



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](#)

工學碩士 學位論文

VaRTM 공정 중 발생하는 Micro-void에  
의한 복합재료 강도 변화에 대한 연구

The Variation of Mechanical Strength by Micro-void in  
Composite Materials During VaRTM Process



指導教授 金 允 海

2012年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

梁 東 薰

工學碩士 學位論文

VaRTM 공정 중 발생하는 Micro-void에  
의한 복합재료 강도 변화에 대한 연구

The Variation of Mechanical Strength by Micro-void in  
Composite Materials During VaRTM Process



指導教授 金允海

2012年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

梁 東 薰

本 論文을 梁東薰 의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長      文 慶 萬      印

委 員      金 俊 榮      印

委 員      金 允 海      印



2012年 2月

韓國海洋大學校 大學院  
材 料 工 學 科

# 목 차

<b>Abstracts</b>	-----	1
<b>제 1 장</b>	<b>서론</b> -----	3
<b>제 2 장</b>	<b>복합재료의 소개</b> -----	7
2.1	복합재료의 종류 -----	7
2.2	복합재료의 응용 분야 -----	9
2.3	복합재료의 성형 공정 -----	12
2.3.1	Hand Lay-up / Spray-up -----	15
2.3.2	RTM(Resin Transfer Molding) -----	16
2.3.3	VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding) ---	17
2.3.4	오토클레이브(Autoclave)-----	20
2.3.4	필라멘트 와인딩-----	23
<b>제 3 장</b>	<b>복합재료의 Void 형성</b> -----	25
3.1	복합재료의 Void 형성 -----	27
3.2	실험 재료 및 시편의 제작 -----	29
3.3	실험 방법 -----	33

3.4	실험 결과 및 고찰 -----	34
3.4.1	단면 분석 결과 -----	34
<b>제 4 장</b>	<b>결론 -----</b>	<b>45</b>
<b>참고 문헌</b>	<b>-----</b>	<b>48</b>



# **A Study of the Voids Which Generated Due to Deposition of Impurities While Producing Composite Materials by the VaRTM Process**

**Dong-Hun Yang**

**Department of Materials Engineering  
*Graduate School of  
Korea Maritime University***

## **Abstract**

Composite materials have many engineering advantages. One of the most important properties composite materials offer is specific strength and specific modulus. For transportation applications including aerospace and automobile application, the weight of the vehicle is a critical importance for energy saving and payload increase.

The VaRTM (Vacuum-assisted Resin Transfer Molding) is a kind of composite material manufacturing process. The VaRTM process has been used in many applications because of its time-saving and cost-effective characteristics.

But impurity can make a problem of materials during the VaRTM process. Insertion of impurity during the VaRTM process makes internal void and this void degrades mechanical properties of materials. Relation between void

generation and impurity is investigated in this study. Impurities are intentionally inserted into the laminate and optical observation is conducted. Internal voids are generated on specimens with thick impurity. Void generation is occurred between the thickness of 1.6 ~ 4.0mm. And void growth is occurred between the thickness of 3.2 ~ 4.0mm. The diameter of void is proportional to the thickness of the impurity. From these results, relation between the void generation behavior and impurity thickness is verified. Experimental results and expected results from the mathematical model show a good agreement with each other. This result notes that the environmental control during the VARTM process is very important for material reliability.



## 제1장 서론

복합재료(Composite Materials)란 성질이 다른 두 종류 이상의 소재를 복합화한 후에 물리적, 화학적으로 각각의 소재가 원래의 상을 유지하면서 원래의 소재보다 우수한 성능을 갖게 한 재료를 말한다. 복합재료의 가장 보편적인 구조는 두 가지 요소, 즉 접합재료의 역할을 하는 기지(Matrix)와 재료의 강도를 증가시키는 강화재(Reinforcement)로 이루어진다. 주로 사용되고 있는 수지복합재료는 강화천, 섬유, 폼(Foam), 혹은 허니컴(Honeycomb)등의 재료를 기지재료인 수지(Resin)에 강화한 재료이다.<sup>(1)</sup>

복합재료는 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도 및 비강성을 가지면서도 내식성이 우수하다고 알려지며 1960년대 이후 우주항공분야 및 자동차 분야에서 그 활용 분야가 점차 증가하고 있으며 향후 금속을 대체할 첨단 소재로서의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 복합재료 중 섬유 강화 플라스틱(Fiber Reinforced Plastic, FRP)은 가장 많이 사용되는 복합재료의 한 종류이며 사용되는 강화섬유나 기지재의 재료에 따

라 그 종류가 매우 다양하다. 일반적으로 기계적 강도가 우수하고 가격이 저렴한 유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)가 가장 많이 쓰이며, 탄소섬유, 아람드섬유, 바잘트섬유 등이 주로 사용되고 있고 그 중 탄소섬유(Carbon Fiber)는 기계적강도가 매우 우수하지만 제조단가가 비싸기 때문에 최종 성형품의 가격이 비싼 단점이 있다. 따라서 가격이 저렴하면서도 기계적 강도가 우수한 유리섬유가 많이 쓰이고 최근에는 유리섬유의 제조단계에서 발생하는 환경유해요소 때문에 다른 대체제의 무기섬유의 연구개발이 한창이다.

한편 복합재료는 제조 방식에 따라 제품의 기계적성질이 매우 큰 차이를 보인다. 제조방법에는 전통적인 핸드레이업(Hand Lay-up) 공법과 진공액상주입공법(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, VARTM), 오토클레이브(Autoclave)공법, 필라멘트 와인딩 공법등이 있다. 최근에는 고가의 장비가 필요없고 대형의 제품을 비교적 저렴한 가격으로 제작할 수 있는 VARTM공법이 주목을 받고있다. VARTM공법은 진공을 이용해

서 한쪽면의 몰드에 프리폼을 적층시킨뒤에 내부의 진공과 대기압과의 압력차를 이용하여 수지가 몰드내부로 함침되도록 하는 공법으로써 기존의 RTM공법에 비해 가격이 저렴하면서도 진공의 압력으로 성형하기 때문에 50~60%의 섬유체적율을 구현할 수 있기 때문에 기계적 강도가 우수하여 경주용 자동차 및 대형 풍력발전기의 블레이드, 고부가가치의 요트 및 보트제작에 최근 그 활용도가 매우 높은 공법이다. 하지만 VARTM공법은 한쪽면의 몰드에 프리폼을 적층하고 진공백을 이용한 몰드 완성작업까지가 현재에는 모두 작업자의 수작업으로 진행되기 때문에 프리폼 내부에 이물질이 포함될 가능성이 존재한다. 특히 대형 풍력발전기의 경우 블레이드의 길이가 약 60m에 달하는 등 성형품의 크기가 커질 수록 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 성형품에 대한 기계적강도 저하정도를 미리 예측하여 제품 불량 및 사용여부에 대한 판단이 필요하게 된다.

본연구에서는 VARTM공정에서 프리폼 내부에 미리준비되어진 일정치수의 이물질을 삽입하고 수지를 함침시켜서 경화하고, 이물질의 주위에 미세기공의 발생수와 크기를 조사하였다. 또한 이물질에 의해 발생된 기공을 포함한 제품의 시편을 채취하여 기계적 강도를 측정하고 정상부와의 기계적 강도를 비교 분석하였다.

## 제 2 장 복합재료의 성형 공정

### 2.1 복합재료의 분류

복합재료는 강화재의 강화형태 및 재료의 종류, 제조공법에 따라 그 종류가 매우 다양하다. 강화재의형태에 따라 섬유강화형 및 분산강화형, 적층강화형 등으로 분류할 수 있으며, 그 중에서 섬유강화 복합재료는 강화섬유의 재료에 따라 다음과 같이 분류될 수 있다.

- 유리섬유 강화 복합재료
- 탄소섬유 강화 복합재료
- 아라미드섬유 강화 복합재료
- 바잘트 섬유강화 복합재료

섬유강화 복합재료는 사용되는 기지재의 종류에 따라 FRM(Fiber Reinforced Metals), FRC(Fiber Reinforced C), FRP(Fiber Reinforced Plastics)등 으로 분류할 수 있다. 그 중

에서 선박 및 항공산업, 풍력발전 산업에서는 성형이 간편하고 기계적강도 및 내식성이 우수한 FRP가 많이 쓰이고 있다. FRP에 쓰이는 강화섬유에 따라 GFRP(Glass FRP), CFRP(Carbon FRP), BFRP(Basalt FRP)라고 한다.



## 2.2 복합재료의 응용분야

복합재료는 기존의 금속재료에 비해 많은 장점을 가지고 있는 것이 특징이다. 특히 기지재를 고분자재료를 사용했을 경우 내식성이 매우 높기 때문에 반영구적인 제품의 설계가 가능하다. 이로 인해서 해수분위기 및 기타의 열악한 환경에도 반영구적으로 사용할 수 있으므로 재료의 유지보수 비용절감 또한 가능하다. 또한 인장강도를 밀도로 나눈 비강도가 매우 높은 재료이기 때문에 제품의 무게를 감소시키는 구조물에 적당하다. 항공기의 경우 항속거리의 증가와 연료절감을 위해 많은 부분을 복합재료화 하고 있으며 최근 개발된 민간항공기인 보잉사의 B787의 경우 동체전체를 복합재료화 함으로써 전체 항공기 부품의 50%이상을 복합재료로 설계하였다는 보고가 있다. 또한 여러부품으로 가공해서 조립하는 생산방식이 아닌 복잡한 구조를 하나의 몰드를 통해서 생산이 가능하기 때문에 생산성이 높고 제조 단가를 줄일 수 있는 장점도 있다. 여러가지의 장점을 요약하면 다음과 같다.

- 금속에 비해 매우 높은 비강도
- 높은 내식성 및 내약품성
- 고탄성 특성으로 인한 내진성
- 고내피로성

이러한 많은 장점을 가지고 있는 복합재료는 그 응용분야 또한 매우 많다. 현재 제품화 되어 실용성이 입증되어진 고탄성의 골프채와 낚싯대를 비롯한 생활용품에서 부터 우주항공분야의 첨단사업에 까지 매우 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 자동차 산업에서는 무게절감에 의한 연료소비의 절감차원에서 매우 긍정적인 재료로 평가되고 있으며 일부 부품들은 복합재료화의 연구가 진행되어지고 있다. 또한 선박을 비롯한 고부가가치의 요트와 보트산업에서 오랫동안 사용할 수 있는 복합재료를 이용하고 있으며 철도차량에도 사용되어지고 있다. 최근에는 친환경 에너지 산업으로의 응용분야가 점차 확대되고 있으며 특히 대형 풍력발전기의 블레이드 재료로 많이 사

용되고 있다. 바람의 힘을 이용하는 풍력발전기의 경우 한번시  
공하면 25년에서 30년의 설계수명을 가지는 제품이고 또한 발  
전효율을 극대화하기 위해서는 우수한 기계적 성질을 가지면  
서 매우 가벼운 소재인 복합재료가 최적의 재료라고 할 수 있  
을것이다.



## 2.3 복합재료의 성형공정

복합재료는 등방성의 금속재료와는 달리 강화재의 방향에 따라 재료의 기계적 성질이 달라지는 이방성 재료이다. 그러므로 제품의 특성에 맞게 강화재의 강화방향을 결정하는 적층방향에 대한 제품설계가 이루어져야 한다. 또한 복합재료는 성형하는 방법에 따라 최종제품의 기계적 성질이 매우 다르고 제조 가격에도 많은 차이가 있기 때문에 제품에 따라 적절한 성형공정의 선택이 중요하다 할 수 있다. 섬유강화 복합재료의 대표적인 성형공법에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 핸드레이업 공법
- RTM 공법
- VARTM 공법
- 오토클레이브 공법
- 필라멘트 와인딩 공법

## (1)핸드레이업 공법

가장 전통적인 형태의 복합재료 제작 공법으로 최근에도 단품의 제작에 주로 쓰이고 있는 간편한 공법이다. 몰드로는 나무나 복합재료, 또는 금속이 쓰이기도 하며 액상의 수지를 건조한 섬유에 작업자가 직접 한 레이어씩 함침시켜나가는 공법으로 매우 간편하고 성형공법이지만 완성품의 기계적 강도는 그리 높지 않다. 수지가 섬유에 함침되는 동안 롤러등을 이용해서 섬유내부의 기체를 빼주어야하며 작업자의 숙련도에 따라 섬유 체적율이 다르고 한사람의 작업자가 성형을 한다고 해도 수작업의 한계상 제품의 부위에 따라 기계적 강도가 달라진다. 또한 사용되는 장비가 없어서 재료는 저렴하나 노동집약적의 공법으로 인건비에 대한 부담도 있다. 주로 소량생산 방식에 적합한 공법이며 시제품등의 모형제작에 많이 사용된다. Fig. 1은 핸드레이업 공법의 모식도를 나타내고 있다.

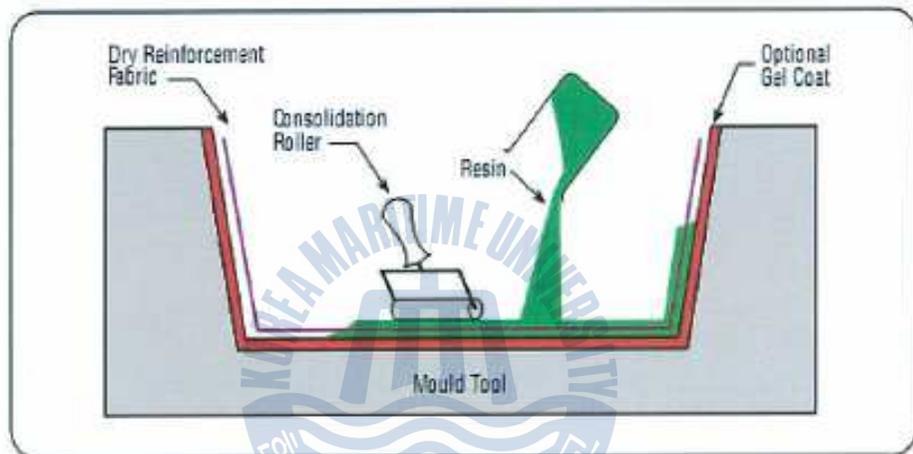


Fig. 1 Picture of Hand lay-up process

## (2)RTM 공법

두개의 금형 사이에 프리폼을 적층하고 내부에 고압의 수지를 주입하는 방식으로 높은 압력과 열에 의한 고성능의 복합 재료 제작이 가능한 공법이다. 연속섬유 강화제가 쓰이기도 하지만 주로 수지내부에 강화재를 분산형으로 섞어서 금형에 주입하여 경화하기도 한다. 고온에 의한 빠른 경화로 제품의 제작시간이 단축되어 대량생산이 가능한 공법이며 완성품의 기계적 강도도 우수한 편이다. 하지만 고가의 제작장비가 필요하기 때문에 높은 비용이 드는 점이 단점이다. Fig. 2는 RTM 공법의 모식도를 나타내고 있다.

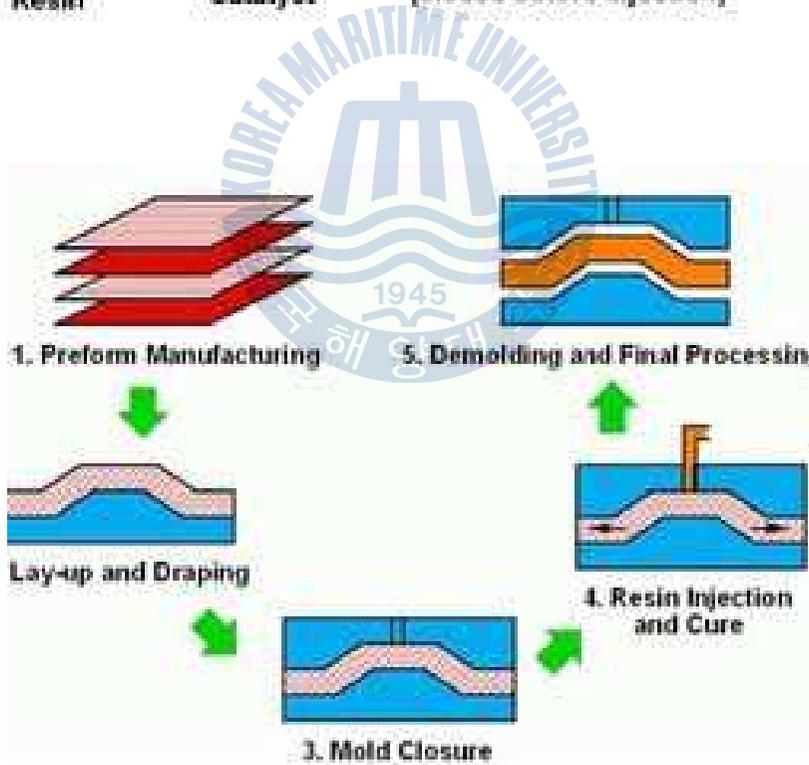
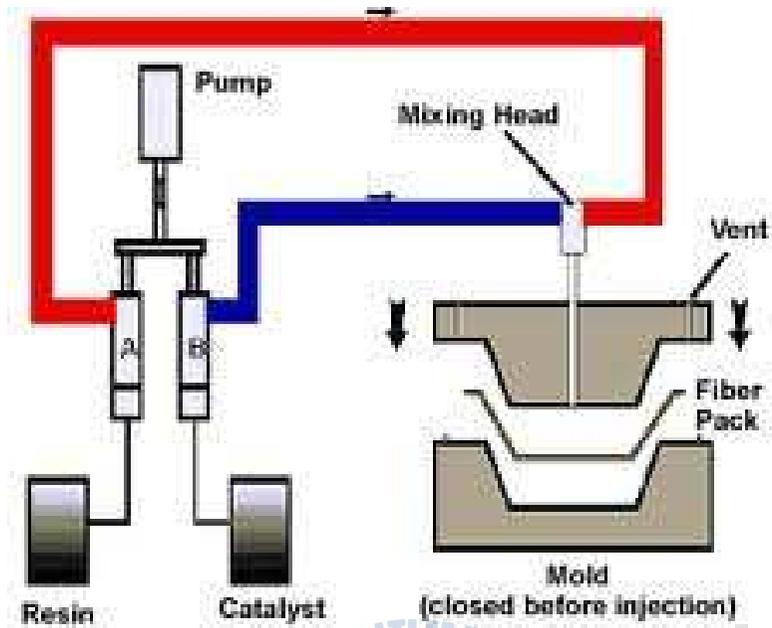


Fig. 2 Picture of RTM process

### (3)VARTM 공법

RTM공법을 응용하여 비교적 최근에 개발된 공법으로 금형의 한쪽면만을 사용하고 다른쪽 한면은 진공압력으로 수축되는 진공백을 이용한다. 따라서 완성품의 기능면이 한쪽만 필요한 제품제작에 적합하며 기존의 RTM공법과 비슷한 수준의 기계적강도를 가지는 제품의 제작이 가능하며 비용이 훨씬 저렴하다. 또한 몇십m 단위의 초대형 제품도 한번의 공정으로 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그림에서와 같이 기능면이 되는 한쪽의 금형에 프리폼을 적층하고 탈형이 쉽게 되도록 록하는 Peel Ply를 적층한다. 그위에 수지의 함침 속도를 높이기 위한 유료망을 설치하고 수지의 주입구와 배출구 포트를 설치한다. 최종적으로 진공백을 이용해서 금형내부를 진공으로 만들어주고 수지를 주입구에 연결하면 대기압차에 의해 수지는 자연적으로 금형내부에 함침되어진다. 함침이 완료되면 양쪽포트를 폐쇄하고 수지가 경화되고나면 탈형하여 완성한다. 공법이 비교적 간편하고 작업이 깨끗할 뿐아니라 기계적 강도

는 높으면서도 작은 비용으로 제작이 가능하기 때문에 최근 많은 연구가 진행되는 공법이다. Fig. 3은 VARTM공법의 모식도를 나타내고 있다.



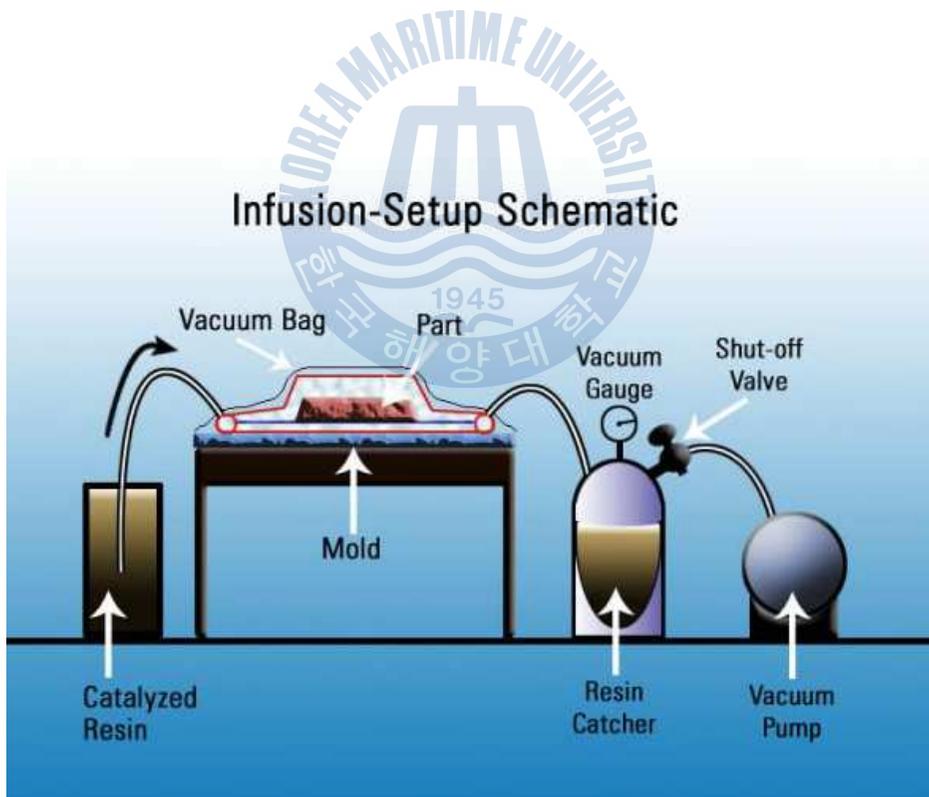
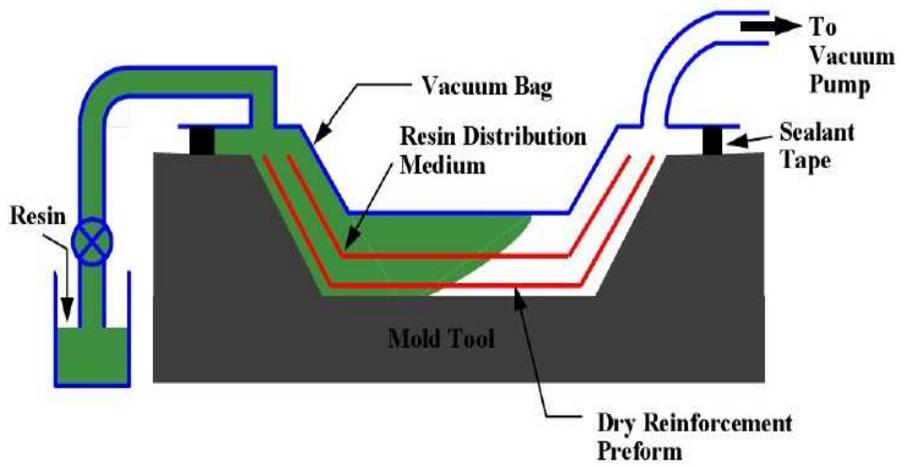


Fig. 3 Picture of VARTM process

#### (4)오토클레이브 공법

오토클레이브 공법은 섬유에 수지가 미리 예비적으로 함침된 프리프레그(Pre-preg)를 재료로 사용한다. 복합재료의 기지재인 수지는 주제와 경화제로 분류되는데 일정량을 서로 배합하여 사용한다. 프리프레그는 주제와 경화제가 혼합되어 섬유에 일정량이 함침되어 경화반응이 시작되는 단계인 B-stage 상태로 냉동으로 보관된다. 그이유는 주제와 경화제와의 반응시간을 지연시킴으로써 장기간 보관이 용이하게 하고 생산 후에 필요에 따라 알맞게 사용 후 보관할 수 있는 기능을 부여하기 때문이다. 이형처리가 된 금형의 내부에 섬유의 배향각에 따라 프리프레그를 일정하게 적층한 후에 이형필름을 올린다. 프리프레그의 과잉수지와 가스를 배출하기 위한 브리더를 적층하고 진공필름으로 마무리하여 적층을 마무리한다. 그 후에 고온고압의 오토클레이브에서 프리프레그에 함침된 수지의 경화조건에 따라 일정 시간과 온도, 압력으로 최종 경화를 한 후에 탈형하면 고품질의 복합재료가 완성이 된다. 이러한 오토클

레이브 공법은 섬유체적율이 약 70%의 고강도 복합재료 제작에 적합한 공법이나 프리프레그의 비싼 가격이 단점이다. Fig.4는 오토클레이브 공법의 모식도를 나타내고 있다.





Fig. 4 Picture of autoclave process

## (5) 필라멘트 와인딩 공법

필라멘트 와인딩 공법은 주로 고압용기의 제작에 쓰인다. 필라멘트 형태의 강화섬유를 연속적으로 수지를 함침시키고 회전하는 멘드럴위에 일정한 각도로 적층하여 완성하는 공법으로써 제품의 형태는 주로 원통이 된다. 매우 높은 기계적 강도를 가지는 제품 제작에 쓰이고 제작에 사용되는 장비의 가격이 고가이기 때문에 특수한 용도의 제품에만 제한적으로 쓰이는 공법이다. 이러한 필라멘트 와인딩 공법은 주로 군사용 핵심부품이나 고압의 압력용기 탱크 제작에 쓰인다. Fig. 5는 필라멘트 와인딩 공법의 모식도를 나타내고 있다.

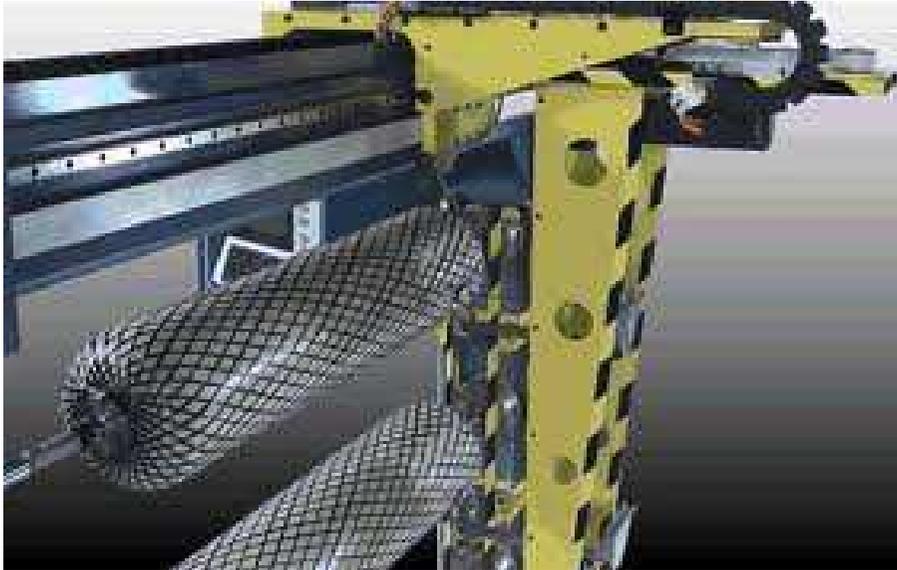


Fig. 5 Picture of filament winding process

## 제 3 장 복합재료의 Void 형성

### 3.1 복합재료의 Void 형성

VARTM 공법은 진공압력을 이용하여 수지를 프리폼에 신속하게 함침시키는 공법으로써 기존의 가압에 의한 수지주입공법보다 금형에 가해지는 힘의 크기가 작고 복잡한 형상을 한번의 공정으로 제작이 가능한 장점이 있다. 금형의 한쪽면에 밀착된 프리폼에 수지가 함침되는 과정에서 완전히 충전되지 못하고 기공(Void)이 남게되는 경우 불량률의 원인이 된다. 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 휘발성 첨가물의 존재, 경화과정에서의 수지의 수축성, 섬유 프리폼의 불균일한 미세구조 등이 있다. 또한 프리폼 내부에 이물질이 존재할 경우 수지의 함침과정에서 기공이 발생할 수 있다. (2) 과거의 연구결과에 따르면 VARTM 및 RTM의 공정에서 섬유 보강층 내부에 유입되는 불순물이 존재할 경우

모세관 현상으로 인하여 보이드가 발생하는 것으로 알려져 있다.(11~15)

보이드는 복합재료 내부에서 응력집중부를 발생시켜 재료의 파괴를 유발하는 치명적인 요소이다. VARTM공정은 작업의 여건상 성형 시 미세 불순물 유입과 수지 함침시 두 유동 매질의 삼투압 차이로 인하여 보강 섬유층의 단면에서 Lead-leg 현상이 발생되어 미세 기공의 형성과 기계적 특성의 변화를 주게 된다. (3)

또한 보이드에서 수분 흡수의 증가로 인한 복합재료 표면의 접합상태 불량과 같은 품질저하는 장기적으로 복합재료의 내구성에도 영향을 미친다. (4)

본 연구에서는 인위적으로 제작된 다양한 크기의 이물질을 프리폼내부에 삽입하여 VARTM공법으로 시편을 제작하여 이물질 주면에 발생하는 보이드의 크기와 수량을 측정하였다. 이를 통하여 VARTM 공정 중 내부에 유입되는 이물질의 크기에 의한 void의 발생 거동을 살펴보았다.

### 3.1 실험 재료 및 시편의 제작

#### 3.2.1 이물질 제작

프리폼 내부에 인위적으로 삽입되는 이물질을 다양한 크기와 두께로 제작하였다. 제작에 사용된 재료는 유리섬유 프리프레그를 일정한 두께가 되도록 각각 적층하고 오토클레이브로 성형, 경화한 후 탈형하고 크기에 맞게 절단하였다. 이물질의 폭은 20mm로 일정하게 하고 두께와 길이를 각각 다섯가지의 크기로 제작하였다. 이물질의 두께는 0.8mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm & 4.0mm로 절단하여 A~E그룹으로 분류하였고 각각의 두께에 길이변수로 2mm, 5mm, 10mm, 15mm & 20mm의 A1~E1까지의 총 25가지의 이물질을 절단 제작하였다. Fig 6는 각각의 두께와 길이로 절단되어 그룹으로 나뉘어진 이물질의 사진을 나타낸다.

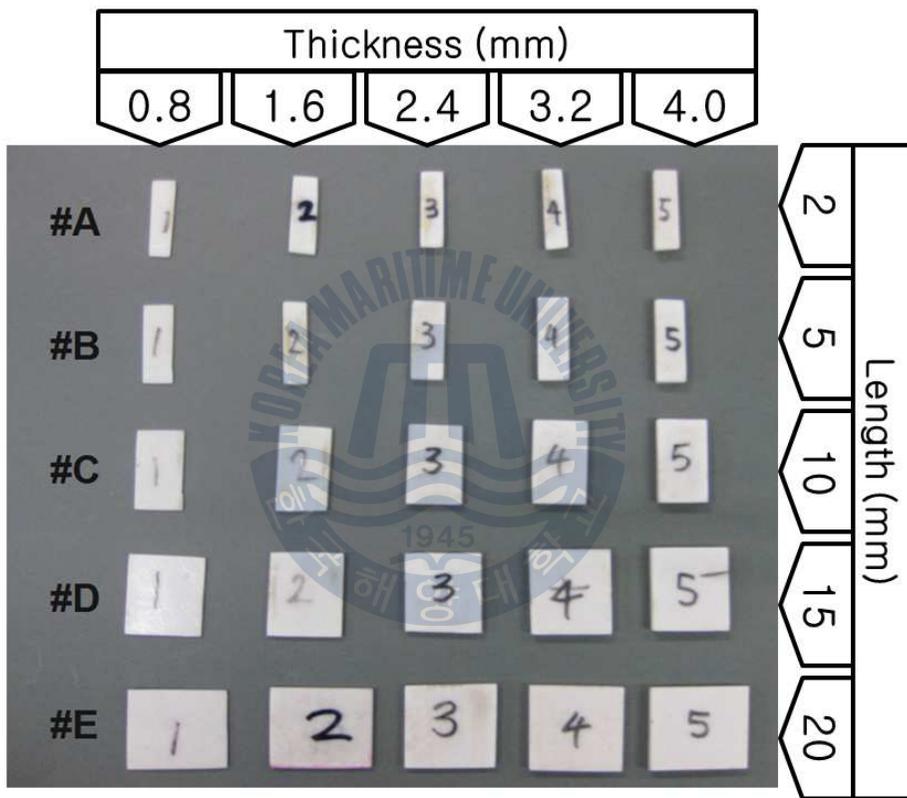


Fig. 6 Scheme of prepared impurity

### 3.2.2 재료 및 시편 제작

제작된 이물질을 프리폼에 인위적으로 삽입하여 VARTM 공법을 이용하여 시편을 제작하였다. 실험에 사용된 보강섬유로는 유리섬유를 사용하였는데 이는 통상적인 VARTM공법에 주로 사용되는 강화섬유로 유리섬유가 가장 많이 사용되기 때문에 실험 재료로 선정하였다. 유리섬유로는 CYMAX사의 DBLT-850이며 이 강화섬유는 총 4개의 레이어로 제작되어있으며 각 층의 배열 방향은 0, 90, +45, -45로 구성되어 있다. 이 섬유와 함께 사용된 수지로는 Infusion용 에폭시 수지인 Hexion사의 RIM135/RIMH137 시스템을 10:3으로 혼합하여 사용하였다.

Fig. 7에 프리폼 내부에 미리삽입된 이물질의 위치를 나타내었다. 미리 제작된 각각의 이물질을 프리폼 레이어의 중앙에 위치시킨 후에 이물질의 길이방향으로 수지가 함침될 수 있도록 주입구를 배치하였다. Fig. 8에는 실험에 사용된 VARTM공법을 순서대로 나타내었다. 그 순서는 다음과 같다.

- (1) 평판 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



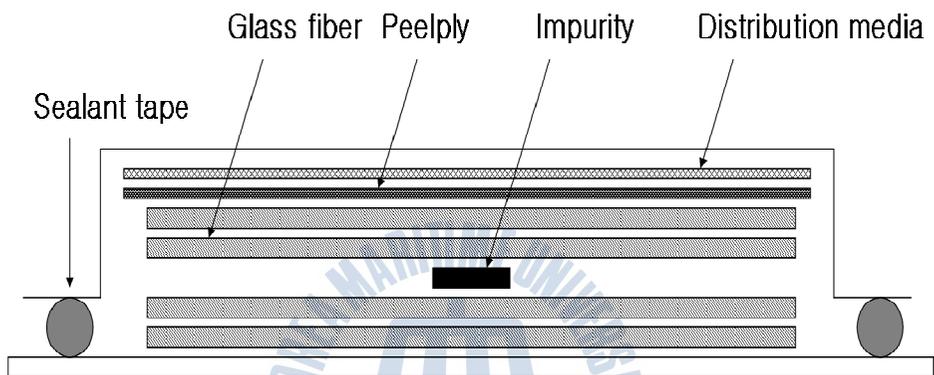
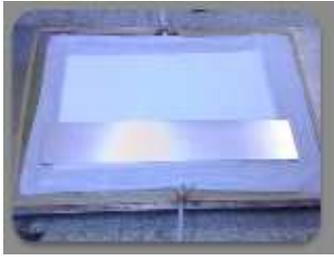
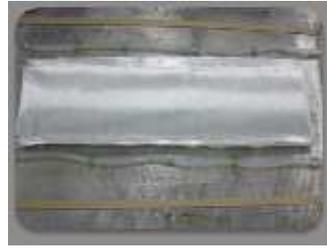


Fig. 7 Lay-up sequence of fiber and impurity



(a) Insert Impurities



(b) Glass Fiber Lay-up



(c) Peel Ply



(d) Pressure Plate



(e) Distribution Media



(f) Vacuum Bagging



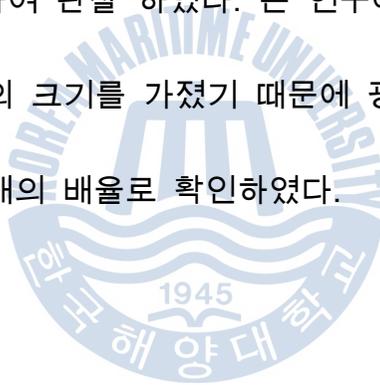
(g) Resin Infusion

Fig. 8 Fabrication of specimens

### 3.3 실험 방법

#### 3.3.1 단면 분석

이물질 주위에 void가 발생할 것으로 예상되는 부위에 대한 분석을 실시하였다. 절단 부위의 void 발생 유무를 확인하기 위하여 void 발생 예상 지점 주위를 절단한 후 폴리싱하여 광학현미경을 이용하여 관찰 하였다. 본 연구에서 발생한 void의 경우 1 mm 내외의 크기를 가졌기 때문에 광학 현미경을 이용하여 10배 및 50배의 배율로 확인하였다.



## 3.4 실험 결과 및 고찰

### 3.4.1 단면 분석 결과

시편의 불순물 주변에 void가 발생할 것으로 예상되는 지점을 절단하여 현미경으로 관찰한 결과 시편의 두께에 따른 void의 발생 경향과 시편의 크기에 따른 void의 발생 경향을 Fig. 9 에 나타내었다. 불순물의 크기에 따른 void의 발생은 나타나지 않았으며 두께가 두꺼워질수록 비례해서 void의 분포도가 높아졌으며 void의 크기 또한 확대되는 것을 알 수 있었다. 따라서 광학 현미경을 통한 단면 분석을 이용하여 void 발생에 영향을 미치는 인자는 불순물의 크기가 아니라 두께임을 알 수 있었다.

void는 0.8mm 두께에서는 거의 발견되지 않았으며 1.6 ~ 2.4 mm 사이에서 void의 발생이 시작되고 분포도가 증가하였다. 두께가 3.2 ~ 4.0mm로 두꺼워지면서 void의 직경이 확대됨을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 두께 0.8mm 이하의 불순물

이 유입될 경우 void의 발생은 없으며 두께 1.6 ~ 2.4mm 사이의 두께를 가지는 불순물이 유입될 경우 재료의 내부에 1mm 미만의 아주 미세한 void가 발생하여 그 분포가 증가하는 것을 알 수 있었다. 두께가 3.2 ~ 4.0mm 사이의 두께를 가지는 불순물이 유입되면 1mm 이상의 비교적 큰 void가 발생하며 이물질의 두께 증가와 함께 void의 크기도 커지는 것을 알 수 있었다..





(a) Microscope photo with different length impurity



(b) Microscope photo with different thickness impurity

Fig. 9 Result of microscopic analysis

또한, 본 실험의 결과를 보다 체계적으로 확립하고자 위에서 살펴 보았던 Microscope photo에 추가하여 실험 data를 시편의 크기 및 두께에 따른 Void의 생성 개수 및 크기를 Table 1에 나타내었다.

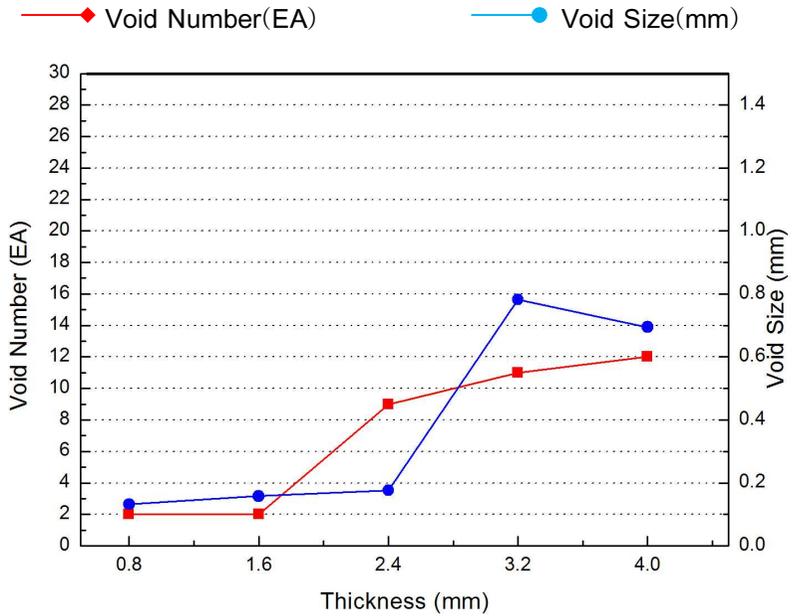
시편의 길이는 20mm로 통일하였으나, 폭은 각각 2mm, 5mm, 10mm, 15mm 와 20mm 로 구분하였고, 이를 다시 A ~ E Group 으로 구분하여 명칭하였다.

다시 각각의 Group은 시편의 두께를 기준으로 하여 0.8mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm 및 4.0mm 세분화 하였다.

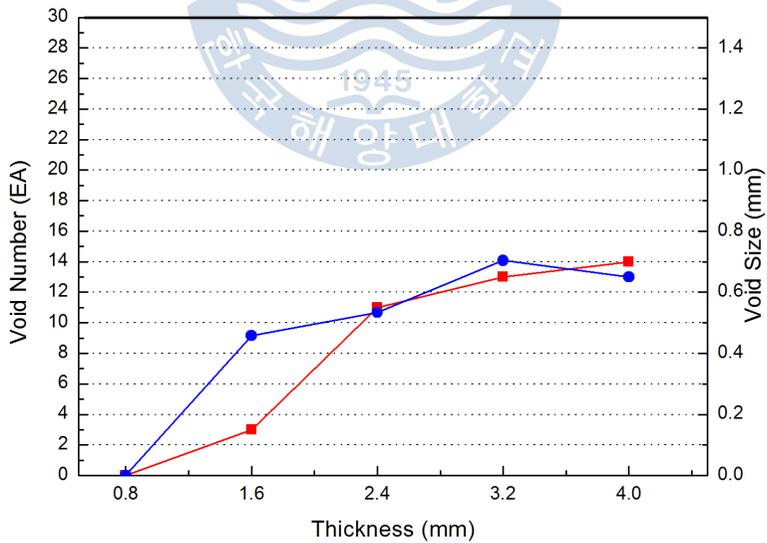
아울러 Table 1 에 따른 그래프를 Fig.10 ~ Fig.13과 같이 나타내었다.

Table 1 시편의 크기와 두께에 따른 Void의 생성 개수와 크기

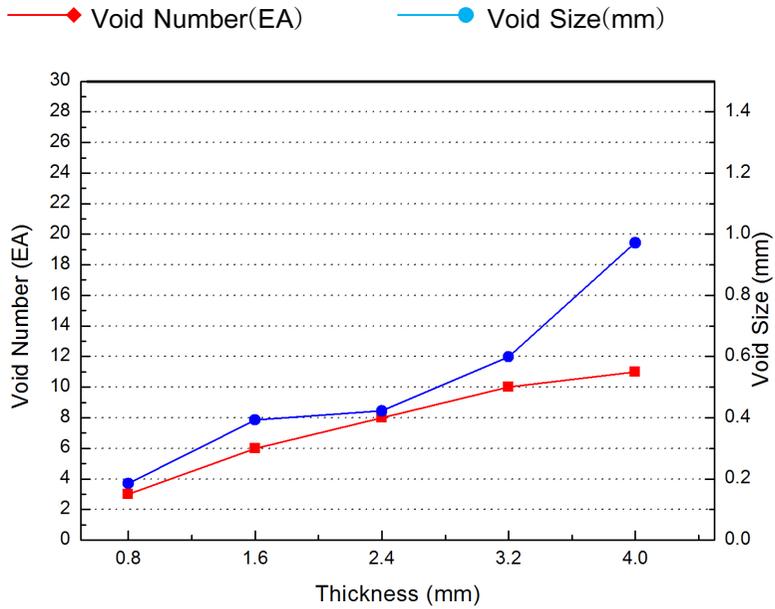
시편	폭(b)	길이(l)	두께(t)	Void Num.	Void Size(mm)		
					Min.	Max.	Average
#A-1	2	20	0.8	2	0.0923	0.1723	0.1323
#A-2	2	20	1.6	2	0.1224	0.1934	0.1579
#A-3	2	20	2.4	9	0.0821	0.217	0.176
#A-4	2	20	3.2	11	0.2454	0.9906	0.7821
#A-5	2	20	4	12	0.1176	1.098	0.6954
#B-1	5	20	0.8	0	0	0	0
#B-2	5	20	1.6	3	0.1263	0.617	0.4581
#B-3	5	20	2.4	11	0.2182	0.697	0.5343
#B-4	5	20	3.2	13	0.2597	1.0481	0.7037
#B-5	5	20	4	14	0.224	1.36	0.6497
#C-1	10	20	0.8	3	0.1142	0.2666	0.1848
#C-2	10	20	1.6	6	0.12	0.631	0.3931
#C-3	10	20	2.4	8	0.2434	0.6608	0.4221
#C-4	10	20	3.2	10	0.1411	0.7905	0.5987
#C-5	10	20	4	11	0.2835	1.5594	0.9721
#D-1	15	20	0.8	1	0.336	0.336	0.336
#D-2	15	20	1.6	3	0.289	0.578	0.4335
#D-3	15	20	2.4	7	0.1469	0.6242	0.4014
#D-4	15	20	3.2	9	0.1846	0.8615	0.6239
#D-5	15	20	4	13	0.2445	1.3493	0.8841
#E-1	20	20	0.8	0	0	0	0
#E-2	20	20	1.6	8	0.2395	0.5989	0.3892
#E-3	20	20	2.4	8	0.1333	0.6733	0.4381
#E-4	20	20	3.2	10	0.1826	1.4132	0.7641
#E-5	20	20	4	26	0.125	1.766	1.1486



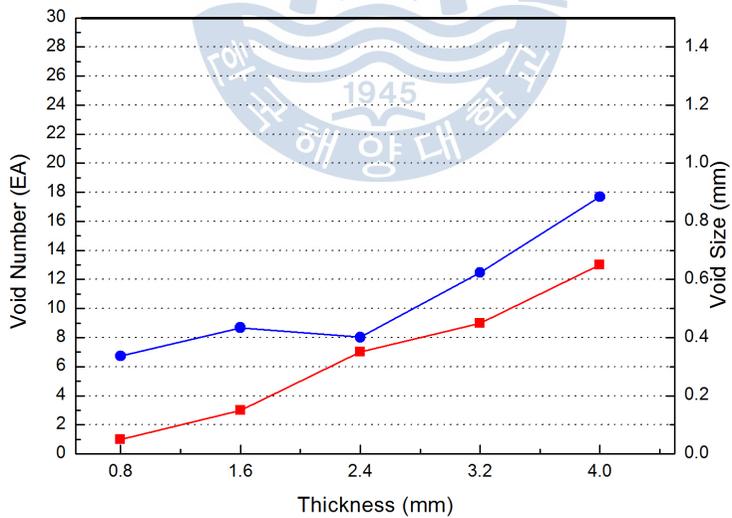
(a) Result of group-A specimen



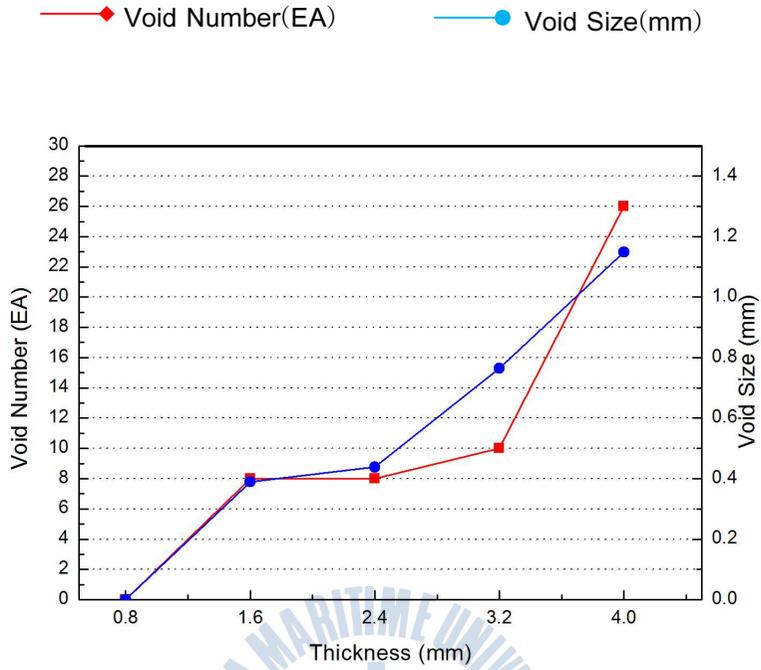
(b) Result of group-B specimen



(c) Result of group-C specimen



(d) Result of group-D specimen



(e) Result of group-E specimen

Fig. 10 Size and number of voids for each specimen group

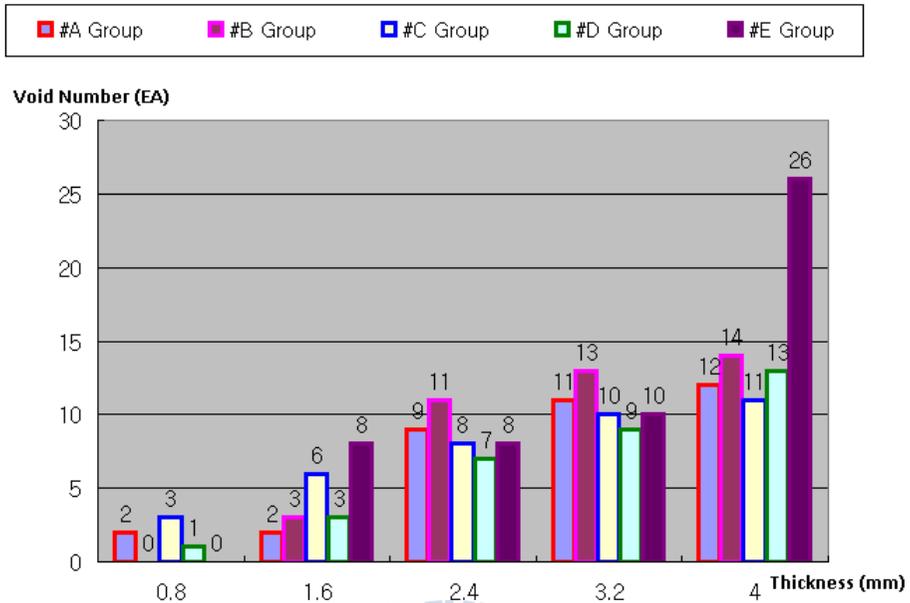


Fig. 11 Number of generated voids for each specimen

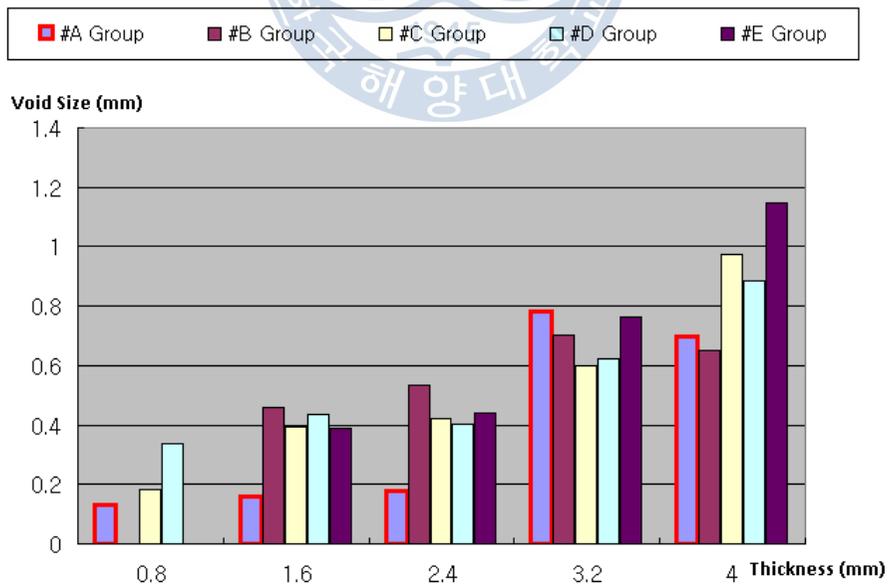


Fig. 12 Size of generated voids for each specimen

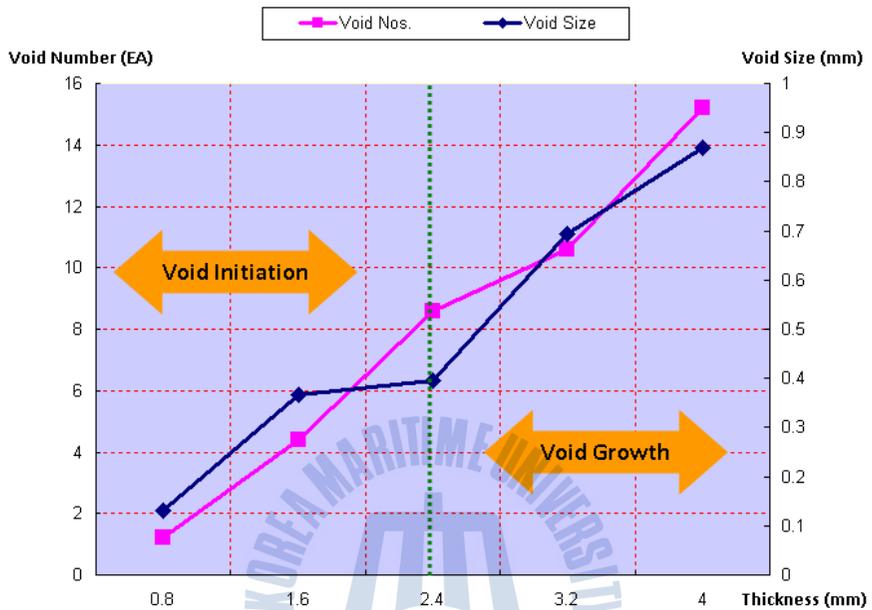


Fig. 13 Results of the void generation

Fig.10 에서 알 수 있듯이 실험에 사용된 시편에 있어서 Void의 생성량 및 크기는 시편의 크기의 증가보다는 두께가 두꺼워질때 확연히 증가하는 것을 알 수가 있었다.

또한, Fig.13은 Fig.11과 Fig.12의 데이터를 바탕으로 만들어진 시편의 두께에 따른 평균적인 Void의 수량과 크기의 변화를 보여주고 있다.

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



## 제 4 장 결론

본 연구에서는 인위적으로 불순물을 삽입하여 VaRTM 시편을 제작하여 불순물로 인하여 발생하는 void에 대하여 살펴보았다.

비파괴검사를 통하여 살펴본 결과로는 내부에 발생한 void를 발견할 수 없었으나 절단면에 대한 광학 현미경 관찰에서 명확하게 void를 발견할 수 있었다. 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 비파괴검사를 통하여 내부에 발생한 void를 발견할 수 없었다. 모든 시편에서 불순물 주변이 다른 명암을 나타내는 것을 확인할 수 있었으나 이는 불순물로 인한 시편의 두께변화로 인한 것으로 판단된다.

2. 각기 다른 다섯 가지 두께를 가진 불순물을 삽입하여 성형한 시편의 경우 void의 생성에 시편의 폭은 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

3. 각기 다른 다섯 가지 두께를 가진 불순물을 삽입하여 성형한 시편의 경우는 두께의 증가에 따라 void의 분포와 void의 직경이 커지는 것을 발견하였다.

4. 불순물의 두께가 0.8mm 에서는 void의 발생을 관찰 할 수 없었으나 1.6mm 이상의 두께에서는 void가 생성되어 두께가 증가함에 따라 분포도가 증가하고 void의 직경이 커지는 것을 알 수 있었다.

5. 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) 신편기자재학, 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 Materials (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



## 감사의 글

지난 2년동안의 시간동안 정말 많은 경험을 한 것 같지만 시간은 짧은 느낌입니다. 교수님을 알게되고 실험실에서 학우들과 보내던 시간은 저의 인생에서 정말 소중한 기억으로 남을 것 입니다. 많이 부족하였던 제자를 기꺼이 받아주시고 학업을 계속할 수 있도록 아낌없는 지원을 해주신 김윤해 교수님을 비롯한 해양대학교 재료공학과 교수님들께 진심으로 감사의 말씀을 전합니다. 또한 연구실 후배들을 위해 항상 고마운 발걸음으로 찾아와 주신 배창원 교수님, 한중원 박사님, 박종태 사장님 깊이 감사드립니다. 그리고 함께 대학원 공부를 같이 했던 영대형, 세호형, 성원, 승준, 희범, 동훈, 도완, 태현, 진우, 학부생들 석진, 민정, 준무, 창욱, 찬엽, 재훈, 민교, 선영, 모두들 감사합니다. 나이 많은 학부생을 챙기느라 고생한 MSA회원들... 병규, 용현, 경민, 영재, 진호, 일규, 그의 친구들.. 너무 감사드립니다.

또한 항상 나의 삶과 함께 해주었던 친구인 진형, 웅길, 동윤, 청현, 이영 에게도 깊은 감사의 인사를 드립니다. 너무나 할 이야기가 많지만 지면이 부족하네요. 응원해 주신 모든 분들께 감사드립니다.

배움의 길은 험난하지만 가치있는 일이라 생각합니다. 공학도로써의 자부심을 가지고 살아가겠습니다.

지금껏 학업을 마칠 수 있도록 응원해주신 어머니와 형님, 형수님, 조카 성욱, 피양세 진숙에게도 감사의 인사를 전합니다. 하늘에 계신 아버님에게도 응원해 주셔서 감사하다고 전해드리고 싶습니다.