

論文

차체 구조용 샌드위치 복합소재 단열 특성 평가

이상진*, 오경원*+, 정종철*, 공창덕**, 김정석***, 조세현*

Evaluation on Adiabatic Property for Vehicular Sandwich Composite Structure

Sang-Jin Lee*, Kyung-Won Oh*+, Jong-Cheol Jeong*, Chang-duk Kong**, Jeong-Seok Kim***, Se-Hyun Cho*

ABSTRACT

Experimental investigation on heat transfer ratio was firstly performed with three types of sandwich panels such as the Carbon/Epoxy Skin-Aluminum Honeycomb and Balsa Core Sandwich Panel of 37mm thickness, the Carbon/Epoxy Aluminum Skin-Honeycomb Core Sandwich Panel of 57mm thickness (including insulator) and the Carbon/Epoxy Skin-Aluminum Honeycomb Core Sandwich Panel of 37mm thickness based on the KS F 2278:2003(Insulation test method of windows). In addition to this investigation, experimental tests were also done for evaluation of heat transportation ratio with the Aluminum Skin- Aluminium Honeycomb Sandwich Panels of 27mm and 35mm thickness, and Aluminum Skin-Foaming Aluminum Sandwich Panel of 27mm thickness by the KS F2277:2002 (Insulation measuring method of construction component-Calibration heat box method or protective heat box method). In this study, it was found that the larger net heat transfer cross sectional area between the skin and the sandwich core is given, the higher heat transportation ratio occurs. It was also found that the hybrid type insulation had better insulation characteristics compared to the non-hybrid type insulation.

초 록

본 연구는 KS F 2278 : 2003 (창호의 단열성 시험 방법)에 의하여 철도차량 및 버스의 내/외장재로 적용 가능한 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤 & 발사코어 샌드위치 판넬(두께 : 37mm), 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤 코어 샌드위치 판넬(두께 : 57mm, 단열재 포함) 및 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤 코어 샌드위치 판넬(두께 : 37mm)에 대한 열관류율 시험을 하였다. 또한 KS F2277 : 2002 (건축용 구성재의 단열성 측정방법-교정열상자법 및 보호열상자법)에 의하여 추가로 알루미늄 스킨-알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬들 (두께 : 27mm, 35mm)과 알루미늄 스킨-포밍 알루미늄 샌드위치 판넬 (두께 : 27mm)에 대한 열관류율 시험을 수행하였다. 본 연구를 통해 면제와 심제사이에 열전달은 실제 단면적이 넓을수록 열관류율이 높았으며, 하이브리드형 복합재일수록 단열성능이 우수함을 확인하였다.

Key Words : 샌드위치 판넬(sandwich panel), 하이브리드 복합재료(hybrid composite material), 교정 열 상자법(Calibrated Hot Box Method(CHB법)), 차체구조용 복합소재 샌드위치(Vehicular Sandwich Composite Structure)

*+ (주)한국화이버 복합재료연구소 교신저자(E-mail:kwoh@fiber-x.com)

** 조선대학교 항공우주공학과

*** 한국철도기술연구원 선임연구원

1. 서론

전 세계적으로 에너지, 환경문제가 크게 대두되면서 운송수단의 에너지 효율 극대화 방안에 대한 연구가 활발히 진행중에 있다.[1] 경량화를 통한 에너지 효율 극대화 및 내식성, 내 보수성이 우수한 복합재료는 주로 항공우주, 스포츠 분야에 사용되어 왔으나 자동차와 열차 등에 전과정 평가(LCA: Life Cycle Assessment) 측면에서 경제성의 우수함이 입증되면서 점차 1차 구조물 적용까지 영역이 확대되어 가고 있다. [2] 현재 여객수송용으로 개발 중인 틸팅열차와 초저상 굴절버스는 하이브리드 복합재 샌드위치 판넬을 적용하여 경량화를 극대화하고, 승객의 쾌적한 실내 환경 조성과 에너지 효율을 극대화한 설계가 이루어져야 한다. 본 논문은 기존에 잘 다뤄지지 않은 차량차체에 관한 단열특성 평가로서, 여객의 쾌적성 및 냉난방 에너지 효율에 대한 문제 접근을 보다 객관적으로 접근하기 위함이다. 현행 운송차체에 대한 법규가 정해져 있지 않아서 건축법규의 단열평가 특성으로 객관화 하려고 하였다. 또한 샌드위치 판넬로서 우려가 되는 단열 특성을 객관적으로 제시함으로써 추후 개발될 샌드위치 차체의 평가기준을 제시하기 위함이다.

본 연구에서는 아래와 같은 6가지의 샌드위치 판넬을 복합재료 차체구조물에 적용시험하기 위해 단열특성을 파악하여 샌드위치구조의 판넬이 구조체로서 적용가능 여부를 평가하기 위함이다. 시험 평가에 사용된 6가지 샌드위치 판넬 시편의 종류들은 다음과 같다.

- 시편①: 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤/발사코어 샌드위치 판넬(두께 : 37mm)
- 시편②: 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤 코어 샌드위치 판넬(두께 : 57mm, 단열재 포함(Glass Wool))
- 시편③: 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤 코어 샌드위치 판넬(두께 : 37mm)
- 시편④: 알루미늄 스킨-알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬(두께 : 35mm)
- 시편⑤: 알루미늄 스킨-알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬(두께 : 27mm)
- 시편⑥: 알루미늄 스킨-포밍 알루미늄 샌드위치 판넬(두께 : 27mm)

사용된 표피 재료는 시편 ①, ②, ③의 경우 평직(Plain weave)으로 직조된 카본/에폭시 프리프레그(CF3327, (주)한국화이바)로 단위중량은 209(g/m²)이며 1-ply당 두께는 0.27mm이다. 9-ply씩 적용되었다. 시편 ④, ⑤, ⑥의 경우 두께 1.2mm인 50계열 알루미늄 판재를 사용하였다. 심재로 사용된 알루미늄 하니콤은 셀크기 3/8"이고 셀 두께는 70μm이다. 알루미늄 판재는 접착성능을 향상시키기 위해 별도의

의 표면처리가 이뤄졌다.

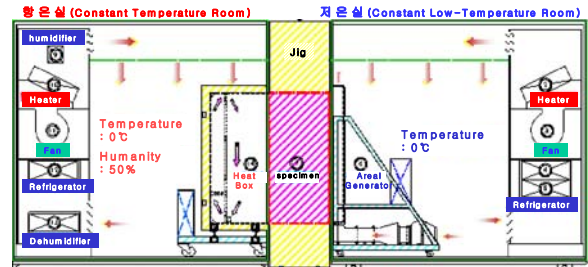


Fig. 1 Configuration of Test Setup.

2. 단열성능시험평가

2.1 단열성능평가를 위한 열관류율 시험개요

단열성능평가를 위한 열관류율 시험장치 개략도는 Fig. 1과 나타내었다. 열관류율 시험은 항온실 시험조건은 20 °C, 50% 이며, 저온실은 0 °C로 설정하여 실험을 진행한다. 열관류율 시험장치는 항온실과 저온실로 나뉘어지며, 항온실내 가열상자와 저온실내 냉풍 취출 장치가 설치된다. 각 실에 공조기기, 온습도 제어장치, 계측장치 및 기타 부대설비로 구성된다. 저온실에는 KS F 2299와 ISO 8990에 의하여 시험체의 전체 표면에 대한 표면 열전달 저항 값을 일정하게 유지하기 위한 냉풍 취출 장치가 구성된다. 냉풍 취출 장치는 저온실의 공기를 시험체 표면에 가능한 균일하게 흐르도록 함과 동시에 풍속을 조절할 수 있다.

2.2 단열성능에 대한 측정 시험 기준

샌드위치 판넬의 차체 단열성능 평가를 모사하기 위해 현재 국내 차량 관련법에는 단열성능평가가 별도의 규정되어 있지 않아, 건축용으로 이루어지고 있는 KS 시험규정에 따라 수행되었다. 적용된 시험장치에서 다음과 같이 시험기준에 의하여 건축부재의 열관류율을 평가하도록 하고 있다.

- KS F 2277 (건축용 구성재의 단열성 측정방법 - 교정 열 상자법 및 보호열상자법)
- KS F 2278 (창호(문)의 단열성 시험방법)

시험은 KS F 2277 부속규정 B로서 '작은 전열 면적을 갖는 시험체의 단열 성능 시험 방법'으로 교정 열 상자법(CHB)을 사용하였다. 가열상자의 개구부의 치수가 1.5×1.5m 미만, 0.9×0.9m 이상의 크기로 가열상자의 주벽은

열저항을 $6\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 이상으로 하며, 기밀과 동시에 열적 결합이 없는 구조로 한다. 가열상자의 표면은 장파장 영역의 방사율 0.9 이상으로 마무리한다. 열원은 전기 히터를 사용하고, 전기히터로부터 시험체로의 방사의 영향을 가능한 한 적게 하기 위해 정류(整流)를 겸하는 방사 차단판을 설치하고, 시험체에 면하는 쪽은

브에서 Co-Curing 방식으로 성형하였으며, Table 2의 도어시편은 고온 프레스 성형을 하였다.

성형된 시편은 시험규격에서 지정하고 있는 $995\text{mm}\times 995\text{mm}$ 로 재단을 하였다. 시편의 두께는 시편②(57mm) > 시편①,③(37mm) > 시편④(35mm) > 시편⑤, ⑥(27mm)이며, 시편의 무게는 시편⑥ (13.10kg) > 시편② (10.76kg) > 시편① (10.26kg) > 시편③(8.90kg) > 시편④(8.56kg) > 시편⑤(8.30kg)이다. 시편의 무게는 알루미늄 하니컴 코어가 삽입된 시편이 가장 가벼웠다. 시편의 변수중 두께가 동일하지 않는 이유는 현재 사용되어지고 있는 제품의 두께이거나 개발중인 차량의 두께이기 때문이다.

Table 1 Specification of Carbody Panel

	시편종류		
	①	②	③
크기	995mm × 995mm	995mm × 995mm	995mm × 995mm
두께	37mm	57mm	37mm
무게	10.26kg	10.76kg	8.90kg

Table 2 Specification of Door Panel

	시편종류		
	④	⑤	⑥
크기	995mm × 995mm	995mm × 995mm	995mm × 995mm
두께	35mm	27mm	27mm
무게	8.56kg	8.30kg	13.10kg

장파장 영역으로 방사율 0.1 이하로 마무리 한다. 가열상자 내의 온도 제어는 임의의 설정 온도에서 $\pm 5^\circ\text{C}$ 의 정밀도로 한다. 가열 상자내의 온도 분포를 작게 하고, 시험체 표면에 풍속을 일정하게 하기 위해 교반용 송풍기를 설치한다. 시험체 부근에서 풍속은 0.5m/s 이내로 하고, 가열 상자 내 각 공기 온도 측정사이의 온도차는 1°C 이내로 한다.

2.3 열관류율 시험시편

열관류율 시험에 사용된 시편은 Table 1과 Table 2와 같이 차체와 도어에 적용될 수 있는 판넬로 각각 3가지씩 구성을 달리하여 총 6가지로 제작하였다. 시험체의 두께는 전열면적의 짧은 변의 치수의 10분의 1이하로 하고, 시험체는 측정전에 $20\pm 5^\circ\text{C}$, 상대습도 ($60\pm 10\%$)의 온습도 상태의 실내에서 양생한다. Table 1의 차체 시편은 오토클레이

2.4 열관류율 시험장치 사양

(1) 항온실 사양

- 가. 항온실내 설정온도 : 20°C (실내 측 공기온도 조건)
+ 항온실내 온도제어 정밀도 : $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내
+ 항온실내 온도 분포도 : $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내
- 나. 습도 범위 : $30\sim 90\%RH$ (항온실 실내온도 $15^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ 범위 기준)
+ 습도제어 정밀도 : $\pm 2\% RH$ 이내
+ 습도제어 분포도 : $\pm 5\% RH$
- 다. 항온실의 기류속도 : 0.5m/s 이내
- 라. 유효 규모 : $3,200(W)\times 3,700(H)\times 3,500(D)\text{mm}$

(2) 저온실 사양

- 가. 저온실내 설정온도 : 0°C (실외 측 외기온도 조건)
+ 저온실내 온도제어 정밀도 : $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내
+ 저온실내 온도 분포도 : $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내
- 나. 저온실의 기류속도 : $0\sim 5\text{m/s}$ 이내에서 제어
- 다. 유효 규모 : $3,200(W)\times 3,700(H)\times 2,500(D)\text{mm}$

(3) 시험체 부착 틀

본 시험에서는 개구부 치수가 $1,000(W)\times 1,000(H)\times 300(D)\text{mm}$ 의 시험체 부착 틀이 사용됐다.

2.5 열관류율 시험절차 및 시험방법

Fig. 2는 시편을 지그에 고정하는 과정을 나타내는 것이다. 개구부에 부착된 시편은 우레탄 폼으로 가장자리를 충전하여 항온실과 저온실의 열량유입을 최대한 차단하고 기밀을 유지하였다. Fig. 3은 T-type 열전대를 부착시킨 것을 나타낸 것이고 시편표면을 9등분하여 항온실과 저온실부분의 양쪽면에 총 18지점에 대하여 표면온도를 측정하였다. Fig. 4와 같이 항온실 내부의 가열상자와 저온실 내부의 기류발생장치를 지그(jig)에 고정시키고, 시험전에 실내온도 $20^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$, 실내 상대습도 $50\pm 5\%$ 의 항온항습실에서 24시간

이상 경화 후 시험에 들어갔다. 시편에 부착된 센서로부터 데이터 획득장치로 데이터를 받아서 시험완료 후 획득된 데이터로 시험분석 및 열관류율을 산출하였다.

2.6 실험결과 자료획득 및 결과 평가

2.6.1 실험 결과 자료획득

가열상자로의 공급열량을 변경하지 않고, 시험체의 양쪽의 공기 온도 및 표면 온도변화가 한 방향으로 변화하지 않고 거의

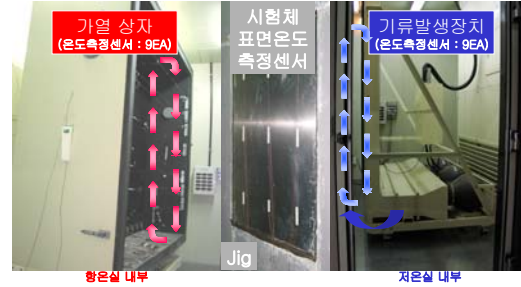


Fig. 4 Before Testing, Pre-treatment Process.

일정하게 된 상태를 확인한 후에, 동시에 양쪽의 공기 온도와 표면 온도 및 가열 상자로의 공급 열량을 30분마다 5회 측정하였고, 그 평균값을 사용하여 열관류 저항 또는 열 저항을 구했다.

2.6.2 실험 결과 자료에 대한 교정

본 시험은 Fig. 5와 같이 교정 열상자법을 사용하였다. 교정 열상자 장치는 장치 전체가 항온조 내에 설치된다. 이때



Fig. 2 Installing Procedure of Specimen.

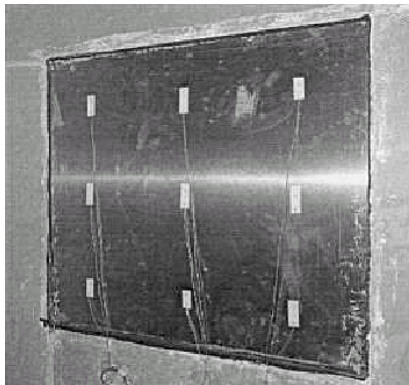


Fig. 3 Installing of thermocouples.

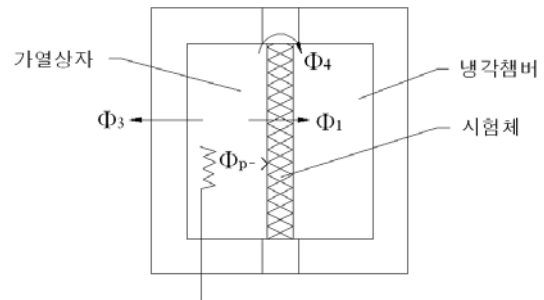


Fig. 5 Calibrated Hot Box[3].

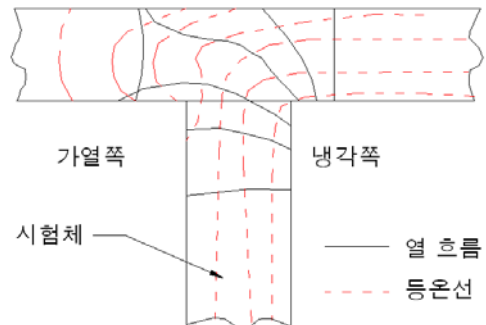


Fig. 6 Heat-flow of the Specimen and Fixture[3].

상자 내의 공기 온도와 항온조 내의 공기 온도는 반드시 일치 하지 않는다. 가열 상자로부터의 손실 열량 Φ_3 는 가열 상자를 열저항이 큰 구조로 함으로써 작게 할 수 있다. 시험체 통과 열량 Φ_1 은 가열상자로의 공급열량 Φ_P 로부터 가열상자에서의 손실 열량 Φ_3 및 시험체 측면의 손실 열량 Φ_4 를 빼서 구한다. 이 Φ_3 및 Φ_4 는 미리 교정한다. 이 교정에는 열저항을 이미 알고 있는 교정판을 사용하지만 특히 Φ_4 의 교정에는 실제로 시험하는 시험체와 같은 두께 및 같은 정도의 열저항을 갖는 교정판을 선택하고 또한 같은 정도의 온도조건에서 실시 할 필요가 있다. 시험체 측면 및 시험체 틀에서 열 흐름은 Fig. 6에서와 같이 나타내고 있다.

교정 열량의 측정방법은 열저항 또는 열전도율 및 두께가 이미 알려져 있는 교정판을 시험체 붙인 위치에 기밀하게 설치하고 시험조건에 적합한 시험상태에서, 가열 상자 내의 발생을 구하고, 가열 상자의 교정 열량을 식(1)에 의해 구한다.

$$Q_C = Q_H - Q_S \quad (1)$$

여기서, Q_C : 교정 열량(W), Q_H : 가열 상자 내 발생 열량(W), Q_S : 교정용 시험체 통과 열량(W), 이다.

위와 같은 식을 이용한 교정선도를 작성하여 본 시험에 적합한 교정 열량값을 사용 하였다.

2.6.3 결과 산출

가. 시험체 통과 열량

시험체를 통과하는 열량은 식 (2)과 같다.

$$Q_N = Q_H - Q_C \quad (2)$$

여기에서, Q_N : 시험체 통과 열량(W), Q_H : 가열 상자 내 발생 열량(W), Q_C : 교정 열량(W)이다.

나. 열관류 저항 및 열관류율

열관류 저항 또는 열관류율은 다음 식에 따라 계산한다.

$$R_K = \frac{Q_{HA} - Q_{CA}}{Q_N} \cdot A \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{R} \quad (4)$$

여기에서, R_K : 열관류 저항($m^2 \cdot K/W$), K : 열관류율 [$W/(m^2 \cdot K)$], Q_N : 시험체 통과 열량(W), Q_{HA} : 가열 상자 내 공기 온도($^{\circ}C$), Q_{CA} : 항온실 내 공기 온도($^{\circ}C$), A : 시험체 전열 면적(m^2)이다.

2.6.4 결과 평가

실험 후 획득된 데이터로 관계식을 통하여 Table 3와 같이 열관류율 K 값이 산출되었다.

알루미늄 스킨-포밍 알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬은 열전달 실제 단면적이 상대적으로 넓어 열전도율이 $6.1[W/m^2K]$ 으로 열전달량이 가장 많았다. 그러므로 단열성능이 아주 나쁘다고 할 수 있다. 차체 판넬의 경우 ① 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤/발사코어 샌드위치 판넬 $3.6[W/m^2K]$, ② 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬(단열재포함) $1.3[W/m^2K]$, ③ 카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤코어 샌드위치 판넬 $4.9[W/m^2K]$ 로 차체의 시험판넬의 열 전달량은 알루미늄 스킨-알루미늄 포밍 하니콤 샌드위치 판넬 보다 적었다. 단열재가 삽입된 경우는 단열재를 적용하지 않은 샌드위치 판보다 약 1.5배정도 더 두꺼워 졌으나 단열특성은 약 3.77배정도 우수하게 나타났다.

알루미늄을 통한 단열특성은 ④ 알루미늄 스킨-알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬(27mm) $5.3[W/m^2K]$, ⑤ 알루미늄 스킨-알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬(35mm) $5.1[W/m^2K]$, ⑥ 알루미늄 스킨-포밍 알루미늄 샌드위치 판넬 $6.1[W/m^2K]$ 으로

Table 3 Test Results for Carbody and Door Panel

시 편	두께 (mm)	시험결과 K ($W/m^2 \cdot K$)	시험 방법	
차체 판넬	① 카본/에폭시 알루미늄 하니콤/발사코어 샌드위치 판넬	37	3.6	KS F 2278
	② 카본/에폭시 알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬(단열재포함)	57(=37+20)	1.3	KS F 2278
	③ 카본/에폭시 알루미늄 하니콤코어 샌드위치 판넬	37	4.9	KS F 2278
도어 판넬	④ 알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬	27	5.3	KS F 2277
	⑤ 알루미늄 하니콤 샌드위치 판넬	35	5.1	KS F 2277
	⑥ 포밍 알루미늄 샌드위치 판넬	27	6.1	KS F 2277

Note : 알루미늄의 열전달율 $\lambda = 6.1 W/m^2K$

미늄 허니컴코어의 두께가 두꺼워 질수록 강성은 좋아지지
만 단열특성은 크게 좋아지지 않음이 확인 되었다.

총괄적인 시험 결과는 도어 판넬의 소재가 알루미늄 판
재와 알루미늄 하니콤인 만큼 도어 판넬의 단열성능이 좋
지 못함을 보여주고 있다. 알루미늄 포밍 코어는 알루미늄
판재의 열전도율과 비슷하며 샌드위치 판넬로서 단열 효과
는 없는 것으로 나타났다. 알루미늄 판재보다 열전도율이
비교적 낮은 카본/에폭시 판넬은 알루미늄 샌드위치 판넬
보다 약 25%정도 단열효과가 상승하였고 단열재(glass
wools)를 추가로 적층시 470% 정도의 단열효과가 증가함을
알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구는 차체에 적용되는 샌드위치 판넬의 단열특성
만을 고려하였다. 단열품을 사용한 샌드위치 판넬이 단열
성으로는 가장 우수 할 수 있으나 구조강도 면에서 부적합
하므로 차체의 구조체로서 사용되어지는 판넬은 임부에 요
구되어지는 구조 강도값을 가지는 판넬이 기본적으로 선택
이 되었다.

- 1) 차체 판넬 단열 성능 시험은 KS F 2278 : 2003 (창호의
단열성 시험 방법)에 의하여 총 3 종류, ①카본/에폭시
알루미늄스킨-하니콤/발사코어 샌드위치 판넬(두께 :
37mm), ②카본/에폭시 스킨-알루미늄 하니콤 코어 샌드
위치 판넬(두께 : 57mm, 단열재 포함), ③카본/에폭시
스킨-알루미늄 하니콤 코어 샌드위치 판넬(두께 :
37mm)에 대한 열관류율을 시험을 하였다.
- 2) 도어 판넬 단열 성능 시험은 KS F2277 : 2002 (건축용
구성재의 단열성 측정방법-교정열상자법 및 보호열상자
법)에 의하여 총 3 종류, ④,⑤알루미늄 스킨-알루미늄
하니콤 샌드위치 판넬 (두께 : 27mm, 35mm)과 ⑥알루
미늄 스킨-포밍 알루미늄 샌드위치 판넬 (두께 : 27mm)
에 대한 열관류율을 시험하였다. 샌드위치 판넬의 두께
가 두꺼워 짐에 따라 상대적인 열전도율은 낮아졌으며
스킨과 접착면이 허니컴 코어에 비해 많은 포밍 알루미
늄 판넬은 전혀 단열이 되지 않았다.

일반적으로 건축용으로 단열재가 들어간 공동주택의 일
반 출입문(1950×900×40mm)의 단열성능 시험 결과에서 열
관류율 K값이 보통 2.24 [W/m²K]인 데 비해, 본 연구 대상
인 도어 판넬의 열관류율 값은 높게 나왔다. 도어 판넬에
단열재를 삽입한 하이브리드형 복합재로 단열성능을 향상
시킬 수 있다고 판단된다.

샌드위치 판넬의 두께 보상을 위해 열 관류율이 상대적
으로 낮은 발사코어를 삽입한 경우가 차체 일체형으로서

단열 성능이 우수하게 나타났으나 상대적으로 판넬의 강성
이 낮아졌다. 별도의 단열재(glass wool)를 포함시킨 하이브
리드 복합재가 판넬의 두께가 두꺼워 졌지만 우수한 단열
특성을 확보함에 따라 강성과 단열특성에 중점을 두었다.

참고문헌

- 1) 김위찬, 르네마보안, “블루오션전략,” 교보문고, 2005. 4.
- 2) Takafumi NAGATOMO, Toru MIYAUCHI, Hiroshi TSUCHIYA,
“PRELIMINARY INVESTIGATION FOR LIFE CYCLE
ASSESSMENT (LCA) OF SHINKANSEN VEHICLES,”
Materials Technology Development Division, 2004.
- 3) KS F 2277 : “건축용 구성재의 단열성 측정방법-교정열상
자법 및 보호열상자법,” 2002.
- 4) KS F 2278 : “창호의 단열성 시험 방법,” 2003.
- 5) 3차년도 최종보고서, “차체형상/실내디자인 및 차량설비 기
술개발(I-6),” (주)한국화이바, 철도청, 2004.
- 6) 이상진, 오경원, 정종철, 조세현, 서승일, “샌드위치 복합소
재가 적용된 톨딩 차량의 단열 특성 평가 연구,” 한국철도
학회 춘계학술대회, 2005년 5월.
- 7) 이상진, 신광복, 류봉조, 정종철, 김정석, “철도차량 분야에
서의 복합재 적용을 위한 성능 평가 기술,” 한국복합재료
학회, 제18권 3호, 2005, pp. 53-58.