

工學碩士學位論文

Cup-burner에서 불활성가스의 유속
및 농도변화에 따른 소화농도와
화염불안정성에 관한 연구



2013年 2月

釜慶大學校大學院

安全工學科

鄭泰喜

工學碩士學位論文

Cup-burner에서 불활성가스의 유속
및 농도변화에 따른 소화농도와
화염불안정성에 관한 연구

指導教授：李 義 周

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2013年 2月

釜慶大學校大學院

安全工學科

鄭泰喜

鄭泰喜의 工學碩士 學位論文을
認准함



主 審 工學博士 愼 晟 佑 (인)

委 員 工學博士 吳 昌 備 (인)

委 員 工學博士 李 彰 俊 (인)

목 차

제 1 장 서 론	6
1.1 연구배경	6
1.2 기존연구	9
1.2.1 화염소화농도	9
1.2.1 화염불안정성 특성	11
1.3 연구목적	14
제 2 장 실험장치 및 방법	16
2.1 실험장치	16
2.1.1 Cup-burner	16
2.1.2 질량유량 제어기	17
2.2 실험방법 및 조건	18
제 3 장 불활성가스 첨가에 따른 소화농도	19
3.1 주위류 유속에 따른 화염소화농도	19
3.2 불활성 가스계 물리적 소화기구	24

제 4장 헵탄폴화재의 화염불안정성	29
4.1 화염불안정성에 대한 유속 및 농도 효과	29
4.2 소화근처에서의 화염불안정성	40
제 5 장 결론	52
참고문헌	55

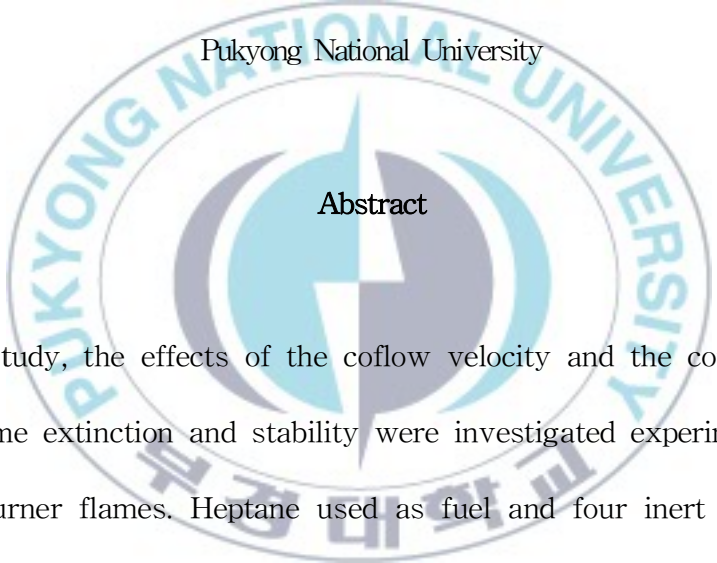


The Study on the Extinguishing Concentration and Flame Instability in the Heptane Pool Fires Diluted by Inert Gas

Tae Hee Jeong

Department of Safety Engineering, Graduate School,

Pukyong National University



Abstract

In this study, the effects of the coflow velocity and the concentration on the flame extinction and stability were investigated experimentally in the cup burner flames. Heptane used as fuel and four inert gases (N_2 , CO_2 , Ar, He) were added into the air in oxidizer stream, of which velocity was varied from 2 cm/s to 16 cm/s.

The concentrations of nitrogen, argon, and carbon dioxide at blow out are increased with increase of oxidizer velocity but that of helium is almost constant regardless of oxidizer velocity. This result might be attributed to the fact that the velocity effect is not noticeable relatively

because of the higher thermal conductivity and diffusivity of helium. Also, the higher coflow velocity induces the lower burning rates of heptane. The flickering frequency decreases with increasing the coflow velocity. The higher oxidizer velocity induces the lower fuel velocity because aerodynamic effect results in the reduction of heat transfer near flame base. The frequency–buoyancy relation with non-dimensional variables coincides with that of buoyant flume and pool fires under ambient air when the characteristic velocity is defined to the difference between fuel and oxidizer velocities. This supports the fact that the origin of the gravitational instability is Kelvin–Helmholtz instability in shear layer.

Also, the flickering frequency has an irregular pattern as nitrogen is added on the oxidizer stream. The irregularity of the flickering according to the concentration of nitrogen might be due to change of flame structure, which is not only influenced on the buoyancy forces by the density field change based on the heat release rate but also coupled with a different stability mode such as radial directional instability. Under near extinction condition, two kinds of instability are observed at anchoring base of the flame as well as at downstream. The occurrence

of flicking motion according to the velocity can be understood by introducing the Richardson number for buoyant force and Kelvin-Helmholtz instability in shear layer. The instability observed at flame base can be classified into four modes, i.e. cell, radial oscillation, swing and rotating. However, it is difficult to find a governing parameter.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

가스계 소화약제의 대표적인 물질인 할론(halon)은 대부분의 화재에 적용할 수 있는 매우 효과적인 소화약제로 전 세계적으로 사용되어온 소화약제이다. 그러나 할로겐 화합물이 지구 대기의 오존층 파괴 물질로 알려짐에 따라 몬트리올 정서에 의하여 여러 선진국에서는 지난 1994년부터 생산을 전면 중단하였으며, 이 정서에 개발도상국에 가입한 국가들은 2010년까지 생산, 소비가 가능하게 되었다. 따라서 세계 각국에서는 할론을 대체할 새로운 소화약제를 개발하기 위하여 많은 노력과 개발연구가 이루어지고 있다. 할론 대체 소화약제는 할로카본(halocarbon)화합물과 불활성가스(inert gas)로 두 가지로 나누어지는데 불활성기체 소화약제인 IG-01, IG-55, IG-541등은 현재 개발되어 사용되어지고 있다. 이들 소화약제의 구성 성분은 대기 중에 존재하는 물질이어서 오존층파괴나 지구온난화에 미치는 악영향이 적고, 소화이후에도 독성이 높은 물질을 생성하지 않는 장점이 있다.

이러한 소화능력 평가에 있어 대체소화약제에서 가장 중요시 되는 문제는 최소소화농도(MEC, minimum extinction concentration)를 측정하는 것

이다. 최소소화농도를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있지만, NFPA(National Fire Protect Association) 2001 Standard [1], ISO(International Standard Organization) [2]등의 Fire Code에서는 컵버너(Cup-burner) 시험방법으로 소화농도를 측정하도록 규정하고 있지만 버너의 형상이나 재질 및 여러 조건에 따라서 화염의 소화가 의존되기 때문에 실제 화재에서 일반화시키기에는 어려움이 있다. 따라서 현재에도 소화농도 평가기준의 정확성을 높이기 위하여 지속적인 연구를 수행하고 있다.

한편, 화재현상의 재료적 복합성과 기하학적 의존성을 고려하면 기존의 화재의 특성과 가장 유사하면서 간단한 구조인 폴화재는 많은 화재연구에서 가장 기본적으로 다루고 있는 방법론이다. 따라서, 화재현상에 대한 기초연구로써 화염불안정성(Flame instability)을 야기시키는 현상에 대해서도 많은 연구들이 이론적, 수치 해석적, 실험적인 방법으로 다양하게 수행되고 있다. 화재의 연소과정에서 발생하는 화염의 불안정 특성은 연소 효율을 떨어뜨릴 뿐만이 아니라 불완전 연소를 일으켜 유해물질을 배출시킨다. 이 때, 발생되어진 유해물질은 사람의 건강에 악영향을 미칠 뿐만이 아니라 환경문제를 크게 가중시키고 있다.

일반적인 폴화재 연구에서는 대기가 정지되어 있는 상태에서 연구가 수행되었다. 하지만 반밀폐공간이나 주위 유동이 있는 상황에서 자유연소상태에서는 화염 구조가 동일할 수 없다. 그러므로 불활성가스를 산화재에

첨가하여 화염의 다양한 거동들에 대해 조사할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 주위 산화재의 유동이 있는 경우에 속도효과와 불활성가스 첨가에 의한 농도변화에 따른 최소소화농도와 화염 불안정성을 컵버너 실험을 통하여 고찰하였다.



1.2 기존 연구

1.2.1 화염소화농도

할론 대체소화약제의 개발시 가장 중요시 되는 문제 중의 하나는 대체후 보물질의 소화성능을 측정하는 것이다. 다양한 소화약제의 소화농도 측정 및 해석에 관하여 많은 연구가 컵버너 실험을 통하여 수행되었다[3-6]. 하지만 화염소화에 관한 물리적 기구 및 산화제의 유속변화 효과에 대해서는 연구가 매우 제한적이었다. 이와 관련된 연구는 주로 컵버너에서 메탄과 같은 기체연료를 사용하여 규명되었다[7-9].

컵버너 장치는 Fire Code 및 설치기관에 따라 조금씩 차이가 있으며 측정된 소화농도에도 약간의 차이는 존재하는 것으로 알려져 있지만, 실용적인 관점에서 그 차이는 크지 않다. 가장 먼저 발표된 컵버너 장치는 1961년 Creiz가 제작한 장치이다[10]. 이 장치는 기체를 연료로 사용하였기 때문에 실제상황의 화재와 다른 측정값을 나타낼 뿐만 아니라 측정장치의 미세한 차이에 의해서도 큰 오차가 발생하는 단점이 있다. 또한, ICI의 Hirst와 Booth는 액체연료를 사용하여 컵버너 장치를 발표하였다[11]. 이 연구에서는 n-Heptane인 액체연료를 사용하였고, 이 실험에서 얻어진 소화농도의 결과값은 Creiz의 장치에 비해 재현성이 있으며 오차가 적기 때문에

현재에도 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 하지만 액체연료를 사용한 컵버너 시험 장치에 측정된 소화농도는 연료의 흔들림이나 측정방법의 차이에 따라서 약간의 차이가 있을 수 있다. 따라서 화염소화는 주위환경에도 많은 영향을 받기 때문에 컵버너의 직경, 높이, 소화약제등을 달리 하여 정확성을 높이기 위해 연구가 이루어졌다[12].

최근에는 소화약제의 평가를 체계적으로 일반화시키기 위한 이론적 예측 모델의 개발을 수행하고 있다. 그 방법 중의 하나로 완전혼합반응로(WSR, well stirred reactor)에서 자세한 화학반응을 고려하여 소화약제 화염소화 농도를 측정하였다[13]. 이 반응로는 물리적 효과 뿐만이 아니라 화학적 효과도 고려할 수 있는 장점이 있다.

1.2.2 화염불안정성 특성

화염의 연소에 있어서 가장 중요한 요소는 화염안정성이며, 오랫동안 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 화염의 불안정성은 화염의 길이가 길어지면 부력효과로 인하여 화염의 주위에 와동이 발생하여 화염이 불안정해지고 진동하게 된다. 일반적으로 부력지배 화염에서는 크게 두 가지 모드의 화염불안정성을 관찰 할 수 있다.

첫 번째는 화염의 진동현상이다. 풀화재는 주변 여건에 따라 다양한 진동 현상이 있음이 오래전부터 발견되었는데 이를 주기적 진동(puffing, flickering, pulsation)으로 일반적으로 부르고, 큰 와(vortex)의 형성에 기인하는 것으로 알려져 있다[14-17]. 풀화재의 진동은 주의공기의 화염으로 유입(entrainment), 화염높이, 연소효율, 화염으로부터의 복사열전달, 그리고 일산화탄소나 연기(soot)를 포함한 연소생성물에 큰 영향을 주기 때문에 자발적 화염진동의 이해는 화재나 기타 에너지 안전 설계에 있어 매우 중요하다. 따라서 풀화재의 주기적인 진동에 대해 많은 연구들이 수행되었다 [18-20]. 특히, 가장 두드러진 진동현상으로는 축방향의 주기적 진동이다. 이 진동 현상의 대표적인 파라미터로서 주파수와 주변 조건들 간의 상관관계를 규명하는데 많은 연구가 진행되었다[21-23].

최근에는 Cetegen과 그 공동연구자들이 헬륨 등을 사용한 비반응 부력

제트를 사용하여 플화재에서 화염상류의 유체역학적 거동을 연구하였다 [24-26]. 이 연구에 의하면 Strouhal 수와 Richardson 수의 상관관계로 진동 주파수를 보다 적절히 표현할 수 있었으며, 이는 플룸과 주위 기체간의 밀도차를 고려한 것이다. 또한, Katta 등은 특정조건에서 불안정해지는 확산화염을 수치해석과 실험을 통하여 부력효과 뿐만 아니라 매연의 복사 열 전달 특성도 화염의 진동에 영향을 미칠 수 있다고 하였다[27].

화염에서 나타나는 다른 불안정성은 화염 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[28-32].

예혼합 화염의 경우 부족화학종의 물질확산이 열확산보다 클 때 셀모양의 불안정성(cellular instability)이 나타나며 이러한 물질확산-열확산 불안정성(diffusional thermal instability)은 이전연구에 의하여 이론적으로 잘 규명되었다[33].

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[34]. 또한, 열손실이 없어도 화염불안정성이 나타나는 연구결과도 확산 제트화염에서 보고되었다[35]. 이 연구에 의하면

반응물의 Le 수가 1이 넘는다면 화염불안정성이 발생할 수 있으며, Le 수의 효과뿐만이 아니라 초기혼합율에도 화염불안정성이 중요한 변수로 나타나는 것을 실험적으로 해석하였다.



1.3 연구 목적

앞에서 설명한바와 같이 가스계 소화약제는 많은 장점이 있으나, 할론계 소화약제는 인체의 유해성과 오존층을 파괴하는 등 다양한 위험성 때문에 더 이상 자유롭게 사용할 수 없게 되었다. 따라서 산화제에 다양한 불활성 가스가 첨가된 화염의 소화현상과 불안정성에 대하여 자세한 정보가 필요하다고 판단하였다.

본 연구에서 사용한 액체 연료(Heptane)의 경우 비균질 특성에 의해 액체연료 표면에서 증발하는 연료의 유량 등 물리적 기구가 기체연료보다 복잡한 특성이 있다. 따라서 현재 불활성가스 소화약제로 사용되고 있는 N_2 , CO_2 , Ar, He을 공기와 혼합하여 산화제의 전체 유속을 고정시킨 상태에서 조성 비율만을 변화시켜가며 화염소화농도를 측정하였고, 전체유속 변화에 따라 유속이 화염의 최소소화농도에 미치는 영향을 고찰하였다.

한편, 화염불안정성에 대한 연구는 제트확산화염에서 많이 수행되었지만, 풀화재에서 체계적으로 수행된 연구는 존재하지 않는다. 하지만, 제트화염 대신 풀화재를 화원으로 사용하는 경우에는 부력지배적인 화염이 형성되므로 두 가지의 불안정성 모드인 축방향 진동과 밑면의 불안정성을 동시에 구현할 수 있는 장점이 있다.

이러한 화염의 불안정성에 대한 현상을 이해하기 위하여 본 연구에서는

실험적으로 주위 산화재의 유동이 있는 경우에 속도효과와 불활성가스 첨가에 의한 농도변화에 대한 화염 불안정성을 컵버너 헵탄 풀화재를 통하여 고찰하고자 한다.



제 2 장 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 Cup-burner

Fig. 2.1은 본 실험에 사용된 버너 및 유로계에 대한 개략도이다. 본 연구에서 사용된 실험 장치는 NFPA 2001 standard[1]를 참고하여 제작하였다. 스테인리스 스틸(stainless steel)로 제작된 컵버너는 외경은 80mm, 내경은 30mm이며, 컵버너 연료노즐 가장자리로 내부는 45도의 경사가 있다. 유리관 하부에는 산화제 유속을 유리관 내부 전 구배에 걸쳐 균일하게 하기 위하여 직경 3mm의 유리구슬(glass bead)로 컵버너 높이의 약 1/3 정도 채웠다.

2.1.2 질량유량 제어기

본 실험에 사용된 연료로는 헵탄(Heptane)을 사용하였으며, Leveling Jack 으로 연료의 높이를 조절하여 연료의 액위를 원하는 높이에 고정시켰다. 산화제로는 공기에 첨가제로서 불활성가스 질소(N_2), 이산화탄소(CO_2),

아르곤(Ar), 헬륨(He)을 사용하였다. 컵버너로 공급되는 연료 및 산화제를 비롯한 모든 유체는 버블미터(Bubble meter)로 검증된 MFC(Mass Flow Controller)로 유량을 정밀하게 오차범위 1%미만으로 제어하였으며, 버너의 하부로 공급된다.

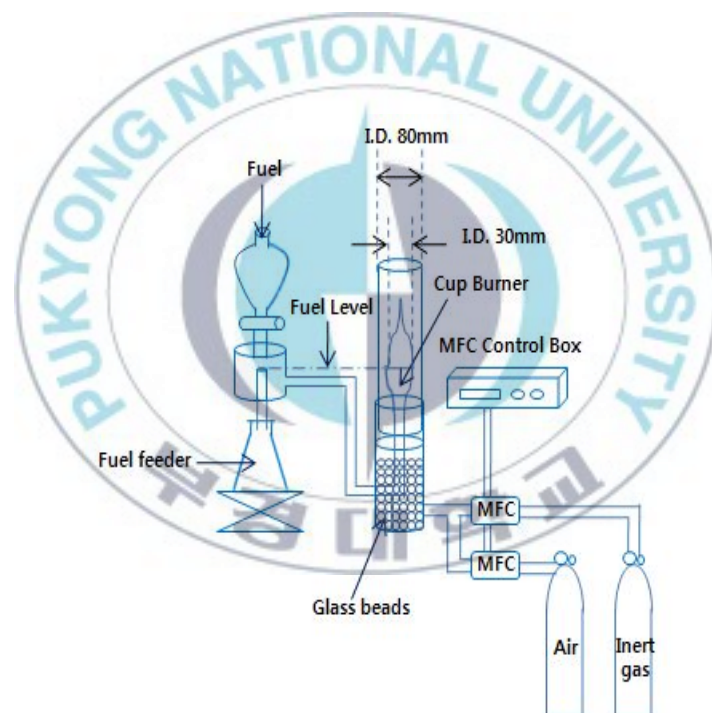


Fig. 2.1 Schematic of cup-burner and flow system.

2.2 실험방법 및 조건

실험은 먼저 연료를 점화시킨 후에 2분 동안 충분히 가열한 다음 화염의 안정성을 확인 하였다. 이후, 농도 효과를 확인하기 위하여 산화제측 전체 유속을 고정시키고 공기와 소화약제의 조성 비율을 조절하면서 공급하였다. 이 때, 각 유속에서 10초 동안 적당한 시간을 배분하여 해당 공기와 불활성가스의 충분한 조성이 이루어 질수 있도록 하였다. 또한, 유속 효과를 확인하기 위하여 유속을 2 cm/s (2 cm/s ~ 16 cm/s)씩 증가시켰다.

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. 2.1의 장치에서 fuel feeder를 통하여 일정시간 동안 공급되는 전체연료량에서 컵버너로 이동하지 못하고 밑으로 남은 연료량의 차이로부터 연소로 소모된 유량을 측정하였다. 화염사진 및 진동하는 화염의 거동을 관찰하기 위하여 화염 정면에서 초당 30 flames의 촬영이 가능한 디지털 카메라 (Nikkon)모델을 이용하여 분석하였다.

제 3 장 불활성가스 첨가에 따른 소화농도

3.1 주위류 유속에 따른 화염소화농도

주위류의 산화제 유량을 고정시키고 소화약제의 물분율을 변화시켜 가며 컵버너에서 생성되는 화염의 모양을 Fig. 3.1에 가시화 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 소화약제의 유량이 증가함에 따라 초기에는 화염의 길이가 증가함을 알 수 있다. 이는 소화약제의 유량이 증가하면서 연소에 필요한 산소 농도 감소에 따른 현상이다. 소화약제의 유량을 더욱더 증가시키면 컵버너 가장자리로부터 화염이 부상되며, 청염의 길이가 증가되면서 결국에는 화염이 소화된다. 풀화재는 초기에는 컵버너 팁에 화염이 부착되어있지만, 소화농도에 가까워지면 컵버너 팁에서 약 2 mm 부상됨을 볼 수 있다. 또한 주위류의 속도가 매우 큰 경우에는 부상 높이는 매우 증가한다.

산화제의 전체유속을 증가시키면서 공기와 소화약제의 유량 조성을 변화하여 불활성가스에 따라 각 유속에 대해 측정된 최소소화농도 결과를 Fig. 3.2에 나타내었다. 기존의 연구결과[11]에서는 확산화염에서의 소화약제의 소화농도는 산화제 유속의 증가에 따라 어느 지점까지 증가하다가 그 이후

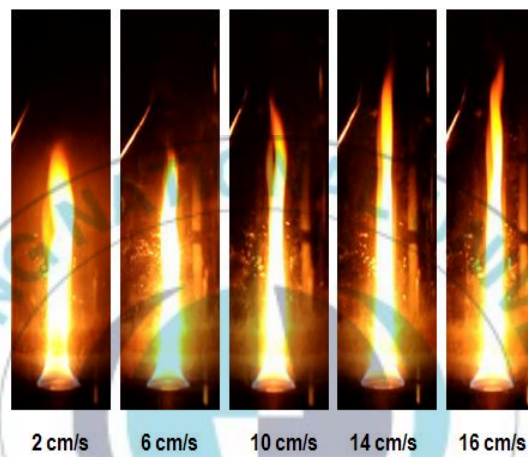


Fig. 3.1 Cup-burner flame shape with increasing the oxidizer velocity. The values of the picture indicates the air velocity.

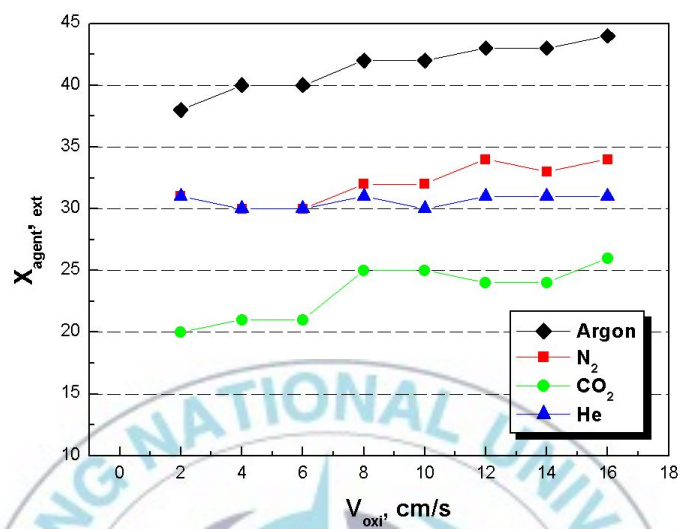


Fig. 3.2 Minimum extinguishing concentration with velocity in the cup-burner.

Agent	NFPA ²⁾	Sheinson et al. ⁸⁾	Saito et al. ⁶⁾
N_2	32	30	33.6
CO_2	23	21	22.0
He	31	–	–
Ar	41	41	43.3

Table. 3.1 Flame-extinguishing concentrations (%) for n-heptane cup-burner flames.

에는 유속이 증가해도 소화능도가 바뀌지 않는 “plateau region”이 있다고 보고되었고, 그 유속영향이 없는 영역에서 standard의 속도를 결정하였다 [12]. 본 연구와 같은 산화제 유속에서 수행된 컵버너 결과는 가스계 연료인 메탄의 경우에만 존재한다[7]. 이 결과에 의하면 본 연구에서 사용한 산화제 속도범위에서는 He를 제외한 Ar, N₂, CO₂ 등 모든 불활성가스에 대해서 소화능도가 바뀌지 않았다. He의 소화능도는 산화제 유속에 영향을 받지 않았고, 다른 모든 가스에 대해서는 산화제 유속이 증가 할수록 최소 소화능도는 증가하였다. 이러한 상반되는 결과는 연료의 차이에 기인한다고 판단되며, 뒤에 보다 자세한 해석을 수행하였다.

불활성가스의 화염소화 과정은 연소가 중단되는 지점까지 산소 농도를 낮추는 희석효과와 활성화된 원자나 자유 라디칼이 형성되지 않은 지점까지 화염 온도를 낮추는 냉각효과로 주로 물리적 효과를 통하여 이루어진다 [3-5]. 이 때 열용량은 화염의 온도를 낮추는데 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 소화능도는 낮을수록 소화능력이 우수하므로 본 연구결과 Fig. 3.2에서 나타났듯이 상대적인 저속의 산화제 유속에서는 다음과 같은 소화효과를 얻을 수 있다.

$$CO_2 > N_2 \approx He > Ar$$

하지만 높은 산화제 유속에서는 He의 소화능력이 N₂보다 약간 증가한다. 앞서 설명한 바와 같이 열용량이 크면 최소소화능도는 감소한다는 사실과

기존의 연구결과를 통하여 확인 할 수 있듯이[6] 4가지의 불활성가스 중에서 열용량이 가장 큰 이산화탄소의 소화능도가 가장 우수하였다. 하지만 헬륨의 경우에는 열용량이 가장 낮은 반면에 소화능도가 두 번째로 우수하다. 이는 헬륨의 열전도도(thermal conductivity)가 나머지 소화약제들 보다 약 10배 정도 높기 때문이다[9]. 다양한 기존 실험결과를 Table 3.1에 정리하였다. 이 모든 실험은 약 3 cm/s의 산화제 유속에서 수행되었고, Fig. 3.2의 결과와 비교하면 오차범위 내에서 일치함을 볼 수 있다.



3.2 불활성가스계 물리적 소화기구

컴버너에서 생성된 풀화재의 소화기구를 설명하기 위해서 기존연구는 각 소화약제의 소화되는 농도에서 비열을 비교한 방법과[3-5] WSR(well-stirred reactor)를 이용하여 평형상태에서의 반응이 더 이상 지속되지 못하는 농도를 소화농도로 결정하는 방법론을[36] 제시하였다. 본 연구에서는 산화제의 유속변화가 존재하므로 WSR 모델을 이용할 경우 산화제 속도변화를 모사할 수 있는 대한 모델링이 필요하다. 기존의 연구에서는 WSR의 변수인 체류시간(residence time), τ 를 본 연구에서 사용한 변수인 산화제 유속과의 관계를 얻었다[36].

$$\tau \propto 1/V_f V_{oxi}^{1/2} \quad (3.1)$$

여기서, V_f 는 연료의 속도, V_{oxi} 는 산화제 속도를 의미한다. 가스연료와는 달리 액체연료는 화염의 특성에 따라 증발되는 연료의 속도가 바뀌는 특성이 있다. 따라서 산화제의 유속에 따른 액체 연료의 속도변화를 예측하기 위해 풀화재의 연소소모율(burning rate)을 실험적으로 측정하였고 그 결과는 Fig. 3.3에 나타내었다. 공기를 산화제로 사용해 주위류의 속도를 변화시켰을 경우에는 Fig. 3.3과 같이 주위류 속도가 증가할수록 연료소모율은 감소함을 볼 수 있다. 이는 액체연료 표면에서의 증발량이 감소하는 것을 의미하므로 표면적이 일정한 본 풀화재에서는 연료증발 속도가 감소

한다. 일반적으로 풀화재의 연속적인 연소를 위해서는 화염에서 액체연료 표면으로의 열량이 공급되어야 하고, 전도, 대류, 복사 등 모든 열전달 기구가 적용된다[37-39]. 또한 다양한 연료소모율에 관한 연구결과[36]로서 버너의 직경이 매우 작은 층류화염인 경우에는 전도의 효과가 가장 크고 직경이 커지면 난류화염으로서 복사의 효과가 가장 중요한 열전달 기구로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 컵버너의 크기는 층류와 난류의 사이에 있는 천이지역에 있으므로 전도와 복사가 유사한 크기로 기여한다고 할 수 있다.

유속의 변화에 따른 화염높이를 Fig. 3.4에 도시하였다. 주위류 유속증가는 스트레인올의 버너근처의 화염의 반응성을 저하시키고 따라서 복사량을 감소시킨다. 또한 화염높이를 증가시키는데 이는 복사열전달량이 거리의 제곱에 반비례함을 상기하면 후류의 화염은 액면에서의 증발에 상대적으로 큰 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다. 결과적으로 유속의 증가는 연료의 증발을 저해하여 연료유속을 감소시키기 때문에 전체적인 스트레인올이 감소하여 화염소화가 지연된다고 할 수 있다. 이러한 현상은 식 (3.1)을 통해서도 WSR 모델링에서 연료속도의 감소는 반응대에서의 전체 체류시간의 감소로 보다 활발한 연소가 가능하다. 이러한 현상은 기체연료에서는 적용되지 않는데 기체연료의 경우는 연료의 속도가 주위류인 산화제 속도와는 독립적인 변수이기 때문이다. 따라서 기체연료와 달리 풀화재 소화농도에

서는 연료속도의 변화를 반드시 고려해 줘야한다.



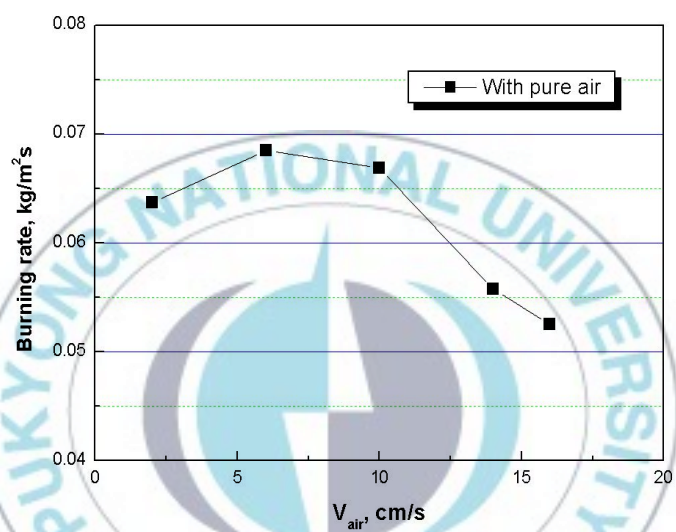


Fig. 3.3 Burning rate of heptane with coflow velocity of pure air in the cup-burner.

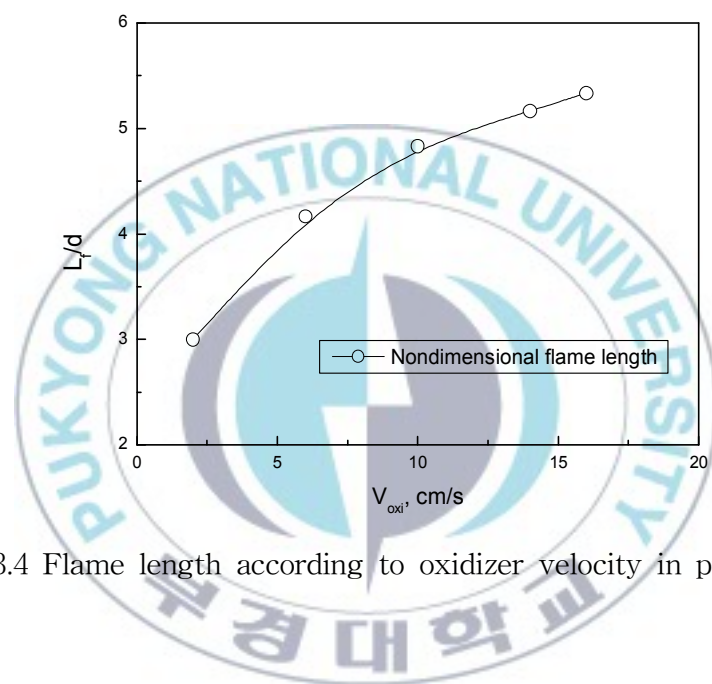


Fig. 3.4 Flame length according to oxidizer velocity in pure air.

제 4 장 헵탄 풀화재의 화염불안정성

4.1 화염불안정성에 대한 유속 및 농도 효과

산화제로서 순수 공기만을 사용하였을 경우에 주위류의 산화제 유속을 증가시켜가며 컴버너에서 생성되는 화염은 화염 하류에서 주기적인 떨림(flickering) 현상이 발견된다. Fig. 4.1에는 시간에 따른 화염의 변화를 사진으로 나타내었다. 초기에 화염에서 길이가 증가하여 하류부근에서 화염 중심축으로 화염이 수렴하는 현상(necking)이 발생한다. 일정시간 후에는 이 부근에서 화염이 떨어져 나가고 다시 길이가 초기화염과 비슷한 화염이 생성된다. 이러한 반복적인 떨림 현상은 일반적으로 풀화재 버너 직경에 의존한다고 알려져 있지만, 본 연구에서는 주위류의 유속을 변화하였을 때 떨림 주파수가 변화함을 확인할 수 있었다.

한편, 추후 설명하겠지만 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 [40]. 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 최소 연료속도(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.

주위류 V_{oxi} 의 변화에 따른 주파수의 변화와 헵탄의 기화된 속도 V_f 를 Fig. 4.2에 나타내었다. 연료표면에서 기화된 속도를 결정하기 위해서 본 연구에서는 연료 부피 소모율을 측정하였다. 이 정보로부터 헵탄의 밀도, 675 kg/m^3 을 고려하여 단위면적당 연료질량 소모율인 연소율(burning rate)을 계산할 수 있고, 액체 헵탄이 표면에서 균일하게 증발한다고 가정하면, 비체적(specific volume)을 이용하여 속도를 최종 결정할 수 있다. 사용된 헵탄 비체적 값은 1 atm 포화증기의 값인 $0.29 \text{ m}^3/\text{kg}$ 을 이용하였다 [41]. Fig. 4.2에서 보듯이 주위류 공기의 속도가 증가함에 따라 주파수는 감소하였고, 증발된 연료속도는 초기에 증가하다가 이후에는 크게 감소함을 볼 수 있다. 연료의 증발속도는 독립적인 일반 기체연료 제트와는 달리 화염에서의 열전달에 기인한다. 직경이 10cm 이하인 풀화재 버너에서는 전도에 크게 의존하며, 다음으로 화염으로부터의 복사열전달이 중요하다고

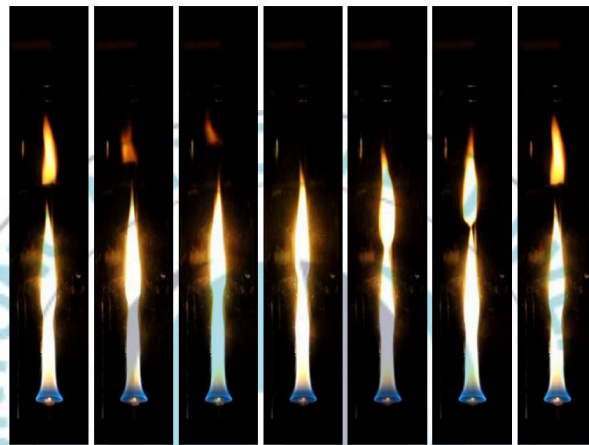


Fig. 4.1 Flickering motion on the cup burner flame.

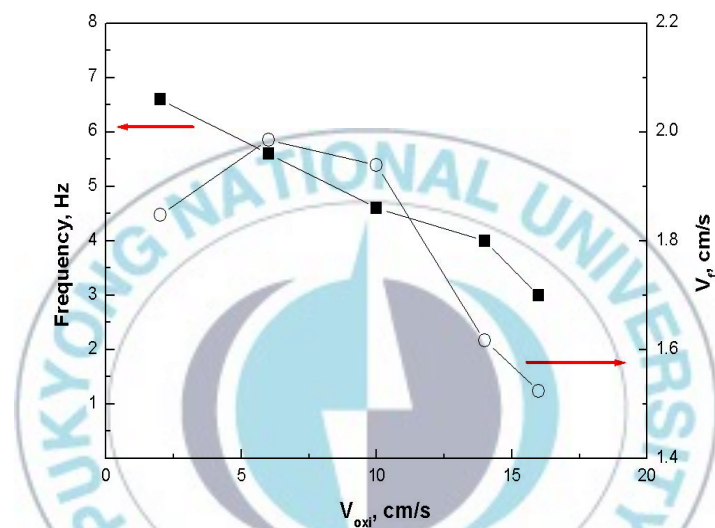
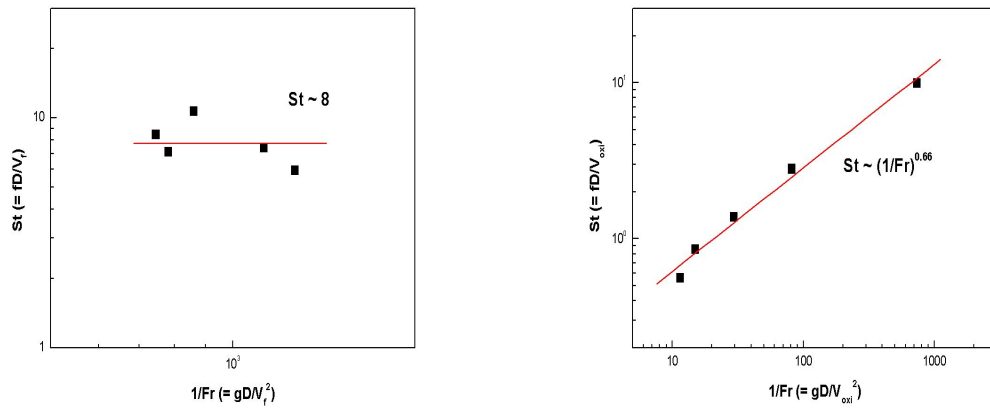
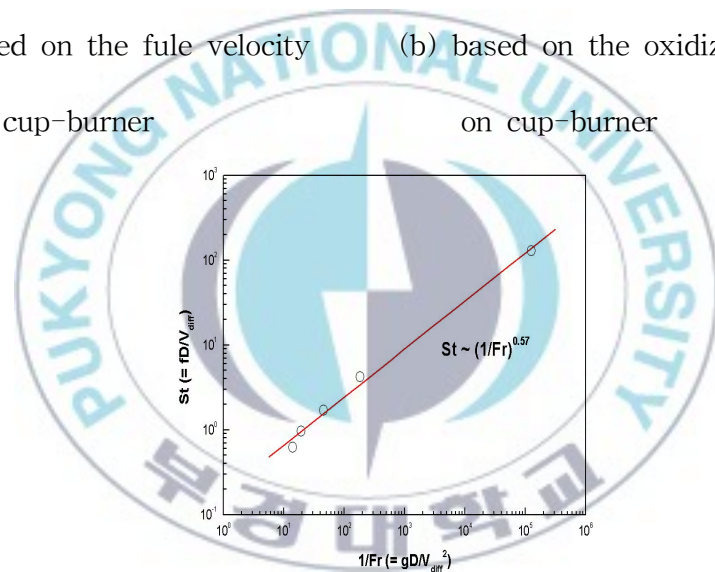


Fig. 4.2 Measured flame-flickering frequency and fuel velocity evaporated from heptane surface as a function of the oxidizer (pure air) velocity.

알려져 있다. 주위류 유속증가는 헵탄 화염면의 스트레인율을 증가시켜 버너가장자리(rim)에 화염 온도가 낮아지고, 결과적으로 전도 열전달량을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다. 또한 공기유속 증가는 화염높이를 증가시키거나, 복사열전달량이 거리의 제곱에 반비례함을 상기하면 후류의 화염은 액면에서의 증발에 상대적으로 큰 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다. 따라서 연료속도는 대략적으로 유속에 반비례한다고 할 수 있다. 앞서 언급하였듯이 폴화재는 모멘텀보다 부력이 지배적인 화염이고, 이 때 발생하는 진동은 화염의 부력 효과로 인하여 버너 가장자리 근처에서 화염과 주위류와의 밀도차에 의한 거대 와동(vortex)이 발생하여 후류에서 불안정성이 나타난다. 이러한 불안정성에 관한 주파수는 일반적으로 무차원 변수인 Strouhal 수($St = fD/V$)로 나타내고 부력은 Froude 수($Fr = gD/V^2$)로 스케일링하여 상사관계를 얻고 있다. 여기서, f 는 화염 진동 주파수, D 는 버너 직경, V 는 특성속도, g 는 중력가속도이다. 일반적인 폴화재나 자유제트에서는 주위 산화제가 정지해 있으므로 주위류 속도는 무시할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 주위류의 유속을 변화시켰고, 연료의 유속 또한 주위류의 유속에 따라 변하기 때문에 두 무차원 변수에서 특성속도를 연료 속도, 산화제 속도, 연료와 산화제 속도차 등 3가지의 속도로 표현하여 보았다. Fig. 4.3(a)의 연료속도로 특성화를 한 결과 Fr 수로 표현한 부력이 화염의 진동불안정성에 아무런 영향을 끼치지 않는 것을 알 수 있다. 이는 밝혀진



(a) based on the fuel velocity on cup-burner (b) based on the oxidizer velocity on cup-burner



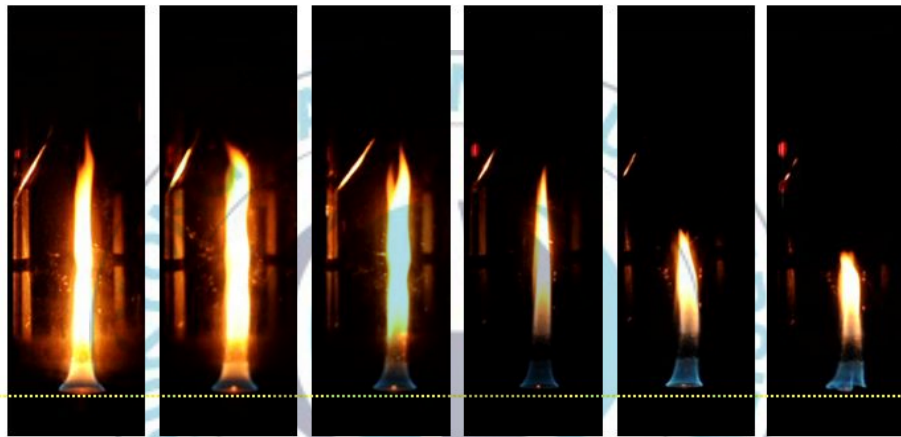
(c) Based on velocity difference between fuel and oxidizer stream on cup-burner

Fig. 4.3 The Strouhal number as a function of the inverse Froude number for heptane pool fires. Three different characteristic velocities were used for the non-dimensional groups.

사실과 부합하지 않으므로 대표 속도로서는 부적합하다. 반면에 Fig. 4.3(b)와 (c)를 보면 산화제측의 유속이 감소할수록 부력의 영향은 커지고, 진동불안정성이 증가하는 것을 알 수 있다. 두 그래프 모두 log 스케일에 대해서 선형적인 결과를 얻을 수 있었지만, 그 변화율에는 산화제의 유속을 고려한 경우에 보다 큰 지수를 보이고 있다. 기존의 주위류 속도가 없는 경우 부력지배화염의 많은 실험데이터를 가지고 해석한 결과를 보면 St 수와 $1/Fr$ 수의 log 스케일 관계식에서 0.57의 지수를 나타낸다[23]. 본 연구에서도 Fig. 4.3(c)에서 같은 관계식을 얻을 수 있었고, 이는 초기에 상류에서 생성되는 와는 연료와 산화제 전단면(shear layer)에서의 속도차에 의해서 생성됨을 입증하고 있다.

주위류의 산화제 유속을 고정시키고 소화약제의 몰분율 X_{N_2} 를 변화시켜 가며 컴버너에서 생성되는 화염의 모양을 Fig. 4.4에 가시화하였다. 실험에서 산화제의 유속은 10 cm/s로 고정하였고, 몰분율은 일반적으로 화재에서 소화약제의 소화농도를 결정하는 방법과 같이 공기에 희석된 질소의 비율을 나타낸다.

질소의 몰분율이 증가함에 따라 초기에는 화염의 길이가 성장함을 알 수 있다. 이는 불활성 기체의 몰분율이 증가하면서 연소에 필요한 산소 농도 감소에 따른 현상이다. 질소의 몰분율을 더욱 증가시키면 컴버너의 끝단으로부터 화염이 부상되며, 청염의 길이가 증가되고 휘염은 짧아지며 결국



$X_{N_2}=0.10$ 0.15 0.20 0.25 0.26 0.27

Fig. 4.4 The photos of Cup burner flame according to nitrogen mole fraction in the oxidizer. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s.

소화된다. 폴화재는 초기에는 컵버너 팁에 화염이 부착되어 있지만 소화농도에 가까워지면 컵버너 팁에서 2mm 부상됨을 볼 수 있다. 또한 주위류의 속도가 매우 큰 경우에는 부상 높이는 매우 증가한다.

Fig. 4.5는 질소의 물분율에 따른 화염의 길이와 헵탄의 연소율을 도시하였다. 같은 속도에서 순수 공기를 주위류로 사용하였을 경우인 $0.067 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 연소율과 비교하면 질소희석이 헵탄의 연소율을 감소시킨다. 이는 화염길이 및 화염온도의 감소에 따른 화염으로부터 연료표면으로의 열피드백 감소에 기인하고[42], 매연의 급격한 감소가 복사열전달을 매우 감소시킨 결과라 판단된다.

Fig. 4.6에는 질소 물분율의 증가에 따른 진동 주파수를 나타내었다. 순수 공기를 산화제로 사용하여 속도 효과를 본 Fig. 4.2와는 달리 매우 불규칙한 진동수를 나타내고 있다. 이러한 불규칙성은 질소의 농도에 따라 화염의 특성이 크게 바뀌게 되고, 이에 따라 부력 뿐 아니라 다른 물리적 현상이 불안정성의 원인이 되기 때문이다. 따라서 향후 불활성 기체의 농도를 변화시켜가며 화염의 구조를 보다 명확히 하면 진동모드를 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

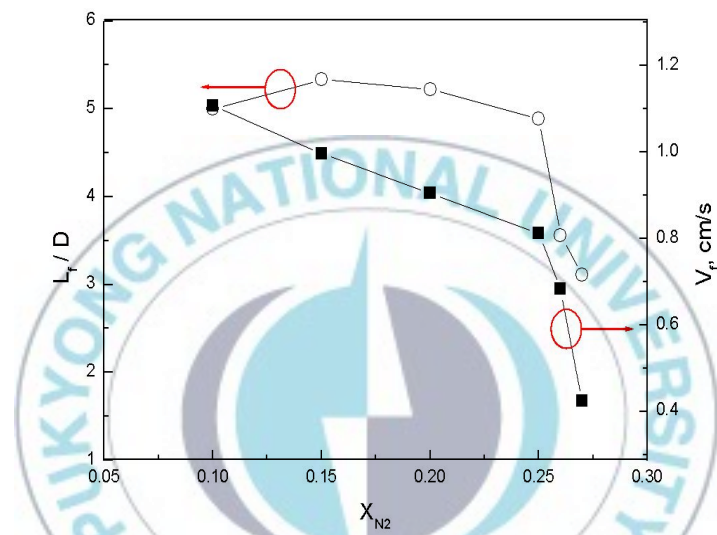


Fig. 4.5 Non-dimensional flame length to the burner diameter and measured burning rate as a function of nitrogen mole fraction in the oxidizer. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s.

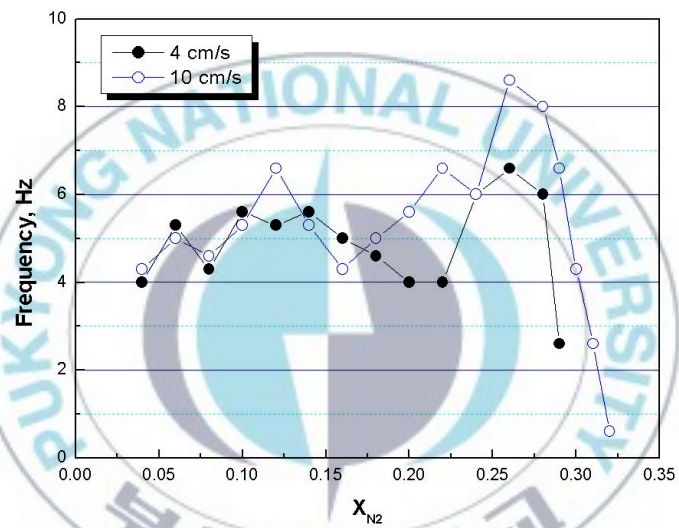


Fig. 4.6 Flickering frequency as a function of nitrogen concentration in oxidizer stream. The oxidizer velocity was fixed at 4cm/s and 10 cm/s.

4.2 소화근처에서의 화염불안정성

화염면에서의 불안정성은 일반적으로 외부의 교란이나 반응물의 조성성분, 국소당량비 그리고 주위의 압력과 온도 등에 의해서 영향을 받는다고 알려져 있다. 또한, 연료나 산화제에 불활성기체를 주입하면 반응물의 조성비율이 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. 4.7에는 불활성기체를 주위류에 희석하였을 때 소화 근처 영역에서 나타나는 불안정성 모드를 그림으로 도시하였다. 모두 4가지의 화염불안정성이 나타나는 가운데 먼저 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(rim) 주위에서 원형 단면의 화염 밑면이 좌우로 떨리는 현상을 의미하며, 회전(Rotation) 모드는 화염밑면이원주방향으로 회전하는 불안정성이다. 또한 반경방향(Radial Oscillation) 모드는 화염 중심으로 화염 베이스가 줄었다가 늘어나는 화염불안정성을 나타낸다. 한편, Fig. 4.8에 나타나는 화염불안정성 모드 중에 심볼 중앙의 검은 (Solid)원은 화

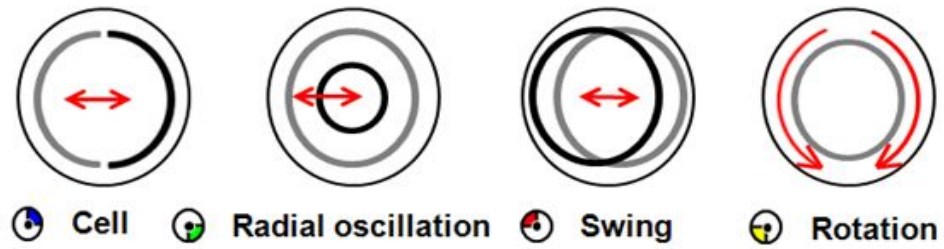
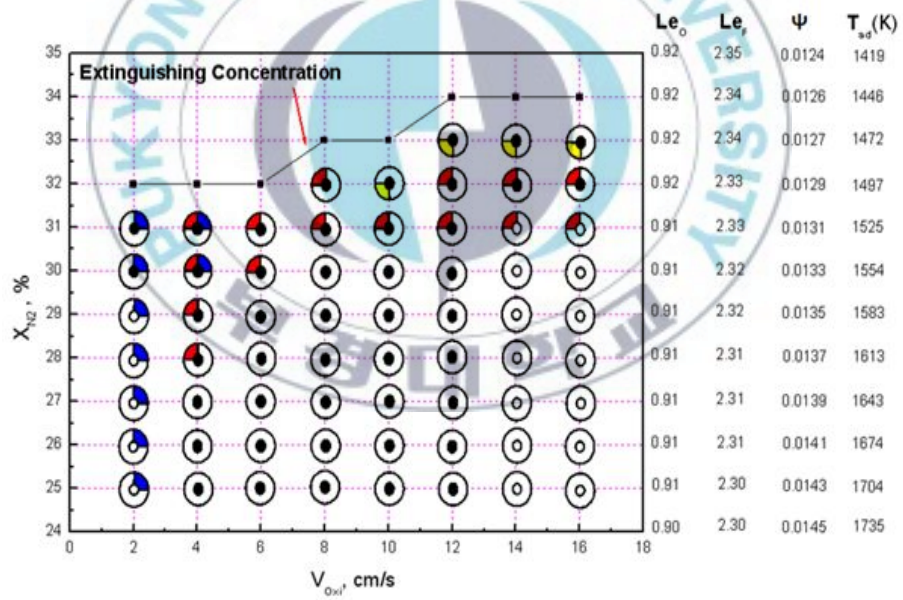
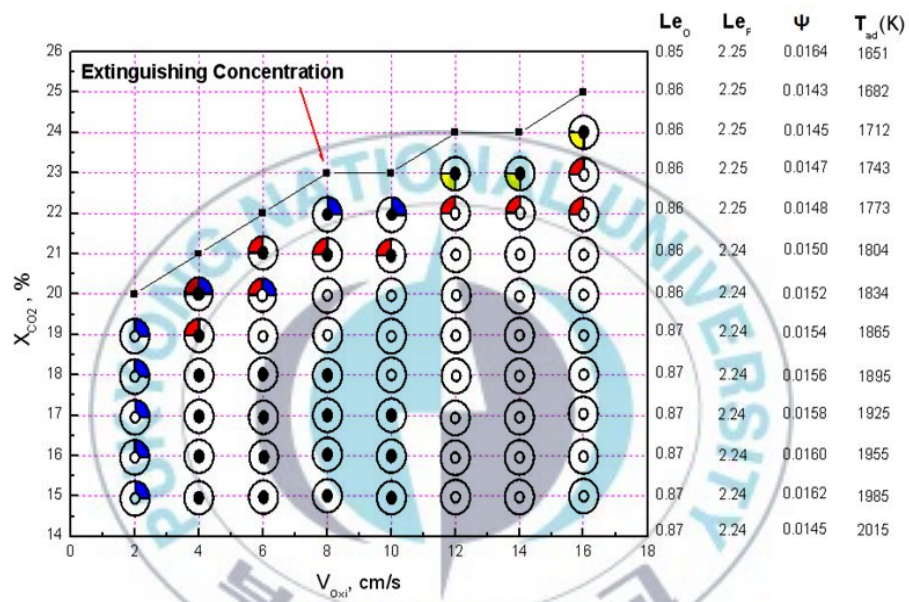


Fig. 4.7 Flame instability mode at flame base and those symbols.



(a) N_2 dilution



(b) CO₂ dilution

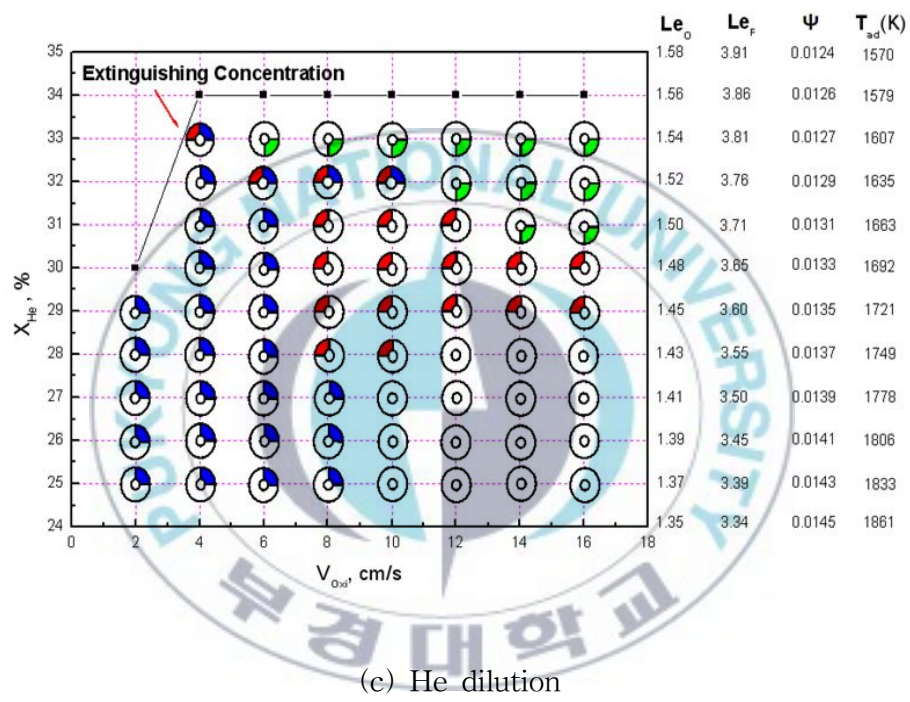


Fig. 4.8 The instability map for nitrogen and carbon dioxide dilutions near extinctions.

염의 축방향 불안정성이 발생함을 의미한다. Fig. 4.8에는 유속변화와 농도 변화에 대해 화염베이스에서의 불안정성 형태를 나타냄과 동시에 초기혼합율, Le number나 단일화염온도의 영향을 살펴보기 위하여 산화제에 다양한 불활성 가스(N_2 , CO_2 , He) 첨가에 따른 화염 불안정성 모드를 도시하였다. 그림에는 각 불활성 기체별로 주위류 유속에 따른 소화농도를 함께 도시하였다. 화염불안정성을 살펴보면 소화농도 근처에서 유속이 증가하면서 불활성기체에 따라 다양한 형태로 화염베이스에서의 불안정성이 나타남을 확인 할 수 있었다. Fig. 4.8(a) 질소희석의 경우 주위류 유속이 낮을 경우와 높을 경우에는 축방향 진동이 발생하지 않으며, 소화농도 근처에서는 축방향 진동 현상이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 유속을 증가시킬수록 소화 근처에서 셀 모드, 스윙 모드 그리고 회전 모드로 불안정성 모드가 변화함을 볼 수 있다. 이 때 화염의 회전방향은 시계 또는 반시계 방향 등의 특정한 방향이 존재하지 않는데, 주위 교란(Disturbance)의 초기 조건(Initial condition)에 따른 현상으로 판단된다. 또한, 소화농도보다 2% 작은 경우에는 유속이 증가하여도 현재의 실험조건에서는 회전모드가 나타나지 않음을 볼 수 있다. Fig. 4.8(b) 이산화탄소로 희석한 경우에는 유속의 증가에 따라 스윙, 셀, 회전 모드로 변화하고, 소화농도에 비해 2% 낮은 이산화탄소 농도에서는 질소희석의 경우와 마찬가지로 스윙모드에서 회전모드로 천이한다. 이러한 결과로부터 원주방향으로 회전하는 불안정성은

주위류 유속에 비해 소화농도에 근접해 있는지에 관한 농도영향이 보다 두드러진 불안정성 모드라 할 수 있다. 마찬가지로 축방향의 불안정성 역시 유속이 낮을 경우와 높을 경우에 나타나지 않는다. Fig. 4.8(c) 헬륨을 희석시켰을 경우에는 앞의 두 불활성기체(N_2 , CO_2)와는 다르게 전체적인 부분에서 축방향 진동이 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 소화농도 근처에서 화염 불안정성 모드가 줄었다가 늘어나는 반경방향(Radial Oscillation) 형태의 불안정성이 나타난다. 기존의 컴버너 연구에는 이러한 3가지 화염 밀면 불안정모드는 보고되지 않았고, 헬륨으로 희석한 경우에 소화근처에서 화염 밀면이 반경방향으로 진동하는 불안정성이 보고되었다. 기존의 연구결과[40]에 의하면 화염 베이스에서의 반경방향 진동수는 축방향 진동수의 절반으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서의 He의 경우에는 축방향 진동이 나타나지 않음에도 불구하고 반경방향의 불안정성만 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 He의 경우에는 공기보다 밀도가 약 7배 정도 낮아서 밀도차의 영향을 받지 않아 와류가 생성되지 않기 때문이라고 판단된다.

한편, 화염 밀면 불안정성에 영향을 미치는 변수들을 파악하기 위하여 각 유속에 대한 물농도에 대해서 Lewis 수, 초기혼합율, 단열화염온도를 조사하였다. 초기혼합율(ψ)은 산화제류에서의 산소 물농도에 대한 연료류의 연료 물농도의 비로써 정의 된다.[35]. 또한, 화염의 불안정성에 미치는

연료와 산화제의 Le 수의 영향을 검토하기 위해서 식 (4.1)와 같이 정의되는 Le를 도입하였다.

$$Le = \alpha / D \quad (4.1)$$

여기서, α 는 열확산도(Thermal Diffusivity)를 의미하고 D 는 식 (4.2)로 정의되는 혼합기평균 확산도(Mixture-averaged Diffusivity)를 나타낸다.

$$D = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k}^k X_j / D_{jk}} \quad (4.2)$$

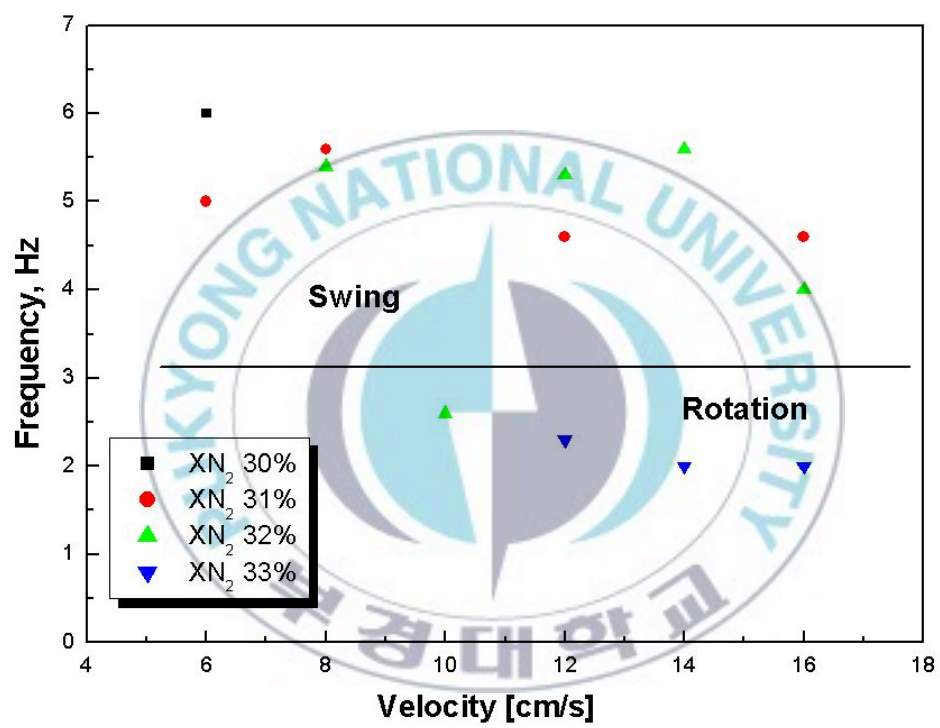
Le 수의 계산을 위한 헵탄의 열역학적 물성치는 San Diego Mechanism[43]을 사용하였고, CHEMKIN-II[49]와 TRANFIT package[50]를 이용하여 혼합기의 물성치를 계산하였다.

또한, 불활성기체의 첨가에 따른 혼합기의 단열화염온도(T_{ad})를 검토하기 위해서 혼합물의 Gibbs 자유 에너지를 최소화 하는 STANJAN 라이브러리[48]를 이용하여 평형상태를 계산하는 EQUIL 코드[45]를 이용하였다. 그리고, 이전연구[46]의 결과와 화염단열온도를 비교해 보았을때 3%이내의 오차범위를 보이며 비활성기체의 첨가에 따른 단열화염온도를 예측하였다.

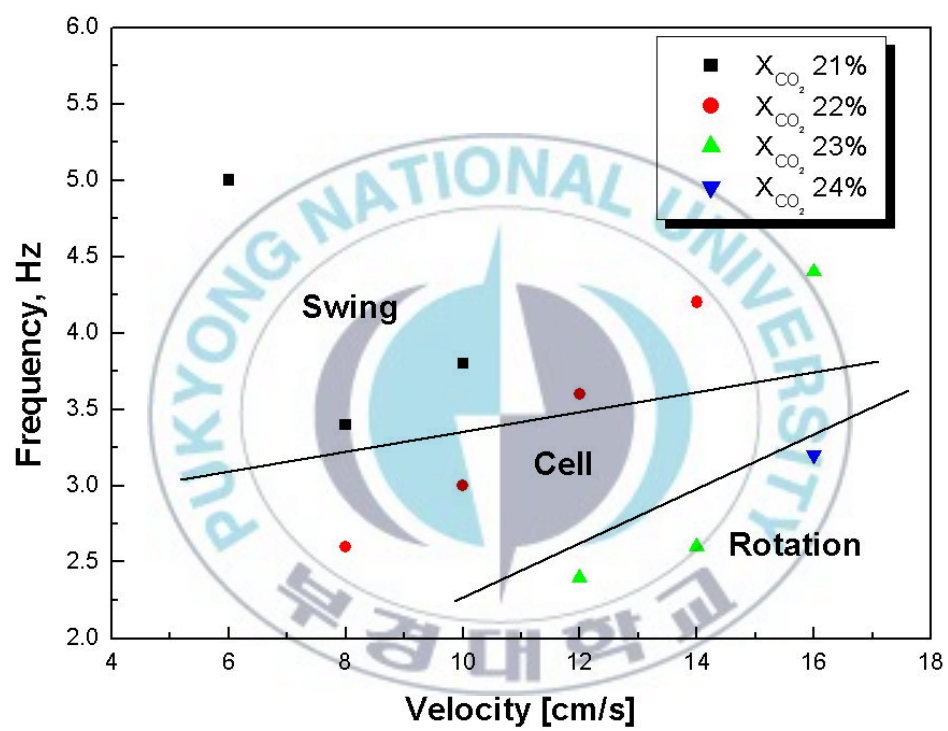
불활성 가스에서의 Le_F 은 1보다 크며, Le_O 는 1보다 작은 값을 나타내고 있다. 따라서 대략적인 불안정성은 연료와 산화제의 Le 수로서 판단할 수 있지만, 다양한 화염불안정성의 모드변환은 단지 Le 수만으로 결정할 수 없다. 그러므로, 다른 새로운 파라미터로서 불활성가스의 초기 혼합율을 비교해보았을 때 서로 큰 차이가 없는 유사한 값을 나타내었다. 그러므로 본 연구의 결과는 이전연구[35]에서 보고되었던 Le 수의 변화와 초기혼합율에 대한 화염불안정성의 경향성은 나타나지 않는다. 한편, 단일화염온도는 전체적으로 불활성가스의 농도가 증가함에 따라 단일화염온도가 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 단일화염온도 또한 특정한 온도에서의 화염불안정성 모드가 나타나지 않는다. 따라서, Fig. 4.8에 나타난 화염불안정성 경향은 이전연구[46-47]에서 나타났던 jet 확산화염 또는 대향류 확산화염과는 다르게 Le 수와 초기혼합율과 같은 열확산 불안정성과 단일화염온도에 의한 열손실 불안정성을 기반으로 분리되어 질수는 없다. 또한 이와 같은 Le 수에서 발생하는 화염 밀면 불안정성 모드의 변화는 주위류 유속의 효과로서 결론내릴 수 있다.

Fig. 4.9에는 화염 베이스를 기준으로 각 불활성가스에 따른 화염 밀면에서의 진동주파수를 유속에 따라 나타내었다. 유속이 낮을 때에 일정한 진동주파수가 나타나지 않아 일정한 진동주기가 나타나는 유속 6 cm/s 에서부터 진동주파수를 측정하였다. 다양한 화염불안정성에 따른 진동주파수를

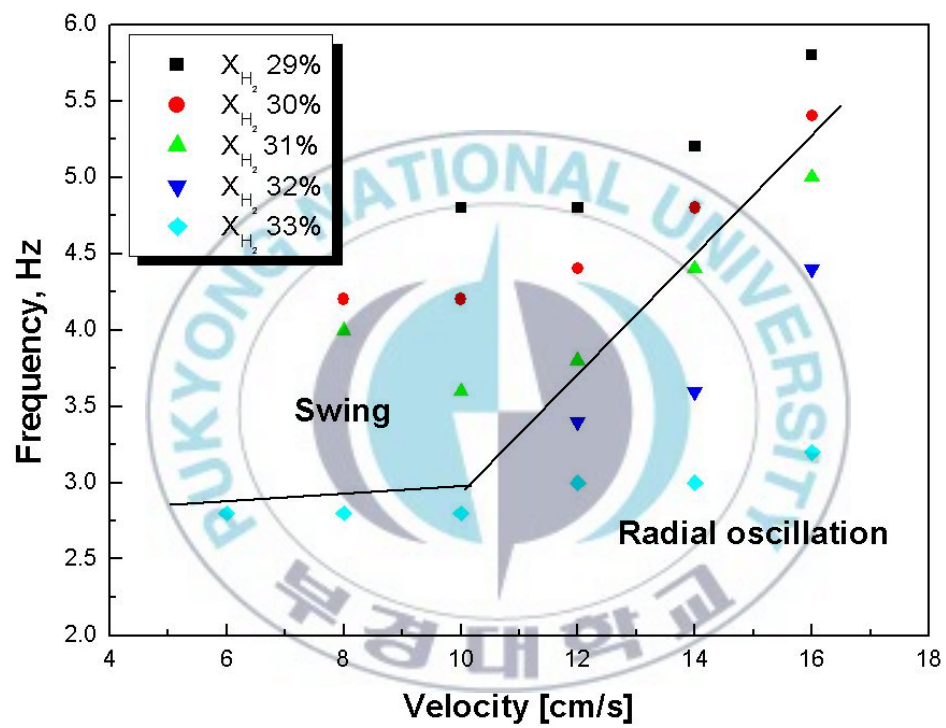
조사한 결과 Fig. 4.9(a) 질소희석의 경우에는 스윙 모드로 나타나는 진동 주파수는 4~6 Hz 정도이며, 회전 모드로 나타나는 진동주파수는 대략 절반인 2~3 Hz 정도이다. 따라서 스윙 모드와 회전모드 간의 상관관계가 있음을 의미한다. 또한, 소화농도에 가까울수록 스윙보다는 회전 모드 형태의 불안정성을 보인다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.9(b) 이산화탄소 희석의 경우에는 스윙과 회전 모드 주파수 사이에 셀의 주파수가 위치함을 볼 수 있다. 셀 모드를 스윙모드의 변화된 종류라 판단하면 대략적으로 스윙모드의 주파수는 회전모드 주파수의 2배임을 또한 확인할 수 있다. Fig. 4.9(c) 헬륨을 희석하였을 경우에만 나타나는 radial oscillation 형태의 진동주파수는 2.8~5.0 Hz정도이며, 다른 화염 불안정 모드와는 다르게 유속이 증가할수록 진동주파수 역시 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다.



(a) N₂ dilution



(b) CO_2 dilution



(c) He dilution

Fig. 4.9 Measurement flame base-flickering frequency to each inner gases.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 비균질 특성의 액체연료인 헵탄과 불활성가스가 첨가되었을 경우 컵버너 헵탄 풀화재에서 유속과 농도의 변화가 최소소화농도 및 화염불안정성의 미치는 인자에 대한 이해를 명확히 하고자 하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

불활성가스 첨가에 따른 소화농도

1) 헬륨을 제외하고는 모든 불활성 기체의 최소소화농도는 산화제 주위류의 속도가 증가할수록 커지는 경향을 보인다. 또한, 불활성기체의 소화는 열용량에 많은 영향을 받아서 사용된 소화약제중 열용량이 가장 큰 이산화탄소가 우수하였다. 헬륨은 다른 소화약제들 보다 더 열전도도가 10배 이상 높기 때문에 열용량이 낮음에도 불구하고 소화성능이 우수하다.

2) 산화제의 유속 증가는 연료소모율을 감소시켜 액체표면에서 증발되는 연료속도를 감소시킨다. 따라서 산화제의 유속증가에 따른 MEC 증가효과는 연료속도 감소에 기인한 전체 스트레인율의 감소때문으로 설명할 수 있다.

3) 산화제의 불활성기체 물분율을 증가시키는 경우는 유속증가와 유사하게 연료소모율을 감소시키는 작용을 한다. 이는 유체역학적 영향과 산화제 화학적 조성의 변화가 액면으로의 열전달율을 변화시키고 궁극적으로는 액체 표면에서 증발하는 연료의 양을 조절한다.

헵탄 풀화재의 화염불안정성

1) 유속이 낮은 경우 축방향 진동이 나타나지 않음을 확인하였다. 이러한 현상은 액면에서의 연료증발량이 축방향 불안정성을 일으키는 최소연소속도보다 작기 때문이다. 또한, 축방향 진동현상은 화염에 의한 열팽창 및 부력등의 영향으로 화염불안정성이 나타나 와류를 생성시키고 이에 따라 화염이 축방향으로 진동한다.

2) 연료와 산화제 속도차를 특성속도로 사용하였을 경우에 St 수와 $1/Fr$ 수의 $\log$ 스케일 관계식에서 기존의 결과와 일치하는 결과를 얻었다. 이는 초기에 상류에서 생성되는 와는 연료와 산화제 전단면(shear layer)에서의 속도차에 의해서 생성됨을 입증하고 있다.

3) 질소 물분율의 증가에 따른 진동 주파수는 매우 불규칙한 진동수를 보이고 있다. 이러한 불규칙성은 질소의 농도에 따라 화염의 특성이 크게 바뀌게 되고, 이에 따라 부력 뿐 아니라 다른 물리적 현상이 불안정성의 원인이 되기 때문이다.

4) 불활성가스 희석하였을 경우, 유속이 증가할수록 화염 밑면에서 스윙, 셀, 회전모드의 다양한 화염불안정성이 소화근처에서 나타났다. 회전 모드의 화염불안정성은(N_2 , CO_2) 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.

참고문헌

- [1] NFPA 2001 "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System", Quincy, MA, 2000.
- [2] ISO 6183, Fire Protection Equipment-Carbon Dioxide Extinguishing system for USE on Premises Design and Installation, 1990(E)
- [3] N. Saito, Y. Ogawa, Y. Saso, C. Liao, R. Sakei, "Flame-extinguishing concentrations and peak concentrations of N₂, Ar, CO₂ and their mixtures for hydrocarbon fuels", Fire Safety Journal, Vol. 27 pp. 185-200, 1996.
- [4] J. A. Senecal, "Flame extinguishing in the cup-burner by inert gases", Fire Safety Journal, vol. 40, pp. 579-591, 2005.
- [5] R. S. Sheinson, J. E. Penner-Hahn, D. Indritz, "The physical and chemical action of fire suppressants", Fire Safety Journal, Vol. 15, pp. 437-450, 1989.
- [6] S. Liu, M. C. Soteriou, M. B. Colket, J. A. Senecal, "Determination of cup-burner extinguishing concentration using the perfectly stirred reactor model", Fire Safety Journal, Vol. 43, pp. 589-597, 2008.
- [7] F. Takahashi, G. T. Linteris, V. R. Katta, "Extinguishment mechanisms of coflow diffusion flames in a cup-burner apparatus",

Proceeding of Combustion Institute, Vol. 31 pp. 2721–2729, 2007.

[8] V. R. Katta, F. Takahashi, G. T. Linteris, "Suppression of cup-burner flames using carbon dioxide in microgravity", *Combustion and Flame*, Vol. 137, pp. 506–522, 2004.

[9] V. R. Katta, F. Takahashi, G. T. Linteris, "Fire-suppression characteristics of CF₃H in a cup burner", *Combustion and Flame*, Vol. 144, pp. 645–661, 2006.

[10] E. C. Creitz, "Inhibition of Diffusion Flames by Methyl Bromide and Trifluoromethyl Bromide Applied to the Fuel and Oxygen Sides of the Reaction Zone", *J. Res. NBS(US)*, Vol. 65A, No. 4, pp. 389, 1961.

[11] R. Hirst, and K. Booth, "Measurement of Flame- Extinguishing Concentrations", *Fire Tech.*, Vol. 13, No. 4, pp.296, 1977.

[12] T. A. Moore, A. Martinez, R. E. Tapscott, "Comparison of the NMERI and ICI-style cup-burners", *Proceedings of the 6th Halon Options Technical Working Conference (HOTWC-97)*, Albuquerque, NM, pp. 388–395, 1997.

[13] S. Liu, M.C. Soteriou, M.B. Colket and J.A. Senecal, "Determination of Cup-burner Extinguishing Concentration using the perfectly stirred Reactor Model", *Fire Safety Journal*, In Press, 2008

- [14] D. S. Chamberlin and A. Rose, "The flicker of luminous flames", Industrial Engineering Chemistry, Vol. 20, pp. 1013 - 1016, 1928
- [15] J. Barr, "Diffusion Flames", 4th Symposium (International) on Combustion, Vol. 4, pp. 765 - 771, 1953
- [16] D. J. Rasbash, Z. W. Rogowski and G. W. V. Stark, "Properties of fires of liquids" Fuel, Vol35, pp. 94 - 107, 1956
- [17] A. J. Grant and J. M. Jones, "Low Frequency diffusion flame oscillations", Combustion and Flame, Vol. 25, pp. 153 - 160, 1975
- [18] M. Furi, P. Papas, P. A. Monkewitz, "Non-premixed jet flame pulsations near extinction", Proceedings of the combustion Institute, Vol. 28, pp. 831-838, 2000
- [19] M.A. Delichatsios, "Gravitational Fluctuations in Pool Fires and Pool Buoyant Flows", Combustion Science and Technology, Vol. 112, pp. 355-358, 1996
- [20] F. Takahashi, G. T. Linteris, V. R. Katta, "Vortex-coupled Oscillations of edge diffusion flames in coflowing air with dilution", Proceedings of the combustion Institute, Vol. 31, pp. 1575-1582, 2007
- [21] W. M. G. Malalasekera, "A Review of Research and an Experimental Study on the Pulsation of Buoyant Diffusion Flames and

Pool Fires", *Fire and materials*, Vol. 20, Issue 6, pp. 261 - 271, 1996

[22] P. Joulain, "The behavior of pool fires: State of the art and new insights", *Proceedings of the combustion Institute*, Vol. 27, pp. 2691-2706, 1998

[23] A. Hamins, J.C. Yang, T. Kashiwagi, "An experimental investigation of the pulsation frequency of flames", *Proceedings of the 24th International Symposium on combustion*, Vol. 24, pp. 1695-1702, 1992

[24] B.M. Cetegen and K.D. Kasper, "Experiments on the oscillatory behavior of buoyant plumes of helium and helium-air mixtures", *Physics of Fluids*, Vol. 8, pp. 2974-2984, 1996

[25] B.M. Cetegen, "Behavior of naturally unstable and periodically forced axisymmetric buoyant plumes of helium and helium-air mixtures", *Physics of Fluids*, Vol. 9, pp. 3742-3752, 1997

[26] B. M. Cetegen and T. Ahmed, "Periodic instability of plumes and fires", *Combustion and Flame*, Vol. 93, pp. 157 - 184, 1993

[27] V R. Katta, W. M. Roquemore, M. Menon, S. T. Lee, R. J. Santoro and T. A. Litzinger, "Impact of Soot on Flame Flicker", *Proc. Combustion Inst.*, Vol. 32, pp. 1343 - 1350, 2009

- [28] J. Buckmaster, A. Hegab and T. L. Jackson, "More Results on Oscillating Edge-flames", *Phys. Fluids*, Vol. 12, pp. 1592 - 1600, 2000
- [29] J. Buckmaster, "Large-Lewis -Number Instabilities of Model Edge-Flames", *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223 - 2233, 2001
- [30] S. Cheamtham and M. Matalon, "Heat Loss and Lewis Number Effects on the Onset of Oscillation in Diffusion Flames", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, pp. 1063 - 1070, 1996
- [31] L. L. Kirkby, R. A. Schmitz, "An Analytical Study of the Stability of a Laminar Diffusion Flame", *Combust. Flame*, Vol. 26, pp. 205 - 220, 1996
- [32] V. N. Kurdyumov and M. Matalon, "Radiation Losses as a Driving Mechanism for Flame Oscillations," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, pp. 45 - 52, 2002
- [33] G. I. Sivashinsky, "Diffusion-Thermal Theory of Cellular Flames", *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 137 - 146, 1977
- [34] J. S. Kim, F. A. Williams and P. D. Ronney, "Diffusional-Thermal Instability of a Diffusion Flames" *Fluid Mech*, Vol. 327, pp. 273 - 301, 1996
- [35] F. Marc, P. Papas and P.A. Monkewitz, "NON-PREMIXED JET

FLAME PULSATIONS NEAR EXTINCTION", Proc. Combustion Inst.,
Vol 28, pp. 831 - 838, 2000

[36] R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, "CHEMKIN-II, A
FORTRAN chemical kinetics package for the analysis of gas-phase
chemical kinetics", Sandia Report SAND89-8009B, 1991.

[37] A. Nakakuki, "Heat Transfer in hot-Zone-forming Pool Fires,
Combustion and Flame", Vol. 109, pp. 353-369, 1997.

[38] M. Klassen, J. P. Gore, Y. R. Sivathanu, A. Hamins, T.
Kashiwagi, "Radiative heat feedback in a toluene pool fire", Proceeding
of Combustion Institute, Vol. 24, pp. 1713-1719, 1992.

[39] P. Joulain, "The behavior of pool fires: State of the art and new
insights", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 27, pp. 2691-2706,
1998.

[40] F. Takahashi, G. T. Linteris, V. R. Katta, "Vortex-coupled
Oscillations of edge diffusion flames in coflowing air with dilution",
Proc. Combustion Inst., Vol. 31, pp. 1575 - 1582, 2007

[41] NIST, "Thermophysical Properties of Fluid Systems",
<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

[42] M. Klassen, J. P. Gore, Y. R. Sivathanu, A. Hamins, T.

Kashiwagi, "Radiative heat feedback in a toluene pool fire", Proceedings of the combustion Institute, Vol. 24, pp. 1713-1719, 1992

[43] <http://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html>

[44] R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics", Sandia Report SAND89 - 8009B, 1989

[45] A. E. Lutz, F. M. Rupley, R. J. Kee and W. C. Reynolds, "EQUIL: A program for computing chemical equilibria", Sandia National Laboratories, 2000

[46] M. Chaos, R. H. Chen, "An experimental study of pulsating instability in near-limit laminar nonpremixed flames", Combust. Sci. Technol, Vol. 176, pp. 1191 - 1215, 2004

[47] D. L. Jacono, P. Papas, P. A. Monkewitz, "Cell formation in non-premixed, axisymmetric jet flames near extinction", Combust. Theory Model., Vol. 7, pp. 635 - 644, 2003.

[48] W. C. Reynolds, "The Element Potential Method for Chemical Equilibrium Analysis: Implementation in the Interactive Program STANJAN", Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 1986.

[49] R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, CHEMKIN-II: A

Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics, SAND89-8009B, Sandia National Laboratories, 1989.

[50] R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Multi Component Transport Properties, SAND86-8246, Sandia National Laboratories, 1986.



감사의 글

2011년 3월...부경대 기계공학과를 졸업한 후 좀 더 공부를 하기를 위하여 지금의 부경대 안전공학과 실험실에서 연구하고 공부한지 벌써 2년이 지났습니다. 지금 생각해 보면 아무런 준비 없이 석사과정을 들어와 오직 공부만 한다는 생각으로 달려왔는데 어느덧 석사를 졸업하게 되었습니다. 제가 지금 여기에 오기까지 많은 분들의 도움이 있었기에 이 작은 결실의 기쁨을 나누고자 합니다.

우선, 제가 가장 좋아하고 존경하는 이의주 교수님 진심으로 고개숙여 감사의 뜻을 전합니다. 항상 부족한 저를 가르치면서 연구자의 방향과 인생의 도리를 깨우치게 해주신 점과 더불어 제가 새로운 꿈과 목표를 가지게 해준 점에 진심으로 감사드립니다.

세미나를 통하여 부족한 부분을 지적해주시고 많은 조언을 해주신 장석록 교수님 그리고 신성우 교수님, 저에게 또 한분의 지도 교수님으로써 연구를 하다가 계산에 필요한 연구에 대해 조언을 해주시고 항상 불편함 없이 저희의 마음을 편안하게 해주시는 오창보 교수님, 이 논문이 완성되기까지 아낌없는 조언을 해주신 이창준 교수님, 권오현 교수님, 이동훈 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

실험에 대하여 그리고 인생에 대하여 항상 같이 고민해 주시고 현재 KAUST 대학에서 박사과정인 대근이 형에게도 진심으로 감사드리며, 앞으로

로 유학 잘 마치고 원하는 꿈을 이루기를 기원합니다. 그리고 많은 조언과
실험에 필요한 부분을 지적해주신 홋카이도대학교에 성환이형과 교토대학
교에 정훈이형에게도 진심으로 감사의 말씀 드립니다.

그리고 실험실 생활을 동거동락하면서 지내온 사랑하는 동생들....내가 힘
들 때 항상 들어주고 옆에 있어준(꿀각꿀각) 호현이, 항상 박사의 꿈을 안
고 열심히 연구하는 지웅이, 같이 실험실 생활을 하면서 같이 고생하고 졸
업을 하게 된 정란이, 앞으로 실험실을 이끌어 나가야 될 영훈이, 언제나
성실하게 생활하고 웃으면 지냈던 은철이, 그리고 우리의 막내.. 코드 한다
고 고생 많은 유정이 모두들 감사의 마음을 전하며 앞으로 자신들이 연구
하는 것에 대해서 좋은 성과를 이루기를 바랍니다. 다른 실험실이지만 실험
장비가 안전공학과에 있어 매일 보고 생활하는 상훈이 그리고 기계과
동생 원준이, 승욱이, 원식이, 용호에게도 진심으로 감사드립니다.

오늘의 제가 있기까지 깊은 사랑으로 돌보아 주신 존경하고 사랑하는 아
버지, 어머니 가슴속 깊이 감사드리고, 제가 항상 실험실에 있어서 집안일
에 소홀히 한 부분을 메워준 저의 사랑하는 여동생에게도 감사한 마음을
전하며 앞으로 더 멋진 미래를 기대하면서 이 기쁨을 함께 하고 싶습니다.

2012년 1월

정 태 희 올림