

마이크로 드릴링 M/C에 의한 미세구멍가공특성에 관한 연구
민승기*, 이동주**, 이응숙, 강재훈***, 김동우****

A Study on the Characteristics of Micro Deep Hole Machining
in Micro Drilling Machine

Seung-Ki Min*, Dong-Ju Lee**, Eung-Sug Lee, Jae-Hoon Kang***
Dong-Woo Kim****

*충남대 대학원 기계공학과, **충남대학교 기계공학과,
한국기계연구원, *인하대 대학원 기계공학과

Abstract

Recently, the trends of industrial products grow more miniaturization, variety and mass production. Micro drilling which take high precision in cutting work is requested more micro hole and high speed working. Especially, Micro deep hole drilling is becoming more important in a wide spectrum of precision production industries, ranging from the production of automotive fuel injection nozzle, watch and camera parts, medical needles, and thick multi-layered Printed Circuit Boards(PCB) that are demanded for very high density electric circuitry.

This paper shows the tool monitoring results of micro drill with tool dynamometer. And additionally, microscope with built-in monitor inspection show the relationship between burr in workpiece and chip form of micro drill machining.

Key Word

Micro hole (미세구멍) Tool dynamometer (공구 동력계) Microscope with built-in monitor (모니터 내장형 현미경) Burr (버어) Micro drill machining (미세드릴가공)

1. 서론

구멍가공 기술은 기계가공 기술중에서도 가장 기본적인 방법으로 생산성 향상을 위해 점차 고속화, 고정밀화되고 있다. 특히 마이크로 드릴링에 의한 미세구멍가공은 미세노즐, 시계산업, 의료기기, 전자제품, PCB(Printed Circuit Boards), IC용 Mask, 광섬유커넥터, 정밀공구 및 게이지 등의 분야로 적용범위가 확대되어 점차 고속화와 고도의 정밀도로 가고 있는 추세이다. 이와같은 기능을 집적시킨 소형부품의 개발 경쟁이 치열해짐에 따라 미세구멍가공 기술의 중요성은 날로 증가하고 있다. [1]

미세드릴가공관 가공에 문제가 되는 직경 1mm 이하를 지칭한다. 이러한 가공방법에는 드릴가공과 같은 기계적 제거 가공방법이 아닌 방전, 레이저, 전자빔과 같은 화학적 고에너지를 사용하는 방법 등이 있으나 미세드릴가공이 주로 사용되고 있는 이유는 고에너지 가공법은 기계적 제거 가공방법에 비해 가공 변질층의 발생이 쉽고, 가공깊이와 전도성에 대해 많은 문제를 포함하고 있기 때문이다. 이에 비해 미세드릴가공은 공구강성의 저하로 쉽게 파손되는 단점이 있지만 가공정도가 양호하고 세장비(Asspect ratio)가 높은 가공을 할 수 있으며 가공후 마무리 작업이 손쉬워 생산성 측면에서 효율적이기 때문에 사용되고 있다. [2]

하지만 미세드릴가공에 있어서 해결해야 할 문제는 높은 세장비의 가공중 절삭유의 공급이 어려워 가공중 발생하는 열의 효과적인 배출과 미세구멍가공상태를 실시간으로 모니터링하여 가공조건을 적절하게 변화시켜 줌으로써 높은 가공정밀도와 동시에 드릴의 변형과 마모를 감소시키는 방안을 모색해야 할 것이다.

본 연구에서는 스텝핑모터 구동형 마이크로 드릴링 머신에서 스텝이송에 의한 미세구멍가공특성중 절삭유제의 사용유무에 따라 발생하는 절삭력 분포를 분석하고 버어와 칩의 형상을 관찰하여 효과적인 가공방법을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 마이크로 드릴링 시스템

본 실험에 사용된 마이크로 드릴링 머신은 스텝핑모터가 내장되어 미세구멍가공시 스텝이송 구동을 할 수 있다.

스텝이송 구동방식은 공구가 부착되어 있는 주축이 일정량 만큼 전진하여 절삭을 하고난 후 반대방향으로 이송 하고 그 후 증분량만큼 주축이 더 전진하여 가공을 하는 것이다. 이러한 구동방식에 의하여 스텝백(step back)이송시 칩과 열의 배출을 용이하게 할 수 있다.

Photo. 1은 이러한 구동방식을 갖춘 마이크로 시스템이다.

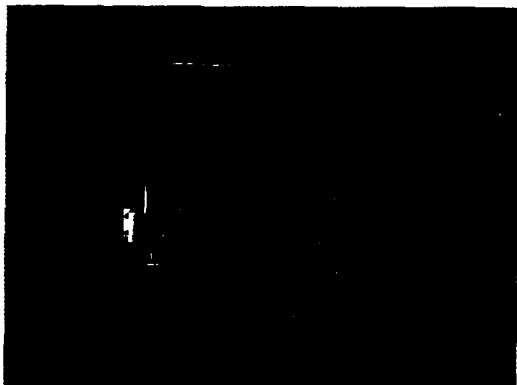


Photo. 1 Experimental apparatus in the micro drilling system

위 실험 장치의 구체적인 사양은 Table. 1에 나타나 있다.

Table. 1 Specifications of the micro drilling machine

Drilling ability	Ø 0.1 ~ Ø 2.0mm
Revolution	Max. 50,000rpm
Torque	500gr-cm
Air pressure (Bearing)	5~6kg/cm ²
Step feed rate	0.01~99.99mm
Total stroke	75mm
Height to collect	From table surface 30~200mm
Size of machining body	300×350×680mm
Weight	35Kg

본 실험에서 사용한 피삭재와 가공상태를 실시간으로 파악하여 이때 발생하는 절삭력을 측정하기 위해 사용된 시스템의 사양과 미세구멍형상과 칩의 형상을 관찰하기 위한 모니터 내장형 현미경시스템의 사양을 Table. 2와 Photo. 2에 나타내었다.

Table. 2 Measuring instrument of experiment for cutting force

Workpiece	SM45C(35×35×2.3 mm)		
Dynamometer	Kistler Co	Type	9257A
Amplifire	Kistler Co	Type	5011B
A/D converter	DAQ Card-AI_16XE-50		
Microscope with built-in monitor	FOTEC CORPORATION (sometech)		



Photo. 2 Microscope with built-in monitoring system

2.2 마이크로 드릴과 공작물의 고정치구

본실험에서 사용한 마이크로 드릴은 스트레이트 피벗형(straight pivot type)형으로서 그 사양을 공구직경에 따라 Table. 3에 나타내었다.

Table. 3 Dimensions of micro drill

Material	Ø d(mm)	L ₁ (mm)	θ
Vanadium Carbide Tool	0.2	2.8	120
	0.3	5.5	120
	0.4	7.0	120
	0.5	7.0	120

Fig. 1은 본 실험에 사용된 마이크로 드릴의 형상을 나타내고 있으며 Fig. 2는 미세구멍가공시 피삭재를 공구동력계에 고정시켜주기 위한 치구시스템을 모델링하여 사용한 것을 나타내었다.

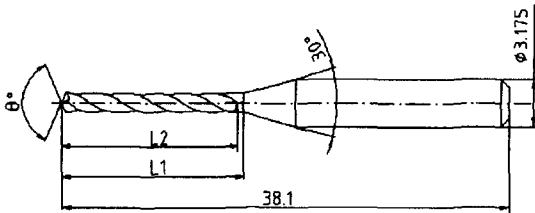


Fig. 1 Geometry of micro drill

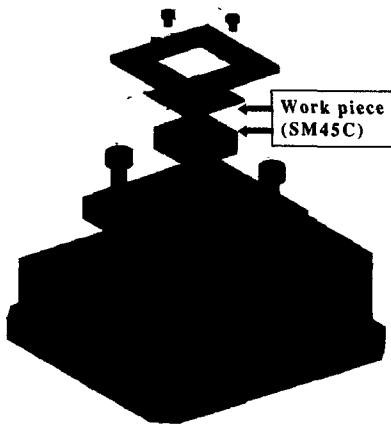


Fig. 2 Exploded view of the fixturing system

3. 미세구멍가공

3.1 마이크로 드릴링에서의 절삭력 분석

드릴링에서의 드릴에 작용하는 힘은 주 절인에

걸리는 힘과 치출부에 걸리는 힘, 그리고 드릴의 주에서의 마찰 및 홈에서의 칩배출에 의한 힘으로 구별할 수 있다.^[3]

일반적으로 드릴에서의 절삭저항을 거론하는 경우 토크와 트러스트로 나눌수 있으며 절삭력 분석시 드릴의 좌우 두 장의 절인에서 발생하는 절삭이 전부 대칭으로 되어 있다고 가정하면 드릴에 걸리는 토크 M_t 와 트러스트 T 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.^[4]

$$M_t = 2 \int_0^R P_M r dr + 2 \int_0^{r_0} P_{M_0} r dr + M_f \quad (1)$$

$$T = 2 \int_0^R P_T r dr + 2 \int_0^{r_0} P_{T_0} r dr + T_f \quad (2)$$

여기서, R : 드릴의 외경, r_0 : 치출부의 반경, P_{M_0} , P_{T_0} : 치출부에 있어서 절삭분력, M_f , T_f 는 위에서 언급한 드릴의주에서의 마찰저항에 의한 힘을 나타낸 것이다. 위의 (1), (2) 식은 드릴의 절삭력에 관한 각 힘들의 작용을 나타낸 것으로 치출부에 걸리는 절삭저항중에서 특히 트러스트가 큰 것이 특징이며 이러한 힘의 분포는 미세구멍가공에서의 절삭력발생시에도 거의 동일하게 적용이 된다.

3.2 공구의 수명을 고려한 가공조건 선정

드릴 가공의 근본적인 문제는 드릴 직경에 따라 매분 회전수와 일회전당 피이드의 양이 다르다는 점이다. 이 값들은 드릴의 재질 및 가공물의 재질에 따라서도 다르다.^[5]

드릴 가공으로 인한 공구의 수명은 가공에서 절인의 외단이 마모되어 나타나는 절삭저항 증대와 절삭이 되지 않는 때까지의 가공횟수 또는 시간으로 나타낸다. 다른 한편으로는 랜드가 칩으로 막혀서 마모되는 경우와 웨브 부분의 열처리 불량으로 인한 마모가 발생하는 것으로도 나타낼수 있다.

Patkay는 실험을 통해 드릴 수명에 대해 다음의 식을 제시하였다.

$$L = 2000 \left(\frac{36}{V} \right)^{10.7} \quad (\text{직경 } 20\text{mm}) \quad \text{----(1)}$$

$$L = 2000 \left(\frac{44}{V} \right)^{17.8} \quad (\text{직경 } 30\text{mm}) \quad \text{----(2)}$$

$$L = 2000 \left(\frac{47.5}{V} \right)^{12.9} \text{ (직경 40mm) ----(3)}$$

식(1), (2), (3)에 따르면 드릴의 수명은 드릴의 절삭속도와 상관관계를 가지고 있으며 속도와는 지수적으로 반비례한다는 것을 알 수 있다. 또 직경이 클수록 드릴의 수명이 길다는 것도 알 수 있다.

본 실험에서는 미세구멍가공시 마이크로 드릴의 마모에 의한 절삭력변화를 감소시키고 최적조건에서의 가공을 통한 미세구멍형상을 얻기 위하여 공구의 교체횟수를 고려하였다. 아래의 Table. 4는 미세구멍가공을 위한 마이크로 드릴링에서의 절삭조건을 나타내었다.

Table. 4 Condition of experiment for micro drilling

Φd(mm)	Number of step	Depth (mm/step)	Feed (mm/sec)	rpm
0.2	4	0.3	0.5	25,000
0.3	5	0.5	0.5	25,000
0.4	5	0.5	0.5	25,000
0.5	5	0.5	0.5	25,000

Table. 4에서 Φ0.2 마이크로 드릴링의 절삭조건이 약간 다른 것은 Φ0.2의 날 길이가 2.8mm이며 드릴의 강성을 고려하여 미세구멍가공시 공구 파손방지를 위해 스텝횟수와 절입깊이를 감소시켰다. Φ0.2 마이크로 드릴을 이용하여 미세구멍을 가공할 경우를 예로 든다면 가공깊이는 다음과 같다.

$$0.3 \times 4 = 1.2 \text{ mm (Depth of cut)}$$

3.3 스텝이송에 의한 가공

가공방법은 Table. 4의 조건으로 Fig. 3과 같은 스텝이송구동을 하여 가공하였다.

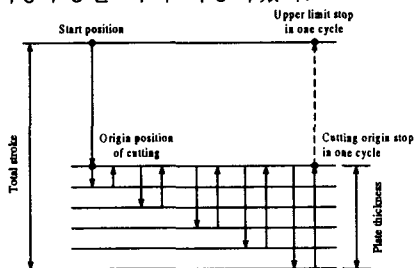


Fig. 3 Diagram of step feed

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭력 분석

본 실험에서 절삭유제의 사용유무에 따라 발생하는 절삭력의 결과로는 Normal force를 트러스트로 간주하여 분석할 경우 절삭유제를 사용하여 습식절삭을 했을 때 건식절삭보다 전반적으로 트러스트가 적게 걸리는 것을 알 수 있다. 아래의 Fig 4.1은 각각의 미세드릴에서 절삭유제의 사용유무에 따른 트러스트의 분포를 보여 주고 있으며 드릴의 직경이 작아질수록 트러스트의 차이가 적어지는데 이것은 절삭유제의 원활한 공급이 이루어지지 않기 때문이라 추측된다.

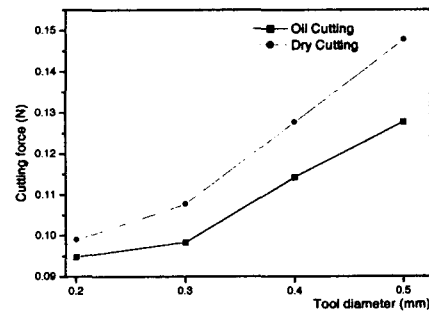


Fig. 4.1 Comparison of the thrust forces variation between oil supplied and dried

토오크의 경우 공구동력계의 성능 제한상 절삭유제의 사용에 따른 정확한 힘의 파악은 어려우나 Tangential force를 토오크로 유추하여 분석할 경우 Dia 0.3mm까지는 트러스트가 검출되는 비슷한 위치에서 토오크가 발생되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.2와 Fig. 4.3은 Normal force와 Tangential force의 스텝이송에 따른 힘의 분포를 나타내었다.

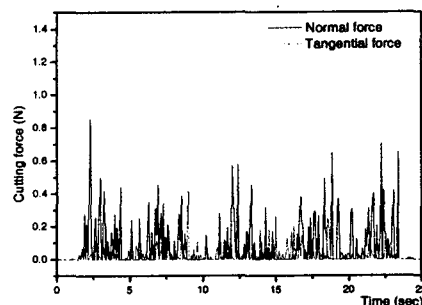


Fig.4.2 Cutting forces variation when cutting oil supplied (Dia : 0.3mm)

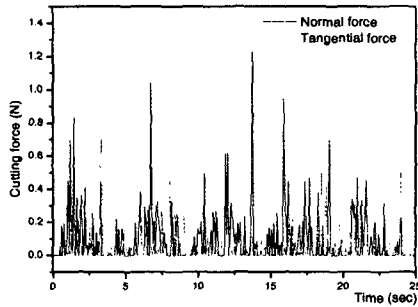
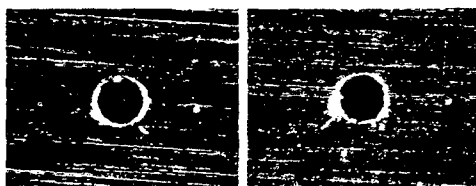


Fig.4.3 Cutting forces variation when dry drilling (Dia : 0.3mm)

4.2 가공면 관찰

일반적인 가공에서 절삭유제를 사용하는것에 따라 가공면 거칠기가 향상되는 것을 알 수 있다. 이것은 절삭유제의 윤활, 반응착, 냉각 등의 작용에 따라서 구성날끝의 생성이 작게 되고 버니싱 효과가 크게 되기 때문이다.^[6]

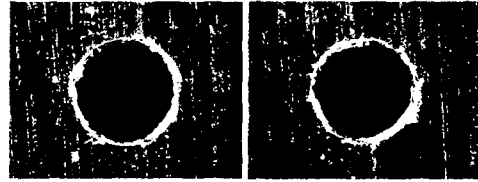
위에서 언급한 것처럼 본 실험에서도 절삭유제를 사용한 습식절삭이 건식절삭에 비해 가공면의 표면에서 일어나는 버어를 감소시켜 가공면 품위를 향상시켜 주는 것을 볼 수 있었다. 아래의 Photo. 3.1~3.4는 절삭유제의 사용유무에 따른 가공면의 형상을 보여 준다.



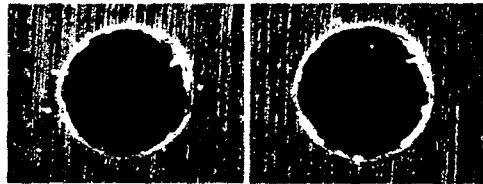
(a) Cutting oil supplied (b) Dried
Photo. 3.1 Comparison of micro deep hole form for a drill diameter of 0.2mm



(a) Cutting oil supplied (b) Dried
Photo. 3.2 Comparison of micro deep hole form for a drill diameter of 0.3mm



(a) Cutting oil supplied (b) Dried
Photo. 3.3 Comparison of micro deep hole form for a drill diameter of 0.4mm



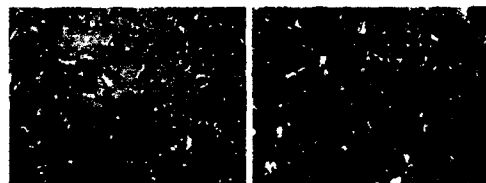
(a) Cutting oil supplied (b) Dried
Photo. 3.4 Comparison of micro deep hole form for a drill diameter of 0.5mm

4.3 칩의 형상 관찰

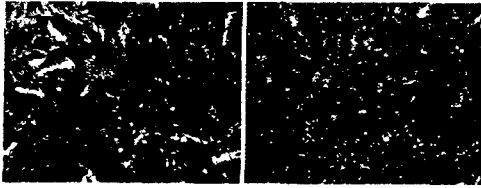
드릴 가공에 있어서는 칩배출이 상당히 중대한 문제로 부각이 된다. 칩의 막힘에 의해서 드릴 수명이 저하하기도 하고 가공면에 흠집을 내는 수도 있기 때문이다. 이러한 이유로 효과적인 칩배출을 하기 위해 가공방법과 절삭유제의 사용을 고려하게 된다. 본 실험에서도 절삭유제의 사용유무에 따라 칩형상이 뚜렷하게 구분 되어졌다.

Photo 4.1~4.4에서는 절삭유제를 사용한 습식절삭일 경우 유동형 칩을 볼 수 있으며 건식절삭인 경우 원활한 칩배출의 곤란으로 부서진 칩형상이 발생됨을 볼 수 있다.

Dia 0.2mm에서도 다른 공구에 비해 뚜렷하지는 않지만 절삭유제의 사용유무에 따른 칩형상이 구분되어짐을 볼 수 있다.

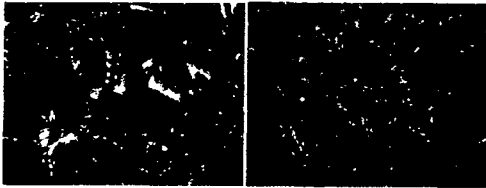


(a) Cutting oil supplied (b) Dried
Photo. 4.1 Comparison of chip form for a drill diameter of 0.2mm



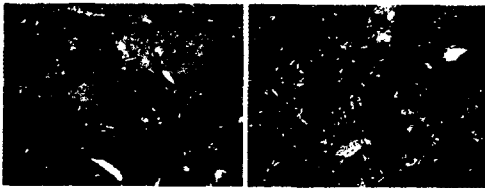
(a) Cutting oil supplied (b) Dried

Photo. 4.2 Comparison of chip form for a drill diameter of 0.3mm



(a) Cutting oil supplied (b) Dried

Photo. 4.3 Comparison of chip form for a drill diameter of 0.4mm



(a) Cutting oil supplied (b) Dried

Photo. 4.4 Comparison of chip form for a drill diameter of 0.5mm

5. 결론

1. 스텝이송에 의한 가공시 Normal force를 트러스트로 간주하고 Tangential force를 토오크로 유추하여 분석할 경우 각 이송구간마다 유사한 형태의 힘이 발생됨을 알수 있었으며 절삭유제를 사용한 습식절삭의 경우 건식절삭보다 미소하지만 적은 힘이 발생되는 것을 볼 수 있었다.

정확한 가공평가를 위해서는 주축에 설치하여 미소한 힘의 변위를 측정할 수 있는 센서가 개발되어야 할 것이다.

2. 절삭유제를 사용한 경우 윤활, 반응착, 냉각 등의 작용과 버니싱 효과에 의해 가공시 발생하는 버어를 전반적으로 감소시키는 것을 볼 수 있었다.

효과적인 절삭을 위해 스텝이송시 공구에 영향을 주지 않는 범위내에서 피삭재 구멍안으로 절삭유를 공급하는 방법을 모색해야 할 것이다.

3. 칩형상에서 절삭유제의 사용유무에 따른 형상을 뚜렷하게 볼 있었다. 절삭유제를 사용한 결과 대부분 유동형 칩이 배출 되었으며 사용하지 않은 경우 칩이 부서져서 배출되는 형상을 볼 수 있다.

칩의 부서져서 나오는 경우 공구의 수명과 가공면 품질에 영향을 줄 수 있으므로 고품위의 가공을 위해서는 가공조건에 따라 적절한 절삭유제를 사용하여 유동형 칩이 배출되도록 하는 것이 바람직하다.

6. 참고문헌

1. 이웅숙, "미세구멍가공용 드릴링머신 개발" 제 2회 정밀기술 심포지움, 한국기계연구원, pp.291~294, 1994
2. J.A. Mcgeough, Advanced Methods of Machining, London NewYork Chapman and Hall, 1988
3. 佐久間 外, "穴加功と穴加功用工具の設計", 大河出版(昭40), pp.23.
4. 이재경, 강재훈, "마이크로 드릴의 제작 및 가공성평가", 한국기계연구원보고서, pp.7~15, 1999
5. Iwata, K. , Moriwaki, T. "Basic Study of High speed Micro Deep Drilling" CIRP Annals. 1981
6. 姜求鳳, 黃榮東 共編, 最新 切削工具와 加工技術" 機電研究社, pp.296~306. 1987