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

송원식* · 박 정*† · 권오붕* · 윤진한** · 길상인**

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

Wonsik Song, Jeong Park, Ohboong Kwon, Jinhan Yun and Sangin Keel

ABSTRACT

The present study was conducted to investigate the flame instability(evaluated by Markstein length and cellular instability) and laminar burning velocity in a constant volume combustion chamber at room temperature and elevated pressure up to 0.3 MPa to suggest the possibility of utilizing mixtures of syngas added DME-air premixed flames in internal combustion engines. The experimentally measured laminar burning velocities were compared to predictions calculated the PREMIX code with Zhao reaction mechanism. Discussions were made on effects of syngas addition into DME-Air premixed flames through evaluating laminar burning velocity, Markstein length, and cellular instability. Particular concerns are focused on cellular instability caused by hydrodynamic instability and diffusive-thermal instability.

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

1. 서 론

환경규제와 에너지수급의 불안정성문제는 오래전부터 대체에너지의 필요성을 증명해왔다. 이러한 문제를 완화하기 위해 메탄, 프로판과 같은 탄화수소연료의 기초화염특성을 시작으로[1,2] 수소[3,4]나 합성가스[5-8] 등의 대체연료개발과 이용가능성에 초점을 맞추어 많은 연구가 이루어지고 있다. 탄화수소연료는 내연기관에서 훌륭한 잠재력을 지니지만 연소생성물인 이산화탄소나 질소산화물로 인하여 대체에너지로서 한계를 갖는다. 수소는 높은 화염전파속도, 가연한계의 확장, 연소생성물이 인체에 무해하다는 이점이 있으나 셀 불안정성(Cellular instability)의 측면에서 본다면 역화(Flash back)가능성이 상당히 높아 위험한 연료로 인식되고 있다. 최근에는 수소와 일산화탄소가 혼합되어있는 합성가스와 합성가스로 생산되는 디메틸에테르가 각광받고 있다. 특히 디메틸에테르(Dimethyl ether, DME)는 가장 간단한 형태인 지방족(Aliphatic) 에테르로 탄소결합이 아닌 에테르결합으로 이루어져있어 매연생성확률이 낮고 SOx가 배출되지 않을 뿐만 아니라 CO_2와 NOx의 발생량이 적다. 또한 끓는점이 -25℃로 낮고 세탄가가 높아(55-60) 연료주입이나 착화가 용이하다[9,10]. 이러한 연료특성에 기인하여 DME가 가정용으로나 발전용, 디젤엔진 등에서의 대체연료로 손꼽히고 있는 만큼 기본적인 연소특성[9,10]이나 화학반응 메커니즘[11,12]을 비롯하여 고효율에 입각한 생성 법[13,14] 등에 초점을 맞추어 많은 연구들이 진행 중이다. DME를 생성하는 방법에는 전통적인 방법인 Two-step process와 최근 고려되고 있는 Single step process가 있다. Two-step process는 Table 1의 Chemical reaction (1), (2)와 같이 합성가스로 메탄올을 생성한 뒤 메탄올의 탈수를 통해서 DME를 생성하는 과정

Table 1. Chemical reaction of syngas to DME

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

* 부경대학교 기계공학과
** 한국기계연구원 그린환경기계연구본부
† 연락저자, jeongpark@pknu.ac.kr

이고 Single step process는 Chemical reaction (3)과 같이 수소와 일산화탄소가 1 : 1로 구성되어 있는 합성가스에서 직접 DME를 생성하는 방법이다[13,14]. 두 가지 방법 모두 DME를 생산하기 위해서는 합성가스가 필요한 것을 알 수 있는데 본 연구는 합성가스가 첨가된 DME-공기 혼합물이 예혼합 연소장치에서의 사용가능성을 알아보기 위해 실시되었다.

2. 실험장치 및 수치해석

2.1. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 연소기는 체적이 일정한 실린더 형으로 내부지름 200 mm, 길이 220 mm이고, 길이 방향으로 직경 100 mm, 두께 40 mm의 석영(Quartz) 창을 부착하여 광학적 접근이 가능하도록 설계하였다. 연소기 내 중앙부에는 직경 0.5 mm의 텅스텐 전극봉이 연결되어 8~10 kV로 공급전압을 변화시킬 수 있다. 반응 혼합물은 각각의 가스가 실험조건에서 설정한 초기압력(P_u)에 상응하는 부분압력으로 공급하였으며, 이를 정압계측기(AEP사의 LabDMM)로 측정하였다. 가스주입 후 무질서한 내부유동이 안정화상태에 도달하게 하기위하여 15분의 시간간격을 두어 실험을 수행하였다. 연소기 중심부에서 점화가 이루어지면 화염 핵(Flame kernel)이 형성되는데 화염이 성장하여 연소기 벽에 닿는 순간 소화하게 된다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 장치를 도식으로 나타내었다. 화염전파거동은 300 W의 제논 광원과 150 mm 오목거울 한 쌍으로 구성된 쉴리렌 시스템으로 가시화 하였고 이를 초당 10,000장으로 촬영이 가능한 고속카메라(Olympus사의 i-speed 3)를 이용하여 기록하였다. 트리거 회로를 제작하여 점화, 화염전파 이미지 획득, 그리고 연소기 내부의 압력변화데이터를 동시에 획득하였다. 연소 후 연소기 내부의 연소생성물은 실험실 배기시스템을 통하여 배출시켰고 응축된 물이나 수증기를 제거하기 위하여 공기압축기를 이용하였다. 화염반경은 6 mm 이상, 30 mm 이하의 범위에서만 다루었는데 화염반경의 최소경계는 점화 시 전기적 교란이 제거되는데 충분한 시간이고 최대한계는 화염이 연소실 벽으로부터의 간섭이 제거되는 지점이다. 실험은 상온(298 ± 3 K), 초기압력 0.1~0.3 MPa의 조건에서 100 %DME 혼합물에 25%, 50%, 그리고 75%의 합성가스를 첨가하였을 경우 화염전파속도를 측정하고 Markstein length와 셀 불안정성으로부터 화염안정성을 검토하고 DME-공기 화염에 합성가스가 미치는 영향에 대하여 논의한다.

2.2. 화염전파속도와 Markstein length

구형으로 전파하는 예혼합 화염은 화염이 스트레치를 받으면서 전파하고 스트레치를 받는 지점마다 화염속도가 변하게 된다. 따라서 화염전파속도를 논할 때 기준이 되는 지점이 필요하고 미연가스 측의 스트레치를 받지 않은 화염전파속도가 그 기준이 된다. 변위속도 S_n은 실험으로 측정한 순간화염반경을 아래의 관계식을 이용하여 계산하였다[2,4-8].

$$S_n = \frac{dR}{dt} \tag{1}$$

여기서 R은 쉴리렌 이미지의 순간화염반경이고 t는 시간이다. 식 (2)과 같이 화염 스트레치 율(Flame stretch rate) K는 화염면적 A의 대수에 관한 라그랑지안 시간도함수이다[2,4-8].

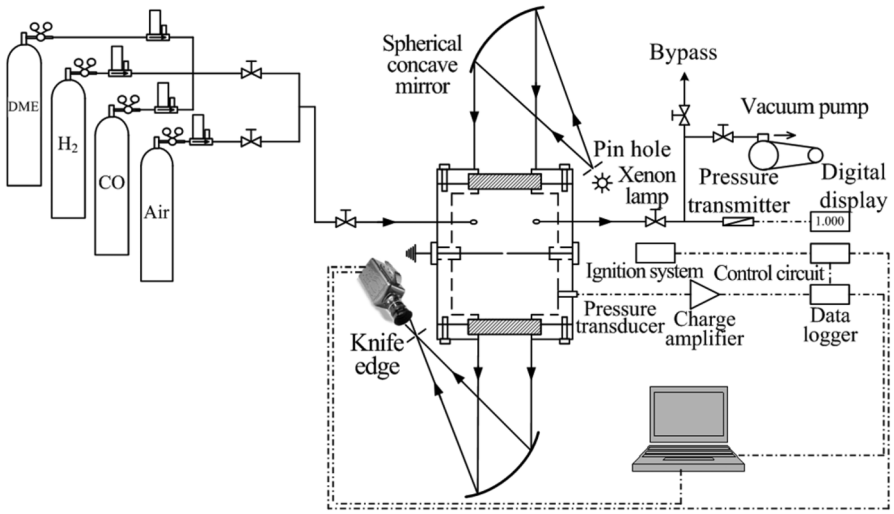

Fig. 1. Schematic representation of the experimental setup.

$$K=\frac{d(\ln A)}{dt}=\frac{1}{A}\frac{dA}{dt} \quad (2)$$

여기서 A는 화염면적이다. 구형화염에서 화염 스트레치 율은 곡률과 화염형상의 조합으로부터 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다[2,4-8].

$$K=\frac{1}{A}\frac{dA}{dt}=\frac{1}{4\pi R^2}\frac{8\pi R dR}{dt}=\frac{2}{R}S_n \quad (3)$$

식 (1)과 (3)로부터 S_n(Stretched flame speed)와 K(Flame stretch rate)의 계산이 가능하고 아래와 같은 선형관계를 갖는다[2,4-8].

$$S_1-S_n=L_bK \quad (4)$$

여기서 S_1은 기연가스 측에서 스트레치를 받지 않은 화염속도이고 L_b는 기연가스의 Markstein length이며 스트레치가 화염속도에 미치는 영향을 나타내는 지표가 된다. S_1은 스트레치가 0일 때 화염속도의 값이지만 실험으로 구현할 수 있는 스트레치는 최소값이 존재하기 때문에 S_1은 S_n과 K가 선형이라는 관계를 이용하여 외삽법(Extrapolation)으로 구할 수 있다. S_1을 구한 뒤 미연가스에서 스트레치를 받지 않은 화염전파속도, S_u^0는 연소기 내 기연가스 측과 미연가스 측 사이의 질량보존관계를 이용하여 계산한다[2,4-8].

$$S_u^0=S_1\left(\frac{\rho_b}{\rho_u}\right) \quad (5)$$

여기서 ρ_u와 ρ_b는 각각 미연가스 측과 기연가스 측에서의 밀도이다.

실험으로 측정한 화염전파속도는 수치해석결과와 비교하기 위하여 PREMIX 코드를 이용하였고 디메틸에테르를 포함하는 반응메커니즘인 Zhao 메커니즘을 이용하였다. Zhao 메커니즘[12]은 55개의 화학종과 290개의 반응단계로 구성되어 있다.

3. 셀 불안정성

셀 불안정성은 크게 부력에 의한 불안정성, 수력학적 불안정성, 그리고 물질-열확산 불안정성에 의해 발생된다. 부력에 의한 불안정성은 $0.3\{g(d/2)\}^{1/2}$와 관련이 있고[15] 본 장치에서 특성길이차원 d에 임계화염반경에 대응하는 $d=60$ mm로 부력의 영향을 평가하면 16.27 cm/s로 도출되어 화염전파속도가 16.27 cm/s 이상인 경우 부력에 의한 불안정성은 완화된다. 수력학적 불안정성은 화염 면 사이의 기연가스 측과 미연가스 측의 급격한 밀도 차에 의해 발생되고 화염두께에 의존한다. $\nabla\rho\times\nabla P/\rho^2$로 유도되는 Vorticity 방정식 내의 Baroclinic 토크가 수력학적 불안정성을 잘 대변하는데 Baroclinic 항의 Gradient의 특성길이가 화염두께가 되기 때문에 화염두께가 얇아지거나 밀도차가 커질 경우 Baroclinic 토크 강도가 증가하여 결국 수력학적 불안정성 역시 증가한다. 물질-열확산 불안정성은 화염이 생성되었을 경우 화염으로부터 빠져나가는 열확산과 화염으로 유입되는 연료의 물질확산의 대립에 의해 야기되며 루이스 수(Lewis number, L_e)로 나타낼 수 있다. 물질-열확산 불안정성의 관점에서 루이스 수가 1보다 클 경우 화염은 안정하고 1보다 작을 경우 화염은 불안정하다.

3.1. 열팽창율과 화염두께

층류화염두께(l_f)는 미연가스 측과 기연가스 측의 밀도 비에 해당하는 열팽창율($\sigma=\rho_u/\rho_b$)과 함께 수력학적 불안정성을 평가하기 위해 사용하였고 C.K. Law 연구그룹에서 제안한 관계식을 사용하였다[5,6].

$$l_f=\frac{\lambda/c_P}{\rho_u S_u^0} \quad (6)$$

여기서 λ와 c_p는 화염대와 미연가스측 온도의 평균에 해당하는 1200 K에서 열전도도와 비열을 뜻한다.

3.2. 유효 루이스 수

혼합물에 단일연료만 존재한다면 부족반응물컨셉(Deficient reactants concept)에 따라 연료와 산화제 중 먼저 소모되는 측의 루이스 수만 고려하면 되지만 본 연구에서는 세 가지의 연료(CH_3OCH_3, H_2, CO)가 사용되었기 때문에 복합연료가 첨가된 혼합물의 특징을 구분하기 위해 유효 루이스 수를 사용하였다. 연료 루이스 수는 사용된 연료의 발열량을 고려하여 식 (7)과 같이 가중평균(Weighted average)을 이용하여 계산하였다.

$$Le_F=1+\frac{q_{DME}(Le_{DME}-1)+q_{H_2}(Le_{H_2}-1)+q_{CO}(Le_{CO}-1)}{q} \quad (7)$$

여기서 Le_{DME}, Le_{H_2}, 그리고 Le_{CO}는 $\phi_i=(X_i/X_A)/(X_F/X_A)_{st}$에서 i-공기(i=DME/H_2/CO) 혼합물의 연료 루이스 수이다. X_F와 X_A는 반응혼합물에서 연료와 공기의 몰분율이고, $q=q_{DME}+q_{H_2}+q_{CO}$는 총 열

방출량(Total heat release)이다. q_j는 $q_j = QY_i/c_PT_u$ $(i, j = DME,\ H_2,\ CO)$로 정의되며 소모된 화학종 j와 관련된 무차원 열방출을 의미한다. Y_i는 공급된 화학종 j의 질량분율, c_P와 T_u는 각각 미연가스의 비열과 온도이다. 유효 루이스 수는 연료 루이스 수 (Le_F)와 산화제 루이스 수(Le_O)의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$Le_{eff} = 1 + \frac{(Le_E - 1) + (Le_D - 1)A_1}{1 + A_1} \tag{8}$$

여기서 Le_E와 Le_D는 각각 과도한 루이스 수와 불충분한 루이스 수를 말한다($\phi < 1$의 경우 연료희박조건이기 때문에 $Le_D = Le_F$, $Le_E = Le_O$가 되고, $\phi > 1$의 경우 연료농후조건이기 때문에 $Le_D = Le_O$, $Le_E = Le_F$에 해당한다). $A_1 = 1 + \beta(\Phi - 1)$는 혼합강도를 나타내고 Φ는 이론당량비(Stoichiometric ratio)조건에서 과도한 반응물과 불충분한 반응물의 질량비를 말하며($\phi \le 1$이라면 $\Phi = 1/\phi$, $\phi > 1$이라면 $\Phi = \phi$), $\beta = E_a(T_{ad} - T_u)/R^0 T_{ad}^2$는 Zeldovich 수이다. 여기서 $E_a = -2R^0[\partial \ln(\rho_u S_u^0)/\partial\,(1/T_{ad})]$는 활성화에너지, T_{ad}는 단열화염온도, 그리고 R^0는 일반기체상수이다. ρ_u, ρ_b와 더불어 T_{ad}는 평형상태로 가정하여 EQUIL code를 이용하여 계산하였다.

4. 결과 및 논의

4.1. 메탄-공기와 DME-공기혼합물의 화염전파속도

화염전파속도는 연소기의 효율을 결정짓는다는 측면이나 정확한 수치해석모델의 개발의 측면에서 예혼합화염의 연구에서 매우 중요한 변수이다. 수치해석 모델 중 GRI-Mech 3.0 버전[16]은 53가지 화학종에 대하여 325가지의 반응스텝으로 구성되어 있고 일반적으로 순수메탄화염을 묘사하는데 최적화 되어 있다고 알려져 있다. 따라서 연구를 수행하는데 앞서 본 연구에서 사용된 실험방법이나 데이터처리기법 등이 화염전파속도나 Markstein length의 측정에 타당성을 검증하기 위하여 메탄-공기 예혼합화염의 화염전파속도를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 초기압력 0.1 MPa, 상온(T_u = 298 ± 3 K)에서 측정한 메탄-공기의 화염전파속도를 실험으로 측정한 결과로 GRI-Mech 3.0 버전의 수치해석결과와 메탄화염의 선행연구결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. 같은 방법으로 디메틸에테르-공기 예혼합화염의 실험결과를 타 연구그룹의 실험결과와 비교하

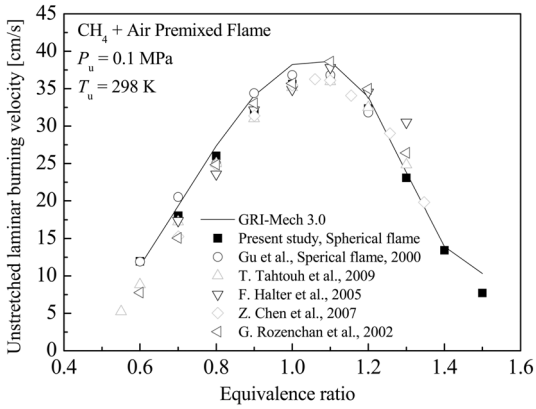

Fig. 2. Unstretched laminar burning velocities of CH_4-air premixed flames compared with data of GRI-Mech 3.0 and previous researches.

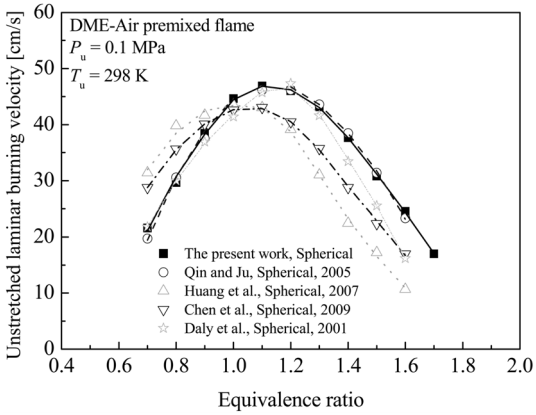

Fig. 3. Untretched laminar burning velocities of DME-air premixed flames compared with data of previous researches.

여 Fig. 3에 나타내었다. 같은 연료와 같은 실험방법으로 측정한 화염전파속도임에도 불구하고 연구그룹마다 결과의 상이함을 보였는데 이는 아직 DME에 적합한 반응메커니즘이 없다는 말이고 동시에 DME 화염의 반응메커니즘에 관한 연구의 필요성을 말해주고 있다. 본 연구에서 측정된 DME의 화염전파속도는 2005년도에 발간된 Qin and Ju 연구그룹의 데이터[9]와 가장 잘 일치하였다.

4.2. DME-공기 예혼합화염에 합성가스의 첨가효과

이번 절에서는 DME-공기화염에 합성가스를 첨가하였을 경우 기연가스의 Markstein length, 화염전파속도, 셀 불안정성의 경향에 대해서 알아보기로 한다. Fig. 4에 나타나듯 50%의 합성가스가 첨가되었을 경우까지 Markstein length는 당량비가 증가함에 따라

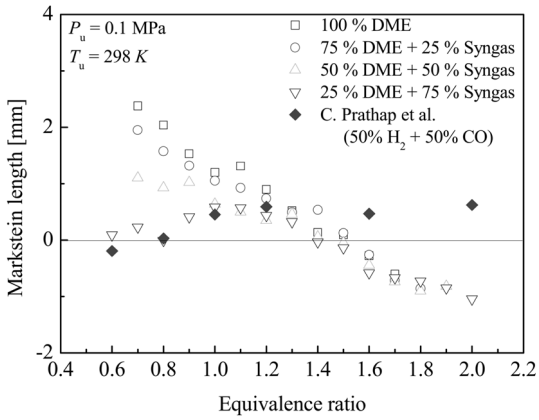

Fig. 4. Syngas effects on Markstein lengths of DME-Air premixed flames at P_u = 0.1 MPa and T_u = 298 ± 3 K.

감소하는 경향을 나타냈지만 75%의 합성가스가 첨가되었을 경우 연료희박화염의 경우 Markstein length가 증가하다가 이론당량비를 기점으로 다시 감소하는 경향을 보였다. Fig. 4에 함께 나타낸 50%H_2 + 50 %CO를 이용하여 선행된 연구[7]에서 L_b는 당량비 1.0까지 증가하는 경향을 보이다가 그 뒤로는 거의 일정한 수준을 유지한다. 이를 본 연구에서 이해해 보면 75%의 합성가스가 첨가된 화염의 연료희박조건에서는 합성가스가 모두 소모되어 100%합성가스와 같은 거동을 보이려고 하다가 즉, 당량비 1.0까지는 L_b가 증가하려는 경향을 보이다가 연료농후화염부터는 반응하고 남은 DME와 합성가스가 추가적인 화학반응을 통해 L_b가 다시 감소된다고 판단된다. 그리고 당량비 1.5를 지나서는 모든 화염은 L_b가 음의 값을 가지면서 선호확산 불안정성을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 P_u = 0.1 MPa, T_u = 298 ± 3 K에서 100%

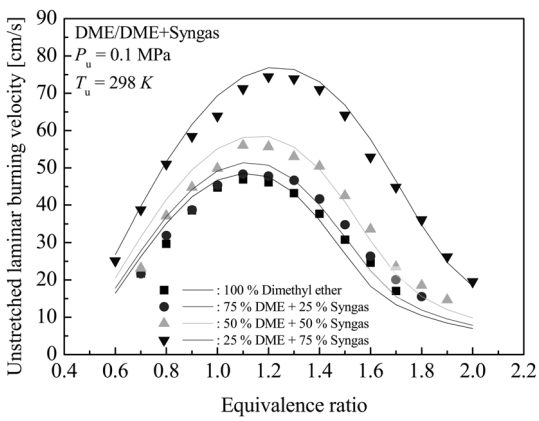

Fig. 5. Measured(symbol) and predicted(line) unstretched laminar burning velocities of DME/DME+Syngas flames at P_u = 0.1 MPa and T_u = 298 ± 3 K.

DME-공기 화염에 25%씩의 합성가스를 첨가하였을 경우 화염전파속도의 실험결과와 Zhao 메커니즘[12]의 수치해석결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 75%의 합성가스가 첨가된 화염을 제외하고 화염속도는 당량비 1.4를 기점으로 1.4 보다 작은 경우 수치해석결과가 실험결과보다 더 높게 도출되었고 1.4 보다 큰 경우 실험결과가 수치해석결과보다 더 높게 나타났다. 그리고 순수 DME, 25%, 그리고 50%의 합성가스가 첨가된 화염의 경우 화염전파속도의 최대값은 당량비 1.1에서 도출되었지만 75%합성가스가 첨가된 화염의 경우 최대화염전파속도는 당량비 1.2로 이동하였다. 그리고 합성가스를 첨가함에 따라 화염전파속도는 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데 이러한 경향은 실험결과 뿐 아니라 수치해석결과에서도 찾아볼 수 있다. Fig. 6은 셀 불안정성을 평가하기 위해 초기압력 0.2 MPa, 당량비 0.8인 조건에서 100 %DME-공기 혼합물에 25%씩의 합성가스를 첨가하였을 경우 화염이미지를 나타내었다. 화염 이미지의 하단부에 루이스 수, 열 팽창율, 그리고 화염두께를 함께 나타내었다. Fig. 6에서 가장 낮은 화염전파속도는 100 %DME일 때이고, 24.54 cm/s로 도출되었기 때문에 부력에 의한 불안정성은 고려하지 않았고 셀 불안정성은 수력학적 불안정성(열 팽창율, 화염두께)과 물질-열확산 불안정성(루이스 수)만을 평가하였다. 100 %DME화염의 경우 혼합물에 단일연료만 첨가되었기 때문에 루이스 수는 부족한 반응물(Deficient reactant)의 루이스 수를 사용했고 이 경우 DME의 연료 루이스 수가 해당된다. 합성가스가 첨가될수록 루이스 수가 줄어드는 경향을 보였으나 측정된 모든 루이스 수가 1 보다 크기 때문에 물질-열확산 불안정성의 측면에서는 셀 불안정성이 발생하지 않았다. 그리고 합성가스를 첨가함에 따라 열팽창율과 화염두께가 모두 감소하였는데 합성가스의 함유량이 더 높은 화염에서의 셀이 더 많이 나타났기 때문에 점화초기의 밀도 차에 의한 영향보다 전파과정에서 화염두께의 감소에 의한 영향이 수력학적 불안정성을 더 증진시켰다고 생각할 수 있다. Fig. 7은 초기압력 0.3 MPa, 당량비 0.8인 조건에서 100 %DME 혼합물에 25%씩의 합성가스가 첨가된 이미지를 나타내고 있다. 초기압력에 의한 영향을 함께 보기 위해 초기압력 외의 조건은 Fig. 6과 동일하게 유지했다. Fig. 6에서와 마찬가지로 Fig. 7에서 100% DME화염의 루이스 수는 연료 루이스 수로 나타내었고 이 경우의 화염전파속도는 21.46 cm/s(> 16.27 cm/s)로 도출되었기 때문에 역시 셀 불안정성은 수력학적 불안정성과 물질-열확산 불안정성만을 고려하였다. 고압에서 합성가스를 첨가하더라도 루이스 수는 모두 1보다 컸기 때문에 물질-열확산에 의한 셀 불안정성

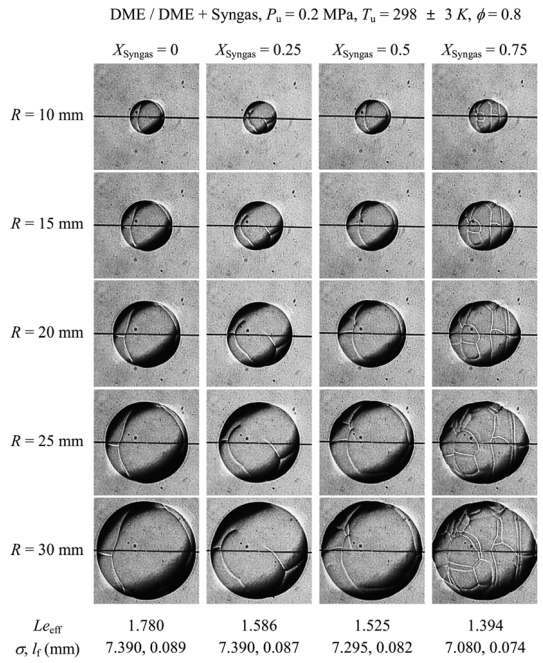

Fig. 6. Syngas effects on cellular instability of DME-air premixed flame at P_u = 0.2 MPa, T_u = 298 ± 3 *K*, and ϕ = 0.8.

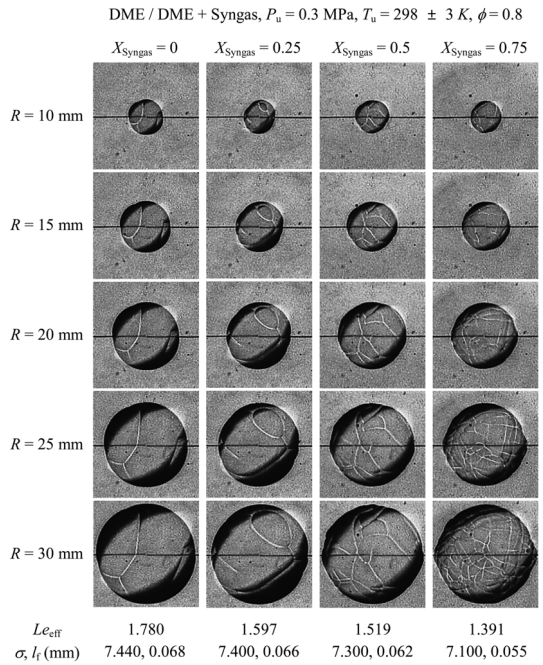

Fig. 7. Syngas effects on cellular instability of DME-air premixed flame at P_u = 0.3 MPa, T_u = 298 ± 3 *K*, and ϕ = 0.8.

은 발생되지 않았다. 한편 합성가스를 첨가함에 따라 열팽창율과 화염두께가 감소하였는데 Fig. 6과 마찬가지로 합성가스의 함유량이 높은 혼합물에서의 화염표면에 많은 셀이 형성되었다. 이는 화염의 전파과정에서 화염두께의 감소가 셀 불안정성을 야기했다고 생각할 수 있다. Fig. 6과 7을 비교해 보면 고압에서의 화염표면에 훨씬 많은 셀이 분포함을 알 수 있는데 이는 고압에서 열 팽창율이 증가하는 양보다 화염두께의 현저한 감소에 기인한다.

4. 결 론

본 연구는 100 %DME 혼합물에 25%씩의 합성가스를 첨가하였을 경우 Markstein length, 화염전파속도, 그리고 셀 불안정성을 평가하는데 그 목적을 두고 있고 결론은 아래와 같다.

1) 합성가스를 첨가함에 따라 Markstein length의 경향은 당량비가 증가함에 따라 감소하였고 50%합성가스가 첨가된 화염까지는 당량비에 따라 일정하게 감소하였으나 75%합성가스가 첨가된 경우 연료희박조건에서는 Markstein length가 증가하다가 이론당량비를 지나고 부터는 다시 감소하는 경향을 보였다. 이를 순수 합성가스를 이용한 선행연구결과와 비교하여 설명하였다.
2) 순수 DME, 25%, 그리고 50%의 합성가스가 첨가된 경우 화염전파속도의 최댓값은 당량비 1.1에서 도출되었고 75%의 합성가스가 첨가된 화염은 최대 화염전파속도가 당량비 1.2로 이동하였다. 이는 수소의 최대화염전파속도가 당량비 2.0에서 나타나기 때문에 합성가스 내 수소의 역할이라고 판단된다.
3) 합성가스가 첨가된 DME-공기 화염의 셀 불안정성을 초기압력 0.2와 0.3 MPa에서 비교하였다. 두 조건 모두 루이스 수가 1보다 크기 때문에 물질-열확산 불안정성에 의한 셀 불안정은 발생되지 않았다. 수력학적 불안정성의 경우 합성가스가 첨가함에 따라 화염은 더 불안정한 모습을 보였는데 이는 점화초기의 밀도 차에 의한 영향보다 전파과정에서 화염두께의 감소에 의한 수력학적 불안정성이 셀 불안정성을 증진시켰다고 생각할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 에너지기술개발사업의 일환(CD20120655)으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Metghalchi M, Keck JC, “Laminar burning velocity of propane-air mixtures at high temperature and pressure”, Combust Flame, Vol. 38, 1980, pp.

143-154

[2] Gu XJ, Haq MZ, Lawes M, Woolley R, “Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures”, Combust Flame, Vol. 121, 2000, pp. 41-58

[3] Aung KT, Hassan MI, Faeth GM, “Flame stretch interactions of laminar premixed hydrogen/air flames at normal temperature and pressure”, Combust Flame, Vol. 109, 1997, pp.1-24

[4] Qiao L, Kim CH, Faeth GM, “Suppression effects of diluents on laminar premixed hydrogen/oxygen/nitrogen flames”, Combust Flame, Vol. 143, 2005, pp.79-96

[5] Vu TM, Park J, Kwon OB, Kim JS, “Effects of hydrocarbon addition on cellular instabilities in expanding syngas-air spherical premixed flames”, Int J Hydrogen Energy, Vol. 34, 2009, pp.6961-6969

[6] Vu TM, Park J, Kwon OB, Bae DS, Yun JH, Keel SI, “Effects of diluents on cellular instabilities in outwardly propagating spherical syngas-air premixed flames”, Int J Hydrogen Energy, Vol. 35, 2010, pp.3868-3880

[7] C. Prathap, A. Ray, M.R. Ravi, “Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition”, Combust Flame, Vol. 155, 2008, pp. 145-160

[8] C. Prathap, A. Ray, M.R. Ravi, “Effects of dilution with carbon dioxide on the laminar burning velocity and flame stability of H_2-CO mixtures at atmospheric condition”, Combust Flame, Vol. 159, 2012, pp. 482-492

[9] X. Qin, Y. Ju, “Measurements of burning velocities of dimethyl ether and air premixed flames at elevated pressure”, Proc Combust Inst, Vol. 30, 2005, pp. 233-240

[10] C. A. Daly, J. M. Simmie, J. Wurmel, “Burning Velocities of Dimethyl Ether and Air”, Combust Flame, Vol. 125, 2001, pp. 1329-1340

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] A. T. Aguayo et al., “Kinetic Modeling of Dimethyl Ether Synthesis in a Single Step on a CuO-ZnO-Al_2O_3/γ-Al_2O_3 Catalyst”, Ind Eng Chem Res, Vol. 46, 2007, pp. 5522-5530.

[15] M.S. Cha, P.D. Ronney, “Propagation rates of non-premixed edge flames”, Combust Flame, Vol. 146, 1006, pp. 312-328.

[16] 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/>.

접수일 : 2012. 12. 06
심사완료일 : 2012. 12. 07