

• 특집 • 공작기계 디지털 트윈 및 지능화

실시간 절삭 계수 식별 기반의 공구 마모 모니터링 시스템

Tool Wear Monitoring System based on Real-Time Cutting Coefficient Identification

최영재^{1,#}, 송기형¹, 김재혁¹, 강구선²

Young Jae Choi^{1,#}, Ki Hyeong Song¹, Jae Hyeok Kim¹, and Gu Seon Kang²

¹ 한국생산기술연구원 디지털전환연구부 (Digital Transformation R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

² 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Corresponding Author / E-mail: youngjae@kitech.re.kr, TEL: +82-31-8040-6165

ORCID: 0000-0002-4646-1342

KEYWORDS: Tool wear (공구 마모), Cutting process monitoring (가공 공정 모니터링), Cutting coefficient (절삭 계수), Tool wear monitoring (공구 마모 모니터링), Real-time monitoring system (실시간 모니터링 시스템)

Among the monitoring technologies in the metal-cutting process, tool wear is the most critical monitoring factor in real machining sites. Extensive studies have been conducted to monitor equipment breakdown in real-time. For example, tool wear prediction studies using cutting force signals and deducting force coefficient values from the cutting process. However, due to many limitations, those wearable monitoring technologies have not been directly adopted in the field. This paper proposes a novel tool wear predictor using the cutting force coefficient with various cutting tools, and its validity evaluates through cutting tests. Tool wear prediction from the cutting force coefficient should conduct in real-time for adoption in real machining sites. Therefore, a real-time calculation algorithm of the cutting force coefficient and a tool wear estimation method proposes, and they compare with actual tool wear in cutting experiments for validation. Validation cutting tests are conducted with carbon steel and titanium, the most commonly used materials in real cutting sites. In future work, validation will be conducted with different materials and cutting tools, considering the application in real machining sites.

Manuscript received: September 19, 2022 / Revised: October 24, 2022 / Accepted: October 31, 2022

NOMENCLATURE

F _t	= Tangential Cutting Force
F _r	= Radial Cutting Force
F _a	= Axial Cutting Force
K	= Cutting Coefficient
h	= Chip Thickness
Φ	= Rotation Angle
z	= Axial Depth of Cut

cft	= Feed Per Tooth of CNC
sad, srd	= Axial Depth, Radial Depth
DefConstIndex	= Define Constant Machining Condition Index
scix	= Constant Machining Condition Index
DefTheta	= Define Tool Feed Direction
sthe	= Tool Feed Direction
cpx, cpy	= X, Y Position
d	= Tool Diameter

afx, afya	= Average of X, Y Cutting Force Measured with a Tool Dynamometer
Nt	= Number of Tool Flutes
crpm	= Spindle RPM
cft	= Feed per Tooth
millType	= Milling Type (1=Upmilling, 2=Downmilling, 0=Slotting)
Kfmincon	= Cutting Coefficient for Minimum Section (Except for Outlier) of Constant Machining Condition
ktc0, krc0, kte0, kre0	= Initial Value of Cutting Coefficients
ektc, ekrc, ekte, ekre	= Updated Cutting Coefficients
optK	= Optimized Cutting Coefficient
optK, Initial	= Initial Value of Optimized Cutting Coefficient
Kwear	= Calculated Cutting Coefficient

1. 서론

절삭가공공정 중에 얻을 수 있는 데이터들 중에서 절삭력 신호는 가공 현상을 이해하기 위한 가장 효과적인 데이터 중 하나이다[1-3]. 그런데, 절삭력을 측정할 수 있는 센서 장치들이 대부분 고가이며 제품의 가공이 이루어지는 영역 안에 설치되어야 하는 등의 환경적 제약으로 인하여 실제 현장에서는 절삭력 데이터를 얻기 어렵다.

공구의 마모 현상은 절삭가공을 통해 생산되는 제품의 품질에 가장 크게 영향을 미치는 요소이다. 이로 인해 가공 현장에서는 공구의 상태를 가늠할 수 있는 모니터링 환경을 가장 필요로 한다. 공구마모를 가장 정확하게 판단할 수 있는 방법은 현미경 등을 이용하여 직접 관찰하는 것이지만, 이 방법은 생산 공정상에서 시간적 손실이 크며, 공구의 마모나 파손이 발생한 가공 사이클의 종료 이후에나 확인이 가능하여 공구 이상 발생 시점에 즉시 대응하지 못할 우려가 있다.

공구 마모를 감지하거나 예측하는 것은 지속적으로 연구되고 있는 주제이며, 직·간접적인 절삭력의 측정을 기반으로 하는 절삭 부하 변화의 추적을 통한 공구 상태 모니터링 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다[4-11].

공구 상태 모니터링에 있어서 가공 조건이 변화하는 상황에 대한 대응 방안은 주요한 이슈 중 하나이다. Nouri 등은 공구 마모 발생에 따라 절삭계수가 변화하는 것을 파악하고, 이를 이용하여 가공 조건에 무관하게 공구의 마모를 모니터링할 수 있는 방법을 제안하였다[12]. 공정 모니터링에서 절삭 계수의 이용 편의성을 향상시키기 위한 절삭 계수 식별 방법에 대하여 많은 연구가 이루어졌다[13-15]. 강구선 등은 가상 가공 기술을 접목한 최적화 방법을 이용하여 가공 공정 중의 실시간 절삭 계수

식별의 정확성을 향상시킬 수 있음을 보여주었다[16].

본 논문에서는 기업 현장에 적용하기 위한 목적으로 공구 마모 모니터링 시스템을 개발한 내용을 소개한다. 앞선 강구선 등의 연구를 기초로 가공 공정 중에 실시간으로 절삭 계수를 식별하고, 초기의 절삭 계수와 갱신된 절삭 계수와의 관계를 정의하여 나타낸 마모 계수로부터 공구 상태를 모니터링할 수 있도록 개발한 시스템을 보여준다. 개발된 공구 마모 모니터링 시스템은 가공 사이클이 반복되는 동안 마모 계수의 변화를 통하여 공구의 마모 상태를 파악할 수 있도록 하였다.

본 연구를 통해 개발된 모니터링 시스템은 여러 종류의 센서를 통하여 동기화된 신호를 수집하도록 구성되어 있다. 절삭 계수의 식별을 위해 필요한 절삭력 데이터는 공구동력계를 이용하여 직접적으로 취득할 수도 있고, 현장의 상황에 따라 동작기계 스핀들과 이송축의 서보 드라이브 출력단에 설치된 전류 센서를 이용하여 계측된 전류 신호를 기반으로 추정하여 사용할 수도 있다.

본 논문에서는 공구 마모 모니터링 시스템의 뼈대가 되는 실시간 절삭 계수 식별과 이를 이용한 마모 계수 정의에 대해 먼저 설명하였고, 이후에 가공 실험을 통하여 개발된 공구 마모 모니터링 시스템의 효용성을 살펴보았다.

2. 실시간 절삭계수 식별

밀링 공정 중의 절삭 부하를 예측하기 위해서 여러 연구자들에 의해 기계적인 힘 모델이 개발되어 왔다[17-19]. 본 논문에서는 초기 절삭계수를 도출하기 위한 절삭력의 계산에 아래의 식(1)과 같이 Altintas에 의해 제안된 엔드 밀링 시의 절삭력 모델을 적용하였다[17].

$$\begin{aligned}
 dF_{t,j}(\theta, z) &= [K_{te}h_j(\theta_j(z)) + K_{te}]dz \\
 dF_{r,j}(\theta, z) &= [K_{re}h_j(\theta_j(z)) + K_{re}]dz \\
 dF_{a,j}(\theta, z) &= [K_{ae}h_j(\theta_j(z)) + K_{ae}]dz
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

수식에서 알 수 있듯이 절삭력은 절삭계수와 절단되는 칩의 형상의 관계에 의해 정의된다. 절단되는 칩의 형상은 가공 조건에 의해 계산될 수 있다. 최근 가상 가공 기술의 발전으로 실제로 가공이 진행되는 중에 칩의 폭이나 두께와 같은 형상에 대한 데이터를 얻을 수 있게 되었다. 절삭계수는 다양한 가공 조건으로 가공 실험을 실시하면서 계측한 절삭력을 기반으로 계산하여 구하게 되는데, 이렇게 다양한 가공 조건에 대한 가공 실험 데이터를 이용하는 방법으로는 사전 실험을 통하여 미리 절삭력을 예측하고자 하는 해당 공정에 필요한 절삭계수를 준비하여야만 한다. 이렇듯 사전 실험이 필요한 제한 사항을 극복하려는 연구들이 근래에 이루어지고 있으며[12,16] 본 논문에서는 강구선 등의 연구에서 제안한 방법을 적용하여 절삭계수를 계산하였다[16].

Fig. 1은 실시간으로 절삭계수를 식별하기 위한 절차를 보여준다.

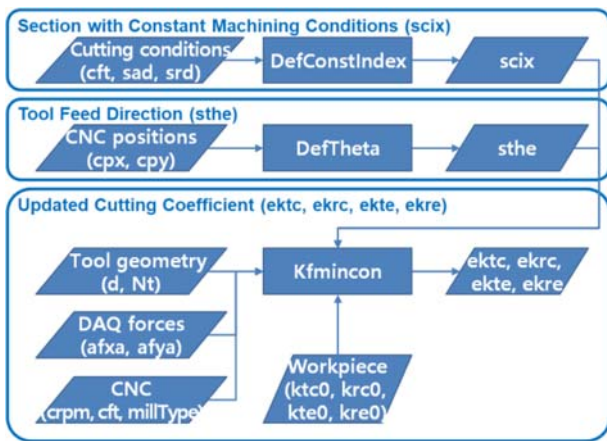


Fig. 1 Cutting coefficient updated process

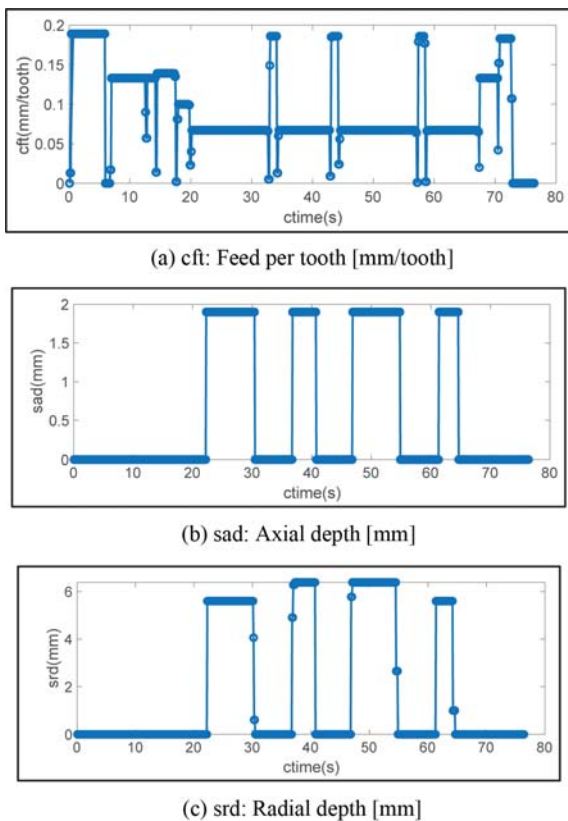


Fig. 2 Input factors for calculating sections with constant machining condition

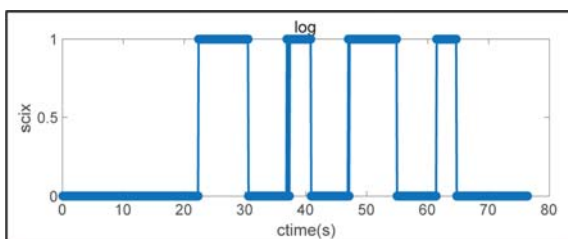


Fig. 3 Constant machining condition index output through calculation (scix → 0: Air-cut, non-constant machining condition / 1: Constant machining condition)

가공 공정 중에 절삭계수를 식별하기 위해서는 안정적인 절삭력 데이터를 획득할 수 있도록 가공 중에 일정한 조건으로 절삭이 이루어지는 구간을 판별하고, 이 구간에서 측정된 절삭력을 이용하게 된다. Fig. 1에서 맨 위쪽 사각형 상자 안의 내용들은 가공 조건이 일정한 구간을 선별하기 위한 절차를 나타낸 것이다. 가공 조건이 일정한 구간의 선별에는 가상 가공 기술을 이용하였는데, Fig. 2와 같이 날당 이송량과 축방향 절삭 깊이, 반경 방향 절삭 깊이를 종합적으로 이용하여 판단하게 된다. Figs. 2와 3은 가공조건 일정 구간(SCIX) 구분을 위한 입력과 출력값의 예를 보여주는데, 가공조건이 일정한 구간을 나타내는 SCIX (Steady-Cut Index)는 날당이송량(Feed per Tooth), 축방향 절삭 깊이(Axial Depth), 반경방향 절삭깊이(Radial Depth)가 모두 균일한 경우를 의미한다. SCIX는 가공조건이 균이한 구간은 1로 정의하고, 일정하지 않은 구간은 0으로 정의하며, 이후의 과정에서 SCIX가 1인 구간에서만 실시간으로 절삭계수를 계산하게 된다.

절삭력 데이터는 가공 공정 중에 공구동력계를 이용하여 측정된 값을 이용하는데, 테이블형 공구동력계를 이용하여 공구의 이송 방향 기준으로 측정된 절삭력을 공구의 절삭날을 기준으로 변환하여 이용한다. Fig. 1 중간 부분 사각형 상자 안의 내용들은 이 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 1 가장 아랫부분 사각형 상자 안의 내용들은 위에서 설명한 가공 조건이 일정한 구간에 해당하는 절삭력 데이터를 이용하여 절삭 계수를 식별하는 절차를 나타낸 것이다. 절삭 계수의 계산 시에는 비교적 작은 크기를 갖는 축방향 성분(K_{ac} , K_{ae})을 제외하였는데, 이를 위하여 Z축의 절삭깊이 조건을 고정하였으며, 가공 시에 절삭력에 지배적인 영향을 미치는 나머지 두 방향의 성분인 K_{rc} , K_{re} , K_{lc} , K_{le} 에 대하여만 절삭계수를 식별하였다.

3. 실시간 절삭계수 식별 기반의 절삭계수 갱신 및 공구마모 모니터링 인자로서의 활용

2장에서 설명한 방법을 바탕으로 절삭계수를 실시간 식별하는 과정에서 시뮬레이션 데이터와 실측 데이터와의 동기화를 통해 실측 절삭력 데이터 중에서 가공 조건이 일정한 구간을 선별하게 된다. 그런데, 실제 공정이 진행되는 중 가공을 위해 공구가 소재에 진입하는 시점과 탈출하는 시점에는 오차가 발생할 수 있다. 가공 조건이 일정하게 유지되는 구간에서만 절삭계수가 계산되도록 하는 과정에서 이렇게 오차가 발생하는 부분들을 특이값으로 처리하였고, 절삭계수 계산 시 배제될 수 있도록 하였다. Fig. 4는 가공 조건 일정 구간을 판단하고, 특이값을 배제하여 절삭계수를 계산해 내는 과정을 살펴볼 수 있는 그래프이다.

Tables 1, 2, 3은 실시간 절삭계수 식별을 통한 절삭계수 갱신을 설명하기 위한 표이다. 강구선의 절삭계수 식별 방법[16]에

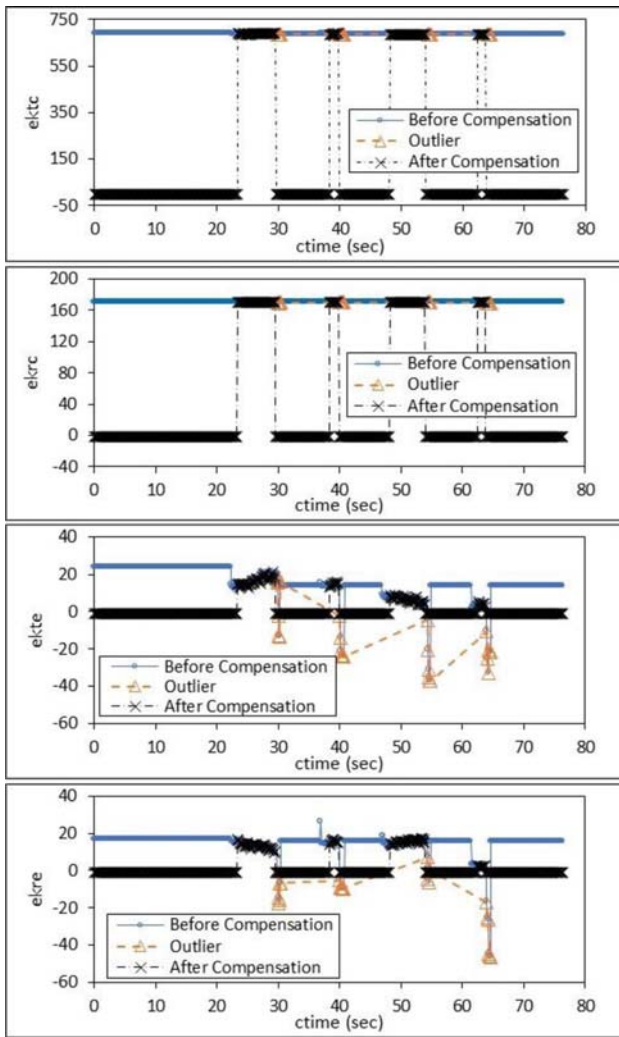


Fig. 4 Real-time calculated Tool wear coefficient

Table 1 Cutting coefficient update process: Initial cutting coefficient

Ktc	Krc	Kte	Kre
688.490	170.520	24.250	16.720

Table 2 Cutting coefficient update process: Realtime cutting coefficient identification (In machining process)

Ctime [s]	Ktc	Krc	Kte	Kre
...
23.375	688.073	170.585	14.392	16.134
23.475	688.115	170.596	15.302	16.600
23.575	688.102	170.573	15.120	15.998
...

Table 3 Cutting coefficient update process: Updated cutting coefficient (After machining cycle)

Ktc	Krc	Kte	Kre
687.902	170.503	11.345	13.377

의하면 알고리즘의 시작을 위해 최초에는 임의의 절삭계수를 지정하여야 하는데, 이는 다양한 가공 조건에 대한 가공 실험을 통하여 측정된 절삭력을 바탕으로 절삭계수를 식별하는 기존의 방법을 이용하여 얻은 값을 이용하였다. Table 1에 나타난 절삭계수 값이 그것이다.

개발된 모니터링 시스템에서는 이 초기값으로부터 시작하여 일정한 가공 조건으로 가공이 이루어지는 구간들에 대하여 0.1초 간격으로 절삭계수를 다시 식별하게 된다. Table 2는 가공 공정 중에 0.1초 간격으로 갱신되는 절삭계수를 나타낸 것이다. 하나의 가공 사이클이 종료되면, 가공 공정 중에 실시간으로 식별되었던 절삭계수들의 평균값을 취하여 현재 가공 사이클이 종료된 시점에서의 대표값으로 갱신하면서 기존의 절삭계수 값을 대체하여 기록하게 된다. Table 3에 나타난 값이 그것이다. 실시간으로 식별된 절삭계수들의 평균값을 취하는 이유는 공정 중에 확인되지 않는 다양한 이유로 절삭력이 일시적으로 상승하여 크게 계산된 절삭계수로 인해 발생할 수 있는 공구 상태 판단 오류를 줄이기 위함이다.

초기의 절삭계수 값과 갱신된 절삭계수 값들을 아래의 식(2)와 같이 정의하게 되면 두 절삭계수 성분(K_t, K_r)을 기존값에 대한 갱신값의 비율 형태로 나타낼 수 있다[12].

$$K_t(j) = \frac{optK_{tc}(j)}{optK_{tc, initial}} \frac{optK_{te}(j)}{optK_{te, initial}} \tag{2}$$

$$K_r(j) = \frac{optK_{rc}(j)}{optK_{rc, initial}} \frac{optK_{re}(j)}{optK_{re, initial}}$$

식(2)에 나타난 두 값을 하나의 합성된 형태로 식(3)과 같이 계산하여 공구의 마모 상태를 살펴보기 위한 지표로 활용하였다. 본 연구에서 개발한 모니터링 시스템에서는 이 지표를 Kwear라고 명명하였으며, 하나의 가공사이클이 종료될 때마다 변화된 하나의 값으로 갱신될 수 있도록 하여 여러 차수의 가공 사이클이 진행되는 동안에 공구의 마모 상태 변화를 판단할 수 있는 지표로 활용하였다.

$$Kwear = \sqrt{K_t(j)^2 + K_r(j)^2} \tag{3}$$

4. 검증을 위한 가공 실험 및 고찰

3장에서 설명한 공구 마모 진행 상태 판단을 위한 지표인 Kwear의 활용성을 검증하기 위하여 가공 실험을 실시하였다. 가공 실험은 SM45C와 Ti6Al4V의 두 가지 소재에 대하여 진행하였다. SM45C 소재에 대한 가공 실험은 지름 16 mm의 두 날 인서트 타입의 엔드밀을 사용하였고, 가공 깊이 3 mm와 가공폭 1 mm에 대하여 3,671 RPM의 스핀들 속도와 440 mm/min의 공구 이송 속도로 가공하도록 조건을 설정하였다. Ti6Al4V 소재에 대한 가공 실험은 지름 10 mm의 두 날 솔리드 엔드밀을 사용하였고, 가공 깊이 0.9 mm와 가공폭 3.5 mm에 대하여 1,911



Fig. 5 Device setting

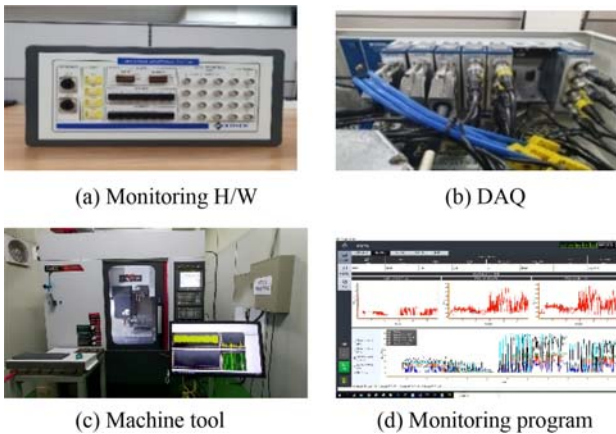


Fig. 6 Monitoring hardware and software

RPM의 스피들 속도와 306 mm/min의 공구 이송 속도로 가공하도록 조건을 설정하였다. 가공 사이클을 진행하는 동안에 이동 설치가 가능한 현미경 장치를 이용하여 스피들에서 공구를 탈거하지 않은 상태로 공구의 마모 상태를 측정하였다. Fig. 5는 실험을 위한 장치의 설치 모습을 보여준다. 가공장비는 3축 머시닝센터를 사용하였으며, 가공 중에 절삭력 측정을 위하여 Kistler 사의 9265B 공구동력계(Tool Dynamometer)를 사용하였다. 절삭계수 도출을 위한 절삭력 신호와 CNC정보는 자체 개발한 통합 모니터링 시스템을 사용하여 수집하였고, 이 모니터링 시스템은 Fig. 6에 나타난 것과 같은 하드웨어와 소프트웨어로 구성이 되어 있다.

Fig. 7은 SM45C 소재에 대한 모든 가공 사이클이 종료된 이후에 공구 마모 상태를 측정한 사진이다. Figs. 8은 7을 관찰한 동일한 시점에 모니터링 시스템의 공구 마모 상태 파악을 위한 화면을 캡처한 이미지이다. 실험 결과, Fig. 8과 같이 SM45C 소재에 대한 가공에서 공구 마모 상태 판단을 위한 지표인 Kwear 값이 가공 사이클마다 지속적으로 상승하는 모습을 보이고 있다.

Figs. 9는 모니터링 시스템에서 8에서와 같이 자동으로 계산된 Kwear 값과, 7에서와 같이 광학 현미경을 이용하여 측정된 공구 마모 수치를 하나의 그래프로 나타낸 것이다. 공구의 마모 수치는 Fig. 7에서와 같이 두 개의 날에 대하여 측정된 수치의

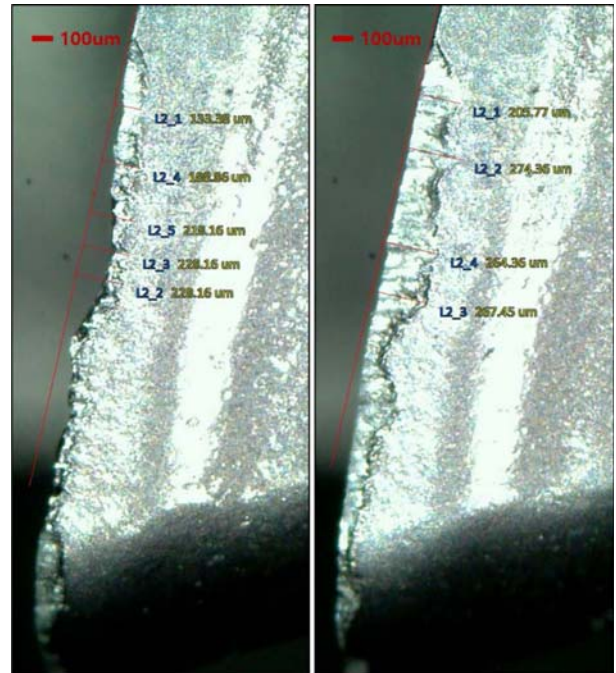


Fig. 7 Pictures of measured tool wear (Workpiece: SM45C)

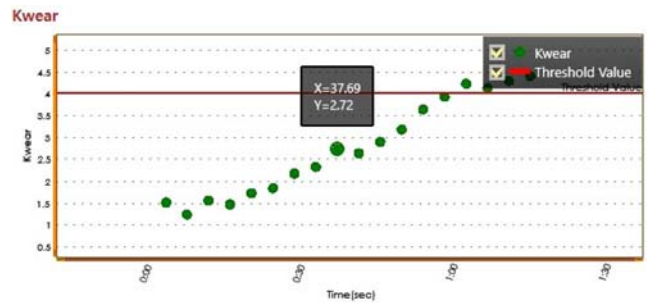


Fig. 8 Kwear update capture of monitoring program (Workpiece: SM45C)

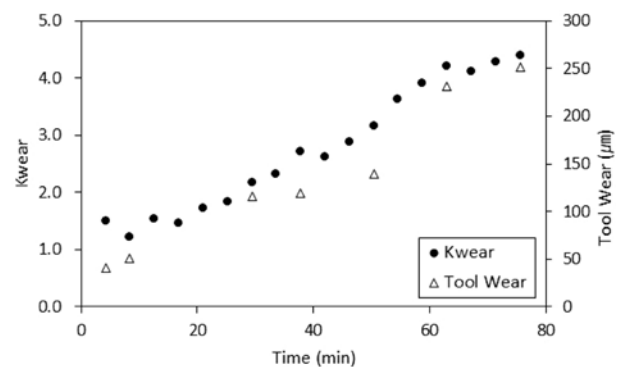
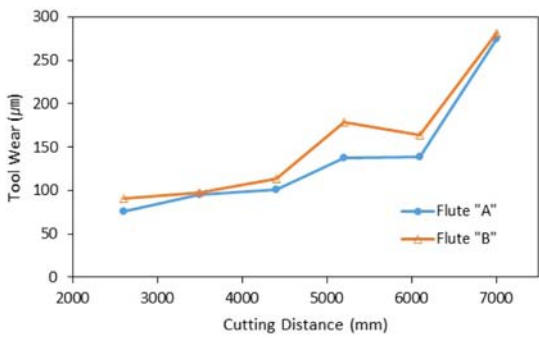
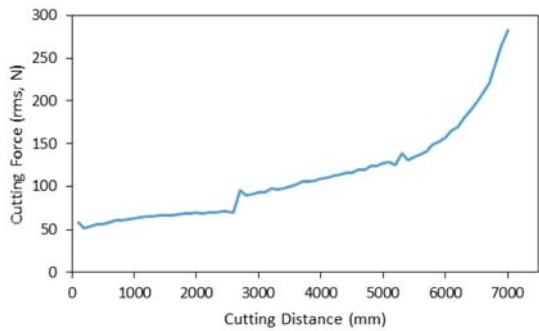


Fig. 9 Comparison of tool wear data and tool wear coefficient (Workpiece: SM45C)

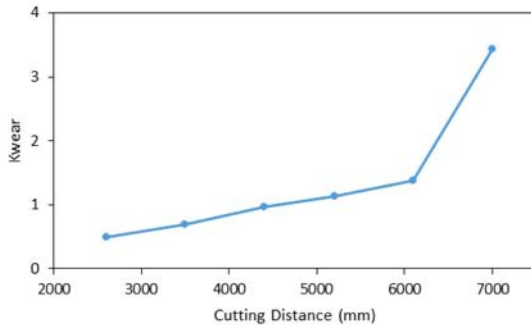
평균값을 사용하여 나타내었다. Fig. 9를 통해 SM45C 소재에 대한 가공 실험에서 공구 마모의 진행과 Kwear 값의 변화가 매우 높은 상관관계를 보여줌을 판단할 수 있다.



(a) Optically measured tool wear



(b) Cutting force measured with a tool dynamometer



(c) Cutting coefficient calculated by monitoring system

Fig. 10 Experimental results for Ti6Al4V

Fig. 10은 Ti6Al4V 소재에 대한 가공 실험 결과들을 보여준다. Fig. 10(a)는 광학식으로 측정된 공구 마모를 나타낸 것이며, 정확하게 동일한 위치를 관찰하기 어려운 한계와 측정을 위한 포인트 선택의 오차를 내포하고 있으나, 전반적으로 가공거리에 따라서 마모가 증가하는 것을 알 수 있으며, 가공거리 약 6,000 mm 이상에서 급격하게 증가하는 모습을 보인다. Fig. 10(b)는 가공거리에 따른 실측 절삭력 데이터로서, 가공거리에 따라 절삭력이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 공구마모와 마찬가지로 가공거리 약 6,000 mm 이상에서 급격하게 증가하는 모습을 보인다. Fig. 10(c)는 하나의 사이클이 끝난 이후 공구마모를 측정하는 시점에서 갱신된 Kwear 데이터들인데, 공구마모 데이터와 정확하게 일치하지는 않지만 가공거리에 따라서 값이 증가하는 현상과 가공거리 약 6,000 mm 이상에서 급격하게 값이 증가하는 경향은 유사하게 나타났다. Fig. 10의 3개의 데이터의

경우 기본적으로 가공거리에 따라서 증가하는 현상이 유사하게 나타나며, 약 6,000 mm 이상을 가공할 경우 각 값들이 급격히 증가하는 현상이 동일하게 나타나고 있다.

공구 교체 주기 기준으로서의 Kwear 상한값 설정은 사용환경과 사용자의 기준에 의존적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 선행 연구[12]와 직접적인 실험들을 통한 데이터에 기반하여 마모 한계에 대응하는 Kwear 수준을 4로 설정하였고, 해당 수준의 대략적인 공구마모는 약 300 µm 안팎으로 나타나고 있다. 개발된 모니터링 시스템에는 사용자들이 참고할 수 있도록 하기 위하여 Fig. 8에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 Kwear 값이 4인 위치를 화면상에 붉은색 가로선으로 표시하였다. 그러나 이 설정치는 가공 현장의 요구나 지속적인 데이터의 축적을 통해 수정 가능한 것이다.

본 논문의 실험들에서는 절삭력의 실시간 측정을 위해서 공구동력계를 사용하였다. 그런데, 실제 가공 현장에서는 비용상, 환경상의 이유 등으로 공구동력계를 사용하기에는 어려움이 있다. 본 연구를 통해 개발한 모니터링 시스템은 이러한 현장의 상황을 고려하여 간접적인 방법으로 절삭력을 추정할 수 있도록 개발되어 있다. 스피들과 이송축 서보 드라이브의 출력단에 설치된 전류센서를 이용하여 측정된 신호를 기반으로 절삭력을 추정하기 위한 기초 연구가 이미 선행되었으며[20], 절삭계수의 계산 시에도 전류신호로부터 추정된 절삭력을 사용할 수 있도록 수정 가능하다.

앞에서 보여준 서로 다른 가공 조건으로 SM45C와 Ti6Al4V 소재에 대하여 실시한 가공 실험 결과는 실제 가공 현장에서 공정 중에 측정이 어려운 공구 마모 상태에 대한 정보를 본 연구를 통해 구현한 모니터링 시스템을 통하여 얻을 수 있는 가능성을 보여주었다. 각 가공 사이클이 진행됨에 따라서 갱신된 절삭계수의 평균값은 각 가공 사이클이 끝난 이후에 앞에서 나타낸 식(2)와 식(3)에 의해 Kwear의 수치로 변환되어 파일에 기록 및 화면에 표시된다. 가공 사이클들이 진행되는 동안의 Kwear 값의 변화 경향에 대한 정보는 실제 가공현장에서 작업자가 간접적으로 공구마모의 진행 상태를 예측할 수 있는 지표로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

5. 결론

공구의 마모 현상은 제품의 품질 및 사업자의 금전적인 손실과 직접 연관이 있어서 연구자와 현장의 작업자 모두에게 중요한 관심사이다. 공구 마모 모니터링 시스템의 구현에 있어서 모든 가공 상황에 적용 가능한가라는 의문은 연구자들의 지속적인 과제로 남아있다.

본 논문은 공구 마모 상태 변화에 대한 간접적인 정보전달 방법으로서 개발한 모니터링 시스템을 소개하였다. 공구의 마모와 밀접한 관계를 가지는 절삭계수의 특성을 이용하여 나타낸 공구 마모에 대한 지표를 Kwear로 명명하여 사용하였다. 근래의

절삭계수와 공구마모의 관계 특성에 대한 연구[12]와 실시간 절삭계수의 식별에 대한 연구[16]는 본 연구에서 소개한 공구 마모 모니터링 시스템의 개발에 큰 기여를 하였다. 두 가지 소재에 대한 서로 다른 가공 조건을 이용한 가공 실험 결과들을 통해 볼 때, 개발된 모니터링 시스템의 Kwear 값의 변화 데이터는 다양한 가공 환경에서의 공구 마모 상태를 간접적으로 예측하는데 있어서 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

기존 연구들을 현장에 적용하는데 있어서의 제약사항으로 작용하는 절삭력 측정과 관련하여서, 본 연구 과제에서는 공구동력계를 대체할 수 있는 방법으로써 전류 신호 기반의 절삭력 추정 방법에 대한 선행 연구를 통하여 준비해오고 있다. 향후 공구 마모 모니터링 시스템의 현장 적용성의 향상을 위하여 절삭계수 계산 시 전류 신호 기반의 추정 절삭력을 활용하는 것에 대한 검증 및 보완과 보다 다양한 가공 상황에 대한 데이터의 축적이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 “장비제어공정 통합 가상공작기계 기술 및 이에 기반한 공작기계 지능화 원천기술개발(No. 20000285)” 과제의 후원으로 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Liang, Q., Zhang, D., Coppola, G., Mao, J., Sun, W., Wang, Y., Ge, Y., (2016), Design and analysis of a sensor system for cutting force measurement in machining processes, *Sensors*, 16(1), 70.
- Tansel, I. N., Demetgul, M., Bickraj, K., Kaya, B., Ozcelik, B., (2013), Basic computational tools and mechanical hardware for torque-based diagnostic of machining operations, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(1), 147-161.
- Rizal, M., Ghani, J. A., Nuawi, M. Z., Haron, C. H. C., (2015), Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52-53, 559-576.
- Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., König, W., Teti R., (1995), Tool condition monitoring-The status of research and industrial application, *CIRP Annals*, 44(2), 541-567.
- Song, K. H., Lee, D. Y., (2018), The state of the art in monitoring technology of machining operations, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(3), 293-304.
- Wang, G., Yang, Y., Xie, Q., Zhang, Y., (2014), Force based tool wear monitoring system for milling process based on relevance vector machine, *Advances in Engineering Software*, 71, 46-51.
- Liu, T.-I., Song, S.-D., Liu, G., Wu, Z., (2013), Online monitoring and measurements of tool wear for precision turning of stainless steel parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(9), 1397-1407.
- Wang, G., Guo, Z., Yang, Y., (2013), Force sensor based online tool wear monitoring using distributed Gaussian ARTMAP network, *Sensors and Actuators A: Physical*, 192, 111-118.
- Karandikar, J., McLeay, T., Turner, S., Schmitz, T., (2015), Tool wear monitoring using naive Bayes classifiers, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9), 1613-1626.
- Wang, G., Yang, Y., Li, Z., (2014), Force sensor based tool condition monitoring using a heterogeneous ensemble learning model, *Sensors*, 14(11), 21588-21602.
- Ritou, M., Gamier, S., Furet, B., Hascoët, J.-Y., (2014), Angular approach combined to mechanical model for tool breakage detection by eddy current sensors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 44(1-2), 211-220.
- Nouri, M., Fussell, B. K., Ziniti, B. L., Linder, E., (2015), Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 1-13.
- Wang, J.-J., Zheng, C., (2002), Identification of shearing and ploughing cutting constants from average forces in ball-end milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(6), 695-705.
- Adem, K. A., Fales, R., El-Gizawy, A. S., (2015), Identification of cutting force coefficients for the linear and nonlinear force models in end milling process using average forces and optimization technique methods, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(9), 1671-1687.
- Gonzalo, O., Beristain, J., Jauregi, H., Sanz, C., (2010), A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(9), 765-774.
- Kang, G., Kim, J., Choi, Y., Lee, D. Y., (2022), In-process identification of the cutting force coefficients in milling based on a virtual machining model, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 23(8), 839-851.
- Altintas, Y., (2012), *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 2nd edition, Cambridge University Press.
- Mandal, N., Doloi, B., Mondal, B., (2012), Force prediction model of zirconia toughened alumina (ZTA) inserts in hard turning of AISI 4340 steel using response surface methodology, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(9), 1589-1599.
- Luan, X., Zhang, S., Li, G., (2018), Modified power prediction model based on infinitesimal cutting force during face milling process, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5(1), 71-80.

20. Song, K. H., Lee, D. Y., Park, K. H., Kim, J. H., Choi, Y. J., (2020), Cutting force estimation using feed motor drive current in cutting process monitoring, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 37(11), 803-812.

**Young Jae Choi**

Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is cutting process monitoring and optimization.

E-mail: youngjae@kitech.re.kr

**Ki Hyeong Song**

Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is precision machining and process monitoring.

E-mail: skhgood@kitech.re.kr

**Jae Hyeok Kim**

Researcher with the Digital Transformation R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology. His current research topics are in-process optimization, process monitoring and energy monitoring of machine tools.

E-mail: vespa@kitech.re.kr

**Gu Seon Kang**

Ph. D. candidate of Mechanical Engineering at KAIST and worked at the Korea Institute of Industrial Technology until July 2021. His current research interest is high-precision optical metrology using the optical frequency comb of the femtosecond pulse laser.

E-mail: kang9sun@kaist.ac.kr