

삭마 및 열분해 반응을 고려한 고체 추진기관의 열해석

김연철

Thermal decomposition and ablation analysis of solid rocket propulsion

Yun Chul Kim

ABSTRACT

A two-dimensional thermal response and ablation analysis code for predicting charring material ablation and shape change on solid rocket nozzle is presented. For closing the problem of thermal analysis, Arrhenius' equation and Zvyagin's ablation model are used. The moving boundary problem are solved by remeshing-rezoning method. For simulation of complicated thermal protection systems, this method is integrated with a three-dimensional finite-element thermal and structure analysis code through continuity of temperature and heat flux.

초 록

고체추진기관의 연소 환경에서 복잡한 형상을 갖는 내열 복합재료의 온도, 밀도분포 및 삭마두께를 예측할 수 있는 방법을 개발하였다. 복합재료의 내부 열반응은 Arrhenius 모델을 이용하였으며, 표면 삭마반응은 Zvyagin 이론을 사용하였다. 표면 삭마에 의한 경계조건 및 격자 이동은 상용해석 코드에서 활용되는 Rezoning-remeshing 기법을 사용하였다. 형상이 복잡한 부품으로 이루어진 2차원 축대칭 노즐 조립체에 적용된 방법은 향후 3차원 FEM 열구조 해석에 활용을 목표로 발전될 것이다.

Key Words: TGA(열중량분석기), Thermal Decomposition(열분해), Ablation(삭마), Solid Rocket nozzle(고체추진기관 노즐)

1. 서 론

열차폐 물질의 분해 및 삭마 반응 기구에 관한 관심은 60년대에 우주발사체 기술로 대표되는 항공우주공학에서 비롯된다. 특히, 미국과 러

시아로 양분되어온 우주 과학 기술은 당시에 존재했던 탄소계 및 유리계 복합재료의 분해 기구를 정립하기 위하여 많은 실험이 진행되었다. 고체 추진기관에 사용되는 내열 복합재료의 열분해 및 삭마 현상을 정확히 예측하기 위해서는 해석 프로그램, 경계조건 및 재료 물성이 정확히 주어져야 한다. 내열 복합재료의 열분해 반응 기구는 고체, 액체 및 기체상에서 이루어지는 복잡

국방과학연구소 1본부 6부
연락처, E-mail: dendrite@hanafos.com

한 반응이기 때문에 실제 상황을 모사하기 위해서는 실험 방법의 선택뿐만 아니라 열분해 및 삭마 반응을 정확히 이해해야 한다. 기술 선진국에서는 많은 실험을 통하여 모델링 식을 선정 한 후에 재료의 열분해 반응 특성 값을 실험실 규모에서 확보하였으며 새롭게 합성 및 제조되는 신물질의 특성도 빠른 시간에 성능을 예측 할 수 있도록 실험 방법이 표준화 되어 있다 [1,2]. 열분해 반응을 표현하기 위하여 반응 속도 상수를 구하게 되며 이렇게 얻어진 상수 값은 재료의 열분해 특성치가 되며 열분해 모사 프로그램에 쓰이는 입력 자료가 된다. 반응속도 상수를 찾기 위한 이론 및 실험식은 대부분이 Arrhenius 식에 근거한 변형된 식을 이용해 오고 있으며 사용되는 기기 및 방법은 열중량분석기 (Thermal Gravimetry Analyzer)에 의한 열분석 방법을 이용해 오고 있다[3]. 열중량법에 의한 열분석 방법은 시료의 중량 변화를 온도 및 시간의 함수로써 기록한 것이다. 본 연구는 TGA 장비를 이용하여 탄소/페놀릭 복합재료의 열분해로 인한 숯 형성 반응을 불활성 분위기에서 가열 속도를 변화 시켜 얻은 열중량 곡선으로부터 열분해 현상과 분해 반응 특성 값을 구하였다[4]. 또한, 실제 상황을 모사하기 위한 연소시험을 통하여 반응 상수를 획득 하는 방법도 탄소계 재료의 표면 삭마 반응은 추진제 연소가스에 함유된 H_2O 와 CO_2 에 의한 산화반응으로 대표된다고 가정하였으며, 산화반응에 의한 삭마량을 표현하기 위하여 Zvyagin's[5] 이론식을 사용하였다.

열분해에 의한 밀도 변환 및 삭마 두께를 표현하기 위하여 FEM 모델 격자의 Remeshing 및 Rezoning 기법이 가능한 범용 해석 코드인 MSC-Marc[6]의 부프로그램을 사용하였으며 해석된 결과는 시험 후 숯 및 삭마 깊이와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 내열재료의 열반응 기구

내열 복합재료가 고온, 고압의 연소가스에 노출될 때 일어나는 열분해 현상은 복잡한 반응

기구를 나타낸다. 반응 초기엔 재료내부의 열전도에 의해 온도가 상승하고 작은 부피 팽창을 하게 된다. 재료 내부에 존재하는 수분과 완전히 경화되지 않은 물질의 확산 및 증발이 일어나고 온도가 600K 이상이 되면 열분해 반응은 재료 내부의 압력증가 및 열전도도 감소를 일으키는 분해가스를 발생 시키며 이는 내열재 표면에 결함을 일으키는 원인이 되기도 한다. 분해가스는 외부에 숯 층이 형성되면, 숯 층의 온도 증가 때문에 탄소 증착이 이루어지며 이는 숯 층의 열전도도 및 밀도 증가를 나타낸다. 또한 크래킹 (cracking)에 의한 분해 반응이 일어나며 숯 층의 온도 상태 따라서 H_2 , CO , CH 등 저분자 물질로 분해가 일어난다. Glass계열 복합재료인 경우에는 1000K 부근부터 액체상태의 SiO_2 는 탄화가스 (CO , CO_2)등과 반응을 하여 유입되는 열에너지를 흡수한다. 이 반응은 전체 화학반응에 의한 열에너지 흡수 중에서 약 70%이상을 차지하게 된다. 2000K 이상에서는 증발이 주요 분해반응이며 탄소성 복합재료는 산소 성분 화합물의 확산에 의한 화학적 삭마 반응이 반응 기구를 결정한다. 숯 층의 삭마는 산화에 의한 침식 및 기계적 요인으로 인한 강도저하로 원재료로부터 떨어져 나가는 과정을 겪는다 (Fig. 1).

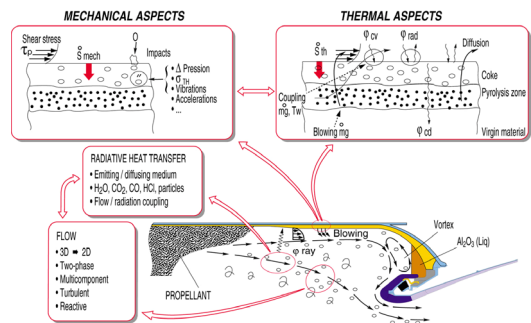


Fig. 1 추진기관의 열반응 현상

이러한 높은 열유속에 의한 내열재 표면의 삭마반응을 포함한 열경계층 조건을 계산하는 것은 매우 중요하다. 열경계층 조건을 결정짓는 인자는 분해가스의 영향을 고려한 대류 열유속, 분자 확산에 의한 엔탈피, 고체 와 가스의 화학적

삭마반응, 재료 내부의 열분해 반응, 액체 및 고체 입자에 의한 기계적 삭마반응에 의하여 결정된다. 입자(고체, 액체)에 의한 기계적 삭마 현상을 표현하는 완전한 이론 방정식은 존재하지 않으나 G-Law[7]와 같은 실험식을 도출하기도 한다. 근래에는 장시간 연소 모타 및 얇은 재료의 급속 가열에 대한 현상을 모사하기 위하여 재료 내부에서 형성된 수분의 증발을 고려한 분석을 하고 있다.

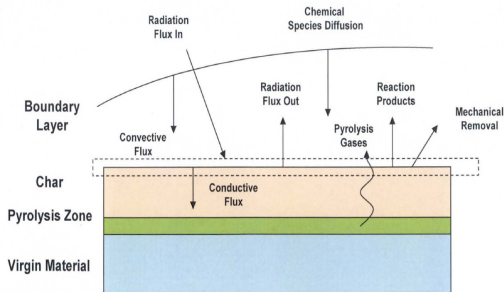


Fig. 2 반응 표면 및 내부 열반응

연소가스 에너지의 대류 열전달에 의한 화학적 삭마와 복사에너지를 표현하는 일반적인 반응 표면(Fig. 2)의 에너지 보존 방정식은 Eq. 1과 같고 표면 삭마 와 열분해 가스 효과를 고려한 재료의 내부 에너지 보존방정식은 Eq. 2와 같다[7, 8].

$$\rho_e u_e C_H (h_r - h_{ew}) + \rho_e u_e C_M \left[\sum (Z_{te}^n - Z_{tw}^w) h_t^w - B' h_w \right] + \dot{m}_c h_c + \dot{m}_g h_g + \alpha_w q_{rad} - F \sigma \epsilon_w T_w^4 - q_{cond} = 0 \quad (1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(k A \frac{\partial T}{\partial x} \right) + (h_g - \bar{h}) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \dot{s} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\dot{m}}{A} \frac{\partial h_g}{\partial x} \quad (2)$$

2.2 내부 열반응 모델

복합재료는 섬유, 수지 및 소량의 첨가제로 이루어져 있다. 열분해는 대부분이 수지상에서 이루어지며 유리계 섬유인 경우엔 일정 온도 이상에서 상변화를 일으킨다. 내부 열반응은 부피가 일정하다고 가정한 경우, 재료의 밀도 감소는 수지 및 섬유에서 발생하는 분해가스 생성에 기인하는 기공의 증가 때문이며 열분해가 끝난 복합

재료의 밀도 값은 열분해 반응 후 형성된 슛 과 섬유의 부피 함유율에 따라서 결정 된다 (Fig 3).

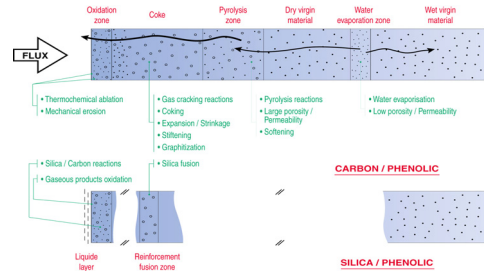


Fig. 3 복합재료의 열분해 개념도

밀도 감소를 표현하는식은 Arrhenius 식에 근거하여 다음과 같은 미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -\frac{J_0}{\rho_b} \Gamma (\rho_m - \rho_m^{\infty}) \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (3)$$

$$t = 0, \quad \rho_m = \rho_m^0$$

초기조건을 기준으로 Eq. 3을 적분하면 아래와 같은 적분식이 얻어진다.

$$\frac{\rho_m}{\rho_m^0} = 1 - \Gamma + \Gamma \exp\left(-\frac{J_0}{\rho_b} \Gamma \int_0^t \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) d\tau\right) \quad (4)$$

TGA(열중량분석기) 실험에서 얻어진 중량 감소 곡선으로부터 활성화 에너지(E_A), 반응계수(J_0) 및 가스화 율(Γ)이 얻어지며 이러한 반응인자는 수지 성분 및 첨가물의 내열 특성에 기인한다. 또한 중량 감소 곡선의 모양도 온도 상승속도가 증가함에 따라서 n차 감소 반응에서 1차 감소 반응으로 변하게 된다. 이러한 예에서 보듯이 고체 추진기관의 연소 조건에서는 높은 온도 상승속도에 기인하여 복잡한 여러 반응이 단순한 1차 반응으로 수렴되는 것을 보여준다.

3. 실험 및 고찰

3.1 열분해 특성 상수 결정

TGA(열중량분석기) 실험에 사용된 재료는 페놀릭 수지를 사용한 복합재료이며 열분해 특성은 Table 1에 보이는 바와 같다. 시편의 균일성을 확보하기 위하여 일정한 75~100 μm 분말 크기로 제조하여 시험하였다. 온도상승 속도의 영향을 보기 위하여 5, 10, 15, 30, 50 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 에서 실험하였으며 분석 구간은 페놀릭 수지의 분해가 일어나는 600K 부근에서 분해반응이 끝나는 1200K 로 정하였다.

Table 1. Characteristic of Carbon/Phenolic

밀도	섬유 분율	수지		반응속도 상수	
		분율	기화열 (Γ)	활성화 에너지 (E_A/R)	반응 계수(J_0)
g/cm^3	%	%	%	K	$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$
1.4	65	35	34	9.1×10^3	3.3×10^5

Figure 4에서와 같이 온도상승 속도가 증가함에 따라서 열분해 반응이 일어나는 구간은 높은 온도 쪽으로 이동하고 있다. 즉, 온도 상승 속도가 증가 할수록 일정한 시간 동안에 내열재에 전달되는 에너지는 감소하여 열분해 반응은 높은 온도에서 이루어진다. 또한, 에너지 전달이 충분히 전달되는 정상상태에서 생성된 숯(Char)과 비교하여 비정상 상태에서 생성된 숯의 결정구조는 다르므로 열전도도, 밀도뿐만 아니라 H_2O 및 CO_2 에 의한 산화 반응 기구에 변화가 이루어진다.

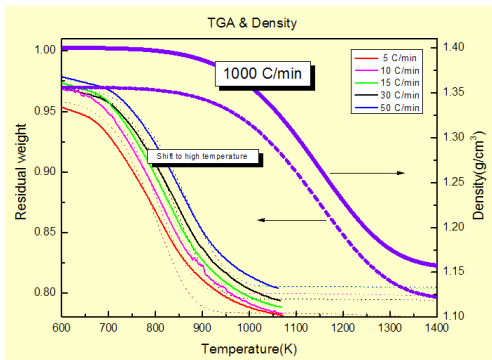


Fig. 4 중량 감소 곡선

3.2 탄소계 표면의 산화 반응

고체 추진기관에서 사용되는 탄소계 재료의 삭마 반응을 규명하기 위해서는 탄소 물질의 표면에서 일어나는 이종 화학 반응과 경계층 내부에서 일어나는 물리-화학적 열물질 전달에 의한 화학적 삭마 모델을 필요로 한다.

일반적으로 고체 로켓의 연소가스에 의해 산화되는 탄소계 재료는 H_2O 와 CO_2 에 의한 확산 반응 (Fig. 5)에 의하여 이루어지며 산화 온도는 결정구조에 따라서 다르다. ATJ 계열 그래파이트는 1200~1300K, Pyrolytic graphite는 1300~1500K에서 산화반응이 시작된다고 보고되었다.

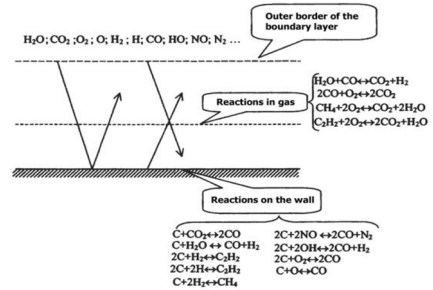


Fig. 5 탄소계 표면의 산화반응

기본 절차의 수립과 탄소계 재료의 표면 삭마 수학적 모델 확립을 위해, 1960년대부터 수많은 연구자들이 여러 그룹으로 나누어 연구를 수행하였다. 탄소의 산화 반응은 순수한 수증기 (H_2O), CO_2 등을 포함하는 뜨거운 가스 혼합물을 만들어내는 전기적 가열 장치로 실험을 수행하였다. 또한 고체 추진기관을 이용한 연소시험을 통하여 그래파이트 및 탄소/탄소 복합재료의 삭마반응에 대한 연구가 이루어졌다. 이러한 실험 및 분석을 통해 Eq. 5와 같은 삭마 질량 유동율에 관한 대수식이 제안되었다[5]. 고체 추진 연소물에 의한 탄소 물질의 삭마 반응에 관한 연구는 축소형 고체 추진 로켓 모터의 연소시험에 의해 수행되었다. 이러한 연구 결과에서 활성화에너지(E) 값의 범위는 약 150~190 kJ/mole, pre-exponential(k_0) 값은 그래파이트 특성에 따라서 $0.4 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ m/s}$ 사이 값을 나타낸다.

$$\dot{m}_w = \frac{h}{C_p} \sqrt{\frac{\left(\frac{M_c}{M} \Omega + 1\right)^2 + 4B_m \Omega - \left(\frac{M_c}{M} \Omega + 1\right)}{2\Omega}} \quad (5)$$

$$\Omega = \frac{h}{C_p} \frac{RT_w}{k_0 P_w M_c} e^{E/RT}$$

- \dot{m}_w : 삭마 질량 유동을
- B_m : 연소가스의 산화포텐셜
- h : 대류열전달 계수
- R : 기체상수
- M_c : 탄소 원자량
- M : 연소가스 평균분자량
- E : 활성화에너지
- k_0 : pre exponential 인자

3.3 FEM 해석 및 발전방향

유한 해석 절차 및 사용된 모델의 검증을 위하여 다음과 같은 절차를 따랐다 (Fig. 6).

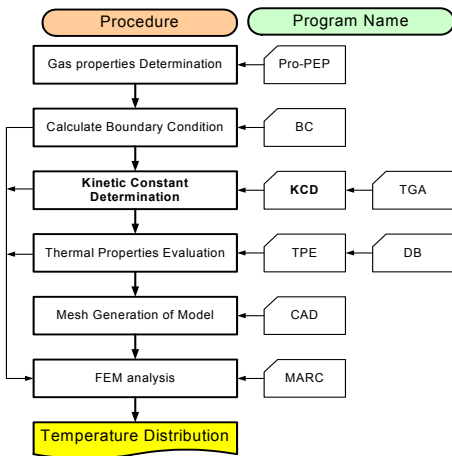


Fig. 6 해석 절차

고체 추진제의 조성을 기준으로 연소관 압력 및 온도 에서 연소가스의 열역학적 특성치를 얻는데 사용되는 Aerotherm Chemical Equilibrium (ACE)[9] 및 CEA 코드[10]를 활용하였으며 대류 열전달계수는 Bartz 식 [11]을 근간으로 축소형 시험모타 에서 얻어진 결과를 수정하여 사용하였다.

$$h = \frac{0.026 \mu_c^{0.2} c_p \left(\frac{P_c}{P_r}\right)^{0.8} \left(\frac{D_t}{Rg}\right)^{0.1} \left(\frac{A_t}{A}\right)^{0.9}}{D_t^{0.2}} \sigma \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{T_w}{T_c}\right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)\right]^{0.68} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{0.12}}$$

내열부품은 직교이방성 특성을 갖는 부품이므로 섬유 배향을 고려한 온도에 따른 열적 특성치를 입력 자료로 사용하였다. 페놀릭 수지의 열분해에 의한 흡열 반응 효과는 약 2.5×10^6 J/kg , 탄소의 산화에 의한 열흡수 효과는 벽면온도를 기준으로 제안된 식 ($Q_s = 12,380 - 0.68 \times T_w$)을 사용하였다. 산화반응에 결정적으로 작용하는 연소가스의 산화 포텐셜 B_m 값은 알루미늄 입자의 물분율을 고려하였으며 약 0.067 이다. 통상적으로 고체 추진기관의 B_m 값은 0.1을 넘지 않는다.

Fig. 7-8과 같이 노즐 조립체의 축방향을 기준으로 경계조건을 부여하였으며 유한요소의 Remeshing 과정 중에도 열경계 조건은 그대로 적용되었다. 해석에 사용된 요소는 축대칭 열해석용 QUAD-4 (40, Full Integration) 이며 모델의 절점 수는 1,935 개, 요소 수는 1,816 개다. 추진제 그레인 형상을 고려한 비대칭 삭마 및 Al_2O_3 입자에 의한 기계적 삭마는 고려하지 않았다.

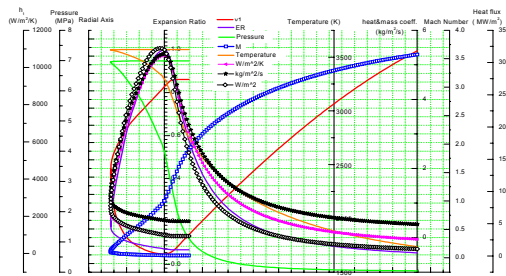


Fig. 7 열해석 경계 조건



Fig. 8 노즐 조립체의 유한요소 모델

숯 및 삭마 현상을 2차원으로 표현하기 위한 유한요소 의 형상 처리기법은 상용해석 코드인 MSC-Marc 에서 제안하고 있는 Shaver, Relax 및 Stretch 기법 중에서 Relax 기법을 사용하였다 [Fig. 9]. 또한 열분해 가스의 배출 방향은 유한요소 모서리에 수직한 방향으로 배출되도록 하는 Stream Line 옵션을 사용하였다. 삭마 두께는 Eq. 5 를 기반으로 MSC-Marc의 User Subroutine Option을 이용하여 계산하였으며, 향후 Charring Material Analysis (CMA) 코드[8,9] 에서 제안한 연소 가스의 엔탈피, 경계층 해석, 내열 재료의 엔탈피 및 화학 반응이 연동된 에너지-물질전달 현상을 고려한 코드를 사용하여 숯 및 삭마해석을 하고자 한다. 또한 3차원 해석을 통한 비대칭 경계 조건이 고려된 열반응 해석 기법이 확립되면 추진제 그레인 및 Al_2O_3 입자에 의한 비대칭 삭마해석이 가능하리라 판단된다 (Fig. 10).

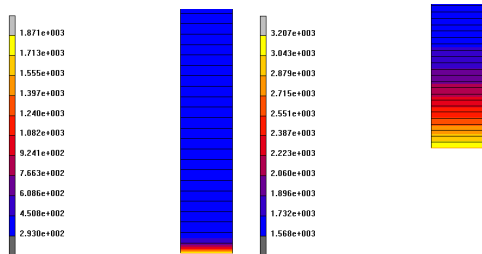


Fig. 9 Relax mesher 기법 결과

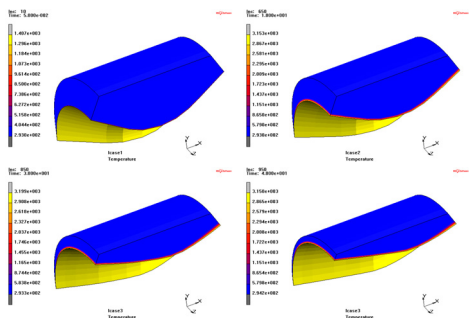


Fig. 10 3차원 삭마 및 열분해 해석

본 논문에서는 축대칭 2차원 해석이 수행되었으며 삭마 현상을 고려한 내열부품의 과도 열전달 결과는 Fig. 11 에 표현되었으며 시간에 따른 내열부품의 삭마 모양은 Fig. 12과 같다.

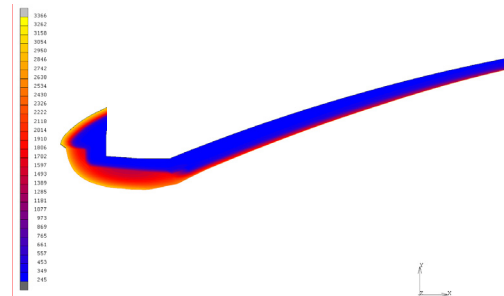


Fig. 11 삭마 및 온도 해석 결과

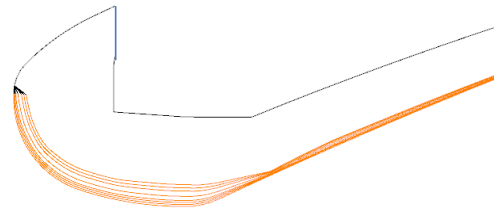


Fig. 12 삭마라인 해석결과

내열부품의 열분해 경계선을 결정하기 위하여 TGA 실험에서 얻어진 중량 감소 곡선에서 계산된 반응 속도 상수 값을 이용하였다. 고체 추진제를 이용한 연소 시험에서 내열부품의 표면 온도 상승 속도는 1000 K/sec 가 넘는 비정상 상태이다. 그러므로 실험실에서 측정된 열분해에 의한 중량 감소곡선은 온도 상승 속도를 감안한 곡선으로 수정하여 사용하여야 한다. 본 논문에서는 온도 상승 속도가 3000 K/sec 인 경우로 가정하여 얻어진 결과를 사용하였다. 향후, 열전대를 내열재 내부에 장착하여 실시간으로 온도를 측정하게 되면 온도 상승효과에 따른 밀도 분포 변화를 좀더 정밀히 파악 할 것으로 예측된다. 현재 기술로 예측된 열분해가 일어나는 온도 범위는 약 800~900 K이며 내열 부품에 형성된 열반응 경계는 Fig. 13에 표현 되었다.

회색 부위는 열분해가 완전히 끝난 후 형성된 Char 영역을 포함하고 있으며 어두운 회색 영역은 Virgin 영역을 나타낸다.

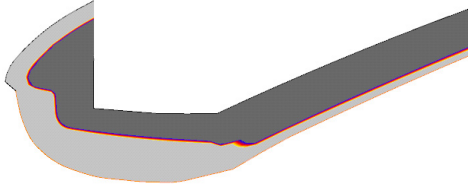


Fig. 13 열분해가 시작되는 경계

3.4 해석 및 실험 결과 분석

예측된 경계조건을 이용한 노즐 내열 부품의 열반응 해석 결과의 타당성을 확인 하기 위하여 실험 후 내열부품을 축 방향으로 절개하여 삭마 및 숯 두께를 분석하였다. 삭마 및 열분해 두께를 정확히 예측하기 위해서는 연소 시험 중에 센서를 활용한 실시간 측정이 필요하지만, 본 논문에서는 시험 후 측정된 자료만으로 분석하였다. 또한 연소 후에 내열 부품에 존재하는 열에너지의 효과 (Soak out)는 고려하지 않았다. 향후, 센서를 활용한 측정 방법 및 연소 시험 후 소화 및 급냉 방법이 적용되면 분석 방법의 신뢰도가 높아질 것이다.

Fig. 14 와 같이 열에너지의 침투 깊이에 따라서 탄소/페놀릭 재료는 (삭마-숯-열분해-처너) 층으로 구분 된다. 탄소계 성분을 함유하고 있는 탄소 섬유 및 수지가 탄화된 숯은 산화에 의해서 삭마가 이루어지며 넓은 범위에서 열분해 구간 (Char-Pyrolysis)이 존재하게 된다. 유리계 재료인 실리카/페놀릭 재료는 (삭마-SiO₂:SiC:Si-숯-열분해-처너) 층으로 표현되듯이 화염에 직접 노출된 부위는 SiO₂가 녹은 층 과 페놀릭 수지가 탄화된 Carbon 성분이 상존하게 된다 (Fig. 15). 이러한 녹은 층은 연소가스의 흐름에 의하여 삭마가 이루어지기도 하지만 Al₂O₃ 입자가 적은 경우엔 일부는 남아서 SiO₂ 및 SiC 층을 형성하여 삭마 및 열차폐 성능을 높이기도 한다.

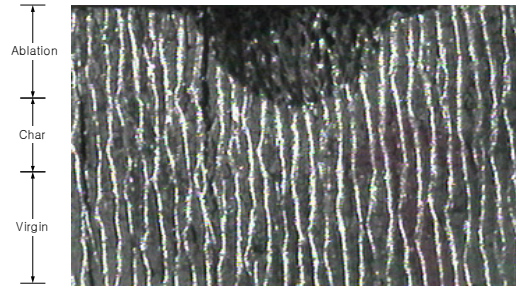


Fig. 14 탄소/페놀릭 재료의 열반응

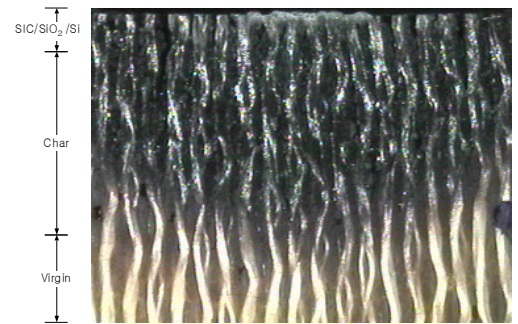


Fig. 15 실리카/페놀릭 재료의 열반응

열설계 및 해석의 목적은 체계 요구조건과 연계된 내탄도 성능을 만족시키기 위해서, 노즐 조립체의 삭마 - 숯 층 두께 및 온도 분포를 예측하여 노즐 조립체의 안전도를 규정하는 것이다. 시험 모타의 분석 위치 및 사용 재료는 Fig. 16 에 표시되어 있으며 삭마/숯/열분해 두께를 해석 값과 비교하였으며 열분해 구간 (Pyrolysis)의 범위를 해석 결과와 비교하였다.

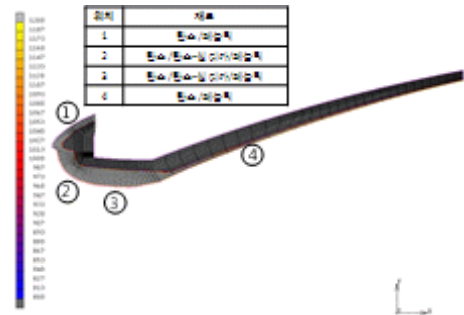


Fig. 16 분석 위치 및 사용재료

3.4.1 유입부 영역 (1번 영역)

유입부 영역으로 불리우는 1번 영역은 탄소 성분의 산화에 의한 화학적 삭마 및 기계적 삭마는 거의 일어나지 않으며 열에너지에 의한 열분해만 일어나는 곳이다. Fig. 17 에서 보듯이 해석 결과 (숯 두께 : 11.7mm, 열분해 두께 3~5mm)는 실제 측정된 값 (숯 두께 : 12~13mm)과 매우 잘 일치한다. 다만 열분해 가스의 압력으로 인한 숯 층의 부풀음 현상은 해석적으로 설명하기는 불가능하기 때문에 해석에서 제외 시켰다.

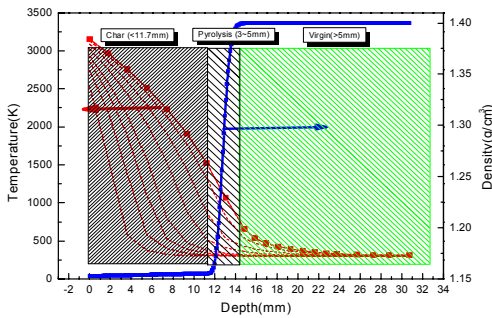


Fig. 17 유입부내열재 온도 및 밀도 분포

3.4.2 노즐목 전방부 (2번 영역)

노즐목 전방부는 연소가스에 의한 가장 큰 에너지를 경험하는 영역이다. Al_2O_3 입자에 의한 기계적 삭마가 일어나는 곳이며 열전달계수도 크기 때문에 산화반응에 의한 삭마도 큰 부분이다. 그러나, 대부분의 탄소계 성분은 H_2O 와 CO_2 에 의한 산화반응에 의한 화학적 삭마가 대부분을 차지하므로 기계적 삭마는 고려하지 않았다. 다만, 실제 현상을 모사하기 위하여 대류 열전달 계수는 복사 및 입자 침적을 고려하여 계산된 대류열전달 계수값의 1.3배를 적용하여 입력 자료로 활용하였다.

해석 결과는 삭마두께 $16\pm 1mm$, 단열재의 열분해 두께는 $6\pm 1mm$ 이다. 시험 후 측정 결과는 삭마 두께 15~16 mm, 단열재의 숯 두께는 $11\pm 1mm$ 이다. 단열재의 숯 두께가 약 2배 이상으로 증가된 것은 연소 시험 후 노즐목 및 내열재에 저장된 열에너지에 의한 효과(Soaking out)로 추측된다.

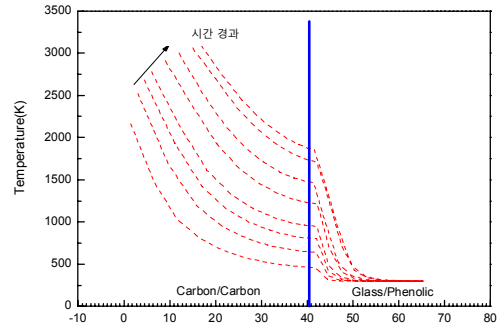


Fig. 18 노즐목 삭마 및 온도 분포

3.4.3 노즐목 (3번 영역)

노즐목 부위는 대류 열전달 계수 값이 가장 큰 영역이며 산화에 의한 화학적 삭마가 가장 많이 일어나는 곳이다. 또한 내탄도 성능에 많은 영향을 끼친다. 그러므로 노즐목의 삭마 예측은 추진기관의 성능 예측과 직결되므로 표준 모타를 활용한 성능 평가가 가장 많이 이루어지는 부품이 된다. 통상적으로 탄소계 노즐목 부품은 밀도에 반비례 하여 삭마가 적게 일어나며 압력의 0.8승으로 비례하여 삭마가 증가한다고 알려져 있다. 해석 결과는 삭마두께 $19\pm 1mm$ (그림 19), 단열재의 열분해 두께는 $5\pm 1mm$ (그림 20) 이다. 시험 후 측정 결과는 삭마 두께 17~18 mm, 단열재의 열분해 두께는 $10\pm 1mm$ 이다. 단열재의 숯 두께가 약 2배 이상으로 증가된 것은 연소 시험 후 노즐목 및 내열재에 저장된 열에너지에 의한 효과 (Soaking out)로 추측된다.

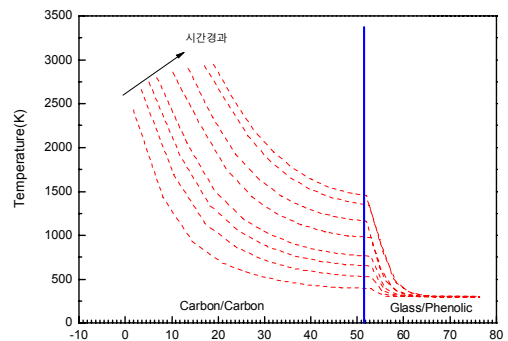


Fig. 19 노즐목 삭마 두께 및 온도 분포

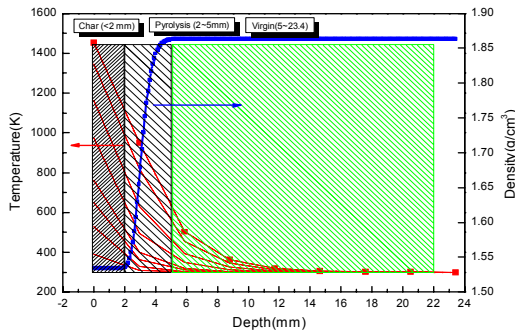


Fig. 20 목단열재 내부 온도 및 밀도

3.4.3 확대부내열재 (4번 영역)

확대부내열재는 탄소/페놀릭 재료를 이용하여 20도 Tape wrapping 공법으로 제작되었다. 연소가스 흐름에 거슬리지 않도록 설계 되었으며 층분리 및 부풀음 현상은 발견되지 않았다. 다만, 밀도가 높은 노즐목 (1.87 g/cm^3)과 조립되는 확대부내열재 (1.4 g/cm^3)의 밀도 차이에서 생성된 작은 계단 모양의 삭마 형상을 관찰 할 수 있다 [12].

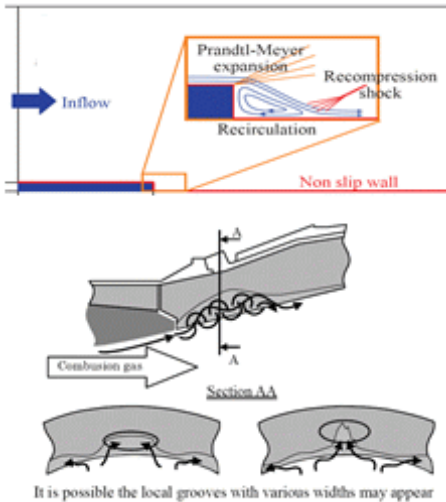


Fig. 21 계단 형상에 의한 과다 삭마

즉, 밀도가 큰 부분과 조립된 밀도가 작은 노즐 부분은 예측된 삭마량에 비하여 조립면 기준으로 특정한 위치에서 최대 2배 이상의 삭마량

을 나타낸다. 이러한 효과가 생성된 곳은 분석 구간에서 제외 하였다.

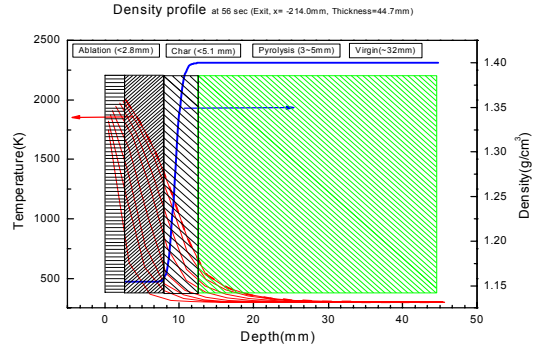


Fig. 22 확대부내열재 삭마 및 온도분포

해석 결과는 삭마두께 $2\pm 1\text{mm}$, 열분해 두께는 $9\pm 1\text{mm}$ 이다. 시험 후 측정 결과는 삭마 두께 $3\sim 4\text{mm}$, 단열재의 열분해 두께는 $10\pm 1\text{mm}$ 이다. 연소 시험 후 나타나는 내열재에 저장된 열에너지에 의한 추가 열분해 효과 (Soaking out)는 매우 적게 나타난 것으로 추측된다.

4. 결 론

열분해 및 삭마 모델을 활용하여 노즐 내열부품의 2차원 슛 및 삭마 해석을 상용해석 코드의 유한요소 처리 기법(Remeshing-Rezoning)을 활용하여 수행하였다. 기존에 제안된 이론을 바탕으로 얻어진 결과는 실험 결과와 비교하여 20% 이내의 오차를 보인다.

상용해석 코드를 활용함으로써 해석에 소요되는 시간을 단축 할 수 있으며 재료 특성에 따른 User-Subroutine을 활용한 다양한 이론식을 적용 할 수 있다.

향후, 3차원 열구조 통합 해석을 위한 방안으로 실리콘카바이드계 (C/SiC), 내열성 고무계 (Kevlar,Silica,CNT-EPDM), 내열강 (Tungsten, Rhenium) 에 대한 화학적 삭마이론을 위해서 가스 동력학과 연계된 해석 방안을 필요로 한다.

참 고 문 헌

1. M. E. Boyle and R. F. Cozzens, "The effect of high heating rate on pyrolysis of carbon/phenolic composites," AD-A200320, 1988
2. J.B.Henderson and M. R. Tant, "Determination of kinetic parameters for the thermal decomposition of phenolic ablative materials by a multiple heating rate method," Vol. 44, Thermochemica, 1981, pp.253-264
3. Sergey Vyazovkin., "A unified approach to kinetic processing of nonisothermal data", International Journal of Chemical Kinetics, Vol. 28, 1996, pp.95-101
4. 김연철, "로켓노즐용 내열재의 열반응 상수 측정기법 연구", 국방과학연구소, MSDC-421-990446, 1999
5. Boyarintsev, V. I. ; Zvyagin, Yu, V., "The Ablation of Graphite in the Turbulent Flow of a Reacting Gas", 1972
6. MSC.Software Corporation, User Subroutine AND Special Routines, Vol. D, 2008
7. MSC.Software Corporation, Theory AND User Information, Vol. A, 2008
8. Aerotherm, User's Manual Aerotherm Charring Material Thermal Response AND Ablation Program, 1970
9. Aerotherm, User's Manual Aerotherm Chemical Equilibrium(ACE) Computer Program, 1969
10. Bonnie J. McBride & Sanford Gordon, Lewis Research Center, NASA, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions AND Applications(NASA-RP1311), , 1996
11. Bartz, D. R., A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective HeatTransfer Coefficients, Jet Propulsion, vol.27, no. 1, pp. 49 - -51, January 1957.
12. Keiichi ISHIKO and Torn SHIMADA, Implicit LES of Compressible Turbulent Flow over a Backward Facing Step in the nozzle of solid rocket motor, AIAA 2010-923, 2010.