

Prediction of the effective thermal conductivity of microsphere insulation

Lingxue Jin, Jiho Park, Cheonkyu Lee, Mansu Seo, and Sangkwon Jeong*

Cryogenic Engineering Laboratory, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea

(Received 6 February 2014; revised or reviewed 25 March 2014; accepted 26 March 2014)

Abstract

Since glass microsphere has high crush strength, low density and small particle size, it becomes alternative thermal insulation material for cryogenic systems, such as storage and transportation tank for cryogenic fluids. Although many experiments have been performed to verify the effective thermal conductivity of microsphere, prediction by calculation is still inaccurate due to the complicated geometries, including wide range of powder diameter distribution and different pore sizes. The accurate effective thermal conductivity model for microsphere is discussed in this paper. There are four mechanisms which contribute to the heat transfer of the evacuated powder: gaseous conduction (k_g), solid conduction (k_s), radiation (k_r) and thermal contact (k_c). Among these components, k_g and k_s were calculated by Zehner and Schlunder model (1970). Other component values for k_c and k_r which were obtained from experimental data under high vacuum conditions were added. In this research paper, the geometry of microsphere was simplified as a homogeneous solid sphere. The calculation results were compared with previous experimental data by R. Wawryk (1988), H. S. Kim (2010) and the experiment of this paper to show good agreement within error of 46%, 4.6% and 17% for each result.

Keywords: microsphere, the effective thermal conductivity, porous media

1. 서 론

현재 극저온 단열 시스템에서 사용되고 있는 분말 단열재인 펄라이트 (perlite), 폴리스티렌 발포립 (EPS beads) 등과 비교 했을 때 마이크로스피어는 무게가 가벼우며 입자크기와 밀도가 작고, 내구성이 좋은 장점을 가지고 있기 때문에 극저온 단열 시스템에 아주 적합한 단열재이다. 또한, 저온 단열법인 MLI는 고진공에서 마이크로스피어보다 단열성능이 약 7배정도 뛰어나 우주 산업 및 극저온 산업에서 적절한 진공도와 함께 사용되고 있다[1]. 그러나 0.1 torr 이상의 저진공에서는 마이크로스피어의 단열성능이 더 좋은 것으로 나타났다[2]. 특히 극저온 유체 운송 및 저장 용기와 같이 구조가 크고 고진공 단열층을 사용 하기 어려운 구조에서는 마이크로스피어가 아주 적합한 단열재이다.

극저온 시스템에 사용할 단열재 선택을 위해 단열재의 성능을 정확하게 예측하는 것이 가장 중요하다. 지금까지 G. R. Cunnington[3], R. Warwryk[4], Fesmire[5] 등 연구자들이 마이크로스피어의 단열성능에 대한 실험적 연구를 진행하였으며, 마이크로스피어의 유효 열전도도 (effective thermal conductivity) 는 분말 주변 잔류 가스, 분말 입자 크기, 경계 온도등의 조건으로 인해 변화한다는 것을 고찰 하였다. 하지만 마이크로스피어의 유효 열전도도 예측에 대한 연구가 아직 미비하다.

마이크로스피어는 속이 빈 폐쇄형 구의 특수한 형태를 가지고 있다. 일반적인 다공성 매질의 유효 열전도도 모델은 다공성 매질의 고체부분과 기체부분을 확연히 구분할 수 있는 구조에 대해서만 모델링을 하였고, 극저온 및 진공 상태에서는 검증한 바가 없다. M. G. Kaganer가

마이크로스피어 단열법의 열전달 요소들을 각각 따로 계산하여 총 유효 열전도도를 유도하는 계산법을 제시했으나[4], H. S. Kim이 실험으로 검증한 바로는 100% 이상의 오차가 발생해 다소 차이가 있는 것으로 나타났다[6]. 본 논문에서는 더욱 정확한 예측을 위해 마이크로스피어 유효 열전도도 계산을 다공성 매질내 유효 열전도도 모델에 적용 할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 유효 열전도도 모델에 대해 더욱 정확한 검증을 위해 3M사의 K20 타입의 마이크로스피어에 대해 실험을 수행하여 진공도가 8×10^{-3} torr 부터 760 torr 까지 변화함에 따라 열전달 변화를 측정하여 마이크로스피어의 유효 열전도도를 얻고 계산 결과와 비교하였다. 추가적으로, 다른 타입의 마이크로스피어에 대해서도 계산을 수행하고, 기존 연구들의 실험 결과와 비교하였다.

2. 마이크로스피어 열전달 모델

마이크로스피어는 기존 단열재로 사용되던 펄라이트, 폴리스티렌 발포립과 같이 다공성 매질의 단열 원리와 유사한 단열 효과를 가진다.

다공성 매질의 유효 열전도도는 고체부분의 점 접촉에 의한 열전달, 유체 부분의 열전달, 면접촉에 의한 열전달, 복사 열전달 등의 영향을 받으며, 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$k_e = f(k_s, k_f, k_c, k_r) \quad (1)$$

그 중, k_s 는 고체를 통한 전도 열전달, k_f 는 마이크로스피어 외부 기체를 통한 전도 열전달, k_c 는

*Corresponding author: imit1103@gmail.com

마이크로스코피어 입자들간의 면접촉을 통한 전도 열전달, k_f 는 복사 열전달의 유효 열전도도이다.

지금까지 다공성 매질 내의 유체이동은 많은 연구자들이 오랜 시간 연구를 해왔고, 1873년 Maxwell 모델로부터 주기적 구조 (periodic structures) 를 지닌 다공성 매질 내의 유효 열전도도 이론식을 제시하였다[7]. 본 연구에서는 마이크로스코피어의 유효 열전도도를 예측하기 위해 Zehner and Schlunder 모델을 사용하였다. 이 모델은 고체-유체 열전도도비가 2000이하 영역에서 이론적으로 적용 가능하고 고체-유체 열전도도비가 8부터 1200사이에서 많은 실험 데이터로 검증되었다[8]. 하지만 Zehner and Schlunder 모델은 복사 열전달 및 다공성 매질 의 고체부분의 면 접촉으로 인한 열전달 영향을 무시하였다는 단점이 있다. 이로 인한 계산 오차는 유체 부분의 압력이 낮아 질수록 커지며, 따라서 고진공 부분에서는 복사 열전달과 다공성 매질의 고체부분의 면접촉으로 인한 열전달을 고려해야 한다. Zehner and Schlunder 모델에서 k_{ss} 은 식 (2)와 같이 계산된다[7].

$$k_{ss} = k_f \left\{ \frac{1 - \sqrt{1 - \phi} + \frac{2\sqrt{1 - \phi}}{1 - \lambda B} \left[\frac{(1 - \lambda)B}{(1 - \lambda B)^2} \ln\left(\frac{1}{\lambda B}\right) \right]}{\frac{B + 1}{2} - \frac{B - 1}{1 - \lambda B}} \right\} \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 다공성 매질의 공극률 (porosity)이고, λ 는 다공성 매질 유체부분의 열전도도와 고체부분의 열전도도의 비이며, 이는 식 (3)과 같이 표현된다. B 는 형상계수 (shape factor) 이며, 고체부분 입자가 구 (sphere) 일 경우 아래 식 (4)로 근사할 수 있다[7].

$$\lambda = k_f / k_s \quad (3)$$

$$B = 1.25 \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{10.9} \quad (4)$$

하지만, 마이크로스코피어는 다른 파우더 단열재와 달리 구 형태의 속이 빈 폐쇄 셀 (closed-cell) 구조를 가지고 있어 마이크로스코피어의 유효 열전도도를 계산하기 위해서는, 다공성 매질 유효 열전도도 모델을 바로 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 마이크로스코피어 폐쇄셀 내부의 빈 공간에 충전되어 있는 유체가 유동이 없고, 마이크로스코피어의 주변 압력과 무관하게 일정한 조성압력을 유지한다는 점을 이용하여, 마이크로스코피어를 가상의 균질 입자로 간주하였다. 이 가상 균질 입자의 열전도도 k_{ss} 를 계산하여 고체 부분의 열전도도로 사용하였고, 식 (3)과 같은 방법으로 열전도도 비를 식 (5)로 나타내었다.

$$\lambda = k_f / k_{ss} \quad (5)$$

그리고 단열재의 공극률은 마이크로스코피어 입자 외부 공간과 단열층 공간의 비로 표현한다. 따라서 공기의 질량을 무시하고 부피 밀도 (bulk density) 와 외관 밀도 (appearance density) 의 비로 공극률을 계산 한다.

마이크로스코피어는 주로 붕규산염 (borosilicate) 타입의 유리로 만들어졌으며, 유리 재질의 열전도도 k_s 는 아래 식 (6)으로 근사할 수 있다[3].

$$k_s = 6.26 \times 10^{-3} T - 7.83 \times 10^{-6} T^2 \quad (6)$$

여기서 T 는 절대온도이다. 마이크로스코피어의 빈 속에는 일반적으로 잔류 가스가 충전되어 있지만 실제로는 그 양이 매우 적기 때문에 진공 상태라고 보아도 무방하다[9]. 따라서 가상의 균질 입자의 열전도도 k_{ss} 는 다음 식 (7)로 근사할 수 있다[10].

$$k_{ss} \approx 2k_s \frac{1 - \frac{V_{empty}}{V_{microsphere}}}{2 + \frac{V_{empty}}{V_{microsphere}}} \quad (7)$$

기체 부분의 열전달 영역은 누센수 (Knudsen number) 로 아래의 세 영역으로 나눌 수 있다:

- 연속체 유동 (Continuum regime, $Kn \ll 1$): 이상기체 일 경우 기체의 열전도도 k_f 는 압력과 무관하다.
- 자유 분자 유동 (Free molecular regime, $Kn \gg 1$): 기체의 압력이 낮거나 기공이 작을 때 기체는 자유 분자 유동이 되며, 기체 압력이 절대 진공 상태와 가까워 질수록 기체의 열전도도 k_f 는 0으로 수렴한다.
- 전이 유동 (transition regime, $Kn \approx 1$): 기체가 연속체에서 자유 분자 유동 영역으로 전이 하는 과정이다. 이 때 기체의 열전도도 k_f 는 아래 식 (8)로 표현 할 수 있다[11].

$$k_f = \frac{k_0}{1 + \frac{p_{1/2}}{p}} \quad (8)$$

k_0 은 연속체 유동 영역에서 기체의 열전도도이고, $p_{1/2}$ 는 k_f 가 k_0 의 절반에 도달 할 때의 압력이다. 공기에 대한 실험적 결과에 의하면 $p_{1/2} = 230 \text{ mbar} / (d_c [\mu\text{m}])$ 이다[12].

위 계산 과정을 통해 Zehner and Schlunder 모델을 이용한 k_{ss} 를 구할 수 있다. 마이크로스코피어 주위 기체의 압력이 고압 또는 상압에 가까운 진공상태에서는 Zehner and Schlunder 모델로 계산한 k_{ss} 값으로 유효열전도도 k_e 를 근사할 수 있다. 이는 해당 압력에서의 유효열전도도는 마이크로스코피어와 이를 둘러싸고 있는 주위 기체를 통한 전도 열침입이 지배적이기 때문이다. 즉, Zehner and Schlunder 모델로 계산한 k_{ss} 는 이웃하는 마이크로스코피어의 면접촉으로 인한 열전달과 복사 열전달에 의한 영향 ($k_c + k_r$) 이 배제된 결과로 볼 수 있다. 그 원인은 $k_c + k_r$ 값은 압력의 변화와 무관하게 약 $1 \text{ mW} / \text{m} \cdot \text{K}$ 수준으로 매우 작기 때문이다. 반면에 고진공환경에서는 k_{ss} 값이 0에 가까워지며 복사 열전달과 이웃하는 마이크로스코피어 사이의 면 접촉으로 인한 열전달이 지배적이기 때문에 k_e 는 $k_{ss} = f(k_{ss}, k_f)$ 와 더불어 k_c 와 k_r 값이 함께 고려되어야 하며 이를 수식으로 정리하면 아래 식 (9)와 같다.

$$k_e = k_{ss} + k_c + k_r \quad (9)$$

여기서 복사 열전도도 k_r 는 다음 식 (10)과 같다[12].

$$k_r = \frac{16\sigma\bar{n}^2T_r^3}{3E(T_r)} \quad (10)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 상수 (Stefan-Boltzmann constant)이고, \bar{n} 은 유효 굴절 계수이며, 복사 온도 T_r 는 아래와 같이 정의된다.

$$T_r^3 = (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) / 4 \quad (11)$$

$E(T_r)$ 는 흡광 계수 (extinction coefficient) 이며, 이 계수는 단열재의 밀도와 재질, 단열층 벽면의 재질 등에 따라 변하며, 실험 장치에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 실험을 통한 실측 값으로 결정된다. 더불어 T_1 은 진공 용기 외벽의 온도이고, T_2 는 액체 질소 용기의 내벽 온도이다.

본 연구 논문에서는 면접촉으로 인한 열전달 부분 k_c 를 확인하기 위해 Area-contact 모델을 적용한다[7]. Area-contact 모델은 Zehner and Schlunder 모델을 바탕으로 변형 계수 α (deformation factor) 를 도입해 다공성 매질내에 존재하는 고체부분의 면접촉의 영향을 고려한 계산 모델이다, 즉 $k_{cs} + k_c$ 을 계산한 식이다. 따라서 본 연구에서는 실험적 연구를 병행 하여 마이크로스피어의 변형 계수를 획득하였다.

$k_c + k_r$ 의 값은 상대적으로 높은 압력에서는 무시할 수 있는 수치이다. 특히 파우더 단열법은 주로 저진공에서 사용되므로 $k_c + k_r$ 값은 실제 단열층의 단열성능에 크게 영향을 미치지 않는다. 또한, 같은 장치에서 한번의 실험을 통해 구해진 k_c 값에서 Area-contact 모델로 구해진 값을 빼서 k_r 을 구할 수 있으며, 차후 계산에서는 실험값을 사용하고 반복적인 실험 검증이 필요없다. 따라서, 본 논문 계산 과정에서 참고한 실험에서 사용한 마이크로스피어의 타입과 실험장치가 모두 다르기 때문에 $k_c + k_r$ 값을 실험 값으로 도입하였다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

더욱 정확한 모델 검증을 위해 본 연구에서 3M사의 K20 마이크로스피어를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험 장치의 구조를 개략적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

실험 장치의 내부 액체 질소 용기와 외부 진공 용기로 구성 되어 있다. 실험중 내부 액체 질소 용기와 외부 진공

용기의 온도를 균일하게 유지하기 열전도도가 높은 구리로 제작 하였고, 진공 용기 외벽 및 액체 질소 용기 상단에 설치되어 있는 구리판에 히터를 부착하였다. 실험 장치의 온도 측정을 위해 액체 질소 주입 라인, 액체 질소 용기 외벽, 액체 질소 용기 상단에 설치된 구리판, 진공 용기 외부 벽면에 각각 온도 센서를 납땜하여 부착 하였다. 실험 장치의 온도 측정을 위해 액체 질소 주입 라인, 액체 질소 용기 외벽, 액체 질소 용기 상단에 설치된 구리판, 진공 용기 외부 벽면에 각각 온도 센서를 납땜하여 부착 하였다.

진공 용기와 액체 질소 용기 사이의 공간, 즉 단열층에는 마이크로스피어가 충전되어 있다. 사용된 마이크로스피어는 표면에 존재하는 수분을 완벽히 제거하기 위해 1.4 kW의 용량을 가지고 있는 제습기로 100°C 에서 3일간 전처리하였다.

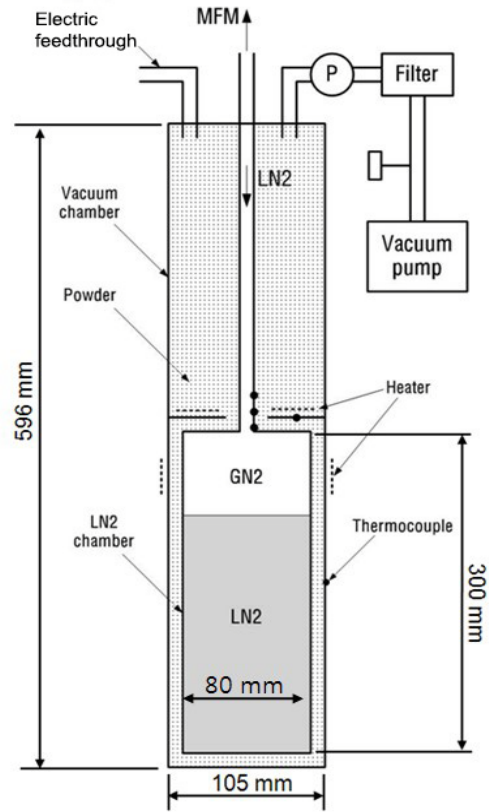


Fig. 1. Experimental apparatus for microspherer thermal insulaton performance test.

진공 용기에 충전된 마이크로스피어는 자체 중력만 작용되고 다른 외부 압력은 없다. 단열층 내의 환경을 조성하기 전에 내부의 공기와 수증기를 배출하기 위해 기체 질소를 흘려준다. 그리고 로터리 펌프와 터보 펌프를 이용해 단열층을 진공 상태로 조성 시킨다. 용기내의 마이크로스피어 입자가 진공 펌프 내로 유입되지 않도록 진공 라인에 7 μm 필터 (SS-8TF-7, Swagelok) 를 설치 하였다. 본 연구의 실험은 8×10^{-3} torr 부터 760 torr 사이에서 진행하였고, 높은 진공도에서부터 기체 질소를 흘려주어 진공도를 낮추는 방법으로 목표압력을 조절 하였다. 각 압력에서의 액체 질소 증발량을 측정함으로써 단열층을 통해 침입하는 열량을 산정하였고 식 (12)로 마이크로스피어 단열층의 유효 열전도도를 계산 하였다[13].

$$k = Q / (S_{\sqrt{A}}^* \cdot \sqrt{A_i} \cdot \Delta T) \quad (12)$$

위 식에서 Q 는 실험에서 측정된 총 열전달 양이고, $S_{\sqrt{A}}^*$ 는 형상 계수이며, 동심원통에 대하여 다음 식 (13)과 같이 계산된다. ΔT 는 진공 용기 외벽과 액체 질소 용기의 내벽의 온도차 이다.

$$S_{\sqrt{A}}^* = \frac{2\sqrt{\pi}}{\{1 + (2/\sqrt{6})[(d_0/d_i)^3 - 1]\}^{1/3} - 1} + \frac{3.1915 + 2.7726(h_i/d_i)^{0.76}}{\sqrt{1 + 2h_i/d_i}} \quad (13)$$

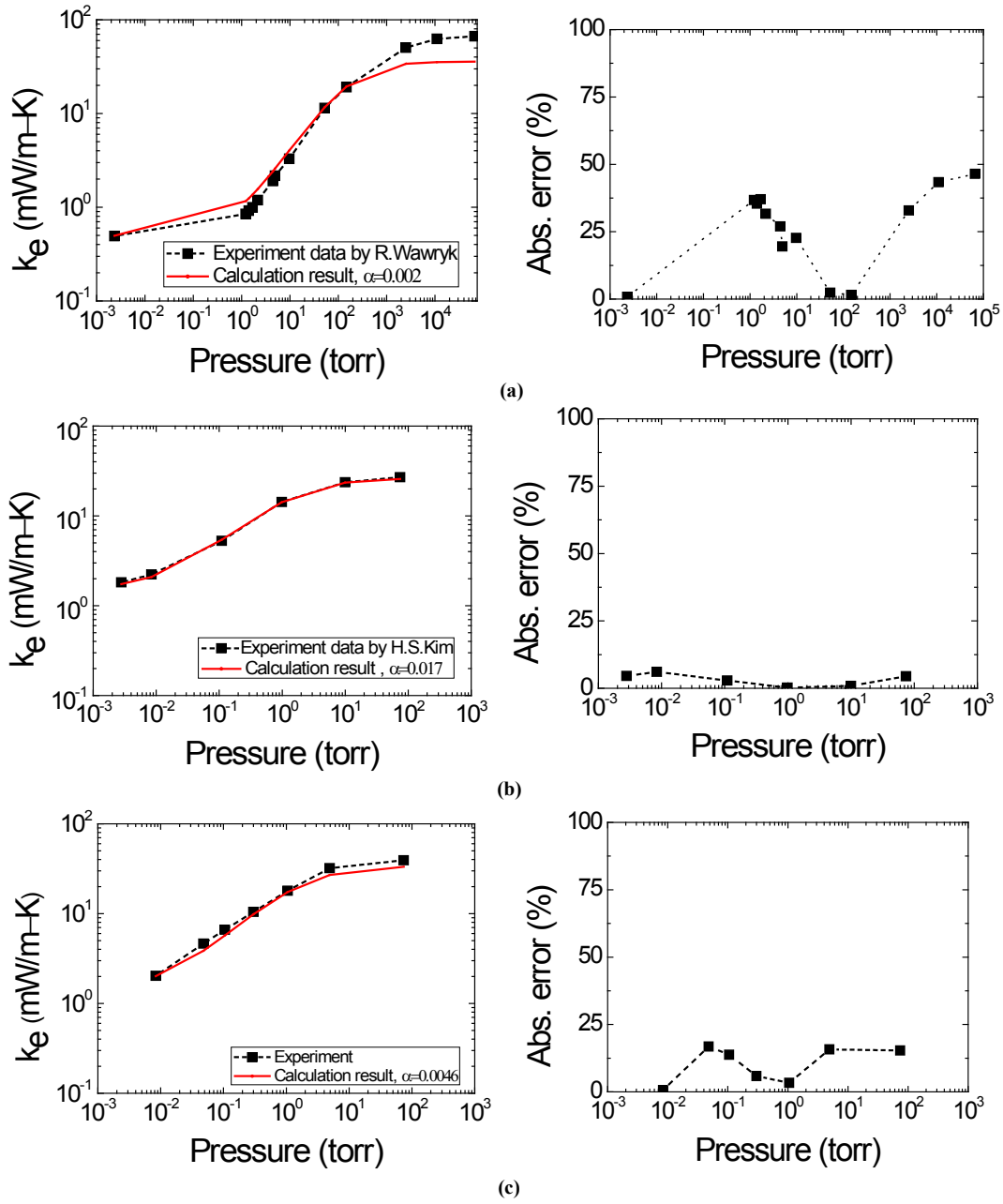


Fig. 2. Comparison of calculation results with experimental results (a) by R. Wawryk, (b) by H. S. Kim, (c) by this research.

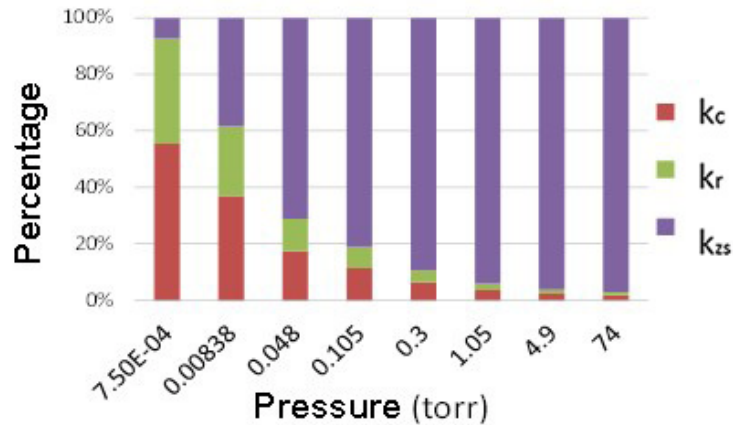


Fig.3. Percentage of each heat transfer component in different pressures.

TABLE 1
MICROSPHERE CHARACTERISTICS.

| Material | R. Warwyk | H. S. Kim | This paper |
|---|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| | SiO ₂ 56% | Soda lime borosilicate glass | Soda lime borosilicate glass |
| Average temperature (K) | 187 | 182.5 | 189 |
| Microsphere apparent density (kg/m ³) | 390 | 125 | 200 |
| Bulk density (kg/m ³) | 168 | 64 | 108 |
| Average particle size (μm) | 95 | 65 | 55 |
| Porosity | 0.57 | 0.488 | 0.46 |

d_o 와 d_i 는 각각 진공 용기와 액체 질소 용기의 직경이고, h_i 는 액체 질소 용기의 높이이며, A_i 는 액체 질소 용기의 표면적이다. 이상 실험을 통해 얻은 유효 열전도도와 다공성 매질 유효 열전도도 계산 모델에서 구한 값과 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다.

4. 계산 결과 및 검증

정립한 유효 열전도도 계산모델의 적용 가능성을 검증하기 위해 본 연구에서 실험을 통해 측정된 마이크로스피어의 유효 열전도도를 계산하였다. 또한 R. Warwyk 와 H. S. Kim 가 지난 연구에서 수행된 실험의 결과와 비교하였고 3M사의 K20 마이크로스피어에 대해서는 실험과 계산을 실행하여 모델을 검증하였다. 계산 및 비교 결과는 Fig. 2에서 나타났다. Fig. 2의 실험 및 계산에서 사용한 마이크로스피어의 사양은 Table 1에 정리하였다.

위 세 실험에 대해 계산한 결과 오차가 각각 46%, 4.6%, 16% 이내로 나타났고, 본 연구에서 고찰하는 유효 열전도도일 경우 수치가 매우 작음에도 불구하고 경향성이 아주 잘 맞는 것으로 나타났다. 그 중 R. Warwyk 실험에 대한 계산 결과는 오차가 상대적으로 크게 나왔다. 그 원인을 분석해 보면 식 (1)에서 고체의 열전도도를 계산할 때 봉 규산염 타입의 유리로 가정하고 계산을 하였다. H. S. Kim 실험에서 사용한 3M사 K1 타입의 마이크로스피어와 본 연구에서 사용한 3M사 K20 타입의 마이크로스피어는 봉 규산염 타입의 유리재질로 제작 되었으나, 논문에 의하면 R. Warwyk 실험에서 사용한 마이크로스피어는 이들과는 조성이 다른 것으로 제시되어 있어, 위와 같은 오차가 발생했을 것이라고 예상된다[4].

또한, R. Warwyk 실험에서 유효 열전도도 계산식의 선택 따라 구해진 유효 열전도도 값에 오차가 발생 할 수 있다. 이와 같은 오차 발생 원인으로 본 연구에서는 Fesmire 실험 결과와 비교하지 않았다. Fesmire 실험에서 3M 사의 K1 타입의 마이크로스피어를 사용했다[5]. 이는 H. S. Kim 실험과 동일한 마이크로스피어이지만 두 실험에서 구해진 유효 열전도도는 차이가 있었으며, 그 오차의 원인도 열전도도 계산식의 차이에서 발생 했다고 판단된다. 논문 [14]에 의하면 Fesmire는 푸리에의 법칙 (Fourier's law)을 사용했고, 이는 무한 길이의 두 동심 원통에 대한 계산식이다. 본 논문과 H. S. Kim 연구에서는 위에서 설명한 바와 같이 원통의 길이를 고려해 형상 계수를 계산하여 유효 열전도도 계산을 진행 하였다.

H. S. Kim의 실험과 본 연구의 실험에서 사용한 K1 타입의 마이크로스피어와 K20 타입의 마이크로스피어는 같은 유리 재질로 제조되었다. K1 타입의 마이크로스피어와

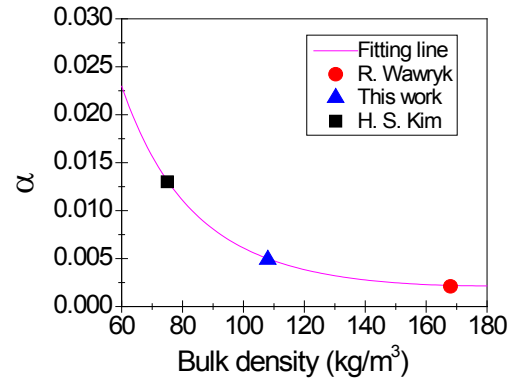


Fig. 4. The relationship of deformation factor and bulk density.

K20 타입의 마이크로스피어의 단열 성능을 비교했을 때, Fig. 2의 (b)와 (c)에서 나타낸 바와 같이 K1 타입의 마이크로스피어가 더 낮은 유효 열전도도를 나타낸다. 이는 K1 타입의 마이크로스피어가 K20 타입에 비해 부피 밀도와 외관 밀도가 더 작기 때문이다. 하지만, K20 타입의 마이크로스피어는 밀도가 큰 만큼, 입자가 단단하고 파괴될 가능성이 적어 단열 성능을 더 오래 유지 할수 있다는 장점이 있기 때문에, 사용자 요구에 맞게 선택하여 사용할 수 있다.

Fig. 3은 각 열전달 요소가 압력 변화에 따라 전체 유효 열전도도에서 차지하는 비중의 변화를 나타낸다. 지진공 상태에서는 k_{cc} 가 나머지 두 요소보다 지배적인 비중을 차지한다는 것을 볼 수 있다. 하지만 압력이 낮아질수록 기체의 영향이 작아지면서 면접촉으로 인한 열전달과 복사 열전달이 더 큰 비중을 차지하게 된다. Fig. 4는 각 실험에서 사용된 마이크로스피어의 변형 계수를 나타내고 있다. 계산 결과에 의해 마이크로스피어의 변형 계수에 대한 피팅 식을 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$\alpha = \exp(-0.78002 - 0.05996\rho_{bulk} + 0.000167741\rho_{bulk}^2) \quad (14)$$

마이크로스피어의 변형 계수는 벌크 밀도에 반비례하는 것을 볼 수 있는데 Table 1. 에서 각 마이크로스피어의 사양을 보면 벌크 밀도가 작은 마이크로스피어는 외관 밀도 (apparent density)도 작다. 이는 마이크로스피어의 유리 두께에 얇기 때문이다. 따라서 분쇄강도가 낮아지며 더욱 쉽게 변형이 일어나는 원인이 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 극저온 단열재로 사용될 수 있는 유리 마이크로스피어의 단열 성능을 예측할 수 있는 계산 모델을

제시하였다. 마이크로스피어는 속이 빈 폐쇄 셀 구조이기 때문에 기존의 다공성 매질 유효 열전도도 모델을 그대로 사용하여 유효 열전도도를 계산하기에는 어려움이 있었다. 따라서 마이크로스피어 입자를 하나의 균질한 물질로 가정하여 기존의 이론식을 통해 정확한 유효 열전도도를 산정할 수 있었다. 그리고 지난 연구에서 진행되었던 마이크로스피어 단열 성능 실험 결과와 새로 정립된 모델의 계산 결과를 비교 하여 계산 모델의 정확성을 확인하였을 뿐만 아니라, 3M사의 K20 타입의 마이크로스피어에 대하여 실험적 연구를 진행하고 이의 결과를 이론식으로부터 계산된 결과와 비교하여 계산 모델의 사용 가능성을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 우주핵심기술개발사업 연구과제입니다. (NRF-2013M1A3A3A02042033)

REFERENCES

- [1] M. Allen, R. Baumgartner, J. Fesmire, and S. Augustynowicz, "Advances in microsphere insulation systems," *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 49, 619, 2004.
- [2] R. Baumgartner, E. Myers, J. Fesmire, D. Morris, and E. Sokalski, presented at the AIP Conference Proceedings, 2006 (unpublished).
- [3] G. R. Cunnington and C. L. Tien, "Apparent thermal conductivity of uncoated microsphere cryogenic insulation", in *Advances in Cryogenic Engineering*, edited by K. D. Timmerhaus (Springer, 1977), vol. 22, pp. 263-271.
- [4] R. Wawryk and J. Rafałowicz, "Heat transfer in microsphere insulation," *Journal of thermal analysis*, vol. 34 (1), 249-257, 1988.
- [5] J. Fesmire and S. Augustynowicz, "Thermal Performance Testing of Glass Microspheres Under Cryogenic Vacuum Conditions," *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 49, 612, 2004.
- [6] S. J. H.S.Kim, S.H.Jeong, "Experimental research about various powder insulation methods," *Progress in superconductivity of cryogenics*, vol. 12, 49-54, 2010.
- [7] P. Cheng and C.-T. Hsu, "The effective stagnant thermal conductivity of porous media with periodic structures," *Journal of Porous Media*, vol. 2 (1), 1999.
- [8] M. Kandula, "On the effective thermal conductivity of porous packed beds with uniform spherical particles," *J. Porous Media*, vol. 14 (10), 919-926, 2011.
- [9] C. K. Chan and C. L. Tien, "Conductance of packed spheres in vacuum," *J. Heat Transfer*, (United States) 95 (3), 1973.
- [10] G. Cunnington Jr and C. Tien, "Heat transfer in microsphere insulation in the presence of a gas", in *Thermal Conductivity 15* (Springer, 1978), pp. 325-333.
- [11] F. S. Sherman, "A survey of experimental results and methods for the transition regime of rarefied gas dynamics," *Rarefied Gas Dynamics*, vol. 2, 228, 1963.
- [12] J. Fricke, H. Schwab, and U. Heinemann, "Vacuum insulation panels—exciting thermal properties and most challenging applications," *International journal of thermophysics*, vol. 27 (4), 1123-1139, 2006.
- [13] P. M. Teertstra, M. M. Yovanovich, and J. R. Culham, "Conduction shape factor models for three-dimensional enclosures," *Journal of thermophysics and heat transfer*, vol. 19 (4), 527-532, 2005.
- [14] J. Fesmire, S. Augustynowicz, and S. Rouanet, "Aerogel beads as cryogenic thermal insulation system," *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 47, 1541, 2002.