

초고속 태핑머신 개발 및 평가

김선호*, 김동훈*, 김선민**, 이돈진***, 이선규**, 안중환****, 이상규*****

Development and Evaluation of Ultra High-Speed Tapping Machine

Sun Ho Kim*, Dong Hoon Kim*, Sun Min Kim**, Don Jin Lee***, Sun Kyu Lee**,
Jung Hwan Ahn****, Sang Gyu Lee*****

ABSTRACT

Tapping is a machining process that makes a female screw on parts to be assembly together. Recently, as the number of small and compact products increases the radius of tap as small as 1 mm is not unusual and more accurate tapping is needed. In complying with those needs, some high-speed tapping machines with synchronizing function have been developed. This paper describes the development of an ultra high-speed tapping machine up to 10,000rpm. The key factors in the tapping speed are the acceleration/deceleration and the synchronizing errors between spindle motor and feed motor. To minimize the acceleration/deceleration time, a low inertia spindle with a synchronous built-in servo motor was developed. To minimize the synchronizing errors, the tapping cycle algorithm was optimized on an open architecture CNC. The developed tapping machine has the acceleration/deceleration time of 0.13sec/10,000rpm for rigid tapping and the synchronizing error below 4.4%. The cycle time for tapping a female screw of M3 and depth 2 times diameter was 0.55sec.

Key words : Ultra high-speed tapping machine(초고속태핑머신), Acceleration/deceleration(가/감속), Synchronizing(동기화), Synchronizing error(동기오차), Open architecture CNC(개방형 CNC)

1. 서론

태핑(Tapping)은 볼트를 이용해 부품을 체결하거나 조립하기 위해 부품에 암나사를 만드는 작업을 말한다. 이를 위해서는 탭(Tap)이라 하는 전용공구가 사용되며 주로 태핑머신이 이용된다. 태핑머신이 개발되기 이전에는 수작업에 의해 암나사가 만들어져 왔다. 이후, 기어 교환방식이 적용되었으나 유연성이 부족하여 대량생산에나 적합했다. 메

카트로닉스 기술은 CNC(Computerized Numerical Control)에 의한 동기 태핑기술을 가능하게 했으며 태핑속도를 획기적으로 증대시켰다. 이러한 기술은 1980년대 중반에나 가능했다.

태핑머신은 밀링, 드릴링, 태핑 등이 이루어지는 기계라는 측면에서는 밀링머신과 유사하나, 태핑기능이 대폭 강화된 기계를 의미한다. 일반 밀링머신의 태핑능력은 500rpm 정도이지만, 태핑머신은 3,000rpm 이상에 이른다.

2002년 4월 30일 접수

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

** 광주과학기술원 기계공학과

*** 부산대학교 대학원 기계공학과

**** 부산대학교 기계공학부

***** (주)코마텍 기술연구소

종전에는 태핑머신의 주된 수요처가 자동차, 기계류, 가전산업 등이었으나, 최근에는 노트북 컴퓨터, 하드 디스크, 휴대폰, PDA, 통신부품 등 IT 산업이 주 수요처가 되고 있다. 이러한 제품들은 소형 경량제품이기 때문에 재료는 알루미늄이 주종을 이루며 볼트의 크기도 작아지는 경향이 있어 고속태핑의 요구가 급속히 증대되고 있다.⁽¹⁾

태핑은 단일공정으로 하나의 완성된 제조공정이기 때문에 태핑머신이 가지는 고속성이 제품의 특성을 나타내며, 고속가공 능력이 신규시장을 만들어가는 특성을 가진다.

고속 태핑에 영향을 주는 인자들로서는 주축의 가감속도와 동기화기술로 구분할 수 있다.

태핑공정은 태핑깊이가 한정되어 있기 때문에 가감속도가 최고태핑속도를 결정하게 된다. 이는 생산성에 직접 영향을 주는 인자가 된다.

태핑 사이클은 주축의 정회전 가속, 등속, 정회전 감속, 정지, 역회전 가속, 등속, 역회전 감속이라는 7개의 공정제어를 수행하면서 이송축과 동기제어를 하게 되는데, 이러한 제어과정에서 주축과 이송축의 동기오차가 발생할 수 있다. 이는 나사산의 눈여움, 탭 파손 등을 유발하기 때문에 동기기술이 최고태핑속도를 결정하는 중요 인자가 될 수 있다.

고속 태핑기술에 대한 연구로는 고속태핑에서 공구의 파손 원인이 되는 토오크를 모델링 하기 위한 연구^(2,3,4), 이중 예측제어를 통한 동기오차 저감기술⁽⁵⁾, 고속에서 높은 가속력을 얻기 위한 충분한 토오크를 갖는 낮은 관성의 스피들 설계에 관한 연구⁽⁶⁾, 그리고 운용 측면에서는 가공상태를 모니터링하기 위한 연구⁽⁷⁾들이 있어 왔다.

태핑머신의 주축은 Fig. 1과 같이 3가지 방식이 개발 적용되어 왔다. 지금까지 많은 태핑머신들은 주축에 회전동력을 전달하는 방법으로 Fig. 1(a)와 같이 벨트를 이용하고 있다. 이 경우, 높은 기계적 관성력, 벨트의 장력변화, 미끄럼 등 때문에 가감속도가 늦고 동기화가 어려워 상용 태핑속도가 2,500-3,500rpm에 머물러 있다. 최근에는 (b)와 같이 커플링을 이용한 직결구동방식도 개발되고 있으나, 연결부의 강성을 유지하기 위해서는 커플링의 무게가 무겁고 관성력이 커서 많은 한계를 가진다.⁽¹⁾

본 연구에서는 초고속 태핑머신을 개발하고 이

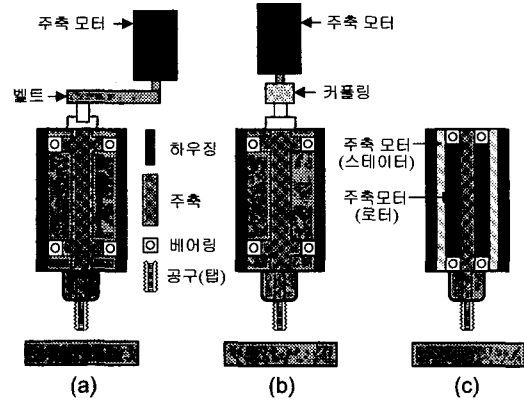


Fig. 1 Spindle structures for tapping machine
(a) Belt drive type, (b) Direct drive type, (c) Built-In type

의 성능을 평가하고자 했다. 초고속이란 현재 태핑머신에서 구현할 수 있는 최고속도를 의미한다. 가감속도를 줄이기 위해서는 Fig. 1(c)와 같이 동기식 빌트인 모터를 적용하여 주축의 관성력을 낮추었다. 동기오차 최소화하기 위해서는 개방형 컨트롤러를 이용해 태핑 사이클을 최적화 했다. 본 논문에서는 세계 최고속 태핑속도를 구현한 기술적 내용들을 소개하고자 한다.

2. 태핑의 공정 특성

동기 태핑머신으로 부품에 암나사를 만드는 공정은 단순하다. 나사를 만드는 탭이라 부르는 공구를 고정시킨 공작기계의 주축이 고속으로 정회전하면서 재료를 파고 들면서 나사가 만들어진다. 나사를 만들고 난 후에는 탭이 역회전하면서 만들어진 나사를 손상시키지 않고 재료를 빠져 나와야 한다. 이를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 주축이 정회전(Forward)하는 구간은 가속, 등속, 감속구간으로 나누어지는데 등속의 중간위치 P_1 이 대략 이송구간의 중간위치가 된다. 그리고 감속후에는 역회전(Backward)을 위해 정지를 하게되며 역회전은 정회전과 동일한 모터제어를 수행하게 된다. 그림에 보이듯이 태핑 사이클을 단축시키기 위해서는 가감속도와 등속시간을 단축해야한다는 것을 알 수 있다.

2.1 주축의 가감속 특성

태핑공정에서 태핑깊이는 탭의 사이즈에 의해 결정된다. 대부분의 태핑에서는 직경의 1.5~2.0배의 깊이를 태핑하게 된다. 나사의 원주방향 가공거리를 s , 주축의 회전속도를 v 그리고 가공시간을 t 라 하면 가공거리는 식 (1)과 같이 표현 가능하다.

$$s = \frac{1}{2} vt \quad (1)$$

식 (1)에서 s 가 일정하다고 한다면 가공시간 t 는 회전속도 v 에 반비례하게 된다. 이러한 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에는 면적 A와 면적 B는 가공거리 s 를 나타낸다. 그림에서 보이듯이 고속 태핑을 이루기 위해서는 가감속도를 고속화해야 한다는 것을 알 수 있다.

2.2 주축-이송축의 동기 특성

태핑에서 최고태핑속도를 제한하는 인자중의 하나가 동기오차이다. 정상적인 태핑이 이루어지기 위해서는 탭이 한 바퀴 회전하는 동안 정확히 나사의 한개 피치만큼 재료를 파고 들어야 한다. 나사를 다 만들고 나면 정지했다가 역회전하면서 한 바퀴 회전할 때마다 정확히 나사의 피치만큼 씩 빠져 나와야 한다. 이를 위해서는 탭을 회전시키는 축과 이송축이 정확히 동기를 이루어야 한다. 동기오차는 회전하는 공구의 각 위치에 대해 Z축이 나사의 피치만큼 정확히 이송하지 못할 때 발생한다. 동기오차의 원인에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 주축모터, 주축, 기어 등을 포함하는 주축의 관성력이다. 동기오차의 발생 개념도를 Fig. 4(a)에 나타내었다. Fig. 4(b)는 태핑절삭 영역에서 동기오차가 발생할 때 치형의 발생하는 산 여빔을 나타낸 것이다. 탭이 정회전하면서 재료를 파고 들어가는 공정에서는 탭의 챔퍼부가 안내를 하지만 역회전시에는 토크가 모든 치형에 일시에 작용하기 때문에 과도한 토크가 작용되어 탭의 파손 원인이 된다. 이러한 절삭특성은 태핑 고속화가 뒤 떨어진 원인중의 하나가 되어 왔다.⁽⁶⁾ 고속 태핑을 이루기 위해서는 동기오차를 최소화해야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 태핑머신에 적합한 주축 개발

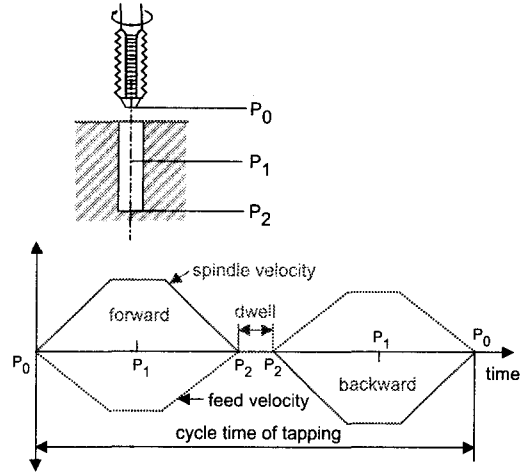


Fig. 2 Tapping cycle for time variant

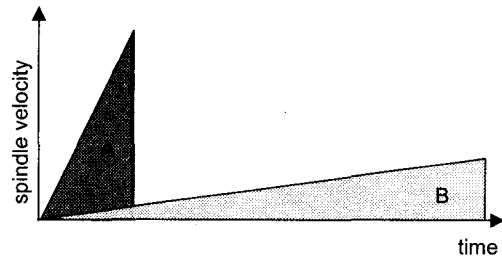


Fig. 3 Relation between time and spindle speed

머시닝센터 등에 사용되는 고속주축과는 달리 태핑머신용 주축은 고속 태핑공정 달성을 위한 가감속시간 단축 및 동기오차감소가 중요한 설계목표이며, 이를 위한 모터 및 베어링선정, 저관성모멘트 등이 우선적으로 고려된다. 아울러 태핑공정을 위한 밀링 등의 절삭이 하나의 태핑머신에서 이루어질 수 있어야 하므로 고속절삭가공이 가능한 고속주축실현까지 동시에 요구하는 기술적 특징을 가진다.

개발된 태핑머신 전용 주축은 다음과 같은 주요 특징을 가진다.

첫째, 주축내장형 동기모터를 사용하여 주축가감속 사이클의 고속화를 달성하였다. 회전부가 영구자석인 동기모터는 비동기형 모터 대비 최고

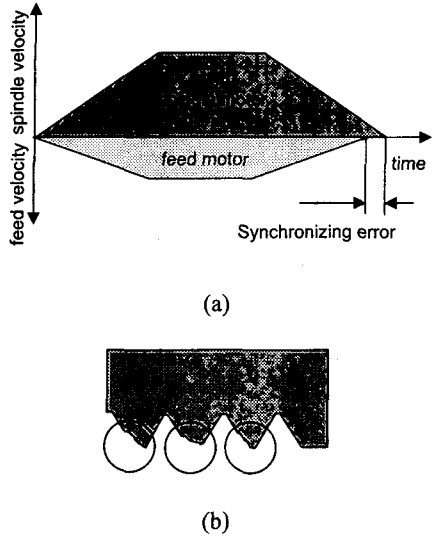


Fig. 4 Synchronizing error
 (a) Concept for synchronizing error,
 (b) Breakage of screw cutter by synchronizing error

60% 까지 높은 토크를 얻을 수 있으며, 약 50%의 가속시간(ramp-up time) 단축과, 유도모터의 철손, 동손과 비교할 때 회전체의 발열이 현저히 낮은 특징을 나타낸다.⁽¹⁾ 따라서, 고속 탭핑공정을 위한 가감속시간 단축, 동기오차 최소화 및 동력전달 요소에서 오는 동기오차 등을 억제하고 고속회전수를 달성하기 위해서 주축 내장형 동기모터를 사용한다. 특히, 동일용량의 고주파 유도 모터 등에 대해 회전체의 저발열 특성은 고속회전의 열변형 및 열예압변화(thermally induced preload change)를 최소화하는 장점을 나타낸다. 개발된 주축의 경우, 0.13sec의 시간에 정지상태에서 10,000rpm까지 가감속을 달성할 수 있다.

둘째, 열변형대응 설계를 통해 열변형에 의한 급격한 예압변화를 억제하였다. 특히, 후축 베어링의 예압방식은 스프링 예압기구 및 스트로크 볼기구를 적용할 수 있으나, 본 연구에서는 구조가 간단해지고 높은 강성을 얻을 수 있는 스프링 예압방식을 적용함으로써 축방향 열변위를 흡수하여 고속회전을 가능하게 하였다.

셋째, 고정도 발란싱에 의한 저진동, 저소음을 달성하였다. 주축의 진동은 가공정도 및 주축의 안

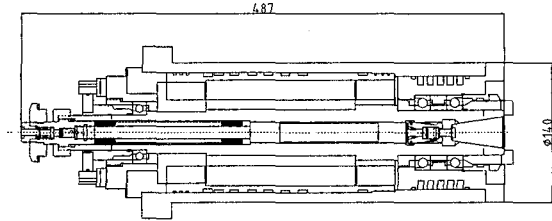


Fig. 5 Structure for tapping machine spindle

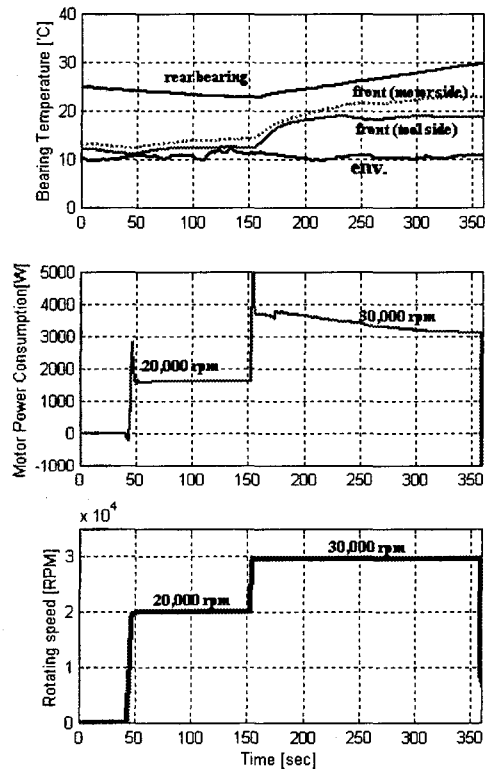


Fig. 6 Power consumption and temperature variation for spindle

정성에 직접적인 영향을 미친다. 특히 30,000rpm의 고속회전에서의 미소 불평형질량에 의한 진동도 베어링 등의 기계부품에 치명적인 손상을 야기할 수 있다. 따라서, 설계단계에서부터 스텝 슬리브(step-sleeve) 기구를 적용하고 나사가공부 등의 설계시 최대한의 축대칭설계를 달성하였다. 또한, 가공조립단계에서 형상공차들을 측정 후 부품을 수정함으로써 불평형을 최소화하여 고정도 발란싱을 달성하였다. 30,000rpm 회전 시, 주축선단 베어링

하우징의 진동을 1.0 μ mPP이하로 측정되었다. 또한, 고정도 발란싱과 함께 소음억제기구를 적용하여 75dB이하의 저소음을 달성하였다.

Fig. 5는 개발된 태핑머신용 고속주축의 개략도를 나타내며, 세라믹 볼 베어링을 사용하여 최고 30,000rpm($d_{m,n}$ 180만, d_n 135만)의 고속회전을 달성하였다. 여기서, $d_{m,n}$ 은 베어링의 유효경과 회전수의 곱이며, d_n 은 베어링의 내경과 회전수의 곱을 의미한다. 이때, 오일-에어 윤활방식을 채택하였으며, 최소유량 윤활조건을 만족하며 저점도유를 사용하여 베어링발열을 최소화하였다. 주축의 1차 고유진동수는 45,700rpm로 30,000rpm까지의 운전영역에서 안정성을 확보하였다. 프리 런(Free-run) 실험에 의한 주축마찰모멘트는 0.2Nm로 이는 모터의 특성이 포함된 수치이다. Fig. 6은 주축의 회전실험 중 측정된 결과이며, 이때 선단베어링 냉각수 공급온도는 5. C, 오일에어 윤활시 공기압은 6kg/cm² 으로 설정하였으며, 베어링 온도는 외륜에 열전대를 설치하여 측정하였다. 모터의 소비동력을 측정하여 실험 중 주축의 급격한 예압변화를 모니터링하였다.

4. 태핑 사이클 최적 프로그램 개발

태핑머신의 CNC는 주축과 이송축의 동기제어를 위한 사이클 기능을 갖는다. 대부분의 태핑머신에 적용되는 폐쇄형 CNC의 경우, 생산자의 의도하에 일반성있는 사이클 기능을 제공하기 때문에 기계 설계자의 의도대로 기계를 제어하기에는 많은 한계를 가진다. 폐쇄형 CNC가 갖는 이러한 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 개방형 CNC(SIEMENS 840D)를 적용했다. 적용한 개방형 CNC의 구조를 Fig. 7에 나타내었다. 하드웨어는 PC 호환인 펜티엄 컴퓨터가 그리고 운영체제로는 윈도우 95가 적용되었다. 유저 프로그램의 작성은 MMC(Man Machine Communication) 103을 이용했으며, 이는 NC 커널측과 PC측을 연결하는 미들웨어 역할을 하게된다.

동기오차를 최소화하기 위한 태핑 사이클의 구조를 아래에 나타내었다. 급속 이송구간에서는 속도 모드 제어(Velocity mode control)를 수행했으며 태핑구간에서는 위치 모드 제어(Position mode control)를 수행했다. 아래 사이클 프로그램에서 SPOS는 모드를 전환하는 예를 나타낸 것이며,

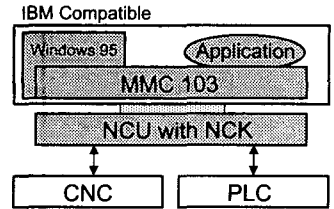


Fig. 7 Structure of open architecture CNC

G331, G332는 각각 태핑동작과 후퇴동작 코드를 나타낸 것이다. 본 연구에서 적용한 제어방법은 주축을 주축이 아닌 하나의 서보축으로 제어가 가능한 장점을 가진다. 이러한 알고리즘에 의해 주축과 이송축의 동기오차를 나사 피치값의 5% 이내로 제어가 가능했다.

```

    . . . . .
    N29 S=SST
    N30 SPOS=DC(POSS)
    N31 BRISK
    N32 G331 AX[ZZ]=DP IP[ZZ]=PP S=SST
    N33 G4 F=DTB
    N34 G332 AX[ZZ]=RFP+HH1 IP[ZZ]=PP S=SST1
    N35 SOFT
    N36 G0 G64 AX[ZZ]=RTP S=HH3 M=SDAC
    N37 MM2:MSG("")
    . . . . .
    
```

5. 실험 및 평가 결과

개발된 태핑머신의 성능을 평가하기 위해 실험이 수행되었다. 재료는 고속태핑에 많이 사용되는 알루미늄(60 계열)이 사용되었고 탭은 고속 싱크로나이즈 탭(OSG HS-AL-SFT)이 사용되었다.

탭은 직경이 3mm인 M3이 사용되었으며 깊이는 직경의 두배 깊이로 가공이 이루어졌다. M3 표준 나사의 피치가 0.5mm, 챔퍼부의 길이(3mm) 그리고 안전높이(2mm)를 감안하면 나사산이 22개 만들어지는 조건에서 실험이 수행되었다.

Fig. 8은 고속 태핑에서 주축과 이송축 모터의 속도 다이어그램을 나타낸 것이다. 신호는 별도의 신호장치를 두지 않고 NC 커널이 제어를 위해 수집하는 엔코더 신호를 인터럽트하여 사용하였다.

그림에서 보이듯이 태핑 사이클을 최적화하기 위해 등속구간은 제거했으며, 9,450rpm에서 가속이 바뀌음을 알 수 있다. 사용된 주축의 가속속도는 0.13sec/10,000rpm이며 9,450rpm까지의 가속시간이 0.128sec가 소요되었음을 알 수 있다. 이때, Z축은 4,500mm/sec로 추종됨을 알 수 있다. 회전방향을 바꾸기 위한 정지시간은 0.07sec로 제어가 가능했다. 벨트를 이용하는 종전기계의 경우 약 0.4sec가 소요되었다.

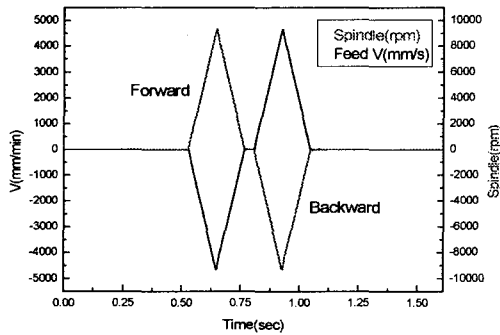


Fig. 8 Diagram between spindle speed and feeding motor for M3 and depth 2 times diameter tapping

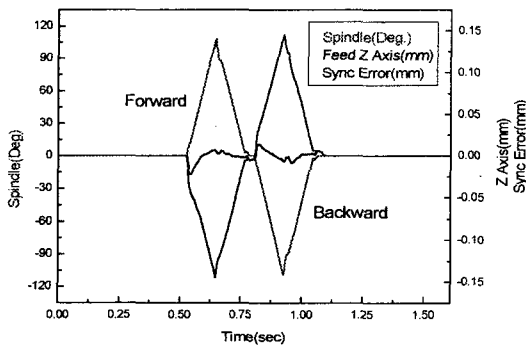


Fig. 9 Diagram of synchronizing error for M3 and depth 2 times diameter tapping

Fig. 9는 고속 태핑에서 주축과 이송축 모터의 추종오차 및 동기오차 다이어그램을 나타낸 것이다. 스피들은 약 110도까지 추종오차가 발생함을 알 수 있으며 이때 동기오차를 줄이기 위해 Z축도

0.145mm 가량 지연시켜 추종오차를 동기화 시킬 수 있다. 이때 발생하는 최대 동기오차는 태핑시작점에서 약 0.022mm를 나타내고 있다. 이는 피치가 0.5mm인 점을 감안한다면 4.4%에 해당된다고 할 수 있다. 그러나, 최대 동기오차가 발생하는 위치는 안전높이 구간에 위치하기 때문에, 실제 탭의 형상에 영향을 주는 동기오차는 역회전 후 가속위치에서 발생하는데 이는 3% 이하가 된다.

Fig. 10은 10,000rpm 태핑 단면을 나타낸 것이다. JIS 규격에서는 가공된 나사산의 밀구멍 확대가 80% 이내일 때 1급 나사라고 한다. 이러한 기준을 적용하면 개발된 태핑머신에 의해 만들어진 암나사의 경우 JIS 1급에 해당된다고 평가할 수 있다.

생산성 측면에서 평가해 보면, 직경이 3mm인 M3 탭을 가지고 직경의 두배 깊이로 나사를 만들기 위해서 벨트구동 방식인 종전의 기계에서는 2.4초 정도가 소요되었으나 개발된 기계를 이용할 경우 0.55초가 소요된다. 이는 생산성 측면에서는 종전기계 대비 500%의 효과를 가진다.

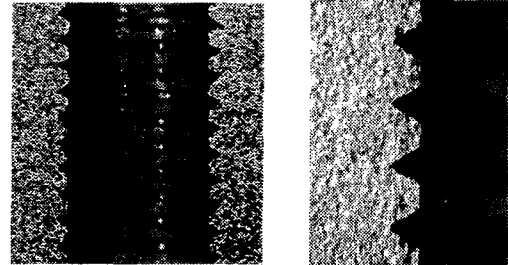


Fig. 10 Cross section for machined female screw for 10,000rpm tapping

6. 결론

본 연구에서는 높은 가속속도와 동기화 기술 개발을 통해 초고속 태핑머신을 개발하고 이를 평가하고자 했다. 가속속도를 최소화하기 위해서는 동기식 빌트인 모터를 적용한 저관성 주축을 개발했으며, 동기오차 최소화하기 위해서는 개방형 컨트롤러를 이용해 태핑 사이클을 최적화하고자 했다. 이러한 연구를 통해 아래와 같은 성과를 얻었다.

- 개발된 저관성 주축은 0.13sec/10,000rpm의 가감속특성을 가지며, 최고 30,000rpm 회전능력을 가진다.
- 개발된 태핑머신을 이용해 M3×0.5, 깊이 2D 기준으로 나사를 만드는 경우, 최고 9,450rpm까지 동기태핑이 이루어진다. 깊이가 깊어질수록 동기태핑속도를 높일 수 있다.
- 동기화 최적 알고리즘 개발을 통해 동기오차를 4.4%대로 최소화할 수 있었다.
- 개발된 태핑머신을 이용한 가공평가 결과, JIS 1급에 해당하는 품질의 나사를 만들 수 있었으며, 생산성측면에서는 M3×0.5, 깊이 2D 기준으로 0.55sec의 태핑 사이클을 달성했다.

참고문헌

1. 김선호, 이선규, 박면용, 안중환, 이상규 외, 고속 태핑머신 설계기술 개발 2000-J-MP-02-B, 과학기술부, 2001.
2. 이돈진, 강지웅, 전현배, 김선호, 안중환, "마찰력을 고려한 고속태핑 토크 모델링," 한국정밀공학회지, 제18권, 제11호, pp. 67-73, 2001.
3. 최만성, 송지복, "고속 태핑에 있어서 탭의 형상과 절삭토크 특성," 한국정밀공학회지, 제13권 제8호, pp.139-145, 1996.
4. Zhang, D. Y. and Chen, D. C., "Relief-face friction in vibration tapping," Int. J. Sci. Vol. 40, No. 12, pp. 1209-1222, 1998
5. Futami, S. and Nakamura, H., "High-speed precision numerically controlled tapping using dual predictive control," AMC2000-Nagoya, pp. 396-400, 2000.
6. Agapiou, J. S., "Evaluation of the effect of high speed machining on tapping," J. of Eng. for Ind., Vol. 116, pp. 457-462, 1994.
7. Liu, T. I. and Ko, E. J., "Diagnosis of tapping operations using an A.I. approach," Proceedings of the 1991 IEEE Int'l conf. Robotics and Automation, pp. 1556-1561, 1991.
8. 김하용 역, "구멍 가공용 공구의 모든 것," 성안당, pp. 200-245, 1996.