

석유계 및 바이오 항공유의 점화지연시간 비교

강셋별^a · 한정식^a · 정병훈^{a,*}

Comparison of Ignition Delay Time of Petroleum-based and Bio Aviation Fuel

Saetbyeol Kang^a · Jeongsik Han^a · Byunghun Jeong^{a,*}

^aAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author, E-mail: jeongbh@add.re.kr

ABSTRACT

This study aimed to obtain data for a comparative analysis of the properties of bio aviation fuel to be developed in the future by measuring and comparing the ignition delay times of various presently used aviation fuels. In the case of petroleum-based aviation fuel, the ignition delay time of exo-THDCP was 4.92 ms, which was 3.42 times longer than 1.44 ms of Jet A-1 at 590 °C / 55 bar. In the case of foreign bio aviation fuel, the ignition delay time of 11POSF7629 was the longest (1.16 ms), while the ignition delay time of 10POSF6308 (1.06 ms), 12POSF7720 (1.07 ms), and 07POSF5172 (1.05 ms) were similar.

초 록

본 연구에서는 향후 개발될 바이오 항공유의 특성을 비교 분석하기 위한 기초 자료를 확보하기 위해, 여러 가지 항공유의 점화지연시간을 측정하여 결과를 비교하였다. 석유계 항공유의 경우에는 590 °C, 55 bar 조건에서 exo-THDCP의 점화지연시간이 4.92 ms로 측정되어 Jet A-1의 측정값인 1.44 ms 보다 3.42배 긴 것을 확인하였다. 또한 외국 바이오 항공유의 경우에는 Sasol사의 11POSF7629가 1.16 ms로 점화지연시간이 가장 길게 측정되었고, UOP사의 10POSF6308은 1.06 ms, 12POSF7720는 1.07 ms, 그리고 Sasol사의 07POSF5172는 1.05 ms로 모두 비슷하게 측정되었다.

Key Words: Petroleum-based Aviation Fuel(석유계 항공유), Bio Aviation Fuel(바이오 항공유), Ignition Delay Time(점화지연시간)

Received 7 June 2018 / Revised 29 November 2018 / Accepted 6 December 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2018년도 춘계학술대회(2018. 5. 30-6. 1, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. Introduction

Jet fuel(aviation turbine fuel)은 가스터빈엔진에 의해 추진되는 비행체에 사용되도록 제조된

항공유(aviation fuel)로 분류되며, 주된 기능은 엔진에서의 연소에 의해 고온, 고압의 기체를 방출함으로써 발생하는 반작용에 의해 항공기에 추진력을 제공하는 것이다[1]. 항공유의 종류에는 민수용 항공기에 사용되는 Jet A와 Jet A-1, 군용 항공기에 사용되는 JP-8과 JP-10등이 있으며[2], 이러한 여러 가지 종류의 항공유는 사용 환경과 용도에 적합하게 개발되었다.

최근에는 세계 각국에서 석유계 항공유 이외에 석유대체자원을 이용하여 제조한 바이오(합성) 항공유가 개발되기 시작하였는데, 남아프리카 공화국에서 석탄을 사용하여 Fisher-Tropsch (F-T) 공정으로 제조한 Synthesized Paraffinic Kerosene(SPK), 오일을 이용하여 Hydroprocessed Esters and Fatty Acid 공정으로 제조한 HEFA-S PK, 발효된 당류를 이용하여 개발된 Synthesized Iso-Paraffins(SIP), 알코올을 이용한 Alcohol-T o-Jet(ATJ) 등이 있다[3].

바이오 항공유는 일반적으로 석유계 항공유에 비하여 사용하는 과정에서 SO_x, NO_x, Particulate matter와 같은 오염물질의 발생이 저감되는 장점을 갖지만, 연료 내에 aromatic의 함량이 거의 없는 특징을 가지는 등, 석유계 항공유와 구성성분에서 차이를 갖기 때문에 이로부터 비롯되는 특성의 차이를 최소화하기 위하여 새로운 제조 공정을 적용하거나, 첨가 물질을 혼합하는 연구 등을 통해 바이오 항공유가 사용되는 체계에서 발생 가능한 문제점을 최소화하기 위한 노력도 진행되고 있다[4,5].

이처럼 특정한 사용 용도와 목적에 부합하는 항공유에 대한 연구 및 개발은 현재에도 많이 진행되고 있으며, 개발된 항공유를 체계에 적용하기 위해서는 여러 가지 특성을 고려하여야 한다. 항공유는 구성하고 있는 물질에 따라 서로 다른 특성을 갖는데, 이는 제트엔진의 설계, 작동조건, 그리고 연료 시스템 제어 장치의 성능 등에 영향을 주기 때문에, 엔진의 운용 이전에 사용하는 연료의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다[6].

본 연구에서는 여러 가지 항공유의 특성 중 점화지연시간을 측정하여 결과를 비교하였다. 석

유계 항공유인 Jet A-1과 고성능 연료로 사용가능한 exo-THDCP(exo-TetraHydroDicycloPentadiene), 외국에서 제조한 바이오 항공유 4종 (11PO SF7629, 10POSF6308, 07POSF5172, 12POSF7720)의 점화지연시간을 측정하였으며, 추가로 연료의 밀도, 표면장력, 인화점을 측정하여 점화지연시간을 분석하기 위한 기본 물성 데이터를 확보하였다. 또한, 이를 통해 향후 개발될 바이오 항공유의 물성 분석 및 특성 비교를 위한 기초 자료를 확보하였다.

2. Experimental

2.1 Materials

본 연구에서 사용한 항공유는 석유계 항공유인 Jet A-1과 2개의 cyclopentadiene이 연결된 불포화 다중고리형 화합물로서 고밀도 및 ring strained 특성으로 인해 분해 시 높은 발열량을 나타내어 고성능 연료로 사용 가능한 exo-THDCP, 외국에서 제조된 바이오 항공유인 11POSF7629, 10POSF6308, 07POSF5172, 12POSF7720이며, 각 항공유의 원료 및 제조방법은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Raw materials and manufacturing methods of various aviation fuels.

| Fuel | Material | Company | Process |
|------------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| Jet A-1 | Petroleum | GS Caltex | Distillation |
| exo-THDCP | Dicyclopentadiene | Domestic company | Hydrogenation & Isomerization |
| 11POSF7629 | Coal | Sasol | Fisher-Tropsch |
| 10POSF6308 | Tallow | UOP | Hydroprocessed |
| 07POSF5172 | Syn gas | Shell | Fisher-Tropsch |
| 12POSF7720 | Camelina | UOP | Hydroprocessed |

2.2 Methods

각 항공유의 점화지연시간을 측정하기 위하여 Combustion Research Unit(CRU, Fueltech) 을 사용하였고, 장비의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. CRU는 일정한 부피의 연소실 챔버 내에 공기를 주입한 후, 실험 조건의 온도와 압력을 유지한 상태에서 시료를 주입하여 연소되는 동안 시간에 따른 압력의 변화를 측정하는 장비이다. 기존에는 Shock tube를 사용하여 점화지연시간을 측정한 여러 연구들이 진행되었으나[7,8], 이는 액체연료가 기화된 이후의 화학적 점화지연 시간만을 측정한 것으로, 연료의 가열단계 및 증발단계를 포함한 전체 점화지연시간을 확인하는데에는 제한이 있다. CRU와 비슷한 방법으로 정적 부피에 일정한 온도와 압력의 공기를 채워 점화지연시간을 측정하는 IQT 장비를 사용한 연구도 진행된 바 있으나[9], 이는 818 K, 21 bar의 단일 조건에서만 측정이 가능하며, 온도와 압력에 따른 점화지연시간의 변화를 확인할 수 없다. 점화 조건이 가장 까다로운 *exo*-THDCP의 완전

연소 조건을 기준으로 하여, 모든 항공유의 점화지연시간을 동일한 조건에서 측정하기 위해 정적 연소 챔버의 온도 및 압력을 각각 590 °C, 55 bar로 설정하였다. 이 때, 장비로 공급되는 산화제인 air의 압력은 60 bar, purging을 위한 질소의 압력은 4 bar로 설정하였으며, 챔버 주위에 공급되는 항온수의 온도는 50 °C로 하였다.

각 항공유의 점화지연시간 측정이 끝난 후에는, 세척을 위해 Methyl Alcohol(DUKSAN, EP, Korea)을 넣어 3초간 3번의 flushing을 진행하였고, 시료를 넣은 후에는 3번의 pre-injection을 통해 노즐의 끝부분까지 연료가 가득 차게 하였다. 이후에는 각 연료별로 연소되는 동안 증가한 압력을 10번씩 측정하였으며, 점화지연시간은 연소가 끝난 후 기록된 최고 압력의 10 %에 도달했을 때의 시간인 MCD(Main Combustion Delay)의 평균값을 사용하여 얻었다.

각 항공유별로 측정된 점화지연시간을 비교 분석하기 위해 필요한 추가 물성으로써 밀도는 Density meter(DM40 DeltaRange, METTLER TOLEDO), 표면장력은 Force tensiometer(K11, KRÜSS), 인화점은 Half-automatic Pensky-Martens Flashpoint Tester(Petrotest)를 사용하여 측정하였다.

물성 측정값의 신뢰성을 확보하기 위해 밀도는 각 시료별로 3번의 측정을 통해 평균값을 구하였고, 표면장력은 6번의 측정을 통해 결과데이터를 확보하였다. 또한, 각 시료의 인화점은 3번의 반복 측정을 실시하여 재현성을 확인하였다.

또한, 대상연료에 대해 화학성분의 정성 및 정량분석을 위해 GC-MS(Gas Chromatography-Mass Spectrometer, Agilent 7890) 분석을 실시하여 유출시간에 따른 스펙트럼 intensity의 피크 모양과 탄소 수 분포를 확인하였다.

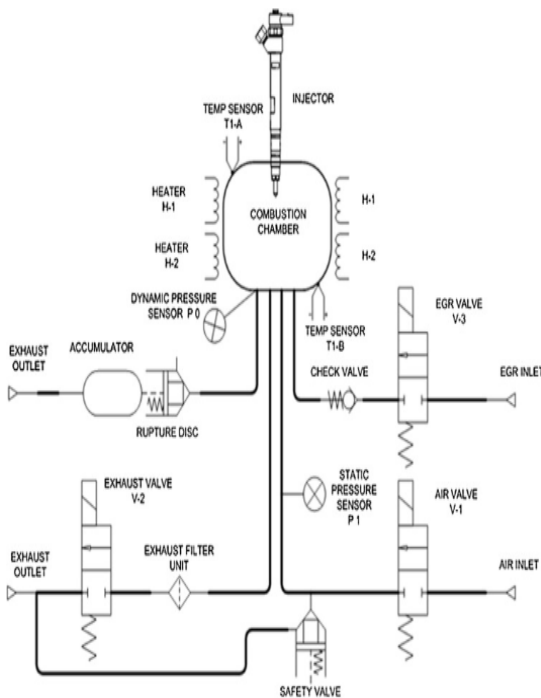


Fig. 1 Schematic of Combustion Research Unit(CRU).

3. Results and Discussion

본 연구에서는 실험 대상인 항공유 중에서 점화 조건이 가장 까다로운 *exo*-THDCP의 완전 연

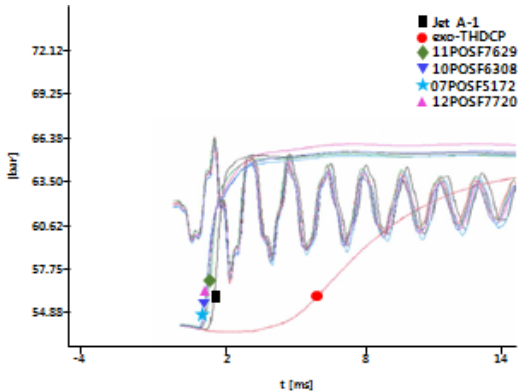


Fig. 2 P-t Curves of various aviation fuels (590 °C, 55 bar).

Table 2. Measured values of ignition delay time.

| Fuel | MCD [ms] |
|------------|----------|
| Jet A-1 | 1.44 |
| exo-THDCP | 4.97 |
| 11POSF7629 | 1.18 |
| 10POSF6308 | 1.06 |
| 07POSF5172 | 1.05 |
| 12POSF7720 | 1.07 |

소 조건인 590 °C, 55 bar로 설정된 CRU 장비를 사용하여, 여러 가지 항공유에 대해 시간에 따른 연료의 주입압력과 연소 시 챔버 압력의 변화를 측정하였고, 그 결과는 Fig. 2와 같다. 측정된 점화지연시간은 Table 2에 정리하였다.

석유계 항공유의 경우, exo-THDCP의 점화지연시간은 4.92 ms로 측정되었으며, 이는 Jet A-1의 측정값인 1.44 ms보다 3.42배 긴 것을 확인할 수 있다. 외국 바이오 항공유의 경우, Sasol사의 11POSF7629의 점화지연시간이 1.18 ms로 가장 길게 측정되었으며, UOP사의 12POSF7720은 1.07 ms, UOP사의 10POSF6308은 1.06 ms, Shell사의 07POSF5172는 1.05 ms로 비슷하게 측정되었음을 확인할 수 있다.

CRU장비를 사용하여 측정한 점화지연시간의 결과 값의 차이를 확인하기 위하여 비열과 증발잠열의 정량적 측정결과가 있는 석유계 항공유의 연료 분사 후 점화되기까지의 과정을 단계별로 구분하여 이론적으로 분석하였고, 그 결과를

Table 3. Stepwise analysis of ignition delay time.

| Step | Fuel | |
|---------------------------------|---|--|
| | Jet A-1 | exo-THDCP |
| Heating of liquid fuel | - Both fuels are heated with the same amount of heat (assumption). $\Delta t = m \cdot C_p \cdot \Delta T / q$ | |
| | $C_p = 2.52 \text{ kJ/kg}$ (at 150 °C) $\Delta T = 120 \text{ °C}$ | $C_p = 2.28 \text{ kJ/kg}$ (at 185 °C) $\Delta T = 155 \text{ °C}$ |
| Evaporation of liquid fuel | - Difference in ignition delay time occurs due to the latent heat. | |
| | ΔH_{latent} (at 150 °C) = 203.4 kJ/kg [10] | ΔH_{latent} (at 185 °C) = 308.2 kJ/kg [12] |
| Ignition of gaseous fuel | - Difference in ignition delay time occurs due to chemical ignition. | |
| | Ignition delay time at 8 bar, 1330 K = 68.9 μs [11] | Ignition delay time at 8 bar, 1330 K = 438.9 μs [13] |
| Analysis of ignition delay time | - Heating of liquid fuel : exo-THDCP is 1.17 times longer than Jet A-1. - Evaporation of liquid fuel : exo-THDCP is 1.5 times longer than Jet A-1. - Ignition of gaseous fuel : exo-THDCP is 6.3 times longer than Jet A-1. | |

Table 3에 나타내었다.

Table 3에서의 각 단계가 모두 점화지연시간에 동일한 영향을 준다고 단순 가정하였을 때, 이론적인 점화지연시간은 exo-THDCP가 Jet A-1보다 약 3배 길다. 이는 CRU장비를 이용하여 측정한 결과인 3.42배 긴 것과 비슷한 수치로, 이를 통해 CRU장비를 이용한 점화지연시간 측정 결과 데이터는 어느 정도 타당성이 있다고 판단할 수 있다. 그러나 CRU 장비를 사용하여 측정한 spray combustion은 액막/액적 형성 및 미립화, 액적 사이의 간섭 등, 실제 연소 과정의 복잡성 때문에 위와 같은 단순한 방법으로는 해

석이 어려우며, 더 명확한 해석을 위해서는 단일 액적의 연소 과정과 관련된 실험이 추가로 필요할 것으로 판단된다.

비열과 증발잠열의 정량적 측정결과가 없는 외국 바이오 항공유의 점화지연시간을 분석하기 위하여 온도별 밀도, 표면장력, 그리고 인화점을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 3 ~ 4와 Table 4에 나타내었다. 온도별 밀도는 특정 온도에서의 표면장력 값을 구하기 위해 필요하며, 이는 주변 대기의 영향을 받지 않는 장비 내의 tube에서 측정하여 굉장히 좁은 오차범위를 갖는 것을 확인할 수 있다. 반면에 표면장력 값은 측정부가 대기에 노출되어 있어, 주변 대기의 영향을 비교적 많이 받기 때문에 밀도 값 보다는 넓은 오차범위를 갖는 것을 확인할 수 있다.

연료의 점화지연시간에 영향을 주는 요소는 물리적 인자와 화학적 인자로 구분할 수 있다. 표면장력은 연료가 분사된 후, 연소 반응이 일어날 수 있는 증기 상태로 분열 또는 미립화 되는데 걸리는 시간에 영향을 주므로 물리적 인자에 해당하며, 인화점은 증기 상태의 연료가 공기와 부분적인 예연소를 거쳐 자발화가 일어날 수 있을 때까지 걸리는 시간에 영향을 주므로 화학적 인자에 해당한다[14,15].

본 실험에서와 같이 CRU로 측정한 점화지연시간의 경우에는 연료와 공기가 미리 혼합된 경우가 아니기 때문에 물리적 점화지연시간과 화

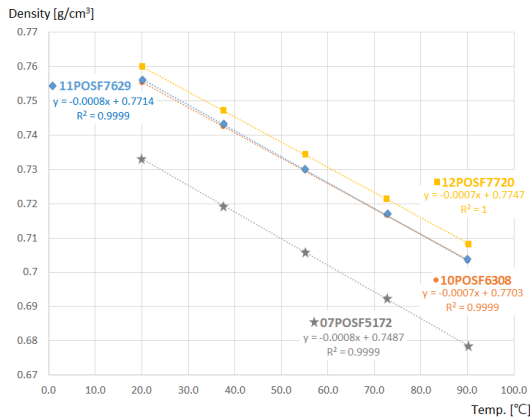


Fig. 3 Density of various aviation fuels.

학적 점화지연시간이 모두 포함된 결과로 볼 수 있다[16-18].

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 온도별 표면장력의 값은 모든 외국 바이오 항공유의 경우에서 유사하게 측정되었다.

일반적으로 표면장력의 측정결과는 연료의 분무입경 등에 영향을 주어 물리적 점화지연시간에 영향을 줄 수 있으나, 본 실험에서는 표면장력 측정값에 따른 점화지연시간 차이를 설명하기 어려웠으며, 이를 명확하게 설명하기 위해서는 동일 조건에서의 점도에 따른 분무 특성에 관한 연구 등이 추가로 진행되어야 한다고 판단된다.

Table 4에 정리된 바와 같이, 외국 바이오 항공유인 10POSF6308, 07POSF5172, 12POSF7720의 경우에는 측정된 인화점이 40~43 °C 범위에 있으며 서로 차이가 적은 것으로 나타났는데, 각 연료의 점화지연시간 측정값 또한 1.05~1.07 ms 범위 내에 있으며 서로 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다.

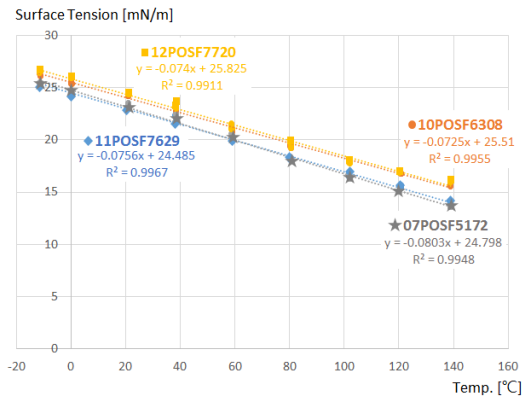


Fig. 4 Surface tension of various aviation fuels.

Table 4. Measured values of flash point.

| Fuel | Flash point [°C] |
|------------|------------------|
| 11POSF7629 | 40~41 |
| 10POSF6308 | 42~43 |
| 07POSF5172 | 40~41 |
| 12POSF7720 | 42~43 |

그러나 11POSF7629의 경우, 인화점이 상대적으로 낮게 측정되었음에도 불구하고, 점화지연시간은 1.18 ms로 다른 바이오 항공유에 비하여

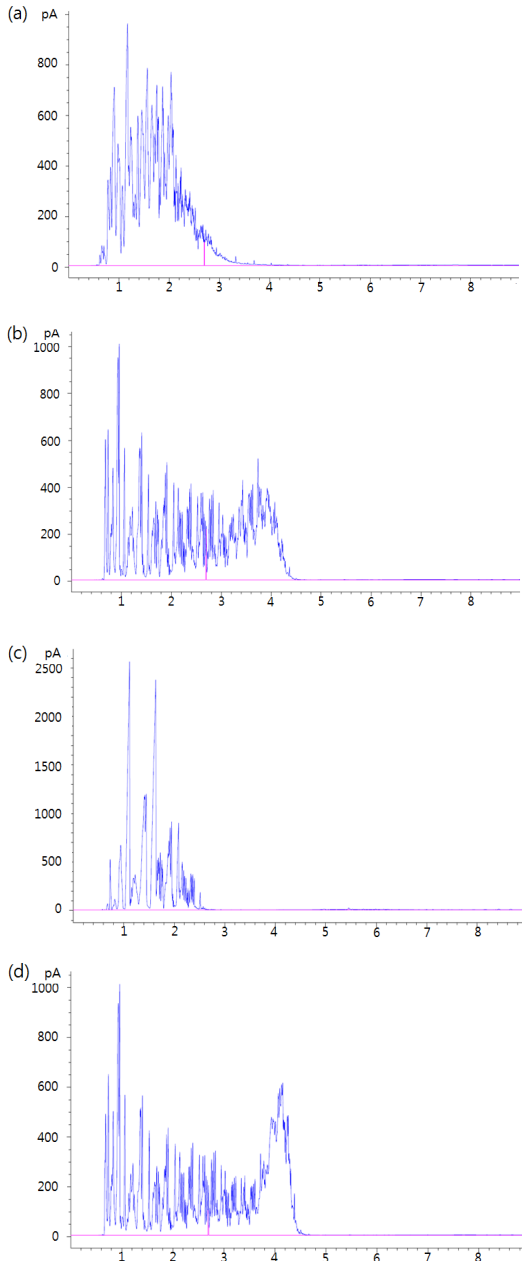


Fig. 5 GC analysis results of bio aviation fuels (a)11POSF7629, (b)10POSF6308, (c)07POSF5172, (d)12POSF7720.

약 11% 길게 측정되었는데, 이는 세탄가의 차이로 설명이 가능하다. 연료의 세탄가가 낮을수록 점화지연시간은 길게 나타나는데[19], Table 5에서 11POSF7629가 다른 연료에 비해 상대적으로 낮은 세탄가를 갖는 것을 확인할 수 있다[20].

외국 바이오 항공유의 화학적 점화지연시간 결과를 분석하기 위한 추가 자료로써, GC 측정결과와 탄소 수 분포의 분석 결과를 Fig. 5와 Table 6에 나타내었다.

Table 6에 정리한 탄소 수 분포 분석 결과로부터 비슷한 세탄가를 가진 외국 바이오 항공유 10POSF6308, 07POSF5172, 12POSF7720의 탄소 수 분포를 비교하였을 때, 12POSF7720의 경우 탄소수가 17개 이상인 C₁₇₊의 함량이 다른 연료에 비해 상대적으로 높았으나, 이로 인한 점화지연시간과 인화점의 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 연료의 화학적 특성을 좀 더 명확하게 해석하기 위해서는 그것을 이루고 있는 분자들의 탄소 수 뿐 만 아니라 화학적인 구조의 특성까지 함께 고려하여야 하며[21], 이와 관련된 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 5. Derived cetane number(DCN) and chemical properties of various bio aviation fuels.

| Fuel | DCN |
|------------------------|------|
| SASOL IPK POSF 7629 | 31.1 |
| HRJ Tallow POSF 6308 | 58.1 |
| SHELL SPK POSF 5172 | 58.4 |
| HRJ Camelina POSF 7720 | 58.9 |

Table 6. Carbon number distribution of bio aviation fuels.

| Type | Hydrocarbon distribution [%] | | |
|------------|------------------------------|-----------|------|
| | C6 ~ C9 | C10 ~ C17 | C17+ |
| 11POSF7629 | 1.2 | 98.8 | 0.0 |
| 10POSF6308 | 5.9 | 91.4 | 2.7 |
| 07POSF5172 | 2.0 | 98.0 | 0.0 |
| 12POSF7720 | 5.4 | 83.6 | 11.0 |

4. Conclusion

본 연구에서는 향후 개발될 바이오 항공유의 물성 분석 및 특성 비교를 위한 기초 자료를 확보하기 위하여 석유계 항공유인 Jet A-1, exo-THDCP와 외국 바이오 항공유 4종의 점화지연시간과 물성을 측정하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CRU 장비를 이용한 정적 연소 챔버 내에서의 연소 실험을 통해, Jet A-1에 비해 고성능 연료로 사용가능한 exo-THDCP의 점화지연시간이 3.42배 긴 것으로 나타났으며, 두 연료의 점화단계별 비열과 증발잠열 수치를 이용한 분석을 통해 실험 결과에 대한 타당성을 확인하였다.

2) 외국 바이오 항공유의 점화지연시간 차이를 분석하기 위해 인화점을 측정한 결과, 인화점이 유사한 경우에는 점화지연시간의 차이도 크지 않음을 확인하였으며, 11POSF7629의 측정 결과를 통해 세탄가가 점화지연시간에 영향을 주는 것을 확인하였다.

3) 외국 바이오 항공유의 탄소 수 분포 결과 분석을 통해 연료의 조성이 점화지연시간에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으나, 보다 정확한 해석을 위해서는 연료를 구성하는 분자들의 화학구조에 대한 분석이 추가로 필요하다.

References

- Hemighaus, G., Boval, T., Bacha, J., Barnes, F., Franklin, M., Gibbs, L., Hogue, N., Jones, J., Lesnini, D., Lind, J. and Morris, J., *Aviation fuels Technical Review*, Chevron Products company, San Ramon, California, U.S.A., 2007.
- Hyeon, D.H., Kim, J.Y., Chun, B.H., Kim, S.H., Jeong, B.H. and Han, J.S., "Improvement of Heat of Reaction of Jet Fuel Using Pore Structure Controlled Zeolite Catalyst", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 5, pp. 95-100, 2014.
- Wang, W.C., Tao, L., Markham, J., Zhang, Y., Tan, E., Batan, L., Warner, E. and Biddy, M., "Review of Biojet Fuel Conversion Technologies", NREL/TP-5100-66291, 2016.
- Liu, S., Zhu, Q., Guan, Q., He, L. and Li, W., "Bio-aviation fuel production from hydrotreating castor oil promoted by the nickel-based bifunctional catalysts", *Bioresource Technology*, Vol. 183, pp. 93-100, 2015.
- Dunn, R.O., "Alternative jet fuels from vegetable oils", *American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 44, No. 6, pp. 1751-1757, 2001.
- Coordinating Research Council, Inc., "Handbook of Aviation Fuel Properties", AFRL-PR-WP-TR-2004-2127, 2004.
- Gauthier, B.M., Davidson, D.F. and Hanson, R.K., "Shock tube determination of ignition delay times in full-blend and surrogate fuel mixtures", *Combustion and Flame*, Vol. 139, No 4, pp. 300-311, 2004.
- Hawthorn, R.D. and Nixon, A.C., "Shock tube ignition delay studies of endothermic fuels", *AIAA*, Vol. 4, No. 3, pp. 513-520, 1966.
- Naser, N., Sarathy, S.M. and Chung, S.H., "Ignition delay time sensitivity in ignition quality tester (IQT) and its relation to octane sensitivity", *Fuel*, Vol. 233, pp. 412-419, 2018.
- Chin, J.S., Rizk, N.K. and Razdan, M.K., "Study on properties of highly heated multicomponent hydrocarbon fuel", *Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, U.S.A., 97-0993, Jan. 1997.
- Wang, H. and Oehischlaeger, M.A., "Autoignition studies of conventional and Fischer-Tropsch jet fuels", *Fuel*, Vol. 98, pp. 249-258, 2012.
- Coordinating Research Council, Inc., "Aviation fuel properties", CRC report NO. 530, 1983.
- Davidson, D.F., Horning, D.C., Herbon, J.T. and Hanson, R.K., "Shock tube measure-

- nts of JP-10 ignition”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, No. 2, pp. 1687-1692, 2000.
14. Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., U.S.A., pp. 539-540, 1988.
 15. Kobori, S., Kamimoto, T. and Aradi, A.A., “A study of ignition delay of diesel fuel sprays”, *Int. J. Engine Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-39, 2000.
 16. Ikegami, M., Shioji, M. and Kimoto, T., “Diesel comturbulent mixing concept”, SAE Technical Paper 880425, 1988.
 17. Edwards, C.F. and Siebers, L.D., “A study of the autoignition process of a diesel spray via high speed visualization”, SAE Technical Paper 920108, 1992.
 18. Yu, T.C., Uyehara, O.A., Myers, P.S., Collins, R.N. and Mahadevan, K., “Physical and chemical ignition delay in an operating diesel engine using hot-motored technique”, *SAE Technical Trans.*, Vol. 64, pp. 690, 1956.
 19. Knothe, G., “Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters”, *Fuel Processing Technology*, Vol. 86, No. 10, pp. 1059-1070, 2005.
 20. Won, S.H., Veloo, P.S., Santner, J., Ju, Y. and Dryer, F.L., “Comparative Evaluation of Global Combustion Properties of Alternative Jet Fuels”, *Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Dallas, U.S.A., AIAA 2013-0156, 2013.
 21. Keshavarz, M.H., “Estimation of the flash points of saturated and unsaturated hydrocarbons”, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 19, pp. 269-278, 2012.