

3D 프린팅을 이용한 복합재 프로펠러용 레이업 툴 개발

김한얼*, 송철기**.#

*씨엘디벨로프먼트, **경상국립대학교 기계공학부, 공학연구원

Development of Lay-up Tools for Composite Propellers Using 3D Printing

Han-Oel Kim*, Chul Ki Song**.#

*CLdevelopment, **School of Mechanical Engineering, ERI, Gyengsang National University
(Received 19 January 2023; received in revised form 15 February 2023; accepted 07 March 2023)

ABSTRACT

A lay-up tool was developed for prototyping composite propellers. A manufacturing tool was designed using 3D-printing technology, and an attempt was made to determine whether the temperature changes of the tool according to the temperature of the curing cycle and the vacuum pressure of the autoclave are harmful. A reduction in production cost and production time owing to the characteristics of 3D printing was confirmed, greatly contributing to the production of composite prototypes by replacing existing tools.

Keywords : 3D Printing(3D 프린팅), CFRP(탄소섬유강화플라스틱), Lay-up Tool(레이업 툴), Composite Propeller(복합재 프로펠러), Curing Cycle(경화 주기)

1. 서 론

세계 대부분의 나라에서 기후변화 문제와 더불어 환경보호와 에너지 저감에 관심을 갖고 있다. 이를 위해 우리나라 뿐 아니라 많은 선진국에서는 CO₂ 배출량 규제를 강화하고 있으며, 환경친화적 및 경량화 소재에 많은 관심을 가지고 지속적인 발전과 개발이 이어지고 있다.

다른 금속에 비해 상대적으로 경량화이며 고강도의 물성 특성을 가진 고탄성 경량 첨단소재인 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP: Carbon Fiber

Reinforced Plastic)이 주요 구조용 재료로 응용되고 있으며, 특히 에너지 분야, 기계항공 산업 등 분야에서 점차적으로 확대 사용되고 있다.^[1,2]

CFRP의 제작은 겔 코팅(coating) 처리가 된 지그(jig)에 매트 또는 섬유질에 열과 압력을 가하면서 수지를 함착시켜 적층 제품으로 만들어낸다.

CFRP 성형시에는 레이업(lay-up)을 위한 툴(tool)이 반드시 필요하며, 그 성형법에는 수동 적층법(hand lay-up method), 레진 인퓨전 방법(resin infusion method), 오토 클레이브 방법 autoclave method) 등이 있다.

최근 들어 CFRP가 가진 경량화, 고강도 특성을 활용하는 다양한 수요가 많은 분야에서 꾸준히 증가되고 있으며, 이에 따라 CFRP 레이업 툴 제작

Corresponding Author : cksong@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1633, Fax: +82-55-772-1630

요구도 증가하고 있다.^[3]

현재 CFRP 제작에 주로 사용되는 레이업 툴은 일반적으로 고온 고압에 견디는 강도를 지녀야 할 뿐만 아니라, 고열 환경에서도 툴의 치수 변화가 작아야 하기 때문에, Al 또는 Fe 소재로 제작하고 있다. 그러나, Al 또는 Fe 소재의 제작방식은 전체 제작 과정 중에서 양호한 표면조도를 얻기 위한 기계 가공비용과 시간에 큰 비율이 차지되고 있다. 또한, 툴의 질량 과다로 인해 보관과 취급이 어렵기 때문에 시간과 소요 비용을 줄일 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 3D 프린팅을 이용하여 CFRP용 레이업 툴을 제작함으로써, 절삭에 의한 소재 낭비를 줄이며, 후가공 공정에 필요한 시간을 절약시켜 시제품의 제작 비용과 시간을 절감시키고자 한다.

FDM(Fused deposition modeling) 3D 프린팅 방법과 DLP(Digital light processing) 3D 프린팅 방법을 사용하여 CFRP용 레이업 툴을 제작하고자 한다.

Fig. 1은 FDM과 DLP를 보여주는 그림으로, FDM 프린터는 노즐을 통하여 열가소성 필라멘트를 분사하여 2차원으로 적층하면서 3차원 형상으로 만드는 3D 프린팅에서 가장 기본적으로 제작하는 방법이며, DLP 방법은 자외선 램프의 조광 장치를 이용하여 한층 전체의 레진(resin)을 경화시켜 한층씩 적층하는 방법으로 출력시간이 빠르며, 높은 정밀도를 가질 수 있다는 장점이 있다.^[4]

Shin^[5]은 속빈 형태로 제품을 3D 프린팅 출력하여 사형 주조(sand mold) 내에서 직접 녹여 형상을 성형하는 방법인 소모성 주형 방식(expendable mold casting)을 이용하는 제작법을 연구하였으며, Hwang^[6]은 3D 프린팅을 이용하여 프레스 금형을 제작하는 연구를 진행하였다. 본 연구는 CFRP용 레이업 툴에 대한 연구로서 기존의 연구와는 다른 차이를 볼 수 있다.

미국 Thermwood 사는 3축 가공기에 3D 프린팅 기술을 결합하여 레이업 툴 제작과 기계가공을 동시에 진행하는 연구를 하였으며, 후가공을 통해 시간의 단축과 매끄러운 표면조건을 획득할 수 있는 장점을 가지는 기술 연구 및 개발을 진행하였

다. Wang^[7]은 복합재 밸브 커버를 FDM 방법으로 제작함에 따른 제품 품질의 차이를 분석하였으나, 복합재 성형 툴의 강도 및 열변화에 의한 툴이 받는 효과에 대한 연구는 진행되지 않았다.

본 연구는 AL 및 Fe 재질의 성형 툴로 제작된 기존의 기술의 부품과 3D 프린팅으로 제작된 제품을 서로 비교함으로써 3D 프린팅 레이업 툴 기술로의 대체 가능성을 연구하는 것이 목적이다.

Fig. 2는 250°F(121°C) 경화 사이클(cure cycle)을 통하여 제작한 추진 및 자세 제어에 사용되는 드론(drone)용 프로펠러를 보여주는 그림이며, Table 1은 그 프로펠러의 제원을 보여준다.

제작 프로펠러의 금형 설계를 진행하며 3D 프린팅 방식의 출력 오차, 열팽창 오차, 경화사이클에 적용되는 압력과 온도를 견디는 열응력을 분석하고, 성형시 제품에 열전도 값을 해석 및 시험으로 비교하여 해석 프로세스 검증 및 대체 가능성 평가를 진행할 것이다.

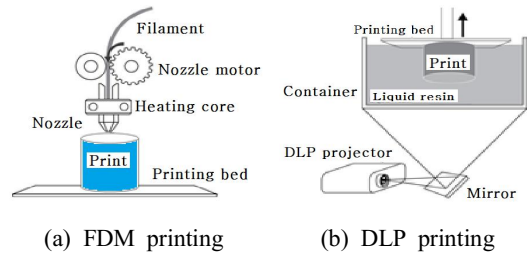


Fig. 1 3D printings

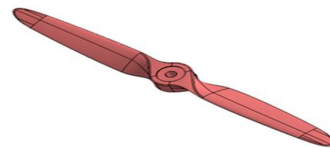


Fig. 2 Propeller

Table 1 Specification of the propeller

	Propeller
Size	152.4 mm
Pitch	50.8 mm
Rotation direction	CW

2. 설계 및 제작

CFRP 성형공법 중 오토클레이브 방식은 높은 온도와 압력을 이용하여 수지를 함침시키는 방식이다. 오토클레이브 공정을 사용하는 환경 중, 수지 경화를 위한 온도 프로파일은 Fig. 3과 같으며, 오토클레이브 내부는 5-6 기압이 가해진다. 초기 30분 동안 80℃까지 증가시킨 후 30분 동안 80℃를 유지하다가 20분 동안 120℃까지 상승시킨다. 이후 90분 동안 120℃를 유지시키다가 60분 동안 상온으로 감소시킨다.

CFRP 프로펠러를 고정하고 압력과 온도를 전달하기 위해 상부, 하부 레이업 툴 설계를 진행하였다. Fig. 4는 상부와 하부 레이업 툴의 형상을 보여주고 있으며, (a)는 하부 툴에 위치를 잡아주는 다웰 핀(dowel pin)과 체결을 위한 구성요소를 추가하였고, (b)는 상부 툴로 프로펠러 경화 후 탈거를 위한 구성요소를 추가하였다.

Table 2는 3D 프린터로 제작될 툴 재료의 물성치를 나타낸 표이다.

툴의 제작 자재에 따른 열특성을 연구하기 위해 열해석을 진행하였다.

Fig. 5는 프로펠러 제작을 위한 툴의 3D 설계 구성을 나타내었으며, 3D 설계 모델을 기준으로 Fig. 6과 같이 유한요소법 모델링을 진행하였다. g 해석모델은 3D 요소로 구성하였고 요소는 2mm 크기 80만개로 구성하였다.

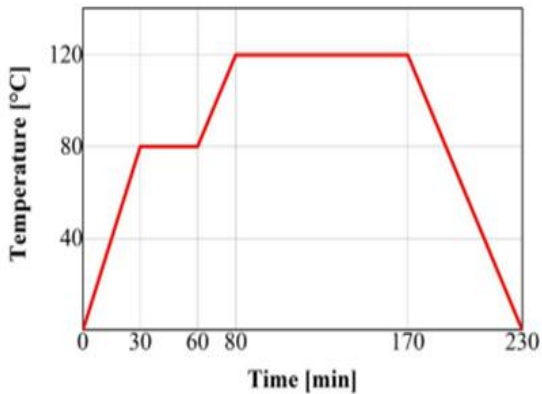


Fig. 3 Curing temperature cycle for CFRPs

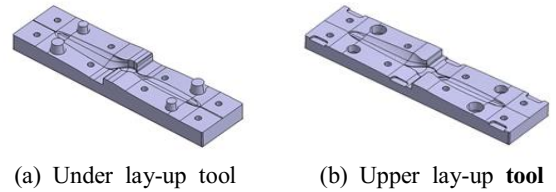


Fig. 4 Design of the lay-up tools

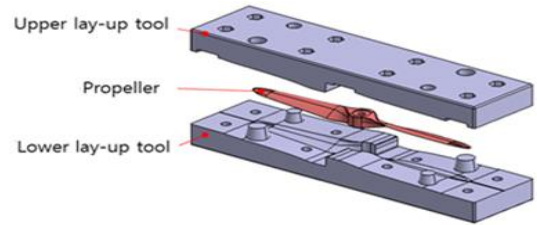


Fig. 5 3D modeling of the lay-up tools

Table 2 Tool material properties for 3D printing

Material	Filament	Resin
method	FDM	DLP
Density (g/cm ³)	1.27	1.2
strength (MPa)	79.2	39.5
modulus (GPa)	3.0	3.0
Poissons ratio	0.36	0.35
CTE $\mu\text{m}/[\text{m}^{\circ}\text{C}]$	29.8	35.0
Tg (°C)	217	170
Thermal conductivity (W/m·K)	0.24	0.26
Specific heat capacity (J/kg·K)	1530	1130

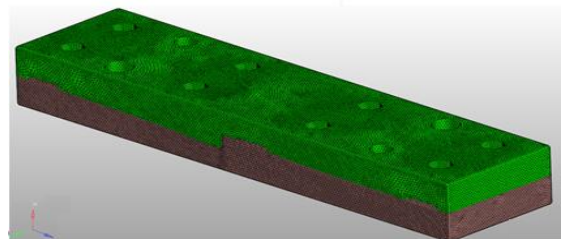


Fig. 6 Combined modeling of the lay-up tools

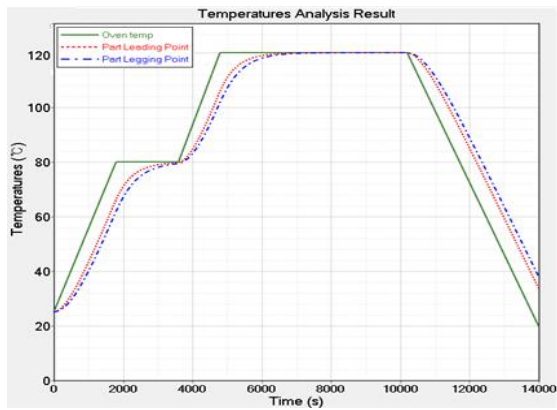


Fig. 7 Temperature-time (FDM tool)

Table 3 Analysis result of the FDM tools

Contents	Value
Max. deviation temperature	18.4 °C
Temperature between part points	4.3 °C
Cure time	3700 s

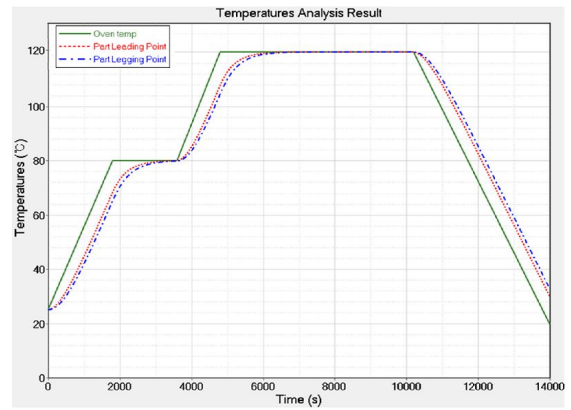


Fig. 10 Temperature-time (DLP tool)

Table 4 Analysis result of the DLP tools

Contents	Value
Max. deviation temperature	14.0 °C
Temperature between part points	3.3 °C
Cure time	4000 s

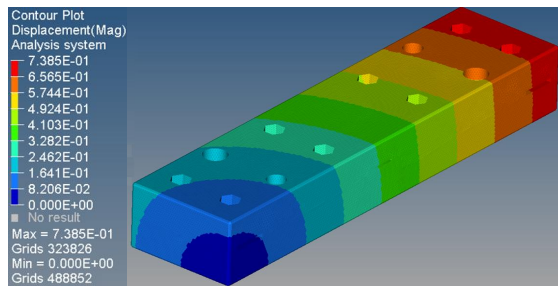


Fig. 8 Heat contour of the FDM tools

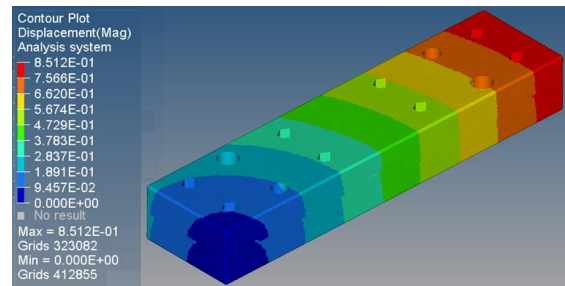


Fig. 11 Heat contour of the DLP tools

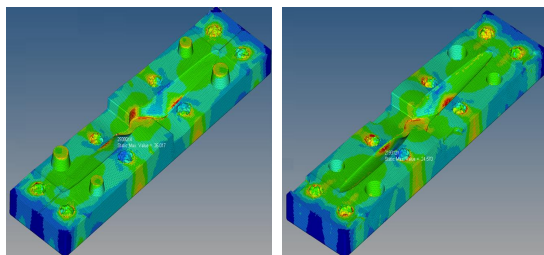


Fig. 9 Stress contour of the FDM tools

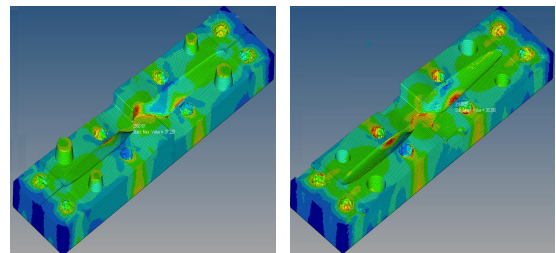


Fig. 12 Stress contour of the DLP tools

2.1 FDM 방법에 대한 열해석

Fig. 7은 FDM 방법으로 제작된 툴에 대한 열해석을 통해 툴에 작용하는 온도 선형점(Leading point)과 온도 후행점(Lagging point)을 선정하여 경화 온도와 시간에 따른 툴의 온도를 보여주는 그림이다. Table 3은 해석 결과를 정리한 표이다. 오븐 내부의 최고 온도와 툴의 최저 온도의 차이가 18.4°C 이고, 온도 선형점과 온도 후행점의 차이는 4.3°C 로 비교적 균일한 온도분포를 가진다고 판단되며, 경화 시간은 3700s로 최소 경화 시간인 3600s 이상을 만족하고 있다.

Fig. 8은 FDM 방법으로 제작된 툴의 열해석 결과를 나타내고 있고, 120°C 의 온도에서 툴은 0.73mm의 열팽창을 보이고 있다.

Fig. 9는 FDM 방법으로 제작된 툴의 응력 분포를 나타내는 그림이다. 최대 응력 부분에서 26MPa로 나타나고 있어, 안전율은 1.00 이상으로 확인되었다.

2.2 DLP 방법에 대한 열해석

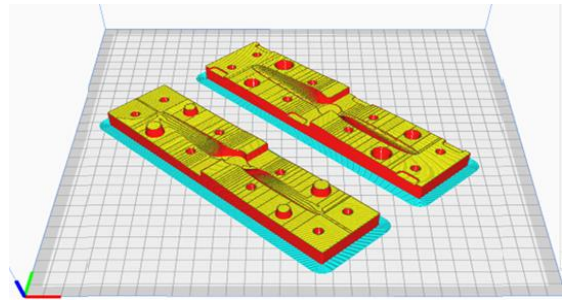
Fig. 10은 DLP 방법으로 제작된 툴에 대한 온도 그래프이다. Table 4는 해석 결과를 표로 요약 정리한 표이다. 오븐 내부의 최고 온도와 툴의 최저 온도의 차이는 14.0°C 이고, 온도 선형점과 온도 후행점의 차이는 3.3°C 로 비교적 균일한 열 분포를 가진다고 판단되며, 경화 시간은 4000s로 최소 경화 시간인 3600s 이상을 만족하고 있다.

Fig. 11은 DLP 방법으로 제작된 툴의 열팽창 해석결과를 나타내고 있고, 120°C 의 온도에서 툴은 0.85mm의 열팽창을 보이고 있다. Fig. 12는 DLP 방법으로 제작된 툴의 응력 분포를 나타내는 그림이다. 최대 응력 부분에서 27MPa로 나타나고, 안전율은 1.00 이상으로 확인되었다.

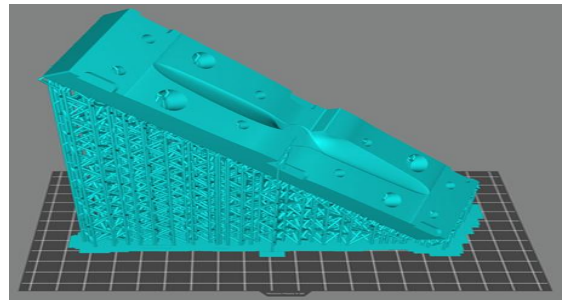
2.3 레이업 툴의 제작

Fig. 13은 툴을 제작하기 위한 슬라이스 프로그램 세팅을 보여주는 그림이다. 내부 채움에 따른 물성 변화에 대한 연구^[8]를 참조하여 내부 채움을 60%로 설정하였다.

Fig. 13의 (a)와 (b)는 각각 FDM 방법으로 제작하는 Cura slice 프로그램과 DLP 방법으로 제작하는



(a) FDM printing



(b) DLP printing

Fig. 13 Slice setting for 3D printing




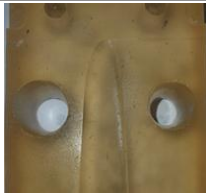
(a) FDM lay-up tool



(b) DLP lay-up tool

Fig. 14 Lay-up tools

Table 5 Tool components

Method	FDM	DLP
Making time	Upper : 14 hours Lower : 15 hours Post processing : 1 hour	Upper : 8 hours Lower : 9 hours Post processing : -
Mass	Upper tool: 89 g Lower tool: 88 g	Upper tool: 179 g Lower tool: 190 g
Surface condition		

Photon workshop 프로그램을 보여주는 그림이다.

Fig. 14는 최종 제작된 레이업 툴의 형상을 나타내고 있으며, FDM 3D 프린팅을 통해 출력된 툴은 출력 후 흔적 제거와 표면품질을 위해 샌딩 작업을 진행하였으며, DLP 3D 프린팅을 통해 출력된 툴은 완전 경화를 위한 자외선램프 상자에서의 경화 과정을 수행하였다.

Table 5는 각 툴의 제작 결과를 정리한 표이다.

FDM 방법으로 제작된 툴은 고른 표면을 얻기 위하여 후처리 공정을 시행하였으며 총제작시간은 약 30시간이었다. 반면에 DLP 방법으로 제작된 툴은 자외선 램프를 통한 레진경화 방식이므로 후처리 공정이 필요하지 않아 총제작시간이 17시간으로 FDM 툴 제작시간에 비교하여 약 50% 시간절감을 할 수 있었으나, 오토클레이브 압력을 견디기 위한 강성을 만족하기 위해 총 질량이 2배 정도로 제작되었다.

3. 제작 및 측정 결과분석

두 방법으로 출력한 결과를 3D 스캐너(Quantum scanner)로 스캔하여 기존의 설계 데이터와 비교하여 최대, 최소 오차 등을 확인하였다.

Fig. 15는 FDM 방법으로 제작한 레이업 툴의 3D 스캐닝 결과를 나타낸 것으로 (a)는 상부 툴의 스캐닝 결과를 (b)는 하부 툴의 스캐닝 결과를 나타낸 것이다.

Table 6은 FDM 방법으로 제작한 상부 툴과 하부 툴에 대한 3D 스캐닝 결과를 정리한 것으로, 상부 툴은 최대 오차 수치는 0.67mm, 최소 오차 수치는 -0.06mm, 평균 오차 수치는 0.21mm, 하부 툴은 최대 오차는 0.50mm, 최소 오차는 -0.04mm, 평균 오차 수치는 0.13mm로 프로펠러 제작 부위의 제작 오차 조건을 만족하였다.

Fig. 16은 소형 오토클레이브를 이용하여 수행된 가열 시험에 표면 열전대를 이용하여 획득한 툴의 온도결과를 그래프로 나타낸 결과이다. 120℃에서 최소 경화시간(60분)을 초과한 80분이므로, 프로펠러 제작에 충분한 온도와 시간을 부여하고 있다고 판단된다. 가열을 마친 후 온도가 급격하게 하락하는 현상은 온도하락 단계에서 소형 오토클레이브의 문을 개방함으로써 급격하게 온도가 하락되었다고 판단된다.

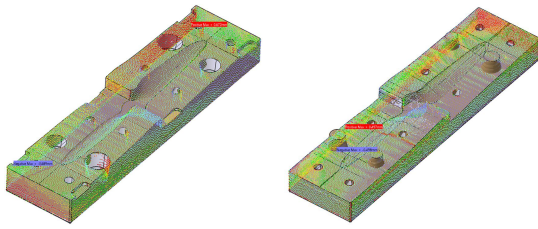
Fig. 17은 FDM 방법으로 제작한 툴에 대하여 최대 온도차이와 각 위치에서의 온도차이를 그래프로 나타낸 것이다. 각 위치에서의 온도차는 최대 3.4℃, 오븐 내부와의 온도차는 13.6℃이다.

각 점은 온도 상승시에 오븐의 가열 속도보다 낮게 온도가 상승하여 최대 13.6℃의 차이를 보이다가, 오븐의 온도 안정기 80℃를 유지할 때 온도가 상승하여 목표 온도에 다다른다, 이후 2차로 120℃로 상승할 때는 그 차이가 줄어들어 최대 7℃의 차이를 보이다가 목표온도 120℃에 도달해 온도를 유지함을 확인하였다.

Fig. 18은 DLP 방법으로 제작한 툴의 3D 스캐닝 결과를 나타낸 것으로 (a)는 상부 툴의 스캐닝 결과를 (b)는 하부 툴의 스캐닝 결과를 나타낸 것이다.

Table 7은 DLP 방법으로 제작한 상부 툴과 하부 툴에 대한 3D 스캐닝 결과를 정리한 것으로, 상부 툴은 최대 오차 수치는 0.45mm, 최소 오차 수치는 0.05mm, 평균 오차 수치는 0.14mm, 하부 툴은 대 오차 수치는 0.30mm, 최소 오차 수치는 -0.02mm, 평균 오차 수치는 0.13mm로 프로펠러 제작 부위의 제작 오차 조건을 만족하였다.

Fig. 19는 DLP 방법으로 제작한 툴에 대하여 최대 온도차와 각 위치에서의 온도차를 그래프로 나타낸 것이다. 각 위치에서의 온도차는 최대 4.6℃, 오븐 내부와의 온도차는 19.5℃이다.



(a) Upper lay-up tool (b) Lower lay-up tool

Fig. 15 Scanning data of the FDM lay-up tools

Table 6 3D scannig data of the FDM tools

Contents	Upper tool	Lower tool
Max. deviation	0.67 mm	0.50 mm
Min. deviation	-0.06 mm	-0.04 mm
Average deviation	0.21 mm	0.13 mm

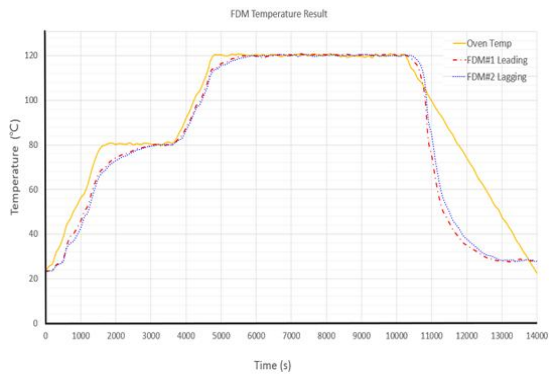
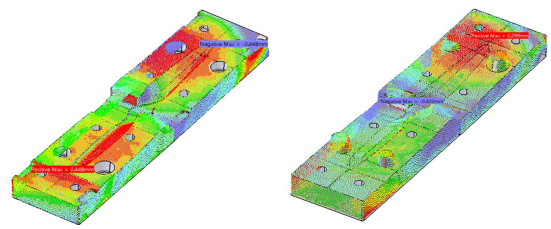


Fig. 16 Thermal change of the FDM tools



(a) Upper lay-up tool (b) Lower lay-up tool

Fig. 18 Scanning data of the DLP lay-up tools

Table 7 3D scannig data of the DLP tools

Contents	Upper tool	Lower tool
Max. deviation	0.45 mm	0.30 mm
Min. deviation	0.05 mm	-0.02 mm
Average deviation	0.14 mm	0.13 mm

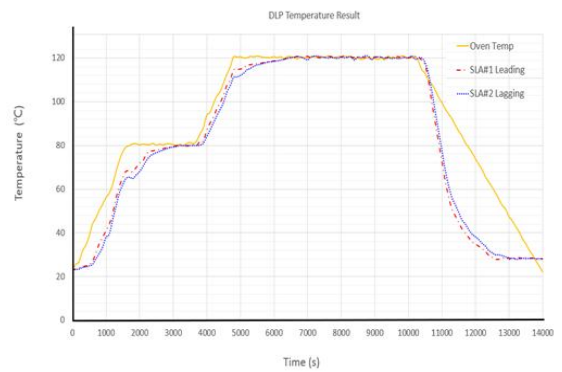


Fig. 19 Thermal change of the DLP tools

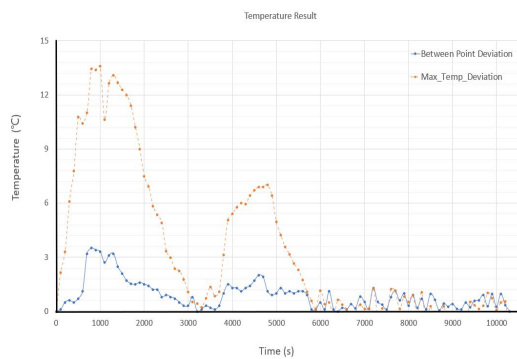


Fig. 17 Temp. deviation of the FDM tools

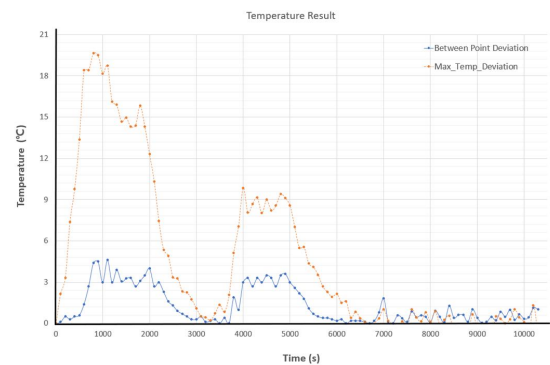


Fig. 20 Temp. deviation of the DLP tools

각 위치에서 온도 상승시에 오븐의 가열 속도보다 늦게 온도가 상승하여 최대 19.5℃의 차이를 보이다가, 오븐이 온도 안정기 80℃를 유지함에 따라 목표온도에 이르게 된다. 이후 120℃로 재상승할 때는 그 차이가 줄어들어 최대 9.8℃의 차이를 보이다가 목표 온도 120℃에 도달한 후에 온도를 유지함을 확인하였다.

각 위치에서는 초기 온도상승 구간에서 4.6℃의 온도 차이를 보이고, 온도 재상승 구간에서 3.5℃의 온도 차이를 보이며, 그 값은 각 부위에서 균일한 온도상승을 하고 있다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3D 프린팅을 이용한 CFRP 프로펠러용 레이업 툴을 설계 및 제작하였다. FDM 방법과 DLP 방법에 따라 열해석 및 응력 해석을 진행하였고, 또한 해석 결과를 검증하기 위해 제작 시험을 수행하였다.

FDM 방법으로 제작된 툴은 샌딩 후가공을 통하여 툴 표면 품질을 향상시킬 수 있었으며, 오토클레이브의 제작 압력 및 온도에서의 최소 경화 온도 및 시간을 만족하는 것을 확인하였다.

DLP 방법으로 제작된 툴은 상대적으로 제작 오차가 적어 보다 정밀한 표면으로 제작될 수 있으며, 최소 경화 온도 및 시간을 만족함을 검증하였다.

따라서 본 연구를 통하여 개발된 레이업 툴은 기존 복합재 제작에 사용되는 Al 또는 Fe 소재의 레이업 툴을 대체하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Lee, K. W., Lee, S. Y., Nam, J. Y., Lee, J. O., Lee, S. Y., and Lee, B. Y., "A Study on the characteristics of the Signals of AE according to Fracture mode of CFRP under Tensile load," The Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 18, No. 4, pp. 51-58, 2010.
2. Choi, K. M., and Chae, H. J., "Design of RTM molds for CFRP by Carbon Fiber Draping and Resin Flow Simulations," Journal of the Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 25-30, 2019. <https://doi.org/10.22847/ksdme.13.1.201903.004>
3. Kim, H. S., Lee, C. H., and Lee, W. K., "A Study on the Prediction of Dimension Variation due to the Temperature Rises of the Composite Materials and Box Beam Type Mold Steel," Composites Research, Vol. 31, No. 1, pp. 12-16, 2018. <https://doi.org/10.7234/composres.2018.31.1.012>
4. <https://m.post.naver.com/viewer/postView.nhn?volumeNo=16989889&memberNo=25379965> (Accessed, 30 OCT. 2018)
5. Shin, G. S., Kwon, H. K., and Kang, Y. G., "Basic Study on the Expendable Mold Casting by FDM 3D Printing" KSMTE Annual Autumn Conference, pp. 151-151, 2019.
6. Hwang, D. S., Lee, K. W., and Kwak, T. S., "Mock-up Press Die Manufacturing by using 3D Printer," Spring Conference of the KSMPE, pp. 163-163, 2017.
7. Wang, P. H., Kim, G., and Ronald Sterkenburg, "Investigating the Effectiveness of a 3D Printed Composite Mold," World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 684-688, 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3566395>
8. Jung, J. H., Hyun, J. H., Jung, H. S., Ko, H. J., Lee, J. H., and Ahn, Y. S., "Permanent Formwork of PLA Filament utilizing 3D Printing Technology," Korean Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 22, No. 1, pp. 81-89, 2021. <https://doi.org/10.6106/KJCEM.2021.22.1.081>