

디메틸에테르-공기 예혼합화염의 화염전파와 화염안정성에 있어서 합성가스의 첨가효과에 관한 실험적 연구

송원식* · 박 정*† · 권오봉* · 윤진한** · 길상인** · 김태형*** · 김영주***

Experimental Study on Role of Syngas Addition on Flame Propagation and Stability in DME-Air Premixed Flames

Wonsik Song*, Jeong Park*†

ABSTRACT

The present experiment was conducted to measure the unstretched laminar burning velocity and cellular instability of DME-air and syngas (in steps of 25 %) added DME-air premixed flames using propagating spherical flame. The experimental results were discussed in two focuses which are effects of syngas fraction and initial pressure on Markstein length, unstretched laminar burning velocities, and cellular instability. The flame instability was evaluated by the Markstein length and cellularity which is caused by diffusional-thermal instability and hydrodynamic instability.

Key Words : Dimethyl Ether, Markstein length, Laminar burning velocity, Cellular instability

이산화탄소와 질소산화물 등의 연소생성물에 대한 환경규제와 대체에너지로써의 사용가능성 측면에서 연소장치에 어떤 연료를 사용할 것인지 결정하는 것은 주의 깊게 고려해야 할 문제이다. 디메틸에테르(CH₃OCH₃, DME)는 에테르결합으로 이루어져있어 매연생성확률이 낮고 SO_x가 배출되지 않을 뿐만 아니라 CO₂와 NO_x의 발생량이 적다. 또한 세탄가가 높아 디젤엔진 등에서의 대체연료로 손꼽히는 연료라는 점에서 많은 연구가 이루어지고 있다.[1-6]

DME를 생성하는 공정에는 전통적인 방법 Two-step process와 최근 고려되고 있는 Single step process가 있다. Two-step process는 Chemical reaction (1), (2)와 같이 합성가스로 메탄올을 생성한 뒤 메탄올을 탈수하는 방법이고 Single step process는 Chemical reaction (3)과 같이 합성가스에서 직접 디메틸에테르로 합성하는 방법이다.[5, 6]

본 연구는 내연기관에서 좀 더 높은 효율을 위한 목적과 미래 수소경제사회에 대비한다는 차원에서 DME+syngas 혼합물의 사용가능성을 화염전파속도와 화염안정성의 방향으로 평가하는 것을

Table 1 Chemical reaction of syngas to DME

Chemical reaction
(1) $CO + 2H_2 \leftrightarrow CH_3OH$
(2) $2CH_3OH \leftrightarrow CH_3OCH_3 + H_2O$
(3) $3H_2 + 3CO \leftrightarrow CH_3OCH_3 + CO_2$

목적으로 한다. 실험은 화염전파속도와 셀 불안정성을 측정하는데 가장 최적화 되어있는 구형화염전파법을 사용하였다.[7] 실험방법으로는 진공으로 만든 정적연소 실린더에 초기압력에 상응하는 부분압력으로 각각의 가스를 공급한 뒤 연소기의 중앙부분에서 전극 봉으로 점화를 시킨다.

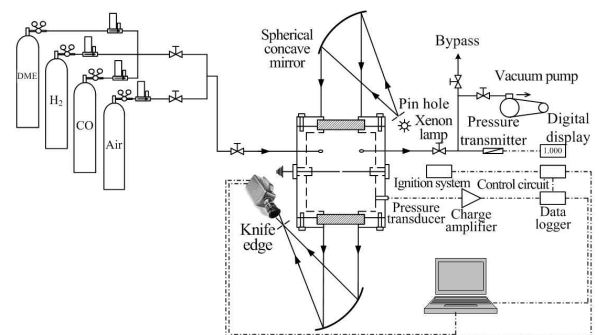


Fig. 1 Schematic representation of the experimental setup.

* 부경대학교 기계공학과
 ** 한국기계연구원 그린환경에너지기계본부
 *** 한국전력연구원 소수화력팀
 † 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr
 TEL : (051)629-6140 FAX : (051)-629-6126

점화 후 화염은 전파하게 되는데 이를 쉘리렌스 시스템을 이용하여 가시화 하였고 초당 10,000장으로 촬영 가능한 고속카메라를 이용하여 이미지를 기록하였다. 획득한 이미지는 매트랩 소프트웨어를 이용하여 영상처리로 화염이 전파할 때의 단위시간당 픽셀 값을 획득하였다. 구형화염은 화염이 전파함에 따라 화염면적이 커져 스트레치가 변하게 된다. 따라서 스트레치에 따른 화염의 순간속도가 달라지기 때문에 화염전파속도는 스트레치를 받지 않은 상태에서의 값이 기준이 되며 이는 (1)과 같이 연소기 내의 질량보존관계를 이용하여 계산하였다.[3, 4, 11]

$$S_u^0 = S_1 \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right) \quad (1)$$

실험으로 측정된 화염전파속도는 이론값과 비교하기 위해 PREMIX 코드[8]를 이용하였고 GRI-Mech 3.0[9]과 Zhao model[10]을 반응메커니즘으로 사용하였다. Fig. 2는 실험을 수행하기에 앞서 실험적 기법이나 데이터처리방법의 타당성을 검증하기 위해 메탄 예혼합화염의 화염전파속도 결과를 나타낸 그림이다. 메탄실험결과는 GRI-Mech 3.0의 수치해석결과와 다른 연구그룹에서 선행한 결과와 잘 일치하였다. 이러한 방법으로 순수 DME-공기 예혼합화염에 대한 화염전파속도를 측정하여 다른 연구결과와 비교한 그림을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 같은 연료와 같은 실험방법을 사용하였음에도 불구하고 결과는 상이하게 나왔는데 본 연구결과는 2005년에 발행된 Qin and Ju[1] 연구그룹과 가장 일치하였다. 본 연구는 DME+Air 혼합물에 25%씩의 합성가스(50% H_2 + 50% CO)를 첨가하였을 경우, 그리고 초기압력이 증가하였을 경우 Markstein length,

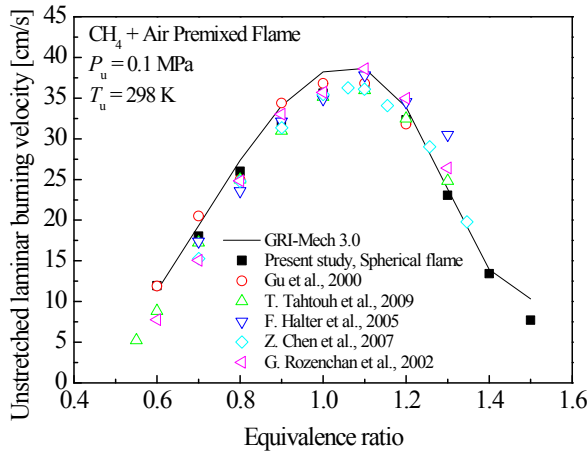


Fig. 2 Unstretched laminar burning velocity of CH_4 -Air premixed flame at $P_u = 0.1$ MPa and $T_u = 298 \pm 3$ K.

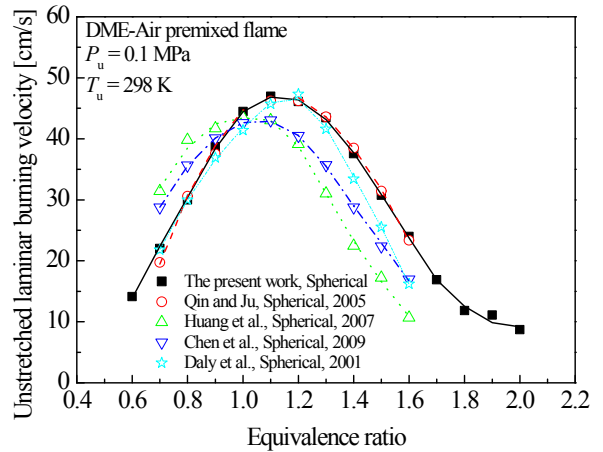


Fig. 3 Unstretched laminar burning velocity of DME-Air premixed flame at $P_u = 0.1$ MPa and $T_u = 298 \pm 3$ K.

화염전파속도, 그리고 셀 불안정성에 미치는 영향에 대해서 논의하도록 한다. DME+Air에 합성가스를 첨가할수록 화염은 불안정함을 보였는데 이는 Markstein length와 셀 불안정성으로부터 확인할 수 있다. Markstein length는 선형으로 표현되는 화염스트레치율에 대한 화염속도의 관계에서 음의 기울기 값으로 정의되고 반응물의 선택확산의 영향을 나타내는 지표가 된다.[3, 4, 11]

$$S_1 - S_n = -L_b \alpha \quad (2)$$

셀 불안정성은 열 팽창율($\sigma = \rho_u/\rho_b$)과 화염두께 ($l_f = (\lambda/c_p)/(\rho_u S_u^0)$)의 조합으로 나타나는 수력학적 불안정성과 루이스 수로 대표되는 물질-열확산 불안정성으로부터 평가할 수 있다. 혼합물 내에 여러 연료가 섞여있을 경우에는 연료루이스 수가 아닌 유효 루이스 수(Effective Lewis number)를 사용하였다.[11]

$$Le_{eff} = 1 + \frac{(Le_E - 1) + (Le_D - 1)A_1}{1 + A_1} \quad (3)$$

여기서 Le_E 와 Le_D 는 각각 초과 루이스 수(Excessive Lewis number)와 희박 루이스 수(Deficient Lewis number)를 의미한다. ($\phi > 1$ 의 경우 $Le_E = Le_F$, $Le_D = Le_O$)

실험결과로는 합성가스의 첨가량이 많을수록 합성가스 내 수소의 선택확산(Preferential diffusion)영향으로 Markstein length의 경향이 복잡함을 보였고 0 또는 음수 값을 갖는 구간이 늘어났다. 화염전파속도의 경우 합성가스를 첨가함에 따라 기하급수적으로 증가하였고 화염전파속도의 최대

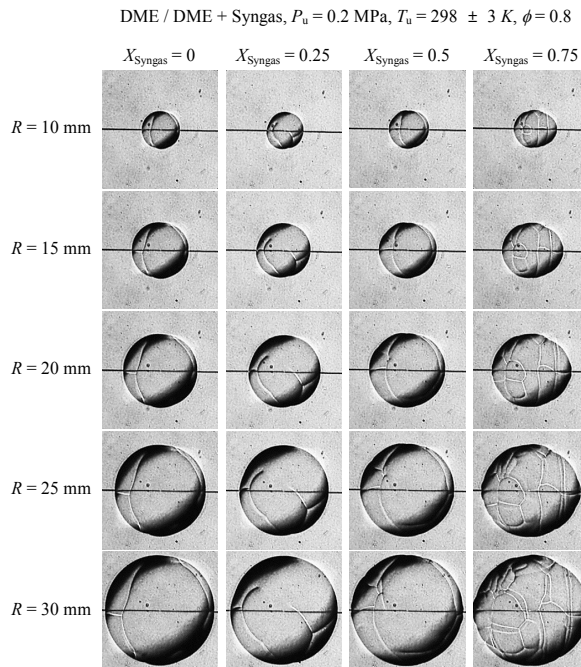


Fig. 4 Syngas effects on cellular instability of DME-Air premixed flame at $P_u = 0.2 \text{ MPa}$, $T_u = 298 \pm 3 \text{ K}$, and $\phi = 0.8$

값 또한 당량비가 높은 방향으로 이동하였다. 합성가스가 첨가함에 따라 유효루이스수가 감소하여 Fig. 4와 같이 셀 불안정성은 증가하는 경향을 보였다. 그러나 계산된 모든 루이스수가 1보다 컸기 때문에 화염 면에 셀은 거의 발생되지 않았다. 수력학적 불안정성의 경우 열팽창율과 화염두께가 동시에 줄어들어 서로 상반된 조합으로 그 둘의 영향이 상쇄된 것으로 보였다. 초기압력이 높아질수록 Markstein length는 당량비에 따라 감소하는 경향을 보였고 초기압력이 높을수록 음수의 값을 가지는 시점이 앞당겨졌다. 초기압력이 높을수록 연소기 내에 혼합물의 밀도가 높아져 100% DME, 75% DME + 25% Syngas, 50% DME + 50% Syngas, 25% DME + 75% Syngas의 화염전파속도는 모두 감소하였다. 고압조건에서 셀 불안정성을 평가했을 때 물질-열 확산 불안정성은 압력에 의존도가 미미한 반면 수력학적 불안정성은 강화되었다. 특히 초기압력이 증가할수록 화염두께가 현저히 얇아져 셀 불안정성은 두드러지게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 에너지기술개발사업의 일환(CD20120655)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] X. Qin, Y. Ju, "Measurement of burning velocities of dimethyl ether and air premixed flames at elevated pressures", Proc Combust Inst, Vol. 30, 2005, pp. 233-240.
- [2] C. A. Daly, J. M. Simmie, J. Wurmel, "Burning Velocities of Dimethyl Ether and Air", Combust. Flame, Vol. 125, 2001, pp. 1329-1340.
- [3] Z. Chen et al., "Measurement of Laminar Burning Velocities of Dimethyl Ether-Air Premixed Mixtures with N2 and CO2 Dilution", Energy & Fuel, Vol. 23, 2009, pp. 735-739.
- [4] Z. Huang et al., "Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air premixed flames", Fuel, Vol. 86, 2007, pp. 2360-2366.
- [5] A. T. Aguayo et al., "Kinetic Modeling of Dimethyl Ether Synthesis in a Single Step on a CuO-ZnO-Al2O3/ γ -Al2O3 Catalyst", Ind Eng Chem Res, Vol. 46, 2007, pp. 5522-5530.
- [6] X. D. Peng, A. W. Wang, B. A. Toseland, P. J. A. Tijm, "Single-Step Syngas-to-Dimethyl Ether Processes for Optimal Productivity, Minimal Emissions, and Natural Gas-Derived Syngas", Ind Eng Chem Res, Vol. 38, 1999, pp. 4381-4388.
- [7] Z. Chen, M. P. Burke, Y. Ju, "Effects of compression and stretch on the determination of laminar flame speeds using propagating spherical flames", Combust Theory Modell, Vol 13, 2009, pp. 343-364.
- [8] R. J. Kee, J. F. Gracar, M. D. Smooke, J. A. Miller, Sandia Report No. SAND85-8240, 1993.
- [9] 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. Lissianski, Z. Qin, GRI-Mech Homepage, Gas Research Institute, Chicago, 1999. Available from: <http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/>.
- [10] Z. Zhao, M. Chaos, A. Kazakov, F. L. Dryer, "Thermal Decomposition Reaction and a Comprehensive Kinetic Model of Dimethyl Ether", Int J Chem Kin, Vol 40, 2008, pp. 1-18.
- [11] T. M. Vu et al., "Effects of diluents on cellular instabilities in outwardly propagating spherical syngas-air premixed flames", Int J Hydrogen Energy, Vol. 35, 2010, pp. 3868-3880.