

工學博士學位論文

하니컴 샌드위치 구조를 이용한 디지털 디스플레이

이송용 복합재료 랙의 개발에 관한 연구

**The Study of Development of the Light Weight Composite Rack
for an Assembly Line of Digital Display Panel Manufacturing**

指導教授 金允海

2006 年8月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

崔 炳 根

本論文을 崔炳根의 工學博士 學位論文으로 認定함

主審：工學博士 文慶萬 (印)

委員：工學博士 李成烈 (印)

委員：工學博士 韓中源 (印)

委員：工學博士 裴昌原 (印)

委員：工學博士 金允海 (印)

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

崔 炳 根

목 차

Abstract

Nomenclatures

제 1 장.	서론	1	
	1.1	연구배경	1
	1.2	연구목적	3
제 2 장.	디지털 디스플레이 이송용 랙의 이해	5	
	2.1	이송용 랙의 정의	5
	2.2	하니컴 샌드위치 랙의 개요	9
제 3 장.	복합재료를 이용한 랙의 설계	17	
	3.1	기본 이론	17
	3.1.1	단면계수와 단면 2 차 모멘트	17
	3.1.2	하니컴 샌드위치 패널의 강성	18
	3.1.3	강도 계산식	20
	3.2	패널의 두께 설계	33
	3.3	결과 및 고찰	37

3.4	결론	37
제 4 장.	복합재료를 이용한 랙의 성형공법 연구	38
4.1	오토클레이브 성형공정에 관한 연구	38
4.1.1	성형장비	38
4.1.2	성형재료	41
4.1.3	성형공정	44
4.1.4	랙 제작	53
4.2	프레스 성형공정에 관한 연구	54
4.2.1	성형장비	54
4.2.2	성형재료	55
4.2.3	성형공정	55
4.2.4	랙 제작	59
4.3	오토클레이브와 프레스에 의해 제작된 랙의 비교	60
제 5 장.	복합재료를 이용한 랙의 특성평가	61
5.1	화학적 특성시험	61
5.1.1	섬유함유율	61
5.1.2	시편 준비	62
5.1.3	시험방법	63
5.1.4	시험결과	64
5.2	기계적 특성시험	66

5.2.1	라미네이트 특성시험	67
5.2.2	라미네이트 특성시험 결과	79
5.2.3	하니컴 샌드위치 구조물의 특성시험	86
5.2.4	하니컴 샌드위치 구조물의 특성시험 결과	90
5.2.5	결과 및 고찰	92
5.3	열적 특성시험	93
5.3.1	유리전이온도	93
5.3.2	DSC	94
5.3.3	DMA	95
5.4	디지털 디스플레이 이송용 랙의 특성평가	103
제 6 장.	결론	108
	참고문헌	111

Nomenclatures

t	:	Total thickness of panel (cm)
t_f	:	Thickness of skin plate (cm)
t_c	:	Thickness of honeycomb core (cm)
a, b	:	Support span (cm)
q	:	Distributed load (kg/cm^2)
P	:	Concentrated load (kg/cm^2)
δ	:	Maximum deflection of panel (cm)
M	:	Maximum moment ($kgcm/cm$)
D	:	Stiffness ($kgcm^2/cm$)
σ_f	:	Stress on skin plate ($kgcm^2$)
τ_c	:	Shear stress on honeycomb core ($kgcm^2$)
σ_{cr}	:	Strength of honeycomb core crush (kg/cm^2)
ρ	:	Density
E	:	Young's modulus of skin plate (kg/cm^2)
G_c	:	Shear elastic coefficient of core (kg/cm^2)
λ	:	$1-(\text{Poisson's ratio})^2$
a_1, a_2, β, γ	:	a_1, a_2, β, γ : Coefficient

Abstract

A composite material is a macroscopic combination of two or more distinct materials, having been designed with mechanically and chemically better function and characteristic than its original individual material.

Fiber reinforced composite materials has various advantages in terms of big specific strength and modulus, environmental isolation, aromatic property, easy fabrication and integration.

Various application of composite materials not only for space shuttle and aerospace but also boat building and common industries has been increased.

There are many fabrication such as fuselage of aircraft and helicopter blade at an autoclave. Car bumpers were made by RTM(Resin Transfer Molding).

According to filament winding process having high strength and modulus carbon fiber with epoxy resin, many pressure vessel have been fabricated.

Aerospace market has sharply increased lately so airframe part makers started to make big carbon composite products. Shipbuilding market are using composite materials hulls and decks. Sporting goods makers are widening its application as well.

Regardless of these various usage of composite materials, the application of the

materials for industry are still limited and required better fabrication technology.

In order to develop composite fabrication technology being applied to real product, continual academic and scientific study is required.

Industrial machinery is bigger according to increasing needs of electric products.

The machinery became efficiency by high speed, productivity, light-weight.

Most of LCD(Liquid Crystal Display) and PDP(Plasma Display Panel) production lines are using aluminum pallets. In case of the aluminum pallets, even if its evaluation technology has been accumulated so far, there is rare evaluation of technology to use composite products on the LCD/PDP production line.

A composite pallet that fiber reinforced epoxy matrix comparing with current metallic ones can be reduced significant weight saving and give us economical advantages.

Commonly, composite materials were known the ability of the significant vibration damping such that it help us minimization of error due to vibration on production line. It can reduce twisted vibration and help us productivity.

Current aluminum pallet having heavy weight makes high vibration and needs more bearings. The composite pallets for the digital display production line can be fabricated either autoclave process or better productivity one, which become light-

weight, easy maintenance and economic point. Between composite materials and metals, there has been developed better adhesive technology such that not only a complete composite pallet can be produced but other additional composite parts can be fabricated in terms of co-curing process. It is surely required to design and to evaluate of the products.

Therefore, in order to make advanced composite pallet on digital display production line, this study will analyze stress of the composite pallet according to the theory of composite materials stress analysis and design the advanced composite pallet.

At the result of above, I want to make some advanced composite pallets and to evaluate various characteristics.

Through this study, I am trying to develop a composite pallet on the display production line which has many advantages just like more weight saving, better mechanical property than current aluminum one.

Moreover, it can make the base of new application for other industry.

This study is trying to show design of the thickness of skinning material and core through stress analysis of the pallet on the display production line.

Some specimen by autoclave process will be prepared.

And it can make possible to evaluate fiber areal weight and mechanical/chemical/thermal properties, eventually I verify the possibility of the use of composite pallet and will develop a high performance advanced composite pallet.

제 1 장 서론

1. 1 연구배경

최근 디지털 및 전자 기기들이 아주 빠른 속도로 발전하고 있다. 하루에도 몇 개씩 신 개발품이 나온다는 디지털 기기 분야에서는 다양한 변화의 흐름 속에서 오랫동안 지속되어온 목표가 바로 경박단소라는 추세이다. 이러한 맥락에서 평판 디스플레이(FPD: Flat Panel Display)의 발전은 필연적이라 할 수 있다. 디지털 디스플레이의 예로는 LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel)가 대표적이다.

전 세계 LCD 시장은 2006년 매출 620억 달러에서 2008년에는 1,240억 달러로 2배 이상 성장할 것으로 전망된다. 그 이유는 현재 세계인들이 사용하는 디스플레이 장비의 상당수가 LCD로 교체될 것으로 예측 할 수 있기 때문이다. 세계 유수업체들이 LCD 시장에 거액을 투자하는 이유는 이런 높은 미래가치 때문이라고 볼 수 있다.

세계시장 수요는 점점 늘어나고 있고 대부분의 기업들은 LCD 제품의 비중을 20~30% 높였다. 현재 국내 L사와 S사는 전세계 LCD 패널의 40%를 생산하고 있다. 현재 L사는 경기도 파주시에 100억 달러를 투

입해 7세대 생산라인을 설립하고 있으며, S사는 충남 아산시에 120억 달러를 투입해 7세대 공장을 짓고 있다. 한국 업체들을 따라잡기 위해 노력하고 있는 대만 업체들은 내년에 LCD 공장건립에 60억 달러를 투자하고, 일본 S전자는 내년 초 10억 달러를 투입해 LCD 생산라인을 확충할 방침이다. 또한, 미국의 I사가 HDTV용 LCOS(Liquid Crystal on Silicon)생산을 통해 LCD 시장에 진입한다.

이와 같이 LCD, PDP 시장이 성장하는 상황에서 무결점 제품의 생산은 국제 경쟁력 우위를 차지할 수 있게 한다. 이를 위해서 생산공정에 사용되는 이송용 랙(Rack)의 연구 및 개발은 필수적이다.

현재 사용하는 랙은 목재 및 알루미늄이 사용되고 있다. 그런데, LCD, PDP가 대형화 되면서 랙의 무게가 증가하고 조립공정에서 제품이 점차 조립되어짐에 따라 점차 무거운 무게를 지지하게 된다. 이로 인하여 처짐 등의 변형이 발생하고 이는 제품 생산에 지장을 초래하기 때문에 무게, 강도, 내구성이 우수한 제품의 필요성이 대두되었다.

한편, 복합재료는 두종류 이상의 소재를 조합하여 물리적, 화학적으로 원래의 원소와 상이한 상을 형성하여 원래의 소재보다 우수한 기능 또는 특성을 발휘하도록 설계된 재료이다. 특히, 이중에서 섬유강화 복합재료는 무게비 강도 및 강성도가 크며 또한 방향성이 있으며, 성형성이 우

수하여 제품의 일체화가 가능한 것이 특징이다.^{1~6)} 따라서 목재, 알루미늄 랙의 무게에 의한 처짐, 자중의 증가 등의 문제를 해소하기 위하여 복합재료를 이용한 랙에 대한 연구개발의 필요성이 대두되었다. 그러나 목재나 알루미늄 랙에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔으나 복합재료를 이용한 랙에 관한 연구는 전무한 실정이다. 그래서 본 논문을 연구하게 되었다.

1.2 연구목적

기존 디지털 디스플레이 패널의 이송용 랙은 일반적으로 알루미늄이나 목재를 가공하여 제작하였다. 이 랙은 그 상부에 디지털 디스플레이 패널을 고정하기 위한 치구물이 설치되며 거기에 패널이 얹혀져서 생산 공정라인을 따라 움직이면서 부품들이 조립되기 때문에 점차 많은 무게를 지지하게 된다. 따라서, 가해지는 하중을 충분히 견디기 위하여 랙의 두께와 면적이 증가하여야 하기 때문에, 자중에 의해서 랙의 무게가 무거워질 뿐만 아니라 베어링의 추가설치가 필요하며 랙의 처짐으로 인하여 자동화 공정에 의해 생산되는 LCD/PDP 제품의 불량 원인이 되기도 한다.

최근에는 디지털 디스플레이 기기가 대형화 되면서 점차 그 무게는 더욱 증가하는 현실이다. 이는 현재 7세대까지 이어진 디지털 디스플레이 기술의 발전에 따라 지속적으로 발생할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 디지털 디스플레이 생산라인에 사용되는 복합재료랙을 제작하기 위하여 먼저 복합재료의 응력해석이론에 의해 적층 복합재료의 응력해석을 통해 복합재료 락을 최적설계하고 최적의 생산공정을 설계하여 이 설계 결과에 따라 복합재료 락을 제작하여 여러 가지 특성들을 평가하여 산업에 바로 적용할 수 있도록 하기 위하여 재료뿐만 아니라 성형공정에 이르기 까지 제조비용 및 생산성을 감안하여 설계하는 것이 본 연구의 목적이다.

제 2 장 디지털 디스플레이 이송용 랙의 개요

2.1 이송용 랙의 정의

최근 산업기술이 노동집약적 산업에서 기술집약적 산업으로 변화되어 가면서 생산에 소요되는 유지 관리 비용과 자원 등의 원가가 높아져서 경쟁력을 얻기가 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 많은 기업들이 공정의 자동화, 원가 최적화 등의 공정개선을 이루려고 노력하고 있다. 특히, 전자제품의 생산은 자동화에 의해 이루어지며, 최적화된 공정상의 경로를 따라 이동하면서 제품이 완성에 이르게 된다. 자동화된 생산라인에서 각각의 공정단계로 제품을 싣고 이동하기 위한 도구로 이송용 랙이 사용되고 있다. 디지털 디스플레이 이송용 랙을 Fig. 1과 Fig. 2에서 보여주고 있다.



Fig. 1 Wooden rack for digital display



Fig. 2 Aluminum rack for digital display



Fig. 3 Using of aluminum lack

2.2 하니컴 샌드위치 랙의 개요

디지털 디스플레이의 대형화에 따라 이송용 랙 또한 대형으로 되어야 하고 무게가 증가되는 것이 당연한 일이다. 이러한 시점에서 이송용 랙을 경량화 하면 생산라인의 효율을 극대화 할 수 있다. 효율을 극대화하는 요인으로는 다음과 같은 요인을 들 수 있다. 먼저 각 요소에 작용하는 힘의 감소로 인하여 유지 및 보수 비용을 절감할 수 있다. 그리고, 중량 감소분에 대한 에너지를 절감할 수 있으며 동일한 에너지로 라인속도의 향상시킬 수 있다.

따라서, 경량화에 우수한 특성을 보이는 하니컴 샌드위치 구조를 이용하였다.

샌드위치 구조란, 적층형 Hybrid 구조의 일종이며, 문자 그대로 표면부의 2층과 중간층으로 구성되며, 이들 3층이 일체화됨에 따라 뛰어난 기능이 발휘되는 구조이다. 샌드위치 구조의 복합성형체는 일반적으로 두껍고 경량재인 코어재료(Core material)의 상하에 얇고 고강도인 면재(Skin material)를 접착시켜 구조상의 강도 효율을 높인 것이다.

면재는 이들 면에 대한 평행방향으로 작용하는 전단응력과 수직방향으로 작용하는 응력에 변형이 되지 않도록 강도를 가져야 한다. 면재로

사용되는 재료는 알루미늄 합금, FRP 라미네이트(Laminate), 티타늄 합금, 철강 및 베니어판 등이 있다.

코어재료는 구조적으로 두 가지의 기능을 구비하여야 한다. 첫째 양 표면 재질을 보강하여 표면에 수직인 방향으로의 변형에 대한 저항성을 증가시킨다. 둘째로는 표면에 수직인 방향에 따라 작용하는 힘에 견딜 수 있는 전단강도를 구비하여야 한다.

코어재료로는 폴리머, 인조고무, 무기질 시멘트, 발사(Balsa wood) 등이 있다. 중간층의 재료로 사용되는 것 중 다른 하나는 하니컴 구조인데, 이것은 얇은 호일(Foil)형 재료를 육각형 셀로 가공하여 셀의 축 방향이 면재에 수직하게 위치시킨 구조이다. 이와 같은 하니컴 구조의 샌드위치 패널은 여러 용도에 사용되고 있는데, 지붕, 바닥, 빌딩의 벽체 등에 사용되고 있으며, 비행기에서는 날개, 동체 및 비행기 꼬리 표면에 사용되고 있다.

Fig. 4는 전형적인 샌드위치 구조물에 대한 개략도이며, 면재(Aluminum sheet, glass fiber, carbon fiber, Kevlar etc.)와 코어재료(aluminum honeycomb, nomex honeycomb, etc.)를 접착제(Adhesive)를 사용하여 결합시킨 것이다.⁷⁾

항공산업에서 널리 응용되고 있는 하니컴 코어와 구조적으로 결합시킨

샌드위치 구조는 무게감소, 강도증가 및 전반적인 비용감소 뿐만 아니라 소음감소, 열전달의 극대/극소화의 효과를 거둬으로써 계속 사용 발전되고 있다.⁸⁾

Fig. 5를 참조하여 각부의 정의된 용어를 살펴보면 “L”은 리본방향(Ribbon direction)이라하고, “W”는 길이방향, “T”는 두께, 노드(Node)는 셀(Cell)사이의 접합된 면, 셀크기(Cell size)는 길이방향의 두 개의 평행한 셀벽 사이의 거리를 뜻한다.⁹⁾

일반적으로 하니킴은 익스펜션 프로세스에 의해서 만들어지는데 고밀도 제품의 경우 corrugated process가 가장 일반적인 방법이다.¹⁰⁾

먼저 Fig. 6은 일반적 방법인 확장에 의한 방법을 보여주고 있는데, 첫째로 노드라인(Node line)에 접착제(Adhesive)가 부착된 재료(Web material)를 적당한 크기로 자른 후 이것을 적층하고 접착부위(Adhesive line)를 경화시켜 확장 시키기 전의 블록(Block)형태로 만든다. 이 블록을 원하는 두께로 잘라 슬라이스(Slice) 형태로 만들고 확장시켜 원하는 셀 형태로 만든다.

Fig. 7에 고밀도 제품을 만드는데 사용되는 corrugated process를 보여주고 있다. Fig. 7에 도시된 바와 같이 공정의 특징은 먼저 재료를 corrugating roll로 미리 성형하고 노드 부분에 접착제를 바르고 적층하

여 블록 형태로 만든 다음 원하는 두께만큼 잘라 사용한다.

하니컴 샌드위치 구조물의 가장 큰 장점은 재료의 자중증가가 거의 없는 상태에서 단지 두께의 변화만으로도 우수한 기계적 특성을 갖게 되는 것을 들 수 있다. Fig.8을 보면 먼저 기준 두께일 때 상대강성을 100, 상대강도 100, 그리고 상대중량을 100으로 보고 두께를 두 배로 했을 때 강성의 증가는 7배이며, 처음과 비교하여 두께를 4배로 변화시키면 강성의 증가는 37배가 증가되어 최종 결과치가 3700에 이르게 된다.¹¹⁾

이렇게 두께증가에 따른 무게증가는 강성이나 강도증가에 비교하면 거의 미미한 수준이라 볼 수 있다. 두께를 두 배로 증가시켜도 무게는 103으로 겨우 3% 증가하며 4배로 증가시켰을 경우에도 106으로 겨우 6%가 증가하는 정도이다.

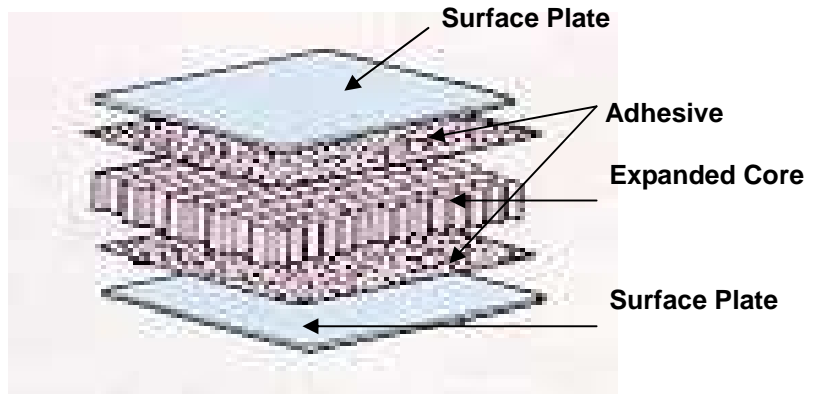
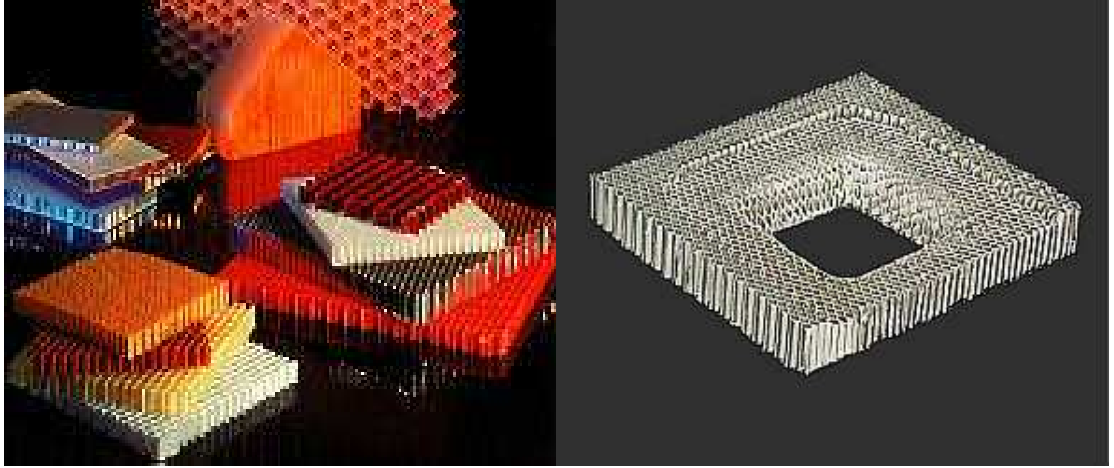
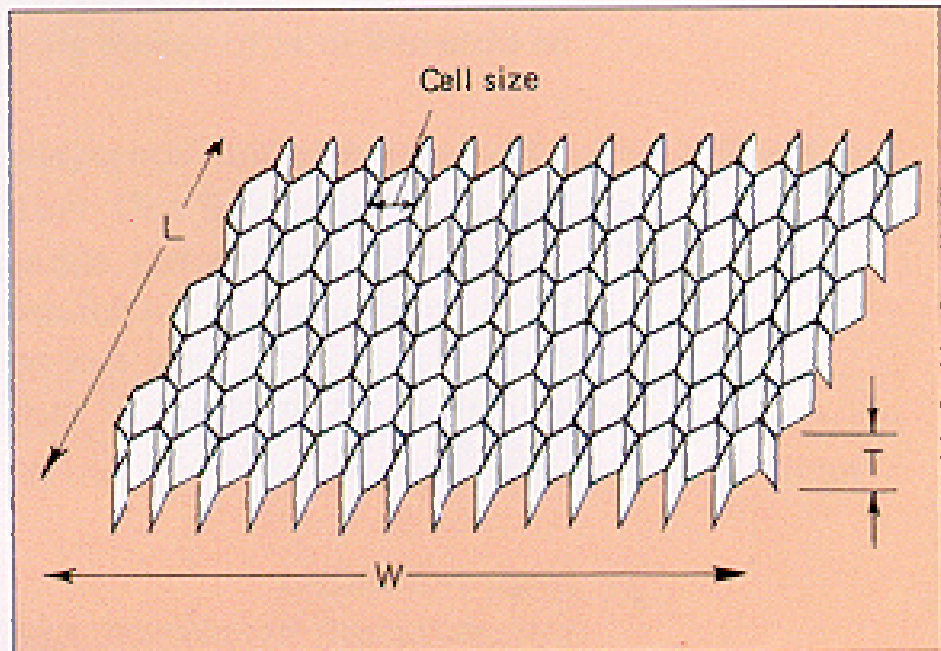


Fig. 4 Honeycomb sandwich structure



L = Ribbon direction, or width

W = Long direction, or direction perpendicular to the ribbon

T = Honeycomb thickness, or cell depth

Fig. 5 The technical terms of honeycomb

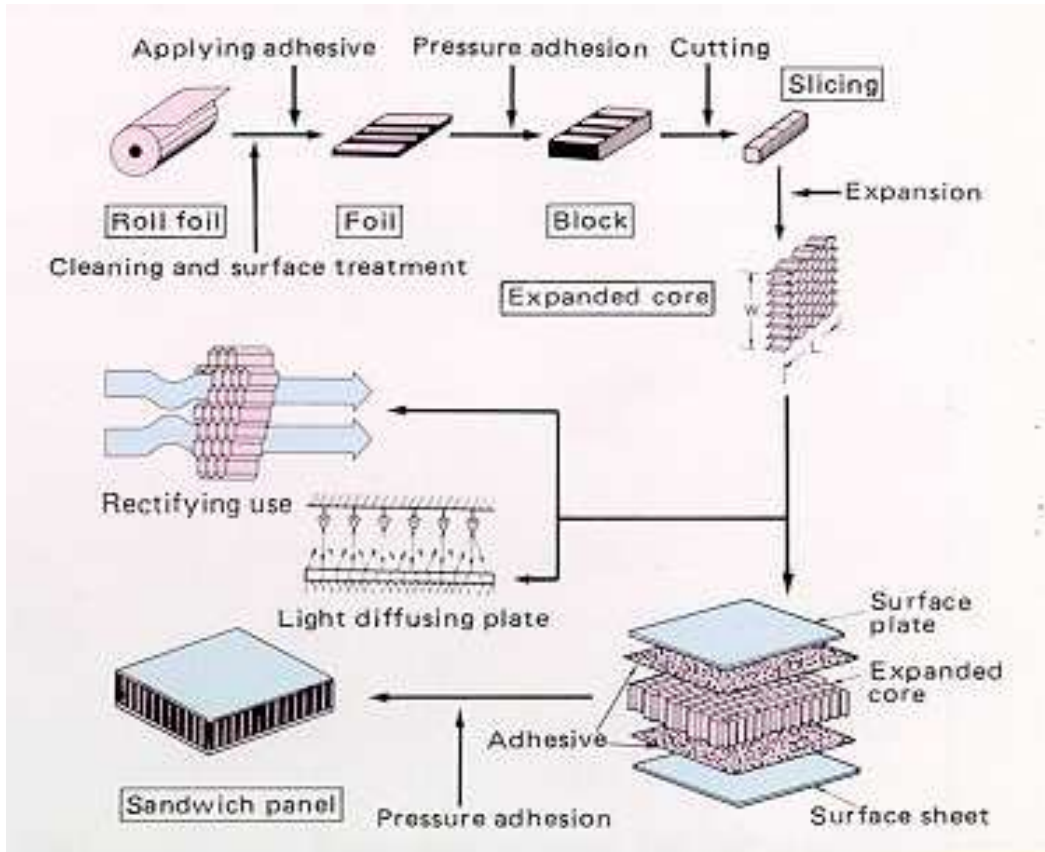


Fig. 6 Expansion method

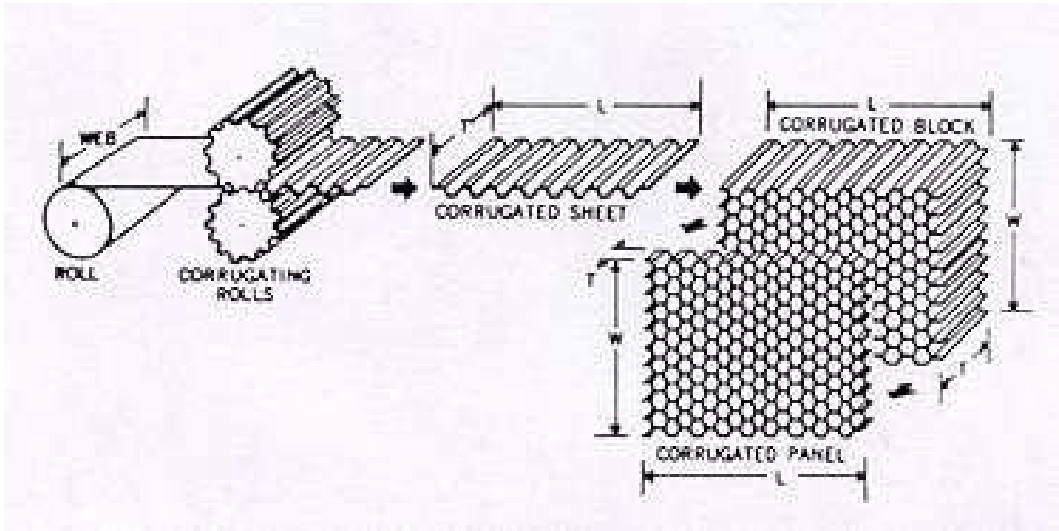


Fig. 7 Corrugate process

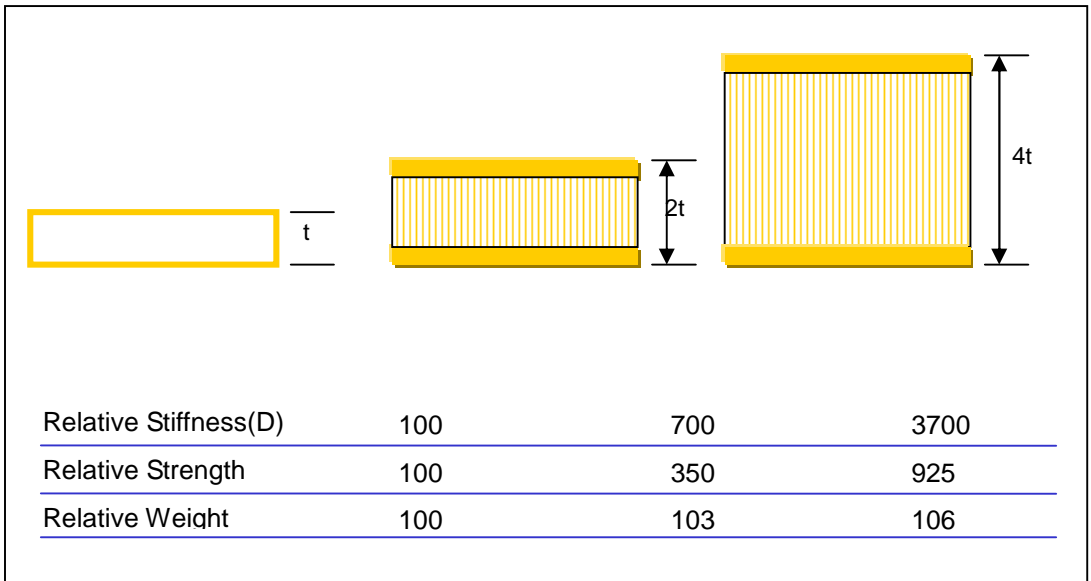


Fig. 8 Property changes of honeycomb sandwich structure¹²⁾

제 3 장. 복합재료를 이용한 이송용 랙의 설계

3.1 기본이론

3.1.1 단면계수와 단면 2차 모멘트

단면계수 및 단면 2차 모멘트는 강도나 처짐을 계산하는 식으로 사용되어 다른 단면을 가지는 빔의 강성을 비교하기 위해 사용하고 있다.

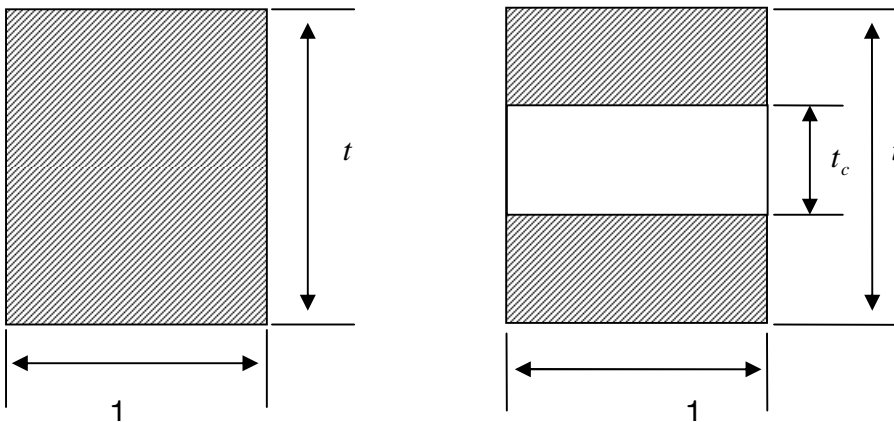


Fig. 9 Section modulus and section second moment

Fig. 6에서 단면적당 단면계수 Z 및 단면 2차 모멘트 I 는 보통 다음 식으로 표시된다.¹³⁾ 식 (3.1)과 식 (3.2)는 라미네이트(Laminate)의 단면계수 및 단면 2차 모멘트이며, 식 (3.3)과 식 (3.4)는 샌드위치 패널의 단면계수 및 단면 2차 모멘트를 나타낸다.

$$Z = \frac{t^2}{6} \quad (3.1)$$

$$I = \frac{t^3}{12} \quad (3.2)$$

$$Z = \frac{t^2 - t_c^2}{6t} \quad (3.3)$$

$$I = \frac{t^3 - t_c^3}{12} \quad (3.4)$$

3.1.2 하니컴 샌드위치 패널의 강성

강성 D 는 보통 $D = EI$ 로써 구해지는 것이 가능하지만, 하니컴 샌드위치 패널은 면재의 두께 t_f 가 충분히 얇기 때문에 식(3.5)로써 구해진다. 그러나, 표면판 두께 및 재질이 다른 경우 식(3.5)를 이용하는 것이 불가능하기 때문에 이러한 경우 단위 폭의 굴곡강성 D 는 (3.6)식과 같이 나타낸다. ¹³⁾(Fig. 7 참조)

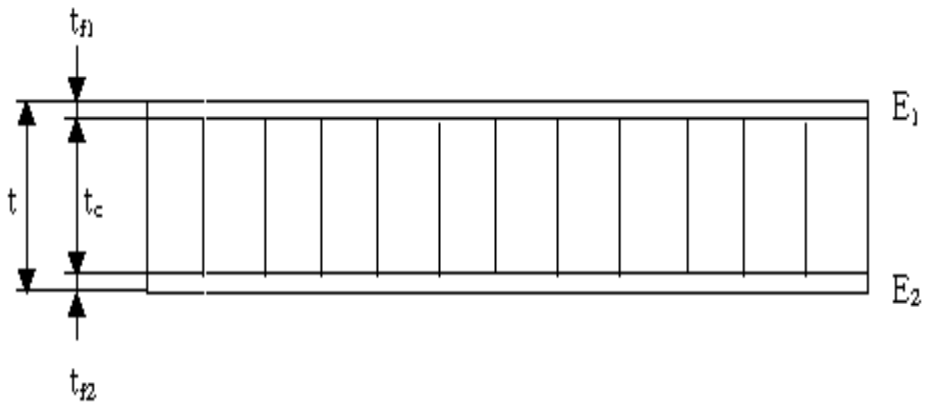


Fig. 10 Stiffness of honeycomb sandwich panel

$$D = \frac{Et(t + t_c)^2}{8\lambda} \quad (3.5)$$

$$D = \frac{(E_1 t_{f1})(E_2 t_{f2})(t + t_c)^2}{4\lambda(E_1 t_{f1} + E_2 t_{f2})} \quad (3.6)$$

식 (3.5)와 같이 강성 D는 코어 두께의 평행방향에 비례해서 증가하는

것을 알 수 있다. 그래도 코어의 두께가 증가하는 것에 의한 샌드위치 전체로써의 중량 증가는 무시 가능한 정도이기 때문에 샌드위치 패널의 처짐을 작게 하기 위해서는 코어 두께를 크게 해야 한다.

3.1.3 하니컴 샌드위치 강도 계산식

샌드위치 패널의 설계 기준은 표면판 및 코어 응력과 패널의 처짐이다. 패널 두께(표면판 두께 및 코어 두께)를 크게 함으로써 표면판 응력을 적게 하는 것이 가능하다면 동시에 강성 D 의 증가에 의해 처짐도 감소한다. 또 지지 점에 있어서 하중방향의 전단력의 분산, 하니컴 코어 및 접착제의 전단 강도도 설계 고려해야 할 요소들이다.¹³⁾

1) 2점 지지, 분포하중

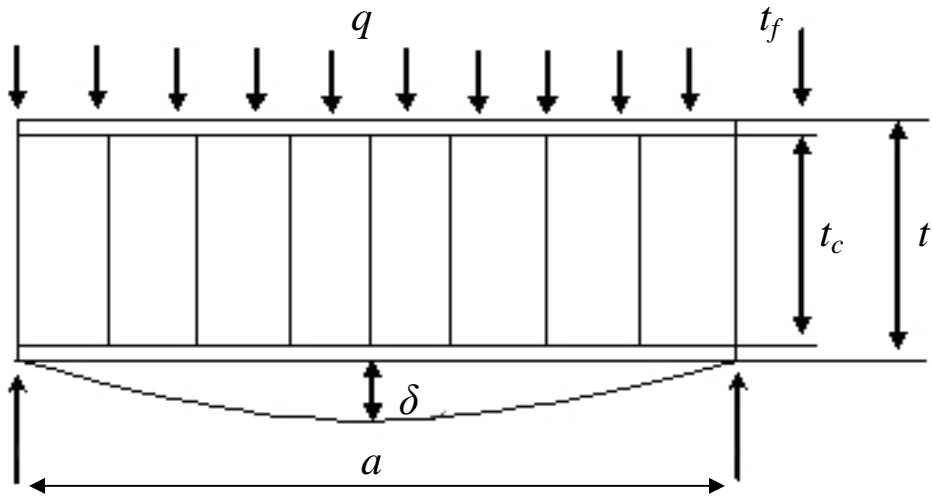


Fig. 11 Distributed load of two point support

Fig. 9는 양 끝점이 지지되고 분포하중(q)이 작용하는 하니컴 구조물에서의 최대 굽힘모멘트(M)와 표면판(Face sheet)의 최대 굽힘응력(σ_f), 코어에서의 최대 전단응력(τ_c)과 최대 처짐(δ)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{qa^2}{8} \quad (3.7)$$

$$\sigma_f = \frac{M}{t_c t_f} \quad (3.8)$$

$$\tau_c = \frac{qa}{t+t_c} \quad (3.9)$$

$$\delta = \frac{5qa^4}{384D} + \frac{qa^2}{8t_c G_c} \quad (3.10)$$

2) 2점지지, 집중하중

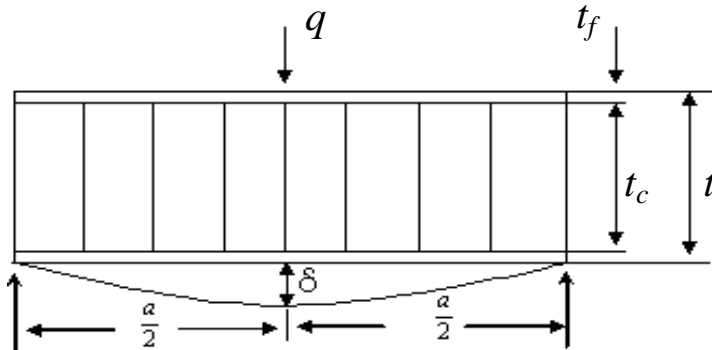


Fig. 12 Concentrated load of two point support

Fig. 9는 양 끝점이 지지된 상태에서 하니컴 중앙에 집중하중을 받는 경우를 도시한 그림이다. 이 경우 중앙지점에서의 모멘트(M)는 최대값을 갖게 되는데 그것에 해당되는 식은 아래 (3.11)식과 같다. (a = 하니컴의 전체길이)

$$M = \frac{Pa}{4} \quad (3.11)$$

식(3.12)는 표면판에서의 굽힘응력 중 최대값에 해당하는 식이다. (t_c = 코어의 두께, t = 하니컴의 두께)

표면판의 최대응력(σ_f)은 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\sigma_f = \frac{M}{t_c t_f} \quad (3.12)$$

하니컴의 중간에 위치하는 코어에서 최대전단응력(τ_c)은 식(3.13)과 같이 구해진다.

$$\tau_c = \frac{P}{t + t_c} \quad (3.13)$$

식(3.14)는 중앙점에서의 최대처짐(δ)을 나타낸 식이다.

(P = 집중하중, D = 강성, G_c = 코어의 전단계수)

$$\delta = \frac{5qa^4}{48D} + \frac{Pa}{8t_c G_c} \quad (3.14)$$

이 타입의 하중을 받는 패널의 경우도 앞에서 서술한 분포하중의 경우와 같지만, 선 혹은 점상의 집중하중의 근원에서는 하중방향의 전단응력은 매우 크고, 이들 하중에 대해 충분한 강도를 가지게 하기 위해서는 다음과 같은 고려가 필요하다.

- ① 하니컴 코어의 밀도를 높일 것
- ② 하중 측 표면 판을 두껍게 하여 하중의 분산을 행할 것
- ③ 하중과 패널의 접촉면적을 크게 할 것
- ④ 하중이 걸리는 부분에 인서트(Insert)를 삽입

3) 캔틸레버 빔(Cantilever beam)의 분포하중

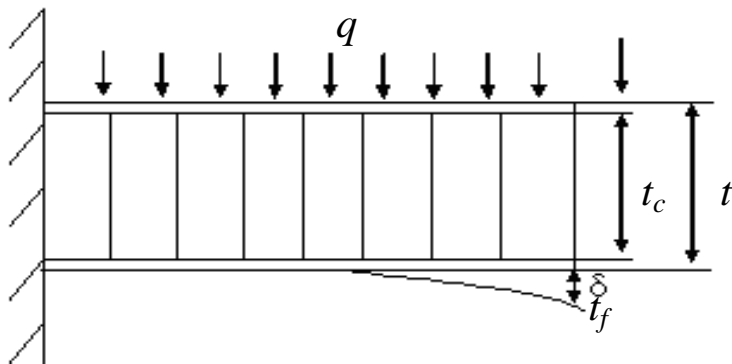


Fig. 13 Distributed load of cantilever beam

Fig. 10은 하니컴 한쪽은 완전히 고정되어 있고 다른 한쪽은 완전히 자유로운 캔틸레버보 형식의 하니컴 구조물이 전 표면판에 걸쳐서 동일한 분포하중이 작용하는 것을 도시한 것이다. 여기서 사용되는 최대모멘트(M), 표면판에서의 최대응력(σ_f), 코어에 작용하는 전단응력의 최대값 τ_c 과 최대 처짐(δ)에 관한 식들은 아래와 같다.

$$M = \frac{qa^2}{2} \quad (3.15)$$

$$\sigma_f = \frac{M}{t_c t_f} \quad (3.16)$$

$$\tau_c = \frac{2qa}{t + t_c} \quad (3.17)$$

$$\delta = \frac{qa^4}{8D} + \frac{qa^2}{2t_c G_c} \quad (3.18)$$

이런 한쪽이 고정된 타입의 지지방법에 대해서 충분한 강도를 가지게 하기 위해서는 고정 지지점과의 결합이 중요한 설계요소로 된다. 일반적으로 이 샌드위치 패널에는 고정 단에 매우 높은 하중이 가해진다.

4) 캔틸레버 빔 집중하중

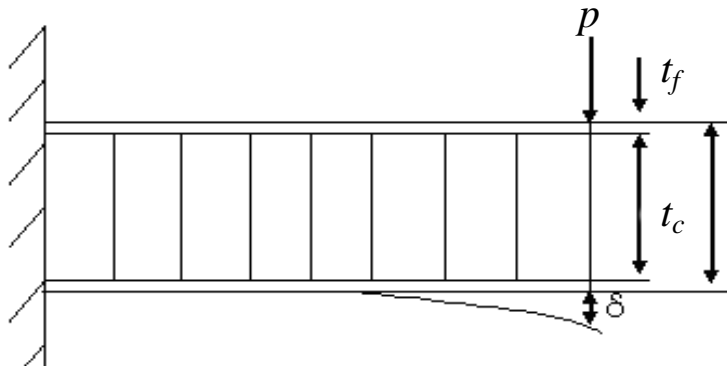


Fig. 14 Concentrated load of cantilever beam

Fig. 11은 Fig. 10과 비교되는 그림으로서 이 캔틸레버빔형의 하니킴은 분포하중이 아닌 집중하중이 작용하는 경우이다. 이 경우에서의 최대 모멘트(M), 표면판의 최대응력(σ_f), 코어의 최대 전단응력(τ_c), 최대 처짐(δ)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M = Pa \tag{3.19}$$

$$\sigma_f = \frac{M}{t_c t_f} \tag{3.20}$$

$$\tau_c = \frac{2P}{t+t_c} \quad (3.21)$$

$$\delta = \frac{Pa^3}{3D} + \frac{Pa}{t_c G_c} \quad (3.22)$$

5) 4점지지, 분포하중

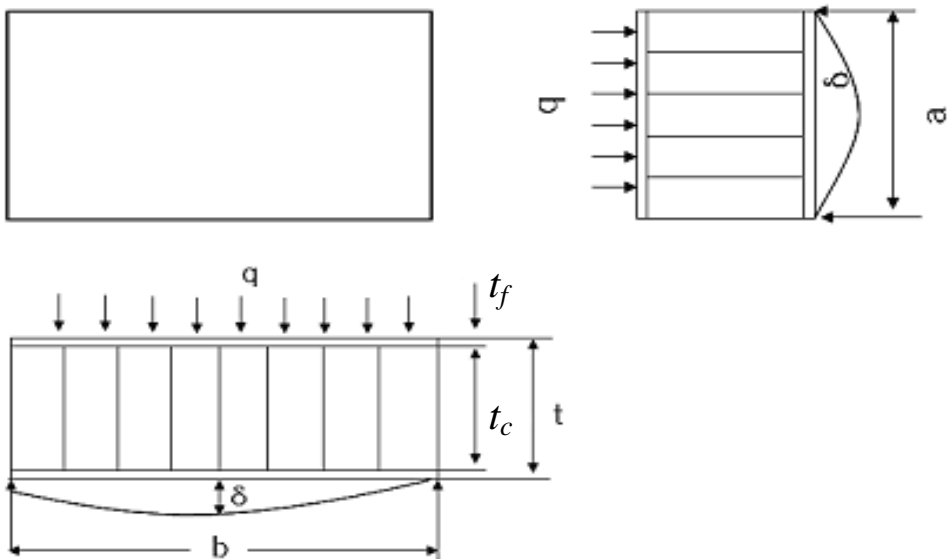


Fig. 15 Distributed load of four point support

Fig. 12는 단순히 하니컴의 길이방향의 1차원적 도식이 아니라 길이방

향과 세로방향까지 고려해서 전 표면판에 걸쳐서 동일한 분포하중이 작용하는 경우에 있어서의 도식이다. 이런 경우에 적용되는 모멘트(M), 표면판의 최대응력(σ_f), 코어의 최대 전단응력(τ_c), 최대 처짐(δ)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$a \leq b$ $\alpha_1, \alpha_2, \beta, \gamma$ 계수 (Fig. 13, Fig. 14 참조)

$$M = \beta qa^2 \quad (3.23)$$

$$\sigma_f = \frac{M}{t_c t_f} \quad (3.24)$$

$$\tau_c = \frac{2rqa}{t + t_c} \quad (3.25)$$

$$\delta = a_1 \frac{qa^4}{D} + a_1 a_2 \frac{qa^2 \pi^2}{t_c G_c} \quad (3.26)$$

일반적으로 패널은 그 사용목적에 따라 설계법은 달라진다. 예를 들면, 벽을 설계할 경우, 처짐은 설계의 기준으로 되지만, 트러스(Truss)의 판 등의 설계의 기준은 되지 않는다. 이 경우는 이동하중이나 집중하중

에 견딜 수 있는 설계를 하지 않으면 안 된다. 설계상의 문제점은 각각의 사용법을 잘 고려해서 설계해야 한다.

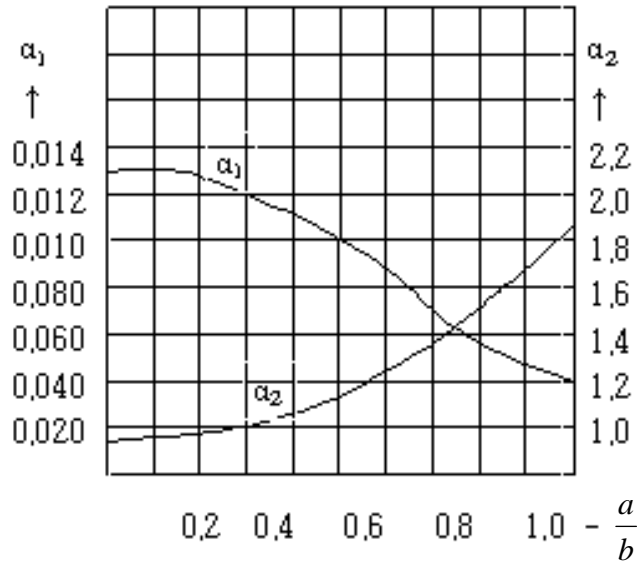


Fig. 16 α_1, α_2 coefficient

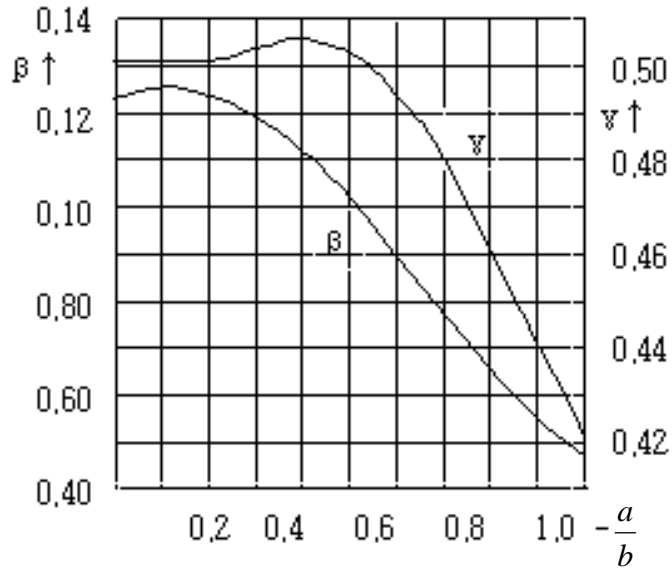


Fig. 17 β, γ coefficient

6) 주상하중

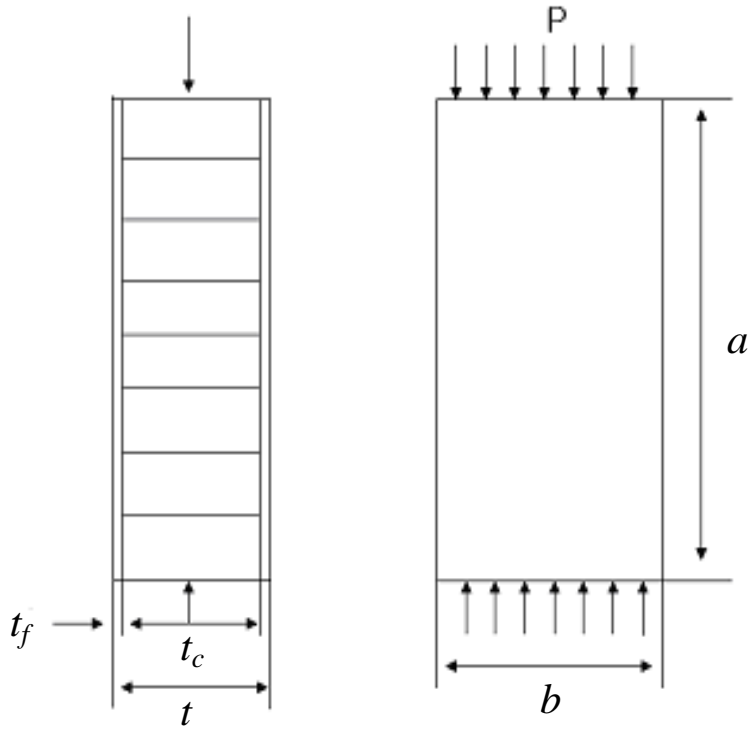


Fig. 18 Load of vertical direction

주상하중 조건에서의 좌굴하중(P)과 표면판 응력(σ_f)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{\pi^2 D}{a^2 + \frac{\pi^2 D}{t_c G_c}} \quad (3.27)$$

$$\sigma_f = \frac{P}{2t_f} \quad (3.28)$$

이 강도계산식은 하중이 양 표면판에 평등하게 가해지는 경우에 있어서의 것이지만, 실제의 경우 과연 평등하게 가해질까 어떤가 하는 것은 의문이다. 이것을 막기 위해서는 패널에 연재를 삽입해서 하중이 양 표면에 가해지도록 해야 한다.

7) 최소중량설계

굴곡강성이 일정하다고 할 때, 최소 중량으로 되려면 t , t_c , t_f 의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.¹³⁾

$$t = a \sqrt{\frac{8\lambda D}{E} \frac{\rho_g}{\rho_c}} \quad (3.29)$$

$$\frac{t_c}{t} = \frac{1}{4} \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (3.30)$$

따라서 식 (3.29)의 조건을 만족하는 D 가 구해지면, t 와 ρ_c 의 관계를 알 수 있기 때문에 적당한 밀도의 하니컴을 선택하고, 단면이 결정된

다.

다음에 모멘트 M 을 주어서, 즉 표면관 응력이 일정하게 가해지는 조건 하에서 최소 중량으로 하고 싶을 때는 아래 식을 만족할 필요가 있다.

$$t = a \sqrt{\frac{2M \rho_c}{\rho_f \rho_f}} \quad (3.31)$$

$$\frac{t_f}{t} = \frac{1 \rho_c}{2 \rho_f} \quad (3.32)$$

또한 전단응력 τ 를 준 경우는 코어의 전단응력의 식보다 임의적으로 코어 두께가 결정될 것이다.

3.2 하니컴 샌드위치 패널의 두께 설계

하니컴 샌드위치 패널의 두께 설계에 있어, 강성은 다음과 같은 식으로 계산된다.²⁾

$$D = \frac{Et_f(t+t_c)^2}{8\lambda} \quad (3.33)$$

- D : Stiffness (kgcm²/cm)
 E : Young's modulus of skin (kg/cm²)
 G_c : Shear elastic modulus of core (kg/cm²)
 λ : 1-(Poisson's ratio)²
 t : Thickness of sandwich structure (cm)
 t_c : Thickness of core material (cm)
 t_f : Thickness of skin material (cm)

4점 지지 분포하중 조건일 때 샌드위치 패널의 최대처짐(δ)은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\delta = \alpha_1 \frac{qa^4}{D} + \alpha_1 \alpha_2 \frac{qa^2 \pi^2}{t_c G_c} \quad (3.34)$$

Fig. 13과 Fig. 14의 그래프에서

$\frac{a}{b} = 0.58$ 일 때, $\alpha_1 = 0.0089$, $\alpha_2 = 0.004$ 이므로 50kg이 4점지
 지에 분포하중이 작용한다고 가정할 경우

$$P = 50\text{kg} \times 9.8\text{N} = 496\text{N}$$

$$q = \frac{P}{a \times b} \quad (3.35)$$

분포하중을 구하면 다음과 같이 9.38N/mm^2 이 된다.

$$q = \frac{496\text{N}}{950\text{mm} \times 550\text{mm}} = 0.000938\text{N/mm}^2$$

스킨 두께를 2mm, 2.5mm로 성형하였을 때의 강성은 식(3.33)으로부터
 다음과 같이 구해진다.

스킨 두께가 2mm 일 때 강성(D)는 식(3.33)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$D = \frac{24800\text{N/mm}^2 \times 2\text{mm} \times (15\text{mm} + 11\text{mm})^2}{8 \times 0.99} = 5462626.3\text{Nmm}$$

스킨 두께가 2.5mm 일 때 강성(D)는 식(3.33)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$D = \frac{24800 \text{ N/mm}^2 \times 2.5 \text{ mm} \times (16 \text{ mm} + 11 \text{ mm})^2}{8 \times 0.99} = 7363636.3 \text{ Nmm}$$

스킨 두께가 2mm일 때 최대처짐(δ)는 식(3.34)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \delta &= 0.0089 \times \frac{0.000938 \text{ N/mm}^2 \times 950^4}{5462626.3 \text{ Nmm}} + 0.0089 \times 0.004 \\ &\times \frac{0.000938 \text{ N/mm}^2 \times 950^2 \times \pi^2}{12 \text{ mm} \times 48.3 \text{ N/mm}^2} = 1.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

스킨 두께가 2.5mm일 때 최대처짐(δ)는 식(3.34)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \delta &= 0.0089 \times \frac{0.000938 \text{ N/mm}^2 \times 950^4}{736363.3 \text{ Nmm}} + 0.0089 \times 0.004 \\ &\times \frac{0.000938 \text{ N/mm}^2 \times 950^2 \times \pi^2}{12.5 \text{ mm} \times 48.3 \text{ N/mm}^2} = 0.9 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.3 결과 및 고찰

LCD 모니터의 무게에 의해 이송용 랙에 50kg의 하중이 가해질 때 스킨두께 2mm와 2.5mm일 때의 하니컴 샌드위치 구조물의 강성을 구하고, 그 값을 이용하여 최대처짐을 계산하였다. 그 결과 스킨 두께 2mm 일 경우 처짐이 1.2m, 스킨 두께 2.5mm일 경우 최대 처짐이 0.9mm로 현재 사용중인 목재나 알루미늄 랙의 최대처짐 3~4mm에 비해 최대 처짐이 훨씬 적은 것을 알 수 있었다.

3.4 결론

앞에서 계산한 바에 의하면 50kg의 LCD 패널이 올라간다고 보았을 때 2.5mm의 스킨두께와 20mm의 코어를 적용하여 25mm 두께에서 최대 처짐이 0.9 mm로 적합한 설계임을 알 수 있었다.

제 4 장. 복합재료를 이용한 랙의 성형공법 연구

4.1 오토클레이브(Autoclave) 성형 공정에 관한 연구

4.1.1 성형장비

본 연구에서 복합재료 랙의 제작에 사용한 오토클레이브 성형기는 컴퓨터 프로그램에 의하여 성형 조건을 입력시킨 다음 진공 압력, 외부 압력, 온도 사이클 등을 전기적 신호로써 압력 주기와 온도 주기를 제어하여 일정한 압력과 온도로 성형할 수 있도록 설계되어 있다. Fig. 19와 Table 1은 실험에 사용한 오토클레이브 성형기의 사진과 그 사양을 나타낸 것이다.



Fig. 19 Scheme of autoclave

Table 1 Specification of autoclave

Classification	Specifications
Internal Max. Operating Conditions	100psig@650°F
Vessel Design Specifications	110psig@450°F
Working Dimensions	36"Dia×48"Length
Power Requirements	480 VAC, 3 ϕ , 60Hz, 60FLA
Estimated Weight	7000lb@30psi Dist. Load

4.1.2 성형재료

면재로써는 에폭시 수지가 함침 되어 있는 유리섬유 프리프레그 (Glass prepreg)를, 코어 재료는 경량이면서 내구성이 뛰어난 노멕스 하니컴 코어(Nomex honeycomb core)를 사용하였다.

1) 유리섬유 프리프레그

본 실험에서는 샌드위치 구조재의 면재로 사용되는 프리프레그로 BMS 8-79에 등재되어 있는 유리섬유/에폭시 프리프레그(Cytec Fiberite glass/epoxy prepreg style 7781)를 사용하였다. Table 2 에 실험에 사용한 프리프레그의 물성을 나타내었다.

Table 2 Properties of prepreg

Property	Value
Tensile strength	552 Mpa
Compression strength	483 Mpa
Interlaminar shear strength	62 Mpa
Resin solid content	39 %
Gel time	4 min
Tg by DMA	121

2) 코어재료

본 연구에서 사용한 코어재료는 그 특성이 우수한 노멕스 하니컴 코어 (Showa CG-SAH1/8)를 사용하였다. 그 조성을 Table 3에 나타내었다.

하니컴 코어는 일반적으로 열적 안정성 및 방염성이 뛰어나고, 탁월한 치수 안정성, 가수분해 안정성 및 내마모성, 제품 가공의 용이성, 화학적 적합성, 우수한 내전압 강도, 내자외선 및 내방사성 그리고 저신율 및 고인장 탄성율과 같은 특성을 가지고 있다.

Table 3 Composition of honeycomb core

Nomex honeycomb core	
Composition	Value
Nomex paper	66 < %
Phenolic multipolymer resin	33 > %
Epoxy multipolymer resin	0.3 > %
Nylon multipolymer resin	0.3 > %

3) 본딩시트(Adhesive film)

에폭시 레진 시스템에 접착제(Adhesive) 개념을 도입하여 판상재 및 구조재를 접착할 수 있는 Loctite Hysol사의 EA 9696 제품을 접착시트를 이용 하였다.

4.1.3 성형공정

1) 재단

프리프레그의 정확한 재단을 위하여 자동 절단기에 도면을 입력하여 공차 범위 내로 재단한다. Fig. 20은 자동 절단기를 이용하여 하니컴 코어를 재단하는 사진이다.



Fig. 20 Scheme of automated cutting machine

2) 레이업 (Lay-up)

재단이 끝난 프리프레그를 Fig. 21에서 보여지는 것과 같이 레이업한다.¹⁴⁾

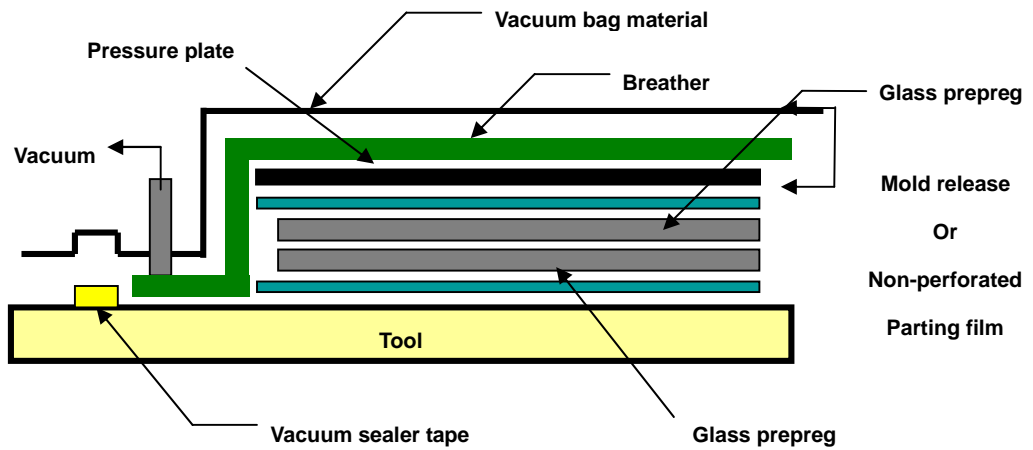


Fig. 21 Diagram of lay-up for process 14)한105

3) 성형준비

Fig. 22와 같이 오토클레이브 내부에 레이업이 끝난 Tool을 넣고 진공호스(Hose)와 진공프로브(Probe)를 연결하고, 성형품의 온도를 측정하기 위해 열전대를 부착한다.

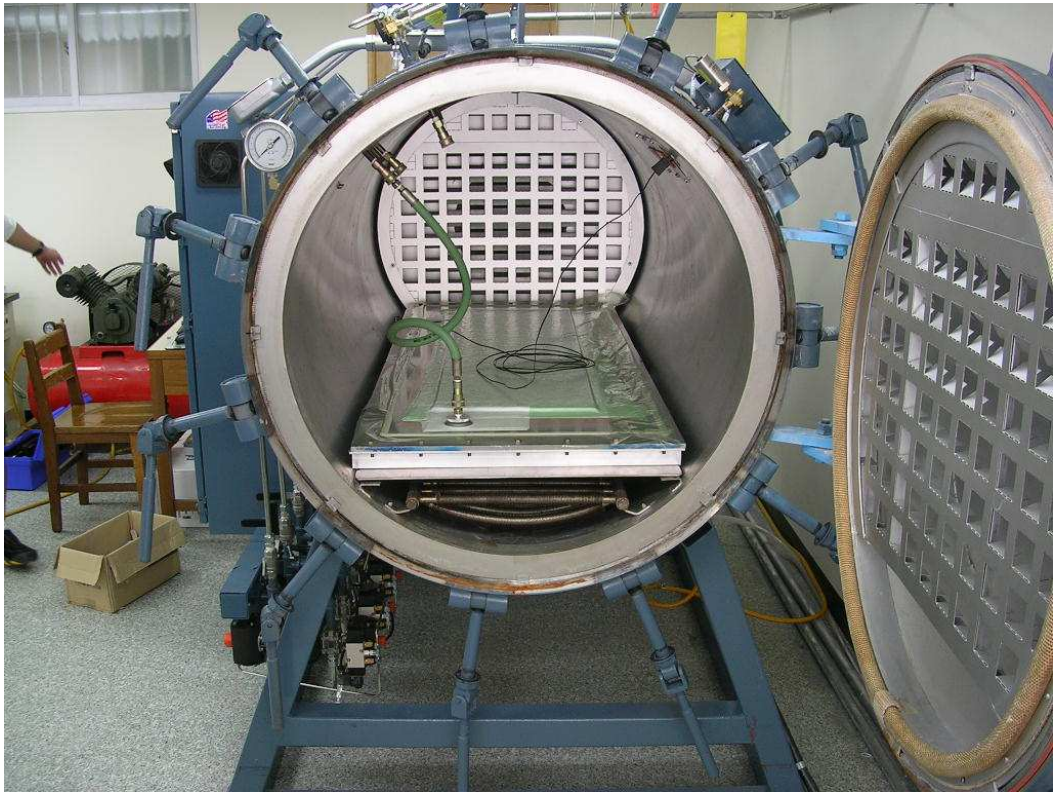


Fig. 22 Arrangement of autoclave operation

4) 오토클레이브 성형

오토클레이브에서 제품을 성형하기 위해서 유리섬유의 경화조건에 따라 적정한 레시피(Recipe)를 작성하여 오토클레이브 제어 시스템에 입력한 후 성형을 시작한다.

Fig. 23은 오토클레이브를 제어하기 위한 제어시스템이며, Fig. 24에 오토클레이브 제어를 위한 레시피를 나타내었고 Fig. 25는 성형에 적용한 경화사이클을 나타내고 있다.

경화사이클을 적용하기 위한 레시피를 ASC사의 CPC 클라이언트를 이용하여 제어시스템에 입력하였다.



Fig. 23 Control system for autoclave

CPC Recipe Report

Recipe Name: Recipes\panel skin 07\23_Mod6

Revision:

Creation Date: 7/24/2004 9:54:36 PM

Modify Date: 10/6/2004 3:00:51 PM

Author:

Specification:

Comment:

	Seg#1	Seg#2	Seg#3	Seg#4	Seg#5	Seg#6	Seg#7
Segment Time	---	---	---	90M	---	---	END
Control TC	AIRTC	---	AVGTC	---	---	---	---
Temperature Rate	---	---	4	---	---	---	---
Temperature Value	CURR	---	260	---	140	30	---
Pressure Value	80	---	---	---	---	0	---
Vacuum Value	-30	0	---	---	---	---	---
Watch Item #1	PRESS	PRESS	HITC	---	LOTC	PRESS	---
Criterion	>15	>40	>250	---	<160	<2	---
Action	GO	GO	GO	---	GO	GO	---
Fan Enable	ON	---	---	---	---	---	---
Pressure Enable	ON	---	---	---	---	---	---
Heating Enable	ON	---	---	---	---	---	---
Cooling Enable	ON	---	---	---	---	---	---
Vacuum Pump	ON	OFF	---	---	---	---	---
HeatExchEnable	OFF	---	---	---	---	---	---
LineAction	VAC	VENT	---	---	---	---	---
Max Air Temp	270	---	---	---	---	---	---
Grace	3M	---	---	---	---	---	---

Fig. 24 Recipe for autoclave process

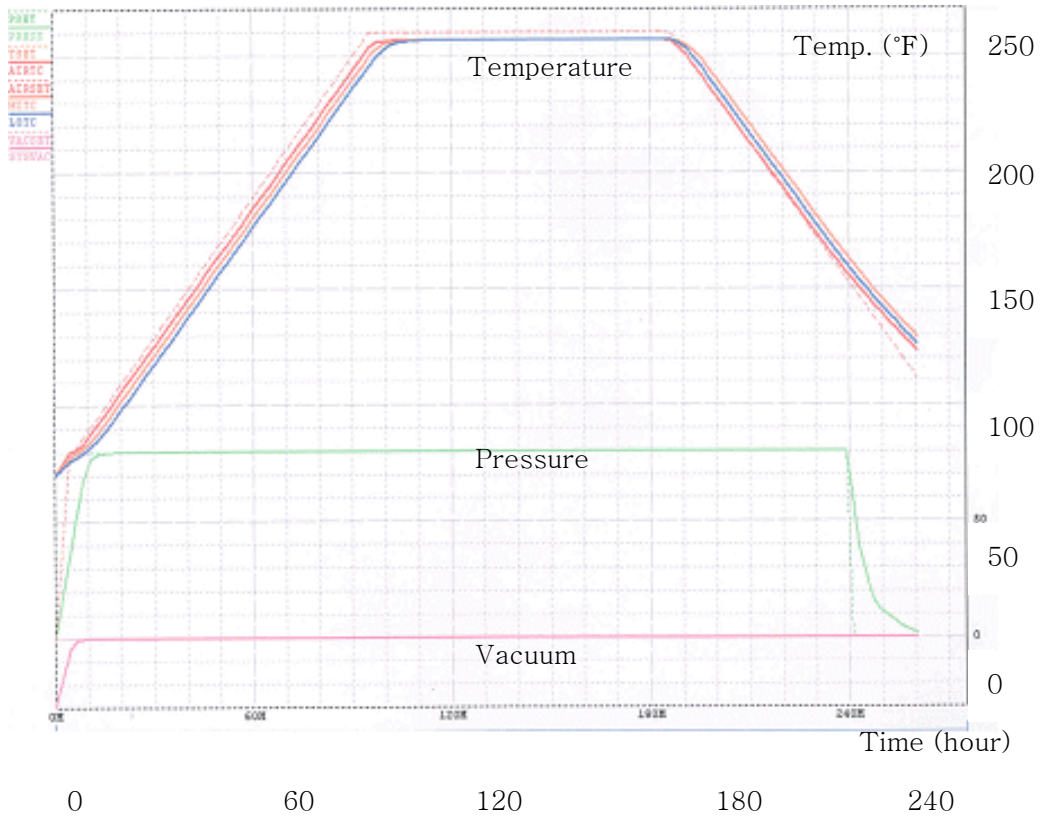


Fig. 25 Cure cycle of prepreg

5) 완성된 면재 및 가공

완성된 면재를 도면에 따라 하니컴 코어 및 각종 치구물과 결합할 수 있도록 가공한다. Fig. 26은 완성된 면재의 사진이다.



Fig. 26 Skin with inserted part

6) 하니컴 코어와 면재의 접착

하니컴 코어와 면재 사이에 접합수단으로 기계적인 결합보다는 접착제에 의한 접착법을 이용한다. 이 때 접착제로는 에폭시 계열의 접착시트를 이용한다. 접착제에 의한 접착이 많이 사용되는 이유는 접착제는 다른 물질에 잘 붙는 성질을 가지고 있을 뿐만 아니라 한 물질에서 다른

물질로 가하여진 힘을 잘 전달시킬 수 있는 강도를 가지고 있기 때문이다.

하니컴 코어와 면재를 가접한 다음 면재의 성형과 똑 같은 과정으로 진공백을 형성하여 고온용 접착시트를 사용하여 오토클레이브로 같은 성형 조건하에서 성형한다.

7) 랙성형

완성된 하니컴 샌드위치 패널을 추가 부품을 장착할 수 있도록 도면에 따라 정확하게 가공을 실시한다.

8) 랙 완성

가공이 끝난 하니컴샌드위치 패널에 추가 부품을 장착하여 복합재료 랙을 완성한다.

4.1.4 오토클레이브 성형에 의한 랙의 제작

앞의 공정을 거쳐 제작한 이송용 랙의 모습을 Fig. 27에서 보여주고 있다.



Fig. 27 Completed transportation rack by autoclave process

4.2 프레스 성형 공정에 관한 연구

4.2.1 성형장비

성형장비로 진공을 가할 수 있는 다단 프레스를 사용하였으며, Fig. 28에 성형에 사용된 프레스의 모습을 보여주고 있다.

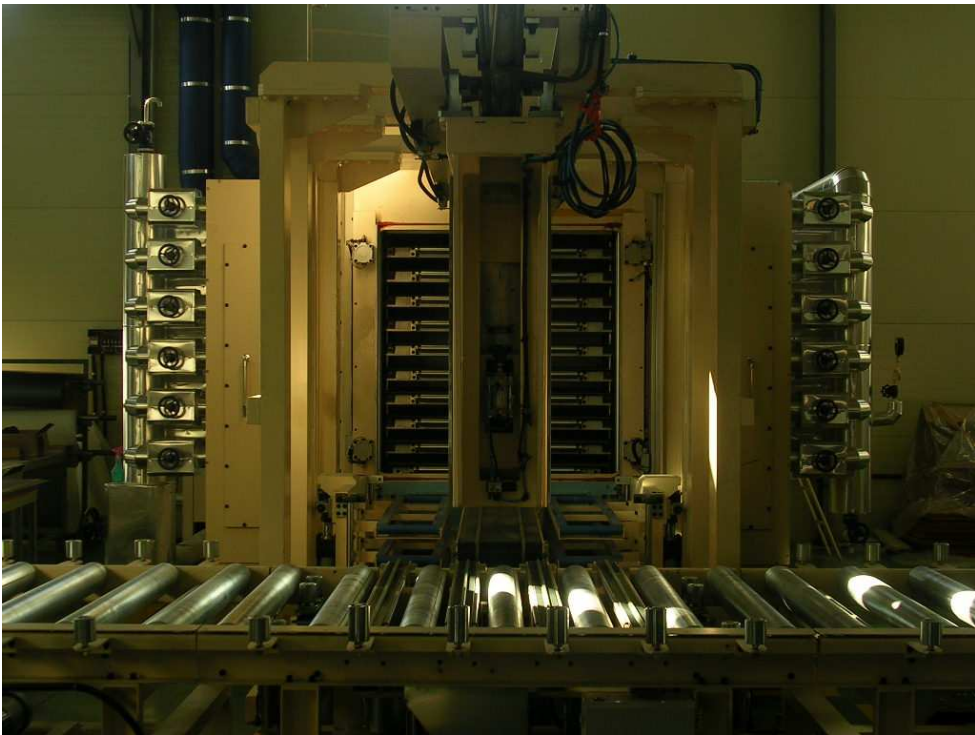


Fig. 28 Scheme of multi layer press used in process

4.2.2 성형재료

본 실험에서는 샌드위치 구조재의 면재로 사용되는 프리프레그로 프레스용 프리프레그(Glass/epoxy style 7628)를 사용하였다. Table 2 에 실험에 사용한 프리프레그의 물성을 나타내었다

하니컴 코어는 오토클레이브에서 적용된 Showa사의 CG-SAH1/8 제품을 사용하였다.

4.2.3 성형공정

1) 재단

오토클레이브와 마찬가지로 정확한 재단을 위하여 자동 절단기에 도면을 입력하여 공차 범위 내로 재단을 한다.

2) 레이업

재단이 끝난 프리프레그와 일체 성형되어지는 부품들을 성형하기 위하여 레이업을 실시한다. Fig. 29에 재단된 재료를 레이업하는 모습을 보여주고 있다.

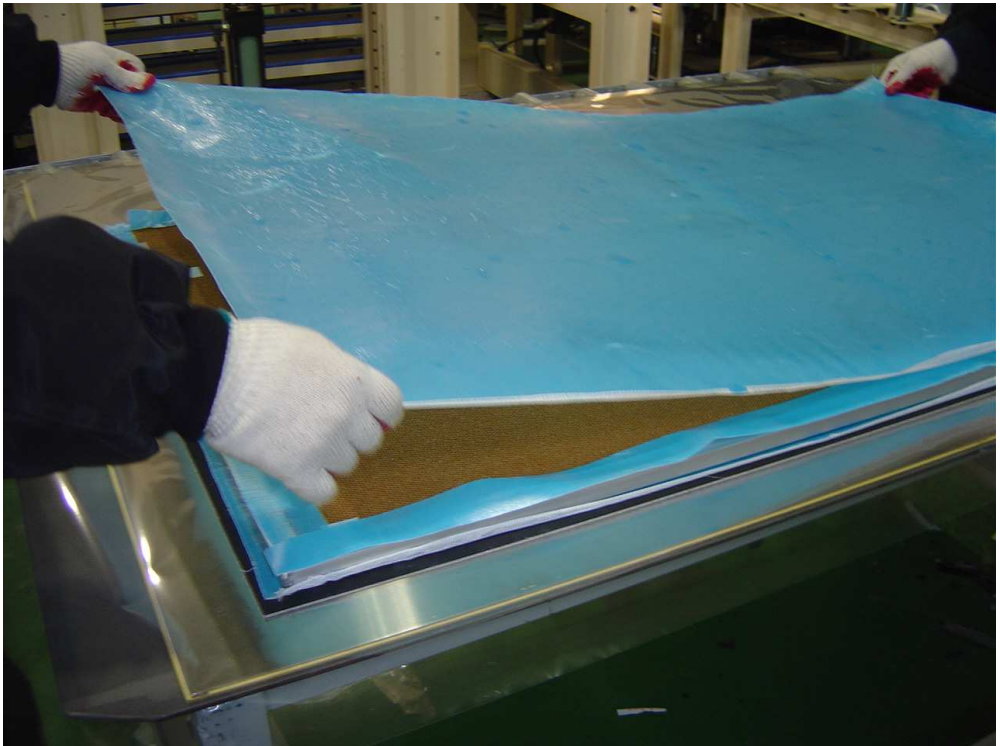


Fig. 29 Material lay-up

3) 프레스 성형

프레스용 프리프레그의 성형조건은 Fig. 30과 같으며 이에 맞추어 온도와 압력을 프레스 컨트롤 장비에 입력하여 성형을 실시한다.

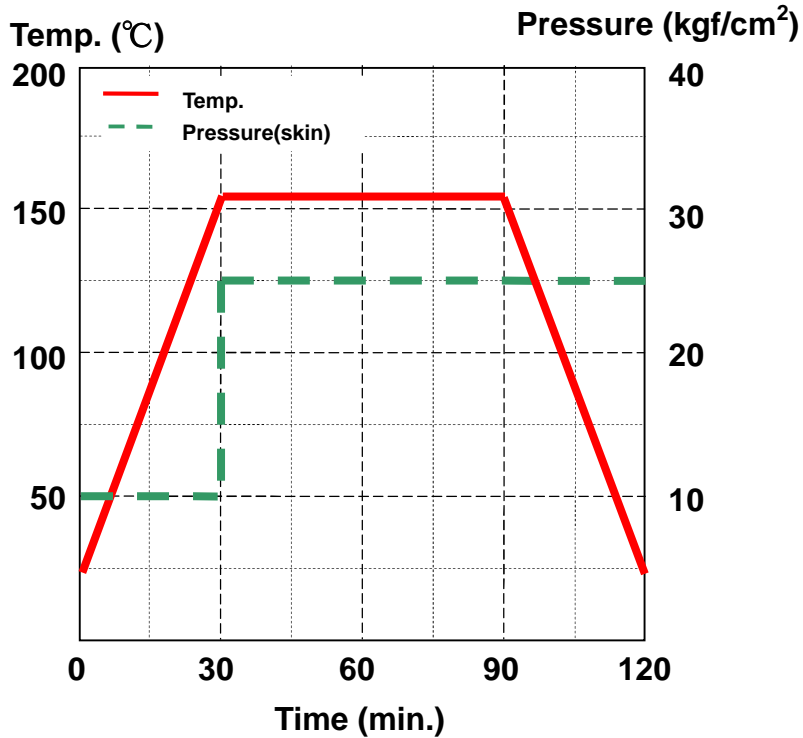


Fig. 30 Cure cycle of prepreg

4) 완성된 면재 가공

완성된 면재를 오토클레이브 성형과 같이 도면에 따라 정확하게 가공을 실시한다.

5) 하니컴 코어와 면재 접착

완성된 면재와 하니컴 코어 사이에 접착시트를 적층하여 다단 프레스를 이용하여 성형을 실시한다.

6) 랙 완성

완성된 하니컴 샌드위치 판넬을 추가되는 부품을 장착하여 랙을 완성한다.

4.2.4 프레스 성형에 의한 랙 제작

Fig. 31에 프레스를 이용하여 제작한 랙의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 31 Completed transportation rack by press process

4.3 오토클레이브 와 프레스에 의해 제작된 이송용 랙의 비교

오토클레이브와 프레스에 의해 이송용 랙을 제작하였으며 이를 통하여 성형에 대한 문제점을 검토하였다.

오토클레이브를 이용하여 성형된 랙은 5장에 기술되는 기계적 특성은 프레스에 비하여 우수하지만 표면의 평활도, 생산성 및 생산에 소요되는 비용이 좋지않았다.

생산성 및 생산비용 측면에서 오토클레이브에서는 한번 작업하여 1개에서 3개 정도가 생산되는 반면 프레스에서는 다단 프레스를 이용하여 한번 작업에 최소 10개 이상이 생산되기 때문에 프레스 성형이 적합한 것으로 사료된다.

표면 평활도를 측정한 결과 오토클레이브 성형에서는 콜플레이트 (Caul plate) 만으로는 성형할 제품에 균일한 압력을 가하지 못하기 때문에 이송용 랙 내부에 삽입되는 알루미늄 인서트 및 알루미늄 프레임과 하니컴 코어와의 단차가 상부 표면에 드러나는 문제점이 발생하였다. 반면, 프레스 성형에서는 상부 금형에 의하여 균일하게 압력을 가하기 때문에 양쪽 면 모두 평탄한 제품을 제작할 수 있었다.

제 5 장 복합재료를 이용한 이송용 랙의 특성평가

5.1 화학적 특성시험

5.1.1 섬유함유율

섬유함유율(Fiber contents)은 유리섬유강화 플라스틱 (GFRP)의 전체 질량(또는 전체부피)에 대한 유리섬유의 질량(또는 부피)의 비율을 백분율로 표시한 것을 말한다.¹⁵⁾ 섬유함유율을 구하는 방법에는 두 가지 방법이 있는데 유리강화 플라스틱 전체의 무게에 대한 유리섬유 무게비율을 백분율로 표시한 유리섬유 무게함유율과 유리섬유강화 플라스틱의 전체 부피에 대한 유리섬유 부피의 비율을 백분율로 표시한 유리섬유 부피함유율로 나누어진다.

유리섬유 강화 플라스틱은 강화재인 유리섬유와 기지재인 수지가 함침되어 적층되는데 유리섬유 강화 복합재료의 기계적 특성에 영향을 미치는 것은 섬유의 역학적 특성과 섬유함유율이다.¹⁶⁾

섬유강화 복합재료의 강도는 섬유함유율, 섬유 배양성, 섬유와 기지재료의 계면상태 등에 의해서 크게 영향을 미치기 때문에 기계적 특성을 결정하기 위해서 중요한 요인이다.¹⁷⁾ 이것은 기계적 특성뿐만 아니라 유

리섬유강화 플라스틱의 열적 특성으로서 요구되는 선팅창률 및 열전도율과 유리섬유 강화 플라스틱의 기본적 특성인 비중이나 비열의 결정에도 필요하기 때문에 유리섬유강화 플라스틱의 기본적 특성을 조사하는 기초 데이터로서 섬유함유율의 측정은 반드시 필요하다.¹⁶⁾

5.1.2 시편의 준비

시편의 무게는 2g 이상이 되도록 3개를 Fig. 32와 같은 위치에서 잘라내어 시험편의 가장자리를 매끄럽게 다듬질 하였다.

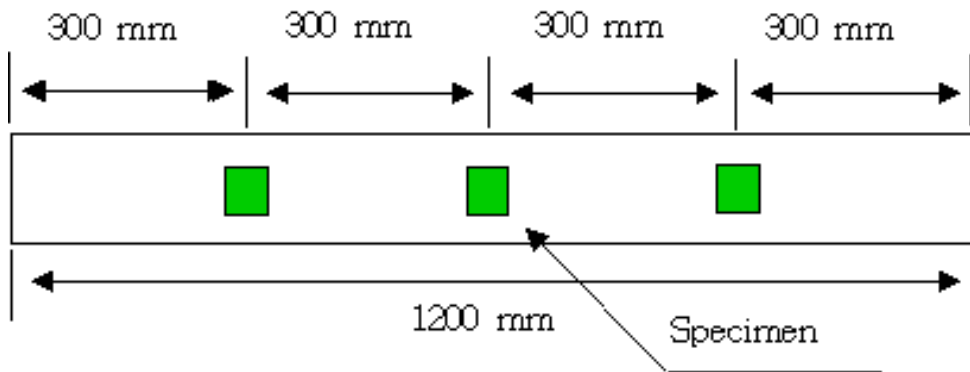


Fig. 32 Classification of test specimen¹⁹⁾배

5.1.3 시험방법

유리섬유강화 플라스틱 섬유함유율의 시험은 햇빛, 자외선 및 열선의 직사광선을 받지 않는 곳에서 온도 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 및 상대습도 $50\pm 5\%$ 에서 48시간 이상 보관하였다가 동일 온도와 동일 습도에서 시험을 실시하였다.¹⁶⁾

시험편의 무게는 2g 이상이 되도록 3개를 제작하여 질량을 측정하여 그 평균치로 계산하였다.¹⁸⁾

시험절차는 다음과 같다.

도가니를 $625\pm 20^{\circ}\text{C}$ 의 전기로에서 일정량이 될 때 까지 건조하고 데시케이터(건조 염화칼슘이나 실리카겔 등 적절한 건조제) 안에서 냉각시켜둔다.

도가니의 질량(M_1) 및 연소전의 도가니와 시험편의 질량(M_2)를 1mg 까지 측정한다.

이 때 도가니는 노 내의 온도 분포를 고려하여 벽면에서 약 2~3cm 거리를 두고 놓아야 하며, 급격한 발화를 피하기 위해서 약 300°C 에서 도가니를 노에 넣고 625°C 로 서서히 온도를 상승시켜 2시간 이상 연소시켜야 한다.

5.1.4 시험결과

본 연구에서 섬유함유율을 구하기 위해 적층한 면재의 전체를 대표할 수 있도록 시험편 3개를 잘라내어 그 질량을 측정하여 평균하여 시험편 질량을 구한 결과 7.6031g 이었으며 도가니의 질량은 1.6152g 이었고 연소 후의 도가니와 시험편 질량은 5.5073g 이었다.

한편 본 연구에서는 충전재를 포함하지 않았기 때문에 유리섬유의 무게함유율(W_f)은 다음 식 (5.1)을 이용하여 계산할 수 있다.²⁾

$$W_f = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (5.1)$$

W_f : Fiber weight fraction(%)

M_1 : Mass of crucible(g)

M_2 : Initial mass of specimen and crucible (g)

M_3 : Final mass of specimen and crucible (g)

따라서, 식 (5.1)에 따라 섬유함유율을 구하면 섬유함유율(W_f)은 65%이다.

섬유함유율이 높으면 강도는 높게 할 수 있으나 수지 함침율이 나빠지게 되고, 반대로 섬유함유율이 낮으면 수지 함침율은 좋으나 강도가 문제될 수 있다. 본 실험에서 섬유함유율이 65%를 유지하고 있으므로 성형에 적용된 온도 및 압력은 적절한 것으로 판단된다.

5.2 기계적 특성시험

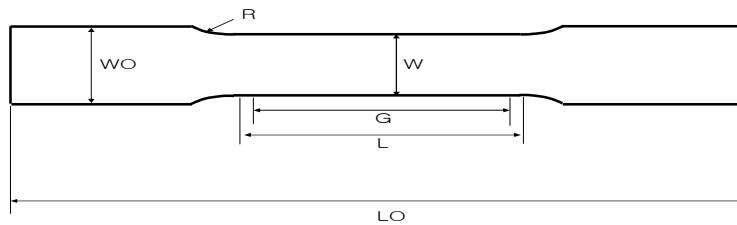
하니컴 샌드위치 패널의 특성을 알아보기 위하여, 스킨에 사용된 라미네이트에 대하여 인장, 압축, 그리고 전단 특성에 대한 시험을 수행하였으며, 샌드위치 시편에 대해서는 굽힘 특성 시험, Flatwise tension 시험을 시행하였다. 시험에 사용된 장비는 UTM(Universal Test Machine)으로 최대 하중 30ton을 가할 수 있다.

5.2.1 라미네이트 특성시험

1) 인장시험

스킨 라미네이트에 대한 인장시험은 ASTM D 638에 따라, 인장시편을 제작하여, 시험을 수행하였으며, 시험조건 및 시편 치수는 다음과 같다. ¹⁹⁾

Specimen	Glass/Epoxy laminate
Stacking Direction	[0/90] _{10T}
Spec	ASTM D638
Temperature	Room Temperature, Dry
Test Speed	0.05 in/min



Unit : in	T	W	L	LO	R	
ASTM 규격 치수	< 0.28	0.25 ±	2.25 ±	7.2	3 ±	
Specimen	1	0.099	0.269	-	-	-
	2	0.098	0.275	-	-	-
	3	0.097	0.278	-	-	-
	4	0.098	0.277	-	-	-
	5	0.098	0.275	-	-	-

인장 시험을 실시하여 인장 강도 및 인장탄성계수를 계산하는 식은 다음과 같다.

* Tensile Stress/Tensile Strength

$$F^{tu} = P^{max} / A \quad (5.2)$$

$$\sigma_i = P_i / A \quad (5.3)$$

- F^{tu} : ultimate tensile strength, MPa [psi]
 P^{max} : maximum load prior to failure, N [lb]
 σ_i : tensile stress at Ith data point, Mpa [psi]
 P_i : load at I-th data point, N [lb]
 A : average cross-sectional area

* Tensile Chord Modulus of
Elasticity

$$E^{\text{chord}} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad (5.4)$$

- E^{chord} : tensile chord modulus of elasticity, GPa [psi]
 $\Delta\sigma$: difference applied tensile stress between the two strain points, MPa [psi]
 $\Delta\varepsilon$: difference between the two strain points (normally 0.002)

Fig. 33과 Fig. 34는 시편의 형상과 시험에 사용된 장비를 나타내고 있다.

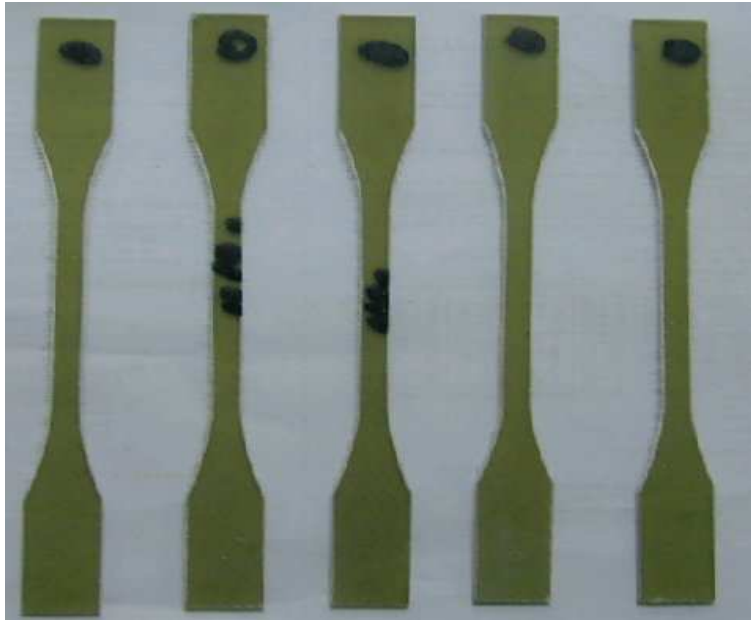


Fig. 33 Specimens for tensile test

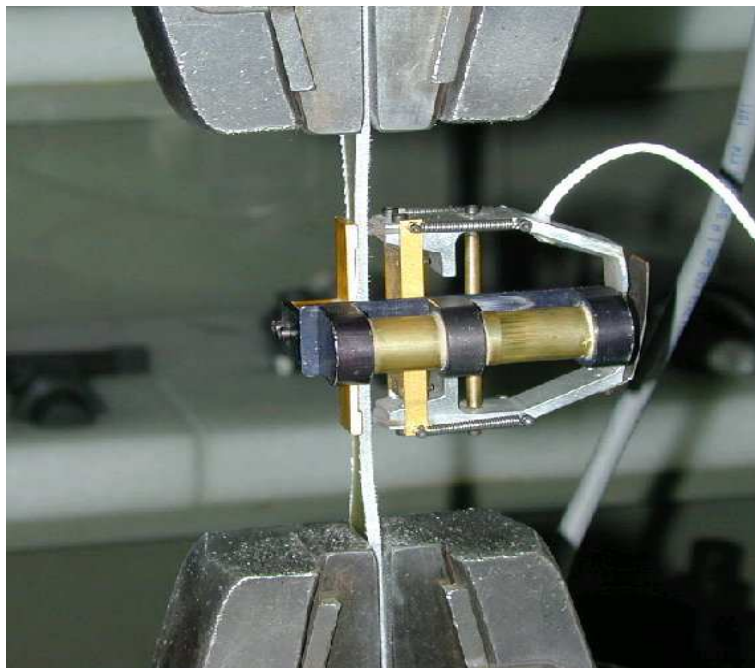
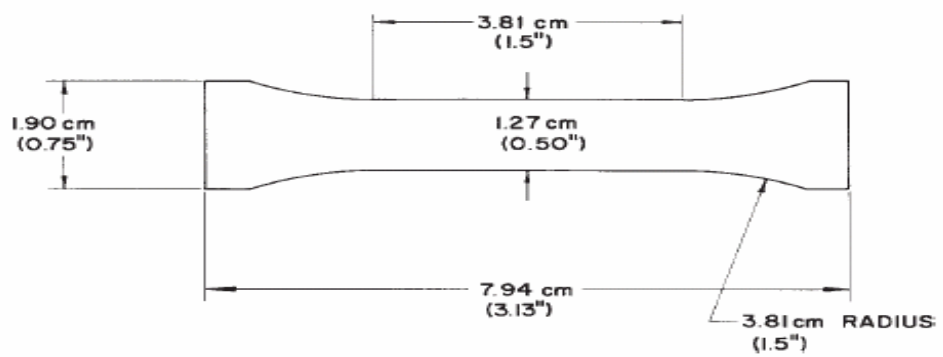


Fig. 34 Apparatus for tensile test

2) 압축시험

스킨 라미네이트에 대한 압축시험은 ASTM D 695에 따라 시험을 수행하였으며, 시험조건 및 시편치수는 다음과 같다.²⁰⁾

Specimen	Glass/Epoxy laminate
Stacking Direction	[0/90] _{10T}
Spec	ASTM D695
Temperature	Room Temperature, Dry
Test Speed	0.05 in/min



ID		Geometry	
		W (in)	T (in)
Specimen	1	0.506	0.1
	2	0.504	0.099
	3	0.505	0.097
	4	0.507	0.097
	5	0.507	0.096

압축시험을 실시하여 압축강도 및 압축탄성계수를 구하는 방식은 아래와 같다.

$$* \text{ Compressive Strength [MPa, psi] } = P^{\max} / A_{\min} \quad (5.5)$$

P^{\max} : maximum compressive load

A_{\min} : the original minimum cross-sectional area

$$* \text{ Modulus of Elasticity [GPa, psi] } = \text{ Stress } / \text{ strain}$$

Fig. 35는 압축시험에 사용된 시편의 모습을 보여준다.

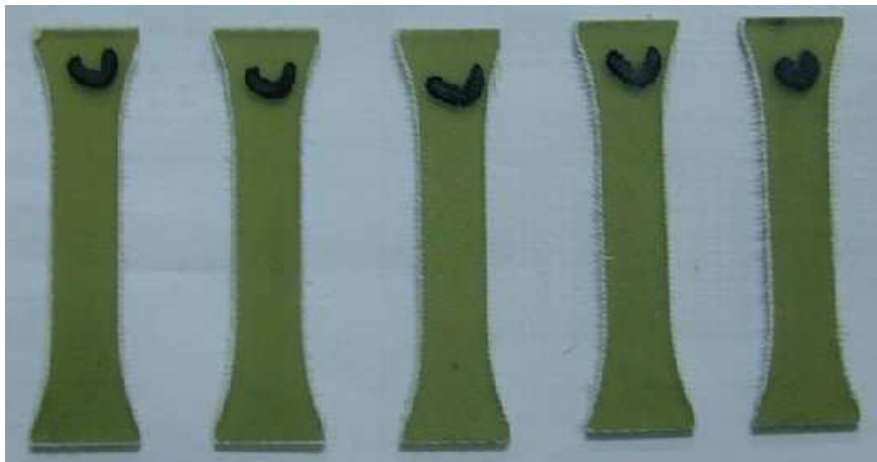
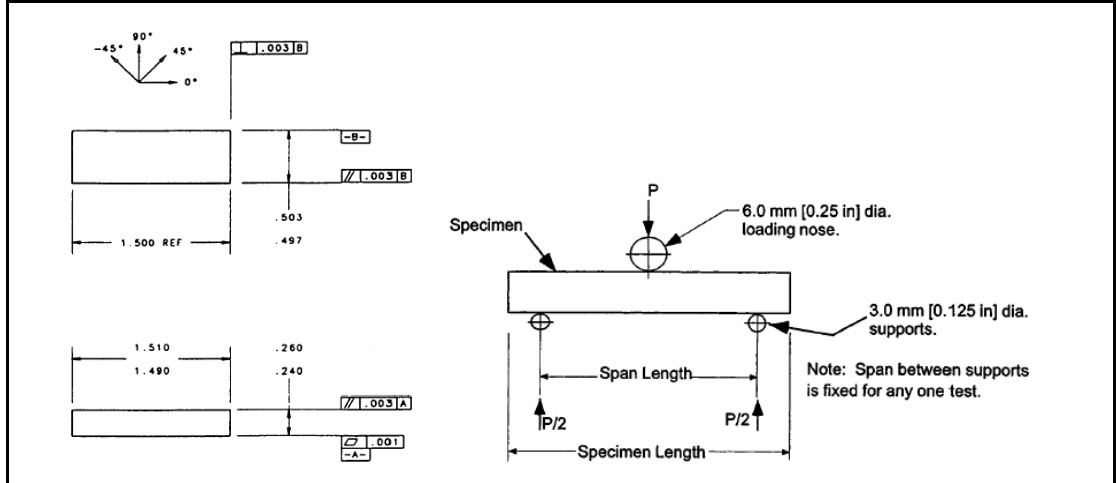


Fig. 35 Specimens for compressive test

3) Interlaminar shear test

Interlaminar shear 시험은 ASTM D 2344를 이용한 Short beam test를 통하여, Interlaminar shear strength를 구하였다. 시험조건 및 시험치수는 다음과 같다.²¹⁾

Specimen	Glass/Epoxy laminate
Stacking Direction	[0/90] _{10T}
Spec	ASTM D2344
Temperature	Room Temperature, Dry
Test Speed	0.05 in/min



ID		Geometry		
		W (in)	T (in)	Span (in)
Specimen	1	0.245	0.0985	0.400
	2	0.245	0.1	0.400
	3	0.245	0.101	0.400
	4	0.245	0.101	0.400
	5	0.245	0.095	0.400

Interlaminar shear strength는 아래의 수식을 이용하여 구할 수 있다.

$$F^{sbs} = 0.75 \times P_m / (b \times h) \quad (5.6)$$

- F^{sbs} : short-beam strength, Mpa(psi)
 P_m : max load observed during the test, N (lbf)
 b : measured specimen width, mm(in)
 h : measured specimen thickness, mm(in)

Fig. 36과 Fig. 37은 Interlaminar shear test에 사용된 시편과 시험장비를 보여준다.

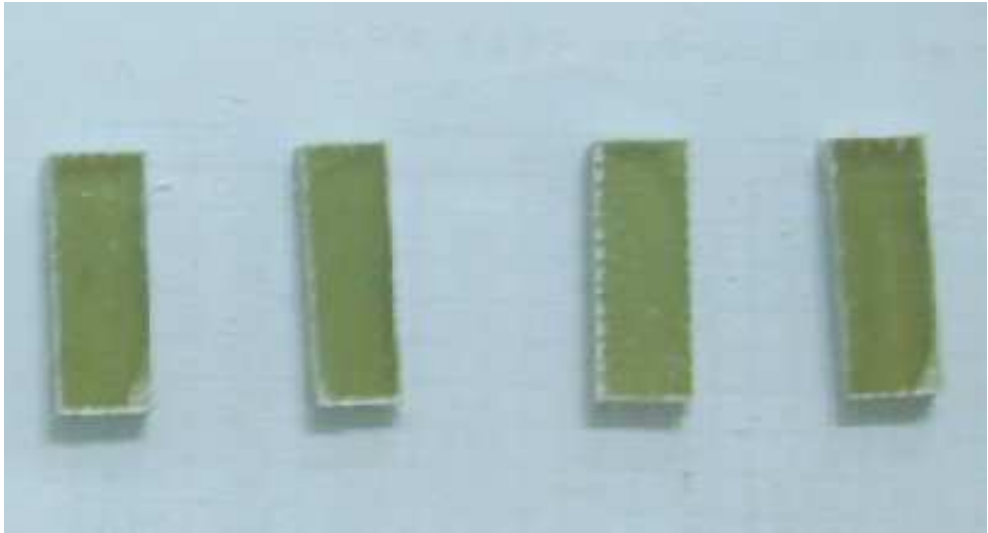


Fig. 36 Specimens for interlaminar shear test

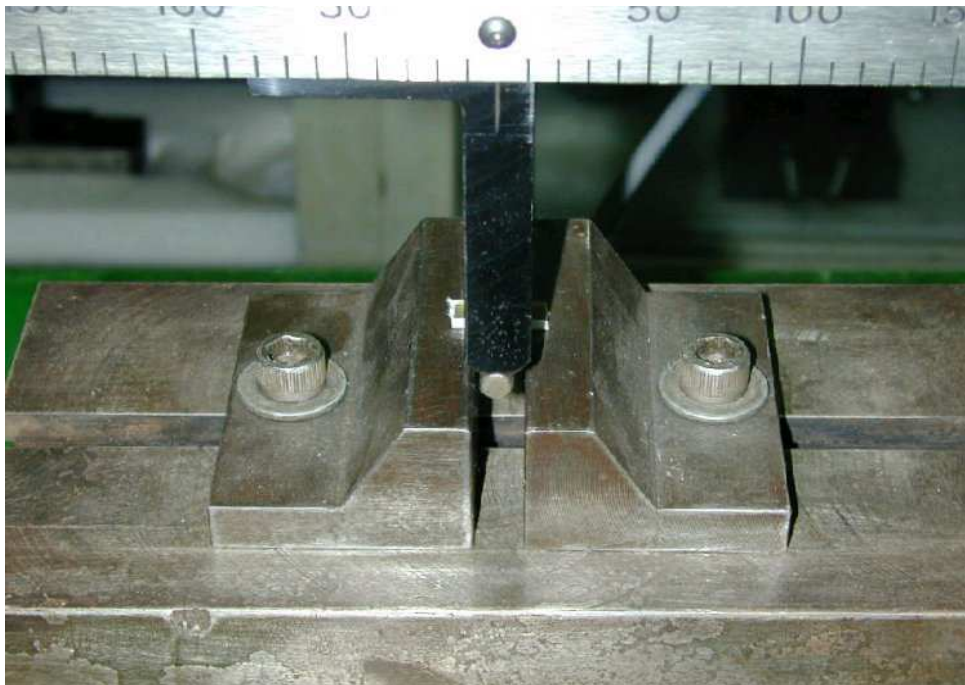


Fig. 37 Apparatus for interlaminar shear test

5.2.2 시험결과

1) 인장시험

인장시험을 통하여 Ultimate tensile strength와 modulus를 구하였으며 결과는 아래 Table 4와 같다.

Table 4 Ultimate tensile strength and modulus

ID	Geometry		F _{tu} (ksi)	E _t (msi)
	w(in)	t(in)		
1	0.269	0.099	54.160	2.787
2	0.275	0.098	59.610	2.598
3	0.278	0.097	58.760	2.548
Ave. auto	0.274	0.098	57.510	2.644
1	0.278	0.099	55.710	2.788
2	0.269	0.096	57.280	2.553
3	0.278	0.097	58.670	2.597
Ave. press	0.275	0.097	57.220	2.646



Fig. 38 Fractured specimens of tensile test

2) 압축시험

압축시험을 통해 Ultimate compression strength와 modulus를 측정
한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Ultimate compression strength and modulus

ID	Geometry		Fcu(ksi)	Ec(msi)
	w(in)	t(in)		
1	0.506	0.1	45.080	5.184
2	0.504	0.099	55.940	3.795
3	0.505	0.097	57.080	7.167
Ave. auto	5.505	0.099	52.7	5.382
5	0.507	0.096	52.060	2.579
6	0.507	0.096	47.750	4.361
7	0.506	0.1	46.780	4.248
Ave. press	0.507	0.097	48.860	3.726

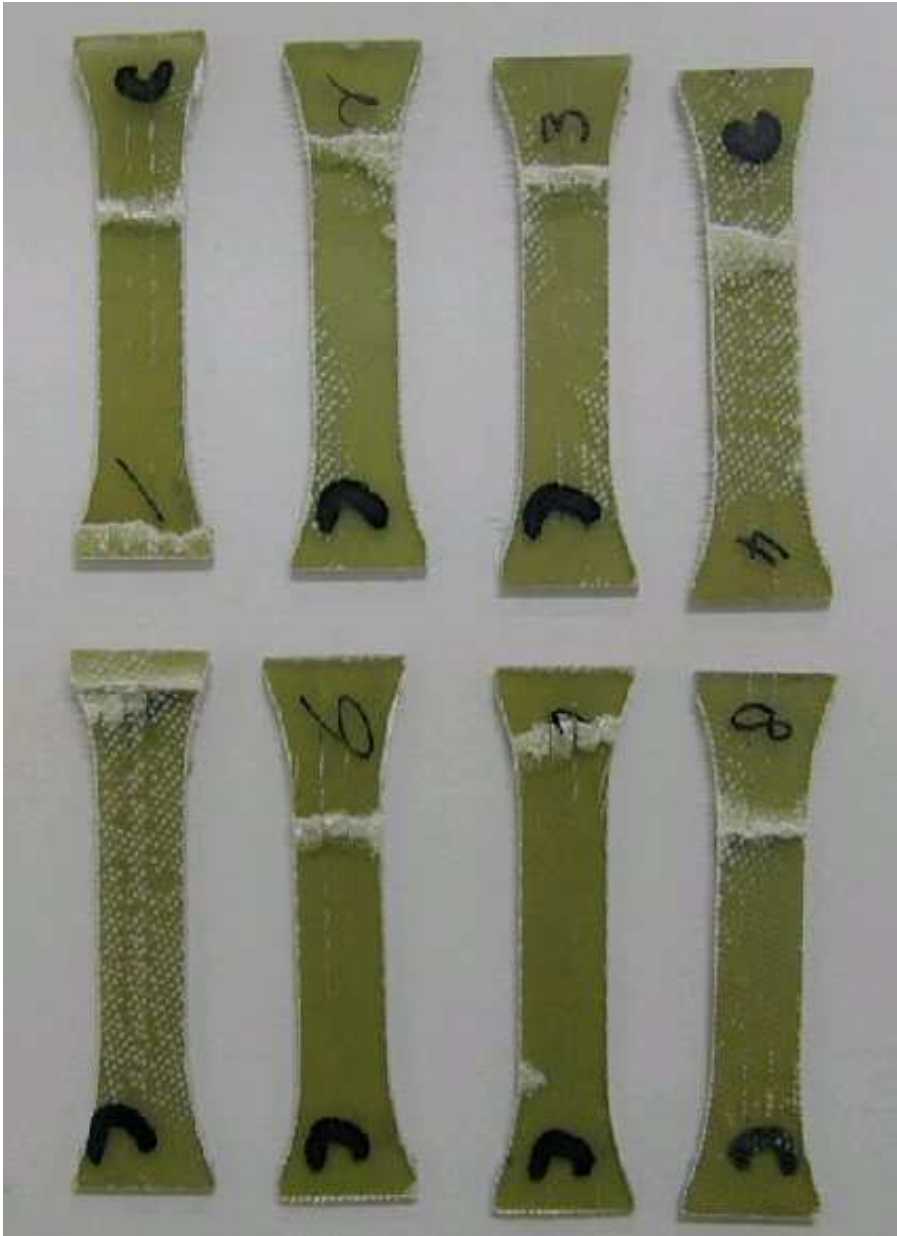


Fig. 39 Fractured specimens of compressive test

3) Interlaminar shear test

Shor beam test를 통해 측정한 Interlaminar shear strength는 Table 6과 같다.

Table 6 Interlaminar shear strength

ID	Geometry			Shear Strength
	w(in)	t(in)	Span(in)	Fsu(ksi)
1	0.245	0.098	0.400	6.410
2	0.245	0.100	0.400	5.920
3	0.245	0.101	0.400	6.140
Ave. auto	0.245	0.100	0.400	6.157
4	0.245	0.095	0.400	6.030
5	0.245	0.098	0.400	6.010
6	0.245	0.101	0.400	6.150
Ave. press	0.245	0.098	0.400	6.063

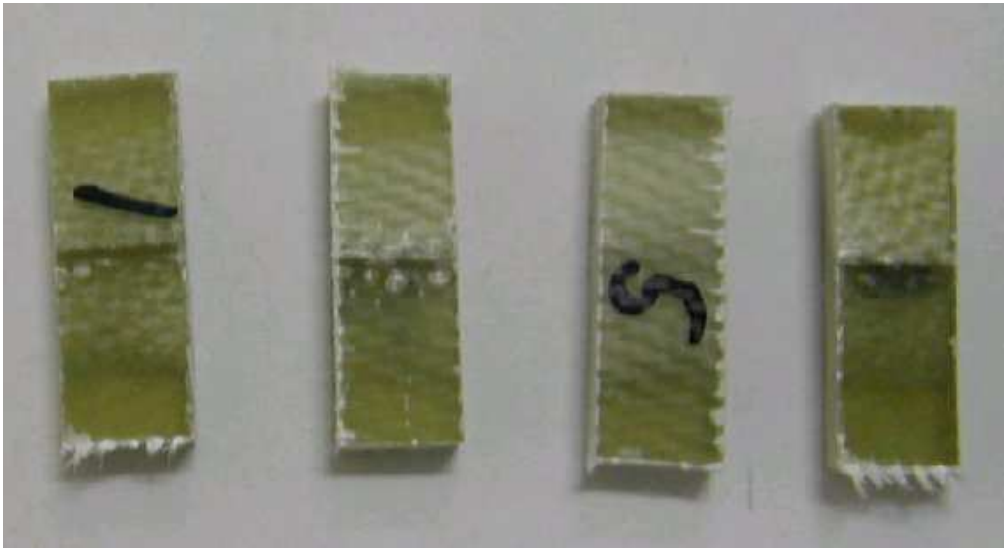
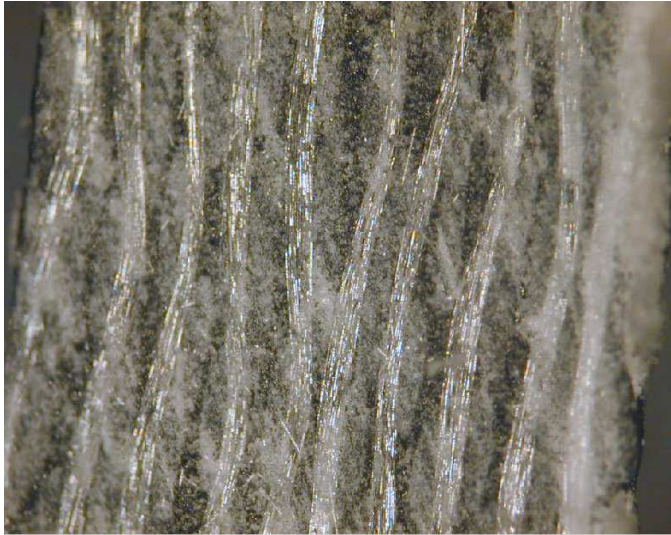


Fig. 40 Fractured specimens of short beam test



(a) Before fracture



(b) After fracture

Fig. 41 Sectional diagrams of specimen

5.2.3 하니컴 샌드위치 구조물의 특성시험

1) 시편제작

하니컴 코어로 보강된 복합재료 시편은 오토클레이브 및 프레스 성형 방법을 이용해 Fig. 42와 같은 형상으로 제작하였다. (a)는 flatwise tension시편 모양이며²²⁾, (b)는 long beam flexural 시편의 모양을 나타낸다.²³⁾ Flatwise tension 시편과 알루미늄 블록과의 접착은 Loctite사의 EA9696 을 사용하였으며, 120℃에서 1시간 경화 접착 하였다. Fig. 42와 같은 시편을 제작하기 위하여 diamond saw에서 가공하여 완성된 시험편을 Fig. 43와 Fig. 44에 나타내었다.

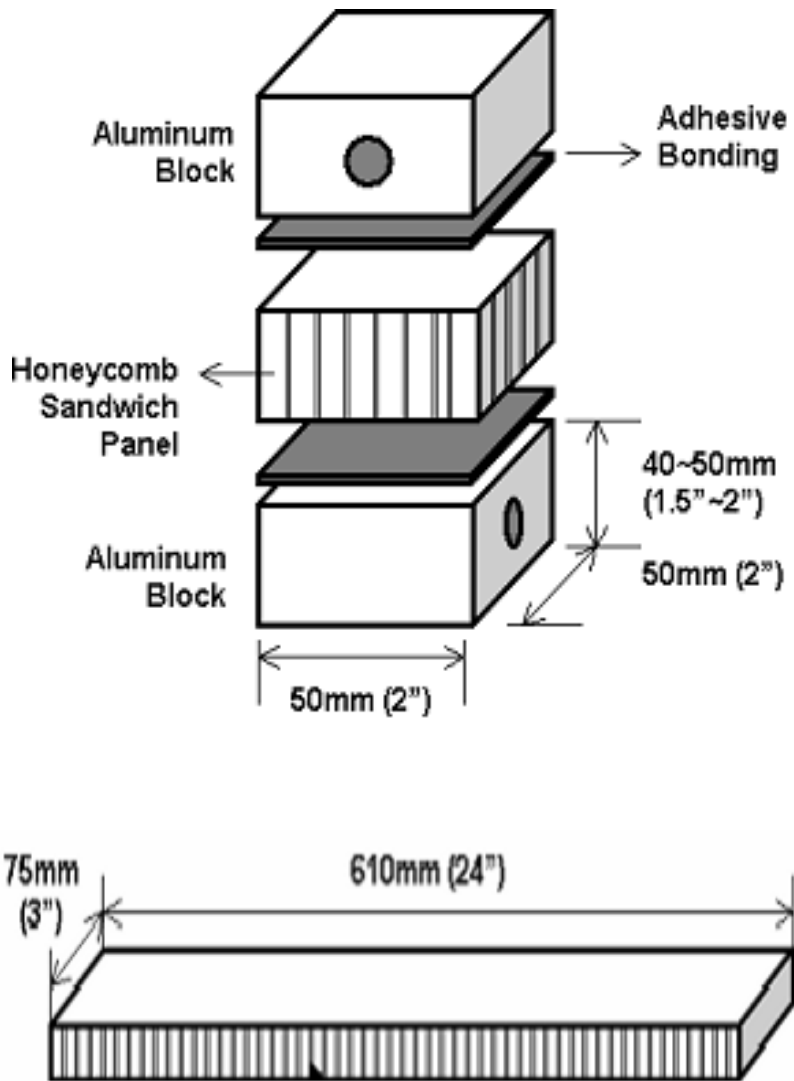


Fig. 42 Scheme of specimen for flatwise tension test and long beam flexural test¹⁴⁾

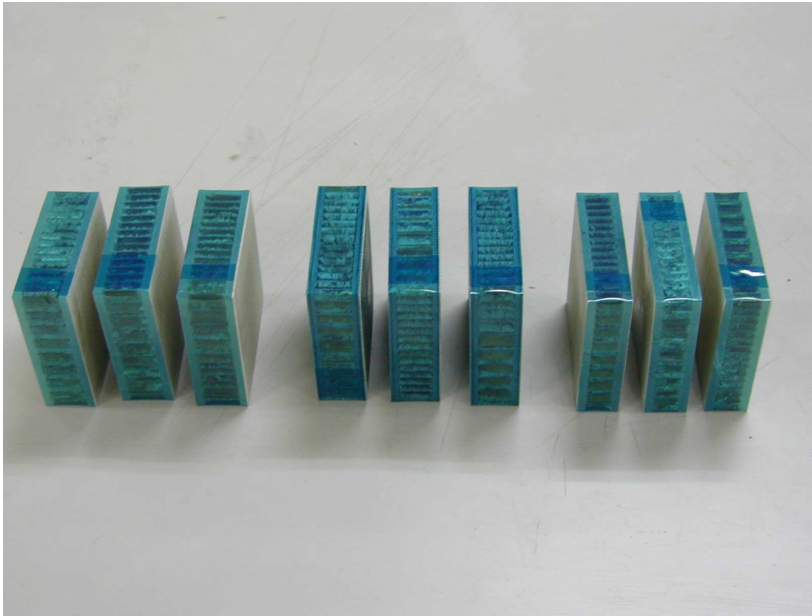


Fig. 43 Specimens for flatwise tension test



Fig. 44 Specimens for long beam flexural test

2) 시험방법

시험조건은 flatwise tension 시험과 long beam flexural 시험에서는 cross head speed를 최대 파단하중이 3~6분 사이에 일어날 수 있는 범위로 정하였다.¹⁴⁾ Flatwise tension, 및 long beam flexural strength의 시험장면을 Fig. 45과 Fig. 46에 나타내었다.

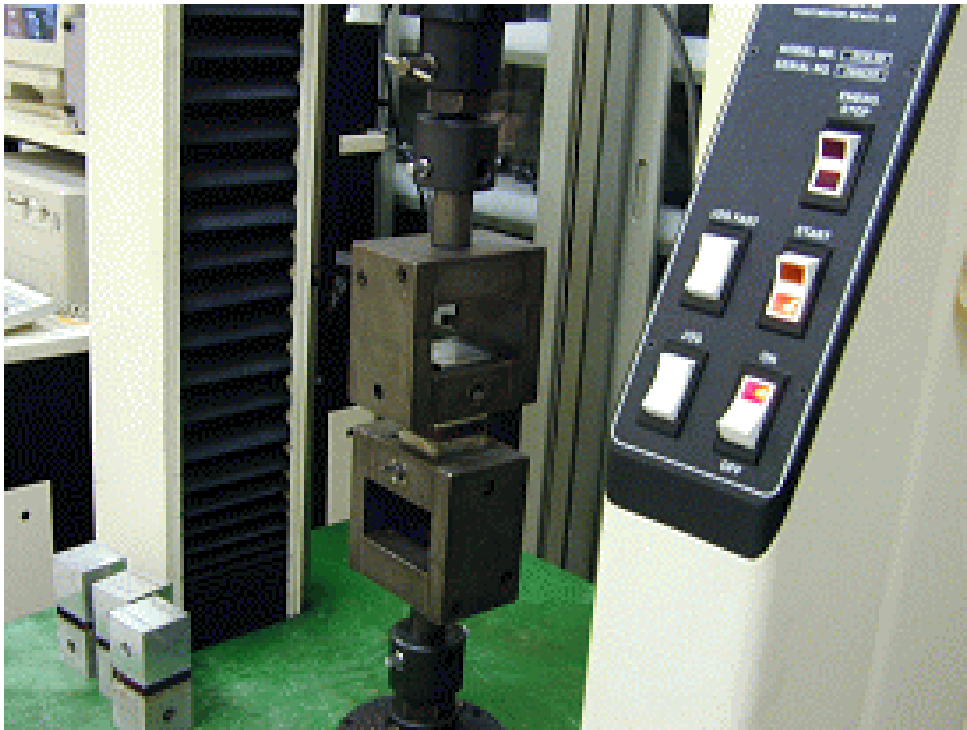


Fig. 45 Apparatus for flatwise tension test

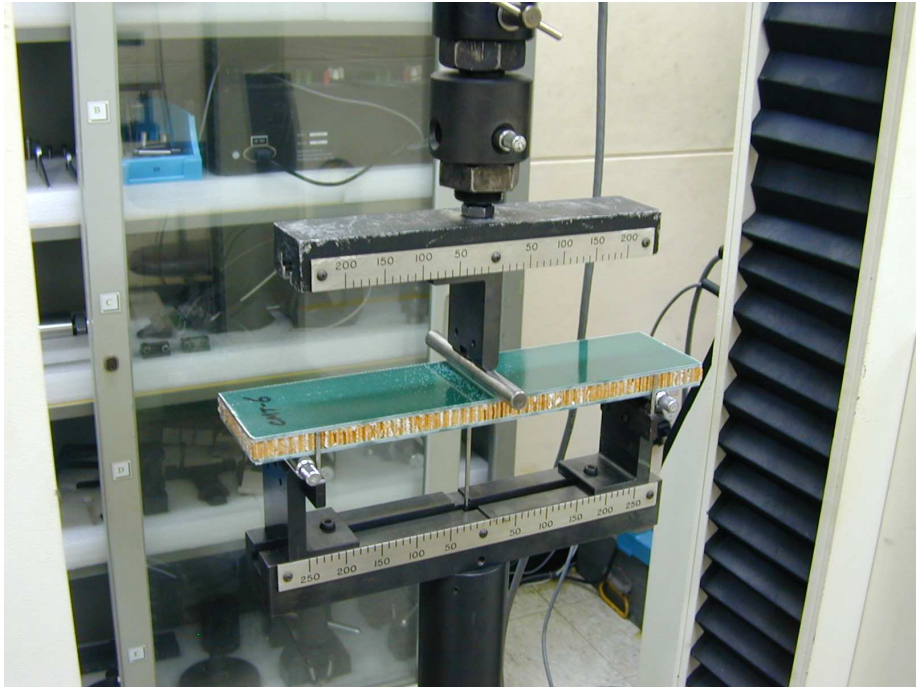


Fig. 46 Apparatus for long beam flexural test

5.2.4 시험결과

본 연구에서 구한 long beam flexural 에 의한 굴곡강도 및 굴곡탄성율을 Table 7 flatwise tension test의 결과를 Table 8에 나타내었다.

Table 7 Results of long beam flexural test

Test item	Flexural strength (MPa)			
	L-direction			
Specimen	1	2	3	Avg.
Autoclave	53.3	54.7	52.7	53.6
Press	51.3	50.6	51.4	51.1
Test item	Flexural strength (MPa)			
	W-direction			
Specimen	1	2	3	Avg.
Autoclave	64.5	63.8	64.5	64.3
Press	61.7	61.9	62.8	62.1

Table 8 Results of flatwise tension test

Test item	Flatwise tension (MPa)			
	1	2	3	Avg.
Autoclave	923.1	912.3	933.5	922.9
Press	888.2	1,032.4	753.5	891.4

5.2.5 결과 및 고찰

이송용 랙에 사용된 라미네이트에 대한 기계적 성질과 오토클레이브와 프레스 성형에 의해 제작한 샌드위치 구조물의 기계적 특성을 평가하기 위한 시험을 행하였다.

그 결과 프레스 성형에 의해 제작된 시편의 기계적 특성이 오토클레이브 성형에 의해 제작된 시편의 기계적 특성보다 2~5% 낮은 값을 나타내었다. 따라서, 프레스 성형에 의하여 오토클레이브에 의한 성형과 유사한 기계적 특성을 가진 이송용 랙을 제작할 수 있음을 확인하였다. 이는 프레스 성형 시 오토클레이브와 유사한 조건을 만들기 위하여 진공압을 걸어주고 성형하였기 때문에 오토클레이브와 유사한 수준의 기계적 물성을 얻을 수 있었던 것으로 사료되며 오토클레이브 성형에 의한 샌드위치 구조물이 2~5% 높은 기계적 물성을 나타내는 것은 장비의 정밀도에 의한 것으로 사료된다.

이상의 결과를 통하여 오토클레이브, 프레스 두 성형방법에서 모두 우수한 기계적 물성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 프레스 성형을 통하여 오토클레이브 성형과 유사한 수준의 제품을 보다 효율적으로 생산할 수가 있다.

5.3 열적 특성시험

5.3.1 유리전이온도

고체 상태의 고분자는 결정상(crystalline state)과 비결정상 (glassy state) 두 가지 형태로 구분될 수 있다. 비결정상에서는 규칙적인 배열이 나타나지 않는다. 즉, 액체와 같이 그 구조가 완전히 불규칙적이다. 따라서 비결정상은 분자 운동이 관측되지 않거나 아주 제한된 분자 운동만이 가능한 언 액체처럼 보여질 수 있다. 온도 증가 시 분자 운동이 가능할 만큼 계의 열적 에너지가 매우 커지며, 분자 운동이 회전이나 고분자 사슬의 비틀림을 수반한다. 이 때 발생한 전이를 유리전이라 한다. 유리전이는 모든 비결정성 물질이나 부분 결정 물질의 특징적인 전이이다. 유리전이온도 (T_g) 아래에서 물질은 고체 상태이거나 깨지기 쉬운 유리상이며, 유리전이온도 이상에서는 액체상 또는 고무와 같은 성질을 갖는다. 유리전이온도에서는 Young's and shear modulus와 비열, 팽창계수(coefficient of expansion), 유전상수 (dielectric constant)등 많은 물리적 성질이 급격히 변한다.²⁴⁾ Fig. 47은 이러한 T_g 와 물리적 성질과의 상관관계를 타나내고 있다.

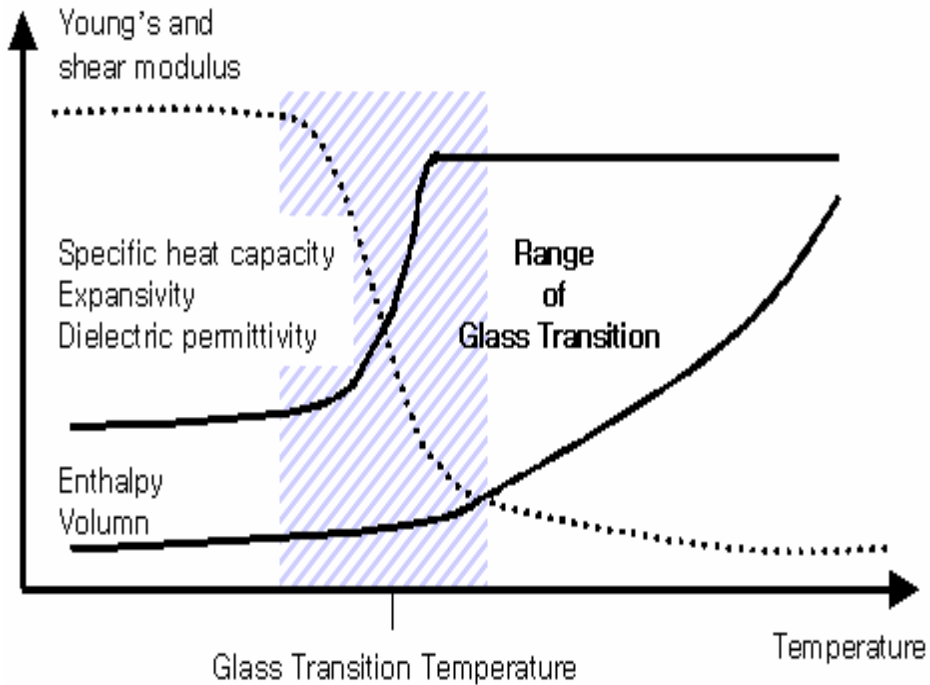


Fig. 47 Correlation between Tg and property

5.3.2 DSC(Differential Scanning Calorimeter)

DSC는 시료물질과 기준물질을 조절된 온도프로그램으로 가열하면서 이 두 물질에 흘러 들어간 열량의 차이(Heat flux, dQ/dt)를 시료온도의 함수로 측정하는 장치로서 반응속도론, 순도분석, 고분자물의 경화에 대한 정보를 제공해준다.²⁵⁾ DSC 곡선에서 피크의 위치, 모양 및 수로부터 시료의 정성적인 확인을 할 수 있고 피크의 넓이는 시료가 변성할 때의

엔탈피(enthalpy)의 변화에 관계되므로 시료중에 반응을 일으키는 물질이나 시료의 열에 대한 변수들을 정량적으로 계산할 수 있게 한다. 고분자가 무정형 부분의 분자사슬 운동, 즉 회전운동, 진동 운동 및 병진 운동이 일어나는 유리상태에서 고무상태로 전이할 때 온도에 따른 비 체적의 변화율이 바뀌게 되기 때문에 DSC 측정 시 열용량 기선의 변화(흡열 반응)가 생기며 이 온도를 유리전이온도 온도점(Tg, temperature of glass transition)으로 정한다. 유리전이 현상은 그 기선의 이동이 일어나기 위한 열량 변화의 크기가 매우 작기 때문에 상당히 정밀한 측정이 요구된다.¹⁴⁾

5.3.3 DMA(Dynamic Mechanical Analysis)

DMA는 진동하는 외력을 가하였을 때 대응하여 발생하는 물질의 변형을 온도에 따라 측정하는 것으로 동적인 탄성율, 손실 탄성율(loss modulus)와 mechanical damping 또는 내부 마찰력 등을 구할 수 있다.²⁶⁾ 여기서 말하는 modulus란 재료의 강성을 뜻하는 것으로 실험 장치에 따라 전단, 인장 또는 굴곡 탄성율 등이 있다.

DMA는 온도에 대한 상수로서 저장 탄성계수(점탄성 성분 중 탄성부

분)인 storage modulu(E')와 손실 탄성계수(점탄성 성분 중 점성부분)인 loss modulus(E'')의 측정을 가능하게 한다. 제동이나 손실계수라 불리는 $\tan \delta$ 로 다음과 같이 표시된다.

$$\tan \delta = \frac{E'}{E''} \quad (5.7)$$

Fig. 48에 측정한 DMA thermogram을 나타내었다.

이 thermogram으로부터 제동 곡선을 근거로 유리전이 온도를 확인할 수 있으며 $\tan \delta$ 곡선의 정점이 유리전이 온도에 해당한다.¹⁴⁾

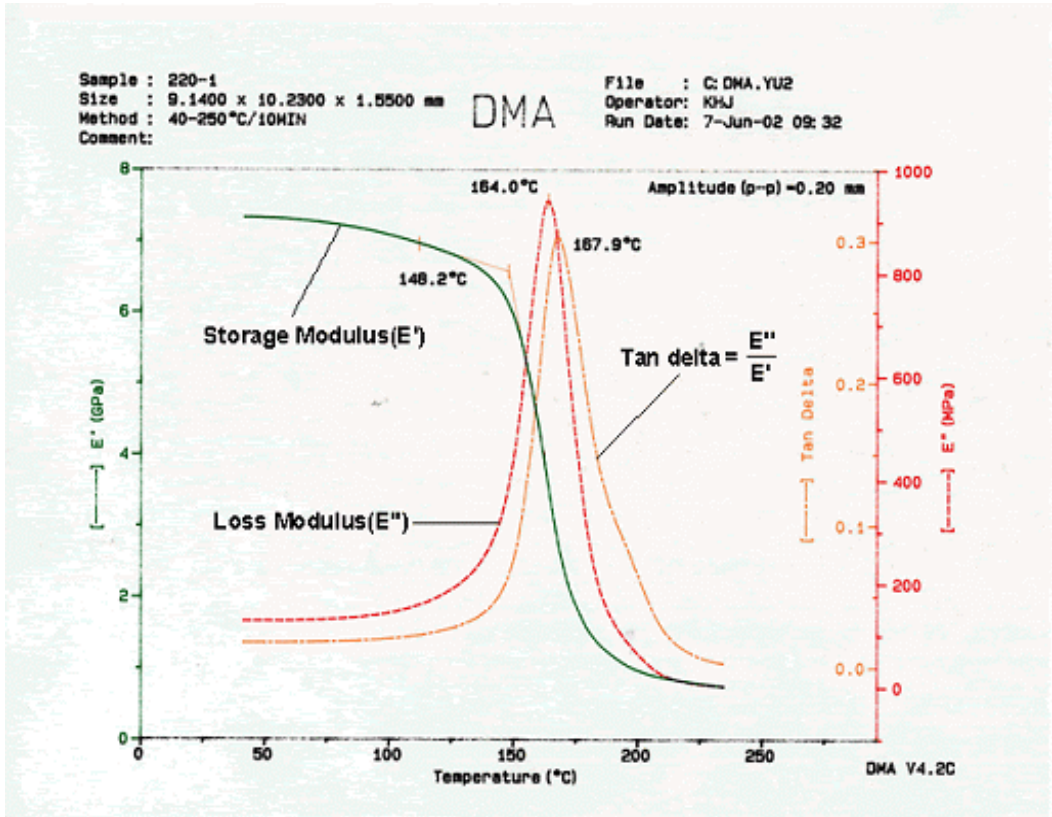


Fig. 48 Results of TA 983 DMA

1) 시편의 준비

본 실험에서 사용된 시편의 제원은 0.9cm X 1.8cm 크기이다. DSC (differential scanning calorimeter) 경우는 프리프레그 성형 시 수지가 추출되게끔 하여 보강재가 포함되지 않은 순수 경화된 수지를 시편으로 사용하였다.(Fig. 49) DMA(dynamic mechanical analysis) 용 시편은

glass/epoxy laminate (두께 2~3mm)를 10mm X 30mm 로 가공하여 제작하였다. (Fig. 50)¹⁴⁾

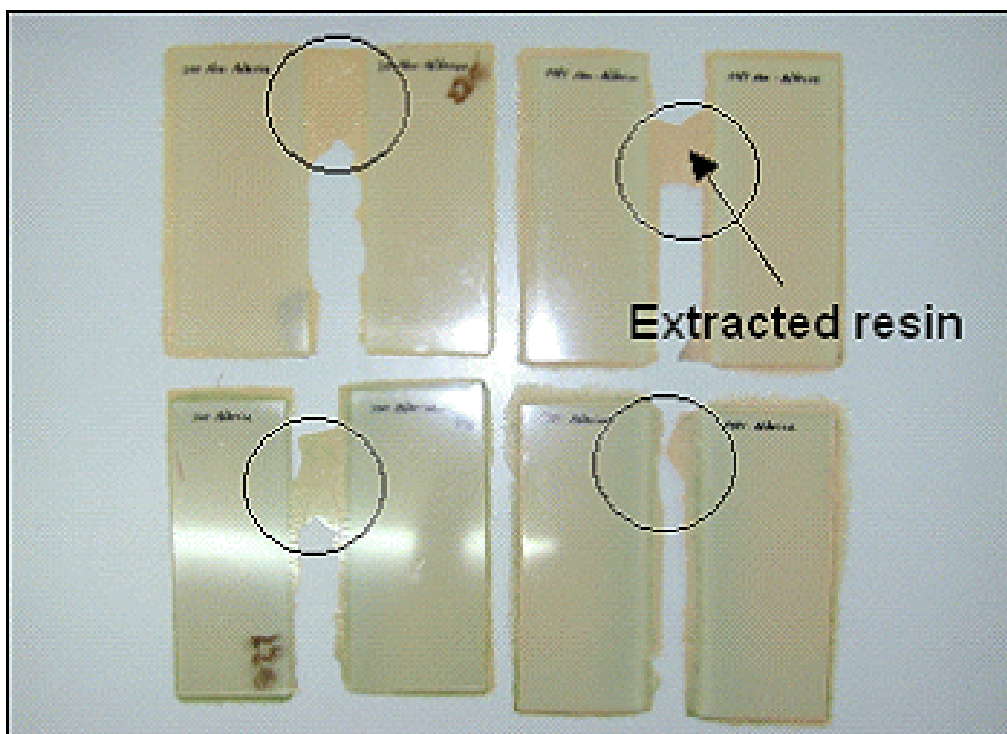


Fig. 49 Specimens for DSC



Fig. 50 Specimens for DMA

2) 시험방법

DMA에 의한 유리전이온도(T_g) 측정은 TA사의 DMA983장비로 각각 라미네이트 시편을 사용하였다. 시험에 적용한 frequency는 resonant mode, heat up rate는 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 하였고 질소 분위기 하에서 상온에서 250°C 까지 측정하였다. 유리전이온도는 loss modulus와 storage modulus의 비인 $\tan \delta$ 값으로 하였다. 라미네이트로부터 추출한 수지의 유리전이온도는 TA사의 DSC 2910 장비를 사용하여 분당 20°C 로 승

온하면서 측정하였다. Pruge gas는 질소를 사용 하였다.¹⁴⁾ 각각 장비 모습을 Fig. 51과 Fig. 52에 나타내었다.



Fig. 51 Dynamic mechanical analysis



Fig. 52 Differential scanning calorimeter

3) 시험결과

본 연구에서는 라미네이트의 유리전이온도를 DMA와 DSC를 이용하여 측정하고 그 변화 양상을 분석하여 물성변화에 어떠한 영향을 미치는가를 알고자 하였으며, 측정 결과치를 Table 9에 나타내었다.

Table 9 Results of DSC, DMA

Test item	DSC	DMA
Glass transition temperature(°C)	131	169

5.3.4 시험결과에 대한 고찰

DSC, DMA를 통하여 이송용 랙의 제작에 사용될 라미네이트의 열적 특성을 살펴보았다.

유리전이온도는 DSC 분석결과 131°C, DMA 분석결과 169°C로 나타났다. 이송용 랙의 사용온도가 최대 70°C인 것을 감안하면 180% 높은 온도까지 열적 안정성을 유지함을 알 수 있었다.

5.4 디지털 디스플레이 이송용 랙의 특성 평가

5.4.1 평활도

표면의 평활도는 0.0016mm로 목표로 삼았던 0.5mm에 만족할 만한 측정 값을 나타내었다.

각 측정 지점의 측정 값은 Table 10에 나타내었으며, 측정결과는 Table 11에 나타내었다.

Table 10 Flatness measurement of composite rack

3	2	1	0	1	2	3
0.037	0.025	0.036	0	-0.012	0.005	0.020

Table 11 Results of flatness test

Property	Requirement	Test values	Remark
Flatness(mm)	0.5mm 이내	0.016mm(AVG.)	(+/- 0.15mm이내)



Fig. 53 Scheme of flatness test machine

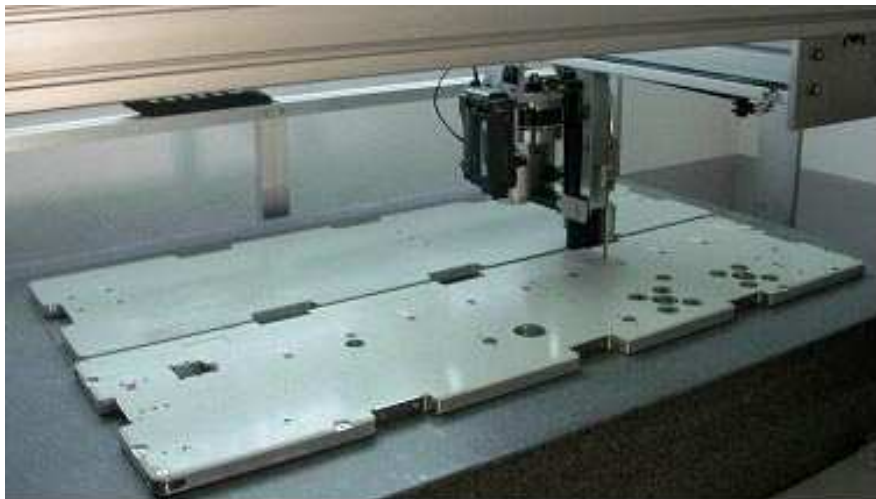


Fig. 54 Scheme of flatness test

5.4.2 상/하판 절연도

상하판의 저항을 측정하여 절연도를 측정한 결과 목표치인 100 옴을 초과하는 충분한 값을 나타내었다.

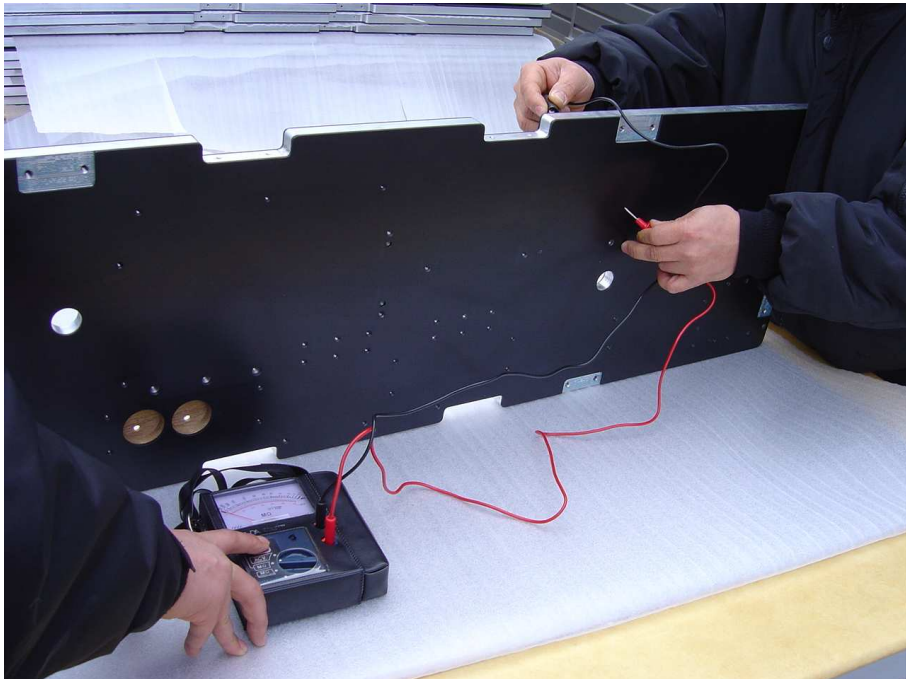


Fig. 55 Scheme of resist test between upper and lower side

5.4.3 동판간 절연도

성형 시 함께 매입되어있는 동판간의 절연도를 측정한 결과 목표치인 100 옴을 초과하는 충분한 값을 나타내었다.

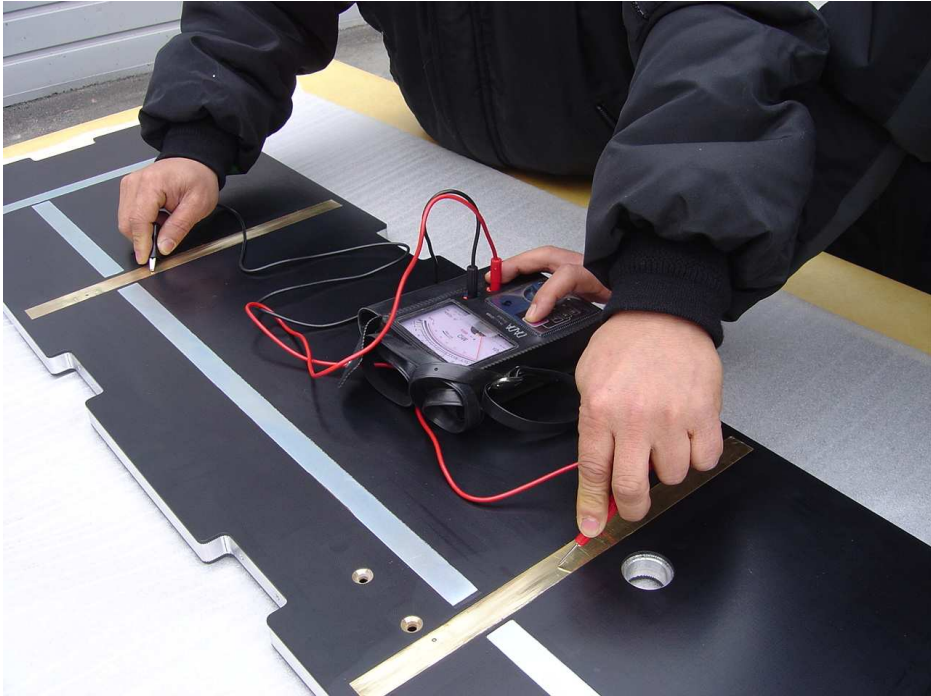


Fig. 56 Scheme of resist between inserted brass parts

5.4.4 Aging 후 평활도

60℃의 조건에서 50kg의 하중을 주고 8시간 에이징을 실시한 후 평활도를 측정하였다. 그 결과 0.024mm 로 목표치인 0.5mm보다 우수한 시험결과를 보여주었다.

Aging 이전과 이후의 평활도를 Fig. 58에 나타내었다.

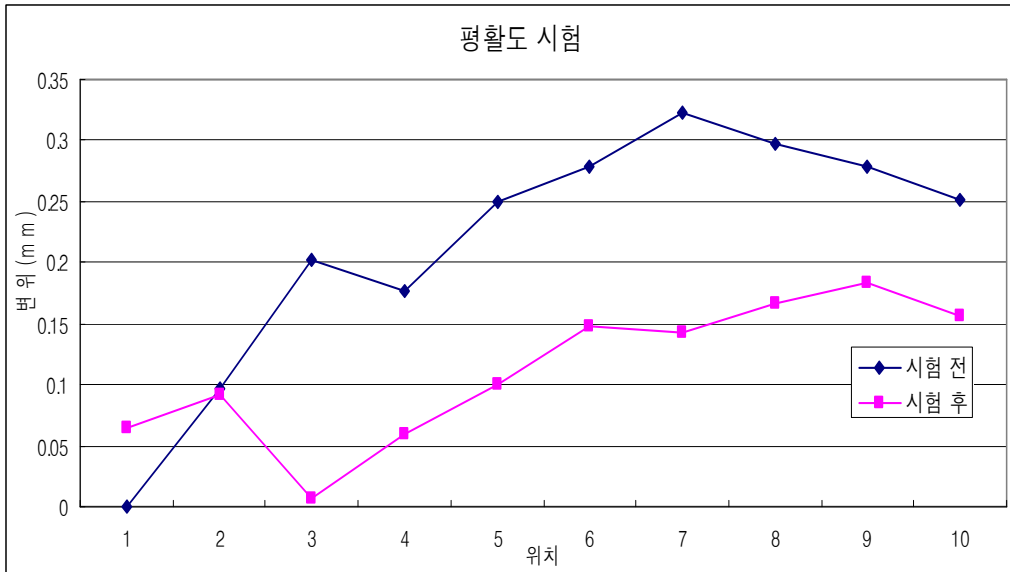


Fig. 57 Comparison of the flatness test

제 6 장. 결론

본 연구에서는 복합재료로 제작하고자 하는 디지털 디스플레이의 생산 라인에 사용되는 랙의 응력해석을 통해 두께가 약 25mm 되는 랙을 설계하였다. 설계 결과에 따라 복합재료 성형법 중에서 우주항공용 부품 등의 성형에 많이 이용되고 있는 오토클레이브 성형법과 일반 산업용으로 사용되는 프레스 성형법을 이용하여 시제품을 제작하여 그 기계적 특성들을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하니컴 샌드위치에 대한 기본적인 강도계산 이론에 의해 면재를 2.5mm, 하니컴 샌드위치의 두께 20mm로 LCD,PDP 생산라인에 사용되는 랙을 설계한 결과 하니컴 샌드위치 구조물의 최대 처짐이 0.9mm로 충분한 특성을 나타내었으므로 최적 설계를 이루었음을 알 수 있었다.

2) 오토클레이브 성형에 의한 하니컴 샌드위치 구조가 프레스에 의한 하니컴 샌드위치 구조보다 2~5% 높은 기계적 특성을 나타내었다. 이는 진공압이 가해지는 성형조건의 정밀도에 의한 것으로 보인다.

3) 오토클레이브 성형에 의한 성형품은 알루미늄 인서트 및 알루미늄 프레임과 하니컴 코어와의 단차로 인한 요철이 상부 표면에 나타남을 알 수 있었다.

4) 따라서 유사한 기계적 특성을 가지고 10배 높은 생산량을 낼 수 있고, 평탄한 표면을 얻을 수 있는 프레스 공정이 최적의 성형 방법으로 판단된다.

5) 라미네이트와 성형시 추출한 경화된 수지시료를 열분석 기구인 DMA와 DSC를 이용하여 유리전이온도를 측정하였다. 측정된 유리전이 온도는 131℃ (DSC)와 169℃ (DMA)로 예상되는 사용 최대온도인 60~70℃ 부근에서의 열적안정성은 충분함을 알 수 있었다.

6) 디스플레이 이송용 랙의 특성을 평가한 결과 평활도, 상/하판 절연도, 동판간 절연도, Aging 후 평활도 모두 만족할 만한 특성을 나타내었다.

7) 경량화 정도를 확인하기 위해 동일한 치수의 알루미늄 랙과 복합재료에 의한 랙의 무게를 계량한 결과 복합재료에 의한 랙이 약 76%의 경량화가 된 것을 알 수 있었다.

이상의 결과를 통하여 하니컴 샌드위치 구조물을 이용한 디지털 디스플레이 이송용 랙의 개발은 최적화된 상태로 이루어졌음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) 奥田謙介, 炭素纖維と 複合材料, 共立出版株式會社, pp 26 ~ 30, 1992.
- 2) Daniel B., Miracle and Steven L., Donaldson, ASM Handbook, Vol. 21, Composites, ASM International, pp 3 ~ 17, 2001.
- 3) 日本材料學會, 先端材料の 基礎知識, オ-ム社, pp 65 ~ 81, 1991
- 4) 福田 博, 横田力男, 塩田-路, 複合材料 基礎工學, 日刊工業新聞社, pp 1 ~ 3, 1994.
- 5) 김윤해, 한중원, 복합재료학, 효성출판사, pp 19~30, 109~148, 2001.
- 6) 島村昭治, 官入裕夫, 複合材料, 實教出版, pp 22 ~ 31, 1993.
- 7) Engineered Materials Handbook, Composites, ASM International, Vol. 1, 1987, pp 11.
- 8) D. Hull and T.W Clyne, An Introduction to Composite Materials, Second Edition, Cambridge Solid State Science Series, pp 275~277.
- 9) 공군군수사령부 항공기술연구소, "Advance Composite Repair", 2000, pp 57~87.
- 10) 김윤해, 한중원 공저, "복합재료학", 효성출판사, 2001, pp 87~124.

- 11) 양영호, 홍석렬 공저, "최신 기계재료", 선학출판사, 2000, pp 5~26.
- 12) H.M. Flower, High Performance Materials in Aerospace, Chapman & Hall, 1995, pp579~580.
- 13) Robert M. Jones, Mechanics of Composite Materials, McGraw Hill, 1985, pp 14~195
- 14) 한중원, 항공기용 복합재 구조물의 성형 및 수리 시 발생하는 결함의 원인 분석과 최소화 방안에 관한 연구, 2003, pp 105~122
- 15) 韓國標準協會, 韓國産業規格 KS F 2240 유리섬유강화 플라스틱의 시험방법 통칙, 1989.
- 16) 배창원, 섬유강화 복합소재에 의한 경량의 선박용 동력 전달축 개발, 2003, pp 79~80
- 17) 조선형, 임영호, 김이곤, 압축성형된 한 방향 섬유강화 고분자 복합판의 섬유함유율 분포, 韓國複合材料學會誌, 第7卷, 第3號, pp 67~76, 1994.
- 18) 官入裕夫, FRP試驗 マニュアル, 日本規格協會, pp. 79~81, 1989
- 19) 韓國標準協會, 韓國産業規格 KS F 2244 유리섬유 강화 플라스틱의 섬유함유율 측정 방법, 1990.

20) ASTM, ASTM D 638 “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”, 2003.

21) ASTM, ASTM D 695 “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics”, 2002.

22) ASTM, ASTM D 2344 “Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates”, 2000.

23) ASTM, ASTM C 297 “Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions”, 2004.

24) Navy MIL-STD-401B CANC NOTICE1, “Sandwich Constructions and Core Materials; General Test Methods”, 1999.

25) Thermal Analysis Terms, Methods, Applications by Georg Widmann & Rudolf Riesen

26) 김영범, 송석정, "열분석기기(DSC, DTA, TGA, TMA)의 원리 및 응용", 고분자과학과 기술, 제4권 5호 pp 390, 1993

27) Takayuki Murayama, "Dynamic Mechanical Properties" Encyclopedia of polymer science and engineering, 2nd edition, John Wiley & Sons, vol. 5, pp 299, 1985

감사의 글

해양대학을 처음에 방문했을때 지도교수인 김윤해 교수님을 만나러 다
른 업무로 갔다가 대학원 진학을 권유받고, 석사를 시작한지 어언 7여년
의 세월이 가까워 옵니다.

한 10여년의 세월을 두고 박사학위를 받을거라고 느긋하게 다니다보
니 벌써 학위논문 후기를 적고 있으니 세월의 빠름을 절감하고 있습니다.

해양대학교 대학원을 다니면서 CKI라는 보트 제조업을 창업하여
VaRTM공법을 도입 발전하여 보트제품을 열심히 만들고 벤처기업을 완
성하여 비전을 가지고 세계시장을 나아가고 있습니다. 또한 해양대 출신
들로서 연구와 생산기술팀을 구성하여 이론을 실제 제품으로 적용하여
성취를 이루고 있습니다. 대학원생 기간동안 많은 발전적인 변화가 있었
습니다.

학위 논문뿐만 아니라 제조업의 성취를 이루기까지 많은 지도편달과
즐거웠던 대학원 과정을 이끌어 주신 지도교수인 김윤해 교수님께 깊은
감사를 드립니다.

그리고 학과 교수님인 문경만교수님, 이성열교수님, 김영식 교수님, 이
병우교수님께도 감사드리고, 논문 지도를 밤 늦은 시간까지 교정을 도와
주신 한국해양수산연수원의 배창원 교수님께도 감사드립니다.

인생과 업무의 선배로서 존경하는 예동아빠께 진심으로 감사드립니다.
바쁜 업무 가운데서도 큰 힘이 되어주는 김국진이사에게 감사 드립니다.

LCD관련 제품개발에 동고동락했고, 깊은 우정을 나누는 부민산업의
장한 사장님과 전대혁부장께도 이글을 빌어 감사 드립니다.

대학원 실험실의 신도훈과 권순철, 이정주, 임철문등 초기 복합재료
실험실 학생들에게 같이 지냈던 즐거운 시간들이 미소짓게 합니다.

손진호박사와 동경대 재학중인 엄수현과 우병훈, 그리고 실험실 현재
학생들에게 고마운 마음을 전합니다. 이 논문의 전체적인 과정을 진행한
조영대대리에게 노고를 치하하고 싶습니다. 그리고 회사의 직원인 박유
진, 조용식에게도 고마운 마음을 전하고, 사회 선배인 강신산업의 황명
훈 부장과 문창하이사, 박창순사장님께도 감사의 인사를 드립니다.

Airtech사의 Mr. Rocklin Farquhar부부, Showa사의 Mr. Hiroshi
Fujimoto에게도 감사의 마음 전합니다.

자나깨나 장남의 성취를 기원하시는 부모님과 장인 장모님께 감사 인
사를 드립니다.

회사일로 고생이 너무 많은 동생 병수와, 경화에게 감사의 마음을 전
합니다.

처가의 선취,희은 처제들에게도 항시 지켜봐 주어서 고마운 마음을 전

합니다.

사업가의 아내로서, 늦각이 대학원생의 아내로서 너무나 훌륭한 내조를 해주는 사랑하는 아내 황임선에게 고마운 마음을 전하고, 건강하고, 귀엽게 잘 자라주는 사랑하는 내 아들들 지윤, 지원에게 이 글을 빌어 고맙다고 하고 싶구나.

사업개발 과정에 시험과 평가 생산, 납품등의 사업화 과정을 같이 진행하여, 그것을 가지고 이렇게 논문화 하기가 사실 어려운 점이 많았습니다. 그러나 나름대로 실제 산업에서 쓰이는 방향으로 충실히 이론적인 토대를 제공하고자 하였습니다. 멋진 논문에 대한 꿈이 컸으나 좀 부족한 면이 아쉬우나 후배들에게 숙제를 남기고자 합니다.