는 또한 항공 산업의 단일 에너지원 의존도를 낮출 수 있고 석유 가격의 변동성에 크게 영향을 받지 않을 수 있는 이점을 갖는다[1-3].

세계 각국에서는 지속 가능한 항공유로서 비식용기름을 원료로 하는 바이오항공유를 개발하려는 노력이 진행되고 있으며, 실제로 미국의 Fulcrum Bioenergy, GEVO, Red Rock Biofuels, 핀란드의 Porvoo 등의 회사에서는 바이오항공유를 개발 및 생산하여 실제 항공기에 이를 사용할 수 있도록 공급하는 역할을 하고 있다. 이외에도 많은 회사들이 바이오항공유에 대한 표준 기술과 상업 생산을 위한 생산 기반 시설을 개발하기 위해 노력하고 있다[4].

Table 1에 나타난 바와 같이 2016년을 기준으로 American Society for Testing and Materials(ASTM)에 의해 4가지의 바이오항공유 제조 공정이 인증되었으며, 이 중에서도 Fig. 1에 나타난 HEFA 공정을 통해 제조한 바이오항공유의 경우에는 ASTM D7566의 규격에 부합하다는 전제하에 기존의 석유계항공유에 최대 50%의 부피비로 혼합하여 사용할 수 있다[2,5,6].

이처럼 새로 개발된 바이오항공유를 실제 항공기에 사용하기 위해서는 여러 가지 특성이 국제 인증 규격에 부합하여야 하고, 기존의 석유계항공유와 동등 이상의 기술사양을 충족하여야 한다. 또한, 기존과 동일한 공급 인프라를 사용할 수 있어야 하며, 항공기 또는 엔진의 개조를 필요로 하지 않아야 한다.

항공유의 여러 가지 특성 중의 하나인 점화지연특성은 연소기의 설계 및 성능 구현 시에 중요하게 고려되는 요소 중의 하나로서, 연료 분사의 시작부터 화염이 발생하는 순간 또는 연료의 연소 시 열 발산에 의한 연소실 내의 압력 상승까지의 시간을 의미한다. 이는 연료가 분사된 후 연소반응이 일어날 수 있는 증기 상태로 분열 또는 미립화 되는 데에 걸리는 시간인 물리적 점화지연시간과 증기상태의 연료가 공기와의 부분적인 예연소를 거쳐 자발화가 일어날 수 있을 때 까지 걸리는 시간인 화학적 점화지연시간으로 구분할 수 있다[7,8].

본 연구에서는 다양한 원료를 이용하여 hydroprocessed esters and fatty acids(HEFA) 공정을 통해 제조된 국내외의 바이오항공유

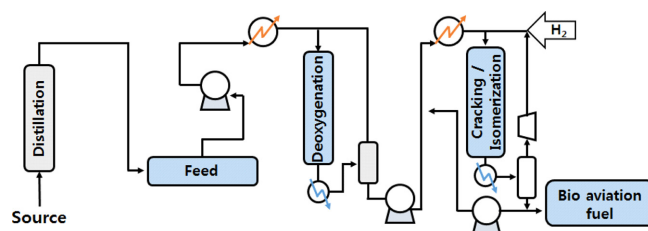


Fig. 1. Production of bio aviation fuel through HEFA process.

의 점화지연특성을 비교 및 분석하였다. 또한, 이러한 바이오항공유의 실제 시스템에의 적용 가능성을 확인하기 위하여 기존에 사용되고 있는 석유계항공유의 점화지연특성과 더불어 바이오항공유와 석유계항공유를 일정한 비율(50:50, v:v)로 혼합하였을 때 나타나는 점화지연특성에 대해서도 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

2-1. 실험 재료

본 연구에서는 국내에서 팜유를 원료로 하여 hydroprocessed 공정을 통해 제조한 바이오항공유(이하 Bio-ADD)와 tallow 및 camelina를 원료로 하여 동일한 공정을 통해 제조한 10POSF6308(이하 Bio-6308) 및 12POSF7720(이하 Bio-7720)을 실험 대상으로 선정하였다. 또한, 기준이 되는 연료로는 GS Caltex사에서 제조 하여 상용되고 있는 석유계항공유인 Jet A-1을 선정하였다.

2-2. 실험 방법

각 항공유의 점화지연시간을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 구성된 Combustion Research Unit(CRU) 장비를 사용하였다. 기존에 수행된 연구들에서는 점화지연시간 측정을 위해 주로 Ignition Quality Tester(IQT) 또는 Shock Tube와 같은 장비를 사용하였으나 [9-11], 이들은 단일 온도 및 압력 조건(818 K, 21 atm)에서만 실험이 가능하거나 연료의 화학적 점화지연시간만을 측정할 수 있는 등의 제한이 있다. 그러나 CRU 장비를 활용할 경우에는 여러 가지의 온도 및 압력 조건(300~880 K, 10~75 atm)을 설정하여 측정이 가능하며, 연료의 화학적 점화지연시간과 물리적 점화지연시간을 모두 포함하는 결과를 얻을 수 있다[12].

CRU 장비는 특정 온도로 설정된 정적 챔버에 설정한 압력에 도달할 때 까지 air를 주입하고, 온도와 압력을 유지한 상태에서 챔버를 향해 있는 injector를 통해 시료를 분사하여 연소가 진행되는 동안 시간에 따른 압력의 변화를 측정한다. 측정된 결과는 IP 541의 규정에 따라 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 완전 연소를 기준으로 기록된 최고 압력의 10%에 해당하는 시간인 Main

Table 1. Manufacturing processes for bio aviation fuel certified by ASTM [2]

Manufacturing process	Details	Year
HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)	Oleochemical conversion processes, such as hydroprocessing of lipid feedstocks obtained from oilseed crops, algae or tallow	2011
FT (Gasification through the Fischer-Tropsch method)	Thermochemical conversion processes, such as the conversion of biomass to fluid intermediates (gas or liquid) followed by catalytic upgrading and hydroprocessing to hydrocarbon fuels	2009
SIP (Synthesised Iso-Paraffinic fuels)	Biochemical conversion processed, such as the biological conversion of biomass (sugars, starches or lignocellulose-derived feedstocks) to longer chain alcohols and hydrocarbons	2014
ATJ (Alcohol-to-jet)	A fourth category includes "hybrid" thermochemical or biochemical technologies; the fermentation of synthesis gas; and catalytic reforming of sugars or carbohydrates	2016

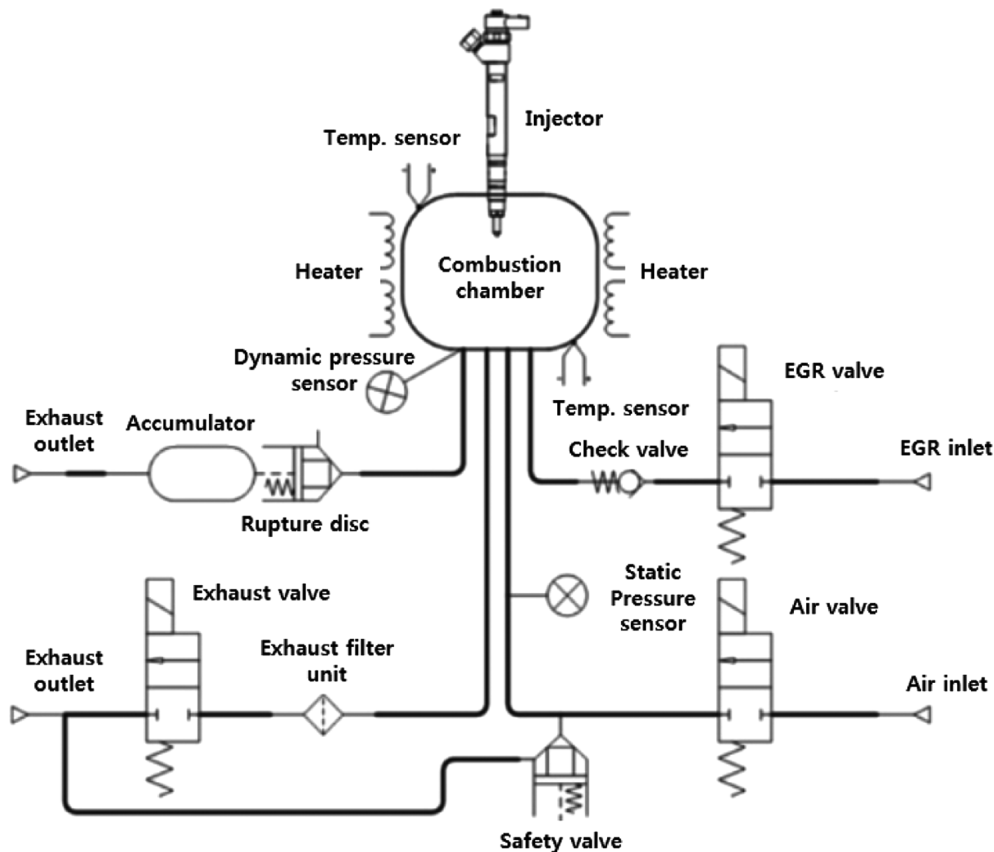


Fig. 2. Schematics of Combustion Research Unit (CRU).

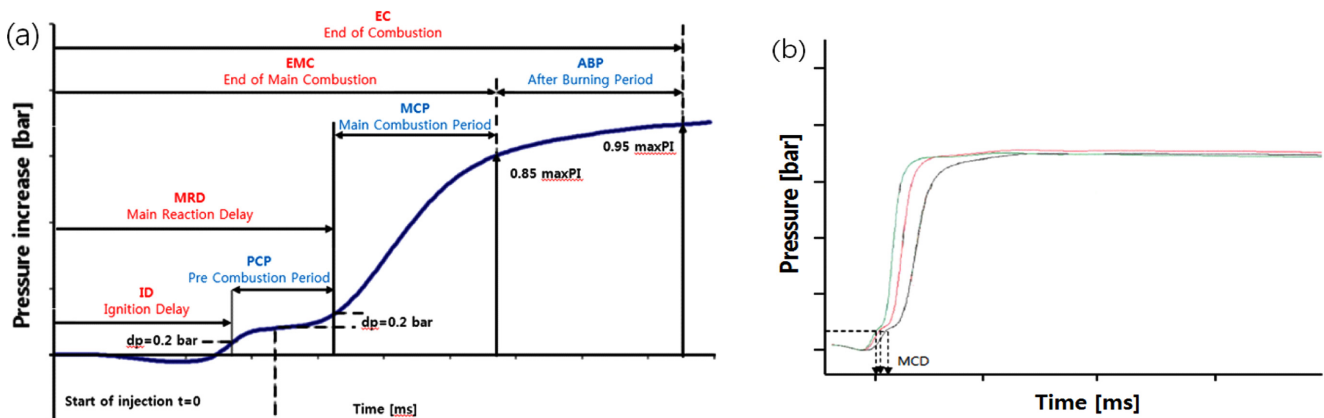


Fig. 3. Pressure change according to combustion time (a) Definition of specific time, (b) Example of results.

Combustion Delay(MCD)의 값을 사용하였다[13].

측정은 장비의 사양, 각 연료의 연소 조건 그리고 기존에 수행된 연구들을 고려하여 4가지의 온도(700, 750, 818, 850 K)와 21 atm의 압력 조건에서 실시하였으며, 이 때 산화제로 사용되는 air는 30 bar, purging의 용도로 사용되는 N_2 는 4 bar의 압력으로 장비에 공급되게 하였다. 연소가 이루어지는 챔버 주위를 순환하는 항온수의 온도는 50 °C로 설정하였다.

연료는 3번의 pre-injection을 통해 연소실로 향해있는 노즐의 끝 부분까지 가득 차게 하였으며, 1000 bar의 압력으로 약 0.09 mL가 분사되게 하였다. 연료 분사 시작의 순간부터 연소가 진행되는 동안 증가한 압력은 10번씩 측정하였으며, 연소가 끝난 후 기록된

MCD의 평균값을 사용하였다. 각 시료에 대한 측정이 완료된 후에는 methyl alcohol (DUKSAN, EP, Korea)를 사용하여 3초간 3번의 세척을 진행하였다.

점화지연시간과 비례하는 관계를 갖는 표면장력 값의 측정을 통해 결과를 분석하기 위하여 각 연료의 온도에 따른 밀도와 표면장력을 Density meter(DM40 DeltaRange, METTLER TOLEDO)와 표면장력 측정기(Force tensiometer-K11, KRÜSS)를 사용하여 측정하였고, 결과의 재현성을 확보하기 위해 5번의 측정을 통한 평균값을 구하였다. 또한, 각 연료의 정성 및 정량적인 분석 자료를 얻기 위해 GC/MS(Gas Chromatography/Mass Spectrometer, Agilent 7890) 장비를 활용하였고, 유출시간에 따른 스펙트럼 intensity의 피크에 해당하는

화합물을 알려진 library를 통해 확인하였다. 이 때, 결과 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 FID 검출기를 통한 분석을 추가로 실시하여 GC/MS를 통해 얻은 분석 결과와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 점화지연시간 측정 결과

실험 대상으로 선정된 각 항공유의 점화지연특성을 확인하기 위해 온도에 따른 점화지연시간을 측정한 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 측정 온도는 CRU 장비에서 설정이 가능한 온도 범위 내의 4가지 조건(700, 750, 818, 850 K)으로 설정하였으며, 압력은 기존에 수행되었던 점화지연시간에 관련된 연구들과 동일한 조건인 21 atm으로 설정하였다.

모든 항공유의 경우, 700 K에서는 연소는 시작되었으나 완전 연소는 이루어지지 않는 것을 확인하였다. Main Combustion Delay(MCD)는 시료의 완전 연소를 기준으로 측정된 최고 압력의 10%에 해당하는 압력에 도달하였을 때의 시간을 의미하므로, 700 K에서 측정된 MCD값은 정확하지 않은 결과 값이라고 할 수 있다.

온도가 높아질수록 모든 항공유의 점화지연시간은 짧아졌으며, 측정된 모든 온도 조건에서 3가지 바이오항공유의 점화지연시간은

비슷하게 측정되었고 Jet A-1의 점화지연시간은 가장 길게 측정되었다. 특히 818 K, 21 atm의 조건에서 Jet A-1, Bio-ADD, Bio-6308 그리고 Bio-7720의 점화지연시간은 각각 3.47, 2.71, 2.73, 2.64 ms로 측정되었다.

Hydroprocessed 공정을 통해 제조된 바이오항공유는 기존의 석유계항공유와 50:50의 부피비로 혼합하여 사용되는 것이 입증되어 있는 사실을 토대로, 국내에서 개발된 바이오항공유인 Bio-ADD와 외국에서 개발된 바이오항공유 중에서도 Bio-6308을 대표 연료로 선정하여 각각을 석유계항공유인 Jet A-1과 50:50(v:v)으로 혼합한 연료의 점화지연시간을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 4(b)에 나타내었다. 혼합한 연료의 경우에도 온도가 높아질수록 측정되는 점화지연시간이 짧아지는 경향을 보이며, 특히 818 K, 21 atm에서의 Jet A-1 + Bio-ADD, Jet A-1 + Bio-6308의 점화지연시간은 2.87, 3.06 ms로 혼합하지 않은 Jet A-1과 Bio-ADD, Jet A-1과 Bio-6308이 갖는 점화지연시간 범위 내의 값이 측정되었다.

3-2. 표면장력 측정 결과 및 분석

Jet A-1과 3종의 바이오항공유가 갖는 점화지연특성을 분석하기 위해 각 연료의 표면장력을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 측정 온도는 표면장력 측정기에 항온수를 공급하는

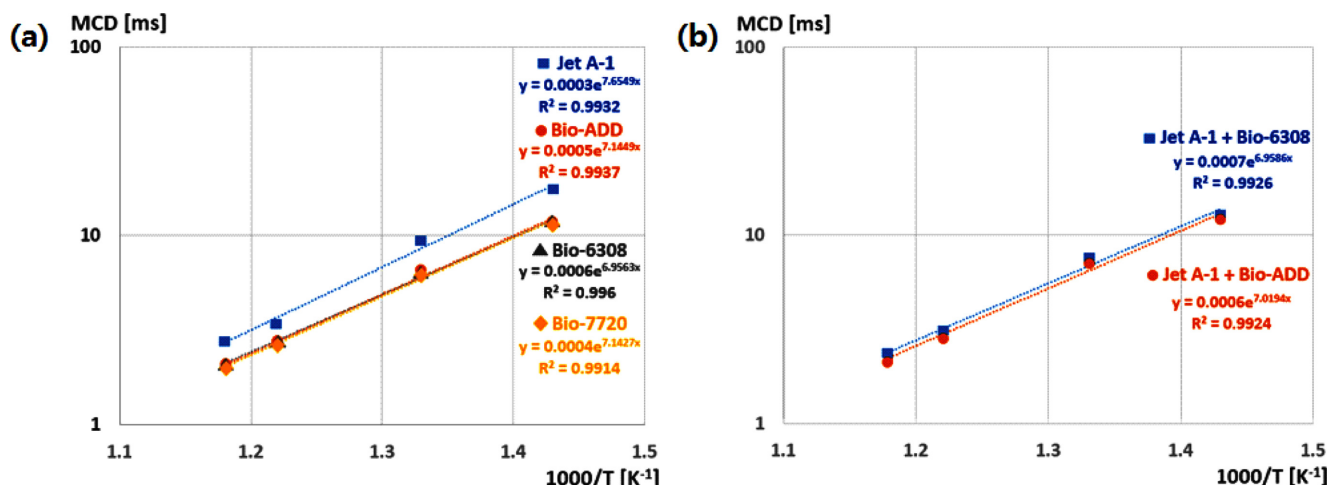


Fig. 4. Main combustion delay (MCD) (a) Various aviation fuels, (b) Blended (50:50, v:v) fuels.

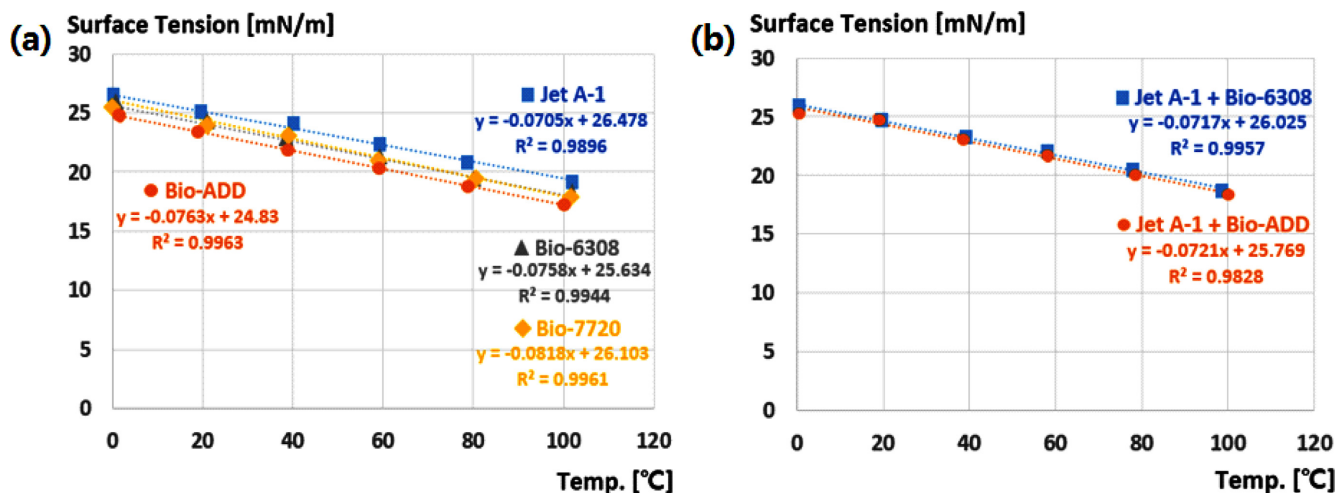


Fig. 5. Surface tension (a) Various aviation fuels, (b) Blended (50:50, v:v) fuels.

circulator의 사양을 고려하여 0~100 °C 까지 20 °C 간격으로 총 6 개의 조건을 선정하였다.

온도가 증가함에 따라 모든 연료의 표면장력은 감소하는 경향을 보이며, 특히 모든 측정 온도 조건에서 Jet A-1의 표면장력이 가장 크게 측정되었다. Bio-6308과 Bio-7720은 비슷한 표면장력 값을 가지며 Bio-ADD는 가장 작은 표면장력 값을 갖는 것으로 나타났다.

동일한 압력과 온도에서 연료가 분사될 때 형성되는 분무입경은 표면장력 값의 제곱근에 비례하며, 연료의 분무입경이 작아질수록 산소와 접촉하는 비표면적이 늘어나 점화가 더 용이하게 되어 점화 지연시간이 짧아질 수 있다[14,15]. 이러한 사실을 통해 측정된 모든 온도에서 표면장력 값이 Jet A-1보다 작게 측정된 3종의 바이오 항공유가 점화지연시간 또한 비교적 짧게 측정된 것으로 유추할 수 있다. Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 Jet A-1에 각각의 Bio-ADD, Bio-6308을 50:50(v:v)로 혼합한 연료의 경우에도 표면장력 값이 혼합하지 않은 Jet A-1과 Bio-ADD, Jet A-1과 Bio-6308이 갖는 표면장력 값의 범위 내에 있으며, 이 또한 혼합된 연료의 점화지연시간과 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

3-3. 연료의 점화지연특성 분석

각 항공유의 정성 및 정량적인 분석 자료를 활용하여 점화지연특성에 대해 추가적으로 해석하기 위해 Gas Chromatography/Mass

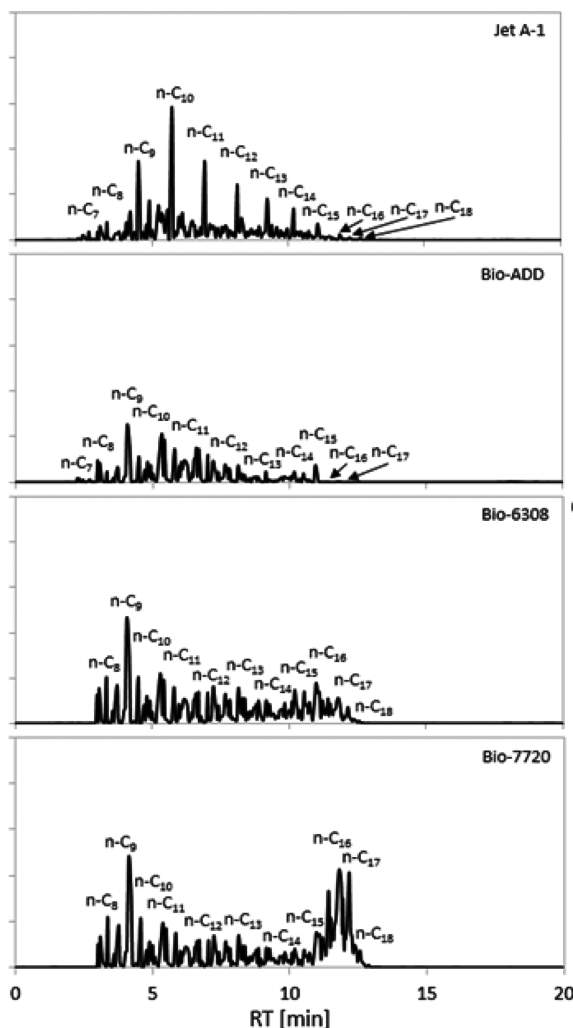


Fig. 6. Intensity peaks of fuels from GC/MS analysis.

Table 2. Results of GC/MS analysis

	Components of fuels [area%]			
	Paraffins		Olefins	Aromatics
	n + iso	Cyclo		
Jet A-1	45.6	29.1	2.4	22.8
Bio-ADD	97.2	2.8	-	-
Bio-6308	98.8	1.2	-	-
Bio-7720	97.7	2.2	-	-

Spectrometer(GC/MS) 분석을 수행하였으며, 검출시간에 따른 intensity peak 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 분석 결과를 토대로 각 연료를 구성하는 화합물의 함량을 화학적 구조에 따라 분류하여 Table 2에 정리하였으며, 이를 통해 Jet A-1에는 다른 바이오항공유에 없는 aromatics가 약 22.8% 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 바이오항공유의 경우에는 n-paraffin, iso-paraffin 그리고 cycloparaffin으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

Jet A-1과 같이 주로 paraffin으로 이루어진 항공유에 aromatics가 함께 존재할 경우에 나타나는 점화지연특성은 이들의 분해 과정에서 생성되는 라디칼의 산화 반응과 관련이 있다. Pilling [16]에 의하면 연료는 Fig. 7과 같이 라디칼의 생성, 이성질화 및 전파의 과정을 통해 점화가 이루어진다. Paraffin은 주변의 O₂와 반응하여 alkyl radical을 생성하며, 이는 다시 산화 반응을 거쳐 peroxy radical 또는 peroxide가 되어 빠른 가지 반응을 일으키면서 점화가 빠르게 전파되게 한다. 그러나 aromatics의 경우에는 산화 반응을 통해 생성되는 benzyl radical(C₆H₅CH₂·)이 Fig. 8과 같이 여러 가지 공명 구조를 가짐으로 인해 열적으로 안정하며 주변 산소와의 반응성도 작아 점화가 지연되게 한다[17-19]. 또한, 탄소수가 7개로 동일한 paraffin과 aromatic의 대표적인 물질인 n-heptane과 toluene을 기준으로 분자의 맨 끝에 위치한 methyl기에서의 C-H dissociation energy가 각각 420.4 ± 4.2, 371.7 ± 6.3 kJ/mol인 것으로 미루어보아[20], paraffin과 aromatics가 함께 존재할 경우에는 alkyl radical

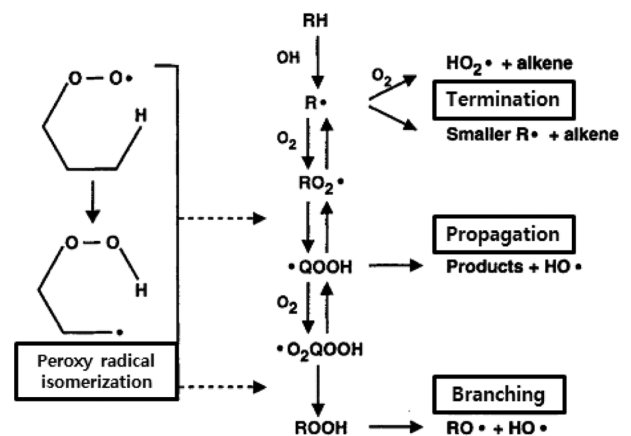


Fig. 7. Chain reactions of radical: formation, isomerization, propagation [16].

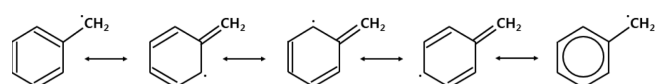


Fig. 8. Resonance structures of benzyl radical [17].

Table 3. C-H dissociation energy of C₆ paraffins [21]

	The broken bonds (bold = dissociated atom)	Bond dissociation energy [kcal/mol]
n-hexane	CH ₃ CH ₂ (CH ₂) ₃ CH ₃	97.6
2,2-dimethylbutane	(CH ₃) ₃ C CH ₂ CH ₃	97.7
2,3-dimethylbutane	(<i>iso</i> -C ₃ H ₇) CH (CH ₃) ₂	95.0
2-methylpentane	(<i>n</i> -C ₃ H ₇) CH (CH ₃) ₂	95.1
3-methylpentane	(CH ₃) CH (C ₂ H ₅) ₂	95.2
cyclohexane	C ₆ H ₁₂	99.1

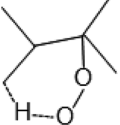
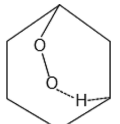
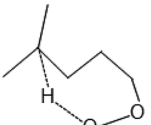
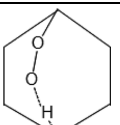
보다 benzyl radical의 생성이 더 수월하여 점화가 지연되는 데에 영향을 줄 것으로 판단된다.

바이오항공유를 구성하는 n-paraffin, iso-paraffin 그리고 cycloparaffin은 탄소수가 6개인 화합물을 기준으로 하였을 때, Table 3에 나타난 바와 같이 분자 내 C-H dissociation energy가 모두 비슷하여 alkyl radical이 생성되는 속도에는 큰 차이가 없을 것으로 판단된다[21]. 그러나 alkyl radical의 산화 반응 시에 반응의 전파에 중요한 전구 물질로 작용하는 peroxy radical의 이성질체가 생성되는 과정에서 차이가 발생한다. Boot et al.[17]에 따르면 peroxy radical이 이성질화되는 과정에서 형성되는 transition state는 주로 낮은 strain energy를 갖는 5-, 6-, 7- ring number의 형태를 이루는데, paraffin의 사슬 길이가 길수록 이러한 형태가 형성되기 쉬우며, 이는 같은 탄소수를 가진 paraffin의 경우에 주사슬에서 branch된 정도가 클수록 안정적인 transition state가 형성되기 어려운 것으로 해석할 수 있다. 실제로 동일한 탄소수를 갖는 화합물을 기준으로 형성되는 transition state의 활성화 에너지는 paraffin이 branch된 정도가 클수록, cyclo일수록 큰 것을 Table 4를 통해 확인할 수 있다[16,22].

위의 사실을 통해 안정적인 transition state가 형성되기 쉬운 특성을 갖는 n-paraffin이 분해 과정 중에서 peroxy radical의 이성질화가 상대적으로 수월하게 진행되어 연료의 점화지연시간이 단축되는 데에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되며, 연료를 구성하는 iso-paraffin과 cycloparaffin의 비율이 높아질수록 점화지연시간이 길어질 것으로 예측할 수 있다.

그러나 본 연구에서 실험 대상으로 선정한 3가지 바이오항공유의

Table 4. Activation energies of transition states [16,22]

Ring number	Transition state	E _a [kcal/mol]
6		26.4
6		32.8
7		13.6
7		25.5

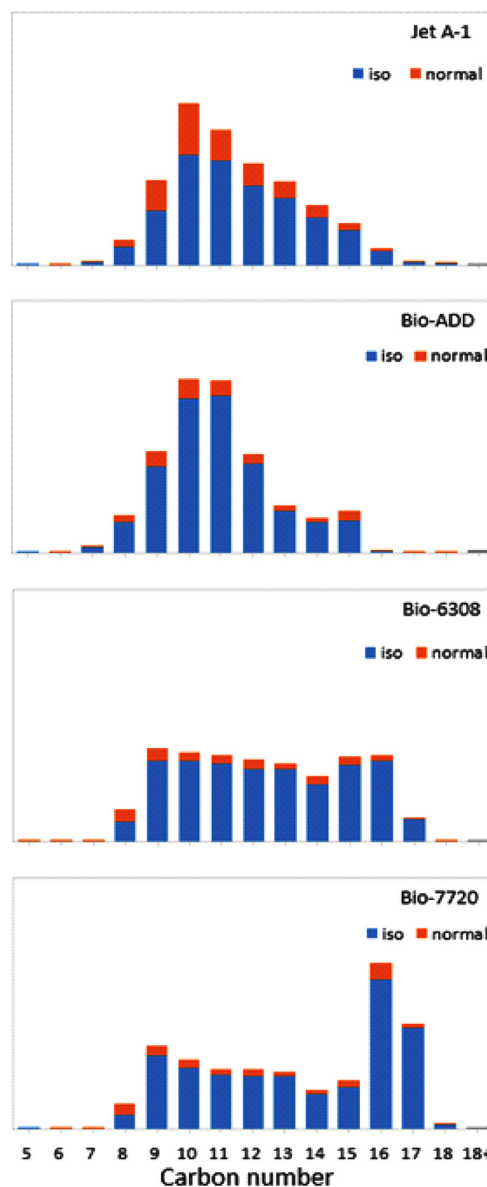


Fig. 9. Composition ratio of paraffins according to carbon number.

경우에는 각각을 구성하는 cycloparaffin의 비율이 모두 비슷한 것으로 분석되었으며, Fig. 9와 Table 5에 정리한 바와 같이 GC/FID를 통해 추가적인 분석을 수행한 결과, n-paraffin과 iso-paraffin의 비율(n-/iso-) 또한 약 0.12로 모두 비슷한 것을 알 수 있다. 따라서 3.1절에 기술한 바와 같이 3가지 바이오항공유의 점화지연시간이 큰 차이를 보이지 않는 것은 각 항공유를 구성하는 n-paraffin, iso-paraffin 그리고 cycloparaffin의 비율이 모두 비슷하기 때문인 것

Table 5. 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-ADD	3.20	17.14	6.30	55.39	2.76	14.35	0.11	0.31
Bio-6308	3.39	13.90	3.75	31.91	3.02	28.63	0.80	14.37
Bio-7720	2.98	12.21	2.79	23.40	2.03	17.95	2.98	35.49

로 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 HEFA 공정을 통해 국내외에서 개발된 3가지의 바이오항공유, 기존에 사용되고 있는 석유계항공유 그리고 바이오항공유와 석유계항공유를 일정한 비율(50:50, v:v)로 혼합한 연료의 점화지연특성에 대하여 비교 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 모든 실험 대상 항공유는 온도가 높아짐에 따라 점화지연시간이 짧아지는 경향을 보이며, 측정된 모든 온도 조건에서 Jet A-1의 점화지연시간이 가장 길게 측정되었으며, 3가지 바이오항공유의 점화지연시간은 비슷하게 측정되었다.

(2) 연료가 분사될 때에 형성되는 분무입경이 작을수록 산소와 접촉하는 비표면적이 증가하여 점화가 용이해 질 수 있으며, 이러한 분무입경은 연료의 표면장력 값의 제곱근에 비례하는 관계를 갖는다. 이와 같은 사실을 토대로 모든 측정 온도 조건에서 가장 높은 표면장력을 갖는 Jet A-1이 점화지연시간 또한 가장 길게 측정되는 것으로 판단된다.

(3) Jet A-1에는 바이오항공유에 없는 aromatics가 약 22.8% 존재하는 것으로 분석되었으며, 이러한 aromatics의 분해 과정에서 열적으로 안정하며 주변 산소와의 반응성도 낮은 benzyl radical이 생성되어 점화지연시간이 길어지는 데에 영향을 줄 수 있을 것으로 해석된다.

(4) 바이오항공유를 구성하는 n-, iso-, cycloparaffin은 분해 과정에서 alkyl radical이 생성되는 데에 필요한 에너지가 모두 비슷하지만 이후의 산화 과정에서 생성되는 peroxy radical의 이성질화 과정에 필요한 에너지의 차이가 점화지연특성에 영향을 줄 수 있다. 그러나 본 연구에서의 실험 대상인 3가지의 바이오항공유는 각각을 구성하는 n-, iso-, cycloparaffin의 비율이 거의 유사한 것으로 분석되어 점화지연시간 또한 비슷하게 측정되는 것으로 해석된다.

(5) 국내외에서 개발된 바이오항공유(Bio-ADD, Bio-6308)를 석유계항공유와 50:50의 부피비로 혼합한 연료의 점화지연시간은 혼합하지 않은 Jet A-1과 각 바이오항공유가 갖는 점화지연시간의 사잇값으로 측정되어, 기존에 사용 중인 시스템을 변경하거나 개선하지 않아도 적용이 가능함을 확인하였다.

감 사

본 연구는 국방과학연구소에서 수행 중인 사업과 관련된 내용의 연구 결과임.

References

1. *Beginner's Guide to Aviation Biofuels*, 2nd ed., Air transport action group, Switzerland(2011).
2. Susan, V. D., Jack, S., Francisco, B., Deger, S., Alessandra S. and Amr, S., "Biofuels for Aviation Technology Brief," International Renewable Energy Agency, 2-4(2017).
3. "ICAO Environmental Report 2016: Aviation and Climate Change," International Civil Aviation Organization, 153-178(2016).
4. Eric, C. W., Jakob, L. P., Christian, E., Rasmus, B., Nicolaj, S., Camilla, T., Toke, L., Rasmus, S. H., Johannes, M. E., Marie, K. R., Jonas, H., Ronja, B. E., Judit, S., Berta, M. G., Jens, J. K. H., Päivi, L., Tiina, P. and Marika, B., "Sustainable Jet Fuel for Aviation - Nordic Perspectives on the use of Advanced Sustainable Jet Fuel for Aviation," Report NO. 538, Nordic Council of Ministers(2016).
5. "Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons," American Society for Testing and Materials(2016).
6. "IATA Guidance Material for Biojet Fuel Management," International Air Transport Association, 4-5(2012).
7. John, B. H., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, New York, 539-540(1988).
8. Petrukhin, N. V., Grishin, N. N. and Sergeev, S. M., "Ignition Delay Time - an Important Fuel Property," *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, **51**(6), 581-584(2016).
9. Zheng, Z., Badawy, T., Henein, N. and Sattler, E., "Investigation of Physical and Chemical Delay Periods of Different Fuels in the Ignition Quality Tester," *J. Eng. Gas Turbines Power*, **135**(6), 061501(2013).
10. Bogin, G. E. J., De Filippo, A., Chen, J. Y., Chin, G., Luecke, J., Ratcliff, M. A., Zigler, B. T. and Dean, A. M., "Numerical and Experimental Investigation of n-Heptane Autoignition in the Ignition Quality Tester(IQT)," *Energy & Fuels*, **25**(12), 5562-5572(2011).
11. Subith, S. V., David, F. D. and Ronald, K. H., "Jet Fuel Ignition Delay Times: Shock Tube Experiments over Wide Conditions and Surrogate Model Predictions," *Combustion and Flame*, **152**(1-2), 125-143(2008).
12. 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," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, **23**(2), 13-20(2019).
13. "Determination of Ignition and Combustion Characteristics of Residual Fuels - Constant Volume Combustion Chamber Method," Energy Institute(2006).
14. <http://www.spray-nozzle.co.uk/resources/engineering-resources/>

- guide-to-spray-properties/4-droplet-size.
15. Gohtani, S., Sirendi, M., Yamamoto, N., Kajikawa, K. and Yamano, Y., "Effect of Droplet Size on Oxidation of Docosahexaenoic Acid in Emulsion System," *Journal of Dispersion Science and Technology*, **20**(5), 1319-1325(1999).
 16. Pilling, M. J., *Low-Temperature Combustion and Autoignition*, 35th ed., Elsevier, Netherlands, 56-66(1997).
 17. Boot, M. D., Tian, M., Hensen, E. J. M. and Mani, S. S., "Impact of Fuel Molecular Structure on Auto-Ignition Behavior-Design Rules for Future High Performance Gasolines," *Progress in Energy and Combustion Science*, **60**, 1-25(2017).
 18. Simmie, J. M., "Detailed Chemical Kinetic Models for the Combustion of Hydrocarbon Fuels," *Progress in Energy and Combustion Science*, **29**(6), 599-634(2003).
 19. 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).
 20. Rakesh, K. M., *Characteristics and Control of Low Temperature Combustion Engines: Employing Gasoline, Ethanol and Methanol*, Springer International Publishing, India, 139(2018).
 21. Luo, Y. R., *Comprehensive Handbook of Chemical Bond Energies*, CRC Press, New York, 21-35(2007).
 22. Buda, F., Heyberger, B., Fournet, R., Glaude, P. A., Warth, V. and Battin, L. F., "Modeling of the Gas-Phase Oxidation of Cyclohexane," *Energy & Fuels*, **20**(4), 1450-1459(2006).