

## Characteristics of Glass/Carbon Fiber Hybrid Composite Using by VARTM

Insub Han,<sup>†</sup> Seyoung Kim, Sangkuk Woo, Kiseok Hong, and Doowon Soe

Energy Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received August 8, 2006; Accepted September, 2006)

### VARTM 공정을 이용한 유리/탄소섬유 하이브리드 복합체의 특성

한인섭<sup>†</sup> · 김세영 · 우상국 · 홍기석 · 서두원

한국에너지기술연구원 에너지신소재연구부 에너지재료연구센터

(2006년 8월 8일 접수; 2006년 9월 14일 승인)

#### ABSTRACT

In VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) process, the permeability generally controls the filling time of the resin and it also affects the void characteristics of the fiber composite. In this study, carbon and glass fiber inter-layered hybrid composites (carbon fiber centered stack) with an epoxy matrix were fabricated by VARTM process and evaluated the resin flow and macro void characteristics. The permeability of glass fiber was higher than that of carbon fiber used in this study. Using Darcy's equation, the permeability of hybrid composites could be predicted and experimentally confirmed. After curing, the macro void content of hybrid composites was investigated using image analyzer. The calculated filling time was well agreed with experimental result and the void content was significantly changed in hybrid composites.

**Key words :** VARTM, Hybrid, Permeability, Filling time, Void

#### 1. 서 론

유리섬유 또는 탄소섬유로 강화된 복합체는 원하는 하중 조건에 따른 설계가 가능하고 비강도가 매우 높은 재료로서 구조물이나 항공기 및 풍력 발전기의 블레이드 등에서 많이 사용되고 있다. 특히, 최근 상대적으로 비강도가 매우 높은 탄소섬유강화 복합체가 그 적용 범위를 넓혀가고 있다.

하이브리드 섬유강화 복합체는 두 종류 이상의 섬유로 보강된 복합체이며, 이종의 섬유를 하나의 모재내에 사용할 경우 두 섬유 각각의 단점을 보완하며, 장점을 부각시키는 하이브리드 효과가 발생하여 섬유강화 복합체의 성능을 향상 시킬 수 있다. 보통의 경우, 고가이지만 고강도 및 고강성의 탄소섬유와 상대적으로 낮은 강성 및 강도의 유리섬유 또는 케블라섬유 등을 하이브리드 섬유강화 복합체의 섬유로 사용한다. 하이브리드 섬유강화 복합체는 복합체의 가격, 무게, 파괴인성, 피로강도 그리고 내충격성을 섬유의 비율 및 종류에 따라 조절이 가능하며, 최근에는 여러 구조물 및 풍력발전기의 블레이드 등에 적용되고 있다.<sup>1)</sup>

VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)은

최근 연구가 활발히 진행되며, 실제적으로도 널리 사용되는 섬유강화 복합체 제조방법 중 하나이다. 아래의 Fig. 1에서와 같이 진공압에 의하여 수지를 프리폼(적층된 상태의 섬유; preform)에 함침시키는 공정이며, 높은 섬유체적비 및 void의 최소화에 매우 유리한 방법이다. 특히, 대형 구조물의 제작시 시간과 비용측면에서 다른 제조방법에 비해 매우 뛰어나다.<sup>2,3)</sup>

Darcy는 수지의 흐름이 압력의 차이에 비례하고, 프리폼의 길이와 수지의 점도에 반비례함을 나타내었으며, 프리폼의 투과도에는 비례함을 보였다. 여기에서 투과도는 실험을 통하거나 계산을 통해 예측이 가능하다.<sup>4)</sup> 하이브리드 섬유강화 복합체와 같은 다종 적층 프리폼이 종종 VARTM에 적용되는데, 이러한 경우의 투과도는 각 프리폼층의 평면 투과도의 산술평균 투과도가 적용된다.<sup>5)</sup>

섬유강화 복합체 내의 void는 항상 존재하며, 이는 재료의 기계적 물성을 떨어뜨리는 원인이 된다.<sup>6)</sup> Void의 존

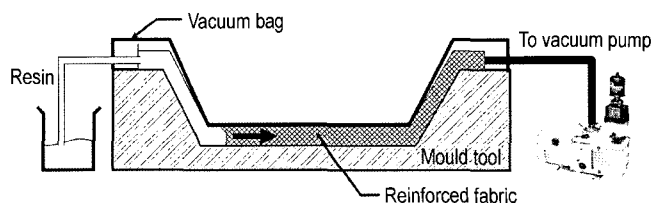


Fig. 1. Schematic view of VARTM process.

<sup>†</sup>Corresponding author : Insub Han

E-mail : ishan@kier.re.kr

Tel : +82-42-860-3140 Fax : +82-42-860-3133

재는 섬유강화 복합체의 층간전단강도, 압축강도, 파괴인성 그리고 피로강도를 저하시키는 요인으로 작용함을 많은 선행 연구들이 보여주고 있으며, 이러한 void의 생성은 진공압력, 수지의 특성(점도 및 표면 에너지) 그리고 프리폼 특성(섬유배열 특성 및 표면 처리상태) 등에 기인함도 밝혀졌다.<sup>7)</sup> 그러므로 구조용 섬유강화 복합체의 void는 최소화 되어야 하며, 특히, 하이브리드 섬유강화 복합체의 경우 프리폼의 종류에 따른 수지의 흐름 특성이 다르므로 반드시 규명되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 유리섬유 프리폼의 중앙에 탄소섬유 프리폼(두께 비로 각각 100%, 75%, 50%, 25%, 0%)을 삽입하여 VARTM으로 복합체를 제조할 때의 수지의 충전 속도와 하이브리드 섬유강화 복합체의 기공형성 양상에 대하여 단일 섬유강화 복합체의 경우와 비교하여 분석하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

하이브리드 섬유강화 복합체를 제조하기 위하여 직조된 탄소섬유와 유리섬유를 사용하였다. 탄소섬유는 레이온계열의 섬유를 사용하였고, 유리섬유의 경우는 한국오웬스코닝社의 WR 580A 섬유를 사용하였다. 각각 섬유 모두의 직조형태는 아래의 Fig. 2와 같이 plain weave이다.

섬유강화 복합체 제조를 위해 사용된 수지는 국도화학(주)의 YD-114 에폭시 수지이며, 경화제는 상온경화제인 D-230 33 wt%를 수지에 섞어 사용하였다. 수지의 점도는 VARTM에서 매우 중요하며, 보통 500 cps 이하의 수지를 사용한다. 또한, 수지 함침중 경화반응이 발생할 경우 완전 함침이 이루어지기 전에 더 이상의 수지주입이 불가능하게 되므로 수지의 가용시간(경화제 첨가 후 경화가 발생하기 전 저점도 상태의 유지시간)이 적당해야 한다. 사용된 수지의 점도 특성을 확인하기 위해 경화제 첨가 후 25°C에서 점도를 측정하였으며 측정에 사용된 점도계는 Brookfield사의 DV-1+이다.

하이브리드 섬유강화 복합체는 Fig. 3과 같이 제조하였으며, 흐름 특성 파악을 위한 시편의 크기는 33 cmL×12 cmW이었다.

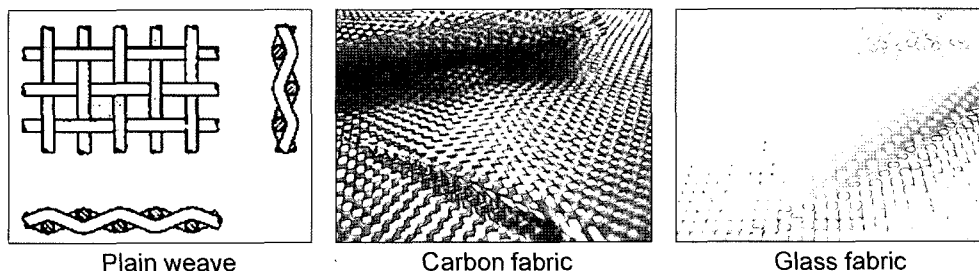


Fig. 2. Carbon and glass fabric used in the experiment.

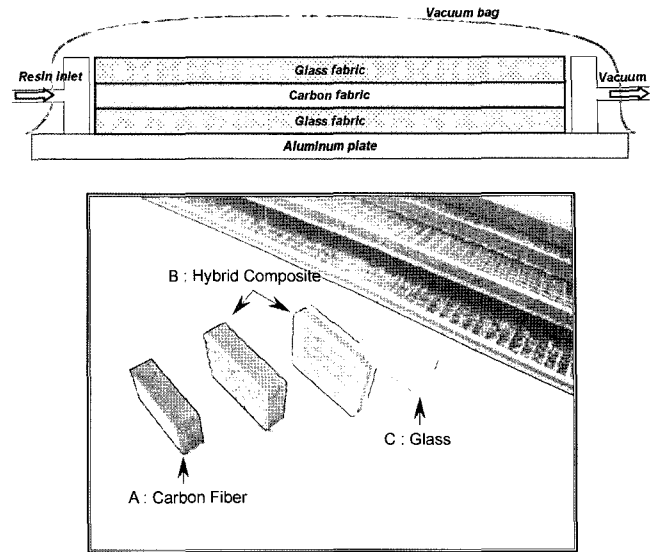


Fig. 3. Schematic view of VARTM process and fabricated specimen.

Table 1. Hybrid Specimen Condition for Experiments

(Unit : mm)

	Specimen No.				
	G-100	G-75	G-50	G-25	G-0
Glass thickness	6.25	4.66	3.11	1.59	0
Carbon thickness	0	1.75	3.51	5.40	6.59
Total thickness	6.25	6.41	6.62	6.99	6.59
Glass content (%)	100	72.7	47	22.7	0

VARTM으로 하이브리드 섬유강화 복합체 제조시의 수지 함침시간과 기공형성 특성에 대하여 알아보기 위해 시편의 종류는 Table 1에서와 같이 모두 5종류를 제작하였다.

단일 프리폼의 투과도 즉, 탄소섬유와 유리섬유 각각의 투과도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 일방향으로 수지를 주입하는 unidirectional flow method를 사용하였으며, 주입시점부터 프리폼이 완전히 채워지는 시간을 측정하였다. 하이브리드 프리폼의 영향을 보기 위한 실험 역시 같은 방법으로 진행되었다.<sup>8)</sup> 또한, 각 단일 프리폼 복합체의 섬유체적비는 ASTM 3171에 의거하여 질산에 경화

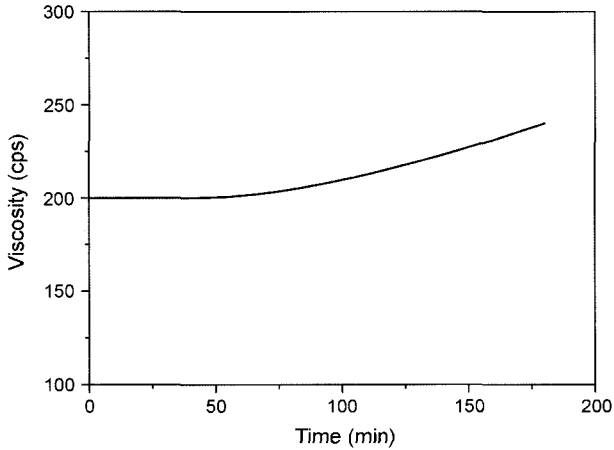


Fig. 4. Viscosity property of used epoxy resin after mixing with hardener.

된 복합체를 녹여 측정하였으며, 각 종류별 복합체의 밀도는 water displacement method를 사용하여 측정하였다.

섬유강화 복합체의 void를 측정하는 데에 image analysis가 매우 유용하고 신뢰도 높은 방법임이 많은 보고서에서 입증되었으므로 본 실험에서 void content의 측정은 image analysis를 선택하였다.<sup>9-11)</sup> 각 시편의 void content는 image analyzer(Counter program, Mirero Co. Korea)를 사용하여 분석하였으며, 시편의 종류마다 모두 10개씩의 시편이 분석되었다. 시편은 2.5×1.5 cm의 크기로 제작되었으며, void는 ICS-305A video microscope(Sometech Co., Korea)를 사용해 100배의 배율로 관찰되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수지의 점도 측정

아래의 Fig. 4에 사용된 수지의 시간에 따른 점도변화를 나타내었다. 시간이 지남에 따라 경화 반응이 발생하게 되어 수지의 점도가 점점 증가함을 나타내고 있으며, 초기 약 60분 동안 점도의 변화는 200 cps에서 변화가 없는 것으로 측정되었다.

따라서, 사용된 수지의 가용시간이 약 60분 정도이며, 점도 또한 200 cps로 VARTM에 적용하기에 적당한 수치임이 판단되었다.

#### 3.2. 하이브리드 프리폼의 투과도와 함침 시간

하이브리드 프리폼의 투과도는 Darcy의 법칙에 의하여 예측이 가능하다. 레이놀즈의 수가 1 이하의 경우 2차원의 프리폼을 통과하는 유체의 흐름 속도  $v_j$ 는 아래의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>12-16)</sup>

$$v_j = \frac{K_{ij}}{\mu_r} \frac{\partial p}{\partial x_j}, \quad \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

여기서  $K_{ij}$ 는 단일 프리폼의 투과도이며,  $p$ 는 압력,  $\mu_r$ 은 수지의 점도,  $x_i$ 는 프리폼의 길이,  $i$ 와  $j$ 는 각각 수지 흐름의 수직 방향과 수지의 흐름 방향을 나타낸다. 여기서 식(1)은 아래의 식(2)와 같이 함침 시간에 대한 식으로 유도 될 수 있다.

$$t_f = \frac{\phi \mu l^2}{2K \Delta p} \quad (2)$$

여기서  $t_f$ 는 수지가 프리폼을 채우는 시간,  $\phi$ 는 프리폼의 porosity를( $\phi = 1 - v_f$ ,  $v_f$ : Fiber volume fraction),  $l$ 은 수지가 흐르는 거리이다. 그러나, 하이브리드 프리폼에서 식(2)는 적용이 불가능하다. 이러한 경우, 하이브리드 프리폼의 함침 시간은 하이브리드 프리폼의 투과도 및 하이브리드 porosity를 도입하여 구할 수 있게 된다.<sup>17)</sup> 하이브리드 프리폼의 투과도는 보통 각 단일 프리폼의 투과도를 산술평균의 값으로 구하게 되며, 하이브리드 프리폼의 porosity는 단일 프리폼의 porosity로부터 각 프리폼의 두께 비율에 의해 구할 수 있다. 아래의 식(3)에 하이브리드 프리폼의 투과도와 함침 시간에 대한 식을 나타내었다.

$$K_{Hybrid} = \frac{1}{H} \sum_{z=1}^n h^{(z)} K^{(z)}, \quad t_{f-Hybrid} = \frac{\phi_{Hybrid} \mu l^2}{2K_{Hybrid} \Delta p} \quad (3)$$

여기서  $K_{Hybrid}$ 는 하이브리드 프리폼의 투과도이며,  $H$ 는 전체 하이브리드 프리폼의 두께,  $n$ 은 적층된 단일 프리폼의 층수,  $h^{(z)}$ 는 Z번째 단일 프리폼의 두께이고,  $K^{(z)}$ 는 Z번째 단일 프리폼의 투과도이다. 또한,  $t_{f-Hybrid}$ 는 하이브리드 프리폼에 대한 수지의 함침 시간이며,  $\phi_{Hybrid}$ 는 하이브리드 프리폼의 porosity이다.

위의 식(2)에서와 같이 수지의 함침 시간은 porosity에 비례한다. 아래 Fig. 5의 탄소섬유와 유리섬유의 복합체 제조후의 단면사진을 보면 수지 흐름의 통로인 porosity의 차이를 볼 수 있다. 즉, 탄소섬유의 굵기는 7  $\mu m$ 이고, 유리섬유의 굵기는 약 22  $\mu m$ 로서 상대적으로 조밀한 탄소섬유 프리폼의 porosity가 유리섬유보다 작음을 알 수 있으며, 이 porosity의 차이가 하이브리드 섬유강화 복합체를 VARTM으로 제조시에 수지 함침 시간과 기공의 형성에 영향을 주게 될 것으로 판단되었다.

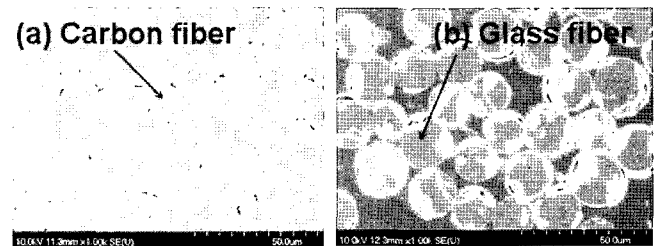


Fig. 5. SEM photographs of (a) carbon and (b) glass fiber composite (1000×).

**Table 2.** Material Properties of Mono-Fabric Composite which Fabricated with VARTM

Properties	Composite	
	Glass fabric composite	Carbon fabric composite
Fiber volume fraction	32.2	43.3
Resin volume fraction	67.8	56.7
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.891	1.401
Viscosity of resin (cps)	200	200
Filling time (sec)	900	1455
Specimen length (cm)	33	33
Vacuum pressure (atm)	1	1
Permeability (m <sup>2</sup> )	1.19019E-07	6.15381E-08

Table 2에는 단일 프리폼 복합체의 분석 결과를 나타내었다. 유리섬유의 경우 탄소섬유보다 섬유체적비가 약 10% 정도 낮게 나왔는데, 이는 porosity가 탄소섬유보다 큼을 나타낸다. 실험을 통해 측정된 투과도 역시 유리섬유가 크게 나타났고, 이에 따른 수지의 함침 시간 또한 유리섬유가 탄소섬유보다 짧게 나타났다.

위 Table 2의 물성 값을 이용하여 계산한 하이브리드 복합체의 porosity, 투과도 및 수지의 함침 시간을 각각

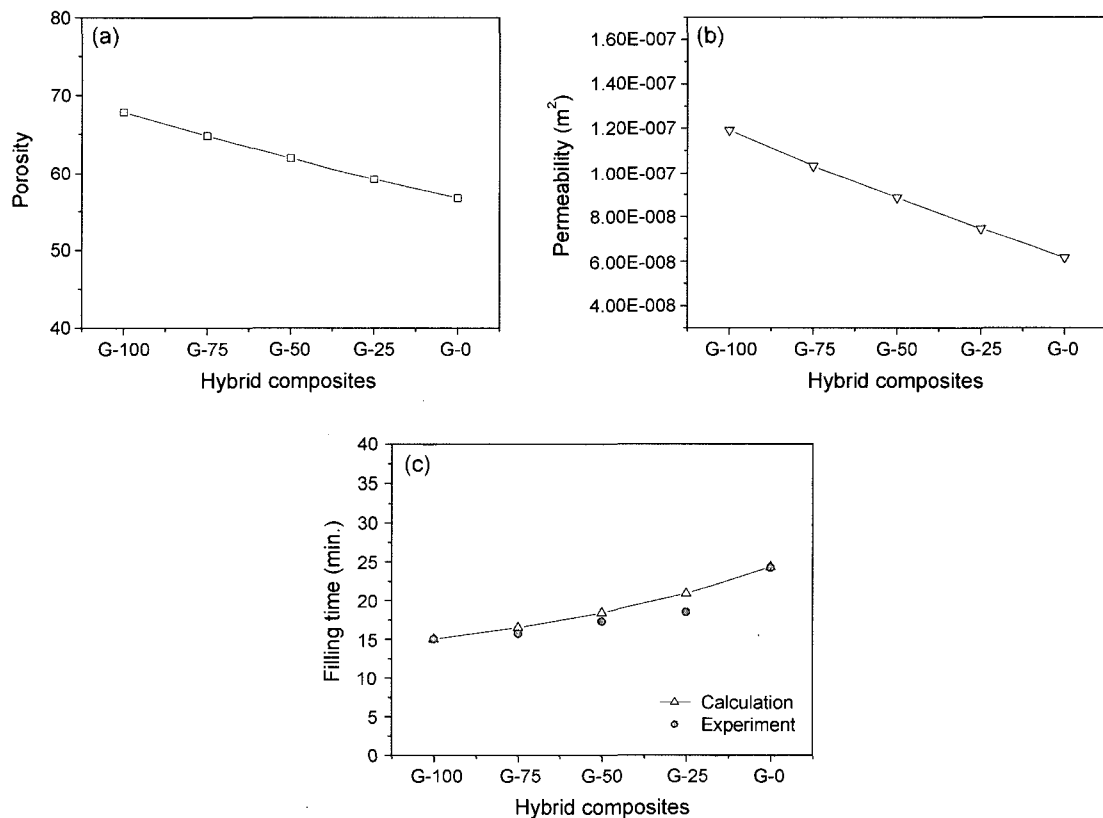
Fig. 6(a), (b) 및 (c)에 나타내었으며, 이를 확인하기 위하여 실험을 통해 얻은 함침 시간 또한 아래 Fig. 6(c)에 함께 나타내었다.

즉, porosity가 작은 탄소섬유의 양이 증가함에 따라 하이브리드 프리폼의 porosity 및 투과도가 감소함을 보인다. 계산된 수지의 하이브리드 프리폼에 대한 함침 시간 또한 실제 측정 시간과 잘 일치함을 볼 수 있으며, 하이브리드 프리폼의 투과도 및 함침 시간은 예측이 가능함을 알 수 있다. Darcy가 제안한 수지의 흐름 특성은 프리폼의 porosity, 크기, 모양 그리고 방향성 등에 좌우된다. 따라서, 조밀한 미세구조에 의해 투과도가 상대적으로 낮은 탄소섬유의 첨가 비율에 의해 수지의 유동 특성은 달라지게 되는데, 탄소섬유의 체적이 증가할수록 수지의 함침 시간은 늘어나게 됨을 알 수 있으며, 이는 이전의 연구자들에 의한 보고와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.<sup>18)</sup>

### 3.3. 하이브리드 섬유강화 복합체의 Void 특성

Fig. 7에 각 시편의 단면이 image analyzer로 분석된 그림을 나타내었다. 관찰된 이미지는 analyzer를 통해 면적으로 계산되고, 이는 다시 void content로 계산되어 Fig. 8에 각 시편의 void content를 나타내었다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 하이브리드 섬유강화 복합체



**Fig. 6.** Properties of the hybrid composites as a function of glass fiber content: (a) calculated porosity, (b) permeability, and (c) filling time.

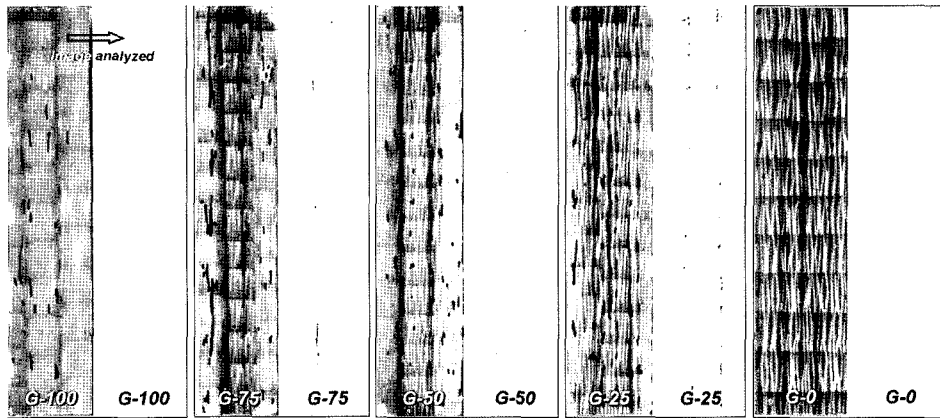


Fig. 7. Void inspection of cross section of the hybrid composite by image analyzer (100×).

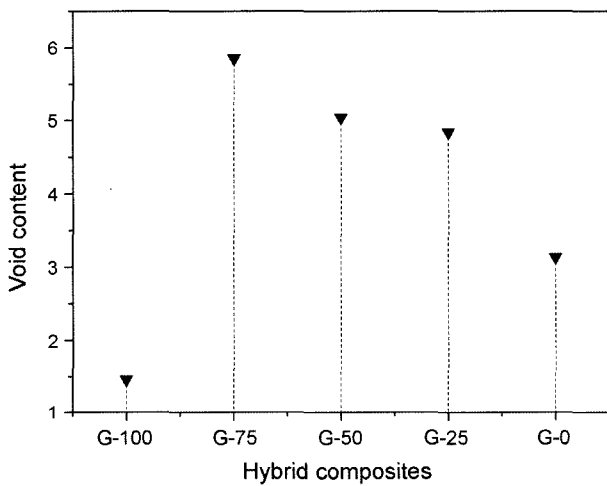


Fig. 8. Void content of the hybrid composites as a function of glass fiber contents.

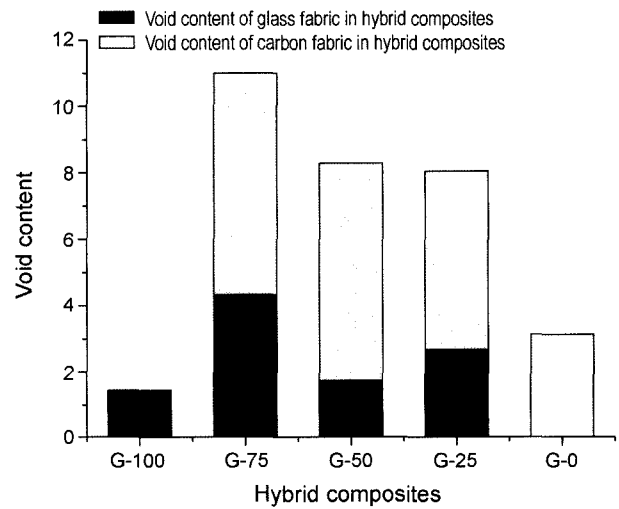


Fig. 10. Partial void content of each fabric in hybrid composites.

의 void content가 단일 섬유강화 복합체의 경우보다 높게 나타났다. 하이브리드 프리폼을 VARTM에 적용할 경우 void content가 증가함을 보이는데 이는 각 프리폼 서로간의 투과도가 다르기 때문에 발생하는 trapped void에 의한 것이며, 이에 대한 모식도를 Fig. 9에 나타내었다. Calado와 Advani는 프리폼 내에서 수지의 이동 중 수지가 수직으로도 이동하게 됨을 밝혔으며,<sup>17)</sup> Heider *et al.*은 프리폼 간에 속도 구배가 발생 할 경우 “enclosed area”에 의해 dry spot 즉, 수지에 함침되지 않는 부분이 생김을 보고하였다.<sup>3)</sup> 따라서, 본 실험의 경우 투과도가 작은 탄소 섬유

가 내부에 들어 있으므로 두께별 수지의 속도 구배가 발생하게 되고, 이는 trapped void의 발생으로 단일 섬유로 제작된 복합체보다 더 많은 양의 void content를 포함하게 되었다고 판단된다.

Fig. 10에는 하이브리드 섬유강화 복합체의 각 섬유영역에서의 void content를 측정된 것이다. G-75를 제외한 나머지 시편의 유리섬유 부분의 void content는 단일섬유 시편의 경우와 하이브리드 시편의 경우 모두 큰 차이가 없으나, 탄소섬유의 경우 단일 탄소섬유의 void content보다 하이브리드 시편의 탄소섬유 내의 void content가 약 두 배

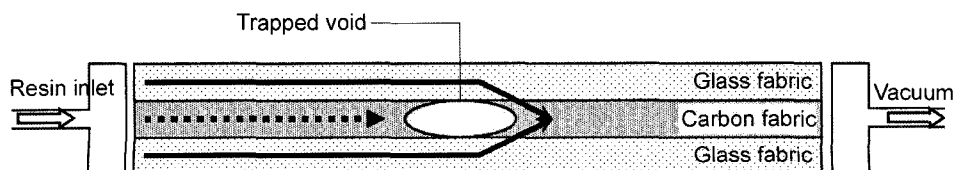


Fig. 9. Trapped void creation due to the permeability difference in hybrid layers during the VARTM process.

임을 보인다. 즉, 하이브리드 섬유강화 복합체의 void content 증가는 탄소섬유 내부에 포함되는 void content의 증가에 기인한 것임을 알 수 있으며, 이는 trapped void에 의한 void content의 증가임을 나타낸다.

#### 4. 결 론

VARTM을 이용한 탄소/유리섬유 강화 하이브리드 복합체 제조시 수지의 함침 시간과 void 형성의 특성에 관하여 조사하였다. 탄소섬유를 내부에 위치시키고 위, 아래로 유리섬유를 적층한 복합체를 제작하였고, 내부 탄소섬유의 비율을 전체 시편의 두께 대비 100, 75, 50, 25, 0%로 변화 시켜가며 실험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 단일 섬유강화 복합체의 투과도 및 porosity를 통해 하이브리드 섬유강화 복합체의 투과도 및 수지의 함침 시간을 예측할 수 있었으며, 실제 측정값과 근사한 값을 보였다. 또한, 투과도가 작은 섬유의 체적 비율이 증가 할수록 전체 하이브리드 프리폼의 투과도는 감소하며, 수지 함침 시간 역시 늘어나게 된다.

2. 내부에 투과도가 상대적으로 낮은 섬유를 위치시켰을 경우 수지의 흐름 속도 차이와 두께방향 수지 흐름의 영향으로 인하여 trapped void가 발생하며, 이는 VARTM을 적용한 하이브리드 섬유강화 복합체 제조시 void의 증가를 가져오게 된다.

#### REFERENCES

1. N. K. Naik, R. Ramasimha, H. Arya, S. V. Prabhu, and N. ShamaRao, "Impact Response and Damage Tolerance Characteristics of Glass-Carbon/Epoxy Hybrid Composite Plates," *Composites Part B: Engineering*, **32** 565-74 (2001).
2. A. Gokce, M. Chohra, S. G. Advani, and S. M. Walsh, "Permeability Estimation Algorithm to Simultaneously Characterize the Distribution Media and the Fabric Preform in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process," *Composites Science and Technology*, **65** 2129-39 (2005).
3. D. Heider, P. Simacek, A. Dominauskas, H. Deffor, S. Advani, and J. W. Gillespie Jr., "Infusion Design Methodology for Thick-Section, Low-Permeability Preforms Using Inter-Laminar Flow Media," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, in press (2006).
4. N. R. L. Pearce, F. J. 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*, **29** 19-27 (1998).
5. Z. Chen, L. Ye, and H. Liu, "Effective Permeabilities of Multilayer Fabric Preforms in Liquid Composite Moulding," *Composite Structures*, **66** 351-57 (2004).
6. L. Liu, B.-M. Zhang, D.-F. Wang, and Z.-J. Wu, "Effects of Cure Cycles on Void Content and Mechanical Properties of Composite Laminates," *Composite Structures*, **73** 303-09 (2006).
7. H. Jinlian, L. Yi, and S. Xueming, "Study on Void Formation in Multi-Layer Woven Fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **35** 595-603 (2004).
8. Y. Luo, I. Verpoest, K. Hoes, M. Vanheule, H. Sol, and A. Cardon, "Permeability Measurement of Textile Reinforcements with Several Test Fluids," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **32** 1497-504 (2001).
9. B. Herzog, B. Goodell, and R. Lopez-Anido, "Electron Microprobe Imaging for the Characterization of Polymer Matrix Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **35** 1075-80 (2004).
10. C. H. Jenkins, "Characterization of the Physical Properties of Composite Materials Using Optical Microscopic Image Analysis-Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites," pp. 175-82, Prentice Hall, NJ, 1998.
11. T. S. Lundström and B. R. Gebart, "Influence from Process Parameters on Void Formation in Resin Transfer Molding," *Polym. Compos.*, **15** [1] 25-33 (1994).
12. R. J. Johnson and R. Pitchumani, "Enhancement of Flow in VARTM Using Localized Induction Heating," *Composites Science and Technology*, **63** 2201-15 (2003).
13. M. K. Kang, W. I. Lee, and H. T. Hahn, "Analysis of Vacuum Bag Resin Transfer Molding Process," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **32** 1553-60 (2001).
14. D. Bender, J. Schuster, and D. Heider, "Flow Rate Control During Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Processing," *Composites Science and Technology*, **66** 2265-71 (2006).
15. N. Kuentzer, P. Simacek, S. G. Advani, and S. Walsh, "Permeability Characterization of Dual Scale Fibrous Porous Media," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37** 2057-68 (2006).
16. J. M. Lawrence, J. Barr, R. Karmakar, and S. G. Advani, "Characterization of Preform Permeability in the Presence of Race Tracking," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **35** 1393-405 (2004).
17. V. M. A. Calado and S. G. Advani, "Effective Average Permeability of Multi-Layer Preforms in Resin Transfer Molding," *Composite Science and Technology*, **56** 519-31 (1996).
18. L. Ding, C. Shih, Z. Liang, C. Zhang, and B. Wang, "In Situ Measurement and Monitoring of Whole-Field Permeability Profile of Fiber Preform for Liquid Composite Molding Processes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **34** 779-89 (2003).