

# 연삭가공시 온도해석을 통한 열변형 예측

## A Study on the Prediction of Thermal Deformation Using Temperature Analysis in Surface Grinding Process

김강석\*, 광재섭(부산대 대학원), 김남경(진주산업대), 송지복(부산대)

### ABSTRACT

The thermal deformation of a workpiece during grinding is one of the most important factors that affect a flatness of a grinding surface. The heat generated in one-pass surface grinding causes the convex deformation of a workpiece. Therefore, the ground surface represents a concave profile. In the analysis a simple model of the temperature distribution, based on the results of a finite element method, is applied. The analyzed results are compared with experimental results in surface grinding. The main results obtained are as follows: (1) The temperature distribution of a workpiece by FEM has a good agreement with the experimental results. (2) The bending moment by generated heat causes a convex deformation of the workpiece and it leads to a concave profile of the grinding surface.

Key Words : surface grinding(평면연삭), thermal deformation(열변형), finite element method(유한요소법), concave profile(오목한 표면형상)

### 1. 서론

연삭가공은 기계가공의 마지막 단계에 속하는 가공으로서, 연삭가공면의 거칠기 및 형상정도가 제품의 품질에 직접 영향을 주게 된다. 최근 연삭에서 고능률·고정밀을 지향함으로써 표면거칠기를 저하시키지 않으면서도 고능률 가공이 가능하며, 형상가공과 마무리 가공이 동시에 이루어 질 수 있는 크리프 피드연삭에 대한 관심이 점차 높아지고 있다.

크리프 피드 연삭은 일반 연삭에 비해 절입깊이가 증가하여 슷들 입자와 공작물 사이의 간섭길이가 길어지므로 높은 열이 발생하는 특성이 있다. 그리고 일반적인 연삭에 비해 이송속도가 낮기 때문에 상대적으로 많은 양의 발생열이 연삭영역에 흡수된다.

고능률 연삭에서는 일반연삭에서 보다 더 많은 열이 발생하기 때문에 이러한 열적인 문제를 해결하기 위해 여러 가지 기법들이 사용되었으며, 연구되고 있다. 이러한 기법이나 연구중에 연삭유체를 이용하여 온도를 저하하는 방법이 최근까지는 가장 좋은 결과를 보여준다. 그러나 이러한 유체를 이용한 방법은 여러 가지 문제점을 안고 있다. 즉 막비등현상

등에 의해 유체를 연삭가공면에 직접적으로 투입하는 것이 어려워 실질적인 효과를 거두지 못하고 있다는 것이다.

연삭시 발생하는 열은 공작물의 형상정도를 저하시키는 주 요인으로 알려져 있다. 본 연구에서는 형상정도를 개선하기 위해 형상정도를 저하하는 주 요인인 연삭시 발생하는 열을 측정하여 관련된 문제점을 해결하고자 한다. 열전대를 이용하여 연삭시 발생하는 열을 측정하고, 측정된 열을 이용하여 FEM으로 해석한다. 해석된 결과는 시간에 따른 열원의 이동을 고려한 공작물 전체의 온도를 보여준다. 측정된 온도와 해석된 온도를 같은 조건에서의 공작물의 표면형상과 비교하면 공작물의 온도와 형상과의 관계를 예측할 수 있으며, 이 결과를 바탕으로 공작물의 형상을 시뮬레이션으로 예측할 수 있을 것이다. 이러한 시스템은 인공지능 기법등을 추가로 적용하여 연삭가공시 연삭휠의 적절할 궤적을 구하면 연삭휠의 궤적을 제어하여 형상정도를 향상시킬 수 있을 것이다.

## 2. 형상오차

평면 연삭시 공작물의 가공 형상에 영향을 미치는 요소로는 연삭점 근방에서 발생하는 높은 열에 의한 피삭재의 국부적인 열팽창, 공작물 상하면의 온도차에 의한 피삭재의 굽힘변형, 잔류응력에 의한 변형, 연삭력에 의한 슛들의 탄성변형, 자력(Magnetic Force)에 의한 변형, 공작기계 자체의 강성 등을 생각할 수 있다.

이상과 같은 열변형에 대해 연삭 슛들은 선정되어진 절입깊이로 고정되어 있고 공작물이 고정된 테이블은 직선운동을 하게 된다. 따라서 공작물의 어떤 부분에서는 열변형으로 인해 처음의 절입깊이보다 더 많은 양을 가공하게 된다. 연삭 종료후 공작물의 온도가 실온으로 떨어지면 공작물은 원래의 형태로 복귀하게 되며 이러한 과정에 의해 공작물이 과다가공이 되어 오목한 모양의 형상오차가 발생하게 되는 것이다.

일반적으로 연삭의 경우에는 가공 시작점으로부터 2/3지점에서 최대 형상오차가 발생한다고 알려져 있으며, 형상오차는 공작물 내부의 온도차에 선형적으로 비례한다고 한다.

## 3. FEM 해석

### 3.1 온도 해석

정지하고 있는 연속체에 대한 2차원 비정상열전도 문제의 지배방정식은 일반적으로 아래식과 같이 표현된다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q$$

여기서  $T(x,y,t)$ 는 온도이며 공간과 시간의 함수이다.  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $\lambda$ 는 열전도율,  $Q$ 는 단위 시간 · 단위면적당 공급되는 열량과 열 발열률이다.

경계조건은 다음과 같다.

- (1)  $T = \bar{T}$  (경계 S1에서 온도가 지정된 조건)
- (2)  $q = q_0$  (경계 S2에서 열유속  $q_0$ 가 있는 조건)
- (3)  $q = h(T - T_\infty)$  (경계 S3에서 열전달 있는 조건)

전체 유한요소식에서 시간적분을 하기 위해서 크랭크-니콜슨(Crank-Nikolson)의 차분식을 도입하면 최종적으로 다음의 식이 완성된다.

$$\left( \frac{1}{2} [K] + \frac{1}{4t} [C] \right) \{ \phi(t + \Delta t) \} \\ = \left( -\frac{1}{2} [K] + \frac{1}{4t} [C] \right) \{ \phi(t) \} + \{ F \}$$

### 3.2 유한요소 모델링

Fig.1은 연삭중 공작물의 온도분포를 계산하기 위한 유한요소 계산모델이다. 여기서 시편의 크기는 길이가 100mm이고 높이가 25mm이다. 연삭스튌이 공작물의 좌측끝에서 우측끝까지 이동하는 순간의 공작물의 온도분포를 구하기 위하여 열유속(연삭스튌)경계를 연삭속도로 이동하게 하였다. 피삭재를 588개의 요소와 650개의 절점으로 분할하여 연삭스튌이 공작물 표면을 이동할 때 시간에 따른 공작물 전체의 온도분포를 구하도록 하였다.

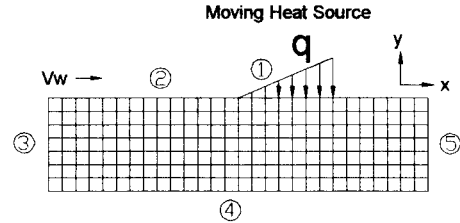


Fig.1 A Model of Finite Element Calculation  
(Number of Nodes : 650  
Number of Elements : 588)

- ① : Constant heat flux boundary condition,  
② ③ ④ ⑤ : Convection boundary condition

### 3.3 열원 모델링

기존의 연삭가공시 공작물의 온도해석에는 삼각형, 사각형, 사다리꼴 모양의 열원으로 모델링하여 해석하였다. 이러한 기존의 해석모델에 대하여 분석하고, 또한 실제 가공 조건과 비교하기 위한 다양한 모델을 적용하였다. 적용한 열원의 형태는 모두 7가지이며 각각 삼각형, 사각형, 반원형, 가우스 분포형, Log Normal 형태의 열원을 이용하여 온도를 해석하였다. 열원은 CASE 1~7로 분류하였으며, Fig.2에서 각각의 경우에 해당하는 모델과 그림을 보여준다. 이중 CASE 1은 사각형, CASE 2는 삼각형, CASE 3는 반원형 분포이다.

CASE 4는 Gaussian 분포형태이며 다음의 식으로 나타나는 곡선이다.

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]$$

CASE 5~7은 Log Normal 분포형태이며 다음 식으로 나타나며,  $\mu = 2$ 일 때

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma y}} \exp \left[ -\frac{(\ln y - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$$

$\sigma = 1.0$  (CASE 5),  $\sigma = 0.75$  (CASE 6)

$\sigma = 0.5$  (CASE 7) 이다.

Fig.3은 FEM 해석 프로그램의 순서도를 보여준다. Table 1은 FEM Modeling에 사용된 여러 가지 조건들을 보여준다.

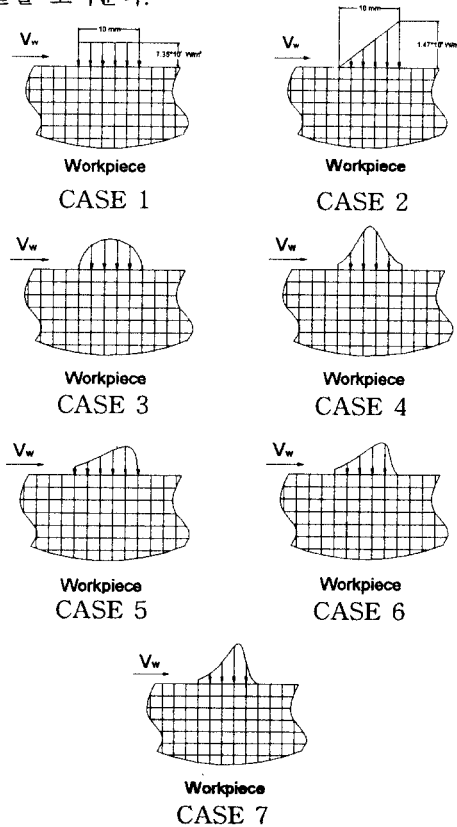


Fig.2 Heat Source Modelling

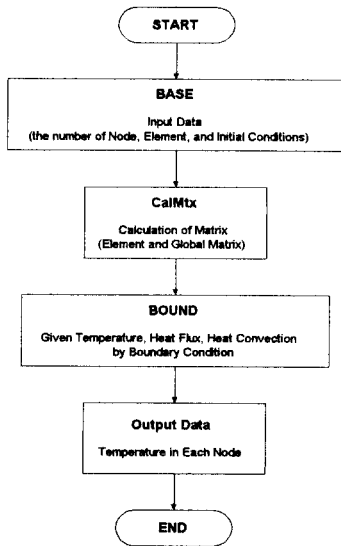


Fig.3 Flow Chart

Table 1 Constant values of a workpiece for a finite element calculation

Density	$\rho$	$7.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Specific heat	$c$	$485 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
Thermal conductivity	$\lambda$	$51.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
Convection heat transfer coefficient	$h$	$0.0263 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

#### 4. 실험장치 및 실험방법

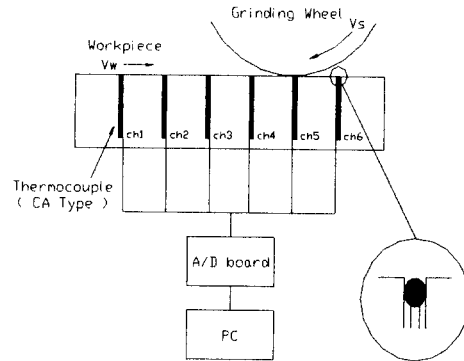


Fig.4 Experimental Setup

FEM 해석을 실제와 비교하기 위해서 온도를 측정할 필요가 있다. 측정된 온도는 공작물 상면에 작용하는 이동 열원의 크기와 공작물 내부의 온도구배를 예측하기 위해 사용된다. 본 논문에서는 연삭시 온도측정에 일반적으로 사용되는 열전대 삽입법을 이용했다. 열전대 삽입법은 공작물에 구멍을 뚫어서 열전대를 삽입하고 열전대와 공작물과의 접촉점을 제외하고는 단열시켜서 온도를 측정하는 기법이다. 실험에서는 공작물에 6지점에 각각 1개씩 열전대를

Table 2 Experimental conditions

Grinding Method	Dry One-pass Up cut
Wheel	WA80K7V
Workpiece material	S45C
Workpiece dimensions	$100 \times 25 \times 25$
Wheel speed $V$	2724 rpm
Table speed $v$	6 m/min
Depth of cut $t$	$10 \mu\text{m}$ , $15 \mu\text{m}$ $20 \mu\text{m}$ , $30 \mu\text{m}$

삽입하여 온도를 측정하였다. 열전대를 통해 획득한 신호는 A/D 기판을 통해 PC에 저장된다.

Fig.4는 실험장치의 개략도를 보여주며, Table 2는 실험조건을 보여준다.

## 5. 실험 결과 및 고찰

### 5.1 시간에 따른 공작물 상면의 온도분포

공작물 상면의 온도는 공작물이 마그네틱 척에 물려져 있는 공작물 바닥에서의 온도변화가 미미하다는 가정하에 공작물의 온도구배와 동일한 개념으로 볼 수 있다. 그러므로 공작물 상면온도는 결국 온도구배에 의해 발생하는 열변형과 이로 인한 형상정도 문제에 직접적인 관계가 있다.

공작물에 삽입한 6개의 열전대에 연삭가공이 진행됨에 따라 측정된 온도는 열원, 즉 연삭휠의 위치가 열전대가 삽입된 위치에 가까워지면 온도가 상승하고, 열원이 멀어지면 온도가 하강한다.

Fig.5는 6개의 열전대에서 얻은 신호를 합성한 것으로 중첩한 결과를 보여준다.

Fig.6은 FEM 해석에 의한 결과를 보여준다. 실험결과와 비교하면 유사한 경향을 보여주고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 측정된 온도와 해석된 온도를 동시에 비교한 것이다. 측정된 데이터와 해석된 데이터를 비교해 보면 유사한 형태를 하고 있다는 것을 알 수 있다. 해석된 결과는 열원이 공작물에 접촉하는 순간부터 이탈하는 순간까지의 온도를 보여주며, 측정된 결과는 가공이 시작되기 전부터 끝날 때까지의 온도를 보여준다.

### 5.2 실험결과 및 모델링 결과에 대한 해석

Fig.5에서 보면 측정된 온도는 절입깊이의 변화에 의해서 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 이것은 가공조건 중에서 절입깊이가 가공시 발생하는 열량에 크게 영향을 미친다는 것을 보여준다. 그리고 Fig.6은 7가지 모델링에 의한 결과를 보여주며 (a)는 CASE 1~4까지의 결과와 (b)는 CASE 5~7까지의 결과를 보여준다. 결과값을 보면 CASE 4와 CASE 7의 경우에 다른 모델에 비해 상대적으로 온도상승 속도가 빠르고 온도가 높다는 것을 알 수 있으며, 실제 표면온도는 열원이 있는 부위에서는 매우 빠른 속도로 열이 퍼져나간다고 볼 때 실제의 경우와 가깝다고 볼 수 있다. CASE 2와 CASE 5의 경우에는 피크값에 해당하는 부분이 실험결과처럼 둥그스름하게 나타난다는 사실을 알 수 있으며 이는 실험조건에서 나타나는 열전대의 지연현상에 대한 정보를 제

공한다고 볼 수 있다.

### 5.3 온도구배와 형상오차

형상오차는 온도구배로 인한 열변형이 가장 큰 요인으로 알려져 있다. 여기서는 실험결과와 해석결과에 의해서 형상오차의 형태는 공작물 표면온도분포와 거의 유사한 형태를 나타내고 있다는 것을 보여준다. 그러나 실험과 해석결과에서 형상오차와 공작물 온도구배의 관계가 선형적으로 나타나지는 않았다. 이것은 공작물이 열팽창을 일으키게 되어 불룩해진 상태에서 가공이 진행되어 발생된다는 형상오차가 실제 가공시에 다른 요인에 의해서 영향을 받기 때문이라고 볼 수 있다. 최대 온도구배에 의한 최대 열변형이 발생하기까지의 시간지연에 의해 공작물 표면온도의 최대점과 형상오차의 최대점이 일치하지 않기 때문에 선형적인 관계가 될 수 없다는 것이 이에 대한 고찰이며, 그외에도 형상오차는 온도와 관련이 깊지만 잔류응력이라든지 자력에 의한 변형, 공작기계 자체의 강성 등의 요인이 더 존재하므로 이러한 요소들을 고려해 분석을 하면 더 정확한 해석이 가능하다고 본다. Fig.7과 Fig.8을 비교해 보면 형상오차와 온도구배의 관계는 특정한 구간에서 부분적으로 선형적인 관계가 있다고 보여진다.

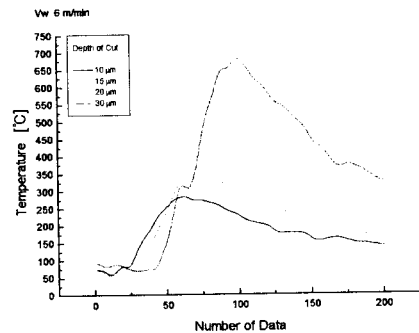
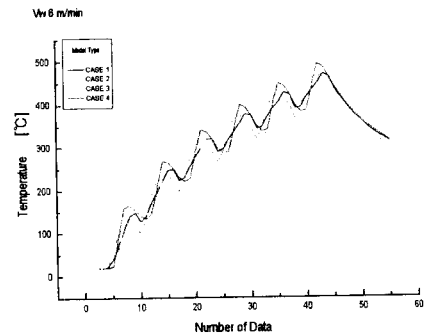
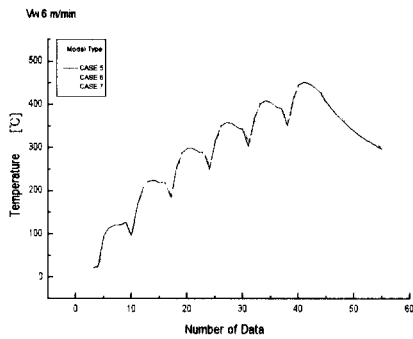


Fig.5 Experimental Result of Temperature

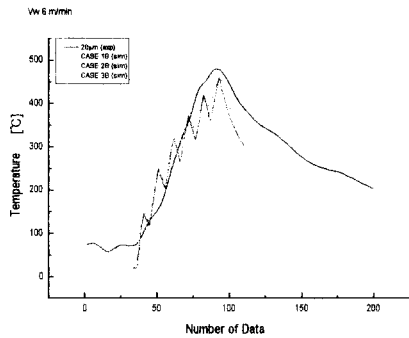


(a) CASE 1 ~ CASE 4

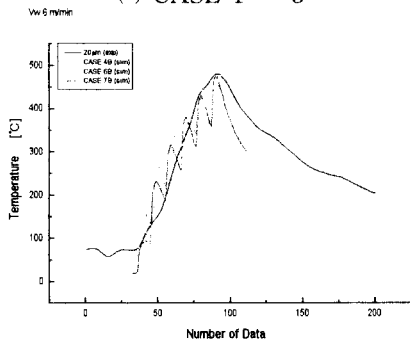


(b) CASE 5 ~ CASE 7

Fig.6 Simulation Results of Temperature



(a) CASE 1 ~ 3



(b) CASE 4, 6, 7

Fig.7 Experimental & Simulation Results of Temperature

## 6. 결론

본 논문에서는 연삭가공시 발생하는 열을 열전대를 통한 실험적인 방법과 FEM을 이용한 해석적인 방법으로 구하여 형상오차와 공작물 표면온도와의 관계를 보였으며, 열원의 다중 모델링을 통해 실제

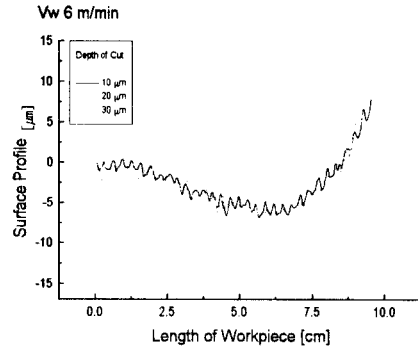


Fig.8 Surface Profile

가공조건에 가까운 모델을 찾으려는 시도를 했다. FEM 해석결과와 실험결과는 비슷한 경향을 나타내었으므로 가공시 공작물 표면온도에 대한 근사해석이 가능하게 되었다. 형상정도와 관계 있는 열변형은 온도구배에 의해 유발되며 이것은 공작물 표면온도와 동일한 개념이므로 가공조건만 주어지면 공작물 표면온도를 시뮬레이션할 수 있다. 또 그에 의해 열변형에 대한 경향을 파악할 수 있으므로 이를 이용하여 실제 연삭공정에 적용하는 연구가 계속된다면 목적한 바인 형상정도의 향상을 꾀할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 矢川元基, 宮崎則幸, “有限要素法による 熱應力・クリープ・熱傳導解析”, 사이엔스社
2. Rowe W.B., Black S.C.E., Mills B., “Experimental Investigation of Heat Transfer in Grinding”, CIRP, 1995
3. 西原徳彦, 河村末久, “平面研削における形状精度に関する研究”, JSPE, 54, pp2283-2288, 1988
4. 西原徳彦, 河村末久, “平面研削における形状精度に関する研究”, JSPE, 54, pp1496-1501, 1988
5. 西原徳彦, 河村末久, “平面研削における形状精度に関する研究”, JSPE, 57, pp1597-1602, 1991
6. Shigeki Okuyama, Tokuhiko Nishihara, “Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding”, JSPE, 54, pp1496-1501, 1988
7. 河村末久, 山川純次, “研削面端末部の形状變化に関する研究”, JSPE, 54, pp1987-1992, 1988
8. R.V. Hogg, J. Ledolter, “Applied Statistics for Engineers and Physical Scientist”
9. E. Kreyszig, “Advanced Engineering Mathematics”