Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:5 (2018) 401~408

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.5.401

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

CFRP 마이크로 드릴가공에서 다중신호를 이용한 드릴 상태감시

이두희[a], 윤지찬[a], 이종환[b], 김정석[c*]

Drill State Monitoring by Multiple Cutting-Process Signals in CFRP Microdrilling

Doo-Hee Lee[a], Ji-Chan Yoon[a], Jong-Hwan Lee[b], Jeong-Suk Kim[c*]

[a] *School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea*
[b] *Department of Mechartronics Engineering, Korea Plytechnic Air Collleges, 46, Daehak-gil, Sacheon, Gyeongnam-do, 52549, Korea*
[c] *Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing (ERC/NSDM), School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehakr-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 5 September 2018
Revised 2 October 2018
Accepted 8 October 2018

Keywords:
Carbon fiber reinforced plastic
Cutting force
Acoustic emission (AE)
Micro drilling
Tool wear propagation
Threshold level

ABSTRACT

The machinability of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is very poor because of its properties that make it difficult-to-machine, and machining trouble is often observed during microdrilling owing to easy drill wear and fracture. Therefore, it is important to effectively monitor the drill tool state in microdrilling operations. Cutting force and acoustic emission (AE) signals are often used to monitor tool states during limited cutting conditions. Using the cutting force and AE signals simultaneously is suggested in this investigation to increase the effectiveness of monitoring tool states in microdrilling. The relationship between tool wear propagation and these signal characteristics are verified for various feed rates, and a good correlation is obtained from the signal processing results in the frequency domain. The power threshold level of simultaneous cutting force and AE signals in the frequency domain can be adopted to monitor microdrilling states of CFRP drilling.

1. 서 론

탄소섬유강화복합재료(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)는 경량 구조용 재료로서 비강도와 비강성이 우수하고 뛰어난 피로특성을 갖고 있으며, 내마멸성 그리고 진동 감쇠성 등이 뛰어난 성능을 가지는 다양한 복합재료로 사용되고 있다. 적층각도, 적층순서 및 경화방법에 의해 원하는 강도와 강성을 가질 수 있도록 설계, 제작이 가능하며, 특히 항공기의 기체구조부나 자동차의 내외장재 등의 경량화를 위해 많이 사용되고 있으며, 환경 규제 충족과 동시에 경량특성으로 인해 가공의 어려움에도 불구하고 경량부품의 소재로 활용되고 있다. CFRP 소재는 가공 시 높은 절삭저항으로 인하여 공구 마멸이 급격하게 일어날 뿐 아니라 층간박리(delamination)나 스필린터링(splintering) 등과 같은 현상이 발생하기 때문에 가공물의 표면상태와 치수정밀도의 저하를 야기하게 되며, 높은 강도로 인해 공구의 수명에 문제가 되고 있다[1].

현재까지 이러한 문제의 해결을 위해 CFRP의 드릴링에 관한 많은 연구가 진행되어 오고 있으며, Yoon 등은 드릴지름의 변화와

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2334
Fax: +82-51-518-7207
E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong-Suk Kim).

주축의 회전속도에 따른 전형적 드릴가공작업을 할 때 발생되는 적층분리현황과 손상에 대하여 AE법을 이용하여 모니터링을 수행하였다[2]. Kim et al. 등은 CFRP 소재가공시 절삭속도와 이송률을 달리하여 드릴링 실험을 실시하고, 출구면 상태와 가공중 발생되는 AE (Acoustic emission)신호의 에너지 등을 분석을 통해 드릴링조건에 따른 AE신호의 특성을 분석하였다[3]. Xian Wu 등은 CFRP 소재의 마이크로 밀링가공에서 마이크로 엔드밀을 이용하여 절삭력과 이송 속도와의 상관관계 및 공구 마멸 패턴에 관한 가공실험을 수행하였다[4]. D. Iliescu 등은 CFRP의 드릴링가공에서 공구마멸이 추력 및 박리에 미치는 영향 및 최적의 공구형상을 파악하는 실험을 수행하였다[5]. Eiji Kondo 등은 AE신호를 이용하여 마이크로 드릴이 파손되기 전 신호를 검출하는 모니터링기법을 연구하였다[6].

본 연구는 마이크로 드릴링에서 공구 손상을 미연에 방지하고 생산성 향상을 위한 미세드릴가공 공구상태모니터링 기법을 구축하기 위해 CFRP소재의 마이크로 가공시 공구상태와 절삭력 및 AE신호 특성과의 상관관계를 분석하여, 마이크로 드릴의 상태감시를 효과적으로 할 수 있는 가공신호 특성을 파악하고자 한다.

2. 마이크로 드릴링 상태감시 실험

2.1 실험조건 및 방법

CFRP 가공에서 절삭조건에 따른 드릴의 마멸량을 관찰하고 절삭변수가 마이크로 드릴에 미치는 영향을 분석하기 위해 마이크로 드릴링가공 실험을 수행하였다. 마이크로드릴의 외양조건과 가공시스템의 동적특성에 기인한 운용조건을 고려하여 최적한 주축회전수를 18,000 rpm으로 선정하였고, 가공물 두께를 고려하여 절삭깊이 1 mm 조건(Step가공량)으로 드릴가공실험을 하였고 Table 1에 나타내었다. 날당 이송량은 안정적인 드릴작업이 가능한 범위내에서 선정하였으며, 가공실험은 건식환경에서 수행하였다.

2.2 실험장치

마이크로 드릴링가공 실험을 위해 최대 80,000 rpm의 주축회전속도를 가지는 BLDC모터 주축(Model Nakanishi)이 장착된 마이크로 가공장비(Micro-stage, Tecmac)를 활용하였다. 이송베드에는 미세절삭력을 측정하기 위해 힘센서(Type 9215A, Kistler)를 활용하여 고주파수 환경에서 절삭력 측정이 가능한 자체 제작된 마이크로 공구동력계를 설치하였다. 고주파수 영역의 신호를 획득하기 위해 AE센서(Pico 4126, PAC)를 가공시편의 윗면에 장착하였으며, Fig. 1에 본 실험에 사용된 실험장비 구성을 보이고 있다. 가공실험에는 직경 0.5 mm의 2날 마이크로 드릴공구(Union C-UMD 2050-070), 가공소재는 두께 2.0 mm의 CFRP 소재를 사용하였으며, 소재의 물성은 Table 2에 나타내었다. Fig. 2에 본 실험에 사용된 공구의 이미지를 나타내고 있다.

AE센서는 주로 미세한 신호의 고주파수 영역의 신호특성을 본석하기 위해, 에일리어싱(aliasing) 현상을 방지하고 미세버

Table 1 Experimental conditions

Number	Spindle speed (rpm)	Feed per tooth (μm/tooth)	Depth of cut (mm)
1	18,000	8	1.0
2	18,000	16	1.0
3	18,000	32	1.0
4	18,000	40	1.0

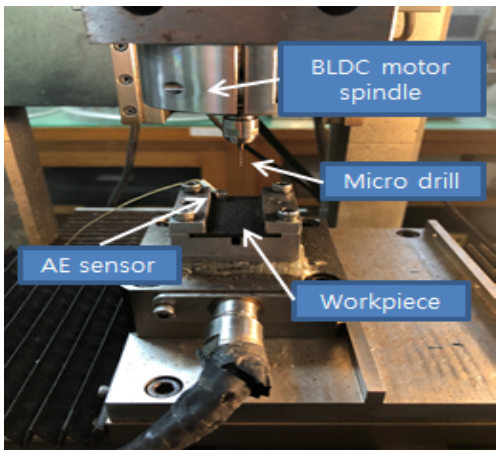


Fig. 1 Experimental setup

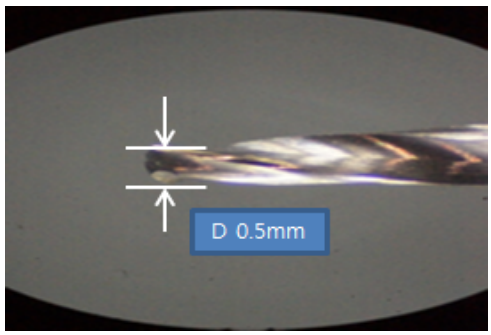


Fig. 2 CCD image of micro drill

Table 2 Mechanical property of CFRP

Tensile	Strength (MPa)	2,030	ASTM D3039
	Modulus (GPa)	113	
Flexural	Strength (MPa)	1,373	ASTM D790
	Modulus (GPa)	83	

생성에 따른 영향을 받지 않고 정확한 신호획득을 위해 샘플링률을 1,000 kHz로 정하였고, 절삭력신호의 샘플링률은 51,200 Hz로 설정하였다. 신호획득을 위해 PC용 DAQ board (Type 4472B, NI)를 활용하였으며 데이터 저장 및 신호처리를 위해 LabVIEW (Ver2015, NI)를 이용한 구성 프로그램을 활용하였다.

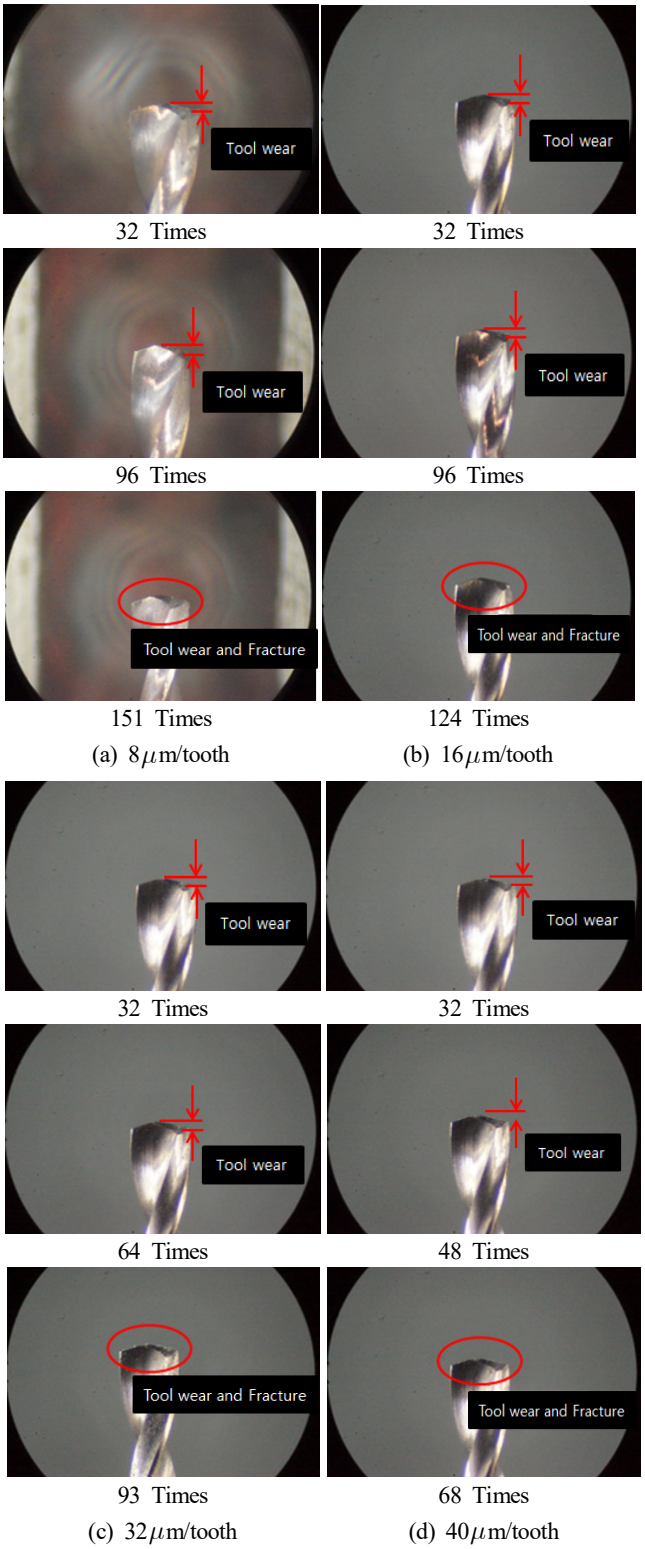


Fig. 3 Tool photograph by CCD camera

2.3 실험결과 및 고찰

2.3.1 가공횟수에 따른 공구상태

Fig. 3에는 가공횟수에 따른 공구상태의 변화를 날당 이송별로 나타내었다. 가공초기부터 모든 날당 이송량에서 마이크로 드릴 공구 플랭크면의 마멸이 진행되었고, 큰 날당 이송량에서 상대적으로 마멸이 더 크게 진행되었으며, 각각의 날당 이송량에서 절삭력이 급격히 증가하는 구간에서 마멸이 크게 진행되었다. 날당 이송량이 클 수록 공구의 마멸이 급속히 증가하는 경향을 확인하였다. 큰 날당 이송량가공에서는 가공중반부 급격한 드릴마멸이 발생하였으나 진전이 크지 않아 상당시간 안정된 가공이 진행되는 것을 보였다.

2.3.2 RMS 절삭력신호 특성

가공횟수에 따른 RMS (root mean square) 절삭력 변화를 이송량별로 Fig. 4에 나타내었다. 작은 날당 이송량에서 절삭력의 증가 폭이 낮게 나타났으며, 큰 날당 이송량에서는 절삭력의 증가 폭이 크게 나타났다. 가공 초반에 공구가 급격하게 마멸되는 시점에서 RMS 절삭력 신호가 크게 상승하는 것은 공구마멸이 급격히 진행되어 소재와 공구간의 진동이 증가한 것으로 사료된다. 가공 후반부로 갈수록 일정구간에서 RMS 절삭력 증가가 둔해지는 현상은 공구의 마멸로 인한 일부 칩핑이 발생하여 드릴경(drill diameter)이 감소하여 가공부하가 크게 증가하지 않은 것에 기인한 것으로 파악된다. 공구상태와 상관관계를 평가해 볼 때, 날당 이송량이 작은 조건(8, 16 μm/tooth)서는 RMS 절삭력신호 특성과 공구의 마멸과의 상관성이 약하고, 날당이송량이 상대적으로 큰 가공조건(32, 40 μm/tooth)에서 RMS 절삭력신호 특성과 공구마멸과의 상관성이 큰 것을 알 수 있다. 이는 금속재료의 가공현

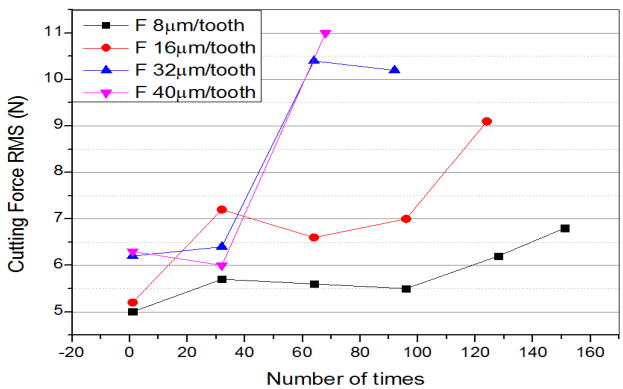


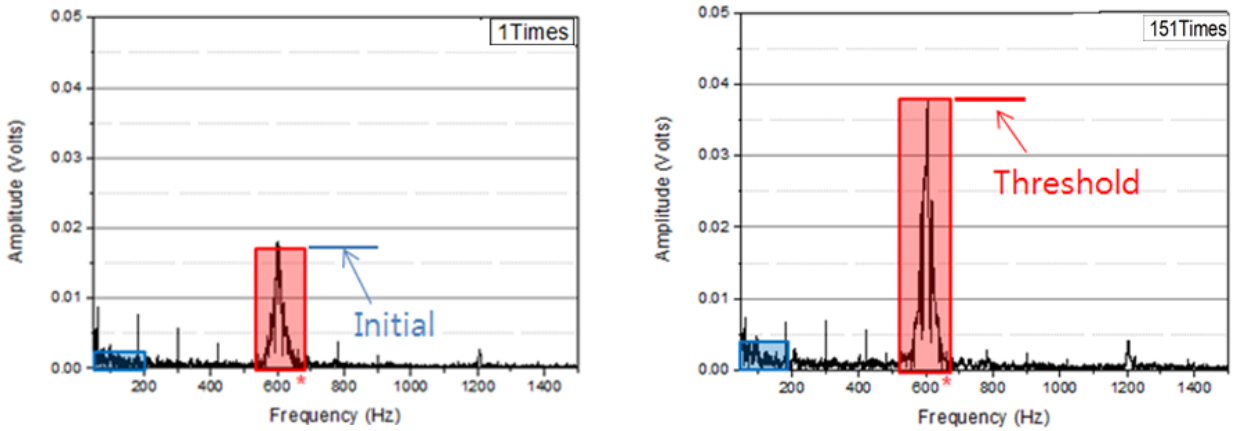
Fig. 4 Resultant cutting force RMS

상과 다르게 CFRP 가공에서는 미세 층간 박리현상에 의해 절삭이 수행되어 날당 이송량이 클 때에는 상대적으로 더 급속히 진행하여 드릴공구마멸에 크게 영향을 주게 되어 나타난 것으로 평가된다.

2.3.3 절삭력 FFT신호 특성

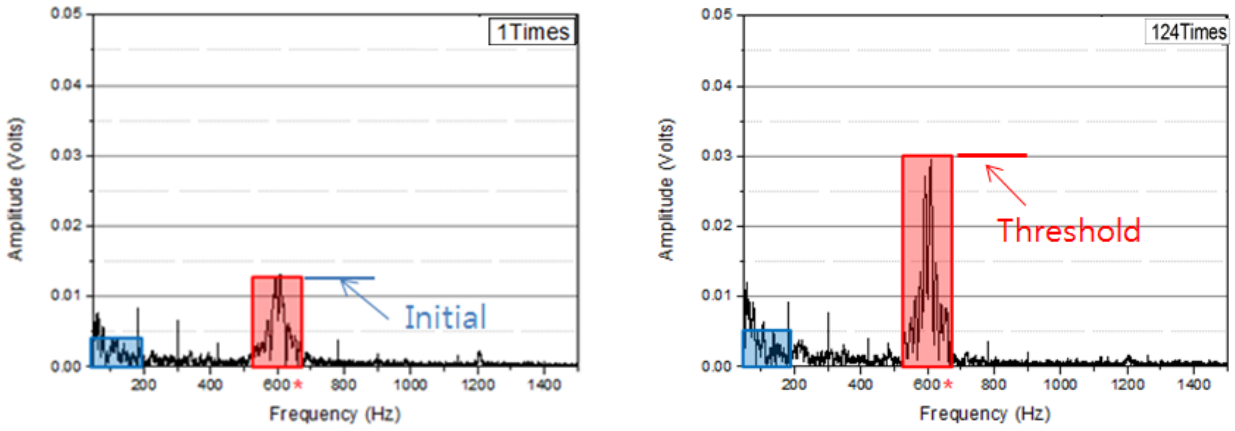
가공시 획득한 절삭력신호를 주파수 영역으로 변환한 FFT (fast fourier transform)그래프를 날당 이송별로 Fig. 5에 나타내었다. 주축회전에 의한 가공주파수(tool passing frequency, TPF)에서 주파수 특성이 특이하게 나타나고 있는데, TPF은 주축회전수 rpm와 사용한 드릴날 수 Zn에 의해 결정된다. 즉, TPF = 18,000 (rpm) × 2(Zn)/60(s) = 600 Hz가 된다. 가공초기에서는 모든 주파수 영역에서 절삭력 진폭의 변화가 미미하였고, 가공중반부 이후로 200 Hz 미만의 주파수 영역과 가공주파수 TPF 근방대역의 절삭력 진폭값이 상승해 가는 것을 보인다. 드릴작업중 공구마멸이 진행할 때 이들 값이 증가해 가며, 공구파손이 이루어지는 근방에서 급격히 변화하는 것을 알 수 있다. 공구상태와 상관관계를 평가해 볼 때, 날당 이송량이 작은 조건(8, 16 μm/tooth)에서는 가공주파수 TPN 근방대역의 진폭값과 공구의 마멸과의 상관계가 큰 것을 알 수 있다. 날당 이송량이 상대적으로 큰 가공조건(32, 40 μm/tooth)에서는 이들 특성과는 달리 200 Hz 미만의 주파수 영역의 진폭값과 공구마멸 및 파손과의 상관성이 큰 것을 알 수 있다. 날당 이송량이 큰 가공에서 가공주파수 근방대역의 절삭력 진폭값이 날당 이송량이 작은 가공에서보다 낮아지는 현상을 보이고 있다. 이는 날당 이송량이 클 경우 일정 깊이의 드릴공정 동안 가공주파수영역 진동 유지시간이 짧으므로 드릴마멸이 일정량 진행되어 있더라도 짧은 순간에 이송이 이루어져서 이송량이 작은 가공보다 상대적으로 안정화되어 나타난 것으로 사료된다.

따라서, 작은 이송량 드릴작업에서는 가공주파수 근방대역의



< 1Times > < 151Times >

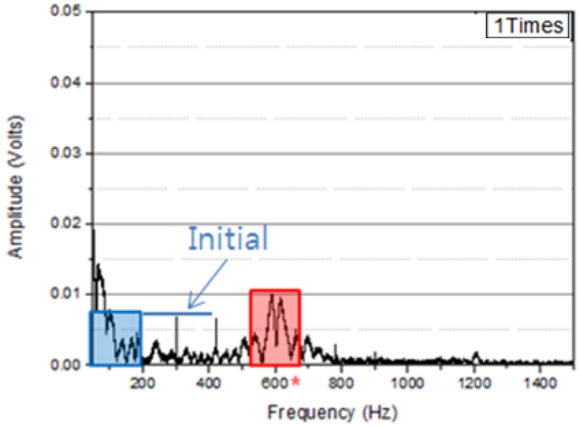
(a) FFT results of Cutting Force (8 μm/tooth)



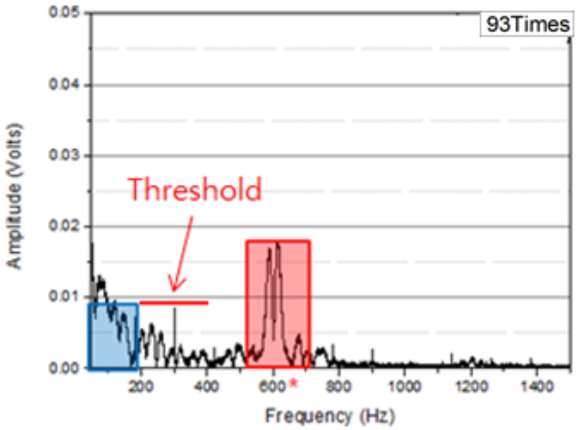
< 1Times > < 124Times >

(b) FFT results of Cutting Force (16 μm/tooth)

Fig. 5 FFT results of cutting force

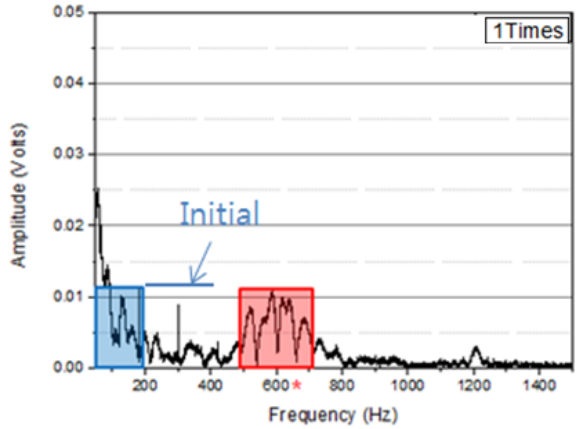


< 1Times >

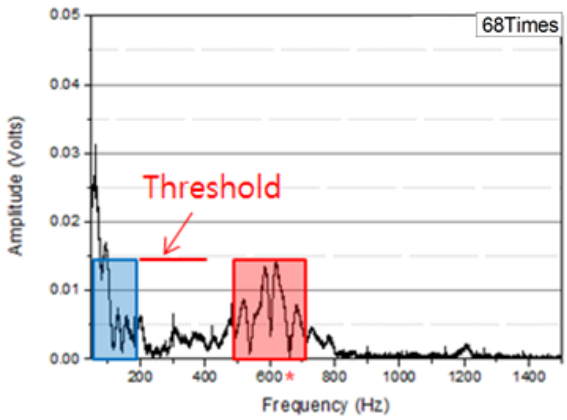


< 93Times >

(c) FFT results of Cutting Force (32 μm/tooth)



< 1Times >



< 68Times >

(d) FFT results of Cutting Force (40 μm/tooth)

Fig. 5 FFT results of cutting force (continued)

절삭력 진폭값이 드릴마멸과 상관관계가 큰 것을 알 수 있고, 날당 이송량이 상대적으로 큰 드릴작업에서는 가공주파수 TPF 보다 상당히 낮은 200 Hz 미만의 주파수 대역의 진폭값이 드릴마멸과의 상관관계가 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5에 절삭초기 주파수대역의 절삭력진폭 초기값(initial)이 드릴공구의 마멸이 진행되어 파단 직전시에 특정 문턱값(threshold)에 도달한 것을 나타내고 있다.

2.3.4 AE RMS 특성

탄성파절삭에너지(elastic cutting energy)와 관련된 신호특성으로 Fig. 6에 가공횟수에 따른 AE RMS 신호의 변화를 나타내었다. 이송량 16 μm/tooth에서 AE RMS 신호가 최대로 나타났으며, 대체적으로 날당 이송량이 클수록 AE RMS신호가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 즉, 이송량 변화에 따른 AE RMS 신호특성은 절삭력 신호특성의 경향과는 다르게 나타남을 알 수 있다.

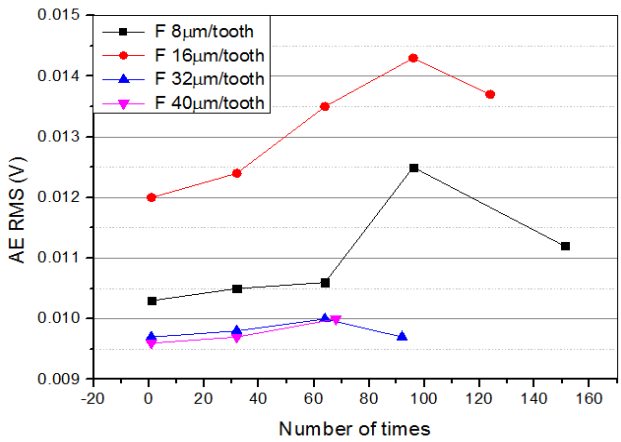


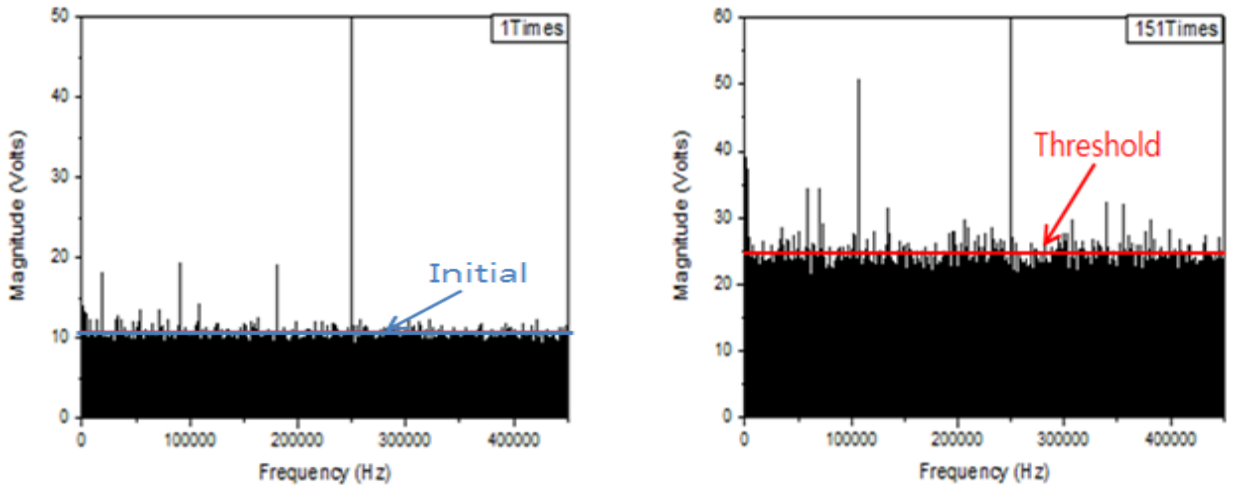
Fig. 6 AE RMS

AE 신호특성을 살펴볼 때, 가공초반부부터 공구의 마멸까지 AE RMS신호가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 가공중반부에서 높은 AE RMS 신호가 나타나게 되는데, 이는 드릴의 초기마멸로

인해 CFRP의 층간 박리 및 파단이 발생하는 것에 따른 특성으로 보인다. 마이크로드릴링 가공에서 AE RMS 신호와 공구 마멸량과의 상관성은 RMS 절삭력 신호특성과 비교할 때 비교적 낮은 것을 알 수 있다.

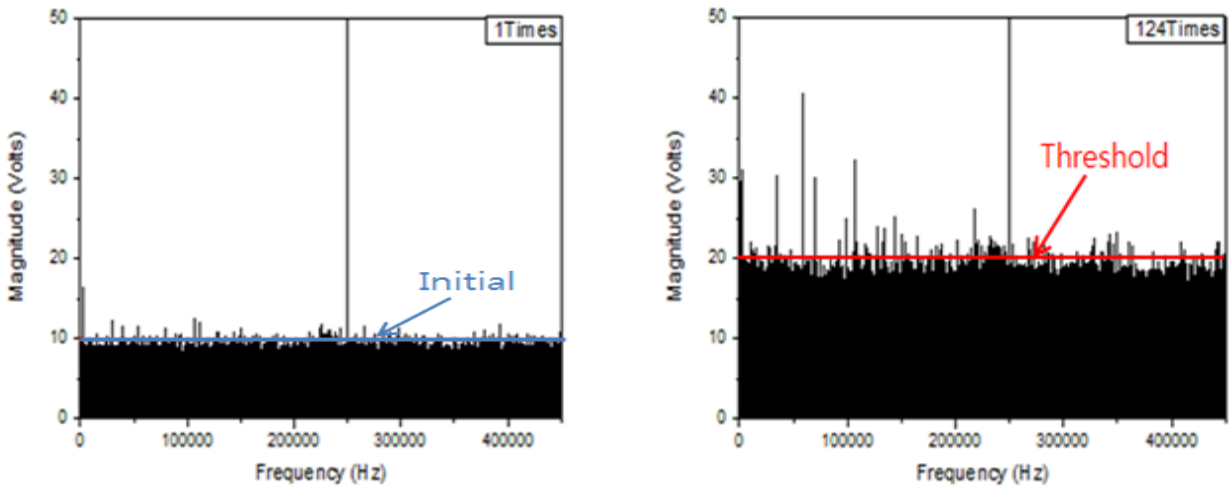
2.3.5 AE FFT신호 특성

가공시 획득한 AE신호를 주파수 영역으로 변환한 FFT그래프를 날당 이송별로 Fig. 7에 나타내었다. AE 신호의 주파수 특성은 백색잡음(white noise)형태와 같이 전 대역에 걸쳐서 유사한 진폭특성을 보이고 있으며 날당 이송량 변화에서도 유사한 특성을 보이고 있다. 공구의 마멸이 진행될수록 진폭이 커지는 경향을 보이며, 이는 절삭저항이 증가하여 층간박리 현상 발생 및 홀 내부의 파단이 나타난 것에 기인한 것으로 보인다. 날당 이송량이 낮은 구간에서는 절삭이 진행되어 갈 때 진폭의 변화가 크게 나타났으며, 날당 이송량이 높은 구간에서는 진폭의 변화가 미미하게 발생하였다. 이는 드릴작업시 이송량이 클 때는 일정 깊이의 드릴공정동안 진동 유지시간이 짧으므로 밀링공정과 달리 드릴마멸이 진행되더라고 짧은 순간에 드릴작업이 수행되기 때문이다. Fig. 7에 보이는 AE 신호의 진폭 평균치변화는 이송량이 작은 조건에서는 드릴마멸이 증가해 갈 때 절삭 초기값(initial)에 비해서 그 변화가 급격히 증가함을 보이므로, 공구 마멸기준(wear criterion)에 따른 적정 문턱값(threshold)을 설정하게 되면 드릴상태 감시에 적용할 수 있게 된다. 따라서 이송량이 작은 조건(8, 16 μm/tooth)에서는 AE FFT신호의 주파수영역 진폭값이 가공상태 감시에 유효하다고 판단되며, 날당 이송량이 큰 조건(32, 40 μm/tooth)에서는 이들의 상관관계가 낮은 것을 보이고 있다.



< 1Times > < 151Times >

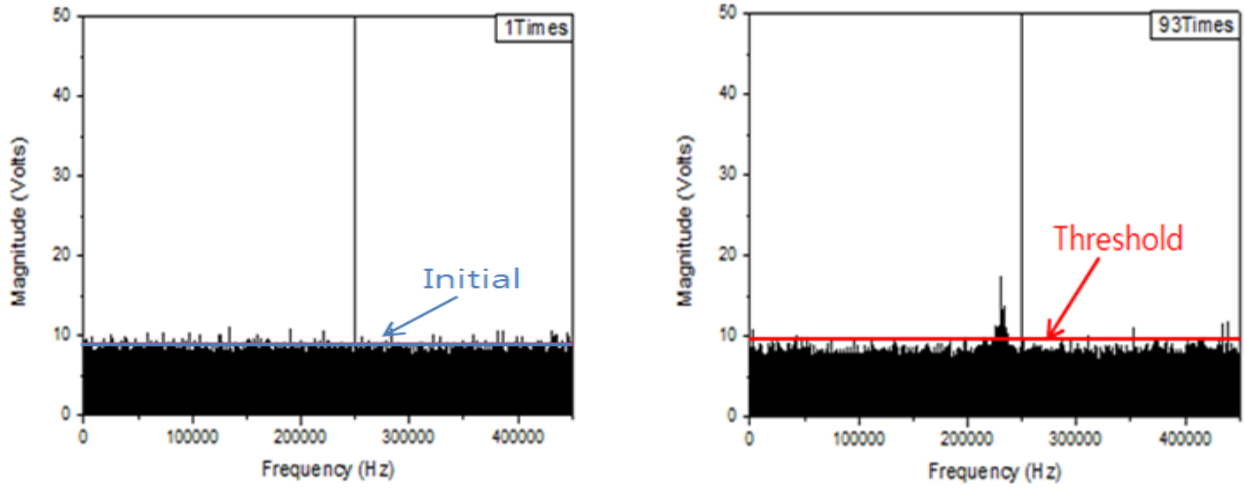
(a) FFT results of AE (8 μm/tooth)



< 1Times > < 124Times >

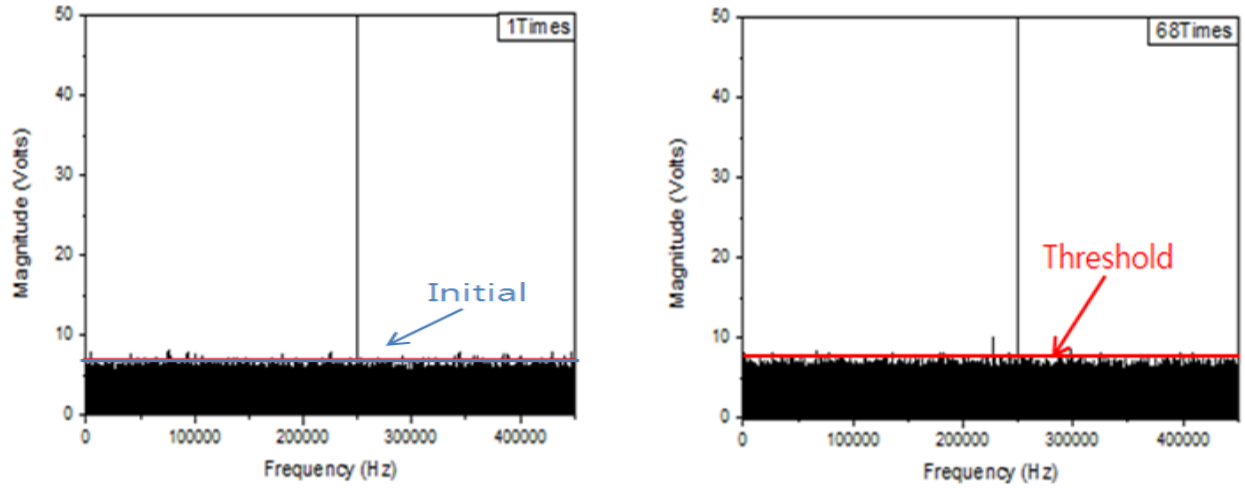
(b) FFT results of AE (16 μm/tooth)

Fig. 7 FFT results of AE



< 1Times > < 93Times >

(c) FFT results of AE (32 μm/tooth)



< 1Times > < 68Times >

(d) FFT results of AE (40 μm/tooth)

Fig. 7 FFT results of AE (continued)

3. 결 론

본 연구에서는 마이크로 드릴을 이용한 CFRP 소재의 드릴링실험을 통해 절삭신호 특성 즉, 절삭력신호와 AE신호의 특성이 공구상태변화와 어떠한 상관관계가 있는지를 분석하였으며, 이를 바탕으로 다음의 결론을 얻었다.

절삭력신호와 공구마멸량 특성에서는 RMS 절삭력과 주파수 대역의 절삭력 진폭값이 드릴마멸량의 변화경향 및 파손과 상관관계가 있음을 확인하였다. AE 신호와 공구마멸량 특성에서는 이송량이 작은 드릴작업에서 주파수영역의 AE 신호 진폭값이 드릴마멸과의 상관관계가 큰 것을 알 수 있었다.

따라서, CFRP 소재의 마이크로 드릴링가공시 이송량이 작은 경우(8, 16 μm/tooth)에는 절삭주파수 대역의 절삭력 진폭의 문턱값(threshold), 이송량이 큰 경우(32, 40 μm/tooth)에는 200 Hz 미만 주파수 대역의 문턱값을 통해 공구마멸을 모니터링할 수 있고, 주파수영역의 AE 신호진폭의 문턱값을 병행 적용하면 효과적인 공구상태감시가 가능한 것을 확인하였다.

이 결과를 이용하여 공구상태감시 프로그램을 구성하게 되면, 일반 공업용 금속재료와 다른 가공특성을 나타내는 CFRP 마이크로 드릴가공에서 생산성과 경제성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2015R1D1A1A01059461).

References

[1] Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J. R. S., Tan, D. C. G., 1999, Machinability Study of Carbon Fiber Reinforced Composite, Journal of Materials Processing Technology 89:90 292-297.

[2] Yoon, Y. S., Kwon, O. H., 2000, The Application of AE for a Drilling Process Monitoring in [0/90 °]s CFRP Composites, Journal of Mechanical Science and Technology A, 24:6 1491-1498.

[3] Kim, H. C., Kim, K. S., 1998, AE(Acoustic Emission) Signal Characteristics of Drilling for CFRP Composite Materials, Journal of Korean Institute of Industrial Educators, 23:2 159-325.

[4] Wu, X., Li, L., He, N., Hao, X., 2016, Experimental Study on Micro Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics, Materials Science Forum, 836-837 185-190.

[5] Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E., Girot, F., 2010, Modeling and Tool Wear in Drilling of CFRP, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 50:2 204-213.

[6] Kondo, E., Shimana, K., 2012, Monitoring of Prefailure Phase and Detection of Tool Breakage in Micro-Drilling Operations, Procedia CIRP, 1 581-586.