

로켓노즐의 방화벽 설계를 위한 열용발의 연성 유한요소해석



이 선 표*

1. 서 론

열경화성 고분자 복합재는 항공산업등 첨단 공학분야에서 구조물을 고온으로부터 보호하기 위해 많이 사용되는 재료이다. 특히 이는 고체추진 로켓이나 액체추진로켓에서 금속 구조물을 연소가스의 고온으로부터 보호하기 위한 방화벽(또는 내화벽, thermal shield)으로 사용된다.

열경화성 고분자재료가 높은 온도(보통 500K 이상)에 노출되면 열분해(pyrolysis)가 일어난다. 열분해의 결과 여러가지 유독성 기체가 발생하며, 재료는 다공성의 탄화층(porous char)으로 남는다. 이러한 과정 중에서 발생하는 기체들은 다공성 탄화층을 통해 밖으로 배출된다. 이러한 현상을 열용발(thermal ablation)이라 부른다.

열용발성 재료를 로켓노즐의 내화벽으로 사용할 때의 장점은 첫째, 재료 자체의 열전도도가 매우 낮다는 것이며 둘째, 열용발의 결과 발생하는 기체의 대류열전달로 인한 냉각효과가 크다는

것이다. 그러나 용발과정 중에 만약에 재료 내에서 기체가 발생하는 속도가 빠져나오는 속도보다 크면, 기체는 재료내의 기공에 누적되어 아주 큰 압력을 발생시키며 이는 재료의 물성치의 취화와 더불어 파괴의 원인이 될 수 있다.

이러한 응용에서 흔히 일어나는 파괴의 형태는 poketing, ply-lift, wedge-out으로 알려져 있다. Poketing은 탄화층의 깊이방향으로 생기는 원형의 파괴이고, ply-lift는 복합재의 서로 접한 층 사이가 분리되는 파손형태며, wedge-out은 구조물의 결합부분에서 복합재 층간의 접촉부가 분리되는 현상이다. 이들 중 poketing은 재료 자체의 성질에 의한 것으로 생각되어지며, plylift와 wedge-out은 구조물내의 응력에 의한 것으로 알려져 있다. 이러한 파괴형태는 누적되는 기체로 인한 기공 내부의 압력 뿐만이 아니라 복합재의 경우 층간의 접촉, 구조물인 경우에는 연결부의 형태등, 구조의 기하학적인 조건과도 밀접한 관계가 있다. 이러한 파손형태들은 온전한 방화작

* 정회원·경기대학교 전자·기계공학부, 조교수

용을 방해하기 때문에 구조물의 효과적인 운용을 위해서는 반드시 제어되어야 한다.

지금까지 이러한 파괴현상에 대해서 기초적인 실험연구가 행해졌으나 아직 파괴의 원인은 정확히 규명되지 않고 있다. 실제로 고온에서 이러한 재료 내부에서는 열적, 화학적, 기계적 과정들이 서로 연성되어 복잡하게 일어나기 때문에 재료 내부에서 일어나는 현상을 정확히 서술하기는 쉽지 않으며, 어떤 방향으로 진행될지 예측하기 힘들다. 이러한 현상에 대한 관찰은 [1]에 자세히 서술되어 있다. 고분자 복합재료에서 일어나는 파괴형태들의 원인을 규명하기 위해서는 위의 각각의 과정들에 대해서 기초적인 성질을 이해하고 이들이 어떻게 상호 작용하는가에 대한 연구가 절실히 요구된다. 더 나아가 이러한 파손원인이 밝혀지면 로켓노즐의 내화벽 설계에 직접적으로 응용할 수 있다.

최근 전 세계적으로 로켓 노즐의 내화벽으로 용발성 복합재, 특히 carbon-phenolic,이 많이 쓰이고 있는 추세이며, 특히 미항공우주국(NASA)에서도 새로운 재료의 개발, 거동예측 및 파손예측을 위한 이론과 프로그램 개발 등에 많은 노력을 하고 있다. 본 기사에서는 필자가 1992년부터 1994년까지 NASA의 SPIP(Solid Propulsion Integrity Program)에 제한적으로 참여하면서 개발한 이론과 유한요소 해석 프로그램, 그리고 이를 이용한 내화벽 해석의 예를 소개한다.

2. 이 론

용발현상을 해석하기 위해서 McManus²⁾, Kuhlmann³⁾, Crose⁴⁾, Kung⁵⁾ 등이 여러 관점에서 이론을 개발하였다. 이들의 이론은 지배방정식이 에너지 보존법칙과 질량보존 법칙이다. 에너지 보존 법칙은 열전달이 내화벽의 깊이 방향으로 진행되는 데에 따른 에너지의 평형을, 질량보존 법칙은 내부에서 발생한 기체가 다공 탄소층(porous char)을 따라 용발하는 현상에서 질량의 평형을 나타낸다. 이 이론들로 로켓의 점화 후 내화벽의 용발깊이 등의 예측이 가능하다. 그

러나 이러한 이론들은 파괴와 가장 밀접하게 관련된 재료의 응력이 고려되지 않았다. 본 기사에서는 열의 흐름, 기체의 확산, 뿐만 아니라 재료의 변형을 지배하는 연성의 수학적 모델을 간단히 소개한다. 재료의 변형, 즉 응력을 고려하기 위해서는 다공 탄성체의 구성방정식 (Biot⁶⁾, Carroll⁷⁾, Katsube⁸⁾)과 운동량의 평형을 기존의 이론과 연성시켜야 한다. 내화벽은 복합재로 만들어지기 때문에 이 이론에서는 이방성 다공 탄성체에 대한 Carroll⁷⁾의 구성 방정식을 이용한다. 또한 내화벽은 축대칭의 형태로 제작되므로 모든 지배방정식은 축대칭 좌표계를 기준으로 유도된다.

운동방정식(운동량 평형)

$$\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r}(\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}) = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r}\tau_{rz} = 0 \quad (1b)$$

이 식들은 각각 r -방향 및 z -방향의 운동량 평형이며, θ -방향에 대해서는 자동으로 만족한다.

기체 확산 방정식(질량 보존)

$$\frac{\partial m_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v}_g) = \frac{\partial m_g^{dec}}{\partial t} \quad (2)$$

여기에서 m_g 는 다공 탄성체의 단위체적당 총 기체질량의 증가량, ρ_g 는 기공 안의 기체 밀도, 는 평균 기체속도 벡터이고 \mathbf{v}_g 는 열분해의 결과 발생하는 기체의 질량이다.

에너지 보존식

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{q}_{cond} + \mathbf{q}_{conv}) + \frac{\partial E^{dec}}{\partial t} \quad (3)$$

여기에서 우변의 두 번째 항인 에너지 밀도는 용발성 재료가 열분해를 일으키는데 필요한 에너지의 시간변화율이다.

기체 확산방정식이나 에너지 보존식의 기체의 발생율 ($\partial m_g^{doc} / \partial t$)이나 열분해에 필요한 소요에너지의 변화율($\partial E^{doc} / \partial t$)은 용발의 속도, 복합재의 구성, 열분해 반응의 활성화 에너지 등과 밀접한 관계가 있으며, 실험적인 데이터를 근거로 계산된다.

여기서는 지배방정식의 기본형태만을 제시하며 자세한 유도과정은 필자의 논문[12]에 기술되어 있다.

3. 유한요소 수식화

앞의 (1a), (1b), (2), (3)식을 Bubnov- Galerkin의 방법으로 유한요소 수식화를 하면 다음과 같은 행렬방정식이 얻어진다.

$$[C] \frac{d}{dt} \{a\} + [K] \{a\} = \{F\} \quad (4)$$

여기에서 $\{a\}$ 는 절점자유도를 포함하는 벡터이며, 절점자유도는 r -방향의 변위, z -방향의 변위, 기공내의 압력, 그리고 온도이다.

식(4)은 절점자유도의 시간변화율 포함하므로 방정식의 형태로 풀기 위해서는 시간에 대한 적분이 필요하다. 오일러의 방법을 사용하면 최종적으로 다음과 같은 선형대수 방정식이 얻어진다.

$$[K_{eff}]^n \{a\}^{n+1} = \{F_{eff}\}^n \quad (5)$$

$[K_{eff}]^n$ 및 $\{F_{eff}\}^n$ 는 필자의 논문[9]에 자세히 기술되어 있다.

4. 구조해석 및 파손예측

일반적으로 카본-페놀릭의 방화벽은 복합재 플라이를 테잎처럼 감아 링의 형태로 만들어지며 링들이 연속적으로 연결되어 방화벽 구조물로 완성된다. 로켓이 점화되면 방화벽 구조물은 연소가스로부터 전달되는 열에 의해 매우 빠르게 가열되며 재료의 취화(degradation)가 일어나

탄소층(char layer)을 형성하게 된다.

각 링들은 그 부분의 특성에 따라 다른 플라이 각도를 가지게 되는데, 축대칭 좌표계에서는 플라이의 각도에 대한 재료상수의 변환에 대해서는 논문[12]에 자세히 기술되어 있다.

본 기사에서는 카울(cowl)의 일부를 점화조건에 따라 해석한 예를 소개한다. plylift는 플라이 각도가 0°인 카울링에서 발생한다. plylift의 위치는 연소가스에 노출되는 표면에서부터 약 1cm 지점이다. 이 위치의 파손현상을 예측하기 위해서 Fig. 1과 같은 유한요소 모델을 사용하였다. 연소가스의 온도는 3500K이고 대류열전달 계수는 500W/km², 연소가스의 압력은 6.89MPa이다.

Fig. 2는 시간 경과에 따른 기공압력과 플라이 두께방향의 응력의 분포를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 두께방향 응력은 온도분포와 밀접한 관계가 있다.

Fig. 3은 시간경과에 따른 온도와 플라이 면방향의 응력의 분포를 보여준다. Fig. 2와 Fig. 3을 비교해 보면 두께 방향의 응력이 면 방향의 응력보다 깊이 방향으로 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다.

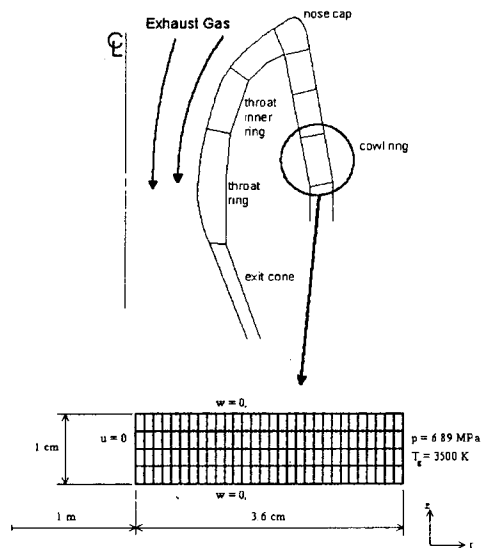


Fig. 1 Schematic illustration of a rocket nozzle structure and finite element model for cowl

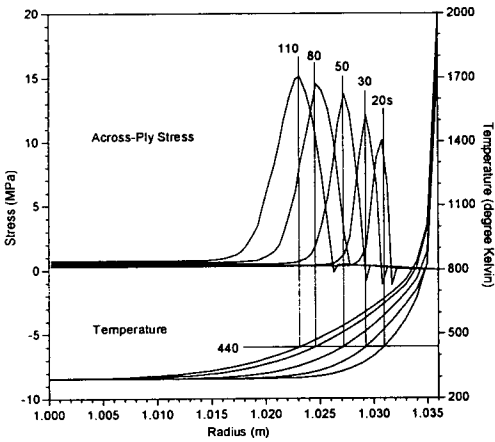


Fig. 2 Variation of temperature and across-ply stress in the cowl zone

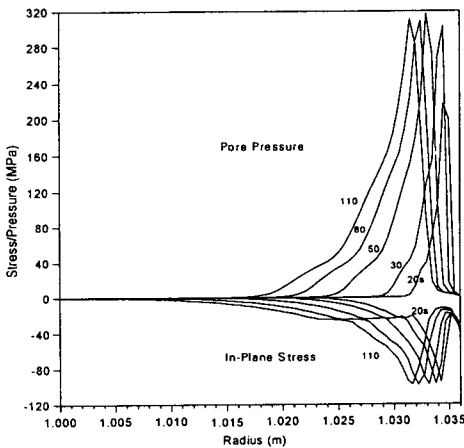


Fig. 3 Variation of pressure and in-plane stress in the cowl zone

Fig. 4는 점화 후 50초와 80초에서 두께 방향의 응력과 두께 방향의 인장강도를 비교한 것이다. 점화 후 80초에 $r=1.026m$ 인 지점에서 두께 방향 응력과 두께방향 인장강도가 일치되는 것을 볼 수 있다.

해석의 결과 plylift는 두께방향 응력에 의한 플라이 사이의 파손(접착이 떨어짐)과 뒤따라 오는 플라이 면 방향의 응력(복합재의 파이버 방향과 일치함)에 의한 국부적인 파이버의 좌굴로

생각할 수 있다. 실제로 유한요소 모델에 플라이 사이의 파손을 모델링하면 Fig. 5와 같은 플라이의 좌굴모드를 구할 수 있다.

5. 결 언

이상과 같이 로켓엔진의 방화벽 설계를 위한 물리적 현상, 이론 및 실제 로켓 노즐의 간단한 해석 예를 소개하였다. 고분자 내화벽 구조를 고체 또는 액체 추진 로켓 엔진에 사용하는 것이 세계적인 추세이며, 재료의 물성치와 같은 중요한 자료들은 보통 공개되지 않는다. 최근 우리나라에서도 인공위성을 발사하기 위한 노력을 하고 있으며, 자체적인 발사체의 개발을 위해서는 이와같은 분야의 연구가 시급하다.

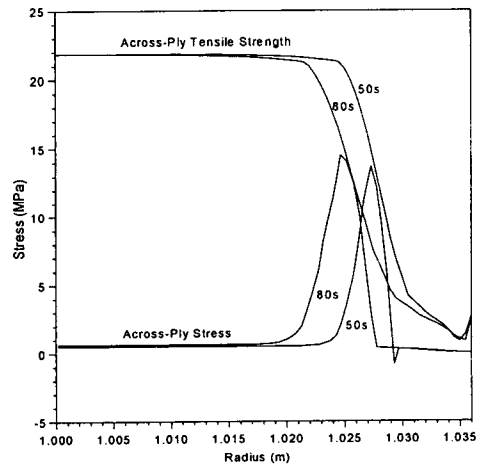


Fig. 4 Comparison of across-ply stress and across-ply tensile strength in the cowl zone at 50 and 80 seconds.

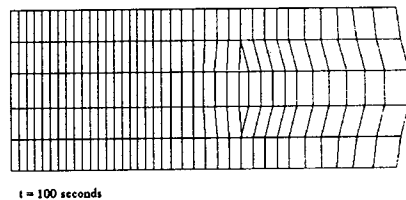


Fig. 5 An opening mode in the cowl zone

참 고 문 헌

1. Brown, S. C. and Clemons, K. T., "The Pyrolysis of an Organic Matrix Composites", ASME Summer Mechanics and Material Meeting, 1992.
2. McManus, H. L. N., "High Temperature Thermomechanical Behavior of Carbon-Phenolic and Carbon-Carbon Composites", Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute Technology, 1990.
3. Kullmann, T. L., "Thermo-Chemical-Structural Analysis of Carbon-Phenolic Composites with pore pressure and Pyrolysis Effects", Ph.D. Dissertation, University of California at Davis, 1991.
4. Crose, J. G., "Verification of Thermo-Chemical-Structural Analysis Method by Duplication of Restrained Thermal Growth Experimental results", presented at Solid Propulsion Integrity Program Task 3.1 Workshop, Magna, Utah, 1991.
5. Kung, H. C., "A Mathematical Model of Wood Pyrolysis", *Combustion and Flame*, Vol. 18, pp.185~195, 1972.
6. Biot, M. A. and Willis, D. G., "The Elastocoefficients of the Theory of Consolidation", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, pp. 155~164, 1957.
7. Carroll, M. M., "An Effective Stress Law for Anisotropic Elastic Deformation," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B13, 1979.
8. Katsube, N and Carroll, M.M., "The Modified Mixture Theory for Fluid-Filled Porous Materials : Theory", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, pp.35~40, 1987.
9. Lee, S, "Finite Element Analysis of Poroelastic Composites Undergoing Thermal and Gas Diffusion", *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 10, No. 4, 1996. 