

## 초음파 진동에 따른 CFRP의 출구 구멍 버 생성

원성재\*, 이상평\*, 박기문\*, 고태조\*<sup>#</sup>

\*영남대학교 기계공학부

### The Exit Hole Burr Generation of CFRP with Ultrasonic Vibration

Sung-Jae Won\*, Ching-Ping Li\*, Ki-Moon Park\*, Tae Jo Ko\*<sup>#</sup>

<sup>\*</sup>School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.

(Received 12 December 2016; received in revised form 2 January 2017; accepted 25 January 2017)

#### ABSTRACT

CFRP has many industrial applications due to its low weight and high strength properties. CFRP is a composite material composed of carbon fibers embedded in a polymer matrix; it provides excellent resistance to fatigue wear, corrosion, and breakage due to fatigue. It is increasingly demanded in aircraft, automotive, and medical industries due to its superior properties to aluminum alloys, which were once considered the most suitable for specific applications. The basic machining methods of CFRP are drilling and route milling. However, in the case of drilling, the delamination of each layer, uncut fiber, resin burning, spalling, and exit burrs are barriers to successful application. This paper investigates the occurrence of exit burrs when drilling holes with ultrasonic vibration. Depending on design parameters such as the point angle, the characteristics of hole drilling were identified and appropriate machining conditions were considered.

**Key Words** : CFRP(탄소섬유복합재), Ultrasonic Vibration(초음파진동), Drilling(구멍가공), Burr(버)

#### 1. 서 론

최근 급격하게 발전하는 항공, 자동차 산업에서는 새로운 재료에 의한 높은 강도와 우수한 기계적 특성을 요구하고 있으며, 초경량화를 목적으로 하는 금속재료의 대체 가능성이 높은 신소재 개발에 관심이 집중되고 있다. 그 중 탄소섬유복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP)는 비강성과 비강도, 내마멸성, 피로 특성 등 우수한 기계적 특성으로 인하여 여러 분야에서 응용되고 있다.

이것은 특히, 항공기, 자동차, 선박, 스포츠 용품 및 의료기기 산업 등에서 많이 사용되고 있으며, 알루미늄 합금에 비해 비중은 절반수준이고 그에 비해 강도가 훨씬 뛰어난 특성을 가지고 있어 경량화가 필요한 항공기 기체나 자동차 구조 및 부품재료로서 사용량이 증가하는 추세에 있다<sup>[1-2]</sup>.

CFRP 복합재료는 탄소섬유를 기본으로 하여 섬유와 에폭시 수지를 사용하여 만들어진 재료로서 섬유 배향각 및 적층수에 따라서 강성 및 강도를 조절할 수 있는 장점이 있다<sup>[3]</sup>. CFRP의 성형방법으로는 오토클레이브(Autoclave) 성형법, 압축성형법(Compression molding), SMC성형법(Sheet Molding Compound) 등 여러 가지의 성형법이 있다.

CFRP 복합재료가 여러 분야에 응용 및 사용되고

<sup>#</sup> Corresponding Author : tjko@yu.ac.kr

Tel: +82-53-810-3836, Fax: +82-53-810-4627

있고 용도가 다양화 되면서 결합 및 형상 가공을 위해서는 효율적이고 효과적인 절삭 가공 공정이 필요하지만 이종재료의 조합에 의한 복합재료이기 때문에 불균질성, 이방성 등의 성질을 가지고 있어 가공조건이나 드릴의 형상 재질 등에 따라서 나타나는 가공 특성이 금속재료와는 다르다.<sup>[4]</sup>

CFRP의 절삭가공 공정 중에서는 엔드밀을 이용한 라우팅(routing)가공이나 드릴을 이용한 구멍가공 공정이 다수를 이룬다. 이때 폴리머 내의 탄소섬유 특성으로 인하여 절삭가공을 매우 어렵게 만들어서 일정 수준의 균일 품질을 얻는데 어려움이 크다.

특히 CFRP의 구멍가공시 발생하는 burr<sup>[5-6]</sup>, 박리현상 등의 구멍가공결함은 복합재료 가공에서 가장 큰 단점으로 지적되고 있다. 이들은 주로 CFRP 복합재료의 드릴 가공 시 구멍의 입구와 출구쪽에서 적층 재료간의 층간 분리현상인 박리(delamination), 섬유 및 수지의 미절삭 및 찢김 현상(uncut resin, uncut fiber, chipping) 등으로 이루어진다. 또한 탄소 섬유복합체는 연마성이 강하여 공구마모가 매우 빠르다는 단점을 가지고 있고, 열에 의한 변형이 생길 우려가 있어서 매우 보수적인 가공 조건을 사용한다. 그리고 CFRP는 열전도계수가 낮아서 열 방출이 어렵고 이로 인하여 드릴공구의 온도상승을 유발하여 공구마모 또는 구멍가공 품질을 나쁘게 한다. 또한, 구멍가공 후 미절삭 결함에 따른 디버링이 필요하지만 미절삭 폴리머나 탄소섬유는 기계적인 강도가 매우 낮아 일반적인 결함 제거 가공법으로는 가공이 어렵다.

이상과 같은 관점에서 본 연구에서는 축방향으로 진동하는 초음파진동 회전 주축을 가진 동작기계를 이용하여 CFRP의 구멍을 가공할 때 구멍가공의 품질 특성을 파악하고자 한다. 또한, 초음파 진동이 드릴가공에 미치는 영향을 분석하고 결함을 최소화할 수 있는 조건을 찾고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

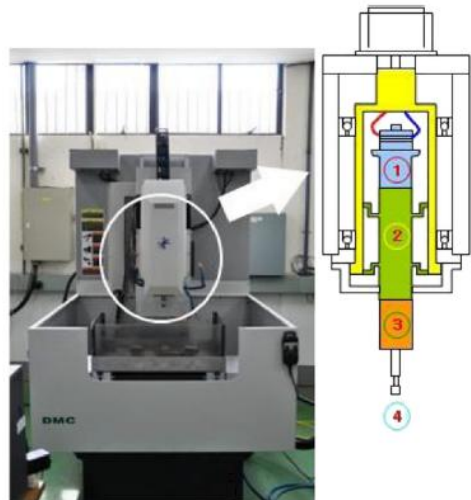
### 2.1 초음파진동 구멍가공장치

본 실험에서 사용하는 가공법은 초음파 회전가공(Rotary Ultrasonic Machining) 으로서, 회전하는 공구

에 축방향으로 초음파 진동을 가하여 가공을 지원하는 방법이다. 이 방법은 초음파 회전 가공의 장점과 칩 제거의 효율성을 바탕으로 경질 재료의 구멍가공이나 절삭가공에 활용할 수 있는 기술이다. 사용하는 공구는 일반적인 엔드밀이나 드릴과 동일하다. 또한 다양한 난삭재료에 초당 2만/4만회의 미세 초음파 진동을 추가하여 구멍 형상 가공시에 효과적으로 사용할 수 있다.

초음파 진동절삭에서는 순간적인 가속도의 증가 현상을 가져옴으로써 아주 큰 가속도로 충격을 주어 공작물을 절삭하는 효과를 준다. 초음파 스피너를 이용한 축방향 가진형태의 구멍가공에서는 일반적으로 4,500 rpm 이하의 낮은 회전수를 사용한다.<sup>[7-11]</sup> 실험에서 사용된 초음파 가공 장비는 DMC사의 모델명 SS-600장비이다. Fig. 1과 Table 1은 초음파 가공기의 사진 및 제원이다.

Table 1 과 같은 기계의 제원으로서 실험시 초음파 주파수는 40kHz를 사용하였으며, 입력전원 power는 50%로 고정하였다. 또한, Fig. 2와 같이 비접촉 변위측정기(PM-E, RADIAN)를 이용하여 초음파 진동량을 측정하였다. 그림에서 알 수 있

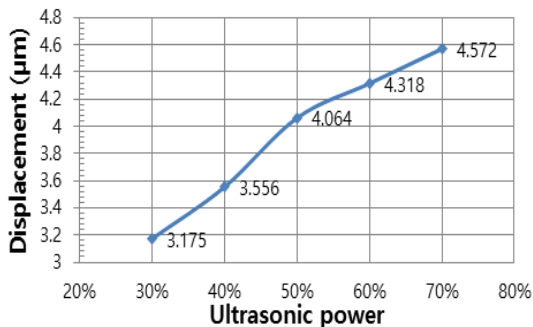


① Ultrasonic generator ② Horn ③ Tool holder  
④ Drill

**Fig. 1 Rotary ultrasonic machine and its internal structure with ultrasonic spindle**

**Table 1 Specifications of ultrasonic machining center**

Company		DMC	
Model		SS-600	
Table	X-axis	mm	610
	Y-axis	mm	450
	Z-axis	mm	540
Spindle	Max. Spindle	min <sup>-1</sup>	5,000
Feed rate	X/Y/Z axis	m/min	36
Ultrasonic unit	Frequency	kHz	20 or 40
	Power	%	0~100
System	Main axis drive	Inverter motor AC servo motor 1.5kW	
	Z-axis drive	Servo motor 0.75kW	
		Ball screw	
Controller	Mitsubishi M70 (option : FANUC )		



**Fig. 2 Ultrasonic vibration according to the levels on the tool**

듯이 초음파의 power가 커질수록 진동량이 비례해서 커지는데, 초음파 power가 50%일 때 진동량은 4.064μm를 나타내는 것을 알 수 있다.

## 2.2 시편 및 공구

본 연구에서 사용된 시편은 일방향 에폭시 프리프레그(prepreg) 오토클레이브(Autoclave) 성형법으로 제작된 시편으로서 섬유 배열 각도는 [0°, 90°]

**Table 2 Specifications of drill tool**

	SSD060 (Widin)	B966A (Kennametal)
Drill diameter (mm)	6	6
Point angle (°)	118	140
Helix angle (°)	30	30
Coating	-	TiAlN

와 Woven Fabric type의 소재 직물형태의 CFRP 시편 2가지를 사용하였다. 2가지 소재 모두 크기는 가로 세로 90mm 로 실험에 적합하도록 절단하였으며, 두께는 5mm 이다.

본 연구에 사용된 절삭 공구는 각각 (주위딘과 Kennametal에서 제작한 드릴로서 공통적인 부분은 Ø6mm 초경 드릴(SSD060, B966A)이며 공구 선단각(Point angle)에 따른 CFRP의 가공성을 알아보기 위해서 SSD060 모델의 경우에는 Point angle이 118°이고 B966A 모델은 Point angle이 140°를 사용하여 실험하였다. Table 2 는 각각 공구의 규격을 나타낸 것이다.

## 2.3 실험장치 구성 및 실험방법

초음파진동 회전주축을 갖춘 머시닝센터의 테이블 위에 공구동력계(Kistler, 9275)를 고정하고, 공구동력계의 위에 Fig. 3과 같이 시편 형상을 고려하여 제작한 지그를 고정하였다. 세부적인 절삭 조건은 Table 3과 같이 직경 Ø6의 초경 드릴로 각각 회전수 800, 1,500, 3,000rpm의 조건과 이송속도 0.025, 0.05, 0.1 mm/rev의 조건으로 Fabric과 UD 형식의 시편에 각각 실험을 진행하였고, 절삭유는 사용하지 않는 건식절삭을 진행하였다. 이때 발생하는 이송방향 절삭력(추력)과 토크를 공구동력계를 이용하여 데이터를 측정하고, 저장한 후 이를 분석하였다. 출구부의 구멍 가공면 상태는 비접촉광학 현미경(Camscope, SOMETECH)를 이용하여 촬영하였다.

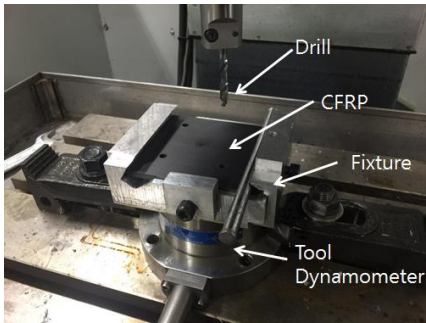


Fig. 3 Experimental setup

Table 3 Experimental conditions

Fabric & Unidirectional Type					
Without Ultrasonic			With Ultrasonic		
No.	rpm	Feed (mm/rev)	No.	rpm	Feed (mm/rev)
1	3000		1	3000	
2	1500	0.025	2	1500	0.025
3	800		3	800	
4	3000		4	3000	
5	1500	0.05	5	1500	0.05
6	800		6	800	
7	3000		7	3000	
8	1500	0.1	8	1500	0.1
9	800		9	800	

### 3. 실험결과 및 고찰

탄소섬유복합재 CFRP를 Table 3과 같은 조건으로 구멍 가공 시에 여러 가지 요소 인자로 인해서 가공 출구부의 구멍품질에 영향을 미치게 된다. 본 논문은 초음파 가진이 어떤 영향을 미치는지를 평가하는 것이므로, 공구 회전수와 이송속도에 따라서 공구 선단각이 118°, 140°로 변할 때의 절삭력 변화와 이에 따른 구멍 출구의 가공불량을 고찰하였다.

#### 3.1 선단각 118°의 특성

Fabric type과 UD type의 CFRP 소재에 대해서

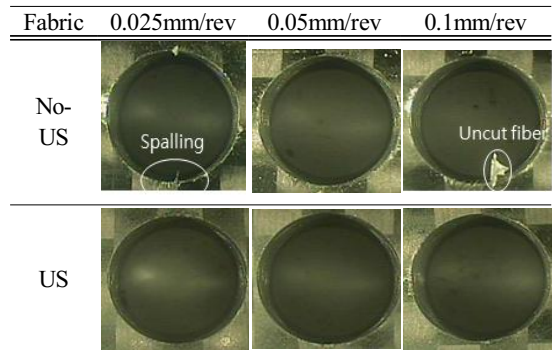


Fig. 4 Comparison along with feedrate under vibration in fabric CFRP

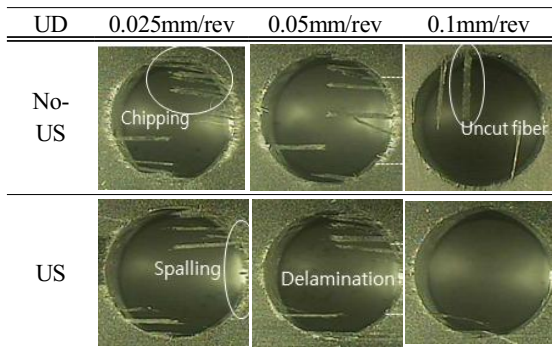


Fig. 5 Comparison along with feedrate under vibration in UD CFRP

드릴 공구 선단각 118°를 사용하여 이송에 따른 일반가공과 초음파 구멍가공으로 각각 가공의 출구면을 비교하고 이에 대한 절삭력을 비교하였다. Fig. 4와 같이 Fabric CFRP의 일반 가공에서 주로 spalling, uncut fiber, delamination 등의 가공 결함이 확인 되었다. 같은 조건에서 초음파 가공을 진행하였을 경우에는 출구 가공면이 매우 깨끗함을 알 수 있었다. Fig. 5에서는 UD type에 대한 출구면을 비교하였는데, 가공 시에 초음파 유무에 관계가 없이 uncut fiber, delamination 등의 가공 결함을 확인 할 수 있다. 그러나 초음파 가공을 진행했을 경우 0.05mm/rev의 사진을 보게 되면 delamination과 같은 결함이 초음파 가공을 했을 경우에 그 면적이 더 줄어들음을 확인할 수 있다.

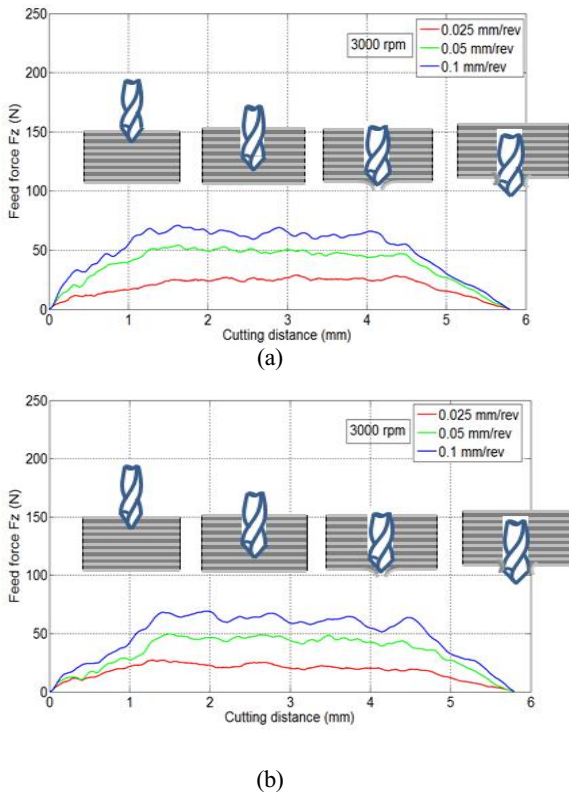


Fig. 6 Cutting force along feed direction in fabric CFRP:(a) without vibration, (b) with vibration

또한 초음파 가공에서 spalling, delamination 등의 가공 결함이 적게 나타나는 경향성을 보인다는 것을 알 수 있으나, uncut fiber와 같은 미절삭 결함부분에 대해서는 효과가 적음을 알 수 있다. 또한, 이송속도의 증가에 따라 일반/초음파 가공 두 경우 모두 가공 출구면의 품질이 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 출구면에서의 가공결함은 회전당 이송속도와 밀접한 관계가 있고, 특히 초음파 진동에는 민감한 특성을 보임을 알 수가 있다.

한편, Fig. 6은 가공시의 추력의 변화를 보이는 그림이다. 구멍가공의 이송속도가 증가하면 진동 부가 유무에 관계없이 추력이 증가하고 있으며, 또한 진동을 부가하는 경우가 상대적으로 추력이 줄어듦을 알 수가 있다. 또한, 구멍 가공에서 초음파 진동이 부가 될 때 공구 진입 시와 가공이 마무리 되면서 CFRP 시편에서 빠져나갈 때에 추력이 초음

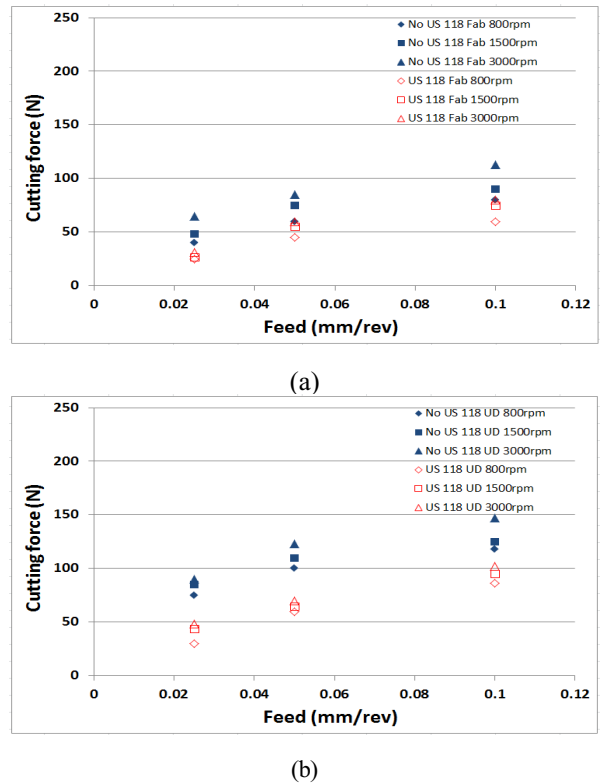


Fig. 7 Sum of cutting force along feed direction: (a) fabric CFRP (b) UD CFRP

파 진동이 부가되지 않을 때보다 기울기가 완만하게 나타났다. 추력이 감소하는 경향을 보아 진입 시와 마무리 시 진동이 부가되면서 진동 부가가 추력의 감소에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 이 힘을 전체 시간의 합으로 합력을 구하여 표현하면 Fig. 7과 같다. 이송속도 3가지 경우를 3가지 회전조건에 대해 실험하여 각각 표현한 것으로 fabric CFRP나 UD CFRP 모두 진동을 부가할 때의 힘이 적게 걸리고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 선단각 140°의 특성

선단각 140°의 경우도 동일한 실험조건으로 실험을 실시하였으며, 그 결과가 Fig. 8 및 Fig. 9이다. 회전당 이송, 즉 이송속도의 증가에 따라서 두 가지 형태의 소재 모두 출구결함이 많이 줄어들음

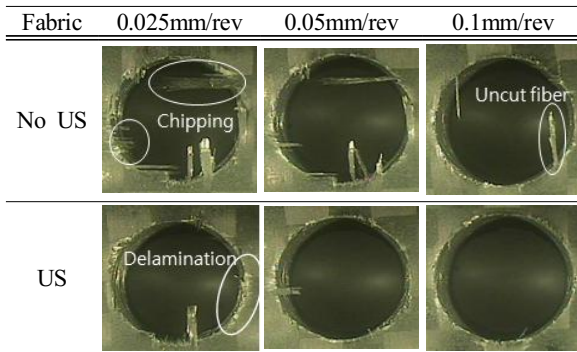


Fig. 8 Comparison along with feedrate under vibration in fabric CFRP

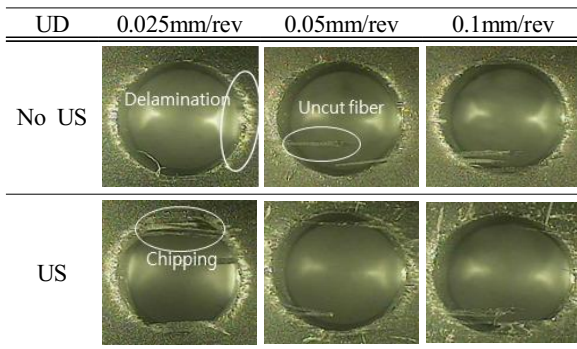


Fig. 9 Comparison along with feedrate under vibration in UD CFRP

알 수 있으며, 특히 초음파 진동을 부가함에 의해서 보다 출구결함을 줄일 수 있다. 그러나 결함의 감소를 118°의 경우와 비교해보면 상대적으로 취약함을 알 수 있는데, 이는 공구선단각이 구멍출구 결함에 상대적으로 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다.

특히 140°의 경우는 윤회성을 고려하여 코팅이 된 공구를 사용했음에도 불구하고 출구결함과는 영향이 없음을 보여준다. 한편, Fig. 10은 추력의 합력을 나타낸 그림으로, 추력 역시 118°의 경우와 비교하여 상당히 증가하고 있음을 보여준다. 마찬가지로 초음파를 부가한 경우에는 절삭력의 감소를 나타내는데 이는 초음파 진동이 CFRP 소재의

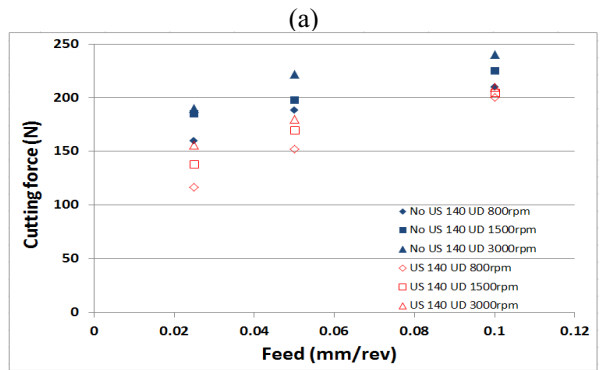
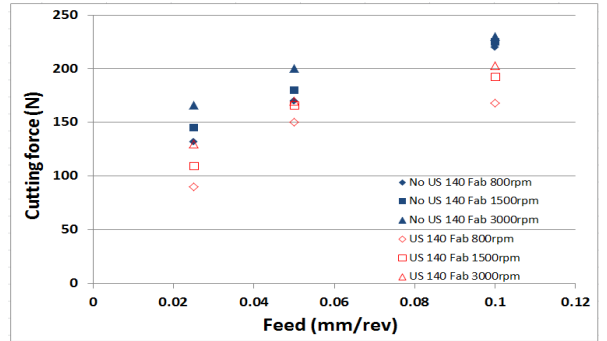


Fig. 10 Sum of cutting force along feed direction: (a) fabric CFRP (b) UD CFRP

형태와 관계없이 구멍가공에 큰 영향을 미침을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 CFRP를 구멍가공할 때 초음파 진동이 구멍가공 출구결함에 미치는 영향을 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 실험을 통하여 도출하였다.

1. CFRP 드릴링 가공에서는 공구의 기하학적 형상, 특히 드릴 공구 선단각은 결함에 큰 비중을 차지한다. 드릴 공구 선단각이 커질수록 결함 발생 빈도수가 증가한다.
2. 드릴 가공 조건 중 공구 회전당 이송량의 영향이 지배적이다. 이송속도가 커질수록 출구측 결

함이 줄어든다.

3. 초음파 진동 드릴 가공을 하는 경우에 이송속도의 증가현상을 가져옴으로써 결함을 줄여주는 효과가 있다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014H1C1A1066502).

## REFERENCES

1. Malick, P. K., Fiber-Reinforced Composite, M. Dekker, pp. 20-40, 1988.
2. 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.
3. H. Yagishita., "Cutting Mechanism of Drilling CFRP Laminates and Effect of Ultrasonic Torsional Mode Vibration Cutting," Transactions of NAMRI/SME, Vol.34, pp.213-220, 2006.
4. W. Koenig, Ch. Wolf, P. Grass, H. Willerscheid, "Machining of Fiber Reinforced Plastics," Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 2, pp. 537-548, 1985.
5. Lee, Y., Shin, G, Kwak, T., "Deburring technology of vacuum plate for MLCC lamination using magnetic abrasive polishing and ELID process," J. of KSMPE, Vol. 14, No. 3, pp. 149-154, 2015.
6. Bae, J., Park, H., Kwon, B., Ko, S., "Determination of cutting conditions for an efficient deburring process using a new deburring tool," J. of KSMPE, Vol. 15, No. 4, pp. 109-117, 2016.
7. Moreland, M. A., "Versatile Performance of Ultrasonic Machining.," Cer. Bull., Vol. 67, No. 6, pp. 1045-1046, 1988.
8. Gilmore R., "Ultrasonic Machining and Orbital Abrasion Techniques," SME Technical Paper(Series) AIR, NM89-419, pp. 1-20, 1989.
9. Neppiras, E. A. and Foskett, R. D., "Ultrasonic Machining- II. Operating Conditions and performance of Ultrasonic drills," Philips Tech. Rev., Vpl. 18, No. 12, pp. 368-379, 1957.
10. Moore D., "Ultrasonic Impact Grinding," Proc. Non-Traditional Machining Conf., Cincinnati, pp.137~139, 1985.
11. Kovalchenko, M. S., Paustovskii, A. V. and Perevyazko, V. A., "Influence of properties of abrasive materials on the effectiveness of ultrasonic machining of ceramics," Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 25, No. 7, pp. 560-562, 1986.