상호작용하는 메탄-수소 예혼합 대향류화염에 관한 연구

문창우* · 박 정**† · 권오붕** · 배대석** · 김정수**

A Study on Interacting CH_4-Air and H_2/N_2-Air Premixed Counterflow Flames

Chang Woo Moon, Jeong Park, Dae Seok Bae and Jeong Soo Kim

ABSTRACT

Using a counterflow burner, downstream interactions between CH_4-air and H_2/N_2-Air premixed flames with various equivalence ratios has been experimentally investigated. Flame stability maps on triple and twin flames are provided in terms of global strain rate and equivalence ratio. Lean and rich flammable limits are examined for methane/air and hydrogen/nitrogen/air mixtures over the entire range of mixture concentrations in the interacting flames. Results show that these flammable limits can be significantly modified in the presence of interaction such that mixture conditions beyond the flammability limit can be still burn if it is supported by stronger flame. The experiment also discusses various oscillatory instabilities in a stability map.

Key Words : Downstream interaction, Flammable limit, Flame extinction, Flame oscillation, Triple flame, Twin flame

1. 서 론

서로 동일하거나 유사한 화학적 성질의 예혼합 화염 사이의 상호작용은 이전부터 많은 연구가 이루어져 왔으며[1-3] 본 연구는 유사하지 않은 화학적 성질의 예혼합 화염 사이의 상호작용이 동일한 혼합기 사이의 상호작용과는 다를 것이라는 관점에서 동기 부여되었다. 이러한 문제는 수소경제화사회로 가는 전환점에서 기존 탄화수소 연료에 수소 혹은 합성가스를 혼소함으로써 기존 설비를 개조(retrofit)하는 연소 방식이 이산화탄소 배출의 억제라는 측면에서 기술적으로 시도되고 잇다는 측면에서 중요한 문제이기도 하다. 화염의 상호작용은 전류 상호작용과 후류 상호작용으로 분류된다. 두 화염사이가 기연 지역이며 화염이 전파할 때 연소가스에 의한 상호작용을 후류 상호작용이라 하고, 상류 상호작용에 비하여 다양한 형태가 존재하게 된다. 상호작용하는 대향류 예혼합화염에서 동일한 혼합기에 대해서는 농도가 균일하므로 상호작용은 나타나지 않으며 농도장이 층상화 된 경우 다양한 형태의 상호작용이 발생할 수 있다.

본 연구도 후류 상호작용을 관찰하기 위해 대향류 버너를 선택하였다. 후류 상호작용에 의한 화염의 배치는 희박예혼합 이중화염 구조와 과농예혼합 이중화염 구조 및 희박 예혼합 화염과 과농예혼합 화염 사이에 하나의 확산화염으로 구성된 삼중화염 구조로 나누어진다. Law[2,3] 등은 선호 확산이 존재하는 경우, 즉 열 확산 계수와 물질 확산 계수의 비로 정의되는 루이스 수가 1이 아닌 경우에 대하여 화염 스트레치와 선호 확산의 복합적인 효과로 나타나는 예혼합 화염의 응답 특성에 대하여 고찰하였다. 즉, 이러한 연구들은 화염 스트레치와 선호 확산이 동시에 존재하는 경우, 미연 지역에서 화염으로 공급되는 반응물의 확산유속과 화염에서 미연 지역으로 확산되는 열유속 사이의 불균형으로 화염 온도의 변화를 가져오게 됨을 밝혔다. 예혼합 화염의 소화와 관련하여 선호 확산과 화염 스트레치는 소화 기구의 차이를 가져오는 중요한 요소로 파악되고 있는데, Law[2] 등은 루이스수가 1 보다 클 때에는 예혼합 화염의 소화가 스트레치에 의한 에너지 손실에 의해 일어나며, 1 보다 작을 때에는 비완성 반응(incomplete reaction)에 기인하는 것으로 설명하였다. Sohrab[1] 등은 동일한 혼합기에 대한 화염의 하류 상호작용에 관한 연구를 대향류 유동장에서 비균일 유동장을 형성하여 예혼합 화염의 가연한계를 측정

* 부경대학교 에너지시스템공학과(원)
** 부경대학교 기계공학부
† 연락저자, jeongpark@pknu.ac.kr

하였고, 그 결과 예혼합 화염이 열적 상호작용을 받을 때 단독화염의 가연한계보다 넓은 범위에서 연소 가능함을 보였다. 본 연구에서는 동일하지 않은 혼합기인 메탄/공기 그리고 질소로 70% 희석된 수소/공기 예혼합 화염간의 상호작용과 소화거동을 명확히 하기위해 실험을 수행하였고, 추가적으로 화염 소화한계 근처에서 나타나는 화염 진동에 대해서도 논의하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 대향류 버너의 개략도이다. 대향류 버너는 내경이 10 mm, 버너 노즐간의 간격 20 mm로 제작하였으며 외부에 교란되는 화염을 제거할 수는 있는 구조로서 화염간의 상호작용에 관한 실험을 수행하였다. 균일한 유동을 유지하기 위해 미세한 메쉬를 노즐 내부에 설치하였다. 동일하지 않은 혼합기 조건에서의 삼중화염의 생성 및 병합조건을 규명하기 위한 실험은 상부에 노즐에서는 15% 수소/85% 질소-공기 혼합기를 분사하고, 하부 노즐에서는 메탄-공기 혼합기를 분사하여 비균일 농도장을 형성하하였다. 소화한계 및 소화 시 현상을 규명하기 위해 상부노즐에서 30% 수소/70% 질소-공기 혼합기를 분사하고, 하부 노즐에서는 메탄-공기 혼합기를 분사하여 비균일 농도장을 형성하였다. 외부의 화염 교란을 막고 후류(wake flow)에 의해 생성되는 외부 화염을 제거하기 위해 질소 장막유동을 공급하게 된다. 장막유동의 유량은 10 L/min로 고정하였다.

본 연구는 화염간의 상호작용에 의하여 나타나는 현상들을 규명하기 위해 당량비, 전체 신장률, 연료의 농도 변화시켰다. 전체 신장률은 다음과 같이 정의하였다.

$$a_g = \frac{V_U + V_L}{2L} \tag{1}$$

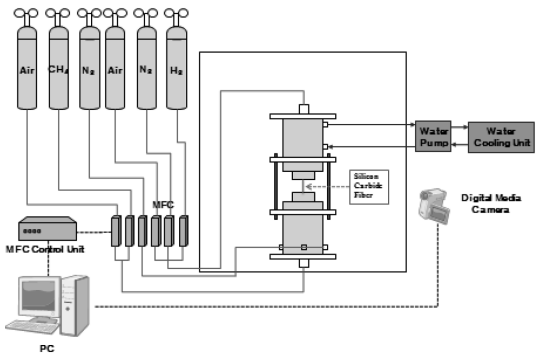

Fig. 1. Schematic diagrams of counterflow burner and flow system.

여기서 V_U는 상부노즐에서의 혼합기의 유동속도를 V_L은 하부노즐에서의 혼합기의 유동속도를 나타내며, L은 노즐간의 거리를 나타낸다. 삼중화염구조가 나타나는 조건과 삼중화염이 확산화염과 하나의 예혼합 화염이 병합되는 조건을 측정하기위하여 상하부 노즐 사이에 Silicon Carbide Fiber를 이용하여 강도를 측정하고, matlab을 이용하여 분석하였다. 그리고 소화한계 부근에서의 상호작용의 효과를 관찰하기 위하여 화염 정면에서 디지털 미디어 카메라로 촬영하고 PC를 이용하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 검토

Lockett 등과 Chung 등[4,5]은 메탄-공기 예혼합 화염들 사이의 상호작용을 통한 삼중화염의 경계와 존재영역을 보였고 삼중화염의 존재는 대향류 유동장의 각각에서 공급되는 당량비 조건뿐만 아니라 스트레치의 영향도 크게 받는다는 것을 밝혔다. Fig. 2는 Silicon Carbide Fiber를 이용하여 얻어진 삼중

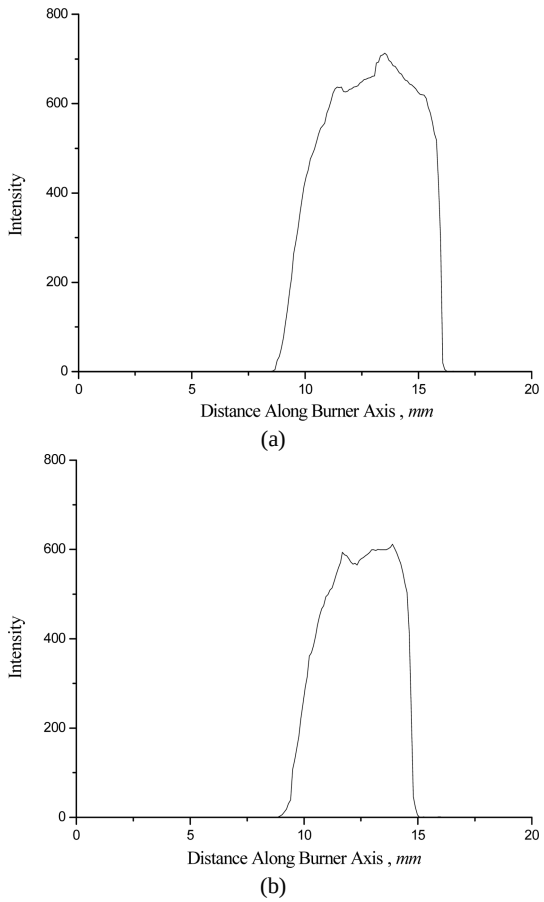

Fig. 2. Intensity as a function of distance along burner axis; (a) triple flame, (b) lean CH_4/Air flame merging.

화염과 병합되었을 때의 강도 분포이다. 강도의 극대값은 화염의 반응지역을 올바로 표시하므로 극대값을 이용하여 삼중화염의 존재를 판단하는 근거로 활용하였다. Fig. 2(a)는 $\Phi_{Rich,\ Upper}$ = 1.21, $\Phi_{Lean,\ Lower}$ = 0.89, a_g = 55 s^{-1} 조건에서 얻어진 삼중화염의 구조이며 Fig. 2(b)는 $\Phi_{Rich,\ Upper}$ =1.25, $\Phi_{Lean,\ Lower}$ = 0.69, a_g = 55 s^{-1}에서 병합되어진 화염구조 이다. 하부의 희박 CH_4/Air 예혼합 화염은 당량비 감소에 따라 화염전파속도가 감소되어 희박 CH_4/Air 예혼합 화염은 정체면 방향으로 이동하여 확산화염과 하부의 희박 CH_4/Air 예혼합 화염은 병합한다.

Fig. 3(a)과 (b)에서 전체 신장률을 40～70 s^{-1}로 증가시키며 당량비 변화에 따른 삼중화염의 생성과 삼중화염의 구조에서 확산화염과 하나의 예혼합 화염이 병합되는 조건을 삼중화염 안정화 선도로 나타내었다. Fig. 3(a)은 15% H_2/85% N_2/Air 과농 예혼합 화염과 CH_4/Air 희박 예혼합 화염에 있어서 화염신장율과 당량비에 따른 화염 안정화 선도를 나타내었다. Fig. 3(b)는 반대 경우로 H_2/85% N_2/Air 희박 예혼합 화염과 CH_4/Air 과농 예혼합 화염에 있어서 안정화선도를 나타내었다. Fig. 3(a)과 (b)에 나타낸 바와 같이 확산화염이 생성되기 위한 임계당량비가 존재하며 전체신장률의 증가로 정체면 방향으로의 이동은 확산화염과 희박 또는 과농 CH_4/Air 예혼합화염의 병합하게 된다. 반면에 본 실험의 조건에서는 점차 과잉 혹은 희박한 상부 의 15% H_2/85% N_2/Air 예혼합 화염의 경우 전체 신장률 증가에 의한 미세한 화염이동은 존재하나 삼중화염의 전체병합을 제외하고는 생성된 확산화염과병합되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 15% H_2/85% N_2/Air 예혼합 화염은 스트레치의 영향을 약하게 받는다는 것을 의미한다. 삼중화염에서 확산화염은 과농 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합화염과 희박 CH_4/Air 예혼합 화염의 경우 당량비 1.12 부근에서 그리고 희박 15% H_2/85% N_2/Air 예혼합화염과 과농 CH_4/Air 예혼합화염의 경우 당량비 1.02 부근에서 나타남이 확인되었다. 두 경우 모두 확산화염 생성 조건은 당량비 1을 초과하여 나타났으며 이 사실은 확산화염의 소화가 과잉조건에 의존한다는 것을 의미한다. 한편 소화한계 및 소화 시 나타나는 현상을 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

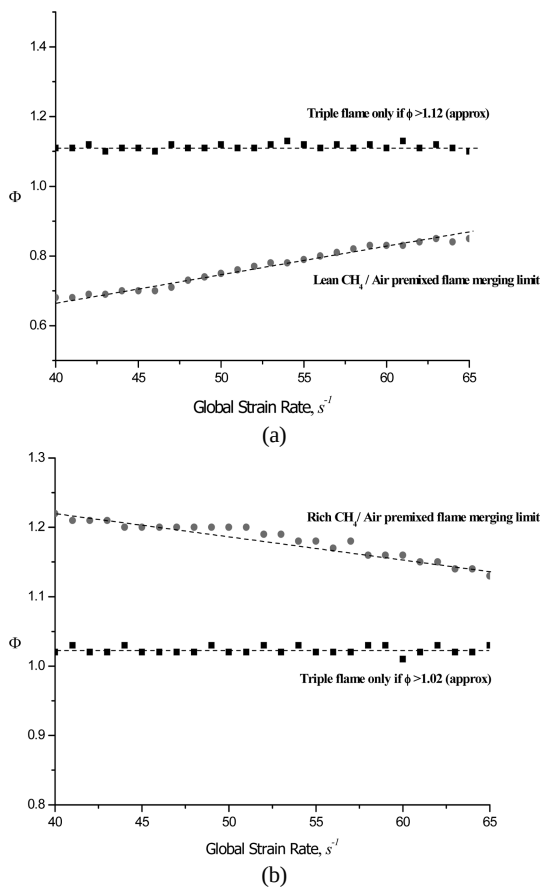

Fig. 3. Triple flame stability maps at (a) the rich 15% H_2/85% N_2/Air mixture and the lean CH_4/Air mixture, (b) the lean 15% H_2/85% N_2/Air mixture and the rich CH_4/Air mixture.

Fig. 4는 Sohrab 등[1]의 희박 CH4/Air 예혼합 화염들 사이의 소화한계 결과와 본 연구의 고정된 전체 신장률 50 s^{-1}에서의 희박 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합화염과 희박 CH_4/Air 예혼합화염 사이의 실험결과를 비교한 결과이다. 단독화염의 희박 CH_4/Air 예혼합 화염의 소화한계는 CH_4 농도 5.1%로 알려져 있고 화염들간의 상호작용이 존재하면 소화한계는 변화하게 된다. 화염은 다른 강한 화염에 의해 가연한계를 넘어서도 유지됨을 의미한다. 이러한 결과를 바탕으로 Fig. 5의 본 실험의 경우는 H_2의 농도

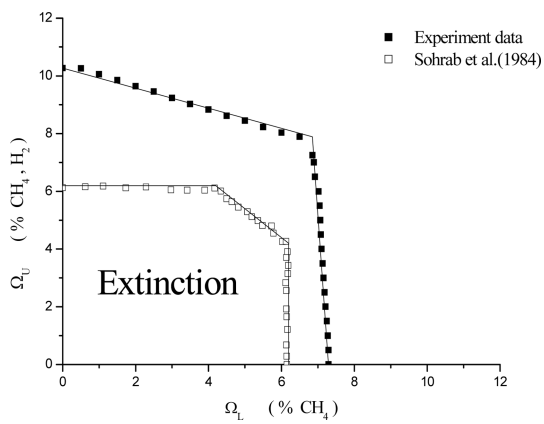

Fig. 4. Comparison of The extinction boundary for lean 30% H_2/70% N_2/Air premixed mixture and lean CH_4/Air premixed flame.

10.27%보다 큰 조건에서는 CH_4 농도 7.29% 이하의 어느 가연한계 농도 조건에서도 화염은 존재할 수 있다는 것을 보여준다. Sohrab 등[1]의 실험결과에 따르면 소화한계 경계면이 성층화를 이루는 경계면은 강한 상호작용이 그리고 축 방향과 수평적인 경계면은 약한 상호 작용이 일어나는 것으로 보고된 바 있다. 그러나 본 연구의 결과는 희박 예혼합 화염의 소화한계 경계면 전 영역이 기울어져 있으며 전 영역에 걸쳐 강한 상호작용이 나타난다는 것을 의미하며, 경계면의 농도의 수치들은 가연한계에 영향을 미치는 열손실을 표현할 것이다. 대칭적인 화염구조에서의 두 화염은 소화되기 전에 가까워진다는 사실과 이 두 화염이 가까워지는 것은 연료의 확산과 혼합기의 루이스 수의 영향에 강하게 의존하고 있다는 것을 이전의 연구에서 보고된 바가 있다[6-8]. 루이스 수가 1보다 작은 혼합기 사이에서는 강한 상호작용, 루이스 수가 1보다 큰 혼합기 사이에서는 약한 상호작용이 나타나게 된다. 본 실험의 과농 30% H_2/70% N_2/Air 혼합기의 루이스 수는 1 보다 크며 희박 30% H_2/70% N_2/Air 혼합기의 루이스 수는 1 보다 작다. 그리고 과농 CH_4/Air 혼합기는 루이스 수가 1 보다 크며 희박 CH_4/Air 혼합기는 루이스 수가 1 보다 작다. 결과적으로 희박상태 혼합기 사이의 상호작용은 과농상태 혼합기 사이의 상호작용보다 크게 나타날 것이라 판단되며 Fig. 5를 통하여 확인할 수 있다. Fig. 5에서의 Regime I과 Regime IV는 희박상태의 혼합기 사이의 소화한계, 과농 상태의 혼합기 사이의 소화한계를 나타낸다. Regime I과 Regime IV를 비교해 보면 과농상태의 혼합기가 상호작용을 하는 Regime IV의 경우가 희박상태의 혼합기가 상호작용을 하는 Regime I 보다 더 사각의 형태에 가깝다는 것을 보여주며 루이스 수가 1보다 작은 영역에서 상호작용이 더 영향이 더 크다는 것을 입증한다. Fig. 5에서는 과농, 희박 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합 화염과 과농, 희박 CH_4/Air 예혼합 화염 사이의 상호작용으로 인한 소화 경계면을 나타내었다. Regimes I, II, III은 희박 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합 화염과 희박 CH_4/Air 예혼합 화염 사이의 상호작용에 의한 화염소화 영역이며 Regimes IV, V, VI은 과농 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합 화염과 과농 CH_4/Air 예혼합 화염간의 상호작용에 의한 화염소화 영역이다. 그리고 Regimes VII, VIII은 삼중화염의 구조가 관찰되는 영역이다. Regime I은 희박 예혼합화염들 사이의 강한 상호작용에 의하여 소화한계가 확장되는 영역이며 Regime IV는 과농 예혼합화염들 사이의 소화한계를 나타내고 있다. Regime II의 영역에서는 두 가지 형태의 소화 거동 모드가 나타난다. H_2 농도 8.3% 이하의 영역에서는 두 희박상태의 예혼합화염이 동시에 소화되는 반면에 8.3% 이상의 영역에서는 희박 CH_4/Air 예혼합 화염만 소화되며 희박 30% H_2/70% N2/Air 예혼합 화염은 소화되지 않는다. 여기서 CH_4/Air 예혼합화염은 H_2 농도 17.5～11.5%구간에서 CH_4 농도 5.5%의 임계농도를 유지하게 되고 화염간의 상호작용에 의한 CH_4/Air 예혼합 화염의 소화한계의 확장됨이 확인된다. CH_4 농도 변화가 거의 없는 것으로 보아 상호작용이 약하게 나타남을 알 수 있으며 일정한 열손실이 존재함을 알 수 있다. 반면 H_2 농도 11.5% 아래의 경계면에서 희박 CH_4/Air 예혼합화염의 소화한계의 변화가 나타나는데, 이것은 희박 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합 화염의 소화한계에 가까워짐으로써 강한 상호작용이 일어난다는 것을 의미한다. Regime V 영역에서는 과농 CH_4/Air 예혼합 화염이 축방향으로 진동하고 CH_4 농도 10.94%에서 과농 CH_4/Air 예혼합 화염은 소화된다. H_2 농도 21.5%를 초과한 영역에서는 과잉된 두 예혼합 화염이 동시에 소화되며 그 이하의 조건에서는 과농 CH_4/Air 예혼합화염만 소화된다. Regime V의 경계면과 Regime II의 경계면을 비교해보면 Regime V의 소화한계의 경계면은 대략 10.94%로 일정한 것에 반해 Regime II 소화한계의 영역은 CH_4/Air 예혼합 화염의 소화 영역을 많이 간섭하고 있는 것이 확인되다. 이것은 희박조건의 소화에서 더 강한 상호작용이 존재함을 의미하며 CH_4/Air 예혼합 화염의 소화시 축방향 진동이 발생한다. Regimes III, IV에서는 CH_4/Air 예혼합 화염은 이미 소화되었으며 과농 및 희박 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합 화염만이 존재한다. 특히 Regime III에서 Regime I로 소화될 때 반경방향의 진동이 일어남이 관찰되었다.

소화영역들에서 나타나는 진동에 대하여 예측해보면 충분히 큰 루이스 수를 갖는 1차원 예혼합 화염에서 화염 진동 불안정성이 나타날 수 있고 열손

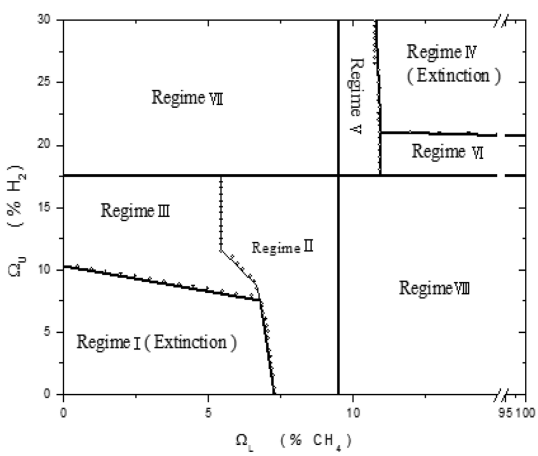

Fig. 5. Flame configurations and extinction boundaries for 30% H_2/70% N_2/Air premixed mixture and CH_4/Air premixed flame.

실에 의해 영향을 받는다고 보고된 바 있다[9,10]. 그러나 서로 상호작용을 일으키는 이중화염에서도 진동 불안정성이 관찰되었다. 루이스 수가 1 보다 큰 경계영역들에서 나타난 축방향 진동은 복사열손실에 의존할 것이며 추가적으로 두 예혼합 화염사이의 온도 차이에 의한 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합 화염 방향으로의 CH_4/Air 예혼합 화염의 열손실에 의한 진동일 것이라고 예측할 수 있다. 수치해석결과 30% H_2/70% N_2/Air 예혼합 화염이 CH_4/Air 예혼합 화염보다 더 낮은 온도를 갖는다는 것이 확인되었으며, 이 같은 결과는 추가적인 열손실이 나타난다는 것을 의미한다. 반면 루이스수 1 보다 작은 경계영역들에서는 복사열손실에 의해 임계루이스수가 감소함에도 불구하고 진동이 관찰되었다. 그리고 반경 방향의 진동의 요인이 복사열손실인지 반경 방향의 전도열손실에인지에 대한 명확함은 의문이다. 향후 본 연구그룹에서는 수치해석 및 주파수 분석을 통하여 진동불안정성의 원인을 분석할 예정이다.

4. 결 론

동일하지 않은 혼합기의 대향류 예혼합 화염에서의 상호작용을 규명하기 위해 H_2/N_2/Air 혼합기와 CH_4/Air 혼합기를 사용하여 실험을 수행하여 화염간의 상호작용을 관찰하였다.

화염의 상호작용은 화염들 간의 분리된 거리, 농도, 스트레치 그리고 루이스 수에 의존하며 특히 스트레치를 받는 유동장에서는 루이스 넘버가 1 보다 작은 혼합기에서는 강한 상호작용을 보였으며 반면 루이스 수가 1 보다 큰 혼합기에서는 약한 상호작용이 일어남을 검증했다. 15% H_2/85% N_2/Air 혼합기와 CH_4/Air 혼합기를 사용하여 얻은 삼중화염 안정화 선도를 나타내어 CH_4/Air 예혼합화염은 스트레치의 영향으로 인해 삼중화염구조의 확산화염과 병합될 수 있지만 본 실험의 조건에서는 15% H_2/85% N_2/Air 혼합기의 경우 스트레치에 의한 위치변화가 없다는 것을 확인하였다. 그리고 30% H_2/70% N_2/Air 혼합기와 CH_4/Air 혼합기를 사용하고 고정된 전체 신장률 50 s^{-1}에서의 소화 경계면을 구분하였다. 루이스수가 1 보다 작은 희박 예혼합 화염들 사이에 상호작용이 강하게 일어나는 것과 1 보다 큰 경우 약한 상호작용이 존재한다는 것을 검증하였다. 그리고 보다 세밀하게 영역을 구분함으로써 소화 거동을 관찰하였다. 소화의 관점을 두면 두 예혼합 화염이 동시에 소화되는 영역과 각각의 예혼합 화염이 분리되어 소화되는 영역으로 분류되어 진다. 소화되는 영역 마다 진동 불안정성이 관찰되었으며 향후 진동 불안정에 대한 수치해석 및 주파수 분석을 통하여 소화 시 진동불안정기구를 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 기초연구사업KRF-2008-314-D00049)과 2009년 에너지자원기술개발사업의 지원을 받았고 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Sorab, S. H., Ye, Z. Y. and Law, C. K., “An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speed”, Twentieth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1984, pp. 1957-1965

[2] Law, C. K., “Dynamics of Stretched Flames”, Twenty-Second Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1988, pp. 1381-1402

[3] Chung, S. H., Law, C, K., “An Integral Analysis of the Structure and Propagation of Stretched Premixed Flames”, Combustion and Flame, Vol. 72, 1988, pp. 325-336

[4] Lockett, R. D., Boulanger, B., Harding, S. C. and Greenhalgh, D. A., “The Structure and Stability of the Laminar Counter-flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame”, Combustion. Flame, 119, 1999, pp. 109-120

[5] 오태균, 정석호, “희박연소에서 발생하는 메탄 농도의 상호작용과 삼중화염에 대한 연구”, 한국자동차 학회지, Vol. 14, No. 6, 2006, pp. 171-178

[6] Tsuji, H. and Yamaoka, I., “Structure and Extinction of Near-limit Flames in a Stagnation Flow”, Nineteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1982, pp. 1533-1540

[7] Ishizuka, S., and Law, C. K., “An Experimental Study on Extinction and Stability of Stretched Premixed Flames”, Nineteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1982, pp. 327-335

[8] Sato, J., “Effects of Lewis Number on Extinction Behavior of Premixed Flames in a Stagnation Flow”, Nineteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1982, pp. 1541-1548

[9] Marolis, S. B., “Bifurcation Phenomena in Burner-stabilized premixed flames”, Combust. Sci. Tech., Vol. 22, 1980, pp. 143-149

[10] Bucmaster, J. D., “Lecture on mathematical Combustion”, SIAM, Vol. 43, pp. 1335-1349

접수일 : 2009. 12. 10
심사완료일 : 2010. 03. 22