

論文

CVD 다이아몬드 및 PCD 드릴을 이용한 항공용 CFRP 복합재료의
홀 가공성 비교

권동준*, 왕작가*, 구가영*, 박종만**

Comparison of Optimum Drilling Conditions of Aircraft CFRP Composites using
CVD Diamond and PCD Drills

Dong-Jun Kwon*, Zuo-Jia Wang*, Ga-Young Gu*, Joung-Man Park**

Abstract

Recently CFRP laminate joints process by bolts and nuts are developed rapidly in aircraft industries. However, there are serious drawback during jointing process. Many hole processes are needed for the manufacturing and structural applications using composite materials. Generally, very durable polycrystalline crystalline diamond (PCD) drill has been used for the CFRP hole process. However, due to the expensive price and slow process speed, chemical vapor deposition (CVD) diamond drill has been used increasingly which are relatively-low durability but easily-adjustable process speed via drill shape change and price is much lower. In this study, the comparison of hole process between PCD and CVD diamond coated drills was done. First of all, CFRP hole processability was evaluated using the equations of hole processing conditions (feed amount per blade, feed speed). The comparison on thermal damage occurring from the CFRP specimen was also studied during drilling process. Empirical equation was made from the temperature photo profile being taken during hole process by infrared thermal camera. In addition, hole processability was compared by checking hole inside condition upon chip exhausting state for two drills. Generally, although the PCD can exhibit better hole processability, hole processing speed of CVD diamond drill exhibited faster than PCD case.

초 록

최근 항공용 재료 산업 분야에서 널리 사용되고 있는 CFRP의 활용이 증가되고 있다. 하지만, CFRP와 같은 복합재료 부품의 결합 시에 단점이 있다. 복합재료를 이용한 다양한 구조를 제조하기 위해선 많은 홀 가공이 필요하다. 일반적으로 CFRP 홀 가공 시 내구성이 매우 강한 polycrystalline crystalline diamond (PCD) 드릴을 사용한다. 하지만, 단가가 비싸고 가공 속도가 느리기 때문에 내구성은 PCD 드릴에 비해 약하나 드릴 형상 변화를 통해 가공 속도를 조절 할 수 있고, 비교적 가격이 저렴한 chemical vapor deposition (CVD) 다이아몬드 코팅 드릴의 사용량이 증가 되고 있다. 본 연구에서는, PCD 드릴과 CVD 다이아몬드 코팅 드릴의 홀 가공성을 비교 평가하였다. 먼저, 홀 가공 조건 식 (날당 이송량, 절삭 속도)을 이용하여 CFRP 홀 가공성을 평가했으며, CFRP 가공 시 드릴링 과정에서 발생하는 시편 내부의 열적 손상 정도를 비교했다. 열화상 카메라로 촬영한 홀 가공 시 발생하는 온도를 이용한 경험식을 만들어 두 드릴의 발열 정도에 따른 홀 가공성을 비교 평가하였다. 또한, 홀 가공 시 발생하는 칩(chip) 배출 여부에 따른 홀 내부의 상태를 평가하여 CVD 다이아몬드 코팅 드릴과 PCD 드릴의 CFRP 홀 가공성을 비교했다. 전반적으로 PCD 드릴의 홀 가공성이 CVD 다이아몬드 드릴에 비해 우수한 성능을 나타냈지만, 홀 생성 속도는 CVD 다이아몬드 드릴이 PCD 드릴에 비해 빠른 결과를 나타냈다.

Key Words : 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP), 드릴 프로세싱(Drilling processing), 홀(Hole), PCD 드릴(Polycrystalline Crystalline Diamond drill), CVD 다이아몬드 드릴(Chemical Vapor Deposition diamond drill)

접수: 2011년 4월 15일, 수정: 2011년 6월 24일, 게재승인: 2011년 8월 17일

* 경상대학교 나노·신소재공학부, 공학연구원

** 경상대학교 나노·신소재공학부, 공학연구원, 교신저자(E-mail:jmpark@gnu.ac.kr)

1. 서론

보잉사의 7E7 모델의 시작으로 항공기 시장에 경제성과 효율성을 강조하면서 비강도가 큰 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)의 이용으로 항공기 부품 시장의 변화를 주도하였다. 또한, 이런 항공기 분야 뿐 아니라 지상의 운송수단의 외장재 및 구조재료로서 재료의 응용이 다양화 되면서 CFRP의 활용성이 높아지고 사용량이 증가되고 있다[1,2].

하지만, 이러한 복합재료 구조물의 최대 단점은 복잡한 구조를 가진 부품 제작의 어려움이다. 복잡한 구조를 이루기 위해 필요부분에 볼트 너트 결합 방법이 많이 이용되고 있으며, 이에 따른 홀 가공의 중요성은 CFRP 복합재료 가공의 주된 부분이 되었다. CFRP의 접합에 맞는 가공을 위해 드릴 도구(tool) 개발 및 복합재료용 최적의 홀 가공 조건 선정이 중요하다. 이는 금속재료를 대체하기 위해서 안정성과 재료에 대한 신뢰가 중요하기 때문이며, 물성 개선을 위해서는 재료 자체의 물성도 중요 하지만 CFRP 간의 접착된 정도와 면의 중요성이 크다[3].

복합재료의 홀 가공에 대한 중요성에 대해 거론하자면 Airbus의 예를 들어 비행기 한 대를 제작하기 위해 약 55,000개 이상의 홀 가공을 하여야 한다는 점에 있어 복합재료에 맞는 도구 개발이 절실히 필요하다. 또한, 많은 량의 홀 가공을 진행해야 하기 때문에 가공 시간을 단축 시켜야 한다. KAI의 경우, 약 1,000개의 홀을 뚫는데 약 5시간에서 8시간의 시간을 사용하고 있으며 이러한 시간을 단축시킬 수 있다면 더 많은 량의 주문량 및 생산량을 맞출 수 있다. 하지만, 이런 가공 속도를 높이기 위해서는 드릴 형상 및 재질의 변화가 필요하나 CFRP의 섬유와 에폭시의 복합적인 물성 때문에 일반 드릴로는 가공하기 힘들다. 일반적으로 다량의 홀 가공 시 사용 되는 도구는 PCD 드릴이지만, 이 드릴의 구매 비용이 비싸고 드릴의 형상 변화에 따른 다이아몬드 코팅이 불가능하기 때문에 CFRP에 적합한 가공 형태의 드릴을 제작하는데 애로사항이 있다.

비행기 제작에 드는 경제성을 증가시키기 위해 기존의 비싸고 가공 속도가 느린 PCD 드릴이 아닌 새로운 드릴 사용으로 경제성 개선이 필요하다. 가공의 경제성뿐만 아니라 라미네이트 구조를 가지는 CFRP 구조상 홀 가공 시 CFRP 앞부분에 발생하는 필업(peel-up) 균열과 드릴링 도중 발생하는 홀 내부 미세 균열에 대한 가공의 개선도 필요하다[4,5]. 학술적인 관점에서 CFRP는 복합적 구조를 가진 재료이기 때문에, 일반적인 금속과의 홀 가공과는 다르게 발열량이 발생 된다. 일부는 칩을 통해 열 에너지가 외부로 배출되나, 드릴의 형상과 가공 조건에 따라 칩의 열에너지 발산이 되지 못하고 CFRP 홀 내부에 열적 에너지가 축적 되면서 내부 균열을 발생 시킨다. 이 경우 홀 사이즈 초과와 같은 적절하지 못한 홀이 되기 때문에 상업적으로 CFRP 부품에 치명적인 문제이다[6,7].

본 연구에서는, 가공 속도와 드릴 톨의 마모정도, 홀 가공 결과에 대한 홀 치수 정확성에 대한 평가 기준을 두고 기존에 사용하고 있는 PCD 드릴과 CVD 다이아몬드 드릴의 가공 능력을 비교 평가 했다. 홀 가공 시 측정되는 가공 단계의 온도를 측정 하여 가공 시 발생하는 발열량을 확인하고 두 드릴의 성능을 평가했다. 다이아몬드 코팅 면적의 제한이 있는 PCD 드릴과 다이아몬드 코팅이 코팅 면적에 제한이 없어 다양한 드릴 형상을 제조할 수 있는 CVD 다이아몬드 드릴을 이용하여 드릴 형상에 따른 가공 결과를 평가 했다. 홀 가공에서 홀 생산성이 중요한 부분이기 때문에 가공 속도에 의한 두 드릴의 성능 평가를 진행했다. 기존 PCD 드릴의 가공 feed 값을 CVD 다이아몬드 드릴의 기준에 맞춰 가공 속도에 따른 결과를 비교 평가 했다.

2. 실험

2.1 재료

KAI (한국항공우주산업(주))에서 제공받은 CFRP (두께: 14 mm)를 이용하여 홀 가공 실험을 진행 하였고 PCD 드릴 (Walter사, 직경: 6.35 mm)과 CVD 다이아몬드 드릴 (Amamco 사, 직경: 6.38 mm)를 이용하여 다이아몬드 코팅법과 드릴의 형상이 다른 두 드릴을 이용하여 홀 가공 능력을 비교 했고, 열화상 카메라 (Dail사, 중국)를 이용하여 홀 가공 과정을 분석 하고 보어 게이지 (bore gage, Mitutoyo사, 일본)를 통하여 홀 상태를 평가하였다. 홀 내부 상태를 확인하기 위해 반사현미경을 이용했다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 절삭가공 식을 이용한 가공 조건 선정

$$V_c = \pi D N \quad (1)$$

$$F_t = \frac{F}{ZN} \quad (2)$$

식 (1)에서, V_c , 절삭 속도를 나타내는 식이고, 식 (2)는 F_t , 날당 이송량을 나타내는 식이다 (D =드릴 직경, N =rpm, F =피드 (feed), Z =날의 수). (1)식은 드릴의 직경과 rpm 조건에 따른 홀을 절삭 하는 속도를 나타내며 전반적으로 rpm 조건을 확인하기 위해 사용된다. (2)식은 홀 가공 시 드릴 한 날이 한 번의 회전으로 홀 내벽을 얼마만큼 절삭하는 정도를 나타내며, 홀 내벽의 조도 및 가공 조건과 연관이 있다. 본 연구에서는 CFRP에 맞는 홀 가공 조건들 (즉, rpm, 피드)을 도출하기 위해 이용하였다. Z 값이 증가될수록 1날당 이송량이 작아져서 N 값을 증가시켜 날당 이송량을 증가 시킬 수 있다. 이에 따라 절삭 속도가 증가함으로써 4날형 드릴의 구조가 2날 형보다 생산성이 우수하다. 4날형 드릴의 최대 feed 값을

기준으로 가공 조건을 잡아 실험을 진행하였다. 그 이유는, 동일한 feed 값 조건에서 일정한 홀 생산 속도를 가진다는 기준에서 두 드릴의 가공성을 비교하고자 하였다.

2.2.2 드릴의 형상에 따른 홀 가공 과정 비교

라미네이트 구조를 가지는 CFRP의 홀 가공은 적층된 CFRP의 에폭시 부분과 섬유 부분으로 이루어진 두 재료의 물성으로 인해 가공 조건 선정에 어려움이 있다[8].

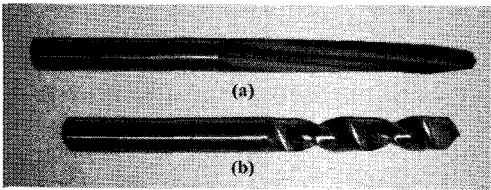


Fig. 1 Comparison of different geometry drills: (a) Ammannco Co., 6.38 mm diameter; (b) Walter Co., 6.35 mm diameter.

이러한 CFRP의 구조적 물성 차이 때문에 CFRP에 맞는 드릴 형상과 가공 조건 선정이 중요하다. CFRP에 적합한 드릴 형상을 알아보기 위해 CFRP 홀 가공 과정이 다른 2가지 드릴 형상을 Fig. 1과 같이 준비하여 실험했다. 4날 형태의 CVD 다이아몬드 드릴과 트위스트 형태의 2날 형태의 PCD 드릴의 형상 차이에 따른 홀 가공의 차이를 검토하였다.

2.2.3 다이아몬드 드릴의 홀 가공 열적 손상 비교

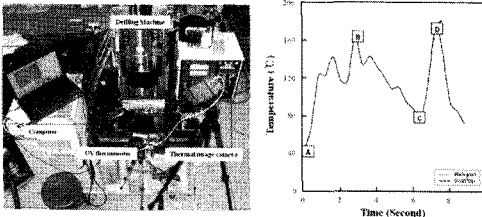


Fig. 2 Equipment of drilling process test and result data of drilling.

Fig. 2와 같이 드릴의 홀 가공 시 홀 부분의 발열 정도를 열화상 카메라로 측정하여 가공 중에 시편에 전달되는 열적 데미지를 확인하였다.

$$T_a = \frac{(B+C)}{2} \tag{3}$$

$$T_b = D - 20 \tag{4}$$

$$T_c = T_g - T_b \tag{5}$$

홀 가공 중에 발생하는 열적 데미지를 평가하는 방법으로, 위의 식 (3), (4), (5)식을 경험적 모델 식으로 도출하였

다. Fig. 2에 결과 그래프처럼 측정 온도 데이터의 변화는 chip의 영향을 많이 받으며 홀 가공 후, 홀을 빠져 나오는 드릴 표면의 온도를 측정하여 홀 내부 온도를 확인 할 수 있었다 (A: 초기 홀 가공될 부분의 온도, B: 홀 가공 시 최대의 발열을 나타내는 홀 주위 온도, C: 홀 가공이 거의 끝나갈 때의 최대 온도 감소 구간, D: 홀을 빠져 나올 때 드릴 표면의 온도).

경험 식 (3) T_a 는 칩 배출 정도를 확인하는 인자로 정의 하였다. B는 칩 배출이 가장 활발하여 홀 가공 시 최대 온도 증가 부분의 값이다. 반면에 C는 칩 배출이 가장 미흡해지면 서 낮은 온도 값을 얻을 때의 온도 값이다. 칩 배출이 잘되고, 안될 때의 영향에 따른 홀 가공 시 칩 배출 정도를 평가 하였다. 홀 가공 시 칩이 원활히 배출 되어야 홀 내벽에 칩에 의한 미세 크랙 정도가 작아지기 때문에 홀 가공 시 칩의 배출 정도는 홀 가공 품질에 대해 영향이 크다. 식 (4) T_b 는 홀 가공을 마치고 상승하는 드릴의 표면 온도 값 D에 일반적으로 칩이 드릴에 붙어 발생된 영향에 의한 평균 온도 증가량 20°C 를 감하여 드릴 표면의 온도를 통해 가공 직후의 홀 내부 온도 값을 나타낸다.

식 (5)는 홀 가공시 발생하는 열적 데미지 T_c 를 얻는 식이다. T_c 값은 DSC 결과로 얻은 CFRP 내 에폭시 성분의 T_g 값과 홀 가공 시 발생한 홀 내부 에너지인 T_b 값을 빼서 드릴링에 따른 CFRP에 미치는 열적 데미지를 확인한다. 에폭시의 T_g 보다 높은 홀 내부 온도 값을 가질 경우 흡수 값의 T_c 값이 나오고 이는 홀 가공에 따른 열적 데미지가 홀에 큰 영향을 주었음을 확인 할 수 있다. 이와 반대로, T_c 값이 양수 값 일수록 CFRP에 낮은 열적 데미지가 가해진 홀 가공임을 확인 할 수 있다.

또 다른 홀 가공 열적 데미지 평가 방법으로, TGA (Q50, TA Instrument사, 미국)를 이용하였다. 시편에 포함 된 에폭시의 함량을 가공 전과 홀 가공 후 발생한 칩을 이용하여 손실 되는 에폭시 양을 비교 하여 발열 정도를 평가 했다. 일반적으로 CFRP 내부의 에폭시 함량은 35%를 차지하고 있었으며 홀 가공 시 발생 칩의 함량은 소폭 감소한 경향을 확인 할 수 있었다. 이는 홀 가공 시 발생한 열적 데미지에 의해 칩 속에 에폭시가 발열에 의해 손실되었기 때문이다.

2.2.4 홀 크기 측정과 홀 상태 비교

홀 가공 과정 상 발생하는 열적 데미지 비교를 통한 가공 능력에 대한 분석 이외에, 홀 가공으로 생성된 홀 직경 정확성과 CFRP 시편의 앞면과 뒷면의 균열 정도를 비교하였다. 홀 직경을 측정하기 위해 보어 게이지 (bore gage)를 사용하여 홀 치수 정확성을 평가하고 절삭 가공 이론식에 의해 설정한 가공 조건의 타당성을 비교하였다[9]. 마지막으로 육안 검사를 통해 홀을 검사하여 필업 (peel up) 균열 과 홀 내부 균열 정도를 비교하여 CVD 다이아몬드 드릴과 PCD 드릴의 가공 성능을 평가 하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 드릴 가공 조건 설정

Table 1 Optimum drilling process of two drill types

Drill Type	N	F	V _c	F _t	Performance
CVD diamond Drill	5600	400	112.19	0.018	X
Diameter: 6.38mm	4480	400	89.75	0.022	△
AMAMCO Co.	3360	400	67.31	0.030	◎
	2240	400	44.87	0.045	○
PCD Drill	5600	400	111.66	0.036	◎
Diameter: 6.35mm	4480	400	89.33	0.045	○
WALTER Co.	3360	400	67.00	0.060	△
	2240	400	44.66	0.089	X

◎: Excellent, ○: Good, △: Medium, X: Poor

Table 1는 (1), (2) 식을 이용하여 홀 가공 생산성에 중점을 두고 가공 조건에 따른 결과를 비교하였다. CVD 다이아몬드 드릴과 PCD 드릴을 날당 이송량 F 와 절삭속도 V_c 를 통해 비교하였다. PCD 드릴은 날이 두 개인 트윈스트 형태의 드릴이며, 높은 f_{cd} 조건을 만족하기 위해선 높은 rpm 값으로 4날형 드릴의 절삭량을 2날로써 빠르게 절삭해야 하기 때문에 높은 rpm 조건에서 좋은 가공성을 보여 주었다. 이에 비해, CVD 다이아몬드 4날형 드릴은 4날이 CFRP의 조건에 맞게 홀 내벽을 절삭해야 하기 때문에 가공 속도는 높일 수 있으나 rpm에 따라 홀 내벽에 조도를 크게 변형시킨다. 따라서, 높은 rpm 조건에서 내벽을 절삭할 경우 CFRP 홀 내부의 섬유 부분을 풀 아웃시킬 수 있다. 드릴 가공 조건 면에서 봤을 때 날당 이송량은 0.3-0.36 mm/날 값일 경우 드릴 종류에 큰 상관없이 CFRP 홀 가공에 적합하다 말할 수 있다.

3.2 각 드릴에 따른 CFRP의 열적 손상 비교

열화상 카메라를 이용하여 각각 드릴의 발열량을 측정하였을 때, CVD 다이아몬드 드릴의 홀 가공 중엔 홀 부분에 발생하는 온도가 최대 200°C까지 발생하였다. 이에 비해, PCD 드릴은 가공 시 약 160°C까지 온도가 발열하였다. Fig. 3은 DSC를 이용하여 CFRP내 에폭시의 T_g 와 T_m 를 확인하였다. CFRP내에 에폭시의 물성 변화는 T_g 값 150°C부터 변형될 가능성이 커짐을 말할 수 있다. 홀 가공 시 발생하는 열적 데미지를 각 드릴별, 각 가공 조건별로 평가하기 위해 위 식 (5)에 맞게 데이터를 정리하여 Fig. 4처럼 나타낼 수 있다.

T_c 값을 통해 홀 가공 시 발생된 열적 데미지가 CFRP에 얼마나 영향을 주는지 확인 할 수 있다. CVD 다이아몬드 드릴 같은 경우, 낮은 rpm 조건으로 갈수록 높은 홀 내부 열적 데미지를 가진다는 것을 알 수 있었다. 이는 4날형 드릴의 기하학적 형상에 의해 낮은 rpm 조건일수록 절삭하는데 드릴과

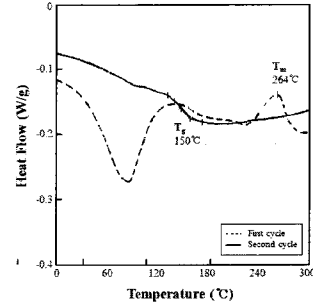


Fig. 3 T_g and T_m using DSC of epoxy in CFRP.

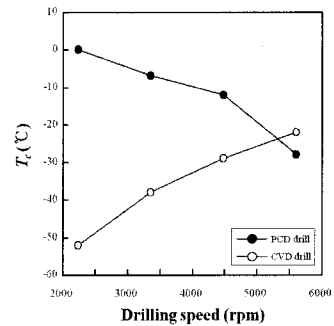


Fig. 4 Temperature of different processing condition during drilling.

CFRP 간에 더 높은 마찰력을 가지기 때문이다. 하지만, PCD 드릴은 이와는 반대의 결과를 얻었다. 높은 rpm 조건에서 높은 열적 데미지를 가지고, 낮은 rpm 일수록 낮은 열적 데미지를 가졌다. PCD 드릴은 CVD 다이아몬드 드릴에 비해 홀 가공의 형태가 다르기 때문에 홀 가공 중 드릴과 CFRP 간의 마찰량이 적다. 이러한 차이에 있어서 CVD 다이아몬드 드릴이 PCD 드릴에 비해 높은 열적 데미지를 CFRP에 준다 할 수 있다.

3.3 칩 발생에 따른 홀 가공성 평가

Fig. 5는 TGA 장비를 이용하여 홀 가공 시 생성된 칩을 통한 홀 가공 중에 발생 되는 열적 데미지를 각각의 드릴 별로 확인하였다. CFRP 속의 에폭시 포함 정도를 비교하여 홀 가공 과정의 발열 정도를 평가하였다. 평가가 가능한 이유는 홀 가공을 하기 전에 CFRP 표면에 존재하는 에폭시 함량을 측정해 봤을 경우, 그래프와 같이 약 에폭시 35% 정도를 포함하고 있었다. 이에 비해, 홀 가공 이후 CFRP의 에폭시 함량은 홀 가공을 진행했던 드릴에 따라 에폭시 함량이 다름을 확인 할 수 있었다. 이러한 이유는 가공 시 발생 되는 열적 데미지로 인하여, 칩 내부에 손실량이 발생되기 때문이다. CVD 다이아몬드 드릴을 이용한 가공이 PCD 드릴에 비해 더 높은 열적 데미지를 CFRP 홀 내부에 주기 때문에 더 많은 손실 양을 가짐을 확인했다.

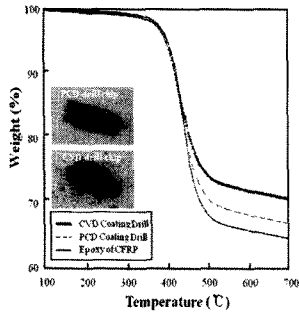


Fig. 5 TGA of chip produced during drilling (PCD drill: 5600 rpm/400 feed, CVD diamond drill: 3360 rpm/400 feed).

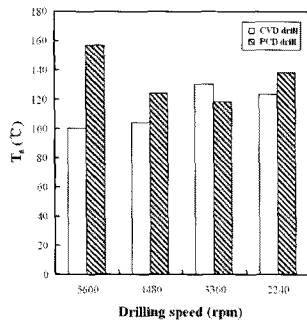


Fig. 6 Temperature of chip outcome during drilling process.

열화상 카메라를 이용하여 칩 배출 정도를 평가할 수 있었다. 식 (3) T_c 값을 이용하여 Fig. 6와 같은 결과로 정리할 수 있다. Fig. 5를 통해 두 드릴의 칩 배출 정도를 비교하면, PCD 드릴이 CVD 다이아몬드 드릴에 비해 전반적으로 원활한 칩 배출을 보여 주었다. 이는, 드릴의 형상에 따른 영향이라 말할 수 있으며, 비틀림 각도가 큰 PCD 드릴의 형상이 CVD 다이아몬드 드릴 형상보다 유리한 칩 배출 구조를 가지고 있기 때문이다. CVD 다이아몬드 드릴의 경우, 낮은 rpm 조건에서 칩 배출이 용이하다. 이는 4개의 드릴 날이 홀 내벽을 깎을 때 발생하는 칩의 발생 속도 및 칩 배출 속도와 연관이 있다. CVD 다이아몬드 드릴의 4날 형태는 칩 배출이 용이하지 못한 구조이기 때문에, 높은 rpm에서는 빠른 칩의 생성 속도와 홀 내부에서 외부로 칩을 배출시키는 속도 차이가 크게 발생되어 원활한 칩 배출을 하지 못한다. 또한 칩 발생 속도가 칩 배출 속도보다 빠를 경우, 홀 내벽과 드릴 사이에 칩이 멩치게 되고 드릴의 회전을 방해하면서 홀 내부에 미세 크랙을 발생 시키게 된다.

3.4 홀 직경 치수 정확성 확인 및 홀 상태 비교

Fig. 7은 가공한 홀의 직경을 보여게이저로 측정하여 홀 직경 치수 정확성을 확인한 결과이다. 가공한 홀 직경을 세 부분 (홀 앞면, 홀 내부, 홀 뒤면)으로 나누어 가공한 홀 치수의 편차를 확인하였다. 홀 직경 측정 결과 열적 데미지평가의

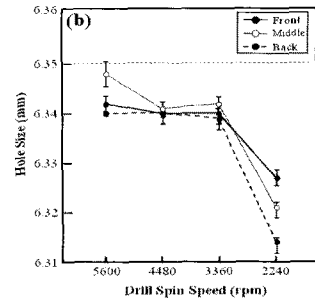
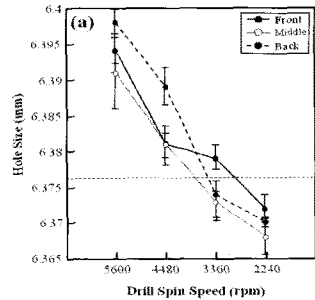


Fig. 7 Comparison of hole size of (a) CVD drill; (b) PCD drill (PCD drill: 5600rpm/400feed, CVD diamond drill: 3360rpm/400feed).

결과와 유사하게 CVD 다이아몬드 드릴은 높은 rpm 조건에서 홀 직경의 정확도가 떨어지고, 낮은 rpm일수록 치수 정확도가 높아졌다. 이와 반대로, PCD 드릴은 높은 rpm일수록 홀 정확도가 높았다. 전반적으로, Fig. 7의 데이터를 통해 확인 할 수 있는 것은 발열량이 높고 칩 배출이 용이하지 못했던 CVD 다이아몬드 드릴의 경우 홀 앞면과 뒷면 그리고 홀 내부의 크기의 편차가 컸다. 하지만, PCD 드릴 같은 경우 그 편차가 대부분 작았으나, 좋은 홀 가공 결과를 가지지 못했던 낮은 rpm 조건에서는 큰 편차를 가졌다. 이를 통해, 드릴에 적합한 가공 조건일 경우, 홀 치수 정확성이 높으며 이러한 결과는 열적 데미지 평가 결과와 칩 배출 정도와 연관성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 드릴의 형상학적으로 평가해 볼 때 PCD 드릴은 CFRP 표면을 드릴 팁 부분의 형상에 맞게 CFRP 표면을 베어 나가는 형태인데 낮은 rpm일 경우 섬유와 에폭시를 원활하게 절삭하지 못하기 때문에 홀 치수 정확성이 떨어진다. 반대로, CVD 다이아몬드 드릴의 경우 높은 rpm 조건에선 홀 가공에 필요 이상의 힘이 주어져 홀을 확장하는 단계에서 필요 이상의 강한 힘으로 인해 홀 내벽에 미세 크랙을 생성시켜 직경이 홀 부분에 따라 편차가 발생되었다.

Fig. 8은 홀 가공 이후 생성된 홀의 상태를 나타내었다. PCD 드릴은 이론상 피드 값보다 초과한 값으로 홀 가공 한 결과로 홀의 앞부분에는 미세 균열을, 홀의 뒷부분에 특정 부분에서 큰 균열이 발생하였다. 이는 PCD 드릴의 홀 가공 과정 시 드릴에 맞지 않는 높은 피드 값에 의해 CFRP의 마지막 섬유 층을 제대로 절삭하지 못하고, 드릴이 섬유 층을

뚫고 나오면서 큰 균열을 발생시켰다. 반면에, CVD 드릴은 시편 뒷면의 균열이 거의 존재하지 않고 홀 앞부분에 드릴이 홀을 빠져나오면서 발생한 미세 크랙이 존재하였다. 이는 칩 배출이 원활하지 못한 드릴 형상이므로 홀 가공 시 배출 되지 못한 뭉친 칩들이 드릴과 같이 나오면서 홀 앞, 뒷부분을 긁으면서 미세 균열을 생성한 것으로 생각된다. 이러한 결과로 PCD 드릴은 높은 피드 값 보다는 낮은 피드 값으로 CFRP를 한층 씩 절삭하여야 하며, CVD 다이아몬드 드릴에 비해 느린 홀 생산 속도를 가지는 드릴이라고 생각된다.

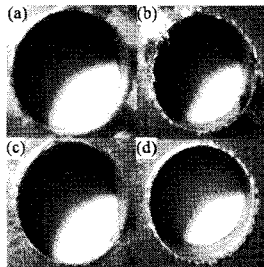


Fig. 8 Photographs of hole condition for (a) PCD drill's hole (front); (b) PCD drill's hole (back); (c) CVD diamond drill's hole (front); (d) CVD diamond drill's hole (back). (PCD drill: 5600rpm/400feed, CVD diamond drill: 3360rpm/400feed).

4. 결론

섬유와 에폭시가 혼합되어 있는 라미네이트 구조인 CFRP의 홀 가공은 일반 금속 구조물과 다른 홀 가공 조건과 그에 맞는 드릴의 형상이 새롭게 필요로 한다. 본 연구를 통해 기존 홀 가공에 많이 사용하는 PCD 드릴과 내구성이 비슷하며 드릴의 형상 변화가 가능한 CVD 다이아몬드 드릴을 이용하여 홀 가공성을 비교 평가하였다. PCD 드릴의 홀 가공 시 발생하는 열적 데미지는 CVD 다이아몬드 드릴에 비해 낮은 편이었다. CVD 다이아몬드 드릴의 4날형 드릴 형상에 의해 칩 발생 속도는 빠르나 칩 배출 속도는 rpm에 영향이 크기 때문에 높은 rpm 조건에서보다 낮은 rpm일 경우 좋은 칩 배출 속도를 확인하였다. 전반적으로 PCD 드릴은 좋은 홀 가공성을 가지나 홀 가공 속도가 CVD 다이아몬드 드릴에 비해 느리다는 점을 확인했다. 많은 CFRP 홀 가공을 빠르게 생산하기 위해서는 CVD 다이아몬드 드릴이 적합하지만 정확하고 정밀한 결과를 얻기 위해서는 CVD 드릴보다는 PCD 드릴을 활용하는 것이 보다 나은 홀 결과를 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 한국항공우주(주)의 용역과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. 연구자 중 권동준은 2단계 BK21의 재정적 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Duro L.M.P., Goncalves D.J.S., Tavares J.M.R.S., Albuquerque V.H.C., Vieira A.A., Marques A.T., "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates," *Composite Structures*, Vol. 92, 2010, pp. 1545-1550.
- 2) Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M.E., Girot F., "Modeling and tool wear in drilling of CFRP," *Composite Structure*, Vol. 29, No. 52, 2001, pp. 669-682.
- 3) Qin F., Chou Y.K., Nolen D., Thompson R.G., Hocheng H., "Coating thickness effects on diamond coated cutting tools," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, 2009, pp. 1056-1060.
- 4) Gilpin A., "Tool solutions for machining composites," *Reinforced plastics*, Vol. 34, August, 2009, pp. 30-33.
- 5) Chou Y.K., Thompson R.G., Kumar A., "CVD diamond technologies for dry drilling applications," *Thin Solid Films*, Vol. 518, 2010, pp. 7487-7491.
- 6) Kwang H.I., Cheon S.C., Kim S.K., Yang I.Y., "Effect of temperature on impact damages in CFRP composite laminates," *Composite Part B*, Vol. 32, 2001, pp. 669-682.
- 7) Lachaud F., Piquet R., Collombet F., Surcin L., "Drilling of composite structure," *Composite Structure*, Vol. 52, 2001, pp. 511-516.
- 8) Endo H., Marui E., "Small-hole drilling in engineering plastics sheet and its accuracy estimation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, 2006, pp. 575-579.
- 9) 김석일, 조재완, "고능률 가공을 위한 절삭 동력 기반의 이송 속도 최적화," 대한기계학회, 생산 및 설계공학부문 추계 Workshop, 2004, pp. 109-116.