

섬유금속적층판 제작을 위한 PTFE 몰드 기반 마이크로파 공정에 대한 실험적 연구

박으뜸¹ · 이영현¹ · 김정² · 강범수² · 송우진[#]

Experimental Study on Manufacturing Fiber Metal Laminate using Microwave Heating Based on PTFE Mold

E. T. Park, Y. H. Lee, J. Kim, B. S. Kang, W. J. Song

(Received March 19, 2020 / Revised May 21, 2020 / Accepted May 28, 2020)

Abstract

Existing composite forming processes such as the autoclave, prepreg compression forming (PCF), RTM, etc. require high production costs because of their long processing time. On the other hand, microwave heating process (MHP) can reduce the production costs since both mold and composite material can be heated directly. The aim of this study is to manufacture a mold consisting of polytetrafluoroethylene (PTFE), quartz glass, stainless steel clamps, and polyether ether ketone (PEEK) bolts for fabricating FML based on self-reinforced polypropylene (SRPP) using the MHP. First, the flame test was carried out prior to the MHP to check the temperature on the mold and whether the spark occurred at the mold and the edge of the FML. Second, the uniaxial tensile test was then conducted to obtain the mechanical properties of the FML manufactured by the MHP. The mechanical properties were compared with those of the FML fabricated by the PCF. As a result, the MHP using the PTFE mold can manufacture the FML more rapidly than the PCF, and obtain acceptable mechanical properties.

Key Words: Fiber Metal Laminate, Flame Test, Microwave Heating Process, Uniaxial Tensile Test

1. 서 론

섬유금속적층판(fiber metal laminate, FML)은 금속 판재 사이에 복합재료가 적층된 하이브리드 복합재다. 금속 및 복합재의 조합에 따라 기존 복합재의 단점인 충격에 대한 낮은 저항력, 파손되었을 시 수리에 대한 어려움, 복합재에 수분이 침투함에 의한 성능 저하 등을 극복할 수 있다[1]. 이러한 장점으로 인하여, 최근 항공기 산업에서는 주로 유리 섬유(glass fiber)나 아라미드 섬유(aramid fiber) 복합재와 알루미늄(aluminum) 판재를 적층한 glass laminate aluminum reinforced epoxy(GLARE)나 aramid reinforced

aluminum laminate(ARALL)과 같은 열경화성(thermoset) 섬유금속적층판을 적용하고 있다[2~3]. 하지만 열경화성 복합재를 기반한 섬유금속적층판은 재활용이 사실상 불가능하며, 성형 공정이 복잡하여 효율적인 생산이 어렵다. 따라서 열가소성(thermoplastic) 복합재를 기반한 섬유금속적층판에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 특히 자기 강화형 폴리프로필렌(self-reinforced polypropylene, SRPP)을 기반한 섬유금속적층판에 대한 기계적 물성치 획득에 대한 연구[4~6]와, SRPP를 기반한 섬유금속적층판으로 이루어진 자동차 임팩트 빔에 대한 충격 성능이 수치해석적으로 비교된 사례가 보고되고 있다[7]. 일반적으로 복합재 부품을 성형하기 위하여 오토클레이브(autoclave), resin transfer molding (RTM) 등 다양한

1. 부산대학교 항공우주공학과, 대학원생

2. 부산대학교 항공우주공학과, 교수

Corresponding Author : Department of Nanomechanics Engineering,
Pusan National University, E-mail: woodysong@pusan.ac.kr,
ORCID : 0000-0003-1136-4750

성형 공정이 적용된다. 또한 SRPP를 기반한 섬유금속적층판의 경우, 이전 연구를 기반으로 prepreg compression forming (PCF) 공정이 적용되고 있다[5].

오토클레이브 공정의 경우, 챔버(chamber) 내부의 공기를 가열하여 복합재를 성형하는 공정으로써, 내부 공기를 가열하기 위하여 많은 시간이 요구된다[8]. RTM의 경우, 수지(resin)를 섬유에 분사하여 복합재를 성형하는 공정으로써, 수지를 가열시키기 위한 공정 시간이 추가적으로 요구되며, 수지 분사를 위하여 압력을 가하기 때문에 초기 설치 비용 및 공정 시간을 고려해보았을 때, 효율적이지 못하다[9~10]. PCF 공정의 경우, 밀폐된 챔버 하단의 금형에 열을 가하여 복합재를 성형하는 공정으로써, 금형의 두께, 열전도계수에 따라 가열하기 위한 긴 공정 시간이 요구된다[11]. 위와 같은 성형 공정들의 공통점은 공기 또는 금형을 가열하여 복합재에 간접적으로 열을 가하는 방식으로 많은 시간을 요구하는 점이다. 따라서 목표 온도까지 도달하는 시간을 효율적으로 단축할 수 있으며, 효율적으로 에너지를 절약할 수 있는 성형 공정이 요구된다. 이러한 기존의 복합재 성형 공정에 대한 단점을 극복하기 위하여 마이크로파를 이용한 공정(microwave heating process, MHP)이 연구되고 있으며, 공정 시간과 에너지 소모를 효과적으로 절감할 수 있는 것으로 보고되고 있다[12~14]. MHP에 의한 가열 메커니즘(heating mechanism)은 크게 쌍극자에 의한 가열(dipolar loss), 전도에 의한 가열(conduction loss), 이력 현상에 의한 가열(hysteresis loss)과 에디 전류에 의한 가열(Eddy current loss)이 있다[15].

물, 세라믹(ceramic) 그리고 에폭시(epoxy)와 같은 소재는 쌍극자(dipole)로 구성되어 있으며, 마이크로파(microwave)가 조사(irradiation)되었을 때, 전기장의 주기적인 변화에 따라 쌍극자가 전기적으로 불안정한 상태가 되어 진동을 일으킨다. 이때 발생한 진동은 소재 내부의 관성(inertia), 탄성, 마찰, 접합력(adhesive force) 등을 유도하여 소재 내부에 열을 발생시킨다. 금속 또는 반도체(semiconductor) 소재의 경우, 주기적으로 변하는 전기장에 의하여 소재 내부의 자유 전자(free electrons)가 이동하면서 자기장이 유도된다. 유도된 자기장은 자유 전자를 반대방향으로 밀어내는 반력(reaction force)을 생성하며, 자유 전자는 가변 전기장에 따라 반복적으로 이동하게 된다. 이때 발생하는 내부 관성, 탄성, 마찰 등이

복합재 내부에 열을 발생시키게 된다. 니켈(nickel), 코발트(cobalt), 철(iron)과 같이 자기장을 가지고 있는 소재의 경우, 마이크로파가 조사되었을 때, 본래의 자기적 상태(magnetic state)가 변화된다. 이때 다시 본래의 상태로 돌아가려고 하는 성질을 보이지만 가역적으로 돌아오지 못하고 일부 자기장 에너지가 열에너지로 치환되는 비가역적 현상(irreversible phenomenon)을 보인다. 이러한 이력 현상에 의하여 소재에 열이 발생하게 된다. 구리(copper), 알루미늄, 은(silver)과 같은 도체(conductor)의 경우, 마이크로파의 관통거리(penetration depth)가 소재의 두께보다 짧을 때, 에디 전류가 발생하게 된다. 이때 에디 전류의 방향은 마이크로파의 자기장에 따라 주기적으로 변하며, 이러한 에디 전류의 방향 변화는 일부 자기장 에너지가 열에너지로 치환되어 소재에 열을 발생시키게 한다. 앞서 언급한 일련의 가열 메커니즘에 의하여 MHP는 몰드 뿐만이 아니라 소재를 직접적으로 가열할 수 있으며, 이러한 과정을 통하여 공정 시간과 에너지 소모량을 효율적으로 절감할 수 있다.

하지만 MHP는 마이크로파에 의하여 거친 표면에 마이크로파 에너지가 집중되어 스파크(spark)가 발생할 수 있기 때문에 가압 장치와 같은 장비를 내부에 설치하는 것에 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여, polytetrafluoroethylene(PTFE)의 팽창압을 이용하여 섬유금속적층판을 제작하는 것이 본 연구의 목표다. PTFE는 기존의 금속 소재보다 열팽창률이 우수하며, 마이크로파에 의한 가열도 이루어지기 때문에 PTFE를 적절히 구속할 수 있다면 별도의 가압 장치 없이 섬유금속적층판에 압력을 가할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 PTFE 몰드를 기반한 MHP를 활용하여 섬유금속적층판을 제작하기 전, PTFE 몰드를 제작하여 불꽃 실험(flame test)을 수행하였으며, 불꽃 실험을 통해 마이크로파 오븐(microwave oven)의 input power와 공정 시간에 따른 몰드의 온도를 확인하였다. 아울러, 몰드와 섬유금속적층판의 스파크 발생 여부를 확인하였다. 그 후, 단축 인장 시험(uniaxial tensile test)을 수행하여 제작된 섬유금속적층판의 탄성계수(tensile modulus), 항복응력(yield strength) 및 인장강도(ultimate strength)를 획득하였으며, MHP의 효율성을 검증하기 위하여 기존의 PCF 공정으로 제작한 섬유금속적층판의 기계적 물성치와 비교하였다.

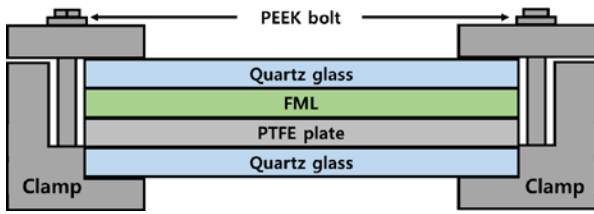


Fig. 1 Configuration of mold based on PTFE plate

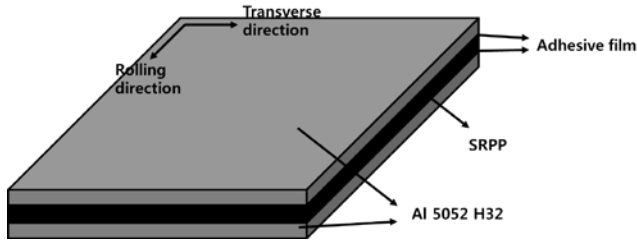


Fig. 2 Configuration of FML plate

Table 1 Process conditions of the MHP and temperature on the mold

Order	Input power (W)	Process time (min)	Temperature (°C)
1	700	60	124.0±11.2
2	700	90	144.1±6.0
3	900	60	162.5±6.3
4	900	90	173.3±12.0
5	1100	60	165.0±7.6
6	1100	90	191.3±9.3

2. 몰드 제작 및 불꽃 실험

2.1 몰드 제작

본 연구에서는 상용 마이크로파 오븐인 LG사의 LG ML32W를 사용하였다. LG ML32W는 2.45 GHz의 주파수(frequency)를 사용하며, 마이크로파 오븐의 내부 폭은 약 440 mm, 길이는 약 235 mm, 높이는 약 310 mm다. 이러한 마이크로파 오븐의 크기를 고려하여, Fig. 1과 같이 폭과 길이가 약 200 mm이며, 두께가 약 2 mm인 석영 유리(quartz glass) 판재와 PTFE 판재를 사용하였다. 또한 마이크로파가 조사될 때, 섬유금속적층판에 열팽창에 의한 압력을 가

하기 위하여 각 판재를 고정시키기 위한 클램프(clamp)를 사용하였다. 이때 클램프의 소재는 스테인리스 스틸(stainless steel)이며, 클램프에 사용된 볼트(bolt)는 실험 중 나사산에 스파크가 발생할 수 있기 때문에, 금속 볼트 대신에 polyetherether ketone(PEEK)으로 제작한 볼트를 사용하였다.

2.2 불꽃 실험

마이크로파를 이용한 복합재 성형 공정에서 가장 중요한 것은 몰드 또는 복합재에 마이크로파가 조사되었을 때, 스파크가 발생하는 지 확인하는 것이다. 예를 들어 평평한 면을 가진 금속 물체에 마이크로파를 조사하였을 때, 대부분의 마이크로파는 입사각에 반하여 반사하게 된다. 하지만 구겨진 알루미늄 호일과 같이 뾰족하거나 거친 면이 존재하는 물체의 경우, 마이크로파가 공기 중으로 다시 반사되지 못하고 내부에 증첩되기도 한다. 이러한 경우, 물체의 특정 부분에 마이크로파 에너지가 집중이 되며, 주로 뾰족한 부분에서 유전 파괴(dielectric breakdown)가 일어나 스파크가 발생하게 된다. 따라서 마이크로파를 이용한 복합재 성형 공정을 수행하기 전, 불꽃 실험을 수행하여 몰드 또는 복합재에 스파크가 발생하는 지 확인해야만 한다.

본 연구에서 사용한 섬유금속적층판은 Fig. 2와 같이 두께 약 2.0mm인 직물 형태(woven-type)의 SRPP와 두께 약 0.5 mm인 알루미늄 5052 판재를 적층하여 제작하였다. 이때 알루미늄 판재의 압연 방향(rolling direction)과 직교 방향(transverse direction)은 SRPP의 섬유 방향과 각각 일치시켰다. SRPP와 알루미늄 판재를 접합시키기 위하여 폴리프로필렌(polypropylene) 소재의 접착 필름을 사용하였다. 이때 각 구성 소재의 폭과 길이는 몰드의 크기를 고려하여 약 200 mm이다. 적층을 수행하기 전, 접착력 향상을 위하여 알루미늄 판재와 SRPP의 표면을 #1000 사포(sand paper)를 이용하여 표면 처리하였다. 실험 중 유전 파괴를 막기 위하여 추가적으로 시험편의 가장자리에 알루미늄 호일(aluminum foil)을 부착하였다 [16]. 본 실험에서는 MHP 수행 중 몰드 및 섬유금속적층판의 스파크 발생 여부와 더불어 폴리프로필렌의 용융점인 약 175°C에 도달하는 지 확인하기 위하여, Table 1과 같이 마이크로파 오븐의 input power와 공정 시간에 따른 스파크 발생 여부 및 몰드의 온도 측정을 수행하였다. 몰드의 온도는 실험

이 끝난 후 적외선 온도계(infrared thermometer)를 이용하여 몰드의 중심 및 가장자리 부근의 온도를 측정하였다.

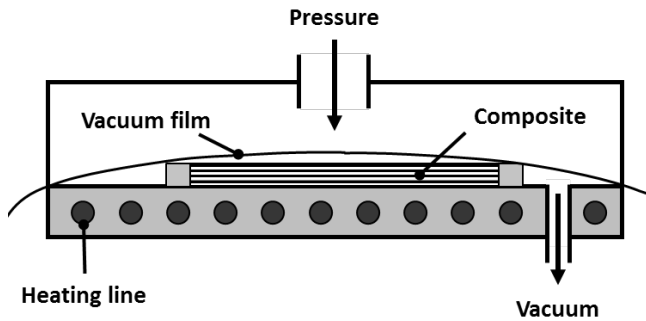


Fig. 3 Configuration of prepeg compression forming

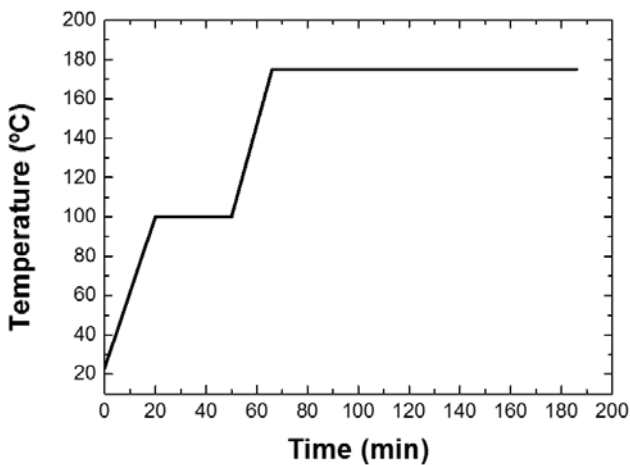


Fig. 4 Thermal cycle of prepeg compression forming



Fig. 5 Universal material test machine (Instron 8516)

각 조건에 따른 온도는 Table 1과 같으며, 설정한 모든 조건에서 스파크가 발생하지 않음을 공정 중 마이크로파 오븐의 윈도우(window)를 통해 확인하였으며, 공정 이후 몰드 및 섬유금속적층판을 관찰하여 스파크에 의한 그을음이 발생하였는지 추가적으로 확인하였다. 또한 마이크로파 오븐의 input power가 1100 W, 공정 시간이 90분인 경우, 몰드의 온도가 접착 필름의 녹는점인 175°C에 충분히 도달할 수 있음을 확인하였다.

3. 단축 인장 실험

불꽃 실험을 기반으로 본 연구에서는 MHP를 이용하여 제작한 섬유금속적층판의 기계적 물성치를 도출하기 위하여 단축 인장 실험을 수행하였다. 우선 섬유금속적층판을 제작하기 위하여 불꽃 실험에서 확인한 input power가 1100 W, 공정 시간이 90분인 조건에서 MHP를 수행하였다. 또한 MHP의 효율성을 검증하기 위하여 기존의 성형 공정인 PCF 공정을 추가적으로 수행하였다. PCF 공정의 경우, Fig. 3과 같이 하단의 금형에 의하여 가열 되는 구조이며, 밀폐된 공간에서 Fig. 4와 같은 열 사이클에 의하여 약 0.4 MPa의 압력과 약 0.096 MPa의 진공압을 가하게 된다. MHP와 PCF 공정에 의하여 제작된 섬유금속적층판은 워터젯(water-jet) 기기를 이용하여 ASTM D3039의 규격에 따라서 길이 약 175 mm, 폭은 약 25 mm인 직사각형 형상으로 절단하였다[17]. 절단된 시험편은 단축 인장 실험을 수행 하기 전, 샌드페이퍼(sandpaper)를 이용하여 절단면의 burr를 제거하였다.

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 Instron 8516을 이용하여 단축 인장 실험을 수행하였으며, 이때 인장 속도는 약 2 mm/min이다. 그 후, 단축 인장 실험으로부터 도출한 변형률-응력 선도(strain-stress curve)를 이용하여 섬유금속적층판의 탄성계수(tensile modulus), 항복응력(yield stress), 인장강도(ultimate strength)를 도출하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 현미경 관찰

MHP와 PCF 공정을 사용하여 제작한 섬유금속적층판의 단면 및 접착면에 대하여 시각적으로 분석

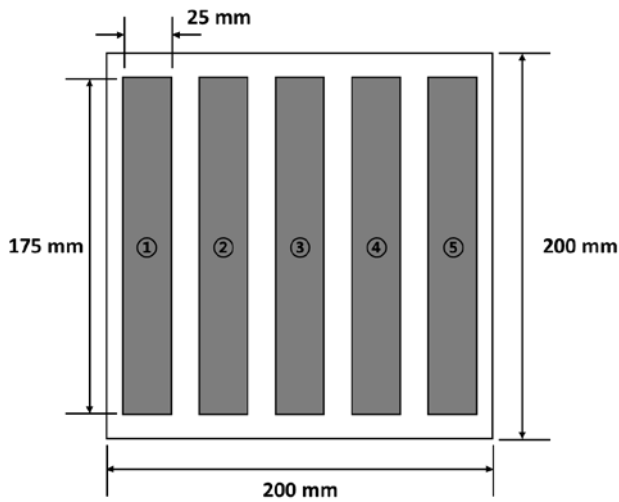
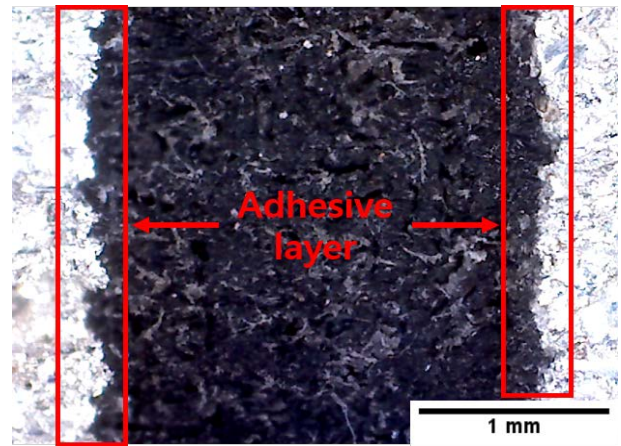


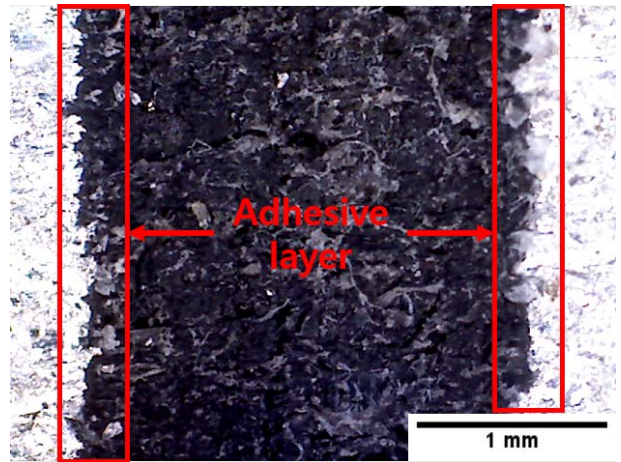
Fig. 6 Cutting location of FML specimens

하기 위하여 현미경 관찰을 수행하였다. 우선 Fig. 6 과 같이 MHP와 PCF 공정으로 제작한 섬유금속적층판 시험편의 단면을 400배율 광학 현미경으로 촬영하였다. 이때 촬영한 시험편은 Fig. 6에서 No. 3에 해당되는 부위의 시험편이며, 해당 시험편의 중심부를 Fig. 6 기준 가로방향으로 절단하여 촬영하였다. Fig. 7(a)과 Fig. 7(b)의 경우, 알루미늄과 SRPP의 경계는 뚜렷하지만 접착층은 구분이 불가능함을 알 수 있다. 이는 접착필름인 폴리프로필렌이 완전히 용융되면서 투명한 형태의 층으로 남기 때문이다. 하지만 Fig. 7(c)의 경우, 접착이 이루어지지 않아 알루미늄과 SRPP가 분리된 것을 확인할 수 있으며, 폴리프로필렌이 완전히 용융되지 않아 불투명한 층을 형성한 것을 확인할 수 있다.

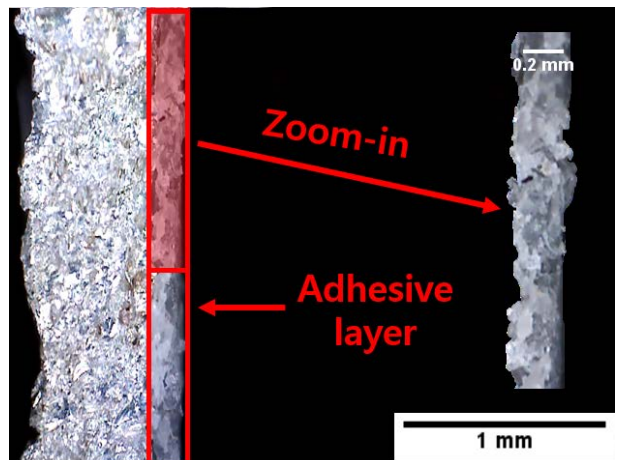
본 연구에서는 이러한 폴리프로필렌의 용융상태에 따른 투명도 차이를 이용하여 Fig. 8과 같이 섬유금속적층판의 접착면을 400배율 광학 현미경으로 촬영하였다. 섬유금속적층판의 접착면을 촬영하기 위하여, 상부 알루미늄 판재와 접착필름 사이에 이형 필름(release film)을 추가적으로 부착하여 섬유금속적층판을 제작하였으며, 그 후 상부 알루미늄 판재와 이형 필름을 제거하였다. 섬유금속적층판의 접착면에 대한 현미경 촬영은 Fig. 8과 같이 총 9개의 위치에서 촬영하였으며, 그 중 비완전 접착 영역(imperfectly-adhesive area)가 상대적으로 높게 나타난 특정 구역에 대한 현미경 사진을 Fig. 9와 같이 나타내었다. Fig. 9(a)의 경우, input power가 1100W, 공정 시간이 90분인 MHP 공정으로 제작한 섬유금속적층



(a) MHP (1100 W, 90 min)



(b) PCF



(c) MHP (700 W, 90 min)

Fig. 7 Microscopic images on cross-section of FML manufactured by MHP and PCF (400x)

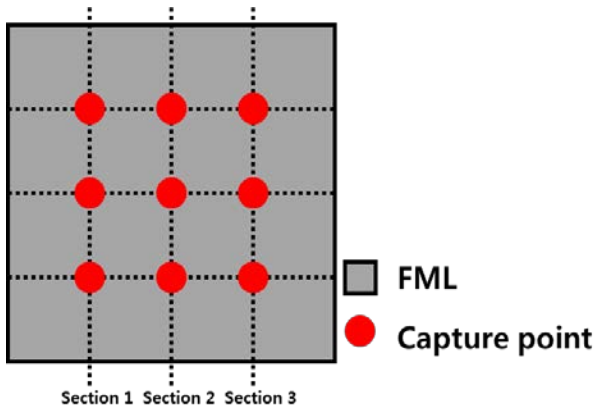
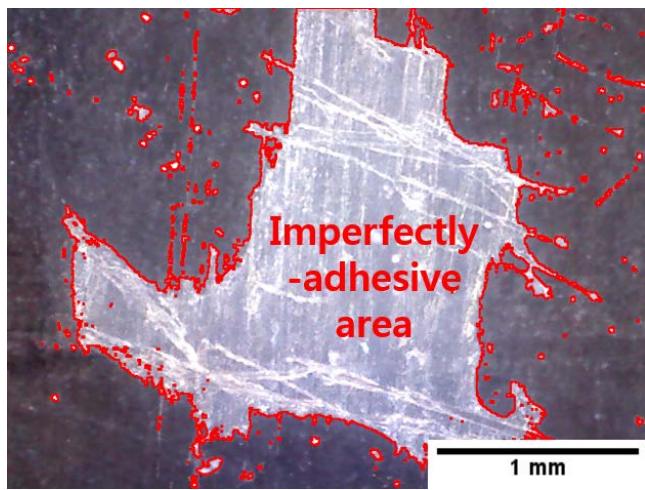


Fig. 8 Capture points on FML

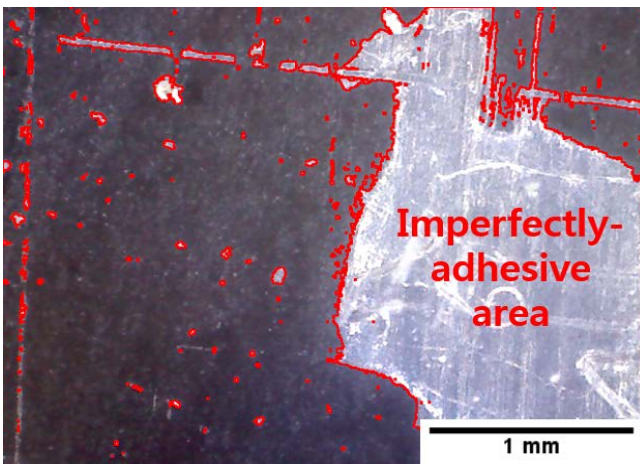
Table 2 Ratio of imperfectly-adhesive area (RIAA) on top-section of FML

Process	RIAA (%)			
	S1	S2	S3	Average
MHP	6.7923	2.1442	10.0271	6.3212
PCF	4.9589	3.3852	4.0177	4.1206

판이며 접착 필름이 완전 용융되지 않은 부분은 비교적 불투명한 색으로 구분이 가능함을 확인하였다. 이러한 현상은 Fig. 7(c)와 동일하다. Fig. 9(b)의 경우, PCF 공정으로 제작한 섬유금속적층판이며, 마찬가지로 완전 용융되지 못하여 접착되지 않은 부분이 존재하는 것을 확인하였다. 이러한 비완전 접착 영역을 좀더 정량적으로 측정하고자 본 연구에서는 이미지 필터링 기법(image filtering technique)을 이용하였다. 이미지 필터링 기법을 수행하기 위하여 본 연구에서는 오픈소스(open source)기반 이미지 분석 프로그램인 Image J를 사용하였으며, 이미지의 색도(hue), 채도(saturation), 명도(brightness)를 필터링 하여 Fig. 9와 같이 비완전 접착 영역의 경계를 찾았다. 그 후, 이미지의 해상도 및 배율 등을 고려하여 실제 영역을 도출하였으며, 각 공정에 따른 섬유금속적층판의 전체영역에 대한 비완전 접착 영역의 비율을 식(1)과 같이 도출하였다.



(a) MHP (1100 W, 90 min)



(b) PCF

Fig.9 Microscopic images on top-section of FML manufactured by MHP and PCF (400x)

$$RIAA = \frac{A_{ia}}{A_{total}} \quad (1)$$

여기서, A_{ia} 는 비완전 접착 영역의 넓이이며, A_{total} 은 촬영한 현미경 이미지의 실제 넓이를 의미하며, 모든 이미지가 동일한 해상도에서 400배율로 촬영되었기 때문에 A_{total} 은 18.75 mm²이다.

비완전 접착 영역의 넓이는 Fig. 8에서 각각의 'Section 1', 'Section 2', 'Section 3'에 해당되는 구역에서의 넓이에 대한 평균값을 사용하였다. 각 공정에 따른 RIAA는 Table 2와 같으며, MHP의 'Section'에 따른 RIAA는 약 ±3.9625%이지만, PCF 공정은 'Section'에 따른 RIAA의 차이가 약 ±0.7919%에 불과한 것을 알 수 있다. PCF 공정의 경우 공기압과 진공압을 이용하기 때문에 MHP보다 상대적으로 압력을 균일하게 가하기 때문이며, MHP는 섬유금속적층판의 가장 자리에 부착한 알루미늄 호일에 의해

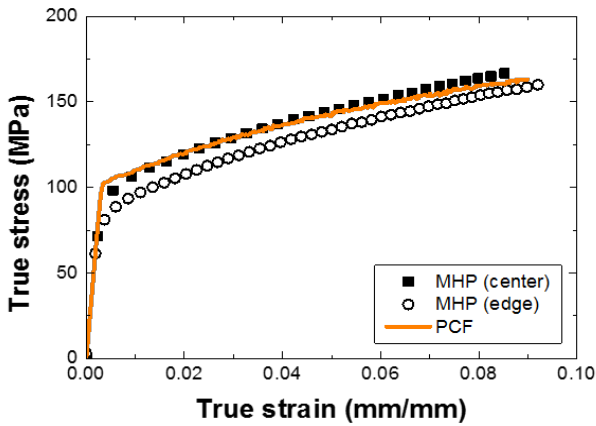


Fig. 10 Strain-stress curves of FML obtained by uniaxial tensile test

Table 3 Mechanical properties of FML manufactured by MHP and PCF

Process	Tensile modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Ultimate strength (MPa)
MHP	32.2442 ±0.7030	104.1680 ±6.3918	161.7328 ±6.306
PCF	33.0462 ±0.8579	104.5425 ±1.9874	163.0021 ±3.2417

마이크로파를 반사하기 때문에 상대적으로 가장자리의 온도가 낮아서 폴리프로필렌의 용융이 지연된 것으로 판단되며, 아울러 본 연구에서 사용한 마이크로파 오븐의 경우, 완전 밀폐형이 아니기 때문에 자연 대류에 의한 섬유금속적층판의 냉각 효과가 완전 밀폐형인 PCF 공정보다 상대적으로 크게 영향을 끼친 것으로 판단된다. 또한 PTFE 판재의 열팽창이 균일하게 이루어지지 않아 PCF 공정에 비해 섬유금속적층판에 압력을 균일하게 가하지 못한 것이 RIAA의 편차에 추가적인 영향을 끼친 것으로 판단된다.

4.2 기계적 물성치 비교

단축 인장 실험으로부터 도출한 변형률-응력 선도는 Fig. 10과 같다. Fig. 6에서 No. 3에 해당하는 중심부의 시험편은 PCF 공정으로 제작한 시험편과 상대적으로 유사한 변형률-응력 선도를 얻었으나, Fig. 6에서 No. 5에 해당하는 가장자리 부분의 시험편은 다른 시험편에 비해 상대적으로 낮은 응력을 보이는 것을 확인하였다. Table 3은 MHP와 PCF 공정으로

제작한 섬유금속적층판의 탄성계수, 항복응력 및 인장강도이며, MHP를 이용하여 제작한 섬유금속적층판의 경우, PCF 공정과 유사한 기계적 물성치를 획득할 수 있음을 확인하였다. 그러나 MHP의 상대편차가 PCF보다 높음을 알 수 있으며, 이는 마이크로파 오븐 내부 공기와 열 대류 현상, 스파크 발생을 막기 위한 알루미늄 호일의 마이크로파 반사 등의 영향으로 섬유금속적층판의 중심부보다 상대적으로 낮은 온도 분포를 보였기 때문이라 판단된다. 아울러, PTFE 판재가 열팽창을 진행할 때, 가장자리 부분과 중심부분의 열팽창 정도가 다르기 때문에 상대적으로 압력이 균일하게 가해지지 못한 부분도 원인이라 판단된다. 이러한 문제를 개선하기 위해서는 알루미늄 호일에 의한 온도 상승 지연을 막기 위한 가장자리 부분에 유전 발열체(dielectric heater) 부착 등을 고려해야 하며, PTFE 판재의 열팽창이 균일하게 일어날 수 있도록 적절한 판재 설계를 수행해야 한다. 또한 마이크로파가 균일하게 조사될 수 있도록 반사판 또는 추가적인 마그네트론 사용을 고려해야 된다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 PTFE 몰드의 열 팽창압을 이용한 섬유금속적층판 제작 및 기계적 물성치를 도출하여 PCF 공정으로 제작한 섬유금속적층판의 기계적 물성치와 비교하여 대체 가능성을 확인하는 것이 목표다. 불꽃 실험을 통하여 마이크로파 오븐의 input power에 따라 스파크 발생 여부 및 목표 온도인 175°C에 도달하는 지 확인하였다. 마이크로파 오븐의 input power가 1100 W, 공정 시간이 90분인 경우 목표 온도에 도달함을 확인하였으며, 스파크가 발생하지 않음을 확인하였다. 그 후, 현미경 관찰을 통하여 접착 필름의 비완전 접착 영역을 도출하였으며, MHP의 ‘Section’에 따른 RIAA는 약 ±3.9625%이지만, PCF 공정은 ‘Section’에 따른 RIAA의 차이가 약 ±0.7919%에 불과한 것을 알 수 있다. 이는 MHP를 이용하였을 때 온도 상승 정도가 균일하지 못한 점과 PTFE 판재의 열팽창이 불균일하게 일어나 섬유금속적층판에 압력을 균일하게 가하지 못한 것으로 판단된다. 이 후, 단축 인장 실험을 수행하여 MHP와 PCF 공정으로 제작한 섬유금속적층판의 변형률-응력 선도를 도출하였으며, 이를 이용하여 탄

성계수와 항복응력, 인장강도를 도출하였다. 결과적으로 MHP를 이용하여 제작한 섬유금속적층판은 기존의 PCF 공정으로 제작한 섬유금속적층판과 유사한 기계적 물성치를 보였다. PCF 공정의 경우, 약 186분의 공정 시간이 소요되지만, MHP의 경우, 약 90분의 공정 시간이 소요된다는 점을 고려하였을 때, 위치에 따른 기계적 성능 저하 문제를 해결할 수 있다면 MHP가 섬유금속적층판을 시간 대비 효율적으로 제작할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었으며, 교신저자는 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] H. S. Choi, H. S. Roh, G. H. Kang, and M. S. Ha, 2004, Study on the Thermo-Mechanical Behaviors of Fiber Metal Laminates using the Classical Lamination Theory, *Trans. Kor. Soc. Mec. Eng. A*, Vol. 28, No. 4, pp. 394-401. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2004.28.4.394>.
- [2] W. Gunnink, 1988, Damage Tolerance and Supportability Aspects of ARALL Laminates Aircraft Structures, *Compos. Struct.*, Vol. 10, No. 1, pp. 83-104. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(88\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0263-8223(88)90062-1).
- [3] L. B. Vohelesang and A. Vlot, 2000, Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 103, No. 1, pp. 1-5. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00411-8).
- [4] B. E. Lee, J. Kim, B. S. Kang and W. J. Song, 2013, Numerical Study of the Formability of Fiber Metal Laminates Based on Self-reinforced Polypropylene, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 3, pp.150-157. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2013.22.3.150>.
- [5] E. T. Park, Y. H. Lee, J. Kim, B. S. Kang and W. J. Song, 2015, Evaluation of the Temperature Dependent Flow Stress Model for Thermoplastic Fiber Metal Laminates, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 1, pp. 52-61. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2015.24.1.52>.
- [6] E. T. Park, Y. H. Lee, J. Kim, B. S. Kang and W. J. Song, 2018, Numerical Study on Inverse Analysis Based on Levenberg-Marquardt Method to Predict Mode-I Adhesive Behavior of Fiber Metal Laminate, *Compos. Res.*, Vol. 31, No. 5, pp. 177-185. <https://doi.org/10.7234/composres.2018.31.5.177>.
- [7] E. T. Park, J. Kim, B. S. Kang and W. J. Song, 2017, Numerical Study on Performance Evaluation of Impact Beam for Automotive Side-Door using Fiber Metal Laminate, *Compos. Res.*, Vol. 30, No. 2, pp. 158-164. <https://doi.org/10.7234/composres.2017.30.2.158>.
- [8] T. Centea, L. K. Grunfelder and S. R. Nutt, 2015, A Review of Out-of-Autoclave Prepregs - Material Properties, Process Phenomena, and Manufacturing Considerations, *Compos. Part A-Appl. S. Manuf.*, Vol. 70, pp. 132-154. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.029>.
- [9] F. Rondina, S. Taddia, L. Mazzocchetti, L. Donati, G. Minak, P. Rosenberg, A. Bedeschi and E. Dolcini, 2018, Development of Full Carbon Wheels for Sport Cars with High-Volume Technology, *Compos. Struct.* Vol. 192, pp. 368-378. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.083>.
- [10] M. Baskaran, I. O. de Mendibil, M. Sarrionandia, J. Aurekoetxea, J. Acosta, U. Argarate and D. Chico, 2014, Proc. 16th Eur. Conf. on Compos. Mater., Seville, Spain, pp. 1-7.
- [11] J. Wulfsberg, A. Hermann, G. Ziegmann, G. Lonsdorfer, N. Stöß and M. Fette, 2014, Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry, *Procedia Eng.*, Vol. 81, pp. 1601-1607. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.197>.
- [12] W. I. Lee, Microwave Curing of Composites, 1984, *J. Compos. Mater.*, Vol. 18, pp. 387-409. <https://doi.org/10.1177/002199838401800405>.
- [13] P. C. Sung, T. H. Chiu and S. C. Chang, 2014, Microwave Curing of Carbon Nanotube/Epoxy Adhesives, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 104, pp. 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.09.003>.
- [14] N. Li, Y. Li, X. Hao and J. Gao, 2015, A Comparative Experiment for the Analysis of Microwave and Thermal Process Induced Strains of Carbon Fiber/Bismaleimide Composite Materials, *Compos. Sci.*

- Technol., Vol. 106, pp. 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.008>.
- [15] R. R. Mishra and A. K. Sharma, 2016, Microwave-Material Interaction Phenomena: Heating Mechanisms, Challenges and Opportunities in Material Processing, Compos. Part A-Appl. S. Manuf., Vol. 81, pp. 78-97. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.035>
- [16] S. C. Joshi and S. K. Bhudolia, 2014, Microwave-Thermal Technique for Energy and Time Efficient Curing of Carbon Fiber Reinforced Polymer Prepreg Composites, J. Compos. Mater., Vol. 48, pp. 3035-3048. <https://doi.org/10.1177/0021998313504606>.
- [17] ASTM Standard D3039, 2014, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-14.