

액상성형공정별 물리적/기계적 특성 비교 평가

박동철* · 김태곤* · 김승혁* · 신도훈* · 김현우** · 한중원***†

Evaluation of Physical and Mechanical Properties based on Liquid Composite Molding

Dong-Cheol Park*, Tai-Gon Kim*, Seung-Hyeok Kim*, Do-Hoon Shin*,
Hyeon-Woo Kim**, Joong-won Han***†

ABSTRACT: Autoclave process has been remaining as one of the most robust and stable process in fabricating structural composite part of aerospace industry. It has lots of advantages, however exhibits some disadvantages or limitations in capital investment and operation. Recently, there have been various Out-of-Autoclave process being researched and developed to overcome those limitations. In this study, laminate specimens were fabricated using LCM (Liquid Composite Molding) process, regarded as one of potential OoA process. DB (Double bagging), CAPRI (Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion), VAP (Vacuum Assisted Process) and Autoclave process were used for laminate specimens. Void content, Thickness, Tg (Glass Transition Temperature), ILSS (Interlaminar Shear Strength) and Flexural strength properties were evaluated for comparison. It is verified that Autoclave based specimen has uniform thickness distribution, the lowest void content and outstanding mechanical properties. And, CAPRI based specimen exhibits relatively good physical and mechanical properties over DB and VAP based specimen and comparable mechanical properties with autoclave based specimen.

초 록: 오토클레이브 (Autoclave) 성형 공정은 항공산업분야의 복합재 부품 제작에 있어서 매우 안정적이고 중요한 제조방법으로서 자리매김 해왔었지만 오토클레이브가 가진 많은 장점과 함께 단점 또는 제약 사항들을 보여 주고 있다. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위하여 다양한 탈 오토클레이브 (OoA, Out-of-Autoclave) 공정들이 연구 개발되고 있는데, 본 연구에서는 탈 오토클레이브 공정 중 하나로서 많은 관심을 받고 있는 액상성형공정 (Liquid Composite Molding)을 사용하여 시편들을 제작하고 이를 오토클레이브 공정으로 제작된 시편과 실험적으로 비교 평가하였다. 액상성형공정 중 DB (Double Bagging), CAPRI (Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion) 및 VAP (Vacuum Assisted Process) 공정을 사용하여 시편 제작을 수행하고 내부 기공 함유량, 두께, 유리전이온도, 층간전단강도 및 굽힘강도 시험 평가를 통하여 각 제작 공정에 따른 차이를 확인할 수 있었다. 전체적으로 오토클레이브 성형 시편이 우수한 두께 균일도, 낮은 기공 함유량 및 양호한 기계적 강도 특성을 보였으며, 액상성형공정 중에서는 CAPRI 성형 시편이 DB 및 VAP 성형 시편에 비하여 상대적으로 우수한 특성을 가짐을 확인하였다.

Key Words: 탈 오토클레이브(OoA), 액상성형(Liquid Composite Molding), VaRTM, CAPRI, VAP

Received 15 October 2018, received in revised form 25 November 2018, accepted 4 December 2018

*Tech Center, Korean Air

**Songwol Technologies

***†Songwol Technologies, Corresponding author (E-mail: jwhan@songwoltech.com)

1. 서 론

복합재료 소재와 적용 장비 기술의 발전은 항공기 기체 구조에 있어서 대형화 및 일체화 된 복합재 부품 적용을 가능하게 해주었으며 기체구조물에서 복합재가 차지하는 비중을 획기적으로 높여주고 있다. 이에 따라 항공기용 복합재 구조부품의 제작공정은 점점 더 다양해지고 복잡해지고 있다[1-3].

전통적으로 항공산업에서의 복합재 부품은 프리프레그 (Prepreg) 자재 한점한점을 몰드 위에 적층시킨 후 진공백을 적용하고 오토클레이브라 불리는 가압오븐에서 경화를 시킴으로써 제작한다. 0.3~1 MPa에 이르는 높은 오토클레이브 압력을 통해 내부 기공과 같은 결함들을 제어함으로써 탁월한 품질의 부품 제작을 가능하게 한다[4]. 하지만 오토클레이브를 이용한 경화 공정은 이런 장점에도 불구하고 높은 초기 자본 투자 및 운영비용, 낮은 생산성과 구조적 크기 및 형상의 제약과 함께 높은 에너지 사용이 수반되는 등의 단점을 가지고 있다. 최근에는 오토클레이브를 사용하지 않는 다양한 형태의 탈 오토클레이브 공정(OoA, Out-of-Autoclave)을 이용한 복합재 부품 제작 기술들이 개발되고 일부 적용되고 있다[5-7].

탈 오토클레이브 공정의 하나인 액상성형공정(LCM, Liquid Composite Molding)은 수지가 미리 함침된 상태로 사용되는 프리프레그 자재와 달리 Dry Preform 보강재를 부품의 형상에 맞게 별도 제작한 뒤 수지(Matrix)를 주입하여 오븐

또는 자체 가열 몰드를 이용하여 경화/제작하는 공정이다. 항공기 부품 제작을 위해 사용되는 액상성형공정은 크게 적용 압력의 형태에 따라 RTM (Resin Transfer Molding)과 VaRTM (Vacuum Assisted RTM)의 두 가지 형태로 구분할 수 있는데 Table 1과 같다.

RTM 공정은 상하형 몰드 내에 Dry Preform을 위치시킨 뒤 낮은 점도의 액상 수지를 가압/주입하여 성형하는데 최종 경화부품에서 결함을 줄이고 우수한 표면 상태를 얻을 수 있으며 공정 자동화가 용이하고 대량생산에 적합하다는 장점이 있다. 반면에 상하 폐쇄형 몰드가 사용되고 높은 압력(0.3~1 MPa)이 적용됨에 따라 제작 비용이 증가되는 원인이 되며 이는 대형 부품에 적용하는데 걸림돌로 작용한다. 따라서, 항공기용 대형 일체화 구조물에는 VaRTM 공정 위주로 다양하게 연구개발이 이루어지고 있다[9,10].

VaRTM 공정은 상대적으로 낮은 0.1 MPa 이하의 압력을 사용하여 진공백 외부 대기 압력과 내부 압력 차이를 이용하여 수지를 주입하는데 주입이 완료된 후 오븐에서 경화된다. VaRTM 공정에서는 두 가지 형태의 압력을 고려해야 하는데 먼저 수지 주입구(Inlet)와 배출구(Outlet)간에 발생하는 압력구배이다. 주입구에는 0.1 MPa의 압력이 배출구에는 0.0 MPa 압력이 적용됨에 따라 발생하는 차압이 구동력이 되어 수지 유동이 이루어지고 최종적으로 배출구에 다다르게 한다. 이는 Darcy 법칙으로 알려진 아래 식 (1)에 따라 압력 차이가 클수록, 프리폼 소재 투과도가 높을수록 유동 속도가 증가한다.

$$v = -\frac{K \cdot dp}{\mu \cdot dx} \quad (1)$$

K 는 투과도(permeability, m^2), μ 는 동점도(dynamic viscosity, Pa·s), dp 는 압력구배 그리고 dx 는 이동거리를 나타낸다.

두번째는 진공백 내부와 외부 간에 발생하는 압력차이로서 이는 진공백 내부에 있는 복합재 부품에 압착 압력(Compacting Pressure)을 가해준다. 이론적으로는 진공백 내부 압력은 0 MPa로서 외부 대기압 0.1 MPa과의 차이만큼 압력이 진공백을 통해서 적용되어야 하지만 실제로는 0.1 MPa의 압력으로 주입된 수지의 영향으로 인해 주입구가 닫혀지기 전까지는 압력 차이가 거의 발생하지 않는다. 따라서 수지 주입이 이루어지는 동안은 추가적인 압착 압력은 0이라고 볼 수 있다. 이 때문에 높은 압력을 적용하는 RTM 공정에 비해 VaRTM 공정을 통해서서는 섬유체적률을 높이고 내부 기공 함유량을 낮추는데 제한이 있다[11]. 하지만 상대적으로 낮은 압력이 적용되므로 하형 몰드 만을 금속재로 사용하고 진공백 또는 멤브레인 등을 상형으로 사용하여 성형이 가능하므로 RTM 또는 오토클레이브 성형에서 구현이 어려운 형상 및 크기의 부품 제작이 가능하다는 장점을 가질 수 있다.

흔히 SCRIMP (Seeman Composites Resin Infusion Molding

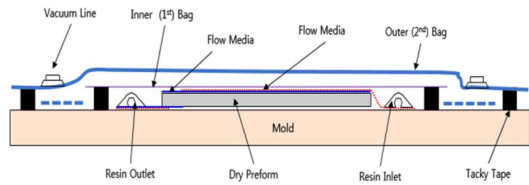


Fig. 1. A400M Cargo Door Fabrication using VAP Process [8]

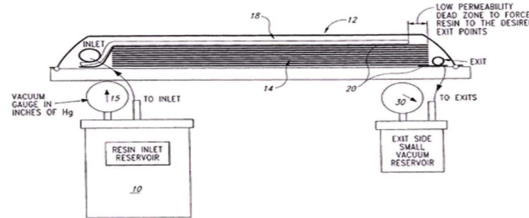
Table 1. Liquid composite molding processes by category

Vacuum based	Pressure based
VaRTM	RTM
SCRIMP	SQRTM
CAPRI	HPRTM
VAP	RTI
MVI	

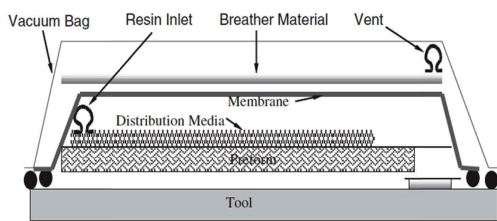
*SQRTM (Same Qualified RTM), HPRTM (High Pressure RTM), RTI(Resin Transfer Infusion), MVI(Modified Vacuum Infusion)



(a) Double Bagging



(b) CAPRI



(c) VAP

Fig. 2. Schematics of (a) Double Bagging, (b) CAPRI [14] and (c) VAP [13]

Process) 공정으로 대표되는 전통적인 VaRTM 공정은 소형 선박 구조물과 같은 일반 산업 분야의 다양한 구조물 제작에 사용되고 있다. 하지만 이 공정의 경우 항공산업에서 요구되는 높은 수준의 품질을 만족하기 어렵기 때문에 이중진공백을 적용하여 품질을 높이는 DB (Double Bagging), 공기 투과성 멤브레인을 적용하는 VAP (Vacuum Assisted Process), 수지 주입압력과 대기압력 차이를 조절/적용하는 CAPRI (Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion) 공정 등과 같은 다양한 공정으로 발전하고 있으며 그 개략적인 개념은 Fig. 2에 표현하였다[12-16].

본 연구에서는 DB, CAPRI, VAP 및 오토클레이브 공정을 이용하여 시편을 각각 제작하고 기공 함유량, 두께 및 유리전이온도와 같은 기초 물성과 층간전단강도와 굽힘강도와 같은 기계적 특성을 비교 평가하였다.

2. 실험

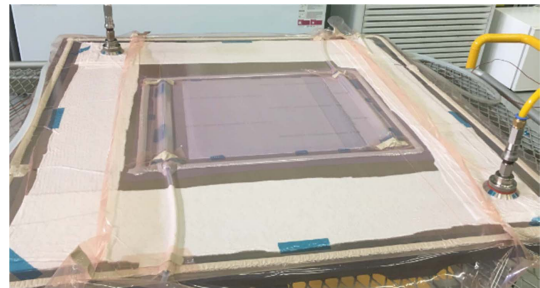
2.1 재료 및 시편 제작

본 연구에서 총 4개의 라미네이트 패널 시편을 제작하였는데 3개의 시편은 액상성형공정으로 제작하였으며 나머지 1개의 시편은 프리프레그 자재를 사용하여 오토클레이브 성형공정으로 제작하였다. 전체적인 시편 구성은 Table 2와 같다.

Dry Preform 자재 및 Prepreg 자재 모두 동일한 2×2 능직 (Twill) 형태의 탄소섬유가 사용되었다. 라미네이트 패널 시편은 총 7 플라이로서 ($0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ$)의 적층 순서를 가지고 350×350 mm의 크기로 제작하였다. #1~#3 시편

Table 2. Summary of Specimens

No.	Process	Material	Manufacturer
#1	DB	Dry Preform (TX1100) / Resin (EP2400)	Solvay-Cytec
#2	CAPRI		
#3	VAP		
#4	Autoclave	Prepreg (HTA40 6K / M21)	Hexcel



(a) Double Bagging



(b) VAP

Fig. 3. Bagging Systems for Specimens (a) #1 Specimen – Double Bagging (b) #3 Specimen – VAP

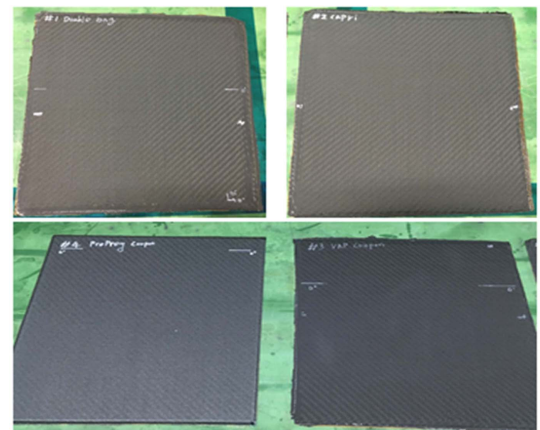


Fig. 4. Cured Laminate Specimens (#1~#4)

에는 모두 같은 종류의 수지(EP2400, Solvay사)를 사용하여 DB, CAPRI 및 VAP 공정을 각각 적용하여 작업하였다. 동일한 경화공정(100°C에서 수지 주입/180°C에서 2시간 경화)을 사용하였으며 프리프레그(HTA40 6K/M21, Hexcel사)를 사용하는 #4 시편의 경우 제작사 추천 표준 사이클(180°C에서 2시간 경화, 0.7 MPa 압력 적용)을 적용하였다.

추가적으로 VAP 공정 시편(#3)에는 내부 공기는 통과되지만 수지는 배출되지 못하는 투과성 멤브레인(C2003, Trans Textiles GmbH)을 사용하여 내부 1차 진공백을 구성하였다.

2.2 평가 방법

제작된 4개의 라미네이트 패널 시편은 두께 측정 후 비파괴 검사 및 화학분석법을 통하여 기공 함유량(Void Contents)을 평가하였다[17]. 이어서 패널에서 해당 시험에 적합한 크기의 시편을 절단 채취하여 DMA 장비를 사용한 유리전이온도(Tg, Glass Transition Temperature)를 측정하였으며 추가적으로 수지 지배적 기계적 특성인 층간 전단강도(ILSS, Interlaminar Shear Strength) 및 굽힘 강도(Flexure Strength) 시험을 수행하였다[18,19].

기공 함유량 평가는 다음과 같이 하였다.

$$V_o = 100 - \left[W_f \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} + (100 - W_f) \right] \cdot \frac{\rho_c}{\rho_r} \quad (2)$$

V_o 는 기공 함유량, W_f 는 섬유 체적률, ρ_c 는 시편의 밀도, ρ_f 는 섬유 밀도 그리고 ρ_r 는 수지 밀도를 나타낸다.

층간 전단강도 및 굽힘강도를 평가하는 식은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{3PR}{4bh} \quad (3)$$

τ 는 층간 전단 강도 (ILSS), P 는 압력, b 는 시편의 너비 (mm), 그리고 d 는 시편의 두께를 나타낸다.

$$f_F = \frac{1.5PS}{Wt^2} \quad (4)$$

f_F 는 굽힘강도(Flexural Strength), P 는 하중, S 는 지지대 간 거리, W 는 시편 너비 그리고 t 는 시편의 두께를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기공 함유량

먼저 4개의 시편 패널에 대하여 비파괴 검사를 통해 내부 기공 함유량을 평가하였다. C-Scan 장비(Tecnomat, Pulse Echo Phased Array)를 사용하여 5 MHz 및 1 MHz로 측정 시 감쇄되는 dB 값을 기준으로 평가하였는데 4개의 시편 모두 감쇠량이 없는 양호한 결과를 나타내었다.

이어서 EN2564에 따라 기공함유량을 평가하였는데 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 프리프레그를 사용하여 제작된 오

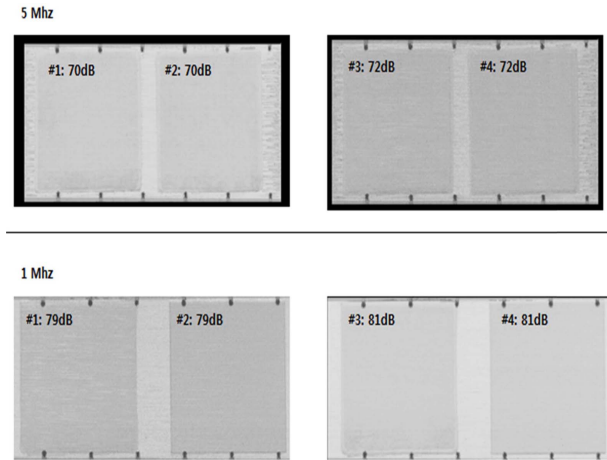


Fig. 5. NDI Result

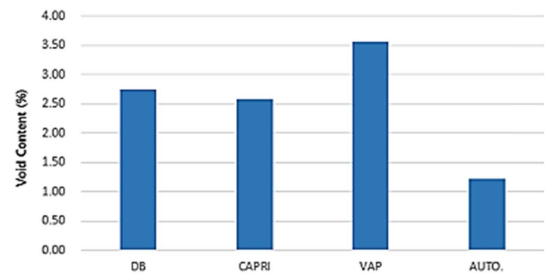


Fig. 6. Void Content Result

토클레이브 성형 시편 #4가 가장 낮은 1.23%를 보였으며 액상성형공정으로 제작된 시편들은 상대적으로 높은 값을 보이는 반면 #1 DB 시편(2.76%), #2 CAPRI 시편(2.57%) 및 #3 VAP 시편(3.56%)의 값을 각각 나타내었다. 액상성형공정 시편들 중에서는 #3 VAP 시편이 가장 높은 값을, #2 CAPRI 시편이 가장 낮은 값을 보였다. (섬유부피분의 경우 #1(52.9%), #2(54.9%), #3(56.0%) 및 #4(50.3%) 보임.)

3.2 두께

시편 두께 측정은 4개의 라미네이트 패널 시편에 대하여 각각 35부위에 캘리퍼스를 사용하여 수행하였다. 각 시편들은 #1 DB (2.196 mm), #2 CAPRI (2.128 mm), #3 VAP (2.206 mm) 및 #4 Autoclave (2.290 mm)의 평균 두께를 보였는데 #2 CAPRI 시편이 가장 얇은 두께를 #4 Autoclave 시편이 가장 두꺼운 두께 값을 보였다.

시편 #4에 사용된 프리프레그 기준 두께는 2.17 mm로서 이를 기준으로 보면 #2 CAPRI 시편만이 2.128 mm의 평균 이하의 두께를 보이며 기준 두께 대비 0.042 mm (-1.9%) 작은 값을 가졌으며 나머지 3개의 시편은 모두 기준 두께보다 높은 값을 보였다. 특히, #4 Autoclave 시편은 2.290 mm의 평균 두께로서 기준 두께 대비 0.120 mm (+5.5%) 높은 값을 보였다.

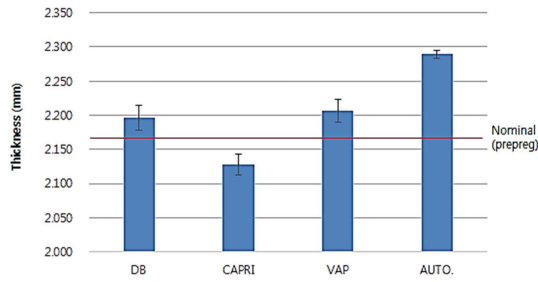


Fig. 7. Average thickness comparison for specimens (#1 DB, #2 CAPRI, #3 VAP & #4 AUTOCLAVE)

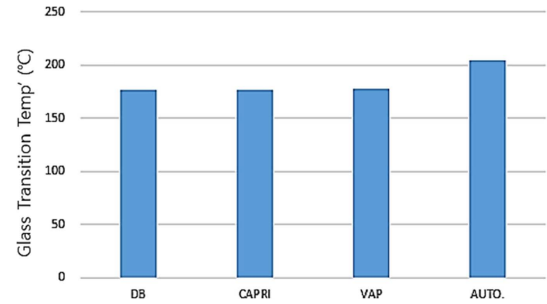


Fig. 8. Tg Test Result

또한 각 시편들의 표준 편차 값을 보면 #1 (0.0356 mm), #2 (0.0315 mm), #3 (0.0327 mm) 그리고 #4 (0.0118 mm)의 값을 나타내었는데 Prepreg 자재를 사용하여 Autoclave 성형 방법으로 제작된 #4 시편이 0.0118로서 가장 낮은 편차값을 보이고 균일한 두께 분포를 가짐을 알 수 있었다. 액상성형 공정을 사용하여 제작된 나머지 3개 시편에서는 비교적 높은 편차값을 보였으며 그 중에서는 CAPRI 공정을 사용하여 제작된 #2 시편이 0.0315 값을 가지며 DB (0.0356)와 VAP (0.0327) 공정 시편에 비하여 상대적으로 균일한 두께 분포를 나타내었다.

Dry Fabric 자재에 수지를 주입하는 액상성형공정으로 제작된 시편들과 달리 프리프레그 소재를 사용하여 오토클레이브 성형을 수행한 #4 시편은 수지가 미리 함침된 프리프레그 소재 자체의 특성 및 상대적으로 높은 점도의 수지가 사용되기 때문에 높은 두께 평균값과 매우 균일한 두께 분포를 가지는 것으로 확인되었다.

반면에 원활한 수지 주입과 우수한 젖음성을 얻기 위해 낮은 점도 특성을 가진 수지를 사용하여 액상성형공정으로 제작된 시편(#1~#3)들은 상대적으로 낮은 평균 두께를 보이는데 그 중에서도 #2 CAPRI 공정 시편이 가장 낮은 두께를 가지고 가장 균일한 두께 분포를 시편 전체적으로 보이는 것을 확인하였다.

이는 수지 주입구와 배출구 간에 0.1 MPa의 일정한 압력 차이가 유지되고 주입된 내부 수지와 외부 대기압차이가 거의 없는 DB 공정과 VAP 공정 시편에 비하여 CAPRI 공정은 주입구와 배출구 간의 차압을 0.05 MPa로 조절하여 수

지 주입과정에서부터 내부 수지 압력과 외부 대기압 차이를 이용한 0.05 MPa의 압착 압력을 가할 수 있기 때문으로 판단된다.

3.3 유리전이온도

DMA (Q800, TA Instrument) 장비를 사용하여 각 시편의 유리전이온도를 측정하였다. #4 Autoclave 성형 시편이 가장 높은 204.7°C를 보였으며, 액상성형공정으로 제작된 #1 DB, #2 CAPRI 및 #3 VAP 성형 시편들은 상대적으로 낮은 176.3°C, 176.2°C 및 177.1°C 값들을 각각 나타냈다.

오토클레이브 공정과 액상성형공정에 각각 다른 종류의 수지(M21 & EP2400)가 사용됨으로 인해 수지 고유의 물성 차이에 따라 유리전이온도 결과 차이가 나타난 것으로 판단되며 동일한 EP2400 수지를 사용하여 액상 성형 공정을 달리 적용한 경우 유리전이온도는 크게 변화되지 않음을 확인하였다.

3.4 기계적 특성

각 시편의 기계적 특성 평가를 위해 수지 지배적 특성인 층간전단강도 및 굽힘강도 시험을 만능 시험기(Universal Test Machine, SFM30)를 사용하여 수행하였다.

층간전단강도 시험의 경우 5개의 시편을 굽힘강도 시험은 4개의 시편을 제작 공정에 따라 각각 시험하였다. 층간전단강도 시험에서 #1 DB 시편은 59.92 MPa, #2 CAPRI 시편은 66.14 MPa, #3 VAP 시편은 60.2 MPa 그리고 #4

Table 3. Summary of specimen thickness

Specimen	Thickness (Average, mm)	Standard Deviation (mm)	Δt (Average - Nominal*, %)
#1 DB	2.196	0.0356	1.2
#2 CAPRI	2.128	0.0315	-1.9
#3 VAP	2.206	0.0327	1.7
#4 Autoclave	2.290	0.0118	5.5

*Nominal thickness (Prepreg basis: 2.17 mm)



Fig. 9. ILSS Test Setup

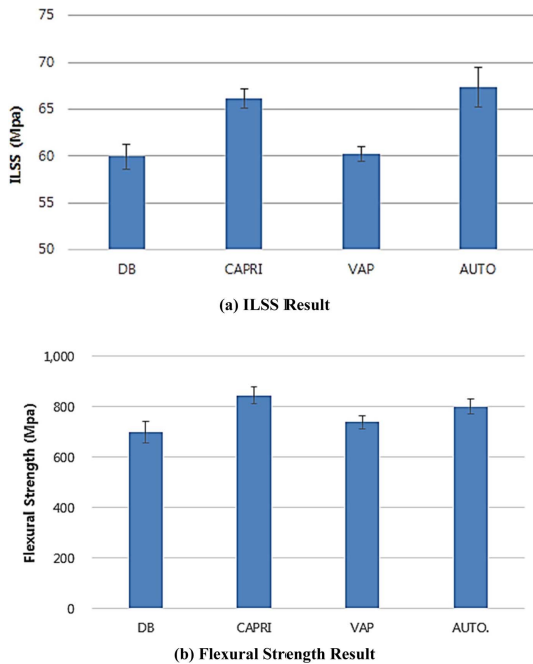


Fig. 10. Mechanical Test results (a) ILSS (b) Flexural Strength

Autoclave 시편은 67.38 MPa의 평균값을 나타내었는데, CAPRI 공정을 이용한 액상성형 공정 시편과 프리프레그를 이용하여 오토클레이브 성형한 시편의 값이 상대적으로 높았으며 DB 시편과 VAP 공정 시편의 경우 비슷한 값을 보였다.

굽힘강도 시험에서도 #1 (699.5 MPa), #2 (844.3 MPa), #3 (738.9 MPa) 및 #4 (800.5 MPa)의 값을 보였는데 앞서 층간 전단강도 시험에서와 유사하게 CAPRI 공정과 오토클레이브 공정 시편의 값이 DB 및 VAP 공정 시편에 비하여 더 높게 나타났다.

이는 CAPRI 및 Autoclave 공정 시편의 경우 경화공정 또는 수지 주입 공정의 시작 때부터 높은 압착 압력이 적용됨으로 인해 전체적으로 균일한 두께 분포를 가지며 상대적으로 낮은 기공 함유량을 가지므로서 높은 계면 결합 강도를 얻을 수 있기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 프리프레그 소재를 바탕으로 한 오토클레이브 성형의 대체 공정으로서 많은 관심을 모으고 있는 액상성형공정을 이용하여 제작된 시편들과 오토클레이브 공정으로 성형된 시편을 실험적으로 비교 평가하였다. 액상성형 공정 중 Double Bagging, CAPRI 및 VAP 공정을 사용하여 시편 제작을 수행하고 내부 기공 함유량, 두께, 유리전이온도, 층간 전단 강도 및 굽힘 강도 시험 평가를 통하여 각 제작 공정에 따른 차이를 확인할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 프리프레그 소재를 사용한 오토클레이브 성형 시편이 액상성형 시편에 비하여 시편 두께 균일도가 우수하였으며, 낮은 기공 함유량을 가지는 것을 확인하였다.

2) 액상성형 공정 내에서는 CAPRI 공정 시편이 DB 및 VAP 공정 시편에 비하여 상대적으로 우수한 두께 균일성과 낮은 기공 함유량을 보였는데 수지 주입 단계에서부터 주입 구와 배출구 압력 차이에 의한 높은 압착 압력을 적용할 수 있기 때문으로 사료된다.

3) 서로 다른 종류의 수지가 사용된 오토클레이브 성형 시편(#4)과 액상성형 시편(#1~#3)들간의 유리전이온도 차이는 발생하였으나 동일한 수지가 사용된 액상성형 시편들 내에서는 차이가 거의 발생하지 않았다.

4) 층간전단강도 및 굽힘강도와 같은 기계적 특성 평가에 있어서 전체적으로는 오토클레이브 성형 시편이 액상성형 시편에 비하여 우수한 특성을 가짐을 보였으나, 액상성형 시편 중 CAPRI 시편은 오토클레이브 성형 시편 못지않은 동등 이상의 기계적 특성을 가짐을 확인하였으며 이는 상대적으로 우수한 두께 균일성 및 낮은 기공 함유량에 의한 것으로 판단된다.

5) 액상성형 시편이 가진 물성들을 오토클레이브 성형 시편과의 비교 시 비교적 동등한 물성을 보임으로서 대체 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

CAPRI 공정의 경우 액상성형 공정 중에서 가장 우수한 품질을 보였지만 상대적으로 낮은 차압으로 인해 수지 주입 시 유동 속도가 낮아지고 전체 작업시간이 길어지는 단점을 가진다. DB 및 VAP 공정에서 공정 변수 제어 측면에서의 접근을 통해 품질을 향상시킬 수 있도록 후속 연구를 이어 나갈 예정이며, 내부 기공 크기, 형상 및 분포와 두께 균일성에 따라 기계적 특성에 미치는 영향에 대하여 미시적 연구/고찰로 확장할 계획이다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부와 한국산업기술진흥원의 지역특화산업육성(R&D) 기술개발사업으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

1. Jerome PORA, "Composite Materials in the Airbus A380 - From History to Future -", *Proceeding of the 13 International Committee on Composite Materials*, Beijing, China, 2001.
2. Marsh, G., "Airbus Takes on Boeing with Reinforced Plastic A350", *Reinforced Plastics*, Vol. 51, Issue 11, 2007, pp. 26-29.
3. Park, D.C., and Kim, Y.H., "Evaluation of Laminate Property using Caulplate Application", *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 29, No. 5, 2016, pp. 231-235.
4. Koushyar, H., "Effects of Variation in Autoclave Pressure, Cure

- Temperature, and Vacuum Application Time on the Porosity and Mechanical Properties of a Carbon/epoxy Composite,” Master Thesis, Wichita State University, USA, 2011.
5. Hong, S.H., Song, M.H., Song, K.I., Baik, S.M., and Shin, S.J., “Fabrication and Evaluation of Integrated Composite Part for Aircraft using OoA Prepreg”, *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 29, No. 5, 2016, pp. 315-320.
 6. Mario Danzi, “Manufacturing of Polymer Composites OOA Prepreg Technology”, CMASLab, ETH Zürich, 2017.
 7. Harshe, R., “A Review on Advanced Out-of-Autoclave Composite Processing”, *Journal of the Indian Institute of Science*, Vol. 95, No. 3, 2015.
 8. Gardiner, G., “A400M Cargo Door: Out-of-Autoclave”, Retrieved from Composites World website: <http://www.compositesworld.com/articles/inside-manufacturing-a400m-cargo-door-out-of-the-autoclave>, 2010.
 9. Phillips, B.J., “Multidisciplinary Optimisation of a CFRP Wing Cover,” Doctoral Thesis, Cranfield University, UK, 2009.
 10. Heider, D., Newton, C., and Gillespie, J.W., *VARTM Variability and Substantiation*, Center for Composite Materials, University of Delaware, 2006.
 11. Kim, S.O., Seong, D.G., Um, M.K., and Choi, J.H., “Experimental and Phenomenological Modeling Studies on Variation of Fiber Volume Fraction during Resin Impregnation in VaRTM”, *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 28, No. 6, 2015, pp. 340-347.
 12. Campbell, F.C., *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier, 2004.
 13. Mitsuhiro Yamashita and Toru Sakagawa, “Development of Advanced Vacuum-assisted Resin Transfer Molding Technology for Use in an MRJ Empennage Box Structure”, *MHI Technical Review*, Vol. 45, No. 4, 2008.
 14. Li, W., Krehl, J., Gillespie, J.W., and Heider, D., “Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, Issue. 20, pp. 1803-1814.
 15. US. Patent No. 7,334,782 B2, “Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion Process”, 2008.
 16. Vishwanath R. Kedari, Basil I. Farah and Kuang-Ting Hsiao, “Effect of Vacuum Pressure, Inlet Pressure, and Mold Temperature on the Void Content, Volume Fraction of Polyester/e-glass Fiber Composites Manufactured with VARTM Process”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 26, 2011, pp. 2727-2742.
 17. “Carbon Fiber Laminate – Determination of the Fiber, Resin and Void Content”, EN 2564, 1998.
 18. “Carbon Fiber Reinforced Plastics – Determination of the Apparent Interlaminar Shear Strength”, EN 2563, 1997.
 19. “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating materials”, ASTM D790-03. 2003.