

◆ 특집 ◆ 탄소섬유복합재 가공시스템

## 탄소섬유복합재 가공의 결함특성 및 결함 저감을 위한 경계검출

### CFRP Drilling Experiments: Investigation on Defect Behaviors and Material Interface Detection for Minimizing Delamination

김규호<sup>1</sup>, 하태인<sup>1</sup>, 이찬영<sup>1</sup>, 안재훈<sup>1</sup>, 김주영<sup>1</sup>, 민병권<sup>1,✉</sup>, 김태곤<sup>2</sup>, 이석우<sup>2</sup>  
Gyuho Kim<sup>1</sup>, Tae In Ha<sup>1</sup>, Chan-Young Lee<sup>1</sup>, Jae Hoon Ahn<sup>1</sup>, Joo-Yeong Kim<sup>1</sup>, Byung-Kwon Min<sup>1,✉</sup>,  
Tae-Gon Kim<sup>2</sup>, and Seok-Woo Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

<sup>2</sup> 한국생산기술연구원 생산시스템그룹 (Manufacturing System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

✉ Corresponding author: bkmin@yonsei.ac.kr, Tel: +82-2-2123-5813

Manuscript received: 2016.5.9. / Revised: 2016.5.25. / Accepted: 2016.5.29.

*CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) and CFRP-metal stacks have recently been widely used in the aerospace and automobile industries. When CFRP is machined by a brittle fracture mechanism, defect generation behaviors are different from those associated with metal cutting. The machining quality is strongly dependent on the properties of CFRP materials. Therefore, process control for CFRP machining is necessary to minimize the defects of differently manufactured CFRPs. In this study, defects in drilling of CFRP substrates with a variety of fiber directions and resin types are compared with respect to thrust force. An experimental study on material interface detection is carried out to investigate its benefits in process control.*

KEYWORDS: CFRP machining (탄소섬유복합재 가공), CFRP-Metal stack (CFRP-금속 스택), Machining condition monitoring (가공상태감시)

#### 1. 서론

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)는 고경도의 탄소섬유와 고강도의 수지를 적층시켜 제작된 복합재로 일반 금속에 비해 높은 강도와 경도를 갖고, 무게가 가볍기 때문에 항공 및 자동차 산업에서 적용 비율이 증가하고 있다. 또한 CFRP에 알루미늄이나 티타늄 등의 금속을 접합시킨 CFRP-금속 스택 (Stack)도 구조재로써 사용이 늘고 있다.

CFRP 제품은 몰드를 이용해 제작하지만 많은 경우 기계적 후가공이 필요하다. 하지만 CFRP는 절삭공구를 사용하더라도 금속과 달리 취성파괴에 의해 재료가 제거되는 경우가 많으며, 적층구조로 되어 있기 때문에 금속가공 시와는 다른 형태의 결함이 발생한다.<sup>1</sup> CFRP에 주로 적용되는 기계적 가공인 드릴링 공정의 대표적인 결함은 입구와 출구에서 탄소섬유 층이 분리되는 박리현상이며 이는 제품의 수명과 품질을 감소시킬 수 있다.<sup>2</sup>

드릴링 가공 시 발생하는 가공결함은 공구의 진행 방향으로 작용하는 추력이 임계 값을 넘어설 때 발생하기 때문에 절삭 추력과 밀접한 관계인 공구이송속도의 조절을 통하여 가공 중 결함이 발생하지 않는 추력을 유지할 필요가 있다.<sup>3</sup> 또한, CFRP는 제작 방식에 따라 기계적 물성이 달라져 드릴링 가공 시 발생하는 절삭 추력의 경향 및 크기가 다를 수 있으며, 입구와 출구 등에서 결함을 일으키는 임계 값의 차이가 생길 수 있어 재료에 따라 가공결함을 줄이기 위한 공정제어의 조건이 달라질 수 있다.

본 논문에서는 CFRP의 제작 방식에 따른 절삭 추력 특성 및 가공결함을 실험을 통해서 비교했으며 이를 공정제어에 응용하기 위한 기초 연구로서 드릴이 CFRP의 경계면을 통과하는 순간을 검출하는 방법을 실험하였다. 이를 통해 가공 중에 CFRP-AI 스택 가공 시 발생하는 추력을 이용해 재료의 경계면을 검출하였다.

## 2. CFRP 드릴링 시 재료에 따른 박리특성

### 2.1 적층방식에 따른 CFRP 드릴링 특성

CFRP 제작 시 탄소섬유의 적층방향은 재료의 기계적인 특성과 가공특성에 영향을 준다. 탄소섬유를 모두 동일한 방향으로 적층해 제작된 UD CFRP (Unidirectional CFRP)는 섬유의 길이 방향으로의 인장 및 압축강도가 섬유의 지름방향으로의 성질보다 크다. 하지만 탄소섬유 층을 90도씩 달리하여 적층한 MD CFRP (Multidirectional CFRP)는 UD CFRP에 비해 기계적인 물성이 등방성에 가깝게 된다.<sup>4</sup> 이러한 기계적 물성의 차이에 의해서 드릴링 가공 시 발생하는 추력과 가공 결함이 달라질 수 있다.

적층방식에 따른 CFRP의 드릴링 특성을 비교하기 위해 동일한 규격의 섬유 (T300, Toray)를 사용하였으며, 프리프레그의 탄소섬유 면적밀도 (Fiber Areal Weight; FAW)를 300g/cm<sup>2</sup>로 통일하여 오토클레이브 방식으로 성형하였다. UD CFRP의 경우 18 층의 탄소섬유 층을 쌓았고, MD CFRP의 경우 17층을 적층하여 제작하였다. 다른 형태로 적층한 CFRP 시편을 드릴링 가공하여 가공 중에 측정된 추력과 드릴의 출구 부분에서의 박리현상을 비교했다. Table 1은 실험에 사용된 UD와 MD CFRP의 제작 조건이다. 박리 특성을 비교하기 위해 출구의 섬유방향은 동일하게 배열하였다.

Table 1 Types of manufactured CFRP

Type	Thickness [mm]	CF model	FAW [g/cm <sup>2</sup> ]	# of plies
UD	5.42	T300	300	18
MD (0°/90°)	5.02	T300	300	17

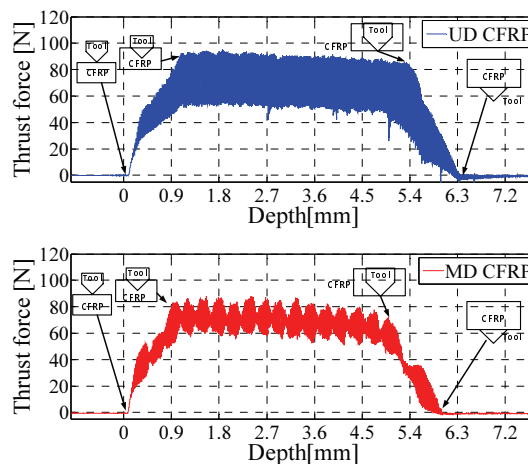


Fig. 1 Thrust force measured during drilling of CFRP

드릴링 가공 실험조건은 피드는 0.04 mm/rev, 드릴 회전속도는 6,500 rpm, 사용된 드릴의 형상은 선단각 140°, 나선각 30°, 지름 6.0 mm이며, TiAlN 코팅이 된 공구를 사용하였다.

드릴링 가공 시 발생하는 추력은 공구동력계 (9272, Kistler)를 이용해 12.8kHz의 샘플링 주파수로 측정했다. Fig. 1은 UD CFRP와 MD CFRP 드릴링 가공 시 측정된 추력에 대해서 20개씩의 데이터를 이용하여 이동평균 (Moving Average)을 사용해 구한 값을 보여주고 있다. UD CFRP와 달리 MD CFRP는 탄소섬유 한 층마다 90도씩 차이가 나도록 적층되어 있기 때문에 절삭 추력의 변동 폭이 탄소섬유 한 층의 두께 (0.3 mm)를 주기로 변화하였다.<sup>5</sup>

각 시편을 가공할 때 발생하는 추력의 평균값은 전체 가공영역에 대해서 거의 같은 값을 보이나, 추력의 변동 폭 및 최대값은 UD CFRP가 MD CFRP의 경우보다 약 10N 크게 발생했다. 출구에서의 박리지수\* (Delamination Factor)는 UD CFRP에

\*박리지수 =  $D_{max}/D_0$ ;  $D_{max}$ : 결함을 포함하는 부분의 지름;  $D_0$ : 드릴홀의 지름<sup>3</sup>

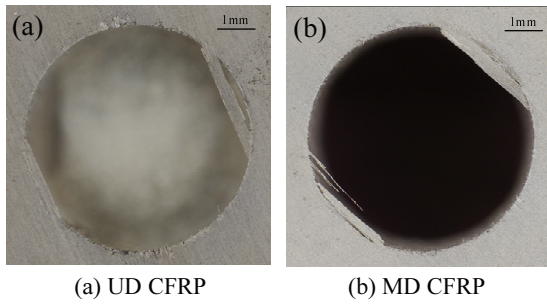


Fig. 2 Delamination and uncut fibers at hole exit

서 1.13으로 측정된 반면, MD CFRP 홀은 1.07로 측정됐다. Fig. 2와 같이 UD CFRP 는 홀 주변에 마지막 층의 탄소섬유 방향으로 박리가 MD CFRP보다 길게 발생하였다.

미절삭 섬유는 두 시편 모두 비슷한 위치에서 발생했다. 이는 드릴 공구가 출구부분에서 탄소섬유의 층간 분리가 이미 발생한 영역을 지날 때, 탄소섬유와 공구날의 상대 각도에 따라 절삭이 잘 이루어지지 않는 영역이 발생하기 때문이다.

2.2 수지에 따른 CFRP 드릴링 특성

CFRP의 강도는 성형 시 사용한 수지에 따라 달라진다. 2.1 절의 적층방식의 경우처럼 사용한 수지의 특성이 CFRP의 가공성에 미치는 영향을 실험을 통해 비교하기 위해 Table 2에 정리한 바와 같이 일반적으로 사용되는 에폭시와 난연 및 내열 에폭시 수지를 이용해 제작한 세 종류의 CFRP 시편을 가공하면서 추력과 결합을 비교했다. 이 실험에서는 탄소섬유가 woven 형태로 직조된 시편을 사용하였다. 가공조건은 2.1 절의 실험에서 사용된 조건에서 피드만 0.03 mm/rev로 변경하였고 다른 조건은 동일하다.

Fig. 3은 각각의 시편을 가공하면서 측정한 추력을 이동평균을 취한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 CFRP 성형 시에 사용한 에폭시의 종류에 따라서도 절삭 추력에 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 가장 높은 추력이 발생한 시편은 내열 수지를 이용하여 제작한 CFRP 이며, 난연 수지를 이용한 경우가 가장 낮은 추력이 발생하였다. 제작된 시편의 압축강도는 일반적인 에폭시 수지를 사용한 경우 약 525 MPa이었으며, 내열 수지를 사용한 경우는 약 656 MPa, 난연 수지를 사용한 경우는 약 518 MPa로 절삭 추력과 압축강도는 같은 경향을 보였다.

Table 2 Types of manufactured CFRP

Thickness [mm]	CF model	FAW [g/cm <sup>2</sup> ]	Resin
5.60	T300	200	Epoxy
4.41	T300	200	Retardant epoxy
3.87	T300	200	Heat resisting epoxy

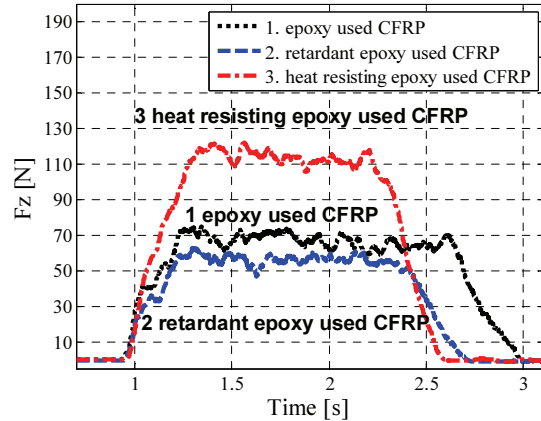


Fig. 3 Thrust force measured during drilling of CFRP manufactured with a variety of resin materials

Hocheng and Tsao<sup>6</sup>에 의하면 Eq. (1)과 같이 출구에서 박리를 발생시키는 임계 추력(F<sub>A</sub><sup>\*</sup>)은 CFRP를 구성하는 수지에 의해 결정되는 층간 전단강도 (G<sub>IC</sub>, interlaminar shear strength), 탄성계수 (E, elastic modulus), 포아송 비 (ν, Poisson's ratio), 미가공층 두께 (h, uncut ply thickness)의 함수로 나타내어진다.

$$F_A^* = \pi \sqrt{32G_{IC} \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}} \tag{1}$$

세 종류의 CFRP 시편은 h를 제외한 물성 값이 모두 다르기 때문에 다른 임계 추력 값을 갖는다.

Fig. 4는 가공된 드릴 홀의 수에 따른 홀의 결합정도를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 내열 수지의 경우 가공된 홀의 수가 증가할수록 출구부분에서의 박리지수가 증가하였다. CFRP 재료의 임계 추력은 제조 방법에 의해 결정되기 때문에 상수로 가정할 수 있다. 따라서, 가공한 홀의 개수가 늘어날수록 공구마모에 의해 추력이 증가하여 임계 추력에 비해 큰 값을 갖게 되었음을 알 수 있다. 내열수지의 경우가 다른 재료에 비해 박리의 증가가 심한 이유는 내열수지의 경도가 높아

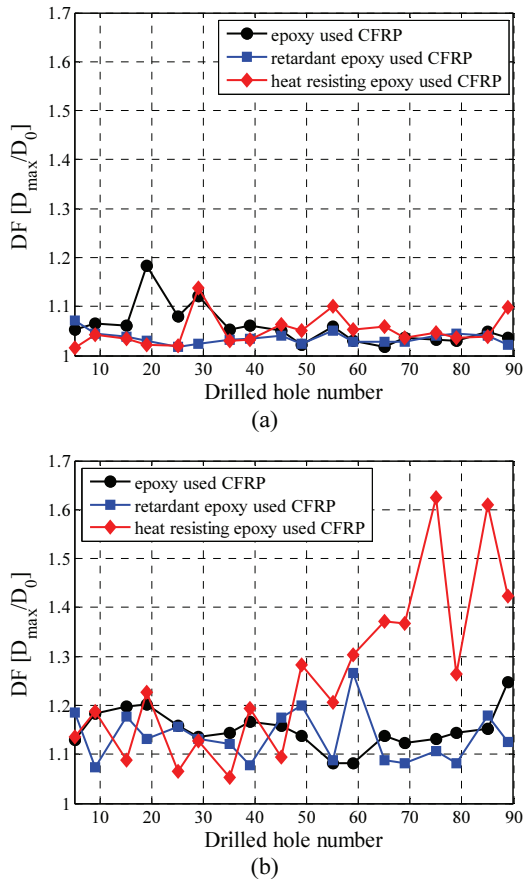


Fig. 4 Delamination factors of (a) inlet and (b) outlet of drilled CFRP manufactured with a variety of resin materials

공구의 마모가 빠른 속도로 증가되고, 공구마모에 의한 절삭 추력의 증가가 박리의 증가로 이어진 것으로 설명할 수 있다.

CFRP 가공은 일반적으로 공구마모가 크게 발생하기 때문에<sup>7</sup> 공구 마모가 진행됨에 따라 변화하는 절삭력을 측정할 수 있다면 공구의 사용시간을 효과적으로 연장하면서 결함을 줄이기 위한 공정제어에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 추력을 이용한 CFRP 재료의 경계 검출

2절에서 CFRP는 섬유적 적층 방식 및 수지의 종류에 따라 기계적인 물성이 바뀌며, 이러한 기계적인 물성의 차이가 가공 시 발생하는 추력과 가공 품질에 영향을 미침을 실험을 통하여 확인하였다.

드릴링 가공 시의 절삭 추력은 피드를 조절함으로써 변경할 수 있다. 이를 이용하여 공구가 CFRP 내로 진입하거나 CFRP 홀의 출구를 지나는 순간을 재료의 경계 검출을 통하여 판단하고 이송 속도를 결함이 발생하지 않는 조건으로 유지함으로써 품질의 향상이 가능하다.

경계 검출은 특히 CFRP-금속 스택의 가공에 유용하게 사용될 수 있는데, 스택 가공에서도 CFRP와 금속이 접합된 부분에서 결함이 주로 발생하며, 이 결함도 가공 시 발생하는 추력에 큰 영향을 받는다. 또한 CFRP와 금속의 최적조건이 다르기 때문에 공구가 특정 재료를 가공할 때 이송 속도를 결함이 발생하지 않는 조건으로 유지함으로써 생산성과 품질을 증대시키는 적응제어의 적용이 가능하다.

Neugebauer et al. 은 CFRP-금속 스택의 가공 중에 측정된 AE (Acoustic Emission) 신호를 이용하여, CFRP의 경계를 측정할 수 있음을 보였다.<sup>8</sup>

본 연구에서는 CFRP-AI 스택을 가공하면서 절삭 추력을 이용해 CFRP 진입 경계와 CFRP-AI 경계를 검출하는 실험을 수행하였다.

### 3.1 경계검출 실험장치 구성

본 연구에서는 woven 형태의 두께 10 mm의 CFRP와 두께 5 mm의 알루미늄 (6061-T6)으로 이루어진 CFRP-AI 스택 시편을 가공하였으며, CFRP와 알루미늄 사이에 접착제 층이 있어 실제 시편의 두께는 15.2 mm 이다. 스피들 회전속도 20,000 rpm, 공구 이송속도 100 mm/min의 가공조건을 사용하였으며 공구는 2날 직경 4 mm의 코팅되지 않은 초경 소재의 드릴을 사용하였다. 추력을 측정하여 경계면을 검출하기 위해서는 동작기계의 제어기에서 Z-축의 위치와 Z-축의 이송방향으로 작용하는 추력을 동시에 측정할 수 있어야 한다. 실험을 위해서는 공구동력계 (9256C1, Kistler)를 이용하여 추력을 측정하였으며 Z-축의 위치는 CNC 제어기 (PMAC2, Delta Tau)가 제공하는 기능을 이용하여 동시에 기록하였다. Fig. 5는 실험에 사용된 장치의 구성을 보여주고 있다.

### 3.2 CFRP-AI 스택의 경계검출

CFRP-AI 스택 시편은 CFRP 부분으로 드릴이 진입을 하여 알루미늄 부분을 가공하는 순서로 가공하였다. 가공 중 검출한 지점은 드릴이 CFRP와 접촉을 시작하는 입구 부분과 CFRP와 알루미늄

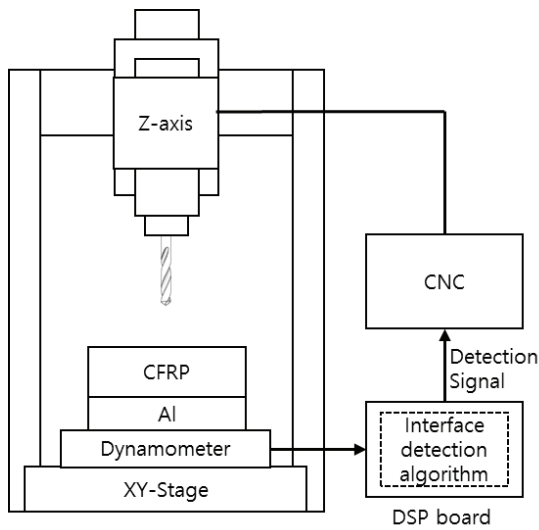


Fig. 5 Schematic of interface detection of CFRP-AI stack

부분의 경계이다. 추력 신호는 20 개의 측정값으로 이동평균을 취하여 사용하였다.

공구동력계를 이용하는 경우 공구와 재료의 접촉이 이루어지지 않을 때 추력이 발생하지 않으므로, 추력이 0 에서 급격하게 증가하는 지점이 재료와 외부와의 경계이다. 하지만, 실제 가공이 이루어지지 않는 경우도 공구동력계로부터 받아 들이는 신호에 잡음이 포함되어 있을 수 있어 실험을 통하여 이동평균이 3N의 임계 값을 처음 넘는 순간을 입구 경계로 판단하였다.

CFRP-금속 스택 재료에서 CFRP와 금속 사이의 경계를 검출할 수 있으면, CFRP와 금속에 각각 적절한 가공조건으로 공정제어가 가능하다. 특히, 드릴이 CFRP를 가공하고 나오는 순간에 박리가 주로 발생하므로, 경계를 정확히 검출하면 재료에 따른 공정조건의 변경은 물론, 박리 감소를 위한 제어에도 활용할 수 있다.

스택 시편에서 CFRP와 알루미늄의 드릴링에서 발생하는 추력은 상당한 차이가 있기 때문에, 추력의 차이를 이용하여 재료의 경계를 검출할 수 있다. 단, 드릴이 경계를 지나가는 점에서 추력이 연속적으로 변하기 때문에, 경계점을 찾기 위한 적절한 방법이 필요하다.

Fig. 6은 실험에 사용한 CFRP-금속 스택을 가공하면서 측정된 추력의 예이다. 실험을 통하여 측정된 추력은 CFRP 부분을 가공 중일 때 약 67 N, 알루미늄 부분을 가공 중일 때 약 203 N이었으며,

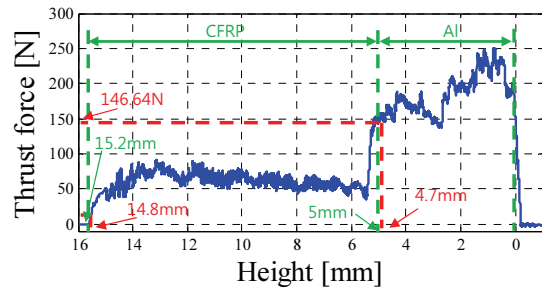


Fig. 6 Recorded thrust force profile during CFRP-AI stack drilling

드릴이 접착제로 이루어진 경계부분을 지나가는 중에는 약 70 N에서 150 N 사이에 값을 가졌다. 15 회의 실험을 통해서 경계부분을 가공할 때의 평균 추력인 107.3 N 경계점을 검출하기 위한 임계값으로 설정하였다.

### 3.3 CFRP-AI 스택 경계검출 결과

경계면 검출 실험을 5회 실시한 결과, CFRP-AI 스택의 입구 경계검출 오차는 최대 0.4 mm, 평균 0.24 mm이었으며, CFRP를 최소 0.10 mm 이상 가공을 해야 검출이 되었다. CFRP와 알루미늄 부분의 경계는 알루미늄 부분의 시작점을 기준으로 최대 0.06 mm 이전에서 최대 0.30 mm 이후 사이에 검출이 되었고 평균오차는 0.15 mm이었다.

실험결과로부터 절삭력을 이용한 CFRP 경계면의 검출이 효과가 있음을 확인하였다. 단, 공구동력계를 이용한 검출 방식을 실제 가공시스템에 적용하는 데는 한계가 있어, 현재 서보모터의 진류를 이용하여 토크를 검출하고 이를 경계면 검출에 활용하는 연구가 진행 중이다. 또한, 일반적으로 CFRP-금속 스택 가공의 경우 기초실험을 통해, 주어진 조건에서의 CFRP와 금속 가공시의 추력이나 진류를 측정하는 것이 가능하나, 다양한 재료와 가공조건에 대해 사전 실험이 없이도 추력 신호의 분석만으로 경계를 검출하기 위한 방법의 연구가 필요하다.

## 4. 결론

CFRP 드릴링 가공 시 탄소섬유의 적층방식과 수지의 종류에 따른 절삭 추력 특성과 가공결함의 발생 특성을 실험적으로 검토하였다. 동일한 탄소섬유 층을 사용한 UD CFRP와 MD CFRP 를 드릴링

가공할 때, 가공 추력의 최댓값이 작은 MD CFRP가 출구부분의 박리지수가 상대적으로 작았다.

CFRP를 구성하는 수지를 일반 에폭시, 내열 에폭시, 난연 에폭시로 달리하여 woven 형태의 CFRP 시편을 제작하여 드릴링 가공 실험을 한 결과 압축강도가 높은 CFRP일수록 절삭 추력이 증가하였다. 압축강도가 큰 내열 수지를 적용한 CFRP 시편은 드릴링 가공 홀 수가 증가할수록 출구에서의 박리지수가 증가했다. 이는 드릴링 가공시 발생한 높은 절삭 추력에 의한 공구마모의 증가와 공구 마모에 따른 절삭 추력의 증가가 박리에 영향을 준 것으로 설명할 수 있다.

CFRP 드릴링 시 발생하는 가공결함은 가공 중에 변화하는 절삭 추력을 측정하여 임계 추력보다 낮게 유지하고, 박리가 주로 발생하는 CFRP의 경계를 검출하여 경계 부근에서 박리가 잘 일어나지 않는 가공 조건을 사용함으로써 줄일 수 있다. 이를 위한 기초 단계로써 CFRP-Al 스택 시편을 가공하는 경우 CFRP 및 CFRP와 알루미늄의 경계를 가공 중에 검출할 수 있는 장치를 구성하였으며, 실험을 통해서 경계를 검출할 수 있음을 보였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 시스템산업 미래 성장동력사업의 일환으로 수행되었다. [10053248, 과제명: 탄소섬유복합재(CFRP) 가공시스템 개발]

## REFERENCES

1. Li, H., Qin, X., He, G., Jin, Y., Sun, D., et al., "Investigation of Chip Formation and Fracture Toughness in Orthogonal Cutting of UD-CFRP," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 82, No. 5-8, pp. 1079-1088, 2016.
2. Davim, J. P. and Reis, P., "Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) using Design Experiments," *Composite Structures*, Vol. 59, No. 4, pp. 481-487, 2003.
3. Sheikh-Ahmad, J. Y., "Machining of Polymer Composites," Springer, pp. 208-210, 2009.
4. Liu, D., Tang, Y., and Cong, W. L., "A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 94, No. 4, pp. 1265-1279, 2012.

5. DiPaolo, G., Kapoor, S. G., and DeVor, R. E., "An Experimental Investigation of the Crack Growth Phenomenon for Drilling of Fiber-Reinforced Composite Materials," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, No. 1, pp. 104-110, 1996.
6. Hocheng, H. and Tsao, C. C., "The Path towards Delamination-Free Drilling of Composite Materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2, pp. 251-264, 2005.
7. Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M. E., and Girot, F., "Modeling and Tool Wear in Drilling of CFRP," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 2, pp. 204-213, 2010.
8. Neugebauer, R., Ben-Hanan, U., Ihlenfeldt, S., Wabner, M., and Stoll, A., "Acoustic Emission as a Tool for Identifying Drill Position in Fiber-Reinforced Plastic and Aluminum Stacks," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 57, pp. 20-26, 2012.