



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(6), 414-421(2019)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.6.414>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 재진입 환경의 탄소/페놀릭 복합재 구조물의 열기계적 연계 해석

손명진<sup>1</sup>, 신의섭<sup>2</sup>

### Thermomechanical Coupled Analysis of Carbon/phenolic Composite Structures in Reentry Environments

Myeong Jin Son<sup>1</sup> and Eui Sup Shin<sup>2</sup>

Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University

#### ABSTRACT

In this paper, thermomechanical coupled analysis of carbon/phenolic composites structures in reentry environment was performed. The interface of thermomechanical coupled analysis was constructed using commercial software. The governing equations of temperature and displacement fields were considered to simulate change of physical behavior due to pyrolysis and ablation effects. The results of thermomechanical coupled analysis were compared with the results of ablation test using arc-heated wind tunnel. Also, the structural stability of reentry capsule was analyzed using the analysis interface. The excellent ablation characteristics and thermal protection effects of the carbon/phenolic composites were confirmed and the constructed analysis interface can be effectively used to perform thermal protection system design.

#### 초 록

본 논문에서는 재진입 환경에 노출된 탄소/페놀릭 복합재 구조물에 대한 열기계적 연계 해석을 수행하였다. 열기계적 연계를 위한 해석 인터페이스를 상용 소프트웨어를 이용하여 구축하였다. 열 분해 및 삭마에 따른 물리적 거동 변화를 모사하기 위해 온도장과 변위장의 주요 지배방정식을 고려하였다. 구축한 해석 인터페이스를 이용하여 탄소/페놀릭 복합재 구조물에 대한 열기계적 연계 해석을 수행하였으며 이를 아크 가열 풍동을 이용한 삭마 실험 결과와 비교하였다. 또한 탄소/페놀릭 복합재를 적용한 재진입 캡슐에 대한 열기계적 연계 해석을 수행하였다. 이를 통해 탄소/페놀릭 복합재의 삭마 특성 및 열 보호 효과와 구축한 해석 인터페이스의 활용성을 확인하였다.

**Key Words :** Thermal Protection System(열 보호 시스템), Ablation(삭마), Thermomechanical Coupled Analysis(열기계적 연계 해석), Carbon/phenolic Composites(탄소/페놀릭 복합재)

#### 1. 서 론

대기권을 재진입하는 우주비행체 및 대륙간탄도미

사일은 극심한 공력 가열 환경(aerodynamic heating environment)에 노출된다. 비행체 선두에 형성된 충격파와 경계층(boundary layer) 사이의 상호 작용으

† Received : March 26, 2019 Revised : May 24, 2019 Accepted : May 27, 2019

<sup>1</sup> Graduate Student, <sup>2</sup> Professor

<sup>2</sup> Corresponding author, E-mail : [esshin@jbnu.ac.kr](mailto:esshin@jbnu.ac.kr)

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

로 인해 비행체가 갖는 운동에너지는 열에너지로 전환되며 주변 공기 및 비행체의 온도를 급격히 변화시킨다. 주변 공기의 온도 변화로 인해 발생하는 열에너지는 대류(convection) 및 복사(radiation)를 통해 비행체 표면의 온도를 상승시킨다. 표면의 고온은 내부로 전도(conduction)되어 구성 재료 차원의 열분해로 인한 물성 저하, 불규칙한 응력 구배 현상 등을 야기하기 때문에 구조물의 파손을 유발할 수 있다. 따라서 공력 가열 환경에서 비행체의 구조적 신뢰성 향상 및 효과적인 임무 달성을 위해 구조물의 내부로 전달되는 열에너지를 효과적으로 차단할 수 있는 열 보호 시스템(thermal protection system, TPS)의 적용이 요구된다[1,2].

탄화(charring) 재료는 상변화 및 질량 손실을 통해 높은 열 부하를 견딜 수 있어 열 보호 시스템 설계에 폭넓게 적용되는 재료이다[3,4]. 탄화 재료는 외부 열에너지 유입으로 인해 내부에서 열화학적 분해를 겪게 되며 숯(char) 층과 열분해 가스(pyrolysis gas)를 형성한다. 새롭게 형성된 열분해 가스는 외부 대류 효과를 차단시킨다. 또한, 물리적 특성이 저하된 숯 층은 재료의 일부가 두께 방향으로 떨어져 나가는 삭마(ablation) 현상을 겪게 되어 열에너지의 추가적인 소모가 발생한다. 이러한 열화학적 분해 및 삭마 문제를 해석하여 열 보호 시스템 설계에 반영하는 것은 중요하다.

탄화 재료에 대한 열화학적 분해 및 삭마를 고려한 1차원 열 응답 해석(thermal response analysis)에 대한 연구가 수행되었다. 삭마에 의한 열전달 및 질량 전달을 고려하여 CMA(charring material thermal response and ablation program), FIAT(fully implicit ablation and thermal analysis program) 등 유한차분법 기반의 해석 코드들이 개발되었다[5,6]. 이러한 해석 코드들은 단일 재료에 대한 1차원 문제의 해석에는 적합하지만 복잡한 기하학적 형상 및 다양한 재료를 사용하는 문제에 있어 적절하지 않다. 또한 구조적인 관점에서 열분해 및 삭마에 의한 열에너지 소모 과정을 정확하게 설계에 반영하기 위해서는 변위장과 온도장의 주요 지배 방정식과 재료의 구성 방정식 등의 연계가 필요하다[7-9].

본 논문에서는 재진입 환경에 노출된 탄소/페놀릭 복합재 구조물의 삭마 특성 및 열응력 분석을 위해 열기계적 연계 해석을 수행하였다. 내부 열분해로 인한 물리적 거동 변화를 모사하기 위해 시차제법(staggered method)을 적용한 완전 연계 인터페이스를 구성하였다. 구축한 해석 인터페이스를 이용하여 탄소/페놀릭 복합재 구조물의 열기계적 연계 해석을 수행하였으며 이를 아크 가열 풍동을 이용한 삭마 실험 결과와 비교하였다. 또한, 재진입 캡슐에 대한 기초 형상 설계를 통해 구축한 해석 인터페이스의 활용성을 확인하였다.

## II. 열기계적 수치 해석 기법

### 2.1 열분해 지배방정식 및 경계 조건

고온 환경에 노출된 탄소/페놀릭 복합재는 내부 열분해로 인하여 물리적 거동 변화를 겪게 되며, 이를 모사하기 위해 열기계적으로 연계된 온도장과 변위장의 주요 지배 방정식을 고려해야 한다.

재료 내부의 에너지 보존 방정식은 열분해 가스의 반응열과 외부로부터의 전도열을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\dot{\mathbf{m}}_g^* h_g) \quad (1)$$

여기서 좌변은 내부 에너지 변화율, 우변의 각 항은 열전도, 열분해 가스의 반응열을 의미한다.

열화학적 분해로 인해 재료의 밀도 변화가 발생하며, 이는 아레니우스 방정식(Arrhenius's equation)에 따라 다음과 같이 미분 방정식 형태로 표현된다.

$$\frac{d\rho}{dt} = -A\rho_v^{1-N}(\rho - \rho_c)^N e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

여기서  $A$ ,  $E_a$ ,  $N$ 은 각자 분해 빈도 인자, 활성화 에너지, 반응 차수를 나타내며 열 중량 분석(thermogravimetric analysis, TGA) 시험을 통한 중량 감소 곡선으로부터 결정된다.

열화학적 분해에 따라 재료는 상변화로 인해 열분해 가스의 형성과 재료의 밀도 저하가 발생한다. 미소 검사 체적의 부피가 일정하다고 가정한 경우, 열분해 가스의 형성율과 재료의 밀도 저하율은 비례하며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\dot{\mathbf{m}}_g^*) \quad (3)$$

열분해 과정에서 형성된 열분해 가스의 질량 유량은 다시 방정식(Darcy's equation)에 의해 다음과 같이 표현된다. 여기서  $K_p$ 는 가스 확산 계수이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (K_p \nabla P) \quad (4)$$

열분해 과정에서 발생하는 기공 압력 및 온도 증가에 따른 재료의 열팽창을 고려한 복합재의 구성 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\epsilon_{kl} - \alpha_{kl}T) - \pi_{ij}P \quad (5)$$

여기서  $\alpha$ 는 열팽창 계수,  $\pi$ 는 기공 탄성 인자이다.

고온 벽면과 열 경계층 사이의 에너지 평형은 열 경계층 내부와 표면 사이의 검사 체적에서 교환되는 열에너지를 고려하며 다음과 같이 표현된다.

$$q_{\text{cond}} = q + \sigma \varepsilon T_w^4 - \rho_c h_{\text{abl}} \dot{s}_c \quad (6)$$

여기서 좌변은 전도열, 우변은 각각 외부 열 유속, 재복사열, 화학적 삭마로 인한 산화열이다.

### 2.2 열-구조 해석 인터페이스

본 논문에서는 탄소/페놀릭 복합재 구조물의 삭마 특성 및 열응력 해석을 위해 상용 유한요소 프로그램 Samcef V15를 사용하였다. 열기계적 연계에 따른 응력 산출을 위해 시차제법을 적용한 열-구조 해석 인터페이스를 Fig. 1과 같이 구축하였다. Amaryllis 모듈을 이용하여 열분해 및 삭마 해석, Mecano 모듈을 이용하여 비선형 구조 해석이 각각 독립적으로 수행되며 각 해석 결과는 Supervisor 모듈에서 교환된다. 열기계적 연계에 따른 응력 및 변형도 산출을 위해 온도, 압력, 밀도, 절점의 위치를 주요 교환 데이터로 설정하였다.

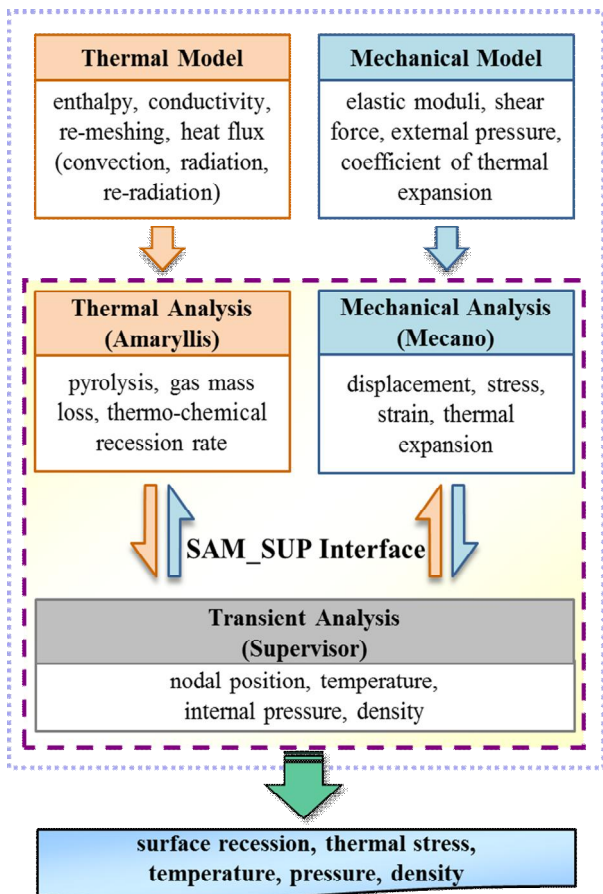


Fig. 1. Flow chart of thermomechanical coupled analysis using Samcef

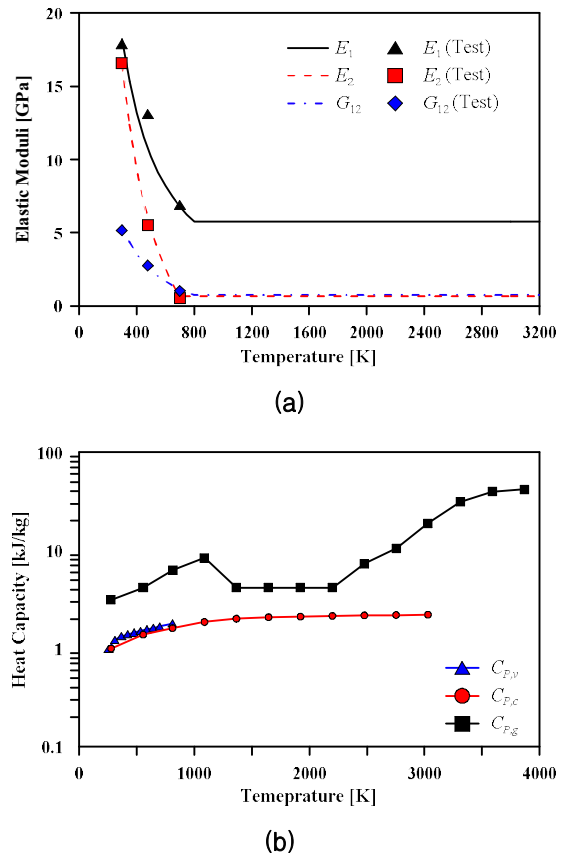


Fig. 2. Carbon/phenolic composites properties: (a) Elastic moduli, and (b) thermal conductivity

Table 1. Carbon/phenolic material properties

Property	Value	Unit
Virgin Density, $\rho_v$	1,650	kg/m <sup>3</sup>
Char Density, $\rho_c$	1,400	kg/m <sup>3</sup>
Frequency Factor, $A$	1st	$2.61 \times 10^5$ 1/s
	2nd	$1.08 \times 10^{10}$ 1/s
Order of Reaction, $n$	1st	3
	2nd	3
Activation Energy, $E_a$	1st	71.134 kJ/mol
	2nd	139.938 kJ/mol
Virgin Porosity, $\phi_v$	0.001	-
Virgin Permeability, $\beta_v$	$1.52 \times 10^{-11}$	m <sup>2</sup>
Gas Molecular Mass, $M_g$	18.35	kg/mol
Dynamic Viscosity, $\mu_g$	$7.98 \times 10^{-6}$	Pa·s
Heat of Pyrolysis, $H_{pyro}$	$4.65 \times 10^5$	J/kg

### III. 열-구조 연계 전산 모형

#### 3.1 탄소/페놀릭 복합재 물성치

전산 모형 해석을 위한 탄소/페놀릭 복합재의 열기계적 물성치를 Fig. 2와 Table 1에 제시하였다[9,10]. 열분해 및 삭마를 고려한 열기계적 연계 해석을 위해 필요한 초기 재료 및 슿 층에서의 재료 물성은 온도에 따른 비선형을 고려한 고온 환경 모사 시험 결과 데이터를 참조하였다. 열분해 과정 모사를 위한 재료 상수는 TGA 시험으로 측정된 데이터를 이용하였다.

#### 3.2 열-구조 연계 전산 모형

전산 모형은 해석 목적에 따라 형상과 열 유속 분포를 달리하여 두 가지 모형을 개발하였으며 이를 Fig. 3에 제시하였다. 시편의 정체점을 대표하는 깊이 방향(in-depth) 모델은 열 유속 집중에 따른 삭마 열 응답 특성을 분석하고자 좌우 및 하단에 대칭 경계 조건을 적용하였다. 시편 형상을 모사한 형상학적 모델은 열 유속 분포에 따른 침식 형상을 예측하기 위해 개발되었다. 형상학적 모델은 축 대칭요소를 적용하여 대칭축인 좌측 경계에 대해 1 방향, 최하단에 대해 1, 2 방향 변위를 구속하였다. 열 유입 경계 조건은 아크 가열 풍동을 이용한 삭마 실험에서 측정된 열 유속[11]과 화학적 삭마에 의한 산화 반응열, 재복사열을 고려하였다. 열화학적 침식률은 삭마 실험을 촬영한 초고속 카메라 분석 결과를 참조하였다.

#### 3.3 응용 예제: 재진입 캡슐 전산 모형

구축한 열-구조 해석 인터페이스의 활용 범위를 확인하고자 재진입 캡슐 전산 모형을 개발하였으며 이

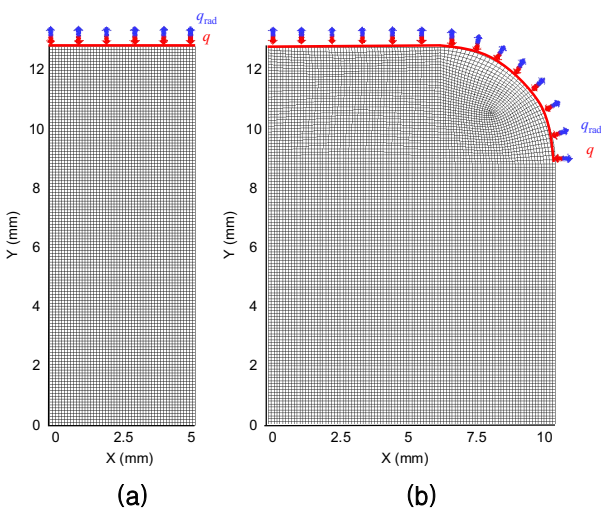


Fig. 3. Thermomechanical coupled model: (a) In-depth model, and (b) geometrical model

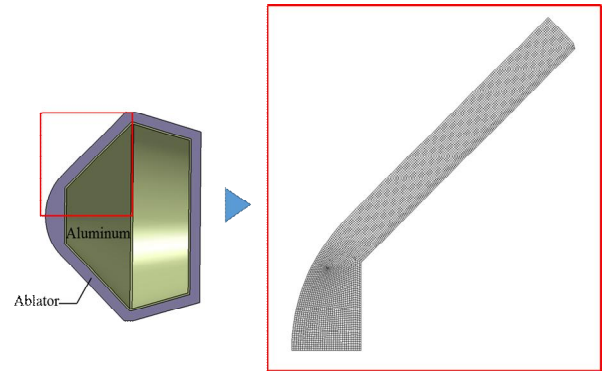


Fig. 4. Application Model: reentry capsule

를 Fig. 4에 제시하였다. 캡슐의 형상 정보는 문헌[8]을 참조하였으며, 열 유속이 집중되는 전면부를 대상으로 모델링 하였다. 탄소/페놀릭 복합재로 이루어진 열 보호 시스템 층과 알루미늄으로 구성된 구조체 층을 구별하였다. 열 유속을 최상단에 균일하게 부여하였으며, 재복사 및 화학적 삭마 효과를 고려하였다. 대칭축인 최하단부의 2 방향 변위와 형상의 우측을 국부 좌표계 기준 2 방향 변위를 구속하였다.

### IV. 결과 및 분석

#### 4.1 실험 환경을 고려한 열-구조 연계 해석

열기계적 연계 해석 및 아크 가열 풍동을 이용한 삭마 실험 결과 비교를 통해 탄소/페놀릭 복합재의 삭마 특성 및 열응력을 확인하였다. 삭마 실험 및 결과 분석은 Fig. 5와 같은 절차에 의해 수행되었다[11,12].

Figure 6은 깊이 방향 모델과 미세 단층 촬영기를 이용해 측정된 시편 높이에 따른 밀도 분포 결과이다. 초기 시편의 높이는 23 mm이며, 표면 침식에 의해 높이는 감소한다. 실험 분석 및 해석 산출 결과는 시편 최상단 밀도의 경우 각각  $1,507 \text{ kg/m}^3$ ,  $1,567 \text{ kg/m}^3$ 이며, 최하단 밀도의 경우  $1,441 \text{ kg/m}^3$ ,  $1,402 \text{ kg/m}^3$ 로 실험 결과와 유사한 경향을 보인다. 반면, 시편의 내부 밀도 분포는 실험 및 해석 결과가 다소 차이를 보였다. 본 연구에서 사용한 재료 물성은 시편의 재료 물성을 고려하여 가정되었다. 밀도 변화는 재료 물성과 연관되어 있는 아래니우스 식에 의해 지배되며 실제 시편의 재료 물성을 적용한다면 해석과 실험값의 차이가 감소할 것으로 추정된다.

Figure 7은 깊이 방향 모델과 초고속 카메라 및 비접촉식 표면 측정기를 통해 측정된 시간에 따른 표면 침식량이다. 초고속 카메라는 시편의 측면을 실시간으로 촬영하며, 영상 분석을 통해 표면 침식량을 산출하였다. 비접촉식 표면 측정기를 통해 삭마 전후 시편의 표면 좌표 데이터 측정하였으며, 데이터 처리

를 통해 표면 침식량을 산출하였다. 해석 모델은 시편 정체점을 모사하였기에 초고속 카메라 데이터의 보정이 이루어졌다. 해석 초반부의 표면 침식량은 열기계적 연계로 인한 열팽창 효과로 인해 상쇄되었다. 실험의 경우 약 10초간 재료의 열팽창 및 현상학적 팽창(intumescence) 효과가 발생한 것을 확인할 수 있다. 해석에 사용한 재료 물성과 현상학적 팽창 효과를 고려하지 않아 실험 값과 해석 값이 차이를 보였다. 45초 이후 측정된 초고속 카메라 및 비접촉식 표면 측정기 분석 결과를 통해 실험이 종료된 이후에도 추가적인 침식이 발생함을 확인할 수 있다. 실험이 종료된 후에도 재료 내부는 일정 시간동안 고온을 유지하기 때문에 추가적인 열분해 및 수축(shrinkage) 효과가 발생한 것으로 추정된다. 전산 모형의 경우 재료의 수축 효과 및 추가 열분해 효과를 고려하지 않았기 때문에 비접촉식 표면 측정기 분석 결과와 차이를 보였다.

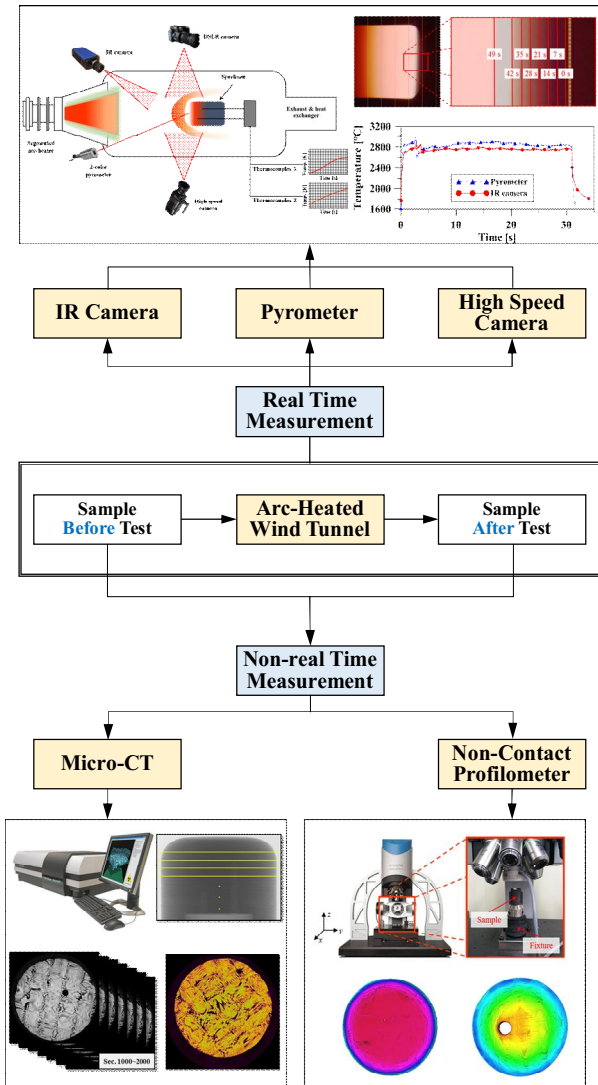


Fig. 5. Ablation test and analysis process

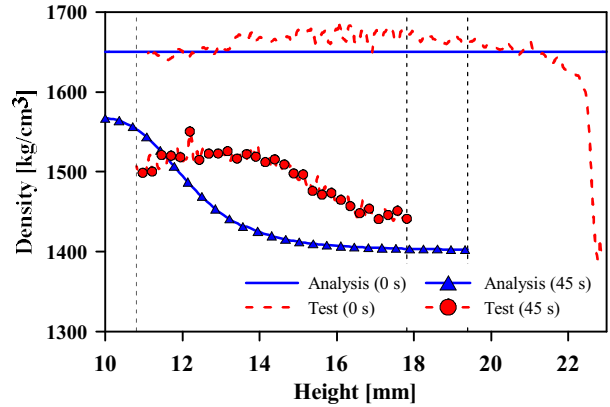


Fig. 6. Density with respect to height

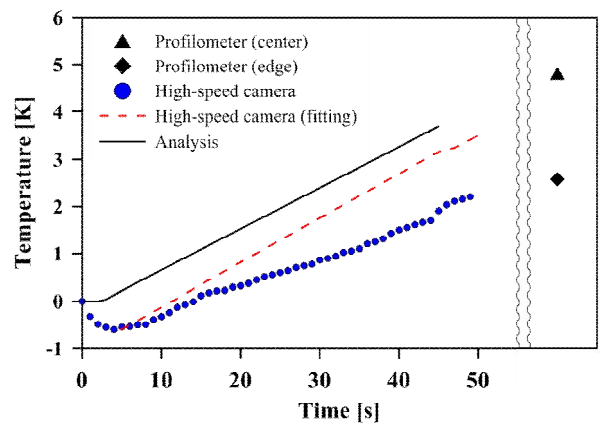


Fig. 7. Surface recession with respect to time

형상학적 모델과 비접촉식 표면 측정기를 통해 표면 침식 형상을 가시화 하여 Fig. 8에 제시하였다. 비접촉식 표면 측정기를 이용하여 측정된 표면 침식 결과는 시편의 측면 방향에서 바라본 침식 형상과 깊이 방향으로 침식 정도를 가시화한 결과를 제시하였다. 해석은 45초간 수행하였으며, 침식 형상이 정성적으로 실험과 유사한 것을 확인하였다. 해석을 통한 침식 형상은 30초, 45초간 실험한 시편의 침식 형상의 중간 지점에 위치하고 있다. 이를 통해 비접촉식 표면 측정기를 이용하여 측정할 수 없는 실험이 종료된 시점의 침식 형상을 전산 모형 해석을 통해 모사할 수 있음을 확인하였다.

Figure 9는 깊이 방향 모델의 30초경 온도 및 von Mises 응력 분포이다. 열 유속이 집중되는 표면온도는 3,000 K로 급격히 상승하며, 12 MPa의 응력 집중이 발생하였다. 최하단에서 7 mm, 9 mm, 11 mm, 13 mm 떨어진 지점을 각각 P1~P4로 지정하였으며, 이 위치에서의 시간에 따른 von Mises 응력을 Fig. 10에 나타내었다. P1, P2 지점은 열 유속이 집중되어 해석 초기부터 급격한 응력 집중이 발생했다. 반면, P3, P4 지점은 해석 초기에는 응력이 발생하지 않았으나, 외부 열의 내부 침투에 따라 응력이 발생했다.

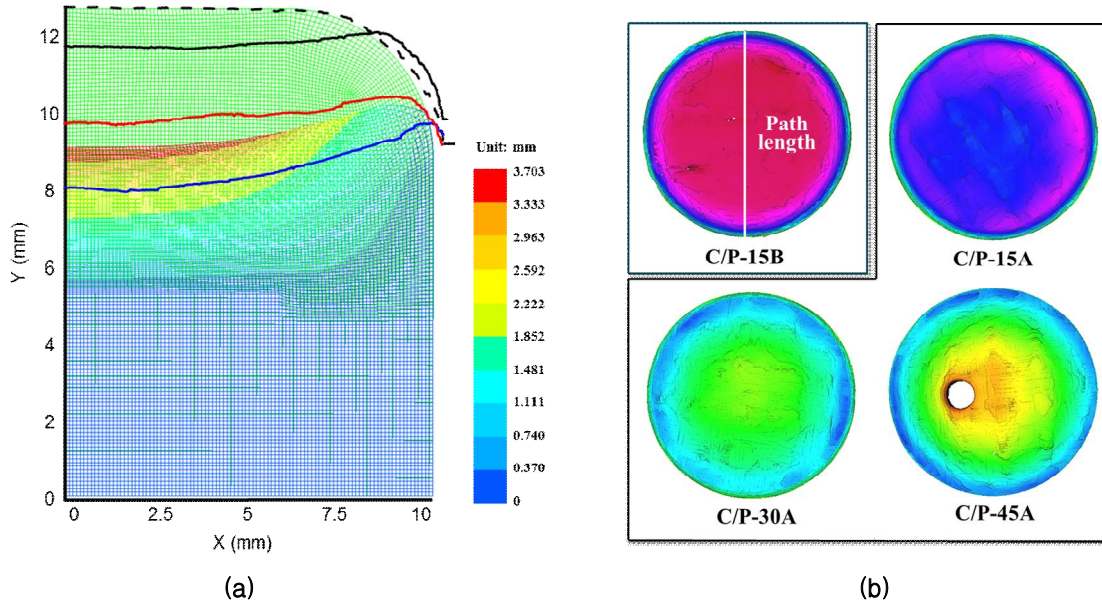


Fig. 8. Surface recession: (a) Side direction, and (b) in-depth direction

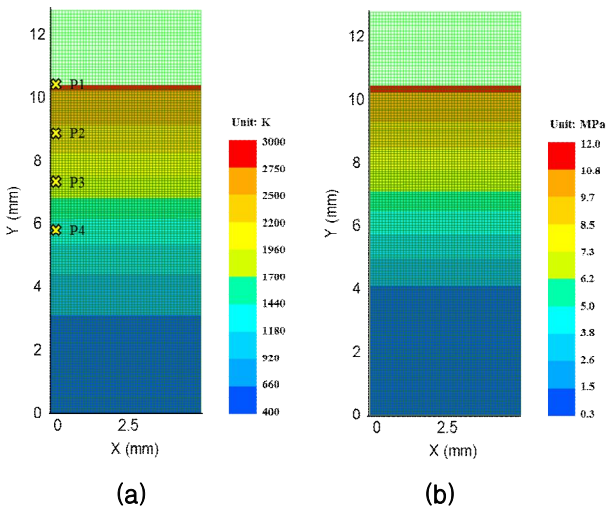


Fig. 9. Contours: (a) Temperature, and (b) von Mises stress at 30 sec.

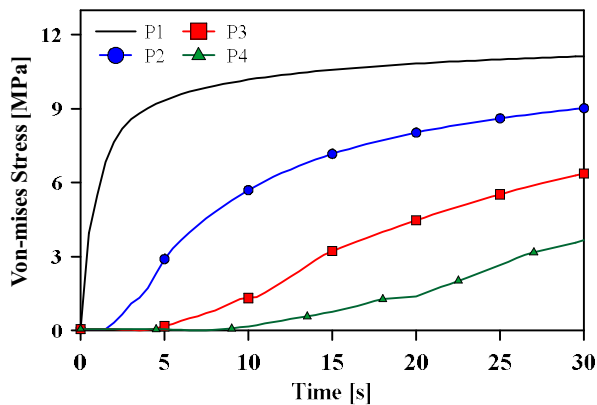


Fig. 10. Time history of von Mises stress

이를 통해 탄소/페놀릭 재료 내부 열 침투에 따른 온도와 응력 변화의 연관성을 확인하였다. 이와 같은 결과는 향후 삭마 실험 시 열전대를 이용한 측정을 통해 검증될 수 있다.

#### 4.2 응용 예제 : 재진입 캡슐 전산 모형

Figure 11은 재진입 캡슐 전산 모형의 20초경 온도 분포이다. 캡슐의 최상단은 2,800 K로 온도가 상승한 반면, 하단부의 알루미늄 층은 상온을 유지하였다. 이를 통해 탄소/페놀릭 복합재가 내부로 침투하는 열을 효과적으로 차단함을 확인하였다. 급격한 온도 상승으로 인한 내부 응력 변화를 확인하기 위해 특정 지점에서의 시간에 따른 von Mises 응력을 Fig. 12에

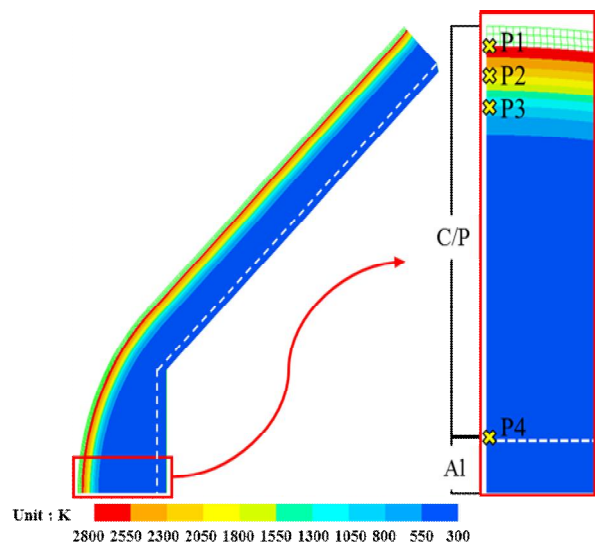


Fig. 11. Contour of temperature at 20 sec.

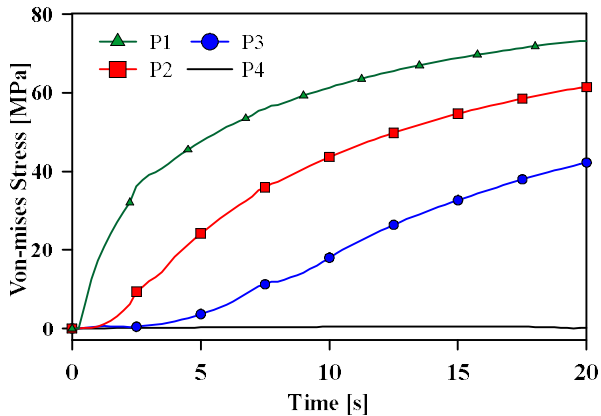


Fig. 12. Time history of von Mises stress

나타내었다. 탄소/페놀릭 복합재 층과 알루미늄 층에서 임의의 지점을 선정했으며 이는 Fig. 11에 P1~P4로 표시하였다. P1~P3 지점은 최상단으로부터 2 mm 씩 떨어진 지점이며, P4 지점은 알루미늄 층의 최상단부이다. 급격한 온도 상승으로 인해 밀도가 완전히 저하된 숏 층을 형성한 P1, P2 지점은 20초 경 약 60~70 MPa의 응력이 발생함을 확인하였다. 열분해가 진행되고 있는 P3 지점은 약 40 MPa의 응력이 발생하였다. 반면, 상온을 유지하는 P4 지점은 응력이 발생하지 않아 본 캡슐이 열-구조적으로 안정성이 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 통하여 본 연계 해석 인터페이스가 열 보호 시스템 설계에 활용될 수 있음을 확인하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 재진입 환경의 탄소/페놀릭 복합재 구조물의 열분해 및 삭마 특성 예측을 위해 열기계적 연계 해석을 수행하였다. 내부 열분해로 인한 물리적 거동 변화를 모사하기 위해 온도장과 변위장의 지배 방정식을 연계할 수 있도록 시차제법을 도입하여 완전 연계 인터페이스를 구성하였다. 전산 모형 해석 결과와 아크 가열 풍동을 이용한 삭마 실험 결과와의 비교를 통해 열-구조 연계 해석 기법의 검증을 수행하였다. 열 유속이 집중되는 깊이 방향 모델 해석 결과를 통해 깊이 방향에 따른 삭마 특성을 확인했다. 또한 형상학적 모델 해석 결과를 통해 열 유속 분포에 따른 삭마 특성을 확인했다. 대체적으로 실험 결과와 유사한 경향성을 보였으며, 열-구조 연계 해석 기법이 탄소/페놀릭 복합재의 삭마 특성 예측에 유용함을 확인하였다. 향후 실제 시편 물성 데이터를 이용한 해석을 수행함으로써 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 재진입 캡슐 전산 모형의 해석을 통해 구축한 열-구조 연계해석 기법의 활용성과 탄소/페놀릭 복합재의 열 보호 효과를 확인하였다.

탄소/페놀릭 복합재의 열 보호 효과로 인해 구조체 층의 온도는 상온을 유지하였으며 구조적으로도 안정적인 경향을 보였다. 두 가지 재료 층에 대한 열-구조 연계 해석을 수행하였으며, 본 연계 해석 기법이 열 보호 시스템 설계에 있어 활용될 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. 2014M1A3A3A02034622)

## References

- 1) Mathews, R. N., and Shafeeque, A. P., "Hypersonic flow analysis on an atmospheric re-entry module," *International Journal of Engineering Research and General Science*, Vol. 3, Issue 5, 2015, pp. 991~1001.
- 2) Laub, B., and Venkatapathy, E., "Thermal protection system technology and facility needs for demanding future planetary missions," *Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science*, Vol. 544, 2004, pp. 239~247.
- 3) Nataili, M., Kenny, J. M., and Torre, L., "Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices: A review," *Progress in Materials Science*, Vol. 84, 2016, pp. 192~275.
- 4) Johnson, S. M., "Thermal protection materials: development, characterization and evaluation," *Proceeding of the HiTemp Conference*, 2012.
- 5) Anon., "User's manual, Aerotherm charring material thermal response and ablation program," Acurex Corporation, Aerotherm Division, 1961.
- 6) Chen, Y. K., and Milos, F. S., "Fully implicit ablation and thermal analysis program (FIAT)," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 36, No. 3, 1999, pp. 475~483.
- 7) Pinaud, G., Bouily, J. M., and Barcena, J., "HYDRA: Macroscopic modeling of hybrid ablative thermal protection system," *Proceedings of the 5th International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering*, 2014.
- 8) Empey, D. M., Gorbunov, S., Skokova, K. A., Agrawal, P., Swanson, G. T., Prabhu, D. K., Mangini, N., Perterson, K. H., Winter, M., and

Venkatapathy, E., "Small probe reentry investigation for TPS engineering (SPRITE)," *Proceeding of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012.

9) Sutton, K., "An experimental study of a carbon/phenolic ablation material," NASA TN-D-5930, 1970.

10) Paglia, L., Tirilloa, J., Marra, F., Bartuli, C., Simone, A., Valente, T., and Pulci, G., "Carbon-phenolic ablative materials for re-entry space vehicles\_plasma wind tunnel test and finite element modeling," *Materials and Design*, Vol. 90,

2016, pp. 1170~1180.

11) Choi, H. W., Roh, K. W., Cheon, J. H., and Shin, E. S., "Quantitative Analysis for Surface Recession of Ablative Materials Using High-speed Camera and 3D Profilometer," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 46, No. 9, 2018, pp. 735~741.

12) Lim, S., Cheon, J. H., Son, M. J., and Shin, E. S., "Quantitative analysis of surface recession on carbon-based ablators using a high-resolution non-contact profilometer," *Materials and Design*, Vol. 149, 2018, pp. 73~80.