

다이아몬드 입자 전착드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 특성에 관한 연구

김형철,* 김기수,* 함승덕,* 김홍배,* 남궁석**

A Study on the Drilling Characteristics of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials by Diamond Grit Electroplated Drills

Hyeong-Chul Kim,* Ki-Soo Kim,* Seung-Duck Hahm,* Hong-Bea Kim,* Suk Namgung**

ABSTRACT

For solving troubles happened during the drilling process with carbon fiber epoxy composite materials(CFRP) by using HSS drill, a few types of diamond grit electroplated drills are manufactured, and machinability of these drills is experimented with a variety of cutting speed and feed rate. These drills have some advantages of good wear resistant and the conception of grinding process. As a result, using of these drills improves both troubles being caused by tool wear and damage of exit surface depending on fiber stacking angle. It is desirable that cutting conditions for the cutting thickness per revolution must be set under 0.01mm when the size of a diamond grit is # 60~80.

Key Words : Carbon Fiber Epoxy Composite Materials(탄소섬유 에폭시 복합재료), Drilling Mechanism(드릴링절삭기구), Tool Wear(공구마멸), Cutting Force(절삭력), Delamination(층간박리), Diamond Grit Electroplated Drill (다이아몬드 입자 전착드릴)

1. 서론

최근 산업발전과 더불어 새로운 재료의 개발에 대한 요구가 날로 증가하고 있으며, 이와 같은 요구에 부응하여 각종 신소재가 개발되고 있다. 이러한 신소재 중에는 에폭시 수지를 기지로 하여 여기에 보강재로 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유등을 사용한 섬유강화 복

합재료(fiber reinforced composite materials)가 있다. 이들 재료들은 비강성(E/ρ), 비강도(S/ρ) 및 감쇠(damping)특성이 일반강이나 알루미늄에 비하여 우수하기 때문에 주로 경량화가 요구되는 항공기, 자동차, 스포츠용품 산업에서 이용되어 왔으며, 최근에는 섬유강화 복합재료의 이방성 성질을 이용하여 부품에 작용하는 역학적 특성에 대응한 기능설계를 할 수 있다는

* 충남대학교 대학원 기계공학과

** 충남대학교 공과대학 기계공학과

장점 때문에 건축용 구조물, 압력용기, 선박용 재료 및 기계부품에 그 활용이 증가되고 있다. 따라서 복합재료로 설계 제작 되는 제품의 성능과 신뢰성 확보를 위하여 여러분야에 대한 연구가 이루어져야 하며, 그 중의 하나가 이들 재료의 가공기술에 관한 연구이다.⁽¹⁾

에폭시 수지등을 기지로 하는 수지계 복합재료는 부품의 대형화, 일체성형화하는 경향이 있지만 제품이 완성단계에 이르기 까지는 반드시 부분적인 기계가공을 필요로 한다. 복합재료의 기계가공은 복합재료를 다른 부품에 접착제를 이용하여 접합하기 위한 부분의 밀링 가공이나 선삭가공, 절단가공, 볼트나 리벳등으로 체결하기 위한 구멍의 드릴가공 방법이 있으며, 각각의 부품을 조립하기 위한 드릴가공은 가공된 구멍의 정밀도에 따라 구조물의 성능을 좌우하는 중요한 공정중의 하나이다. 구조물의 성능에 영향을 주는 드릴가공된 구멍의 정밀도는 가공 중에 발생하는 결함분포 영역 및 결함 정도, 거스러미(burr)의 형성, 진원도(roundness), 가공된 거칠기(machined surface roughness) 등으로 평가된다.

복합재료 가공중에서 유리섬유 및 탄소섬유 복합재료의 가공에 대하여 어느 정도 연구가 진행되어 왔다.⁽²⁻⁴⁾ 이들의 연구는 주로 선삭가공이나 2차원 절삭장치를 이용하여 칩생성기구, 공구수명, 가공면거칠기 등에 대하여 이루어져 왔으며, 최근에는 복합재료를 초경공구로 가공할 때의 공구수명에 대한 Taylor 지수, 역학모형을 이용한 공구마멸 특성을 해석 및 실험적 검토, 공구 재료의 종류에 따른 절삭 성능등에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다. 그러나 드릴링에 대한 자료는 거의 발표되고 있지 않은 실정이기 때문에 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 가공 시 생산현장에 적용시키는데 필요한 드릴의 최적형상 및 절삭조건에 많은 어려움이 있다. 따라서 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링에 대한 체계적인 연구를 진행하여 드릴링 가공기술의 최적화, 실용화에 대한 자료를 구축할 필요성이 있다.

수지계 섬유강화 복합재료를 드릴링하였을 때 대두되는 문제로는 재료의 강한 연마성으로 인한 심한 공구마멸의 발생, 드릴의 입구와 출구쪽에서 각 ply들의 분리현상의 발생, 재료내부의 각 ply들이 박리되는 내부 층간박리(delamination)현상의 발생, 드릴가공된 벽면으로부터 섬유 또는 레진(resin)의 탈락현상 등이 있다. 이러한 결점을 최소화하여 고정밀도로 높은 생산성을 얻기 위하여는 드릴링 현상에 대한 체계적인 연구가

필요하다.

탄소섬유 및 유리섬유 에폭시 복합재료의 선삭가공 및 드릴링에 관한 연구를 종합하여 볼 때 유리섬유 복합재료는 고속도강 공구나 초경합금 공구로써 가공이 가능하며, 탄소섬유나 아라미드섬유 에폭시 복합재료는 다이아몬드나 CBN과 같은 높은 내마멸성 공구를 이용하는 것이 바람직하다는 결과를 유출할 수 있었다.⁽⁷⁻⁸⁾

본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 특성에 관한 자료를 구축하고, 추천 절삭조건 및 탄소섬유 에폭시 복합재료 가공용 드릴의 설계제작을 위한 최적형상을 제시할 목적으로 표준 고속도강드릴, 다이아몬드 입자 전착드릴, 표준드릴에 PCD(poly-crystalline diamond) 팁을 용접(brazing)한 드릴, 표준공구에 절삭날 형상을 변화시키고 다이아몬드 입자를 전착한 드릴, 코어형 다이아몬드 입자 전착드릴을 제작하고, 이들 공구를 이용하여 드릴링 실험을 행하였다. 각각의 드릴형상에 따른 절삭성능을 비교 검토하기 위하여 절삭력, 공구 마멸, 결합층의 분포, 거스러미 형성등의 드릴가공 특성을 검토하였다.

2. 시험편 및 공구

본 실험에 사용된 탄소섬유 에폭시 복합재료 prepreg는 (주)선경 인더스트리의 USN-150형으로 시험편은 hand lay-up방법으로 적층한 후 autoclave 경화법을 이용하여 성형하였으며, 적층각도는 이방성재료가 드릴링에 미치는 영향을 가장 잘 나타낼 수 있는 일방향 ($\pm 0^\circ$)로 하였다. 성형된 재료는 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 40×40 mm, 두께 5mm의 크기로 절단하여 시험편을 준비하였다. 경화후 일방향 탄소섬유 에폭시 복합재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

실험에 사용한 드릴은 직경 $\phi 10$ mm로 하여, 표준 고속도공구강 드릴(type-A), 표준드릴에 초경(WC)기층재 위에 다이아몬드 입자가 함께 성장하도록 고온, 고압하에서 소결(燒結)시킨 다결정 다이아몬드(PCD)인 compax 팁을 부착시킨 드릴(type-B), 표준 드릴에

Table 1 The physical properties of carbon fiber epoxy composite materials

Tensile Strength (GPa)	Tensile Modulus (GPa)	Fiber Content (Volume %)	Density (g/cm ³)
2.06	153	60	1.6

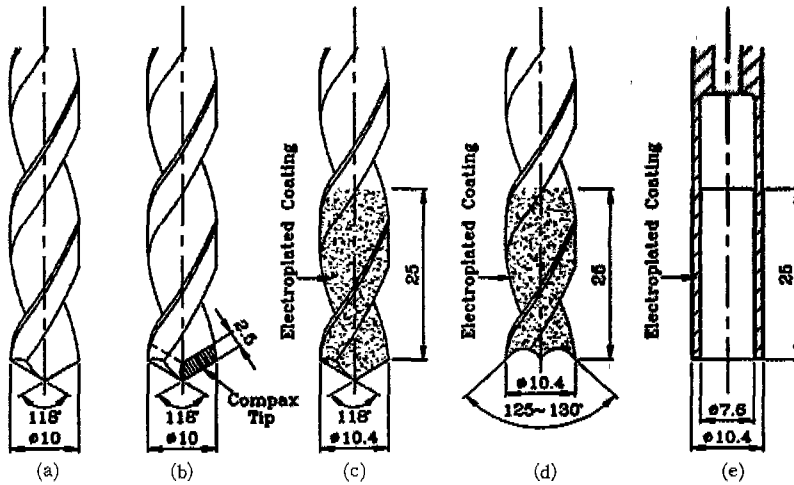


Fig. 1 Configuration of the drills used in drilling experiment

Table 2 Mechanical properties of compax tip

Ultimate Compressive Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Transverse Rupture Strength (MPa)	Diamond Content (Volume %)	Knoop Hardness (GPa)
6900~7600	900	480~1700	88~95	50

입도(mesh) #60~80의 다이아몬드 입자를 약 0.25 mm 두께로 전착한 드릴(type-C), 드릴의 선단부를 변형시킨 후에 다이아몬드 입자를 전착한 드릴(type-D), 그리고 core 형 다이아몬드 입자 전착드릴(type E) 등 모두 5가지의 형태로 하였다. Fig. 1은 실험에 사용한 드릴의 형상과 치수를 나타내고 있다.

Compax 팁은 1973년에 미국의 GE(General Electric)에 의해 처음 소개된 것으로 초경(WC) 기층재 위에 다이아몬드 입자가 함께 성장하도록 고온, 고압하에서 소결(燒結)시킨 다결정다이아몬드(PCD)로서 다이아몬드 입자의 입도(粒度)에 따라 1300, 1500, 1600 계열이 있으며, 한계 절삭속도는 보통 270m/min정도임이 보고되고 있다. 본 연구에서는 이들 중에서 1500계열(中粒)을 택하여 만든 compax 팁을 사용하였으며, Table 2는 실험에 사용한 compax 팁의 기계적 성질을 나타내고 있다.

3. 복합재료 드릴링 메카니즘 및 실험방법

3.1 복합재료 드릴링 메커니즘

일반 금속재료는 등방성을 갖지만 탄소섬유 복합재료

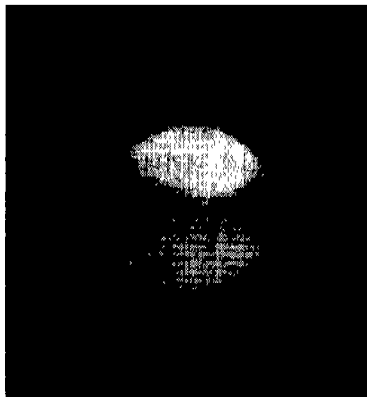
는 방향에 따라 특성이 달라지는 이방성을 나타낸다. 이와 같은 이방성의 절삭 메카니즘을 논하기 위해서는 섬유 배열각, 공구의 절삭 이송방향등을 고려하여야만 한다. 탄소섬유 에폭시 복합재료의 표준 고속도강 공구로 드릴링할 때의 절삭 메카니즘은 드릴의 회전평면인 X-Y면과 절삭 이송방향인 Z축면으로 구분할 수 있으며, 각각의 평면에서 서로 다른 형태를 나타내게 된다.^(9~10)

Fig. 2는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 표준 고속도강 드릴과 다이아몬드 입자 전착드릴에 의한 드릴링 실험의 대표적인 예로, 가공조건은 이송 30 mm/min, 절삭속도 50 m/min으로 시편의 가공 출구면을 근접촬영한 것이다. 표준 고속도강드릴에 의한 가공의 경우, 드릴의 주절삭날과 섬유가 만나는 각도에 따라 출구면 일부에 거스러미(burr)가 존재하는 가공상태를 보인다. 따라서 참고문헌 [9, 10]과 Fig. 2를 비교하여 Fig. 3과 Fig. 4의 복합재료 드릴링 메커니즘을 설정하였다. 다이아몬드 입자 전착드릴에 의한 가공의 경우, 미세한 입자에 의한 연삭개념의 가공이 진행되기 때문에 드릴의 주절삭날과 섬유가 만나는 각도에 의존하는 가공상태를 줄일 수 있으므로 표준 고속도강 드릴에 의한 가공보다 양호한 출구면 가공상태를 보이고 있다.

Fig. 3은 X-Y 평면 상의 절삭날부의 절삭기구를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 드릴의 절삭날과 탄소섬유의 적층각이 이루는 각에 의하여 상향절삭(up-cutting)과 하향절삭(down-cutting)으로 구분된다. 섬유의 길이방향 적층을 0°로 할때 0°



(a) Using Type-A drill



(b) Using Type-C drill

Fig. 2 Photographs of the drilled surface at exit (feed reat:30 mm/min, cutting speed:50 m/min)

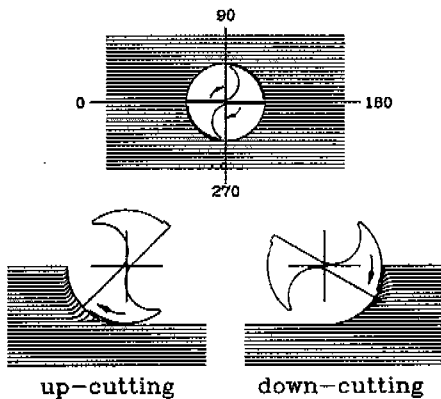
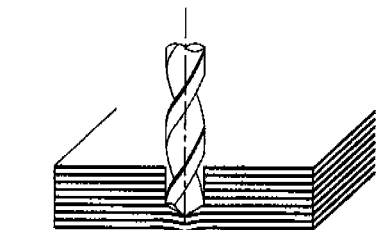


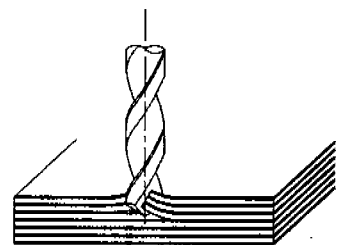
Fig. 3 Drilling mechanism of the CFRP in X-Y surface

~90°, 180°~270°는 하향절삭, 90°~180°, 270°~0°는 상향절삭을 하게 된다. 하향절삭의 경우, 절삭기구의 관점에서 볼 때 절삭날이 탄소섬유를 누르면서 섬유 단면을 절단하는 fiber cutting 형태의 절삭기구를 보이기 때문에 박리현상은 감소되고, 표면거칠기는 감소한다. 그러나 상향절삭의 경우, 드릴의 절삭날이 섬유를 미처 절단하지 못하고 드릴의 절삭날을 따라 돌려 일어나는 듯한 delamination 형태의 절삭기구를 보인다. 따라서 하향절삭과는 반대로 표면거칠기는 증가하게 된다.

Fig. 4는 절삭이송방향(Z축)으로의 표면 층간박리현상을 도식적으로 보인 것이다. 입구면에서는 미처 절단되지 못한 섬유들이 드릴의 트위스트 홈을 따라 뒷쪽으로 말려 올라가는 peel-up 현상을 보이며, 출구면에서는 입구면과는 다른 양상인 push-out 현상을 보인다. 이러한 현상은 가공이 진행 됨에 따라 급격한 공구 마멸이 진행되고, 미절삭 부분의 층간 전단강도(inter-lamina shear strength)가 줄어 들기 때문에 출구 쪽에서 심한 push-out 현상을 보인다. 따라서 push-out 현상에 의한 박리현상을 피하려면 추력(thrust force)을 감소시킬 수 있는 공구의 형상이나 절삭조건 선정이 필요하며, 단인에 의한 절삭보다는 다인공구에 의한 가공 즉, 연삭의 개념을 도입한 다이아몬드 입



(a) Push-out delamination at exit



(b) Peel-out delamination at entrance

Fig. 4 Drilling mechanism of the CFRP in feed direction

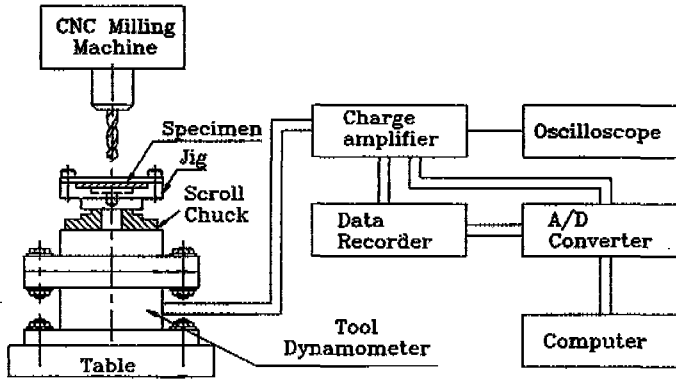


Fig. 5 Configuration of the experimental set-up

자나 CBN 입자 전착드릴의 방법도 가공성능을 높일 수 있으리라 생각된다.

3.2 실험방법

본 실험을 위한 드릴링은 CNC 밀링(독일 DEKEL Co.)을 이용하여 수행하였으며, 이송, 절삭속도등의 변화에 따른 탄소섬유 에폭시 복합재료의 가공면 상태와 절삭력의 변화, 공구의 마멸에 관한 검토 등을 드릴의 선단부 형상에 따라서 실험하여 비교 검토하였다.

Fig. 5는 드릴가공시 절삭력 측정및 절삭력의 거동을 관찰하기 위한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. CNC 밀링머신의 테이블 위에 압전형 공구동력계 (piezo-electric type tool dynamometer:Kistler, Type 9065)를 고정하고, 그 위에 3-jaw 척을 고정하였으며, 시험편은 고안된 지그를 이용하여 척에 고정시켰다.

실험은 건식드릴링으로 보조밀판을 부착시키지 않은 상태에서 수행하였으며, 드릴의 이송은 20, 30, 40, 50 mm/min, 드릴의 주축 회전수는 400, 800, 1600, 2500 rpm으로 하였다. 다이아몬드 입자 전착드릴로 드릴링을 할 경우, 드릴의 회전수와 이송속도에 의하여 결정되는 드릴 1회전당 여러개의 다이아몬드 입자로 구성된 거시적인 절삭날 1개의 절삭두께는 돌출된 다이아몬드 입자의 크기에 비하여 작아야만 연속개념을 갖는 드릴링을 수행할 수 있다.

Fig. 6은 드릴 1회전당 거시적 절삭날 1개의 절삭두께를 구하기 위한 모델을 나타낸 것이다. 드릴의 이송속도를 V_f (mm/min), 드릴의 회전수를 N (rpm)이라고 하면, 여러개의 다이아몬드 입자로 구성된 2개의

거시적인 절삭날을 갖는 드릴인 type-C 드릴의 경우, 드릴 1회전당 거시적 절삭날 1개의 절삭두께 t (mm/rev)는 다음의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$t = (V_f / 2N) * \sin \theta \text{ (mm/rev)} \quad (1)$$

여기에서 표준 고속도강 드릴의 선단각(point angle)은 118° 이므로 θ 의 값은 59° 가 된다. 본 실험에서 사용한 다이아몬드 입자의 크기는 약 0.3~0.4 mm 정도로써, 이러한 다이아몬드는 전착 결합제에 의하여 입자 1개의 일부가 결합제에 묻히고, 입자 크기의 1/3~1/2 정도만이 결합제 밖으로 돌출된다. 따라서 이 드릴로 연속개념을 갖는 드릴링을 수행하기 위해서는 드릴 1회전당 절삭날 1개의 절삭두께 t 는 0.1 mm 이하가 되어야만 한다.

본 실험에서 수행한 실험조건에 대하여 드릴 1회전당 거시적 절삭날 1개의 절삭두께를 식 (1)에 의하여 계산한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3에서 알 수 있는 것처럼 드릴 1회전당 가장

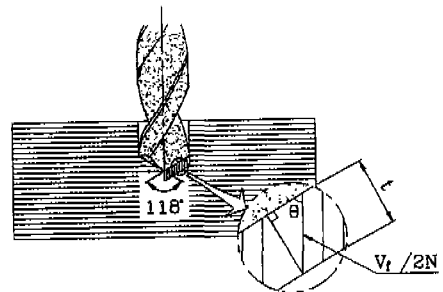


Fig. 6 Model to obtain cutting thickness in drilling

Table 3 Cutting thickness per revolution (mm)

rpm feed	400	800	1600	2500
20	0.0214	0.0104	0.0048	0.0034
30	0.0321	0.0161	0.0081	0.0051
40	0.0429	0.0214	0.0107	0.0069
50	0.0536	0.0270	0.0134	0.0086

큰 절삭두께는 회전수 400 rpm, 이송속도 50 mm/min 인 경우로서 그 값은 0.0536 mm 이다. 따라서 본 연구에서 선정된 모든 실험조건은 드릴 1 회전 당 절삭날 1 개의 절삭두께 t 가 0.1 mm 이하 이어야만 하는 연삭개념의 드릴링 조건을 충족하고 있다고 생각할 수 있다.

실험결과와 분석은 Fig. 5에 나타낸 방법으로 절삭력의 거동을 분석하였으며, 공구현미경 (Union Co. Japan)을 이용하여 주절삭면과 치줄(chisel)부분의 마멸량을 측정하였다. 가공부위의 결합의 존재 여부는 공구현미경을 이용한 관찰, 육안 검사법등으로 행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 표준 고속도강 드릴의 공구마멸

절삭조건이 표준고속도강 드릴의 마멸에 미치는 영향을 조사하기 위하여 드릴의 이송속도를 20, 30, 40, 50 mm/min로 하고, 각각의 이송속도에서 드릴의 주축 회전수를 400, 800, 1600, 2500 rpm으로 변화시키면서 실험하였으며, 드릴링 후에 공구현미경을 이용하여 드릴의 주절삭면과 치줄부분의 마멸량을 측정하였다.

Fig. 7은 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 실험시의 공구마멸 실험으로부터 얻어진 결과의 대표적인 것을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 드릴의 회전수 400 rpm일 때 이송속도 변화에 따른 공구마멸량을 측정된 결과로써, 드릴의 이송속도가 감소하면 드릴의 마멸이 상대적으로 증가하고 있음을 보이고 있다. 일반적으로 급속을 드릴링할 경우 드릴의 마멸은 이송속도가 증가하게 되면 절삭열의 증대로 인하여 공구마멸이 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링에 있어서의 공구마멸은 반대되는 현상을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 동일한 회전속도에서 이송속도가 감소하게 되면, 탄소섬유와 공구의 연마작

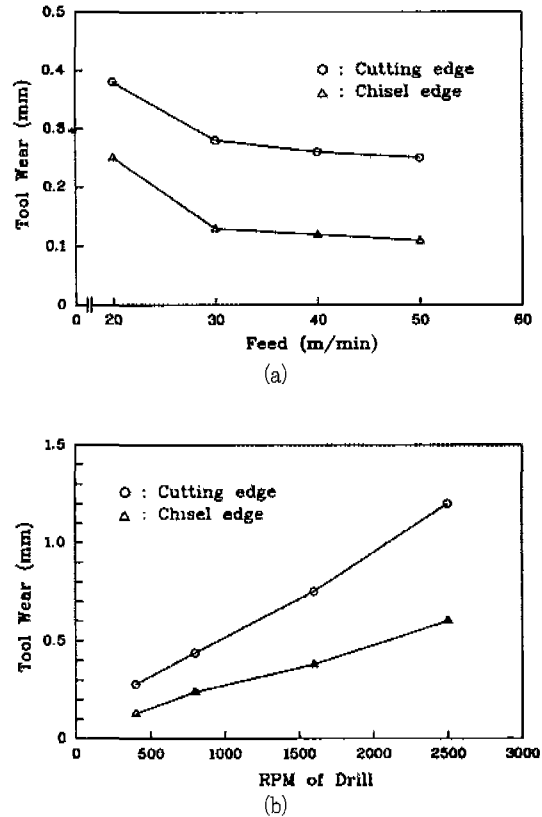


Fig. 7 Tool wear in drilling of the CFRP w.r.t. feed (a) and rpm (b)

용을 일으키는 시간, 즉 드릴공구가 연마성이 매우 강한 탄소섬유와의 마찰시간이 증가하게 됨으로써 공구의 마멸이 심하게 발생하게 되고, 드릴 선단부 날끝의 예리함이 짧은 시간 동안 유지되는 비정상 상태의 절삭이 이루어지기 때문으로 사료된다.

Fig. 7(b)는 이송속도 30 mm/min 일 때 드릴의 회전수 변화에 따른 공구마멸량을 측정된 결과로서, 드릴의 회전수 즉, 절삭속도가 증가함에 따라 급격한 공구마멸의 증가현상을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 탄소섬유가 강도가 높고, 경(硬)하기 때문에 낮은 절삭속도에서는 심한 공구마멸을 일으키게 되며, 절삭속도가 증가함에 따라서 드릴공구와 탄소섬유의 마찰 접촉 시간이 증가하게 됨으로써 발생된다고 사료된다. 따라서, 고속도강에 의한 탄소섬유 복합재료의 드릴링은 가공시 발생하는 절삭력이 탄소섬유 복합재료의 층

간전단강도를 넘지 않는 범위내에서 드릴공구와 탄소섬유 복합재료의 마찰 접촉 시간을 줄일 수 있는 작은 절삭속도에서 빠른 이송속도로 가공하는 것이 유리하다고 유추할 수 있다.

4.2 절삭력

Fig. 8은 각각 이송속도 30 mm/min 인 조건에서 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴가공시 발생하는 절삭력의 추력(thrust)과 토크(torque)를 드릴의 회전수 변화에 따라 측정된 결과를 나타내고 있다.

드릴링에서 이송이 일정하고 가공중에 공구마멸이 심하게 발생하지 않을 경우, 즉 절삭속도 또는 절삭거리에 대한 공구마멸의 의존성이 크지 않을 경우에는 드릴

의 회전수가 증가하면 절삭점에서 절삭 단면적이 감소되어 절삭력이 감소되는 경향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 compax 팁 드릴(type-B), 다이아몬드 입자 전착드릴(type-C, D, E)의 경우는 드릴의 회전수 증가에 따라 절삭력이 감소되는 경향을 나타내고 있으며, 이와 같은 결과는 이론적 절삭력의 경향과 일치되는 결과로써 이들 드릴은 절삭속도 및 절삭거리에 대한 공구마멸의 의존성이 크지 않은 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 이들 드릴로 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴링하면 절삭력의 거동관점에서만 판단할 경우 정상상태의 드릴링이 이루어지고 있는 것으로 판단할 수 있다.

그러나 표준 고속도강드릴(type-A)을 이용한 드릴링의 경우는 이들 결과와는 반대되는 경향을 나타내고 있다. 실험조건과 같이 이송속도가 일정하고 드릴의 회전수가 증가하게 되면 동일한 깊이의 드릴링을 하여도 절삭점에서 피삭재와 공구와의 절삭거리가 증가하게 된다. 이와 같은 드릴링 조건에서는 공구마멸의 절삭속도 및 절삭거리 의존성이 심한 공구의 경우 절삭속도 증가에 따라 심한 공구마멸을 일으키게 된다. 표준 고속도강드릴이 다른 형태의 드릴과 반대되는 경향을 나타내고 있는 것은 앞에서 서술한 것처럼 다른 공구에 비하여 상대적으로 경도가 낮은 표준고속도강 드릴이 낮은 절삭속도에서도 절삭거리가 증가함에 따라 심한 마멸을 일으키고, 절삭속도 증가에 따라 경한 탄소섬유와의 절삭접촉시간이 길어지게 되어 드릴의 주절삭날이 심하게 마멸됨으로써 절삭력 증대를 초래하는 것으로 판단된다.

각 형상의 드릴에 대한 절삭력의 추력을 비교하여 보면 compax 팁 드릴의 경우는 공구의 회전수 변화에 따른 절삭력의 변화 거동이 이론적 변화 거동을 따르는 안정적 특성을 나타내고 있다. 그러나 표준 드릴에 다이아몬드 입자를 전착한 드릴, 표준 드릴의 주절삭날 형상을 변화 시키고 다이아몬드 입자를 전착한 드릴, 코어형 다이아몬드 드릴의 경우는 낮은 회전수에서는 매우 높은 절삭력을 나타내고 회전수 증가에 따라 절삭력이 급격히 감소되는 경향을 나타내고 있으며, 드릴의 회전수가 2500 rpm에 이르면 어느 정도 일정한 값을 나타낸다.

이와 같이 낮은 회전수에서 절삭력이 크게 나타나는 원인은 식 (1)에서 설명하고 있는 거시적 절삭날 1개의 절삭두께와 돌출된 다이아몬드 입자의 크기와의 상관관계로 설명할 수 있다. 이론적으로 계산된 절삭두께(t)

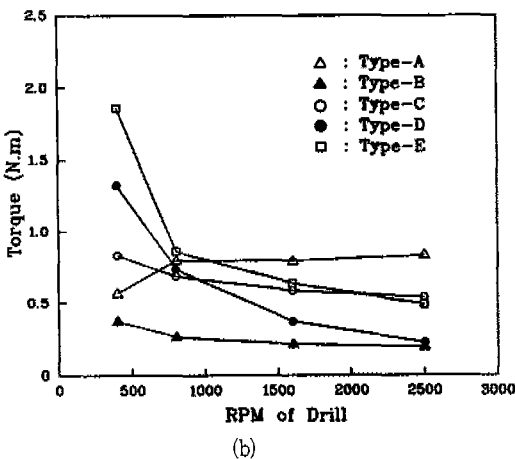
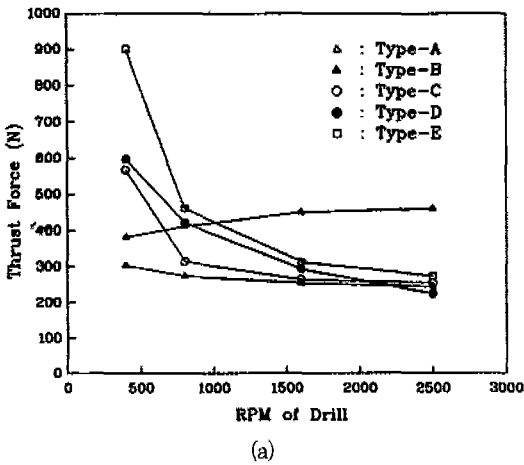


Fig. 8 Thrust (a) and Torque (b) in drilling of the CFRP w.r.t. rpm

가 돌출된 다이아몬드 입자의 크기(s)보다 작더라도 돌출입자 크기와 절삭두께의 비(s/t)가 크기 않을 경우, 실제 절삭작용은 일반 드릴링 절삭작용과 다이아몬드 입자에 의한 연삭작용이 혼합된 형태를 이루게 된다. 다이아몬드 입자를 전착하여 제작된 드릴의 경우는 주절삭날의 예리함이 사라지게 되고 이로 인하여 표준 형상의 드릴에 비하여 절삭작용이 불량하여 진다. 따라서 이들 드릴을 이용하여 드릴링을 할 경우에는 실제의 절삭작용이 일반 절삭작용과 연삭작용이 혼합되지 않고 순수한 연삭작용에 의하여 가공이 이루어 질 수 있도록 s/t비를 충분히 크게 설정할 수 있는 조건, 즉 이송량이 일정할 경우 드릴의 회전수를 매우 높게 하는 절삭조건으로 드릴링 하여야 한다고 사료된다.

400~800 rpm의 비교적 낮은 회전수 범위, 즉 드릴의 1회전당 절삭두께가 큰 조건에서는 공구형상이 E, D, C, B형 순으로 절삭력의 추력이 크게 나타나고 있는데, 이것은 드릴의 주절삭날의 크기 및 형상 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 실험과 같이 동일한 절삭조건 즉, 드릴의 1회전당 절삭 두께가 일정할 경우, B, C, D형 드릴은 절삭점에서 절삭날과 공구는 선접촉을 하게 되며, 코어형(type-E)드릴은 외경과 내경에 의하여 형성되는 면접촉을 하게 됨으로써 다른 형태의 드릴에 비해 코어형 드릴의 경우가 매우 큰 절삭력을 나타낸다. 또한 주절삭날부의 형상을 변화시킨 D형의 경우는 B, C형 드릴에 비하여 주절삭날부의 길이가 크기 때문에 이 두가지의 경우보다 큰 절삭력을 나타내고 있는 것으로 사료되며, C형이 거시적인 두 개의 주절삭날이 절삭작용을 행하는 B형에 비하여 절삭력이 크게 나타나는 것은 여러개의 절삭날을 갖는 입자가 탄소섬유와 에폭시 수지에 대하여 연삭작용에 의한 가공이 이루어지는 칩생성기구와 다이아몬드 입자 사이의 눈매임 현상에 의한 절삭력의 차이라고 생각된다.

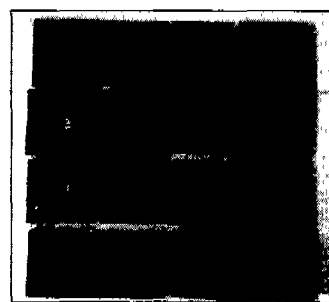
또한 절삭력의 토크성분을 비교하여 보면 A 및 B형 드릴의 경우는 추력의 거동과 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 C, D, E형의 경우에는 낮은 회전수 범위에서는 A 및 B형에 비하여 큰 토크값을 나타내며, C형과 E형의 경우에는 드릴의 회전수 변화에 따라 토크의 변화가 민감하지 않고, D형의 경우는 매우 민감함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 절삭과정에서 발생하는 칩배출의 용이성에 의한 것으로 특히, E형의 경우에는 칩배출이 매우 불량하여 다이아몬드 입자의 눈매임 현상이 발생하고 이로 인하여 토크의 크게

증가하며, 회전속도가 증가하여도 토크값이 다른 형태에 비하여 큰 값을 갖는 것으로 생각된다.

이상의 절삭력의 거동을 비교 검토한 결과 type-B, C, D 형상의 드릴을 사용하여 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴링하는 것이 절삭력 관점에서는 안정적인 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

4.3 결함 및 가공면의 정밀도

Fig. 9은 표준 고속도강 드릴(type-A)을 이용하여 드릴의 이송은 20, 30, 40, 50mm/min, 드릴의 주축 회전수는 400, 800, 1600, 2500 rpm의 절삭조건으로 드릴링한 후의 출구면 상태와 정도를 나타내고 있다. 모든 조건에서 절삭조건에 관계 없이 입구면의 상태는 양호하였으나 출구면의 상태는 매우 불량한 상태를 나타내고 있다. 특히 드릴의 회전수가 높고, 이송속도가 작은 경우에 출구면의 상태가 극히 불량하였다. 절삭초기에는 공구마멸이 일어나지 않은 예리한 절삭날을 가지고 있으며, 가공시 발생한 절삭력이 절삭점 보다 아래 부분인 복합재료의 미가공 부분의 층간 전단강도 보다 작기 때문에 내부층간박리(delamination)현상의 발생이 일어나지 않는 정상상태의 절삭이 이루어져 입구쪽에서는 비교적 양호한 가공면을 얻을 수 있으나, 절삭이 진행되면서 강한 섬유와의 마찰작용에 의하여 매우 빠른 속도로 공구마멸이 진전되어 절삭상태는 급



Symbol : ● Good ▲ Usual × Bad

cutting speed / feed	13	25	50	80
	20	×	×	×
30	▲	×	×	×
40	▲	×	×	×
50	×	×	×	×

Fig. 9 Photograph of the drilled specimen (Type-A drill)

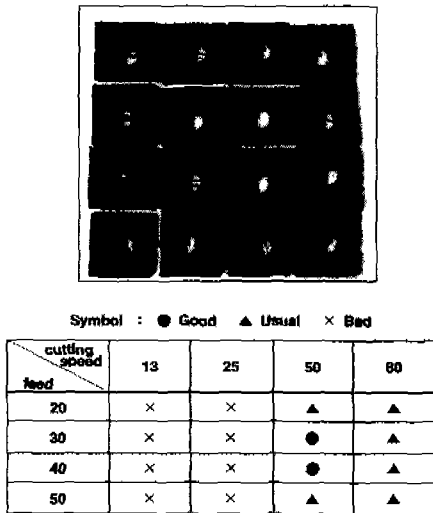


Fig. 10 Photograph of the drilled specimen (Type-B drill)

격히 불량하여 지며, 공구의 마멸에 비례하여 절삭력 또한 증가되게 된다.

드릴이 재료를 관통하고 나오는 시점에 이르러서는 이미 공구의 마멸량이 매우 크게 되어 절삭날의 예리함이 사라지게 된다. 따라서 출구쪽에서는 드릴의 절삭날이 섬유를 절단하지 못하게 되어 심한 거스러미를 생성시키며, 재료내부에서는 각 ply들의 분리현상이 발생하고, 매우 큰 결합영역이 존재하게 된다. 또한 드릴의 회전수가 높고 이송속도가 작을 수록 가공면 상태가 불량해지는 것은 회전수가 높고 이송속도가 작을 수록 동일한 깊이의 구멍을 가공할 때 상대적으로 공구와 재료의 접촉거리(절삭거리)가 증대되어 공구마멸이 크게 발생하기 때문이라고 생각된다. 이것은 Fig. 7과 8의 공구마멸과 절삭력의 관찰 결과로부터 이해할 수 있다.

이상의 표준 고속도강 드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 절삭특성을 실험적으로 검토한 결과 표준 고속도강은 공구마멸이 매우 크게 발생하고, 가공면 상태가 매우 불량함을 알 수 있었다. 따라서 탄소섬유 에폭시 복합재료를 구멍가공하기 위한 드릴의 재질로 고속도강은 적절하지 못하며 거스러미의 생성, 재료내부의 층간 분리현상, 결합영역등이 발생하지 않는 고정밀도의 구멍가공을 위해서는 공구의 경도가 높아야만 함을 알 수 있었다.

Fig. 10은 다결정 燒結 다이아몬드 팁(compax

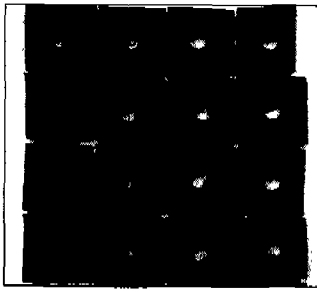
tip)을 표준 고속도강 드릴에 부착시킨 드릴(type-B)로 표준 고속도강 드릴에 의한 실험과 동일한 절삭조건으로 실험한 후 드릴링 가공된 시험편의 출구쪽 모양을 나타낸 결과이다. 이 경우 표준 고속도강 드릴(type-A)과는 다르게 드릴의 회전수가 증가 할 수록, 이송속도가 작아질 수록 입구, 출구쪽의 가공면 상태는 양호해지는 것을 관찰할 수 있다. 특히, 가공된 시편의 출구면에 다소의 절단되지 않은 거스러미가 남기는 하지만, 층간의 박리에 의해 섬유가 밀려서 부풀어 오르는 현상 및 결합영역이 현저하게 적다. 이러한 것도 내마멸성이 강한 compax의 성질에 의하여 시편에 대한 가공이 완료될 때 까지 공구의 날부분이 예리하게 유지되어 강한 탄소섬유를 지속적으로 양호하게 절단하는 정상상태의 절삭이 이루어지기 때문이라고 사료된다.

정상상태의 드릴링에서는 이송속도가 일정할 때 절삭속도를 증가시키거나 일정한 절삭속도에서 이송을 증가시키면 절삭점에서 절삭면적이 증가하여 절삭력이 증대되게 되며, 칩 배출이 용이하지 못하게 되어 피삭재의 관점에서 본다면 과도한 절삭조건으로 변화되어 가공면의 상태가 악화되게 된다. 따라서 정상상태 드릴링에서 절삭속도가 높더라도 공구마멸이 크게 문제가 되지 않는다면 이송속도를 작게 하거나 절삭속도를 크게 하는 방법이 보다 양호한 가공면을 얻을 수 있다고 사료된다. 결론적으로 탄소섬유 에폭시 복합재료를 compax tip 드릴로 드릴링을 할 경우 절삭속도 50 m/min 이상, 이송속도 20~40 mm/min의 조건으로 드릴링을 하면 가공된 구멍의 정밀도를 향상시킬 수 있다고 판단된다.

Fig. 11은 표준 고속도강 드릴에 다이아몬드 입자를 전착하여 제작한 드릴(type-C)로서, Table 3의 절삭조건으로 드릴링한 후의 가공면 상태와 정도를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 표준 고속도강 드릴인 type-A형 보다는 절삭속도가 비교적 높은 50 80 m/min 사이에서는 가공면이 양호함을 발견할 수 있었다.

이것은 드릴링 작용이 절삭작용에서 다이아몬드 입자의 예리한 선단이 강한 탄소섬유를 절단하는 연삭작용으로 전환되기 때문이라고 생각된다.

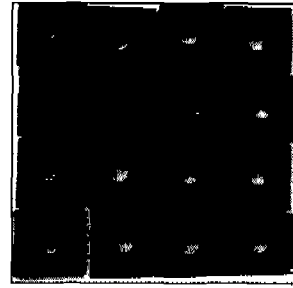
드릴 1 회전당 절삭두께와 가공면 정도와의 관계를 알아보기 위하여 Table 3과 Fig. 11을 비교하여 보면, 드릴 1회전당 절삭두께가 10 μ m 이하의 조건에서는 가공면이 양호함을 확인할 수 있었다. 이것은 본 실험



Symbol : ● Good ▲ Usual × Bad

cutting speed \ feed	13	25	50	80
20	×	×	●	●
30	×	×	●	●
40	×	×	▲	●
50	×	×	▲	●

Fig. 11 Photograph of the drilled specimen (Type-C drill)



Symbol : ● Good ▲ Usual × Bad

cutting speed \ feed	13	25	50	80
20	×	▲	●	●
30	×	×	●	●
40	×	×	●	●
50	×	▲	▲	●

Fig. 12 Photograph of the drilled specimen (Type-D drill)

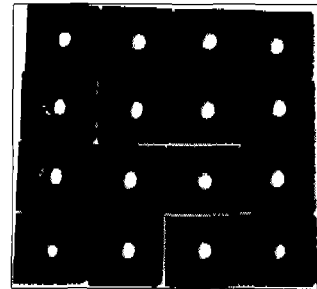
조건이 모두 연삭개념의 드릴링이었지만 피삭재인 탄소 섬유 에폭시 복합재료의 재료적 특성과 드릴 1 회전당 거시적 절삭날 1 개의 절삭두께와의 상관관계가 있음을 의미하는 것으로 탄소섬유 에폭시 복합재료를 구성하는 탄소섬유의 굵기가 6~9 μ m인 범위를 고려하여 본다면, 양호한 가공면을 얻기 위해서는 절삭날 1 개당 절삭두께가 탄소섬유의 직경에 비하여 같거나 작은 조건이 되어야 한다는 것을 의미한다.

그러나 너무 작은 절삭두께를 갖는 절삭조건으로 드릴링을 할 경우 드릴과 피삭재와의 마찰접촉 시간의 증대로 인하여 사용온도 범위가 120 $^{\circ}$ C 정도인 에폭시 수지의 성질을 변화시켜 적층간 박리현상을 유발시킬 우려가 있으므로, 적층두께가 비교적 두꺼운 탄소섬유 에폭시 복합재료를 드릴링할 경우에는 절삭유를 주입해주는 습식법의 드릴링을 하는 것이 바람직하다고 사료된다.

표준 고속도강 드릴에 다이아몬드 입자를 전착한 드릴을 이용하여 탄소섬유 복합재료를 드릴링할 경우 추천 드릴링조건은 절삭속도 50m/min의 조건에서는 이송속도 20~30mm/min, 70m/min이상의 절삭속도에서는 20~50mm/min의 조건이다.

Fig. 12는 구심성에 영향을 미치지 않는 한도 내에서 표준 고속도강 드릴의 주 절삭날을 W모양으로 변형시키고 다이아몬드 입자를 전착한 드릴(type-D)을 이

용하여 Table 3의 절삭조건으로 실험한 후 드릴링 가공된 시험편의 출구쪽 모양을 나타낸 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 다른 형태의 드릴에 비하여 비교적 넓은 범위의 절삭조건에서 양호한 상태의 드릴링이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 드릴의 주 절삭날을 W모양으로 변화 시킴으로써 치끝에지가 미가공된 섬유를 출구면으로 밀어내는 push-out 현상을 감소 시킴으



Symbol : ● Good ▲ Usual × Bad

cutting speed \ feed	13	25	50	80
20	×	×	▲	●
30	×	×	▲	▲
40	×	×	×	▲
50	×	×	×	×

Fig. 13 Photograph of the drilled specimen (Type-E drill)

로 다른 형태의 드릴에 비하여 양호한 가공면을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 코어형 다이아몬드 입자 전착드릴(type-E)을 이용하여 Table 3의 절삭조건으로 실험한 후 드릴링 가공된 시험편의 출구쪽 모양을 나타낸 결과이다. 실험에 사용한 다른 형태의 드릴에 비하여 출구쪽에서의 거스러미는 발생하지 않았지만, ply들의 분리로 인한 부풀어 오름현상 즉, 재료내부의 결합이 심하게 발생하였다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유로는 코어형 다이아몬드 입자 전착드릴의 경우, 표준 고속도강 드릴과는 달리 칩배출을 위한 트위스트 홈(flutes)이 없기 때문에 가공중에 발생하는 칩이 배출되지 못하고 다이아몬드 입자 사이에 달라 붙어 눈메임을 일으키며, 정상적인 가공이 진행되지 못하고 재료들이 밀려나게 되어 재료내부의 결합이 심하게 발생하는 것으로 생각된다. 또한, 결합의 정도도 탄소섬유의 원주방향 보다는 길이 방향으로 열전도도가 크기 때문에 탄소섬유의 길이방향의 결합이 더욱 심하게 발생한다.

이상의 연구 결과를 종합하여 보면, 표준 고속도강 드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링은 공구의 심한 마멸에 의하여 양호한 상태의 구멍을 가공할 수 없을 뿐만 아니라 공구 수명이 매우 짧기 때문에 적절하지 못한 공구이다. 또한 코어형 다이아몬드 입자 전착드릴의 경우에는 칩배출 불량으로 인하여 가공 상태가 매우 불량하다. 따라서 코어형 드릴을 사용할 때 칩배출 문제를 해결하여야 하기 위하여 헬리컬이송 방식과 같은 절삭방식을 생각할 수 있다. 그러나 헬리컬이송 방식을 취하기 위하여는 특별한 이송기구를 고안하거나 CNC공작기계를 이용하여야 하는 단점이 있으며, 또한 대형 구조물 가공의 경우, 공작기계에 의한 가공은 거의 불가능하고, 수작업인 핸드 드릴링(hand drilling) 방법을 이용하여 드릴링을 행할때 드릴의 구심성이 없는 단점이 있다. 표준 고속도강 드릴에 compax 팁을 용접한 드릴(type-B), 표준고속도강 드릴에 다이아몬드 입자를 전착한 드릴(type-C)과 표준 고속도강 드릴의 주절삭날을 변형시키고 다이아몬드 입자를 전착한 드릴(type-D)의 경우는 양호한 드릴링을 할 수 있었다. 특히 주절삭날을 W형태로 변형시킨 경우가 보다 넓은 절삭조건에서 양호한 드릴링을 할 수 있었다. 그러나 표준 고속도강 드릴에 compax 팁을 용접한 드릴은 공구의 제작단가가 매우 높기 때문에 가공된 구멍의 정밀도와 실용성 측면에서는 type-C, type-D의 공

구가 보다 우수한 형태의 공구로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 특성에 관한 자료를 구축하고, 추천 절삭조건 및 탄소섬유 에폭시 복합재료 가공용 드릴의 설계제작을 위한 최적 형상을 제시할 목적으로 표준 고속도강 드릴, compax tip 드릴 및 다양한 형태의 다이아몬드 입자 전착드릴을 이용하여 드릴링 실험을 행하였다.

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 표준 고속도강 드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 실험 결과 이송량이 작고 절삭속도가 클수록 가공면 상태가 불량였으며, 이는 공구마멸이 매우 심하게 발생하기 때문이다. 따라서 고정밀도의 구멍 가공을 위해서는 공구의 내마멸성이 높아야 한다.

(2) 탄소섬유 에폭시 복합재료 드릴링 시 표준 고속도강 드릴 보다 다이아몬드 입자 전착드릴을 사용한 경우가 공구 마멸과 섬유 적층각에 의존하는 출구면 손상을 해결할 수 있으므로 양호한 구멍을 가공할 수 있다.

(3) 다이아몬드 입자 전착드릴에 의한 탄소섬유 에폭시 복합재료의 드릴링 시 재료의 손상은 공구마멸 보다 입자사이의 눈메임 현상에 의한 영향을 크게 받으며, 입자의 크기가 # 60~80인 경우, 가공조건 선정에 있어서 절삭날 1회전당 절삭두께가 적어도 0.01mm 이하가 되도록 하여야 한다.

후 기

이 논문은 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모 과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. P. K. Malick, "Fiber-Reinforced Composites", Marcel Dekker, Inc., pp.3-4, 1988.
2. A. Koplev, A. Lystrup and T. Vorm, "The Cutting Process, Chips and Cutting Force in Machining CFRP", Composites, Vol.14, No.4, pp.371-376, 1983.
3. K. Sakuma, M. Seto, M. Taniguchi, "Tool Wear in Cutting Carbon Fiber Rein-

- forced Plastics (The Effect of Physical Properties of Tool Materials”, Bulletin of JSME, Vol.28, No.245, pp.2781-2788, 1985.
4. T. Kaneeda, “CFRP Cutting Mechanism”, NAMRC XVIII, pp.216-221, 1989.
 5. M. Ramulu, M. Faridnia, J. L. Garbini, J. E. Jorgensen, “Machining of Graphite/Epoxy Materials with Polycrystalline Diamond(PCD) Tools”, Conference Proceedings of the Winter Annual Meeting of ASME, pp.33-40, 1989
 6. W. König, Ch. Wulf, P. Graß, H. Willerscheid, “Machining of Fiber Reinforced Plastics”, Annals of the CIRP, Vol.34/2, pp.537-548, 1985
 7. 金弘培, 咸承德, 南宮 碩, “炭素纖維 強化 複合 材料의 드릴링 特性에 關한 研究”, 韓國精密工學會, 春季學術大會論文集, pp.115-119, 1992.
 8. K. S. Kim, D. G. Lee, Y. K. Kwak, S. Namgung, “Machinability of the Carbon Fiber Epoxy Composite Materials in Turning”, J. of Material Processing Tech., Vol.32, pp.553-570, 1992.
 9. W. König, P. Graß, 1989, “Quality Definition and Assessment in Drilling of Fiber Reinforced Thermosets,” Annals of the CIRP, Vol.38/1, pp.119-124.
 10. H. Ho-Cheng, C. K. H. Dharan, 1990, “Delamination During Drilling in Composite Laminates,” Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.112, pp.236-239.