

다양한 파우더 충전 단열 방법의 단열 성능에 대한 실험적 연구

Experimental research about thermal insulation performance of various powder insulation methods

김희선^{1*}, 정상권², 정성하³

H.S. Kim^{1*}, S. Jeong², S.H. Jeong³

Abstract: This paper presents apparent thermal conductivity of various powder at different vacuum levels for cryogenic insulation. Four kinds of powder insulator are examined by using boil-off calorimetry at pressure range from 50 Torr to 3 mTorr. The first material is perlite which is widely used in cryogenic application. Microsphere is the second one that is recently proposed as a replacement powder for liquid hydrogen storage tanks. It is a hollow sphere made of silica with the diameter in the order of 10 to 100 μm . Popped rice and polystyrene beads are also selected as candidates for powder insulation even though they are polymers. With their porous elliptic and spherical configuration and light density, they demonstrate fairly good thermal insulation performance at pressure range from 50 Torr to 3 mTorr. According to the experimental investigation in this paper, microsphere and polystyrene beads possess promising insulation characteristic as powder insulators and further study is desired.

Key Words: powder insulation, apparent thermal conductivity, microsphere, perlite, popped-rice, polystyrene bead.

1. 서 론

분말 단열은 펄라이트, 에어로겔 등과 같은 미세 분말을 충전함으로써 대류, 복사 열전달을 크게 줄이는 단열 방법이다. 이 방법은 진공 환경을 조성하면 매우 높은 단열 성능을 얻을 수 있을 뿐 아니라, 다양한 구조에 적용이 가능하므로 LNG와 같은 극저온 액화 가스 운송 및 저장, 수송 관로 및 일반 건축 외장재까지 폭넓게 사용되어 왔다. 특히 최근에는 에너지 고갈 문제로 인해, 유용한 열의 유출과 불필요한 열 유입을 방지하여 에너지 효율을 높이기 위한 핵심인 단열 기술의 중요성이 크게 대두되었다.

과거에는 대부분의 극저온에서의 분말 단열재로서

진주암을 팽창시켜 얻은 다공성 분말인 펄라이트가 사용되어 왔다. 그러나 펄라이트가 비정형의 유리질 알갱이이므로 분말 충전 뒤에도 입자의 깨짐 및 재배치로 인한 가라앉음 현상이 있으므로, 속이 빈 구의 구조를 한 마이크로스피어는 다음과 같은 연구 결과를 근거로 펄라이트의 대안으로 제안되었다. Fasmire와 Augustynowicz는 마이크로스피어의 단열 성능이 펄라이트에 비해 높음을 보였고[1], Allen 등은 마이크로스피어의 내구성이 펄라이트에 비해 우수함을 실험적으로 확인한 바 있다[2]. 또한 Baumgartner 등은 극저온 액체 질소 저장 용기의 단열재로서 마이크로스피어를 사용했을 때 펄라이트에 비해 증발량이 약 80%로 줄어드는 것을 확인하였다[3]. 그러나 위 연구자들이 실험한 펄라이트와 마이크로스피어는 그 밀도가 다르고, 위 연구 이외에는 실험적 연구가 미비하므로 펄라이트와 마이크로스피어의 단열 성능에 대한 정량적인 측정 및 비교는 향후 마이크로스피어의 사용에 대해 좋은 지표가 될 것이다.

한편 쌀을 팽창시켜 얻은 튀밥과 폴리스티렌 발포립은 다공성의 타원형 또는 구형 입자로 높은 단열 성능을 가질 것으로 예상된다. 폴리스티렌은 오래 전부터 발포된 형태로 저온 단열에 사용되어 왔으나 발포립 충전 단열 성능에 대한 연구가 미비하다. 또한 쌀, 옥수수 등 전분은 중합체를 대체할 친환경적인 폼의 모재로 모색된 바 있으나[4] 튀밥 형태의 단열 성능에 대한 실험적 연구는 전무하므로, 본 논문에서 이에 대한 단열 성능을 정량적으로 측정하여 단열재로서의 가치를 평가하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 실험 장치

분말 단열재의 단열 성능은 증발 열량법을 통해 측정되었다. 실험 장치의 구조는 Fig. 1과 같다. 본 실험 장치는 진공 용기와 그 내부의 액체 질소 저장 용기로 구성되어 있다. 진공 용기 내벽과 액체 질소 저장 용기 외벽 사이의 공간에 분말 단열재가 충전된다. 분말 단열재 충전층을 통해 유입된 열에 의해 증발하는 액체 질소의 양을 질량 유량 측정기(Mass flow meter)로 측정하여 분말 단열재의 단열 성능을 측정한다. 분말이 충전된 진공 용기에 진공 상태를 조성하기 위하여 로터리 펌프와 터보 펌프를 사용하였으며, 분말의 유입으로부터 펌프를 보호하기 위하여 연결 파이프의 중간에 Solberg(솔버그)사의 진공용 분말 필터를 연결하였다. 필터의 재질은 종이이며, 크기가 2 μm 이상인 분진에 대해 99 %를 걸러내는 모델로서 1 mTorr 이하의 진공도를 유지함이 확인되었다. 압력계는 분말에

¹학생회원 : 한국과학기술원 대학원 기계공학과 석사과정

²정 회 원 : 한국과학기술원 공대 기계공학과 교수

³비 회 원 : 한국과학기술원 대학원 기계공학과 석사과정

*교신저자 : sunnykim@kaist.ac.kr

원고접수 : 2009년 09월 24일

심사완료 : 2010년 07월 15일

게재확정 : 2010년 07월 15일

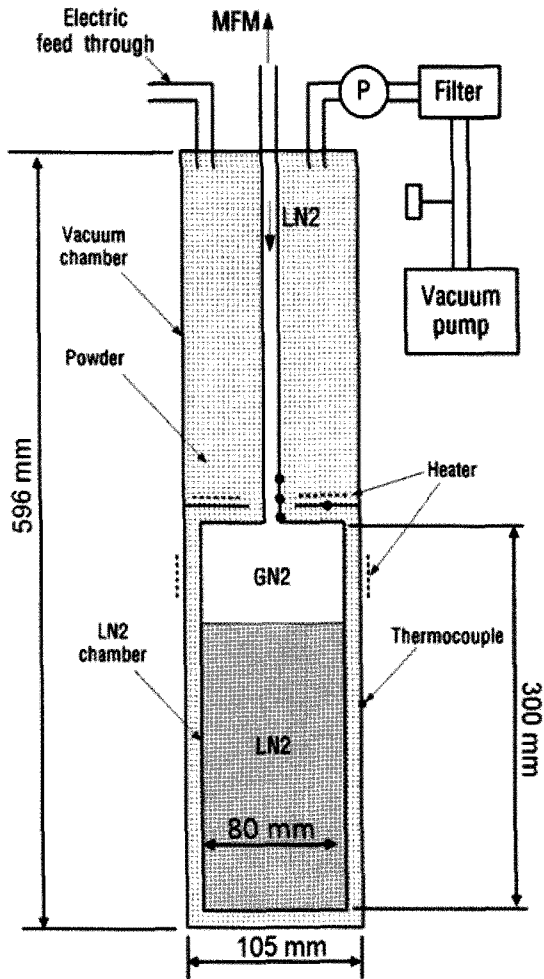


Fig. 1. Experimental apparatus structure.

영향을 적게 받는 열전대 압력계를 사용하였다. 온도 경계 조건인 진공 용기의 겉면의 온도를 15 °C로 일정하게 유지하기 위하여 용기 겉면에 실리콘 면상 발열 히터를 부착하고, 열전대로 그 온도를 측정하여 히터의 작동을 제어하는 릴레이식 온도 제어기를 사용하였다. 또한 용기의 전체 온도를 균일하게 유지하기 위하여 열전도도가 높은 동으로 제작하였다.

2.2. 실험 방법

증발 열량법을 이용한 단일 성능의 측정 방법은 다음과 같다. 진공 용기와 액체 질소 용기 사이의 공간에 분말 단열재를 충전한 뒤 1 mTorr 수준의 진공도를 조성한다. 순수한 질소 기체를 이용하여 내부 압력을 목표로 하는 값으로 조절한 뒤, 액체 질소 용기 내부에 액체 질소를 충전한다. 액체 수위 측정기를 액체 질소 유입구에 삽입하여 수위를 측정한 뒤, 액체 질소가 용기의 90% 이상 채워지면 액체 질소 유입구와 질량 유량 측정기를 연결하여 정상 상태에 도달했을 때 액체 질소 증발 질량 유량을 측정하였다. 정상 상태에 도달하는 시간은 각 분말 단열재의 단일 성능에 따라 상이하므로, 정상 상태 도달 전에 액체 질소의 수위가 50 % 이하로 낮아질 경우에는 실험 도중 액체 질소를 재충전하여 50~90 %의 수위를 유지하도록 하였다.

질량 유량 측정기로 측정된 액체 질소의 증발 질량 유량 m 과 질소의 증발 잠열 h_{fg} 의 곱으로 식 1에 보인 것처럼 유입량 Q 를 구할 수 있다.

$$Q = mh_{fg} \tag{1}$$

본 실험 장치와 같이 유한한 길이의 동심인 두 원통에 대하여 Teertstra 등이 다음과 같은 열 유입량 계산식을 제안하였다[5]. 동심의 내부, 외부 원통 사이의 공간에 열전도도가 k 인 물질이 채워져 있을 때 전도 열 유입량 Q 는 식 2와 같다.

$$Q = kS_{\sqrt{A_i}}^* \sqrt{A_i} (T_i - T_o) \tag{2}$$

위 식에서 A_i 는 액체 질소 용기의 겉넓이, T_i 는 액체 질소 용기 겉면의 온도, 그리고 T_o 는 진공 용기 겉면의 온도를 뜻한다. 위 식에서 형상 계수 $S_{\sqrt{A_i}}^*$ 는 식 3과 같이 계산된다.

$$S_{\sqrt{A_i}}^* = \frac{2\sqrt{\pi}}{[1 + (2/\sqrt{6})(d_o/d_i)^3 - 1]^{\frac{1}{3}} - 1} + S_{\infty}^* \tag{3}$$

$$\text{단, } S_{\infty}^* = \frac{3.1915 + 2.7726(h_i/d_i)^{0.76}}{\sqrt{1 + 2h_i/d_i}}$$

위 식에서 d_i , h_i 액체 질소 용기의 직경과 높이, d_o , h_o 는 진공 용기의 직경과 높이를 뜻한다. 위 과정에 의해 열 유입량이 Q 인 실험 대상의 유효 열전도도도 k_{eff} 는 식 4와 같이 구해진다.

$$k_{eff} = \frac{Q}{S_{\sqrt{A_i}}^* \sqrt{A_i} (T_i - T_o)} \tag{4}$$

한편 실험 장치에서 액체 질소 유입 파이프를 통한 전도 열전달은 의도하지 않은 열전달이다. 따라서 Fig. 1의 1번 부위에 열전대를 일정한 간격으로 부착하여 실험 중 파이프를 통한 전도 열 유입량을 구하여 실험 결과로부터 해당 값을 제하여 보정함으로써 실험 결과의 정확도를 높였다.

2.3. 실험 대상

실험 대상인 분말 단열재로는 서론에서 언급한 펠라이트, 마이크로스피어, 폴리스티렌 발포폼과 쌀 튀밥을 선정하였다. 상기 단열재의 분말 단열재로서의 특징을 Table. 1에 정리하였다. 한편 Fig. 2는 각 분말 단열재의 확대 현미경 사진이다.

분말 단열재는 단위 부피 당 유효 표면적이 넓고 그 중에는 내부에 기공을 가진 것도 있어 수분이 흡착되기 쉬우므로 수분을 제거하기 위해 다음과 같은 과정을 통해 건조하였다. 먼저 가열 용기에 분말을 넣고 무게를 측정해 가며 가열한다. 이 때 가열 용기는 분말과의 접촉 면적이 최대화 되도록 가로, 세로 500 mm에 높이 30 mm의 넓은 알루미늄 용기를 사용하였다. 가열 온도는 각 분말 재료의 특성에 맞게 산정하였다. 유리질인 펠라이트와 마이크로스피어의 경우 수분이 증발하기 쉬운 200 °C 이상의 높은 온도를 조성하는 데 무리가 없었으나 폴리스티렌 발포폼은 고온에서 쉽게 유리화되므로 유리화 온도 이하인 75 °C 로 온도를 유지하였다. 쌀 튀밥의 경우 쌀 전분이 타는 온도 밀인 120 °C로 가열 온도를 산정하였다. 분말이 담긴 용기의 무게를 3시간 간격으로 측정하여 분말의

Table 1. Characteristics of Powder insulator.

	Perlite	Microsphere	EPS beads	Popped-rice
Shape	Porous irregularly shape	Hollow sphere	Porous sphere	Porous spheroid
Material	SiO ₂ (75%) Al ₂ O ₃ (15%)	Soda lime borosilicate glass	Polystyrene	Rice starch
Particle size (average)	90 μm	65 μm	1 mm (100 μm, pore)	11×6×4 mm (200 μm, pore)
Bulk density	55 kg/m ³	73 kg/m ³	43 kg/m ³	61 kg/m ³
Baking out temperature	200 °C	200 °C	75 °C	120 °C
Water mass content	6.4 %	3.9 %	1.7 %	21.5 %
Note	-	3M, K1 product	-	-

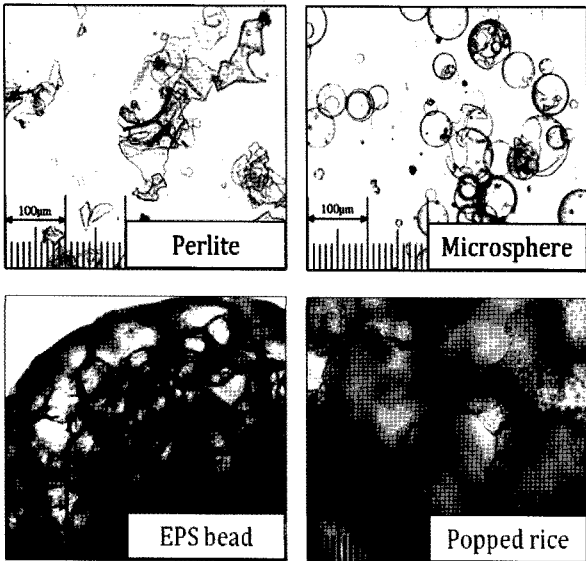


Fig. 2. Magnified view of tested powder insulators.

무게 변화량이 0.5 % 이하일 때 분말 내 수분이 모두 제거된 것으로 간주하였으며, 건조 전과 후의 무게 변화를 통해 각 분말의 함수율을 측정하였다. 그 결과 흡습성이 좋은 쌀 전분이 21.5 %로 가장 큰 함수율을 가지는 것을 확인하였으며, 재질은 비슷함에도 불구하고 마이크로스피어에 비해 외부로부터 수분이 달라붙기 쉬운 열린 기공을 많이 가진 펄라이트가 함수율이 보다 높음을 확인하였다. 함수율이 가장 낮은 단열재는 폴리스티렌 발포립으로 그 값이 1.7 %이었다. 분말의 건조 후 곧바로 실험장치인 진공 용기와 액체 질소 용기 사이의 공간에 채워 넣은 뒤 밀폐하고, 진공 펌핑과 질소 가스를 이용한 퍼지를 5~8회 반복하여 내부를 정화함으로써 잔여 수분의 가능성을 없앴다.

3. 분말 단열재 내 열전달 모델

실험 대상인 분말 단열재의 유효 열전도도를 예상하기 위한 적합한 열전달 모델로, Wawryk과 Rafalowicz에 의해 수행된 마이크로스피어에 대한 다음과 같은 열전달 모델을 사용하였다(5). 단, 펄라이트는 다른 섯

과 입자 구조가 매우 상이하므로 제외하였다. 마이크로스피어와 같이 속이 빈 구형 입자로 이루어진 분말을 통한 열전달은 다음과 같은 세 가지 경로를 통해 일어난다. 첫 번째로 입자를 통한 고체 열전도, 두 번째로 입자 사이 기공을 통해 일어나는 분자 열전도, 마지막으로 입자 사이 공간에서 일어나는 복사 열전달이다. 열전달이 독립적인 이 세 경로로 일어난다고 가정하였을 때 분말 전체의 유효 열전도도 k_{eff} 는 식 5와 같다(5).

$$k_{eff}(T, p) = k_{ss}(T, p) + k_{gc}(T, p) + k_r(T) \quad (5)$$

위 식에서 k_{ss} 는 고체를 통한 전도 열전달, k_{gc} 는 충전 가스를 통한 전도 열전달, 그리고 k_r 은 복사 열전달의 유효 열전도도를 뜻한다.

Wawryk과 Rafalowicz가 수행한 열전달 모델 정립 및 유효 열전도도의 예측은 아래와 같은 내용을 가정하였다.

- 모든 입자의 크기는 균일하다.
- 입자 사이의 기공에서 누셀수 Kn 은 충분히 작다.
- 세 열전달 경로는 서로 독립적이다.
- 입자 자체의 열저항은 입자 간 접촉 열저항에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다.

이 열전달 모델은 마이크로스피어를 대상으로 한 것이며, 펄라이트, 폴리스티렌 발포립과 쌀 튀밥에 적용했을 시 그 정확성을 보장할 수 없다. 우선 마이크로스피어 입자는 속이 빈 얇은 껍질을 가진 구인 반면, 펄라이트, 폴리스티렌 발포립과 쌀 튀밥은 모두 공극률이 마이크로스피어보다 큰 다공성 물질로 입자 당 열전도도가 보다 크다. 따라서 위에서 네 번째 가정에 상반되므로 오차의 요인이 될 것이다. 그러나 입자 자체의 열저항은 곧 고체를 통한 열전달, k_{ss} 에 영향을 끼치는데 이는 1 mTorr 수준의 고진공 상태를 제외하면 k_{eff} 에서 차지하는 비중이 낮으므로 이 차이는 고진공에서만 큰 오차를 야기할 것으로 여겨진다. 또한 폴리스티렌 단열재와 쌀 튀밥은 마이크로스피어와 달리 입자의 겉 표면이 무르고 작은 영률을 가지며, 표면 상태 또한 매끄럽지 않으므로 접촉면이 크다. 따라서 마이크로스피어와 달리 접촉 열저항이 입자 자체의 열저항에 비해 지배적으로 크지 않다. 이것은 위 모델의 기본 가정과 다소 차이가 있다. 그러나 본 실험에서는 충전된 단열재의 자중이 매우 작아 입자 간 접촉면이

큰 힘을 받지 않는다. 따라서 입자 간 접촉면 반경이 상대적으로 작으므로 낮은 영률과 표면 상태가 야기하는 오차가 크지 않을 것이다.

유효 열전도도에서 큰 비중을 차지하는 기체 전도 열전달 모델에 의한 열전도도를 구하는 식은 아래의 식 6과 같다[5].

$$k_{gc}(T, p) = k_g \left[\frac{5.8\delta_s^2}{K} \left(\frac{1}{K} \ln \left(\frac{k_{gr}}{k_g} - 1 - \frac{K}{2} \right) + 1 \right) \right] \quad (6)$$

위 식에서 좌변의 k_{gc} 는 기체 전도에 대한 유효 열전도도이다. 이는 온도 T , 압력 p 에 대한 함수이다. 우변의 δ_s 는 마이크로스피어 내 고체의 부피비로 1에서 공극률을 뺀 값과 같다, k_{gr} 는 마이크로스피어 입자의 열전도도를 나타낸다. K 와 k_g 는 아래의 식 7과 8에 의해 각각 계산된다[5].

$$K = 1 - \frac{k_g}{k_{g0}} \quad (7)$$

$$k_g = \frac{k_{g0}}{1 + \frac{19}{6} \frac{2 - \alpha}{\alpha} Kn} \quad (8)$$

여기에서 Kn 은 누센수이고, α 은 열적용 계수이다. 위 식으로부터, 입자의 기체 전도에 대한 유효 열전도도를 구할 때 입자 내 공극률과 입자 내 공극의 특성 길이 중요한 변수임을 알 수 있다. 이에 따라 폴리스티렌 발포립과 튀밥의 구조를 고려하여 계산에 반영하였다. 마이크로스피어는 속이 빈 구라는 구조 상 기체가 충전되어 전도의 매개체가 되는 공간은 마이크로스피어 입자 사이의 기공뿐이다. 반면 폴리스티렌 발포립 및 튀밥은 입자의 내부와 외부 사이에 열린 기공이 존재하므로 내부의 기공도 기체를 통한 열전달에 기여한다. 또한 전체에서 입자 간 공극보다 입자 내부 기공이 차지하는 부피비가 더 크기 때문에, 기체를 통한 열전도 모델에서 중요한 변수인 전체 기공률 및 기공의 특성 길이가 입자의 내부 기공의 값이 되어야 할 것이다. 단, 계산 결과에 의하면 충전 기체의 압력이 낮아지면 큰 기공들이 미치는 영향이 지배적이게 되므로 이때에는 위와 같은 가정을 사용하지 않는 편이 더 정확할 것이다.

본 연구에서 측정 대상은 위와 같은 고찰에 의거하여 Wawryk과 Rafalowicz의 마이크로스피어에 대한 열전달 모델을 사용해 그 유효 열전도도를 예측하고, 실험 결과와 비교하였다. 특히 쌀 튀밥과 폴리스티렌 발포립과 같이 입자가 다공성인 경우에는 위에서 언급

한 바와 같이 기체 전도 열전달에 있어서 입자와 입자 간 기공의 특성 길이와 공극률을 사용한 경우와, 입자 내부의 기공의 것을 사용한 경우를 같이 계산하고 도 시하여 그 차이를 확인하였다.

4. 실험 결과

실험 결과 측정된 유효 열전도도의 압력에 따른 변화를 그래프로 나타내었다. 각 결과에서 오차 분석은 식 (3), (4)를 EES(Engineering Equation Solver) 프로그램에 입력하고, 실험에서 사용된 각종 계측 장비의 오차 범위를 사용하여 계산하고 그래프에 도시하였다. 각 압력에서의 정확한 측정값은 Table. 2에 따로 나타내었다.

(행변환) Fig. 3의 (a)는 실험에서 측정된 마이크로스피어의 유효 열전도도를 Fasmire와 Augustynowicz가 측정한 유효 열전도도, 그리고 Wawryk과 Rafalowicz가 제안한 열전달 모델에 따라 예측한 값과 함께 나타낸 것이다. Fasmire와 Augustynowicz의 실험 결과와 본 실험 결과는 특히 고진공에서 차이가 심해진다. 본 연구에서 사용한 마이크로스피어는 위 연구자들이 사용한 것과 같은 제품이나 후 처리 과정에 차이가 있다. Fasmire와 Augustynowicz의 연구에서 사용된 마이크로스피어는 수분 제거, 밀도가 낮은 입자 제거 및 방수성의 성분이 입자 표면에 도포되었으나 본 연구에서는 수분 제거만 행하였다. 밀도가 낮은 입자는 큰 입자를 뜻하며 큰 입자를 제거함으로써 단위 부피 당 입자 간 접촉 횟수가 높아지고, 이것은 주로 고체를 통한 열전달의 유효 열전도도를 낮추는 원인이 된다. 또한 입자 외 공간이 협소해짐으로써 공극률이 작아져 기체를 통한 열전도 및 복사 열전달을 줄이는 결과를 가져온다. 이와 같은 차이로 인하여 Fasmire와 Augustynowicz가 측정한 마이크로스피어의 유효 열전도도가 본 실험 결과에 비해 낮게 나타난 것으로 보인다. 특히 고진공에서 차이가 크게 나는 것으로 보아 위에서 언급한 후처리 과정이 고체를 통한 전도 열전달의 감소에 특히 기여한 것으로 판단된다. 한편 Wawryk과 Rafalowicz의 열전달 모델에 의해 예측된 유효 열전도도와 본 실험 결과 또한 다소 차이를 보인다. 앞에서 언급한 열전달 모델의 기본 가정과 실제 분말 단열재의 다음과 같은 차이는 실측값과의 오차의 원인이 된다. 먼저 마이크로스피어 분말의 입자 크기는 균일하지 않고 15 μm 에서 120 μm 까지 매우 넓게 분포하여 있다. 또한 실제 열전달 현상은 고체를 통한 열전도, 기체를 통한 열전도와 복사 열전달의 세 경로가 독립적이지 않으므로 이와 같은 필연적인 차이는 열전달 모델에 의해 실측값을 정확하게 예측하지 못하

Table 2. Experimental results of each powder insulators at various pressure.

* P: Pressure (Torr)

k_{eff} : Effective thermal conductivity (W/mK)

Microsphere		Polystyrene beads		Popped rice		Perlite	
P	k_{eff}	P	k_{eff}	P	k_{eff}	P	k_{eff}
75	27.10	50	21.11	54	39.3	50	34.06
10	23.87	14	20.55	10	37.02	10	30.3
1	14.33	1.4	18.30	2.6	31.92	1	19.79
0.11	5.32	0.1	10.33	0.1	25.32	0.1	8.69
0.0084	2.22	0.011	4.93	0.01	12.87	0.01	3.74
0.0028	1.83	0.0031	2.51	0.0035	8.1	0.0032	2.5

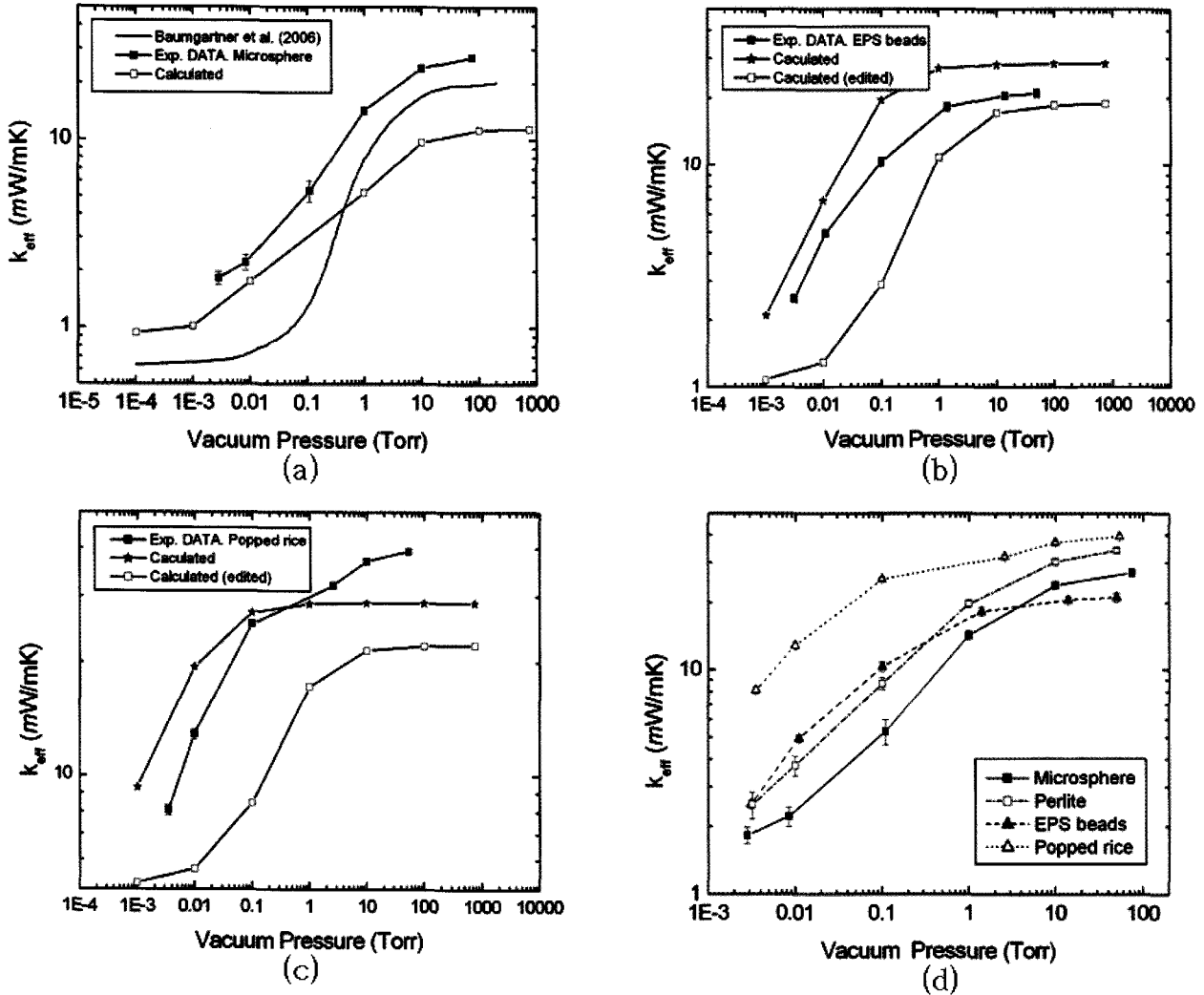


Fig. 3. Experimental results. (a) Microsphere (b) EPS beads (c) Popped rice (d) Microsphere, perlite, EPS beads and popped rice.

는 원인이 된다.

Fig. 3의 (b)는 실험에 의해 측정된 폴리스티렌 발포립의 유효 열전도도를 예측한 값과 함께 나타낸 것이다. 밀도가 같은 폴리스티렌 폼에 비해 발포립 형태로 충전하는 것이 약 1.5배 이상 단일 성능이 좋은 것으로 나타났다. 폴리스티렌 발포립의 입자는 균일한 편이므로 압력 변화에 따른 과도기에서 열전도도의 변화율의 변화가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이와 같이 대기압에 가까운 압력에서는 일정하다가 특정 압력에서부터 급격히 하락하는 추이는 열전달 모델에 의해 예측된 추이와도 일치한다. 폴리스티렌 발포립과 같이 입자가 다공성인 경우에, 앞에서 언급한 바와 같이 입자 외부 공간의 기공을 대신 내부의 기공을 및 특성 길이를 적용한 수정된 계산 결과와 수정하지 않고 마이크로스피어의 모델을 그대로 사용하여 계산한 결과를 실험 결과와 각각 비교하였다. 예상하였던 것과 같이 압력이 높을 때에는 수정된 모델이, 압력이 낮을 때에는 단순히 마이크로스피어로 가정한 모델이 각각 더 정확한 것을 확인하였다.

Fig. 3의 (c)는 실험에 의해 측정된 튀밥의 유효 열전도도의 압력에 따른 변화를, 예측한 값과 함께 나타낸 것이다. 튀밥은 폴리스티렌 발포립과 마찬가지로, 전체에 대해 입자 내부의 높은 기공률과 작은 특성 길이를 적용한 것이 오차의 원인 중 하나이다. 또한 튀밥의 실험 결과와 두 가지 방법으로 예측한 결과를 비교하였다. 충전 기체의 압력이 낮아질수록 기존 모델

에 의해 예측한 값과의 오차가 감소하므로 진공 상태에서 튀밥을 마이크로스피어로 가정하여 유효 열전도도의 예측 가능성을 확인하였다. 그러나 충전 기체의 압력이 높을 때에는 두 가지 예측 결과와는 모두가 차이가 있다. 이는 튀밥 사이의 기공이 국소적인 대류가 생길 정도로 충분히 크기 때문에 단순히 분자 전도 모델에 의해 예측된 것 보다 실제 열전달이 크게 측정된 것으로 추론된다.

Fig. 3의 (d)에 펄라이트, 마이크로스피어, 폴리스티렌 발포립과 튀밥의 유효 열전도도를 함께 보인다. 마이크로스피어가 가장 좋은 단일 성능을, 그리고 튀밥이 가장 나쁜 단일 성능을 갖는 것으로 확인되었다. 폴리스티렌 발포립, 튀밥과 같은 다공성 입자는 압력에 대한 유효 열전도도가 마이크로스피어와 달리 압력이 낮아질수록 빠르게 감소하고 있다. 이러한 경향성은 열전달 모델에서 예측되고 Fig. 3의 (b)에서 보인 바와 같이, 압력이 높을 때에는 내부의 작은 기공이 지배적이고, 압력이 낮아지면 입자 외부의 큰 기공이 지배적이게 되는 차이에서 기인한다. 본 결과에서 주목할 점은 폴리스티렌 발포립이 대기압과 낮은 압력에서 각각 마이크로스피어와 비슷한 수준의 단일 성능을 갖는다는 점이다. 폴리스티렌 발포립은 함수율이 낮고, 입자가 날리지 않아 보다 다루기 쉬우며 밀도도 낮은 장점을 가지고 있으나 자중이 커지거나 충전된 상태에 가해지는 외력이 커지게 되면 쉽게 변형하고 접촉 열저항도 크게 감소한다는 단점이 있어 소규모 단

열 장치에서만 경쟁력을 가진다. 한편 마이크로스피어와 펄라이트를 비교하였을 때 마이크로스피어가 함수율이 낮고 단열 성능도 더 높다는 연구 결과를 재차 확인하였다. 마이크로스피어는 기계적 신뢰도 측면에서도 펄라이트보다 우위에 있으며 [2] 튀밥, 폴리스티렌 발포립보다 우위에 있는 것은 자명하므로, 대규모 단열 장치 및 운송 장치와 같이 기계적 신뢰도가 중요한 장치에 가장 적합하다. 튀밥은 입자 크기가 너무 커 기계 분자 열전달이 활발하고, 전분의 특성상 함수율도 높은데다 수분을 제거하는 데 가장 오랜 시간이 걸리므로 현 상태에서는 단열재로서의 사용은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 분말 단열재로서 가장 일반적으로 사용되어 온 펄라이트, 펄라이트의 대안재로서 제안된 마이크로스피어, 그리고 실험적 연구가 부족하였던 폴리스티렌 발포립 및 튀밥의 충전 상태에 대한 다양한 압력에서의 단열 성능을 측정하고, 일련의 열전달 모델을 통해 예측한 값과 비교한 뒤 구형 입자형 분말 단열재의 열전달 성능 예측에 대해 고찰하고 검증하였다. 위와 같은 단열 성능 평가를 통해 마이크로스피어의 높은 단열 성능을 확인하였을 뿐 아니라, 폴리스티렌의 발포립 충전 상태에서의 높은 단열 성능을 발견하였고 충전 단열재로서의 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. R0A-2007-000-20062-0)
또한, 마이크로스피어를 공급해 준 3M(쓰리엠) 사에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] J.E. Fesmire, S.D. Augustynowicz, "Thermal performance testing of glass microspheres under cryogenic vacuum conditions", Transactions of the cryogenic engineering conference, Vol. 49, pp. 612-618, 2004.
[2] M.S. Allen, R.G. Baumgartner, J.E. Fesmire, S.D. Augustynowicz, "Advances in microsphere insulation systems", Transactions of the cryogenic engineering conference, Volume 49, pp. 619-626, 2004.

[3] R.G. Baumgartner, E.A. Myers, J.E. Fesmire, D.L. Morris, E.R. Sokalski, "Demonstration of microsphere insulation in cryogenic vessels", Transactions of the cryogenic engineering conference, Vol. 51, pp. 1351-1358, 2006.
[4] W. Lui, J. Peng, "Effects of operating conditions on degradable cushioning extrudate's cellular structure and the specific heat", Journal of Cellular Plastics, Vol. 39, pp. 439-450, 2003.
[5] P. Teertstra, M.M. Yovanovich, J.R. Culham, "Conduction shape factor models for three-dimensional enclosures", Journal of thermophysics and heat transfer, Vol. 19, pp. 527-532, 2005.
[6] R. Wawryk, J. Rafalowicz, "The influence of residual gas pressure on the thermal conductivity of microsphere insulations", International journal of thermophysics, Vol. 9, pp. 611-625, 1988.

저 자 소 개



김희선(金熹宣)
1986년 8월 13일생, 2008년 한국과학기술원 기계공학과 졸업, 현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정.



정상권(洪吉童)
1962년 8월 16일생, 1985년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년-1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 한국과학기술원 기계공학과 정교수.



정성하(鄭盛夏)
1986년 3월 9일생, 2009년 한국과학기술원 기계공학과 졸업, 현재 한국과학기술원 기계공학과 석사과정.