



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

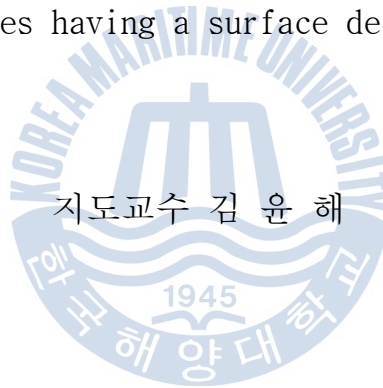
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

표면 결함을 가지는 복합재료 후판에서의 인장특성 연구

A Study on the Tensile properties of composite material
plates having a surface defects



지도교수 김 윤 해

2014년 1월 10일

한국해양대학교 대학원

재료공학과

김 태 현

본 논문을 김태현의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

위원

위원

김 준 영

문 경 만

김 윤 해

(인)

(인)

(인)

2014년 1월 10일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	v
List of Figures	vi
Abstract	viii
 1. 서 론	
1.1 개요	1
1.2 연구 배경	3
 2. 복합재료	
2.1 복합재료의 성형방법	5
2.1.1 Hand-lay up	5
2.1.2 Spray up	7
2.1.3 Filament winding	9
2.1.4 Pultrusion	11
2.1.5 Resin Transfer Molding (RTM)	13
2.1.6 Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)	15
2.1.7 Vacuum Bag Molding Process	17
2.2 복합재료의 손상	2
2.2.1 복합재료 손상 개요	19
2.2.2 복합재료 손상의 종류	19
 3. 재료 및 실험방법	
3.1 재료 소개	23
3.2 시편 설계	25
3.3 시편 제작	28
3.4 실험 방법	39

4. 실험결과 및 고찰	
4.1 인장시험 결과	40
4.2 파단면 관찰	44
4.3 결과 고찰	48
5. 결 론	49
참고문헌	51
감사의 글	54



List of Tables

Table 1 Properties of glass fiber fabric	23
Table 2 Properties of Resin	24
Table 3 Tensile Specimen Geometry Requirements	38
Table 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations	38



List of Figures

Fig. 1 Surface defects of composite materials	4
Fig. 2.1 Hand-ray up process	6
Fig. 2.2 Spray up process	8
Fig. 2.3 Filament winding process	10
Fig. 2.4 Pultrusion process & product	12
Fig. 2.5 RTM process	14
Fig. 2.6 VARTM process	16
Fig. 2.7 Vacuum bag process	18
Fig. 2.8 Impact damage	21
Fig. 2.9 Crack & Delamination	21
Fig. 2.10 Hole damage	22
Fig. 2.11 Lightning damage	22
Fig. 3.1 Schematic of 1 ply under type	25
Fig. 3.2 Schematic of 2 ply under type	26
Fig. 3.3 Schematic of 3 ply under type	27
Fig. 3.4 Specimen configuration	28
Fig. 3.5 Specimen	32
Fig. 3.6 Specimen drawing	37
Fig. 3.7 Universal Test Machine (KDMT - 156)	39
Fig. 4.1 Reference specimen result	40
Fig. 4.2 Group 1 average tensile strength	41
Fig. 4.3 Group 2 average tensile strength	42
Fig. 4.4 Group 3 average tensile strength	43

Fig. 4.5 Micrographs of 0.3 void area specimens (X 50)	4
Fig. 4.6 Micrographs of 0.6 void area specimens (X 50)	6
Fig. 4.7 Micrographs of 0.9 void area specimens (X 50)	8



A Study on the Tensile properties of composite material plates having a surface defects

Kim, Tae-Hyun

Department of Materials Engineering Graduate School,
Korea Maritime & Ocean University

Abstract

The development of industry in the composite material has been applied in many industries are trying to move very dynamically. Specially, Wind generators in particular for the fabrication of large structures using composite material is increasing significantly. Production of large composite structures has been used by VATRM process.

However, VARTM process to create large structures includes a lot of symptoms. Especially void area is occurred on the surface of the product. To eliminate these defects, the surface of the structure needs repair.

In order to check the effect on the surface of composite materials including the void area, the 7mm plate of specimen was made with void area. Mechanical strength was measured and analyzed through tensile

tests, Also compared to that of the void free area.

In this study, the volume of material remains the same, but the surface defects inserted by changing the position and thickness of void area were designed with three different groups.

The inserted void rate of the specimen is between 2.5% and 7.7%. In addition, compare to the void free specimen, tensile strength is decreased at approximately 11%.

As a result of observing the fracture plane delamination showed similar appearance. Also external shock can affect that the material's peeling being happened. In other words, if surface porosity is found, that needs some repair.

The VARTM process to create large structures, the strength and safety will be improved if the variables which could include pores are removed as much as possible.

KEY WORDS: Composite material plates 복합재료 후판; Tensile strength property 인장강도특성 ; Surface defects 표면결함; Voids area 기공영역

제 1 장 서 론

1.1 개요

복합재료는 2종류 이상의 서로 다른 종류의 재료를 합쳐서 각각의 재료들의 장점을 최대한으로 이끌어내고 단점은 서로 보완하는 재료를 말한다. 두 종류 이상의 재료가 합쳐졌을 때 금속재료는 새로운 상이 나타나는 합금이 되지만 복합재료는 그 재료들의 원래 상이 그대로 나타난다는 차이가 있다.

기본적으로 구조물의 하중을 지지하는 강화재와 강화재를 보호하고 그 형상을 유지해주는 기지재료로 나눌 수 있다. 강화재의 종류에 따라 FRM(Fiber Reinforced Metal), FRP(Fiber Reinforced Plastic), FRC(Fiber Reinforced Ceramic)으로 지칭되며 일반적으로는 섬유강화 플라스틱인 FRP를 가장 많이 사용하고 있다. 그 가격 때문에 주로 우주, 항공 산업에 주로 사용되었으나 최근에는 자동차 및 선박, 스포츠용품 등으로 그 사용 영역을 넓혀나가고 있다.

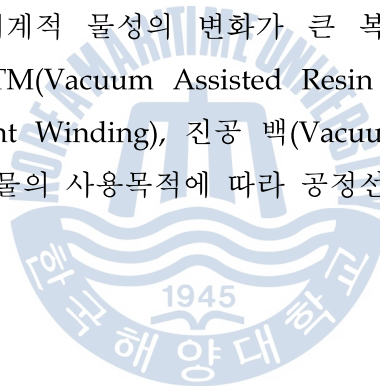
섬유강화 복합재료는 금속재료와는 다르게 이방성의 물질로 사용되는 강화섬유와 기지재료의 종류 및 강화섬유의 방향에 따라 그 특성이 다르게 나타나며 이러한 성질 때문에 설계 가능한 재료라 불린다. 기존의 금속재료에 비해 높은 비강성과 비강도를 가지는 것이 특징이며 이러한 특징을 이용하여 경량화가 요구되는 구조물에 대해서 금속재료를 대체하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.

강화섬유는 많은 종류가 있지만 산업에서 많이 적용하는 섬유로는 유리

섬유, 탄소섬유, 아라미드 섬유가 있으며 강화섬유의 선택은 구조물의 사용방법에 따라 폭 넓게 선택할 수 있다. 일반적으로는 기계적 물성이 좋고 저렴한 유리섬유가 구조물 제작에 많이 선택되지만 이보다 더 좋은 기계적 물성을 원하는 경우에는 탄소섬유를 적용하고 있다.

복합재료에서 사용되는 기지재료 또한 적용범위에 따라 많은 종류가 사용되고 있지만 일반적으로는 저렴하고 기계적 물성이 좋은 에폭시(Epoxy) 수지를 많이 사용하고 있으나 최근에는 폴리에스테르(Polyester), 비닐에스테르(Vinylester)등과 같은 열경화성 수지를 적용하기도 하며 PEEK(Polyether-ether Ketone)과 같은 기능성 열가소성 수지를 사용하기 위한 연구가 각광받고 있다.

제조공정에 따른 기계적 물성의 변화가 큰 복합재료는 핸드 레이업(Hand-ray up), VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), 필라멘트 와인딩(Filament Winding), 진공 백(Vacuum Bag)공정 등이 많이 사용되고 있으며 구조물의 사용목적에 따라 공정선택이 필요하다.



1.2 연구 배경

최근 고유가시대가 도래하며 화석연료에 대한 의존도를 줄이고 친환경, 재생 가능한 에너지를 개발하기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며 풍력 발전산업이 현실적인 대안으로 받아들여지고 있다. 10kW~100kW급의 저용량 풍력발전기는 나무나 금속재료를 사용하여 발전기용 블레이드(Blade)를 제작하였지만 1MW급과 같이 대용량 풍력발전기 제작이 활발한 지금에는 효율적인 전력생산을 위하여 블레이드의 무게를 줄이기 위하여 복합재료를 이용한 풍력발전기용 블레이드를 제작하고 있으며 이 길이는 30m가 넘어가는 것이 많고 발전용량이 늘어감에 따라 그 크기 및 길이가 더 커져가고 있다.

풍력발전기용 블레이드의 제작에는 프리프레그(Prepreg)를 이용한 접합이 없는 일체형 블레이드 공정과 VARTM공정을 이용하여 상하파트를 제작하여 접합하는 공정이 있으며 최근에는 점점 커져가는 구조물 제작을 위해 VARTM을 이용한 상하파트 제작 공정이 채택되고 있다.

VARTM을 이용한 제작 공정 시 온도나 습도와 같은 외부환경의 영향이나 프리폼 적층 시 삽입되는 이물질로 인해 수지의 흐름이 원활하지 않게 될 경우 Fig. 1과 같이 최외측 수지층이나 그 바로 아래의 표면 섬유층에 기공이 모이는 결함을 볼 수 있으며 이러한 결함을 제거하기 위해 수리과정을 거치고 있다. 이러한 수리공정으로 인해 풍력발전기용 블레이드의 제작시간이 늘어나고 이는 생산성 저하를 불러오고 있다.

풍력발전기용 블레이드는 루트(Root)부의 경우 80mm가 넘는 후판으로 제작되고 있으며 주로 루트부에서 수지층 및 표면 섬유층에 기공이 모이는 결함이 발견되고 있다. 이러한 표면의 기공 영역이 복합재료 구조물 전체 강도에 어떠한 영향을 미치며 꼭 수리를 여부를 판단할 수 있는 지표가 있다면 생산성의 향상에 도움이 될 것이라 생각된다.

본 연구에서는 VARTM 공정중 최외측 수지층과 표면 섬유층에 생성되는 기공이 복합재료 후판에 미치는 영향을 확인하기 위해 후판 정의의 최소단위인 6mm가 넘고 복합재료 인장실험에서 요구하는 최소단위인 7mm의 후판을 내부 기공영역을 부여하여 제작하였다. 또한 인장실험을 통하여 기계적 강도를 측정하고 정상부의 기계적 강도와 비교하여 분석하였다.



Fig. 1 Surface defects of composite materials (Void area)

제 2 장 복합재료

2.1 복합재료의 성형방법

2.1.1 Hand-lay up

복합재료 성형방법 중 가장 오래된 공법으로 복잡하지 않은 형상 또는 크기가 큰 제품의 제조에 널리 사용된다. 주로 이형제가 코팅된 mold 위에 적층된 섬유에 수지를 가하며 롤러로 압착하는 형태로 작업이 진행되며 모든 형태의 섬유와 직물을 사용 할 수 있으며 이 때 적층된 시트의 수에 따라 그 두께가 결정되는 특징이 있다.

공정을 진행하며 섬유의 방향이 틀어지거나 적층 섬유 사이에 공기가 포함 될 가능성이 매우 높으며 공정 자체는 간단하여 초보자도 쉽게 할 수 있는 공정이지만 작업자의 숙련도에 따라 그 품질이 크게 달라질 수 있어 타 공정에 비해 제품의 강도가 현저히 떨어진다.

Hand lay-up 공정은 적은 수량의 제품 제작에 사용되며 보트외판 제작 등에 많이 적용되고 있다.

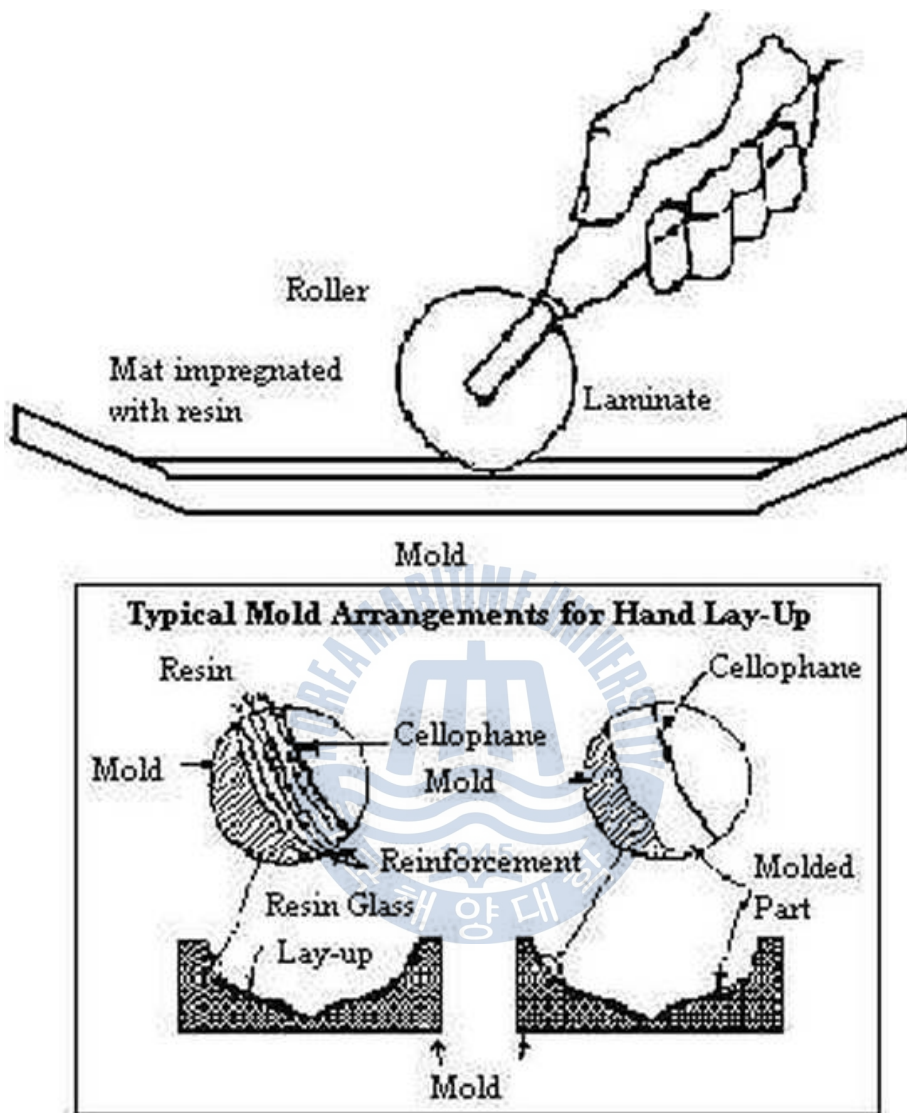


Fig. 2.1 Hand-ray up process

2.1.2 Spray up

Spray up 공정은 이형제 코팅된 mold에 약 10~30mm의 짧은 섬유를 수지가 분사되는 spray에 짧은 섬유를 혼합하여 원하는 두께만큼 방사하는 형태의 제조방법으로 Hand ray-up 공정의 자동화 process이다.

이음매가 없는 일체형의 제품을 얻을 수 있으나 수지함유량이 높고 섬유의 방향성이 없어 제품의 강도가 낮다.

Hand ray-up 공법에 비해 생산성은 좋으나 완벽한 자동화는 아니기에 대량생산에는 적합하지 않으며 보트외판이나 욕조 제작 등에 적용되고 있다.





Fig. 2.2 Spray up process

2.1.3 Filament winding

Filament winding 공정은 로빙 또는 토우와 같은 연속섬유를 수지에 함침시켜 회전하는 맨드렐에 감는 공정이다. 보강재는 이웃하는 밴드에 감기거나 밴드폭의 배수만큼의 거리를 두고 반복적으로 와인딩되어 맨드렐의 표면을 완전히 감싸게 된다. 와인딩이 완료되면 일반적으로 다른 공정과는 다르게 별도의 압축과정 없이 고온에서 경화한다. 경화공정이 끝나면 탈형, 사상 및 마무리 공정으로 Filament winding 공정이 완료된다.

습식 Filament winding 공정은 위와 같은 순서로 공정이 진행되며 건식 Filament winding 공정은 이미 수지가 함침되어 경화가 일정 부분 진행된 프리프레그를 이용하여 제작된다.

Filament winding 제품의 품질은 와인딩 시 섬유의 장력 및 감는 각도에 따라 물성 설계가 가능하다. 하지만 와인딩의 각도가 작은 경우 성형에 어려움을 겪을 수도 있다. 또한 와인딩 속도는 수지의 함침속도에 의해 좌우되며 수지 함침속도 내에 와인딩 속도가 있어야 수지가 완전히 함침된 제품을 만들 수 있다.

경화 공정 후 제품 내부의 맨드렐은 제거하는 것이 일반적이거나 형상 등의 이유로 제거가 힘들 때는 제거하지 않는 경우도 있다. 최근에는 컴퓨터 제어를 통한 자동화 장비를 많이 사용하고 있으며 이로 인해 품질의 균일성이나 복제성이 월등히 좋아졌다.

Filament winding 공정은 실린더, 파이프, 튜브 및 구 또는 기하학적 돔 형상을 갖는 압력용기 등 다양한 구조물을 생산하는데 적용된다.

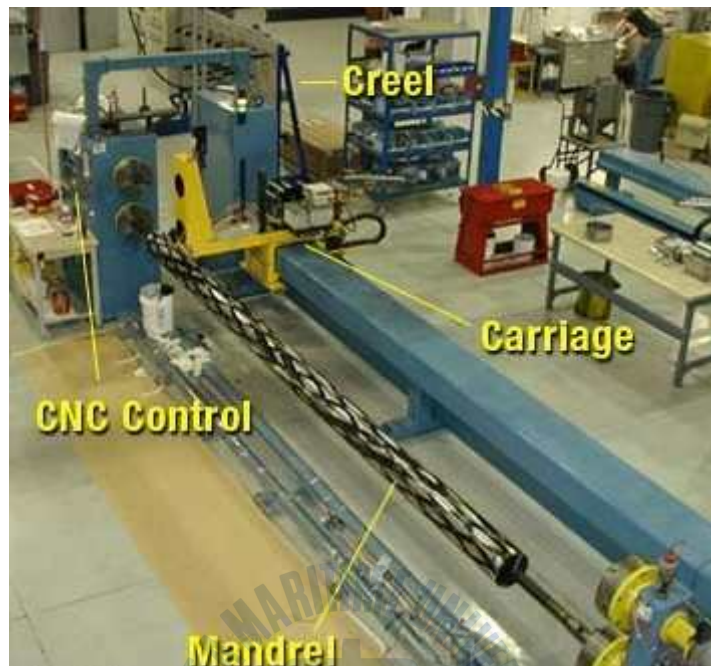


Fig. 2.3 Filament winding process

2.1.4 Pultrusion

Pultrusion 공정은 높은 섬유함유율(30~70%)과 일정한 단면을 가지는 긴 복합재료를 제조하기 위해 사용되는 연속 공정이다. 장섬유가 수지에 함침되어 가열된 금형을 통과하면서 형상을 잡음과 동시에 경화가 완료되며 금형을 빠져나온 제품은 원하는 길이만큼 절단하여 완료된다.

Pultrusion 공정은 금속의 압출과 유사하지만 금형 내부에서 외부로 밀려나가는 압출과는 달리 금형 외부에서 제품을 당긴다는 점에서 다르다. 일정한 속도로 연속적인 공정 진행이 가능한 점에서 복합재료 성형공정 중 생산성이 높은 편에 속하며 대량생산에 용이하다. 제품을 당겨서 만드는 공정의 특성상 섬유는 축 방향으로 배열되며 따로 축의 수직방향으로 강화시키지 않으면 제품의 강도는 축 방향으로 나오게 된다. 금형을 통과하여 제작되므로 정확한 치수의 제품 성형에 유리하다. 직선적인 형태의 제품을 만드는데 유리한 공정이지만 이 공정을 이용한 반경화된 제품을 제조하여 곡선형상의 제품 생산에 사용 할 수 있다.

최근에는 다양한 각도의 섬유 성형방법이나 열가소성 수지를 이용하는 기술개발에 관심이 높아지고 있으며 그에 따른 연구 또한 늘어나고 있다.

Pultrusion 공정은 주로 파이프나 빔과 같은 구조물의 제작에 적용되고 있다.

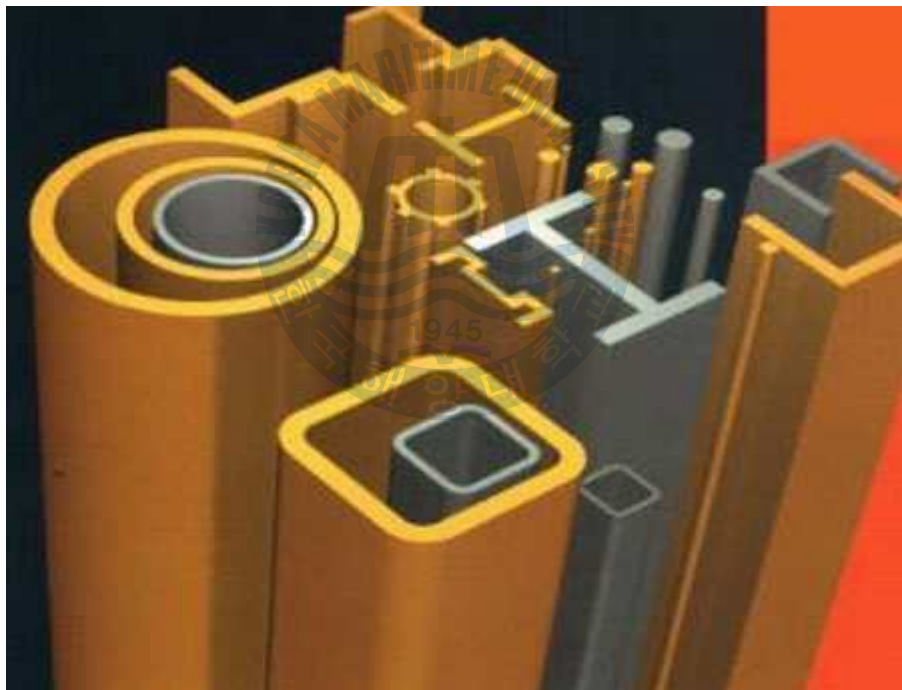
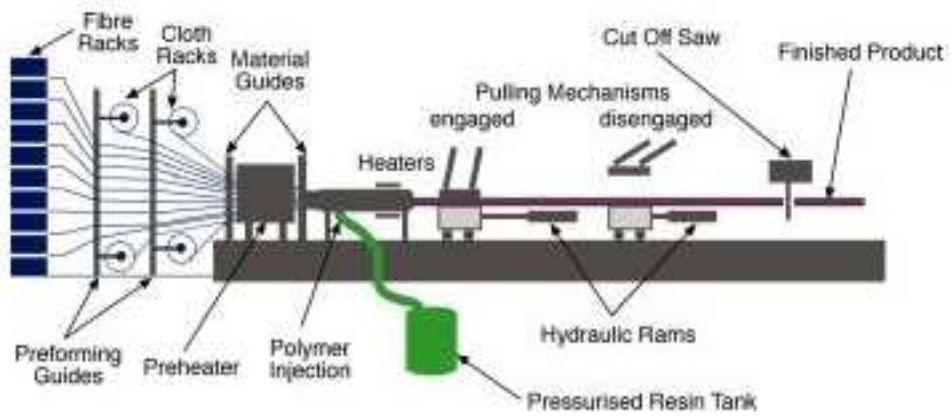


Fig. 2.4 Pultrusion process & product

2.1.5 Resin Transfer Molding (RTM)

RTM 공정은 원하는 형상의 금형 안에 예비성형체(preform)을 넣고 금형을 밀폐시킨 후 주입구를 통하여 수지를 금형 안에 주입하고 열과 압력을 가하여 성형하는 공정이다.

RTM 공정은 사용 수지에 따라 수분에서 수시간의 경화시간이 걸리므로 다른 복합재료 제조공정에 비해 제조시간이 짧은 편에 속하며, 복잡한 형상의 제조에 유리하고 복제성이 좋아 대량생산에 유리하다. 또한 장섬유를 사용하고 수지함유율이 50% 수준이므로 비교적 양질의 제품을 얻을 수 있다.

RTM과 유사한 공정으로는 RIM(Reaction Injection Molding), RRIM(Reinforced Reaction Injection Molding), SRIM(Structural Reaction Injection Molding) 등이 있다.

RIM이나 RRIM은 주로 단섬유를 이용하는 높은 생산성을 지닌 공정이며, SRIM공정은 금형 안에 예비성형체를 넣는 것은 같지만 반응성이 좋은 수지를 이용하므로 금형이 닫힌 후 빠른 시간 안에 수지를 주입하여야 하는 공정이다.

RTM 공정을 이용하여 여러 가지 자동차 부품이나 보트 등을 제작하는데 적용할 수 있다.

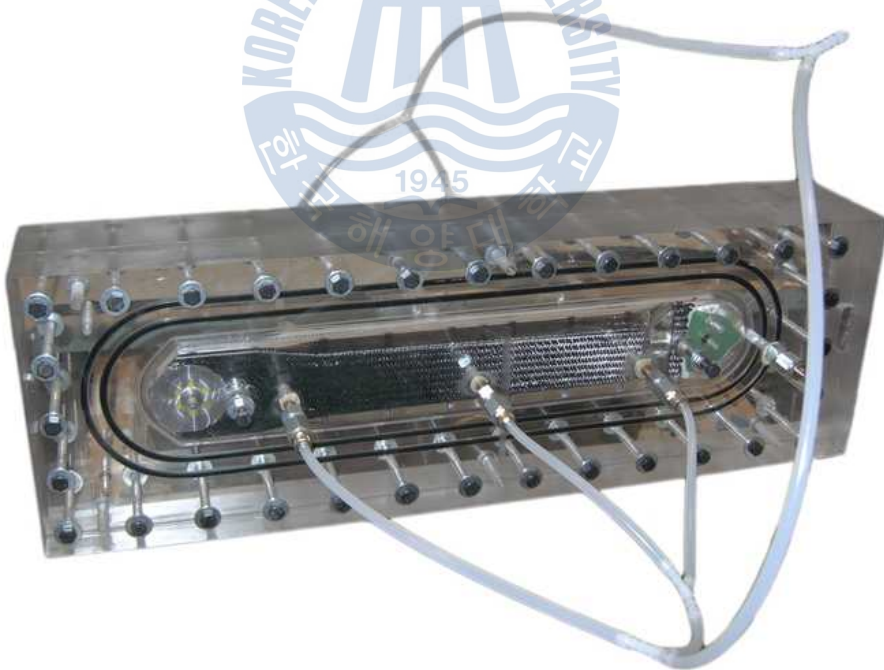
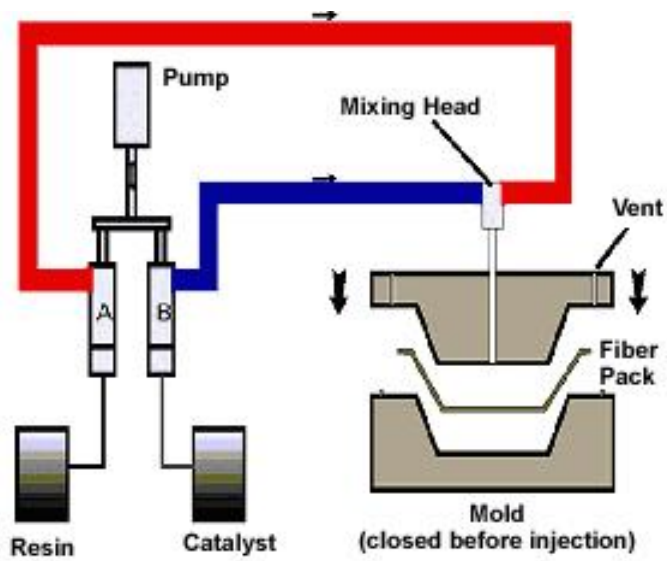


Fig. 2.5 RTM process

2.1.6 Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)

SCRIMP(Seaman Composite Resin Injection Manufacture Process)라고도 불리며 몰드와 유연한 진공백 사이에 프리폼 및 부자재를 넣고 내부를 진공을 이용하여 대기압 이하로 낮춘 후 수지를 진공압력만으로 빨아들여 프리폼을 적신 후 경화시켜 성형하는 공정이다.

대기압 이하의 진공을 가함으로서 프리폼을 압축하고 몰드 내부의 공기 및 가스를 제거하며 수지의 흐름을 원활하게 한다. 이를 통하여 높은 섬유함유율을 가지는 균일한 표면의 고품질 완성품을 기대할 수 있다.

진공을 유지하지 못하거나 기포가 제거된 수지를 사용하지 않는다면 보이드(void)가 형성되고, 이 보이드는 제품이 파손되는 원인으로 작용할 수 있다. 또한 수지가 주입되고 몰드에 완전히 채워지기 위해서 수지의 겔화를 막는 것이 중요하며 수지의 겔화는 온도와 같은 환경적인 요인에 영향을 받으므로 이를 막기 위한 일정한 온습도 유지가 중요하다.

대형의 복합재료 구조물 제작에 유리하며 비교적 생산비용이 적게 들지만 대량생산에는 알맞지 않은 공정으로 풍력발전기용 블레이드나 FRP 선박 등의 제작에 적용된다.

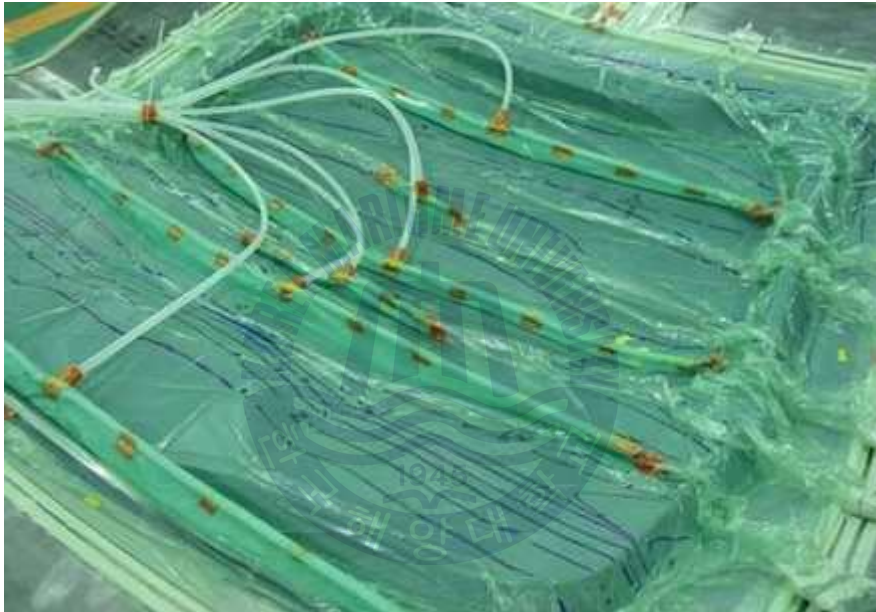
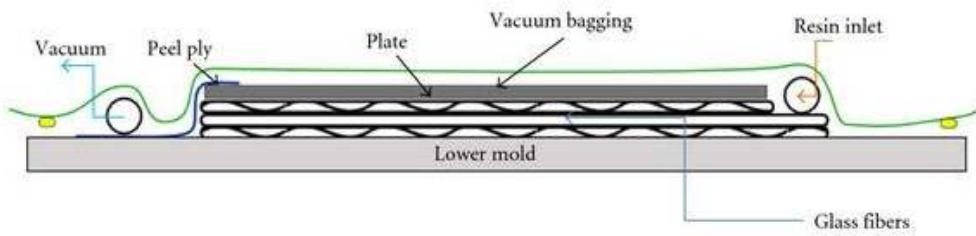


Fig. 2.6 VARTM process

2.1.7 Vacuum Bag Molding Process

진공 백 성형 공정은 반경화된 프리폼인 프리프레그(prepreg)를 원하는 형상의 몰드위에 적층하고 진공 백으로 감싼 후 내부를 진공상태로 유지한 뒤 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 진공 백 외부에 압력과 온도를 가하여 성형하는 복합재료 제조 공정이다.

곡률과 같이 복잡한 3차원 형상의 제품을 만들어내는데 유리하며 프리프레그를 이용하기 때문에 작업이 용이하며 높은 수지함유율의 균일한 제품을 만들 수 있다. 진공 백 내부의 진공상태를 계속 유지하며 외부에서는 지속적인 압력을 가하기 때문에 수지 반응 시 발생하는 가스나 프리폼 내부의 공기가 빠져나오게 되므로 결함이 적은 제품을 만들 수 있다.

고가의 오토클레이브 장비가 갖추어져야 하며 오토클레이브 내부 크기에 따라 성형할 수 있는 제품의 크기의 한계가 결정된다.

대량생산에는 불리하지만 동시에 다른 형상의 제품을 성형할 수 있고 복합재료 제조공정 중 가장 좋은 기계적 물성을 나타내는 제품 성형이 가능하여 고품질의 성형품을 원하는 항공우주산업이나 샌드위치 구조물의 제조가 적용된다.

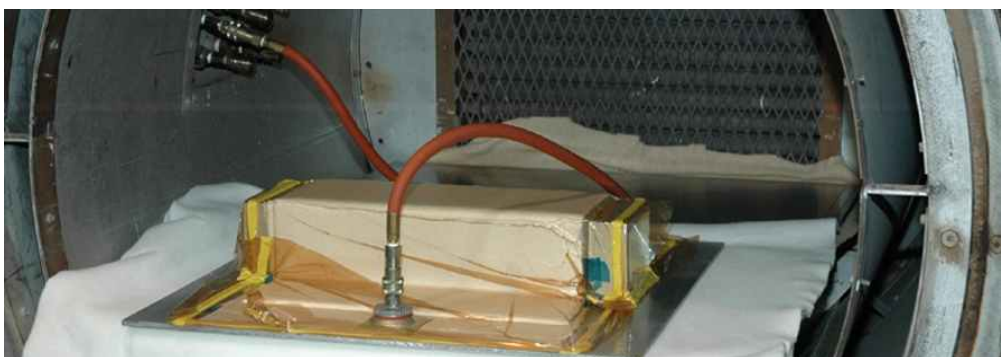


Fig. 2.7 Vacuum bag process

2.2 복합재료의 손상

2.2.1 복합재료 손상 개요

복합재료의 손상은 그 정도에 무시할 수 있는 손상, 수리 가능한 손상, 수리 불가능한 손상, 3종류로 분류할 수 있다. 무시할 수 있는 손상은 구조물에 영향을 크게 주지 않는 정도의 손상을 말하며 수리 가능한 손상은 표면이나 연결부위 또는 코어재료에 대한 손상으로 교체나 수리를 통해 해결될 수 있는 손상을 말한다. 수리 불가능한 손상은 손상의 크기나 범위가 수리 한계를 넘어서는 손상을 말한다. 수리 한계를 넘어서는 손상은 설계 검토를 통해 전문 수리업체를 통한 수리나 교체 등의 적절한 조치를 취하여 사용하거나 그렇지 못할 경우 폐기된다.

손상의 검출은 육안 검사 및 태핑(Tapping) 시험을 통해 간단한 검사를 하고 비파괴 검사를 통해 정확한 손상의 위치 및 크기를 검출한다.

2.2.2 복합재료 손상의 종류

1) 코스매틱 결함 (Cosmetic defect)

구조물의 표면에 발생하는 결함으로 복합재료에서 구조물의 하중을 지지하는 강화 섬유에는 손상을 주지 않아 구조물의 기계적 물성에는 영향을 미치지 않는다.

2) 충격 손상 (Impact damage)

외부의 충격으로 발생하는 결함으로 충격량에 따라 3종류의 손상이 모두 나타난다. 주로 운송, 보관 중의 부주의나 보호커버와 같은 보호장비를 갖추지 않고 방치하는 경우에 발생한다.

3) 박리손상 (Delamination damage)

접착된 강화섬유 층이 분리되거나 샌드위치 구조물에서 적층판과 코어

재료가 분리되어 발생한다. 주로 적층판 내의 이물질, 수분에 의해 생긴 틈이 외력에 의해 벌어지거나 외부 충격에 의해 층간결합이 약한 부분이 떨어져 나감으로서 발생한다.

4) 균열 (Crack)

금속재료에서의 균열과 크게 다르지 않으며 페인트 층이나 육안 식별 가능한 외부에 발생하는 균열은 구조물에 영향을 주지 않거나 수리가 가능한 정도에 그치는 경우가 많다. 적층판 내부에 존재하는 내부 균열은 기공이나 이물질, 수분에 의한 틈에서 균열이 시작된다. 내부 균열은 육안으로 발견이 힘들기 때문에 비파괴 검사를 실시하여 손상여부를 측정한다.

5) 홀 손상 (Hole damage)

복합재료의 체결을 위해 홀을 가공할 때 작업자의 공구취급 미숙이나 과도한 토크의 부하로 홀 주변의 적층판이 박리되는 것이다. 불필요하거나 잘못된 위치에 가공된 홀 등도 함께 포함된다.

6) 낙뢰 손상 (Lightning damage)

복합재료는 기후의 변화에 따라 얼었다 녹았다는 반복하면서 구조물 내부나 재료 내부에 수분이 생기며 이는 낙뢰가 복합재료 구조물을 충격할 수 있는 원인이 된다. 강력한 전류로 복합재료 구조물을 충격하면 구멍이 뚫리거나 외부엔 작은 홀 정도만 남기고 내부의 코어 재료를 손상 시키는 경우도 있다. 낙뢰 손상은 복합재료 구조물의 운용 중에 생기는 손상이기 때문에 이미 도장이 되어있는 경우가 많아 외부 육안 검사만으로는 발견하기 쉽지 않다.



Fig. 2.8 Impact damage

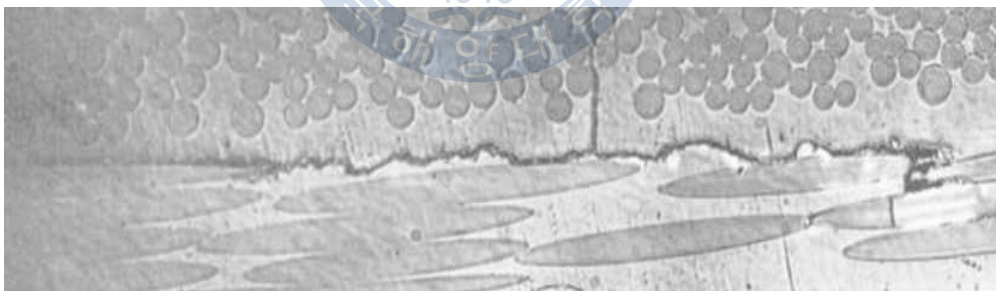


Fig. 2.9 Crack & Delamination

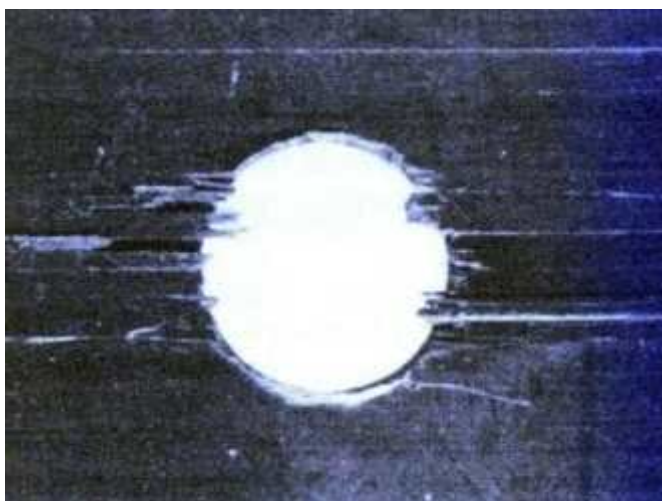


Fig. 2.10 Hole damage



Fig. 2.11 Lightning damage

제 3 장 재료 및 실험방법

3.1 재료 소개

VARTM 공정을 이용하여 적층판을 제작하기 위하여 강화재료는 Cymex사의 glass fiber fabric을 사용하였으며 그 특성은 Table 1 과 같다.

기지재료는 국도화학(社)의 KFR-121 에폭시 수지를 사용하였으며 경화제는 KFH-141을 사용하였다. Table 2 에서 그 특성을 나타낸다.

Table 1. Properties of glass fiber fabric

Density(g/cm ³)	2.55
Tensile strength(MPa)	3,450 ~ 3,800
Elastic modulus(GPa)	72 ~ 76
Stress(MPa)	2,050
Modulus(GPa)	76
Elongation(%)	3.02
Temperature range(°C)	-60 ~ +460
Thermal conduction rate W/(m.oK)	0.034 ~ 0.4

Table 2. Properties of resin

Gel time (min) DIN EN ISO 2535	25°C, 65 RH, 100g Scale	210~230
Curing shrinkage (wt%) DIN 16945, Section 6.5		4.0~4.1
Cured density (g/cm ³) DIN EN ISO 1183		1.1~1.2
Water absorption (wt%) DIN EN ISO 175	23°C, 65 RH 24hr 168hr	0.09~0.10 0.39~0.40
Dimensional stability under heat (°C) DIN EN ISO 75-2		70~80
Tensile Property DIN EN ISO 527-2	Strength (MPa) Modulus (GPa) Strain to failure (%)	65~75 2.9~3.1 9.2~9.4
Flexural Property DIN EN ISO 178	Strength (MPa) Modulus (GPa)	110~120 2.8~3.0

3.2 시편 설계

섬유의 적층 시 복합재료 구조물의 표면기공을 구현하기 위하여 가장 외측 섬유의 1ply, 2ply, 3ply 아래에 3cmx1cm 면적과 0.3mm, 0.6mm, 0.9mm 두께를 가지는 테프론 시트를 삽입하였다.

1) 1 ply under type (Group 1)

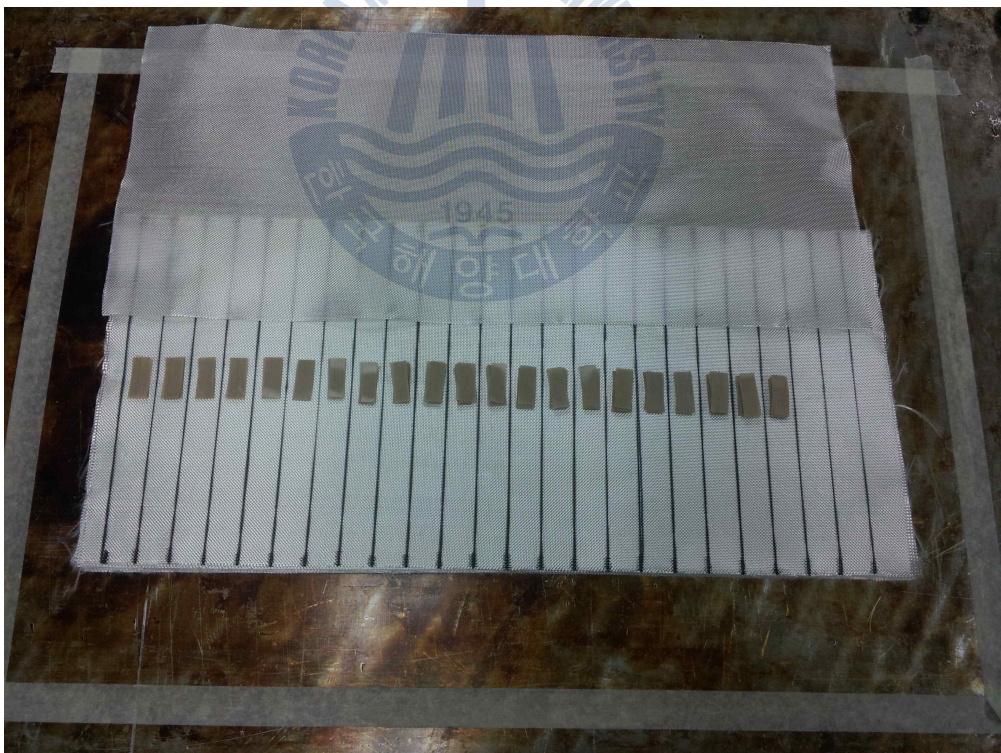
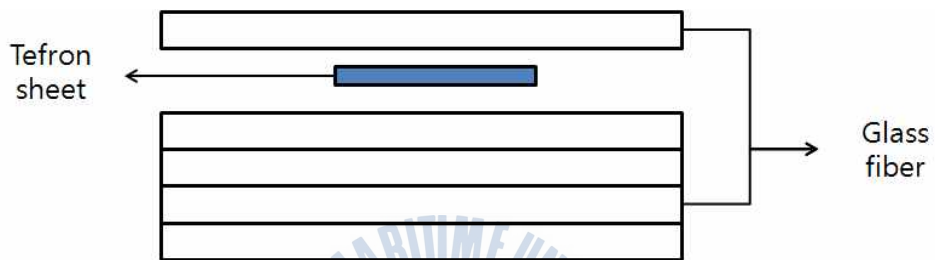


Fig. 3.1 Schematic of 1 ply under type

2) 2 ply under type (Group 2)

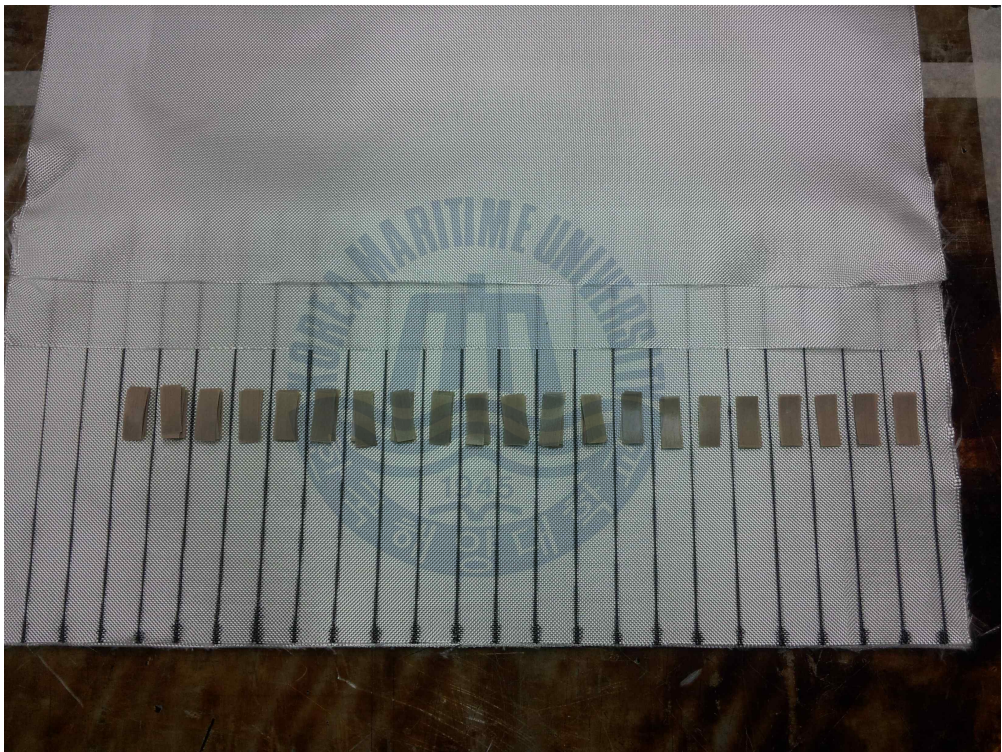
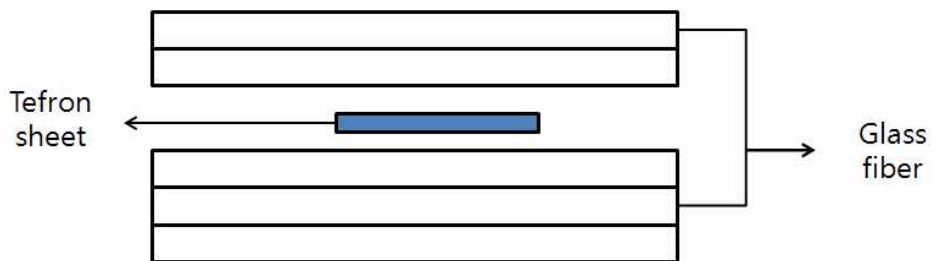


Fig. 3.2 Schematic of 2 ply under type

3) 3 ply under type (Group 3)



Fig. 3.3 Schematic of 3 ply under type

3.3 시편 제작

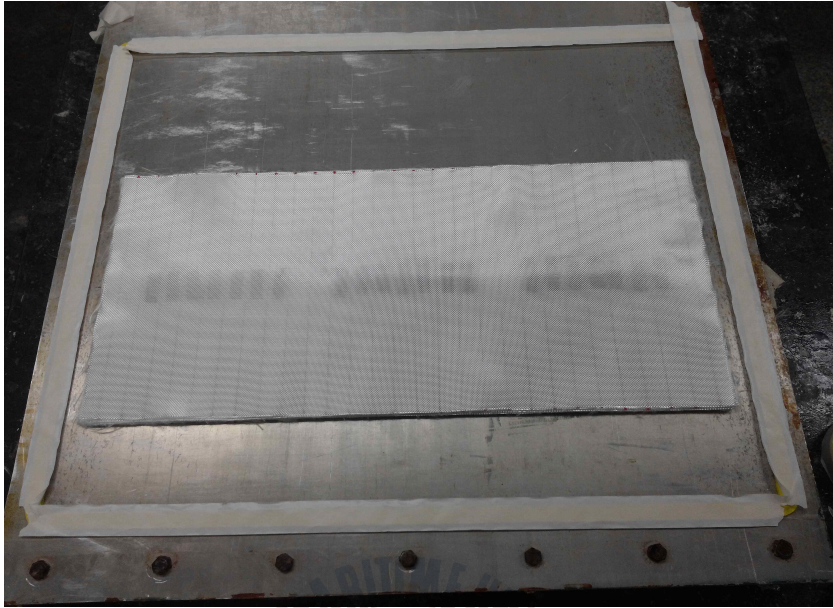
본 실험에서 시편은 후판 제작을 위해 ASTM D 3039/3039M의 조건에 의해 제작되었다.



(a)



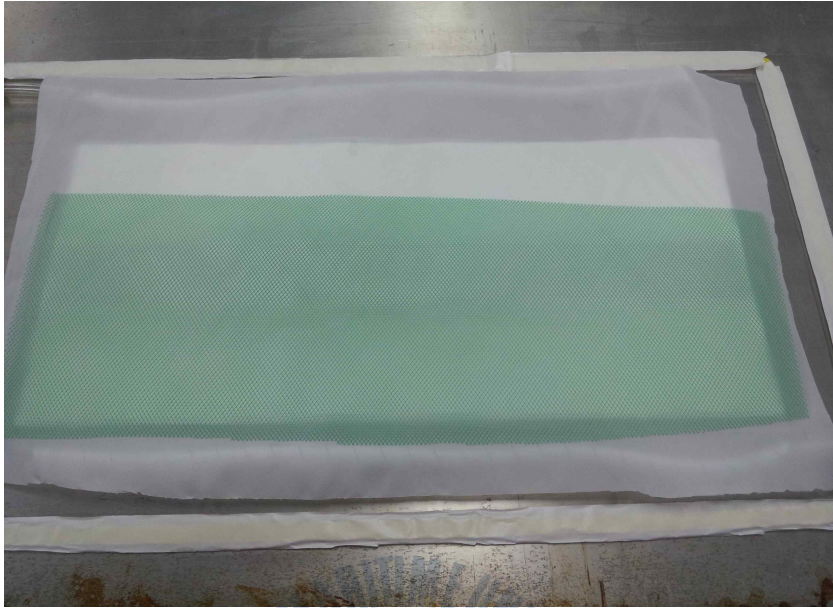
(b)



(c)



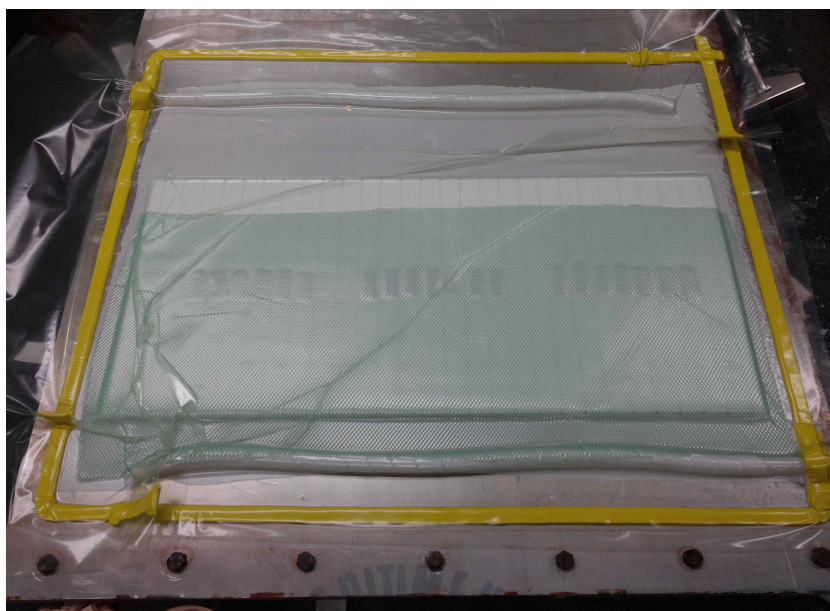
(d)



(e)



(f)



(g)

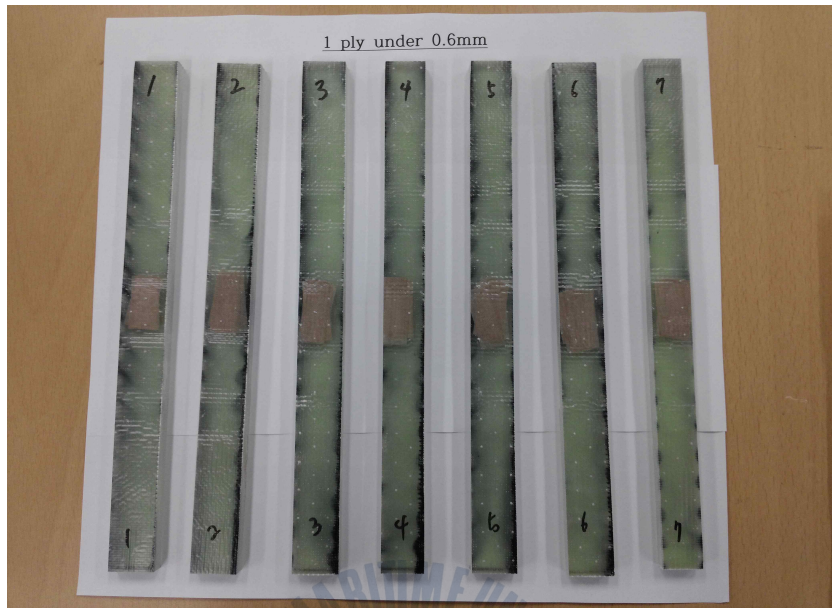
Fig. 3.4 Specimen configuration



(a)



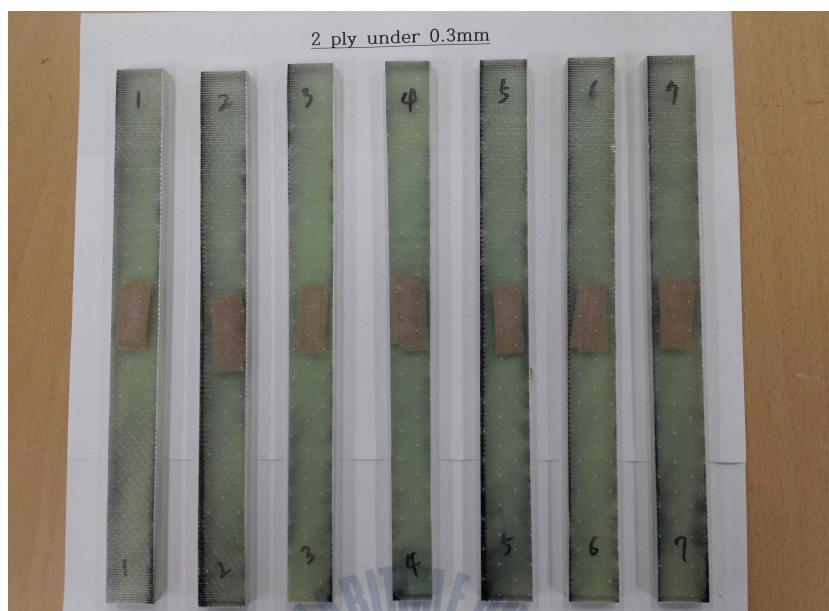
(b)



(c)



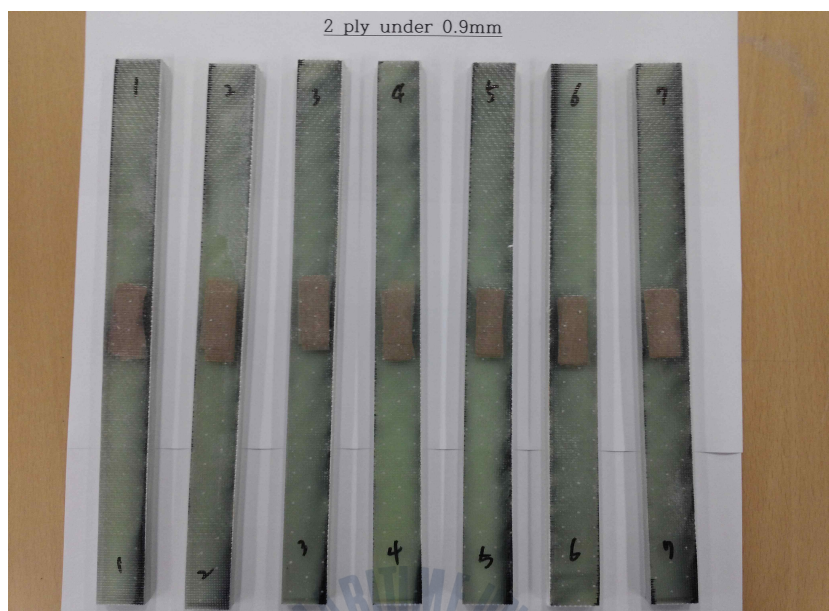
(d)



(e)



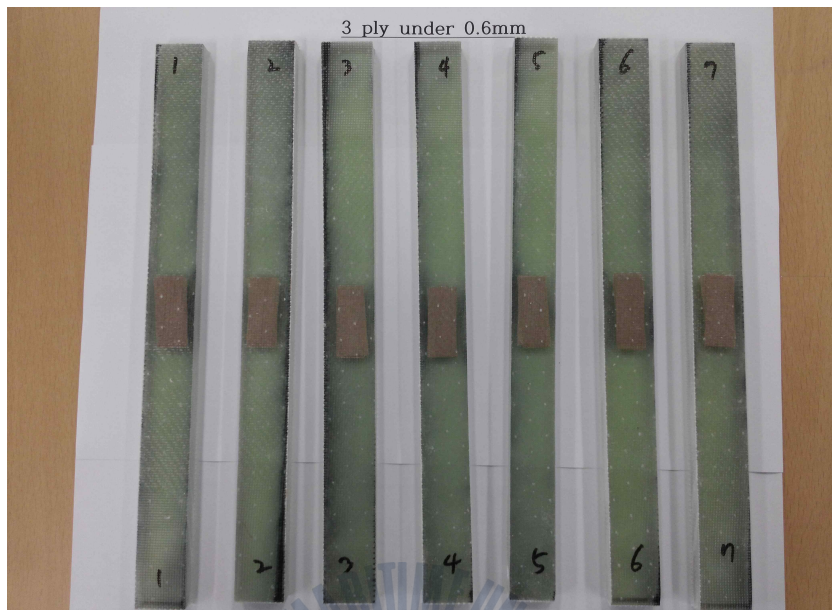
(f)



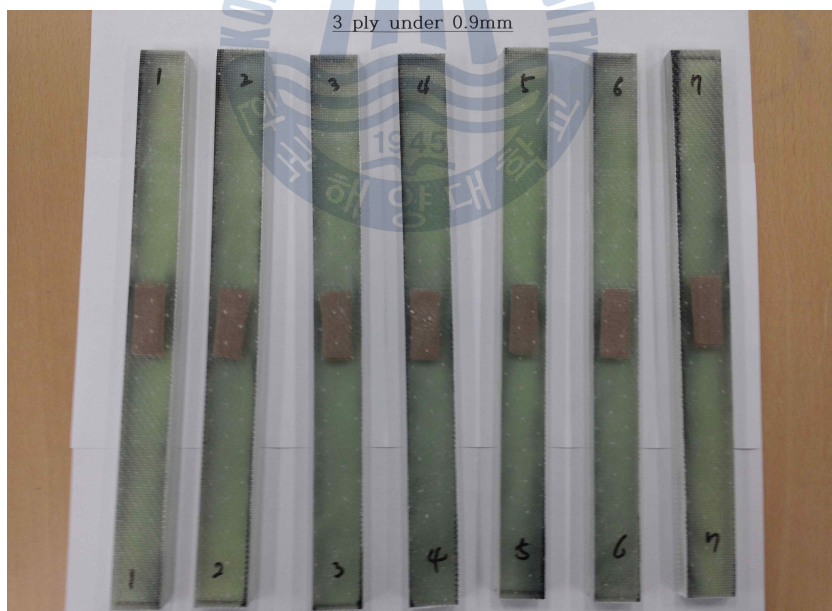
(g)



(h)



(i)



(j)

Fig. 3.5 Specimen

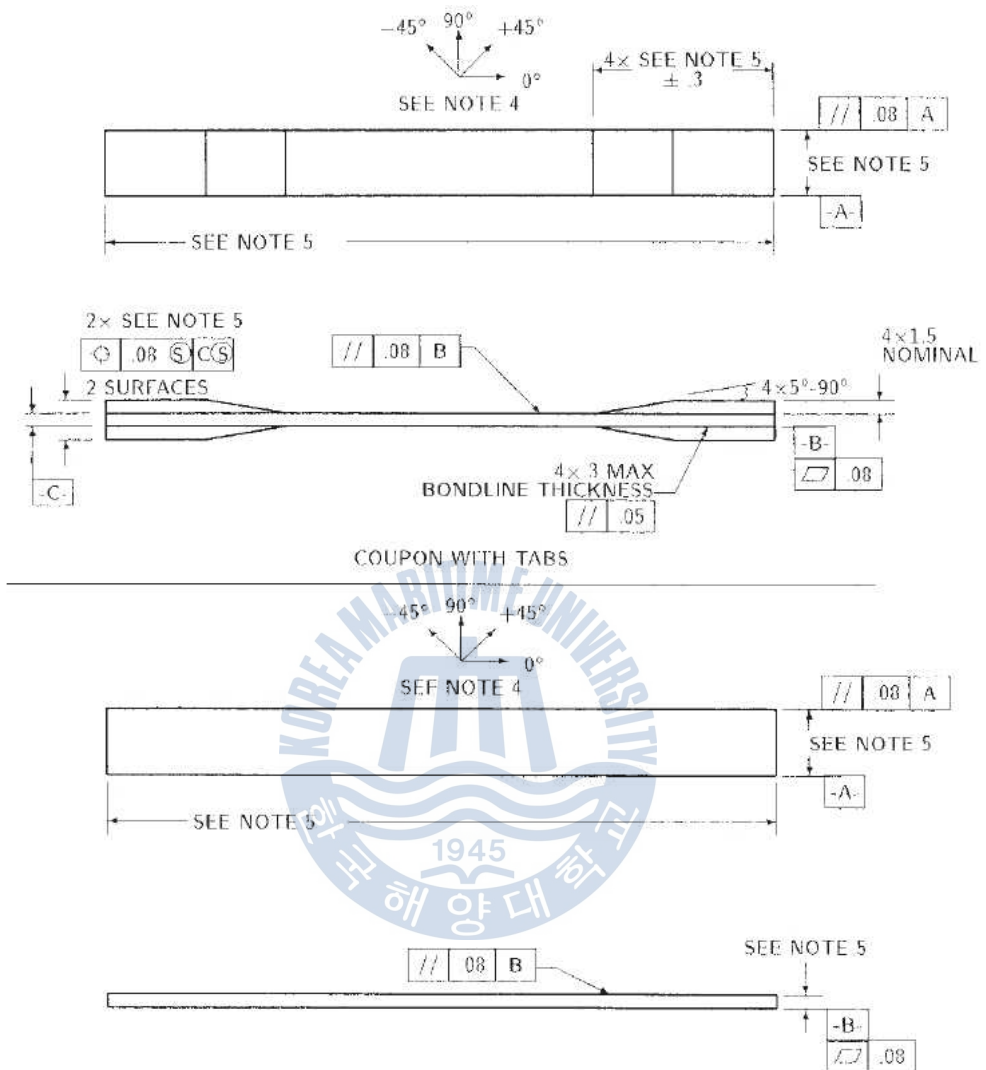


Fig. 3.6 Specimen drawing

Table 3. Tensile specimen geometry requirements

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	± 1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	± 4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	± 1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

Table 4. Tensile specimen geometry recommendations

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

3.4 실험 방법

본 실험은 표면 결함을 가지는 복합재료 후판의 인장특성을 알아보기 위해 ASTM D 3039/ D 3039M의 실험조건에 의해 인장실험을 수행하였다. 각각의 타입별로 7개의 시편을 제작하였고 그 중 최대, 최소값을 제외하고 5개 시편에 대한 평균값을 취하였다.

인장실험은 Kyung-Do 사의 Universal Test Machine을 사용하였으며 이 장비는 최대 하중을 10t까지 가할 수 있다. ASTM D 3039/ D 3039M의 조건에 의해 2mm/min의 Cross head speed를 설정하였다.



Fig. 3.7 Universal Test Machine (KDMT - 156)

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 인장시험 결과

직교이방성 복합재료 후판에서 표면층에 각기 다른 종류의 표면기공을 구현하여 인장 시험한 결과는 다음과 같다.

Reference specimen의 인장시험의 결과 151 MPa에서 198 MPa의 편차를 가지며 Fig. 4.1에 그 결과 값을 나타내었다.

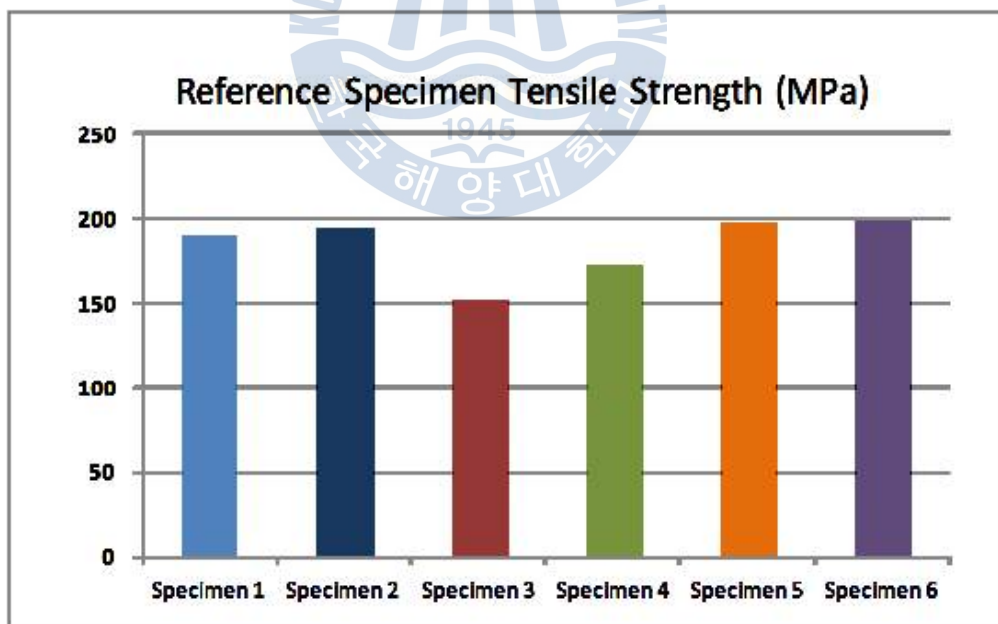


Fig. 4.1 Reference specimen result

다음은 각각의 그룹별로 Reference specimen과 평균값을 비교한 것이다. Fig 4.2에서는 그룹 1은 1ply 아래에 표면기공을 구현하였을 때 인장 시험값의 평균을 나타낸 것이다. 강도의 편차는 160 MPa에서 165 MPa을 나타내고 있다. 이는 Reference specimen의 값과 비교하였을 때 약 11%의 강도감소율을 보여주고 있다.

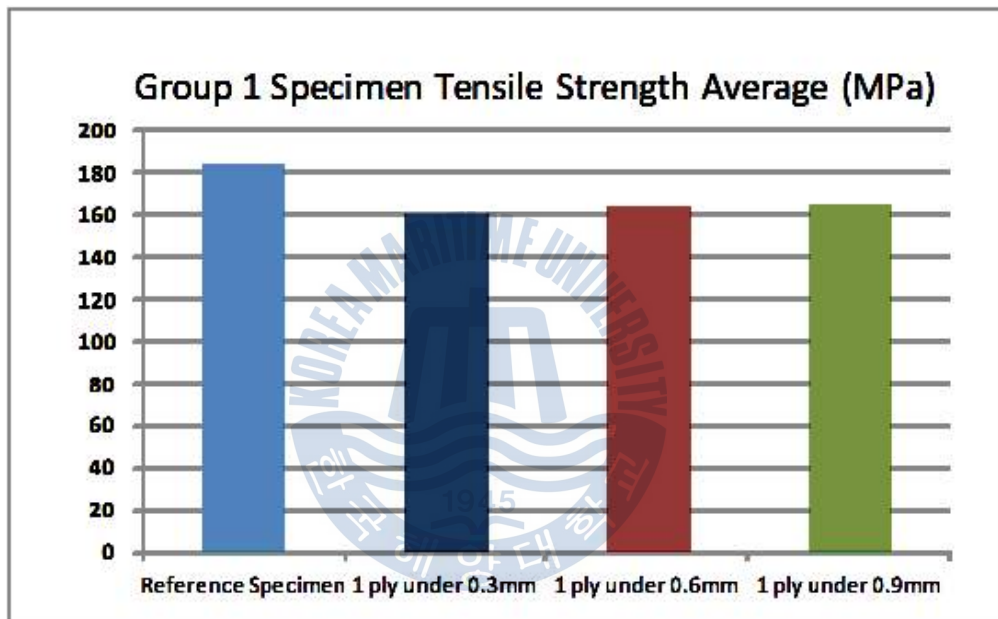


Fig. 4.2 Group 1 average tensile strength

Fig 4.3에서는 그룹 2는 2ply 아래에 표면기공을 구현하였을 때 인장 시험값의 평균을 나타낸 것이다. 강도의 편차는 163 MPa에서 175 MPa을 나타내고 있다. 이는 Reference specimen의 값과 비교하였을 때 약 10%의 강도감소율을 보여주고 있다.

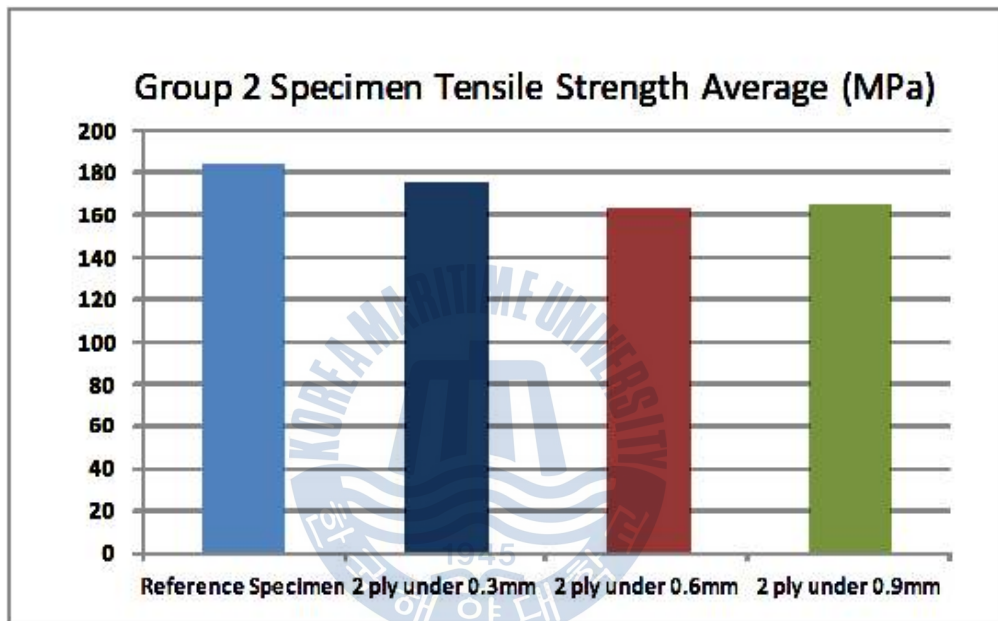


Fig. 4.3 Group 2 average tensile strength

Fig 4.4에서는 그룹 3은 3ply 아래에 표면기공을 구현하였을 때 인장 시험값의 평균을 나타낸 것이다. 강도의 편차는 155 MPa에서 169 MPa을 나타내고 있다. 이는 Reference specimen의 값과 비교하였을 때 약 13%의 강도감소율을 보여주고 있다.



Fig. 4.4 Group 3 average tensile strength

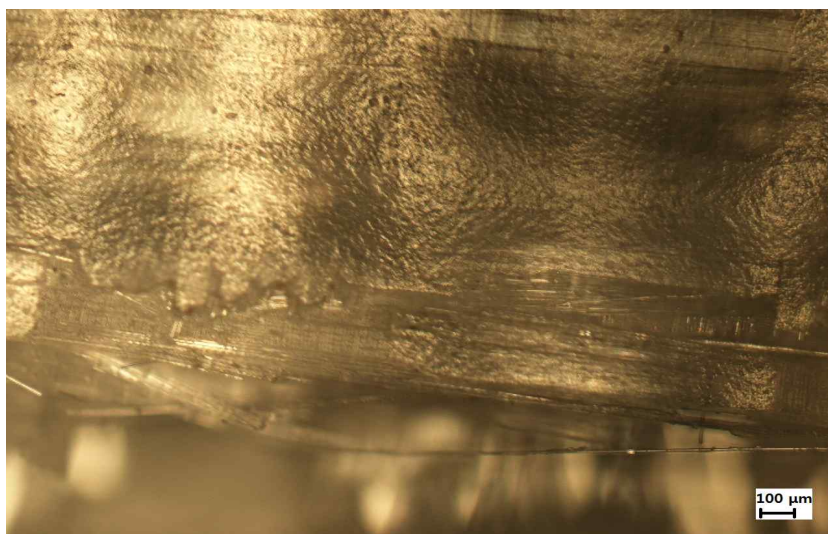
4.2 파단면 관찰

Fig. 4.5에서 4.7과 같이 시편의 파단표면과 파단면을 광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

파단표면(a)을 관찰한 결과 복합재료에서 흔히 볼 수 있는 Pull out 현상은 비교적 많이 나타나지 않았으며, 박리현상 보다는 절단에 가까운 형상을 가지고 있었다.

파단면(b)을 관찰한 결과는 기공영역 구현을 위해 삽입되었던 테프론 시트의 크기와 같은 기공영역이 생성된 것을 볼 수 있었으며, 그 형상은 복합재료 결합 중 한가지인 Delamination 현상과 흡사한 모습을 보여주고 있다. 이로 인해 외측 얇은 라미네이트 층은 전체 라미네이트 층에서 박리된 것과 유사한 형상으로 관찰되었다.



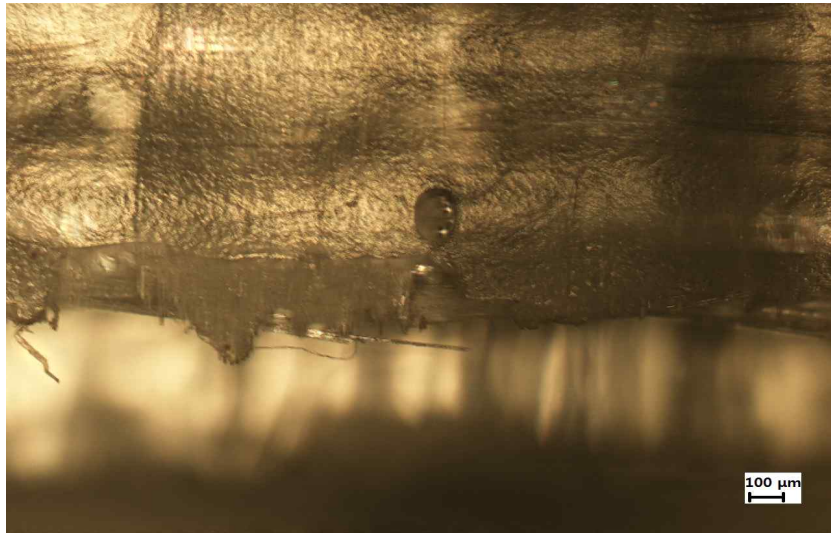


(a) Surface



(b) Fracture

Fig. 4.5 Micrographs of void area specimens having a 0.3mm thickness (X 50)

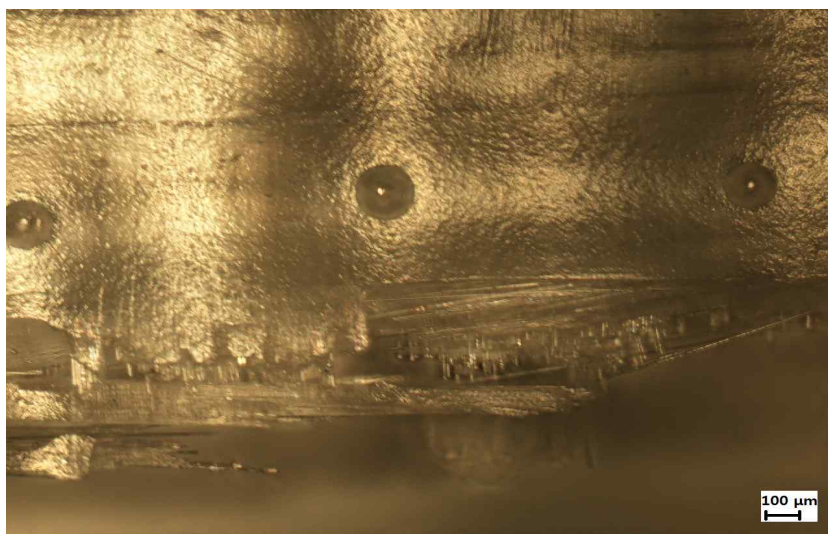


(a) Surface



(b) Fracture

Fig. 4.6 Micrographs of void area specimens having a 0.6mm thickness (X 50)



(a) Surface



(b) Fracture

Fig. 4.7 Micrographs of void area specimens having a 0.9mm thickness (X 50)

4.3 결과 고찰

본 논문에서는 전체 부피 3500mm^3 의 복합재료 후판에 최소 90mm^3 에서 최대 270mm^3 의 부피를 가지는 표면기공이 삽입되었을 때 최소 2.5%에서 최대 7.7%의 기공함유율을 보인다. 복합재료의 전체 부피에서 기공함유율이 1% 미만일 경우 강도예측에서 기공함유율을 무시 할 수 있으며 2.5% ~ 7.7%의 기공함유율은 복합재료 강도예측에서 무시 할 수 없는 기공함유율이라는 것을 알 수 있다.

각각의 그룹의 평균값을 Reference specimen과 비교하였을 때 인장강도의 감소가 있었으며 그 편차는 약 30 MPa 정도이다. 이는 약 11%의 강도 감소율을 보여주고 있다.

절단면의 표면과 파단면을 관찰한 결과 전체적인 파단형태는 Pull out 현상은 비교적 많이 보이지 않았으며, 기공영역에 따른 공간의 생성으로 파단면의 관찰 결과 Delamination과 유사한 형상을 보여주고 있다. 이는 사용하중 및 재료의 노후화에 따른 박리현상이 야기될 가능성이 있다. 또한 외층의 라미네이트 층은 1, 2, 3 Ply의 얇은 라미네이트 층으로 형성되어있는 만큼 외부의 충격에 의해 쉽게 박리 및 손상 될 가능성이 있다고 사료된다.

각 그룹끼리의 강도편차는 크지 않다는 것을 볼 때 표면기공이 재료표면에서 얼마나 깊숙이 존재하는지, 그리고 그 층의 두께가 얼마나 두꺼운지에 대한 것은 크게 중요하게 작용하지 않다는 것을 알 수 있다. 이는 기공의 부피보다 표면기공의 생성 자체로 Delamination 현상과 같은 결함을 유발하여 재료의 강도저하에 기여하는 부분이 더 크다고 할 수 있다.

기공영역의 생성위치가 재료의 강도저하에 직접적으로 영향을 미치지 않는으나 표면에 가깝게 형성될 경우 외부충격에 의한 박리가 쉽게 일어날 것으로 생각되며 이는 구조물 자체의 파손에 큰 영향을 미치기 때문에 발견 즉시 수리가 필요할 것으로 판단된다.

제 5 장 결론

본 논문에서는 직교이방성의 복합재료 후판에 생성된 표면기공이 인장강도에 미치는 영향을 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 재료의 부피는 동일하지만 재료에 삽입된 표면기공의 위치와 기공층의 두께를 달리하여 재료 설계를 하였으며, VARTM 공정을 통해 제작된 시편을 ASTM D 3039/ D 3039M 실험방법을 통해 인장 실험을 실시 비교하였다.

(2) 시편에 삽입된 표면기공의 함유율은 최소 2.5%에서 최대 7.7%이며 인장실험 결과 Reference specimen와 약 11%의 인장강도 감소율을 나타내었다.

(3) 3가지 그룹간의 강도의 편차는 크지 않으며 이는 복합재료 후판에 있어서 표면기공의 위치나 두께와는 상관없이 기공의 존재 자체만으로 재료강도의 저하를 야기한다는 것을 알 수 있다.

(4) 파단면 및 표면을 관찰한 결과 기공으로 인한 공간생성으로 복합재료에서 흔히 볼 수 있는 Delamination 현상과 유사한 모습을 보였으며, 이는 재료의 강도저하에 직접적인 영향은 미치지 않으나 표면층에 가깝게 생성될 경우 외부 충격에 취약하다. 이로 인하여 재료의 박리 및 손상이

일어날 수 있으므로 구조물 제작 후 표면기공영역이 발견될 경우 적절한 수리를 요 할 것으로 판단된다.

(5) VARTM 공정을 이용하여 두께가 두꺼운 대형 구조물을 제작할 경우 기공이 유입될 수 있는 변수를 줄임으로서 원하는 강도와 안전성의 향상에 기여할 수 있을 것이다.



참고문헌

- (1) 김윤해, 한중원 공저, 2001, 복합재료학, 효성출판사
- (2) 이대길, 정명영, 최진호, 전성식, 장승환, 오제훈 공저, 2007, 복합재료, 홍릉과학출판사
- (3) 양동훈, *VaRTM* 공정 중 발생하는 *Micro-void*에 의한 복합재료 강도 변화에 대한 연구, 석사학위 논문
- (4) 조용식, 복합재료 *REPAIR* 시 *EXTRA STRUCTURAL PLY* 적층방법에 따른 *REPAIR* 성능에 대한 연구, 석사학위 논문
- (5) 최덕현, 황운봉, 2003, 복합재료학회, 표면 손상을 입은 적층판의 강도 예측 및 분석, 16(5), 15-20
- (6) 임원균, 조형석, 2003, 대한기계학회, 2축하중을 받는 직교이방성재료 내 균열의 임계응력, 4, 37-42
- (7) 강민성, 박홍선, 최정훈, 구재민, 석창성, 2012, 대한기계학회, 평직 *CFRP* 적층복합재료의 섬유배열각도에 따른 파괴강도 예측, 대한기계학회 논문집 A권 36(8), 881-887
- (8) 정우길, 임원균, 2005, 대한기계학회, 조합하중을 받는 섬유복합재료의 파손기준, 대한기계학회 춘추학술대회 2005(11), 1434-1439
- (9) 최정훈, 이우형, 박홍선, 강민성, 구재민, 석창성, 2008, 대한기계학회, 평직 *CFRP* 복합재료의 파손강도 및 파괴저항성 특성 평가, 대한기계학회 춘추학술대회 2008(5), 561-566

- (10) 한수연, 김성준, 신의섭, 2013, 한국항공우주학회, *미시역학 모형을 이용한 섬유강화 복합재료의 기공 탄성 및 응력 집중도 평가*, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집 2013(4), 205-208
- (11) 강문구, 배준호, 이우일, 2004, 한국복합재료학회, *VARTM 공정에서의 금형 충전 및 기공 형성에 관한 3차원 수치해석*, 한국복합재료학회지 17(3), 1-7
- (12) 서영호, 이형국, 2001, 한국복합재료학회, *가압함침공정 중 기공 형성에 대한 제조 변수의 영향*, 한국복합재료학회 학술발표대회자료 2001, 184-188
- (13) Sérgio Frascino Müller de Almeida, Zabulon dos Santos Nogueira Neto, 1994, *Effect of void content on the strength of composite laminates*, Composite Structures, Volume 28, 139-148
- (14) P. K. Govindan Potti, B. Nageswara Rao, V. K. Srivastava, 2000, Advanced Composite Materials, *Fracture strength of composite laminates containing surface notches*, Vol. 10(1), 29-37
- (15) J.E. Little, X.W. Yuan, 2012, NDT & E International, *Characterisation of voids in fibre reinforced composite materials*, Vol. 46, 122-127
- (16) David Arencón, José Ignacio Velasco, 2009, Materials, *Fracture Toughness of Polypropylene-Based Particulate Composites*, Materials 2009, Vol. 2, 2046-2094
- (17) Ling Liu, Bo-Ming Zhang, Dian-Fu Wang, Zhan-Jun Wu, 2006, Composite Structures, *Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates*, Vol. 73, 303-309
- (18) John A. Nairn, 2001, Composites Science and Technology, *Fracture mechanics of composites with residual stresses, imperfect interfaces, and traction-loaded cracks*, Vol. 61, 2159-2167

- (19) M Kumosa, 2005, IEEE Trans, *Brittle Fracture Failure of Composite (Non-Ceramic) Insulators*,
- (20) K.S. Tan, N. Guo, B.S. Wong, C.G. Tui, 1995, NDT & E International, *Comparison of Lamb waves and pulse echo in detection of near-surface defects in laminate plates*, Vol. 28(4), 215 - 223
- (21) P. Cawley, R. Adams, 1988, NDT Intern, *A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints*, 21 (1988), 208 - 222
- (22) W. Bai, B. S. Wong, 2001, Measurement Science and Technology, *Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography*, Vol. 12(2), 142 - 150
- (23) Z. Hashin, 1990, Mechanics of Materials, *Thermoelastic properties of fiber composites with imperfect interface*, Vol.8(4), 333 - 348
- (24) J.K. Kim, Y. W. Mai, 1991, Composites Science and Technology, *High strength, high fracture toughness fibre composites with interface control – A review*, Vol.41(4), 333 - 378
- (25) M. N. YUAN, Y. Q. YANG, B. HUANG, J. K. LI, Y. CHEN, 2008, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, *Evaluation of interface fracture toughness in SiC fiber reinforced titanium matrix composite*, Vol.18(4), 925 - 929

감사의 글

여러 가지 일로 인하여 남들보다 긴 대학원 생활을 하며 이제야 석사과정의 마지막인 논문을 마무리 짓게 되어 만감이 교차합니다. 앞만 보고 달려야하는 기간을 이리 저리 한눈팔며 끌어온 시간이 아쉽기도 하지만 이 시간 속에서 얻은 경험들이 헛되었다고는 생각하지 않습니다.

먼저 기나긴 대학원 생활을 하는 아들을 보면서 지속적으로 힘을 실어주시고 용기를 주신 부모님과 공부한다고 고생한다고 하시며 응원해주시던 할머니, 툭툭대면서도 부탁이나 도움을 뿌리치지 않고 도와주던 동생 나영이 너무나도 감사하고 사랑합니다.

군대를 제대하고 고민이 많은 저를 복합재료 실험실로 이끌어주시고 늘 “생각하는 대로 하면 된다.”라고 힘을 북돋아 주시며, 새롭고 귀중한 경험의 기회를 주신 김윤해 교수님께 진심으로 존경과 감사의 마음을 올립니다. 또한 복합재료에 있어서 많은 지식으로 넓은 시야를 가지게 해주신 한중원 박사님, 김국진 박사님께도 깊이 감사드립니다.

공부뿐만이 아니라 인생에 있어서도 조언과 격려를 아끼지 않으셨던 감히 인생의 멘토라 하고 싶은 영대형과 성열이형에게도 깊은 감사를 드리며 앞으로도 많은 조언을 부탁드립니다.

회사와 사회, 그리고 실무를 경험할 수 있는 기회를 주신 최병근 사장님, 짧은 기간이었지만 따뜻하게 해주신 배성우 부장님 이하 (구) 데크항공 풍력사업부 직원 분들께 감사드립니다.

햇수로 8년이란 시간을 복합재료 실험실에서 생활하며 가장 오랜 시간을 보냈던 첫째형 윤성원 박사님, 늘 실험실을 든든하게 중심 잡아주는 이진우 실장, 힘든 기간을 지나게 해 주었던 준무, 성화, 한빈이, 수정이와 옆집 사는 잘하는 우리 둘째형에게도 감사드립니다.

끝으로 많은 고민과 기쁨과 슬픔을 같이 해주었던 겸손회 친구들과 군대
동기 최민욱 아저씨에게도 감사의 말을 전하며, 이 논문의 완성이 있기
까지 도움 주셨던 모든 분들께 이 논문을 바칩니다.

2013년 12월

김 태 현 올림

