

## 평면연삭에서 다변수 입력에 의한 형상오차 해석 The Geometric Error Analysis by Various Variable Inputs In Surface Grinding

김 강 석\*(부산대 대학원), 홍 순 익(부산대 대학원), 락재섭(부산대 대학원), 송지복(부산대 공대)

### 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 is comparatively in good agreement with the experimental results. (2) The bending moment by generated heat causes a convex deformation of the workpiece and it reads to a concave profile of the grinding surface.

Key Words : surface grinding, thermal deformation, temperature distribution, finite element method, concave profile

### 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 스톱 입자와 공작물 사이의 간섭길이 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 열

이 발생하기 때문에 이러한 열적인 문제를 해결하기 위해 여러 가지 기법들이 사용되었으며, 연구되고 있다. 이러한 기법이나 연구중에 연삭유제를 이용하여 온도를 저하하는 방법이 최근까지는 가장 좋은 결과를 보여준다. 그러나 이러한 유제를 이용한 방법은 여러 가지 문제점을 안고 있다. 즉 막비등현상 등에 의해 유제를 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 주요인인 연삭시 발생하는 열을 측정하여 관련된 문제점을 해결하고자 한다. 열전대를 이용하여 연삭시 발생하는 열을 측정하고, 측정된 열을 이용하여 FEM

으로 해석한다. 해석된 결과는 시간에 따른 열원의 이동을 고려한 공작물 전체의 온도를 보여 줄 것이며, 이 결과들을 이용하여 앞으로 추가의 연구가 수행될 것이다. 공작물의 온도를 알게되면 공작물의 변형량을 계산하여 형상을 예측할 수 있다. 공작물 변형에 대한 실험데이터와 해석결과를 신경회로망 기법을 이용해 연삭휠의 적절할 궤적을 구하면, 연삭가공시 휠의 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 상하면에 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 과다 가공이 되어 오목한 모양의 형상오차가 발생하게 되

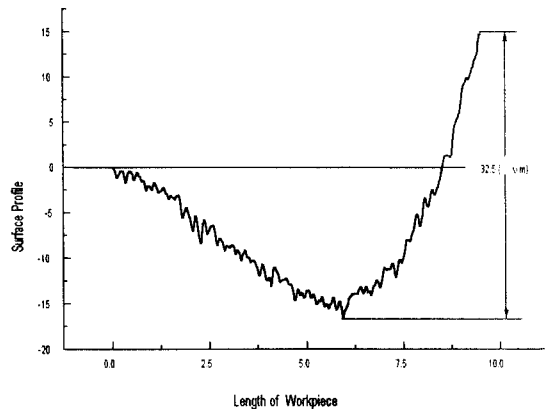


Fig.1 Geometrical Error (Wheel speed : 2724 rpm, Table speed : 4.5 m/min, Depth of cut : 20 μm)

는 것이다. 일반적으로 연삭의 경우에는 가공 시작점으로부터 2/3지점에서 최대 형상오차가 발생한다고 알려져 있으며, 형상오차는 공작물 내부의 온도차에 선형적으로 비례한다고 한다. Fig.1은 실제 가공을 통해 얻은 공작물의 표면형상을 보여준다. 여기서 공작물의 2/3지점에서 최대 형상오차가 발생했다는 것을 알 수 있다.

## 3. FEM 해석

### 3.1 온도 해석

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

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

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

경계조건은 다음의 3가지로 구분할 수 있다.

- (1)  $T = \bar{T}$  (경계  $S_1$ 에서 온도가 지정된 조건)
- (2)  $q = q_0$  (경계  $S_2$ 에서 열유속  $q_0$ 가 있는 조건)
- (3)  $q = h(T - T_\infty)$  (경계  $S_3$ 에서 열전달이 있는 조건)

여기서, 요소내의 온도분포

$T(x, y, t) = [N(x, y)] \{ \phi(t) \}$ 를 가지는 형상함수(보간함수)를 도입하여 정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$[k] \{ \phi \} + [C] \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right] = \{ f \}$$

여기서,

$$[k] = \int_{V^e} \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV$$

$$[C] = \int_{V^e} \rho c [N]^T [N] dV$$

$$\{ f \} = \int_{V^e} \dot{Q} [N]^T dV - \int_{S^e} q [N]^T dS$$

이다. 그리고 앞의 경계조건을 고려하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[k] = \int_{V'} \lambda \left( \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} \right) dV$$

$$+ \int_{S_2} h [M]^T [M] dS$$

$$\{f\} = \int_{V'} \dot{Q} [M]^T dV + \int_{S_2} h [M]^T dS$$

$$- \int_{S_3} h T_{\infty} [M]^T dS$$

그래서, 전체 유한요소식은 아래와 같이 표현된다.

$$[K] \{\phi\} + [C] \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right] = \{F\}$$

$\phi()$  : 전체 절점온도 벡터,  $[K]$  : 열전도 매트릭스

$[C]$  : 열용량 매트릭스,  $\{F\}$  : 열유속 벡터

전체 유한요소식에서 시간적분을 하기 위해서 크랭크-니콜슨(Crank-Nikolson)의 차분식을 도입하면 시간( $t + \Delta t/2$ )에 대한 절점온도 벡터는

$$\left\{ \phi \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} = \frac{1}{2} (\{ \phi(t + \Delta t) \} + \{ \phi(t) \})$$

와 같이 주어진다.

또한 시간( $t + \Delta t/2$ )에 대한 절점온도 벡터의 시간미분은 다음과 같이 표현되며

$$\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} = \frac{\{ \phi(t + \Delta t) \} - \{ \phi(t) \}}{\Delta t}$$

위 두식을 전체 유한요소식에 대입하여 정리하면 최종적으로 다음의 식이 완성된다.

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

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

### 3.2 FEM Modeling

Fig.2는 연삭중 공작물의 온도분포를 계산하기 위한 유한요소 계산모델이다. 여기서 시편의 크기는 길이가 100mm이고 높이가 25mm이다. 연삭숫돌이 공작물의 좌측끝에서 우측끝까지 이동하는 순간의 공작물의 온도분포를 구하기 위하여 열유속(연삭숫돌)경계를 연삭속도로 이동하게 하였다. 피삭재를 196개의 요소와 232개의 절점으로 분할하여 연삭숫돌이 공작물 표면을 이동할 때 시간에 따른 공작물 전체의 온도분포를 구하도록 하였다.

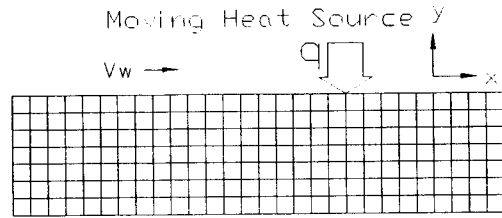


Fig.2 A Model of Finite Element Calculation  
(Number of Nodes : 232,  
Number of Elements : 196)

Table.1은 FEM Modeling에 사용된 여러 가지 조건들을 보여준다.

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

Density	$\rho$	$7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
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	$h$	$10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

### 4. 실험방법 및 장치

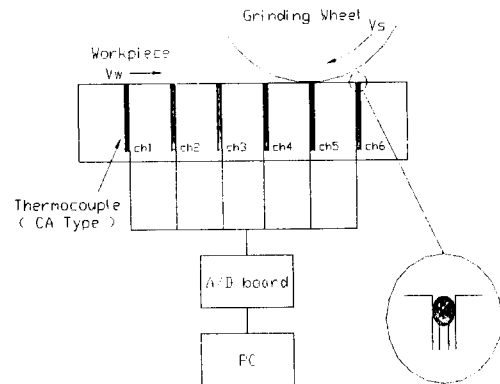


Fig.3 Experimental Setup

FEM 해석을 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 삽입하여 온도를 측정하였다. 열전대를 통해 획득한 신호는 A/D board를 통해 PC에 저장된다.

Fig.3은 실험장치의 개략도를 보여주며, Table.2는 실험조건을 보여준다.

Table.2 Experimental conditions

Grinding Method	Dry One-pass
Wheel	Up cut WA80K7V
Workpiece material	STD11
Workpiece dimensions	100×25×25
Wheel speed V	2724 rpm
Table speed v	4.5 m/min
Depth of cut t	20 μm

## 5. 실험 결과 및 고찰

### 5.1 시간에 따른 공작물 전체의 온도분포

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

Fig.4는 6개의 열전대에서 얻은 신호를 합성한 것으로 중첩한 결과를 보여준다. 6번의 위치에서 피크값이 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig.5는 FEM 해석에 의한 결과를 보여준다. 실험결과와 비교하면 유사한 경향을 보여주고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.6은 Fig.4의 결과를 분석하여 휠이 공작물에 접촉을 개시하는 순간부터 휠이 공작물의 가공을 완료하여 접촉이 종료되는 순간까지를 다시 계산하여 그려준 것이다.

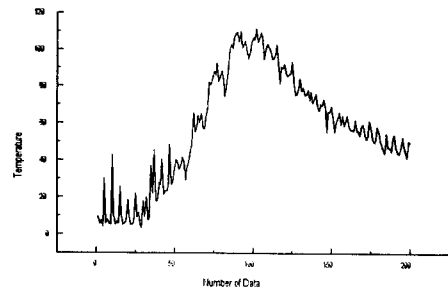


Fig.4 Experimental Result of Temperature (sum of six temperature data)

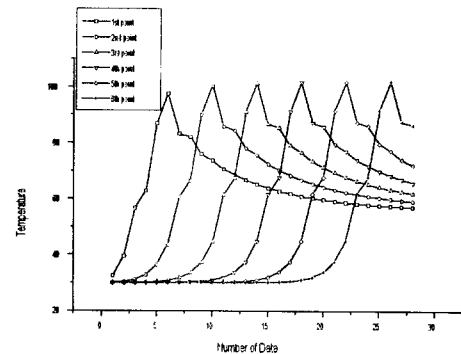


Fig.5 Simulation Result of Temperature by FEM

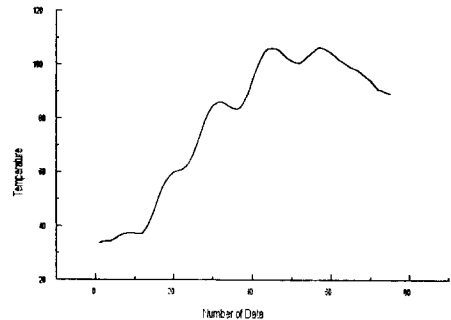


Fig.6 Temperature in the real contact zone of the wheel & workpiece (by Experiments)

즉 열원이 공작물에 열전달을 일으키는 순간에서부터 열원이 공작물에서 사라지는 순간까지를 계산한 결과를 보여주는 것이다. 이것은 Fig.7의 결과와 비

## 6. 결론

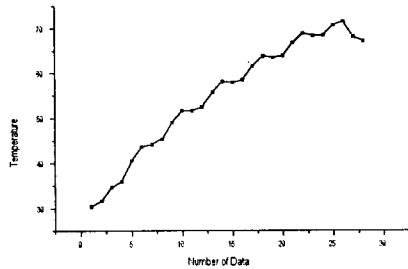


Fig.7 Temperature in the real contact zone of the wheel & workpiece (by Simulation)

교하기 위한 것으로 Fig.7의 결과는 FEM에서 해석한 결과므로 열원이 공작물의 표면을 따라 이동하는 순간의 절점의 온도이다. 따라서 이 해석결과를 실험결과와 동일한 조건에서 비교하는 것이 가능하며 두 그림을 비교해 보면 유사한 형태를 하고 있다는 것을 알 수 있다.

### 5.2 온도구배와 형상오차

Fig.1에서 실험에 의한 형상오차를 보였다. 실험에 의해 측정된 형상오차는 일반적으로 가공시작점에서부터 약 2/3지점에서 최대가 된다는 사실을 입증해 주고 있다.

형상오차는 온도구배로 인한 열변형이 가장 큰 요인으로 알려져 있다. 여기서는 실험결과와 해석결과에 의해서 형상오차가 최대가 되는 지점근처에서 온도구배가 최대가 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 실험과 해석결과에서 형상오차와 공작물 내부의 온도구배의 관계가 선형적으로 나타나지는 않았다. 이것은 형상오차를 유발하는 다른 여러 가지 요소들에 의한 영향때문이라 생각된다. 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.1과 Fig.6, Fig.7을 비교해보면 형상오차와 온도구배의 관계는 특정한 구간에서 부분적으로 선형적인 관계가 있다고 보여진다.

본 논문에서는 연삭가공시 발생하는 열을 열전대를 통한 실험적인 방법과 FEM을 이용한 해석적인 방법으로 구하여 형상오차와 공작물내부의 온도구배의 관계를 보였으며, 실험을 통해 일반적으로 형상오차는 가공개시점에서 2/3지점에서 최대가 된다는 것을 보였다.

FEM 해석 결과와 실험결과는 비슷한 경향을 나타내었으므로 공작물 전체에 대한 온도해석이 가능하였다. 따라서 앞으로의 추가 연구에 필요한 온도구배에 대한 데이터를 생성하는 것이 가능하게 되었다. 그리고 이 논문의 해석결과와 실험결과를 이용하여 연삭중 발생하는 실제 열변형의 정도를 예측할 수 있으므로, 인공지능 기법을 이용해 휠의 궤적을 정하여, 휠의 위치를 제어하면서 형상오차를 줄이는 것에 대한 연구가 진행중이다.

### 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
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, 57, pp1597-1602, 1991
5. Shigeki Okuyama, Tokuhiko Nishihara, “Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding”, JSPE, 54, pp1496-1501, 1988
6. 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