



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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

VaRTM 공정을 이용한 복합재료 성형 시  
이물질 및 압력변화에 의한 Void 형성에  
관한 연구

Formation of the Micro-void in Composite Materials During VaRTM  
Process according to the Pressure and Thickness of the Impurity



지도교수 김 윤 해

2014년 1월 10일

한국해양대학교 대학원

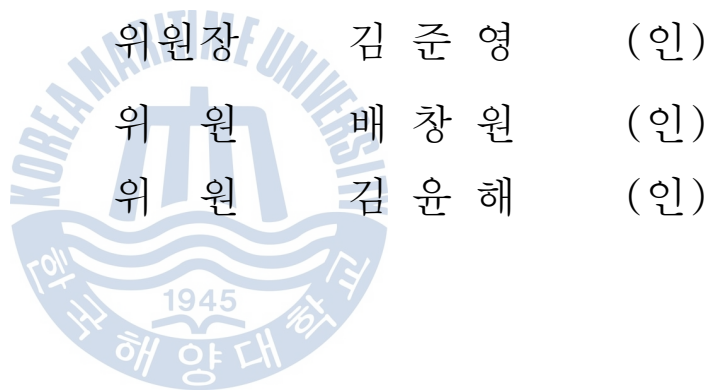
재료공학과

박 충 용

---

---

본 논문을 박충용의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2014년 1월 10일

한국해양대학교 대학원

# Contents

List of Tables .....	i
List of Figures .....	ii
Abstract .....	iii

## 1. 서론

1.1 복합재료의 소개 .....	1
1.2 연구의 목적 .....	5

## 2. 복합재료와 성형공정

2.1 복합재료의 분류 .....	7
2.1.1 유리섬유 .....	8
2.1.2 탄소섬유 .....	9
2.1.3 아라미드 섬유 .....	9
2.1.4 현무암 섬유 .....	9
2.2 복합재료의 장점 .....	16
2.3 복합재료의 성형 공정 .....	18

## 3. 실험 재료 및 시편의 제작

3.1 복합재료의 Void 형성이론 .....	24
3.2 이물질 제작 .....	26
3.3 재료 및 시편의 제작 .....	27

## 4. 결과 및 고찰

4.1 단면 분석 .....	31
-----------------	----

5. 결론 .....	41
참고문헌 .....	43



## List of Tables

<b>Table 1</b>	The properties of glass fiber-----	8
<b>Table 2</b>	The comparison of property for basalt fiber-----	12
<b>Table 3</b>	The size and number of void according to the thickness of specimens-----	36



# List of Figures

<b>Figure 1</b>	Basic shape of composite materials-----	2
<b>Figure 2</b>	Honeycomb structure-----	3
<b>Figure 3</b>	Boeing 787 air plane parts with CFRP-----	4
<b>Figure 4</b>	Selection of effective progress-----	6
<b>Figure 5</b>	Images of the basalt and basalt fibers-----	11
<b>Figure 6</b>	Manufacturing process of the basalt fibers-----	13
<b>Figure 7</b>	The application of basalt fibers-----	15
<b>Figure 8</b>	Composite rate of Boeing 787-----	17
<b>Figure 9</b>	Hand lay-up process-----	19
<b>Figure 10</b>	RTM process-----	20
<b>Figure 11</b>	VaRTM process-----	21
<b>Figure 12</b>	Autoclave process-----	23
<b>Figure 13</b>	Void creation mechanism-----	25
<b>Figure 14</b>	Scheme of prepared impurity-----	26
<b>Figure 15</b>	Shape of basalt fiber-----	27
<b>Figure 16</b>	Lay-up sequence of fiber and impurity-----	29
<b>Figure 17</b>	Fabrication of specimens-----	30
<b>Figure 18</b>	Microscope photo with different thickness impurity-----	34
<b>Figure 19</b>	Result of group-A specimen-----	38
<b>Figure 20</b>	Result of group-B specimen-----	39
<b>Figure 21</b>	Result of group-C specimen-----	40

# Formation of the Micro-void in Composite Materials During VaRTM Process according to the Pressure and Thickness of the Impurity

Park, Choong Yong

Department of Materials Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The purpose of this study is the evaluation about the Micro-void generated by the impurity. The glass fiber reinforced composite made through the vacuum bag molding method was used with the impurity. The basalt fiber known as environment-friendly fiber was used as the fiber of the Micro-void specimen and the epoxy resin was used as the base material. The VaRTM process was performed for the making specimens. The change was given to the thickness of the impurity and pressure in order to see about production of the void. Consequently, as the thickness of the foreign material became thick and the pressure was enhanced, the size of the void grew and the production frequency of the void was enhanced.

**KEY WORDS:** Micro-void, Glass fiber, Vacuum bag molding method, Epoxy resin, Basalt fiber, Composites, VaRTM, Impurity, Pressure



# 제 1 장 서론

## 1.1 복합재료의 소개

복합재료(Composite Materials)란 성분과 형태가 다른 두 종류 이상의 소재를 조합시켜 유효한 기능을 가지게 된 재료를 일컫는다. 복합재료의 구성요소로는 섬유(fiber), 입자(particle), 모재(matrix)등이 있으며, 이러한 요소들로 구성된 복합재료는 일반적으로 층상 복합재료, 입자강화 복합재료, 섬유강화 복합재료 등으로 구분할 수 있다. Fig. 1에 복합재료의 기본 형상을 나타내었다[1].

층상 복합재료로는 내식성 및 원가절감을 고려하여 스테인레스강, 구리, 니켈 등을 입힌 클래딩(cladding) 금속판재나 허니콤(honeycomb) 구조물 등을 들 수 있다. Fig. 2에 허니콤 샌드위치의 구조를 나타내었다.

복합재료화 함으로써 개선할 수 있는 특성은 강도(strength) 및 강성도(stiffness), 내식성(corrosion resistance), 고온특성, 전기 절연성(electrical insulation), 단열성(thermal insulation), 경량화(weight reduction), 외관 등을 들 수 있다. 이러한 특성이 동시에 모두 개선되는 것은 아니고 목적과 필요성질에 의해 조합하여 재료를 만들 수 있으며 가장 큰 장점은 무게비 강도 및 강성도라고 할 수 있다[2-3].

현재 항공, 조선 및 자동차등 여러 산업분야에서는 대부분 금속재료를 이용하는 것이 일반적이며 구조물의 특징에 맞게 볼팅, 리벳팅, 용접 또는 시멘트와 결합하여 철골 구조 등 구조물의 조건에 맞는 구조물을 구축하였다. 복합재료가 발달함에 따라 가장 많이 응용되어 발전한 곳이 우주공학과 항공 산업분야가 함께 발전하였다. 특히, 날개, 동체 및 착륙

기어의 경량화는 연료비용을 줄이기 위해 적용되며 근 수년 동안 개선된 탄소섬유 복합재료가 비행기의 하중을 줄이기 위해 사용되어 왔다. 탄소 섬유 재료는 강도 면에서 알루미늄이나 티타늄과 유사 하지만 무게는 훨씬 가볍기 때문에 보잉 787과 에어버스 A380과 같은 비행기에서 사용되고 있으며 A380은 뼈대 및 꺾데기의 40% 정도를 전혀 없이 최첨단 플라스틱과 탄소섬유, 초경량 금속합금으로 만들었다. 날개와 같은 높은 하중이 집중되는 곳에서는 알루미늄 대신에 탄소물질을 사용함으로써 하중의 10퍼센트를 줄 일 수 있게 되었다[4-6].

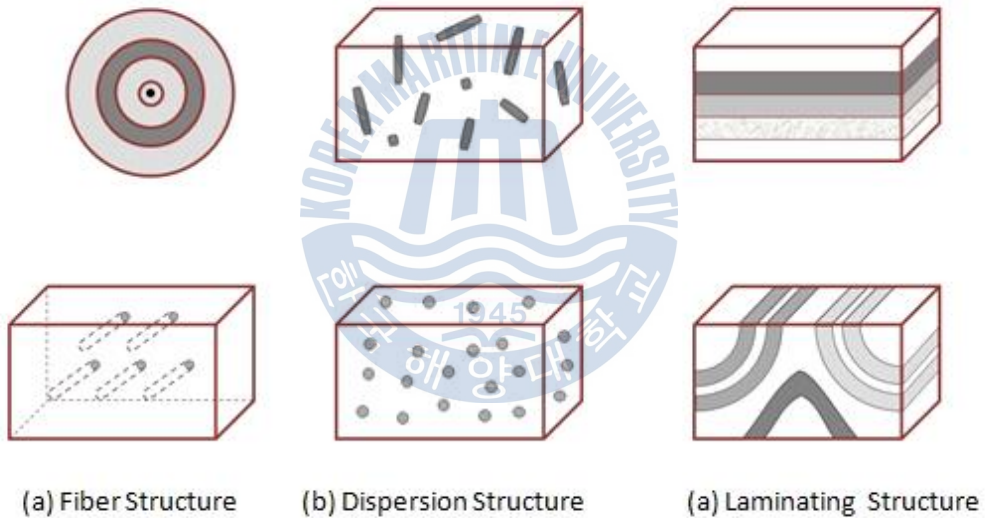


Fig. 1 Basic shape of composite materials

또한 비행기의 상부를 유리섬유보강 접착제를 사용하여 초박막 알루미늄 합금 층으로 구성된 Glare라 불리는 새로운 물질로 대체함으로써 수톤의 무게를 경량화 시켰으며 이는 알루미늄보다 밀도가 10퍼센트 낮다. 이처럼 복합소재 관련 기술이 항공 쪽에 먼저 전파되어 쓰이는 것처럼 모든 산업 분야에서의 복합재료 관련 기술은 널리 보급될 것으로 보여진다. 현재 이슈화 되고 있는 온실가스 배출규제에 대응하기 위해 자동차, 철도차량 등의 운송수단의 경량화에 연구 적용되고 있으며 복합재료를 적용한 경량화의 결과는 연비의 향상으로 이어져 온실가스를 줄이는 하나의 필수적인 요소로 작용될 것으로 생각된다.

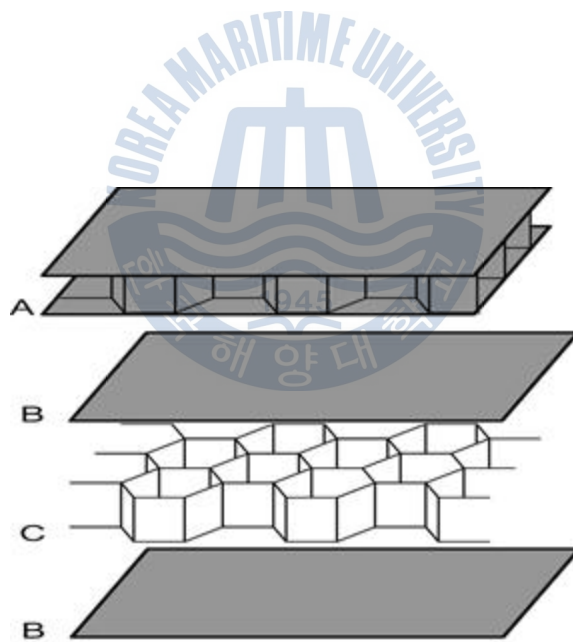


Fig. 2 Honeycomb structure



Fig. 3 Boeing 787 air plane parts with CFRP

## 1.2 연구의 목적

복합재료는 제조 방식에 따라 제품의 기계적 성질이 매우 큰 차이를 보인다. 제조방법에는 가장 기본적인 전통적인 핸드레이업(Hand Lay-up) 공법과 진공액상주입공법(Vacuum assisted Resin Transfer Molding, VaRTM), 오토클레이브(Autoclave)공법, 필라멘트 와인딩 공법 등이 있다. Fig. 4에 각 공정에 따른 제작품의 성능과 생산량에 대한 관계 그래프를 나타내었다. 최근에는 대형 구조물과 같은 큰제품을 비교적 저렴한 가격으로 제작할 수 있는 VaRTM공법이 주목을 받고 있다. VaRTM공법은 진공을 이용해서 한쪽면의 몰드에 프리폼을 적층시킨 뒤에 내부진공과 외부 압력의 차이를 이용하여 수지가 몰드내로 함침 되도록 하는 공법으로써 기존의 RTM공법에 비해 가격이 저렴하면서도 진공의 압력으로 성형하기 때문에 50~60%의 섬유 체적률을 구현할 수 있기 때문에 기계적 성질이 우수하여 경주용 자동차, 슈퍼카 및 대형 풍력발전기의 블레이드, 고부가가치의 요트 및 보트제작에 최근 그 활용도가 매우 높은 공법이다. 하지만 VaRTM공법은 한쪽면의 몰드에 프리폼을 적층하고 진공백을 이용한 몰드 완성작업 까지가 모두 작업자의 수작업으로 진행되기 때문에 프리폼 내부에 이물질이 포함될 가능성이 존재한다. 특히 대형 풍력발전기의 경우 블레이드의 길이가 약 60m에 달하는 등 성형품의 크기가 커질수록 프리폼의 적층작업이 복잡하고 어려워진다. 적층과정에서 불안정하게 프리폼 내부로 삽입되는 이물질은 수지의 함침과정에 방해요소로 작용하며 특히 경화공정 후에 이물질 주위에 거대기공 및 미세기공의 발생을 초래하며 이러한 기공들은 재료의 내부에서 응력집중부로 작용하기 때문에 최종 성형품의 기계적 강도를 저하시키는 요소로 작용할 수 있다. 따라서 VaRTM공정은 프리폼의 적층과정에서부터 이물질의 포함가능성에 대해 방지대책이 필요하며 또한 포함되어서 발생할 수 있는 성형품

에 대한 기계적강도 저하정도를 미리 예측하여 제품 불량 및 사용여부에 대한 판단이 필요하게 된다[7].

본 연구에서는 VaRTM공정에서 프리폼 내부에 미리준비 된 일정치수의 이물질을 삽입하고 수지를 함침 시켜서 경화하고, 이물질의 주위에 미세기공의 발생수와 크기를 조사하였다. 또한 VaRTM공정 중의 가해지는 압력을 조절하여 void 생성의 변화를 살펴보았다.

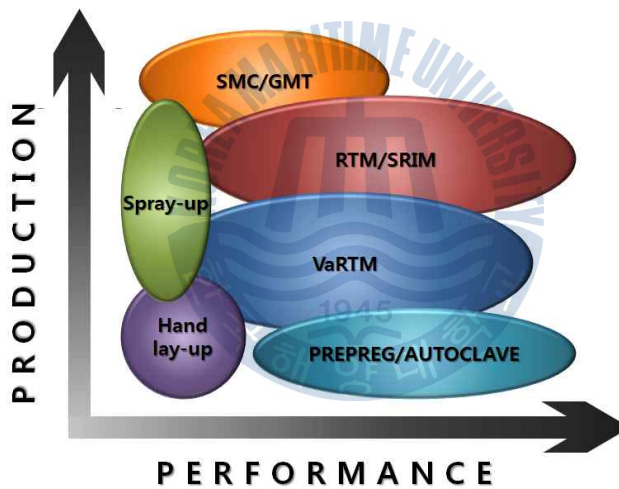


Fig. 4 Selection of effective progress

## 제2장 복합재료와 성형공정

### 2.1 복합재료의 분류

복합재료는 여라가지 분류로 나눌수 있다. 강화재의 형태 및 재료의 종류, 제조공법에 따라 매우 다양하다. 강화재의 형태에 따라 분류를 하면 섬유강화형 및 분산강화형, 적층강화형 등으로 분류할 수 있으며, 그 중에서 섬유강화 복합재료는 보강섬유의 재료에 따라 다음과 같이 분류될 수 있다.

모재의 종류에 따라 분류를 하면 금속은 FRM(Fiber Reinforced Metals), 플라스틱은 FRP(Fiber Reinforced Plastics) 등으로 분류되지만 일반적으로 복합재료라 하면 FRP를 의미한다. FRP에 보강 섬유로 유리 섬유(Glass Fiber)가 사용되면 GFRP, 탄소섬유(Carbon Fiber)를 사용하면 CFRP라고 한다.

그중에서 선박 및 항공 산업, 풍력산업에서 기계적강도 및 내식성이 우수한 FRP가 많이 쓰이고 있다[8-9].

- 1) 유리 섬유 강화 복합재료
- 2) 탄소 섬유 강화 복합재료
- 3) 아라미드 섬유 강화 복합재료
- 4) 기타 섬유 강화 복합재료 (보름, 카바이드, 바잘트 등)

### 2.1.1 유리섬유

1939년에 미국의 오웬스코닝(Owens-Corning)사가 처음으로 대량생산한 재료로 유리섬유(glass fiber)의 원료로는 규사(silica), 석회석(limestone), 붕사 등이 주를 이루며, 배합에 따라 성질이 달라진다.

유리섬유의 성질 및 응용분야는 원료조성에 따라, A- 유리, C-유리 등으로 나눌 수 있다. 유리섬유의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The properties of glass fiber

Fiber	Specific gravity	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Mohs hardness
A	2.5	3033	-	-
C	2.49	3033	69	6.5
E	2.54	3448	72.4	6.5
S	2.48	4585	85.5	6.5



## 2.1.2 탄소섬유

탄소섬유(Carbon Fiber)는 흑연섬유(graphite fiber)로도 지칭되며, 탄소 원자의 결정구조를 이용한 고강도 섬유로 현재 최신 복합재료에 사용되는 보강섬유의 대종을 이루고 있다. 탄소섬유는 1959년에 미국의 유니언 카바이드사에 의해 처음 상품화된 섬유로 개발되어 성능면이나 가격면에서 꾸준한 발전을 거듭하여 하고 있으며 최근 피치(pitch)를 이용한 탄소 섬유가 보편화 되고 있다.

탄소섬유는 기존의 금속재료가 갖고 있지 않은 여러가지 장점, 높은 무게비강도 및 탄성계수, 낮은 열변형률, 높은 피로강도 등을 가지고 있어 성형기술의 발달, 탄소섬유의 가격하락, 새로운 기지재료의 개발과 더불어 많은 발전을 이루고 있다.

## 2.1.3 아라미드 섬유

아라미드(aramid)섬유는 방향성 폴리아미드(aromatic polyamide) 섬유의 총칭으로서 85%이상의 아라미드결합이 두개의 방향성 고리에 직접 붙어 있는 인조섬유로 정의된다. 케블라(Kevlar)라는 이름으로 처음 시장에 등장했으며 분자사슬이 섬유방향으로 배열되어 있으며 수소결합에 의해 서로 묶여있다.

또한, 탄소섬유나 유리섬유처럼 쉽게 부러지지 않으며 케블라 섬유로 제조한 복합재료는 충격특성이 우수하며 로프와 타이어에 가장 많이 사용된다.

## 2.1.4 현무암 섬유

### 1) 현무암섬유의 정의 및 특징

현무암은 다른 암석재에 비해서 경도, 연성 등 물리적 성질이 우수할

뿐만 아니라 현무암을 구성하는 화학성분에 의해 눌림, 충격, 휨 등에 대한 저항성이 뛰어나다.

현무암 섬유는 마그마의 분출로 생성된 현무암으로 만든 섬유이다. 전 세계적으로 매장량이 풍부한 현무암을 이용해 생산하게 되는 현무암 섬유는 크게 연속섬유와 단섬유로 구분 되어질 수 있다. Table 2에 현무암 섬유의 물성을 나타내었다..

일반적으로 화산에서 분출된 마그마가 굳어져 생성된 것으로  $\text{SiO}_2$ 를 50% 정도 함유하고 있는 화성암을 일컫으며 습기, 온도등 주변 환경에 대한 저항성도 화강암이나 대리석보다 성능이 우수하다고 하며 내부에 존재하는 기공 때문에 가벼운 특성을 가져 전통적으로 건축자재 등으로 많이 사용되어져 왔다. 그러나 현무암의 가장 중요한 특징 중 하나는 인체에 해로운 각종 방사선의 함량이 국제기준보다 현저히 낮아 최근에는 환경 친화적인 재료로 많은 각광을 받고 있다. Fig. 5는 현무암섬유의 형상을 나타내고 있다.

현무암 생산 공정은 Fig. 6에 현무암 연속섬유의 생산 과정 모식도를 나타내었다. 1차공정은 20mm 이하의 굵기로 된 현무암을 쇄석으로 분쇄하여 1,440 ~ 1,480°C 사이의 온도로 용융시키는 용융단계, 2차 공정은 용융물을 1,380 ~ 1,480°C로 유지하면서 얇게만드는 인발단계, 3차 공정은 연속섬유를 960 ~ 1,150°C로 서서히 온도를 줄이는 냉각단계, 4차 공정은 냉각된 섬유 표면에 표면처리제를 도포한 후 건조하고 권취하는 단계를 통해 생산된 섬유이다.

단섬유 제조 시 적합한 현무암은 연속섬유와 마찬가지로 용융시켰을 경우 균질한 용융물이 형성될 수 있어야 되며, 섬유를 제조할 수 있는 점도를 유지할 수 있는 온도범위가 충분히커야 되는 조건을 만족시킬 경우 균일하고 우수한 물성을 갖는 제품의 양산이 가능하다.

현무암 섬유는 환경 친화적인 재료이고, 기계적 안정성을 가지며 뛰어난 내마모성과 고내열성, 내수성, 내화학성, 흡음성과 향균성 및 탈취효

과가 있고, 원적외선 방사율이 높은 특징이 있다. 이러한 특징을 가지는 현무암 섬유는 용암이 지표로 분출하여 굳은 후 오랜 시간에 걸쳐 풍화를 통해 안정화가 이루어진 암석을 사용하기 때문에 자연 친화적인 섬유 소재라고 할 수 있다.



(a) Basalt



(b) Product of basalt and basalt fibers

Fig. 5 Images of the basalt and basalt fibers

**Table 2.** The comparison of property for basalt fiber

Fiber	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Basalt	2.8	3,100~4,840	85~95	(3.15)
E-glass	2.5	2,000~3,500	70	2.5(4.7)
S-glass	2.5	4,570	86	2.8(5.6)
Aramid	1.4	3,000~3,150	63~67	3.3~3.7
Carbon	1.7	4,000	230~240	1.4~1.8



Fig. 6 Manufacturing process of the basalt fibers

## 2) 현무암섬유의 적용 분야

현무암 섬유는 러시아에서 처음으로 군사용으로 개발후 첨단 기술로 활용되었다가 서방 국가에 알려지면서 세계 여러 나라로 전파되어 현재는 각국에서 관심분야에 맞춰 활발히 연구되고 있다. 현무암 섬유를 포함한 광물 섬유는 현재 산업용 섬유의 10% 정도의 비율을 점유하고 있으며, 국내에서의 수요도 점차 증가하고 있는 실정이다.

현무암 섬유는 물리적 특성이 유리섬유와 유사하거나 유리섬유보다 우수한 점 때문에 섬유강화복합재료와 섬유강화시멘트에 적용이 가능하다. 그리고 뛰어난 내열성을 가지기 때문에 방열복이나 고온 환경에서의 각종 보호용품으로 사용이 가능하며 또한 내식성이 우수하여 해수 환경에 영향을 받는 해양플랜트에 사용되는 복합재료 구조물에 적용이 가능하다 Fig. 7는 현무암 섬유의 적용 분야를 보여준다.

- 환경필터, 고온 분진필터, 내 화학필터
- 생활 건강 및 의료용 (원적외선, 단열성 이용)
- 콘크리트 강화섬유, 고강도 복합재
- 자동차용 머플러 흡음재
- 해양/수산용 복합재료 보강재
- 전기 배선용 케이블 내화 구조재
- 건축용 내화방화재, 방화커튼
- 고온 작업복 및 장갑, 고온용 Buffer
- 탄소섬유 대체용 풍력발전용 Blade 및 고품질 FRP
- 해양플랜트용 파이프



Fig. 7 The application of basalt fibers



## 2.2 복합재료의 장점

복합재료들이 항공분야 뿐만 아니라 점차 자동차, 철도 나아가 해양플랜트에 쓰이는 이유를 알아보면 다음과 같은 장점들이 있기 때문이다.

- (1) 가장 큰 장점은 무게 대 강도비가 높다는 것이다. 이러한 장점을 이용하여 금속부품을 대체하여 같은 강도를 확보하면서 무게를 현저히 줄일 수 있게 되어 금속을 대체한 재료의 경량화가 가장 큰 장점이다.
- (2) 해양 또는 화학 물질과 반응하여 금속재료처럼 쉽게 부식되지 않는다. 이러한 내식성 내부식성으로 인하여 땅속이나 해양 구조물에 설치시 부식이 쉽게 되지 않아 유지관리가 편리하다.
- (3) 탄성을 가지고 있어 매우 유연하고 진동에 견디도록 설계가 가능하다. 뒤튐림 응력을 받을시 탄성 때문에 쉽게 견딜 수 있으며 이에 따라 금속 구조물에서 발생하는 피로응력을 제거할 수 있다.
- (4) 제조 공법의 발달로 쉽게 성형이 가능하며 굴곡 및 원형 등 원하는 형상으로 성형이 용이하여 복잡한 구조물의 제작이 가능하다.
- (5) 오늘날 복합재료는 가격 면에서 점점 하락하고 있으며 설비도 개선이 되어 여러 생산기술도 점점 공법의 발달로 효율적으로 변하고 있다.

이러한 많은 장점을 가지고 있는 복합재료는 그 응용분야 또한 매우 많다. 현재 일상적 양산제품이 되어버린 골프채와 낚싯대와 같은 취미용품뿐만 아니라 우주항공분야의 첨단사업에 까지 매우 다양한 분야에 적용되고 있다. 자동차, 철도 산업에서 무게절감에 의한 연료소비의 절감차원에서 매우 긍정적인 재료로 평가되어 부분적으로 적용이 되고 있다. 그리고 최근에 설계 생산되는 항공기에서는 복합재료의 비율이 50%까지 적용되어 생산되고 있다[10-12].



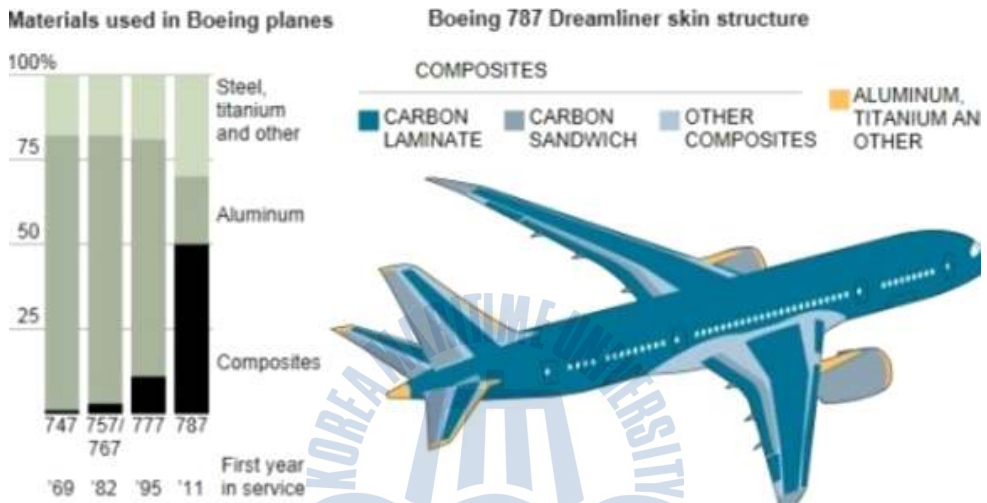


Fig. 8 Composite rate of Boeing 787

## 2.3 복합재료의 성형 공정

복합재료는 성형 공정은 일반 금속재료와 매우 다르며 섬유강화 복합재료의 제조방법은 기지(matrix)가 되는 물질에 따라 좌우되며, 지지재료가 수지 종류에 따라 달라진다. 수지의 종류는 크게 열을 가했을 때 굳는 열경화성 수지와 열을 가했을 때 수지가 녹는 열가소성 구분된다[13].

복합재료는 일차적으로 성형이 완료되면 필요에 따라 절단 작업등의 후 가공을 거치기 때문에 후 공정에 맞는 공법을 선택하여 성형을 실시해야한다. 현재까지 연구개발 되어 활용되고 있는 각종 복합재료의 성형법은 아래와 같다.

- 1) Hand Lay-Up 공법
- 2) RTM 성형법
- 3) VaRTM 성형법
- 4) 오토클레이브 성형법



### 1) Hand Lay-Up 공법

가장 오랜 역사를 가졌으며 단순한 복합재료 제작 공법으로 현재에도 간단한 부품 및 구조물 제작에 주로 쓰이고 있는 공법이다.

1차적으로 몰드를 나무나 금속으로 제작 후 액상 수지를 섬유와 함께 사람이 손으로 한 층씩 함침 시켜 만드는 공법으로 방법이 매우 간단한 성형공정을 거치지만 수지 내 기공 발생 등으로 인한 기계적 성질은 좋지 않다. 수지가 섬유에 함침 되는 동안 롤러 등을 이용해서 섬유내부의 기체를 빼주어야 하며 작업자의 숙련도에 따라 섬유 체적율이 다르고 한 사람의 작업자가 성형을 한다고 해도 수작업의 한계 상 제품의 부위에 따라 기계적 강도가 달라진다. 또한 사용되는 장비가 없어서 재료는 저렴하나 노동 집약적의 공법으로 인건비에 대한 부담도 있다. 주로 소량 생산 방식에 적합한 공법이며 시제품 등의 모형제작에 많이 사용된다.

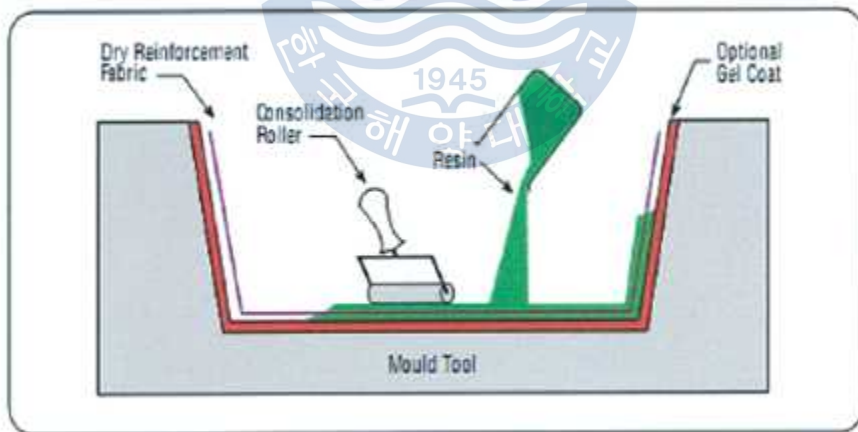


Fig. 9 Hand lay-up process

## 2) RTM(Resin Transfer Molding)

제작해 놓은 금형을 내부에 보강섬유 프리폼(preform)을 넣고 주입구를 통해 수지를 주입한 후, 진공으로 금형 내부를 유지하면서 열과 압력을 가해 성형하는 공법이다. RTM 성형법은 진공 상태에서 낮은 일정한 압력이 가해져 균질한 제품을 생산 할수 있으며 , 비교적 높은 보강섬유 함유율(50%wt까지)과 빠른 제조시간(12분 이하)의 장점을 가진다. 그러나 금형을 제작해야 되는 단점과 진공펌프 및 여러 종류의 설비가 필요하여 초기 투자비용이 많이 발생하는 단점이 있다.

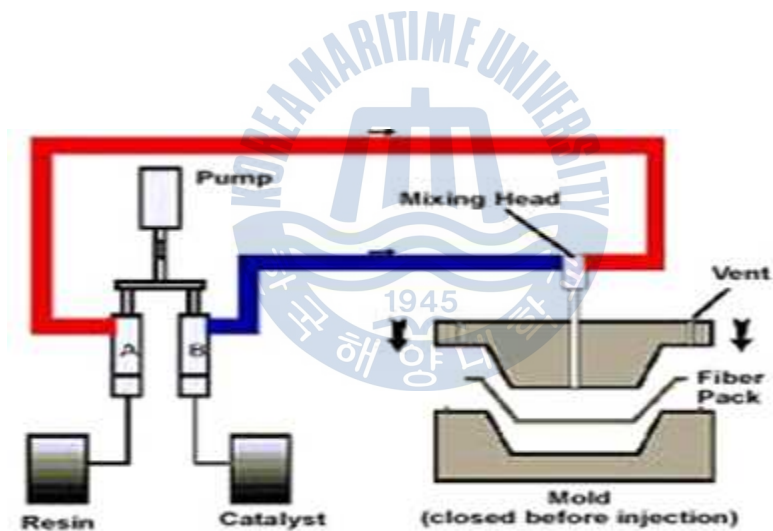


Fig. 10 RTM process

### 3) VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding)

VaRTM은 RTM과 비교하여 대형이며 수량이 많지 않은 제품을 생산할 때 쓰이는 공법이다. 상대적으로 고품질과 높은 섬유 함유율을 가지며, 형상이 복잡한 복합재료 구조물의 제작이 가능한 공법으로 VaRTM은 양쪽 면이 모두 금형으로 되어 있는 RTM과 달리 한쪽 면의 금형과 진공백으로 금형을 이루고 대기압과 금형 내부의 압력차를 이용하여 금형 내부에 적층된 Preform에 수지를 신속하게 함침시켜 복합재료 구조물을 성형하는 방법이다.

VaRTM 공정은 진공의 힘을 이용하여 수지가 주입되면서 금형 내부의 기포를 배출시키며 대기압으로 진공백 면을 통하여 수직의 압력이 가해져 제품 내부의 기공을 줄여주고 섬유 함유율을 높일 수 있다.

VaRTM 공법은 RTM 및 오토클레이브(Autoclave) 공법에 비해 성형비용이 적게 들며, 핸드레이업(Hand Lay-up) 공정보다 더 일정하고 양질의 제품을 생산할 수 있다.

한번 수지가 함침된 프리폼은 최종의 복합재료 부품이 만들어 지도록 적절한 경화 사이클 하에서 경화되어진다. 이 공정은 몰드로부터 복합재료 제품을 탈형하게 되면 완전히 끝나게 된다.

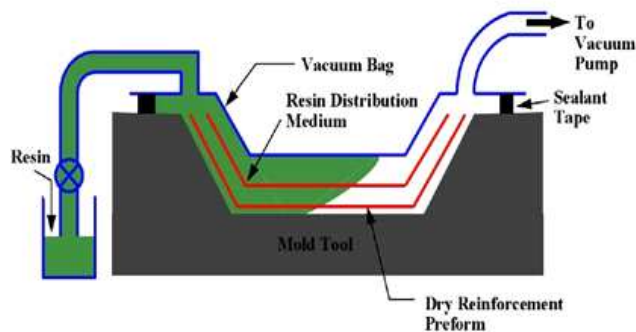


Fig. 11 VaRTM process

#### 4) 오토클레이브(Autoclave)

오토클레이브(Autoclave)란 열과 압력을 동시에 가할 수 있는 가압로인데 오토클레이브 성형법은 그 공정이 복잡하고 부자재가 많이 필요하며, 공정 및 제조 시간이 길고, 장비가 비싸다는 단점이 있는 반면, 외부에서 진공백에 압력을 가해 내부 진공상태를 유지시킬 수 있으므로, 수지로부터 발생하는 휘발분이 제거되며, 프리프레그(prepreg)의 층간 적층을 완전하게 할 수 있어서 기계적 성질이 우수한 제품을 만들수 있는 장점이 있다.

가장 일반적으로 섬유강화 복합재료를 제작할 경우에 사용되고 있는 오토클레이브는 성형법이며, 또한 프리프레그(prepreg)를 이용하거나 곡률이 있는 패널(panel)로 구성된 항공기 부품의 생산에 가장 적합한 방법으로 많이 적용되고 있다.

그러나 오토클레이브에 의해 성형된 샌드위치 구조물의 내부 결함 형성을 최소화하고 플라이(Ply)의 적층 방향이 정확하고 균일하며 층과 층 사이의 분리가 없는 양호한 제품을 성형하기 위해서는 온도 및 압력 속도, 가열, 가압시기 및 유지시간 등을 고려한 최적의 경화 공정을 설정하여야 한다. 또한 오토클레이브는 배치(Batch)식의 수작업이므로 생산성이 떨어지는 단점도 있다[14-16].

복합재료 성형 때 가해지는 압력은 수지의 유동, 프리프레그의 두께변화, 가공률 및 기계적 특성 등에 영향을 미치므로 가해지는 압력의 크기와 압력이 가해지는 시점 및 지속시간들을 규명할 수 있다.

이번 시험에는 이런 영향을 미치는 압력을 변화 하면서 수지의 함침속도를 조절하여 시편 제작 및 반응을 연구해보기로 했다.



Fig. 12 Autoclave process



### 3. 실험 재료 및 시편의 제작

#### 3.1 복합재료의 Void 형성이론

과거의 연구 결과에 따르면 VaRTM 및 RTM 공정 중 수지가 함침되는 시점에 섬유 층 사이에 불순물이 존재할 경우 모세관 현상으로 인하여 마이크로 void가 형성되는 것으로 알려져 있다[17].

기공의 형성과정에는 주입구와 벤트(Vent)의 위치, HPL(High Permeability Layer)와 섬유 프리폼의 장착 정밀도, 진공압력(Vacuum Pressure)의 크기, 프리폼의 물리적 성질, 주입된 수지내의 첨가물의 존재, 경화과정에서의 수지의 수축성, 섬유 프리폼의 불균일한 미세구조 등이 있다. 또한 프리폼 내부에 이물질이 존재할 경우 수지의 함침과정에서 기공이 발생할 수 있다.

복합재료뿐만 아니라 모든 재료에서 내부에 void가 발생할 경우 내부에서 응력집중이 발생하여 기계적 강도를 저하시키는 요인으로 작용된다 [18-20].

본 연구에서는 VaRTM 공정 중 인위적으로 다양한 두께의 이물질을 바잘트 섬유를 적용한 시편 제작시 삽입하여 내부에 void가 생성된 시편을 제작하였다. 또한 공정 압력을 조절하여 압력이 void 생성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 연구를 진행하였다. 이를 통하여 VaRTM 공정 중 내부에 유입되는 이물질의 두께와 압력을 조정하여 수지가 함침 되는 속도에 따른 void의 발생 거동을 살펴보았다.



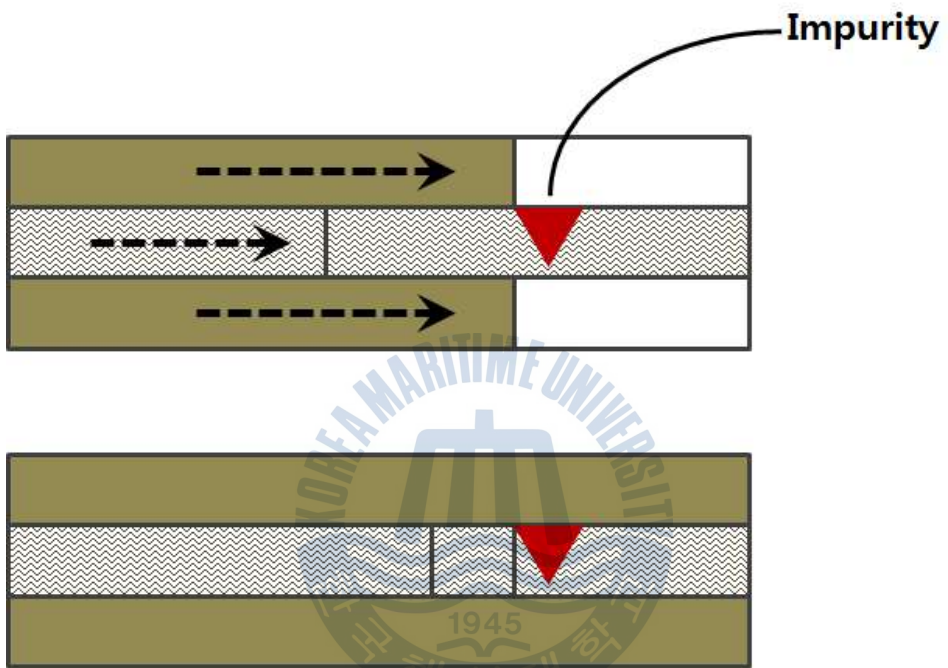


Fig. 13 Void creation mechanism

### 3.2 이물질 제작

VaRTM 시편 내부에 인위적으로 삽입되는 이물질을 다양한 두께로 제작하였다. Fig. 14에 각각의 두께로 절단되어 나뉘어진 이물질의 사진을 나타내었다. 제작에 사용된 재료는 Hexcell사의 BMS 8-79 유리섬유 Prepreg를 사용하였다. 유리섬유 Prepreg를 일정한 크기로 절단하고, 이형 처리된 판상 몰드위에 한 장씩 차례로 적층을 한 후, 이형 필름과 진공백을 사용하여 진공을 잡았다. 그런 후에 오토클레이브로 성형을 했다. 경화된 시편을 몰드에서 탈형하고 크기에 맞게 절단하였다. 이물질의 폭과 크기는 일정하게 하고 두께를 각각 다섯 가지의 크기로 제작하였다. 각각의 두께변수는 0.8mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm & 4.0mm로 이물질을 절단 제작하였다.



Fig. 14 Scheme of prepared impurity

### 3.3 재료 및 시편의 제작

압력에 따른 복합재료 내부의 void 생성 영향에 대해 알아보기 위해 실험에 필요한 재료를 준비하였다. 실험에 사용된 재료는 세코텍사의 일방향 현무암 섬유를 사용하였다. 섬유와 함께 사용된 기지재료인 수지는 Infusion용 에폭시 수지인 Hexion사의 RIM135/RIMH137 시스템을 10:3으로 혼합하여 사용하였다. Fig. 15에 사용된 재료의 사진을 나타내었다.

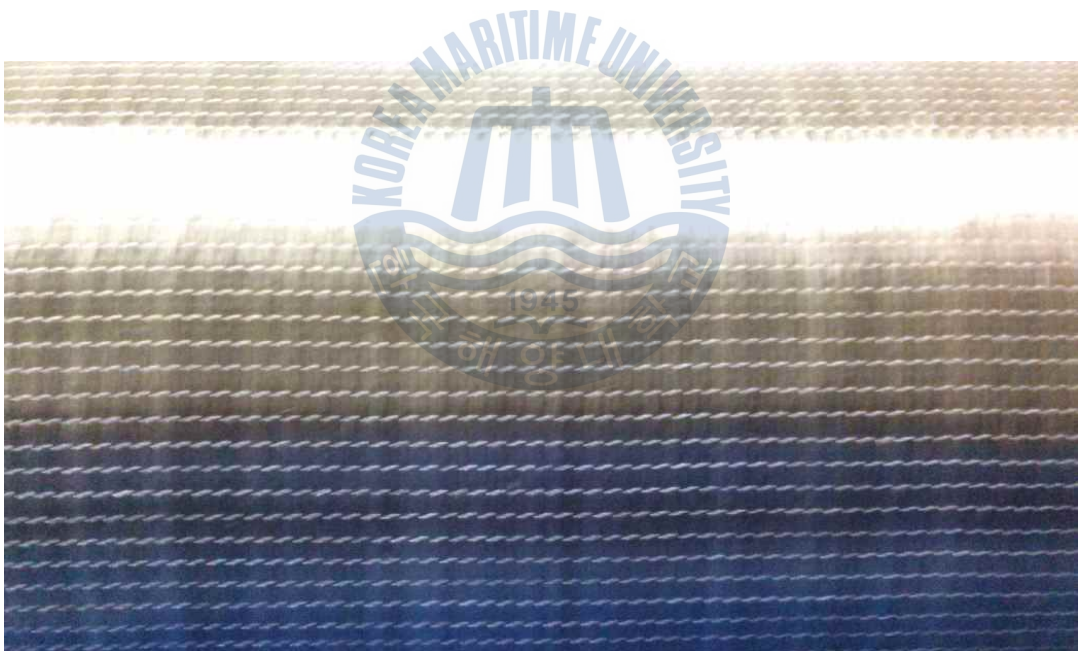


Fig. 15 Shape of basalt fiber

위 3.1절에 나타난 것처럼 void를 인위적으로 형성시키기 위해 제작된 이물질을 복합재료 적층 재료 내부에 인위적으로 삽입하여 VaRTM 공법을 이용하여 시편을 제작하였다. 실험에 사용된 보강섬유로는 현무암 섬유를 사용하였는데 이는 최근 각광받고 있는 광물섬유인 현무암섬유에 대한 기공에 의한 강도 변화 여부를 알아보기 위해서이다.

Fig. 16에 복합재료 내부에 미리 삽입된 이물질의 위치를 나타내었다. 미리 제작된 각각의 이물질을 프리폼 레이어의 중앙에 위치시킨 후에 이물질의 길이방향으로 수지가 함침될 수 있도록 주입구를 배치하였다. Fig. 17에는 실험에 사용된 VaRTM공법을 순서대로 나타내었다. 그 순서는 다음과 같다.

- (1) 판상 몰드의 이형처리
- (2) 프리폼 적층 및 이물질 위치고정
- (3) peel ply 적층
- (4) 유료망 적층
- (5) 수지주입구 및 진공흡입구 설치
- (6) 실란트 테이핑
- (7) 진공백 적층 및 진공처리
- (8) 수지주입 및 함침
- (9) 경화 후 탈형



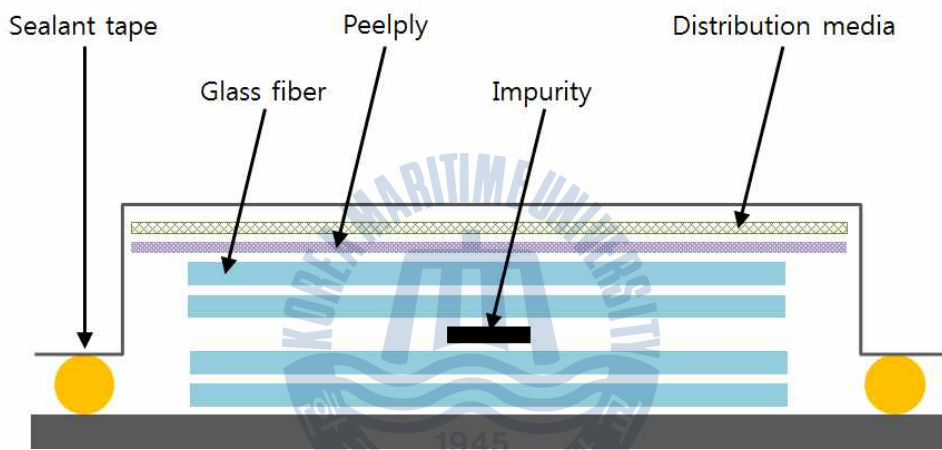


Fig. 16 Lay-up sequence of fiber and impurity

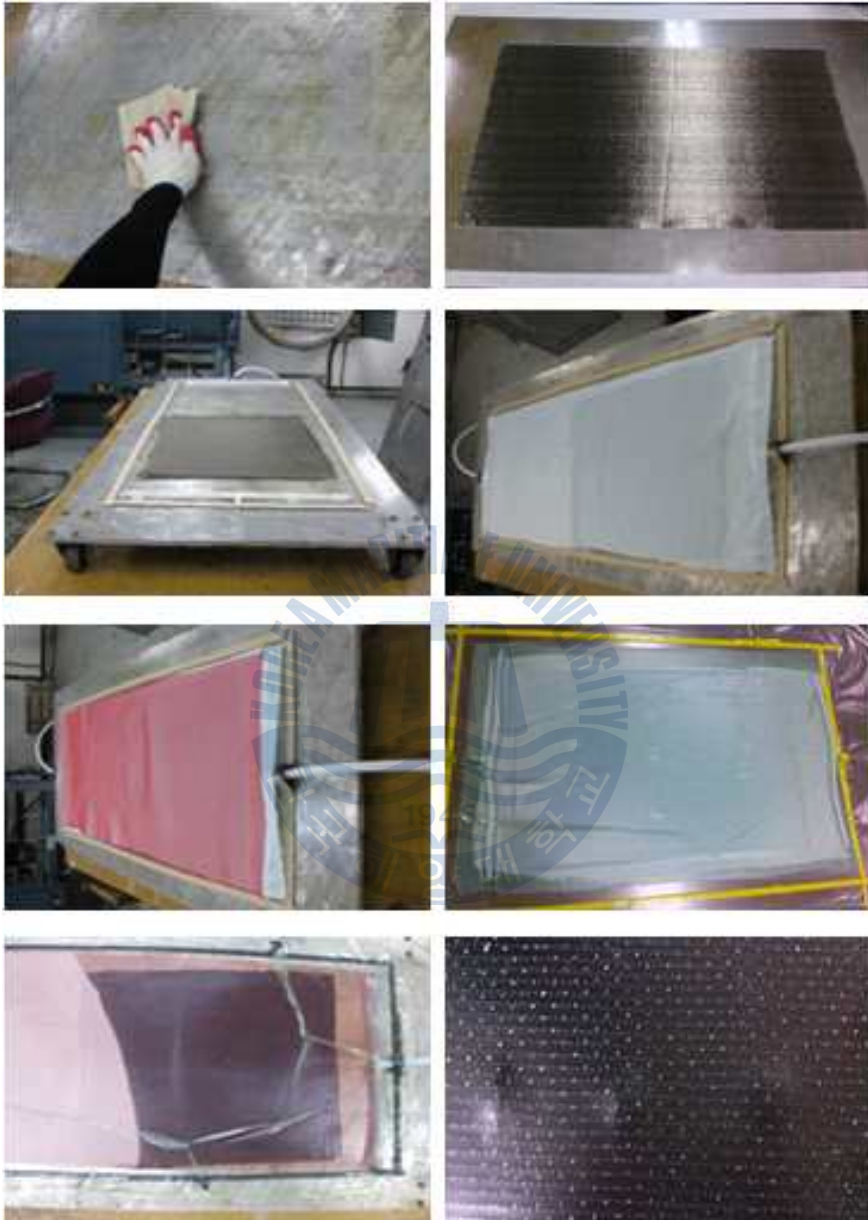


Fig. 17 Fabrication of specimens

## 4. 결과 및 고찰

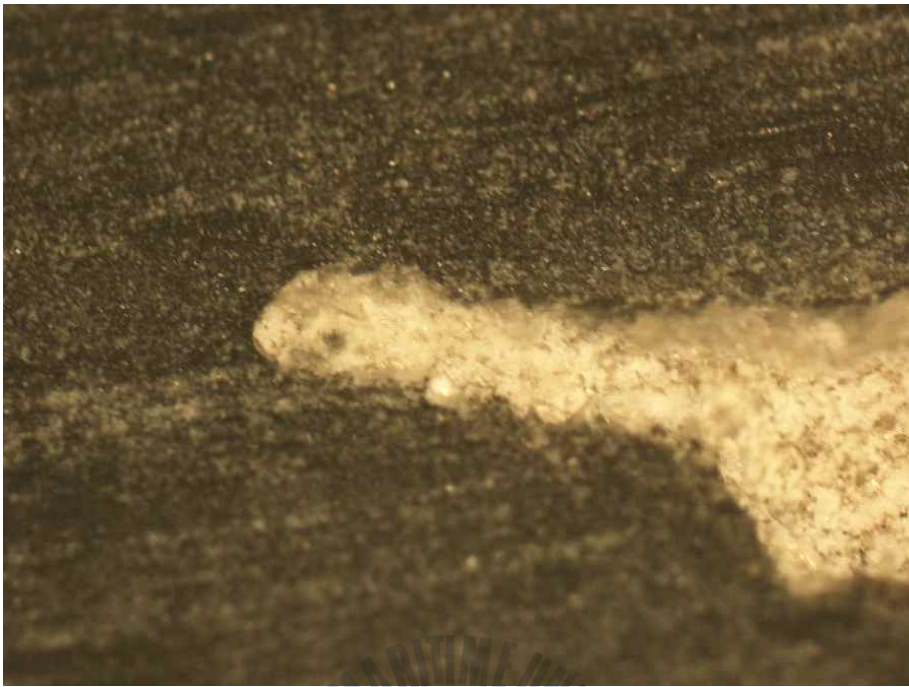
### 4.1 단면 분석

시편의 이물질 주변에 void가 발생할 것으로 예상되는 지점을 커팅기를 사용하여 절단하고 광학현미경으로 관찰하였다. 시편의 두께에 따른 void의 발생 경향을 Fig. 18에 나타내었다. 앞선 연구를 통해 이물질의 크기는 void의 생성에 영향을 미치지 않는다는 것이 증명되었기에 본 연구에서는 이물질의 크기변수는 고려하지 않았다. 결과를 통해 이물질의 두께가 두꺼워질수록 그와 비례하여 void의 분포도가 높아졌으며 void의 크기 또한 확대되는 것을 알 수 있었다.

또한, 본 연구에서는 VaRTM 공정 중 가해진 압력에 따른 void의 생성 여부를 확인해 보았다. 공정 중 가해진 압력변수는 -10inHg, -20inHg & -30inHg로 가정하였다. 압력변수를 통한 void 형성 결과를 보면 가해지는 압력이 높아질수록 더 크고 많은 void가 형성되는 것을 알 수 있었다.

따라서 광학 현미경을 통한 단면 분석을 이용하여 void 발생에 영향을 미치는 인자는 이물질의 크기와 압력임을 알 수 있었다.





(a) 0.8mm



(b) 1.6mm





(c) 2.4mm



(d) 3.2mm



(e) 4.0mm

Fig. 18 Microscope photos with different thickness impurity

그림을 보면 void는 시편의 두께가 0.8mm에서는 거의 발견되지 않거나 극소수의 양만 확인할 수 있었으며 두께가 1.6 ~ 2.4 mm 사이에서 void의 발생이 시작되고 그 분포도가 증가하기 시작하였다. 두께가 3.2 ~ 4.0mm로 두꺼워지면서 void의 직경이 확대되고 그 수가 증가됨을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 두께 0.8mm 이하의 이물질이 유입될 경우에는 void 발생의 영향력은 미미하며 두께 1.6 ~ 2.4mm 사이의 두께를 가지는 이물질이 유입될 경우 재료의 내부에 직경 1mm 미만의 아주 미세한 void가 발생하여 그 분포가 증가하는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 두께가 3.2 ~ 4.0mm 사이의 두께를 가지는 이물질이 유입되면 직경 1mm 이상의 비교적 큰 void가 발생하며 이물질의 두께 증가와 함께 void의 크기도 커지는 것을 알 수 있었다.

VaRTM 공정 중 가해진 압력에 따른 실험 결과를 살펴보면 -10inHg의 경우에는 void가 비교적 적게 발견되는 걸 확인할 수 있었으며 -20inHg의 압력에서는 void의 수가 증가하기 시작하다가 -30inHg의 압력에서는 void의 수와 그 직경이 확연히 증가함을 알 수 있었다.

본 연구의 결과를 보다 체계적으로 확립하기 위해서 위에서 살펴보았던 광학 현미경 사진에 추가하여 시편의 두께 및 압력에 따른 void의 생성 개수 및 크기를 Table 3에 나타내었다.

시편의 길이와 폭은 동일한 크기로 통일하였으나, 두께는 각각 8mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm 및 4.0mm 세분화 하였다. VaRTM 공정 중 가해진 압력은 -10inHg, -20inHg & -30inHg로 정하였고, 이를 다시 A ~ C Group 으로 구분하여 명칭 하였다.

**Table 3.** The size and number of void according to the thickness of specimens

Specimen	Width (b)	Length (l)	Thickness (t)	Void Number	Void Size(mm)		
					Min	Max	Average
A-1	10	20	0.8	0	0	0	0
A-2	10	20	1.6	2	0.1354	0.2124	0.1739
A-3	10	20	2.4	4	0.1191	0.2729	0.2156
A-4	10	20	3.2	9	0.2571	0.8913	0.6427
A-5	10	20	4.0	10	0.1725	1.1334	0.6595
B-1	10	20	0.8	1	0.2251	0.2251	0.2251
B-2	10	20	1.6	3	0.2334	0.3319	0.2628
B-3	10	20	2.4	4	0.1981	0.3724	0.3525
B-4	10	20	3.2	11	0.2791	0.9834	0.6312
B-5	10	20	4.0	14	0.2529	1.2998	0.8776
C-1	10	20	0.8	2	0.2217	0.3572	0.2895
C-2	10	20	1.6	3	0.2525	0.4045	0.3199
C-3	10	20	2.4	3	0.2129	0.6213	0.4277
C-4	10	20	3.2	13	0.2334	1.4551	0.8924
C-5	10	20	4.0	15	0.2594	1.6419	1.0424

Table 3에 나타낸 시편의 두께 및 압력에 따른 void의 생성개수 및 크기를 Fig.19 ~ Fig.21과 같이 그래프로 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 실험에 사용된 시편에 있어서 void의 생성량 및 크기는 시편의 크기의 증가보다는 두께가 두꺼워질 때 확연히 증가하는 것을 알 수가 있었다.

즉, 두께가 큰 복합재의 성형일수록 void의 생성량 및 크기가 증가되는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.



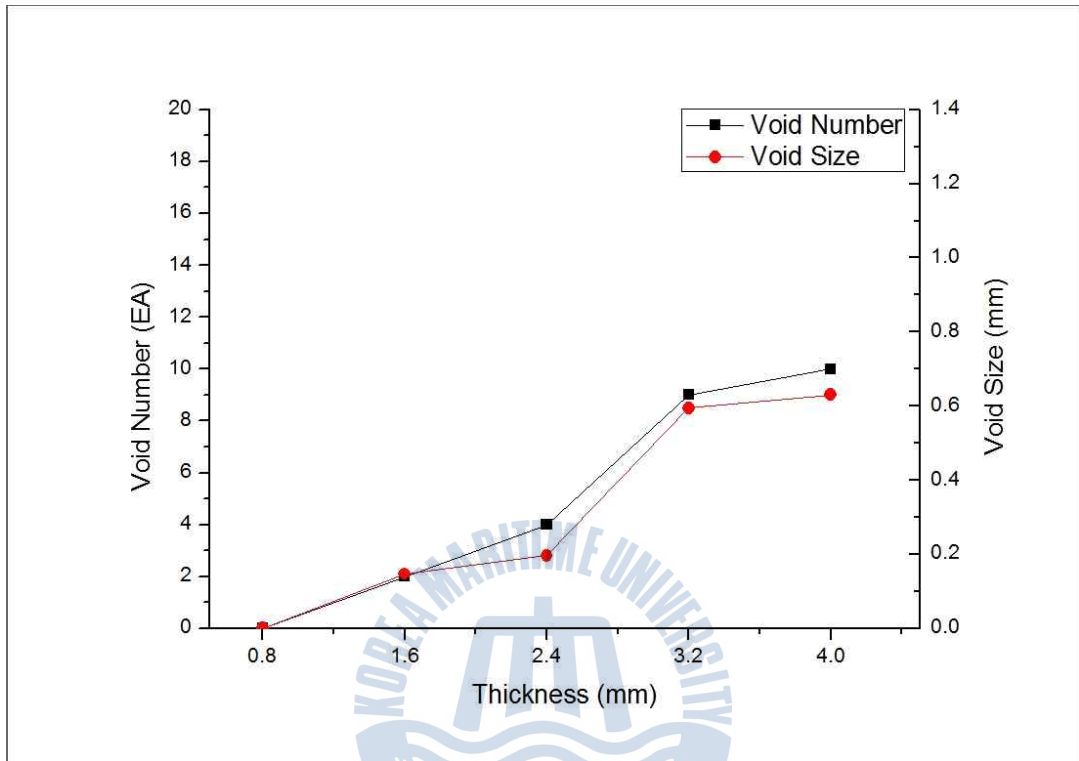


Fig. 19 Results of group-A specimen

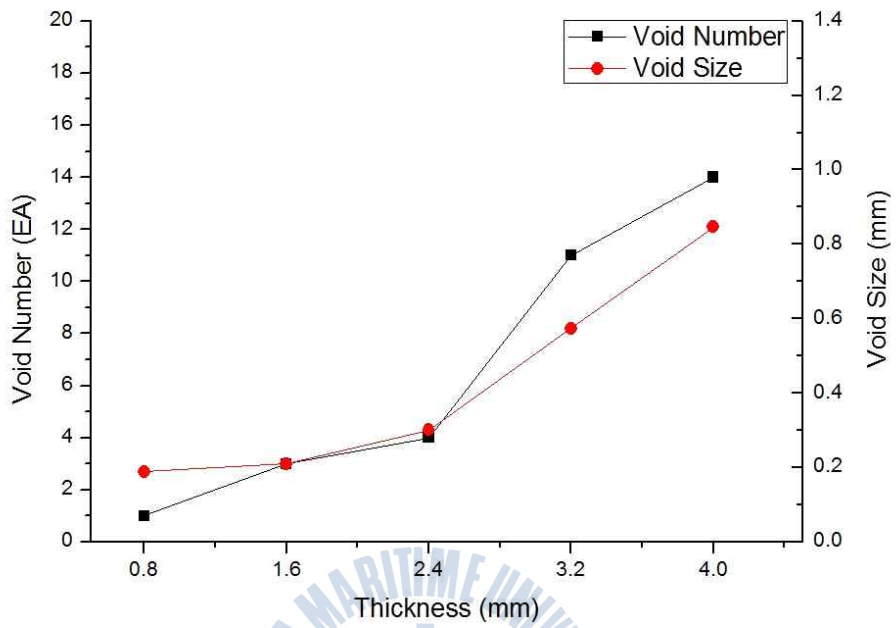


Fig. 20 Results of group-B specimen

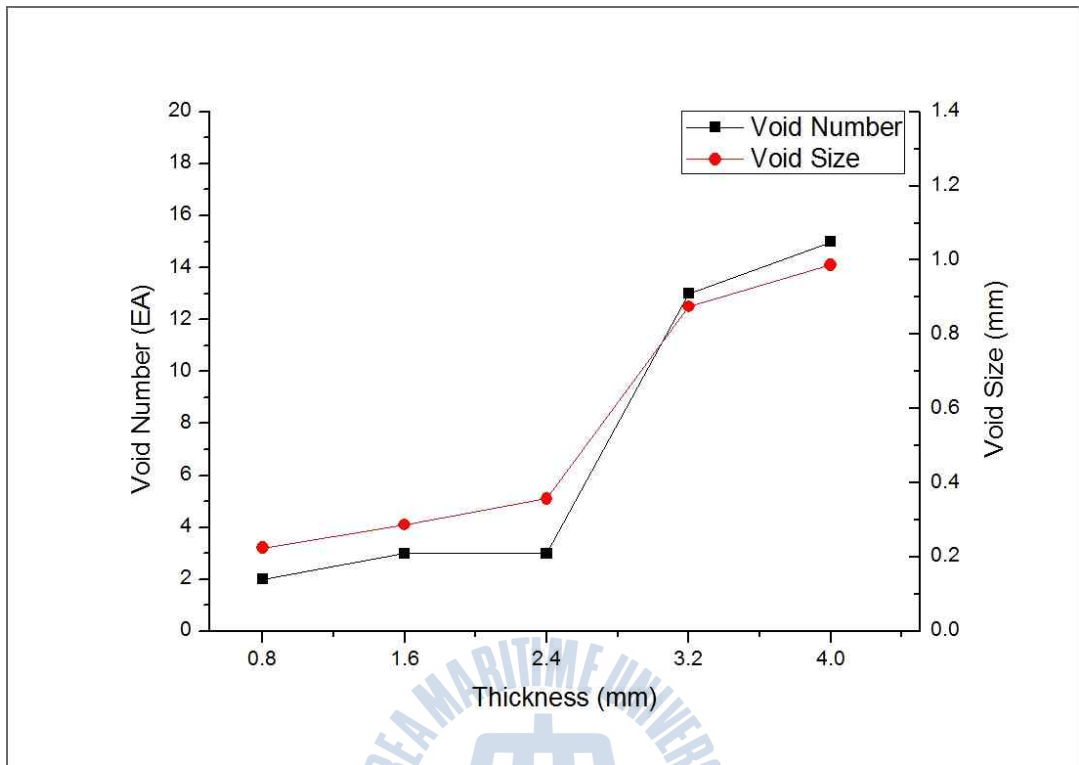


Fig. 21 Results of group-C specimen



## 5. 결론

본 연구에서는 인위적으로 불순물을 삽입하여 VaRTM 시편을 제작하여 불순물로 인하여 발생하는 void에 대하여 살펴보았다. 특히, 절단면에 대한 광학 현미경 관찰에서 명확하게 void를 발견할 수 있었다. 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 각기 다른 다섯 가지 두께를 가진 불순물을 삽입하여 성형한 시편의 경우 void의 생성에 시편의 폭은 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.
2. 각기 다른 다섯 가지 두께를 가진 불순물을 삽입하여 성형한 시편의 경우는 두께의 증가에 따라 void의 분포와 void의 직경이 커지는 것을 발견하였다.
3. 0.8mm의 불순물 두께에서는 void의 발생을 관찰 할 수 없었으나 1.6mm 이상의 두께에서는 void가 생성되어 두께가 증가함에 따라 분포도가 증가하고 void의 직경이 커지는 것을 알 수 있었다.
4. 두께 1.6 ~ 2.4mm 범위는 void가 발생하기 시작하여 분포도를 넓혀가는 생성이 활발하게 이루어졌으며 두께가 3.2mm를 넘어가면서 void의 직경이 확대되는 성장 반응이 활발하게 이루어졌다.

이상의 연구 내용을 통하여 불순물의 유입이 복합재료 내부에 void를 생성하여 재료의 결함으로 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

최근 풍력 발전기의 블레이드 등 복합재료로 만들어지는 대형 구조물의 제작에 VaRTM 공정을 이용하고 있다. 그러나 오토클레이브와 프리프레그를 이용하여 제작하는 항공기 부품 등과 다르게 이러한 일반 산업 구조물들의 제작에 있어서는 환경에 대한 관리가 소홀하게 이루어지고 있다.

항공기 부품의 제작과 같이 클린 룸(Clean Room)을 따로 만들어 현장을 조성하는 것은 어렵다 하더라도 성형 공정 중 유입될 수 있는 이물질에 대한 관리 기준을 확립하면 VaRTM 공정을 이용하여 제작한 복합재료에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.



## 참고문헌

- (1) 김윤해, 한중원, 복합재료 (한국해양대학교 조선기자재 공학부) : Page 15, 18
- (2) Michael Scholarth Koefoed, Modeling and Simulation of the VaRTM Process for Wind Turbine Blades, 2003.
- (3) Ronald F. Gidson, Principle of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, 1994
- (4) Sheno, R.A. and Welicome, J.F., Composite materials in marine structure volume 1: Fundamental aspect, Cambridge University Press. Cambridge. UK, 1993
- (5) 신편기계재료학, 기계 재료학 교재 편찬위원회, 2007: Page 355~356
- (6),(8)&(9) 김윤해, 한중원, 복합재료 (한국해양대학교 조선기자재 공학부) : Page 18, 137~139 & 126~128
- (7) 손진호, VaRTM 성형공법에 의해 제조된 첨단 복합재료의 물리적. 기계적 특성평가 및 그 응용, 박사학위 논문: Page 7 & 12~13
- (10) 정연운, 라미네이트와 하니콤 샌드위치 구조물의 강도 특성에 미치는 Thermal Aging의 영향, 석사학위 논문: Page 6~8
- (11) Parnas, R. S., A. J. Salem, T. A. K. Sadiq, H. P. Wang, and S. G. Advani, "The interaction between micro- and macro- scopic flow in RTM preforms", Composite Structures vol. 27, 1994, pp. 93-107
- (12) Pears, N. R. L., F. Guild, and J. Summerscales, "An investigation into the effects of fabric architecture on the processing and properties of fibre reinforced composites produced by resin transfer moulding",

Composites Part A: Applied Science and manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing) Vol. 29 Issue. 1-2, 1998, pp. 19-27

(13) Bergstrom, R. , “The influence of fiber architecture for resin flow properties in vacuum injection and RTM method. Ahlstrom Glassfiber“, 1999

(14) Lundstrom, T. S. R. Stenberg, R. Bergstrom, H. Partanen, and P. A. Birkeland, In-plane permeability measurements: A nordic round-robin study“, Composites Part A: Applied Science and manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing) Vol. 31 Issue. 1, 2000, pp. 29-43

(15) Drapier, S., O. Elbouazzaoui, A. Vautrin, A. Pagot, and P. Henrat, “Assessment and prediction of the influence of the stitching on the transverse permeability of NC2 multiaxial reinforcement. In H. Sol and J. Degrieck (Eds.)“ Tenth European Conference on Composite Materiale (ECCM10), Brugge, Belgium, 2002, pp. 1-10

(16) Binetruy, C. and J. Pabiot, “Effect of fabric architectural heterogeneities on effective and saturated permeabilities in RTM“ Processing, Intergrated Design and Manufacturing, 1997.

(17) Binetruy, C., B. Hilaire, and J. Pabito, “The influence of fiber wetting in resin transfer molding: Scale effects“, Polymer Composites Vol. 21 Issue 4, 2000, pp. 548-557

(18) Pearce, N., F. Guild, and J. Summerscales, “A study of the effects of convergent flow fronts on the properties of fibre reinforced composites produced by RTM“, Composites Part A: Applied Science and manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing) Vol. 29 Issue. 1-2, 1998, pp. 141-152

- (19) Williams, C., J. Summerscales, and S. Grove, "Resin infusion under flexible tooling(RIFT): A review", Composites Part A: Applied Science and manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing) Vol. 27 Issue 7, 1996, pp. 517-524
- (20) Labat, L., J. Breard, S. Pillut-Lesavre, and G. Bouquet, "Void fraction prevision in LCM parts", The european physical journal: applied physics Vol. 16, 2001, pp. 157-164
- (21) R.G. Lam, J.L. Kardos, "The permeability and compressibility of aligned and crossplied carbon fibre beds during processing of composites" , ANTEC 89 (2nd edn.)SPE, New York, 1989, pp. 1408-1412
- (22) L. Trevino, K. Rupel, W.B. Young, M.J. Liou, L.J. Lee, "Analysis of resin injection moulding in moulds with preplaced fibre mats. 1: Permeability and compressibility measurements" , Polymer Composites, vol. 12 no. 1, 1991, pp. 20-29
- (23) A.D. Mahale, R.K. Prud'homme, L. Rebenfeld, "Quantitative measurement of voids formed during liquid impregnation of non-woven multifilament glass networks using an optical visualization technique" , Polym. Eng. Sci, 32 (5) ,1992 , pp. 319-326
- (24) N. Patel, V. Rohatgi, L.J. Lee, "Micro-scale flow behaviour and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fibreglass mat" , Polym. Eng. Sci, 35 (10),1995, pp. 837-851
- (25) N. Patel, L.J. Lee, "Effects of fiber mat architecture on void formation and removal in liquid composite molding" , Polym Compos, 16 (5) ,1995, pp. 386-399

(26) H.T. Yosida, T. Ogasa, R. Hayashi, “Statistical approach to the relationship between ILSS and void content of CFRP” , Compos Sci Technol, 25, 1986, pp. 3-18

(27) B.D. Harper, G.H. Staab, R.S. Chen, “A note on the effects of voids upon the hygral and mechanical properties of AS4/3502” , J Compos Mater, 21 (1987), pp. 280-289

