

삭마반응을 고려한 고체 추진기관 노즐 조립체의 열반응 및 구조해석

김연철* · 도영대* · 함희철* · 문순일*

Coupled Analysis of Structure and Surface Ablation in Solid Rocket Nozzle

Yun Chul KIM* · Doh Young Dae* · Hahm Hee Cheol* · Moon Soon IL*

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 thermo-structural 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.

초 록

고체추진기관의 연소 환경에서 노즐 조립체의 온도, 삭마두께를 고려한 2차원 축대칭 열구조 해석을 하였다. 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

내열 복합재료의 열분해 반응 기구는 고체, 액체 및 기체상에서 이루어지는 복잡한 반응이기

때문에 실제 상황을 모사하기 위해서는 실험 방법의 선택뿐만 아니라 열분해 및 삭마 반응을 정확히 이해해야 한다. 열분해를 특성짓는 반응 속도 상수를 찾기 위한 이론 및 실험식은 대부분이 Arrhenius 식에 근거한 변형된 식을 사용한다. 또한, 탄소계 재료의 표면 삭마 반응은 추

* 국방과학연구소 1본부 6부

† 교신저자, E-mail: etoile3000@gmail.com

진제 연소가스에 함유된 H₂O 와 CO₂ 에 의한 탄소의 산화반응으로 대표된다고 가정한다. Zvyagins 이론식을 사용하였다.

본 연구 결과는 열분해에 의한 밀도 변화 및 삭마 두께를 표현하기 위하여 FEM 모델 격자의 Remeshing 및 Rezoning 기법이 가능한 범용 해석 코드인 MSC-Marc-ATAS 를 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 일어난다. 온도가 600K 이상이 되면 열분해 반응은 재료 내부의 압력증가 및 열전도도 감소를 일으키는 분해가스를 발생 시키며 내열재 표면에 결함을 일으키는 원인이 되기도 한다. 분해가스는 외부에 숯 층이 형성되면, 숯 층의 높은 온도 때문에 탄소 증착이 이루어지며 숯 층은 열전도도와 밀도가 증가하게 된다. Glass계열 복합재료인 경우에는 1000K 부근부터 액체상태의 SiO₂는 탄화가스 (CO, CO₂)등과 반응을 하여 유입되는 열에너지를 흡수한다. 이 반응은 전체 화학반응에 의한 열에너지 흡수 중에서 약 70%이상을 차지하게 된다. 탄소성 복합재료는 산소 성분 화합물의 확산에 의한 화학적 삭마 반응이 반응 기구를 결정한다.

2.2 내부 열반응 모델

복합재료는 섬유, 수지 및 소량의 첨가제로 이루어져 있다. 내부 열반응은 부피가 일정하다고 가정한 경우, 재료의 밀도 감소는 수지 및 섬유에서 발생하는 분해가스 생성에 기인하는 기공의 증가 때문이며 열분해가 끝난 복합재료의 밀

도 값은 열분해 반응 후 형성된 숯 과 섬유의 부피 함유율에 따라서 결정 된다.

열분해에 의한 밀도 감소를 표현하는 식은 Arrhenius 식에 근거하여 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -\frac{J_0}{\rho_b} \Gamma (\rho_m - \rho_m^\infty) \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (1)$$

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

$$\frac{\rho_m}{\rho_m^0} = 1 - \Gamma + \Gamma \exp\left(-\frac{J_0}{\rho_b} \Gamma \int_0^t \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) d\tau\right) \quad (2)$$

3. 실험 및 FEM 해석

3.1 열분해 특성 상수 결정

TGA(열중량분석기) 실험에 사용된 재료는 페놀릭 수지를 사용한 복합재료이며 열분해 특성은 Table 1에 보이는 바와 같다.

Table 1. Characteristic of Carbon/Phenolic

밀도	섬유 분율	수지		반응속도 상수	
		분율	기화열 ()	활성화 에너지 (E _A /R)	반응 계수(J ₀)
g/cm ³	%	%	%	K	kg/m ³ s
1.35	65	35	34	9.1×10 ³	3.3×10 ⁵

3.2 탄소계 표면의 산화 반응

고체 로켓의 연소가스에 의해 산화되는 탄소계 재료는 H₂O 와 CO₂에 의한 확산 반응에 의하여 이루어지며 산화 온도는 결정구조에 따라서 다르다. 고체 추진기관을 이용한 연소시험을 통하여 그라파이트 및 탄소/탄소 복합재료의 삭마반응에 대한 연구가 이루어졌으며 실험 및 분석을 통해 Eq. 3와 같은 삭마 질량 유동율에 관한 대수식이 제안되었다.

$$\dot{m}_w = \frac{h}{C_p} \sqrt{\frac{\left(\frac{M_c}{M} \Omega + 1\right)^2 + 4B_m \Omega - \left(\frac{M_c}{M} \Omega + 1\right)}{2\Omega}} \quad (3)$$

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

- 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

유한 해석 절차 및 사용된 모델의 검증을 위하여 다음과 같은 절차를 따랐다 (Fig. 1).

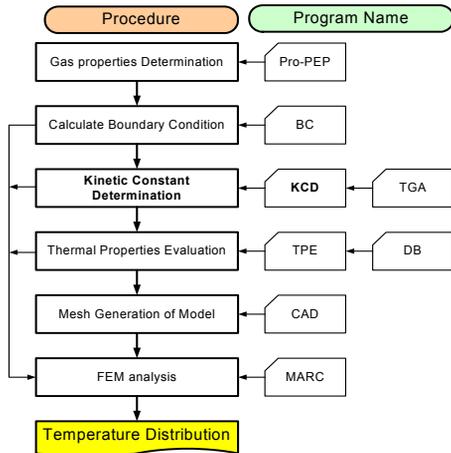


Fig. 1 해석 절차

고체 추진제의 조성을 기준으로 연소관 압력 및 온도 에서 연소가스의 열역학적 특성치를 얻는데 사용되는 CEA 결과를 활용하였으며 대류 열전달계수는 Bartz 식을 근간으로 축소형 시험 모터 에서 얻어진 결과를 수정하여 사용하였다.

해석에 사용된 요소는 축대칭 열해석용 QUAD-4 (40, Full Integration) 이며 모델의 절점 수는 6,974 개, 요소 수는 6,730 개다 (Fig. 2).

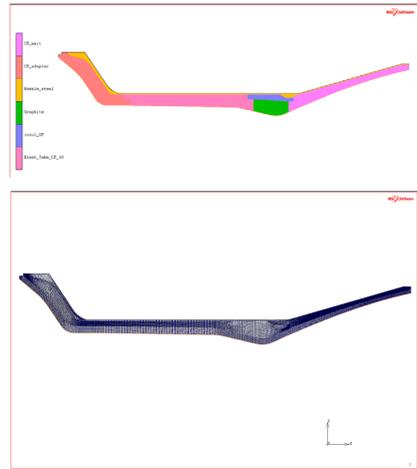


Fig. 2 노즐 부품 및 Mesh 형상

숏 및 삭마 현상을 2차원으로 표현하기 위한 유한요소 의 형상 처리기법은 상용해석 코드인 MSC-Marc 에서 제안하고 있는 Stretch 기법을 사용하였다.

3.4 해석 및 실험 결과 분석

삭마 현상을 고려한 내열부품의 과도 열전달 결과와 삭마 모양은 Fig. 3 과 같다.

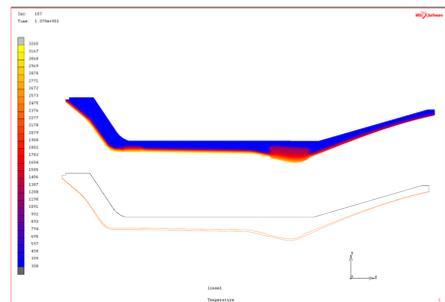


Fig. 3 내부 온도 및 삭마 현상

노즐 조립체 열반응 해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 내열부품을 축 방향으로 절개하여 삭마 및 숏 두께를 해석 값과 비교하였다. 알루미나 입자에 의한 기계적 삭마 와 연소 후 Soaking out에 의한 추가 열분해를 고려하지 않은 경우에 20% 이내에서 연소 시험 후 측정 된 실험치와 일치 하였다 (Fig. 4)

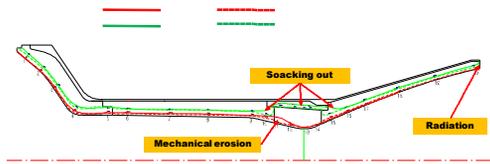


Fig. 4 해석/시험 결과 비교

노즐 구조해석을 위해 노즐 열해석을 수행하는 동시에 구조해석을 행하는 Coupled 해석을 하였다. Marc- ATAS는 삭마가 일어날 때 삭마층을 Rezoning하여 mesh를 Remeshing한다. 이때의 과정이 열구조에 미치는 영향을 알기 위해 Coupled 해석을 수행하였다. 여기서 열응력 해석 결과는 삭마가 가장 많이 되는 노즐 목에 대해서만 언급하였다. 본연구의 노즐목에서 사용된 재료는 Graphite 이므로 이 부분에서 열에 의한 강도의 변화가 가장 심하기 때문이다. 열구조해석시 온도 변화에 따른 기계적 물성은 온도변화에 대한 탄성을 변화 및 온도 변화에 따른 열팽창계수 변화를 사용하였다. 해석시 노즐목, 노즐 유입부 및 노즐 팽창부, 노즐 구조체들은 서로 contact 처리를 하였고 노즐목에서는 접촉제가 삽입되는 부위는 Gap 처리를 하여 해석을 수행하였다. Fig. 5 는 노즐목에서 연소 후 11초때의 삭마를 고려할 때와 고려하지 않았을 때의 형상을 나타낸다. 그리고 Fig. 6 는 연소 후 11초에 Graphite에 작용되는 Hoop 방향의 응력을 나타낸 것이다. 연소 후 11초 때 노즐목의 최대 온도는 2963K이며 이때의 최대 응력은 Hoop 방향에서 발생되며 최대응력은 - 162Mpa 즉 압축으로 162 Mpa가 작용된다. 삭마를 고려하지 않았을 때는 연소후 11초때 노즐목의 최대 온도는 3029K 이며 Hoop 방향의 최대 응력은 -167Mpa로 계산되었다. 응력은 관점에서는 삭마를 고려할 경우와 삭마를 고려하지 않는 경우의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

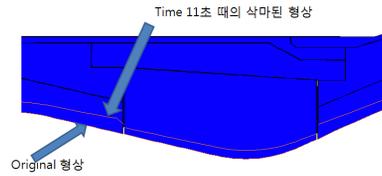


Fig. 5 노즐목에서의 삭마전과 삭마후의 형상

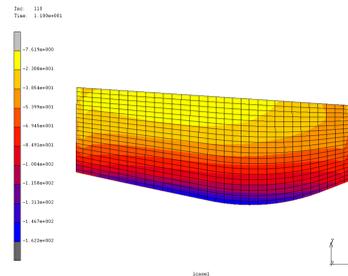


Fig. 6 연소 후 11초 때의 Hoop 방향 응력

4. 결 론

상용해석 코드인 MSC-Marc-ATAS 와 개발된 열분해 및 삭마 모델을 활용하여 노즐 내열부품의 2차원 슛 및 삭마를 고려한 열구조 해석을 수행하였다. 입자에 의한 삭마 효과를 제외하였을 경우 해석 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 적용할 수 있다.

향후, 실리콘카바이드계 (C/SiC), 내열성 고무계 (Kevlar,Silica,CNT-EPDM), 비삭마 내열강 (Tungsten, Rhenium) 에 대한 화학적 삭마이론을 위해서 가스 동력학과 연계된 해석 방안을 필요로 한다.

참 고 문 헌

1. Ted B. Wertheimer, Fabrice Laturelle, "Thermal Stress Analysis of TPS using Marc", TFAWS 2008 Program, 2008

2. 김연철, “로켓노즐용 내열재의 열반응 상수 측정기법 연구”, 국방과학연구소, MSDC-421-990446, 1999
3. Boyarintsev, V. I. ; Zvyagin, Yu, V., “The Ablation of Graphite in the Turbulent Flow of a Reacting Gas”, 1972
4. Fabrice Laturelle, Ted B. Wertheimer, “Thermal Decomposition Analysis of Rocket Motors and Other Thermal Protection Systems using MSC-Marc-ATAS”, Virtual Product Development Conference (Oct. 13-15, 2003)