

## 다공성 단열재를 포함한 열방어구조의 열 특성 분석

황경민<sup>1</sup> · 김용하<sup>1</sup> · 이정진<sup>2</sup> · 박정선<sup>3,†</sup><sup>1</sup>한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과<sup>2</sup>한국항공우주연구원<sup>3</sup>한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부Thermal Characteristic Analysis of Thermal Protection System  
with Porous InsulationKyungmin Hwang<sup>1</sup>, Yongha Kim<sup>1</sup>, Jungjin Lee<sup>2</sup> and Jungsun Park<sup>3,†</sup><sup>1</sup>Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University,<sup>2</sup>Korea Aerospace Research Institute,<sup>3</sup>Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

## Abstract

In a number of industries, porous insulations have been frequently used, reducing thermal insulation space through excellent performance of the thermal insulation's characteristics. This paper suggests an effective thermal conductivity prediction model. Firstly, we perform a literature review of traditional effective thermal conductivity prediction models and compare each model with experimental heat transfer results. Furthermore, this research defines the effectiveness of thermal conductivity prediction models using experimental heat transfer results and the Zehner-Schlunder model. The newly defined effective thermal conductivity prediction model has been verified to better predict performance than other models. Finally, this research performs a transient heat transfer analysis of a thermal protection system with a porous insulation in a high speed vehicle using the finite element method and confirms the validity of the effective thermal conductivity prediction model.

## 초 록

본 논문에서는 다공성 단열재의 정확도가 높은 유효 열전도율 예측 모델을 새롭게 제안하고, 기존 예측 모델 및 시험 결과와 비교 검증하였다. 이를 위해 기존 유효 예측 모델들을 다공성 단열재의 고체 부피율에 따른 열전도율 시험 결과 값과 비교하였다. 그리고 고체의 부피율에 따른 유효 열전도율 시험 결과와 비교하여 가장 높은 정확도를 가진 Zehner-Schlunder 모델 및 시험 결과 데이터를 기반으로 고체-유체의 부피율과 열전도율 비로 구성된 다항식을 추가하여, 새로운 유효 열전도율 예측 모델을 정의하였다. 예측 모델을 시험 결과와 비교하여 검증하였다. 또한, 예측 모델을 적용하여 열방어구조의 과도 열전달 해석을 수행하였으며, 열전달 시험 결과와의 비교를 통해 유효 열전도율 예측 모델의 유효성을 확인하였다.

**Key Words** : Thermal Protection System(열방어구조), Thermal Characteristic Analysis(열 특성 분석), Effective Thermal Conductivity(유효 열전도율), Porous Insulation(다공성 단열재)

## 1. 서 론

다공성 단열재는 탁월한 단열 효과로 단열공간을 최소화하여, 기존 단열재 대비 내부 공간을 활용할 수 있어 여러 산업 분야에서 사용되고 있다. 특히 높은 단열 효과뿐만 아니라 경량화가 요구되는 항공우주 산업분야에서는 이와 같은 다공성 단열재의 수요가 증가

하고 있다. 초음속으로 비행하는 비행체는 공력가열로 인해 비행체 표면 온도가 상승하며, 이로 인한 구조물의 열 파손에 대한 문제가 발생할 수 있다. 고온의 환경조건을 갖는 구조물에 대한 열전달 및 열응력에 관한 연구는 활발히 진행되고 있다[1, 2]. 초고속 비행체의 표면 온도 상승을 막기 위해서는 다공성 단열재와 같은 고성능의 단열재를 적용한 열방어구조가 요구된다[3]. 1981년 미국 NASA에서는 스페이스 셔틀의 발사에 성공하였으며, 공력가열을 통한 기체 표면의 온도 상승을 막기 위해 다공성 단열재를 포함한 열방어구조를 사용하였다[4]. 다공성 단열재를 포함한 구조물의 열 특성을 분석하기 위해서는 다공성 단열재의 유효 열전도율 예측이 필요하다. 유효 열전도율 예측 방법은 시험적 방법[5, 6]과 해석적 방법[7, 8]이 있다. 유효 열전도율 예측을 위한 시험적 방법은 많은 시간과 비용이 소요되는 반면에 해석적 방법은 적은 시간과 비용으로 유효 열전달율을 예측할 수 있기 때문에 설계 초기 단계에서 유효하다. 따라서 다공성 단열재의 열 특성에 관한 연구에서는 해석적 방법을 기반으로 유효 열전도율 예측 모델 정의하였다. 기존 유효 열전도율 예측 모델은 대표적으로 Rayleigh, modified Rayleigh, Zehner-Schlunder와 같은 모델이 있으며, 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비의 함수로 구성된다. 이러한 모델들은 열전달 시험 결과와 비교하여 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비가 높아짐에 따라 예측 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 다공성 단열재의 정확도가 높은 유효 열전도율 예측 모델을 새롭게 제안하고, 기존 예측 모델 및 시험 결과와 비교 검증하였다. 이를 위해 기존 유효 열전도율 예측 모델들을 다공성 단열재의 고체 부피율에 따른 열전도율 시험 결과 값과 비교하였다. 그리고 고체의 부피율에 따른 유효 열전도율 시험 결과와 비교하여 가장 높은 정확도를 가진 Zehner-Schlunder 모델 및 시험 결과 데이터를 기반으로 고체-유체의 부피율과 열전도율 비로 구성된 다항식을 추가하여, 새로운 유효 열전도율 예측 모델을 정의하였다. 정의된 유효 열전도율 예측 모델을 시험 결과와 비교하여 검증하였다. 또한, 개선된 유효 열전도율 예측 모델을 적용하여 초고속 비행체 열방어구조의 과도 열전달 해석을 수행하였으며, 열전달 시험 결과와의

비교를 통해 예측 모델의 유효성을 확인하였다.

## 2. 유효 열전도율 예측 모델

### 2.1 기존 유효 열전도율 예측 모델

다공성 단열재는 Fig. 1과 같이 고체와 유체가 함께 구성되어 있는 단열재이다. 따라서 다공성 단열재를 포함한 복합재 구조물의 열전달 특성을 분석하기 위해서는 유효 열전도율에 대한 예측이 요구된다. 이러한 유효 열전도율 예측 모델은 시험 및 해석적 이론을 기반으로 정의된다. 유효 열전도율의 대표적 모델은 Rayleigh, modified Rayleigh, Zehner-Schlunder와 같은 모델이 있다. 유효 열전도율 예측 모델들은 다공성 단열재의 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비의 함수로 구성된다.

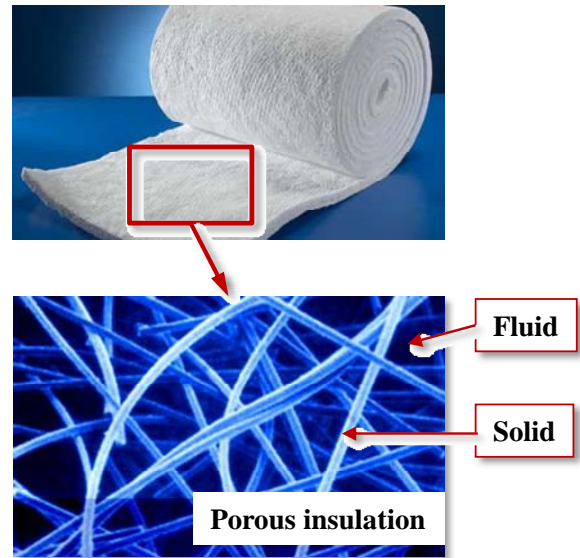


Fig. 1 Configuration of porous insulation

다공성 단열재의 유효 열전도율 예측을 위한 Rayleigh 모델은 식 (1), modified Rayleigh 모델은 식 (2)~(3), Zehner-Schlunder 모델은 식 (4)~(6)과 같이 정의된다.

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{A_1 - 2\phi - 0.525A_3\phi^{10/3}}{A_1 + \phi - 0.525A_3\phi^{10/3}} \quad (1)$$

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{A_1 - 2\phi + 0.409A_2\phi^{7/3} - 2.133A_3\phi^{10/3}}{A_1 + \phi + 0.409A_2\phi^{7/3} - 0.906A_3\phi^{10/3}} \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{2+\lambda}{1-\lambda} \quad A_2 = \frac{6+3\lambda}{4+3\lambda} \quad A_3 = \frac{3-3\lambda}{4+3\lambda} \quad (3)$$

$$\frac{k_e}{k_f} = 1 - \sqrt{\phi} + \frac{2\sqrt{\phi}}{1-B\lambda^{-1}} \times B_z \quad (4)$$

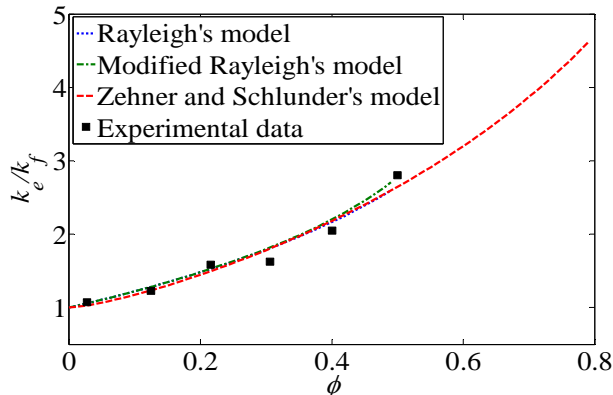
$$B_z = \frac{(1-\lambda^{-1})B}{(1-\lambda^{-1}B)^2} \ln \frac{1}{\lambda^{-1}B} - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{1-\lambda^{-1}B} \quad (5)$$

$$B = 1.25 \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{10/9} \quad (6)$$

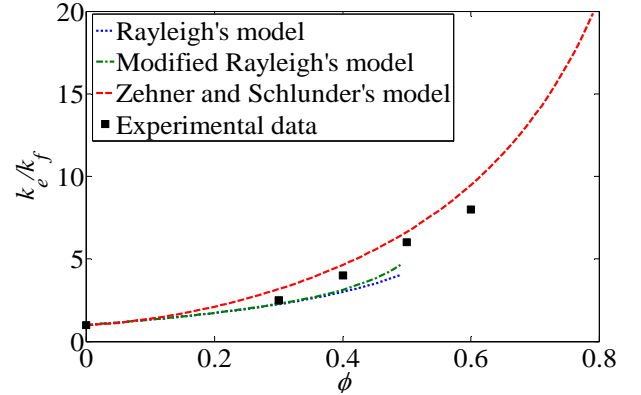
식 (1)~(6)에서 유효 열전도율, 고체 및 유체 열전도율은  $k_e$ ,  $k_s$ ,  $k_f$ 로 표기되며, 고체 부피율(volume fraction)  $\phi$ 와 고체-유체 열전도율 비  $\lambda$ 는 아래 식 (7)과 같이 정의된다.  $V_f$ 와  $V_s$ 는 유체와 고체의 부피를 나타낸다.

$$\phi = \frac{V_s}{V_s + V_f}, \quad \lambda = \frac{k_s}{k_f} \quad (7)$$

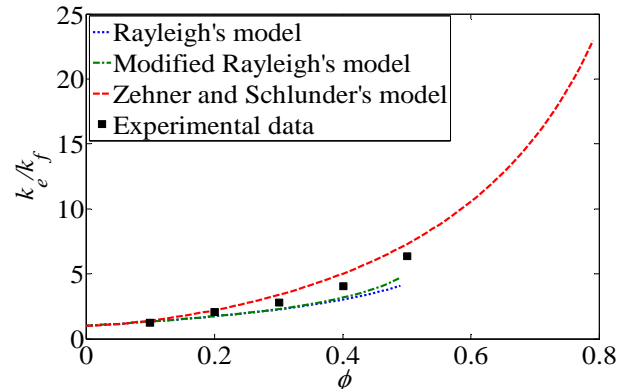
Figure 2~5는 Wong-Bollampally, Kanuparthi, Woodside-Mesmer가 수행한 시험 결과와 기존 이론의 유효 열전도율 예측 결과를 비교한 도표이다 [9~11].



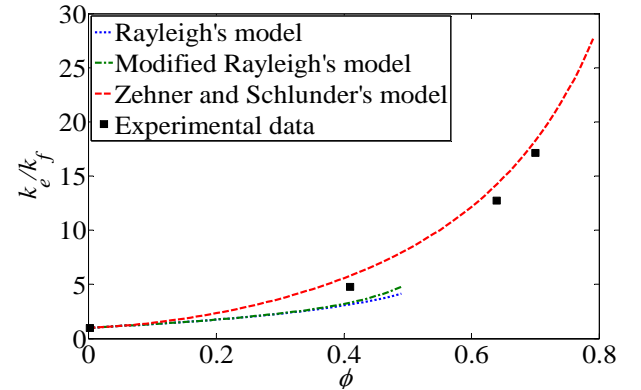
**Fig. 2** Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experimental data (Wong-Bollampally :  $\lambda=7.7$ )



**Fig. 3** Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experimental data (Kanuparthi :  $\lambda=125$ )



**Fig. 4** Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experimental data (Wong-Bollampally :  $\lambda=184.6$ )



**Fig. 5** Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experimental data (Woodside-Mesmer :  $\lambda=325.8$ )

Rayleigh, Modified Rayleigh 모델은 고체 부피율이 0.5 이상에서 유효 열전도율이 계산되지 않는다. 또한, Rayleigh, Modified Rayleigh, Zehner-Schlunder 모델은 고체-유체 열전도율 비가 커짐에 따라 유효 열전도율 시험 결과와 비교하여 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 개선된 유효 열전도율 예측 모델

본 논문에서는 기존 예측 모델과 비교해 가장 높은 정확도를 가진 Zehner-Schlunder 모델을 개선하여 유효열전도율 예측 모델을 제안하였다. 또한 예측 정확도를 높이기 위해 고체 부피율( $\phi$ )과 고체-유체 열전도율 비로 구성된 다항식을 추가하여, 개선된 유효 열전도율 예측 모델을 정의하였다. 제안된 유효 열전도율 예측 모델은 식 (8)~(11)과 같다.

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 C_i} (C_1 f_{zeh} + C_2 f_2 + C_3 f_3) \quad (8)$$

$$f_{zeh} = 1 - \sqrt{\phi} + \frac{2\sqrt{\phi}}{1 - \frac{k_f}{k_s} B} \times B_z \quad (9)$$

$$f_2 = \left( 1 - \phi + \frac{k_s}{k_f} \phi \right) \quad (10)$$

$$f_3 = \left( (1 - \phi)^2 + \frac{k_s}{k_f} \phi^2 \right) \quad (11)$$

여기서  $f_{zeh}$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ 은 Zehner-Schlunder 모델과 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비로 구성된 다항식을 나타낸다. 유효 열전도율 계수인  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 의 합은 1이며, 유효 열전도율은 고체의 부피율이 0일 때 유체 열전도율  $k_f$ 가 됨을 확인하였다. 유효 열전도율 계수는 기존 시험 결과를 바탕으로 회귀 분석을 통하여 도출한다[12]. 회귀 모델은 다음 식 (12)와 같이 정의되며, 독립변수 X는 식 (13)과 같이 Zehner-Schlunder

모델과 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비로 구성된 다항식을 나타낸다.

$$[y] = \sum_{i=1}^n [\beta_i] [X_i] \quad (12)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} f_{zeh}(x_{11}, x_{21}) & f_2(x_{11}, x_{21}) & f_3(x_{11}, x_{21}) \\ f_{zeh}(x_{12}, x_{22}) & f_2(x_{12}, x_{22}) & f_3(x_{12}, x_{22}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{zeh}(x_{1k}, x_{2k}) & f_2(x_{1k}, x_{2k}) & f_3(x_{1k}, x_{2k}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$x_{1k} = \lambda, \quad x_{2k} = \phi \quad (14)$$

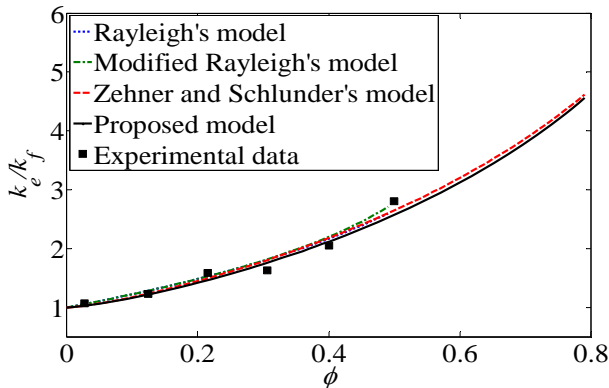
$$[\beta] = [\beta_1 \beta_2 \dots \beta_n]^T = ([X][X])^{-1}[X][y] \quad (15)$$

$$[y] = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k]^T \quad (16)$$

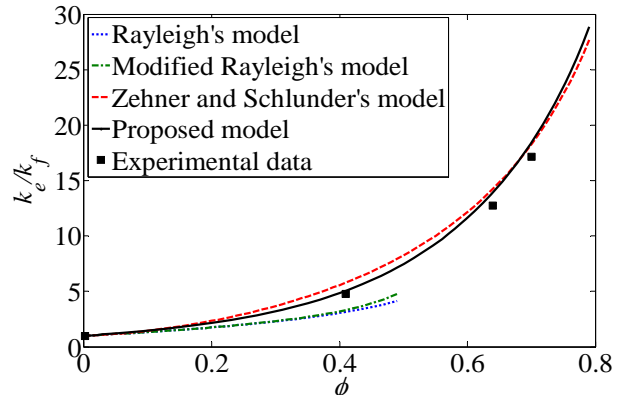
여기서 다항식은 2차 항까지 고려하였으며, 계산된 유효 열전도율 계수는 Table 1과 같다. 본 논문에서 제안한 유효 열전도율 예측 모델의 정확도를 확인하기 위해 기존 유효 열전도율 모델 및 시험 결과와 비교하였다. Figure 6~9에 나타나듯이 정의된 유효 열전도율 예측 모델은 기존 유효 열전도율 예측 모델보다 높은 고체-유체 열전도율 비에서 시험 결과와 비교하여 높은 정확도를 가진다. 또한, 특정 재료에 대한 유효 열전도율 시험이 아닌 고체-유체 열전도율 비에 따른 시험에 대해 고려했기 때문에 다양한 재료에 대해 적용이 가능하다. 고체-유체 열전도율 비에 따른 유효-유체 열전도율 비 시험 결과 값과 유효 열전도율 예측 모델을 이용한 결과 값의 평균 오차를 Fig. 10과 같이 구하였다.

**Table 1** Coefficient of effective thermal conductivity

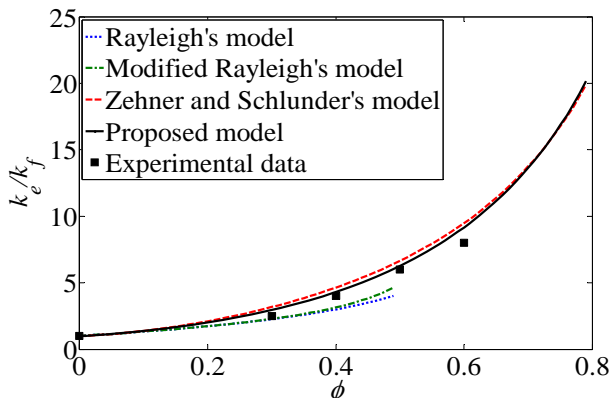
$C_1$	$C_2$	$C_3$
0.9424	-0.0161	0.0224



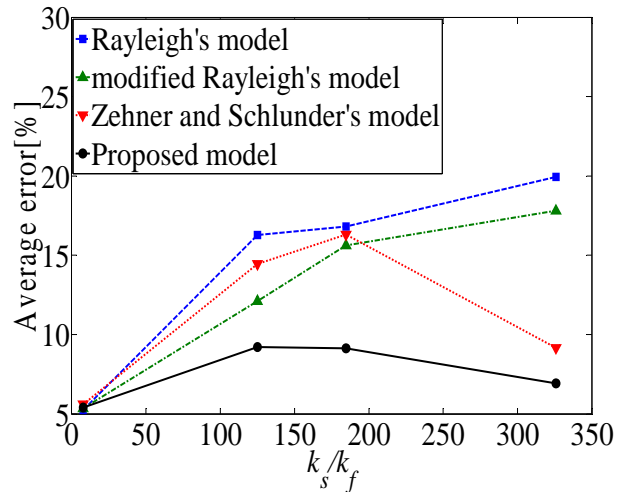
**Fig. 6** Comparison of proposed model and other models with the experimental data (Wong-Bollampally :  $\lambda=7.7$ )



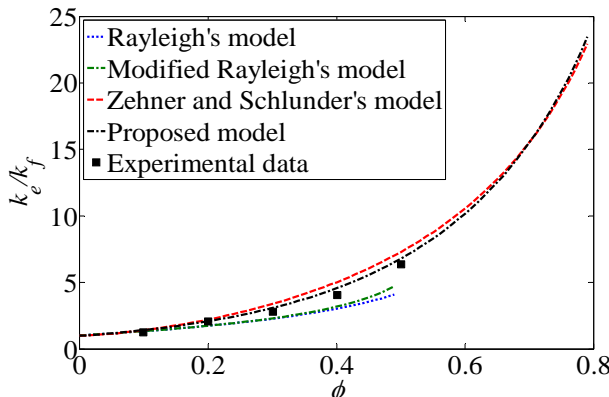
**Fig. 9** Comparison of proposed model and other models with the experimental data (Woodside-Mesmer :  $\lambda=325.8$ )



**Fig. 7** Comparison of proposed model and other models with the experimental data (Kanuparthi :  $\lambda=125$ )



**Fig. 10** Average error of effective thermal conductivity prediction models



**Fig. 8** Comparison of proposed model and other models with the experimental data (Wong-Bollampally :  $\lambda=184.6$ )

본 논문에서 제안된 유효 열전도율 예측 모델은 고체-유체 열전도율 비의 변화에도 단열재의 부피율에 따른 유효-유체 열전도율 비의 예측 정확도가 높은 것을 확인했으며, 정확한 오차 분석을 수행한 결과 고체-유체 열전도율 비에 따른 평균 오차 10% 이내의 높은 정확도를 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 다공성 단열재의 유효 열전달을 예측 모델은 초고속 비행체의 열방어구조와 같은 다공성 단열재를 포함한 복합재 구조물의 초기 설계 단계에서 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

### 3. 다공성 단열재를 포함한 복합재 구조물 유한요소 모델링

#### 3.1 다공성 단열재를 포함한 열방어구조

제안된 유효 열전도율 예측 모델의 유효성을 확인하기 위해 다공성 단열재를 포함한 열방어구조에 대한 열전달 해석을 수행하였다. 수치적 예제인 초고속 비행체의 열방어구조는 초내열합금인 Inconel 625 평판 및 Ti-6Al-4V 평판과 다공성 단열재로 구성된 복합재 구조물이며, 각 모서리에 볼트로 체결되어 있다. 열방어구조 내에서 볼트에 의한 열전달 효과를 최소화하기 위해서 단열 소재의 와셔와 스페이서를 사용하였다. 실제 열전달 시험 결과와 열전달 해석 결과를 정확하게 비교하기 위해, 열전달 시험 조건과 동일하게 열방어구조에 시험 치구인 Baffle Plate를 적용하였다. 열방어구조의 형상 및 열전달 시험 모델 형상은 Fig. 11, 12와 같다.

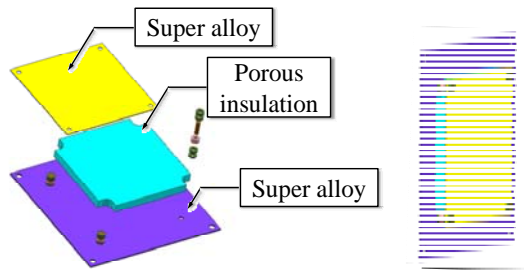


Fig. 11 Configuration of TPS

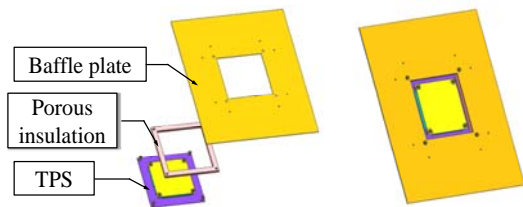


Fig. 12 Configuration of experimental model

#### 3.2 다공성 단열재의 재료 물성 예측

다공성 단열재의 재료 물성을 확인하기 위해 열방어구조에 사용된 다공성 단열재 6개 시편의 질량을 측

정하였으며, 측정결과는 Table 2와 같다. 다공성 단열재 시편의 높이는 13 mm, 가로, 세로의 길이는 50 mm이며 시편의 형상은 Fig. 9와 같다. 6개 시편의 질량을 각각 측정하였으며, 시편의 평균 질량은 3.01 g이다. 다공성 단열재의 고체 밀도는  $3.49 \times 10^{-9}$  ton/mm<sup>3</sup>이며, 식 (17)을 이용하여 다공성 단열재의 고체 부피를 계산하였다. 또한 식 (18)을 통해 다공성 단열재의 평균 고체 부피율을 0.0265 로 계산하였다. 본 논문에서 제안한 유효 열전도율 예측 모델을 열방어구조의 다공성 단열재에 적용하였다. 열방어구조의 온도에 따른 유효 열전도율을 Table 3과 같이 계산하였다.

$$V_{saffil} = \frac{m_{specimen}}{\rho_{saffil}} \tag{17}$$

$$\phi = \frac{V_{Saffil}}{V_{specimen}} \tag{18}$$

Table 2 Mass of porous insulation specimens

Specimen No.	Mass [g]
1	2.73
2	2.92
3	2.70
4	3.27
5	3.26
6	3.16

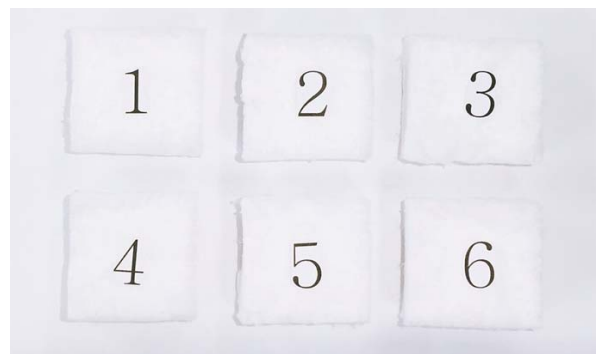


Fig. 13 Specimen of insulation

**Table 3** Material properties of porous insulation

Temperature [°C]	Thermal conductivity [mm·ton/s <sup>3</sup> °C]	Specific heat capacity [mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> °C]	Density [ton/mm <sup>3</sup> ]
0	0.0305	1.01*10 <sup>9</sup>	9.25*10 <sup>-11</sup>
200	0.0438	1.03*10 <sup>9</sup>	
400	0.0554	1.07*10 <sup>9</sup>	
600	0.0650	1.11*10 <sup>9</sup>	
800	0.0745	1.15*10 <sup>9</sup>	

**Table 6** Material properties of STS 304

Temperature [°C]	Thermal conductivity [mm·ton/s <sup>3</sup> °C]	Specific heat capacity [mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> °C]	Density [ton/mm <sup>3</sup> ]
100	16.2	500	8*10 <sup>-8</sup>
500	21.5		

**3.3 열방어구조의 유한요소 모델링**

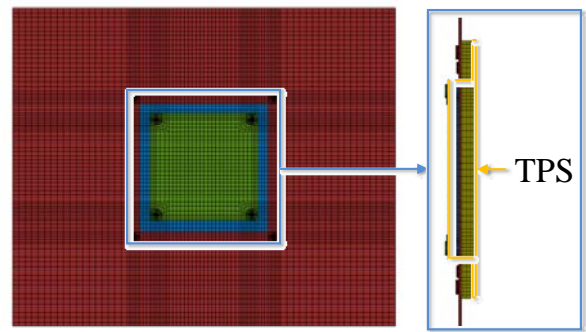
열방어구조의 유한요소 모델을 Fig. 14와 같이 생성하였다. 실제 열전달 시험 결과 값과 해석 결과를 비교하기 위하여 Baffle Plate에 열방어구조가 볼트로 체결된 구조로 유한요소 모델링하였으며, ABAQUS의 DC3D8요소를 사용하였다. 온도 조건은 열전달 시험과 동일하게 안쪽 평판과 바깥쪽 평판에 Fig. 15와 같이 외부 온도에 대한 자연대류 및 복사조건으로 하였다. 또한, 온도에 대한 재료 물성의 비선형성은 USER SUBROUTINE인 UMATHT를 이용하여 고려하였다. 온도에 따른 Inconel 625, Ti-6Al-4V, 스테인리스 스틸의 재료 물성은 Table 4~6과 같다.

**Table 4** Material properties of Inconel 625

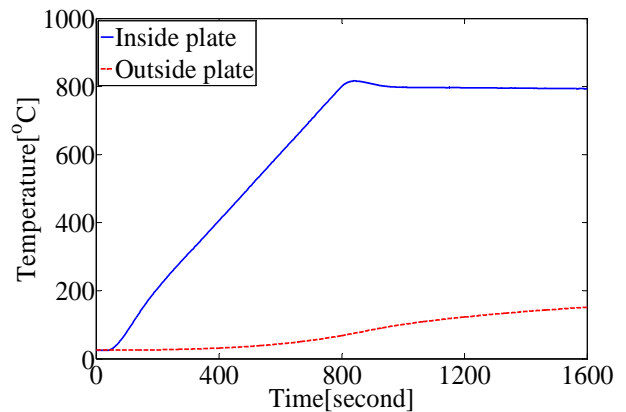
Temperature [°C]	Thermal conductivity [mm·ton/s <sup>3</sup> °C]	Specific heat capacity [mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> °C]	Density [ton/mm <sup>3</sup> ]
200	3.8286	4.49*10 <sup>8</sup>	8.45*10 <sup>-9</sup>
400	4.7873	5.03*10 <sup>8</sup>	
600	5.6930	5.53*10 <sup>8</sup>	
800	6.6280	6.06*10 <sup>8</sup>	

**Table 5** Material properties of Ti-6Al-4V

Temperature [°C]	Thermal conductivity [mm·ton/s <sup>3</sup> °C]	Specific heat capacity [mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> °C]	Density [ton/mm <sup>3</sup> ]
200	2.7767	5.72*10 <sup>8</sup>	4.43*10 <sup>-9</sup>
400	3.6854	6.49*10 <sup>8</sup>	
600	5.1470	7.61*10 <sup>8</sup>	
800	7.9870	8.89*10 <sup>8</sup>	



**Fig. 14** Configuration of finite element model



**Fig. 15** Temperatures of inside and outside plates

**3.4 열방어구조의 과도 열전달 해석 결과**

과도 열전달 해석은 다공성 단열재의 유효 열전달을 예측 시험 결과와 비교하여 정확도가 높은 Modified Rayleigh, Zehner-Schlunder 모델과 본 논문에서 제안된 유효 열전도를 예측 모델을 적용하여 수행하였다. 온도 측정 위치는 열방어구조의 바깥쪽 평판의 중앙점이다.

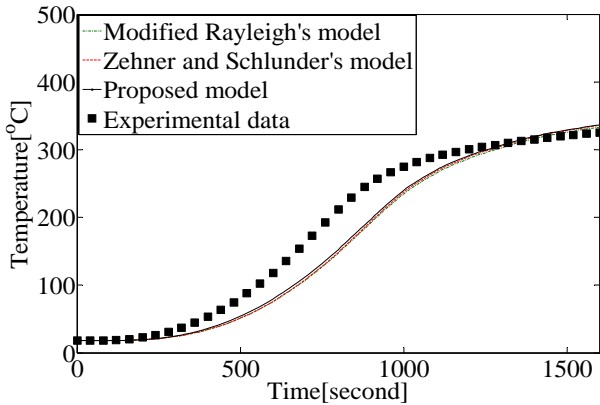


Fig. 16 Result of transient heat transfer analysis

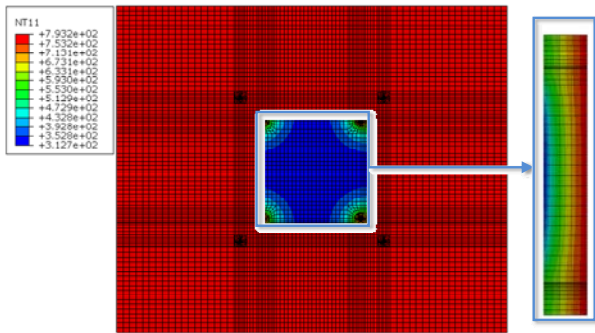


Fig. 17 Configuration of heat transfer analysis

$$Average\ error = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{exp,t_i} - T_{model,t_i}}{T_{exp,t_i}} \right| \times 100 \quad (19)$$

$$t_i = 0, 10, 20, \dots, 1600 \quad n = 160$$

Table 7 Average error of prediction models

Prediction model	Average error
Modified Rayleigh	17.12
Zehner-Schlunder	16.89
Proposed model	15.60

과도 열전달 해석 결과는 Fig. 16~17과 같으며, 각 유효 열전도율 예측 모델을 적용한 온도 분포 결과는 모두 유사한 형태를 보인다. 또한, 각 유효 열전도율 예측 모델을 적용한 열전달 해석 결과에서 얻어진 시간에 따른 온도 변화를 열전달 시험 결과와 비교하였다. 식 (19)와 같이 10초 단위로 열전달 실험 결과 값

과 유효 열전도율 예측 모델의 해석결과의 평균 오차를 구하였다.  $T_{exp,t_i}$ 는 열전달 실험으로 얻은  $t_i$ 에서의 온도이며,  $T_{model,t_i}$ 는 열전달 해석으로 얻은  $t_i$ 에서의 온도이다. Modified Rayleigh, Zehner-Schlunder 모델과 본 논문에서 제안한 유효 열전도율 예측 모델의 평균 오차를 분석하였으며, 기존 유효 열전도율 예측 모델 대비 새로 제안한 예측 모델이 오차율이 작은 것을 확인하였다. 유효 열전도율 예측 모델의 평균오차는 Table 7에 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 정확도가 향상된 다공성 단열재의 유효 열전도율 예측 모델을 정의하기 위해, 기존 유효 열전도율 예측 모델을 다공성 단열재의 열전도율 시험 결과 값과 비교하였다. 시험 결과와 비교하여 가장 높은 정확도를 가진 Zehner-Schlunder 모델 및 시험 결과 데이터를 기반으로 고체 부피율과 열전도율 비로 구성된 다항식을 추가하여, 개선된 유효 열전도율 예측 모델을 정의하였다. 제안된 유효 열전도율 예측 모델을 시험 결과 데이터와 비교하여 기존 모델보다 정확도가 높음을 확인하였다. 또한, 특정 재료가 아닌 4 종류의 고체-유체 열전도율 비에 대한 시험 결과를 기반으로 예측 모델을 제안했기 때문에 다양한 재료에 대한 유효 열전도율 예측이 가능하다. 유효 열전도율 예측 모델을 적용하여 초고속 비행체 열방어구조의 과도 열전달 해석을 수행하였으며, 열전달 시험 결과와 기존 모델을 이용한 열전달 해석 결과의 비교하여 본 논문에서 제안한 예측 모델이 높은 정확도를 가지는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 유효 열전달을 예측 모델은 열방어구조와 같은 다공성 단열재를 포함한 복합재 구조물의 초기 설계 단계에서 적용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.



## References

- [1] J. S. So, G. S. Do, Y. J. Jang, S. H. Song, J. S. Han and H. J. Moon, "A study on nozzle structure analysis about thermal stress effect associated with nozzle thickness in rocket," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 28-34, 2008.
- [2] S. S. Park, Y. G. Moon and J. S. Kawk, "Numerical analysis and 2-D experiment of heat transfer coefficient on the pintle of a controllable thruster," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 24-28, 2012.
- [3] C. L. Christopher, "High Speed Flight Vehicle Structures: An Overview," *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 5, pp. 978-985, 2004.
- [4] E. A. Thornton, *Thermal Structures for Aerospace Applications*, AIAA Educational Series.
- [5] M. Castellino, M. Rovere, Shahzad and M. I. Tagliaferro, "Conductivity in carbon nanotube polymer composites," *Thermochimica Acta*, Vol. 635, pp. 8-16.
- [6] C. Zhang, Y. Du, Y. Liu and B. Sundman, "Thermal conductivity of Al-Cu-Mg-Si alloys : Experimental measurement and CALPHAD modeling," *Thermochimica Acta Journal*, Vol. 87, pp. 237-242.
- [7] M. Kandula, "On the effective conductivity of porous packed beds with uniform spherical particles," *Journal of Porous Media*, Vol. 14, pp. 919-926, 2011.
- [8] C. T. Hsu, P. Cheng and K. W. Wong, "Modified Zehner-Schlunder models for stagnant thermal conductivity of porous media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2751-2759.
- [9] C. P. Wong and R. S. Bollampally, "Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 74, pp. 3396-3403, 1999.
- [10] S. Kanuparthi, G. Subbarayan, T. Siegmund, B. Sammakia, "An efficient network model for determining the effective thermal conductivity of particulate thermal interface materials," *IEEE Transactions on Components and Packing Technologies*, Vol. 31, No. 3, pp. 611-621.
- [11] W. Woodside, J. H. Messmer, "Thermal conductivity of porous media I. Unconsolidated sand," *Journal of Applied Physics*, Vol. 12, No. 9, pp. 1688-1699, 1961.
- [12] N. R. Draper and H. Smith, *Applied Regression Analysis*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley.