

마이크로 구멍 가공 중의 열적 현상에 관한 연구

A Study on the Thermal Behavior during Micro Hole Drilling

류승호*(대우전자), 조동우(포항공대)

SeungHo Ryoo*(Daewoo Electronics Co. Ltd.), DongWoo Cho(Pohang Univ.)

ABSTRACT

The thermal analysis method containing micro drilling characteristic is proposed for the first time. There are such problems in thermal analysis of micro hole drilling as the thermal modeling complexity of drilling process and the undesirable micro drilling characteristic. Especially, the undesirable micro drilling characteristic prevents our using conventional thermal modeling. To model the thermal behavior of the micro drilling process, the finite different method, where heat source vectors are distributed by the measured thrust and torque, is proposed. This method agrees with thermal behavior of the real system. And, it enables to predict the temperature field near the drill during drilling. The validity of this method is verified in comparing with experimental results.

Key Words : micro drilling(미세구멍가공), thermal analysis(열해석), micro drilling characteristic(미세구멍가공의 특징), finite different method(유한차분법), predict(예측), temperature field(온도장)

1. 서 론

마이크로 구멍가공기술은 오늘날, 각종 전자제품, 인쇄회로기판, 시계 산업, 광섬유 커넥터(Connector), 미세노즐, 오리피스(Orifice), 우주 항공용 전자 부품, 의료용 광학기기, 정밀 공구, 측정장치 등에 널리 적용되고 있다. 특히 전자, 컴퓨터 산업에서의 마이크로 구멍 가공은 전자 소자들의 집적도 향상에 따라, 가공 구멍의 미세화, 세장비(가공 구멍의 직경에 대한 가공 깊이의 비)의 증가, 회로기판의 고밀도 등의 이유로 더욱 고도의 가공 정도, 고생산성이 요구된다. 그러나, 마이크로 드릴은 가늘고 길기 때문에 굽힘과 비틀림 강도에 한계가 있어 충격에 약하며, 가공 중에 칩과 열이 잘 배출되지 않고, 절삭유를 공급하기도 힘들다. 이 때문에, 드릴링(Drilling) 작업 도중 절삭 저항의 증가, 칩의 엉킴, 공작물과의 충돌 등으로 드릴이 부러지기 쉬운 맹점이 있다. 위와 같은 맹점을 극복하기 위해서 역학적인(Dynamic) 연구, 즉 마이크로 드릴링시 생기는 절삭력, 절삭 토크(Torque)에 관한 연구[1][6][8] 등이 조금씩 행해지고 있으나, 마이크로 드릴링시 생기는 열적 현상에 관한 연구는 전무하다. 특히, 가공하고자 하는 시편의 종류가 다양해지고 어려운 가공 조건에서의 가공이 요구되는

요즘엔 이에 관한 연구가 반드시 수반되어야 할 것이다.

절삭시 발생하는 열에 관한 연구는 Benjamin Thomson 이 일정 조건의 물 속에서 절삭을 하였을 때, 들어간 기계적인 에너지에 대한 물의 온도 변화를 알아낸 것이 처음이라고 볼 수 있다.[9][10] 특히, 드릴의 열적 현상에 관한 연구는, 드릴링시 발생하는 열을 1949년에 Schmidt 와 Roubik 이 증류수 속에서 드릴링 시 발생하는 온도의 변화를 측정하면서 시작되었다.[10] 그 후 많은 모델들이 제시되고, 이를 통해 가공시 드릴의 온도를 예측하는 것이 어느 정도 가능하게 되었다. 특히, 유한차분법(Finite difference method)이나 유한요소법(Finite element method)의 발달과 전산기의 발달은 이것에 관한 연구에 많은 도움을 주었다. 그러나, 위에서 언급한 모델들의 대부분은 드릴링시 측정된 실험데이터에 의존할 수 밖에 없다. 왜냐하면, 모델 자체가 요구하는 여러 가지 입력 조건들을 실제의 시스템에서 측정해야만 하는 경우가 많기 때문이다. 그래서, 많은 실험식들과 실험데이터가 드릴의 열적 거동의 해석을 위해서 필요하게 된다. 최근에 제시된 Agapiou 의 모델도 실험 데이터에 의존하는 힘모델(Force model)이 있어야만 드릴의 온도 분포의 예측이 어느 정도 가능하다.[2][3]

특히, 본 논문에서 다루고 있는 마이크로 드릴은 그 기

하학적 형상으로 인해 입력으로 주어야 하는 인자 (Parameter)들의 일부를 구해 낼 수가 없고, 마이크로 드릴링시 발생하는 특이한 현상들, 예를 들면, 드릴링시 계속해서 증가하는 트리스트(Thrust)와 토오크, 버(Bur) 발생의 극대화, 칩 배출의 불원활, 먹힘 현상등의 발생, 심한 완더링(Wandering) 현상 등으로 인해 기존의 모델 [4][5][7] 을 사용할 수 없을 뿐더러, 이론적인 모델을 도출하기도 힘들다. 이에 본 논문에서는 마이크로 드릴링의 특성을 반영하는 열원 백터를 구하여, 마이크로 드릴링시 발생하는 드릴과 드릴 주변에서의 열적 거동을 유한차분법을 통해서 구해 내었다. 그리고, 이를 기존의 모델과 비교하여 마이크로 드릴링시 발생하는 열적 거동의 특이함을 분석해 보았다.

2. 실험적 접근

마이크로 드릴링 머신은 드릴링 본체와 구동계, 그리고 데이터 처리부로 구성된다. 드릴링 본체는 Fig. 1 에 나타나 있다. 실제로 구동을 담당하는 볼스크류 시스템의 진동을 억제하기 위해 드릴링 본체의 강성이 크도록 제작하였다. 그리고, 드릴과 공구대의 직각도를 확보하기 위해서 주축과 베드를 연삭 가공하였다.

데이터 처리계에서 수행하는 작업은 크게 세가지로 나뉜다. 절삭 조건 데이터, 토오크 및 트리스트 데이터, 온도 데이터의 처리가 그것이다.

절삭 조건 데이터는 드릴의 피드속도와 드릴의 회전속도로 구성된다. 피드 속도는 제어 컴퓨터에서 직렬통신(RS232C)을 통하여 펄스를 생성하는 컴퓨터에 전달된다. 그리고 펄스를 생성시키는 컴퓨터는 속도에 해당하는 펄스를 DI/O(Digital Input/Output)를 통하여 마이크로 스텝모터(Micro Stepping Motor)에 전달하게 된다. 스핀들의 회전 속도는 광섬유센서(Fiber optic sensor)를 이용, 카운터 보드에서 이를 카운팅(Counting)하여 각 샘플링타임 동안의 드릴의 회전수를 얻는다.

토오크와 트리스트 데이터는 Fig. 1 의 ⑤, ⑥에서 측정한다. 마이크로 드릴링시의 토오크와 트리스트는 측정하기에 너무 작기 때문에 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 직경이 작은 구리 봉에 스트레인 게이지를 부착하여 트리스트 검출 센서를 제작하였고, Kistler 9001 로드와셔(load washer)를 이용하여 트리스트를 측정하였다.

절삭력 데이터 처리부의 간략도는 Fig. 2 와 같다.

온도 데이터의 처리는 Fig. 3 과 같은 시편을 Fig. 1 의 ⑧의 Workpiece 위치에 놓고 드릴링시 발생하는 온도를 TempScan/1000 을 사용하여 측정하였다. 이 때, 열전대(Thermocouple)는 Fig. 3 과 같이 지름 1 mm, 길이 2.5 mm

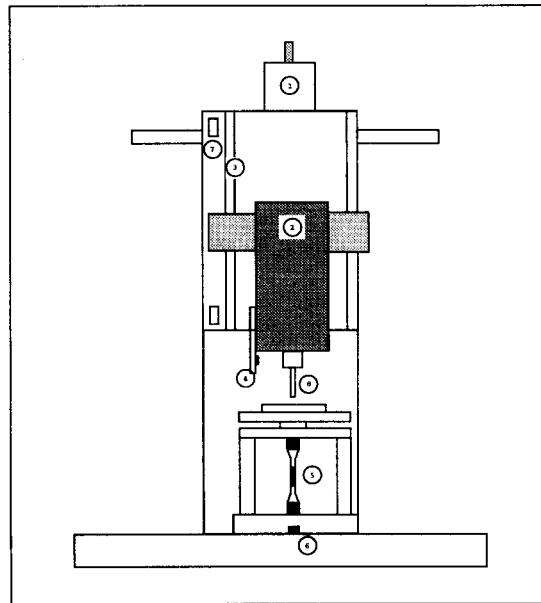


Fig. 1 Main body of the micro drilling system

| | |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1 : Micro stepping motor | 2 : Air spindle |
| 3 : Ball screw | 4 : Fiber optic sensor |
| 5 : Torque sensor | 6 : Load washer (Thrust sensor) |
| 7 : Limit switch | 8 : Drill & workpiece |

구멍들에 꽂은 뒤, 밀폐시킨 다음 온도를 측정하였다.

일반적으로 드릴 주변에서의 온도를 구하기 위해서는 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나뉜다. 직접적인 방법은 열전대를 직접 드릴이나 시편(Workpiece)에 구멍을 뚫어 온도를 측정하는 방법이고, 이는 절삭비트(Cutting Edge) 주위의 온도를 측정하는데 주로 사용된다. 간접적인 방법은 적외선 온도계(Infrared Thermometer)를 사용하여 온도를 측정하는 방법을 말하고, 이는 드릴 측면(Flank) 부위의 온도를 측정하는데 주로 사용된다.

그러나, 마이크로 드릴링의 경우에는 마이크로 드릴의 기하학적 형상 때문에, 직접적인 방법을 사용하여 열원 백터를 추정하는 것은 거의 불가능하다. 그러므로, 본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 마이크로 드릴링시 발생하는 열원 백터를 구하기 위해서, 시편상에 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하고 밀폐시킨 뒤 시편의 온도를 측정하였다. 드릴 비트의 중심에 가장 접근시키기 위하여, 드릴비트의 중심에서 각각 2 mm, 3 mm, 4 mm 떨어진, 깊

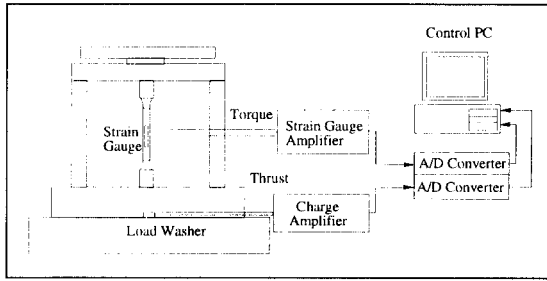


Fig. 2 A schematic diagram of the cutting force data acquisition system.

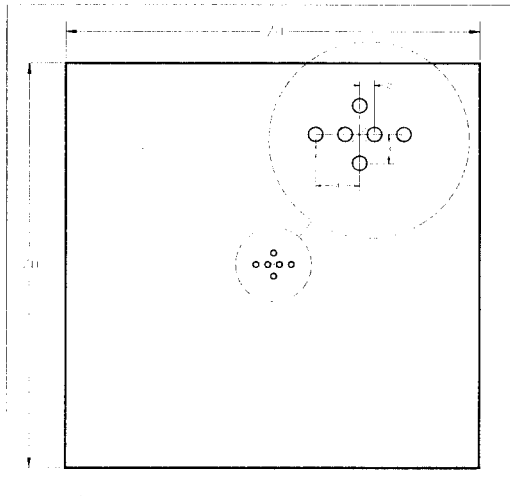


Fig. 3 The workpiece used to measure the temperature distribution

이 2 mm 인 구멍의 온도를 측정함으로써 열원 벡터의 크기를 추정할 수 있었다. 이 때, 구멍의 깊이를 시편 두께의 반으로 한 이유는 자연대류(Natural Convection)의 영향을 가장 적게 받는 상태의 열원 벡터를 구하기 위함이다.

Fig. 4 는 드릴 비트의 중심에서 각각 2 mm, 3 mm, 4 mm 떨어진 곳에서 측정된 온도의 시간에 따른 분포이다. 이를 통해서 전체의 온도 추이를 커브피팅(Curve Fitting)으로 구할 수 있다. 각 시간에 대한 가운데 지점에서의 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 은 피팅된 온도 함수의 $n = 0$ 인 위치에서의 미분 값을 통해 구해 낸다. 이로부터 식. (1)을 이용하면 q'' 을 구할 수 있다.

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

여기서

q'' : Heat source vector (W/m^2)

k : Thermal conductivity ($W/m \cdot K$)

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Temperature gradient normal to a surface (K/m)

이다.

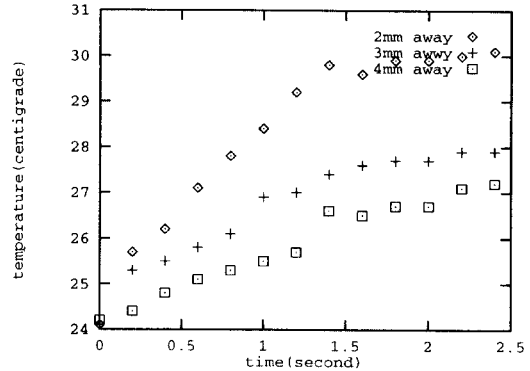


Fig. 4 Temperature changes in the points where are 2 mm, 3 mm & 4 mm away from the center of drilled hole (Drill diameter : 0.5 mm, Frequency : 545 Hz, Feed Rate : 1.67 mm/sec, Workpiece : SS40 Iron)

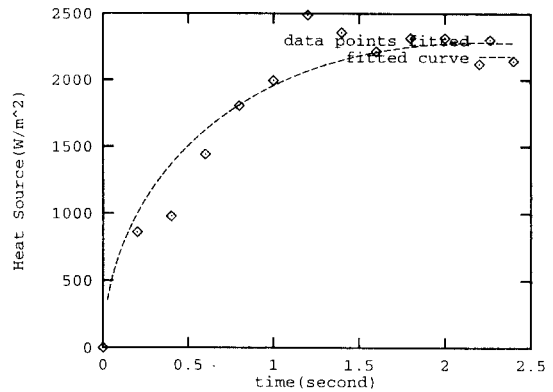


Fig. 5 The magnitude of the heat source vectors & their fitted curve (Drill diameter : 0.5 mm, Frequency : 545 Hz, Feed Rate : 1.67 mm/sec, Workpiece : SS40 Iron)

Fig. 5 는 위와 같은 방법으로 얻어진 열원 벡터의 크기와 그 피팅커브(Fitting Curve)를 시간에 따라 그려 놓은 그림이다. 이를 살펴 보면 마이크로 드릴링시 전 구간이 전이영역(Transient Region)에 놓임을 알 수 있다. 이는 토오크와 트러스트가 계속해서 증가함으로 인해 열원 벡터의 크기도 따라서 계속해서 커지기 때문이다.

3. 유한차분법을 이용한 온도장 해석

마이크로 드릴링은 일반적인 드릴링과는 다른 여러 가지 특성을 가진다. 그 중 깊이에 따라 계속 증가하는 토오크와 트러스트, 관통된 구멍의 입구와 출구에 가공 찌꺼기(Bur)가 생기는 현상의 현저함, 스미어(Smear)의 발생 등이 열적 현상과 관련된 사항이다. 이 중 본 연구에서는 깊이에 따라 계속 증가하는 토오크와 트러스트를 열원 모델에 도입하여 마이크로 드릴링 시 발생하는 열적 거동을 더 잘 서술하는 유한차분모델을 개발하였다.

마이크로 드릴링 시의 온도 분포를 고찰하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 시편(Workpiece)상에서 온도 분포는 동심원을 이룬다.
2. 축을 중심으로 반경방향(r-direction)과 깊이방향(z-direction)으로의 열전달만 존재하고 θ 방향으로의 열전달은 존재하지 않는다.
3. 드릴본체로의 열전달은 무시한다.

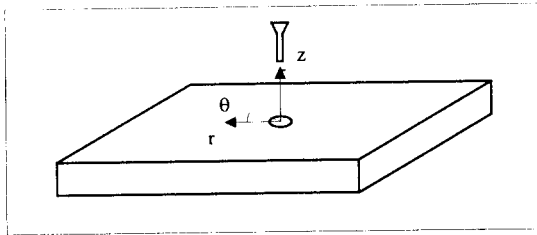


Fig. 6 The Coordinate used in FDM

이러한 시스템을 지배하는 방정식은 원통좌표계(Cylindrical Coordinate)의 열확산방정식으로 다음과 같이 표기된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

엘리먼트(Element)는 Fig. 7 과 같이 환(環)모양의 엘리먼트로 잡았다. 경계조건(Boundary Conditions)을 살펴보면 Fig. 8 과 같다. 드릴의 중심축과 마이크로 드릴링 머신 본체로의 열전달은 없다고 가정하므로 단열 조건을 사용하였다. 그리고, 축에서 10 mm 이상 떨어진 시편의 바닥은 실제로 온도를 측정해 보면 그 부근에서 온도 구배가 거의 없음을 확인할 수 있으므로 역시 단열 조건을 주었다. 시편의 윗면과 옆면엔 자연 대류 조건을

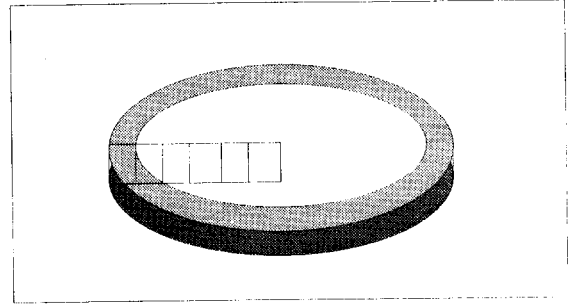


Fig. 7 Ring-shaped Elements

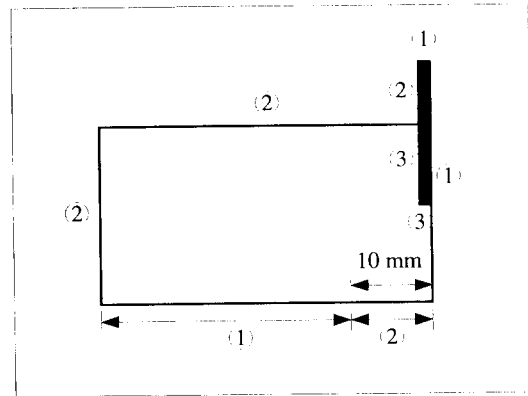


Fig. 8 Boundary Conditions at the workpiece & drill
(① : Adiabatic, ② : Natural Convective, ③ : Heat Source)

주었고, 드릴링시 발생하는 열원 벡터가 드릴의 절삭날과 옆면에 경계조건으로 들어간다

Fig. 8 에서 ③의 경계조건을 주시해 보자. 우리가 2 장에서 실험으로 구한 열원 벡터는 r-방향으로의 열원 벡터이다. 그러므로, 이 열원 벡터를 드릴의 옆면에 배치시킬 수 없다. 이에 다음의 가정하에 z-방향의 열원 벡터를 구하였다.

1. 드릴링시 발생하는 열은 입력으로 들어가는 기계적인 에너지가 모두 열로 바뀐다고 가정한다.
2. 드릴링시 발생하는 열은 독립된 힘 F_r , F_z 의 크기에 비례하여 나뉘어 질 수 있다.

즉, 2 장에서 언급한 토오크로부터 F_r 을, 트러스트로부터 F_z 를 구하여 이들의 비로부터 q_z^* 를 식 (3)에 의하여 구할 수 있다.

이렇게 해서 구한 q_r^* , q_z^* 를 Fig. 8 의 ③부분의 각각에 해당하는 영역에 분포시킴으로써 마이크로 드릴의 특성을 이용한 유한차분해석이 되었다.

$$q_z'' = \frac{F_z}{F_r} \cdot q_r'' \quad (3)$$

4. 실험 및 해석 결과

Fig. 9에서 Fig. 10은 각각 드릴 지름이 0.5, 0.7 mm 일 때의 실험 데이터와 유한차분법에 의한 결과와의 비교이다. 온도가 증가해 가는 양상과 온도 자체도 아주 유사함을 알 수 있다. 유한 차분 모델의 정확성이 입증되어진다. 드릴의 지름이 커짐에 따라, 온도도 따라서 증가한다. 이는 절삭 저항이 그만큼 커져서 드릴의 토크와 트러스트가 커짐에 기인한다. 그러나, Fig. 11을 보면 드릴의 지름이 0.6 mm에서 0.7 mm로 커졌을 경우의 온도의 증가폭이 0.5mm에서 0.6mm로 커졌을 경우의 그것보다 더 작다. 이는 칩의 배출이 잘 됨에 따라 마이크로 드릴링의 특성이 감소되어 절삭 저항이 그만큼 작아지기 때문이다.

Fig. 11은 최고 온도를 나타내는 드릴의 플루트(Flute) 부분의 온도값을 각 드릴 지름에 따라 나타낸 것이다. 이를 보면 마이크로 드릴링시에도 온도의 변화가 드릴의 기하학적 형상에 크게 의존함을 알 수 있다. 그러므로, 정밀 가공이 요구되는 곳에서는 온도까지 같이 제어되는 시스템을 갖추어야 함을 알 수 있다. 그렇지 못할 경우에는 생산성이 다소 낮더라도 드릴이 충분히 냉각될 시간을 가지는 팩드릴 가공이 더 잇점을 가질 수 있을 것이다.

Fig. 12는 마이크로 드릴링 머신을 PID 제어를 한 경우와 그렇지 않을 경우를 드릴의 온도가 가장 높은 플루트 부근에서 비교한 경우이다. 이를 보면 PID 제어기로 드릴링시 발생하는 토크와 트러스트를 조절할 경우 온도가 전이 영역에서 약간 감소된 것을 알 수 있다. 온도를 제어하지 않고도 이러한 결과를 얻은 것은 PID 제어에 의해, 절삭 저항이 제어되기 전보다 감소되기 때문이다.

Fig. 13은 시편의 가운데 부분에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 유한차분결과로 0.5 mm의 드릴로 가공시 나타난 결과이다. 0.5 mm의 링 모양의 열원에서 열이 빠른 속도로 확산되어 가는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로 드릴링시, 드릴 및 절삭된 구멍 주위에서의 열적 현상에 대해서 고찰해 보았다.

마이크로 드릴은 역학적(Dynamic), 열적으로 보통의

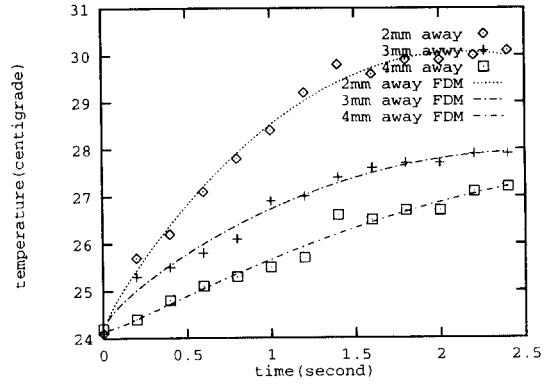


Fig. 9 Comparison FDM result with measurement data (depth : 2.5 mm, drill diameter : 0.5 mm)

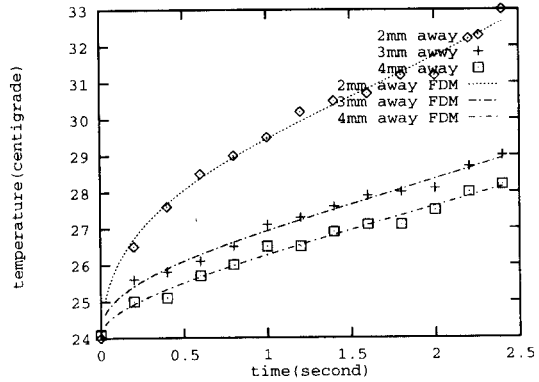


Fig. 10 Comparison FDM result with measurement data (depth : 2.5 mm, drill diameter : 0.7 mm)

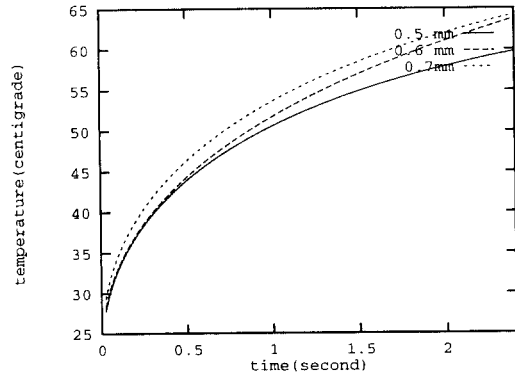


Fig. 11 Temperature variation with respect to drill diameter(2.5 mm deep from the drill surface)

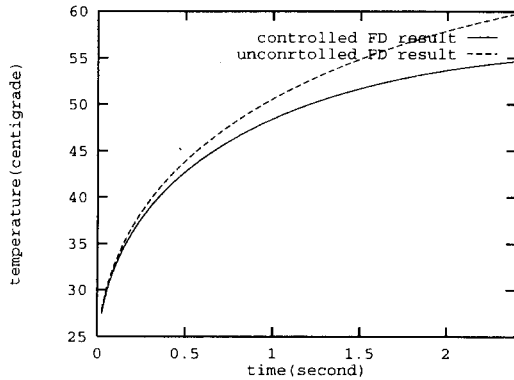


Fig. 12 Comparison the uncontrolled with the controlled (2.5 mm deep from the drill surface, drill diameter : 0.5 mm)

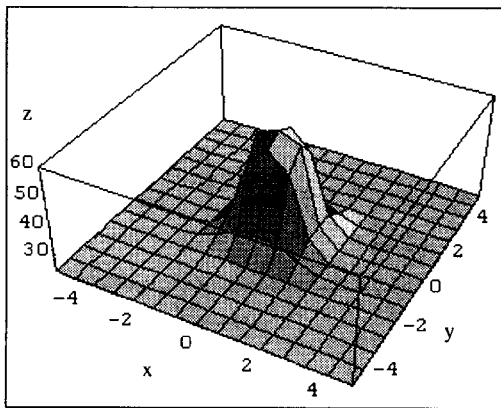


Fig. 13 Temperature distribution at the center region of the workpiece (x, y axis : mm, z axis : degree(centigrade), drill diameter : 0.5 mm)

드릴과는 다른 여러 현상을 가진다. 그러므로, 기존의 연구 방향으로는 마이크로 드릴링 시 열적 현상을 규명할 수 없다. 이에, 마이크로 드릴링의 특성을 살린 유한 차분모형을 만들고 이를 적용하여 열적 현상을 규명하였다. 다음은 얻어진 결론들이다.

1. 간접적으로 측정된 온도 데이터로부터 열원을 추정하여 마이크로 드릴 주위의 온도를 추정하는 것이 가능하였다.
2. 마이크로 드릴링시 계속 증가하는 토오크와 트러스트를 열원을 분포시키는데 이용함으로써 마이크로 드릴의 특성을 가미한 유한차분모형을 최초

로 만드는 것이 가능하였다.

3. 유한 차분 모델은 실험 데이터와, 정성적인 것 뿐 아니라, 정량적으로도 아주 일치하는 정확한 결과를 내 주었다.
4. 드릴의 직경이 커짐에 따라 마이크로 드릴의 특성이 떨어지는 것을 온도의 증가량의 감소함을 봐서 알 수 있었다.
5. 최고로 온도가 높고 올라가는 부분은 마이크로 드릴의 플루트(Flute)부분으로 60~70 도 까지 온도가 상승하였다.

참고 문헌

1. Iwata K., Moriwaki T. and Hoshikawa M., "Fundamental study of high speed micro deep drilling", 精密技 術, 47, 2, p.p. 240~246., 1983
2. S. Agapiou, D. A. Stephenson, "Analytical and experimental studies of drill temperatures", Transactions of the ASME, 116, February, p.p. 54~60, 1994
3. S. Agapiou, M. F. DeVries, "On the determination of thermal phenomena during a drilling process", Int. J. Mach. Tools Manufact., 30, p.p. 203~215, 1990
4. K. Saxena, M. F. DeVries, S. M. Wu, "Drill Temperature distributions by numerical solutions", ASME Journal of engineering for industry, 93, p.p. 1057~1065, 1971
5. A. Stephenson, "Assessment of steady-state metal cutting temperature models based on simultaneous infrared and thermocouple data", ASME Journal of engineering for industry, 113, p.p. 121~128, 1991
6. A. Stephenson, J. S. Agapiou, "Calculation of main cutting edge forces and torques for drills with arbitrary point geometries", Int. J. Mach. Tools Manufact., 32, p.p. 521~538, 1992
7. A. Stephenson, A. Ali, "Tool temperatures in interrupted metal cutting", ASME Journal of engineering for industry, 114, p.p. 127~136, 1992
8. Kato S., Yamaguchi K., Yamada M., "Stress distribution at the interface between tool and chip machining", 94, p.p. 683~689, ASME Journal of engineering for industry, 1972
9. Milton C. Shaw, Metal Cutting Principles, Oxford university press, p.p. 1~46, 1984
10. M. Trent, "Metal cutting", Butterworths, London, Chapter 5.