

소형 시험모터의 노즐 열전달 및 삭마 통합해석

배 지 열¹ · 김 태 환¹ · 김 지 혁¹ · 함 희 철² · 조 형 희^{1*}

¹연세대학교 기계공학과, ²국방과학연구소

Conjugate Simulation of Heat Transfer and Ablation in a Small Rocket Nozzle

Ji-Yeul Bae¹, Taehwan Kim¹, Ji Hyuk Kim¹, Heecheol Ham² and Hyung Hee Cho^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea

²Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

Abstract

Ablative material in a rocket nozzle is exposed to high temperature combustion gas, thus undergoes complicated thermal/chemical change in terms of chemical destruction of surface and thermal decomposition of inner material. Therefore, method for conjugate analysis of thermal response inside carbon/phenolic material including rocket nozzle flow, surface chemical reaction and thermal decomposition is developed in this research. CFD is used to simulate flow field inside nozzle and conduction in the ablative material. A change in material density and a heat absorption caused by the thermal decomposition is considered in solid energy equation. And algebraic equation under boundary layer assumption is used to deduce reaction rate on the surface and resulting destruction of the surface. In order to test the developed method, small rocket nozzle is solved numerically. Although the ablation of nozzle throat is deduced to be higher than the experiment, shape change and temperature distribution inside material is well predicted. Error in temperature with experimental results in rapid heating region is found to be within 100 K.

Keywords : ablative material, ablation, thermal decomposition, ATJ graphite

1. 서 론

고체 로켓에서 노즐은 연소실에서 배출되는 고온 고압의 연소가스를 팽창시켜 추진력을 발생시키는 중요한 역할을 한다. 그러나 이 과정에서 연소가스에 노출된 노즐 내부 벽면은 가혹한 부하를 받게 된다. 따라서 고체 로켓의 노즐에는 그라파이트 혹은 탄소섬유와 페놀 수지로 구성된 복합재 등 가볍고 강도가 높은 탄소계 재질을 내열재로 사용한다. 내열재들은 연소가스로부터 발생한 산화 환경에 노출되어 표면이 파괴되며 내부에서는 페놀 수지의 결합이 고온으로 끊어지는 열분해 과정을 겪게 된다. 이 과정에서 발생하는 화학반응은 대부분이 흡열 반응이므로 내열재 표면의 열이 구조물로 전달되는 것을 막는 것에 도움을 준다.

고온에 노출된 내열재 내에서 일어나는 열/화학적 변화에

관해서는 Rindal 등(1966)의 연구가 잘 정리하였다. 열전도로 인해 재료 온도가 상승하여 일반적으로 수지가 분해되는 온도인 500°C 이상이 되면 페놀 수지를 구성하는 분자결합이 분해되는 내부 열반응이 일어난다. 이 과정에서 페놀의 탄소 주결합이 더 안정적이므로 대부분 H 등이 포함된 곁가지가 분해되어 휘발성의 분해가스(H₂, H₂O, CO₂ 등)가 되고 탄소잔여물이 남게 된다. 이 때 탄소잔여물은 고온에서도 안정하여 다공성 숯층(Char)의 형태로 내열재의 형태를 유지하게 되며 휘발성의 분해가스가 이 다공성 구조를 통과하여 표면으로 분출된다. 그리고 남아있는 내열재의 표면은 연소가스의 산화물질에 의해 화학적으로 파괴된다.

내열재 표면의 화학적 파괴, 즉 삭마의 경우 고체 로켓 초기 개발과정에서 다양한 실험적인 연구가 진행되었으며 이를 통해 대부분이 로켓 연소가스 내의 산화물질인 H₂O, CO₂와 OH에

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-2828; E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr
Received December 1 2016; Revised December 13 2016;
Accepted January 31 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

의해 발생하나 OH는 연소가스 내에 거의 존재하지 않아 영향이 적음이 알려졌다(Koo *et al.*, 2007). 그리고 Boyarintsev 등(1972)은 경계층 가정을 적용하여 표면에서의 카이네틱 화학반응과 경계층 내부에서의 물질전달을 대수식으로 표현하여 탄소계 내열재의 표면파괴속도를 도출하였다. 최근에는 Thakre 등(2008)이 연소가스 내 연소가스의 water-gas shift 반응과 표면의 탄소 화학반응을 함께 고려하여 노즐의 정상삭마(steady-state ablation) 속도를 도출하였다.

이렇듯 내열재 내외부에서는 복잡한 열적/화학적 변화 및 그로 인한 내열재 형상 및 물성 변화가 일어나므로 노즐의 열설계를 위해서는 고체 로켓 유동장과 내열재 내부의 표면 화학반응, 내열재 내부의 열반응을 모두 고려해야 한다. 그러나 현재 공개된 대부분의 연구들은 정상삭마 가정 하에 노즐 표면의 화학적 파괴만을 해석하거나 내열재 표면의 열입사를 가정하여 내열재 내부만을 해석하고 있다. 미국과 러시아, 유럽 등에서는 대부분 이론적으로 연구된 결과를 통합한 독자적인 해석 코드를 보유하고 이를 설계에 활용하는 것으로 판단되나 이러한 연구는 공개된 문헌에서 찾기 힘들며 국내에서는 관련 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 로켓 노즐 유동장과 탄소계 내열재 표면에서 발생하는 삭마 및 내열재 내부의 열반응을 통합 해석하는 코드를 개발하여 노즐 내열재의 정확한 열조건을 도출하고자 하였다. 노즐 유동장을 계산하기 위해 ANSYS Fluent v.15를 사용하였으며 삭마 계산을 위해 경계층 적분법과 대수식으로 모델링된 삭마공식을 사용하였다. 또한 아레니우스 식을 사용하여 내열재 내부 열반응을 모델링하였으며 내열재와 관련된 수식들은 User Defined Function (UDF)의 형태로 Fluent에 통합하여 해석하였다. 해석결과를 검증하기 위해 그라파이트 노즐목이 적용된 소형 시험모터를 해석하였으며 측정된 온도와 결과를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 내열재 열분해 및 열전도 모델

내열재에서 발생하는 수지의 분해는 고온으로 인해 고체 분자결합이 분해되는 열분해이며 기체와는 달리 고체 상태에서 반응이 발생하므로 Arrhenius 식으로 잘 예측된다. 아레니우스 식에 기반을 둔 내열재 내부 열반응율은 아래와 같은 밀도 변화율에 대한 식으로 나타난다.

$$\frac{d\rho_m}{dt} = -k\chi_q\rho_0(\beta - \epsilon/\chi_q)e^{-E_m/RT} \quad (1)$$

여기서, m 은 열분해가 일어난 상태의 내열재를 나타내는 하첨자이며 0은 초기상태의 내열재를 나타내는 하첨자이다. 따라서 ρ_m 는 내열재의 현재 밀도, ρ_0 는 내열재의 초기 밀도, β 는 내열재 내의 바인더 분율, χ_q 는 바인더 내의 기화성분의 분율, k 는 열반응의 반응상수, E_m 은 열반응의 활성화 에너지이다. 반응에 참여할 수 있는 질량은 공극률 ϵ 을 통해 모델링되며 수식은 아래와 같다.

$$\epsilon = \int_0^t \chi_q k(\beta - \epsilon/\chi_q) e^{-E_m/RT} \quad (2)$$

내열재가 열분해되면 탄소로 이루어진 고체 잔여물과 휘발성 가스물질이 발생한다. 식 (1)은 고체로 남아있는 질량에 대한 수식이며 가스의 형태로 배출된 물질은 내열재 내부 슛층을 통해 표면으로 분출된다. 분해가스가 1차원으로 거동하며 슛층에 머무르지 않고 모두 외부로 배출된다고 가정하면 반지름이 r_s 인 체적을 통과하는 가스유량은 열반응 층의 두께 δ 에서 발생할 질량변화를 적분한 형태로 도출할 수 있으며 아래와 같은 수식으로 나타난다.

$$G = -\frac{1}{r} \int_{r_s}^{\delta} r(1 - \rho_0/\rho_q) \frac{d\rho_m}{dt} dr \quad (3)$$

여기서, ρ_q 는 분해가스의 밀도를 나타내며 이후 식에서 첨자 q 는 항상 분해가스를 나타낸다.

그리고 내열재의 내부 열반응으로 인한 밀도변화, 흡열, 가스 이동을 모두 고려한 고체 내부의 1차원 에너지 방정식은 아래와 같이 나타난다.

$$C_{p_m} \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk_m \frac{\partial T}{\partial r}) + \quad (4)$$

$$C_{p_q} G \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{d\rho_m}{dt} [\frac{Q_s}{X_q} + C_{p_q} T(1 - \rho_q/\rho_0)]$$

식에서 C_p 는 비열, k 는 내열재의 열전도도, Q_s 는 단위질량당 바인더 파괴로 인한 흡열량을 나타낸다. 위 식은 일반적인 고체 에너지 방정식에 화학반응으로 인한 항이 추가된 형태로 우변의 각 항은 열전도, 분해가스 이동 및 열분해로 인한 흡열반응을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 Fluent의 코드 통합기능인 UDF를 이용하여 분해가스 이동 및 열분해로 인한 흡열반응을 energy source 항으로 Fluent에 통합하였으며 이를 통해 내열재 내부의 에너지 보존방정식을 해석하였다.

2.2 내열재 삭마 모델

내열재의 삭마는 로켓 연소가스 내부의 산화물질에 의한 화학적 삭마와 연소가스 입자와 전단응력에 의한 기계적 삭마가 있다. 기계적 삭마는 입자궤적 계산이나 전단력에 의한 표면 파괴 모델링이 매우 어려우며 추력상승을 위해 매우 많은 양의 알루미늄 입자를 첨가한 경우를 제외하고는 화학적 삭마에 비해해 크지 않다. 따라서 기계적 삭마는 고려하지 않거나 경험식을 통해 고려하는 경우가 많다.

화학적 삭마가 지배적인 경우 탄소계 내열재의 삭마는 주로 표면에서 발생하는 아래 화학반응에 의해 발생하게 된다.



이 화학반응은 연소가스 내에 존재하는 H₂O, CO₂의 표면으로의 확산과 표면의 온도에 따라 변화하는 화학반응율에 따라 변화하는 복잡한 비균질(heterogeneous) 화학반응이다. 따라서 각 반응의 반응상수, 활성화 에너지, 연소가스 내에서의 화학조성 변화 및 경계층 내부의 물질전달을 모두 해석해야 도출할 수 있다. 그러나 이러한 계산은 매우 복잡하며 요구되는 물성이 많으므로 Boyarintsev 등(1972)은 경계층 내 열/물질전달의 상사를 이용하여 산화물질의 표면으로의 공급과 표면에서의 화학반응율을 단순화하였다. 이 과정에서 경계층 내의 루이스수(Le) 및 프란틀수(Pr)은 모두 1로 가정하였고 두 반응의 반응상수와 활성화 에너지가 유사하다고 가정하였다. 이러한 가정 하에서 삭마로 인한 표면의 후퇴속도는 표면에서 화학반응의 질량유량을 내열재의 밀도로 나누어 도출할 수 있으며 아래의 식과 같다.

$$V_n = \frac{\dot{m}}{\kappa\rho} \quad (7)$$

$\kappa\rho$ 는 반응이 끝난 내열재의 밀도이다. 여기서 표면에서의 화학반응의 질량유량은 아래의 식으로 표현된다.

$$\dot{m} = \alpha \frac{\sqrt{\left[1 + \Omega \left(\frac{M_C}{M_e}\right)\right]^2 + 4\Omega B_m} - \left[1 + \Omega \frac{M_c}{M_e}\right]}{2\Omega} \quad (8)$$

식에서 α 는 경계층의 열/물질 전달계수로 열전달계수 h 를 비열 c_p 로 나눈 값이며 B_m 은 연소가스 내에 산화물질의 분율을 나타낸다. M_c 와 M_e 는 각각 탄소와 연소가스의 물질량이며

Ω 는 무차원 삭마 파라미터로 아래와 같이 정의된다.

$$\Omega = \alpha \frac{\bar{R} T_w}{p_w} \frac{e^{\frac{E_0}{RT_w}}}{K_C M_C} \quad (9)$$

여기서, T_w 과 p_w 는 벽면에서의 온도와 압력이며 K_C 와 E_0 는 표면 화학반응에서의 반응상수와 활성화 에너지이다. 이러한 계산과정에서 가장 중요한 것은 열/물질 전달계수 α 를 도출하는 것으로 본 연구에서는 경계층 적분법을 통해 열전달계수를 도출하여 사용하였다.

2.3 시험모터 형상 및 해석조건

본 연구에서 해석한 모터는 국방과학연구소에서 내열재 실험에 사용한 모터로 출판된 바 없는 실험결과를 제공받아 본 연구의 검증에 사용하였으며 형상은 Fig. 1과 같다. 인입부에는 탄소/페놀계 내열재가 사용되었으며 목 삽입재로는 ATJ 그라파이트가 사용되었다. 그리고 열전도가 가장 빨리 일어나는 노즐 목에는 목 삽입재 후방에 실리카/페놀계 내열재를 사용하여 열이 외부로 빠져나가지 않도록 설계되었다. 마지막으로 케이스는 AISI 4130 합금으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 노즐은 노즐 목 삽입재에 연결된 온도측정용 열전대의 연결을 위해 케이스에서 실리카/페놀계 내열재로 플러그가 설치되어 있으나 본

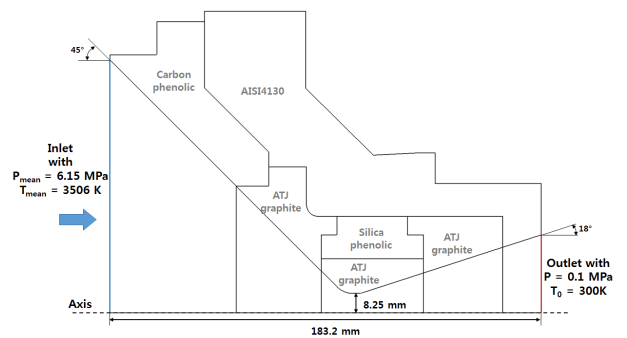


Fig. 1 Geometry of rocket nozzle, materials and mean boundary conditions

Table 1 Properties of nozzle material

| Material | Density (kg/m ³) | Specific heat (J/kgK) | Conductivity (W/mK) |
|-----------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|
| ATJ graphite | 1740 | 667.3 | 86.9 |
| Carbon phenolic | 1340 | 750.0 | 0.990 |
| Silica phenolic | 1741.2 | 1089 | 0.586 |
| AISI4130 | 7845 | 469.0 | 43.2 |

연구의 해석에서는 확대칭으로 해석을 수행하기 위해 이를 제거하였다. 해석에 사용된 각 물질의 열물성은 Table 1에 나타나 있다.

그리고 Fig. 2(a)는 노즐 목 삽입체에 설치된 열전대의 위치를 나타낸다. 내열재 내부로의 전도를 관찰하기 위해 깊이 별로 4개의 열전대가 설치되었으며 노즐 내 위치별 열전도의 차이를 확인하기 위해 노즐 목에서 앞뒤로 2개의 열전대가 추가로 설치되었다. 실제로 높이별로 열전대 설치 시 배선에 필요한 공간이 없으므로 Fig. 2(b)에 나타난 것과 같이 깊이가 다른 열전대 삽입 시에는 90° 간격으로 열전대를 설치

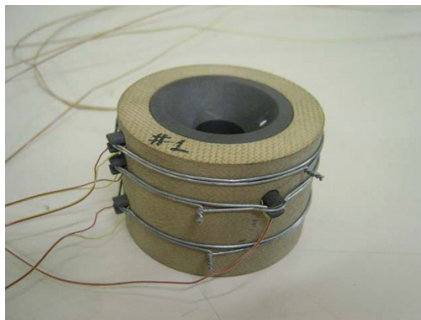
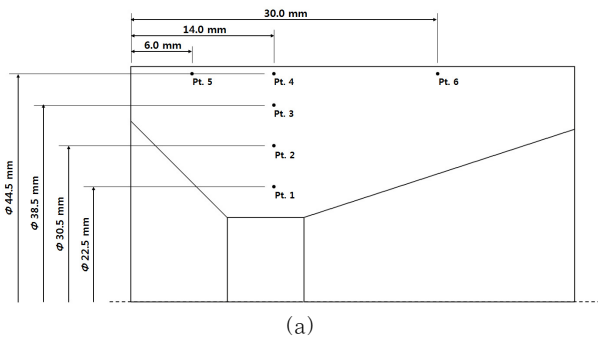


Fig. 2 (a) Locations of installed thermocouples in throat insert (b) actual shape of throat insert with thermocouples

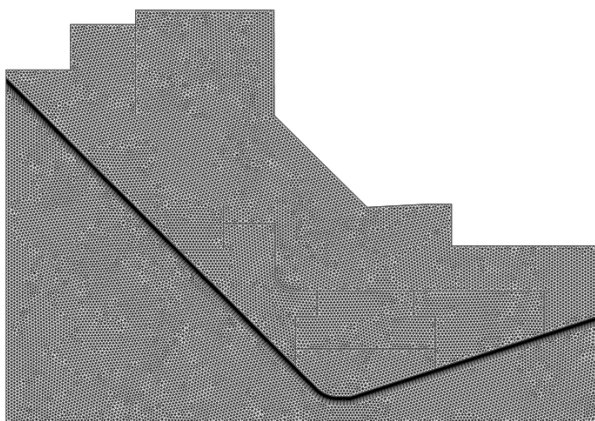


Fig. 3 Computational grid for conjugate simulation of nozzle flow and thermal response of nozzle

하였다. 정확한 온도측정을 위해 ATJ 그래파이트로 만들어진 플러그에 열전대를 매립하는 방법이 사용되었다.

시험모터에는 알루미늄 입자가 포함된 HTPB계 추진제가 사용되었으며 연소실에서 end burning 형태로 연소하였다. 약 12초의 연소시간 동안의 평균 연소압력 및 연소온도는 각각 6.15MPa, 3506K이다. 화학적 삭마에서 중요한 변수인 CO₂ 및 H₂O의 몰 분율은 NASA의 CEA 프로그램(Gordon *et al.*, 1996)으로 계산되었으며 연소실에서 0.016, 0.156이다. 연소 가스 내에 포함된 액적 상태의 알루미늄 Al₂O₃의 몰 분율은 0.08이다.

본 연구에서는 노즐의 열/유동장 해석에 ANSYS Fluent v.15를 이용하였다. 해석에 사용된 연소가스의 물성은 NASA CEA 프로그램으로 도출된 값을 온도에 따라 내삽하여 사용하도록 하였다. 노즐 내부유동은 난류유동이므로 Menter의 SST *k- ω* 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 이 모델은 경계층 내 난류에너지 소산을 모델링에 ω 를 사용하여 정확도가 높으며 ω 기반 모델의 문제점인 경계층 외부 난류강도에 대한 민감성을 *k- ϵ* 모델과의 블렌딩을 통해 해결하여 그 정확성이 입증되었다(Menter, 2009). 또한 유동해석의 그래디언트 계산에 Least square cell based 방법을 사용하였으며 각 변수의 차분화에는 2nd order upwind를 사용하였다. 해석에는 확대칭 조건을 사용하였으며 Fig. 3에 나타난 것과 같은 총 5만개의 비정렬 격자를 적용하고 표면에는 10 μ m의 경계층 격자를 적용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 시간에 따라 변하는 노즐 내열재 내부의 온도 분포를 나타낸 것으로 시간에 따라 노즐 내열재로 열이 전달 되는 양상을 확인할 수 있다. 먼저 카본/페놀릭과 ATJ 그래파이트를 비교하면 열전도도가 낮은 카본/페놀릭은 내부로의 열침투가 일어나지 않고 표면에 열이 억제되는 것에 비해 ATJ 그래파이트가 배치된 부분은 열이 내부로 빨리 침투되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이의 반대급부로 표면온도는 카본/페놀릭이 더 높으며 이는 카본/페놀릭이 물질 전달율이 매우 높은 노즐 목에 적용될 경우 매우 높은 삭마율을 나타내는 원인이 된다. 그리고 ATJ 그래파이트가 적용된 위치 간의 비교에서는 노즐 목 삽입체가 가장 빨리 가열되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 노즐 내의 질량유속 ρu 가 노즐 목에서 최대가 되어 최대의 열/물질 전달이 발생하기 때문이다. 연소가 종료 되는 12초 시점에서는 노즐 목 삽입체의 온도는 2600K을 상회하는 것으로 도출되었다.

Fig. 5는 노즐 목 위치에서 시간에 따른 깊이방향 온도분

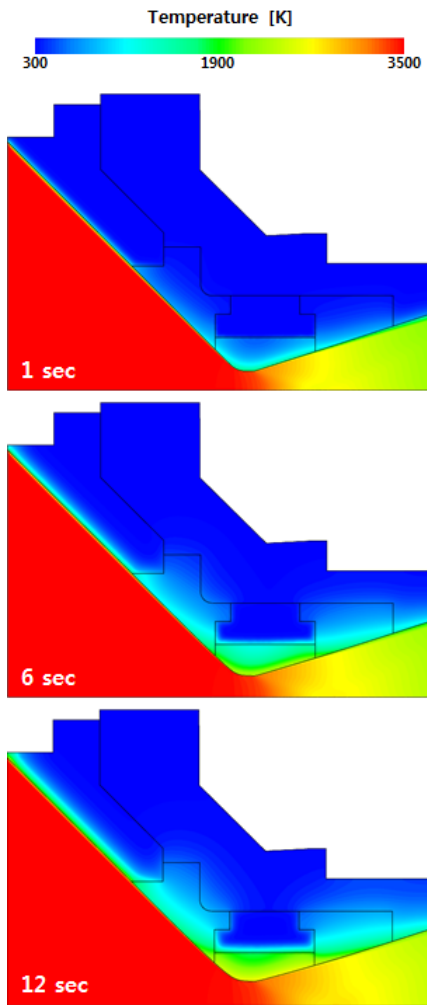


Fig. 4 Change in temperature distribution with time

포를 나타낸 것이다. 먼저 노즐 목의 높은 열유속으로 인해 연소가스에 1초만 노출되어도 표면온도가 1700K에 달하는 것을 확인할 수 있다. 깊이방향 온도분포에서 변곡점이 생기는 영역은 노즐 목 후방에 삽입된 실리카/페놀릭 내열재와의 계면이며 실리카/페놀릭은 열전도도가 매우 낮으므로 온도구배가 ATJ 그라파이트에 비해 더 크게 나타난다. 또한 온도가 충분히 상승한 경우 페놀릭 수지의 열분해와 이로 인한 내부 흡열반응이 일어나므로 깊이방향 온도구배가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 특징적인 것으로 아직 노즐 목 표면에서 열이 전도로 침투되지 않은 0.04m 이상의 구간에서도 시간이 지남에 따라 온도변화가 생기는 것이 관찰되었는데 이는 열전도가 잘되는 ATJ 그라파이트와 AISI4130 케이스를 통해 열이 후방으로 먼저 전도되었기 때문으로 보인다. 그러나 12초 이후에도 실리카/페놀릭 내열재의 온도가 초기 온도에서 변화하지 않는 구간이 있으므로 내열재 내부 전도는 외부 케이스의 열조건과는 무관하다고 볼 수 있을 것으로 판단된다.

또한 Fig. 5에서의 온도구배의 시작인 표면위치가 바뀌는

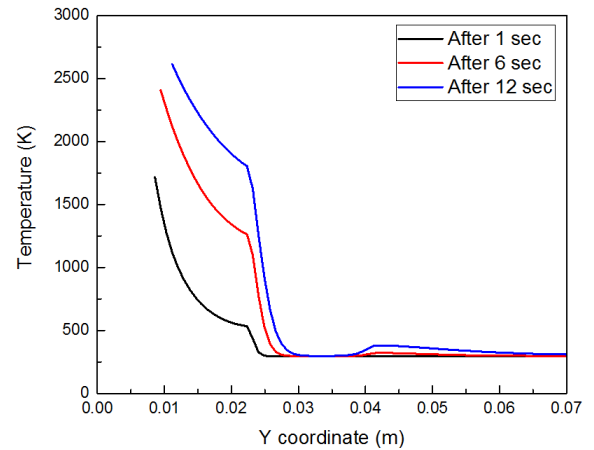


Fig. 5 In-depth distribution of temperature at the nozzle throat

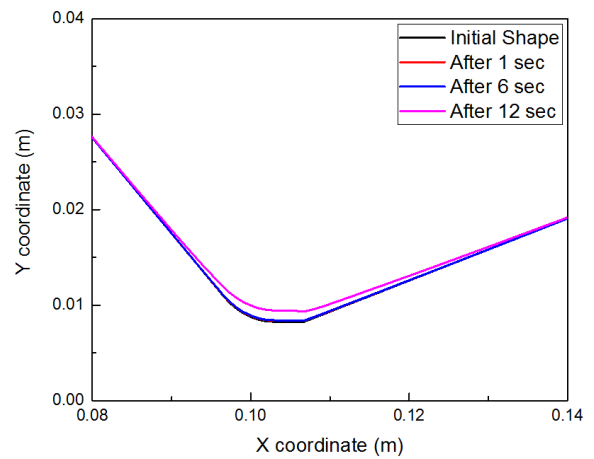


Fig. 6 Change in surface shape during simulation

것은 노즐 목이 시간이 지남에 따라 삭마되기 때문으로 Fig. 6에 시간에 따른 노즐 목의 형상변화가 나타나있다. 열/물질 전달계수가 최대가 됨에 따라 표면으로의 산화물질의 전달도 활발하며 온도도 높은 노즐 목에서 가장 삭마가 많이 일어난 것을 확인할 수 있다. 또한 삭마속도는 내열재 표면온도에 따라 지수 함수적으로 지배받으므로 노즐온도가 크게 상승한 후반부에 더 크게 발생한다. 이는 연소시작 6초까지 거의 변화하지 않던 노즐목이 12초 이후에는 상당한 변화가 발생한 것에서 확인할 수 있다. 노즐 목은 최대 1.05mm 삭마된 것으로 나타났으며 이는 실험으로 측정된 삭마두께인 0.685mm에 비해 53.3%의 오차를 나타냈다. 그러나 본 실험에서는 노즐의 크기가 작아 삭마량 자체가 매우 작으며 이에 따라 정량적인 비교는 더 큰 노즐에서의 실험결과를 사용해야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 Fig. 7은 열전대로 측정된 실험에서의 노즐 내부 온도와 본 연구에서 해석으로 도출한 온도를 비교한 것이다. 온도상승과정에서는 실험과 해석의 오차가 100K 내외로 가열

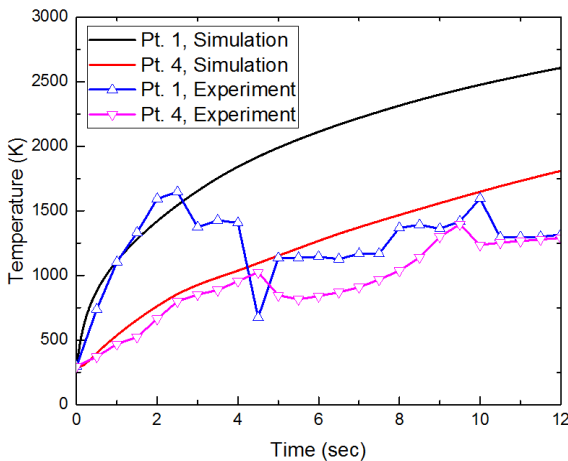


Fig. 7 Comparison of temperature history on monitoring points with experiment

과정이 유사하게 해석된 것을 알 수 있다. 두 열전대 모두 가열 구간에서 온도가 상승하다가 다시 하강하는 것을 볼 수 있는데 고온에서 열전대에 문제가 생긴 것으로 판단된다. 이는 본 실험에 사용된 R-type 열전대의 특성 상 1000K 이상에서는 사용이 힘들기 때문이다. 또한 열응력에 취약한 ATJ 그라파이트 소재 특성 상 실험 후 노즐 목 일부 구간에서 크랙이 발생하였는데 이로 인해 고온가스가 침투하여 온도측정에 문제를 발생시켰을 가능성도 존재한다. 특히 1번 열전대의 경우 표면에서 3mm 떨어진 곳에 위치한 열전대로 특히 온도상승이 매우 빠르게 이루어져 문제가 생긴 것으로 판단된다. 전반적으로 해석으로 도출된 온도가 실험에 비해 높게 예측되었으며 이는 노즐 목 삭마가 실험에 비해 더 빨리 진행된 영향도 있을 것으로 보인다. 삭마가 크게 발생할 경우 특정 지점까지의 내열재 두께가 감소하므로 열전도의 측면에서 열저항이 감소하는 영향을 나타내기 때문이다. 따라서 코드의 정량적인 분석을 위해서는 목 삽입재 뿐만 아니라 모터 외부에도 추가적인 열전대를 설치하여 결과를 확인해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 노즐에 적용되는 내열재의 표면 및 내부에서 일어나는 열적, 화학적 변화와 이로 인한 노즐의 열응답을 도출하기 위해 노즐 유동장, 내열재 삭마, 내열재 열분해를 통합하여 해석하는 해석기법을 개발하였다. 내열재 내부의 전도와 노즐 열유동장을 통합해석하기 위해 CFD를 사용하였으며 내열재 열분해로 인한 밀도변화 및 흡열반응을 Arrhenius 식으로 모델링하였다. 또한 표면에서의 복잡한 비균질 화학반응을 해석하기 위해 경계층 가정이 적용된 대수식을 이용하여 표면 화학반응을 모델링하였다. 해석결과를 검증하기 위해 그라파이트 노즐 목이 적용된 소형 시험모터를

해석하였다.

해석결과 노즐 내부에서 내열재의 서로 다른 물성이 고려된 열전도 해석이 이루어짐을 확인하였다. 또한 내열재 표면의 삭마와 이로 인한 흡열반응이 고려된 온도분포도 도출되었다. 삭마량 측면에서는 오차가 나타났으나 이는 실험에서 나타난 노즐 목의 삭마량 자체가 크지 않기 때문으로 판단된다. 실험에서 측정된 온도와 동일 위치의 해석결과를 비교하였을 때 열전대에 문제가 생기기 이전의 가열 구간에서는 100K 내외로 초기의 급가열 구간이 잘 예측된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 통합 해석기법은 향후 노즐의 내열설계에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다(계약번호 UD140024GD).

References

Boyarintsev, V.I., Zvyagin, Y. (1972) The Ablation of Graphite in the Turbulent Flow of a Reacting Gas, (No.FTD-MT-24-1754-71) WRIGHT-PATTERSON AFB OHIO.

Gordon, S., McBride, B.J. (1996) *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications*, National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Program.

Koo, J., Ho, W., Ezekoye, O. (2006) A Review of Ablation Modeling for Thermal Protection Systems, *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 0 vols., American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Menter, F.R. (2009) Review of the Shear-Stress Transport Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective, *Int. J. Comput. Fluid Dyn.*, 23(4), pp.305~316.

Thakre, P., Yang, V. (2008) Chemical Erosion of Carbon-Carbon/Graphite Nozzles in Solid-Propellant Rocket Motors, *J. Propuls. & Power*, 24(4), pp.822~833.

Rindal, R., Flood, D., Kendall R. (1966) Analytical and Experimental Study of Ablation Material for Rocket Engine Application, NASA CR-54757, 15.

요 지

로켓 노즐에 적용되는 내열재는 고온의 연소가스에 노출되어 표면이 파괴되고 내부의 수지재질이 열분해되는 복잡한 열화학적 변화를 겪으며 이러한 현상을 예측해야 노즐의 내열설계가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 로켓 노즐 유동장과 탄소계 내열재의 표면삭마 및 내부 열반응을 통합하는 코드를 개발하여 노즐의 표면변화와 내열재 내부의 열응답을 도출하고자 하였다. 노즐 열유동장에서 발생하는 표면 열유속과 내열재 내부 열전도를 계산하기 위해 CFD를 사용하였으며 내열재 내부에서 발생하는 밀도변화와 흡열반응을 내부 에너지 방정식에 고려하였다. 또한 내열재 표면에서의 삭마계산을 위해 경계층 가정이 적용된 대수식을 이용하였다. 개발된 해석기법을 검증하기 위해 소형 시험모터에 대한 해석을 수행하였으며 해석결과 노즐 목의 삭마가 다소 크게 예측되었으나 내열재 형상변화 및 내부 열전도가 잘 해석되는 것을 확인하였다. 또한 실험에서 측정된 온도와 비교 시 가열 구간에서 유사한 가열 속도를 나타내는 것을 확인하였으며 온도 오차는 100K 내외로 나타났다.

핵심용어 : 내열재, 삭마, 열반응, ATJ 그래파이트