

생산성을 증시한 초경합금 소재 마이크로 드릴의 최적 형상설계

김건희*

(논문접수일 2003. 10. 8, 심사완료일 2004. 5. 19)

Optimum Shape Design of Cemented Carbide Micro-drill in Consideration of Productivity

Gunhoi KIM*

Abstract

Recently reduction of industrial products in size and weight has been increased by application of micro-drills in gadgets of high precision and a great interest of a micro-drilling has been raised. Due to the lack of tool stiffness and the chip packing, the micro-drilling requires not only the robust tool structure which has not affected by vibration but also effective drilling methods designed to prevent tool fracture from cutting troubles.

This paper presents an optimum design shape of a 0.15 mm micro-drill associated with a new manufacturing process to improve the production rate and to lengthen the tool life and suggestions on the micro-drilling characteristic properties associated with the tool life and workpiece quality.

Key Words : Micro-drill(마이크로 드릴), Optimum design(최적설계), Productivity(생산성), Cemented carbides material(초경합금 소재), Tool life(공구수명), Workpiece quality(가공품위), Finite element method(유한 요소법)

1. 서론

드릴가공은 기계가공 기술 중 가장 기본적인 가공방식의 하나로 생산성 향상의 측면에서 점차 고속화되어 가고 있고, 전자제품 등의 고기능화, 다양화, 소형화 등의 추세에 대응하기 위해 드릴작업의 미세화 및 심공화의 요구가 증대되고 있다. 특히 최근의 첨단의료 장비나 소형소자의 신소재 개발로 nano-micrometre 정도의 드릴가공이 요구되고, 이들 소자가공을 위한 마이크로 드릴의 개발 및 새로운

소재에 대한 가공성의 평가가 시급하다. 특히 점차 국내 산업도 첨단의료기, 컴퓨터 회로기판에 요구되는 VLSI 집적도 향상에 따른 관통구멍의 미세화, 신수지 개발, 회로판의 고밀도 다층화 배선, 고도의 기능을 집적시킨 소형부품 개발을 위한 마이크로 가공기술의 중요성이 날로 증가하고 있다⁽¹⁾.

현재는 초경합금을 미립자하여 인성을 증대시킨 마이크로 드릴이 개발되어 있으나 이 또한 고속절삭용으로는 많은 문제점이 대두되고 있다⁽²⁾. 또한 내열을 고려하여 드릴

* 전주대학교 공학부 (gunhoi@jj.ac.kr)
주소: 560-731 전라북도 전주시 완산구 효자3가 1200번지

공구에 TiC, TaC 등을 첨가한 복합공구 등이 개발되고 있고, 그 밖에 초경합금제의 드릴 선단부에 소결 다이아몬드를 접합한 복합드릴, 드릴의 선단부에 다이아몬드를 코팅한 미세드릴 등이 개발되고 있다. 다이아몬드를 이용하면 경도와 열전도성이 매우 우수하여 절삭성이 좋고, 내마모성이 좋아 초경합금제 드릴보다 수십~수백 배의 수명 및 고정도 가공이 가능한 것으로 실험결과가 보고되고 있으나 공구 제작이 매우 어려운 난점으로 되어 있다^(3,4).

본 연구는 마이크로 드릴 중 초경합금 소재를 대상으로 직경 0.15mm 이하의 마이크로 드릴의 개발을 위한 기본적 설계를 하고, 기본설계를 바탕으로 시제작한 마이크로 드릴을 이용하여, 기초실험을 하였다. 실험을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 기초형상 설계를 보완·수정하여 최적 형상을 결정하였다. 0.15mm 초경합금 소재의 마이크로 드릴의 최적설계에 있어 드릴의 강성분석은 유한요소법(FEM)을 적용하였으며, 각 요소의 형상설계 및 전체 형상설계는 3차원 모델링에 의한 시뮬레이션을 기초로 하였다. 또한 최적형상설계에 있어서는 고속회전용 공구로써 공구수명과 가공품질(진원도, 진직도)를 중점으로 한 생산성을 중시한 설계를 하였다. 또한 본 설계를 바탕으로 제작한 마이크로 드릴의 성능평가를 위한 실험을 통해 마이크로 드릴의 기초적 가공기술을 확립하였다.

2. 생산성을 중시한 마이크로 드릴의 형상설계

2.1 최적설계를 위한 영향인자 구성

본 연구에서는 생산성을 중시한 0.15mm이하 마이크로 드릴의 최적 형상설계를 하였다. 초경합금(cemented carbides)은 금속의 탄화물 분말을 소성하여 만든 로크웰 경도 HRC 70~80 정도의 합금이다. 일반적으로 사용하는 초경공구는 Co(코발트)와 W(텅스텐) 입자를 소결한 것이다. 이와 같은 마이크로 드릴용 초경공구의 선정에 있어서는 경도, 항절력, 인성, 입자크기, 밀도 등의 물리적 특성을 고려하였다. 또한 동일한 소재의 경우에 있어서는 미립자의 크기에 따라 드릴의 강성과 성능을 크게 좌우하게 된다. Fig. 1은 마이크로 드릴의 설계상에 고려해야 할 주요 요소이다.

Fig. 1에서 A, B는 절삭 날 길이로 A와 B의 길이의 차에 따라 갭, 오버 랩, 홈 위치에 영향을 갖는 중요한 영향인자이며, C는 웹 두께로 드릴 강성에 영향을 주며, D, E는 절삭 날 폭으로 D와 E의 폭의 차에 따라 강성과 고속회전시 떨림 현상에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 또한 F는 레

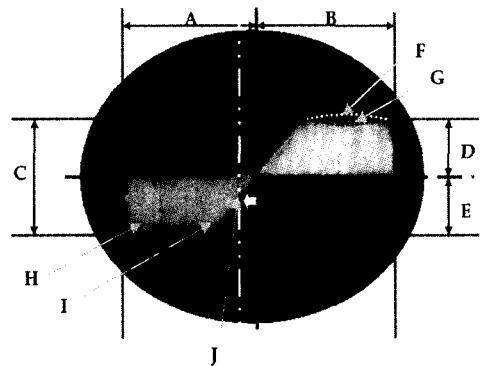


Fig. 1 Influence components of micro-drill

이 백으로 칩 뭉텅에 영향을 주며, G는 흑으로 강성에 다소 영향을 미치고, H는 테이퍼로 칩핑과 강성에 영향을 미친다. 그밖에 I는 플레어로 강성과 G에 영향을 미치며, J는 웹 엇으로 가공 센터링에 직접적인 영향을 미친다. 또한 초경 마이크로 드릴은 강 또는 난삭재 가공에서는 사용이 곤란하였으나 최근에는 웹두께와 플레어 강성, 선단각의 보완에 의하여 강과 난삭재 등의 사용이 가능하게 되었다.

고속회전과 더불어 공작기계의 고강성 및 고정도가 요구되고, 파손의 우려를 감안하여 구폭비를 적게 하며, 파손 및 칩핑이 발생할 가능성 등을 고려한 설계가 필요하다. 따라서 본 연구의 초경합금 마이크로 드릴용 미립자의 크기는 경도, 항절력, 인성, 입자크기, 밀도 등의 물리적 특성에 우수한 0.6 μ m이하의 미세 분말을 마이크로 드릴용 공구로 선정하였다.

2.2 FEM 분석에 의한 강성 최적설계

생산성을 중시한 마이크로 드릴의 최적설계를 위하여 직경 0.15mm 마이크로 드릴의 초경합금 소재에 대하여 드릴에지 형상을 단순화한 2차원해석과 3차원 형상을 상정한 솔리드 모델에 대하여 유한요소법(FEM)에 의한 강도해석을 실시하고, 본 논문에는 상용해석 프로그램인 MARC에 의한 2차원 해석 결과만을 나타내었다. 이는 마이크로 드릴의 기계적 강성을 분석함으로써 가공 중에 발생하는 마이크로 드릴의 절손을 억제하고, 공구수명을 극대화하기 위한 것으로 WC와 Co가 주성분인 초경합금 소재를 선정하였다. 소재의 탄성계수는 40,000kgf/mm², 포아송 비(poisson ratio)는 0.31이다. 2차원해석은 드릴에지의 형상만을 단순화하

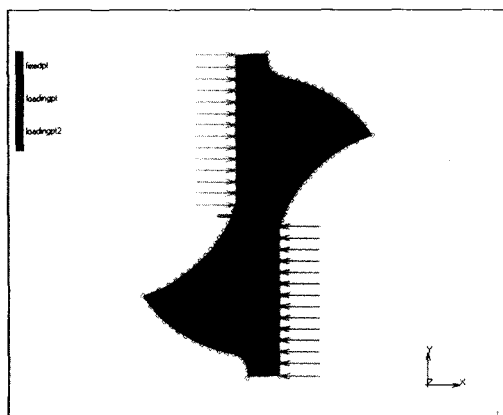


Fig. 2 2-D model for analysis of microdrill by FEM

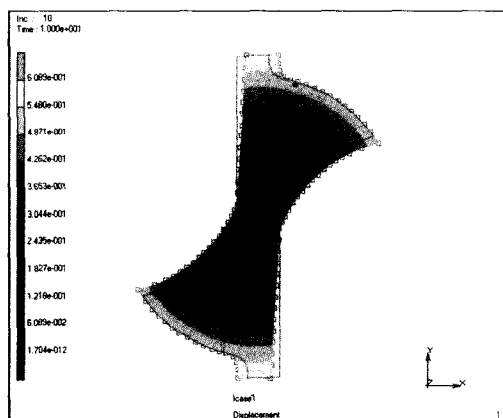


Fig. 3 Result of FEM analysis of deformation

여 정적인 해석을 실시하였으며, 해석을 위한 경계조건으로는 드릴의 선단부에 해당하는 중심부를 x, y축 방향으로 고정하고 절삭날 부분에 등분포하중이 작용하는 것으로 가정하여 x축 방향으로 단위하중을 작용시켰다. 2D 해석을 위하여 드릴 선단부의 메쉬 분할 및 경계조건을 Fig. 2에 나타냈다.

또한 Fig. 3은 드릴 선단부에 등분포 하중이 작용하는 것으로 상정하여 2D해석 결과로 선단부의 변형(deformation)을 나타내고 있다. 위와 같이 마이크로 드릴의 가공 중에 걸리는 부하에 따른 변형은 선단부 중앙에서 최대가 됨을 알 수 있다. 이는 중앙부가 가장 큰 부하가 걸림을 나타낸다. 2D해석결과는 무차원으로 응력해석을 하였으며, 응력분포를 보면 Fig. 4와 같이 선단부의 안쪽 끝인 노란색 부분이

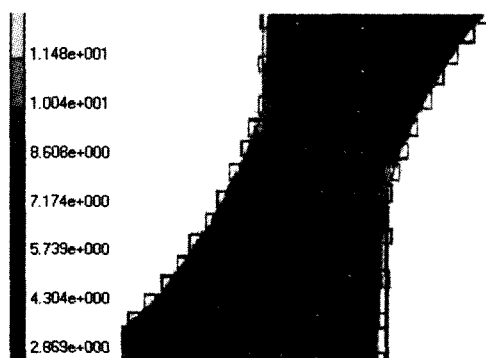


Fig. 4 Result of FEM analysis

로 1.004e+001에서 1.148e+001정도로 양단에 비하여 3~4배 정도 전단응력이 가장 크게 발생하여 가장 취약한 강성이 됨을 알 수 있다. 즉 이 부분에서 마이크로 드릴의 강성이 가장 취약하며, 3D해석 결과 강성은 샹크부(shank part)와 몸체부(body part)와의 경계부분인 테이퍼 시작점에서 취약함을 알 수 있었다. 즉 이는 직경 0.15mm 마이크로 드릴의 설계 시에는 선단부, 샹크부와 몸체부와의 경계부분인 테이퍼 시작점을 중점으로 고려하는 설계가 요구된다.

3. 마이크로 드릴의 형상 결정

생산성을 증진한 초경합금 소재의 마이크로 드릴에 대한 전체형상은 기본적으로 기존의 공작기계의 공구부착 장치 등을 고려한 유연성 있는 설계가 필요하다^(5,6).

마이크로 드릴의 가공성과 수명에 관계되는 요소 중에 치즐 각(chisel angle), 선단 각(point angle), 비틀림 각(helix angle), 웹 두께(web thickness), 마진 폭(margin width), 플루트 폭(flute width), 티닝(tinning) 등이 주요 요소이다. 그 밖에 전체 길이(overall length), 샹크 직경(shank diameter), 몸체 길이(body length), 플루트 길이(flute length), 언더 컷(undercut) 등이다. 이들 요소 중, 드릴 생산성 및 수명에 중요한 영향을 미치는 영향인자로는 비틀림 각, 플루트 길이, 선단 각, 웹 두께, 언더 컷 등이다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 효율적인 설계를 위하여 3차원 모델링에 의한 단면부(Fig. 5), 선단부(Fig. 6)의 각각에 대하여 형상 설계하였다.

설계 절차는 우선 가상공간에서 설계한 다음 3차원 시뮬레이션에 의해 형상검증을 하였다. 그 다음 프로그램 상에서 가공된 마이크로 드릴의 형상은 초기 설계목적에 부합되

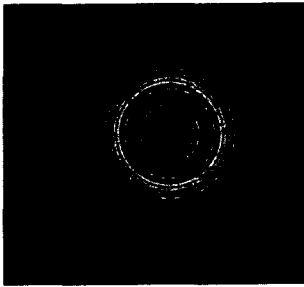


Fig. 5 Design of 3D-solid modeling of cross section

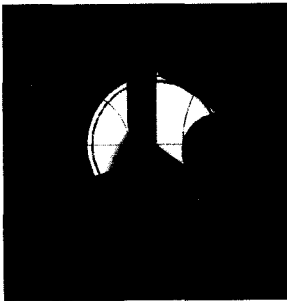


Fig. 6 Design of 3D-solid modeling of point

는지 검토한 후, 마이크로 드릴의 제작공정 중에 공구 형상에 대한 검토작업을 병행하였다.

기본적 설계를 바탕으로 제작한 0.15mm 마이크로 드릴에 대한 실험결과, 드릴 선단부의 마진(margin)을 두는 것은 오히려 선단부의 마모를 촉진시키는 결과를 초래하였다. 그밖에 마이크로 드릴의 티닝부는 X-type 형상으로 설계하였다. 그 이유는 마이크로 드릴에 있어서는 드릴경이 매우 작기 때문에 S-type와 N-type는 실제적으로 제작하기 어렵고, W-type는 실험결과 선단부의 강성이 취약하여 쉽게 마모를 초래하였다. 또한 드릴의 선단부의 경사 각 $\alpha=12\sim15^\circ$, 전단 각 $\beta=120\sim125^\circ$, 비틀림 각 $\nu=30\sim35^\circ$ 로 결정하였다. 경사 각 $\alpha=12\sim15^\circ$ 와 전단 각 $\beta=120\sim125^\circ$ 는 일반적인 드릴에 비해서 크게 결정하였는데, 그 이유는 드릴선단이 매우 작기 때문에 충분한 강성을 유지할 수 있기 위함이며, 비틀림 각 $\nu=30\sim35^\circ$ 로 설정한 이유는 드릴의 절삭성을 최대한 극대화하기 위함이다.

4. 마이크로 드릴의 요소별 최적설계

4.1 비틀림 각의 최적설계

마이크로 드릴의 비틀림 각(helix angle)은 드릴 외주부의 경사각 역할을 하며, 비틀림 각을 크게 하면 절삭성이 향상되어 저항력은 감소되나 칩 배출은 역으로 나빠진다. 또한 마이크로 드릴 강성의 저하로 인한 진동발생의 원인이 된다. 따라서 금속가공용 마이크로 드릴의 생산성과 공구수명을 극대화하기 위해서는 공작물의 재질에 따라서 비틀림 각의 크기를 변형할 필요가 있다.

Fig. 7은 마이크로 드릴의 언더 컷(under-cut)으로 설계한 것과 언더 컷을 두지 않고 설계한 것에 대한 비틀림 각에 따른 공구수명의 관계를 나타내고 있다. 위의 결과와 같이 공구수명은 언더 컷이 있는 것은 비틀림 각이 35° 까지는 증가하나, 그 이상이 되면 오히려 감소되고, 언더 컷이 없는 것은 30° 까지는 증가하나, 그 이상이 되면 오히려 감소된다. 이는 마이크로 드릴의 설계에 있어서 양쪽 모두 35° 부근의 값으로 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 한편 Fig. 8과 같이 진원도의 경우에는 $25^\circ\sim35^\circ$ 범위에서 가장 적은 진원도 오차를 나타냈다. 따라서 비틀림 각의 사용범위는 $30^\circ\sim35^\circ$ 가 적당하나, 생산성을 중시하는 경우는 공작물의 종류에 따라서 마이크로 드릴의 비틀림 각을 변경할 필요가 있다. 즉 연한 공작물 가공에는 비틀림 각이 클 경우, 진동과 칩핑이 발생하게 되어 마이크로 드릴의 수명이 저하되는 반면, 칩의 변형폭이 적게되어 상대적으로 열 발생이 적어 마이크로 드릴의 수명이 연장된다.

또한 절삭저항이 적고 절삭성에 중점을 두는 알루미늄 가공 및 절삭온도에 의해 가공정확도를 동반하는 스테인레스강과 내열강 등에는 비틀림 각을 크게 하는 것이 바람직하다.

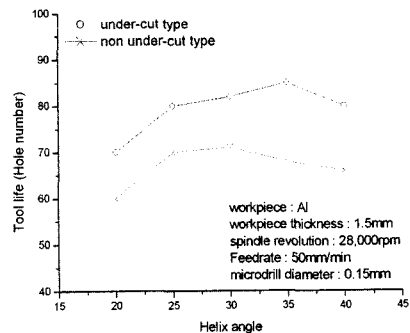


Fig. 7 Tool life variation according to helix angle

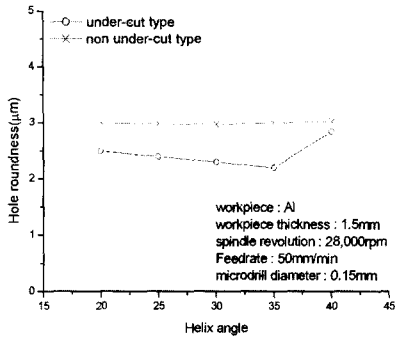


Fig. 8 Hole roundness error variation according to helix angle

칩 배출성이 떨어지면 구멍의 가공정도도 나빠지며, 또한 가공부하가 크게 발생하여 마이크로 드릴의 수명을 단축시키게 된다.

4.2 플루트 길이(flute length)의 설계

플루트(flute)는 비틀림 각과 선단 각에 의해 절삭날의 경사각을 구성하고, 마이크로 드릴의 성능을 결정짓는다. 또한 칩 배출의 통로이며 절삭유의 유입통로이다. 플루트의 길이가 너무 길면 마이크로 드릴의 강성이 저하되어 가공초기의 센터링(centering)이 부정확하게 된다. 따라서 가공 구멍의 정도가 저하되어 구멍직경이 커진다.

플루트 길이에 대한 마이크로 드릴의 강성은 플루트 길이가 길수록 마이크로 드릴의 강성은 약해진다. 그러나 마이크로 드릴의 강성을 크게 하기 위해서 플루트 길이를 짧게 할 수 없으므로 가공품의 두께에 최대강성을 갖는 플루트 길이를 설계한다. Fig. 8은 플루트 길이에 따른 마이크로 드릴의 수명을 나타내고 있다. 플루트 길이가 길면 마이크로 드릴의 강성은 저하되어 마이크로 드릴의 수명이 짧아진다. 또한 Fig. 9는 언더 컷이 있는 경우에 대하여, 플루트 길이가 길수록 마이크로 드릴의 센터링에 대한 정확도가 매우 저하됨을 알 수 있다. 이는 마이크로 드릴 작업시에 위치정도의 부정확을 초래할 뿐만아니라 진원도 및 진직도에 나쁜 영향을 미치게 된다.

또한 Fig. 10은 플루트 길이에 따른 진직도(straightness), Fig. 11은 진원도(roundness)에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 위의 결과에서 알 수 있듯이 마이크로 드릴의 언더 컷(under-cut)으로 설계한 것과 언더 컷을 두지 않고 설계한

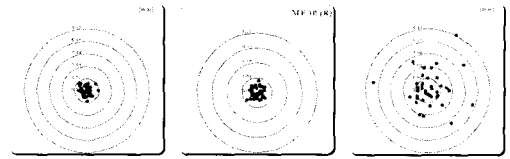


Fig. 9 Centering accuracy according to flute length of 2mm(left), 4mm(center), 8mm(right)

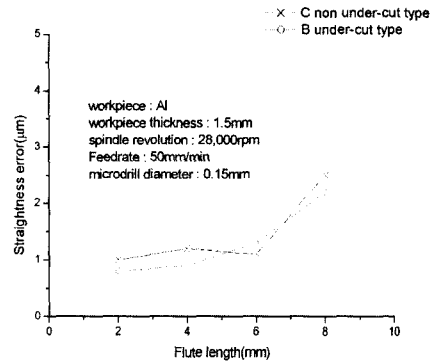


Fig. 10 Relationship between tool life and flute length

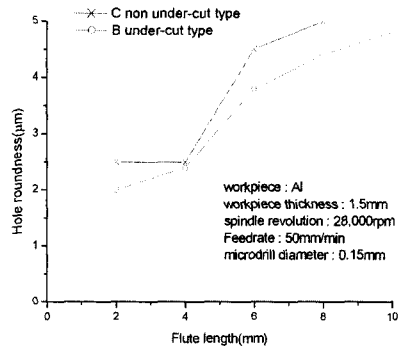


Fig. 11 Roundness and straightness error variation according to flute length

것 모두 플루트 길이에 따라 진직도와 진원도에는 많은 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 즉 플루트 길이가 길수록 가공 시작 시에는 센터링이 부정확하게 되어 진원도가 나빠지고, 가공 중에는 강성의 저하에 의하여 진동발생의 원인이 되어 진직도가 저하된다.

4.3 선단 각(Point angle)과 절삭저항을 고려한 설계

선단 각은 절삭성능에 영향을 주며, 공작물의 종류에 따라 일반적으로 118°~140°가 권장되나 표준 값으로 118°가 추천되고 있다. 선단 각이 지나치게 작게 되면 절삭날의 길이가 길어져 칩의 형태가 얇게 되어 단위당 절삭저항은 증대하게 된다.

Fig. 12는 선단 각에 따른 추력(thrust)과 토크(torque)와의 관계를 나타내고 있다. Fig. 13과 같이 선단 각이 작을수록 추력은 감소되지만 반대로 토크는 증가하고, 가공 후에는 버의 발생이 증가되게 된다. 반대로 선단 각이 클수록 추력은 증가하지만 토크는 감소하게 되어 가공 후에 구멍직경이 확대되나, 오히려 버(burr)의 발생은 억제되어 공구수명은 증가한다. 그러나 선단 각이 한계 이상이 되면 절삭성이 악화되어 가공부하를 증대시켜 가공품위를 저하시키는 결과를 초래한다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 0.15mm 이하 마이크로 드릴에 대한 선단 각의 선정은 토크와 트러스트와의 관계, 버의 발생관계등을 고려하여 118°~130°로 결정하였으며, 이는 대체적으로 절삭성능 및 가공품위 등에 만족할 만한 결과를 얻었다.

4.4 웹 두께(Web thickness)와 드릴 강성을 고려한 설계

마이크로 드릴의 웹부는 마이크로 드릴의 축심부를 형성하는 부분으로 절삭성과 강성을 고려한 설계에 중점을 두고 분석하였다. 웹 두께는 마이크로 드릴의 중심부의 두께로서 축심부를 형성하며 마이크로 드릴의 강성이 결정된다. 일반적

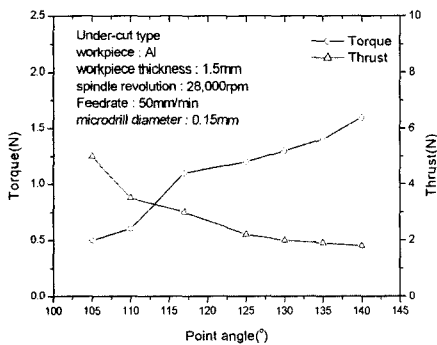


Fig. 12 Thrust and torque variation according to point angle

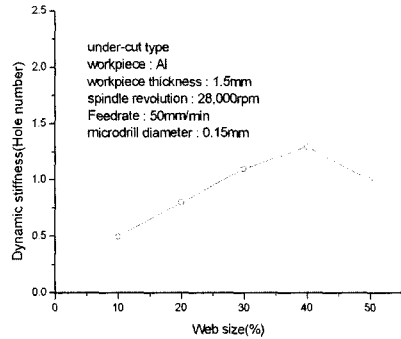


Fig. 13 Relationship between web size and dynamic stiffness for micro-drill

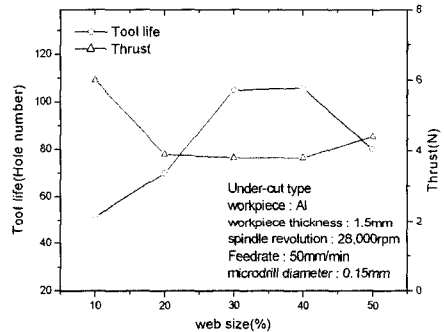


Fig. 14 Relationship between web size and thrust and tool life for micro-drill

으로 마이크로 드릴직경의 11%~20%정도로 하며, 금속용 마이크로 드릴의 경우에는 28%~33%로 하는 것이 일반적이다. 경우에 따라서는 깊은 구멍 가공용에 있어서는 55%까지도 가능하다⁽⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 금속가공용 마이크로 드릴의 강성과 절삭성을 극대화하는 구속조건에서 웹 두께의 최적결정을 위한 기초실험을 하였다. Fig. 13와 같이 마이크로 드릴의 웹 두께에 따른 드릴 강성과의 관계에서 보듯이 웹 두께가 40%까지는 증대됨에 따라 마이크로 드릴의 강성은 급격히 증대됨을 알 수 있다. 하지만 웹 두께가 어느 한계 값 이상으로 되면 절삭성은 매우 급격히 감소된다.

또한 Fig. 14는 웹 두께에 따른 공구수명과 트러스트에 대한 실험 결과이다. 결과와 같이 트러스트는 웹 두께가 20%

까지는 점차 감소, 20~40%까지는 일정한 값을 갖으나 40% 이상이 되면 다시 증가하는 경향이 있다. 한편 공구수명은 웹 두께가 30~40%일 때 가장 효과적임을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 마이크로 드릴의 절삭성을 극대화 하면서 드릴의 강성을 만족할 수 있는 0.15mm 이하의 마이크로 드릴의 웹 두께 조건은 30%~40%로 결정하였다.

4.5 언더 컷(Undercut)과 마찰력을 고려한 설계

마이크로 드릴의 직경은 선단부에서 생크부로 갈수록 작게 되도록 설계되는데, 이는 가공 중에 마이크로 드릴의 외부가 공작물과의 마찰을 최소화하기 위함이다. 즉 가공 중 마이크로 드릴의 마진부(margin part)가 공작물에 마찰되지 않도록 드릴 직경 100mm에 대하여 0.02mm~0.08mm(2~8%) 정도로 외경을 작게 설계한다. 그러나 언더 컷을 지나치게 크게 하면 드릴가공 중의 동적강성이 약해져 구멍의 진원도와 진직도를 저하시키게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 두 가지 점을 고려하여 언더 컷을 100mm에 대하여 0.04mm~0.05mm(4~5%)로 설계하였으며 가공실험 결과 마찰력은 최소화되었다.

4.6 가공시간에 따른 진원도를 고려한 설계

Fig. 15는 마이크로 드릴의 가공시간에 따른 진원도와와의 관계를 나타낸다. 아래 사진의 결과는 가공회수 1, 10, 100, 127번째의 가공 홀에 대한 진원도 SEM 사진이다. 결과와 같이 가공개수가 증가함에 따라 진원도 오차는 증가한다. 대체적으로 첫 번째 홀의 진원도 오차는 2 μ m 정도이며, 100번째 홀에 대한 진원도 오차는 5 μ m 정도로 2.5배 정도로 악화되었다. 또한 127번째 홀에 대한 진원도 오차는 20 μ m로 매우 악화되었다.

5. 전체 형상설계

초경합금 소재의 마이크로 드릴의 형상설계는 기존의 공작


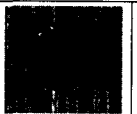


			
Hole no.1, Roundness error:2 μ m	Hole no.10, Roundness error:2.5 μ m	Hole no.100, Roundness error:4.5 μ m	Hole no.127, Roundness error:20 μ m

Fig. 15 Roundness error according to number of micro-hole

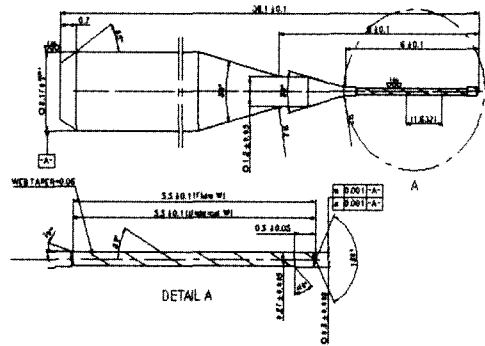


Fig. 16 Design of overall shape for micro-drill

기계의 공구 장착장치(chuck)를 최대한 고려한 콜릿 규격에 적합한 설계가 되도록 하였으며, 그 위에 강성과 인성을 고려하여 공구수명이 극대화할 수 있는 형상설계가 되도록 하였다. Fig. 16은 생산성을 극대화하기 위하여 FEM과 드릴 수명을 고려한 최적형상이 되도록 생크 길이 3.170mm, 전체 형상길이 38.1mm, 플루트 길이 1.0~6.0mm, 몸체 길이 25.4mm, 선단 각 130°, 테이퍼 각 30°로 하였으며, 그 밖의 각각의 요소에 대하여는 본 논문의 4.1~4.6절의 실험결과를 토대로 설계하였다.

6. 결론

본 연구는 초경합금 소재의 직경 0.15mm 이하에 대하여 마이크로 드릴의 개발을 위한 공구재료에 따른 각 요소의 형상설계 및 생산성을 증시킨 전체형상 설계, 공구수명을 고려한 고속회전용 드릴의 강성분석, 가공품의 진원도·진직도 분석 등에 기초한 최적 형상설계 및 성능평가에 따른 마이크로 드릴의 가공기술을 제안하였다. 얻어진 결과는 아래와 같다.

- (1) 생산성을 증시킨 직경 0.15mm 마이크로 드릴의 강성 설계를 위하여 유한요소법에 의한 기계적 강성분석과 전단응력 분석을 기본으로 마이크로 드릴의 전체 형상, 몸체 길이, 플루트 길이, 테이퍼 각 등을 결정하였다.
- (2) 각 요소별 설계에 있어서는 비틀림 각의 결정은 칩 배출의 용이성, 공구수명 및 진원도 관계를 고려하였으며, 플루트 길이의 결정은 비틀림 각과 선단 각의 관계와 센터링과의 관계를, 선단 각의 결정은 절삭저항과의 관계를, 웹 두께의 결정은 드릴강성과의 관계를, 언더 컷의

- 설계는 가공 중의 마찰력과 관계를 고려하였으며, 또한 가공품위를 극대화하기 위하여 가공시간에 따른 진원도 결과를 토대로 각각의 요소에 대하여 결정하였다.
- (3) 생산성을 극대화하기 위하여 FEM과 드릴수명을 고려한 최적형상 결정은 생크 길이 3.170mm, 전체 형상길이 38.1mm, 플루트 길이 1.0~6.0mm, 몸체 길이 25.4mm, 선단 각 130°, 테이퍼 각 30°로 하였으며, 또한 본 설계에 기초하여 제작한 마이크로 드릴에 의한 기초 실험 결과를 바탕으로 최적 형상설계를 하였다.
- (4) 본 설계를 바탕으로 제작한 마이크로 드릴의 성능평가를 위한 실험을 통해 마이크로 드릴의 기초적 가공기술을 확립하였다.

참 고 문 헌

- (1) Sawata, K., Hirai, K., and Tanamura, I., 1999, "Super-precision micro-machining by nano-machine", *JSME*, Vol. 48, pp. 243~244.
- (2) Kim, H. N. 1999, "Micro deep hole drilling operation technique," *KSMTE*, No. 8, Vo 1.1, pp. 15~20.
- (3) Muller, P., 1992, "Flexible usage of microdrill", *European production engineering*, Vol. 16, pp. 79~81.
- (4) Kim, M. G., and Yoo, B. H., 2001, "Development of micro-hole drilling machine and assessment of cutting performance", *KSMTE*, Vol. 10, No. 5, pp. 39~44.
- (5) Kim, G. H., 2001, "Optimum manufacturing process of micro-drill", *The Korean Society of Manufacturing Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 109~116.
- (6) Kim, H. S., Ko, T. J., and Oh, M. S., 2000, "Drill shape and cutting conditions for environmentally conscious drilling," *KSMTE*, Vol. 9, No. 2, pp. 36~44.
- (7) Cselle, T., "New directions in drilling", 1995, *Manufacturing Engineering*, pp. 77~80.