

간접냉각시스템을 이용한 인코넬 718소재의 가공성 평가

김진형^{*,**}, 이어울^{**}, 박성환^{**}, 이동진^{**}, 강명창^{**,#}

^{*}와이지원(YG-1), ^{**}부산대학교 공과대학 융합학부

Machinability Evaluation of Inconel 718 Material Using Indirect Cooling System

Jin-Hyeong Kim^{*,**}, Yeo-Wool Lee^{**}, Seong-Hwan Park^{**}, Dong-Jin Lee^{**}, Myungchang Kang^{**,#}

^{*}YG-1 Co., Ltd., Incheon, 21300, Korea

^{**}Graduate school of convergence science, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

(Received 15 January 2019; received in revised form 8 February 2019; accepted 12 February 2019)

ABSTRACT

This paper presents a machinability evaluation of Inconel 718 material when using a new uniform-temperature indirect cooling method that incorporates constant-pressure liquid nitrogen (LN2). The flank wear of a TiAlN coated tool used with this indirect cooling system was much lower than that of the tool used with dry machining under all machining conditions. Also, the surface roughness resulting from machining with this indirect method was far less than that of a dry machined surface after the same cutting time. Reduced heat generation and uniform temperature in turning operations play important roles in tool life and surface quality.

Keywords : Turning(선삭), Indirect Cooling(간접냉각), Inconel 718(인코넬 718), Tool Wear(공구마멸), Surface Roughness(표면조도)

1. 서 론

초내열합금인 인코넬 718 소재는 고강도, 내산화성, 내부식성, 내균열성, 내열성, 내충격성과 고온강도가 우수한 특성으로 항공우주산업과 해양산업, 원자력발전 등의 첨단산업에서 엔진 및 터빈의 부품소재로 자리잡고 있다^[1]. 그러나 이 소재는 공구수명 단축과 절삭성능 및 가공면의 품질이 저하되는 단점으로 인해 대표적 난삭재로 분류된다^[1,2].

인코넬 718소재의 절삭성능을 향상을 위해 습식방식((Cuttingfluid), 극미량 미스트(Minimum quantity

lubrication)^[3,4], 액체질소(Liquid nitrogen) 분사방식을 적용한 극저온가공(Cryogenic machining)에 대한 연구가 진행되고 있다^[5,6], 특히 액체질소를 직접 분사시 과도한 냉각에 의한 피삭재와 칩의 동결현상, 높은 절삭열이 발생하고 있는 가공면에 극저온의 액체질소를 분사함으로써 가공면과 칩의 급냉에 의한 열 경화(Thermal hardening)로 인해 칩브레이킹의 어려움과 공구 인선부의 심한 마멸현상으로 공구수명 문제가 야기되고 있다^[6].

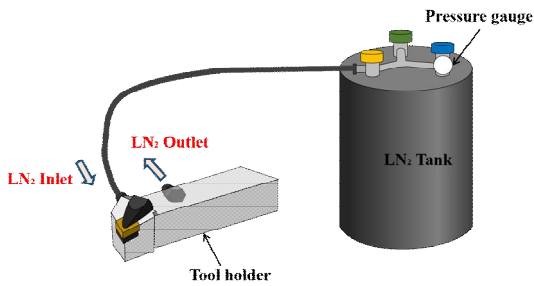
이러한 직접분사방식의 단점을 극복하기 위해 액체질소를 적용한 일정온도 유지방식의 간접냉각방식이 최근 연구되고 있다^[2]. 간접냉각방식은 액체질소가 기화기를 거쳐 공구홀더의 생크부에 유입되는 가스압력과 입구의 직경에 따라 생크 내부에 유동

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

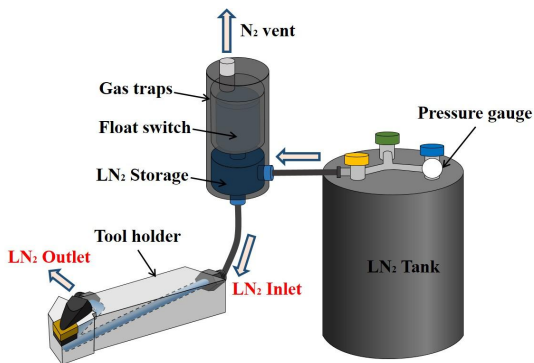
Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-667-5124

하는 액체질소 양이 결정되어 냉각을 행하고, 절삭 공구의 인선부와 피삭재의 가공면 온도에 균일한 효과를 가질 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 선삭용 극저온 간접냉각 시스템(Indirect cooling system using liquid nitrogen)을 새로이 설계하고 제작하였다. 간접방식의 적용은 공구홀더 생크에 설치된 가스 입구를 통해 생크 내부로 유입된 액화질소는 일정한 압력으로 유동시켜, 전도 열전달 방식에 의해 공구 인선부와 피삭재 가공면에 대한 공구홀더의 생크부 온도를 검토하였다. 그리고, 건식과 극저온 간접냉각방식의 가공환경에서, 가공시간에 따른 절삭속도와 이송량의 변화에 대한 공구마멸, 절삭력, 표면거칠기 및 칩형상과의 상관관계에 대하여 조사하여 인코넬 718소재의 절삭성 (Machinability)을 평가하고자 한다.



(a) Conventional indirect cooling system^[2]



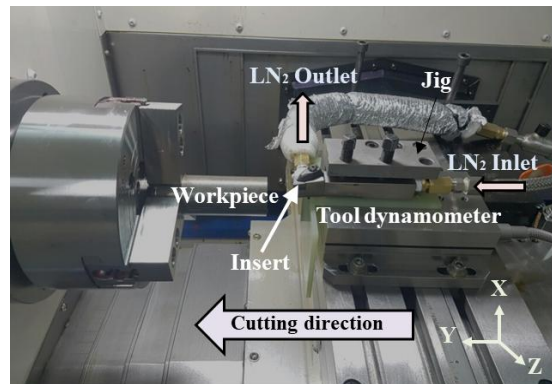
(b) New indirect cooling tooling system

Fig. 1 Method of indirect cooling system using cryogenic Liquid nitrogen

2. 간접냉각시스템 구성 및 실험방법

2.1 극저온 액화질소의 간접냉각시스템

Fig. 1(a)는 간접냉각 방식중 하나로, 전도냉각에 의해 인서트의 하단을 냉각시키는 방법이다. 그러나 불균일한 액화질소의 기화로 인해 분사압력이 변화하고, 분사속도와 유량이 변화함으로써 냉각량 또한 변화하는 단점을 가진다^[2,6]. Fig. 1(b)는 새로이 제안한 간접냉각방식으로 액화질소탱크(Liquid nitrogen tank)에서 액체질소를 분리기로 분사하여 기체와 액체가 분리된 후 일정한 압력으로 제작된 공구홀더의 입구 (Inlet)으로 공급되어 인서트 하단을 정온전도 냉각시킨다. 또한 가공방향과 반대의 출구 (Outlet)으로 배출되어 가공물에 영향을 주지 않고 대기 중으로 기화됨으로써 우수한 냉각 효과를 가질 것으로 생각된다.



(a) Experimental device



(b) Indirect cooling tool holder

Fig. 2 Experimental set-up using new cooling system and tool dynamometer of Inconel 718 material at CNC turning machine

2.2 실험 및 데이터측정장치 구성

본 연구에서는 건식과 간접냉각시스템의 절삭성을 알아보기 위하여, CNC 선반 (HT 1200, Doosan, South Korea)에서 Fig. 2(a)와 같이 주절삭이송은 Y축, 가공깊이는 X축으로 제어되면서 가공된다. Fig. 2(b)는 극저온 간접냉각에 사용된 공구홀더의 형상이다. 공구홀더로 유입되는 액체 질소를 유동해석을 통하여 13 bar의 압력으로 분사하도록 설계되었다. 또한 가공 중의 절삭현상을 규명하기 위하여, 공구동력계 (Kistler, 9257B, Switzerland) 위에 공구 고정용 지그를 설치하여 공구를 고정시킨 후 절삭방향 Y축으로 이송하면서 3분력의 절삭력을 획득하였다.

2.3 가공조건 및 가공성 평가방법

가공에 사용된 소재는 고용화 열처리된 인코넬 718소재(∅38)이고, 기계적 특성을 Table 1에 나타내었다^[2-3]. 실험에 사용된 공구는 초내열합금 가공용으로 공구노우즈 반경과 냉각조건을 고려하여 TiAlN 코팅된 초경합금 인서트 (TT5080, TaeguTec, Korea)를 사용하였다. Table 2의 본 실험에서 사용한 선삭가공조건은 선행연구에서 보고되고 있는 가공조건을 바탕으로 선정하였다^[2,4,8].

Table 1 Material properties of Inconel 718 alloy^[1]

Material properties	
Tensile strength (MPa)	1448
Yield strength (MPa)	1158
Elastic modulus (GPa)	211
Hardness (HRC)	38
Thermal conductivity (W/m·K)	11.2

Table 2 Experimental conditions

No	Speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Cooling condition
1	60	0.1	0.5	Dry
2		0.2		
3		0.3		Indirect

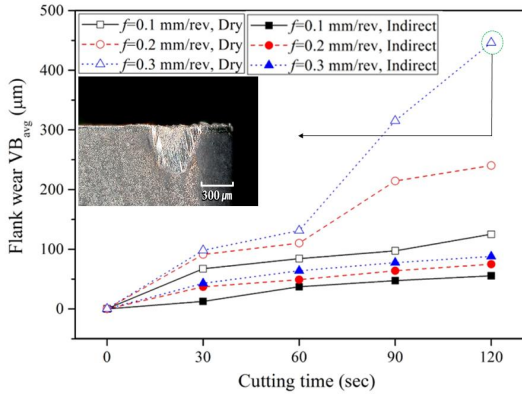
그리고, 공구마멸 및 칩표면의 관찰을 위해 광학현미경 (KH-8700, Hirox, Japan)을 사용하였고 공구의 여유면 마멸(Flank wear)은 주절삭날 여유면의 공구 모서리부터 마멸된 부분까지의 평균거리(VB)를 가공시간 120 sec까지 30 sec 간격으로 측정하였고, 공구마멸 특성으로부터 공구수명에 준하는 가공시간 300 sec까지 추가적으로 공구마멸을 측정하였다. 가공된 시편의 표면조도를 측정하기 위하여 표면분석기 (NS-3000, Nanosystems, South Korea)를 이용하여 측정하였고, 오차를 최대한 줄이기 위해 가공이 끝난 지점으로부터 5 mm 간격으로 5회 측정을 실시한 후 평균 표면조도값을 나타내었다^[3].

3. 실험결과 및 고찰

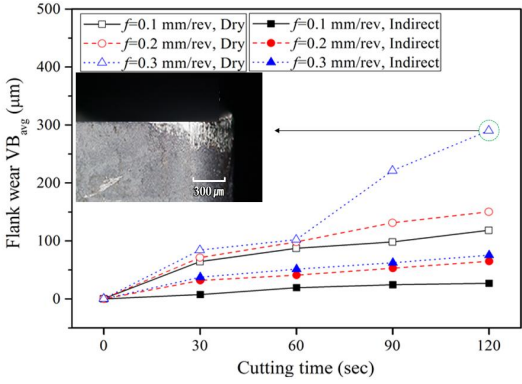
3.1 간접냉각효과에 의한 공구마멸과 절삭력 특성

인코넬 718소재의 선삭가공에서 극저온 질소가스의 일정한 압력에 의한 균일한 온도분사효과를 가질 수 있는 간접냉각방식의 효과를 알아보았다. 가공시간의 변화에 있어서 절삭속도와 이송량의 변화에 따른 여유면 공구마멸, 절삭력, 표면조도 및 칩형태에 관한 가공특성을 관찰하였다.

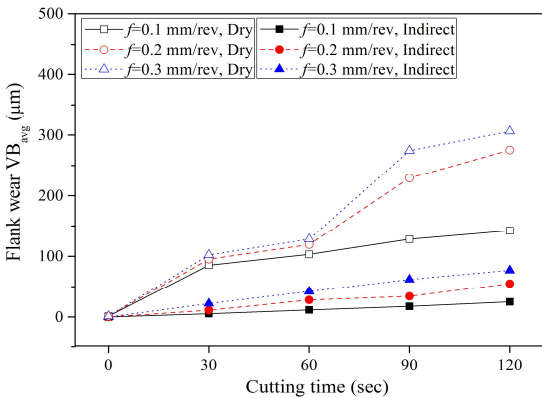
Fig. 3은 각각의 절삭속도 40, 60, 80 m/min에 있어서, 두가지 종류의 냉각방식과 이송량의 변화에 대하여, 가공시간 증가에 따른 여유면의 공구마멸을 측정한 결과이다. 먼저, 가공시간의 증가에 따라 건식일 때가 간접냉각방식에 비하여 공구마멸이 모든 가공조건에서 확연하게 더 큼을 알 수 있다. 그리고 냉각방식의 효과를 알아본 결과, 건식에서는 대체적으로 가공시간 60 sec를 기점으로 공구마멸이 상대적으로 급격하게 증가하는 현상을 보인다. 반면에, 간접냉각방식에서는 본 실험의 가공초기에서 120 sec 범위 내에 있어서 가공시간의 증가에 따라 공구마멸은 서서히 증가하는 경향을 보이며, 이는 본 가공조건범위에서 간접냉각방식에 의한 인코넬 718소재의 안정적인 가공이 이루어지고 있음을 설명하고 있다.



(a) Cutting speed : 40m/min



(b) Cutting speed : 60m/min



(c) Cutting speed : 80m/min

Fig. 3 Characteristics of flank wear with cutting time under variation of cooling method and feed rate in case of each cutting speed

한편, 건식에서 절삭속도 40 m/min, 이송량 0.3 mm/rev 인 경우가 가공시간 120 sec에서 공구마멸 값 445 μm 로 가장 큰 공구마멸이 발생하였다. 그리고 간접냉각방식에서는 절삭속도 증가에 따라 공구마멸은 거의 일정하고, 가공시간의 증가에 따라 서서히 증가하는 경향을 보인다. 이는 주어진 실험영역에서 매우 안정적으로 인코넬 718소재의 가공이 이루어지고 있음을 의미한다^[4,5]. 또한 이송량과 가공시간의 증가에 있어서 공구마멸은 미소하게 증가하는 현상을 보인다.

Fig. 4는 간접냉각방식에서 절삭속도 80 m/min 인 경우에 이송량 증가에 따른 여유면 공구마멸 상태는 매우 안정적으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 간접냉각방식으로 절삭속도 80 m/min 조건에서 인코넬 718소재 가공이 유용함을 제시할 수 있다. 추가적으로 공구수명^[7]에 준하는 공구마멸의 경향을 알아보기 위하여 가공시간을 300 sec 까지 수행하였다. Fig. 5와 같이 정상적인 마멸 증가곡선을 보이며, 이송량 0.1 mm/rev일 때 공구마멸이 가장 작게 발생함을 확인하였다.

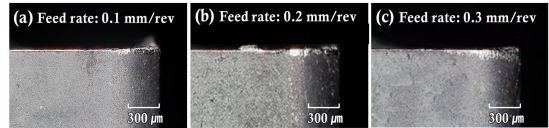


Fig. 4 Optical microscope image of flank wear with feed rate at cutting time 120 sec and cutting speed 80 m/min

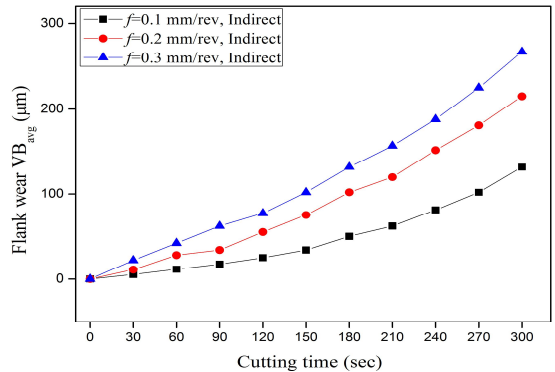


Fig. 5 Characteristics of flank wear with cutting time 300 sec under cutting speed 80 m/min

이때의 절삭력 특성 또한 Fig. 6에 보이는 바와 같이 건식에 비하여 간접냉각방식의 주분력방향의 절삭력 (F_c)이 2배정도 작음을 알 수 있다. 그리고 가공초기에서 120 sec동안의 가공시간 증가에 따라 절삭력의 변화는 거의 일정한 특성을 보였다. 이와 같은 절삭력 특성은 앞서 고찰한 공구마멸의 변화특성과도 동일한 경향을 보였다.

3.2 간접냉각효과에 의한 표면조도 및 칩형상 특성

절삭조건에 의한 변화에 의한 건식, 간접냉각방식에 의한 표면조도 특성을 비교하면서, 기존에 보고되고 있는 직접냉각방식 중의 하나인 초저온냉각방식과의 비교우위를 조사하였다. Fig. 7은 각각의 3가지 가공환경에서 이송량 0.2 mm/rev인 경우 절삭속도 변화에 따른 평균 표면조도 Ra 값을 나타낸 결과이다. 절삭속도가 증가함에 따라 앞서 고찰한 공구마멸의 특성에 기인하여 표면조도는 건식에 비하여 간접냉각방식이 약 1.2 μm 내외로 거의 일정한 변화 거동을 보였다. 그리고 이송량 0.1 mm/rev와 0.3 mm/rev에서도 평균 표면조도값의 거동은 미소한 조도값의 변화이외는 유사한 경향을 보였다.

Fig. 8은 절삭속도 80 m/min에서 이송량의 변화에 따른 평균 표면조도 Ra 값을 나타낸 결과이다. 각각의 3가지 가공환경에서, 이송량이 증가함에 따라 평균 표면조도는 비례적으로 증가하는 경향을 보이며, 간접냉각방식이 건식 그리고 초저온방식에 비하여 가장 우수한 평균 표면조도 값을 가짐을 알 수 있었다. 특히 최근에 많이 보고되는 초저온방식과 비교하여도 Ra 값의 표준편차가 가장 작았고, 매우 안정적인 절삭거동을 보였다. 또한 이송량 0.2 mm/rev에서 3가지 가공환경에서 가공표면 형상을 관찰한 결과, 건식에서는 버, 그루브, 소재용착(Adhered material fragment)과 뜯김(Tearing)이 발생하였고, 직접냉각에서는 용착이외의 현상들이 나타났다. 그러나 극저온의 질소가스를 이용한 간접냉각에서는 미세한 뜯김만이 관찰되어 가장 양호한 고품위의 가공면을 얻을 수 있었다.

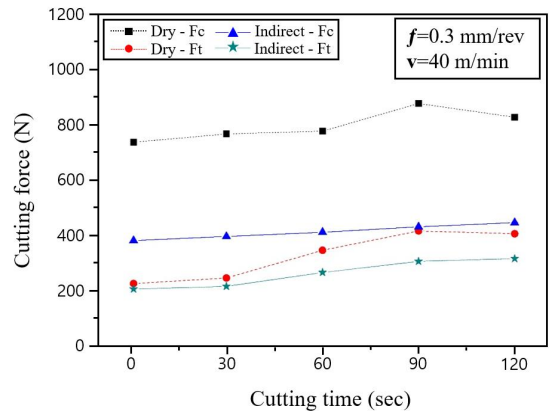


Fig. 6 Characteristics of ave. cutting forces with cutting time at v 40 m/min, f 0.3 mm/rev

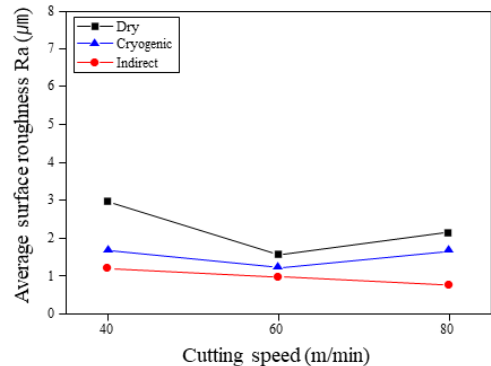


Fig. 7 Characteristics of ave. surface roughness with cutting speed at feed rate 0.2 mm/rev

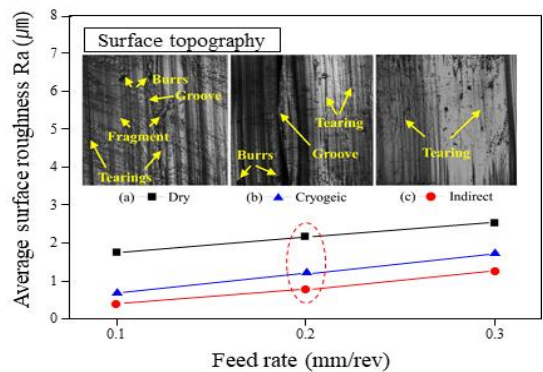


Fig. 8 Characteristics of ave. surface roughness with feed rate at cutting speed 80 m/min

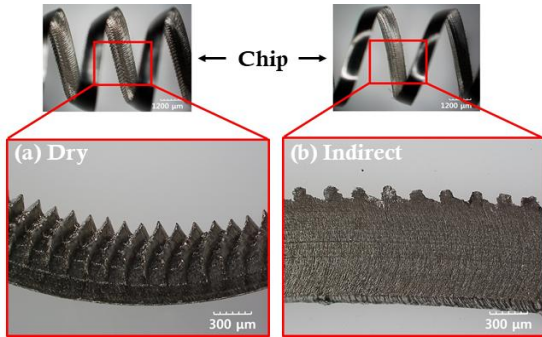


Fig. 9 Images of machined surface at cutting speed 80 m/min and feed rate 0.2mm/rev

난삭성 인코넬 718소재의 표면조도와 칩형상의 연관성을 조사하면, 절삭속도 40 m/min과 이송량 0.1 mm/rev에서 120 sec 가공한 후 칩형상 (Chip formation)을 관찰하였다. Fig. 9에서 건식경우는 소재의 냉각속도 영향으로 대부분 열에 의한 소성 변형으로 티타늄소재의 칩배출 형태와 유사한 툽니형태의 칩형상을 보이며^[2,8], 간접냉각방식은 건식과는 확연하게 다른 비교적 안정적인 칩의 흐름에 의한 연속형 칩형태 (Continuos chip)를 얻었다.

5. 결론

인코넬 718의 선삭가공에서 액체질소를 적용한 일정온도 유지방식의 간접냉각시스템에 따른 가공성평가를 수행하였다. 건식의 경우 가공시간 60 sec에서 급격한 공구마멸이 발생하였고, 특히 절삭속도 40 m/min, 이송량 0.3 mm/rev에서 최대 여유면 마멸 445 μm값을 보였다. 반면 간접냉각방식에서는 가공시간의 증가에 따라 공구마멸이 서서히 증가하는 안정적인 가공이 이루어짐을 알 수 있었다. 이때 절삭력은 간접냉각방식이 건식에 비하여 주분력이 2배정도 작게 나타났다. 또한 평균 표면조도는 공구마멸의 영향에 기인하여 건식과 기존 직접 극저온방식에 비하여 절삭속도와 이송량의 증가에 따라 양호한 조도값과 가공표면 형상을 얻었다. 칩형상은 건식에서 툽니형태의 불연속형에서, 안정적인 칩흐름의 연속형 형태를 보였다.

후 기

This work was supported by a 2-Year Research Grant (201705660002) of Pusan National University.

REFERENCES

1. Thakur, A. and S, Gangopadhvay., "State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based superalloy," International Journal of Machine Tool and Manufacture, Vol. 100, pp. 25-54, 2016.
2. Iturbe, A., Hormaetxe, E. and Arrazola, P. J., "Surface integrity analysis when machining Inconel 718 with conventional and cryogenic cooling," Procedia CIRP, Vol. 45, pp. 67-70, 2016.
3. Kim, M. W., Ryu, K. T. and Kang, M. C., "Characteristics of Tool Wear and Surface Roughness using for Hybrid Lubrication in Micro-Milling Process of Flexible Fine Die," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 6, pp. 30-36, 2013.
4. Wang, Z. Y. and Rajurkar, K. P., "Cryogenic machining of hard-to-cut materials," Wear, Vol. 239, pp. 168-175, 2000.
5. Park, K. B., Cho, Y. T. and Jung, Y. G., "Efficient MQL-based Drilling of Inconel 601," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 1-8, 2018.
6. Park, K. B., Cho, Y. T., Shin, D. S. and Jung, Y. G., "The Effect of a Sealed Cover and POSS-type Cutting Oil on MQL Drilling," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 77-82, 2016.
7. Devillez, A., Le Coz, G., Dominiak. and Dudzinski, D., "Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, pp. 1590-1598, 2011.
8. International Organization for Standardization, "Tool-Life Testing with Single-Point Turning Tools. ISO 3685," 1993.