

CFRP 드릴링 공정에서의 공구의 특성에 따른 절삭부하와 공구마모 거동의 고찰

박동섭*, 정영훈**,#

*경북대학교 대학원 기계공학과, **경북대학교 기계공학부

Study on Tool Wear and Cutting Forces by Tool Properties in CFRP Drilling

Dong Sub Park*, Yeong Hun Jeong**,#

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyungpook National University,

**School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

(Received 3 April 2017; received in revised form 26 May 2017; accepted 21 June 2017)

ABSTRACT

Recently, the use of advanced materials with light weight significantly increases because of global regulation on CO2 emission. Especially, CFRP (carbon fiber reinforced plastics) one of the most promising advanced materials. Since CFRP has pretty higher strength per unit weight than steel, it is one of most popular materials in aviation industry and its application to automobile rises sharply. Especially, one of the frequent machining processes for CFRP is drilling to make a hole, however, CFRP drilling has troublesome limitations in hole quality and productivity induced due to delamination, splintering and severe tool wear. Particularly, cutting loads increase caused by tool wear makes delamination and splintering even severer. Therefore, tool wear monitoring or reduction in CFRP drilling must be considered seriously. In this study, we measured thrust force, flank wear, and tool surface temperature in drilling using various tools with different sizes and materials. Consequently, it was presented the effects of tool properties on drilled hole quality, thrust force and tool surface temperature.

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Plastics(탄소섬유복합재, CFRP), Thrust Force(절삭추력), Tool wear(공구마모)

1. 서 론

최근 지구 온난화와 더불어 이산화탄소의 배출규제가 전 세계적으로 강화되면서 경량 첨단소재에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 탄소섬유복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)는 항공

기 분야에서는 그 활용도가 이미 매우 높으며, 최근 자동차 분야에서의 활용이 급격히 증가하는 추세에 있다. 탄소섬유복합재가 각광 받고 있는 가장 큰 이유는 초경량, 고강도의 소재이기 때문이다.^[1] 그러나 탄소섬유를 적층하여 만든 소재이기 때문에 일반 소재들과 달리 특이한 가공 특성을 보여 가공에 어려움을 겪고 있다.

탄소섬유복합재의 가공 시 가장 큰 문제는 박리, 섬유돌출 등에 의한 가공품의 불량 문제와 높은 공

Corresponding Author : ykjeong@knu.ac.kr

Tel: +82-53-950-5577, Fax: +82-53-950-6550

구 마모로 인한 가공품질 저하 및 비용 증가 등이다. 특히 공구 마모는 공구비용을 높이는 동시에 절삭부하를 증가시키고 이로 인해 박리와 섬유돌출 현상이 현저하게 증가되는 문제를 야기한다.^[2] 따라서 소재의 특성을 반영한 가공 기술을 통해 공구 마모를 줄이는 동시에 상태감시를 통한 공구 마모를 감시하는 기술 등이 요구된다.

Helmi Attia 등은 WC-Co 공구의 마모 메커니즘 조사하여 공구 수명을 평가하고 공구 마모가 수명의 품질에 미치는 영향에 대해 연구하였으며 절삭속도가 공구 마모에 미치는 영향을 Taylor 방정식을 이용하여 모델링 하였다.^[3] 또한 D. Iliescu 등은 CFRP의 가공 시 절삭추력을 예측하고 평가하였다. 또한 절삭추력과 드릴링 파라미터와 공구 마모의 관계를 분석하여 모델링하고 이를 증명하였다.^[4]

본 연구에서는 탄소섬유복합재의 드릴링 시 공구의 특성에 따른 마모 거동과 이것이 가공에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 서로 다른 형상 및 크기를 가진 드릴링 공구를 이용하여 300개의 구멍을 가공하는 동안 공구 마모와, 가공품질, 절삭추력, 공구표면 온도 등을 측정하였다. 이를 통해 공구의 특성에 따른 마모의 거동의 차이를 분석하고 가공품질, 절삭추력과 공구표면의 온도와 공구형상, 공구 마모 간의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치의 구성 및 실험 조건

드릴링 실험은 소형 3축 텀핑 센터(M643-T14-A3, CSCAM)에서 진행하였다. 가공 조건으로는 공구 제조사의 추천에 따라 주축 회전속도는 3000 RPM, 공구의 이송속도는 0.05 mm/rev이었으며, 각각의 공구마다 300개씩 구멍가공 실험을 진행하였다. 4축 공구동력계(9272A, Kistler)와 전하앰프(5070, Kistler)를 활용하여 절삭추력을 얻었다. 절삭추력 신호는 10 Hz로 저주파통과필터링 후 사용하였다. 공구 마모를 측정하기 위해 현미경(SMZ745T, Nikon)을 이용하여 매 60개의 드릴링마다 여유면 마모를 측정하였다. 또한 5개의 구멍가공마다 공구 끝부분의 표면온도를 열전대를 이용하여 측정하였다.

Table 1 Information of drills used in this study

Model (Company)	Material	Coating	Diameter [mm]	Point angle [°]
NHD100 (TaeguTec)	WC	TiAlN	10.0	140
NHD080 (TaeguTec)	WC	TiAlN	8.0	140
CDF080 (TaeguTec)	WC	Diamond	8.0	110

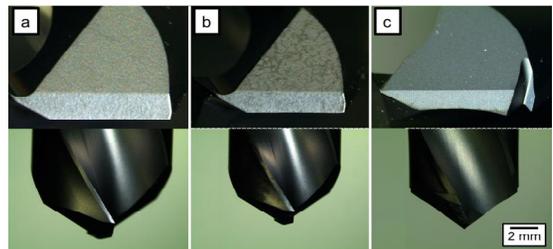


Fig. 1 Microscope images of various drilling tools of (a) D: 10 mm, TiAlN coated; (b) D: 8 mm, TiAlN coated; (c) D: 8 mm, diamond coated

Table 1은 실험에 사용한 공구의 특성을 보여준다. 실험에서는 재료의 영향을 보기 위해 초경드릴에 TiAlN을 코팅한 것과 다이아몬드를 코팅한 것을 고려하였다. 드릴 공구의 직경은 8, 10 mm, 선단각은 110°, 140°를 고려하였다. 그러나, 제품 종류의 한계로 코팅재질, 직경 및 선단각의 독립적인 영향을 볼 수 있는 조합으로의 선정은 곤란하였다. Fig. 1은 사용된 공구의 형상을 보여준다. 특히, 다이아몬드코팅, 직경 8 mm, 선단각 110°의 공구는 CFRP 전용 제품이다. 가공물은 실제 항공기에 사용되는 패브릭(fabric) 타입, 두께 6 mm의 CFRP 평판이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공구 종류에 따른 실험 결과

Fig 2는 직경 10 mm의 TiAlN코팅 초경드릴로 구멍가공을 한 경우 첫 번째와 300번째 구멍을 가공할 때의 절삭추력과 공구 마모를 보여준다. 그림으로부터 1개의 구멍 가공 시를 기준으로 300개의 구

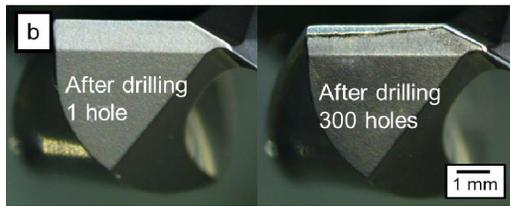
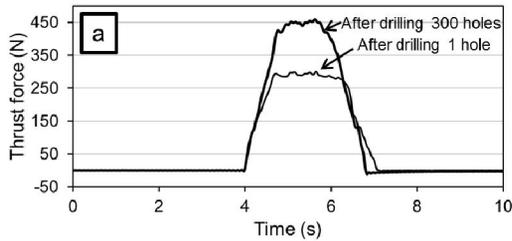


Fig. 2 (a) Thrust force, (b) flank face of a 10 mm TiAlN coated carbide tool after drilling 1 and 300 holes

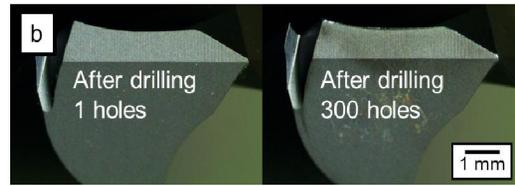
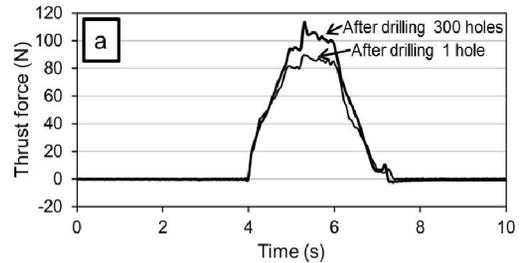


Fig. 4 (a) Thrust force, (b) flank face of a 8 mm diamond coated carbide tool after drilling 1 and 300 holes

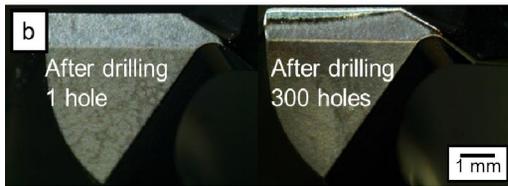
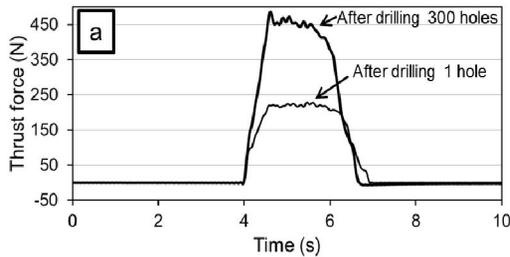


Fig. 3 (a) Thrust force, (b) flank face of a 8 mm TiAlN coated carbide tool after drilling 1 and 300 holes

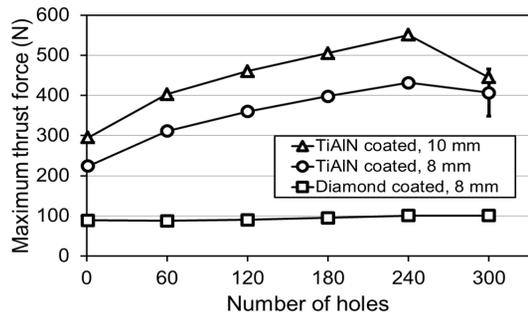


Fig. 5 The maximum thrust forces when drilling holes up to 300 with different 3 types of tools

명 가공 시 절삭추력은 약 1.6배의 증가를 보였다. 또한 300번째 구멍 가공 후 여유면에 마모가 현저하게 발생하였음을 알 수 있다. Fig 3의 직경 8 mm TiAlN코팅 초경드릴로 실험한 결과에서는 동일한 조건에서 절삭추력은 약 2배 증가하였으며, 마모 또한 유사하게 발행하였음을 확인할 수 있다. Fig 4는 CFRP 전용공구인 직경 8mm 다이아몬드코팅 초경공구를 이용했을 때의 결과를 보여준다. 가공에

다른 절삭추력의 증가는 약 25% 수준이며, 마모 또한 TiAlN코팅 초경드릴에 비해 현저히 적은 수준임을 알 수 있다.

Fig 5에서는 구멍 가공 횟수에 따른 최대절삭추력의 변화를 나타낸 것이다. 직경이 큰 공구일수록 큰 절삭추력이 발생함을 할 수 있으며, 이는 일반적인 재료제거율이 공구에 비례하기 때문임을 알 수 있다. 구멍 가공 횟수가 증가할수록 더 큰 절삭추력이 필요함을 확인할 수 있다. 특히, TiAlN코팅 초경드릴의 경우에는 현저한 증가를 보이지만, 다이아몬드코팅 초경드릴은 그 증가가 상대적으로 미비함을 확인할 수 있다. 따라서 다이아몬드코팅 초

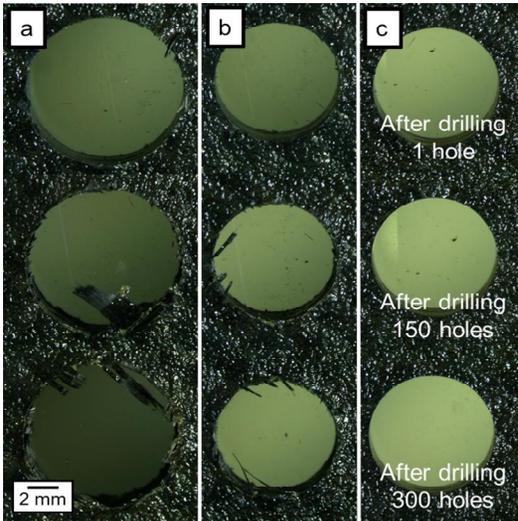


Fig. 6 Exit views of the machined holes (a) D: 10 mm, TiAlN coated; (b) D: 8 mm, TiAlN coated; (c) D: 8 mm, diamond coated

경드릴은 300개 구멍가공 이후에도 계속 공구 마모가 진행되지만 충분한 횟수의 가공이 가능할 것으로 예상된다. 다이아몬드 코팅 공구의 경우 마모가 거의 없는 순간에도 절삭력이 TiAlN코팅 공구에 비해 현저히 낮음을 볼 수 있으며, 이는 다이아몬드 코팅 공구의 마찰특성에 영향을 받았을 수 있으나 우선적으로 선단각이 작은 것에 기인한 것으로 추정된다. 또한, TiAlN코팅 초경드릴의 경우에는 240개의 구멍 가공 이후에는 절삭추력이 다소 줄어드는 것을 확인하였다.

Fig 6은 실제 가공된 구멍의 출구 부분을 보여준다. 다이아몬드 코팅 공구를 사용하였을 때는 300개의 구멍 가공 시까지도 상당히 높은 드릴링 품질을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 반면 TiAlN 코팅 공구는 가공 횟수가 늘어날수록 가공 입출구 부분에 미절삭 섬유가 관찰되었다. 이는 300개까지의 구멍 가공 시 공구 마모에 의한 절삭추력의 증가로 야기된 것으로 추정된다.

Fig 7은 가공물에 5개의 구멍 가공 시마다 공구의 끝의 온도를 측정한 것이다. 30개 구멍 가공 시마다 시편을 교체로 인해 약 3분간 가공을 중지하였다. 또한 60개 구멍 가공 시마다 공구 마모의 검

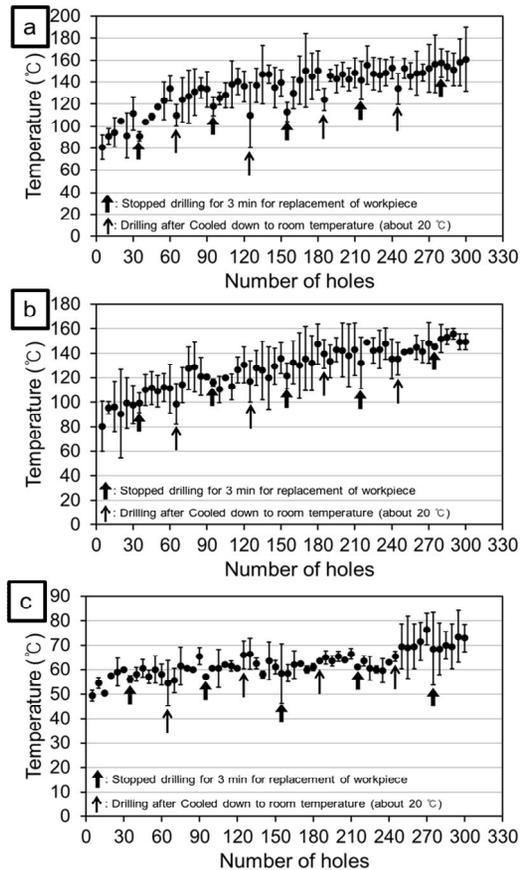


Fig. 7 Temperatures at tool tip when drilling holes up to 300 with different 3 types of tools (a) D: 10 mm, TiAlN coated; (b) D: 8 mm, TiAlN coated; (c) D: 8 mm, diamond coated

사를 위해 공구를 상온으로 냉각시켰으며, 마모 측정 후 다시 장착하여 계속 가공하였다. 시편 교체 후 초반의 가공에서는 온도가 하강하여 다시 올라가는 경향을 띄고 있으나 가공이 진행될수록 온도는 상승하고 있고 이는 공구의 마모로 인하여 시편과 공구 사이의 마찰열에 의한 것으로 추정된다. 10 mm 직경의 TiAlN코팅 초경드릴에서는 첫번째 구멍 가공 후 60°C에서부터 시작하여 300번째 구멍 가공까지 최대 약 180°C 까지의 높은 온도 상승률을 가지고 있었으며, 8 mm 직경의 TiAlN코팅 초경드릴은 최소 66°C에서 최대 약 160°C로 높은 온도

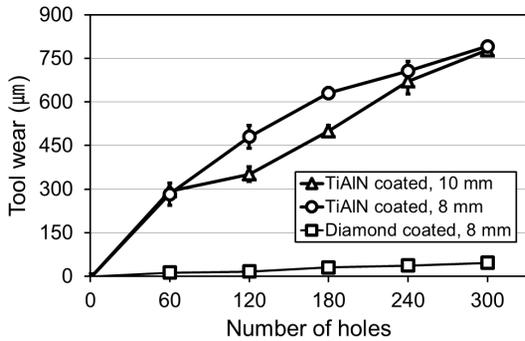


Fig. 8 Tool wear growth according to the number of drilled holes

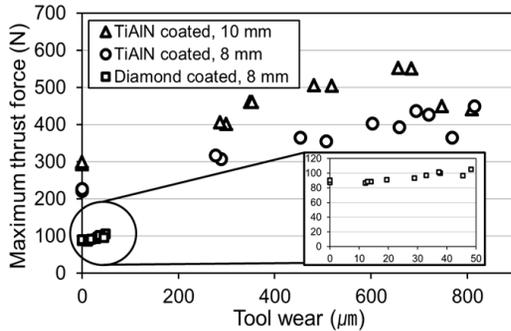


Fig. 9 Relationships of between the tool wear and thrust force

상승이 있었다. 그러나 다이아몬드 코팅 초경드릴은 300개의 구멍가공동안 최대-최소 온도차가 약 33°C로 TiAlN코팅 초경드릴과는 전혀 다른 온도의 특성을 가지고 있다. 또한 TiAlN코팅 초경드릴은 그림에서 보는 바와 같이 계속적인 구멍 가공에 따라 지속적인 온도의 증가가 나타나고 있는 반면, 다이아몬드 코팅 초경드릴은 약 240개의 구멍 가공이 이뤄지는 동안은 온도의 거동이 비교적 안정되며, 이후부터 급격한 온도증가가 발생하는 점에서 본 연구의 가공 조건을 기준으로 약 250개의 구멍 가공 이후 마모 거동에 차이가 발생할 것으로 추정할 수 있다.

공구의 마모량을 측정한 결과는 Fig. 8에 나타나 있다. 300개의 구멍 가공 시의 TiAlN코팅 초경드릴은 약 800 μm로 측정되었으며, 본 연구의 조건에서는 공구의 직경에 따른 차이는 찾을 수 없었다. 다

이아몬드 코팅 초경드릴은 TiAlN코팅의 경우에 비해 현저히 낮은 약 47 μm로 측정되었다. 이는 본 연구에서 사용한 다이아몬드 코팅 초경드릴이 코팅 소재가 다르고 선단각이 작은 점이 동시에 영향을 미친 것으로 평가된다.

3.2 실험 결과에 대한 고찰

일반적으로 공구의 마모는 절삭부하를 높이고 가공품질을 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다.^{[5],[6]} 따라서, 공구 마모에 따른 절삭추력의 거동을 분석하였으며, 그 결과는 Fig 9와 같다. 우선 다이아몬드 코팅 초경공구는 마모량 현저히 적고, 절삭추력의 변화도 현저히 적어 상대적인 비교는 곤란하지만 마모가 증가함에 따라 절삭추력도 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 절삭추력과 마찰력의 관계를 고려한다면 Fig. 7(c)의 상대적으로 안정적인 온도거동을 설명할 수 있으며, 또한 작은 절삭추력으로 인해 Fig. 6의 가공품질의 결함도 적은 것을 추정할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 CFRP 전용 다이아몬드 코팅 초경공구는 작은 선단각에 의한 작은 절삭추력과 다이아몬드 코팅으로 인한 내마모성이 높아 절삭추력의 증가가 적은 점으로부터 작은 절삭추력으로 상대적으로 장시간 사용이 가능함을 알 수 있다. 직경이 서로 다른 TiAlN코팅 초경공구를 비교하면 10 mm 직경의 공구가 8 mm의 공구에 비해 더 큰 절삭추력을 받고 마모에 따른 절삭추력의 증가도 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 마모의 증가에 따른 절삭력의 증가가 비교적 선형적인 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다. Fig 10과 11은 각 공구의 마모에 대한 온도증가율을 보여준다. 모든 공구에서 마모 큰 공구일수록 가공이 진행됨에 따라 온도가 더 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10에서 보인 바와 같이 750 μm 이상에서는 온도의 상승폭은 상대적으로 적음을 볼 수 있으나 이는 대기와의 열전도가 평형을 이루었기 때문으로 추정된다. Fig. 11의 다이아몬드 코팅 공구의 경우 초기 마모 시에는 약 10°C의 온도 상승을 보였고 20 μm의 마모가 진행된 경우 온도 상승은 상대적으로 적었다. 그러나 마모량이 42 μm 이상인 경우에 온도 상승이 약 15°C 정도 전체적으로 증가하였다.

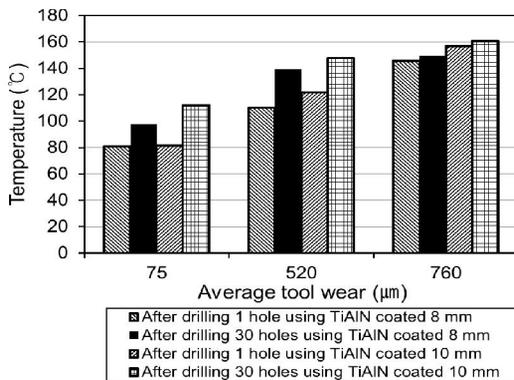


Fig. 10 Relationships of between the tool wear and temperature increase in TiAlN coated carbide tools

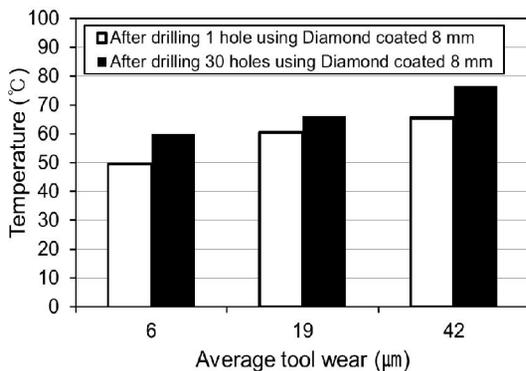


Fig. 11 Relationships of between the tool wear and temperature increase in diamond coated carbide tool

이 또한 마모에 의한 절삭추력 의 증가와 전반적으로 유사한 경향을 가지는 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소섬유복합재의 드릴링 가공에서 공구의 형상과 코팅재질에 따른 마모거동을 분석하고 이와 함께 절삭추력, 온도상승, 가공표면 등을 연관관계를 분석하였다. 이를 통해 공구의 선단각, 코팅재질이 절삭추력과 내마모성과 직접적으로 연관되어 작은 선단각을 가지고 다이아몬드 코팅이 이뤄진 경우 그렇지 않은 경우들에 비해 CFRP 드

릴링에 있어서 월등한 가공품질과 가공내구성을 가짐을 확인하였다.

후 기

“본 연구는 산업통상자원부의 시스템산업미래성장 동력사업의 일환으로 수행하였습니다. [10053248, 과제명: 탄소섬유복합재(CFRP) 가공시스템 개발].”

REFERENCES

1. Wang, X., Kwon, P. Y., Sturtevant, C., Kim, D. W., Lantrip, J., "Tool wear of coated drills in drilling CFRP", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 15, No. 1, pp. 127-135, 2013.
2. Park, J. N., Jeong, S. T., and Cho, G. J., "A Study on the Machining Characteristics in GFRP Using HSS Tools", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 2, No. 2, pp 37-44, 2003.
3. Rawat, S. and Attia, H., "Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites", Wear, Vol. 267, No. 5, pp. 1022-1030, 2009.
4. Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M. E. and Girod, F., "Modeling and tool wear in drilling of CFRP", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 50, No. 2, pp. 204-213, 2010.
5. Won, S. J., Li, C. P., Park, K. M. and Ko, T. J., "The Exit Hole Burr Generation of CFRP with Ultrasonic Vibration", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 134-140, 2017.
6. Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., Kaufeld, M., Knoblauch, V., Schneider, G., "A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)", Composite Structures, Vol. 155, pp. 173-183, 2016.