

마이크로파 복합재 성형 공정을 이용한 폴리프로필렌 접착층의 모드 I 에너지 해방률에 대한 실험적 연구

박으뜸¹· 김태준²· 김 정³· 강범수³· 송우진^{4,#}

Experimental Study on Mode-I Energy Release Rate of Polypropylene Adhesive Layer Manufactured by Microwave Composite Forming Process

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

(Received November 16, 2021 / Revised January 19, 2022 / Accepted January 21, 2022)

Abstract

Recently, the composite material market is gradually growing. Various composite forming processes have been developed in order to reduce the production cost of the composite material. Unlike the conventional forming process, the microwave composite forming process has the advantage of reducing the processing time because the composite material is heated directly or indirectly at the same time. Due to this advantage, in this study, a double cantilever beam test was conducted with specimens manufactured by the microwave composite forming process. The purpose of this study was to compare mode-I energy release rate for specimens manufactured by prepreg compression forming and microwave composite forming processes. First, a microwave oven was proposed to conduct the microwave composite forming process. Double cantilever beam specimens were manufactured. After that, the double cantilever beam test was conducted to obtain the mode-I energy release rate. Mode-I energy release rates of specimens manufactured by the microwave composite forming and prepreg compression forming processes were then compared. As a result, mode-I energy release rates of specimens fabricated by the microwave composite forming process were similar to those fabricated with the prepreg compression forming process with a relatively reduced process time.

Keywords: Double Cantilever Beam Test, Microwave Composite Forming Process, Mode-I Energy Release Rate, Polypropylene Adhesive Film

1. 서 론

최근 건축, 자동차, 항공우주 분야 등에서 복합재는 널리 사용되고 있다[1]. 복합재는 기존의 금속 소재에 비해 우수한 비강도성을 가지고 있으며, 적용

하는 섬유 또는 수지에 따라서 내화염성, 내부식성, 내충격성, 그리고 재활용성 등 다양한 기능을 부가할 수 있다[2]. 이러한 장점을 바탕으로 최근 건축 산업에서 기존의 금속 소재보다 높은 비강도, 내마모성, 내침식성을 가진 복합재를 사용하여 다리의 보강재를 제작한 사례가 있으며[3], 자동차 산업에서는 높은 연비와 비강도를 가진 복합재를 사용하고 있다[4]. 또한, 항공우주 분야에서는 화물 또는 탑승객의 수를 증가시키기 위하여 항공기의 구조물을 복합재로 대체하고 있으며[5], 다목적 인공위성

1. 부산대학교 부품소재산업협력연구소, 전임연구원
2. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 대학생
3. 부산대학교 항공우주공학과, 교수
4. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 교수
Corresponding Author : Department of Nanomechatronics Engineering,
Pusan National University, E-mail: woodysong@pusan.ac.kr.
ORCID : 0000-0003-1136-4750

분에서는 무게를 절감시켜 추가적인 실험 장비를 설치할 수 있도록 복합재를 사용하고 있는 추세다 [6].

하지만 복합재 산업은 기반 시설 및 유지에 많은 비용이 요구되기 때문에 자본 집약적인 산업이라 불리고 있다. 이는 복합재 시장의 성장을 방해하는 주요 요인 중 하나라고 분석되고 있다[1]. 또한, 복합재를 부품으로 성형하기 위해서 긴 공정 시간을 요구하기 때문에 높은 제조비용이 발생된다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해서 resin transfer molding(RTM), prepreg compression forming(PCF) 등과 같은 out of autoclave 공정이 연구되고 있다[7~8].

RTM 공정은 원하는 형상의 몰드 안에 섬유 프리폼(preform)을 적층하고, 수지(resin)를 몰드 내부에 분사하여 진공 상태에서 열과 압력을 가하는 성형 방법이다. RTM 공정은 복합재를 짧은 공정시간으로 성형할 수 있지만, 액체 상태의 수지를 고압으로 분사하기 위하여 추가적인 장비가 요구된다. PCF 공정의 경우, 열선(heat wire)가 삽입된 몰드에 복합재 프리프리프레그(composite prepreg)를 적층하고 진공 상태에서 열과 압력을 가하는 성형 방법이다. PCF 공정은 몰드를 복합재 성형에 적합한 온도까지 가열하기 위해서 몰드의 두께, 몰드 소재에 따른 열전도성(thermal conductivity)에 따라서 긴 공정 시간을 요구한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최근 microwave composite forming(MCF) 공정이 연구되고 있다.

MCF 공정은 마이크로파에 의한 유전 가열(dielectric heating) 원리에 의하여 몰드 뿐만 아니라 복합재까지 동시에 가열할 수 있는 공정이다[9]. 소재가 물, 세라믹, 또는 에폭시(epoxy)와 같은 쌍극자(dipole) 분자인 경우, 마이크로파가 조사(irradiation) 되었을 때, 쌍극자가 진동을 일으켜 열을 발생시킨다[10]. 또한, 소재가 금속 또는 반도체(semiconductor)와 같이 자유전자(free electron)를 가지고 있는 경우, 마이크로파가 조사되었을 때, 자유전자가 전자기력의 방향에 따라 움직이게 된다. 이로 인하여 유도된 자기장에 의하여 자유전자는 반대방향으로 다시 움직이게 된다[10]. 이러한 자유전자의 반복적인 움직임에 의하여 소재에 열이 발생하게 된다. 그 밖에 자기장을 가지고 있는 자성 물체의 경우, 마이크로파에 의하여 자기장이 변화하며, 본래의 자기장으로 돌아오는 과정에서 비가역적으로

일부 자기 에너지(magnetic energy)가 열 에너지로 전환하게 되어 소재에 열이 발생하게 된다[10]. 이와 같은 유전 가열 원리를 착안하여, 본 연구에서는 유전 가열체인 silicon-carbide(SiC) 판재가 삽입된 몰드를 활용하여 피가열체 뿐만 아니라 몰드도 동시에 가열할 수 있도록 하였다.

유전 가열 원리를 기반한 MCF 공정은 최근까지 다양한 소재와 더불어 기존의 성형 공정과 비교하는 연구가 진행되었다. Joshi 는 MCF 공정으로 탄소 섬유를 기반한 복합재를 제작하여 기존의 autoclave 공정으로 제작한 복합재와 유사한 기계적 물성치를 획득함과 동시에 공정 시간은 약 60%, 에너지 소모율은 약 25% 절감하였으며[11], Li 도 마찬가지로 탄소 섬유를 기반한 복합재를 제작하여 기존의 autoclave 공정에 비하여 공정 시간은 약 45%, 에너지 소모율은 약 3% 절감하였다고 보고하였다[12]. Xu 는 MCF 공정이 기존의 경화 공정에 비하여 약 39% 공정 시간을 단축하였으며, 압축강도는 약 22% 증가하였다고 보고하였다[13].

기존의 연구 사례들은 MCF 공정으로 제작한 복합재의 인장 물성치, 압축 물성치 등을 도출하고 기존의 공정에 비교하는 것이 대부분이다. 하지만, 복합재는 특정 방향의 하중에 의하여 층간 분리(delamination)이 발생할 수 있기 때문에 복합재의 접착 특성에 대하여 반드시 규명해야 한다. 하지만, MCF 공정으로 제작한 복합재에 대한 접착 특성에 관련된 연구사례는 미미하다. 복합재의 접착 특성은 하중 방향에 따라 모드 I(opening mode), 모드 II(sliding mode), 모드 III(tearing mode)로 구분되며, 이를 규명하기 위해서는 접착층의 에너지 해방률(energy release rate)를 도출해야 한다[14].

본 연구에서는 double cantilever beam(DCB) 시험편을 MCF 공정으로 제작하여 접착 필름인 폴리프로필렌(polypropylene, PP)의 모드 I 에너지 해방률을 도출하고 기존의 PCF 공정으로 제작한 시험편과 비교하는 것이 목표다. 우선, 본 연구에서 제안한 SiC 몰드와 마이크로파 오븐을 사용하여 DCB 시험편을 제작하였다. 그 후, DCB 시험을 수행하여 시험편의 층간분리 길이(delamination length), 하중-변위 그래프를 도출하였다. DCB 시험으로부터 얻어진 실험 데이터를 활용하여 modified beam theory(MBT), compliance calibration method(CCM)으로 모드 I 에너지 해방률을 도출하였다. 도출한 모드 I 에너지 해

방률은 기존의 PCF 공정으로 제작한 DCB 시험편의 에너지 해방률과 비교하였다.

2. 마이크로파 오븐 및 SiC 몰드

2.1 마이크로파 오븐

이전 연구에서는 MCF 공정을 수행하기 위하여 기존의 상업용 마이크로파 오븐과 PTFE 몰드를 사용하였다[9]. 하지만 상업용 마이크로파 오븐의 경우, 마그네트론(magnetron)의 input power 를 시간에 따라 수동으로 제어하기 때문에 정밀한 온도 제어가 불가능하다. 또한, MCF 공정 중 내부 온도 측정이 불가능한 점, PTFE 몰드의 불균일한 열팽창압이 이전 연구에서 적용한 PTFE 몰드를 사용한 MCF 공정의 한계점이었다[9]. 이를 극복하기 위해서, 본 연구에서는 마이크로파 오븐을 제작하였으며, PTFE 몰드를 대체하여 SiC 몰드를 사용하였다.

2.1.1 챔버 설계

본 연구에서는 원통형 형상의 마이크로파 오븐을 제작하였다. 이때 챔버(chamber)의 지름은 약 620 mm 이며, 길이는 약 1026 mm 이다. 챔버의 두께는 내부 공기압의 최대값인 15 bar 를 견딜 수 있도록 약 6 mm 로 설계하였다. 설계한 챔버는 Fig. 1 과 같으며, 마그네트론의 설치 및 열화상 이미지 촬영을 위하여 각각 직사각형, 원형 홀(hole)을 가공하였다.

챔버의 수평선을 기준으로 약 25 도에 가공된 직사각형 홀은 마그네트론과 마이크로파를 전달하기 위한 웨이브 가이드가 연결되며, 챔버 내부 압력을 유지하면서 동시에 마이크로파가 챔버 내부로 조사되기 위하여 실리케이트 윈도우(silicate window)를 설치하였다. 챔버의 상부의 직사각형 홀의 경우, 챔버 내부를 확인하기 위한 조명이 설치되는 곳이며, 마찬가지로 실리케이트 윈도우가 설치되었다. 이때, 챔버 내부의 마이크로파가 외부로 누출되지 않기 위하여 stainless steel 로 이루어진 타공판을 실리케이트 윈도우의 챔버 내부 방향에 설치하였다. 타공판의 타공 지름은 기존의 상업용 마이크로파 오븐의 타공판을 참고하여 약 2 mm 로 설계하였다. 이 경우, 타공 지름이 마이크로파의 파장인 약 122.45 mm 보다 짧기 때문에 마이크로파가 투과하지 못하고 반사하며, 가시광선은 투과하여 내부에 조명의 빛을 조사할 수 있다. 또한, 챔버 내부에서 반사된

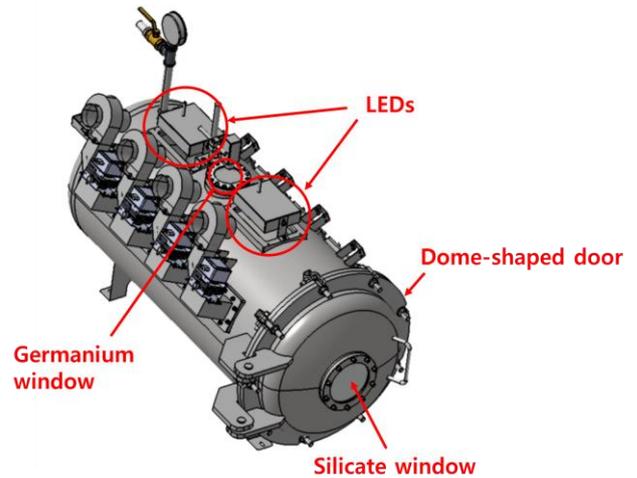
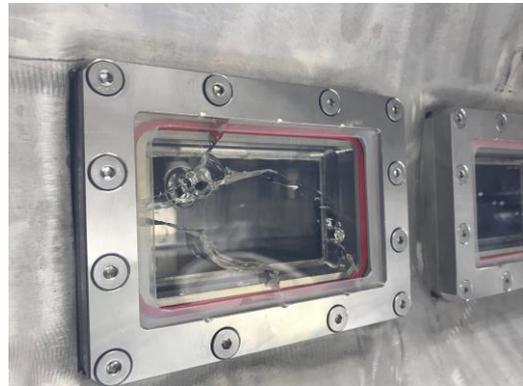


Fig. 1 3D model of chamber



(a) dielectric breakdown on silicate window



(b) steel shields to prevent dielectric breakdown

Fig. 2 Broken silicate window and steel shields

마이크로파와 마그네트론으로부터 조사되는 마이크로파가 서로 간섭하여 Fig. 2(a)와 같이 실리케이트 윈도우에 유전 파괴(dielectric breakdown)가 발생되는

것을 막기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 stainless steel 로 이루어진 metal shield 를 설치하였다. 챔버의 원형 홀은 마이크로파가 외부로 누출되는 것을 막으면서 내부의 열화상 이미지 촬영을 용이하게 하기 위하여 저마늄 윈도우(germanium window)를 설치하였다.

저마늄 윈도우의 경우, 적외선만 투과시키는 전자기와 필터(electromagnetic wave filter) 역할을 하기 때문에 마이크로파는 차단함과 동시에 적외선 촬영이 가능하다.

2.1.2 마이크로파 조사 장치

본 연구에서는 MCF 공정 도중 마이크로파 오븐 내부의 온도에 따라 input power 를 제어하기 위하여 Luxtem 사에서 제작한 인버터형 마그네트론(inverter-type magnetron)을 사용하였다. 총 4 개의 마그네트론이 챔버에 설치되었으며, 각 마그네트론의 주파수는 2.45GHz, 가용 input power 의 범위는 0W 에서 1100W 이다. 각 마그네트론은 switched-mode power supply(SMPS)에 연결하여 전압을 제어하는 방식으로 input power 를 제어하였다. 또한, MCF 공정 중 발생할 수 있는 마그네트론의 과열을 막기 위하여 각 마그네트론에 Fig. 3(a)와 같이 국부적인 냉각에 용이한 sirocco-type 의 냉각 팬(cooling fan)을 설치하였다.

마그네트론으로부터 생성된 마이크로파를 챔버 내부로 조사하기 위하여 Fig. 3(b)와 같이 웨이브가이드(waveguide)를 마그네트론과 챔버 사이에 설치하였다. 웨이브가이드는 형상에 따라 차단주파수 대역(cut-off frequency band)이 존재하며, 본 연구에서 사용하는 주파수를 고려하여 WR 340 을 사용하였다.

WR 340 은 SUS 304 재질이며, 약 1.736 GHz 이하의 주파수와 약 3.471 GHz 이상의 주파수를 차단한다. 따라서 본 연구에서 사용하는 마그네트론에서 발생하는 마이크로파의 주파수인 2.45 GHz 를 고려하였을 때, WR 340 은 웨이브가이드로써 적절하다 판단하였다.

2.1.3 온도 측정 장치

MCF 공정 중, 몰드의 온도를 제어하기 위해서는 몰드의 온도를 측정하는 것이 중요하다. 열전대(thermocouple)는 온도를 측정하기 위한 장비로 널리 사용되고 있으나, 열전대의 끝 부분에 유전파괴(dielectric breakdown)이 발생할 가능성이 높다. 따라서, 본 연구에서는 Weldmann 사의 광섬유 온도



(a) sirocco-type cooling fans



(b) waveguide assembled with magnetron

Fig. 3 Cooling fans and waveguides of microwave oven

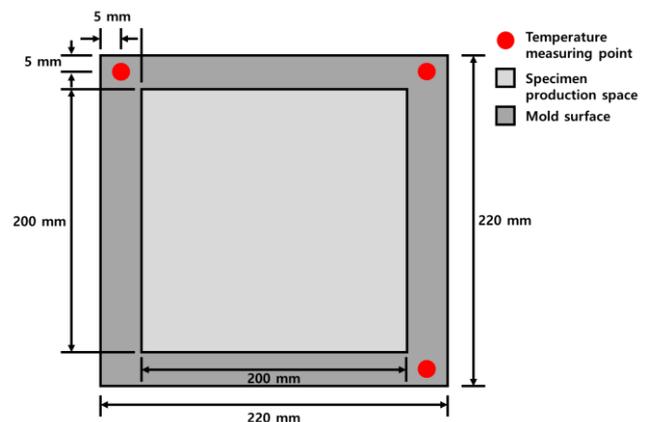


Fig. 4 Temperature measuring spots on SiC mold

측정 센서를 사용하였다. 광섬유 온도 측정 센서의 경우, 유전파괴를 막기 위하여 섬유 외피가 PTFE 재질로 이루어져 있다. PTFE 는 유전상수(dielectric constant)와 유전손실(dielectric loss)가 아주 낮으며, 유전파괴 강도가 매우 높은 소재이기 때문에

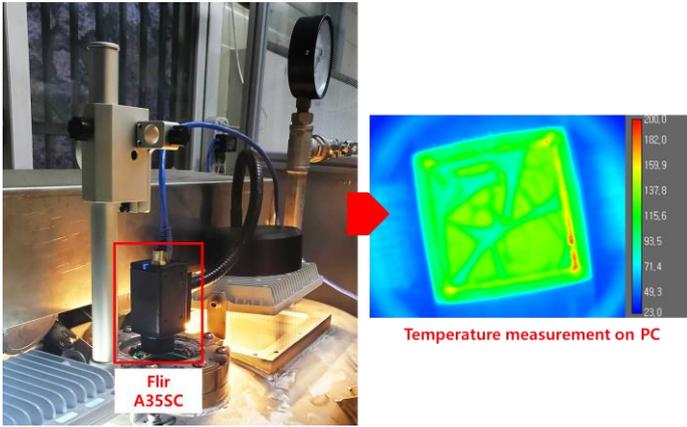


Fig. 5 IR camera installed on microwave oven and actual measured IR image



Fig. 6 Control board to set temperature cycle

우수한 절연재료로 알려져 있다[15]. 본 연구에서는 3 개의 광섬유 온도 측정 센서를 사용하였으며, Fig. 4 와 같이 몰드 내부의 STS 304 판재 가장자리에서 측정을 실시하였다. 측정된 온도 값들은 실시간으로 마이크로파 오븐에 기록되며, 세 온도값의 평균값을 사용하여 마이크로파 오븐의 input power 를 제어하였다.

또한, MCF 공정 중, 실제 몰드의 온도 분포를 측정하기 위하여 Fig. 5 와 같이 FLIR 사의 A355C 열화상 카메라를 챔버 상부에 설치하였다. 열화상 카메라의 경우, 실시간으로 온도 분포가 컴퓨터에 전달되며, 스파크 발생 여부를 확인하기 용이하다.

2.1.4 온도 제어 방법

MCF 공정은 주어진 공정 시간 동안 몰드의 온도가 일정하게 유지될 수 있게 하는 것이 중요하다.

Table 1 Input power depending on measured temperature

Input power (W)	Temperature range (°C)
1100	$T < (T_{set} - T_r)$
$-1100/T_r \cdot (T - T_{set})$	$(T_{set} - T_r) \leq T \leq T_{set}$
0	$T > T_{set}$

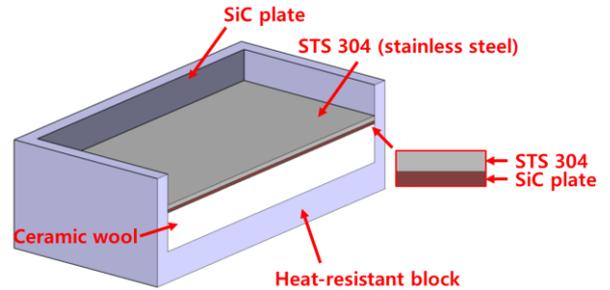


Fig. 7 Configuration of SiC mold

따라서, 본 연구에서는 Fig. 6 과 같이 공정 시간에 따른 온도 제어가 가능한 제어 보드를 구축하였다. 광섬유 온도 측정 센서로부터 측정된 평균 온도값에 의하여 각 마그네트론의 input power 는 Table 1 과 같이 계산된다. 이때, T 는 센서로부터 측정된 평균 온도값이며, T_{set} 은 목표 온도, T_r 은 보정 온도값이다.

본 연구에서는 경험적 방법으로 보정 온도값에 15 를 대입하였다. 만약, T 가 $(T_{set} - T_r)$ 보다 낮은 온도일 때, 각 마그네트론의 input power 는 1100 W 이며, T_{set} 까지 도달하는 동안 input power 가 0 W 될 때 까지 선형적으로 감소시킨다. 이러한 방법은 몰드의 열관성에 의한 과도한 과열(over heating)을 방지할 수 있으며, T_r 의 값을 조절함으로써 상황에 따른 열관성을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.2 SiC 몰드

SiC 몰드는 Fig. 7 과 같이 내열 블록, 세라믹 울 (ceramic wool), STS 304 판재, SiC 판재로 구성되어 있다. SiC 판재는 유전가열 소재로써 마이크로파 소각로(microwave incinerator), 산업용 열풍기(industrial hot air blower) 등 여러 곳에서 활용되고 있는 소재다. 내열 블록의 경우, 몰드의 형상을 유지시켜주며 SiC 판재의 높은 열이 외부로 방출되는 것을 막아주는 역할을 한다. 세라믹 울은 단열 효과와 함께 SiC

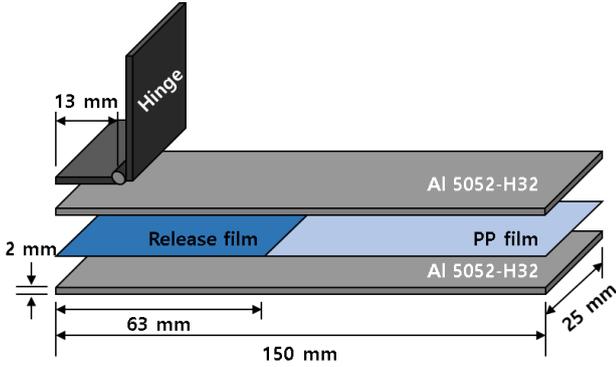


Fig. 8 Configuration of DCB specimen

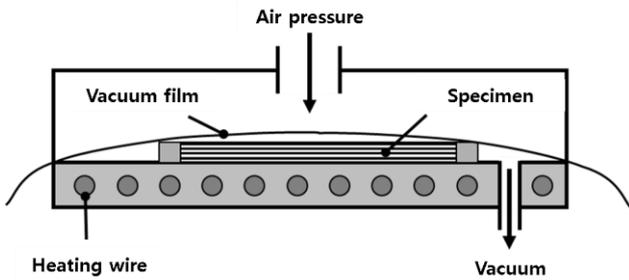


Fig. 9 Configuration of PCF process

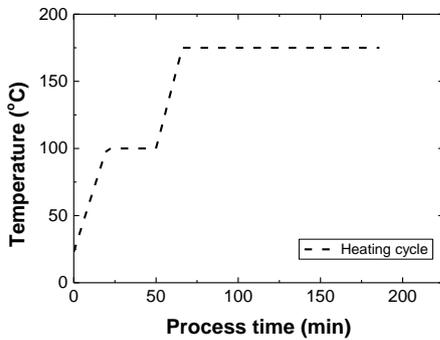


Fig. 10 Heating cycle of PCF process

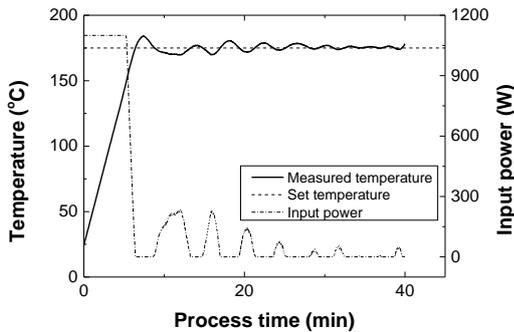


Fig. 11 Measured temperature and input power according to process time

몰드 내부에 삽입되어 있는 SiC 판재를 충격으로부터 보호하는 역할을 한다. STS 304 판재는 내부의 SiC 에 발생한 열이 시험편에 간접적으로 전달되도록 하는 역할을 한다. SiC 몰드는 가용 길이와 폭이 각각 약 210 mm 이며, 깊이는 약 10 mm 이다.

3. DCB 시험편 제작

3.1 DCB 시험편 규격

본 연구에서는 MCF 공정으로 제작한 DCB 시험편의 PP 접착층에 대한 모드 I 에너지 해방률을 PCF 공정으로 제작한 DCB 시험편의 PP 접착층에 대한 모드 I 해방률과 비교하기 위하여 Fig. 8 과 같이 ASTM D5528 을 참고하여 DCB 시험편을 제작하였다[16]. 시험편은 Al 5052-H32 판재와 Collano 사의 PP 필름(Collano 23.111)로 구성되어 있으며, 시험편의 길이는 약 150 mm 이며, 폭은 약 25 mm 이다. 이때, PP 필름의 길이는 약 87 mm 이며, 폭은 시험편과 동일하다. 시험편의 남은 영역은 이형 필름(release film)이 삽입되어 Al 5052-H32 판재가 서로 접촉되지 않도록 하였으며, 힌지(hinge)를 부착하기 위한 공간인 약 13 mm 와 PP 필름이 원활하게 층간 분리가 이루어지도록하는 초기 층간 분리 길이 약 50 mm 를 확보하였다.

Fig. 8 과 같이 적층한 DCB 시험편은 힌지를 부착하지 않은 상태에서 PCF 공정과 MCF 공정을 통해 PP 필름을 용융 및 응고시킴으로써 접착 시킨다. 그 후, DCB 시험 중 층간 분리 길이를 측정하기 위하여 시험편의 측면을 5 mm 간격의 눈금을 표시하였다. 그 후, 힌지는 에폭시(epoxy) 접착제를 사용하여 DCB 시험편에 부착하였다.

3.2 PCF 공정

PCF 공정은 Fig. 9 와 같이 밀폐된 공간에서 열선(heat wire)이 삽입된 하부 금형을 가열하여 DCB 시험편을 제작하는 공정이다. DCB 시험편을 제작하기 위하여 Fig. 10 과 같은 온도 사이클을 사용하였으며, 최대 온도는 PP 필름의 용융 온도를 고려하여 약 175°C 로 설정하였다. 용융된 PP 필름의 기포를 제거하기 위하여 약 0.4 MPa 의 공기압을 가하였다. PCF 공정이 끝난 이후, DCB 시험편은 상온 조건에서 서서히 냉각시켰다.

3.3 MCF 공정

본 연구에서는 SiC 몰드를 사용하여 MCF 공정을 수행하였으며, T_{set} 는 175°C, 총 공정 시간은 40 분으로 설정하였다. 이때, 챔버 내부는 PCF 공정과 같이 약 0.4 MPa의 공기압을 가하였다. MCF 공정 중 실제 공정 시간에 따른 SiC 몰드의 온도와 input power의 추이는 Fig. 11과 같다. 마이크로파가 조사되기 시작함과 동시에 SiC 몰드의 온도가 급격히 상승함을 확인할 수 있으며, 온도 제어 시스템에 따라 input power가 감소됨을 확인하였다. 그 후, 열관성에 의하여 초기에 약 184°C까지 온도가 상승하였지만 다시 냉각하여 결과적으로 175°C에 점차적으로 수렴함을 확인하였다. MCF 공정이 끝난 뒤, DCB 시험편은 PCF 공정과 같이 상온 조건에서 서서히 냉각시켰다.

4. DCB 시험 및 에너지 해방률 도출

4.1 DCB 시험

본 연구에서는 PP 필름의 모드 I 에너지 해방률을 도출하기 위하여 DCB 시험을 수행하였다. DCB 시험은 Fig. 12과 같이 MDTI사의 만능재료시험기(MINOS-020)를 사용하여 수행되었으며, 인장속도는 10 mm/min이다. 만능재료시험기의 측정 장비로부터 하중과 수직 변위를 측정하였으며, 층간 분리 길이는 DCB 시험을 영상으로 촬영하여 실제 실험 시간과 동기화하는 방법으로 측정하였다. PCF 공정과 MCF 공정으로 제작한 DCB 시험편의 하중-변위 그래프는 Fig. 13(a)와 같으며, 층간 분리 길이에 따른 하중은 Fig. 13(b)와 같다.

4.2 모드 I 에너지 해방률

본 연구에서는 ASTM D5528을 참고하여 PP 필름의 모드 I 에너지 해방률을 modified beam theory(MBT), compliance calibration method(CCM)으로 도출하였다.

MBT는 층간 분리가 발생한 전면부가 완전 구속 조건일 때, 식(1)과 같이 모드 I 에너지 해방률을 도출할 수 있다.

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1)$$

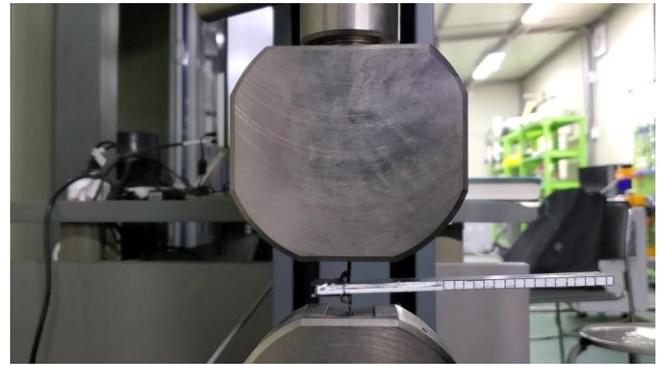
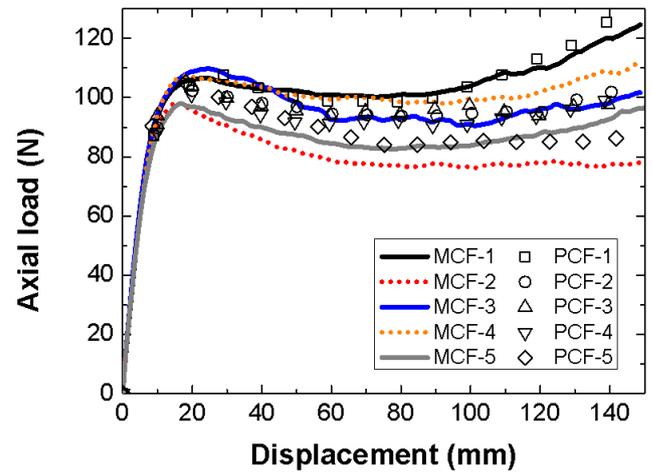
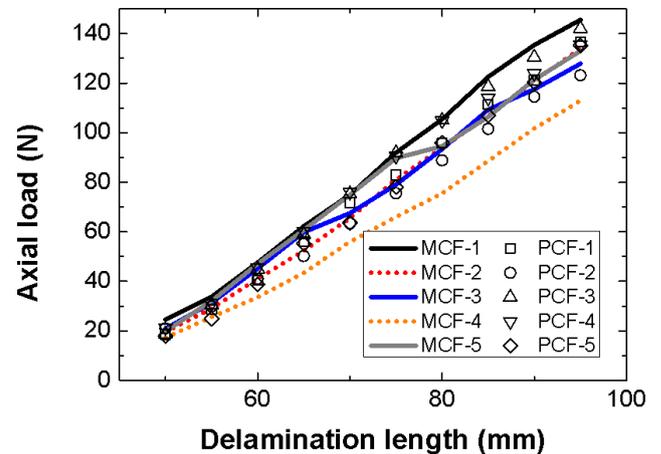


Fig. 12 DCB test conducted using universal material testing machine (MINOS-020)



(a) displacement vs. axial load



(b) delamination length vs. axial load

Fig. 13 Axial load data according to displacement and delamination length

G_{ic} 는 모드 I 에너지 해방률이며, P 는 측정 하중, δ 는 수직 변위, b 는 시험편의 폭, a 는 층간 분리 길이이다. 식(1)의 경우, DCB 시험 중 실제 시험편의 회전 운동이 반영되지 않았기 때문에 회전 운동에 의한 층간 분리 길이를 보정할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 ASTM D5528 을 참고하여 식(2)와 같이 MBT 를 보정하여 모드 I 에너지 해방률을 도출하였다.

$$G_{ic} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad (2)$$

Δ 는 층간 분리 길이를 보정하기 위한 인자로써, Fig. 14 과 같이 층간 분리 길이에 대한 절편과 같다. 이때, Fig. 14 의 C 는 DCB 시험편의 컴플라이언스이며, 수직 변위와 하중에 대한 비인 δ/P 이다.

CCM 은 $\log C$ 와 층간 분리 길이를 Fig. 15 와 같이 도출한 후, 식(3)을 사용하여 모드 I 에너지 해방률을 도출하였다.

$$G_{ic} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (3)$$

n 은 선형 곡선 접합(linear curve fit)을 사용하여 도출한 Fig. 15 의 기울기를 의미한다.

4.3 모드 I 에너지 해방률 비교

DCB 시험으로부터 도출한 모드 I 에너지 해방률은 Table 2 와 같다. MBT 를 사용하여 도출한 모드 I 에너지 해방률의 경우, MCF 공정으로 제작한 DCB 시험편의 경우, PCF 공정으로 제작한 DCB 시험편보다 모드 I 에너지 해방률이 약 0.97% 낮음을 확인하였으며, CCM 를 사용하여 도출한 모드 I 에너지 해방률의 경우, MCF 공정으로 제작한 DCB 시험편이 PCF 공정으로 제작한 DCB 시험편보다 모드 I 에너지 해방률이 약 1.39% 낮음을 확인하였다. 수치적으로 미루어 보았을 때, MCF 공정으로 제작한 DCB 시험편이 PCF 공정으로 제작한 DCB 시험편보다 모드 I 에너지 해방률이 상대적으로 낮으나 유의미한 차이는 보이지 않음을 확인하였다. 이는 MCF 공정이 PCF 공정을 충분히 대체할 수 있음을 알 수 있으며, 공정 시간을 미루어 보았을 때, MCF 공정이

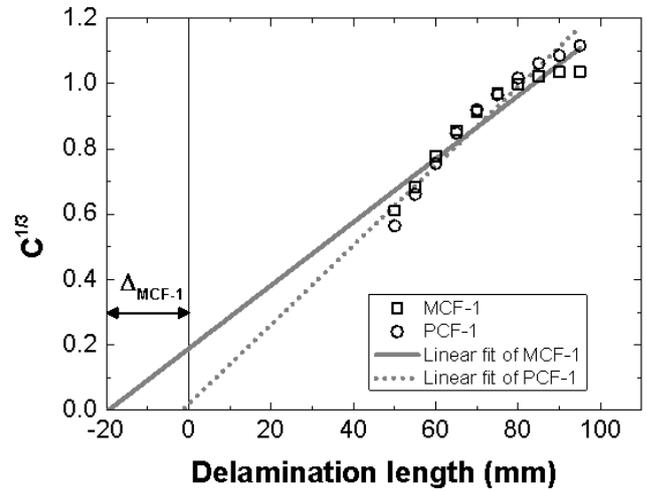


Fig. 14 Calculation of correction factor for MBT

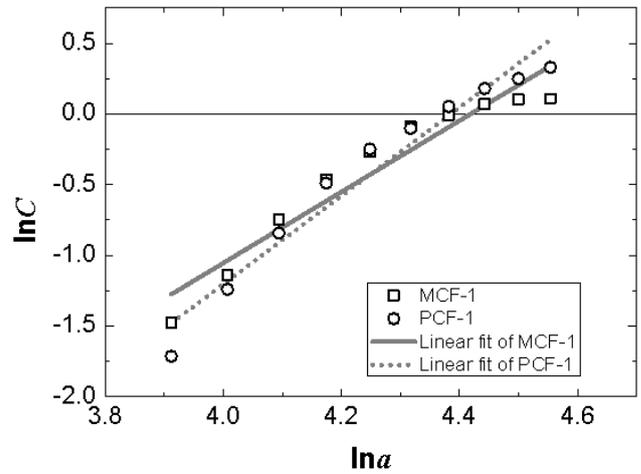


Fig. 15 Calculation of slope for CCM

Table 2 Mode-I energy release rate of DCB specimens

Process	Mode-I energy release rate (N/mm)			
	MBT		CCM	
	Avg.	Std.	Avg.	Std.
MCF	1.8857	0.1350	2.4483	0.2168
PCF	1.9041	0.1927	2.4829	0.1730

효율적으로 DCB 시험편을 제작할 수 있음을 확인하였다. PCF 공정의 경우, 열선이 삽입된 금형의 두께, 열전도성에 따라 목표 온도까지 도달하는 것에 비교적 많은 시간을 소요하지만, MCF 공정의 경우 SiC 판재와 시험편이 유전 가열에 의하여 직·간접적

으로 가열되기 때문에 비교적 빠른 가열 속도를 보임을 확인하였다. 또한, SiC 몰드를 사용함으로써 MCF 공정의 문제점인 불균일한 전자기장에 의한 피가열체의 국부가열 문제를 SiC 몰드 자체의 발열로 해결할 수 있음을 보였다. 아울러, 본 연구는 열가소성 수지 중 하나인 PP 필름이 충분히 용융되어 접착될 수 있음을 확인하였기 때문에 MCF 공정을 이용한 열가소성 복합재 성형의 적용 가능성을 충분히 입증하였다고 판단할 수 있다. 하지만, 본 연구에서 제안한 DCB 시험편의 층간 분리 길이는 영상 촬영 시 렌즈 또는 화각에 따른 시각적 오차와 영상과 실제 실험간 시간에 따른 오차가 다소 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 DCB 시험편의 가장자리 라인 또는 crack tip 을 인식할 수 있는 이미지 트래킹(image tracking) 기법을 사용한 측정 방법[17], 또는 음향 방출 센서(acoustic emission sensor)를 사용한 음향 신호 분석법 등의 방법 등이 있다[18].

5. 결론

본 연구에서는 MCF 공정을 이용하여 제작한 DCB 시험편의 접착층인 PP 필름에 대한 모드 I 에너지 해방률을 도출하는 것이 목표다. MCF 공정을 수행하기 위하여 마이크로파 오븐을 제안하였으며, 제안한 마이크로파 오븐을 사용하여 DCB 시험편을 제작 및 DCB 시험을 수행하였다. DCB 시험으로부터 도출한 모드 I 에너지 해방률은 기존의 PCF 공정으로부터 얻어진 모드 I 에너지 해방률과 비교하였으며, 본 연구의 결과는 아래와 같다.

(1) MBT 와 CCM 를 사용하여 도출한 모드 I 에너지 해방률의 경우, MCF 공정으로 제작한 DCB 시험편이 PCF 공정으로 제작한 시험편보다 각각 약 0.97%, 1.39% 낮음을 확인하였다. 이는 MCF 공정이 PCF 공정과 비교적 유사한 모드 I 에너지 해방률을 얻을 수 있음을 확인하였다.

(2) 공정 시간을 고려하였을 때, MCF 공정이 PCF 공정보다 비교적 효율적으로 시험편을 제작할 수 있음을 확인하였다. PCF 공정의 경우, 하부 금형의 두께, 열전도성에 따라 가열 속도가 비교적 느린 반면, MCF 공정이 유전 가열 원리에 따라 몰드와 피가열체를 동시에 가열하기 때문에 가열 속도가 비교적 빠른 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 DCB 시험의 경우, 형성된 접착층에 대한 미세 조직 관찰이 이루어지지 않았다. 따라서, 향후 MCF 공정으로 제작한 DCB 시험편을 광학 또는 전자 현미경으로 관찰 및 분석할 계획이며, 이를 이용하여 PCF 공정과 MCF 공정간 시험편의 공극(void)에 대한 정량적·정성적 비교를 수행할 계획이다.

후 기

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

REFERENCES

- [1] Grand View Research, 2020, Composites Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Carbon, Glass), By Resin (Thermosetting, Thermoplastics), By Manufacturing Process, By End Use, And Segment Forecasts, 2020–2027
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/composites-market>.
- [2] H. S. Choi, H. S. Roh, W. J. Choi, and M. S. Ha, 2005, Load Transfer Behaviors of the Splice-Jointed Fiber Metal Laminates, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 29, No. 2, pp. 220–227. <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2005.29.2.220>
- [3] V. M. Karbhari, 2004, Fiber Reinforced Composite Bridge Systems—Transition from the Laboratory to the Field, *Compos. Struct.*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.04.026>
- [4] K. Mehl, S. Schmeer, N. Motsch-Eichmann, P. Bauer, I. Müller, and J. Hausmann, 2021, Structural Optimization of Locally Continuous Fiber-Reinforcements for Short Fiber-Reinforced Plastics, *J. Compos. Sci.*, Vol. 5, No. 5, pp. 118. <https://doi.org/10.3390/jcs5050118>
- [5] A. Vlot and L. B. Vohelesang, 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)

- [6] Z. S. Toor, 2018, Space Applications of Composite Materials, *J. Space Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 65~70.
- [7] J. M. Lee, B. M. Lee, and D. C. Ko, 2016, CFRP Compression Forming Technology, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 3, pp. 203~208.
- [8] B. J. Han, Y. C. Jeong, C. M. Kim, R. W. Kim, and M. Kang, 2019, Forming Characteristics during the High-Pressure Resin Transfer Molding Process for CFRP, *Adv. Compos. Mater.*, Vol. 28, No. 4, pp. 365~382. <https://doi.org/10.1080/09243046.2018.1556236>
- [9] E. T. Park, Y. H. Lee, J. Kim, B. S. Kang, and W. J. Song, 2020, Experimental Study on Manufacturing Fiber Metal Laminate using Microwave Heating Based on PTFE mold, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 29, No. 4, pp.179~187.<http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2020.29.4.179>
- [10]R. R. Mishra and A. K. Sharma, 2016, Microwave-Material Interaction Phenomena: Heating Mechanisms, Challenges and Opportunities in Material Processing, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 81, pp. 78~97. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.035>
- [11]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, No. 24, pp. 3035~3048. <https://doi.org/10.1177/0021998313504606>
- [12]N. Li, Y. Li, J. Jelonnek, G. Link, and J. Gao, 2017, A New Process Control Method for Microwave Curing of Carbon Fibre Reinforced Composites in Aerospace Applications, *Compos. Part B-Eng.*, Vol. 122, pp. 61~70. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.009>
- [13]X. Xu, X. Wang, W. Liu, X. Zhang, Z. Li, and S. Du, 2016, Microwave Curing of Carbon Fiber/Bismaleimide Composite Laminates: Material Characterization and Hot Pressing Pretreatment, *Mater. Des.*, Vol. 97, pp. 316~323. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.093>
- [14]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>
- [15]H. Y. Park, M. S. Ahn, and D. P. Kang, 1996, Proc. Kor. Inst. Electr. Electron. Mater. Eng. Conf., Kor. Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., Korea, pp. 216~219.
- [16]ASTM Standard D5528, 2013, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, DOI: 10.1520/D5528-13.
- [17]C. Schmandt and S. Marzi, 2018, Effect of Crack Opening Velocity on Fracture Behavior of Hyperelastic Semi-Structural Adhesive Joints Subjected to Mode I Loading, *Procedia Struct. Integrity*, Vol. 13, pp. 799~805. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.154>
- [18]S. Samborski, A. Gliszczynski, J. Rzeczkowski, and N. Wiacek, 2019, Mode I Interlaminar Fracture of Glass/Epoxy Unidirectional Laminates. Part I: Experimental Studies, *Mater.*, Vol. 12, No. 10, pp. 1607. <https://doi.org/10.3390/ma12101607>