

RFI 공정시 적정 수지필름 두께에 관한 연구

윤성현^{*,**} · 이정완^{*} · 김정수^{*} · 김위대^{**} · 엄문광^{*†}

A Study on the Proper Resin Film Thickness in RFI Process

S.H. Yoon^{*,**}, J.W. Lee^{*}, J.S. Kim^{*}, W.D. Kim^{**}, M.K. Um^{*†}

ABSTRACT: The RFI process can be applied to very thick structures without limiting the resin viscosity. When the proper thickness of the resin film cannot be set, the resin film creates either the non-impregnated section or the excessive resin contents and this leads to the deterioration of mechanical properties. Therefore, this study proposed a method for setting the resin film thickness in the RFI process. The fiber compaction behavior test was proposed by setting the proper resin film thickness and the properties of composites were evaluated through short beam shear strength test, compression test and porosity measurement to verify the proposed method. The evaluation of physical properties of composites was conducted and an appropriate level of resin film thickness was found based on the results of fiber compaction behavior test.

초 록: RFI 공정은 수지 점도에 제한이 없어 매우 두꺼운 구조물에도 적용이 가능하다. 수지필름 두께를 설정할 때 수지필름의 두께가 얇은 경우 미함침 구간이 발생하여 기계적 물성이 저하되고, 수지필름 두께가 두꺼운 경우 필요이상의 여분 수지가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 RFI 공정에서 수지필름 두께 설정을 위한 방법을 제시하였다. 적정 수지필름 두께를 설정하는 방법으로 섬유압착거동 시험을 제시하였고, 제시된 방법의 검증을 위해 숏빔전단강도시험, 압축시험, 기공률 측정을 통해 복합재 물성을 평가하였다. 복합재 물성 평가 결과, 섬유압착거동시험 결과를 바탕으로 적정 수준의 수지필름 두께를 찾을 수 있었다.

Key Words: RFI 공정(Resin Film Infusion process), OoA(Out of Autoclave), 수지필름 두께(Resin film thickness), 섬유압착거동(Fiber compaction behavior)

1. 서 론

최근 민간 항공기를 포함한 항공기 부품 기술 개발 방향은 연료 효율 증가와 부품 경량화로 요약된다. 부품 경량화를 위해 다양한 복합재 공정 중 경제성을 고려한 OoA(Out of Autoclave) 공정 기술이 연구되고 있다. OoA 공정 중 수지를 섬유에 직접 주입하는 RI(Resin Infusion) 공정은 고품질의 복합재 성형이 가능하나 수지 점도에 따라 제작 가능한 두께가 제한적이다. 하지만 RFI(Resin Film Infusion) 공

정은 수지필름을 섬유매트 사이에 적층하여 사용하므로 짧은 수지 주입거리로 두께의 제한이 없다. RFI 공정은 필름의 적절한 끈적임(tack)을 이용하여 섬유와 몰드면에 손쉽게 부착이 가능하여 작업이 매우 쉽고 능률적이다. 또한 RI 공정과 같이 버려지는 수지도 없을 뿐더러 수지를 원활하게 이송해줄 부자재의 비용이 줄어들며, 수지를 직접 다루지 않으므로 작업장의 환경을 매우 청결하게 유지할 수 있다[1-4].

RFI 공정에서는 RI 공정과는 달리 추가적으로 공급되는

Received 1 December 2017, received in revised form 9 February 2018, accepted 11 February 2018

*Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

*†Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea, Corresponding author (E-mail: umk1693@kims.re.kr)

**Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Pusan, Korea

수지가 없으므로 사용되는 수지필름의 두께 설정이 매우 중요하다. 수지필름이 필요량에 비해 두꺼울 경우 섬유체 적률이 감소하고 그에 따른 기계적 물성 저하를 초래하게 된다. 반면 수지필름이 필요량보다 부족할 경우 섬유 층 사이에서 미함침 되는 구간이 발생한다. 미함침과 같은 결함은 계면결합력을 떨어뜨려 전단, 굴곡, 압축 물성을 저하시키고 나아가 피로, 흡습 물성까지도 저하시킬 수 있다[5-7].

따라서 본 연구에서는 RFI 공정시 적정 수지필름 두께를 설정하기 위한 방법으로 섬유압착거동 시험을 제시하였다. 이에 대한 검증으로 수지필름 두께를 조절하여 다양한 복합재를 제작하였고, 제작된 패널에 대해 숏빔전단강도 시험, 압축시험, 기공률 측정을 통해 수지필름 두께별 물성을 비교하였다.

2. 실험

2.1 재료

강화재료로는 항공용 섬유로 쓰이는 T700 Grade의 탄소 섬유를 이용하여 직조한 satin 패턴 형태를 가진 Hexcel社의 섬유와 T650 Grade의 탄소 섬유를 이용하여 직조한 plain 패턴 형태를 가진 Cytec社의 섬유를 사용하였다. 기지재료로는 항공용 수지로 쓰이고 있는 Cytec社의 PRISM EP-2400을 사용하였다.

2.2 섬유압착거동시험

수지필름의 두께 설정을 위해 섬유압착거동시험을 진행했다. 섬유압착거동시험에서는 적층된 섬유를 압착시킬 경우 압력에 의해 그 두께가 줄어들고, 이에 따라 섬유 매트 사이의 공극이 줄어들어 섬유체적률이 증가하게 된다. dry mat 상태의 압착 거동과 실제 실험에서 사용되는 수지필름을 교차적층한 preform의 압착 거동의 차이가 있을 수 있으나 온도를 올려 수지필름 함침 시 수지필름의 강성이 매우 떨어지게 되고, 섬유강성과 수지필름의 강성을 비교하게 되면 '섬유 강성 >> 수지 강성'이므로 대부분의 힘을 섬유가 받을 것이라고 생각했다. 그렇기 때문에 1 atm에서 함침 후의 preform의 두께는 dry mat 상태의 섬유압착거동과 큰 차이가 없을 것이라고 가정하고 실험하였다. 실험에서 사용된 보강재는 100 × 100 mm² 크기로 재단 후 전자식 지지저울을 사용하여 면중량을 측정하였다. 그 후 일정한 방향으로 50장씩 적층하여 만능재료시험기에서 각 세트별로 두께 변화가 거의 없을 때까지 0~1 atm에 해당하는 반복하중으로 1set 당 10회 수행하였다. 하나의 직물당 총 3set에 걸쳐 측정되었으며, 적용된 최대 하중은 실제 시편 성형시에 적용되는 진공압력(101.325 kPa = 1 atm)에 준한 하중이다. 측정된 결과는 ASTM D2731에 근거하여 섬유체적률로 환산하였다. 그 결과 satin 형태의 경우 1 atm에서 54.8%, plain 형태의 경우 53.1%로 환산되었으며 Fig. 1에 나타내었다.

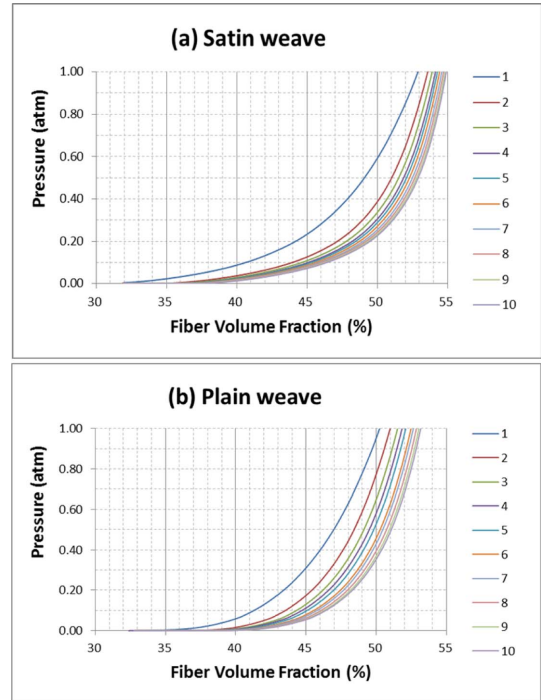


Fig. 1. Fiber compaction behavior of; (a) satin weave and (b) plain weave

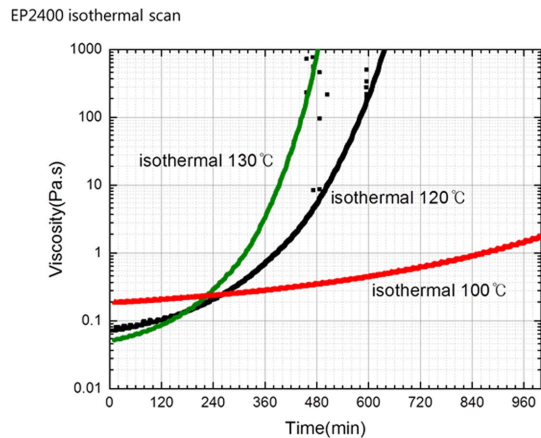


Fig. 2. Viscosity changes over time for the different isothermal conditions: 80°C, 120°C, and 130°C

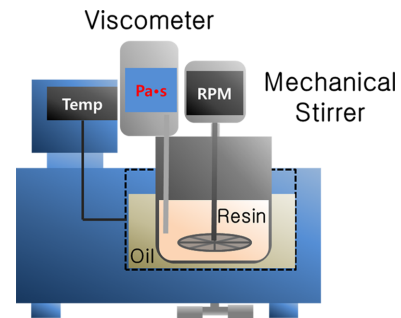


Fig. 3. Schematic diagram of B-stage curing device

2.3 수지필름 제조

수지필름 제조를 위해 수지를 반경화 상태인 B-stage로 만들어 필름형태로 제작하였다. 적절한 B-stage 진행 온도를 찾기 위해 세 가지 온도에서 isothermal scan 방식으로 점도를 측정하였고 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 수지 B-stage를 위한 적정 온도는 안정적인 겔타임과 적절한 점도 상승을 보이는 120°C로 결정하였으며, 항온 오일 수조에서 경화를 진행하였다. Fig. 3는 B-stage 경화 장치 개략도이다. 순환식 오일 수조에서 30분 간격으로 실시간 점도를 측정하고, 샘플을 채취하여 작업이 가능한 수준의 테키(tacky)를 확인하였다. 그 결과 5시간 15분 경과 후 120°C에서 0.63 Pa·s의 점도를 가진 수지를 상온으로 냉각시켰을 때 작업성이 가장 좋은 것으로 판단되었다. 앞선 조건으로 B-stage 수지를 필름 캐스팅하였다. 제조된 필름의 두께를 측정할 결과 장비의 두께 편차는 ±10 µm로 측정되었고, 두께 편차를 고려하여 500 µm 이상의 두께로 수지필름을 제작하였다.

2.4 패널 제작

수지필름 두께를 조절하여 RFI 공정 패널들을 만들었고, 건전한 복합재 물성의 비교를 위한 RI 공정 패널도 제작했다. Fig. 4에 시편 제작 공정에 대한 개략도를 나타내었다. RI, RFI 두 공정 모두 120°C 4시간, 180°C 2시간의 경화사이클을 적용하였다. 각 패널에 사용된 수지필름은 몰드면에 닿는 곳에 한 장 적층하고 나머지 수지필름은 섬유 사이에 고르게 분포시켰다. 솟빔전단강도 시험용 패널은 100 × 100 mm² 사이즈로 섬유 장수는 같게, 수지필름 두께를 다르게 하여 제작하였다. 패널의 조건은 섬유압착시험 상 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4 기압에 해당하는 섬유체적률을 목표로 제작하였다. 압축시험은 시험 치구의 최대 하중을 고려하여 복합재의 두께를 2 mm 이상 3 mm 미만으로 결정하였고, 200 × 200 mm² 사이즈로 섬유 장수는 다르게, 수지필름 두께는 같게 하여 제작하였다. 패널의 조건은 49, 52, 55, 58, 61% 섬유체적률을 목표로 제작하였다. 기공률 분석용 시편은 각각의 패널에서 획득하였다. 각 패널별 넘버링을 하

Table 1. Detailed panel information

Panel No.	Lay-up	Process	Film thick (µm)	Film Ply (n)	Aim V _f (%)	Result V _f (%)
S1	[0°] ₁₂	RFI	670	4	52.0	50.0
S2	[0°] ₁₂	RFI	610	4	53.3	53.0
S3	[0°] ₁₂	RFI	580	4	54.2	54.7
S4	[0°] ₁₂	RFI	560	4	54.8	55.3
S5	[0°] ₁₂	RFI	540	4	55.3	55.8
S6	[0°] ₁₂	RFI	530	4	56.0	56.0
S7	[0°] ₁₂	RI	-	-	54.8	54.8
S8	[0°] ₅	RFI	530	2	49.0	48.8
S9	[0°] ₅	RFI	480	2	52.0	51.8
S10	[0°] ₆	RFI	530	2	55.0	54.5
S11	[0°] ₇	RFI	530	2	58.0	56.2
S12	[0°] ₈	RFI	530	2	61.0	58.8
S13	[0°] ₅	RI	-	-	54.8	54.4
P1	[0°] ₂₀	RFI	620	4	50.4	50.1
P2	[0°] ₂₀	RFI	570	4	51.6	52.0
P3	[0°] ₂₀	RFI	550	4	52.4	53.0
P4	[0°] ₂₀	RFI	530	4	53.1	53.6
P5	[0°] ₂₀	RFI	520	4	53.7	54.5
P6	[0°] ₂₀	RFI	510	4	54.3	54.7
P7	[0°] ₂₀	RI	-	-	53.1	53.4
P8	[0°] ₉	RFI	530	2	49.0	49.4
P9	[0°] ₁₀	RFI	530	2	52.0	51.5
P10	[0°] ₁₂	RFI	530	2	55.0	55.1
P11	[0°] ₁₃	RFI	530	2	58.0	56.6
P12	[0°] ₁₅	RFI	530	2	61.0	59.1
P13	[0°] ₁₀	RI	-	-	53.1	53.4

였고, satin 패턴 복합재의 경우 S, plain 패턴 복합재의 경우 P를 패널 넘버의 앞 글자로 기입했다. 솟빔전단강도시험용 패널 중 RFI 공정 패널인 경우 1~6, RI 공정 패널인 경우 7의 숫자를 패널 넘버의 뒷글자로 기입했다. 압축시험용 패널 중 RFI 공정 패널인 경우 8~12, RI 공정 패널인 경우 13의 숫자를 패널 넘버의 뒷글자로 기입하였다. 제작된 패널들은 마이크로미터로 30회 두께 측정하여 섬유체적률로 환산하였다. 섬유체적률은 면중량과 섬유의 장수를 곱한 후 섬유의 밀도와 측정된 복합재의 두께를 나눈 후 100을 곱하여 환산한다. 적층 정보, 수지필름 두께, 수지필름 장수, 목표 섬유체적률, 실제 제작된 섬유체적률에 대한 패널 상세 정보는 Table 1에 나타내었다.

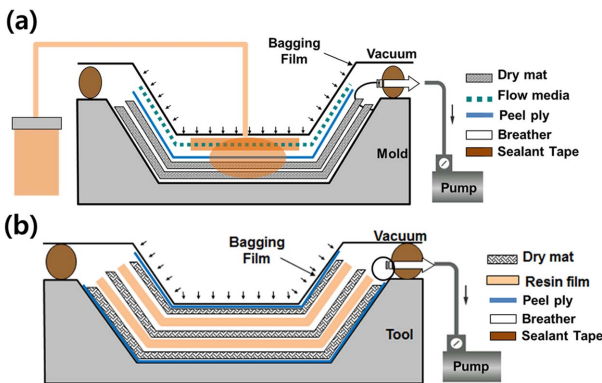


Fig. 4. Schematic diagram of; (a) Resin Infusion process and (b) Resin Film Infusion process

2.5 복합재 물성 시험

RFI 공정시 수지필름의 양에 따라 복합재에 미치는 영향을 판단하기 위해 솟빔전단강도시험, 압축시험, 기공률 분

석을 진행하였다. 계면의 결합력을 측정하기 위한 시험으로서 숏빔전단강도시험을 수행하였고, 규격은 ASTM D2344를 참고하였다. 시편의 개수는 패널당 5개씩, 사이즈는 폭 10 mm, 길이 30 mm로 가공하였다. 복합재가 압축하중을 받을 때 섬유 파단을 견디기 위해 기지재의 역할이 중요하다. 그러므로 기지재의 건전함을 시험하고자 압축시험을 수행하였고, 규격은 ASTM D6641을 참고하였다. 시편의 개수는 6개씩 사이즈는 폭 25 mm, 길이 140 mm로 가공하여 strain gage를 부착하였다. 숏빔전단강도시험과 압축시험의 시험속도는 동일하게 1 mm/min으로 진행하였다. 복합재 내부의 미합침과 기공을 관찰하기 위하여 기공률 분석을 수행하였고, 규격은 ASTM E2015와 CMH-17의 6.6.7절을 참고하였다. 시편은 모든 패널에서 폭 20 mm, 길이 20 mm로 가공하여 마운팅 후 폴리싱하였다. 단면은 광학 현미경에서 100배율로 측정하였고, CMEIAS-IT 프로그램을 이용하여 기공률을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

섬유압착거동시험 상에서 1기압에 해당하는 섬유체적률은 $V_f@1\text{atm}$ 이라 나타내었으며, 빨간 점선으로 표시하였

다. 이는 ‘3. 결과 및 고찰’에 나오는 모든 그래프에 동일하게 표시하였다. 또한, ‘3. 결과 및 고찰’에 나오는 모든 섬유체적률 결과는 실제 제작된 패널로부터 복합재의 두께를 측정하여 섬유체적률로 환산한 데이터이다.

3.1 숏빔전단강도시험 결과

Fig. 5(a),(b)는 satin 패턴의 복합재와 plain 패턴의 복합재의 숏빔전단강도시험 결과 그래프이다. 전단 시험 결과 두 가지 패턴의 복합재 모두 섬유체적률이 $V_f@1\text{atm}$ 미만일 시 동일한 수준의 전단강도가 측정되었다. $V_f@1\text{atm}$ 이상일 시 섬유체적률이 올라갈수록 전단강도가 하락하는 것을 확인할 수 있었다. $V_f@1\text{atm}$ 미만의 섬유체적률에서는 섬유에 충분한 수지가 공급되어 동일 수준의 계면결합력을 지녔으나, $V_f@1\text{atm}$ 이상의 섬유체적률에서는 수지공급의 부족으로 결합이 생겨 계면결합력이 하락하는 것으로 판단된다.

3.2 압축시험 결과

Fig. 6~8은 압축시험 결과이다. Fig. 6(a),(b)는 satin 패턴의 복합재와 plain 패턴의 복합재의 압축 강성 결과 그래프이다. 압축 강성은 0.1~0.3(%) 변형률에서 계산되었다. 압축

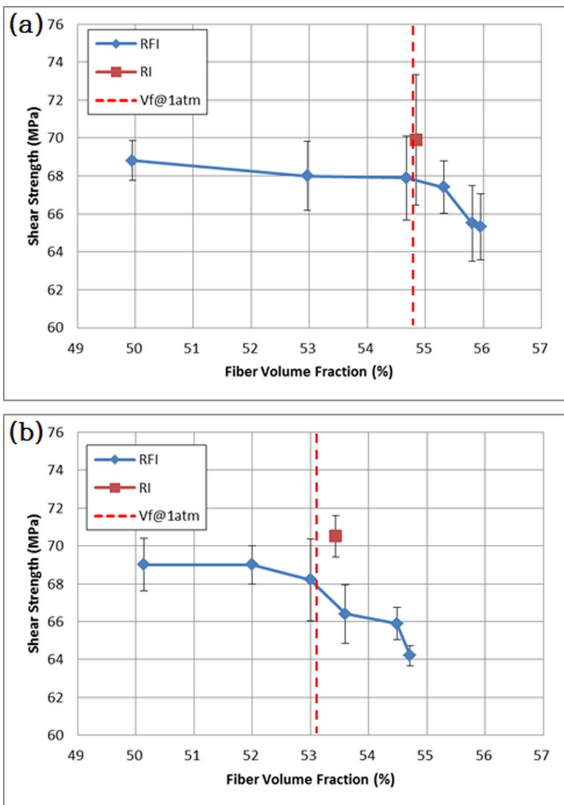


Fig. 5. Short beam shear strength depending on fiber volume fraction; (a) satin weave composites, and (b) plain weave composites

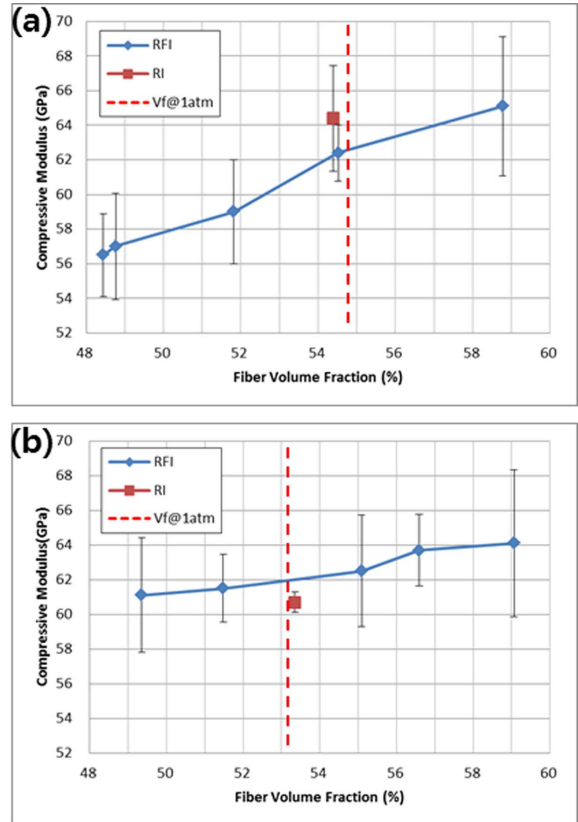


Fig. 6. Compressive modulus depending on fiber volume fraction of; (a) satin weave composites, (b) plain weave composites

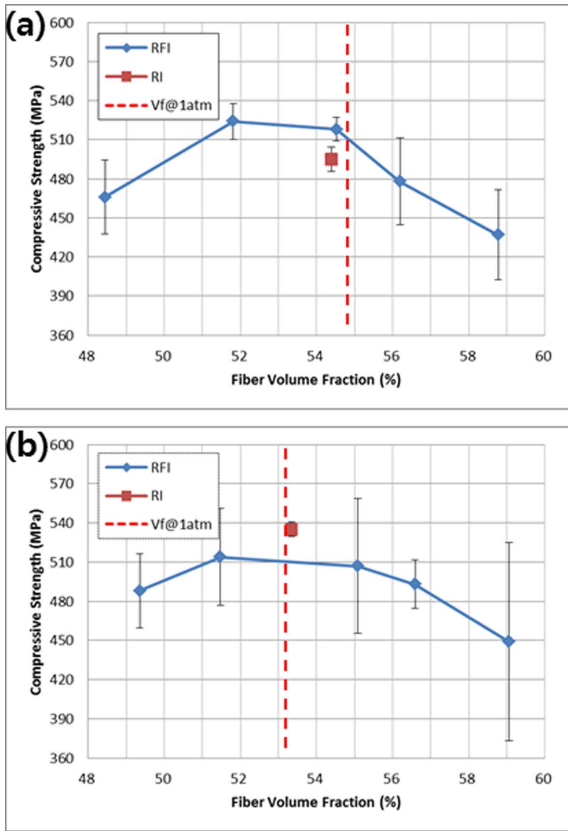


Fig. 7. Compressive strength depending on fiber volume fraction of; (a) satin weave composites, (b) plain weave composites

강성은 압축시험의 파단이 일어나지 않는 초기 구간에서 구해지기 때문에 섬유체적률이 증가할수록 강성 또한 증가하는 추세를 보였다.

Fig. 7(a),(b)는 satin 패턴의 복합재와 plain 패턴의 복합재의 압축강도 결과 그래프이다. 두 가지 패턴의 복합재 모두 $V_f@1atm$ 를 기준으로 섬유체적률이 증가할수록 압축강도는 저하되는 것으로 나타났다. 이는 복합재 내 기공이 생겨 섬유간 응력전달 역할을 하는 수지가 부족하여 압축강도가 하락하는 것으로 판단된다.

또한 $V_f@1atm$ 를 기준으로 섬유체적률이 감소할수록 복합재의 압축강도가 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이는 기공과 같은 복합재 내부 결함이 아닌 수지체적을 증가에 따른 섬유체적률의 감소로 인해 압축강도가 낮아진 것으로 판단된다. Fig. 8(a),(b)는 섬유체적률 감소에 따른 강도가 저하되는 영향을 무시하고자, 압축강도(S) 결과에 해당하는 섬유체적률(V_f)을 나누었다. 계산되어진 값은 그 값 중 최대값(S/V_f)으로 나눈 후, 그 값에 100을 곱하여 Percentage 값으로 비교한 그래프이다. Fig. 7(a)의 섬유체적률 48.5%의 압축강도 466 MPa은 RI 복합재의 압축강도 495 MPa와 비교하였을 때, 섬유체적률이 감소함으로 인하여 압축강도가 낮게 측정되었지만 Fig. 8(a)의 그래프를 보면 오히려 5% 이

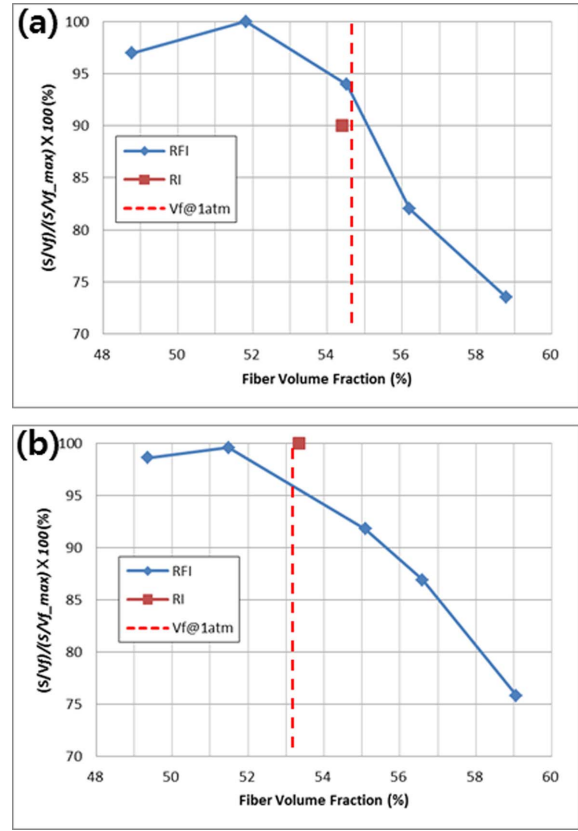


Fig. 8. Normalized compressive strength versus fiber volume fraction results of; (a) satin weave composites, (b) plain weave composites

상 압축에 대한 저항이 높음을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 7(b)의 $V_f@1atm$ 미만의 섬유체적률을 가진 압축강도의 경우 RI 복합재의 압축강도와 비교하였을 때 하락하는 경향을 보이지만, 이 또한 Fig. 8(b)의 그래프를 참고하게 되면 동일 수준인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8(a),(b)에서 두 가지 패턴의 복합재 모두 1기압 이상의 섬유체적률을 목표로 수지필름 두께를 설정하여 복합재를 제작하였을 시 압축에 대한 저항성이 급격히 떨어졌고, 약 59% 섬유체적률에 도달하였을 때 약 25% 압축에 대한 저항성이 하락하였다.

3.3 기공률 분석 결과

Fig. 9는 기공률 분석 결과이다. (a)는 satin 패턴의 복합재에서 숯빔전단강도시험용 패널에서 측정한 기공률과 압축시험용 패널에서 측정한 기공률을 나타내었고, (b)는 plain 패턴의 복합재에서 숯빔전단강도시험용 패널에서 측정한 기공률과 압축시험용 패널에서 측정한 기공률을 나타내었다. 그 결과 $V_f@1atm$ 미만의 섬유체적률에서는 기공률이 약 0.3% 미만으로 유지되는 것을 확인할 수 있었으나, $V_f@1atm$ 이상의 섬유체적률에서는 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있었다. $V_f@1atm$ 를 기준으로 생성되는 기공의 관

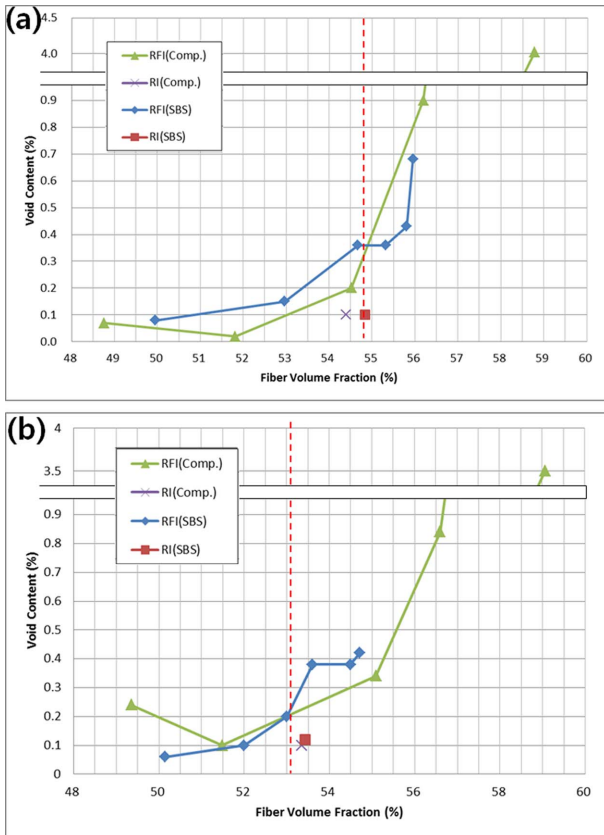


Fig. 9. Void content analysis results of; (a) satin weave composites, and (b) plain weave composites

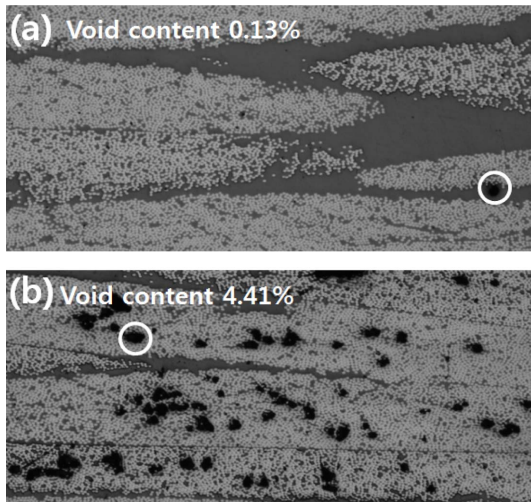


Fig. 10. A cross-sectional photograph taken with an optical microscope of; (a) matrix void (S8), and (b) fiber void (S12)

찰 형태도 달랐다. $V_f@1\text{ atm}$ 미만의 섬유체적률을 가지는 복합재에서는 Fig. 10(a)와 같이 기지재에서의 기공이 관찰되었고, $V_f@1\text{ atm}$ 이상의 섬유체적률을 가지는 복합재에서는 Fig. 10(b)에 보이는 바와 같이 전체적으로 섬유다발에

기공이 형성되어 있다.

이는 부족한 수지필름의 양으로 인해 섬유에 충분한 수지가 공급되지 못했기 때문이다.

3.4 복합재 물성 평가 결과

Fig. 11(a),(b)는 satin 패턴의 복합재에서 기공률 측정 결과와 압축시험 그래프 중 Fig. 8(a), 숏빔전단시험 결과를 비교한 그래프이며, Fig. 12(a),(b)는 plain 패턴의 복합재에서 기공률 측정 결과와 압축시험 그래프 중 Fig. 8(b), 숏빔전단시험 결과를 비교한 그래프이다. 두 가지 패턴의 복합재 모두 $V_f@1\text{ atm}$ 이상의 섬유체적률을 가질 시 물성이 하락하고, $V_f@1\text{ atm}$ 미만의 섬유체적률을 가질 시 동일 수준의 물성을 유지하는 것을 확인 할 수 있다. 숏빔전단시험은 계면결합력을 비교하기 위한 시험으로서 $V_f@1\text{ atm}$ 미만의 섬유체적률에서 동일한 수준의 계면결합력을 가지고 있고, $V_f@1\text{ atm}$ 이상의 섬유체적률을 가질 시 기공률 증가에 의해 계면의 결합력이 낮아진 것으로 판단된다. 압축시험 결과 $V_f@1\text{ atm}$ 미만의 섬유체적률에서 충분한 수지 공급으로 압축과단까지 기지재가 균일한 응력전달과 좌굴을 억제하고 있는것으로 보여지나, $V_f@1\text{ atm}$ 이상의 섬유체적률

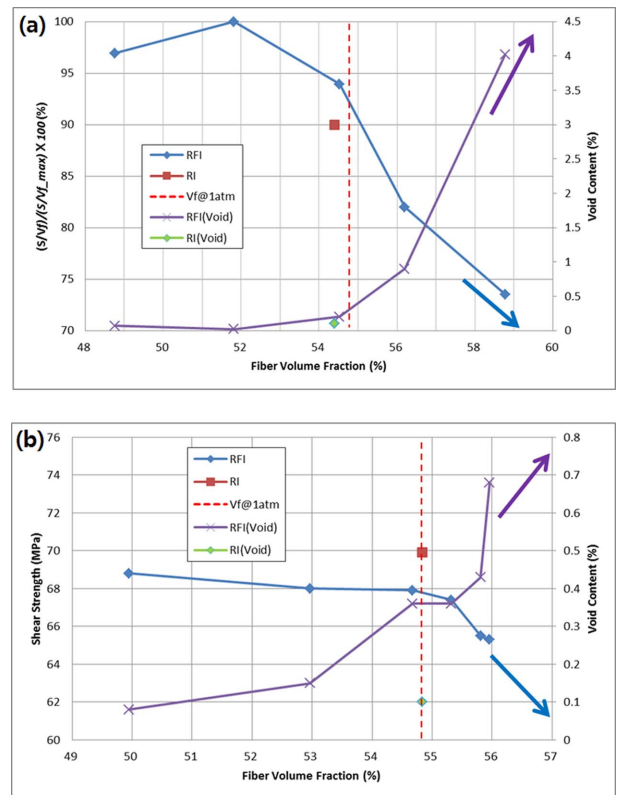


Fig. 11. (a) Normalized compressive strength versus fiber volume fraction, and void content depending on fiber volume fraction (b) Short beam shear strength and void content depending on fiber volume fraction (satin weave composites)

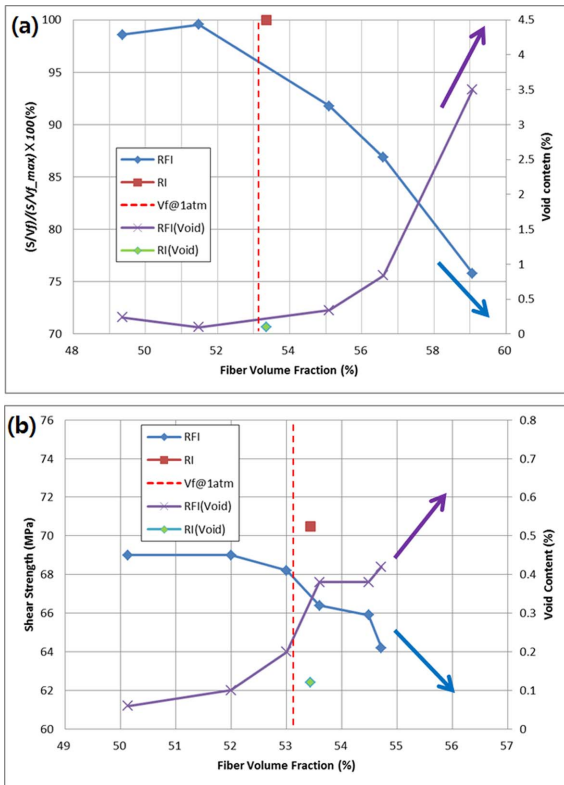


Fig. 12. (a) Normalized compressive strength versus fiber volume fraction, and void content depending on fiber volume fraction (b) Short beam shear strength and void content depending on fiber volume fraction (plain weave composites)

에서는 단면 전체에 미합침이 관찰되며 이는 압축과단까지 섬유를 지탱하는 기지재의 역할 능력이 점점 하락한 것으로 판단된다. RFI 공정으로 제작한 $V_f@1 \text{ atm}$ 에 해당하는 내삽한 물성과 RI 공정으로 제작한 패넌의 전단강도 및 압축강도를 비교하였을 때 약 5% 이내의 강도 차이를 보였으며, 기공률을 비교하였을 때 0.3% 미만으로 거의 동등한 물성을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 섬유압착거동시험을 결과를 토대로 섬유체적률을 설정하였고 수지필름 두께를 조절하여 복합재 물성 평가를 위한 패넌을 제작하였다. 물성 평가 결과, 섬유

압착거동시험 상 1기압 상태 이상의 섬유체적률 목표로 제작하였던 패넌은 미합침과 같은 결함과 함께 기계적인 물성이 하락하였으며, 1기압 상태 미만의 섬유체적률을 목표로 제작하였던 패넌들은 동일 수준의 건전한 복합재 물성을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 RFI 공정시 적정 수지필름 두께는 섬유압착시험 결과를 토대로 주어진 압력에서 환산된 섬유체적률 이하로 제조하는 것이 바람직하며 수지량 최적화를 위해 0.7 atm~0.9 atm에 해당되는 섬유체적률로 수지필름 두께를 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 해양융합소재산업화사업(No.10053841)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

REFERENCE

- Kim, G.S., and Park, G.S., "The Influence of Water Environment on the Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Reinforced Composite Materials," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 17, No. 2, 1993, pp. 52-59.
- Chung, S., and Hwang, B.H., "A Microstructural Study of the Wear Behavior of SiC_p/Al Composites," *Wear*, Vol. 27, 1994, pp. 307-314.
- Ashby, M., Shercliff, H., and Cebon, D., *Material Engineering, Science, Processing and Design*, University of Cambridge, UK, 2007.
- Antonucci, V., Giordano, M., Nicolais, L., Calabro, A., Cutolo, A., and Inserra, S., "Resin Flow Monitoring in Resin Film Infusion Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143, 2003, pp. 687-692.
- Herzog, B.J., *Characterization of the Void Content of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Materials Fabricated by the Composites Pressure Resin Infusion System (COMPRIS)*, MS, 2004.
- Liu, L., Zhang, B.M., Wang, D.F., and Wu, Z.J., "Effects of Cure Cycles on Void Content and Mechanical Properties of Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 73, 2006, pp. 303-309.
- Dhakal, H.N., Zhang, Z.Y., and Richardson, M.O.W., "Effect of Water Absorption on the Mechanical Properties of Hemp Fibre Reinforced Unsaturated Polyester Composites," Vol. 67, Issues 7-8, 2007, pp. 1674-1683.