

# 선삭에서 공구열변형이 표면 형상에 미치는 영향에 관한 연구

염철만\*, 신근하\*\*, 홍민성\*\*

## A Study on the Effect of Tool Thermal Deformation on Surface Profiles for Turning Process

Zhe Man Lian\*, Keun Ha Shin\*\*, Min Sung Hong\*\*

### Abstract

During the turning of the workpiece, cutting heat causes thermal deformation of the cutting tool which influences the surface characteristics of the machined part. This paper presents a study of thermal deformation of the cutting tool. For this purpose, cutting tool is modeled based on Pro/Engineering and the thermal deformation is simulated by means of the finite element method. The thermal effect on the surface roughness profile is simulated by using surface-shaping system. It has been shown that the results of simulation are similar to those of experiment.

**Key Words** : Surface roughness(표면거칠기), Thermal deformation(열 변형), FEM(유한 요소법), Surface-shaping system(표면가공시스템)

### 1. 서 론

절삭가공 중 에너지는 칩을 생성하고 공구와 공작물 사이의 마찰로 소모되어진다.<sup>(1)</sup> 절삭할 때 주어진 일의 양 중 에서 대부분이 열로 소멸되며, 절삭에서 생기는 열의 종류는 전단면에서 전단 소성변형 때문에 생기는 열과 칩과 공구경사면의 마찰로 인해 발생하는 열, 공구에 의해서 가공물 모체에서 칩이 분리될 때 생기는 열이 있는데, 이 중에서 칩이 분리될 때 생기는 열은 다른 것에 비해 적으

로 절삭열로는 첫 번째와 두 번째의 것이 중요시된다.<sup>(2)</sup>

절삭열의 대부분이 칩에 의해 제거되며 공구와 가공물에 의해 제거되는 열은 칩에 의한 열의 방출보다 적다. 공구를 가열하는 열량은 공구의 온도를 상승시키며 이로 인해 공구의 열변형이 발생한다. 이 공구 변형은 절삭 날을 변형시키고, 공작물의 표면 형상에 영향을 주며, 이로 인해 가공된 부품의 표면 거칠기에 영향을 미치게 된다.

많은 연구자들은 실험적 방법과 유한 요소법으로 절삭 온도를 측정하고 계산하였다.<sup>(3,4)</sup> 공작물의 열변형은 온도

\* 아주대학교 기계공학과 대학원(lzm@madang.ajou.ac.kr)  
\*\* 아주대학교 기계 및 산업공학부

의 변화에 의해 영향을 받는다.<sup>(6)</sup> 그리고, 플랫 엔드밀(Flat Endmill)에서 가공시 발생하는 열의 측정과 이로 인한 열변형이 표면 거칠기에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다.<sup>(6)</sup>

그러나, 온도변화에 따른 열변형량의 수학적 모델과 선삭에서 공구의 열변형이 표면 형상에 미치는 영향에 관한 연구는 적은 편이다.

본 연구에서는 열변형량의 수학적 모델과, 이를 이용한 선삭에서 공구의 열변형량을 예측하는 방법을 시도하였다. 먼저 열변형량을 수학적 모델을 통해서 예측하고, 이를 FEM 해석을 통해 경향을 비교 분석하였다. 공구 인서트는 Pro/Engineer로 모델링 하였고, 온도와 열변형을 ANSYS를 사용하여 해석하였으며, 공구의 열변형량이 표면 형상에 미치는 영향은 표면 가공법 (surface-shaping system)을 사용하여 시뮬레이션 하였다.<sup>(7)</sup> 마지막으로 실험을 통하여 표면 프로파일을 얻고, 열변형량의 예측과 변형된 공구의 형상, 표면 거칠기에 미치는 영향에 대해 비교 분석하였다.

## 2. 공구 열변형 이론

본 연구에서는  $0 \leq x \leq L_x$ ,  $0 \leq y \leq L_y$ ,  $0 \leq z \leq L_z$ 의 크기를 가지는 공구 인서트의 유한 솔리드 모델이 고려되었다. 가공 중에 칩이 일정한 속도로 공구 경사면 (rake face)을 흘러가고, 일정한 마찰열이 공구와 칩 사이에서 발생하게 된다. 예리한 절삭날에 의한 가공과, 플랭크 면(flank face)과 공작물 사이의 접촉은 무시하고, 절삭공구의 열원(heat source)은 공구와 칩 사이에 의해서만 생성된다고 가정하였다. 열원은 Fig. 1에 나타내었고, 지배방정식과 경계조건은 아래와 같다.

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = Q(x, y, t) \quad (2)$$

$$z = 0; 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b.$$

여기서,  $T$ 는 온도,  $\lambda$ 는 열전도율,  $\alpha$ 는 열확산율,  $a$ 와  $b$ 는 Fig. 2에서와 같이 공구 페이스 면에 있는 열원의 공구-칩 사이의 접촉 길이를 나타내며,  $Q$ 는 열원의 열량을

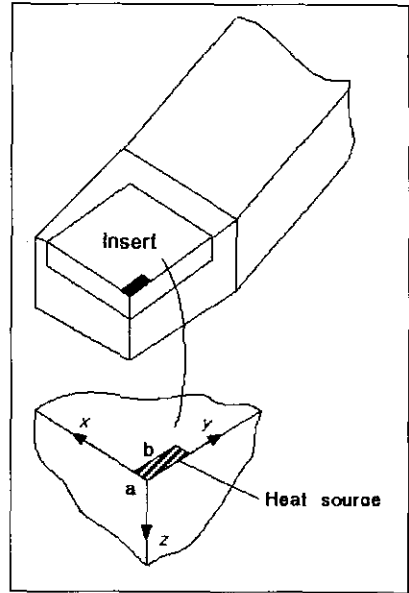


Fig. 1 Heat source of the rake face

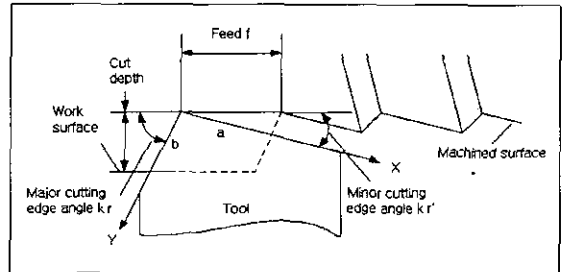


Fig. 2 The size of heat source

나타낸다. Fig. 1에서 공구의 좌표축을 표시하였으며, 열원은  $x$ 축 방향으로  $a$ ,  $y$ 축 방향으로  $b$ 를 갖는 사각형 모양이고, 공구의 표면에 놓여있다고 가정하였다.

여기서,  $a$ 와  $b$ 를 다음과 같은 수식적으로 계산할 수 있다.

$$a = 1.75 \cdot f \cdot \sin(k_r)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin(k_r)} \quad (3)$$

Green's Function를 적용하여 공구온도를 표현하면 다음과 같다.<sup>(8,9,10)</sup>

$$T(x, y, z, t) = \frac{\alpha Q}{\lambda} \int_0^a \int_0^b \int_0^t \theta_G d\tau dx' dy'$$

$$= \frac{8Q}{\lambda} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\eta_p}{\beta_m^2 + v_n^2 + \eta_p^2}$$

$$\times [1 - \exp(-\alpha(\beta_m^2 + v_n^2 + \eta_p^2)t)] \times C_x C_y C_z P_a P_b \quad (4)$$

여기서,  $\lambda$  는 열 전도율(thermal conductivity)이며,

$$C_x = \frac{H \sin(\beta_m x) + \beta_m \cos(\beta_m x)}{(H^2 + \beta_m^2)L_x + 2H}$$

$$C_y = \frac{H \sin(v_n y) + v_n \cos(v_n y)}{(H^2 + v_n^2)L_y + 2H}$$

$$C_z = \frac{H \sin(\eta_p z) + \eta_p \cos(\eta_p z)}{(H^2 + \eta_p^2)L_z + 2H}$$

$$P_a = \frac{H}{\beta_m} (1 - \cos(\beta_m a)) + \sin(\beta_m a)$$

$$P_b = \frac{H}{v_n} (1 - \cos(v_n b)) + \sin(v_n b)$$

이고,  $\theta_G$  는 Green's Function로서 식 (5)에 나타내었다.

$$\theta_G = 8 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} [\exp(-\alpha(\beta_m^2 + v_n^2 + \eta_p^2)(t - \tau))]$$

$$\times \frac{H \sin \beta_m x + \beta_m \cos \beta_m x}{(H^2 + \beta_m^2)L_x + 2H} \times \frac{H \sin v_n y + v_n \cos v_n y}{(H^2 + v_n^2)L_y + 2H}$$

$$\times \frac{H \sin \eta_p z + \eta_p \cos \eta_p z}{(H^2 + \eta_p^2)L_z + 2H} \times (H \sin \beta_m x' + \beta_m \cos \beta_m x')$$

$$\times (H \sin v_n y' + v_n \cos v_n y') (H \sin \eta_p z' + \eta_p \cos \eta_p z') \quad (5)$$

여기에서

$$\beta_m : m - \text{th positive root of } \tan(\beta L_x) = \frac{2\beta H}{(\beta^2 - H^2)}$$

$$v_n : n - \text{th positive root of } \tan(v L_y) = \frac{2v H}{(v^2 - H^2)}$$

$$\eta_p : p - \text{th positive root of } \tan(\eta L_z) = \frac{2\eta H}{(\eta^2 - H^2)}$$

이며,  $\beta_m, v_n, \eta_p$  는 고유치(eigenvalue)이다.

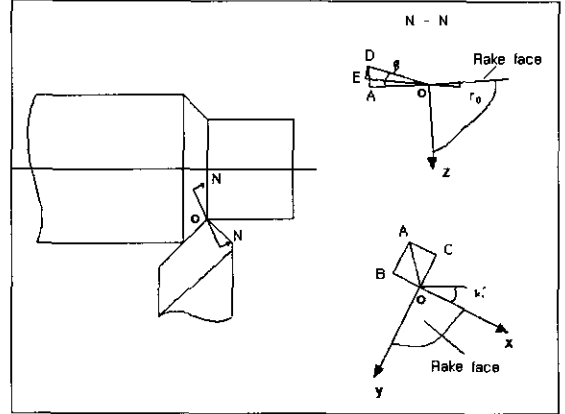


Fig. 3 The thermal deformation of the cutting tool

Fig. 1에서 좌표축 x 방향으로의 공구 열변형은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta x = \frac{8Q\eta}{\lambda} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\eta_p}{\beta_m^2 + v_n^2 + \eta_p^2}$$

$$\times [1 - \exp(-\alpha(\beta_m^2 + v_n^2 + \eta_p^2)t)] \times C'_x C_y C_z P_a P_b \quad (6)$$

y와 z 방향도 이와 같은 방법으로 구할 수 있다.

여기서,

$$C'_x = \frac{(H/\beta_m)(1 - \cos(\beta_m L_x)) + \sin(\beta_m L_x)}{(H^2 + \beta_m^2)L_x + 2H}$$

이다.

공구 열변형은 Fig. 3에서 보여주며, 다음과 같이 표현 된다.

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \times$$

$$\cos(\tan^{-1} \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} - r_0) \times \cos(\tan^{-1} \frac{\Delta x}{\Delta y} - k'_r) \quad (7)$$

여기서,  $r_0$ 는 경사각 (rake angle) 이고,  $k'_r$ 은 여유각 (minor cutting edge angle)이다.

### 3. 표면가공 시스템 (Surface-Shaping System)

이 시스템은 공작기계의 기구학과 절삭 공구의 기하학 및 가공된 표면의 형상을 예측하기 위한 목적으로, 절삭날 위의 표면가공점과 공작물과의 상관관계를 나타낸다. 표면가공시스템은 절삭공구의 기본운동뿐만 아니라 가공시 발생하는 공구의 런아웃(runout), 기계의 변형, 진동, 고차원 운동까지도 포함되어 있다. 그러므로, 이 시스템은 제조 공정의 표면 특성 예측을 위한 일반적인 수학적 모델을 제시한다.<sup>(7)</sup>

Fig. 4에서는 단인 공구(single-point tool)를 이용한 선반 작업에서의 표면 가공 시스템을 나타낸다. 기본 좌표계 {S<sub>0</sub>}에서 절삭날 위의 표면 가공점 P<sub>k</sub>의 벡터 r<sub>0</sub>는 아래와 같이 나눌 수 있다.

$$r_0 = B_{0.5} r_5 = {}^N A^6(\theta) {}^N A^1(x) {}^N A^2(y) {}^N A^3(z) {}^E A^1(e_{th}) r_5 \quad (8)$$

여기서  ${}^N A^6(\theta)$ 는 Z축에 의한 {S<sub>1</sub>} 좌표계의 회전을 나타내는 변환행렬이고,  ${}^N A^1(x)$ ,  ${}^N A^2(y)$ ,  ${}^N A^3(z)$ 는 X, Y, Z 방향에서의 좌표변환을 나타낸다. 또한  ${}^E A^1(e_{th})$ 는 열변형을 나타내는 오차항이다. r<sub>5</sub>는 {S<sub>5</sub>}프레임에서 공구의 기하학적 벡터를 나타내는 것이며 식 (9)와 같다.

$$r_5 = {}^N A^5(\psi) {}^N A^1(\rho) {}^N A^2(-p_y) e^4 \quad (9)$$

여기서,  ${}^N A^5(\psi)$ 는 Y축을 중심으로 ψ만큼의 회전을 나타내며,  ${}^N A^1(\rho)$ 와  ${}^N A^2(p_y)$ 는 좌표계 {S<sub>5</sub>}에서 각각 X와 Y축 방향에서 r<sub>5</sub>의 ρ와 p<sub>y</sub> 만큼 이동을 나타낸다.

### 4. 시뮬레이션 및 검증

#### 4.1 시뮬레이션 결과

표면 가공법으로 3차원 표면 형상과 표면 거칠기를 구하는 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 표면형상을 얻을 수 있다.

시뮬레이션의 조건은 Table 1에 나타내었다. 시뮬레이션의 결과에 의하면 공구 열변형은 가공물의 표면 거칠기 프로파일에 영향을 준다. 열변형 오차를 고려한 경우와 이

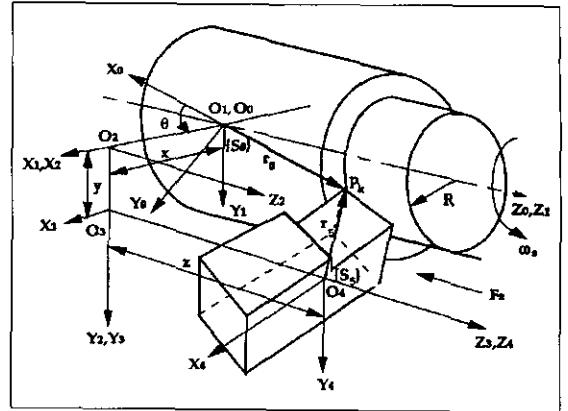


Fig. 4 Surface-shaping system of the turning process

Table 1 Simulation conditions

	Condition(1)	Condition(2)
Feed	0.2(mm/rev)	0.4(mm/rev)
Major cutting edge angle	75°	45°
Minor cutting edge angle	15°	45°
Cutting speed	250(m/min)	
Depth of cut	1.0(mm)	
Back rake angle	-5°	
Tool	Carbide insert	

상적인 경우의 차이를 시뮬레이션 조건(1)과 (2)에서 3차원과 2차원으로 각각 Fig. 5와 Fig 6에 나타내었다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에 3차원 형상을 이송(feed) 방향으로 잘라서 나타낸 것인데, 표면 형상이 이송 방향을 따라 변화함을 알 수 있다. 이것은 공구의 시간에 따른 열변형 오차에 기인한 것이다. 이로 인해 이상적인 경우와 오차항을 첨가한 경우 표면형상의 차이가 거의 일직선으로 증가해감을 보이고 있다. Fig. 6에 나타난 시뮬레이션(2)은 절삭날 각을 각각 45°도로 변화시켜보았다. 이것은 Green's Function의 사용에서 열원의 크기 변화를 가져오며, 변형량 증가의 방향도 바뀌게 됨으로써, 이상적인 경우와 오차항을 첨가한 경우 표면형상의 차이가 바뀌게 된다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 Fig. 5(b)와는 달리 팁을 중심으로 양쪽의 변화가 유사함을 알 수 있다. Green's Function과 표면가공법에 바탕을 둔 시뮬레이션에서 사용된 물성치들은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material properties of the simulation

Thermal diffusivity ( $\alpha$ )	0.05(m <sup>2</sup> /hr)
Coefficient of linear expansion ( $\eta$ )	6.0 × 10 <sup>-6</sup> (/°C)
Thermal conductivity ( $\lambda$ )	41.28 (Kcal/m · hr · °C)
Relative coefficient of heat transfer ( $H$ )	0.25 (1/m)

### 4.2 FEM 해석을 통한 검증

절삭 공구의 열 변형을 관찰하기 위해, 카바이드 인서트를 Pro/Engineer 2000i에서 모델링 하였고, ANSYS 5.6을 사용하여 열변형 해석하였다. 시뮬레이션에서 사용한 재료 물성치 (material properties)는 Table 2와 같다. Fig. 7은 공구 인서트의 FEM 모델을 보여주며, 공구 인서트의 열 변형을 Fig. 8에 나타내었다. 공구 팁(tool tip) 부분의 열 변형량은 41μm이다. Fig. 8에서 보면 -y 방향으로의 증가가 -x 방향의 증가보다 큼을 알 수 있는데, 이것은 사각형인 열원의 크기에 따라 다르며, 시뮬레이션에서도 이런 경향을 볼 수 있었다.

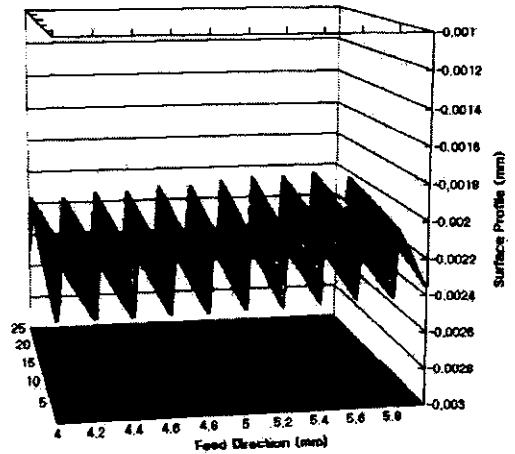
### 5. 실험결과 및 고찰

절삭실험은 시뮬레이션(1)과 (2)와 같은 조건으로 시행하였다. 열변형이 없는 이상적인 경우와 열변형이 있는 비교 실험 데이터를 얻기 위해 열 발생을 감소시키는 윤활 가공과 열 발생을 방지하는 건식 가공의 두 데이터를 비교하여 얻었다.

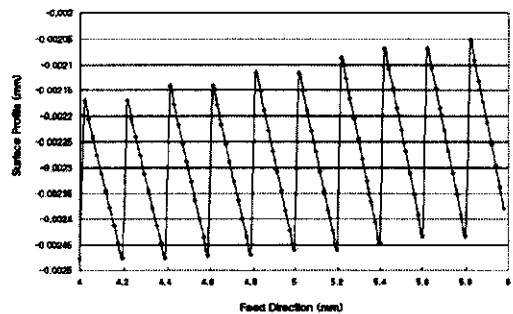
표면 거칠기 측정은 Mitutoyo의 SURFTEST SV-600을 사용하였다. 시뮬레이션(1)의 조건으로 윤활과 건식으로 가공하고 표면 거칠기를 측정하여, 이 차이를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 5(b)에 나타난 톱니모양의 경향을 Fig. 9에서도 볼 수 있다.

윤활과 건식 가공에서 얻은 데이터는 열변형과는 별도의 진동 오차에 의해서 위아래의 떨림이 있으며, 피드가 0.2 (mm/rev)이므로 피드방향으로 0.2mm간격마다 공구의 주(nominal)기하학적 특성이 나타나 있다.

Fig. 10은 시뮬레이션(2)의 조건으로 가공하고 표면 거칠기를 측정하였다. 이상적인 경우와 열 변형을 고려하였을 때의 표면형상 차이를 확대하여 Fig. 10 (b)에 나타내었으며, 이를 통해 Fig. 6과 같이 공구 팁 부분을 중심으로



(a) 3-D profile difference



(b) 2-D profile difference

Fig. 5 The difference of surface profiles between ideal and thermal deformation under the simulation conditions (1)

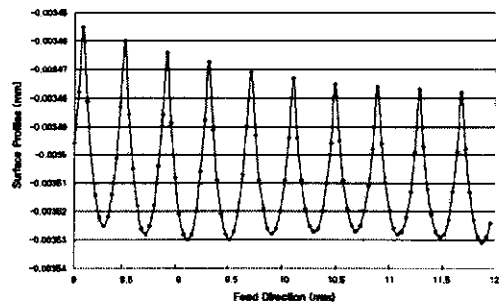


Fig. 6 The difference of surface profiles between ideal and thermal deformation under the simulation conditions (2)

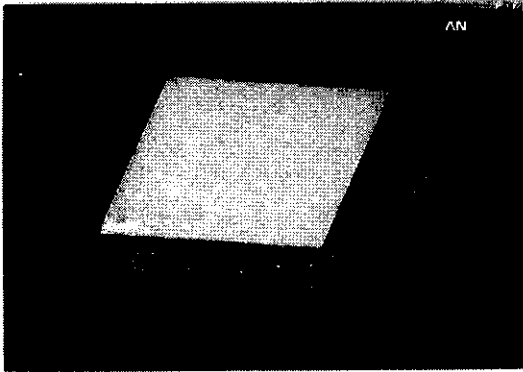


Fig. 7 The FEM model of tool insert

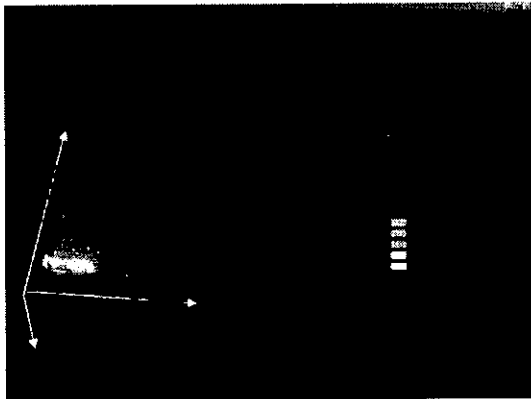


Fig. 8 The thermal deformation of the tool insert

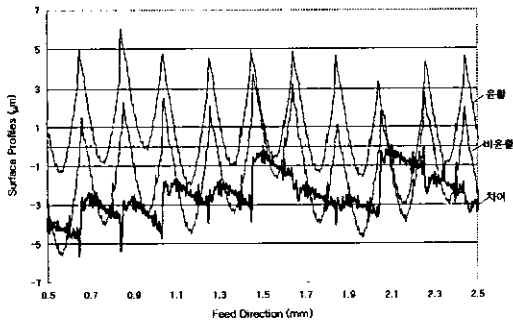
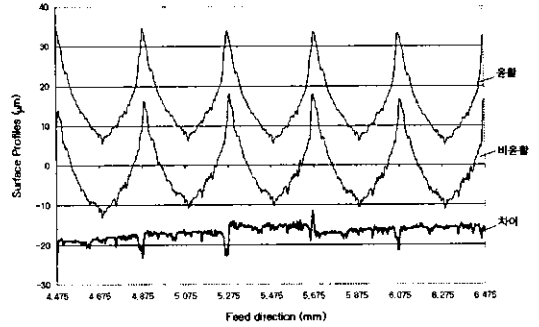
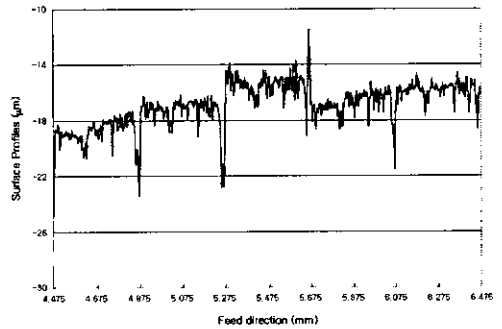


Fig. 9 The profiles of the experiment condition (1)

양쪽으로 대칭된 열변형의 결과를 볼 수 있다.



(a) Profiles of the experiment condition (2)



(b) Magnification of the profiles difference

Fig. 10 The profiles of the experiment condition (2)

FEM 해석과 시뮬레이션결과를 통하여 열변형량은 -y 방향과 -x 방향의 증가량에 차이가 있다는 것이 검증되었다. 이것을 실험하여 Fig. 9, 10에 나타내었다. 실험조건(1)에서는 이송(feed)방향으로 갈수록 더 큰 변형량을 알 수 있고, 실험조건(2)에서는 이송을 0.4 (mm/rev)로 증가시킴으로써 열원에서  $a$ 의 크기가 증가되어 팁을 중심으로 대칭하여 변형됨을 알 수 있다. 절삭깊이와 이송을 변화시킴으로써 열원의 크기가 변하고, 이로 인한 공구 팁 부분의 변형 유형을 알 수 있으며, 표면 형태의 변화를 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 선삭작업시 발생하는 공구의 마찰열과 이로 인한 열변형을 Green's Function을 사용하여 모델링하고, 이를 표면가공법에 공구 열변형 오차항을 첨가하여

표면형상을 얻어낸 후, 공구 열변형량이 표면 거칠기에 미치는 영향에 대해 예측하였다.

본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Green's Function을 사용하여 공구의 열변형을 예측할 수 있었다.
- (2) FEM 해석과 시뮬레이션을 통하여 공구 경사 면 (rake face)의 열변형량을 분석하였고, 공구의 열변형이 표면 형상에 영향을 주는 것을 확인하였다.
- (3) 실험을 통하여 열변형에 의한 표면형상의 변화 경향 및 표면거칠기에 미치는 영향에 대해서 관찰하였다.
- (4) 표면가공법의 일반적 모델에 열변형 오차 항을 첨가함으로써, 선삭에서의 표면거칠기를 예측할 수 있었다.

- (10) Ozisik, M. N., Boundary Value Problems of Heat Conduction, DOVER PUBLICATIONS, New York, 1968.

### 참 고 문 헌

- (1) David, A. S., and John, S. A., Metal Cutting Theory and Practice, MARCEL DEKKER, 1997.
- (2) 서남섭, 신판 정밀공작법, 대광서림, 1996.
- (3) Tay, A. O., Stevenson, M. G., and de Vahl Davis, G., "Using the Finite Element Method to Determine Temperature Distributions in Orthogonal Machine", Proc. Inst. of Mech. Engrs., Vol. 188, pp. 627~638, 1974.
- (4) Stephenson, D. A., and Ali, A., "Tool Temperatures in Interrupted Metal Cutting", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 127~136, 1992.
- (5) Stephenson, D. A., and Barone, M. R., "Thermal Expansion of The Workpiece in Turning", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, pp. 542~550, 1995.
- (6) 홍민성, "엔드밀 작업에서 공구의 열변형에 관한 연구", 한국공작기계학회지 제8권 제5호, pp. 25~29, 1999.
- (7) Hong, M. S., "Generation, Characterization and Synthesis of Engineering Surfaces", Ph.D Thesis, Northwestern University, 1993.
- (8) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, Oxford, 1959.
- (9) Beck, J. V., Cole, K. D., Haji-Sheikh, A., and Litkouhi, B., Heat Conduction Using Green's Functions, HEMISPHERE, 1992.