

〈論 文〉

탄소섬유강화 플라스틱의 고정도, 고능률 드릴링 가공

박규열* · 최진호* · 이대길*

(1994년 5월 17일 접수)

Highly Precise and Efficient Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics

Kyu Yeol Park, Jin Ho Choi and Dai Gil Lee

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Plastics(탄소섬유강화 플라스틱), Delamination(층간박리), Helical-Feed Drilling Method(헬리컬피드 구멍가공 방식), WC-Co Drill(초경 합금 드릴), CIB-D Core Drill(주철본드 다이아몬드 코어 드릴), Ball Nose Type Core Drill(볼 노즈형 코어 드릴)

Abstract

The high strength and wear-resistant metal bonded diamond wheel was applied to the drilling process of carbon fiber reinforced plastics(CFRP), The helical-feed drilling method was use for the first time to overcome the limit of drilling depth of the conventional drilling process and to improve the dressing of the wheel. The helical-feed drilling method was found effective at high cutting speed without the limit of drilling depth.

1. 서 론

탄소섬유강화 플라스틱(carbon fiber reinforced plastics:CFRP)은 높은 비강성, 비강도 및 감쇠능과 온도 변화에 대한 치수 안정성 등의 금속재료에서는 얻기 어려운 뛰어난 재료특성에 의해, 항공기와 우주개발 기기(機器)분야에서 일반 스포츠 레저(Leisure)산업까지 폭 넓게 사용되고 있다.^(1,2) 또한, CFRP를 강체 혹은 회전체의 구조재로 사용할 경우, 중량감소에 의한 에너지 절감효과와 더불어 높은 정도의 위치결정이 가능하여, 항공기 및 자동차의 샤프트,⁽³⁾ 공작기계의 스피들,⁽⁴⁾ 로봇 팔⁽⁵⁾ 등에 사용이 확대되고 있다. 이와같이 CFRP를 기계요소 혹은 구조물의 部材로 적용하고자 할 경우 이종재와의 접합이 필요하게 되며, 일반적으로 리벳이음 등의 기계적인 접합과 접착제에 의한

접합이 적용된다. 기계적 접합에서는 접착제 접합시의 단점으로 지적되는 접착대상물의 형상 및 표면상태에 의한 제약, 사용온도 및 습도 등의 사용환경에 의한 제약을 극소화할 수 있다는 장점을 갖는다. 단, 이종재 접합 구조물의 효율성은 각 소재간의 접합부 강도에 의해 크게 좌우되며,⁽⁶⁾ CFRP와 같은 복합재료를 채용한 경우에 기계적인 접합시에 드릴링 가공에 의해 발생하는 퍼징(fuzzing) 및 층간박리(delamination) 현상 등이 재료의 피로특성 열화의 원인으로 지적되고 있다. CFRP의 드릴링 가공에는 주로 절삭공구를 사용한 드릴링 가공이 적용되고 있으며, 이때 각종 FRP의 드릴링 가공에서 나타나는 매트릭스 수지와 강화 섬유와의 기계적 성질의 차이에서 비롯되는 퍼징 및 층간박리 현상과,⁽⁷⁻¹⁰⁾ 탄소섬유의 높은 경도 및 강도 특성에 의한 극심한 공구마모로 인한 공구 지속성(tool durability)의 저하⁽¹¹⁾가 문제점으로 지적되고 있다. 드릴링 가공에 있어서의 상기의 문제점은, CFRP를 고신뢰도가 요구되는 분야의 기기·

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

부품으로 적용시에 장해요소로 작용하게 되며, 따라서 CFRP의 효과적인 드릴링 가공방식의 개발은 CFRP부품의 신뢰성 증대를 통하여 CFRP의 새로운 용도개발에 크게 기여하는 것으로 기대할 수 있다.

한편, 이와같이 난가공 특성을 갖는 CFRP의 효과적인 드릴링 가공을 실현하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 기존의 연구는 절삭공구를 사용한 전형적인 드릴링 방식에 의존하고 있음을 알 수 있다. 즉, CFRP의 드릴링 가공에 관한 기존의 연구는 절삭가공에 있어서의 공구형상, 공구재질 및 가공조건에 의한 드릴링 특성을 조사하는 수법이 주류를 이루고 있음을 알 수 있다. 일례로, Hocheng⁽¹³⁾은 CFRP의 드릴링 가공에 있어서, 동일 절입속도의 조건하에서 절삭속도 $V_t; 62.8 \text{ m/min}$ 와 $V_t; 7.85 \text{ m/min}$ 의 경우를 비교하여, 단위 회전당 절입량(제거량)이 작은 고속회전수의 조건하에서 드릴링 출구측에 퍼징 및 층간박리현상이 현저하게 발생하는 결과가 얻어져 CFRP의 드릴링 가공정도에 미치는 인자가 단지 배분력(thrust force)만에 국한되지 않음을 입증하였다. 또한, Jane⁽¹⁴⁾은 CFRP의 드릴링 가공에 다이아몬드 입자 코팅 연삭공구를 사용하여 양호한 드릴링 특성이 얻어짐을 밝혀, CFRP의 드릴링에 연삭 드릴링 방식의 적용 가능성을 시사하고 있다. 이와 같이, CFRP의 효과적인 드릴링 가공을 위하여 다방면에 많은 연구결과가 얻어지고 있음에도 불구하고, 가공능률과 가공정도를 동시에 만족시키는 CFRP의 드릴링 가공이 아직 실현되지 않고 있기 때문에, 새로운 가공방식의 개발에 대한 요구가 높아지고 있다.

본 연구에서는 CFRP의 드릴링 가공에 있어서, 퍼징과 층간박리(delamination)가 없는 고정도 및 높은 제거효율의 고성능 드릴링 가공기술을 확립하기 위하여, 고강도 및 높은 내마모성의 소결형 메탈본드 다이아몬드 슷돌(metal bonded sintering-diamond wheel)을 이용한 연삭가공의 적용성을 조사하였다. 또한 메탈본드 슷돌에 의한 드릴링 가공중에 발생하는 슷돌의 눈막힘현상을 해결하기 위하여 헬리컬절입 드릴링 방식을 제안하여, CFRP의 드릴링 가공에의 적용효과 및 드릴링 특성에 관하여 조사하였다.

2. 실험장치 및 드릴링방법

2.1 실험장치 및 피삭재료

CFRP의 드릴링 가공에 사용한 실험장치 및 드릴링 공구의 사양이 Table 1에 나타나있다. 드릴링 실험에는, 주축 모터동력 7.5 kW, 최대 회전수 6,000 rpm의 수직형 머시닝 센터를 사용하였다. 드릴링 공구는, WC-Co재의 표준형 트위스트 드릴(WC-Co standard two-flute straight-shank drill: WC-Co drill)과 주철 결합재 다이아몬드 슷돌(cast iron bond diamond wheel)의 일반형 코어 드릴(CIB-D core drill), 일반형 코어 드릴의 선단부에 볼 엔드밀 형상의 곡물을 성형시킨 볼 노즈형 코어 드릴(CIB-D ball nose type core drill)의 3 종류를 사용하였다. CIB-D 슷돌은 주철 분말중에 다이아몬드 입자를 흡입하여 고온 고압하에서 소결 성형한 것으로, 높은 내마모성, 고강도의 특성에 의해 세라믹재료 등의 연삭가공에 사용되고 있으며,⁽¹⁵⁾ 본 연구에서는 CFRP의 드릴링 가공중에 발

Table 1 Experimental equipments for drilling of carbon fiber reinforced plastics

| | |
|----------------|--|
| Machine tool | Machining center (MC) : TNV-40, 7.2 kw[SAEIL HEAVY INDUSTRIES Co., Ltd. Korea] |
| Drilling tools | <p>Tungsten carbide (WC-Co) two-flute twist drill, $\phi 10 \text{ mm}$ [KOREA TUNGSTEN Co., Ltd. Korea]</p> <p>Cast iron bond diamond (CIB-D) wheel, normal type core drill : #100 (concentration ; 100), $\phi 10 \times W2 \text{ mm}$ ($\phi 6 \text{ mm}$ center hole forming)</p> <p>ball nose type core drill : #100 (concentration ; 100), $\phi 10 \text{ mm}$, tip sectional radius 5 mm ($\phi 4 \text{ mm}$ center hole forming) [FUJI DIE Co., Ltd. Japan]</p> |

생하는 공구마모문제를 해결하기 위하여 CIB-D 슛들을 채택하였다. 또한, 드릴링실험에 사용한 CFRP는 PAN(polyacrylonitrile)계의 고강도 탄소섬유를 에폭시 수지에 일방향으로 적층성형한 것으로, 실험내용 및 용도에 따라서 두께 2 mm와 10 mm의 두 종류를 사용하였다. 실험에 사용한 CFRP의 기계적 성질은 Table 2에 나타난 바와 같다. 동소재는 탄소섬유와 에폭시수지의 탄성률에 큰차이를 나타내는 이종재의 복합재료로, 이러한 재료특성으로 인하여 드릴링 가공시에 퍼징 및 층간박리현상이 발생하여 가공정도(drilling integrity)와 가공능률(drilling efficiency)을 동시에 만족시키는 것이 매우 어려운 것으로 알려져 있다.^(8,12) 가공액은 드릴링 가공시의 분진발생방지 및 가공부위의 냉각을 목적으로 케미컬 솔루션 타입의 수용성 연삭액을 50배로 희석하여 사용하였다.

2.2 실험방법

실험장치는 머시닝센터와 공구동력계(tool dynamometer) 등으로 구성되며, 실험결과는 가공중에 로드셀로부터의 신호를 충전 앰프(charge amplifier)를 통하여 퍼스널컴퓨터에 받아들여 전용의 데이터처리 소프트웨어를 사용하여 기록처리하였다. 실험방법은, CIB-D 코어 드릴에 의한 연삭 드릴링 가공의 경우, #100WC(white alundum) 슛들에 의한 기계적인 방법으로 초기 드레싱을 실시한 후 실험에 사용하였다. 드릴링실험에는 WC-Co 드릴과 CIB-D 코어 드릴을 사용한 일반적인 드릴링 방식(conventional drilling method), CIB-D 코어 드릴을 사용한 헬리컬절입 드릴링방식(helical-feed drilling method)의 두방식을 적용하였다. 절입방식에 의한 공구이송 기구의 차이는 Fig. 1에 나타난 바와같이, 일반적인 드릴링방식이 드릴링방향(구멍깊이방향)에 대하여 직선적인 절입 형태를 취하는 반면, 헬리컬절입 방식에서는 드릴링방향에 대하여 헬리컬 궤적의 절입형태를 취하게 되며, 헬리컬절입 방식의 적용에 의하여 코어 드릴을 사용한 드릴링 가공시에 칩 배출의 용이성 및

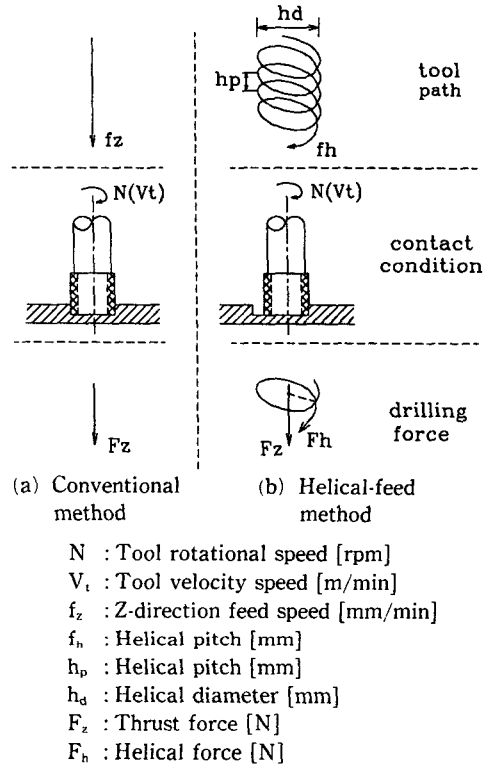


Fig. 1 Schematic illustration of the drilling method and the drilling force

가공액 공급성의 향상 등의 효과를 기대할 수 있다. 실험결과는 주로 드릴링 방식 및 공구형상의 차이에 의한 드릴링 특성을 조사하여, 퍼징 및 층간박리가 없는 CFRP의 드릴링에 관하여 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 WC-Co 드릴에 의한 CFRP의 드릴링

Fig. 2는 WC-Co 드릴을 사용한 CFRP의 드릴링 가공의 경우에 공구회전수(tool rpm : N)와 절삭배분력(thrust force : F_z)의 관계를 나타낸다. z축 방향의 이송속도, 즉 절입속도 f_z 가 매분당 10 mm

Table 2 Mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics

| Specific gravity | Tensile strength(GPa) | Fiber volume content (%) | Remarks (Tensile modulus : GPa) |
|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 1.6 | 2.06 | 60 | * Carbon fiber : 207.0 |
| | | | * Epoxy resin : 1.3 |

의 일정한 조건하에서, 공구회전수의 증가와 더불어 절삭력이 감소하여 공구회전수 N 이 6,000 rpm, 즉 절삭속도 V_f 가 188 m/min에서 배분력 F_z 는 18 N 전후의 값을 나타내었다. 이와같이 공구회전수의 증가에 따른 절삭력의 감소는 회전수와 단위 절삭량이 역비례 관계로 설명되어지는 일반적인 절삭 기구와 합치하는 결과이다. Fig. 3은 직경 10 mm의 WC-Co 드릴과 두께 10 mm의 CFRP 판재를 사용하여 N ; 2,000 rpm, f_z ; 10 mm/min의 드릴링 조건하에서 드릴링 회수에 따른 드릴링 출구측(exit section)의 가공면 상태를 관찰한 결과이다. 드릴링 회수의 증가와 더불어 가공면 품질이 저하되어 10회 가공(total drilling depth; 100 mm) 시에는 층간박리현상을 동반한 퍼징현상이 현저하게 발생하였다. 이것은 드릴링 회수의 증가에 따른 절삭날(cutting edge)의 마모에 기인한 것으로, 이러한 가공상태의 차이를 주사식 전자현미경을 사용

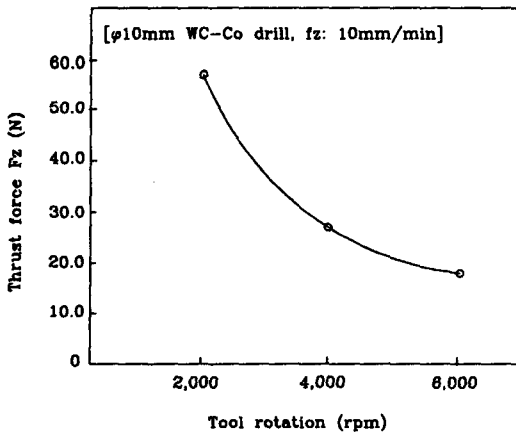
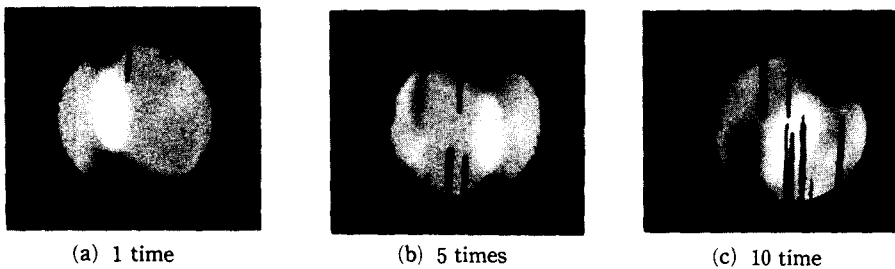


Fig. 2 Correlation between the thrust force and the tool rotational speed in the drilling of CFRP with WC-Co drill

하여 가공 전후의 절삭날 상태를 관찰한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 가공전의 상태에 비해서 드릴링 가공 10회 종료후의 드릴에서는 절삭날의 마모가 명료하게 관찰되어, WC-Co 드릴을 사용한 CFRP의 드릴링 가공에는 공구마모가 격심한 것이 확인되었다. 일련의 결과로부터, WC-Co드릴을 사용한 CFRP의 드릴링 가공의 경우 가공중에 드릴의 마모에 의해 층간박리현상을 동반한 퍼징현상이 발생하며, 이로 인하여 고품위의 가공면과 더불어 안정된 드릴링 상태의 유지가 곤란한 것이 판명되었다.

3.2 다이아몬드 코어 드릴에 의한 CFRP의 드릴링 #100 주철본드 다이아몬드 코어 드릴(CIB-D core drill)과 두께 t 가 2 mm의 CFRP 판재를 사용하여 CFRP의 드릴링 가공을 실시하였다. Fig. 5는 코어 드릴을 사용한 드릴링 가공에서의 배분력과 공구회전수의 관계를 나타내며, 공구회전수의 증가에 따른 배분력의 감소가 Fig. 3에서 나타낸 절삭공구(twist drill)의 경우에 비하여 완만하며, 이러한 경향은 동일 코어 드릴의 사용시에 빠른 절입속도의 조건하에서 현저하게 나타났다. 이것은 코어 드릴을 사용한 드릴링 가공의 경우, 공구와 공작물간의 접촉 상태의 기하학적 형상에 의하여 칩의 배출이 곤란한 드릴링 기구와 더불어 연질의 에폭시 모재로 구성되는 CFRP의 재료특성에 기인한 것으로 사료된다. Fig. 6(a)는 코어 드릴과 t ; 10 mm의 CFRP 판재를 사용한 드릴링 가공중의 배분력의 변화를 나타낸 결과로, 드릴링 가공 실시후의 초기 단계에는 정상적인 드릴링 가공이 진행되지만, 드릴링 깊이 4 mm 전후에서 코어 드릴의 눈막힘(wheel loading)에 의한 것으로 간주되는 배분력의 급증현상이 발생하였다. 또한, 가공 종료 후의 드



(a) 1 time (b) 5 times (c) 10 time
[N; 2,000 rpm, f_z ; 10 mm/min, WC-Co drill, CFRP 10 mm plate]

Fig. 3 Variations of the exit section of the hole with respect to drilling times

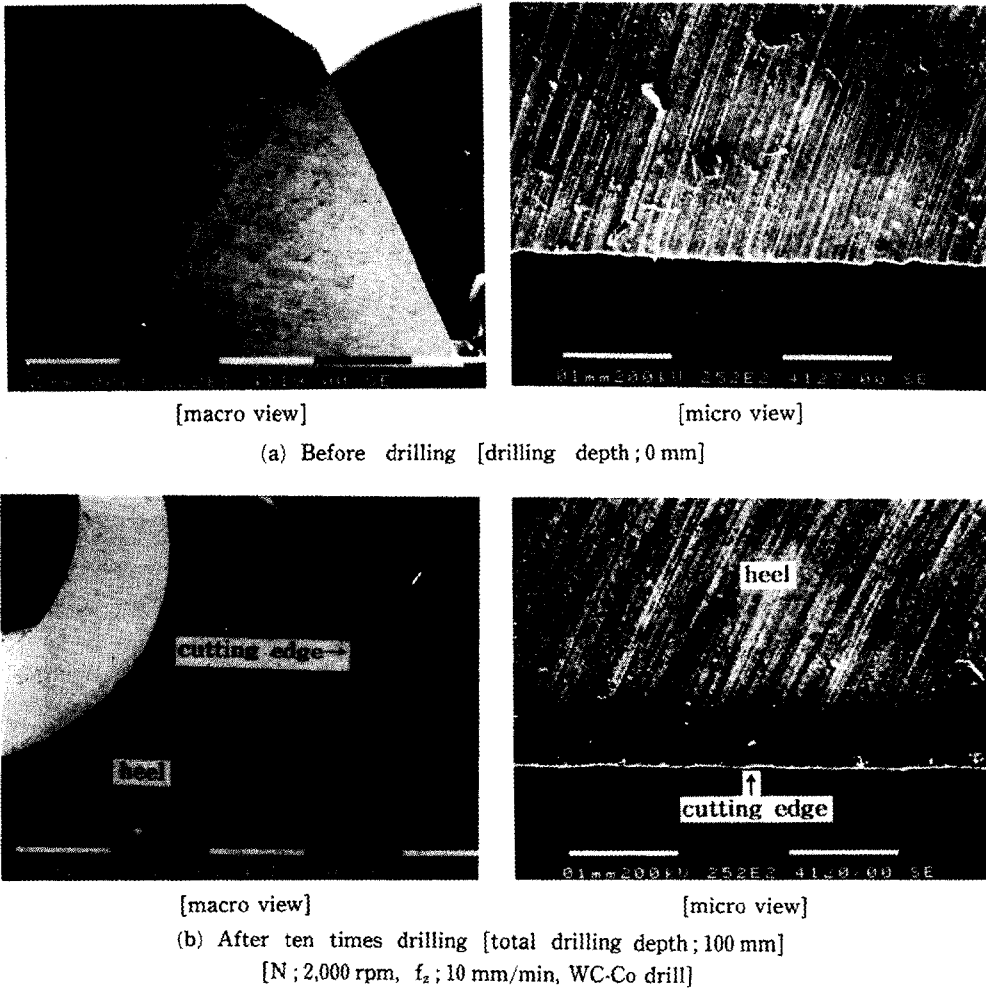


Fig. 4 Different views of the tool condition according to the CFRP drilling

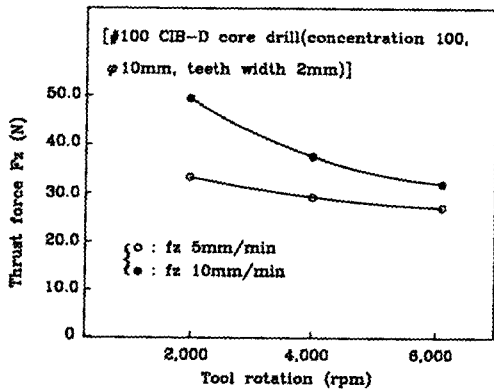
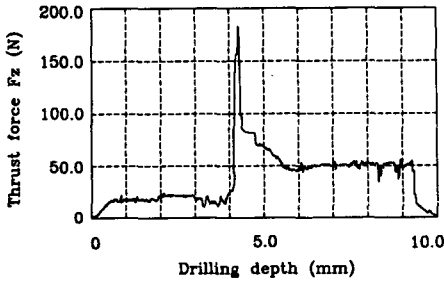
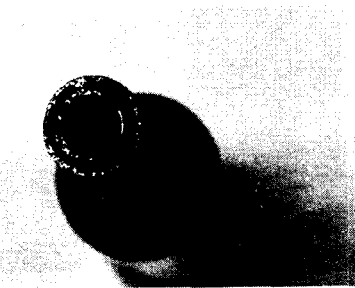


Fig. 5 Correlation between the thrust force and the tool rotational speed in the drilling of the CFRP with the metal bonded diamond core drill

릴링 가공면에서는 소재의 열손상(burning) 흔적이 육안으로 명료하게 관찰되었으며, 가공 종료후의 코어 드릴의 상태를 관찰한 결과, Fig. 6(b)에 나타낸 바와 같이 코어 드릴의 작용면이 CFRP의 칩에 의해 피복되어 눈막힘현상이 확인되었다. 이와 같이 CFRP의 드릴링 가공 중에 발생하는 코어 드릴의 눈막힘현상은, CIB-D 코어 드릴의 다이아몬드 입자와 CFRP의 내마모성을 고려할 경우, 다이아몬드 입자의 마모에 의한 연삭성의 저하보다 칩 배출성의 불량에 의한 칩의 누적에 기인한 것으로 판단된다. 일련의 결과로부터, 코어 드릴을 사용한 CFRP의 드릴링 가공에서는 가공 중에 칩의 효과적인 배출(처리)이 곤란하여 정상적인 드릴링 가공이 가능한 드릴링 깊이의 한계가 존재하는 것



(a) Fluctuation of the drilling force in deep hole drilling

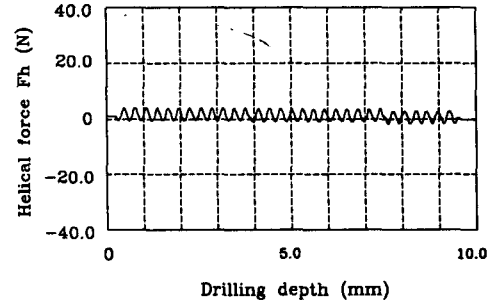
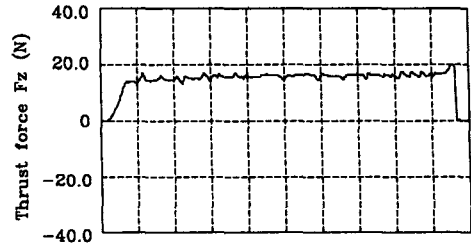


(b) Views of the tool after drilling
 [#100 CIB-D core drill ($\phi 10$ mm, tooth width 2 mm)],
 [V_t ; 6,000 rpm, f_z ; 10 mm/min]

Fig. 6 Drilling force fluctuation of the CFRP with the metal bonded diamond core drill

이 확인되었다.

한편, Fig. 7은 헬리컬 드릴링방식을 적용하여, #100 CIB-D 코어 드릴을 사용한 t ; 10 mm의 CFRP판재의 드릴링 가공 중의 배분력(thrust force: F_z)과 헬리컬 분력(helical force: F_h)을 측정 한 결과이다. 헬리컬절입 방식을 적용한 경우, Fig. 6(a)의 결과에서 나타난 일반 드릴링방식에 의한 동일 드릴링 깊이의 가공중에 보이는 가공력(drilling force)의 변동이 발생하지 않으며, 안정된 드릴링 상태를 유지하는 것이 확인되었다. 이것은 설정된 총 드릴링 깊이를 헬리컬 이송과 동시에 상시 미세분할하면서 드릴링 가공이 진행되는 헬리컬 절입의 이송기구를 고려할 경우, 헬리컬절입 드릴링방식의 적용에 의하여 가공 중에 칩의 배출이 원활하며, 헬리컬 이송시 공구표면에 부착한 칩이 공구와 피삭재와의 접촉면에서 발생하는 미끄럼파찰에 의해 제거되는 슛돌면의 드레싱효과가 얻어져 코어 드릴의 눈막힘현상이 방지된 결과로 사료된다. Fig. 8은 헬리컬절입 드릴링 가공에 있어서 헬



[#100 CIB-D core drill ($\phi 10$ mm, teth width 2 mm)]
 [V_t ; 6,000 rpm, f_h ; 300 mm/min, p_h ; 0.1 mm]

Fig. 7 Drilling force variation of the CFRP in the helical-feed drilling method with the metal bonded diamond core drill

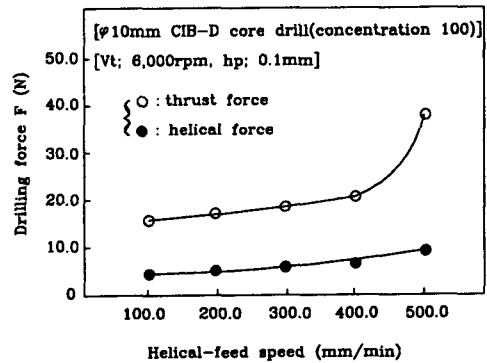


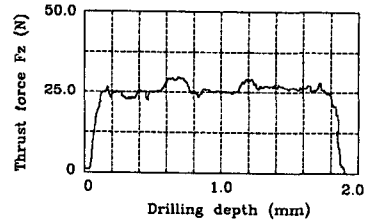
Fig. 8 Correlation between the drilling force and the helical-feed speed in the drilling of the CFRP with the helical-feed method

리컬절입속도(helical-feed speed: f_h)와 가공력과 의 관계를 조사한 결과이다. N ; 6000 rpm, 헬리컬 피치(helical pitch: h_p) 0.1 mm의 조건하에서, f_h 의 증가와 더불어 가공력이 점진적으로 상승하여, f_h ; 500 mm/min 전후에서 가공력의 합력(resultant force)이 급격하게 상승하는 결과가 얻어졌다. 이 경우, 특히 F_z 의 증가가 현저한 점을 고려할 경우, 가공력의 급상승현상은 코어 드릴의 눈막힘에

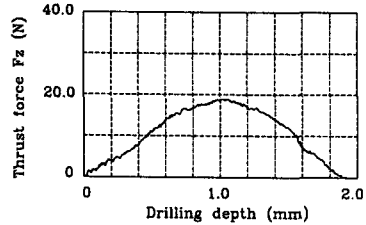
기인한 것으로, 헬리컬절입에 의한 드릴링 가공에도 정상적인 가공상태가 유지가능한 적정한 드릴링 조건이 존재하는 것이 확인되었다.

Table 3은 WC-Co 드릴과 CIB-D 코어 드릴을 사용한 드릴링방식 및 드릴링조건에 따른 CFRP 드릴링 시편의 인장시험 결과이다. 동 결과에 의하면, 정상적인 드릴링 가공이 진행된 상태에서는 드릴링 공구를 포함한 드릴링방식에 의한 파괴특성은 큰 차이를 보이지 않으며, WC-Co 드릴을 사용한 경우에 단위 회전수당 절입량(제거량)이 적은 조건 하에서 파괴하중이 낮은 결과로 나타났다. 이것은 강화섬유와 모재 수지의 결합상태에 의해 소재특성이 좌우되는 장섬유강화 복합재료의 구조적인 특성을 고려할 경우, 고속회전수의 조건하에서는 절삭거리의 증가에 따른 열발생의 증가로 에폭시 모재의 열화가 진행된 결과로 추측되며, 이와 같은 결과가 CIB-D 코어 드릴을 사용한 드릴링 가공에 있어서 코어 드릴의 눈막힘현상이 발생하는 드릴링 조건하에서 파괴하중이 현저하게 저하되는 결과와 합치하는 사실로부터 인지할 수 있다.

CFRP의 드릴링 가공에 있어서 코어 드릴의 형상에 따른 드릴링 특성의 차이를 조사하였다. Fig. 9는 코어 드릴의 형상에 따른 드릴링 가공중에 배분력을 측정한 결과로, 일반 코어 드릴에 비해 볼 노-즈형 코어드릴의 사용시에 배분력의 최대치가 약 1.5배 낮은 결과가 얻어졌다. 또한, 가공후의



(a) Normal type core drill



(b) Ball nose type core drill

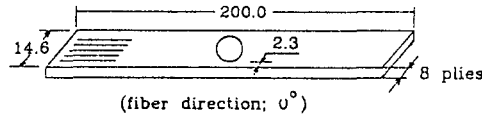
[#100 CIB-D wheel(concentration 100)]

[V_1 ; 6,000 rpm, f_2 ; 10 mm/min, CFRP 2 mm plate]

Fig. 9 Influence of the tool shape on the drilling of the CFRP with the metal bonded diamond core drill.

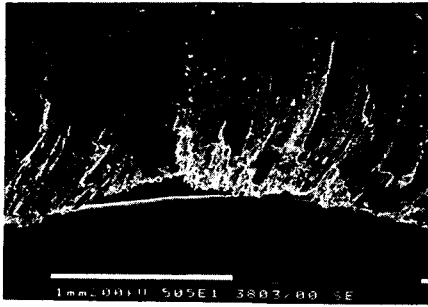
드릴링 출구측의 상태를 SEM을 이용하여 관찰한 결과, Fig. 10에 나타낸 바와 같이, 볼 노-즈형 코어드릴의 사용에 의해 탄소섬유의 박리현상이 거의 나타나지 않는 양호한 드릴링 가공면이 얻어지는

Table 3 Tensile test results of the drilling specimens of carbon fiber reinforced plastics

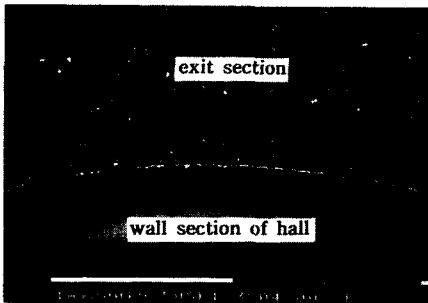


[Dimensions of the drilling specimen]

| | Tool | Drilling method | Failure load (kN) | Remarks (drilling condition) |
|---|-------------|-----------------|-------------------|--|
| 1 | WC-Co drill | Conventional | 4.579 | N ; 2,000 rpm, f_2 ; 10 mm/min |
| 2 | WC-Co drill | Conventional | 4.114 | N ; 6,000 rpm, f_2 ; 10 mm/min |
| 3 | Core drill | Conventional | 4.473 | N ; 6,000 rpm, f_2 ; 10 mm/min |
| 4 | Core drill | Conventional | 3.463 | N ; 6,000 rpm, f_2 ; 20 mm/min (※ wheel loading occurs) |
| 5 | Core drill | Helical-feed | 4.533 | N ; 6,000 rpm, f_h ; 400 mm/min h_p ; 0.1 mm |



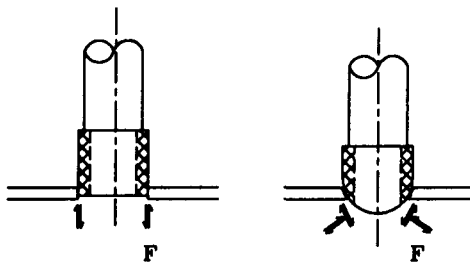
(a) Normal type core drill



(b) Ball nose type core drill (tip sectional radius 5mm)

[#100 CIB-D wheel (concentration 100)]
[N; 6,000 rpm, f_z ; 10 mm/min, CFRP 2 mm plate]

Fig. 10 Variations of the hole condition due to the different tool shapes.



(a) Normal type (b) Ball nose type

Fig. 11 Schematic illustration of the drilling characteristics according to the core drill types

것이 확인되었다. 이것은 Fig. 11에 나타난 바와 같이, 코어 드릴의 형상에 따라서 피삭재와의 접촉 형태 및 배분력의 작용방향이 상이하여, 드릴의 기하학적인 차이에 의한 드릴링 출구측에서 배분력의 분산효과가 얻어진 결과로 추정되며, 이와 같은 결과는 코어 드릴에 의한 CFRP의 고정도 (fuzzing

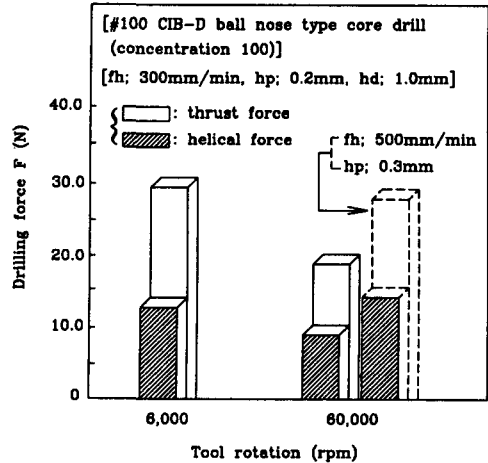
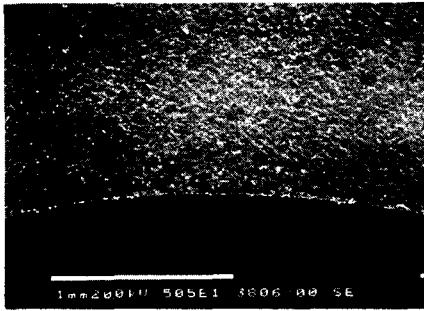


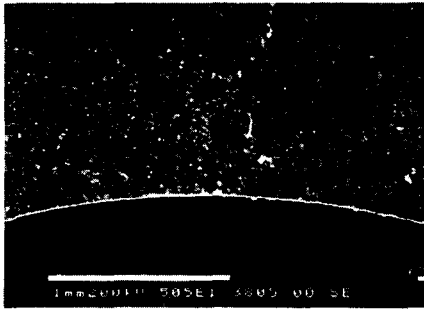
Fig. 12 Influence of the tool rotational speed on the drilling of the CFRP with the helical-feed method

and delamination free) 드릴링 가공에는 볼 노-즈형 코어드릴의 사용이 유리함을 입증하는 것으로 사료된다.

Fig. 12는 #100 CIB-D 볼 노-즈형 코어 드릴을 사용하여, 정상적인 드릴링 가공상태가 유지가능한 한계에 가까운 조건하에서, 헬리컬절입 드릴링방식에 의한 CFRP의 드릴링 가공능률과 가공력을 조사한 결과이다. 이 실험에서는 공구의 고속 회전수역에서 헬리컬절입 드릴링방식의 적용성을 조사하기 위하여 N ; 6,000 rpm 및 N ; 60,000 rpm의 회전수를 설정하였으며, 실험에는 주축 최고 회전수 100,000 rpm의 Niigata Engineering Co., Ltd. [Japan]의 UHS-10를 사용하였다. 동일한 드릴링 조건을 설정한 경우, N ; 60,000 rpm에서 공구회전수의 대폭 증가에도 불구하고, Fig. 13에 나타난 바와 같이 드릴링 가공면의 열손상이 발생하지 않았으며, 보다 낮은 가공력으로 양호한 드릴링 가공이 가능함이 확인되었다. 헬리컬절입 방식에서는 공구의 헬리컬케체에 의한 피삭재와의 접촉점이 상시 이동하여 열의 집중현상이 방지되며, 설정된 공구 공전직경 (helical diameter: hd)이 연삭액의 공급경로로 작용하여 가공열의 냉각효율이 향상되는 효과가 얻어진 결과로 사료된다. 한편, N : 60,000 rpm의 조건에서는 보다 가혹한 드릴링조건으로 f_h ; 500 mm/min, h_p ; 0.3 mm를 설정하는 것이 가능하며, 매분당 실질 드릴링속도 (netz-direction feed speed) 47.5 mm의 드릴링 가공능률이 얻어졌



(a) Entry section



(b) Exit section

Fig. 13 Views of the hold condition with the helical-feed drilling method when the tool rotation speed was 60,000 rpm. [#100 CIB-D ball nose type core drill (concentration 100)], [N; 60,000 rpm, f_h ; 300 mm/min, h_p ; 0.2 mm, h_d ; 1.0 mm]

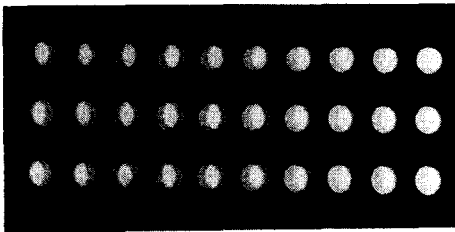


Fig. 14 Drilling samples of the CFRP with the helical-feed drilling method which used the ball nose type CIB-D core drill. [#100 CIB-D ball nose type core drill (concentration 100)], [N; 6,000 rpm, f_h ; 300m/min, h_p ; 0.2 mm, h_d ; 1.0 mm]

다. 일련의 결과로부터 헬리컬절입 드릴링 방식의 적용에 의하여 고속연삭의 조건하에서 열손상이 방지되어 높은 드릴링 가공능률이 얻어짐이 확인되었다. Fig. 14는 N; 6,000 rpm의 조건하에서 #100 CIB-D 볼 노-즈형 코어드릴을 사용한 CFRP의 연속 드릴링 가공 시편을 나타낸다. 이 경우 총 드릴

링깊이는 300 mm로 가공 후에 코어 드릴의 마모는 거의 측정되지 않았다. 이러한 결과는 코어 드릴의 다이아몬드 입자와 CFRP의 재료특성을 고려할 경우, CFRP의 드릴링 가공에 의한 CIB-D 코어 드릴의 마모는 극히 미소한 것으로 추정할 수 있다.

4. 결 론

CFRP의 고정도, 고능률 드릴링 가공기술의 확립을 목표로 하여 실시한 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) WC-Co 드릴을 사용한 드릴링 가공에서는, 가공중에 격심한 공구마모에 의해 고정도의 가공면을 얻기위한 안정된 가공상태를 지속시키는 것이 곤란하였다.

(2) 코어 드릴을 사용한 연삭 드릴링 가공에서는, 정상적인 드릴링 가공이 가능한 드릴링깊이에 한계가 존재하였다.

(3) 헬리컬절입 드릴링방식을 도입한 연삭 드릴링 가공에서는, 드릴링깊이에 관계없이 효과적인 드릴링 가공이 가능하였다.

(4) 볼 노-즈형 코어 드릴을 사용한 연삭 드릴링 가공에 의하여, 퍼징 및 층간박리현상이 거의 발생하지 않는 높은 정도의 드릴링 가공이 가능하였다.

(5) 고속연삭의 조건을 이용한 헬리컬절입 드릴링방식에 의하여, 높은 드릴링 가공능률을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Maclick, P. K., 1988, *Fiber-Reinforced Composite*, Dekker, New York, pp. 3-4.
- (2) Schwarts, M. M., 1984, *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, New York, Ch. 7.
- (3) Reugg, C. and Habermeir, J., 1980, "Composite Propeller Shafts Design and Optimization, in: A. Bunsell et al. (Eds.)," *Advances in Composite Material, Proc. ICCM 3*, Vol. 2, Paris, pp. 1740 ~1755.
- (4) Lee, D. G., Sin, H. C. and Suh, N. P., 1985, "Manufacturing of a Graphite Epoxy Composite Spindle for a Machine Tool," *Ann. CIRP*, 34(1), pp. 365~369.
- (5) Lee, C. G., Kim, K. S. and Kwak, Y. K., 1991,

- "Manufacturing of a SCARA Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Material," *Robotica*, 9 pp. 219~229.
- (6) Reinhart, T. J., Composite, *ASTM International*, pp. 479~495.
- (7) Doran, J. H. and "Maikish, C. R., 1973, Machining Boron Composites," In *Composite Materials in Engineering Design*, ASM, pp. 242~250.
- (8) Marx, W. and Trink, S., 1978, "Manufacturing Methods for Cutting, Machining and Drilling Composite Materials", *Tech. Rep. #AD-B034202*.
- (9) Mackey, B. A., 1980, "How to Drill Precision Holes in Reinforced Plastics in a Hurry," *Plastics Engineering*, pp. 22~24.
- (10) Doer, R., Greene, E., Lyon, B. and Taha, S., 1982, "Development of Effective Maching and Tooling Techniques for Kevlar Composites," *Tech. Rep. #AD-A117853*.
- (11) Sakuma, K., Yokoo, Y. and Seto, M., 1984, "Study on Drilling of Reinforced Plastics" (*GFRP and CFRP*), *Bull. JSME*, Vol. 27(228), pp. 1237~1244.
- (12) Koenig, W., Wulf, C., Grass, P. and Willerscheid, H., 1985, "Machining for Fiber Reinforced Plastics," *Ann. CIRP*, Vol. 34(2), pp. 537~548.
- (13) Hocheng, H. and Puw, H. Y., 1992, "On Drilling Characteristics of Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastics," *Int. Jrn. Mach. Tools and Manufact.*, Vol. 32(4), pp. 583~592.
- (14) Jane, S. and Yang, D. C. H., 1992, "Delamination Free Drilling of Composite Laminates, Fabrication and Manufacturing of Composite Materials," *Ann. ASME*, MD-Vol. 35, pp. 45~59.
- (15) Nakagawa, T., Suzuki, K. and Uematsu, T., 1986, "Highly Efficient Grinding of Ceramics and Hard Metals on Grinding Center," *Ann. CIRP*, Vol. 35(1), pp. 205~210.