

CFRP 드릴링에서 TiAlN DLC 코팅과 PCD의 공구마모 비교

백종현*, 김수진*[#]

*경상국립대학교 기계항공공학부

Comparison of TiAlN DLC and PCD Tool Wear in CFRP Drilling

Jong-Hyun Baek*, Su-Jin Kim*[#]

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

(Received 24 March 2022; received in revised form 12 April 2022; accepted 18 April 2022)

ABSTRACT

A high-hardness tool material is required to reduce extreme abrasive wear when drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP). Single-crystal diamond is the hardest material in the world, but it is very expensive to be used as a cutting tool. Polycrystalline diamond (PCD) is a diamond grit fused at a high temperature and pressure, and diamond-like carbon (DLC) is an amorphous carbon with high hardness. This study compares DLC coatings and PCD inserts to conventional TiAlN-coated tungsten carbide drills. In fiberglass and carbon fiber reinforced polymer drilling, the tool wear of DLC-coated carbide was approximately half that of TiAlN-coated tools, and slight tool wear occurred in the case of PCD insert end drills.

Keywords : Diamond-Like Carbon(DLC코팅), Polycrystalline Diamond(다결정 다이아몬드), Tool Wear(공구마모), CFRP(탄소섬유강화 복합재료)

1. 서 론

섬유강화 복합재료의 절삭 메커니즘은 박리(Delamination), 좌굴(Buckling), 절단(Fiber cutting)으로 이루어진다^[1]. 이때 탄소섬유와 공구의 연마(Abrasive) 작용으로 일반강과 비교해서 4-8배 빠른 여유면 마멸(Flank wear)이 발생한다^[2]. 마모가 발생하면 축 방향 절삭력이 증가하고 박리 결합이 발생한다^[3].

공구마모를 줄이기 위해 CFRP(Carbon fiber reinforced plastic) 드릴링에 고가의 다이아몬드 대신 코

팅과 PCD(Polycrystalline diamond) 인서트가 사용되고 있다. 다이아몬드 코팅 드릴의 초기 마모는 거리에 따라 선형으로 느리게 진행하고 초경이 드러나면 거뜰해 곱으로 급격하게 마모된다^[4]. CFRP 드릴시 기존 TiAlN 코팅의 효과는 미미하지만 다이아몬드 코팅의 경우 공구마모가 약 10%로 감소한다^[5]. 초경과 비교해 공구마모율이 다이아몬드 코팅은 약 20%, PCD 인서트는 약 2%로 감소한다^[6]. 다이아몬드 코팅 공구의 주요 마모 메커니즘은 다이아몬드 코팅의 박리와 노출된 초경의 극심한 연마 마모의 조합이다^[7]. 위 연구들은 일반적인 드릴과 엔드밀을 대상으로 했고 PCD 평엔드 드릴(Flat end drill)의 마모 연구는 부족했다.

DLC(Diamond-like carbon)은 경도가 높은 비정질 탄

Corresponding Author : hoslee@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-250-7301, Fax: +82-55-250-7399

소로 디스크, 반사경, MEMS 보호 코팅에 사용된다^[8]. DLC 코팅을 CFRP 절삭공구에 적용한 연구들은 다음과 같이 서로 다른 결론을 내고 있다. DLC와 TiN 코팅이 드릴의 마모와 품질에 미치는 영향이 미미했다^[9]. CFRP 알루미늄 복합재 드릴링에서 DLC 코팅 공구의 수명이 TiAlN코팅 공구 보다 약 2배 길었다^[10]. DLC 코팅은 (AlCrSi/Ti)N코팅에 비해서 공구 수명향상 효과가 작았다^[11]. CFRP 밀링에서 다이아몬드, DLC, AlCrN 코팅 순서대로 공구 수명이 우수했다^[12]. 위와 같이 DLC 코팅 논문들 사이에 차이가 있어서 CFRP를 DLC 코팅 드릴과 기존 TiAlN 코팅 드릴로 가공해 공구마모를 비교할 필요가 있다.

본 연구에서는 외부는 유리섬유 내부는 탄소섬유를 적용한 섬유강화 복합재료를 각각 TiAlN과 DLC 코팅한 초경 드릴과 이중 나선각 엔드밀로 가공해 코팅 종류가 플랭크 마모에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 또한 PCD 인서트로 제작한 평엔드 드릴과 일반 TiAlN 코팅 초경 평엔드밀로 복합재료를 드릴링해 공구 소재가 마모에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 공구 및 실험 조건

2.1 DLC 코팅

합금강 가공에 널리 사용되는 TiAlN 코팅과 비철금속과 복합재 가공에 사용되는 DLC 코팅의 공구 수명을 비교하였다. 기업에서 사용하는 조건으로 구멍 150홀 건식 드릴 후 공구 현미경으로 플랭크 마모를 측정하였다.

실험에 사용된 드릴과 엔드밀의 형상은 Fig. 1이고 가공조건은 Table 1과 같다. Fig. 1(a) (b)와 같이 드릴의 선단각은 85°이며 날수는 2날이고, Fig. 2(c) (d)와 같이 엔드밀의 선단각은 184°이며 날수는 4날이다. 드릴은 회전속도 3,000rpm, 이송속도 100mm/min, 엔드밀은 회전속도 2,000rpm, 이송속도 100mm/min을 사용하였다. (주)제이제이툴스의 DLC 코팅 드릴은 Fig. 1(a)이고 엔드밀은 Fig. 1(c)이다. (주)윈트의 TiAlN 코팅 드릴은 Fig. 1(b)이고 엔드밀은 Fig. 1(d)이다.

실험에 사용된 공작 기계는 S&T 중공업의 TNV-650B 모델로 최대 회전속도는 6,000rev/min이고 최대 이송속도는 1,000mm/min이다. Fig. 2(a)의 소재는 인발성형(Pultrusion)으로 제작된 두께 6.2mm 유리섬유

와 탄소섬유 강화 스택 구조 복합재로 H사 G전기차 크로스멤버로 사용하고 있다. Fig. 2(b)와 같이 드릴링 실험 중에 FLIR사 Flir ix series i3모델 적외선 카메라로 측정한 절삭 온도는 87~127°C로, 금속절삭에 비해 현저하게 낮아 절삭 온도가 마모에 미치는 영향이 없을 것으로 보인다.

2.2 PCD 평엔드 드릴

밀링과 드릴이 모두 가능한 PCD 평엔드 드릴을 개발해 일반 TiAlN 코팅 초경 평엔드밀과 공구수명을 비교하였다. Fig. 3(a)는 측면 밀링용 옆 날과 드릴용 바닥

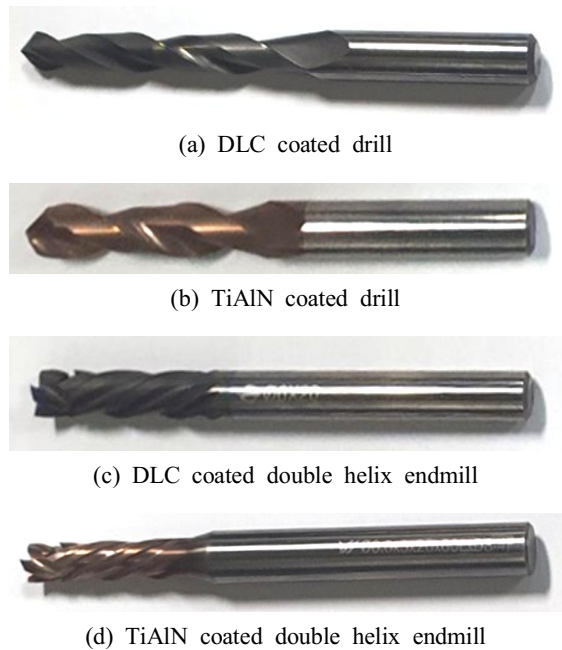
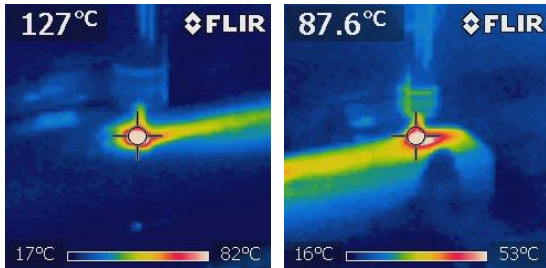


Fig. 1 DLC coated drill and double helix endmill

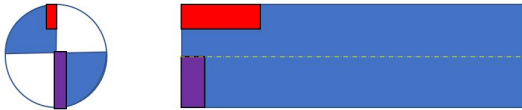


(a) Drilling experiments



(b) Drilling temperature

Fig. 2 FRP drilling and side milling experiments



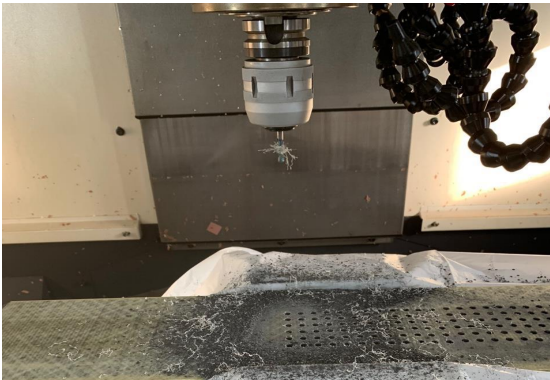
(a) PCD flat end drill concept design



(b) PCD flat end drill



(c) TiAlN coated WC flat endmill



(d) FRP flat end drilling experiments

Fig. 3 PCD flat end drill

Table 1 Tools and experimental conditions

Tool	Point angle (°)	Diameter (mm)	Number of tooth	Spindle speed (rpm)	Feed (mm/min)
Drill	85	5.8, 6.5	2	3,000	100
Endmill	184	6.0	4	2,000	100

날을 각각 하나씩 가진 PCD 평엔드 드릴의 개념도다. Fig. 3(b)는 두 PCD 팁을 초경 생크와 용접해 제작한 PCD 평엔드 드릴이다. Fig. 3(c)는 한국OSG의 TiAlN 코팅 초경 평엔드드릴이다.

직경 6mm 2날로 같고 재질이 다른 두 공구로 유리 탄소섬유 적층 복합재를 드릴해 마모 특성을 비교하였다. 회전수는 3,000rpm으로 동일하고 이송속도는 100mm/min, 200mm/min, 300mm/min로 20회씩 총 60회를 드릴 하였다. Fig. 3(d) 실험에 사용된 공작 기계는 (주)화천기공의 머시닝센터 Vista100이고 앞 실험에 사용한 것과 동일한 GFRP CFRP적층 복합재료이다. 드릴링 전후 바닥 날을 INSIZE 사의 ISM-PM600SA와 ISM-PM200SB모델 공구현미경으로 측정해 플랭크 마모를 비교하였다.

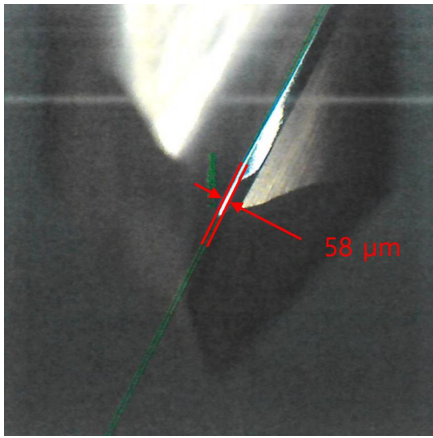
3. 실험결과 및 고찰

3.1 DLC 코팅

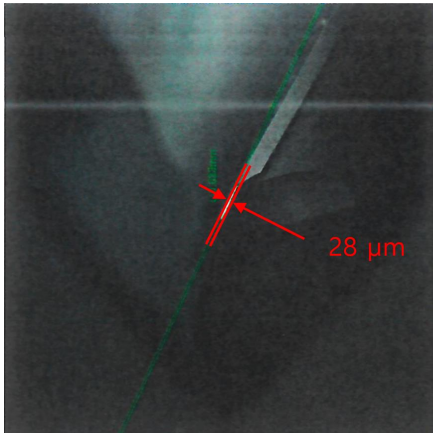
Fig. 4(a) (b)에서는 서로 다른 코팅을 적용한 드릴을 같은 조건에서 150회 가공한 후 여유면 마모를 비교하였다. 일반 초경 드릴의 마모는 약 130 μ m이지만[Kim 20], Fig. 4(a) TiAlN 코팅 드릴의 마모는 58 μ m, Fig. 4(b) DLC 코팅 드릴의 마모는 28 μ m로 감소한다.

Fig. 4(b) (c)에서는 같은 DLC 코팅 드릴에 대해서 가공 횟수를 두 배 증가시켜 여유면 마모를 비교하였다. Fig. 4(b)는 DLC 드릴로 150회 가공 후 여유면 마모 28 μ m이고, Fig. 4(b)는 같은 사양의 드릴로 300회 가공 후 여유면 마모 55 μ m이다. 드릴 구멍의 수가 2배 증가할 때 공구마모가 1.96배 증가했다.

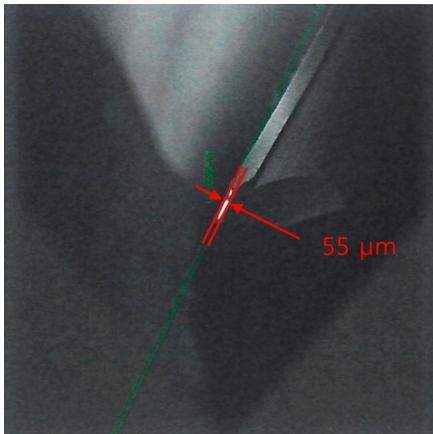
Fig. 5(a) (b)에서는 코팅의 종류가 다른 두 엔드밀로 같은 조건에서 150회 원호보간 가공 후 여유면 마모를 비교하였다. Fig. 5(a) TiAlN 코팅 엔드밀의 마모는 37 μ m이고 Fig. 5(b) DLC 코팅 엔드밀의 마모는 19 μ m이다.



(a) TiAlN, 150 holes, 58 μ m

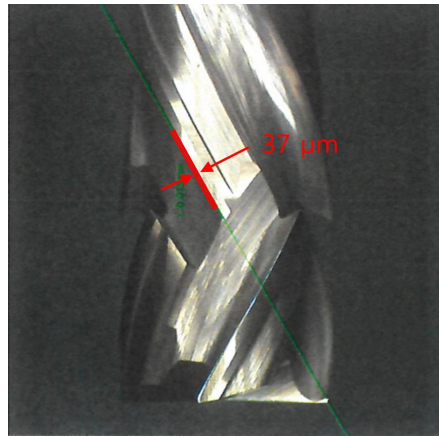


(b) DLC, 150 holes, 28 μ m

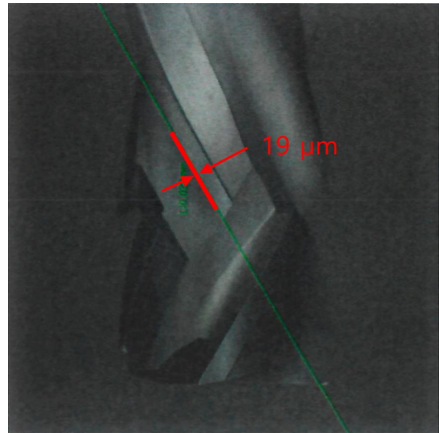


(c) DLC, 300 holes, 55 μ m

Fig. 4 Effect of DLC coating on drill



(a) TiAlN, 150 holes, 37 μ m



(b) DLC, 150 holes, 19 μ m

Fig. 5 Effect of DLC coating on endmill

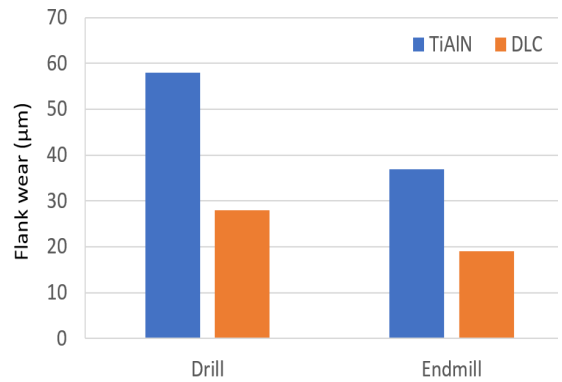
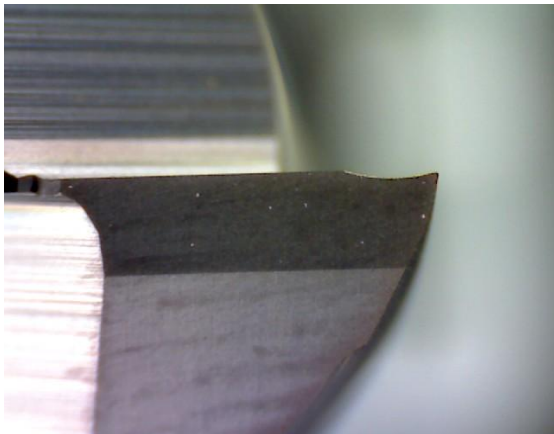


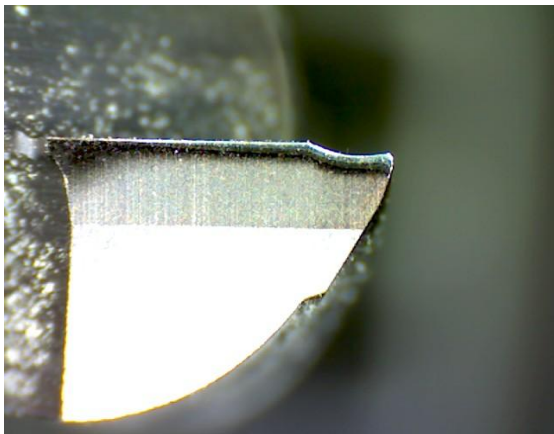
Fig. 6 Effect of DLC coating on flank wear, 150 holes

Fig. 6은 TiAlN 코팅과 DLC 코팅 드릴과 엔드밀의 플랭크 마모를 그래프로 표시하였다. TiAlN 코팅과 비교해서 DLC 코팅 드릴의 여유면 마모가 58% 작았다. TiAlN 코팅 보다 DLC 코팅 엔드밀의 여유면 마모가 49% 작았다.

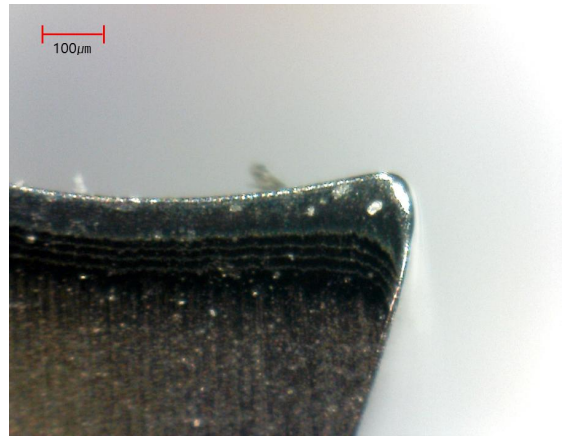
드릴과 엔드밀 모두 TiAlN 코팅보다 DLC 코팅의 플랭크 마모가 절반 정도로 작았다. 이것은 경도가 높은 탄소섬유 절삭에서 주로 물리적 연삭 마모가 발생하는데 DLC 코팅으로 공구의 표면 경도가 높아졌기 때문으로 보인다. 이렇게 DLC 코팅은 경도가 높아 탄소섬유 복합재료 절삭에 적합하지만, 철에는 화학적 확산이 발생하고 600°C 이상 고온에서 흑연화되기 때문에 스틸 절삭에는 적합하지 않다.



(a) New TiAlN coated WC

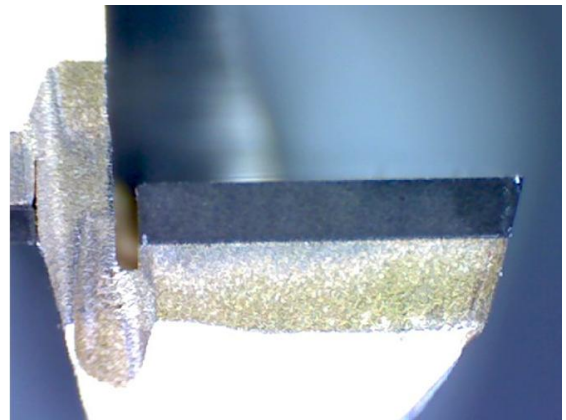


(b) Used TiAlN coated WC, 60 holes

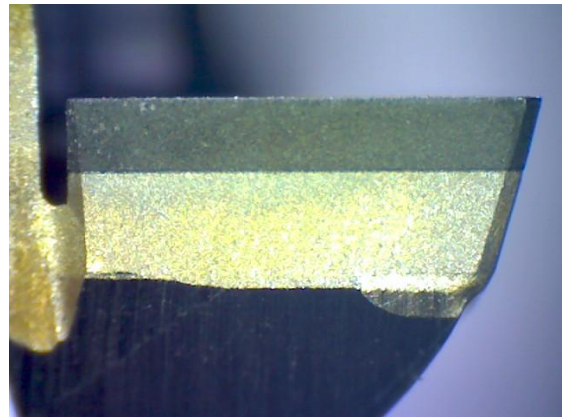


(c) Flank wear of TiAlN coated WC, 99µm

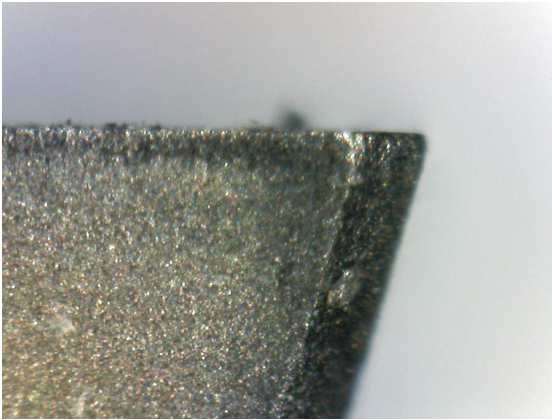
Fig. 7 Flank wear of TiAlN coated WC flat endmill



(a) New PCD insert



(b) Used PCD insert, 60 holes



(c) Flank wear of PCD insert

Fig. 8 Flank wear of PCD flat end drill

3.2 PCD 엔드밀

같은 GFRP CFRP 적층 복합재료를 동일한 조건에서 TiAlN 초경 코팅 평엔드밀로 드릴링해 플랭크 마모를 Fig. 7에 나타내고, PCD 인서트 평엔드 드릴로 드릴링해 바닥날의 플랭크 마모를 Fig. 8에 나타내 비교하였다. Fig. 7(a) (b)는 가공 전과 60홀 드릴 후 TiAlN 코팅 초경 엔드밀의 바닥 날을 공구 현미경으로 촬영한 것이다. 엔드밀의 경우 중심의 마모는 작고 끝으로 갈수록 마모가 증가하였다. 이것은 날의 절삭 거리와 속도가 반경에 비례하기 때문으로 보인다. 날 끝의 모서리의 마모가 가장 커서 초기에 각진 날이 가공 후 Fig. 7(c)와 같이 날 끝에서 99 μ m인 최대 플랭크 마모와 32 μ m인 노즈 반경이 생겼다. TiAlN코팅 초경공구 날 끝에서 급격한 마모와 코팅층 박리가 일어났으며 초경 모재가 날 끝에서 169 μ m까지 드러났다. 날 끝 모서리에서는 바닥 날과 측면 날이 양쪽에서 탄소섬유를 절단함으로 마모가 큰 것으로 생각된다. 또한 탄소섬유를 최초로 절단하는 날이 끝 모서리이기 때문에 이미 절단된 탄소섬유를 추가 절단하는 안쪽 날과 비교해서 마모가 크게 발생한 것으로 보인다.

Fig. 8(a) (b)는 가공전과 60홀 드릴 후 PCD 인서트 엔드밀의 바닥 날을 공구 현미경으로 촬영한 것이다. 가공 전 PCD의 공구 인선 Fig. 8(a)와 가공 후 날 Fig. 8(b)의 차이가 작고 가공 후 날의 마모가 거의 보이지 않는다. 광학현미경으로 공구 선단

부를 확대 촬영한 Fig 8(c)에도 PCD 팁의 마모가 거의 보이지 않는다. 이것은 PCD의 경도가 약 90GPa로 공구 소재 중에서 가장 높아 탄소섬유 절단시 연삭마모가 거의 발생하지 않기 때문이다.

4. 결론

CFRP 드릴링 시 발생하는 극심한 연삭 마모를 줄이기 위해서는 고경도 공구 재료가 필요하다. 본 연구에서는 DLC 코팅 공구와 드릴 가능한 PCD 평엔드밀을 제작해 기존 TiAlN 코팅 공구와 비교해서 플랭크 마모가 얼마나 개선되는지 확인하였다.

DLC 코팅의 효과에 대해 논문들 간의 차이가 있었는데 본 연구에 GFRP CFRP 적층 복합재료 구멍 가공 실험으로 드릴과 엔드밀 모두 기존 TiAlN 코팅보다 DLC 코팅의 플랭크 마모가 절반 정도로 작게 발생함을 확인하였다.

PCD 평엔드밀을 CFRP 드릴링에 적용해 공구마모를 비교한 연구가 부족해 본 연구에서 PCD 평엔드 드릴을 개발해 GFRP CFRP 적층 복합재료 드릴링에 적용하였다. 실험에서 기존 TiAlN 코팅 초경 평엔드밀의 마모가 99 μ m 발생했지만 PCD로 제작한 평엔드 드릴의 마모는 거의 발생하지 않았다.

위와 같이 공구수명 관점에서 GFRP CFRP 적층 복합재료 가공에 DLC 코팅 초경 드릴과 엔드밀이 적합하고, 기존 TiAlN 코팅 초경과 비교해 PCD 인서트가 평엔드 드릴에도 훨씬 뛰어난 내마모성을 보임을 확인했다.

후 기

“이 논문은 2021년도 교육부 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-003)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Kaneeda, T., “CFRP cutting mechanism,” Proc. of 17th North American Manufacturing Research Conf., Vol. 220, pp. 216-221, 1989.

2. Kim, K. S., Lee, D. G., Kwak, Y. G., Nam, G. S., “Machinability of Carbon Fiber Epoxy Composites in Turning,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 63-73, 1991.
3. Kim, K. B., Seo, J. H., Kim, T. G., Jun, M. B. G., Jeong, Y. H., “Comparative Analysis and Monitoring of Tool Wear in Carbon Fiber Reinforced Plastics Drilling,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 37, No. 11, pp. 813-818, 2020.
4. Ilescu, D. M. F. D., Gehin, D., Gutierrez, M. E., 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.
5. Wang, X., Kwon, P. Y., Sturtevant, C., Lantrip, J., “Tool wear of coated drills in drilling CFRP,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 1, pp. 127-135, 2013.
6. Hrechuk, A., Bushlya, V., M’Saoubi, R., Ståhl, J. E., “Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP,” *Procedia Manufacturing*, Vol. 25, pp. 294-301, 2018.
7. Fernández-Pérez, J., Díaz-Álvarez, J., Miguélez, M. H., Cantero, J. L., “Combined analysis of wear mechanisms and delamination in CFRP drilling,” *Composite Structures*, Vol. 255, pp. 112774, 2021.
8. Robertson, J., “Diamond-like amorphous carbon,” *Materials Science and Engineering*, Vol. 37, No. 4-6, pp. 129-281, 2002.
9. Murphy, C., Byrne, G., Gilchrist, M.D., “The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 216, No. 2, pp. 143-152, 2002.
10. D’Orazio, A., El Mehtedi, M., Forcellese, A., Nardinocchi, A., Simoncini, M., “Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 30, pp. 582-592, 2017.
11. Swan, S., Bin Abdullah, M. S., Kim, D., Nguyen, D., Kwon, P., “Tool wear of advanced coated tools in drilling of CFRP,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 140, No. 11, pp. 111018, 2018.
12. Sa, M. W., “Comparison Study on Side Milling of CFRP with AlCrN-based, Diamond-Like-Carbon (DLC), and Diamond-Coated End Mill,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 9-15, 2020.