

고속 탭핑에서의 절삭 특성 해석

강지웅*, 김용규, 이돈진(부산대원), 김선호(한국기계 연구원), 김화영, 안중환(부산대)

Analysis of Cutting Characteristics in High Speed Tapping

J.W. Kang*, Y.K. Kim, D.J. Lee(Dept. of Mech. & Int. system, PNU), S.H. Kim(KIMM), H.Y. Kim, J.H. Ahn(Pusan National University)

ABSTRACT

Productivity of tapping has been increasing through the technological advances in synchronization between spindle rotation and feed motion even in the high spindle speed. However, not much researches have been conducted about tapping process because its complicate cutting mechanism.

In order to investigate the characteristics of the tapping process, this paper concentrates on the analysis of cutting torque behavior during one cycle of tapping. As one complete thread is performed through the whole chamfer cutting, cutting torque increases highly in chamfer cutting, but smoothly in full thread cutting functioning of the threads guide. Cutting torque in backward cutting is smaller than in forward cutting due to only friction force in against between the tool and workpiece. And torque behavior of a periodic Sine ripple-mark was identified during one revolution of a tap.

Key Words . High Speed Tapping(고속 탭핑), Synchronizing(동기화), Forward cutting(전방가공), Backward cutting(후방가공), Chamfer cutting(췌퍼부 가공), Cutting torque(절삭 토크).

1. 서론

탭핑은 뱀이라는 공구를 사용하여 암나사를 가공하는 공정으로서 가장 좋은 암나사를 가공하는 것이 탭핑의 주요 목적이며 생산능률과 생산원가의 절감 등의 이유로 가공의 고속화가 요구되고 있다. 그러나 절삭 공정중 마무리 단계인 탭핑공정은 밀링작업이나 선반작업 및 드릴링 작업등에 비해 상대적으로 고속화가 어려워 생산성에 큰 걸림돌¹¹⁾이 되고 있다. 고속화에 가장 큰 어려움 중의 하나는 탭핑은 정회전에서 탭을 형성하고 다시 역회전으로 형성된 탭을 따라 탭공구가 빠져 나와야하는데, 이때 주축회전속도와 Z축의 이송량이 상대적으로 일치하지 않으면 탭 파손, 암나사 확대, 축소 또는 문드러지는 등 뱀 품질에 많은 악영향을 끼치게 된다¹²⁾. 더욱이 역회전 전에 감속 그리고 가속 구간이 있기 때문에 실제적인 주축회전속도에서 가공이 이루어지지 않는다. 현재는 이러한 문제점들에 대한 많은 연구가 이루어지고 있어 현재 대부분의 탭핑머신은 5000rpm 이상에서 가공이 가능하게 되었으며 10000rpm 이상에서 가공이 가능한 제품도 출시되고 있다.

탭핑을 고속화하게 되면 칩 배출, 공구 파손, 주축과 Z축의 동기화 문제 등에 더 많은 고려를 해야 한다. 현재는 동기화에 대한 많은 연구가 행해지고 있고 고속 탭핑 작업을 위한 공구 등도 이미 개발되어 사용되고 있다. 이러한 문제점들은 결국 토크의 크기 변화로 나타나게 되고 탭 파손을 예측하는데 있어서 토크가 가장 중요한 인자중의 하나이다¹³⁾. 특히 고속 탭핑에서는 소직경의 공구를 주로 사용하기 때문에 이러한 고속화에 따르는 문제점들을 해결하기 위해서는 탭 공구 형상과 거동에 따른 절삭력 특성을 이해하기 위한 연구가 더욱 요구된다.

이 논문에서는 고속 탭핑머신에 쓰이는 탭 공구 형상과 나사 절삭과정을 살펴보고 소직경의 탭 공구로 고속 탭핑을 할 때 공구의 1회전시 나타날 수 있는 토크 곡선 형태를 이론적으로 예측해보고 실제 실험을 통해서 확인한다. 그리고 고속 탭핑시의 공구의 거동에 따라 일반적으로 나타날 수 있는 절삭 토크 특성 곡선 등을 해석한다. 마지막으로 주축 변화에 따른 평균 토크 크기를 측정함으로써 절삭력과 관계를 규명한다.

2. 탭 프로세싱과 절삭 토크 파형

2.1 탭 공구 형상과 나사 절삭 과정

실험에 사용된 탭 공구는 Fig. 1에서 보이는 형상의 주축 회전과 이송을 완전 동기화한 NC 탭핑머신에 대응하도록 제작된 직경이(D×P) M3×0.5인 고속 싱크로 스파이럴(HSS, High Speed Synchro-Spiral) 탭을 사용했고 챔퍼(Chamfer)부의 산수는 2.5산, 완전나사(Full thread)부는 3산, 칩 배출을 위한 3개의 플루트(Flute), 3개의 랜드(Land)부를 가지는데 Fig. 2에 각 랜드별 단면을 보여준다.

나사 절삭 과정을 살펴보기 위해 편의상 첫 번째 날의 절삭높이가 가장 작은 랜드(Land)부부터 차례로 A, B, C라 하면, Fig. 3에서 처럼 A1-B1-C1-A2-...-An-Bn-Cn으로 절삭이 이루어지며 플루트를 통해 칩이 배출된다. 그리고 Land A의 첫 번째 날인 A1날은 직접적인 절삭이 일어나지 않고 나사내기 구멍에 대한 안내 역할을 하게 되고 챔퍼부까지의 날인 C2의 절삭날이 가공을 끝내게 되면 C3 날부터는 완전한 나사산이 형성된다. 완전 나사부에서는 챔퍼부에서 절삭된 완전 나사산의 암나사에 들어가서, 안내(guide)날이 되면서 나사 가공을 마무리하고 있다. 그러므로 완전 나사부에서는 실제적인 절삭 가공은 없다. 완전나사부가 끝나고 후방에서 다시 챔

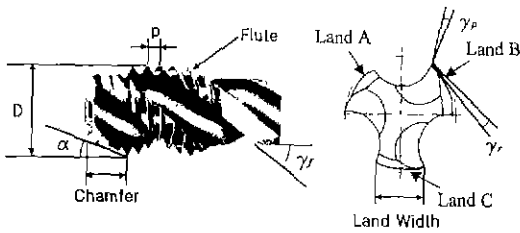


Fig. 1 Shape and geometry of HSS tap

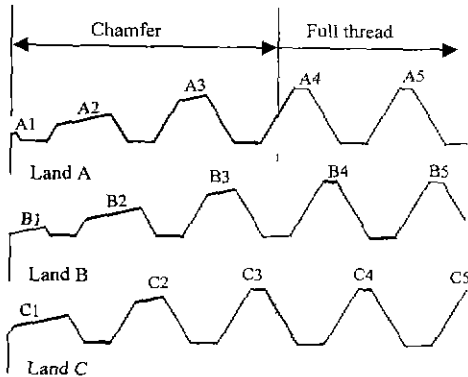


Fig. 2 Cross-sections of tap along lands

퍼형으로 직경이 감소함으로써 고속 탭핑에서의 칩 배출과 마찰력을 최소화하도록 설계되었다.

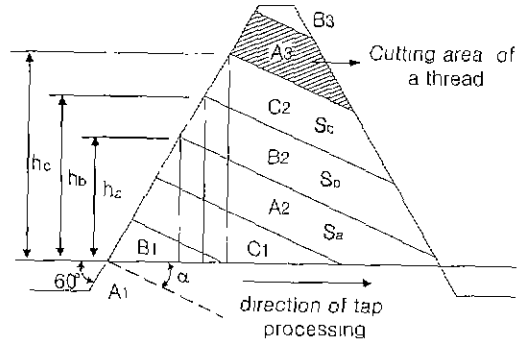


Fig. 3 Sequence of threads

2.2 절삭 토크 파형

탭 공구로 절삭을 할 때는 위의 Fig. 3처럼 각 날의 절삭 면적이 다르므로 절삭력 또한 다르다. 3개의 날이 공작물에 물려서 1회전을 했을 때 절삭 토크 파형이 어떻게 되는지를 이론적으로 고찰하기 위해 먼저 각 날의 절삭 면적을 각각 S_a , S_b , S_c 라 하면 이들의 합력 R 은 다음과 같이 비절삭 저항 $k(\text{kg/mm}^2)$ 에 절삭 면적을 곱한 값으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_a &= k \cdot S_a, \\ R_b &= k \cdot S_b, \\ R_c &= k \cdot S_c \end{aligned} \quad (1)$$

이 합력들을 다시 X축과 Y축의 절삭력으로 분리하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고,

$$\begin{aligned} F_{ax} &= R_a \cos \theta, F_{ay} = R_a \sin \theta, \\ F_{bx} &= R_b \cos(\theta + \frac{2}{3} \pi), F_{by} = R_b \sin(\theta + \frac{2}{3} \pi), \\ F_{cx} &= R_c \cos(\theta + \frac{4}{3} \pi), F_{cy} = R_c \sin(\theta + \frac{4}{3} \pi) \end{aligned} \quad (2)$$

이 절삭력들은 공구의 회전 각도에 따라 식 (3)과 같이 \sin 과 \cos 형태의 파형으로 절삭력이 작용한다.

$$\begin{aligned} F_x(\theta) &= [R_a \cos \theta + R_b \cos(\theta + \frac{2}{3} \pi) + R_c \cos(\theta + \frac{4}{3} \pi)] \\ F_y(\theta) &= [R_a \sin \theta + R_b \sin(\theta + \frac{2}{3} \pi) + R_c \sin(\theta + \frac{4}{3} \pi)] \end{aligned} \quad (3)$$

각 날들이 서로 다른 절삭력으로 회전을 하면서 이동을 하기 때문에 절삭력이 큰 쪽으로 공구가 휘어

나 공작물의 변위를 일으켜 공구의 회전에 따라 sin 형태의 곡선을 만든다.

이러한 절삭 분력의 영향은 공작물을 지지하는 지그의 형태에 따라서 변할 수 있다. X, Y축 중에서 어느 한 축의 양방향으로 공작물을 지지했을 때 공작물의 면이 깨끗하지 못하거나 미끄럼 등에 의해 이상적으로 공작물을 지지하지 못하는 현상이 발생하게 되고 3개의 날에 대한 합력은 고정하지 않은 축 방향으로 공작물에 미세한 변위를 일으킨다. T자 홈 베드 위에 공구동력계를 설치했을 때 또한 같은 영향을 준다. 직경이 큰 탭 공구는 절삭시 소직경의 탭 공구에 비해 상대적으로 공구 강성이 크고 절삭 토크 세기와 추력이 크게 작용하기 때문에 미세한 공작물의 움직임은 무시되어져 사인파의 곡선형태는 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그러나 직경이 작은 탭 공구일수록 절삭 토크가 작아지는 반면 미세한 변위에 대해서는 민감하게 작용하게 되고 특히 넥크(neck) 직경이 작기 때문에 이러한 변위에 대해 공구의 휨 현상이 증가하여 사인파 토크 곡선이 뚜렷하게 나타난다. 본 실험에서는 Y축 방향으로 공작물을 지지했기 때문에 X축 방향의 분력 F_x 에 의한 영향으로 사인파형태의 토크 곡선이 나타나게 될 것이다.

3. 실험 결과

3.1. 실험 장치 구성

Fig. 3은 실험장치의 구성도이다. 탭핑머신은 SPT30 탭핑센터로 주축 최대 속도는 10000rpm, 탭핑 최대속도는 6000rpm이며 주축 모터와 스피들은 벨트구동으로 이루어지고 있다. 절삭토크는 공구동력계(Kistler-9272)를 설치하여 Spindle Encoder와 함께 12비트 100kHz의 상용 A/D Converter 보드를 거쳐 실시간으로 PC상에서 처리되었다. 주축 회전수는 500rpm에서 6000rpm까지 500단위로, 공작물은 알루미늄 60계열을 사용해서 실험을 행했다.

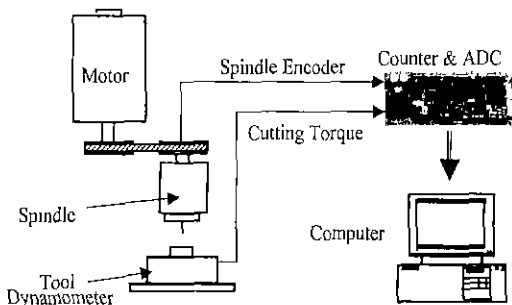


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up

3.2 절삭 토크 곡선

Fig. 4는 공구 직경 $M3 \times 0.5$, 가공 길이 8mm로 주축 회전속도 5500rpm(51.8m/min)에서의 가공 실험을 했을 때 토크신호와 스피들 회전속도를 보여준다. 피치가 0.5mm이고 8mm의 깊이를 가공했기 때문에 공구는 16회전을 하게 되고 산의 개수 또한 16개가 되어야한다. 그리고 토크 곡선 형태를 이론적으로 해석한 것처럼 정확히 1회전당 하나의 사인파 곡선이 나타나고 있다.

먼저 전방가공구간 중 챔퍼부 가공구간은 급격한 토크의 증가를 보여주고 절삭날의 개수에 따라 증가함을 알 수 있다. 완전한 나사산 형태는 이 챔퍼부에서 모두 끝나게 된다. 다음으로 완전나사부 가공구간에서는 토크가 완만하게 증가하는데 이것은 직접적인 나사 절삭은 없지만, 공구와 공작물간의 마찰력에 기인한 것으로 볼 수 있다. 2.65초에서 2.91초 사이에는 스피들 속도가 거의 정지 상태에 있는 드웰(dwell)구간을 보여주는 데 전방가공이 끝나고 공구가 원하는 깊이에 다다랐을 때 이론적으로 이 드웰구간은 나타나지 않아야 되지만 실제로는 주축에 일정한 시간만큼 나타나고 있고 이 구간에서 마지막 나사산이 만들어지는 과정에서 절삭날이 정지해 있는 상태를 보여준다. 이때의 공구 정지 위치에 따라 대략 3가지 형태의 토크 곡선 패턴이 관찰되었다. 전방가공이 끝나고 스피들이 역회전으로 가속을 시작하면서 후방가공이 시작된다. 이때는 전방가공에서 모든 탭이 형성되었기 때문에 형성된 탭의 나사산을 따라 공구가 빠져나오게 되고 그림에서처럼 공구와 공작물 사이의 마찰과 칩등에 의한 마찰력에 의해서 약간의 토크가 걸리게 되지만 칩배출이 원활하지 못한 경우에는 공구의 Z축 이송을 방해하면서 토크가 크게 증가하는 현상^[3]을 보이게 된다.

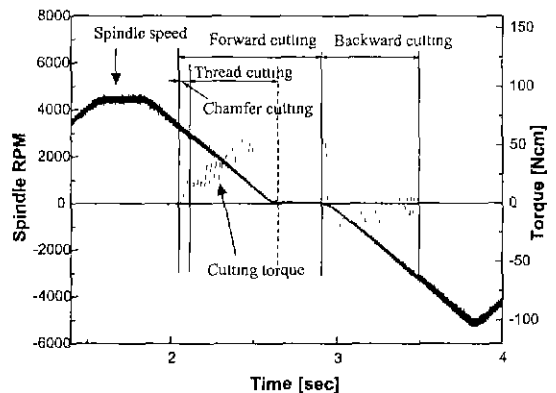


Fig. 5 Behaviour of cutting torque and spindle speed during one cycle of tapping

Fig. 6은 후방가공이 시작되기 전 드웰 구간에서의 공구 정지 위치에 따라 세 가지 형태의 토크 폭선 패턴 측정결과를 보여준다. 탭 가공은 챔퍼부와 완전나사부 모두 Land A, Land B, Land C로 1회전을 이룬다. 1개의 나사산을 절삭할 때 토크변화를 세 개의 Land와 연계시켜 마지막 나사산이 만들어지는 감속구간에서 살펴보면 Land의 위치에 따라 토크 특성곡선 형태는 그림과 같이 3가지 유형으로 나눌 수 있다. 먼저 그림(a)의 A는 탭 날의 Land A부에서만 절삭이 끝난 상태로 토크가 증가하다 멈추고 그 크기를 유지한다. (b)는 Land B부분에서 끝나 토크가 정점에서 감소하는 도중에 끝난다. 그리고 그림 (c)는 Land C부분에서 끝나 토크가 최저점 근처의 세기를 유지하는 형태를 보여주고 있다

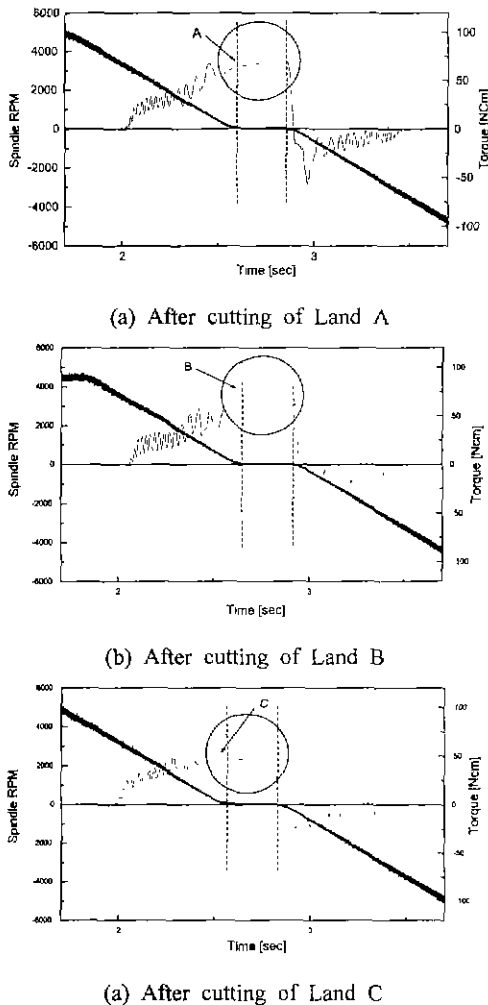


Fig. 6 Cutting torque patterns according to the stop position of threading

3. 3 주속과 절삭력 관계

M3과 M5 두 개의 공구로 같은 가공 조건에서 절삭 실험을 한 후 완전 나사부의 평균 토크 크기를 측정 한 결과 M3은 약 32~37Ncm 정도로 나타났고 M5인 경우는 약 58~64Ncm 정도의 크기를 보여줬다. 두 경우에서 주속 변화에 대해서는 크게 증가 또는 감소하는 경향을 보이지 않았고 절삭력 측면에서도 주속 변화에 대해서 일정한 크기를 유지하는 것으로 측정되어 두 관계는 서로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4. 결론

고속탭핑에서의 절삭 특성을 해석하기 위해 소직경(M3)의 탭 공구를 사용하여 스피indle 회전수 6000 rpm까지의 고속 탭핑 실험을 한 후 토크 폭선 패턴을 분석했다.

- (1) 공구 각 날의 절삭력이 모두 다르기 때문에 공구의 1회전시 X, Y축 방향으로 sin곡선과 cos곡선 형태의 절삭 분력이 작용한다.
- (2) 소직경의 탭 공구에서는 공구가 1회전 했을 때 사인과 형태의 토크 곡선이 뚜렷이 나타났다.
- (3) 전방가공에서 생성된 사인과 곡선의 개수는 공구 회전수와 일치한다.
- (4) 전방가공이 끝나기 직전 탭의 절삭날 Land부 위치에 따라 3가지 형태의 토크 특성 곡선이 나타났다.
- (5) 주속 변화는 절삭력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. J.S.Agapiou, "Evaluation of the Effect of High Speed Machining on Tapping", Journal of Engineering for Industry, Transaction of ASME, Vol.116, pp457-462, 1994.
2. Takeyama, "On Synchronous and Torsional Rigidity in a Threading Machine", Annals of the CIRP, Vol.37, No.1, pp361-364, 1988.
3. 최만성, 송지복, "고속탭핑에 있어서 탭의 절삭 토크의 특성", KSPE, Vol.13.No.8, pp.34-41, 1996.