

Inconel 718의 평엔드밀링가공에서 가공성평가에 관한 연구

정지훈⁺, 권해웅⁺⁺, 구준영⁺, 김평호⁺, 김정석^{*}

(Manuscript received: Oct, 29, 2012 / Revised: Dec, 4, 2012 / Accepted: Dec, 7, 2012)

A Study on Machinability Evaluation of Inconel 718 in Flat End Milling

Jihoon Jeong⁺, Haewoong Kwon⁺⁺, Joonyoung Koo⁺, Pyeongho Kim⁺, Jeongsuk Kim^{*}

Abstract

Inconel 718 alloy has been widely used in the aerospace, heavy industry and electronic industry. However, the machinability of this alloy is very poor, which is attributed to their inherent high strength that is maintained at elevated temperatures. The tool life is dominant problem in machining difficult-to-cut materials, so it is necessary to select the efficient cutting conditions for the improvement of tool life. In this study, the cutting force, tool wear and surface roughness are investigated in end milling machining under various cutting conditions. By this experiment, the efficient machining condition of this alloy is suggested to adopt in various industries.

Key Words : Inconel 718(인코넬 718), Flat endmilling(평엔드밀링), Tool life(공구수명)

1. 서론

최근 항공기, 방위, 에너지, 전자산업 등의 발전과 더불어 합금 특히 초내열합금(Super Heat Resistant Alloy) 사용이 급증하고 있는데, 이들 소재는 가벼우면서도 단단하고 내열성, 내마모성 등이 뛰어나다. 그러나 Ni과 Co를 함유하여 난삭성 특성을 나타내기 때문에 고효율·고품위 가공을 위한 최적 가공조건과 가공환경 선정에 대한 연구가 필요하다^(1~3).

난삭성 소재가 가공성이 떨어지는 것은 가공시 공구와 가공재료 사이의 화학적 반응으로 인한 응착이 발생하여 과도한 칩발생, 공구수명 단축, 가공면 품질등을 악화시키기 때문이다. 최근 절삭가공은 스핀들 고속화와 공구재료와 코팅 기술의 발전 등으로 인하여 고속절삭이 가능하게 되었으며, 난삭재의 가공이나 초고속, 초정밀가공과 같은 특수한 가공기술도 개발되

고 있다. 그러나 절삭속도가 증가할수록 공구의 수명은 상대적으로 감소하며, 특히 고속가공에서는 공구수명의 지배적 요인이 되는 절삭온도가 증가하여 공구수명을 급격하게 감소시킨다. 절삭온도 상승은 공구의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 피삭재 표면에 가공변질층이나 잔류응력등을 발생시켜서 제품의 품질을 악화시킨다. 선삭가공에 대한 구체적인 절삭조건은 많은 논문과 연구로 어느 정도 가공자료가 만들어져 있으나, 밀링가공시 솔리드 타입의 엔드밀가공에서 적용할 만한 절삭데이터는 아직 정립이 되지 않고 현장에서 시행착오에 의해 가공이 수행되고 있는 실정이므로 난삭재의 밀링가공이나 고속가공에 따른 절삭데이터의 확보가 필수적이라 할 수 있다^(4~6). 본 논문에서는 Inconel 718의 엔드밀 가공시 가공조건과 환경에 따른 공구마멸과 절삭력, 표면거칠기와 같은 절삭 특성을 평가하여 가공 현장에 적용할 가공 조건을 검토하고 정립하고자 한다.

⁺ 부산대학교 기계공학부 대학원

⁺⁺ ㈜화천기공

^{*} 교신저자, 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC/NSDM)

주소: 609-735 부산광역시 장전동 산30

✉ Corresponding Author E-mail: juskim@pusan.ac.kr

2. Inconel 718의 가공성평가

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있으며, 본 연구에서는 20,000rpm급 3축 머시닝 센터(Makino-V55)를 이용하여 가공실험을 수행하였다. 실험에 사용된 엔드밀은 초경(Tungsten Carbide: WC)재질로 TiCN계열의 코팅을 적용하고 4날을 갖고, 헬릭스 각은 40°이다. 바이스에 고정된 공작물의 반복가공을 통해 마멸된 공구형상변화는 CCD카메라(JAI-CVS3200)를 이용하여 관찰하였다. CCD카메라는 관찰시 발생할 수 있는 런아웃과 측정오차 등을 줄이기 위하여 머시닝센터 내부에 고정하여 공구가 스핀들에 장착된 상태에서 관찰이 가능하게 하였다.

절삭력 측정은 공구동력계(Kistler, 9257B)를 이용하여 공작물과 같은 형상의 축소된 시편을 만든 후 공구동력계위에 설치하고 절삭력 시편을 가공하면서 X, Y, Z축으로 발생하는 주분력, 배분력, 이송분력을 증폭기를 통하여 증폭시킨 후 컴퓨터에 저장하였다.

공구수명기준은 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 예비 가공실험에

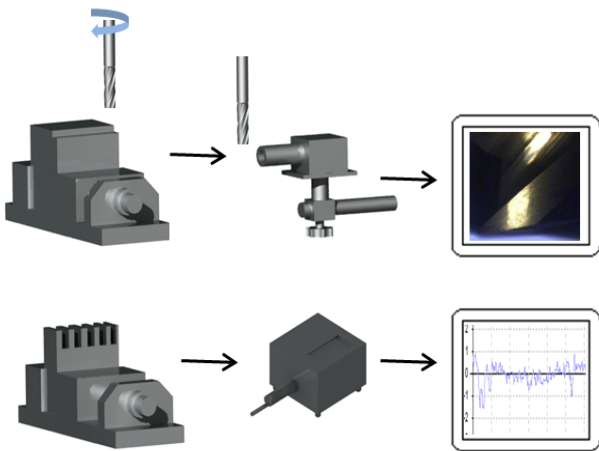
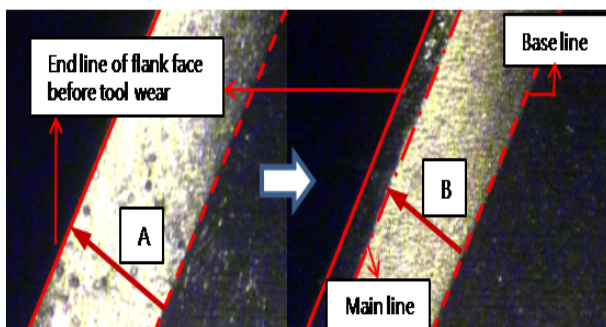


Fig. 1 Experimental set-up



Flank wear width : A-B=0.2mm

Fig. 2 Measurement method of tool wear

서 공구 마멸이 0.3mm근방에서 급격히 증가하는 특성이 있는 것을 파악하고 안정적인 마멸이 끝나는 시점의 마멸폭이 0.2mm (A-B)에 도달하였을 때로 설정하여 공구수명으로 하였다.

표면거칠기 측정은 머시닝센터 테이블위에 측정을 위한 시편을 준비하여 가공실험을 수행하였다. 가공시편의 면을 접촉식 표면거칠기 측정기(Taylor Hopson-Surtronic 3+)를 이용하여 측정거리 2.5mm에서 표면거칠기 값을 측정하였다.

실험에 사용된 절삭유(극동유화 New S 1A, KS W1종)는 수용성 절삭유(10%, pH=9)로서 유량 20l/min의 값으로 분사하면서 절삭실험을 수행하였다. Table 1에 실험조건 및 사용장비를 나타내었으며 Table 2는 볼엔드밀 가공실험의 조건들을 나타내었다.

Table 1 Experimental condition for machining

Machining Center	MAKINO V-55
Tool	φ8mm, WC 4-flute Helix Angle 40°
Workpiece	Inconel 718
Cutting Fluid	Dry, Oil-mist, wet
Tool Overhang(mm)	24mm
Spindle Revolution, rpm	2,000, 3,000, 4,000rpm
Feed/tooth(mm), F_t	0.1mm, 0.2mm
Radial Depth of Cut, R_d (mm)	0.1mm
Axial Depth(mm), A_d	5mm

Table 2 Experimental condition for machining

Exp. No.	Spindle speed, rpm	Feed rate, F_t (mm/tooth)	Radial depth of cut, R_d (mm)	Axial depth of cut, A_d (mm)
1	2,000	0.1	0.1	5
2	2,000	0.2	0.1	5
3	2,000	0.1	0.2	5
5	3,000	0.1	0.1	5
6	3,000	0.2	0.1	5
7	3,000	0.1	0.2	5
9	4,000	0.1	0.1	5
10	4,000	0.2	0.1	5
11	4,000	0.1	0.2	5

2.2. 실험결과 및 고찰

2.2.1 가공조건에 따른 절삭력과 공구마멸

Fig. 3은 실험조건 선정을 위한 예비절삭실험의 결과로 반경 절입량 0.1mm, 날당 이송량 0.1mm, 스핀들 회전수가 6,000, 8,000, 10,000rpm일 때 공구의 마멸을 나타내었다. 상대적으로 고속인 6,000rpm이상의 회전에서는 엔드밀의 여유면이 치핑과 같은 이상마멸을 나타내며 공구마멸의 진행이 가공길이에 비해 빠르게 진행된 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 3(c)의 사진에서는 공구의 날뿔이 심하게 마멸되어 없어진 것을 알 수 있다. 절삭시 공구는 칩과 피삭재가 접촉하는 계면사이에는 매우 큰 압력이 작용하기 때문에 마찰과 절삭으로 인한 높은 절삭온도가 발생하는데 절삭유제가 공구-칩, 공구-피삭재의 계면에 효과적으로 도달하지 못함으로써 공구수명에 나쁜 영향을 미치는 것으로 여겨진다. 가공초기 공구에 생기는 이러한 치핑은 가공시 심한 소음과 진동을 발생시키며, 공구수명을 감소시키는 원인 중에 하나이다. 따라서 이러한 트러블을 피하기 위하여 회전수 선정은 5,000rpm이하에서 실험하였다.

Fig. 4는 Table 2의 조건에 따라 가공후의 공구의 마멸된 사진을 나타내었다. 이전 예비실험과 마찬가지로 저속에서 공구 여유면의 안정된 마찰마멸을 관찰할 수 있으며 스핀들회전수

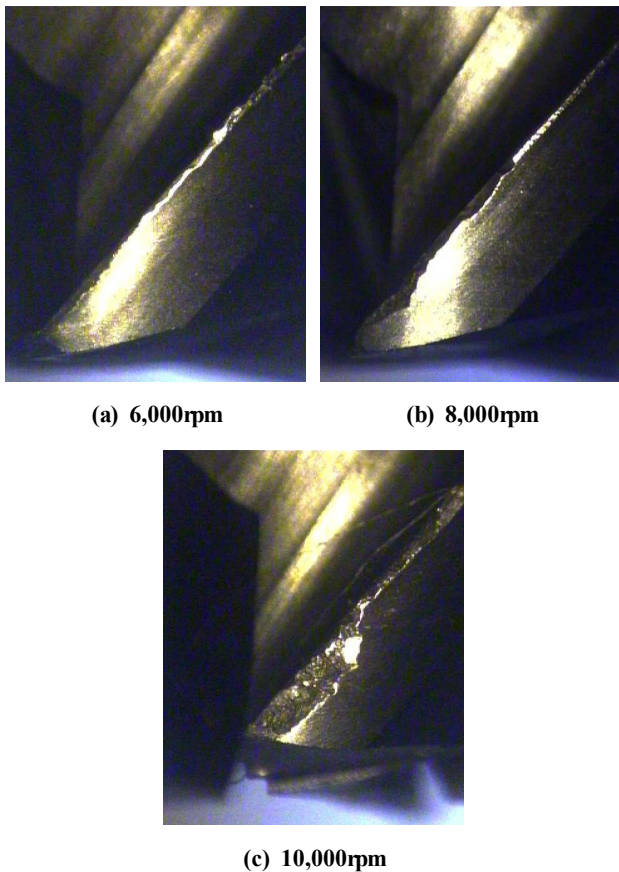


Fig. 3 Photos of tool wear

가 높아질수록 마이크로 치핑 등의 이상 마멸을 볼 수 있다. 또한 반경 절입량이 0.2mm일 때는 모든 조건에서 공구의 마멸이 심하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 가공길이에 따른 공구마멸의 경향을 스핀들 회전수 별로 나타내었다. 반경 절입량이 0.2mm일 때가 모든 조건에서 가공길이가 가장 짧았으며 공구마멸의 경향이 급속해지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 공구의 인성이 균질하다고 볼 때, 반경방향의 절입량 증가가 절삭력 증가에 더 민감하게 작용하여 공구마멸과 공구손상에 영향을 준 것으로 평가된다. 반경 절입량이 0.1mm이고 날당 절입량이 0.2mm일 때 가공길이가 가장 길며 공구마멸의 속도가 비교적 안정적으로 나타난다. 이는 날당 절입량(이송량) 증가는 치수효과(Size Effect)에 영향을 받아 절삭력 증가가 둔화되고 칩 흐름이 원활하게 되는 효과가 있어 공구마멸이 상대적으로 작아지게 되는 것으로 평가된다. 이상의 결과로부터 Inconel 718 가공시 3,000rpm에서 날당 이송량을 증가시켜 가공하는 것이 반경 절입량을 증가시켜 가공하는 것보다 동일 소재 제거율(Material Removal Rate : MRR) 조건에서 유리함을 알 수 있다.


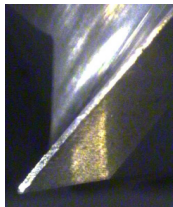

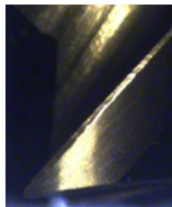
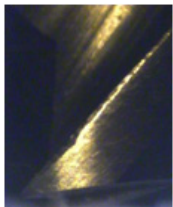

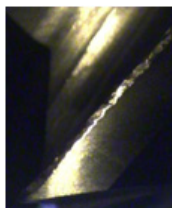
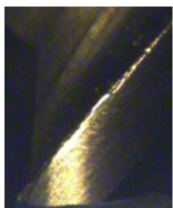

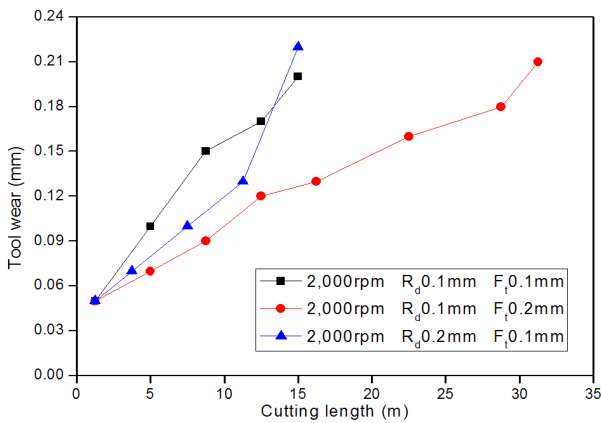
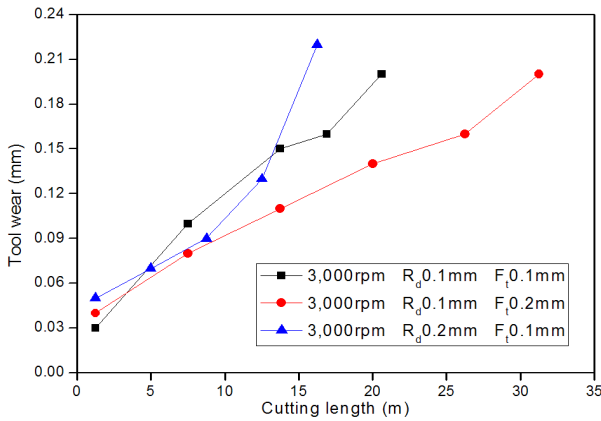
Spindle rpm	Radial depth of cut, R_d 0.1(mm) Feed per tooth, F_t 0.1(mm)	Radial depth of cut, R_d 0.1(mm) Feed per tooth, F_t 0.2(mm)	Radial depth of cut, R_d 0.2(mm) Feed per tooth, F_t 0.1(mm)
(a) 2,000	 15m	 31m	 15m
(b) 3,000	 20m	 31m	 16m
(c) 4,000	 25m	 28m	 15m

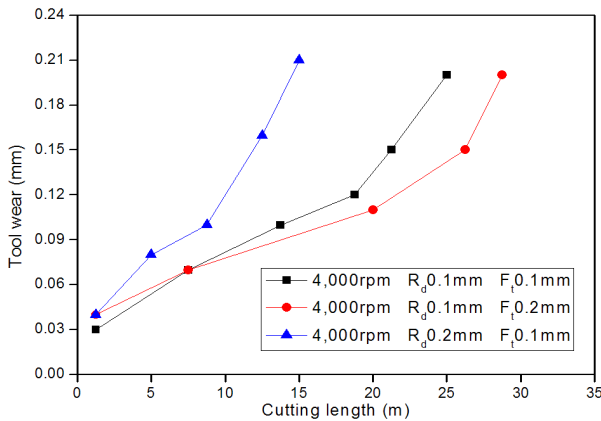
Fig. 4 Photos of tool wear according to cutting condition



(a) 2,000rpm



(b) 3,000rpm



(c) 4,000rpm

Fig. 5 Tool wear curves according to cutting length

Fig. 6에 보이는 절삭력은 절삭시 발생하는 3분력(주분력, 배분력, 이송분력) 중 절삭에 가장 영향이 큰 주분력의 크기를 나타내고 있다. 엔드밀 가공과 같은 단속절삭의 경우 전체절삭력의 평균값은 비절삭시간의 영향으로 실제 평균 절삭력보다 작아지게 되므로, 정확한 절삭력을 구하기 위해 기준값(Threshold)

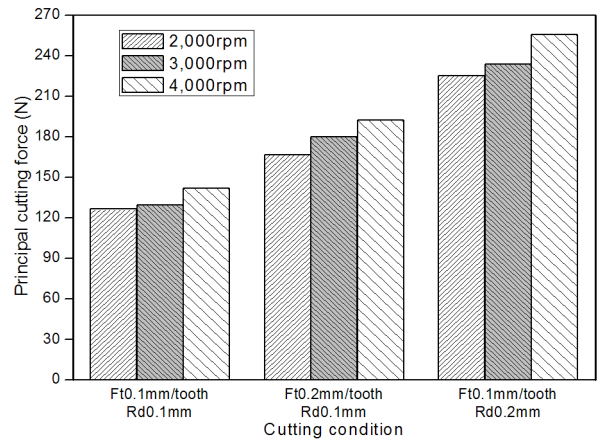


Fig. 6 Principal cutting force vs. Cutting condition

을 정하고 그 이상의 값들만으로 다시 평균값을 구해 유효 절삭력으로 측정하였다.

절삭력 특성은 가공거리가 가장 짧은 조건인 반경 절입량 0.2mm와 날당 절입량 0.1mm에서는 각각 225, 233, 255N의 크기로 큰 절삭력을 보이고, 반경 절입량과 날당 절입량이 모두 0.1mm일 때는 126, 129, 142N으로 절삭력이 가장 낮게 나타났다. 그리고 절삭거리의 경향과 유사하게 날당 이송량의 증가 시 절삭력의 크기변화는 반경 절입량의 증가시의 절삭력 크기 변화보다 크지 않았으며, 또한 이때 공구손상도 크게 증가하지 않는 특성을 보이고 있다.

2.2.2 가공조건에 따른 표면 거칠기

가공조건에 따른 표면 거칠기 특성은 Fig. 7에 보이는 바와 같다. 회전속도가 증가함에 따라 표면 거칠기가 향상되는 특성을 보이고 있는데, 이는 회전속도 증가는 절삭날이 받는 회전당 이송량의 감소효과와 칩 흐름의 개선으로 기인한 것으로 보인다. 또한, 표면 거칠기는 절삭중 기하학적인 공구궤적과 관련되는데, 이송량에 민감하게 영향을 받게 된다. 이러한 이유로 날당 이송량 0.2mm일 때 공구마멸은 0.1mm때보다 작으나 기하학적 특성때문에 0.1mm때보다 표면 거칠기가 크게 나타남을 알 수 있다.

공구마멸에 따른 표면거칠기 특성을 파악하기 위한 절삭실험을 수행한 결과로서, Fig. 8은 4,000rpm, 반경 절입량 0.1mm, 날당 이송량 0.2mm의 조건에서 공구마멸전과 공구마멸후의 가공면 표면거칠기 프로파일(Profile)을 나타내었다. 마멸전의 중심선 평균거칠기(Ra) 값은 1.58 μ m이며, 마멸후의 값은 1.74 μ m이다. Ra 값의 차이에 비해 표면거칠기의 프로파일 형상은 거칠게 나온 것을 알 수 있다. 이 경향은 모든 절삭실험에서 동일하게 나타났으며, 이는 공구마멸이 가공면의 형상에 영향이 있음을 알 수 있다.

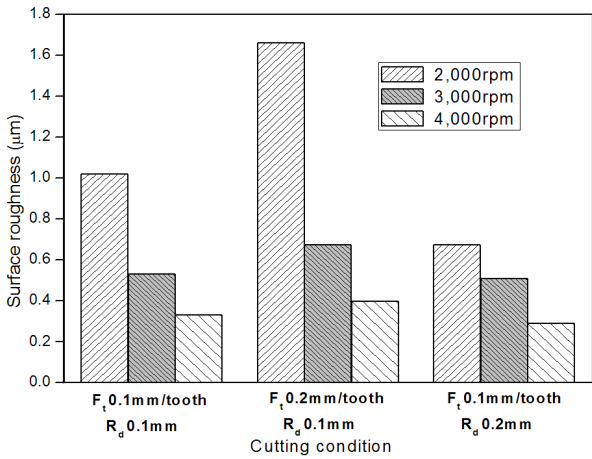


Fig. 7 Surface roughness according to cutting condition

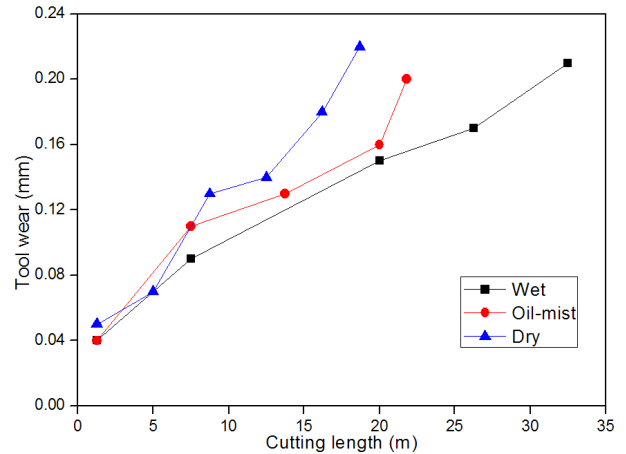
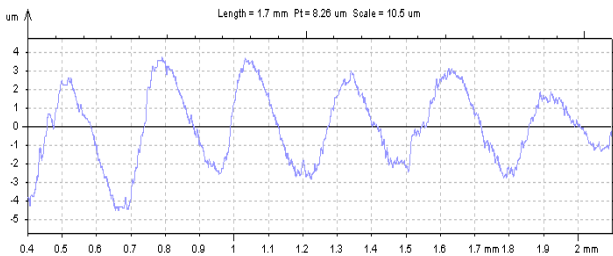
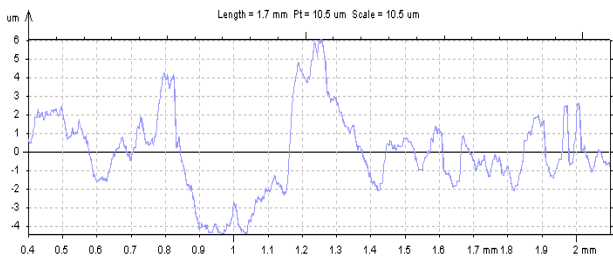


Fig. 9 Tool wear according to different cutting environments



(a) New tool



(b) Worn tool

Fig. 8 Surface roughness profile

2.2.3 가공환경에 따른 공구마멸

Fig. 9는 절삭유, 오일미스트, 건식의 가공환경에 따른 절삭 거리를 나타내었다. 오일미스트(UNIST UNI-MAX, MIST OIL 210)는 5bar의 압력으로 직경 1.5mm의 노즐을 통하여 분사하였다. 압축공기를 이용하여 오일을 미립자로 만들어 가공점에 분사하였다. 압축된 공기는 벤트리(Venturi)를 통과할 때 속도가 높아지면서 동시에 압력이 낮아진다. 압력이 낮아지는 지점에서 오일 흡입이 발생되며, 속도가 빠른 공기와 혼합된 오일은 배플판(Baffle plate)을 통과하면서 오일 미스트가 생성된다. 가공 조건은 3,000rpm, 반경 절입량 0.05mm와 날당 절입량 0.1mm의 조건에서 수행하였다.

3. 결론

본 연구에서는 Inconel 718의 평엔드밀을 이용한 엔드밀 가공에서 가공조건에 따른 공구마멸과 절삭력, 표면거칠기 등의 가공성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭력특성과 공구마멸 거동이 상관관계가 있음을 확인하였고, 동일 소재제거율(MRR)로 가공하고자 할 때, 절삭력에 민감한 반경 절입량의 증가보다 상대적으로 덜 민감한 날당 이송량을 증가하여 가공하는 것이 공구수명 측면에서 유리하다.
- (2) 표면거칠기 값은 절삭속도가 증가할수록 향상되는 특성을 나타내었다.
- (3) 플랫 엔드밀 가공에서는 절삭유 사용이 오일미스트 사용시보다 더 효과적임을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Choudhury, I. A., and El-Baradie, M. A., 1998, "Machinability of Nickel-base Super Alloys: a General Review," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77, No. 1~3 pp. 278~284.
- (2) Balazinski, M., Songmene, V., and Kops, L., 1995, "Improvement of Tool Life through Variable Feed Milling of Inconel 600," *CIRP Annals*, Vol. 44, No. 1, pp. 55~58

- (3) Kim, K. W., Choi, H. M., Chae, W. S., and Kim, D. H., 2001, "Performance of PVD and CVD Coated Carbide Tools in Machining Inconel 718," *Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 41~48.
- (4) Kwon, H. W., Kim, J. S., Kang, I. S., and Kim, K. T., 2010, "Machining Characteristics Evaluation of Super Heat-resistant Alloy(Inconel 718) according to Cutting Conditions in High Speed Ball End-milling," *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 1, pp. 1~6.
- (5) Jun, T. S., Kim, N. K., and Chung, S. C., 1999, "Cutting Force Analysis in End Milling Process for High-speed Machining of Difficult-to-Cut Materials," *Proc. of KSMTE*, pp. 359~364.
- (6) Sharman, T. A., Dewes R. C., and Aspinwall, D. K., 2001, "Tool Life when High Speed Ball Nose End Milling Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, No. 1~3, pp. 29~35.