

비접촉센서를 이용한 Inconel 718 밀링가공에서 공구상태 감시

최용기^a, 황문창^a, 김영준^a, 박강휘^a, 구준영^b, 김정석^{b*}Tool Condition Monitoring with Non-contacting Sensors in
Inconel 718 Milling ProcessesYong-Ki Choi^a, Moon-Chang Hwang^a, Young-Jun Kim^a, Kwang-Hwi Park^a,
Joon-Young Koo^b, Jeong-Suk Kim^{b*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

^b School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National University,

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	5	October	2016
Revised	24	November	2016
Accepted	28	November	2016

Keywords:

Inconel 718
Milling
Tool life
Sound pressure level
Cutting temperature

ABSTRACT

The Inconel 718 alloy is a well-known super-heat-resistant alloy and a difficult-to-cut material. Inconel 718 with excellent corrosion and heat resistance is used in harsh environments. However, the heat generated is not released owing to excellent physical properties, making processes (e.g., adhesion and thermal fatigue) difficult. Tool condition monitoring in machining is significant in reducing manufacturing costs. The cutting tool is easily broken and worn because of the material properties of Inconel 718. Therefore, tool management is required to improve tool life and machinability. This study proposes a method of predicting the tool wear with non-contacting sensors (e.g., IR thermometer for measuring the cutting temperature and a microphone for measuring the sound pressure level in machining). The cutting temperature and sound pressure fluctuation according to the tool condition and cutting force are analyzed using experimental data. This experiment verifies the effectiveness of the non-contact measurement signals in tool condition monitoring.

1. 서론

최근 기계산업의 발달로 항공 제트기관, 원자로, 시험로 제작의 수요가 증가하고 있다. 제트기관, 원자로, 시험로의 특성상 가혹한 환경에서 고강도, 내마모성, 그리고 내부식성 측면에서 우수한 특성을 가지며 고온 및 저온 상태에서도 특성의 변화가 적은 소재의 필요성이 대두되고 있다. 니켈합금은 전반적으로 내식성과 내

열성이 우수하여 가혹한 환경에 견디는 내식재료와 고온 용도로 중요성이 커지고 있다^[1-3]. 특히 Inconel 718은 대표적인 니켈합금으로 내열성이 우수하며, 고온의 산화기류에서 산화되지 않으며 신장, 인장, 강도, 항복점 등의 성질이 고온에서 유지되어 기계적 성질이 우수하다. 그러나 이러한 우수한 물리적 특성으로 인해 가공에 있어서 상당한 어려움이 발생한다. 특히 소재의 내열 특성상 가공 시 발생하는 열이 방출되지 않음으로 인해 소재

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-3079

Fax: +82-51-518-7207

E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong Suk Kim).

의 응착에 의한 치핑과 열피로가 발생하게 된다. 이에 따라 균열 그리고 열화학적인 확산 현상에 의한 공구 표면경화로 공구파손이 발생하고, 공구의 수명이 급격하게 저하하게 된다^[4]. 따라서 인코넬 718 밀링가공에 있어서 공구상태 감시의 중요성이 대두되고 있다. 기존의 연구에서는 공구상태 감시를 위해 주로 공구동력계, 가속도계, AE 센서, 공작기계 및 주축 모터의 전류 신호를 이용한 다양한 방법을 사용하고 있다^[5,6]. 그러나 공구동력계는 하중, 가공물의 크기의 제한이 따르며, AE 센서의 경우에도 가공조건에 따라 검출조건이 다양하게 준비되어 있어야 한다. 또한 전류 신호의 경우에도 낮은 시스템 대역폭, 비선형의 마찰력 특성, 온도특성 등이 신호에 많은 영향을 미치게 되어 검출에 한계로 남아있다^[7]. 본 논문에서는 Inconel 718의 밀링가공 실험을 통해 가공특성을 파악하고, 공구상태 감시에 효과적인 비접촉센서를 파악하고자 한다.

이를 위해 가공시편에 부착하여 절삭신호를 획득하는 공구동력계, 가속도계와 원거리에서 절삭신호를 획득할 수 있는 비접촉센서로 마이크로폰, IR Thermometer, IR Camera를 활용하였다. 주축회전속도, 날당 이송량의 변화에 따른 밀링가공 실험을 수행하여 획득한 가공신호 특성을 분석하고, 그 결과를 바탕으로 마멸실험을 실시하여 공구의 상태와 절삭온도, 음압신호의 관계를 파악하고자 한다. 이를 통해 공구상태 감시에 효과적인 비접촉센서를 파악하고자 한다.

2. 기초 밀링가공 실험

2.1 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 밀링가공 실험장치에 대해 나타내었다. 가공실험은 최대 20,000 rpm급의 3축 머시닝센터(V55, Makino)를 이용하였다. 가공시편의 소재는 Inconel 718이며, 소재의 물성치와 화학적 조성은 Table 1, 2에 나타내었다^[8]. 가공실험은 10 mm의 직경을 가지는 4날 엔드밀(SUS-CUT, YG-1)을 이용하여 수행하였다. 신호

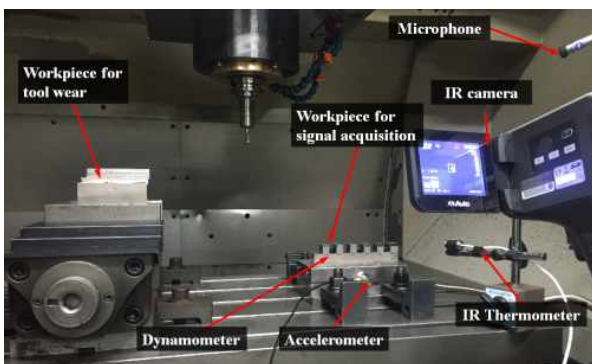


Fig. 1 Experimental setup

획득용 시편을 밀링가공하며 공구동력계(9257b, Kistler)를 통해 절삭력을 획득하였다. 가속도신호는 Bruel & Kjaer사의 Type 4384 가속도계를 사용하였다. 비접촉센서 마이크로폰(4189, B&K)과 IR Thermometer (IR14 814 T22)는 가공시편과 일정거리에서 두어 신호를 획득하도록 장치하였다. 신호획득 및 처리를 위해 NI사의 LabView와 DAQ장비를 활용하였다.

획득한 절삭온도의 신뢰성을 위해 IR Camera를 설치하여 부가적으로 절삭온도를 측정하였다. IR Thermometer로 측정된 절삭온도값은 IR Camera (NEC InfRec G120)와 달리 측정 영역의 평균온도로 연산하기에 값의 차이가 있으나 경향성이 유효함을 확인하였다.

실험조건은 반응표면법의 중심합성계획을 활용하여 작성하였다. 독립변수는 날당 이송량, 주축회전속도로 정하였다. 각 독립변수의 수치는 일정한 증분으로 3단계로 나누어 절삭실험을 수행하였다. Table 2에 실험조건 및 사용 장비를 나타내었으며, Table 3에는 밀링가공 실험조건들을 나타내었다. 실험조건에 따른 밀링가공 실험을 수행하면서 절삭력신호, 절삭온도, 진동가속도(Acc: acceleration)신호, 음압신호(SPL: sound pressure level)들을 획득하였다. 획득한 절삭력, 절삭온도의 평균과 진동 가속도신호, 음압신호는 RMS 연산을 통해 조건에 따른 Inconel 718의 가공신호 특성을 분석하였다.

Table 1 Material properties of Inconel 718^[8]

Density	Ultimate strength	Yield strength	Elongation at break	Rupture strength
8.19 g/cm ³	1375 MPa	1100 MPa	25%	593 MPa

Table 2 Chemical composition of Inconel 718^[8]

Composition	Al	Cr	Co	Cu	Fe	Mn
%	0.2~0.8	17~21	1	0.3	17	0.35
Composition	Mo	Ni	Nb	Si	S	Ti
%	2.8~3.3	50~55	4.75~5.5	0.35	0.015	0.65~1.15

Table 3 Experimental condition for machining

Machining Center	MAKINO V-55
Tool	Φ10 mm, SUS-CUT
Workpiece	Inconel 718
Cutting Fluid	Dry
Tool Overhang (mm)	30
Spindle Revolution (rpm)	1,500, 2,500, 3,500
Feed/tooth (mm/tooth), F_t	0.01, 0.02, 0.03
Radial Depth of Cut (mm), R_d	0.2
Axial Depth (mm), A_d	5

Table 4 Machining condition for experiments

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	1500	0.01	0.2	5
2	2500	0.01	0.2	5
3	3500	0.01	0.2	5
4	1500	0.02	0.2	5
5	2500	0.02	0.2	5
6	3500	0.02	0.2	5
7	1500	0.03	0.2	5
8	2500	0.03	0.2	5
9	3500	0.03	0.2	5

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 절삭력

Fig. 2에는 날당 이송량의 변화에 따른 절삭력합력 RMS값의 변화를 나타내었다. 날당 이송량이 증가함에 따라 절삭력합력이 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 현상은 소재제거율(material removal rate)의 증가로 인해, 충격량이 증가한 결과로 사료된다. 이는 일반적인 소재의 절삭특성과 유사한 결과로 나타났다. 주축 회전속도의 변화에 따른 절삭력의 유의미한 변화는 나타나지 않았다.

2.2.2 절삭온도

Fig. 3에는 날당 이송량의 증가에 따른 절삭온도평균의 변화를 나타내었다. 밀링가공 실험에서 획득한 절삭온도의 신뢰성을 위하여 IR Thermometer와 IR Camera를 이용하여 절삭온도를 획득하였다. 날당 이송량 증가에 따라서 0.02 mm/t에서 절삭온도값이 감소 후 0.03 mm/t에서 증가하는 경향이 보이며, 주축회전속도가 1,500 rev/min 조건에서 공통적으로 낮은 절삭온도값이 측정되었다.

2.2.3 가속도신호와 음압신호

Fig. 4에는 날당 이송량의 변화에 따른 음압신호값의 변화를 나타내었다. 모든 조건에서 주축회전속도와 날당 이송량이 증가할수록 음압신호값이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 충격량의 증가에 따른 결과로 사료된다. 음압신호와 절삭력 비교분석 결과, 조건에 따른 변화특성이 유사한 경향을 가지는 것을 확인하였다. 이를 활용하여 비접촉센서를 이용한 절삭상태의 상대적인 예측이 유효하다고 사료된다.

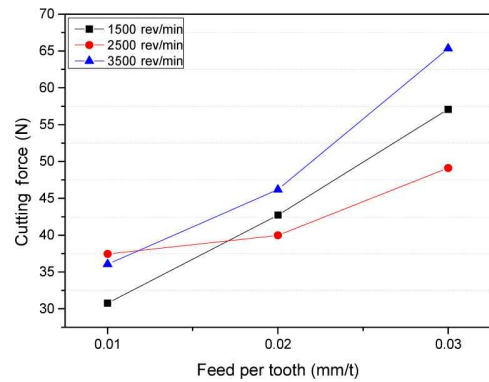
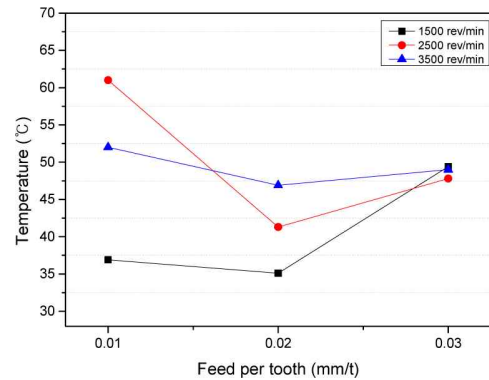
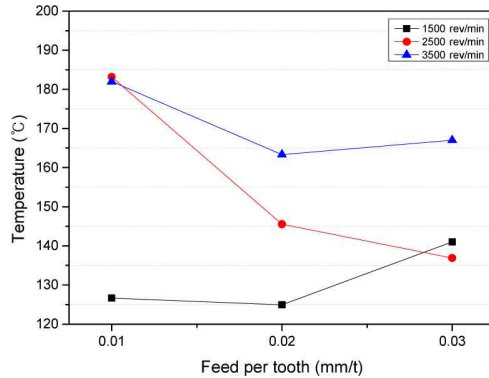


Fig. 2 Cutting forces according to feed per tooth



(a) IR Thermometer



(b) IR Camera

Fig. 3 Cutting temperature according to feed per tooth

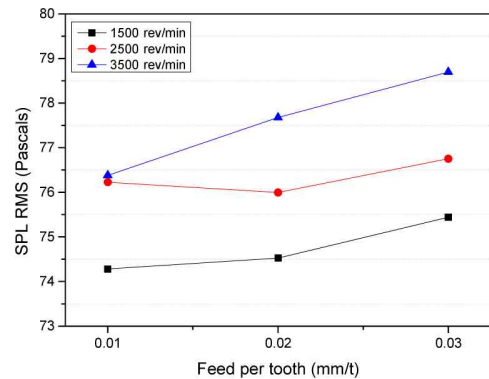


Fig. 4 Sound pressure level according to feed per tooth

3. Inconel 718 마멸실험

3.1 실험방법 및 비접촉 절삭신호

3.1.1 실험방법

Fig. 5에는 Inconel 718 마멸실험의 개략도를 나타내었다. Fig. 1과 같이 마멸가공용 시편을 이용하여 밀링가공을 하고, 마멸거리에 따라 신호획득용 시편을 가공하여 절삭신호를 획득하였다. 기초가공실험에서 실행했던 조건 중 주축회전속도를 2,500 rpm으로 고정하고 날당 이송량을 3가지 수준으로 선정하였다. 선정된 가공조건으로 마멸실험을 수행하면서 절삭력신호, 진동가속도신호, 음압신호, 절삭온도신호들을 획득한다. 가공거리 증가에 따른 공구형상변화는 CCD카메라를 이용하여 측정하였다. 이 때 플랭크 마멸의 폭은 ISO의 단인공구 마멸기준에 따라 0.3 mm^[9]로 수명한계를 정하였다. 마멸실험에서 획득한 절삭력의 평균과 Acc RMS평균, SPL RMS평균을 연산하고 Acc, SPL신호에 대한 FFT 분석을 수행한다. 또한 마멸거리에 따른 공구형상의 변화를 각 센서에 따른 획득신호와 비교하여 검증하였다. Inconel 718 마멸실험에서 공구마멸상태를 판단에 비접촉센서의 유효성을 기존의 센서와 비교분석하였다. Table 5에는 마멸 실험조건들을 나타내었으며, 마멸실험은 건식가공으로 수행하였다.

3.1.2 절삭온도와 음압신호

Fig. 6에 직교절삭에서의 변형영역을 나타내었다. 재료가 탄성 변형할 때 요구되는 에너지는 변형에너지로서 재료 안에 저장되며

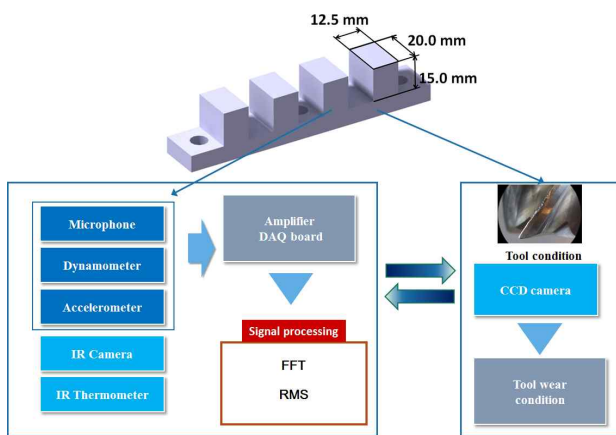


Fig. 5 Scheme of machining experiments

Table 5 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	2500	0.01	0.2	5
2	2500	0.02	0.2	5
3	2500	0.03	0.2	5

열은 발생되지 않는다. 그러나 재료가 소성 변형할 때는 사용된 에너지는 대부분 열로 변환된다. 절삭작업 시 재료는 극히 높은 변형을 받게 되고, 전체 변형 중 탄성변형이 차지하는 비율은 매우 작다. 그러므로 모든 에너지가 열로 변환된다고 가정할 수 있다. 에너지가 열로 변환되는 것은 두 개의 주요 소성변형 영역에서 일어난다. 전단영역(shear zone) 또는 주 변형영역(primary deformation zone)인 AB와 2차 변형영역(secondary deformation zone)인 BC이다. 추가적으로 가공길이가 증가함에 따라 공구에 크레이터와 플랭크 마멸이 발생하게 되면 이로 인해 공구와 새로운 가공면 사이의 마찰이 발생하는 3차 변형영역(tertiary deformation zone) BD가 존재하게 된다. 절삭가공 중의 이상 진동은 공작물, 공구, 동작기계 구조부를 진동시키고 이 때 발생하는 소음은 공기 중으로 전달되어 음압의 변화로 나타난다. 이와 같은 이상 진동이 공구마멸의 주요 원인이 되어 소음이 발생된다.

따라서 공구 마멸상태 감지에서 절삭온도와 음압신호 측정은 효과적인 계측방법이라 판단되고 마멸실험에서 이를 검증하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 가공조건에 따른 절삭력과 공구상태

Fig. 7은 가공길이에 따른 공구상태의 변화를 날당 이송량별로 나타내었다. 날당 이송량이 0.01 mm/tooth일 때 가공길이가 5 m에서 마멸이 되었으며, 가공초기에 플랭크 마멸로 인한 공구마멸이 급격하게 일어나는 것을 알 수 있다. 날당 이송량이 증가할수록 안정적으로 가공이 되며 플랭크 마멸의 증가폭이 줄어들어 가공길이가 늘어났다.

Fig. 8은 가공길이에 따른 절삭력을 날당 이송량별로 나타내었다. 가공거리 0 m에서의 절삭력은 날당 이송량의 증가에 따라 소재제거율이 높아져 충격량에 의해 절삭력이 상승하였다. 그러나 가공길이가 증가할수록 날당 이송량이 작은 조건에서 더 높은 절삭력이 측정되었다. 그리고 날당 이송량이 증가할수록 가공길이에 따른 절삭력이 낮아지며 절삭력의 상승폭도 작아졌다. 이는 난삭성 소재의 특성으로 공구마멸이 진행됨에 따라 공구절인이 예리하지 않은

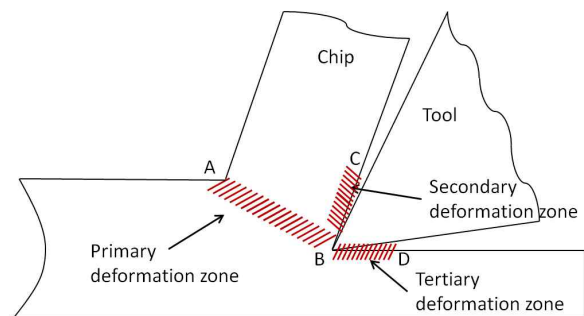


Fig. 6 Cutting deformation zone

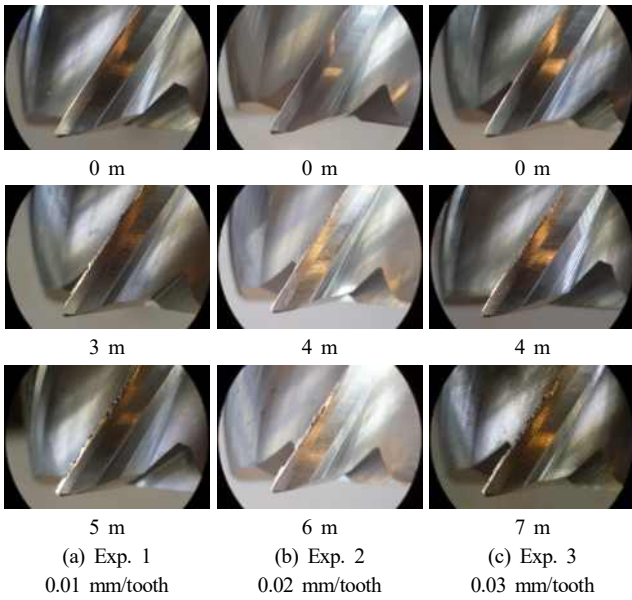


Fig. 7 Tool wear according to feed per tooth

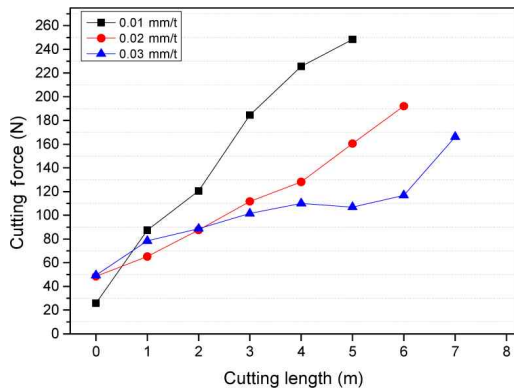
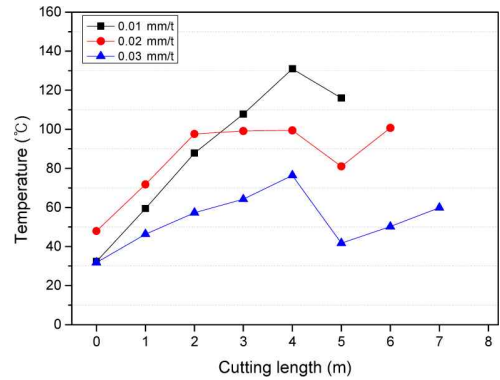


Fig. 8 Cutting force according to cutting length

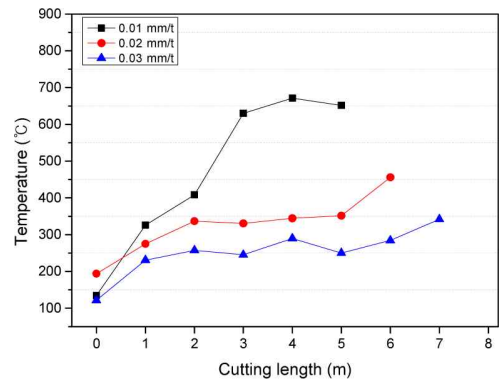
상황에서 날당 이송량이 낮을수록 미변형 칩두께가 작아서 비절삭 저항이 커지는 현상인 치수효과(size effect)로 사료된다^[10]. 또한 공구마멸량의 증가와 절삭력의 변동 특징이 유사함을 확인할 수 있다. 기존의 연구와 같이 절삭력의 변화특성을 통해 공구상태를 효과적으로 예측할 수 있다고 판단된다.

3.2.2 가공조건에 따른 절삭온도

Fig. 9에는 가공길이에 따른 절삭온도의 변화를 날당 이송량별로 나타내었다. IR Thermometer와 IR Camera로 측정된 절삭온도의 값은 다르지만 가공길이에 따라 상대적으로 유사한 경향을 나타내었다. 가공길이가 증가함에 따라 모든 조건에서 전반적으로 절삭온도값이 증가하였으며 날당 이송량 0.01 mm/tooth 조건에서 가장 크게 증가하였다. 날당 이송량이 0.01, 0.02, 0.03 mm/tooth으로 커질수록 절삭온도와 그 증가폭이 작아졌다. 이는 마멸이 급격하게 커질수록 절삭이 무뎠어져 공구와 공작물 사이 마찰열이 커진



(a) IR Thermometer



(b) IR Camera

Fig. 9 Cutting temperature according to cutting length

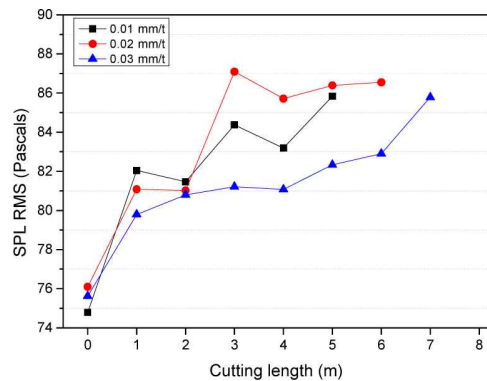


Fig. 10 SPL according to cutting length

결과로 사료된다.

3.2.3 가공조건에 따른 가속도신호와 음압신호

Fig. 10에 가공길이에 따른 음압신호 RMS값의 변화를 날당 이송량 별로 나타내었다. 음압신호는 가공거리가 증가하면서 마멸의 정도에 따라 증가하였다. 조건에 따른 공구의 마멸정도와 음압신호 값의 변화가 유사한 경향을 보였다.

Fig. 11에는 날당 이송량 0.01 mm/tooth 조건에서 가공길이에 따른 가속도와 음압신호를 주파수 영역으로 변환한 FFT그래프를

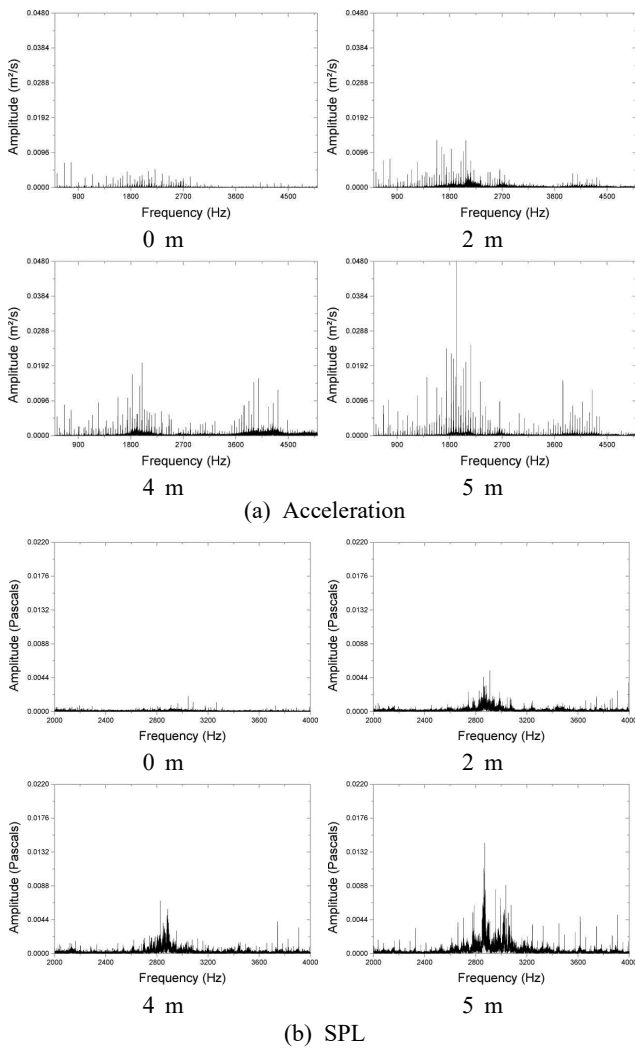


Fig. 11 FFT graphs of acceleration and SPL signals

나타내었다. 저주파대역에서 절삭과 상관없는 노이즈가 발생하여 300 Hz high pass filter를 적용하여 노이즈를 제거하였다. 가공 거리가 증가함에 따라 가속도신호 FFT 1,600~2,700 Hz 대역에서, 음압신호 2,500~3,200 Hz에서 진폭값이 크게 발생하는 특징을 가지고 있다. 공구마멸이 발생하여 가공 시 불안정한 가공이 일어난 결과로 사료된다. 공구상태 감시에서 가속도신호는 FFT 분석이 유효하고, 음압신호는 RMS값과 FFT값 모두 유효하다고 판단된다.

3.2.4 고찰

Fig. 12에는 공구 마멸시험에서 획득한 절삭력과 절삭온도, 음압신호를 가공길이에 따라 나타내었다. 공구상태를 판단을 위해 공구 동력계를 이용한 절삭력의 변화분석이 유효하다는 기존의 연구결과^[11]를 바탕으로 비접촉 계측신호와 공구상태의 상관관계를 파악하기 위해 가공길이에 따른 절삭온도와 음압신호의 변화특성을 절삭력의 변화특성과 비교분석하였다. 모든 조건에서 공구마멸이 진

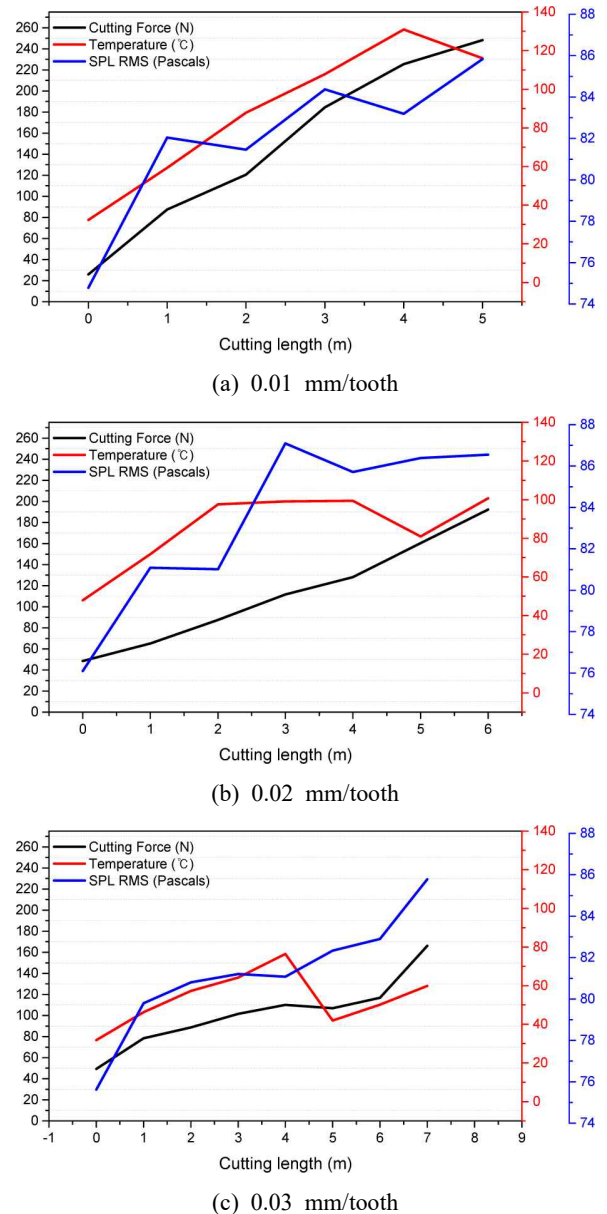


Fig. 12 Cutting force VS temperature VS SPL according to cutting length

행됨에 따라 절삭력이 증가하였으며, 공구마멸 정도에 비례해서 절삭온도, 음압신호의 값이 유사한 경향을 나타내었다. 이는 공구마멸이 진행됨에 따라 크레이터 마멸과 플랭크 마멸로 인해 절인이 무더진 상태로 불안정한 가공이 이루어지고, 이로 인해 마찰열과 소음이 커진 결과로 판단된다.

위 실험결과를 바탕으로 공구상태 감시에서 절삭온도와 음압신호가 유효하다는 것을 확인하였다. 절삭공정에서 음압신호가 절삭온도에 비해 신호획득이 용이하고, 가공거리에 따른 절삭력의 변화특성과 더욱 일치하였다. 따라서 Inconel 718 공구상태 감시에서 신호획득이 용이하고 조건에 따라 균일하게 측정된 음압신호가 가장 효과적이라 판단된다.

4. 결 론

공구동력계, 가속도계, 마이크로폰, IR Thermometer를 이용하여 난삭성 소재인 Inconel 718 소재의 밀링가공 시 공구상태 감시를 위해 가공특성을 파악하였다. 본 논문의 실험결과를 바탕으로 다음의 결론을 도출하였다.

공구 마멸실험에서 일반적인 소재 절삭특성과 달리 날당 이송량이 낮은 조건일수록 공구마멸이 빠르게 일어나 가공길이가 짧아졌다. 이는 Inconel 718소재의 특성상 날당 이송량이 작을수록 치수 효과의 영향을 많이 받아, 비절삭저항이 커진 결과로 사료된다.

가공거리에 따른 공구상태의 변화특성과 절삭온도, 음압신호의 변화특성 간에 상관관계가 있음을 확인하였다. 공구마멸이 진행됨에 따라 마찰열, 소음의 상승으로 절삭온도와 음압신호 RMS값과 음압신호 FFT 특정 주파수의 진폭이 커지는 것을 확인하였다. 절삭온도에 비해 음압신호 변화특성이 상대적으로 공구마멸과 상관관계가 크므로 Inconel 718 공구상태 감시에서 음압신호가 더욱 유효하다고 판단된다.

후 기

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

References

- [1] Jeong, J. H., Kwon, H. W., K, J. Y., Kim, P. H., K, J. S., 2012, A study on Machinability Evaluation of Inconel 718 in Flat End milling, Journal of the KSMTE, 21:6 982-987.
- [2] Kwon, H. W., Kim, J. S., Kang, I. S., 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, 19:1 1-6.
- [3] Choudhury, I. A., El-baradie, M. A., 1998, Machinability of Nickel-base Super alloys: A General Review, Journal of Materials Processing Technology, 77: 1-3 278-284.
- [4] Cha, j. H., Han, S. B., 2010, Searching Optimal Cutting Condition for Surface Roughness in Turning Operation on Inconel 718 using Taguchi Method, Journal of the KSMTE 19:2 295-300.
- [5] Li, H. Z., Zeng, H., Chen, X.Q., 2006, An Experimental Study of Tool Wear and Cutting Force Variation in the End Milling of Inconel 718 with Coated Carbide Inserts, Journal of Materials Processing Technology, 180:1-3 296-304.
- [6] Dimla, E. Dimla Snr., 2000, Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations: A Review of Methods, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40:8 1073-1098.
- [7] Li, X., Guan, X. P., 2004, Time-frequency-analysis-based Minor Cutting Edge Fracture Detection During End Milling, Mechanical Systems and Signal Processing, 18 1485-1496.
- [8] Matweb, n.d., viewed 9 Sep. 2016, <<http://www.matweb.com>>.
- [9] ISO, 2008, Tool Life Testing in Milling-Part 2 : End Milling, ISO 8688-2, Geneva.
- [10] Dinesh, D., Swaminathan, S., Chandrasekar, S., Farris, T. N., 2001, An Intrinsic Size Effect in Machining due to the Strain Gradient, Proc. of ASME IMECE, 1-8.
- [11] Kwon, Y. K., Oh, S. H., Kim, D. H., 1993, The RMS Characteristics of Cutting Force Depending on the Tool Wear, Journal of Mechanical Science and Technology, 17:9 2214-2222.