

<논 문>

Al/액체연료 슬러리 액적의 연소와 미세폭발 (I) - 실험적 연구 -

변도영* · 조주형** · 백승욱*** · 안국영****

(1996년 10월 25일 접수)

Combustion and Microexplosion of Al/Liquid Fuel Slurry Droplets (I) — Experimental Study —

Do-Young Byun, Ju-Hyeong Cho, Seung-Wook Baek and Kuk-Young Ahn

Key Words : Microexplosion(미세폭발), Additives(첨가제), Heterogeneous Nucleation(이질 핵형성), Internal Temperature Distributions(내부온도분포), Radiative Interaction(복사열 간섭영향)

Abstract

The microexplosive combustion of a slurry droplet was investigated experimentally. The microexplosion has been approximately considered to be caused by pressure build-up in the shell and to be promoted by heterogeneous nucleation of liquid carrier, which is due to the suppression of evaporation and subsequent superheating of liquid carrier. To closely investigate the pressure build-up and the heterogeneous nucleation, the experiments were conducted in an electric combustor, of which temperature was controllable(400K-900K). And the effects of two aligned droplets on the interactive combustion and microexplosion were found in a hot post region of a flat flame burner. Transient internal temperature distributions for slurry droplets were measured. And the shell formation and the microexplosion of suspended Al/JP-8 and Al/n-heptane slurry droplets were examined with various surfactant concentrations(0.5-5wt%) and solid loadings(10-50 wt. %). The microexplosion time of binary array of droplets was found to be less than that of the isolated droplet due to radiative interaction between droplets.

1. 서 론

슬러리 액적 연료는 석탄, 알루미늄 등과 같은 고체연료의 입자들과 액체연료의 혼합으로 구성된다. 석탄을 이용한 액적에는 Coal-Water Mixture

(CWM)와 Coal-Oil Mixture(COM) 등이 있으며 금속을 이용하게 되면 열량과 독성을 고려하여 Al, B 등을 사용한다. 이러한 연료들의 가장 큰 효용성은 고체연료의 고밀도 에너지이다. 슬러리 액적의 응용성은 산업, 군사적으로 다양하여 보일러, 디젤엔진, 터빈과 공기흡입식 추진기관 등에 적용될 수 있다. 일반적으로 슬러리 액적은 액체연료의 연소 후에 고체입자들이 점화, 연소하게 되며 이때에 고체입자들은 결집하여 고체집괴(agglomeration)를 형성한다. 슬러리 액적은 에너지 함유 측

*한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

**한국항공우주연구원

***회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

***한국기계연구원

면에서 큰 이점을 갖고 있으나 고체입자의 긴 반응 시간 때문에 저 연소 효율을 갖게된다. 이 난점을 해결하기 위한 방안으로서 제기되고 있는 것이 초기에 액적을 미세폭발(microexplosion) 시킴으로써 2차 핵화(secondary atomization)를 강제하고 그 결과로써 연소 면적을 확대하는 것이다. 이러한 미세폭발의 효율적 이용과 통제를 위해서는 그 메카니즘과 현상에 대한 연구가 필요하다.

많은 연구자들에 의해서 석탄을 이용한 슬러리 액적(COM, CWM)의 연소 특성에 대한 실험적, 이론적 연구가 수행되었다.^(1~3) 그리고 첨가제를 사용하여 Coal/JP-10 슬러리 액적의 미세폭발 특성을 관찰하기도 하였으며 미세폭발에 대한 액적 표면에서의 쉘 형성과 그 특성에 대한 실험적 측정을 바탕으로 이론적 모델링을 수행하였다.⁽⁴⁾ 슬러리 액적의 미세폭발의 메카니즘과 관련한 연구로서 Takahashi^(5~7)와 동료들은 B/JP-10 슬러리에 대한 실험적, 이론적 연구를 수행하여 액적의 표면에 형성되는 불 투과성 쉘이 증발 기체를 차단하고 이로 인하여 압력이 증가하면서 미세폭발이 가능함을 제안하였다. 고체입자의 질량분율이 특정한 기준값 이상이면 액체연료가 증발하면서 액체면이 액적 내부로 침투하여 표면에는 단단한 다공질 쉘(Rigid Porous Shell)이 형성된다. 그리고 쉘의 고체입자는 첨가제(Surfactant)와 결합하여 불투과적(Impermeable) 특성을 지니게 됨으로써 내부 증발가스를 차단하고 증발을 억제하기 때문에 이질 핵형성(Heterogeneous Nucleation)과 그에 따른 압력 상승(Pressure Build-up)을 야기한다. 이러한 일련의 과정이 미세폭발의 단계적 현상임을 주장하였다. 또한 외부 환경의 산소량, 온도와 금속 입자의 크기, 액적의 농도, 첨가제 등 여러 조건들에 대한 미세폭발의 현상을 더욱 구체적으로 규명하였다.

Wong^(8~11)과 그 동료들은 AI/JP 10, B/JP-10, AI/C/JP-10 등의 슬러리 액적의 연소와 미세폭발 현상을 연구하였다. 특히 실험 조건 온도가 액적에 포함된 첨가제의 열분해 이상이어야 미세폭발이 가능하다는 실험 결과로부터 첨가제의 열분해에 대한 주의를 제기하였고 메카니즘으로서 쉘의 형성과 함께 액체연료의 과열(superheating)과 이질 핵형성(heterogeneous nucleation)을 제안하였다. Wong^(9,10)과 그 동료들은 AI/C/JP 10 슬러리 액적의 고정, 자유낙하 상태의 미세폭발 현상을 여러 실험조건속에서 수행하여 고체입자의 농도에 따라 미세폭발시

액적 표면에 형성되는 쉘이 첨가 고체입자에 따라서 불투과적(Impermeable)이기도 하고 투과적(Permeable)일수도 있으며 미세폭발에 첨가제의 열분해가 중요함을 시사하는 실험 결과를 제시하였다.

실제의 연소기 내에서는 연료가 분사되어 미립화된 액적들이 집단의 형태로 연소하기 때문에 상호 간섭 효과가 존재할 것이다. 이러한 액적 상호간의 영향을 규명하기 위하여 두개의 액적을 배열하여 연소 특성을 연구하였다. Xiong⁽¹³⁾과 동료들은 액체 연료 액적에 대하여 두 액적의 거리에 따른 연소율(Burning rate)의 차이를 규명하였으며, Kharbat⁽¹⁴⁾는 석탄 입자의 연소에 있어서 배열된 두 개의 석탄 입자가 각각 복사열의 효과를 주기 때문에 연소가 더욱 효율적으로 됨을 보였다.

본 연구에서는 미세폭발에 대한 첨가제와 고체입자 함유량의 영향과 각각의 역할을 살펴보고 미세폭발이 일어날 때의 액적의 내부온도분포를 측정하여 그 관계를 고찰하였으며 단일 액적이 아닌 두 액적을 나란히 배열하였을 때의 복사 열전달과 근접 연소에 의한 상호 간섭 효과에 의한 연소와 미세폭발의 특성을 관찰하였다.

2. 실험적 방법

본 연구에서는 두 종류의 실험장치를 이용하였다. 하나는 온도 조절이 가능한 복사열원을 이용하여 제작한 연소기로서 900K 이하의 실험조건을 제공한다. 상대적으로 낮은 온도조건하에서는 액적의 증발, 연소 과정이 느리기 때문에 여러 요소들이 미세폭발에 미치는 영향을 관찰하기가 용이하다. 따라서 고체입자, 첨가제의 영향과 내부 온도 분포 등을 위 연소기를 사용하여 관찰하였으며 실험장치의 개략도와 구체적인 내용은 이전 연구결과⁽¹⁵⁾에 제시되어 있다. 위와는 달리 배열된 두 액적의 상호 간섭 효과는 실제 연소환경과 유사한 고온에서(1000K 이상) 실험하였으며, 균일한 온도와 속도 조건을 획득할 수 있는 평면화염버너를 제작하여 그 예혼합 화염의 후류에서 수행하였다. 구체적인 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

온도는 지름이 100 μ m인 R-type의 열전대를 이용하여 측정할 후, 복사열손실을 보정하여 획득하였으며 액적 내부의 온도 분포는 지름이 25 μ m인 R-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 액적의 질

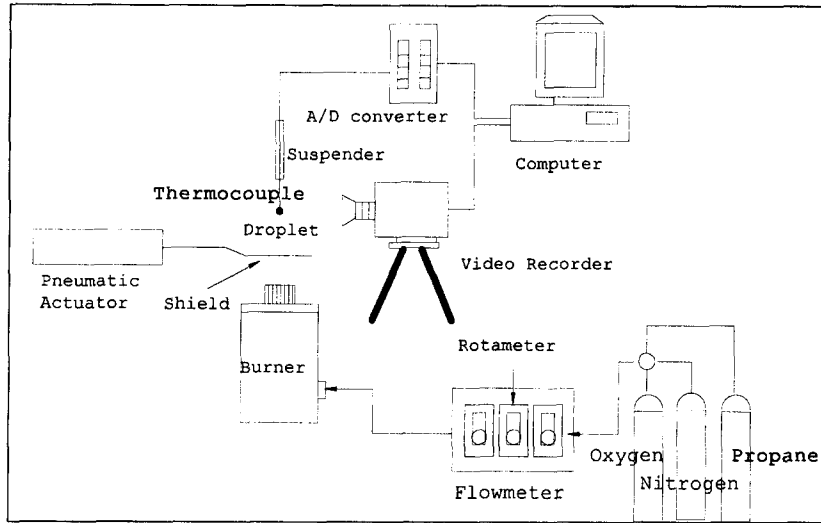


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for flat flame burner

Table 1 Experimental conditions for combustor and flat flame burner

Title	T_g (K)**	T_h (K)***
C1	478	588
C2	493	603
C3	576	737
C4	607	819
C5	864	1113
B1*	1413	

*stoichiometric ratio=0.8 for flat flame burner
flowrate(l/hr)- C_3H_8 :11.4, O_2 :70.2, N_2 :300

**gas temperature in the combustor

***surface temperature of the heater

화시기와 지름의 변화를 측정하는데 사용된 화상처리 장치는 Sony 사의 CCD-V5000이며 그림자 효과(Shadow Effect)를 위하여 역조명(Back-flash)하였다.

액적의 구성은 고체입자(Al), 액체연료(n-heptane, 또는 JP-8), 그리고 첨가제(surfactant : SPAN85, FLUKA사, 분자량<1000g/mol) 등으로 이루어져 있으며 각각의 무게비를 Al은 10-50 wt%, 첨가제는 0.5-5wt%의 범위 내에서 변화시키면서 실험하였다. 첨가제의 열분해 온도는 TGA(Thermo-Gravimetric Analysis) 결과로부터 2%

무게손실 온도인 492K로 정의하였다. 액적을 고정하는 지지대(suspender)는 지름이 100 μ m인 광섬유(SiO_2)의 끝에 세라믹 셸(ceramic shell)을 접착시켜 제작하였으며 이러한 지지대는 액적 모양을 구형과 흡사하게 고정할 수 있다. 지지대를 통한 열전달의 오차는 무시 가능하다.⁽¹²⁾ 그리고 증발후의 액적 표면 구조를 관찰하기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진을 촬영하였다.

연소기를 이용한 실험조건은 액적이 존재하는 위치에서의 공기 온도와 복사열원인 전기 히터의 벽면 온도로 정의되고 평면화염 버너의 실험조건은 당량비와 후류 가스의 온도로서 정의된다. 구체적인 실험 조건은 Table 1에 명시되어 있다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 증발현상과 셸 형성

액적이 고온의 환경에 노출되면 입사되는 열유속에 의하여 액체연료면이 가열, 증발되어 지름의 감소는 시간에 대하여 제곱의 선형성을 따른다(d^2 -law). 복사열원을 이용한 연소기 내부의 가스 온도가 액체연료인 JP-8의 초기 끓는점(442K)과 첨가제의 열분해 온도(492K)보다 낮은 조건에서의 실험결과는 어떠한 부풀음(swelling)이나 미세폭발도 야기하지 않고 증발만이 가능하다는 사실과 고체입자와 첨가제의 함유량 변화에 따른 증발비례상수의

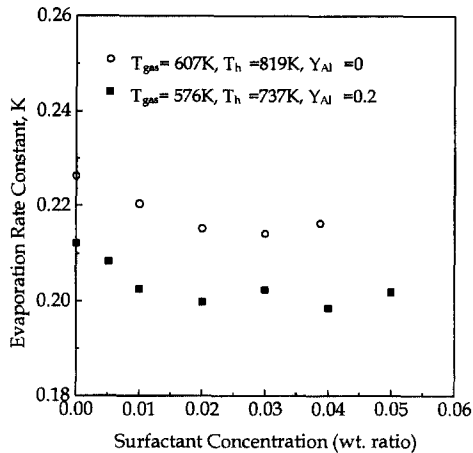


Fig. 2 Evaporation rate constant, K , versus surfactant concentration for Al/n-heptane droplet

영향을 보여준다.⁽¹⁵⁾ 고체입자가 포함되면 액체 연료가 증발할 때 고체입자는 입자들간의 모세관 힘의 결과로 생긴 표면장력 때문에 표면을 따라 축적되며, 형성된 입자층은 증발을 억제한다. 브라운 운동에 의한 고체입자들의 액적 내부로의 확산은 Stokes-Brownian 식으로부터 무시 가능하다. 증발현상에 있어서 첨가제 분자들은 액적 표면에 단일막(monolayer)을 형성하여 증발 비례상수를 감소시키며, 슬러리 액적에서는 첨가제가 고체입자들과 결합하여 더욱 더 단단한 층을 형성하여 증발 억제를 강화한다. 첨가제의 영향을 정량적으로 확인한 결과가 Fig. 2에 도시되어 있다.

$$d^2 - d_0^2 = -Kt \quad (1)$$

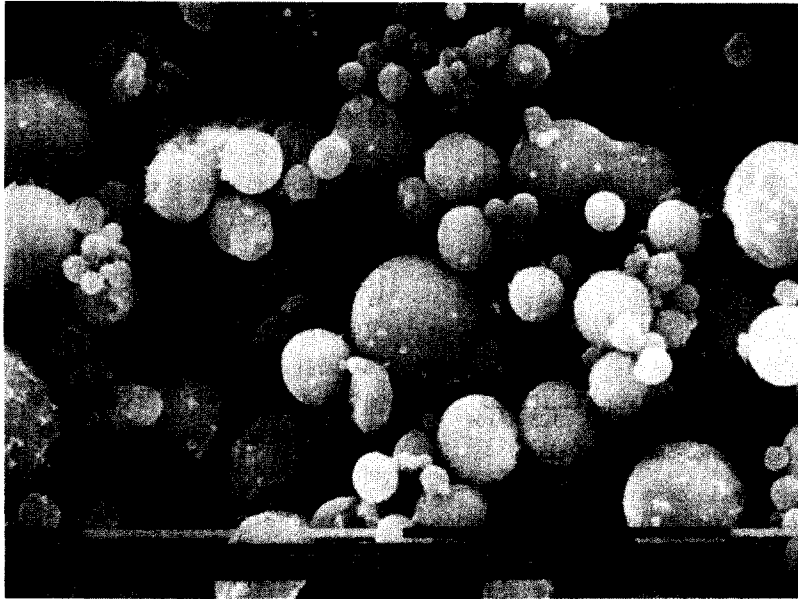
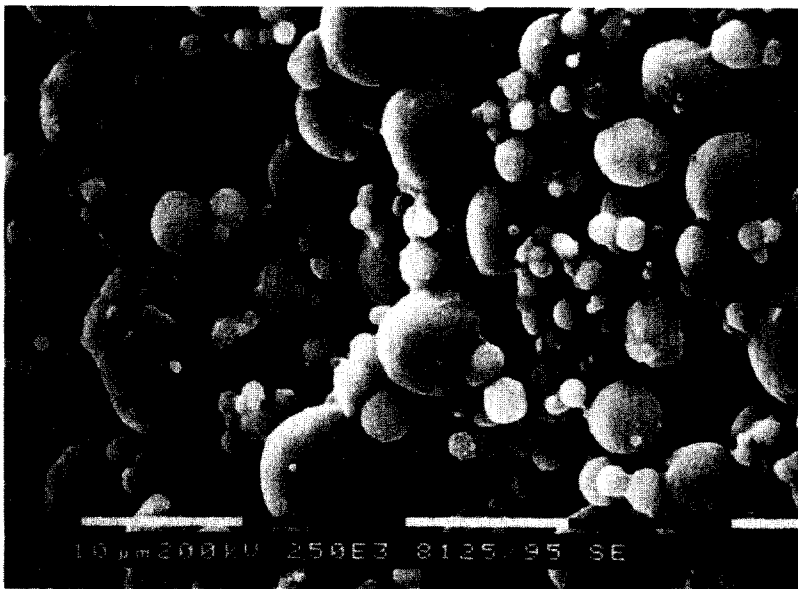
Fig. 2는 복사열원 연소기 내에서 히터의 벽면 온도가 576K, 607K(C3, C4 실험조건)일 때에 액체연료 액적과 슬러리 액적에 대한 증발 실험 결과이다. 식 (1)은 증발하는 액적의 지름변화를 비례상수 K 로써 표현하고 있으며, K 값에 대한 첨가제 함유량의 영향을 Fig. 2에 도시하고 있다. 첨가제는 액적의 표면에 단일막을 형성하거나 슬러리 액적의 고체입자와 결합하여 셀 구조를 형성하여 증발을 억제한다. 따라서 첨가제의 함유량이 증가할수록 증발 억제 효과 또한 증가할 것이다. 그러나 Fig. 2의 결과는 첨가제의 함유량이 약 2wt%의 임계값이 존재하며 이 값은 온도나 고체입자의 함유여부에도 큰 변화가 없음을 보여주고 있다. 첨가제

는 액적의 표면에서 막을 형성하거나 고체입자들을 결합시키는 작용에 있어서 표면을 에워쌀 수 있는 일정 함유량을 만족하면 더 이상의 첨가는 의미가 없게 된다.

액체연료가 증발함에 따라 남게되는 고체입자들은 액적 내부로 확산되지 못하고 표면에 축적되면서 셀 구조를 형성한다. 셀 표면을 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 관찰하였다. Fig. 3에서 첨가제의 함유여부에 따른 액적 표면에서의 고체입자들간의 연결구조를 볼 수 있다. 그림에서 보여주는 알루미늄 입자들은 첨가제가 존재함으로써 (b)에서 보이는 바와 같이 서로간의 결합을 더욱 강화하고 궁극적으로는 첨가제의 열분해 물질이 표면구조의 빈공간을 차단하여 순간적으로 불투과성의 셀을 형성하고 미세폭발을 가능하게 한다. 반면 첨가제가 포함되지 않은 결과인 (a)에서 보이는 다공질 구조는 증발후이기 때문에 표면이 건조하여 입자들간의 연결구조가 부족함을 관찰할 수 있다.

3.2 내부온도분포와 미세폭발거동

슬러리 액적의 미세폭발의 메카니즘을 제안하면서 Takahashi⁽⁶⁾ 등은 액적의 거동을 d²-law 단계, 셀 형성 단계, 미세폭발 단계의 세 단계로 구분하였다. 액적의 지름감소가 정지하고 액체연료면인 증발면이 액적 내부로 침투하기 시작한 시점부터가 셀 형성과 미세폭발 단계로 정의되었는데 이 두 단계는 구분이 모호할 뿐만 아니라 동시에 진행되는 현상이다. 더욱이 셀 형성에 있어서 중요한 요소는 d²-law 단계에서 고체 입자층이 형성되는 현상이다. 기존의 연구자들은^(6~7) d²-law단계 이후의 첨가제의 열분해 과정을 셀 형성 단계로 구분하였으나 본 연구에서는 d²-law단계 자체가 고체입자를 표면에 축적시키면서 셀을 형성한다고 생각하였으며 그 이후의 과정은 한가지 현상으로 압축하여 설명할 수 없으므로 압력증가 단계로 정의하여 아직도 분명히 규명되지 않은 단계를 단순화하고자 하였다. 따라서 미세폭발 단계를 다음의 세 단계로 수정하여 제안하고자 한다. D²-law의 선형성이 관찰되는 증발 시작까지를 가열단계, 증발을 시작한 시점부터 지름감소가 정지되어 액체면이 액적 내부로 침투하기 직전까지를 셀 형성 단계, 마지막의 폭발 순간까지를 압력 급증 단계로 정의한다. Fig. 4는 가스 온도가 576K인 C3 실험 조건에서

(a) $T_k=576K$, $Y_M=0.3$ (b) $T_k=576K$, $Y_M=0.3$, $Y_{surf}=0.03$ **Fig. 3** SEM micrographs of slurry droplets agglomerate

미세폭발 거동과 세 단계의 구분을 보여주고 있다. 또한 Fig. 4는 미세폭발(microexplosion)과 파열(disruption)을 구분하여 미세폭발을 최후의 폭발 시점을 지칭하고 파열을 최초의 부풀음(swelling)의 파괴되는 시간으로 표현하고 있다.

위의 세 단계 구분을 바탕으로 고체입자의 함유량의 미세폭발 시간에 대한 영향과 각 단계의 영향을 Fig. 5에서 보여주고 있다. (a)와 (b)는 각각 실험조건 C3, C5의 실험조건에서의 결과이다. 두 결과를 비교하면 세 단계가 각각 차지하는 시간 비

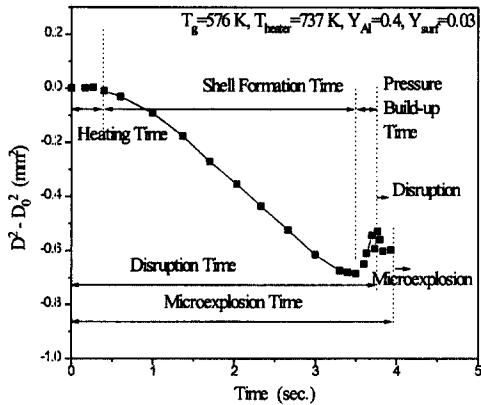
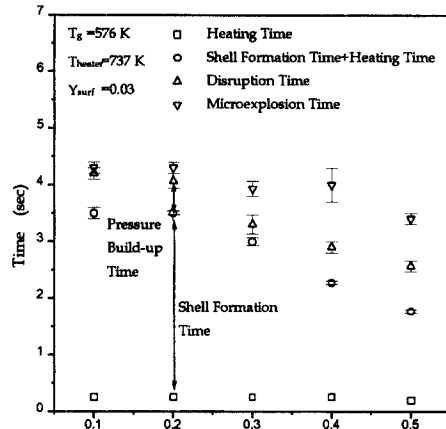


Fig. 4 Definition of the stages of microexplosion and the slurry droplets life times Heating stage, Shell formation stage, Pressure build-up stage Disruption time, Microexplosion time

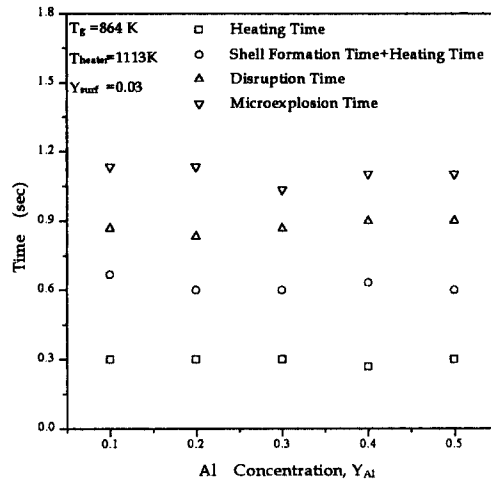
중의 변화를 알 수 있다. 즉 온도가 증가할수록 셸 형성 시간이 감소하여 고체입자의 함유량의 영향은 미미해진다. 이는 평면화염버너에서 실험을 수행하여 고체입자의 영향이 존재하지 않는다는 Wong과 Turns⁽⁸⁾의 결과와 일치한다. 미세폭발에서 고체입자의 역할은 첨가제와 함께 셸을 형성하여 증발을 차단하는 것이지만 주위 온도가 증가할수록 셸 형성 단계의 시간은 감소하고 과열이 빨리 진행하므로 고체입자의 함유량의 영향은 감소할 것이다. 고체입자 함유량에 따른 입자들의 표면 축적율에는 차이가 있을 것이나 셸은 첨가제의 열분해로 완성된다고 사료되기 때문에 온도조건이 증가할수록 열분해와 이질 핵형성의 조건이 더욱 빨리 이루어지기 때문이다. 이 결과는 역으로 첨가제의 중요성을 보여주고 있다고 사료된다.

Fig. 6은 위와 같은 C3, C5 실험조건에서의 액적의 초기지름이 미세폭발 시간에 미치는 영향을 보여준다. 액적의 크기가 작을수록 액적 내부로의 열전달이 빠르게 일어나고 증발이 빠르게 일어나므로 미세폭발 시간이 감소한다.

액체연료가 증발하면서 고체입자들이 표면에 축적되어 셸을 형성하고 증발면이 액적내부로 침투하면 다공질 층의 영역이 액적 표면에 형성되어 확장된다. 액적 표면이 계속해서 가열되면 다공질 층에 남아있는 첨가제의 열분해가 고체입자층을 더욱 견고히 하며 내부 과열과 이질 핵형성이 일어난다. 이로 인한 압력증가가 단단한 셸을 파괴하면서 미세폭발이 일어난다.^(5~11) 핵형성 (nucleation)이란



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of Al concentration effects on microexplosion time at different environmental temperatures

액체연료가 받은 열을 증발로 방출하지 못하고 계속 축적하다 보면 어느 한계 (limit of superheat) 를 넘게되며 준안정 (metastable) 상태 이상으로 과열되어 순간적으로 기포를 형성하는 현상이다. 즉, 과열된 액체 연료 상태를 준안정 상태라 하고 어느 한계 이상으로 과열되면 더 이상 액체 상태를 유지하지 못하고 핵형성이 유발되어 순간적으로 기포 형성이 급증하게 된다. 액체가 고체 표면에서는 더 쉽게 준안정 상태를 넘게되며 이를 이질 핵형성이라 한다. 첨가제의 열분해의 작용을 확인하기 위하여 Wong과 Lin⁽⁹⁾의 실험과 같은 방법으로 최초로

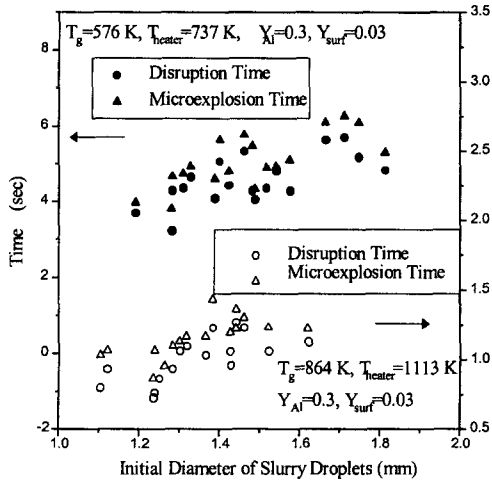
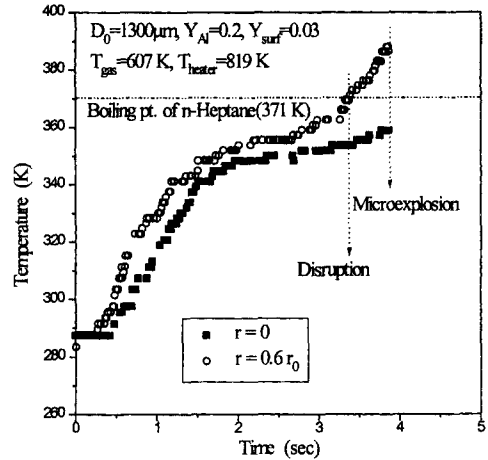


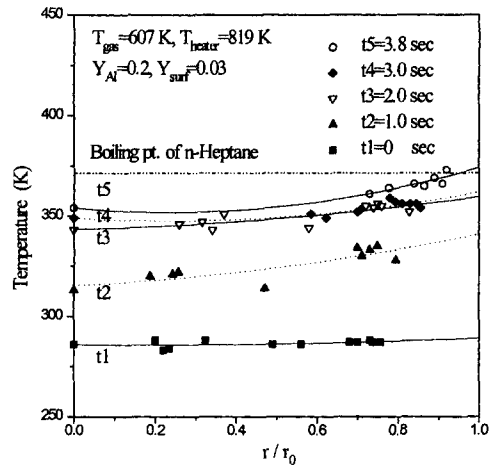
Fig. 6 Microexplosion time versus initial diameter of slurry droplet

미세폭발이 관찰되는 온도조건을 찾았다. 앞에서 정의한 열분해 온도(492K)와 액체연료의 끓는점을 기준으로 하여 다양한 온도 조건에서 실험하였다. 사용된 액체연료인 n-heptane과 JP-8의 끓는점이 각각 371K, 442K로서 큰 차이가 존재함에도 불구하고 미세폭발을 관찰할 수 있는 온도 조건은 실험 조건 C1, C2로서 열분해 온도에 상응하거나 근접한 온도임을 알 수 있다. 따라서 그 양은 미소하지만 첨가제의 화학적 열분해에 의한 작용 가능성을 추론할 수 있다. 외부온도 조건에 의한 실험과 함께 내부 온도 추이를 측정하여 미세폭발의 메카니즘을 확인하였다.

내부 과열과 압력 증가 현상은 실험적 방법으로 확인하기가 용이하지 않으나 내부 온도분포는 매우 가는 열선대(25 μ m)를 이용하여 측정할 수 있다. 실험조건 C4에서 $Y_{Ai}=0.2$, $Y_{surf}=0.03$ 인 액적의 연소와 미세폭발 과정의 내부온도 분포 변화를 측정된 결과가 Fig. 7에 도시되어 있다. 액적 중심부의 온도는 과열(disruption)까지는 액체연료인 heptane의 습구온도(ca. 353K)에 접근하는 반면 지름의 0.6배($r=0.6r_0$) 지역은 계속 증가하는 양상을 보여 주고 있다. 이는 증발면이 계속 액적 내부로 침투하지만 미세폭발이 액체연료가 모두 증발하기 전에 발생함을 의미한다. 또한 시간에 따른 액적 내부 온도 분포의 결과에서 미세폭발이 일어나는 3.8 sec의 온도 분포를 보면 액적의 외부지역은 액체연료의 끓는점을 상회함을 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Internal temperature distributions of the droplet

이는 셸의 근처에서 과열(superheating)될 수 있음을 의미한다. 순수 액체 연료만으로는 끓는점 이상으로 과열될 수 없으나 슬러리 액적은 첨가제와 고체입자에 의하여 형성된 셸이 증발을 억제하므로 과열될 수 있다. 내부 온도 측정의 결과가 이러한 가정,^(7,11) 즉 액적 내부의 과열과 이질 핵형성의 가능성을 뒷받침한다.

3.3 두 액적의 상호 간섭 효과

슬러리 액적의 미세폭발 과정은 액체연료의 증발 및 연소와 표면의 셸 형성, 내부 과열로 요약될 수 있다. 따라서 액적이 집단으로 연소하는 실제 연소

기에서는 상호 간섭에 의한 영향이 클 것이다. 두 액적을 나란히 배치하여 그 거리에 따른 화염의 복사열전달 효과를 살펴보았다. 실험조건은 평면화염 버너 후류에서 대류에 의한 고온의 연소환경을 제공하는 B1이었다. Xiong⁽¹³⁾ 등과 Kharbat⁽¹⁴⁾ 등은

순수 액체 연료 액적과 석탄 입자의 연소에 대하여 거리에 따른 연소 특성을 규명한 바 있다. Fig. 8은 순수 n-Heptane에 대하여 두 액적의 초기 분리 거리(l/d_0)에 대한 화염 지속 시간(burning life time)의 상관관계를 보여주고 있다. 두 액적을 연소시키면 단일 액적의 경우보다 지속시간이 감소하여 어느 특이 분리거리에서는 최소의 화염지속시간을 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 시간이 감소하는 이유는 두 액적에 점화된 화염에 의한 상호 복사 열전달의 효과이다. 따라서 두 액적의 거리가 멀어질수록 화염지속시간은 단일 액적의 지속시간에 접근할 것이다. 반면에 지속시간이 최소가 되는 특이거리보다 더 근접하는 경우에는 화염지속시간(burning life time)이 오히려 증가한다. 그 이유는 액적 사이의 대류가 산소를 화염에 공급하는데 너무 근접하게 되면 대류량이 감소하여 산소가 부족하게 되기 때문인 것으로 생각된다.

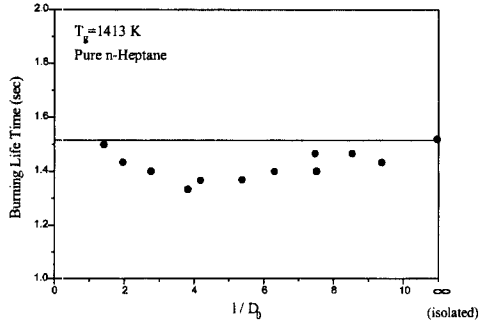


Fig. 8 Dependence of the burning life time on initial separation distance

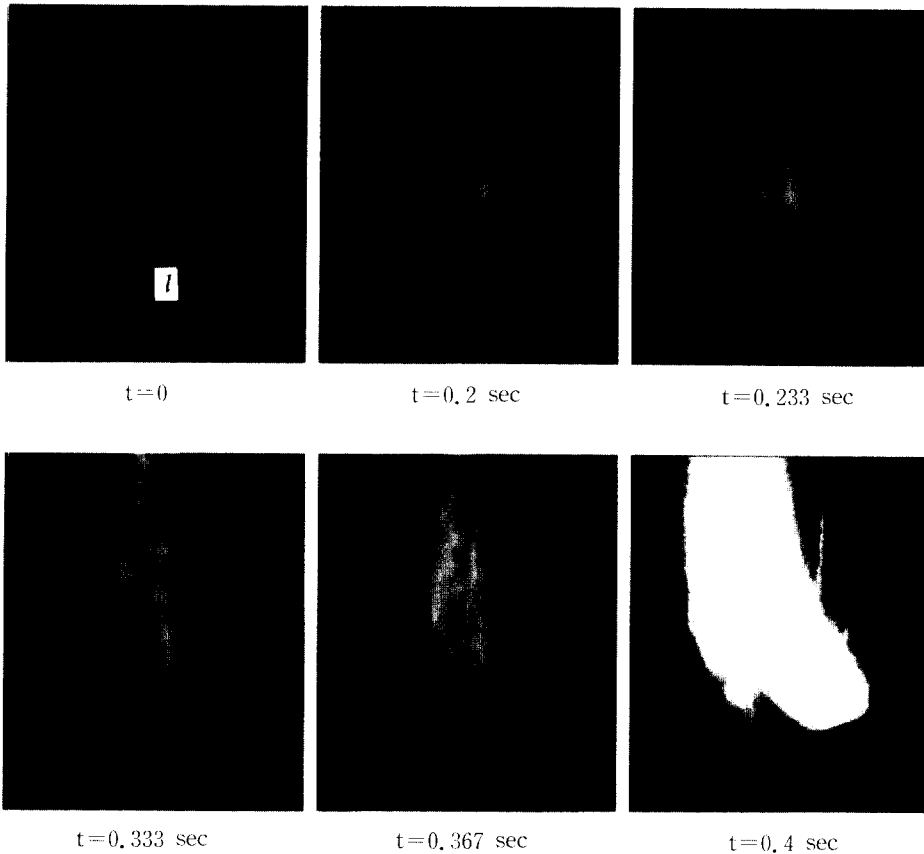


Fig. 9 Ignition and micro explosion plosion sequence for binary slurry droplets (time : 0, 0.2, 0.233, 0.333, 0.367, 0.4 sec)

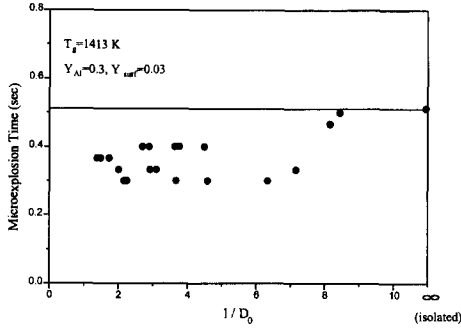


Fig. 10 Dependence of the microexplosion time on the initial separation distance

나란히 배열된 두 액적은 점화 이후에 서로 떨어진 거리에 따라서 화염이 결합 또는 분리된다. 거리가 멀어질수록 단일 액적의 연소과정과 유사하게 되며 복사열전달의 보기상수(view factor)에 의하여 상호 간섭 효과도 감소한다. Fig. 9는 두 액적이 고온의 조건에서 동시에 미세폭발하는 화상으로 상호 간섭효과에 의하여 화염이 결합되고 미세폭발도 단일 액적의 경우보다 더욱 빨리 일어남을 보여 주고 있다. 또한 미세폭발 직전까지 관찰되는 화염은 미세폭발의 메카니즘에서 필수적인 셀의 구조가 충분히 증발을 차단하여 압력을 증가시키고 이질 핵형성이 가능할 정도이면 반드시 불 투과적이지는 않더라도 미세폭발이 가능함을 보여준다. 왜냐하면 미세폭발 직전까지 화염이 지속적으로 유지할 수 있다는 것은 액체 연료의 증발 가스가 지속적으로 셀을 통과하여 기체장으로 공급된다는 사실을 의미하기 때문이다. 슬러리 액적에 대한 두 액적의 분리 거리에 따른 미세폭발 시간의 의존성이 Fig. 10에 도시되어 있다. 미세폭발 시간이 최소가 되는 특이 거리는 순수 액적의 경우와는 달리 명확하지 않았으며 거리가 가까워질수록 미세폭발 시간이 여전히 감소하는 경향만을 보였다. 이는 특이거리보다 더 가까운 거리에 존재하는 두 액적의 화염존재시간이 다시 증가하는 경향을 보인 Fig. 8의 결과와는 다른 양상으로서 미세폭발에 있어서 복사열전달의 영향과 공기중 산소의 함유량의 영향 등과 같은 더욱 구체적인 연구가 필요하다. 어느 한계이상으로 거리가 가까워 저도 순수 액적과 같이 역으로 시간이 증가하지 않는 이유는 미세폭발은 점화이후에 바로 일어나기 때문에 액적 사이의 대류와 연소로 인한 산소 결핍의 영향을 크게 받지 않기 때문일 것으로 추론해 본다. 실험 조건에서

산소 함유량에 따른 영향을 관찰한다면 어떤 결론을 얻을 수도 있을 것으로 사료된다. 전체적으로 두 액적의 영향으로 인하여 단일 액적일 때보다 미세폭발 시간이 감소하는 것은 액적 상호간의 복사열전달로써 설명이 가능하다. 즉 두 액적이 존재하여 연소하면 화염의 복사열 때문에 빠르게 미세폭발이 야기되고 너무 멀어지면 복사 열전달의 양이 작아지기 때문에 단일 액적의 미세폭발 시간에 접근한다. 따라서 실제 연소기에서는 고온에서 집단 연소가 일어나므로 단일 액적을 통하여 예측되는 것보다 더 빨리 미세폭발 할 것이다.

4. 결 론

슬러리 액적의 미세폭발 거동을 관찰함에 있어서 증발과 셀의 형성, 파열, 미세폭발의 단계로 제안되는 메카니즘을 바탕으로 액적의 거동을 가열 시간, 셀 형성 시간, 압력 증가 시간으로 구분하여 다양한 온도 조건과 액적 구성으로 실험, 분석하였다. 또한 실제 연소기에서의 영향을 살펴보기 위해서 두 액적끼리의 상호 간섭 효과를 실험하였다.

(1) 첨가제의 임계값을 d^2 -법칙의 증발비례상수로부터 정량적으로 관찰할 수 있었다.

(2) 끓는점이 55K 이상 차이가 존재하는 Heptane과 JP-8을 슬러리의 액체연료로 사용한 두 경우 모두에 대하여 첨가제의 열분해 온도인 492K에 근접하는 전후의 온도조건에서 미세폭발을 관찰할 수 있었다. 본 결과는 미소량이지만 첨가제의 열분해의 중요성을 암시한다.

(3) 셀의 형성은 미세폭발의 기본 현상으로서 고체입자, 첨가제 등을 필수 구성 요소로 하여 특정 온도조건 이상의 환경에서 미세폭발을 가능하게 한다. 외부 온도가 증가할수록 세 단계 중에서 미세폭발 시간에 대한 셀 형성 시간의 비중이 감소하여 고체 함유량의 영향이 미미해진다.

(4) 미세폭발 시간은 초기 액적의 지름이 증가할수록, 외부 온도조건이 감소할수록 증가한다.

(5) 복사열전달에 의한 두 액적의 상호 간섭 효과는 단일 액적보다 빠른 미세폭발을 야기하여 실제 연소기에서는 집단 연소가 일어나므로 단일 액적의 결과보다 더 빨리 미세폭발이 일어날것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Miyasaka, K. and Law, C. K., 1980, "Combustion and Agglomeration of Coal-Oil Mixtures in Furnace Environments," *Combustion Science and Technology*, Vol. 24, pp. 71~82
- (2) Yao, S. C., 1983, "Behavior of Suspended Coal Water Slurry Droplets in a Combustion Environment," *Combustion and Flame*, Vol. 51, pp. 335~345
- (3) Ahn, K. Y., Baek, S. W. and Choi, C. E., 1994, "Investigation of a Coal-Water Slurry Droplet Exposed to Hot Gas Stream," *Combustion Science and Technology*, Vol. 97, pp. 429~447
- (4) Lee, A. and Law, C. K., 1989, "Gasification and Shell Characteristics in Slurry Droplet Burning," *AIAA 89-2437*, pp. 1~17
- (5) Takahashi, F., Heilweil, I. J., Dryer, F. L., 1989, "Disruptive Burning Mechanism of Free Slurry Droplets," *Combustion Science and Technology*, Vol. 65, pp. 151~165
- (6) Takahashi, F., Dryer, F. L. and Williams, F. A., 1986, "Combustion Behavior of Free Boron Slurry Droplet," *Twenty-first Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute*, 1983~1991
- (7) Cho, S. Y., Takahashi, F. and Dryer, F. L., 1989, "Some Theoretical Considerations on the Combustion and Distribution of Free Slurry Droplets," *Combustion Science and Technology*, Vol. 67, pp. 37~57
- (8) Wong, S. C. and Turns, S. R., 1989, "Disruptive Burning of Aluminum/Carbon Slurry Droplets," *Combustion Science and Technology*, Vol. 66, pp. 75~92
- (9) Wong, S. C., Lin, A. C. and Chi, H. Y., 1990, "Effects of Surfactant on the Evaporation, Shell Formation and Disruptive Behavior of Slurry Droplets," *Twenty-third Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute*, pp. 1391~1397
- (10) Wong, S. C. and Lin, A. C., 1992, "Microexplosion Mechanism of Al/Carbon Slurry Droplets," *Combustion and Flame*, Vol. 89, pp. 64~76
- (11) Wong, S. C., Lin, A. C. and Wu, C. E., 1994, "Microexplosions of Boron and Boron/Carbon Slurry Droplets," *Combustion and Flame*, Vol. 96, pp. 304~310
- (12) Wong, S. C. and Lin, A. C., 1992, "Internal Temperature Distributions of Droplets Vaporizing in High Temperature Convective Flows," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 237, pp. 671~687
- (13) Xiong, T. Y., Law, C. K. and Mitasaka, K., 1984, "Interactive Vaporization and Combustion of Binary Droplet Systems," *Twentieth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, 1781~1787
- (14) Kharbat, E., Annamalai, K. and Gopalakrishnan, C., 1995, "Ignition and Combustion of Isolated and Binary Array of Coal Particles," *Combustion and Flame*, Vol. 100, 413~421
- (15) 변도영, 백승욱, 1995, "JP-8/Al 액적의 미세폭발에 관한 연구," 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp. 208~211
- (16) Blazowski, W. S., Future 1978, "Jet Fuel Combustion Problems and Requirements," *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 4, pp. 177~199