

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(3), 163-172(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.3.163

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

## 열방어구조의 다공성 단열재 유효 열전도율 예측 모델링

황경민\*, 김용하\*, 김명준\*, 이희수\*, 박정선\*\*

## Prediction Modeling on Effective Thermal Conductivity of Porous Insulation in Thermal Protection System

Kyung-Min Hwang\*, Yong-Ha Kim\*, Myung-Jun Kim\*, Hee-Soo Lee\* and Jung-Sun Park\*\*

Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University\*

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University\*\*

## ABSTRACT

Porous insulation have been frequently used in a number of industries by minimizing thermal insulation space because of excellent performance of their thermal insulation. This paper devices an effective thermal conductivity prediction model. First of all, we perform literature survey on traditional effective thermal conductivity prediction models and compare each other model with heat transfer experimental results. Furthermore this research defines advanced effective thermal conductivity prediction models model based on heat transfer experimental results, the Zehner-Schlunder model. Finally we verify that the newly defined effective thermal conductivity prediction model has better performance prediction than other models. Finally, this research performs a transient heat transfer analysis of thermal protection system with a porous insulation using the finite element method and confirms validity of the effective thermal conductivity prediction model.

## 초 록

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 증가하고 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 모델에 대하여 문헌조사를 수행하였고, 다공성 단열재의 고체 부피율에 따른 열전도율 시험 결과 값과 비교하였다. 또한 유효 열전도율 시험 결과와 비교하여 가장 높은 정확도를 가진 Zehner-Schlunder 모델 및 시험 결과 데이터를 기반으로 새로운 유효 열전도율 예측 모델을 정의하였으며, 시험 결과 데이터와 비교하여 기존 유효 열전도율 예측 모델보다 유사한 정확도를 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 개선된 유효 열전도율 예측 모델을 적용하여 초고속 비행체 열방어구조의 과도 열전달 해석을 수행하였으며, 열전달 시험 결과와의 비교를 통해 예측 모델의 유효성을 확인하였다.

† Received : September 21, 2016      Revised : November 29, 2016      Accepted : December 3, 2016

\*\* Corresponding author, E-mail : jungsun@kau.ac.kr

**Key Words** : Porous Insulation(다공성 단열재), Thermal Protection System(열방어구조), Regression Analysis(회귀 분석), Heat Transfer Experiment(열전달 시험), Effective Thermal Conductivity(유효 열전도율)

**I. 서론**

다공성 단열재는 탁월한 단열 효과로 단열공간을 최소화하여, 기존 단열재 대비 내부 공간을 활용할 수 있어 여러 산업 분야에서 사용되고 있다. 특히 높은 단열 효과로서 경량화가 요구되는 항공우주 산업분야에서는 이와 같은 다공성 단열재의 수요가 증가하고 있다. 초음속으로 비행하는 비행체는 공력가열로 인해 비행체 표면 온도가 상승하며, 이로 인한 구조물의 열 파손에 대한 문제가 발생할 수 있다. 초고속 비행체의 표면 온도 상승을 막기 위해서는 다공성 단열재와 같은 고성능의 단열재를 적용한 열방어구조가 요구된다[1]. 미국 NASA에서는 1981년 스페이스 셔틀의 발사에 성공하였으며, 공력가열을 통한 기체 표면의 온도 상승을 막기 위해 다공성 단열재를 포함한 열방어구조를 사용하였다[2]. 이러한 다공성 단열재를 포함한 구조물의 열 특성을 분석하기 위해서는 다공성 단열재의 유효 열전도율 예측이 필요하다. 유효 열전도율 예측 방법은 시험적 방법과 해석적 방법이 있다[3~9]. 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 모델을 정의하였다. 기존 유효 열전도율 예측 모델은 대표적으로 Maxwell, Kunii-Smith, Rayleigh, Modified Rayleigh, Zehner-Schlunder, Macdevette와 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.

**II. 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 Maxwell, Rayleigh, Modified Rayleigh, Kunii-Smith, Zehner-Schlunder, Macdevette와 같은 모델이 있다. 유효 열전도율 예측 모델들은 다공성 단열재의 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비의 함수로 구성된다. 다공성 단열재의 유효 열전도율 예측을 위한 Maxwell 모델은 식 (1), Rayleigh 모델은 식 (2), Modified Rayleigh 모델은 식 (3)~(4), Kunii-Smith 모델은 식 (5)~(6), Zehner-Schlunder 모델은 식 (7)~(9), Macdevette 모델은 식 (10)~(12)와 같이 정의된다.

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{\lambda + 2 - 2\phi(1 - \lambda)}{\lambda + 2 + \phi(1 - \lambda)} \tag{1}$$

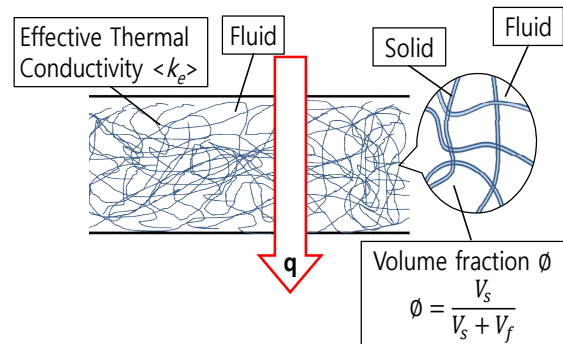


Fig. 1. Configuration of porous media

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

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

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

$$\frac{k_e}{k_f} = 1 - \phi + \frac{\phi}{B_k + \frac{2}{3\lambda}} \quad (5)$$

$$B_k = 0.305\lambda^{-0.25} \quad (6)$$

$$\frac{k_e}{k_f} = 1 - \sqrt{\phi} + \frac{2\sqrt{\phi}}{1 - \frac{B}{\lambda}} \times B_z \quad (7)$$

$$B_z = \frac{\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)B}{\left(1 - \frac{B}{\lambda}\right)^2} \ln \frac{\lambda}{B} - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{1 - \frac{B}{\lambda}} \quad (8)$$

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

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{1}{B_m} \left( (1 - \phi) + \phi \frac{\rho_p c_p}{\rho_f c_f} \right) \quad (10)$$

$$B_m = \frac{2(1 - \phi^{1/3})^2(n+1)}{n-1} \left( \frac{1 + \phi^{1/3}}{2} - \frac{1}{n+1} \right) \quad (11)$$

$$n = 2.233 \quad (12)$$

식 (1)~(12)에서 유효 열전도율, 고체, 유체 열전도율, 비열, 밀도는  $k_s, k_s, k_f, c_s, c_f, \rho_s, \rho_f$ 로 표기되며, 고체-유체 열전도율 비  $\lambda$ 와 고체 부피율 (volume fraction)  $\phi$ 는 다음 식 (13)~(14)와 같이 정의된다.  $V_s, V_s$ 는 유체, 고체 부피를 나타낸다.

$$\lambda = \frac{k_s}{k_f} \quad (13)$$

$$\phi = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (14)$$

Figures 2~6은 Kanuparthi, Wong-Bollampally, Woodside-Mesmer, Kwak, Yoo, Chandersaker, Kleinstreuer가 수행한 시험 결과와 기존 이론의

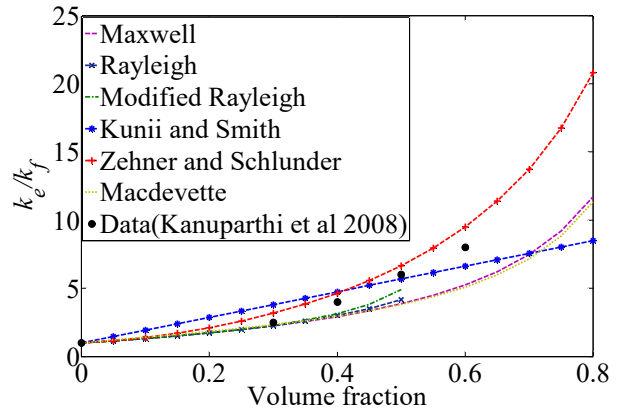


Fig. 2. Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=125$ )

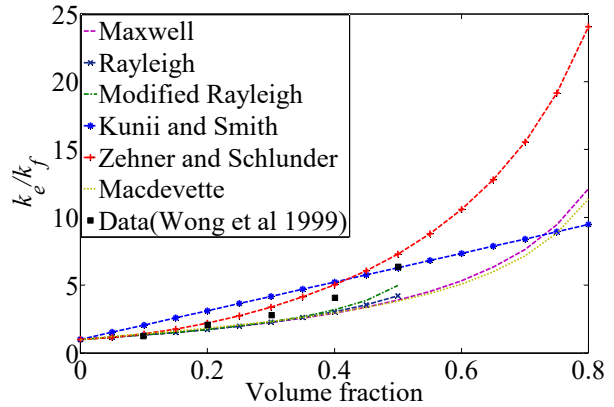


Fig. 3. Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=184.6$ )

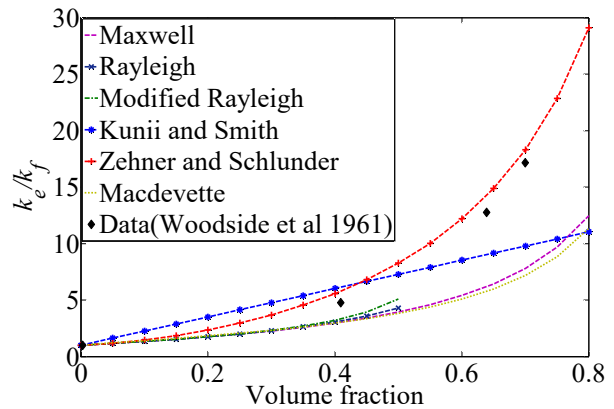


Fig. 4. Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=325.8$ )

유효 열전도율 예측 결과를 비교한 도표이다 [10~16]. Kunii-Smith 모델은 고체 부피율의 비선형성이 고려되지 않으며, Rayleigh, Modified

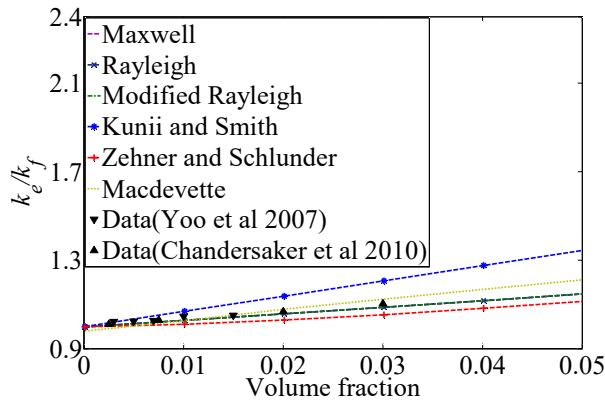


Fig. 5. Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=51.7$ )

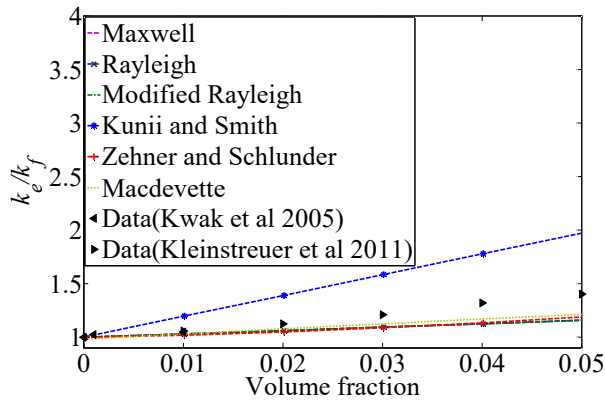


Fig. 6. Comparison of Zehner-Schlunder model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=1554.3$ )

Rayleigh 모델은 고체 부피율이 0.5 이상에서 유효 열전도율이 추정되지 않는다. Macdevette 모델은 고체 부피율이 0.1 이하의 다공성 단열재에 대하여 적용 가능하기 때문에 고체 부피율이 높을 경우에는 정확도가 떨어진다. 또한, Maxwell, Rayleigh, Modified Rayleigh, Kunii-Smith, Zehner-Schlunder, Macdevette 모델은 고체-유체 열전도율 비와 고체 부피율이 커짐에 따라 시험 결과와 비교하여 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

### III. 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 부피율과 고체-유체 열전도율 비로 구성된 다항식을 추가

하여, 개선된 유효 열전도율 예측 모델을 정의하였다. 제안된 유효 열전도율 예측 모델은 식 (15)~(19)와 같으며,  $f_{zeh}$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ 는 Zehner-Schlunder 모델과 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비로 구성된 다항식을 나타낸다.

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 C_i} (C_1 f_{zeh} + C_2 f_2 + C_3 f_3 + C_4 f_4) \quad (15)$$

$$f_{zeh} = 1 - \sqrt{\phi} + \frac{2\sqrt{\phi}}{1-\lambda B} \times B_z \quad (16)$$

$$f_2 = (1 - \phi + \lambda\phi) \quad (17)$$

$$f_3 = ((1 - \phi)^2 + \lambda\phi^2) \quad (18)$$

$$f_4 = \left( (1 - \phi)^3 + \frac{k_s}{k_f} \phi^3 \right) \lambda \quad (19)$$

유효 열전도율 계수인  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ 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. 회귀 모델은 다음 식 (20)과 같이 정의되며, 독립변수  $X$ 는 식 (22)와 같이 Zehner-Schlunder 모델과 고체 부피율과 고체-유체 열전도율 비로 구성된 다항식을 나타낸다[17].

$$y = \sum_{i=1}^n \beta_i X_i \quad (20)$$

$$\beta = [\beta_1 \beta_2 \dots \beta_4]^T = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (21)$$

$$X = \begin{bmatrix} f_{zeh}(x_{11}, x_{21}) & f_2(x_{11}, x_{21}) & \dots & f_4(x_{11}, x_{21}) \\ f_{zeh}(x_{12}, x_{22}) & f_2(x_{12}, x_{22}) & \dots & f_4(x_{12}, x_{22}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{zeh}(x_{1k}, x_{2k}) & f_2(x_{1k}, x_{2k}) & \dots & f_4(x_{1k}, x_{2k}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k]^T \quad (23)$$

$$x_{1k} = \lambda, \ x_{2k} = \phi \quad (24)$$

여기서 다항식은 3차 항까지 고려하였으며, 계산된 유효 열전도율 계수는 Table 1과 같다. 본

Table 1. Coefficient of effective thermal conductivity

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
0.9778	0.0069	-0.0586	0.0739

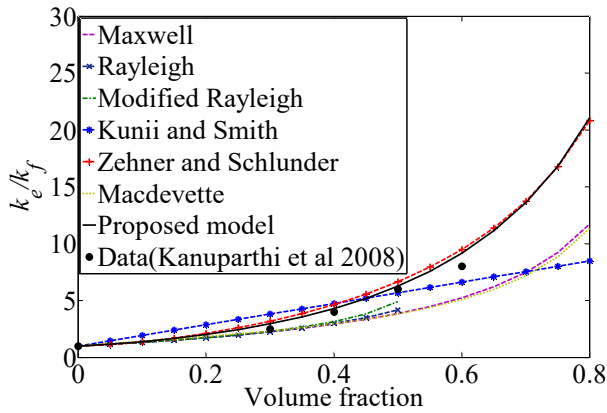


Fig. 7. Comparison of proposed model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=125$ )

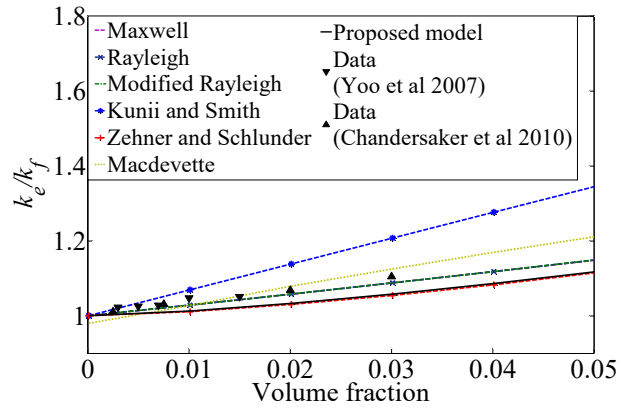


Fig. 10. Comparison of proposed model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=51.7$ )

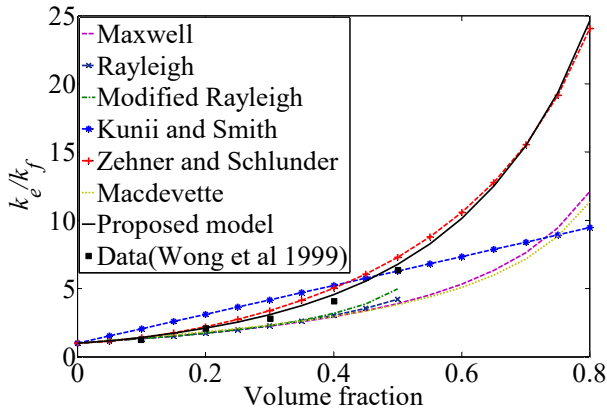


Fig. 8. Comparison of proposed model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=184.6$ )

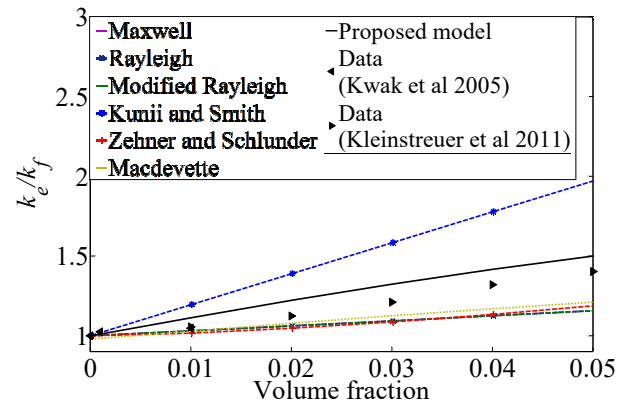


Fig. 11. Comparison of proposed model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=1554.3$ )

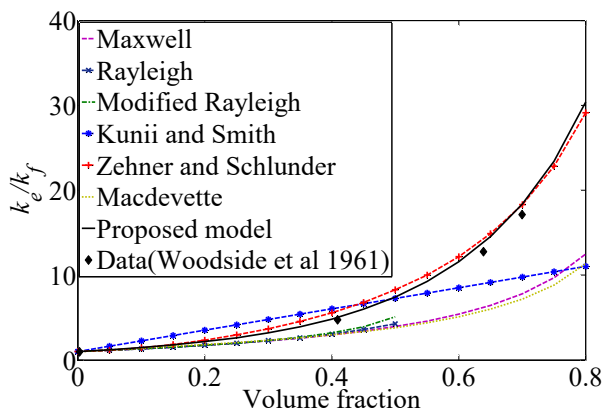


Fig. 9. Comparison of proposed model and other models with the experiment data ( $k_s/k_f=325.8$ )

논문에서 제안한 유효 열전도율 예측 모델의 정확도를 확인하기 위해 기존 유효 열전도율 모델 및 시험 결과와 비교하였다.

Figures 7~11에 나타나듯이 정의된 유효 열전도율 예측 모델은 Rayleigh, Modified Rayleigh, Kunii-Smith, Zehner-Schlunder, Macdevette 모델보다 높은 고체-유체 열전도율 비와 고체 부피율에서 시험 결과와 비교하여 높은 정확도를 가진다. 또한, 본 논문에서는 제안된 모델의 정확성을 수치적으로 표기하기 위해 기존 모델 및 제안된 모델과 각 시험 결과의 비교 오차를 수치적으로 분석하였으며, 결과는 Fig. 12~18과 같다.

Kunii-Smith 모델은 고체 부피율에 대한 비선형성이 고려하지 않았기 때문에 대부분의 고체-유체 열전도율 비와 고체 부피율에서 오차가 높은 것을 확인할 수 있다. Maxwell, Macdevette 모델은 낮은 고체-유체 열전도율 비와 고체 부피율에서는 정확도가 높지만 고체-유체 열전도율 비와 고체 부피율이 증가함에 따라 오차가 증가함을 확인할 수 있다. Rayleigh 모델은 전반적으로 Maxwell 모델보다 정확도가 높지만 높은 고

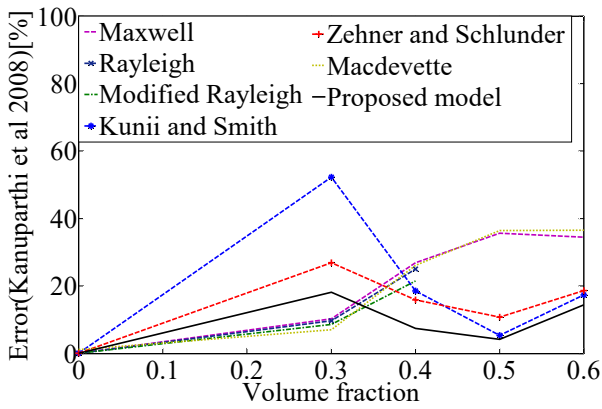


Fig. 12. Error of effective thermal conductivity prediction models (Kanuparthi et al 2008 :  $k_s/k_f=125$ )

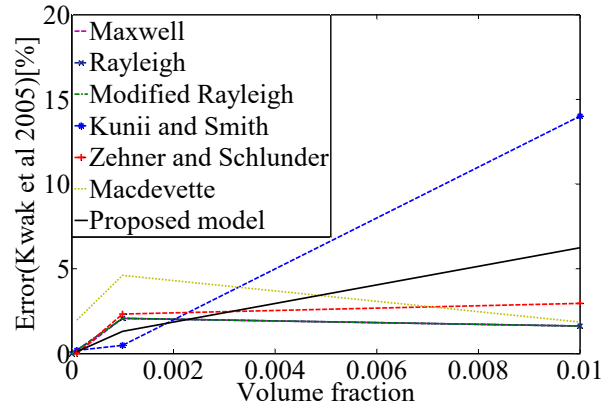


Fig. 15. Error of effective thermal conductivity prediction models (Kwak et al 2005 :  $k_s/k_f=1554.3$ )

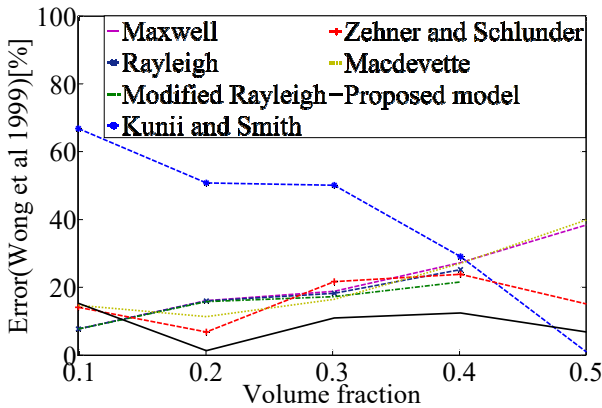


Fig. 13. Error of effective thermal conductivity prediction models (Wong et al 1999 :  $k_s/k_f=184.6$ )

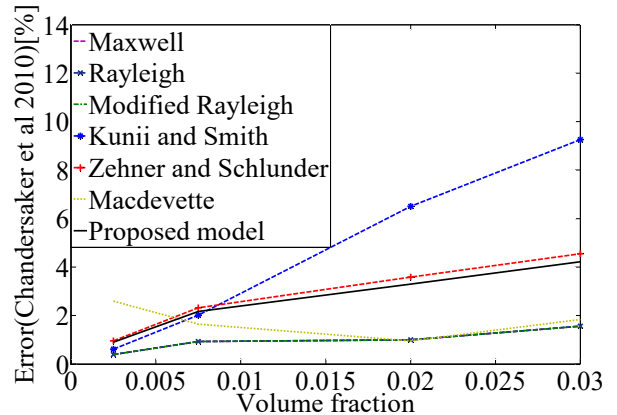


Fig. 16. Error of effective thermal conductivity prediction models (Chandersaker et al 2010 :  $k_s/k_f=51.7$ )

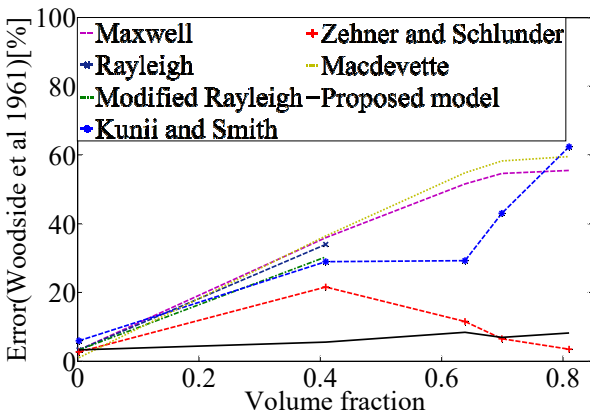


Fig. 14. Error of effective thermal conductivity prediction models (Woodside et al 1961 :  $k_s/k_f=325.8$ )

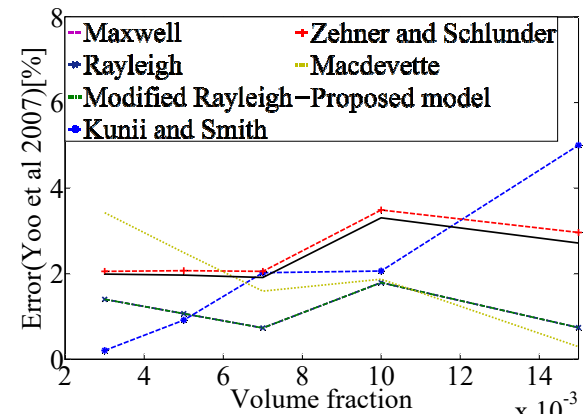


Fig. 17. Error of effective thermal conductivity prediction models (Yoo et al 2007 :  $k_s/k_f=51.7$ )

체-유체 열전도율 비와 고체 부피율에서는 정확도가 떨어진다. Modified Rayleigh 모델은 Rayleigh 모델에 고체-유체 열전도율 비의 항을

추가하여, Rayleigh 모델보다 높은 고체-유체 열전도율 비와 고체 부피율에서의 예측 정확도가 높았다. 본 논문에서 제안된 유효 열전도율 예측

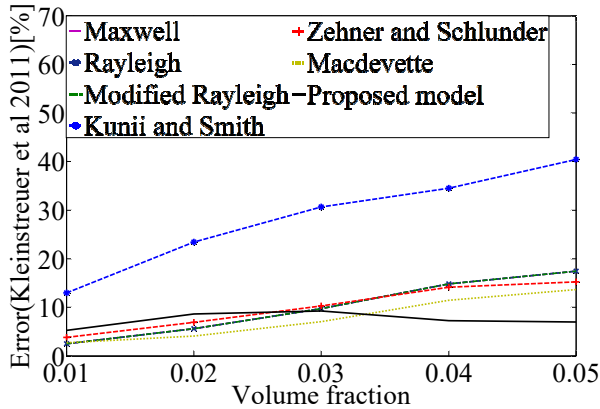


Fig. 18. Error of effective thermal conductivity prediction models (Kleinstreuer et al 2011 :  $k_s/k_f=1554.3$ )

모델은 대부분의 고체-유체 열전도율 비 및 고체 부피율에서 오차 20% 이내를 만족하는 것을 확인하였다. 특히, 고체-유체 열전도율 비가 높은 다공성 소재에 대한 유효 열전도율 예측 시험 결과(Woodside-Mesmer, Kwak, Kleinstreuer)와의 비교 오차는 10% 이내를 만족한다.

따라서 정의된 유효 열전도율 예측 모델은 고체-유체 열전도율 비와 고체 열전도율이 높은 초고속 비행체 열방어구조에 포함된 다공성 단열재의 열 특성 분석에 적합한 것을 확인하였다. 또한, 특정 재료에 대한 유효 열전도율 시험이 아닌 고체-유체 열전도율 비에 따른 시험에 대해 고려했기 때문에 다양한 재료에 대해 적용이 가능하다.

#### IV. 열방어구조의 열전달 해석

##### 4.1 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. 열방어구조의 형상은 Fig. 19와 같다.

##### 4.2 다공성 단열재의 재료 물성 예측

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

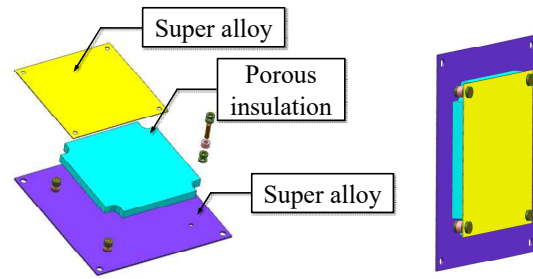


Fig. 19. Configuration of TPS

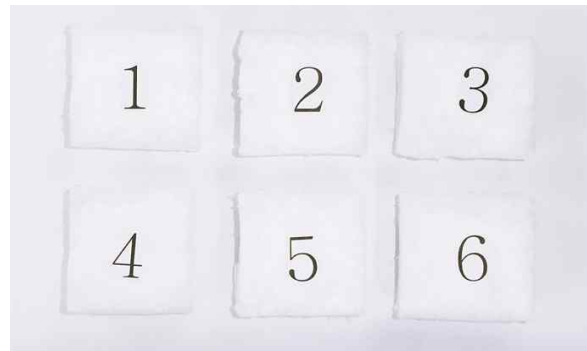


Fig. 20. Specimen of insulation

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

질량을 측정하였으며, 측정결과는 Table 2와 같다. 다공성 단열재 시편의 높이는 13 mm, 가로, 세로의 길이는 50 mm이며 시편의 형상은 Fig. 20과 같다. 6개 시편의 질량을 각각 측정하였으며, 시편의 평균 질량은 3.01 g이다. 다공성 단열재의 고체 밀도는  $3.49 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$ 이며, 식 (25)를 이용하여 다공성 단열재의 고체 부피를 계산하였다. 또한 식 (26)을 통해 다공성 단열재의 평균 고체 부피율을 0.0265로 계산하였다. 본문에서 제안한 유효 열전도율 예측 모델을 열방어구조의 다공성 단열재에 적용하였다. 열방어구조의 온도에 따른 유효 열전도율을 Table 3과 같이 계산하였다.

$$V_{saffil} = \frac{m_{specimen}}{\rho_{saffil}} \quad (25)$$

Table 3. Material properties of 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>	

$$\phi = \frac{V_{Suffil}}{V_{specimen}} \quad (26)$$

4.3 열방어구조의 유한요소 모델링

열방어구조의 유한요소 모델을 Fig. 21과 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

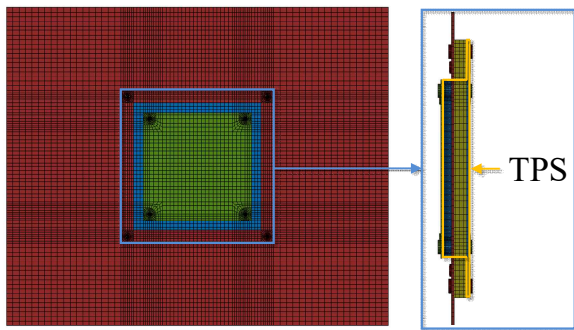


Fig. 21. Configuration of finite element model

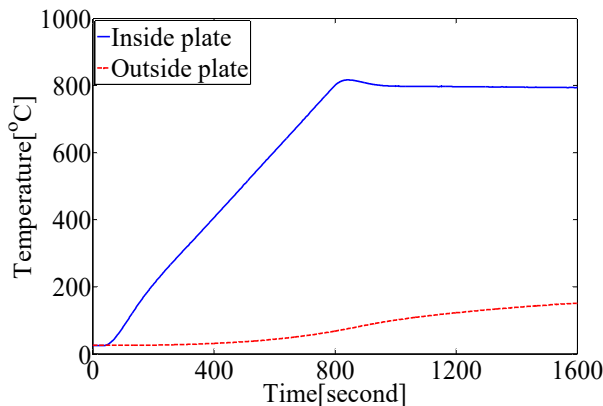


Fig. 22. Temperatures of inside and outside plates

바깥쪽 평판에 Fig. 22와 같이 외부 온도에 대한 자연대류 및 복사조건으로 하였다. 또한, 온도에 대한 재료 물성의 비선형성은 USER SUBROUTINE 인 UMATHT를 이용하여 고려하였다.

4.4 열방어구조의 과도 열전달 해석 결과

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

과도 열전달 해석 결과는 Fig. 23~24와 같으며, 각 유효 열전도를 예측 모델을 적용한 온도 분포 결과는 모두 유사한 형태를 보인다. 또한, 각 유효 열전도를 예측 모델을 적용한 열전달 해석 결과에서 얻어진 시간에 따른 온도 변화를 열전달 시험 결과와 비교하였다.

10초 단위로 열전달 시험 결과 값과 Zehner-Schlunder 모델과 제안된 유효 열전도를 예측 모델의 해석결과의 오차를 구하였다. 유효 열전도를 예측 모델의 오차는 Fig. 25에 나타내었으며, Zehner-Schlunder 모델과 비교하여 새로 제안한 예측 모델이 오차율이 최대 3.61 % 작은 것을

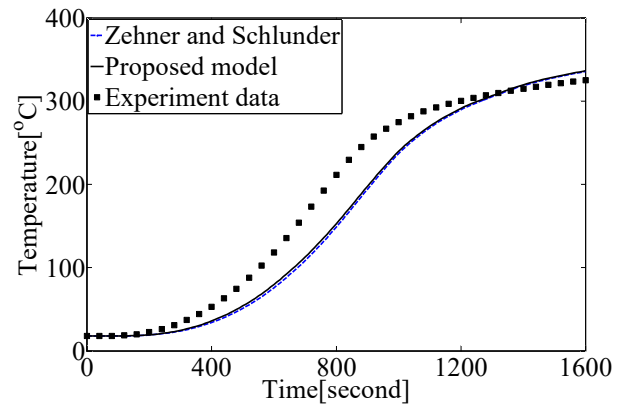


Fig. 23. Result of heat transfer analysis

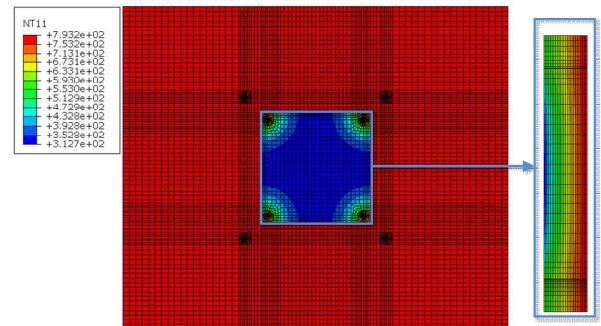


Fig. 24. Configuration of heat transfer analysis



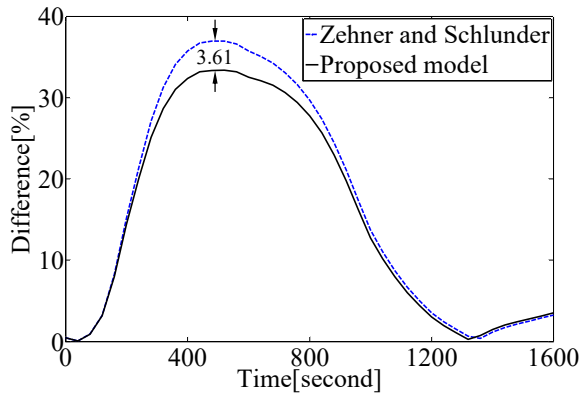


Fig. 25. Difference of proposed model and Zehner and Schlunder model

확인하였다. 따라서 제안된 유효 열전달을 예측 모델은 열방어구조와 같은 다공성 단열재를 포함한 복합재 구조물의 초기 설계 단계에서 더 높은 정확도를 가지며 적용될 수 있을 것이다.

### V. 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 결과를 개선하여 고체-유체의 부피율과 열전도율 비로 구성된 다항식을 추가하여, 개선된 유효 열전도율 예측 모델을 정의하였다. 정의된 유효 열전도율 예측 모델을 시험 결과와 비교하여 기존 모델에 의한 결과와 비교하여 유사한 정확도를 가지며, 또한 특정 재료에 대한 유효 열전도율 시험이 아닌 고체-유체 열전도율 비에 따른 시험에 대해 고려했기 때문에 다양한 재료에 대해 적용이 가능하다. 유효 열전도율 예측 모델을 적용하여 초고속 비행체 열방어구조의 과도 열전달 해석을 수행하였으며, 열전달 시험 결과와 기존 모델을 이용한 열전달 해석 결과를 비교하여 본 논문에서 제안한 예측 모델이 높은 정확도를 가지는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 정의한 유효 열전달을 예측 모델은 열방어구조와 같은 다공성 단열재를 포함한 복합재 구조물의 초기 설계 단계에서 더 높은 정확도를 가지며 적용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지

원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.

### References

- 1) Christopher, C. L., "High Speed Flight Vehicle Structures: An Overview," *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 5, 2004, pp. 978-985.
- 2) Thornton, E. A., *Thermal Structures for Aerospace Applications*, AIAA Educational Series.
- 3) Castellino, M., Rovere M., Shahzad, M. I., Tagliaferro, M. I., "Conductivity in carbon nanotube polymer composites," *Thermochimica Acta*, Vol. 635, pp. 8-16.
- 4) Zhang, C., Du, Y., Liu, Y., Sundman, B., "Thermal conductivity of Al-Cu-Mg-Si alloys : Experimental measurement and CALPHAD modeling," *Thermochimica Acta Journal*, Vol. 87, pp. 237-242.
- 5) Maxwell, J. C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, 1873, pp. 365.
- 6) Kunii, D., Smith, J. M., "Heat transfer characteristics of porous rocks," *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 6, 1960, pp. 71-78.
- 7) Kandula, M., "On the effective thermal conductivity of porous packed beds with uniform spherical particles," *Journal of Porous Media*, Vol. 14, 2011, pp. 919-926.
- 8) Hsu, C. T., Cheng, P., Wong, K. W. "Modified Zehner-Schlunder models for stagnant thermal conductivity of porous media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2751-2759.
- 9) MacDevette, M. M., Ribera, H. and Myers, T. G., "A simple yet effective model for thermal conductivity of nanofluids," *Centre De Recerca Matemàtica*, Preprint, No. 1149, 2013.
- 10) Wong, C. P., Bollampally, R. S., "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, 1999, pp. 3396-3403.
- 11) Kanuparthi, S., Subbarayan, G., Siegmund, T., Sammakia, B., "An efficient network model for determining the effective

thermal conductivity of particulate thermal interface materials," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 31, No. 3, pp. 611-621.

12) Woodside, W., Messmer, J. H., "Thermal conductivity of porous media I. Unconsolidated sand," *Journal of Applied Physics*, Vol. 12, No. 9, 1961. pp. 1688-1699.

13) Kwak, K. and Kim, C., "Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol," *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 17, No. 2, June, 2005, pp. 35-40.

14) Yoo, D. H., Hong, T. E., Hong, J. A., Eastman, J. A. and Yang, H. S., "Thermal

conductivity of  $Al_2O_3$ /Water nanofluids," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 51, 2007.

15) Chandersaker, M., Suresh, S. and Bose, A. C., "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of  $Al_2O_3$ /water nanofluid," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, pp. 210-216.

16) Kleinstreuer, C. and Feng, Y., "Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review," *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, No. 1, 2011, pp. 229-242.

17) Draper, N. R. and Smith, H., *Applied Regression Analysis*, 3rd Ed., John Wiley.