

## 연삭조건 변화에 따른 가공물의 온도 분포

하만경\*, 객재섭\*, 객태경\*\*

### Temperature Distribution of Workpiece Varying with Grinding Condition

Man-Kyung Ha\*, Jae-Seob Kwak\* and Tae-Kyung Kwak\*\*

#### ABSTRACT

Grinding temperature between a grinding wheel and a workpiece surface, rising rapidly during a machining operation, has bad effects on a surface integrity such as the burning, the residual stress and the crack. In this study, the temperature distribution was obtained briefly by the finite element method and the grinding temperature of a workpiece varying with the grinding condition was measured experimentally. For obtaining the grinding temperature, a thermocouple method was applied. Three thermocouples were inserted in a surface of each workpiece. Changed grinding conditions were the depth of cuts, the feedrate, the dry and wet grinding, the up and down grinding and the number of pieces.

**Key Words** : Grinding Temperature (연삭온도), Grinding Condition (연삭조건), Finite Element Method (유한요소법), Thermocouple Method (열전대법)

#### 1. 서론

연삭가공 동안 높은 온도는 표면과 휠 그리고 가공물 사이에서 발생되어지고 공작물의 표면성질에 좋지 않은 영향을 줄뿐만 아니라, 잔류응력을 유발하는 원인이 된다. 게다가, 공작물 내에서의 온도 구배로 인해 열팽창 및 수축이 달라지므로 뒤틀림이 일어난다. 발생열의 일부가 공작물로 전도되면 공작물은 팽창하여 치수정확도를 맞추기가 힘들어진다<sup>(1)(2)</sup>. 이러한 국부적인 열팽창은 연삭깊이를 증가시키는 효과를 가져오고, 결과적으로 가공 후에는 형상오차를 남기게 된다<sup>(3)</sup>. 따라서 연삭 발생열과 연삭온도가 문제가 되므로 열의 발생을 완전히 방지할 수는 없으나, 연삭열의 발생기구 및 그

것에 미치는 가공조건의 영향을 해명함으로써 실제의 연삭가공에서 연삭열 최소화 방법이 필요하다. 이를 위해 많은 이론적 및 실험적인 연구가 이루어지고 있다. 많은 연구자들이 이동열원에 대해 온도와 응력에 대한 해석적 모델을 제시하였다.

Nakano 등<sup>(4)</sup> 평면연삭에서 가공중에 일어나는 공작물의 열변형과 연삭후 공작물의 형상오차에 대해서 이론과 실험적인 연구를 하였다. 또 Okuyama 등<sup>(5)</sup> 단공정 연삭에서 열변형 거동을 유한요소법으로 밝히고, 실험을 통하여 공작물의 진직도를 측정함으로써 해석결과의 타당성을 확인하였다. 또 Yokoyama 등<sup>(6)</sup> 슷돌 축의 탄성변위와 피삭재의 열팽창량 등을 고려한 실험과 단순화된 3차원 모델을 이용한 해석결과와 비교하였다.

☞ 2001년 12월 6일 접수  
\* 부경대학교 기계공학부  
\*\* 부경대학교 대학원

Ebbrell 등<sup>(6)</sup>은 연삭공정에서 연삭유제 공급에 관한 연구를 통하여 연삭점에 공급되는 연삭유제량과 공작물의 표면품질이 상관관계가 있음을 제안하였다. 이 연구에서는 노즐의 위치, 노즐 홀의 크기, 압력 등의 영향을 실험적으로 검증하였다. 이들 연구들은 이론적 해석 및 실험적 측정을 일정한 조건에서만 실행하였다. 그러나 열발생은 연삭 가공변수와 공작물의 복잡한 상호관계 때문에 정확한 예측이 힘들고, 고속으로 회전하는 스톱들과 공작물의 접촉점의 연삭열 측정이 난해하기 때문에 정확한 해법이 될 수 없었다<sup>(7)(8)</sup>. 따라서 본 연구에서는 이동열원에 의한 온도 분포를 해석하기 위해 연삭가공시 발생하는 열을 다양한 실험조건으로 구하였고, 그 파라메타들을 비교·분석하였으며, 유한요소해석으로 정확한 해석결과를 제시하였다.

## 2. 유한요소해석적 온도

### 2.1 열전도 모델링

정지하고 있는 연속체에 대한 2차원 비정상 열전도 문제의 지배방정식은 일반적으로 아래의 식과 같이 표현가능하다<sup>(9)(10)(11)</sup>.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 온도이며, 공간과 시간의 함수이다.  $\rho$ 는 밀도,  $C$ 는 비열,  $\lambda$ 는 열전도율,  $Q$ 는 단위시간당 단위면적당에 공급되는 열량이다. 여기서 요소내의 온도분포를 가지는 형상 보간함수 ( $T(x, y, z) = [N(x, y)] \phi(x)$ )를 도입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다<sup>(12)</sup>.

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

유한요소해석법에 의한 온도분포는 테이블 이동, 스톱들의 회전수, 접선연삭 저항 등의 관계식으로부터 유도된 열유속에 의한 것이며, 길이방향( $X$ ),

깊이 방향( $Y$ )의 각 절점에 대하여 시간변화에 따르는 온도분포를 해석하였다.

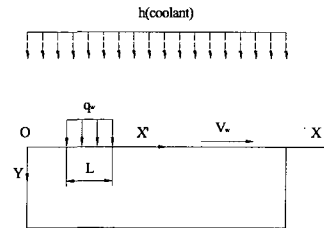


Fig. 1 Two dimensional thermal model of the surface grinding process

Fig. 1은 평면연삭에서 냉각제에 의한 습식 연삭가공을 해석적으로 모델링하기 위해 일정열원(uniform heat source)이 반무한 탄성체에서 이동하는 것으로 모델링하였다. 연삭스톱들과 공작물이 접촉하는 길이  $L$ 에 대하여 일정하고, 공작물의 이송속도  $V_w$ 로 이동한다고 가정하였다. 냉각제에 의한 대류 열전달계수  $h$ 는 공작물 표면에 대해서 일정하다고 가정하였고, 공작물은 완전탄성체로서  $X$ 방향으로는 길이가 무한하다고 가정하였다. 연삭과정중 발생하는 재료제거와 관련된 복합적인 현상은 무시하였다.

Fig. 2는 피삭재(180mm × 40mm)에 요소크기를 0.5mm × 0.5mm로 분할하여 연삭스톱들이 공작물 표면을 이동할 때 시간에 따른 공작물 전체의 온도분포를 구하도록 하였다.

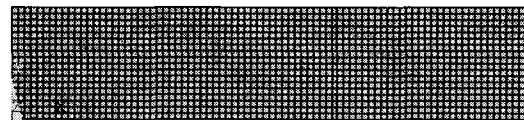


Fig. 2 Finite element model of the workpiece used in the simulation (element size : 0.5mm × 0.5mm)

### 2.2 유한요소해석 조건

Table 1은 유한요소해석에 사용된 여러 가지 조

건들을 보여준다. 열원의 이동속도가 0.2 m/s이고 요소의 길이가 0.5mm이므로 시간간격을 0.0005 / 0.2 = 0.0025(sec)로 하여 시간간격으로 해석을 반복하였다<sup>(12)</sup>.

Table 1 Simulation conditions

Item	Condition		
Workpiece velocity	Vm :	0.2	m/s
Contact length	L :	2.236	mm
Heat flux	q <sub>0</sub> :	54.78	MW/m <sup>2</sup>
Density	ρ :	7840	kg/m <sup>3</sup>
Conductivity	κ :	50	W/m℃
Specific heat	C <sub>p</sub> :	460	J/kg℃
Poisson's ratio	ν :	0.3	
Thermal expansion	α :	0.000015	m\m℃
Young's modulus	E :	220	Gpa

### 2.3 온도해석

일정열원일 때 유한요소해석법을 통한 이동열원의 중심에서 온도분포를 보면 Fig. 3과 같다. 연삭가공이 완료된 좌측부분에서는 등온선의 간격이 넓고, 가공해야할 부분에서는 비교적 좁은 현상을 나타내고 있다. 이것은 연삭숫돌의 이동 때문에 생기는 현상임을 알 수 있으며, 열원의 접촉부분 최고온도는 650℃정도이다. 또한 열원의 전방에서부터 열팽창하기 시작하여 열원의 후방 선단부분에서 최대의 열변형을 보이고 대류에 의한 냉각작용으로 열변형량이 감소한 것을 알 수 있다. 가공물의 내부로 갈수록 등온선의 간격이 넓어지는데 이는 가공물 내부로 갈수록 열의 전달 속도에 따른 온도의 감소 때문인 것으로 사료되어 진다. 또한 Fig. 3과 Fig. 4에서 공작물의 표면온도와 형상오차의 관계를 규명함으로써 공작물의 형상오차를 예측할 수 있다는 결론을 얻었다. 또한, Fig. 4는 열원이 공작물의 중간지점에 있을 때의 공작물의 변형과 Von Mises 응력을 나타낸 것이다. 수직방향응력은 이러한 상당응력 중에 외력이 작용하는 수직방향에 대한 응력으로 인장응력은 공작물의 열팽창에 의한

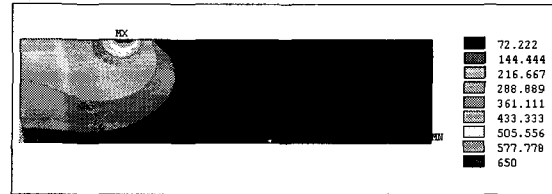


Fig. 3 Temperature distribution of workpiece

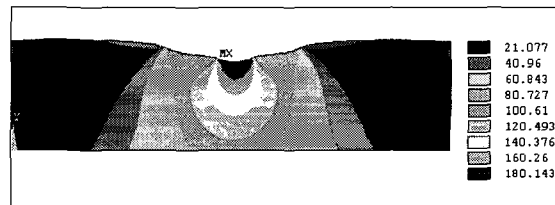


Fig. 4 Deformation and Von Mises stress of workpiece

것으로, 압축응력은 연삭력에 의한 것으로 볼 수가 있다. 따라서 연삭가공중 발생하는 열변형은 연삭숫돌의 실제 절입깊이와 차이를 나타낼 수 있으며, 공작물의 소성열변형을 인한 치수 변형과 공작물 내의 잔류응력이 존재하게 됨을 알 수 있다.

### 3. 실험적 온도

연삭가공 동안의 온도분포를 측정하기 위한 실험으로 다양한 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental specifications and conditions

Item	Specifications and conditions
Grinder	: Horizontal spindle type surface grinder
Wheel	: WA100LmV
Fluids	: Shell lubricant (Soluble type, 10:1)
Wheel speed	: 1,800rpm
Table speed	: 2, 5m/min
Depth of cut	: 10~40μm
Grinding method	: Up & down, Dry & wet
Thermocouple	: K-type (0.65mm)

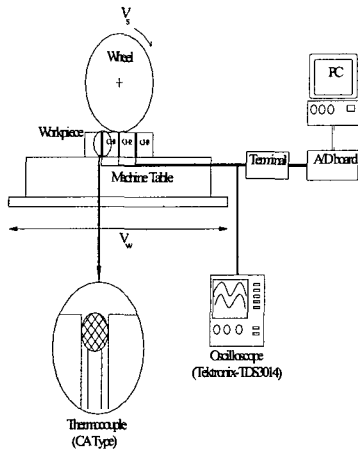


Fig. 5 Experimental set-up

공작물 표면에서 온도 측정은 일반적으로 사용되는 열전대 삽입법을 이용했다. 먼저 공작물에 3mm의 드릴구멍을 뚫어서 열전대를 삽입하고 열전대와 공작물과의 접촉점을 용접하였다.

### 3.1 연삭점에서의 온도

공작물에 삽입한 3개의 열전대에 연삭가공이 진행됨에 따라 측정된 온도는 열원, 즉 연삭숫돌의 위치가 열전대가 삽입된 위치에 가까워지면 온도가 상승하고, 열원이 멀어지면 온도가 하강한다. Fig. 6은 열전대에서 나온 데이터를 한 그래프에서 나타내었다. 가공이 시작됨에 따라 공작물표면의 온도

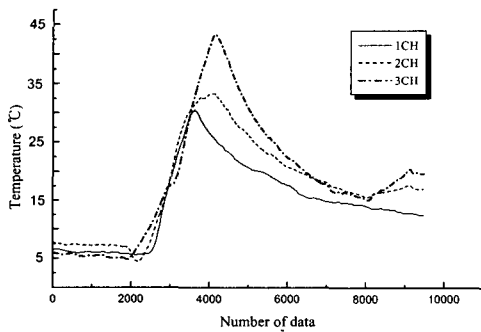


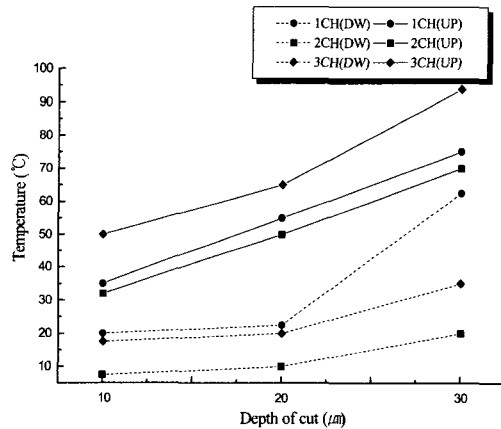
Fig. 6 Experimental results of temperature on the surface of workpiece

는 상승하기 시작해서 1CH를 통과하는 순간 측정치의 최고점에 올랐다가 2CH, 3CH일 때 가공물에서 최고 온도를 나타낸다. 각각의 열전대에서 가공이 시작되고 난 후 누적된 온도에 의해 1CH에서보다 3CH에서 더 높은 온도를 보인다. Fig. 6은 1CH에서 2CH로 진행하는 동안 누적된 온도는 3°C정도 누적되었고 2CH에서 3CH로 진행하는 동안 10°C정도의 누적이 되었다.

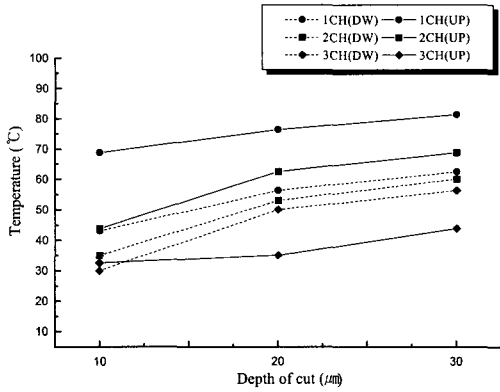
### 3.2 건식연삭에서의 온도

건식 연삭에서 이송량 변화에 따른 각 채널의 온도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 이송량이 2m/min일 때 상향 연삭이 하향 연삭보다 3배정도 높은 온도를 나타내었고, 5m/min일 때 또한 각각의 채널을 비교해볼 때 대체로 상향 연삭이 하향 연삭보다 높은 온도를 나타내었다. 이는 상향 연삭시 절삭력이 하향 연삭시 절삭력보다 높다는 것을 고려하여 볼 때 상향 연삭이 하향 연삭보다 높은 절삭율을 보이기 때문에 높은 온도가 발생하는 것으로 사료되어진다. 각 채널당 온도를 살펴보면 상향일 때는 3CH에서 가공이 진행되어 1CH에서 가공이 완료되었기 때문에 온도는 3CH, 1CH, 2CH의 순으로 온도 변화를 보이고 있는데, 이는 연삭 가공중 가공물의 휨 현상으로 연삭숫돌의 실제 절입깊이와 차이를 보이고 1CH과 3CH은 과도 절삭이 발생한다.

또한, 이송량을 증가 시켰을 때는 열원이 통과하는 속도가 증가해서 가공물 내부의 온도누적이



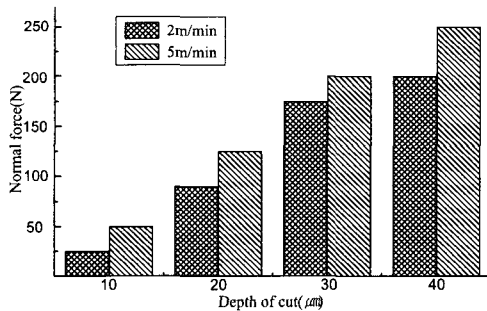
(a) Table speed 2(m/min)



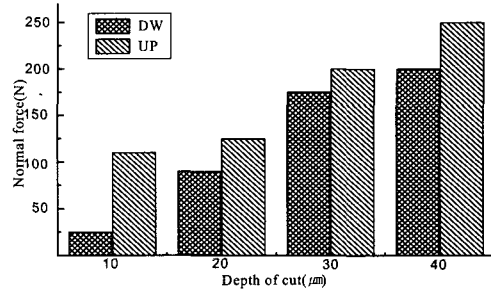
(b) Table speed 5(m/min)

Fig. 7 Variation of temperature in accordance with depth of cut (Dry grinding)

상대적으로 적어진 것으로 보이며 그로인해 가공물의 온도구배나 휨현상이 발생하지 않은 것으로 사료되어진다. Fig. 8에서 보인 것은 절입깊이와 연삭 형식에 따른 수직분력을 측정된 것이다. 절입깊이가 증가할수록 수직분력은 증가를 보이고 이송량이 변화함에 따라서도 증가함을 알 수 있었다. 또한 상향 연삭과 하향 연삭에서도 상향 연삭이 하향 연삭에 대해 약 20%정도 높은 연삭력을 나타내고 있다. 이상의 Fig. 7과 Fig. 8을 볼 때 연삭열은 연삭력과 상관 관계가 있음을 입증하였다. 결론적으로 연삭열은 이송속도에 반비례하고 절입깊이에 대해



(a) Table speed change



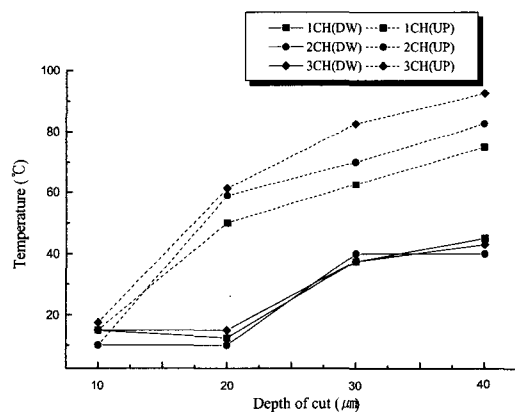
(b) Up and down grinding

Fig. 8 Normal force versus grinding conditions

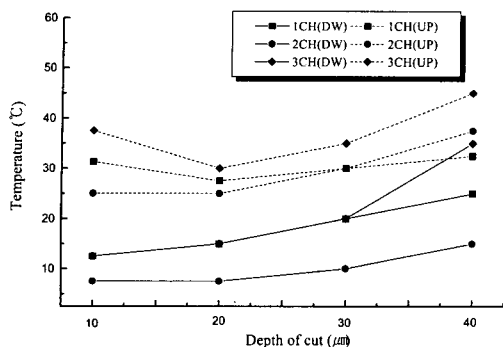
서는 비례함을 알 수 있고 연삭력과 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 이러한 연삭력과 연삭열과의 상관관계를 규명할 수 있다면 연삭열에 대한 과라 메타로서 앞으로 많은 활용이 가능할 것이라고 생각되어진다.

### 3.3 습식 연삭에서의 온도

Fig. 9(a), (b)는 습식 일 때 2m/min 과 5m/min의 연삭 온도 변화를 나타낸 것이다. 절입깊이가 20μm 이상일 때 상향 연삭은 하향 연삭에 비례해 3배정도의 높은 온도를 나타내고 있다. 이는 절입깊이가 증가할수록 슷돌과 가공물의 접촉면에 도달하는 냉각유제의 양이 적기 때문인 것으로 사료되어진다.



(a) Table speed 2(m/min)



(b) Table speed 5(m/min)

Fig. 9 Variation of temperature in accordance with depth of cut (Wet grinding)

또한, 이송량 변화에 대해서는 5m/min일 때가 2m/min일 때보다 더 낮은 온도를 나타내는데 이는 열원이 가공물을 통과하는 속도가 빨라서 가공물에 누적되는 온도가 상대적으로 적기 때문인 것으로 사료되어진다. 이상에서 연삭가공 동안 냉각유제의 공급이 슷돌 회전방향으로 공급되었다는 것을 고려해 볼 때 절삭유제의 사용 또한 연삭열에 큰 영향을 줄을 알 수 있었다.

### 3.4 연삭조건에 따른 온도

Fig. 10, 11은 가공횟수에 따른 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 가공횟수에 따른 온도 변화량에

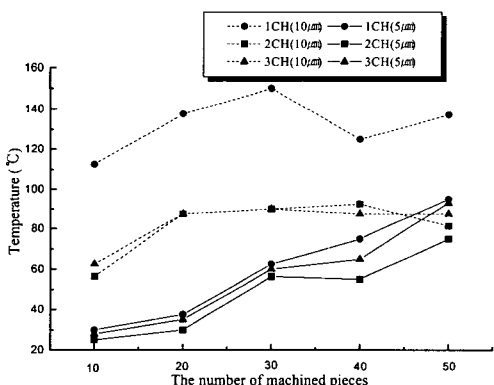


Fig. 10 Experimental results between number of piece and temperature

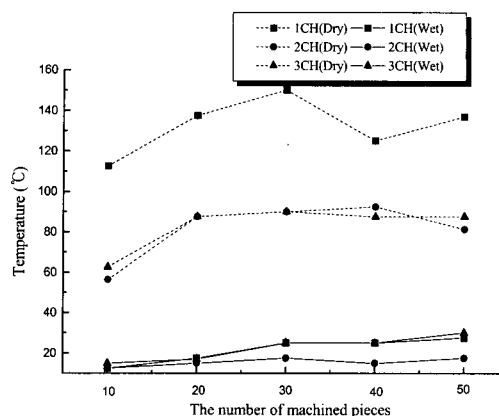


Fig. 11 Temperature difference between dry and wet grinding

서 절입깊이가 10μm일 때 5μm에 비해서 2배이상의 높은 온도가 발생했고, 가공횟수가 증가할수록 가공물의 2CH에서의 온도 증가율은 감소함을 알 수 있는데, 이는 가공물의 열변형에 의한 것으로 사료되어지고, 가공시작점 근처의 열전대에서 가장 높은 온도를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 11에서는 가공횟수 증가에 따른 건식 연삭과 습식 연삭의 온도차이는 6배 이상임을 알 수 있었고, 습식 연삭은 가공횟수의 증가에 따른 온도변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 냉각유제의 냉각작용에 의한 것으로 사료되어진다.

## 4. 결론

본 연구에서는 연삭가공시 발생하는 열을 실험적인 방법으로 구하였고, 그 파라메타들을 비교·분석하였다.

- (1) 연삭가공이 완료된 좌측부분에서는 등온선의 간격이 넓고, 가공해야할 부분에서는 비교적 좁은 현상을 나타내고 있고, 가공물의 내부로 갈수록 등온선의 간격이 넓어지는데 이는 가공물 내부로 갈수록 열의 전달 속도에 따른 온도의 감소 때문인 것으로 사료 되어진다.
- (2) 건식 연삭에서 연삭열은 이송속도에 반비례하고 절입깊이에 대해서는 비례함을 알 수 있고

연삭력과 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

- (3) 습식 연삭시 절입깊이가 20 $\mu$ m 이상일 때 상향 연삭 하향 연삭에 비례해 3배정도의 높은 온도를 나타내고 있고, 이송량 변화에 대해서는 5m/min일 때가 2m/min일 때보다 더 낮은 온도를 나타내었다.
- (4) 가공횟수에 따른 온도 변화량에서 절입 깊이가 10 $\mu$ m일 때 5 $\mu$ m에 비해서 2배이상의 높은 온도가 발생했고, 건식 연삭과 습식 연삭의 온도차이는 6배 이상임을 알 수 있었고, 습식 연삭은 가공 횟수의 증가에 따른 온도변화가 거의 없음을 알 수 있었다.

9. Kwak J.S., and Song J.B., "Fault detection of the cylindrical plunge grinding process by using the parameters of AE signals," KSME International Journal, Vol. 14, No. 7, pp. 773-781, 2000.
10. Jaeger J. C., "Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts," Proceedings of the Royal Society of New South Wales, 76, pp. 203-224, 1942.
11. 정종달, 정해도, 최현종, 김남경, "크리피드 연삭에서 열원 모델에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제2호, pp. 171-176, 2001.
12. 김동길, 남원우, 이상조, "평면 연삭 가공시 발생하는 연삭열에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제1호, pp. 187-194, 2001.

### 참고문헌

1. W. B. Rowe, "Thermal Analysis of High Efficiency Deep Grinding," Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, pp. 1-19, 2001.
2. C. Guo, S. Malkin, "Analysis of Transient Temperatures in Grinding," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, pp. 571-577, 1995.
3. Y. Kakano and K. Ota, "Analysis of Steady State Thermal Deformations of Workpiece During Surface Grinding Operation," JSPE, Vol. 61, pp. 364-368, 1996.
4. S. Okuyama, et al., "Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding," JSPE, Vol. 64, pp. 1496-1501, 1998.
5. K. Yokoyama, et al., "Thermal Deformation of Workpiece in Surface Grinding," JSPE, Vol. 62, pp. 967-971, 1996.
6. S. Ebbrell, et al., "The Effects of Cutting Fluid Application Methods on the Grinding Process," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, No. 2, pp. 209-223, 2000.
7. 孫明煥, "切削加工論," 文運堂, pp. 300-312, 1995.
8. Milton C Shaw, "Principles of Abrasive Processing," Clarendon Press-Oxford, pp. 55-58, 1996.