

Al/액체연료 슬러리 액적의 연소와 미세폭발(II) — 이론적 연구 —

조주형* · 변도영** · 백승욱*** · 안국영****

(1997년 9월 25일 접수)

Combustion and Microexplosion of Al/Liquid Fuel Slurry Droplets (II)

— Theoretical Study —

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

Key Words : Slurry Droplet, Microexplosion(미세폭발), Heterogeneous Nucleation(이질 핵형성), Limit of Superheat(과열 한계), Pressure Build-Up(압력 급증가)

Abstract

The microexplosion of a slurry droplet was considered to be caused by the shell formation and the following pressure build-up in the shell which would be promoted by the suppression of evaporation, subsequent superheating and heterogeneous nucleation of liquid carrier. To closely investigate the pressure build-up and the heterogeneous nucleation, a numerical model was introduced by considering the internal temperature distributions with the shell formation, suppression of evaporation and pressure build-up inside. The microexplosion time was estimated by postulating the limit of superheat for heterogeneous nucleation. The simulation yielded a reasonably good agreement with experimental results for Al/n-heptane slurry droplets under various solid loadings.

기호 설명

| | |
|--|---|
| <p>A_d : 빈도 인자수 (pre-exponential factor)</p> <p>C : 비열</p> <p>D : 질량 확산 계수</p> <p>E : 활성화 에너지</p> <p>e_s : 액적 표면 복사 방사율, 0.8</p> <p>L : 액체연료의 증발 잠열</p> <p>l : 두께</p> <p>MW : 분자량</p> <p>p : 압력</p> <p>Q : 반응열</p> | <p>q : 열유속</p> <p>q_{cd} : 전도 열유속</p> <p>q_r : 복사 열유속</p> <p>R_u : 일반 기체상수, 8314J/kmol K</p> <p>r : 반경방향좌표</p> <p>T : 온도</p> <p>T_B : 끓는점</p> <p>T_{cr} : 임계온도</p> <p>t : 시간</p> <p>V : 가스 속도</p> <p>Y : 질량비</p> |
|--|---|

*회원, 한국항공우주연구소

**회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

***회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

****회원, 한국기계연구원

그리스문자

ϕ : 고체입자 부피비

ϵ : 다공성 (porosity)

- ω : 고체입자 질량 분율
- σ : Stefan-Boltzmann 계수
- ρ : 밀도
- λ : 열전도도
- μ : 점성도
- μ_{sto} : 화학적 당량비

아래첨자

- 0 : 초기조건
- ∞ : 대기조건
- co : 액적의 중심 영역
- F : 연료
- g : 가스
- li : 액체
- N_2 : 질소
- O : 산소
- s : 고체입자, 액적 표면
- sh : 축적된 셸
- sl : 고체입자와 액체의 혼합물

1. 서 론

슬러리 액적의 미세폭발(microexplosion) 현상은 연소기 내부에서 효율적인 연소를 유도하기 때문에 그 연구의 중요성이 점점 더 부각되고 있다. 슬러리 연료는 순수 액체연료에 비해 단위 부피당 높은 에너지를 가지고 있다는 장점이 있기 때문에 램젯(ramjet)과 같이 부피가 제한된 공기 흡입식 추진기관에서 주로 응용되고 있다. 그러나 이런 장점의 이면에는 액체연료의 증발 후에 생성된 고체연료 입자 집괴(agglomerate)의 가열 및 연소를 위한 시간이 액체연료 액적의 연소 시간보다 상대적으로 길다는 결점이 존재한다.⁽¹⁾ 이런 단점을 극복하기 위한 효과적인 방법으로 제시된 것이 슬러리 액적의 연소 과정 중에 액적의 미세폭발이다. 즉 연소기 내부에 액적을 분사시키는 것을 액적의 1차 미립화(primary atomization)라고 한다면 2차 미립화에 해당하는 액적의 미세폭발을 유도하여 고온에 노출된 액적의 연소 면적을 최대화하는 것이다.

지금까지 슬러리 액적의 미세폭발 현상에 대해 많은 실험적, 이론적 연구가 수행되어 왔다.⁽²⁻⁹⁾ Takahashi와 그의 동료들^(5,6)은 Boron/JP-10 슬러리 액적의 연소와 미세폭발 현상을 관찰한 것을 토대로 미량의 첨가제(표면활성제)를 포함하는 슬러

리 액적이 가열되어 어떤 임계 온도에 도달하게 되면 첨가제의 열분해에 의해 액적 표면에 축적된 고체입자와 함께 비투과성 막이 형성되어 액체 연료의 증발을 차단함을 제시하였다. 그 결과로써 내부 압력이 증가하고 궁극적으로는 액적 표면의 셸을 파괴하면서 미세폭발이 가능하다는 메카니즘이다. 이와 유사한 연구로서 Wong과 그 동료들은^(1,2,7,9) 여러 종류의 슬러리 액적의 연소와 미세폭발에 대하여 외부온도, 고체입자량, 첨가제의 함유량, 외부 산소량 등의 영향을 실험적으로 연구하면서 미세폭발 현상을 규명하고자 하였다. Takahashi등이 언급한 압력 증가와 함께 Wong과 Lin⁽⁸⁾은 증발율이 낮은 표면활성제에 의해서 액체연료의 증발이 억제되고, 액적은 액체연료의 끓는점 이상으로 과열되므로 어느 순간에 이질 핵형성(heterogeneous nucleation)에 의한 증기 방울이 형성될 수 있으며, 이로 인한 내부 압력의 급격한 증가가 바로 미세폭발의 원인임을 제시하였다. 첨가제인 표면활성제의 종류와 첨가 유무나 첨가량에 따라 액적의 증발과 파열 현상은 큰 차이를 보이는데 이는 첨가제가 미세폭발에 있어서 매우 중요한 역할을 함을 의미한다. Wong과 동료들은⁽⁷⁾ 첨가제의 역할로서 열분해에 의한 셸의 비투과적 성질을 강화하는 것이라는 Takahashi와 유사한 결과를 얻었다. 이론적 연구로서 Wong과 Lin⁽⁸⁾은 액적 내부의 반지름의 0.8 배 위치의 온도가 액체연료의 끓는점에 도달할 때 파열의 시초(initiation of disruption)에 도달한다는 실험 결과를 미세폭발의 이론적 기준점으로 삼아 그 결과들을 예측하기도 하였다.

이상과 같은 문헌 조사에서 보여지듯이 슬러리 액적의 미세폭발에 관한 많은 실험적, 이론적 연구가 진행되고는 있으나 미세폭발의 현상으로 제시되는 셸의 형성과 압력증가, 이질 핵형성등의 구체적 현상에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히 개괄적으로 압력증가와 이질 핵형성을 메카니즘으로 제시하고는 있으나 정량적으로 미세폭발의 시점을 정의할 수 있는 기준(criteria)을 위 현상에서 이끌어 내지 못하고 있다. 본 논문에서는 Al/n-heptane 슬러리 액적의 미세폭발 현상을 이질 핵형성의 관점에서 접근하여 증발 역제를 가정하고 이질 핵형성 온도를 기준으로 삼아 미세폭발 거동과 시간을 예측하고자 한다. 실험적 결과와의 비교를 통하여 본 연구에서 제시하고 있는 모델의 유용성을 살펴 보았다. 또한 미세폭발의 단계를 다음과 같이 초기

순간부터 미세폭발 순간까지를 가열 단계(heating stage), 셸 형성 단계(shell formation stage) 및 압력증가 단계(pressure build-up stage)로 구분하고, 각각의 단계가 미세 폭발에 기여하는 정도를 고찰한다.

2. 이론적 해석

본 이론 모델에 필요한 기하학적 형상은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 세 영역으로 구분할 수 있으며, 세 영역은 각각 슬러리 영역(고체입자+액체)과 다공성이 다른 다공질의 두 영역(고체입자+기체)이다. 초기에 일정 온도로 유지되어 있는 액적이 고온의 환경에 존재하게 되면 증발이 일어나면서 지름이 감소하게 되고 그동안 표면장력에 의하여 고체 입자도 같이 이동하면서 표면에 임의의 다공성으로 축적한다. 이 축적 과정이 정지하면 액적의 지름 감소도 멈추게 되지만 증발은 지속적으로 진행되므로 액체면이 액적 내부로 침투하게 되며, 따라서 액적 내부에는 고체입자가 축적된 셸 영역 외에 초기 상태와 같은 고체입자의 분포를 지니는

다공질 영역과 슬러리 영역의 세 영역이 존재하게 된다. 물론 셸 영역의 다공성은 내부의 두 영역의 다공성보다 작다.

2.1 지배 방정식

슬러리 영역 : $0 < r < r_{ii}$

에너지 보존 방정식 :

$$(\rho C)_{sl} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_{sl}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

위 식에서 아래첨자 sl 은 고체입자와 액체연료가 혼합되어 있는 슬러리 영역을 의미하며 물성치는 아래와 같이 구할 수 있다. ⁽¹⁰⁾

$$(\rho C)_{sl} = \phi(\rho C)_s + (1 - \phi)(\rho C)_{ii} \quad (3)$$

$$\lambda_{sl} = \lambda_s + \left[-\frac{b}{2} + \left[\frac{b^2}{4} + \frac{a^3}{27} \right]^{1/2} \right]^{1/3} - \left[\frac{b}{2} + \left[\frac{b^2}{4} + \frac{a^3}{27} \right]^{1/2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

여기에서,

$$a = \frac{[(1 - \phi)(\lambda_s - \lambda_{ii})]^3}{\lambda_{ii}}, \quad b = a\lambda_s' \quad (5)$$

다공질 영역과 기체장 : $r_{ii} < r$

$$\text{연속 방정식 : } \epsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\epsilon r^2 \rho_g V) = 0 \quad (6)$$

에너지 보존 방정식 :

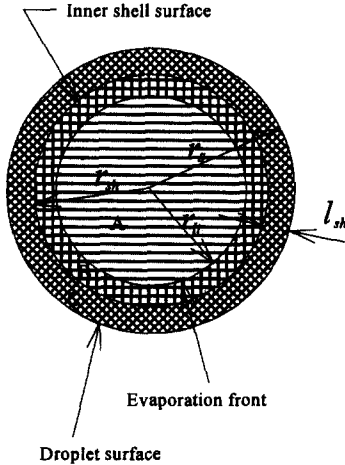
$$(\rho C)_{sg} \frac{\partial T}{\partial t} + \epsilon(\rho C)_g V \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_{sg} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \epsilon(MW) r Q \dot{\omega} \quad (7)$$

아래첨자 sg 는 액체연료가 증발한 후에 남게 되는 다공질의 영역에서 고체입자와 기체가 존재하는 상태를 나타내고 있으며 이때의 물성치는 슬러리 영역과 유사하게 구할 수 있다. ⁽¹¹⁾ 그리고 반응율, $\dot{\omega}$ 은 아래의 식에 제시되어 있다.

$$(\rho C)_{sg} = \phi(\rho C)_s + (1 - \phi)(\rho C)_g \quad (8)$$

$$\frac{\lambda_{sg}}{\lambda_g} = \epsilon \left[1 + \beta \frac{d_s h_{r,g}}{\lambda_g} + \frac{\beta(1 - \epsilon)}{\frac{1}{\eta} + \frac{d_s h_{r,g}}{\lambda_g}} + \frac{2}{3} \frac{\lambda_g}{\lambda_s} \right] \quad (9)$$

식 (9)의 관계식에서 d_s 는 고체입자의 평균 지름을 나타내고, h_r 은 열전달 계수, β 와 η 는 각각



☐ binary mixture(solid+liquid) ($\epsilon = \epsilon_{co}$)

▣ nonaccumulated porous shell ($\epsilon = \epsilon_{co}$)

▤ accumulated porous shell ($\epsilon = \epsilon_{sh}$)

Fig. 1 Schematic picture of a evaporating slurry droplet.

Table 1 Physical Properties and Parameters.

| Parameters | Unit | Value | |
|---------------------------|-------------------|--|--|
| n-heptane ⁽¹⁸⁾ | A_d | $\text{kg}^2 \text{m}^3/\text{kmol}^3\text{sec}$ | 0.8×10^6 |
| | C_p | J/kg K | 2310 |
| | E | J/kmol | 0.7×10^8 |
| | MW | kg/kmol | 100 |
| | Q | J/kg | 4.46×10^7 |
| | μ_{sto} | | 11 |
| | μ | N/ m ² sec | 1×10^{-5} |
| | T_B | K | 371.55 |
| | $\lambda^{(17)}$ | W/mK | $0.265 - 6.4048 \times 10^{-4} T + 5.9524 \times 10^{-7} T^2$ (280 K < T < 400 K) |
| | $L^{(18)}$ | J/kg | $55536.37(540 - T)^{0.3436}$ |
| $\rho^{(19)}$ | kg/m ³ | $965.276 - 0.9543 T$ (273.15 K < T < 443.15 K) | |
| Al ⁽¹⁹⁾ | C_p | J/kg K | 997 |
| | λ | W/m K | 236 |
| | ρ | kg/m ³ | 2702 |

두 입자의 중심간의 거리와 접촉하는 액체막의 두께를 나타낸다.⁽³⁾

화학종 보존 방정식 :

$$\rho_g \frac{\partial Y_o}{\partial t} + \rho_g V \frac{\partial Y_o}{\partial r} + \mu_{sto} (MW)_o \omega = \frac{1}{\varepsilon} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\varepsilon r^2 \rho_g D_o \frac{\partial Y_o}{\partial r} \right] \quad (10)$$

$$\rho_g \frac{\partial Y_f}{\partial t} + \rho_g V \frac{\partial Y_f}{\partial r} + (MW)_f \omega = \frac{1}{\varepsilon} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\varepsilon r^2 \rho_g D_f \frac{\partial Y_f}{\partial r} \right] \quad (11)$$

$$\text{상태 방정식 : } \rho_g = \frac{p(MW)_g}{R_u T} \quad (12)$$

압력 증가 방정식

$$\varepsilon V = -\frac{K}{\mu} \nabla p, \quad K = \frac{d_s^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \quad (13)$$

화학종 보존 방정식인 (10), (11)식 내의 질량 확산 계수 D_f, D_o 는 Fuller⁽¹²⁾등이 제안한 방법으로 구할 수 있다. 본 연구에서 고려한 n-heptane과 air의 대기압하에서의 질량 확산 계수는 다음과 같은, $D_f = D_o = 3.294 \times 10^{-10} T^{1.75} (\text{m}^2/\text{sec})$, 식을 이용하여 계산을 수행하였다. Table 1에 기체장과 액체연료, 알루미늄 등의 물적 특성과 여러 계수들의 값이 제시되어 있다. 반응열에 대한 모델은 아

레니우스(Arrhenius) 형태의 단일 단계 반응으로 고려하였다.

$$\dot{\omega} = \frac{A_d \rho_g^2 Y_o Y_f}{(MW)_o (MW)_f} \exp\left[-\frac{E}{R_u T}\right] \quad (14)$$

기체의 평균 분자량은 $(MW)_g = \left[\frac{Y_o}{(MW)_o} + \frac{Y_{N_2}}{(MW)_{N_2}} + \frac{Y_f}{(MW)_f} \right]^{-1}$ 이고 화학종의 질량 보존 방정식은 $Y_o + Y_{N_2} + Y_f = 1$ 이다.

2.2 초기 및 경계 조건

위 지배 방정식들에 대한 초기 및 경계 조건은 다음과 같다.

$$t=0; \quad T = T_o \quad (0 \leq r \leq r_s) \quad (15)$$

$$T = T_\infty, \quad Y_f = 0, \quad Y_o = Y_{o\infty} \quad (r_s < r) \quad (16)$$

$$r=0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (17)$$

$$r=\infty; \quad T = T_\infty, \quad Y_f = 0, \quad Y_o = Y_{o\infty} \quad (18)$$

$$r=r_{ii}(t); \quad \rho_g D_o \frac{\partial Y_o}{\partial r} \Big|_+ = \rho_g V Y_o \quad (19)$$

$$-\rho_g D_f \frac{\partial Y_f}{\partial r} \Big|_+ = \rho_g V (1 - Y_f) \quad (20)$$

$$\frac{dr_{ii}}{dt} = \frac{-\dot{m}}{4\pi\rho_{ii}r^2} \Big|_{r=r_{ii}} - \frac{\int_{r_{ii}}^{r_u} \varepsilon \frac{\partial \rho_L}{\partial t} r^2 dr}{[\varepsilon \rho_L r^2]_{r=r_{ii}}} \quad (21)$$

$$Y_F|_{r=r_u} = A \exp \left[-\frac{(L_o \cdot MW)}{R_u} \int_{r_0}^{r(r_u)} \frac{(T_{cr} - T)^a}{T^2} dT \right]_{r=r_u} \quad (22)$$

$$T|_+ = T|_- \quad (23)$$

식 (19)부터 식 (23)까지의 식들은 액체연료의 증발면에서의 경계 조건으로서 질량, 에너지, 화학종의 평형을 나타낸다. 특히 식 (21)은 에너지 평형 관계로부터 반지름의 감소를 얻을 수 있는 관계를 나타내고 있으며 이때, $m = \frac{4\pi r^2}{L} \left[q|_+ - \lambda_{st} \frac{dT}{dr} \Big|_- \right]$ 이고 $c=1$ 이면 액적의 가열 단계와 셀 형성 단계에서 사용되며 $c=\varepsilon$ 이면 액체연료면이 액적 내부로 침투한 이후인 압력 증가 단계에서 사용된다. 식 (22)는 증발 잠열을 온도의 함수로 고려하였을 때의 Clausius-Clapeyron 식으로서 (부록 참조) 계수 A를 곱함으로써 증발 억제 현상을 묘사하고자 한다. A가 1이면 증발 억제는 존재하지 않으며 A=0이면 완전한 증발 억제를 의미한다. 첨가제와 고체입자에 의한 증발 억제를 정량화하기란 현실적으로 어렵기 때문에 이와 같은 계수를 이용하여 적당한 증발 억제 현상을 도입하고자 하는 것이다. 증발면에서의 증발 기체의 속력은 다음의 (24)식과 같이 나타난다.

$$V = \frac{\rho_{li}}{\rho_g} \frac{dr_{li}}{dt} \quad (24)$$

$$r = r_s(t); \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_- = \frac{q}{\lambda_{sg}} \quad (25)$$

$$p = p_\infty \quad (26)$$

위에서 q 는 슬러리 액적 표면에서의 열 유속이며 다음과 같이 전도 열유속과 복사 열유속의 합으로 나타난다.

$$q = q_{cd} + q_r = \lambda_g \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_s} + e_s \sigma (0.53267 T_h^4 - T_s^4) \quad (27)$$

이때, 복사 열유속을 구하는 관계에서 온도항의 계수 0.53267은 본 연구와 비교하고자 하는 실험 장치⁽¹³⁾의 히터와 액적의 보기상수(view factor)를 구한 값이다. 액적의 표면 방사율을 나타내고 있는 e_s 는 회색체로 가정하여 그 값을 0.8로 지정하였다. 복사열원을 제공하는 히터로 구성된 실험 장치의 특징 때문에 반드시 복사열에 의한 항을 첨가해 주어야 한다.

4. 결과 및 토의

수치적 계산을 위해서 외부 압력은 1 atm, 산소의 양은 0.21, 액적의 초기 온도는 293 K로 고정된 값을 이용하였으며 편미분 방정식을 푸는데 있어, 안정성을 제공하는 내재적 방법(implicit method)을 사용하였고 시간적으로는 전방 차분법, 공간적으로는 중앙 차분법을 사용하였다.

본 연구는 내부 온도 분포, 압력 분포 등의 해석을 통한 미세폭발 현상의 모사와 예측이 목적이므로 시간에 따른 액적의 크기를 보다 정확하게 예측하는 것이 필요하다. 따라서 온도 증가에 따른 액체 성분의 열팽창을 고려하는 것이 요구되며, 순수 액체 연료의 증발 과정에 있어서 열팽창을 고려하여 계산한 결과가 Fig. 2에 도시되어 있다. 점화되지 않는 순수 증발 조건에 대한 해석에 있어서 열팽창을 고려하지 않을 때(점선)보다 열팽창을 고려할 때(실선) 실제 증발 현상에 더 근접하게 됨을 볼 수 있다. 초기 가열 단계에서 액적이 약간 부풀어 오르는 것은 가열에 의한 액적의 팽창율이 증발에 의한 액적의 감소율보다 크기 때문이고 약 1.4 sec부터는 d²-law의 선형성을 잘 따라감을 볼 수 있다. 따라서 액적의 거동을 이론적으로 모델링하기 위해서는 열팽창의 고려가 중요함을 나타내고 있다.

미세폭발 과정에서 첨가제는 매우 중요한 역할을 담당하고 있으며 첨가제가 없는 경우에는 미세폭발

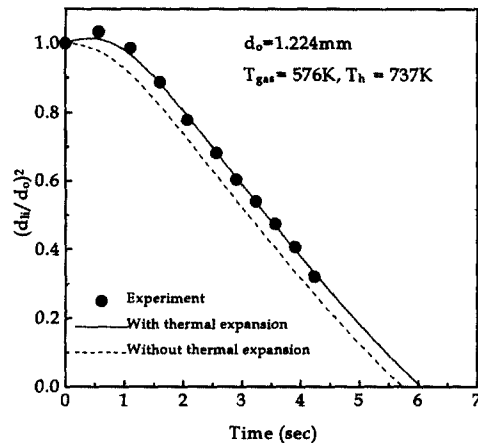
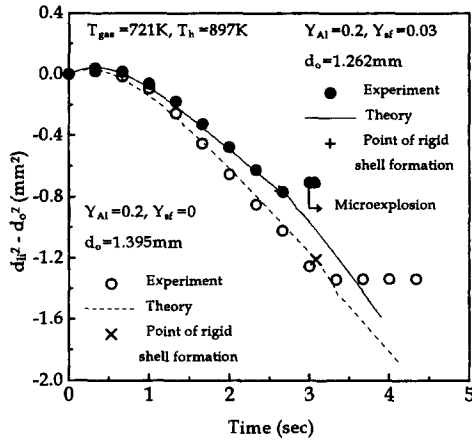
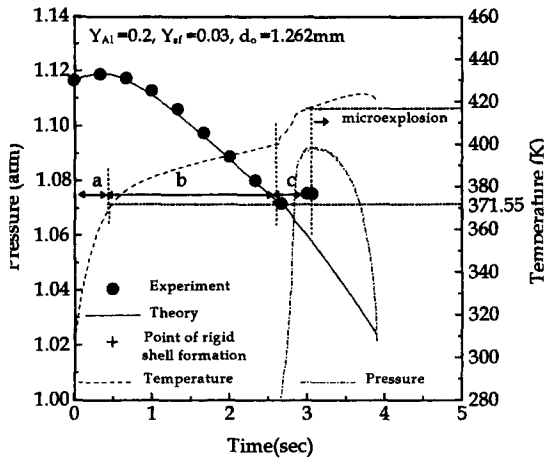


Fig. 2 Experimental and theoretical variation of diameter squared for a pure n-heptane droplet.



(a)



(b)

Fig. 3 Experimental and theoretical results for a stabilized Al/n-heptane slurry with $Y_{Al}=0.2$, $T_{gas}=721$ K and $T_h=897$ K. (a) Comparison of d^2 for slurry droplets with/without surfactant (b) Variations of superheating and pressure build-up at the evaporation front of a stabilized Al/n-heptane slurry (a : heating stage, b : shell formation stage, c : pressure build-up stage).

이 일어나지 않는다. Fig. 3은 $T_{gas}=721$ K일 경우에 표면활성제의 유무에 따른 슬러리 액적의 증발 현상과 미세폭발 과정의 온도, 압력 추이를 보여주고 있으며, 표면활성제가 포함된 경우에 증발이 지연되면서 압력이 증가하고 미세폭발이 일어남을 볼 수 있다. 이는 끓는점이 높고 점성이 강한 표면활성제가 액체 연료의 증발을 억제하기 때문이

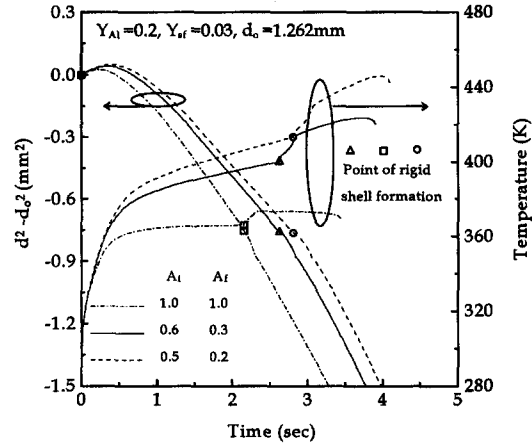


Fig. 4 The effect of the suppression factor on evaporation and superheating for a stabilized slurry with $d_0=1.262$ mm, $Y_{Al}=0.2$, $T_{gas}=721$ K and $T_h=897$ K. A_i : initial suppression factor of evaporation, A_f : final suppression factor of evaporation.

다. 여기에서 표면활성제로는 SPAN 85를 사용하였다.

첨가제에 의한 증발 억제는 수정된 Clausius-Clapeyron식인 식 (22)에서 증발억제계수(A)를 사용하여 모사된다. 증발 억제 계수는 다음 식 (28)과 같이 초기와 최종 증발억제계수(A_i , A_f)와 초기 액체연료의 무게에 대한 현재의 액체연료 무게의 비로 표현하였다.

$$A = A_i - (A_i - A_f) \times \left[1 - \frac{m_{li}}{m_{li,0}} \right] \quad (28)$$

Fig. 4는 초기 및 최종 증발억제계수의 슬러리 액적에 대한 증발 억제 결과를 보여주고 있다. 이 계수들은 물리적인 값은 아니지만 모델링에 있어서 증발억제를 모사하는 매개변수 연구로서의 가치가 있다고 하겠다. 증발억제계수가 작을수록 증발이 더욱 억제되며 액적은 더욱 과열될 수 있는 가능성을 보여준다. Fig. 3과 이후의 결과들에서는 A_i , A_f 를 각각 0.6, 0.3으로 선택하여 계산하였다.

미세폭발 단계는 다음의 세단계로 구분될 수 있는데 Takahashi 등⁽⁶⁾이 구분한 세단계와 유사하지만 본 연구에서는 압력증가와 이질 핵형성이 핵심 과정으로 생각되고 쉘은 d^2 -law 단계에서 고체입자와 첨가제의 결합으로 거의 완성된다고 보이기 때문에 가열 단계, 쉘 형성 단계(d^2 -law 단계), 압력증가 단계로 구분하였다. 이러한 구분은 여러 온도

조건에서 각 단계가 미세폭발 과정에서 차지하는 비중을 비교, 고찰하고자 설정하였다. 그 개략도가 Fig. 5와 같다. 액적이 고온의 환경에 놓이게 되면 열팽창이 증발보다 큰 가열단계를 지나서 셀 형성 단계를 경험하는데 임의의 두께까지는 표면장력에 의해서 고체입자가 표면에 축적한다. 그러나 어느 순간을 지나면 셀의 강화로 인하여 지름 변화가 정지하면서 액체면이 액적내부로 침투하고 그 이후에 액적 내부에서 나타나는 증발억제와 이질 핵형성에 의하여 미세폭발이 일어난다. 이때 셀의 기준 두께는 실험적 결과인 지름의 크기와 임계 다공성을 0.476으로 삼아서 그 관계식으로 부터 얻을 수 있었다.⁽³⁾ 그러나 이것은 액적이 비교적 느린 증발과정을 경험하여 d^2 -law 단계를 거칠 경우이며 고온에서 체 d^2 -law 단계를 거치지 않고 미세폭발이 일어나는 경우에는 Lee와 Law⁽¹⁵⁾가 언급한 바와 같이 고체입자와 같은 정도의 크기인 $6\mu\text{m}$ 를 셀 두께로 삼았다.

Fig. 3의 미세폭발 거동에서는 셀 형성 단계가 뚜렷하게 관찰되고 셀 형성 단계가 세 단계 중에서 가장 큰 비중을 차지하지만 Fig. 6은 보다 높은 외부 온도($T_{\text{gas}}=864\text{ K}$) 하에서 액적의 거동이기에 때문에 가열 초기 단계에서부터 셀이 형성되어 액적의 크기가 거의 일정하게 유지되며, d^2 -law 구간이 관찰되고 있지 않다. 이 때 표면에 형성된 셀은 단단하기보다는 액체 성분의 끌어당기는 힘과 증발된 기체의 밀어내는 힘에 의해 셀을 구성하고 있는 고체입자들이 힘의 평형 상태를 유지하고 있어 셀 자

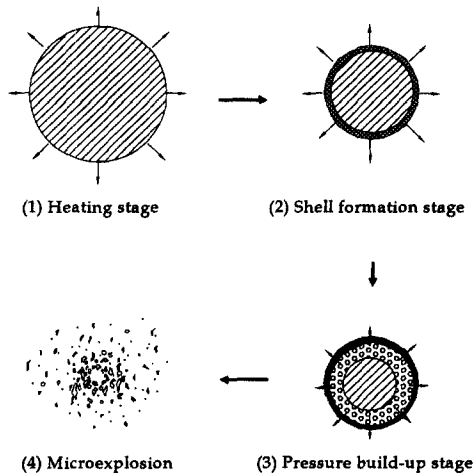
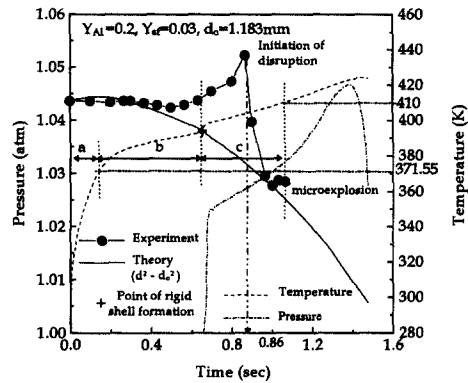
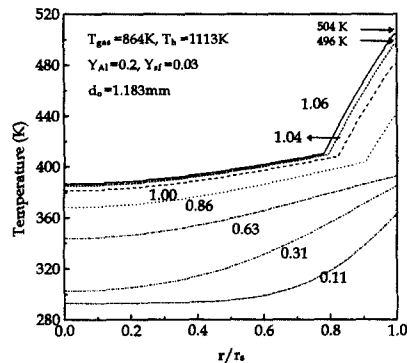


Fig. 5 Microexplosion mechanism of a slurry droplet with surfactant.

체는 단단하기보다는 유동성을 갖고 있다. 이것은 액적 내부로의 열전달이 매우 빨라서 셀 형성 단계보다 이질 핵형성에 의한 압력증가 단계가 더 중요함을 의미한다. Fig. 6의 (a)는 액적 거동과 증발면에서의 온도, 압력의 추이를 보여주고 있으며 (b)는 내부 온도분포를 보여주고 있다. (a)에서의 파열시초 (initiation of disruption)와 미세폭발 (microexplosion)을 구분하여 나타낸 것은 Wong과 Lin⁽⁸⁾이 액적 반지름의 0.8 배 지역의 온도가 액체연료 끓는점이 되면 파열 시초가 관찰된다는 연구결과와 비교하기 위해서이다. 하지만 그들은 Al/



(a)



(b)

Fig. 6 Experimental and theoretical results for a stabilized Al/n-heptane slurry with $Y_{\text{Al}}=0.2$, $Y_{\text{sf}}=0.03$, $T_{\text{gas}}=864\text{ K}$, $T_{\text{b}}=1113\text{ K}$ and $d_0=1.183\text{ mm}$. (a) Superheating and pressure build-up at the evaporation front (a : heating stage, b : shell formation stage, c : pressure build-up stage) (b) Internal temperature distributions.

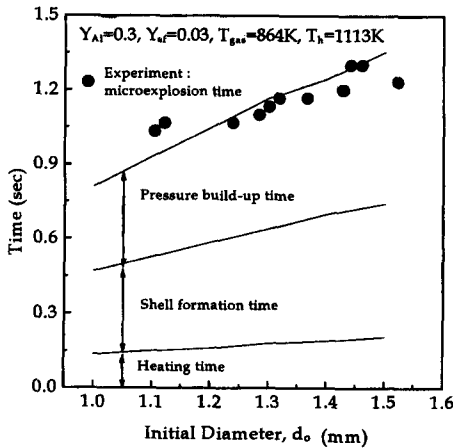


Fig. 7 The effect of initial diameter on microexplosion times for $Y_{Al}=0.3$, $Y_{sr}=0.03$, $T_{gas}=864$ K, $T_h=1113$ K.

C/JP-10 슬러리 액적을 대상으로 삼았기 때문에 미세한 탄소입자의 영향으로 더 빠르게 미세폭발 현상을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 연구에서처럼 Al입자만을 사용한 슬러리 액적이 미세폭발 하기 위해서는 더욱 단단한 셸의 형성이 필요하고 이질 핵형성을 위해서는 더 많은 시간이 요구된다. (a)의 결과를 보면 약 0.86초에 파열 시초가 관찰되는데 그 시간의 내부온도분포를 (b)에서 보면 반지름의 0.8 배 지역의 온도가 끓는점 (371.5 K)보다 약 10 K정도 상회하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Al입자만을 사용하였기 때문에 좀 더 액적 내부로 증발면이 침투할 것이라는 추정에 비추어 반지름의 0.8 배 지역에서 더 높은 온도가 도출된 것을 설명할 수 있을 것이다. Wong과 Lin이 사용한 파열시초의 기준은 특정한 경우에만 적용 가능하며 또한 미세폭발이 아닌 파열시초의 예측이므로 미세폭발 예측을 위한 기준 설정이 필요하다.

슬러리 액적의 미세폭발 시간을 예측하기 위한 임계 조건을 찾기 위해서 Fig. 3 과 Fig. 6 의 미세폭발 순간의 액체연료 증발면의 온도를 살펴보면, Fig. 3에서는 증발면의 온도가 약 418 K, Fig. 6에서는 약 410 K 일 때 미세폭발이 일어남을 볼 수 있다. 따라서 액체연료인 n-heptane은 증발면의 온도가 약 410 K 근처일때 이질 핵형성이 일어나는 것으로 추정할 수 있다. Eberhart 등의⁽¹⁶⁾ 결과에 의하면 n-heptane의 동질 핵형성 (homogeneous nucleation) 온도는 약 487 K이다. 그러나 미세폭발 과정에서는 액체 연료를 고체입자들이 에워싸고

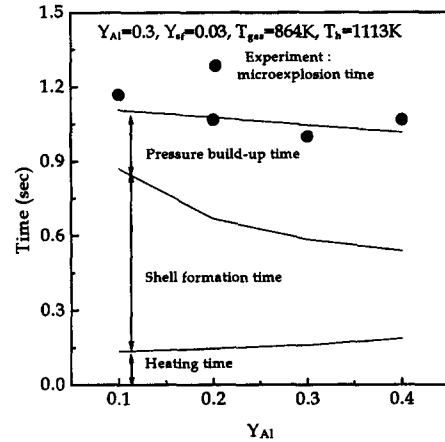


Fig. 8 The effect of initial solid loading on microexplosion times for $Y_{sr}=0.03$, $T_{gas}=864$ K, $T_h=1113$ K, and $d_0=1.2$ mm.

있으므로 이질 핵형성이 일어나며 때문에 보다 낮은 온도에서 핵형성이 가능하게 된다. 이질 핵형성의 정확한 임계온도를 구하는 것은 현실적으로 상당히 어려운 일이기 때문에 본 연구에서는 이론적 모델링의 결과인 410 K를 미세폭발의 기준값으로 설정하고자 한다. 하지만 이질 핵형성의 임계온도에 대한 추가의 연구가 수행되어야 할 것이다.

Fig. 7은 초기 액적 크기에 따른 미세폭발 시간을 나타내 주고 있다. 그림을 보면 액적크기와 미세폭발 시간이 어느 정도 비례하는 것을 볼 수 있는데 이것은 액적이 커지면 액적 내부로의 단위 표면적당 열전달이 작아져서 액적의 가열과 증발 현상 전반이 느려지기 때문이다. 또한, Fig. 7과 같이 가스의 온도가 864 K로 비교적 고온의 온도 조건속에서는 압력증가 단계가 미세폭발 시간에 가장 지배적임을 알 수 있다. 온도 환경에 따른 세 단계의 구분은 Fig. 3 (b)와 Fig. 6 (a)를 비교하면 고온일 때 압력증가 단계가 미세폭발 시간에 지배적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 같은 온도 조건에서 고체 입자의 초기 질량분율이 미세폭발 시간에 미치는 영향을 나타내며, 고체입자의 초기 질량분율이 증가할수록 미세폭발 시간이 대체로 감소하지만 그 차이가 미미함을 보여 준다. 고체입자의 초기 질량분율이 증가할수록 액적의 열전도율이 높아져서 내부로의 열전달이 크고 셸의 형성이 용이해서 미세폭발이 빨라진다. 그러나 고온일 경우에는 셸 형성 시간이 매우 짧아 압력증가 단계가 지배적이므로

온도 조건이 중요해지고 고체입자의 질량분율에는 큰 영향을 받지 않는다.

5. 결 론

슬러리 액적의 미세폭발 현상에 대해 이론적 모델링을 통한 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면활성제는 액체 성분의 증발 억제를 유발하며, 이로 인한 액체 성분의 과열은 액적내부에 이질 핵형성을 유도하여 미세폭발을 일으킨다. 이러한 미세폭발 과정을 가열 단계, 쉘 형성 단계, 압력 증가 단계로 세분할 수 있다.

(2) 액적의 크기가 감소할수록, 고체입자의 초기 질량분율이 어느 한도 내에서 증가할수록 미세폭발 시간은 감소하는 경향을 보인다. 그러나 고온의 환경일수록 압력 증가 단계가 중요하게 되어 쉘 구조에만 영향을 주는 입자의 초기 질량분율에 따른 미세폭발 시간의 차이가 크지 않다.

참고 문헌

- (1) Wong, S. C., Turns, S. R., 1987, Ignition of Aluminum Slurry Droplets, *Combustion Science and Technology*, Vol. 52, p. 221~242
- (2) Wong, S. C., Turns, S. R., 1989, Disruptive Burning of Aluminum/Carbon Slurry Droplets, *Combustion Science and Technology*, Vol. 66, pp. 75~92
- (3) Cho, S. Y., Takahashi, F., Dryer, F. L., 1989, Some Theoretical Consideration on the Combustion and Disruption of Free Slurry Droplets, *Combustion Science and Technology*, Vol. 67, pp. 37~57
- (4) Maloney, D. J., Spann, J. F., 1988, Evaporation, Agglomeration, and Explosive Boiling Characteristics of Coal-Water Fuels under Intense Heating Conditions, *Twenty-Second Symposium (Int.) on Combustion*, pp. 1999~2008
- (5) Takahashi, F., Dryer, F. L., Williams, F. A., 1986, Combustion Behavior of Free Boron Slurry Droplets, *Twenty-First Symposium (Int.) on Combustion*, pp. 1983~1991
- (6) 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
- (7) Wong, S. C., Lin, A. C., Chi, H. Y., 1990, Effects of Surfactant on the Evaporation, Shell Formation and Disruptive Behavior of Slurry Droplets, *Twenty-Third Symposium (Int.) on Combustion*, pp. 1391~1397
- (8) Wong, S. C., Lin, A. C., 1992, Microexplosion Mechanisms of Aluminum/Carbon Slurry Droplets, *Combustion and Flame*, Vol. 89, pp. 64~76
- (9) Wong, S. C., Lin, A. C., Wu, C. E., 1994, Microexplosions of Boron and Boron/Carbon Slurry Droplets, *Combustion and Flame*, Vol. 96, pp. 304~310
- (10) Lee, T. Y. R., Taylor, R. E., 1978, "Thermal Diffusivity of Dispersed Materials," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 100, p. 720
- (11) Kunii, D., Smith, J. M., 1960, "Heat Transfer Characteristics of Porous Rocks," *AICHE Journal*, Vol. 6, p. 71
- (12) Reid, R. C., Pausnitz, J. M., Poling, B. E., 1987, *The Properties of Gases and Liquids*, 4th ed., McGraw-Hill, New York
- (13) 변도영, 백승욱, 1995, "JP-8/AI 액적의 미세폭발에 관한 연구," 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, pp. 208~211
- (14) Kuo, K. K., 1986, *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons, p. 94
- (15) Lee, A., and Law, C. K., 1991, "Gasification and Shell Characteristics in Slurry Droplet Burning," *Combustion and Flame*, Vol. 85, pp. 77~93
- (16) Eberhart, J. G., Kreamer, W., and Blander, M., 1975, "Metastability Limits of Superheated Liquids: Bubble Nucleation Temperatures of Hydrocarbons and Their Mixtures 1," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 50, No. 2, pp. 369~378
- (17) Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., and Ganic, E. N., 1985, *Handbook of Heat Transfer Fundamentals (2nd Edn.)*, McGraw-Hill, New York
- (18) Saitoh, T., and Nagano, O., 1980, "Transient Combustion of a Fuel Droplet with Finite Rate of

Chemical Reactions," *Combustion Science and Technology*, Vol. 22, pp. 227~234

(19) Raznjevic, K., 1976, Handbook of Thermodynamic Tables and Charts, Hemisphere Pub. Corp.

부 록 : The Modified Clausius-Clapeyron Equation

상평형에 대한 Clausius-Clapeyron 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dp}{dT} \approx \frac{\rho_g L}{T} \quad (\text{A-1})$$

윗 식에서 L 은 증발 잠열로서 온도에 대한 함수로 표현된다.

$$L = L_0 (T_{cr} - T)^a \quad (\text{A-2})$$

(A-1) 식에 (A-2) 식을 대입하고 이상 기체 방정식, 으로부터 밀도를 제거하면, 다음과 같은 미분 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{p(MW)_F}{R_u T^2} L_0 (T_{cr} - T)^a \quad (\text{A-3})$$

식 (A-3)을 상태 1에서 상태 2까지 적분을 수행하는데 상태 1을 액체연료의 끓는점으로 설정하면 이므로

$$\ln \left[\frac{p_2}{p_1} \right] = \frac{L_0 (MW)_F}{R_u} \int_{T_1}^{T_2} \frac{(T_{cr} - T)^a}{T^2} dT \quad (\text{A-4})$$

$$Y_F(T) = \exp \left[- \frac{L_0 (MW)_F}{R_u} \int_T^{T_b} \frac{(T_{cr} - T)^a}{T^2} dT \right] \quad (\text{A-5})$$