韓國精密工學會 2003 年度 春季學術大會論文集 pp. -

하드터닝에서 CBN 공구홀더의 열변형이 가공정밀도에 미치는 영향

노승국*(KIMM), 이찬홍(KIMM), 하재용(대우종합기계)

Analysis of Thermal Displacement of PCBN Tool Holder for Machining Accuracy in Hard Turning

S. K. Ro(KIMM), C. H. Lee (KIMM), J. Y. Ha(Daewoo Heavy Industries & Machinery LTD.)

ABSTRACT

The hard turning is a turning operation performed in high strength alloy steels (HRC>30) in order to reach surface roughness close to those obtained in grinding. This is possible because of availability of improved tool materials (polycrystalline cubic boron nitride, PCBN), ad more rigid machine tools. According to many previous work of hard turning mechanism, the maximum temperature of cutting can be raised up to 1000℃. As the heat generation rate is very high, the thermal displacement of tool holder cannot be negligible. Therefore, the aim of this paper is to analyze effects of high heat generation at CBN tool tip to the thermal displacement of a tool holder in hard turning and finally geometric accuracy. The thermal behavior of a CBN tool holder is investigated by numerical simulation and experiment, and the result shows thermal elongation of microns order is possible during hard turning process.

Key Words : hard turning (하드터닝), thermal displacement of tool holder (공구홀더 열변형), finite element analysis(유한요소 해석), geometric accuracy (형상정밀도)

1. 서론

하드터닝(Hard Turning) 기술은 베어링, 엔진 밸브류, 피스톤 등 열처리한 열처리된 고경도 재료를 CBN 선삭공구를 이용하여 IT5 이하의 치수공차와 표면조도 2 ㎛이하의 정밀가공하는 것으로 다양한 가공분야에 적용이 될 수 있고 고가의 연삭공정을 진정으로 대신할 수 있는 꿈의 가공기술로 알려져 있어 10 여년 전부터 자동차 부품가공을 중심으로 발전되고 있다. 하드터닝은 일반적으로 연삭을 대신할 수 있는 가공방법으로 일반 선삭과의 차이점은 절삭기 공구 끝에서 이루어질 정도로 미소 절삭깊이를 가지고 있고 절삭력중에서 배분력의 크기가 커서 기계의 강성이 커야 정밀한 가공이 가능하다. 이러한 하드터닝의 궁극적인 목적은 고정밀의 가공정밀도를 얻는 것이므로 공작물 표면의 조도는 물론, 기계 구조물이나 공작물의 발열에 의한 치수정밀도도 매우 중요한 부분이라 할 수 있다. 특히, 경도가 높은 열처리된 공작물을 CBN 공구로 가공하는 하드터닝시 가공부에서의 발열은 일반 가공에 비하여 매우 커서 절삭 온도가 크게 증가할 수 있다.

하드터닝 가공시에 발생하는 열에 대해서는 이론과 실험적을 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 가공면의 표면조도 등의 품질과 공구 수명, 마모 등에 대한 관점으로 주로 연구되었으며[2][3][4] 이러한 관점에서 측정한 결과를 보면 커터의 절삭부위에서의 온도가 1000℃ 이상으로도 상승할 수 있는 결과가 보고되고 있다.[1][2] 이러한 발열량은 건식가공시에는 대부분 툴홀더를 통하여 전달된다고 볼 수 있으며 에에 따른 공구홀더의 열변위는 필연적으로 발생하게 된다. 이때, 공구부는 온도가 높기는 하지만 작은 크기로 인하여 열변형은 크지 않으나 상대적으로 크기가 큰 툴홀더의 열변형은 공구의 변위를 발생시켜 공작물의 치수정밀도를 해칠 수 있으므로 이러한 툴홀더의 열변형에 대하여 가공정밀도에 미칠 수 있는 영향에 대하여 해석할 필요가 있다.

본 연구에서는 하드터닝에 적용되는 PCBN 공구의 홀더에 대하여 발열조건에 따른 온도분포와 열변형량을 수치해석 및 실험적인 방법을 이용하여 분석하고 실제 가공시 가공정밀도에 미칠 수 있는 영향을 예측하였다. 수치해석은 실제 툴홀더를 모델링 하여 유한요소법을 이용하여 해석하였으며 해석결과 툴홀더의 온도상승에 의한 공구단의 열변형량이 가공 공차 이상으로 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 또한 툴홀더에 CBN 커터를 장착한 상태에서의 가열실험을 통하여 공구 홀더에서의 온도 분포와 열변형을 측정하였으며 이러한 결과를 토대로 공구홀더의 열변형에 의한 가공 정밀도의 영향을 예측하였다.

2. 툴홀더의 열변형 해석

2.1 하드 터닝시 CBN 공구에서의 발열

CBN 공구를 이용한 고경도 강재의 하드터닝시에 발생하는 열은 하드터닝은 연삭공정을 대체하기는 하지만 기본적으로 선삭공정이므로 표면조도와 함께 치수정밀도가 매우 중요하다. 대체로 공작기계의 열변형을 검증할 때, 주로 주축대와 이송계의 발열에 의한 기계 구조물의 열변형에 대하여 설계시부터 고려의 대상이 되나 가공에서의 발열에 대해서는 표면조도나 가공 안정성, 툴의 수명과 같은 관점에서 접근하게 되어 연구들이 진행되어 왔다. Ueda[2] 등의 연구결과를 보면 하드터닝시의 가공부의 온도는 최대 1000℃까지 증가됨을 알 수 있다. 이러한 고발열은 절삭유를 통한 냉각이 이루어지지 않는다면 공구홀더로 대부분 전달될 것임을 예측할 수 있다. 이러한 발열은 공구홀더의 열변위를 발생시키게 되며, 이때의 발열은 가공물의 형상정밀도에 영향을 미치게 될 수 있으므로 이러한 툴홀더의 열변형을 해석할 필요가 있다.

2.2. 해석 모델 및 해석조건

이러한 공구홀더의 열변형을 예측하기 위하여 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.(ANSYS 6.0 사용) 대상 모델로는 주로 사용되는 외경 가공용 공구(TNMN11034T, PCBN)와 공구홀더(CTJNR/R2525M)를 모델링 하였으며 이때 해석에 적용된 각 재질의 물성치는 Table 1 과 같고 요소는 SOLID87 과 SOLID92 를 사용하였다.

경계조건은 툴홀더 지지부에서 공구대를 통한 열전달을 고려하였으며 나머지 부분에 대하여는 상온에 의한 자연대류를 가정하였다. 또한 변위는 3 면에 대하여 각각 X, Y, Z 방향 변위를 고정하였다.

이러한 해석을 위한 유한요소 모델을 Fig.1 에 나타내었으며 결과 검토를 위한 절점들을 표시하였다.

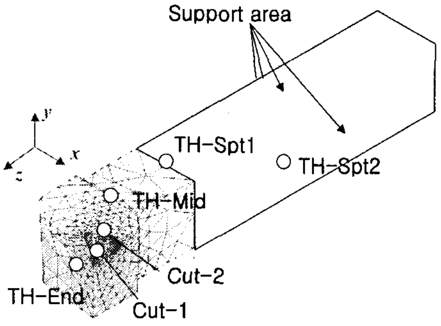


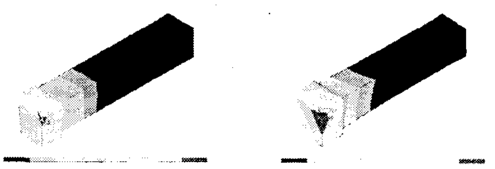
Fig. 1 The model of a tool holder and a PCBN cutter for numerical simulation

Table 1 Material properties of the model

Material	Cutter (PCBN)	Tool Holder (Steel)
Modulus of Elasticity [Gpa]	680	205
Density [g/cm³]	4.00	7.85
Thermal Conductivity [W/m℃]	100	49.8
Heat Expansion Ratio	0.40e-5	1.15e-5
Specific Heat [J/Kg℃]	793	450

2.3 발열 조건에 따른 해석 결과

가공시의 발열량은 절삭속도, 깊이, 재질 등의 가공조건에 많은 영향을 받게 되므로 정확한 발열량을 계산하기 위해서는 절삭 시뮬레이션이나 가공실험을 통한 측정이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 발열에 의한 툴홀더 변형의 해석이 목적이므로 기 연구되어진 결과를 이용하도록 한다. 우선, CBN 툴의 가공부위의 한 개의 절점(332)에서의 온도가 900℃로 가열된 경우의 온도 분포와 열변위의 크기를 해석한 결과는 Fig. 2 와 같이 툴홀더의 온도는 40℃를 넘지 않음을 알 수 있으며 이때의 전체 열변형 크기는 약 5.6㎛정도임을 알 수 있다.



a. temperature distribution b. displacement (USUM)

Fig. 2 Temperature and displacement when tool tip temperature is 900℃

그러나 실제적으로 한 점에서 가공이 일어나는 것이 아니고 일정한 절삭깊이를 가지고 일어나게 되므로 일정온도에 대한 조건보다는 가공 부분 노드의 발열을 주는 것이 좀더 실제 조건에 근접한다. 따라서 가열조건을 절삭깊이 0.2mm 정도를 감안하여 4 개의 노드에 가열하는 방법을 적용하였다. 4 개 노드의 열량 합이 20W 일때 가공부위(Cut-1)에서의 온도는 1097℃를 나타내었으며 Fig. 1 에 표시된 각 부분의 열량변화에 따른 온도분포와 공구홀더 끝단에서의 열변형은 각각 Fig. 3 과 Fig. 4 와 같다. 이 경우에는 한 개의 절점에 온도를 적용한 경우보다 온도 및 변위의 증가가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 주로 가공정밀도에 영향을 줄 수 있는 Z 방향 변위는 약 15 ㎛ 정도로 가공 공차에도 영향을 줄 수 있는 변위임을 알 수 있다.

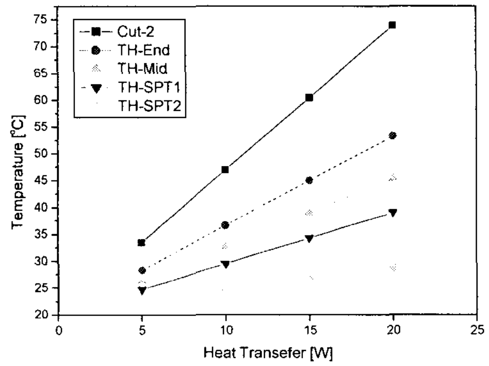


Fig. 3 Temperature due to heat flow at cutter tip

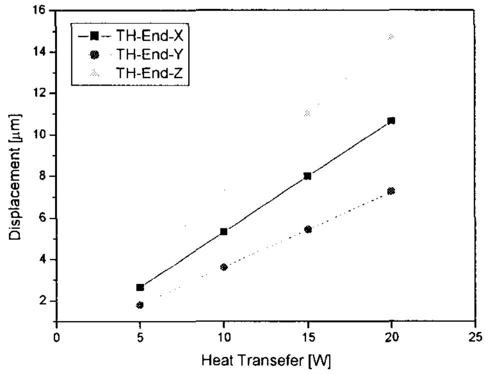


Fig. 4 Displacement of tool holder end

2.4 가열에 따른 시간응답

이러한 가공시의 발열은 가공시간에 따라 오랜 시간 지속될 수도 있으며 때로는 짧은 시간만 적용될 수도 있다. 따라서 시간에 대한 응답을 해석할 필요가 있다. Fig.5 는 0.2mm 의 절삭깊이를 가정한 조건에서 20W 발열시 각 부분의 온도와 변위 특성을 나타내고 있다. 상대적으로 열전도계수가 큰 커터 부분의 경우 온도증가가 빠르게 나타나고 있으며 툴홀더 부분의 안정시간은 상대적으로 큼을 알 수 있다. 이때, 툴홀더 선단에서의 열변위는 툴홀더 부분의 온도상승 곡선과 비슷한 기울기를 보이고 있으며 변위가 안정되는데 약 7 분 정도의 시간이 걸리는 것으로 나타났다.

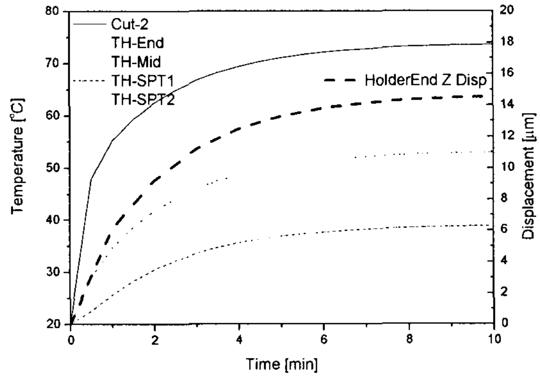


Fig. 5 Transient analysis for 20W total heat flow

2.5 툴홀더 열변형의 가공정밀도 영향 예측

열변형이 발생할 경우 외경가공에 있어서 변위량이 발생하면 공작물과 공구간의 기계강성을 고려하면 가공 오차를 예측할 수 있다. 즉, 자유단에서 공구부의 변위를 δ_0 라고 하고, 이때의 공작물과 공구대간의 기계 상대 강성을 K_m, 툴홀더의 돌출 부분 강성을 K_t 라고 할 때 이때의 최종변위 δ는 다음의 식(1)과 같이 나타나는데, 공구홀더의 돌출부위가 짧아서 K_t 가 매우 큰 경우 공구의 변위는 열변위와 같아짐을 알 수 있다. 이 변위는 실제 가공시의 가공 깊이의 변화로 나타날 수 있어 형상정밀도에 영향을 주게 된다. 즉 2.4 절의 조건과 같이 발열이 큰 상태로 5 분이상 가공하는 경우 초기에 비하여 치수오차가 12 ㎛이상 발생할 수 있음을 알 수 있다.

$$\delta = \frac{K_t}{K_m + K_t}\delta_0 \approx \delta_0 \qquad (1)$$

3. 공구홀더의 열변형 실험

가공중의 툴홀더의 열변형을 측정하는 것이 용이치 않으므로 툴홀더의 열변형을 예측하기 위하여 툴홀더와 CBN 공구를 이용하여 툴홀더 열변형을 측정하였다. 실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 6 과

같이 공구 끝단에 온도조절이 가능항 가열기로 가열을 하고 이때의 툴홀더에서의 온도변화를 열전대를 이용하여 측정함과 동시에 툴홀더 끝단에 용량형 변위센서(12.5 ㎛/V, resolution 0.01 ㎛)를 설치하여 열변위를 열전대를 측정하였다. 열전대는 커터의 뒷부분(Cutter, 해석시 Cut-2)과 툴홀더의 상부 윗부분 (Holder1, 해석시 TH-Mid) 그리고 지지부(Holder2, 해석시 TH-Spt1)의 온도를 측정하였으며 가열기의 온도는 비접촉 온도계로 측정하였다. 가열부분의 온도는 해석과 같이 위치에 따른 온도구배가 크므로 직접적인 측정의 정확도를 확보할 수 없어 측정하지 않았다.

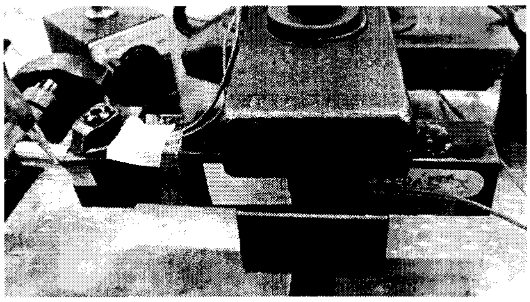


Fig. 6 Experimental set-up for measuring tool holder thermal displacement and temperature

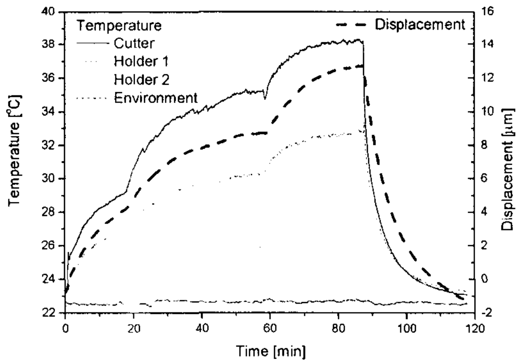


Fig. 7 Experimental result temperature and displacement of tool holder

이때 가열부의 온도와 접촉부위를 변화시켜가며 온도와 변위를 측정한 결과가 Fig. 7 에 나타나있다. 가열온도는 초기에 200℃를 가하였으며 20 분 후에는 가열면적을 약간 증가시켰고 60 분에선 온도를 300℃로 증가시켰다. 최종적인 커터와 툴홀더 접촉부(Cutter)의 온도는 약 38℃였으며 툴홀더 끝단의 축방향 변위는 약 13 ㎛가량 나타났다. 또한 변위의 증가 특성을 보면 툴홀더의 온도 증가보다 약간 늦은 시간응답성을 가지고 있음을 알 수 있어 열변위가 안정되는 시간은 적어도 20 분 이상 소요되는 것을 알 수 있다.. 여기서 툴홀더상단(Holder1)의 온도가 30℃이상 즉 상온과 8℃이상의 온도증가가 있을 경우 변위는 10 ㎛이상 발생할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 실험 결과는 정량적으로 해석결과와 일치하지는 않는데, 이는 접촉면적 등 열적 환경이 실제 기계가공 상태 및 해석시의 가정들과의 차이에서 원인을 찾을 수 있다. 그러나 경향적으로는 매우 유사한 결과를 보이고 있으며 실제 장착상태의 조건에 따라 툴홀더의 발열은 가공정밀도에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

지금까지의 연구결과에서 본 연구에서는 하드터닝 가공시의 발열에 의한 툴홀더의 열변형이 가공정밀도에 미치는 영향을 예측하기 위하여 수치해석 및 실험을 통하여 공구홀더의 온도 및 열변형을 해석하였다. 해석결과 0.2mm 정도의 절삭깊이에서 절삭부의 온도가 1097℃까지 오르는 발열조건에서 가공깊이방향 열변위는 14 ㎛ 까지 발생하였으며 가열실험을 통한 측정 결과 툴홀더의 온도가 10℃ 증가하였을 때 13 ㎛의 변위가 발생하며 시간응답을 통하여 실제 가공중에서도 발열이 큰 조건에서 수분이상 가공하는 경우 툴홀더의 변형이 가공공차 이상으로 발생하여 형상정밀도에 영향을 줄 수 있음을 예측할 수 있었다.

이러한 영향이 실제 가공정밀도에 미치는 영향을 정확히 해석하기 위하여 앞으로 가공실험을 통한 검증을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. H. K. Tö nshoff, C. Arendt, R. Ben Amor, "Cutting Hardened Steel", Annals of the CIRP, 49/2, Keynote paper, 2000
2. Takashi Ueda, Mahfudz Al Huda, Keiji Yamada, Kazuno Nakayama, "Temperature Measurement of CBN in Turning of High Hardness Steel", Annals of the CIRP Vol. 48, pp. 63-68, 1999
3. X.L. Liu, D.H. Wen, Z.J. Li, L. Lao, F.G. Yan, "Cutting Temperature and Tool Wear Of Hard Turning Hardened Bearing Steel", J. of Material Processing Technology, Vol. 129. pp. 200-206, 2002
4. G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, "Tool-Wear Mechanisms in Hard Turning With Polycrystalline Cubic Nitride Tools". Wear. Vol. 250, pp. 576-586, 2001