

알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 적용한 철도차량 통로문의 경량화

Light Weight by Application of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels in End Door of Rolling Stock

정남용(숭실대학교 기계공학과), 이승발*(대구지하철공사)

Abstract : Many papers have been conducted on the applications of honeycomb sandwich materials to reduce the cost of production and maintenance, and to improve the high speed and light weight in rolling stocks, aircrafts and so on. The end door of rolling stock is generally made of rolled steel or stainless steel. Thus, the weight of these materials are heavier than that of nonferrous metals and thermal deformation by welding or complexity of manufacturing process is occurred.

Therefore, this paper is aimed to develop the light weight by application of end door which is made of aluminum honeycomb sandwich panels in rolling stocks and to propose the standards of design and evaluation for its adhesively bonded strength.

1. 서 론

산업발달과 수송수요의 증가로 철도차량의 고속화, 경량화를 비롯한 제작비 및 유지보수비의 절감을 목표로 끊임없는 기술혁신이 이루어지고 있다. 특히 경량화는 경제적인 측면에서 에너지 절약의 목표와 고속화를 추구하는 철도차량에서는 매우 중요하고, 필수적인 과제이다. 철도차량의 경량화는 종래의 연강재료에서 알루미늄 합금, 또는 고장력 스테인레스강에서 복합재료 및 신소재에 의한 차체구조의 경량화가 지속적으로 시도되어 왔다.

일본에서는 신간선의 철도차량에 브레이징 알루미늄 하니컴 판재(honeycomb panel)를 적용한 차체구조가 개발되어 시험운행에 있고⁽¹⁾, 개발중인 자기부상 열차의 초전도 자석을 지지하는 프레임에 사용되고 있다⁽²⁾. 또한, 현재 영국의 런던

지하철에서는 접착에 의한 알루미늄 하니컴 판재를 철도차량의 출입문에 적용하여 운행중에 있다⁽³⁾. 국외에서는 하니컴 샌드위치 판재의 접착에 의한 사용이 항공기 및 각종 산업 분야에서 증가하고 있는 추세이지만, 철도차량용 재료로서 구조해석 방법이나 성능기준, 신뢰성, 시험기준, 설계 및 강도평가 방법에 대한 표준화가 되어 있지 않고, 이에 대한 기초 자료도 거의 없는 실정이다.

특히, 국내에서는 알루미늄 하니컴 판재를 철도차량의 구조에 적용한 예나 접착구조의 안전성 및 내구성에 관한 연구도 거의 없기 때문에 이에 대한 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

기존 전동차의 통로문(end door)은 일반압연강재, 또는 스테인레스강재 프레임을 사용하여 내·외판에 스폿용접을 이용한 구조로 제작되어 왔다. 이 제작방식은 강도에 비해 중량이 크고, 용접 후 열변형이나 제작 공정이 매우 복잡한 단점을 지니고 있다.

그러나 알루미늄 하니컴 판재를 사용한 철도차량용 통로문의 제작공정은 단순하고, 용접방식에 비하여 열변형이 적고, 경량화가 가능하며, 비강도가 크고, 소음·진동 및 충격흡수 능력이 큰 장점을 지니고 있다.

따라서, 본 논문에서는 철도차량용 통로문의 경량화 방안을 검토하기 위하여 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 적용한 시험품을 제작한 후 실험을 통하여 통로문의 강성평가 및 경량화 설계 방법을 제시하고자 한다.

2. 하니컴 통로문의 모델링

2.1 하니컴 샌드위치 판재

하니컴은 벌(蜂)이 꽃가루나 알을 저장하기 위해 만든 6각형 모양의 코어를 말하고, 하니컴

코어는 작은 6각형을 밀집시켜 벌집 모양으로 만든 구조이다. 하니컴 코어의 재료로는 알루미늄, 연강, 스테인레스강과 같은 얇은 판이나 종이, 또는 각종 FRP 등이 폭넓게 사용되고 있다.

판재로서의 전형적인 샌드위치 구조는 2개의 얇고 비교적 강도가 높은 표면재와 가벼운 코어로 구성되어 있다. 표면재와 코어재는 유연성이 있지만, 이 두 재료가 결합했을 때에는 강하고 가벼운 특징을 가지고 있다. 이와 같이 하니컴 코어에 표면재를 접착한 것을 하니컴 샌드위치 판재(honeycomb sandwich panel)라고 한다.

하니컴은 체적의 90~99%는 공간이므로 이것을 코어로 하는 샌드위치 구조는 중량에 비해 강성이 매우 크다. 또한 하니컴은 그 자신으로서 비구조용 열교환 요소, 정류판, 광의 확산, 전자 차폐, 충격흡수 등에 이용되지만, 주로 그 양면에 표면판을 접착제로 접착시킨 판재로 만들어 강도 부재로 사용하는 수가 많다.

2.2 하니컴 통로문의 설계조건

알루미늄 하니컴 샌드위치 판재의 특성인 고강성, 경량성, 제작비 저감 등을 고려하여 기존의 스테인레스강재 통로문과 동등 이상의 충분한 강도와 강성을 가지고, 호환성을 고려하여 기존의 제품과 동일한 창유리 롤러, 록커 손잡이 등을 사용할 수 있도록 설계를 하고자 한다.

하니컴 샌드위치 판재의 파괴 모드와 그 원인을 고려하여⁽⁴⁾, 설계하중에 대하여 충분한 강도와 강성을 가진 하니컴 샌드위치 판재를 설계하려면, 다음과 같은 기본적인 구조조건을 구비하여야 한다.

- (1) 샌드위치 판재가 설계하중에 대한 과도한 처짐이 발생하지 않는 충분한 굽힘강성 및 전단강성을 갖는 구조일 것.
- (2) 코어재는 설계하중에 대한 좌굴을 지탱할 수 있는 두께의 전단탄성을 가질 것.
- (3) 코어재는 설계하중에 대한 충분한 전단강도를 가질 것.
- (4) 외판은 설계하중에 의한 인장 또는 압축, 전단 등에 대한 충분한 내력을 갖는 두께를 선정할 것.

따라서 기존의 연강재 또는 스테인레스강재 통로문과 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재구조 통로

문의 설계조건은 한국철도표준규격(KRS) 및 전동차 통로문의 제작시방서에서 요구하는 성능시험과 합격기준을 만족시켜야 한다⁽⁵⁾.

일반적으로 하니컴 샌드위치 판재 구조의 강도 설계는 작용하중에 대하여 파괴되지 않는 충분한 강도와 과도한 처짐이 생기지 않는 강성설계가 필요하다. 따라서 통로문에 3점 굽힘하중을 가했을 때 스테인레스강재 통로문의 최대처짐과 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재 통로문의 최대처짐은 5mm 이내로 되어야 하는 조건으로 설계기준을 정하고, 기존 스테인레스강재 통로문과 시험품인 알루미늄 하니컴 판재 통로문의 최대처짐을 비교·검토하였다.

2.3 판재 기초이론

하니컴 샌드위치 판재구조의 통로문에 3점 굽힘하중이 작용할 때 강도 및 강성 설계에 대한 기초이론을 검토하였다.

(1) 굽힘강도 : 알루미늄 하니컴 코어의 탄성률은 극히 적고, 일반적으로 전단탄성률은 약 100 MPa 정도이다. 따라서 Fig. 1에 표시한 하니컴 샌드위치 판재가 굽힘모멘트를 받는 경우 외판과 코어재의 탄성률을 각각 E_f , E_c 라 하면, 굽힘모멘트는 외판에서만 받게 된다. 그림에서 하니컴 샌드위치의 두께 방향으로 임의의 점 z 에서 응력 σ_f 는 식 (1)과 같이 된다.

$$\sigma_f = \frac{M}{Z} = \frac{Mz}{I} \dots\dots\dots (1)$$

그림에서 높이 d , 폭 b 를 가진 하니컴 샌드위치 판재의 경우, I 는 식 (2), (3)과 같이 표시된다.

① 외판의 두께가 $t_f = t_{f1} = t_{f2}$ 인 경우

$$I = \frac{b}{12} (d^3 - t_c^3) \dots\dots\dots (2)$$

② 외판의 두께가 $t_{f1} \neq t_{f2}$ 인 경우

$$I = \frac{bd^3}{12} \{ (t_c + t_{f1} + t_{f2})^3 - t_c^3 \} \dots\dots\dots (3)$$

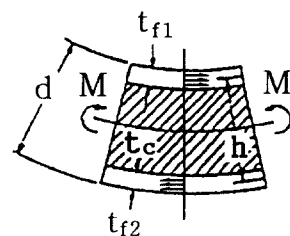


Fig. 1 Beam subjected to bending moment

(2) 처짐 : 하니컴 샌드위치 판재에 굽힘 모멘트가 작용할 때 처짐은 외판의 굽힘변형과 코어의 전단변형에 의한 처짐의 합으로 다음 식과 같이 된다.

$$\delta = \frac{Pa^3}{48D} + \frac{Pa}{4U} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, a 는 판재의 길이, U 는 전단강성이고, 굽힘강성 D 는 다음 식과 같이 된다.

$$D = E_f I = E_f \frac{b}{12} \{ (t_c + 2t_f)^3 - t_c^3 \}$$

$$= \frac{E_f b t_f}{6} (3t_c^2 + 6t_f t_c + 4t_f^2) \dots\dots\dots (5)$$

외판과 코어의 탄성률 E_f , E_c 가 있지만, $E_f \gg E_c$ 이므로 코어재의 E_c 는 무시할 수 있다.

전단변형에 의한 전단강성 U 는 다음 식으로 표시된다⁽⁶⁾.

$$U = \frac{(t_f + t_c)^2}{t_c} G_c b \dots\dots\dots (6)$$

(3) 굽힘강도 및 처짐 계산 : 통로문 중앙의 강성을 확인하기 위하여 3점 굽힘시험으로 중앙에 최대 100kgf의 집중하중이 작용한다고 가정하고, 외판의 최대굽힘 응력과 최대처짐을 식(1)과 식(4)에 대입하여 계산한 결과는 Table 1과 같다.

그 결과 외판에 작용하는 최대굽힘 응력은 1.54kgf/mm²로, 알루미늄재료 A5052의 인장강도는 30~42kgf/mm²이므로 안전율은 20 이상으로 충분한 강도임을 알 수 있다. 또한 최대처짐은 4.98mm로 계산되었다.

그러나 실제 통로문은 중앙에 유리창틀과 통로문 테두리에는 방풍용 버팀 고무프레임이 있고, 각종 부속품을 조립하는 프레임으로 구성되어 있기 때문에 계산만으로는 정확한 판단이 어렵다. 그러나 그 가능성을 확인하고, 최적설계를 하기 위해 모델링 평가를 하는 것이 더욱 효과적이라 생각된다.

Table 1 Theoretical calculations of bending stress and deflection for end door

Maximum moment(M) [kgf-mm]	Facing bending stress(σ_f) [kg/mm ²]	Maximum deflection(δ) [mm]	Dimension of end door [mm]
4.56×10 ⁴	1.54	4.98	Width : 890 Height : 1825 Thickness : 25

2.4 모델링 방법

전동차의 출입문은 러시아워때 승객이 만차(滿車)된 상태에서 굴곡된 선로를 통과할 때 원심력에 의하여 승객이 출입문쪽으로 밀리거나, 충격으로 출입문이 휘어지거나, 파손 등으로 출입문이 탈락하는 것을 방지하고, 승객의 안전을 위하여 제작규격에는 충분한 강도와 강성시험을 규정하고 있다.

이러한 강성을 확인하기 위하여 실물크기의 모델을 길이와 폭이 같고, 판재의 두께가 25, 30 mm인 2종류와 외판의 두께 1.0, 1.5, 2.0 mm의 3종류를 Table 2와 같이 조합하여 4종류의 모델을 제작하였다.

Table 2 Dimensions for four types of the specimens

Type	Facing thickness(t_f) [mm]	Door thickness(d) [mm]	Window size [mm]	Model size [mm]	Material
I	2.0×2.0	25	Width : 590 Height : 480	Width : 890 Height : 1825	*Facing A5052 *Honeycomb core A3003
II	1.0×1.5	30			
III	2.0×1.5				
IV	2.0×2.0				

2.5 모델링 결과

제작된 모델은 3점 굽힘시험 방법으로 통로문의 중앙에 하중 100 kgf(길이 L=630mm, 환봉 직경 d=φ160mm, 환봉의 재질 SS41)을 작용시키고, 다이얼 게이지로 그 처짐량을 측정하였다.

Table 3 Modelling results

Type	Deflection(δ) [mm]	Weight of model [kg]
I	5.7	15.0
II	5.5	14.5
III	4.8	14.6
IV	4.1	16.0

모델시험편의 처짐량 측정결과를 Table 3에 나타낸 바와 같이 Type III는 중량의 증가 없이 강성이 증가함을 알 수 있다. 또한 설계기준으로 제시한 최대처짐이 5mm 이내를 만족시키는 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 새로운 차량을 설계할 때 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 사용한 통로문의 두께를 30mm로 하면 최적설계가 가능할 것으로 판단된다. 그리고 기존의 스테인레스강재 통로문과 두께가 같은 25mm일

때 외판 두께가 2.0mm인 것은 처짐이 5.7mm로 나타났다. 이것은 설계기준 보다 0.7mm 크지만 모델 제작에서는 창유리, 창틀, 단부 방풍 버팀 고무틀이 생략되었으므로 실제로 시험품 제작에는 부속품의 부착으로 인하여 강성이 더욱 보강될 것이므로 이 정도면 충분한 강성을 가진 모델링 결과로 판단된다.

3. 접착강도시험 및 평가

3.1 접착시험의 개요

하니컴 샌드위치 판재의 설계에서 요구되는 접착강도, 강성, 피로강도 및 내구성 등에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 이들에 대한 시험을 실시하여 검증하는 것은 대단히 중요하다.

시험은 선정된 재료가 설계조건을 만족하는가를 평가하기 위하여 시험품을 제작하기 전에 제품과 동일 로드와 재료로 시험편을 제작하여 성능을 확인하고, 시험 데이터를 충분히 분석평가하여 설계강도 및 안전율 등에 대한 문제점을 파악하였다.

하니컴 샌드위치 판재의 파괴모드, 접착제의 박리, 표면재의 강도 부족에 대한 현상을 파악하기 위하여 다음과 같은 대표적인 4종류의 접착시험을 미국 재료시험협회(ASTM)가 규정한 방법에 따라 수행한 후 접착시험에 대한 기준을 제시하고자 한다.

- ① 면방향 인장강도 시험 ② 굽힘 시험
- ③ 벗김 항력시험 ④ 접착 환경시험

3.2 접착 시험편의 제작

접착 시험편의 표면처리는 탈지(脫脂), 에칭, 수세, 건조 등과 같은 기본적인 과정을 거쳐 외판과 하니컴 코어를 적층한 후, 가열로에서 Fig. 2와 같은 접착공정으로 온도를 1.5~3°C/min로 130°C까지 상승시킨다. 압력을 3kgf/cm²까지 가

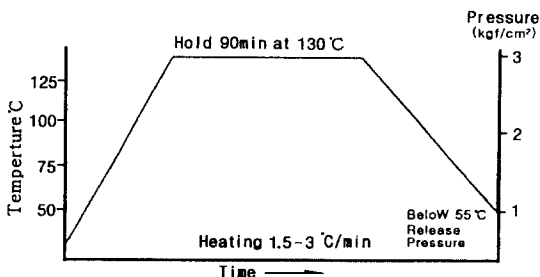


Fig. 2 Curing cycle of adhesive

압한 상태로 90분간 유지한 후 압력을 제거하고, 냉각시켜 접착시험편의 제작을 완료하였다.

3.3 접착강도 시험

(1) 면방향 인장강도 시험

접착면의 접착강도 시험편을 제작하여 시험 방법은 ASTM규격⁽⁷⁾에 의하고, 시험기는 만능재료시험기(Instron 4510)를 사용하고, 인장속도는 0.5 mm/min로 시험편이 파단될 때까지 하중을 측정하였다. 시험편이 파단될 때 인장하중 곡선을 그래프로 그려서, 파단점의 하중치를 측정 한 후 단면적에 대한 인장강도를 산출하였다. 그 결과 시험편 5개의 면방향 인장응력의 평균치는 28.8kgf/cm²을 나타내었다.

(2) 하니컴 벗김 항력시험

접착면의 벗김항력 시험편을 제작하고, 시험 방법은 ASTM규격⁽⁸⁾에 의하고, 만능재료시험기(Instron 4510)를 사용하였다. 인장하중 속도를 25mm/min로 벗기면서, 벗김거리가 25~152mm 사이에서 발생하는 하중 값을 측정하여 평균한 값을 계산식⁽⁸⁾에 대입하여 벗김항력강도를 산출하였다. 시험편 5개에 대한 벗김항력의 평균치는 3.1mm·kgf/mm 로 나타났다.

(3) 굽힘시험

접착면의 강도와 알루미늄 하니컴 판재의 강성을 시험하기 위하여 시험편을 Fig. 3과 같이 제작하고, 3점 굽힘시험은 ASTM 규격⁽⁹⁾에 의한 방법으로 굽힘시험을 실시하였다. 압축하중 속도는 2mm/min로 하고, 시험편이 파단될 때까지 하중과 처짐량을 다이얼 게이지로 측정하였고, 그 결과는 Fig. 4와 같이 나타났다. 작용하중 400kgf일 때, 처짐이 4.5mm가 될 때 까지는 하중과 처짐이 비례적으로 변화하였다.

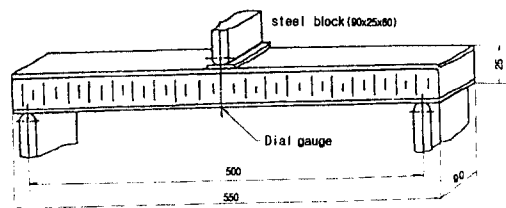


Fig. 3 3-point bending test for honeycomb sandwich panel

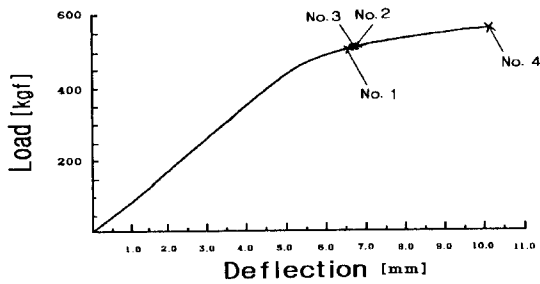


Fig. 4 Load-deflection diagram

3.4 접착 환경시험

(1) 고온 및 저온 내수성시험

고온과 저온상태에서 접착면의 내수성 접착 강도를 측정하기 위해 면방향 인장시험을 3.3절의 (1)항과 같은 방법으로 실시하였다.

고온시험은 시편을 $55 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수중에 5일간 흡습 시킨 후, 그 상태에서 시험을 실시하고, 저온시험은 시편을 -45°C 로 냉각시킨 후 시험을 실시하였다. 시험결과 저온시험에서 면방향 인장응력의 평균치는 42kgf/cm^2 이고, 상온(20°C)에서 측정된 응력 28.8kgf/cm^2 보다 45.8% 가 증가된 강도를 나타내었다. 고온시험에서 면방향 인장강도는 25kgf/cm^2 로 상온에서 측정된 28.8kgf/cm^2 보다 강도가 13.2% 감소함을 알 수 있다.

(2) 박리시험 : 극한상태의 온도변화에 따른 접착면의 박리현상을 파악하기 위해 시험편의 크기는 가로 및 세로가 각각 300mm , 두께는 25mm 의 시험편을 제작하였다. -40°C 의 저온상태에서 8시간을 유지한 후, 다시 고온 80°C 상태에서 8시간을 유지하고, 상온 $24 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 2시간을 방치한후 하니컴 코어와 접착제, 외판사이의 박리현상을 이동식 현미경을 사용하여 관찰하였다. 이 때 접착된 외판과 하니컴 샌드위치 사이의 접착부위

Table 4 Test result of adhesive strength

Item of test	Average value	
Flatwise tensile test	$28.8 [\text{kgf/cm}^2]$	
Bending test	400 kgf, 4.43 mm (deflection) Bending stress : $74.14 [\text{kgf/cm}^2]$	
Peel test of climbing drum	$3.17 [\text{mm} \cdot \text{kg/mm}]$	
Fatigue test	Good	
Environment test	Low temperature	$42 [\text{kgf/cm}^2]$
	High temperature	$24.7 [\text{kgf/cm}^2]$
	Peel test	Good

에 박리현상이나 균열 등과 같은 결함이 관찰되지 않았고, 접착상태는 전반적으로 양호한 상태였다.

3.5 접착 강도평가

접착 강도시험 결과와 강도평가를 항목별로 정리하면 Table 4와 같다.

4. 시험품의 제작 및 실험방법

4.1. 시험품의 재료

(1) 외판 : 지금까지의 모델링 결과와 접착강도 실험을 기초로 기존의 스테인레스강재 통로문과 동일한 크기로 시험품을 제작하기 위하여 다음과 같은 재료를 선정하였다.

통로문의 외판은 일반산업용 재료로 많이 사용되고 있는 비열처리합금 Al-Mg계로 내식성, 가공성, 용접성이 우수하고 절곡 및 프레스가공을 고려하여 Al합금 중에서 중간정도의 강도를 가진 KS D 6701의 A5052P를 선택하였다. 이 재료의 인장강도는 $19 \sim 29\text{kgf/cm}^2$ 이고, 항복강도는 $8 \sim 18\text{kgf/cm}^2$, 신연률은 $6 \sim 25\%$ 이다.

Table 5 Comparison for the characteristics of cores

Materials	A3003	A5052	A5056	A2024
Allowable max. temp. [$^\circ\text{C}$]	180	180	180	220
Rigidity	G	G	E	E
Corrosion resistance	F	G	G	F
Fatigue resistance	F	G	G	F
Cost	Low cost	Medium	Few cost	High cost

E : Excellent G : Good F : Common

Table 6 Mechanical properties of core material (CIBA Co. merchandise)

Core type	Modulus of elasticity (E_c) [kgf/mm^2]	Shearing elastic modulus(G_c) [kgf/mm^2]	Density [kg/m^3]
3/8-3003-25	7×10^4	30	59

(2) 하니컴 코어 : 알루미늄 하니컴 코어의 재료는 항공기용과 일반산업용의 2종류가 일반적으로 생산되고 있다. 항공기용으로는 A5052, A5056, A2024의 3종류, 일반산업용으로는 A3003, A3004의 2종류가 대표적이다. 본 연구에서는 가격이 저렴하고 내식성과 내피로성이 우수한 3/8-3003-25의 재료를 선택하였고, 재료의 성질은 Table 5 및 Table 6과 같다⁽¹⁰⁾.

(3) 접착제 : 하니컴 샌드위치 판재는 하니컴 코어와 외판 재료를 고분자 접착제 시트로 외판이 힘을 받아 변형이 발생할 때 하니컴 코어와 외판 재료가 파괴되기 직전까지 양호한 접착상태를 유지하여야 한다. 이러한 특성을 고려하여 국내에서는 시트형 에폭시계 Bondex 206이라는 상품이 개발되어 있다.

Table 7은 국내 생산제품과 영국 Ciba사 제품에 대한 접착제의 성능을 비교한 것이다.

Table 7 Properties of adhesives

Properties	Bondex 206	Redux 609
Areal weight [g/m^2]	300 ± 15	300 ± 15
Volatile content [%]	0.8	1.5
Gell time [min]	5 ~ 7	5 ~ 7
Heat deflection temp. [$^{\circ}C$]	140 ~ 150	130 ~ 140
Drum peel strength [in-lb/in]	13.2	11.5
Lap shear strength [psi]	3960	3300
Flatfish tension [psi]	410	380

Note : 1. Face : AL-2024-T3, Thickness : 1 mm
 2. Honeycomb core : Al-3/8"-3003(Core)
 Thickness:1/2"

4.2. 시험품의 형상 및 치수

본 연구의 실험에 사용한 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 적용한 통로문에 대한 시험품의 형상 및 치수는 Fig. 5와 같고, 기존의 골조방식 스테인레스강재 통로문의 형상 및 치수는 Fig. 6과 같다.

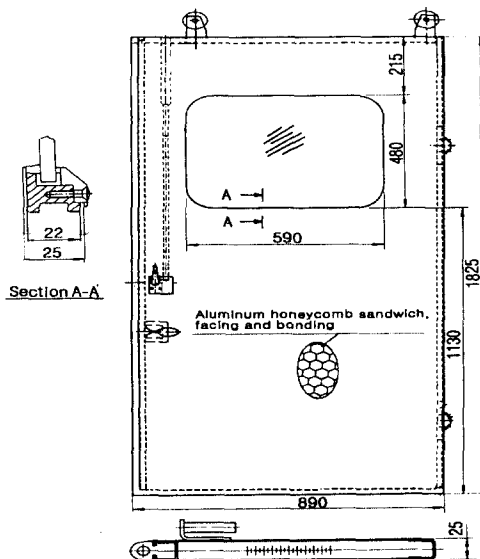


Fig. 5 Shape and configuration of designed door with Al honeycomb sandwich panel

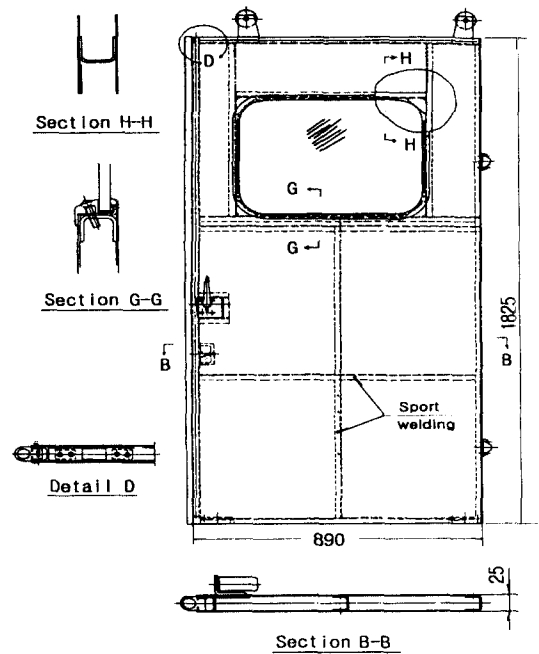


Fig. 6 Shape of end door with mild steel in rolling stock

4.3. 시험품의 제작방법

철도차량 통로문에 대한 시험품의 제조공정은 Fig. 7과 같은 순서로 외판과 하니컴 코어를 성

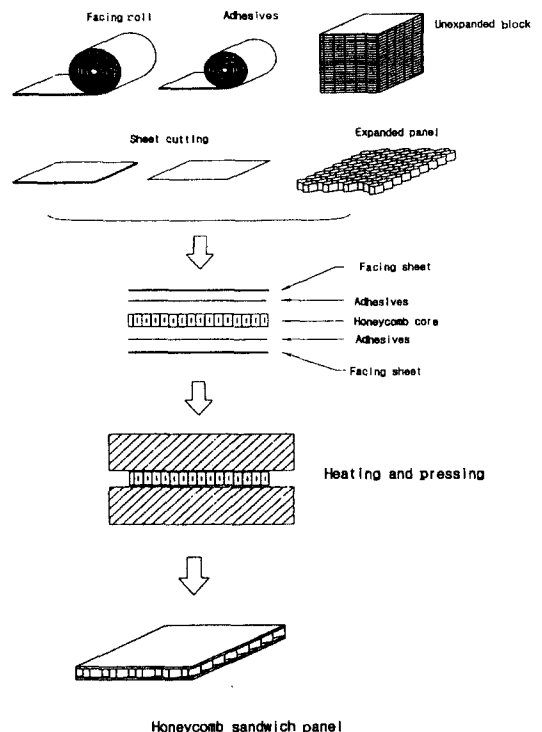


Fig. 7 Manufacturing process of honeycomb sandwich panel

형하여 부품을 조립한 후 적층시켰다.

내·외판과 하니컴 샌드위치의 접착은 고온 압축로에서 Fig. 2와 같은 접착공정으로 상승온도는 130°C가 될 때까지 1.5~3°C/min 로 하였다. 또한 압력 3kgf/cm²에서 90분간 유지하였다가 압력을 제거하고 냉각시키면서 접착을 완료하였다.

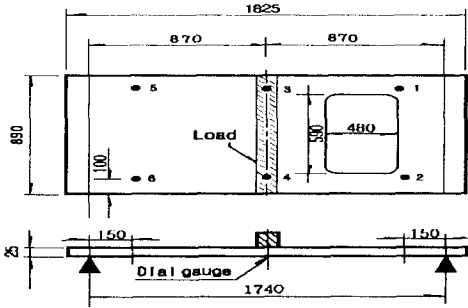


Fig. 8 3-point bending test of end door with Al honeycomb sandwich panel

4.4. 시험품의 실험

(1) 3점 굽힘시험 : 기존의 스테인레스강재 통로문과 시험품인 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재 통로문의 강성을 비교·평가하기 위하여 하중-처짐과 잔류 변형량을 측정하였다.

측정방법은 Fig. 8과 같이 통로문의 1~6위치에 집중하중을 각각 0kg→20kg→40kg→60kg→80kg→100kg의 순으로 하중의 전달속도가 50mm/min 이하가 되도록 하중을 증가시키면서 각 위치의 처짐량을 다이얼 게이지로 측정하였다.

기존 스테인레스강재 통로문의 3점 굽힘시험 결과는 Table 8과 같고, 시험품인 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 적용한 통로문의 시험결과는 Table 9에 나타내었다.

Table 8 Relation of load and deflection for end door with stainless steel

Position Load[kg]	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
20	0.75	0.40	0.86	0.72	0.43
40	1.53	0.84	1.76	1.50	0.82
60	2.31	1.30	2.63	2.24	1.30
80	3.04	1.71	3.50	2.98	1.70
100	3.83	2.16	4.40	3.71	2.15
Residual deflection [mm]	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01

Table 9 Relation of load and deflection for end door with Al honeycomb sandwich panel

Position Load[kg]	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
20	0.48	0.44	0.83	0.80	0.37
40	0.98	0.91	1.75	1.70	0.80
60	1.37	1.28	2.64	2.44	1.06
80	2.00	1.89	3.58	3.48	1.69
100	2.50	2.35	4.52	4.38	2.12
Residual deflection [mm]	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01

(2) 시험품의 피로시험 : 알루미늄 하니컴 통로문의 시험품을 제작한 후 접착부의 균열발생, 박리 및 피로파괴 거동 등을 확인하기 위해 피로시험기에 고정한 후 Fig. 8에 나타난 3, 4위치에 수직 반복하중을 0→100→0kgf 로 작용시키고, 스트로크는 5±0.3 mm, 1회 왕복속도는 1.5초로 시험하였다.

하중반복 횟수 및 잔류변형량의 측정결과는 Table 10과 같고, 잔류변형량은 0.03 mm로 나타났고, 접착부분의 균열발생이나 박리현상은 관찰되지 않았다.

Table 10 Result of fatigue test for end door with Al honeycomb sandwich panel

Cycle Division	Number of loading cycles					Decision of experiment result
	2×10 ⁴	4×10 ⁴	6×10 ⁴	8×10 ⁴	10×10 ⁴	
Max deflection [mm]	4.63	4.64	4.76	4.87	4.92	Good adhesive condition
Residual deformation [mm]	0.03					

4.5. 실험결과 및 고찰

기존의 스테인레스강재를 사용한 내부골조 스폿용접과 접착에 의한 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 적용한 통로문의 강성을 측정하기 위한 3점 굽힘시험에 대한 하중-처짐의 측정결과인 Table 8과 Table 9에 의해 다음과 같이 요약된다. 기존의 스테인레스강재의 내부골조 스폿용접 방식은 유리창 부근에 100kg의 하중이 작용할 때에 최대처짐이 3.83mm 였고, 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재의 접착방식을 채택한 통로문의 측정결과는 2.50mm로 나타났다.

이상의 실험결과로부터 기존의 스테인레스강재 골조방식이 본 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 사용한 시험품의 강성보다 낮게 나타났다. 이는 유리창 부근의 골조배열 방식의 차이에 따른 현상으로 파악된다. 그러나 전반적으로 최대처짐은 스테인레스강재 골조방식이 4.41mm이며, 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 사용한 방식은 4.69mm로 전동차 통로문의 제작 시방서에서 규정하는 최대처짐 5mm 이내를 만족시키므로 이들의 강성은 안전한 것으로 판단된다.

또한 잔류변형량은 모두 0.03mm이내로 전동차 통로문 제작 시방서에 규정하는 0.5mm이하로 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 철도차량 통로문의 경량화를 위한 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재의 적용에 관한 실험적 해석을 시도하였다. 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 사용한 통로문의 시험품을 제작하여 이에 대한 강성 및 접착강도 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 적용한 철도차량 통로문의 시험품을 제작한 후 3점 굽힘 시험에서 하중 100kg이 작용할 때 최대처짐은 4.69mm 였다. 또한 하중을 제거한 후 잔류변형량은 0.03mm로 측정되어 시험기준을 만족하였다. 따라서 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 사용한 철도차량 통로문의 시험품이 스테인레스강재의 통로문 시험기준을 만족하므로 강성 측면에서 더욱 우수하다.

2) 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 적용한 철도차량 통로문의 시험품에 대한 중량은 28 kg으로, 스테인레스강재를 사용한 통로문의 중량 40 kg보다 개당 30%의 경량화 효과가 나타났다.

3) 동일한 강성에서 스테인레스강재를 사용한 내부골조 용접방식의 철도차량 통로문보다 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재의 접착에 의한 통로문은 제작공정이 단순하여 더욱 경제적이다. 그러나 장래 철도차량 구조재로서 내구성에 대한 지속적인 연구의 필요성이 요망된다.

이상과 같이 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재를 사용한 접착구조 방식은 철도차량용 구조재로서의 경량화에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) 仲村達二, “新幹線用アルミニウム合金製構體の發展”, 電氣車の科學, Vol.45, 1992, pp. 14
- 2) 佐藤 孝, “ハニカム構造材料の應用技術(下卷)”, シ-エムシ, 1995 pp.10~13.
- 3) “Composites News Special Railly Supplement”, Ciba, October, 1995.
- 4) George Lubin, “Handbook of Composites”, Van Nostrand Reinhold Company, pp 589.
- 5) “전기동차용 출입문”, 철도용품표준규격, 철도 2244-2380.
- 6) 野口義男, 吉田敏康, “CFP ハニカムサンドイッチハネルの面内剪斷強性”, 日本機械學會誌, 제7권 3호, 1981.
- 7) “Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions”, ASTM Designation : C 297-94.
- 8) “Climbing Drum Peel Test of Adhesives”, ASTM Designation : C 297-94.
- 9) “Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions”, ASTM Designation : C 393-94.
- 10) “新しい構造材ハニカムコアのすべて”, 横浜ゴム資料, pp. 3.