

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 연구되었음

미소경 드릴링 머신의 개발과 절삭현상의 연구

백인환*, 정우섭**

A study on the Development of Micro Hole Drilling Machine and its Mechanism

In-Hwan Paik*, Woo-Seop Chung**

ABSTRACT

Micro Drills have found ever wider application. However micro drilling is a machining to integrate the difficult machinabilities such as tool stiffness, position control and revolution accuracy, and is known to cost and time consuming. So, this study aimed to practice ultra-miniature drilling(0.05 ϕ) with simple component, if possible. System is developed as the three modules : feed drives, spindle and monitoring part. The dynamics of measured current signals from the spindle of Micro Hole Drilling machine are investigated to establish the criteria of stepfeed mechanism. Cutting experiments identify the relationship of spindle rpm, feed rate and tool life. The smaller drill diameter is, the more suitable cutting condition have to be selected because of chip packing.

Key Words : Ultraminiature drilling, Micro Stepping Motor, Stepfeed Mechanism, Current Dynamics, Tool Life, Chip Packing

1. 서론

최근 메카트로닉스의 진보 과정에서 소형정밀부품의 수요가 증가함에 따라 미세부품의 제작기술에 대한 중요성이 점점 높아지고 있다. 미세구멍가공의 경우 미세영역에 대한 정의는 명확하지 않지만 대개 $\phi 1$ 전후를 소경, $\phi 0.4$ 이하를 미세경으로 정의하고 있으며, 가공

방법에는 드릴가공과 같은 기계적 가공 뿐만 아니라 방전, 레이저, 전자빔 가공으로 대표되는 고에너지 가공법을 들 수 있다.⁽¹⁾ 고에너지 가공법은 기계적 가공법에 비해 가공깊이 가공정도 상에 문제가 있으며 가공변질층의 발생이 쉽고 가공부의 전도성이 문제시되는 경우도 있다. 이에 비해 미세드릴가공은 공구강성 저하로 인해 쉽게 파손된다는 점은 있지만 가공정도가 양호하

* 부산대학교 생산기계공학과(정회원)

** 부산대학교 대학원 생산기계공학과(정회원)

고 어스펙트비가 높은 가공이 가능하며 생산성 및 가공 코스트 면에서 실용화가 가장 높은 분야이다. 이러한 특성으로 인해 국외에서는 미소경 드릴링 머신의 試作 및 절삭특성에 관한 연구에서부터^(6,7) 최근에는 미세드릴 가공의 토오크, 트러스트, 온도 등과 같은 제어인자의 센싱감도를 높이는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.^(8,9)

미세드릴가공은 스텝피드 메카니즘과 같은 가공법상의 특징, 공구강성 문제, 위치결정의 정도, 공구척킹의 정도의 요구 등과 같이 가공상의 난점이 집적해 있는 가공이며 다른 가공에 비해 시간과 비용이 걸리는 가공으로 인식되어 왔다. 그리하여 본 연구는 미세구멍 설계의 일반화를 추구하고 미세드릴가공 자동화에 대한 연구의 일환으로 미소경 드릴링 머신의 이송구동계, 주축계, 가공 시스템의 감시부를 개발하고 드릴파손을 최소화할 수 있는 절삭조건 등을 밝혀 미세드릴의 수명향상에 기여하고자 한다.

2. 미소경 드릴링 머신의 개발

미소경 드릴링 머신은 기계자체의 정밀도가 가공하는 구멍의 정밀도에 큰 영향을 미치기 때문에 일반 공작기계보다 신속하고 정확한 이송구동계가 필요하며 고속회전에서 안정한 주축계를 요구한다. 또한 미세드릴가공의 경우 초기에 적절한 절삭조건을 선택하여도 공구마모, 급속결정, 소결입자 크기 등에 의해 절삭상황이 급변하므로 초기 절삭조건에 전적으로 의존할 수 없고 가공 중 제어가 가능한 감시부를 필요로 한다. 이와 같이 이송구동계, 주축계, 과부하 검출장치의 조합으로 미세드릴가공의 특징적인 가공방법인 스텝피드 메카니즘을 구성할 수 있다. 과부하 검출장치에 의해 주축계의 미세드릴에 걸리는 과부하가 감지되면 이송구동계의 급속귀환에 의해 드릴은 자동적으로 후퇴하고 과부하의

원인인 칩의 배출과 절삭유의 공급을 행한 후 가공을 중단한 좌표까지 드릴을 복귀하여 가공을 재개할 수 있도록 한다. 가공에 필요한 절삭력은 아주 미세하므로 가공기의 전체구조보다는 주축계의 공구주변이나 공작물의 고정 등과 같이 국부적인 영역에서 강성이 문제시되는 경우가 많다. 그리하여 본 실험실에서 이미 試作 하였던 미소경 드릴링 머신에서 주축계, 이송구동계의 설계를 개선하여 가동부를 정밀가공하고 감시부의 센싱감도를 높혀 $\phi 0.05$, $\phi 0.1$ 과 같은 초미세 드릴가공을 시도하였다. 가공기의 특징은 Table 1과 같다.

2.1 이송구동계

가공기의 이송축은 진동발생을 억제하고 빈번한 스텝백 발생에 대처할 수 있도록 고강성 타입의 LM 가이드를 사용하여 직진안내를 구성하며 백래쉬가 거의 발생하지 않는 연삭 볼 스크류 및 더블 너트를 사용하여 회전운동을 상하직선 운동으로 변환하는 수직형 이송구동계로 개발하였다. 미소경 드릴링 머신의 이송기구 동력원으로는 초저속, 초미세, 저진동 운동이 요구되므로 0.0036°/스텝의 고분해능을 가진 5상 마이크로 스텝핑 모터를 사용하여 높은 위치결정 정도와 회전정도를 실현하였다. 제어방법은 범용의 콘트롤러를 사용할 수도 있지만 지령의 경로를 일원화 하고 앞으로 미세드릴가공의 적용제어로 연구를 확장하기 위해 PC를 사용하여 Fig. 1과 같이 이송축 모터의 속도제어를 한다.

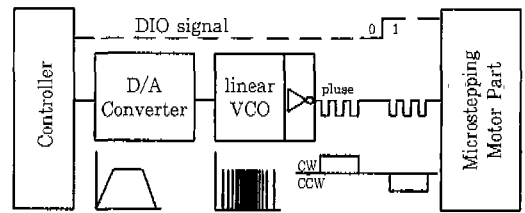


Fig. 1 Control of micro stepping motor

이 방법은 콘트롤러의 D/A 변환값으로 리니어 전압 제어 발전기의 듀티비를 조절하여 구동펄스를 안정적으로 발생시키므로 급속이송, 절삭이송에 적당한 이송구동펄스의 조절이 용이하다.

2.2 주축계

미세가공기에 있어서 주축계는 이송구동계와 함께 가

Table 1 Specification of Micro Hole Drilling M/C

Machine type	Vertical type
Drilling capacity	0.05 - 1 mm
Z axis stroke	90
Z axis motor resolution	0.05 μ m/pulse
Feed rate range	0 - 175 mm/min
Spindle RPM	0 - 15000
Machine size	250 \times 380 \times 590

공성능을 지배하는 가장 중요한 구성요소이다. 미세드릴가공에서 가공물체의 진원도 오차는 주축의 회전정도에 의해 영향을 받으며 특히 $\phi 0.1$ 이하 가공의 경우 주축의 회전정도는 가공오차, 파손, 수명 등에 지배적인 영향을 미친다. 그리하여 주축계는 모든 비대칭 요소를 제거하여 가능한 간단하게 구성함으로써 진동발생을 억제하였고, 정밀급 가공이 가능한 주축전용 소형베어링을 사용하여 드릴장착시 회전오차를 억제함과 동시에 주축의 원활한 고속회전도 가능하게 하였다.

열변위에 대한 대책으로서 주축과 주축용 모터의 직결, 미세한 절삭력에 대처할 수 있는 적절한 소형베어링의 선정 등과 같이 우선은 열발생을 억제하는 구조로 설계하였으며, 이미 발생한 열을 빨리 스펀들 밖으로 방출할 수 있도록 상부에 팬모터를 설치하였다.

스핀들 모터의 조립도는 Fig. 2와 같으며 광센서를 설치하여 주축의 속도제어 및 주축변화에 의한 감시를 가능하게 하였다.

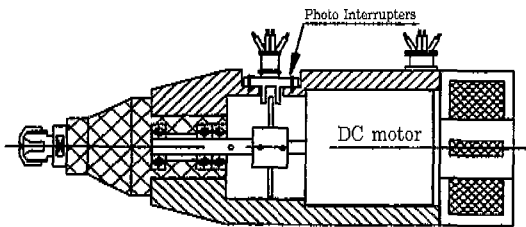


Fig. 2 Spindle structure

2.3 과부하 검출장치

최근 기계가공의 자동화 무인화 요구에 대응하기 위해 가공상태를 감시하여 이상을 판정하는 다종다양의 센서 시스템이 개발되고 있다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 이들 중 절삭중의 주축용 모터의 전류값을 측정하여 부하상승으로부터 공구 이상을 판정하거나 이송속도를 제어하는 시스템이 많이 제시되고 있다.⁽¹⁰⁾ 이 방법은 주축계의 강성저하를 초래하지 않고 또한 실용적인 방법이지만 일반적인 공작기계에서 감지 가능한 범위를 금속드릴가공의 경우 대략 $\phi 6$ 정도로 한정하고 있다.⁽¹⁰⁾

이에 대한 대책으로써 스펀들 모터 설계단계에서 미세 가공에 필요한 적정모터의 선정은 효과적인 미세부하의 감지를 가능하게 하여 가공개시전에 표준전류치를 설정하고 가공중에 표준이상치의 저하를 검출할 수 있

도록 한다. 본 연구에서는 응답성이 높고 직선성이 양호한 홀소자를 이용하여 전류자계의 강도를 전압으로 변환하여 감시시스템을 구축하였으며 그 원리를 Fig. 3에 나타내었다.

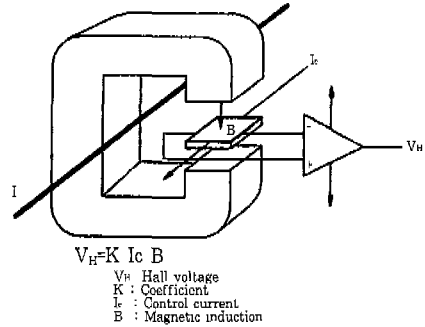


Fig. 3 Principle of current sensor

2.4 시스템 제어 및 성능 장치

이상을 기초로 한 가공기 전체 제어 시스템을 Fig. 4에 제시하였다. 스테핑 모터의 사용시는 대개 오픈루프제어를 사용하지만 빈번한 스텝백 발생에 의한 공구 복귀위치 오차를 최소화하기 위해 공구위치를 볼 스크류의 회전각도로부터 검출하는 세미 클로우즈드 제어를 병행하고 있다.

미세가공기의 성능평가는 요구정도의 미소화로 인해 고분해능의 측정기를 필요로 하며 측정자체도 용이하지 않으므로 본 연구는 초미세 드릴가공 후 가공물체에 전사된 상태를 주사형 전자현미경으로 측정하여 주축의 회전정밀도를 평가하고 주축용 모터의 전류변화를 측정하여 드릴에 걸리는 부하감시의 가능성을 제시하고자 하였다.

Fig. 5은 초미세 드릴가공시 가공물체에 전사된 형태를 디지털 주사형 전자현미경으로 촬영한 것이며, Fig. 6은 $\phi 0.2$ 로 드릴가공시 마모가 진행함에 따라 증가하는 전류신호를 20Hz 버트워스 형 로패스 필터에 의해 필터링한 후 이동평균한 파형으로써 드릴가공상태를 잘 판단할 수 있는 토오크의 변동을 간접적으로 제시하고 있다.

3. 미세드릴가공의 절삭현상

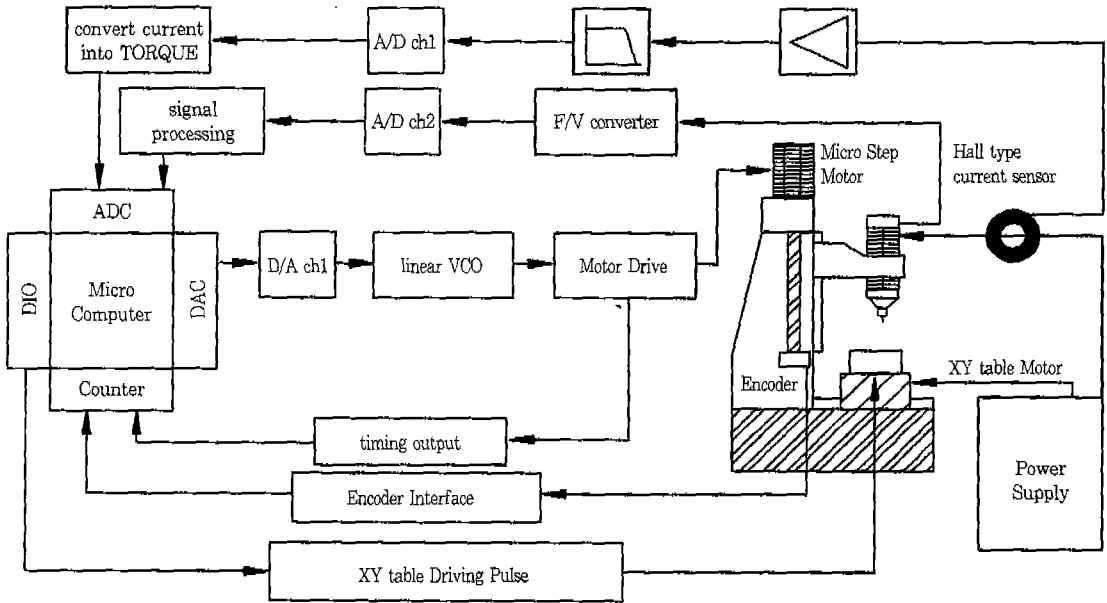


Fig. 4 Control system of Micro Hole Drilling M/C

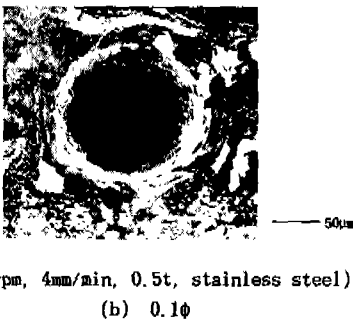
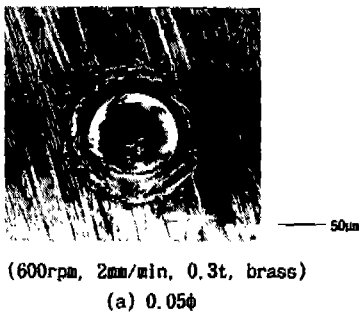


Fig. 5 SEM photographs of ultraminiature hole

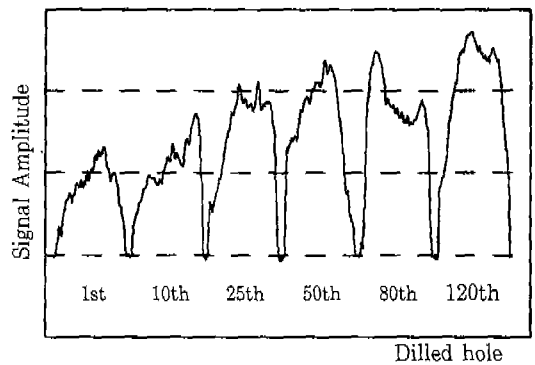


Fig. 6 Current signal dynamics

난삭가공이라 하면 일반적으로 가공물의 높은 경도, 난이한 형태의 가공물 구조, 가공깊이가 깊고 고정도를 요구하는 경우들을 난삭가공에 포함시킬 수 있으며, 높은 경도의 재질에 미세드릴가공을 실현하는 것은 난삭가공에서도 가장 어려운 가공 중의 하나이다. 이러한 미세드릴가공의 유연한 사용을 위하여 이송속도, 주축회전수와 공구수명의 관계에 관한 실험과 동시에 수명실험 과정에서 발생하는 칩의 형태, 공구파손 형태로부터 미세드릴의 파손원인을 규명하고자 하였다.

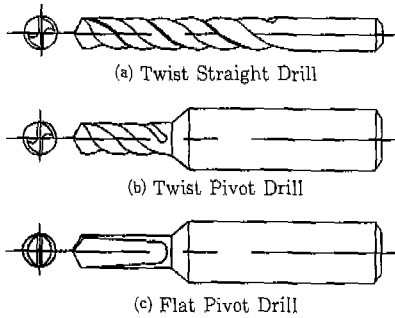


Fig. 7 Various shapes of drill

Fig. 7은 미세드릴의 종류를 나타낸 것으로 스트레이트 드릴은 깊은 구멍가공이 가능하지만 레이디얼 강성이 낮아지기 때문에 $\phi 0.2$ 정도가 한계이며 드릴직경이 더 미세하여 질수록 인선부에 비해 생크부 직경이 큰 피벗형 드릴을 사용하는 것이 유리하다. 실험에서는 수명 및 칩배출성이 우수한 HSS 트위스트 피벗형 드릴을 사용하였다.

미세드릴의 파손은 칩배출의 상태에 의존하므로 칩발생 형태와 관련있는 이송속도와 주축회전수를 변화시키면서 적절한 칩생성과 양호한 공구수명을 나타내는 가공영역을 탐색하였다. 수명실험은 스테인레스 강을 대상으로 하여 다른 절삭조건을 동일상태로 두고 각각 3회씩 실시하여 평균을 취하였으며 그 결과는 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

공구수명은 이송속도가 미세해 질수록 계속 증가한 후 5mm/min을 정점으로 다시 감소하고 있다. 이 원인은 이송속도가 너무 느리면 칩이 미세하게 파쇄되어 절

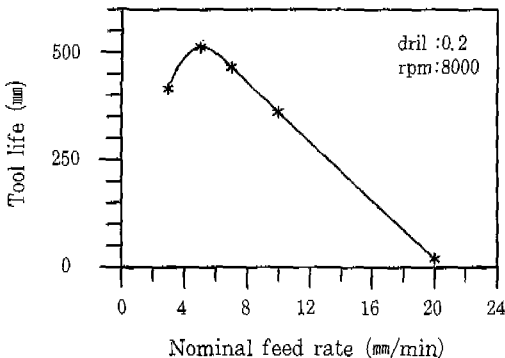


Fig. 8 Relationship of tool life and feed rate

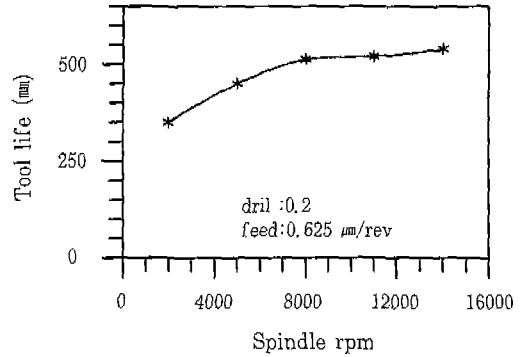


Fig. 9 Relationship of tool life and spindle rpm

삭중에 칩이 배출되지 않고 홈에 막히는 칩막힘 현상으로 인해 공구수명의 저하를 유발하는 듯하다. 주축회전수와 공구수명의 관계는 주축회전수의 증가에 따라 공구수명은 오히려 완만히 증가함을 보이고 있다. 드릴이 더 미세해질수록 칩이 배출되는 홈은 작아지므로 칩막힘 현상은 더욱 심화되며 이에 대응하여 적절한 이송속도의 선정 및 낮은 주축회전수에서의 안정한 가공이 필요로 하며 또한 새로운 형태의 드릴의 개발이 요구되고

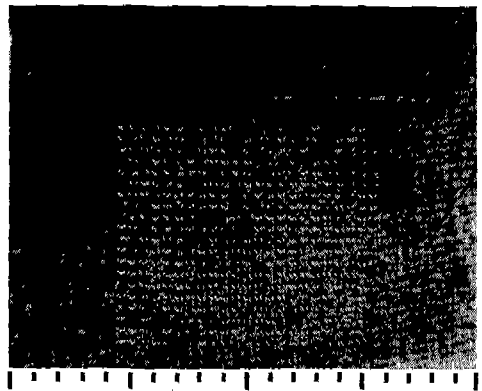


Fig. 10 Cutting example and micro drill (drill 0.2 φ, stainless steel)

있다.

Fig. 10은 이러한 적정조건에 의해 450개의 드릴가공이 이루어진 1.2t의 스테인레스 시편과 0.2φ 마이크로 드릴을 나타낸 것이고 Fig. 11은 마모가 진행됨에 따라 버어의 발생 등에 의해 가공 정도가 악화되는 과

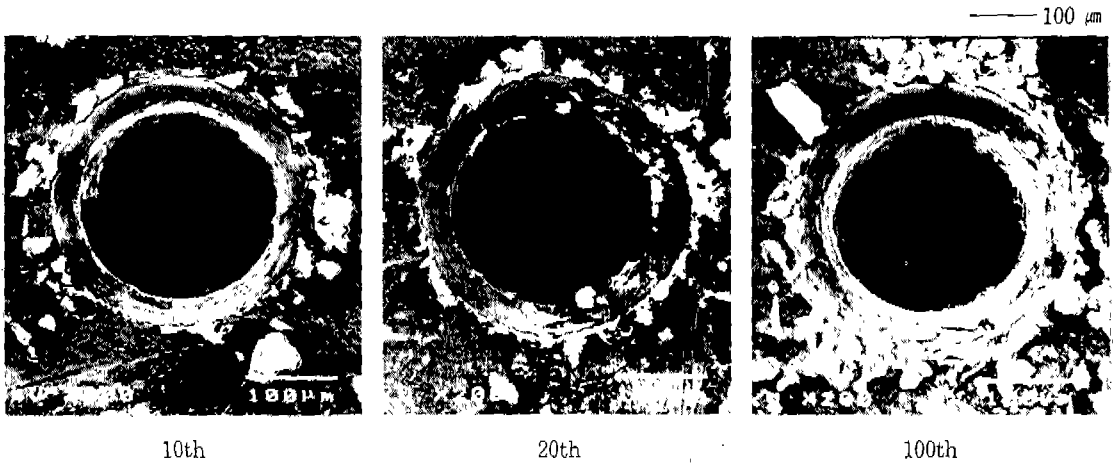


Fig. 11 SEM photographs of drilled hold

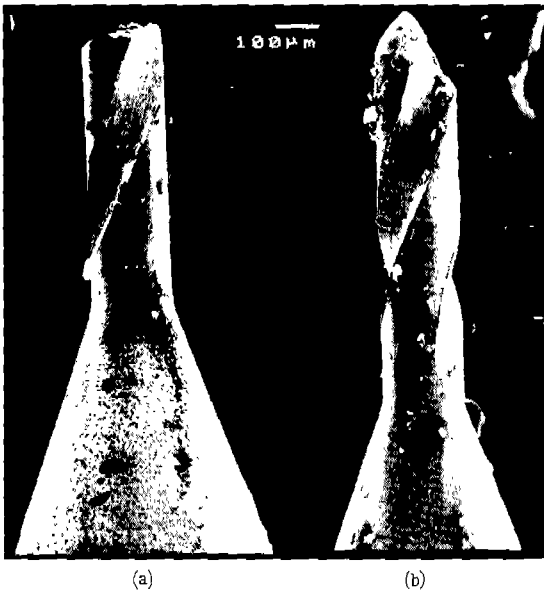


Fig. 12 Fracture shape of micro drill

정을 보인 것이다.

Fig. 12는 미세드릴의 파손형태를 나타낸 것으로 각각 드릴중심선에서 $\pi/2$, $\pi/4$ 로 파손된 것으로 보아 파손원인이 각각 굽힘과 토크의 영향임을 짐작할 수 있다. 이러한 파손형태는 가공물 입자의 불규칙성, 드릴파손시의 칩상태 등에 의해 절삭조건에 상관없이 불규칙하게 발생하였고, Fig. 8, 9의 실험에 있어서는

(a) 형태의 파손이 70% 정도로 우세하게 발생하였다. 이러한 파손형태에 근거한다면 미세드릴가공의 적절한 제어방법을 구축하기 위해서는 트러스트, 토크 양자를 동시에 검출할 수 있는 새로운 형태의 감시 시스템이 요구되며 아울러 미세드릴가공의 적응제어방법도 기대되고 있다.

4. 결 론

본 연구는 미소경 드릴링 머신의 개발을 통하여 최소 0.05mm의 구멍뚫기와 높은 어스펙트비의 가공을 실현하였으며 아울러 가공현상 및 공구수명 관점에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 적절한 스펀들의 설계에 의해 이상전류값으로 부터 미세드릴의 과부하를 감지할 수 있었다.
- 2) 미세드릴가공의 적정 이송속도 및 주축회전수 영역을 확인할 수 있었다.
- 3) 드릴직경이 미세해질수록 칩막힘을 방지할 수 있는 적절한 절삭조건 선택이 필수적이다.

참고문헌

1. 백인환 외 2인, "미소경 드릴링 머신의 試作과 절삭현상의 연구", 韓國精密工學會 93년도 春季學術大會 抄錄集, pp. 66-70
2. 백인환 외 1인, "미소경 드릴링 머신의 성능개선과

- 미세드릴 가공조건 선정에 관한 연구”, 韓國精密工學會 93년도 春季學術大會 論文集, pp. 66-70
3. 菅原章, “小徑ドリルによる精密穴加工”, 機械の研究, 第37卷, 第3號, pp. 371-376, 1985
 4. 岩田一明, “高速微小深穴ドリル加工の基礎的研究”, 精密機械, 第49卷, 第2號, pp. 98-104, 1983
 5. 大久保修, “微小徑ドリルの折損原因の究明と折損豫知に関する研究”, 日本機械學會論文集 第51卷, 第471號, pp. 2929-2935, 1985
 6. 菅原章, “A Few Effects on the Formation of Burr in Micro Drilling”, 精密機械, 第48卷, 第3號, pp. 43-49, 1982
 7. 金浴保彦, “多層プリント配線板用高精度小徑穴あけ機の開發”, 精密機械學術誌, 第54卷, 第12號, pp. 47-51, 1988
 8. T. Nagao, “Investigation into Drilling Laminated Printed Circuit Board Using a Torque Thrust temperature sensor”, CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 79~82, 1988
 9. 中尾政之, “微小徑ドリル用トルク, スラストセンサの開發”, 1993 日本精密工學會 秋季學術大會
 10. M. A. Mannan, “Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements”, CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 350, 1989
 11. W. Koing, “TOOL MONITORING OF SMALL DRILLS WITH ACOUSTIC EMISSION”, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 32, No. 4, pp. 487-493, 1992
 12. “微細小徑深穴加工技術をいま考之る”, 機械技術, 第34卷, 第6號, pp. 34-38, 1986
 13. “超硬ドリルによる微細小徑深穴加工”, 機械技術, 第34卷, 第6號, pp. 39-44, 1986
 14. “穴加工の最新動向を深る”, 機械技術, 第37卷, 第8號, pp. 21-71, 1989
 15. Peter Muller, “Flexible Usage of Micro Drills”, European Production Engineering 16, pp. 79~81, 1992.
 16. 이징구, 기계가공 계측기술, 機電研究社, pp. 13-55, 1990
 17. Joseph Pusztai, COMPUTER NUMERICAL CONTROL, A Prentice-hall company, pp. 57~64, 1983