

고압에서 DME-Air 혼합기의 화염속도 측정

이수각* · 이기용*

Measurement of Laminar Flame Speeds of Dimethyl Ether-Air Mixtures at High Pressure

Su Gak Lee*, Ki Yong Lee*

ABSTRACT

Spherically expanding flames are used to measure flame speeds, which are derived the corresponding laminar flame speeds at zero stretch. Dimethyl Ether-Air mixtures at high pressure are studied over an extensive range of equivalence ratios. The classical shadowgraph technique is used to detect the reaction zone. In analytical methodology the optimization process using least mean squares is performed to extract the laminar flame speeds. Laminar flame speeds are compared with results reported in the literature.

Key Words : Dimethyl ether, Flame speed, Shadowgraph technique, High pressure

최근에는 화석연료의 고갈과 환경문제가 이슈가 되어 친환경적인 연료가 급부상하는데 이 중 하나가 디메틸에테르(Dimethyl ether, DME)이다. DME는 CH_3OCH_3 의 분자구조를 지닌 가장 간단한 에테르이며 LPG와 비슷한 성질을 갖고 있어 기존의 연소장치에 사용할 수 있으며, 인체에 거의 무해하고 안정성이 높다. 에테르결합으로 매 연발생이 적고 이산화탄소와 질소산화물, 황산화물이 기존 탄화수소 연료보다 적게 배출된다. 실제로 디젤엔진에 비해 이산화탄소 배출량은 8%, 질소산화물과 황산화물은 절반 이상 저감되었다 [1]. 이 DME 연소에 대해 수많은 실험이 이뤄졌고, 수치해석을 통한 DME 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다.

앞선 연구를 살펴보면, Lowry 등[2]은 연료로서 CH_4 에 DME를 첨가한 경우 화염속도, Markstein 길이 및 Lewis 수의 효과를 실험 및 수치해석으로 연구하였다. 그 결과 DME의 소량 첨가는 Markstein 길이가 큰 값을 갖게 하였다. DME의 첨가는 화염속도를 거의 선형적으로 증가시키며, 압력의 증가는 화염속도를 감소시켰다. Vries 등 [3]은 실린더 형태의 압력용기와 Z-type schlieren 시스템을 사용하여 DME-Air 화염에 대한 화염속도를 측정하였다. 초기온도 298K 및 고압조건(1, 5, 및 10atm)에서 얻어진 화염속도 및 Markstein 길이를 제시하였고, 화염속도 결과는 수치

해석 결과와 잘 일치됨을 보여주었다. Chen 등 [4]은 1기압 및 298K 조건에서 DME-Air 화염에 첨가제(Ar, N_2 및 CO_2)를 첨가한 경우에 대한 화염속도를 측정하였다. 그 결과 화염속도 저감 효과는 CO_2 , N_2 및 Ar 순으로 나타났다.

일부 연구가 있지만 고압에서 DME-Air 화염에 대한 화염속도의 실험 결과는 부족한 점이 있어 본 연구에서는 고압에서 DME-공기 예혼합 화염에 대한 화염속도를 측정하였고, 그 결과를 다른 연구자의 결과와 비교하였다.

압력 용기 내에서 구형으로 전파되는 화염을 형성하였고, shadowgraph 기술을 적용하여 화염 이미지를 얻었다. 측정 장치에 대한 개략도와 화염 이미지는 Fig. 1과 2에 나타났다.

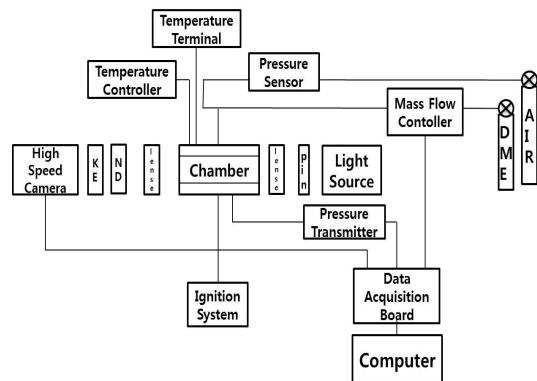


Fig. 1 Schematic diagram of experiment system

* 국립안동대학교 기계공학과

† 연락저자, kylee@andong.ac.kr

TEL : (054) 820-5899 FAX : (054) 820-6127

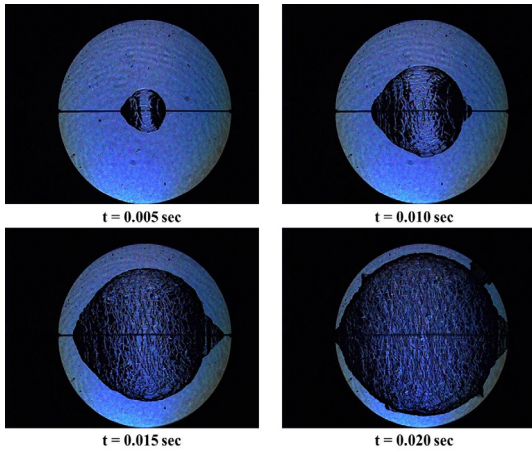


Fig. 2 Shadow images for DME-Air flame at T=300K, P=10atm and $\phi=1$

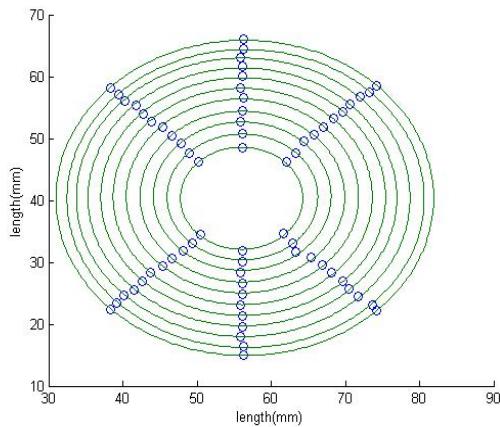


Fig. 3 Circles from Shadow images

구형으로 전파되는 화염 이미지(Fig. 2 참조)로부터 화염반경을 얻기 위하여 수치해법(least-square method)를 적용하여 데이터 분석을 하였다.

$$J = \sum_{i=1}^n (d_i - r)^2 \quad d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (1)$$

최소값 J 를 갖는 반경($=r$)을 구하여 시간에 따른 반경의 변화를 구하였다. Fig. 3은 화염이 퍼져나가는 것을 나타내는 것으로 심볼은 화염 이미지로부터 측정된 좌표를 나타내고, 원을 나타내는 실선은 식(1)로부터 얻어진 반경에 근거하여 나타난 원이다.

기연 화염속도(V_{s0})와 Markstein 길이(L_b)를 얻기 위해 다음의 식들을 사용하였다.

$$V_s (= \frac{dr}{dt}) = V_{s0} - L_b K \quad (2)$$

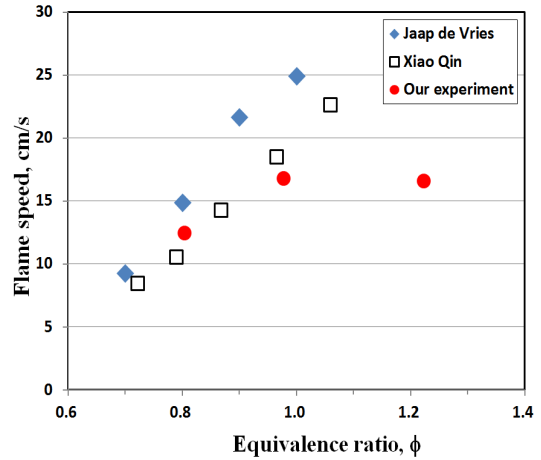


Fig. 4 The flame speeds with respect to equivalence ratio for DME-Air flames at T=300K and P=10atm

$$K = \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} \quad (3)$$

식(3)에 식(2)를 대입하고 적분하면 다음과 같다.

$$r(t) - r(t_0) + 2L_b \ln\left(\frac{r(t)}{r(t_0)}\right) = V_{s0}(t - t_0) \quad (4)$$

식(4)에 대해 least square의 최적화를 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Psi(L_b, V_{s0}) = \sum_{i=1}^n \left(t_i - t_0 - \frac{r_i - r_0}{V_{s0}} - 2 \frac{L_b}{V_{s0}} \ln\left(\frac{r_i}{r_0}\right) \right)^2 \quad (5)$$

Fig. 3으로부터 얻어진 데이터를 갖고, 식(5)에 대입하여 풀면, 기연 화염속도와 Markstein 길이가 얻어진다. 다음 식을 통해 화염속도(S_L)를 계산할 수 있다.

$$S_L = \frac{\rho_b}{\rho_u} V_{s0} \quad (6)$$

여기서 미연 및 기연밀도(ρ_u 및 ρ_b)는 Chemkin-pro[5]를 이용하여 계산하였다.

Fig. 4는 압력 10atm, 초기온도 300K 및 당량비 변화에 따른 측정된 화염속도 결과를 나타냈다. 비교를 위해 다른 연구자의 실험 결과[3,6]를 포함시켰다. 당량비 1 근처에서 본 실험 결과는 Vries 등[3]의 결과보다 낮게 예상하고 있지만 Qin 등[6]의 결과와는 비교적 잘 일치하고 있다.

후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 일환(No.2011-0011040)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] W.S. Baek, W.J. Cho, "The Status of DME Development and Utilization as a Fuel", *KIC News*, Volume 13, No.2, 2010 pp.1-6
- [2] W.B. Lowry, Z. Serinyel, M.C. Krejci, H.J. Curran, G. Bourque, E.L. Petersen, "Effect of methane-dimethyl ether fuel blends on flame stability, laminar flame speed and Markstein length", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, 2011, pp. 929 - 937
- [3] J.D. Vries, W. B. Lowry, Z. Serinyel, H. J. Curran, E. L. Petersen, "Laminar flame speed measurements of dimethyl ether in air at pressures up to 10atm", *Fuel*, Vol. 90, 2011, pp. 331-338
- [4] Z. Chen, C. Tang, J. Fu, X. Jiang, Q. Li, L. Wei and Z. Huang, "Experimental and numerical investigation on diluted DME flames: Thermal and chemical kinetic effects on laminar flame speeds", *Fuel*, Vol. 102, 2012, pp. 567 - 573
- [5] CHEMKIN-PRO, Reaction Design Inc., San Diego, CA 92121, USA
<http://www.reactiondesign.com>.
- [6] X. Qin, Y. Ju, "Measurements of burning velocities of dimethyl ether and air premixed flames at elevated pressures" *Proc Combust Inst.* Vol. 30, 2005, pp. 233-340