한국정밀공학회지 제18권 제2호 (2001년 2월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 2, February 2001.

크립피드 연삭에서 열원 모델에 관한 연구

정종달*, 정해도**, 최헌종***, 김남경****

A Study on Heat Source Model to Creep Feed Grinding

Jong Dal Chung*, Hae Do Jeong**, Hon Zong Choi***, Nam Kyung Kim****

ABSTRACT

This study focuses on the energy partition and heat flux distribution in creep-feed grinding. From the measurements of transient grinding temperature in the workpiece which the thermocouple was embedded, the overall energy partition to the workpiece was estimated with moving heat source theory using the developed scalene triangle heat model. The energy partition was calculated as 3.75% in down grinding smaller than 5.3% in up grinding. Also, the scalene triangle heat model was confirmed as the most optional heat model in correspond to the experimental data. Then, the heat flux distribution was calculated from temperature responses. The heat flux is negative behind the grinding zone where fluid was applied. In this experimental result, the total heat flow to the workpiece per unit width obtained by integrating the positive heat flux was 0.7W/mm for down grinding.

Key Words : Creep Feed Grinding(크립피드 연삭), Energy Partition(열유입비율), Heat Flux Distribution(열원분포), Scalene Triangle Heat Model(부등변 삼각형 열원 모델), Up Grinding(상향 연삭), Down Grinding(하향 연삭)

1. 서론

연삭작업은 공작물 가공시 단위체적당 제거율에 대해 고에너지가 요구되며 이 에너지는 연삭 부위에 열로 변환된다. 이 열은 공작물에 전도되어 공작물 내부에 온도 분포가 생기고, 이것에 의해서 공작물에 생기는 변형이나 열응력 등에 중요한 영향을 미친다. 그래서 연삭온도를 해석하고 공작물에서의 열과 적용된 유제의 냉각에 따른 열전달 등이 전체 에너지에서 차지하는 비율 등에 대해서 이론적 및 실험적 연구가 이루어지고 있다.

대부분의 Jaeger의 이동열원 이론을 사용하여 열유입비율과[1~3] 역 열전달에 의한 간단한 열유입비율[4] 등을 밝혔다. 이러한 이론들을 사용하여 온도 상승을 계산하기 위해서 연삭 지점에서 전체 열흐름 분포와 공작물로의 열분할을 규명하는 것이 필요하다.

최근에는 밀링과 선삭공정이 생략된 단공정으로 할 수 있는 크립피드 연삭[5]과 고속화를 통한 생산성 증대를 할 수 있는 고속연삭[6]등의 고능률로의 연삭으로 바뀌어 가고 있다. 지금까지는 크립피드 연삭에서 열해석은 사각형과 삼각형 모델 등

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계공학부
*** 한국생산기술연구원
**** 진주산업대학교 기계설계공학과

으로 실제가공 현상과 일치시키기 힘든 모양이었다.[1~4] 그래서 본 연구에서는 크립피드에서 가장 적합한 열원 모델을 개발하고 열유입비율과 온도분포를 파악하고자 한다.

2. 열원 모델 해석과 실험

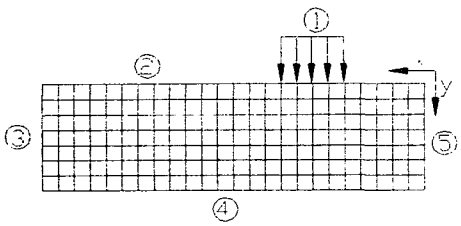
2.1 열원모델 해석

식 (1)은 연삭숫돌에 적용되는 열전도방정식이다. 여기서 T는 온도, ρ 는 밀도, c는 비열, k는 열전달계수이며, x, y, z는 각각 직각좌표축이다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z})+\dot{q}=\rho c\frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

여기서 열전달계수(thermal conductivity : k)는 상수로 가정하고 연삭숫돌 폭방향으로의 열 이동을 무시하면 2차원으로 해석할 수 있다. 식 (2)는 식 (1)을 테일러 급수전개하고 미소영역의 x, y 분할이 같은 경우의 2차원 열전도방정식이다. 여기서 내부 열발생이($\dot{q}$)은 없다.

$$T^{p+1}_{m,n}=\frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2}\left(T^{p}_{m+1,n}+T^{p}_{m-1,n}+T^{p}_{m,n+1}+T^{p}_{m,n-1}\right)+\left[1-\frac{4a\Delta t}{\Delta x}\right]T^{p}_{m,n} \quad (2)$$



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

Fig. 1 Boundary conditions for simulation of grinding surface temperature

Fig.1는 연삭숫돌의 열경계조건을 나타낸 것이다. 여기서, ①은 연삭숫돌과 공작물의 접촉부분이며 열원으로 가정하였다. ②, ③, ④와 ⑤의 열경계조건은 연삭유에 의한 균일한 냉각조건으로 가정하였다.

Fig.2은 프로그램을 작성하기 위한 순서도를 나타낸 것이다. 공작물의 초기온도와 연삭액의 초기온도는 동일하며 재료내부는 균일 온도분포로 가정하였다. 임의순간에서 온도분포는 시간증분이전의 온도 계산결과를 사용하여 초기온도에 대입하고 열원의 경계조건을 계산한다. 균일한 열원이 공작물의 이송속도에 따라 이동하면서 계속적으로 작용한다.

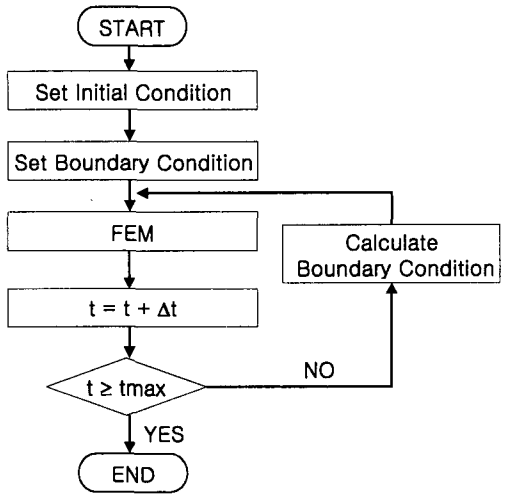


Fig. 2 Flow chart for simulation

2.2 실험

연삭 조건은 표1과 같이 0.001mm에서 5mm까지 절입이 가능한 크립피드 NC연삭기로 수행하였으며 절입깊이는 0.5mm로 하였다.하향 및 상향연삭 방법으로 숫돌 속도 V_s = 30m/s, 공작물 속도 V_w = 5mm/s, 그리고 숫돌 연삭깊이 a = 0.5mm로 수행되었다. 하향연삭의 경우 숫돌의 회전방향는 연삭영역에서 공작물 속도와 동일한 방향이며 유제는 Fig.3에 보여주는 것과 같이 적용된다. 상향연삭은 왼쪽부터 유제를 적용하고 반대 방향으로 숫돌회전 속도를 가지게 하여 실험하였다. 연삭유제는 5%수용성 유제를 사용하여 노즐 유속이 2ℓ/s로 적용시켰다. 공작물 표면에서 온도 측정은 공

작물 내에 심은 열전대를 사용하여 연삭가공이 될 때마다 측정되었다. 열전대에서 나온 데이터는 증폭기로 증폭한 후 아날로그-디지털 변환기를 거쳐 PC로 전송하여 데이터를 수집(Daqboard)· 분석하였다. Fig.3에서 보는 것와 같이 공작물 아래쪽에서 직경1.32mm 구멍을 뚫어 바닥에서 두 선은 방전용접을 함으로써 열간 접합을 행하였다.

Table 1 Experimental conditions

Grinding machines	HWCHEON HGN-64CF	
Wheel specification	64A80F15VMF ϕ 305×22×ϕ 127	
Grinding conditions	Grinding type	Plunge grinding
	Wheel speed (Vs)	30m/s
	Table speed (Vw)	5mm/s
	Depth of cut	0.5mm
Fuids	5% soluble oil in water 2 *l*/s	
Workpiece	S45C 90×22.5×9 ($l \times h \times b$)	

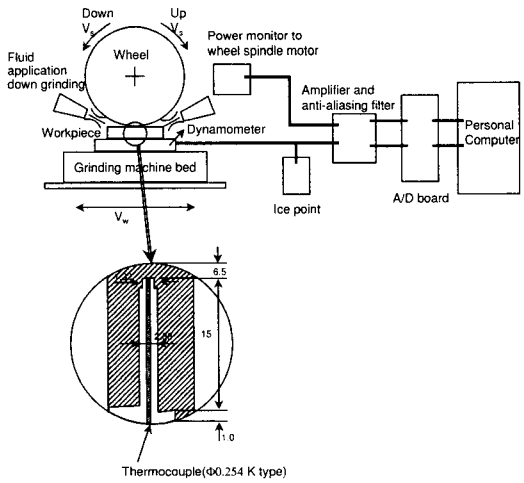
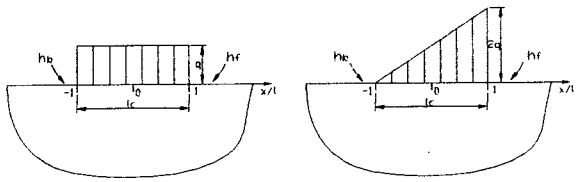


Fig. 3 Schematic diagram of experimental equipments

공작물 아래쪽으로부터 먼저 직경 2.38mm의 구멍을 깊이 15mm까지 뚫고 그 다음 직경 1.32mm인 작은 구멍을 뚫었다. 구멍의 바닥에 용접될 때 열전대는 공작물의 표면에서부터 6.5mm가 되었다. 열전대선의 통로가 되도록 공작물의 아래쪽에 작은 홈이 만들어졌다. K-type 크롬-알루멜(30게이지 선) 열전대로 추천 온도 범위 -165℃에서 1260℃를 가지는 것을 선택하였다. 각 열전대 선은 직경 0.254mm를 가지며 두 선은 테프론으로 피복되었다. 응답속도를 빨리하기 위해 가능하면 지름이 작은 열전대를 사용하는 것이 좋으나, 순간 온도를 측정하는 것이 아니고 공작물 평균온도를 측정하므로 더 작은 열전대는 필요하지 않다.



(a) Rectangle heat source (b) Right-angled triangle heat source

Fig. 4 Conventional heat source

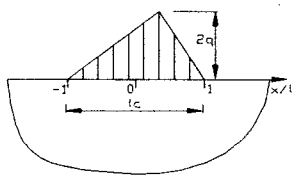


Fig. 5 New triangular heat source (=Scalene triangle heat source)

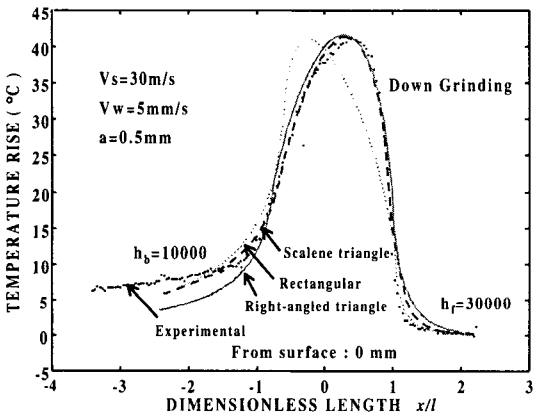
지금까지는 연삭 영역내에서 전체 열흐름은 균일한 것(사각형 형태, Fig.4 (a)) 또는 비례하는 것(삼각형, Fig.4 (b))으로[1~5] 모델화 되어져 있으며 공작물로의 열분배는 연삭지점을 따라 일정한 균일속도로 이동한다는 가정으로 되어졌다. 그러나 실제로 연삭 영역에서 열흐름은 급격히 상승하였다가 서서히 하강한다. Fig.5에서와 같이 기존의 비례하는 삼각형 모델을 양쪽으로 붙인 형태로 비교적 간단하게 사용할 수 있는 새로운 열원 모델

로 분석하고자 한다. 이 모델의 이름은 부등변 삼각형이라고 명하였다.

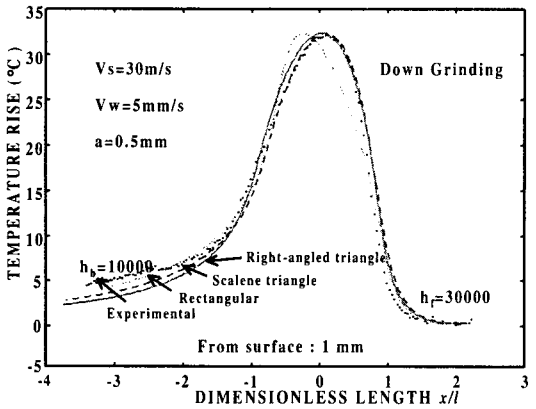
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 에너지 분할 분석

측정한 온도데이터의 예를 Fig.6에 보여주고 있다. 점들은 연삭숫돌이 열전대에 닿는 순간의 실험온도데이터를 나타낸다. 그림에서 수평축은 기하학적 현길이 $l_c=\sqrt{d_s a}$ 로 나타낼 때 $2l$길이의 연삭접촉길이($-1\le x\le 1$)의 중간점에서 측정된다. 실제로 연삭에서 발생된 모든 에너지는



(a)



(b)

Fig. 6 Measure temperature and analytical solution for down grinding

연삭 접촉호 l_c에서 열로 변환되어 결과적으로 전체 평균 열흐름량은 다음 식과 같다.

$$q_t=\frac{P}{l_c b} \tag{3}$$

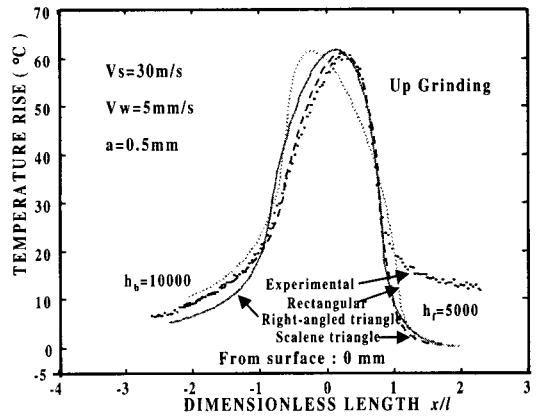
여기서, P는 전 연삭동력이며 b는 공작물 폭이다. 발생된 전체 열 중에서 단지 ε 부분만 공작물에 전도된다. 그러므로 연삭부위에서 공작물로의 평균 열 흐름은 다음과 같다.

$$q_w=\varepsilon q_t=\frac{\varepsilon P}{l_c b} \tag{4}$$

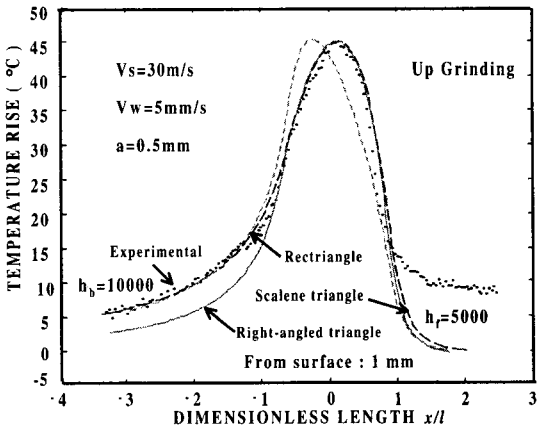
측정된 온도를 이동 열원 해석에 맞추기 위해 측정된 결과와 가장 잘 맞는 q_w값을 발견하는 것이 필요하다. 이것은 또한 전체 연삭력 P가 알려져 있다면 ε 의 에너지 분할에 대한 값을 얻게 한다. 크립피드연삭에서 유제에 의한 냉각은 낮은 ε 의 값을 제공하고, 공작물의 누름이나 열적 손상을 피하기 위해 연삭지점에 제공될 필요가 있다.

Fig.6은 유한요소법 이용하여 측정 깊이에서 시간의 변화에 따른 온도데이터를 해석적으로 예측한 결과이다. 표면 아래 깊이는 각 측정된 온도데이터에 대해 영점을 최종적으로 지나가는 것으로 정하고 최종으로 지나가기 직전까지의 지나간 횟수에 1회 연삭깊이를 곱해줌으로 표면으로부터 연삭지점의 깊이를 얻을 수 있다. 일반연삭에 비하여 이송속도가 매우 느리고 단위 면적당 연삭유분사량이 많기 때문에 연삭온도는 크게 올라가지 않았다. 기준의 모델과 새로운 삼각형 모델로 해석적 온도데이터를 분석하였다. 사각형 모델은 일반 연삭에서는 비교적 적용이 가능하였으나[1,2], Fig.6에서 보듯이 크립피드 연삭에서는 열원 모델로 적용이 부적합하였다. 다른 두 모델의 연삭영역의 상승부에서는 온도가 비슷하게 상승한다. 그러나 온도 하강영역에서는 부등변 삼각형 열원 모델이 연삭영역에서 측정된 실험 온도데이터와 해석적 온도데이터가 일치하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 열유입비율은 사각형 모델은 3.58%, 삼각형 모델은 이전의 연구 결과[5]의 3.5%보다 작은 3.38%로 나타난다. 그리고 부등변 삼각형 모델은 기준의 모델들 보다 큰 3.75%의 열유입비율을 얻을 수 있었다. 따라서 사각형 모델에서 삼각형 모델로 변화함에 따라 유입비율이 감소하였다가[2] 새로운 모델인 부등변 삼각형으로 변화함에 따라

비율이 증가한다. 크립피드에서 열흐름 열원 모델로는 새로운 삼각형 모델이 적합하다는 것을 알 수 있었다. 여기서, 부등변 삼각형의 밑변의 비율은 7:1이다.



(a)



(b)

Fig. 7 Measure temperature and analytical solution for up grinding

Fig.7는 상향 연삭의 온도데이터를 해석적으로 예측한 결과이다. Fig.6에서와 같이 열원모델은 부등변삼각형이 적합함을 알 수 있다. 부등변삼각형에서의 열유입비율은 5.3%이다. Fig.6과 7을 비교해 보면 열유입비율이 하향연삭에 비하여 상향 연삭이 크게 나타난다. 또, 상향 연삭은 열대류전달계수(h)가 하향 연삭의 반대인 전방의 대류열전달계수가 후방의 대류열전달계수보다 작게 나타난다. 하향연삭에서는 두께가 두꺼운 쪽부분 연삭되기 때문에 유제의 유입이 잘 되어서 냉각효과가 크기때문에 열유입비율이 작게 나타난다.

3.2 역열전달분석

Fig.8는 공작물로의 열흐름은 연삭영역과 연삭영역 바깥의 냉각을 나타낸 그림이다.

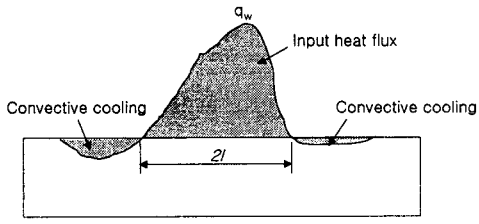


Fig. 8 Heat source due to heating and cooling

연삭영역의 열은 양의 열플럭스(positive heat flux)와 대류 냉각 열플럭스(convestive cooling negative heat flux)의 결과이다. 역열전달분석은 방법에는 온도에 의한 방법(Temperature Mathing Method), 적분에 의한 방법(Integral Method) 그리고 귀추에 의한 방법(Sequential Methods)이 있다.[4)]

본 연구에서는 온도에 의한 방법을 이용하여 역열전달을 분석하고자한다.

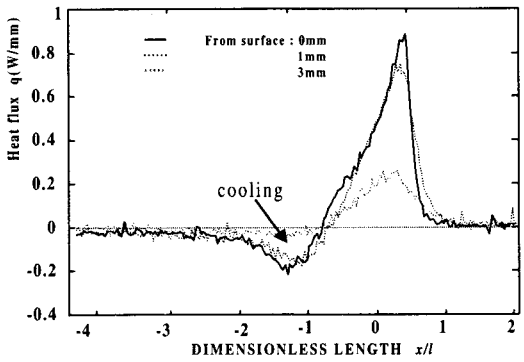


Fig. 9 Heat flux distribution on work surface (Down Grinding)

Fig.9는 하향연삭에서의 온도에 의한 열흐름을 구한 결과이다. 열유입비율(ε)는 부등변삼각형에

의해 구한 값을 대입하고 동력(P)은 가공에서 측정되어진 값을 사용하였다. 연삭영역에서는 양의 열플럭스를 가지고 냉각재가 작용하는 부분에서는 음의 열플럭스를 가지는 것을 볼 수 있다. 그림에서 보듯이 깊이가 깊어짐에 따라 열플럭스가 작고, 냉각지점의 냉각 열플럭스도 작게 나타난다. 연삭영역에서 열플럭스가 작다는 것은 에너지 분할이 작다는 것이다. 냉각지점의 열플럭스가 깊이가 깊어짐에 따라 작은 이유는 냉각재가 직접 도달하지하고 간접적로 작용하기 때문에 냉각효과가 작게 나타는 것이다. Fig. 9의 0mm의 전체 열흐름(Total heat flux)는 약 0.7W/mm이다.

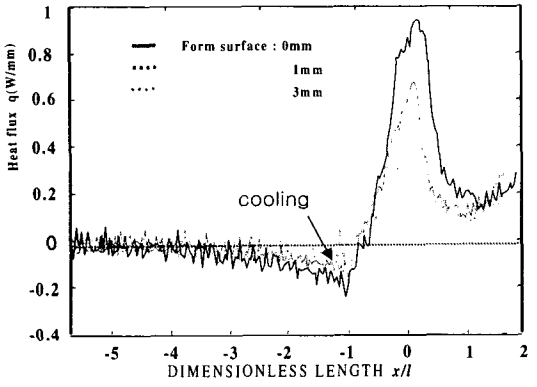


Fig. 10 Heat flux distribution on work surface (Up grinding)

Fig.10는 상향연삭에서의 온도에 의한 열흐름을 구한 결과이다. Fig. 9와 비교하여 보면 Fig. 10의 열플럭스가 크게 나타나고 있다. 그 이유는 앞에서 설명하였듯이 유제에 의한 냉각 효과가 작아서 에너지 분할이 크게 나타나기 때문에 열플럭스가 크게 나타난다. 또 상향연삭에서는 하향연삭과 달리 냉각 열플럭스 영역이 양쪽에 존재한다.

4. 결론

크립피드을 행하여 온도 분포, 열유입비율, 냉각효과를 연구한 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻었다.

1) 유한요소 프로그램으로 열유입비율과 대류열전달계수등을 쉽게 예측할수 있으며, 측정된 접촉호 길이와 기하학적 접촉호는 비교적 잘 일치하였다.

2) 크립피드 연삭에서 기준의 열원 모델보다 새로운 부등변 삼각형 열원 모델이 적합하였다.

3) 하향 크립피드 연삭에서 유제가 접촉호를 통과하는 연삭 숫돌 전방의 대류열전달계수(h_f)는 후방의 대류열전달계수(h_b)보다 크고, 공작물로의 열유입비율은 약 3.75%였다.

4) 상향 크립피드 연삭에서 유제가 접촉호를 통과하는 연삭 숫돌 전방의 대류열전달계수(h_f)는 후방의 대류열전달계수(h_b)보다 작고, 공작물로의 열유입비율은 약 5.3%였다.

5) 하향연삭은 연삭영역의 후방에만 냉각 영역이 발생하고, 이에 반해 상향연삭에서는 전후방 모든 영역에서 냉각 영역이 존재한다.

후 기

본 연구는 1999년도 선도기술개발사업(G7)의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사합니다.

참고문헌

1. B. Zhu, C. Guo, J. E. Sunderland., S. Malkin, "Energy to the Workpice for Grinding of Ceramics," Annals of the CIRP Vol. 44, pp. 267-271, 1995.
2. Malkin, "Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and Cubic Boron Nitride abrasive Wheels," 1993.
3. C. Guo, S. Malkin, "Effectiveness of Cooling in Grinding," For presentation at CIRP Annals Convention, 1995.
4. C. Guo, S. Malkin, "Inverse Heat Transfer Analysis of Grinding, Part 1," Journal of Engineering for Industry, Vol, 118, pp. 137-142, 1996.
5. N. K. Kim, C. Guo, S. Malkin, "Heat Fiux Distribution and Energy Partition in Creep-Feed Grinding," Annals of the CIRP, Vol. 46 pp. 227-232, 1997.
6. T. Jin, G. Q. Cai, H. D. Jeong, N. K. Kim, "Heat Transfer Model of High Efficiency Deep Grinding," KSPE 추계학술대회, pp. 582-585, 1998.