

정면밀링공정중 주축모터전류를 이용한 절입비의 실시간 추정

조규진*, 오영탁*, 권원태**, 주종남***

In-process Immersion Ratio Estimation Using Spindle Motor Current during Face Milling

K.J. Cho*, Y.T. Oh*, W.T. Kwon**, C.N. Chu***

Abstract

In order to regulate cutting torque in milling, monitoring system should be set to a certain threshold. Radial immersion ratio is an important factor to determine the threshold and should be estimated in process for automatic regulation. In this paper, on-line estimation of the radial immersion ratio using spindle motor current in face milling is presented. When a tooth finishes sweeping, a sudden drop of cutting torque occurs. This torque drop is equal to the cutting torque acting on a single tooth at the swept angle of cut and can be acquired from cutting torque signals. Average cutting torque per revolution can also be calculated from cutting torque signals. The ratio of cutting torque acting on a single tooth at the swept angle of cut to the average cutting torque per revolution is a function of the swept angle of cut and the number of teeth. Using the magnitude of this ratio, the radial immersion ratio is estimated. Identical algorithm is adopted to estimate the immersion ratio based on the spindle motor current measurement. The experiments performed under different cutting conditions show that the radial immersion ratio can be estimated within 10% error range by the proposed method using spindle motor current. Varying immersion ratio is also estimated well using the presented algorithm.

Key Words : Spindle Motor Current, Cutting Torque, Immersion Ratio, Face Milling

1. 서 론

무인생산시스템을 구축하기 위해서는 절삭상태를 실시간으로 감시하고 진단할 수 있는 시스템의 개발이 필수적이다. 절삭상태 감시를 위한 파라미터 중 가장 정확한 것

은 절삭력으로 알려져 있다. 하지만 가장 일반적인 절삭력 측정 센서인 공구동력계는 고가이고 가공 가능한 공작물의 크기를 제한하며 시스템의 동적시스템을 변화시키므로 실제 현장에서는 사용 불가능하다. 이를 극복하기 위하여 절삭력을 간접적으로 측정하는 방법이 많이 개발

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
** 서울시립대학교 정밀기계공학과
*** 서울대학교 기계항공공학부

되었는데 그 중 모터 전류나 파워를 이용하여 절삭력을 간접 추정하는 것이 최근의 연구추세이다.

절삭력 또는 전류값 등을 이용하여 절삭상태를 감시할 경우 공구파손, 과부하 등의 이상상태와, 정상상태를 구분하는 기준이 되는 값이 필요한데 이것을 임계값(Threshold)이라고 한다. 이 임계값은 절삭조건에 함수이므로 임계값의 결정을 위하여 절삭조건을 실시간으로 파악하는 것이 필수적이다. 절삭 조건에는 가공속도, 날당이송량, 축방향 절입량, 반경방향 절입량 등이 있는데, 정면밀링가공 중 임계값의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 반경방향 절입량이다. 따라서 임계값의 탄력적인 변화를 위해서는 반경방향 절입량의 추정이 필요하다. 절삭가공 중 절삭 조건의 변화를 검출하는 방법들은 지속적으로 연구되었다. Altintas⁴¹⁾ 등은 반경방향 절입비를 이송방향과 이송에 수직인 방향의 날당평균 절삭력과와 날당 준평균 절삭 합력의 비에 대한 다항식으로 나타냄으로써 반경방향 절입비를 추정하였다. 또한 Altintas와 Yellowley²⁾는 순간 절삭력의 평균제곱값과 날당 준평균 절삭합력의 비로부터 반경방향 절입비를 추정하였다. Tam⁵⁾ 등은 절삭날이 절삭에 참여하는 시간을 이용하여 반경방향 절입비를 구하는 연구를 수행하였으며, 황지홍⁴⁾과 권원태⁶⁾는 절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 절삭력과 이송방향과 이송에 수직인 방향에 대해 분리한 후, 분리된 두 절삭력 성분의 비와 두 개의 날당 평균 절삭력 비가 절입각과 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비의 함수임을 이용하여 반경방향 절입비를 추정하였다.

절삭력 추종제어를 통한 생산성의 향상, 공구 과부하의 방지에 관한 연구 또한 계속 수행되었다. Kim⁵⁾ 등은 절삭합력의 회전당 평균값을 검출하여 피지 이론을 적용, 평균값이 일정한 한계값을 넘지 않도록 이송속도를 제어하였다. Altintas⁶⁾는 공구동력계로 측정된 절삭합력의 회전당 최대값을 검출하여, 적응제어 이론을 적용하여 가공 중에 기준값을 넘지 않도록 이송속도를 제어하였다. 김태용¹⁷⁾ 등은 이송모터의 전류로부터 절삭력을 추정하여 절삭력의 최대값이 정해 놓은 일정 한계값을 넘지 않도록 이송속도를 제어하였다. 김기대⁶⁾는 주축 전류를 측정하여 절삭토크를 추정하여 절삭토크의 평균값이 정해진 값을 넘지 않도록 이송속도를 제어하였다. 이 연구들은 공통적으로 절삭력 추종제어를 행하여 전체 절삭력의 크기를 일정하게 하였다.

본 연구에서는 정면밀링을 이용한 황삭 가공시에 절삭토크를 이용하여 반경방향 절입비를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 주축전류를 이용하여 절

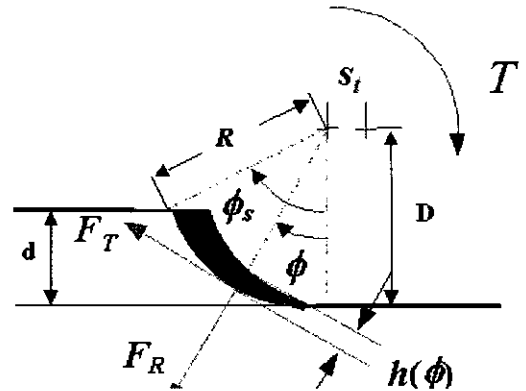


Fig. 1 Uncut chip geometry during milling

입비를 추정하였다. 즉, 절입각에서 절삭을 마치는 날에 걸리는 절삭토크와 회전당 평균절삭 토크의 비가 절입각의 함수임을 이용하여 절입비를 추정하였고 또한 주축전류가 절삭토크에 비례하므로 위의 알고리즘을 이용하여 측정된 주축전류로 절입비를 추정하였다.

2. 전류를 이용한 반경방향 절입비 추정 알고리즘

정면 밀링에서의 반경 방향 절입비는 공구 직경 D에 대한 공구의 반경방향 절입 깊이 d의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{Immersion Ratio} &= \frac{\text{반경방향 절입깊이}(d)}{\text{공구직경}(D)} \\ &= \frac{1 - \cos \phi_s}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ϕ_s 는 절입각이다. 절삭토크는 다음과 같이 표현된다.

$$T(\phi) = R * F_T(\phi) = RK_s a S_f \sin \phi \quad (2)$$

단, ϕ 는 현재 절입각, F_T 는 접선방향 절삭력, a 는 축방향 절삭깊이, S_f 는 날당 이송, K_s 는 비절삭저항, R 은 공구반경이다.

2.1 반경 방향 절입비 추정 알고리즘

주축전류를 이용하여 반경방향 절입비를 예측하기 위해

우선 절삭토크를 이용하여 절입비를 추정하는 알고리즘을 제시하기로 한다.

절입각에서 절삭중인 날이 절삭을 끝마치는 순간의 절삭토크의 차이값과 절삭토크의 회전 당 평균값의 비(T_{ave} / T_{diff})를 절입각에 대한 함수로 만들 수 있다. 절삭토크의 회전 당 평균값은 한 날에 걸리는 순간절삭토크를 한 날이 절삭을 시작하여 끝마치는 각도동안 적분하여 날 수를 곱한 후에 2π 로 나누어서 구할 수 있다.

$$T_{ave} = R \frac{N}{2\pi} \int_0^{\phi_s} F_T(\phi) d\phi$$

$$= R \frac{NK_s a_s}{2\pi} [1 - \cos \phi_s] \quad (3)$$

절입각에서 절삭중인 날이 절삭을 마치는 순간의 절삭토크는 절삭 날수에 상관없이 한날 절삭시의 절입각에서의 절삭토크와 같다.

$$T_{diff} = R * F_T(\phi_s) = RK_s a_s \sin(\phi_s) \quad (4)$$

(3)식을 (4)식으로 나누면 같다.

$$\frac{T_{ave}}{T_{diff}} = \frac{N}{2\pi} \frac{1 - \cos \phi_s}{\sin \phi_s} = \frac{N}{2\pi} \tan \frac{\phi_s}{2} \quad (5)$$

2.2 주축전류를 이용한 절삭토크의 추정

식(5)를 ϕ_s 에 대하여 정리하면 식 (6)으로 되고 이를 그래프로 표시한 것이 Fig. 2이다.

$$\phi_s = 2 \tan^{-1} \left(\frac{2\pi T_{ave}}{N T_{diff}} \right) \quad (6)$$

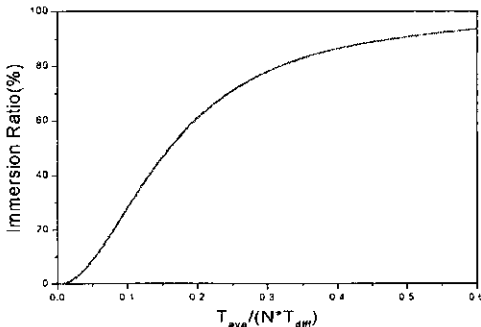


Fig. 2 Relationship between immersion ratio and $T_{ave}/(N * T_{diff})$ during machining with N teeth

한 날이 절삭을 끝마치는 순간의 절삭토크와 절삭토크의 회전 당 평균값의 비, 그리고 공구의 날수를 알면 반경방향 절입비가 계산된다.

절삭토크를 이용한 반경방향 절입비의 추정 알고리즘에 의하면 절삭토크의 절대적인 크기는 절입비 추정에 영향을 미치지 않는다. 그러므로 주축전류의 상대적인 값들의 크기가 절삭토크와 같다면 주축전류를 그때 해당하는 절삭토크로 변환할 필요 없이 측정된 주축전류를 이용하여 직접 절입비를 추정할 수 있다. 이를 이용하여 본 연구에서는 전류값이 나타내는 정확한 절삭 토크값을 구하는 대신 주축 전류 RMS(Root Mean Square)값을 구한 후, 공회전시 모터에 인가되는 전류의 RMS값을 빼 준 값을 절입비 추정에 사용하였다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}} \quad (7)$$

여기서 I_u, I_v, I_w 는 각각 주축의 u, v, w 상의 전류신호이다. 공회전시 인가되는 전류의 RMS값(I_{rms})은 정상상태에서는 구동계와 모터계의 마찰력(쿨롱마찰력+점성마찰력)에 해당한다. 그러므로 계산된 전류값은 순수한 절삭력에 해당하는 값이 된다.

일반적으로 주축모터의 동적민감도는 낮기 때문에 제한적인 조건에서 밖에 사용할 수 없다. 절입비 추정을 위해서는 평균절삭토크와 절삭토크의 최대최소의 차이 값의 비가 중요하므로 공작기계에 대한 동적민감도를 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Dynamic Sensitivity} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\text{difference}(I_{rms})_{\phi_i} / \text{average}(I_{rms})}{\text{difference}(T)_{\phi_i} / \text{average}(T)} \quad (8)$$

여기서 N 은 날의 개수를 나타낸다.

Fig. 3은 공작기계(MCH-10)의 Bandwidth를 나타내는 그래프이다. 실험에서 사용한 공작기계의 경우, 절삭 주파수가 40Hz 미만일때는 주축전류를 사용하여 절입비를 추정할 수 있다. 일반적으로 평면밀링을 이용한 황삭가공에서는 200rpm ~ 400 rpm의 주축회전수를 사용하기 때문에 황삭가공에서는 반경방향 절입비를 추정할 수 있다.

3. 반경방향 절입비 실시간 감시의 필요성

밀링에서의 절삭력 추종제어에 관한 기존의 연구들에서 사용하는 검출인자는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 절삭합력 또는 절삭 토크의 1 회전 당 최대값이 기준값을 넘지 않게 이송속도를 조절하는 것이고^(5,6) 두 번째 방법은 절삭합력 또는 절삭 토크의 회전 당 평균값이 기준값을 넘지 않게 이송속도를 조절하는 방법이다.^(6,7) 절삭합력 또는 절삭토크의 회전 당 최대값을 기준으로 이송속도를 조절하는 것은 각 날에 작용하는 최대값을 임계값 이하로 유지하여 공구파괴가 발생하지 않도록 하는 것이다. 이때 설정된 임계값은 절삭에 참여하는 날 수에 무관하게 일정한 것이 지금까지의 추세였다. 하지만 같은 절삭력이라도 외날 절삭시와 여러날 절삭시 각 날에 작용하는 순간 절삭력의 크기는 달라진다. 외날 절삭과는 달리 여러날 절삭시에는 각 날당 작용하는 순간 절삭력의 크기가 임계값에 훨씬 못 미치게 된다. 이때 각 날당 순간 절삭력의 크기를 추정하는 가장 중요한 인자가 반경방향 절입비이다.

두 번째로 절삭합력 또는 절삭토크의 회전 당 평균값이 일정하도록 이송속도를 조절할 때는 두가지 현상이 발생한다. 우선 한 날에만 절삭력이 작용할 때의 평균값을 임계값으로 설정할 경우, 첫 번째의 경우처럼 최대값을 임계값으로 결정하였을 때와 같은 현상이 발생한다. 즉 여러날 절삭시에는 임계값으로 설정된 평균값을 유지하기 위해, 실제 각 날이 건널 수 있는 절삭력보다 훨씬 작은 절삭력이 작용하는 이송속도를 유지하게 되어 생산성이 현저히 저하된다. 반대로 여러날 절삭시의 평균값을 임계값으로 설정할 경우는 반대현상이 발생한다. 작은 반경방향 절입비로 절삭시에는 한 날만이 절삭에 참여하게 되고 한 날에

인가되는 절삭력의 평균값을 임계값과 맞추려면 과도한 이송속도를 갖게된다. 이로써 각 날에 과도한 절삭력이 인가되어 공구파손과 같은 치명적인 상태를 초래하게 된다.

시뮬레이션을 통하여 날 하나에 걸리는 최대 토크와 평균 절삭토크 및 회전 당 최대 절삭토크와의 관계를 살펴보면 Fig. 3과 같다.

Fig. 4에서는 6날 밀링커터를 사용하여 90% 절입비로 절삭을 하였을 경우에, 절삭력 추종제어에 사용되는 절삭 토크 인자들인 회전 당 최대 절삭토크(T_{Sum_max})와 평균 절삭토크(T_{ave}) 그리고 실제 각 날에 걸리는 절삭 토크의 최대값(T_{1_max})을 나타내었다. 하지만 실제 실험시 측정할 수 있는 것은 여러 날이 동시에 절삭하여 발생하는 절삭 토크의 합력과 이 값을 평균한 평균절삭토크이다. Fig. 5는 정면 밀링 가공시 한 날에 걸리는 최대 절삭토크(T_{1_max})와 절삭토크의 회전 당 최대값(T_{Sum_max})의 비를 밀링커터의 날수를 변경시키면서 반경방향 절입비에 대한 함수로 나타낸 것이다. 외날 절삭의 경우에는 두 절삭 토크의 비(T_{Sum_max}/T_{1_max})가 1이지만 두 날 이상일 동시에 절삭하는 경우에는 절입비가 증가할수록 그 비도 증가하고 있다.

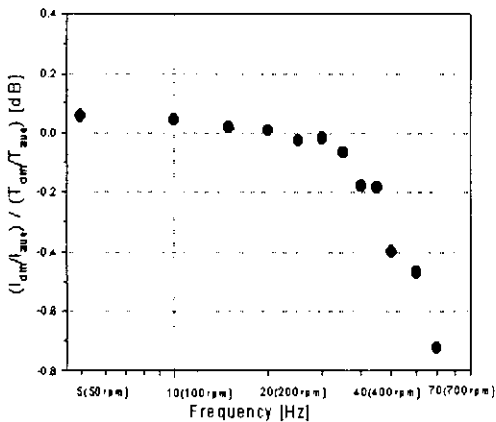


Fig. 3 Dynamic sensitivity of machining center

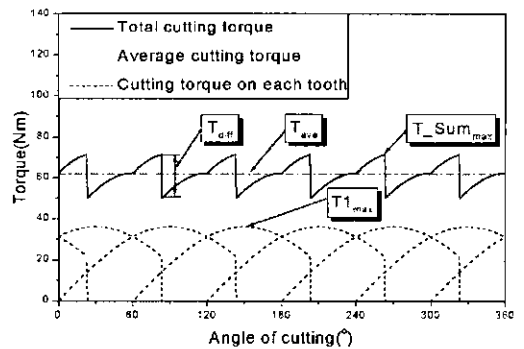


Fig. 4 Simulated milling torque when 6 teeth participate in cutting with 90% immersion ratio

밀링커터의 날 수가 많아질수록, 동시 절삭하는 날 수도 많아지게 되어 절삭토크의 비도 커지게 된다. 공구날이 10개인 밀링커터를 사용하여 절삭을 하는 경우, 절입비가 10%인 경우 한 날에 걸리는 최대 절삭토크와 절삭토크의 회전 당 최대값의 비는 1.02로 두 값에는 큰 차이가 없다. 하지만 절입비 100%로 절삭을 할 경우 절삭토크의 회전 당 최대값은 한날에 걸리는 최대절삭토크의 3.23배

가 된다. 두 경우 날 하나에 부과되는 절삭토크는 같아도 회전 당 최대절삭토크는 3배 정도의 차이가 난다. 절삭토크의 회전당 최대값을 기준으로 절삭력 추종제어를 수행하여 두 경우에 대해 동일한 임계값을 적용한다면, 두 번째 경우는 첫 번째 경우에 비해 각 날에 걸리는 부하가 1/3 수준으로 이송속도가 낮아지게 되어 생산성이 저하된다. 그러므로 두 경우에 대해 반경방향 절입비에 따라서 서로 다른 임계값이 적용되어야 한다.

Fig. 6은 한 날에 걸리는 최대 절삭토크($T_{1_{max}}$)와 절삭토크의 회전당 평균값(T_{ave})의 비를 밀링커터의 날수를 바꾸어 가면서 반경방향 절입비에 대한 함수로 표시한 것이다. Fig. 2와는 다르게 외날 절삭인 경우에 두 절삭토크의 비($T_{ave}/T_{1_{max}}$)가 1보다 작아지게 된다. 이것은 절삭토크의 회전당 평균값이 한 날에 부과되는 최대절삭토크보다 작

아진다는 것이다. 예를 들어 3날 절삭의 경우, 외날 절삭인 절입비 20%로 가공시 두 절삭토크의 비는 0.24이다.

하지만 100% 절입비로 가공을 하면 두 절삭토크의 비가 0.96이 되어 동일한 날당 최대 절삭토크에 대해 두 번째 경우 평균 절삭토크가 4배 정도 커지게 된다. 만약 두 번째 경우를 기준으로 임계값을 잡아 두 경우에 대해 동일한 임계값으로 평균절삭토크를 이용한 절삭력 추종제어를 수행하면, 절입비가 20%인 경우, 평균절삭토크는 작아도 한 날에 걸리는 최대 토크는 절입비가 100%인 경우의 4배이므로 공구에는 과부하가 걸리게 되어 공구 파손이 일어난다. 그러므로 두 경우에 대해 서로 다른 임계값이 적용되어야 하며 이때 기준이 되는 것은 반경방향 절입비이다.

3.1 새로운 임계값의 설정

지금까지의 절삭력 추종제어에 관한 연구들에서는 임계값을 절삭에 참여하는 날 수와 무관하게 정했다. 하지만 반경방향 절입비에 따라 절삭에 참여 하는 날 수가 달라지게 되는데 이러한 조건변화에 무관하게 임계값을 일정하게 유지한다면 한 날에 걸리는 최대 절삭토크는 조건에 따라 달라진다. 정면 밀링에 있어서 공구의 파손 및 과부하에 결정적인 영향을 주는 것은 한 날에 걸리는 최대 절삭토크이므로 반경방향 절입비가 변하더라도 한 날에 걸리는 최대 절삭토크는 일정하도록 임계값을 변경해야 한다.

우선 한 날에 걸릴 수 있는 최대 절삭토크를 기본 임계값(Basic Threshold)으로 설정한다. 한 날에 걸리는 최대 토크와 전체 절삭토크의 최대값의 비 또는 최대 토크와 평균값의 비(Torque Ratio)는 반경방향 절입비를 알면 구할 수 있다. 최대절삭토크를 기준으로 추종제어를 할 경우, 절삭토크의 회전당 최대값과 한 날에 걸리는 최대절삭토크의 비($T_{Sum_{max}}/T_{1_{max}}$)를 사용하며, 평균절삭토크를 기준으로 추종제어를 할 경우, 절삭토크의 회전당 평균값과 한 날에 걸리는 최대절삭토크 비($T_{ave}/T_{1_{max}}$)를 사용한다. 기본 임계값(Basic Threshold)에 절삭토크비(Torque Ratio)를 곱하면, 전체 절삭토크를 기준으로 하는 임계값을 구할 수 있다.

$$Threshold = Torque Ratio \times Basic Threshold \quad (9)$$

즉, 공구의 날 하나에 대한 허용 절삭토크가 주어지면, 반경방향 절입비를 추정하여 절삭력 추종제어를 위한 전체 절삭토크 기준의 새로운 임계값을 설정할 수 있다.

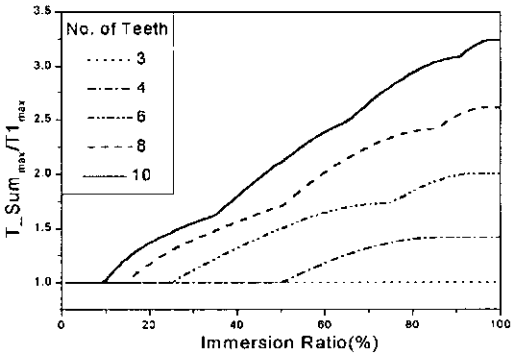


Fig. 5 Relationship between immersion ratio and the ratio of maximum torque to maximum torque on one tooth

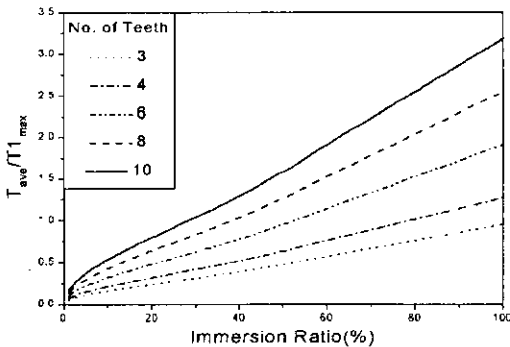


Fig. 6 Relationship between immersion ratio and the ratio of average torque to maximum torque on one tooth

4. 실험 및 결과

4.1 실험장치

실험은 통일중공업 MCH-10 Horizontal Machining Center에서 수행하였다. 공구는 직경 100mm의 정면 밀링 커터를 사용하였고, 인서트는 대한중석의 SPKN1203EDR KT650을 사용하였으며, 전류신호는 삼진전자 LA타입 Hall Sensor로 측정하였다. 실험에 사용된 절삭토크 센서는 Kistler Type 9123B 회전공구동력계 (Rotating Cutting Force Dynamometer)로서 가해지는 절삭토크에 비례하여 전하가 발생하는 압전현상을 이용한 것이다. 압전센서의 전하크기는 회전공구동력계 내의 전하증폭기에서 전압신호로 바뀐 후, 디지털 신호로 변환되어 PCM 방식으로 고정자(Stator)(Kistler Type 5221A1)에 무선으로 전달된다. 이 고정자는 주축에 별도의 지그를 이용하여 회전 공구동력계와 1-2mm 정도의 간격을 유지하도록 설치하였다.

무선으로 수신된 신호는 고정자에서 다시 아날로그 신호로 변환된 후 전하증폭기(Kistler Type 5223A)에 의하여 증폭되어 A/D converter로 입력된다. 모든 신호는 Encoder에서 나오는 신호를 이용하여 한 회전당 1024개의 신호를 받았다.

이렇게 함으로써 절삭 도중 회전속도의 변화에 무관하게 항상 같은 위치에서의 절삭토크에 해당하는 전류값을 측정하였다. 크기 170×100 mm 인 일반 구조용 탄소강 SM45C 시편을 반경방향 절입비 10%에서 90%까지 변화시켜가며 절삭실험을 수행하였다.

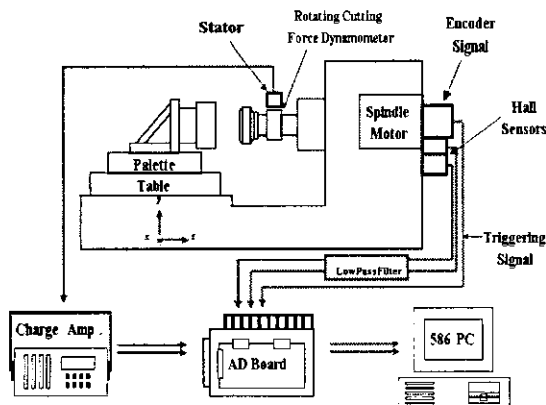


Fig. 7 Schematics of the experimental set-up

4.2 실험결과

전류를 이용하여 절입비를 추정하는 실험은 크게 3가지 경우에 대하여 행하였다. 첫 번째는 이송속도를 변화시키면서, 두 번째는 절삭속도를 변화시키면서, 세 번째는 날 수를 변화시키면서 실험을 행하였다. 각각의 경우 회전 공구동력계와 홀센서를 이용하여 절삭토크와 전류의 크기를 측정 후 절입비를 추정하였다. Fig. 8, 9는 날당이송의 변화에 대한 추정알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위한 실험의 결과이다. 직경 100mm 정면밀링 커터에 3날을 장착한 후 절삭하였다.

절삭 조건은 주축회전속도 200rpm, 절삭깊이 2mm, 날당 이송 0.2, 0.3, 0.4 mm/tooth 이다. Fig. 8은 절삭토크를 이용하여 절입비를 추정한 결과이고, Fig. 9는 전류를 이용하여 추정한 결과이다. 두 경우 모두 절입비가 실제 값에 매우 근사하게 추정되었다.

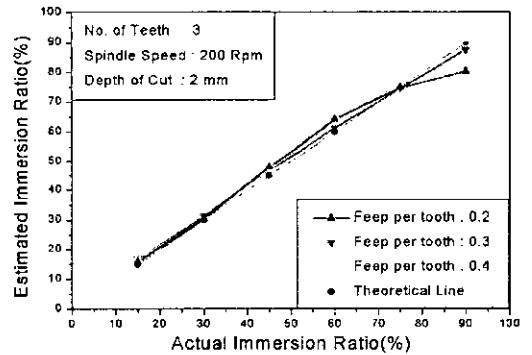


Fig. 8 Estimation of immersion ratio using torque with different feed per tooth

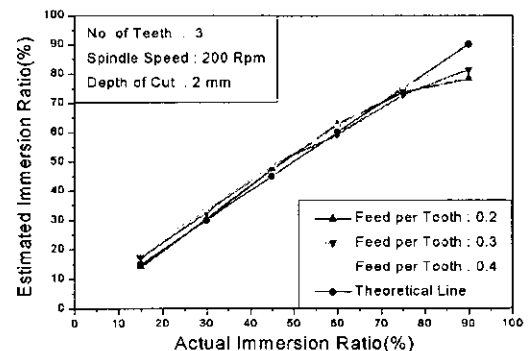


Fig. 9 Estimation of immersion ratio using current rms value with different feed per tooth

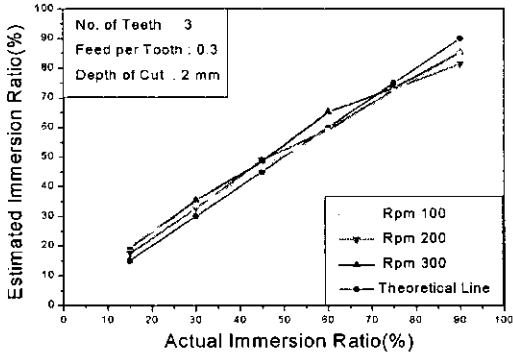


Fig. 10 Estimation of immersion ratio using current rms value with different spindle speed

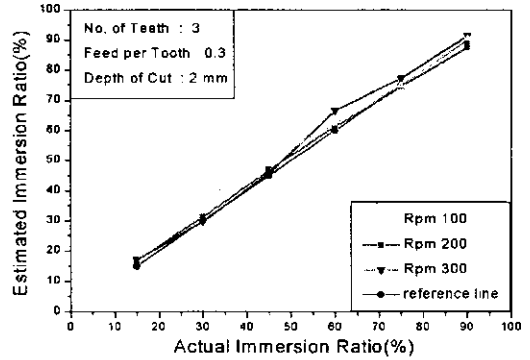


Fig. 12 Estimation of immersion ratio using torque with different spindle speed

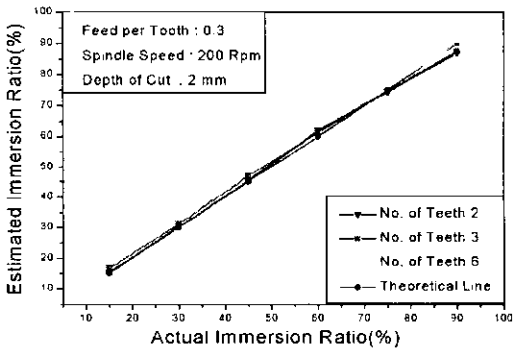


Fig. 11 Estimation of immersion ratio using torque with different no. of teeth

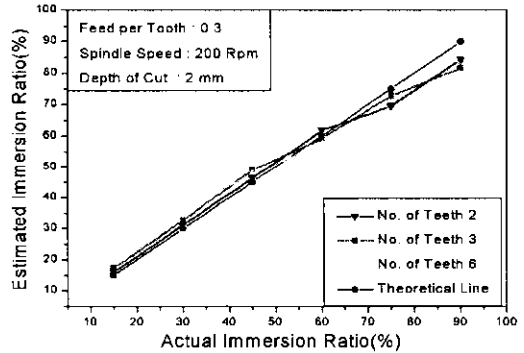


Fig. 13 Estimation of immersion ratio using current rms value with different no. of teeth

특히 날당이송이 0.2mm/tooth 인 경우 절입비가 90% 일 때 절삭력을 이용한 절입비의 추정치가 실제값보다 약간 작게 추정되었는데 전류를 이용한 추정치도 똑같은 양상을 보이고 있어 전류의 절삭토크에 대한 추종성을 잘 보여주고 있다. Fig. 10, 11은 날당이송은 0.3mm/tooth 로 고정하고, 주축속도를 100rpm, 200rpm, 300rpm으로 변화 시켜가면서 절삭을 수행하여 절입비를 추정한 결과이다. Fig. 10은 절삭토크를 이용하여 추정한 결과이고 Fig. 11은 전류를 이용하여 추정한 결과이다. 주축속도의 변화에 무관하게 전류를 이용한 절입비 추정도 비교적 정확하였다.

하지만 절삭속도의 증가는 시스템의 대역폭에 영향을 받는다. 이 실험에 사용된 MCH-10 기종은 3날 절삭시 300rpm까지 무난하게 절입비를 추정함을 알 수 있다. Fig. 12, 13는 날당이송은 0.3 mm/tooth, 주축속도는

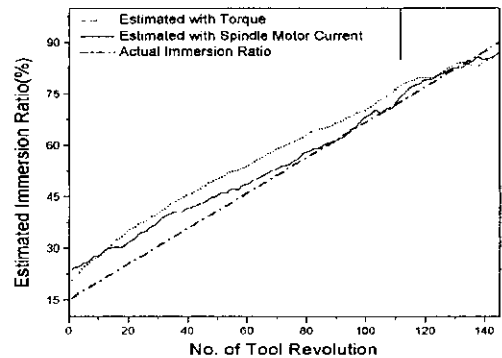


Fig. 14 Estimation of continuously varying immersion ratio

200rpm으로 고정하고, 날수를 2개에서 6개로 변화시켜 가면서 실험하여 각각 절삭토크와 전류를 이용하여 반경

방향 절입비를 추정한 결과이다. Fig. 14는 반경방향 절입비가 연속적으로 변화도록 실험을 수행한 결과이다. 날당 이송은 0.3mm/tooth, 주축속도는 200rpm으로 3날 절삭을 수행하였다.

전체적으로 추정결과는 실제값과 10% 이내의 오차를 보이고 있다. 하지만 이 추정값을 절삭력 추종제어를 위한 탄력적인 임계값 설정에 이용할 것임을 고려하면 10%의 오차는 충분히 허용 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 주축전류를 이용하여 반경방향 절입비를 추정하는 실험을 실행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭력 추종제어에 있어서 임계값의 설정을 위한 반경방향 절입비의 추정은 반드시 필요함을 보였고 반경방향 절입비를 고려한 새로운 임계값을 설정하는 방법을 제시하였다.
- (2) 한 날이 절삭을 마치는 순간의 절삭토크의 차이값, 절삭토크의 평균값의 비, 그리고 날 수가 반경방향 절입비의 함수임을 이용하여 반경방향 절입비를 추정하는 방법을 제시하였다.
- (3) 제안된 알고리즘은 전류를 이용하여 절입비를 추정할 때도 이송속도, 회전속도, 날의 개수, 날당이송 등에 무관하게 반경방향 절입비를 10% 오차 범위 내에서 추정하였다.
- (4) 제안된 알고리즘은 절입비가 연속적으로 변하는 절삭조건하에서도 절입비를 잘 추정함을 보였다.

참고 문헌

- (1) Y. Altintas, I. Yellowley, "The identification of radial width and axial depth of cut in peripheral milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.27, pp. 367~381, 1987.
- (2) Y. Altintas, I. Yellowley, "In-process detection of tool failure in milling using cutting force models," *ASME, J. Eng. for Ind.*, Vol. 111, pp. 149~157, 1989.
- (3) J. H. Tarn, M. Tomizuka, "On-line monitoring of tool and cutting conditions in milling," *ASME, J. Eng. for Ind.*, Vol. 111, pp. 206~212, 1989.
- (4) 황지홍, 오영탁, 권원태, 주종남, "정면밀링에서 절삭력을 이용한 반경방향 절입비의 실시간 추정," 한국정밀공학회논문집, 제 16권, 제 8호, pp. 178~185, 1999.
- (5) M. K. Kim, M. W. Cho, K. Kim, "Application of the fuzzy control strategy to adaptive force control of non-minimum phase end milling operations," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.34, pp. 677~696, 1994.
- (6) Y. Altintas, "Direct adaptive control of end milling process," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.34, pp. 461~472, 1994.
- (7) T. Y. Kim, J. W. Kim, "Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.36, pp. 925~937, 1996.
- (8) 김기대, 권원태, 주종남, "주축모터 전류를 통한 절삭력의 간접추정 및 절삭력 추종제어," 한국정밀공학회논문집, 제14권 제10호, pp. 15~27, 1997.
- (9) 김명곤, 권원태, "정면밀링에서 절삭력을 이용한 절입비와 절삭력비의 실시간 추정," 한국공작기계학회논문집, 제 9권, 제 4호, pp. 91~98, 2000.