

論文

Resin Infusion Process를 이용한 샌드위치 구조물에서의 수지유동에 관한 연구

최중식* · 김대흠* · 이건웅** · 임순호*** · 김준경*** · 최철립***

Study on the resin flow in the sandwich structure using resin infusion process

J.S.Choi*, D.H.Kim*, K.W.Lee**, S.H.Lim***, J.K.Kim*** and C.L.Choi***

ABSTRACT

Resin Infusion Process has been developed for overcoming the defects of prepreg process. RIP is the process which contains resin flow and curing simultaneously. RIP process is easily applicable to unidirectional or woven fabrics preform or honeycomb (sandwich) type structure. A measuring apparatus was designed for modeling the resin flow of the stitching sandwich structures which contained the polyurethane foam and glass fabrics. Permeability and capillary pressure of glass fabrics/epoxy resin system were obtained using this apparatus from resin infusion experiments. Resin flow rates to glass fabrics and stitching holes were characterized from model experiments separately.

And the filling time to stitching sandwich structures was calculated combining these two model experiments.

초 록

고분자 복합재료를 제조하는데 많이 사용되는 프리프레그 공정은 프리프레그 보관의 문제점, 복잡한 형태의 구조물을 만들기가 힘들다는 단점을 가지고 있어 단점을 개선하기 위한 연구가 많이 수행되고 있으며 최근에 Resin Infusion Process(RIP), Resin Transfer Molding(RTM) 공정 등이 개발되고 있다. RIP는 보강 섬유 양쪽 또는 한쪽에 수지필름을 적층한 상태에서 가열 가압하며 공정 중에 함침과 경화가 동시에 일어나는 공정이다. RIP를 이용하여 제조하고자 하는 스티칭(stitching) 샌드위치 구조물의 수지유동 모델 실험을 위해서 수지유동 측정장치를 제작했다. 제작된 측정장치를 이용해서 섬유직조내에서의 수지유동 실험으로부터 유리섬유직조와 에폭시수지 계에서의 투과계수와 모세관압을 구해 냈으며 이 값들로부터 Kozeny 상수를 계산해 낼 수 있었고 섬유직조의 함침완료 시간을 계산할 수 있었다. 또한 섬유직조를 흐른 수지가 스티칭 홀(stitching hole)로 흐를 때의 유동속도를 실험적으로 구해 냈다. 이로부터 스티칭 홀에서의 함침시간을 계산했고 앞에서 구한 섬유직조의 함침시간과 스티칭 홀의 함침시간으로부터 스티칭 샌드위치 구조물의 전체 함침시간을 구하였다. 이상의 결과로부터 공정 중에서 섬유직조로의 함침시간이 전체 공정시간을 결정하는데 지배적이라는 사실을 알게 되었다.

*광운대학교 화학공학과

**대림산업

***한국과학기술연구원 고분자연구부

1. 서 론

고분자 복합재료를 제조하기 위해서 여러 가지 방법이 사용되고 있는데, 그 중 많이 사용되는 것 중의 하나가 열경화성 고분자 수지가 미리 함침된 프리프레그를 여러겹 적층하여 오토클레이브 내에서 경화시키는 프리프레그 공정이다[1]. 그러나 프리프레그 공정은 프리프레그를 사용함에 따른 보관의 문제점과 복잡한 형태를 갖는 구조물 제작의 어려움, 그리고 고가의 설비비 등과 같은 단점을 가지고 있다. 이와 같은 프리프레그 공정의 단점을 개선하기 위한 연구가 많이 수행되고 있으며 최근에 resin infusion process(RIP), resin transfer molding(RTM) 공정 등이 개발되고 있다.

이 중에서 RIP는 보강 섬유 양쪽 또는 한쪽에 수지 필름을 적층한 상태에서 공정 중에 함침과 경화가 동시에 일어나는 공정이다[2-4]. 또한, 오토클레이브와 같은 대형 설비가 필요하지 않고 프리프레그 제조 단계를 줄일 수 있는 방법으로써 복합재료 제조에 유리한 공정이라고 할 수 있다. RIP는 건조된 섬유직조에 수지가 주입되는 RTM과 유사한 점을 가지고 있으나 수지를 필름형태로 섬유직조와 함께 적층할 수 있기 때문에 RTM에서 수지가 섬유직조에 수평으로 이동하는 것과는 달리 수지가 섬유직조에 수직 방향으로 흐르므로 수지 이동 경로가 짧은 장점을 지니고 있다. 또한 삽입하는 수지의 형태나 위치에 따라 최적의 수지 함량과 함침 시간을 조절할 수 있고 3차원 형태의 구조물, 특히 하나컴(honeycomb) 구조나 폼(foam)을 삽입한 샌드위치 구조물에 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

Table 1에 프리프레그 공정, RTM, RIP를 비교해 보았다.

Table 1. Comparison of RIP with prepreg process and RTM

	프리프레그 공정	RTM	RIP
prepreg 사용 여부	○	×	×
cost	높다	낮다	낮다
fiber content	높다	낮다	중간
fiber type	UD/Woven	Woven	UD/Woven
수지 이동 거리	짧다	길다	짧다
3차원 구조	×	○	○

RIP 공정을 개발하기 위해서 수지유동을 해석하는 모델 연구가 필요하다. 이는 함침 과정 상태가 최종 복

합재료 물성에 영향을 미치기 때문이다. RIP에서 매트릭스용 수지로 주로 사용되고 있는 열경화성 수지는 경화되기 전에는 점성 유체로 존재하여 섬유보강재 직조 사이의 유동 및 젖음성(wettability)이 좋아 다루기가 편하고, 열을 가하면 가교 구조를 형성하여 경화된다. 경화가 될 때까지 공정 중의 수지의 점도 변화를 보면 초기 승온단계에서 점도가 계속 감소하여 최소점을 갖고 경화가 진행되면서 점도가 상승하기 때문에 RIP와 같이 수지의 유동이 있는 공정에 적용하기가 유리하다. 본 연구에서는 RIP를 이용한 샌드위치 구조물에서 수지의 유동 모델 연구를 하고자 한다. 본 실험에서는 Fig. 1과 같은 샌드위치 구조물에서의 수지유동 모델에 관해 실험을 행하였다.

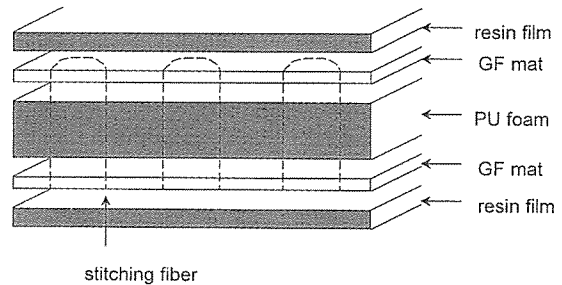


Fig. 1. Schematic diagram of stitching sandwich structure

본 연구에서 사용된 스티칭된 샌드위치 구조물의 경우 수지의 흐름은 윗면과 아래 면의 섬유직조를 수지가 수직으로 통과하여 채우는 흐름[transverse flow]과 섬유직조를 통과한 수지가 스티칭 섬유를 따라서 흐르는 흐름[longitudinal flow]로 구분할 수 있는데 이때 수지는 Fig. 2에 표시한 것과 같이 샌드위치 구조물 내를 흐르게 된다.

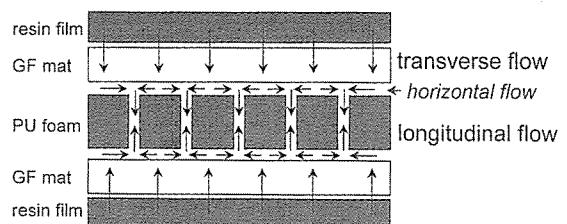


Fig. 2. Resin flow path in the stitching sandwich structure

합 섬유직조 안으로 수지가 충전될 때의 수지유동에 관한 연구는 다공성 매질에서 유체의 유동에 관한 Dar-

cy의 법칙을 적용함으로써 정량적으로 연구되어 왔다 [5-7]. 섬유직조의 수지 함침 공정에서는 섬유직조로의 수지 투과계수와 수지의 표면장력에 기인한 모세관압이 가장 큰 영향을 미치는 변수로 고려될 수 있다 [5,6]. 특히 수지의 표면장력은 복합재료 제조 공정에서 수지에 대한 섬유직조의 젖음성을 결정하는 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 좋은 젖음성은 양질의 복합재료 제조와 최종 성형품의 기계적 물성 향상을 위한 필수적인 요소이다. 또한 표면장력은 모세관압에 의한 수지 흐름성을 향상시켜 섬유직조를 따라 흐르는 함침 공정을 개선할 수 있다[7]. 일반적으로 모세관압 효과는 수지의 표면장력, 섬유와 수지간의 접촉각, 그리고 섬유직조의 구조, 기공율, 섬유 직경, 모세관 기공의 배열 형태 등에 영향을 받는다.

안규중 등은 섬유직조의 비정상 상태 투과계수와 모세관압을 동시에 측정할 수 있는 실험 방법을 제안하였다[6].

1.1 섬유직조를 수직으로 통과하는 흐름 (transverse flow)

뉴턴성 유체가 다공질 매질 내를 흐를 때 압력구배와 유속의 관계는 Darcy의 법칙으로부터 다음과 같은 선형 방정식으로 나타낼 수 있다[8,9].

$$\tilde{v} = - \frac{K}{\mu} \nabla P \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, \tilde{v} 는 전단속도(superficial velocity), μ 는 수지의 점도, K 는 투과계수를 나타내는 텐서, ∇P 는 압력구배이다. 섬유직조내의 압력구배가 선형이라고 가정하고, 이를 비정상 상태의 섬유직조로의 흐름(transverse flow)에 적용하면 다음과 같은 유동 선단에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dY_p}{dt} = \frac{K}{\mu e} \left(\frac{\Delta P}{Y_p} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기에서 Y_p 는 수직 방향의 수지 침투 길이, e 는 섬유직조의 기공율, ΔP 는 섬유직조 수직 방향으로의 압력 차이이다. 식(2)를 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Y_p^2 = \frac{2K}{\mu e} (\Delta P_m + \Delta P_c) \cdot t \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서, ΔP_m 은 금형의 기계적 압력, ΔP_c 는 모세관압이다. 섬유직조 기공율인 e 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$e = 1 - \frac{n\xi}{\rho h} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서, n 은 적층된 섬유직조 수, ξ 는 섬유의 면적밀도(areal density)(g/cm²), ρ 는 섬유의 밀도, 그리고 h 는 적층된 섬유직조 높이이다. 식 (3)에서 살펴보면 수지의 점도와 섬유직조 기공율을 변화시키지 않고 금형의 압력을 변수로 해서 수지 침투 길이를 측정하면 투과계수 K 와 모세관압 ΔP_c 를 구할 수 있음을 알 수 있다.

투과계수의 기공율에 따른 변화는 다음과 같은 Kozeny-Carman 식으로 표현할 수 있다[6].

$$K = \frac{R_f^2}{4 \cdot k'} \cdot \frac{e^3}{(1-e)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서, R_f 는 섬유 필라멘트의 반경, 그리고 k' 는 Kozeny 상수로서 섬유직조의 유형과 종류에 관계되는 물질 상수이다.

1.2 스티칭 섬유를 따라서 흐르는 흐름(longitudinal flow)

섬유직조를 완전히 채우고 난 수지는 섬유직조와 폼 사이에서 스티칭 홀 방향으로 수평 흐름(horizontal flow: Fig. 2 참조)을 흐른 후에 스티칭 홀을 채우는 흐름(longitudinal flow)이 생기게 된다. 그러므로 스티칭 홀을 채우는 수지유동 해석을 위해서는 홀 방향으로의 수평 흐름 시간을 고려해 주어야만 한다. 섬유직조를 스티칭 한 경우와는 달리 폴리우레탄 폼을 스티칭 하게 되면 (스티칭 바늘의 직경 : 5mm) 판 형태의 홀이 생기게 되므로 스티칭 홀 내에서의 수지의 흐름은 관내의 수지유동으로 표현될 수 있다.

1.3 스티칭 샌드위치 구조물의 함침시간 계산

공정조건을 잡기 위해서는 수지가 샌드위치 구조물을 채우는 시간을 알아야 한다. 우선 섬유직조에서의 함침시간을 얻기 위해서 다음과 같은 계산이 필요하다.

위의 식 (1)에서는 등은 상태로 가정하고 수지의 함침 깊이를 계산해 내었으므로 실제 공정 중에서 함침깊이를 계산하려면 등은 상태가 아니라 승은 중에 수지의 함침깊이를 계산하여야 한다. 그러므로 식 (1)은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\frac{dY_p}{dt} = \frac{K}{e} \left(\frac{\Delta P}{Y_p} \right) \int \frac{1}{\mu(t)} dt \dots\dots\dots (6)$$

온도에 따른 수지점도의 변화는 직접 실험을 통해 관계식을 얻은 후 식 (6)에 대입하여 함침시간을 승은 속도에 따라 계산하였다.

스티칭 홀에서의 함침시간을 계산하기 위해서는 다음과 같은 절차가 필요하다. 즉 섬유직조를 채운 후 곧바로 스티칭 홀로 수지가 흘러 들어가므로 그때의 온도를 기준으로 수지유동속도를 계산하여야 한다. 고로 실험에서 수지유동 속도를 온도별로 얻어내었고 이 실험결과로부터, 스티칭 홀을 채우는 시간을 계산해 낼 수 있었다. 스티칭 샌드위치 구조물의 총 함침시간은 섬유직조를 채우는 함침시간과 스티칭 홀을 채우는 함침시간을 더함으로써 구할 수 있었다.

2. 실험 방법

실험에서 수지는 DGEBA(Diglycidyl ether of bisphenol A)계열의 2관능성 에폭시 수지를 사용하였다. 초기 점도 조절을 위해 액상의 YD-128(국도 화학 Co.)과 고상의 YD-011(국도 화학 Co.)를 1 : 1의 비율로 섞어 사용하였다. 수지유동 실험을 위해서 경화제

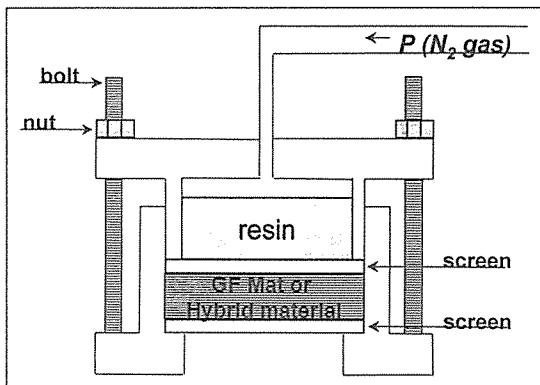


Fig. 3. Schematic diagram of resin flow measuring equipment

는 사용하지 않고 RIP 실험을 수행했다. 사용된 섬유 직조는 2K 1150Tex이며 직조 밀도는 6.3×6.3 tow/inch인 평직의 유리 섬유(한국화이버 Co.)를 사용하였다. 사용된 우레탄 폼(삼정 기연(주))은 밀도 45kg/m²의 폼 - closed pore 타입을 사용하였다. 수지 유동 특성 실험을 위해 아크릴을 재료로 하여 측정 장치를 제작하였으며 개략도는 Fig. 3과 같다.

실험 진행 순서는 다음과 같다. 직경 5cm의 원기둥 형으로 제작된 커터(cutter)를 사용하여 원형의 유리섬유직조를 준비하고 수지는 YD128 wt50%, YD011 wt50%의 혼합 비율로 약 80℃정도로 가열하면서 균일하게 섞는다. 측정 장치에 일정한 수(15장)의 유리섬유직조를 넣고 식 (4)에 따라서 측정장치 내의 유리섬유직조 두께를 조정하여 기공율을 조절한다. 유리섬유직조가 들어있는 측정 장치와 수지를 오븐에 넣고 100℃에서 약 40분간 예열을 한다(등온 실험 조건). 측정 장치와 수지가 충분히 가열되었을 때 수지를 측정장치에 주입하고 일정 압력을 가하면서 수지를 섬유직조에 함침시킨다. 수지의 함침 실험에서 함침 시작 시점은 예열된 수지를 미리 오븐에서 가열되어있는 측정 장치에 넣은 후 곧 질소 가스를 이용하므로써 수지를 함침시키기 시작했으며 이 때의 시간을 시작 시점으로 결정하였다. 일정 시간이 지난 후에 측정 장치를 오븐에서 꺼내고 수지가 부분 함침된 유리섬유직조를 꺼낸다. 함침된 수지의 무게를 측정해서 섬유직조 기공율로부터 함침 깊이를 계산한다.

우레탄 폼내에 존재하는 스티칭 홀에서의 수지유동을 해석하기 위해서 3장의 유리섬유직조와 홀을 뚫은 우레탄 폼을 위의 측정 장치에 넣고 실험을 행하였다. 먼저 직경이 5mm인 스티칭 바늘을 사용하여 원기둥 모양의 우레탄 폼(직경 5cm, 두께 3cm)에 일정 간격의 홀을 뚫은 후 유리섬유직조와 우레탄 폼을 측정 장치에 넣는다.

수지가 침투될 때의 온도 변화를 최소화하기 위해 일정 온도의 오븐에서 40분간 예열하였다. 측정 장치와 수지가 충분히 가열되었을 때 (열적으로 안정한 상태에 이르렀을 때) 수지를 측정장치에 주입하고 일정 압력을 가하면서 수지유동 흐름을 측정한다. 일정 시간 동안에 수지가 흘러나오는 양을 측정해서 섬유직조를 통과한 수지가 홀내부를 채우는 유동속도를 구할 수 있다.

공정에서 실제 수지의 유동은 승온과정 중에 발생하므로 온도 변화에 따른 수지의 점도 변화를 Brook-

field 점도계를 사용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 논문은 크게 세부분으로 구분할수 있는데 첫 번째는 일정온도와 압력하에서 섬유직조에 대한 수지유동 실험으로부터 K값과 모세관압을 구하는 것이고 두 번째는 우레탄 폼내의 스티칭 홀을 흐르는 수지유동에 대해 기초 모델 실험을 행하여 수지함침시간을 예측하는 것이다. 마지막으로 실지공정에서의 함침시간 계산은 온도를 일정속도로 올리면서 수지를 함침시키는 공정이므로 이때에는 수지점도의 온도의존식을 대입하여 섬유직조에서의 함침시간을 계산하였으며 섬유직조를 다 채웠을 때의 온도를 기준으로 스티칭 홀로 흘러 들어가는 수지 유동속도로부터 함침시간을 계산한 후 이들 두 함침시간을 더하여 총 함침시간을 구하였다. 각각의 실험결과와는 다음과 같이 얻을 수 있었다.

다공성 매체에서의 유체 거동에 관한 Darcy's law를 섬유직조 수직 흐름에 도입하여 섬유직조의 투과계수(transverse permeability)를 실험적으로 얻을 수 있었다. Fig. 4는 외부 압력, 기공율, 온도를 일정하게 유지시키면서 함침 시간에 따른 수지의 침투 깊이를 측정된 결과이다. 식 (3)으로부터 고찰하여 볼 때 이 그래프가 원점 (0,0)을 지나가는 것을 확인함으로써 본 연구에서 제조한 측정장치를 이용하여 투과계수 및

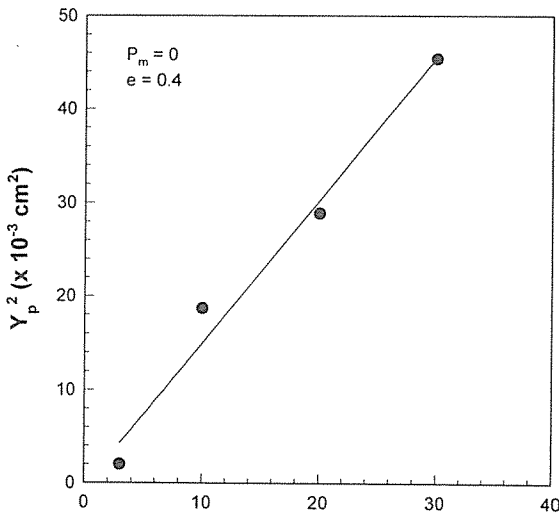


Fig. 4. Resin impregnation depth as a function of time without applied pressure(Temp. 100 °C, porosity 0.4)

모세관압을 구할 수 있음을 확인할 수 있었다.

압력을 가하면서 투과계수 측정 실험을 행할 때 실험 시작점에서 함침이 안된다는 것을 보여준다. 투과계수 측정 실험에서 수지의 함침의 시작점은 압력이 가하는 시점을 시작점으로 했다. 그래서 압력을 가한 시간을 고정시키고 압력을 변화시키면서 함침깊이를 측정했다.

실제 실험에서 직경 5cm의 섬유직조를 사용하였는데 수직 방향으로의 함침이 수평하게 일어나지 않으므로 함침된 수지의 무게를 측정해서 수지가 수평하게 함침된다고 가정하여 이때의 함침 깊이를 계산해서 결과에 사용하였다.

Fig. 5는 식 (3)을 이용하여 투과계수 및 모세관압을 구하기 위해 외부 압력 및 섬유 기공율에 따른 수지 침투 깊이를 측정된 결과 그래프이다. 함침 시간은 3분, 온도는 100°C로 일정하게 유지시키면서 실험을 행하였다.

섬유 기공을 변화는 측정장치에서 유리섬유직조의

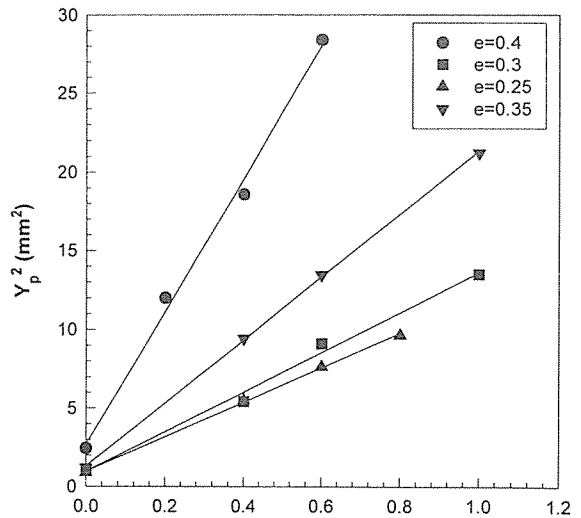


Fig. 5. Resin impregnation depth as a function of applied pressure for various porosities

두께를 바꿈으로서 조절하였으며 외부 압력은 압력 가스를 사용하여 변화시켰다. 이 그래프의 기울기로부터 투과계수를 계산하고 x축 절편으로부터 모세관압을 얻을 수 있었다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 계산된 투과계수로서 섬유직조 기공율에 따른 투과계수의 변화를 보여주고 있다. 기공

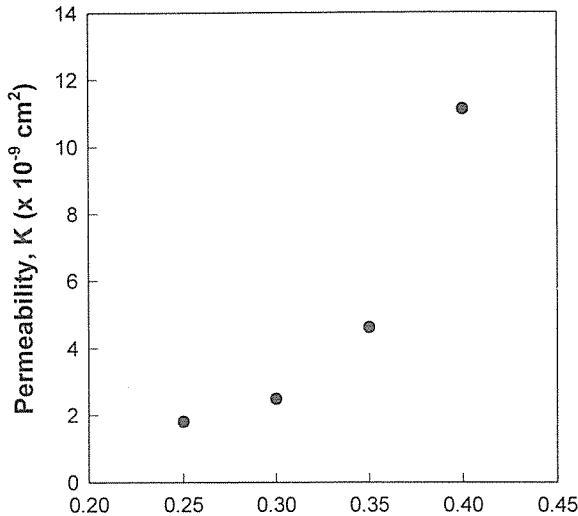


Fig. 6. Permeability change as a function of porosity

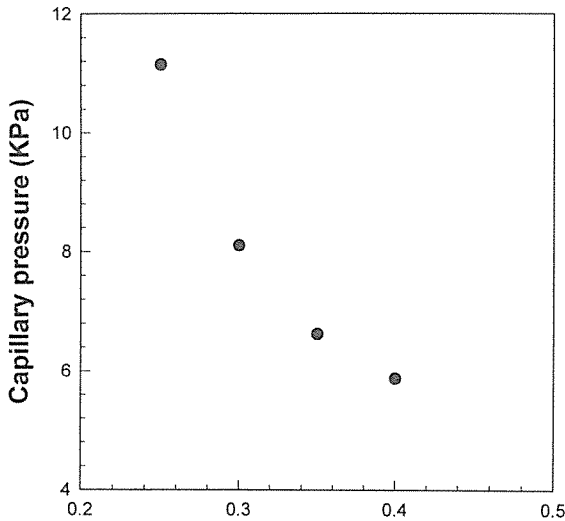


Fig. 7. Capillary pressure change as a function of porosity

율이 0.3까지는 투과계수가 서서히 증가하나 0.3보다 큰 기공율에서는 투과계수가 급격히 증가함을 알 수 있다. Fig. 7은 Fig. 5에서 계산된 모세관압으로서 섬유직조 내의 기공율에 따른 모세관압 변화를 보여 주고 있는데, 기공율 감소에 따라서 모세관압이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 동일한 섬유직조를 사용하여 두께를 변화시키므로써 기공율을 조절하였는데 기공율이 낮을수록 직조 내의 기공 크기가 감소하여 모세관압

효과가 크게 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 이와 같은 모세관압 효과는 RIP에서 수지 함침과 기공(void) 형성에 큰 영향을 미친다[10]. 즉, 기공율이 너무 작게 되면 모세관압은 증가되나 투과계수가 너무 낮게 되어 수지의 함침성이 나빠질 뿐만 아니라 기공이 많이 형성되며 기공율이 너무 커지면 모세관압에 의한 효과가 감소하기 때문에 수지 함침성이 떨어지게 된다.

고로 기공율을 조절함으로써 최적의 수지 함침성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 섬유직조의 기공율 변화에 따른 수지 투과계수의 변화를 보여주는 식(5)를 도시한 그림이다. 그림에서 기울기는 Kozeny 상수로 정의되는 값을 나타내는데, 이 값은 섬유직조 기공율에 무관한 수지 함침에 연관된 상수이다. 본 연구에서 사용된 유리섬유직조의 Kozeny 상수는 5.74이었다.

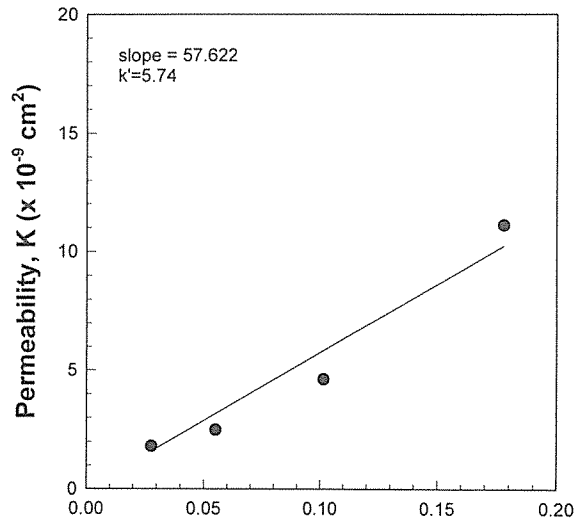


Fig. 8. Relationship between permeability and fiber porosity for calculating Kozeny constant

스티칭 홀에서의 수지유통을 해석하기 위해서 홀-홀 거리를 변화시키며 실험을 행하였다. 본 실험에서 제작한 측정장치의 내부 모양이 원기둥형이므로 Fig. 9와 같이 스티칭 홀 사이의 수지 이동 거리가 위치에 따라 다르게 나타난다.

즉 그림에서 보듯이 중앙 부분은 실제 시편과 홀사이의 거리가 같지만 가장자리 부분은 균일하게 분포가 되어 있지 않아서 홀사이의 거리가 중앙부분과 다르게 된다. 그래서 수지유통 속도를 측정한 실험을 바로 실

제 시편에 적용할 수가 없고, 각 홀 사이의 거리에 따라 수지의 평균 수평 유동 거리를 구해서 이 평균 거리에 따른 수지유동 속도를 얻어냈으며 이를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 실제 시편의 홀 사이의 간격인 1cm, 2cm, 3cm 등과 그래프가 만나는 점이 실제 시편에서의 수지유동 속도이다.

실제 샌드위치 구조재 제작 공정 중 수지 함침이 온

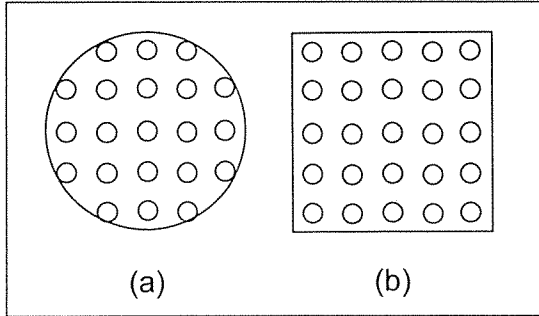


Fig. 9. Different position of stitching hole in the measuring equipment with sandwich composite
(a) Measuring equipment
(b) Sandwich composite

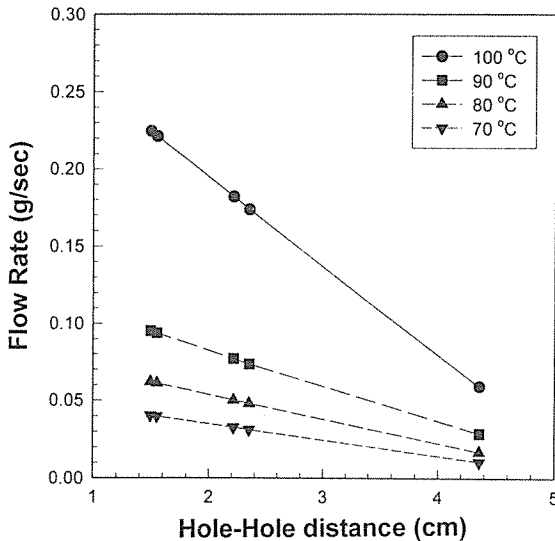


Fig. 10. Resin flow rate as a function of hole to hole distance for the stitching foam

도 상승 중에 일어나므로 사용된 수지의 온도에 따른 점도 변화는 Brookfield 점도계를 이용하여 실험하였으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

수지의 함침은 경화 반응이 일어나기 전에 일어나

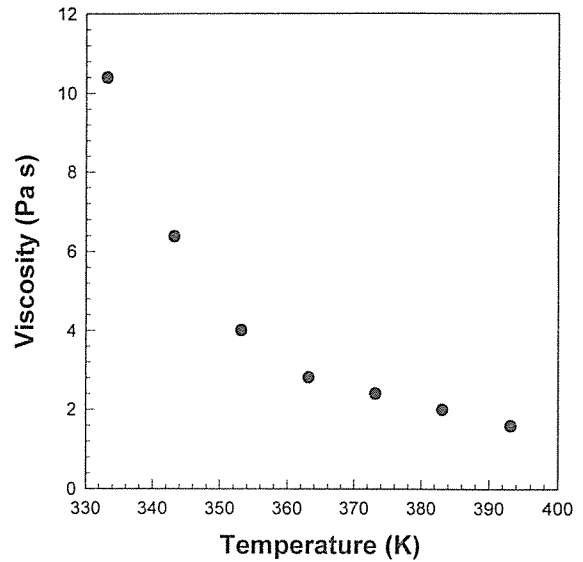


Fig. 11. Viscosity of epoxy for various temperatures

로 경화제를 섞지 않은 에폭시 수지만의 점도를 온도에 따라 측정하였다. 본 연구에서는 수지유동 모델링에 응용하기 위해 두 개의 매개변수를 이용한 Arrhenius 형의 모델식을 도입하여 사용하였다.

실험 결과로부터 얻은 점도의 온도 의존성 식은 다음과 같다.

$$\eta (Pa \cdot s) = 5.63 \times 10^{-5} \exp \left(\frac{3990}{T} \right) \quad (7)$$

위의 수지유동 실험 결과와 점도 데이터로부터 전체 스티칭 스티칭 구조물의 수지 함침 시간을 계산해 낼 수 있다. 전체적인 함침 시간을 계산하기 위하여 섬유직조내 함침 시간과 스티칭 홀에서의 함침 시간을 따로 계산하여 그 결과를 Fig. 12, 13에 나타내었다.

Fig. 12는 승온 속도에 따라 함침 시간을 계산해 놓은 것이다. 이때 섬유직조는 3장을 사용한 경우로 계산했으며 온도는 실온(25℃)에서 경화 온도인 115℃까지 일정한 승온 속도로 가열하는 사이클에 대한 함침 시간을 계산한 것이다. 이 그래프로부터 고찰하여 볼 때 통상 오토클레이브 성형에서 2℃/min의 승온 속도를 사용하므로 3장 섬유직조를 사용했을 때의 수지 함침 시간은 대략 20분 정도가 걸림을 예측할 수 있다.

Fig. 13은 수지의 섬유직조 함침이 완료된 이후 스티칭 홀을 채울 때의 함침 시간을 나타낸 것이다. 승온

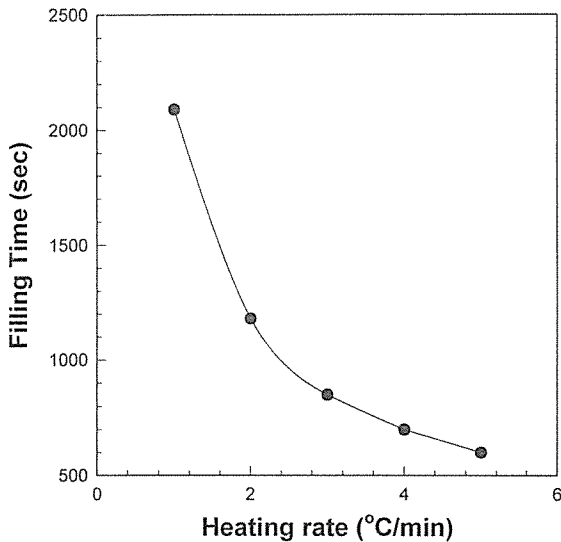


Fig. 12. Resin filling time through the glass fabrics as a function of heating rate

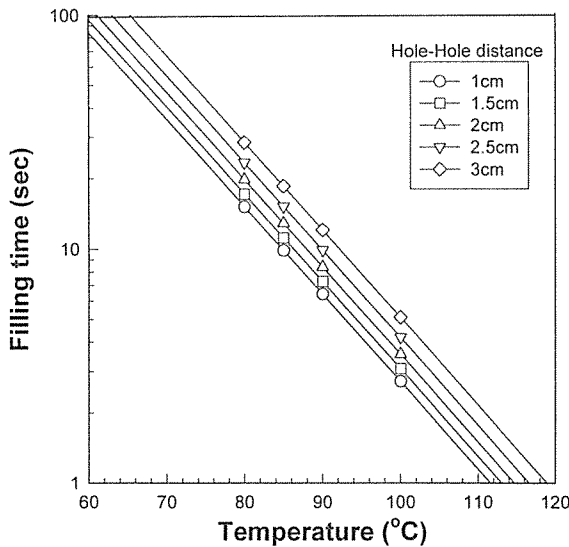


Fig. 13. Resin filling through the stitching hole as a function of resin temperature

속도에 따라 섬유직조에서의 함침이 완료되었을 때의 온도가 다르므로 여러 온도에서 함침 시간을 계산해 놓았다. Fig. 12와 비교하여 볼 때 섬유직조에서의 함침 시간은 수백에서 수천초 정도인데 비해 직경이 5mm이고 길이가 3cm인 스티칭 홀에서의 함침시간은 매우 짧은 것을 알 수 있었다.

실제 샌드위치 구조재에서의 수지 함침은 섬유직조

에서의 함침이 일어난 후 연속해서 스티칭 홀로의 흐름이 일어나므로 그 결과를 Fig. 14에 정리하여 보았다.

이 그림에서 알 수 있듯이 전체적인 함침완료 때가

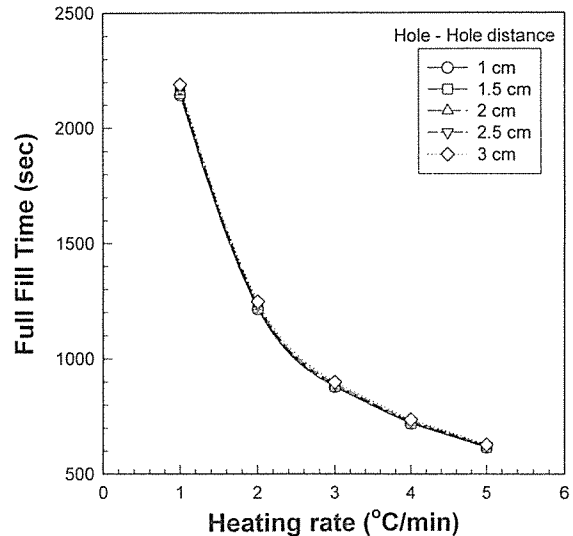


Fig. 14. Total filling time for the stitching sandwich structure

지의 시간은 폴리우레탄 폼에 있는 홀 사이의 거리에 따라 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 스티칭 스티칭 구조물의 제작공정에서 섬유직조를 채우는 시간이 전체 공정시간을 결정하는데 지배적이라는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 실험의 결과에 따르면 섬유직조의 기공율이 증가함에 따라 투과계수가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 섬유직조 기공율이 감소할 때 모세관압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험 중 섬유직조의 두께를 바꿈으로써 기공율을 변화시켰는데 기공율이 낮을수록 직조내의 기공의 크기가 감소하여 모세관압 효과가 크게 나타나는 것으로 해석할 수 있었다. 이와 같은 모세관압 효과는 RIP에서 수지함침과 기공 형성에 큰 영향을 주게 된다. 그러므로 기공율이 어느 정도 이상 크게 되면 투과계수가 증가해서 함침속도는 증가하나 모세관압이 작아지게 되어 기공이 형성되기 쉬워지게 되어 최종제품의 물성이 나빠지게 된다. 또 기공율이 어느

정도 이하로 작아지면 모세관압은 증가하나 투과계수가 너무 낮게 되어 수지의 함침이 나빠지게 된다. 그러므로 기공율을 조절함으로써 최적의 수지함침 조건을 얻을 수 있다. 투과계수와 기공율과의 관계로부터 수지함침의 특성을 나타내는 Kozeny 상수를 얻을 수 있었다. 본 실험의 결과 사용된 유리섬유직조와 에폭시 수지 계에서 Kozeny 상수는 5.74로 얻어졌다. 또한 샌드위치 구조체의 RIP 제조공정에서 섬유 기공율이 0.4정도이므로 실제 RIP에서 유리섬유직조에 걸리는 모세관압이 5.8Kpa임을 예측할 수 있었다. 스티칭 홀에서의 수지유동실험에서 홀-홀 간격에 따른 수지의 유동속도를 얻어내어 샌드위치 구조물의 함침시간을 계산하는데 사용할 수 있었다. 샌드위치 구조체에서 수지의 함침시간은 섬유직조 3장을 사용했을 때, 오토클레이브의 제조공정에서 가장 많이 사용되는 2℃/min의 승온속도로 실온부터 실험에 사용된 에폭시 수지의 경화온도인 115℃까지 승온시킬 때 섬유직조의 함침시간은 약 20분 정도가 걸리는 것으로 예측할 수 있었고 이 승온속도 때의 스티칭 홀의 함침시간은 이에 비해서 무시될 수 있을 정도로 작은 것을 알 수 있었다. 이는 RIP를 이용해서 샌드위치 구조물을 제조할 때 섬유직조를 채우는 시간이 전체 공정시간을 결정하는데 지배적임을 의미한다.

참 고 문 헌

1. Ahn, K. J. & Seferis, T.C., "Prepreg Process Analysis," Polymer Composites, Vol.14, No.4, 1993, p.349.
2. Letlerman, L. E., "Resin Infusion Process and Apparatus," US Patent 4, 622, 091, 1986.
3. Shin, S. B., Ahn, and Seferis, J. C., "Flow and Void Characterization of Stitched Structure Composite Using Resin Flim Infusion Process (RFIP)," Polymer Composites, Vol.15, 1994, p.453.
4. Shim Sang-Beom, Ph. D. Dissertation, University of Washington, Seattle, 1995.
5. Williams, J. G., Morris, C. E. M., and Ennis, B. C., "Liquid Flow Through Aligned Fiber Beds," Polym. Eng. Sci., Vol.14, 1974, p.413.
6. Ahn, K. J., Seferis, J. C., and Berg, J. C., "Simultaneous Measurement of Permeability and Capillary Pressure of Thermosetting Matrices in Woven Fabric Reinforcements," Polymer Composites, Vol.12, 1991, p.146.
7. Lee, G. W., Lee, M. H., Kim, S. W., and Lee, K. J., "Experimental and Numerical Studies on the Flow Characteristics in Resin Transfer Molding Process," Korea J. Rheology, Vol.7, 1995, p.139.
8. Scheidegger, A. E., The Physics of Flow Through Porous Media, 3rd ed., Ch.4, University of Toronto Press, Toronto, 1974.
9. Bear, J., Dynamics of Fluid in Porous Media, Ch.4, Elsevier, 1972.
10. Patel, N., & Lee, J. L., "Effect of Fiber Architecture on Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding," Polymer Composite, Vol.16, No.5, 1995, p.386.