

공구 형상에 따른 CFRP의 가공결함 제거에 관한 연구

박기문*, 고태조*[#], 위전*, 띠루말라이 쿠마란*

*영남대학교 기계공학부

A Study on the Removal of CFRP Machining Defects by Various Tool Geometries

Ki Moon Park*, Tae Jo Ko*[#], Zhen Yu*, Thirumalai Kumaran S*

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.

(Received 24 May 2017; received in revised form 7 June 2017; accepted 12 June 2017)

ABSTRACT

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) has many industrial applications due to its low weight and high strength properties. Due to its superior properties, for example, excellent resistance to fatigue wear, corrosion, and breakage from fatigue, it has been widely applicable to aircraft, automotive, and medical industries and so on. The main machining for CFRP is drilling, and route milling. In case of drilling, the machining defects such as the delamination of each layer, uncut fiber, resin burning, spalling, and exit burrs are inevitable. The issue to remove such kind of defects is necessary to make CFRP parts successful. From this point of view, this paper investigates the removal effectiveness of machining defects existing at exit region with different type of tool geometries. Consequently, based on the experiments, the tool geometry is most impact factor to remove uncut fiber or resin.

Key Words : CFRP(탄소섬유복합재), Deburring(디버링), Burr(버), Tool geometry(공구 형상)

1. 서 론

최근 국제적으로 온난화현상과 같은 환경문제가 대두됨에 따라 CO₂ 감소와 같은 환경규제가 여러 나라에서 이슈화되고 있다. 그에 따라 고효율 연비, 에너지 저감 등이 중요해지면서 항공, 자동차 산업에서는 높은 강도와 우수한 기계적 특성을 요구하면서 동시에 초경량화를 가지는 신소재 사용에 관심이 집중되고 있다. 이런 점에서 탄소섬유복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics; CFRP)는 인장강도

가 높고, 피로 및 부식이 없는 고강도 경량 소재로서 비강성, 비강도, 내마멸성, 피로 특성 등 우수한 기계적 특성으로 인하여 각광을 받고 있다.

특히, 항공기, 자동차, 선박, 스포츠 용품 및 의료 기기 산업 등에서 많이 적용되고 있고, 철에 비해 밀도가 1/4 수준이고, 인장강도는 철보다 2배 높은 특성을 가지고 있어 경량화가 필요한 항공기 기체 또는 자동차 프레임 및 부품재료로서 사용량이 증가하는 추세이다.^[1-3]

CFRP의 성형법으로는 오토클레이브(Autoclave) 성형법, 압축성형법(Compression molding), SMC(Sheet Molding Compound)성형법이 있다. 탄소섬유를 기본으로 섬유와 에폭시 수지를 사용하여 만들어진 CFRP는 섬유 배향각 및 적층수에 따라서 강

Corresponding Author : tjko@yu.ac.kr

Tel: +82-10-3537-2576, Fax: +82-53-810-4627

성 및 강도를 조절할 수 있는 장점이 있다.^[3] 그러나 CFRP는 이종재료의 조합에 의한 복합재료이기 때문에 불균질성, 이방성 등의 성질을 가져서 금속 재료와는 다른 기계적 특성을 지녀 가공 시 여러가지 어려움이 발생하게 된다.^[4] 높은 강도와 진동발생으로 인하여 가공이 어렵고 분진형태의 칩 발생으로 인하여 발열 및 공구마모가 진행되어 CFRP의 구멍가공 시 입구 및 출구면에서 여러 가공결함이 발생하기 쉽다.

CFRP는 분진형태의 칩을 가지고 있고 연마성이 강하여 공구마모가 매우 빠르다는 단점을 가지고 있다. 또한 CFRP는 열전도계수가 낮아서 열 방출이 어렵고 이로 인해 드릴공구의 온도상승을 유발하여 공구마모가 더 심화되고 가공결함이 발생하는 원인이 되기도 한다.^[1]

CFRP 구멍가공의 주요 가공결함으로는 적층 재료간의 층간분리현상인 박리(delamination), 섬유 및 수지가 미절삭 되거나 찢어지는 현상으로 인한 가공 결함(uncut fiber, uncut resin, chipping)이 있다. 미절삭 버와 박리현상과 같은 가공결함은 복합재료의 가공에서 가장 큰 단점으로 지적되고 있다.^[5-6]

따라서 구멍가공 후 미절삭 버를 제거하는 디버링이 필요하지만 가공 후 가공면에 붙어있는 미절삭 폴리머나 탄소섬유는 절삭력을 건디는 특성이 낮아져서 일반적인 가공법으로는 결함제거가 매우 어렵다. 예를 들어서, 항공산업기준 약 1000회의 구멍가공 후 공구를 교체하게 되는데 미절삭된 버 등을 효과적으로 제거할 수 있는 디버링 기법이 있다면 공구의 잦은 교체도 방지할 수 있어 경제적인 효과를 기대할 수 있다.

이러한 점에서 본 연구에서는 섬유배향각과 공구날의 상대적인 각도에 의한 CFRP의 가공결함 원인 등을 규명하고, 이에 따라 형태가 다른 6개의 공구를 선정하여 디버링에 이용하였으며 회귀분석법을 이용하여 각 공구의 버 제거율을 비교분석함으로써 최적의 디버링 가공조건을 제시하였다.

2. CFRP 결함발생 원인

2.1 결함 종류 및 원인

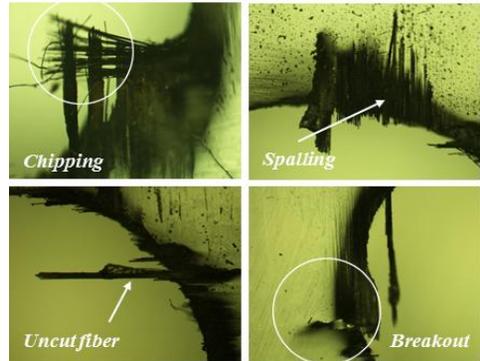


Fig. 1 Defect in CFRP drilling

CFRP 구멍가공으로 발생하는 주요 가공결함으로는 Fig. 1과 같이 chipping, spalling, uncut fiber, breakout 등이 있다. 이 중 디버링으로 제거가 가능한 것은 미절삭된 섬유나 폴리머 등이며 한번 발생한 박리(delamination), breakout 등은 결함개선이 불가능하다. 이들은 주로 CFRP 구멍가공 시 출구면에서 많이 발생하게 되는데 가공결함 발생요인으로는 CFRP의 섬유배향각, 가공조건, 공구형상(선단각, 공구마모), 공구재료(재질, 코팅) 등이 있다.

박리와 같은 결함은 구멍가공 시 발생하는 공구의 추력이 섬유와 폴리머층의 벤딩모멘트 한계를 넘어설 때 층간분리 현상이 생겨 발생하게 된다. 미절삭 버와 같은 결함은 공구마모가 심화될수록 발생률이 높아지는 경향을 보인다.

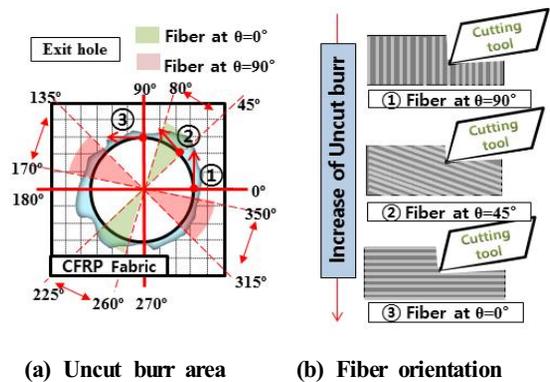


Fig. 2 Uncut fiber zone depending on fiber orientation

Fig. 1에서 보는 바와 같은 미절삭 버는 출구면에서 주로 발생하는데, Fig. 2 (a)와 같이 섬유배향각이 0° 일 때 45~80°, 225~260° 영역에서 주로 발생하고, 섬유배향각이 90° 일 때는 135~170°, 315~250° 영역에서 발생빈도가 높다. [7-8]

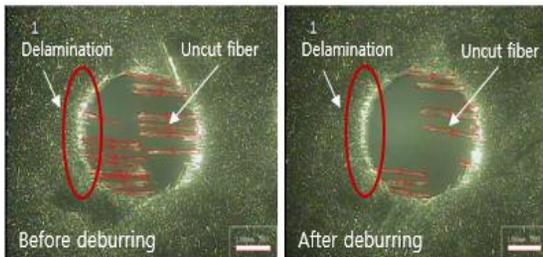
이는 구멍가공 시 섬유배향각과 공구날과의 상대각도가 달라지기 때문이다. 구멍가공을 할 때 Fig. 2 (b)처럼 섬유배향각이 90° 일 때 공구의 절삭날이 섬유배향각과 상대적으로 수직에 가까우면 절삭력이 가해져 CFRP 시편의 절단이 원활하게 이루어지지만 공구날이 45° 에서 0° 로 배향된 섬유층을 가공할 때는 비스듬한 섬유층에 같은 방향으로 절삭력이 작용해 미절삭되는 부분이 발생하기 시작한다.

2.2 버 제거율

디버링 실험을 위하여 미리 300~400회의 구멍가공 후 공구마모가 많이 진행된 드릴을 이용하여 미절삭 섬유 등의 버가 많이 발생하도록 하였다.

버를 생성한 후 공구를 교체하고 같은 위치에 재가공을 함으로써 디버링이 가능한데, Fig. 3과 같이 미절삭 버의 면적을 측정하여 합한 후 디버링 전과 후를 비교하면 식 (1)과 같이 버 제거율(BRR; burr removal rate)을 계산할 수 있다. 버 제거율은 디버링 실험 후 성능평가의 지표로 사용될 것이다. [13]

$$BRR(\%) = \frac{\int_{Before} A_{burr} - \int_{After} A_{burr}}{\int_{Before} A_{burr}} \quad (1)$$



(a) Before deburring (b) After deburring

Fig. 3 Measurement of burr area

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치 구성 및 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 일방향 에폭시 프리프레그(prepreg) 오토클레이브(Autoclave) 성형법으로 제작된 시편으로 섬유 배열 각도가 [0°, 90°]로 적층된 MD(Multi-directional) CFRP를 이용하였다. 소재 직물형태의 Fabric CFRP는 미절삭 버가 상대적으로 적게 생성되고 MD CFRP는 많이 생성된다. Fig. 4의 머시닝센터 ACE-V45(구. 대우중공업)를 이용하여 버생성 및 디버링 실험을 하였으며 버생성은 400회 이상 가공하여 마모가 많이 진행된 초경드릴(Widin, SSD060)을 이용하였다.

Table 1과 같은 가공조건으로 디버링 실험을 진행하였고, 이송속도(0.03, 0.167, 0.33mm/rev)와 공구 회전수(1500, 3000rpm)를 변화시켜 디버링할 때 가공조건이 미치는 영향 또한 함께 관찰하였다.

Table 1 Experimental conditions in deburring

Parameters		Type
Workpiece	Type	MD CFRP Composite
	Thickness	5mm
Spindle speed (rpm)		1500/3000
Feed (mm/rev)		0.03/0.167/0.33
Tool diameter		6mm



(a) Daewoo ACE-V45 (b) Deburring MD CFRP

Fig. 4 Experimental setup

Table 2 Tool selection according to geometry

Tool		Characteristic				Picture
No	Category	Company	Product name	Diameter	Purpose	
1	Carbide drill	WIDIN	SSD060	6mm	Drilling	
2	Carbide reamer	SANGSIN	GEM C100	6mm	Hole extension	
3	Rotary burr	YG1	SB-1ML	6mm	Deburring	
4	2-Blade Endmil compression	SSOBOM	SSOBOM-D3A55	6mm	Milling for wood	
5	4-Blade Endmil compression	YG1	GUF40060	6mm	Milling for CFRP	
6	6-Left blade endmil	KENNAM ETAL	CDDC0600A6AH	6mm	Milling for CFRP	

Table 2와 같이 형태가 다른 6종의 공구를 선정 하였는데 구멍가공과는 관련이 없는 공구들도 많이 포함되었다. CFRP의 미절삭 버의 제거에는 공구형상이 중요하다고 판단한 것이 그 이유인데 그 용도에 맞도록 공구형태가 각기 다르다.

발생한 버는 기계적 강성이 매우 낮은 상태로 마모가 없는 새 드릴로 교체하여도 버 제거가 잘되지 않는다. 버를 생성할 때 사용된 공구는 헬리컬이 오른쪽으로 감겨있는 우날 드릴이고, Fig. 2 (b)와 같이 섬유배향각 0° 기준 45~80°, 225~260° 에서 버가 많이 발생한다.^[7] 우 절삭날에 영향을 받아 만들어진 미절삭 버는 디버링 시 동일한 우날, 우헬리컬을 가지는 공구로는 45~80°, 225~260° 영역에서 발생한 미절삭 버의 제거가 되지 않을 가능성이 높다. 반면에 좌날 즉, 반대 헬리컬로 이루어진 절삭날 공구에서는 해당 버 발생 구역이 반대로 버가 절삭이 잘되는 구간에 속하므로 미절삭 버가 제거될 가능성이 높다.

1~6번 공구 중 3번 공구만 유일하게 디버링을 목적으로 하는 공구이고 그 외에는 각각 구멍가공, 구멍확장, 목공용 밀링, CFRP 밀링의 용도로 사용되고 있는 공구들이다. 4번과 5번 공구는 우날과 좌날이 섞여있는 컴프레션 엔드밀이고 6번 공구는 6날로 이루어진 좌날, 좌헬리컬 엔드밀이다.

실험은 각 공구별로 0.033, 0.167, 0.33mm/rev, 1500, 3000rpm의 가공조건에서 3회씩 디버링을 한 후 버 제거율의 평균을 구하여서 비교 및 분석을 하였다. Taguchi 실험법에 의해서 공구형태, 공구회전수, 이송속도 중에서 버 제거율에 영향을 미치는 인자를 찾고, 회귀분석법을 이용하여 신뢰성을 분석하였다.^[9-11]

3.2 실험결과

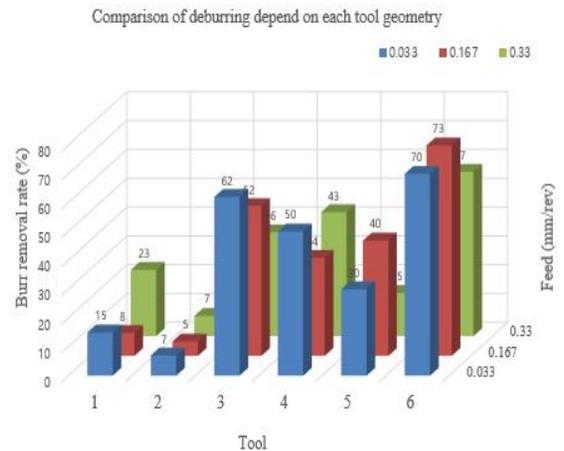


Fig. 6 Comparison of deburring on each tool

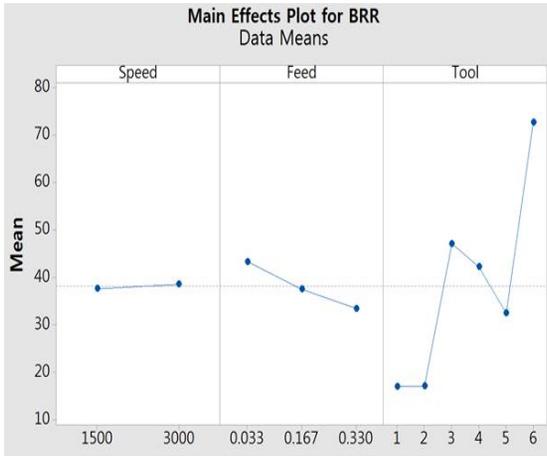


Fig. 7 Main effects plot for burr removal rate

Fig. 6의 결과 그래프를 보면 6번 6날 좌날 엔드밀의 0.167mm/rev, 3000rpm에서 73%의 버 제거율로 디버링 효과가 가장 좋았다. 두 번째로는 3번 로타리바가 0.033mm/rev, 3000rpm에서 62%의 버 제거율을 보인다.

Minitab 17을 이용하여 BRR에 영향을 미치는 인자를 분석하였고 결과는 Fig. 7과 같다. 공구 회전수와 이송속도의 변화가 BRR에 미치는 영향은 미미하지만 공구의 기하학적 형태가 미치는 영향은 큰 것으로 나타나고 특히, 6번 공구일 때 높은 영향을 미친다. 각 인자의 기여도 분석에 사용된 회귀분석 모델은 식 (2)와 같다. [12]

$$BRR(\%) = 21.8 + 0.00055 \text{Speed} - 88 \text{Feed} + 3.89 \text{Tool} + 61 \text{Feed} * \text{Feed} + 0.746 \text{Tool} * \text{Tool} + 0.0072 \text{Speed} * \text{Feed} - 0.00035 \text{Speed} * \text{Tool} + 4.7 \text{Feed} * \text{Tool} \quad (2)$$

식(2)는 BRR을 회귀분석법으로 표현한 것이며, 공구회전수(Spindle speed), 이송속도(Feed), 공구 형태(Tool type)의 인자가 BRR에 기여하는 정도와 오차율을 계산할 수 있다. Fig. 8은 각 인자간의 관계에 의한 BRR을 나타내고 있는데 빨강색일 때 높은 버 제거율, 파랑색일 때 낮은 버 제거율을 나타낸다. 이송속도와 공구 회전수는 버 제거율에

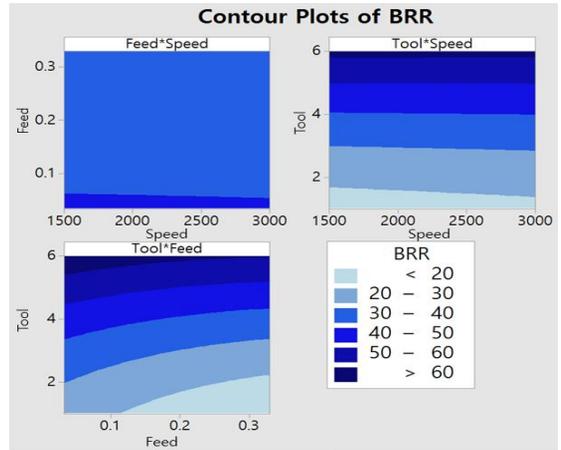


Fig. 8 Contour plots of burr removal rate

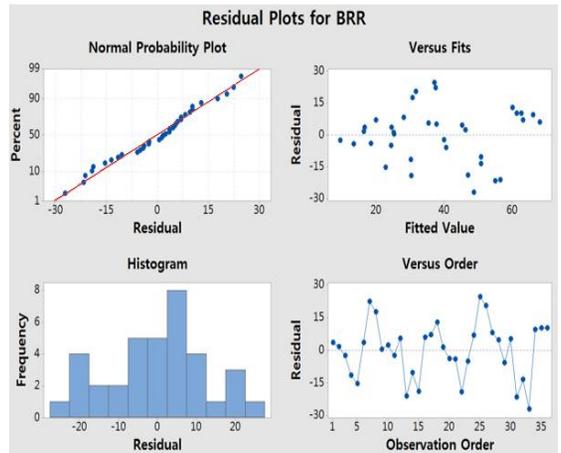


Fig. 9 Residual plots for burr removal rate

큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있고, 이송속도가 느려질수록 버 제거율은 높아지는 경향을 띠고 있다.

Table 3은 각 인자와 버 제거율의 관계를 분산 분석(ANOVA; Analysis of Variance)으로 나타낸 표이다. BRR에 미치는 영향은 공구형태가 57.23%이며 공구 회전수 0.05%, 이송속도 3.78%로 가공 조건이 버 제거율에 미치는 영향은 공구형태보다 크지 않고 공구의 기하학적인 형상에 큰 영향을 받는다. Fig. 9는 디버링 실험 결과의 신뢰성

Table 3 ANOVA for burr removal rate

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
Regression	8	9565.4	9565.39	1195.67	5.58	0	62.33%
Speed	1	6.9	0.83	0.83	0	0.951	0.05%
Feed	1	580.6	124.72	124.72	0.58	0.452	3.78%
Tool	1	8782.3	45.23	45.23	0.21	0.649	57.23%
Feed*Feed	1	14.3	14.31	14.31	0.07	0.798	0.09%
Tool*Tool	1	124.7	124.69	124.69	0.58	0.452	0.81%
Speed*Feed	1	15.4	15.36	15.36	0.07	0.791	0.10%
Speed*Tool	1	7.3	7.31	7.31	0.03	0.855	0.05%
Feed*Tool	1	33.9	33.93	33.93	0.16	0.694	0.22%
Error	27	5780.9	5780.93	214.11			37.67%
Total	35	15346.3					100.00%

DF=Degree of freedom; SS=Sum of squares; MS=Mean square

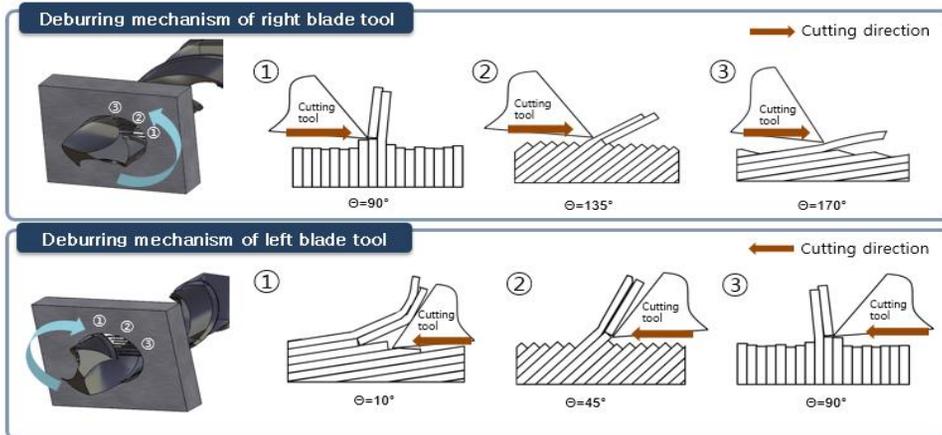


Fig. 10 Cutting schematic according to fiber orientation

분포도에 관한 것인데, 첫 번째 그래프인 정규확률도의 직선그래프 양옆으로 결과값이 근접할수록 신뢰성이 높은 데이터라고 할 수 있다. 또한 Fig. 9의 히스토그램에서는 가운데 막대값이 크고 형태가 “n”형태에 가까울수록 신뢰성이 높은 데이터이다. 디버링 실험에서 회귀분석으로 표현된 실험인자의 전체 기여도는 62.33%이다.

3.3 좌날공구의 디버링 메커니즘 분석

산업현장에서는 일반적으로 우날, 우헬리컬을 가

지는 공구가 많이 사용되고 있다. 이 우날 드릴로 CFRP를 가공하고 나서 발생하는 미절삭 섬유 등의 버는 동일한 방향의 절삭날을 갖는 공구로는 디버링이 잘 되지 않는 경향을 보인다. Fig. 10의 우날 공구의 디버링 매커니즘을 보면 디버링할 때 공구가 시계반대방향으로 회전하면서 절삭날과 섬유배향각의 상대위치가 90°, 135°, 170° 순으로 만나게 되면서 절삭날이 누워있는 방향으로 절삭력이 가해져 절삭되지 않는 현상이 발생한다. 반면에 좌날 공구의 경우 시계방향으로 회전하면서 섬유배향각과의 상대각도가 10°에서부터 90°까지 순차적으로 만나게 됨에 따라 절삭력이 효과적으로 전달되

는 디버링 매커니즘을 갖게 된다. 따라서 좌날 공구는 우날로 생성된 미절삭 버에 대하여 효과적인 디버링이 가능함을 유추해낼 수 있다.

4. 결 론

6가지의 형태가 다른 공구를 이용하여 CFRP의 구멍가공으로 발생한 미절삭 버 등의 가공결함을 제거하는 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초경드릴, 초경리머, 로타리바, 2날 엔드밀 컴프레션, 4날 엔드밀 컴프레션, 6날 좌날엔드밀의 6가지 공구에 대한 MD CFRP의 디버링 실험을 하였으며 3000rpm, 0.167mm/rev, 6날 좌날엔드밀 일 때 약 73%의 버 제거율로 가장 디버링 효과가 좋았다.
2. 공구형태가 버 제거율에 미치는 영향은 57.23% 공구 회전수 0.05%, 이송속도 3.78%로 가공 조건은 미절삭 버를 제거함에 있어서 영향이 미미하며, 공구의 기하학적인 형상이 버 제거율에 영향을 많이 미치는 것을 확인하였다.
3. 일반적인 공구는 우날, 우헬리컬을 가지며 이러한 형태의 공구로 생성된 미절삭 버는 반대 형태인 좌날, 좌헬리컬을 가지는 공구로 효과적인 디버링이 가능하다.

후 기

“이 논문은 2014년 교육부와 한국연구재단의 지역 혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2014H1C1A1066502)” 또한, “본 연구는 산업통상자원부의 시스템산업미래성장동력사업의 일환으로 수행하였음. (10053248, 과제명: 탄소섬유복합재(CFRP) 가공시스템 개발).

REFERENCES

1. 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.
2. Malick, P. K., Fiber-Reinforced Composite, M. Dekker, pp. 20-40, 1988.
3. Cheong, S. K., and Jeong, S. K., “Mechanical Behavior of Laminated Composites Using Scrim prepregs for Fishing Rods,” Composites Research, Vol. 12, No. 5, pp.80-86, 1999.
4. Koenig, W., Wolf, C., Grass, P. and Willerscheid, H., “Machining of Fibre Reinforced Plastics,” CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 34, No. 2, pp. 537-548, 1985.
5. Lee, Y. C., Shin, G. H., Kwak, T. S., “Deburring Technology of Vacuum Plate for MLCC Lamination Using Magnetic Abrasive Polishing and ELID Process,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 149-154, 2015.
6. Bae, J. K., Park, H. Y, Kwon, B. C., Ko, S. L., “Determination of Cutting Conditions for an Efficient Deburring Process Using a New Deburring Tool,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 109-117, 2016.
7. Xu, J., An, Q., Cai, X., Chen, M., “Drilling Machinability Evaluation on New Developed High-strength T800S/250F CFRP Laminates,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 14, No. 10, pp. 1687-1696, 2013.
8. Jia, Z., Fu, R., Niu, B., Qian, B., Bai, Y. and Wang, F., “Novel Drill Structure for Damage Reduction in Drilling CFRP Composites,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 110, pp. 55-65, 2016.
9. Liu, Y., Shin, M. S., Seo, T. W., “Optimization Design of Dry Adhesion for Wall-Climbing Robot on Various Curvatures Based on Experiment,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 23, No. 4, pp. 398-402, 2014.

10. Lee, D. G., Jang, J. H., Seo, T. W., “Robust Optimal Design of Tail Geometry for Stable Water-running Robots,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 25, No. 2, pp.132-137, 2016.
11. Choi, J. H., Kim, J. H., Park, S. S., Seo, T. W., “Robust Optimum Design of Resonance Linear Electric Generator for Vehicle Suspension,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 23, No. 4, pp. 403-407, 2014.
12. Kumaran, S. T., Ko, T. J., Li, C. P., Yu, Z., Uthayakumar, M., “Rotary Ultrasonic Machining of Woven CFRP Composite in a Cryogenic Environment,” Journal of Alloys and Compounds, Vol. 698, pp. 984-993, 2017.
13. Islam, Md. M., Li, C. P., Ko, T. J., “Dry Electrical Discharge Machining for Deburring Drilled Holes in CFRP Composite,” International Journal of Precision Engineering and manufacturing-Green Technology, Vol. 4, No. 2, pp, 149-154, 2017.