

혼합초단열재에서 진공분말패널의 외피형상 및 패널배열에 따른 단열성능해석

The Numerical Analysis on Insulation Performance with Respect to the Envelope Geometries and Array of Evacuated Powder Panel in Rigid Foam/Evacuated Powder Composite Panels

홍 진 관*
J. K. Hong

Key words : Polyurethane Foam(폴리우레탄폼), Evacuated Powder Panel(진공분말패널), Insulation Performance(단열성능), Envelope(외피), Overall Thermal Conductivity(유효열전도율)

Abstract

Evacuated powder insulations have long been known to have better thermal performance than existing commercially available insulators, such as fiber glass and CFC-blown foam.

To make a composite powder panel, a series of individually evacuated panels was encapsulated in a rigid closed cell foam matrix. The panels were encapsulated in a thin glass sheet barrier to preserve the vacuum. The thermal conductivity of the individual panel was found to be 0.0062W/m²K by experiment and the polyurethane foam above had a thermal conductivity of 0.024W/m²K.

In this study, numerical analysis using finite element method was carried out to investigate insulation performance of rigid foam/evacuated powder composite panel with respect to panel geometries such as panel pitch, panel aspect ratio and panel area ratio.

Numerical analysis has indicated that more optimal vacuum panel geometries, much lower overall thermal conductivities can be achieved.

1. 서 론

전체에너지 소비의 1/3이상이 주거용이나 상업용에서 사용되므로 상업용이나 주거용에 사용되는 단열재의 성능향상은 에너지 사용을 감소시키는데

대단히 중요한 역할을 한다. Polyurethane, Polyisocyanurate foam과 같은 독립기포형(closed cell foam) 단열재등이 양호한 단열성으로 인하여 오늘날 재래의 단열제로서 사용되고 있다. 그러나 많은 경우에 사용시간이 경과함에 따라 독립기포형 세포내로 외부공기가 확산침윤하여 단열성능이 상당히 감소되는 문제점이 있다⁽¹⁾. 특히 기존의 CFC

* 경원대학교 건축설비학과

대신 대기오존층을 파괴하지 않는 대체발포제를 사용하는 독립기포형 단열재의 유효열전도율은 상당히 증가하게 되었다⁽²⁾. 냉동 냉장분야에서 단열재의 두께를 증대시키지 않고 미래에 더욱 엄격해질 에너지기준에 부합하기 위해서 단열성능의 증가가 요구된다. 이러한 목적으로 진공단열패널이 제안되었으며 이러한 패널의 유효열전도율은 단열성능이 가장 우수한 독립기포형에 비해 1/3이하가 된다는 사실이 알려지게 되었다. 사용이 용이한 평면벽형태의 여러가지 다른 진공단열패널이 제시되었는데 그중 하나의 형태는 높은 진공공간을 분리하는 두개의 평행한 금속판으로 구성되어 있으며 양쪽판을 지지하는 지지대를 따라서 기계적강도가 유지될 수 있도록 부가적인 두께가 필요하다. 이와 같은 구조 때문에 1m나 그 이하의 폭의 크기가 될 때 패널의 주위에서 바람직하지 않는 상당한 크기의 주변열전달현상(circumferential heat transfer)을 수반한다. 더 진전된 형태로 분말충진형 패널을 들 수 있다. 이 경우 분말은 진공유지를 위한 외부와의 압력차를 지지하기 위해서 적절한 압축강도를 가져야 한다. 패널내의 가스압력이 1-100Pa 범위로 감소될 때 미세분말의 유효열전도율이 최소 된다는 연구결과가 실험에 의해 밝혀졌다⁽³⁾. 이 경우 복사열전달은 불투명한 미세분말을 사용함으로써 억제시킬 수 있다. 분말의 고체열전도는 미세한 분말입자의 접촉저항에 의해서 정해지고, 분말사이의 기체열전도는 분말 미립자사이의 틈새거리 보다 기체분자의 평균자유행로가 작아질 때 최소가 된다. 이와 같이 되기 위해서 가스압력을 초진공으로 감소시킬 필요는 없다. 미세분말이 적절한 압축강도를 가지기 때문에 진공분말을 충전하기 위한 외피(envelope)는 굳고 견고한 구조가 되지 않아도 무방하다. 외피의 주요한 기능은 진공시스템내로 공기가 침입해 진공이 깨어지는 것을 방지하는 것이다. 이와 같은 외피물질로 얇은 금속박막이 사용되게 되었다. 만약 금속박막에 미세한 구멍이나 다른 결함이 없다면 오랫동안 진공상태를 유지시켜 줄 것이다. 이같이 아주 얇은 금속박막이 사용되는 경우에도 오랜기간 동안 기밀을 유지하기 위해 상면과 하면 가장자리에서 이어져야 한다. 이 경우에도 고온면에서 저온면으로 이음때 주변에서 열전달이 발생

하게 되어 단열성능의 감소를 피할 수 없다는 것이 밝혀 졌다⁽³⁾. 외피물질로서 다층의 폴리머(Polymer)를 사용하는 방법이 제안되었는데 이러한 단열시스템 역시 사용시간의 경과에 따른 공기확산에 의해 단열성능이 손실된다는 것이 실험결과에 의해 밝혀졌다⁽³⁾. 패널내의 압력이 다소 높아질 때까지 단열성능을 경감시키지 않도록 패널내에 충전하는 분말로는 대단히 미세한 분말의 사용이 요구된다. 그러나 미세한 분말의 경우 가격이 너무 고가이기 때문에 단열시스템에 적용하기에 어려운 실정이다.

진공단열시스템의 외피물질로서 유리나 세라믹을 사용하는 연구가 MIT내의 진공단열 연구팀에서 수행되었으며 유리의 경우 모든 종류의 대기가스에 대해 낮은 가스투과성을 가진다는 사실이 밝혀졌다. Solomou⁽⁴⁾에 의하면 실리카유리막(silica glass film)의 대기가스 투과성이 폴리머막(polymer film)에 비해서 1/80 정도가 된다는 사실이 실험에 의해 밝혀 지게 되었으며 유리의 열전도계수는 다른 물질에 비해 진공단열시스템의 단열성능에 중요한 영향을 끼치는 상면과 하면의 이음부에서 발생될 수 있는 주변열전달을 최소로 하기에 적합하다는 것이 밝혀 지게 되었다⁽⁴⁾. 진공단열 패널들은 작은 크기의 타일이나 벽돌형태로 고안되어 사용될 수 있으며 외피물질인 유리는 대기가스 불투과성이 양호하여 패널사용 수명시간 동안 패널내를 양호한 진공상태로 유지하는 것이 가능할 뿐만 아니라 다소 가격이 싸고 입자가 굵은 분말의 사용을 가능하게 한다. 외부 충격으로 부터 진공패널을 보호함과 동시에 단열성능을 최대로 하기 위한 혼합초단열재 개발에 대한 연구가 최근에 진행되고 있다.

본 논문은 외피물질로 유리를 사용하여 진공패널을 제작한 후 이를 폴리머폼(polymer foam)속에 배열하므로서 앞서 설명한 주변열전달현상을 차단하고 단열성능을 최대로 하기 위한 혼합초단열재 개발에 관한 해석으로서 폴리머폼속에 배열되는 진공패널외피의 기하학적인 형태 및 패널의 배열형태가 단열성능에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 이를 위해서 실험적으로 측정된⁽⁴⁾ 진공패널과 폴리머폼의 열전도율을 사용하여 패널과 폴리머폼의 면적비(area ratio)변화와 폴리머폼내에 배열된 진공패

널의 배열간격, 배열피치, 패널의 종횡비(aspect ratio) 및 진공패널의 외피형상 변화에 따른 혼합 단열재의 열전달해석을 유한요소법(finite element method)을 적용하여 수행하고 진공패널외피의 기하학적 배열특성이 유효열전도율에 미치는 영향을 비교 검토하였다. 이와 같은 해석결과들은 단열성능을 높힐 수 있는 혼합초단열재(rigid foam/evacuated powder composite panels)제조에 기초로 활용될 수 있을 것이며 혼합단열재의 개발에 응용될 수 있을 것이다.

2. 수치해석

2.1 기본이론

$$\begin{aligned}
 -(k_{ij}T_{,j})_{,i} &= f \text{ in } \Omega \\
 T &= g \text{ on } S_1 \\
 (k_{ij}T_{,j})n_i &= h \text{ on } S_2 \\
 (k_{ij}T_{,j})n_i &= -k_o(T-T_\infty) \text{ on } S_3
 \end{aligned} \quad (1)$$

위에 주어진 지배방정식을 경계조건이 포함된 일반화된 유한차분 방정식을 얻기 위하여 해석영역에서의 지배방정식의 양변에 임의의 연속함수를 곱하고 부분적분을 하면

$$\int_{\Omega} k_{ij}T_{,j}\bar{T}_{,i}d\Omega - \int_S k_{ij}T_{,j}n_i\bar{T}d\Gamma = \int_{\Omega} f\bar{T}d\Omega \quad (2)$$

위식에 식 (1)의 경계조건을 적용하면

$$\begin{aligned}
 \int_S k_{ij}T_{,j}n_i\bar{T}d\Gamma &= \int_{S_1} (k_{ij}T_{,j})n_i\bar{T}d\Gamma + \int_{S_2} h\bar{T}d\Gamma \\
 &\quad - \int_{S_3} k_o(T-T_\infty)\bar{T}d\Gamma \quad (3)
 \end{aligned}$$

경계 S_1 에서 경계조건이 $T=g$ 이므로 경계 S_1 에서 임의의 연속함수 (\bar{T})는 0이 된다는 조건이 성립된다. 이 조건을 식 (3)에 적용하면 식 (3)은

$$\begin{aligned}
 \int_S k_{ij}T_{,j}n_i\bar{T}d\Gamma &= \int_{S_2} h\bar{T}d\Gamma + \int_{S_3} k_oT_\infty\bar{T}d\Gamma \\
 &\quad - \int_{S_3} k_oT\bar{T}d\Gamma \quad (4)
 \end{aligned}$$

가 되고 이식을 식 (2)에 대입하면 경계조건을 포함한 지배방정식 (1)에 대한 약형(weak form)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T &= g \text{ on } S_1 \\
 \int_{\Omega} k_{ij}T_{,j}\bar{T}_{,i}d\Omega &+ \int_{S_3} k_oT\bar{T}d\Gamma \\
 &= \int_{\Omega} f\bar{T}d\Omega + \int_{S_2} h\bar{T}d\Gamma + \int_{S_3} k_oT_\infty\bar{T}d\Gamma, \\
 \forall \bar{T} \ni \bar{T} &= 0 \text{ on } S_1 \quad (5)
 \end{aligned}$$

식 (1)의 모든 경계조건이 적분형으로 변형된 식 (5)에 포함되어 있으며 식 (1)에서 T에 대한 2계 미분항이 적분형으로 변형된 식 (5)에서 T에 대한 1계 미분의 항으로 대치되므로 식 (1)의 약형인 식 (5)는 근사해를 구하는데 있어 많은 유리한 점이 있다. 약형인 식 (5)로부터 근사해를 얻기 위하여 해석영역(Ω)에서 함수 T와 \bar{T} 를 유한차분하여야 하며 차분(discretization)에 사용된 유한요소로는 해석의 편리를 위하여 구조역학 해석시 CST(constant strain triangular) Element로 알려진 Three Node Triangular Element를 사용하였다. CST Element를 사용하여 식 (5)의 약형을 유한차분하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 T_\alpha &= g_\alpha \text{ on } S_1 \\
 \sum_{e=1}^E \bar{T}_\alpha K_{\alpha\beta}^{e3} T_\beta &+ \sum_{e=1}^{E_3} \bar{T}_\alpha K_{\alpha\beta}^{e3} T_\beta \\
 &= \sum_{e=1}^E \bar{T}_\alpha f_\alpha^{e3} + \sum_{e=1}^{E_2} \bar{T}_\alpha f_\alpha^{e2} + \sum_{e=1}^{E_3} \bar{T}_\alpha f_\alpha^{e3}, \\
 \forall \bar{T} \ni \bar{T} &= 0 \text{ on } S_1 \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서 E_3' , E_2' 는 경계면 S_3 , S_2 에서의 선요소(line element) 수이며 $[K_{\alpha\beta}^{e3}]$ 는 경계면 S_3 에서의 요소강성행렬(element stiffness matrix)이며 $[K_{\alpha\beta}^{e2}]$ 는 해석영역 Ω 에서의 요소강성행렬(element stiffness matrix)이다. 기타 f_α^{e3} , f_α^{e2} 등은 경계조건에서 부과되는 일반하중벡터(generalized load vector)이다. 요소강성행렬과 일반하중벡터 등은 해석영역과 경계면에서의 각 유한요소 Ω 혹은 S_e 에 대해 얻어 질 수 있다. 유한차분화된 약형

식 (6)에 의하여 각 요소차원의 강성행렬과 하중 벡터를 조합하면 해석영역 전체에 대한 강성행렬 및 하중벡터를 구할 수 있다⁽⁵⁾.

2.2 해석대상 모델

본 해석에서는 진공분말패널의 형상 및 진공분말패널의 배열변화에 따른 단열성능을 해석하기 위하여 아래와 같은 3종류의 해석영역을 설정하여 모델해석을 하였다.

- (1) 진공분말패널의 외피선단부의 형상변화를 고려한 모델해석
 - (2) 외피선단부의 형상을 직사각형 형태로 고정할 때 패널과 폴리퍼폼의 면적비변화와 폴리머폼내에 배열된 진공패널의 배열피치간격 및 종횡비의 변화를 고려한 모델해석
 - (3) 실제 제작된 패널의 모델해석
- 등의 3종류의 모델을 설정하고 각각의 경우의 해석을 수행하여 단열성능의 변화를 검토하였다.

Fig.1은 해석모델을 보여주기 위해서 본해석에서 사용한 해석영역의 한 예를 표시하였다. 여기서 상면온도(T_{top})과 하면온도(T_{bot})은 각각 450°K , 400°K 로 임의로 설정하였으며 측면벽은 단열조건을 부과하였다. 해석에서 사용한 진공분말패널과 Packaging foam의 열전도율은는 각각 실험에 의해 측정된 $K_{panel}=0.0062\text{W/m}^{\circ}\text{K}$, $K_{foam}=0.024\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ 를 사용하였다.

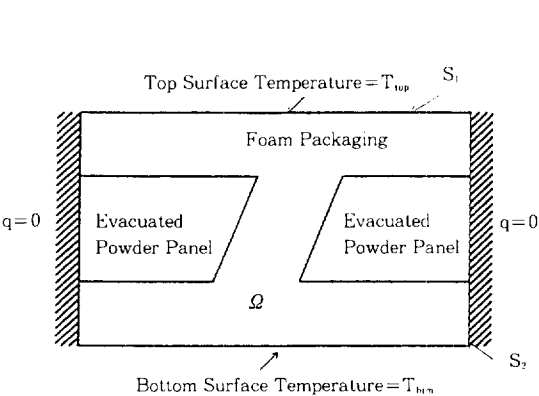


Fig.1 Analysis domain of rigid foam/evacuated powder composite panels

2.3 해석방법

해석영역에서 유한차분화된 선형방정식을 풀기 위하여 상면과 하면의 경계 S_1 에서 경계 조건 $T_1=g_1$ 를 선형방정식에 부과하기 위하여 Penalty Method⁽⁵⁾를 사용하였으며 측면은 단열조건으로 하여 혼합단열재의 유효열전도계수를 계산하였다. 경계조건이 부과된 선형방정식을 풀기 위하여 Gaussian Elimination Method가 사용되었다. 일반적으로 강성행렬은 0이 아닌 행렬요소가 대각요소에 밀집되고 0인 요소가 많이 포함된 정방행렬의 형태를 가지게 되는데 이와 같은 형태의 행렬을 해석하기 위하여 Banded Stiffness Matrix Algorithm⁽⁶⁾이 사용되었다. 강성행렬의 Band 폭은 Element Connectivity에 따라 변하게 되는데 Band 폭을 줄이기 위해서 Automatic Mesh Generator⁽⁵⁾를 사용하였으며 해석한 결과를 출력하기 위한 Post-processor로서 TECPLOT Ver.6.9⁽⁷⁾를 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

Fig.2와 Fig.3은 해석에서 사용한 전처리과정에서 생성된 균일한 형태의 CST격자와 해석결과를 상면온도(T_{top}) 450°K , 하면온도(T_{bot}) 400°K 사이의 등온선을 나타내고 있다. 진공패널이 위치한 부분에서 등온선의 간격이 매우 좁아지며 등

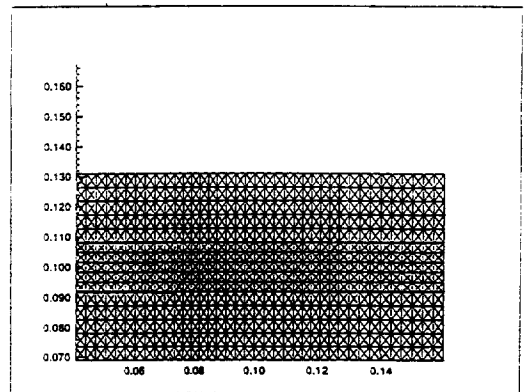


Fig.2 Finite element mesh for rigid foam/evacuated powder composite panels

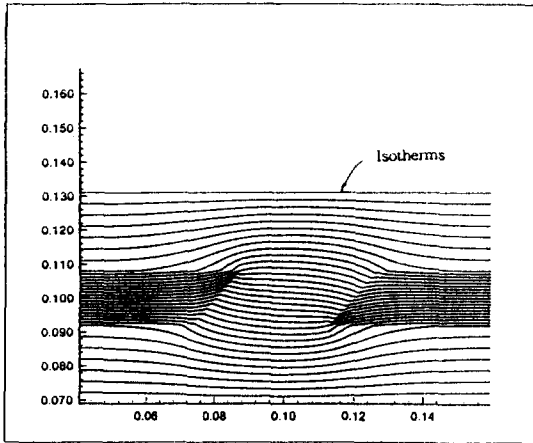


Fig.3 Isotherms of rigid foam/evacuated powder composite panels from numerical analysis

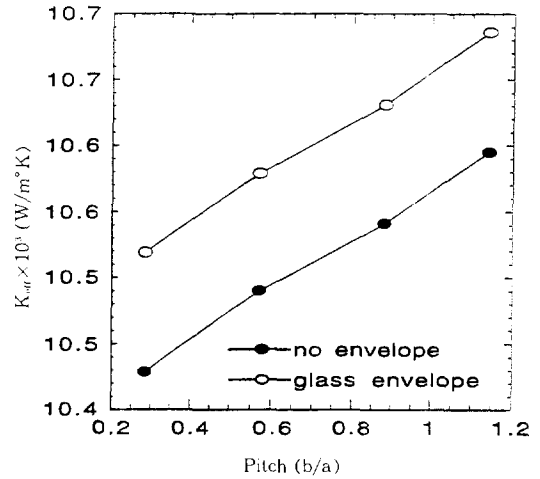


Fig.5 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to pitch

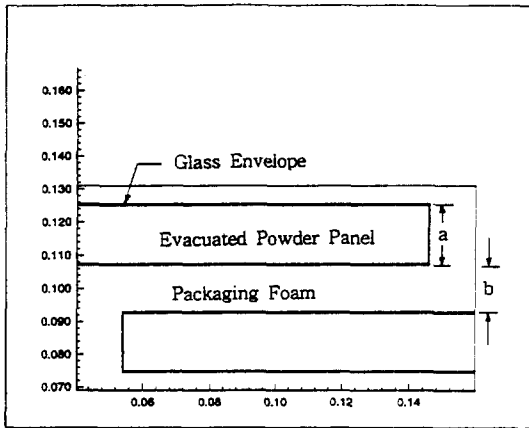


Fig.4 Analysis domain of rigid foam/evacuated powder composite panels. (with glass envelope, $K_{glass}=1.4W/m^2K$, $t_{glass}=0.15mm$)

온선 간격이 좁은 상부 패널과 하부패널의 사이공간의 Foam층에서 주로 열전달이 일어나는 것을 추정할 수 있다. 따라서 진공패널의 형상과 배치가 전체 혼합단열재의 단열성능에 중요한 영향을 미친다는 것을 예상할 수 있다.

Fig.4는 외피물질로 두께(t_{glass}) 0.15mm, 열전도

율(K_{glass}) $1.4W/m^2K$ 인 얇은 박판유리를 사용한 경우의 해석영역을 나타낸 것이며 Fig.5는 패널면적비(= A_{panel}/A_{total})를 49.8%로 고정한 경우 외피물질이 없다고 가정한 경우와 외피물질로 위의 얇은 박판유리를 사용한 경우 피치(b/a)변화에 따른 유효열전도율에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. Fig.5에서 피치가 증가할수록 단열효과는 감소하며 외피가 있는 경우가 없는 경우에 비해 유효열전도율이 모든 피치에 대해 거의 일정한 비율로 0.9% 정도 상승함을 알 수 있다. 따라서 단열재내의 진공분말패널의 배열형상이 단열성능에 미치는 영향의 평가를 위한 본 해석에서는 해석의 신속과 격자생성의 편의를 위하여 외피물질을 무시한 상태에서 진공분말패널의 배열조건변화에 따른 단열특성 해석을 수행하였다.

Fig.6은 $r(=c/a)$ 을 0.3226으로 고정한 경우 진공분말패널과 Packaging foam의 면적비의 변화에 따른 유효열전도율을 표시하였다. 패널의 두께 c값이 일정하게 고정되는 경우 유효열전도율은 패널의 길이증가에 따른 면적비의 증가에 따라 직선적으로 감소하고 있으며 이는 패널의 길이가 증가할수록 열전달경로의 길이가 길어지기 때문으로 판단된다.

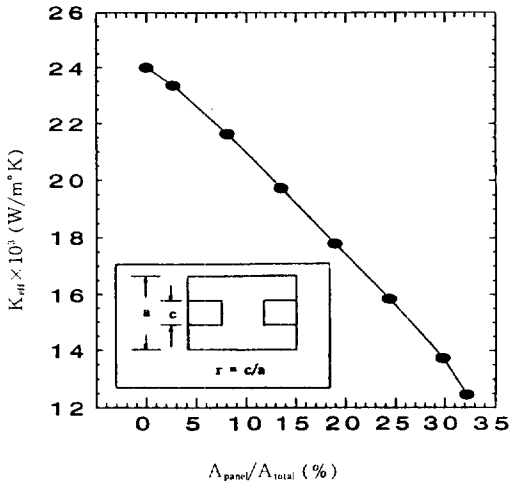


Fig.6 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to area ratio

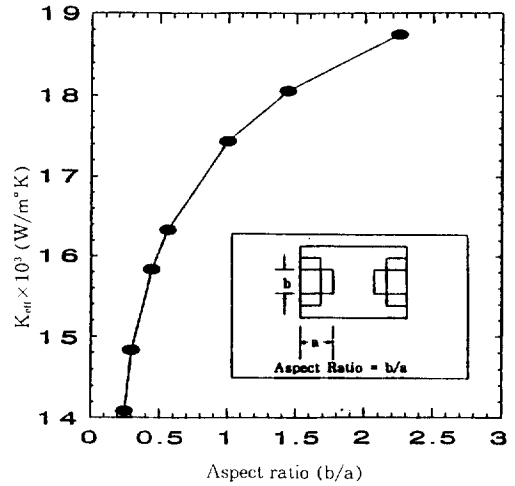


Fig.8 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to aspect ratio

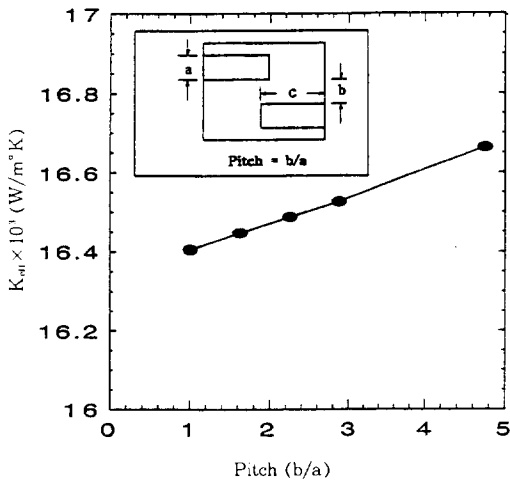


Fig.7 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to pitch

Fig.7은 진공분말패널의 면적비가 17.67%로 일정하고 $r(=c/a)$ 을 10.1875로 고정할 경우 피치 (b/a)변화에 따른 유효열전도율을 표시하였다. 면적비와 $r(=c/a)$ 이 일정한 경우 피치가 클수록 혼합단열재의 단열성능이 감소하는데 이는 피치가 커

질수록 하부패널과 상부패널사이의 간격이 증가함에 따른 열전달경로가 넓어지기 때문으로 판단된다.

Fig.8은 진공분말패널의 면적비가 24.4%로 일정한 경우 진공분말패널의 종횡비(b/a)변화에 따른 유효열전도율을 표시하였다. 진공분말패널의 종횡비가 커질수록 Foam을 통한 열전달경로의 면적이 넓어지게 되어 열저항이 감소되어 단열성능이 점점 저하함을 알 수 있다.

Fig.9는 진공분말패널의 면적비가 17.67%로 일정한 경우 상부 진공분말패널과 하부 진공분말패널의 중심거리를 고정할 때 진공분말패널의 종횡비 (b/a)변화에 따른 유효열전도율을 표시하였다. 진공분말패널의 종횡비가 커질수록 Foam내에서 열전도율이 작은 패널에 의해 차단된 열전달경로의 면적이 점점 넓어지게 되어 유효열전도율이 직선적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig.10은 진공분말패널의 면적비가 49.8%로 Fig.7의 진공분말패널의 면적비 17.67%에 비해 커서 진공분말패널의 두께가 두껍고 $r(=c/a)$ 값을 Fig.7의 r 값 10.1875보다 작은 5.7143으로 고정할 경우에 대해서 피치(b/a)변화에 따른 유효열전도율을 표시하였다. 면적비와 $r(=c/a)$ 이 일정한 경

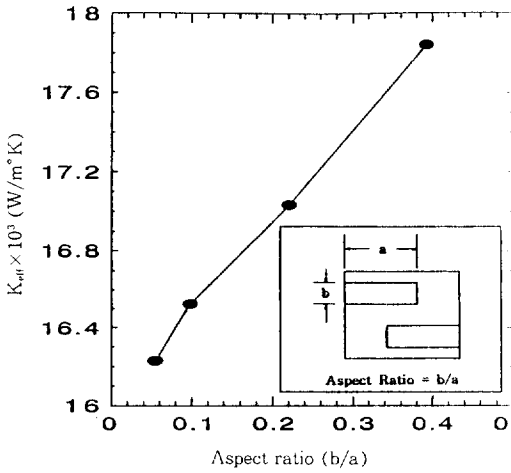


Fig.9 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to aspect ratio

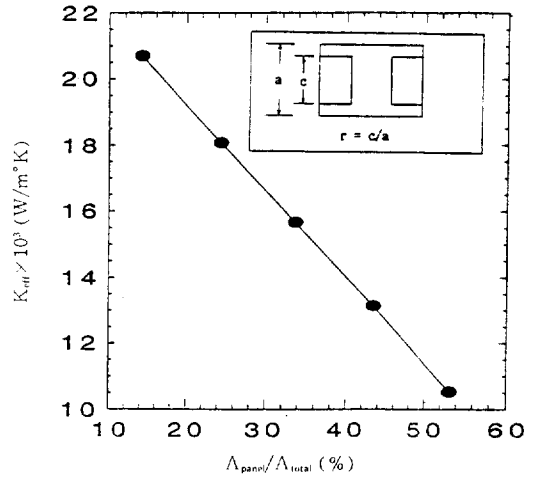


Fig.11 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to area ratio

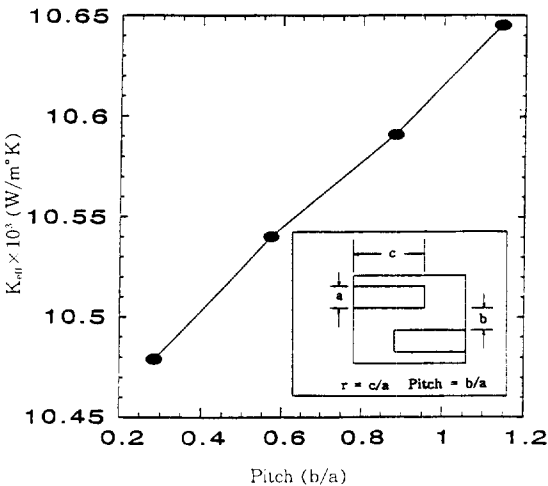


Fig.10 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to pitch

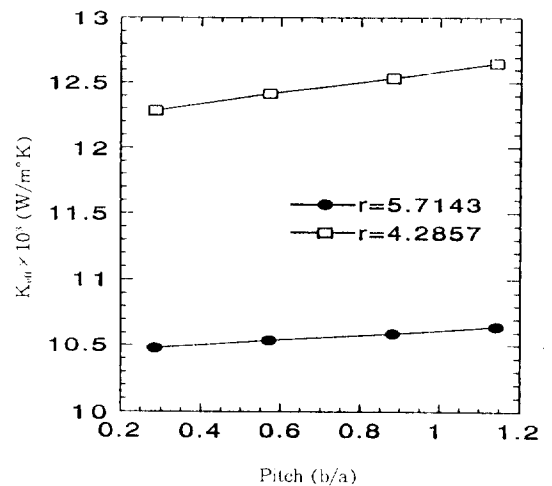


Fig.12 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to pitch for two different values of r (c/a)

우 피치가 클수록 상부와 하부패널 사이의 열전달 경로의 면적이 넓어져서 혼합단열재의 단열성능이 감소하는데 이는 진공분말패널의 두께가 얇은 Fig.7의 경우와 유사한 경향임을 알 수 있다.

Fig.11은 $r(=c/a)$ 값으로 Fig.6의 r 값 0.3226은 보다 큰 0.5806으로 고정된 경우 즉 Fig.6의 경우에 비해서 진공분말패널의 두께가 두꺼운 경우 진공분말패널의 면적비의 변화에 따른 유효열전도

율을 표시하였다. 패널의 폭이 임의값으로 고정되는 경우 유효열전도율은 면적비의 변화에 따라 직선적으로 감소함을 알 수 있다. Fig.6의 경우와 유사한 경향을 보인다.

Fig.12는 이미 Fig.10에서 서술한 진공분말패널의 면적비가 49.8%, $r(=c/a)$ 값이 5.7143인 경우와 진공분말패널의 면적비 37.95%, $r(=c/a)$ 값 4.2857인 경우에 대해서 피치(b/a) 변화에 따라서 유효열전도율을 비교도시한 것인데 Fig.10에서 진공분말패널의 두께 a 가 일정할 때 r 값이 큰 (●) 경우에서 유효열전도율에 미치는 피치의 영향이 적음을 알 수 있다. 이것은 r 값이 적은 경우가 r 값이 큰 경우에 비해서 열의 전달경로가 짧아져서 열전달에 미치는 피치의 영향이 상대적으로 증대됨을 의미한다.

Fig.13은 이미 앞에서 서술한 Fig.6과 Fig.11을 비교도시한 것으로서 진공분말패널의 면적비가 일정한 경우일 때 $r(=c/a)$ 값이 0.3226인 경우인 진공분말패널의 길이가 길고 폭이 좁은 경우에서 열전달경로의 길이의 증가에 따른 열저항의 증가로 인해 상대적으로 단열성능이 양호해지며 면적비의 변화에 따른 유효열전도율의 감소도 급격함을 알 수 있다.

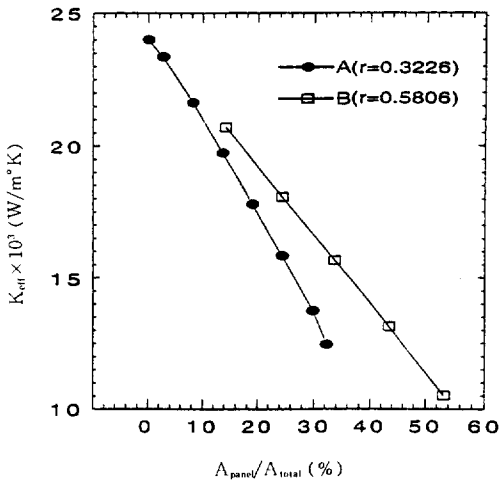


Fig.13 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to area ratio for two different values of r (c/a)

Fig.14는 패널의 두께($t_s \sim t_c$)를 일정하게 유지하고 패널의 길이를 증가시켜 패널의 면적비를 변화시킬 때 패널외피 선단부의 형상변화에 따른 유효열전도율의 변화를 도시하였다. 같은 면적비에서도 패널외피의 형상이 사다리꼴인 A type일때가 B나 C Type에 비해 단열성능이 상대적으로 양호함을 보여주고 있는데 이는 두께를 일정하게 한 경우에 동일한 패널면적비에서 외피형상이 사다리꼴인 A type의 경우에서 열전달경로가 상대적으로 길어지기 때문으로 판단된다.

Fig.15는 앞서 설명한 바와같이 단열성능이 상대적으로 양호한 사다리꼴 형태로 실제 제작된^{(5),(6)} 혼합단열재의 실제 단면형태를 나타내었다. 실제 제작시 사용된 혼합단열재 각 구성물질 Packing foam, 진공분말패널 및 플라스틱층(plastic layer), 진공그리스층(vacuum grease layer), 유리층(glass barrier)의 열전도율의 값은 순서대로 각각 0.024, 0.0062, 0.180, 0.209, 1.4W/m² K이며 각 치수는 그림에 상세히 표시되어 있다.

Fig.16은 실제 세개층으로 구성되어 있는 Fig.15의 혼합단열재에 대해서 격자생성, 해석 시간 단축 및 해석의 편의를 위하여 설정된 Simple Model

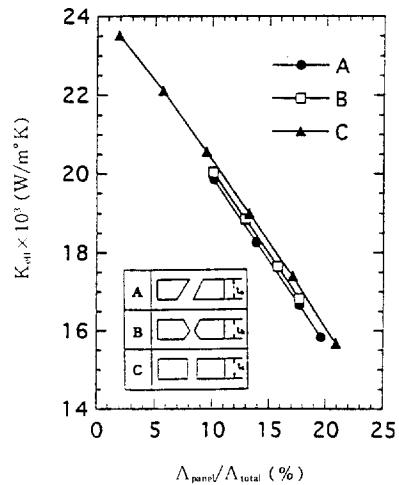


Fig.14 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to area ratio for values of panel envelope configuration

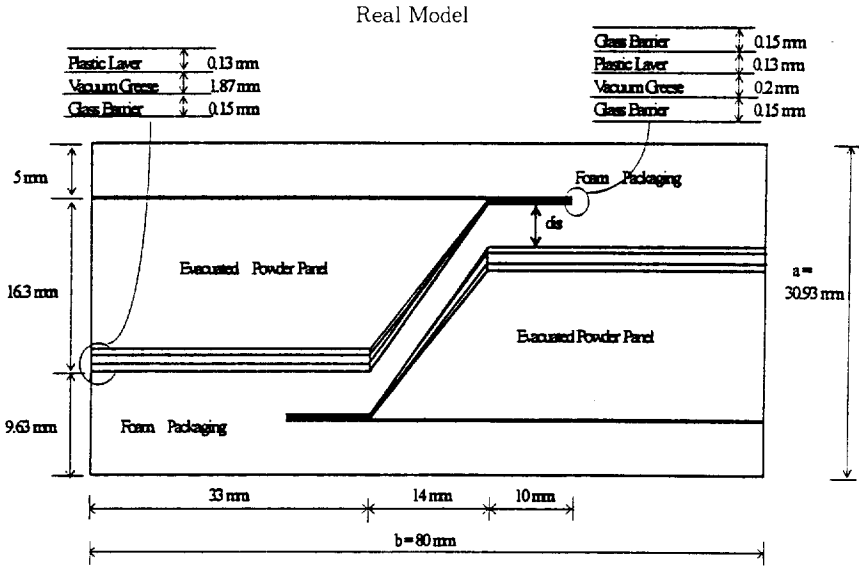


Fig.15 Real model geometry of rigid foam/evacuated powder composite panels with envelope

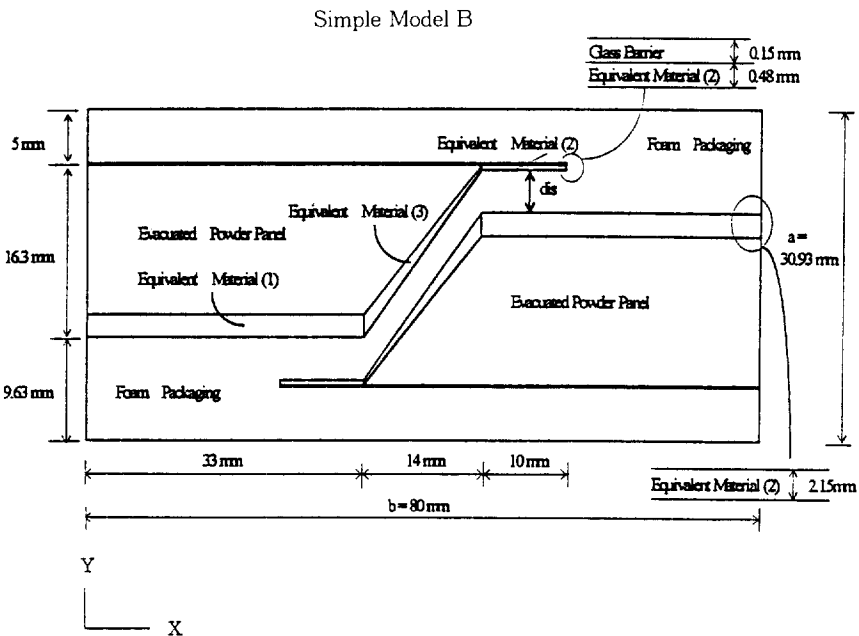


Fig.16 Simple model(B) geometry of rigid foam/evacuated powder composite panels with envelope

(B)를 나타내었다. 즉, Fig.15의 플라스틱층, 진공그리스층, 유리층을 합한 전체 두께를 갖는 한개층의 등가물질로 해석영역을 단순화하였다. Simple Model에서 사용된 등가물질의 열전도율을 산정하기 위해서 아래 식 (7)과 같이 각 층에 대해서 병렬회로의 개념을 적용하였는데 이는 외피물질로 사용된 열전도율이 진공분말패널의 열전도율의 수배 혹은 수십배 이상이 된다는 사실에 근거하고 있다.

$$\sum k_i \cdot t_i = k_{\text{equivalent}} \cdot t_{\text{total}} \quad (7)$$

이와 같이 단순화된 Simple Model의 타당성을 검증하기 위한 해석을 수행하였는데 실제 제작된 Fig.15의 Real Model을 Fig.16의 Simple Model(B)로 단순화하여 해석한 결과는 약 13,000개 정도의 격자를 사용하여 계산한 결과 0.4% 이내에서 유효열전도율의 값이 서로 잘 일치하였다.

Fig.17은 Fig.16에서 보는 바와 같이 혼합단열재에 제작시 진공분말을 감싸고 있는 플라스틱층과 외부 외피물질인 유리층사이에 기밀을 유지하기 위해서 Fig.16의 Simple Model(B)와 달리 진공그리스층의 두께가 0.2mm로 일정하게 되도록 제작된 이상적인 경우에 대해서 설정된 해석모델을 나타내고 있다. 본 해석에서는 진공그리스가 단열성능에

미치는 영향을 알아보기 위해서 진공그리스층의 두께가 0.2mm~1.8mm사이에서 변하는 경우를 단순화한 Simple Model(B)의 경우와 비교하였다. 실제 제작시 균일한 두께가 되도록 진공그리스층을 유지하는 것은 어려운 것으로 생각된다. 기타 자세한 혼합단열재 제작에 대해서는 N. Solomou⁽⁴⁾와 L. R. Glicksman, 홍^{(5) (9)}에 자세히 설명되어 있다.

Fig.18은 패널면적비가 45.26% 이고 중형비가 2.5865인 경우 Fig.16의 Simple Model(B)와 Fig.17의 Simple Model(A) 및 플라스틱층, 진공그리스층, 유리층등의 외피물질이 없다고 가정한 이상적인 경우에 대해서 상부패널과 하부패널의 수직 이격거리를 변화시킬 때 유효열전도율을 도시하였다. 진공그리스층의 두께가 0.2mm로 일정한 Simple Model(A)에 비해서 진공그리스층의 두께가 0.2~1.8mm로 변하는 Real Model을 단순화한 Simple Model(B)의 경우에서 유효열전도율의 값이 대략 10% 정도 증가함을 볼 수 있으며 외피층이 없다고 가정한 이상적인 경우에 비해서 최소한 각각 23%, 34% 정도 유효열전도율의 값이 증가함을 보이고 있는데 이와 같은 경향은 중형비를 1, 2, 4로 변화시키면서 해석한 경우에도 공통적으

Simple Model A

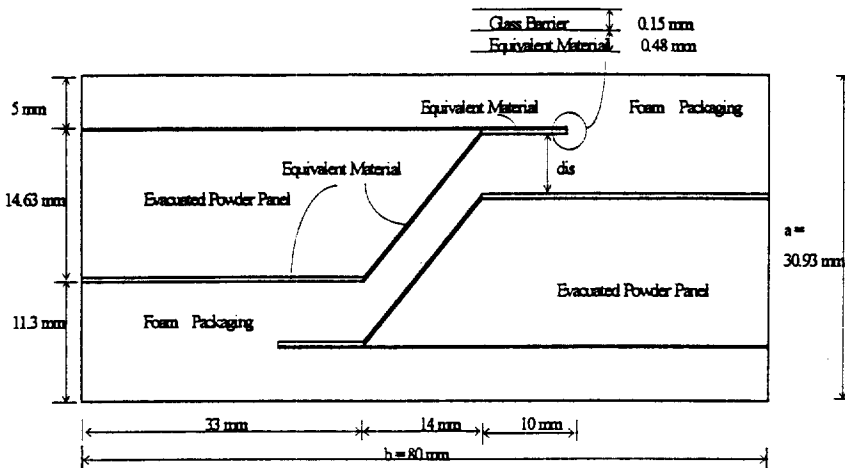


Fig.17 Simple model(A) geometry of rigid foam/evacuated powder composite panels with envelope

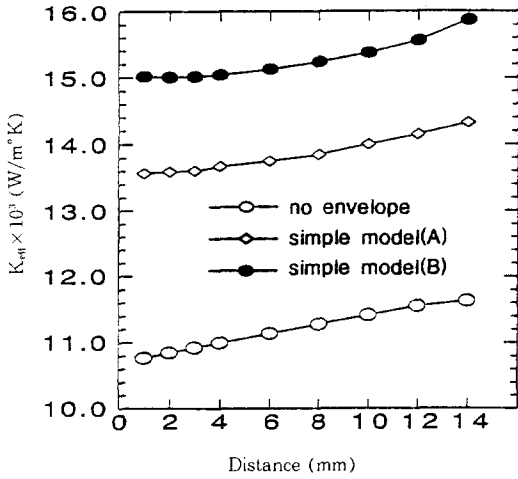


Fig.18 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to separation distance

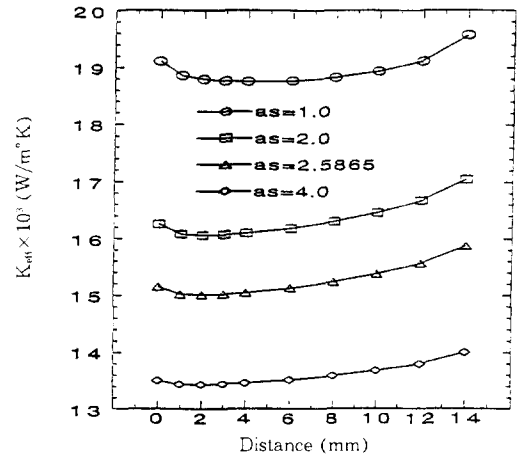


Fig.20 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to separation distance for different values of aspect ratio

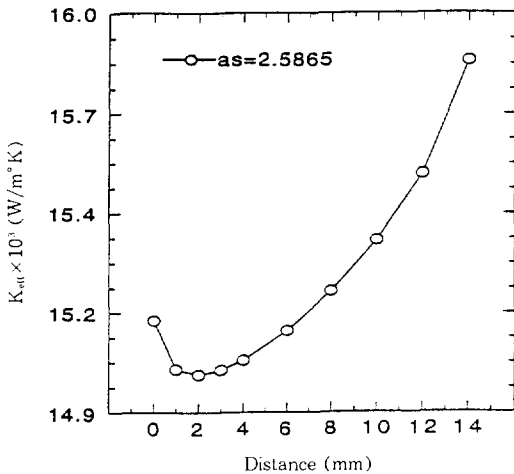


Fig.19 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to separation distance

로 발생되었다. Fig.19는 Simple Model(B)에서 패널면적비가 45.26% 이고, 종횡비가 2.5865인 경우 상부패널과 하부패널의 수직 이격거리를 변화시키면서 계산한 유효열전도율을 도시한 것인데 진공그리스층의 두께가 변하는 Simple Model(B)에서 유효열전도율이 최소가 되는 수직거리가 2mm

임을 보여주고 있다. 이와 같은 계산결과는 다소 특이한 결과로 생각되는데 그 원인은 Fig.16의 Simple Model(B)에서 이와 같은 혼합초단열재의 열전도에 심대한 영향을 미치게 되는 경사진부분 등가물질(3)(equivalent material(3))의 불균일한 형상과 관련이 있는 것으로 판단된다. 그러나 진공그리스층의 두께가 일정한 Simple Model(A)에서는 위와 같은 특이한 현상이 발견되지 않았다.

Fig.20은 앞서 설명한 Simple Model(B)에 대해서 혼합단열재의 패널면적비를 45.26%로 일정하게 유지하면서 혼합단열재를 길이방향으로 늘려서 혼합단열재의 종횡비(a/b)를 변화시키는 경우 상부패널과 하부패널의 수직 이격거리 변화에 따른 유효열전도율 변화를 도시한 것이다. 종횡비가 1, 2, 2.5865, 4로 변화하는 모든 경우에 대해서 유효열전도율이 최소가 되는 수직이격거리가 존재함을 알 수 있다.

Fig.21은 Fig.20의 경우를 종횡비를 기준으로 도시한 것이다. 유효열전도율이 최소가 되는 수직 이격거리가 2~4mm이며, 종횡비가 1, 2, 2.5865, 4로 증가함에 따라 유효열전도율이 약 35% 정도 급격히 감소함을 알 수 있는데 이것은 동일한 패널 면적비에서도 종횡비가 1, 2, 2.5865, 4로 증가함

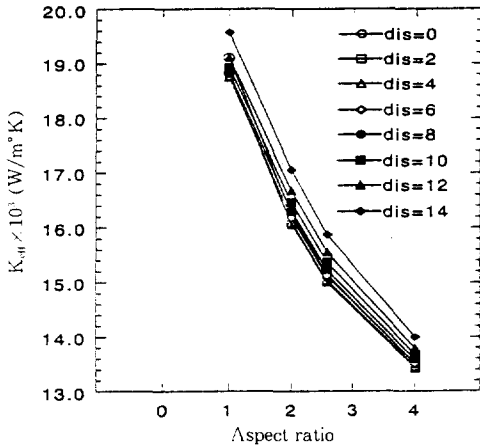


Fig.21 Effective conductivity of rigid foam/evacuated powder composite panels with respect to aspect ratio for different values of separation distance

에 따라 상부패널과 하부패널사이의 열전달 경로길이 증가하게 되어 열저항이 증가하기 때문으로 판단된다. 종횡비가 단열성능에 미치는 영향이 최대치를 추정하기 위한 해석이 수행되었다^{(8), (9)}. 이 결과에 의하면 종횡비가 10이 될때까지 단열성능이 최소 60% 이상 지속적으로 증가하게 되며 14 이상이 되면 종횡비의 증가가 단열성능 증가에 미치는 영향이 최대점에 도달하게 되어 종횡비가 그 이상이 되더라도 단열성능의 증가가 미미해진다는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

실험적으로 측정된 진공분말패널과 Packaging foam의 열전도율을 사용하여 패널외피의 기하학적 형태 및 동일한 직사각형 형상의 패널외피에 대해서 패널과 Foam의 면적비 변화와 Foam내에 배열된 진공분말패널의 배열간격, 배열피치, 종횡비 등의 변화에 따른 단열성능해석과 실제 제작된 혼합 단열재에 대한 해석모델을 설정하여 혼합단열재의 종횡비와 상하부 패널의 수직 이격거리 변화에 따른 열전달해석을 유한요소법(finite element method)

을 적용하여 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 진공분말패널의 면적비는 혼합단열재의 단열 특성에 중요한 영향을 미치며 일반적으로 같은 두께의 패널을 사용할 경우 면적비가 증가할수록 열전달 경로길이 길어져서 단열성능이 양호하다.

2) 일정한 면적비에서 패널의 형태가 변화하지 않는 경우 피치가 증가할수록 단열성능이 감소한다.

3) 패널의 면적비를 일정하게 유지하고 상하부 패널의 중심거리가 일정한 경우 패널의 종횡비가 커질수록 단열성능이 감소한다.

4) 패널의 두께를 일정하게 유지하면서 패널의 길이를 증가시켜 면적비를 변화시킬 때 패널의 길이가 긴 경우가 짧은 경우에 비해서 유효열전도율에 미치는 상하부 패널의 피치의 영향이 적어짐을 알 수 있다.

5) 패널의 두께를 일정하게 유지하면서 패널의 길이를 증감시켜 면적비를 변화시킬 때 패널외피의 기하학적 형태변화에 따른 단열성능은 패널외피의 형상이 사다리꼴이 되는 경우에서 가장 양호함을 알 수 있다.

6) 실제 제작된 혼합단열재를 대상으로 수행된 해석결과에서 진공그리스층이 단열성능저하에 미치는 영향이 10% 정도로 다소 크게 나타났으며, 전체 외피층이 단열성능 저하에 미치는 영향이 25~35% 정도임을 알 수 있다.

7) 실제 제작된 혼합단열재를 대상으로 수행된 해석결과에서 혼합단열재의 종횡비의 증가에 따라 유효열전도율이 약 35~65% 정도 감소되어 종횡비가 단열성능 증가에 미치는 영향이 지대함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- Glicksman, L. R. and Ostrogorsky, A. G., 1989, "Time Variation of Insulating Properties of Closed-Cell Foam Insulation", Journal of Thermal Insulation, Vol. 12, pp. 270~283.
- Glicksman, L. R., Brehm, T. R. and Ostrogorsky, A. G., 1989, "Thermal Insulation:

Degradation of Foam Insulation with Time and the Impact of Environmental Regulations on Foam Properties”, Proceedings of the CIB XIth International Congress, Paris, France.

3. Mcelroy, D. L., Yarbrough, D. W., Copeland, G. L., Weaver, F. J., Graves, R. S., Tong, T. W. and Fine, H. A., 1984, “Development of Advanced Thermal Insulation for Appliances”, Technical Report ORNL/CON-159, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
4. Solomou, N., 1993, “Development of Advanced Insulation Systems: Evacuated Powder Panels Encapsulated in a Thin Glass Barrier”, M. S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
5. Noborou, K., 1986, “Finite Elements Method in Mechanics”, Cambridge University Press,

Cambridge/New York.

6. Chandrupatla, T. R. and Belegundu, A. D., “Introduction to Finite Elements Engineering”, pp. 29~39, Prentice-Hall., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
7. Tecplots User’s Manual, Version 6.9, Amte Engineering, Inc., P. O. Box 3633, Bellevue WA 98009-3633.
8. L. R. Glicksman, 홍진관, 1995, “발포 Foam 과 진공분말 Panel을 사용한 혼합초단열재에 관한 연구”, 공기조화 냉동공학회 동계 학술발표논문집, pp. 445~451.
9. L. R. Glicksman, N. Solomou, J. K. Hong, 1995, “Development of Rigid Foam/Evacuated Perlite Powder Composite Panels for Thermal Insulation”, BETEC Conference on Superinsulation Technology in N.I.B.S., pp. 27~51.