

# 하이브리드 방식의 절삭력 평준화를 통한 CNC 엔드 밀링에서의 공구 마모 모니터링 시스템

이강재#, 양민양\*

## Tool Wear Monitoring System in CNC End Milling using Hybrid Approach to Cutting Force Regulation

Kang-Jae Lee<sup>#</sup>, Min-Yang Yang<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

A Tool wear monitoring system is indispensable for better machining productivity with guarantee of machining safety by informing the tool changing time in automated and unmanned CNC machining. Different from monitoring using other signals, the monitoring of spindle current has been used without requiring additional sensors on machine tools. For the reliable tool wear monitoring, current signal only of tool wear should be extracted from other parameters to avoid exhaustive analyses on signals in which all parameters are fused. In this paper, influences of force components of parameters on measured spindle current are investigated and a hybrid approach to cutting force regulation is employed for tool wear signal extraction in the spindle current. Finally, wear levels are verified with experimental results by means of real-time feedrate aspects changed to regulate the force component of tool wear.

**Key Words :** Tool Wear Monitoring(공구 마모 모니터링), Force Components(절삭력 요소), Cutting Force Regulation(절삭력 평준화), Spindle Current(주축 전류), Feedrate Override(이송속도 오버라이드)

## 1. 서 론

CNC 가공의 생산성 향상은 가공 자동화 및 무인화에서의 가공 안정성 확보를 통해 극대화 될 수 있다. 그러나 실제현장에서의 가공 자동화 및 무인화의 문제점은 가공 중 발생하는 공구 이상의 감지 및 이

에 따른 공구 교체를 위해 작업자가 기계로부터 자유로울 수 없다는 것이다<sup>1-2)</sup>. 따라서 1980년대 후반부터 공구 상태 모니터링 시스템 개발에 관한 연구가 진행되고 왔고, 모니터링 시스템을 통해 적절한 시기에 공구를 교체할 수 있도록 공구 이상의 감지 및 공구 이상 정도의 확인이 요구되었다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 기계에 부가적인 센서를 통해 획득되는 절삭력 신호, 진동 신호, 음향 신호 혹은 기계로부터 직접 획득되는 주축 전류의 해석을 통한 연구가 진행되었다<sup>3-4)</sup>.

# 교신저자 : 한국과학기술원 대학원 기계공학과  
E-mail : za\_e@kaist.ac.kr

\* 한국과학기술원 기계공학과

절삭력 신호는 크게 시간 영역에서 해석되는 정적 신호와 주파수 영역에서 해석되는 동적 신호로 나뉜다. 동적 신호의 주파수 영역 해석은 공구의 급작스런 이상만을 감지하였으며 많은 데이터를 필요로 하여 실시간 적용이 어렵고, 시간 영역에서 해석되는 정적 신호는 피삭재 혹은 가공 조건과 같은 공구 상태 외 인자에도 민감하여 부가적인 동적 신호 해석을 필요로 하였다. 또한 측정 장비인 공구동력계는 고가이며 현장 적용에 어려움이 있었다.

진동 신호는 주파수 영역에서 전력스펙트럼밀도(PSD)와 같은 해석이 진행되었으나 점진적인 공구 이상 감지에는 적합하지 못하며 부가적 신호가 요구되어 센서 혼합(fusion)으로 인한 복잡성이 야기되었다.

음향 신호의 주파수 영역 해석 역시 급작스런 공구 파손만을 감지할 수 있었으며 피삭재, 가공 조건 및 기계 구조 등과 같은 공구 상태 외 인자에도 매우 민감한 단점을 보였다.

이와 같은 기존 연구는 공구의 극단적인 이상 상태만을 감지하였을 뿐, 공구 교체를 위해 동시에 요구되는 점진적인 공구 이상 상태의 모니터링을 이루지 못하였다. 이는 기존의 연구가 가공 공정에 있어 여러 주변 인자에 의한 신호 요소들이 혼재된 획득 신호의 처리 및 해석에 중점을 두었기 때문이다. 또한 기존 연구의 공구 상태 모니터링 시스템은 가공 자동화 및 무인화에서 근본적으로 요구되는 가공 안정성을 고려하지 않았다. 즉, 가공 안정화를 통한 공구 이상 억제가 적용되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구의 문제점으로부터 다음의 사항이 고려된다.

- (1) 신호 획득의 용이성
- (2) 실시간 적용의 편의성
- (3) 가공 안정성
- (4) 공구 상태 외 인자에 의한 신호 요소 제거
- (5) 점진적인 이상인 공구 마모 모니터링

본 연구의 목적은 가공 절삭력의 정적 신호를 대변하는 주축 전류 신호를 모니터링하고, 하이브리드 방식의 절삭력 평준화를 통하여 주축 전류 신호 내의 공구 상태에 관계하지 않는 요소의 영향을 제거한 공구 마모만의 절삭력 요소를 토대로 공구 마모를 정량적으로 판단하는 공구 상태 모니터링 시스템을 구현하는 것으로, 절삭력 평준화에 의한 가공 안정성을

통하여 공구 이상 현상의 최소화도 함께 고려하였다

이를 위해, 가공 공정 중 발생하는 절삭력 요소에 대해 알아보고 측정 주축 전류에서의 공구 마모 성분의 신호 분리에 대해 알아본다. 신호 분리를 위해 적용되는 하이브리드 방식의 절삭력 평준화의 구성 요소인 오프라인 이송속도 제어 및 실시간 이송속도 제어를 소개하고 이를 통한 공구 마모 신호의 분리를 확인한다. 마지막으로 공구 마모에 의한 주축 전류의 변화에 실시간 적용되는 이송속도 오버라이드의 양상을 알아보고 이를 통한 공구 마모의 정량적인 모니터링을 실제 가공 공정에서의 실험을 통하여 확인한다.

## 2. 공구 마모에 의한 신호 분리

### 2.1 주축 전류에서의 절삭력 요소

본 연구에서는 부가적인 센서를 요구하지 않는 주축 전류 모니터링 방법을 적용한다<sup>[5]</sup>. 주축 전류 내 절삭력 요소는 서로 독립적인 인자에 의한 것으로 Fig. 1과 같다<sup>[6]</sup>. 가공 조건에 의한 예측 가능한 요소와 이를 제외한 예측 불가능한 요소들로 나뉜다.

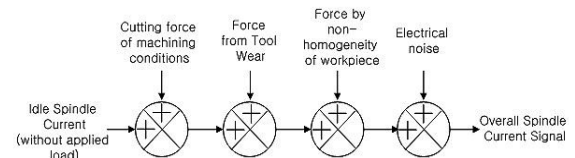


Fig. 1 Force components in spindle current signal

### 2.2 공구 마모에 의한 전류 신호 분리

주축 전류로부터 공구 마모에 의한 신호 요소의 분리를 통한 점진적인 공구 마모의 정량적인 모니터링을 위해 다른 인자들의 영향을 선택적이고 순차적으로 제거하도록 한다. 이를 위해 오프라인 이송속도 제어 모듈과 실시간 이송속도 제어 모듈로 구성된 하이브리드 방식의 절삭력 평준화가 적용된다.

## 3. 하이브리드 방식의 절삭력 평준화

공구 마모에 관련되지 않은 신호 요소를 제거하기

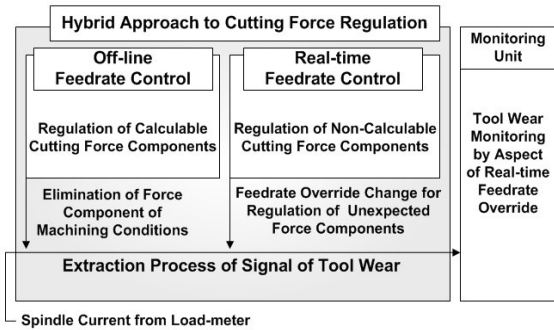


Fig. 2 Hybrid approach to cutting force regulation

위해 적용된 하이브리드 방식의 절삭력 평준화의 개념도는 Fig. 2와 같다.

본 연구에서의 하이브리드 방식이란 오프라인 이송속도 제어와 실시간 이송속도 제어가 상호 보완적으로 적용된 절삭력 평준화를 의미한다. 오프라인 이송속도 제어를 통해 1차적으로 가공 조건에 의해 선행 계산된 절삭력 요소가 평준화되고 이후 가공 중 측정되는 주축 전류에는 공구 마모 혹은 피삭재의 비균질성과 같은 예측 불가능한 신호 요소들만이 측정된다. 이러한 요소들은 가공 안정성을 위한 실시간 이송속도 제어를 통해 평준화되며 이 때 적용된 이송속도 오버라이드의 양상을 모니터링 함으로써 공구 마모의 감지 및 판단이 이루어질 수 있다.

### 3.1 오프라인 이송속도 제어 모듈

오프라인 이송속도 제어를 위해 먼저 가공 조건에 의한 절삭력 선행 계산이 이루어진다<sup>7)</sup>. 여러 방법 중에서 미소절삭력 모델을 이용한 방법은 엔드밀의 미소절삭요소에 작용하는 절삭력의 총합을 구하는 방식이다<sup>8)</sup>. 본 연구에서는 빠른 연산을 위해 Fig. 3과 같이 공구날의 미소 깊이에 대한 미소절삭력을 각 미소 각도 (0, 5, 10, ..., 180°)에서 공구의 날 방향으로 누적하는 방식으로 선행 계산하며 메모리에 저장한다. 그 후, 가공 NC Code로부터 소재와 공구간의 절삭 영역 및 공구 이송 벡터가 입력되면 메모리에 저장되어 있는 미소절삭력으로 식 (1)과 같은 최대 순간 절삭력을 Fig. 4와 같이 구하게 된다.

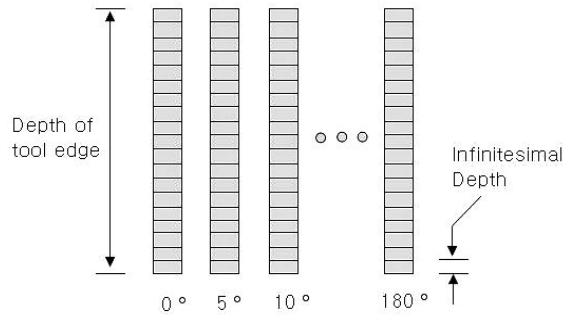


Fig. 3 Infinitesimal cutting force in cutting edge

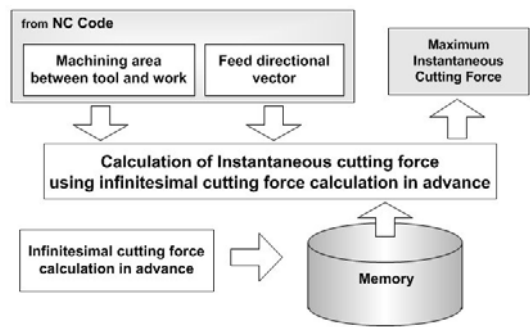


Fig. 4 Cutting force using infinitesimal cutting force calculation in advance

$$F(\theta) = \sum_n^N (f_{L,e}(\theta_n) - f_{L,s}(\theta_n)) \quad (1)$$

여기서,  $F(\theta)$ 는 공구 회전각  $\theta$ 에서의 순간 절삭력,  $N$ 은 공구날 수, 그리고  $f_L(\theta)$ 은 회전각-공구날 좌표계에서의 누적 미소 절삭력으로 공구날과 피삭재 간에 접촉하는 부분과 접촉하지 않는 부분을 고려한 빼기 연산으로 구해진다.

Fig. 5는 오프라인 이송속도 제어 알고리즘을 보이고 있다. 기준 절삭력( $F_{ref}$ ) 설정을 위해 가공 추천 조건이 입력되고, 그 후 가공 경로를 나타내는 NC Code로부터 가공 조건에 의한 구간별 (*block*: 본 연구에서는 이송방향 2mm) 절삭력( $F_{block}$ )이 계산된다. 식 (1)을 통한 구간별 절삭력은 식 (2)와 같이 기준 절삭력과 비교되어 이송속도가 증가 혹은 감소로써 조정되며, 모든 가공 구간에 대해 예측 가능한 절삭력 요소를 평준화 시키는 이송속도를 지정하게

된다.

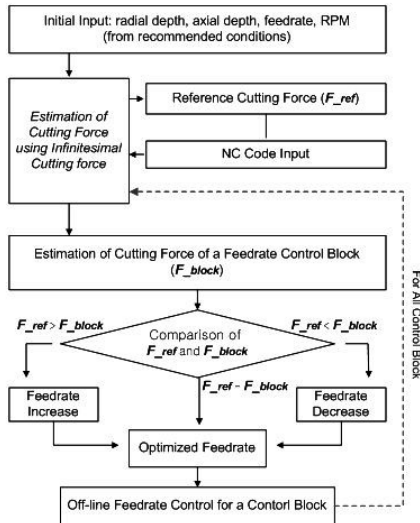


Fig. 5 Off-line feedrate control algorithm

$$NewFeedrate = \frac{F_{ref}}{F_{block}} \cdot NCCodeFeedrate \quad (2)$$

### 3.2 실시간 이송속도 제어 모듈

오프라인 이송속도 제어를 통한 예측 가능한 절삭력 요소의 평준화 이후, 실시간 이송속도 제어 모듈에서는 가공 안정성을 위해 가공 중 발생하는 예측 불가능한 절삭력 요소를 평준화한다.

실시간 이송속도 제어 과정을 통해 측정 주축 전류를 기준 주축 전류에 추종시키므로 주축 전류와 절삭력, 이송속도와 절삭력간의 관계를 알아볼 필요가 있다<sup>9-10)</sup>.

공작 기계의 주축계의 운동방정식은 식 (3)과 같다.

$$K_t I_m = J \frac{d\omega}{dt} + B_M \omega + T_f + T_d \quad (3)$$

여기서,  $K_t$ 는 주축 모터 상수,  $I_m$ 은 주축 전류,  $J$ 는 모터축의 등가관성,  $\omega$ 는 주축 회전속도,  $B_M$ 은 모터축의 점성 감쇠,  $T_f$ 는 모터축의 쿨롱 마찰 토크,  $T_d$ 는 외란 토크이다.

식 (3)은 주축 회전 속도가 일정한 정상상태에서는

식 (4)와 같이 절삭력과 주축 전류간의 선형 관계로 표현된다.

$$K_t I_m = C_s + r \cdot F_c \quad (4)$$

밀링 가공에서 이송속도와 절삭력 간의 관계를 알아보기 위해 공구 1회전의 평균 절삭력 ( $F_c$ )을 미소 날에서의 미소절삭력에 대한 적분을 통해 구하고 이를 식 (4)에 대입하면 결과적으로 식 (5)와 같이 이송속도와 주축전류와의 관계를 구하게 된다. 이 때, 식 (5)를 간략하게 표현한 식 (6)과 같은 선형 관계를 통해 Fig. 6와 같은 과정의 실시간 이송속도 제어가 진행되며, 알고리즘은 Fig. 7과 같다<sup>11)</sup>.

$$K_t I_m = C_s + r \cdot \frac{\int_0^{2\pi} p_s \frac{r}{T} \tan \alpha_h A(\alpha) d\phi}{T} \cdot f_t \quad (5)$$

$$I_m = A_f + B_f \cdot f_m \quad (6)$$

여기서,  $p_s$ 는 비절삭 에너지,  $\alpha_h$ 는 엔드밀의 비틀림각,  $f_t$ 는 날당 이송속도,  $f_m$ 는 분당 이송속도,  $\phi$ 는 공구회전각,  $N_t$  공구의 날수,  $T$ 는 공구회전주기,  $A$ 는 공회전 주축 전류,  $B$ 는 이송속도와 주축 전류간의 비례 계수이다.

추천 가공 조건으로부터 기준 주축 전류 ( $I_{ref}$ )를 설정하고 스핀들의 초기 구동으로 인한 주축 전류 피크 (peak)를 인지하여 공회전 주축 전류 ( $A$ )를 설정한다. 앞서 설정된 전류 값들과 현재 이송속도와의 관계로부터 식 (6)의 계수 ( $B$ )를 구하게 되고, 측정 주축 전류와 기준 주축 전류와의 차이가 허용 범위 내로 줄어들 때까지 이송속도 오버라이드를 변경 지령한다. 이러한 실시간 이송속도 제어 과정을 통해 예측 불가능한 신호 요소들이 평준화되며 이 때의 이송속도 오버라이드의 양상을 모니터링 하게 된다.

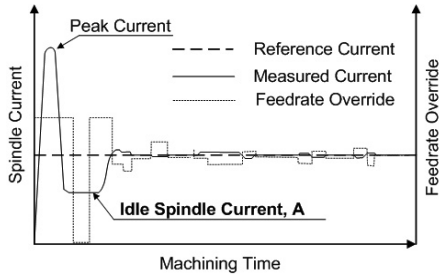


Fig. 6 Procedures of real-time feedrate control

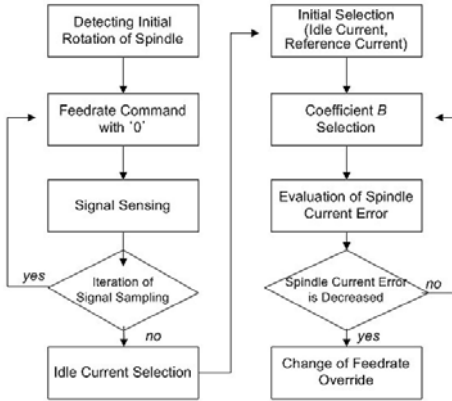


Fig. 7 Real-time feedrate control algorithm

feedrate control

하이브리드 방식의 절삭력 평준화의 성능을 검증하기 위해 Fig. 8(a)의 가공형상에 대해 실험을 진행하였다. 절삭력 평준화가 적용되기 전에 150mA의 편차를 보이던 측정 전류(b)는 오프라인 이송속도 제어를 통해 가공 조건에 의한 절삭력 요소가 평준화되어 50mA정도의 차이(c)를 보였다. 이후 실시간 이송속도 제어를 통해 20mA이내로 감소(d)되어 가공 중 불규칙적으로 변화하는 절삭력 요소가 대부분 평준화되어 기준 주축 전류에 추종함을 보인다. 따라서 하이브리드 방식의 절삭력 평준화를 통해 인자별 절삭력 요소 영향이 선택적이고, 순차적으로 제거될 수 있음을 확인하였다.

4. 실시간 이송속도 오버라이드를 통한 공구 마모 모니터링

4장에서는 실시간 이송속도 제어 모듈에서 측정 전류를 기준 주축 전류에 추종시키기 위해 변경 지령되는 이송속도 오버라이드를 통한 공구 마모 모니터링을 위해, 먼저 오프라인 이송속도 제어 후 공구 마모에 의해 증가한 전류 신호의 신뢰성을 확인한다. 전류 증가량에 의해 감소 지령되는 이송속도 오버라이드와 공구 마모 형상간의 관계를 통해 공구 마모를 모니터링하며 이 때, 공구 마모 외 인자들의 불규칙한 영향을 제거하기 위해 이송속도 오버라이드의 이동 평균값을 적용한다.

4.1 공구 마모에 의한 전류 신호 신뢰성

공구 마모를 고려한 절삭력 요소는 Fig. 9와 같으므로 식 (4)과 같은 절삭력 요소에 공구 마모영역에서의 마찰을 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_m = a + b \cdot F_c + k_1 \cdot \omega$$

$$= I_{MRR} + I_{fric} \tag{7}$$

여기서,  $\omega$ 는 공구 여유면의 공구 마모폭,  $I_{fric}$ 은 공구 마모면의 마찰에 의한 주축 전류이다.  $I_{MRR}$ 은 가공 조건에 의해 계산되는 소재 제거율 ( $Z_M$ )에 의

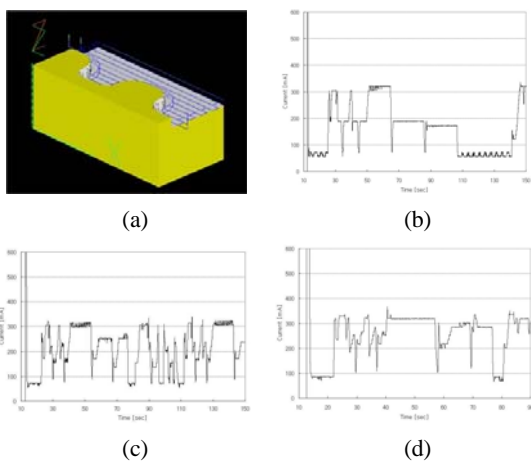


Fig. 8 Performance verification of hybrid approach to cutting force regulation: (a) Machining shape, (b) without cutting force regulation, (c) Off-line feedrate control, (d) Real-time

한 전류 값으로, 추천 가공 조건이 적용되면 실시간 이송속도 제어의 기준 주축 전류 ( $I_{ref}$ )로 설정되며 다음의 선형 관계와 같다.

$$I_{MRR} = A_{\beta} + B_{\beta} \cdot Z_M \quad (8)$$

식 (7)에서, 하이브리드 방식의 오프라인 이송속도 제어를 통해  $I_{MRR}$ 이 평준화되어 일정한 상수로 보면 측정되는  $I_m$ 은 공구 마모폭만의 함수로 표현될 수 있다. 실제 공구 마모가 발생하는 가공 실험에서, 식 (7)을 만족하는 Fig. 10과 같은 주축 전류의 증가와 실제 측정 공구 마모폭과의 선형관계로부터 공구 마모에 의한 주축 전류의 신뢰성을 확인할 수 있다.

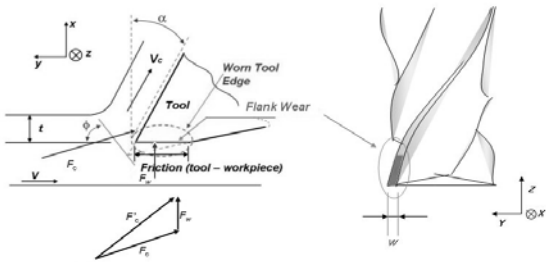


Fig. 9 Cutting force considering tool wear width

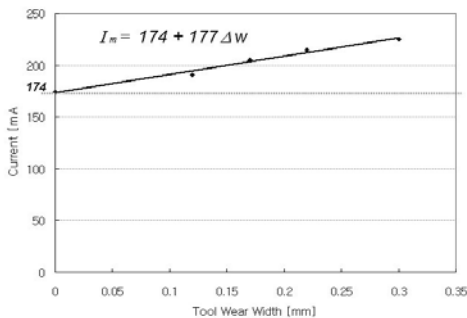


Fig. 10 Reliability of spindle current of tool wear

## 4.2 이송속도 오버라이드를 통한 공구 마모 모니터링

공구 마모에 의한 주축 전류의 증가량은 가공 안정성을 위한 실시간 이송속도 오버라이드의 적용으로 상쇄되며 이 때 변화하는 오버라이드의 양상을 통해 공구 마모 모니터링이 가능하게 된다.

먼저, 측정되는  $I_m$ 이 실시간 이송속도 제어를 통해 다음과 같이 초기 설정된  $I_{ref}$ 에 추종하게 된다.

$$I_m = I_{MRR} \cdot f_{ovr} + I_{fric} = I_{ref} \quad (9)$$

공구 마모로 인해 증가한 주축 전류량은 식 (8)과 (9)의 관계로부터 이송속도 오버라이드와의 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$I_{fric} = \frac{B \cdot Z_M}{100} (100 - f_{ovr}) \quad (10)$$

여기서,  $f_{ovr}$ 는 백분율 (%)로 지령되는 실시간 이송속도 오버라이드이다.

공구 마모 폭 ( $\omega$ )에 따른 주축 전류의 식 (7)을 식 (10)에 대입하면 식 (11)과 같이 공구 마모폭을 이송속도 오버라이드로 나타낼 수 있으며 공구 마모폭의 변화량에 대해 간략히 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta \omega = k_{ovr} \cdot \Delta f_{ovr} \quad (11)$$

이 때, 실시간 이송속도 오버라이드는 공구 마모 뿐만 아니라 예측 불가능한 다른 요인 역시 내재한 주축 전류 변화량에 대응하는 것이므로, 이동 평균을 적용하여 공구 마모 외 인자의 영향을 제거한 점진적인 모니터링을 할 수 있게 되며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$(f_{ave\_ \%})_i = \sum_{t=1+N_m}^{N+N_m} \frac{(f_{ovr\_ \%})_t}{N} \quad (12)$$

여기서,  $(f_{ovr})_t$ 는 실시간 제어 루프에서 결정되는 이송속도 오버라이드,  $N$ 은 평균을 위해 표본된 이송속도 오버라이드 개수,  $N_m$ 은 표본된 이송속도 오버라이드의 이동 주기이다.

Fig. 11은 실시간 이송속도 제어를 통한 가공 시 공구 마모로 인해 점진적으로 감소하는 이송속도 오버라이드 이동 평균값 (이하 이동 평균값)과 결과적으로 일정하게 측정되는 주축 전류를 보이고 있다. 이 때, Fig. 12와 같은 이동 평균값과 실제 공구 마모폭간의 상관 계수 0.98의 높은 선형 관계를 통해 (상관 계수 1 = 완전 선형 관계) 정량적인 공구 마모 판단이 가능함을 알 수 있다.

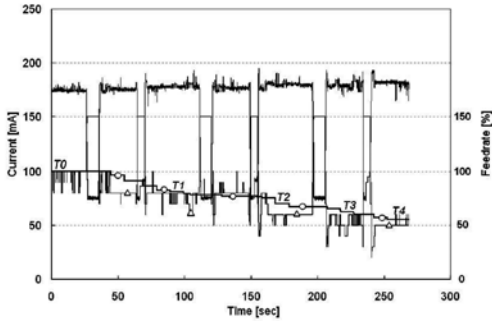


Fig. 11 Aspect of feedrate override and current

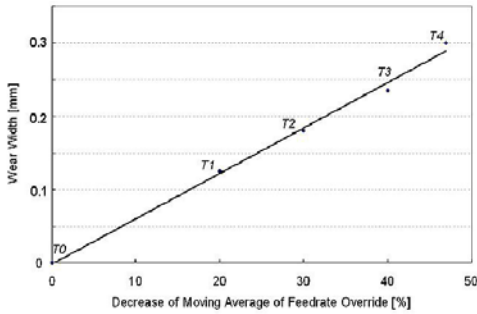


Fig. 12 Moving average of feedrate override and tool wear width in quantity

공구 마모로 인한 마찰력은 일반적으로 피삭재와 접촉하는 공구 마모면적과의 선형관계로 알려져 있다.<sup>[12-13]</sup> 공구 마모면은 가공 중 발생하는 마모폭과 가공 초기에 선정되는 축방향 절삭 깊이의 곱으로 근사되며 따라서 식 (11)에 축방향 절삭 깊이를 고려하면 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\omega = \frac{k_{ref}}{R_{Ad}} \cdot \Delta f_{ave} \quad (13)$$

여기서,  $k_{ref}$ 는 기준 축방향 절삭 깊이에서의 비례 계수,  $R_{Ad}$ 는 기준 축방향 절삭 깊이에 대한 각 공정에서의 축방향 절삭 깊이의 비(ratio)이다. 즉, 기준 축방향 절삭 깊이에서의 1회 실험에서 계수 ( $k_{ref}$ )를 구하고, 각 공정에서의 축방향 절삭 깊이의 비 ( $R_{Ad}$ )를 적용하면 다양한 축방향 절삭 깊이에서의 정량적인 공구 마모 모니터링이 가능함을 예상할 수 있으며 5장에서 이를 검증하도록 한다.

## 5. 공구 마모 모니터링 실험 및 결과

### 5.1 시스템의 구성

본 연구에서 구현된 공구 마모 모니터링 시스템의 주요부는 Fig. 13에서 보이고 있으며 주요부간의 인터페이스는 Fig. 14에서 보이고 있다.

실험에 사용된 CNC 머시닝 센터는 FANUC 0M컨트롤러가 장착된 대우 AL-40 모델이다. 오프라인 이



Fig. 13 System configuration

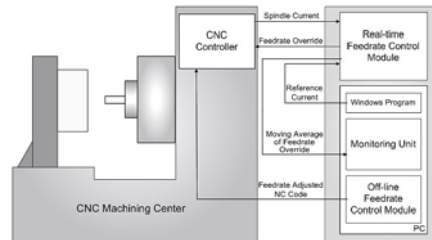


Fig. 14 Main interface of System

송속도 제어 모듈, 공구 마모 모니터링 유닛 및 실시간 이송속도 제어 모듈의 기준 주축 전류 설정 소프트웨어는 PC 기반이며, 실시간 이송속도 제어 모듈의 이송속도 오버라이드 조정을 위해 빠른 연산속도와 민첩한 응답성을 지닌 DSP (TMS320C31)가 내장된 컨트롤러를 사용되었다.

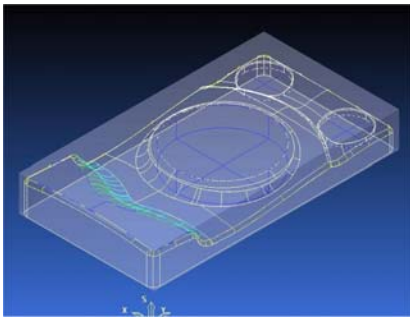
### 5.2 실제 공구 경로에서의 실험

실제 가공 형상 및 가공 경로에서의 공구 마모 모니터링의 성능을 검증하기 위해 Table 1과 같은 조건에서 실험을 실시하였다. 가공 형상은 스피커로서

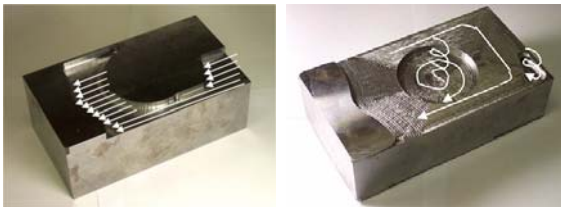
Fig. 15와 같다.

**Table 1 Experimental conditions**

	Exp #1	Exp #2
Tool Path Strategy	One-way (Directional parallel)	Offset (Contour parallel)
Axial Depth of Cut	8mm	5mm
$R_{ad}$	1	0.625
Tool Material	HSS-coated	TiAlN-coated
HRC Hardness	18 (SM45C)	18 (SM45C)
Tool Diameter( $\phi$ )	10mm	10mm



**Fig. 15 Practical machining model of speaker**



(a) (b)

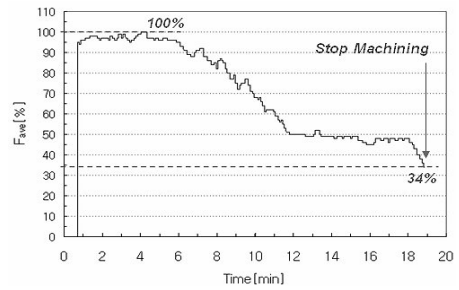
**Fig. 16 Path direction: (a) exp #1, (b) exp #2**

실제 가공 형상 실험에서의 공구 경로는 Fig. 16과 같다. 본 실험에 앞서 기준 축방향 절삭 깊이에서의 1회 실험을 통해  $k_{ref}(=3.0)$ 을 구하고, 식(13)에 이를 고려하여 축방향 절삭 깊이가 다른 각 실험에서 공구 마모 0.2mm가 예상되는 이동 평균값을 100%에서 감소한 각각 34%, 48%로 설정하였다. 일반적으로 0.3mm를 공구 마모폭의 한계로 설정하지만 본 연구에 사용된 머시닝센터의 특성상 0.2mm를 한계로 하였다.

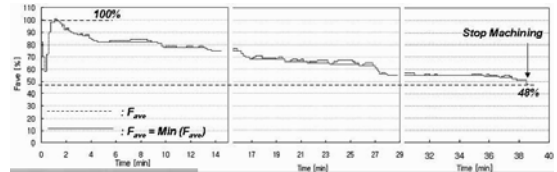
첫 번째 실험에서는 이동 평균값으로 400개의 이송속도 오버라이드를 취하고 100개 이동 주기로서 (5

초) 새로운 표본을 취하여 이동 평균값이 34%로 감소 될 때까지 가공을 진행하였다.

두 번째 실험에서는 이동 평균값으로 1000개의 이송속도 오버라이드를 취하고 200개의 이동 주기로서 (10초) 새로운 표본을 취하여 이동 평균값이 48%로 감소 될 때까지 가공을 진행하였다. 각 실험에서 시간에 따른 이동 평균값의 양상은 Fig. 17(a), (b)와 같으며 두 번째 실험에서는 이동 평균의 최소값 (Min [ $f_{ave}$ ])만을 취하여 더욱 점진적인 이송속도 오버라이드의 변화 양상이 보이도록 하였다.



(a)



(b)

**Fig. 17 Moving Average ( $f_{ave}$ ) : (a) exp #1, (b) exp #2**

실험 결과는 다음과 같다.

- 1) 각 실험에서 목표 공구 마모폭 (0.2mm)이 예상되는 각 이동 평균값 (34%, 48%)에서 가공을 멈추고 실제 측정된 공구 마모폭은 각각 0.18, 0.17mm로서 목표 공구 마모폭에 매우 근사한 값을 보였다.
- 2) 점진적으로 감소하는 이동 평균값을 통해 가공 중 발생하는 불규칙적인 신호 영향이 충분히 제거됨을 확인하였다.
- 3) 공구 마모가 발생하는 가공 시간 (수십 분 혹은 수 시간 이상)의 범주 내에서는 이동 평균으로 다소 늦어지는(수십 초) 응답성은 문제가 되지 않았다.
- 4) 이동 평균의 최소값만을 취하면 공구 마모와 이송



속도 오버라이드간의 높은 선형성을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 CNC 가공에서의 공구 마모를 감지하고 정량적으로 판단하기 위해 하이브리드 방식의 절삭력 평준화를 통한 공구 마모 모니터링 시스템을 구현하였다. 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 획득된 주축 전류는 CNC 머시닝 센터로부터 쉽게 획득되므로 신호 획득이 용이하다.
2. 오프라인 이송속도 제어와 실시간 이송속도 제어가 상호보완적으로 적용된 하이브리드 방식의 절삭력 평준화를 통해 공구 마모 외 주변 인자의 영향을 선택적이며 순차적으로 제거 할 수 있다. 이로써 공구 마모에 의한 주축 전류 신호를 분리할 수 있다.
3. 공구 마모에 의한 주축 전류 증가는 가공 안정화를 위한 실시간 이송속도 오버라이드의 적용으로 재 안정화되며 이때 변경 지령되는 이송속도 오버라이드의 이동 평균값으로부터 정량적인 공구 마모를 모니터링 할 수 있다.
4. 공구 마모 외 주변 인자의 영향을 제거한 후 적용되는 실시간 이송속도 오버라이드를 통해 공구 마모가 모니터링 되므로 소모적인 신호처리를 피할 수 있어 실시간 적용성이 뛰어나다.

## 참고문헌

1. Ulsoy, A. G. and Koren, Y., "Application of Adaptive Control to Machine Tool Process Control," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 9, No. 4, pp. 33-37, 1989.
2. Altintas, Y., "Direct Adaptive Control of End Milling Process," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 4, pp. 461-472, 1994.
3. Dimla, E. Dimla Snr, "Sensor Signals for Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations-A Review of Methods," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 42, pp. 1073-1098, 1999.
4. Cho, D. W., Lee, S. J. and Chu, C. N., "The State of Machining Process Monitoring Research in Korea," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 39, pp. 1697-1714, 1999.
5. Jeong, Y. H., Cho, D. W., "Estimating Cutting Force from Rotating and Stationary Feed Motor Current on a Milling Machine," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 42, pp. 1559-1566, 2002.
6. Jesus, R. T. R., Gilberto, H. R., Ivan, T. V., Carlos, J. C. J., "Driver Current Analysis for Sensorless Tool Breakage Monitoring of CNC Milling Machines," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 43, pp. 1529-1534, 2003.
7. Tounsi, N., Elbestawi, M. A., "Optimized Feedrate Scheduling in Three Axes Machining. Part I: Fundamentals of the Optimized Feed Scheduling Strategy," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 43, pp. 253-267, 2002.
8. Yang, M. Y. and Park, H. D., "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, pp. 45-54, 1991.
9. Ulsoy, A. G., Koren, Y. and Rasmussen F., "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools," ASME J. of Dynam. Syst., Meas. Contr., Vol. 105, pp. 107-112, 1983.
10. Yang, M. Y. and Lee, T. M., "Hybrid Adaptive Control Based on the Characteristics of CNC End Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 42, pp. 489-499, 2002.
11. Choi, J. G. and Yang, M. Y., "In-Process Prediction of Cutting Depths in End Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 39, pp. 705-721, 1999.
12. Shao, H., Wang, H. L. and Zhao, X. M., "A Cutting Power Model for Tool Wear Monitoring in Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 44, pp. 1503-1509, 2004.
13. Tonshoff, H. K., Arendt, C. and Amor, R. Ben, "Cutting Hardened Steel," Annals of the CIRP

Vol. 49, pp. 1-19, 2000.