

저기압 고산소 환경에서 화염 전파특성에 관한 실험적 연구

양호동 · 권행준* · 박설현**†

조선이공대학교 자동차과, *조선대학교 대학원, **조선대학교 기계시스템 · 미래자동차공학부

Experimental Study on the Flame Spread Characteristics under Reduced Atmospheric Pressures and Elevated Oxygen Concentrations

Ho-Dong Yang · Hang-June Kwon* · Seul-Hyun Park**†

Department of Automobiles, Chosun College of Science & Technology

*Department of School of Mechanical System Engineering, Graduate School of Chosun University

**School of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun University

(Received October 31, 2016; Revised December 13, 2016; Accepted December 15, 2016)

요 약

발사체의 지상 운영과정이나 발사과정에서 일어날 수 있는 화재와 폭발사고 예방을 위해 1단 동체 내부에 형성될 수 있는 연소 환경에서 화염의 전파특성을 고찰해 보았다. 이를 위해 1단 동체 내부에 형성될 수 있는 고산소-저기압 환경을 연소챔버 내에 조성하고 고체연료를 점화시켜 화염 전파율을 측정하였다. 고체연료로는 두께가 0.18 mm인 광섬유를 사용하였다. 주어진 조건에서 산소농도가 증가함에 따라 광섬유를 따라 전파하는 화염의 속도는 급격히 증가하였지만 챔버 내의 압력이 대기압에 가까질 수록 화염의 전파속도는 감소하였다. 압력 증가에 따른 화염전파율의 감소의 원인을 파악하기 위해 대류열전달계수와 화염전파율의 압력 상관성 분석해 보았으며, 이를 통해 압력이 낮아질수록 대류 열손실이 줄어들어 화염전파율이 증가하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

The characteristics of flame spread under similar atmospheric conditions to those inside the first stage of launch vehicles were investigated to provide fundamental knowledge to prevent fires and explosions of vehicles during launching operations. To this end, the rate of flame spread on the solid fuel was measured at elevated oxygen concentrations and reduced atmospheric pressures. A 0.18 mm diameter optical fiber was used as a solid fuel. The experimental results indicated that elevated oxygen concentrations can increase the rate of flame spread while increasing the atmospheric pressures to 1 atm can lead to decreases in the rate of flame spread. The increases in the rate of flame spread with pressure is due mainly to reductions in the convective heat loss that are clarified through an analysis of the pressure dependence on the convective heat transfer coefficient.

Keywords : Flame spread, Solid fuel, Elevated oxygen concentrations, Reduced atmospheric pressures

1. 서 론

발사체 기술의 완성도는 한 국가의 국방 및 우주 기술 능력을 가늠해 볼 수 있는 척도이며, 우주강국들은 자주적 발사능력을 확보하여 안정적인 우주개발을 수행하고 있다. 또한 첨단기술 및 재래기술이 복합적으로 결합된 발사체 기술의 확보를 통해 관련 산업계로의 기술과급을 꾀하고 있다. 우리나라 역시 세 차례의 시도 끝에 발사에 성공한 나로호(Korea Space Launch Vehicle-I, KSLV-I)를 통해 우주강국을 위한 힘찬 발걸음을 내딛었다. 하지만 러시아

의 1단 발사체 기술에 의존하며 2차례 실패 끝에 발사에 성공한 나로호는 자주적 발사체 기술 확보에 대한 필요성을 일깨워준 충분한 계기가 되었다. 특히, 나로호 2차 발사 실패는 발사 137초 후 1단 연소 구간 비행 중 폭발사고⁽¹⁾로 추정되고 있어 발사체 기술 중 화재 통제 기술의 중요성을 일깨워 주고 있다. 발사체의 산화제로 주로 사용되는 액체 산소의 강력한 산화능력으로 인해 언제라도 발생할 수 있는 화재를 발사체 동체 내부에서 통제할 수 있는 기술은 발사체 화재 안전과 직결되는 문제이며, 우주발사체의 성공적 발사 여부를 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다.

†Corresponding Author, E-Mail: isaac@chosun.ac.kr
TEL: +82-62-230-7174, FAX: +82-62-230-7171

ISSN: 1738-7167
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.6.078>

대기권내에서 추력 발생을 위해 추진제의 연소가 이루어지는 동안 발사체 내부에 발생할 수 있는 연소 환경의 특징을 살펴보면 압력 및 산소 농도의 변화를 들 수 있다. 가령, 현재 한창 개발 중인 한국형 발사체(Korea Space Launch Vehicle-II, KSLV-II)와 유사한 발사 패턴(발사 고도, 발사속도, 단 분리 등)을 갖고 있는 러시아 우주 발사체인 소유즈(Soyuz)호의 동체 내부 압력은 발사 고도가 상승함에 따라 점차 감소하여 1단이 분리되는 시점에 도달하면 동체 내부 압력은 0.1 atm 이하로 감소하게 된다. 아울러, 발사 충격, 진동 등으로 인해 산화제 라인에서 누설 가능성이 상존하고 있다. 산화제로 사용되는 액화산소가 소량이라도 누설되어 기체로 상변화하는 경우 부피가 급격히 팽창하여 주변을 산소 과잉 환경으로 만들어 발화를 유발할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 발사체 발사 과정 중 1단 동체 내부에서 사고로 인해 발생될 수 있는 저기압-고산소 환경에서 생성된 화재의 특성 중 고체 연료의 화염 전파특성을 고찰해 보고자 하였다.

본 연구에서는 고체연료로 가연성 피복(폴리에틸렌)의 두께가 얇은 광섬유를 사용하였으며, 이는 피복의 물리적 두께가 열적 두께(Thermal trickiness)보다 두꺼워 열관성을 무시할 없는 전선의 화염전파 현상을 고찰한 선행연구⁽²⁻⁴⁾와 차별되는 점이다. 고체연료의 열관성을 무시할 수 없는 경우, 화염 전파현상은 화염 면에서 고체연료 표면으로의 복사 열전달과 고체연료 주위의 유동에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다⁽⁵⁾. 특히, 화염 면으로 부터의 복사 열전달 현상은 연소환경(압력, 산소농도, 그을음 농도, 연료 농도 등)에 따라 크게 달라지므로 열적 두께가 두꺼운 고체연료의 화염전파 현상은 해석과정이 복잡하고 단순화된 해석이 불가능하다. 또한 열관성이 큰 전선 피복의 경우 화염 전파과정에서 완전히 열분해되지 않은 폴리에틸렌이 화염 내부에 존재하여 전파 현상의 해석을 더욱 복잡하게 만들 수 있다^(3,4). 하지만, 본 연구에 적용된 광섬유와 같이 열적 두께가 얇은 고체연료의 경우 화염 전파현상이 화염 면에서 고체연료 표면으로 열전도에 의해 주로 지배받고 화염 내부에 열분해가 완전히 되지 않은 폴리에틸렌이 존재하지 않기 때문에 현상의 해석이 단순해지고 본 연구에 고찰해 보고자하는 저기압-고산소 환경의 영향이 화염전파에 미치는 영향을 정성적으로 고찰해 볼 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험 장치는 Figure 1에 제시되어 바와 같이 크게 10 L 연소 챔버와 진공펌프, 점화장치로 구성되어 있다. SUS304 재질의 연소 챔버는 2쌍의 광학창이 각각 평행하게 설치되어 점화 및 화염 전파과정을 가시화할 수 있도록 설계·제작되었다. 연소 챔버 내 저기압 환경을 조성하기 위해서 최대 24 L/min 유량으로 챔버의 감압이 가능한 진공펌프

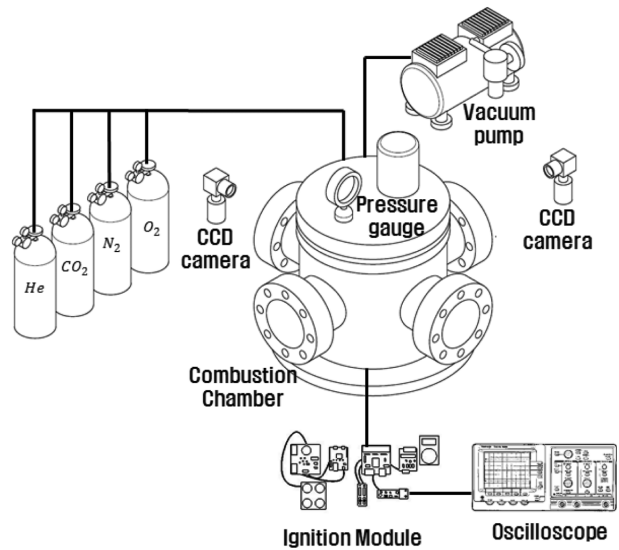


Figure 1. Schematics of experimental set-up.

가 챔버에 연결되어 있고, 가압용기에 저장된 산소(oxygen, O₂)와 질소 가스(nitrogen, N₂)를 공급받아 챔버 내에서 혼합할 수 있도록 하였다. 또한 연소 챔버의 감압과 가압 시 내부의 압력을 실시간으로 모니터링하고 제어하기 위해서 아날로그 압력계와 디지털 압력계지를 장착하였다. 연소 챔버 내부에는 고체 연료로 사용된 광섬유를 광학창을 통해 가시화할 수 있도록 연소 챔버 바닥면과 수평으로 설치하였다. 점화장치는 DC-DC 컨버터를 통해 12 volt의 직류 전압을 최대 350 volt까지 상승시켜 용량이 큰 콘덴서에 충전한 다음 방전 신호를 인가하면 니크롬선에 방전하여 가열시킬 수 있도록 제작하였다. 니크롬선은 광섬유 아래쪽에 설치되어 있으며, 모든 실험조건에서 광섬유와 니크롬선의 간격은 항상 동일하게 유지될 수 있도록 조정하였다. 가열된 니크롬선에 의해 점화가 일어난 직후 광섬유를 따라 이동하는 화염은 광학창을 향해 있는 CCD 카메라를 통해 PC에 저장하였다.

2.2 실험방법

저기압-고산소 환경을 조성하기 위해 진공펌프를 이용하여 연소 챔버를 먼저 진공 상태에 도달할 때까지 감압하고 산소와 질소 가스를 식(1)에 제시된 돌턴의 분압법칙(Dalton's law of partial pressure)을 이용하여 설정압력에서 산소농도(mole %)가 21%~40%로 유지될 수 있도록 하였다.

$$O_2 \text{ [mole \%]} = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + P_{N_2}} \quad (1)$$

식(2)에서 P_{O₂}와 P_{N₂}는 각각 연소 챔버 내에서 산소와 질소 가스의 분압을 의미한다. 연소 챔버의 설정 전압력(P_{O₂} + P_{N₂})은 실험이 진행되는 동안 0.2 atm~1.0 atm으로 유지하였다. 본 연구에서 저기압-고산소 환경을 모사하기 위해서

Table 1. Summary of O₂ mole % and Atmospheric Pressure for Each of Excremental Conditions

O ₂ mole percent	Atmospheric Pressure
30 [mole %]	1.0 [atm]
	0.9 [atm]
	0.8 [atm]
	0.7 [atm]
	0.6 [atm]
	0.5 [atm]
	0.4 [atm]
	0.2 [atm]
Atmospheric Pressure	O ₂ mole percent
0.5 [atm]	21 [mole %]
	30 [mole %]
	40 [mole %]

연소 챔버에 적용한 산소 농도와 압력 실험 조건은 Table 1에 정리해 두었다.

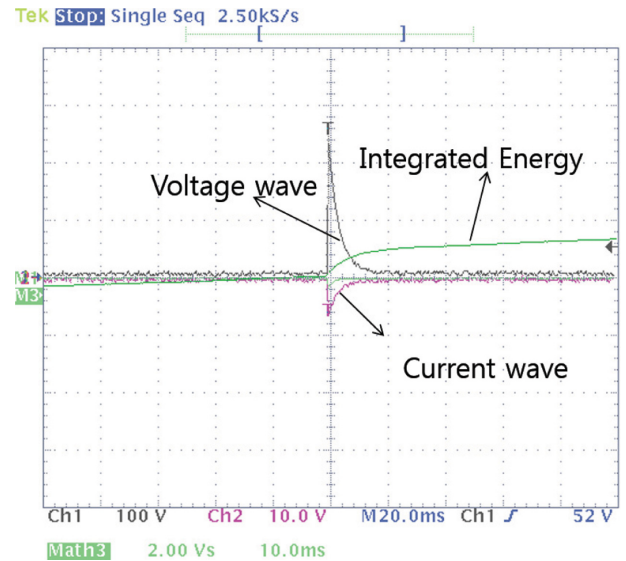
앞서 기술한 바와 같이 고체연료의 화염 전파특성을 알아보기 위해서 본 연구에서는 지름이 0.18 mm인 광섬유(optical fiber)를 사용하였다. 광섬유의 중심부는 불연재인 실리카(silica)로 구성되어 있고, 중심부의 바깥쪽에는 가연재인 폴리에틸렌(polyethylene)이 코팅되어 있어 적절한 점화에너지가 가해지면 폴리에틸렌이 연소하면서 광섬유를 따라 화염이 전파하게 된다. 다만, 이 때 KSLV-II 동체 내부의 연료 누유를 모사하기 위해 점화 직전 동일한 양의 발사체 액체 연료, Jet A1 소량을 광섬유의 정 중앙에 적셔 실험을 실시하였다. 점화 직전 연소 챔버에 주입된 질소와 산소가 완전히 섞일 수 있도록 충분한 시간이 지난 뒤, 콘덴서에 충전된 고전압이 니크롬선에 방전되면서 가열된 니크롬선에 의해 Jet A1 연료가 먼저 점화되고 이후 광섬유를 따라 화염이 전파하게 된다.

니크롬선에서 발생된 에너지가 일정하지 않은 경우, Jet A1 연료의 증발에 영향을 줄 수 있고 이는 초기 화염 전파 속도에 다시 영향을 미칠 수 있으므로 모든 실험조건에 동일한 점화에너지를 적용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 동일한 점화에너지를 인가하기 위해 Figure 2에 제시되어 있는 바와 같이 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하여 니크롬선의 양단에 인가된 전류와 전압을 우선 측정하였고, 식(2)을 이용하여 얻어진 전류와 전압파형을 적분하여 점화에너지, E_{ign} 를 산출하였다⁽⁶⁾.

$$E_{ign} = \int_0^{t_0} v i dt \quad (2)$$

식(2)에서 v 는 전압, i 는 전류, t_0 는 방전시간을 각각 의미한다.

점화 직후 광섬유를 따라 전파되는 화염의 이미지는 흡

**Figure 2.** Measured voltage-current signals and integrated ignition energy versus time.

수식 중립필터(absorptive neutral density filter)를 통해 필터링한 후 CCD 카메라로 저장하였으며, 이미지프로세싱 소프트웨어인 Matrox Inspector 8.1@을 이용하여 저장된 이미지로 부터 화염 전파율을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

통상 액체 연료의 점화에너지는 주어진 연소 압력과 산소농도 반비례하는 것으로 알려져 있다⁽⁷⁾. 따라서 본 연구에 적용된 실험조건 중 가장 낮은 대기압 조건인 0.2 atm과 가장 낮은 산소농도 조건인 21%로 조합된 실험조건의 점화 에너지를 적용하면 모든 실험조건에서 액체 Jet A1을 점화시킬 수 있다. 0.2 atm에서 산소농도가 21%의 실험조건에서 식(2)에 의해 계산된 점화에너지는 73.5 mJ이었으며, 점화에너지 변화로 인한 초기 화염 전파속도 변화를 최소화하기 위해 모든 실험조건에 대해 동일한 에너지(73.5 mJ)를 적용하였다. 저기압-고산소 환경을 모사하기 위해서는 산소농도를 30%로 고정하고 연소 챔버의 압력을 대기압에서 0.2 atm까지 감압하였다. Figure 3은 Jet A1이 점화된 직후 고체 연료인 광섬유를 따라 전파하는 화염을 CCD 카메라로 촬영된 이미지이다.

점화 직후 시간이 경과함에 따라 광섬유를 따라 이동하는 화염의 거리가 압력이 낮을수록 더 길어지는 것을 그림을 통해 관찰할 수 있다. 압력감소에 따른 화염전파율의 변화를 자세히 이해하기 위해서 Figure 3의 화염전파 이미지로 부터 화염 이동거리를 시간의 함수로 측정하여 Figure 4에 도시하였다. 그림에 도시되어 있는 바와 같이 연소 챔버 내부의 압력이 낮아짐에 따라 화염전파율을 의미하는 직선의 기울기가 커지는 것을 뚜렷이 관찰할 수 있으며, 이는 Figure 3의 화염전파 이미지를 통해 시각적으로 관찰

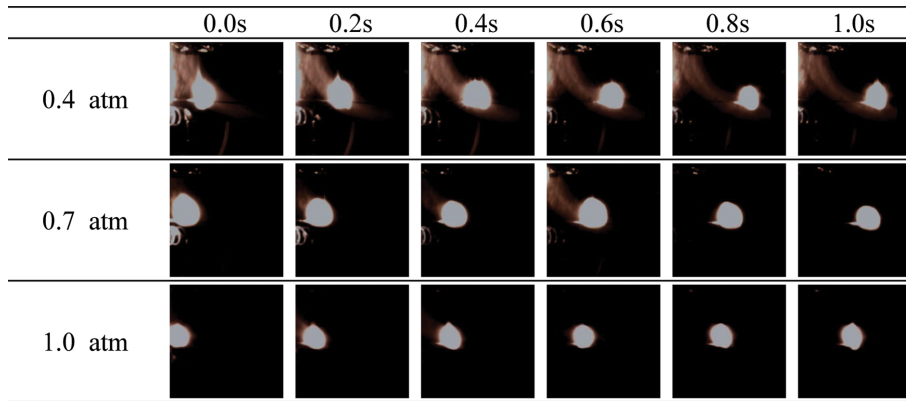


Figure 3. Sequential images of flame spread in 30% O₂ at different atmospheric pressures.

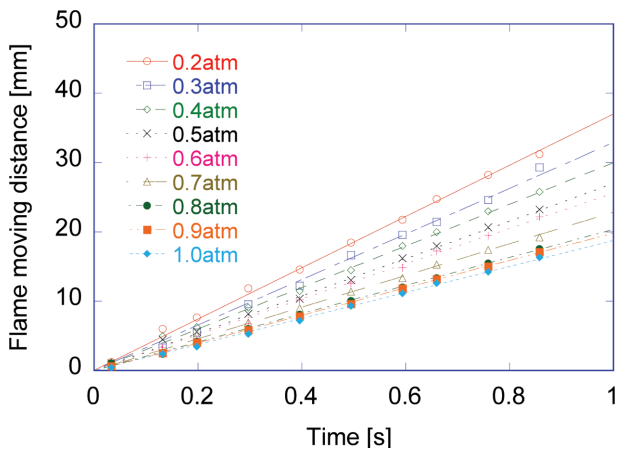


Figure 4. Flame moving distance measured as a function of time after ignition.

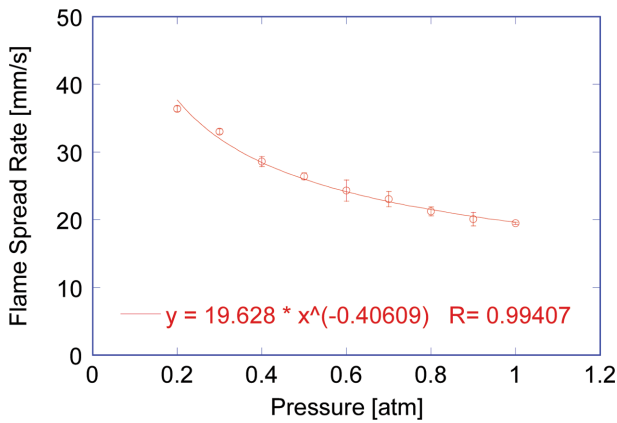


Figure 5. Measured flame spread rate plotted as a function of time after ignition.

할 수 있는 결과와도 잘 일치한다.

Figure 5는 압력변화와 화염전파율의 상관관계를 알아보기 위해 측정된 화염전파율을 압력의 함수로 표현한 그래프이다. 즉, 단위 시간 당 화염의 이동거리를 디지털 이미징 프로세싱 기법을 이용하여 측정된 다음 Figure 4와 같

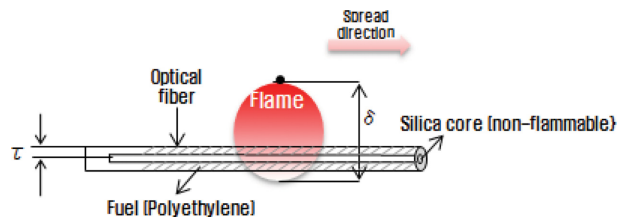


Figure 6. Schematics of flame spread on an optical fiber.

이 직선의 기울기로 부터 화염 전파율을 계산하고 해당 압력별로 도시한 결과이다. 화염 전파율은 각 압력 조건별 (저기압 조건; 0.2 atm~1.0 atm)로 5번 측정된 결과의 평균 값이며 측정 표준편차도 아울러 도시하였다. 그림에 도시되어 있는 바와 같이 압력과 화염전파율 사이에 반비례 경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있으며, 지수함수로 표시된 추세선을 이용하면 압력과 화염전파율의 상관 관계를 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$S_f \approx 20P^{-0.4} \text{ [mm/s]} \quad (3)$$

식(3)에 제시된 압력과 고체연료의 화염 전파율과 상관 관계를 보다 자세히 고찰해 보기 위해서는 고체연료의 화염 전파현상을 살펴보는 것이 보다 실제적인 화염 전파현상을 이해하는데 도움이 될 수 있다. Figure 6에서와 같이 광섬유를 따라 이동하는 화염의 이동속도는 광섬유 표면에 작용하는 단위 면적당 열유속과 광섬유의 엔탈피 증가율의 상관관계를 이용하여 식(4)로 표현할 수 있고, 화염 전파율, S_f 로 정의할 수 있다^(5,8).

$$S_f = \frac{q\delta}{\rho_s C_{p,s} (T_s - T_\infty)\tau} \quad (4)$$

식(4)에서 q 는 열유속이며, ρ_s , $C_{p,s}$, τ 는 각각 광섬유의 밀도, 비열, 두께를 의미한다. 본 연구에서 고체 연료로써 사용된 광섬유와 같이 열적 두께가 얇아 내부로 열전도를 무시할 수 있는 경우, (thermally-thin, $\tau \approx 1$) 열유속은 화염에서 기체로의 열전도, $q \approx \lambda_g(T_f - T_s)/\delta$ 로 표현할 수 있

으므로 식(4)은 식(5)와 같이 다시 정의할 수 있다.

$$S_f = A \frac{\lambda_g}{\rho_s C_{p,s} \tau} \frac{T_f - T_s}{T_s - T_\infty} \quad (5)$$

식(5)에서 A는 상수이며, λ_g 는 기체의 열전도계수, T_f , T_s 및 T_∞ 는 각각 화염온도, 광섬유의 표면온도 및 주위온도를 의미한다.

식(5)에서 연소챔버의 압력 변화에 따라 화염전파율에 크게 영향을 줄 수 있는 인자는 기체의 열전도계수와 화염의 온도이다. 기체의 열전도계수의 경우, 주어진 압력 범위 내에서 변화가 크지 않기 때문에 화염의 온도변화를 고려해 볼 필요가 있다. 압력의 변화는 화학종의 열해리(thermal dissociation)에 영향을 주어 화염 온도의 변화를 유발할 수 있지만⁽⁹⁾, 주어진 압력범위 내에서는 그 영향이 매우 제한적일 것으로 판단된다. 하지만 압력 변화는 식(6)과 식(7)에 통해서 알 수 있는 바와 같이 광섬유(실린더) 주위 Grashof수(Gr)의 변화를 통해 대류열전달계수에 영향을 줄 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$h = 0.432(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \frac{\lambda_g}{d} \quad (6)$$

$$Gr = \frac{g \Delta T d^3 \rho^2}{T_f \mu^2} \quad (7)$$

식(6)와 (7)에서 Pr은 Prandtl수이며, d는 광섬유의 직경, g는 중력가속도, μ 는 점성계수, ΔT 는 화염과 주위와의 온도차이다. 이때 주위의 기체를 이상기체로 가정하면 식(6)에서 Gr는 밀도와 압력의 상관관계로 인해 식(6)의 대류열

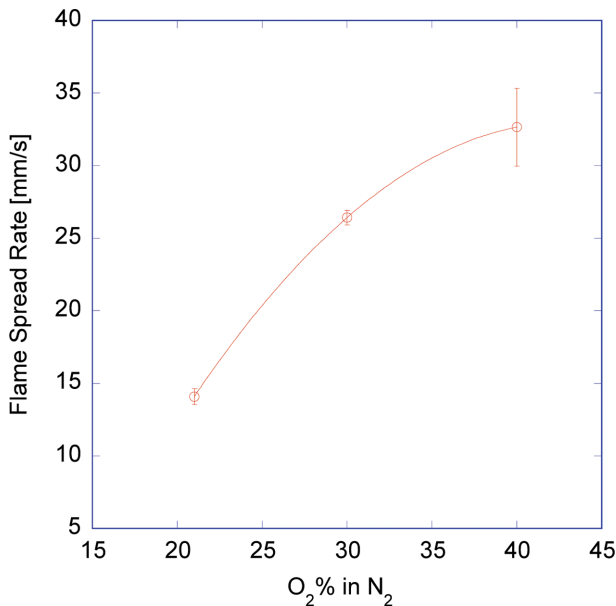


Figure 7. Measured flame spread rate as function of oxygen concentration.

전달계수는 $h \cdot P^{0.5}$ 로 나타낼 수 있다. 식(3)에 제시된 화염 전파율과 대류열전달계수는 모두 유사한 압력 의존성을 보이고 있으므로, 연소 챔버 내부의 압력이 감소하면 대류 열전달계수의 감소로 인해 광섬유 주위의 대류 열손실이 줄어들고 화염온도가 상승하여 화염전파율이 증가할 수 있다.

Figure 7은 연소 챔버내의 압력은 0.5 atm으로 유지되면서 질소 환경에서 산소농도가 21%에서 40%까지 증가할 경우 화염전파율을 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 산소농도가 증가함에 따라 화염전파율은 급격하게 증가하는 것은 식(5)를 통해 쉽게 판단해 볼 수 있는 바와 같이 화염온도의 직접적인 상승에 기인한 것으로 판단된다. 아울러 확산화염의 특성상 산소농도가 높아지면 화염의 크기가 작아지고⁽¹¹⁾, 이로 인해 고체 연료인 광섬유로의 열전도가 급격히 커지는 것도 화염전파율이 증가하는 원인 중 하나로 꼽을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 발사체 1단 동체 내부의 대표적인 연소 환경인 저기압-고산소 조건에서 발생할 수 있는 화재의 특성을 고찰해 보고자 고체 연료 화염전파 실험을 수행하였다. 주어진 조건에서 화염전파 현상을 보다 용이하게 해석할 수 있도록 본 연구에서는 열적 두께가 얇은 광섬유를 고체연료로 사용하였다. 아울러, 저기압 조건에서 발사체 1단 동체 내부에서 산화제가 국부적으로 누설되는 상황을 모사하기 위해서 연소 챔버 내의 압력은 대기압에서 0.2 atm까지 감압하였으며, 산소 농도는 최대 40%까지 증가시켜 화염전파 실험을 실시하였고, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 고산소 환경(산소 농도 30%)에서 측정된 화염전파율은 압력이 낮아질수록 급격히 증가하였으며, 압력(P)과 화염전파율(S_f)의 상호관계는 아래 식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$S_f \approx 20P^{-0.4} \text{ [mm/s]}$$

(2) 압력이 감소하는 경우 Grashof 수도 감소하며, 이로 인해 광섬유 주위의 대류열전달계수(h) 역시 감소하고 아래 같은 상관관계를 갖는다.

$$h \approx P^{0.5}$$

즉, 압력이 감소할수록 광섬유 주위의 대류 열손실은 감소하고 화염의 온도가 상대적으로 높아져 화염전파율은 증가할 수 있다.

(3) 산소 농도가 높아지면 증가된 산화반응으로 인해 화염온도가 상승하고, 화염 면으로부터 광섬유 표면으로의 열전도율이 증가하여 화염전파율이 급격히 상승하는 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(no. 2014R1A1A1002184).

References

1. G. R. Cho, "The Launch Progress of NARO Space Launch Vehicle", Proceeding of 2012 fall conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, p. 232 (2012).
2. Y. K. Jin, M. K. Kim, J. Park, S. H. Chung, J. H. Yun and S. I. Keel, "Effect of Applied DC Electric Fields in Flame Spread over Polyethylene-Coated Electrical Wire", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, Vol. 35, No. 3, pp. 321-330 (2011).
3. Y. K. Jin, M. K. Kim, J. Park, S. H. Chung, T. H. Kim and J. H. Park, "Experimental Study on the Effects of AC Electric Fields on Flame Spreading over Polyethylene-insulated Electric-Wire", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, Vol. 34, No. 11, pp. 1015-1025 (2010).
4. Y. Nakamura, N. Yoshimura, H. Ito, K. Azumaya and O. Fujita, "Flame Spread over Electric Wire in Sub-atmospheric Pressure", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 32, No. 2, pp. 2559-2566 (2009).
5. Y. Son and P. D. Ronney, "Radiation-Driven Flame Spread over Thermally Thick Fuels in Quiescent Microgravity Environments", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 29, pp. 2587-2594 (2002).
6. S. Zhong, X. Li, L. Lu, C. Ren and Z. Wang, "Experimental Investigation on Measurement of Spark Discharge Energy Using Integration Method", Procedia Engineering, Vol. 15, pp. 2690-2694 (2011).
7. L. G. Britton, "Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations", American Institute of Chemical Engineer, USA (1999).
8. P. D. Ronney, "Understanding Combustion Process through Microgravity Research", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 27, pp. 2455-2506 (1998).
9. S. R. Turns, "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill (1999).
10. T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 7th Edition Wiley, USA (2011).
11. S. H. Park, S. C. Choi, M. Y. Choi and A. Yozgatligil, "New Observations of Isolated Ethanol Droplet Flames in Microgravity Conditions", Combustion Science and Technology, Vol. 180, pp. 631-651 (2008).