

초고속 태핑에서 동기오차가 태핑특성과 나사품질에 미치는 영향 분석

이돈진[#], 김선호^{*}, 안중환^{**}

Investigation of Influences of Synchronizing Errors on the Tapping Characteristics and Thread Quality in the Ultra-High-Speed Tapping

Don Jin Lee[#], Sun Ho Kim^{*}, Jung Hwan Ahn^{**}

ABSTRACT

Synchronizing errors between the spindle motor and the z-axis motor directly influences the cutting characteristics and the thread quality in tapping, because the tapping process is accomplished by synchronizing the movement of the z-axis with the revolutionary spindle motion. Generally synchronizing errors are decided by the parameters of the servo system and commanded velocity. The excessive synchronizing errors which are induced by the parameter mismatch and high cutting velocity can cause tap breakage due to the abrupt increase of cutting torque or damage the thread accuracy by overcutting the already cut threads. In this paper, the influences of the synchronizing errors on the tapping characteristics in the ultra high-speed tapping will be described and a minimum level of synchronizing errors necessary to maintain the quality of the cut thread will be presented.

Key Words : Synchronizing Error(동기오차), Tapping Torque(태평토크), Thread Quality(나사품질), Feedforward Control(피드포워드 제어)

1. 서론

태핑은 텁이라는 전용공구를 사용하여 이송축과 회전축을 동기시킴으로써 암나사를 절삭하는 과정을 말한다. 태핑은 밀링이나 드릴링과 같은 가공방법과는 달리 나사의 생성을 위한 전방가공에서 스판들의 정회전 가속, 정속, 감속과 약간의 정지구간이 있고, 이미 생성된 나사산을 파손시키지 않으면서 나사산을 빠져 나오는 후방가공을 위한 역회

전 가속, 정속, 감속의 복잡한 사이클로 이루어져 있다. 따라서 체결력이 우수한 고품질의 나사를 절삭하기 위해서는 스판들의 회전에 Z축의 이송을 정확하게 동기 시켜 움직이는 것이 매우 중요하다.

최근, 노트북 컴퓨터, 하드 디스크, 이동전화기, PDA, 통신부품 등과 같은 IT 관련 제품들의 수요가 급속히 증가하고 이들의 크기도 휴대성을 고려해 작아지고 있다. 결과적으로 이런 제품들을 조립하기 위해 나사 또한 작아지고 있으며, 1mm 정도의 나

접수일: 2003년 3월 29일; 개재승인일: 2003년 7월 11일

교신저자: 부산대학교 지능기계공학과

E-mail: djlee6@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-3087

* 한국기계연구원 지능형 정밀기계연구부

** 부산대학교 기계공학부

사도 흔히 이용되고 있다. 나사가 작아질수록 기초 구멍의 드릴링과 태핑은 가공시의 BUE(Built Up Edge)를 방지하기 위해 고속으로 가공해야 할 필요가 있다. 또한, IT 관련 제품들은 생산량이 절대적으로 많기 때문에 생산성 증대를 위한 고속화가 필연적이다. 이런 요구에 부응하여 최근 10,000rpm까지 태핑작업이 가능한 초고속 태핑머신이 개발되었다.¹ 그러나 고품질 나사절삭과 생산성 증대를 위한 태핑의 고속화는 필연적으로 주축과 Z축 간의 동기오차를 증가시킨다. 기준을 초과하는 동기오차의 증가는 고품질의 나사절삭이라는 당초의 목표를 희석시켜 버리고, 가공된 나사산을 뭉그러뜨린다. 따라서 초고속 태핑에서 동기오차의 증가가 절삭특성에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구가 필요하다.

고속 태핑기술에 대한 연구들로는 고속태핑에서 공구의 파손 원인이 되는 토크를 모델링 하기 위한 연구^{2,3}, 텁의 형상과 절삭특성에 관한 연구⁴, 고속태핑의 절삭특성에 관한 연구⁵, 이중 예측제어를 통한 동기오차 저감기술⁶, 그리고 운용 측면에서는 가공 상태를 모니터링하기 위한 연구⁷들이 있었다.

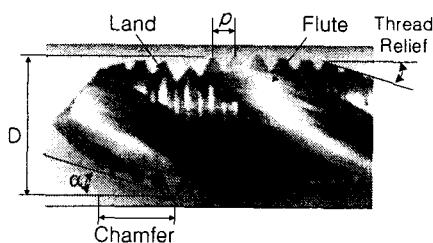


Fig. 1 Photograph of a spiral tap

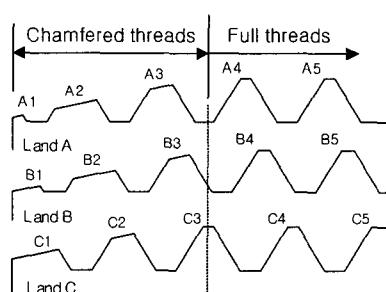


Fig. 2 Cross-sections of threads along each land

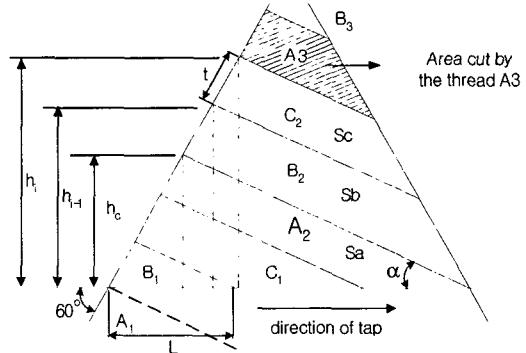


Fig. 3 Cutting areas by consecutive chamfered threads

본 연구에서는 초고속 태핑머신에서 제어계의 파라미터 변동이나 태핑 속도증가에 의해 야기되는 동기오차가 절삭특성에 미치는 영향을 이론적인 태핑 토크모델의 경우와 비교하고 생성된 나사의 품질에 관해서도 조사하였다.

2. 태핑토크 모델링

텝에 의한 암나사의 절삭은 챔퍼부의 나선모양으로 들어선 불완전 산의 절삭날에 의해 이루어지며 각 절삭날은 텁의 회전과 함께 소정의 절입량씩 분담하여 절삭을 하고 챔퍼부 전체에서 완전한 나사산을 형성한다. 완전나사부는 원칙적으로 절삭은 하지 않고 이미 완성된 나사산과 어울려서 텁 자신을 안내하는 역할을 한다. Fig. 1은 3개의 플루트와 랜드를 가지는 고속 태핑용 동기형 스파이럴 텁의 형상을 보여주고 p 와 D 는 각각 나사 피치와 직경을 나타낸다. Fig. 2는 각 랜드 별로 연속된 절삭날의 단면을 보여준다. 나사 절삭과정을 살펴보기 위해 편의상 첫 번째 날의 절삭높이가 가장 작은 랜드(Land)부 부터 차례로 A, B, C라 하면, Fig. 2에서처럼 $A_1-B_1-C_1-A_2-\cdots-A_n-B_n-C_n$ 으로 절삭이 이루어지며 플루트를 통해 칩이 배출된다. 그리고 랜드 A의 첫 번째 날인 A_1 날은 직접적인 절삭이 일어나지 않고 나사내기 구멍에 대한 안내 역할을하게 되고 챔퍼부 마지막 날인 B_n 의 절삭날이 가공을 끝내게 되면 C_n 날부터는 완전한 나사산이 형성된다. 완전나사부에서는 챔퍼부에서 절삭된 완전 나사산의 나사에 들어가서, 안내 날이 되면서 나사가공을 마무리 한다. Fig. 3은 챔퍼부의 각 날이 절

삭할 때의 각 날에 걸리는 절삭면적을 보여준다. 위에서 설명했듯이 A_1 날은 절삭을 하지 않고 B_1 부터 절삭이 이루어지므로 그림에서 B_1 에 해당하는 부분이 처음으로 절삭되는 면적이며 차례대로 B_3 까지 절삭이 이루어진다. 이러한 절삭 메커니즘을 바탕으로 태핑 시에 발생되는 절삭토크 T 를 추정하면 다음과 같이 된다.²

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

여기서,

k : 비절삭 저항

r : 공구중심에서 각 절삭 면적까지의 거리

S : 절삭면적

β : 공구의 회전각도

또, 완전나사부에서는 절삭은 일어나지 않고 이미 생성된 나사를 안내만 하기 때문에 안내면과의 마찰에 의해 마찰토크가 발생된다. 마찰토크는 다음의 식으로 주어진다.

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

여기서,

Q : 완전나사부의 추력

p : 나사 피치

μ : 마찰계수

최종적인 절삭토크는 이 두식의 합으로 주어지며 본 연구에서 사용된 재료인 AI7075를 적용하면

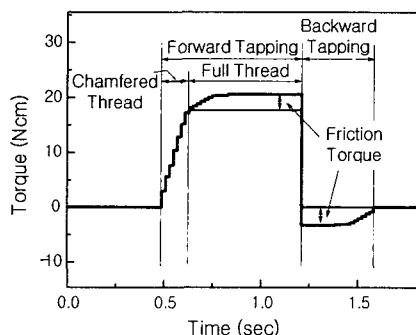


Fig. 4 Simulated tapping torque

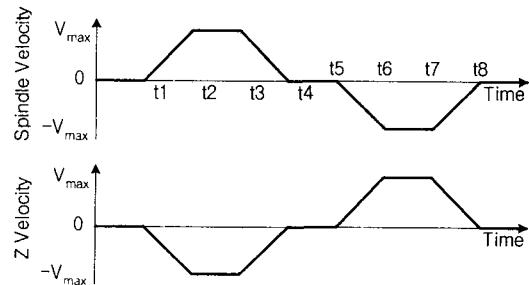


Fig. 5 Velocity pattern of spindle axis and z-axis in a tapping cycle

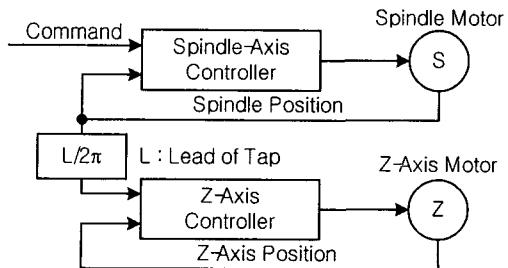


Fig. 6 Conventional synchronous control for rigid tapping

예비실험에 의해 $k=138\text{kg/mm}^2$, $p=0.5\text{mm}$, $\mu=0.242$ 가 된다. Fig. 4는 M3 텁에 대해서 태평토크의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 챔퍼부 구간에서는 각 절삭 날이 절삭에 들어갈 때마다 단계적으로 절삭토크가 상승하고 완전나사부가 절삭에 들어가기 시작하면 마찰에 의한 영향으로 절삭토크가 완만하게 증가함을 볼 수 있다. 후방가공에서는 동기오차가 없다고 가정하였기 때문에 절삭은 일어나지 않고 마찰에 의한 토크만 발생함을 알 수 있다.²

3. 리지드 태핑을 위한 동기서보제어

일반적인 태핑과 비교했을 때 리지드(Rigid) 태핑은 주축의 회전에 따라 Z축의 이송을 동기시킴으로써 태핑을 하는 방법을 말한다. Fig. 5는 리지드 태핑에서 두 축 - 주축과 Z축 - 간의 전형적인 속도패턴을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 태핑 사이클은 전방가공에서 가속(t1-t2), 정속(t2-t3), 감속, 그리고 정지(t3-t4), 후방가공에서 가속(t4-t5), 정속(t5-t6), 감속(t6-t7)으로 이루어져 있다. 밀링이

나 선삭가공에서 주축은 속도 모드로 제어가 되지만, 태평에서는 주축도 이송축과 마찬가지로 위치제어 모드로 변경된다. 일반적으로 주축의 위치제어가 Z축의 위치제어보다 어렵기 때문에 리지드 태평을 위한 동기제어에서 주축이 마스터(Master)축이 되고, Z축이 슬레이브(Slave) 축이 된다.⁶

Fig. 6은 전형적인 동기제어의 블록 다이어그램을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 나사가공을 위해 주축의 제어기에 입력된 위치지령은 주축 모터를 제어하고 주축의 현재 위치는 다시 Z축의 위치지령으로 입력된다. 피드백 제어루프를 가지는 이런 방식의 동기제어 시스템은 마스터 축과 슬레이브 축 지령사이의 시간지연으로 인한 동기불일치의 문제를 발생시킨다. 때문에 필연적으로 동기오차가 발생하게 된다. 이런 동기오차는 공구에 걸리는 절삭력을 증가시켜 텁을 파손시키거나 생성된 나사산을 무너뜨리는 역할을 한다. 그러므로 리지드 태평에서는 예측제어나 피드포워드제어와 같은 부가적인 제어알고리즘을 통해 이런 동기오차를 최소화로 유지하도록 제어하고 있다.

Fig. 7은 실험에 사용된 초고속 태평머신(NTT-30B, KOMATEK)에서 NC 제어기로 채용한 SIEMENS 사의 840D에서 일반적인 피드백 서보시스템에 피드포워드 루프를 추가시킨 경우의 Z축 제어기의 블록다이어그램을 보여준다.

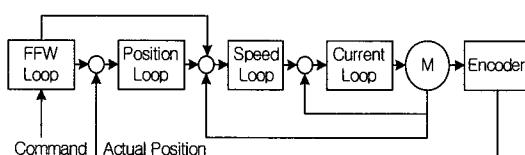


Fig. 7 Feedforward integrated Z-axis servo controller

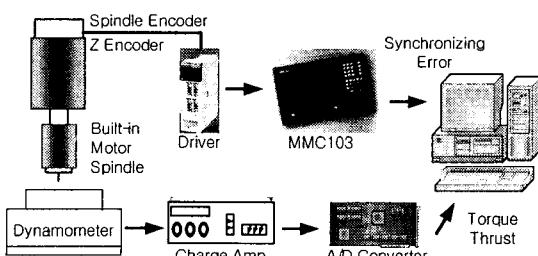


Fig. 8 Experimental setup

4. 실험 및 실험결과

4.1 실험장치의 구성

동기오차와 탭평시의 절삭특성과의 관계를 알아보기 위해 AI7075를 대상으로 M3 스파이럴 텁을 사용하여 초고속 태평머신에서 실험하였다. NTT-30B는 최대 30,000rpm까지 회전가능하며, 10,000rpm 까지 태평이 가능한 동기형 빌트인(Built-In) 주축모터를 사용하였고 개방형 NC 제어기인 SIEMENS 사의 840D를 채용하였다¹. Fig. 8은 실험장치의 구성을 보여준다. 공구동력계(Kistler- 9272)를 사용하여 절삭토크와 추력을 A/D변환기를 통해 측정하고 동시에 MMC103의 서보 트레이스(Servo Trace) 기능을 사용하여 주축과 Z축의 현재 위치를 구한 후 동기오차를 계산하였다.

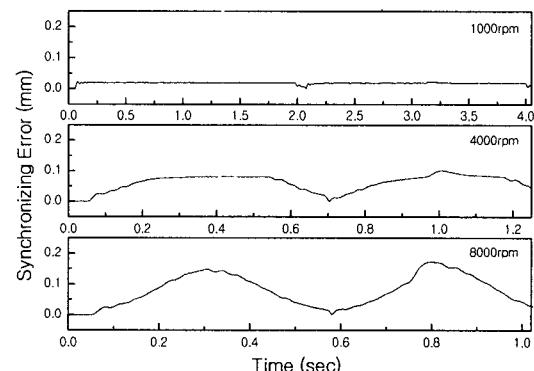


Fig. 9 Synchronizing errors at different cutting speeds

4.2 동기오차에 영향을 주는 인자

4.2.1 주축 속도

Fig. 9는 주축 속도가 각각 1000, 4000, 8000rpm 일 때의 동기오차의 거동을 보여준다. 주축 속도를 제외한 모든 조건이 동일할 때 주축 속도가 증가함에 따라 최대동기오차가 각각 19, 79, 141 μm 으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.2.2 피드포워드 계인

본 연구에서 사용한 태평머신이 채용하고 있는 CNC 제어기인 840D에서 피드포워드 제어를 사용할 경우 드라이브에 대한 튜닝이 적절히 이루어진다면 피드포워드 계인 값은 거의 1이다. 실험에 사

용한 시스템도 고속태평을 위해 최적으로 튜닝되었기 때문에 피드포워드 게인 값은 1이다. 고속태평에 있어서 동기오차가 태평특성에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해 의도적으로 피드포워드 게인을 변경시켜 동기오차를 증가시켰다. Fig. 10은 4000rpm에서 피드포워드 게인 k_{ffw} 를 1.04에서 0.96으로 설정할 때 동기오차의 거동을 보여준다. 피드포워드 게인이 1보다 클 경우 오버피드(Overfeed), 즉, Z축이 주축보다 먼저 진행하고 그림에서 동기오차는 음의 값으로 표시되며 1보다 작을 경우 언더피드(Underfeed)가 되며 Z축의 이송보다 주축의 회전이 먼저 이루어진다. 피드포워드 게인이 1.0에서 멀어질수록 동기오차가 커지는 것을 볼 수 있다.

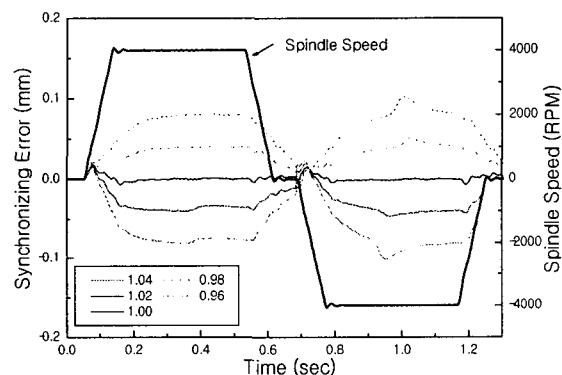


Fig. 10 Synchronizing errors at different feedforward gains for 4000rpm

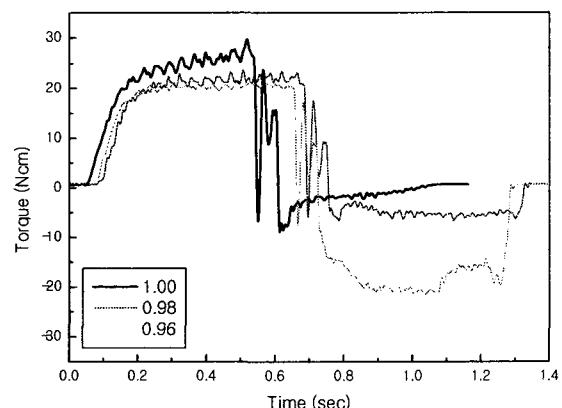


Fig. 11 Tapping torque at 2000rpm

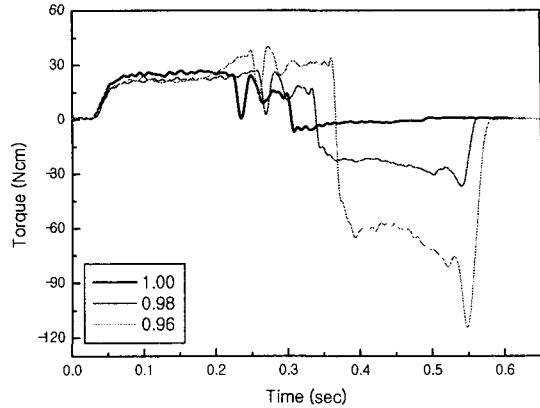


Fig. 12 Tapping torque at 8000rpm

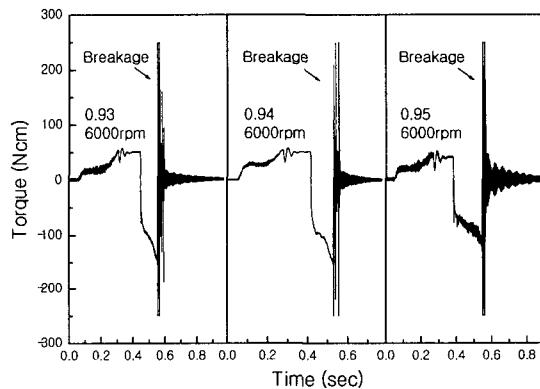


Fig. 13 Tapping torque at tap breakage

4.3 동기오차가 절삭특성에 미치는 영향

Fig. 11과 12는 각각 2000rpm과 8000rpm에서의 각 게인 별 절삭토크를 보여주는 그래프이다. 먼저, 시뮬레이션 결과를 Fig. 11의 절삭토크 그래프에서 긁은 선으로 그려져 있는 동기오차가 최소인 경우와 비교하면 절삭토크의 형태가 거의 같다는 것을 알 수 있다. 전방가공에서의 절삭토크는 챔퍼부에서 급격하게 증가하다가 완전나사부에서 완만하게 증가하며, 후방가공에서는 가속시의 동기오차 증가에 의한 약간의 토크를 제외하면 절삭토크가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 예측한 대로 후방가공에서는 나사의 절삭이 이루어지지 않고 단지 생성된 나사산을 따라서 그대로 빠져나오기 때문이다. 그러나 피드포워드 게인이 0.98과 0.96인 경우 2000rpm과 8000rpm에서 동기오차가 각각 0.04

에서 0.147mm, 0.021mm에서 0.073mm로 증가하고, 전방가공에서는 챔퍼부에 의해 나사가 만들어지면서 들어가기 때문에 동기오차가 있어도 절삭력 증기가 크게 나타나지 않지만, 후방가공에서는 이미 만들어진 나사를 빠져나오기 때문에 절삭력이 모든 날에 한꺼번에 걸리게 되면서 절삭토크가 과도하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, Fig. 12의 8000rpm의 경우 전방가공에서는 2000rpm과 별다른 차이를 보이지 않으나 후방가공에서는 훨씬 더 크게 토크가 증가하는 것을 볼 수 있다.

피드포워드 게인이 0.94인 경우에는 템의 허용 비틀림 토크보다 큰 절삭토크로 인해 템의 파손이 일어났다. Fig. 13은 각각 게인이 0.93, 0.94, 0.95인 경우 템이 파손되었을 때의 절삭토크를 보여준다. 3가지 경우 모두 동일한 절삭토크 패턴을 보여주고 있으며 후방가공에서 과도한 토크로 인해 템이 파손됨을 알 수 있다.

4.4 동기오차가 나사품질에 미치는 영향

태평에 의해 만들어진 암나사의 정밀도는 ISO 또는 JIS, ANSI 등에 허용 한계치수 및 공차에 대해서 규정되어 있다. 그러나 암나사의 정밀도를 측정하는 적당한 방법이 없기 때문에 일반적으로 한

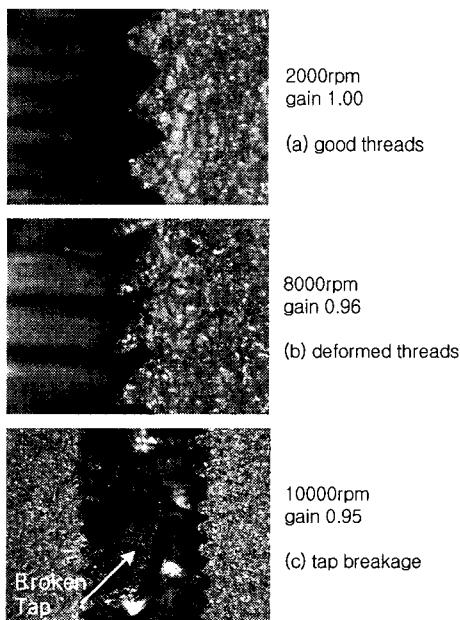


Fig. 14 Photographs of cut threads of M3

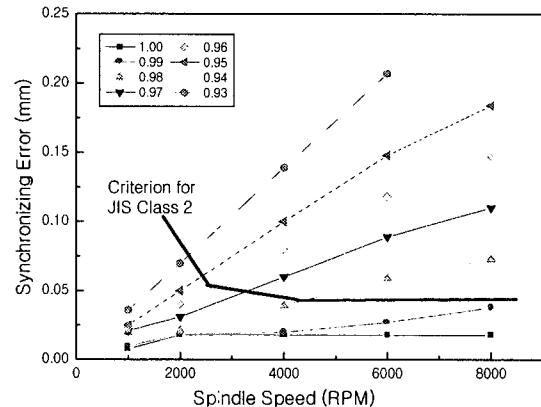


Fig. 15 Maximum synchronizing errors under various conditions

계 나사 게이지를 이용해 JIS 또는 ISO 기준을 정하고 있다. 본 연구에서는 JIS 2급 기준의 한계 나사 게이지를 사용하여 가공된 암나사의 정밀도를 측정하였다. Fig. 14(a)는 JIS 2급에 해당되는 나사의 단면을 보여준다. 정확하게 절삭이 이루어졌음을 보여준다. 그러나 Fig. 14(b)는 과도한 동기오차로 인해 절삭된 나사산이 한쪽으로 누워버린 것을 볼 수 있다. Fig. 14(c)는 과도한 동기오차로 인한 절삭력 증가로 후방가공 중 템이 파손되어 나사 속에 박혀있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 15는 게인과 회전수를 고려한 동기오차의 최대값을 보여주는 그래프이다. 두꺼운 선을 기준으로 아래쪽의 조건들은 모두 한계 나사 게이지에 의해 JIS 2급 수준에 합격한 절삭조건을 나타낸다. 절삭속도가 2000rpm 보다 작은 경우에는 어느 정도 동기오차가 있더라도 문제없이 나사를 절삭할 수 있으나 고속으로 갈수록 동기오차 약 40μm를 초과하는 경우 JIS 2급 수준을 나사를 가공할 수 없었다. 그러므로 초고속 태평에서는 제어계의 튜닝을 통해서 적절한 수준이하로 동기오차가 유지되어야 함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 초고속 태평머신에서 제어계의 파라미터 변동이나 태평 속도증가에 의해 야기되는 동기오차가 절삭특성에 미치는 영향을 이론적인 태평 토크모델의 경우와 비교하고 생성된 나사의 품

질에 미치는 연향에 대해서도 조사하였다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

- 동기오차가 거의 없도록 튜닝된 상태에서 실험적으로 구해진 태평토크 패턴은 이론적으로 구해진 태평토크 모델과 잘 일치하였다.
- 동기오차는 절삭속도 뿐만 아니라 피드포워드 제어기의 변화에 따라 크게 변동하였다.
- 동기오차가 큰 경우, 전방가공에서는 나사산을 만들면서 진행하기 때문에 동기오차가 없는 경우와 비교하여 태평토크가 크게 증가하지 않으나 후방 가공에서는 이미 절삭된 나사산들과 절삭날이 동기오차로 인해 한꺼번에 힘이 걸리게 되기 때문에 태평토크는 큰 폭으로 증가하고 이로 인해 생성된 나사산은 한쪽방향으로 나사 무너짐이 발생하였다.
- 초고속 태평에서 JIS 2급의 나사수준을 유지하기 위해서는 M3 텁의 경우 피치의 8%인 0.04mm 이내로 제어되어야 한다.

396- 400, 2000.

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.

참고문헌

1. Kim, S. H., Kim, D. H., Kim, S. M., Lee, D. J., Lee, S. K., Ahn, J. H., Lee, S. G., "Development and Evaluation of Ultra High-Speed Tapping Machine," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 11, pp 221-227, 2002.
2. Lee, D. J., Kang, J. W., Jeon, H. B., Kim, S. H., Ahn, J. H., "Modeling of High-Speed Tapping Torque Considering Friction Force," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 11, pp. 67-73, 2001.
3. Choi, M. S., "A Study on Tapping Torque in High Speed Tapping," J. of KSME, Vol. 18, No. 12, pp. 3195-3201, 1994.
4. Lorenz, G., "A Study on the Effect of Tap Geometry," Mech. Eng. Transaction, Inst. Eng., Australia, Me, Vol. 3, pp. 101-104, 1978.
5. Agapiou, J. S., "Evaluation of the Effect of High Speed Machining on Tapping," J. of Eng. for Ind., Vol. 116, pp. 457-462, 1994.
6. Futami, S. and Nakamura, H., "High-Speed Precision Numerically Controlled Tapping using Dual Predictive Control," AMC2000-Nagoya, pp.