

모델링/시뮬레이션 기법을 이용한 세라믹 섬유 단열재의 열전도도 해석 I

An Analysis of Thermal Conductivity of Ceramic Fibrous Insulator by Modeling & Simulation Method I

강 형* 백 용 기**
Kang, Hyung Baek, Yong-Kee

요 약

시뮬레이션/모델링 기법을 이용하여 세라믹 섬유단열재의 열전도도를 분석하였으며, 열전도도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 세라믹 섬유 단열재는 1600℃까지 사용할 수 있는 고온용 단열재로써 극심한 공력가열 환경에 노출되는 고속 항공기 및 유도무기에 적용 가능한 재료이다. 섬유 단열재의 열전도도는 전도 열전달 및 복사 열전달에 의해 결정되므로 각각의 메카니즘에 의한 열전도도를 계산하였다. 전도 열전달은 균질화 기법을 이용하였으며, 복사 열전달은 무작위 수(random number)를 이용하여 계산하였다. 특히 복사 가능 거리 및 확률을 도입함으로써 실험 상수(experimental constant) 없이 복사 열전도도를 계산할 수 있었다. 본 논문 연구 방법으로 계산된 섬유 단열재의 열전도도는 실험값에 대하여 평균 93%의 신뢰도를 나타내었다. 또 본 논문에서 개발한 열전도도 계산 프로그램은 섬유와 공기의 열적 특성만으로 계산이 가능하므로, 섬유 단열재와 유사한 내부조직을 갖는 대부분의 복합재료에 적용할 수 있다.

주요기술용어 : 세라믹 섬유 단열재(ceramic fibrous insulator), 균질화 기법(homogenization technique), 전도 열전달(conductive heat transfer), 복사 열전달(radiative heat transfer), 복사 확률(radiative probability)

ABSTRACT

Thermal conductivity of ceramic fibrous insulator was analysed and predicted by using the modeling/simulation technique. Ceramic fibrous insulators are widely used as high temperature insulator on account of their lightweight mass and heat resisting properties. Especially it is suitable to protect the high speed aircraft and missiles from severe aero-thermodynamic heating. Thermal conductivity of ceramic fibrous insulator could be determined from the conductive heat transfer and the radiative heat transfer through the insulator. In order to estimate conductive thermal conductivity, homogenization technique was applied, while radiative thermal conductivity was computed by means of random number and radiation probability. Particularly radiation probability can make it possible to estimate the

* 국방과학연구소 선임연구원

** 국방과학연구소 책임연구원

conductivity of fibrous insulator without any experimental constant. The calculated conductivity predicted in the present study have a reasonable accuracy with an average error of 7 percent to experimental data.

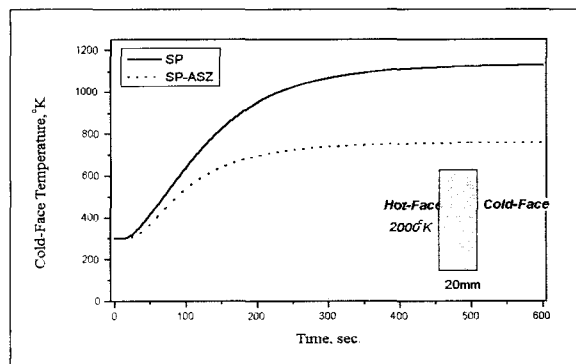
1. 서 론

세라믹 섬유 단열재는 고체인 소량의 세라믹 섬유와 다량의 공기로 구성된 복합재료이다. 이 재료는 가볍고 내열성이 우수하며, 열전도도가 작기 때문에 우주·항공 분야와 같이 극한 환경에 노출되는 장비의 단열재로 이용하고 있다. 특히 고속 유도무기의 동체 내벽에 적용하여 비행 중 발생하는 공력가열에 대하여 동체 내부를 보호하는데 효과적이다.

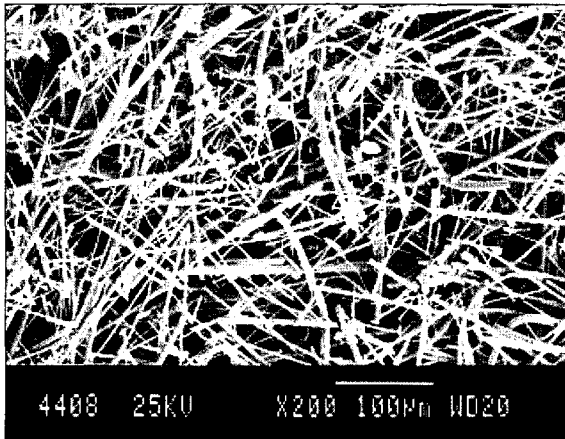
고속 유도무기의 동체 외벽 재료로 흔히 탄소-탄소 복합재, 실리카-페놀(silica-phenol) 복합재 등의 내열재를 사용한다. 이러한 복합재는 우수한 내열 특성을 갖고 있으나 열전도도가 $1.6 \sim 2.3 \text{W/m}^2\text{K}^{[1]}$ 으로 섬유 단열재의 열전도도 $0.1 \sim 0.4 \text{W/m}^2\text{K}^{[2]}$ 에 비해 상대적으로 크다. 따라서 극심한 공력 가열에 대하여 동체 내부를 보호하기 위하여 복합재의 동체 외벽을 일정한 두께 이하로 줄일 수 없다. 그러나 섬유 단열재를 적용할 경우 동체 외벽의 두께를 감소시킬 수 있으며, 또 섬유 단열재의 비중은 초고온 복합재 비중의 20% 이하이므로 중량 감소도 기대할 수 있다. 그림 1은 고온 복합재 실리카-페놀(SP)에 국과연에서 개발한 섬유 단열재(ASZ 단열재)를 적용했을 경우 단열 효과를 비교한 것으로, 재료의 고온부(hot-face) 온도가 2000°K 로 일정할 때 저온부(cold-face)의 온도를 시간에 따라 도시한 것이다. 두께 20mm의 실리카-페놀 복합재와, 두께 15mm의 실리카-페놀 복합재에 두께 5mm의 ASZ 단열재를 적용시킨 재료의 단열 효과의 차

이를 분명하게 확인할 수 있다.

섬유 단열재의 단열 효과는 낮은 열전도도에 기인하므로 새로운 섬유 단열재를 개발하기 위하여 열전도도를 제어할 필요가 있다. 그러나 섬유 단열재는 이종 물질인 섬유와 공기를 통하여 열이 전달되며, 섬유의 배열이 무작위로 형성되어 있으므로 열전도도를 예측하기 쉽지 않다. 그림 2는 섬유 단열재의 내부조직으로써 무작위로 배열된 섬유와 공기의 형상을 확인할 수 있다. 또 무기체계의 급격한 발전에 대처하기 위하여 신속하고 효율적인 재료 개발이 중요한 요소로 작용하게 되었다. 이러한 이유로 최근에는 재료 개발에 모델링/시뮬레이션 기법을 적용하려는 시도가 추진되고 있다. 재료공학 분야에서는 구조물 제작과 마찬가지로 설계, 제조, 시험/평가의 단계를 거쳐 재료를 개발한다. 이와 같은 일련의 재료 개발 단계는 상당한 인적, 물적 자원을 필요로 하며, 경우에 따라 시



[그림 1] 실리카-페놀 복합재에서 ASZ 단열재의 적용 효과 비교



[그림 2] 세라믹 섬유 단열재(ASZ)의 내부조직

험/평가 후 다시 재료를 설계해야 할 필요도 있다. 그러나 재료 개발에서 모델링/시뮬레이션 기법을 적용할 경우, 재료 설계 이전에 재료의 특성을 예측할 수 있으며, 개발 단계에서 생길 수 있는 시행착오를 최소화할 수 있다.

본 논문은 모델링/시뮬레이션 기법을 이용하여 섬유 단열재의 열전도도를 해석하고 예측할 수 있는 프로그램을 개발하는 것이다. 섬유 단열재의 열전도도는 섬유의 열적 특성(thermal properties) 외에 섬유의 크기, 섬유의 함량, 섬유의 배열 형태 등 내부조직에 의해 변화하는데, 이러한 변수의 영향을 정량적으로 분석함으로써 섬유 단열재의 열전도도를 제어할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 내부조직과 열전달 이론을 기초로 섬유 단열재의 열전도도 해석 프로그램을 제작하였으며, ASZ 단열재를 대상으로 프로그램의 타당성을 검토하였다.

2. 이론적 배경 및 해석 방법

가. 섬유 단열재의 열전도도

열은 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)의 3가지 메카니즘(mechanism)으로 전달된다. 이러한 열 전달 메카니즘은 독립적인 현상이므로 섬유 단열재 내부에서의 열전달은 각 메카니즘에 의한 열전달의 합으로 나타낼 수 있다. 즉, 섬유 단열재의 열전도도 $k^{insulator}$ 는

$$k^{insulator} = k_{convection} + k_{conduction} + k_{radiation} \quad (1)$$

이 된다. 여기서 k_i 는 각 메카니즘에 의한 열전도도이다. 공기와 같은 유체에서는 외부에서 작용하는 힘이 없을 경우에도 대류에 의해 열이 전달될 수 있으나, 섬유 단열재에서와 같이 섬유와 섬유 사이에 존재하는 공기의 크기가 작을 경우 대류 열전달(convective heat transfer)은 무시할 수 있다. 공기와 섬유에 의한 전도 열전달(conductive heat transfer)은 동일한 메카니즘으로 일어나며 서로 연관되어 있다. 또 기체에 대한 복사 열전달(radiative conduction)은 무시할 수 있으므로 식 (1)을 다시 쓰면

$$k^{insulator} = k_{conduction}^{air+fiber} + k_{radiation}^{fiber} \quad (2)$$

이 된다. 따라서 공기와 섬유에 의한 전도 열전도도 $k_{conduction}^{air+fiber}$ 와 섬유에 의한 복사 열전도도 $k_{radiation}^{fiber}$ 으로부터 섬유 단열재의 열전도도를 계산할 수 있다.^[3]

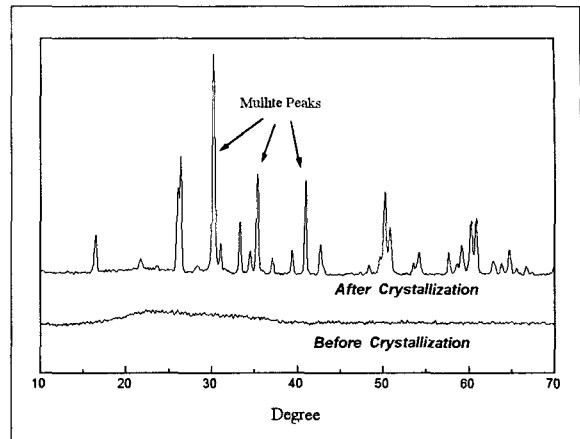
나. 전도 열전도도

섬유 단열재의 전도 열전도도는 구성 물질인 섬유

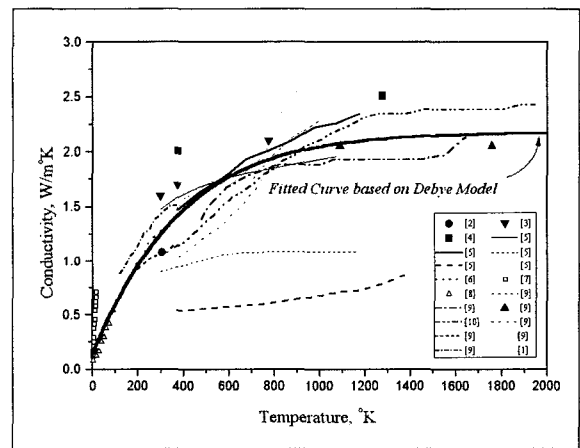
와 공기의 열적 특성, 내부 조직에 의해 영향을 받는다. 따라서 열전도도를 계산하기 위하여 섬유와 공기의 온도에 따른 비열 및 열전도도를 알아야 하며 수치해석을 위하여 내부조직을 정량화 할 필요가 있다. 공기의 열전도도는 여러 참고 문헌에 발표되었으나 섬유의 열전도도에 대한 연구 결과는 많지 않다. 또 섬유 단열재에서 섬유는 무작위로 배열되어 있으므로 내부조직을 정량화 하기 쉽지 않다. 즉 이에 대한 해석 방법이 전도 열전도도를 계산하는데, 가장 중요하다.

본 논문에서 개발한 열전도도 예측 프로그램은 ASZ 단열재에 적용하기 위한 것이므로 ASZ 단열재 제조에 사용한 섬유의 열전도도를 알아야 한다. ASZ 단열재는 1600°C 이하에서 사용 가능한 고온용 단열재로써, 단열재 제조에 사용한 섬유의 조성은 알루미나(alumina, Al_2O_3), 실리카(silica, SiO_2), 지르코니아(zirconia, ZrO_2)가 중량비로 각각 46~48%, 37~39%, 14~16%이다. 흔히 사용하는 알루미나와 실리카 조성의 섬유에 지르코니아를 첨가함으로써 섬유의 내열성을 개선한 것이다. 그러나 ASZ 섬유에 대한 열전도도, 특히 온도에 따른 열전도도의 변화는 아직까지 발표된 바 없다. 또 이와 유사한 알루미나-실리카 조성의 섬유에 대한 실험 결과도 많지 않으며, 일부 열전도도 자료는 ASZ 섬유와 달리 결정질(crystalline) 재료에 대한 것이다. 그림 3은 ASZ 섬유의 X-ray 분석 결과로써, ASZ 섬유가 비정질 상으로 구성되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 물리적 개념을 기초로 ASZ 섬유의 열전도도를 추정하였다.

비정질 세라믹 재료에 대하여 온도에 따른 열전도도 변화는 재료에 무관하게 유사한 경향을 나타내며 그 차이도 크지 않다고 알려져 있다.^[4] 따라서 여러



[그림 3] 세라믹 섬유의 X-ray 분석 결과



[그림 4] Debye Model에 의한 섬유의 열전도도

가지 세라믹 비정질 재료에 대한 열전도도 측정값을 기초로 ASZ 섬유의 열전도도를 가늠할 수 있다. 그림 4는 여러 가지 비정질 재료의 열전도도를 종합한 것이다. 그러나 그림 4에서 알 수 있듯이 동일한 조성의 재료에서도 실험 결과가 일정하지 않으므로 열전도도의 온도 의존성을 단순하게 구하기 곤란하다.

유전 물질에서 열전달은 포논(phonon)을 기초로 이해할 수 있다.^[11] 즉, 열전도도는 원자의 열용량(heat capacity), 평균 자유행로(mean free path) 등에 의존

한다. 그런데 비정질상 재료(amorphous phase material)에서 평균 자유행로는 원자간 거리와 같으므로 열전도도는 열용량에 비례하게 된다. 흔히 고체의 열용량은 Debye 모델 또는 Einstein 모델을 이용하여 물리적으로 계산할 수 있으므로 열전도도의 온도 의존성을 해석할 수 있다. 그림 4에 Debye 모델을 이용하여 계산된 열전도도를 같이 나타내었는데, 여러 가지 비정질 세라믹 재료의 열전도도에 Debye 모델을 적용시킨 것이다.

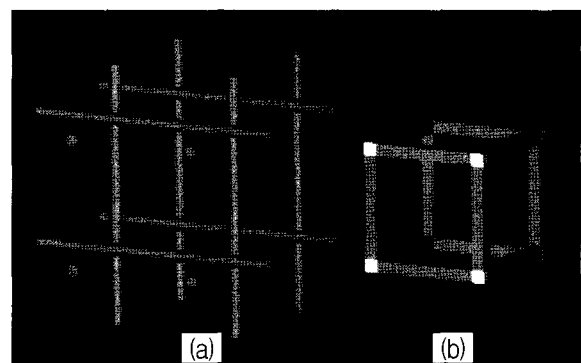
섬유 단열재에서 전도 열전도도는 공기와 공기, 섬유와 섬유, 공기와 섬유 사이에서 일어나는 열 전달의 합이므로 섬유와 공기의 배열 형상, 즉 내부조직에 영향을 받는다. 흔히 이종 물질이 혼합된 복합재의 열전도도를 간단히 계산하기 위하여 혼합률 법칙(rule of mixture)^[12]을 이용한다. 그러나 혼합률 법칙은 내부조직이 단순한 경우에 적용할 수 있으며, 열전도도를 계산할 때 두 물질 사이의 열 전달을 충분히 고려하지 않는 단점이 있다. 따라서 내부조직이 복잡한 섬유 단열재에서는 혼합률 법칙을 적용하기 곤란하다.

본 논문에서는 전도 열전도도를 계산하기 위하여 균질화기법(homogenization technique)을 이용하였다. 균질화 기법은 복합재의 등가 물성치(equivalent property)를 구하는데 유용한 방법 중의 하나이다. 이 방법은 복합재 내부의 미시적(micro scale) 열전달 현상을 이용하여 거시적(macro scale) 등가 열전도도를 구하는 것이다. 균질화 기법은 혼합률 법칙을 이용할 수 없는 보다 복잡한 내부조직의 재료에 적용할 수 있으나 내부조직이 규칙적으로 반복되는 형상일 경우 효율적이라고 알려져 있다. 그림 2에서와 같이 섬유 단열재에서 섬유는 무작위(random)로 배열되어 있으며 규칙성을 보이지 않는다. 따라서 섬유의 배열을 재구성하여 규칙적인 내부조직 모델을 설정할 필요가

있다. 섬유 단열재에서 섬유의 배열이 특정한 방향으로 편중되어 있지 않으며, 또 열전달이 1차원적으로 일어난다는 가정으로 열전도도를 계산하기 때문에 섬유의 배열을 규칙적인 형태로 재구성할 수 있다고 판단하였기 때문이다. 그림 5는 재구성한 섬유 단열재의 내부조직 모델이다. 그림 5(a)와 같이 섬유의 배열이 직각 형태(orthogonal)라고 가정하면 그림 5(b)와 같은 단위 형상(unit cell)을 얻을 수 있다. 이 때 단위 형상에서 섬유와 공기의 비율은 전체 섬유 단열재에서의 비율과 같다.

섬유 단열재에서 섬유와 섬유를 접착시키기 위하여 흔히 결합재를 첨가한다. 결합재는 섬유를 연결시킴으로 섬유와 섬유를 통한 전도 열전달에 영향을 미칠 수 있다. 이를 고려하기 위하여 그림 5 (b)에서 8개의 모서리를 결합재라고 가정하였으며 전도 열전도도를 계산하기 위하여 섬유, 공기, 결합재의 열전도도를 이용하였다.

균질화 기법을 적용하여 등가 열전도도를 구하는 방법^[13]은 이미 보고된 바 있으며 다음과 같은 방법으로 계산한다. 전도 열전달은



[그림 5] 섬유 단열재의 (a) 내부조직 모델 및 (b) 단위 형상

$$\int_{\Omega} \left(v \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla v \cdot k \nabla T \right) d\Omega = \int_{\Omega} v \dot{q} d\Omega \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있는데, 여기서 v 는 가상온도(virtual temperature), ρ 는 밀도, C 는 비열, k 는 열전도도, T 는 온도, \dot{q} 는 열 이동속도(heat flux)이다. 충분히 작은 크기의 상수 ε 에 의해 복합재의 거시적(macro scale) 온도(T_a), 가상온도(v_a)와 내부조직의 미시적(micro scale) 온도(T_i), 가상온도(v_i)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T_a(x) + \varepsilon T_i(x, y) \quad (4)$$

$$v = v_a(x) + \varepsilon v_i(x, y) \quad (5)$$

무한히 작은 ε 에 대하여 식(3)을 거시적 가상온도 v_a 와 미시적 가상온도 v_i 로 분해하면

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Omega} \left[v_a \rho C \frac{\partial T_a}{\partial t} + \nabla_x v_a k (\nabla_x T_a + \nabla_y T_i) - v_a \dot{q} \right] d\Omega = 0 \quad (6)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Omega} [\nabla_y v_i k (\nabla_x T_a + \nabla_y T_i)] d\Omega = 0 \quad (7)$$

이 된다. 거시적 온도와 미시적 온도의 선형적 특성을 고려하여 변수를 분리하면

$$T_i(x, y) = -\chi_i(y) \frac{\partial T_a(x)}{\partial \chi_i} \quad (8)$$

이 되는데, 여기서 미시적 변수 χ_i 은 내부조직 형상의 주기 Y 에 의하여

$$\chi_i(y) = \chi_i(y + Y) \quad (9)$$

으로 나타낼 수 있으므로 식 (3)을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left(\rho v_a C \frac{\partial T_a}{\partial t} + \nabla_x v_a k^H \nabla_x T_a \right) d\Omega \\ = \int_{\Omega} v_a \dot{q}^H d\Omega \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다. 여기서 k^H , \dot{q}^H 는 각각 균질화된 등가 열전도도 및 등가 열 이동속도(heat flux)이다. 이를 이용하여 등가 열전도도 및 등가 열 이동속도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$k_{ij}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(k_{ij} - k_{ik} \frac{\partial \chi_j}{\partial y_k} \right) dY \quad (11)$$

$$\dot{q}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \dot{q} dY \quad (12)$$

다. 복사 열전도도

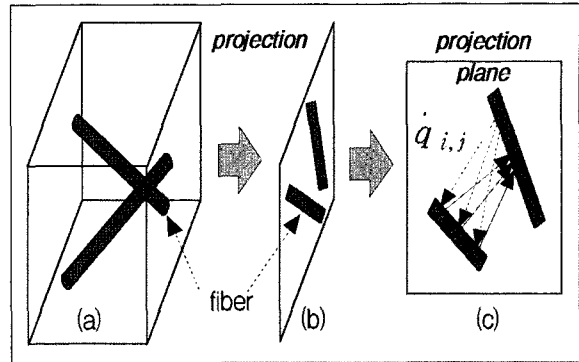
섬유 단열재에서 복사 열전달은 섬유와 섬유 사이에서만 일어나므로 섬유와 섬유 사이에서 전달되는 모든 열량을 계산함으로써 열전도도를 구할 수 있다. 이를 위하여 섬유 단열재 내의 각 섬유를 좌표 형태로 수치화 할 필요가 있다. 그러나 복사 열전달은 배열 형태에 크게 의존하므로 내부조직을 인위적으로 재구성하기 곤란하다. 즉, 그림 5(b)와 같은 내부조직 모델을 이용할 경우 계산 결과의 신뢰도는 낮아질 것이다. 따라서 내부조직 모델은 몬테카를로 시뮬레이션^[14](Monte Carlo simulation) 기법의 개념을 이용하였다.

섬유 단열재에서 섬유는 그림 2에서와 같이 무작위로 구성되어 있다. 따라서 컴퓨터의 무작위 수

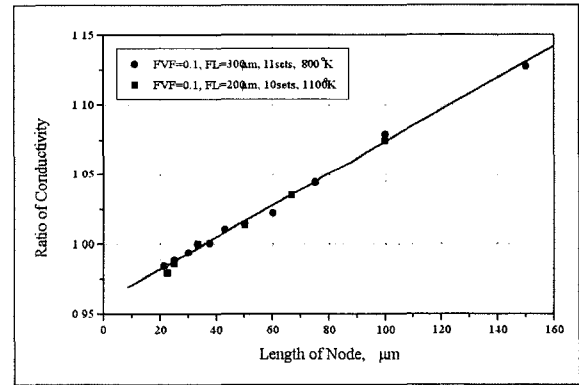
(random number)를 이용하여 무작위로 형성된 섬유
의 배열 형태를 얻을 수 있으며 이러한 과정을 무한
히 반복하여 평균값을 취하면 실제 내부조직에 근접
하게 된다. 이를 흔히 몬테카를로 시뮬레이션이라 하
며 무작위로 형성되는 값의 확률 평균을 구할 때 유
용하다.

복사는 섬유 표면의 한 점(point)에서 다른 점으로
열이 이동하는 것이므로, 시편 단위의 크기에 포함된
섬유의 수와 현재의 계산기(computer) 성능을 감안할
때 직접 계산하는 것은 비효율적이다. 따라서 노드
(node)의 개념을 도입하여 2차원으로 해석하였다. 노
드는 수치해석 방법에서 흔히 사용하는 것으로 섬유
를 일정한 크기로 나누고 나누어진 부분을 하나의 노
드라고 간주하는데, 노드 내의 특성은 동일하다고 가
정하는 것이다. 노드의 크기가 클수록 계산은 신속하
고 용이하지만 오차가 커진다. 또 3차원 공간에 존재
하는 섬유를 2차원 면에 투영시키고 복사 열전달은 2
차원 투영면에서 일어난다고 가정하였다. 계산기의 성
능과 열전도도 예측 프로그램의 효율성을 감안할 때
해석 방법을 단순화시키는 것이 효율적이라 판단하였
기 때문이다. 그러나 이와 관련된 오차를 최소화하기
위하여, 노드 길이의 영향을 정량적으로 분석하여 복
사 열전도도 계산에 반영하였다. 또 3차원 섬유 배열
을 2차원으로 해석할 때 생기는 오차를 줄이기 위하
여 투영면을 이용하였다. 그림 6은 2차원 복사 열전달
의 개념을 나타낸 것이다.

복사 열전달 계산에서 노드(node)는 계산의 효율성
을 위하여 임의로 설정하는 것이며 노드의 길이에 따
라 복사 열전도도 계산 결과가 달라질 수 있다. 그림
7은 노드 길이에 따른 복사 열전도도의 변화를 나타
낸 것이다. 복사 열전도도는 온도, 섬유 길이 등에 따
라 크기가 다르기 때문에 노드 길이 33.3 μ m일 때를



[그림 6] 투영면을 이용한 복사 열전달 계산의
개념도



[그림 7] 노드 길이에 따른 복사 열전도도의 변화율

기준으로 변화율을 비교한 것이다. 일정한 섬유 함량
에 대하여 계산된 복사 열전도도의 변화율은 섬유 길
이, 온도에 무관하며, 노드 길이에 대하여 직선적으로
변화한다. 따라서 그림 7에서 외삽법(extrapolation)을
이용하여 노드의 길이가 0일 때의 열전도도를 구할
수 있으며 이를 계산 결과에 적용하였다.

그림 6(c)에서 투영면의 두 섬유 사이의 복사 열전
달은 다음 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$q_{1,2} = \frac{\epsilon_1 A_1 \epsilon_2 A_2 (E_1 - E_2)}{\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2 - \epsilon_1 \epsilon_2 A_1 A_2} \quad (13)$$

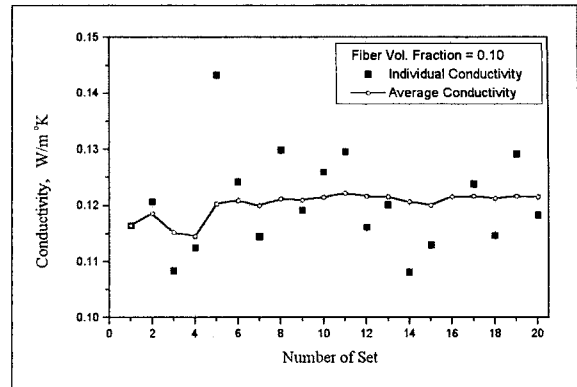
여기서 ϵ_1, ϵ_2 는 각각 두 고체의 emissivity이며 A_1, A_2 는 복사 면적, F_1 은 기하학적 배열 형태이다. 또 섬유를 흑체(black body)라고 가정하면 $E_i = \sigma T_i^4$ 이 되는데, σ, T 는 각각 Stefan-Boltzmann 상수와 흑체의 온도이다. 동일한 두 고체의 온도가 각각 T_1, T_2 일 때, 식 (13)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{q}_{1,2} = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2 - A_1 F_1} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (14)$$

즉, 주어진 온도 조건에서 복사에 의한 열 전달은 섬유의 기하학적 배열 형태에 의존하게 된다. 섬유의 3차원 배열형태가 2차원으로 투영될 때 기하학적 배열 형태를 나타내는 상수 F_1 이 달라지지만 복사 면적 A_i 도 달라지므로 전체적인 열 이동 속도 $\dot{q}_{1,2}$ 의 변화는 크지 않다. 따라서 복사 열전도도 계산에서 3차원 섬유 배열을 2차원으로 투영시킴으로써 발생하는 오차는 크지 않을 것으로 판단된다.

복사 열전도도는 몬테 카를로 시뮬레이션의 개념을 기초로 계산하였으므로 독립적인 계산 횟수에 따라 신뢰도가 달라진다. 그러나 효율적인 측면에서 무한히 많은 계산은 불필요하다. 그림 8은 각각의 독립적인 열전도도 계산 횟수에 대하여 평균 열전도도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 Set는 계산 횟수를 의미한다. 그림 8에서와 같이 계산 횟수가 증가함에 따라 평균치는 일정한 값에 수렴하게 된다. 또 계산 횟수가 5회 이상 20회까지 평균값의 표준편차는 0.5% 수준이다. 따라서 계산 횟수를 5회 이상으로 설정할 필요가 있다. 본 논문에서는 계산 횟수를 10회로 동일하게 하였다.

흔히 복사 열전달을 태양의 복사 열전달에 기초한



[그림 8] 계산 횟수에 따른 평균 열전도도

모델(solar model)로 이해한다. 태양열의 복사 열전달은

$$\dot{q}^{\text{solar}} = \frac{4}{3} \frac{\sigma}{\kappa} T^4 \quad (15)$$

으로 나타낼 수 있는데, 여기서 κ 는 Rosseland mean extinction coefficient 또는 Rosseland mean opacity이다. 그러나 섬유단열재의 복사 열전달은 태양열 모델과 달리 모든 섬유에서 자유롭게 복사 열전달이 일어나지 않는다. 복사 열전달은 포톤(photon)이라는 일종의 전자기파(electro-magnetic wave)에 의해 열이 이동하는 것이므로 섬유와 섬유 사이에 장애물이 없을 경우에 일어난다. 즉, 하나의 섬유에서 다른 섬유까지 직선적인 투명성이 확보될 때 복사 열전달이 가능하다. 따라서 섬유 단열재 내의 모든 섬유와 섬유 사이에서 복사 열전달이 일어나지 않으며 섬유와 섬유 사이의 거리에 따라 복사 열전달이 가능한 확률이 달라진다. 본 논문에서는 복사 열전도도를 계산하는데 복사 가능 확률을 적용하였다.

하나의 섬유에서 일정한 거리에 위치한 다른 섬유 사이에 존재하는 섬유의 수를 이용하여 복사 가능확

를 계산할 수 있으며, 이는 투영 면적 중 다른 섬유에 의해 가려지지 않는 면적의 비율과 같다. 반경이 R 이며 두께 dr 인 속이 빈 구(spherical shell)를 고려할 때, 구의 부피 dV 와 여기에 포함된 섬유의 수는

$$dN = \frac{\phi dV}{\pi/4 L D^2} = \frac{16 \phi}{L D^2} R^2 dr \quad (16)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 ϕ 는 섬유의 체적비 (fiber volume fraction), D, L 은 각각 섬유의 직경 및 길이이다. 섬유 하나의 평균 투영면적 \overline{A}^b 을 이용하여 전체 투영면적 A_0 에 대하여 섬유에 의해 가려지는 면적비 dR_A^0 은 다음 식 (17)과 같다.

$$dR_A^0 = \frac{\overline{A}^b}{A_0} \cdot dN \quad (17)$$

섬유 단열재에 이용한 섬유는 직경에 대하여 길이가 상대적으로 길기 때문에 투영면에서 섬유와 섬유는 필연적으로 겹쳐진다. 따라서 실제 섬유에 의해 가려지는 면적은 겹쳐진 면적만큼 감소한다. 정사각형의 투영면에서 투영된 섬유가 균일하게 배열되어 있다고 가정하여 하나의 섬유에 대하여 다른 섬유에 의해 겹쳐지는 수 dN^{lap} 을 구할 수 있으며, 또 섬유와 섬유가 겹쳐지는 평균 면적 \overline{A}^{lap} 는 식 (19)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$dN^{lap} = \left(\frac{16}{\pi^3} \frac{L}{D^2} \phi dr \right)^{1/2} \quad (18)$$

$$\overline{A}^{lap} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2}{\pi} DL \arctan \left(\frac{2D}{\pi L} \right) - D^2 \log \left\{ \tan \left(\frac{2D}{\pi L} \right) \right\} \right] \quad (19)$$

이 되며, 이를 이용하여 투영면에서 섬유에 의해 가려지는 실제 면적비를 계산하면

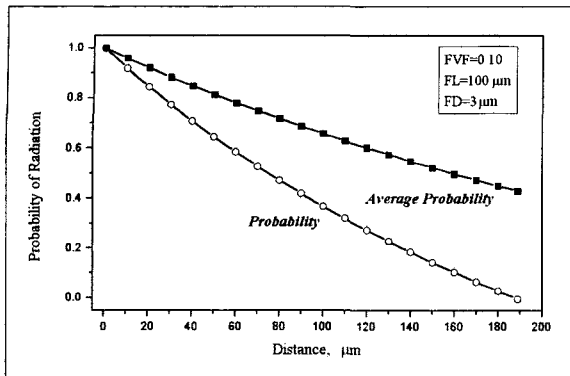
$$dR_A = dR_A^0 - \frac{1}{2} \frac{\overline{A}^{lap}}{A_0} \cdot dN^{lap} \quad (20)$$

이 된다. 중심에서 거리 R 에 위치한 섬유가 보일 확률, 즉 복사 열전달이 가능한 확률 $P(R)$ 은 섬유에 의해 가려지지 않을 확률과 같으므로 반경 R 인 구(sphere) 내에 존재하는 모든 섬유에 대하여 계산하면

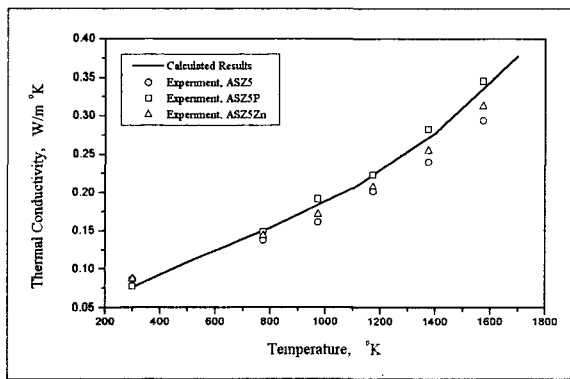
$$P(R) = \text{Lim}_{dr \rightarrow 0} \prod_{i=1}^{R/dr} (1 - dR_A) \quad (21)$$

이 된다.

그림 9는 섬유 함량 10%인 섬유 단열재에서 섬유와 섬유 사이의 거리에 따른 복사 가능 확률을 나타낸 것이다. 섬유에서 거리가 멀어질수록 복사 가능 확률은 급격히 감소하여 $100\mu\text{m}$ 떨어진 섬유로 복사 열전달이 일어날 확률은 약 0.37이며 $200\mu\text{m}$ 떨어진 섬유로의 복사 열전달은 무시할 수 있다. 또 그림 9에 평균 확률(average probability)을 같이 도시하였는데, 평균 확률이란 주어진 거리 내에서 복사 열전달이 일어날 수 있는 평균 확률을 의미한다. 즉, $100\mu\text{m}$ 이내에 존재하는 모든 섬유에서 복사 열전달이 일어날 확률은 약 0.66이 되며 따라서 전달되는 복사 열량은 방사되는 열량의 약 66%임을 의미한다.



[그림 9] 거리에 따른 복사 가능 확률



[그림 10] 계산 결과와 실험 결과의 비교

3. 결 과

가. 계산 결과의 비교

그림 10은 계산 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 여기서 ASZ5는 직경 3 μm , 길이 94 μm 의 섬유를 이용하여 제조한 섬유 단열재로써 섬유 함량은 약 9.6%이다. ASZ5P는 섬유는 ASZ5와 동일하나 단열재 제조 방법을 달리한 것이며, ASZ5Zn은 섬유의 조성을 극소량 변화시킨 것으로써 두 재료 모두 ASZ5 단열재와 유사한 것이다. 그림에서와 같이 계산 결과의 신뢰도는 90%~94%로써, 본 논문에서 연구한 열전도도 계

산 방법이 섬유 단열재의 열전도도를 예측할 수 있는 효과적인 방법임을 알 수 있다.

특히 본 논문의 열전도도 예측 방법은 섬유 함량과 섬유 및 공기의 열적 특성만으로 계산하며 임의의 상수 또는 실험 상수를 도입하지 않았기 때문에 유사한 내부 조직을 갖는 여러 가지 재료에 적용 가능하다. 또 섬유의 직경 및 길이의 영향을 정량적으로 계산할 수 있으므로 섬유 단열재의 내부조직 설계에 활용 가능하다.

나. 복사 가능 확률

식 (15)의 태양열 모델에서 Rosseland mean extinction coefficient, χ 는 본 연구의 복사 가능 거리와 유사한 개념으로써, χ 와 그림 10의 복사 가능 거리 d^r 의 역수는 같은 물리적 의미를 갖는다. 섬유 단열재에서 실험적으로 측정된 χ 는 기공률 0.93~0.96의 범위에서

$$\chi = 4.02 \times 10^4 \cdot (1 - p) \quad (22)$$

이라고 발표된 바 있다.^[15] 여기서 χ 의 단위는 1/m이며, p 는 기공률이다. 이를 이용하여 실험결과와 계산결과를 비교하였다. 표 2는 실험식 (22)를 이용하여 계산한 Rosseland mean extinction coefficient χ 와 계산된 복사 가능 거리의 역수 $1/d^r$ 를 비교한

[표 1] 계산결과($1/d^r$)와 실험결과(χ)의 비교

섬유 함량	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
$\chi, m^{-1}, \times 10^3$	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6	6.4
$1/d^r, m^{-1}, \times 10^3$	3.2	4.2	5.3	6.4	7.4	8.5

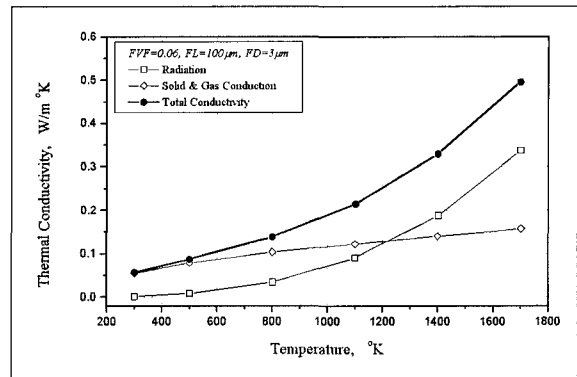
것이다.

표 1에 의하면 섬유 함량에 따른 Rosseland mean extinction coefficient x 와 복사 가능 거리의 역수 $1/d'$ 는 유사한 크기를 갖는다. 실험식에 의한 값과 계산 값에 차이가 있는 것은 식 (18) 및 (19)에서 섬유와 섬유가 균일하게 겹쳐진다고 가정하였으며 3개 이상의 섬유가 겹치는 현상을 무시하였기 때문이다. 즉, 3개 이상의 섬유가 겹쳐질 경우 다른 섬유에 의한 복사 열전달을 방해할 확률이 감소하므로 복사 가능 거리는 증가하며 실험 값 x 에 근접할 것이다. 또 섬유 함량이 증가할수록 그 차이가 증가하는 것은 섬유 함량이 커질수록 3개 이상의 섬유가 겹쳐질 가능성이 증가하기 때문이다.

그러나 섬유 단열재에서는 Rosseland mean extinction coefficient x , 또는 복사 가능거리 d' 만으로 열전도도를 정확히 예측할 수 없으며, 다른 섬유에 의해 복사 열전달이 방해받는 것을 고려해야 한다. 그림 10에서와 같이 본 논문의 계산 결과가 실험 결과와 잘 일치하는 것은 복사 가능 확률을 적용하였기 때문이다. 기 발표된 섬유 단열재의 열전도도 해석 방법^[15,16]에서는 대부분 이 점이 간과되었기 때문에 필연적으로 임의의 상수 또는 실험 상수를 적용했으나, 본 논문에서는 복사 가능 확률을 이용하여 물리적 상수만으로 열 전도도 해석이 가능하였다.

다. 섬유단열재 열전달 메커니즘

전도에 의한 열전도도와 복사에 의한 열전도도로부터 섬유 단열재의 열전도도를 계산하였다. 그림 11은 온도에 따른 섬유 단열재의 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 낮은 온도에서는 전도 열전도도가, 높은 온도에서는 복사 열전도도의 영향이 상대적으로 크다. 그림 11은 온도에 따른 섬유 단열재의



[그림 11] 섬유함량 10% 섬유단열재에서 온도에 따른 열전도도 변화

열전달 메커니즘을 이해하고 열전도도를 예측할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 또 섬유 단열재의 단열 특성을 개선하기 위하여 낮은 온도에서는 전도 열전달을, 높은 온도에서는 복사 열전달을 억제하는 것이 효과적인 방법임을 시사한다.

라. 결합제의 영향 분석

섬유와 섬유를 접촉시키는 결합제의 영향을 검토하였다. 표 2는 섬유 함량 10%의 섬유 단열재에서 결합재 열전도도에 따른 섬유 단열재의 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 여기서 k_{fiber} 는 섬유의 열전도도이다. 표 1에서와 같이 결합재의 열전도도가 섬유 열전도도의 3배일 때 섬유 단열재의 열전도도는 1.5%~2.9% 증가한다.

섬유의 결합을 위하여 섬유 단열재에 첨가는 결합재는 극히 소량이며 그림 5(b)를 참고하면 전체 섬유 단열재의 약 0.7%이다. 그러나 섬유 단열재에 첨가되는 결합재가 기계적 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다는 점에서 표 2의 결과는 중요한 의미를 시사한다. 즉, 섬유 단열재의 기계적 특성은 섬유와 섬유의 결합력에 의해 크게 달라지는데, 적절한 결합재를 선택할

[표 2] 결합재 열전도도 변화에 따른 섬유단열재의 열전도도

결합재 열전도도	k_{fiber}	$2 \times k_{\text{fiber}}$	$3 \times k_{\text{fiber}}$
500°K	0.1182	0.1208	0.1222
800°K	0.1634	0.1666	0.1682
1100°K	0.2141	0.2175	0.2193
1400°K	0.2827	0.2863	0.2881
1700°K	0.3762	0.3799	0.3818

경우 열전도도의 변화 없이 기계적 특성을 향상시킬 수 있다.

3. 결 론

수치해석 방법을 이용하여 섬유 단열재의 열전도도를 예측할 수 있다. 결과의 신뢰도는 평균 93%로써 본 연구에서 이용한 열전도도 해석 방법이 섬유 단열재의 열전도도를 예측하는 효과적인 방법임을 확인하였다.

복사 열전달 가능 확률의 개념을 도입함으로써, 기존의 수치해석 방법에서 흔히 사용하는 임의의 상수 또는 실험 상수를 배제할 수 있다. 따라서 유사한 내부 조직을 갖는 모든 섬유 단열재에 대하여 열전도도를 예측할 수 있다.

섬유 단열재의 열전도도에 미치는 결합재의 영향을 정량적으로 분석한 결과 전체 열전도도의 변화는 3% 미만이었다. 따라서 섬유 단열재의 기계적 특성과 열적 특성을 동시에 개선시킬 수 있는 방안을 수립할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 황기영 외 1, "Patran과 Abaqus를 이용한 로켓 노즐 내열재/단열재의 열전도도 해석", 연구보고서(MSDC-421-960754), 국방과학연구소, 1996.
- [2] 정동익 외 4, "세라믹 섬유 단열재의 1차년도 물성 분석" 연구보고서(MSDC-411-961540), 국방과학연구소, 1996.
- [3] 강형 외 3, "수치해석법을 이용한 세라믹 섬유단열재의 단열특성 분석 (I)" 연구보고서(TEDC-411-000633), 국방과학연구소, 2000.
- [4] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", John Wiley & Sons Inc. 1976, p.625.
- [5] David W. Richerson, "Modern Ceramic Engineering", Marcel Dekker Inc., 1982.
- [6] B. V. Karlekar and R. M. Desmond, "Engineering Heat Transfer", West Publishing Company, 1977, p.555.
- [7] L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science", Addison-Wesley Pub. Co., 1964.
- [8] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", John Wiley & Sons Inc. 1976, p.642.
- [9] "A Survey of High Temperature Ceramic Materials for Radomes", ML-TDR-64-296, 1964.
- [10] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", John Wiley & Sons Inc. 1976, p.626.
- [11] C. Kittel, "Introduction to Solid State Physics", John Wiley & Sons Inc. 1976.

- [12] J. P. Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill Inc., 1990.
- [13] 이진희 외 1, "균질화 기법을 이용한 복합재료의 등가 열전도계수의 계산" 대한기계학회 논문집 18권, 5호(1994), p.1245.
- [14] Dierk Raabe, "Computational Material Science" Wiley-Vch, 1998.
- [15] K. Kamiuto et. al. "Experimental Study of Simultaneous Conductive and Radiative Heat Transfer in Ceramic Fiber Insulation", J. Nuclear Sci. & Techn., Vol.19, No.6, 1982, p.460.
- [16] D. A. Stewart et. al. "Thermal Response of Integral, Multicomponent Composite Thermal Protection System", J. Spacecraft, Vol.23, No.4, 1986, p.420.