

병렬가공기계용 CFRP의 레이저 용접특성 시뮬레이션

이승택*, 박승규**, 최해운***,#

*계명대학교 융합공학대학원 지능형자동차공학과, **계명대학교 대학원 기계공학과, ***계명대학교 기계자동차공학과

CFRP Laser Joining Computer Simulation in a Parallel Kinematic Machine

Seung-Taek Lee*, Seung-Gyu Park**, Hae-Woon Choi***,#

*Dept. of Int. Vehicle Engineering, Grad. School of Convergence Eng., Keimyung University

**Dept. of Mechanical Engineering, Grad. School of Keimyung University

***Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University .

(Received 9 December 2016; received in revised form 30 December 2016; accepted 9 January 2017)

ABSTRACT

A computer simulation method is introduced to understand the joining phenomena of PC and CFRP by estimating the temperature of the weld zone. Following the prior or preliminary research, the power range was set between 3 watts and 7 watts, and the scanning speed was set at 500 mm/min and 1,000 mm/min, respectively. Based on the computer simulation, the temperature near the joining boundary was not sufficient at the scanning speed of 1,000 mm/min, regardless of the selected powers. However, the temperature increases above the melting temperature of the selected polymers at the scanning speed of 500 mm/min. The simulation results were compared with actual weld samples to validate its actual use.

Key words: CFRP(탄소섬유강화플라스틱), Laser Welding(레이저용접), Computer Simulation(수치해석)

1. 서 론

차량경량화에 대한 관심이 높아지면서, 복합재료인 탄소섬유강화플라스틱(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymers)에 대한 연구가 최근 많이 진행되고 있다.

CFRP 복합재료는 탄소섬유의 높은 인장강도와 가벼운 비중으로 인해서 경량화가 가능하며, 자동차의 구조재 및 각종 부품, 항공기의 구조재 등 첨단산업의 기능성 핵심소재로 이용될 수 있지만, 경제성 문제 등으로 인해서 아직 보편적으로 사용되고 있지 못하다.

CFRP는 매트릭스수지를 플라스틱으로 경합한 소재로서, 매트릭스수지에 따라 열경화성(TS, Thermosetting Resin)과 열가소성(TP, Thermoplastic Resin)으로 구분된다. 이러한 복합소재의 기능을

Corresponding Author : hwchoi@gw.kmu.ac.kr
Tel: +82-53-580-5216, Fax: +82-53-580-6067

위해서 CFRP는 적어도 하나 이상의 섬유층으로 이루어지는 상부 탄소섬유층과 하부 탄소섬유층으로 구성이 되어 있으며, 상하부 탄소섬유층의 사이에 열경화성 또는 열가소성 수지의 흐름을 원활히 하기 위해서 플로메쉬를 배치한다. 이후 상부 및 하부 예비성형몰드에서 성형하는데, 주로 진공하에서 작업이 이루어진다.¹⁾

CFRP 복합소재의 효율적 활용을 위해서 다양한 방법의 최적화 설계가 많이 연구되었다. 특히, 3차원 치수 데이터를 활용하여 기존 제품에 대한 응력분포해석이나, CFRP 자체의 응력분포, 그리고 응력 집중부위에 대한 설계 및 해석도 많은 연구가 수행이 되었다.²⁾

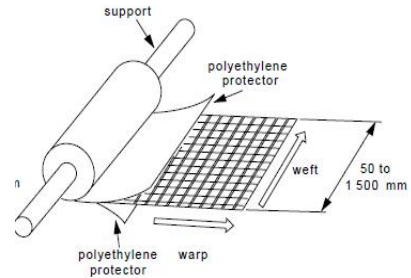
이러한 설계적 연구뿐만 아니라, 성형된 CFRP를 용도에 맞게 접합하면 자동차, 조선, 항공 및 발전설비용 대면적 응용분야에도 다양하게 응용할 수 있다. 본 연구에서는 병렬가공기(PKM, Parallel Kinematic Machine)를 이용, 열가소성수지 계열의 CFRP와 PC(Poly-carbonate)를 레이저열원으로 접합할 때 발생하는 열영향 분포를 시뮬레이션을 통해 예측하여, 소재가 유리전이온도 이상이 되는 조건을 최적화 하는 방법을 기술하고자 한다.

2. 시뮬레이션 이론적 배경

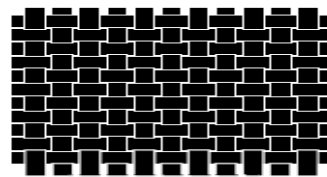
2.1 접합소재 및 시뮬레이션 변수

실험에 사용된 소재는 철에 비해 1/4의 무게로 가볍고, 인장강도는 10배 정도이며, 응력부식, 자연파괴 등이 없어 장기 변형 손실이 적은 CFRP 소재와, 광학적 투과성이 우수하고 열변형이 적은 Polycarbonate(PC)를 사용하였다.

사용된 CFRP는 격자무늬의 섬유와 레진이 조합된 제품을 사용하였으며, 격자무늬의 형태는 수직, 수평 방향의 섬유들이 일정한 간격을 형태가 적용되었다 (Fig. 1). 사용된 레진은 CP370-LSS(日本, Mitsubishi 社)이며, 상세한 물성치는 Table 1에 정리 되었다. 상대재인 PC는 시중에서 일반적으로 구매할 수 있는 투명도가 약 95%이상인 소재로서, 비스페놀 A와 포스젠의 연쇄 구조로 이루어진 열가소성 플라스틱 중합체이며, 내열성, 내충격성



(a) Structure of CFRP



(b) Matrix of CFRP

Fig. 1 Matrix Structure of CFRP⁴⁾

Table 1 Mechanical Properties of CFRP⁴⁾

Filament Count	60K
MUL [mg/m]	3,200
Density [g/cm ³]	1.81
Tensile Modulus [Gpa]	250
Tensile Strength [Mpa]	4,900

및 투명성이 있어서 고기능성 플라스틱을 사용하였다.³⁾

2.2 시뮬레이션 신뢰성 검증

본 연구에 사용된 열해석 소프트웨어는 상용 COMSOL MultiphysicsTM V.5.2로서, 열전달 해석 및 변형 등을 동시에 수행 할 수 있는 Multiphysics 기능을 수행한다. 시뮬레이션 결과와 실제 온도 분포의 비교 검증을 위해서 Fig. 2에서 예시된 바와 같이 IR 영역의 온도측정 장치인 FLIRTM 열화상 카메라를 사용하여서 검증 하였다. 적외선 열화상 카메라는 피사체의 표면에서 복사되는 열에너지를 적외선 파장형태로 검출하여, 복사열의 강도에 따라 색상을 다르게 표현해주는 장치이다.⁵⁾

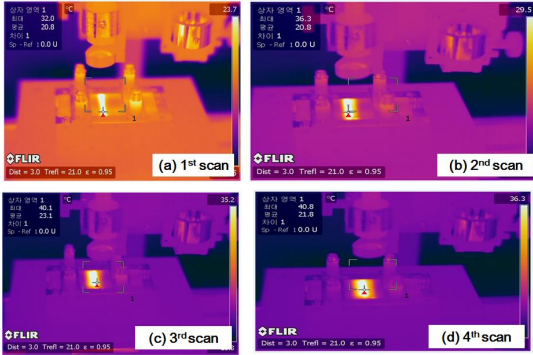


Fig. 2 Temperature measurement by IR camera⁶⁾

접침 소재의 반사광학특성을 계산하기 위해서 식(1)을 이용하였다.

$$R_L = \frac{(n - m)^2}{(n + m)^2} \times 100 \quad (1)$$

여기서, n: polymer의 굴절지수, m: air의 굴절지수이며, 상부소재인 Polycarbonate의 굴절률을 1.4~1.6라고 가정 하고, 공기의 굴절지수 m은 1이라고 가정을 하면, 반사율은 2.8 ~ 5.3%이 되는 것을 알 수가 있어, 측정에 의한 반사율을 5%로 설정 하였다. 폴리머 소재에 대한 시뮬레이션은 선행연구에서 소개된 바와 같이, 레이저를 접합영역에 조사하면서 일정 속도로 시편을 이송시키면서, 온도 분포를 열화상 카메라로 측정하는 방식으로 수행하였다. 이때 열화상 카메라의 온도와 시뮬레이션 온도를 비교 분석하였다. 시뮬레이션에서 사용된 열전달 지배식은 식(2)와 같다.

$$Q(x, y, z) = Q_0(1 - R_c) \cdot \frac{A_c}{\pi \sigma_x \sigma_y} e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]} \cdot e^{-A_c z} \quad (2)$$

여기서, Q₀는 열원의 침투출력, x, y, z는 공간 좌표, R_c는 표면반사도, σ_x, σ_y는 x 및 y 방향의 빔 반경, 그리고 A_c는 표면 흡수 층 두께 이다. 경계조건으로 자연대류를 초기온도는 20℃로 설정 하였다.

Table 2 Parameters for Simulation

Variables	Expression	Value
x0	0[mm]	0m
y0	0[mm]	0m
sigx	1[mm]	0.001m
sigy	1[mm]	0.001m
Q0	3[W]	3 W
Rc	0.1	0.1
Ac	30[1/cm]	3000 /m
L	40[mm]	0.04 m
Lz	2[mm]	0.002 m
v	1000[mm/min]	0.01667 m/s
time_end	L/v	2.4 s
time_step	time_end/100	0.024 s
offset	0[mm]	0 m

Table 2에서 정리된 바와 같이, 시뮬레이션에서 R_c 값은 0.10로 가정하였는데, 이는 식(1)에서 도출된 반사율 5%와, PC의 투과율을 95%로 가정하여, 투과 중 일어나는 흡수율 90%을 설정 하였다. 본 시뮬레이션에서 변수(Parameters)는 흡수층 두께인 A_c 인데, 실험결과와 시뮬레이션 결과를 최종 비교 검증하여서 Ac는 30[cm⁻¹]로 최종설정 하였다.

또한, 레이저빔의 크기(sigx, sigy)는 반경이 x방향과 y방향 각각 1mm로 설정하였으며, 블록의 두께는 2mm 그리고 크기는 가로세로 40mm 로 설정을 하였고, 온도측정은 접합 경계면에서 소재방향으로 각 0.1mm 상하부에서 측정하여 레이저의 직접조사에 의한 온도 급상승 구간을 피하였다. 시뮬레이션 모델이 Fig. 3에 도시되었다.

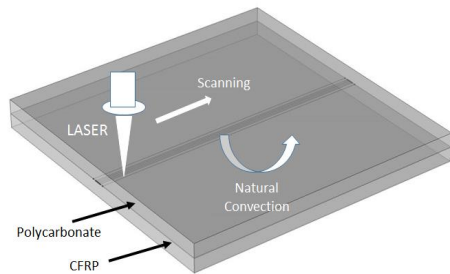


Fig. 3 Simulation model

2.3 시뮬레이션 범위 설정

PC와 CFRP의 접합시 접합압력, 레이저출력, 이송속도 및 초점크기에 영향을 받는다. 선행실험의 결과, 가장 큰 영향을 주는 인자는 레이저 출력 및 이송속도였다. 이송속도가 500mm/min일 때는 3 ~ 7 watt 전 범위에서 CFRP의 수지가 PC와 잘 접합되었지만, 1,000mm/min의 이송속도에서는 출력이 높은 7 watt를 제외하고는 접합이 불안정하게 이루어졌다. 따라서, 시뮬레이션에서는 레이저 출력을 3 ~ 7 watt 범위로 설정하고, 이송속도는 500mm/min와 1000mm/min 영역에서 수행하기로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

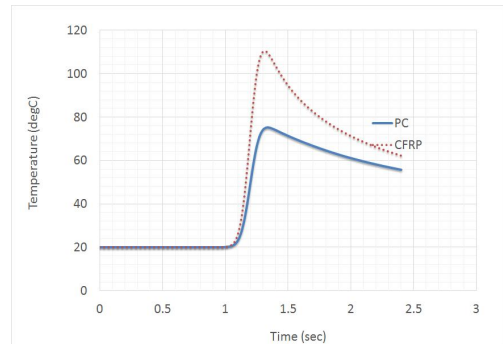
3.1 가변출력, 정속이송 1,000mm/min

이송속도는 1,000mm/min 로 고정하고, 출력을 3 ~ 7 watt 범위 내에서 가변 하여 시뮬레이션을 수행 하였으며, 그 결과가 Fig. 4에 정리 되었다.

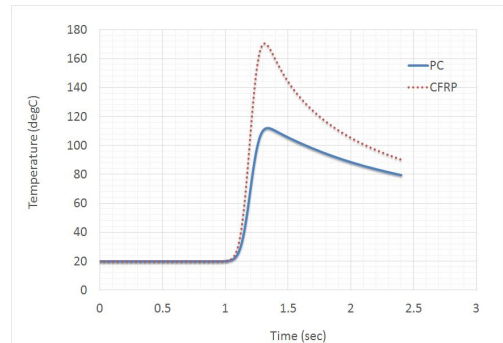
출력이 3 watt 일시 최고온도는 경계면에서 PC 영역 0.1mm 되는 곳의 온도는 75.2°C 였고 CFRP 영역 0.1mm 되는 곳의 온도는 110.3°C로 계산 되었다. 또한, 5 watt출력에서의 최고 온도는 PC측 111.9°C, 그리고 CFRP 측에서는 170.6°C로 시뮬레이션 되었다.

최대출력 7 watt에서 실험결과 최고온도는 PC 측 148.7°C, 그리고 CFRP 측에서는 230.8°C로 시뮬레이션 되었다. 3 ~ 7 watt 전범위내에서 최고 230.8°C의 온도가 예측 되었으며, 최고 온도 도달 후 외부의 자연대류 조건과 폴리머 내부의 열전달로 인해서 온도가 완만하게 감소하는 것을 볼 수가 있었는데, 이는 폴리머의 열전달계수가 금속에 비해 현저히 낮음에 기인한 것으로 볼 수가 있다.

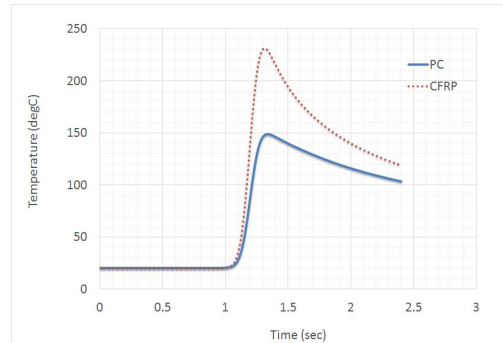
통상적으로 CFRP 결함을 하는 Resin의 성분이 나일론 계열일 경우 유리전이온도(Glass Transition Temperature)범위가 190~350°C 이고 PC가 150°C 인 것을 감안하면, 이송속도 1,000mm/min의 시험조건에서는 출력범위 3 ~ 7 watt에서 신뢰도 있는 접합의 어려움이 발생할 것으로 예상이 된다.



(a) Power 3 watt



(b) Power 5 watt



(c) Power 7 watt

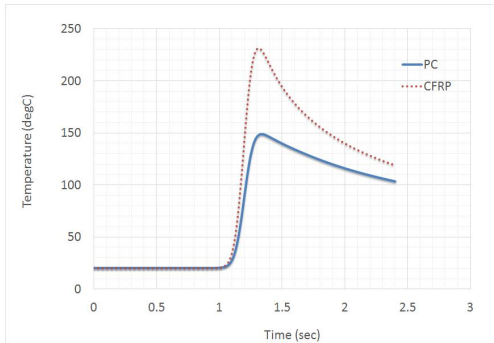
Fig. 4 Temp. distribution with 1,000mm/min

3.2 가변출력, 정속이송 500mm/min

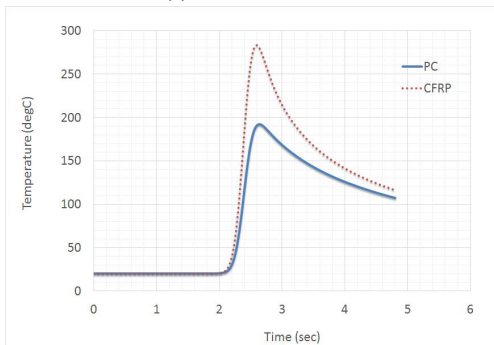
동일한 실험조건에 이송속도만 500mm/min 로 변경하고, 출력을 3 ~ 7 watt 범위내에서 가변하여 시뮬레이션을 수행 하였으며, 그 결과가 Fig. 5에 정리되었다. 출력이 3 watt 일시 최고온도는 경계면에서 PC 영역 0.1mm 되는 곳의 온도는

148.7°C 였고 CFRP 영역 0.1mm 되는 곳의 온도는 230.8°C로 계산 되었다. 5 watt출력에서는 PC측 192.5°C, CFRP 측은 최고 283.5°C로 계산되었다.

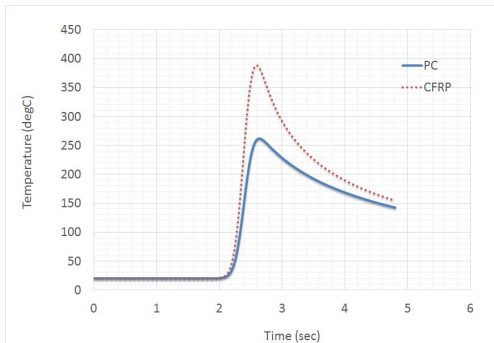
출력을 7 watt로 상승시킨 상태에서 시뮬레이션 한 결과, 최고 온도는 PC측 261.5°C, 그리고 CFRP 측은 최고 388.9°C이며, 이때는 PC와 CFRP 모두 과입열이 발생된 것으로 판단이 된다.



(a) Power 3 watt



(b) Power 5 watt



(c) Power 7 watt

Fig. 5 Temp. distribution with 500mm/min

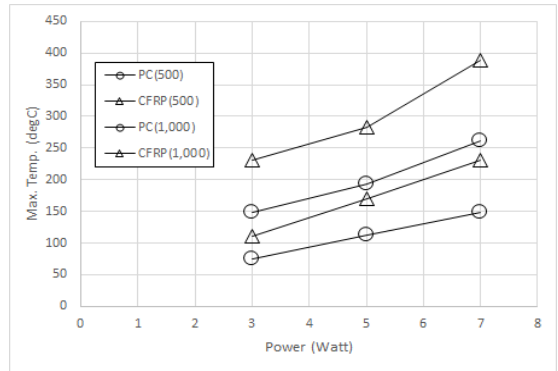
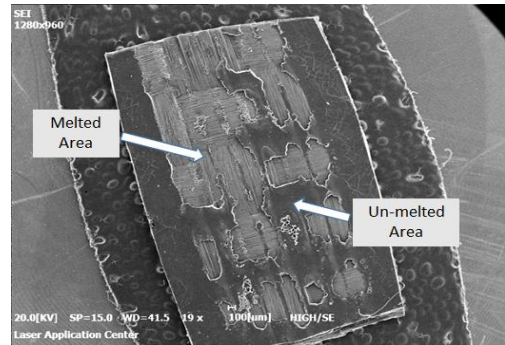
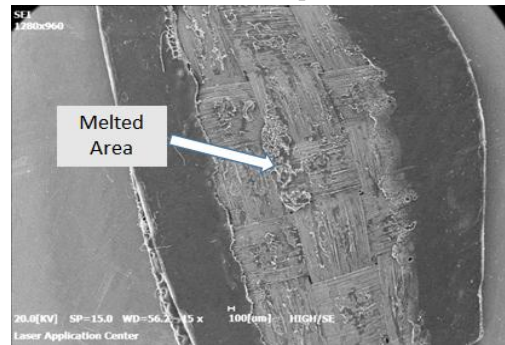


Fig. 6 Summary of Max. Temp for PC and CFRP



(a) Power 3 watt, Scan Speed 1000mm/min



(b) Power 7 watt, Scan Speed 500mm/min

Fig. 7 SEM images of CFRP surface irradiated by laser

PC와 CFRP에서 시뮬레이션 된 결과를 종합하여 Fig. 6에 비교 하였다. 표기된 데이터는 경계면에서 0.1mm offset 위치에서 측정한 최고온도 값으로서 PC와 CFRP를 구분하여 표기 하였다. 최

고온도는 CFRP 측에서 출력 7 watt, 접합속도 500mm/min에서 이루어 졌으며, 최저온도는 PC측에서 출력 3 watt, 접합속도 1,000mm/min에서 예측되었다.

이러한 현상은 실제 용접샘플에서도 나타나는데, Fig. 7에서 예시된 바와 같이 최저 에너지 조사 조건인 출력 3 watt 이송속도 1,000mm/min에서는 레이저에 의해서 녹은 영역과 녹지 않은 영역이 혼재 되어 있는 반면(Fig. 7(a)), 최고 에너지 조사 조건인 출력 7 watt, 이송속도 500mm/min에서는 전체영역이 녹은 흔적이 관찰 되었다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저를 이용한 탄소섬유강화 플라스틱의 접합특성을 시뮬레이션 한 결과에 대해서 보고하였다. 선행연구를 바탕으로, 시뮬레이션에서 레이저 출력을 3 ~ 7 watt 범위로 설정하고, 이송속도는 500mm/min와 1000mm/min 영역으로 설정 하였다.

이송속도 1,000mm/min에서는 전 출력범위에서 다소 불완전한 용접온도 상승을 보였으며, 폴리머 대부분의 영역에서 온도상승이 충분하지 못해서 CFRP의 수지가 제대로 녹지 못하고 PC와 불완전한 접합이 되는 것으로 판단된다. 반면, 500mm/min에서는 모든 용접면이 200℃ 이상으로 계산되어서 양호한 접합특성을 보였다. 나일론 계열일 경우 유리전이온도 범위를 감안하면, 이송속도 500mm/min에서 양호한 접합이 될 것으로 예상 하였으며, 이는 실제 용접 시제품의 결과와도 유사하였다.

실험 및 시뮬레이션 결과 CFRP 접합시 가장 민감한 변수는 출력 및 이송속도 이며, 동일한 에너지의 열원이 소입된다고 하더라도, 이송속도가 지나치게 빠르게 되면, 열흡수가 일어나기 위한 최소한의 시간이 보장되지 않아서 접합의 신뢰성이 크게 떨어지는 것을 알 수가 있었다. 반면, 소입 레이저출력은 이송속도 변수에 비해서 상대적으로 민감도가 작아서, 이송속도를 제1변수로 설정한 후 레이저출력범위를 제 2변수로 제안하는

것이 바람직 할 것으로 판단된다. 또한, CFRP를 구성하는 Resin의 경우는 가급적 유리전이온도 범위가 넓은 것이 접합공정에 유리할 것으로 판단이 된다.

본 연구결과를 활용하면 CFRP 레이저 접합시 발생하는 열영향 분포를 컴퓨터시뮬레이션을 통해서 예측할 수 있을 것으로 기대되며, 궁극적으로는 접합에 필요한 최적에너지를 도출 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 KIAT 경제협력권산업육성사업 비즈니스협력형R&D(R0003919)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Hong, S. H., Moon, J. H., Kwak, S. H., Song, K. Y. and Shin, D. W., "A Study on Development of Molding Method for CFRP," Proceedings of the KSMPE Fall Meeting, pp. 52, 2012.
2. Moon, J. H., Han, K. D., Hong, S. H., Kwon, Y. G. and Do, R. M., "A Study on Development of Automobile Parts using CFRP," Proceedings of the KSMPE Fall Meeting, pp. 59, 2011.
3. Park, S. H. and Jung, Y. D., "Shrinkage Characteristics of Polycarbonate Injection Molding Composed of Tensile Specimen Type," Proceedings of the KSMPE Fall Meeting, pp. 191~196, 2004.
4. Web reference, Hexcel, Prepreg Technology Heg, <http://www.hexcel.com>, 2016.
5. Jung, Y. S., Roh, C. S., Lee, G. I. and Kim, J. Y., "Reliability Evaluation of a Motor Core Applied Ultrasound Infrared Thermography Technique," Journal of the KSMPE, Vol. 15, No. 4, pp.60~66, 2016.
6. Song, C. H. and Choi, H. W., "Laser Energy Optimization for Dissimilar Polymer Joining," Journal of KWJS, Vol. 32, No. 2, pp.189~195, 2014.