

## 다공성 고온 절연체의 열전도도 특성

조장호, 김영채, 이성철

한양대학교 세라믹공정연구센터, 서울, 133-791

## Thermal conductivity of high temperature porous insulation

Jang-Ho Jo, Young Chai Kim and Sung-Chul Yi

*Ceramic Processing Research Center (CPRC), Hanyang University, Seoul 133-791, Korea*

요 약 우주왕복선과 같은 발전된 비행체의 열 차단 시스템(TPS)에서의 이상적인 후보로는 섬유질 내화성 복합 절연체(FRCI)와 AETB(Alumina-Enhanced Thermal Barrier)가 있다. 이 중, 본 연구에서는 FRCI의 열 펄스에 대한 열적응답을 실리카와 비교하여 수학적으로 모델링하여 전사모사 하였다. 또, 100~2000 K의 온도범위에서 FRCI의 여러 변수에 따른 각 열전도도를 계산하여 보았다.

Abstract Ideal candidates for the thermal-protection system of advanced spacecraft like Space Shuttle, are FRCI(Fibrous Refractory Composite Insulation) and AETB (Alumina-Enhanced Thermal Barrier). In the present work, we carried out the mathematical modeling and computer simulation of the thermal response of FRCI to heat pulse, comparing with that of silica. Also, we calculated the conductivity of FRCI as various variables at the temperature range of 100~2000 K.

### 1. 서 론

AOTV(Aeroassisted Orbiter Transfer Vehicle)이나 발전된 군용 비행기 등과 같이 지구의 대기로 재 진입하는 비행기를 위한

열 차단 시스템(Thermal-Protection System, 이하 TPS)의 설계시 요구사항은 우주왕복선보다 더 많은 것을 요구하게 되었다. 이러한 비행체들은 바깥 몰드 선(Outer Mold Line, 이하 OML)에서는 고온에 대한 능력을, 정

체점 근처의 안쪽 몰드 선(Inner Mold Line, 이하 IML)에서는 강한 기계적 성질을 요구한다. 이러한 물성의 조합은 서로 다른 두 목적을 제공하는 두 물질의 접착시킨 완성된 다중요소 TPS를 통해 이루어질 수 있다. 이러한 시스템을 위한 이상적 후보로는 낮은 밀도의 FRCI(Fibrous Refractory Composite insulation)[1]와 AETB(Alumina-Enhanced Thermal Barrier)[2]등이 있으며, 이것들은 발전된 비행체의 TPS를 위한 설계 요구사항에 맞게 제작이 가능하다. 예를 들면, FRCI에서는 실리카와 알루미늄오보로실리케이트(aluminoborosilicate)의 질량 비를 변화시킴으로써 넓은 범위의 기계적 성질을 얻을 수 있다. 그러나, FRCI의 열적능력은 한계가 있다. 열적능력의 척도인 표면 수축(surface recession)은 알루미늄나 함유를 FRCI에 첨가하여 AETB를 형성함으로써 최소화될 수 있으나, 장력의 손실이 따른다. 그런 까닭에 높은 온도와 장력에서 적은 표면 수축을 하는 TPS는 AETB를 고강도의 FRCI의 표면에 부착함으로써 얻을 수 있다.

발전된 비행체에서 이러한 다중요소 시스템의 사용을 연구하기 위해서는 공기역학적 가열에 대한 그것들의 열적 응답이 결정되어야만 한다. 이러한 비행체의 표면에서 생성되는 단기 열 펄스는 세 가지 메커니즘에 의해 TPS를 통해 전달되는 데, 그것은 고체 전도, 기체 전도 그리고 복사이다. 이 중, 복사는 온도 변경에 따른 높은 온도로 인해 물질의 열적 응답을 결정하는 데 주된 역할을 담당한다. 그렇기 때문에, 공기역학적 아크-젯 환경에 대한 선택된 다중요소 TPS의 열적 응답은 이러한 물질 안에서 복사에 의한 열전달을 포함하기에 충분한 정도의 높은 표면 가열 속도에서 연구된다.

본 연구에서는 FRCI와 실리카의 열 펄스

에 대한 열적응답을 수학적으로 모델링하여 전사모사 하였으며, 100~2000 K의 온도범위에서 FRCI의 여러 변수에 따른 각 열전도도를 계산하여 보았다.

## 2. 모델링

### 2.1. 가정

계산을 단순화하기 위하여 물질과 열전달의 본질을 묘사하는 데 있어서 세 가지의 일반적인 가정을 사용하였다. 그 가정들은 다음과 같다.

- 1) 절연물질은 균일(homogeneous)하다.
- 2) 열은 한쪽 방향으로만 전달된다.
- 3) 열은 평형 전도 메커니즘을 통해 전달된다. 따라서 분리되어 다루어질 수 있다.

### 2.2. 수학적 모델링

일반적으로 열전도 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_x = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( kA \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 열용량,  $T$ 는 절대 온도,  $A$ 는 열전도 면적,  $x$ 는 표면으로부터의 거리,  $k$ 는 겉보기 열전달 계수(또는 열전도도)이다.

2.1.절의 가정 3)에 의해  $k$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = k_{so} + k_g + k_r \quad (2)$$

여기서  $k_{so}$ 는 고체 상(solid phase) 열전도도,  $k_g$ 는 기체 상(gas phase) 열전도도,

$k_r$ 는 복사에 의한 열 전도도이다.

식(2)는 고체의 부피 비를 고려해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k = f_1(S_v)k'_{so} + (1-S_v)k'_g + f_2(S_v)k'_r \quad (3)$$

여기서  $S_v$ 는 고체의 부피 비이다. 보통,  $f_1 = S_v$ ,  $f_2 = 1/S_v$  로 주어진다. 식(3)에서  $k'_{so}$ 는 다음과 같다.

$$k'_{so} = \eta \left[ N_i/N_T \sum_{j=1}^n (M_j/M_T) k_j(T) \right] \quad (4)$$

식(4)에서  $\eta$ 는 접착효율(bonding efficiency),  $N$ 은 섬유 의 개수, 하첨자  $i$ 는 섬유 의 방향 (st-strong, w-weak),  $M$ 은 질량, 하첨자  $j$ 는 섬유물질 (s-silica, absaluminoborosilicate),  $k_j$ 는 물질  $j$ 의 열전도도이다.

식(3)에서  $k'_g$ 는 다음과 같다.

$$k'_g = aT^b [L_M / (L_M + w)] \quad (5)$$

윗 식에서  $a$ 와  $b$ 는 상수,  $L_M$ 은 엔지니어링 모델에서 정의되는 기공크기,  $w$ 는 아래 식(6)으로 정의되는 기체의 평균 자유행로이다.

$$w = KT/P \quad (6)$$

식(6)에서  $K$ 는 공기에 대한 기체상수,  $P$ 는 압력이다. 따라서, 기체의 열전도는 압력, 온도와 기공크기의 함수이다.

식(3)에서  $k'_r$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k'_r = 4\epsilon_{TH}(T)\sigma T^3 d_M [(1-\gamma^2)/\gamma^2(2-\gamma)] \quad (7)$$

여기서  $\epsilon_{TH}$ 는 total hemispherical emittance,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $\gamma$ 는  $d_M$

$/L_M$  ( $d_M$ 은 엔지니어링 모델에서 정의되는 지름,  $d_M = L_M(S_v/3)^{0.5}$ )이다. Total hemispherical emittance  $\epsilon_{TH}$ 는 아래의 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{TH} = 0.442 \ln(3300/T) \beta \quad (8)$$

식(8)에서  $\beta$ 는 emittance adjustment 파라미터이다.

세 가지 전도 메커니즘을 조합하면 겉보기 열전도도  $k$ 는 아래의 식(9)와 같이 정리하여 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} k = & \eta S_v \left[ N_i/N_T \sum_{j=1}^n (M_j/M_T) k_j(T) \right] \\ & + (1-S_v) a T^b [L_M / (L_M + w)] \\ & + 4\epsilon_{TH} \sigma T^3 L_M [(1/S_v - 1/3) / (2\sqrt{S_v/3} - S_v/3)] \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.3. 파라미터

전산모사에 쓰인 모든 파라미터들은 참고 문헌[4]를 참고하였으며, 밀도와 알루미늄노보로실리케이트의 함량에 따라 이를 각각 Table 1과 Table 2에 정리하였다. 단, 절연체의 길이  $h$ 는 3.81 cm 이었으며, 실리카와 알루미늄노보로실리케이트의 온도에 따른 열전도도는 각각 식(10)과 식(11)에 나타낸 바와 같다.

$$k_s = 0.0033 T^{0.285} \text{ [W/cm}\cdot\text{K]} \quad (10)$$

$$k_{abs} = 0.223 T^{-0.2498} \text{ [W/cm}\cdot\text{K]} \quad (11)$$

### 2.4. 열적응답의 전산모사

2.2.절에서 식(1)은 편미분 방정식이다. 본 연구에서는 numerical method of line[5]을

Table 1

Values of parameter as content of aluminoborosilicate  $\rho=0.192[\text{g}/\text{cm}^3]$

	$M_{\text{abs}}/M_T$	$N_w/N_T$	$\eta$	$\beta$	$L_M(\text{cm})$
silica	0.0	0.304	0.13	0.70	0.0013
FRCI 20	0.2	0.265	0.14	0.60	0.0016
FRCI 40	0.4	0.305	0.14	0.63	0.0018
FRCI 60	0.6	0.294	0.14	0.30	0.0058
FRCI 80	0.8	0.195	0.13	0.15	0.0073

Table 2

Values of parameter as content of aluminoborosilicate  $\rho=0.32[\text{g}/\text{cm}^3]$

	$M_{\text{abs}}/M_T$	$N_w/N_T$	$\eta$	$\beta$	$L_M(\text{cm})$
silica	0.0	0.315	0.19	1.00	0.0013
FRCI 20	0.2	0.193	0.25	1.00	0.0016
FRCI 40	0.4	0.187	0.36	0.80	0.0018
FRCI 60	0.6	0.207	0.13	0.60	0.0058
FRCI 80	0.8	0.177	0.12	0.40	0.0073

알고리즘으로 택하여 식(1)을 풀었다. x의 grid 수는 101개이었으며, 전산모사 시 쓰인 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

I.C. :  $T=298.15 \text{ K}$  at all x

B.C. 1 :  $T=1560.15 \text{ K}$  at  $x=0$

( $t < 420 \text{ sec}$ )

$T=298.15 \text{ K}$  at  $x=0$

( $t \geq 420 \text{ sec}$ )

B.C. 2 :  $T=298.15 \text{ K}$  or  $\partial T / \partial x = 0$  at  $x = h$  (isothermal or adiabatic condition)

B.C. 2에서 h는 전체 절연체의 두께이다. B.C. 1에서 보면, 표면의 온도는 열 펄스로 인해 1560.15 K로 420 초간 일정하게 유지되다가 420 초 이후부터는 상온인 298.15 K

로 유지되는 것을 알 수 있다.

본 연구에서  $x=h$  에서의 경계조건은 등온조건 또는 단열조건으로 전산모사하여 보았으며 이것은 B.C. 2에 나타나있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 실리카와 FRCI의 열적응답 비교

Fig. 1은 B.C.2가 등온 조건일 때, 실리카와 FRCI 40의 열적응답을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 실리카와 FRCI 40 모두 비슷한 응답특성을 보이고 있으나, 실리카의 내부 온도( $x/h=0.5$  또는  $x/h=0.83$  에서)가 FRCI 40 보다 약간 덜 증가하는 것으로 보아 실리카의 응답특성이 더 좋은 것으로 보인다. 이는 Leiser 등[4]의 연구결과에 의하면 실리카의 낮은 겉보기 열전도도 때문인 것으로 생각된다. 그러나 Leiser 등[3]의 연구결과에서도 나타나 있듯이 실리카는 FRCI 보다 기계적 강도가 좋지 않아, 열적응답특성과 기계적 강도 양면을 고려하면 실리카 보다는 알루미늄노보로 실리케이트가 적당량 첨가된 FRCI 재료가 비행체의 단열재료로 더 적합할 것으로 생각된다.

Fig. 2는 B.C.2가 단열 조건일 때, 실리카와 FRCI 40의 열적응답을 나타낸 그림이다. 단열조건임에도 불구하고 실리카와 FRCI 40 모두 내부벽면의 온도가 거의 증가하지 않는 우수한 열적응답특성을 보이고 있다. 등온 조건인 경우와 마찬가지로 실리카의 내부 온도가 FRCI의 것 보다 덜 증가한 것으로 보아 단열 조건일 때도 실리카는 FRCI 40 보다 우수한 열적응답특성을 갖는 것으로 사료된다.

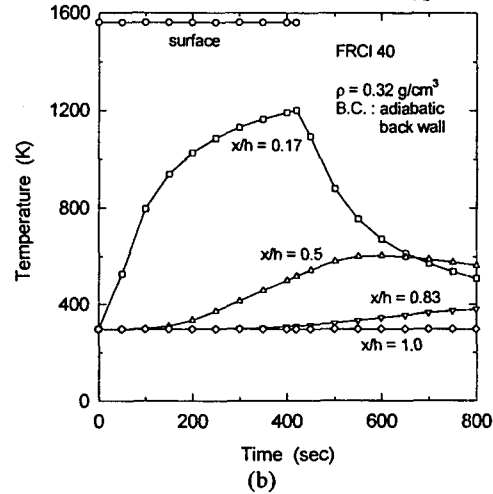
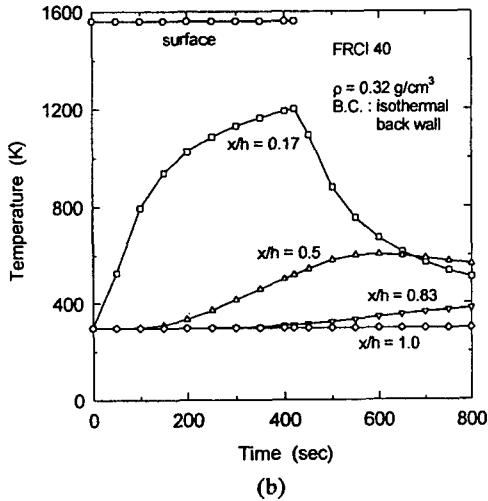
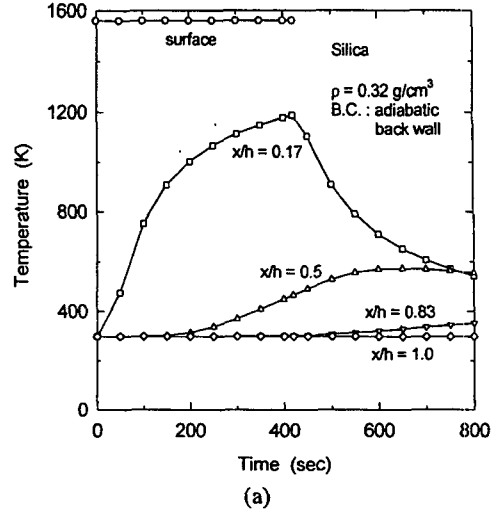
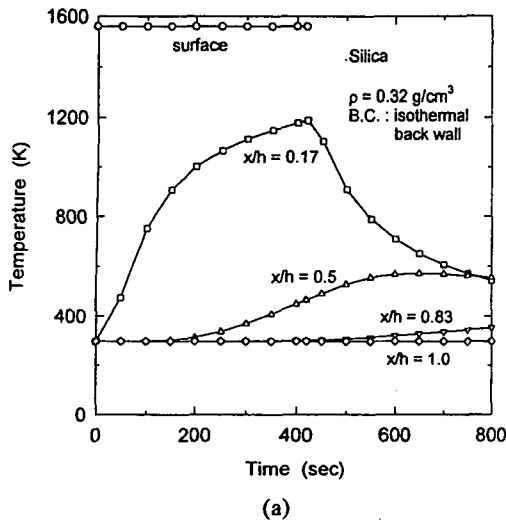


Fig. 1. Comparison between calculated thermal response of silica and FRCI 40 with isothermal backwall.

Fig. 2. Comparison between calculated thermal response of silica and FRCI 40 with adiabatic backwall.

3.2. 밀도에 따른 열전도도

Fig. 3은 실리카의 밀도에 따른 열전도도를 보인 것이다. 두 경우 모두 겔보기 열전도도가 낮은 온도에서는 기체의 열전도도에 의해 크게 영향받으나, 고온에서는 주로 복사 열전도도에 좌우됨을 알 수 있다. 그리고 겔보기 열전도도 중 고체의 열전도도가 차지

하는 부분은 매우 작았다.

두 그림을 비교해보면, 겔보기 열전도도는  $0.32 \text{ g/cm}^3$  인 것이 더 작은 것을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 이는 밀도의 증가로 인한 고체 열전도도의 증가에도 불구하고 복사 열전도도가 더 큰 폭으로 감소했기 때문인 것으로 보이는 데, 이는 Leiser 등 [4]의 연구결과와도 일치하는 결과이다. 또,

밀도의 증가로 인해 기체 열전도도는 감소하였으나 그 폭은 매우 작았다.

Fig. 4는 FRCI 40의 밀도에 따른 열전도도를 보인 것이다. 실리카의 경우와 마찬가지로 고온에서의 겉보기 열전도도는 주로 복사 열전도도에 좌우됨을 알 수 있다. 이러한

경향은 FRCI 중 알루미늄노보로실리케이트의 함량에 상관없이 나타났다.

FRCI 40도 실리카와 마찬가지로 밀도의 증가로 겉보기 열전도도가 감소하였으며, 이는 주로 복사 열전도도에 기인한 것임을 이 그림을 통해 알 수 있다.

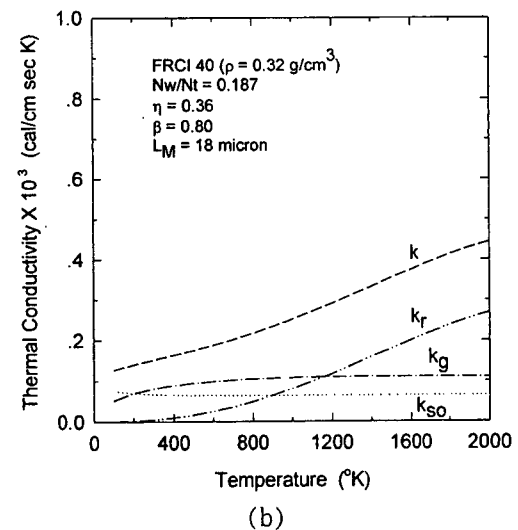
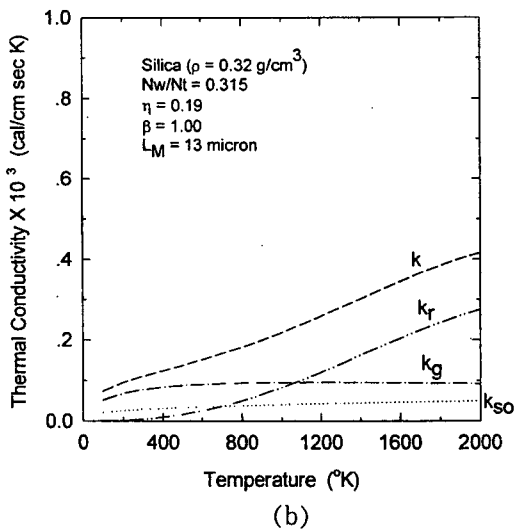
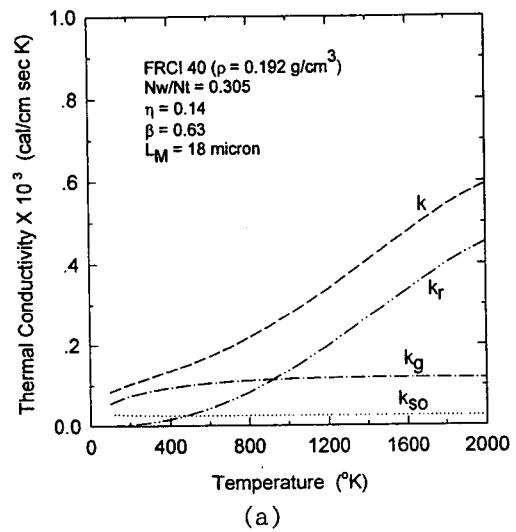
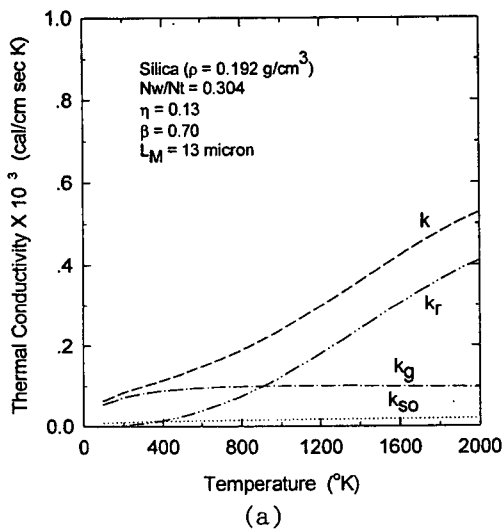


Fig. 3. Thermal conductivity for silica : (a)  $\rho = 0.192 \text{ g/cm}^3$ , (b)  $\rho = 0.32 \text{ g/cm}^3$ .

Fig. 4. Thermal conductivity for FRCI 40 (a)  $\rho = 0.192 \text{ g/cm}^3$ , (b)  $\rho = 0.32 \text{ g/cm}^3$ .

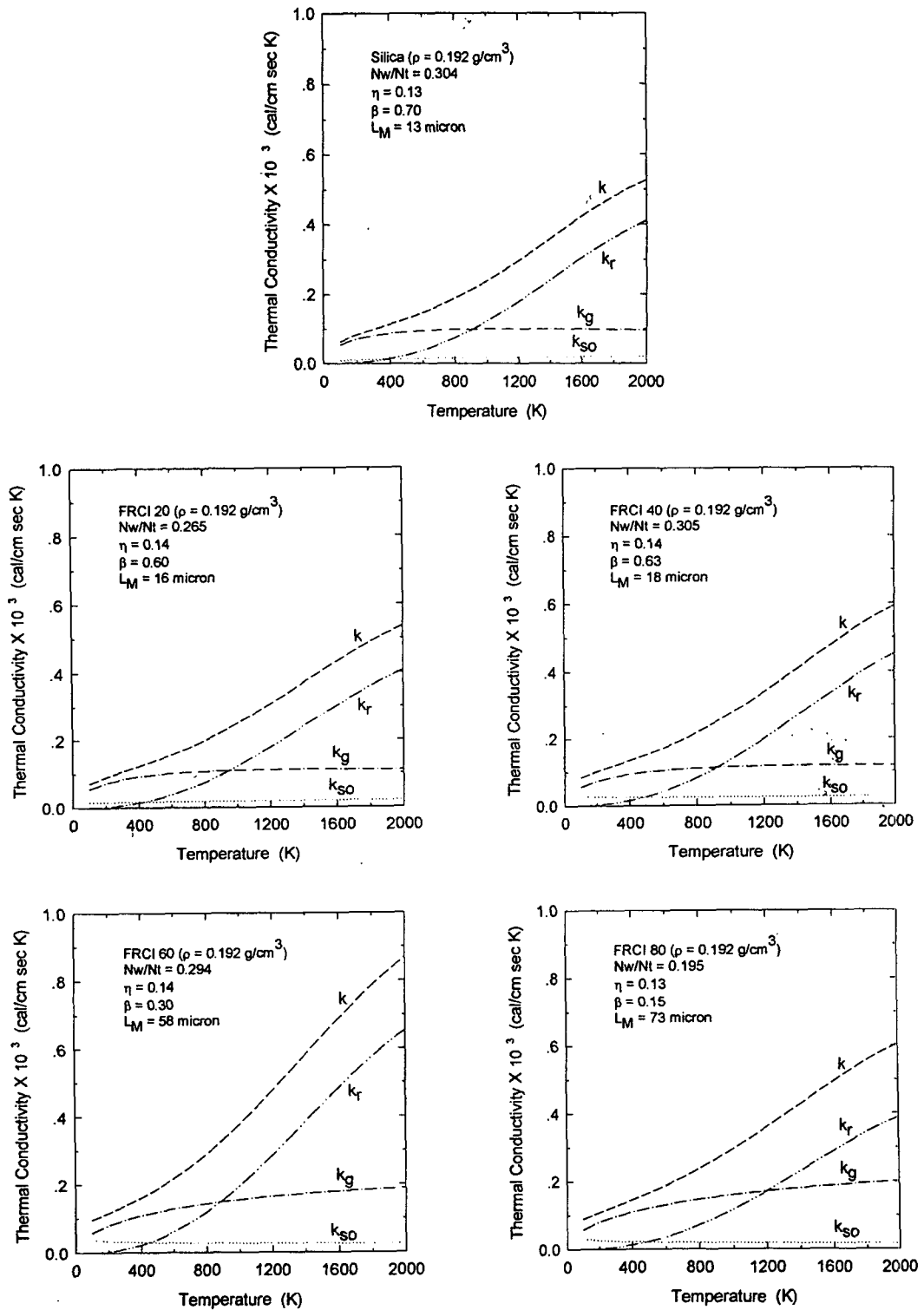


Fig. 5. Thermal conductivity for silica and FRCI.  $\rho = 0.192 \text{ g/cm}^3$ .

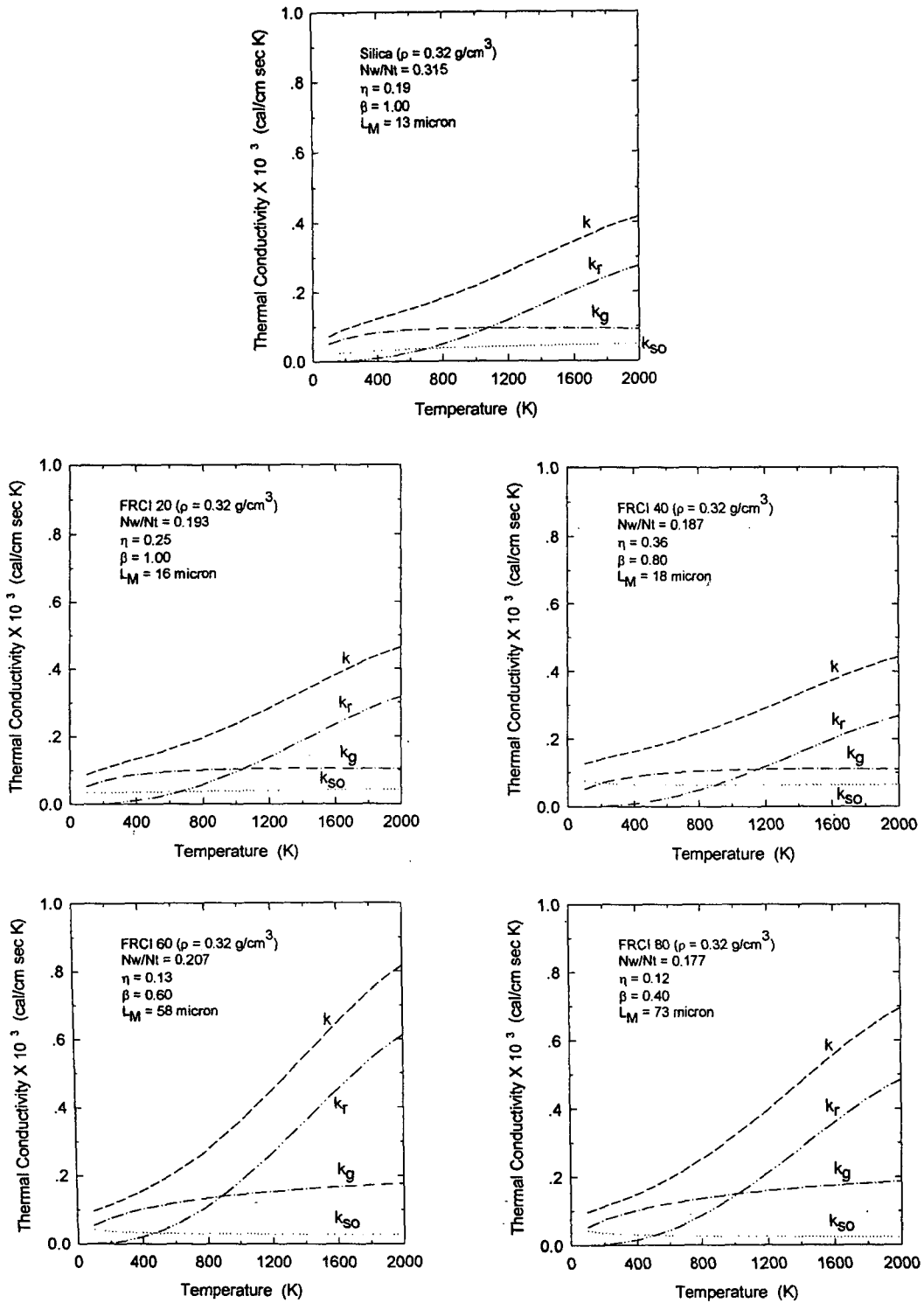


Fig. 6. Thermal conductivity for silica and FRCI.  $\rho = 0.32$  g/cm<sup>3</sup>.



### 3.3. 알루미늄노보로실리케이트의 함량에 따른 열전도도

Fig. 5는 밀도가  $0.192 \text{ g/cm}^3$ 일 때 알루미늄노보로실리케이트의 함량에 따른 열전도도를 나타낸 그림이다. 알루미늄노보로실리케이트의 함량이 60 wt% 까지 겔보기 열전도도가 증가하다가 80 wt%에서는 감소하는 것을 볼 수 있다. 기체 열전도도를 보면 함량의 증가에 따라 계속 증가하는 것을 볼 수 있으며, 복사 열전도도는 겔보기 열전도도와 마찬가지로 60 wt% 까지 증가하다가 80 wt%에서는 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 겔보기 열전도도가 주로 복사 열전도도에 크게 영향받음을 알 수 있다. 그리고, 고체의 열전도도는 함량에 상관없이 거의 일정하였다. 결국, 알루미늄노보로실리케이트의 함량은 주로 복사 열전도도와 기체 열전도도에 영향을 주며, 고체 열전도도에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 6은 밀도가  $0.32 \text{ g/cm}^3$ 일 때 알루미늄노보로실리케이트의 함량에 따른 열전도도를 나타낸 그림이다. 밀도가  $0.192 \text{ g/cm}^3$ 일 때와 마찬가지로 알루미늄노보로실리케이트의 함량이 60 wt% 까지 겔보기 열전도도가 증가하다가 80 wt%에서 감소하는 것을 볼 수 있다. 또, 밀도가  $0.192 \text{ g/cm}^3$ 인 경우와 마찬가지로 기체 열전도도는 알루미늄노보로실리케이트의 함량 증가에 따라 계속 증가하였으며, 복사 열전도도는 60 wt% 일 때가 가장 높았다. 고체 열전도도는 40 wt%에서 가장 높았다가 그 이후 계속 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 보았듯이 실리카가 FRCI 40 보다 열적응답특성이 더 좋았는데 그 이유를 Fig. 6에서 알 수 있다. Fig. 6에서 실리카와 FRCI 40의 열전도도를 비교해

보면 실리카의 열전도도가 약간 더 작은 것을 볼 수 있다. 그리고 두 경우의 복사 열전도도와 고체 열전도도가 비슷한 것으로 보아 이러한 차이는 기체 열전도도의 차이에 기인한 것임을 알 수 있다.

## 4. 결 론

이상과 같은 FRCI의 열적응답의 전산모사 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실리카가 FRCI 40 보다 열적응답특성이 좋았으며, 이는 실리카의 기체 열전도도가 FRCI 40의 것 보다 작기 때문인 것으로 사료된다.

2) 고온에서 복사 열전도도는 겔보기 열전도도의 대부분을 차지하였다.

3) 밀도의 증가는 고체 열전도도를 증가시켰으나, 복사 열전도도를 더 큰 폭으로 감소시켜 결국 겔보기 열전도도를 감소시켰다.

4) 알루미늄노보로실리케이트의 함량은 60 wt%까지는 겔보기 열전도도를 증가시켰으나 그 이후로는 감소시켰으며, 이는 알루미늄노보로실리케이트의 함량에 따른 복사 열전도도의 변화에 기인한 것으로 사료된다.

## 사 용 기 호

### Italic

A	area [ $\text{cm}^2$ ]
$C_p$	specific heat [ $\text{J/g}\cdot\text{K}$ ]
d	diameter [cm]
h	total insulation thickness [cm]
K	gas constant for air [ $\text{J/mol}\cdot\text{K}$ ]

k	thermal conductivity [W/cm·K]
L	pore size [cm]
M	mass [g]
N	number of fibers [dimensionless]
P	pressure [atm]
S <sub>v</sub>	solid volume fraction [dimensionless]
T	temperature [K]
t	time [sec]
w	mean free path [cm]
x	in depth distance [cm]

## Greek

$\beta$	emittance adjustment parameter [dimensionless]
$\epsilon$	emittance [dimensionless]
$\eta$	bonding efficiency [dimensionless]
$\rho$	density [g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant [=5.6705 × 10 <sup>-12</sup> W/cm <sup>2</sup> ·K]

## Subscript

g	gas
i	fiber orientation, st-strong, w-weak
j	fiber material, s-silica, abs-aluminoborosilicate
M	engineering model
r	radiation
so	solid
T	total

## 감사의 글

본 연구는 1996년도 교육부 신소재 분야의 연구 지원에 의하여 수행되었으며, 한양대학교 신소재 공정 공학원의 장학금 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [ 1 ] Leiser, D.B., Goldstein, H.E. and Smith, M., U.S. Patent No. 4,148,962 (1978).
- [ 2 ] Leiser, D.B., Stewart, D.A. and Smith, M., Advances in TPS and Structures for Space Transportation System, NASA CP-2315 (1983).
- [ 3 ] Leiser, D.B., Stewart, D.A., Kolodzie, P. and Smith, M., AIAA Paper 85-1056 (1985).
- [ 4 ] Leiser, D.B. and Stewart, D.A., Ceram. Eng. Sci. Proc. 6 (1985) 769.
- [ 5 ] Schiesser, W.E., The Numerical Method of Lines: Integration of Partial Differential Equations, Academic Press, Inc., San Diego, CA (1991).