

## 천연섬유 복합재료의 홀 가공을 위한 파라메트릭 연구

이동우\* · 오정석\*\* · 송정일\*†

### Parametric Study for Hole Machining in Natural Fiber Composites

Dong-Woo Lee\*, Jung-Suck Oh\*\*, Jung-Il Song\*†

**ABSTRACT:** In this study, natural fiber composites including flax fiber reinforcement was manufactured. It was tried to find optimum design of drill and machining factor for minimizing the damage during hole machining in natural fiber composites. Taguchi optimization was used for minimizing the number of experiments and evaluation of the effect of machining factor during hole machining in natural fiber composites. The experimental results indicate that the newly designed drill distributes cutting resistance well and minimizes surface roughness and produces fine surfaces. Developed new drill has been dispersed in the cutting resistance during processing, it was possible to obtain the smooth hole surface. Also, it was found that optimal rotational speed and feed rate of drill for hole machining.

**초 록:** 본 연구에서는 천연섬유 복합재료의 홀 가공 인자를 최적화 하기 위하여, 진공 인퓨전 성형공정을 이용하여 천연섬유 복합재료를 제조하였으며 보강재료는 아마섬유를 사용하였다. 그 후 가공에 적합한 드릴을 설계하고, 선정된 가공조건에 따라 홀 가공을 수행하였다. 실험횟수를 최소화하기 위하여 다구찌 실험계획법을 사용하였으며, 홀 가공 후 가공면내 거칠기를 측정하고 거칠기비 분석을 통하여 그 결과를 비교하였다. 실험결과 천연섬유 복합재료의 가공 시 절삭저항을 분산할 수 있는 새로운 드릴을 설계하였다. 이 드릴을 사용할 경우 가공중의 절삭저항이 분산되었으며, 표면거칠기가 최소화된 천연섬유 복합재료를 얻을 수 있었다. 또한 홀 가공에 적합한 최적의 드릴 회전속도 및 이송속도를 선정하였다.

**Key Words:** 홀 가공(Hole machining), 천연섬유 복합재료(Natural fiber composites), 다구찌법(Taguchi method), 가공인자(Machining factor)

#### 1. 서 론

고분자 복합재료는 대량생산을 하기 위하여 기술개발이 꾸준히 이루어지고 있지만, 아직까지는 2차 가공을 반드시 필요로 하는 부분이 많아서 힘든 실정이다. 2차 가공에는 다이아몬드 휠 커터, 워터 젯, 레이저 등의 절단기를 이용하여 제품을 원하는 크기 및 형상으로 가공하기 위한 절단 작업, 복합재료를 다른 금속이나 복합재료에 접합하기 위

한 접합부의 밀링가공이나 선삭가공, 그리고 볼트나 리벳 등으로 체결할 수 있도록 하는 홀 가공(drilling)이 있다. 특히, 각각의 부품을 조립하기 위하여 준비되는 홀 가공은 그 품질에 따라 구조물 등의 성능을 좌우하는 중요한 공정 중의 하나이다[1,2].

복합재료의 홀 가공 시 발생하는 문제점으로는 복합재료의 층간 박리(delamination), 재료 내부에서 각 섬유들의 분리(separation), 가공 면 가장자리나 벽면에서 섬유 및 수

Received 16 November 2016, received in revised form 24 February 2017, accepted 25 February 2017

\*Department of Mechanical Engineering, Changwon National University

\*†Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Corresponding author (E-mail: jisong@changwon.ac.kr)

\*\*Management Support Division, Hanwha Techwin

지의 해짐(splintering), 공구의 마멸 등이 있다[3-11]. 그러나 탄소섬유 복합재료(CFRP)의 경우에는 이를 해결하기 위한 연구가 꾸준히 이루어져 왔으며 현재는 우수한 품질의 홀 가공이 가능하다.

천연섬유 복합재료는 환경문제가 세계적으로 부각됨에 따라 사용량이 점점 증가하고 있는 친환경 소재이다[9]. 천연섬유의 물성은 일반적으로 합성섬유에 비해서 낮기 때문에 천연섬유 복합재료는 주로 집, 차량의 내·외장재, 장식재 등에 활용되고 있다. 섬유의 물성차이로 인해 복합재료의 물성도 달라지며, 홀 가공 시 요구되는 최적 조건도 다를 것으로 예상 가능하다. 그러나 천연섬유 복합재료를 이용한 홀 가공 연구는 그 사용량의 증가에 비해 미미한 실정이다.

본 연구에서는 천연섬유 복합재료의 홀 가공 시, 가공부의 손상을 최소화하기 위하여 천연섬유의 유형에 따른 최적 파라미터(parameter)를 제시하고자 하였다. 가공 파라미터로는 드릴 헤드(head)의 형상, 드릴의 회전속도, 피드(feeds) 세 가지로 선정하였으며, 복합재료 내에서의 천연섬유 형태, 수지의 함량에 따라 그 영향을 비교하였다. 또한 다구찌(Taguchi) 실험계획법을 본 연구에 적용하여 실험횟수를 최소화하여 천연섬유 복합재료의 홀 가공을 위한 최적조건을 도출하고자 하였다[12].

## 2. 실험 방법

### 2.1 천연섬유 복합재료의 제조

천연섬유와 열경화성 수지를 이용하여 탄소섬유 복합재료(CFRP)와 세 종류의 천연섬유 복합재료를 제조하였으며, 제조한 복합재료의 종류 및 섬유체적율은 Table 1과 같다.

본 연구에서 선정된 드릴의 형상은 CFRP 가공에 사용되는 드릴을 참고하여 설계되었다. 따라서 그 성능을 검증하기 위하여 CFRP를 제조하였으며, 천연섬유 복합재료는 복합재료의 유형에 따른 최적의 가공 파라미터를 선정하기 위하여 세 종류가 제작되었다.

FFRP-UD와 FFRP-RD는 각각 일방향, 임의의 방향으로 배열된 아마섬유를 사용하여, 천연섬유의 배열방향이 가공에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 각각의 복합재료는 천연섬유의 특징에 따라 섬유체적율도 다르며, 이러한 특성들이 홀 가공에 미치는 영향을 확인하기 위하여 제조하였다.

**Table 1.** Manufactured composites for hole machining study

Designation	Resin	Fiber volume fraction (vf.%)
CFRP	Epoxy	0.48
FFRP-UD	Epoxy	0.25
FFRP-RD	Epoxy	0.25

### 2.2 다구찌 실험계획법

다구찌 실험계획법은 일본의 다구찌(Taguchi) 박사에 의해 개발된 실험계획법중 하나로, 제어가능한 인자를 이용하여 제어할 수 없는 인자(잡음)에 강건한 설계(Robust design)를 할 수 있는 실험계획법의 일종이다. 실험에 사용되는 인자(factor) 및 수준(level)을 선정할 후, 다구찌 실험계획법을 적용하면 실험횟수를 최소화 하면서 시험결과에 영향을 주는 최적인자를 선정할 수 있기 때문에 최적화 연구에 널리 사용되고 있다. 다구찌 실험계획법은 강건(robust) 설계와 혼용하여 사용하고 있는데, 강건설계는 외부 요인 및 잡음에 강하거나 둔감한 설계를 의미한다. 이러한 다구찌 기법은 최소한의 실험을 통해 최적 해를 찾기에 매우 효과적이다.

다구찌 기법에서는 인자 및 수준의 영향을 평가하기 위한 방법으로 신호 대 잡음 비(Signal to Noise Ratio, 이하 S/N비)를 사용한다. S/N 비의 단위로는 데시벨(dB)을 사용하는데, 이는 통신에서 사용하는 단위이다. 다구찌 기법에서 데시벨은 신호가 잡음에 대하여 민감한 정도를 나타낸다. S/N비는 높을수록 외부 잡음에 대해서 둔감하다는 뜻으로 높을수록 좋다. 특성치에 따라서 SN비에 대한 정의가 달라지며, 평균이 같은 두 집단에서 분산이 작을수록 S/N비는 높다.

$$\begin{aligned}
 S/N비 &= \frac{\text{신호의 힘}}{\text{잡음의 힘}} = \frac{\text{신호입력이 산출물에 전달된 힘}}{\text{잡음이 산출물에 전달된 힘}} \\
 &= \frac{\text{목적이 산출물의 결과에 반영된 정도}}{\text{잡음의 크기가 산출물 결과에 나쁜 영향 정도}} \\
 &= \frac{\text{모평균 제곱의 추정 값}}{\text{분산의 추정 값}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

### 2.3 드릴의 설계

새롭게 설계된 드릴은 기존에 CFRP의 홀 가공을 위해서 개발되어 사용되고 있는 제품을 참고하여 제작하였으며 Fig. 1과 같다.

세 드릴의 원형 단면을 보았을 때의 형상은 모두 같으며, 9개의 면으로 구성되어 있다. 측면의 경우에는 직접 복합재료를 절삭하게 되는 가공 날 부위의 형상을 세부적으로 설계하여 가공하고자 하는 복합재료의 특성에 따라 Type A, Type B, Type C 세 종류의 드릴을 설계하였다. 최종적으로 가공된 측면의 형상은 복합재료의 드릴링 시 발생하는 문제들(해짐, 박리 등)을 최소화 할 수 있는 디자인이다.

Type A는 절삭 날 부위(Primary Edges)를 140°와 160° 경사를 주어 완만하여 박리의 방지에 효과적이고 소재가 직접적으로 가공이 되는 날 부위(Primary Edges)의 stage를 두 개의 stage로 나누어서 절삭의 저항이 작게 발생이 되는 디자인이다. 드릴의 body부 의 Helix angle 각도는 드릴 A, B, C 모두 일반적으로 적용하는 15~40도로 설계 하였다. 복합

소재에서 가공성 향상의 절삭저항이 CNC밀링머신의 Z축 방향으로 아주 작은 힘으로 가공이 되므로 가공 품질에도 좋은 영향을 주는 형상이다.

Type B는 절삭 날(Primary Edges)의 가장자리가 날카롭게 하여 섬유를 잘 절단 될 수 있도록 드릴의 날 부(Primary Edges)를 156도, 164도로 두 구간으로 나누어 설계하여 헛짐을 방지하는 효과가 있고 드릴의 center부위는 약 1 mm 구간을 드릴 형상으로 돌출하는 설계를 하여 소재를 가공 시에 흔들림 및 저항을 줄여주기 위하여 날 부를 디자인하였다. 이 형상의 경우는 가공이 되는 날 부 설계를 조밀하게 하여 복합소재 가공 홀의 단면 정도 또한 품질이 우수하다. 소재 가공의 마무리 부분의 형상에도 단면이 우수한 품질로 가공이 되었다.

Type C는 드릴에 두 개의 단을 주어 초기에는 드릴의 가공면적이 적다가 이 후 가공면적이 넓어지는 형상을 사용하였는데, 이는 추력(Thrust force)을 분산시키는 효과가 있다. 이 형상의 경우는 2 step으로 가공함으로써 가공 시간은 기존의 Type A, B 보다는 5 mm 깊게 내려가는 단점이 있지만 복합소재의 가공성과 품질 향상에는 아주 좋은 형상이다.

2.4 가공 인자

천연섬유 복합재료의 최적 홀 가공을 위해서 Table 2와 같이 가공 드릴의 형상(Shape), 드릴의 회전속도(Speeds), 드

Table 2. L9 Orthogonal array

No.	Shape	Speeds (RPM)	Feeds (mm/min)
1	Type A	1800	10
2	Type A	2500	15
3	Type A	3200	20
4	Type B	1800	15
5	Type B	2500	20
6	Type B	3200	10
7	Type C	1800	20
8	Type C	2500	10
9	Type C	3200	15

릴의 이송속도(Feeds) 세 가지 가공인자를 선정하였다. 예비실험을 통하여 각각의 가공인자가 천연섬유의 가공에 미치는 영향을 확인 후, 가공인자별로 3 수준(level)을 선정하였으며, 선정된 가공인자와 수준을 이용하여 Table 2와 같은 직교배열표를 작성하였다. 가공인자와 수준이 각각 3일 경우, 경우의 수를 모두 고려하면 27번의 실험이 필요하지만, 다구찌 실험계획법을 사용할 경우 9번의 실험을 수행한 뒤 통계적 방법으로 그 결과를 분석하기 때문에 실험횟수를 최소화 할 수 있다.

본 연구에서는 다구찌 실험계획법에 따라, 제조한 복합재료별로 총 9가지 가공조건으로 홀 가공을 수행한 뒤 가공면 내의 거칠기 측정, SEM 이미지의 분석 등을 통하여 천연섬유 복합재료의 홀 가공을 위한 최적의 드릴 형상 및 가공조건을 선정하였다. 가공면 내 거칠기의 측정 방법으로는, 가공면 내의 원주방향으로의 거칠기는 모두 동일하다고 가정하고, 홀 가공된 각 재료의 원주 둘레에서 한 점을 선정 선정하였다. 그 후 중심선 평균 거칠기 방법(Ra)을 이용하여, 선택한 점에서 두께방향으로 거칠기를 5회 측정한 뒤 그 평균값을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 천연섬유 복합재료의 홀 가공

복합재료의 홀 가공 시, 드릴이 진입하는 면인 입구층과 드릴이 빠져나오는 면인 출구층의 손상 형태가 다르다. 예비실험을 통하여 천연섬유 복합재료의 홀 가공 시 출구층에서 주로 손상이 발생함을 알 수 있으며, 가공조건별로 출구층의 손상을 분석하여 최적의 드릴형상 및 가공조건을 도출하고자 하였다. Fig. 2는 Type A, 2500RPM, 15 mm/min의 조건으로 가공한 JFRP의 입구층과 출구층 형상으로, 홀 가공 시 손상 형태가 다를 수 있다.

Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5는 CFRP, FFRP-UD와 FFRP-RD의 홀 가공 후 출구면 손상 형태이다. 실험계획법에 따라 총 9 가지 가공조건으로 홀 가공을 수행하였다. 홀 가공 결과, 적

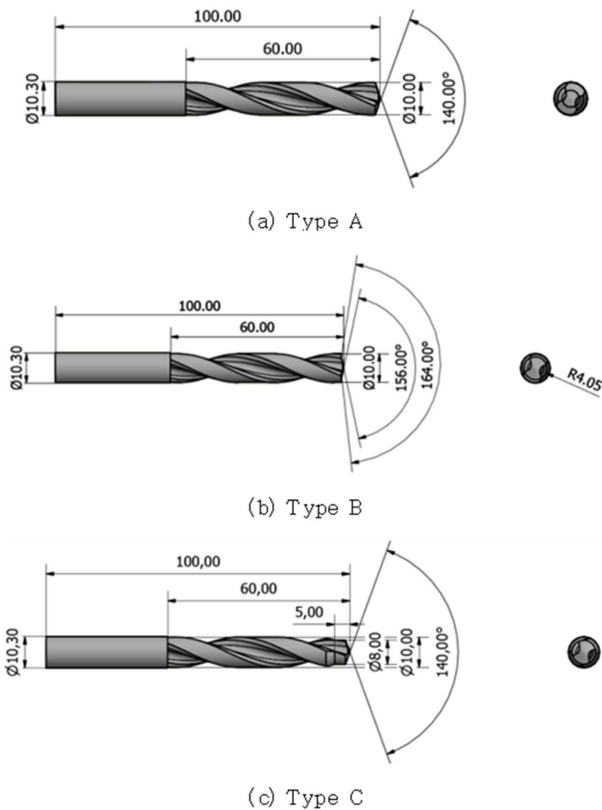


Fig. 1. Designed shape of three drill



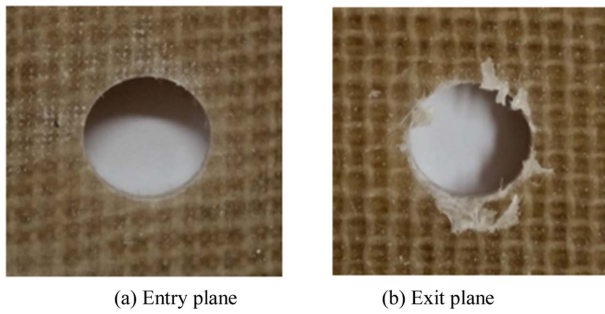


Fig. 2. Comparison of machined hole surfaces

Drilled shape			
Conditions	Type A, 1800, 10	Type A, 2500, 15	Type A, 3200, 20
Drilled shape			
Conditions	Type B, 1800, 15	Type B, 2500, 20	Type B, 3200, 10
Drilled shape			
Conditions	Type C, 1800, 20	Type C, 2500, 10	Type C, 3200, 15

Fig. 3. Exit plane of drilled hole in CFRP

Drilled shape			
Conditions	Type A, 1800, 10	Type A, 2500, 15	Type A, 3200, 20
Drilled shape			
Conditions	Type B, 1800, 15	Type B, 2500, 20	Type B, 3200, 10
Drilled shape			
Conditions	Type C, 1800, 20	Type C, 2500, 10	Type C, 3200, 15

Fig. 4. Exit plane of drilled hole in FFRP-UD

Drilled shape			
Conditions	Type A, 1800, 10	Type A, 2500, 15	Type A, 3200, 20
Drilled shape			
Conditions	Type B, 1800, 15	Type B, 2500, 20	Type B, 3200, 10
Drilled shape			
Conditions	Type C, 1800, 20	Type C, 2500, 10	Type C, 3200, 15

Fig. 5. Exit plane of drilled hole in FFRP-RD

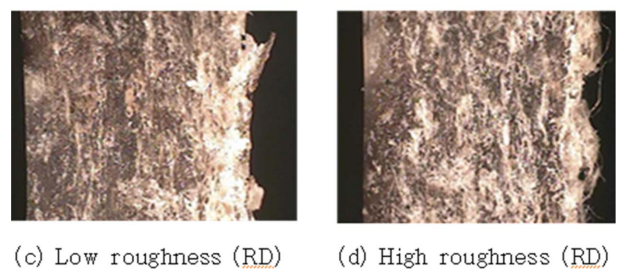
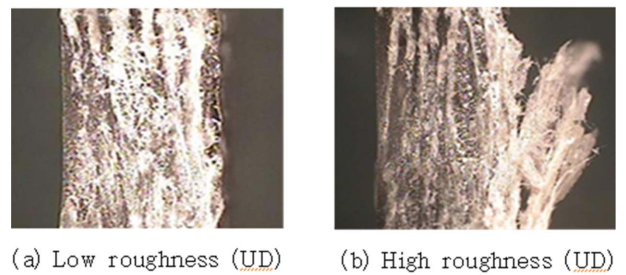


Fig. 6. Machined hole surface of FFRP

충복합재료의 주요 손상거동인 박리가 CFRP에서는 많이 나타났으나, 천연섬유 복합재료인 FFRP에서는 거의 나타나지 않았다. 그러나, FFRP에서는 섬유가 닳아서 헤지는 현상이 상대적으로 많이 나타났다.

연구에 사용한 세 드릴을 비교해보면, 헤짐의 방지에 효과적으로 설계한 드릴인 Type A를 사용하여 가공하였을 때 전반적으로 가공상태가 양호하였으며, 특히 저 Feed 및 저 RPM으로 가공한 FFRP-UD의 가공상태가 가장 우수하였고 헤짐 현상도 최소화 되었다.

FFRP-RD의 경우 전반적으로 헤짐 현상은 적었으나, FFRP-UD의 저피드, 저속도 가공에 비해서는 품질이 떨어졌다.

**Table 3.** Roughness of drilled hole surface

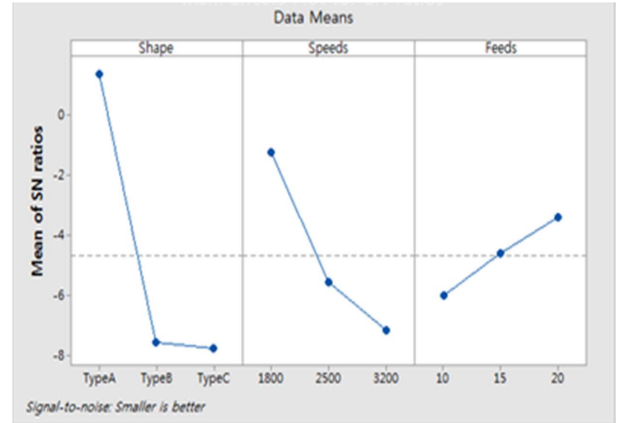
No.	Roughness (μm)		
	CFRP	FFRP-UD	FFRP-RD
1	0.31	0.56	1.33
2	0.32	0.96	3.80
3	0.29	1.15	4.67
4	0.30	1.88	2.65
5	0.42	1.92	6.22
6	1.56	3.81	4.78
7	0.41	1.46	2.78
8	1.47	3.73	3.92
9	0.42	2.70	7.40

그러나 육안관찰로는 가공인자의 영향을 정량적으로 비교할 수 없기 때문에 홀 가공면 내의 표면거칠기를 측정하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. CFRP의 거칠기는 천연섬유 복합재료와의 상대적인 비교를 위하여 측정한 것으로, 홀 가공부의 거칠기가 매우 낮게 나오는 것을 알 수 있다. CFRP는 오래전부터 사용되어왔기 때문에 가공연구도 꾸준히 이루어져 왔으며 그 결과 홀 가공시의 품질도 우수한 편이다. 그러나 천연섬유 복합재료의 홀 가공 거칠기는 CFRP에 비해서 높다. FFRP-UD와 FFRP-RD 모두에서 다구찌 실험계획법의 직교배열표 중 1번 가공조건을 사용하였을 때 거칠기가 가장 낮게 나타났으며 FFRP-UD가 특히 낮게 나타났다. 거칠기가 가장 나쁜 가공조건은 FFRP-UD와 FFRP-RD에서 각각 6번과 9번 조건으로 가공하였을 때이다. Fig. 6는 FFRP 복합재료 중 거칠기의 차이가 가장 큰 가공조건을 비교한 것으로, 복합재료의 우측면이 드릴이 빠져나오는 출구면으로써 좌측면에 비해서 손상이 큼을 알 수 있으며, 이는 드릴의 형상 및 홀 가공조건이 천연섬유 복합재료의 품질에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

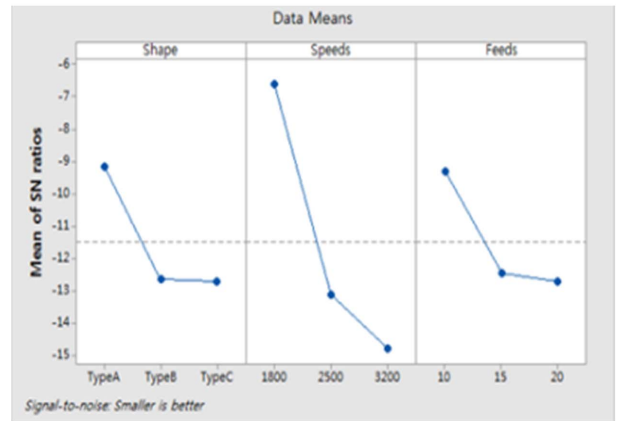
**3.2 거칠기 비를 통한 최적 가공인자의 선정**

Fig. 7의 거칠기 비는 가공인자가 거칠기에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 각각의 소재에 대하여 어떤 인자가 거칠기에 가장 큰 영향을 주는지 알 수 있으며 거칠기 비 값이 높을수록 홀 가공후의 가공면 내 표면거칠기가 낮음을 의미하며 이는 홀 가공 품질이 우수함을 나타내고, 최대값과 최소값의 차이가 클수록 해당 가공인자가 품질에 큰 영향을 주는 것이다. FFRP 복합재료의 거칠기 비를 살펴보면, FFRP-UD 복합재료의 경우, Type A, 저 회전속도, 고 피드에서 가공 상태가 우수하며 거칠기에 가장 큰 영향을 주는 인자는 드릴의 형상이다. 그러나 FFRP-RD 복합재료의 경우에는 피드가 느릴 때 가공 상태가 가장 우수하였으며 드릴의 회전속도가 거칠기에 가장 큰 영향을 주는 인자이다. 이는 천연섬유의 배열방향에 따라서 천연섬유 복합재료의

가공에 적합한 드릴의 형상 및 파라미터가 달라짐을 의미한다. 각각의 소재에 대한 최적 가공인자는, FFRP-UD는 Type A, 1800 RPM, 20 mm/min이고, FFRP-RD는 Type A, 1800 RPM, 10 mm/min이다.



(b) FFRP-UD



(c) FFRP-RD

**Fig. 7.** Roughness ratio of FFRP

**Table 4.** ANOVA for CFRP

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Shape	2	71.14	35.57	3.16	0.240
Speeds	2	44.32	22.16	1.97	0.337
Feeds	2	128.54	64.27	5.71	0.149
Total	8	266.50			

**Table 5.** ANOVA for FFRP-UD

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Shape	2	24.840	12.4202	31.94	0.030
Speeds	2	112.009	56.0046	144.00	0.007
Feeds	2	21.698	10.8489	27.90	0.035
Total	8	159.325			

Table 6. ANOVA for FFRP-RD

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Shape	2	164.89	82.444	12.41	0.075
Speeds	2	56.19	28.096	4.23	0.191
Feeds	2	10.29	5.147	0.77	0.563
Total	8	244.66			

ANOVA 분석 결과를 보면 FFRP-UD의 경우 드릴의 형상은 거칠기에 영향을 주지만 회전속도와 피드는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타난다. 반면에 FFRP-RD의 경우에는 세 파라미터가 모두 유의미한 영향을 주었다. 그 이유는 FFRP-RD의 경우 섬유가 임의로 배열되어 있어 섬유의 체적율이 낮는데, 이러한 경우 가공조건이 품질에 더욱 큰 영향을 주기 때문인 것으로 예상되며, 섬유체적섬유 높였을 때 가공 후의 거칠기가 감소할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 천연섬유 복합재료의 홀 가공 시 제품의 품질에 영향을 미치는 인자를 조사하기 위하여 다양한 가공조건으로 홀 가공을 실시하였으며 그 결론은 다음과 같다.

범용 드릴의 경우 드릴의 포인트각과 재질에 관계없이 복합재료에 큰 손상을 주지만, 천연섬유 복합재료에 맞게 재설계한 드릴을 사용한 경우 홀 가공시의 절삭저항을 분산할 수 있는 형상인 Type A가 우수한 가공성을 보였다. 전반적으로는 널리 사용되는 소재인 CFRP의 가공에 비해서 천연섬유 복합재료의 가공 시 손상이 크게 나타났으며 이는 천연섬유 복합재료의 가공을 위한 드릴 설계의 최적화가 필요함을 의미한다. 천연섬유 복합재료의 사용량은 점차 증가하는 추세이기 때문에 이를 가공하기 위한 새로운 드릴에 대한 필요성은 점차 증가할 것으로 보인다.

다구찌 실험계획법을 이용하여 직교배열표를 작성한 후, 홀 가공 시 드릴의 형상, 회전속도, 피드가 가공부의 거칠기에 미치는 영향을 거칠기 비 분석과 분산분석을 이용하여 확인한 결과 FFRP의 가공시에는 파라미터에 따라 가공부의 품질이 다르게 나타났으며, 섬유가 일방향으로 배열된 FFRP-UD의 경우에는 드릴의 형상이 품질에 가장 큰 영향을 미쳤지만 섬유가 임의의 방향으로 배열된 FFRP-RD의 경우에는 드릴의 회전속도가 더욱 큰 영향을 미쳤다. 따라서 천연섬유 복합재료의 정밀한 홀 가공을 위해서는 복합재료의 특징에 따라 가공 파라미터를 최적화하여 홀 가공을 수행하는 것이 필요하며, 전반적으로는 Type A형상의 드릴을 이용하여 저속, 저 피드로 가공할 때 복합재료의 거칠기가 가장 낮게 나타났다. 이 조건을 활용하여 천연섬유 복합재료의 홀 가공을 수행하였을 때 우수한 품질을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030058 and No. 2013R1A2A2A01017108).

#### REFERENCES

- Bridges, R.R., "A Quantitative Study of Some Factors Affecting the Abrasiveness of Particle Board," *Forest Prod. J.*, Vol. 11, 1971, pp. 39-41.
- Porankiewicz, B., "Variation in Composition of Micro-grain Cemented Carbide and Its Impact on Cutting Edge Wear During Particleboard Machining," *in: Proc. 13th IWMS, Vancouver*, pp. 791-799, (1997).
- Porankiewicz, B., and Gro€nlund, A., "Tool Wear-influencing Factors," *in: Proc. 10th IWMS, UC*, 1991, pp. 220-229.
- Gurunathan, T., Mohanty, S., and Nayak, S.K., "A Review of the Recent Developments in Biocomposites Based on Natural Fibres and Their Application Perspectives," *Compos. Part A.*, Vol. 77, 2015, pp. 1-25.
- Ramesh, M., Palanikumar, K., and Hemachandra Reddy, K., "Influence of Tool Materials on Thrust Force and Delamination in Drilling Sisal-Glass Fiber Reinforced Polymer (S-GFRP) Composites," *Procedia Materials Science*, Vol. 5, 2014, pp. 1915-1921.
- Lingyu Sun, Ronald F. Gibson, Faramarz Gordaninejad, Jonghwan Suhr, "Energy Absorption Capability of Nanocomposites: A Review," *Composite Science and Technology*, vol. 69, 2009, pp. 2392-2409.
- Deshmanea, C., Yuana, Q., and Misra, R.D.K., "High Strength-toughness Combination of Melt Intercalated Nanoclay-reinforced Thermoplastic Olefins," *Materials Science and Engineering*, Vol. 460, 2007, pp. 277-287.
- Deshmanea, C., Yuana, Q., Perkins, R.S., and Misra, R.D.K., "On Striking Variation in Impact Toughness of Polyethylene-clay and Polypropylene-clay Nanocomposite Systems: The Effect of Clay-polymer Interaction," *Materials Science and Engineering*, Vol. 458, 2007, pp.150-157.
- Takechi Furukawa, "Nanoclay," *Japan Plastics*, Vol. 61, No. 9, pp. 21-23.
- Terese E. Glodek, Steven E. Boyd, Ian M. McAninch, John J. LaScala, "Properties and Performance of Fire Resistant Eco-composites Using Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS) Fire Retardants," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 14, 2008, pp. 2994-3001.
- Lee, S.E., Song, Y.H., and Chung, K.S., "Incombustibility of Polypropylene by Metal Addition Flame Retardant," *The Korean Society of Safety*, Vol. 20, No. 4, 2005, pp. 40-45.
- Oh, J.S., "Parametric Study for Hole Drilling in Natural Fiber Composites," Master Dissertation, Changwon National University, Changwon, Korea, 2015.