한국추진공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집 pp.377~380 2005 KSPE Spring Conference

스크램제트 연료로써 JP-7 의 점화 특성

최정열* · Puneesh Puri** · Fuhua Ma** · Vigor Yang**

Ignition Characteristics of JP-7 as a Scramjet Fuel

Jeong-Yeol Choi* · Puneesh Puri** · Fuhua Ma** · Vigor Yang**

ABSTRACT

A study of ignition characteristics of cracked JP-7 fuel with both oxygen and air has been conducted over a wide range of pressures (1-20 atm), temperatures (1200-2000 K), and equivalence ratios (0.5-1.5). Correlations of ignition delay, of the form, $\tau = Aexp(E/RT)[F]^a[O_2]^b$ are established using the Chemkin-II package and least square analysis. The effect of C_3 hydrocarbons in cracked JP-7 fuel is examined by comparing the ignition delays for two different cracked compositions. A comparison for ignition delay is also made with the experimental results obtained by injecting liquid JP-7 fuel in air using a shock tube apparatus.

초 록

산소 및 공기와 반응시 크랙된 JP-7 연료의 점화 특성에 관한 연구를 넓은 범위의 압력(1-20atm)과 온도(1200-2000K), 당량비(0.5-1.5)에 대해서 수행하였다. Chemkin-II Package와 최소 자승법을 이용하여 $\tau = Aexp(E/RT)[F]^a[O_2]^b$형태로 점화 지연시간을 계산하고 각 변수 사이의 상호관계를 검증하였다. 크랙된 JP-7 연료에서 C_3 탄화수소 계열 성분의 영향을 두 가지 다른 크랙된 JP-7연료의 조성에 대하여 점화지연 시간을 비교하였으며, 액체 JP-7 연료의 점화 지연 시간과도 비교하여 보았다.

Key Words: Endothermic fuel, JP-7 fuel, Ignition, Chemical kinetics, Chemkin

1. 서 론

20세기 후반기 동안, 고속 비행을 위한 다양하고 특별한 목적의 항공기 연료가 개발되었다. 1960년대까지 민간용 및 군사용 제트기의 연료로 이용된 액체 탄화수소의 운용상의 온도는 고온에서 화학적으로 분해되는 연료의 특성 때문에 453K로 제한되었다. 그러나, 이런 제한조건은 JP-7 연료가 개발됨으로써 극복되었다. 이 연료는 매우 잘 정제된 등유로 황 및 방향족 성분을 작게 가지며, 12그램의 평균 분자량을 가진 알킨족으로 구성되어있다. 열적 안정성이나 열 흡수 용량, 에너지 밀도에 있어서 일반적인 등유보다 우수

* 부산대학교 항공우주공학과
** Dept. Mechanical Engineering, PennState
연락저자, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

하지만, 값이 비싼 단점이 있다[1].

최근 JP-7, JP-8, JP-10을 포함한 여러 가지 JP 계열 연료의 점화특성에 관한 중요한 연구가 수행되었다. JP-10 연료는 매우 높은 에너지 밀도를 가지고 있고, 미사일 추진기관 연료로 광범위하게 이용되고 있다. 이 연료에 대한 실험으로 Colket과 Spadacinni는 Shock Tube 실험을 통하여 스크램젯 추진기관에 대한 점화 지연 시간을 측정하였으며, Davidson등은 JP-10/산소/아르곤 혼합물의 점화지연시간에 대한 연구를 수행하였다. JP-8연료에 대한 연구로는 Schulz등이 대체 혼합물을 사용하여 JP-8의 산화에 대하여 연구하였고, Violi 등은 6가지의 순수한 탄화수소 대체물을 이용하여 JP-8에 대한 semi- detailed kinetics 모델을 개발하여 이 연료의 점화 특성을 연구하였다. 반면, 다른 JP 계열 연료와 비교할 때, JP-7의 점화 특성에 관한 연구는 여전히 초기 단계에 있다. 따라서, 이번 연구는 크랙된 JP-7/산소, 공기 혼합물의 점화 특성 이해와 점화지연 시간에 영향을 미치는 각 성분사이의 상호관계 파악, 더 나아가 연소파 점화 시스템 및 흡열 연료 엔진의 설계 및 개발에 필요한 크랙된 생성 혼합물의 자발 점화 특성에 대한 기초적인 정보를 제공할 수 있을 것이다[2].

2. 방 법 론

연구에 적용된 크랙된 JP-7 연료로 C_3 탄화수소 계열 성분을 포함한 경우와 그렇지 않은 두 가지 경우의 JP-7연료를 고려하였다. 본 연구에서 세 종류의 화학 반응 메커니즘을 이용하였다. 기본적으로는 53개의 화학종과 325개의 반응으로 이루어진 GRI-Mech-3.0을 이용하였으며[3], 여기에, C_3H_6와 C_3H_8의 C_3화학종의 상세한 반응을 포함한 Williams의 반응기구를[4] 고려한 방법과, Marinov가 농후한 연료의 PAH 형성을 모델링한 방법[5]을 추가하여 비교 연구하였다. 따라서, Chemkin II Package와 위에서 언급한 반응 기구들을 이용하여 1,200 ~ 2,000K의 온도, 1~20atm의 압력, 0.5~1.5의 당량비에 대한 공기 및 산소와 반응하는 크랙된 JP-7연료의 점화 특성을 연구하였다. 구체적으로 위의 메커니즘상의 선형화된 미분방정식을 LSODE를 이용하여 계산하였으며, 얻어진 각 성분의 점화지연시간을 최소자승법을 최적화하였다. 대부분의 조건에서 Table 1의 USAF와 NASA로 주어진 두 가지 크랙된 JP-7연료에 있어 점화 지연 시간에 관한 차이가 거의 없음을 확인할 수 있었기 때문에, 구성 성분이 간단한 NASA 조성을 JP-7연료의 기본 선분으로 선택하여 이용하였다. Fig. 1은 여러 가지 초기 온도 및 1기압 조건에서 이론 혼합비에서 크랙된 JP-7/산소 혼합물의 시간에 대한 온도 변화를 보여준다. 점화 지연은 큰 활성화 에너지를 가진 흡열 반응의 결과로 Fig. 1에서 갑작스런 온도 증가로 나타나며, 점화 과정은 시작, 이동, 분기, 종결로 이루어진 자유 활성기 연쇄 반응에 의해 이루어진다. 온도 도표에서 볼 수 있듯이 초기 수평 부분은 다양한 연쇄 시작 반응과 관련된 유도 시간을 나타낸다.

Table 1. Molar composition of cracked JP-7 fuel

Compound	USAF	NASA
Hydrogen (H_2)	-	0.0523
Methane (CH_4)	0.281	0.5029
Ethane (C_2H_6)	0.215	0.2053
Ethene (C_2H_4)	0.159	0.2395
Propane (C_3H_8)	0.135	-
Propene (C_3H_6)	0.210	-

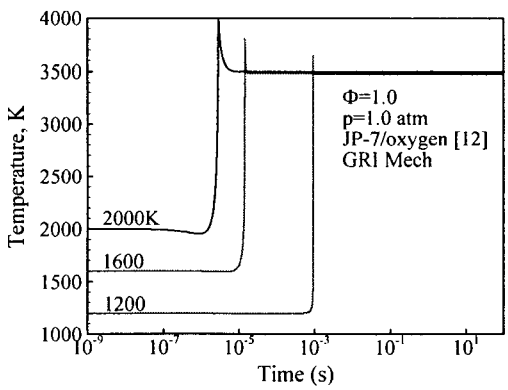

Fig. 1 Temperature evolution of stoichiometric cracked JP-7/oxygen mixture at p=1atm with various initial temperatures.

Figure 2는 1200K의 온도, 1기압, 이론반응(stoichiometric)조건 하의 크랙된 JP-7/산소 혼합물에 대한 각 성분의 시간에 대한 질량 분율 변화를 보여준다. 종결(terminating)과정에서 H, O, HO_2, OH와 같은 활성기(radical)을 수반한 반응 및 H_2O 및 CO_2의 형성은 Fig. 2에서 나타나는 열 방출과 온도의 급격한 증가의 주요 원인이다.

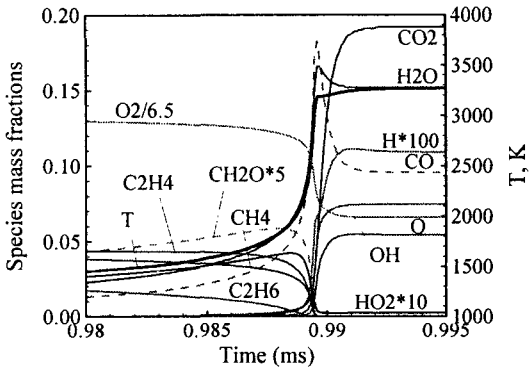

Fig. 2 Temporal evolution of species mass fractions for stoichiometric cracked JP-7/oxygen mixture at p=1atm with initial temperature of 1200K

점화지연시간 τ는 주어진 온도와 압력에서 반응의 부분적 완결 시간을 나타낸다. 예혼합 연료와 산소에 대해 점화지연시간은 아래와 같이 수학적으로 표현되어 진다.

$$\tau = Aexp(E/R_u T)[F]^a[O_2]^b$$

여기서, τ 는 점화 지연시간 [s], E 는 활성화 에너지 [kcal/kmol], T 는 초기온도[K], R_u는 일반 기체 상수 [kcal/kmolK], $[F]$와 $[O_2]$는 연료와 산소 농도 [mol/m^3], A는 선 지수함수 인자이다.

3. 결 과

GRI-Mech 화학반응 속도론을 사용하여 크랙된 JP-7/산소 혼합물에 대하여 얻어진 데이터를 최소자승법으로 얻은 점화지연 시간은 아래와 같으며,

$$\tau = 8.32\times10^{-10}\exp(39{,}166/R_u T) \times [F]^{-0.3455}[O_2]^{-0.3573} \quad (1)$$

크랙된 JP-7/공기 혼합물의 점화지연 시간은 다음과 같다.

$$\tau = 4.21\times10^{-9}\exp(36{,}396/R_u T) \times [F]^{-0.1788}[Air]^{-0.4978} \quad (2)$$

위 두 식에서 보듯이 점화지연시간은 연료와 공기 및 산소의 농도의 역수에 비례하는 것을 알 수 있고, JP-7연료와 공기와 반응시 공기의 농도가 점화 지연시간에 더 강하게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

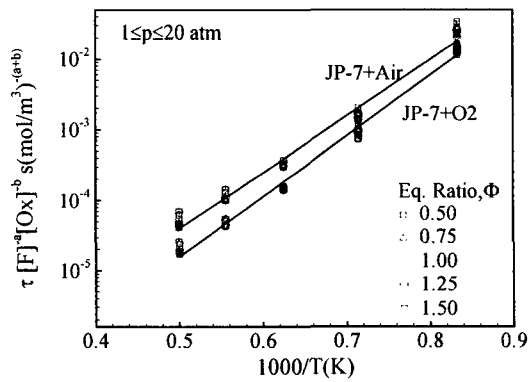

Fig. 3 Ignition delays of cracked JP-7 with oxygen and air

Figure 3은 크랙된 JP-7/산소 혼합물 및 크랙된 JP-7/공기 혼합물의 점화지연시간을 보여준다. 공기에 대한 JP-7의 점화지연 시간이 같은 초기 조건의 산소에 대한 점화지연 시간 보다 크다는 것을 알 수 있으며, 압력과 온도가 증가

할수록 둘 사이의 점화지연 시간 차이가 커진다는 것을 알 수 있다.

다음은 크랙된 JP-7연료와 액체 JP-7 연료간의 점화지연 시간 차이를 비교한 경우로 Fig. 4에 나타나 있다. 여기에서 사용한 액체 JP-7연료 성분은 NASA 조성을 이용하였으며, 각 성분의 점화 상호 관계는 방정식(2)에 의하여 주어진 식을 이용하였다. Fig. 4에서 보듯이 액체 연료에 대한 점화 지연 시간은 액체 연료의 기화 및 혼합에 필요한 시간 때문에 2차수 정도 더 커지며, 이것이 크랙되지 않은 순수한 연료에 비하여 크랙된 연료가 더 짧은 점화지연 시간을 갖게 되는 원인이 되는 것이다. 또한, d^2법칙에 근거한 간단한 해석을 통하여 액체 JP-7연료 액적의 기화시간이 1 ms 정도의 크기를 갖는 것을 Fig. 4에서 알 수 있다.

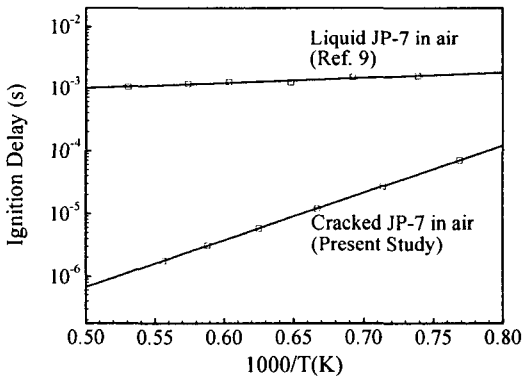

Fig. 4 Comparison of ignition delay between cracked and liquid JP-7 fuel in air

4. 결 론

넓은 압력 (1~20atm), 온도 (1,200~2,000K) 및 당량비 (0.5~1.5) 범위에 대해 크랙된 JP-7 연료와 산소/공기와의 점화과정을 상세 반응기구를 이용하여 살펴봄으로써, 점화 지연시간을 온도 및 농도의 함수로 최적화된 형태를 도출할 수 있었으며, 산소보다 공기와 반응시 점화지연시간이 더 커진다는 기본적 사실을 확임함과 더불어 연료 성분 중 C_3 탄화수소 성분은 점화지연시간에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 또한, 크랙된 JP-7 연료와 액체 JP-7 연료 사이의 점화지연 시간을 비교하여 액체 연료에 대한 점화지연 시간이 액체 연료의 기화 및 혼합시 필요한 시간 때문에 2차수 정도 커진다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 Mr. B. Bullard를 프로그램 관리자로 하는 NASA Marshall 우주 비행 센터의 Grant NAG8-187 으로 지원 되었다. JP-7 연료에 관한 기술적인 정보를 제공하여 주신 T. Edwards 박사님께 깊이 감사드린다.

참 고 문 헌

1. T. Edwards, J. Prop. Power, Vol. 19, No. 6, 2003, pp.1089-1107.
2. J.Y. Choi and V. Yang, AIAA Paper 2003-5207, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 2002.
3. G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer,M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner Jr., V.V. Lissianski and Z. Qin,www.me.berkeley.edu/gri_mech/
4. F.A. Willaims, http://maemail.ucsd.edu/combustion/
5. N.M. Marinov, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, A.M. Vincitore, M.J. Castaldi and S. M.Senkan, Combust. Flame, Vol.114, 1998, pp.192-213.