



### 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.

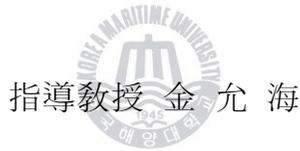
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

VaRTM 공정을 이용한 복합재료 성형 시  
이물질에 의한 Void 형성에 관한 연구

A Study of the Voids which Generated due to Deposition  
of Impurities While Producing Composite Materials by  
the VaRTM Process



2010年 5月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

姜 英 九

工學碩士 學位論文

VaRTM 공정을 이용한 복합재료 성형 시  
이물질에 의한 Void 형성에 관한 연구

A Study of the Voids which Generated due to Deposition  
of Impurities While Producing Composite Materials by  
the VaRTM Process



2010年 5月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

姜 英 九

本 論 文 을 강영구 의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長      文 慶 萬      印

委 員      裴 昌 原      印

委 員      金 允 海      印



2010年 5月

韓國海洋大學校 大學院  
材 料 工 學 科

# 목 차

Abstracts	-----	1
제 1 장	서론 -----	3
제 2 장	복합재료의 성형 공정 -----	5
2.1	복합재료의 분류 -----	5
2.2	복합재료의 장점 -----	6
2.3	복합재료의 대표적 성형 공정 -----	7
2.3.1	Hand Lay-up / Spray-up -----	8
2.3.2	RTM(Resin Transfer Molding) -----	11
2.3.3	VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding) ---	14
2.3.4	오토클레이브(Autoclave)-----	16
제 3 장	복합재료의 Void 형성 기구 -----	18
3.1	복합재료의 Void 형성 이론 -----	18
3.2	실험 재료 및 시편의 제작 -----	19
3.3	실험 방법 -----	22
3.4	실험 결과 및 고찰 -----	23
3.4.1	비파괴 분석 결과 -----	23
3.4.2	단면 분석 결과 -----	26
제 4 장	결론 -----	35
참고 문헌	-----	37

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

Young-Goo Kang

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

## Abstract

In these days, composite materials are used overall industries such as in air crafts, ship construction, other marine industries, wind turbine blade, etc.

There are numerous process for fabricating of the composite materials for example Hand Lay-up / Spray-up, RTM(Resin Transfer Molding), VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding), Autoclave, etc.

Comparing to different process, the VaRTM(Vacuum-assisted Resin Transfer Molding) has many advantages above all other process.

The VaRTM process is widely used for manufacturing of large structures and the same process mostly offers high quality application similar to the autoclave process and it also have a cost advantage like hand lay-up process.

However, deposition of impurities during the VaRTM process make internal voids and these voids degrade mechanical properties of materials.

This documentation has been developed upon investigation on the voids which generated by deposition of impurities during the VaRTM process. It also includes deficiencies of composite materials for the voids generated during this process.

Impurities are intentionally inserted into the laminate for investigation, and NDI and optical observation are carried out.

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.

This study shows some useful data and relations between voids and impurities. Accordingly, the result of this paper could be used for improving a further quality of composite materials produced by VaRTM process.

## 제1장 서론

복합재료(Composite Materials)란 간단히 두 종류 이상의 소재를 복합화한 재료를 말하지만 개념적으로는 두 종류 이상의 소재를 복합화한 후에 물리적, 화학적으로 각각의 소재가 원래의 상을 유지하면서 원래의 소재보다 우수한 성능을 갖게 한 재료를 말한다.

오늘날 세계의 복합소재 관련 기술을 보면, 미래의 항공 산업 분야뿐만 아니라 모든 산업 분야에서의 복합재료 관련 기술은 널리 보급될 것으로 보여 진다.

또한 고갈되어가는 화석연료를 절약하고 심각한 상태에 놓인 지구 대기환경을 보호하기 위한 자동차, 철도차량 및 항공기 등의 운송수단의 경량화 추세는 현재 선진국에서 강력하게 추진되고 있으며 이를 해결하는 데는 복합재료의 사용이 필수적인 것으로 생각된다.<sup>(1)</sup>

특히 최근에는 석유 에너지의 대체와 그린 에너지에 대한 지속적인 개발과 국제 사회의 환경 보호 및 이와 관련된 제도의 개선에 대한 활발한 움직임으로 인해 풍력 발전 산업이 재조명되고 있다.

또한 최근의 해운 및 조선 산업의 경기 침체로 인해 경영상 어려움에 처한 대형 조선소들이 앞 다투어 새로운 사업 분야로 풍력산업에 관심을 갖고, 이 분야에 경쟁적으로 진출하는 모습을 볼 때 산업 전반에 걸쳐서 복합재료의 사용이 더 이상 선택이 아닌 필수적인 현실이 되어지고 있다는 것이 증명되어지고 있다.

이와 같은 대형 조선소들의 움직임들은 그 동안 소형어선, 레저용 선박 및 군함과 같은 특수 목적 선박에만 국한되어 사용되었던 복합재료를 일반 상선을 비롯한 대형 선박에도 적용할 수 있는 좋은 기회가 될 것은 분명한 사실이다.

한편, 대형 복합재료 구조물의 성형에 있어서는 제작비용이 저렴하고 성형공정 시간이 비교적 짧은 VaRTM 공정이 주로 사용되고 있다. VaRTM 공정은 진공압을 이용하여 수지를 보강섬

유 속으로 함침시키는 공정으로, 기존의 가압에 의한 수지주입과 비교하여 금형에 가해지는 힘의 크기가 작고 복잡한 형상을 손쉽게 성형할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 VaRTM 공정은 수지를 함침시키기 위해 압력차가 최대 1 기압으로 제한이 되어 수지의 빠른 유동을 얻기가 어렵다. 이로 인하여 Macro Void와 Micro Void가 서로 다른 매질 내의 삼투압으로 인해 형성되게 된다.<sup>(2)</sup>

Void는 복합재료 내부에서 응력 집중부를 발생시켜 재료의 파괴를 유발하는 치명적인 요소이다. VaRTM 공정은 작업 여건상 성형 시 미세 불순물 유입과 수지 충전시 두 유동 매질의 삼투압 차이로 인하여 보강 섬유층의 단면에서 lead-leg 현상이 발견되어 미세 기공의 형성과 기계적 특성의 변화를 주게 된다.<sup>(3)</sup>

또한 Void에서 수분 흡수의 증가로 인한 복합재료 표면의 접합상태 불량과 같은 품질 저하는 장기적으로 복합재료의 내구성에도 영향을 미친다.<sup>(4)</sup>

따라서, 본 논문은 안정성에 초점을 맞추어 VaRTM 공정을 이용하여 제품을 성형함에 있어 작업 여건에 의한 이물질 유입과 이로 인해 생성된 Void로 인한 기계적 특성의 변화에 대하여 해석해 보고자 한다.

이를 위해 본 연구에서는 두께 및 크기가 다른 이물질을 인위적으로 유리 섬유에 올려놓고 VaRTM 공법을 이용하여 서로 크기가 다른 Void를 포함한 실험 시편을 제작하였고 이를 통하여 이물질의 크기 및 두께에 따른 결함 발생의 양상을 규명하고자 하였다.

## 제 2 장 복합재료의 성형 공정

### 2.1 복합재료의 분류

복합재료를 강화 형태에 의해 분류하면 그 구조에 따라 다음과 같이 대별할 수 있다.

- 섬유 강화형 복합재료
- 분산 강화형 복합재료
- 적층 강화형 복합재료

복합 재료의 구조는 지금까지는 2상 복합의 단순한 형이 주를 이루었으나, 제조 기술의 발달에 따라 2종 이상의 입자, 섬유 그리고 이질의 섬유를 복합한 혼성 강화형 복합재료가 많아지고 있다.

또, 복합재료는 모재의 종류에 따라 금속은 FRM(Fiber Reinforced Metals), 플라스틱은 FRP(Fiber Reinforced Plastics) 등으로 분류되지만 일반적으로 복합재료라 하면 FRP를 의미한다.

FRP에 보강 섬유로 유리섬유(Glass Fiber)가 사용되면 GFRP, 탄소섬유(Carbon Fiber)를 사용하면 CFRP라고 한다.<sup>(5)</sup>

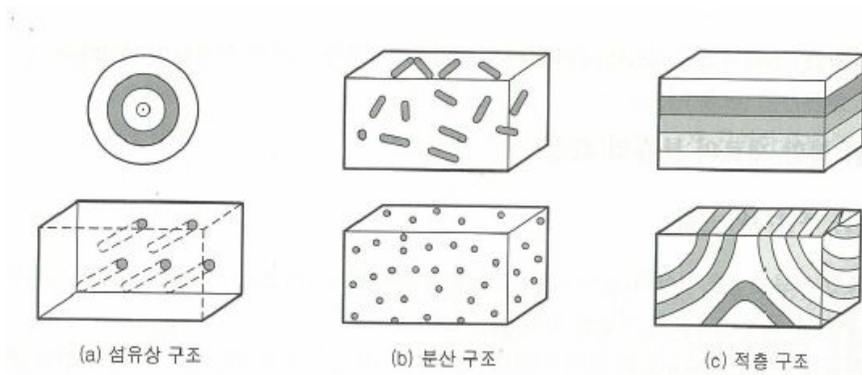


Fig. 1 Basic shape of composite materials

## 2.2 복합재료의 장점

복합재료들이 점점 더 많이 사용되는 이유로는 다음과 같은 장점들이 있기 때문이다.

(1) 가장 큰 장점은 무게 대 강도비가 높다는 것이다. 이러한 사실들로 인하여 복합재료 부품은 금속재료와 같은 강도를 가지면서도 그 무게를 현저하게 줄일 수 있다.

(2) 복합재료는 금속재료처럼 부식되지 않는다. 이러한 내식성 내부식성으로 인하여 유지 비용측면에서 비용 절감 효과로 이어질 수 있다.

(3) 복합재료는 매우 유연하고 진동에 견디도록 설계하여 금속 구조물에서 발생하는 응력 피로 현상을 제거할 수 있다.

(4) 복합재료는 성형이 용이하여 복잡한 구조물의 제작을 가능하게 한다.

(5) 오늘날 복합재료는 가격 면에서 점점 효율적으로 되어가고 생산기술도 점점 완숙한 단계로 접어들고 있다.<sup>(6)</sup>



### 2.3 복합재료의 대표적 성형 공정

복합재료의 성형에는 다양한 종류의 재료들이 여러 형태로 사용되고 있다. 사용 재료의 종류 및 형태에 따라 성형 공법 및 성형 조건이 달라지며 성형품의 물성에도 큰 차이가 있다.

어떤 공정에 대해 비용적으로 보다 효율적인 공정의 선택을 위한 기준은 제품의 생산량, 크기와 형상의 대칭성, 비강도와 비강성 및 표면 처리 등이 있을 수 있다.

Fig. 2에서는 생산성과 효율성을 고려한 공정선택 기준을 도시하였다.<sup>(7)</sup>

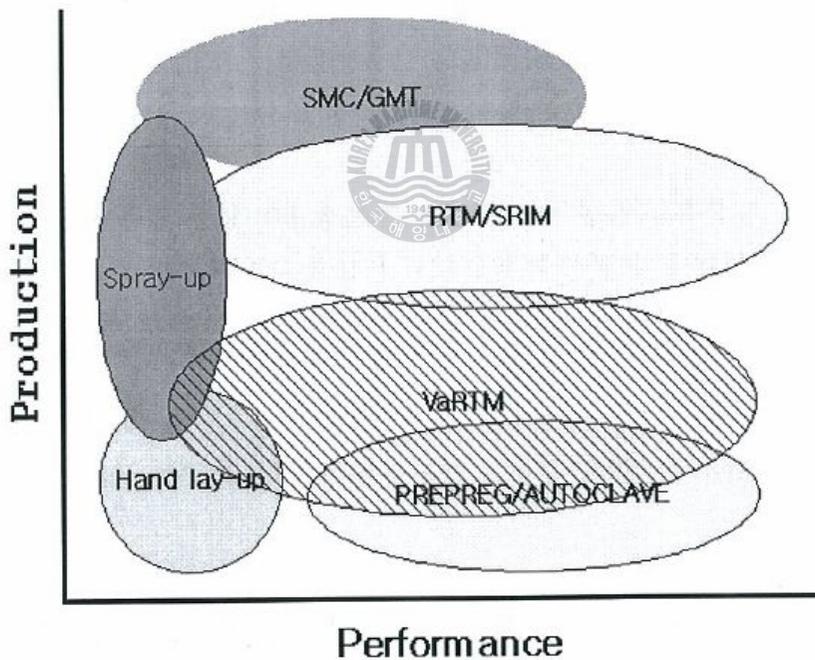


Fig. 2 Selection of effective progress

### 2.3.1 Hand Lay-up / Spray-up 성형

#### (1) Hand Lay-up

가장 오래된 성형법 중의 하나로 매우 간단한 공정이나 적용 비중이 높은 성형법이다.

일반적으로 나무나 유리 섬유강화 복합재료를 이용한 금형을 사용하나, 치수 안정성 등이 요구될 때는 알루미늄, Steel 금형을 사용하는 인건비가 대단히 높은 성형법이기도 하다.

유리섬유 등의 강화재를 한 레이어(layer)씩 금형 위에 적층하고 기지재료인 수지를 함침시키면서 성형하는 방법으로 상온에서 방치하여 경화시키는 방법이나 생산 속도를 향상시키기 위해 금형에 가열 장치를 설치하여 경화 시간을 줄이는 방법도 병용하고 있다.

성형 공정은 다음과 같은 방식에 의해서 이루어진다.



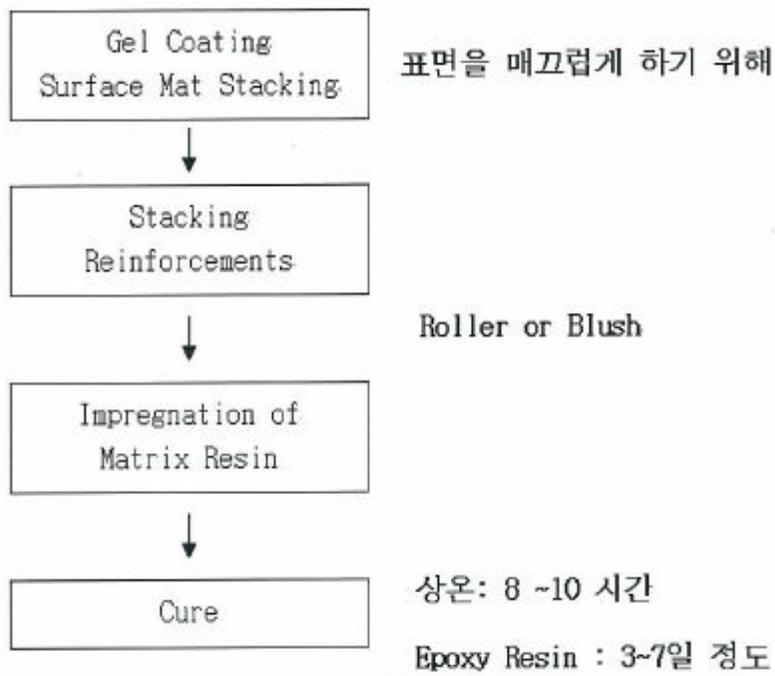


Fig. 3 Hand lay-up procedure

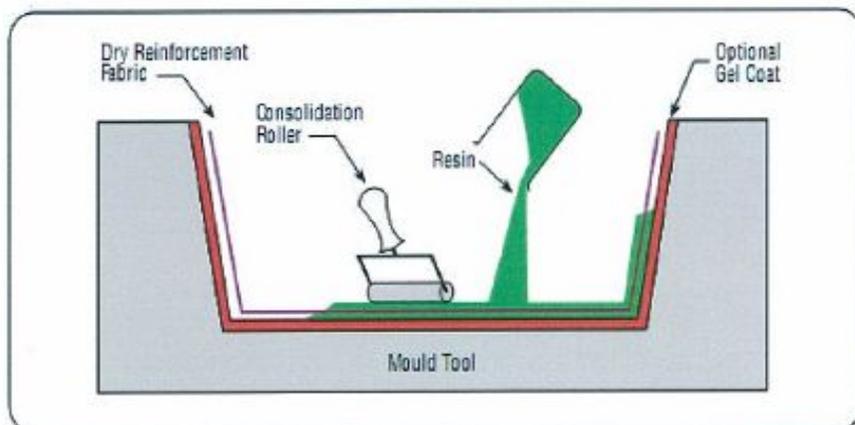


Fig. 4 Hand lay-up process

## (2) Spray-up

수지 및 보강섬유를 금형에 분사 고착시키는 성형방법이다.  
보강섬유의 Roving을 절단기로 적당한 길이로 절단한 후 Air Spray Gun으로 수지와 함께 분사한다.

성형 공정은 다음과 같은 방식에 의해서 이루어 진다.

이때 금형 표면은 Hand Lay-Up과 같이 분사 전에 Gel Coating을 한다. <sup>(8)</sup>

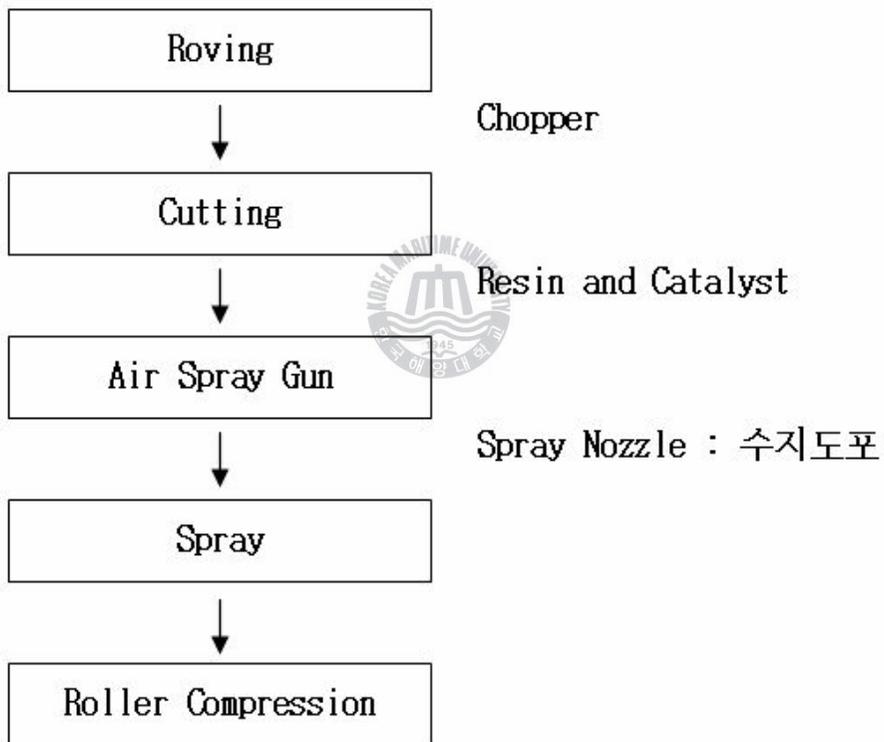


Fig. 5 Spray-up procedure

### 2.3.2 RTM (Resin Transfer Molding)

유럽에서는 Resin Injection(RI), 미국에서는 Resin Transfer Molding(RTM)이라 부르며, 요즘에는 일반적으로 미국식으로 RTM 이라고 부르고 있다. 이 성형법의 시도는 25 ~ 30년 전부터 생각되어져 왔지만, 구체적으로 실용화 기술로 된 것은 비교적 최근의 일이다. RTM은 일반적으로 다음과 같이 정의할 수 있다. 즉, 대형 GFRP 제품이나 소형의 제품을 동시에 다량 성형 할 때 사용하는 방법으로 Female 금형과 Male 금형 사이에 강화섬유로 제품의 형상과 같이 제작된 프리폼(Preform)을 위치시킨 다음 외부에서 압력을 가해 수지를 주입(함침)시킨 후 경화시켜 제품을 성형하는 방법을 말하는 것이다.

사용 범위는 다른 성형법에 비해 광범위하며, 특징으로는 대형의 복잡한 상업용 제품을 낮은 생산 비용으로 제조할 수 있으며, 궁극적으로는 고정밀도 적층 성형방법의 품질 향상을 목표로 하고 있다.

다른 복합재료 성형법에 비해 장치 및 설비비가 저렴하고, 복잡한 형상의 대형부품을 쉽게 성형할 수 있으며 보강재의 양과 방향성을 조절하여 제품의 기계적인 성질을 향상시킬 수 있는 등의 특성으로 최근 크게 각광받고 있는 성형법 중의 하나이다.

#### (1) RTM 공정 과정

RTM의 성형과정은 크게 다음의 4 단계로 나누어 생각할 수 있다. 각 성형과정은 생산할 수 있는 제품의 크기에 따라 적당히 조절할 수 있으며, 기본적인 공정은 Hand Lay-up법과 Compression Molding과 비슷하다 할 수 있다.

- Preform 이라는, 원하는 모양의 제품 형상과 비슷하게 재단되거나 형체를 갖춘 강화재가 금형 내부에 놓여지게 된다.
- 금형을 닫고 밀폐를 확실하게 하기 위하여 프리폼은 금형의 밀폐(Seal. Pinch-off) 영역을 넘어가지 않도록 주의해야 한다.

- 금형이 닫히고 체결(Clamp) 되면, 수지가 금형의 통기로 흘러나오기 시작할 때, 수지의 유동이 저지되고 수지의 경화가 시작된다.
- 제품을 금형에서 꺼낼 수 있을 정도로 경화시키는 데에는 수지의 종류에 따라 수 시간이 걸리고, 금형에서 꺼낸 제품은 수지의 반응을 완전하게 하기 위하여 후경화를 시킬 수 있다.

## (2) RTM 공정의 특성

RTM 공정에 의해 제조 가능한 범위는 비교적 정교한 물체로부터 대형 제품까지 광범위하며, 현재는 금속재료를 대체할 수 있는 기계부품의 제조 등에 효과적인 가격과 생산 기간의 단축 등으로 크게 각광을 받고 있는 성형법이다. 따라서 RTM 공정의 특징을 간략하게 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 점도가 낮은 Oligomer 상의 수지를 사용하면, 저압(0.7 MPa 정도)으로 수지를 주입할 수 있기 때문에 형체기구와 금형의 간략화가 가능하다.
- 사출성형이나 압축성형에 비해 성형비용을 감소시킬 수 있다.
- 성형원리로 보면 Rib, Boss, Core 등의 일체형 성형이 가능하다.
- 섬유를 Preform화하는 것에 의해 섬유배향, 섬유분율의 제어가 가능하여 안전한 품질의 성형품을 얻을 수 있다.

RTM 공정은 다른 복합재료 성형법과는 달리 적용 범위가 넓은 점에서 큰 장점을 가지고 있으며, 저압으로 성형이 가능한 점이 그 사용에 다양성을 부여하고 있다.

반면에 복잡한 모양의 제품을 만드는 데 제한이 있는데, 강화재를 수지 주입 이전에 금형에 위치하는 Rib, Boss를 금형 내에 미리 삽입하는 것이 어렵기 때문에, 구멍이나 Groove 등의 작은 형상의 구현이 어려운 것이 단점이다.

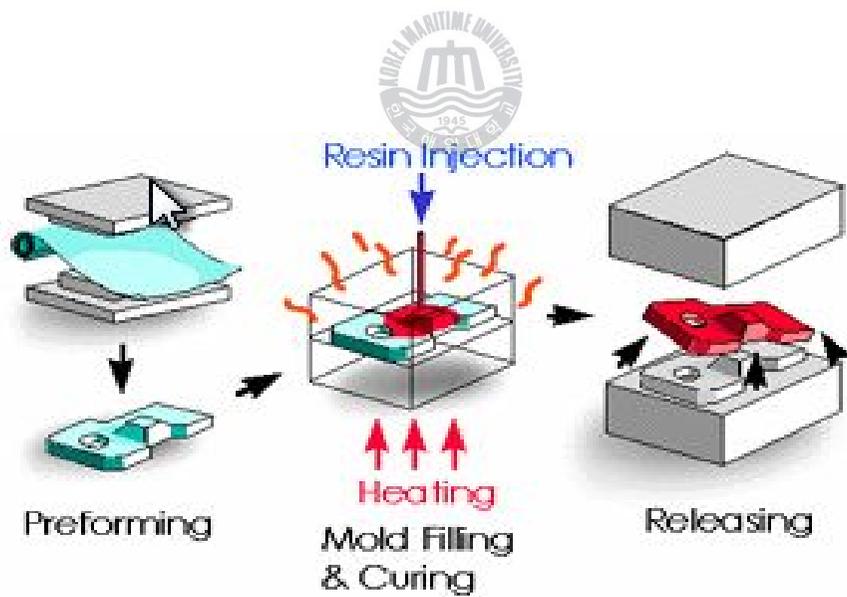
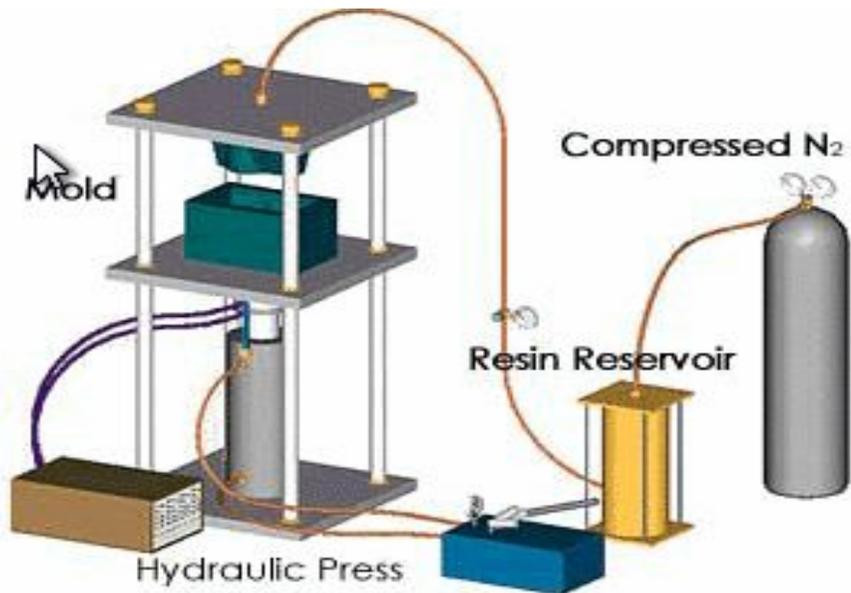


Fig. 6 RTM process

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

VaRTM은 RTM과 비교해서 더욱 대형이며 생산 대수가 적은 성형물에 적합한 공법이다. 그리고 고품질과 높은 섬유 함유율을 가지며, 형상이 복잡한 복합재료 구조물의 제작이 가능한 Closed Mold 기술이다.

VaRTM은 양쪽 면이 모두 금형으로 되어 있는 RTM과 달리 한쪽 면의 금형과 진공백으로 금형을 이루고 대기압과 금형 내부의압력차를 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 높여준다.

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

한번 수지가 함침된 프리폼은 최종의 복합재료 부품이 만들어 지도록 적절한 경화 사이클 하에서 경화 되어진다. 이 공정은 몰드로부터 복합재료 제품을 탈형하게 되면 완전히 끝나게 된다.<sup>(9)</sup>

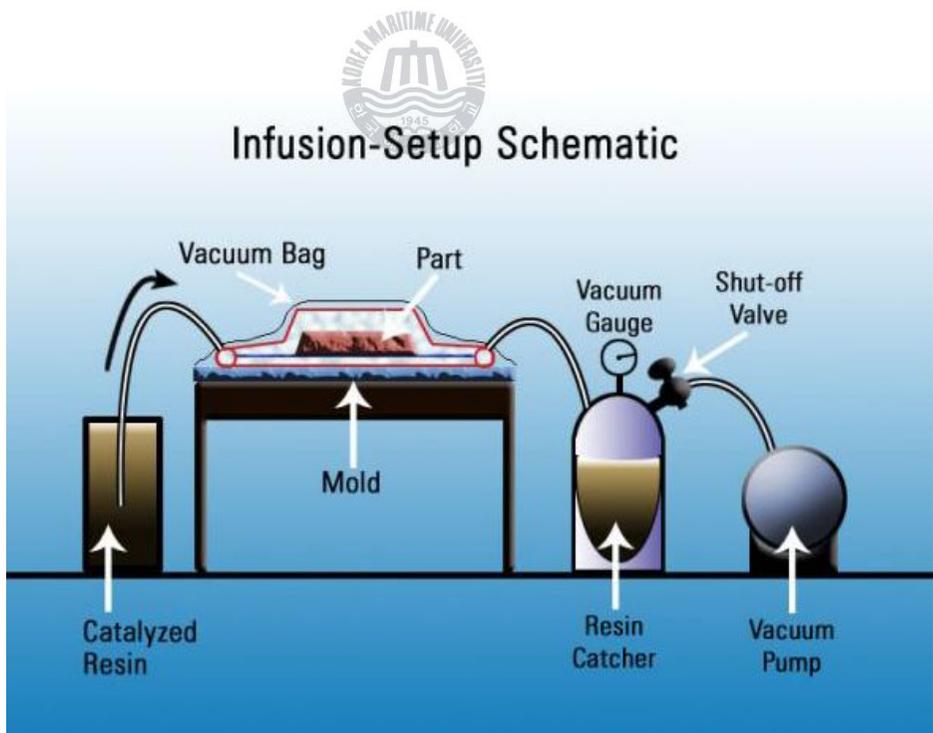
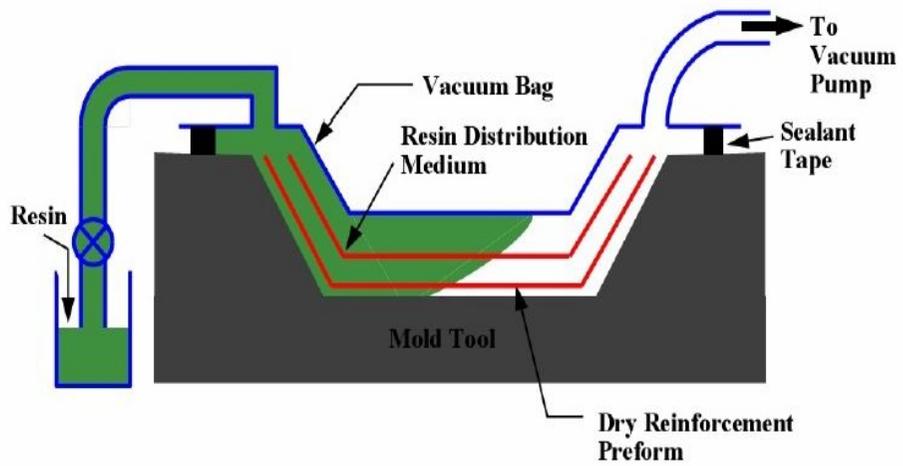


Fig. 7 VARTM process

#### 2.3.4 오토클레이브(Autoclave)

오토클레이브(Autoclave)란 열과 압력을 동시에 가할 수 있는 가압로이며, 오토클레이브를 이용한 성형법은 보강섬유와 수지의 혼합물을 백(Bag)으로 밀폐시킨 후 백 내부를 진공상태로 하고, 백 외부로부터 압력을 가하여 요구하는 형상과 기계적 성질을 구비한 복합재료 제품을 성형하는 방법이다. 특히, 오토클레이브는 섬유강화 복합재료를 제작할 경우에 가장 일반적으로 사용되고 있는 성형법이며, 또한 프리프레그(prepreg)를 이용하거나 곡률이 있는 패널(panel)로 구성된 항공기 부품의 생산에 가장 적합한 방법으로 많이 적용되고 있다.

오토클레이브 성형법은 대형 부품을 제작할 수 있을 뿐만 아니라 고품질을 얻을 수 있고 형태가 서로 다른 부품들도 동시에 성형할 수 있으며, 하니콤 샌드위치 형태의 복합재료 성형에도 적합하다는 등의 이점이 있다. 그러나 오토클레이브에 의해 성형된 샌드위치 구조물의 내부 결함 형성을 최소화하고 플라이(Ply)의 적층 방향이 정확하고 균일하며 층과 층사이의 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 떨어지고, 성형 버그(Bug)측 표면이 매끄럽게 되지 못하며, 표면재의 두께 정밀도도 제한되는 결점이 있으므로, 오토클레이브에 관하여 충분한 연구가 필요하다.<sup>(10)</sup>



Fig. 8 Picture of autoclave

## 제 3 장 복합재료의 Void 형성 메커니즘

### 3.1 복합재료의 Void 형성 이론

과거의 연구 결과에 따르면 VaRTM 및 RTM 공정 중 섬유 레이어 사이에 불순물이 존재할 경우 모세관 현상으로 인하여 마이크로 void가 형성되는 것으로 알려져 있다. <sup>(11~15)</sup>

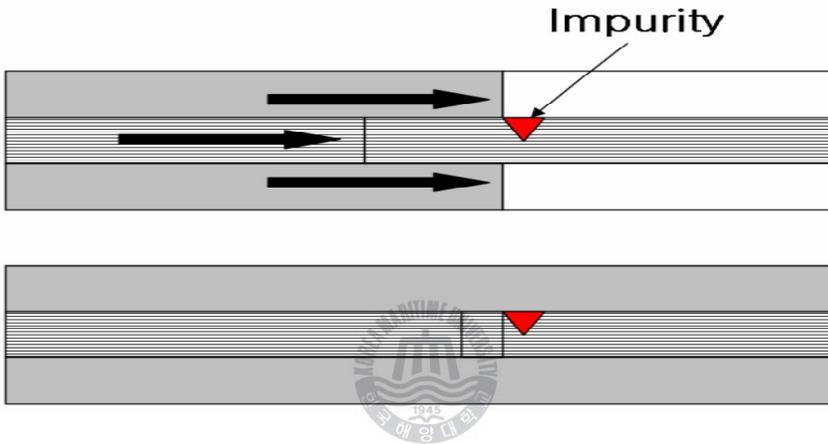


Fig. 9 Void creation mechanisms

Fig. 9에 마이크로 void가 형성되는 메커니즘을 개략적으로 나타내었다. <sup>(20)</sup>

복합재료뿐만 아니라 모든 재료에서 내부에 void가 발생할 경우 내부의 결함에서 응력집중이 발생하여 재료의 기계적 강도를 저하시키는 요인으로 작용하게 된다.

본 연구에서는 VaRTM 공정 중 인위적으로 다양한 크기의 이물질을 삽입하여 내부에 void가 생성된 시편을 제작하였다. 이를 통하여 VaRTM 공정 중 내부에 유입되는 이물질의 크기에 의한 void의 발생 거동을 살펴보았다.

## 3.2 실험 재료 및 시편의 제작

### 3.2.1 불순물 제작

VaRTM 시편 내부에 인위적으로 삽입할 불순물을 제작하기 위하여 BMS 8-79 (Hexcell사) 유리섬유 에폭시 프리프레그를 오토클레이브에서 성형하여 다섯 가지 두께(mm)의 라미네이트를 성형하였으며 이를 각각 다섯 가지 길이로 절단하여 인위적인 불순물을 제작하였다. 성형 공정중 발생가능한 이물질의 크기를 0.8mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm & 4.0mm 두께와 2mm, 5mm, 10mm, 15mm & 20mm 폭으로 가정하여 총 25개의 이물질을 함유한 시편을 제작하였다.

불순물 성형에 사용된 오토클레이브는 ASC사에서 제작한 것을 사용하였다. Fig. 10에 제작된 불순물의 모습을 나타내고 있다.



Fig. 10 Scheme of prepared impurity

### 3.2.2 재료 및 시편 제작

내부에 void가 생성된 시편을 제작하기 위하여 앞서 제작한 불순물을 삽입하여 VaRTM 공정으로 시편을 제작하였다. 시편의 제작에 사용된 재료는 DBLT 850 (CYMAX) 유리섬유와 RIM 135 (Hexion) 에폭시 수지와 RIM H 137 (Hexion) 경화제를 이용하였으며 주재와 경화제는 70:30의 비율로 혼합하였다.

Fig. 11에 불순물의 삽입 위치와 유리섬유 레이어의 배열을 나타내고 있다.

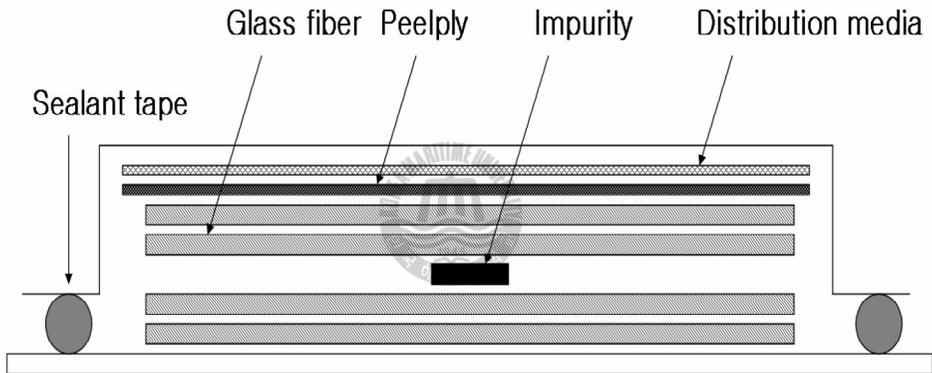
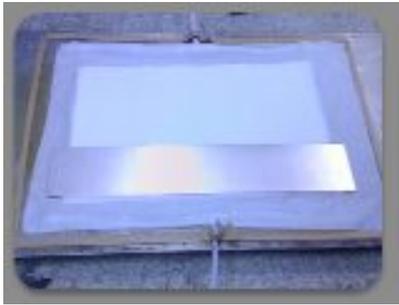
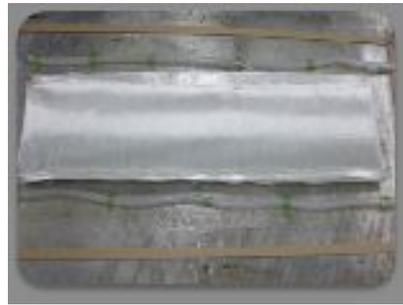


Fig. 11 Lay-up sequence of fiber and impurity



(a) Insert Impurities



(b) Glass Fiber Lay-up



(c) Peel Ply



(d) Pressure Plate



(e) Distribution Media



(f) Vacuum Bagging



(g) Resin Infusion

Fig. 12 Fabrication of specimens

### 3.3 실험 방법

#### 3.3.1 비파괴 분석

성형한 시편의 내부에 void의 존재 유무를 확인하기 위하여 일차적으로 UT 와 C-scan 비파괴검사를 실시하였다. 비파괴검사는 크기 별로 각기 다른 두께의 다섯가지 불순물을 삽입한 시편에 대하여 실시하였다.

#### 3.3.2 단면 분석

비파괴검사를 실시한 후 불순물 주위에 void가 발생할 것으로 예상되는 부위에 대한 분석을 실시하였다. 절단 부위의 void 발생 유무를 확인하기 위하여 void 발생 예상 지점 주위를 절단한 후 폴리싱하여 광학현미경(Unicon사의 X30)을 이용하여 관찰 하였다. 본 연구에서 발생한 void의 경우 1 mm 내외의 크기를 삽입했기 때문에 광학 현미경(Unicon사의 X30)을 이용하여 10배의 배율로 확인하였다.



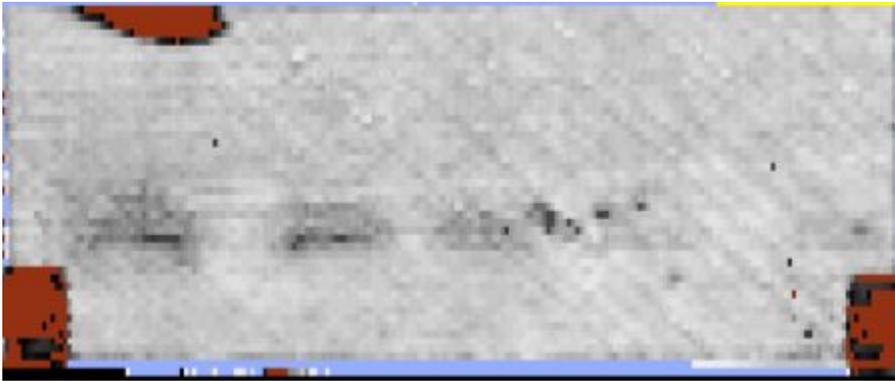
### 3.4 실험 결과 및 고찰

#### 3.4.1 비파괴 분석 결과

파괴 시험법에 의한 void의 분석 이전에 void 생성 여부 및 void 생성 위치에 대하여 알아보기 위하여 비파괴 검사를 수행하였다.

비파괴 검사를 실시한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 비파괴 검사 결과를 살펴보면 불순물은 명확하게 표현이 되었으나 내부에 발생한 void는 규정하기가 어려운 것으로 판단된다. 불순물 주변이 전반적으로 명암이 다르게 나타나 차이를 보이고 있지만 void의 발생은 시편의 모든 방향이 아니라 불순물의 앞쪽에서만 발생해야 한다.<sup>(16~19)</sup> 따라서 불순물 주변의 명암이 다르게 나타나는 부분은 불순물의 삽입으로 인하여 불순물 주변에 발생한 높이의 차이로 인한 것으로 판단된다.

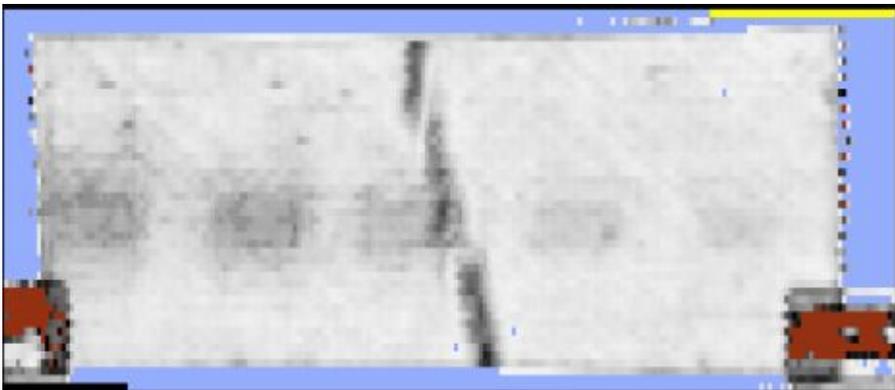




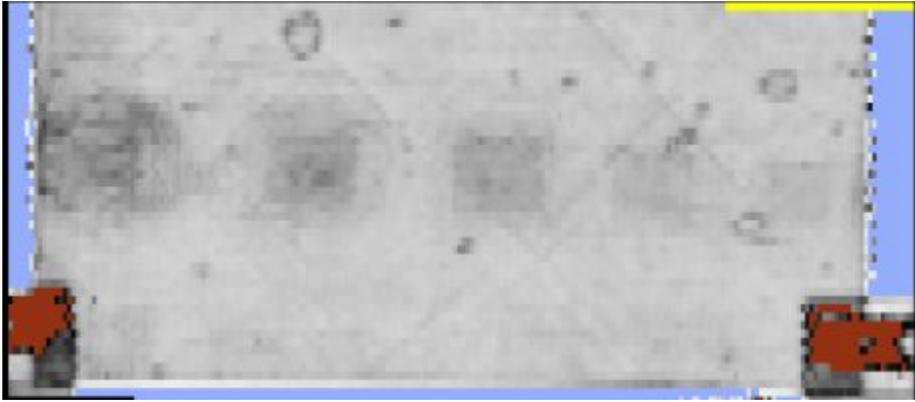
(a) NDI result of 0.8mm length specimen



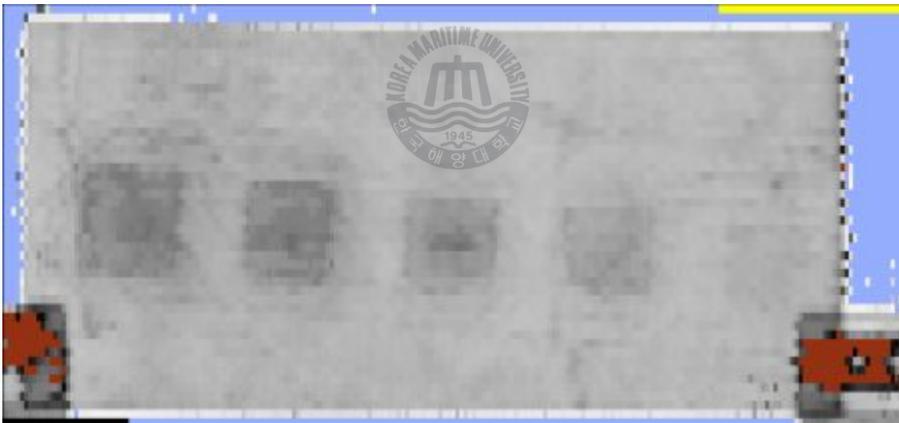
(b) NDI result of 1.6mm length specimen



(c) NDI result of 2.4mm length specimen



(d) NDI result of 3.2mm length specimen



(e) NDI result of 4.0mm length specimen

Fig. 13 Result of non-destructive inspection

### 3.4.2 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. 14에 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 불순물이 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. 14 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 Group으로 구분하여 명칭하였다.

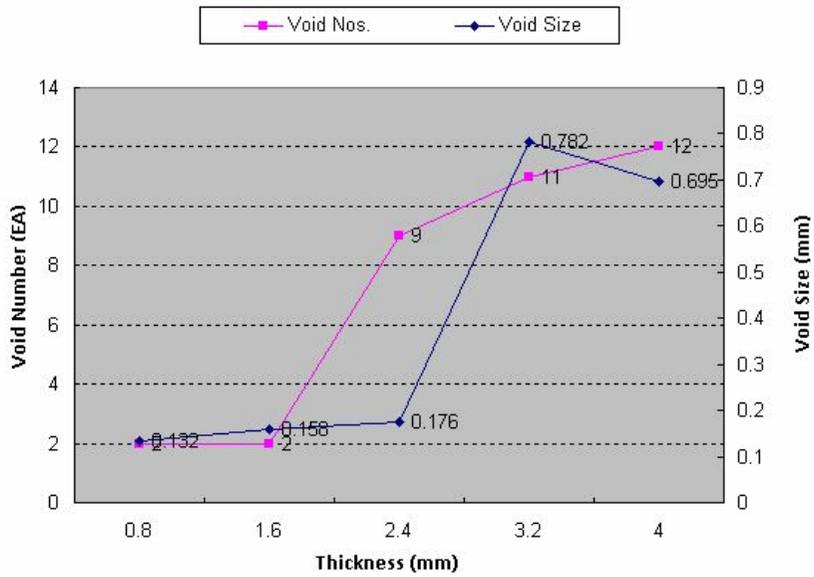
다시 각각의 Group은 시편의 두께를 기준으로 하여 0.8mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm 및 4.0mm 세분화 하였다.

아울러 Table 1 에 따른 그래프를 Fig.15 ~ Fig.18과 같이 나타내었다.

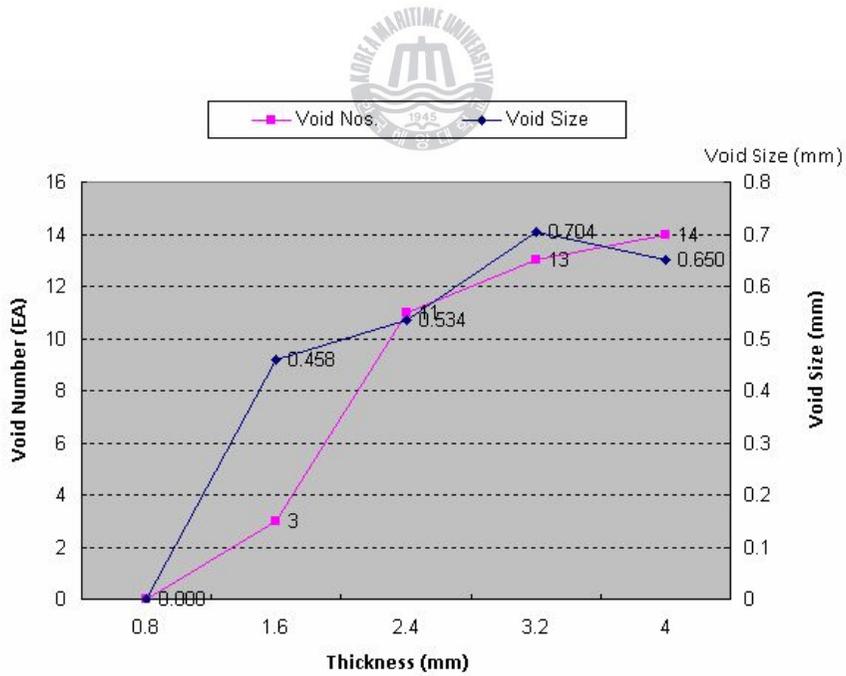


Table 1 시편의 크기와 두께에 따른 Void의 생성 개수와 크기

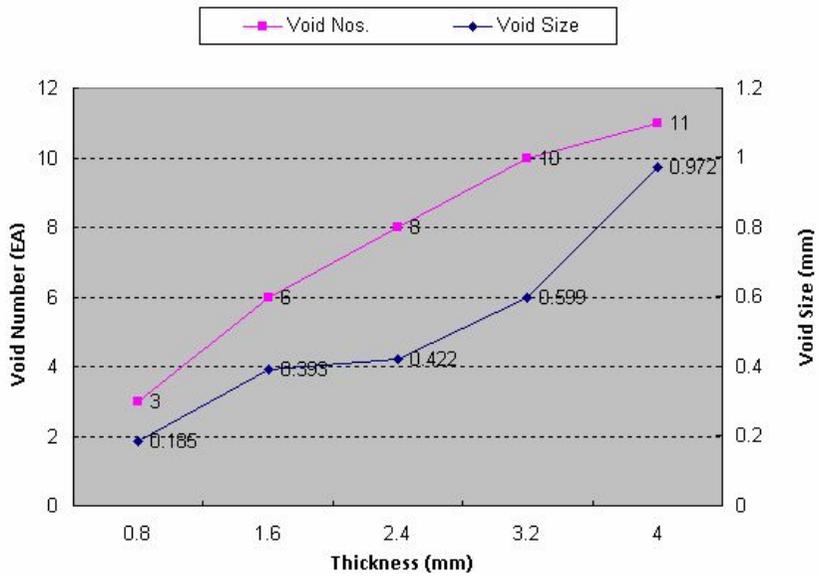
시편	폭(b)	길이(l)	두께(t)	Void Num.	Void Size(mm)		
					Min.	Max.	Average
#A-1	2	20	0.8	2	0.0923	0.1723	0.1323
#A-2	2	20	1.6	2	0.1224	0.1934	0.1579
#A-3	2	20	2.4	9	0.0821	0.217	0.176
#A-4	2	20	3.2	11	0.2454	0.9906	0.7821
#A-5	2	20	4	12	0.1176	1.098	0.6954
#B-1	5	20	0.8	0	0	0	0
#B-2	5	20	1.6	3	0.1263	0.617	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



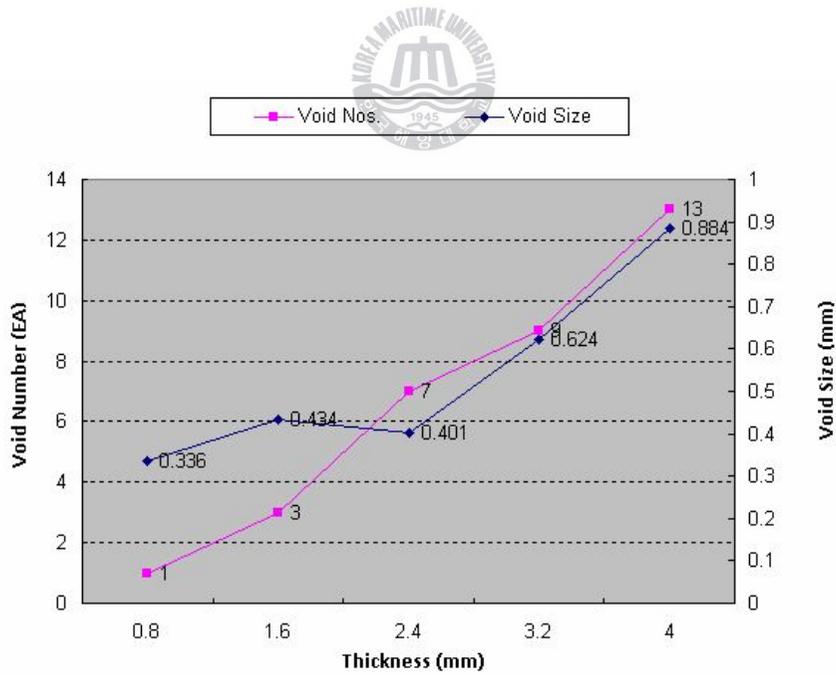
(a) Result of group-A specimen



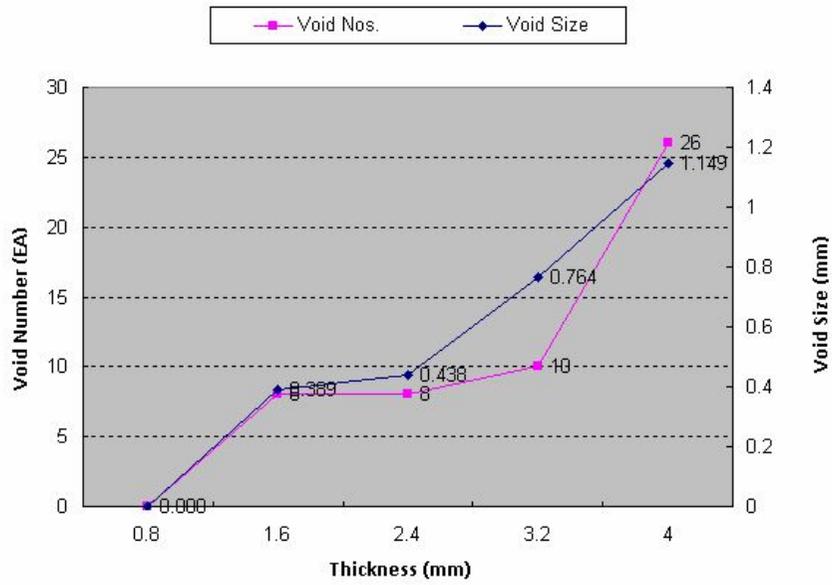
(b) Result of group-B specimen



(c) Result of group-C specimen



(d) Result of group-D specimen



(e) Result of group-E specimen

Fig. 15 Size and number of voids for each sepcimen group



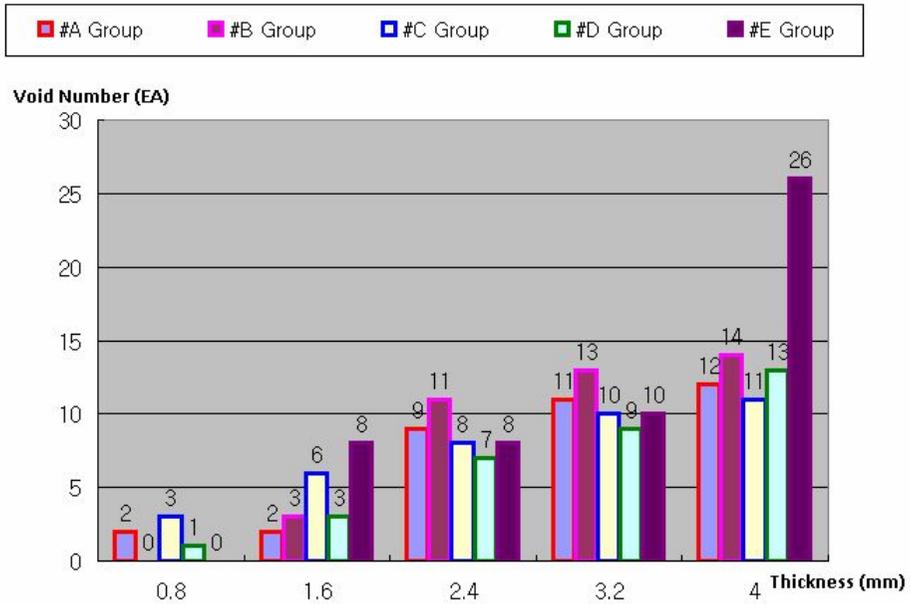


Fig. 16 Number of generated voids for each specimen

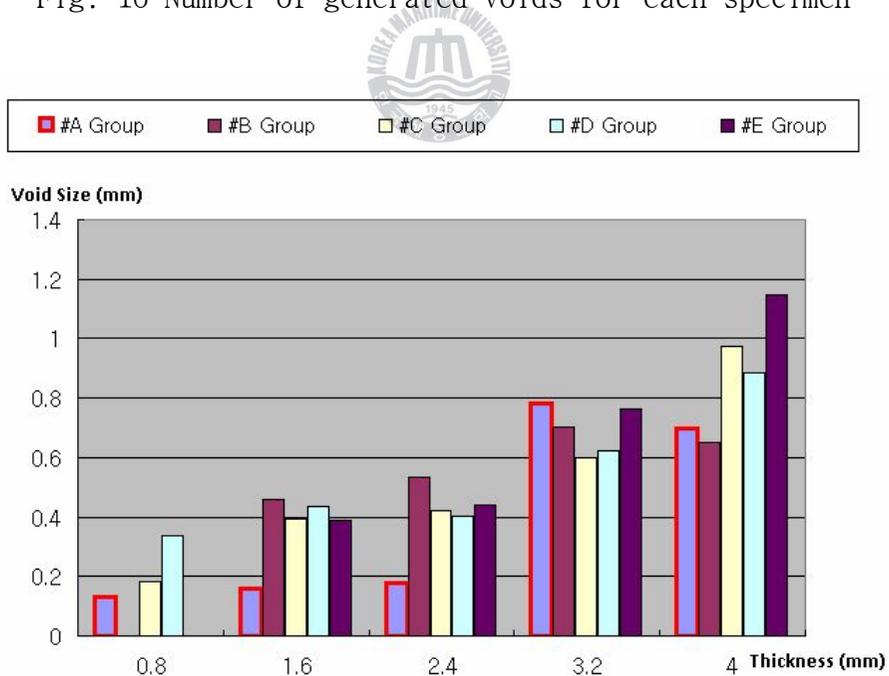


Fig. 17 Size of generated voids for each specimen

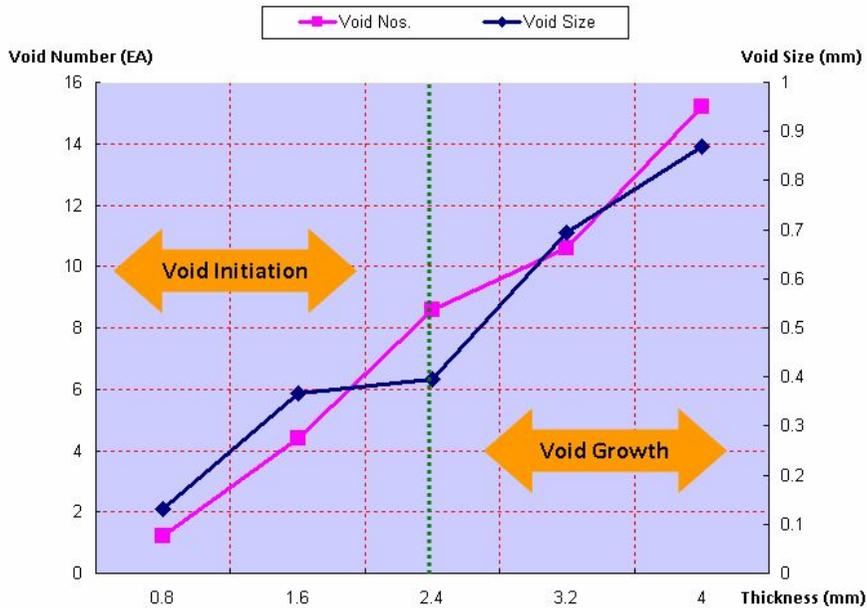


Fig. 18 Results of the void generation

Fig.16과 Fig.17에서 알 수 있듯이 실험에 사용된 시편에 있어서 Void의 생성량 및 크기는 시편의 크기의 증가보다는 두께가 두꺼워 질때 확연히 증가하는 것을 알 수가 있었다.

또한, Fig.18은 Fig.16과 Fig.17의 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) 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

