

## 마찰력을 고려한 고속탭핑 토크 모델링

이돈진\*, 감지웅\*, 전현배\*, 김선호\*\*, 안중환\*\*\*

### Modeling of High-speed Tapping Torque Considering Friction Force

Don Jin Lee\*, Ji Woong Kang\*, Hyun Bae Jeon\*, Sun Ho Kim\*\*, Jung Hwan Ahn\*\*\*

#### ABSTRACT

This paper aims at developing a torque model for the high-speed tapping with small-diameter taps. As recent industries such as automobile and information technology grows, taps smaller than 5mm in diameter are needed much more. In that occasion, the friction force between a tap surface and a workpiece plays much more important role in the tapping torque than in the larger tapping. Tapping mechanism was analysed based on the tap geometry. It has two steps : one is a forward cutting composed of the chamfered threading and full threading and the other is the backward cutting. The torque by the cutting force in the chamfered threading is calculated using the cutting area and the specific cutting force while the torque by the friction force, which is rather dominant than the cutting force both in the full threading and in the backward cutting, is calculated using the normal force on the threads and the friction coefficient. The experiment has shown that the results by the proposed torque model fit quite well with the actual measurements within the error of 10%

**Key Words** : Tapping(탭핑), Tapping mechanism(탭핑 매커니즘), Tap geometry(탭형상), Chamfered thread(첼퍼부), Torque modeling(토크 모델링), Friction force(마찰력)

#### 1. 서론

탭핑 작업은 탭을 사용하여 나사를 가공하는 공정으로서 가장 좋은 나사를 가공하는 것이 탭핑의 목적이며 기계가공 중에서 어려운 가공의 하나이다. 탭핑 작업은 대부분의 경우 절삭 공정 중 가장 마지막으로 이루어지며 탭핑시 작업조건의 불량이나 칩배출이 원활하지 못할 경우, 드릴링과 탭핑가공 축의 불일치 등의 이유에 의해 탭의 파손이나 가공된 나사의 확대, 축소 또는 뭉그러지는 트러블이 발생하게 된다. 가공된 나사의 확대나 축소는

나사의 체결력을 떨어뜨리거나 체결자체를 불가능하게 만든다. 또 가공 중 탭이 파손되면 제품 자체를 못쓰게 되므로, 많은 구멍제품이 필요한 항공, 자동차 산업 등에서는 이런 것에 대한 적극적인 대책이 필요하다. 특히 최근 눈부시게 발전하고 있는 IT 산업에는 직경 3mm이하의 소구경 탭핑 작업이 많이 필요한데 최적 절삭속도를 내기 위해 주축의 고속화가 일반화되어 가고 있다. 탭핑이 고속화될수록 주축과 Z축의 동기제어, 칩 배출의 측면에서 고도의 기술이 필요하다. 왜냐하면 소구경 탭의 경우 아주 미소한 토크의 변화에도 쉽게 파손이 일어

2001년 2월 26일 접수  
\* 부산대 지능기계공학과  
\*\* 한국기계연구원 자동화연구부  
\*\*\* 부산대 기계공학부

나기 때문이다. 그러므로 이런 현상을 방지하기 위해서는 탭에 걸리는 토크를 모니터링 해야 할 필요가 있다. 탭핑시의 절삭토크에 관한 연구로서 G.Lorenz는 탭의 챔퍼 릴리프와 레이크 각과 탭핑 토크와의 관계에 관해 연구하였고<sup>1-3)</sup>, Doyle 등은 탭의 형상 외에 피삭재의 종류, 나사내기의 크기, 절삭조건 토크에 대한 영향을 연구하였으며<sup>4)</sup>, 최만성 등은 절삭면적을 이용한 토크모델링, 고속탭핑에서의 탭형상과 절삭토크특성을 연구하였고<sup>5,6)</sup>, 이정길 등은 난삭재의 탭핑과 탭형상과의 관계에 대해 연구하였다<sup>7)</sup>. 그러나, 이런 연구들은 주로 탭의 형상이 절삭토크에 미치는 영향에 관한 것으로서 절삭시의 실시간 공구 모니터링을 위한 이론적인 기초로서는 부족한 면이 있다.

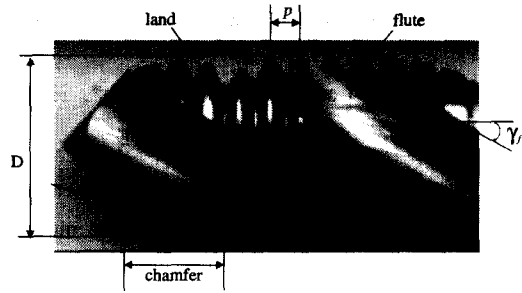
본 연구에서는 탭상태 감시를 위한 기초연구로서 탭에 걸리는 토크를 예측하기 위한 모델을 제안하였다. 탭에 작용하는 토크는 탭의 각 날에 작용하는 절삭력과 마찰력에 대한 함수로 규정하고, 이를 시뮬레이션하였으며 그 결과를 실험적으로 구한 결과와 비교하였다.

## 2. 탭핑 절삭기구

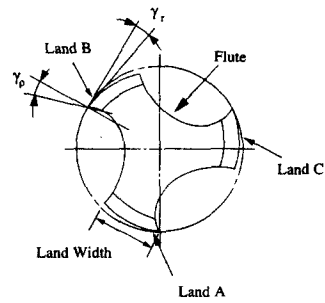
일반적으로 탭은 직경이 작은 공구의 경우에 챔퍼부, 완전 나사부, 백 테이퍼부, 목부, 그리고 생크부, 사각부로 이루어진다. Fig.1은 탭의 사진과 완전 나사부의 단면을 나타낸다. 탭에 의한 암나사의 절삭은 챔퍼부의 나선 모양으로 늘어선 불완전 산의 절삭날에 의해 이루어지며 각 절삭날은 탭의 회전과 함께 소정의 절입량씩 분담하여 절삭을 하고, 챔퍼부 전체에서 완전한 나사산을 형성한다. 완전 나사부는 원칙적으로 절삭은 하지 않고, 이미 완성된 나사산과 어울려서 탭 자신을 안내하는 역할 즉, 자진(self-guidance)작용을 한다. 실험에는 챔퍼부의 산수가 2.5산, 완전나사부는 3산, 칩 배출을 위한 3개의 플루트(Flute), 3개의 랜드(Land)부를 가지는 HSS 탭을 사용하였다. Fig.2는 각 랜드에 대한 절삭날의 단면을 보여준다.

나사 절삭 과정을 살펴보기 위해 편의상 첫 번째 날의 절삭높이가 가장 작은 랜드(Land)부부터 차례로 A, B, C라 하면, Fig.2에서 처럼 A<sub>1</sub>-B<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>-...-A<sub>n</sub>-B<sub>n</sub>-C<sub>n</sub>으로 절삭이 이루어지며 플루트를 통해 칩이 배출된다. 그리고 Land A의 첫 번째 날

인 A1날은 직접적인 절삭이 일어나지 않고 나사내기 구멍에 대한 안내 역할을 하게 되고 챔퍼부 마지막 날인 B3의 절삭날이 가공을 끝내게 되면 C3 날부터는 완전한 나사산이 형성된다. 완전 나사부에서는 챔퍼부에서 절삭된 완전 나사산의 나사에 들어가서, 안내 날이 되면서 나사 가공을 마무리한다.<sup>8,9)</sup>



(a) Photograph



(b) Cross section of the full thread

Fig. 1 Tap geometry

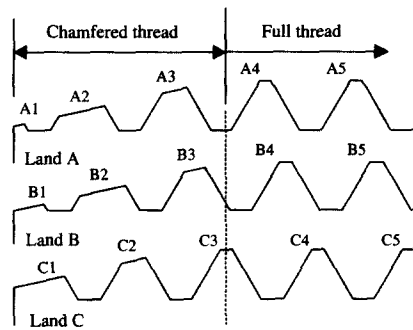


Fig. 2 Cross-sections of threads along each land

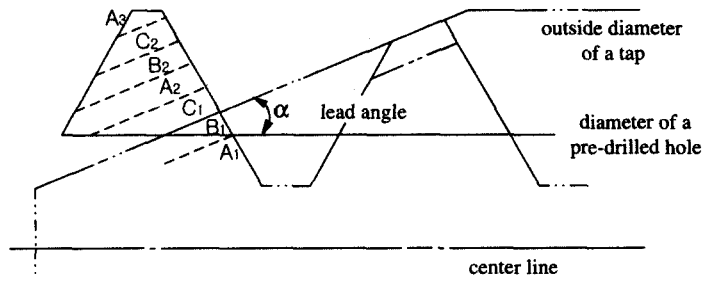


Fig. 3 Progressive cutting sections by each thread during tapping process

Fig.3은 실제로 탭의 각 날이 들어가는 모습을 보여주고 있다.

절삭토크가 구해진다. 즉, 절삭 토크 T는

$$T_i(\beta) = k \cdot r(\beta) \cdot S_i(\beta) \quad (1)$$

### 3. 탭핑토크 모델링

로 주어진다. 여기서,

탭핑에서 탭에 가장 큰 영향을 미치는 것은 토크 세기의 변화이다. 특히 작은 직경의 탭을 이용하여 탭핑 가공을 할 때 공구 마모, 칩 배출 불량, 기계 진동 등 여러가지 이상현상이 발생 하면 직접적으로 토크의 세기에 영향을 미치게 된다. 이런 토크 변화는 결국 가공 상태를 나쁘게 하여 나사산의 형성에 악영향을 끼치게 되고 심지어 공구의 파손을 초래한다. 그러므로 가공 중 토크 세기 변화를 감시하는 것은 아주 중요한 일이라 할 수 있을 것이다.

- $k$  : 비절삭 저항
- $r$  : 공구중에서 각 절삭면적까지의 거리
- $S$  : 절삭면적
- $\beta$  : 공구의 회전각도 이다.

본 연구에서는 절삭력과 마찰력만을 고려한 토크를 모델링하였다. rigid 탭핑 가공시 발생하는 토크의 세기는 절삭력, 마찰력, 동기오차, 칩 상태, 절삭유 상태에 따라서 토크의 크기가 변하지만 이런 인자들 중에서 가장 크게 작용하는 것은 절삭력과 마찰력이다. 마찰력에 의한 토크의 경우 탭 형상과 절삭유계의 종류, 그리고 가공시 칩에 의한 영향 등 많은 인자에 의해 결정되기 때문에 정확한 마찰 토크를 구하기는 어렵지만 일반적인 가공 조건을 기준으로 실험을 통하여 얻은 데이터에 의해 마찰 계수를 구하였다.

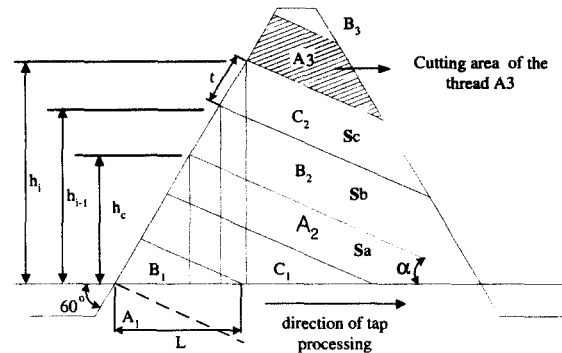


Fig. 4 Cutting areas by chamfered threads

#### 3.1 절삭력 토크 모델링

절삭력에 의한 토크를 모델링하기 위해 챔퍼부의 각 날이 들어가면서 절삭하는 두께는 일정하고, 절삭력은 각 날이 절삭하는 절삭면적에 비례한다고 가정하였다. 그러므로 각 절삭면적에 공구 중심에서의 거리와 공작물의 비절삭 저항을 곱하게 되면

Fig.4는 챔퍼부의 각 날에 의한 절삭면적을 나타낸다. 절삭기구에서 A1날은 절삭을 하지 않고 B1부터 절삭이 이루어지므로 그림에서 B1에 해당되는 부분이 처음으로 절삭되는 면적이며 차례대로 B3까지 절삭이 이루어진다. 구간에 따라 절삭면적의 모양이 다르기 때문에 경계높이 hc를 기준으로 절삭 날의 위치에 따라 다음과 같이 3구간으로 나누어 절삭 면적S를 구한다.

$$\textcircled{1} \quad h_{i-1} \leq h_c, \quad h_i \leq h_c \quad \text{일 때} \quad (2)$$

$$S_i = \frac{1}{2} \delta (h_i^2 - h_{i-1}^2)$$

$$\textcircled{2} \quad h_{i-1} \leq h_c, \quad h_i > h_c \quad \text{일 때} \quad (3)$$

$$S_i = \frac{1}{2} \delta (h_i^2 - h_{i-1}^2) - \frac{1}{2} \phi [(h_i \delta - p)^2 - (h_c \delta - p)^2]$$

$$\textcircled{3} \quad h_{i-1} \geq h_c, \quad h_i > h_c \quad \text{일 때} \quad (4)$$

$$S_i = \frac{1}{2} \delta (h_i^2 - h_{i-1}^2) - \frac{1}{2} \phi [(h_i \delta - p)^2 - (h_{i-1} \delta - p)^2]$$

여기서,

$h_i$ :  $i$ 번째 날일 때의 절삭 높이

$$h_c = \frac{p \tan 60^\circ \tan \alpha}{\tan 60^\circ + \tan \alpha}$$

$$\delta = \left( \frac{1}{\tan 60^\circ} + \frac{1}{\tan \alpha} \right)$$

$$\phi = \frac{\sin 60^\circ \sin \alpha}{\sin(60^\circ - \alpha)}$$

이다. 그리고 중심선에서부터 절삭날까지의 거리  $r(\beta)$ 는 다음과 같다.

$$r(\beta) = \frac{D_0}{2} + h_i \quad (5)$$

여기서,  $D_0$ 는 공구의 지름에서 나사산의 높이를 뺀 지름이다. 결국 총 절삭 토크는

$$T(\beta) = k \cdot \sum_{i=0}^n [r_i(\beta) \cdot S_i(\beta)] \quad (6)$$

이다. 여기서  $n$ 은 탭이  $\beta$ 만큼 회전했을 때까지 절입된 날의 수이다.

이때 각 절삭 면적들은 각 날이 Z축 방향으로 서서히 이송을 하면서 절삭을 행하게 된다. 즉, 전체 면적이 한꺼번에 절삭을 하는 것이 아니라 어느 정도의 회전과 이송을 하여 각 날이 완전히 절삭면에 닿았을 때 각 구간에서 구한 면적 크기로 일정

하게 토크로 작용하게 된다. 이러한 점을 고려해서 각 날 당 최대 면적까지 도달하게 되는 회전 각도를 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\textcircled{1} \quad h_i \leq h_c \quad \text{일 때} \quad (7)$$

$$L = h_i \delta, \quad R_L = \frac{2\pi h_i \delta}{p}$$

$$\textcircled{2} \quad h_i > h_c \quad \text{일 때} \quad (8)$$

$$L = \cos 60^\circ \left[ t + \frac{(h_i \delta - p) \sin \alpha}{\sin(60^\circ - \alpha)} \right],$$

$$R_L = 2\pi \frac{L}{p}$$

여기서  $t$ 는 각 날당 절입량,  $L$ 은 각 날이 완전한 절삭 면적에 이를 때까지의 이송거리,  $R_L$ 은 Z축의 이송에 대한 주축 스피들의 회전 각도이다.

### 3.2 마찰력 토크 모델링

마찰력은 공구표면과 공작물이나 칩 사이에 상대운동 때문에 생긴다. 공구 직경이 큰 탭은 절삭 토크가 상대적으로 마찰력보다 훨씬 크게 작용하게 되지만 직경이 작은 탭일 수록 절삭력은 감소하게 되고 절삭날에 여유각이 별로 없기 때문에 상대적으로 마찰력이 크게 작용하게 된다. 그러므로 작은 직경의 탭을 사용해서 탭가공을 할 때는 마찰력에 의한 토크를 고려할 필요가 있다.

1회의 탭공정에서는 챔퍼부에서 주로 절삭이 일어나고 완전 나사부는 실제 절삭이 일어나지 않고 안내작용만 이루어지기 때문에 챔퍼부에서는 절삭토크가 완전 나사부에서는 마찰 토크가 중요하다. 따라서 전방가공에서는 이 둘을 더해 줌으로써 전체 토크의 크기를 알 수 있다. 그리고 후방가공에서도 절삭이 이루어지지 않고 공작물과 각 절삭 날들이 접촉한 상태로 회전하다가 각 날이 생성된 나사산을 따라 차례로 공작물에서 빠져 나오게 되므로 마찰 토크에 의한 영향만이 작용하게 된다. 그러므로 마찰력에 의한 토크 증가는 완전 나사부가공구간과 후방가공, 이 두 구간에 대해서만 적용시킨다.

완전 나사부에서의 마찰토크를 구하기 위해 사각나사에 대해서 구한 후 삼각나사로 변환시켜서 마찰토크를 구한다. Fig.5에서 미끄럼 면의 마찰이 없다고 생각할 때 공구에 가해지는 외력을  $P_0$ 라

하면 나사를 1회전시킬 때 외력이 하는 일은  $2\pi r P_0$ 가 된다. 그리고 이 에너지를 받아서  $Q$ 는  $h$ 만큼 올라가므로  $Q$ 가 한 일은  $Qh$ 이다. 이 두 일량은 같아야 한다. 즉,

$$2\pi r P_0 = Qh$$

$$\therefore P_0 = \frac{Qh}{2\pi r} = Q \tan \alpha \quad (9)$$

가 된다. 여기서

$$r = (d_1 + d_2) / 2$$

$d_1, d_2$  : 탭 나사산의 외경과 내경이다.

여기에 마찰에 의한 영향을 고려하면 외력과 수직력 사이에는 리드각  $\alpha$ 에 마찰각  $\rho$ 를 더해지는 형태로 되고, 이때의 외력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = Q \tan (\alpha + \rho) \quad (10)$$

따라서 마찰력만에 의한 토크는

$$T_f = (P - P_0) \cdot r$$

$$= Q r [ \tan (\alpha + \rho) - \tan \alpha ] \quad (11)$$

가 된다.

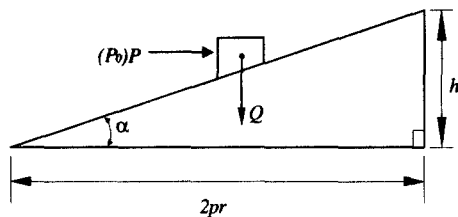


Fig. 5 Diagram of acting forces on a thread face

피치를  $p$ 라 하면  $\tan \alpha = \frac{p}{2\pi r}$ , 마찰 계수  $\mu = \tan \rho$ 의 관계를 식(1)에 대입하여 정리

하면

$$T_f = Q \cdot r \cdot \left[ \frac{p + 2\pi r \mu}{2\pi r - p\mu} - \frac{p}{2\pi r} \right] \quad (12)$$

이다. 나사산의 각이  $\beta$ 인 삼각 나사의 경우 (Fig.6)에는 축방향의 힘  $Q$ 에 대하여 나사면에 작용하는 수직력은  $\frac{Q}{\cos \beta/2}$ 로 된다. 그러므로 유효지름에서의 접선방향의 마찰력은  $\mu \cdot \frac{Q}{\cos \beta/2}$

이고, 수직력  $Q$ 에 대한 마찰계수 ( $\mu'$ )는

$$\mu' = \frac{\mu}{\cos \beta/2} = \tan \rho'$$

이다. 결국 삼각 나사에서 마찰 토크

$$T_f = Q \cdot r \cdot \left[ \frac{p + 2\pi r \mu'}{2\pi r - p\mu'} - \frac{p}{2\pi r} \right] \quad (13)$$

가 된다. 여기서  $T_f$ 는 완전 나사부 가공 구간에서의 실제 측정된 토크의 크기와 마지막 챔퍼부 날의 가공이 끝난 시점에서 측정된 토크 크기와 차를 볼 수 있고,  $Q$ 는 완전 나사부 가공에서의 추력의 크기라 볼 수 있다. 위의 (13)식으로부터 실험적 마찰계수  $\mu$ 를 구해 낼 수 있고 이 마찰계수를 이용해서 마찰력에 의한 토크의 크기를 예측할 수 있다.

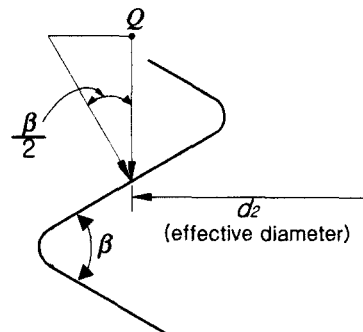


Fig. 6 Normal force on a triangle-thread

#### 4. 실험결과

##### 4.1 실험장치구성

모델링된 탭핑토크를 검증하기 위하여 탭핑센터((주)코마텍:STP-30)를 사용하여 Fig.7과 같은 장치를 구성하였다. 주축과 Z축의 위치와 속도를 알기 위해 각 모터의 엔코더 신호를 측정할 수 있는 20MHz, 24비트 업다운 멀티모드 3채널 카운터 보드를 제작하였으며, 절삭시의 토크 측정을 위해 공구동력계(Kistler-9272)로부터 아날로그 신호를 입력 받을 수 있는 12비트 100MHz의 상용의 AD보드를 사용하였다. AD보드의 8253타이머를 이용하여 10kHz의 샘플링 속도로 AD변환과 동기를 맞추어 엔코더의 신호를 샘플링 하였다. 탭핑센터는 주축 최대 속도가 10,000rpm, 탭핑 최대속도가 6,000rpm이다.

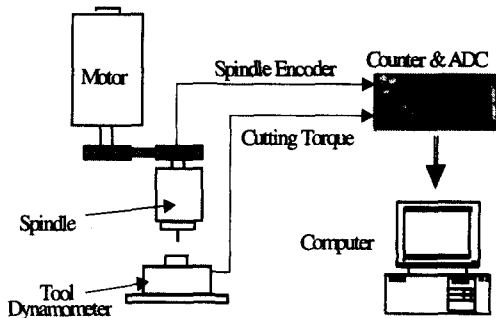


Fig. 7 Schematic diagram of the experimental setup

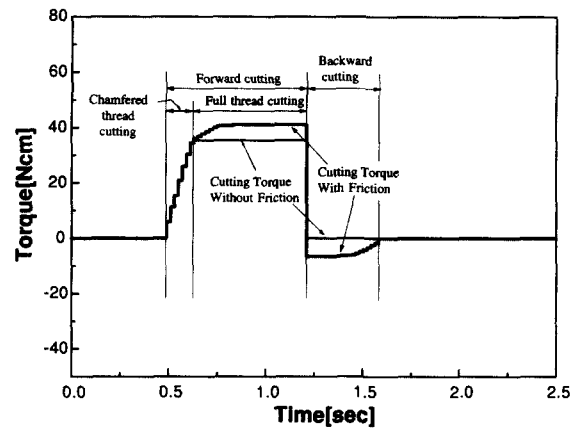
실험에 사용된 공작물은 탭핑가공의 가장 많은 부분을 차지하는 알루미늄으로 했으며 특히 합금(A150)계열을 사용해서 실험을 하였다. 사용한 공구는 M3× 0.5, M5× 0.8, M8× 1.25, M10× 1.5, 그리고 주속은 500rpm으로부터 최대 탭핑 가공 속도인 6000rpm까지 500단위로 행했다.

##### 4.2 시뮬레이션 및 실험결과 비교

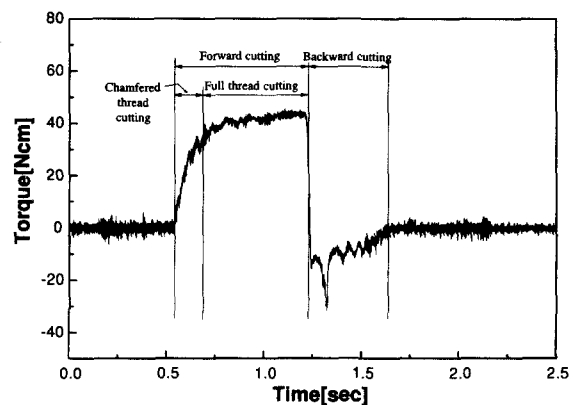
먼저 시뮬레이션에 사용된 마찰계수를 추정하기 위하여 예비절삭 실험을 하였다. 실험결과 챔퍼부에서의 절삭토크는 평균적으로 35Ncm, 추력은 13.5N였으며, 모델링에서 구한 식(13)을 사용하여 마찰계수를 구한 결과 0.242를 얻었으며 비절삭 저항 k는 180kg/mm<sup>2</sup>을 사용하였다<sup>10)</sup>. 그림 8(a)는 제안

된 모델링에 따라 경사각 12도의 M3 × 0.5의 탭에 대하여 시뮬레이션한 결과이다.

챔퍼부 구간에서는 각 절삭날이 절삭에 들어갈 때마다 단계적으로 절삭토크가 상승하고 완전나사부가 절삭에 들어가기 시작하면 마찰에 의한 영향으로 절삭토크가 아주 완만하게 증가하다가 완전나사부를 지나고 나면 일정하게 유지된다. 전방가공이 끝난 후 후방가공이 시작되면 공구의 회전방향이 반대로 되어 토크가 (-)가 되고 각 날들이 공작물에서 빠져 나옴에 따라 마찰토크가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다.



(a) Simulated results



(b) Actual results

Fig. 8 Comparison of one-cycle tapping torque curve

Fig.8(b)는 6000rpm으로 실제 가공 실험을 했을 때의 토크 신호와 주축 회전속도를 보이는데, 시뮬

레이션 결과와 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 탭핑 가공은 전방가공이 끝난후 바로 후방가공이 이루어지게 되는데 이때 공구가 역회전하므로 반드시 스핀들이 일단 정지해야 한다. 그림에서 완전 나사산 가공이 끝난 후 스핀들 회전수가 0인 상태를 유지하는 구간(0.93~1.22초)이 보이는데 이때 절삭날이 그대로 공작물에 박혀 있는 상태로 있게 되어 절삭 토크가 0이 되지 않고 일정한 토크 세기를 유지한다.

후방가공이 시작되면 토크가 (-)로 되고 절삭날이 공작물 바깥으로 빠져 나옴에 따라 토크가 완만히 감소하게 된다. 후방가공 구간 중 보이는 약간의 급격한 변동신호는 전방가공시의 남은 칩이나 버가 절단되거나 또는 마찰면에 끼어 생기는 것으로 생각된다.”

또, 주속과 절삭토크와의 관계를 알아보기 위해 500rpm부터 6000rpm까지 가공을 하였으나 별다른 상관관계를 보이지는 않았다. 그러므로 절삭모델에서 별도로 속도 항목을 추가할 필요는 없는 것으로 생각된다.

## 5. 결론

- 1) 소직경의 스파이럴 탭의 기하학적 형상을 기초로 하여 마찰력을 고려한 탭핑의 절삭 모델을 제안하였다.
- 2) 각 날당 절삭면적에 상당하는 절삭 토크와 함께 마찰력에 의한 토크를 고려한 모델링을 시뮬레이션 한 결과 실제 가공시의 토크 거동 패턴과 각 가공 구간에서 10%이내의 오차로 잘 일치하였다.
- 3) 챔퍼부에서는 날의 절입에 따라 절삭되는 면적이 증가하므로 토크가 선형적으로 증가하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기계류 부품”사업 중 “고속탭핑머신 설계기술개발”과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. Lorenz.G, "The Effect of Rake Angle in Nut

Tapping," C.I.R.P. annals, Vol. 12, pp. 116-119, 1963.

2. Lorenz.G, "A Study on the Effect of Tap Geometry," Mech. Eng. Transaction, Inst. Eng., Australia, Me, Vol. 3, pp. 101-104, 1978.
3. G.Lorenz, "On Tapping Torque and Tap Geometry," C.I.R.P. annals, Vol. 29, No. 1, pp. 1-4, 1980.
4. E.D.Doyle, D.K.Dean, "Effect of Axial Forces on Dimensional Accuracy during Tapping," Int.J.Mach.Tool Des.Res., Vol. 14, pp. 325-333, 1974.
5. 최만성, “고속탭핑에 있어서 절삭토크에 관한 연구,” 대한기계학회논문집, 제18권 12호, pp. 3195-3201, 1994.
6. 최만성, 송지복, “고속태핑에 있어서 탭의 형상과 절삭토크의 특성,” 한국정밀공학회지 제13권 8호, pp. 139-145, 1996.
7. 이정길, 최만성, “STS304의 태핑과 탭 형상에 관한 연구,” 한국정밀공학회지 제17권 11호, pp. 55-68, 2000.
8. 한국 OSG, "태핑작업 Technical Data," 한국 OSG, pp. 12-15, 1990.
9. 신정식, 김찬호, 안중환, 김화영, 김선호, “고속탭핑의 가공상태 감시시스템(I)-탭 형상에 기초한 절삭토크 시뮬레이션,” 대한기계학회 학술대회 논문집[A] pp. 1074-1078, 1999.
10. 김하룡 역, “구멍가공용 공구의 모든 것,” 성안당, 1996.