

소화근처 헵탄 풀화재의 화염불안정성

정 태 희* · 이 의 주**

* 부경대학교 안전공학과

Flame Instability in Heptane Pool Fires Near Extinction

Tae Hee Jeong* and Eui Ju Lee**

* Dept. of Safety Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received July 10, 2012 ; Revised September 14, 2012 ; Accepted September 15, 2012)

Key Words: Pool Fire(풀화재), Cup Burner(컵버너), Inert Gas(불활성기체), Flame Instability(화염불안정성), Flickering Frequency(진동주파수)

초록: 액체연료를 사용하는 풀화재에서 화염불안정성에 대하여 산화제 유속변화와 농도변화의 효과를 알아보기 위해 컵버너 실험을 수행하였다. 연료는 헵탄을 사용하였고, 산화제는 공기에 질소와 이산화탄소를 희석하였다. 소화근처에서 축방향 및 화염 밑면에서 두 가지 형태의 대표적인 불안정성이 관찰되었다. 화염 밑면에서 발생하는 불안정성은 셀, 스윙, 회전 모드로 특성화 할 수 있고, 산화제의 유속이 증가할수록 모든 불활성 기체에서 셀, 스윙 모드에서 회전모드로 천이하였다. 이러한 화염밑면 불안정성에 영향을 미치는 변수들을 파악하기 위하여 초기혼합률, Le 수, 단열화염온도에 대해서도 함께 조사되었다. 이 중 Le 수가 불안정성 모드와 가장 큰 상관관계를 보이고 있지만 보다 정확한 관계를 규명하기 위해서는 더 많은 실험조건에서의 결과가 요구된다. 또한, 소화농도근처의 화염에서는 유속이 작거나 큰 경우에는 축방향 주기적인 진동불안정성이 나타나지 않고, 적절한 산화제 속도 영역에서만 관찰된다. 이는 작은 유속에서는 증발하는 연료속도가 임계유속이하이며, 큰 유속에서는 반응중인 연료유속과 산화제 유속이 유사하기 때문으로 판단된다.

Abstract: A cup burner experiment was performed to investigate the effect of the oxidizer velocity and concentration on flame instability near extinction. Heptane was used as a fuel and air diluted by nitrogen and carbon dioxide was used in the oxidizer stream. Two types of flame instabilities at the flame base and at axial downstream were observed near extinction. The instability at the flame base could be characterized by cell, swing, and rotation modes, and the cell mode changed to the rotation mode through the swing mode as the oxidizer velocity increased. To assess the parameters for the flame instability, the initial mixture strengths, Lewis number, and adiabatic flame temperature were investigated under each condition. The Lewis number might be the most important among them, but it is impossible to generalize because of the insufficient number of cases. Furthermore, the axial periodic flickering motion disappeared at low and high oxidizer velocities near extinction. This resulted from the fact that low oxidizer velocity induced evaporated fuel velocity below the critical velocity and high velocity made the reacting fuel velocity comparable.

1. 서 론

연소현상에 대한 기초연구로서 화염불안정성(flame instability)을 야기시키는 현상에 대하여 많은 연구들이 이론적, 수치해석적, 실험적인 방법으로 수행되었다. 일반적으로 부력 지배 확산화염에서는 크게 두 가지 모드의 화염불안정성을 관찰할 수 있다. 첫 번째 모드는 축방향의 주기적

진동이다. 축방향 화염진동은 주변 여건에 따라 다양하게 나타나는데 이를 주기적 진동(flickering)으로 일반적으로 부르고 있고, 큰 와(vortex)의 형성에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 특히, 축방향 떨림현상의 대표적인 파라미터로서 주파수와 주변 조건들 간의 상관관계를 규명하는데 많은 연구가 진행되었다. 이러한 축방향 떨림 주파수는 상대적인 부력의 크기를 의미하는 무차원 변수인 Fr 수와 주파수의 무차원 변수인 St 수 또는 Ri 수와의 상관관계가 있음이 알려져 있다. 주위류가 존재하는 제트에서의 무차원 변수에 적

† Corresponding Author, ejlee@pknu.ac.kr

용하는 특성 속도는 제트와 주위류와의 속도차이로 정의해야 기존의 상관관계를 만족함을 얻을 수 있었다.⁽⁵⁾ 또한, Katta 등은 특정조건에서 불안정해지는 확산화염을 수치해석과 실험을 통하여 연구하여 부력효과 뿐만 아니라 매연의 복사열 전달 특성도 화염의 진동에 영향을 미칠 수 있다고 하였다.⁽⁶⁾

확산화염에서 나타나는 다른 불안정 모드는 화염의 밑면(base)에서 발견되어 진다. 화염 밑면에서의 불안정성은 확산화염과 부분 예혼합 화염 구조에서 다양하게 관찰되었고, 이러한 화염 불안정성의 원인으로 화염 내 열손실과 물질확산-열확산의 차에 의해 나타나는 현상으로 밝혀진 바 있다.⁽⁷⁻¹¹⁾ 예혼합 화염의 경우 부족화확종의 물질확산이 열확산보다 클 때 셀모양의 불안정성(cellular instability)이 나타나며 이러한 물질확산-열확산 불안정성(diffusional thermal instability)은 이전연구⁽¹²⁾에 의하여 이론적으로 잘 규명되었다. 확산화염의 경우에는 일차원 화염을 모델로하여 Le 수가 작을 때 소염근처에서 물질확산-열확산의 영향에 의해 강한 화염대와 국소 소염대가 번갈아 나타나는 줄무늬 모양(striped pattern)의 불안정성이 나타난다고 이론적인 해석이 보고되었다.⁽¹³⁾ 또한, 열손실이 없어도 화염불안정성이 나타나는 연구결과도 확산 제트화염에서 보고되었다.⁽¹⁴⁾ 이 연구에 의하면 반응물의 Le 수가 1이 넘는다면 화염불안정성이 발생할 수 있으며, Le 수의 효과뿐만이 아니라 초기혼합률에도 화염불안정성이 중요한 변수로 나타나는 것을 실험적으로 해석하였다. 이러한 확산화염 밑면에서의 불안정성은 상류의 강한 혼합에 의해 그 특성이 부분 예혼합화염과 유사할 수 있으므로 일반적으로 예혼합화염에서의 기구인 열-확산 불안정성 모드로 해석하는 것이 일견 타당하다고 할 수 있다.

화염불안정성에 대한 많은 연구가 제트확산화염에서 수행되었지만 플화재에서 체계적으로 수행된 연구는 존재하지 않는다. 제트 대신 플화재를 화원으로 사용하는 경우에는 부력 지배적인 화염이 형성되므로 두 가지의 불안정성 모드인 축방향 떨림과 밑면의 불안정성을 동시에 구현할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 컵버너(cup burner)를 모델로 확산화염의 산화제에 불활성기체(N_2 , CO_2)를 희석한 헵탄연료로 유속변화와 농도변화에 대한 화염밑면과 축방향 진동에

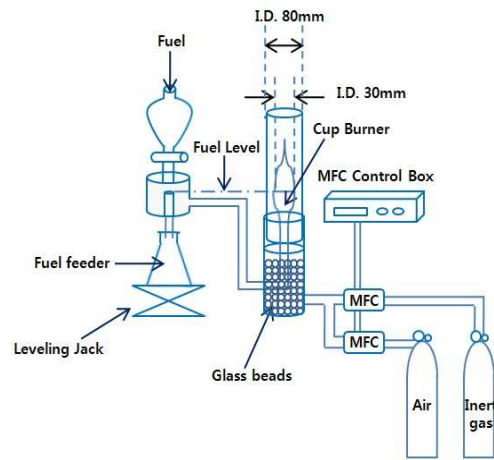


Fig. 1 Schematic of cup-burner and flow system

관한 불안정성에 관하여 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 플화재에서의 산화제 유속과 농도 변화에 따른 화염의 떨림 주파수를 측정하였다. 컵버너 실험 장치는 NFPA 2001 Standard⁽¹⁵⁾를 참고하여 제작하였으며, 자세한 구성은 Fig. 1과 같다. 연료로는 헵탄(heptane)을 사용하였으며, Leveling Jack으로 연료의 높이를 조절하여 연료의 액위를 원하는 높이에 고정시켰다. 컵버너는 스테인레스 스틸로 제작되었으며, 내경은 30mm이며, 컵버너 가장자리로 내부에는 45도로 경사가 있다. 유리관 하부에는 산화제의 유속을 유리관 내부 전 구배에 걸쳐 균일하게 하기 위하여 직경 3 mm의 유리구슬(glass bead)로 컵버너 하부에 약 1/3정도 채웠다. 유리관의 내경은 80 mm이다. 유속을 2 cm/s (2 cm/s ~ 16 cm/s)씩 증가시켜가면서 실험을 하였고, 산화제 측의 공기와 희석을 위한 불활성가스는 버블미터(bubble meter)로 검증된 MFC(mass flow controller)를 사용하여 유량을 오차범위 $\pm 1\%$ 미만으로 제어하였으며 측정 장치의 하부로 공급된다. 실험은 먼저 연료를 점화시킨 후에 2분 동안 충분히 가열한 다음 화염의 안정성을 확인하였다. 이후, 산화제측 전체 유속을 고정시키고 공기와 불활성기체의 조성 비율을 조절하면서 공급하였다. 이 때, 각 유속에서 10초 동안 적당한 시간을 배분하여 해당 공기와 불활성기체의 충분한 조성이 이루어 질수 있도록

하였다. 화염의 소화여부 기준은 눈으로 관찰하여 3분 이내에 불이 꺼지면 소화농도로 간주하였다. 또한 유속에 따른 소화기구를 설명하기 위해 단위면적당 연료소모율을 측정하였다. 연료소모율은 경계조건을 일정하게 만들고 일정한 수위를 고정하기 위해 만든 Fig. 1의 장치에서 일정시간 동안 공급되는 전체연료량에서 컵버너로 이동하지 못하고 밑으로 남은 연료량의 차이로부터 연소소모된 유량을 측정하였다. 화염 사진 및 주파수는 초당 30 frames의 촬영이 가능한 디지털 카메라(Nikon, D90)를 이용하여 촬영하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 화염 밑면에서의 불안정성

화염면에서의 불안정성은 일반적으로 외부의 교란이나 반응물의 조성성분, 국소당량비 그리고 주위의 압력과 온도 등에 의해서 영향을 받는다고 알려져 있다. 또한, 연료나 산화제에 불활성기체를 주입하면 반응물의 조성 비율이 달라져 물질확산과 열확산의 비(Lewis number)가 변화하여 이로 인해서 화염전파속도나 화염면의 온도가 변화하게 된다. 본 연구에서는 산화제에 다양한 불활성 기체를 첨가하여 유속변화와 농도변화에 대해 화염 밑면에서의 불안정성 형태를 조사함과 동시에 각 불안정성의 떨림 주파수를 측정하였다. Fig. 2에는 질소와 이산화탄소를 주위류에 희석하였을 때 소화근처 영역에서 나타나는 불안정성 모드를 그림으로 도시하였다. 소화 근처에서 화염 밑면에서 나타나는 셀(Cell) 구조는 현재의 실험조건에서는 2개의 셀로 구성되고 시간에 따라 좌우로 이동하는 주기적인 거동을 보인다. 스윙(Swing) 불안정성 모드는 컵버너 림 주위에서 원형 단면의 화염 밑면이 좌우로 떨리는 현상을 의미하며, 회전(Rotation) 모드는 화염밑면이 원주방향으로 회전하는 불안정성이다. 이 때 화염의 회전방향은 시계 또는 반시계 방향 등의 특정한 방향이 존재하지 않는데, 주위 교란(Disturbance)의 초기조건(Initial condition)에 따른 현상으로 판단된다. 또한 심볼 중앙의 검은(Solid) 원은 축방향 불안정성의 발생을 의미한다.

Fig. 3에는 두 불활성 기체(N₂, CO₂)로 희석된 주위류에서 소화근처 농도에서의 화염 불안정성 모드를 유속에 따라 도시하였다. 그림에는 각 불

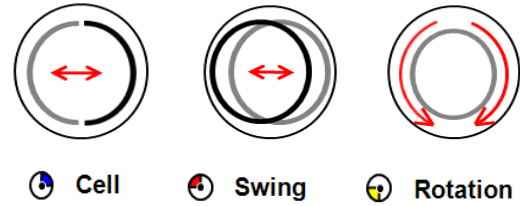


Fig. 2 Flame instability mode at flame base and those symbols

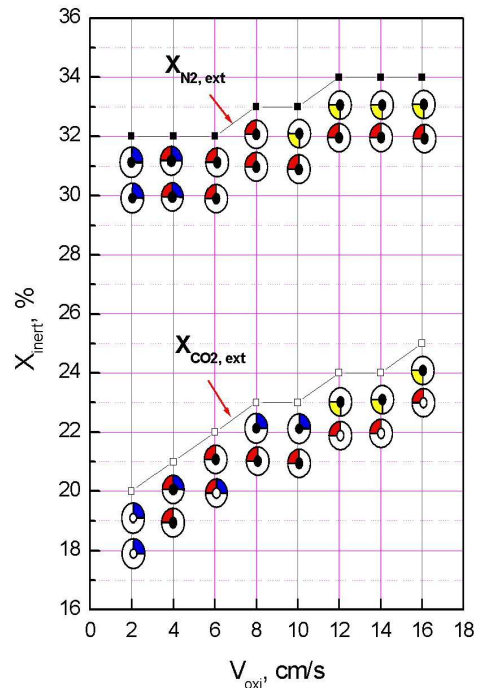
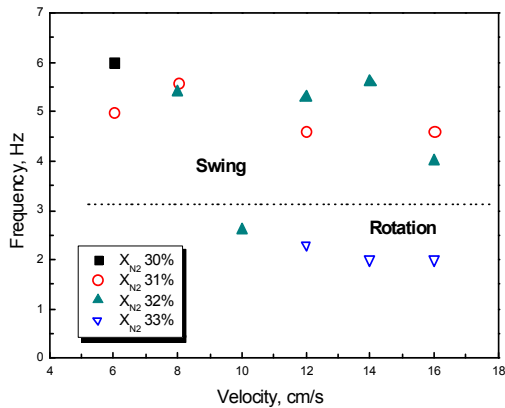
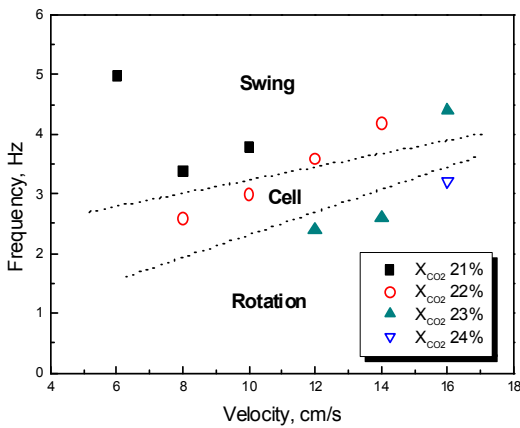


Fig. 3 The instability map for nitrogen and carbon dioxide dilutions near extinctions

활성 기체별로 주위류 유속에 따른 소화농도를 함께 도시하였다. 화염불안정성을 살펴보면 소화농도 근처에서 유속이 증가하면서 불활성기체에 따라 다양한 형태로 화염베이스에서의 불안정성이 나타남을 확인할 수 있었다. 질소희석의 경우 주위류 유속을 증가시킬수록 소화 근처에서 셀 모드, 스윙 모드 그리고 회전 모드로 불안정성 모드가 변화함을 볼 수 있다. 또한, 소화농도보다 2% 작은 경우에는 유속이 큰 부분에서도 현재의 실험조건에서는 회전모드가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이산화탄소로 희석한 경우에는 유속의 증가에 따라 셀, 스윙, 회전 모드로 변화하고, 소화농도에 비해 2% 낮은 이산화탄소 농도에서는 질소희석의 경우와 마찬가지로 셀 모드에서 스윙



(a) N2 dilution



(b) CO2 dilution

Fig. 4 Measurement flame base-flickering frequency to each inner gases

모드로 천이한다. 이러한 결과로부터 원주방향으로 회전하는 불안정성은 소화근처 농도에서 주위류 유속에 크게 의존하는 불안정성 모드라 할 수 있다. 기존의 컵버너 연구에는 이러한 3가지 화염 밀면 불안정모드는 보고되지 않았고, 헬륨 희석한 경우에 소화근처에서 화염 밀면이 반경방향(Radial oscillation)으로 진동하는 불안정성이 보고되었다. 기존의 연구결과⁽¹⁶⁾에 의하면 화염 베이스에서의 반경방향 진동수는 축방향 진동수의 절반으로 알려져 있다.

Fig. 4에는 각 불활성가스에 따른 화염 밀면에서의 진동주파수를 유속에 따라 나타내었다. 유속이 낮을 때에 일정한 진동주파수가 나타나지 않아 일정한 진동주기가 나타나는 유속 6 cm/s에서부터 진동주파수를 측정하였다. 다양한 화염 불안정성에 따른 진동주파수를 조사한 결과 질소 희석의 경우에는 스윙 모드로 나타나는 진동주파

Table 1 parameters related to the flame instability

Diluents	X_{inert} (%)	Le_0	Le_F	ψ	T_{ad} (K)
N2	32	0.92	2.33	0.0129	1497
CO2	22	0.86	2.25	0.0148	1773

수는 4~6 Hz 정도이며, 회전 모드로 나타나는진동주파수는 대략 절반인 2~3 Hz 정도이다. 따라서 스윙 모드와 회전모드 간의 상관관계가 있음을 의미한다. 또한, 소화농도에 가까울수록 스윙 보다는 회전 모드 형태의 불안정성을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 이산화탄소 희석의 경우에는 스윙과 회전 모드 주파수 사이에 셀의 주파수가 위치함을 볼 수 있다. 셀 모드를 스윙모드의 변화된 종류라 판단하면 대략적으로 스윙모드의 주파수는 회전모드 주파수의 2배임을 또한 확인할 수 있다.

화염 밀면 불안정성에 영향을 미치는 변수들을 파악하기 위하여 각 유속에 대한 물농도에 대해서 Lewis 수, 초기혼합률, 단열화염온도를 조사하였다. 초기혼합률, ψ ,은 산화제류에서의 산소 물농도에 대한 연료류의 연료 물농도의 비로써 정의 되었다.⁽¹⁴⁾ 연료와 산화제 Le 수의 산정을 위해 헵탄의 물성치는 San Diego Mechanism⁽¹⁷⁾에서의 값을 사용하였고, 기타 기체는 CHEMKIN-II⁽¹⁸⁾를 이용하였다. 또한, 단열화염온도, T_{ad} ,는 EQUIL 코드⁽¹⁹⁾를 이용하여 계산하였으며, 이전연구^(14,22)의 결과와 비교하여 3%의 오차범위 내에서 잘 일치하였다.

Table 1에는 주위류 유속이 10cm/s 일 때의 값들을 나타내었다. 위의 변수들은 유속에는 무관하고 불활성 기체의 희석에 따라 달라지는 값이다. 두 불활성 기체에서 Le_F 은 1보다 크며, Le_0 는 1보다 작은 값을 나타내고 있다. 따라서 대략적인 불안정성은 연료와 산화제의 Le 수로서 판단할 수 있지만, 다양한 화염불안정성의 모드변환은 단지 Le 수 만으로 결정할 수 없다. 그러므로, 다른 새로운 파라미터로서 두 가지의 불활성 가스의 초기 혼합률을 비교해보았을 때 서로 큰 차이가 없는 유사한 값을 나타내었다. 그러므로 본 연구의 결과는 이전연구⁽¹⁴⁾에서 보고되었던 Le 수의 변화와 초기혼합률에 대한 화염불안정성의

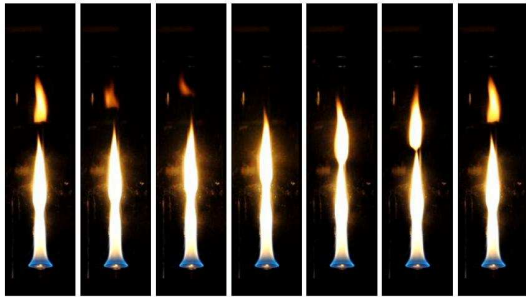


Fig. 5 Flickering motion of the cup burner flames near extinction

경향성은 나타나지 않는다. 한편, 단열화염온도는 전체적으로 불활성가스의 농도가 증가함에 따라 단열화염온도가 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 같은 물 농도에서는 CO_2 의 단열화염온도가 비열이 크므로 N_2 에 비해 더 작지만 소화 근처영역에서는 CO_2 의 단열화염온도가 낮은 물분율에 기인하여 큼을 알 수 있다. 하지만 단열화염온도 또한 특정한 온도에서의 화염불안정성 모드가 나타나지 않는다.

따라서, Fig. 3에 나타난 화염불안정성 경향은 이전연구^(14,20-22)에서 나타났던 제트 확산화염 또는 대향류 확산화염과는 다르게 Le 수와 초기혼합률과 같은 열확산 불안정성과 단열화염온도에 의한 열손실 불안정성을 기반으로 분리되어 질수는 없다. 또한 이와 같은 Le 수에서 발생하는 화염 밀면 불안정성 모드의 변화는 주위류 유속의 효과로서 결론내릴 수 있다.

3.2 축방향 화염 불안정성

주위류인 산화제에 불활성 기체를 희석하였을 때 소화 근처 농도에서 화염 하류에 축방향 주기적인 떨림(flickering) 현상이 Fig. 5와 같이 발견된다.

Fig. 5에는 시간에 따른 화염의 변화를 사진으로 나타내었다. 초기에 화염에서 길이가 증가하여 하류부근에서 화염중심축으로 화염이 수렴하는 현상(necking)이 발생한다. 일정시간 후에는 이 부근에서 화염이 떨어져 나가고 다시 길이가 작은 화염이 생성된다. 이러한 반복적인 떨림 현상은 일반적으로 풀화재 버너 직경에 의존한다고 알려져 있지만, 본 연구에서는 주위류의 유속을 변화하였을 때 소화 근처농도에서도 떨림 주파수

가 변화함을 확인할 수 있었다. N_2 와 CO_2 를 희석하였을 경우에는 유속이 가장 낮은 부분에서는 축방향 불안정성이 나타나지 않으며, 유속을 증가시키면 주기적 떨림 현상이 나타나다가 이후 다시 화염이 안정되는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 화염의 축방향 진동은 화염면과 주위류의 밀도차에 의하여 발달되는 와류에 의한 것임을 이전 연구를 통하여 알 수 있다.⁽¹⁶⁾ 주위류 유속이 작은 경우에는 소화농도 근처에서 화염의 길이가 매우 짧아지는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 액면에서의 연료 증발량(burning rate)이 작음을 의미한다. 따라서 축방향 불안정성을 유발하기 위한 최소연료속도(critical velocity)보다 작아져서 불안정성이 나타나지 않는다고 볼 수 있다. 또한, 큰 주위류 유속에서는 화염에 의한 열팽창 및 부력 등의 영향으로 증가된 연료층 속도와 산화제의 속도 크기가 유사(comparable)하게 되어 Ri 수나 Fr 수에 들어가는 특성속도(characteristic velocity)가 작아지므로 축방향 진동이 사라진다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 N_2 , CO_2 등 다양한 불활성가스 희석에 대한 화염불안정성을 컵버너에서 형성된 풀화재에서 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) N_2 , CO_2 등 불활성가스 희석하였을 경우, 유속이 증가할수록 화염 밀면에서 스윙, 셀, 회전 모드의 다양한 화염불안정성이 소화근처에서 나타났다.

(2) 회전 모드의 화염불안정성은 셀 모드, 스윙 모드의 불안정성 보다 진동주파수가 약 2배 정도 작다. 또한, 이 때 회전하는 회전 방향은 특정한 방향이 존재하지 않는데, 이는 주위 교란의 초기조건에 따른 현상으로 판단된다.

(3) 유속이 낮은 경우 축방향 진동이 나타나지 않음을 확인하였다. 이러한 현상은 액면에서의 연료증발량이 축방향 불안정성을 일으키는 최소연소속도보다 작기 때문이다.

(4) 축방향 진동현상은 화염에 의한 열팽창 및 부력등의 영향으로 화염불안정성이 나타나 와류를 생성시키고 이에 따라 화염이 축방향으로 진

동한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(20102030200051)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Chamberlin, D. S. and Rose, A., 1928, "The Flicker of Luminous Flames," *Industrial Engineering Chemistry*, Vol. 20, pp. 1013~1016.
- (2) Barr, J., 1953 "Diffusion Flames," *4th Symposium (International) on Combustion*, Vol. 4, pp. 765~771.
- (3) Rasbash, D. J., Rogowski, Z. W. and Stark, G. W. V., 1956, "Properties of Fires of Liquids," *Fuel*, Vol. 35, pp. 94~107.
- (4) Grant, A. J. and Jones, J. M., 1975, "Low Frequency Diffusion Flame Oscillations," *Combustion and Flame*, Vol. 25, pp. 153~160.
- (5) Jeong, T. H. and Lee, E. J., 2012, "The Effects of Velocity and Concentration in the Oxidizer of Heptane Pool Fires on the Flame Stability," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 36, No. 3, pp. 309~314.
- (6) Katta, V. R., Roquemore, W. M., Menon, M., Lee, S. T., Santoro, R. J. and Litzinger, T. A., 2009, "Impact of Soot on Flame Flicker," *Proc. Combustion Inst.*, Vol. 32, pp. 1343~1350.
- (7) Buckmaster, J., Hegab, A. and Jackson, T. L., 2000, "More Results on Oscillating Edge-Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 12, pp. 1592~1600.
- (8) Buckmaster, J., 2001, "Large-Lewis-Number Instabilities of Model Edge-Flames," *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223~2233.
- (9) Cheamtham, S. and Matalon, M., 1996, "Heat Loss and Lewis Number Effects on the Onset of Oscillation in Diffusion Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, pp. 1063~1070.
- (10) Kirkby, L. L., Schmitz, R. A., 1996, "An Analytical Study of the Stability of a Laminar Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 26, pp. 205~220.
- (11) Kurdyumov, V. N. and Matalon, M., 2002, "Radiation Losses as a Driving Mechanism for Flame Oscillations," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, pp. 45~52.
- (12) Sivashinsky, G. I., 1977, "Diffusion-Thermal Theory of Cellular Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 137~146.
- (13) Kim, J. S., Williams, F. A. and Ronney, P. D., 1996, "Diffusional-Thermal Instability of a Diffusion Flames," *Fluid Mech*, Vol. 327, pp. 273~301.
- (14) Marc, F., Papas, P. and Monkewitz, P.A., 2000, "Non-Premixed Jet Flame Pulsations near Extinction," *Proc. Combustion Inst.*, Vol. 28, pp. 831~838.
- (15) Anon, NFPA 2001, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System," *Proceedings National Fire Protection Agency*, Quincy, MA, 2000.
- (16) Takahashi, F., Linteris, G. T., Katta, V. R., 2007, "Vortex-coupled Oscillations of Edge Diffusion Flames in Coflowing Air with Dilution," *Proc. Combustion Inst.*, Vol. 31, pp. 1575~1582.
- (17) <http://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html>
- (18) Kee, R. J. Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics", Sandia Report SAND89-8009B
- (19) Lutz, A. E., Rupley, F. M., Kee, R. J. and Reynolds, W. C., 2000, "EQUIL: A Program for Computing Chemical Equilibria," Sandia National Laboratories.
- (20) Jacono, D. L., Papas, P. and Monkewitz, P. A., 2003, "Cell Formation in Non-Premixed, Axisymmetric Jet Flames Near Extinction," *Combust. Theory Model.*, Vol. 7, pp. 635~644.
- (21) Chen, R. H., Chaos, M. and Kothawala, A., 2007, "Lewis Number Effects in Laminar Diffusion Flames Near and Away from Extinction," *Proc. Combustion Inst.*, Vol. 31, pp.

- 1231~1237.
- (22) Chaos, M. and Chen, R. H., 2004, "An Experimental Study of Pulsating Instability in Near- Limit Laminar Nonpremixed Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 176, pp. 1191~1215.