

흑연 노즐목 내열재의 열화학적 침식 특성 분석

Analysis on Thermochemical Erosion Properties for Thermal Insulation Materials of Graphite Nozzle Throat

김 영 인^{1*} · 이 수 용²

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과(한서대학교)

²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Young-in Kim^{1*} · Soo-yong Lee

¹School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University(Hanseo University), Gyeonggi-do, 10540, Korea

²School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

[요 약]

로켓 (rocket)이란 배출가스를 빠르게 분사하여 그 반작용의 힘으로 추진력을 발생시키는 추진 장치이다. 그리고 고체추진 로켓 (solid rocket motor)의 구조에서 노즐 (nozzle)은 추력을 발생시키는 중요한 구성품으로 고온/고압 환경으로 인하여 연소되며 액체로켓 (liquid rocket propulsion systems)과 다르게 노즐을 냉각시킬 수 없어 연소가스에 의해 침식 (erosion)이 발생한다. 본 논문은 oxy-acetylene torch tester를 개발 및 이용하여 흑연 (graphite) 재질의 노즐목 (nozzle throat) 내열재에 대하여 열화학적 침식 특성을 실험 및 이론적 모델로 규명하고 이를 통하여 침식에 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 연구하였다.

[Abstract]

In the solid rocket motor (SRM), a thrust of rocket is generated by a nozzle so it is very important device. The nozzle of SRM is a condition of high temperature and high pressure so occurs the erosion by combustion gas. The liquid rocket propulsion systems (LRPSs) cools the nozzle by the fuel and oxidizer but SRM does not cool the nozzle. This paper deal with the development of the oxy-acetylene torch tester and investigate the thermochemical erosion properties for the thermal insulation materials of the graphite rocket nozzle throat through the experiment. The results of experiments are compared with the results of Theoretical model and identify the key factors affecting of erosion. The results is in good agreement with the experimental data.

Key word : Graphite, Thermochemistry, Erosion, Rocket nozzle throat, Oxy-acetylene.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.2.90>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 10 April 2018; Revised 12 April 2018

Accepted (Publication) 24 April 2018 (30 April 2018)

*Corresponding Author ; Young-in Kim

Tel: +82-41-671-6270

E-mail: alad@hanseo.ac.kr

I. 서론

로켓 (rocket)이란 배출가스를 빠르게 분사하여 그 반작용의 힘으로 추진력 (thrust)을 발생시키는 추진 장치이다. 일반적으로 추진제 및 에너지에 따라 액체추진 로켓 (liquid-propellant rocket), 고체추진 로켓 (SRM; solid-propellant rocket motor), 핵추진 로켓 (nuclear propulsion rocket), 레이저추진 로켓 (laser propulsion rocket) 등으로 구분할 수 있으며 우주탐사, 인공위성 발사체, 무기 등에 용도와 목적에 따라 사용된다 [1]. 이 중에서 고체추진 로켓은 주로 모터케이스 (motor case), 점화기 (igniter), 추진제 (propellant), 노즐 (nozzle), 절연체 (insulation), 제어 및 구동장치 등으로 구성되어 있으며 이러한 고체추진 로켓의 구조에서 노즐은 추력을 발생시키는 중요한 구성품으로 고온 고압 환경으로 인하여 연소되며 액체로켓과 다르게 노즐을 냉각시킬 수 없어 연소가스에 의해 침식 (erosion)이 발생한다. 로켓 노즐의 침식은 로켓의 도달 높이, 도달 거리, 비행 속도에 영향을 준다 [1]. 이러한 침식 재료에 대한 시험평가로는 oxy-acetylene torch 시험, arc-image 시험, CO₂ laser 시험, arc plasma torch 시험, electric arc tunnel 시험, rocket motor 시험 등이 사용되고 있다 [2]. 해외에서는 미국의 펜실베이니아 주립대학의 K. K. Kuo와 S. T. Keswani, 이탈리아 로마 라사피엔자 대학교의 Daniele Bianchi와 Francesco Nasuti가 침식을 화학지배 침식과정 (chemical-controlled recession process)과 확산지배 침식과정 (diffusion-controlled recession process)으로 침식 모델을 이용하여 연구하였으며 국내에서는 함희철 등이 주요 산화물 (CO₂, H₂O, O₂), 밀도 등이 열화학적 침식에 미치는 영향을 연구한 바가 있다 [3]-[5].

본 논문은 oxy-acetylene torch 시험장치를 개발 및 이용하여 흑연 (graphite) 재질의 노즐목 내열재에 대하여 열화학적 침식 특성을 실험 및 이론적 모델로 규명하였으며 이를 통하여 침식에 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 체계적으로 연구하였다.

열화학적 침식에서 영향을 주는 주요 인자로는 표면온도 (surface temperature), 표면 압력 (surface pressure), 질량분율 (mass fraction), 화학량론 계수 (stoichiometric coefficient), 흑연 밀도 (graphite density) 등이 있다 [6].

II. 이론적 배경

2-1 이론식

불균일 반응속도론 (heterogeneous reaction kinetics)에서 침식은 화학지배 침식과정과 확산지배 침식과정으로 분류할 수 있다. 낮은 온도에서는 화학적 반응속도가 낮아 주로 화학지배 침식과정의 영향이 크다. 그러나 높은 온도에서는 흑연과 화학적 반응속도가 빠르게 진행되어 화학종에 의한 확산과정 (diffusion process)이 침식에 영향을 크게 작용한다. 즉, 확산침식율 ($\dot{r}_{c,d}$)의 영향이 크다. 따라서 화학 침식율과 확산 침식율을 모두 고려하여 침식을 계산해야 한다 [7]. 또한 침식율은 H₂O, CO₂, OH의 농도에 비례하고 H₂의 농도에 반비례하다.

그림 1은 로켓노즐 침식의 물리적 및 화학적 과정을 나타낸 그림이다 [8]. 연소가스를 통해 대류와 복사 열전달이 이루어지고 노즐 내부는 전도 열전달이 발생한다. 노즐 표면 (surface)에서는 불균일 반응 (heterogeneous reaction)이 일어나 기체상의 화학종 (gas-phase chemical species) 확산 (diffusion)과 열분해 (pyrolysis) 및 증발 (evaporation)이 발생하고 최종적으로 연소가스의 흐름에 의한 재료의 이탈이 발생하여 노즐 표면의 침식이 발생한다. 화학지배 침식과정에서 흑연 표면 침식에 영향을 미치는 주요 화학종의 화학반응식은 수식 (1)과 같으며 O, O₂, NO 등의 기타 화학종은 무시한다.

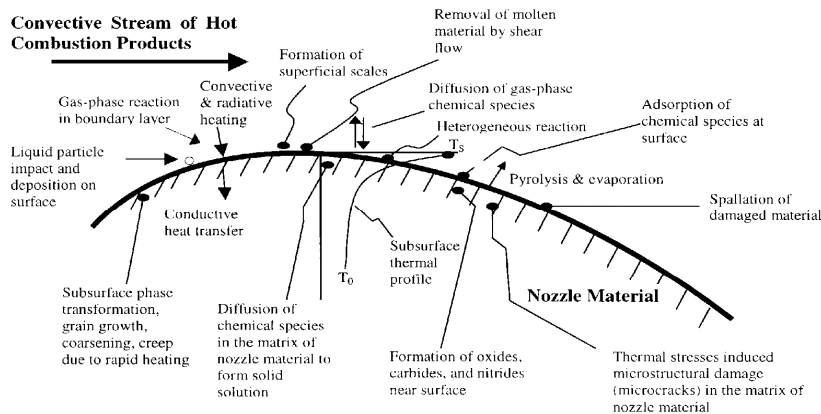


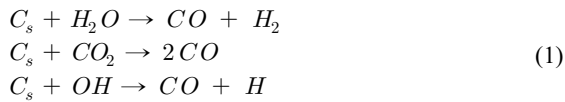
그림 1. 로켓 노즐 침식의 물리적 및 화학적 과정

Fig. 1. Physical and chemical processes of rocket nozzle erosion.

표 1. 불균일 반응에 대한 반응속도 데이터

Table 1. Kinetic data for heterogeneous reactions [8].

Surface reactions	A_i	E_i (kcal/mol)	b	n	Remarks
$C_s + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$4.8 \times 10^5 \text{ (kg/m}^2 \text{ s atm}^{0.5}\text{)}$	68.8	0.0	0.5	
$C_s + CO_2 \rightarrow 2CO$	$9.0 \times 10^3 \text{ (kg/m}^2 \text{ s atm}^{0.5}\text{)}$	68.1	0.0	0.5	
$C_s + OH \rightarrow CO + H$	$3.61 \times 10^2 \text{ (kg k}^{0.5}\text{/m}^2 \text{ s atm)}$	0.0	-0.5	1.0	MOS
	$100 \text{ (kg k}^{0.5}\text{/m}^2 \text{ s atm)}$	0.0	-0.62	1.0	MMOS



여기서 H_2O , CO_2 , OH 는 주요 산화물이며 H_2 , CO , H 는 주요 생성물이다. 그리고 i 종에 대한 반응률 상수 (K_i)를 arrhenius 방정식으로 표현하면 수식 (2)와 같다.

$$K_i = A_{s,i} T^{\beta_i} \exp\left(-\frac{E_{a,s,i}}{R_u T}\right) \tag{2}$$

여기서 $A_{s,i}$: pre-exponential factor, β_i : temperature exponent, $E_{a,s,i}$: activation energy, T : 표면온도, R_u : 일반 기체상수 (universal gas constant) 이다. 그리고 흑연 표면에서의 화학 지배 침식율 ($\dot{r}_{c,th}$)은 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다 [9].

$$\dot{r}_{c,th} = \sum K_i P_i^{n_i} / \rho_c \tag{3}$$

여기서 불균일 반응에 대한 반응속도 데이터는 표 1과 같다. 그리고 확산지배 침식과정에서 solid-gas interface에서의 SMB (surface mass balance) 방정식은 다음과 같다 [6].

$$\begin{aligned}
 (\bar{\rho} \tilde{Y}_i)_g + (\bar{\rho} D \frac{\partial \tilde{Y}_i}{\partial r})_g \\
 = \dot{\omega}_i - \frac{1}{A} \frac{d}{dt} \iint_S \rho'_i ds + \rho_c \dot{r}_c \tilde{Y}_i
 \end{aligned} \tag{4}$$

위 식 (4)에서 좌측은 i 종의 대류질량 유동항, 확산질량 유동항이며 우측은 i 종의 생성속도항, 질량 축적속도항, 공급되는 질량 유동항이며 \tilde{Y} 는 질량분율, A 는 면적, ρ 는 밀도, \dot{r}_c 는 침식율이다. Solid-gas interface에서 온도가 높으면 반응물들은 탄소와 반응이 활발하여 반응물의 농도는 매우 작아진다. 따라서 $(\tilde{Y}_i)_g \approx 0$ 이며 수식 (4)는 수식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{\omega}_i + \rho_c \dot{r}_c \tilde{Y}_i = 0 \tag{5}$$

그리고 반응물 B_i 와 흑연 C_s 의 반응은 수식 (6)과 같다.

$$\nu_{c,i} C_s + \nu_{B,i} B_i = \sum_j \nu_j \text{Prod}_j \tag{6}$$

따라서 흑연 표면에서의 확산지배 침식율 ($\dot{r}_{c,d}$)는 다음과 같다.

$$\dot{r}_{c,d} = \frac{1}{\rho_c} \sum_i \dot{\omega}_i \frac{\nu_{c,i}}{\nu_{B,i}} \frac{MW_C}{MW_{C_i}} \tag{7}$$

MW 는 분자량 (molecular weight), ν 는 화학량론 계수 (stoichiometric coefficient)이다.

2-2 열화학적 침식과정의 특성

열화학적 침식에서 화학적 침식과 확산 침식에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 표면온도, 표면압력, 반응물과 생성물 농도, 밀도 등이 있다. 밀도는 침식에 미치는 영향이 크며 밀도가 높을수록 침식에 대한 저항성이 크다. 또한 연소실 압력이 증가하면 가스상의 밀도 증가로 침식이 증가한다 [10]. 또한 표면온도에 따라 화학지배 침식과정과 확산지배 침식과정으로 구분할 수 있으며 온도가 높을수록 확산지배 침식과정에 의한 침식의 영향이 크게 작용 한다 [4]. 화학종의 영향은 침식의 주요 원인인, H_2O 와 CO_2 는 CO 를 생산하기 위하여 흑연과 반응함으로써 침식은 H_2O , CO_2 , OH 의 농도에 비례하고 H_2 의 농도에 반비례하다 [11]. 수식 (1)의 화학식에서 온도에 대한 화학종의 농도를 보면 온도가 높을수록 CO_2 , H_2O 는 감소하는 반면 CO , OH 는 증가하는 특성이 있다. 그밖에 침식에 영향을 미치는 인자로는 표면 거칠기, 유동특성, AI 입자, 재질의 열전도도, 재질의 기공도 등이 있다.

III. 실험장치 및 방법

3-1 실험장치

열화학적 침식 특성을 파악하고 이론식에 대입할 필요한 인

자를 측정하기 위하여 oxy-acetylene torch 시험장치를 개발하였다. 개발한 장치는 적용 열량이 낮고 노출면이 작은 단점이 있으나 비용이 적게 들고 간편하며 신속하게 재료를 파악할 수 있는 장점이 있다 [12]. 개발한 장비는 산소-아세틸렌 제어부, 데이터 측정부, 데이터 수집 및 저장부, 시편 고정부로 구성되어 있다. 산소-아세틸렌 제어부는 산소와 아세틸렌의 유량, 압력, 혼합비, 시간을 제어한다. 토치는 victor model 315FC, Tip은 type 4, No. 7을 사용하였다. 자동점화 장치와 타이머를 장착하여 정확한 작동시간을 설정할 수 있도록 제작하였다.

시편 고정부는 시편을 고정하고 데이터 측정부의 pressure transducer (다셀 CMM-50K)와 thermocouple (K-type)이 압력과 온도를 측정한다. 또한 infrared thermometer (Chino IR-AH)를 이용하여 표면온도 (T_w)를 측정하였다. 데이터 수집 및 저장은 NI USB-6009와 Labview를 이용하였으며 타이머와 솔레노이드 밸브를 장착하여 자동적으로 정확하게 시간을 제어하였다. 압력계기 다셀 DN-50W와 온도계기 KN-2000W를 장비에 장착하였다. 그리고 냉각방법은 공랭식으로 압축공기를 시편고정부, 이동축, 센서 접촉부 등에 분사하여 고온으로 인한 장비 파손과 에러를 방지하였다.



그림 2. 개발한 산소-아세틸렌 토치 시험장치
 Fig. 2. The developed Oxy-acetylene torch test equipment.

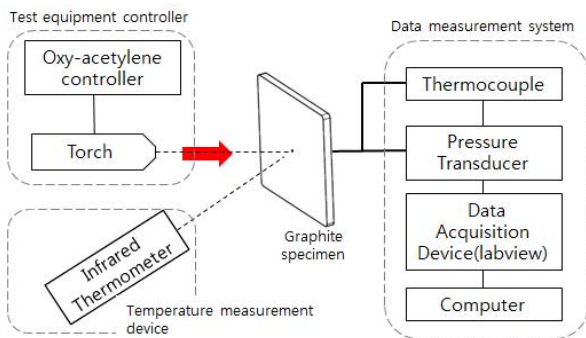


그림 3. 산소-아세틸렌 토치 시험장치의 개념도
 Fig. 3. Schematic diagram of Oxy-acetylene torch test equipment.

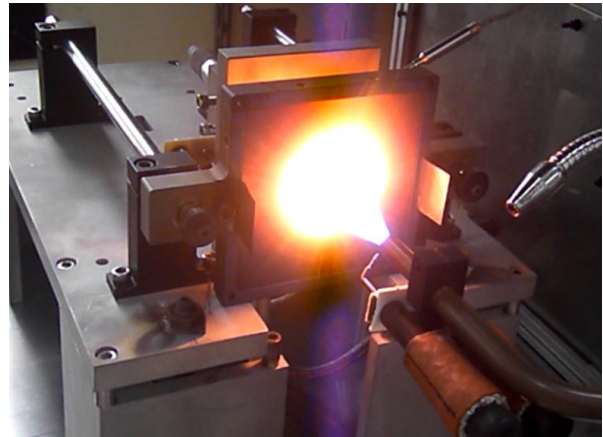


그림 4. 침식 시험
 Fig. 4. Erosion testing.

3-2 실험조건

시편은 사이즈 가로 100.5 mm x 세로 100.5 mm, 두께는 6.5 mm이며 재질은 MERSEN사의 흑연 Grade 6520로 밀도 1,750 kg/m^3 , 기공도 (porosity) 17%, 열전도도 160 $W/m \cdot C$ 를 사용하였다. MERSEN사는 항공기 및 로켓에 장착되는 흑연 및 C/C 복합재료 부품을 생산하고 있다 [13]. 산소와 아세틸렌의 유량은 산소 3 m^3/hr , 아세틸렌 1.1 m^3/hr 이며 압력은 산소 0.12 MPa, 아세틸렌 0.02 MPa로 설정하였다. 화염은 산소-아세틸렌 비율 1:1로 중성 불꽃으로 하고 시편과 토치와의 거리는 60 mm로 설정하였다. 실험 작동시간은 120초로 설정하였으며 그림 3과 같이, 시편에 가해지는 압력과 온도는 실시간으로 NI USB-6009와 Labview를 이용하여 컴퓨터에 저장된다. 또한 표면의 온도는 전방에서 Infrared thermometer를 이용하여 측정하였다. 그림 4는 개발한 장비를 이용하여 침식실험을 하는 그림이다.

IV. 실험결과

4-1 시편 분석

120 초의 침식 실험 후, 시편의 침식된 상태는 그림 5와 같다. 그림의 점선부분과 같이 비교적 넓은 범위에서 침식이 발생하였으며 실험 전의 시편 (오른쪽 위의 작은 그림)에 비해 침식으로 인한 기공이 많이 발생하여 이는 거친 표면으로 나타났다. 화염의 중심 지점인 시편의 중심부가 가장 거칠었다. 그림에서는 흰색 점으로 나타나고 있다. 또한 침식은 초반에는 조금 나타나다가 34 초, 1,000 °C에서 높은 온도의 빨간 침식 입자가 많이 발생하며 외부로 이탈하는 현상이 나타났다. 이러한 이탈 입자는 표면에서 기공형태로 나타남을 알 수 있다.

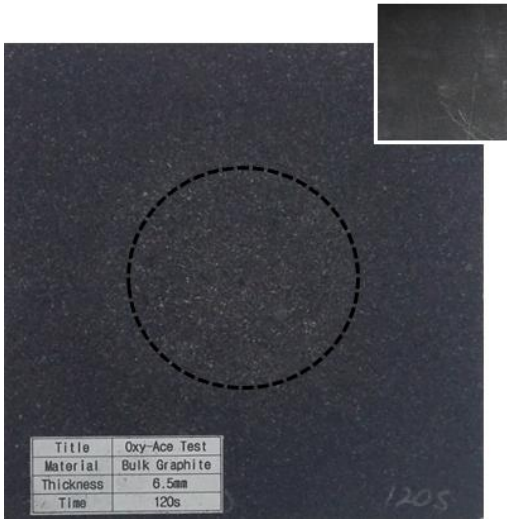


그림 5. 시험 후 시편 정면
Fig. 5. The front view of specimen after test.



그림 6. 시험 후 시편 단면
Fig. 6. The cross section of specimen after test.

그림 6은 실험 후, 120초 동안 실험한 시편의 중앙 단면을 절단하여 침식량을 측정된 것으로 총 2.1 mm이 측정 되었다. 측정은 높이게이지를 이용하여 중앙 부분을 측정하였다.

4-2 이론값과 측정값의 침식을 비교

침식값은 화학지배 침식율 ($\dot{r}_{c, ch}$)와 확산지배 침식율 ($\dot{r}_{c, d}$)의 이론식을 이용하여 계산하고 실험한 침식값과 비교하였다. 여기서 주요 변수로는 표면온도, 표면 압력, 질량분율, 밀도 등이 있다. 연소가스의 질량분율은 NASA CEA의 출력값을 이용하였다 [14]. 실험결과, 표면 온도는 1914.15 K이며 압력은 3.6 bar가 측정되었다. 그리고 각각 계산된 $\dot{r}_{c, ch}$ 와 $\dot{r}_{c, d}$ 는 조화평균법을 이용하여 최종 침식율 (\dot{r}_{total})를 계산 하였다. 표 2는 측정된 침식량과 침식율을 나타낸 것이다. 침식율은 측정된 총 침식량을 120초를 나누어 초당 침식되는 양을 계산하였다. 계산한 결과는 0.0175 mm/s로 나타났다.

이론식에 대입하여 계산된 이론 침식율은 0.0184 mm/s로, MOS 데이터보다는 MOS 데이터 (표 1)를 적용하는 것이 더 좋은 결과값을 얻을 수 있었다. 표 3은 침식율에 대하여 실험값과 이론값을 비교한 것으로 이론값은 조화평균을 이용하여 산출하였다. 차이 값은 0.0009 mm/s이고 오차는 5.27%로 좋은 결과값을 보였다.

표 2. 측정된 침식율

Table 2. The measured erosion rate.

	Measured data	Remarks
Total erosion (r_{total})	2.10 mm	
Erosion rate (\dot{r}_{total})	0.0175 mm/s	120 s

표 3. 측정된 침식율과 계산한 침식율의 비교

Table 3. The comparison of calculated erosion rate and measured erosion rate.

	Erosion rate (\dot{r}_{total})	Remarks
Measured values	0.0175 mm/s	
Calculated values	0.0184 mm/s	Harmonic mean
Error	5.27%	

4-3 주요 인자의 영향

실험 결과, 침식에 영향을 미치는 주요한 인자는 표면온도, 표면 압력, 질량분율, 밀도, 열전도도로 나타났다. 표면 온도는 열화학적 침식에서 화학적 침식과 확산 침식에 미치는 영향을 좌우하는 것으로, 온도가 높을수록 확산에 의한 영향이 크게 나타난다. 연소가스의 화학적 농도는 화학식에서 보는 바와 같이 흑연과 반응하는 H_2O , CO_2 , OH 영향이 다른 화학종에 비해 크므로 이 화학종을 분석하면 침식을 이론적으로 예측할 수 있다. 또한 밀도가 클수록 침식에 대한 저항력이 크므로 침식을 줄이기 위해서는 재료의 밀도를 높여야 한다. 열전도도의 영향은 열전도도가 높을수록 침식량이 넓게 분포하며 전도도가 낮을수록 침식 반경이 좁게 나타났다. 실험 결과, 열전도도가 낮은 재료는 작은 반경에서 온도가 높아지고 재료는 숯 (char)으로 변하고 숯은 열을 가지고 고온의 입자 형태로 표면에서 떨어져 나갔다. 그리고 일정 온도 이상에서 본격적인 많은 양의 고온입자가 이탈하는 현상을 실험을 통해 확인하였다.

V. 결 론

본 연구는 노즐목 내열재의 침식에 대한 연구로 실험을 위하여 oxy-acetylene torch 시험장치를 개발하였다. 또한 열화학적 침식 특성을 규명하기 위하여 화학지배 침식과정과 확산지배 침식과정으로 구분하고 이론식을 체계적으로 연구하였다. 침식에 영향을 주는 주요 핵심인자에 대하여 분석한 결과, 표면온도, 표면 압력, 질량분율, 밀도, 열전도도가 서로 상관관계를 가지며 침식에 영향을 미침을 파악할 수 있었다. 또한 실험 결과값과 이론식 결과값의 비교에 있어서는 오차가 5.27%로 좋은 결과를 도출하였다.

본 연구는 로켓 노즐뿐만 아니라 우주귀환 비행체 (reentry capsule)의 대기권 진입 시, 표면의 침식에 대한 기초연구에도

활용될 수 있다. 향후 연구로는 개발한 시험장치를 이용하여 적층형 C-C 복합재료와 흑연의 침식특성을 실험 및 이론적으로 연구하고자 한다.

References

[1] Y. S. Hong, *Artificial Satellite and Space Launch Vehicle*, 2nd ed., Seongbuk, Korea: Cheong Moon Gak, pp. 51-91, 2005.

[2] I. S. Park, I. S. Oh, and H. J. Joo, "Ablation characteristics of 4D-carbon/carbon composites," *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 8, pp. 687-693, 1997.

[3] K. K. Kuo and S. T. Keswani, "A Comprehensive theoretical model for carbon-carbon composite nozzle recession," *Journal of Combustion Science and Technology*, Vol. 42, pp. 145-164, 1985.

[4] D. Bianchi and F. Nasuti, "Thermochemical erosion analysis of carbon-carbon nozzles in solid-propellant rocket motors," in *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Tennessee: NV, pp. 1-16, 2010.

[5] H. Ch. Ham, "A Study on the thermal response characteristics of carbon/carbon composites for nozzle throat insert," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 10, pp. 30-37, 2006.

[6] R. Acharya and K. K. Kuo, "Effect of pressure and propellant composition on graphite rocket nozzle erosion rate," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 6, pp. 1242-1254, 2007.

[7] P. Thakre and V. Yang, "Chemical erosion of carbon-carbon/graphite nozzles in solid-propellant rocket motors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 4, pp. 822-833, 2008.

[8] K. K. Kuo and R. Acharya, *Applications of Turbulent and Multi-phase Combustion*, 1st ed., Hoboken New Jersey: Wiley, 2012.

[9] R. Acharya and K. K. Kuo, "Numerical simulation of graphite nozzle erosion with parametric analysis," in *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2010-6848*, Nashville: TN, 2010.

[10] H. Ch. Ham, "The effect of pressure and oxidation mole fraction on ablation rate of graphite for nozzle throat insert," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 1, pp. 8-15, 2014.

[11] S. T. Keswani, E. Andiroglu, J. D. Campbell, and K. K. Kuo, "Recession behavior of graphitic nozzles in simulated rocket motors," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 22, No. 4, pp. 396-397, 1985.

[12] H. J. Joo and Y. Kim, A study of the ablative behavior on carbon/carbon composites, Korea Science and Engineering Foundation, pp. 11-14, 2002.

[13] MERSEN, MERSEN Aerospace Catalogue. [Internet]. Available: <http://www.graphite-eng.com>.

[14] S. Gordon and B. J. McBride, Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications, NASA RP 1311, 1994.



이수용 (Soo-Yong Lee)

1989년 07월 ~ 1990년 08월 : Stanford university(Post doctor)
 1992년 03월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 교수
 2006년 01월 ~ 2012년 12월 : 한국항공우주학회 이사
 2009년 03월 ~ 2011년 01월 : 한국항공대학교 산학협력단장 및 연구협력처장
 2013년 01월 ~ 2016년 12월 : 항공우주시스템공학회 부회장
 ※관심분야 : 복합재료 데이터 분석 및 해석, 항공기재료, 항공기 구조해석



김영인 (Young-In Kim)

2007년 03월 ~ 현재 : 한서대학교 항공융합학부 항공정비전공 교수
 2012년 03월 ~ 2014년 02월 : 한국항공대학교 박사과정 수료
 2015년 05월 ~ 2017년 05월 : 충북 MRO산업 정책자문 위원
 2015년 12월 ~ 현재 : IPC Korea standards committee 기술자문 위원
 2016년 09월 ~ 현재 : 한서대학교 항공기술교육원 원장
 ※관심분야 : 로켓추력 분석 및 해석, 항공정비공학, 항공정비 기술