

F-T 공정으로 합성된 바이오항공유의 화학적 조성에 따른 점화특성 분석

강삿별*

국방과학연구소

34060 대전광역시 북유성대로 488번길 160

(2020년 6월 12일 접수; 2020년 7월 16일 수정본 접수; 2020년 7월 16일 채택)

Analysis on Ignition Characteristics According to the Chemical Composition of Bio Jet Fuel Synthesized by F-T Process

Kang Saetbyeol*

Agency for Defense Development

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

(Received for review June 12, 2020; Revision received July 16, 2020; Accepted July 16, 2020)

요 약

본 연구에서는 F-T 공정을 통해 합성하여 제조한 바이오항공유(Bio-7629, Bio-5172)와 기존에 사용 중인 석유계항공유(Jet A-1)의 점화특성을 비교하여 분석하였다. Combustion research unit (CRU) 장비를 활용하여 각 항공유의 점화지연시간을 측정하였고, 그 결과를 연료의 물성 및 구성 화합물에 대한 분석을 통해 해석하고자 하였다. 점화지연시간은 Bio-5172가 가장 짧게 측정되었으며 Jet A-1이 가장 길게 측정되었다. 이는 물리적 점화지연시간에 영향을 줄 수 있는 연료의 물성 측면에서 Jet A-1이 가장 큰 표면장력을 가지며 Bio-5172가 가장 낮은 점도를 갖기 때문인 것으로 해석된다. 또한, 각 연료를 구성하는 화합물의 종류 및 비율에 대하여 분석한 결과, 실험 대상 바이오항공유에 없는 방향족화합물이 Jet A-1에는 약 22.8%의 비율로 존재함을 확인하였다. 이는 산화 과정 시에 비교적 반응성이 낮은 benzyl radical을 생성하여 점화지연시간이 길게 측정되는 데에 영향을 주는 것으로 판단된다. Bio-7629와 Bio-5172는 paraffin으로만 구성되어 있으며, n-/iso-의 값은 각각 0.06, 0.80으로 큰 차이를 보였다. 가지화된 정도가 낮은 paraffin일수록 산화 시에 생성되는 peroxy radical의 이성질화가 빠르게 진행되어 점화의 전파속도 또한 빨라진다. 따라서 n-paraffin의 함량이 비교적 높은 Bio-5172의 경우에 점화지연시간 또한 짧게 측정된 것으로 해석된다.

주제어 : F-T 공정, 바이오항공유, 석유계항공유, 점화특성, 파라핀계 탄화수소

Abstract : In this study, the ignition characteristics of bio jet fuel (Bio-7629, Bio-5172) produced by F-T process and petroleum-based jet fuel (Jet A-1) were compared and analyzed. The ignition delay time of each fuel was measured by means of a combustion research unit (CRU) and the results were explained through an analysis of the properties and composition of the fuel. The ignition delay time of Bio-5172 was the shortest while that of Jet A-1 was the longest because Jet A-1 had the highest surface tension and Bio-5172 had the lowest viscosity in terms of fuel properties that could affect the physical ignition delay time. As a result of the analysis of the constituents' type and ratio, 22.8% aromatic compounds in Jet A-1 could generate benzyl radical, which had low reactivity during the oxidation reaction, affecting the increase of ignition delay time. Both Bio-7629 and Bio-5172 were composed of paraffin only, with the ratio of n-/iso- being 0.06 and 0.80, respectively. The lower the degree of branching is in paraffin, the faster the isomerization of peroxy radical is produced during oxidation, which could determine the propagation rate of the ignition. Therefore, Bio-5172, composed of more n-paraffin, possesses shorter ignition delay time compared with Bio-7629.

Keywords : F-T process, bio jet fuel, petroleum-based jet fuel, ignition characteristic, paraffin

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: wooyeol@nate.com; Tel: +82-42-821-2454; Fax: +82-42-823-3400

doi: 10.7464/ksct.2020.26.3.204 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

석유 자원은 시간이 지남에 따라 가격이 점차 증가하는 추세를 보이며, 제한적인 매장량에 의해 일부 생산국을 통한 수입에 의존하여야 하는 문제를 갖는다. 따라서 석유 기반의 연료의 주요 소비처인 항공 분야에서는 이를 대체하기 위한 기술의 개발을 위해 노력하고 있다[1]. 이러한 기술 중의 하나로서 목재, 농작물, 유기성 폐기물 등을 원료로 하여 바이오항공유를 제조하는 공정에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 여기에는 동식물성 유지를 원료로 하는 전환 공정인 hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA), 석유대체 자원을 원료로 하여 액화를 통해 액체연료를 제조하는 열화학적 전환 공정인 Fischer-Tropsch synthesis (F-T), 바이오매스를 원료로 하는 생화학적 전환 공정인 synthesised iso-paraffinic fuels (SIP) 그리고 촉매를 사용하여 개질한 당 또는 탄수화물을 원료로 하는 열화학적 또는 생화학적 전환 공정인 alcohol to jet (ATJ) 등이 있다[2,3].

이중에서도 F-T 공정은 Fe, Co, Ru와 같은 촉매와의 반응을 통해 얻은 CO, H₂를 up-grading하여 액체연료로 만드는 기술로서, 이에 대한 개략적인 내용을 Figure 1에 정리하여 나타내었다[4]. F-T 공정은 high temperature Fischer-Tropsch (HTFT)와 low temperature Fischer-Tropsch (LTFT)로 구분되며, 이러한 반응 온도 조건에 따라 생성되는 물질의 종류 및 비율이 달라질 수 있다. 특히 LTFT를 통해 생성되는 물질은 주로 긴 사슬 형태의 탄화수소로 이루어지며 aromatics가 거의 없는 특징을 갖는다[5,6].

현재까지 F-T 공정을 통해 제조된 바이오항공유는 ASTM의 D7566 규격에 부합하는 경우에 한하여 기존에 사용 중인 석유

계항공유에 최대 50%의 부피비로 혼합하여 사용할 수 있다[7]. 이처럼 새로 개발된 바이오항공유가 상용되기 위해서는 여러 가지 물성이 국제적인 인증 규격에 부합하여야 함은 물론이고, 기존과 동일한 엔진에의 적용이 가능하도록 하기 위해 연소기 설계 및 성능 구현에 영향을 줄 수 있는 중요한 요소 중의 하나인 점화특성에 대한 고려도 필수적이다.

항공유의 점화특성을 확인하는 방법 중의 하나로서 연료가 분사되는 시점부터 화염이 발생하는 순간 또는 연소열의 발생에 의한 연소실 내의 압력 상승까지의 시간을 의미하는 점화지연시간을 측정하여 분석할 수 있다. 이는 노즐을 통해 분사된 연료가 연소반응이 일어날 수 있는 증기 상태로 미립화 되는 과정에 필요한 시간인 물리적 점화지연시간과 증기 상태의 연료가 공기와의 부분적인 예연소를 통해 자발화가 일어나는 과정에 필요한 시간인 화학적 점화지연시간으로 구분할 수 있다[8,9].

본 연구에서는 바이오매스를 원료로 하여 제조된 syn gas를 이용해 F-T 공정으로 합성한 바이오항공유의 점화지연시간을 측정하여 분석하였다. 또한, 기존 시스템에의 적용 가능성을 검토하기 위하여 상용 중인 석유계항공유의 점화지연시간도 측정하여 함께 비교 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험 재료

본 연구에서는 Sasol사에서 syn gas를 이용하여 F-T 공정으로 제조한 11POSF7629 (이하 Bio-7629)와 Shell사에서 syn gas를 이용하여 동일한 공정으로 제조한 07POSF5172 (이하 Bio-5172)을 실험 대상으로 선정하였다. 또한, GS Caltex사에서 제조하여 상용 중인 석유계항공유(Jet A-1)를 비교 대상 연

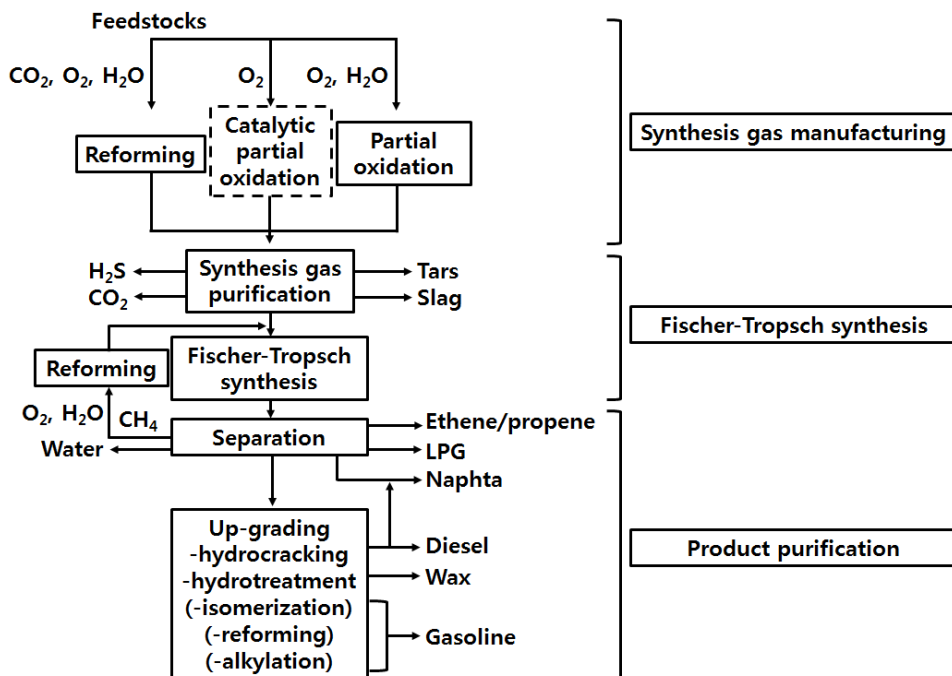


Figure 1. Overall F-T process scheme [4].

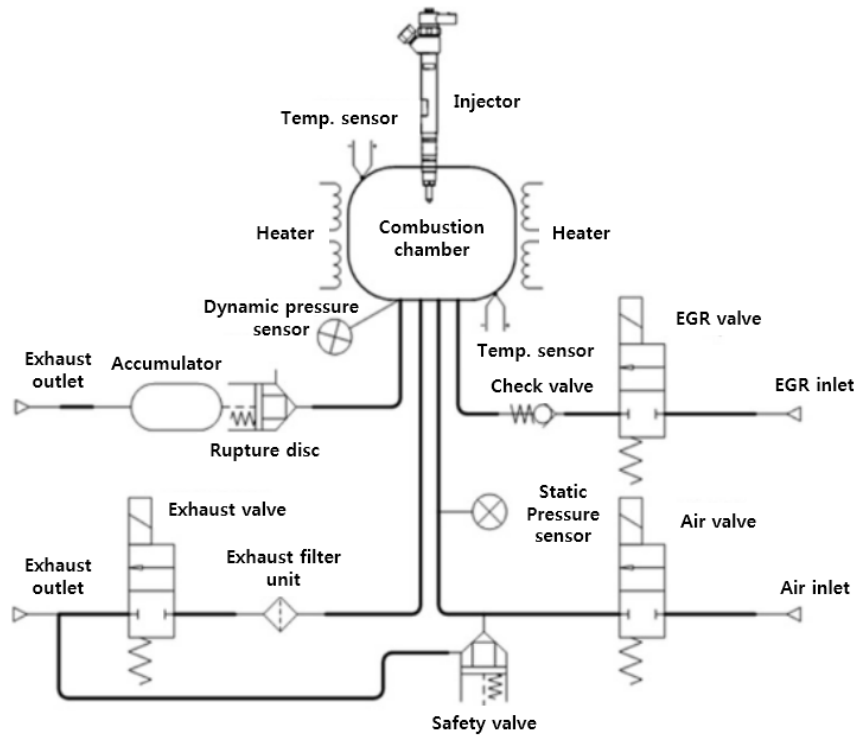


Figure 2. Schematics of CRU.

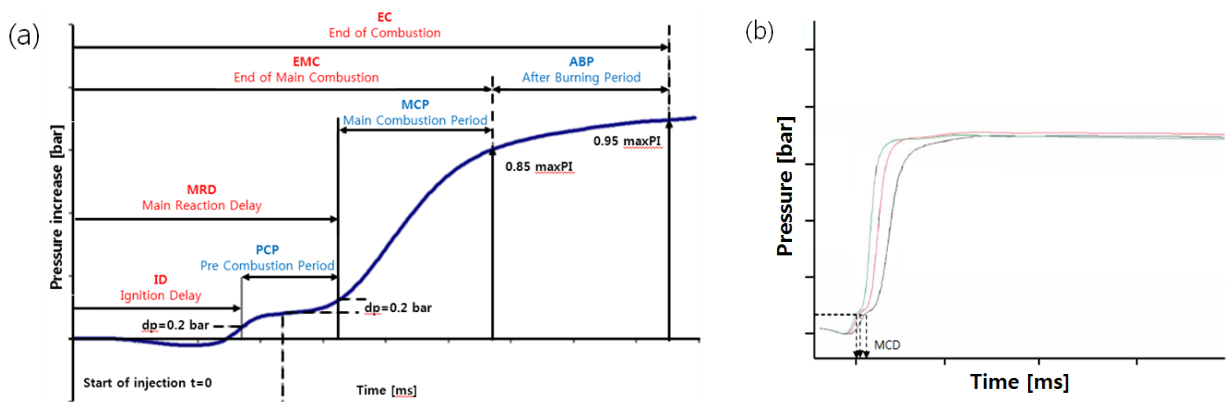


Figure 3. P-t curve obtained by using CRU (a) Definition of specific time, (b) Example of results.

료로 선정하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 연료의 점화지연시간 측정

Figure 2와 같이 구성된 combustion research unit (CRU) 장비를 활용하여 각 연료의 점화지연시간을 측정하였다. 기존에도 여러 가지 항공유의 점화지연시간 측정에 관한 많은 연구가 진행된 바 있으나[10,11], 이들은 주로 ignition quality tester (IQT)를 활용하여 818 K, 21 atm의 고정된 조건에서만 실험을 진행하거나 shock tube를 활용하여 증기 상태인 연료의 화학적 점화지연시간만을 측정하였다. 그러나 CRU 장비를 사용할 경우에는 300 ~ 880 K, 10 ~ 75 atm의 다양한 온도 및 압력 조건에서 실험이 가능하며, 액체 상태의 연료가 노즐을 통해 고온 고압의 연소실로 분사되어 점화됨에 따라 물리적 점화지연시

간과 화학적 점화지연시간을 모두 포함하는 결과를 얻을 수 있다[12].

CRU 장비는 특정 온도 조건으로 설정된 일정한 부피의 연소실에 air를 주입하여 측정하고자 하는 압력 조건을 만들고, 이를 유지한 상태에서 injector를 통해 시료를 분사하여 시간이 지남에 따라 변화하는 압력을 측정한다. 이러한 과정을 통해 기록된 결과는 IP 541의 규정에 따라 Figure 3과 같이 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 연료의 완전 연소를 기준으로 기록된 최고 압력의 10%에 도달할 때 까지 걸린 시간인 main combustion delay (MCD) 값을 점화지연시간으로 정의하였다[13].

실험은 완전 연소 하는 데에 가장 높은 온도 및 압력이 요구되는 Bio-7629의 조건을 기준으로 하여 590 °C, 55 bar에서 수행하였으며, 이때 펌페로 부터 공급되는 air의 압력은 60 bar, N₂의 압력은 4 bar로 설정하여 각각 산화제 및 purging의 용도

Table 1. MCD of various fuels

Fuel	MCD [ms]
Jet A-1	1.44
Bio-7629	1.18
Bio-5172	1.05

로 사용될 수 있게 하였다. 또한, 고온 고압의 조건에서 연소가 이루어지는 연소실 주위를 순환하는 항온수의 온도는 50 °C로 설정하였다.

연료는 3번의 pre-injection을 통해 노즐의 끝부분까지 가득 차게 하였으며, 실험 시에는 1000 bar의 순간적인 압력으로 약 0.09 mL가 연소실에 분사되게 하였다. 연료 분사 시작의 순간부터 완전 연소가 될 때까지의 압력 변화는 재현성의 확인을 위해 10번씩 측정하였으며, 기록된 MCD의 평균값을 결과로 사용하였다. 각 시료에 대한 측정이 끝난 후에는 methyl alcohol (DUKSAN, EP, Korea)를 사용하여 3초간 3번의 flushing을 통해 세척을 진행하였다.

2.2.2. 연료의 물성 측정

점화지연시간 측정 결과를 분석하기 위한 참고 데이터를 확보하기 위하여, 연료의 물리적 점화지연시간에 영향을 줄 수 있는 밀도와 표면장력을 각각 밀도 측정기(DM40 DeltaRange, METTLER TOLEDO)와 표면장력 측정기(force tensiometer-K11, KRÜSS)를 사용하여 측정하였다. 장비의 사양을 고려하여 0 °C 부터 100 °C까지 총 6가지 온도에서의 물성을 상압의 조건에서 측정하였으며, 결과의 재현성을 확보하기 위해 5번의 측정을 통한 평균값을 구하였다. 또한, 저온 동점도 측정기(LKV5000, Koehler)를 사용하여 -30 °C부터 0 °C까지 총 4가지 온도에서의 동점도를 측정하였으며, 마찬가지로 재현성 확보를 위해 3번의 측정을 통한 평균값을 구하였다.

2.2.3. 연료의 성분 분석

각 연료에 대한 정성 및 정량적인 분석을 위해 Gas Chromatography/Mass Spectrometer (GC/MS, Agilent 7890) 장비를 활용하여 결과를 확인하였으며, 신뢰성 확보를 위해 flame ionization detector (FID)를 통한 분석을 추가로 실시하여 각각의 결과를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

각 연료의 점화특성을 비교하기 위해 CRU 장비를 이용하여 점화지연시간을 측정하였으며, 실험은 590 °C, 55 bar에서 수행하였다. 그 결과, Table 1에 정리한 바와 같이 2가지 바이오항공유의 점화지연시간은 석유계항공유인 Jet A-1의 경우보다 짧게 측정되었으며, 특히 Bio-5172가 Bio-7629 보다 점화지연시간이 짧은 것으로 확인되었다.

연료의 점화특성을 결정하는 물성 중의 하나인 표면장력은 연료가 노즐을 통해 분사될 때에 형성되는 분무입경의 제곱근

Table 2. Kinematic viscosities of various fuels

Temp. [°C]	Kinematic viscosity [cSt]		
	Jet A-1	Bio-7629	Bio-5172
-30	4.88	4.76	3.28
-20	3.61	3.64	2.68
-10	2.84	2.93	2.26
0	2.30	2.48	2.00

Surface tension [mN/m]

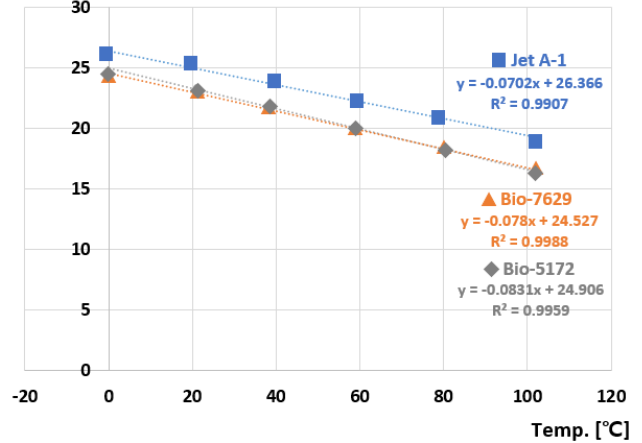


Figure 4. Surface tensions of various fuels.

에 비례하는 관계를 가지며, 특정 압력 및 온도 조건에서 연료가 분사될 때 형성되는 분무입경이 작아질수록 주변의 산소와 접촉하는 비표면적이 증가하게 되어 점화가 더 수월해 지는 데에 영향을 줄 수 있다[14,15]. 이러한 사실에 입각하여 실험 대상 연료의 온도에 따른 표면장력을 측정된 결과를 Figure 4에 나타내었으며, 모든 측정 온도에서 Jet A-1에 비하여 작은 표면장력 값을 갖는 2가지의 바이오항공유가 점화지연시간 또한 짧게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 2에는 실험 대상 연료의 온도에 따른 동점도 측정값을 나타냈으며, 이 때 사용한 장비는 -30 °C ~ 0 °C 범위 내의 온도만 설정이 가능한 장비로, 측정은 각 연료가 갖는 온도에 따른 동점도의 경향성을 확인하기 위해 수행하였다. 특정 온도에서의 연료의 점도는 동점도와 밀도의 곱으로 나타낼 수 있으며[16], 계산을 통해 얻은 연료의 온도에 따른 점도 값을 Figure 5에 정리하였다.

연료의 점도 역시 물리적 점화지연시간에 영향을 줄 수 있으며, 점도가 낮을수록 점화 및 화학반응을 일으키기 위해 극복하여야 하는 유동 저항이 낮아 점화지연시간이 짧아진다[17,18]. 따라서 측정된 모든 온도에서 가장 낮은 점도를 갖는 Bio-5172가 점화지연시간 또한 가장 짧게 나타난 것으로 판단된다.

각 연료를 구성하는 화합물에 대한 정성 및 정량적인 분석을 통해 점화특성을 추가적으로 해석하기 위해서 Gas Chromatography/Mass Spectrometer (GC/MS) 분석을 수행하였으며, 검출시간에 따른 intensity peak 그래프를 Figure 6에 나타내었다.

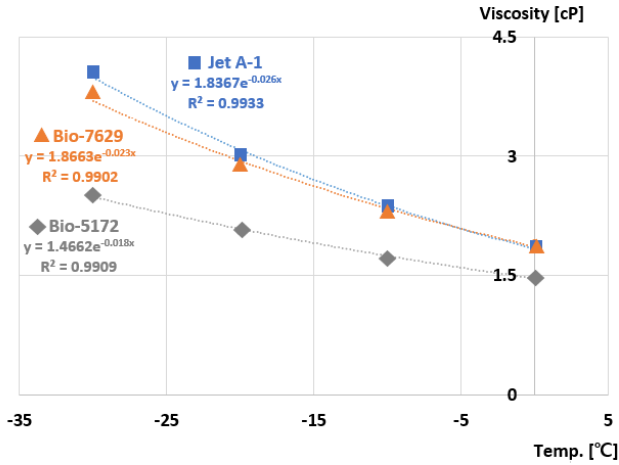


Figure 5. Dynamic viscosities of various fuels.

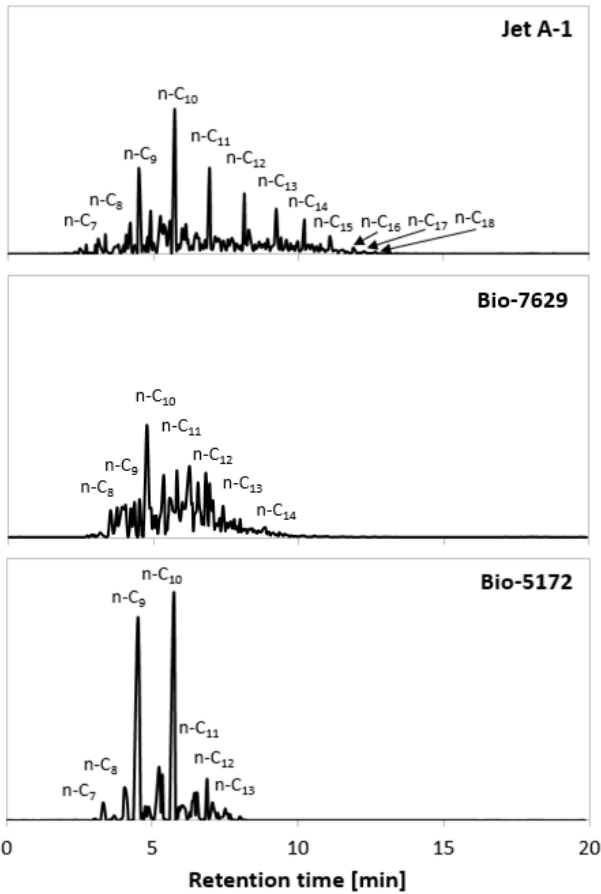


Figure 6. Intensity peaks of various fuels by GC/MS analysis.

분석 결과를 토대로 각 연료를 구성하는 화합물의 종류와 비율을 화학적 구조에 따라 분류하여 Table 3에 정리하였으며,

Table 3. 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-7629	99.6	0.4	-	-
Bio-5172	99.1	0.9	-	-

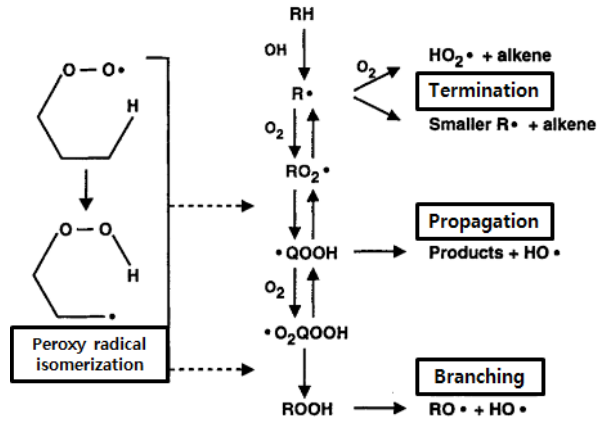


Figure 7. Reactions of radical: formation, isomerization, propagation [19].

이를 통해 Bio-7629와 Bio-5172는 paraffin으로만 구성되어 있고 Jet A-1에는 paraffin 이외에도 olefin과 aromatics가 각각 약 2.4%, 22.8%의 비율로 함께 존재하는 것을 확인할 수 있다.

Pilling [19]에 의하면 연료의 점화는 Figure 7과 같이 이를 구성하는 화합물로 부터의 라디칼 생성, 이성질화, 전파의 과정을 통해 이루어진다. 이 때 paraffin의 경우에는 alkyl radical을 생성하며, 이는 다시 산화 과정을 거쳐 peroxy radical이 되어 빠른 가지 반응을 통해 점화가 빠르게 전파되게 한다. 그러나 aromatics의 경우에는 Figure 8과 같이 여러 가지 공명 구조를 갖는 benzyl radical을 생성하며, 이는 구조적 안정성에 의해 반응성이 낮아 점화가 지연되는 데에 영향을 미친다[20-22].

Figure 9에 나타난 바와 같이 radical이 생성될 때에 필요한 bond dissociation energy (BDE)의 측면에서 같은 탄소수를 갖는 화합물일 경우에 paraffin의 C-H BDE가 aromatics의 C-H BDE보다 더 높은 값을 가지므로 alkyl radical 보다는 benzyl radical의 생성이 비교적 더 수월할 수 있다[23]. 따라서 paraffin과 aromatics가 같이 존재하는 Jet A-1가 산화 반응을 거칠 때, 점화가 빠르게 진행되게 하는 alkyl radical 보다는 점화를 지연시키는 benzyl radical이 더 쉽게 생성되어 paraffin으로만 이루어진 Bio-7629와 Bio-5172 보다 점화지연시간이 더 길게 측정

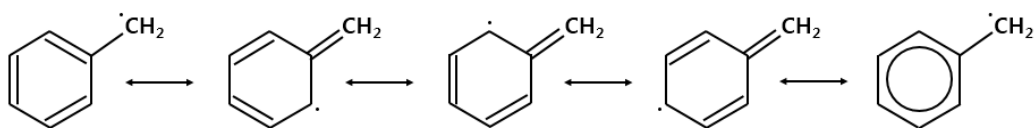


Figure 8. Various resonance structures of benzyl radical [20].

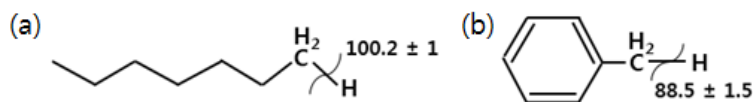


Figure 9. BDE of C₇ compounds (a) n-heptane(paraffin), (b) toluene(aromatics) [23].

Table 4. Results of GC/FID analysis

	Paraffins in fuels [wt%]							
	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-7629	1.59	14.51	3.56	72.58	0.18	7.04	0.05	0.16
Bio-5172	19.78	6.69	24.47	48.34	0.02	0.28	0.01	0.12

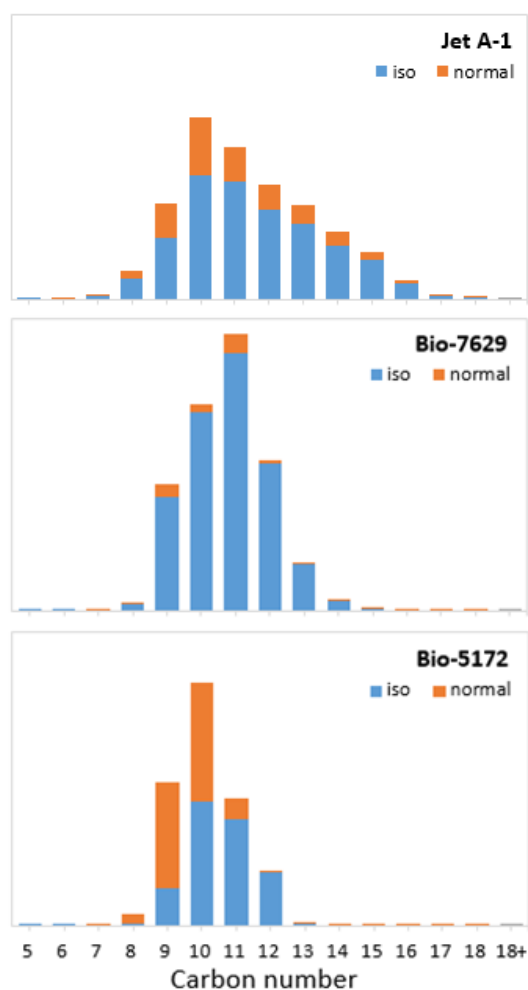


Figure 10. Composition ratio of paraffins in various fuels.

되는 것으로 해석할 수 있다.

연료를 구성하는 주요화합물인 paraffin의 화학적 구조 및 탄소수에 따른 구성 비율을 FID 검출기를 사용하여 분석한 결과를 Figure 10과 Table 4에 정리하여 나타내었으며, 특히 Bio-7629와 Bio-5172의 경우에 n-paraffin과 iso-paraffin의 구성 비율(n-/iso-)이 각각 0.06, 0.80으로 큰 차이를 보이는 것을 확

인할 수 있다. Boot et al. [20]에 따르면 paraffin이 산화 되는 과정에서 생성되는 peroxy radical의 이성질화 반응이 점화의 전파속도가 결정되는 데에 중요한 역할을 한다. 이때 형성되는 transition state가 구조적으로 안정한 형태일수록 이성질화가 되기 쉬우며, 이러한 transition state는 paraffin의 사슬 길이가 길수록, 가지화 된 정도가 낮을수록 형성될 수 있는 site가 증가하여 쉽게 형성되며 빠르게 이성질화 될 수 있다. 따라서 n-/iso-가 비교적 높은 Bio-5172가 Bio-7629보다 산화 과정 중에 생성되는 peroxy radical의 이성질화가 수월하게 진행되어 빠른 전파 과정을 거치기 때문에 점화지연시간 또한 짧게 측정 되는 것으로 해석할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국외에서 F-T 공정으로 제조한 2가지 바이오항공유와 기존에 상용 중인 석유계항공유의 점화특성에 대하여 비교 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 온도 및 압력이 각각 590 °C, 55 bar인 조건에서 Bio-5172의 점화지연시간이 가장 짧게 측정되었으며, Jet A-1의 점화지연시간이 가장 길게 측정되었다. 모든 측정 온도 조건에서 가장 높은 표면장력을 갖는 Jet A-1이 가장 긴 점화지연시간을 가지며, 가장 낮은 점도를 갖는 Bio-5172가 가장 짧은 점화지연시간을 갖는 것을 확인할 수 있다.

실험 대상 바이오항공유는 paraffin으로만 구성되어 있는 반면에, Jet A-1에는 paraffin과 약 22.8%의 aromatics가 함께 존재하며, aromatics의 분해 과정에서 구조적으로 안정하여 반응성이 낮은 benzyl radical이 생성되므로 점화지연시간 또한 길게 나타나는 것으로 해석된다. 실험 대상 바이오항공유를 구성하는 n-paraffin과 iso-paraffin이 alkyl radical이 되어 산화 과정을 거쳐 생성하는 peroxy radical의 이성질화가 점화의 전파 속도를 결정하는 중요한 역할을 한다. 이는 paraffin의 사슬이 길수록, 가지화 된 정도가 낮을수록 수월하게 진행되므로 n-/iso-의 비율이 비교적 높게 측정된 Bio-5172의 점화지연시간이 Bio-7629에 비하여 짧게 나타나는 것으로 해석된다.

References

1. Pupan, D., "Environmental Evaluation of Biofuels," *Period Polytech. Ser. Soc. Man Sci.*, **10**(1), 95-116 (2002).
2. <http://biofuel.org.uk/second-generation-biofuels.html> (accessed June. 2019).
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. Fischer, F., "Fischer Tropsch Synthesis," FT_synthesis-2013_PW.pdf.
5. Steynberg, A. P., Espinoza, R. L., Jager, B., and Vosloo, A. C., "High Temperature Fischer-Tropsch Synthesis In Commercial Practice," *Appl. Catal. A: Gen.*, **186**(1-2), 41-54 (1999).
6. Espinoza, R. L., Steynberg, A. P. Jager, B., and Vosloo, A. C., "Low Temperature Fischer-Tropsch Synthesis From a Sasol Perspective," *Appl. Catal. A: Gen.*, **186**(1-2), 13-26 (1999).
7. "Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons," American Society for Testing and Materials, (2016).
8. John, B. H., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill Book Company, New York, 539-540 (1988).
9. 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).
10. Ziliang, Z., Tamer, B., and Naeim, H., "Investigation of Physical and Chemical Delay Periods of Different Fuels in the Ignition Quality Tester," *J. Eng. Gas Turbines Power*, **135**(6), 1-11 (2013).
11. Vasu, S. S., Davidson, D. F., and Hanson, R. K., "Jet Fuel Ignition Delay Times: Shock Tube Experiments Over Wide Conditions And Surrogate Model Predictions," *Combust. 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," *J. Korean Soc. Propuls. Eng.*, **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> (accessed June. 2019).
15. Gohtani, S., Sirendi, M., Yamamoto, N., Kajikawa, K., and Yamano, Y., "Effect of Droplet Size on Oxidation of Decosahexanoic Acid in Emulsion System," *J. Dispersion Sci. Technol.*, **20**(5), 1319-1325 (1999).
16. Nouredini, H., Teoh, B. C., and Davis, C. L., "Viscosities of Vegetable Oils and Fatty Acids," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **69**(12), 1189-1191 (1992).
17. Shahabuddin, M., Liaquat, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., and Mofijur, M., "Ignition Delay, Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Biodiesel," *Renew. Sust. Energy Rev.*, **21**, 623-632 (2013).
18. Jyoti, B. V. S., Naseem, M. S., and Baek, S. W., "Hypergolicity and Ignition Delay Study of Pure and Energied Ethanol Gel Fuel with Hydrogen Peroxide," *Combust. Flame*, **176**, 318-325 (2017).
19. Pilling, M. J., "Low-Temperature Combustion and Autoignition, 35th ed.," Elsevier, Netherlands, 56-66 (1997).
20. Boot, M. D., Tian, M., Hensen, E. J., and Sarathy, S. M., "Impact of Fuel Molecular Structure on Auto-Ignition Behavior-Design Rules for Future High Performance Gasolines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **60**, 1-25 (2017).
21. Simmie, J. M., "Detailed Chemical Kinetic Models for the Combustion of Hydrocarbon Fuels," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **29**(6), 599-634 (2003).
22. 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).
23. Rakesh, K. M., "Characteristics and Control of Low Temperature Combustion Engines: Employing Gasoline, Ethanol and Methanol," Springer International Publishing, India, (2018).