

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2019.23.3.067>

흡열분해 모사연료의 층류화염 전파속도 측정

진유인^a · 이형주^{b,*} · 한정식^c

Measurement of Laminar Burning Velocity of Endothermic Fuel Surrogates

Yu-In Jin^a · Hyung Ju Lee^{b,*} · Jeongsik Han^c

^aPackage Development Team, Hanwha Power Systems, Korea

^bDivision of Aeronautics, Cheongju University, Korea

^cThe 4th R&D Institute - 5th Directorate, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: leehjadd@cju.ac.kr

ABSTRACT

The laminar burning velocity of endothermic fuel surrogates is measured in this study, in order to investigate combustion characteristics of aviation fuel after being used as coolant in an active cooling system of a hypersonic flight vehicle. A Bunsen burner was manufactured such that the laminar burning velocity can be taken for two types of surrogate fuels, SF-1 and 2. The results showed that the burning velocity of surrogate fuels was faster at high equivalence ratio conditions than that of the reference fuel (RF), and specifically, the velocity of SF-1 had the maximum value at the highest equivalence ratio compared with those of SF-2 and RF.

초 록

본 연구에서는 항공유가 극초음속 비행체용 능동냉각시스템의 냉원으로 사용되면서 흡열분해된 후의 연소특성을 확인하는 연구의 일환으로, 흡열분해 모사연료에 대한 층류화염 전파속도를 측정하였다. 흡열분해 모사연료 2종(SF-1, 2)을 제조하고 분젠버너 시험장치를 제작하여 층류화염속도를 측정한 결과 기준연료(RF)와 비교해 보면 전체적으로 높은 당량비에서 화염전파속도가 빠르게 나타나고 있으며, 특히 SF-1이 SF-2 및 RF보다 훨씬 높은 당량비에서 최대 속도를 가짐을 확인하였다.

Key Words: High-speed Air-breathing Engine(고속 공기흡입엔진), Bunsen Burner(분젠 버너), Premixed Flame(예혼합 화염), Chemiluminescence(화학 자발광)

1. 서 론

스크램제트 엔진은 높은 비추력 특성과 초음속에서 극초음속에 이르는 광범위한 운용 유연성으로 대기권 내에서 고체 및 액체 로켓의 대안으로 연구되고 있다[1]. 그러나 실용적으로 비

행 가능한 초고속 비행체의 구현에는 많은 기술적 난제들이 존재하는데, 그 중에서도 매우 심각한 문제는 고속 비행에 따른 공력가열 문제이다. 이러한 동체와 엔진 벽면에서의 과도한 가열 문제를 해결하기 위해서는 고온 단열 소재뿐만 아니라 열을 흡수할 수 있는 능동 냉각 시스템이 필요하게 된다. 액체 탄화수소 연료는 지난 수십년간 공기흡입 추진기관용 항공유로 사용되어 왔는데, 이러한 액체 탄화수소 연료는 연료의 종류에 따라서 선택적인 열분해 및 촉매분해반응을 이용한 흡열반응으로 기존의 냉각방식보다 매우 우수한 냉각 특성을 가지는 것으로 알려져 있고[2,3], 따라서 능동 냉각시스템의 냉원으로서 사용이 가능하다[4,5]. 그러나 냉각시스템 출구에서의 연료는 사용된 연료의 종류, 전체적인 가열량 및 열흡수 용량 그리고 흡열분해 반응조건에 따라 다르기는 하지만[6], 불가피하게 매우 높은 온도로 가열될 경우 열분해 또는 촉매분해에 의하여 낮은 탄소수의 탄화수소 및 다양한 성분의 탄화수소로 분해된다[3]. 이와 같이 분해된 연료는 고압으로 초음속 연소기로 분사되며, 흡입구로부터 램 압축된 초음속 공기 유동과 혼합되어 연소된다.

그런데 고속 비행체가 마하 5 이상의 속도로 비행하면 엔진 내부의 유동도 초음속 상태를 유지하며 연료/공기 혼합기체의 연소실 체류시간은 수 밀리 초 정도로 매우 짧게 된다[7]. 또한 흡입구로부터 엔진 연소실에 이르는 동안 형성되는 충격파 열(shock-train)은 연소기 내부의 유동을 매우 복잡하게 만든다. 그러한 가혹한 조건에서는 점화 및 화염전파 속도가 빠른 수소가 연료로서 가장 적합하지만[1,7], 낮은 밀도와 극저온 연료 시스템을 필요로 하는 특성 때문에 실용적인 초음속 연소 엔진에 사용하기가 매우 까다롭다. 따라서 액체 탄화수소 연료를 능동냉각 시스템의 냉원으로 사용 후 낮은 탄소수의 탄화수소로 분해된 연료를 초음속 엔진 연소실에 분사하면 연소기 내에서의 짧은 체류시간과 복잡한 유동 조건에서도 연료는 원래의 고탄소수 탄화수소 액체연료에 비하여 효과적인 분사, 혼합, 점화 및 화염 유지가 가능하다. 이에 따라

최근에는 탄화수소 액체연료의 흡열분해 및 촉매분해에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다 [2,3,5].

따라서 본 연구에서는 초고속 비행체의 능동 냉각시스템에서 냉원으로 사용되면서 임계점(critical point) 이상으로 가열된 항공유가 저탄소수 탄화수소 연료로 흡열분해 또는 촉매분해된 후의 기본적인 연소 특성을 확인하기 위하여 흡열분해 모사연료(surrogate)에 대한 화염전파속도를 측정하였다. 이전 연구결과[8] 및 관련자료들로부터 확인된 흡열분해된 연료의 주성분들 중에서 많은 비율을 차지하는 주성분을 그룹별로 2~3가지로 분류하고 각그룹들의 대표성분을 획득이 용이하고 인체독성이 낮은 물질로 선정된 다음, 실험효과가 현저하도록 임의로 구성성분의 개수 및 혼합비율을 조절하고 혼합하여 이의 조합에 따른 2종의 액체형태의 흡열분해 모사연료를 제조하였다. 그리고 분젠버너를 제작하여 제조된 모사연료에 대한 층류화염 전파속도를 측정하고 그 결과를 원래의 탄화수소 연료에 대한 측정결과와 비교하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 분젠버너를 이용한 화염전파속도 측정 기법 및 분젠버너 제작 결과를, 3장에서는 흡열분해 모사연료 제조 결과를, 4장에서는 기존의 항공유와 제조된 연료에 대한 층류화염 전파속도 측정 결과를, 그리고 마지막으로 5장에서는 결론을 정리하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 분젠 버너를 이용한 화염전파속도 측정

층류화염속도(laminar burning velocity, S_u)는 연료의 가장 기본적인 연소 특성이며, 연료-공기 혼합물의 물리화학적 특성 상수로서 화염의 전파(propagation), 부상(lift-off), 소화(blowout) 등을 분석하는데 필수적이다. 층류화염속도는 1차원 화염 방정식의 특성치로서 1차원 화염면이 미연소 혼합물에 대하여 수직방향으로 전파되는 상대속도로 정의되는데, 공기-연료 혼합물의 온도 및 압력, 당량비, 연료의 조성 등에 따라 넓

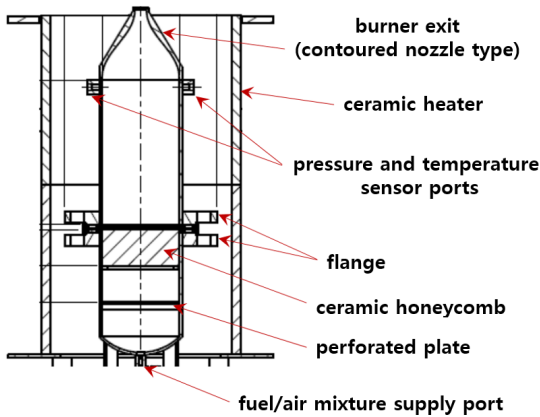


Fig. 2 Schematic of Bunsen burner.

체 연료와 혼합되면 연료가 기화하면서 필터와 스월러를 통과하면서 균일하게 1차로 혼합된다. 이렇게 가열 및 혼합된 연료-공기 기체는 Fig. 2의 버너 하단의 공급포트로 공급되고 이후에 타공판과 세라믹 하니콤 구조물을 지나면서 2차 혼합 및 유동의 균질화가 이루어지고 이러한 혼합기체가 버너 출구 전단의 곡선 노즐을 지나면서 유속이 축소되며 가속되어 버너 출구에서 균일한 유동이 형성된다. 그리고 Fig. 2 및 3에 의하면 버너 몸체를 에워싸는 원통 형태의 세라믹 히터가 표시되어 있는데 이는 시험 초기에 냉각되어 있는 버너 몸체를 빠른 시간 내에 시험조건으로 가열함으로써 연료-공기 혼합기체가 버너 몸체 구조물에 의해 냉각되는 현상을 방지하기 위해 버너 몸체 가열용으로 설치한 히터이다.

2.3 데이터 계측, 화염 이미지 획득 및 처리

분젠버너 시험장치의 주요 위치에는 공기 또는 공기-연료 혼합기체의 온도를 계측하기 위한 센서가 장착되어 있는데, 온도센서는 K-type 열전대(OMEGA K-type thermocouples, 0 ~ 1,250 °C)를 사용하였다. 한편 공기 공급라인에는 MFC를 설치하여 공급되는 공기유량을 정밀하게 제어하였다. 사용된 MFC는 LineTech사의 M3100A 모델로서 제어 및 계측 유량은 1 ~ 50 SLPM이다. 또한 저유량의 액체연료를 정확하게 공급하기 위해서 유량범위 0.0015 ~ 9 ml/min에서 사용 가능한 Micro annular gear pump(HNP

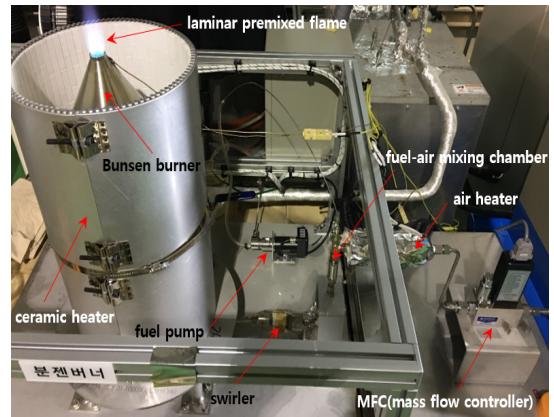


Fig. 3 Experimental apparatus of Bunsen burner.

Microsystem mzt-2505)를 사용하였다. 한편, 실험 과정에서 공급되는 연료량은 0.01g까지 계측이 가능한 소형 정밀저울을 이용하여 계측하였다. 연료를 비커에 담아 저울 위에 올려놓고 연료펌프를 가동하면 일정한 유량의 연료가 시험장치로 공급되며, 이때 시간에 따른 저울의 중량변화를 측정하면서 지속적으로 계측하면 일정 시간동안 소모된 총 연료량이 확인되므로 단위 시간당 유량을 측정할 수 있다.

분젠버너 시험장치를 이용하여 층류화염을 생성한 후 화염 계측용 카메라를 이용하여 화염 영상을 획득하였으며, 생성된 층류화염의 CH^* 자발광만을 계측하기 위해 4 Mega-pixel CCD 카메라(TSI, PowerView, 2048 X 2048 pixels) 앞에 430 nm 근처의 파장만을 투과시키는 대역필터(CVI, 430BP10)를 적용하였다. 카메라의 노출시간은 20 msec이고, 각각의 시험조건에 대하여 10 fps (frame per second)의 속도로 50장의 영상을 획득하였다. 층류화염 전파속도를 측정하기 위해서는 화염의 경계면을 보다 정확하게 추출하여야 하며, 이를 위해 각 시험조건에서 획득한 50장의 영상과 화염이 없는 상태에서 획득한 50장의 영상을 각각 평균하여 얻은 두 영상을 뺀 배경차감 평균 화염 영상을 이용하여 화염 경계면을 획득하는 영상 후처리 작업을 수행하였다. 화염의 경계면을 획득하기 위해 Otsu 알고리즘을 이용하는 Matlab 내부함수인 graythresh 함수를 사용하였다[14].

3. 흡열분해 모사연료의 제조

3.1 흡열분해 연료의 특성

흡열연료(endothermic fuel)는 일반적인 열흡수 형태인 물질자체의 온도상승 및 상변화에 필요한 물리적인 열(physical heating)의 흡수뿐만 아니라 화학적 변화에 필요한 열의 흡수(heat-absorbing chemical reaction)가 가능하므로 전체적으로 이를 이용하여 흡열분해반응을 발생시키는 반응기 주변으로부터 많은 열을 흡수할 수 있는 heat sink 작용을 할 수 있다[8]. 또한, 흡열연료는 흡열반응(endothermic reaction) 즉, 화학적 분해(cracking) 또는 개질(reforming) 반응 결과로 기체상 또는 액체상태의 분해 및 변형된 형태의 탄화수소형 물질들을 생성하는데, 이들은 수소, ethylene, propylene, butadiene, methane 등과 같은 기체성분 그리고 hexane과 같은 aliphatic hydrocarbons, hexadiene과 같은 alkene류, cyclohexane, methylcyclopentane, methylcyclohexane과 같은 cyclic hydrocarbons (naphthene), methylcyclohexene, cycloheptadiene과 같은 cyclic olefins, 그리고 benzene, toluene, naphthalene과 같은 방향족 화합물 등의 수소를 포함하는 탄화수소형화합물성분으로 구성된다[8]. 이들 분해반응물의 조성 및 함유량은 사용된 흡열연료의 종류와 흡열반응조건에 크게 영향을 받는다[8]. 액체연료의 흡열반응, 즉 액체연료의 분해/개질반응에 관계되는 화학적 반응을 크게 나누면, dehydrogenation, dehydrocyclization, dedimerization, isomerization, aromatization 그리고 cracking 반응 등으로 구별되며, 이들 반응은 촉매가 충전/흡착된 열교환 반응기(catalytic heat exchanger reactor) 내에서 일어난다. 반응기에서의 이들 반응의 속도는 연료의 종류, 전달되는 열의 양과 반응기를 통과하는 연료의 양 그리고 촉매반응특성과 같은 반응기 고유의 화학반응처리속도와 밀접한 관계가 있다[8].

3.2 흡열분해 모사연료

본 연구에서는 항공용 액체연료인 ADF S-1을

Table 1. Composition of SF-1 and 2.

Fuel	Composition	Percentage (by volume)
SF-1	n-hexane/methylcyclohexane	50%/50%
SF-2	n-hexane/methylcyclohexane/toluene	40%/30%/30%

기준연료(Reference Fuel, 이하 RF)로 하고 이 연료에 대한 다양한 조건에서의 흡열반응 연구 결과[8]로부터 흡열분해로 생성된 매우 많은 액체성분들을 aliphatic hydrocarbons, cyclic hydrocarbons, 그리고 aromatic hydrocarbons과 같이 크게 분류하고, 이들 중에서 다음조건을 만족하는 화합물들을 선정한 다음 본 실험에 사용할 모사연료를 제조하였다. 즉, 1) 시험장치 및 운용조건을 고려하여 상온에서 안정적인 액체상태이고, 2) 상업적으로 확보가 쉽게 가능한 물질이고, 3) 실험 및 취급상 인체에 비교적 무해하고 안전하며, 4) 제조비용이 저렴한 물질이어야 한다. 이와 같은 기준을 바탕으로 aliphatic hydrocarbons을 대표하여 n-hexane을, cyclic hydrocarbons을 대표하여 methylcyclohexane (MCH)을, 그리고 benzene, toluene과 같은 방향족 화합물(aromatic hydrocarbons)을 대표하여 toluene을 선정하여 Table 1과 같이 2종의 모사연료를 제조하였다.

4. 실험 및 분석 결과

4.1 화염전파속도 획득 과정

2장에서 상세히 설명한 바와 같이 분젠버너 화염을 촬영하면 Fig. 4(a)와 같이 화염의 CH* chemiluminescence 이미지가 획득된다. 이 때 화염의 형상은 특정 실험조건에서의 순간(instantaneous) 화염 형상이다. 특정 조건에서 대표되는 화염 형상을 추출하기 위하여 이러한 순간 이미지를 50장을 획득한 후 평균(averaged)

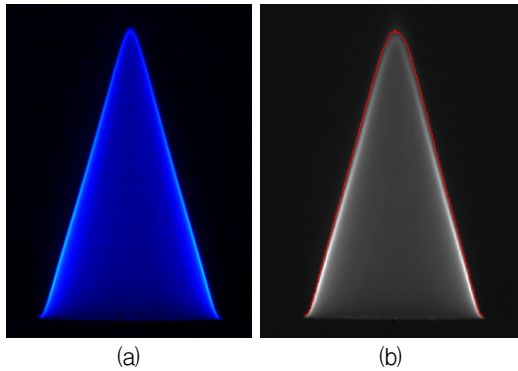


Fig. 4 (a) CH* chemiluminescence image, and (b) extracted flame front by edge detection.

처리하고 평균 이미지에 대하여 edge detection 기법으로 화염면을 추출하면 다음 Fig. 4(b)와 같다. 이와 같이 추출된 화염면은 좌표로 변환되어 표현되는데 좌우의 이미지가 약간 다르기 때문에 대표적인 화염면을 추출하기 위해 다항함수로 근사(fitting)하면 6차 다항식의 형태로 화염면이 정의된다. 이렇게 획득된 6차 다항식을 y축을 기준으로 회전체 적분을 수행하면 화염의 면적이 계산되고 이렇게 계산된 화염 면적과 버너로 공급되는 연료-공기 혼합기체의 체적유량으로 식 (1)에 의해 층류화염 전파속도가 최종 계산된다.

4.2 시험장치 검증

본 절에서는 시험장치 검증을 위하여 Jet A-1 연료에 대하여 화염전파속도를 측정하고 이를 이전에 보고된 실험[15] 및 계산결과[16]와 비교하였다. 혼합물 온도 470 K 조건에서 화염의 CH* 이미지를 획득한 결과는 Table 2와 같다. 그리고 Fig. 5에는 층류화염 전파속도 측정결과를 도시하였는데, 당량비 0.8 ~ 1.2 범위에서 본 연구에서 제작한 분젠버너 측정결과가 이전의 실험결과와 매우 유사함을 알 수 있으며, 특히 Chong and Hochgreb[15]의 실험결과와 본 연구의 측정결과를 정량적으로 비교한 결과 상대오차가 1.9 ~ 4.4% 범위 이내로 확인되었다. 이로부터 분젠버너 시험장치는 비교적 정확한 층류화염 전파속도 측정 능력을 보유하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. CH* chemiluminescence images of Jet A-1 at $T = 470$ K.

$T_{in} = 470$ K $V_{in} = 2.74$ m/s $\Phi = 0.95$	$T_{in} = 470$ K $V_{in} = 2.46$ m/s $\Phi = 1.05$	$T_{in} = 470$ K $V_{in} = 2.19$ m/s $\Phi = 1.17$

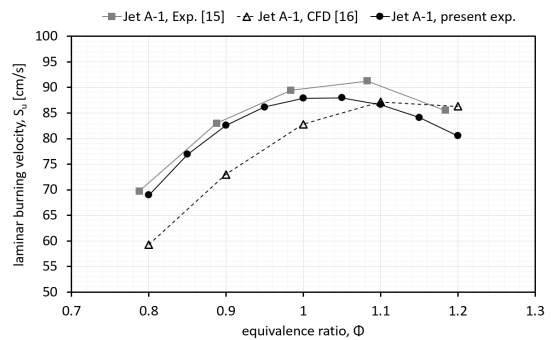


Fig. 5 Laminar burning velocity of Jet A-1 at $T_{in} = 470$ K.

4.3 화염전파속도 측정 결과

흡열분해 모사연료에 대한 층류화염 전파속도 측정은 550 K 조건에서 수행하였다. 이 온도는 기준 연료인 RF의 비등점이 460 K(187°C)임을 고려하여 액체 상태의 연료가 가열된 공기와 만나 빠른 시간 내에 증발이 끝나도록 하게 위해서 비등점보다 충분히 높은 조건으로 설정한 결과이다. Fig. 6에는 RF와 Jet A-1 연료에 대하여 470 K와 550 K에서 측정된 화염전파속도를 비교한 결과인데, 우선 두 연료가 모두 유사한 화염전파속도 특성을 보이고 있으며, 온도가 약 80 K 상승함에 따라 최대 화염전파속도는 약 87 cm/s에서 116 cm/s로 약 30 cm/s 상승하였다. 그러나 당량비가 0.7일 때에 470 K 조건에서는 RF가 화염속도가 약간 빠르는데 반해 550 K 조건

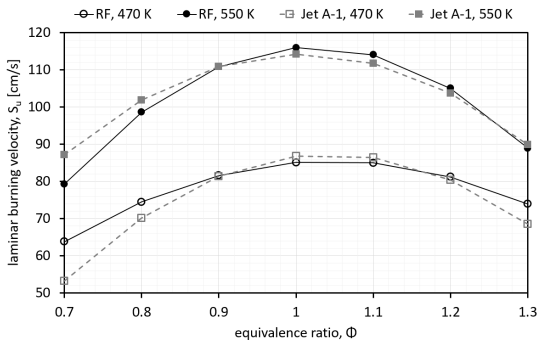


Fig. 6 Laminar burning velocity of RF and Jet A-1.

이 되면 Jet A-1의 화염속도가 약간 빠름을 알 수 있다.

Table 3 및 4에는 2종의 흡열분해 모사연료 각각에 대한 다양한 속도 및 당량비 조건에서의 CH* chemiluminescence 이미지 획득 결과를 보여주며, 이러한 이미지들로부터 추출한 화염전파속도 측정결과를 Fig. 7에 도시하였다. 기준연료인 RF와 비교해 보면 세 연료 모두 최대 화염전파속도는 110 ~ 120 cm/s로 유사하다. 그러나 화염전파속도가 최대가 되는 당량비는 흡열분해 모사연료가 RF보다 높음을 알 수 있다.

Chong and Hochgreb[15]에 의하면, 화염전파속도가 최대가 되는 당량비는 연료의 단열화염온도(adiabatic flame temperature)가 최대가 되는 당량비와 관계되며, 연료의 조성이 변하여 단열화염온도가 최대가 되는 당량비가 증가하면 그에 따라 화염전파속도는 낮은 당량비에서는 감소하고 높은 당량비에서는 증가하는 경향이 있음을 보고하였다. 그들은 또한 연료의 구성 성분의 비율 변화에 따라 연료의 반응성이 변화하

Table 3. CH* chemiluminescence images of SF-1 at $T_{in} = 550$ K.

V_{in} [m/s]	3.49	3.19	2.95	2.72	2.71
Φ	0.98	1.06	1.15	1.25	0.99
CH* image					

Table 4. CH* chemiluminescence images of SF-2 at $T_{in} = 550$ K.

V_{in} [m/s]	3.49	3.19	2.95	2.72	2.71
Φ	0.98	1.06	1.15	1.25	0.99
CH* image					

지만 이러한 변화의 크기는 성분 비율에 단순히 비례하지는 않음을 보이고, 그 원인에 대한 분석은 보다 체계적인 추가 연구가 필요하다고 결론지었다.

본 연구에 사용된 RF의 경우에는 주 성분이 이중고리형 포화탄화수소 화합물이어서 연소를 위한 이중고리의 분해 및 연소과정이 SF-1 및 2를 구성하는 n-hexane, MCH, 그리고 toluene과는 매우 다른 특성이 있다. 또한 SF-1과 2 사이에도 n-hexane과 MCH의 혼합 비율이 다를 뿐만 아니라 toluene의 유무라는 큰 차이가 있다. 따라서 SF가 RF에 비하여 전체적으로 높은 당량비에서 화염전파속도가 빠르게 나타나고 있으며, 특히 SF-1이 SF-2 및 RF보다 훨씬 높은 당량비에서 최대 속도를 가지는 특성은 보다 면밀한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

결론적으로 본 연구를 통해 측정된 흡열분해 모사연료의 화염전파속도 특성은 흡열분해 연료가 엔진에 공급되어 연소되는 경우 국소 당량비

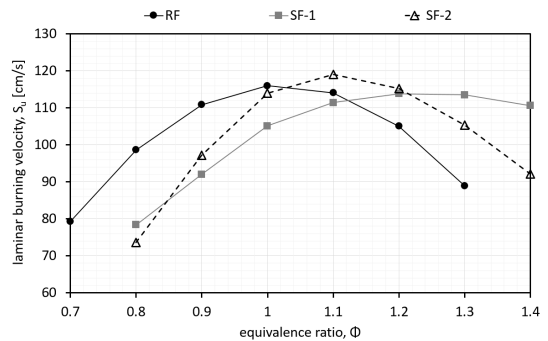


Fig. 7 Laminar burning velocity of SF-1 and 2 at $T_{in} = 550$ K.

가 보다 높은 영역에서 화염이 존재할 것임을 예측할 수 있는 근거로서 향후 초음속 연소기 설계 시 이러한 흡열분해 연료의 특성을 고려해야 함을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 초고속 비행체의 능동 냉각시스템에서 냉원으로 사용되면서 임계점 이상으로 가열된 항공유가 저탄소수 탄화수소 연료로 흡열분해 또는 촉매분해된 후 초음속 연소기에서 화염을 형성하는 특성을 간접적으로 확인하기 위하여 흡열분해 모사연료에 대한 화염전파속도를 측정하였다. 이전 연구결과들로부터 파악된 흡열분해된 연료의 주 성분들 중에서 일반적으로 구하기 쉽고 많은 비율을 차지하는 성분을 2~3가지로 선정하여 이들의 조합에 따른 흡열분해 모사연료 2종(SF-1, 2)을 제조하였다. 그리고 분젠버너 시험장치를 제작하여 제조된 모사연료에 대한 층류화염 전파속도를 측정하고 그 결과를 원래의 탄화수소 연료에 대한 측정결과와 비교하였다.

연구 결과 기준연료인 RF와 비교해 보면 전체적으로 높은 당량비에서 화염전파속도가 빠르게 나타나고 있으며, 특히 SF-1이 SF-2 및 RF보다 훨씬 높은 당량비에서 최대 속도를 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 연구 결과는 액체연료가 흡열분해되어 초음속 엔진으로 공급되고 연소되는 경우 그 조성에 따라 국소 당량비가 보다 높은 영역에서 화염이 존재할 것임을 예측할 수 있는 근거로서, 향후 초음속 연소기 설계 시 이러한 흡열분해 연료의 최종 조성과 그에 따른 연소 특성을 고려해야 함을 확인하였다.

References

1. Van Wie, D.M., D'Alessio, S.M. and White M.E., "Hypersonic Air-breathing Propulsion," *Johns Hopkins APL Technology Digest*, Vol. 26, No. 4, pp. 430-437, 2005.
2. Edwards, T., "USAF Supercritical hydrocarbon fuels interest," *31st AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 93-0807, January 1993.
3. Cooper, M. and Shepherd, J.E., "Thermal and Catalytic Cracking of Fuel for Pulse Detonation Engine Applications," GALCIT Report FM 2002.002, 2002.
4. Sobel, D.R. and Spadaccini, L.J., "Hydrocarbon fuel cooling technologies for advanced propulsion," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 119, No. 2, pp. 344-351, 1997.
5. Rao, P.N. and Kunzru, D., "Thermal cracking of JP-10: Kinetics and product distribution," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 76, No. 1-2, pp. 154-160, 2006.
6. Gasner, J.A., Foster, R.C. and Fujimura C., "Evaluation of thermal management for a Mach 5.5 hypersonic vehicle," *28th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Nashville, T.N., U.S.A., AIAA 92-3721, July 1992.
7. Pace, D., "Scramjet fuel choices: Hydrogen versus hydrocarbons," *Journal of University of New South Wales at ADFA*, Vol. 1, pp. 1-12, 2007.
8. Kim, J., Hyeon, D.H., Park, S.H., Chun, B.H., Jeong, B.H., Han, J.S. and Kim, S.H., "Catalytic endothermic reactions of exo-tetrahydrodicyclopentadiene with zeolites and improvement of heat of reactions," *Catalysis Today*, Vol. 232, pp. 63-68, 2014.
9. Andrews, G.E. and Bradley, D., "Determination of Burning Velocities : A Critical Review," *Combustion and Flame*, Vol. 18, No. 1, pp. 133-153, 1972.
10. Bouvet, N., Chauveau, C., Gokalp, I., Lee, S.Y. and Santoro, R.J., "Characterization of syngas laminar flames using the Bunsen

- burner configuration," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 1, pp. 992-1005, 2011.
11. Mazas, A.N., Fiorina, B., Lacoste, D.A. and Schuller, T., "Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames," *Combustion and Flame*, Vol. 158, pp. 2428-2440, 2011.
 12. Egolfopoulos, F.N., Hansen, N., Ju, Y., Kohse-Hoinghaus, K., Law, C.K. and Qu, F., "Advanced and challenges in laminar flame experiments and implications for combustion chemistry," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 43, pp. 36-67, 2014.
 13. Albayrak, K., "Design of a low-speed axisymmetric wind tunnel contraction," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 37, No. 1, pp. 79-86, 1991.
 14. Emberson, D.R., Ihracska, B., Imran, S. and Diez, A., "Optical characterization of Diesel and water emulsion fuel injection sprays using shadowgraphy," *Fuel*, Vol. 172, pp. 253-262, 2016.
 15. Chong, C.T. and Hochgreb, S., "Measurements of laminar flame speeds of liquid fuels," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, pp. 979-986, 2011.
 16. Kumar, K., Sung, C. and Hui X., "Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative Jet fuels," 47th *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Orlando, F.L., U.S.A., AIAA 2009-991, January 2009.