열보호재료의 열 및 물질전달 현상에 관한 수치해석적 연구

김정훈* · 권창오** · 서정일** · 배철호*** · 송동주***

(1999년 4월 27일 접수)

A Numerical Study of Heat and Mass Transfer Phenomena for Thermal Protection Material

Jung-Hoon Kim, Chang-Oh Kwon, Jeong-Il Seo, Cheol-Ho Bai and Dong-Joo Song

Key Words: Ablation(삭마, 용발), Thermal Protection System(열보호계), Charring Material(炭형성 재료), Pyrolysis Gas(열분해가스), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달),

Abstract

A numerical analysis is performed to predict the thermal response and ablation rate for charring or non-charring material which is designed to be used as thermal protection system (TPS). The numerical program composed of in-depth energy balance equation and the aerotherm chemical equilibrium (ACE) program. The ACE program calculates various thermochemical state from ablation products. The developed numerical program is verified by comparing the reported results from literature. The sensitivity tests for input parameters are performed. The thermal behavior of ablating material is mainly affected by density of ablating material, convective heat transfer coefficient and recovery enthalpy of flow field.

기호설명

A : 분해요소(decomposition component)
B : 비례계수, 분해요소
B' : 분출변수(blowing parameter)
C_p : 정압비열 [kJ/kgK]
D : 물질확산계수 [m^2/s]
E : 활성에너지(activation energy)
g_h : 열전달 전도도(conductance) [kg/m^2s]
H : 총엔탈피(total enthalpy) [kJ/kg]
H_r : 회복(recovery) 엔탈피
h : 정엔탈피(static enthalpy) [kJ/kg]
h_{coeff} : 열전달 계수 [W/m^2K]
$\bar{h}$: 식 (15)와 같이 정의한 것
j : 물질확산유속 [kg/m^2s]
k : 열전도율 [W/mK]
m : 질량분율(mass fraction)
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
Pr : 프란틀수(Prandtl number)
q : 열유속 [W/m^2s]
R : 일반기체상수
r : 회복 계수(recovery factor)
St : 스탠튼수(Stanton number)
$\dot{S}$: 표면후퇴율(recession rate) [m/s]
s : 유동방향
T, t : 온도 [K], 시간 [s]
u, v : s-방향, y-방향 속도성분
x : 표면과 함께 움직이는 좌표계
y : 삭마되기전 원표면에 고정된 좌표계, 유동방향과 수직인 좌표계

그리스문자

α, ε : 흡수율, 방사율
μ : 점도(viscosity)
ρ : 밀도 [kg/m^3]
ϕ_{blow} : 분출수정계수(blowing correction factor)

* 회원, 영남대학교 대학원 기계공학과
** 영남대학교 대학원 기계공학과
*** 회원, 영남대학교 기계공학부

상첨자

0 : 화학형성엔탈피 기준
'' : 유속

하첨자

c : 숯(char)
e : 경계층 가장자리(edge)
g : 열분해가스(pyrolysis gas)
h : 열전달
i : 화학종(species), 열분해 요소
k : 화학성분
(k) : 성분 k의 총 질량분율
m : 물질전달
s : 현열(sensible) 엔탈피
v : 원재료
w : 삭마표면
0 : cold wall

1. 서 론

고온, 고속 유동장에 비행체가 노출되었을 때 높은 열전달환경으로부터 시스템을 보호하기 위하여 열보호재료를 사용하는데, 삭마물질들이 열보호재로 주로 사용되고 있다. 순간적으로 높은 열환경에서의 열보호재료는 표면에서 삭마(용발, ablation ; 열화학적 혹은 기계적인 작용에 의해서 물질이 제거되는 현상)되어 열전달을 줄여줌으로써 고온유동영역을 벗어나 안정될 때까지 시스템을 보호할 수 있다. 이러한 표면의 삭마현상을 정확히 예측하는 것은 격심한 공기역학적 열환경으로부터 비행체 보호를 위한 열보호재 설계를 위해서 매우 중요하다. 뿐만 아니라 실제 고온, 고속 열유동장을 구현하기 위한 실험장치의 구성이 어려워 다양한 열환경에서 일반화된 삭마해석 모델의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 삭마해석을 하는 목적은 시스템이 부여된 임무를 수행할 수 있도록 적당한 삭마재료를 선택하고, 그 두께와 무게를 예측하여 열보호계(thermal protection system)설계에 적용하기 위함이다.

현재 삭마재로 사용되는 물질들 중에는 그래파이트(graphite)와 같이 노출된 표면에서 화학반응과 승화의 결과로써 삭마되는 균질재료가 있다. 이것은 특히 비행체의 노즈립부분과 로켓모터의 라이너, 노즐 등과 같이 극한 열유동환경에서 사용된다. 또한 카본-페놀릭(carbon-phenolic) 등과 같이 내부에서 열분해(pyrolysis)가 일어나고 그 결과로 숯(char)층이 형성되는 복합(composite)재료도 다양한 환경에서 많이 사용되고 있다. 이와 같은 열보호재의 삭마현상을 해석하는 전통적인 방법으로는 단순화된 삭마열(heat of ablation)을 이용하는 것인데,[1,2] 이는 많은 화학반응현상을 일반화하여 모델링 할 수 없기 때문에 적절한 삭마재 두께의 예측이 불확실하다. 이에 반해, 재료의 열화학분해모델을 사용하면 숯층과 열분해층의 해석이 가능하고, 주어진 열보호재에 대해 두께 및 무게의 예측이 용이하기 때문에 전산기기의 발달과 더불어 이러한 방법들이 많이 연구되어 왔다. 1983년 Thompson[3]은 유사에너지 평형식과 열전달계수를 분출변수(blowing parameter)와 상관관계하여 삭마현상을 해석하였고, 1988년 Blackwell[4]은 유한검사체적과 대류(convection)문제를 지수차분법(exponential difference scheme)을 이용해 삭마율과 표면온도를 예측하였다. 1998년 Ahn[5]은 열분해가스의 연속방정식과 운동량방정식을 적용하여 열분해가스에 의한 냉각효과를 보였다. 1994년 Milos[6]의 논문에는 그 이전까지의 연구가 잘 요약되어 있다. 항공우주 선진국에서는 지난 60년대부터 현재까지 열보호계에서 삭마현상이 꾸준히 연구되어 왔지만 국내에서는 거의 전무한 상태이다.

본 연구에서는 이러한 연구의 시작단계로 열경계층에서의 유입조건이 주어질 때, 표면과 내부에서의 열 및 물질전달현상을 유한차분법을 이용하여 해석하였다. 그래파이트는 내부에서의 열분해모델이 필요하지 않지만, 카본-페놀릭과 같은 숯형성(charring) 물질은 가열되면 내부로 열분해가 진행되어 가스를 발생시키게 된다. 이 가스는 열분해영역을 빠져나가면서 원재료에 기공을 남겨 숯을 형성하고 복잡한 열화학적, 기계적 반응을 통해 재료를 제거시킨다. 이와 같은 현상을 간단하게 물리적 현상으로 나타내 보면 다음과 같다.

$$\text{virgin plastic} \rightarrow \text{char} + \text{gas}$$

이것을 토대로 3차원 등방성재료의 1차원 비정상 열전달방정식을 계산하고 시간에 따른 온도분포

와 삭마량을 예측함으로써 그래파이트와 카본-페놀릭의 삭마특성을 연구하였다. 또한 열경계층에서의 유입조건에 따른 삭마율의 민감도 해석을 수행하였다.

2. 지배방정식

2.1 성분보존 방정식

경계층에서 모든 성분의 물질확산계수가 균일하고(equal diffusion coefficients) 프란틀수와 루이스수가 1 이라면, k 성분에 대한 화학성분보존의 법칙은 식 (1)과 같고, Fig. 1 과 같이 나타낼 수 있다.

$$j_{k_w} + m_{(k)_w}(\rho v)_w = m_{(k)_g}\dot{m}_g'' + m_{(k)_c}\dot{m}_c'' \quad (1)$$

여기서 $m_{(k)}$ 는 성분 k 의 총 질량분율, $\dot{m}''$은 물질유속(mass flux)을 나타내며 식 (1)에서 응축상(condensed phase)의 삭마는 고려하지 않았다. 화학반응하는 고속의 유동장에서 경계층 방정식은 프란틀수와 루이스수가 1 일 경우 식 (2)와 같다.

$$\rho u\frac{\partial H}{\partial s} + \rho v\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial H}{\partial y}\right) \quad (2)$$

여기서 H 는 총엔탈피(total enthalpy)로 식 (3)과 같이 정의된다.[7]

$$H = (\text{sensible} + \text{chemical})\ \text{enthalpy} + \frac{u^2}{2} \quad (3)$$

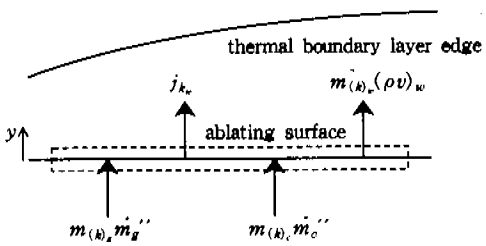


Fig. 1 Element conservation for composite material at ablating surface.

여기서 현열(sensible) 엔탈피는 온도차에 의한 엔탈피 증가를, 화학(chemical) 엔탈피는 화학적인 형성엔탈피(enthalpy of formation)를 가리킨다.

1958년 Lees[8]는 삭마되는 표면(ablating surface)과 경계층에서의 현상을 결합시키기 위해 체적전달계수(bulk transfer coefficient)를 이용하였다. 따라서 식 (2)의 해는 식 (4)와 같이 무차원 전달계수를 사용하여 열유속으로 나타낼 수 있다.

$$q = \rho_e u_e St_h(H_e - H_w) \quad (4)$$

여기서 St_h 는 열전달 스탠튼수이다. 한편 온도차에 의한 물질전달효과(Soret effect)를 무시하고, 확산계수가 모든 성분의 물질에 대해 균일하다고 가정하면, 층류유동인 경우 경계층에서의 화학성분보존 방정식은 식 (5)와 같다.

$$\rho u\frac{\partial m_{(k)}}{\partial s} + \rho v\frac{\partial m_{(k)}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho D\frac{\partial m_{(k)}}{\partial y}\right) \quad (5)$$

식 (4)와 유사하게 물질확산유속을 나타내면 다음과 같다.

$$j_{k_w} = \rho_e u_e St_m(m_{(k)_w} - m_{(k)_e}) \quad (6)$$

여기서 St_m 은 물질전달 스탠튼수 이다.

2.2 에너지보존 방정식

1959년 Rosner[9]는 균일확산계수일 때 삭마가 없는 표면(cold wall)에서의 에너지방정식을 식 (7)과 같이 제시하였다. 식 (7)에서 좌변은 전도와 물질확산에 의해 삭마재의 표면으로 들어오는 총 열전달률을 나타내고 우변은 현열(sensible)과 화학(chemical) 에너지의 전달률을 열 및 물질전달계수의 형태로 나타내었다. Fig. 2 는 삭마되는 표면에서의 에너지 평형을 나타낸 것이다.

$$k_g\frac{\partial T}{\partial y} - \sum_i j_{i_w}h_i^o = \rho_e u_e St_h(H_{sr} - h_{sw}) + \rho_e u_e St_m\sum_i(m_{ie} - m_{iw})h_i^o \quad (7)$$

여기서 H_{sr} 은 식 (8)과 같이 정의된다.

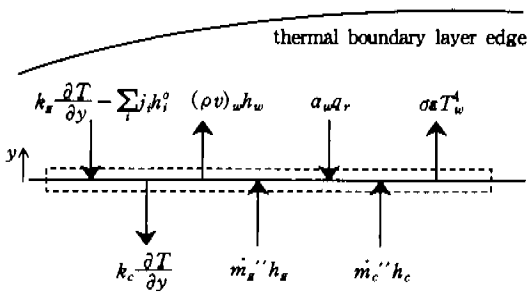


Fig. 2 Energy balance for composite material at ablating surface.

$$H_{sr}=H_r-\sum_i m_{iw}h_i^o \tag{8}$$

식 (8)에서 H_r은 회복엔탈피(recovery enthalpy)로 총엔탈피와 운동항(kinetic term)에 회복계수(recovery factor)를 곱한 것이다. 식 (7)을 이용하여 용축상의 삭마를 제외한 표면에너지평형식(surface energy balance, SEB)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&\rho_e u_e St_h(H_{sr}-h_{sw})+\rho_e u_e St_m\sum_i(m_{ie}-m_{iw})h_i^o\\&+a_w q_r+\dot{m}_g'' h_g+\dot{m}_c'' h_c\\&=(\rho v)_w h_w+k_c\frac{\partial T}{\partial y}+\sigma\varepsilon T_w^4\end{aligned} \tag{9}$$

고속물질전달(high mass transfer)이 일어날 때 분출효과(blowing effect)를 고려하기 위해 분출변수를 식 (10)과 같이 정의한다. 식 (8)과 식 (10)을 식 (9)에 대입하면 표면에너지평형식을 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.[10]

$$B'=\frac{(\rho v)_w}{\rho_e u_e St_m} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}&\rho_e u_e St_h\Big\{H_r-\sum_i m_{ie}h_i^o-h_{sw}\\&+\frac{St_m}{St_h}\Big(\sum_i(m_{ie}-m_{iw})h_i^o-B'h_w\Big)\Big\}+\dot{m}_c'' h_c\\&+\dot{m}_g'' h_g+a_w q_r-k_c\frac{\partial T}{\partial y}-\sigma\varepsilon T_w^4=0\end{aligned} \tag{11}$$

2.3 내부(in-depth) 에너지 방정식

그래파이트와 같은 균질재료는 표면에서의 열화학평형만을 고려하면 된다. 그러나, 두 가지 이상의 물질이 복합된 재료의 삭마현상은 열환경에 노출되었을 때, 최초 원재료 표면에서부터 열분해가 일어나 가스를 발생시키며 내부로 진행하게 되므로 내부에서의 열화학반응을 나타낼 필요가 있다. 또한 더 이상 열분해되지 않는 상태, 즉 숯(char)이 표면부터 형성되고 일정온도 이상에서 떨어져 나가며, 그 결과로써 표면이 후퇴(recession)하게 된다. 따라서 열환경에 따른 적절한 두께를 선택하기 위해 숯의 두께를 예측하는 것이 설계 시 중요한 인자가 된다. 이러한 내부에서 시간에 따라 변하는 각 격자의 밀도계산은 식 (12)와 같은 아레니우스(Arrhenius)식을 사용한다.[11]

$$\frac{\partial\rho_i}{\partial t}=-B_i\exp^{-\frac{E_i}{RT}}\rho_{v_i}\left(\frac{\rho_i-\rho_{c_i}}{\rho_{v_i}}\right)^{\phi_i} \tag{12}$$

여기서 ρ_{vi}는 삭마재 요소 i의 열분해 이전밀도, ρ_{ci}는 열분해 후 숯의 밀도를 나타낸다. ψ_i는 분해반응차수(decomposition reaction order), E_i는 활성에너지(activation energy), B_i는 비례계수이다. 이와 같은 자료는 재료의 TGA(thermogravimetric analysis)로부터 얻어진다. 내부의 열분해 영역에서 밀도의 변화율은 발생되는 가스율과 같으므로, 열분해 가스에 대한 질량보존식은 식 (13)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=\frac{\partial\dot{m}_g''}{\partial y} \tag{13}$$

한편 내부에너지 방정식은 검사체적에서의 열분해가스의 질량보존식을 포함하여, 표면이 후퇴함에 따라 움직이는 좌표계에 의한 영향을 고려한 식 (14)를 사용한다.[11]

$$\begin{aligned}\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}\Big)_x&=\frac{\partial}{\partial x}\Big(k\frac{\partial T}{\partial x}\Big)_t+(h_g-\overline{h})\frac{\partial\rho}{\partial t}\Big)_y\\&+\dot{S}\rho C_p\frac{\partial T}{\partial x}\Big)_t+\dot{m}_g''\frac{\partial h_g}{\partial x}\Big)_t\end{aligned} \tag{14}$$

여기서 하첨자 x는 후퇴하는 표면의 좌표계, y는 삭마되기전 원표면에 고정된 좌표계이다. 식 (14)

외 좌변은 에너지변화율, 우변은 각각 전도열에너지, 열분해에너지율, 표면후퇴로 인한 영향, 가스의 에너지를 나타낸다. $\overline{h}$는 원재료와 숯의 밀도로 가중된(density-weighted) 엔탈피의 차이를 나타내며 식 (15)와 같이 정의한다.[11]

$$\overline{h} \equiv \frac{\rho_v h_v - \rho_c h_c}{\rho_v - \rho_c} \tag{15}$$

3. 삭마(ablation) 모델링

본 연구는 숯형성(charring) 또는 비 숯형성(non-charring) 삭마재의 열 및 물질전달 현상을 해석하여 비정상 열응답 및 삭마율을 1차원 계산으로 나타내고, 기본적인 재료의 물성치 특성과 열환경에 대한 반응을 조사하는데 목적을 두고 있다. 따라서 열화학삭마 문제에 초점을 두고, 파쇄(spallation)와 페일링(failing) 등의 기계적 삭마, 코우킹(coking)과 같은 숯과 가스의 재반응, 숯외 팽창(swelling) 등은 고려되지 않았다. 또한 계산의 편의와 열 및 물질전달의 물리적 모사의 난해함을 피하기 위해 루이스수를 1로하고, 균일물질확산계수를 사용하였다. 사용된 삭마모델을 Fig. 3에서 도식화하였다. 삭마재는 단순히 열전도도가 낮은 물질을 사용하여 내부로의 열전달을 억제하는 효과뿐만 아니라 다양한 열화학, 기계적인 작용으로 삭마물질들이 떨어져 나가면서 유입되는 에너지를 막는 분출효과(blowing effect)를 가지고 있다.

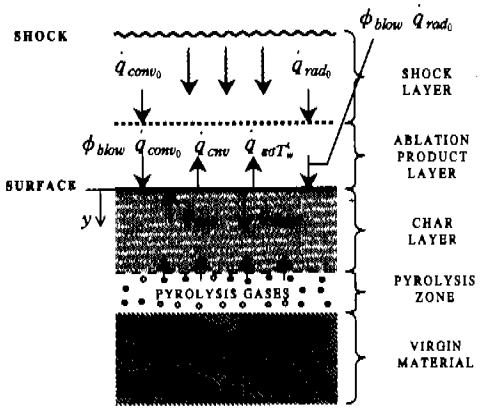


Fig. 3 Schematic of ablation model for composite material.

이를 계산에 적용하기 위해 유입되는 열량에 대한 열전달계수를 식 (16)과 같이 수정한다.

$$g_h = g_{h_0} \phi_{blow} \tag{16}$$

여기서 g_h는 열전달 전도도(conductance)를, 하첨자 0은 삭마가 없을 때(cold wall)의 경우이다. 또한 분출수정계수(blowing correction factor) ϕ_{blow}는 쿠엣유동(Couette flow) 모델을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.[12]

$$\phi_{blow} = \frac{\ln(1+aB')}{aB'} \simeq \frac{aB_0'}{\exp(aB_0') - 1} \tag{17}$$

여기서 B_0'은 식 (18)과 같이 정의되며, a는 가중치이다.

$$B_0' = \frac{\dot{m}_w''}{g_{h_0}} \tag{18}$$

1990년 Potts[13]에 의하면 Mills[12] (Prof. of UCLA)는 카본-페놀릭의 경우 루이스수를 1로 가정했을 때 a=1.3 을 추천했다. 한편 발생한 열분해 가스는 검사체적에 수직한 방향으로 곧 바로 빠져나간다고 가정하고 가스의 운동량방정식은 고려하지 않는다. 또한 생성된 숯의 인장력은 충분히 커서 파쇄(spallation)는 일어나지 않는다고 가정한다. 복합재료인 카본-페놀릭의 경우 탄소(graphite)에 페놀수지(resin)를 채워서 만들며 보강재인 그래파이트는 거의 열분해되지 않는다. 따라서 수지의 열분해 모델로써 아레니우스(Arrhenius)식을 사용하여 전체 격자에 대해 밀도 변화를 계산한다. 에너지방정식을 풀기 위해서 유사정상상태의 열경계층 해석결과가 필요한데 이를 위해 사용되는 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$\rho_e u_e St_h = \frac{h_{coeff}}{C_p} = g_h \tag{19}$$

$$H_r = H_e - (1-r)\frac{u_e^2}{2} \tag{20}$$

여기서 h_{coeff}는 열전달계수이며 r은 회복계수(recovery factor)이고 층류일 경우 $Pr^{1/2}$ 을, 난류일 경우 $Pr^{1/3}$ 을 취한다.

4. 수치 해석

1차원 내부에너지방정식의 유한차분식을 구하기 위해서 계산 공간을 비균일 격자로 분할한다. 특히 표면후퇴 및 온도변화가 격심한 삭마표면에서 격자의 간격을 가장 작게 하고, 내부로 들어갈수록 간격을 늘이는 방법을 채택하였다. 유한차분식에서 이동좌표 및 열분해가스에 의한 대류항은 상류차분(upwind difference)을, 전도항은 중앙차분(three points implicit central difference)을 사용하였다. 중앙차분법에 의해 차분방정식을 유도하면 삼각대각행렬형태의 대수식이 구해지며, 표면에너지평형식으로부터 구해진 경계조건을 사용하여 TDMA(tri-diagonal matrix algorithm)에 적용하였다. 여기서 내부에너지방정식의 표면격자에서는, 전도열유속이 표면온도의 함수이므로 표면에너지평형식(SEB)의 전도항과 결합될 수 있다. SEB에는 미지수인 표면온도의 함수항이 있으므로 비선형방정식이 되어, 방정식을 만족하는 표면온도를 찾을 때까지 Newton-Raphson 방법으로 반복계산을 한다. 또한 SEB는 삭마생성물과 온도가 연관된 표면에서의 엔탈피, 물질전달 구동력인 농도차 등의 값이 필요하다. 이와 같은 항들은 Aerotherm Chemical Equilibrium (ACE)[14] 프로그램을 이용하여 계산할 수 있도록 하였다. ACE는 삭마물질의 화학성분 비와 생성가능한 화학종을 모델링하면, 주어진 압력과 삭마생성물의 양에 따른 열화학상태를 결정할 수 있는 프로그램이다.

5. 수치계산예 및 검토

본 연구에서 적용하는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 기 발표된 논문의 문제를 모델로 하여 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 정체점에서의 비정상 열응답 및 삭마율 계산의 모델로써 Henline[15]의 논문을 적용했다. 사용된 삭마재는 그래파이트와 카본-페놀릭이며 스틸쉘 구조(steel shell structure)를 제외하고 3.05 *cm*의 두께로 정하였다.

5.1 비 숯형성(Non-charring) 재료의 삭마

1984년 Potts[16]에 의하면 열분해가 일어나지 않는 그래파이트의 경우 카본-카본(carbon-carbon) 삭마재의 물성치와 유사하여 편의상 서로 교환해서(interchangeable) 사용할 수 있고, 특히 비열의 경우 JANAF 테이블[17]의 고체탄소(solid carbon)와 잘 일치한다. 본 연구에서는 Henline의 카본-카본 삭마재의 결과와 비교하기 위해서, Table 1과 같이 ATJ 그래파이트의 물성치[18]를 사용하였다. 화학성분은 질량기준으로 그래파이트는 C(100%), 경계층 가장자리(boundary layer edge)에서는 대기성분으로 N(76.7%), O(23.3%)를 사용하였다. 경계층과 표면에서의 화학종(species)은 C, C_2, C_3, C_4, C_5, N, N_2, O, O_2, O_3, CO, CO_2, C_3O_2, CN C_2N_2 C_4N_2 NO, NO_2, N_2O, C(응축상)를 모델링하였으며, 필요한 물성치는 JANAF 테이블[17]을 이용하였다.

Fig. 4는 ACE의 계산으로, 압력이 변할 때 온도에 따른 그래파이트의 삭마율을 나타내었다. 1기압 기준으로 1000*K*~1500*K* 사이에서는 화학반응율에 의한 산화영역(reaction rate controlled oxidation region)이지만 그 영향이 미소하므로 본 연구에서는 무시하였다. 1500*K*~3500*K* 에서는 확산에 의한 산화영역(diffusion controlled oxidation region)이고 무차원 삭마율인 B' 이 0.17이 되며 기준값으로 정하였다.[16] 3500*K* 이상에서는 탄소의 승화(sublimation)가 일어나는 영역으로 참고문헌 (19)와 잘 일치하고 있다. 또한 1기압일 때의 그래파이트는 승화에 의해 표면온도가 약 4000*K*를 초과하지 않지만 압력이 증가함에 따라 승화에 의한 삭마기구(ablation mechanism)의 시작 온도가 높기 때문에 표면온도는 4000*K* 이상으로 상승할 수 있다.

Table 1 ATJ graphite thermophysical data.[18]

Density		1.73 g/cm^3
Temperature [*K*]	Specific heat [*J/gK*]	Thermal conductivity [*W/mK*]
300	0.71	110
500	1.1	93
1000	1.7	59
1500	2.0	39
2000	2.1	28
2500	2.1	26
3000	2.2	31

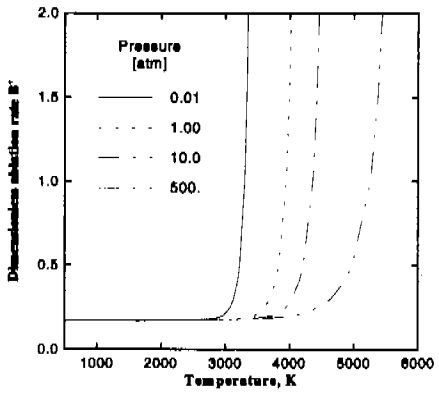
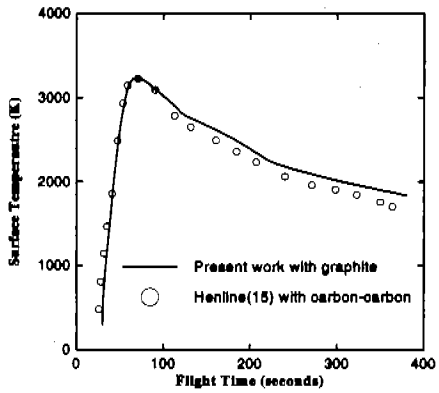


Fig. 4 Dimensionless ablation rate for graphite, full equilibrium thermochemical solution.

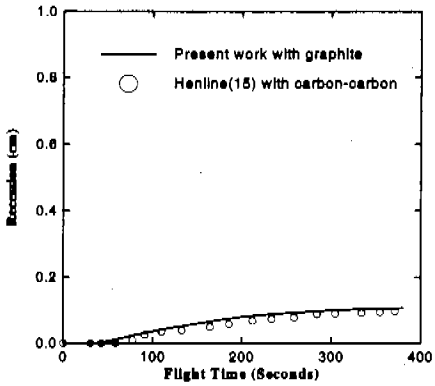
Table 2 Trajectory boundary layer edge condition data for SEB calculation.[15]

Time [sec]	Pressure [kPa]	Recovery enthalpy [MJ/kg]	Radiant heat flux [MW/m^2]	Heat transfer conductance [kg/m^2s]
30	20.77	92.97	0.396	0.0342
60	27.86	86.87	5.21	0.0639
90	22.29	69.83	2.32	0.0586
120	20.36	57.29	0.821	0.0488
180	14.39	40.51	0.012	0.0439
220	12.56	32.78	0.0	0.0244
300	7.19	22.78	0.0	0.0146
340	4.86	20.16	0.0	0.0098
380	3.85	18.35	0.0	0.0049

이러한 결과로써 참고문헌 (15)에 주어진 비행궤적의 시간에 따른 열유입조건을 Table 2와 같이 적용하고 Henline[15]의 결과와 비교하였다. 여기서 식 (17)과 같이 삭마생성물(ablation product)의 분출효과(blowing effect)는 가중치를 0.24로 적용하였다.[15] Fig. 5(a)는 표면온도의 변화를 나타냈으며 최고 3240*K*가 되었다. 시간이 지남에 따라 미소한 차이가 있음을 볼 수 있는데, 이는 해석에 사용된 그래파이트의 물성치가 비교대상인 카본-카본과 다를 수 있기 때문이다. Fig. 5(b)는 삭마가 일어남에 따라 후퇴(recession)하는 표면의 위치를 나타냈으며, 380초에서는 원표면부터 0.107 *cm*깊이 만큼 표면이 제거되었다.



(a) Surface temperature histories



(b) Surface recession histories

Fig. 5 Comparison of present work with Henline's results[15] for ATJ graphite.

5.2 숯형성(Charring) 재료의 삭마

숯층을 형성하는 카본-페놀릭의 열분해모델은 참고문헌 (20)과 (21)을 참조하였으며 각각 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 열분해가스의 화학성분은 질량기준으로 C(53.1%), H(12.8%), O(34.1%)로 하였고,[15] 숯은 C(100%)를 사용하였다. 열분해가스 및 숯의 화학종으로는 H, C, N_2, CO, CH_2, O, O_2, CHN, CN, C_2H_2, C_2N_2, H_2, C_2H, C_2, CH, C_3, C_3H, C(응축상)를 모델링하였다. Fig. 6은 압력이 0.275기압일 때, 식 (10)에서와 같이 무차원 가스발생률 B_g'에 대하여 온도에 따른 무차원 숯삭마율 B_c'을 나타내며 참고문헌 (15)의 결과

Table 3 Carbon-phenolic(one component model) thermochemical and physical data.[20]

Initial density ρ_v	1.30 g/cm^3
Residual density ρ_c	0.77 g/cm^3
Reaction order ψ	2
Pre-exponential term B	1.1e+4 sec^{-1}
E/R	1.1e+4 K

Temperature [K]	Specific heat [J/gK]		Thermal conductivity [W/mK]	
	Virgin	Char	Virgin	Char
300	0.96	1.1	0.65	0.54
500	1.5	1.7	0.83	0.69
1000	1.8	2.0	1.2	1.1
1500	2.0	2.0	1.7	1.5
2000	2.1	2.1	2.1	1.8
2500	2.3	2.1	2.5	2.2
3000	2.5	2.1	3.0	2.6

Table 4 Carbon-phenolic(two component model) thermochemical and physical data.[21]

	A	B
Initial density ρ_{vi} [g/cm^3]	0.973	0.324
Residual density ρ_{ci} [g/cm^3]	0.519	0.0
Reaction order ψ_i	3	3
B_i [sec^{-1}]	4.48e+9	1.4e+4
E_i/R [K]	2.04e+4	8.56e+3

Temperature [K]	Specific heat [J/gK]		Thermal conductivity [W/mK]	
	Virgin	Char	Virgin	Char
300	0.88	0.88	1.2	1.4
500	1.5	1.7	1.3	1.7
1000	2.0	2.0	1.4	2.7
1500	2.0	2.0	1.4	4.6
2000	2.1	2.1	1.4	7.1
2500	2.1	2.1	1.4	10.0
3000	2.1	2.1	1.4	14.0

와 잘 일치한다. 여기서 Fig. 4에서와 같이 화학반응율에 의한 산화영역은 무시하고 확산에 의한 산화영역에서는 무차원 숯삭마율을 0.17로 정하였다. 표면의 승화영역에서 B_c'이 일정할 때, B_g'이 큰 것은 가스가 많이 발생한다는 것을 뜻하며 그 만큼의 에너지를 가지고 떨어져 나가기 때문에 B_g'이 작은 값에 비해 표면온도는 낮아진다. Table 2와 같은 열유입조건을 이용해 Fig. 7(a)와 같이 수지(resin)의 분해모델에 따른 삭마재의 표

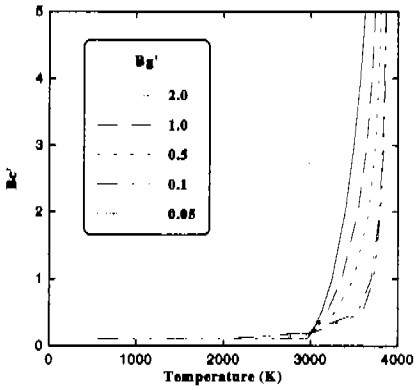
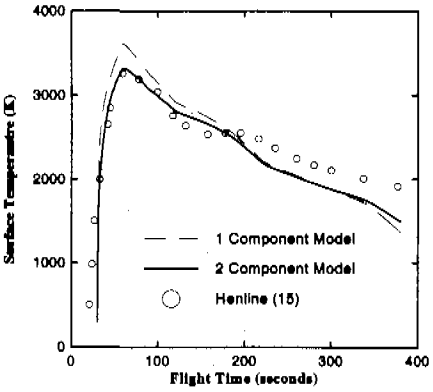
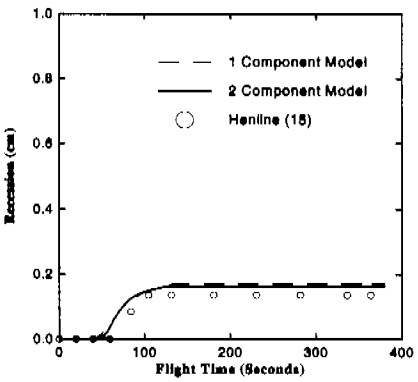


Fig. 6 Dimensionless char ablation rate for carbon-phenolic at 0.275atm.



(a) Surface temperature histories



(b) Surface recession histories

Fig. 7 Comparison of present work with Henline's results[15] for carbon-phenolic.

면온도의 변화를 나타내었다. 수지의 분해하는 모델은 TGA에서 온도에 따라 중량의 감소단계를 해석하는 방법을 말하며, 한 성분으로 나타낼 경우[20]가 두 성분모델[21]보다 최대 9% 더 높게 나타나지만 200초부터는 거의 동일한 열응답을 보여주고 있다. 또한 두 모델 모두 대류열전달계수가 가장 큰 60초대에서 최대표면온도를 보이고 있다. Fig. 7(b)는 삭마재의 표면후퇴량을 나타내었다. 40초대에서 표면후퇴가 시작되어 130초에서는 일정하게 유지되고 2성분 모델과 1성분 모델 각각 0.162 *cm*, 0.171 *cm*로 거의 차이가 없었다. Fig. 8은 내부로 진행하는 열분해과정을 나타내었다. 숯의 밀도에 미소량을 더한 값을 숯의 경계로 하고 원재료의 밀도에 미소량을 뺀 값을 열분해층의 경계로 정한 후, 각 격자에서의 밀도를 계산함으로써 열분해영역과 숯의 두께 등을 알 수 있다. 200초대부터 더 이상 열분해가 내부로 진행되지 않는 것은 표면에서 3.05 *cm* 아래부분을 스틸쉘(steel shell) 구조로 정하였기 때문에 열화학반응이 일어나지 않는다.

이상의 결과에서 살펴본 바와 같이 카본-페놀릭의 경우 Henline[15]의 결과와 거의 일치하고 있지만 미소한 차이가 날 수 있는 것은 본 연구의 모델로 삼은 논문[15]에는 계산을 위한 자료가 완전하게 주어져 있지 않았고 따라서 약간 다른 물성치와 화학모델을 사용했을 수 있기 때문이다. 이러한 삭마재의 물성치 변화가 해석결과에 미치는 영향을 고찰하기 위해 밀도, 비열, 열전도율을 변화시키면서 계산을 수행하였다. Fig. 9에서는 전체 삭마재의 밀도를 변화시키면서 표면의 온도 변화와 후퇴량을 나타낸 것이다. 삭마재의 밀도

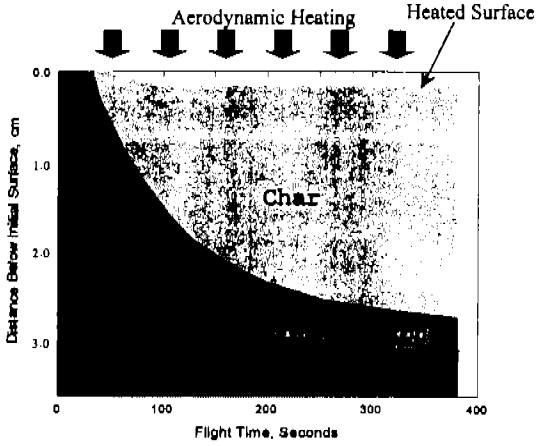


Fig. 8 Predicted degradation depth histories.

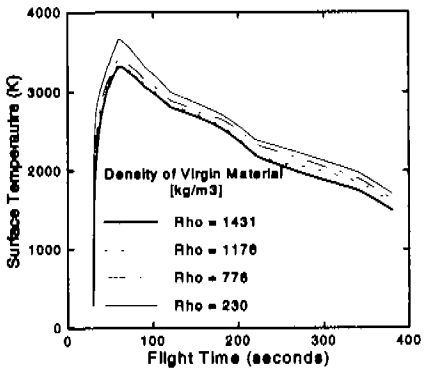
가 높을수록 후퇴량이 작아지고, 최대표면온도는 낮아지는 경향을 보이고 있다. 밀도가 230 kg/m^3와 1431 kg/m^3인 경우에 최대 표면온도는 각각 3722*K*와 3278*K*인데, 밀도가 작은 경우에도 삭마 및 열분해가 적절히 일어나면 표면온도를 한계값 이하로 유지할 수 있지만, 표면후퇴량은 0.864 *cm*와 0.152 *cm*로써 밀도가 작은 경우 삭마재의 두께가 열보호재 설계에 상당히 중요하게 됨을 알 수 있다. Fig. 10은 참고문헌 (21)의 물성치를 기준으로 삭마재의 원재료와 숯의 비열을 변화시키며 온도와 후퇴량의 변화를 나타냈다. 비열의 변화에 따른 표면온도는 거의 같은 값을 나타내고 있으며 표면후퇴량도 최저 0.076 *cm*에서 최고 0.178 *cm*로 큰 차이가 없다. Fig. 11에서는 삭마재의 열전도율을 변화시켰을 때 열응답 및 후퇴량을 나타내고 있는데 비열의 경우와 마찬가지로 큰 영향이 없다. 그러나 표면 온도는 열전도율이 클수록 내부로의 열전달이 활발하여 온도가 낮아지며, 내부로의 전달된 에너지의 축적으로 인해 시간이 지남에 따라 표면온도가 서서히 떨어지는 양상을 나타낸다

5.3 비 숯형성 재료와 숯형성 재료의 열응답

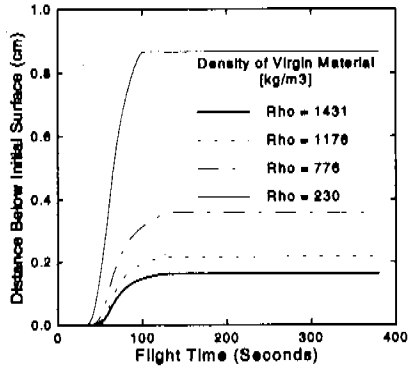
그래파이트와 카본-페놀릭의 표면 및 내부에서 열응답을 각각 Fig. 12, Fig. 13에 나타내었다. 그래파이트의 경우 220초 이후, 표면에서부터 서서히 식어감에 따라 온도가 떨어지지만 내부는 축열로 인해 오히려 표면온도보다 높아짐을 볼 수 있다. 따라서 시스템 구조(structure) 자체에 영향을 줄 수도 있으므로 설계시 유의해야 한다. 반면 Fig. 13에서와 같이 카본-페놀릭의 경우는 수지성분이 열분해하여 가스를 발생시키며 내부로 전달되는 열에너지를 가지고 빠져나가게 되기 때문에 시스템 내부로의 에너지 축적을 줄이게 된다. 그러나 열분해가 끝난 숯층은 가스에 의한 냉각효과를 가지지 못하므로 열응답이 그래파이트의 경우와 유사한 형태가 된다.

5.4 열유입조건에 의한 삭마 민감도

한편 삭마량은 경계층으로부터 유입되는 열전달량 등에 따라 크게 변화하게 되는데 그 영향을 고찰하기 위해 Table 2에서 30초일 때의 열경계층 조건을 기준으로 하여, 정상상태로 진행시킨 후 카본-페놀릭에 대한 민감도 조사를 하였다.

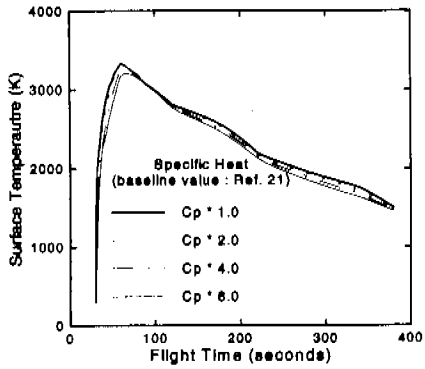


(a) Surface temperature histories

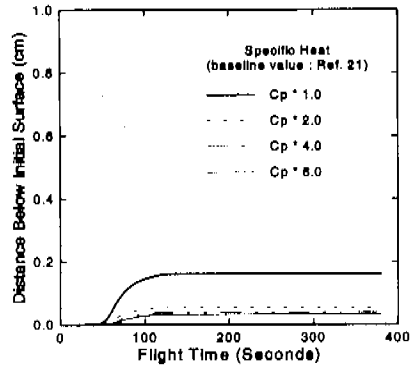


(b) Surface recession histories

Fig. 9 Prediction of thermal response and ablation for different densities using boundary layer edge condition as Table 2.

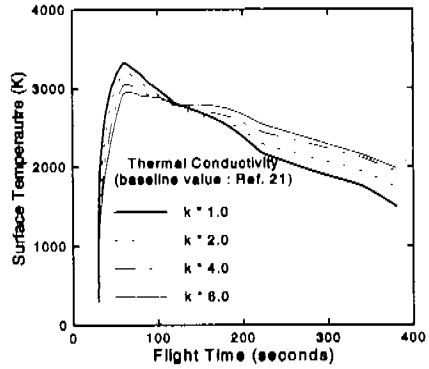


(a) Surface temperature histories

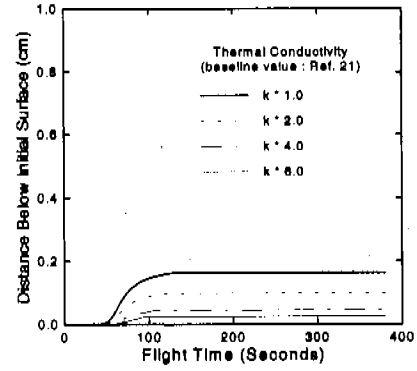


(b) Surface recession histories

Fig. 10 Prediction of thermal response and ablation for different specific heats using boundary layer edge condition as Table 2.



(a) Surface temperature histories



(b) Surface recession histories

Fig. 11 Prediction of thermal response and ablation for different thermal conductivities using boundary layer edge condition as Table 2.

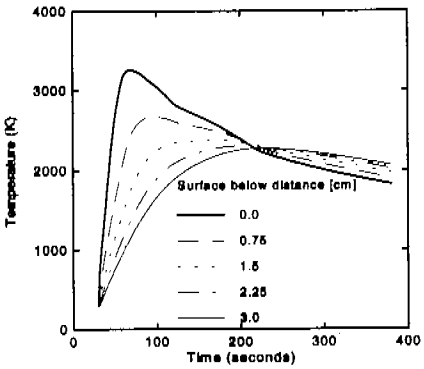


Fig. 12 Thermal response of in-depth for ATJ graphite using boundary layer condition as Table 2.

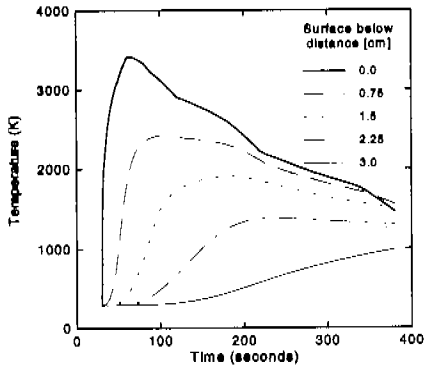


Fig. 13 Thermal response of in-depth for carbon-phenolic using boundary layer condition as Table 2.

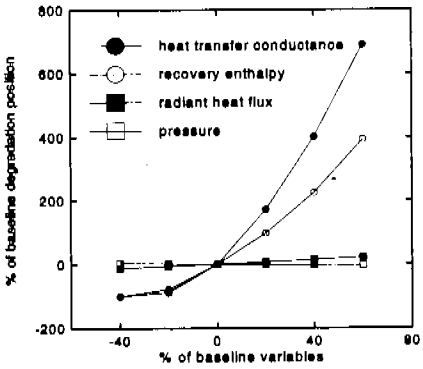


Fig. 14 Sensitivity of recession for heat transfer conductance, recovery enthalpy, radiant heat flux and pressure.

Fig. 14는 열전달계수, 회복엔탈피, 복사열유속, 압력의 변화에 따른 표면후퇴량을 백분율로 나타내었다. 열전달계수와 회복엔탈피가 20% 증가할 때 표면후퇴는 각각 200%와 100%로써 이 두 요소가 가장 큰 영향을 주었다. 반면 복사열유속과 압력에는 거의 영향을 받지 않았다.

6. 결 론

이상의 열보호재료의 열 및 물질전달 현상에 관한 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 열보호재 설계를 위해 화학평형코드인 ACE 프로그램을 결합시켜 1차원 비정상 삭마계산을 하는 열 및 물질전달프로그램을 개발하고 기 발표된 논문자료와 비교한 결과 잘 일치하였다.

(2) 삭마재의 물성치와 열경계층 조건에 대한 영향을 고찰하기 위해 민감도 조사를 수행하고 삭마특성을 해석하였다. 그 결과 삭마재의 밀도와 유동장으로부터의 대류열전달계수, 회복엔탈피가 삭마량에 큰 영향을 주었다.

(3) 본 연구에서 적용한 재료의 열화학분해모델(thermochemical decomposition model)은 내부의 비정상 숯층형성과 열응답 예측을 가능하게 하므로 열보호재 설계시 그 두께의 예측이 용이하였다.

(4) 비 숯형성(non-charring) 재료인 그래파이트는 숯형성(charring) 재료인 카본-페놀릭에 비해 삭마량이 작으므로 비교적 열환경이 격심한 곳에 적당하며 시스템 또는 구조체(structure)가 열응답에 민감하지 않은 부분에 사용될 수 있다.

(5) 카본-페놀릭은 그래파이트와 달리 수지성분이 열분해하여 가스를 발생시키는데 이것은 열흡수(heat sink)와 같은 역할을 하여 내부로의 열전달을 줄일 수 있기 때문에 열응답에 민감한 시스템에 적당하다. 또한 그래파이트에 비해 밀도가 낮으므로 시스템을 경량화 할 수 있다.

(6) 본 연구에서는 열화학삭마(thermochemical ablation) 현상을 해석하였으며 파쇄(spallation)와 같은 기계적삭마(mechanical ablation) 현상은 고려하지 않았다. 숯형성 재료의 경우 숯층에서는 코우킹(coking), 숯의 팽창(swelling)과 같은 복잡한 물리적 현상을 고려하여야 하고, 기계적삭마 역시 주된 삭마기구(ablation mechanism)이므로 향후 이에 관한 연구도 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

(1) Reynolds, R.A., Nourse, R.W. and Russell, G.W., 1992, "Aerothermal Ablation Behavior of Selected Candidate External Insulation Materials," 28th *AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference*, Nashville, TN, Paper 92-3056.

(2) 함희철, 배주찬, 이태호, 전광민, 이진호, 1992, "유한해석법을 이용한 조합 내열부품의 1차원 삭마 및 숯층형성 해석," 대한기계학회논문집, 제 16권, 제 5호, pp. 943~951.

(3) Tompson, R.A., 1983, "Viscous Shock-Layer Flow over Multiconic Reentry Vehicles," MS Thesis, Virginia Tech, Va.

(4) Blackwell, B.F., 1988, "Numerical Prediction of One-Dimensional Ablation Using a Finite Control Volume Procedure with Exponential Differencing," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 17~34.

(5) Ahn, H.K., 1998, "Heatshield Problems of Pioneer-Venus and Muses-C," Ph. D. Thesis, Tohoku Univ.

(6) Milos, F.S. and Rasky, D.J., 1994, "Review of Numerical Procedures for Computational Surface Thermochemistry," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 1.

(7) Rohsenow, W.M. and Hartnett, J.P. eds., 1973, *Handbook of Heat Transfer*, McGraw Hill, New York, Section 16, 19.

(8) Lees, L., 1958, "Convective Heat Transfer with Mass Addition and Chemical Reactions," *Third AGARD Combustion and Propulsion Colloquium.*

(9) Rosner, D.E., 1959, "Similitude Treatment of Hypersonic Stagnation Heat Transfer," *ARS Journal*, Vol. 29, No. 3.

(10) Kendall, R.M., Rindal, R.A. and Bartlett, E.P., 1965, "Thermochemical Ablation," *AIAA Paper* 65-642.

(11) Moyer, C.B. and Rindal, R.A., 1968, "An Analysis of the Coupled Chemically Reacting Boundary Layer and Charring Ablator, Part II," *NASA CR-1061.*

(12) Mills, A.F., *Heat and Mass Transfer*, Chapter 10, Irwin.

(13) Potts, R.L., 1990, "Hybrid Integral/Quasi-Steady Solution of Charring Ablation," *AIAA Paper* 90-1677.

(14) Powars, C.A. and Kendall, R.M., 1969, "Aerotherm Chemical Equilibrium (ACE) Computer Program User's Manual," Aerotherm Corp.

(15) Henline, W.D., 1992, "Thermal Protection Analysis of Mars-Earth Return Vehicles," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 29, No. 2, pp. 198~207.

(16) Potts, R.L., 1984, "On Heat Balance Integral Solutions of Carbonaceous Ablator Response During Reentry," *AIAA Paper* 84-0393.

(17) Chase, M.W.Jr., Davies, C.A., Downey, J.R.Jr., Frurip, D.J., McDonald, R.A. and Syverud, A.N., 1985, "JANAF Thermochemical Tables, Third Edition," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 14.

(18) Davy, W.C., Menees, G.P., Lundell, J.H. and Dickey, R.R., 1978, "Hydrogen-Helium Ablation of Carbonaceous Materials : Numerical Simulation and Experiment," *AIAA Paper* 78-866.

(19) Milos, F.S. and Daniel, J.R., 1992, "Numerical Procedures for Three-Dimensional Computational Surface Thermochemistry," *AIAA Paper* 92-2944.

(20) Bueche, J.F., 1977, "Effects of Improvements and Uncertainties in Thermophysical Properties on Carbon Phenolic Heatshield Thermal Performance Predictions," *AIAA Paper* 77-787.

(21) Peterson, D.L. and Nicolet, W.E., 1974, "Heat Shielding for Venus Entry Probes," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 11, pp. 382~387.