

분위기 가스 변화에 의한 폴리스티렌 구의 미소중력 연소특성

최병철* · 이토켄이치* · 후지타오사무*

(2001년 2월 7일 접수, 2001년 8월 9일 심사완료)

Microgravity Combustion Characteristics of Polystyrene Spheres with Various Ambient Gases

Byung-Chul Choi, Kenichi Ito and Osamu Fujita

Key Words: Combustion(연소), Microgravity Combustion(미소중력 연소), Droplet Combustion(액적 연소), Polystyren(폴리스티렌), EGR(배기 재순환)

Abstract

An experimental and numerical analysis were conducted to investigate the transient temperature distribution and flame propagation characteristics over an inline polystyrene spheres under microgravity. From the experimental, a self-ignition temperature of polystyrene bead was 872 K under gravity. Flame spread rates were 4.6-5.1 mm/s with ambient gas N₂ and 2.3-2.5 mm/s with ambient gas CO₂, respectively. Flame radius diameters were 17 mm with ambient gas N₂ and 9.6 mm with ambient gas CO₂, respectively. These results suggest that the flame propagation speed could be affected in the Diesel engine and the boiler combustor by EGR. In terms of the flame spread rate and the transient temperature profile, numerical results have the qualitative agreement with the experiment.

1. 서론

디젤엔진, 산업용 보일러 및 가스터빈은 비교적 연료의 연소제어가 용이한 액체연료를 분사하여 미립화된 액적군의 착화, 화염전파 현상을 통하여 연소에너지를 이용하고 있다. 이러한 분무연소는 액적군의 연소로 그 현상은 매우 복잡하지만, 액적군은 단일 액적의 집합이므로 단일 액적의 연소로 간략화하여 액적군의 연소현상을 해석하여 왔다. 일반적으로 단일 액적이 정지된 공기 중에서 착화하면 액적 주위에 화염이 형성되

지만, 연소가스에 작용하는 부력 때문에 자연대류가 발생하여 원추형의 전주화염을 형성한다. 그러나 미소중력장에서는 부력이 작용하지 않기 때문에 구상에 가까운 화염이 형성된다.⁽¹⁾

액적연소의 모델링 역시 단일액적이 구상으로 연소한다는 가정 하에서 많이 수행되고 있다. 그러나, 실제 분무연소는 액적군의 연소이므로 단일 액적을 모델링할 경우 액적간의 연소 간섭현상을 파악하는 데에는 오차가 발생할 수 있다. 이러한 일련의 액적 간의 연소현상을 파악하는 것은 실제 분무연소 현상의 규명에 매우 중요하다. 중력장에서 액적군의 연소실험은 자연대류의 발생으로 매우 복잡해지기 때문에 이들의 영향을 제거한 상태에서 액적군의 연소특성을 파악하려는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연소실험조건을 만드는 방법으로는 미소중력장을 이용하는 방법이 있다. 지구상에서 미소중력장을 형성하는

* 책임저자, 회원, 전남대학교 자동차연구소

E-mail : bcchoi@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1681 FAX : (062)530-1689

* 홋카이도대학 공학부 기계과학부

가장 간단한 방법으로는 자유낙하법이다. 즉, 연소실험장치를 자유낙하시키면서 액적군의 연소과정을 관찰하는 기법이다.

미소중력장에서 액체 및 고체입자의 연소에 관한 연구는 많이 진행되어 왔다. Kumagai 등⁽²⁾은 부탄, 에탄올의 단일 액적에 관한 연구를 시작하였다. 여기서 액적의 연소속도정수를 구하고, 자연대류 효과를 관찰하였다. 단일 액적의 연소에 관한 연구에서는 레이저 광계측기법을 이용하여 메탄올 및 n-dodecane, n-heptane의 OH radical를 계측한 예도 있다.⁽³⁾ 액적군에 대해서는 액체 연료를 직접 이용한 예는 드물고, Fujita 등⁽⁴⁾은 액적의 배열방법이나 표면증발 문제를 제거하기 위하여 고체연료 폴리스티렌 구를 액적으로 상정하여 입자간격이 화염형상, 연소속도, 구의 연소수명에 미치는 영향에 대한 연구를 하였다. 그러나, 액적군 연소현상을 많은 인자들에 대하여 미소중력장 하의 실험으로만 관찰하기에는 많은 어려움이 있고, 연소현상의 정확한 이론적 해석이 부족한 점이 있다. 연소현상의 수치해석에 관한 연구로는, Smooke⁽⁵⁾의 일차원 정상상태 모델에 의한 층류에혼합화염의 안정성에 관한 연구예가 있고, Cho⁽⁶⁾ 등의 미소중력장에서 n-heptane 단일 액적의 착화현상의 비정상 일차원 수치해석예가 있다.

한편, 디젤엔진이나 정치용 내연기관이나 외연기관에서 NOx저감을 목적으로 EGR(Exhaust Gas Recirculation)을 채용할 경우, 흡기에 CO₂와 같은 불활성 가스가 다량 함유되어 있는데, 이들 성분이 디젤 분무연소에 미치는 영향을 파악하는 것은 저공해 디젤엔진의 개발과정에 있어서 매우 중요하다.

본 연구에서는 액적군의 연소실험 애로사항을 배제하고, 분무연소 현상을 보다 단순화하기 위하여 고체연료인 폴리스티렌 구를 디젤 분무의 액적 연료로 상정하여 미소 중력장에서 연소특성을 파악하고, 이들 연소현상을 수치해석하고자 한다. 미소중력실험에서는 디젤연료 분무상태의 액적군을 다수의 폴리스티렌 구로 대체하여 구간의 화염전파특성을 파악하고, EGR을 고려하여 연소장분위기 가스를 N₂, CO₂으로 변화하였을 경우 화염전파특성을 관찰한다. 한편, 수치해석에서는 내

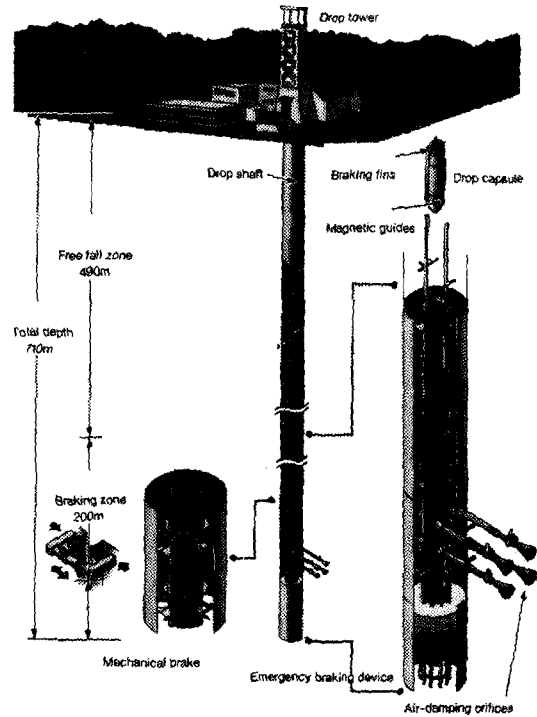


Fig. 1 Drop tower for the micro-gravity experiment in Kamisunagawa, Japan

부열원이 없는 비정상상태의 열전도방정식을 이용하여 무중력장 하에서 액적군의 연소장 분위기 가스 성분에 따른 화염의 전파특성 및 비정상 상태의 연소장의 온도변화특성을 구하여 실험결과와 비교분석 한다. 분위기 가스는 N₂, CO₂, He, Ar을 선택하고 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 미소중력 상태 연소실험

미소중력 실험은 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 일본무중력센터(Japan Microgravity Center, JAMIC)의 약 10초 자유낙하탑에서 수행하였다. 낙하 구간은 전체 710m 길이지만, 이 중 자유낙하 길이는 초기 490m 높이며 나머지구간은 낙하캡슐의 제동구간이다. 자유낙하 시 미소중력의 정도는 10⁻⁵G 이하이다. 연소장치가 들어가는 낙하캡슐의 외관은 $\phi 1.8\text{m} \times 7.85\text{m}$ 이며, 이 중 가운데 3.2m가 실제 실험장치가 들어가는 부분이

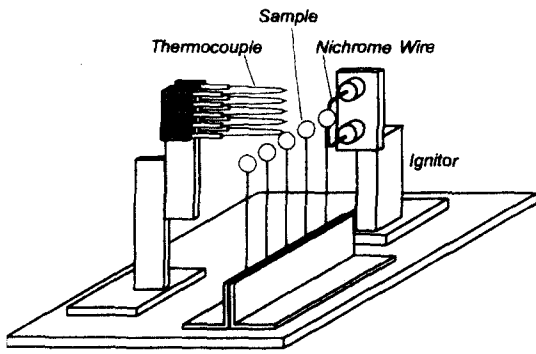


Fig. 2 Combustion apparatus in the drop capsule

다. 캡슐 내부 실험장치의 계측 및 제어는 전부 무선으로 수행하고 있다.

연소실험장치의 개략을 Fig. 2에 나타낸다. 연료 폴리스티렌 구는 그림처럼 직경 0.2mm 피아노선에 고정하여 일정한 간격으로 배열을 하며, 우측에 점화를 위한 니크롬선이 배치되어 있다. 폴리스티렌 구의 직경은 2.5mm이며, 구간의 간격은 4.5mm를 실험조건으로 하였다. 연소장 주위의 분위기 가스는 공기, 즉 산소농도가 21% 질소가 79%인 경우와 동일한 산소농도에 질소 대신 CO₂ 가스로 대체한 경우를 실험조건으로 선정하였다.

화염의 전파과정의 영상은 Hi Vision CCD 카메라(SONY XCH-1125)와 렌즈(Nikkor 105mm F2.5S)를 사용하여 기록하였다.

2.2 중력 상태 연소실험

중력상태에서 폴리스티렌 구의 착화온도를 구하는 실험을 행하였다. 고온의 분위기는 분리되는 튜브형 전기로를 이용하여 만들며, 전기로의 온도는 온도제어기로 벽면 근처의 온도를 중심으로 제어한다. 실험은 대기압, 자연대류 상태에서 내부의 공기온도가 약 873K에서 수행하였다. 폴리스티렌구는 직경 6 mm의 것을 사용하였다. 폴리스티렌 구를 외경 0.5 mm의 K형 열전대 끝에 고정하여 연소 시 구의 내부 및 연소 중심부의 온도를 측정하고, 또한 동종의 열전대를 폴리스티렌 구와 나란히 배열하여 분위기의 온도를 동시에 측정하였다. 착화과정의 영상은 디지털 비

디오 카메라(SONY DCR PC100)를 사용하여 촬영하였다.

3. 수치해석

분무연소에 있어서 액적군 간의 화염전파 수치해석은 무중력상태인 경우 대류현상이 없는 것으로 단순화할 수 있다. 그리고, 복사에 의한 전열은 무시하였다. 지배방정식은 다음과 같은 내부발열반응이 없는 비정상상태의 열전도방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

여기서, T는 온도, x는 축 방향 거리, α는 열확산계수, t는 시간을 각각 나타낸다.

초기조건은 T_i=1300 K로 일정하며, 그 외 점에서의 초기온도는 T_∞=300 K로 일정하다.

경계조건은 $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (at x=L)인 단열조건을 선택하였다.

상기 열전도방정식 (1)을 무차원화하기 위하여 온도, 축방향거리 및 시간에 대하여 다음 무차원수를 도입한다.

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}, \bar{x} = \frac{x}{L}, \bar{t} = \frac{\alpha t}{L^2} = Fo. \tag{2}$$

여기서, T_i는 초기온도, T_∞는 분위기 온도로 일정하며, L은 모델링 대상의 축방향 길이, \bar{x} 는 무차원 거리, \bar{t} 는 무차원 시간을 나타낸다. Fo는 Fourier 수로 특정체적에 있어서 열전도에 의한 열전달량과 에너지 저장물의 비로 나타낸다. 식 (2)를 이용하여 식 (1)을 무차원화하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\partial \theta}{\partial Fo} \tag{3}$$

주어진 초기조건 및 경계조건을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{초기조건} : \theta(\bar{x}, 0) &= 0.0 \\ \text{경계조건} : \theta(0, Fo) &= 1.0, \quad Fo > 0 \end{aligned} \tag{4}$$

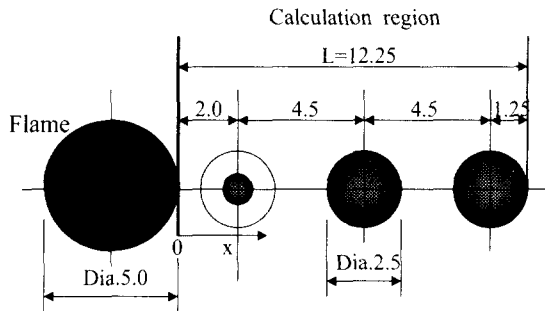


Fig. 3 Modelling region of combustion fields

$$\frac{\partial \theta(1, F_o)}{\partial x} = 0, F_o > 0 \quad (5)$$

수치계산은 식 (3)을 차분법의 양해법(Explicit method)으로 수행하였다. 수치계산을 함에 있어서 $F_o=0.11-0.43$ 까지는 거의 동일한 결과를 얻을 수 있음을 확인하여 $F_o < 0.5$ 를 수렴조건으로 하였다. 이 때 시간격자 Δt 는 $2.5 \times 10^{-5} - 4.4 \times 10^{-4}$ s 범위에 있다.

수치계산에 사용한 각종 물성치 중 Table 1에 실험에 사용한 폴리스틸렌의 300K에서 대표적인 물성치를 나타낸다.⁽⁷⁾ 초기 1300K의 화염온도가 비정상상태에서 전열되어 폴리스틸렌 구의 온도가 872 K에 도달하면 착화한 것으로 간주하였다. 그리고 분위기 가스의 변화에 의한 비정상시의 화염전파특성 및 열확산에 의한 온도증가 특성을 관찰할 때 사용한 각 분위기 가스의 300K에서의 물성치를 Table 2에 나타낸다.

Fig. 3은 $Pd=4.5$ mm의 연소장 모델을 나타내고 있다. 모델에서 화염크기는 직경 5mm이며, 화염의 선단부의 온도가 1300K으로 일정하다고 가정하고, 그 주위의 온도는 300K으로 일정한 초기상태에서 계산을 시작한다. 폴리스틸렌 구의 직경은 2.5mm이며, 수치계산 대상의 축방향의 길이는 $L=12.25$ mm이다.

4. 실험결과 및 고찰

폴리스틸렌의 화학식은 $(-CH(C_6H_5)CH_2)_n$ 이며 분자량은 약 백만 정도이다. 이러한 폴리스틸렌을

Table 1 Polystyrene properties⁽⁷⁾

Properties(at 300K, 0.1MPa)	Quantity
Self-ignition temperature(K)	764
Thermal conductivity (W/m.K)	0.08-0.138
Specific heat (C_{pi}) (kJ/kg.K)	1.34
Density(solid) (kg/m ³)	15-30

Table 2 Thermal properties of ambient gases⁽⁸⁾

Ambient gases	Thermal conductivity(λ) (at 300K, 0.1MPa) mW/m.K	Thermal diffusivity(α) (at 300K, 0.1MPa) (mm ² /s)
CO ₂	16.55	10.82
N ₂	26.14	22.07
Ar	17.67	20.9
He	152.7	180.9

디젤연료의 분무 액적으로 상정하여, 미소중력장에서 액적을 일렬로 나열하여 화염의 전파특성을 고찰하였다. Fig. 4는 연소 분위기가 대기압, 공기 중에서 연료 입자의 미소중력장에서 화염전파 거동의 비디오 촬영결과를 나타내고 있다. 폴리스틸렌구 간의 거리는 4.5 mm이다. Fig. 5는 분위기가 산소 21%, CO₂ 79%로 변경한 경우의 결과이다. 폴리스틸렌 구 간의 거리는 3.5mm이다. 각 영상의 오른쪽 위의 숫자는 실험 개시 후의 실시간을 나타낸 것이며, 실험개시 후 약 2초부터 미소중력 상태로 들어간다. 영상 중 화염의 진행방향은 왼쪽에서 오른쪽이다.

미소중력장에서 연소과정 중 열전달은 확산과 열전도, 복사현상이 지배적이다. 각 구의 화염전파 과정을 보면, 먼저 왼쪽의 구가 착화 후 연소하면 고온의 화염으로부터 열이 주위의 공기를 열전도에 의해 가열하고, 다음 구의 시료는 열분해에 의해 탄화수소 계통의 가연성가스를 발생하여 주위로 확산되어 간다. 열전달이 더욱 진행하여 가연성가스의 조건이 착화가능 공연비 범위에 들어가고 온도가 착화온도에 도달하면 착화하여 화염이 전파되어 간다.^(9,10)

미소 중력장의 특유의 액적 주위의 원주화염

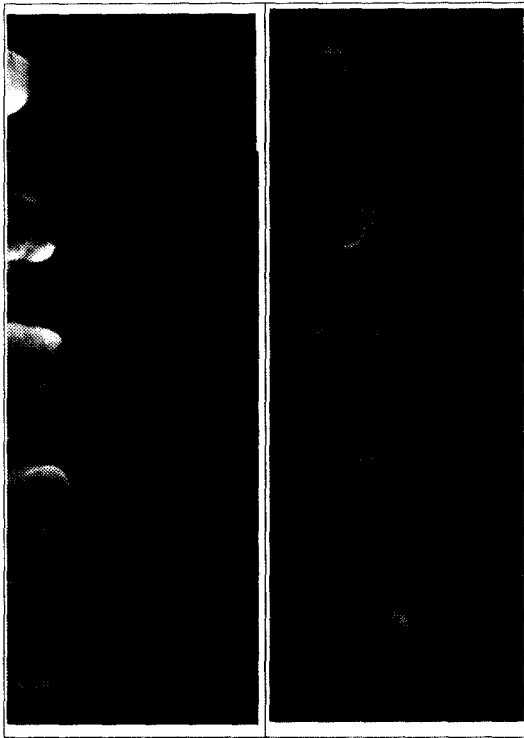


Fig. 4 Microgravity combustion characteristics of polystyrene solid particle (dia.=2.5mm) with ambient gas N₂ (Pd=4.5mm)

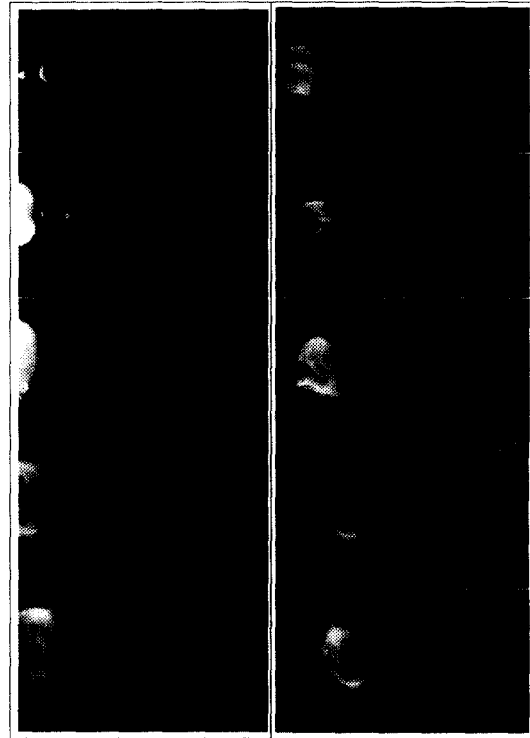


Fig. 5 Microgravity combustion characteristics of polystyrene solid particle(dia.=2.5mm) with ambient gas CO₂ (Pd=3.5 mm)

직경을 비교하여 보면, Fig. 4의 N₂ 분위기에서의 화염의 평균직경은 약 17mm이며, CO₂ 분위기에서는 약 9.6mm로 나타났다. 단, 화염의 직경은 좌우 및 상하의 평균 직경을 나타내었다. 즉, 불활성 가스인 CO₂가 79%나 포함된 경우(Fig. 5)가 열확산계수가 N₂에 비교하여 거의 반 정도로 낮아 화염구의 직경도 작게 나타난다.

화염전파율(Flame spread rate)을 비교하면 공기 분위기(Fig. 4)에서는 4.6-5.1 mm/s 정도이고, CO₂ 분위기(Fig. 5)에서는 2.3-2.5 mm/s 이었다. CO₂ 분위기에서는 화염구도 작을 뿐만아니라 화염전파율도 공기 중보다 느림을 알 수 있다. 이러한 현상은 디젤엔진이나 보일러에서 EGR을 실시할 경우, CO₂와 같은 불활성가스가 흡입공기에 다량 함유되어 화염의 전파속도가 늦어지는 이유를 명확히 입증해주고 있다.

Fig. 6은 중력장에서 폴리스티렌의 착화시 분

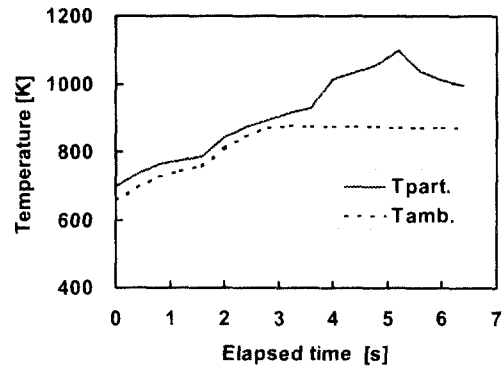


Fig. 6 Self-ignition characteristics of polystyrene under gravity

위기온도 및 구의 중심온도를 나타낸 것이다. 결과 중 T_{part.}는 구의 중심온도, T_{amb.}는 분위기의 온도를 각각 나타낸다. 분위기의 온도를 여러

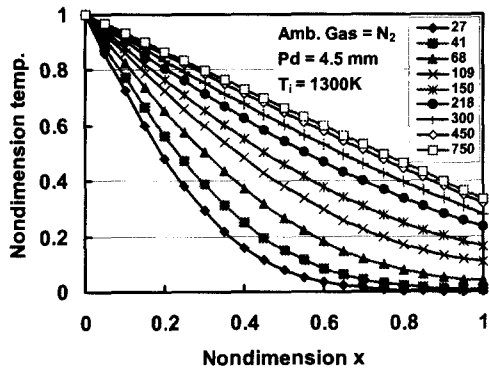


Fig. 7 Transient temperature profile with ambient gas N₂ (Pd=4.5mm, O₂=21%, N₂=79%)

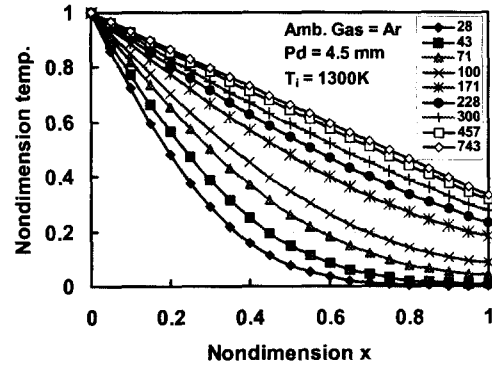


Fig. 8 Transient temperature profile with ambient gas Ar (Pd=4.5mm, O₂=21%, Ar=79%)

조건에서 실시한 결과 872 K이 착화에 최적임을 확인하였다. 그 결과 직경 6 mm의 구를 872 K의 공기 중에 갑자기 투입하면 구는 급격히 열분해하여 용융, 증발, 착화현상이 복합적으로 진행된다. 이 결과에서는 경과 시간 3.6 s까지는 용융과 증발현상이 복합적으로 일어나다가, 이 시점에서 구의 온도가 급격히 상승하는 것으로 판단하여 착화점으로 간주하였다. 이 때 착화온도(T_{ign})는 872 K이다.

5. 수치해석 결과 및 고찰

수치계산에서는 실험에서 수행하지 못한 다양한 분위기 가스조건에서 비정상상태의 온도전도 특성 및 화염전파특성에 대하여 시뮬레이션한다.

수치계산 조건은, 폴리스틸렌 입경이 2.5 mm, 폴리스틸렌 구 간의 거리(Pd)는 4.5 mm이다. 초기 화염구의 온도는 1300K, 분위기 온도는 300K으로 일정하다. 그리고 분위기 가스의 영향에 관한 수치해석 조건은, 산소가 21%로 일정한 상태에서 나머지 79%의 가스를 N₂, Ar, CO₂ 및 He으로 변화시킨 경우이다. 압력은 대기압 조건에서 수치해석을 수행하였다. Fig. 7-10의 결과는 폴리스틸렌 입경의 존재는 무시하고 단순히 주어진 연소장에서 온도전도에 의한 비정상상태의 온도분포를 분위기가스의 조건에 따라 검토한 결과이다. 각 결과의 범례 중 수치는 비정상상태의

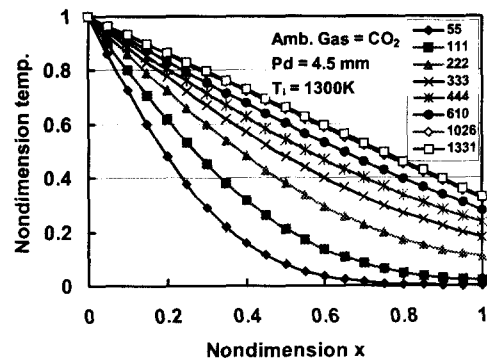


Fig. 9 Transient temperature profile with ambient gas CO₂(Pd=4.5mm, O₂=21%, CO₂=79%)

경과시간을 나타낸다.

Fig. 7-10은 Fig. 3과 같은 연소장, Pd=4.5 mm인 경우, 공기 중에서 폴리스틸렌 구가 3개 배열된 경우의 수치해석 결과이다. 수치해석 결과는 경과시간에 대한 무차원 축방향 거리에 대한 무차원 온도분포를 각각 나타내고 있다.

Fig. 7은 분위기 가스가 O₂=21%, N₂=79%인 경우로, 초기 약 109 ms까지는 온도분포가 급격하게 상승하다가 그 이후는 완만해져 750 ms 이후는 거의 정상상태에 가까워짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 분위기 가스가 O₂=21%, Ar=79%인 경우로, 초기 약 100 ms까지는 온도분포가 급격하게 상승하다가 그 후에 완만해지는 경향은

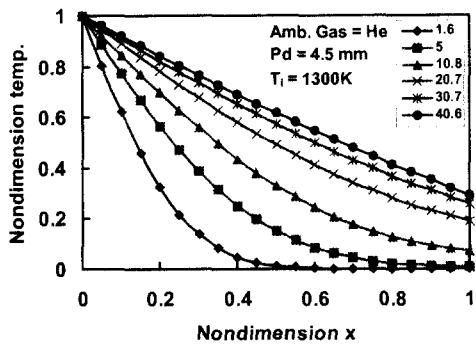


Fig. 10 Transient temperature profile with ambient gas He (Pd=4.5mm, O₂=21%, He=79%)

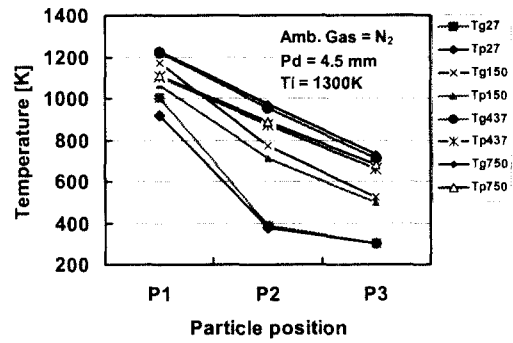


Fig. 11 Ignition time of particle with ambient air under microgravity

Fig. 7의 결과와 거의 동일하다. 이것은 Table 2에 나타낸 것과 같이 N₂ 및 Ar의 열확산계수가 거의 같기 때문이다.

Fig. 9는 분위기 가스가 O₂=21%, CO₂=79%인 경우로, 초기 온도분포 상승형태를 Fig. 7과 비교하면 상당히 완만해지는 경향을 나타내고 있다. 즉, 동일한 온도분포에 도달하는 시간은 N₂ 분위기의 약 2 배에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이는 CO₂의 열확산계수가 N₂의 거의 절반정도이기 때문이다. 이 결과는 Fig. 5의 미소중력실험 결과와 잘 일치한다.

Fig. 10은 분위기 가스가 O₂=21%, He=79%인 경우로, 초기 온도분포 상승형태를 Fig. 7의 공기 분위기와 비교하면 상당히 빠른 경향을 나타내고 있다. 즉, 동일한 온도분포에 도달하는 시간은 공기 분위기의 약 20 배에 가깝다. 이는 He의 열확산계수가 약 8배나 되기 때문이다.

이상의 수치해석 결과는 폴리스티렌 구는 고려하지 않고 연소장 고려하여 주위 분위기가스의 열확산계수만의 영향으로 비정상상태의 온도분포를 예측하여 보았다. 그 결과 분위기가스의 열확산계수가 온도분포의 지배적임을 확인하였다. 폴리스티렌 구 중심의 온도는, 구 주위의 온도와 구의 물성치를 고려한 열평형계산으로부터 산출하였다. Fig. 11-14는 각 분위기가스 조건에서의 폴리스티렌 구의 중심 온도분포를 나타낸 결과이다.

Fig. 11은 분위기 가스가 O₂=21%, N₂=79%인

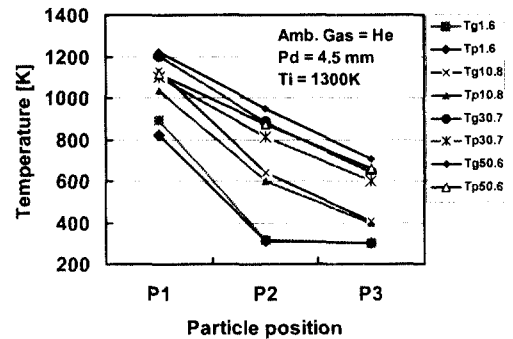


Fig. 12 Ignition time of particle with ambient gas He under microgravity

경우로, 결과는 구 주위의 가스온도(Tg)와 구의 온도(Tp)를 경과 시간에 대하여 나타내고 있다. 온도는 실제온도이다. 초기 30 ms에서 보면, 첫 번째 구(P1) 주위의 가스온도가 구의 온도보다 높고, 두 번째 구(P2)에서는 그 온도차가 약간 작아지고, 그 하류 쪽으로 갈수록 가스온도가 낮아져 두 온도차는 거의 나지 않는다. 시간이 경과하여 P3의 온도가 높아질수록 가스와 구의 온도 차이는 커짐을 볼 수 있다. 그리고, 폴리스티렌의 실제 착화온도는 Fig. 6에서 나타낸 것처럼 872 K으로, 구의 중심온도가 872 K에 도달하면 착화하여 연소가 진행되는 것으로 가정하여 화염전파율(Flame spread rate, FSR)을 구하였다. 화염전파 거리는 Fig. 3과 같이 x=0에서 P2 중심까지의 거리(6.5 mm)를 대상으로 하였다. 이렇게 하

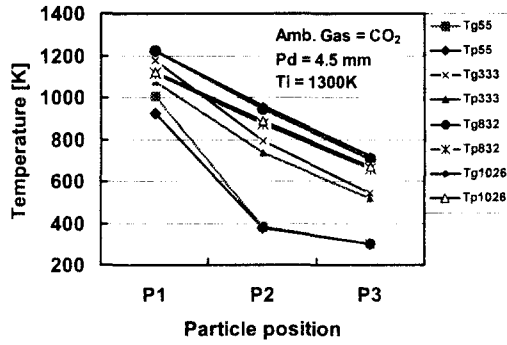


Fig. 13 Ignition time of particle with ambient gas CO₂ under microgravity

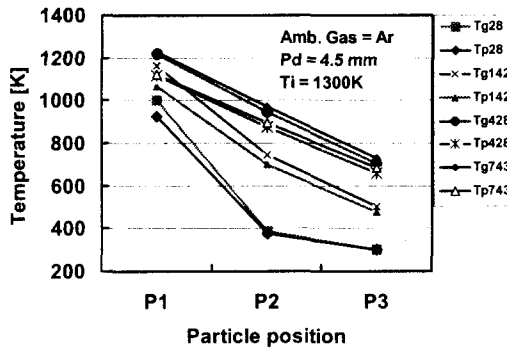


Fig. 14 Ignition time of particle with ambient gas Ar under microgravity

여 구한 N₂ 분위기의 화염전파율은 14.7 mm/s 이었다.

Fig. 12는 분위기 가스가 O₂=21%, Ar=79%인 경우로, N₂ 분위기의 조건과 거의 동일한 특성을 나타내고 있다. 그 이유는 Fig. 7-8에서 설명한 것과 동일한 현상 때문이다. Ar 분위기에서의 FSR은 약 15.5 mm/s 이다.

Fig. 13은 분위기 가스가 O₂=21%, CO₂=79%인 경우로, Fig. 9에서 관찰한 것처럼 온도 상승률이 N₂ 분위기 보다 늦어지고 있다. 이 때 FSR은 7.8 mm/s로 N₂ 혹은 Ar 분위기의 연소장에 비교하여 거의 절반 수준이다.

Fig. 14는 분위기 가스가 O₂=21%, He=79%인 경우로, 온도상승속도가 가장 빠르며, FSR은 130

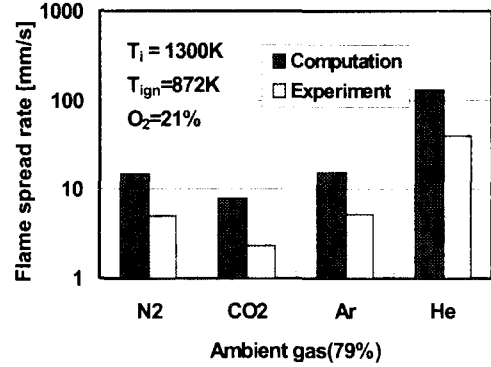


Fig. 15 Comparison of flame spread rate by experiment and computation (T_{ign}=872K)

mm/s로 가장 크다.

이상의 FSR을 실험에서 구한 값과 수치해석에서 구한 값을 비교한 결과를 Fig. 15에 나타낸다. 실험에서 구한 FSR 값은 영상으로부터 화염의 움직인 거리와 걸린시간으로부터 계산한 값이다. 미소중력장에서 측정된 FSR 실험결과는 N₂ 분위기에서 5.1 mm/s, Ar 분위기에서 5.2 mm/s, CO₂ 분위기에서 2.4 mm/s, He의 분위기에서 약 40 mm/s를 각각 나타내었다. Pd=4.5 mm의 수치해석 결과는 실제 이들 실험값과 비교하여 약 3배 높은 값을 나타내고 있다. N₂ 분위기에서 FSR은 14.7 mm/s, Ar 분위기에서는 15.5 mm/s, CO₂ 분위기에서는 7.8 mm/s 및 He 분위기에서는 130 mm/s 이다. 그 이유는 본 수치해석에서는 고체의 용융, 증발, 기-액 상호작용 및 복사현상 현상을 고려하지 않고 단순히 열전도방정식으로 열확산계수의 의존성만을 수치해석하였기 때문이다.

보다 정확한 해석을 위해서는 연소과정 중 고체 구의 용융, 액적의 증발, 기-액 상호작용, 화염의 복사현상도 고려해야할 것으로 생각된다. 가능하면 단순 열전도 방정식보다는 고차의 Navier-Stokes 방정식 등을 이용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는, 미소중력장의 낙하실험에는 많은 예산이 소요되므로, 실험회수를 줄일 수 있게 연소장을 단순화하여 열전도방정식만을 이용한 수치해석기법으로 이들 연소현상에서의 온도분포를 예측하는데 의미를 두었다.

6. 결론

미소중력장에서 폴리스틸렌 구의 분위기 가스의 변화에 따른 연소특성의 실험 및 수치해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 중력상태에서 폴리스틸렌의 착화온도는 872 K이다.

(2) 화염전파율(FSR)은 N_2 분위기에서 4.6-5.1 mm/s이고, CO_2 분위기에서는 2.3-2.5 mm/s로 느리다.

(3) 원주화염구의 직경은 N_2 분위기에서 약 17 mm, CO_2 분위기에서 약 9.6 mm로 작다. 이들 FSR 결과와 화염구의 크기의 분위기 가스의 효과는 디젤엔진이나 보일러에서 EGR이 화염전파속도를 지연시키는 효과가 있음을 나타내주고 있다.

(4) 단순한 열전도방정식에 의해 연소장의 비정상온도분포를 구한 결과, 온도분포는 분위기가스의 열확산계수에 의존하며, 이 결과는 화염전파율의 실험결과 경향과 비교적 일치하였다.

후 기

본 연구는 과기부의 국제공동연구(1-04-002) 및 전남대학교 학술재단의 해외교수파견연구('99. 12.26-00.2.25)의 지원으로 수행하였다. 연구비지원에 감사드리며, Hokkaido Univ.의 우주환경응용연구실의 관계자들에게 감사드린다.

참고문헌

(1) 송규근, 최병철, 1999, 연소공학, 청문각, pp. 138~149.

(2) Kumagai, S. and Isoda, H., 1956, "Combustion of Fuel Droplets in a Falling Chamber," *The 6th Symposium (Int.) on Combustion*, p. 726.

(3) Koing, J., Eigenbrod, C., Tanabe, M., Renken, H. and Rath, H. J., 1996, "Characterization of Spherical Hydrocarbon Fuel Flames: Laser Diagnosis of the Chemical Structure Through the OH Radical," *26th Symposium (Int.) on Combustion*, pp. 1235~1242.

(4) Fujita, O., Ito, K., Furuyama, K. and Ueno, M., 1998, "Combustion Propagation in a Crowd Fuel Droplet Based on the Microgravity Experiment Results," *The 36th Japanese Symposium on Combustion*, pp. 432~434.

(5) Smooke, M. D., 1982, "Solution of Burner-Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value Methods," *J. of Computational Physics*, Vol. 48, pp. 72~105.

(6) Cho, S. Y. and Dryer, F. L., 1999, "A Numerical Study of the Unsteady Burning Behaviour of n-heptane Droplets," *Combust. Theory Modeling*, Vol. 3, pp. 267~280.

(7) Hildado, C. J., 1982, "Flammability Handbook for Electrical Insulation," Technonic Publishing.

(8) 1991, JSME, JSME Data Book : Heat Transfer (4th Edition), pp. 328~330.

(9) Choi, D. S., Kim, D. J. and Hwang, S. C., 2000, "Development Behavior of Vaporizing Sprays from a High-pressure Swirl Injector using Exciplex Fluorescence Method," *KSME Int. J.*, Vol. 14, No. 10, pp. 1143~1150.

(10) Lee, S. H and Ryou, H. S., 2000, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," *KSME Int. J.*, Vol. 14, No. 7, pp. 796~806.