

# 밀링공정에서 주축모터전류를 이용한 절입비 추정

조규진\*, 권원태\*\*, 조동우\*\*\*, 주종남\*\*\*\*

## Immersion Ratio Estimation Using Spindle Motor Current during Milling

K. J. Cho\*, W. T. Kwon\*\*, D. W. Cho\*\*\*, 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.

**Key Words** : Spindle Motor Current(주축모터전류), Cutting Torque(절삭토크), Immersion Ratio(절입비), Face Milling(정면밀링)

### 1. 서 론

무인생산시스템을 구축하기 위해서는 절삭상태를 실시간으로 감시하고 진단할 수 있는 시스템의 개발이 필수적이다. 절삭상태 감시를 위한 파라미터 중 가장 정확한 것은 절삭력으로 알려져 있다. 하지만 가장 일반적인 절삭력 측정 센서인 공구동력계는 고가이고 가공 가능한 공작물의 크기를 제

한하며 시스템의 동적시스템을 변화시키므로 실제 현장에서는 사용 불가능하다. 이를 극복하기 위하여 절삭력을 간접적으로 측정하는 방법이 많이 개발되었는데 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 이

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 서울시립대학교 정밀기계공학과

\*\*\* 포항공과대학교

\*\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

것을 임계값(Threshold)이라고 한다. 이 임계값은 절삭조건인 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. Altintas<sup>(1)</sup> 등은 반경방향 절입비를 이송방향과 이송에 수직한 방향의 날당평균 절삭력차와 날당 준평균 절삭 합력의 비에 대한 다항식으로 나타냄으로써 반경방향 절입비를 추정하였다. 또한 Altintas와 Yellowley<sup>(2)</sup>는 순간 절삭합력의 평균계급값과 날당 준평균 절삭합력의 비로부터 반경방향 절입비를 추정하였다. Tam<sup>(3)</sup> 등은 절삭날이 절삭에 참여하는 시간을 이용하여 반경방향 절입비를 구하는 연구를 수행하였으며, 황지홍<sup>(4)</sup>은 절입각에서 절삭을 끝마치는 날에 걸리는 절삭력을 이송방향과 이송에 수직한 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, 공구과부하의 방지에 관한 연구 또한 계속 수행되었다. Kim<sup>(5)</sup> 등은 절삭합력의 회전당 평균값을 검출하여 퍼지 이론을 적용, 평균값이 일정한 한계값을 넘지 않도록 이송속도를 제어하였다. Altintas<sup>(6)</sup>는 공구동력계로 측정된 절삭합력의 회전당 최대값을 검출하여, 적응제어 이론을 적용하여 가공 중에 기준값을 넘지 않도록 이송속도를 제어하였다. 김태용<sup>(7)</sup> 등은 이송모터의 전류로부터 절삭력을 추정하여 절삭력의 최대값이 정해 놓은 일정 한계값을 넘지 않도록 이송속도를 제어하였다. 김기대<sup>(8)</sup> 등은 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 절삭 토크를 이용하여 반경방향 절입비를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 이를 바탕으로 주축전류를 이용하여 절입비를 추정하였다. 절입각에서 절삭을 마치는 날에 걸리는 절삭토크와 회전

당 평균절삭 토크의 비가 절입각의 함수임을 이용하여 절입비를 추정하였으며 주축전류가 절삭토크에 비례함을 이용하여 주축전류를 사용하여 절입비를 추정하였다.

## 2. 반경방향 절입비 실시간 감시의 필요성

밀링에서의 절삭력 추종제어에 관한 기존의 연구들에서 사용하는 검출인자는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 절삭합력 또는 절삭 토크의 1회전 당 최대값이 기준값을 넘지 않게 이송속도를 조절하는 것이고<sup>(5),(8)</sup> 두 번째 방법은 절삭합력 또는 절삭 토크의 회전 당 평균값이 기준값을 넘지 않게 이송속도를 조절하는 방법이다.<sup>(6),(7)</sup>

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 되므로 생산성 향상의 여지가 남게 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 견딜 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 갖게 된다. 이로써 각 날에 과도한 절삭력이 인가되어 공구파손과 같은 치명적인 상태를 초래하게 된다.

시뮬레이션을 통하여 날 하나에 걸리는 최대 토

크와 평균 절삭토크 및 회전 당 최대 절삭토크와의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

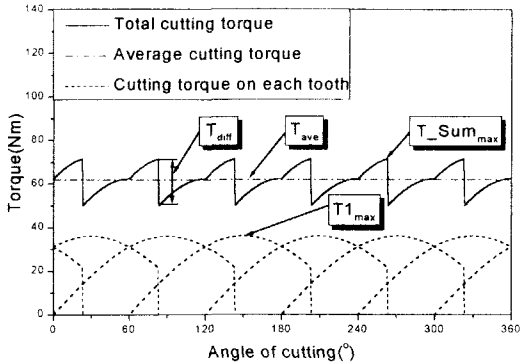


Fig. 1 Simulated milling torque when 6 teeth participate in cutting with 90% immersion ratio

Fig. 1에서는 6날 밀링커터를 사용하여 90% 절입비로 절삭을 하였을 경우에, 절삭력 추종제어에 사용되는 절삭토크 인자들인 회전 당 최대 절삭토크( $T_{Sum\_max}$ )와 평균 절삭토크( $T_{ave}$ ) 그리고 실제 각 날에 걸리는 절삭 토크의 최대값( $T1_{max}$ )을 나타내었다. 하지만 실제 실험시 측정할 수 있는 것은 여러 날이 동시에 절삭하여 발생하는 절삭토크의 합력과 이 값을 평균한 평균절삭토크이다.

Fig. 2는 정변 밀링 가공시 한 날에 걸리는 최대 절삭토크( $T1_{max}$ )와 절삭토크의 회전 당 최대값( $T_{Sum\_max}$ )의 비를 밀링커터의 날수를 변경시키면서 반경방향 절입비에 대한 함수로 나타낸 것이다. 외날 절삭의 경우에는 두 절삭토크의 비( $T_{Sum\_max}/T1_{max}$ )가 1이지만 두 날 이상이 동시에 절삭하는 경우에는 절입비가 증가할수록 그 비도 증가하고 있다. 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 3.23배가 된다. 두 경우 날 하나에 부과되는 절삭토크는 같아도 회전 당 최대절삭토크는 3배 정도의 차이가 난다. 절삭토크의 회전당 최대값을 기준

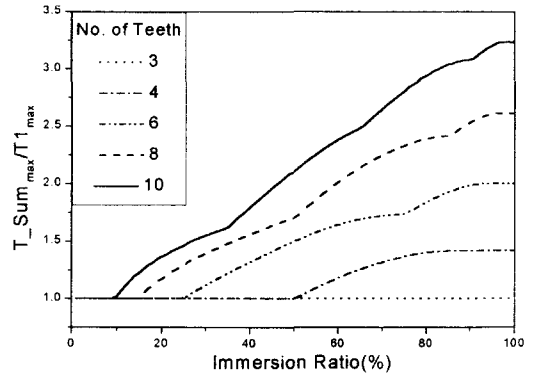


Fig. 2 Relationship between immersion ratio and the ratio of maximum torque to maximum torque on one tooth

으로 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 따라 서로 다른 임계값이 적용되어야 한다.

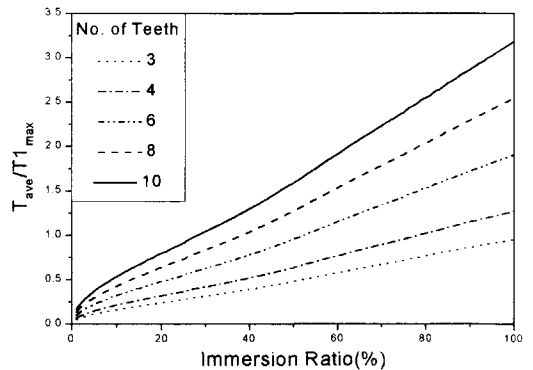


Fig. 3 Relationship between immersion ratio and the ratio of average torque to maximum torque on one tooth

Fig. 3은 한 날에 걸리는 최대 절삭토크( $T1_{max}$ )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( $T_{ave}/T1_{max}$ )가 1보다 작아지게 된다. 이것은 절삭토크의 회전당 평균값이

한 날에 부과되는 최대절삭토크보다 작아진다는 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.

**2.1 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( $T_{Sum_{max}}/T_{I_{max}}$ )를 사용하며, 평균절삭토크를 기준으로 추종제어를 할 경우, 절삭토크의 회전당 평균값과 한 날에 걸리는 최대절삭토크 비( $T_{ave}/T_{I_{max}}$ )를 사용한다. 기본 임계값(Basic Threshold)에 절삭토크비(Torque Ratio)를 곱하면, 전체 절삭토크를 기준으로 하는 임계값을 구할 수 있다.

$$Threshold = Torque Ratio \times Basic Threshold \quad (1)$$

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

**3. 전류를 이용한 반경방향 절입비 추정 알고리즘**

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

$$Immersion Ratio = \frac{\text{반경방향절입깊이}(d)}{\text{공구직경}(D)} = \frac{1 - \cos \phi_s}{2} \quad (2)$$

여기서  $\phi_s$ 는 절입각이다.

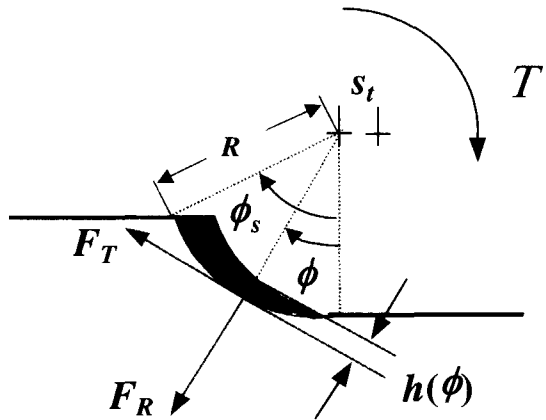


Fig. 4 Uncut chip geometry during milling

Matellotti는 밀링공정에 있어서 실제적인 날의 경로를 원호로 근사시켜 순간 칩 두께  $h(\phi)$ 를 날당 이송  $S_t$ 의 사인함수로 나타내었다.

$$h(\phi) = S_t \sin \phi \quad (3)$$

접선방향의 절삭력  $F_T$ 는 순간적인 미절삭 면적  $ah(\phi)$ 에 비절삭압력  $K_s$ (Cutting Pressure)를 곱

하여 계산하였고 반경 방향 절삭력  $F_R$ 은 접선 방향 절삭력  $F_T$ 에 두 절삭력 사이의 비  $r$ 을 곱하여 구하였다.

$$F_T(\phi) = K_s a h(\phi) = K_s a S_t \sin \phi \quad (4)$$

$$F_R(\phi) = r F_T(\phi) = r K_s a S_t \sin \phi \quad (5)$$

여기서  $a$ 는 축방향 절삭깊이이고  $\phi$ 는 현재의 절입각이다.

절삭 토크는 접선방향 절삭력  $F_T$ 에 공구의 반경  $R$ 을 곱하여 다음과 같이 구한다.

$$T(\phi) = R * F_T(\phi) = RK_s a S_t \sin \phi \quad (6)$$

### 3.1 반경 방향 절입비 추정 알고리즘

절삭토크 또는 절삭력의 예측을 위하여 이송모터전류 또는 주축모터전류를 사용할 수 있다. 하지만 이송모터 전류를 이용하여 절삭력을 예측할 경우 다음과 같은 문제점이 발생한다.

첫째, x축과 y축 방향의 기계구조와 절삭조건의 차이 때문에 동적 성질이 달라지므로 전류로 추정된 절삭력이 각 축에서 같은 시간에 발생한 절삭력을 반영하지 못한다. 둘째, 각 축의 마찰 보상을 위해서는 많은 실험과 보정이 필요하다. 결과적으로, 2축 이상의 절삭 가공시 이송모터전류를 이용한 절삭력 예측이 어렵다.

그에 비해 주축 모터는 절삭방향에 무관하고 한 축의 전류 신호만을 이용하므로 서로 다른 마찰 성분이나 서로 다른 시간지연요소들을 고려할 필요가 없으므로 보다 간편하다. 단 대역폭이 좁아 높은 절삭속도로 가공할 때 정확한 절삭토크 추정이 어렵지만 황삭의 경우는 회전속도가 높지 않기 때문에 주축전류를 이용하여 절삭토크를 예측하는데 큰 무리가 없다.

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  $2\pi$ 로 나누어서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{ave} &= R \frac{N}{2\pi} \int_0^{\phi_s} F_T(\phi) d\phi \\ &= R \frac{NK_s a S_t}{2\pi} [1 - \cos \phi_s] \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$T_{diff} = R * F_T(\phi_s) = RK_s a S_t \sin(\phi_s) \quad (8)$$

두 값을 나누어 주면,

$$\frac{T_{ave}}{T_{diff}} = \frac{N}{2\pi} \frac{1 - \cos \phi_s}{\sin \phi_s} = \frac{N}{2\pi} \tan \frac{\phi_s}{2} \quad (9)$$

위의 식을 절입각  $\phi_s$ 에 대한 식으로 정리하면,

$$\phi_s = 2 \tan^{-1} \left( \frac{2\pi}{N} \frac{T_{ave}}{T_{diff}} \right) \quad (10)$$

위의 식을 그래프로 표시한 것이 Fig. 5이다. 한 날이 절삭을 끝마치는 순간의 절삭토크와 절삭토크의 회전 당 평균값의 비, 그리고 공구의 날수를 알면 반경방향 절입비가 계산된다.

### 3.2 주축전류를 이용한 절삭토크의 추정

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

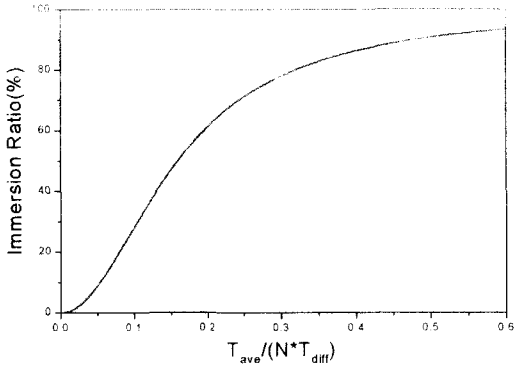


Fig. 5 Relationship between immersion ratio and  $T_{ave}/(N \cdot T_{dfn})$  during machining with N teeth

값을 절입비 추정에 사용하였다. 공회전시 인가되는 전류의 RMS값은 정상상태에서는 구동계와 모터계의 마찰력(쿨롱마찰력+점성마찰력)에 해당한다. 그러므로 계산된 전류값은 순수한 절삭력에 해당하는 값이 된다.

#### 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 Kistler Type 5221A1 고정자(Stator)에 무선으로 전달된다. 이 고정자는 주축에 별도의 시그를 이용하여 회전 공구동력계와 1-2mm 정도의 간격을 유지하도록 설치하였다. 무선으로 수신된 신호는 고정자에서 다시 아날로그 신호로 변환된 후 Kistler Type 5223A 전하증폭기에 의하여 증폭되어 고정자에서 다시 아날로그 신호로 변환된 후 Kistler Type 5223A 전하증폭기에 의하여 증폭되어 A/D converter로 입력된다. 모든 신호는 Encoder에

서 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 변경방향 절입비 10%에서 90%까지 변화시켜가며 절삭실험을 수행하였다.

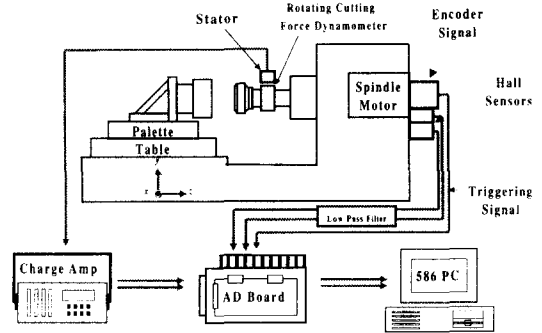


Fig. 6 Schematics of the experimental set-up

##### 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 측정할 후

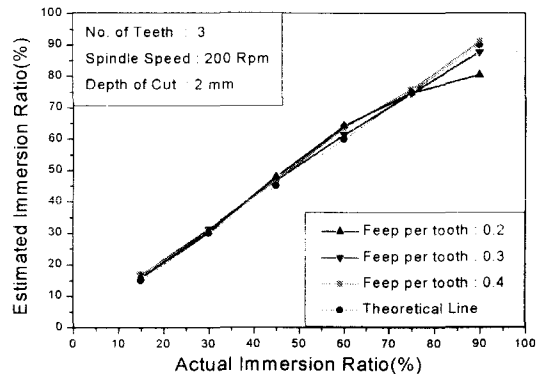


Fig. 7 Estimation of immersion ratio using torque with different feed per tooth

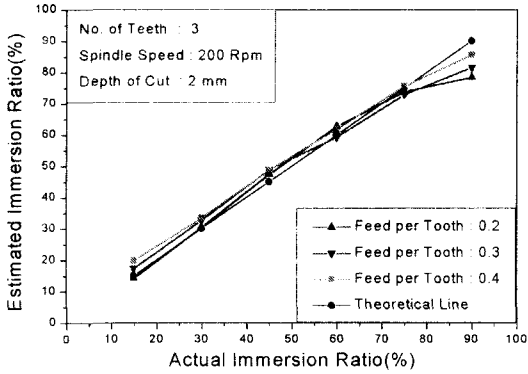


Fig. 8 Estimation of immersion ratio using current rms value with different feed per tooth

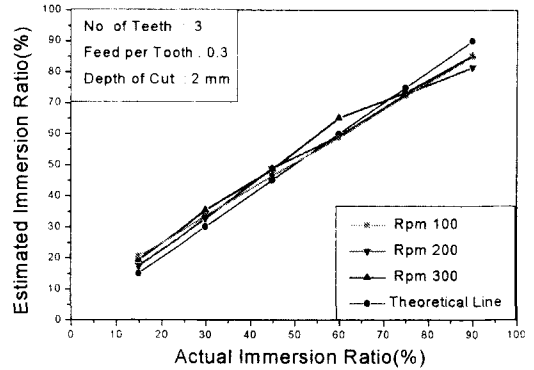


Fig. 10 Estimation of immersion ratio using current rms value with different spindle speed

절입비를 추정하였다.

Fig. 7, 8은 날당이송의 변화에 대한 추정알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위한 실험의 결과이다. 직경 100mm 정면밀링 커터에 3날을 장착한 후 절삭하였다. 절삭 조건은 주축회전속도 200rpm, 절삭 깊이 2mm, 날당 이송 0.2, 0.3, 0.4 mm/tooth 이다. Fig. 7은 절삭토크를 이용하여 절입비를 추정한 결과이고, Fig. 8은 전류를 이용하여 추정한 결과이다. 두 경우 모두 절입비가 실제값에 매우 근사하게 추정되었다. 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. 9, 10은 날당이송은 0.3mm/tooth 로 고정하고, 주축속도를 100rpm, 200rpm, 300rpm으로 변화시켜가면서 절삭을 수행하여 절입비를 추정한 결과이다. Fig. 9는 절삭토크를 이용하여 추정한 결과이고 Fig. 10은 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.

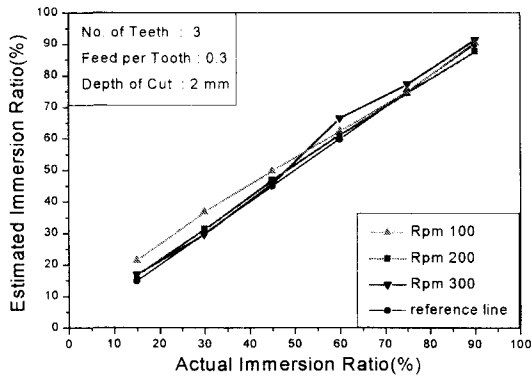


Fig. 9 Estimation of immersion ratio using torque with different spindle speed

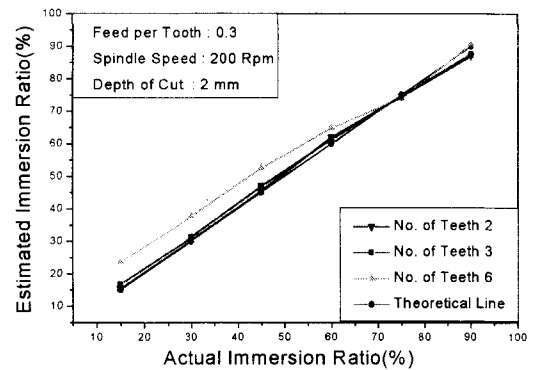


Fig. 11 Estimation of immersion ratio using torque with different no. of teeth

Fig. 11, 12는 날당이송은 0.3 mm/tooth, 주축속도는 200rpm으로 고정하고, 날수를 2개에서 6개로 변화시켜가면서 실험하여 각각 절삭토크와 전류를 이용하여 반경방향 절입비를 추정한 결과이다.

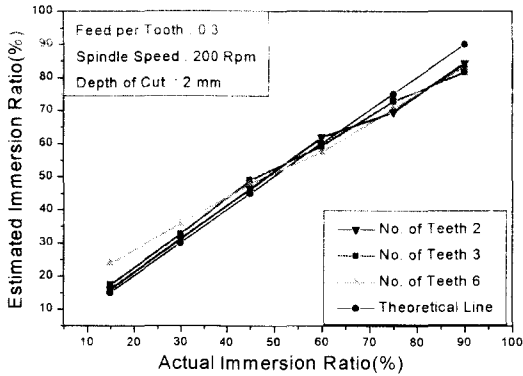


Fig. 12 Estimation of immersion ratio using current rms value with different no. of teeth

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. 결 론

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.

### 후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-E-39)에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

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. Tam, 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*, 제16권, 제8호, 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 간접측정 및 절삭력 추종제어," *한국정밀공학회논문집*, 제14권 제10호, pp. 15-27, 1997.