Journal of the KIMST, Vol. 18, No. 3, pp. 293-299, 2015
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2015.18.3.293

Research Paper 에너지 · 탄두 부문

연속발진 레이저에 의한 공기 유동에 노출된 유리섬유 강화 플라스틱 손상효과

이광현*,1) · 신완순1) · 강응철1)

1) 국방과학연구소 국방고등기술원 첨단기술연구센터

Damage Effect on Glass Fibre Reinforced Plastics under Airflow by a Continuous Wave Laser

Kwang Hyun Lee*,1) · Wan-Soon Shin1) · Eung-Cheol Kang1)

1) *Advanced Technology Agile Development Center, Institute of Defense Advanced Technology Research, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 14 October 2014 / Revised 20 April 2015 / Accepted 22 May 2015)

ABSTRACT

We analyzed the damage effect on Glass Fibre Reinforced Plastics(GFRP) under air flow by irradiation of continuous wave near-IR laser. Damage process and temporal temperature distribution were demonstrated and material characteristics were observed with laser intensity, surface flow speed and angle. Surface temperature on GFRP rapidly increased with laser intensity, and the damaged pattern was different with flow characteristics. In case of no flow, penetration on GFRP by burning and flame generation after laser irradiation was appeared at once. GFRP was penetrated by the heat generated from resin ignition. In case of laser irradiation under flow, a flame generated after burning extinguished at once by flow and penetration pattern on GFRP were differently shown with flow angle. From the results, we presented the damage process and its mechanism.

Key Words : CW Laser(연속발진 레이저), GFRP(유리섬유 강화 플라스틱), Air Flow(공기유동), Laser Damage Effect (레이저 손상 효과)

1. 서 론

유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fibre Reinforced Plastics, GFRP)은 무게가 가볍고 인장 강도가 우수한 특성을 가지고 있어, PCB, 풍력발전 블레이드, 자동차 및 무인기 등의 외장 재료로 널리 사용되고 있고 있다[1-6]. 특히 무인기의 경우 강도를 유지 하면서 무게를 최소화 하여 작은 동력으로 운용을 할 수 있어야 함으로 GFRP가 많이 사용되고 있다[1].

최근 무인기에 대한 감시정찰 활동이 증가함에 따라 이에 대한 방어 대응 수단에 대한 관심이 증가되고 있

* Corresponding author, E-mail: khlee82@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

다. 레이저의 경우 광속으로 빛을 전달하므로 신속 대응이 가능하고, 발사당 가격이 저렴함으로 무인기 대응 수단중 하나로 개발되고 있다. 무인기에 대한 레이저 효과를 확인하기 위해서는 손상에 필요한 에너지 수준과 손상 메커니즘이 사전에 도출되어야 한다.

GFRP는 복합소재로써 가는 유리섬유를 접착을 위한 레진과 함께 촘촘히 배열하여 가공한다. 유리섬유의 조성은 대부분 SiO_2이며 약간의 Al_2O_3, CaO, MgO 등의 산화화합물이 혼합되어있다. 유리섬유를 배열하는 방법에 따라 평직, 능직, 주자직, 후레이직 등의 조직구조를 가지며, 유리섬유를 직교하여 쌓는 평직이 가장 일반적인 방법이다[7,8]. 유리섬유를 접착시키기 위해 사용한 레진은 Bisphenol A 계열의 에폭시 타입 유기물로 발화점이 낮기 때문에, 발화점 이상으로 상승시키는 에너지를 전달하면 점화 및 연소시킬 수 있다[9,10]. 또한 무인기가 비행할 때 표면에 공기 유동이 발생하므로, 유동 특성에 따라 연소된 물질이 유동과 함께 비산되어 손상효과가 다르게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

본 연구에서는 레이저 조사에 의한 GFRP의 손상효과를 확인하기 위해 근적외선 파장의 연속발진 레이저를 이용하여 유동 특성 변화에 따른 GFRP의 손상 실험을 수행하였다. 손상 효과를 확인하기 위해 레이저 빔강도, 표면 공기 유속 및 방향에 따른 가시적 손상 변화와 표면 온도 및 손상된 시편의 재료적 특성을 분석하여 조건에 따른 손상효과 및 손상메커니즘을 규명하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

유동 중에 놓인 GFRP에 레이저를 조사하기 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 레이저 조사를 위해 GFRP 시편을 별도의 마운트를 이용하여 레이저 조사 방향과 수직으로 설치 고정하였으며, 바람의 방향과 유속을 변화시킬 수 있도록 장치를 고안하였다. 바람의 방향을 변화시키기 위해 아음속 노즐을 사용하였으며, 시편을 기준으로 0 ~ 90°의 임의의 방향으로 노즐 분사 각도를 변환 고정할 수 있는 마운트를 사용하였다. 본 실험에서는 공기 유동방향에 따른 효과만을 확인하기 위해 분사각도를 0°와 45°로 제한하였다. 바람의 유속변화를 위해 별도의 공기공급장치를 이용하고, 노즐에 가해지는 공기의 압력은 공압 레귤레이터를 이용하여 변화시켰다. 유동 입사각도에 따른 시편 표면 근처의 레이저 조준점에서의 유속을 측정하기 위해 2공 피토관(Pitot tube)을 이용하였다. 레이저 조사에 따른 GFRP의 표면의 온도분포는 적외선 온도계(IMPAC IN 5, Lumasense)를 이용하여 측정하고, 손상과정 측정은 가시광 CCD 카메라를 이용하여 수행하였다. 반사 및 산란되는 레이저 빔에 의한 영상 포화를 방지하기 위해 카메라 앞에 근적외선 차단 필터를 사용하였다.

Table 1은 실험에 사용된 레이저 사양을 나타낸다. 레이저에 의한 표적 손상 정도는 빔강도에 따라 달라지므로, 빔강도 변화를 위해 레이저 출력 또는 빔 직경을 바꿀 필요가 있다. 레이저 출력은 최소 100 W에서 1 kW 사이에서 가변이 가능하며, 빔 직경은 레이저 시준기(Collimator)에서 나온 빔을 볼록 렌즈(f = 200 mm)를 이용하여 변화시켰다.

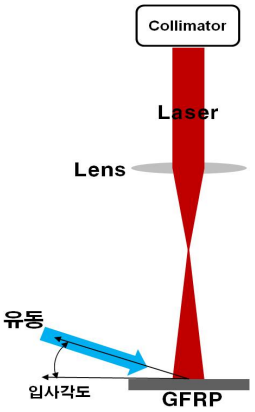

Fig. 1. Schematic of experimental

Table 1. Laser specification

List	Specification
Medium	Yb-doped fiber
Type	CW
Wavelength	λ = 1.07 μm
Power	Max. 1 kW
Polarization	Random
Beam diameter	5.85 mm
M2	1.05
Beam divergence	0.24 mrad

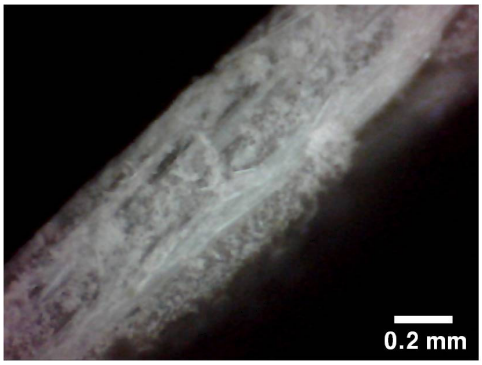

Fig. 2. Cross section of GFRP

Fig. 2는 광학 현미경을 이용하여 촬영된 GFRP의 단면 사진을 나타낸다. 단면구조는 총 5겹의 평직(수직교차배열)형태로 짜여진 유리섬유 층으로 구성되어 있음을 확인하였다.

레이저 조사에 의한 GFRP의 손상효과를 정량적으로 규명하기 위해서는 재료적 특성 및 시편의 광학적 특성이 확인되어야 한다. 시편으로 사용된 GFRP의 재료적 특성 및 광학적 특성을 확인하기 위해 시편 단면 사진 촬영 및 투과율과 반사율 측정을 수행하였다.시편 표면이 페인트로 도장되어 있기 때문에 빛은 표면에서 난반사되는 특성을 가지므로 적분구를 이용하여 반사율을 측정하였다. 투과율의 경우 spectrophotometer (Cary 5G)를 이용하여 파장별 투과율을 측정하였다. Fig. 3은 측정된 결과를 나타낸다. 측정된 투과율과 반사율 결과로부터 아래의 수식 (1)을 통해 GFRP의 흡수계수를 구하였다.

$$a = -\frac{1}{t} ln(\frac{T}{1-R}) \quad (1)$$

T는 투과도, R은 반사도, t는 시편의 두께를 각각 나타낸다. Fig. 4에 계산된 흡수계수 그래프를 나타내었다.

Table 2는 문헌 및 측정 결과로부터 획득한 GFRP의 물성을 나타낸다. 사용한 GFRP의 두께는 0.65 mm로써 Fig. 4에서 구한 광학특성으로 판단할 때 조사된 레이저 빔의 73.7 %가 GFRP의 표면으로부터 0.28 mm 깊이에 내부에 흡수되는 것을 알 수 있다. 레진을 열분해하기 위한 발화온도 372 ℃이며, 유리섬유를 용융시키기 위해서는 1200 ℃ 이상의 온도까지 가열해야 함을 알 수 있다.

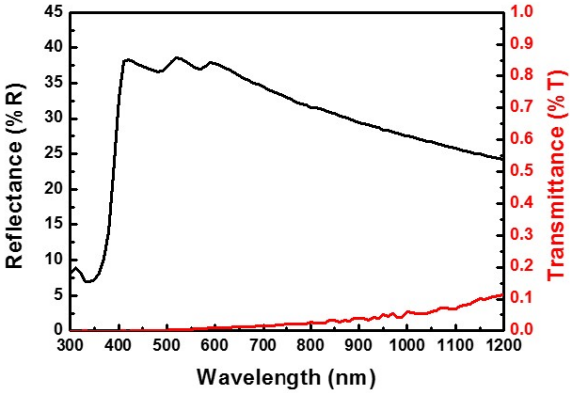

Fig. 3. Reflectance and transmittance of GFRP by wavelength

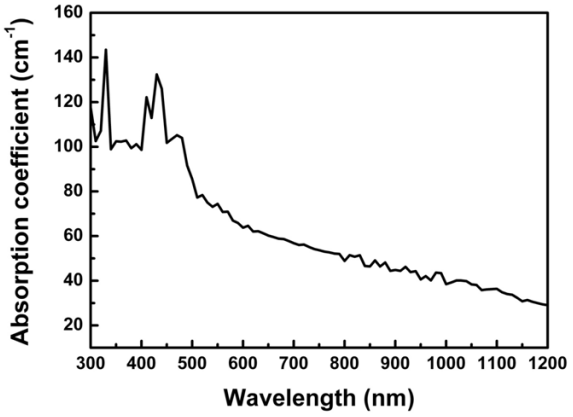

Fig. 4. Absorption coefficient of GFRP by wavelength

Table 2. material data of GFRP[7-11]

Thickness	Density	Resin ignition T	Thermal conductivity
0.65 mm	1.76 ~ 2.01 g/cm^3	372 ℃	10.4 W/mK
Specific heat	GFRP softening T	GFRP melting T	GFRP min. viscosity T
806.4 J/kg℃	830 ~ 916 ℃	1065 ~ 1200 ℃	1160 ~ 1260 ℃
Refractive index	Transmittace (T) (1070 nm)	Refrectance (R) (1070 nm)	Absorption coefficient (a) (1070 nm)
1.574	0.07 %	26.3 %	35.80 cm^{-1}

2.2 실험결과 및 분석

근적외선 레이저 조사에 의한 GFRP 손상효과를 확인하기 위해 레이저 빔강도, 유동속도 및 방향에 따른 손상실험을 수행하였다. 동일한 조건하에서의 손상특성을 확인하기 위해 조사시간은 동일하게 유지하였다.

Table 3은 실험 조건 및 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 흡수 레이저 빔 강도와 유동 유무 및 입사각도, 손상 형태로 정리하였다. 흡수 빔 강도 지수는 조사된 레이저 빔 강도와 측정된 흡수율(Table 2), 기준 빔강도를 이용하여 무차원화 하여 나타낸 값이다. 시편번호 3~5에서 사용된 빔강도 조건이 1에 해당된다. 유동 입사각에 따른 유속은 구성된 측정 장치로부터 표면방향으로만 측정된 압력으로부터 산출한 값들이다.

Fig. 5는 조건에 따른 레이저 조사 실험시 측정한 실시간 영상과 레이저 조사 후 손상된 시편 사진들이다. Fig. 5(1)는 유동이 없는 경우 빔강도에 따른 손상형태를 나타낸 것으로 레이저 조사시 연소에 의한 화염과 레이저 산란광이 밝게 나타났고, 손상된 시편은 레이저가 조사된 영역 주변으로 연소재가 침착되어있음을 보여준다. 빔강도 지수가 4 이상일 때 관통되었으며, 1일 때는 레이저 조사된 영역의 경계만 관찰될 뿐 관통은 발생되지 않았다. 빔강도 지수에 따라 손상영역의 크기가 달라지는 것은 빔강도를 맞추기 위해 사용된 빔직경이 다르기 때문이다. Fig. 5(2)는 시편 표면에 평행한 유동에 대한 빔강도에 따른 손상형태를 나타낸다. 유동이 없는 경우와 달리 연소에 의한 화염효과가 나타나지 않았고, 점광원형태의 레이저 산란광이 보였다. 모든 시편에서 관통효과를 나타내었고, 관통된 구멍 주변에 침착된 연소재(그을음)도 보이지 않았다. 또한 시편 표면은 레이저광의 가우시안 분포와 유사한 동심원형태로 손상 표면이 나타났다. Fig. 6은 동일한 빔강도 조건 하에 유동의 분사각을 변화시켜 입사각에 따른 효과를 나타내는 결과이다. 유동이 45도 입사 유동 시편 '4'는 관통되지 않았으며, 0도 입사 유동 시편만 관통되었다. 이는 표면 방향의 유속의 차이로 인한 비산 입자 제거 정도가 다르기 때문이다.

Fig. 5~6의 결과를 종합하여 볼 때 레이저에 의한 GFRP의 가시적인 손상 형태는 연소에 의한 (1) 화염(연소)과 (2) 관통으로 생각할 수 있다. 화염 및 연소효과는 유리섬유를 접착할 때 쓰이는 유기물 레진에 의한 발생된 것으로 판단된다. 이는 레진의 발화점이 372 ℃로 낮으며 발화물질이기 때문이다.

Table 3. summary of experimental results

No.	Laser intensity [ab. unit]	Surface (tangential) flow speed [m/s]	Incidence [°]	Damage pattern
1	16	-	-	Burning /penetration
2	4	-	-	Burning /penetration
3	1	-	-	Burning
4	1	60.5	45	-
5	1	106.4	0	Penetration
6	4	106.4	0	Penetration

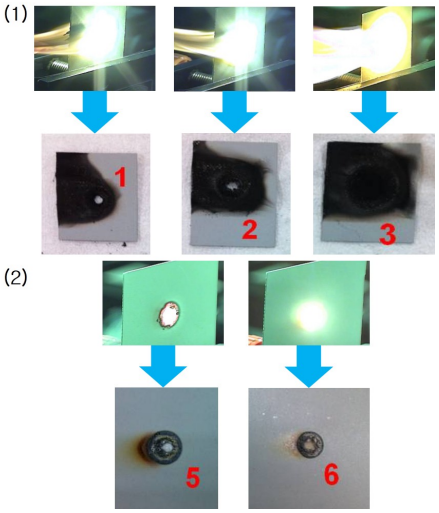

Fig. 5. Damage by laser intensity.
(1) without flow, (2) with flow

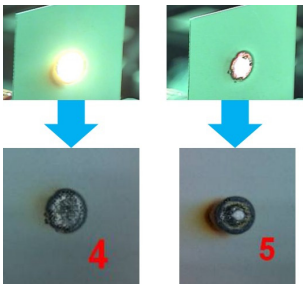

Fig. 6. Damage by flow incidence(left: 45°, right: 0°)

유동이 없는 경우, 레이저에 의한 화염효과는 레진이 발화점 이상으로 가열되었기 때문이다. 하지만 유동이 있는 경우, 화염은 초기에 발생되었다가 바로 소화되었다. 이는 화염 유지를 위해 필요한 레진 열분해 가스와 산소가 용융과 동시에 유동에 의해 외부로 제거되기 때문이다. GFRP의 관통를 위해서는 유리섬유가 용융 또는 증발되어 제거되어야만 한다. 실험에 사용된 E-glass 계열 유리섬유가 관통된 것은 GFRP는 용융 또는 증발 온도 이상으로 가열되어졌음을 의미한다.

Fig. 7~9는 레이저 on 및 off에 따른 GFRP의 가열 및 냉각 온도를 적외선 온도계(측정 한계 : 900 ℃)를 이용하여 측정한 결과이다. 적외선 온도계의 방사율은 열전대와의 온도측정을 통해 선정하였다. Fig. 7은 유동이 없는 경우 레이저 빔 강도에 따른 가열 및 냉각 온도 분포를 나타낸다. Table 4를 통해 빔 강도 지수가 클수록 가열 온도 구배는 크게 나타났으며, 레이저 조사 직후 수 초 이내에 레진의 발화점 이상으로 가열되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 입사각 0도에서 유동이 존재할 때의 레이저 빔 강도에 따른 가열 및 냉각 온도 곡선이다. 빔강도에 따라 온도 구배가 증가하였으며, 유동이 있는 경우에서 유동이 없는 경우보다 동일 빔강도에서 온도 상승속도는 낮게 나타났다. 이러한 결과는 2 가지의 이유로 원인을 유추할 수 있는데, 첫 번째는 고속유동에 의한 GFRP 냉각 효과이며, 두 번째는 유동이 없을 때 발생되는 연소재(Fig. 5)에 의한 광학적 특성 변화이다. 냉각효과는 고속분사된 경우 표면 온도가 더 빠르게 낮아지는 것으로부터 확인 할 수 있다. 광학적 특성 변화는 유동이 없는 경우 레진의 연소재가 표면에 검게 침착되고, 이에 따라 흡수율이 증가하여 GFRP에 흡수되는 레이저 빔의 양이 증가하기 때문에 더 빠른 가열 온도 구배를 나타낸다고 판단할 수 있다.

Fig. 9는 빔강도 지수 1일 때 유동 입사각도에 따른 GFRP 표면의 온도분포이다. 레이저 조사에 따라 500 ℃까지 가열되는 특성은 유동분사각도에 관계없이 일치하지만, 그 이후에는 다르게 나타났다. 입사각도가 0° 인 경우 빠른 유속에 의해 레진 열분해 가스와 유리섬유 입자들이 더 빠르게 비산되어 화염효과가 나타나지 않지만, 유동이 없거나 입사각도가 45°인 경우 입사각도가 0° 인 경우보다 비산 입자의 제거 속도가 상대적으로 느리기 때문에 화염효과가 나타나 적외선 온도계로 측정된 온도가 더욱 높게 나타난 것으로 판단된다.

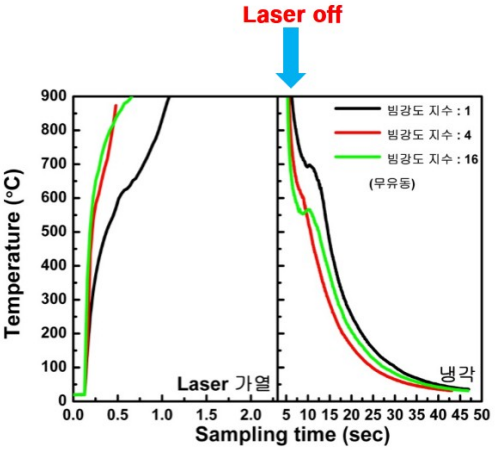

Fig. 7. Temperature of GFRP surface by laser intensity

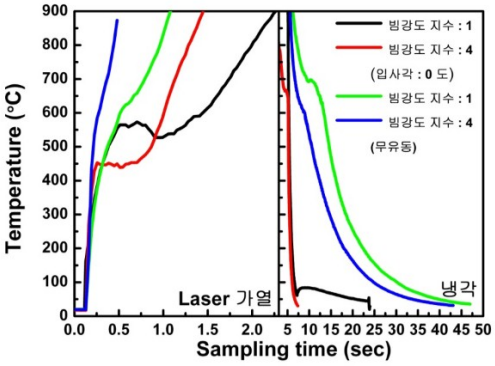

Fig. 8. Temperature of GFRP surface with and without flow

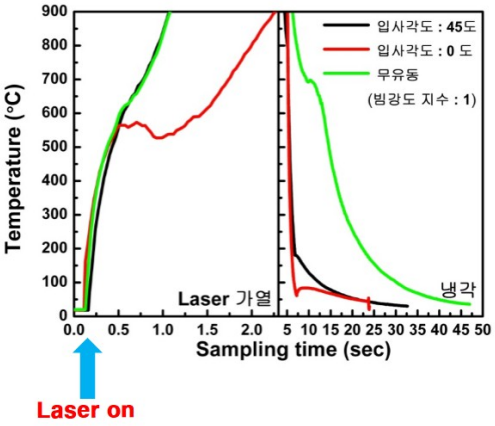

Fig. 9. Temperature of GFRP surface by flow incidence

Table 4. temperature gradient until 900 ℃

No.	Laser intensity [ab. unit]	Surface (tangential) flow speed [m/s]	Temperature gradient [℃/s]
1	16	-	1931.6
2	4	-	1832.2
3	1	-	832.3
4	1	60.5	840.7
5	1	106.4	394.4
6	4	106.4	622.9

실험조건에 따라 달라지는 레이저 가열 및 냉각에 따른 온도차이가 GFRP의 재료적 변화와 손상에 어떠한 효과를 유발하는지 확인하기 위해서 광학현미경을 이용하여 50배와 400배로 시편을 관찰하였다.

Fig. 10(1)는 표면 유동이 없는 경우의 현미경 사진이다. 레이저 빔강도가 가장 큰 시편 1은 연소재가 침착되어 있으며, 관통 근처의 유리다발들이 모두 승화된 것처럼 보였다. 시편 2는 연소재와 함께 가열된 유리다발들이 구형으로 응고된 것들이 보였으며, 관통 hole의 크기는 시편 1과 비슷하였다. 하지만 시편 3의 경우는 연소재 침착과 함께 여전히 유리 섬유들이 직물형태로 존재하였으며, 관통효과가 발생하지 않았다. 레이저 빔 강도가 가장 약했던 시편 3에서는 화염으로 연소는 일어났지만 유리섬유를 용융 및 비등시키기에는 에너지가 부족했음을 알 수 있다. Fig. 10(2)는 표면 유동이 존재한 경우의 현미경 사진이다. 모든 시편에서 유리다발이 응고된 구조들과 황색의 침착물들이 보였다. 하지만 유동 입사각도가 45도인 경우(시편 4) 관통효과가 발생하지 않았다. 이는 표면에 수직한 유동 방향 성분에 의해 용융된 유리섬유가 완전히 소거되지 않고 용융 pool 내에서 잔류하며 대류했고, 레이저 off후 그대로 응고되었기 때문이다. 이러한 열전달 효과 때문에 시편 4는 시편5, 6보다 더 큰 크기의 용융 pool을 보였다. 유동 입사각도가 0도인 경우(시편 5, 6) 관통효과가 나타났다. 관통 hole 주변으로 유리 섬유 응고 형태가 구형보다는 hole의 원주를 따라 고르게 형성되었음을 관찰하였다. 이는 유리섬유가 표면에서 천천히 가열되었다가 빠르게 냉각되면서 최소 점성상태에서 충분한 kinetics를 가지지 못한 상태로 응고하였기 때문에 마치 결함 조직으로부터 성장한 형태의 유리결정질을 보인 것으로 여겨진다.[8,12]

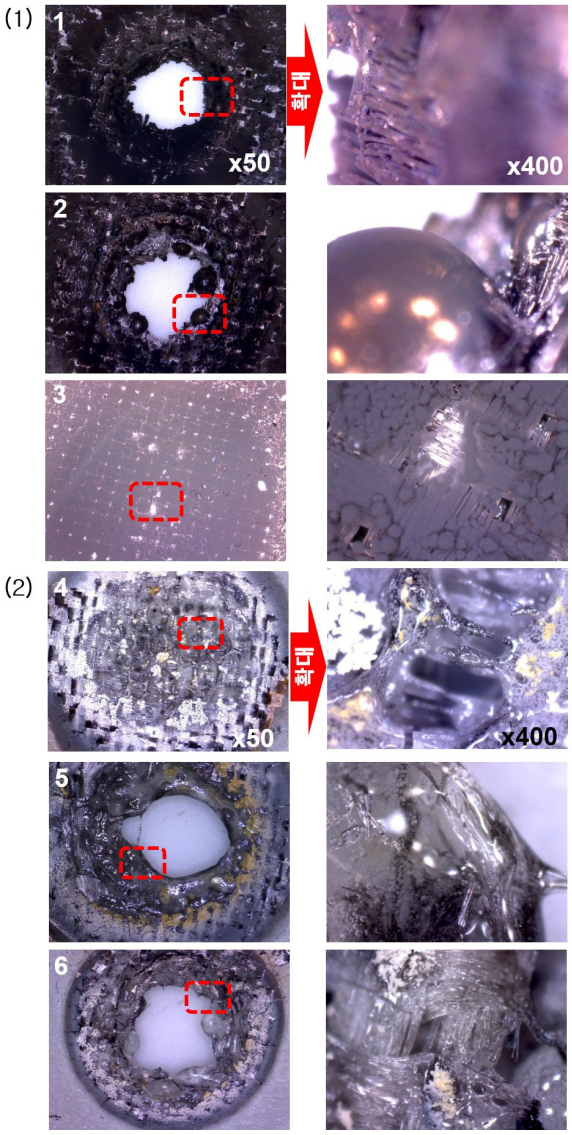

Fig. 10. Microscope images. (1) without flow, (2) with flow(left: x50, right: x400)

Fig. 11은 GFRP의 손상 과정을 가시적으로 종합하여 설명하기 위한 모식도이다. (1) 레이저 및 유동 인가되면, 온도가 상승하고 (2) 유리섬유가 충분히 용융되고, 레진이 연소되기 시작한다. (3) 유리섬유 용융 pool에서 유동에 의해 유리섬유와 레진 입자들이 유동방향으

로 비산되기 시작한다. (4) 레이저 조사 off후 유동의 대류에 의해 급격히 냉각되고 응고시 점성변화가 빠르게 일어나면서 타원 및 원주를 따라 유리섬유가 응고된다. 위와 같은 과정이 연속발진 고출력 레이저에 의해 유동에 노출된 GFRP의 손상 효과임을 실험을 통하여 분석하고 도출하였다.

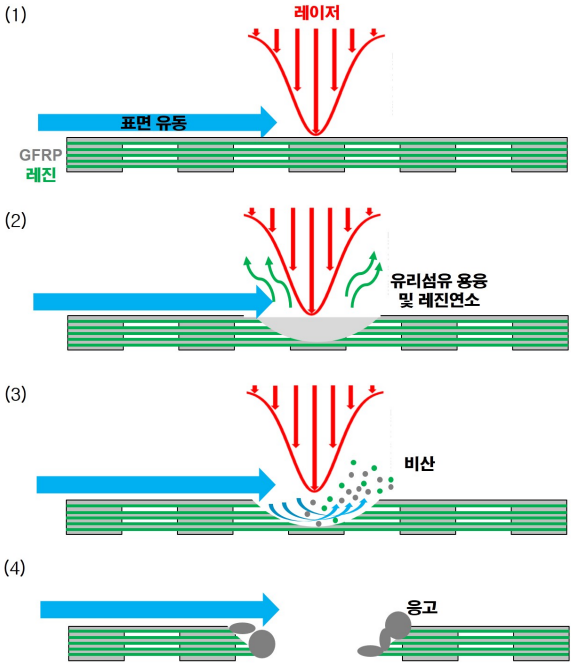

Fig. 11. Damage process model of GFRP.
(1) laser irradiance with flow, (2) melting of GFRP and burning of resin, (3) melting and ablation of evaporated particle, and (4) solidification of GFRP by cooling after laser irradiance

3. 결 론

본 연구에서는 레이저 조사에 의한 GFRP의 손상효과를 확인하기 위해 근적외선 파장의 연속발진 레이저를 이용하여 공기유동 변화에 따른 GFRP의 손상 실험을 수행하였다. 손상 효과를 확인하기 위해 레이저 조사에 따른 가시적 변화와 표면 온도를 측정하고, 손상된 시편의 재료적 특성을 분석하여 조건에 따른 손상효과를 확인하였다.

References

[1] S. S. Wu, C. D. Boley, J. N. Florando, M. M. LeBlanc, W. H. Lowdermilk, S. M. Rubenchik, and J. R. Stanley, “Deep Penetration in Aerospace Composite Materials Using Near-Infrared Laser Radiation,” Laboratory Directed Research and Development 2012 Feasibility Study, 12-FS-014, 1-44, 2012.

[2] E. Aoyama, H. Inouej, T. Hirogaki, H. Nobe, Y. Kitaharal and T. Katayama, “Study on Small Diameter Drilling in GFRP,” Composite Structures, 32, 567-573, 1995.

[3] S Fatimah, M Ishak, and S N Aqida, “CO_2 Laser Cutting of Glass Fiber Reinforce Polymer Composite,” ICMER2011, 2012 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 36 012033, 1-7, 2012.

[4] K. C. Yung, S. M. Mei, and T. M. Yue, “A Study of the Heat-Affected Zone in the UV YAG Laser Drilling of GFRP Materials,” J. Mater. Process. Technol. 122, 278-285, 2002.

[5] N. Chand and S. Neogi “Low Stress Abrasion of Laser Irradiated GFRP Composites : An Experimental and Microstructural Study,” J. Mater. Science, 37, 2763-2771, 2002.

[6] 김재상, 유웅재, 이호준, 조용무, 김재도, “GFRP의 레이저 절단특성 연구,” 한국정밀공학회 94년 춘계학술대회논문집, 145-150, 1994.

[7] F. T. Wallenberger, J. C. Watson, and H. Li, “Glass Fibers,” 2001 ASM International ASM Handbook, Vol. 21: Composites, #06781G, 2001.

[8] F. T. Wallenberger and P. A. Bingham, Fiberglass and Glass Technology(Springer Science + Business Media, LLC 2010) Chap.

[9] YD-115 TDS, 국도화학 catalog.

[10] BPA, Wikipedia(Internet)

[11] Composite Materials Handbook(MIL-HDBK-17-2F, Volume 2 of 5 17 June 2002), Chap 6.

[12] A. K. Jena and M. C. Chaturvedi, Phase Transformation in Materials(Prentice Hall, 1992), Chap. 6.2 pp. 192-206.